

# 高寒区地表过程与环境观测研究网络

High-cold region Observation and Research Network for Land  
surface processes & Environment of China (HORN)

## 2022 年报

Annual Report 2022



2023 年 03 月 北京

## 目录

|                   |    |
|-------------------|----|
| 一、基本情况.....       | 1  |
| 二、发展动态.....       | 3  |
| 三、观测研究进展.....     | 5  |
| 1. 大气物理观测研究.....  | 5  |
| 2. 大气环境观测研究.....  | 13 |
| 3. 冰川/湖泊观测研究..... | 18 |
| 4. 植被生态系统研究.....  | 39 |
| 5. 土壤/冻土观测研究..... | 55 |
| 四、试验示范.....       | 74 |
| 五、公众服务.....       | 84 |
| 六、年度数据统计.....     | 90 |
| 1. 论著统计.....      | 90 |
| 2. 在研项目统计.....    | 91 |
| 3. 新增项目统计.....    | 93 |
| 4. 结题项目统计.....    | 94 |
| 5. 人才培养统计.....    | 96 |
| 七、大事记.....        | 97 |
| 八、组织机构.....       | 98 |
| 九、联系方式.....       | 99 |

## 一、基本情况

“高寒区地表过程与环境观测研究网络”（简称“高寒网”）以满足高寒区对全球和周边地区环境变化影响机制与模型研究的数据需求，满足高寒区区域环境变化过程与发展趋势研究的数据需求，满足高寒区资源合理利用与经济社会可持续发展的数据需求为科学目标，以构建中国科学院所属野外站为主体的国家级“高寒网”为发展目标。

“高寒网”目前包括 20 个加盟野外站，分别是 8 个国家级野外站纳木错站、珠峰站、那曲站（西藏大学-地理资源所-青藏所）、天山冰川站、格尔木站、北麓河站、玉龙雪山站、三江源站，4 个中国科学院院级野外站藏东南站、慕士塔格站、阿里站、青海湖站，5 个相关所级站祁连山站、若尔盖站（西北研究院）、若尔盖站（成都生物所）、那曲站（西北研究院）、申扎站，以及与中国科学院生态研究网络共享数据的 3 个站拉萨站、海北站、贡嘎山站。根据院先导专项、科技部二次青藏科考专项、国家重点研发专项、国家自然科学基金委重大项目等重要研究任务的需要和青藏高原地区全国重点实验室的发展需求，“高寒网”野外站开展了青藏高原及周边地区的大气边界层过程、冰川-湖泊变化、高寒生态系统样地观测，建立了数据信息开放共享系统。

2022 年，“高寒网”在项目争取、成果产出、人才培养等方面继续取得新的进步。

项目争取方面：2022 年全体科研人员目前在研项目 244 项，顺利完成 99 个项目结题，新争取到来自国家自然科学基金委、科技部、中科院、地方政府支持的项目共计 90 项，经费总额为 9756.43 万元。

成果产出方面：高端科研成果持续产出，2022 年发表有 Nature Reviews Earth & Environment、Nature Geoscience、Nature Ecology & Evolution、Nature Communications、Science Bulletin 等在内的高影响力论文和论著 533 篇，其中 SCI 引文 415 篇，263 篇影响因子大于 4 科研论著成果丰硕。2022 年格尔木站、天山冰川站、玉龙雪山站等台站在科学出版社、商务印书馆等出版社共出版科研著作 13 本。同时，2022 年共申请获得各类专利 46 项，其中发明专利 16 项、实用新型 25 项、软件著作权 5 项。2022 全体科研人员获得省部级及专业学会奖项共 10 项，其中珠峰站、玉龙雪山站、三江源站和北麓河站等站科研人员荣获西藏、青海和甘肃等科学技术一等奖 7 项。本年度向各级政府和铁路集团等共提交 8 份政府咨询报告，其中北麓河站提交至国办的《气候变暖导致冻土变化威胁青藏铁路安全》咨询报告得到了国务院副总理刘鹤的批示。天山冰川站提交至新疆维吾尔自治区政府的《西北干旱区冰川水资源及其变化》、《乌鲁木齐河观测研究》等相关材料，得到新疆维吾尔自治区马兴瑞书记的批示。

新疆维吾尔自治区政府设立厅厅联动项目，目前已有水利厅、气象局、自然资源厅、科技厅等联系天山冰川站，计划合作设立研究课题。

科研团队与人才建设方面：2022 年依托“高寒网”各站共有 126 位研究生毕业，其中博士研究生 87 人，硕士研究生 39 人。目前还有 262 研究生在“高寒网”台站开展毕业设计工作。珠峰站引进韩存博博士获海外优青支持；那曲站（西北院）引进胡俊俊博士、格尔木站引进的杨思忠博士获中国科学院率先行动“百人计划”支持；三江源站赵凯、李雪、张科、曲家鹏和张中华等获青海省“昆仑英才·高端创新创业人才计划”支持。

服务地方与支撑大型科考方面：2022 年藏东南站、纳木错站、珠峰站、格尔木站、那曲站（青藏所）和慕士塔格站等开展了形式多样的科普讲座、夏令营、科普研学、社会实践课程等服务当地和全国大中小学生；天山冰川站服务保障 2022 年北京冬奥会雪务工作受到科技部、北京冬奥组委和首钢大跳台等部门或单位的高度认可和表彰；珠峰站支撑服务的二次科考“巅峰使命”珠峰科考创造多项新纪录入选两院院士评选的“2022 年中国十大科技进展新闻”；藏东南站、珠峰站、那曲站（西北院）等高原上多站点同时支撑服务二次科考的“2022 高原低涡组网综合立体观测试验”任务。三江源站为青海省海南州“国家可持续发展议程创新示范区”建设提供科技支撑。

## 二、发展动态

### 1. 天山冰川站雪务保障工作受到科技部、北京冬奥组委和首钢大跳台等单位高度认可

2-4月,中国科学院西北生态环境资源研究院陆续收到中华人民共和国科学技术部、北京2022年冬奥会和冬残奥会组织委员会(以下简称“北京冬奥组委”)和首钢滑雪跳台场馆运行团队感谢信,向以西北研究院秦大河院士、王飞腾研究员为代表的北京冬奥会雪务保障科研团队致以衷心的感谢。

感谢信提到,办好北京2022年冬奥会和冬残奥会是习近平总书记亲自决策、亲自推动的国家大事,是中国对国际社会的庄严承诺。“更快、更高、更强—更团结”,是奥林匹克新格言,也是各方齐心协力推动冬奥成功举办的生动实践。科技助力于奥运的“简约、安全、精彩”,为“一届真正无与伦比的冬奥会”举办发挥了有效支撑作用。天山冰川站王飞腾研究员牵头研发的储雪技术,为国家跳台滑雪中心、首钢大跳台制定针对性的储雪方案,为冬奥雪务工作提供了坚实的科技支撑。王飞腾研究员开展的工作不仅得到冬奥组委、科技部和国家体育总局等相关部门认可,同时也通过中央电视台、新华社和《人民日报》等国家级媒体的报道受到社会各界的广泛关注,据初步统计这些报道的点击量在1亿次左右,充分体现了中国科学院提出的“国家队”“国家人”,心系“国家事”、肩扛“国家责”的使命担当。

### 2. 珠峰站支撑的“巅峰使命”珠峰科考创造多项新纪录,入选两院院士评选的“2022年中国十大科技进展新闻”

2023年1月12日,由中国科学院院士和中国工程院院士投票评选的2022年中国十大科技进展新闻在京揭晓,“巅峰使命”珠峰科考创造多项新纪录成功入选。

2022年4-5月份,第二次青藏科考组织实施了由5支科考分队16个科考小组270名科考队员参加的“巅峰使命”珠峰科考活动,创造了多项新纪录:科考队首次建成了梯度联网的巅峰气象观测站;首次利用高精度雷达测量了珠峰顶部的冰雪厚度;首次取得了峰顶的冰雪样品;创造了浮空艇环境观测的9050米最高海拔世界纪录;首次利用直升机观测广域的大气温室气体浓度;首次获得珠峰地区地面至39km高空的臭氧浓度;首次获得高原常驻和短居人群的高山生理适应数据。这次科考队员主要来自中国科学院青藏高原研究所、北京大学、中国科学院西北生态环境资源研究院、中国科学院地理科学与资源研究所、中国科学院空天信息创新研究院、兰州大学、中国科学院西双版纳热带植物园等17家单位,是第二次青藏科考启动以来学科覆盖面最广、参加科考队员最

多、采用仪器设备最先进的综合性科考，是人类在珠峰地区开展极高海拔综合科学考察研究的一次壮举。

“巅峰使命”珠峰科考是近年来地球科学领域最具影响的科考活动之一。“巅峰使命”珠峰科考实现了从“登山科考”到“科考登山”的战略转变，实现了从“我要征服你”到“我要了解你”的登山思路的转变，实现了新技术和新手段的应用，取得了重要国际影响。“巅峰使命”珠峰科考取得的宝贵数据和样品将为促进“从0到1”重大创新性科考成果产出和人类更全面深刻地认识自然、守护好世界上最后一方净土及全球生态环境保护做出新的贡献。珠峰站在科考中提供了全方位的后勤保障和支撑服务工作。

### 3. 三江源站为海南州“国家可持续发展议程创新示范区”建设提供科技支撑

三江源站为海南州“国家可持续发展议程创新示范区”建设提供科技支撑。该示范区青藏高原唯一，为全球可持续发展提供中国经验，入选青海省十大国家级科技创新平台之一，资助5000万元。

### 4. 那曲站（西北院）开展“2022高原低涡组网综合立体观测试验”

2022年6月8日，由那曲站联合“地气相互作用及其气候效应”专题的17家单位组织实施的“2022高原低涡组网综合立体观测试验”的出征仪式在线上线下同步举行，中国科学院青藏高原研究所、中国科学院西北生态环境资源研究院、中国气象局高原气象研究所、中国科学院空天信息创新研究院、中国气象局国家气候中心、西藏自治区气象局、南京大学、浙江大学、中山大学、长安大学、华北电力大学、兰州大学、复旦大学、中国科技大学、南京信息工程大学、成都信息工程大学等单位共25位专家参会，本次组网综合立体观测试验总负责人，中科院青藏高原所地气作用与气候效应团队马耀明研究员宣布出征、授科考旗。本次组网综合立体观测试验将结合已运行的青藏高原首个地气间水热交换立体综合观测平台，在14个观测站上同时利用GPS无线电探空、微波辐射计、大气边界层塔、大气湍流观测系统等目前最先进的大气观测仪器，追踪高原低涡天气系统的生成、发展、移动及其产生降水的全过程。

央视新闻、新华社、中国科学报、中国新闻网、腾讯新闻、新浪新闻等多家平台和媒体对此次出征仪式进行了报道和宣传。

### 三、观测研究进展

“高寒网”野外台站根据所处地理位置及观测研究特色在大气物理和大气环境监测、冰川/湖泊监测、植物生态研究和土壤/冻土监测方面开展连续监测及研究，取得的主要进展或创新点如下：

#### 1. 大气物理观测研究

##### ➤ 珠峰站

**基于科考建立的湍流观测网的 10 个高寒草地生态系统：**对统一标准化的方法处理得到完整的年尺度碳通量数据进行了分析。发现高原东北部和东部具有较强的碳汇水平，且温度通常是该地区草地生长季碳通量的限制因素；而西部则呈现较弱的碳源或碳汇水平，该地区草地生态系统主要受水分控制，碳通量空间变化主要由主导环境因子的经向或海拔变化引起，该研究为青藏高原碳通量的评估提供了指导。该研究发表在《Agricultural and Forest Meteorology》(Wang et al., 2021)。另外，观测数据处理方法不一可能导致对青藏高原碳汇的估计产生较大差异。研究表明峰值检测和数据插补的方法有助于得到更准确的碳汇数据。该研究发表在 PNAS 上 (Wang et al., 2022)。

**对 Noah 陆面过程模式中地表反照率方案进行青藏高原本地优化：**基于卫星遥感反演的反照率数据，综合考虑雪深和雪龄对反照率的影响，对 Noah 陆面过程模式中地表反照率方案进行青藏高原本地优化。结果显示模式采用改进的反照率方案显著降低青藏高原反照率的高估，提高了模拟与卫星反演反照率之间的相关性，改善了气温模拟的冷偏差，更准确模拟出强降雪的空间分布特征，突破了 Noah 默认的反照率方案影响因子的局限性，也为卫星遥感数据产品在数值模拟中的应用提供新视角。该研究成果发表在《Advances in Atmospheric Sciences》上 (Liu et al., 2022a)。同样，改进的地表反照率方案在 WRF 模拟冰川微气象方面也发挥了巨大潜力，显著缓解了 Noah-MP 默认的反照率方案引起的净短波和净辐射的低估，该研究结果发表在《Remote Sensing》上 (Liu et al., 2022b)。

##### ➤ 格尔木站

**开展了藏北高原大气边界层结构特征分析与加热（冷却）率的研究：**利用安多和那曲地区的探空资料，合作分析了藏北高原夏季大气边界层的结构特征和加热（冷却）率。结果表明，藏北高原夏季大气边界层高度有明显的日变化。干季大气边界层高度大于雨季。在干季和雨季，白天对流边界层最大高度分别可达 3200m 和 2500m，平均最大

高度约为 2500m；夜间稳定边界层最大高度可达 900m，平均最大高度约为 500m。安多和那曲都出现了逆湿现象，强逆湿主要出现在晴天的午夜和阴天的中午。大气边界层的加热（冷却）率具有明显的日变化，晴天时较大，阴雨天较小。大气边界层白天加热率和夜间冷却率的平均值基本相当，大气能量收支基本平衡。

**揭示了冻融过程与地表能量收支相互作用机理：**青藏高原分布有广泛的多年冻土，并在地气交换、地表过程、水文循环中扮演着重要的角色。活动层作为多年冻土与大气之间的“缓冲层”，是多年冻土与大气间水热交换的过渡层，是联系大气圈、水圈、生物圈的纽带，其变化不仅影响土壤自身的水热力特性，改变土壤内部的水热平衡，而且会对水循环、能量交换、碳循环、生态系统、气候系统等产生重要的影响。多年冻土区地表能量收支与活动层冻融过程密切相关，二者有着强烈的相互作用（图 1.1.1），是陆面过程研究的关键。

在此，基于青藏高原多年冻土区典型站点唐古拉站长时间序列的观测资料，分析其地表能量收支变化特征及其与冻融过程间的相互作用关系。研究结果表明，青藏高原多年冻土区地表能量收支有着明显的季节变化特征，唐古拉地区春季以感热为主，夏季则以潜热交换为主。冻融过程，降水，辐射，地表状况等均对地表能量收支变化有着显著影响。研究结果进一步表明，地表能量的积累对活动层融化深度有着显著的影响。此外，在观测的年份中，土壤热平衡系数的数值始终大于 1，可见在气候变化背景下，唐古拉地区多年冻土有退化的趋势。

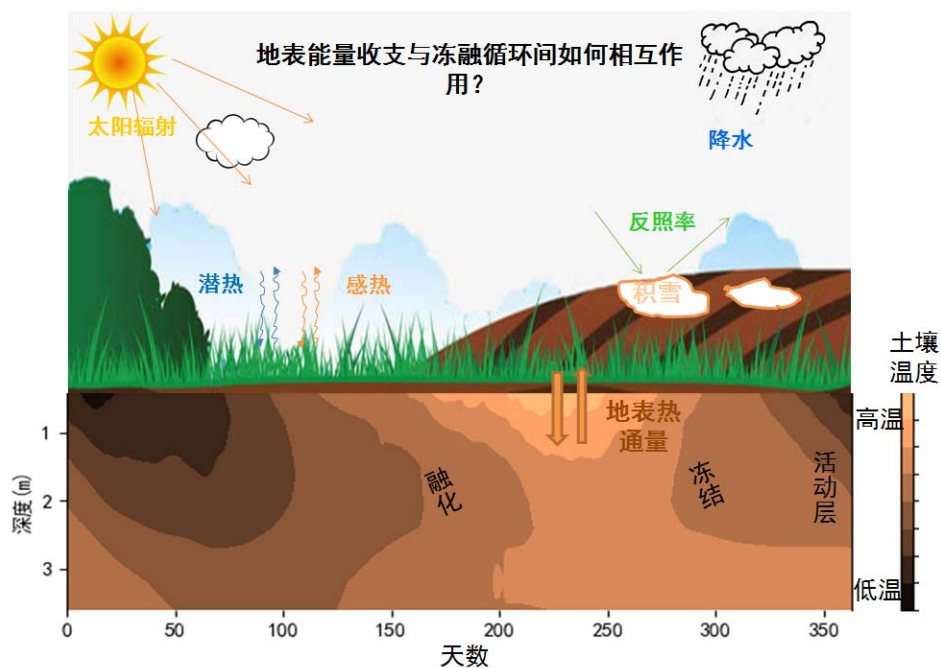


图 1.1.1 地表能量收支与冻融循环相互作用示意图

**评估了青藏高原及环北极地区地表能量收支模拟性能及时空分布特征：**青藏高原及环北极地区地表能量收支对全球气候系统有着重要影响。在此基于青藏高原及环北极多年冻土区 6 个观测站点数据评估了 30 个 CMIP6 模型感潜热模拟效果。青藏高原地区潜热通量模拟效果较好，相关系数可达 0.9，RMSE 为  $30 \text{ W m}^{-2}$ （图 1.1.2）。北极地区感热通量模拟效果较好，相关系数及 RMSE 分别为 0.8 and  $24 \text{ W m}^{-2}$ （图 1.1.3）。另外，多模型平均结果表明北极及青藏高原地区地表能量收支有着明显的季节变化特征及区域差异。在青藏高原，感热冬季最低，春季急剧增加并在初夏最高。北极地区的季节转换没有青藏高原地区明显，主要是由于二者净辐射的差异。潜热主要受降水及土壤表层含水量影响。青藏高原及北极地区地表能量收支有着明显的区域差异，近 30 年（1985–2014），感、潜热在高原和北极呈现上升趋势。青藏高原地区潜热偏高与表层含水量模拟高估及雨季降水量高估有关；另外，青藏高原地区感热低估与地表风速及地气温差低估有关，而北极则感热高估，这与地表风速的高估及地气温差在暖气的高估有关。

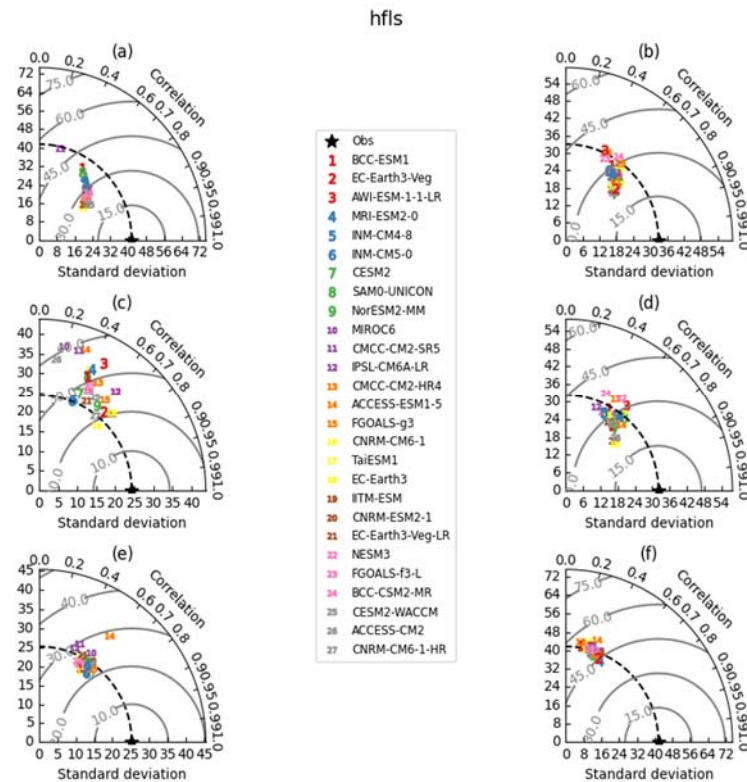


图 1.1.2 不同站点各模型潜热通量泰勒图(a) TGL, (b) XDT, (c)WDL, (d)NewD66, (e) Tussock, (f) Cherskiy

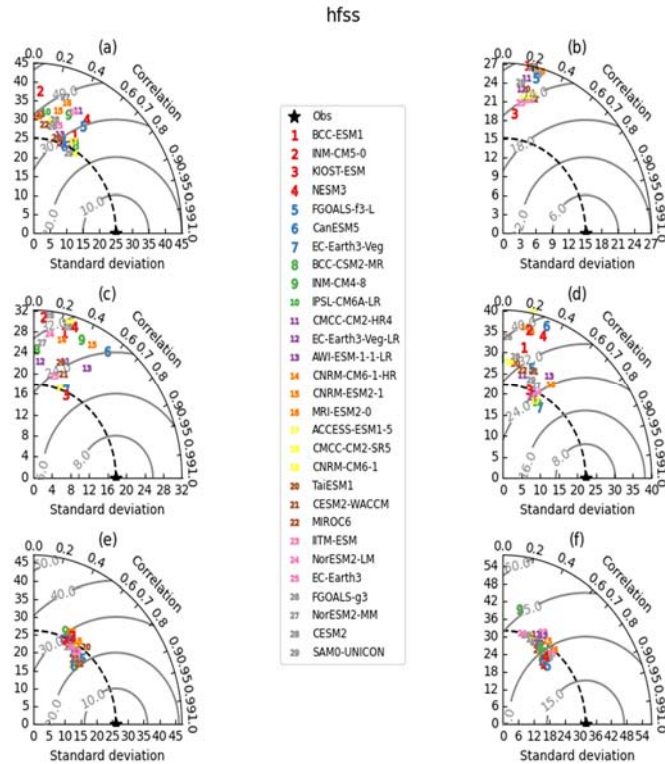


图 1.1.3 不同站点各模型感热通量泰勒图(a) TGL, (b) XDT, (c)WDL, (d)NewD66, (e) Tussock, (f) Cherskiy

**预估了北半球多年冻土区气温的未来变化趋势：**气温是研究气候变化最主要、最直接的指标,也是多年冻土存在与否的关键因素。本研究利用北半球多年冻土区 2002–2014 年大量的气温观测资料对 CMIP6 中 23 模式输出的气温结果进行了评估,利用表现最优的模式对北半球多年冻土区的气温未来时空变化特征进行了分析。结果表明: 气温在零星多年冻土和岛状多年冻土地区高于连续多年冻土。北半球多年冻土区气温从 1900 年到 2014 年和 1980 年到 2014 年升温率分别为  $0.10^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  和  $0.35^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ; 在低排放到高排放的情况下,2015 年至 2100 年北半球多年冻土区气温升温率分别为  $0.09^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.38^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  和  $0.95^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。北半球多年冻土区未来气温变化空间差异较大(图 1.1.4),高海拔、过渡性和高纬度多年冻土区相比,高纬度多年冻土区的变暖趋势是最大。此外,不同多年冻类型区也存在很大差异,由连续多年冻土到岛状多年冻土气温逐渐升高,而从岛状的多年冻土区到连续多年冻土区升温趋势呈现逐渐增加的趋势。与全球气温变化趋势对比发现,未来 SSP1–2.6, SSP2–4.5 和 SSP5–8.5 情景下,北半球多年冻土区变暖趋势约为全球变暖速率的 1.6 倍。该研究结果为进一步认识北半球多年冻土区的区域差异及其对气候变化的响应过程提供了依据。

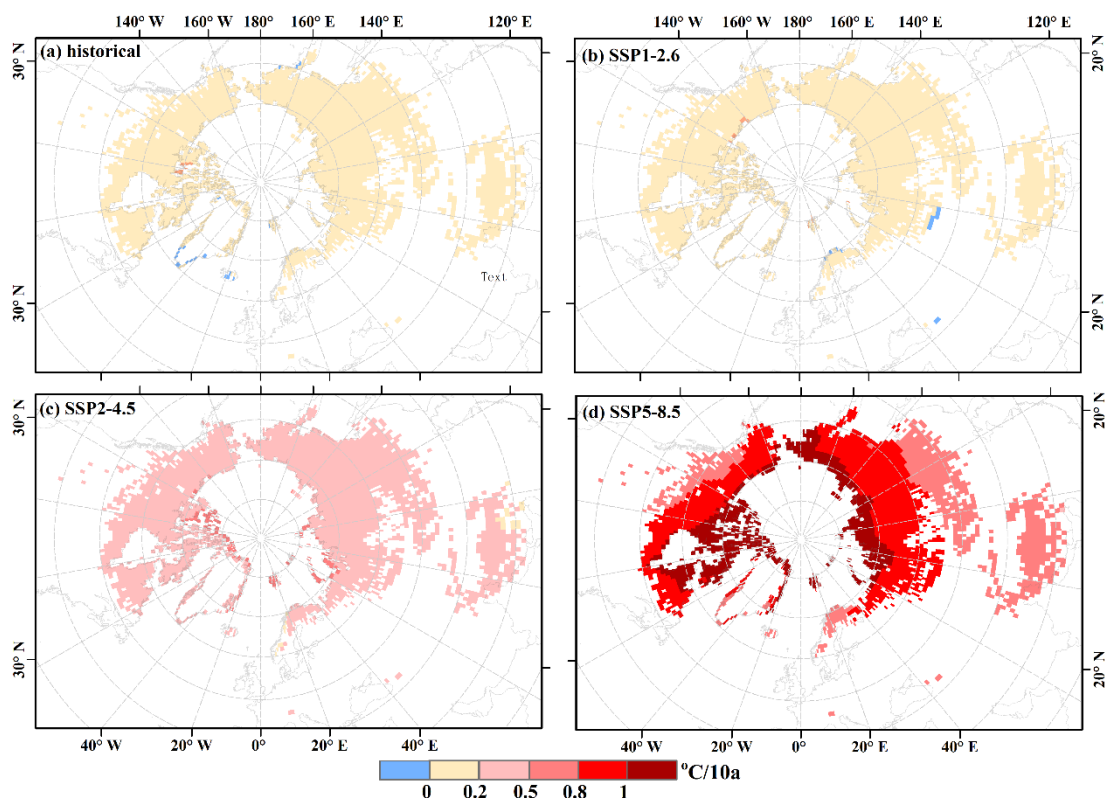


图 1.1.4 北半球多年冻土区气温升温趋势空间分布特征:(a) 历史时期; (b) SSP1-2.6; (c) SSP2-4.5; (d) SSP5-8.5.

#### ➤ 若尔盖站(西北研究院)

**气候变化对 2020 年夏季我国长江流域破纪录梅雨的影响:** 在气候变暖背景下, 极端降水灾害事件频发, 对人类社会的深远影响。在 2020 年夏季, 我国长江流域发生了破纪录梅雨, 梅雨持续时间长达 62 天, 降水量达 759.2 毫米, 为 1961 年以来历史最高值。那气候变化是否影响了此次梅雨事件呢? 基于分段积分方法、Storyline 方法和多参数化方案集合试验, 定量评估东亚区域气候变化对 2020 年破纪录梅雨的影响, 发现东亚区域气候变暖引起的东亚夏季风环流变化使 2020 年夏季我国长江流域破纪录梅雨减弱 9.2 - 14.1%。

**黄河源区积雪对高寒草地水热传递的影响研究:** 青藏高原极端降雪事件日益增多, 导致积雪条件的变化越来越大。然而, 对不同积雪条件下土壤水-热传递的详细研究很少。利用近 5 年多源观测资料, 分析了黄河源区高寒草地积雪对水-热传递的影响。深层土壤春季至夏季的年变暖速率远大于秋冬季的季节年变冷速率, 而土壤浅层春季至夏季的年变暖速率远大于秋冬的季节年变冷速率。长期的积雪覆盖降低了浅层土壤的平均温度和抑制了极端低温的出现。积雪对土壤温度的影响随着冻结阶段的不同而不同, 其保温作用主要表现在冬季(冻结中期)。深秋和早春时期, 青藏高原太阳辐射依旧较强, 积雪的高

反照率不足以抵消热量损失。积雪融化后的液态水可穿过 0.80 ~ 1.60 m 的冻土层，下渗至 3.20 m 及以下土壤，下渗深度远大于以往的研究，可能与冻结层中固态水含量低、砾石含量高有关。积雪融化后，考虑相变潜热，观测到的地表热通量从早到中午显著增加。地表热通量在多雪年的积雪期持续增加。4 月下旬至 5 月，除融雪期时段外，少雪年和多雪年的地表热通量无显著差异。春季，多雪年浅层土壤的解冻期明显变长，形成了较长的日冻融循环期，加剧了土壤水分的蒸发和损失，不利于植被的返青。与之相反，多雪年不同深度土壤的解冻日期接近，有利于更多的融雪水渗透到土壤深处。冬季和早春期间，多雪年和少雪年的感热通量差异远大于潜热通量。本研究提供了青藏高原极端积雪条件下土壤水-热传递的精细物理图像，为深入理解中纬度和高海拔地区积雪-冻土相互作用提供参考。

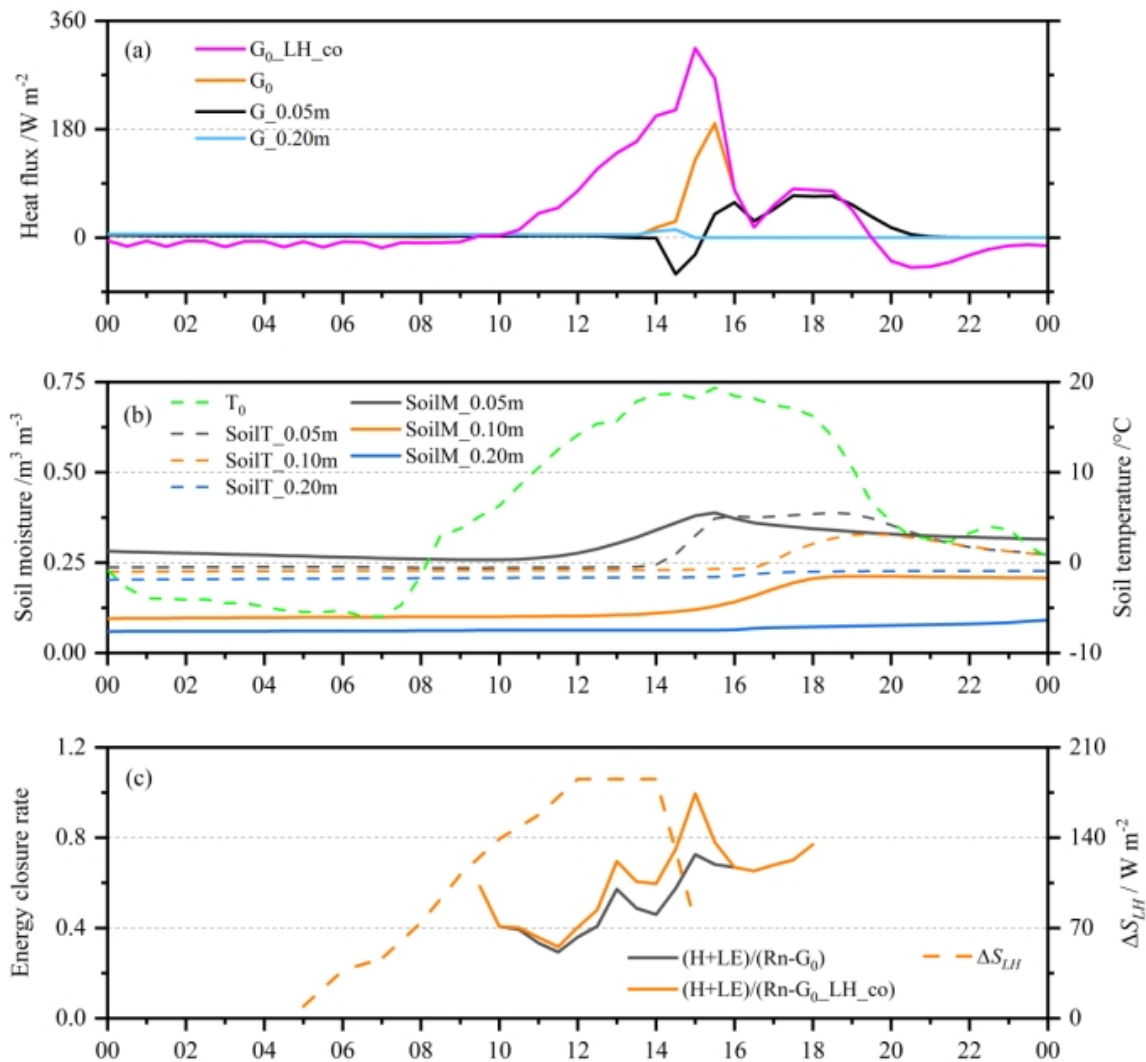


图 1.1.5 2019 年 4 月 18 日土壤热通量(a)、土壤温湿度(b)、能量闭合率和相变潜热 (c)。

2022 年度，那曲站科研工作进展主要有：利用加密探空资料，深入细致的分析了藏北高原夏季大气边界层结构和加热(冷却)率特征；利用 NCEP-NCAR 和 CRU TSv4.00 再分析资料，研究了丝绸之路遥相关、北大西洋-东亚和北亚型遥相关及其协同作用通过调节青藏高原环流影响青藏高原夏季风的年际变化；利用中国区域地面气象要素驱动数据集 CMFD 和美国 MODIS 土地覆盖产品数据 MCD12C1，使用 CLM4.5 陆面模式，模拟研究了 1980~2016 年青藏高原的土壤温度、湿度和冻融状态的变化及其对气温和降水的响应机理等。

### ➤ 那曲站（西北院）

**藏北高原夏季大气边界层结构和加热(冷却)率特征：**那曲站成员谷良雷副研究员等利用安多和那曲 1 天 8 次的高密度探空资料，分析研究了藏北高原夏季大气边界层结构和加热(冷却)率特征。研究表明，藏北高原夏季大气边界层高度有明显的日变化；大气边界层高度干季大于雨季。在干季和雨季，白天对流边界层最大高度分别可达 3200m 和 2500m，平均最大高度约为 2500m；夜间稳定边界层最大高度可达 900m，平均最大高度约为 500m。两地干季以西风为主，雨季以东风为主。干季的风速(切变)大于雨季的，晴天的纬向(经向)风速(切变)大于阴天。安多和那曲都出现了逆湿现象，强逆湿主要出现在晴天的午夜和阴天的中午。大气边界层的加热(冷却)率具有明显的日变化，晴天时较大，阴雨天较小。该研究对藏北高原边界层特征及风温湿变化进行了深入细致的分析，解释了藏北高原复杂地形上大气边界层高度和加热(冷却)率变化的物理机制，研究结果有助于更好地了解青藏高原大气边界层结构及其变化规律。

该研究成果推动了那曲站在大气边界层物理研究方面的发展。

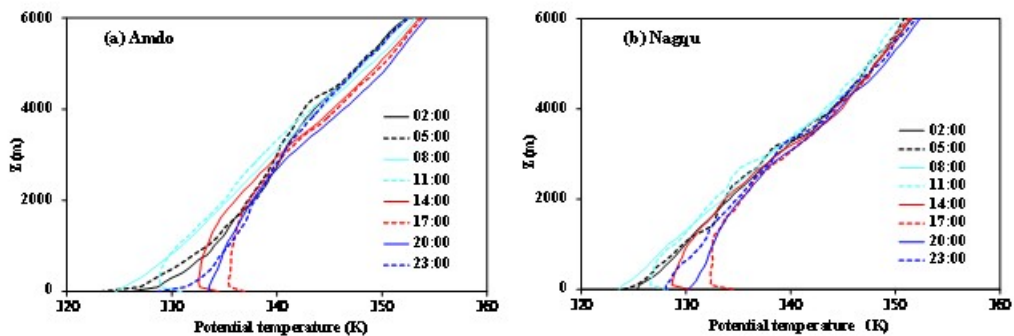


图 1.1.6. 安多 (a: 1998.6.1-8.21 的平均值) 和那曲 (b: 2004.8.15-8.26 的平均值) 的位温廓线图

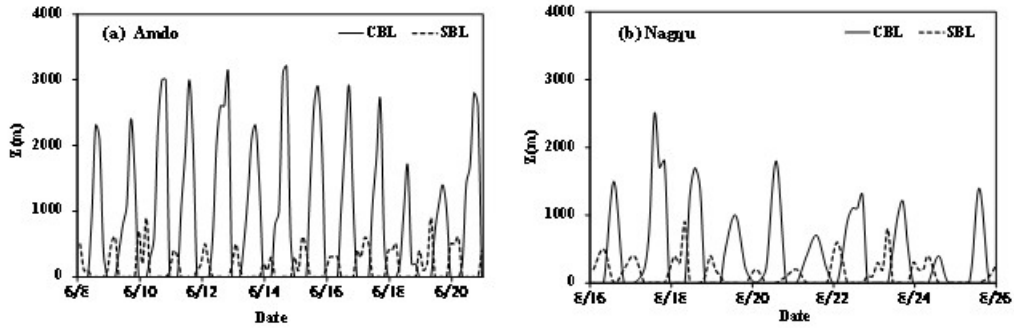


图 1.1.7. 安多 (a: 1998.6.8-6.20) 和那曲 (b: 2004.8.16-8.24) 对流边界层 CBL 和稳定边界层 SBL 高度的日变化

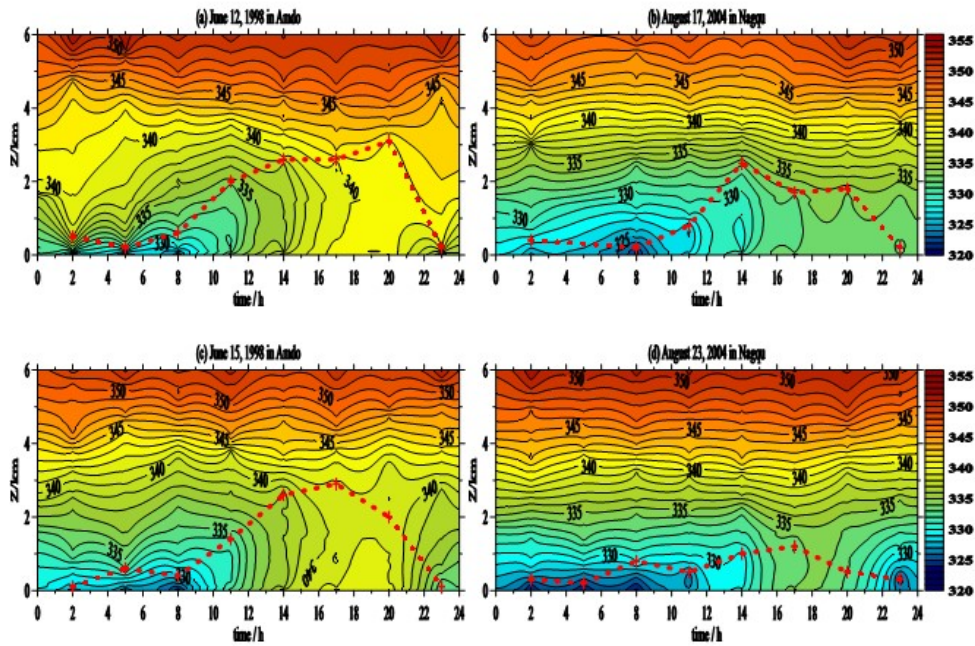


图 1.1.8 晴天日 (a:安多; b:那曲) 和多云日 (c:安多; d:那曲) 位温日变化; 红色虚线表示边界层高度

**中高纬度大气遥相关对青藏高原夏季风年际变化的影响:** 那曲站成员博士生樊威伟等利用美国气象环境预报中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)联合制作的 NCEP-NCAR 再分析数据集以及英国东英格利亚大学气候研究所的全球陆地格点(CRU TSv4.00)分析数据集,研究了中高纬遥相关波列对青藏高原夏季风的影响。研究表明,丝绸之路遥相关、北大西洋-东亚和北亚型遥相关均可以通过调节青藏高原环流影响青藏高原夏季风的年际变化。此外还研究了这两支波列的对高原夏季风的协同影响:当丝绸之路遥相关与北大西洋-东亚和北亚型遥相关处于相同位相时,青藏高原夏季风出现显著异常;当丝绸之路遥相关与北大西洋-东亚和北亚型遥相关处于相反位相时,青藏高原夏季风无显著响应。

该研究成果推动了那曲站在高原气候动力学研究方面的发展。

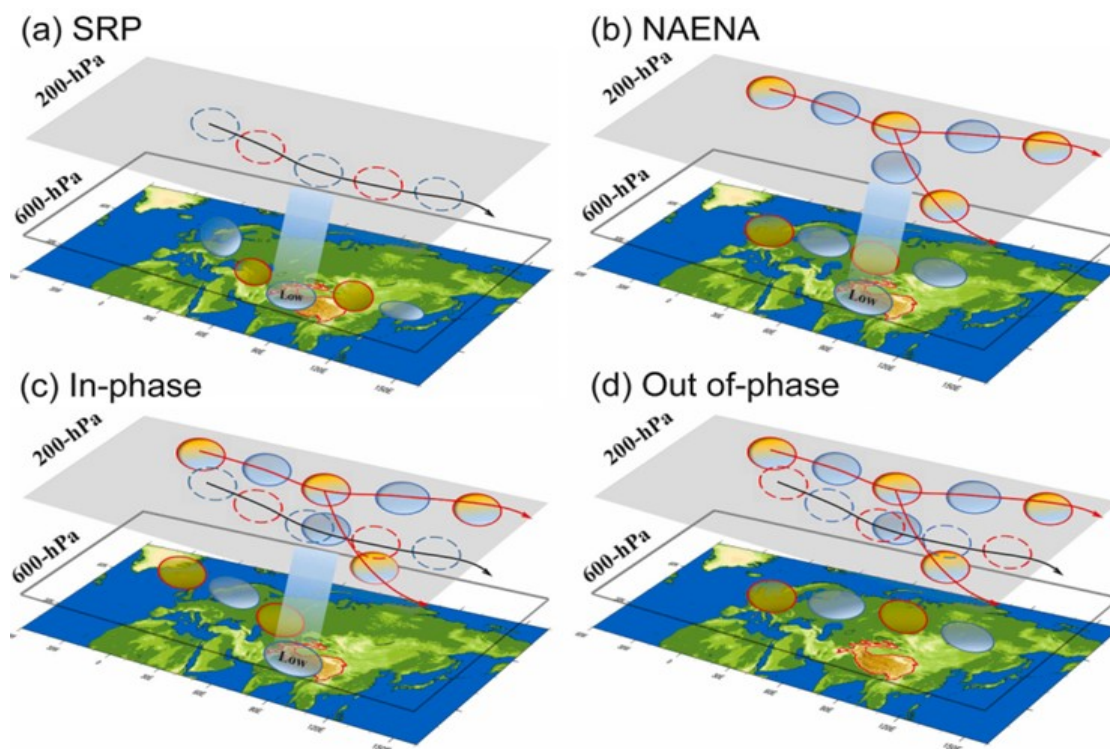


图 1.1.9 (a)丝绸之路遥相关与(b)北大西洋-东亚和北亚型遥相关对青藏高原夏季风年际变化影响示意图；丝绸之路遥相关与北大西洋-东亚和北亚型遥相关处于(c)相同位相(d)相反位相时青藏高原夏季风的响应

## 2. 大气环境观测研究

### ➤ 玉龙雪山站

借助玉龙雪山站冰冻圈化学观测网络，揭示了青藏高原东部多相态水体水溶性有机碳氮(**WSOC/N**)和颗粒态黑碳(**PBC**)浓度空间模态。发现从南向北、自东向西，高寒径流中 **WSOC** 浓度逐渐升高。水溶性含碳质物质在高原冰冻圈区碳循环中占主导地位：高寒冰川除具有水文循环的特征外，还对冰冻圈地区的碳、氮循环具有动态调节作用。它们储存和运输/转化水溶性化学物质。这些物质随着融水径流从冰川中释放出来，对于维持下游生态系统平衡和微生物生命活动具有重要影响。来自偏远和高海拔地区的冰川化学记录可以提供过去大气环境区域或全球尺度的信号。**WSOC** 在影响水体光化学过程和微生物养分可利用性方面也发挥着重要作用。然而，冰冻圈地区 **WSOC** 的迁移转化和循环机制仍不清楚。

因青藏高原其海拔高、人口稀少，当地人类活动对生态环境影响较弱，是揭示碳循

环和碳转移过程的理想天然档案。青藏高原北部冰川是亚洲主要河流的源头，如黄河、长江、雅鲁藏布江等。迄今为止，对该地区多环境水体中的 WSOC 和 WSON 的研究很少，了解其含量特征、时空格局、迁移和转化对这一独特的冰冻圈区域至关重要。因此，对该地区水溶性有机物质进行现场观测和实验测试分析，全面揭示其时空变化特征及其地球化学过程是十分必要的（图 1.2.1）。

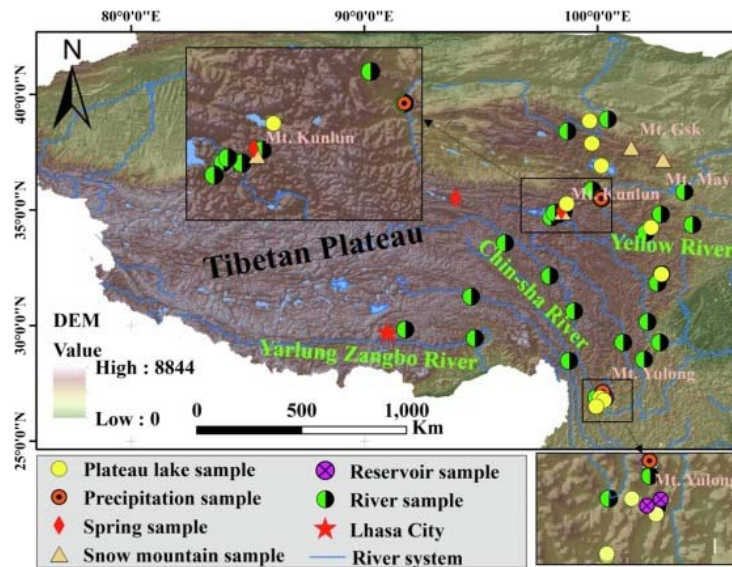


图 1.2.1 青藏高原各种雪、水样品采样点的地理分布，左上角子符号表示昆仑山脉

本研究首次系统研究了青藏高原东部（海洋性冰川区）冰冻圈多类型水体中的水溶性有机碳(WSOC)、有机氮(WSON)和颗粒态黑碳(PBC)。结果表明，从南向北、从东向西，高寒河流径流中 WSOC 浓度逐渐升高。冰川区高寒河流径流和降水中的 WSOC 和氮素具有明显的季节变化特征。WSON 是青藏高原东南部高海拔冰冻圈区降水中溶解性总氮的主要成分(63.4%)。水溶性含碳质物质在青藏高原冰冻圈碳循环中占主导地位，而高寒河流中的颗粒态含碳质物质在冰冻圈碳循环中占比很小。光学特性分析表明，在高寒河流径流中，PBC 的光吸收能力(MAC-PBC 为  $2.28 \pm 0.37 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ )明显强于 WSOC 的吸光性( $0.41 \pm 0.26 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ )。冰川雪中溶解性无机化学离子组成主要为  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  (平均为  $45.13 \pm 3.75\%$ )，表明(化石燃料)燃烧源在该地区的贡献较高。本研究结果对了解全球高海拔冰冻圈地区的碳-氮循环具有重要意义。未来的工作应基于冰冻圈地区多种环境介质的更可靠的现场观测和测量，以确保亚洲高山地区的生态环境保护和高质量发展。

图 1.2.2 显示了 2020 年 4 月下旬至 10 月中旬降水中 WSOC 和 WSTN 的季节变化特征。雨水 WSOC 浓度范围为  $0.21 \sim 5.33 \text{ mg L}^{-1}$ ，平均浓度为  $0.81 \pm 0.741 \text{ mg L}^{-1}$ ，反映了高

原东南部大气输送和沉积带来的大量有机物质。雨龙雪山降水中 WSTN 浓度为  $0.1 \sim 2.56 \text{ mg L}^{-1}$ ，平均值为  $0.388 \pm 0.122 \text{ mg L}^{-1}$ ，而降水中 WSON 浓度为  $0.07 \sim 2.54 \text{ mg L}^{-1}$ ，平均值为  $0.246 \pm 0.116 \text{ mg L}^{-1}$ 。因此，青藏高原东南部高海拔冰圈地区(如玉龙雪山)降水中碳、氮含量较高。然而，青藏高原东南部高海拔冰川区的雨水 WSOC 浓度显著低于玉龙雪山周边 5 个采样站夏季降水( $1.25 \pm 0.56 \text{ mg L}^{-1}$ )。此外，偏远冰川地区的雨水 WSOC 和 WSTN 浓度也显著低于中国北方降水的平均值(WSOC 范围为  $2.4$  至  $3.9 \text{ mg L}^{-1}$ )。这一现象表明，大气碳、氮物质主要来源于人为排放，华北特大城市大气不可避免地受到广泛的人类活动以及相关的车辆和工业排放的影响。此外，高海拔平流层硫酸盐侵入也是导致研究区域(海拔:4510 m a.s.l.)降水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度高的一个关键因素。强降雨和清除作用可以解释季风季节降水中溶解有机物质浓度较低的原因。此外，充足的太阳辐射和光衰变可能是雨季雨水 WSOC 损失的原因。

在青藏高原东部山区河流中发现了明显的 WSOC 浓度空间异质性(图 1.2.2a)。研究区西北北部 WSOC 浓度( $2.44 \sim 3.80 \text{ mg L}^{-1}$ )显著高于青藏高原南部( $0.04 \sim 1.99 \text{ mg L}^{-1}$ )。具体而言，玛多县和三江源国家公园的 WSOC 浓度最高(约  $3.80 \text{ mg L}^{-1}$ )。从东向西，高寒河流径流 WSOC 浓度逐渐升高。这种格局可能是由于 1) 河中生态环境的差异，东部河流生态环境较好，年降水量多于西部；2) 污染物排放流入差异。该地区西部部分毗邻青海柴达木盆地，是典型的沙漠地区，大量的粉尘微粒可从沙漠输送到高原西部；3) 水温；4) 河流径流。研究区 WSTN 的空间分布与 WSOC 的空间分布一致，北部河流的 WSTN ( $0.60 \sim 0.73 \text{ mg L}^{-1}$ )高于南部河流( $0.05 \sim 0.42 \text{ mg L}^{-1}$ )，特别是 TP 东北部山区河流的 WSTN 浓度显著高( $1.4 \sim 3.0 \text{ mg L}^{-1}$ )(图 1.2.2b)。WSON 浓度在该区域的北部( $0.30 \sim 0.45 \text{ mg L}^{-1}$ )和南部( $0.02 \sim 0.11 \text{ mg L}^{-1}$ )之间也存在微弱的空间趋势，河流 WSON 浓度( $0.45 \sim 0.68 \text{ mg L}^{-1}$ )也存在明显的东西梯度(图 1.2.2c)。

来自原生浮游生物和藻类氮物质具有较高的氮浓度和较低的 C/N 比。在东部地区观测到的高 WSON 浓度可能是由于研究区域的人为和微生物活动增强。此外，高寒河流中 WSON 浓度较高，说明高寒河流径流 WSON 是 WSTN 的主要组成部分。除了灰尘和生物物质燃烧外，车辆排放和二次形成也是 WSON 的重要来源。农业活动的释放还可以提高高山河流径流中含氮物质的含量。

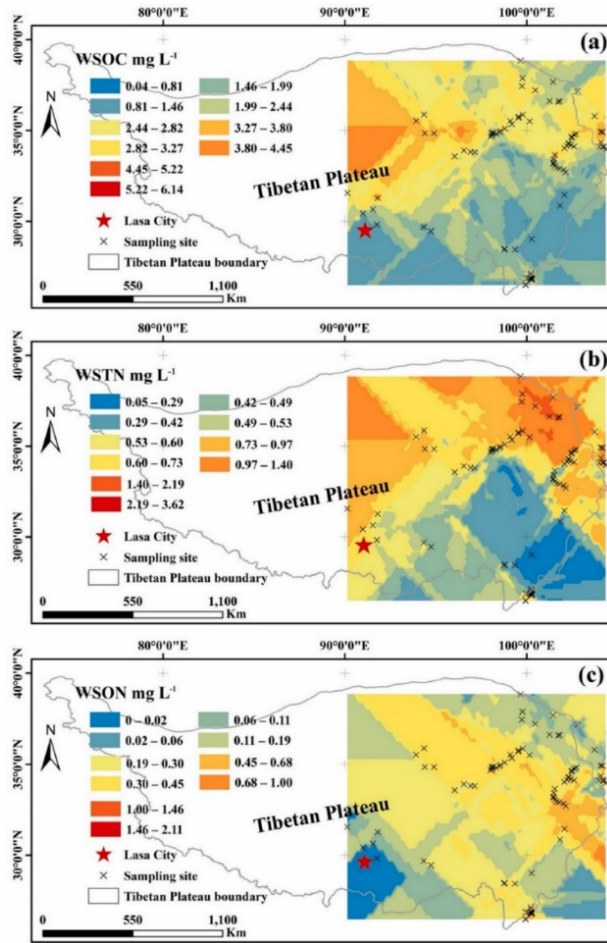


图 1.2.2 青藏高原东部高寒河流径流水溶性有机碳(WSOC)、水溶性总氮(WSTN)和水溶性有机氮(WSN)浓度的空间分布

现场观测、再分析数据集、数值模拟和统计分析方法，系统描述了黑碳对于青藏高原南部降水及其冰川物质亏损的影响程度及其机制，成果发表于 **Nature Communication**：黑碳气溶胶是化石燃料和生物质不完全燃烧的产物，具有强烈的吸光性，是仅次于二氧化碳的大气升温气候强迫因子。黑碳沉降到雪冰中会导致雪冰表面反照率降低，从而加速冰川和积雪的消融，进而改变区域的水文过程以及水资源变化。青藏高原被誉为“亚洲水塔”，是亚洲数条大江大河的发源地，水资源变化事关十亿人口的用水安全。

青藏高原毗邻的南亚地区是目前全球黑碳高排放区之一，模式与地球化学证据均显示，南亚黑碳气溶胶能够跨越喜马拉雅山脉输送到青藏高原内陆地区，南亚排放源对青藏高原黑碳气溶胶的贡献达到 60% 以上，并主要影响高原的南部和中部地区 (Yang et al., 2018; Mukesh et al., 2022)。同时，对冰川和积雪的观测与模拟研究发现，黑碳气溶胶对青藏高原雪表反照率降低的贡献平均约为 20% (范围 10~50%)，导致高原冰川消融增

加约 20%（范围 15~40%），并使得积雪期减少 3~4 天。由此，南亚黑碳气溶胶的跨境传输对青藏高原冰冻圈的加速消融影响显著。

最新的一项研究从南亚黑碳气溶胶影响区域降水的角度，分析其对青藏高原冰川变化的影响。研究发现，21 世纪以来，南亚黑碳气溶胶通过改变南亚季风水汽输送，进而间接影响青藏高原冰川的物质补给。其主要机制是，南亚黑碳气溶胶导致中高层大气增温，增加了南北气温梯度，增强了南亚区域的对流活动，使得水汽在南亚当地辐合；同时，黑碳可以增加大气中的云凝结核数量（图 1.2.3）。黑碳气溶胶引起的这些气象条件变化，使得更多的水汽在南亚当地形成降水，从而传输到青藏高原的水汽减少，导致高原中部和南部季风期降水减少，特别是高原南部减少显著（图 1.2.4），降水的减少进一步带来冰川的物质补给减少。在 2007-2016 年间，减少的物质补给占青藏高原平均冰川物质亏损的 11.0%，而在高原南部达到 22.1%（图 1.2.5）。

南亚黑碳气溶胶对青藏高原冰川消融具有直接和间接效应，即跨境传输和沉降导致的高原冰川加速消融为直接效应；而减少高原夏季降水量，即降低高原冰川的物质补给量，进而使得冰川物质亏损量增大为间接效应。南亚黑碳气溶胶直接和间接效应的共同作用，加速了以冰川为主体的“亚洲水塔”水资源损失。未来预估指出，南亚黑碳气溶胶排放仍将持续增加。为了“亚洲水塔”水资源的可持续利用，南亚地区黑碳减排势在必行。

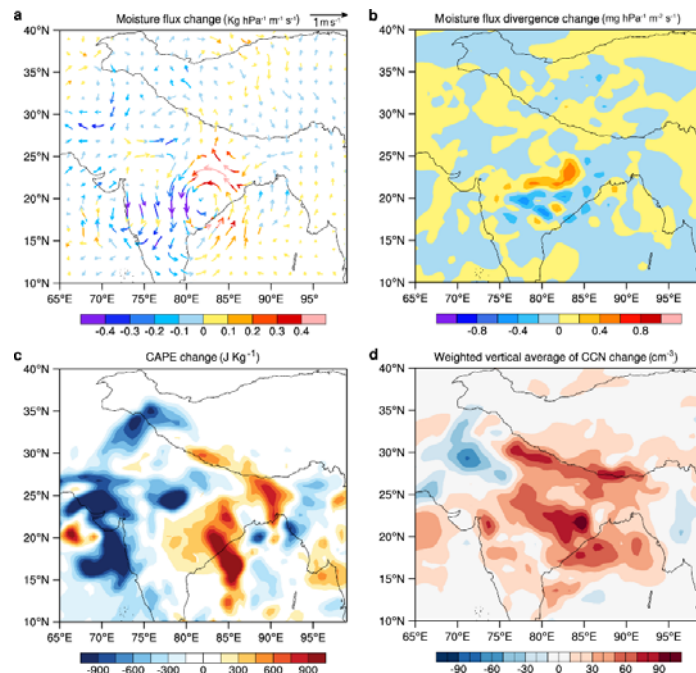


图 1.2.3 南亚黑碳气溶胶引起的 2007–2016 年夏季(6–9 月)平均的气象场变化: a 水汽通量变化; b 水汽通量散度变化; c 对流有效位势能变化; d 整层凝结核变化

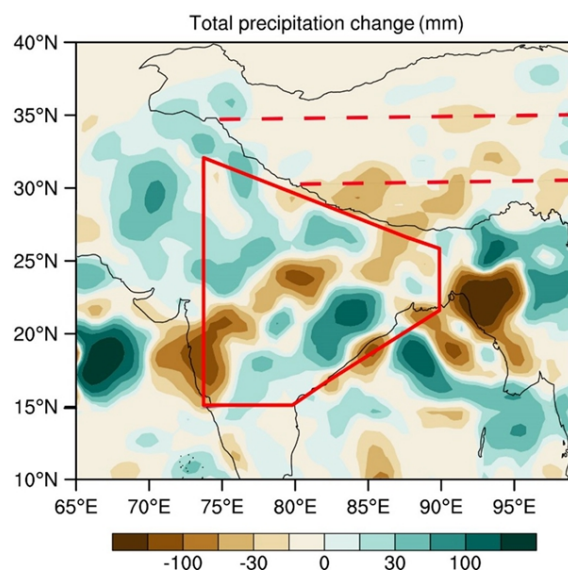


图 1.2.4 南亚黑碳气溶胶引起的 2007–2016 年夏季(6–9 月)平均降水变化

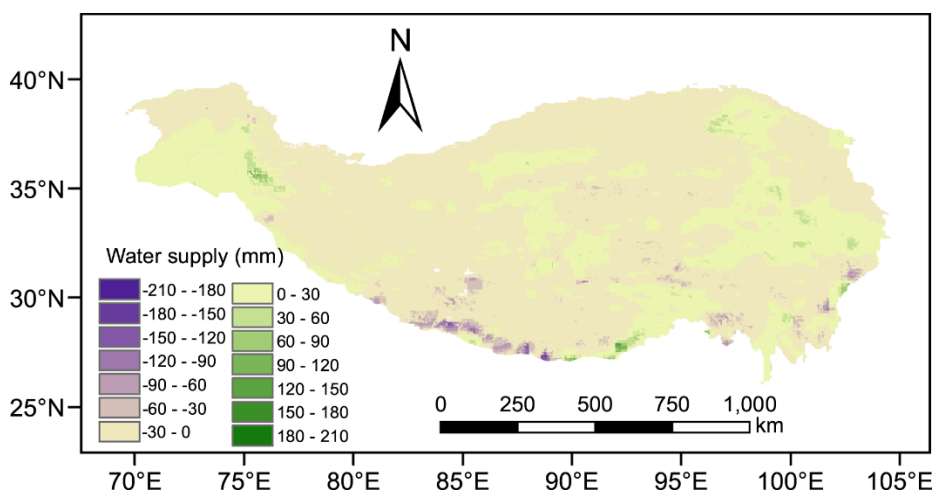


图 1.2.5 南亚黑碳气溶胶引起的 2007–2016 年夏季(6–9 月)平均冰川物质补给量变化

### 3. 冰川/湖泊观测研究

#### ➤ 纳木错站

**地下水补给显著影响青藏高原西部湖泊水量平衡：**青藏高原分布着世界上海拔最高的湖泊群，是我国最主要的湖泊分布区之一。自上世纪 90 年代末以来，受降水增加和冰冻圈加速消融影响，青藏高原内陆区湖泊出现显著扩张，影响了区域生态环境和周边基础设施。影响湖泊水量平衡的因素较多，如大气降水、湖面蒸发、冰冻圈消融、地下水补给或渗漏等。由于缺少系统的水文气象观测资料，目前对高原湖泊水量平衡的研究大多侧重地表水，难以直接监测和量化地下水对湖泊的补给。近日，中科院青藏高原所环境变化与多圈层过程团队与合作者通过在青藏高原西部开展连续 5 年的湖水水位和

水文气象监测(图 1.3.1),发现地下水补给导致冬季湖面结冰期湖水水位出现显著上涨,对青藏高原西部湖泊水量平衡影响显著。

对于青藏高原大多数湖泊来说,冬季湖面结冰期湖水水位保持稳定或微弱下降,主要原因是冬季降雪、入湖径流和湖面升华等影响水量平衡的各个分量对湖水水位影响有限。然而,最新的监测结果表明,青藏高原西部湖泊在湖面结冰期水位出现显著上涨,如鲁玛江东错、美马错、结则茶卡和龙木错等。在鲁玛江东错和美马错,湖面结冰期的水位上涨幅度可达 0.25-0.35m,约占全年湖水水位升高值的一半(图 1.3.2)。综合考虑冬季湖面降雪、入湖径流和湖面升华等因素,科研人员发现冬季湖面结冰期水位上涨的主要原因是地下水补给,其补给量占流域内夏季总降水的 13-25%。对全年湖水水量平衡的计算结果表明,地下水补给占总入湖流量的 59-66%,说明地下水补给不仅对高原西部湖泊水量平衡起到关键作用,还是区域水循环的重要组成部分。

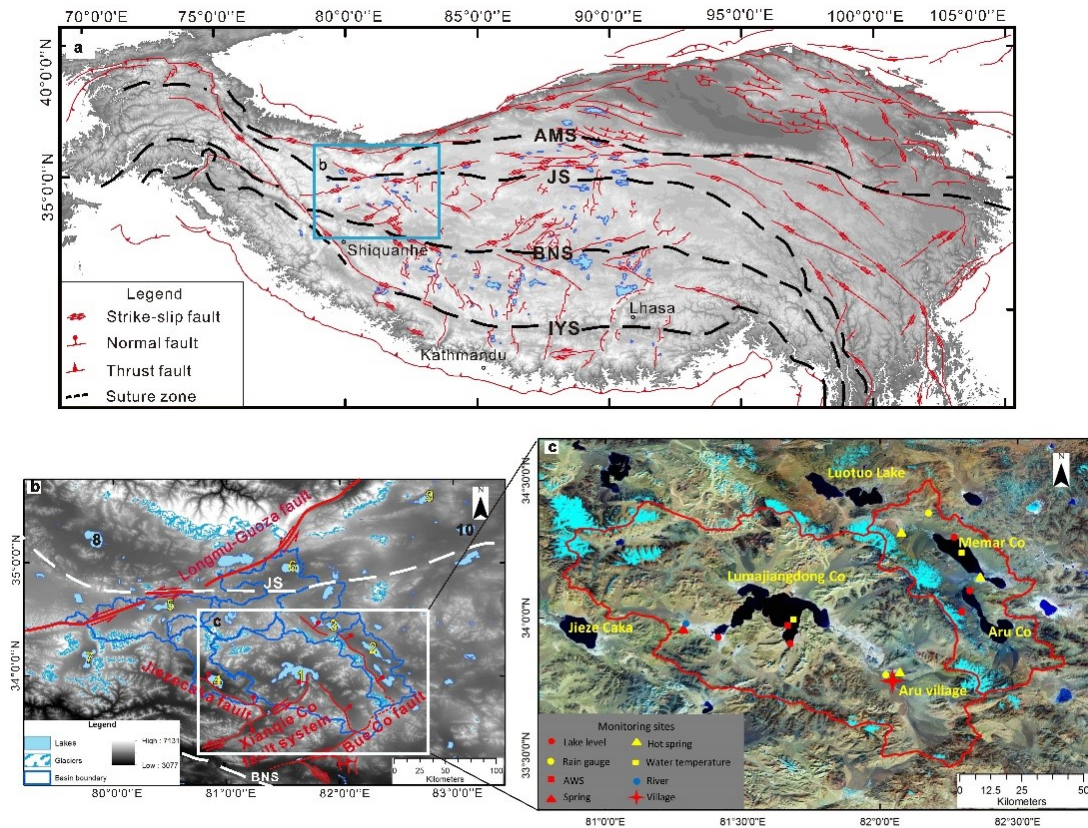


图 1.3.1 研究区域地质构造图和湖泊水量平衡观测点位置

科研人员进一步分析发现,青藏高原西部地下水的形成可能与区域地质构造特征有关。研究区域基岩以石炭纪和二叠纪的灰岩为主,各个流域均分布有活动正断层带(图 1.3.1),有利于存储和输送地下水。高海拔地区的冰川、积雪融水通过活动断层破碎带补给地下水,并在低海拔地区汇入湖泊。由于地下水补给稳定且循环周期长,大量地下

水补给甚至可以显著改变高原西部湖泊水位季节甚至年际变化特征。这意味着具备类似地质构造和补给条件的其它湖泊也可能存在可观的地下水补给,进而影响湖泊的季节和年际变化过程。

上述研究结果以“Critical role of groundwater inflow in sustaining lake water balance on the western Tibetan Plateau”为题,发表在《Geophysical Research Letters》上,我站固定科研人员类延斌副研究员为第一作者和通讯作者。青藏高原西部湖泊水位监测数据已在国家青藏高原科学数据中心网站共享(<https://doi.org/10.11888/Terre.tpdc.272314>)。本研究获得第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0201)、国家自然科学基金委青藏高原地球系统基础科学研究中心项目(41988101)和中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA2006020102)等资助。

论文链接: <https://doi.org/10.1029/2022GL099268>

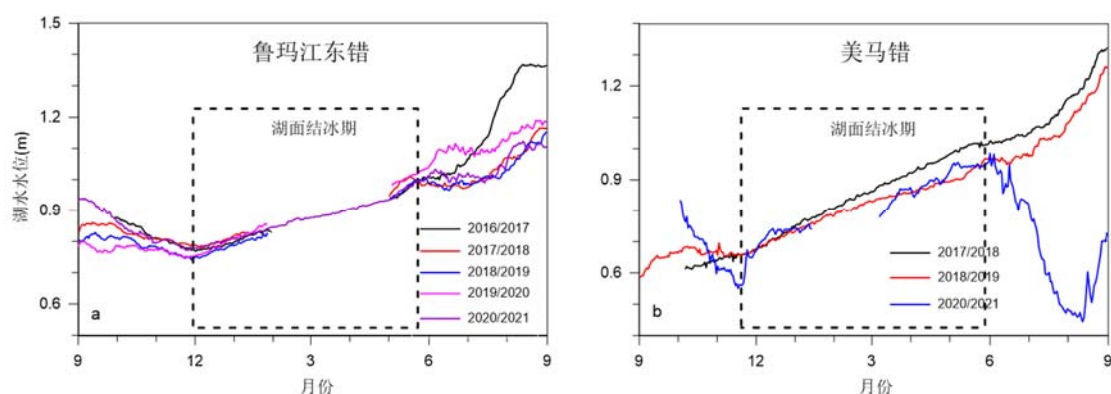


图 1.3.2 冬季湖面结冰期鲁玛江东错和美马错湖水水位变化

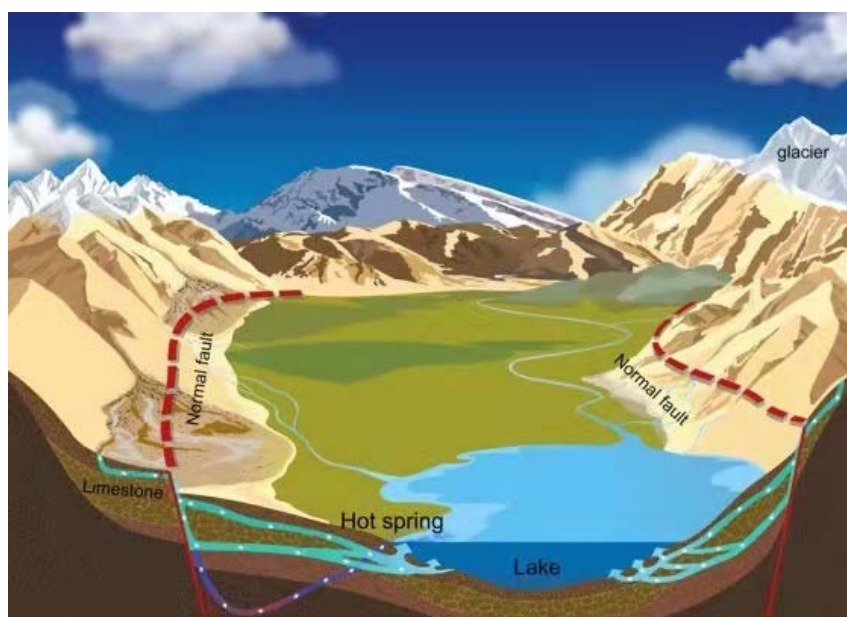


图 1.3.3 研究区流域水循环示意图

**青藏高原湖泊沉积物中古四醚的分布、潜在来源及对水深的响应：**青藏高原对气候变化具有不同时间尺度的敏感性，是全球气候变化和区域响应研究的热点。其分布广泛的湖泊是研究的理想之地。该地区的古湖泊水位记录有助于预测未来的水文变化趋势。然而，现有的古四醚类湖泊水位指标在该地区的适用性尚不明确，从而阻碍了该地区古气候研究的进展。该研究对青藏高原地区 83 个湖泊和周边 22 个土壤的 108 个表层沉积物样品进行了研究（图 1.3.4），探讨了其分布、来源和环境控制因素。湖泊沉积物中古细菌四醚大部分是原位产生的，异地成因是次生的。亚硝化古菌（以前称为 Thaumarchaeota）可能是湖泊和土壤中的主要生物来源，其他古菌（如产甲烷古菌）也可能是湖泊中的生物来源。在研究的环境变量中，湖泊水深是影响古细菌四醚在湖泊中分布的主要因素（图 1.3.5）。%Cren 和 %OH-GDGTs 是潜在的湖泊水位代用指标。此外，Cren/Cren' 比值对水深的响应较好，可作为一种新的水位指示指标（图 1.3.6）。此外，湖泊营养状况和溶解氧(DO)浓度可能会影响 %Cren、%OH-GDGTs 和 Cren/Cren' 比值；因此，在营养状况相对较高的湖泊中，需要谨慎使用这些湖泊水位的代用指标。研究结果为进一步认识四醚分布格局和重建古湖泊水位提供了参考。

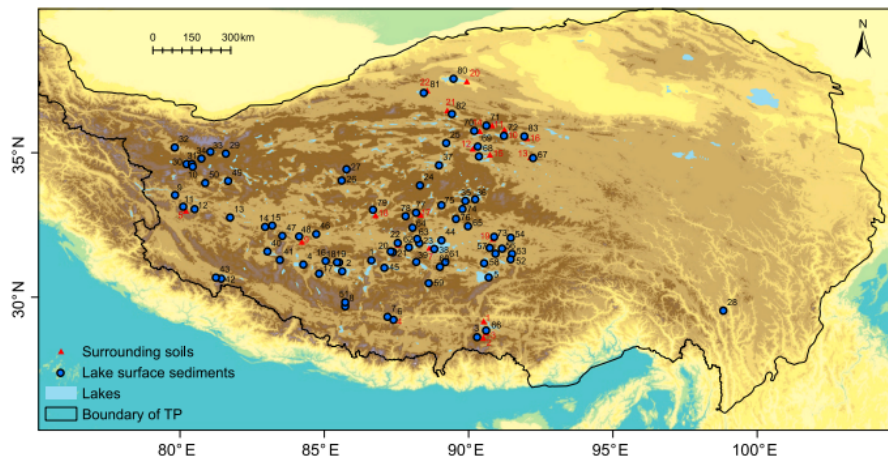


图 1.3.4 青藏高原 83 个湖泊(蓝点)和 22 个周边土壤(红三角)的 108 个表层沉积物样品点位

该成果以“Distribution, potential sources, and response to water depth of archaeal tetraethers in Tibetan Plateau lake sediments”为题，近期正式刊发在国际地学期刊《Chemical Geology》。我站固定科研人员朱立平研究员为该成果的通讯作者。研究获得了第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0202)、国家自然科学基金委项目(41831177)和中国科学院 A 类战略性先导科技专项(XDA20020100)项目等资助。论文链接：<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.120825>

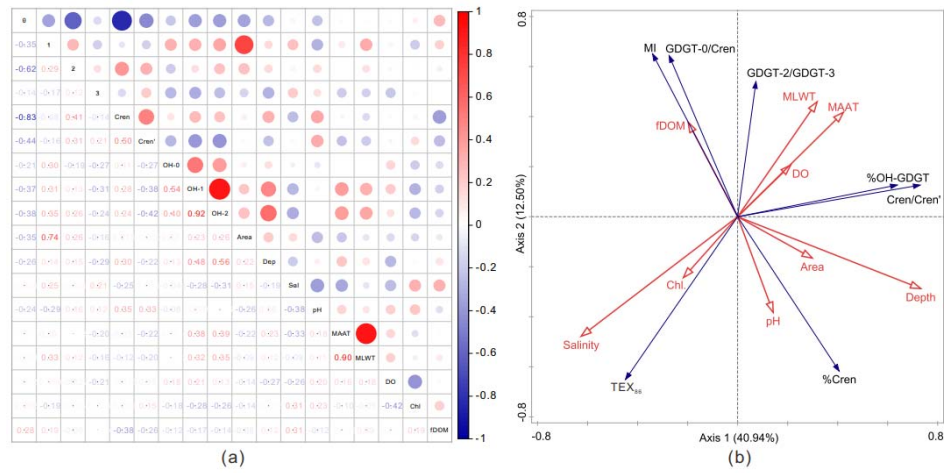


图 1.3.5 古四醚丰度与湖区面积、水深、MAAT、MLWT 和水质参数(pH、盐度、DO、Chl-a、fDOM) 9 个环境参数的相关矩阵。(b)冗余分析(RDA)结果描述了环境变量  $\text{TEX}_{86}$ 、MI、%OH-GDGTs、GDGT-0/Cren、GDGT-2/GDGT-3、%Cren 和 Cren/Cren' 比值之间的关系。

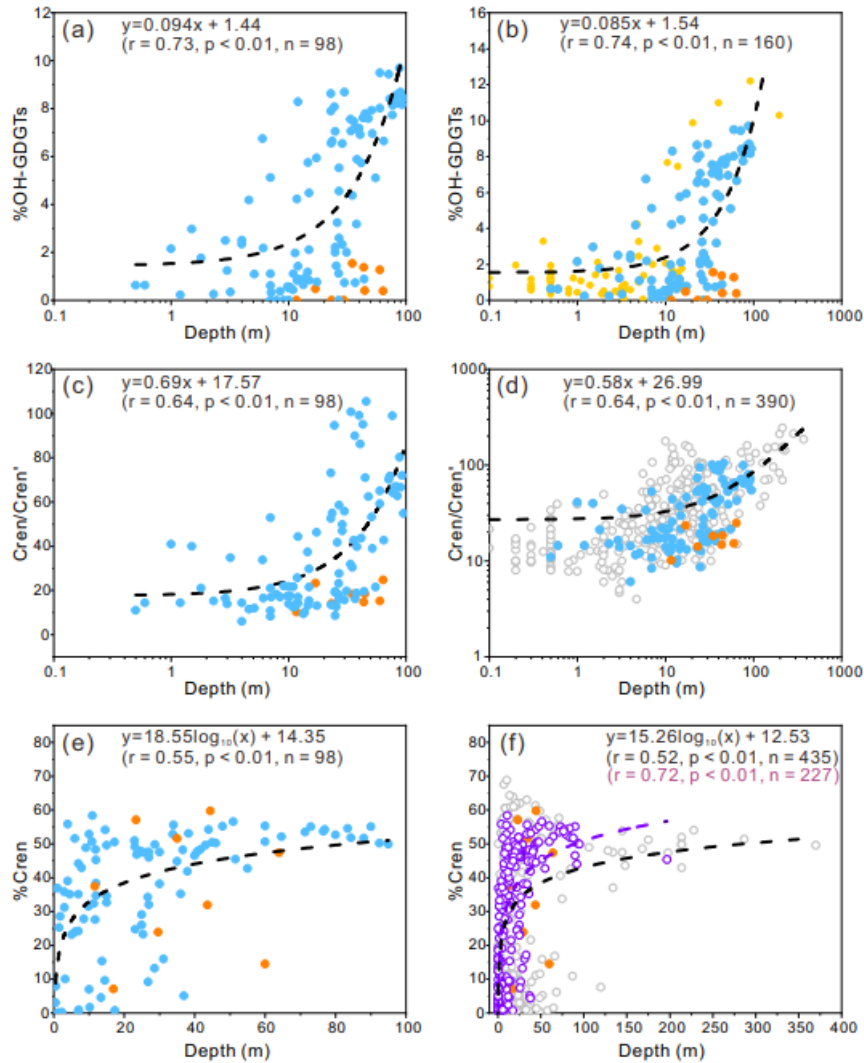


图 1.3.6 古细菌四乙醚分布随水深的变化

**高原中部环流过渡区西风带对全新世气候变化影响：**西风急流与亚洲夏季风的协同作用共同影响了高原面上过去和现在的环境变化过程。古气候研究通常认为，西风影响代表干冷，季风影响代表相对暖湿。相对应的降水  $\delta^{18}\text{O}$ （加权平均）存在不同的高低阈值。然而，西风对青藏高原全新世气候的影响依然存在争论，尤其是对中全新世（距今 8000-4000 年左右）水文气候变化过程。关键在于缺乏西风降水的直接或独立代理指标，这阻碍了我们对西风带效应的深入认识。

我站学术站长朱立平研究员联合其他相关单位的科研人员综合对比分析了高原中部西风-季风过渡区六个湖泊连续的多指标古环境记录（图 1.3.7），结合提取的多站点现代降水稳定同位素再分析资料（图 1.3.8），充分评估不同状态下降水氢同位素的阈值差异，建立了一个整合不同独立指标记录的“西风效应指数(Westerlies effect index)”来评估全新世西风带对青藏高原中部的影响（图 1.3.9）。

研究表明，青藏高原中部晚冰期以来的有效湿度总体上遵循南亚季风主导区的湿度模式——在早全新世气候适宜期里达到最大。西风带对青藏高原中部古气候变化的影响有两种类型：I 型（冷干）和 II 型（凉偏干或中等湿）。西风效应 II 型的情景发生在季风和西风的过渡区（如 CQTP）或相应的大气环流处于转换期（如中全新世）（图 1.3.9），减弱的夏季风导致西风降水相对重要性的增加，西风降水有利于维持过渡区在季风减弱背景下中等或高的湖泊水位，而大量的冬季降水也会降低沉积物中  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}_{\text{wax}}$  数值。因此，在环流过渡区，西风的影响并不总是意味着干燥的条件，在特定的时段或情况下，也可能是相对湿润。

从区域尺度的大气环流过程看，青藏高原中部的气候水文波动以大约 7 ka 为分界经历了两个周期，在大约 7 ka 之前，各指标曲线的变化有相对一致性，我们把这种同步情况称为两种环流相互作用中的“单独控制型”(single-dominant type)，即从 15-10 ka 倾向于西风主控，而在 10-7 ka 为季风主控。中晚全新世（后一个周期）则存在非同步现象，期间可能受到大陆性气团的活动影响，存在不同距离的水汽输送和强化的局地水循环。

本研究分析了青藏高原上与西风与季风相互作用相关联的水文过程和环境演变动力，提示在全新世某些时候西风带水汽传输到过渡区的作用，重视未来暖湿化趋势下夏季暴雨或冬季暴雪等极端降水增加的不确定性。

该成果以“Westerlies effect in Holocene paleoclimate records from the central Qinghai-Tibet Plateau”为题，近期正式刊发在国际地学期刊《Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology》。我站固定科研人员陈浩为

第一作者，朱立平研究员为通讯作者。研究获得了第二次青藏高原综合科学考察研究、泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设等项目资助。

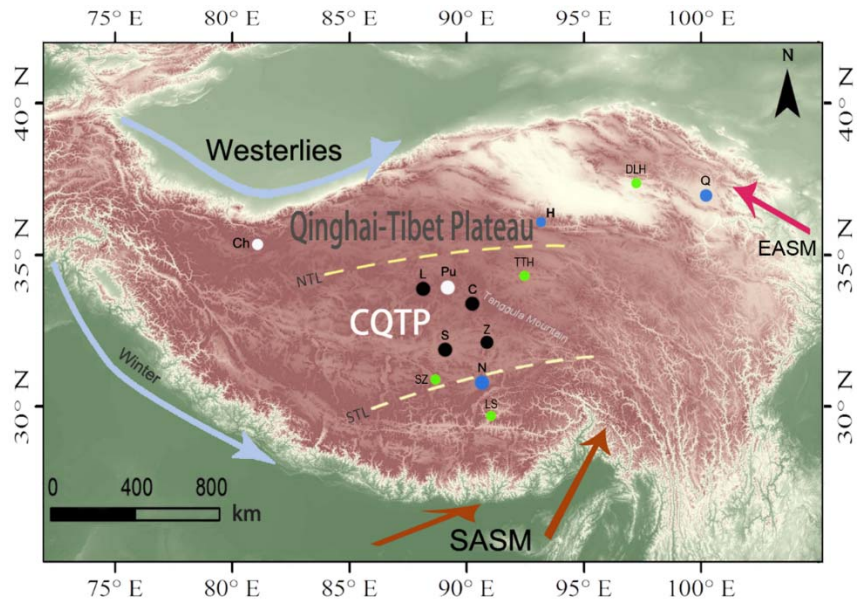


图 1.3.7 研究区概况图 (LS: 拉萨; TTH: 沱沱河; DLH: 德令哈; SZ: 申扎; Pu: 普若岗日冰川; Q: 青海湖; N: 纳木措; S: 色林措; C: 赤布张措; L: 令戈措; Z: 兹格塘措)

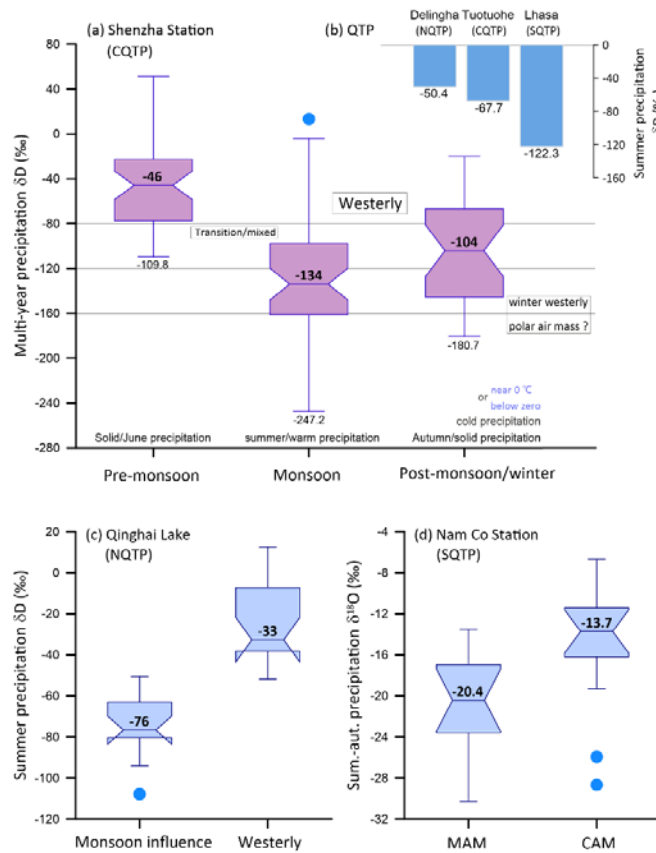


图 1.3.8 现代降水稳定同位素统计

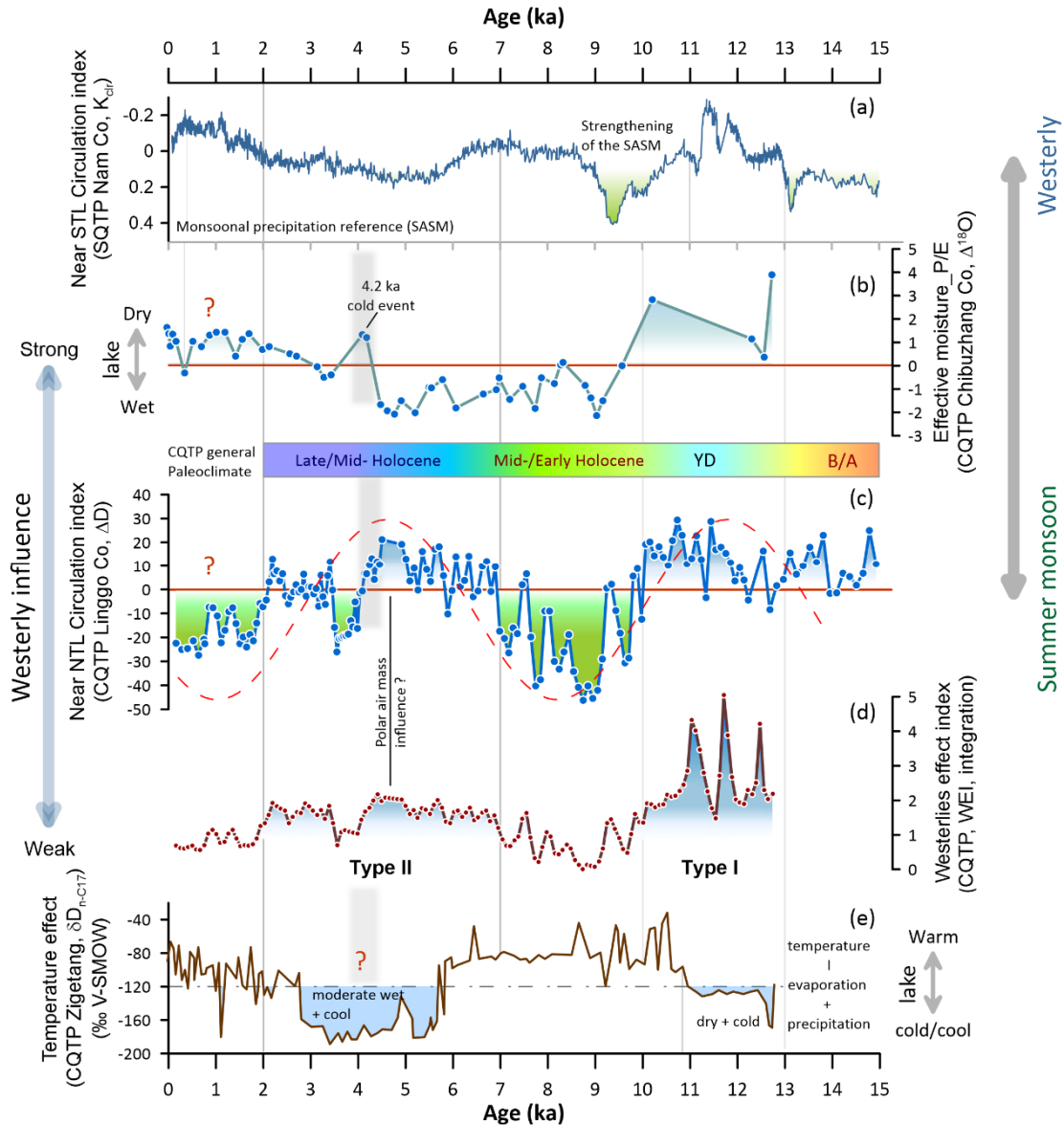


图 1.3.9 青藏高原中部西风影响指数及区域大气环流指标（西风影响指数为无量纲，数值越高，西风影响越大）

### ➤ 珠峰站

**青藏高原地区湖泊对气候变化的响应取得新进展：**基于湖泊观测数据和卫星遥感数据，发现位于季风区的巴木错和西风区的龙木错湖泊有所扩张而受到西风-季风协同作用区拉昂错湖泊略有萎缩。湖泊扩张主要与气温升高和降水增加相关，湖泊萎缩则蒸发贡献更大。该研究发表在《Remote Sensing》，(Ma et al., 2022)。另外，通过对拉昂错在无冰期水温变化的分析，发现了 8 月下旬湖泊分层中断这一罕见的现象。同时借助一维湖泊模型 WRF-Lake 分析认为可能是因为增加的潜热通量降低了湖水表面温度，使湖泊和空气间的温差增大，从而加剧湖-气相互作用的结果。该研究发表在《Frontiers

in Earth Science》, (Su et al., 2022)。以上研究为后续进一步研究青藏高原地区湖泊对气候变化的响应提供了一定的思路并奠定了基础。

### ➤ 天山冰川站

**西北干旱区冰川资源及其变化：**冰川是西北干旱区重要的水资源，在新疆第三次科考等项目支持下，开展“西北干旱区冰川资源及其变化”系统研究，发表一批高质量科研成果。主要研究进展如下：

(1) **更新了西北干旱区冰川资源数据。**西北干旱区现有冰川 23378 条，冰川总面积为 24221.63 km<sup>2</sup>，总储量为 2155.82 km<sup>3</sup>，分别占全国冰川总量的 48.1%、46.7%和 47.8%。主要分布在新疆的塔里木内流水系，天山山脉的准噶尔内流水系、吐鲁番哈密内流水系、伊犁河，阿尔泰山脉的额尔齐斯河等水系以及甘肃祁连山的河西内流水系（包括疏勒河、黑河和石羊河）（图 1.3.10）。

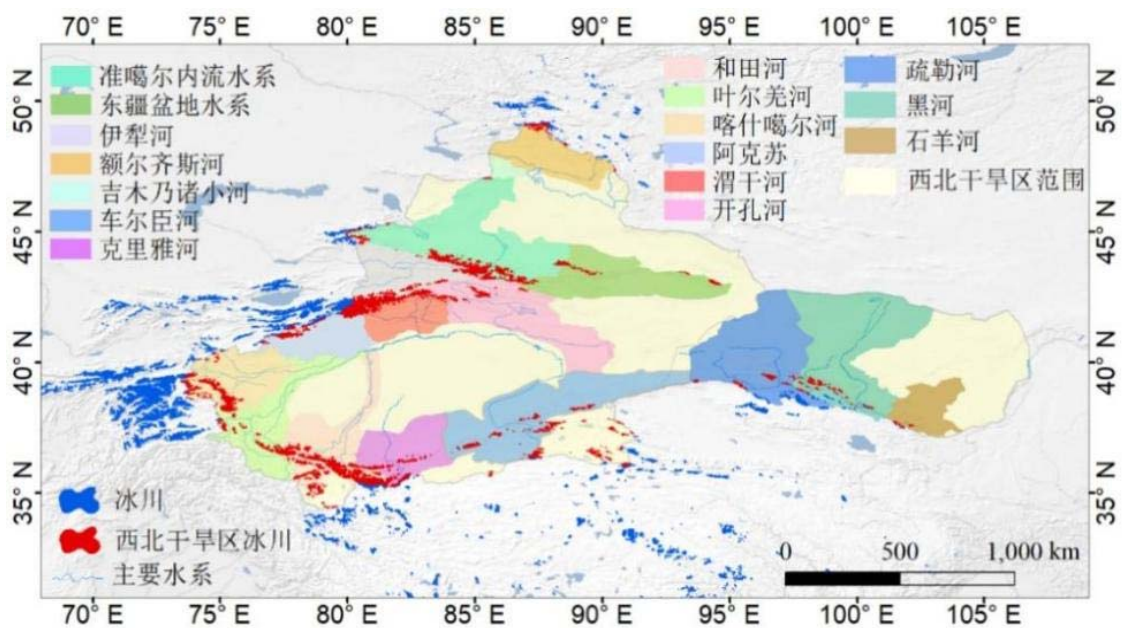


图 1.3.10 中国西北干旱区冰川及分布的主要流域分布图

(2) **查明了西北干旱区冰川过去近 50 年来的变化。**由于全球气候变暖，西北干旱区新疆境内的冰川总面积缩小 11.7%，不同区域的缩减比率为 8.8%–34.2%，其中阿尔泰山冰川退缩最显著，缩小 37.2%。祁连山冰川在不同区域的缩小比率为 5.5%–48.5%。干旱区冰川粒雪线（融雪期末雪线）高度以平均 3.3 m/a 的速率上升。过去 60 年来，干旱区大多山区的积雪略有增加。气候变暖会导致融雪时间提前，未来干旱区积雪呈总体减少趋势（图 1.3.11）。

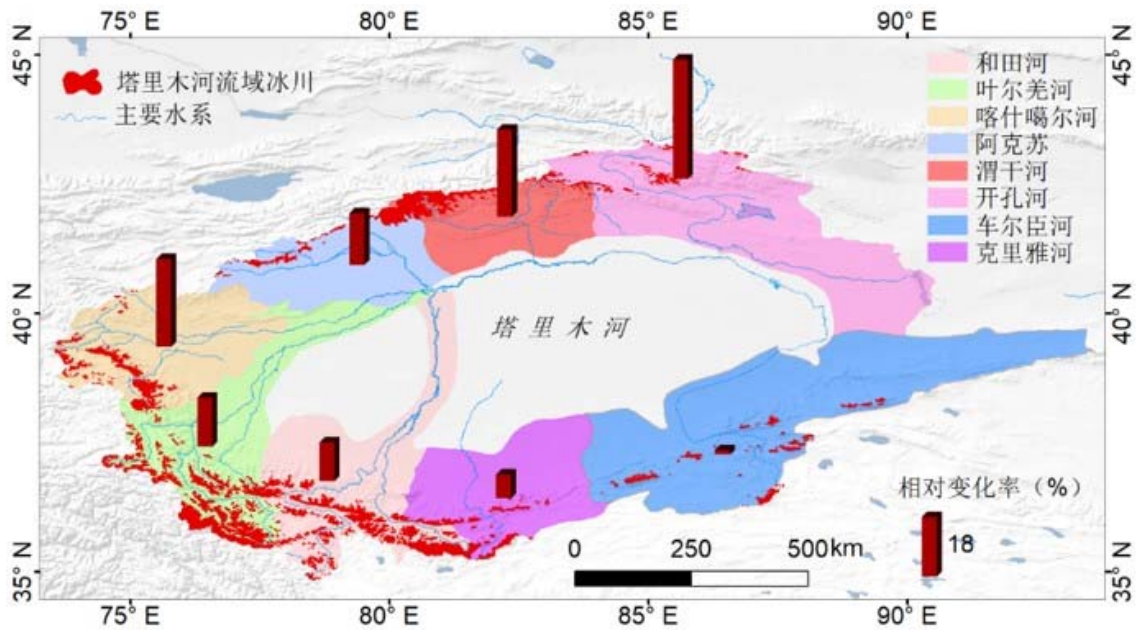


图 1.3.11 塔里木河流域冰川分布及变化

(3) 预估了未来冰川及其融水径流变化。在未来百年尺度，西北干旱区的冰川还将持续退缩，冰川加速消融变化首先使得径流增加，在一些大冰川作用地区形成冰川灾害，随后由于冰川面积的减少而出现冰川径流“拐点”，且冰川径流对气温的依赖更强。冰川覆盖率低、以小冰川为主的流域，其冰川融水径流“拐点”已经出现，如天山的乌鲁木齐河、头屯河、三屯河、库车河、呼图壁河、吐哈盆地诸小河流、祁连山的石羊河和黑河等。冰川规模较大的流域，“拐点”出现较晚，预估在 2050 年前，融水径流仍将呈现持续稳定的增加趋势，如塔河流域的阿克苏河、和田河和叶尔羌河等。而冰川规模介于二者之间的流域，会在未来 10~20 年会出现冰川融水径流“拐点”，如天山和祁连山的玛纳斯河、霍尔果斯河、安集海河、木扎尔特河、疏勒河等

(4) 查明了近期冰雪灾害变化，分析阐述了未来趋势。气候变化加剧了冰川和积雪的消融和不稳定性，使得包括冰湖溃决洪水、冰川跃动、冰崩在内的冰川灾害急增，以及包括雪灾和冰雪洪水在内的雪灾频次和强度有增加的趋势。

(5) 发现小冰川消失的时间和影响。研究表明，未来无论哪种气候情景，降水量是否增加，西北干旱区面积小于  $0.5 \text{ km}^2$  的冰川在本世纪中叶会因为消融而消亡，而到本世纪末，面积小于  $2.0 \text{ km}^2$  的冰川也会消亡，面积小于  $10 \text{ km}^2$  的冰川剩余冰量很可能低于 30% (图 1.3.12)。小冰川大量消失的潜在影响体现在对河川径流的贡献和调节作用、对气候的反馈作用的影响和对景观和旅游资源的影响四个方面。

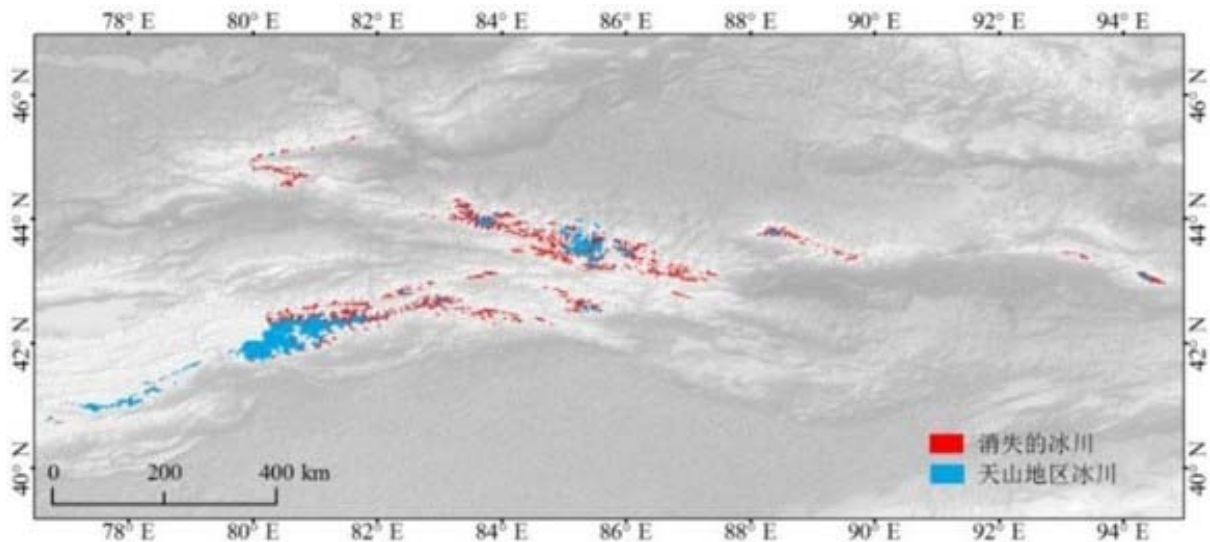


图 1.3.12 RCP4.5 排放情景下，2090 年前中国境内天山地区消失冰川的空间分布

(6) 查明了冰雪旅游资源和开发现状。西北地区，尤其是新疆雪资源得天独厚，雪期长、雪量大、雪质好，为开展冰雪运动产业奠定了良好基础。气候变暖将导致部分地区降雪减少，自然积雪覆盖降低。但通过技术创新，可以提升滑雪场应对未来气候变化的影响。西部冰川旅游资源丰富，类型多样，但是，西北地区冰川旅游发展较为缓慢，景点稀少，与冰川资源禀赋并不相符，与国外冰川旅游发展差距较大。

(7) 针对冰川保护和冰雪灾害，提出了政府决策建议。对冰川的保护与冰川消失的应对包括修建山区水库和设立冰川保护区；对旅游区价值高的冰川可以采用人工降雪和覆盖反光隔热材料的方法加以保护；建议加强关键地区冰川的监测研究，建立冰川灾害的预测、预报、预警体系建设。

**乌鲁木齐河流域冰川水文系统模拟研究：**乌鲁木齐河流域有着 60 年的观测研究历史，其相关研究奠定了我国内陆河研究的基础。在流域尺度上，围绕乌鲁木齐河这一样板流域开展了“冰川—河源区—流域”完整、系统的水文模拟研究，主要进展如下：

(1) 乌河流域冰川物质平衡变化模拟及对径流的影响。1980~2020 年乌鲁木齐河流域冰川的物质损失和物质平衡线高度均呈增加趋势，平均值为  $-0.85 \pm 0.32 \text{ m w. e. a}^{-1}$ ，略大于天山山区平均冰川物质损失值。近 20 年来流域冰川的物质损失显著加剧，1999~2020 年 ( $-1.04 \pm 0.32 \text{ m w. e.}$ ) 年均冰川物质平衡几乎是 1980~1998 年 ( $-0.62 \pm 0.32 \text{ m w. e.}$ ) 的 1.7 倍，主要原因是气温升高和消融季节延长。

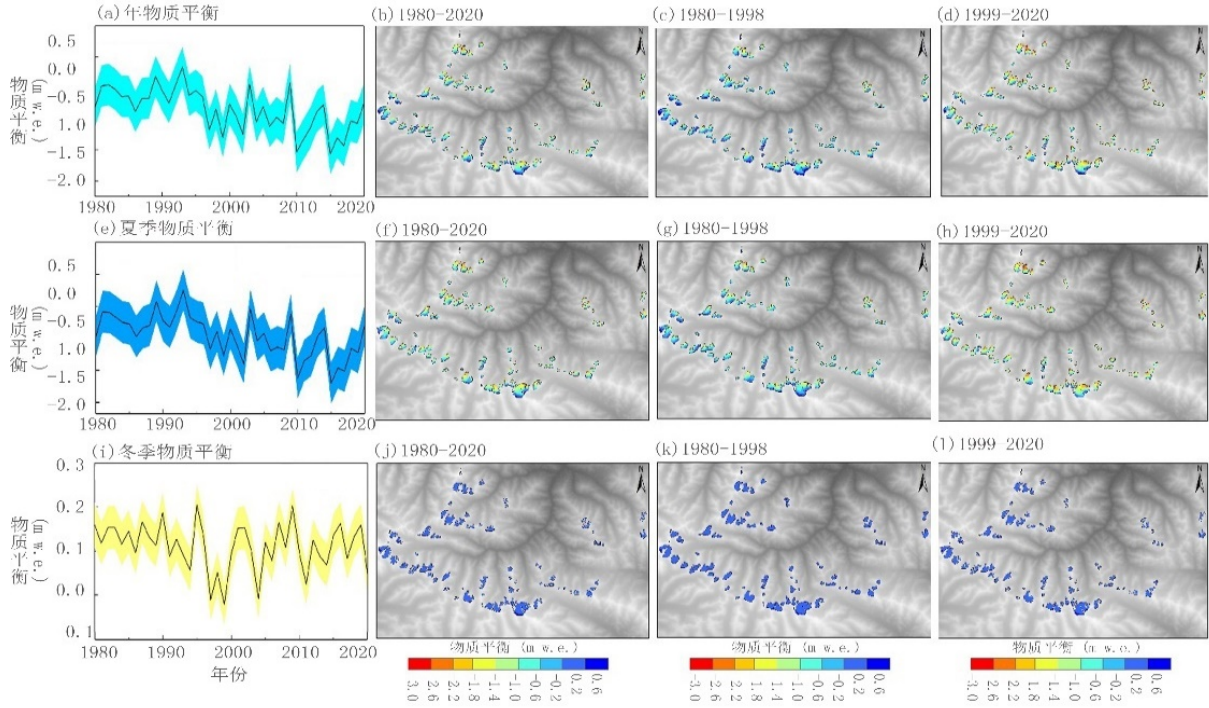


图 1.3.13 乌河流域冰川物质平衡年际、年代际变化

(2) 全分量高分辨率分布式冰川能量-物质平衡模拟研究。冰川物质平衡是表征冰川积累和消融最重要的参数之一，是目前国际冰川学界重点和前沿观测研究领域。冰川物质平衡和冰川区气象数据的稀缺限制了对天山冰川变化的认知。为更好地理解冰川与气候之间的联系，进一步理解冰川消融过程和机理，天山冰川站研究人员利用德国柏林洪堡大学研制开发的冰川能量—物质平衡模型（COSIMA, Coupled Snowpack and Ice surface energy and Mass balance model），充分考虑了大气、冰川表面以及表面以下 10 m 内雪层的物质和能量交换过程，通过建立物质平衡与气象要素变化之间的关系，目前已经实现对乌鲁木齐河源 1 号冰川小时尺度的冰川能量物质平衡模拟。该项研究结果表明：1 号冰川在消融期经历了显著的物质损失（ $-0.77 \text{ m w.e.}$ ）。辐射通量和湍流通量是影响冰川表面能量收支的主要能量项，其中净短波辐射（ $148.18 \text{ W m}^{-2}$ ）、长波辐射（ $241.84 \text{ W m}^{-2}$ ）及感热通量（ $10.08 \text{ W m}^{-2}$ ）是主要的能量收入项，反射的长波辐射（ $-283.11 \text{ W m}^{-2}$ ）、潜热通量（ $-5.93 \text{ W m}^{-2}$ ）及地热通量（ $-3.41 \text{ W m}^{-2}$ ）是主要的能量支出项。表面消融（ $-0.73 \text{ m w.e.}$ ）和固态降水（ $0.19 \text{ m w.e.}$ ）主导着冰川物质损失。敏感性结果表明气温是影响 1 号冰川物质损失的主导气象因子。

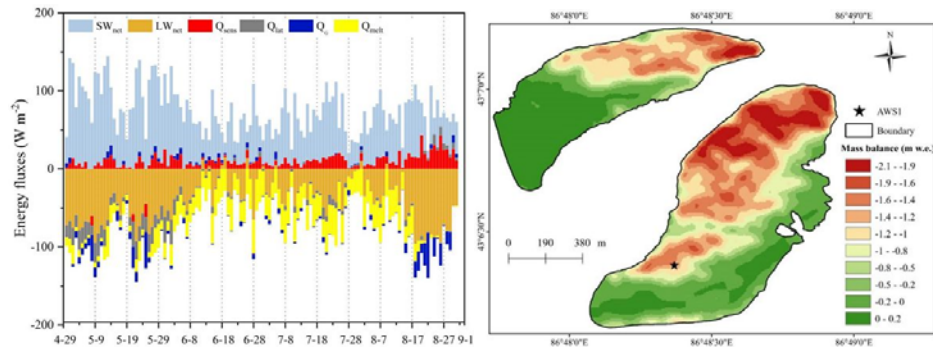


图 1.3.14 消融期乌鲁木齐河源 1 号冰川各能量通量（左图）和模拟的消融期乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡空间变化（右图）

(3) 开展了乌源 1 号冰川和河源区（7 条冰川）径流模拟及预测研究。结果表明，过去 60 年间，1 号冰川水文站的平均冰川径流量约占总径流量的 70%，其中冰川区降水径流和冰川融水径流分别占 44%和 26%，其余的 30%来自非冰川区降水径流。河源区 7 条冰川总面积到 2021 年减少 11%；到 2040 年（35 年）减少 55.8%，到 2060 年（55 年）减少 89.6%。

(4) 模拟研究发现冰川径流“拐点”及成因，并实测出径流“拐点”。研究表明，径流“拐点”是否出现与升温速率有直接的关系，与冰川面积存在间接关系。径流“拐点”在实际中很少能够观测到。1996~2019 年，乌鲁木齐河源夏季气温升高了 15%，在冰川面积变化条件下，融冰径流却下降了 16%。如果保持面积不变，则模拟的融冰径流会增加 3%，说明在这一阶段，升温对融冰径流产生的正向作用与面积减小的负向作用可以相互抵消。冰川径流“拐点”在这段时间内已经出现，分析表明很可能是 2010 年前后。

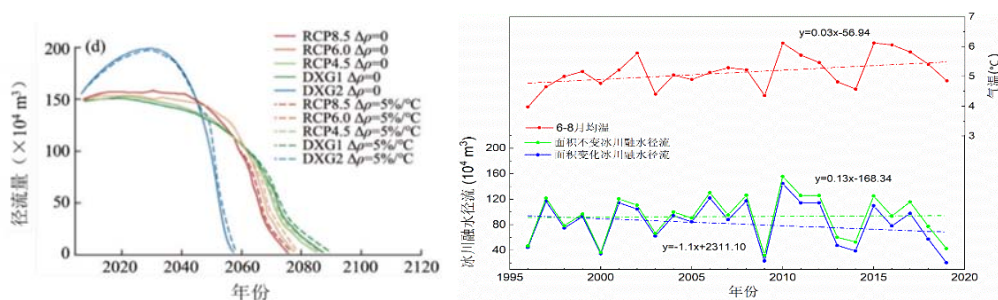


图 1.3.15 不同升温情景下乌源 1 号冰川融水径流模拟结果（左图）和 1996~2019 年 1 号冰川融水径流（模拟）、夏季气温、降雪量年际变化及其趋势（右图）

(5) 成果“西北干旱区冰川、积雪水资源及其变化”成为《中国西北干旱区水资源与生态环境研究报告》第二章，后者为中国科学院资源环境领域向党的二十大会议献礼的五大成果之一。



#### 本报告各章作者

- 第一章：陈亚宁、李 稚、段伟利、王旋旋、李玉朋  
 第二章：李忠勤、王飞腾、徐春海、陈 拓、陈仁升、上官冬辉、阳 勇、王璞玉  
 第三章：陈亚宁、方功煥、李 稚、黄文静、姚俊强、张齐飞  
 第四章：徐建华、陈亚宁、范梦甜、沈丹婕  
 第五章：沈彦俊、郭 英  
 第六章：尹振良、王凌阁  
 第七章：刘文彬、李宗省、吕爱锋、高文德  
 第八章：杨林山、张齐飞、张雪琪、朱 猛  
 第九章：陈亚宁、王怀军、李卫红、席海洋、郝海超  
 第十章：朱成刚、陈亚宁、司建华

图 1.3.16 《中国西北干旱区水资源与生态环境研究报告》

### 雪冰化学与环境研究：

(1) 西北城市大气颗粒物与挥发性有机物污染研究。该项研究结果表明：西北地区有机物和水溶性无机离子占 PM 组分的 41%~60%。雾霾生成有两种模式：人为污染型 (AP 型：SNA 贡献增加) 和粉尘污染型 (DP 型：Ca<sup>2+</sup> 贡献增加，SNA 贡献减少)。来源解析表明区域来源对 PM<sub>2.5</sub> 污染的贡献接近一半 (AP 型占 40%，DP 型占 50%)，区域传输也是雾霾污染的重要来源。VOCs 浓度高低排序为甲醇>乙醛>甲酸+乙醇>丙酮，与其他城市相比，西北地区的含氧性 VOCs (OVOCs) 含量较高，芳香烃较低。重点讨论了 VOCs 与 PM 的关系，发现在低氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 条件下，主要的 SOA 生成前体物为 C10-芳烃、二甲苯和苯乙烯，VOCs 氧化解释了 9.9~20.7% 的 SOA 生成，而在高 NO<sub>x</sub> 条件下，C10-芳烃和甲苯占主导地位，VOCs 氧化解释了 6.1-10.8% 的 SOA 生成。

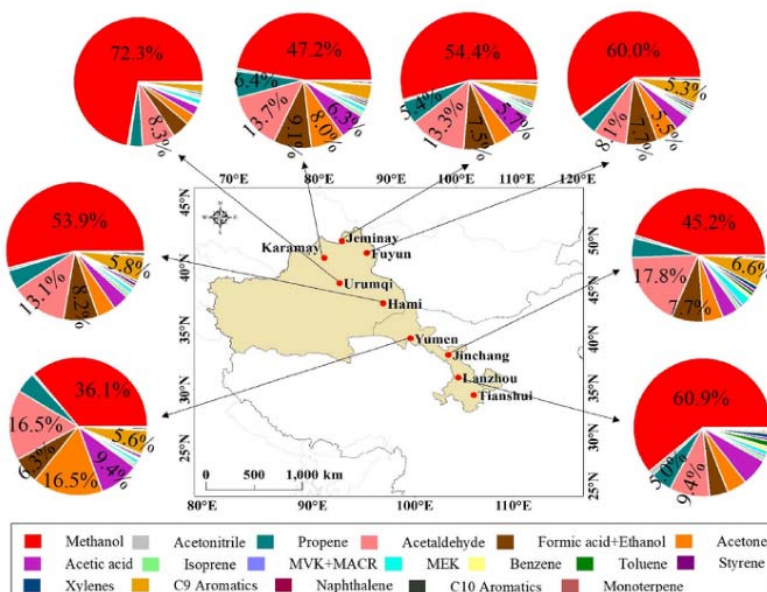


图 1.3.17 西北地区 VOCs 的贡献

(2) 揭示了新冠疫情前后冰川区气溶胶和雪坑的化学演变过程。利用 1 号冰川雪坑样品和大气污染物数据, 研究了新疆 16 个主要城镇主要大气污染物的变化特征, 发现疫情可能会通过减少交通和工业强度对天山冰川的雪化学产生影响, 未来将从冰芯、年轮和其他档案中获得更多证据。基于长期采集的气溶胶数据, 研究了乌鲁木齐河源区新冠肺炎疫情期间总悬浮颗粒物化学成分的季节变化, 呈现典型的秋季高、冬季低的季节特征, 并证实了化石燃料燃烧源对冰川的影响很明显, 气溶胶主要受岩盐、灰尘、煤炭燃烧和汽车尾气的影响。

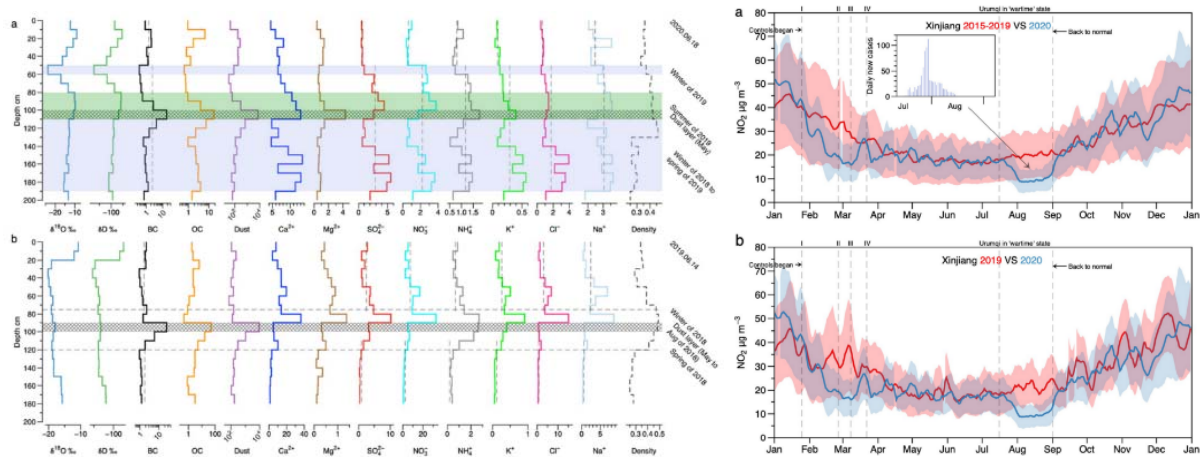


图 1.3.18 雪坑稳定同位素 ( $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$ )、BC、OC、可溶性离子和雪密度特征

(3) 揭示了上世纪南极东部海岸沉积物中黑碳变化。黑碳是生物质燃烧和化石燃料燃烧产生的重要气候强迫剂。它可以有效吸收可见光, 并在气候系统中发挥关键作用。作为仅次于二氧化碳的第二重要辐射强迫质量, 黑碳通过吸收和散射大气顶部的太阳辐射直接影响气候, 并通过改变云的形成和减少冰雪的反照率间接影响气候, 南极洲可以接收南半球排放的黑碳气溶胶, 并保存排放和大气传输的历史。从南极洲东部海岸采集的冰芯 (CA2016-75) 中的黑碳高分辨率记录, 显示在过去 100 年 (1915~2015) 中积累的黑碳浓度 ( $0.030 \text{ ng g}^{-1}$ ) 和通量 ( $7.22 \mu\text{g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ) 都是南极冰雪的最低值。在 20 世纪 50 年代至 90 年代中期, 黑碳浓度呈现长期下降趋势, 随后至 2015 年呈上升趋势。反向轨迹分析表明, 南美洲和澳大利亚的生物质燃烧和人为生物燃料消耗产生的排放是沉积物中黑碳的主要来源。对黑碳沉积和大气环流指数 (厄尔尼诺-南方涛动、南方环行模式和南极涛动) 的小波光谱分析和时间相关性分析证实, 可能是因为它们对黑碳运输和天气条件的直接影响导致了火灾的发生和源区域的后续排放。

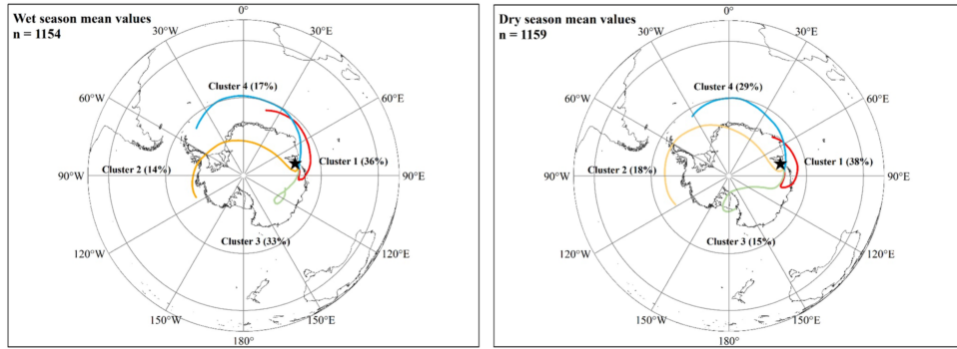


图 1.3.19 南极东海岸耐火性黑碳（ rBC ）传输路径

### ➤ 慕士塔格站

**第三极西部地区上游水资源预测研究取得进展：**第三极是地球上除了南极和北极之外冰川分布最多的地区（总面积约 10 万  $\text{km}^2$ ），随着气候快速变暖，冰川的加速消融引发了人们对下游农业、生态和社会供水的担忧。然而，冰川融水的重要性在第三极各个流域并不一致。第三极超过 50% 以上的冰川集中分布在西天山-帕米尔-喀喇昆仑-兴都库什-西喜马拉雅山。相较位于青藏高原东南部主要受季风影响的流域（如黄河源、澜沧江-湄公河上游等），冰雪融水对受西风主导且下游干旱的西部流域具有更重要的水资源意义。但是该地区历史径流特征及未来水资源变化尚未得到充分的量化和评估，已有研究存在较大争议。高山区地面气象观测数据的缺乏、模型中对冰川水文过程描述的不足以及不同气候模式间对未来气候变化情景预估的巨大差异，是阻碍充分理解高山区冰川流域径流过程及未来水资源演化的主要因素。

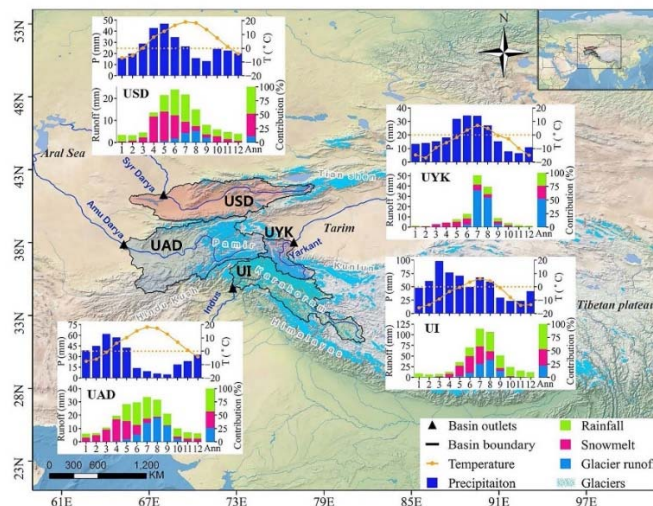


图 1.3.20 锡尔河、阿姆河、印度河和叶尔羌河上游历史时期（1971-2000）月均降水、温度及月径流组分特征

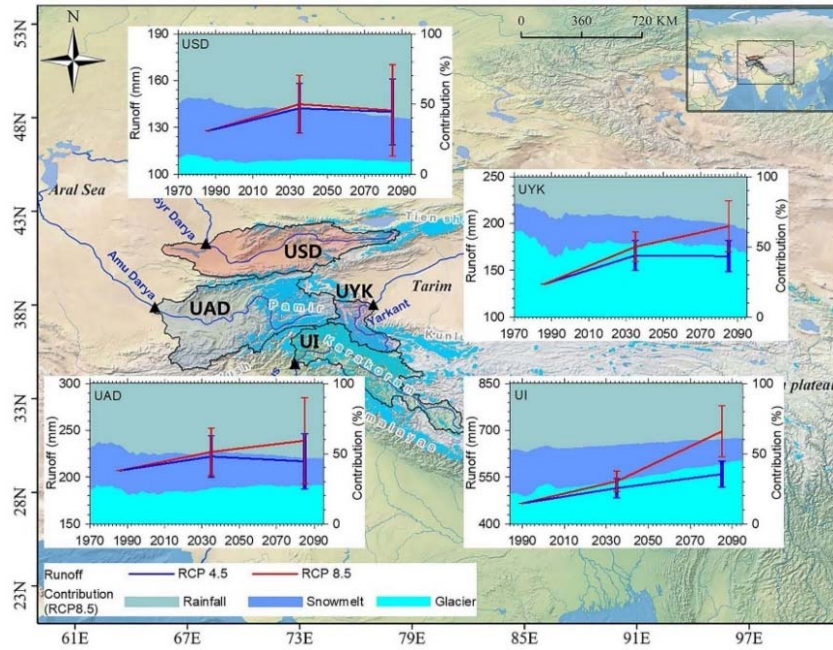


图 1.3.21 锡尔河、阿姆河、印度河和叶尔羌河上游未来（1970-2099）总径流及径流组分演化

针对以上科学问题，选取位于第三极地区西部的锡尔河、阿姆河、印度河和叶尔羌河的上游（图 1.3.20）为研究对象，系统研究这四个流域当下的径流特征、未来可用水量、季节变化和水文干湿极值的演化。基于经过矫正的历史气象数据、验证后的冰川水文模型、降尺度和误差矫正后的 22 个 GCM 模式，研究发现：1. 在印度河、叶尔羌河和阿姆河，本世纪末之前（RCP8.5 情景下）由于降雨径流和冰川径流的共同增加，流域年总径流将持续呈增加趋势，冰川径流仍将是印度河和叶尔羌河全年和旱季径流的重要水源（图 1.3.21）；由于冰川径流的叠加，阿姆河和印度河未来存在洪水增加的风险（图 1.3.22）。2. 在锡尔河，由于春季融雪提前和冰川作用减弱，年总径流量在本世纪中期之后将呈现减少趋势，径流补给将更加依赖降雨（图 1.3.21）；同时未来洪峰出现时间将在春季提前 1 个月，夏季径流量将显著减少（16-30%），极端洪水（主要在春季）和干旱（主要在夏季）的频率和强度将同时增加（图 1.3.23），进一步加深该国际河流上下游的水资源分配冲突。

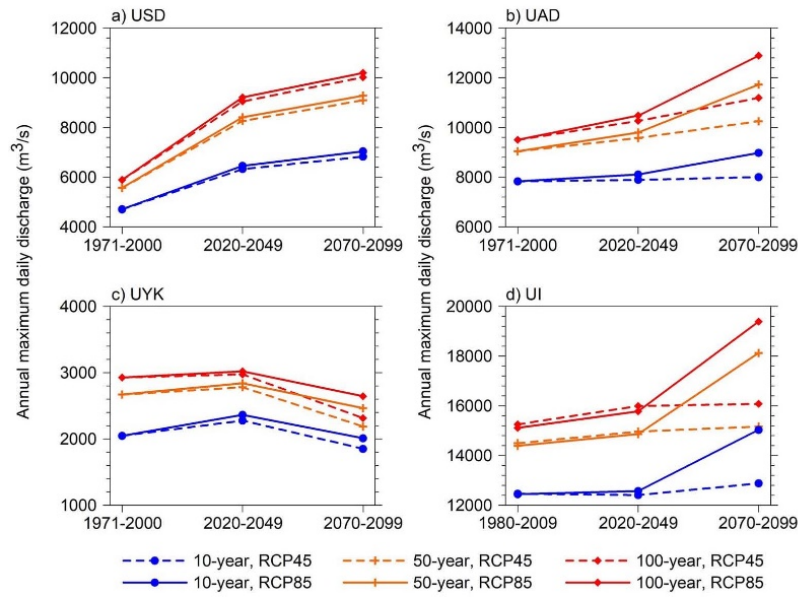


图 1.3.22 锡尔河、阿姆河、印度河和叶尔羌河上游未来（1971-2099）不同重现期下极端洪水变化

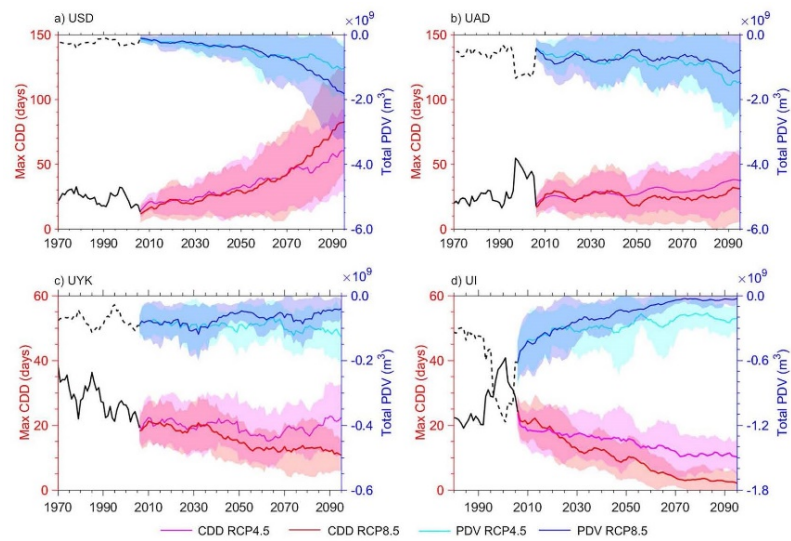


图 1.3.23 锡尔河、阿姆河、印度河和叶尔羌河上游未来（1970-2099）最大连续干旱天数和累积缺水变化

### ➤ 阿里站

**高海拔冰川区气温变率研究：**基于青藏高原不同冰川流域 2019 年的气温资料，分析了冰川区和非冰川区气温变率。结果表明，高原西部和中部高海拔冰川区的近地表气温受下降风的影响较小，可以从非冰川区气温进行线性外推获得；而高原东南部温冰川上盛行的局地下降风对气温产生明显的冷却效应，因此从低海拔非冰川区进行线性外推会导致高估。本研究表明在估算青藏高原冰川消融时，应考虑不同气候条件下高海拔冰川

区的不同温度递减率和冰川的冷却效应。研究成果发表于 Journal of Applied Meteorology and Climatology。

**西昆仑冰川物质平衡异常原因探讨：**基于观测和模型模拟，重建了古里雅冰川 1970–2019 年的物质平衡变化。结果表明，年代际尺度上，从 1970s–1990s 到 1990s–2010s 期间，由于消融季降水的增加，使得西昆仑地区冰川物质平衡呈增大趋势；年际尺度上，2000–2019 年因消融季气温总体较低，使得该地区冰川的消融小于冰川的降雪积累，但随着消融季气温的增加，古里雅冰川年度物质平衡呈降低趋势，这种变化将导致西昆仑冰川异常现象的终止。文章发表在 Journal of Geophysical Research: Atmospheres。

### ➤ 玉龙雪山站

**在已有研究基础上，利用多源数据/多技术方法，重点明晰了冰雪相关灾害的形成机制及其分类，并全面分析了全球尺度冰冻圈灾害影响的时空特征，并对冰冻圈灾害未来发展趋势进行了评估：**20 世纪 70 年代以来，全球冰圈的持续退缩影响着人类社会，造成了一系列与冰雪有关的灾害。尽管冰冻圈被分为陆地、海洋和大气冰冻圈，但鉴于大气冰冻圈事件与陆地暴露体相结合形成的灾害却发生陆地，故冰冻圈灾害多为陆地和海洋冰冻圈。或按冰冻圈物理属性，称之为冰雪相关灾害。在已有研究成果的基础上，重点探索冰雪相关灾害的形成机制，分类其类型和时空尺度，揭示冰雪相关灾害及其未来形势对全球高险区的综合影响。在陆地上，灾害主要发生在中低纬度的高山区和高纬度的多年冻土区，表现为冰川/积雪/冻融相关灾害频次增加，冻融灾害范围扩大。记录的霜冻事件呈减少趋势，但冰雹灾害分布极不均匀。总体而言，预计未来陆地上冰冻雨雪灾害事件的频率将会增加。在海洋上，灾害主要分布在北极沿海地区和全球低洼岛屿或地区，且具有较大的潜在风险。其中，沿海冻融、冰山、海平面上升及其影响，可能或预计将在未来几十年继续增加。

冰冻圈灾害作为一种破坏性事件或现象，对人类或其生存环境产生重大影响。它的形成不仅需要冰冻圈灾害作为致灾条件，还需要人、财产、资源、基础设施等受灾害影响的对象。一般来说，冰冻圈灾害是冰冻圈事件、灾害形成环境以及经济和社会系统脆弱性综合作用的结果。按其触发因素划分，冰冻圈灾害可分为冰崩、雪崩、冰川跃动、冰雪洪水/泥石流、冰湖溃决、冻融、冰凌/凌汛、冰山、沿海冻融侵蚀、暴风雪、风吹雪、冰雹、霜冻、冰冻雨雪等灾害。全球冰冻圈灾害发生地与显著变暖区和极端天气气候事件频发区具有良好的空间相关性。其中，暴露于冰冻圈快速变化、无疑具有高风险和巨大潜在影响的领域需要谨慎关注。冰雪雪崩经常发生在世界各地的中纬度和高纬度积雪覆盖的山区。冰川涌浪主要发生在喀拉和帕米尔高原、天山和北欧斯瓦尔巴德群岛、

北美新斯科舍省、冰岛、格陵兰、阿拉斯加和育空、加拿大北极和安第斯地区，常引起冰川跃动。蒙古、高加索、格鲁吉亚、中国西部等牧区雪灾多发，灾情严重，经常伴有风雪。冰雪洪水广泛分布在俄罗斯、高加索、中亚的中高纬度地区的高海拔山脉、美国和加拿大的西北沿海山脉、喜马拉雅山脉和喀喇昆仑山脉。冰湖溃决洪水主要分布在兴都库什-喜马拉雅山脉、加拿大西南海岸、南美洲安第斯山脉和青藏高原。由冰雪覆盖的火山喷发引起的拉合尔洪水大多出现在墨西哥、哥伦比亚、厄瓜多尔、智利和冰岛。冻融灾害主要发生在北极国家、青藏高原和中国东北地区，经常危及道路网络、油气管道、机场和居民区等基础设施和建设。冰山灾害主要集中在南极海岸、格陵兰岛周边和加拿大东北部海域。海冰灾害主要集中在北极国家的沿海和近岸地区，尤其是北极航道。海岸冻融侵蚀主要发生在俄罗斯、阿拉斯加和加拿大的北部海岸。在全球范围内，冰冻圈影响下的海平面上升主要威胁中低纬度的岛屿和海岸。海平面上升往往与风暴潮重叠，形成沿海洪水，造成海岸侵蚀，直接影响社会系统。暴风雪灾害主要出现在美国东北部、加拿大西南部、西伯利亚、中国东北、阿尔泰、欧洲和日本，经常危及航空和交通网络。冰冻雨雪灾害主要发生在中国南方。冰雹灾害主要分布在中纬度西海岸(从加拿大不列颠哥伦比亚省到美国加利福尼亚海岸、西欧、北欧海岸、地中海海岸和日本西北部)和一些高山地区(图 1.3.24)。

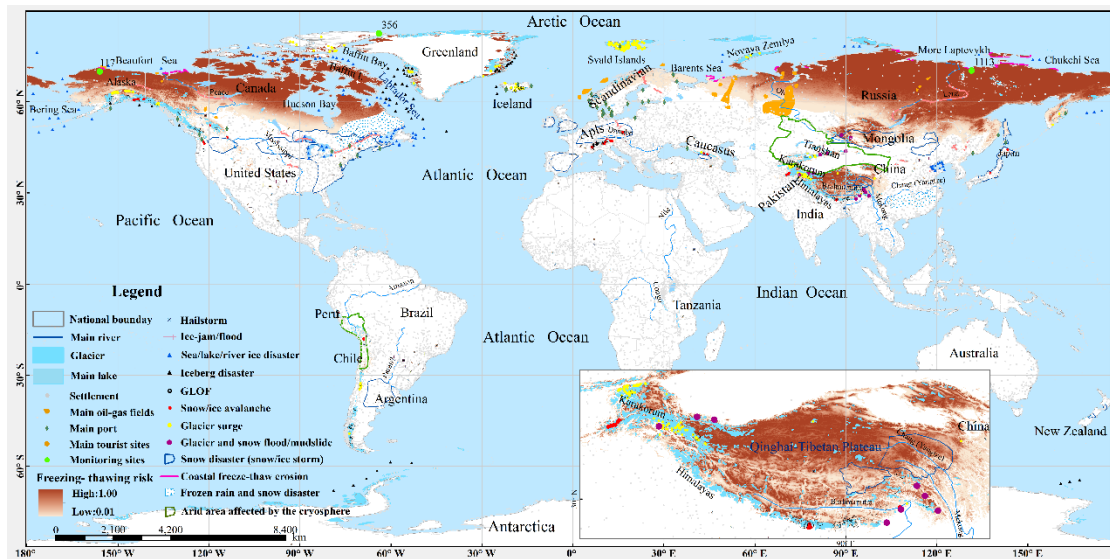


图 1.3.24 全球冰雪相关灾害空间分布

在陆地上，冰雪相关灾害多发生在中低纬度地区和高纬度多年冻土区，灾情更加频繁和严重，如暴风雪、冻雨、雪灾、冰雹、霜冻、雪崩、冰崩、冰川跃动、冰川洪水/泥石流、融雪洪水、冰凌/凌汛、冻融灾害等。在海洋上，冰山、浮冰运动、海冰冻结消融、

沿海冻融侵蚀、SLR 灾害等经常影响北极沿海资产和海上设施、海上活动和航运安全，如航道拥堵，增加了船舶和航行安全风险，对港口、海上钻井平台、海岸工程、近海水产养殖和近海居民活动(狩猎、旅游)造成破坏。冰冻圈灾害影响范围广、灾损大。例如，1949-2000 年，美国暴风雪总共造成 216 亿美元的损失。1982-1994 年期间，美国平均每年经历 16 次冰冻雨雪事件，这比暴风雪的次数要高得多。2018 年 11 月，因暴风雪，美国机场超过 1600 个航班被取消。2008 年，中国冰冻雨雪灾害造成严重损失，造成 107 人死亡，直接经济损失 1119 亿元。2000 年至 2010 年间，欧洲和北美的雪崩造成约 1900 人死亡。仅 2010 年、2012 年和 2016 年，阿富汗兴都库什和克什米尔地区发生了三次大规模雪崩，造成 419 人死亡。2000 年至 2015 年期间，阿富汗有 200 万人遭受雪崩，超过 15.3 万人受到影响。全世界有记录的冰湖溃决事件有 1348 次。全球冰川灾害已直接造成至少 13160 人死亡。占地球海岸 34%的北极多年冻土海岸正遭受着巨大的侵蚀，其侵蚀速率高达 25 米/年。

冰雪灾害风险评估不仅取决于冰雪灾害发生的概率，还取决于未来暴露要素的密度和规模的估计。在近期(2035-2050 年)，冰川物质亏损、多年冻土融化、积雪覆盖和北极海冰范围减少预计将继续。整个 21 世纪，格陵兰岛和南极冰盖的质量损失将不断增加。未来，由于人口增长和社会经济发展，预计冰冻圈灾害将持续增加，特别是在安第斯山脉、亚洲高山、高加索和欧洲阿尔卑斯山区。

在统计上，未来极端寒冷事件的减少比前工业时代更为显著，而且极端寒冷事件对全球变暖的影响往往比极端寒冷事件更敏感。在极端寒冷的天气中，由于人口密度和财富的增加，未来的冰雹损害预计会增加。全球变暖可能减少冻雨事件的频率，而全球陆地平均霜日数也将发生显著变化。预测 2041-2070 年期间北美冬季雨雪事件增加，春季减少(RCP4.5 和 RCP8.5)。IPCC 第 5 次评估报告以来的证据表明，预计雨雪事件在高海拔地区的频率将增加，出现在春天早一些、秋天晚一些，而在低海拔地区减少(高信度)。在 RCP 4.5 和 RCP 8.5 情景下，到 21 世纪中叶，中国日最低气温分别比 1986-2005 年高 1.7℃和 2.2℃，霜冻日数分别减少 13 d 和 16 d，冻结日数也分别减少 10 d 和 12 d。结果表明:21 世纪各模式霜冻日数均呈减少趋势;几项研究表明，未来几十年，北美冰雹的频率将会增加，而小冰雹的频率将会减少。随着冰川融化和退缩的继续，全球冰湖增长的趋势将继续，甚至可能加速，在一个变暖的世界中增加脆弱的冰碛湖的供应。据预测，近地表多年冻土的广泛退化将在 21 世纪对北方社区、生态系统和工程系统产生有害影响。与 1986-2005 年相比，2080-2099 年北半球近地表冻土面积将分别减少 37%±11% (RCP 2.6)、51%±13% (RCP 4.5)、58%±13% (RCP 6.0)和 81%±12% (RCP

8.5)。其中,俄罗斯冻土面积到本世纪末将分别减少  $32\% \pm 11\%$  (RCP 2.6)、 $49\% \pm 13\%$  (RCP 4.5)、 $55\% \pm 14\%$  (RCP 6.0)和  $76\% \pm 12\%$  (RCP 8.5)。这很有可能对京俄高速铁路和亚马尔半岛油气管道的维护造成影响。

#### 4. 植被生态系统研究

##### ➤ 藏东南站

**林线树轮生长持续增加主要得益于大气  $\text{CO}_2$  升高的施肥效应:** 大气  $\text{CO}_2$  浓度持续增加,一方面会导致全球气候变暖,另一方面可通过增强植物光合作用,提高陆地植被系统吸收大气  $\text{CO}_2$  的能力(大气  $\text{CO}_2$  施肥效应),从而对全球变暖产生负反馈作用。由于大气  $\text{CO}_2$  增加与气温升高的高度同步性,目前仍缺乏有效数据支撑研究对植被生长的相对影响及相关机制。另外,自然生态系统普遍缺氮,尤其在森林生态系统中,大气  $\text{CO}_2$  浓度持续升高将不断加剧植物生长的氮限制,抑制大气  $\text{CO}_2$  升高的施肥效应。综上,大气  $\text{CO}_2$  浓度升高导致的光合速率增加是否能转化为树木生物量的持续增加,长时间尺度的树轮宽度序列是否能记录树木生长对大气  $\text{CO}_2$  浓度升高的响应,尚无定论。

叶片光合速率增加通常会导致叶片寿命降低,加速林冠叶周转(叶片的生长和凋落动态)和氮循环,增加叶片凋落量以及氮回流和归还量(叶凋落量=最大叶生物量/叶寿命,图 1.4.1)。但是,林冠叶片凋落量与树轮生长之间是否存在密切的内在联系,以及因叶片凋落量增加而增强的氮循环是否能长期维持大气  $\text{CO}_2$  升高对树轮生长的促进作用,仍然是未解之谜。开展相关研究将有助于科学评估大气  $\text{CO}_2$  施肥效应对森林碳汇功能的长期贡献。

为此,中国科学院藏东南站罗天祥研究员等在藏东南色季拉山典型树种(急尖长苞冷杉和方枝柏)林线开展了连续 10 年(2007-2017 年)的定位观测研究,测定了树木径向生长量、叶片凋落量、氮回流量和归还量的季节、年际动态以及相关气候因子等指标。结果显示,1. 以上两树种年/季节树木径向生长量与前一年/季节的叶凋落量及其引发的氮回流和归还量均存在滞后的正相关关系(图 1.4.2); 2. 近 10 年的树轮宽度、叶片凋落量以及氮回流和归还量均呈明显增加趋势,其变化主要受大气  $\text{CO}_2$  浓度升高来驱动(图 1.4.3); 3. 大气  $\text{CO}_2$  浓度升高主要通过增强叶周转和氮循环,间接促进树木径向生长,其直接和间接效应之和远大于气候因子的总效应(图 1.4.4); 4. 类似的变化格局也存在于更长时间尺度(1986-2017 年)和更大空间尺度的树轮宽度序列(图 1.4.5)。

研究表明,相较于气候变化影响的时空变异性,近 30 年青藏高原林线树轮生长的普遍增加主要得益于大气  $\text{CO}_2$  升高的施肥效应。在大气  $\text{CO}_2$  浓度升高的环境下,因叶

片凋落量增加而增强的氮回流和氮归还量可以自主缓解树木生长的氮限制,有利于长期维持大气  $\text{CO}_2$  浓度升高对树木生长的促进作用。这一发现不仅为研究森林生态系统碳氮循环变化提供了新途径,也为进一步完善陆地生物地球化学模型提供了科学依据。

该研究成果以“Enhanced leaf turnover and nitrogen recycling sustain  $\text{CO}_2$  fertilization effect on tree-ring growth”为题,在线发表于《自然-生态与演化》(Nature Ecology & Evolution)。

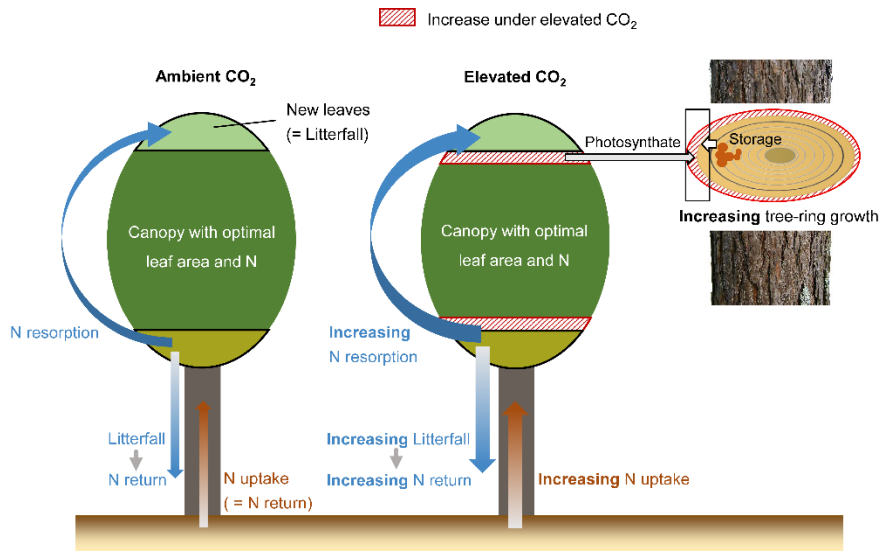


图 1.4.1 大气  $\text{CO}_2$  浓度升高影响叶周转、氮循环以及树木径向生长的概念模型图

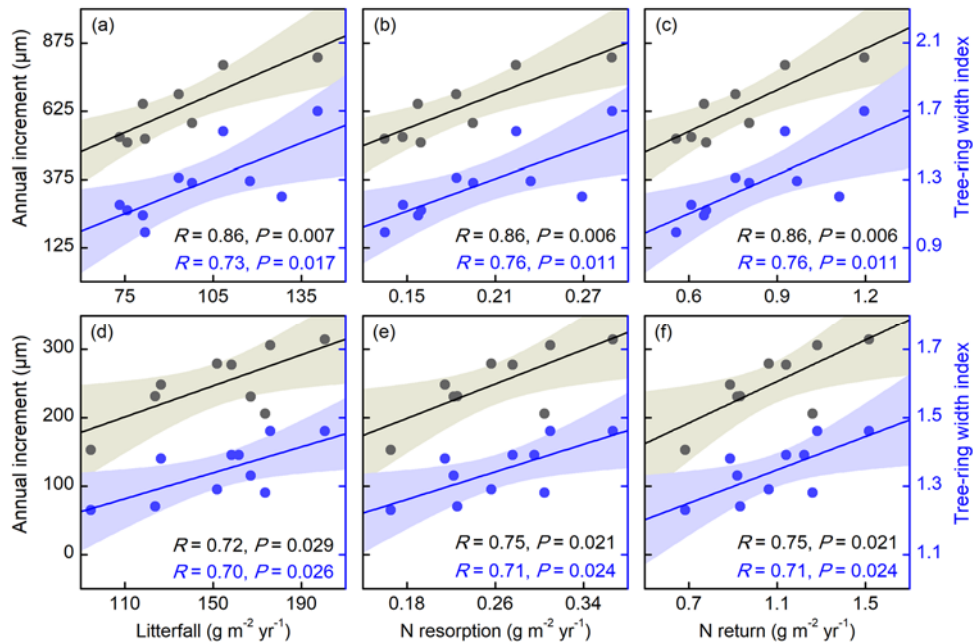


图 1.4.2 2007-2017 年急尖长苞冷杉 (a-c) 和方枝柏 (d-f) 年径向生长量与前一年 (前年 6 月至当年 6 月) 叶凋落物量、氮回流量和归还量的相关关系

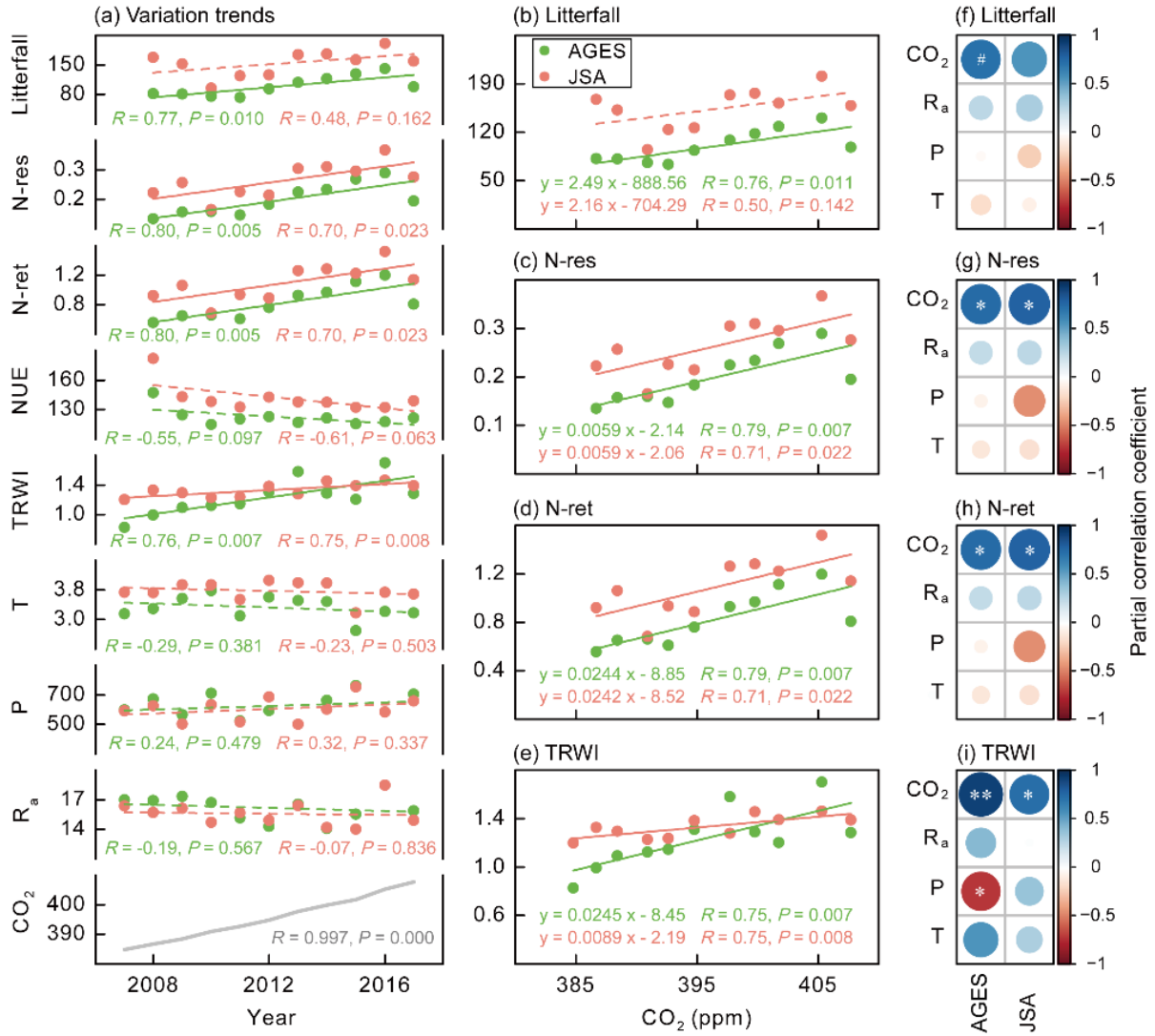


图 1.4.3 大气 CO<sub>2</sub> 浓度和气候因子对两树种林线叶凋落物量、氮回流和归还量以及树轮生长量年际变化的相对影响

注：(a) 急尖长苞冷杉 (AGES, 绿色实心圆) 和方枝柏 (JSA, 红色实心圆) 年凋落物量 (g m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>)、氮素回流量 (N-res, g m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>)、氮素归还量 (N-ret, g m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>)、氮素利用效率 (NUE, g DM g<sup>-1</sup> N) 和树轮宽度指数 (TRWI), 以及两树种林线生长季 (5-8 月) 平均最低气温 (T, °C)、降水量 (P, mm)、太阳辐射 (R<sub>a</sub>, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) 和来自夏威夷莫纳罗亚天文台 (Mauna Loa Observatory, Hawaii, <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>) 的大气 CO<sub>2</sub> 浓度 (CO<sub>2</sub>, ppm) 的年际变化趋势; (b-e) 两树种林线年凋落物量、年氮素回流和归还量和树轮宽度指数与大气 CO<sub>2</sub> 浓度的相关关系; (f-i) 两树种林线年凋落物量、年氮素回流和归还量和树轮宽度指数分别与气候因子 (T, P, R<sub>a</sub>) 和大气 CO<sub>2</sub> 浓度的多元线性回归偏相关关系。# P < 0.10, \* P < 0.05, \*\* P < 0.01。

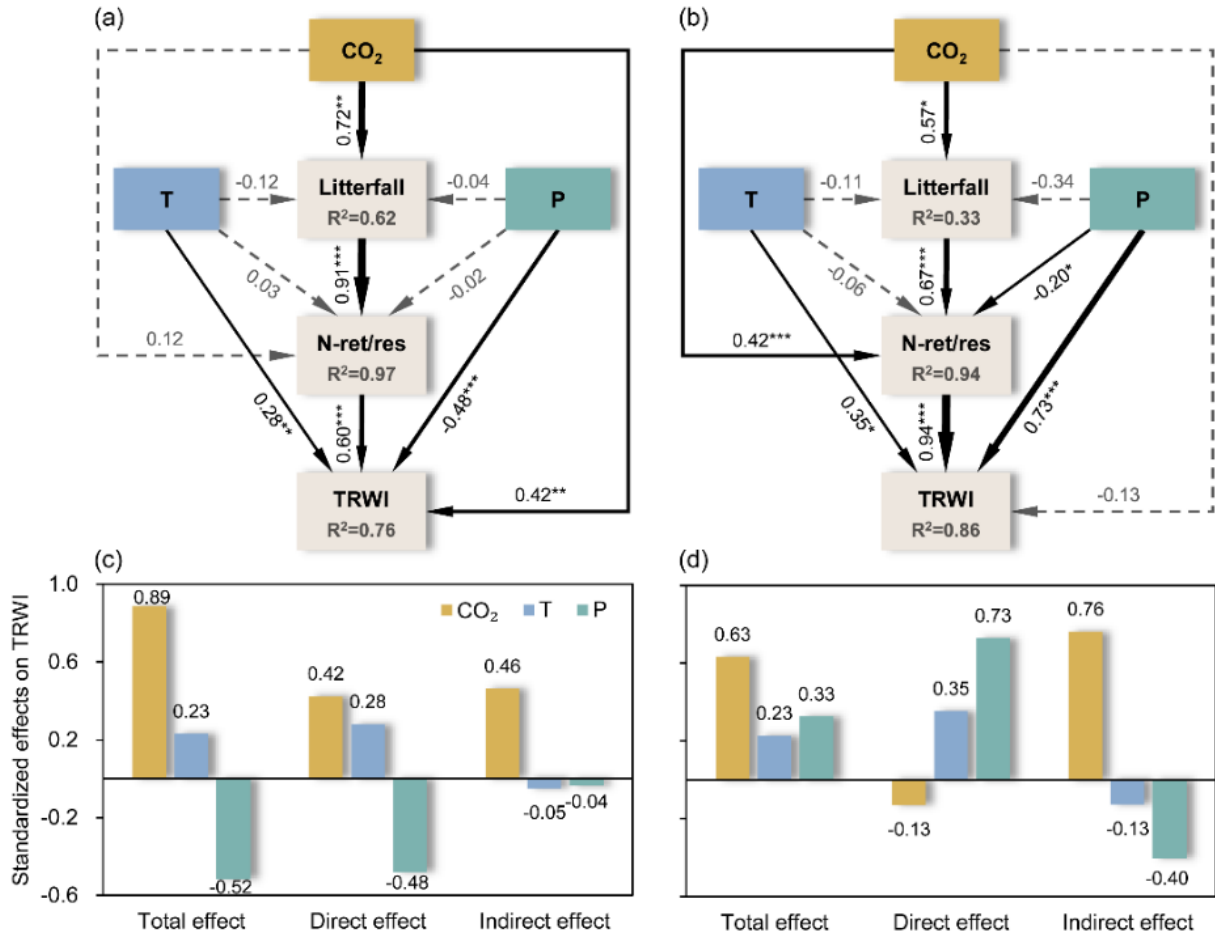


图 1.4.4 利用结构方程模型量化大气 CO<sub>2</sub> 浓度和气候因子对两树种林线树轮宽度指数年际变化的直接和间接影响效应。

注：(a, c) 大气 CO<sub>2</sub> 浓度和气候因子影响急尖长苞冷杉树轮宽度指数变化的标准化路径系数 (a) 以及直接、间接和总效应 (c;  $\chi^2 = 0.310$ ,  $P = 0.578$ , CFI = 1.00, RMSEA = 0.000, AIC = 40.31); (b, d) 大气 CO<sub>2</sub> 浓度和气候因子影响方枝柏树轮宽度指数变化的标准化路径系数 (b) 以及直接、间接和总效应 (d;  $\chi^2 = 0.507$ ,  $P = 0.477$ , CFI = 1.00, RMSEA = 0.000, AIC = 40.51)。黑色实线箭头表示达到显著的路径，箭头线条的宽度表示关系强弱。灰色虚线箭头表示未显著的路径。箭头旁的数字是标准化的路径系数。R<sup>2</sup> 表示模型中因变量的被解释度。T: 生长季平均最低气温; P: 生长季降水量; CO<sub>2</sub>: 生长季大气 CO<sub>2</sub> 浓度; N-ret/res: 年氮归还/回流量; TRWI: 树轮宽度指数。\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ , \*\*\*  $P < 0.001$ 。

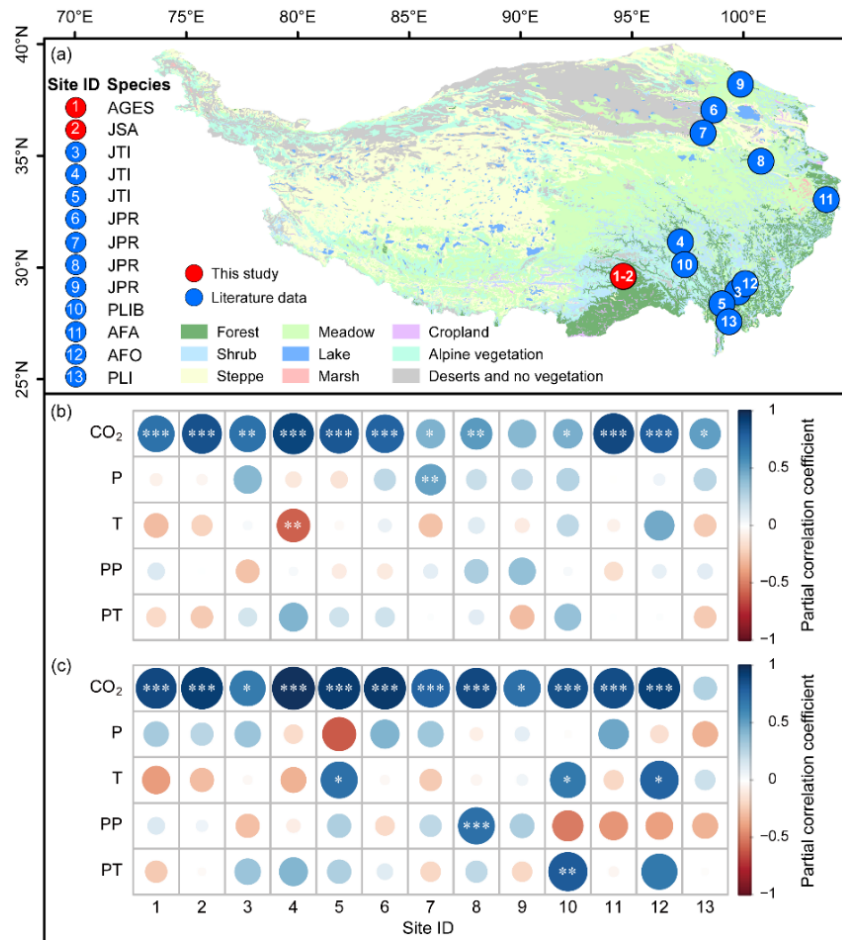


图 1.4.5 近 30 年大气 CO<sub>2</sub> 浓度和气候因子对青藏高原 8 树种 13 个林线样点的树轮宽度指数动态变化的相对影响

注：(a) 13 个树轮宽度年表的空间分布。树种名缩写：AGES，急尖长苞冷杉 (*Abies georgei* var. *smithii*)；JSA，方枝柏 (*Juniperus saltuaria*)；JTI，大果圆柏 (*Juniperus tibetica*)；JPR，祁连圆柏 (*Juniperus przewalskii*)；PLIB，川西云杉 (*Picea likiangensis* var. *balfouriana*)；AFA，岷江冷杉 (*Abies faxoniana*)；AFO，川滇冷杉 (*Abies forrestii*)；PLI，丽江云杉 (*Picea likiangensis*)；(b-c) 树轮宽度指数 (b) 及其 10 年滑动平均 (c) 与前一年和当年生长季早期 (5-6 月) 平均最低气温 (PT, T) 和降水量 (PP, P) 以及大气 CO<sub>2</sub> 浓度 (CO<sub>2</sub>) 的多元线性回归偏相关关系。\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ , \*\*\*  $P < 0.001$ 。

**土壤水分和营养状况交互影响传粉者驱动的自然选择：**自然选择经典理论认为，植物传粉者互作机制 (plant-pollinator interactions) 是驱动被子植物花性状进化的重要动力。然而，被子植物面临的往往是复杂多样的生物与非生物环境。非生物环境，主要是土壤含水量和营养状况，能够同时影响植物花性状的呈现状态和植物繁殖成功。基于此，本研究以分布于青藏高原的西藏报春 (*Primula tibetica*) 为材料，通过析因试验设计和人工操控试验，定量研究土壤水分和营养状况两类非生物因子对传粉者驱动花性状进化的主体影响和协同影响 (图 1.4.6)。研究证明，传粉者驱动西藏报春单花性状和组合花性状的进化，但土壤含水量和营养状况在此过程中起着重要作用。虽然有研

究证明，非生物因素对自然选择的影响主要通过影响性状表达和影响适合度两类途径。本研究表明，土壤含水量和营养状况主要通过影响目标物种的雌性繁殖成功来对自然选择施加影响（图 1.4.7）。研究证明，单纯通过动植物关系来衡量自然选择的大小是不够全面的，需要全方位的考虑目标物种所处的生物与非生物环境。

一直在藏东南站开展工作的西华大学吴云副教授在 *New Phytologist* (中科院一区, IF=10.323) 发表题为 “Soil water and nutrient availability interactively modifies pollinator-mediated directional and correlational selection on floral display” 的研究论文。

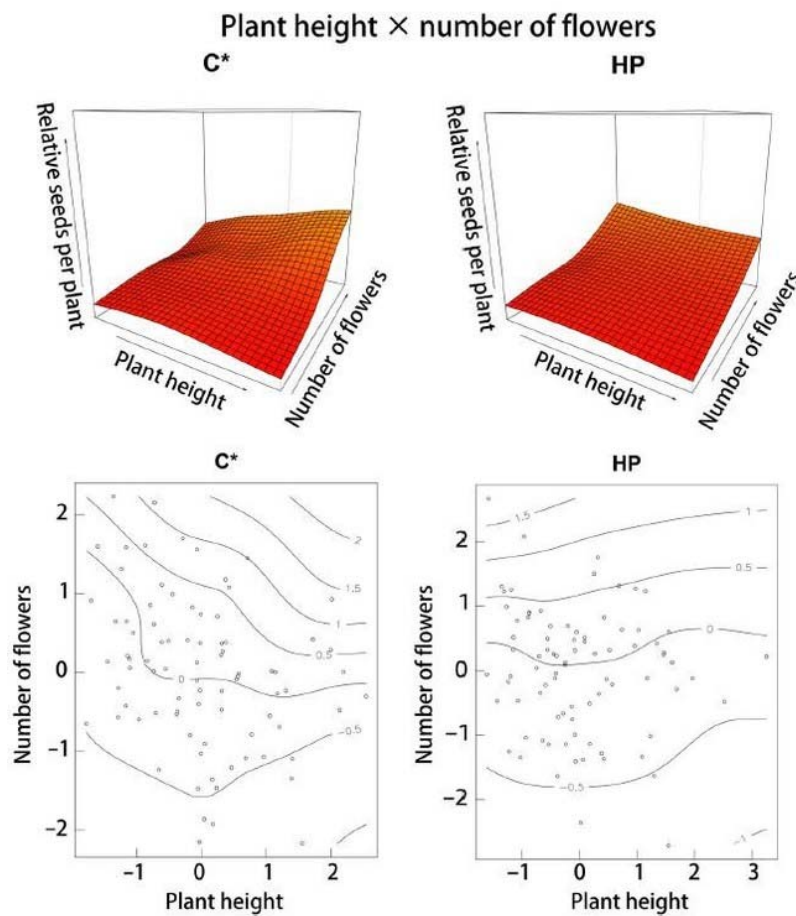


图 1.4.6 土壤水分和营养状况对西藏报春花性状密度曲线和组合花性状获得自然选择的影响

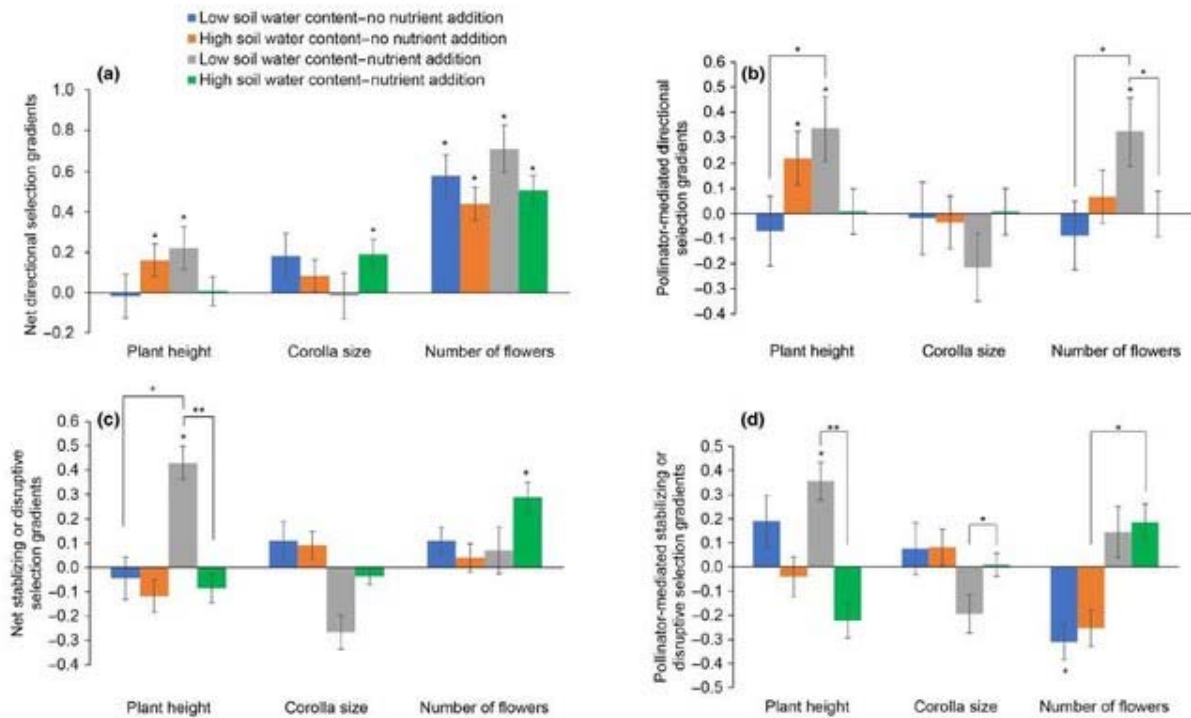


图 1.4.7 土壤水分和营养状况对传粉者驱动西藏报春单花性状进化的影响

### ➤ 格尔木站

评估了当前及未来气候变化情景下青藏高原苔藓植被的潜在地理分布及其变化: 苔藓植物是青藏高原高寒草地的植被组成成分之一，发挥着重要的生态作用。但是由于苔藓植物矮小，常被研究者忽略。在气候变化背景下，揭示青藏高原苔藓的潜在地理分布格局及其变化具有重要意义。针对以上问题，课题组基于苔藓分布点数据和环境变量数据，采用最大熵 MaxEnt 模型，揭示了影响苔藓潜在地理分布的主要环境因子，并预测了青藏高原地区苔藓潜在地理分布及其变化特征。模型模拟结果表明，青藏高原苔藓面积约  $179.97 (\pm 0.87) \times 10^4 \text{ km}^2$ ，约占青藏高原总体面积的  $77 (\pm 0.44)\%$ ；刀切法分析发现，影响苔藓植被生态位的主要环境因子是土壤水分、紫外线-B 辐射、温度季节性差异和降水；CMIP6 未来气候变化情景下，苔藓生态位向海拔较高的地区移动。多年冻土区将成为苔藓生态位移动的主要缓冲区（图 1.4.8）。

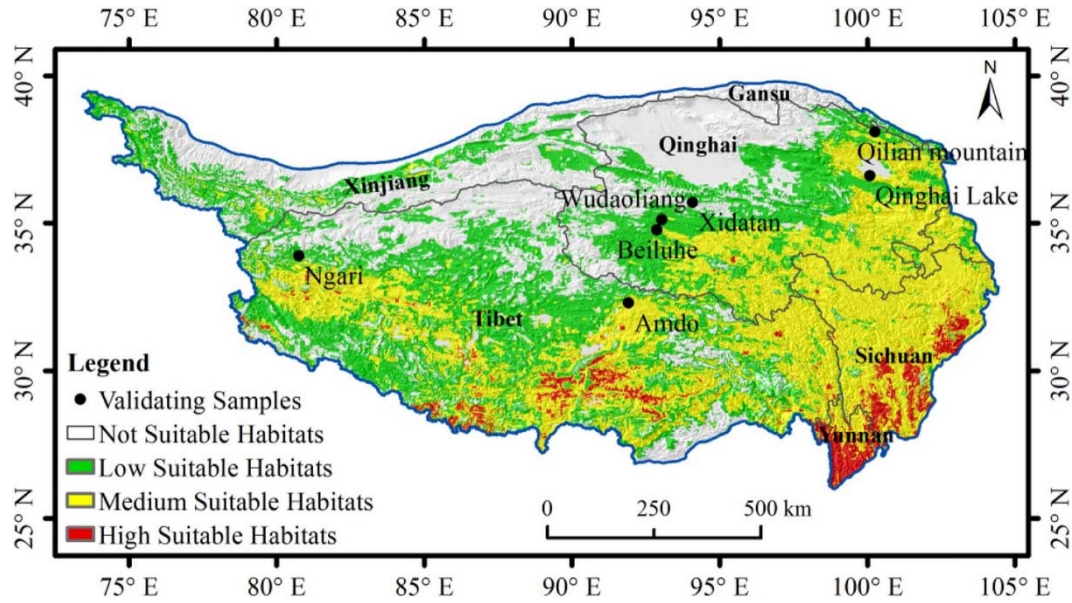


图 1.4.8 青藏高原地区苔藓植被潜在地理分布

### ➤ 三江源站

#### 生物多样性适应机制和规律探索方面：

**揭示牦牛适应青藏高原极端环境新机制：**利用二代 (Illumina)、三代测序技术 (Nanopore)，结合 Hi-C 互作图谱技术辅助基因组组装，分别构建了野牦牛和家牦牛高质量染色体水平参考基因组，分析了 SV 在牦牛基因组的分布特征。发现牦牛肺脏中携带 SV 的差异表达基因 (DEG) 最多，其中 127 个基因的 SV 在启动子和外显子区，这些变异影响 ARNT、GATA1、MAGF、KLF5 及 HOXB5 等关键转录因子的靶向结合。其次，研究构建了牦牛和黄牛肺脏组织单细胞图谱，发现牦牛肺脏中内皮细胞存在分化，产生了一类特异的内皮细胞亚型。发现牦牛及黄牛肺脏中内皮细胞群表达含 SVs 的差异基因最多，表明肺脏内皮细胞的发育和对低氧适应的功能可能受 SV 影响。观察到牦牛的肺组织中存在较多的弹性纤维，弹性纤维可以增强肺的收缩能力，有利于牦牛在高原环境中的适应，进一步分析发现参与弹性纤维组装的 LOX 基因在牦牛间质细胞中的表达显著升高。为系统开展牦牛遗传资源保护与利用，建立全基因组选择育种技术体系，提供了重要数据。相关成果以 “Long read genome assemblies complemented by single cell RNA-sequencing reveal genetic and cellular mechanisms underlying the adaptive evolution of yak” 发表在 Nature Communication 上。同日，Science News 以 Yaks breathe easy thanks to newly discovered lung cells 为题对该工作进行报道。西北高原所博士研究生高雪为论文第一作者，昆明动物所博士后王胜为共同第一作者，西北高原所杨其恩研究员、赵新全研究员和昆明动物所吴东东研究员为论文共同通讯作者。

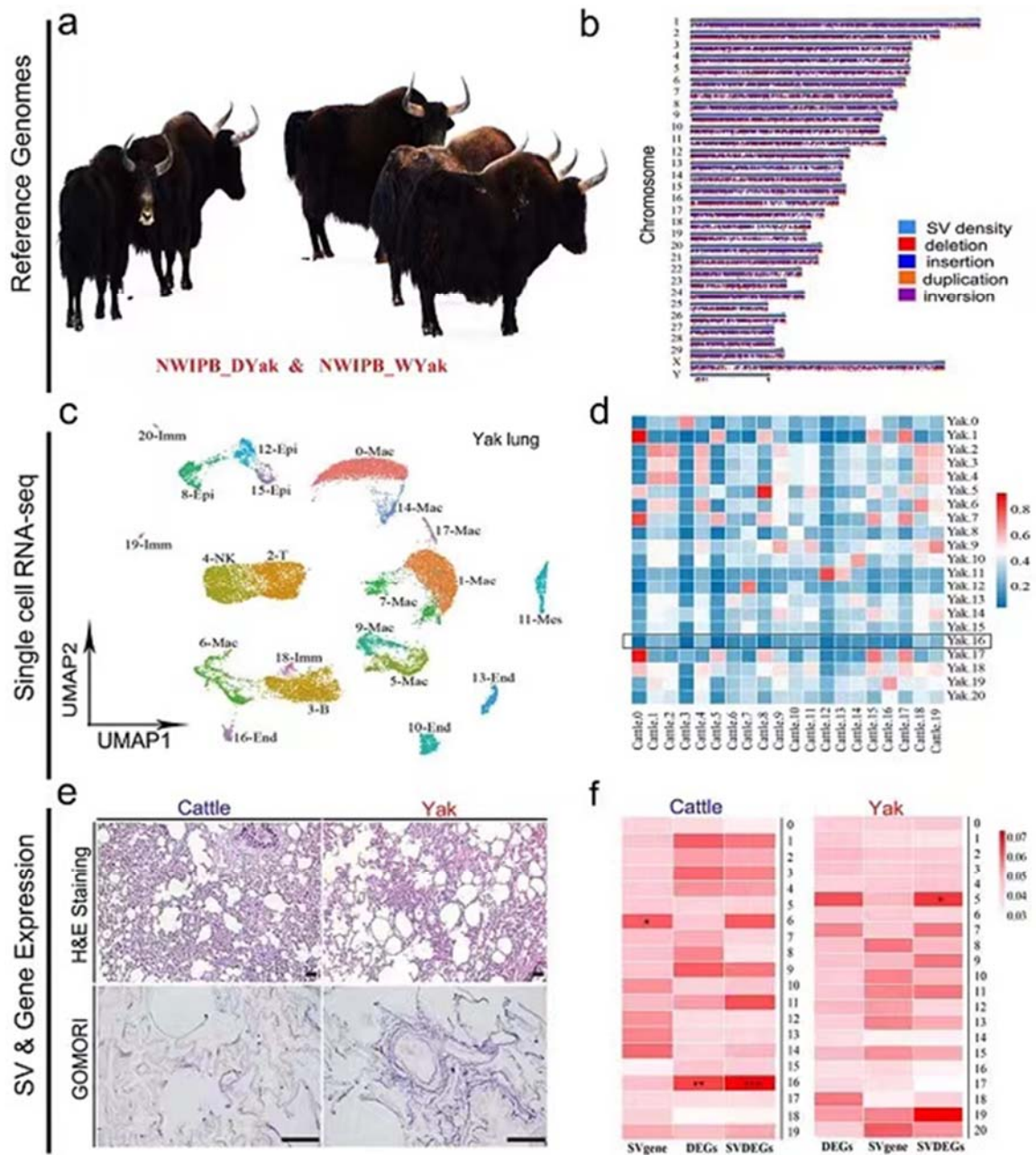


图 1.4.9 构建家牦牛和野牦牛高质量参考基因组及揭示了基因组结构变异在基因表达调控和肺脏细胞分化中的潜在功能 (a. 牦牛和黄牛; b. 染色体 SV 统计; c. 牦牛肺部组织细胞簇的 UMAP 聚类; d. 不同牦牛个体间皮尔逊相关系数的热图; e. 牦牛、黄牛肺组织 H&E 和弹性纤维染色, 比例尺 = 50 微米; f. 热图显示牦牛、黄牛肺部标记基因中 SV 基因、DEG 和 SVDEG 的标准化比率。)

### 提出藏羚迁徙产羔规避寄生虫感染风险的行为策略，建议保护藏羚产羔地及迁徙路线：

科学认知藏羚迁徙行为与种群持续增长的关系，对其种群健康发展至关重要。藏羚迁徙到卓乃湖一带产羔仅停留  $24 \pm 3$  天左右，而粪便中的优势寄生虫/卵囊发育到感染阶段至少需要 30–35 天。加之该区域冬季极其寒冷干燥，藏羚粪便中很少有球虫或线虫的幼虫能够越冬。藏羚对产羔地的短期利用和快速回迁很可能是藏羚羊避免增加消化道寄生虫感染风险的重要行为策略。卓乃湖湖水外溢、湖底外漏，局部沙化并没有影响藏羚迁徙卓乃湖区域产羔数量、迁徙时间的提前也没有延长产羔后滞留时间、产羔地沙生植被及建群种较高纤维素含量也排除未获取高质量食物的可能，由此推测雌性藏羚在季节迁徙权衡过程中，通过规避消化道寄生虫感染而获益，即确保幼崽早期存活，保持种群快速恢复。建议保护可可西里卓乃湖以及周边区域藏羚“大产房”的生态原真性和完整性，辅以人工干预保护完整的迁徙路线，是保证藏羚种群恢复和健康发展的有效措施。相关成果以“Tibetan antelope migration during mass calving as parasite avoidance strategy”和“藏羚集群产羔与其胃肠道寄生虫传播和感染的风险”分别发表在 The Innovation 和 兽类学报。

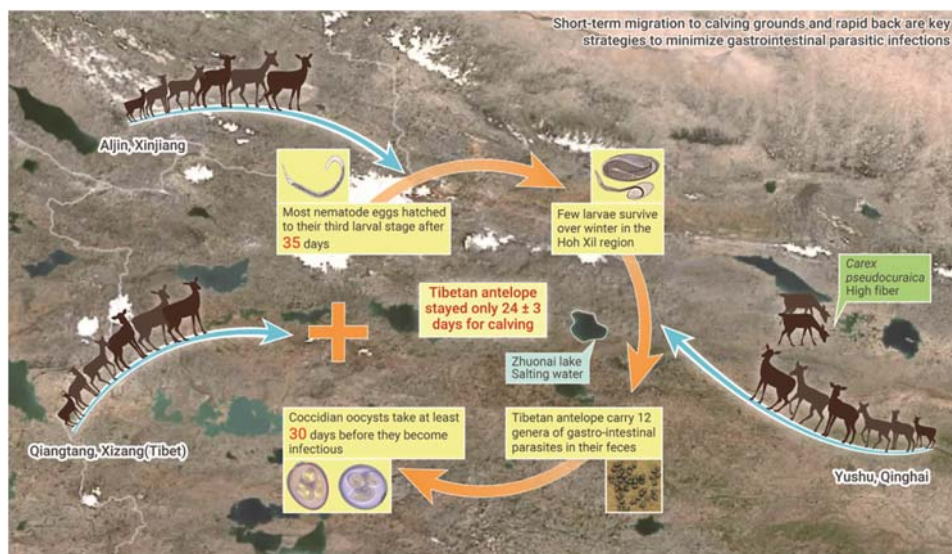


图 1.4.10 藏羚迁徙产羔规避寄生虫感染风险

揭示了低氧暴露损害后代精子发生，并表现出代际效应：利用低压低氧舱模拟海拔 5000 m 环境条件下缺氧 4 周的小鼠模型，评价了缺氧对小鼠精子发生过程、雄激素水平和睾丸基因表达的影响。低氧暴露降低了移植后未分化精原细胞的数量，但不改变精原干细胞的再生能力，降低了小鼠血清雄激素的水平，也显著增加了小鼠畸形精子的比例，但常氧恢复 2 月后精子发生恢复正常。与对照相比，766 个基因表达上调，965 个基因表达下调。6 月龄 F1 代小鼠表现精子发生受损，但 F2 代小鼠精子发生正常，表明环境低氧引起的精子发生不存在跨代效应。

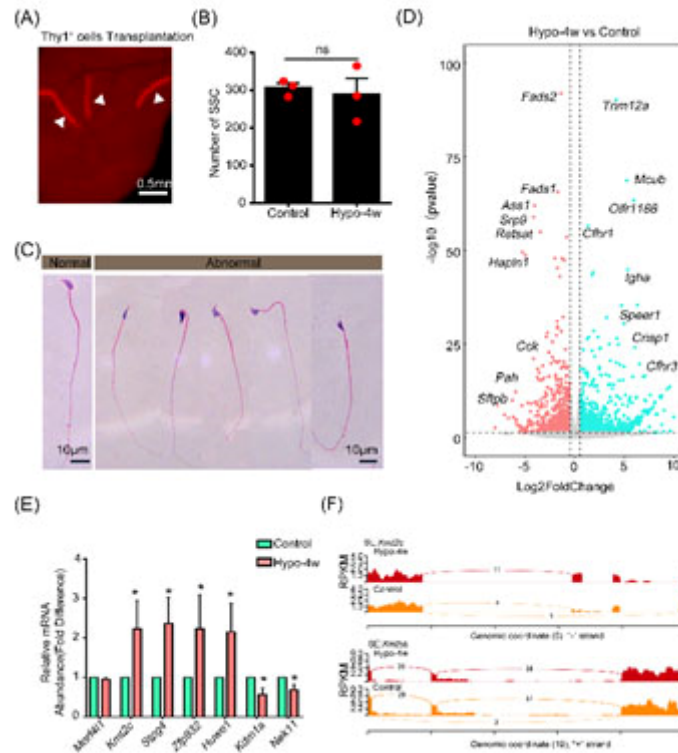


图 1.4.11 低氧暴露损伤小鼠精子发生，造成基因表达和可变剪切变化，并表现出代际效应

(A)移植后两个月受体小鼠睾丸的代表性图像。白色箭头表示 SSCs 形成的细胞集群。标尺：0.5mm。(B)计算对照组和低氧四周雄性小鼠的平均 SSCs 数量。每个点代表一个生物重复。(C)光学显微镜下代表性精子图。异常精子有不同的异常精子头部形态，包括头部较细和头部呈三角形。(D)火山图显示了对照组与低氧 4 周处理小鼠睾丸基因的差异表达，淡红点表示下调，青色点表示上调。(E)RNA-seq 检测选择性剪接的表观遗传差异基因表。(F)外显子跳跃可变剪接(SE)示意图。

**青藏高原特有食草动物白唇鹿肠道微生物组成及生态过程研究：**基于 16S rRNA V3-V4 区测序，利用 QIIME2 流程方法对圈养和野生白唇鹿粪便微生物结构和组成进行了分析。结果表明，圈养白唇鹿肠道菌群中厚壁菌门 (Firmicutes) 相对丰度低于野生种群，而拟杆菌门 (Bacteroidetes) 相对丰度高于野生种群；在属水平上，条件致病菌和果胶分解菌相对丰度较高。PCoA 分析表明野生白唇鹿和圈养白唇鹿的肠道菌群组成和功能存在显著差异。零模型、中性群落模型和生态位宽度联合分析表明，圈养通过提高确定性过程的贡献，改变了其肠道微生物群落的生态组装过程。综合以上结果，研究认为，圈养能够通过持续施加选择性压力而改变白唇鹿肠道微生物，从而对其宿主产生潜在的不利影响。本研究为濒危物种的保护生物学研究提供了新的研究手段和视角。

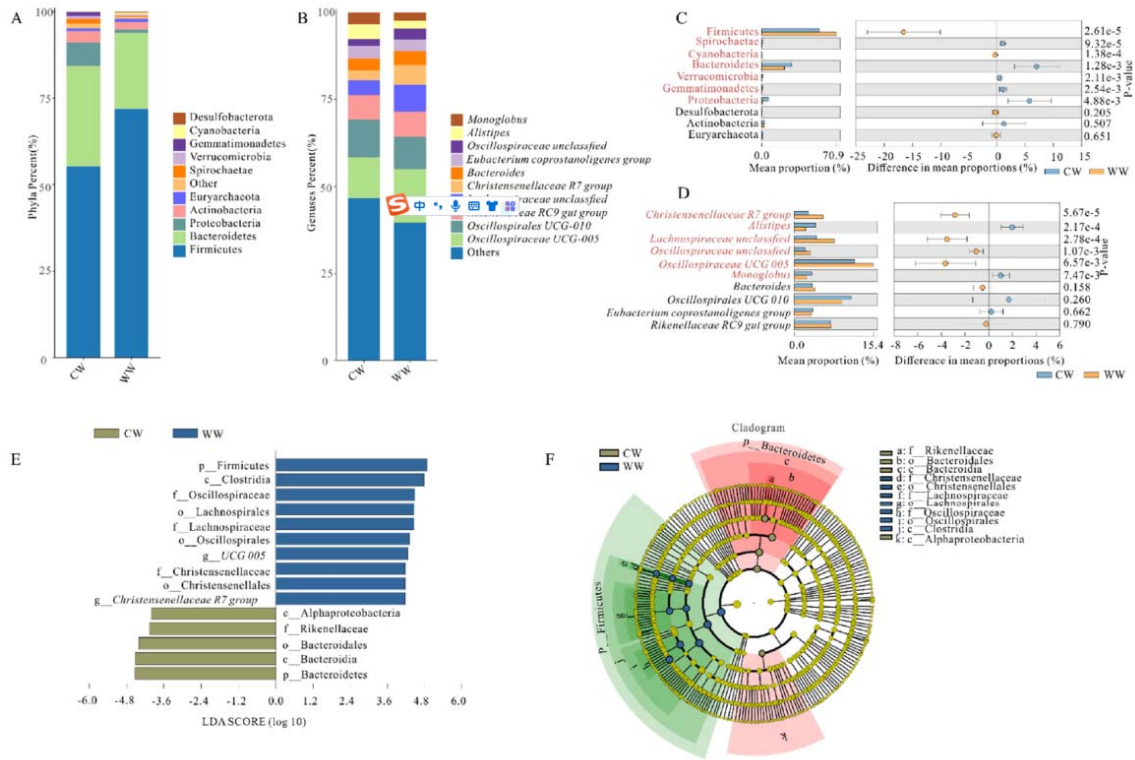
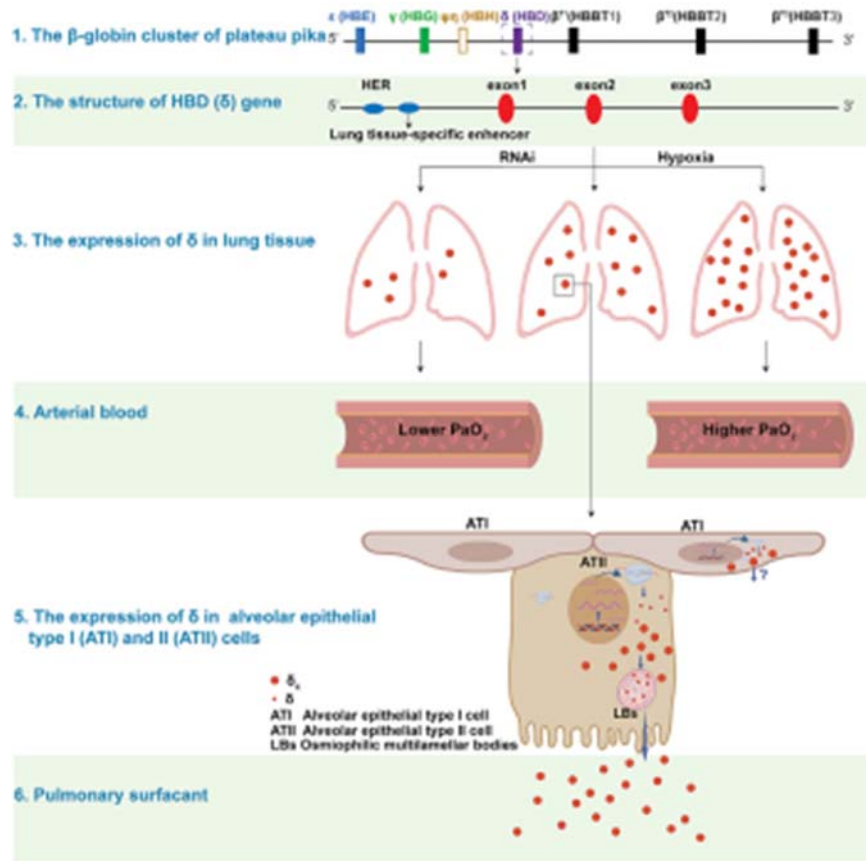


图 1.4.12 白唇鹿肠道微生物群落组成及成分差异分析

**揭示高原鼠兔适应青藏高原低氧环境的新机制：**在高原鼠兔肺表面活性物质中发现了一种高含量的同源四聚体血红蛋白，明确了该蛋白的编码基因、在肺组织中的表达特征和水平、该蛋白合成和分泌的细胞及其在肺表面活性物质中的相对含量以及在肺组织中发挥的功能。研究表明，高原鼠兔肺组织中的同源四聚体血红蛋白由 HBD（ $\delta$ ）控制合成，在高原鼠兔肺组织中特异性表达，低氧显著上调 HBD 的表达；在高原鼠兔肺泡上皮 I 和 II 型细胞中特异性表达，通过板层小体分泌到肺泡腔中，成为肺表面活性蛋白的主要成分；抑制肺组织中 HBD 的表达导致高原鼠兔红细胞增生、血红蛋白和血液黏度增大，血液中乳酸浓度显著提高，该蛋白对高原鼠兔从低氧环境中获取氧发挥着重要的作用。研究结果对肺表面活性物质蛋白成分组成和功能理论做出了重要补充；修正了“血红蛋白只在红细胞中表达”的古老概念；有力佐证了“血红蛋白非红细表达和非协同表达”的理论。

图 1.4.13 HBD ( $\delta$ ) 基因在高原鼠兔肺部的表达

### 国家公园建设：

**构建草地多功能目标管理模式，提出自然保护体系建设和科技支撑建议：**草地作为可再生自然资源载体，构成区域发展的物质和环境基础。草地具有自然景观草地、放牧草地、栽培草地等多样性类型，包含多种多样的动物、植物、微生物资源，调节功能、供给功能、支持功能和文化遗产功能等生态系统服务也具有多功能性。通过构建草地多功能目标管理模式，可实现草地生态、生产和生活功能多功能优化管理，对保护自然、服务人民和永续发展具有重要意义。

为更好地实现草地多功能目标管理与自然保护地建设，将草地的多功能性作为自然保护地体系建设的重要内容，建议：1) 优化自然保护地类景观草地、放牧草地和栽培草地空间布局，实现草地的多功能管理目标；2) 科学核定放牧草地载畜量，实现草地资源的持续利用；3) 因地制宜地扩展栽培草地建植，创建现代草牧业生产的新模式，突破高寒地区草牧业季节性营养不平衡瓶颈；4) 实施自然保护地放牧家畜与当地野生食草动物平衡管理的示范工程，践行人与自然生命共同体理念；5) 实施新的补偿标准，以“机会+管护”成本为原则进行补偿，根据保护效果寻找新的补偿机制，解决区域间发展存在的不平衡、不充分问题。

以国家公园为主体的自然保护地体系示范省建设需要科技先行，其内涵包括：构建基于资源环境承载力的绿色发展指标及预警体系，绿色发展的技术体系，自然保护地建设与农牧业协调发展、自然-社会经济系统可持续管理的创新模式；研究高原物种多样性形成机理，挖掘生物类群适应极端环境的基因资源，生物资源高值利用的新技术、新途径；星-空-地一体化监测技术创新，服务于各类自然保护地管理的监测体系和数据产品；建立以生态系统供给功能、调节功能和文化功能为主的生态产品清单，评估生态产品价值，探索自然保护地生态产品价值实现路径及相适应的制度政策体系；建设服务于生态体验、环境教育、科普旅游以及自然保护地管理的高技术展示平台、云端国家公园博物馆，实现绿水青山向金山银山转变。相关成果以“三江源草地多功能目标管理与自然保护地建设”和“青海自然保护体系建设科技支撑的几点建议”分别发表在自然保护地和青海科技。

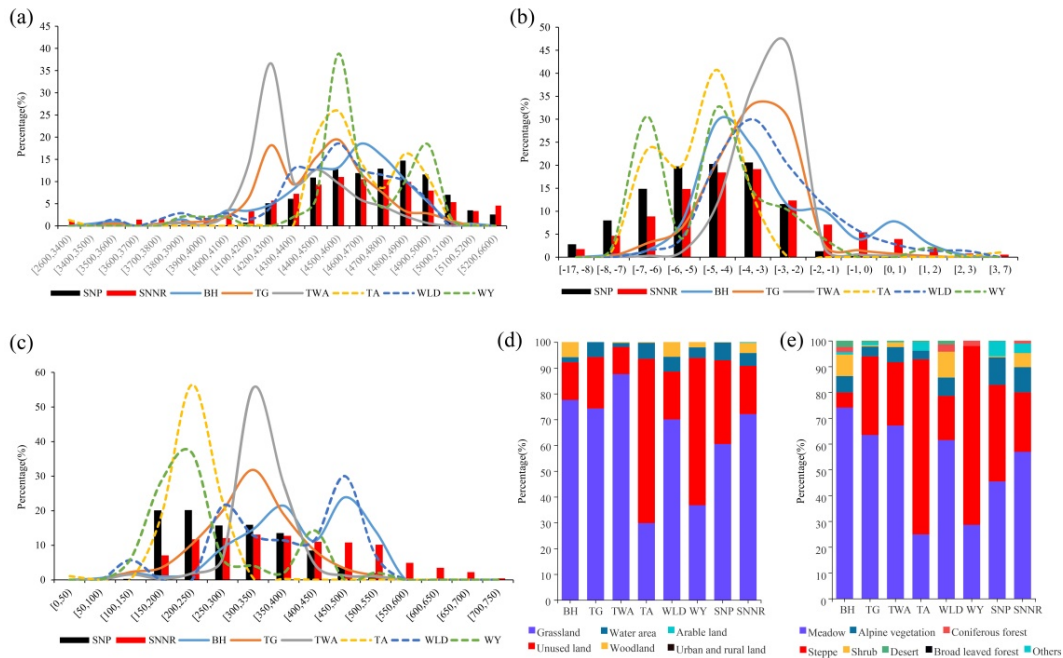


图 1.4.14 三江源区域大型食草野生动物环境变量分析

**三江源国家公园大型野生食草动物优先保护区规划研究：**整合近几年的三江源内野生动物的调查监测结果，共获得 1434 个藏羚、藏野驴、岩羊、藏原羚、野牦牛和白唇鹿 6 种大型食草野生动物分布的空间位点，利用最大熵生态位模型分析 6 个物种的适宜空间分布，采用保护等级策略和草地承载力策略共同规划三江源区域大型食草野生动物优先保护区。结果表明，6 种大型食草野生动物优先保护区主要位于三江源国家公园内及其周边区域，其环境特征为海拔 4000–5000 m，年平均温度低于  $-3^{\circ}\text{C}$ ，年降水量 200–400 mm 的高寒草甸、高寒草原和未利用土地。基于保护等级和载畜量不同策略，三江源国家

公园 6 种大型食草野生动物高度适宜、中度适宜和低度适宜面积占比均高于三江源自然保护区。大型食草野生动物优先保护区在空间不连续，未完全纳入三江源国家公园（试点）范围内，生态系统代表性、原真性和完整性不够突出。因此建议在三江源国家公园体制试点范围的基础上进行功能区域优化及边界范围调整，完整纳入长江、黄河、澜沧江所有源头区域，增强了各功能分区的整体性和联通性。研究结果为首批三江源国家公园总体规划-范围边界、功能区划优化实施方案提供直接数据。

### 草地生态系统功能：

首次量化了三江源食草动物的碳通量和在草地碳收支中的作用，发现家畜在草原碳消耗中占主要比例：准确评估碳收支是预测未来气候变化及其对生态系统影响的关键部分。草地具有多种生态系统功能，包括支撑野生动物、牲畜等。食草动物从饲草中摄取生物量碳，消化代谢，最后保留部分碳。由于草地生态系统碳过程的定量研究尚不完善，导致区域草地生态系统碳收支的估算存在不确定性。开发了三江源食草动物代谢碳通量模型。通过测定主要草食动物的代谢体重和日消化量，估算其采食量和碳代谢率。地上生物量（12.2 Tg C yr<sup>-1</sup>）中 5.52 Tg C yr<sup>-1</sup>（45%）被主要的食草动物摄入，其中 39.31%通过呼吸 CO<sub>2</sub> 释放到大气中，43.77%以粪便和尿液的形式返回生态系统，16.96%保留在食草动物体内，用于种群再生或人类福祉。首次量化了食草动物的碳通量，发现家畜在草原碳消耗中占主要比例，这对于了解区域碳收支，缓解和适应全球草原气候变化具有重要意义。

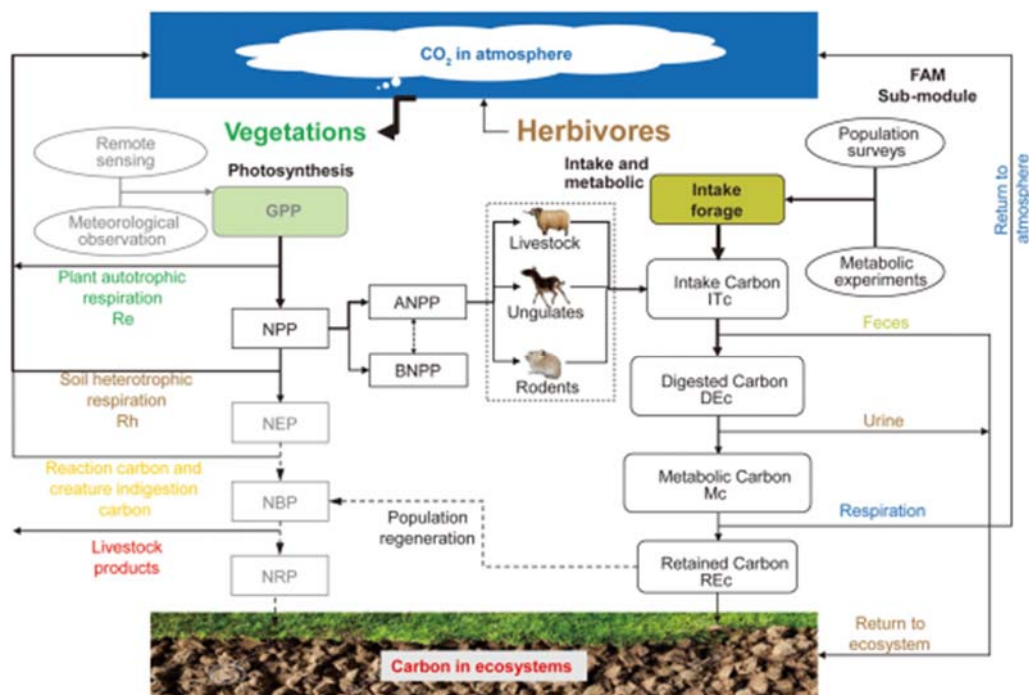


图 1.4.15 三江源高寒草地食草动物碳代谢通量概念框架

**合理管理多年生人工建植草地有助于中国青藏高原三江源土壤微生物群落的正向演替：**草地重建是缓解青藏高原三江源“黑土滩”的一种主要方法，而如何管理建植草地也至关重要。哪种人工管理模式更能有效地恢复“黑土滩”退化草地？通过研究不同管理模式下人工草地植被特性、土壤理化性质和土壤微生物群落结构的变化，探讨了不同管理模式对人工草地群落的影响，为恢复“黑土滩”提供科学依据。植被特性和土壤理化性质分别通过实地调查和实验室分析等方法得出，并且运用高通量测序技术测定了土壤微生物群落组成。研究表明，在不同管理模式下的人工建植草地植被特性、土壤理化性质和土壤微生物群落结构存在明显差异，而且植被植物多样性、地上生物量、土壤有机碳显著控制着放线菌门和担子菌门。当建植一次时 Shannon-Wiener 指数、地上生物量和土壤有机碳达到峰值，此时放线菌门和担子菌门所被注释的 ASVs 的相对丰度显著富集。此外，该管理模式下土壤的细菌多样性最高，真菌多样性最低，土壤逐渐成为“细菌型”土壤。由此得出，建植一次的人工草地植被特性和土壤环境更有利于整体群落的正向演替，是恢复“黑土滩”最合理的管理模式。

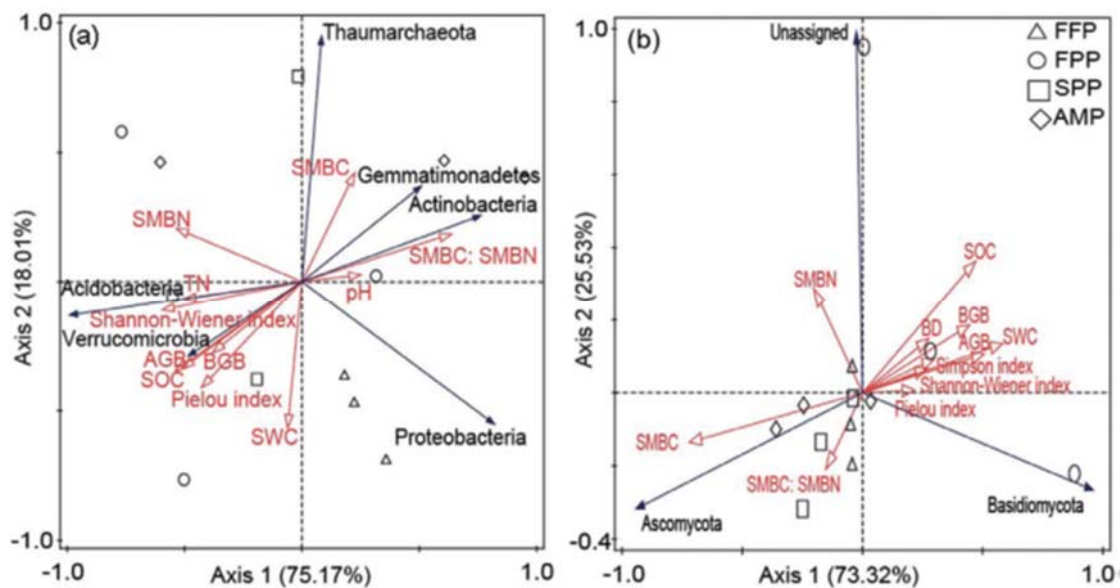


图:1.4.16 建植人工草地利于整体群落正向演替，是恢复“黑土滩”的合理管理模式

**三江源高寒草地表层土壤碳、氮、磷呈东高西低分布，碳氮比、氮磷比较低，氮矿化能力较高且氮限制较小：**生态系统碳 (C)、氮 (N)、磷 (P) 的平衡和化学计量学特征，可以反映土壤有机质的质量和含量，对于理解生态过程和生态系统对气候变化和干扰的响应具有重要意义。通过测定三江源 15 县区的代表性高寒草地的土壤 C、N、P，探讨了三江源高寒草地 0 ~ 20 cm 表层土壤碳、氮、磷的空间分布特征及其化学计量学特征，并分析了其与纬度、经度、海拔以及植被特征（多样性、高度、盖度、生物量等）的相

关性。三江源土壤有机碳 (SOC)、全氮 (TN)、全磷 (TP) 和无机碳 (SIC) 平均密度分别为  $7.56 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $0.71 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $151.57 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $1.77 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。三江源土壤 SOC、TN 和 TP 空间分布呈现东高西低的格局，而土壤 SIC 则呈现相反的格局。土壤 TP 的空间异质性较小，表明整个地区土壤母质差异不大。土壤养分主要受经度、土壤含水量、pH 值、植被高度和盖度的影响。三江源高寒草地  $0 \sim 20 \text{ cm}$  土壤 C: N: P 比值约为 48:5:1，C: N、C: P、N: P 比值受土壤含水量和植被高度的显著影响。土壤 C: N 比 (10.45) 和 N: P 比 (4.51) 均低于全国水平，表明三江源土壤 N 矿化能力高于全国其他地，且土壤 N 限制程度较小。

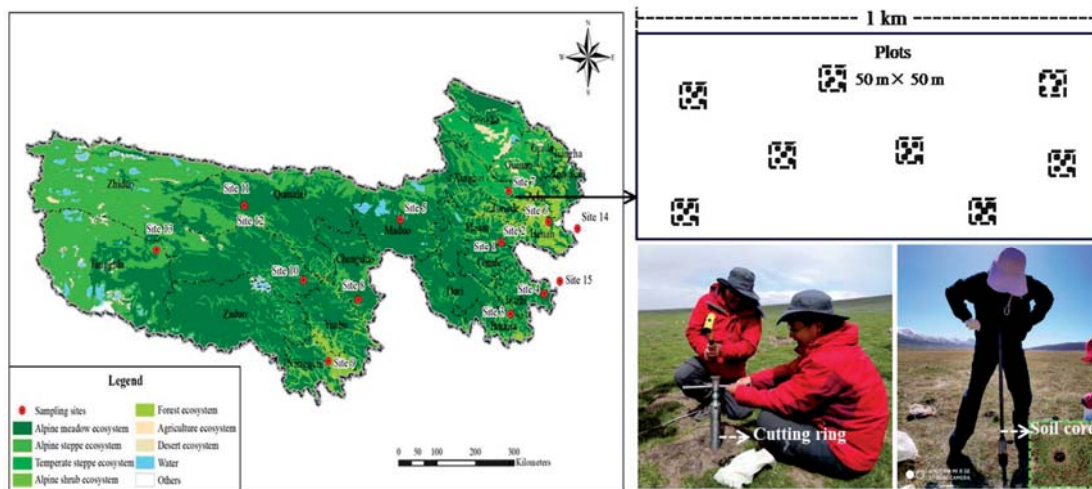


图 1.4.17 三江源土壤碳、氮、磷密度及化学计量学特征采样点分布图

## 5. 土壤/冻土观测研究

### ➤ 格尔木站

**阐明了坡向调节下的青藏高原东北部典型山地冻土分带规律：**山地多年冻土的分布对于区域气候、生态、水文和基础设施建设至关重要。但是由于多年冻土深埋地下以及山区崎岖地形的影响，缺少准确、翔实的山区冻土分布图仍是制约山地冻土环境研究的瓶颈之一。首次利用探地雷达剖面资料建立了坡向影响下的区域尺度的山地冻土分带模型。结果表明，探地雷达与 GIS 结合的方法对于青藏高原上地形起伏的山区多年冻土的探测和制图具有良好的应用前景。结果表明：对于黄河上游的曲什安河流域，连续多年冻土、不连续多年冻土和季节多年冻土的面积比例分别为 38.1%、25.0% 和 36.9%。连续多年冻土带和不连续多年冻土带的边界在阳坡为 4472m，阴坡为 4291m，边界上的多年平均地表温度和气温分别为  $-1.3^{\circ}\text{C}$  和  $-5.7^{\circ}\text{C}$ 。同时，在不连续多年冻土带

和无多年冻土带的边界在阳坡为 4258m，阴坡为 4061m，多年平均地表温度和气温分别为  $-0.3^{\circ}\text{C}$  和  $-3.9^{\circ}\text{C}$ 。因此，高程因素造成了山区冻土的垂直分带规律，而坡向因子通过调节入射的太阳辐射分配影响多年冻土分布和热状况。坡向调节作用对多年冻土下界高度的影响约为 180~200m。钻孔地温观测结果表明，阳坡的年平均地温比阴坡高  $1.4\sim 1.6^{\circ}\text{C}$ （图 1.5.1）。

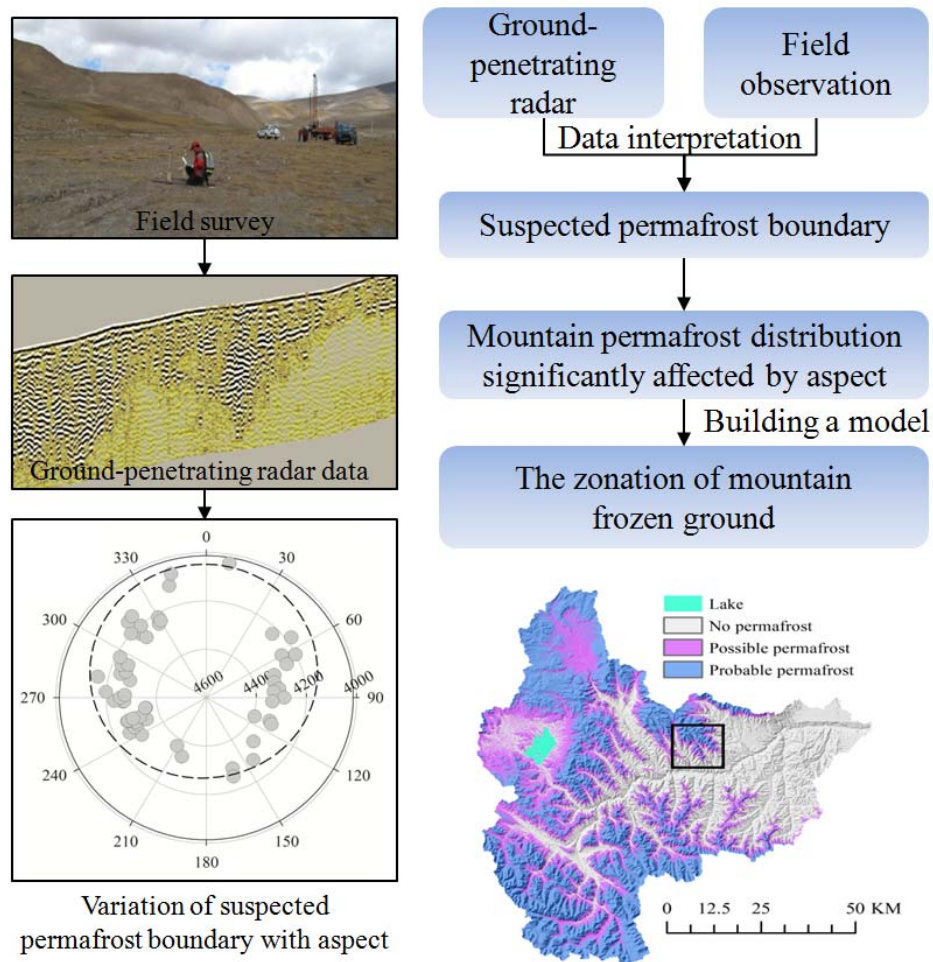


图 1.5.1 基于探地雷达的多年冻土分布流程图和结果

**对比分析了青藏高原腹地各拉丹冬南北坡多年冻土和地下冰的发育特征：**青藏高原唐古拉山南北两侧在地形地貌、地理和气候特征上存在显著差异，多年冻土的发育状况和特征也明显不同。受第二次青藏高原综合科学考察研究等项目资助，多年冻土对亚洲水塔的影响专题考察分队分别于 2019 年和 2020 年的 10—11 月对唐古拉山各拉丹冬南侧的色林错上游扎加藏布源区（简称“湖源区”）和北侧的长江上游沱沱河源区（简称“江源区”）进行了多年冻土野外考察（图 1.5.2）。利用钻探、坑探、地球物理勘探等方法对多年冻土的分布边界、多年冻土剖面的地层、地下冰等特征进行了描述和取样，

同步构建了多年冻土温度和活动层水热观测网络，为多年冻土对亚洲水塔影响的机理分析、数值模拟以及情景预估提供数据保障。对野外调查资料的初步分析认为，各拉丹冬南北两坡地层沉积类型和地下冰赋存状态存在明显差异，北坡多年冻土的热稳定性、地下冰含量、冰缘地貌类型多样性均高于南坡，但由于受到构造地热、河流融区等多种因素的影响，北坡的冻土分布形式更为复杂。江源区 100 m 钻孔剖面揭示了连续分布的、厚度大于 50 m 的地下冰；在该区域发现了多年生冻胀丘分布群，并利用钻探和地球物理勘探方法对该区域规模最大、结构最完整的冰核型冻胀丘进行了较为系统的勘察剖析。两次野外调查工作为后期区域冻土理化指标分析，冻土环境化学、古气候环境研究的开展奠定基础。

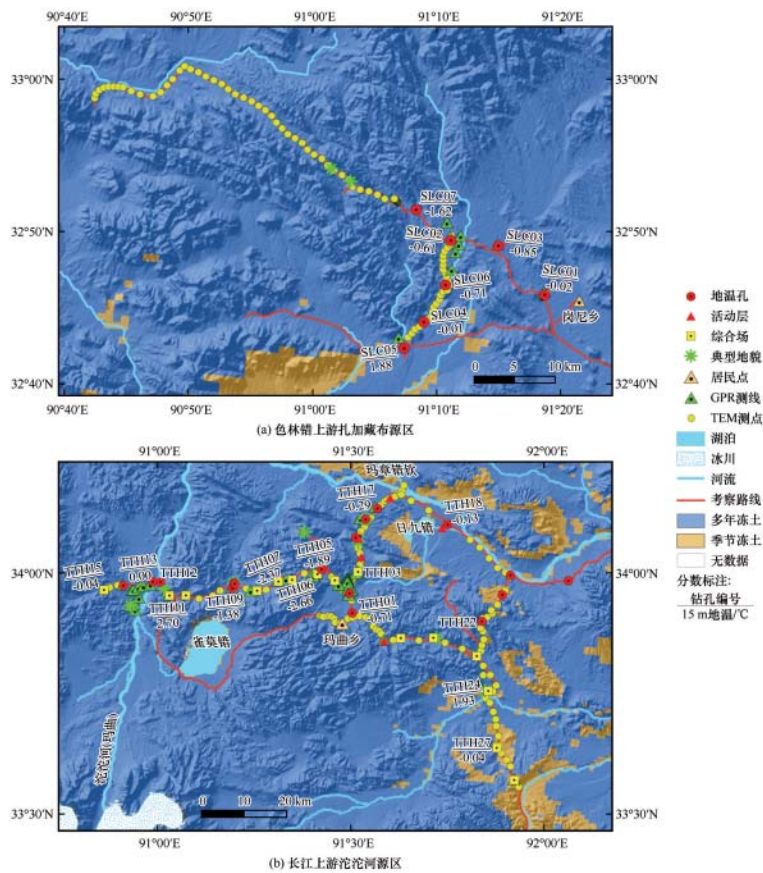


图 1.5.2 青藏高原腹地各拉丹冬南北坡的野外调查路线

**揭示了中国地区多年冻土空间分布及变化特征：**地表温度表征多年冻土状态的重要参数，同时也是多年冻土分布模拟的上边界条件之一。MERRA2 是 NASA GMAO 发布的最新一代再分析产品，其地表温度数据集在中国区域冻土制图中的适用性尚未被评估。针对以上问题，格尔木站通过将 MERRA2 地表温度和气象站实测及其他三种再分析地表温度数据对比，揭示了 MERRA2 地表温度数据在中国区域的适用性；探讨并对比分析了不同

再分析校正方法，将校正后的数据运用于冻土制图和变化监测中。本研究获得结果如下：

通过与气象站实测地表温度比较，揭示了 MERRA2、JRA55、ERA-interim 和 MERRA 四种地表温度数据集在中国及多年冻土区的精度，得出 MERRA2 地表温度更接近气象站实测值，尤其是在多年冻土区（图 1.5.3）；探讨了两种不同的 MERRA2 地表温度再分析数据偏差校正方法，通过统计对比分析发现，基于高程差-地表温度偏差的线性回归方法可更有效的消除了 MERRA2 地表温度与实测数据的偏差；基于校正后的 MERRA2 地表温度日数据和冻结指数模型，对中国地区的冻土分布进行制图，并分析了 1980–2018 年及其变化特征分析（图 1.5.3）。

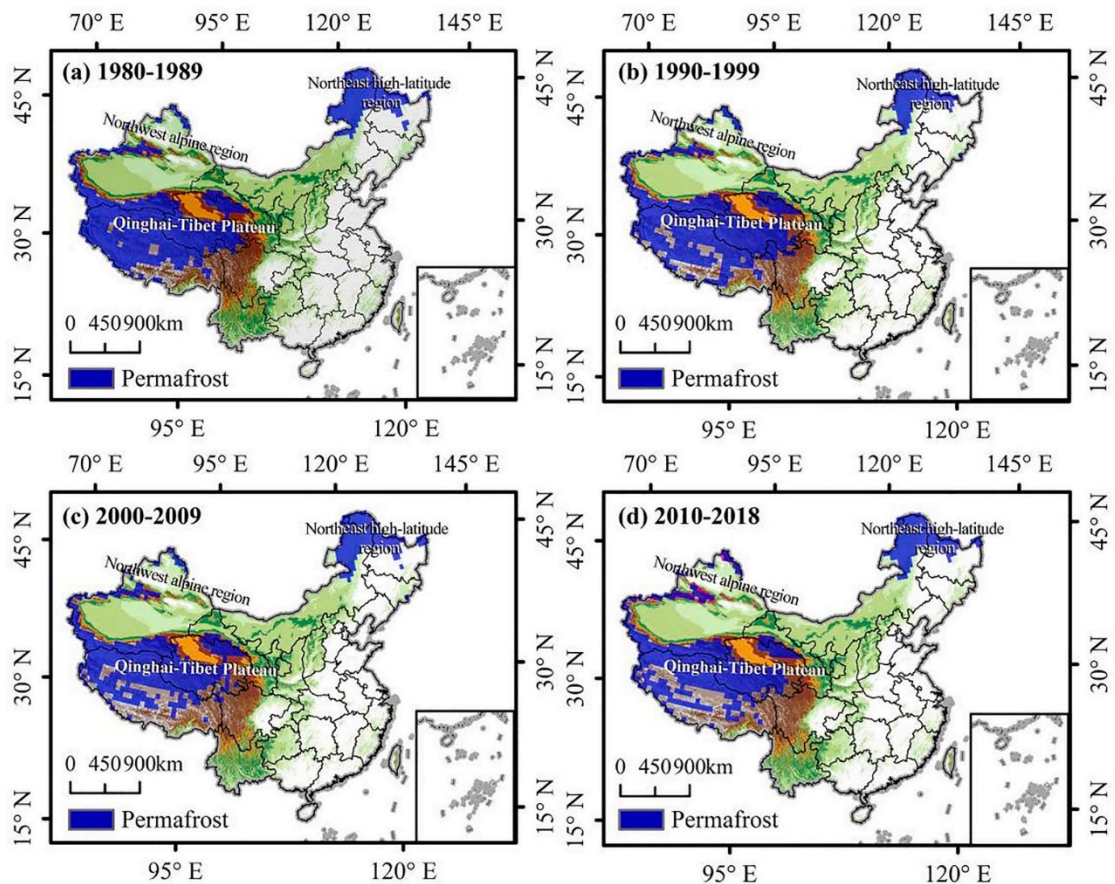


图 1.5.3 不同时间段中国地区冻土分布

**揭示了环北极多年冻土区土壤有机碳储量的空间分布格局：**多年冻土中储存着大量有机碳，是陆地生态系统中最大且周转时间最长的碳库。在全球变暖背景下，多年冻土发生大范围退化，导致其封存的大量有机碳被微生物分解释放，进一步加剧气候变暖。但北半球多年冻土区土壤有机碳的空间分布和储量在全球范围内仍存在较大的不确定性。

基于多个高分辨率环境变量和土壤有机碳样本数据集（>300 个土壤剖面），采用机

器学习方法估算了北半球多年冻土区顶部 3 m 土壤有机碳的储量和空间分布。确定了土壤有机碳的关键控制因子。结果发现环北极地区多年冻土区 ( $20.8 \times 10^6 \text{ km}^2$ ) 表层土壤有机碳储量为  $1079 \pm 174 \text{ Pg C}$ ，其中北极多年冻土区为  $1057 \pm 167 \text{ Pg C}$ ，第三极多年冻土区为  $22 \pm 7 \text{ Pg C}$ 。年平均气温和 NDVI 是北极和第三极多年冻土区有机碳储量空间分布的主要控制因素 (图 1.5.4)。这一估计结果比现有的全球土壤有机碳储量地图更准确。该研究获得的北半球多年冻土区土壤有机碳数据集可以为我们在区域和全球多年冻土碳循环及其对气候系统的反馈研究方面提供数据基础。

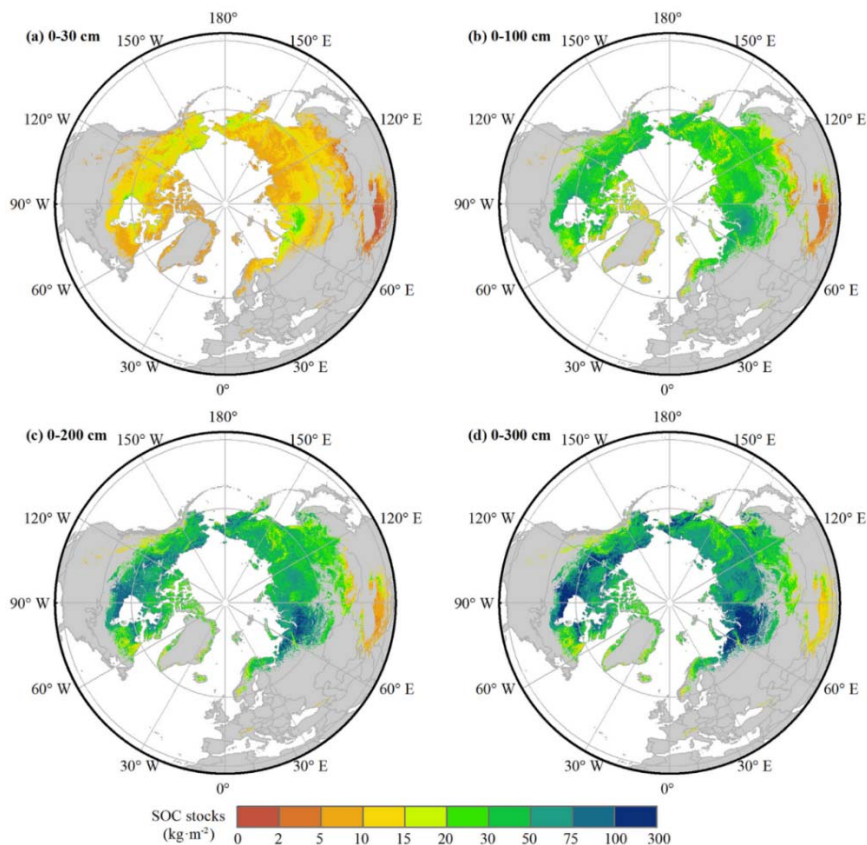


图 1.5.4 北半球多年冻土区不同土层有机碳储量的空间格局

### ➤ 若尔盖站（成都生物研究所）

#### 高寒沼泽湿地不同深度的土壤碳库对外源物质输入及增温的响应

泥炭沼泽是全球重要的土壤碳库，气候变化使泥炭沼泽土壤碳库面临巨大挑战。其中外源物质输入引起的激发效应正在严重改变泥炭沼泽土壤碳的分解过程。本研究通过室内模拟实验，研究不同深度土壤碳库对外源物质输入的响应，发现表层土壤主要对简单物质敏感，深层土壤主要对复杂物质敏感，而过渡兼氧层土壤同时对简单和复杂物质敏感。不同深度土壤响应外源物质的过程机理不同，主要原因是差异的土壤营养状态和

微生物活性。研究结果表明激发效应是泥炭沼泽土壤碳动态研究中不可忽略的过程，特别是严重分解的兼氧层土壤。本研究成果以“Carbon stock stability in drained peatland after simulated plant carbon addition: Strong dependence on deeper soil”为题发表在 *Science of the Total Environment* 上。

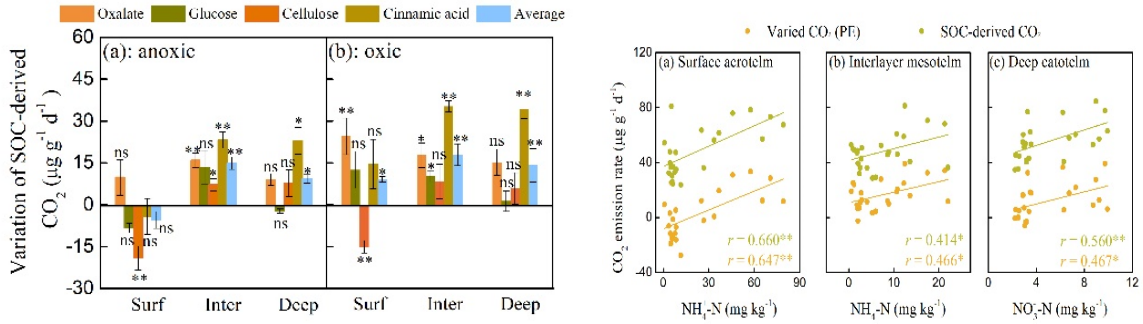


图 1.5.5 不同深度土壤对外源物质输入响应（左）土壤 CO<sub>2</sub> 排放与 N 营养之间的关系（右）

兼氧层土壤含有大量的复杂有机碳，同时微生物活性及 CO<sub>2</sub> 排放潜势最低，研究也发现兼氧层土壤 CO<sub>2</sub> 排放对增温不敏感，表层有氧层和深层厌氧层土壤 CO<sub>2</sub> 排放对增温敏感，且分别受碳质量和分解者活性的调控。过渡层土壤 CO<sub>2</sub> 排放对营养物质变化敏感。该结果表明以往的以深度为依据的碳动态研究可能高估了退化泥炭沼泽碳的丢失。在未来的泥炭沼泽土壤碳动态研究中，需要考虑沿剖面土壤环境的变化，同时需要考虑营养物质在土壤碳动态中的重要性。本研究成果以“Varied response of carbon dioxide emissions to warming in oxic, anoxic and transitional soil layers in a drained peatland”为题发表在 *Communications Earth & Environment* 上。

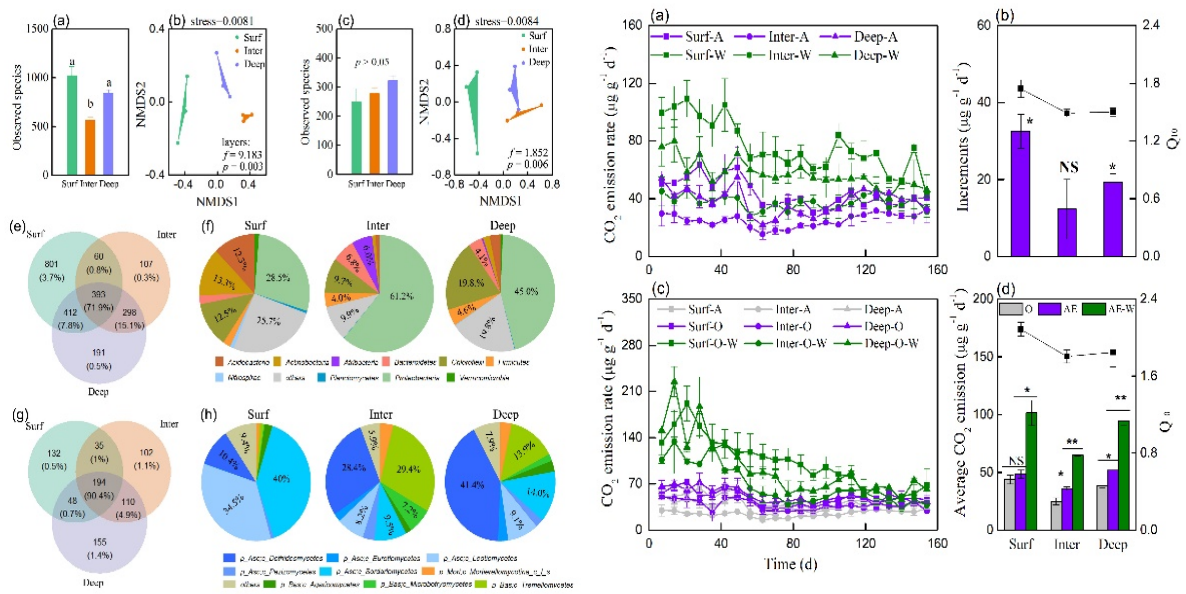


图 1.5.6 不同深度土壤微生物特性差异（左）及不同深度碳排放动态对增温的响应（右）

### ➤ 若尔盖站（西北研究院）

**青藏高原土壤湿度-大气强耦合机理：**土壤湿度作为陆-气相互作用中非常重要的参数，会对地表能量的分配及向上水汽输送产生影响。利用青藏高原 16 个站点地面观测数据和 L 波段探空观测数据，通过一维边界层模型模拟和对流触发潜能-低层湿度指数（CTP-HIlow）框架研究了青藏高原土壤湿度对午后对流触发的影响。主要研究了高原地区土壤湿度对夏季对流触发的影响，并确定了适用于高原地区 CTP 和 HIlow 的阈值。在此基础上，进一步分析了可能对对流触发产生影响的气象要素。青藏高原上的对流触发主要受大气背景控制，土壤湿度影响对流触发的区域主要在高原中部。由于高原空气密度较低，地面热通量产生的浮力通量较大，即使在弱稳定的条件下也可能触发对流。大气可降水量和风速也会影响对流的触发。

### ➤ 那曲站（地理所）

**森林经营方式对土壤碳排放的影响：**阐明土壤呼吸对间伐和林下移除的响应机制是评估人工林经营方式对土壤碳循环影响的关键。本研究通过长期的土壤碳通量监测，发现抚育间伐和林下移除（UR）对土壤呼吸（Rs）和自养呼吸（Ra）都有显著影响。与对照样地相比，抚育间伐后 Rs 和 Ra 分别增加 15.3% 和 26.3%，但 UR 分别降低 17.4% 和 45.0%（图 1.5.7）。与 Rs 和 Ra 不同，异养呼吸（Rh）不受间伐或林下移除的影响（ $P>0.05$ ）。在抚育间伐和林下植被移除共同存在的处理下，Rs、Ra 和 Rh 不受间伐和 UR 的交互影响。Rs 和 Rh 存在显著的年际变化。处理和年份对 Rs、Ra 和 Rh 的交互作用不显著，表明五年治疗效果相似。

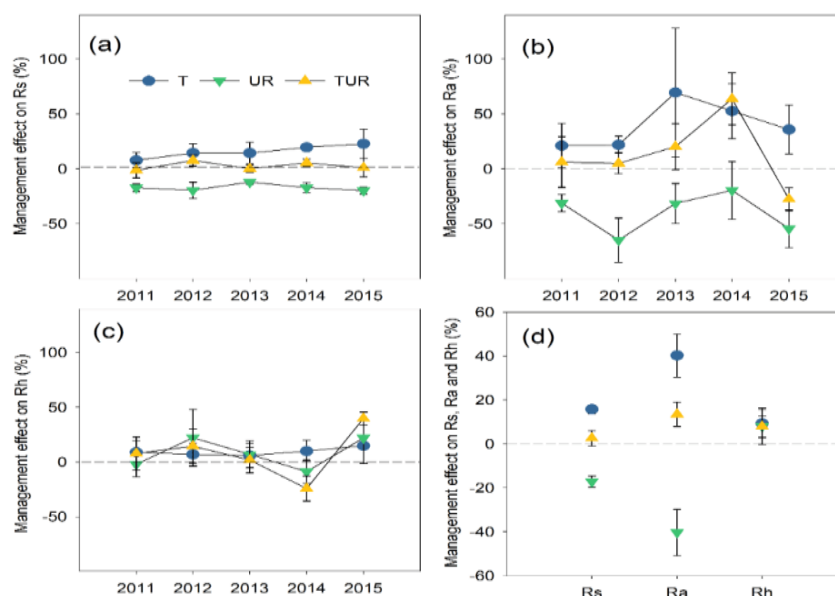


图 1.5.7 间伐和林下植被移除对土壤呼吸的影响

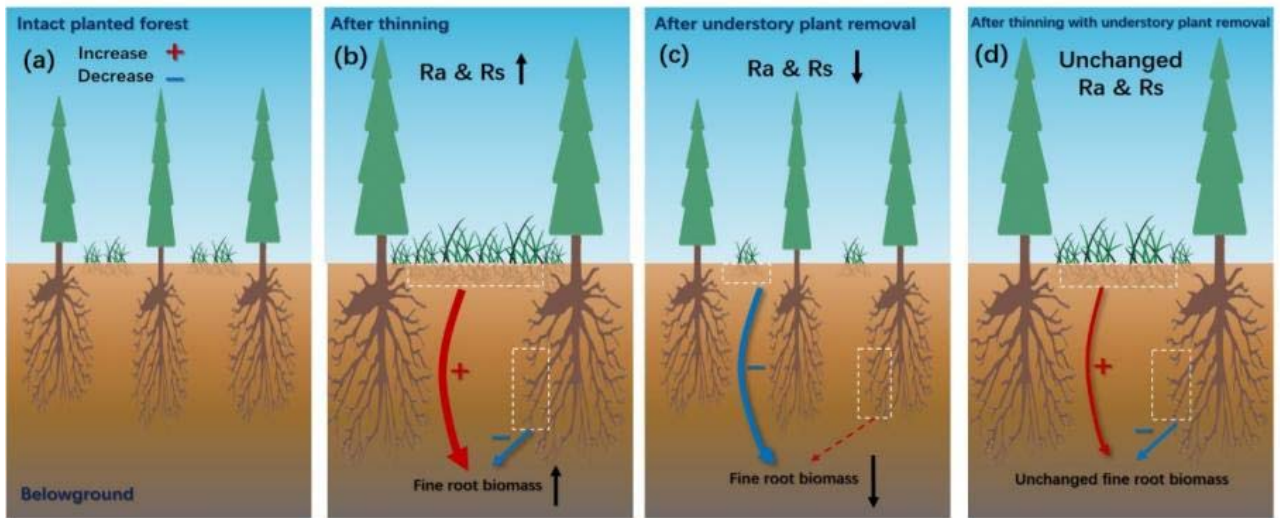


图 1.5.8 不同管理方式影响土壤呼吸组分的机制

在五年的研究期间，观察到土壤呼吸（ $R_s$ ）对抚育间伐和林下移除（UR）的相反的响应模式。这些结果表明，通常被忽视的林下植物的状况也可以通过调节光合作用碳的地下分配的质量和绝对量来显著影响  $R_s$ 、 $R_a$  和  $R_h$ 。 $R_s$  对不同处理的差异化反应可能与  $R_a$  和  $R_h$  对间伐和/或林下植物处理的差异响应有关。 $R_a$  而不是  $R_h$  可能是  $R_s$  变化的主要原因。抚育间伐可以通过改变细根的光合产物供应从根本上影响  $R_a$ ， $R_a$  在间伐后显著增加，这可能有两个原因。首先，疏伐可以通过促进其细根产量来刺激剩余树木的  $R_a$ （图 1.5.8）。第二，显著刺激的林下地上生物量带来了更多的呼吸细根和增强的  $R_a$ 。与间伐处理不同，与对照相比，林下移除处理中细根的损失导致  $R_a$  较低。这些结果表明，林下植物生物量在决定土壤呼吸变化方面起着关键作用，在未来的研究中，我们需要特别注意林下植物（如草和灌木）和冠层树木之间的不同生长策略。

本研究发现，树冠树木抚育间伐增加了土壤总呼吸（ $R_s$ ）和自养呼吸（ $R_a$ ），而林下植物的移除通过降低  $R_s$  和  $R_a$  来补偿抚育间伐引起的增量。 $R_s$  和  $R_a$  的增加可能与抚育间伐后资源可用性提高导致的剩余树木和林下植物的根系生长增强有关。然而，移除林下植物会降低光合作用和细根生物量，从而抵消抚育间伐诱导的  $R_s$  和  $R_a$  刺激。与  $R_s$  和  $R_a$  不同，异养呼吸（ $R_h$ ）不受管理处理的影响，这可能与不变的森林底质和微生物生物量碳（MBC）有关。我们的研究结果强调了林下条件对土壤  $CO_2$  排放的显著影响，以及  $R_a$  和  $R_h$  对管理实践的独立反应。提高对疏林和林下植被清除对土壤呼吸的理解，对于评估不同森林管理做法的碳相关后果至关重要。我们的研究结果强调，需要更全面地将森林管理效应纳入碳循环模型，以提高森林碳预算核算的准确性。

**我国干旱半干旱区植被覆盖度变化及驱动要素：**提高我国生态系统服务能力是生态治理的关键，干旱和半干旱区生态系统普遍比较脆弱，因此成为当前生态治理的重点区域。我国生态工程大规模实施有效的恢复和保护了生态脆弱区，但其如何通过改变土地利用类型而影响干旱半干旱区植被覆盖度还不是很清楚。研究基于 2000 年和 2018 年两期数据计算土地利用/土地覆盖类型变化面积转移矩阵，并提取 LULC 发生变化的像元（图 1.5.9-10）。结果显示，约  $5.75 \times 10^4 \text{ km}^2$  的耕地由其他土地利用类型转化而来，其中 53.29 % 由草地转化而来。同时，约  $5.37 \times 10^4 \text{ km}^2$  耕地转化为其他土地利用类型，其中 44.34 % 转化为居民地。新增林地面积  $2.72 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，其中由草地转化而来的林地约占 59.35 %。与林地、耕地的扩张相反，草地流失面积大于草地新增面积，大部分新增草地由未利用地转化而来（约占 57.72 %）。

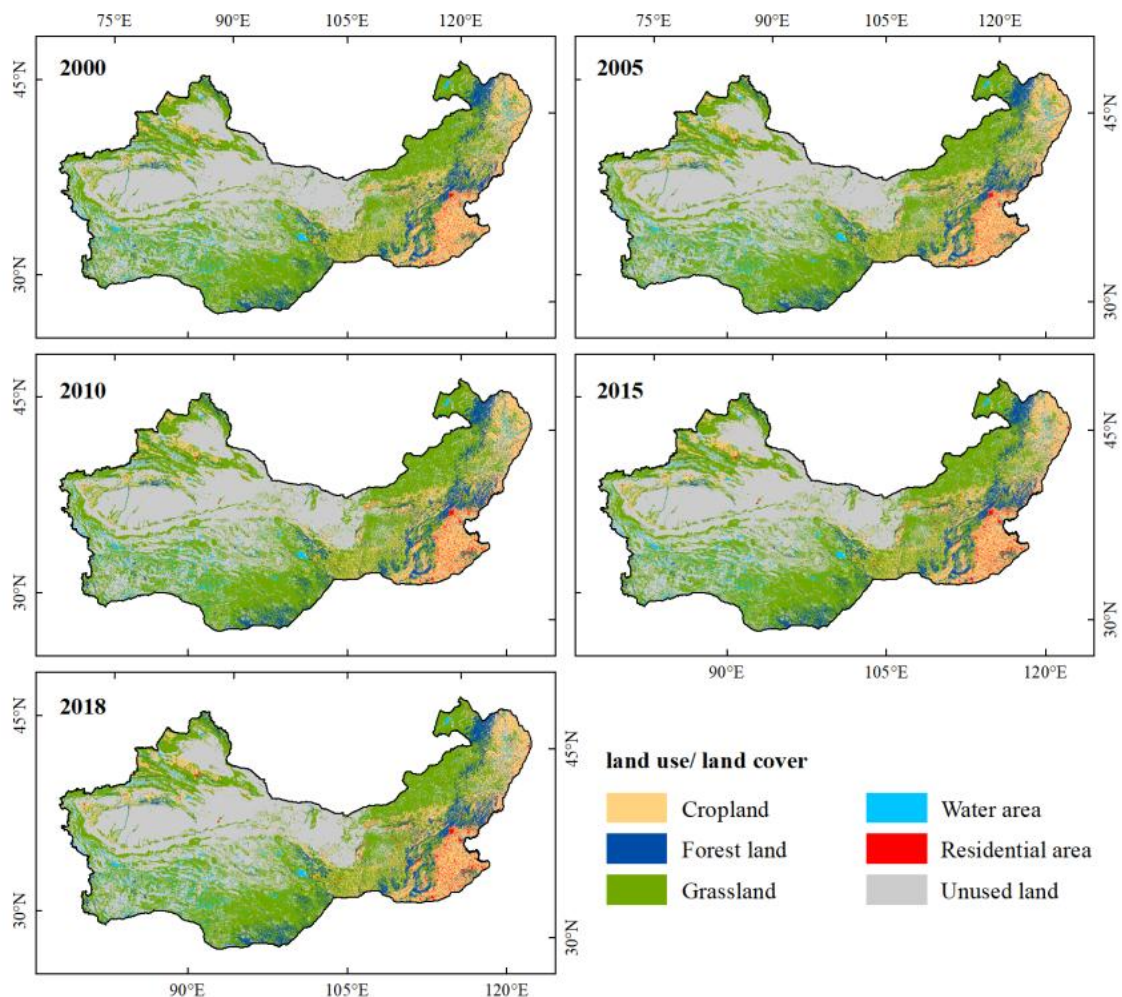


图 1.5.9 2000-2018 年中国干旱-半干旱区土地利用/土地覆盖类型

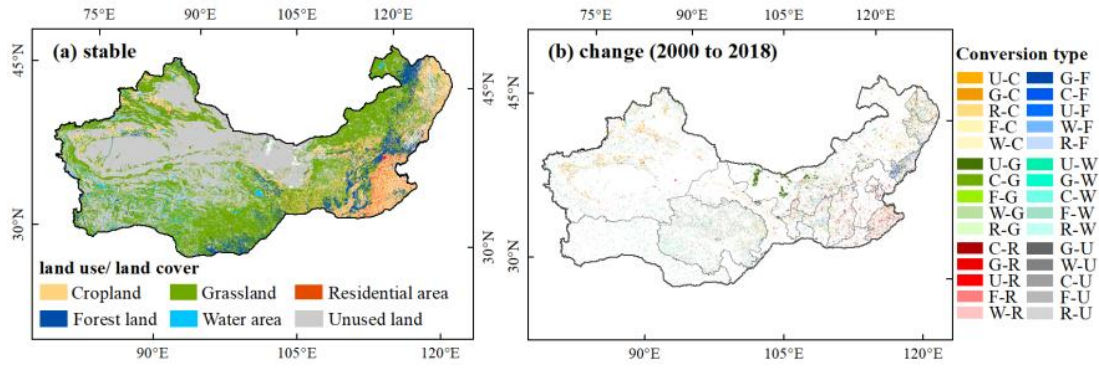


图 1.5.10. 中国干旱-半干旱区土地利用/土地覆盖类型稳定和变化区域

注：C 为耕地；F 为林地；G 为草地；W 为水域；R 为居民地；U 为未利用地；“A-B”指“A 向 B 的转移”，例如，“C-F”指“耕地向林地的转移”。

干旱-半干旱区地表反照率 (LSA) 多年均值 (2000–2018) 空间分布呈现出从西北向东南递减的特征 (图 1.5.11)，LSA 的变化趋势集中分布在  $-0.005 \sim 0.005/\text{year}$ 。其中 58.1 % 的区域 LSA 表现出下降趋势，其中 24.6 % 的像元显著下降 ( $p < 0.05$ )，该部分像元集中分布在黄土高原和华北平原。另有 41.9 % 的像元表现出 LSA 增大趋势，但多数不显著 ( $p > 0.05$ )。

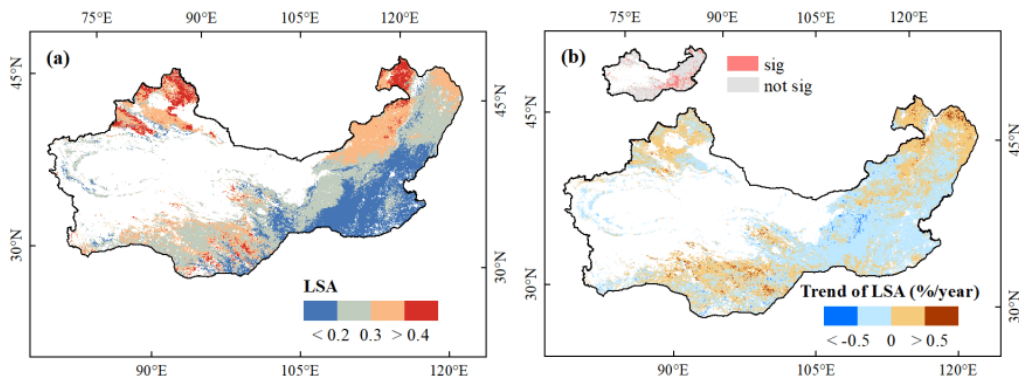


图 1.5.11. LSA 多年均值及 MK Sen's slope 变化趋势空间分布

统计结果表明，绿化和 LULCC 对 LSA 变化的相对贡献因 LULCC 类型而异 (表 1)。总的来说，在植被类型相互转化的大部分地区，绿化主导了 LSA 变化，但草地转林地除外。草地转林地时，LULCC 对 LSA 变化的贡献高达 66.38 %，表明造林可能对 LSA，进而对气候系统产生重要影响。当耕地转草地、林地转耕地时，与绿化的贡献相比，LULCC 对 LSA 变化的贡献非常小，甚至可以忽略不计 (分别为 1.86 % 和 8.46 %)。对于耕地转林地、林地转草地和草地转耕地，绿化对 LSA 变化的相对贡献约为 LULCC 贡献的两倍。综上所述可知，LULCC 对植被绿化引起的 LSA 变化有显著影响，植被类型对  $\Delta \text{LSA} / \Delta \text{LAI}$  具有调节作用，这可能进一步影响 LSA 减少带来的升温幅度。

表 1. 绿化和 LULCC 对  $\frac{\Delta LSA}{\Delta LAI}$  的相对贡献率

| 转换类型    | Con <sub>green</sub><br>(%) | Con <sub>LULCC</sub> (%) |
|---------|-----------------------------|--------------------------|
| CRO→FOR | 67.22                       | 32.78                    |
| CRO→GRA | 98.14                       | 1.86                     |
| FOR→CRO | 91.54                       | 8.46                     |
| FOR→GRA | 71.89                       | 28.11                    |
| GRA→CRO | 67.73                       | 32.27                    |
| GRA→FOR | 33.62                       | 66.38                    |

综上所述,2000–2018 年,中国干旱–半干旱区土地利用/土地覆盖发生了深刻变化,主要表现为耕地、林地和居民地的扩张以及草地的减少。与植被类型稳定区相比,土地利用/土地覆盖变化(LULCC)不改变 LAI 的趋势方向,但对 LSA 的趋势有着复杂的影响。由于植被冠层的反射特性不同,LSA 和 LAI 之间的相关性在不同 LULC 之间差异很大,尤其是在生长季期间。在植被类型转换的大多数地区,绿化主导 LSA 的变化,LULCC 通过冠层结构的变化调节 LSA 的变化。

**气候变暖减弱了氮添加对高寒草甸土壤碳库微生物贡献的负效应:**微生物源土壤有机碳作为土壤有机质的重要来源,可能会影响土壤碳库的稳定性,受到越来越多的关注。高海拔生态系统含有大量土壤有机碳,可能容易受到快速气候变化的影响。然而,全球变化的背景下这些地区土壤微生物源有机碳产生和积累碳的机制的认识还较少。本研究通过在青藏高寒草甸设置的模拟气候变暖和氮沉降全球变化试验平台,探讨了高寒草甸土壤微生物源有机碳对两种变化因子的响应机理。本研究中,高寒草地土壤总氨基糖(167.51–297.36  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )和微生物源碳含量远低于全球范围内其他生态系统中的测定值(图 1.5.12),表明寒冷气候可能会对土壤微生物残体的积累产生抑制作用。经过 6 年的全球变化控制实验,增温促进了土壤微生物源碳的细菌碳(增加 53.56%)和真菌碳的积累(增长 25.60%)。氮添加抑制了土壤微生物来源的有机碳的积累(降低了 25.37%),同时真菌碳含量相对于细菌碳含量降低幅度更大。即增温和氮沉降下,真菌/细菌残留比值显著下降,表明这两个全球变化因素降低了土壤中真菌来源的碳量,这可能与土壤微生物对氮的需求有关(图 1.5.13–14)。一方面,增温显著降低了地上生物量和叶片 C:N 比,而氮沉降降低了叶片 C:N 比和土壤氮矿化率,表明增温和氮沉降减少了土壤微生物对氮的需求。另一方面,与细菌相比,真菌的生物量 C:N 比较高,即真菌对氮的需求较低,而氮需求的降低将减少植物对真菌的投资。考虑到真菌和细菌来源

的碳比值高度依赖于生态系统土壤氮有效性，我们推测氮需求下降将倾向于细菌生长而不是真菌，从而导致真菌对土壤残体碳的贡献减少。

整体而言，高寒生态系统土壤微生物碳对增温和氮沉降具有高度敏感性。随着土壤微生物残体的不断积累和富集，增温提高了土壤中微生物源碳的比例，表明增温对高寒草甸土壤碳稳定有显著贡献（图 1.5.15）。氮沉降降低了土壤微生物对有机碳形成的贡献程度，但增温和氮沉降消除了这种负面影响。考虑到土壤微生物残体在土壤稳定碳库中的重要性，本研究强调了增温和氮沉降情境下土壤微生物活动是调节土壤稳定性碳积累的重要途径。

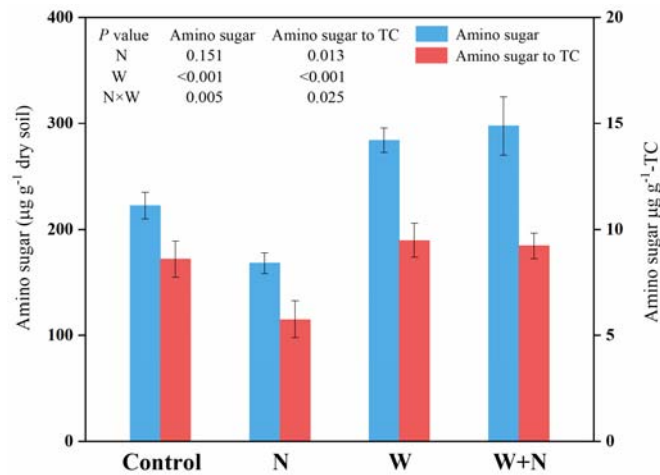


图 1.5.12 增温和氮添加对土壤总氨基糖及其占土壤总碳的比例的影响

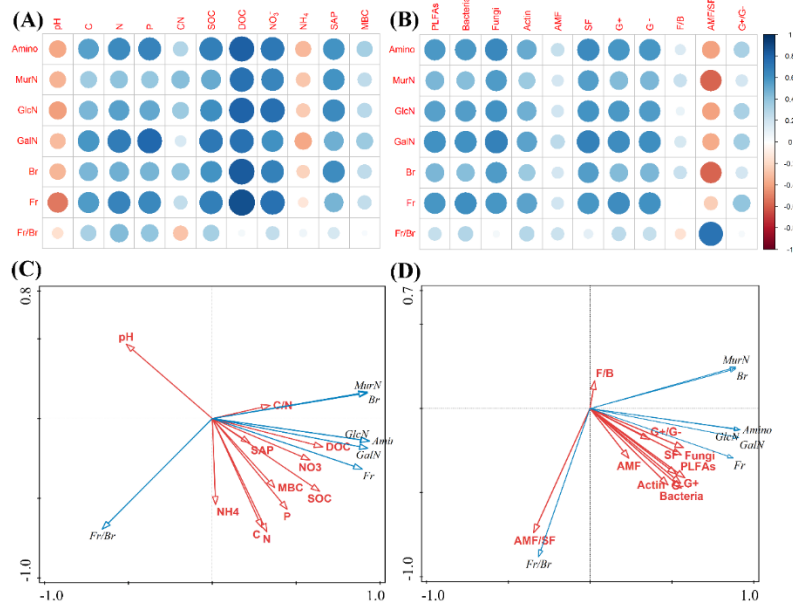


图 1.5.13 土壤性质和土壤氨基糖的相关分析

(A.土壤理化性质和氨基糖的 Pearson 相关关系；B. 土壤微生物性质和氨基糖的 Pearson 相关关系；C. 土壤理化性质和氨基糖的冗余分析；D. 土壤微生物性质和氨基糖的冗余分析)

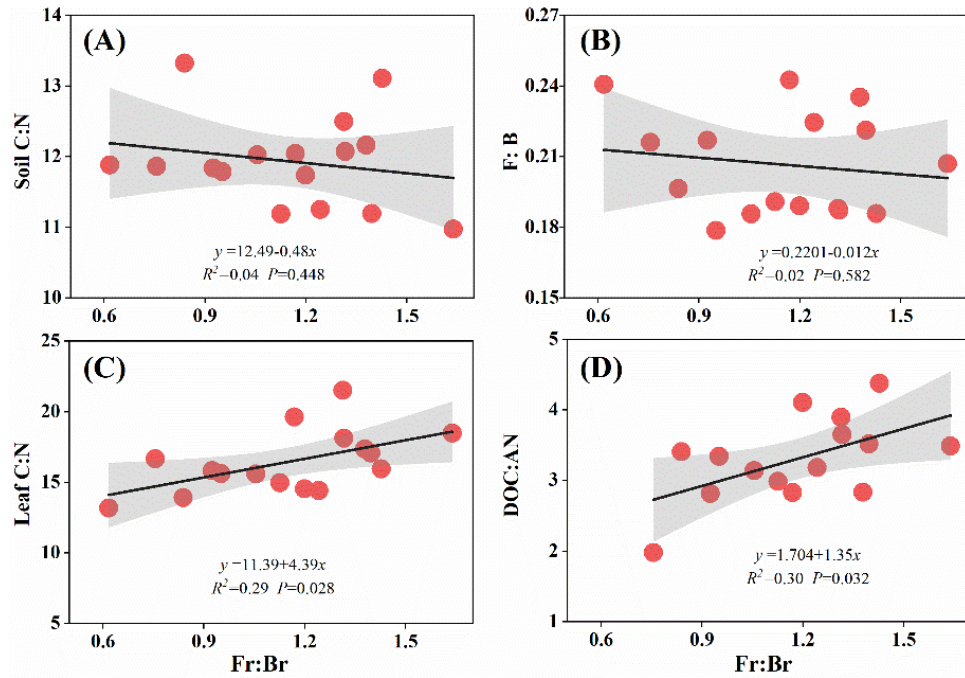


图 1.5.14 叶片 C:N (A)、土壤 C:N (B)、DOC:AN (C) 和土壤真菌:细菌 (D) 与真菌:细菌比的关系

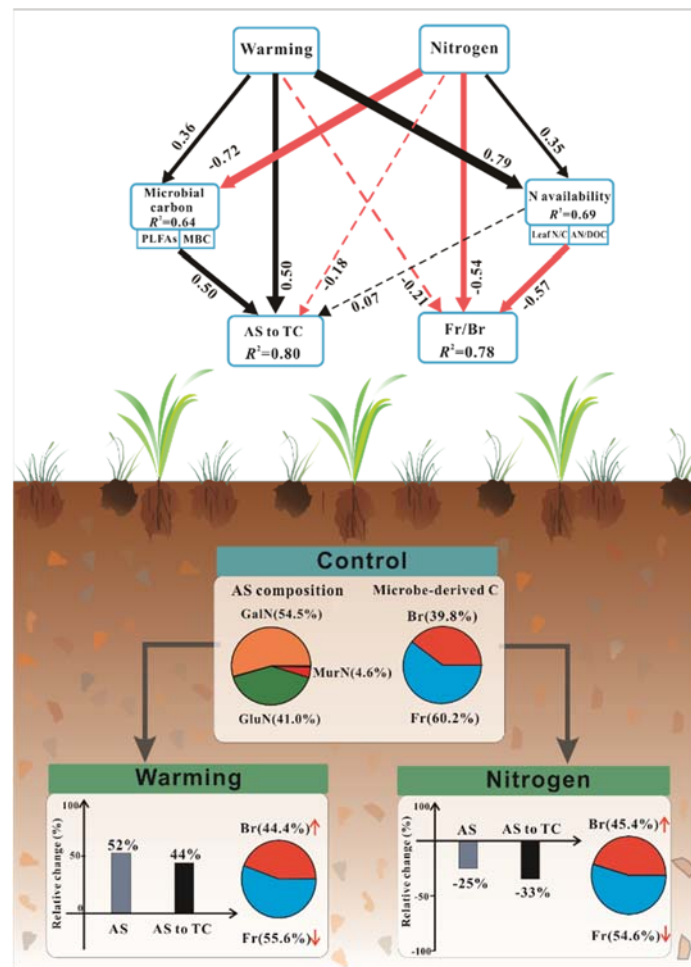


图 1.5.15 实验增温和氮添加对土壤氨基糖和微生物源碳影响的结构方程模型和示意图

## ➤ 那曲站（西北院）

**1980~2016 年青藏高原土壤冻融过程对气候变化的响应：**那曲站成员博士生付春伟等利用中国科学院青藏高原研究所的中国区域地面气象要素驱动数据集（CMFD）和美国 MODIS 土地覆盖产品数据（MCD12C1），使用 Community Land Model（CLM）4.5 陆面模式，研究了 1980~2016 年青藏高原的土壤温度、湿度和冻融状态的变化及其对气温和降水的响应。研究发现，青藏高原地区在过去 37 年里变得更加温暖和湿润，区域平均气温和降水量均有所增加。1980~1998 年气温相对较冷，1999~2016 年气温相对较暖。青藏高原大部分地区土壤温度和湿度受气温和降水的影响，均呈上升趋势。从总体上看，1981~2016 年，青藏高原冻结日期推迟，融化期提前，冻结时长缩短。表层土壤首先冻结和融化，随着时间的推移，渗透到深层土壤，冻融过程具有明显的滞后性。降水和气温对冻融过程有显著影响，气温升高推迟了冻结期，使融化期提前，缩短了冻结时长。降水量最高的地区，土壤冻结较晚，融化较早，冻结持续时间最短。植被较少的地区冻结得早，融化得晚。高原西北部冻融持续时间增加，其地区冻融持续时间减少。该研究成果推动了那曲站在寒区陆面过程研究方面的发展。

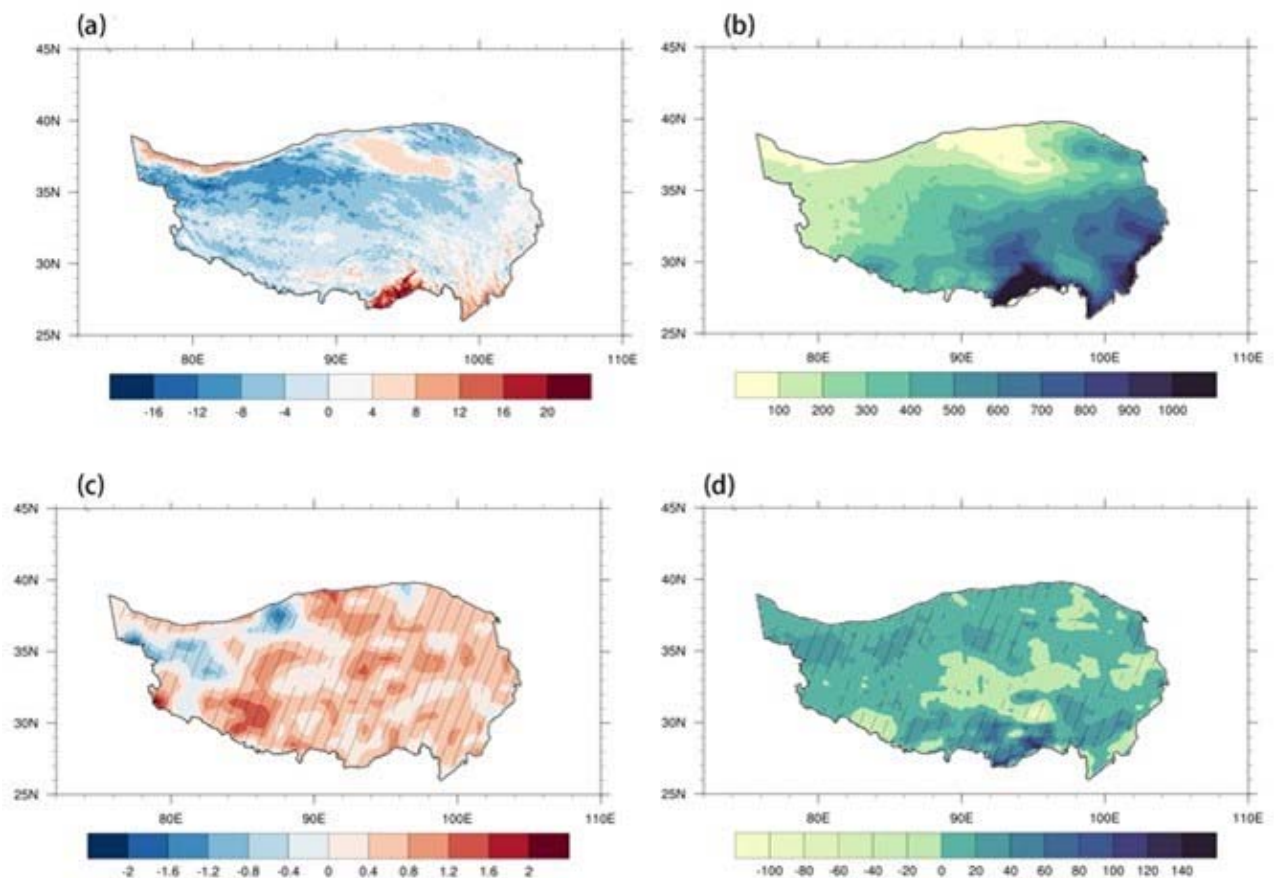


图 1.5.16 1980-2016 年青藏高原气候及气温和降水趋势

### ➤ 北麓河站

**青藏高原多年冻土区风火山滑坡发育机制研究：**青藏高原的多年冻土分布广泛，在高海拔和低纬度地区的面积超过 100 万平方公里。青藏高原是全球对气候变化最敏感的地区之一，也被认为是全球变暖的放大器。气温上升导致多年冻土温度和活动层厚度增加，在高原上，多年冻土退化尤为明显。与气候变暖相关的多年冻土退化可能伴随着热喀斯特过程，如热侵蚀和斜坡失稳，这些过程可能对建筑物或基础构成不可忽视的危害。世界各地的多年冻土区活动层滑脱、热融滑塌和热喀斯特湖普遍发育。活动层滑脱是一种浅层平移式滑坡，主要是整个活动层以多年冻土区上限为滑动面向下滑动。它们常发育在相对平缓的斜坡上，通常是由夏季高温或强降水引起。活动层滑脱会威胁基础设施，如房屋、道路和管道，并可通过增加溶质和有机物进入水文网络而改变水文环境。还通过暴露储存的有机碳的土壤于增加分解速度的环境条件中而影响局部和全球碳循环。若活动层滑脱在未来更频发将扩大这些影响。

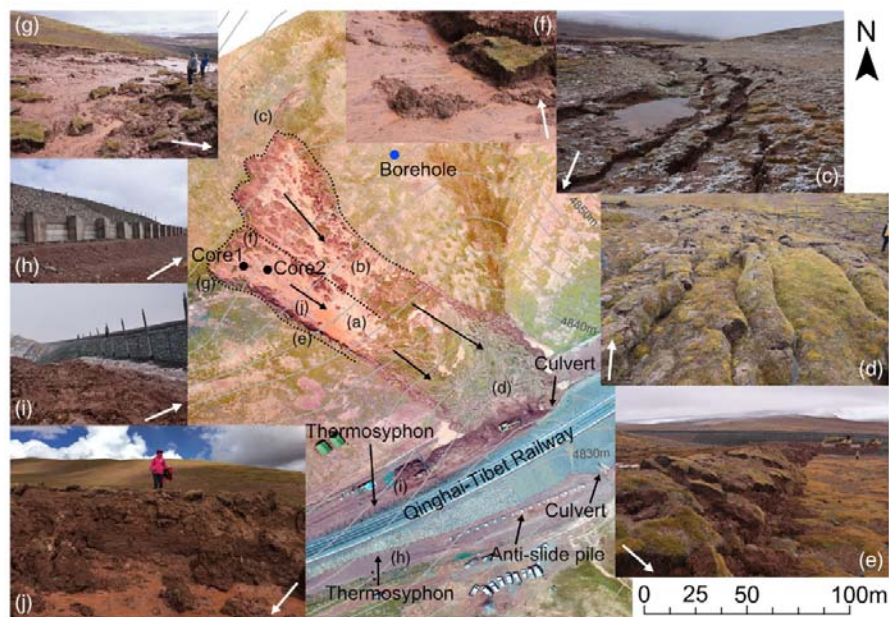


图 1.5.17 风火山滑坡的鸟瞰图及详细照片

青藏铁路和青藏公路沿线发育大量滑坡，滑坡对青藏铁路完整性及运营安全构成了直接威胁。因此，研究多年冻土滑坡的发育机制具有重要意义，有助于增加我们对多年冻土区活动层滑脱的理解，提高防灾减灾水平。本研究通过对气温、降水和地面温度等分析，试图解释引发青藏高原风火山一处典型滑坡发育的原因。主要结论如下：该滑坡主滑坡体的最小下坡速度约为 20 m/h，高于以往报道的数值，滑塌体撞到了青藏铁路路基上，但没有损坏铁路路基。通过对气温、降水和地面温度的分析表明，它可能是由以下因素引发：暖季末，热量损失进入永久冻土层，活动层底板向上冻结，导致富冰多年

冻土向上发展；发生滑坡年份（2018 年）和前几年的夏季降水量高于平均水平，导致高冰含量冻土的形成；2018 年地温的升高，且融化深度达到最大，在暖季节结束时活动层融化底板接近富冰冻土的顶部；一些其他因素可能引发滑坡，与青藏铁路相邻的坡脚处存在热管，可能导致铁路下方的永久冻土上限高于相邻的坡脚；铁路路基还阻挡从坡上向下流动的地下水流，从而提高地下水位，这两个因素都可能影响地下水上坡；此外，坡脚削坡修建青藏铁路时可能削弱了边坡底部土体的抗剪强度，也是影响整体边坡抗剪强度的一个因素。

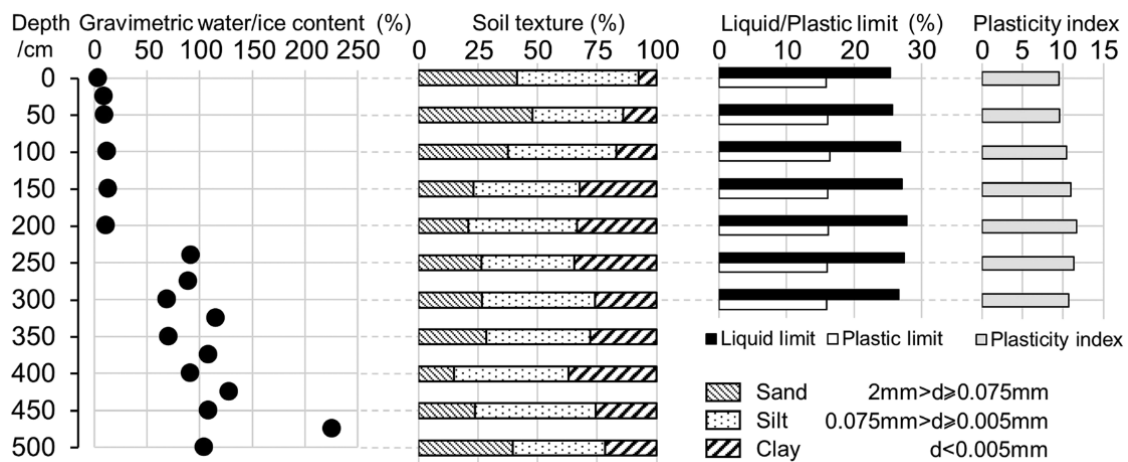


图 1.5.18 2021 年 12 月 25 日钻孔（位于图 6 Borehole）深度的重量水/冰含量、土壤质地、液体极限、塑性极限和塑性指数

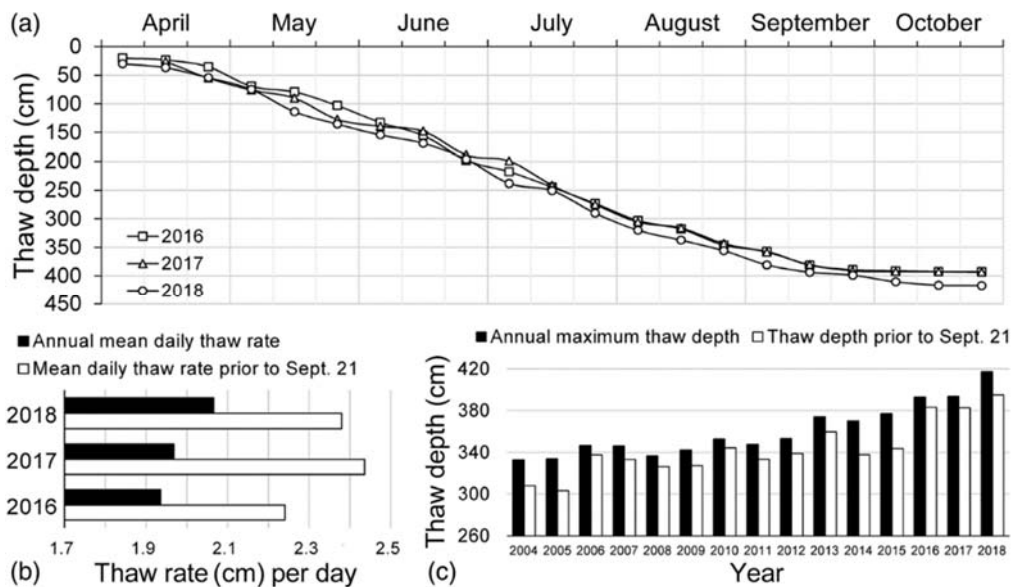


图 1.5.19 北麓河气象站活动层的融化速率和融化深度(a) 2016 年、2017 年和 2018 年 4 - 10 月融化深度的变化；(b) 2016- 2018，每年 9 月 21 日之前的年平均融化速率和日平均融化速率；(c) 2004 - 2018，每年 9 月 21 日前的年最大解冻深度和的解冻深度

**多年冻土区群桩基础稳定性试验研究：**目前桩基越来越多的被应用在多年冻土区，其中钻孔灌注桩应用最为广泛，为了研究冻土地区钻孔灌注桩热稳定性。以青藏高原多年冻土区中科院北麓河站综合楼桩基场地为实例，结合现场温度监测及数值模拟，探讨了多年冻土区群桩的热稳定性。本文所得主要结论如下：桩间距大于 2 倍热扰动半径，不会出现热扰动范围叠加产生的群桩热效应，小于 2 倍热扰动半径时，会发生群桩热效应。当发生群桩热效应时，桩周冻土温度明显高于无群桩热效应的桩周冻土温度，回冻过程更加缓慢，回冻时间会显著增加。通过数值模拟对不同条件下群桩的热扰动进行预测：现场高温冻土条件下，当桩间距是单桩热扰动半径的 1.65 倍时，出现群桩热效应，桩周冻土的回冻时间需要两年左右，是单桩回冻时间的 1.7 倍；低温冻土条件下当桩间距是单桩热扰动半径的 0.75 倍及 1.5 倍时，也会出现群桩热效应，桩周冻土的回冻时间分别需要 680 天和 800 天左右，是单桩回冻时间的 2.6 倍和 3.0 倍；大直径桩高温冻土条件下当桩间距是单桩热扰动半径的 1.76 倍左右时，桩周冻土回冻时间是单桩的 1.8 倍，当桩间距是单桩热扰动半径的 0.88 倍左右时，桩周冻土在十年内都未完全回冻。以上研究工作以 Monitoring and simulation of the thermal behavior of cast-in-place pile group foundations in permafrost regions 为题发表于 Cold Regions Science and Technology 上。

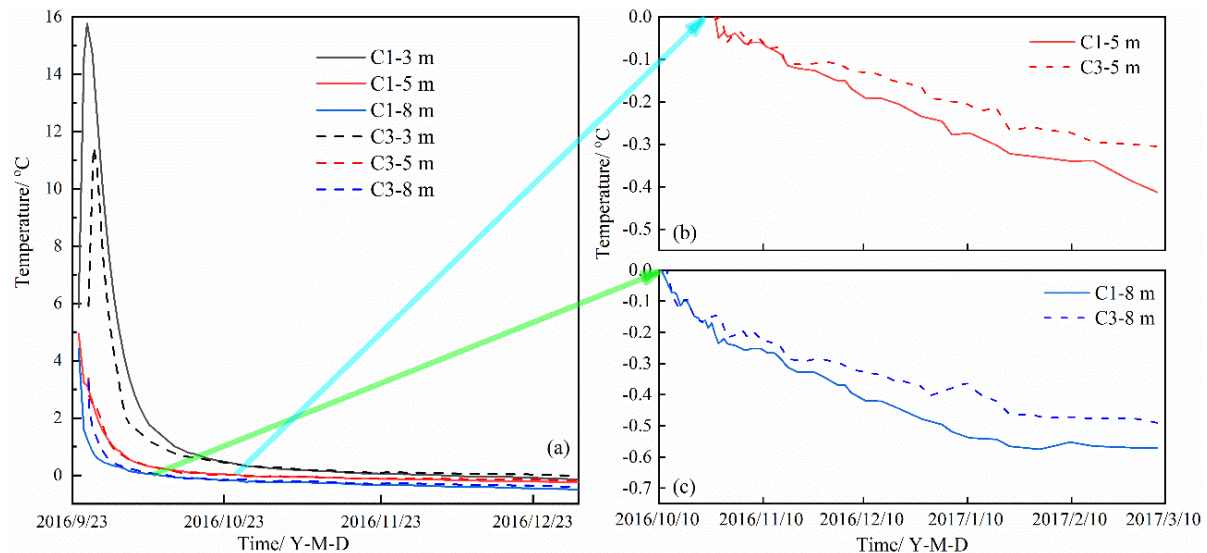


图 1.5.20 混凝土浇筑后桩基温度监测结果

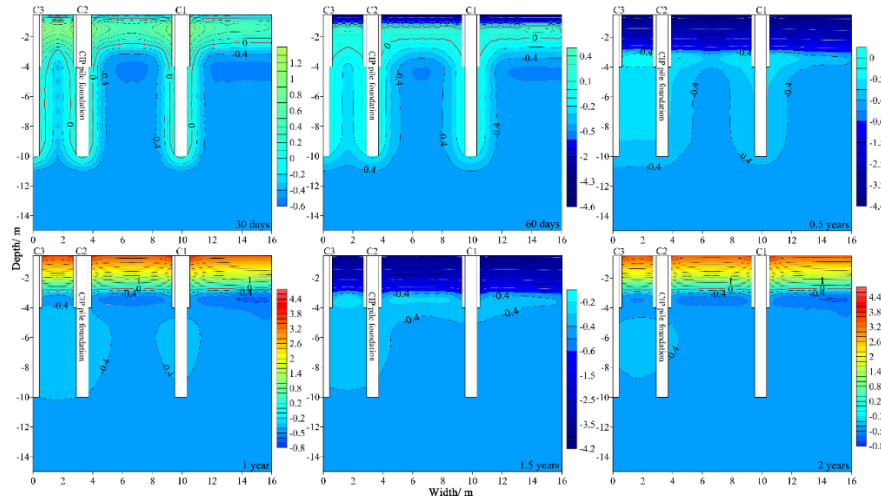


图 1.5.21 数值模拟监测结果

**青藏高原黄河源区多年冻土地下冰所指示的冻融历史研究：**理解历史时期多年冻土的演化过程对于过去冰缘环境的变化研究以及未来冻土变化预测意义重大。明晰青藏高原冻土演化以及冻融历史对于过去气候变化以环境演化分析意义重大。基于黄河源区泥炭丘和热融谷冻土剖面高分辨率地下冰同位素、溶解性有机碳以及冷生构造的分析，确定了地下冰的形成过程，最终基于同位素和水化学变化规律阐明了黄河源区浅层冻土的冻融历史。主要结论如下：（1）受补给来源、成冰过程以及土壤水文过程的影响，黄河源区两个剖面地下冰稳定同位素和水化学组成完全不同。另外，由于冻融循环和水分迁移过程的变化，地下冰同位素和水化学随深度变化显著。总体来讲，泥炭丘地下冰（P-1）来源于冷期同位素偏负的水体，而热融谷（P-2）地下冰来源于现代降水和气候温暖时期受降水补给的地下水。（2）构建了地下冰形成过程中同位素分馏模型。通过将实测数据与模型结果对比分析并确定了两个剖面浅层地下冰（NSGI）和深层地下冰（DLGI）的成冰机制和形成过程。结果显示，泥炭丘浅层地下冰的形成包括三个过程：0.7-1.6m，主要受活动层冻融循环的影响，1.6-2.2m，地下冰主要经历了水分迁移和慢速的平衡冻结成冰过程，2.2-2.8m，液态水快速原位冻结成冰；而泥炭丘深层地下冰主要形成于分凝过程。热融谷浅层地下冰主要是液态水快速冻结形成；而深层地下冰主要经历了水分迁移和慢速的平衡冻结成冰过程。（3）基于高分辨率地下冰同位素、溶解性有机碳以及冷生构造分析，确定了黄河源区 0-5m 冻土冻融历史。4.8-2.8m：受到气候冷暖交替影响，冻土经历了冻结-融化循环变化过程；2.8-2.2m：早期暖湿气候导致冻土融化以及季风的盛行，土壤内季风降水和冻土融水混合，在随后的冷期，冻结成冰；2.2-1.6m：气候冷干期，冻土持续加积；1.6-0.7m：水文开放环境下，以现代冻融循环过程为主。

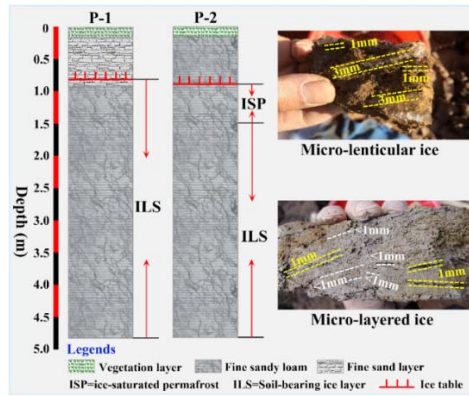


图 1.5.22 黄河源区冻土冷生构造和典型地下冰特征

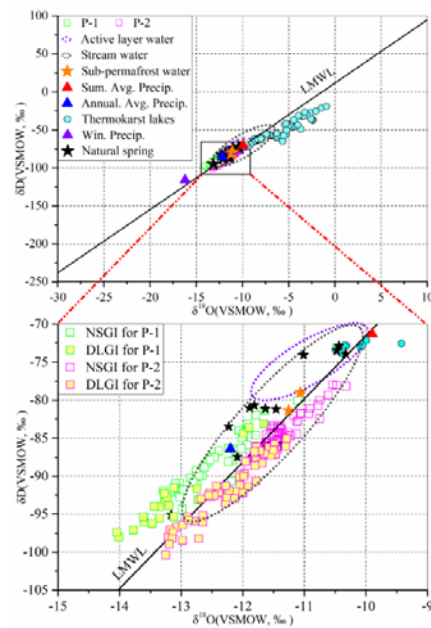


图 1.5.23 地下冰  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta\text{D}$  分布特征及其与其他水体的对比

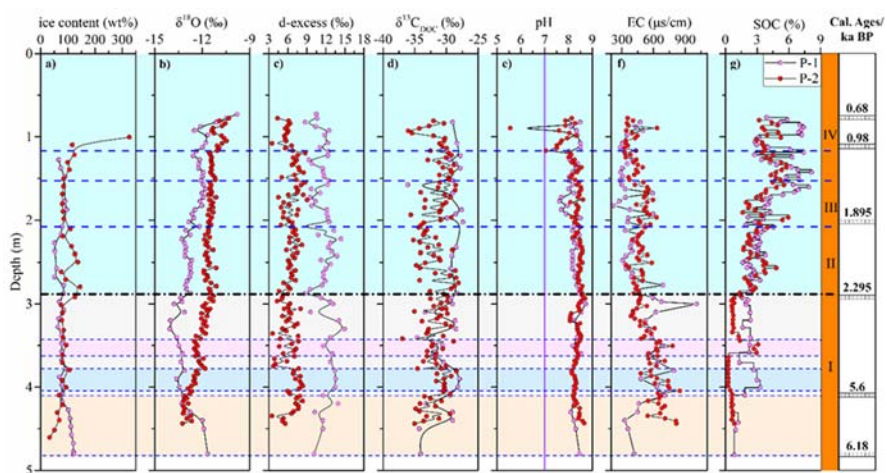


图 1.5.14 含冰量、地下冰同位素、水化学以及 DOC 和 SOC 所指示的冻融历史

## 四、试验示范

### ➤ 天山冰川站

2022 年，天山冰川站开展了新疆阿勒泰清河县青格里狼山滑雪场雪场规划考察和阿勒泰将军山滑雪场雪务保障工作。同时，继续参与阿勒泰地区克兰河流域、布尔津河流域优质冰川水开发利用项目，在分析不同位置水质变化特征及原因的基础上，考虑自然环境、交通条件等因素，为冰川水厂的选址提供了科技支撑，形成了“科研院所+政府+企业”三方合作模式，为地区的产业脱贫注入新活力。此外，也参与了 2022(中国·阿勒泰)大健康论坛，为阿勒泰发展大健康产业助力。



图 4.1 阿勒泰将军山滑雪场雪务保障



图 4.2 2022（中国·阿勒泰）大健康论坛主旨报告

### 冰川保护模式推广

将传统冰川学（物质平衡等）和应用材料科学结合起来，形成新的学科交叉；将科学和技术结合，转化为工程实践应用于冰川，即应用微观尺度的“地球工程学”实现减缓区域气候变暖。结合地面三维激光和无人机获取的数字高程模型、反照率以及气象数据，定量评估了三种不同覆盖材料下减缓冰川消融的效果。发现覆盖材料的冰川区域能够减缓 29%~56%，提出的利用覆盖材料减缓冰川消融的方法，为缓解和适应气候变化的决策提供了科学实践依据，同时为解决普通民众和相关政府部门普遍关注的冰川消融问题提供了借鉴。

### 工程应用

2023 年在新疆交规院横向课题”G219 西天山特长隧道（昭苏-温宿）冰川穿越区与公路建设相互影响专题研究“支持下，重点开展了隧道穿越区（南疆西天山托木尔峰）的冰川基础信息野外考察，对以木扎尔特冰川为代表的隧道口冰川情况进行实地考察，取得冰川厚度、探测冰川表碛区准确分布边界，以及冰下地形信息、基岩物质组成等信息，为隧道选线施工提供准确数据支撑。



图 4.3 达古冰川减缓冰川消融试验



图 4.4 G219 西天山特长隧道川越冰川区示意图

### ➤ 三江源站

**国家公园大型野生食草动物优先保护区和功能区域规划：**三江源国家公园作为我国首批设立的面积最大且海拔最高的国家公园，是青藏高原生物多样性大尺度保护的典型代表。园区内保持着野生动物重要栖息地的原真性和完整性，其中藏羚羊、野牦牛、藏野驴、藏原羚等特有珍稀大型食草野生动物分布范围广且种群数量大，对维持整个生态系统的多样性和稳定性具有关键作用。随着保护力度加强，大型食草野生动物种群数量稳定增加，部分物种濒危等级下降，与家畜争草等矛盾冲突日益不断，对草地生态系统的影响日益加剧。在兼顾野生动物保护和草地载畜量的情景下，规划大型食草野生动物优先保护区是三江源国家公园生物多样性保护和可持续发展的重要环节。

整合近几年的三江源内野生动物的调查监测结果，共记录获得了藏羚、藏野驴、岩羊、藏原羚、野牦牛和白唇鹿 6 种大型食草野生动物分布的空间位点 1434 个，并获取了与上述物种密切相关的 79 个环境变量，利用最大熵生态位模型分析 6 个物种的适宜空间分布，采用保护等级策略和草地承载力策略共同规划三江源区域大型食草野生动物优先保护区。结果表明，6 种大型食草野生动物优先保护区主要位于三江源国家公园内及其周边区域，其环境特征为海拔 4000–5000 m，年平均温度低于  $-3^{\circ}\text{C}$ ，年降水量 200–400 mm 的高寒草甸、高寒草原和未利用土地。基于保护等级和载畜量不同策略，三江源国家公园 6 种大型食草野生动物高度适宜、中度适宜和低度适宜面积占比均高于三江源

自然保护区。大型食草野生动物优先保护区在空间不连续，未完全纳入三江源国家公园（试点）范围内，生态系统代表性、原真性和完整性不够突出。因此建议在三江源国家公园体制试点范围的基础上进行功能区域优化及边界范围调整，完整纳入长江、黄河、澜沧江所有源头区域，增强了各功能分区的整体性和联通性。研究结果为三江源国家公园总体规划-范围边界、功能区划优化实施方案提供直接数据。

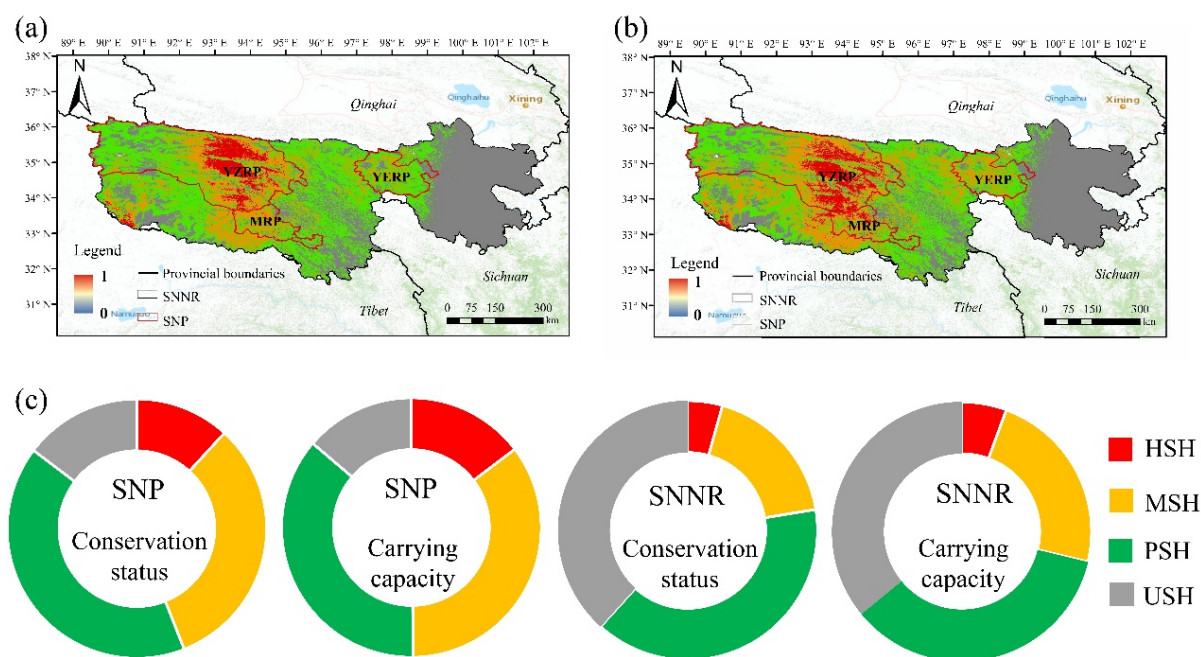


图 4.5 基于保护等级和载畜量不同策略的三江源区域大型食草野生动物优先保育区分析

**三江源-黄河源区域野生动物与家畜承载力评估：**草地约占全球陆地表面面积的 30-40%，是陆地生态系统的重要组成部分，它既是野生动物赖以生存的自然栖息地，又是畜牧业发展的物质保障。然而，以往对草地承载力的研究大多只考虑家畜，而忽略了野生动物。三江源地处青藏高原腹地，野生动物资源丰富，是中国重要的生态安全屏障和重要的天然牧场。近年来，随着保护力度的加大，野生动物数量稳步增加，引发了人们对草地超载的担忧。草地超载会引起区域生态系统失衡，生物多样性丧失，生态系统功能下降，从而威胁区域生态安全。草畜平衡已成为三江源地区生态保护和可持续发展的重要因素。

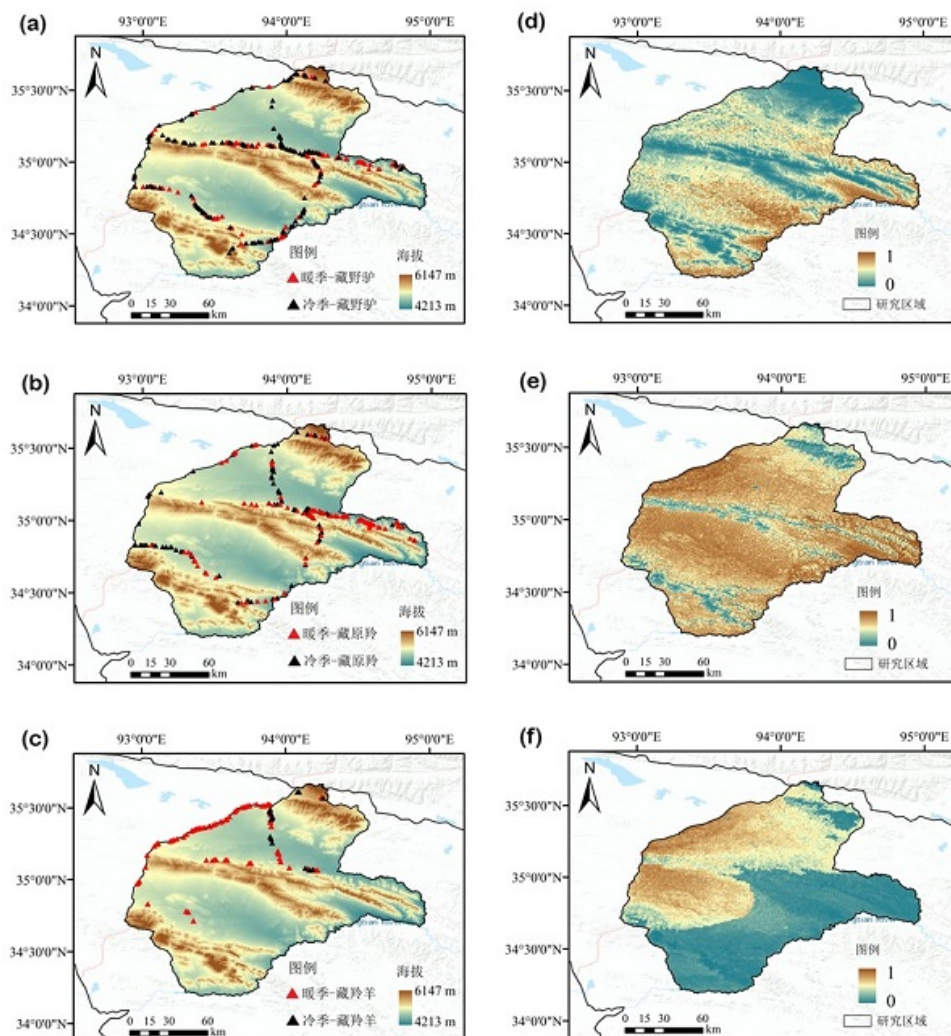


图 4.6 曲麻河乡主要大型野生食草动物分布（左侧）及生境适宜性分析（右侧）

以三江源地区曲麻河乡为研究区域，采用遥感-过程耦合模型对 2020 年草地可食牧草及其粗蛋白质产量进行了估算，进而计算了该区域的草地理论承载力。根据调查和生境适应性分析获得大型野生食草动物藏野驴、藏原羚和藏羚的种群数量和家畜数量，估算了现实载畜量。承载压力指数用该区域的现实载畜量和理论承载力的比值进行计算。结果表明，可食牧草理论承载力为 274,800 标准羊单位 (SHU)，低于该区域粗蛋白理论承载力，因此，可食牧草承载力更符合可持续发展目标。野生大型食草动物贡献了约 20,700 SHU，而家畜贡献了 256,500 SHU。如果只考虑牲畜，承载压力指数为 0.93，不超载；如果同时考虑野生动物和家畜，承载压力指数为 1.01，略有超载。野生动物对承载压力的贡献约为 7.5%，家畜对承载压力的贡献远大于野生食草动物，但在估算草地承载压力时仍需考虑野生动物。

本研究提出了兼顾野生动物和家畜的承载压力指数，分别评估了以“食物”和“营

养”为基础的理论承载力，分析了野生动物对草地承载压力的影响。由于该地区野生动物分布较多，不考虑野生动物会低估现实载畜量，导致承载压力指数被低估。研究结果建议将综合野生动物和家畜种群数量的草地承载压力指数用于未来青藏高原草地生态系统和自然保护地的管理，这对保护青藏高原脆弱草地生态系统和维持生物多样性以及社会经济的可持续发展具有重要意义。

**三江源国家公园外围支撑区优质饲草基地建植及草产品加工技术应用示范：**针对三江源国家公园高寒草地牧草现存量不足以承载野生食草动物繁衍及放牧家畜生产需求，导致野生食草动物生存空间受限，威胁国家公园草地生态功能提升和可持续协同发展的问题，集成示范高产优质饲草种植及草产品加工技术。

依托青海贵南草业、青海现代草业、诺颖等企业、专业合作社，在青海省海南州完成高产优质燕麦、小黑麦与箭筈豌豆等一年生优质高产饲草基地 1.5 万亩，垂穗披碱草、中华羊茅、草地早熟禾等多年生人工草地 4.5 万亩；累计生产一年生优质牧草 7500 吨、多年生牧草 4800 吨。基于三江源国家高原外围支撑区规模化高产优质饲草种植和草产品加工技术示范，为三江源国家公园草畜平衡调控和抵抗雪灾提供饲草保障，有效减轻野生动物栖息地放牧扰动，科技支撑三江源国家公园生态系统原真性、完整性保护。



图 4.7 外围支撑区优质饲草建植及草产品加工示范（海南州贵南县）

#### ➤ 那曲站（青藏所）

**嘎尔德有机牧业生产系统关键技术体系研发：**2021 年那曲站在那曲市色尼区人民政府的支持下，与那曲市色尼区西藏嘎尔德生态牧业发展有限公司（简称“嘎尔德”）合作开展了人工草地优化种植模式、那曲牦牛奶、绒体质增效技术研发等相关科研活动，目前已取得了阶段性成果：1）筛选出了产量高、品质好适合本地条件的牧草品种，并研究了各种水肥处理对牧草产量的影响（图 4.8,4.9）；2）研究了蛋白质饲料与多汁饲料补饲对牦牛奶产量及品质的影响（图 4.10-4.12）。同时，在现有研究的基础上，我们与嘎

尔德公司联合北京林业大学草业学院李耀明副教授和西藏低碳草牧科技有限公司正在积极申报中央引导地方科技发展资金项目区域创新体系建设项目，拟研究那曲牦牛乳生产性能主要影响因素及生态草种快速繁育技术，具体内容包括低碳型人工草地管理措施的研究、冬季母牦牛饲养营养管理对奶产量和品质及生产性能的影响、那曲牦牛乳发酵的优质乳酸菌制品研发、提高优势乡土草种种子生产能力及快速繁育技术研发、试验平台建设和优化生产模式示范与推广。

此外，2022 年 4 月那曲站斯确多吉研究员与北京林业大学草业学院李耀明副教授、西藏自治区职业技术学院刘海聪教授和南京农业大学邵涛教授合作在那曲高寒牧区（嘎尔德）开展生态草牧业科技示范（中国科学院战略性先导科技专项 A 类一子课题），具体包括高寒牧区牧草品种引进筛选和抗逆栽培技术研究与示范、青干草调制技术研究与示范、混合青贮技术研究与示范、牦牛乳绒生产饲草配方技术研究与示范等四方面内容。

目前，已初步形成了“地方出题，那曲站答题”的长效科研合作机制和技术研发模式，为当地龙头企业有机、低碳、可持续发展提供技术支撑。

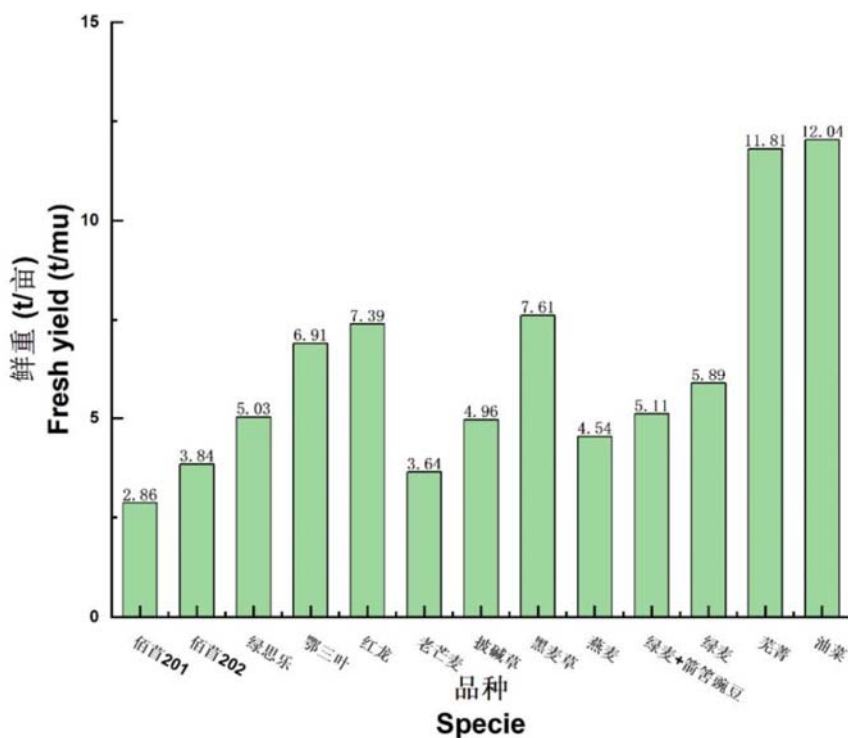


图 4.8 不同品种牧草的亩产量

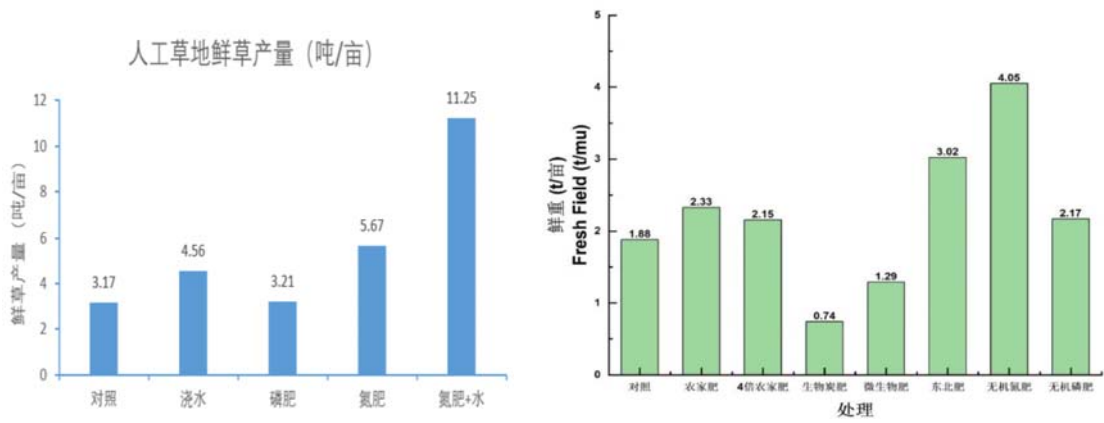


图 4.9 水肥处理对牧草亩产量的影响

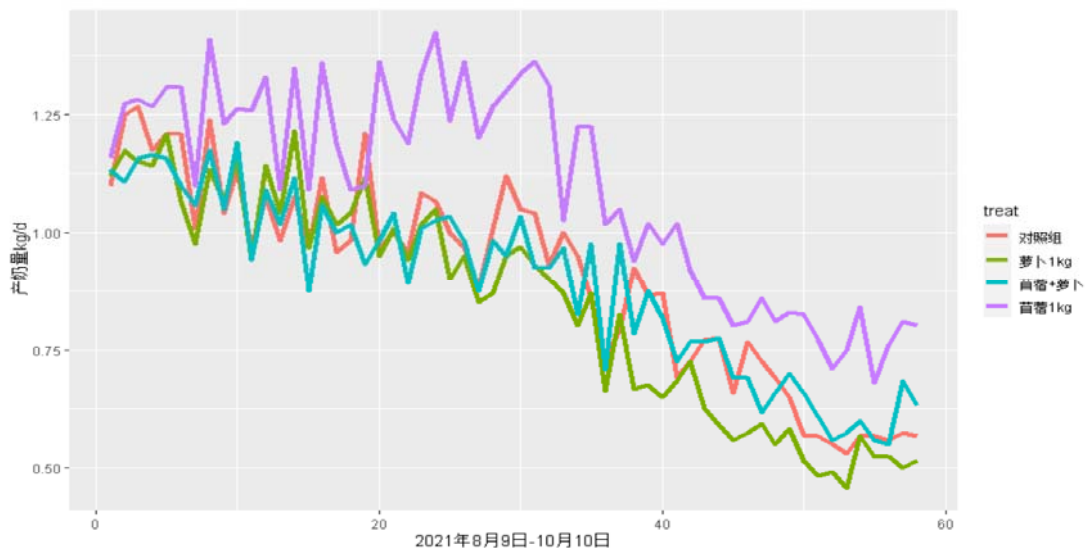


图 4.10 不同补饲处理对牦牛奶产量的影响

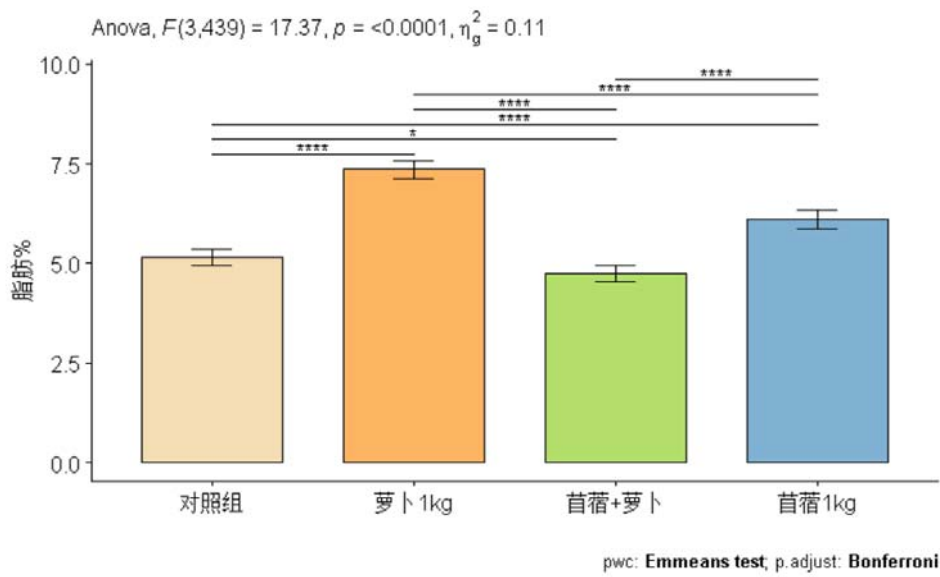


图 4.11 不同补饲处理对牦牛奶脂肪含量的影响

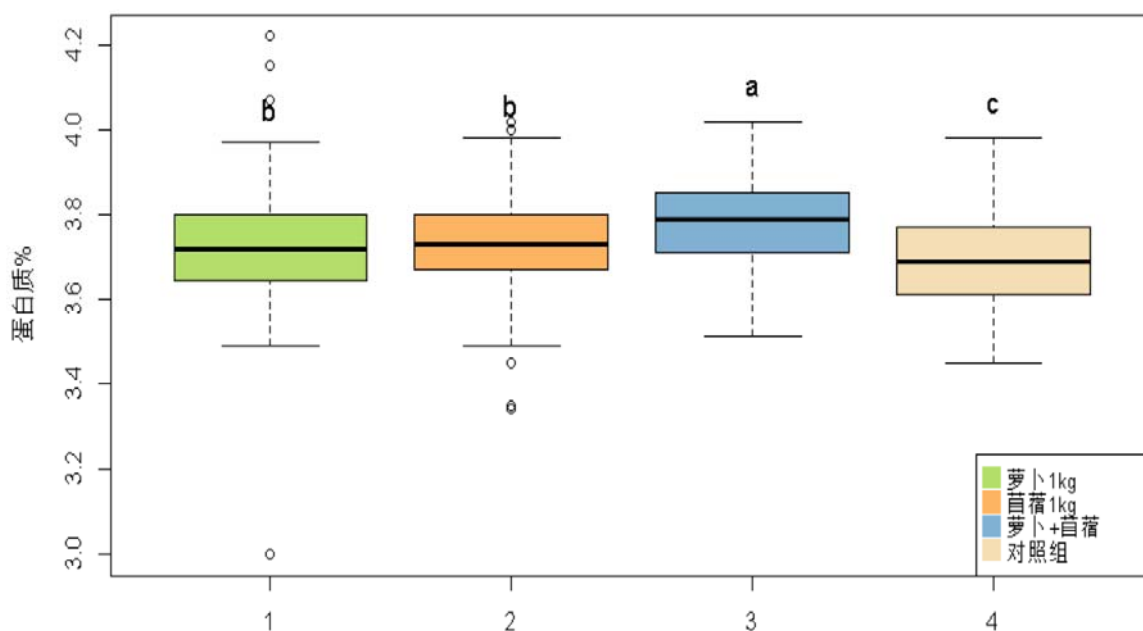


图 4.12 不同补饲处理对牦牛奶蛋白质含量的影响

#### ➤ 北麓河站

**青藏高原多年冻土区滑坡监测技术示范：**近年来，青藏高原暖湿化趋势增强，青藏铁路、公路、输油管道等线性工程建设、人类活动对冻土的扰动明显，青藏高原多年冻土区滑坡逐渐增多，对既有工程构筑物的安全、铁路安全运营造成极大威胁，同时对生态环境造成破坏。野外调查发现青藏铁路、公路工程沿线热融滑坡导致多处输电线杆倾斜甚至倒塌，滑塌体损害路基、堵塞桥涵、威胁铁路运营安全。

为解决上述问题，本监测技术体系可提供一种全天候、实时动态的多物理场的多年冻土区滑坡监测体系，其特征在於：该监测体系包括设在距离滑坡体的稳定地面上的 GNSS 基准点以及通过远程信号传输系统连接在一起的 GNSS 位移监测仪、土壤含水率监测仪、数个温度传感器和人机交互平台端；沿所述滑坡体的后缘、中部、前缘以及所述 GNSS 基准点分别布设所述 GNSS 位移监测仪；所述土壤含水率监测仪的探头布设在所述滑坡体的后缘活动层范围内不同深度处；所述温度传感器沿所述滑坡体的中部纵深布设；临近每个所述的 GNSS 位移监测仪处、土壤含水率监测仪和温度传感器设有为其供电的太阳能板套件及蓄电池。

本发明与现有技术相比具有以下优点：（1）集成了 GNSS 位移监测仪、土壤含水率监测仪及地温监测设备，构建了集三维变形场、水分场、温度场于一体可以获取实时数据的多物理场冻土滑坡监测体系，与现有技术相比具有成本低、准确、监测参数更为完整的特点，提供一套更为完善的监测技术体系。（2）综合考虑了 GNSS 位移监测仪、土

壤含水率监测仪及温度传感器的监测结果，不仅实现了对多年冻土区滑坡的实时监测，而且准确构建多年冻土区滑坡启滑和破坏阈值的基础，从而提高了判断多年冻土区滑坡启滑的准确性，加深多年冻土区滑坡体蠕滑过程、规律、机理的研究和多年冻土区滑坡灾害的预警、防治。

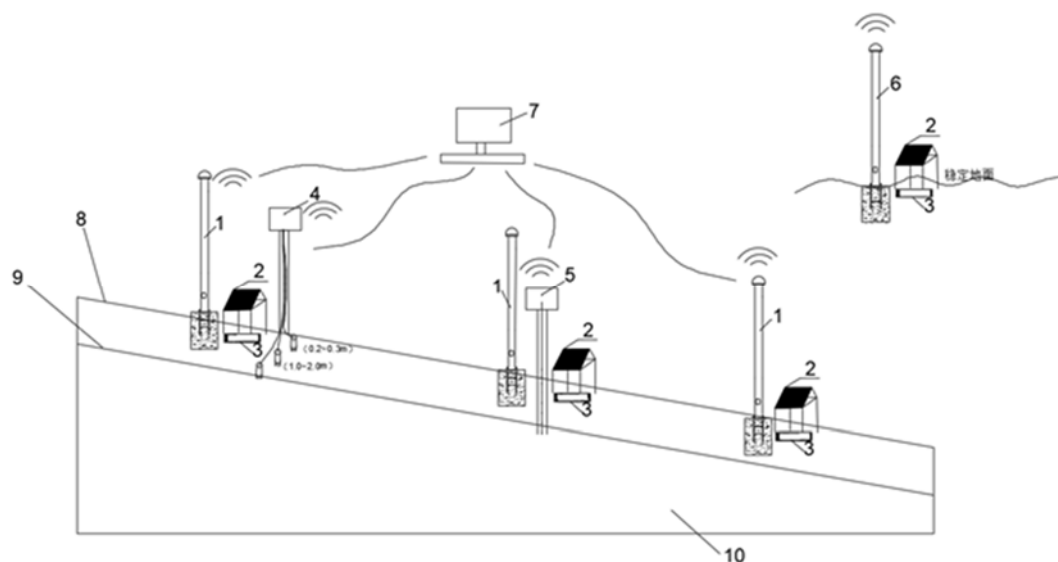


图 4.13 多年冻土区滑坡监测系统布设示意图与现场布设图

## 五、公众服务

### ➤ 天山冰川站

#### 《人民日报》以“攀高寒冰川 探应用前沿”为题报道王飞腾研究员

2022年5月27日《人民日报》文化版块报道了天山冰川站王飞腾研究员在冰川研究方面的科研工作。行走雪域冰川10余年，天山冰川站80后研究员王飞腾有过不少难忘的经历：在冰川表面铺盖隔热反光材料，探寻冰川保护路径；王飞腾瞄准了太阳辐射管理方法，在冰川表面铺盖隔热反光材料，给冰川“盖被子”，以达到减少太阳辐射、降低温度、减缓消融的目的。经过两个多月的尝试，发现“盖被子”区域的冰体消融速度明显减慢，与未覆盖区域的冰体相比，平均减缓消融厚度达1米。将冰雪基础研究与应用研究相贯通，率领团队为北京冬奥会造出合格冰状雪；从野外科考到滑雪场地，从自然降雪到人工造雪，王飞腾团队面临新的考验。经历上百次试验，终于造出合格的冰状雪，并研发了雪质检测设备。开展科普讲座，延伸拓展冰雪应用研究。从事科研工作多年，不断探索发现始终是激励王飞腾前进的动力。“冬奥会让冰雪‘冷资源’成了‘热经济’，我相信冰雪研究这张‘冷板凳’，也可以坐出‘新热点’。”王飞腾说。

#### 《新华社》报道李传金“三赴南极再相逢 他以科考护南极”

2022年6月5日新华社报道：2021年11月5日，“雪龙”号极地科学考察船搭载天山冰川站李传金研究员和150多名队员从上海起航，前往南极执行中国第38次考察任务，此前，他还执行过中国第29次、第32次南极考察任务。2022年4月底，历时170多天的中国第38次南极科学考察圆满结束。李传金也顺利完成大洋考察任务。这次南极之行，李传金主要聚焦表层海水采集、大气观测等内容。随他而返的还有他采集的200公斤环南极不同地点的海水、裸露基岩区沉积物和生物地球化学样品。这些样品对分析和了解关键地壳元素的生物地球化学循环至关重要。李传金说，南极科考是他一生的荣耀，再苦再累都值得。“在南极，危险与艰苦并存，但付出与收获相伴”。

### ➤ 珠峰站

#### 支撑和服务“巅峰使命2022——珠峰极高海拔地区综合科学考察研究”

2022年5月在西藏自治区开展了“巅峰使命2022——珠峰极高海拔地区综合科学考察研究”首次突破了8000米以上海拔高度，对人类来说是一项具有挑战性的壮举。本专题在珠峰大本营和珠峰站利用高空无线电探空、测风雷达、微波辐射计、大气湍流观测系统、大气边界层塔和自动气象站等目前世界上最先进的大气观测仪器完成了大气

垂直结构探测和极端天气过程观测任务，成功保障了登山队员顺利冲顶以及高海拔地区自动气象站的布设工作。该项工作在央视新闻、人民资讯、凤凰网、光明网、新华社、人民日报、中国气象报社等多家新闻媒体和公众号中进行广泛报道。此次科考初步成果以新闻稿形式发表在《Advances in Atmospheric Sciences》上 (Ma et al., 2022)。

### ➤ 格尔木站

#### 大学生创新实践训练计划来站考察

2022 年 5 月 28 日-29 日，我站特别研究助理陈杰博士、兰州理工大学项目协助指导老师郝君明博士、来自兰州理工大学和兰州大学的“大学生创新实践训练计划”（简称：科创计划）本科生（刘振源、梁胤祺、宋鹏月、韩文杰、郝大鹏、彭子棋等）、以及我站博士研究生尚程鹏和姜佩卿一行 12 人赴马街山多年冻土与环境综合观测场及附近一处滑坡发生地点进行了野外调查和现场采样工作。在马街山多年冻土与环境综合观测场，我站人员对科创计划本科生详细介绍了各种观测仪器的作用和观测指标及数据传输过程，使他们了解了多年冻土区风温湿压常规气象和物候监测过程。大家依据“科创计划”项目任务，开展了植被根系数据采集、冻土形变观测和滑坡要素观测。

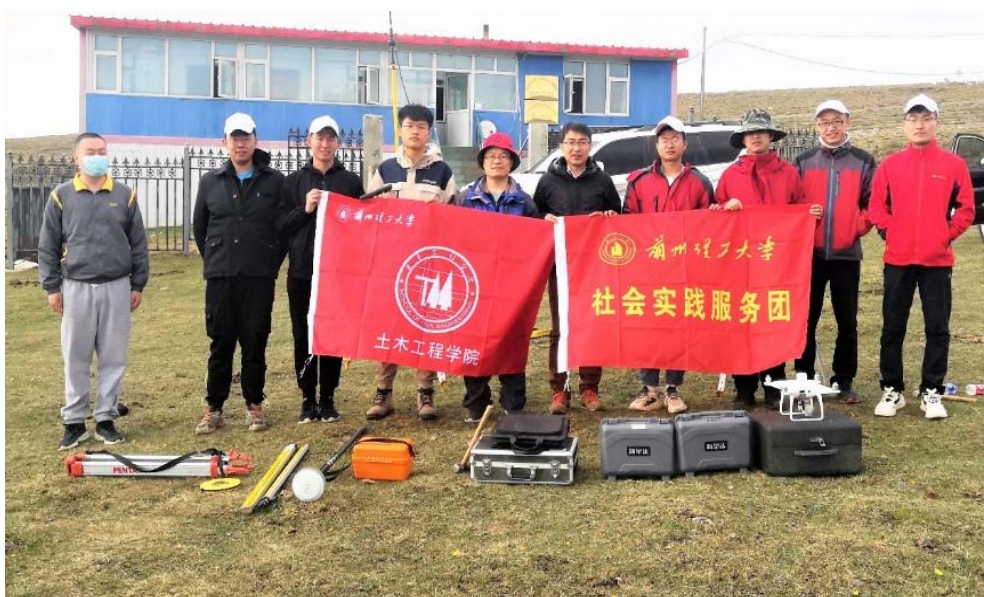


图 5.1 野外考察人员在马街山多年冻土与环境综合观测场合影

### ➤ 慕士塔格站

台站在 2022 年接待了来自全国的研学队员，向队员们介绍了室内外观测仪器和当地自然环境特征。



图 5.2 台站研学活动照片

### ➤ 玉龙雪山站

2022 年间，玉龙雪山站承担了中国极地研究中心 39 次南极昆仑站考察预选队员适应性训练活动。同时，与武汉大学中国南极测绘研究中心联合举办了“冰川夏令营”活动。通过以上活动，加深了在三方在冰川实时监测、物质平衡研究等国际前沿研究方面的认识，为下一步深度合作与交流奠定了基础。本站承担了中国地理学会山地分会年会（线下参会人员 100 余人）。期间，参会人员考察玉龙雪山站及其冰川观测网络。通过此次会议，为从事山地科学科研人员介绍了山地冰冻圈科学研究方向，加深了山地科学与冰冻圈科学的认识，促进了两学科间的有机衔接。本年度，接待大学生暑期实践实习和科技夏令营 200 多人次。通过以上活动，大大提高了公众对冰冻圈与环境的认知程度及气候变化、冰川保护相关方面知识的了解。

### ➤ 那曲站（青藏所）

**参加那曲市 2022 年全国“科技活动周”启动仪式：**5 月 21 日，那曲站工作人员一行 4 人参加了那曲市 2022 年全国“科技活动周”启动仪式，副站长杨智永应那曲市科技局邀请在启动仪式上介绍了那曲站的建站意义、发展历程、野外试验平台、科研成果与服务地方等基本情况，表达了希望与那曲市各级政府机构在科研项目和科学传播与应用等方面进行深度合作的愿望，担负起那曲站作为国家级野外台站应有的社会责任，为地方社会的可持续发展贡献一份力量。同时，强调了那曲站作为全国和西藏自治区科普教育基地欢迎各界人士莅临指导。



图 5.3 那曲市 2022 年全国“科技活动周”启动仪式

**在站开展科普活动：**为了普及科学知识，加强台站与当地社会公众的交流与联系。5月22日，那曲站邀请那曲市色尼区小学30余名学生和家长到站做客、参观。大家一起观看了电视公开课《青藏高原的形成与隆升》（2022-04-02期开讲啦），了解到千百万元的板块碰撞才造就了“世界屋脊”青藏高原。随后工作人员带领学生参观了台站实验室和科研观测试验场地与设施，介绍了那曲站围绕高寒草地生态系统开展的水、土、气、生等观测内容，引导青少年学生感悟科学的魅力，培养科学兴趣和科学精神。



图 5.4 在那曲站开展科普活动

**西藏自治区中小學生 2022 年暑期研学实践活动：**为了普及科学知识，引导青少年学生感悟科学的魅力，培养科学兴趣，同时助力“双减”工作。07月12日，中国科学院青藏高原研究所拉萨部与那曲市科学技术协会在西藏那曲高寒草地生态系统国家野外科学观测研究站（以下简称“那曲站”）联合开展西藏自治区中小學生 2022 年暑期研学实践活动，邀请那曲市色尼区中学20名学生到那曲站做客、参观。中国科学院青

藏高原研究所拉萨部主任王君波研究员、野外台站办公室主任王永杰高级工程师、拉萨部科普业务主管燕妮老师、那曲市科学技术协会程自强科长、那曲站副站长杨智永等参加了活动。

那曲站观测主管次仁曲宗向同学们详细地介绍了那曲站的科学观测内容、科研工作进展、驻站工作人员生活情况以及园区未来发展规划等基本情况。随后，大家一起观看了电视公开课《青藏高原的形成与隆升》，了解到千百万年的板块碰撞才造就了“世界屋脊”青藏高原；在站研究生张苏人通过一个小的控制实验引导同学们了解植物光合作用的基本原理以及光合强度与光照或二氧化碳条件的关系；最后参观了台站实验室和科研观测试验场地与设施，了解部分监测高寒草地生态系统过程和功能的方法。



图 5.5 色尼区 20 名中学生参观那曲站



图 5.6 西藏自治区中小學生 2022 年暑期研学实践活动

### ➤ 那曲站（西北院）

**大学生和研究生暑期社会实践活动：**2022 年 6 月至 8 月的暑假期间，分别来自兰州大学大气科学学院、资源环境学院和物理科学与技术学院以及浙江大学地球科学学院和成都信息工程大学大气科学学院的 16 名大学生和研究生在那曲站开展了暑期社会实践活动，不同学校 and 不同学科的知识背景充分发挥了各成员的专业知识以及推动成员从学科交叉的角度解决问题，更深刻地理解高寒地区气候特征及其变化。

前期，学生们根据那曲站专业老师的指导，提前准备好衣物和药品，购买了保险，以便适应高寒环境，应对可能发生的身体不良反应。提前了解了那曲站的观测内容与研究方向，通过查阅文献了解了青藏高原的气候变化、冰川消退、土壤发育等环境状况，了解了当地藏族文化。

中期，同学们实地和线上实践相结合，了解了那曲站历史沿革及构成，初步掌握高寒草地生态系统演变规律与生物多样性保育、高寒草地对全球变化响应和适应机理研究、高寒草地对全球变化的影响格局及其驱动机制、高寒草地优化管理和区域可持续发展模式与范围等研究方向。由站内工作人员讲解同学们的相关问题，阐明高寒生态系统退化原因和过程；发展适应性高寒草地管理、退化草地恢复和重建、以及资源综合利用和保护等技术体系，并进行示范。让同学们对那曲站所针对草地退化、气候变化响应和生态系统管理等重大问题有更好的理解。

后期，同学们对本次暑期实践所收获的数据、资料、技术方法以及心得做出总结。利用我站提供的那曲地区 1954-2012 年气候相关数据，采用数学统计方法进行量化分析，结合 Excle、MATLAB、ArcGIS 等有关软件，根据自己所学的知识以及对数据的分析，撰写并完成了实践报告和学术论文“基本气象要素观测方法及西藏那曲气候分析”。

同学们通过各种方法及查阅文献和资料对那曲站所提供的数据进行了一定的分析，更直观的体会了那曲地区的气候特征，对该问题有了自己的思考。团队间的交流越发频繁，提升了团队意识，达到了暑期社会实践活动的目的。



图 5.7 那曲站暑期社会实践现场活动（2022 年 6 月 10-30 日）

## 六、年度数据统计

## 1. 论著统计

| 年份     | 类型   | SCI           |                       |            |     |       | EI | CSCD | 会议论文 | 其他 | 论文总数 | 著作 |
|--------|------|---------------|-----------------------|------------|-----|-------|----|------|------|----|------|----|
|        | 影响因子 | IF $\geq$ 4.0 | 4.0 $>$ IF $\geq$ 2.0 | IF $<$ 2.0 | 小计  | 平均 IF |    |      |      |    |      |    |
| 2022 年 | 第一标注 | 197           | 63                    | 11         | 271 | 6.53  | 1  | 55   | 1    | 4  | 334  | 6  |
|        | 第二标注 | 47            | 24                    | 2          | 73  | 6.45  | 1  | 15   |      | 1  | 90   | 3  |
|        | 其他标注 | 43            | 15                    | 2          | 60  | 5.74  |    | 16   | 2    | 1  | 77   | 4  |
|        | 总计   | 287           | 102                   | 15         | 404 | 18.72 | 2  | 86   | 3    | 6  | 501  | 13 |
| 2021 年 | 第一标注 | 121           | 64                    | 33         | 218 | 4.918 | 1  | 75   |      | 11 | 305  | 13 |
|        | 第二标注 | 29            | 18                    | 14         | 61  | 4.619 | 1  | 22   |      | 5  | 89   | 1  |
|        | 其他标注 | 109           | 25                    | 7          | 141 | 5.666 | 3  | 34   |      | 22 | 200  | 2  |
|        | 总计   | 259           | 107                   | 54         | 420 | 5.068 | 5  | 131  |      | 38 | 594  | 16 |
| 2020 年 | 第一标注 | 115           | 107                   | 37         | 259 | 3.993 |    | 104  |      |    | 363  |    |
|        | 第二标注 | 26            | 13                    | 6          | 45  | 4.847 |    | 29   |      |    | 74   |    |
|        | 其他标注 | 64            | 31                    | 30         | 125 | 5.001 | 2  | 13   | 3    | 2  | 145  | 17 |
|        | 总计   | 205           | 151                   | 73         | 429 | 4.614 | 2  | 146  | 3    | 2  | 582  | 17 |
| 2019 年 | 第一标注 | 81            | 67                    | 40         | 188 | 3.988 | 7  | 100  | 3    | 5  | 303  | 9  |
|        | 第二标注 | 30            | 17                    | 8          | 55  | 4.33  |    | 34   | 1    | 1  | 91   | 3  |
|        | 其他标注 | 57            | 43                    | 24         | 124 | 4.681 |    | 25   |      |    | 149  | 2  |
|        | 总计   | 168           | 127                   | 72         | 367 | 4.333 | 7  | 159  | 4    | 6  | 543  | 14 |
| 2018 年 | 第一标注 | 37            | 85                    | 40         | 162 | 3.09  |    | 97   | 1    | 3  | 263  | 7  |
|        | 第二标注 | 11            | 17                    | 5          | 33  | 3.359 |    | 23   |      |    | 56   |    |
|        | 其他标注 | 37            | 39                    | 12         | 88  | 3.95  |    | 18   |      |    | 106  |    |
|        | 总计   | 85            | 141                   | 57         | 283 | 3.466 |    | 138  | 1    | 3  | 425  | 7  |
| 2017 年 | 第一标注 | 49            | 94                    | 55         | 198 | 3.252 | 2  | 108  | 2    | 15 | 326  | 15 |
|        | 第二标注 | 9             | 14                    | 3          | 26  | 5.021 | 1  | 24   |      |    | 51   |    |
|        | 其他标注 | 17            | 20                    | 1          | 38  | 4.502 |    | 5    |      | 1  | 43   | 2  |
|        | 总计   | 75            | 128                   | 59         | 262 | 4.258 | 3  | 137  | 2    | 16 | 420  | 17 |

## 2. 在研项目统计

| 基金类别 |            | 2022 年(经费单位: 万元, 下同) |          |          | 2021 年(经费单位: 万元, 下同) |          |          | 2020 年(经费单位: 万元, 下同) |          |         |
|------|------------|----------------------|----------|----------|----------------------|----------|----------|----------------------|----------|---------|
|      |            | 项目数                  | 总经费      | 当年经费     | 项目数                  | 总经费      | 当年经费     | 项目数                  | 总经费      | 当年经费    |
| 基金委  | 面上项目       | 44                   | 2603     | 206.349  | 57                   | 3520.32  | 749.56   | 72                   | 4657.4   | 864.5   |
|      | 地区科学       | 8                    | 1402     | 196      | 2                    | 562      | 349      | 0                    | 0        | 0       |
|      | 杰青         | 1                    | 400      |          | 7                    | 2227     | 175      | 5                    | 1850     | 0       |
|      | 青年基金       | 15                   | 1086     | 122.4    | 18                   | 449      | 99.6     | 34                   | 853      | 53.5    |
|      | 优秀青年       | 3                    | 520      | 120      | 1                    | 120      |          | 2                    | 270      | 0       |
|      | 重大项目       | 1                    | 368.5    | 184.25   | 3                    | 3860.5   | 984.81   | 6                    | 1862.5   | 484.3   |
|      | 重大研究计划     |                      |          |          | 5                    | 902      | 457.4    | 2                    | 435      | 128     |
|      | 重点项目       | 9                    | 2293.6   | 258      | 9                    | 2927     | 1048.02  | 16                   | 4052     | 1365.4  |
|      | 其他         | 6                    | 2751     | 450      | 6                    | 892.25   | 157.35   | 11                   | 1534.6   | 586.7   |
|      | 小计         | 87                   | 11424.1  | 1536.999 | 108                  | 15460.07 | 4020.74  | 148                  | 15514.5  | 3482.4  |
| 科技部  | 973/重点研发计划 | 10                   | 10069.42 | 1195.45  | 24                   | 15173.68 | 2593.96  | 45                   | 20553.9  | 6697    |
|      | 科技支撑计划     |                      |          |          |                      |          |          | 6                    | 13056.4  | 2703.6  |
|      | 重大科学研究计划   | 2                    | 200      | 35       | 5                    | 2048.04  | 359.43   | 5                    | 5258     | 1123.6  |
|      | 国家基础性工作专项  | 8                    | 1852.96  | 487.86   | 1                    | 271      | 68       | 2                    | 69       | 16      |
|      | 其他         | 13                   | 25368.09 | 1975     | 16                   | 33010.49 | 3113.46  | 10                   | 8769     | 702     |
|      | 小计         | 33                   | 37490.47 | 3693.31  | 46                   | 50503.21 | 6134.85  | 68                   | 47706.3  | 11242.2 |
| 中科院  | 百人计划       |                      |          |          | 1                    | 200      | 200      | 1                    | 200      | 200     |
|      | 西部系列       | 6                    | 885      | 75       | 7                    | 695      | 225      | 6                    | 495      | 85      |
|      | 创新系列       |                      |          |          |                      |          |          |                      |          |         |
|      | 重点部署项目     |                      |          |          |                      |          |          | 5                    | 1240     | 240     |
|      | STS 计划     |                      |          |          | 1                    | 250      | 100      |                      |          |         |
|      | 先导专项       | 22                   | 22738.67 | 797.66   | 32                   | 28065.49 | 1910.91  | 37                   | 24799    | 2566.4  |
|      | 其他         | 8                    | 2020     | 129      | 9                    | 4001.76  | 737.22   | 35                   | 8648.9   | 1208.2  |
|      | 小计         | 36                   | 25643.67 | 1001.66  | 50                   | 33212.25 | 3173.13  | 84                   | 35382.9  | 4299.6  |
| 其他   | 博士后科学基金    | 3                    | 34       | 0        | 5                    | 47       | 34       | 4                    | 26       | 16      |
|      | 国际合作       |                      |          |          | 9                    | 992.42   | 294.47   | 1                    | 4192     |         |
|      | 各级实验室开放基金  | 17                   | 163      | 24.5     | 7                    | 48.2     | 48.2     | 4                    | 71.2     | 71.2    |
|      | 所级         |                      |          |          | 1                    | 10       |          | 1                    | 10       | 10      |
|      | 地方         | 27                   | 1140.28  | 304.5    | 21                   | 1720.3   | 314.3    | 49                   | 9022.6   | 3873.4  |
|      | 其他         | 41                   | 11833.25 | 2980.97  | 35                   | 8788.36  | 1789.16  | 27                   | 2113     | 674.4   |
|      | 小计         | 88                   | 13170.53 | 3309.97  | 78                   | 11606.28 | 2480.13  | 86                   | 15434.8  | 4645    |
| 总计   |            | 244                  | 87728.77 | 9541.939 | 282                  | 110781.8 | 15808.85 | 386                  | 114038.5 | 23669.2 |

## 六、年度数据统计

| 基金类别 |            | 2019 年 |         |         | 2018 年 |         |        | 2017 年 |         |         |
|------|------------|--------|---------|---------|--------|---------|--------|--------|---------|---------|
|      |            | 项目数    | 总经费     | 当年经费    | 项目数    | 总经费     | 当年经费   | 项目数    | 总经费     | 当年经费    |
| 基金委  | 面上项目       | 71     | 4780.7  | 851.11  | 64     | 4605.7  | 659    | 56     | 4449.28 | 710.42  |
|      | 地区科学       |        |         |         | 0      | 0       | 0      | 2      | 89      | 44.5    |
|      | 杰青         | 3      | 1100    |         | 4      | 1550    | 0      | 2      | 800     |         |
|      | 青年基金       | 31     | 796     | 113.64  | 28     | 720     | 102.2  | 15     | 398.25  | 60.25   |
|      | 优秀青年       | 1      | 150     | 78      | 1      | 130     | 0      | 1      | 130     |         |
|      | 重大项目       | 3      | 914.04  | 204.46  | 3      | 780     | 247    | 8      | 1537    | 307     |
|      | 重大研究计划     | 9      | 1366    | 399.55  | 12     | 1665    | 80     | 5      | 695.8   | 20      |
|      | 重点项目       | 8      | 2444    | 666.04  | 8      | 2447.3  | 12.4   | 5      | 1406.28 | 150     |
|      | 其他         | 1      | 550     | 105     | 9      | 988.3   | 216    | 7      | 690     | 238.4   |
|      | 小计         | 127    | 12100.7 | 2417.8  | 129    | 12886.3 | 1316.6 | 101    | 10195.6 | 1530.57 |
| 科技部  | 973/重点研发计划 | 43     | 9165.25 | 1683.86 | 28     | 6463.4  | 503.3  | 4      | 1231.5  | 211.5   |
|      | 科技支撑计划     | 1      | 45      | 16      |        |         |        | 3      | 657     |         |
|      | 重大科学研究计划   |        |         |         | 5      | 1299.6  | 230.1  | 6      | 1904    | 36      |
|      | 国家基础性工作专项  | 2      | 63      |         | 3      | 219     | 36     | 1      | 33      |         |
|      | 其他         | 11     | 8898    | 1503    | 6      | 1287.7  | 585.2  | 23     | 9160.6  | 1412.32 |
|      | 小计         | 57     | 18171.3 | 3202.86 | 42     | 9269.7  | 1354.6 | 37     | 12986.1 | 1659.82 |
| 中科院  | 百人计划       | 4      | 1400    | 440     | 2      | 470     | 40     | 2      | 330     | 60      |
|      | 西部系列       | 1      | 50      | 20      | 1      | 20      | 20     | 10     | 145     | 52      |
|      | 创新系列       |        |         |         | 1      | 80      | 20     | 1      | 80      | 20      |
|      | 重点部署项目     | 9      | 4155    | 926     | 6      | 1400    | 130    | 9      | 1735    | 320     |
|      | STS 计划     | 3      | 1288    |         | 2      | 1048    | 28.8   | 2      | 310     | 60      |
|      | 先导专项       | 37     | 18406.6 | 2892.39 | 17     | 9017.6  | 1873.3 | 5      | 5       |         |
|      | 其他         | 44     | 10656.8 | 2159.37 | 15     | 2739    | 731.2  | 13     | 3002    | 1124.8  |
|      | 小计         | 98     | 35956.3 | 6437.76 | 44     | 14774.6 | 2843.3 | 42     | 5607    | 1636.8  |
| 其他   | 博士后科学基金    | 1      | 5       |         | 2      | 28      | 0      | 2      | 30      | 10      |
|      | 国际合作       | 6      | 828     | 164.18  | 10     | 3098.1  | 520.5  | 6      | 2499.3  | 490.5   |
|      | 各级实验室开放基金  |        |         |         | 1      | 10      | 0      |        |         |         |
|      | 所级         | 2      | 195     | 50      | 7      | 545     | 77     | 8      | 476     | 62      |
|      | 地方         | 61     | 9825.83 | 2426.45 | 36     | 5696.8  | 2222.1 | 29     | 4645.7  | 1075.6  |
|      | 其他         | 10     | 813.55  | 109     | 8      | 1242.5  | 583.3  | 8      | 1711.39 | 400.95  |
|      | 小计         | 80     | 11667.4 | 2749.63 | 64     | 10620.4 | 3402.9 | 53     | 9362.39 | 2039.05 |
| 总计   |            | 362    | 77895.7 | 14808.1 | 279    | 47551   | 8917.4 | 233    | 38151.1 | 6866.24 |

## 3. 新增项目统计

| 基金类别 |            | 2022 年 |         | 2021 年 |          | 2020 年 |         | 2019 年 |         | 2018 年 |         | 2017 年 |         |
|------|------------|--------|---------|--------|----------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
|      |            | 项目数    | 总经费     | 项目数    | 总经费      | 项目数    | 总经费     | 项目数    | 总经费     | 项目数    | 总经费     | 项目数    | 总经费     |
| 基金委  | 面上项目       | 12     | 613.18  | 15     | 824      | 26     | 1402.8  | 25     | 1583.8  | 24     | 1483    | 20     | 1370    |
|      | 地区科学       |        |         |        |          |        |         |        |         |        |         | 2      | 56      |
|      | 杰青         |        |         |        |          | 2      | 800     | 1      | 400     |        |         | 3      | 1150    |
|      | 青年基金       | 8      | 230     | 11     | 306      | 17     | 361     | 4      | 105     | 11     | 287     | 17     | 446     |
|      | 优秀青年       |        |         | 2      | 350      |        |         | 2      | 240     | 1      | 150     |        |         |
|      | 重大项目       |        |         |        |          |        |         | 1      | 368.5   | 1      | 184     | 2      | 490     |
|      | 重大研究计划     |        |         |        |          |        |         | 1      | 307     | 1      | 320     | 1      | 300     |
|      | 重点项目       | 3      | 816     | 2      | 577      | 3      | 319     | 2      | 604     | 4      | 1240    | 1      | 330     |
|      | 其他         | 2      | 595     | 5      | 1090     | 11     | 2089.6  |        |         | 5      | 1300    | 5      | 244     |
|      | 小计         | 25     | 2254.18 | 35     | 3147     | 59     | 4972.4  | 36     | 3608.3  | 47     | 4964    | 51     | 4386    |
| 科技部  | 973/重点研发计划 | 2      | 649     | 4      | 865.4    | 4      | 9522    | 4      | 1976    | 3      | 483.8   | 6      | 1076.1  |
|      | 科技支撑计划     |        |         |        |          | 2      | 798.6   |        |         |        |         |        |         |
|      | 重大科学研究计划   |        |         | 2      | 422      |        |         |        |         | 1      | 543     | 1      | 70      |
|      | 国家基础性工作专项  | 6      | 1258.96 |        |          | 1      | 271     | 1      | 283     | 2      | 56      | 1      | 30      |
|      | 其他         | 2      | 1445    | 1      | 230      | 1      | 1800    | 7      | 13535.6 | 5      | 280     | 4      | 235     |
|      | 小计         | 10     | 3352.96 | 7      | 1517.4   | 8      | 12391.6 | 12     | 15794.6 | 11     | 1362.8  | 12     | 1411.1  |
| 中科院  | 百人计划       |        |         | 1      | 200      |        |         |        |         |        |         |        |         |
|      | 西部系列       | 1      | 50      | 4      | 546      | 2      | 400     |        |         | 3      | 145     |        |         |
|      | 创新系列       |        |         |        |          |        |         |        |         | 1      | 80      |        |         |
|      | 重点部署项目     |        |         |        |          |        |         |        |         |        |         | 1      | 300     |
|      | STS 计划     |        |         | 1      | 250      | 1      | 200     | 2      | 375     | 3      | 144     | 2      | 1140    |
|      | 先导专项       |        |         |        |          | 1      | 8       | 4      | 920.4   | 19     | 12913.5 | 1      | 566     |
|      | 其他         | 3      | 550     | 4      | 360      | 14     | 1147    | 11     | 5895    | 20     | 2892.2  | 5      | 702.15  |
|      | 小计         | 3      | 600     | 10     | 1356     | 18     | 1755    | 17     | 7190.4  | 46     | 16174.7 | 9      | 2708.15 |
| 其他   | 博士后科学基金    |        |         | 2      | 26       | 1      | 8       | 2      | 16      | 1      | 8       |        |         |
|      | 国际合作       |        |         | 2      | 255      | 2      | 499     |        |         | 2      | 275     | 3      | 102     |
|      | 各级实验室开放基金  | 3      | 36      | 16     | 148.2    | 7      | 81.2    |        |         |        |         |        |         |
|      | 所级         |        |         |        |          |        |         | 2      | 41      | 1      | 10      | 4      | 165     |
|      | 地方         | 17     | 836     | 28     | 4969.58  | 47     | 3314.3  | 26     | 6223.56 | 18     | 3669.6  | 6      | 2402    |
|      | 其他         | 31     | 2677.29 | 34     | 3742.58  | 7      | 481.5   | 19     | 1420.05 | 4      | 710.5   | 9      | 1723    |
|      | 小计         | 50     | 3549.29 | 82     | 9141.36  | 64     | 4384    | 49     | 7700.61 | 26     | 4673.1  | 22     | 4392    |
| 总计   |            | 84     | 9756.43 | 134    | 15161.76 | 149    | 23503   | 114    | 34293.9 | 130    | 27174.6 | 94     | 12897.3 |

## 4. 结题项目统计

| 基金类别 |            | 2022 年 |          |         | 2021 年 |         |          | 2020 年  |        |         |
|------|------------|--------|----------|---------|--------|---------|----------|---------|--------|---------|
|      |            | 项目数    | 总经费      | 当年经费    | 项目数    | 总经费     | 当年经费     | 项目数     | 总经费    | 当年经费    |
| 基金委  | 面上项目       | 16     | 812.5    | 20      | 21     | 1432.1  | 115.3    | 13      | 702    | 10      |
|      | 地区科学       |        |          |         |        |         |          |         |        |         |
|      | 杰青         | 3      | 1020     |         |        |         |          |         |        |         |
|      | 青年基金       | 9      | 213      | 18      | 8      | 202.84  | 10.1     | 7       | 171    | 8       |
|      | 优秀青年       | 2      | 240      |         | 1      | 150     |          |         |        |         |
|      | 重大项目       | 3      | 615      | 35      | 1      | 425     |          |         |        |         |
|      | 重大研究计划     | 3      | 467      | 382.4   | 3      | 380     |          | 3       | 164    |         |
|      | 重点项目       | 2      | 663      | 5       | 2      | 610     |          | 5       | 1421   |         |
|      | 其他         | 2      | 225      | 5       | 2      | 103.2   |          | 7       | 287    | 25.5    |
|      | 小计         | 40     | 4255.5   | 465.4   | 38     | 3303.14 | 125.4    | 35      | 2745   | 43.5    |
| 科技部  | 973/重点研发计划 | 12     | 10755.32 | 509.44  | 7      | 3843    | 425      | 6       | 1156.5 | 33      |
|      | 科技支撑计划     |        |          |         |        |         |          |         |        |         |
|      | 重大科学研究计划   | 1      | 739.7    | 75.59   |        |         |          | 1       | 50     |         |
|      | 国家基础性工作专项  | 1      | 271      | 106     |        |         |          |         |        |         |
|      | 其他         | 2      | 715.41   |         |        |         |          | 2       | 55     |         |
|      | 小计         | 16     | 12481.5  | 691.03  | 7      | 3843    | 425      | 9       | 1261.5 | 33      |
| 中科院  | 百人计划       | 1      | 200      |         | 1      |         |          |         |        |         |
|      | 西部系列       | 2      | 215      | 5       | 2      | 65      | 5        |         |        |         |
|      | 创新系列       |        |          |         |        |         |          |         |        |         |
|      | 重点部署项目     |        |          |         | 4      | 640     | 88       | 4       | 840    | 65      |
|      | STS 计划     |        |          |         | 1      | 35      | 10.5     |         |        |         |
|      | 先导专项       | 9      | 9221.79  | 930.86  |        |         |          | 2       | 150    |         |
|      | 其他         | 5      | 1725     | 30      | 1      | 80      |          | 15      | 3080.7 | 487     |
|      | 小计         | 17     | 11361.79 | 1165.86 | 9      | 820     | 103.5    | 21      | 4070.7 | 552     |
| 其他   | 博士后科学基金    | 1      | 8        |         | 1      | 8       | 8        |         |        |         |
|      | 国际合作       |        |          |         |        |         |          |         |        |         |
|      | 各级实验室开放基金  | 4      | 31       | 21      | 3      | 26      | 10       |         |        |         |
|      | 所级         | 1      | 10       |         |        |         |          | 1       | 135    | 30      |
|      | 地方         | 5      | 265.2    |         | 6      | 2239    | 857.5    | 17      | 2180   | 494     |
|      | 其他         | 15     | 811.06   | 110     | 16     | 2345    | 950.15   | 8       | 391.2  | 140.3   |
|      | 小计         | 26     | 1125.26  | 131     | 26     | 4618    | 1825.65  | 26      | 2706.2 | 664.3   |
| 总计   |            | 99     | 29224.05 | 2453.29 | 91     | 80      | 12584.14 | 2479.55 | 91     | 10783.4 |

## 六、年度数据统计

| 基金类别 |            | 2019 年 |         |         | 2018 年 |         |         | 2017 年 |        |         |
|------|------------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|--------|---------|
|      |            | 项目数    | 总经费     | 当年经费    | 项目数    | 总经费     | 当年经费    | 项目数    | 总经费    | 当年经费    |
| 基金委  | 面上项目       | 28     | 2037.7  | 53.4    | 18     | 1634    | 97.5    | 12     | 940    | 130     |
|      | 地区科学       |        |         |         |        |         |         |        |        |         |
|      | 杰青         | 1      | 400     |         |        |         |         |        |        |         |
|      | 青年基金       | 14     | 347     | 23      | 12     | 677     |         | 10     | 202    | 71.4    |
|      | 优秀青年       | 1      | 200     |         |        |         |         |        |        |         |
|      | 重大项目       | 1      | 50      |         | 1      | 340     |         |        |        |         |
|      | 重大研究计划     | 4      | 215     |         | 5      | 462.6   | 50      | 2      | 200    | 30      |
|      | 重点项目       | 2      | 680     | 101.16  | 3      | 640     | 84      | 2      | 155    |         |
|      | 其他         |        |         |         | 2      | 140     |         | 2      | 320    | 20      |
|      | 小计         | 51     | 3929.7  | 177.56  | 41     | 3893.6  | 231.5   | 28     | 1817   | 251.4   |
| 科技部  | 973/重点研发计划 | 2      | 1031    |         | 2      | 713.5   |         | 6      | 1950   | 335     |
|      | 科技支撑计划     |        |         |         |        |         |         | 4      | 792    | 20      |
|      | 重大科学研究计划   |        |         |         |        |         |         | 2      | 854    | 20      |
|      | 国家基础性工作专项  |        |         |         |        |         |         | 1      | 1355   |         |
|      | 其他         |        |         |         | 3      | 288.4   | 28.4    | 1      | 456    |         |
|      | 小计         | 2      | 1031    | 0       | 5      | 1001.9  | 28.4    | 14     | 5407   | 375     |
| 中科院  | 百人计划       | 2      | 570     |         | 3      | 450     |         | 1      | 150    | 50      |
|      | 西部系列       | 2      | 30      | 10      | 4      | 65      | 35      | 2      | 30     | 5       |
|      | 创新系列       |        |         |         | 1      | 100     | 50      |        |        |         |
|      | 重点部署项目     |        |         |         |        |         |         | 3      | 385    |         |
|      | STS 计划     | 1      | 200     | 64      | 1      | 100     |         | 1      | 540    | 180     |
|      | 先导专项       | 5      | 729     | 6       | 3      | 6.33    | 6.33    | 9      | 1243.4 | 11      |
|      | 其他         | 8      | 535.16  | 9.9     | 6      | 1030    | 185     | 2      | 130    | 30      |
|      | 小计         | 18     | 2064.16 | 89.9    | 18     | 1751.33 | 265     | 18     | 2478.4 | 276     |
| 其他   | 博士后科学基金    |        |         |         | 1      | 2.5     |         | 5      | 8      | 5       |
|      | 国际合作       |        |         |         | 1      | 45      | 45      | 2      | 320    | 15      |
|      | 各级实验室开放基金  |        |         |         | 4      | 86      | 31      |        |        |         |
|      | 所级         | 2      | 21      | 15      | 1      | 10      |         |        |        |         |
|      | 地方         | 13     | 2536    | 50      | 12     | 3094    | 116.7   | 13     | 1672   | 101     |
|      | 其他         | 4      | 581.5   | 168.5   | 6      | 1809    | 795.2   | 10     | 338    | 70      |
|      | 小计         | 19     | 3138.5  | 233.5   | 25     | 5046.5  | 987.9   | 30     | 2338   | 191     |
| 总计   |            |        | 90      | 10163.4 | 500.96 | 89      | 11693.3 | 1512.8 | 90     | 12040.4 |

## 5. 人才培养统计

| 类别     |    | 毕业研究生 | 在站研究生 | 客座研究生 | 小计  |
|--------|----|-------|-------|-------|-----|
| 2022 年 | 硕士 | 39    | 101   | 36    | 176 |
|        | 博士 | 87    | 161   | 18    | 266 |
|        | 总数 | 126   | 262   | 54    | 442 |
| 2021 年 | 硕士 | 39    | 98    | 37    | 174 |
|        | 博士 | 66    | 162   | 12    | 240 |
|        | 总数 | 105   | 260   | 49    | 414 |
| 2020 年 | 硕士 | 53    | 132   | 30    | 215 |
|        | 博士 | 52    | 179   | 20    | 251 |
|        | 总数 | 105   | 311   | 50    | 466 |
| 2019 年 | 硕士 | 56    | 140   | 33    | 229 |
|        | 博士 | 36    | 189   | 21    | 246 |
|        | 总数 | 92    | 329   | 54    | 475 |
| 2018 年 | 硕士 | 46    | 99    | 20    | 165 |
|        | 博士 | 48    | 118   | 39    | 205 |
|        | 总数 | 94    | 217   | 59    | 370 |
| 2017 年 | 硕士 | 37    | 108   | 28    | 173 |
|        | 博士 | 28    | 102   | 18    | 148 |
|        | 总数 | 65    | 210   | 46    | 321 |
| 2016 年 | 硕士 | 32    | 97    | 38    | 167 |
|        | 博士 | 21    | 108   | 22    | 151 |
|        | 总数 | 53    | 203   | 60    | 318 |
| 2015 年 | 硕士 | 33    | 104   | 36    | 173 |
|        | 博士 | 37    | 106   | 17    | 160 |
|        | 总数 | 70    | 210   | 53    | 333 |

## 七、大事记

|      |                                                                                                                                                                        |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 月  | <ul style="list-style-type: none"><li>- 北麓河站俞祁浩研究员获中国大坝工程学会 2021 年度科技进步一等奖</li><li>- 山冰川站承担的国家重大研发计划项目所取得的“北京 2022 年冬奥会赛事用雪保障”成果入选中科院 2021 年度 14 个科技创新亮点成果之一</li></ul> |
| 4 月  | <ul style="list-style-type: none"><li>- 科技部、北京冬奥组委和首钢大跳台等单位向天山冰川站服务保障 2022 年北京冬奥会雪务保障科研团队发来感谢信</li></ul>                                                               |
| 5 月  | <ul style="list-style-type: none"><li>- 珠峰站服务支撑的二次科考“巅峰使命”珠峰科考顺利登顶，创造多个世界记录</li></ul>                                                                                  |
| 11 月 | <ul style="list-style-type: none"><li>- 那曲市人大常委会主任才仁郎公一行到访那曲站（青藏所）</li></ul>                                                                                           |

## 八、组织机构

### 1. 第一届科学委员会

|      |     |                |
|------|-----|----------------|
| 主 任： | 姚檀栋 | 中科院青藏高原研究所     |
| 委 员： | 于贵瑞 | 中科院地理科学与资源研究所  |
|      | 朱立平 | 中科院青藏高原研究所     |
|      | 赵新全 | 中科院西北高原生物研究所   |
|      | 李忠勤 | 中科院西北生态环境资源研究院 |
|      | 张宪洲 | 中科院地理科学与资源研究所  |
|      | 赵 林 | 南京信息工程大学       |
|      | 周凌晞 | 中国气象科学研究院      |
|      | 康世昌 | 中科院西北生态环境资源研究院 |
| 秘书长： | 朱立平 | 中科院青藏高原研究所     |

### 2. 网络综合中心

主 任：朱立平，010-84097093，lpzhu@itpcas.ac.cn

## 九、联系方式

|     | 野外台站               | 依托单位             | 站 长  | 联系电话         | 电子邮箱                      |
|-----|--------------------|------------------|------|--------------|---------------------------|
| 1   | 纳木错多圈层综合观测研究站      | 中科院青藏高原研究所       | 王君波  | 010-84097055 | wangjb@itpcas.ac.cn       |
| 2   | 珠穆朗玛大气与环境综合观测研究站   | 中科院青藏高原研究所       | 马伟强  | 13261930368  | wqma@itpcas.ac.cn         |
| 3   | 藏北高原草地生态系统研究站      | 中科院地理科学与资源研究所    | 张扬建  | 010-64889703 | zhangyj@igsnr.ac.cn       |
|     | 那曲生态环境综合观测研究站      | 中科院青藏高原研究所       | 斯确多吉 | 17711915187  | tsechoedorji@itpcas.ac.cn |
| 4   | 天山冰川观测试验站          | 中科院西北生态环境资源研究院   | 王飞腾  | 13519605545  | wangfeiteng@lzb.ac.cn     |
| 5   | 青藏高原冰冻圈观测研究站（格尔木站） | 中科院西北生态环境资源研究院   | 吴通华  | 0931-4967713 | thuawu@lzb.ac.cn          |
| 6   | 玉龙雪山冰川与环境观测研究站     | 中科院西北生态环境资源研究院   | 王世金  | 0931-4967371 | xiaohanjin@126.com        |
| 7   | 北麓河冻土工程与环境综合观测研究站  | 中国科学院西北生态环境资源研究院 | 陈继   | 13893199072  | chenji@lzb.ac.cn          |
| 8   | 三江源草地生态系统定位观测站     | 中科院西北高原生物研究所     | 赵 亮  | 0971-6143282 | lzhao@nwipb.cas.cn        |
| 9   | 藏东南高山环境综合观测研究站     | 中科院青藏高原研究所       | 邬光剑  | 010-84097080 | wugj@itpcas.ac.cn         |
| 10  | 慕士塔格西风带环境综合观测研究站   | 中科院青藏高原研究所       | 徐柏青  | 010-84097075 | baiqing@itpcas.ac.cn      |
| 11  | 阿里荒漠环境综合观测研究站      | 中科院青藏高原研究所       | 赵华标  | 15011542296  | zhaohb@itpcas.ac.cn       |
| 12  | 青海湖国家级自然保护区联合科研基地  | 中科院西北生态环境资源研究院   | 文莉娟  | 13993181209  | wlj@lzb.ac.cn             |
| 13  | 那曲高寒气候环境观测研究站      | 中科院西北生态环境资源研究院   | 胡泽勇  | 0931-4967654 | zyhu@lzb.ac.cn            |
| 14  | 祁连山冰川与生态环境综合观测研究站  | 中科院西北生态环境资源研究院   | 秦 翔  | 0931-4967370 | qinxiang@lzb.ac.cn        |
| 15  | 若尔盖高寒湿地生态研究站       | 中科院成都生物研究所       | 高永恒  | 028-82890536 | gaoyh@cib.ac.cn           |
| 16  | 若尔盖高原湿地生态系统研究站     | 中科院西北生态环境资源研究院   | 孟宪红  | 0931-4967091 | mxh@lzb.ac.cn             |
| 17  | 申扎高寒草原与湿地生态系统观测试验站 | 中科院成都山地灾害与环境研究所  | 王小丹  | 028-85234712 | wxd@imde.ac.cn            |
| 18* | 贡嘎山高山生态系统观测试验站     | 中科院成都山地灾害与环境研究所  | 常瑞英  | 13881786474  | changruiying@imde.ac.cn   |
| 19* | 海北高寒草甸生态系统定位研究站    | 中科院西北高原生物研究所     | 曹广民  | 0971-6123010 | caogm@nwipb.cas.cn        |
| 20* | 拉萨高原生态试验站          | 中科院地理科学与资源研究所    | 戴尔阜  | 13621090941  | daief@igsnr.ac.cn         |

\* 与中国科学院生态系统研究网络野外站共享数据。