

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)

2021 年报

Annual Report 2021



2022 年 02 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.....	9
3. 冰川/湖泊观测研究.....	14
4. 植被生态系统研究.....	33
5. 土壤/冻土观测研究.....	50
四、试验示范.....	63
五、公众服务.....	69
六、年度数据统计.....	73
1. 论著统计.....	73
2. 在研项目统计.....	74
3. 新增项目统计.....	76
4. 结题项目统计.....	77
5. 人才培养统计.....	79
七、大事记.....	80
八、组织机构.....	81
九、联系方式.....	82

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，分别是藏东南站、珠峰站、纳木错站、慕士塔格站、阿里站、那曲站（西藏大学-地理资源所-青藏所）、天山冰川站、格尔木站、祁连山站、若尔盖站（西北研究院）、玉龙雪山站、那曲站（西北研究院）、拉萨站、海北站、三江源站、贡嘎山站、申扎站、若尔盖站（成都生物所）、青海湖站、北麓河站。在“十三五”发展期间，围绕院“一三五”规划的总体目标和战略任务，根据院先导专项、科技部重点研发专项、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球科学卓越创新中心的发展需求，“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。

2021 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。全体研究人员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 535 项，经费总额为 152,575.8 万元。科研成果持续产出，共发表论文和论著 610 篇，其中 SCI 引文 420 篇。

科研团队与人才建设继续发展，人才争取方面，天山冰川站王璞玉研究员和那曲站（西北研究院）于海鹏助理研究员入选 2021 年度中国科学院青促会优秀会员。基于天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，在滑雪场造雪、储雪、雪质保障和赛道维护等方面为北京 2022 年冬奥会雪上项目提供了重要的技术支撑和服务保障，该项成果入选为中科院 2021 年度 14 个科技创新亮点成果之一，产生重要的社会影响。著作出版方面，玉龙雪山站学委会主任秦大河院士领衔，台站康世昌、陈拓、杨梅学、王世金研究员和天山冰川站任贾文研究员、李忠勤研究员参编的《冰冻圈科学概论（修订版）》获教育部全国优秀教材（高等教育类）特等奖。以上台站人员为核心的冰冻圈科学研究集体获中国科学院杰出科技成就奖（国家级奖励）。那曲站（西北研究院）于海鹏博士获国家自然科学基金优秀青年科学基金项目资助和甘肃省杰出青年基金项目资助，于海鹏博士获 2020 年度甘肃省科技进步奖二等奖（9/10）。北麓河站赖远明院士获得 2020 年国家科学技术进步二等奖（排名第 2）和中国科学院优秀导师奖，俞祁浩课题组获 2021 年度国家重大项目两河口水电站下闸蓄

水阶段（2018-2020）科技创新特别贡献奖。白瑞强博士荣获 2021 年度“中国科学院优秀博士学位论文”，高樯博士获得 2021 年度朱李月华奖学金。各台站依托“高寒网”共培养研究生 414 人，其中博士研究生 240 人，硕士研究生 174 人。

二、发展动态

1. 天山冰川站“冬奥会赛事用雪保障”成果入选中科院 2021 年度科技创新亮点成果

2021 年天山冰川站围绕冬奥会雪务保障技术开展了大量的技术试验研究，获得发明专利 3 项、实用新型专利 5 项和软件著作权 1 项。其中，针对冬奥会雪务工作中造雪、储雪、保雪三方面的核心问题，开展了属地化试验研究，主要进展包括：（1）通过野外观测试验和室内数值模拟，确定了储雪和保持雪质试验的 18 个关键观测指标，获得了储雪大小和形状对储雪效果影响的实验装置发明专利和“储雪堆优化设计软件 V1.0”软件著作权，并在冬奥雪场（崇礼云顶滑雪场和小海陀高山滑雪中心）和示范应用雪场（哈体院帽儿山滑雪场和黑龙江省亚布力体育训练基地）开展推广和应用，结果表明所形成的储雪技术方案可以减少 85% 的雪量融化，满足滑雪场的用雪需求，部分研究结果已提交北京首钢滑雪大跳台项目。（2）在国家高山滑雪中心、哈尔滨亚布力滑雪场和张家口崇礼云顶滑雪场开展了冰状雪赛道制作与关键参数观测野外试验，根据每个滑雪场实时气象条件和现场雪质参数，运用多种机械设备，完成赛道制作中基础制作、静置、注水等环节，确定出不同气候条件下冰状雪赛道制作最优技术方案，形成了《冰状雪赛道制作技术流程》和《冰状雪赛道标准》。该研究成果与中国科学院过程工程研究所、中国科学技术大学科大讯飞股份有限公司、空天信息创新研究院等单位成果一起入选“中科院多项科技成果助力北京冬奥”科技创新亮点成果。

2. 天山冰川站组织编制第三次新疆综合科学考察工作指南

通过收集国内外已有冰冻圈观测规范，联合冰冻圈领域数家科研单位，编制完成了《新疆第三次综合科学考察冰冻圈调查指南》。该指南三部分组成：第一部分为《冰川资源调查指南》，包括《冰川资源地面调查指南》、《冰川遥感调查规范》和《高新技术冰川观测指南》；第二部分为《积雪资源调查规范》；第三部分为《多年冻土调查指南》。该指南具有如下特点：数据的政府决策和产业服务功能、冰雪固态和动态资源及其变化预估、冰雪资源与其它资源相互关系以及流域和行政区域全覆盖。内容涉及第三次新疆综合科学考察冰川、冻土、积雪的考察方法、路线、重点考察内容和考察区域（包括无人区和无资料区）；数据质量控制方案和数据库平台建设方案；新疆冰冻圈资源未来变化及其影响预估；冰雪灾害预警体系的建立。该指南是我国第一部针对整个新疆冰冻圈资源调查规范，已提交至第三次新疆综合科学考察项目办公室，得到了科技部、中科院和项目组有关专家的高度肯定，目前已用于指导第三次新疆综合科学考察。

3. 拉萨站余成群研究员团队获中国扶贫发展中心表扬

2021 年 1 月，扶贫开发领导小组办公室中国扶贫发展中心发来感谢信，感谢拉萨站余成群研究员团队承担并高质量完成西藏脱贫攻坚案例总结工作。西藏脱贫攻坚案例总结工作是受国务院扶贫开发领导小组办公室委托，记录西藏脱贫攻坚史实的一部志书，成果主要包括《西藏脱贫攻坚案例研究报告》（228.2 千字）和《西藏脱贫攻坚案例总结报告》（11.7 千字），研究成果充分体现了习近平总书记精准扶贫精准脱贫思想在西藏自治区的光辉实践，记录了西藏自治区党委、政府在党中央领导和全国人民支援下团结带领各族干部群众合力攻坚的奋斗历程，讲述了西藏广大贫困群众奋发脱贫的感人故事，铭刻了西藏脱贫攻坚伟大成就的辉煌篇章。为完成“案例总结”，研究团队全体成员多次深入西藏自治区开展驻扎式调研，遍访西藏自治区 7 个市（地区），共计前往 57 个县（区）实地调研 163 个生动案例，召开自治区、市（地区）、县（区）、乡（镇）和村（居）各级座谈会、研讨会共计 181 次，访谈干部、企业、农户等 441 人次，广泛收集相关文献资料和脱贫攻坚生动案例共计 1232 份。目前，《西藏脱贫攻坚案例总结报告》及相关成果已由国务院扶贫开发领导小组办公室发布，《西藏脱贫攻坚案例研究报告》已进入出版阶段。

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

➤ 那曲站（西北生态环境资源研究院）

近 56 年中国极端降水事件的时空变化格局：那曲站博士生卢珊等研究发现近年全国极端降水事件明显增多，极端降水量和极端降水日数呈增加趋势的站点占总站数的 68%，且主要集中在东南沿海和西部地区。全国平均的极端降水事件的开始时间和结束时间分别呈现出明显的提前和推迟趋势，西北地区、青藏高原和东北地区极端降水事件的开始时间显著提前，西北地区的结束时间显著推迟。

进一步分析了西北地区极端降水变化及相关机理，发现近年来极端降水事件在西风区和高原区增加，在季风区减少；西北地区夏季极端降水在 1986 年出现突变性增加；伴随着夏季极端降水的突变性增长，1986 年前后，西北地区夏季大气环流、水汽输送及大气不稳定性均发生了很大变化。1986-2016 年的环流背景利于西风区和高原区极端降水增多，抑制了季风区极端降水的发生。

在这些研究基础上，结合甘肃省实际情况，向中共甘肃省委办公厅提交了咨询报告《关于提升我省极端天气气候事件风险防范能力的建议》，推动了那曲站在极端降水的风险防范研究方面的发展。

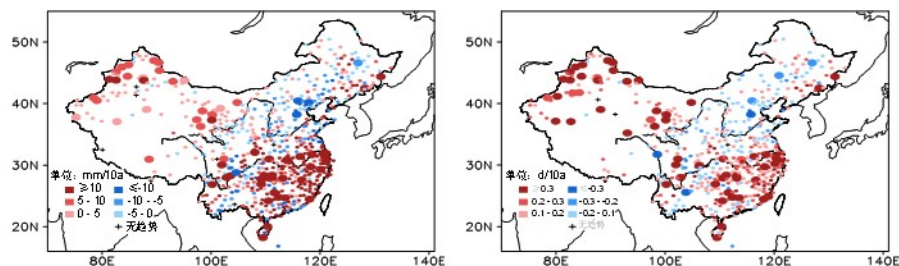


图 1.1.1 极端降水量和极端降水日数变化趋势空间分布

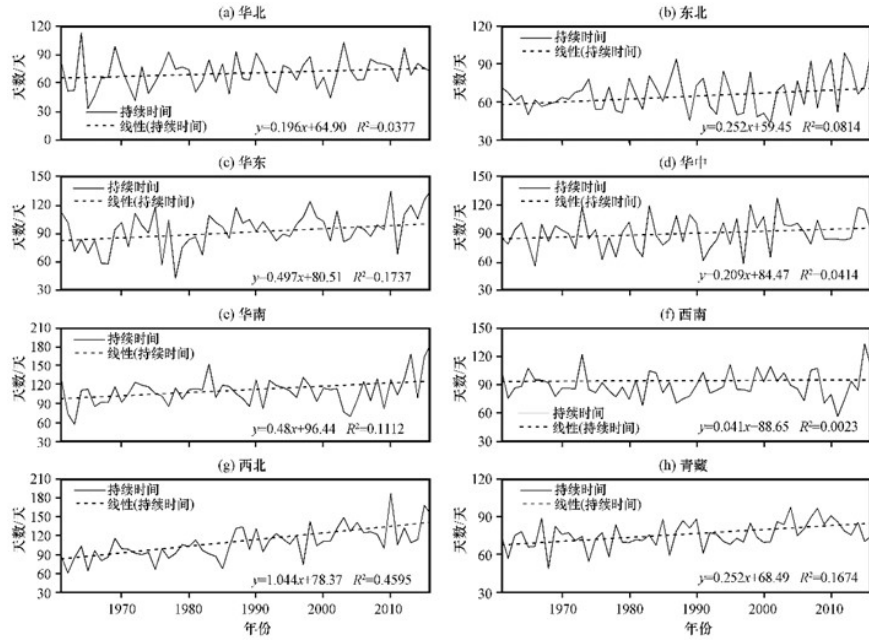


图 1.1.2 各分区极端降水事件持续期逐年变化

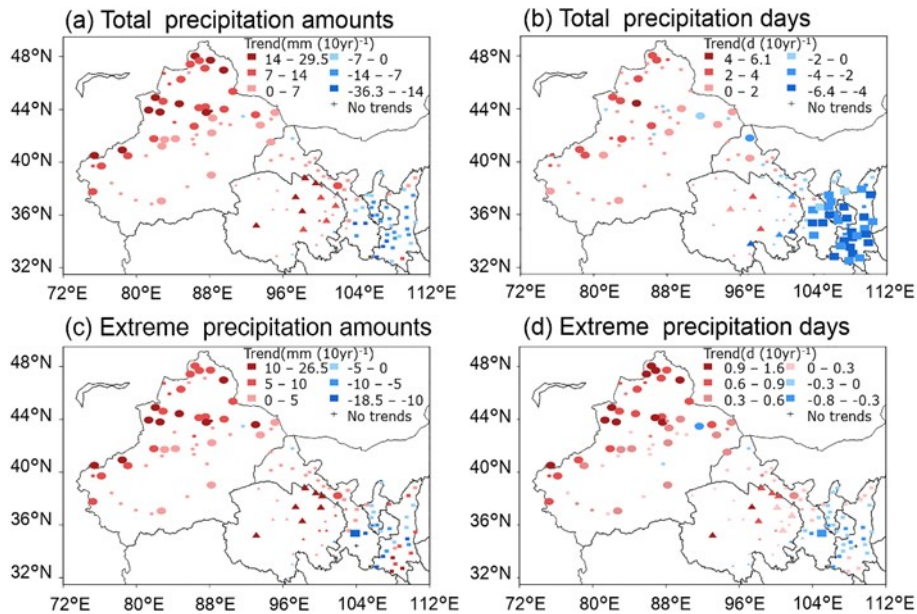


图 1.1.3 西北地区总降水量(a, b)及极端降水(c, d)的空间变化特征

2000 年以来青藏高原及其周围地区感热恢复及其海拔放大效应：那曲站博士生樊威伟等基于高原及周边 130 个气象台站历史资料，探究了 2000 年前后青藏高原地表感热的恢复及其海拔放大效应。高原地表感热 1981-2000 年呈减弱趋势，而 2001-2016 年呈增强趋势，且高原地表感热趋势具有显著的海拔依赖性特征：感热呈减弱趋势时，更高海拔地区减弱更显著；呈增强趋势时，更高海拔地区增强更显著。分析发现高原上 500hPa 西风带风速在前期减弱，后期增强。由于高海拔地区对大气环流响应更加剧烈，

导致了地面风速在 2000 年以前减弱趋势随海拔高度升高而增大；在 2000 年以后的增强趋势随海拔高度升高而增大，进而形成了地表感热趋势的海拔放大效应。该研究成果推动了那曲站在气候变化研究方面的发展。

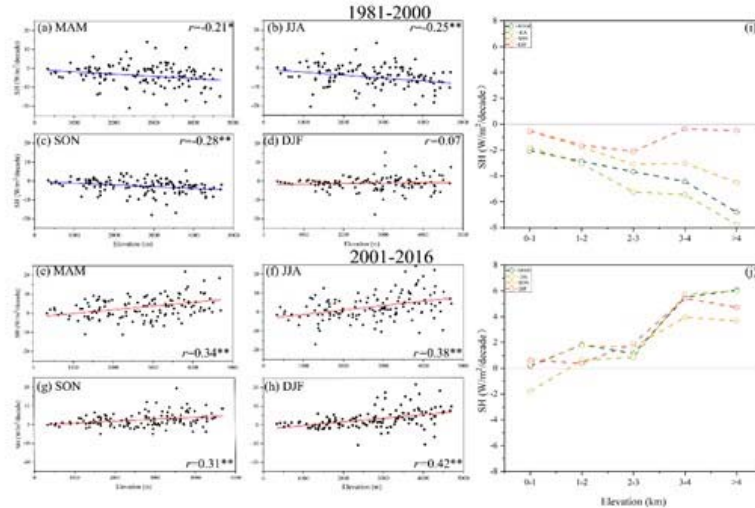


图 1.1.4 1981-2000 年和 2001-2016 年青藏高原不同海拔站点地表感热变化趋势

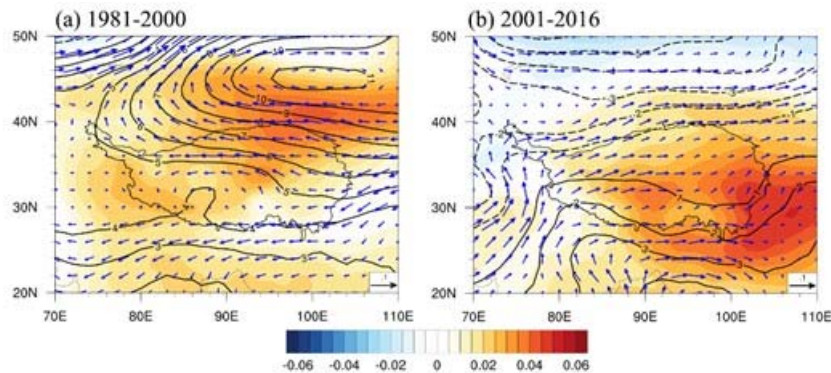


图 1.1.5 a) 1981-2000 年及 b) 2001-2016 年青藏高原 500hPa 风速（矢量）、位势高度（等值线）、温度（填色）变化趋势

► 珠峰站

发展了考虑大地形拖曳作用的有效粗糙度参数化方案：基于科考建成的第三极地区多圈层地气相互作用立体综合观测网络体系的长期连续观测资料，发展了考虑大地形拖曳作用的有效粗糙度参数化方案，并将其引入地表能量平衡系统模型（SEBS），再利用改进的 SEBS 模型，结合 MODIS 卫星遥感数据和 CMFD 气象再分析数据，计算得到了 2001-2018 年青藏高原月平均的蒸散发量，并利用位于高原不同下垫面的 6 个湍流通量站的观测数据验证了改进的 SEBS 估算的蒸散发量。新的研究表明，青藏高原平均年蒸散发总量（2001-2018）为 1.238 ± 0.058 万亿吨，但其年变化趋势存在很大的空间差异性。同时发现高原蒸散发量在其东部增加，西部减少，但整体呈减少趋势。青藏高原 2001-

2018 陆地蒸散发数据现已公开发布 (Han et al., 2021, ESSD), 一经发布就受到了广泛的关注, 该套数据可以广泛地应用于气象、水文以及生态等多个学科的研究。

发展了一种考虑浅层土壤含水量和土壤质地影响的 MOD16 蒸散发模型: 基于 MOD16 模型并结合青藏高原地区的地面站点观测资料, 发展了一种考虑浅层土壤含水量和土壤质地影响的 MOD16 蒸散发模型 MOD16-STM, 研究结果表明, 浅层土壤含水量是影响青藏高原蒸散的主导因子, 并且分析发现用于草地植被蒸腾的平均气孔导度最优值为 $0.0038(\text{m/s})$ 。该研究有效地提高了青藏高原地区蒸散发的估算精度, 有助于估算青藏高原蒸散发和加深对青藏高原地区气候变化的理解, 并且在陆面模型改进方面具有巨大潜力 (Yuan et al., 2021)。

➤ 若尔盖站(西北研究院)

黄河源区积雪和气候变化及其对春季径流的影响: 近几十年来, 黄河源区气候和积雪变化显著。然而, 它们对春季径流的影响尚不清楚。利用气象站、野外站、水文站和遥感等观测资料, 研究了气候和积雪的变化及其对春季径流的协同影响。发现气候变暖主要是由日最低温度引起的, 近 20 年来最低地表温度 ($0.235^{\circ}\text{C}/\text{年}$) 的增加远大于最低气温 ($0.081^{\circ}\text{C}/\text{年}$), 春末夏初降水增幅最大。年内降水和径流均呈现双峰型, 年际变化吻合较好。在年尺度上, 降水量相对变率仅增加 $0.65\%/\text{年}$, 而径流量达到 $2.52\%/\text{年}$ 。气象站积雪深度仅占遥感产品的 27.67% , 与春季径流相关性较差。1% 的雪深变化导致 4 月径流量变化为 0.43% , 1% 的雪日变化导致径流量变化为 0.82% 。11 月至 3 月的降水量和积雪深度可以部分解释春季径流量增加的变化, 其相关系数分别为 0.79 和 0.67 。

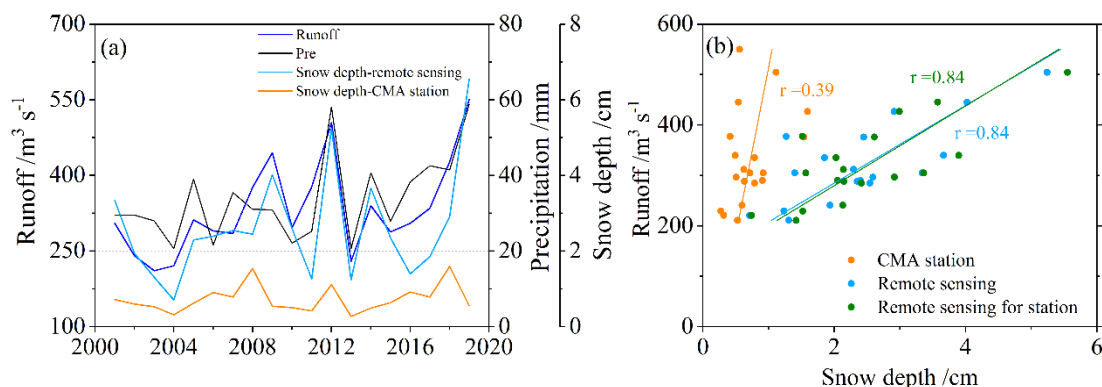


图 1.1.6 前期降水、站点和遥感雪深、春季径流的年际变化 (a) 及雪深和径流的相关性 (b)

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%。

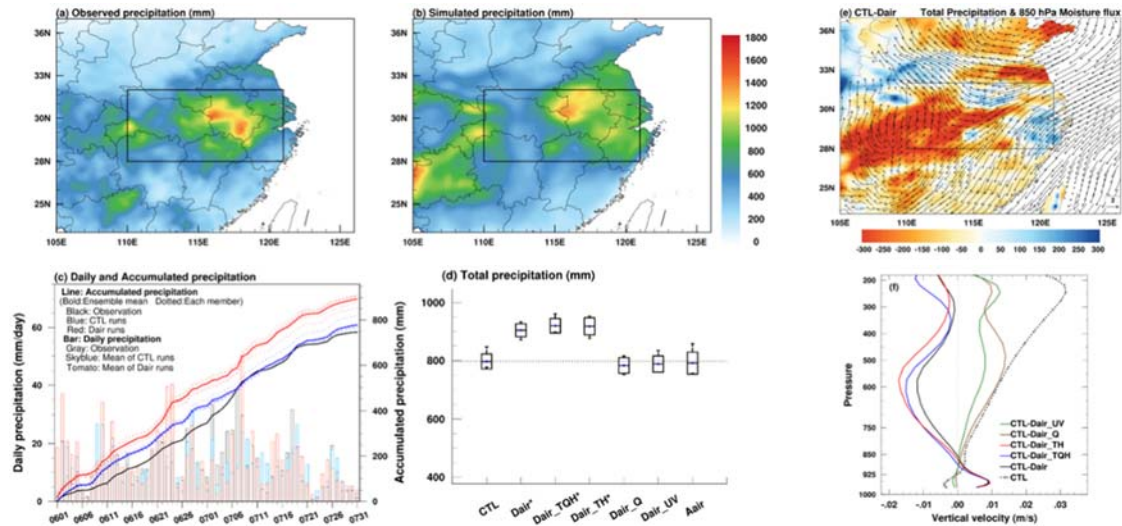


图 1.1.7 气候变化对长江流域破纪录梅雨的影响（模拟对比环流场及定量分析）

2. 大气环境观测研究

➤ 藏东南站

树轮记录近百年来藏东南多环芳烃的变化趋势：多环芳烃（Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs）主要来源于自然或人类活动过程中有机物质的不完全燃烧，其在全球环境中分布广泛，排放历史久远。虽然多个大型国际计划已将 PAHs 列入监测项目，北极和欧盟 PAHs 的监测也已经持续 30 年，但更长时间尺度的观测数据仍难以获得。近日，王小萍研究员团队在藏东南地区钻取了树轮样品，利用树轮追溯了近百年来（1916–2018）藏东南地区 PAHs 的变化趋势，为获取长时间历史 PAHs 数据提供了新思路。

该研究利用树芯/大气分配系数模型，重建了藏东南地区近百年来大气 PAHs 的变化趋势。研究表明，藏东南树轮中 PAHs 的历史变化趋势与当地及周边地区（印度）的社会经济发展密切相关。第二次世界大战时期（1939–1945）发现了高浓度的 PAHs；自印度工业化开始（1980s），树轮中的 PAHs 浓度呈现增长趋势。分子比率和正矩阵分解模型的定性-定量分析结果均表明，近百年来生物质和煤燃烧是藏东南 PAHs 的主要来源，但在西藏和平解放时期（1951–1952）交通源成为 PAHs 的主要来源，自 1986 年以后，随着经济的快速发展，交通源的贡献呈上升趋势。上述研究成果以“Century-long record of polycyclic aromatic hydrocarbons from tree rings in the southeastern Tibetan Plateau”为题，发表于《Journal of Hazardous Materials》。

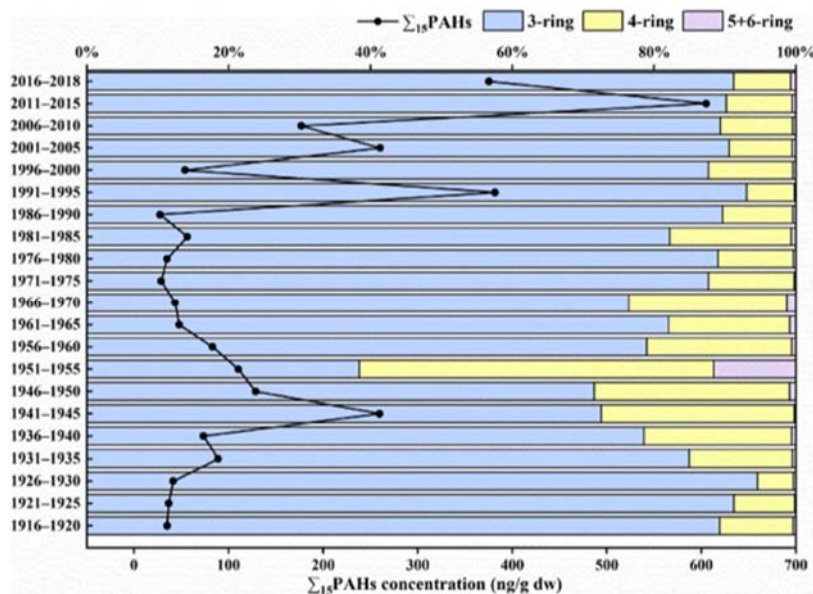


图 1.2.1 藏东南树芯中 PAHs 的浓度变化与组成特征

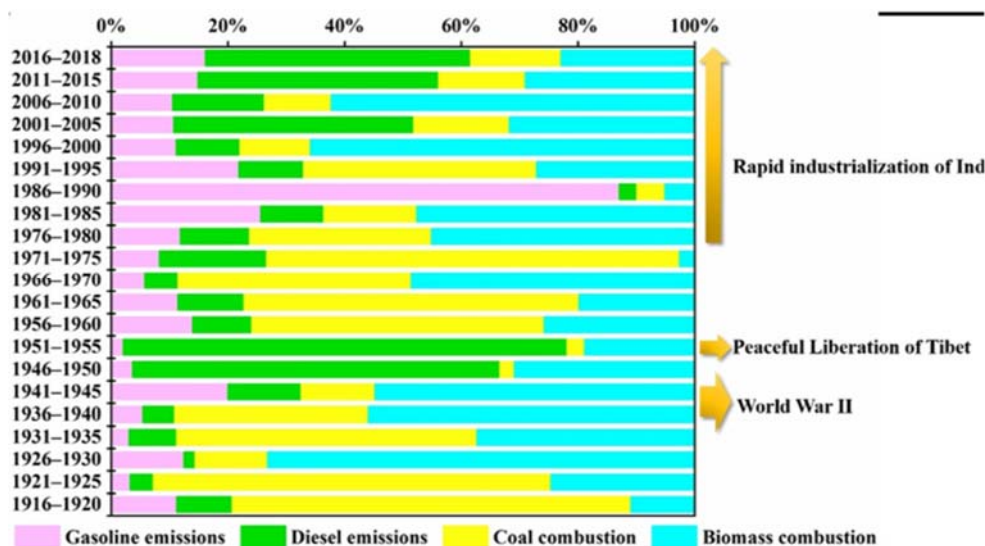


图 1.2.2 PAHs 源贡献百分比的时间序列

➤ 慕士塔格站

青藏高原唐古拉山冰芯黑碳研究进展：黑碳是大气气溶胶的重要组成，主要来源于化石和生物质燃料在高温条件下的不完全燃烧。和气溶胶的其他组分相比，黑碳对可见光到红外波长范围的太阳光均具有强烈的吸收作用，是影响气候变化的重要因子。冰芯是存储大气黑碳的良好载体，通过分析冰芯中的黑碳含量变化特征，可以研究历史时期黑碳变化趋势及其原因，为今后环境保护政策的制定提供科学依据。

本研究的冰芯取自青藏高原中部唐古拉山哈日钦冰川。唐古拉山全长约 500 km，平均海拔高度 5500–6000 m，总体位于西风环流与印度季风的分界线。哈日钦冰芯 1850 年以来的黑碳含量显示，1850–2000 年间哈日钦冰芯黑碳含量平均值为 1.25 ng mL^{-1} ，黑

碳含量的最大值 7.76 ng mL^{-1} 出现在 1976 年, 最小值为 1896 年的 0.17 ng mL^{-1} 。1950 年以前, 哈日钦冰芯黑碳含量水平较低, 变化波动较小, 这一时期黑碳均值为 0.7 ng mL^{-1} 。1950 年以来, 冰芯中黑碳含量表现出急剧增加的趋势, 这一时期年均黑碳含量为 2.1 ng mL^{-1} , 是 1850–1950 年这一时段黑碳含量的 3 倍。其中 1963 年、1976 年和 1983 年左右黑碳含量出现峰值。特别是进入 21 世纪来, 黑碳含量迅速增加, 2000–2014 年时段黑碳含量均值高达 3.07 ng mL^{-1} 。

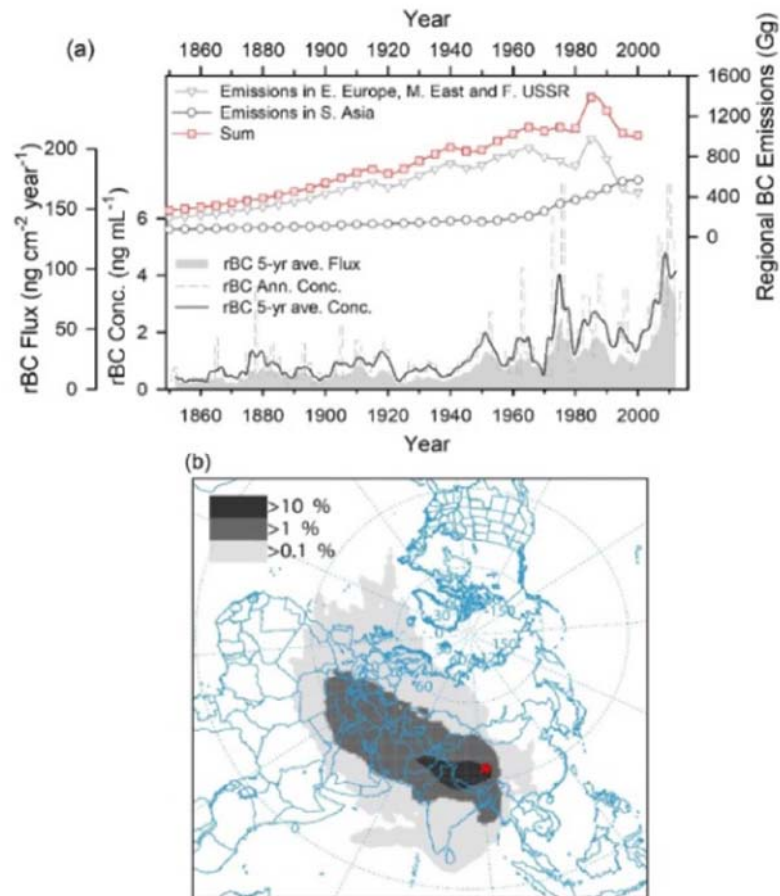


图 1.2.3 冰芯黑碳含量记录和其他区域黑碳排放量(a)以及冰芯钻取点气团轨迹分析(b)

冰芯钻取点位于偏远山区, 当地及周边地区人类活动非常有限, 气团轨迹分析显示冰芯中黑碳主要来源于远距离的欧洲、中亚和南亚等地区, 而且这些地区的黑碳排放量与冰芯黑碳记录有较好的一致性。冰芯中黑碳含量增加的幅度与先前研究中报道的青藏高原其他冰芯中黑碳含量变化趋势总体吻合, 说明青藏高原地区冰芯黑碳记录表现出强烈的人为排放特征, 而且人为排放对青藏高原冰芯黑碳含量的影响越来越大。

➤ 玉龙雪山站

吸光性气溶胶对冰冻圈消融影响研究进展: 青藏高原冰川正在发生强烈消融, 表现

为冰川末端退缩以及冰川物质亏损,并对周边河流径流、人均水资源量等产生深刻影响。冰川退缩主要受到气候变暖以及降水的影响;同时,冰川表面反照率的降低可导致冰川表面短波吸收增强,进而加速冰川消融。玉龙雪山站康世昌研究员团队基于 MODIS (分辨率为 $500\text{m} \times 500\text{m}$ 的中分辨率成像光谱仪) 反照率数据,系统分析了 2000–2018 年间青藏高原冰川表面反照率变化的时空分布,探讨了冰川表面反照率变化与物质平衡的关系,并利用模型估算了反照率降低导致的冰川消融量,评估了冰川中黑碳对反照率降低的贡献。研究表明,喜马拉雅山和藏东南地区冰川末端退缩显著,西昆仑和喀喇昆仑地区冰川退缩较弱甚至有前进现象;典型冰川物质平衡自 20 世纪 90 年来以来物质亏损加速。在青藏高原东南部和喜马拉雅山地区,冰川表面反照率相对较低,尤其是夏季冰川消融期;而在喀喇昆仑地区,反照率相对较高的冰川通常表现出轻微的退缩甚至前进。冰川表面(夏季)平均反照率变化的区域特征与冰川退缩和物质平衡变化的区域特征相似,表明过去 20 年冰川物质平衡与冰川表面反照率之间存在显著正相关关系。夏季冰川表面反照率降低对冰川消融量的贡献约 30–60%。由于其强烈的光吸收,冰川中黑碳是反照率降低的一个重要因素,可使得夏季青藏高原冰川消融增加约 15%。该研究评估了反照率降低对冰川消融的贡献率,提升了我们对青藏高原冰川加速消融原因的新认识。

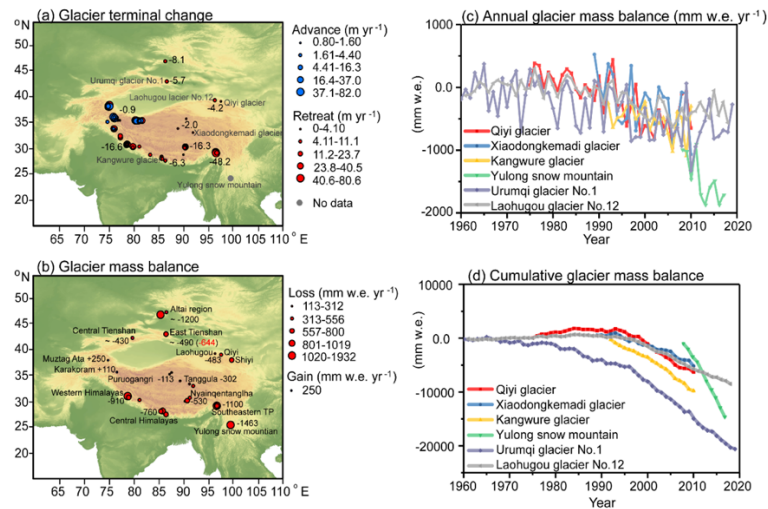


图 1.2.4 青藏高原及其周边地区冰川变化的空间分布 (更新自 Yao et al., 2012) (a) 冰川末端变化, (b) 冰川年均物质平衡, (c) 典型冰川年冰川物质平衡变化, 和(d) 典型冰川累积物质平衡变化

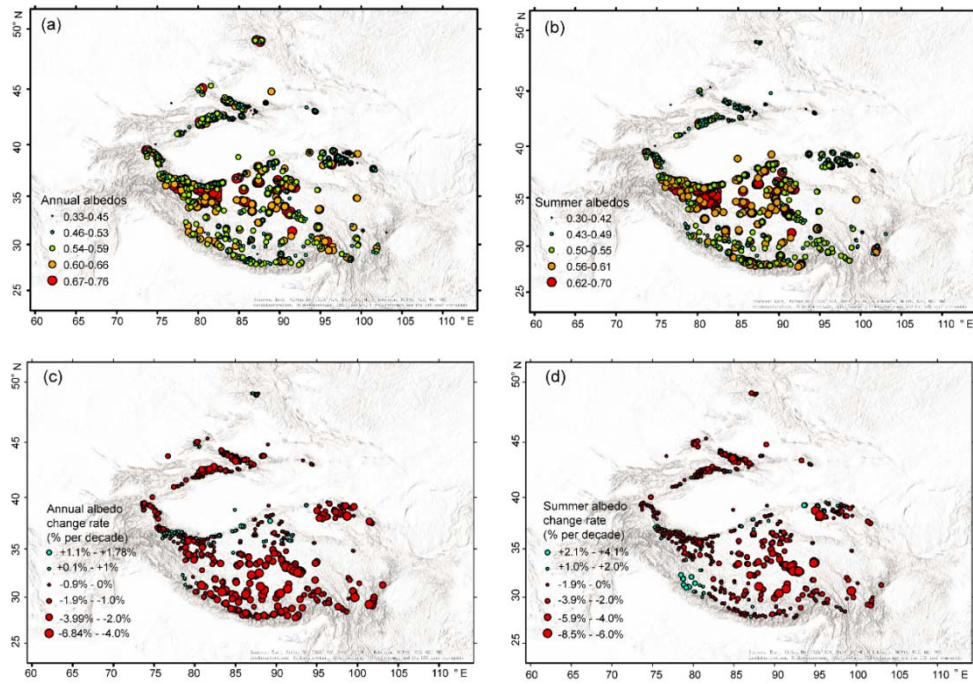


图 1.2.5 利用 MODIS 数据反演的 2001-2018 年期间青藏高原及其周围地区冰川表面年平均反照率 (a) 和夏季平均反照率 (b)，以及 (c) 年均和 (d) 夏季冰川表面反照率变化率 (每十年%)

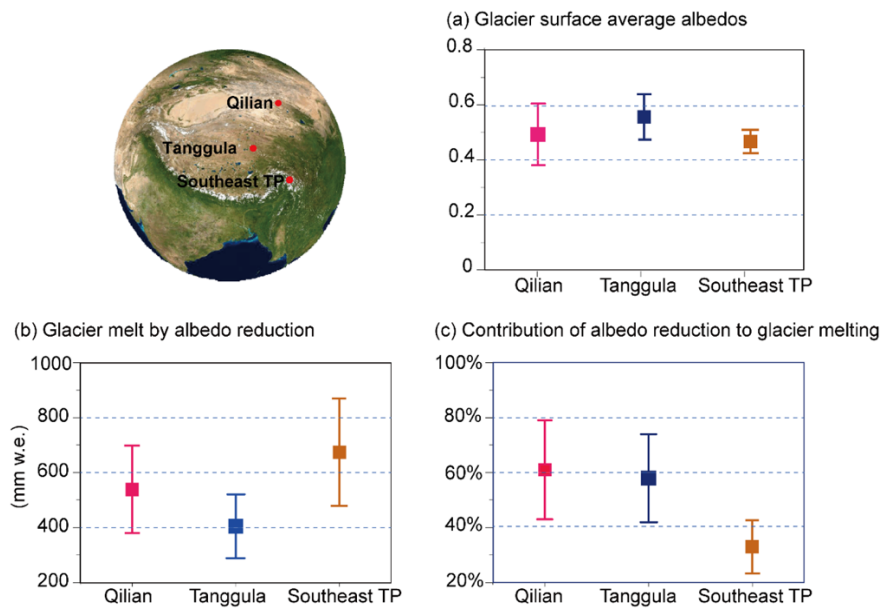


图 1.2.6 基于 MODIS 数据反演冰川表面平均反照率 (2001-2018 年) 和评估的祁连山、唐古拉山和青藏高原东南部反照率降低导致的冰川消融量以及贡献

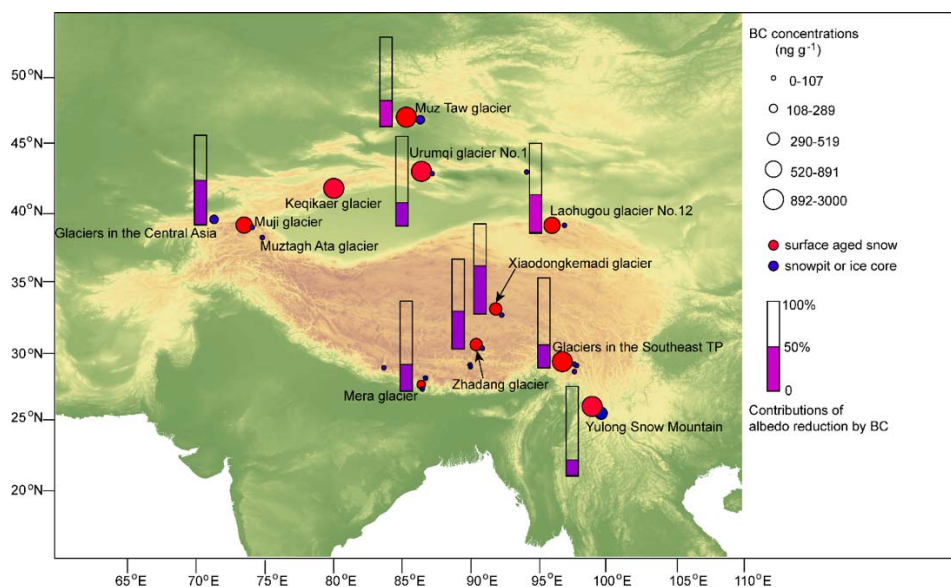


图 1.2.7 青藏高原冰川中黑碳浓度及其对地表雪反照率降低的影响

3. 冰川/湖泊观测研究

➤ 纳木错站

青藏高原湖泊水质实测调查与研究获得丰富数据：青藏高原湖泊广布，面积超过 1 km² 的湖泊数量超过 1400 个，总面积超过 50 000 km²，占据我国湖泊总面积一半以上，是地球上海拔最高、数量最多、面积最大的高原湖群区，是“亚洲水塔”的重要组成。该地区湖泊受人类活动干扰较小，湖泊的多种水质参数受水剖面能量分布、水汽能量交换以及湖泊生态系统影响，对区域气候和环境变化产生敏感响应。由于青藏高原大部分湖泊所处环境条件恶劣，缺乏湖泊水质参数实测数据，严重制约了对青藏高原湖泊时空变化的深入认识。中科院青藏高原所湖泊与环境变化团队基于近 10 多年来的野外调查工作，共获取 2009 年至 2019 年期间采集的 124 个封闭湖泊实测水质参数，包括水温、盐度、pH、叶绿素-a、蓝绿藻、溶解氧、荧光溶解有机质、浊度和透明度等，涉及湖泊总面积为 24570 km²，占青藏高原湖泊总面积 53%。

研究表明，青藏高原湖泊盐度变化很大，从淡水湖到盐湖皆有分布，且目前绝大部分处于非淡水状态。大多数湖泊表现出碱性特征，营养化程度低，浮游植物和溶解性有机质较少，浊度低，透明度高。湖泊盐度、pH 呈现明显的南北差异，湖泊水温呈现随季节和海拔高度的变化，而湖水透明度随湖泊面积增加而加深。该研究首次提出青藏高原大范围的湖泊实测水质参数，为湖泊水环境参数的尺度变换和时空变化研究提供丰富的基础数据，有助于促进深入认识气候变化下青藏高原的湖泊水环境、水生态和水资源。该研究成果以“In-situ water quality investigation of the lakes on the Tibetan Plateau”为题发表在《Science Bulletin》上。

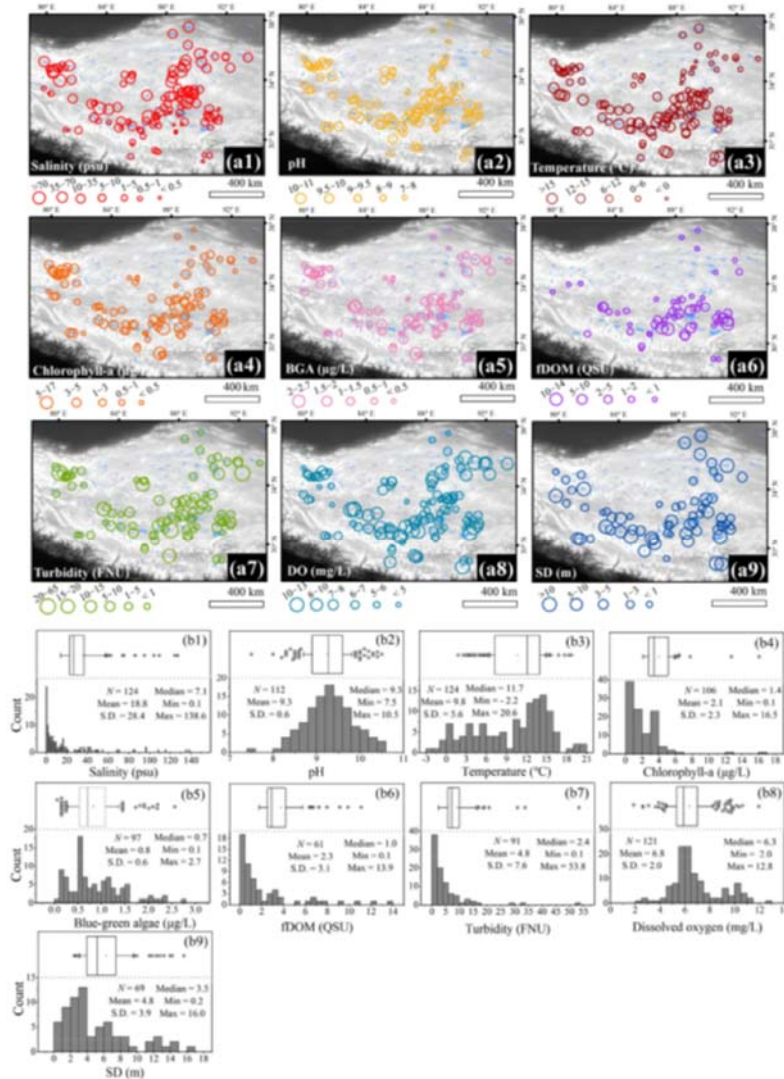


图 1.3.1 青藏高原湖泊水质参数的空间分布，包括：盐度（a1、b1）、pH（a2、b2）、水温（a3、b3）、叶绿素-a（a4、b4）、蓝绿藻（a5、b5）、荧光溶解有机物（a6、b6）、浊度（a7、b7）、溶解氧（a8、b8），和透明度（a9、b9）

湖泊沉积揭示南亚季风北缘长江源区的古气候变化：以青藏高原为主体的第三极是目前全球变暖最强烈的地区，也是未来全球气候变化影响最不确定的地区。西风与印度季风两大环流是控制青藏高原气候与环境变化的决定性因素，位于两大环流的过渡区域的环境变化对环流具有敏感响应。

长江源区处于现代南亚季风北缘，是受西风与季风协同影响的过渡地带和内外流区的分界地带，也是第二次青藏高原科考的江湖源核心区。各拉丹东冰川、多尔索洞错-赤布张错（大型湖泊）、沱沱河、扎加藏布（西藏最大内流河，色林错北岸的补给河流）等重要水资源在这里聚汇。目前，该区域尚缺乏覆盖万年以上的连续环境记录。

针对上述问题和区域，中科院青藏高原所朱立平研究员带领的湖泊与环境变化团队

利用赤布张错湖泊岩芯沉积物重建了长江源区过去 13000 年的古气候变化记录, 评估了南亚季风与中纬度西风之间过渡带自晚冰期以来的古气候变化特点以及环流效应。科研人员对取自该湖的一根 548cm 岩芯进行粒度、元素与碳酸盐等多指标分析, 结果表明长江源区晚冰期末期以来的气候变化分为四个阶段: 晚冰期 (12.7–10.6 ka) 相对寒冷; 早全新世 (10.6–6.6 ka) 暖湿; 中晚全新世 (6.6–1.9 ka) 温凉偏冷和干燥; 最近的 2000 年出现变暖变湿的趋势。

与其他区域的记录相比, 该区域具有与季风和西风带非同步演化的过渡特征。长江源区有效湿度整体遵从南亚季风区的变化模式, 即季风环流驱动了晚冰期以来的古气候变化, 主要受增强的夏季太阳辐射控制, 但到中全新世, 有效湿度受八月份的阳光辐射影响, 碳酸盐沉积增加。在中晚全新世, 湖泊维持了中等水位, 可能受到西风效应 (冷空气与降雪) 和冰川融水叠加的影响。目前, 该区域的气候水文条件处于温和偏湿的状态, 可能接近早全新世的晚期。

该研究有助于评估长江源区这一环境变化敏感区的水资源变化的未来发展趋势, 为中华水塔乃至三江源区生态环境评估及相关研究提供更多科学参考。研究成果发表在国际地学期刊《Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology》。

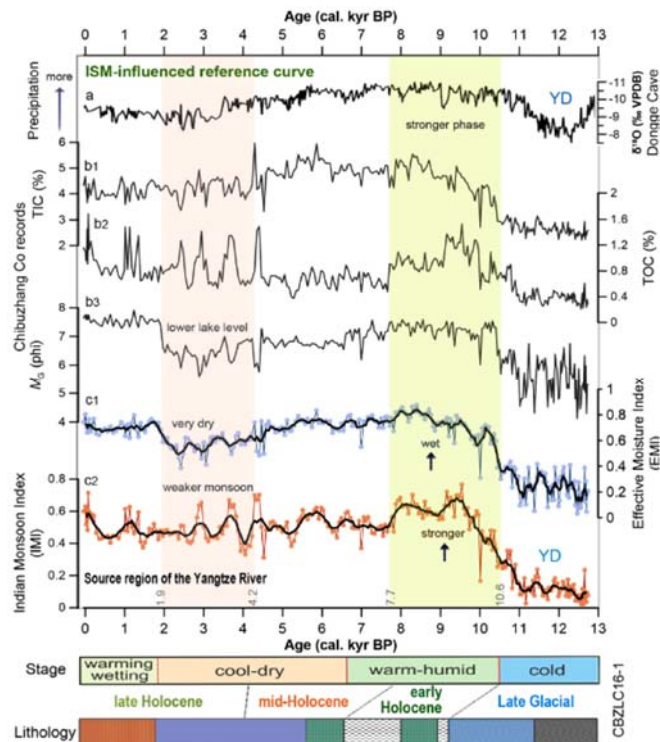


图 1.3.2 长江源区古气候变化与古气候指数

藏北寒旱核心区过去 5000 年来的湿度变化及植被演化: 青藏高原气候受西风和印度季风的共同影响, 高原不同地区的地表环境变化记录对两大环流影响的响应会产生差

异。然而，目前青藏高原上已有的古气候记录分布并不均匀，特别是由于缺乏高原中-北部寒旱核心区的研究结果，导致研究人员对全新世两大环流对高原的影响范围和过程的认识尚不清楚。

为获得高原寒旱核心区的过去气候环境变化记录，辨析区域气候变化对西风季风环流系统的响应程度，我站朱立平研究员带领湖泊与环境变化团队，利用位于藏北羌塘高原的布若错（一个受冰川补给影响的湖泊）的湖芯沉积物，重建了青藏高原中北部寒旱核心区 5000 年以来的湿度变化及植被演化历史，研究了季风和西风在该区域的演化过程。结果表明，该区域中晚全新世以蒿属草原植被为主，发展到 900 aBP 前后，草原和荒漠植被开始交替出现，总体呈现湿度逐渐降低的特征。根据布若错沉积岩芯孢粉谱特征及其与季风区、过渡区和西风区记录的对比结果，发现该流域在 3800 aBP 前，经历了一个相对暖湿的阶段，主要受印度季风控制；之后，植被演化揭示了流域逐步变干的过程，反映了该流域印度季风影响逐渐减弱；3200 aBP 后，布若错流域的西风影响不断增强，流域持续变干。1000 aBP 后，尽管流域变干趋势减缓，但该流域仍受强势西风主控，轻微增强的季风影响范围仍局限于念青唐古拉、冈底斯山脉以南。在最近 5000 年气候由湿变干的过程中，曾经出现 4 次更加显著的干旱时期（4400 - 4100、3850 - 3650、3300 - 3000 和 1900 - 1400 a BP）和 2 次寒冷时期（3200 - 2800 和 400 a BP-现在）。

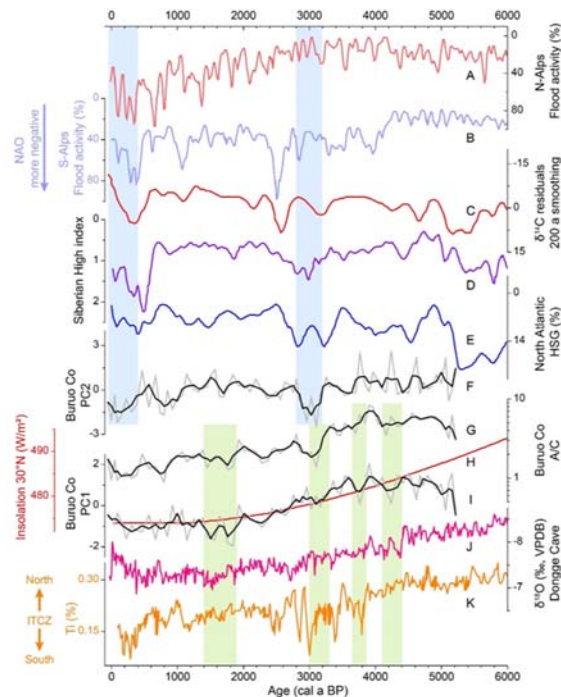


图 1.3.3 布若错记录与全球其他环境记录对比

➤ 天山冰川站

大陆性和干旱区冰川变化及其影响研究获系统性新进展：中国冰川变化的气候、环境、水文水资源、生态和灾害效应十分显著，开展冰川变化及其影响研究意义重大。2021年，天山冰川站围绕冰川变化过程和机理、雪冰化学与环境、冰川与其它圈层相互作用等方面开展基础研究，共发表文章 62 篇，其中 SCI 论文 41 篇（影响因子大于 4.0 的文章 19 篇）。

1) 冰川变化过程和机理：通过多技术集成，开展了冰川动力过程、变化机理研究。通过集成全球卫星导航系统、地基三维激光扫描和无人机，开展了乌鲁木齐河源 1 号冰川和木斯岛冰川变化过程观测研究；通过耦合冰川能量—物质平衡模型与多层冰温模型量化冰下传导热通量对物质平衡模拟的影响；基于实测物质平衡数据，分析全球冰川物质平衡的时空变化特征。以上研究成果发表在《*Journal of Glaciology*》、《*Global and Planetary Change*》和《*Science China Earth Sciences*》等国际期刊上。

采用多种遥感技术查明了冰川灾害发生过程及机理，开展了区域尺度冰川几何形态、物质平衡和反照率等变化研究。利用 Sentinel-1 和 Landsat 系列影像，获取了帕米尔高原克拉亚伊拉克冰川和格拉丹东岗加曲巴冰川跃动前后运动速度，分析了冰川跃动机理；查明了天山艾比湖流域和喀喇昆仑山罕萨流域冰川几何形态和运动速度变化、获取了天格尔峰冰川近 20 年雪线变化；采用 MODIS 反照率数据分析了青藏高原冰川表面反照率时空变化，探究了冰川表面反照率变化与冰川物质平衡的关系。以上研究成果在《*Earth-Science Reviews*》、《*Journal of Glaciology*》和《*Remote Sensing*》等期刊上发表。

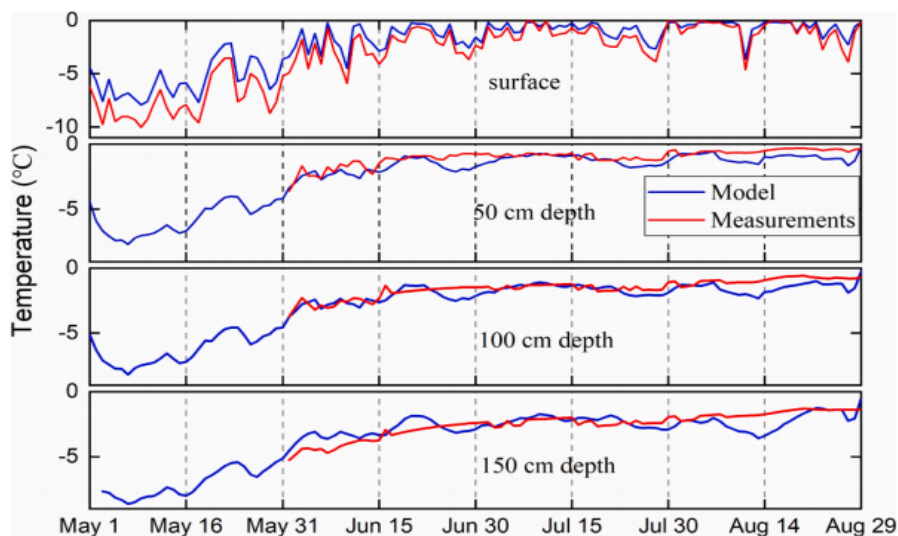


图 1.3.4 乌鲁木齐河源 1 号冰川不同深度的冰川温度模拟

2) 雪冰化学与环境研究：通过野外采样、在线观测和数值模拟分析，探明雪冰中化

学物质的组成、来源及对冰川消融影响，理清了干旱区城市空气污染特征、潜在来源和成因。基于野外样品数据，分别以青冰滩 72 号冰川和乌鲁木齐河源 1 号冰川为例，量化沙尘暴对冰川区环境的影响和吸光性物质对冰川消融影响。利用在线观测，分析了天水市主要污染物的来源和吉木乃县光学气溶胶的特性，研究了西北地区 9 个城市 PM 和 VOCs 的相互作用、来源和影响，研究结果提高了对特殊气候条件下自然粉尘与人为污染之间相互作用的理解。以上研究成果在《*Environmental Pollution*》、《*ACS Earth and Space Chemistry*》和《*Science of The Total Environment*》等期刊上发表。

3) 冰川与其它圈层相互作用：通过指标体系构建，开展了我国冰冻圈变化的脆弱性以及水资源功能、服务和区划研究。构建了涵盖自然地理、人口、社会经济和农业等因素的冰川变化脆弱性框架，评估了中国天山和祁连山的冰川变化脆性；系统评估了冰冻圈融水对我国水资源贡献及其区域差异，判识了不同地区冰冻圈融水的潜在服务。研究成果在《*Journal of Geographical Sciences*》和《*Advances in Climate Change Research*》等期刊上发表。

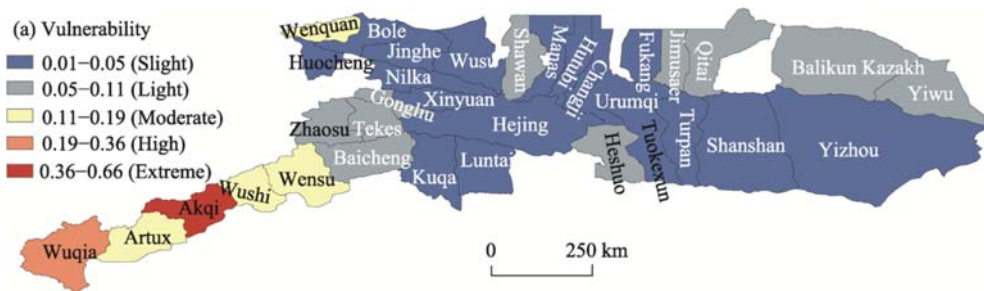


图 1.3.5 天山冰川变化的脆弱性空间分布

开展了冰雪覆盖流域水文过程及其对气候变化的响应研究。利用 HBV 模型量了乌鲁木齐河源 1 号冰川融冰、融雪和降雨径流组分的占比，确定了融冰径流“拐点”时间在 2002–2008 年间。利用 GBEHM 模型模拟了阿尔泰山河源区融雪径流过程，完成了各融雪组分的定量化评估及其对气候变暖的响应机制。以上研究成果在《*Journal of Hydrology*》和《*Hydrological Processes*》等期刊上发表。

4) 其他：天山冰川站还长期开展北极斯瓦尔巴德地区两条多温型冰川（AustreLøvénbreen 冰川和 Pedersenbreen 冰川）观测研究，并将天山冰川站观测规范用于极地。天山冰川站自上个世纪 90 年代起，一直参与中国南极科学考察及北极格陵兰冰盖考察，获取了两个冰盖典型冰川流域大量的实测数据和样品。2021 年，我站科研人员查明了东南极冰盖雪层中稳定同位素的时空变化，研究成果在《*Journal of Glaciology*》等期刊发表。

本年度天山冰川站还在冰川地貌与第四纪冰川、冰缘植被与生态等方面取得突破，在第四纪冰川沉积序列与地貌演化冰缘植被的变化特征及控制机制方面开展了系统研究。相关结果发表在成果在《冰川冻土》和《*Science of The Total Environment*》等期刊上。

➤ 藏东南站

雅鲁藏布江径流对藏东南冰川消融响应研究成果：第三极地区，尤其是喜马拉雅山脉东部，冰川正在经历加速消融，这一现象与 21 世纪初季风期降水减少吻合。日益退缩的海洋型冰川在多大程度上缓冲了雅鲁藏布江上游（奴下水文站以上流域）不断减少的降水径流，目前尚不清楚。

中科院青藏高原研究所环境变化与多圈层过程团队及其合作者利用基于焓的分布式冰冻圈水文模型，结合墨脱水文观测资料，分析了雅鲁藏布江全流域（巴昔卡以上）的冰雪融水对径流的贡献情况。研究发现，1998-2019 年期间，雅鲁藏布江下游总径流增加速率（奴下水文站以下流域；+6.40 亿方/年）抵消了上游的总径流减少速率（奴下水文站以上流域；-6.89 亿方/年）；但是，藏东南冰川融水并不是下游水量增加的主要原因。1998-2019 年期间，雅鲁藏布江上游冰川融水对径流的贡献有限（15.7 毫米/年，约占上游总径流的 3.5%），以融雪径流的贡献为主（78.8 毫米/年，约占上游总径流的 22.3%）；在湿润的下游，这两个分量的绝对值则要大得多（冰川融水径流贡献为 144.8 毫米/年，融雪径流贡献为 219.1 毫米/年；然而它们仅占下游总径流的 5.7%和 7.8%）。对比 1998 年前后（1981-1997 和 1998-2019），由于冰川退缩和不断增长的非季风期降水，在上游和下游均发现了冰川融水贡献下降（上游从 7.2%减少至 3.5%，而下游从 8.2%减少至 5.7%；图 3）、积雪融水贡献增加的现象（上游从 16.6%增加至 22.3%，而下游从 7.2%增加至 7.8%）。

对整个雅鲁藏布江流域而言，过去 40 年里，降雨、融雪、冰川融化和地下水补给分别占总径流的 73.3%、17.2%、5.5%和 4.0%。与大陆型冰川相比，藏东南冰川的消融虽量大但相对贡献不足，这主要是因为丰富的季风期降水与高海拔地区温度最高的时期相吻合，冰川融化的贡献被降雨的贡献稀释。上述研究成果近期以“*Vanishing glaciers at southeast Tibetan Plateau have not offset the declining runoff at Yarlung Zangbo*”为题发表在《*Geophysical Research Letters*》。

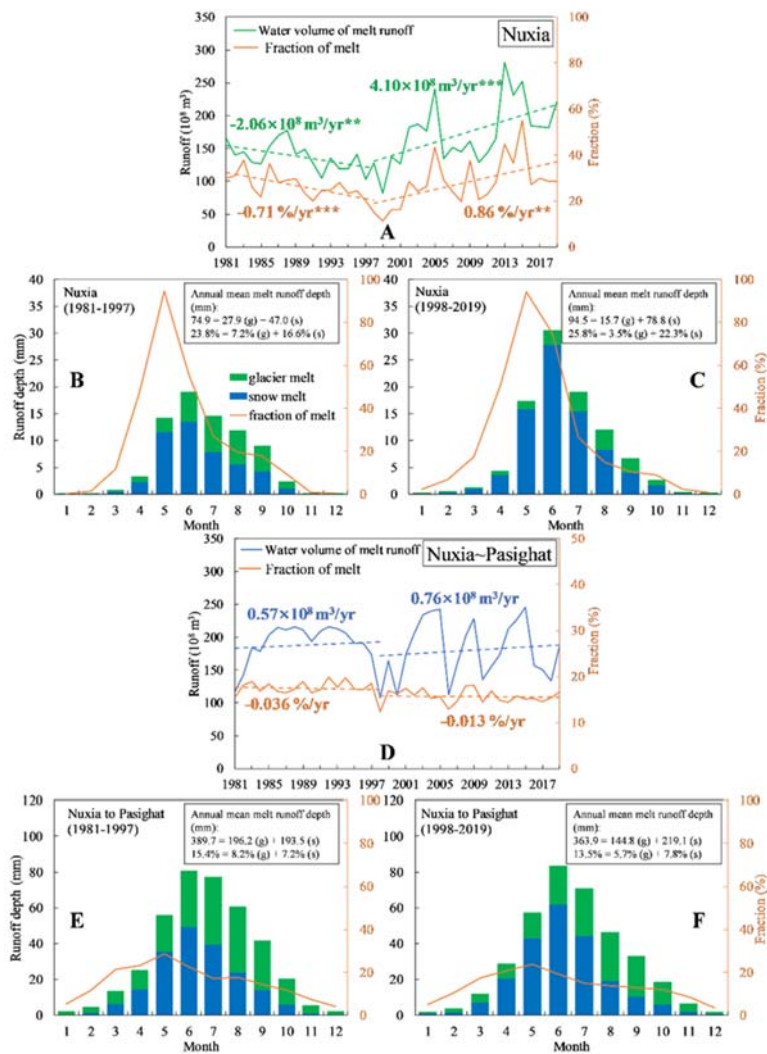


图 1.3.6 雅鲁藏布江（奴下水文站）上下游流域不同时期融水径流对比

➤ 阿里站

青藏高原西部冰川物质平衡受控于降水变化：青藏高原冰川是补给亚洲众多大江大河的重要源区。青藏高原冰川总体呈快速退缩和物质加速损失状态但空间差异巨大，在西昆仑-喀喇昆仑-东帕米尔地区甚至存在冰川正积累状态。对青藏高原西部纳木那尼和小昂龙冰川的物质平衡及慕士塔格扩扩色勒冰芯积累量进行分析研究，发现降水是该地区冰川变化的最主要控制因素，固态降水增加冰川物质补给并通过改变冰面反照率进而影响消融能量平衡从而影响冰川物质平衡状况，气温是影响这一地区冰川变化的次要因素。相关研究进展发表于 Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Journal of Climate 和 Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology。

➤ 祁连山站

祁连山区冰川 1961-2013 年物质平衡变化：冰川物质平衡作为气候的产物，其动态

变化会引起冰川末端位置、面积、冰储量及径流的变化。随着气候变暖，全球大多数的冰川呈现退缩状态，并且在最近 20 a 出现了加速的趋势。研究表明在 1.5 °C 气候情景下，到 21 世纪末亚洲高山区的冰川储量只有目前的 64%±7%。山地冰川作为一种淡水资源，在农业用水、水力、水生生物以及基本的水供应方面起着重要的作用。尤其是在干旱半干旱区，夏季冰川融水是河流的主要补给来源，对径流具有调节作用。祁连山的冰川区是柴达木盆地干旱半干旱区与河西走廊的“湿岛”，监测和估算祁连山区冰川物质平衡的变化对于干旱区的意义重大。冰川物质平衡的重建能够恢复其长时间序列的变化，有助于认识气候变化对冰川和径流的影响，而且对冰川物质平衡的预估具有重要的参考价值。基于中国第二次冰川编目数据、国家青藏高原科学数据中心的降水数据和气象站的实测气温数据并结合数字高程模型，利用加入辐射项的分布式度日模型，以已有监测冰川资料为基础获取度日因子，通过优化参数，对祁连山流域尺度 1961—2013 年的冰川物质平衡变化序列进行重建。结果表明：祁连山的冰川物质平衡变化以 1995 年为界可以划分为 2 个阶段。1961—1995 年，祁连山冰川物质平衡正负交替变化且变化幅度较小，冰川的消融量和积累量基本持平，平均物质平衡为 $0.11 \pm 0.13 \text{ m w. e. a}^{-1}$ ；1996—2013 年，冰川消融迅速加剧，物质平衡恒为负，平均物质平衡为 $-0.54 \pm 0.13 \text{ m w. e. a}^{-1}$ ，主要原因是正积温的逐年升高导致冰川消融加剧。1961—2013 年祁连山冰川的累积物质平衡为 $-12.76 \pm 4.24 \text{ m w. e.}$ 。空间分布上祁连山中段和东段流域的冰川消融速率大于西段的冰川。

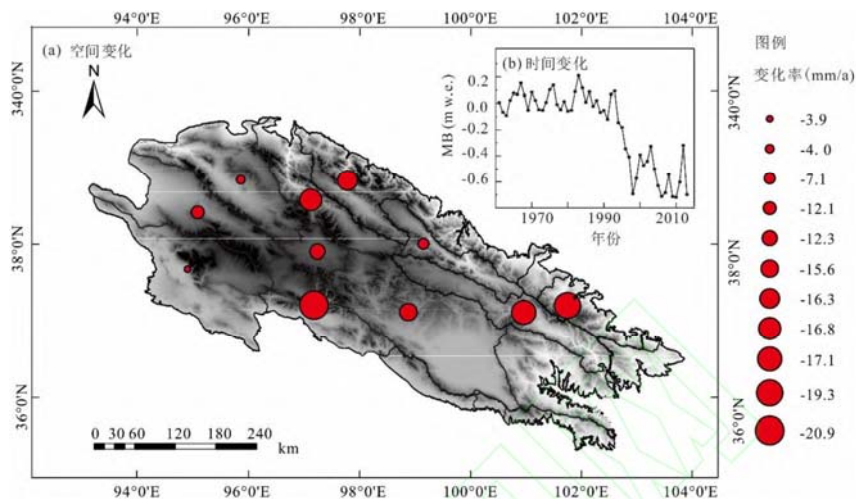


图 1.3.7 祁连山冰川物质平衡时空变化图

祁连山疏勒河流域上游不同景观对径流贡献量：疏勒河上游位于青藏高原的东北边缘，祁连山的西段，面积约 1 万 km^2 ，为中下游干旱区重要的水源地。该流域内分布 486 条冰川，面积约 403.5 km^2 ，多年冻土和季节冻土分别占 75%与 25%。地表类型有不同覆

盖度的草地（高、中、低覆盖度草地），灌木，高寒荒漠，裸地等景观类型。不同景观类型由于其自身特征（包括叶面积指数，反照率，粗糙度，高度等）的不同，其能量平衡与水量平衡过程显著不同。其中冰川在消融季接受大量的能量，产流量较大，是干旱区水资源的重要组成部分。

基于遥感与实地观测获取各景观的特征参数与气象、土壤等数据，利用分布式水文模型计算了疏勒河流域上游地区不同景观对径流的贡献量。从整个区域来看，草地产流量最大草地， $4.47 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占总径流量的 42.69%，进一步细分为高、中、低覆盖度草地，产流量占总径流量分别为 4.5%、15.6% 和 22.5%；其次为冰川的产流量 $2.64 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占总径流量的 24.9%；再次为高寒荒漠与裸地，各自产流量分别为： $2.05 \times 10^8 \text{ m}^3$ (19.6%)， $1.31 \times 10^8 \text{ m}^3$ (12.5%)；灌木的产流量最小为 $0.04 \times 10^8 \text{ m}^3$ (0.4%)。但是，各景观的单位面积产流能力与各自特征关系密切，由大至小分别为：冰川、高寒荒漠、低覆盖度草地、高覆盖度草地、中覆盖度草地、灌木和裸地。从不同海拔高度分区来看，中低山区（2000–4000m）和高山区（4000–5900m）面积几乎相等，但是产流差距接近 4 倍，即中低山区产流占总径流的 20.1%，高山区产流占 79.9%；中低山区中、低覆盖度草地是主要的产流区（12%），裸地约占 5%，其他为 3.1%，高山区冰川和高寒荒漠是主要的产流区，分别占 24.9% 与 18%；随海拔的上升，各景观的产流能力逐渐提高的，高山区是主要的产流区。

(Jin, Z., Zhao, Q., Qin, X., Zhang, J., Zhang, H., Qin, J., Qin, Y., Li, H., Chen, J., Liu, Y., Li, Y., & Wang, L. (2021). Quantifying the impact of landscape changes on hydrological variables in the alpine and cold region using hydrological model and remote sensing data. *Hydrological Processes*, 35(10), e14392. <https://doi.org/10.1002/hyp.14392>)

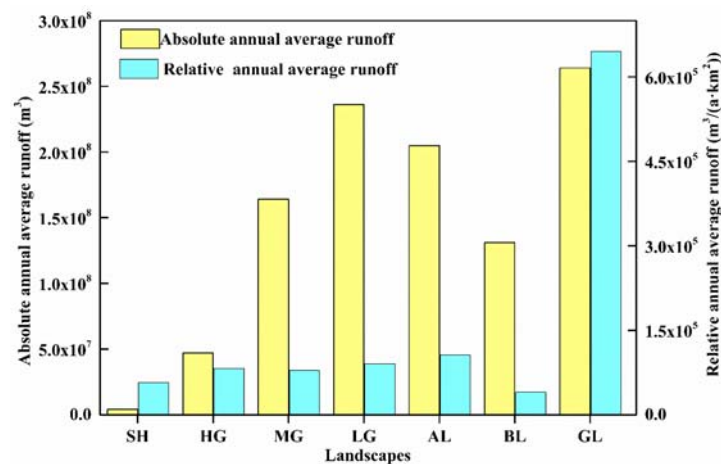


图 1.3.8 各景观的相对产流与绝对产流 (SH, HG, MG, LG, AL, BL, GL 分别指灌木、高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地、高寒荒漠、裸地、冰川)

➤ 玉龙雪山站

中国海洋型冰川区冰川变化时空分异特征研究：对比第一次冰川编目，第二次冰川编目时期中国海洋型冰川区岗日嘎布、达古雪山、玉龙雪山、梅里雪山冰川面积缩减率均超过了 38%，远高于全国 18% 的平均水平。白水河 1 号冰川、海螺沟冰川、帕隆 4 号、帕隆 94 号典型海洋性冰川运动速度分别介于 6.33–30.78 m/a、41–205 m/a、15.1–86.3 m/a、7.5–18.4 m/a 之间，其速度远高于其他类型冰川。中国海洋型冰川物质平衡变化最剧烈，年物质平衡在 -1.80 – 0.44 m w.e. 区间波动，观测时间段内年平均物质平衡递减率为 -0.037 m w.e. a^{-1} ，多年平均为 -0.66 m w.e.，远高于中国冰川年物质平衡亏损速率 (-0.015 m w.e. /a, $p < 0.0001$) 大于全球冰川物质亏损速率 (-0.013 m w.e. /a, $p < 0.0001$) (基于已监测冰川统计)。总体而言，海洋性冰川对气温更为敏感，对降水敏感性较弱 (Wang et al., 2021)。

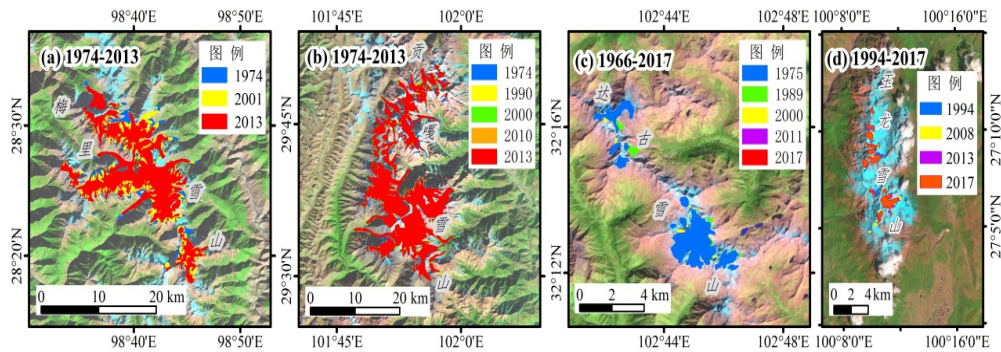


图 1.3.9 不同历史时期梅里雪山、贡嘎雪山、达古雪山与玉龙雪山冰川变化空间分布

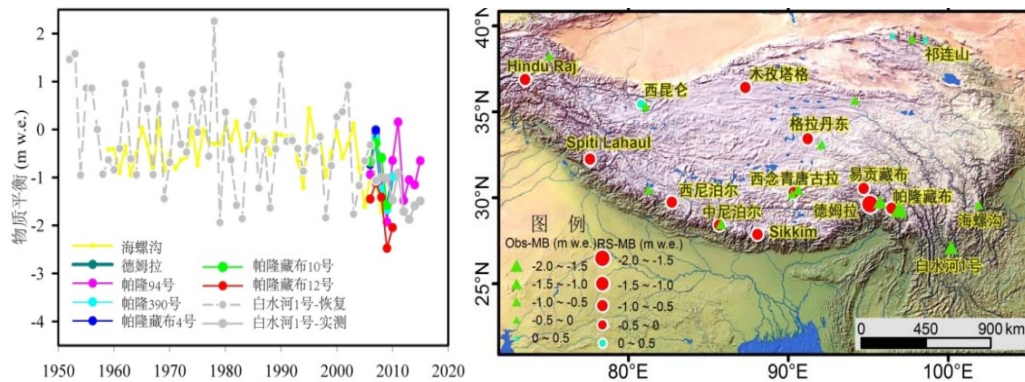


图 1.3.10 典型海洋型冰川物质平衡监测记录及其空间差异(三角形和圆圈分别代表冰面观测和遥感解译物质平衡变化)

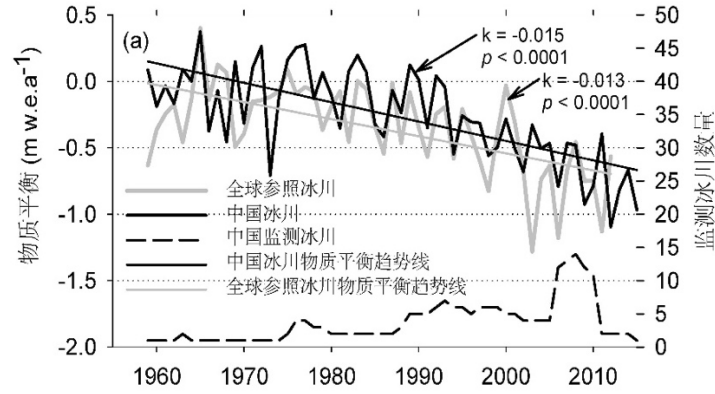


图 1.3.11 中国冰川物质平衡与全球参照冰川物质平衡变化对比

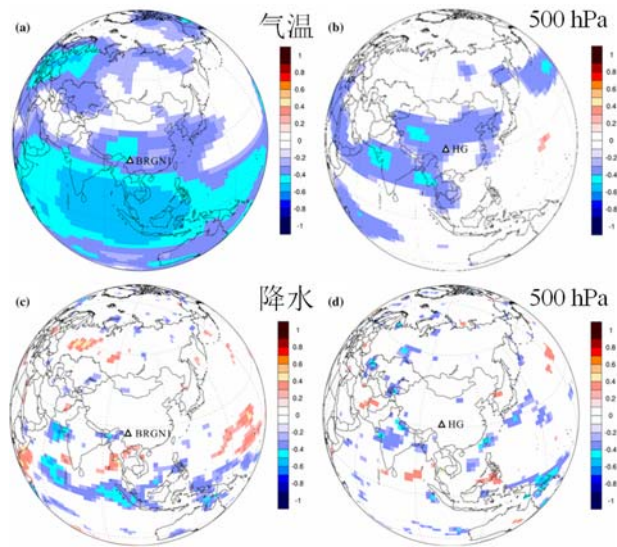


图 1.3.12 白水河 1 号冰川(BRGN1)(a,1958-2016)和海螺沟冰川(HG)(b,1959-2008)500 hPa 温度与物质平衡的空间相关性($\geq 95\%$ 置信水平), 与总降水和物质平衡空间相关性(c)和(d)

2008-2020 年, 玉龙雪山白水河 1 号冰川非季风期的积累(多年平均为 0.53 ± 0.08 m w. e.) 远远不能抵消季风期由气温和液体降水驱动的消融(多年平均为 2.08 ± 0.20 m w. e.), 这意味着冰川无法达到平衡状态, 并迅速失去了其质量(多年平均损失 1.54 ± 0.30 m w. e.)。除气温对其消融的影响, 液体降水与消融之间也存在明显的相关关系($r = 0.73$), 即液体降水越大, 冰川表面消融剧烈。降雨本身携带热能, 汇聚成河流时, 会侵蚀冰体。作为一种可能的载体, 通过冰隙将热量带入冰川的更深区域, 导致冰内/冰下融化等(Yan et al., 2021)。

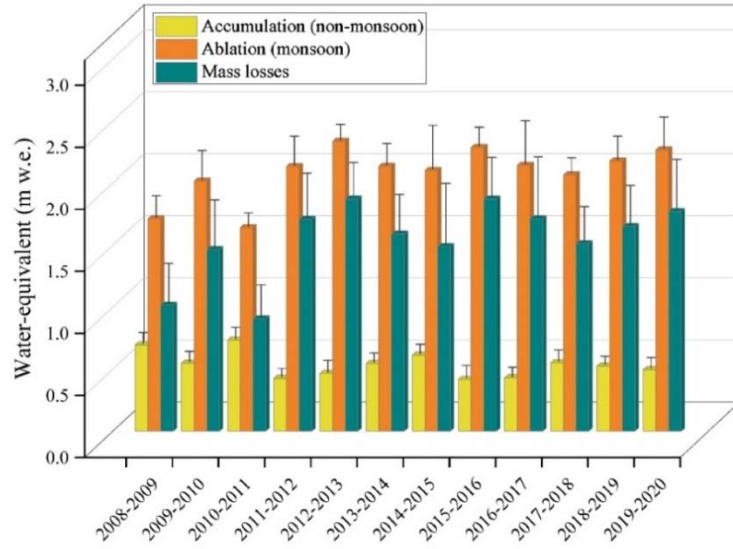


图 1.3.13 2008-2020 年白水河 1 号冰川物质平衡变化

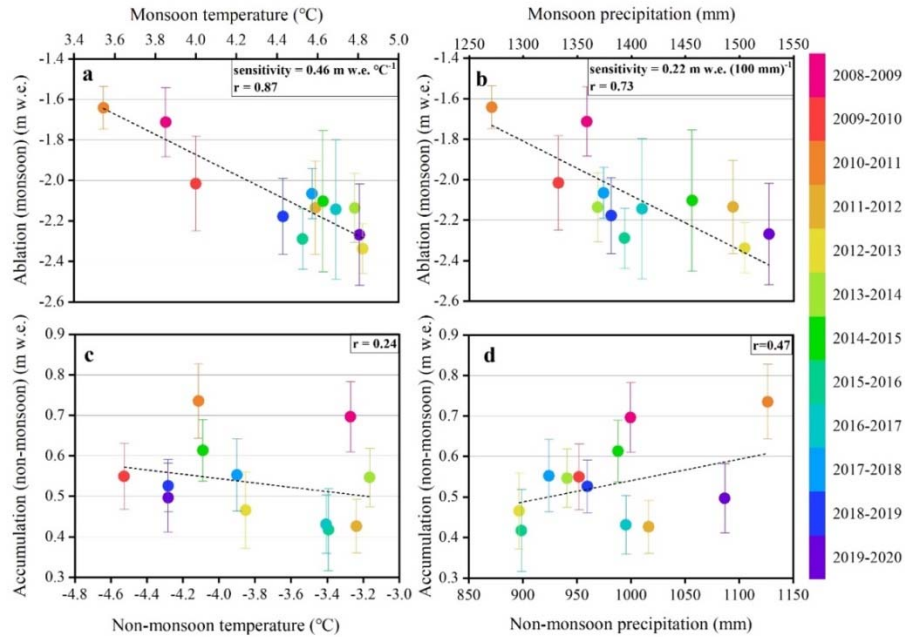


图 1.3.14 季风期、非季风期降水与物质平衡相关性分析

2012-2019 年际尺度上，白水河 1 号冰川（BRG1）表面运动速度总体呈下降趋势，冰川平均速度为 22.5 m/yr，并以 1.73 m/yr 的速度下降。2012 年，平均速度约为 25.4 m/yr，2013 年增加到 30.77 m/yr（最大平均速度），然后在 2019 年下降至 15.61 m/yr。观测到的减速主要是因气候强迫下显著的冰川物质亏损引起，因冰川变薄致重力加速削减，进而影响到冰川运动速度。

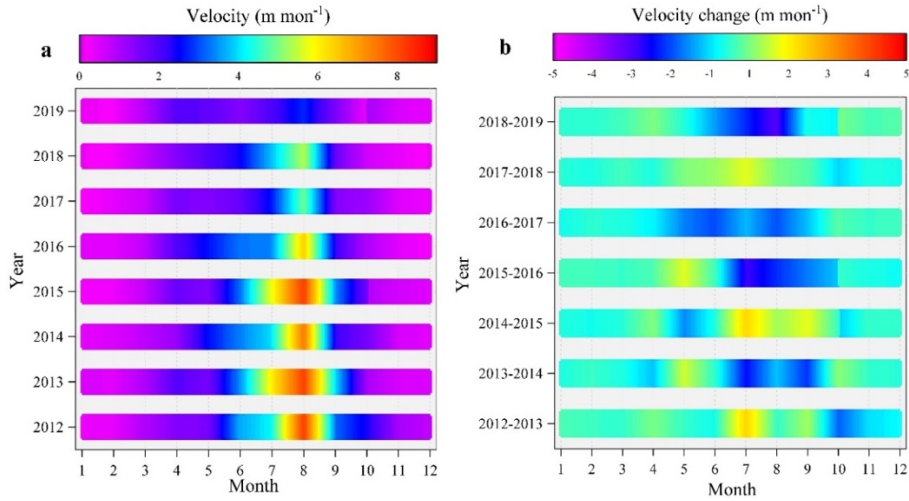


图 1.3.15 (a) 2012-2019 年 BRG1 平均每月运动速度；(b) 2012-2019 年 BRG1 平均每月运动速度年际差异

2012-2019 年间季节尺度上，白水河 1 号冰川（BRG1）季风期（6-9 月）的运动速度显著高于非季风期（10 月-次年 5 月），约占全年运动量的 68%-72%。每年 1 月冰川表面的运动速度最低，为 $<0.50 \text{ m mon}^{-1}$ ，2-7 月增加至 $\sim 0.80\text{--}3.9 \text{ m mon}^{-1}$ ，8 月达到运动速度的峰值（ $\sim 3.6\text{--}8.0 \text{ m mon}^{-1}$ ）。通过比较年际差异，在随后的每个 10-次年 5 月间，速度的年际变化很小，并保持在 $0.1\text{--}0.2 \text{ m}$ 的浮动范围内。6-9 月表现出较大的年际差异，说明年平均运动速度很大程度上取决于季风期（6-9 月）的运动速度。这些过程与表面熔融诱导的基础润滑和冻结速率控制的基础摩擦有关。冰川区温度 $<4^{\circ}\text{C}$ ，降水 $<200 \text{ mm}$ ，质量损失 $<-700 \text{ mm w. e.}$ （非季风期）冰川运动速度慢，月平均运动速度 $<2 \text{ m mon}^{-1}$ 。高冻结率导致冰川与其底部基岩之间产生了显著的摩擦阻力，导致在这一时期冰川运动相对不显著。冰川区温度 $>4^{\circ}\text{C}$ ，降水 $>200 \text{ mm}$ ，质量损失 $>-700 \text{ mm w. e.}$ （季风期）冰川运动速度较快。我们的观察发现在这一时期，由于冰川冰面消融诱导的冰川底部滑移成为运动速度加快的主要原因。

在空间尺度上，BRG1 的加速发生在距离冰川末端约 $600\text{--}700 \text{ m}$ 的区域（约 $4600\text{--}4700 \text{ m asl}$ ），平均速度为 $30\text{--}40 \text{ m yr}^{-1}$ 。在 2012-2019 年期间，在距离冰川末端 $400\text{--}600 \text{ m}$ 区域，冰川以较高的速度移动，年运动量 $\sim 20\text{--}33 \text{ m yr}^{-1}$ 。距离冰川末端 $700\text{--}1200 \text{ m}$ 的冰川区域，运动速度从 31.3 m yr^{-1} 逐渐下降到 18 m yr^{-1} 。2013 年观测到的较高运动速度（ $\sim 23 \text{ m yr}^{-1}$ ）已扩展到距离冰川末端 1200 m 的区域。2019 年，整个研究区范围内保持了较低的运动速度（均 $<25 \text{ m yr}^{-1}$ ）。

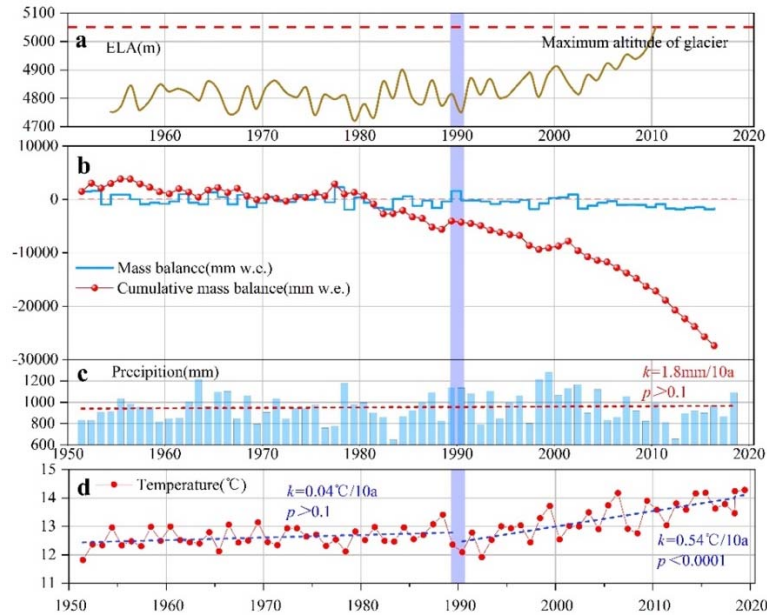


图 1.3.16 (a) 1959-2020 年间 BRG1 的平衡线高度变化; (b) BRG1 自 1952 年以来的年质量平衡和累积质量平衡; 丽江气象站多年平均降水量(c)和多年平均气温(d)

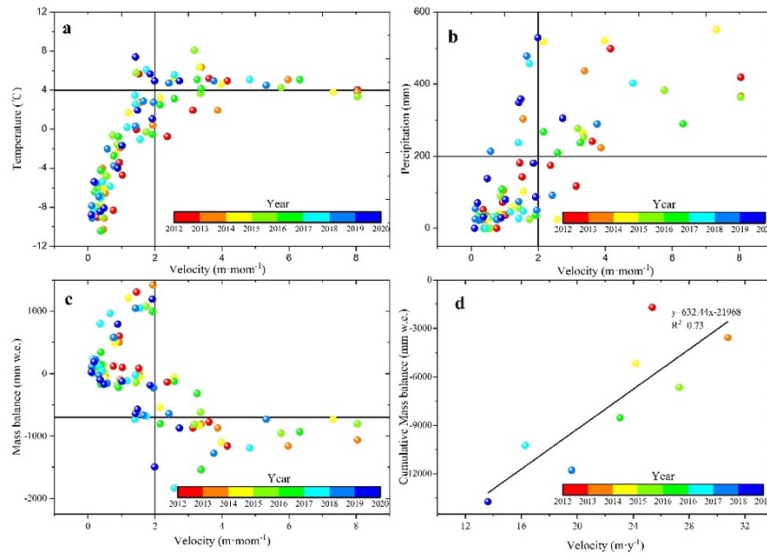


图 1.3.17 2012-2019 年 BRG1 运动速度与月平均气温(a)、月平均降水量(b)的关系; BRG1 运动速度与物质平衡(c)和累积质量平衡(d)之间的关系

这种变化通常与冰川的几何形状有关。冰川宽度改变形成的侧向压缩对冰的有效黏度和冰川的变形速率有很大影响,进而影响运动速度。大量物质损失(和大量融水产生)的冰川区域具有更有效的基础水文系统,有效地润滑冰床并加速冰川流动。冰裂隙的发育增强了冰川表面太阳辐射的能量增益,导致冰面融水增加,融水的输入诱导底部滑移,对表面速度产生潜在影响。

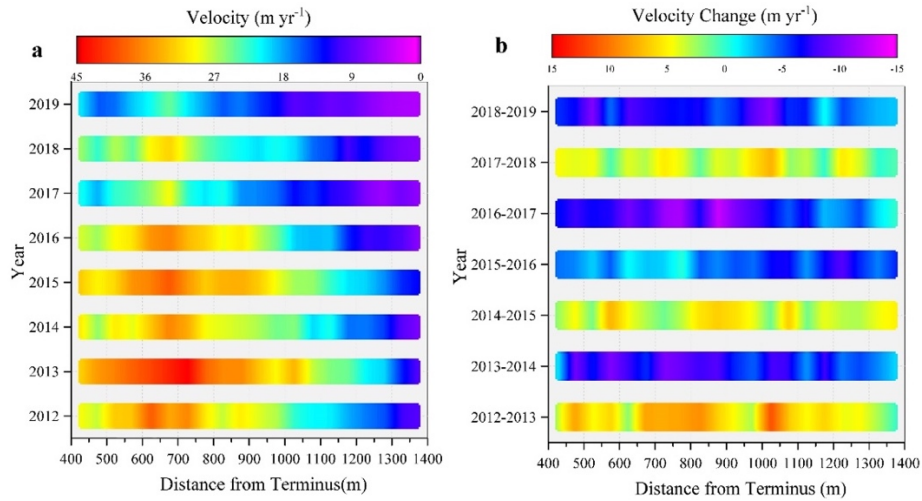


图 1.3.18 (a) 2012 - 2019 年 BRG1 纵剖面的地面速度年际变化; (b) BRG1 纵向剖面的地面速度年际差异

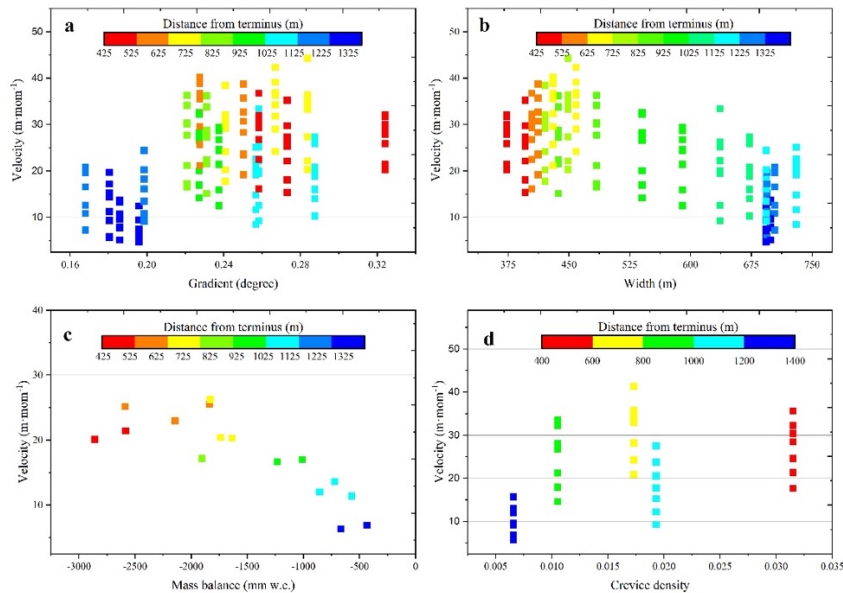


图 1.3.19 (a)冰川运动速度与坡度关系; (b)与冰川宽度关系; (c)与物质平衡关系; (d)与冰裂隙密度的关系

冰湖溃决灾害形成的外在和内在机理研究：近 10 年，新增 5 次冰湖溃决灾害-折麦错（2009-07-03）、嘎错（2009-07-29）、然则日阿错（2013-07-15）、贡巴通沙错（2016-07-05）、金乌错（2020-06-25）溃决灾害。其中，4 次冰湖溃决均位于中国海洋性冰川区。2020 年 6 月 25 日那曲嘉黎县吉翁措冰碛湖溃决，淹没或冲毁农田 382.43 亩，约 43.9 km 道路被冲毁，总投资 840 万元的已完工 45% 的依噶景区项目全部被淹没。2020 年 7 月 25-28，玉龙雪山站赴海洋型冰川区嘉黎县开展金乌措冰湖溃决灾害调研工作。

基于雷达和光学图像数据，分析了溃决前后金吾错冰湖的演变过程。结果表明：溃

决前（5月29日），溃决后（7月27日），金乌错冰湖面积和库容分别为 0.58 km^2 和 0.071 km^3 ，溃决后仅为 0.26 km^2 和 0.017 km^3 。溃决库容量高达 540 万 m^3 。

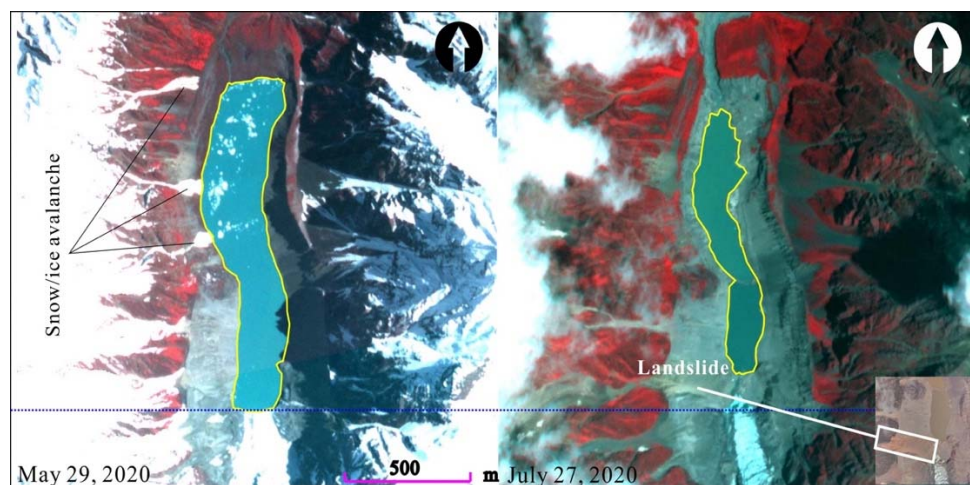


图 1.3.20 金乌错冰川湖近红外组合影像(左:5月29日溃决前;右:2020年7月27日冰川爆发后)(蓝色虚线为冰川末端;左边的黑线是雪崩或冰雪崩;右边的白色框为滑坡现场)影像来源: earthexplorer

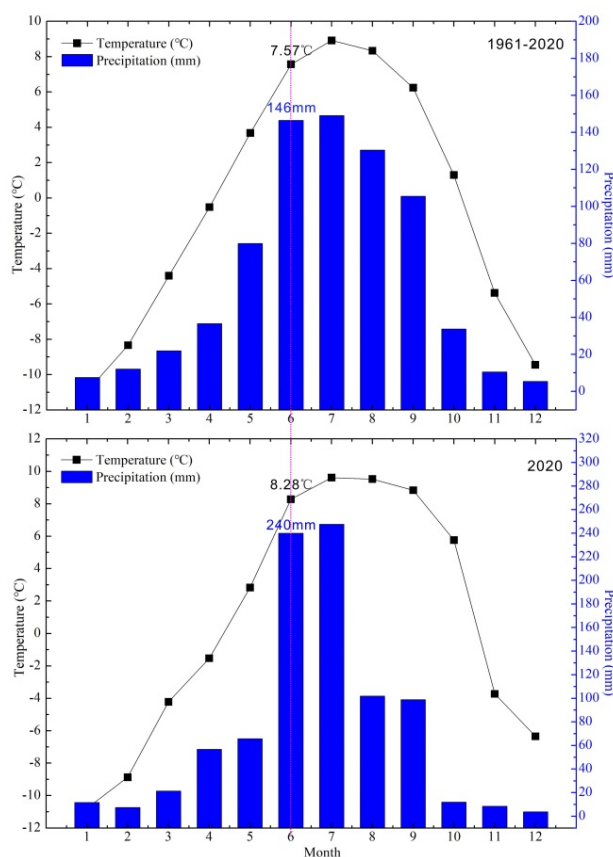


图 1.3.21 1961-2020 年与 2020 年嘉黎县气象站站月平均气温和降水比较

金吾错冰湖周边嘉黎县气象站气象数据显示,1984-2020 年该区域气温呈上升趋势,变化速率为 $0.12^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,特别是 2000 年以后,上升速率为 $0.40^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。1961-2020 年,

降水量呈轻微增加趋势, 仅增加 23.33 mm/10a。其中, 2009–2020 年有显著增加趋势, 仅增加 293.84 mm/10a, 2009–2020 年的平均值(777.46 mm)比 1961–2020 年的平均值(733 mm)高 43.64 mm。2020 年 6 月, 月气温和降水数据显示: 2020 年 6 月月平均气温为 8.28℃, 远高于 1961–2020 年多年平均 7.57℃。高温使雪崩概率增加, 冰雪崩、滑坡和加速冰川融化, 进而增加的水量和物质进入冰川。与此同时, 6 月降水(240 毫米)的平均值是远远高于 1961–2020 年期间 146 毫米。其中, 5 月 21 日至 6 月 24 日有一个连续的降水过程, 降水量高达 224 mm。可以说, 溃决前 6 月高温和强降水过程是溃决主要原因。溃决洪水泥石流灾害也导致尼屋乡多段河流和建筑物处于高风险状态。因此, 迫切需要重视溃坝等低概率灾害, 尽早采取实时工程措施, 将其潜在影响降到最低。总体而言, 此次溃决诱因为强降水和边坡失稳滑坡 (Wang et al., 2021)。

米堆冰川位于西藏波密县, 该区域曾多次发生冰崩和冰湖溃决事件 (如错噶冰湖和那隆藏布支沟冰湖)。光谢错冰湖位于米堆冰川末端, 冰川末端完全插入冰湖。1988 年 7 月 15 日, 光谢错冰湖发生溃决, 溃决前冰湖面积为 0.42 km², 溃决后面积减少至 0.19 km², 溃决洪水体量达 540 万方。主要原因如下: 1) 区域气候变暖远高于全球, 冰川融化加速、不稳定性增强。1961–2019 年, 波密地区年平均气温 8.9℃, 且存在显著的升温趋势, 每十年升温 0.3℃。近 20 年, 年平均气温 9.5℃, 表现出显著的升温加速趋势, 每十年增加 0.4℃。2) 短期强降水增加冰湖水源补给。1988 年 7 月 1–15 日期间, 总降水量 132.6 mm, 其中, 7 月 2–16 日发生持续性降水。特别是, 3 日和 4 日每天降水量达到 32.8 mm 和 65.1 mm。大量降水进入光谢错冰湖, 抬升湖水水位。3) 米堆冰川物质平衡出现正平衡。模拟研究发现: 1961–2019 年米堆冰川年平均物质平衡为 -1.88 m w. e., 多年平均夏季物质平衡为 -2.38 m w. e.。其中, 1987–1989 年物质平衡连续为正, 分别为 0.13、0.16、0.22 m w. e.。此外, 1988 年冰川夏季融水总量为 2.44 m w. e., 高于多年夏季平均消融。4) 冰川前进/跃动, 冰内水系溃决, 最终导致冰湖溃决。持续高温天气和强降水, 为冰湖带来大量水源补给; 同时冰川突然前进/跃动, 冰内水系通道打开, 大量水体进入冰湖 (具体体量无法计算), 冰湖水位快速抬升, 最终导致 1988 年 7 月 15 日冰湖溃决 (Che et al., 2021)。

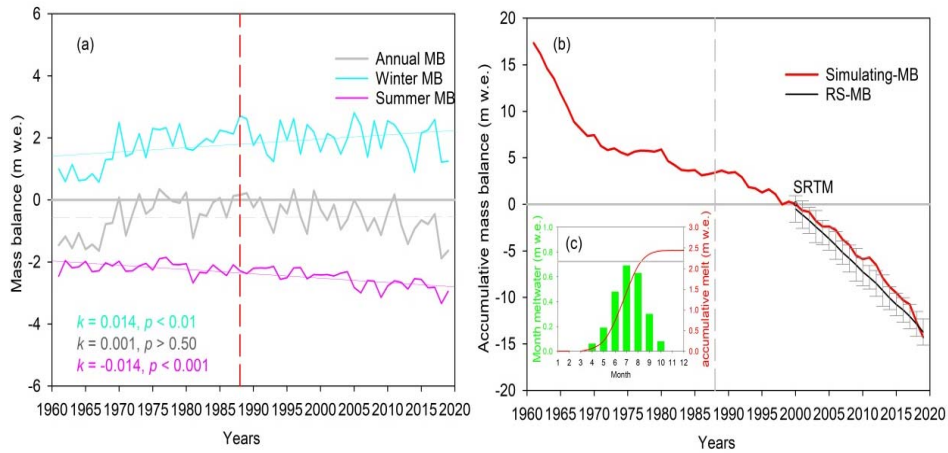


图 1.3.22 米堆冰川物质平衡模拟结果（小图 c 为 1988 年的月尺度融水）

气候快速变暖，高原冰冻圈特别是冰川已失稳，灾害变多。总体而言，全国各部门对冰冻圈灾害研究和预警能力均较薄弱，因此建议在米堆冰川-光谢错冰湖建立综合观测站，将其打造成冰冻圈科学相关冰冻圈灾害研究及其防灾减灾示范站点；同时加强冰冻圈灾害研究团队建设，推进相关监测和预警业务，为全国冰冻圈防灾减灾和可持续发展提供科技支撑。

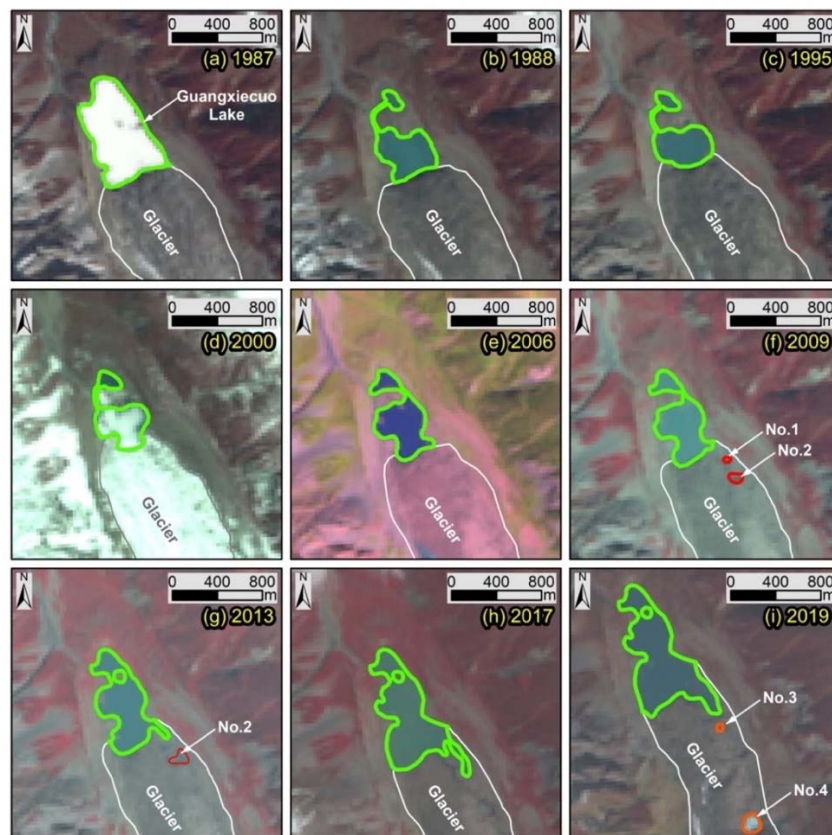


图 1.3.23 光谢错冰湖溃决前后面积变化及其冰湖演替过程

4. 植被生态系统研究

➤ 拉萨站

气候变暖使得生态系统呼吸的温度敏感性趋同：研究收集包括青藏高原在内的全球 74 个涡度相关站和 54 个野外实地增温实验数据，揭示了陆地生态系统呼吸敏感性随温度变化全新的时空变异规律，并对未来气候变暖情景下陆地生态系统呼吸敏感性的空间模式做了预测。

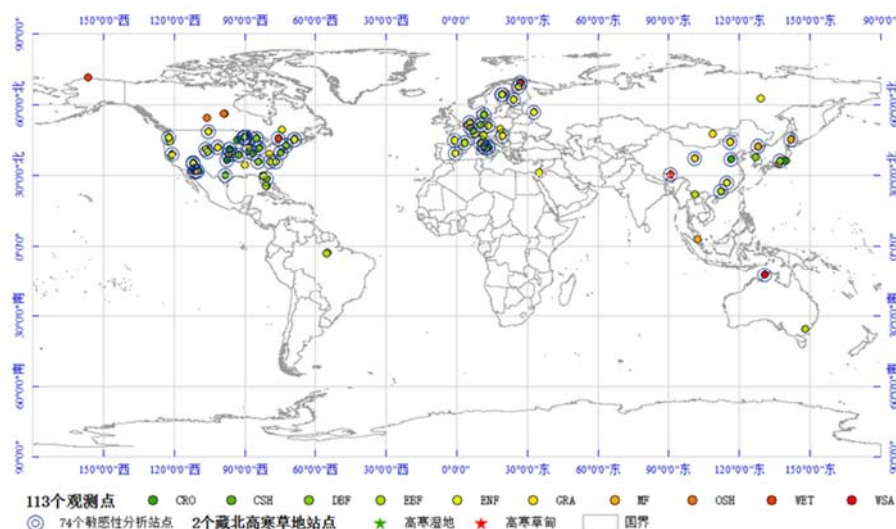


图 1.4.1 研究站点分布：图中，不同的颜色的点代表 10 种不同的植被类型：CRO,农田；CSH, 郁闭灌丛；DBF, 落叶阔叶林；EBF, 常绿阔叶林；ENF,常绿针叶林；DRA, 草地；MF, 常绿与落叶混交林；OSH, 开放灌丛；WET, 湿地；WSA, 稀树草原。

研究表明，高纬度高海拔寒冷地区生态系统虽然有显著较高的温度敏感性，气候变暖后温度敏感性的下降也更强烈，而随着气候变暖的持续进行，这种对温度敏感性的下降程度在空间上的差异也会越来越小，因此未来持续的气候变暖很可能会使全球陆地生态系统的呼吸敏感性趋同（1.44，1.38-1.50）。

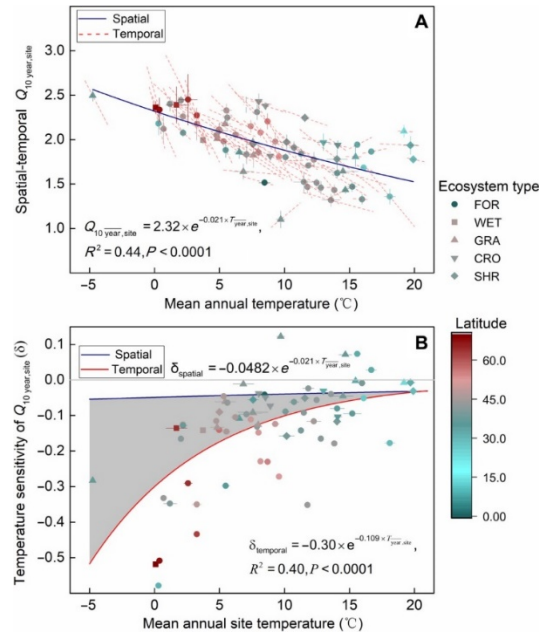


图 1.4.2 Q_{10} 及其时空温度敏感性随年均温变化的时空模式

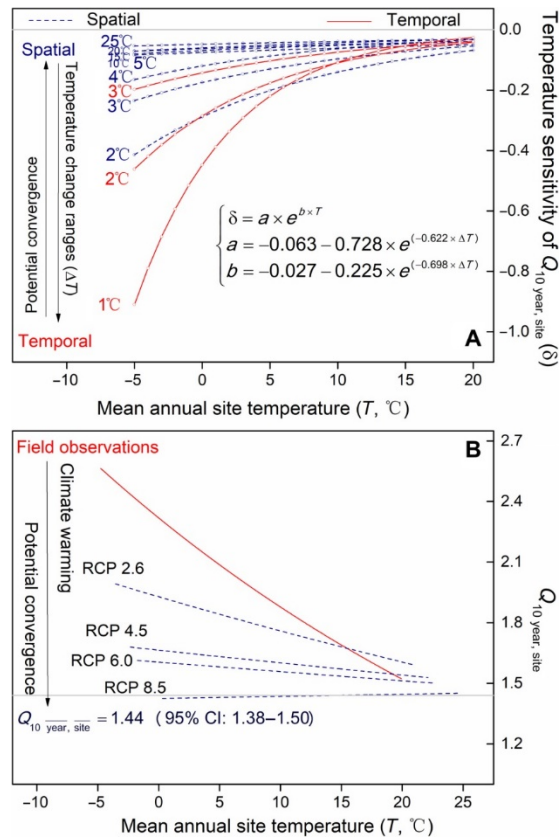


图 1.4.3 气候变暖下 (RCPs) 陆地生态系统呼吸温度敏感性潜在趋同

但是，温度敏感性响应气候变化在空间上的这种变异模式在大多数目前的地球系统模式中是被忽略的。显然，这种伴随着增温而表现出的温度敏感性的强烈地下调，尤其是在高纬度高海拔寒冷地区（如青藏高原等极地地区），会很大程度上缓和（并不能完全

抵消，因为并未降为 1.0）由于增温而引起的碳排放预测。因此，本研究认为由于气候变暖引起的陆地生态系统大量的碳流失需要被重新仔细评估，尤其是在青藏高原地区等高纬度高海拔寒冷地区。

研究成果的水平和影响:随着异质性的气候变化的持续，全球陆地生态系统应对气候变化的敏感性研究已成为全球变化科学研究的重点领域。生态系统呼吸的温度敏感性(Q10)是气候变化-碳循环反馈关系中的重要参数。已有研究表明，高纬度高海拔寒冷地区温度敏感性更高，同时这些地区的气候变暖也更加强烈，因此暗示了高纬度高海拔寒冷地区，例如青藏高原高寒生态系统碳排放不断加剧的可能性。但是，Q10 随温度变化的时空模式在气候变暖的进程中会不会改变是未知的。本研究利用观测数据和模型模拟，系统分析了 Q10 的时空变异规律，为更为准确地量化气候变化-碳循环响应与反馈提供了理论支撑。研究结果在今年 4 月 9 日发表在国际著名综合期刊 Science Advances 上，张宪洲研究员和牛犇博士分别为本文的通讯作者和第一作者。

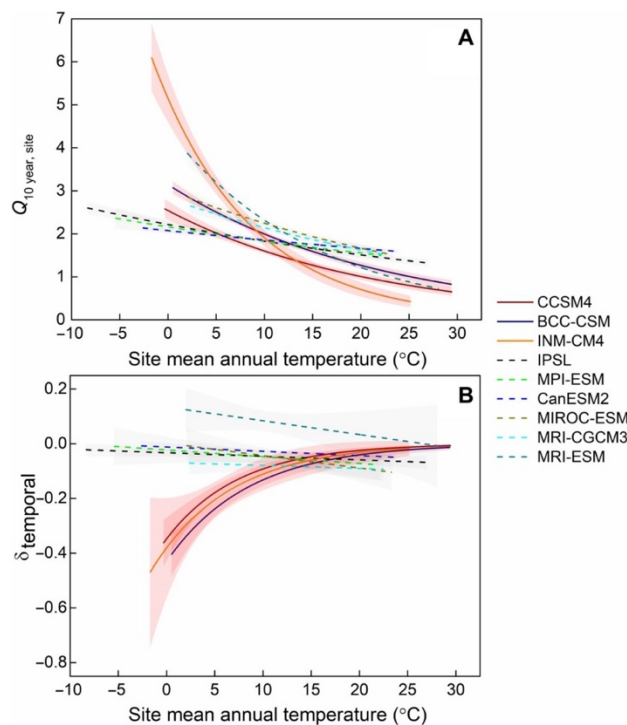


图 1.4.4 机理模型（9 个 CMIP5 模式）输出数据驱动的 Q10 年均温变化的时空动态

➤ 三江源站

同域分布的牦牛和高原鼠兔通过菌群互惠促进菌群的多样性和相似性:物种间的相互作用为理解物种共存机制提供了基础。高原鼠兔和牦牛在青藏高原有着共同的栖息地和相似的食物。随着人口扩张和过度放牧，牦牛数量增加而高原鼠兔的种群密度也随之增加。为了揭示两者之间的潜在关联，我们研究了两个物种肠道菌群的变化规律。利用

16S rDNA 进行测序技术，对同域和异域鼠兔和牦牛的粪便菌群结构和功能进行了研究。结果表明，同域分布增加了鼠兔肠道微生物多样性和相似性。同域分布的鼠兔的菌群中 Firmicutes, Proteobacteria, Cyanobacteri 和 Tenericutes 丰度降低，而 Verrucomicrobia 的丰度增加。同域的牦牛的 Firmicutes, Bacteroidetes, and Spirochaetes 的丰度显著增加，而 Cyanobacteria, Euryarchaeota, and Verrucomicrobia 的丰度明显减少。在同域中，高原鼠兔从牦牛菌群中获得 2692 个 OUT，牦牛从鼠兔菌群中获得 453 个 OTU。Firmicutes, Bacteroidetes, Verrucomicrobia 和 Proteobacteria 主要通过水平传播的方式在鼠兔和牦牛间传播。研究显示水平传输是选择过程，鼠兔和牦牛倾向于通过水平方向发展互惠关系。

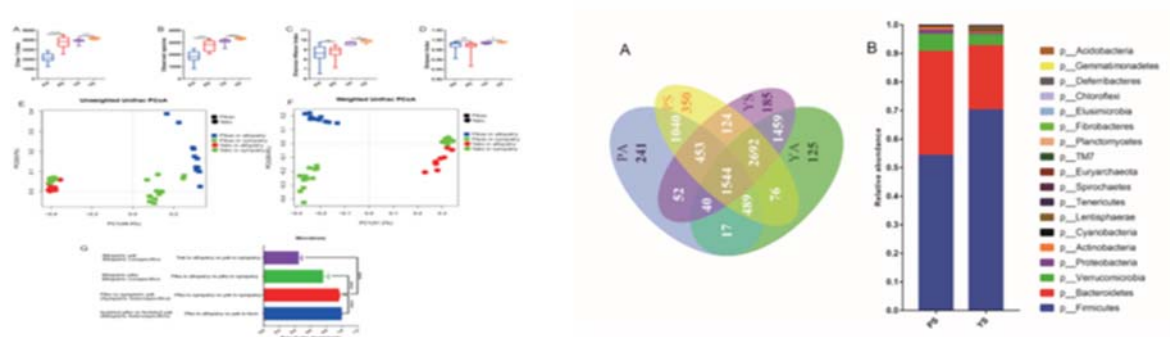


图 1.4.5 高原鼠兔肠道菌群多样性

全球草地生态系统分析:就全球草地生态系统尤其是青藏高原高寒草地的现状、退化程度和主导因素进行了整合分析，进而提出的几项重要的战略措施：在全球政策中增加对草原的认识；制定草地退化的标准化指标；利用科学创新的方法实现区域和景观尺度的有效恢复；加强修复经验的知识转让和数据共享。通过标准化评估和对退化草地和恢复草地潜在生态系统服务权衡的共同理解，达到平衡利益相关者的需求，将有助于制止草地退化，促进恢复，并有效维持草原生态系统提供的社会、经济、文化和生态效益。发表在国际顶刊杂志《Nature Reviews Earth & Environment》。

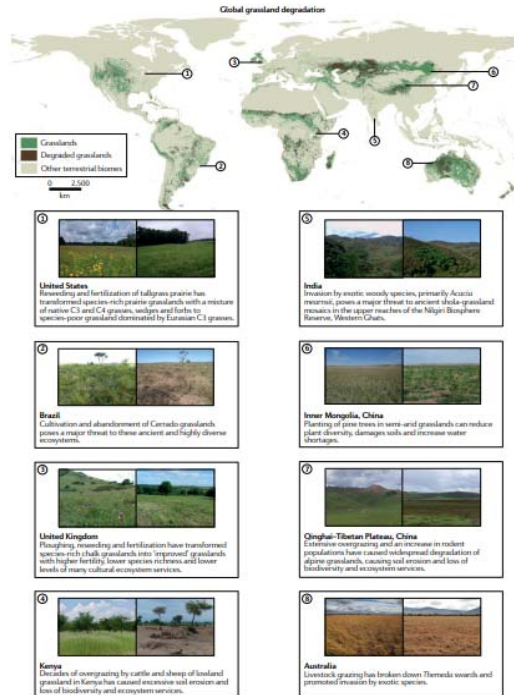


图 1.4.6 全球草地退化的程度（未退化草地左和退化草地右对比）

➤ 申扎站

生态工程实施对高寒植被调控作用凸显：青藏高原的高寒草地对气候和放牧强度变化敏感，利用 1981-2015 年间的 GIMMS 遥感植被指数 (NDVI)，以牲畜存栏数作为放牧的关键指标，以气温、降水表征气候变化，开展放牧和气候变化对该区高寒植被影响的研究。旨在阐明气候变化和生态工程（放牧活动）对高寒草地变化的相对影响，为评估高寒草地对气候变化响应和制定合理生态工程政策提供理论依据。

1981-2000 年间，草地 NDVI 总体呈现增加趋势，增加最明显的出现在雅江河谷地带；2000-2007 年间，NDVI 有下降趋势，下降明显的区域出现在那曲的东北部；2008-2015 年间，NDVI 有回升趋势，回升明显区域出现在阿里的西部。

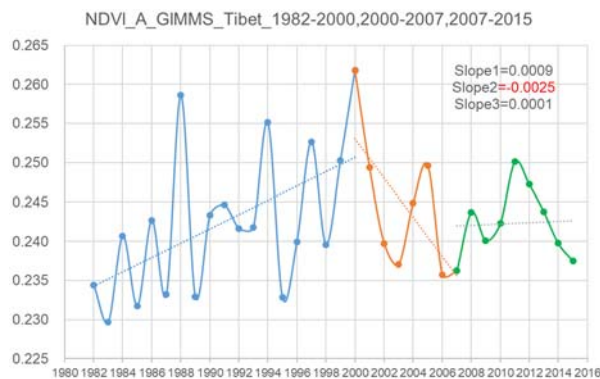


图 1.4.7 1981-2015 年西藏草地 NDVI 变化趋势

西藏退牧还草工程始于 2004 年，2006 年进一步推广实施，2007 年全面展开。以 1981-2000 年的植被变化为本底，以气温和降水为自变量，NDVI 为因变量，建立二元回归模型，选取置信区间 95%以上的栅格进行模拟。

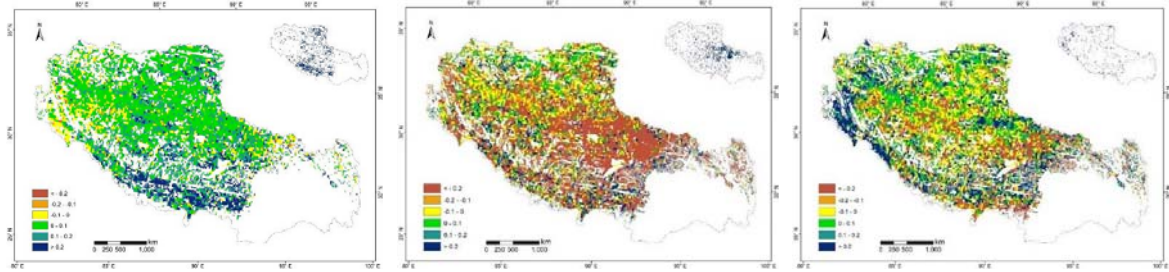


图 1.4.8 1982-2000-2007-2015 年西藏自治区放牧活动与减畜工程的实施情况

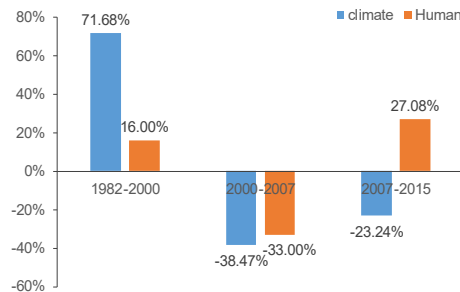


图 1.4.9 驱动力定量区分结果

研究表明，高寒草地植被变化的主要驱动因素随着气候条件变化强度和生态工程的实施力度而变化，植被整体生长状况在退牧还草、减畜等重大生态工程实施前后存在明显差异，生态工程的实施明显影响人类活动的贡献率。1982-2000 年间，相对良好的水热条件有助于草地生长，而放牧活动也趋近于稳定，此时，气候变化起到主要驱动作用（+71.68%）；2000-2007 年间，植被绿度的降低，人口增加、放牧活动增加引起的贡献率为-33.00%，气候条件的贡献率为-38.47%，两类驱动因素贡献率大体相当；2007-2015 年，生态工程全面展开，减畜率达到 30%左右，草地绿度整体有所提高，在气候贡献率为-23.24%的情况下，人类活动的贡献率依然为 27.08%。

结果进一步表明，气候变化和放牧活动均可能成为驱动草地变化的主要因素，且气候变化和放牧活动对高寒草地植被变化的影响程度存在明显的时空差异，而生态工程的实施起着很重要的作用。

青藏高原生态安全屏障碳汇功能状态及变化过程

(1) 青藏高原高寒生态系统是重要碳汇且持续增强: 青藏高原是全球最大的高山冻土区，气候变暖可能导致大量冻土碳释放，但气候暖湿化也能促进植物碳固定提升，区

域碳源汇平衡状态和趋势存在不确定性。通过综合定位监测、控制试验和模型模拟等技术手段对青藏高原陆地生态系统碳源汇现状及动态进行了系统研究。研究发现，青藏高原 32 个监测点中 26 个呈现净碳汇状态，区域净碳汇是此前科学界预期的 4 倍。高寒生态系统净碳汇最强值出现在约海拔 4000 米左右。碳交换的温度敏感性分析发现，水热同期的夏天碳固定速率系统性地高于冬季碳释放对温度的敏感性，且这一现象随海拔升高更为明显。16 个控制实验结果显示，青藏高原碳汇在模拟变暖情境下总体呈现增强趋势且存在阈值，模式模拟也表明青藏高原暖湿化对碳固定的促进超过了冻土碳释放的影响。上述证据表明，青藏高原高寒生态系统总体是重要的碳汇，将对气候变暖形成负反馈。成果以 Research Article 发表于 PNAS 期刊。在此基础上，团队与中科院西北院和北京师范大学等单位合作，进一步量化了青藏高原冰川、河流、湖泊、湿地、热融湖塘等各组分的碳通量。研究发现，上述地表要素的碳流失仅抵消了高原陆地碳汇的 16.8%，高原陆地生态系统碳汇仍主导青藏高原净碳平衡。该研究为认知青藏高原净碳平衡提供了初步的全景图，未来更多的原位观测将有助于改善其不确定性。成果以 Letter 形式在 PNAS 进一步阐述了陆地碳汇对整个高原碳平衡的决定性作用。上述系列成果为青藏高原生态安全屏障关键功能量化和重大生态工程时空格局优化提供了重要科技支撑。

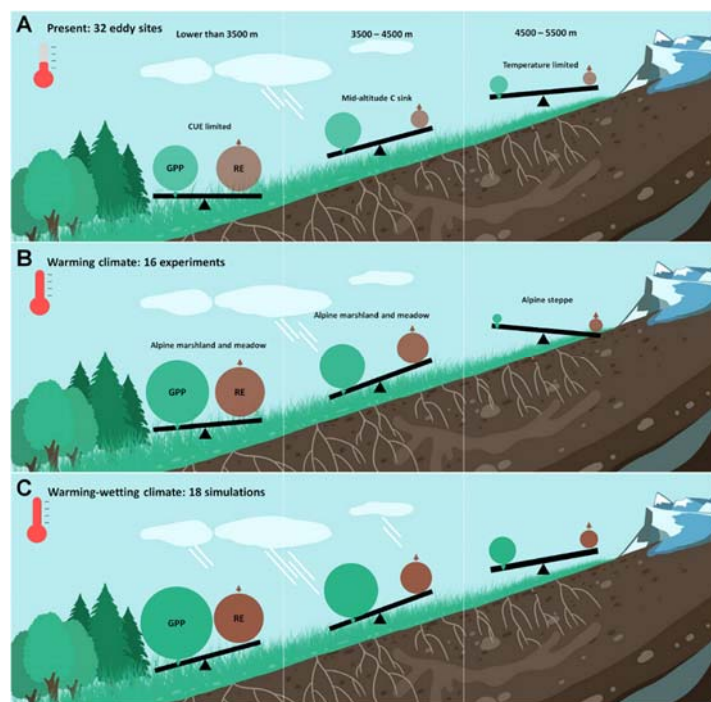


图 1.4.10 青藏高原高寒生态系统 CO₂ 汇海拔分布及对气候变化响应模式

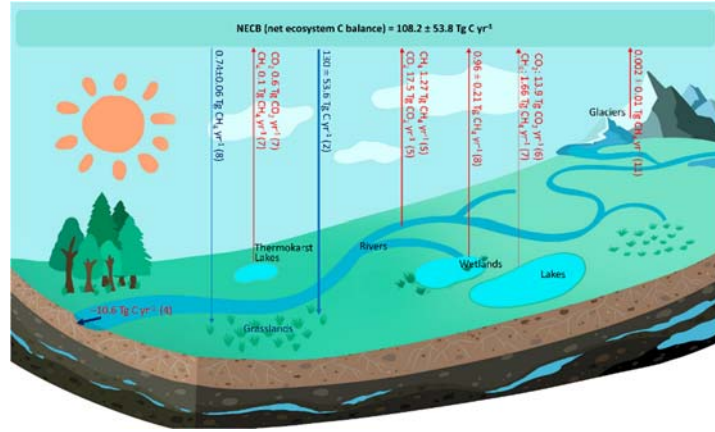


图 1.4.11 青藏高原净生态系统碳平衡初步估算

(2) 不同高寒生态系统碳水热对放牧与围栏封育的响应存在差异:为解决草地退化问题,青藏高原自 2004 年开展了大规模围栏生态工程,定量分析围栏对碳水热过程的影响对认识重大生态工程的环境效应具有重要科学意义。基于位于羌塘地区申扎站高寒草原和湿地围栏内外配对涡度协方差分析观测,连续 2 年的数据表明申扎高寒草原和湿地生态系统均是净 CO_2 汇。高寒草原放牧与围栏封育生态系统 2 年平均 CO_2 吸收量及碳利用效率 (CUE, NEP/GPP) 分别为 61 g C m^{-2} 、 26 g C m^{-2} 和 21%、9%;高寒湿地放牧与围栏封育生态系统 2 年平均 CO_2 吸收量及碳利用效率分别为 79 g C m^{-2} 、 163 g C m^{-2} 和 12%、30%。围栏封育提高了高寒湿地生态系统的碳汇强度及碳利用效率,而高寒草原生态系统则相反。

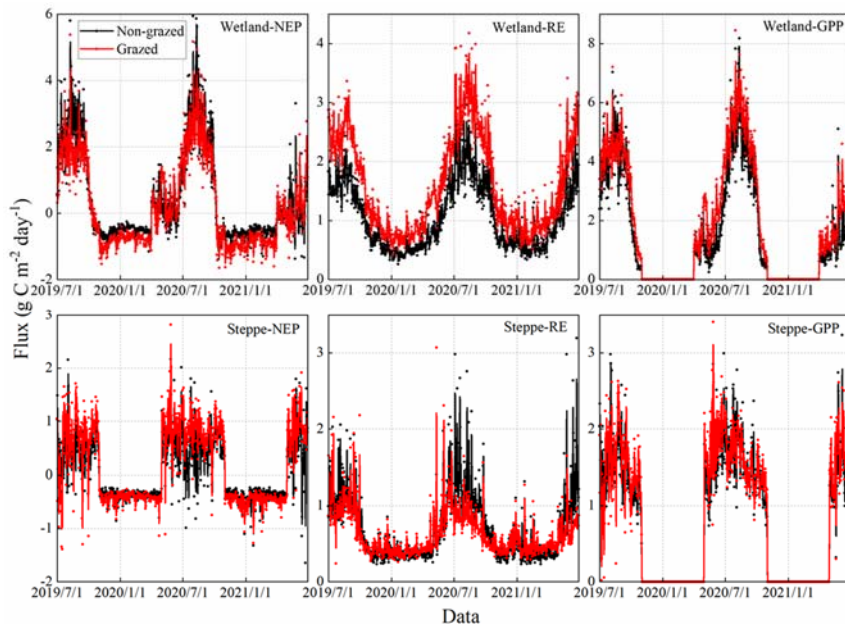


图 1.4.12 青藏高原申扎高寒湿地和草原放牧与围栏封育下生态系统的 $[\text{CO}_2]$ 通量日变化特征 (NEP, Net ecosystem productivity, 净生态系统生产力; RE, Ecosystem respiration, 生态系统呼吸; GPP, Gross primary productivity, 总初级生产力)

研究期内高寒湿地生态系统围栏封育内的潜热（LE 值）、感热（H 值）以及非生长季的草原生态系统的 LE 值均高于外部，而高寒草原生态系统的感热通量表现与之相反，生长季内的 LE 值围栏内外差异不显著。生长季期间，各生态系统类型 H 值和 LE 值月均日变化均呈单峰曲线，高寒湿地生态系统 H 值月均日变化最大值为 143.185 W/m^2 ，最小为 -17.236 W/m^2 ；潜热最大为 357.164 W/m^2 ，最小值为 13.989 W/m^2 。高寒草地生态系统 H 值月均日变化最大值 239.428 W/m^2 ，最小为 -23.664 W/m^2 ；LE 值最大为 180.698 W/m^2 ，最小值为 2.893 W/m^2 。从整体上看，研究分析了不同生态系统围栏内外水热通量变化规律，围栏封育提高了高寒湿地生态系统的能量通量，对高寒草原生态系统的影响并不显著。

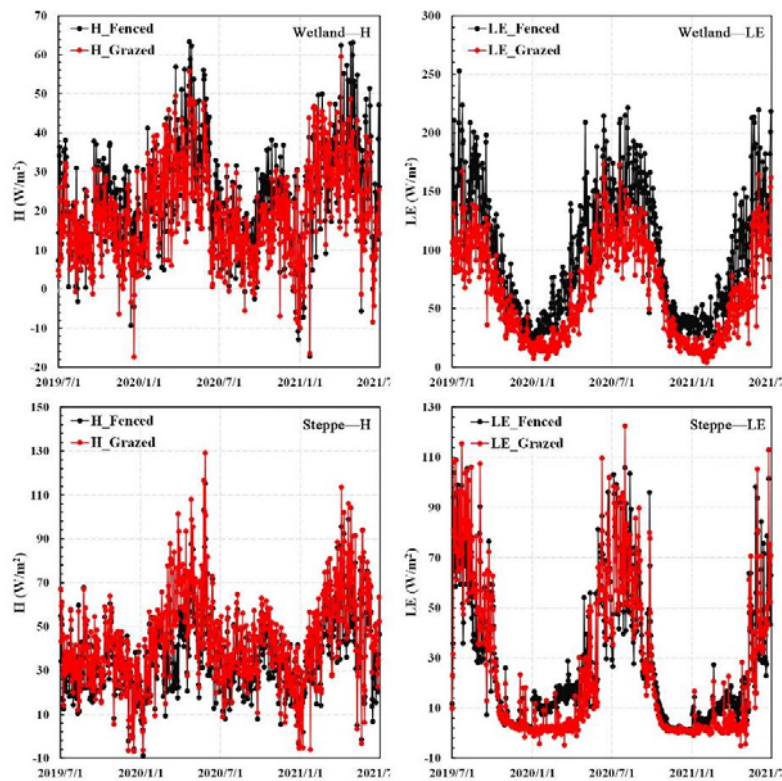


图 1.4.13 青藏高原申扎高寒湿地、草原生态系统围栏内外 H、LE 通量日变化特征

（H，Sensible Heat Flux，感热通量；LE，Latent Heat Flux，潜热通量）

基于高光谱的高寒草地物种识别与多样性监测

（1）机载高光谱-地面控制实验平台的建设：研发了一套适用于生态工程区域的无人机高光谱植被恢复成效监测及分析系统，以满足现代智能化工程监测的使用需求。无人机高光谱草原植监测系统（大疆 M600Pro+Rikola 高光谱仪）监测，利用无人机搭载高光谱相机来进行区域生态恢复工程成效分析监测，该技术具有以下优点：1）通过无人机飞行控制系统获取高时空分辨率的植被生长信息，实时反映植被恢复成效；2）建立综

合评估模型，避免单指标片面结论，有效的解决了生态恢复工程成效监测与评估的技术问题；3)反映了生态工程区植被恢复年限的光谱响应特征。

无人机高光谱草地生态工程成效监测技术系统是通过以下子系统实现的：1) 无人机信息采集子系统，基于无人机高光谱航空遥感系统采集植被生长过程中的低空高分辨率高光谱遥感影像；2) 遥感图像预处理单元，用于遥感影像的波段配准、空三加密、反射率校正等预处理过程；3) 植被信息反演建模系统，基于植被参数反演方法，建立植被参数高光谱遥感反演模型并拟合最佳光谱指数 4) 建设野外调查数据库，通过设置野外典型样区，记录并归纳不同物候期生物量、群落植被盖度等指标植被指数与对应恢复程度的标准关系；5) 生态工程植被恢复成效的评估模型，构建可视化的三维模型来评估植被恢复情况，6) 评估结果的可视化输出，输出实时工程成效报告及成效效果图。所述数据处理中心为装载有工具软件的计算机系统。

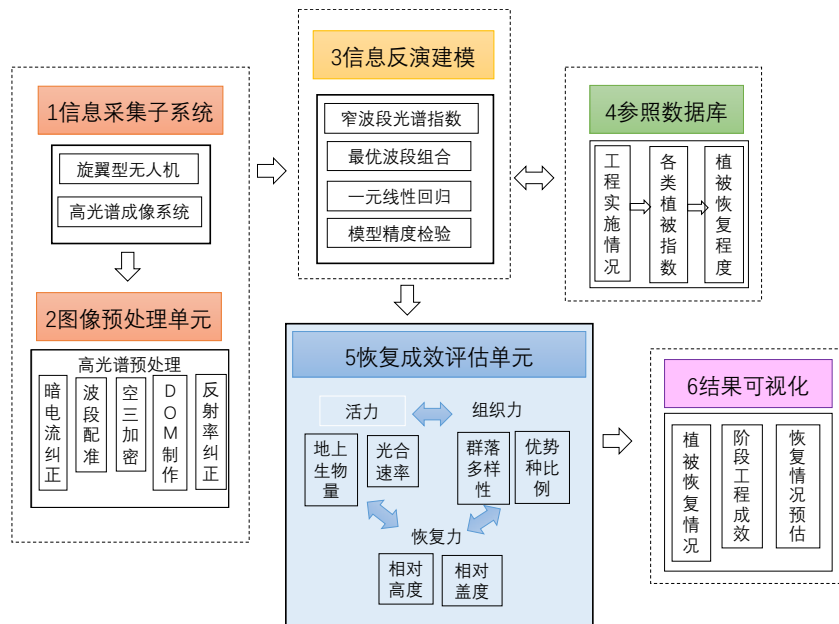


图 1.4.14 高光谱（机载+地面）-地面控制实验平台框架图

(2) 基于高光谱的高寒草地物种识别与多样性监测: 建立青藏高原植被高光谱数据库。作为高寒沼泽、高寒草甸和高寒草原等类型的典型优势种藏北嵩草、矮嵩草、紫花针茅和火绒草具有明显的光谱特征差异，主要体现在红边位置、红边形状、红谷和纤维素吸收波段处，与植物的生长形态固有特性密切相关。在围栏禁牧工程实施的草地恢复过程中，光谱反射率整体上持续升高，叶绿素吸收造成的“红谷”特征增强，近红外水分吸收谷也变明显，土壤背景光谱特征渐渐降低。紫花针茅及其伴生种植被生长高度低矮，片叶内卷，叶面积较小，故植被覆盖度大小会显著影响光谱反射率。因此，对高寒植物的光谱曲线根据覆盖度不同而分别研究。

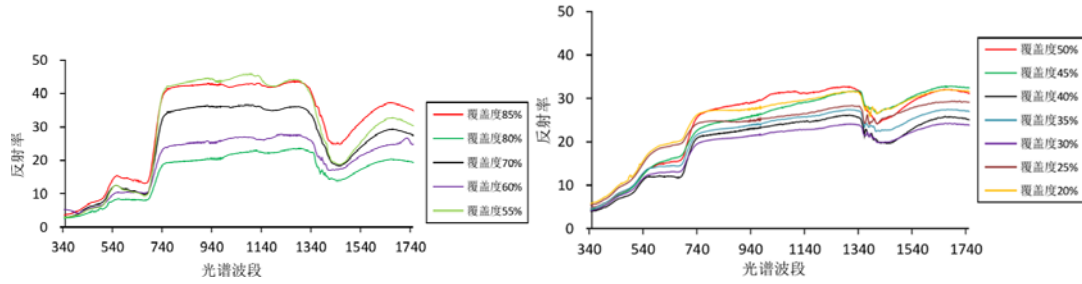


图 1.4.15 不同覆盖度下紫花针茅光谱特征图

藏北高寒草原植物矮小、稀疏，空间分布异质性强。这一特性使得这里的植物物种鉴定比其它平原地貌的植物鉴定困难得多。本部分旨在探索植物近距离高光谱成像的潜力。具体来说，我们评估哪些光谱波段哪些分类方法适合进行植物物种鉴定。采用连续统去除法、光谱指数法和主成分法增强光谱差异植物物种间的特征。然后，采用基于随机森林(RF)的变量重要性评价进行降维，选择有利于鉴别禾草种类的指标。基于这些指标构建了四组数据集以支持向量机(SVM)、RF、人工神经网络(ANN)和光谱角制图仪(SAM)。我们发现:1)利用马氏距离和变异重要度评价方法表明，红波段、红边波段和光谱指数均为对植物物种鉴定的重要作用；2)在四个分类器中，神经网络分类器的分类效果最好数据集 3 上的反射率图像的总分类精度为 94.73%，Kappa 系数是 0.93；3)机器学习算法 RF 和 ANN 在植物物种识别方面表现良好，总体精度大于 91.59%，kappa 系数大于 0.89。这些结果表明高光谱图像和机器学习分类器，可以有效地使用鉴定高山草原植物种类。

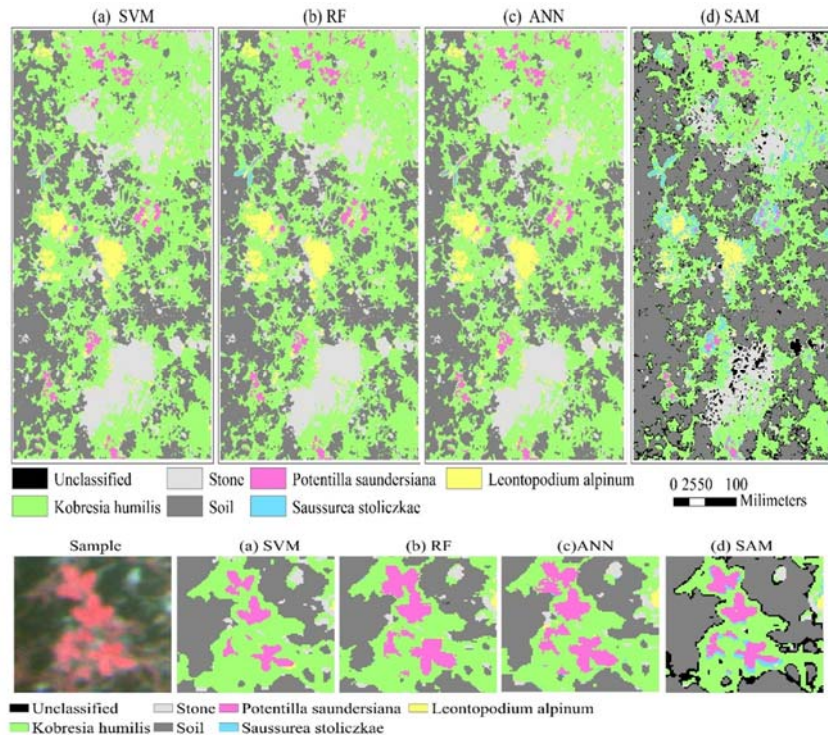


图 1.4.16 基于近距离高光谱图像的藏北高寒草原植物种类例图

➤ 那曲站（地理所）

全球变化关键要素对高寒草地群落土壤碳稳定性的影响：以高寒草地生态系统为研究对象，通过控制实验等方法，揭示了氮素有效性和降水变异调节 CO_2 浓度升高对碳通量的施肥效应。一般认为 CO_2 浓度升高能够促进植物生长和生态系统碳汇 (CO_2 施肥效应)。但是 CO_2 施肥效应的大小，以及其他全球变化因子对 CO_2 施肥效应的影响还存在很大的不确定性。此外，缺乏来自高海拔地区的实验研究结果也限制了我们对 CO_2 施肥效应的认知。

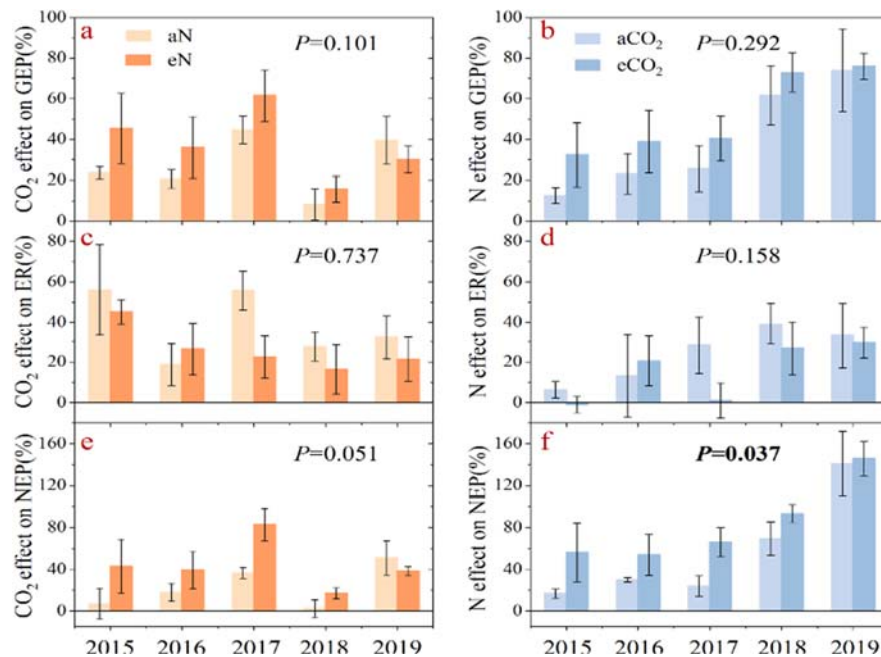


图 1.4.17 低氮(aN)和高氮(eN)环境下 CO_2 浓度升高引起的 GEP (a), ER (c) and NEP (e)变化百分比; 环境 CO_2 浓度(aCO₂)和 CO_2 富集(eCO₂)环境下施氮引起的 GEP (b), ER (d) and NEP (f) 变化百分比。

基于青藏高原半干旱草地生态系统为期五年的 CO_2 浓度升高和氮添加控制实验，以及较大的生长季降水量变异，本研究发现 CO_2 浓度升高同时提高了生态系统总生产力 (GEP) 和生态系统呼吸 (ER)，对净生态系统生产力 (NEP) 无显著影响。 CO_2 浓度升高处理下叶片氮含量的降低抑制了 CO_2 浓度升高对植物生长和生态系统碳通量 (尤其是 GEP 和 NEP) 的刺激作用。在施氮的环境下， CO_2 浓度升高会促进碳汇。此外，生长季降水的变异对 CO_2 施肥效应起着重要的调节作用。丰沛的降水会降低 CO_2 浓度升高对碳通量的刺激作用。我们的研究表明 CO_2 浓度升高只在氮添加的条件下或在较干旱的环境下会刺激生态系统碳汇。

由于生态系统广泛地受到氮素的限制，陆地生态系统在全球大气 CO_2 升高的背景下对减缓气候变化发挥的作用可能比预测的更弱，而且这种作用还与降水的变异密切相关。

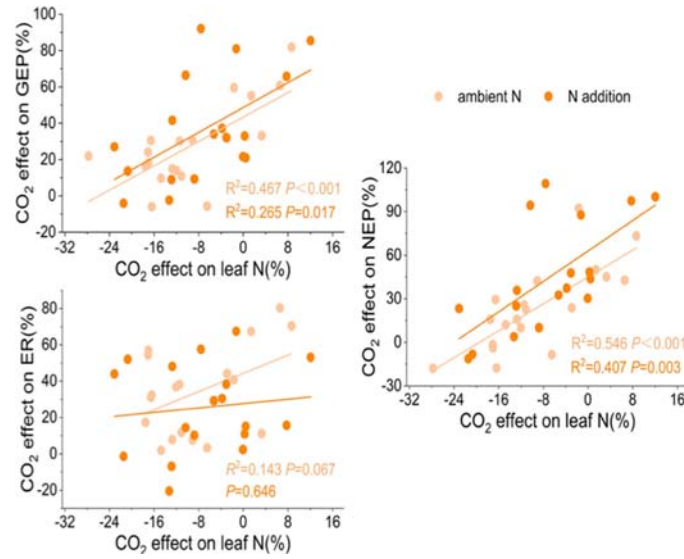


图 1.4.18 CO₂ 浓度升高对 GEP, ER and NEP 的效应与叶片氮含量变化的关系

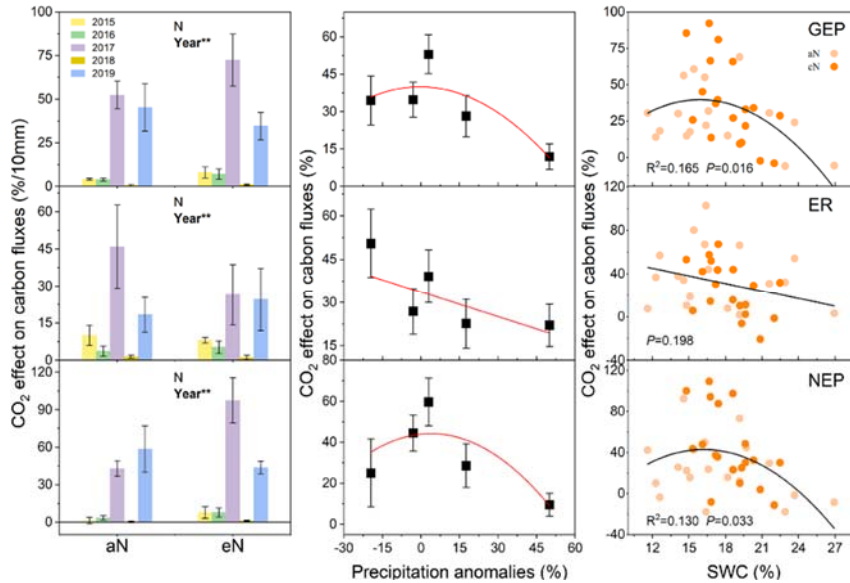


图 1.4.19 低氮(aN)和高氮(eN)环境下 eCO₂ 效应的降水敏感性(左列); 生长季降水异常与 eCO₂ 效应的关系(中间列); 低氮(aN)和高氮(eN)环境下生长季土壤水分含量与 eCO₂ 效应的关系

在全球氮沉降效率不断增加的背景下,通过对氮梯度的控制,探究施氮条件下土壤呼吸对 CO₂ 浓度升高的响应规律,结果表明施氮不改变 CO₂ 浓度升高对土壤呼吸的刺激作用。全球大气 CO₂ 浓度持续升高可以通过改变土壤碳过程进而影响生态系统碳循环。土壤 C 对 CO₂ 浓度升高的响应具有很大的不确定性,CO₂ 浓度升高是如何与其他因素(如氮素有效性)相互作用影响土壤碳通量是这种不确定性的重要来源。本研究根据典型高寒草地生态系统上开展的 CO₂ 浓度升高和氮添加交互实验,将 5 年的土壤呼吸原位测量与实验室微生物代谢效率的培养实验相结合,我们发现在环境氮条件下和施氮条件下 CO₂ 浓度升高对土壤呼吸的刺激效应相同,施氮对土壤呼吸无显著影响。在低氮条件下,

微生物活性的提高是 CO_2 浓度升高刺激土壤呼吸的主要原因；在施氮条件下， CO_2 浓度升高通过提高胞外酶活性对呼吸的刺激作用与微生物碳利用效率的提高对土壤呼吸的抑制作用部分抵消。本研究的结果表明在当前的氮素条件下以及未来氮沉降引起的氮素有效性增加的条件下， CO_2 浓度的升高均会增加土壤碳的损失。该结果对于深入认识高寒生态系统在全球碳循环中的作用至关重要。

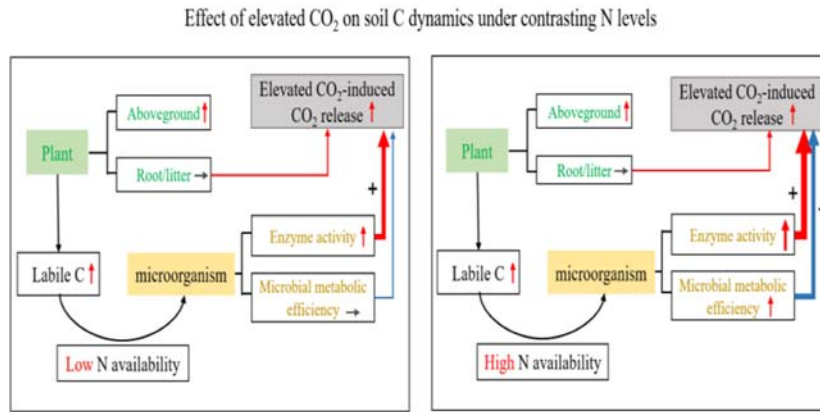


图 1.4.20 CO_2 浓度升高在低氮和高氮环境下对土壤呼吸的刺激作用

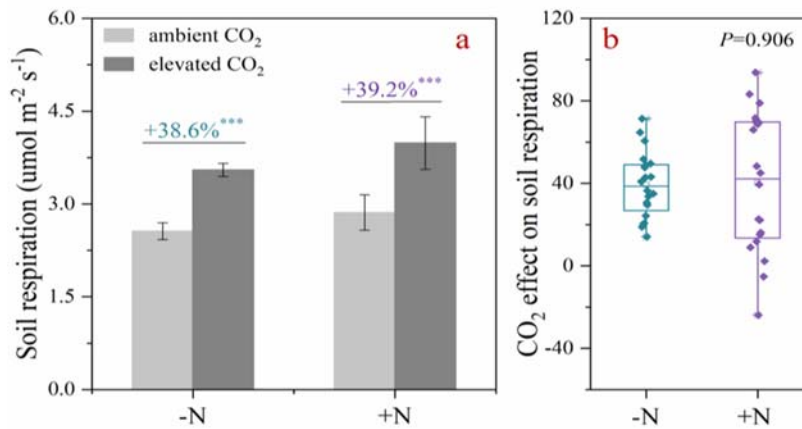


图 1.4.21 低氮(左)和高氮(右)环境下 CO_2 浓度升高对土壤呼吸的作用概念图

水分有效性对高寒草甸生产力的调节制约机制：

水分因素是限制高寒草甸生产力的关键要素，依托那曲站的长期数据积累，探究水分有效性对探究高寒草甸群落固碳与耗水平衡关系，阐明藏北高寒草甸水分利用效率的变化及干旱对水分利用效率的影响。

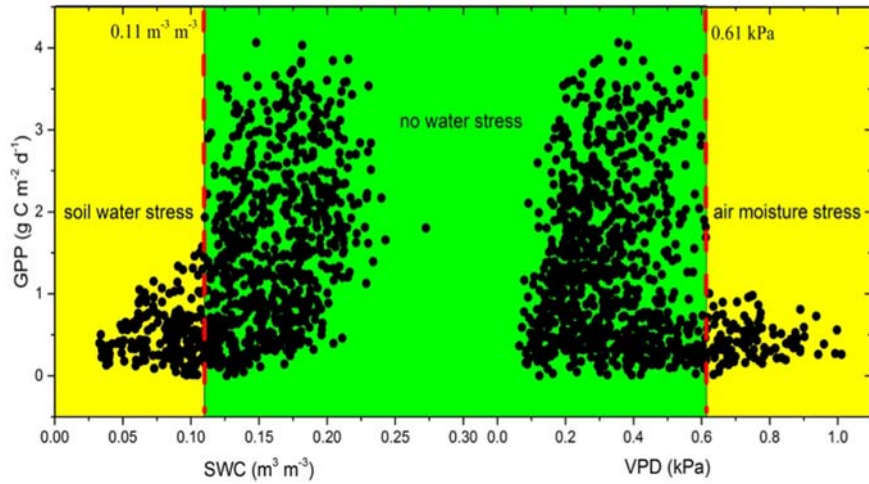


图 1.4.22 高寒草甸生态系统土壤干旱和大气干旱阈值

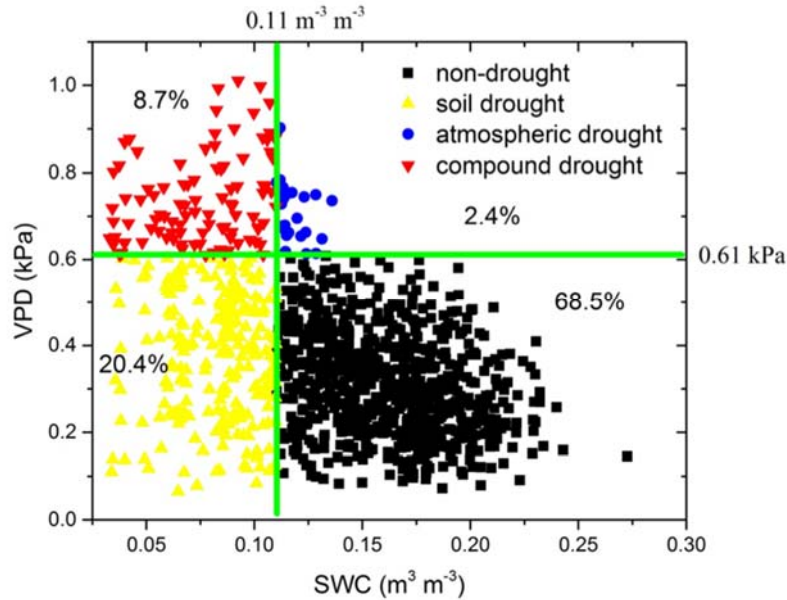


图 1.4.23 不同类型干旱的发生概率

利用那曲站连续 7 年的观测资料,探讨了大气干旱、土壤干旱和复合干旱对高寒草甸生产力的影响。结果表明,藏北高寒草甸生长季内生态系统生产力的变化主要受水分条件调控。当发生土壤干旱($SWC < 0.11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$)或大气干旱($VPD > 0.61 \text{ kPa}$)时,生态系统总初级生产力(GPP)受到明显抑制。其中,土壤干旱发生概率最高,为 20.4%。大气干旱发生概率为 2.4%,复合干旱($SWC < 0.11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 且 $VPD > 0.61 \text{ kPa}$)发生概率为 8.7%。复合干旱对 GPP 的抑制作用最强,使 GPP 降低 $1.47 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$,大气干旱使 GPP 降低 $1.10 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$,土壤干旱使 GPP 降低幅度最小,为 $0.69 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。然而,土壤干旱的发生频率较高,持续时间较长,显著降低了高寒草甸 GPP 的年总量。三种干旱类型均使感热通量(H)显著增强,正反馈于干旱,导致 GPP 的进一步下降。

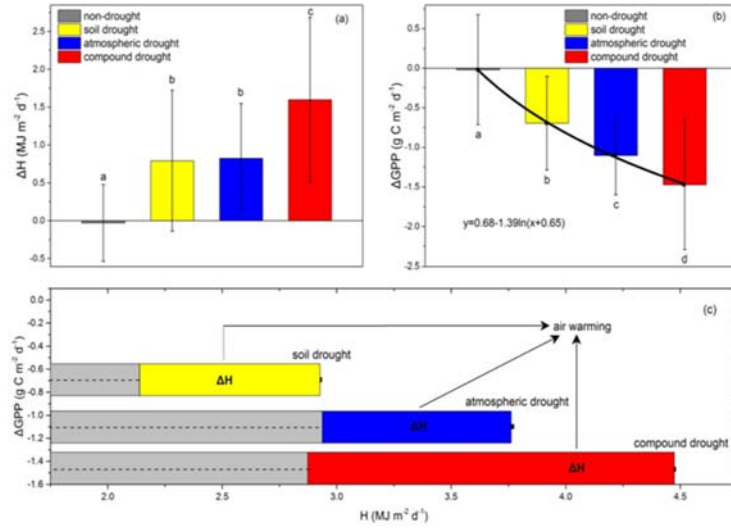


图 1.4.24 不同干旱类型对感热通量及 GPP 的影响

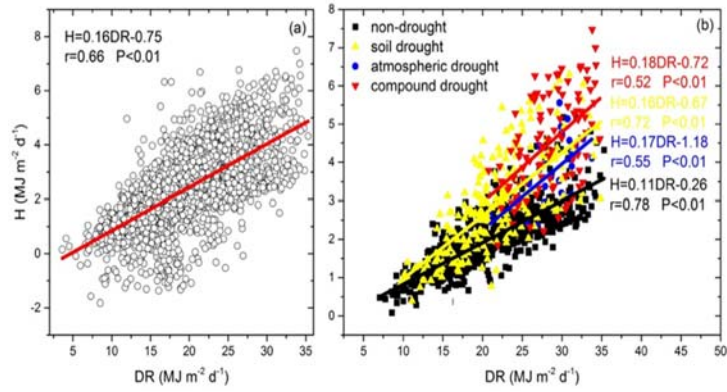


图 1.4.25 不同类型干旱条件下向下短波辐射对感热通量的贡献变化

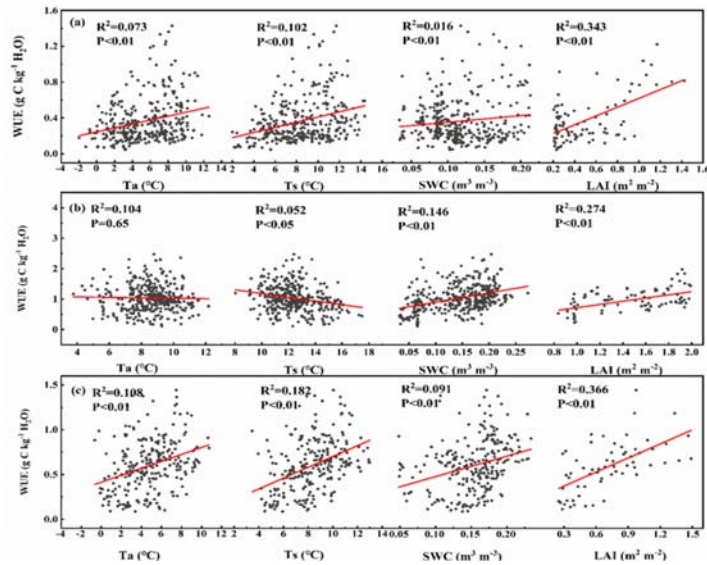


图 1.4.26 生长季内不同时期 ((a) 生长季初、(b) 生长盛季、(c) 生长季末) 日尺度上水分利用效率 (WUE) 与空气温度 (TA)、土壤温度 (TS)、土壤含水量 (SWC)、叶面积指数 (LAI) 的关系

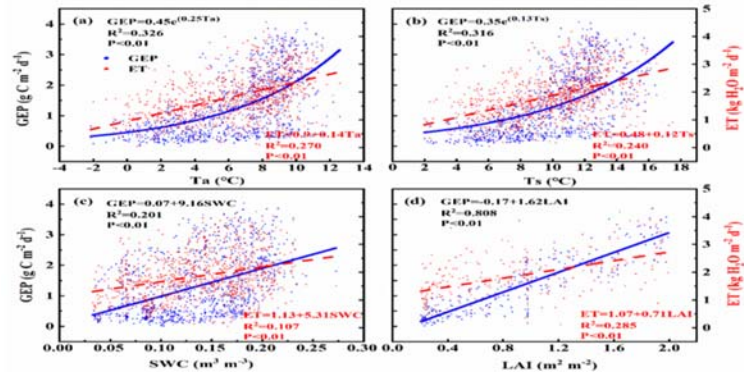


图 1.4.27 生态系统生产力 (GEP)、蒸散量 (ET) 与 (a) 空气温度 (TA)、(b) 土壤温度 (TS)、(c) 土壤含水量 (SWC) 及 (d) 叶面积指数 (LAI) 的关系图

水分利用效率 (Water use efficiency, WUE) 是反映固碳与耗水平衡关系的常用指标。本研究旨在阐明藏北高寒草甸水分利用效率的变化及干旱对水分利用效率的影响。基于那曲站涡度相关系统观测到的 2013–2018 年连续 6 年 (2013–2018 年) 的碳水通量数据, 利用生态系统总生产力 (GEP)/蒸散量 (ET) 计算 WUE。研究发现, 生长季的不同时期, WUE 的主控因子不同。生长季初和生长季末, WUE 主要受温度控制。生长盛季 WUE 主要受水分条件调控。而 LAI 则是在整个生长季过程中对 WUE 均有显著影响。碳水耦合决定 WUE 变化, 生态系统 GEP 和 ET 对于干旱时期环境变量做出的不同响应, 决定了 WUE 对于干旱的响应特征。干旱发生时期和持续时长对水分利用效率有着不同的影响。生长季初干旱使 WUE 升高; 生长盛季遭遇干旱, WUE 急剧降低; 生长季末短期干旱会使 WUE 略微升高。通常长期干旱 WUE 降低、短期干旱使 WUE 升高。但在 2013 年生长盛季的短期干旱使 WUE 降低, 2016 年和 2018 年的生长季初长期干旱使 WUE 升高。表明在该高寒草甸生态系统中, 相比于干旱持续时长, 干旱发生时间可能对 WUE 起着更为决定性的作用。

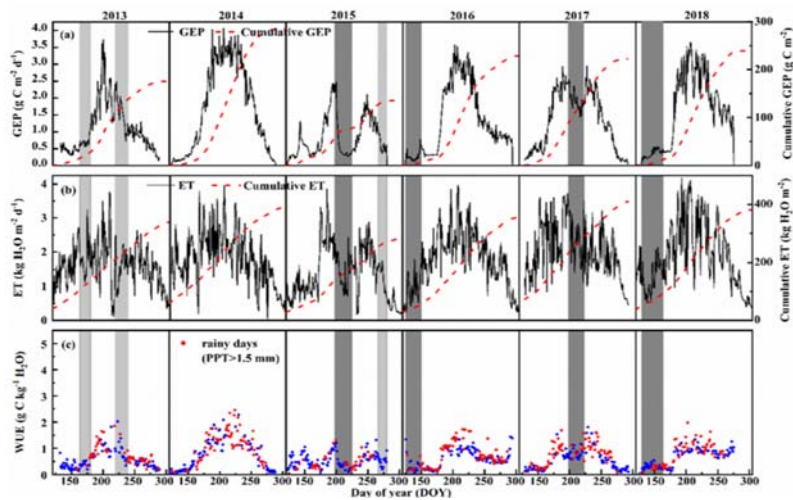


图 1.4.28 生态系统总生产力 (GEP)、蒸散量 (ET) 和水分利用效率 (WUE) 的季节变化及其受干旱的影响。浅灰色区域为短期干旱, 深灰色区域为长期干旱

5. 土壤/冻土观测研究

➤ 格尔木站

青藏高原大范围多年冻土区地面形变研究取得进展：格尔木站发展了适用于多年冻土区大空间尺度的 InSAR 地面形变反演方法，将其应用于青藏高原中部约 14 万平方公里的区域（Sentinel-1 SAR 影像）。该方法引入了 MODIS 地表温度和土壤数据，更充分的考虑了多年冻土区冻融过程的时空异质性，能够有效的分离与活动层冻融过程相关的季节形变以及与多年冻土融化有关的长期形变。结果表明，青藏高原中部经历着广泛的季节和长期形变。该研究引入了地理探测器方法和相关性分析来揭示地表形变的控制因子。研究表明，坡度是季节形变的主要控制因素：地势平坦的地区更容易发生较大的季节形变。而地下冰含量和多年冻土温度则是长期形变的主要控制因子：高温且富冰多年冻土更容易诱发长期形变的发生。这也从侧面说明了，低温富冰多年冻土虽然现在较为稳定，但是在气候持续变暖过程中，低温多年冻土会向高温多年冻土持续转变，进而引发更为广泛的长期形变。该成果可为青藏高原乃至北极多年冻土地面形变监测提供可靠的技术方法，深化理解多年冻土区地表形变与冻融过程及冻土退化之间的关系，为高原生态环境保护和工程建设维护提供重要的科学支撑。该成果发表于地学一区 TOP 期刊 Remote Sensing of Environment (IF=10.164)。

为了预估青藏高原多年冻土区的融沉风险状况，格尔木站通过多评估指数模型（即，沉降指数 I_s ，风险区划指数 I_r ，容许承载力指数 I_a ）相结合的方式，对整个青藏高原多年冻土区潜在融沉风险进行模拟预估。通过对比分析三个模型的结果发现，由于每个模型考虑的影响因素（主要包括地下冰含量、年平均地温和活动层厚度的相对变化等）不同，最终模拟结果存在很大差异。因此，提出修正的一致性指数（ I_c ）模型，完成整个青藏高原多年冻土区的融沉风险评估。基于 I_c 模型的预估可以有效避免不同模型中由于考虑影响因子不同所带来的模拟结果的差异性。该方法充分考虑了模型之间的共性，在一定程度上可以保证最终分类结果的可靠性。考虑到融沉风险模型的实际应用，本研究进一步将 I_c 模型应用到青藏铁路沿线，研究结果表明，地下冰的存在是多年冻土发生沉降的必要条件；青藏铁路沿线多年冻土区约 40.2% 的面积属于中高风险区，且主要分布在多年冻土区边界，其中南部边界中高风险区的范围要明显高于北部边界。随着气候变暖和人类活动的加剧，该地区可能成为沉降发生最严重的区域。基础设施对多年冻土变化的敏感性较为复杂，因此，需要在中高融沉风险区采取紧急和必要的措施，同时，建立工程基础设施的预警系统，防止更大的经济损失。本研究可为青藏高原多年冻土区工程设施的设计、施工和运行维护等方面提供科学依据。该成果以 Risk assessment of

potential thaw settlement hazard in the permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau. 为题发表于地学 TOP 期刊 Science of The Total Environment(IF= 7.963)。

青藏高原冻土有机碳储量估算及变化取得新进展：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，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。以青藏高原为核心的第三极是全球气候变暖最强烈的地区之一，其冻土中储存的有机碳可能成为气候变暖环境下的潜在碳源，之前已有第三极冻土有机碳储量估算结果还存在一定的不确定性。格尔木站通过整合 2000 年以后公开发表的历史文献数据资料以及课题组相关实验监测数据，采用机器学习方法模拟了第三极冻土区 0-3m 土壤有机碳储量和空间分布，得到了 1 公里高分辨率土壤有机碳分布图，并与以往在第三极地区开展的冻土碳制图研究进行了对比分析，重新估算了第三极地区冻土有机碳储量总量。模拟计算结果表明，第三极土壤有机碳自东南向西北递减，0-3m 土壤有机碳总储量约为 46.18 Pg，其中多年冻土区 21.69 Pg，季节冻土区 24.49 Pg。该数据集为地球系统模型提供了重要的基础数据，也可以为复杂地形条件下土壤属性的制图研究提供参考。该成果以 A 1-km resolution soil organic carbon dataset for frozen ground in the Third Pole 为题发表于地学 TOP 期刊 Earth System Science Data (IF=11.333)。

格尔木站在 IBIS 模型冻融过程中增加未冻水方案以及根据青藏高原特殊的环境特征调整动力学粗糙度 (Z0m) 和比叶面积 (SLA) 等参数。选取四种不同植被类型站点 (高寒荒漠草原, 高寒草原, 高寒草甸, 高寒沼泽草甸) 验证改进的 IBIS 在高原单点上的适用性及碳收支现状。最后利用 CMIP5 不同排放路径 (RCP2.6, RCP6.0, RCP8.5) 的未来情景气候数据输入到模型中进而探索未来变暖下青藏高原碳收支变化趋势及碳源汇效应。发现在添加未冻水方案并调整了 Z0m 之后, IBIS 模型模拟土壤含水量的能力得到了极大的提高。整体土壤水热的误差降低了 25.2%。通过调整 SLA 参数, NPP 的模拟误差减少了 79.9%。高寒草原表现为碳源 ($39.16 \text{ gC/m}^2/\text{a}$), 高寒草甸表现为碳汇 ($-63.42 \text{ gC/m}^2/\text{a}$)。在 RCP 2.6、RCP 6.0 和 RCP 8.5 的气候变暖情景下, 高寒荒漠草原和高寒草原将吸收更多的碳, 而高寒草甸和高寒沼泽草甸预计在 2071-2100 年从碳汇向碳源转变。我们的研究揭示了植被类型在 IBIS 模型模拟多年冻土生态系统碳的源/汇效应中起着重要作用。研究结果还强调了未冻水对土壤水热状况和比叶面积对高寒植被生长的重要性, 并对不同多年冻土生态系统响应气候变暖的表现提出了新的见解。该成果发表于地学 TOP 期刊 Catena (IF=5.198)。

通过在青藏高原多年冻土和非多年冻土区的交界地区进行采样, 可以回答以上科学

问题。由于研究区范围较小，总体的气候条件因子可以认为是一致的，至少利用遥感方法在空间分析时这些区域的气候是一致的。在局地区域内，影响多年冻土是否存在的因素主要是坡向、土壤水分、地形和植被等因素。通过对有无多年冻土的采样点进行分析，发现多年冻土区土壤有机碳含量较高。进一步分析土壤水分和容重与土壤有机碳的相关性，发现在多年冻土区，土壤水分和容重在多年冻土采样点对有机碳含量解释的方差要大于无多年冻土存在的采样点。土壤颗粒组成和砾石含量是土壤有机碳预测的重要因子，但是解释的方法取决于是否有多多年冻土存在。该结果表明，多年冻土存在时，有利于土壤有机碳的保存。该结果明确了多年冻土区内有无多年冻土存在时土壤有机碳的差异，这表明以后多年冻土区碳循环的研究中需要考虑有无多年冻土的实际分布。该成果发表于地学 TOP 期刊 Catena (IF=5.198)。

青藏高原多年冻土变化研究取得进展：陆面过程模型数量、种类繁多众多，对陆面模式的参数化方案进行评估有助于增强我们对模型行为的理解，并为模型的改进提供参考。由于在一个建模框架内选择参数化方案非常简单，Noah-MP 在相关模型比较工作中受到了广泛的关注。然而，目前针对多年冻土区土壤水热过程的模型比较研究仍然比较匮乏。格尔木站以多年冻土典型站点唐古拉站为研究对象，考虑前期工作中提出的风导致的积雪升华 (Gordon) 和湍流过程组合方案 (Y08-UCT) 两个物理过程，对 Noah-MP 模型对积雪事件、活动层温度和活动层水分的模拟能力进行了全面的评估，识别了影响较大的物理过程，并进一步研究了不同参数化方案的表现。研究发现：Noah-MP 倾向于高估积雪事件，积雪升华 (SUB) 和雪/土壤温度时间方案 (STC) 对积雪事件的影响最大。考虑风导致的积雪升华 (SUB(2)) 和半隐式雪/土壤温度时间方案 (STC(1))，可以有效地改善模型对积雪的高估。模型对积雪的高估大大导致了土壤温度的低估，土壤温度因此主要受积雪过程的主导。辐射传输冠层间隙 (RAD)，表层拖曳系数 (SFC) 以及径流和地下水 (RUN) 过程对土壤温度的影响次之，其余过程的影响十分有限。消除积雪的影响后，土壤温度仍然存在系统的冷偏差和较大的不确定性，特别是在寒冷季节的深层。Y08-UCT 的组合方案有助于解决土壤温度的冷偏差。Noah-MP 倾向于低估土壤湿度。大多数物理过程对土壤水分的影响有限，其中 RUN 过程占主导地位。STC 和 SUB 过程对暖季浅层液态水含量有较大影响。相关方法与结论能够为青藏高原多年冻土区活动层水热和多年冻土模拟提供参考。该成果发表在期刊 Geoscientific Model Development 上 (IF=6.135)。

目前大量研究集中在长期、缓慢的气候变化对冻土变化的影响，但是很少关注短时的高强度极端事件的影响，比如高强度和高频率的极端高温事件对活动层热状况会产生

怎样的影响尚不清楚。基于青藏高原唐古拉多年冻土监测点的长期气象和活动层水热实测数据,发现当地活动层热状态的变化与极端暖事件的持续时间和强度显著正相关;极端暖事件对当地活动层融化深度的贡献为 $13.5\% \pm 4.9\%$, 更高的贡献率发生在融化初期和末期;活动层的融化过程决定其热状况对极端暖事件的响应程度;此外,极端暖事件频率和强度的年际差异在一定程度上会决定活动层热状态的年际差异。这一结果有助于从极端事件的角度深化冻土变化的认识,并为冻土模型的改进提供参考依据。该成果发表在期刊 *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (IF= 4.261)。

水分是土壤的基本属性之一,其在很大程度上决定了生态系统演替和水文过程。青藏高原在过去几十年来总体上呈变暖变湿的趋势,由此引起了植被生长变好和多年冻土退化等现象。从多年冻土和土壤水分相互作用关系来看,多年冻土的存在是会影响到土壤水分过程的。但是在青藏高原地区,多年冻土的活动层埋藏深度较大,多年冻土是否会影响表层土壤水分的动态?但是由于土壤水分长期观测数据稀缺的原因,目前还不清楚。为解决上述科学问题,科研人员选择了多年冻土区和非多年冻土区的采样点,利用监测点的数据,对土壤水分的遥感数据产品精度进行了评估和矫正。随后,在各个采样点上,利用遥感数据产品计算得到了1986年到2016年的期间生长季的表层土壤数据产品。通过对各个区域温度、降水和土壤质地的综合比较后,进一步分析各个采样点的动态,发现多年冻土区的采样点土壤水分变化相对更为稳定,且活动层较大的地区,水分变化更为剧烈。这说明多年冻土区土壤水分较为稳定。考虑到活动层厚度较大,多年冻土存在的地区,较低的土壤温度减少蒸散发可能也是其作用途径之一。该研究表明,多年冻土退化后,可能会导致土壤水分的年变化差异增加,从而可能会影响到区域的生态系统和水文循环。该成果发表于地学 TOP 期刊 *Catena* (IF=5.198)。

基于格尔木站和黑河遥感试验站提供的多年冻土区16个站点的长期观测数据,首次开展了10套近地表及根系土壤水分产品的验证工作。研究表明,青藏高原多年冻土区近地表、根系土壤水分产品精度整体较低。其中ESA CCI, SMOS-IC以及SMAP-L4近地表土壤水分产品表现较好;所有的近地表土壤水分产品都表现为湿偏差。SMAP-L4和GLDAS-Noah根系土壤水分产品精度优于ERA5-Land,但所有的根系土壤水分数据均无法准确捕捉活动层冻结/融化时期根系土壤水分快速上升/下降的特征。进一步分析近地表、根系土壤水分产品的影响因素,发现近地表土壤温度精度较低以及射频干扰(RFI)是近地表土壤水分模拟不准确的重要原因。在冻结或融化时期,根系土壤水分产品无法准确模拟根系土壤水分动态变化特征的主要原因是其所使用的陆面模型对冻土相变过程考虑不足且缺乏对未冻水迁移过程的描述。与以往季节冻土区近地表土壤水分

产品验证结果相比, 本研究发现近地表土壤水分产品在青藏高原多年冻土区的精度有所下降。该成果发表于地学一区 TOP 期刊 Remote Sensing of Environment (IF=10.164)。

格尔木站联合南京信息工程大学, 首次发布了该站团队长期积累的青藏高原多年冻土综合观测数据集, 探讨了气候变化背景下青藏高原多年冻土变化的基本特征。该数据集包括在青藏高原多年冻土区的 6 个自动气象观测站、12 个活动层及 84 个钻孔长时间序列观测数据, 主要观测要素包括气象 (气温、降水、风速、比湿等)、多层土壤温度和水分、活动层厚度及冻土温度等观测数据; 该数据集形成了能够基本覆盖青藏高原高平面的 (包括可可西里无人区和阿尔金山无人区等区域)、与多年冻土有关的多要素观测数据; 各观测数据在收集和处理过程中都已经过了严格的质量控制, 可为青藏高原水文模型、陆面过程模型和气候模型的验证、发展和改进提供支撑。该研究结果在线发表于地学顶级期刊 Earth System Science Data 期刊上。

➤ 若尔盖站 (成都生物研究所)

中国泥炭地铁结合有机碳及其决定因素: 在铁氧化矿物与有机碳之间存在很强的相关性, 然而铁氧化矿物对泥炭地有机碳保存的作用却鲜为人知。本研究采集了中国中西部 10 块泥炭地的土壤样品, 对铁结合态有机碳浓度、特性及空间变异特征进行了综合调查, 确定了气候因子和土壤理化性质对有机碳与铁氧化矿物间相关性的影响。研究发现, 铁结合态有机碳的浓度为 $3.91\text{--}18.79\text{ g kg}^{-1}$ 。平均存在 $3.42 \pm 1.32\%$ 的土壤有机碳与铁氧化矿物直接结合。OC: Fe 摩尔比为 $2.17\text{--}12.18$, 表明共沉淀机制是影响泥炭地活性铁矿物与有机碳结合的主要机制。稳定同位素分析表明铁氧化矿物偏向与 ^{13}C 富集的有机物结合。铁氧化矿物的来源、当地植被以及水位是导致 10 块泥炭地铁结合有机碳含量不同的主要原因。本研究揭示了泥炭地铁结合有机碳的定量特征和空间变异特性, 为泥炭地生态系统碳循环评估和管理提供了重要信息。本研究成果发表在 Geoderma 上。

排水对高寒泥炭地土壤微生物及温室气体排放的影响: 选择短期排水 (3 年) 和长期排水 (48 年) 点, 探究排水如何影响泥炭地的微生物多样性和活性。结果表明: (1) 排水时间和水位下降对土壤细菌和真菌群落的多样性和组成均有显著影响, 部分细菌被真菌分解者所取代; 在长期排水泥炭地微生物种间相互作用更为复杂, 长期排水使土壤微生物群落形成复杂、稳定的网络, 进而提高泥炭地微生物碳的利用效率; 排水显著改变了溶解无机氮的浓度, 这些变化与细菌和真菌群落结构以及许多优势微生物物种丰度的变化有关; 土壤中的细菌和真菌群落均与呼吸速率、CUE:NUE 比值和 GMea 值之间存在显著相关性, 但真菌群落比细菌群落能更好的解释微生物活性。体而言, 本研究发现

排水泥炭地，真菌在微生物介导的泥炭地生态系统功能中扮演着比细菌更重要的角色，水位对温室气体排放的影响大于排水时间，气候变暖增加了温室气体排放的变异性，该研究结果有助于更好地了解排干泥炭地的生态系统功能。本研究成果发表在 Ecological Indicators 上。

➤ 若尔盖站（西北研究院）

碳吸收“热点”的变化特征及影响因子：通过观测模拟增温条件下土壤理化性质的变化，从而了解土壤理化性质的改变对高寒植物的影响，进而影响高寒植物光合速率和植被生产力。我们比较了生长室内（OTCs）、对照样地（OAs）和典型高寒草甸（alpine meadow, AM）的土壤理化性质，从结果可以看出，AM 中，随着土层的加深，容重逐渐增加，0-10 cm 土层容重最小，20-30 cm 土层容重最大；OTCs 和 OAs 不同深度土壤容重无显著差异($p>0.05$)。增温显著提高了高寒 0-10 cm 土层容重，AM、OAs、OTCs 在 0-10 cm 土层容重分别为 0.92 g/m^3 、 1.07 g/m^3 、 1.08 g/m^3 。

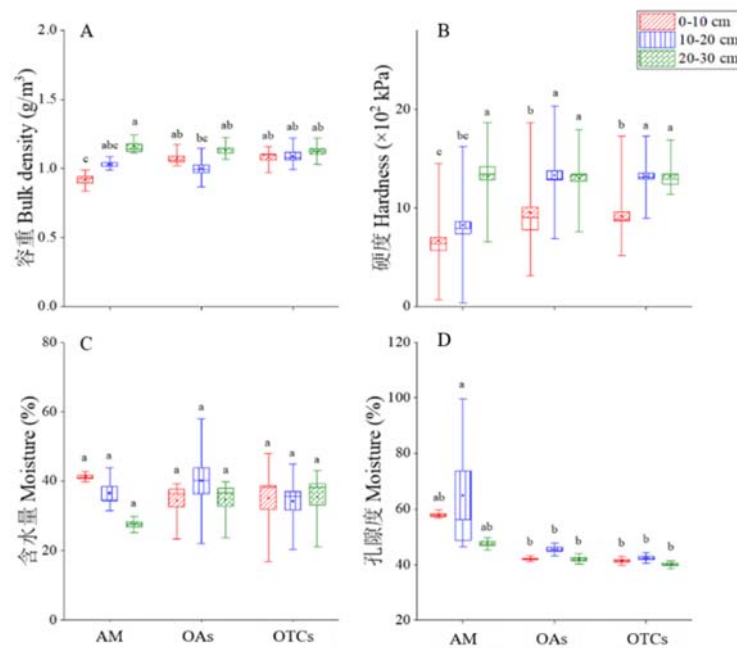


图 1.5.1 增温对土壤物理性质的影响

随着土壤深度的增加，硬度逐渐增加，0-10 cm 土层硬度显著低于 10-20 cm、20-30 cm 土层。AM、OAs 和 OTCs 在 0-10 cm 土层硬度分别为 669、954、914 kPa，OAs 和 OTCs 在 0-10 cm 土层硬度显著高于 AM，但是 OAs 和 OTCs 在 0-10 cm 的土层硬度差异不显著($p>0.05$)。AM、OAs 和 OTCs 在 20-30 cm 土层硬度差异不显著。

高寒草地土壤含水量介于 27.62 %-41.16 %。AM、OAs 和 OTCs 的土壤含水量差异不

显著，且不同土层含水量差异也不显著，但 OTCs 的土壤含水量低于 OAs。高寒草地孔隙度介于 40.03 %–65.02 %。AM 的土壤孔隙度最大，0–10 cm、10–20 cm、20–30 cm 土层孔隙度分别为 57.97 %、65.02 %、47.58 %。增温降低了高寒草地土壤孔隙度，但三者之间差异不显著。综合来说，模拟增温使 0–10 cm，10–20 cm 土层土壤含水量下降，土壤孔隙度、PH 值和土壤硬度也有所下降，而土壤硬度下降更有利于植物生长。

➤ 那曲站（西北研究院）

草地放牧管理改变了青藏高原土壤性质和微生物多样性：那曲站成员秦燕燕博士等以青藏高原那曲高寒草地为研究对象，运用生态学、土壤学、微生物学调查方法，调查不同放牧方式（季节性放牧、连续放牧、围封放牧）的高寒草地植被特征、土壤属性和微生物多样性，研究不同放牧方式对土壤性质和微生物多样性的影响，结果表明：在三种放牧方式下，围封放牧的土壤属性值介于连续放牧和季节性放牧中间；土壤细菌、真菌丰富度和 α -多样性差异均不显著；围封放牧的土壤真菌 β -多样性与连续放牧和季节性放牧的差异均显著(图6)。这表明放牧管理可以改变土壤性质和微生物 β -多样性，围封放牧可能是一个较为有用的、长期的草地恢复方式。本研究成果推动了那曲站在高海拔地区植物生态环境研究的发展。

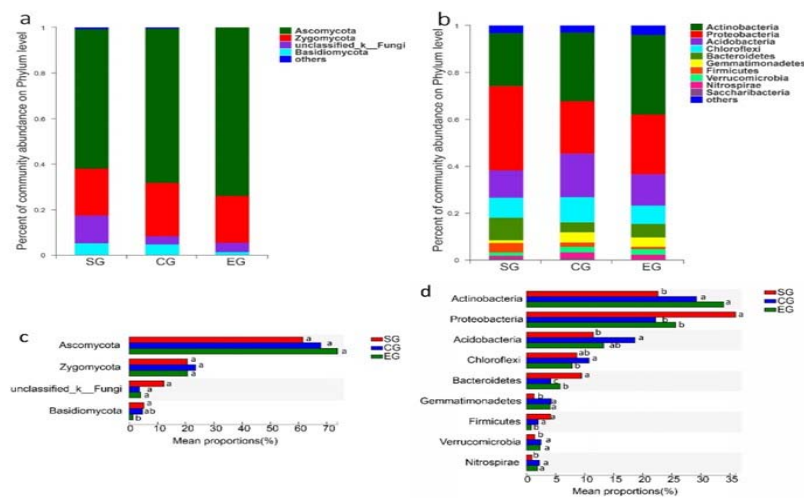


图 1.5.2 不同放牧方式的细菌 (a)、真菌丰富度(b)及优势种(c, d) (显著性水平: $p < 0.05$. SG: 季节性放牧; CG: 连续放牧; EG: 围封放牧)

➤ 北麓河站

青藏铁路多年冻土区补强路基及普通路基热状态及变形分析研究：为研究青藏铁路冻土区应用最为广泛的两种主动冷却措施——热管和块石护坡结构作为补强措施的工程效果，冻土工程国家重点实验室、青藏高原北麓河站冻土工程与环境研究团队选取位于青藏高原连续多年冻土南界附近的青藏铁路 K1497+150 路基断面，通过对该断面 2006

年以来地温和变形监测数据的分析,研究了该地区多年冻土退化特征,并通过与补强前路堤的对比,探讨了热管和块石护坡结构对路基的补强效果。

研究结果表明,气候变暖背景下该地区的多年冻土发生了显著退化,且补强前路基下伏多年冻土的退化速率显著高于附近天然场地。2006至2009年,天然场地多年冻土上限下降速率为 5.4cm/a ,而左路肩下多年冻土上限下降速率为 9cm/a 。补强后的监测数据表明,块石护坡结构和热管均可提高路基的热稳定性。块石护坡主要在夏季起到保温作用,对深层冻土的降温效果并不显著,单独使用块石护坡结构补强措施不能避免气候变暖条件下高温冻土区路基下伏多年冻土的退化。热管在冬季较强的降温能力可以增加路基内部的冷储量,有利于减缓气候变暖的影响。进一步分析表明,块石护坡+热管的复合措施降温效果强于单一措施,可以有效冷却路基下多年冻土,显著减小多年冻土升温 and 融化造成的路基沉降。相关研究成果可为未来青藏铁路高温冻土区路基补强措施的选择提供参考。研究成果发表于 *Advances in Climate Change Research* 期刊。

另外,为了阐明气候变暖下普通路基的热特性,还利用实测分析了青藏铁路普通路基断面的地温变化过程,并通过数值模拟对该路基未来50年地温场演变进行了模拟。结果表明,由于路基修建和气候变暖的综合影响,路基下多年冻土的退化速度显著快于未受干扰的天然场地。路基走向引起的阴阳坡效应造成了路基下多年冻土温度分布的不对称。从长远来看,天然场地和路基下的多年冻土都在发生退化。冻土的持续退化会导致路基的沉降和变形,特别是阴阳侧冻土的不对称退化会导致路基形成纵向裂缝。因此,及时采取加固措施来减缓冻土退化,调节路基阴阳侧的地温,对普通路基的稳定具有重要意义。该研究发表在 *Advances in Materials Science and Engineering* 期刊上。

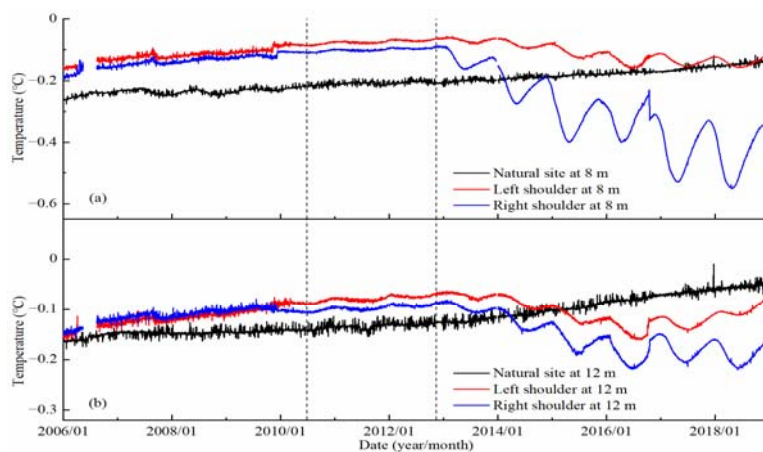


图 1.5.3 增设补强措施前后 8m (a)和 12m (b)处多年冻土温度变化

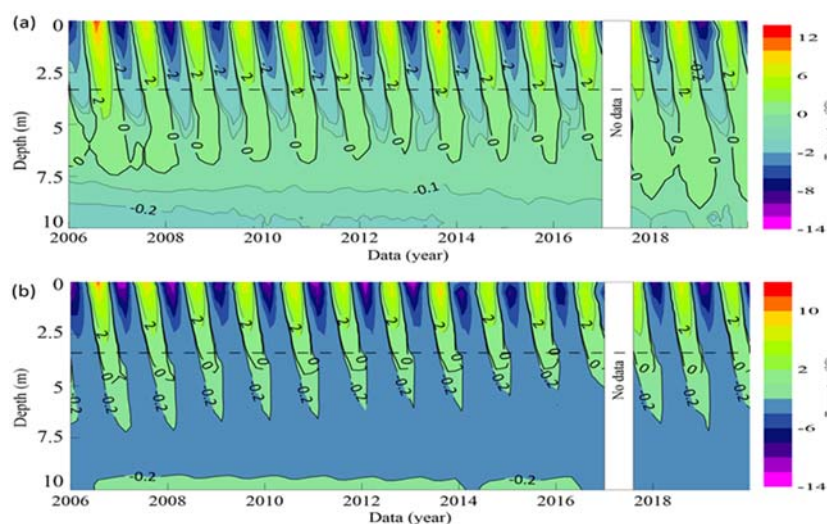


图 1.5.4 普通路基地温变化过程(a)左路肩(b)右路肩

青藏高原多年冻土区管道式护坡路基试验研究：为分析多年冻土路基管道式调控降温机理及降温效能，2018 年 5 月在中科院北麓河试验基地附近青藏公路正线 K3056+500 (34°49'N, 92°55'E) 使用烟示踪法进行了流场可视化试验进行了管道式护坡现场实体工程试验。试验结果表明，坡面管道降温措施可以实现对冻土路基内部的对流换热过程，并发现了“双向对流换热效应”，并通过路基空气流场数值模型，分析了空心调控层的双向对流换热效应产生的机制，模拟结果表明，管道式护坡路基可以显著提高路堤背风坡处的对流换热强度，特别是路基背风坡的空气流速显著提高，有利于路基的降温。另外，管道式护坡路基的双向对流效应以及坡面空气流速分布的均匀性有利于护坡的均匀降温。该研究成果发表在 Cold Regions Science and Technology 期刊上。

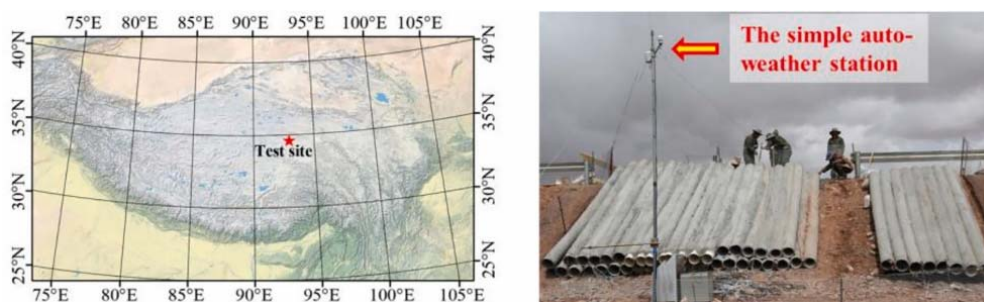


图 1.5.5 试验场地位置和照片

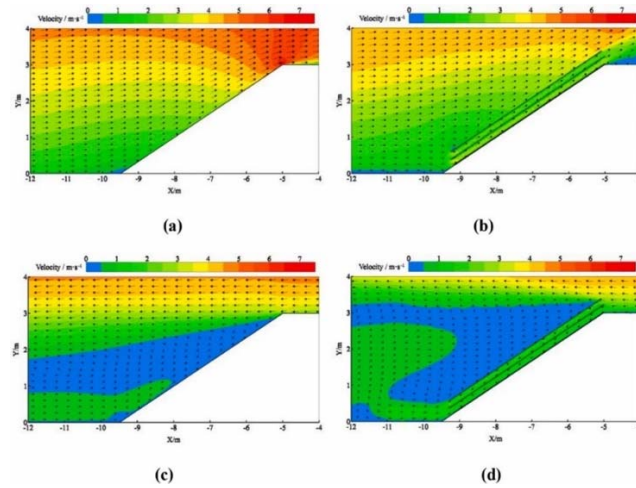


图 1.5.6 路基阳坡侧空气场特性：(a) 正向风场无措施路基；(b) 正向风场管道式护坡路基；
(c) 逆向风场无措施路基；(d) 逆向风场管道式护坡路基

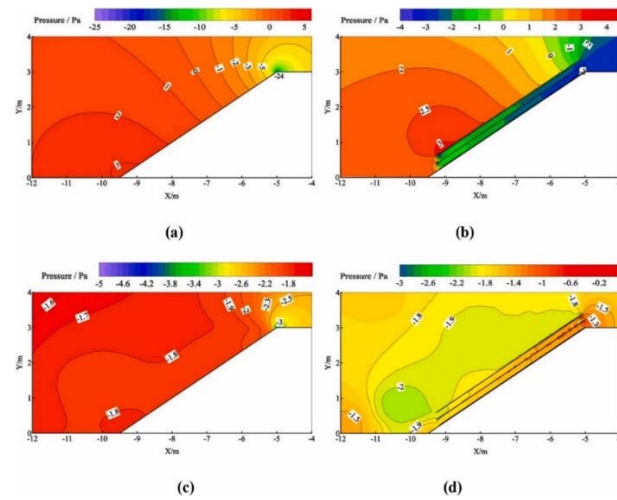


图 1.5.7 路基阳坡侧相对风压分布：(a) 正向风场条件下无措施路基；(b) 正向风场条件下管道式护坡路基；
(c) 逆向风场条件下无措施路基；(d) 逆向风场条件下管道式护坡路基

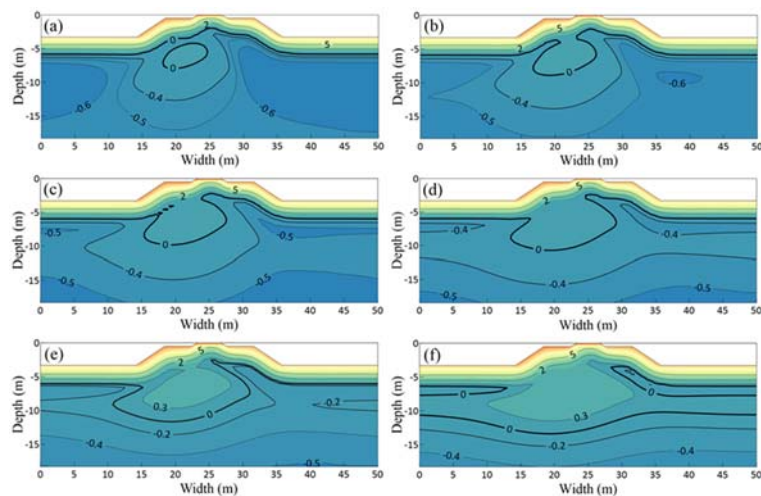


图 1.5.8 基于模拟的 K1068+750 断面温分布(a)2022/7/1;(b) 2027/7/1;(c)2032/7/1;(d)2042/7/1;(e) 2037/7/1;(f)2052/7/1

青藏高原多年冻土区风积沙下活动层水热状况研究：目前，青藏高原沙漠化正处于强烈发展态势。高原沙漠化不仅威胁着高原生态环境，而且更重要的是对冻土环境及其上部工程设施（例如青藏公路、铁路）造成不可忽视的危害。本研究通过对青藏高原红梁河流域沙漠化区域内四个试坑浅层地温、水分及热量过程的研究，试图揭示高原冻土区风积沙地表下土体的水热状况，进而研究其对下部冻土所造成的热影响。对四个活动层水热场地的观测结果进行分析发现，沙层厚度的变化是影响其水热过程最重要的因素。随沙层厚度增加，土壤冻融起始时刻提前，锋面平均迁移速度增大；暖季（正在融化阶段和已经融化阶段升温时期）地温升高，冷季（已经融化阶段降温阶段，正在冻结阶段和已经冻结阶段）地温下降，地温年较差增大；蒸发量增大，含水率全程下降；冷暖季热量收支均减小；地温梯度逐渐增大。以风积沙层厚度为主要因素所形成的这种水热过程确定了风积沙对其下部冻土的存在及发展可能具有不利影响。该研究成果发表于 *Agricultural and Forest Meteorology* 期刊上。

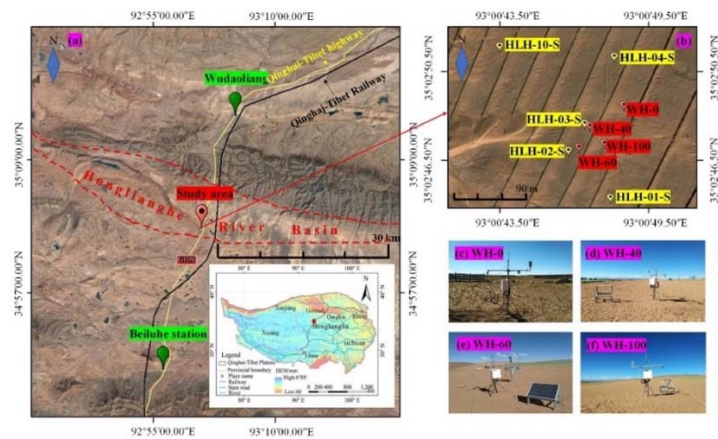


图 1.5.9 红梁河风积沙-冻土观测场位置和场地布设情况

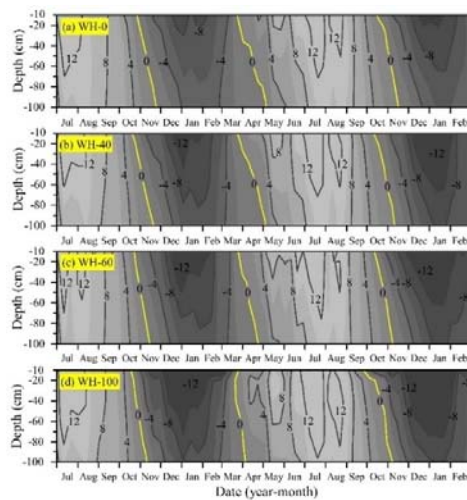


图 1.5.10 各试坑浅层冻融过程

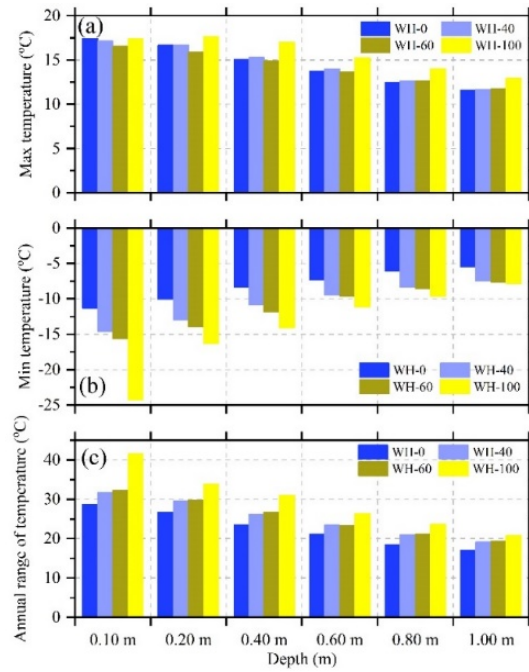


图 1.5.11 2018 年各个场地地温极大值(a)、各场地地温极小值(b)、各场地地温年较差(c)

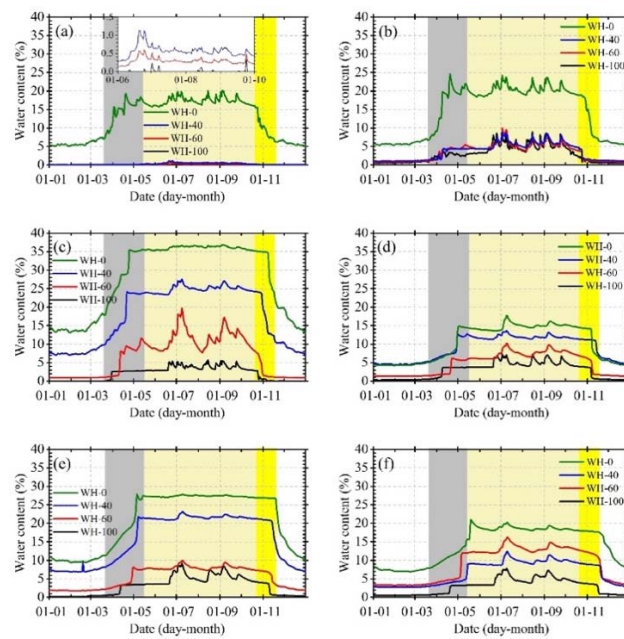


图 1.5.12 各活动层不同深度含水量情况 (a-f: 0.10、0.20、0.40、0.60、0.80、1.00m)

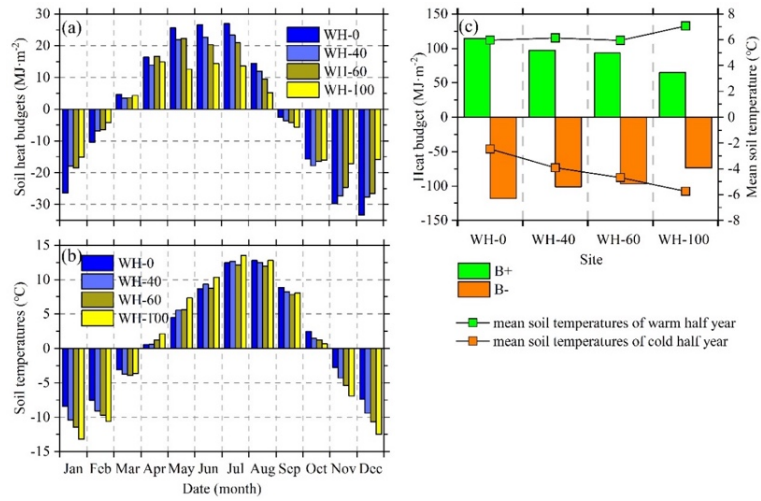


图 1.5.13 2018 年 0.20m 深度处 (a-c : 各场地月热量收支、月均温度、冷半年和暖半年热量收支和平均温度)

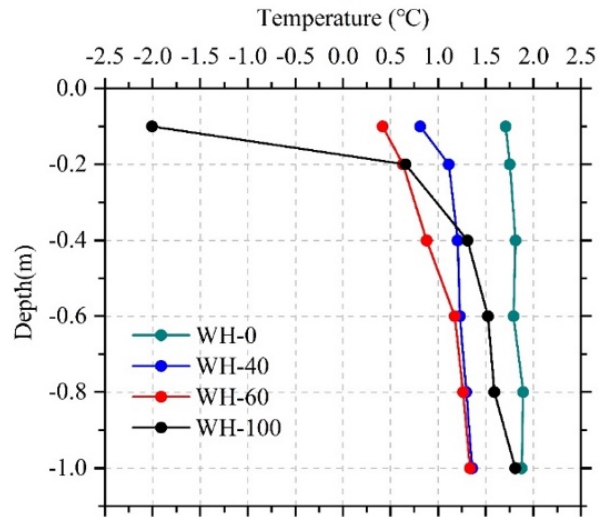


图 1.5.14 2018 年各场地不同深度年平均地温 (即地温梯度)

四、试验示范

➤ 天山冰川站

冰状雪赛道制作

冰状雪赛道主要用于国际大型比赛的高山滑雪的滑降、回转等比赛项目。国际赛事有成熟冰状雪赛道雪质评定标准,但其量化指标掌握在欧美少数雪务保障公司和国际雪联裁判手中,对我国实行技术封锁。2020年12月3日至2021年12月30日期间,天山冰川站科研人员依托国家重点研发计划“2022年京-张冬奥会雪道保障技术与示范研究”项目,先后在黑龙江亚布力滑雪场、张家口崇礼云顶滑雪场和国家高山滑雪中心开展了多次冰状雪赛道制作试验,根据每个滑雪场实时气象条件和现场雪质参数,运用多种机械设备,完成赛道制作中基础制作、静置、注水等环节。经过多次制作和修整,目前已经掌握了适合于我国季风气候区的高山冰状雪赛道制作部分关键技术。通过与国际雪务保障公司的冰状雪参数对比及多次运动员试滑,部分关键指标已达到国际比赛赛道要求。



图 4.1 冰状雪赛道制作

滑雪场储雪和保持雪质技术

人工造雪和储雪是近年来冬奥会应对雪量不足的重要手段,为保障冬奥会比赛期间的用雪需求以及应对极端天气的影响,储雪和保持雪质是重大冰雪运动举办的重要保障。为了实现对我国 2022 年冬奥会雪上项目提供技术保障,并服务于后奥运时代我国冰雪产业“南展西扩东进”的战略目标。天山冰川站研究人员对储雪技术开展了一系列的前期研究与技术公关,并成功研发了一套适合不同气候和地形条件下的属地化“量身定制”的储雪和保持雪质技术。该技术的实现依赖于 3 套系统耦合运作:1) 利用能量平衡模型,模拟计算储雪堆表面能量通量。通过气象要素监测系统与气象场动力-统计降尺度

系统获取储雪点当前及未来气象要素变化序列，作为模型输入参数；2) 通过隔热材料优选系统，计算储雪堆隔热层对外界能量的隔绝效率，获取雪堆内部吸收能量的动态变化序列；3) 以上一步输出为驱动，雪质监测系统获取的雪堆雪质实时变化数据为初始条件，采用 SNOWPACK 雪质演变模型模拟计算雪堆中雪质实时变化数据及物质迁移路径，完成储雪堆能质迁移转换动态过程模拟预报。目前，该技术已在崇礼云顶滑雪场、小海陀高山滑雪中心、哈体院帽儿山滑雪场、黑龙江省亚布力体育训练基地和新疆阿勒泰将军山滑雪场开展了试验验证，结果表明采用的储雪技术可以减少 85% 的雪量融化，满足滑雪场的用雪需求。



图 4.2 野外储雪试验

人工措施减缓冰川消融试验，助力区域生态旅游可持续发展

达古冰川位于青藏高原东缘，四川省阿坝州黑水县境内。过去 50 余年，随着全球气候变暖，该冰川面积减小了 69.64%，正走向“消亡”。由于达古冰川是黑水县重要的旅游资源，其快速退缩严重限制了当地冰川旅游事业的可持续发展，因此应用人工手段减缓冰川消融尤为迫切。2020 年以来，天山站科研人员利用覆盖隔热材料的方法，在达古冰川开展冰川“盖被子”保护试验。研究方案由室内模拟和野外试验这两部分组成。其中室内模拟主要使用冰川学相关的模型（SNOWPACK）模拟不同材料的隔热效果及对冰川消融的影响，从而选择出最佳的材料组合结构；野外试验首先是验证设计方案的可靠性与可行性，并依据试验结果，选择最优的材料铺设方案和改进铺设设备，完成木斯岛冰川关键消融区的防护工程，从而达到减缓冰川的消融的目的。本年度在之前试验的基础上，将新型纳米铺设在冰川表面。经过一个夏季，初步估计新纳米材料能够有效减缓 80% 左右的冰川消融，比 2020 年实施的土工织布效果更好。该项试验为景区资源保护提供了强力的科技支撑，得到了黑水县政府和达古冰川管理局的高度重视，并于 2021 年 10 月召开“达古冰川应对气候变化与减缓冰川消融”研讨会，持续服务该地区的生态

环境保护和可持续发展。



图 4.3 会议合影

► 玉龙雪山站

联合武汉大学成功研发冰川实时监测集成系统并投入使用

2021 年 7 月、10 月，玉龙雪山站联合武汉大学中国南极测绘研究中心采用太阳能板供电，辅以激光测距和相机等手段，在玉龙雪山白水河 1 号冰川上布设一台全球导航卫星系统 (GNSS)，以获取冰川冰流速的长期观测。同时，在 GNSS 上架设了雷达测距仪，可以直接连续获取雷达天线距冰面距离，该设备实现了物质平衡花杆高度变化数据的自动获取，进而极大地减轻了人工监测的难度和安全性。此次布设，其一是验证冰川长期观测技术，如得到有效验证，可搭载更多传感器，获取冰川其他观测信息；其二，获取的冰川冰流速，有助于冰川冰流速的多尺度分析，判别是否存在冰川跃动等现象。此外，在两根物质平衡花杆上固定超声波测距仪，用以实时测量物质平衡花杆高度，并将测量数据与集成式 GNSS、激光测距仪组网，通过电台和收集网络实时回传至实验室服务器，对数据进行实时监测与分析。该工作首次实现冰面变化自动化观测与数据实时回传，将在今后冰川监测工作中物质平衡精细化观测与模拟中发挥重要作用。

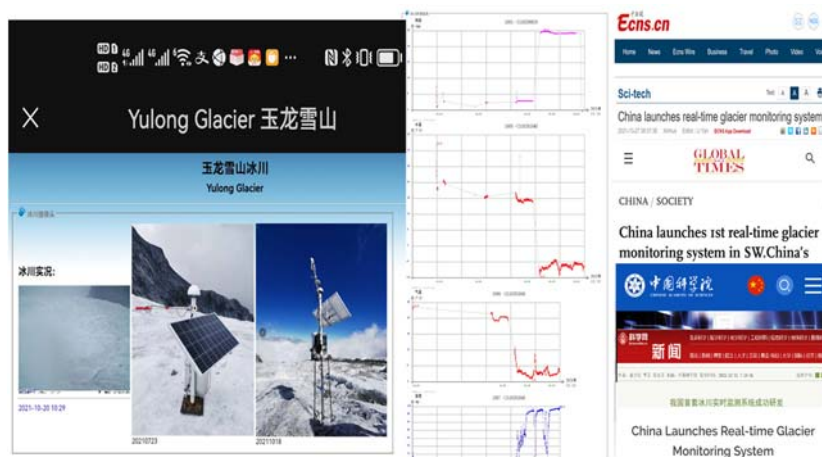


图 4.4 玉龙雪山冰川实时监测系统及其多家融媒体报道、宣传

该观测系统兼容多种传感器，集数据采集、传输、解析、入库和发布于一体，实时性高，具备软件自主可控，硬件可定制可扩展的特点，为后续玉龙雪山站“一站四区”（一站即玉龙雪山站；四区即岗日嘎布、梅里雪山、贡嘎雪山、达古雪山）典型冰川实时监测和精细化研究奠定了坚实基础。

➤ 拉萨站

（1）野生牧草驯化选育、引进优良牧草选育与种子繁育技术

西藏高寒特殊生境条件决定了适宜性广的优质牧草种质资源匮乏，严重制约了人工饲草基地建设退化草地恢复治理。该成果开展了西藏本地野生牧草种质资源收集驯化选育、优良牧草品种引种筛选与选育、主栽牧草品种种子本土生产的研究与示范工作，取得了突破性进展。其中，收集了西藏野生牧草种质资源 1000 余份，建立了西藏野生牧草种质资源圃，驯化选育出了“巴青披碱草”等本地优良野生牧草品系，为退化草地恢复治理和高寒地区人工饲草基地建设提供了优良的牧草资源。引进牧草种质资源 160 余份，筛选出“中兰 1 号”紫花苜蓿、“333/A”箭筈豌豆、“青稞 1 号”青饲玉米、绿麦草等耐寒、耐旱、耐瘠薄、适宜性广的高产牧草品系，在全区推广面积已达 4000hm²。选育出了“中兰 2 号”紫花苜蓿，具有较好的抗逆特性。突破了紫花苜蓿、箭筈豌豆、鸭茅、垂穗披碱草等主要栽培牧草品种本土大面积繁种技术，种子产量均提高 20%以上，苜蓿实现了大面积繁种的技术突破。这些成果有效解决了西藏优良牧草种质资源匮乏、本土种子繁育能力弱的问题，为近年来西藏草牧业快速发展的奠定了坚实的基础。

（2）牧草抗逆高产种植管理技术

建立规模化人工饲草种植基地是解决西藏饲草短缺的重要措施，在保障青稞安全的前提下进行种植业结构调整，发掘饲草基地建设潜力成为草牧业的关键因素。该成果在详细调研西藏土地资源状况、农业气象条件基础上，提出了人工饲草基地建设的时空拓展理念及配套技术体系，充分利用和挖掘边缘土地、麦后余热资源潜力，建立规模化牧草种植示范基地。针对农区大量可利用荒地、中低产田等立地条件，系统研究集成了牧草抗旱、抗寒、耐瘠薄的高产栽培技术，以及粮饲复种技术，制定了黑麦草、箭筈豌豆、苇状羊茅等 6 个牧草品种的种植技术标准。相关技术在全区推广示范面积已达 25000hm²，其中南木林县结合沙化土地整治，开发了 3 万亩人工饲草种植基地，林周县也将开发约 10 万亩荒地用于饲草基地建设。该成果有效解决了西藏人工饲草基地建设保障青稞安全的“争地”问题，将为西藏“十三五”时期新增 100 万亩人工饲草基地提供技术保障。

（3）草产品加工技术与利用

西藏草产品加工一直比较粗放，营养成分损失极为严重，系统的草产品加工技术的缺乏成为草畜转化效率低的关键原因。该成果结合青藏高原特有的光热条件，研究集成出适合西藏特殊生境条件的青干草干燥技术以及草颗粒、草块生产工艺，探讨了青贮饲料发酵品质动态变化规律，研发出主栽牧草和农作物秸秆混合青贮技术及发酵品质调控方案，开发了青稞酒糟青贮添加剂，研制出适应西藏特殊自然条件的特异性乳酸菌剂，提出了青贮饲料分装及抗有氧腐败技术措施。该成果不仅降低了牧草营养成分流失，而且充分利用作物秸秆资源解决了青贮原料不足问题，克服了农作物秸秆单独饲喂营养价值低、适口性差的缺陷，为进行草产品商品化生产积累了扎实的技术基础。

➤ 三江源站

（1）乡土草种筛选及种植

筛选种是青海冷地早熟禾、青海中华羊茅、同德老芒麦、同德短芒披碱草、青牧 1 号老芒麦、青海扁茎早熟禾、同德无芒披碱草和同德贫花鹅观草等共 10 种。推广环湖毛稈羊茅（品种登记号 575）、环湖高寒羊茅（品种登记号 577）2 个乡土草种。同德短芒披碱草、青海中华羊茅和青海冷地早熟禾等 3 个牧草种子进行规模化生产，种植生产田 88760 亩，累积生产牧草种子 7550 吨，年均生产草种约 2500 吨，年实现销售收入 2683 万元。推广同德贫花鹅观草栽培技术规程（D63/T1542-2017）及同德贫花鹅观草种子生产技术规程（D63/T1541-2017）2 项地方标准。



图 4.5 筛选种与种植生产田

（2）草产品研发及示范

建立不同配置比例小区 48 个，筛选出燕麦+蚕豆、燕麦+箭筈豌豆、燕麦+豌豆和黑麦+箭筈豌豆、黑麦+蚕豆的 5 项种植模式，推广《高寒地区紫花苜蓿越冬技术规范》和《高寒牧区小黑麦和箭筈豌豆混播及青贮利用技术规程》2 项地方标准；有机燕麦栽培技术作业规程和草块/草颗粒加工 3 项企业技术规程，研发出牧草草捆、草颗粒、草块和青贮等 4 个产品，示范和推广种植面积为 19520 亩，生产草产品约 20935.24 吨，产值 3360.16 万元。



图 4.6 品种筛选与收割

(3) 畜牧业发展技术及示范

示范和集成家庭联营牧场+草-牛产业增产模式、股份制合作社+草-羊增产模式、企业“规模化、集约化”草业发展发展模式、“公司+基地+牧户的土地流转草业发展模式”和区域资源优化配置模式等 5 种发展模式，建立和示范冷季营养均衡养殖示范小区 2 个（嘉仓和雪域诺央专业合作社），推广 3 项营养均衡养殖技术，完成藏羊示范 4300 只、牦牛 1600 头，技术推广应用 6.3 万头只。



图 4.7 畜牧业模式与基地

五、公众服务

► 天山冰川站

向公众科普冬奥会雪务保障新技术

2021 年天山冰川站科研人员通过新华社、中央电视台、人民日报、科技日报、环球时报和甘肃卫视“丝路大讲堂”、中国科学报等媒体就冬奥会雪务保障工作进行了系统的宣传报告，包括为北京 2022 年冬奥会提供风险防范和不利气象条件下的赛道雪质和雪源保障预案，打造属于中国人自己的冰状雪赛道，研发高效储雪技术，实现绿色“用雪自由”等，传达了中国科学院科研工作者在冬奥会所做的贡献。



图 5.1 甘肃卫视丝路大讲堂“我与北京冬奥会的故事”

冰川变化及其保护研究成果被各级媒体报道

有关乌鲁木齐河源 1 号冰川观测研究和天山博格达峰考察，以及新疆冰川研究被央视和地方媒体多次报道。央视 CGTN 频道、CCTV4、CCTV 记录频道拍摄的天山南北记录片，将李忠勤作为科研界代表详细拍摄了其团队在新疆开展的冰川观测研究工作。自治区党委宣传部也组织拍摄了李忠勤团队工作专题片，向国外介绍新疆的冰川研究工作。



图 5.2 新疆电视台《今日聚焦》“雪莲盛开在天山冰川上”



图 5.3 中央电视台记录频道“天山南北——中国新疆生活纪实”



图 5.4 新疆维吾尔自治区党委宣传部组织的摄制组在天山冰川站拍摄李忠勤团队工作专题

➤ 格尔木站

2021 年 7 月 2 日下午，日本国立环境研究所梁乃申主任研究员应站长吴通华研究员邀请在我站进行了线上学术交流，并作了题为“全球变化下以森林土壤为主的亚洲陆地生态系统的 CO_2/CH_4 动态”的学术报告，清华大学林光辉教授、西北院陈生云研究员以及我站在兰人员等总共 60 多人参与了学术交流。梁乃申研究员介绍了他近年来依据自主研发的大型多通道自动开闭箱在亚洲不同气候带中组建的观测网络系统，并介绍了其在土壤呼吸/树干呼吸/光合作用/生态系统 NEE 以及土壤增温实验等方面的研究进展。学术报告结束后梁乃申研究员与线上线下人员就碳通量观测问题进行了深入的讨论和交流。



5.5 视频会议现场

2021年7月9日，中国极地研究中心南极中山国家站胡红桥站长、赵勇常任站长、南极长城国家站丁海涛副研究员、北极黄河站马红梅副站长和中国极地研究中心业务主管李杰一行5人到本站格尔木基地进行调研交流，本站吴通华研究员、吴晓东研究员、乔永平高级工程师和驻站职工及学生参加了此次调研交流活动。上午，在吴晓东研究员和乔永平高级工程师的陪同下，胡红桥站长一行前往本站西大滩野外综合观测场进行了现场调研，并就野外观测场点布设和仪器设备长期连续观测等问题进行了探讨。下午吴通华研究员在本站三楼会议室向来访人员进行了工作汇报，双方就野外台站在建设、运行和管理等方面进行了深入交流。会议结束后，来访人员也参观了土壤实验室和温室大棚等园区基地。最后，来访人员一致认为本站作为国内和国际上均有影响力的冰冻圈综合观测研究站，已经形成一支观测水平过硬和管理高效的团队，并表示以后将继续加强与本站之间的交流和合作。



5.6 来访人员合影留念

➤ 那曲站(西北研究院)

兰州大学 2021 年地学行知会暑期实习计划云实践

受疫情影响,兰州大学地学行知会的暑期野外考察实践活动临时改变了计划。2021 年 8 月 25 日,开展了云实践活动,那曲站站长胡泽勇研究员在线介绍了青藏高原季风气候和地面气象观测,学生们在线学习了各种类型的气象观测系统,认识到了野外观测试验和科研工作的重要性,也了解到了在青藏高原开展野外试验的艰辛和乐趣,并进行了热烈的讨论,增进了学生们的科研兴趣。兰州大学 2022 级大气科学学院本科生张洁同学主动报名并申报西北研究院“大学生创新实践训练计划”,已获批准。

“青藏高原地气间水热交换立体综合观测研究平台启动”发布会

2021 年 7 月 15 日,在中科院西北生态环境资源研究院举行了“青藏高原地气间水热交换立体综合观测研究平台启动”发布会。央视新闻频道《朝闻天下》、央视新闻客户端、新华社、光明日报、中国科学报、中国科技网、中国新闻网、中国甘肃网、兰州新闻网、兰州晚报等多家平台和媒体进行了报道和宣传。

➤ 拉萨站

举办草产品加工技术和奶牛健康养殖管理技术培训班

2021 年度,拉萨站承担了西藏自治区人力资源和社会保障厅《2021 年专家服务脱贫攻坚工作》。2021 年 9 月 23-27 日,拉萨站沈振西研究员、钟志明高级工程师,孙维高级工程师担任培训老师,在西藏拉萨市达孜区和山南市隆子县,针对西藏草牧产业发展中人工草地建设滞后的现状,聚焦牧草种植、草产品加工和牲畜集中健康养殖环节的关键技术问题,以青饲玉米、燕麦、紫花苜蓿等优质牧草栽培管理技术,青干草、青贮饲料等草产品加工技术和奶牛健康养殖管理技术为重点,组织牧草种植企业的技术人员、周边村(居)农牧民开展会议培训和现场观摩,共培训技术人员 120 人。



图 5.7 培训班现场

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						
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
2016 年	第一标注	30	72	63	165	2.997	1	83	8		257	4
	第二标注	8	18	12	38	3.1		23			61	
	其他标注	8	7	5	20	4.17		2			22	
	总计	46	97	80	223	3.422	1	108	8		340	4

2. 在研项目统计

基金类别		2021 年(经费单位: 万元, 下同)			2020 年(经费单位: 万元, 下同)			2019 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	57	3520.32	749.56	72	4657.4	864.5	71	4780.7	851.11
	地区科学	2	562	349	0	0	0			
	杰青	7	2227	175	5	1850	0	3	1100	
	青年基金	18	449	99.6	34	853	53.5	31	796	113.64
	优秀青年	1	120		2	270	0	1	150	78
	重大项目	3	3860.5	984.81	6	1862.5	484.3	3	914.04	204.46
	重大研究计划	5	902	457.4	2	435	128	9	1366	399.55
	重点项目	9	2927	1048.02	16	4052	1365.4	8	2444	666.04
	其他	6	892.25	157.35	11	1534.6	586.7	1	550	105
	小计	108	15460.07	4020.74	148	15514.5	3482.4	127	12100.7	2417.8
科技部	973/重点研发计划	24	15173.68	2593.96	45	20553.9	6697	43	9165.25	1683.86
	科技支撑计划				6	13056.4	2703.6	1	45	16
	重大科学研究计划	5	2048.04	359.43	5	5258	1123.6			
	国家基础性工作专项	1	271	68	2	69	16	2	63	
	其他	16	33010.49	3113.46	10	8769	702	11	8898	1503
	小计	46	50503.21	6134.85	68	47706.3	11242.2	57	18171.3	3202.86
中科院	百人计划	1	200	200	1	200	200	4	1400	440
	西部系列	7	695	225	6	495	85	1	50	20
	创新系列									
	重点部署项目				5	1240	240	9	4155	926
	STS 计划	1	250	100				3	1288	
	先导专项	32	28065.49	1910.91	37	24799	2566.4	37	18406.6	2892.39
	其他	9	4001.76	737.22	35	8648.9	1208.2	44	10656.8	2159.37
	小计	50	33212.25	3173.13	84	35382.9	4299.6	98	35956.3	6437.76
其他	博士后科学基金	5	47	34	4	26	16	1	5	
	国际合作	9	992.42	294.47	1	4192		6	828	164.18
	各级实验室开放基金	7	48.2	48.2	4	71.2	71.2			
	所级	1	10		1	10	10	2	195	50
	地方	21	1720.3	314.3	49	9022.6	3873.4	61	9825.83	2426.45
	其他	35	8788.36	1789.16	27	2113	674.4	10	813.55	109
	小计	78	11606.28	2480.13	86	15434.8	4645	80	11667.4	2749.63
总计		282	110781.8	15808.85	386	114038.5	23669.2	362	77895.7	14808.1

六、年度数据统计

基金类别		2018 年			2017 年			2016 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	64	4605.7	659	56	4449.28	710.42	38	3277	701.9
	地区科学	0	0	0	2	89	44.5	2	100	25
	杰青	4	1550	0	2	800				
	青年基金	28	720	102.2	15	398.25	60.25	17	829	92
	优秀青年	1	130	0	1	130				
	重大项目	3	780	247	8	1537	307	1		14
	重大研究计划	12	1665	80	5	695.8	20	6	847.3	154
	重点项目	8	2447.3	12.4	5	1406.28	150	8	4629.5	880.8
	其他	9	988.3	216	7	690	238.4	8	980.2	30
	小计	129	12886.3	1316.6	101	10195.6	1530.57	80	10663	1897.7
科技部	973/重点研发计划	28	6463.4	503.3	4	1231.5	211.5	8	1466.5	290
	科技支撑计划				3	657		5	884	30
	重大科学研究计划	5	1299.6	230.1	6	1904	36	3	1514	448
	国家基础性工作专项	3	219	36	1	33		3	1415	23.6
	其他	6	1287.7	585.2	23	9160.6	1412.32	6	1555.91	186
	小计	42	9269.7	1354.6	37	12986.1	1659.82	25	6835.41	977.6
中科院	百人计划	2	470	40	2	330	60	3	600	40
	西部系列	1	20	20	10	145	52	5	100	40
	创新系列	1	80	20	1	80	20	2	180	50
	重点部署项目	6	1400	130	9	1735	320	7	925	175
	STS 计划	2	1048	28.8	2	310	60	2	180	50
	先导专项	17	9017.6	1873.3	5	5		14	465.5	142.84
	其他	15	2739	731.2	13	3002	1124.8	11	1952.5	703
	小计	44	14774.6	2843.3	42	5607	1636.8	44	4403	1200.84
其他	博士后科学基金	2	28	0	2	30	10	4	33	31
	国际合作	10	3098.1	520.5	6	2499.3	490.5	2	186	50.4
	各级实验室开放基金	1	10	0						
	所级	7	545	77	8	476	62	12	754.6	281.6
	地方	36	5696.8	2222.1	29	4645.7	1075.6	21	4077.7	1547.9
	其他	8	1242.5	583.3	8	1711.39	400.95	5	1217.24	166.8
	小计	64	10620.4	3402.9	53	9362.39	2039.05	44	6268.54	2077.7
总计		279	47551	8917.4	233	38151.1	6866.24	193	28170	6153.84

3. 新增项目统计

基金类别		2021 年		2020 年		2019 年		2018 年		2017 年		2016 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	15	824	26	1402.8	25	1583.8	24	1483	20	1370	18	1153.5
	地区科学									2	56	1	39
	杰青			2	800	1	400			3	1150		
	青年基金	11	306	17	361	4	105	11	287	17	446	9	224
	优秀青年	2	350			2	240	1	150				
	重大项目					1	368.5	1	184	2	490	1	230
	重大研究计划					1	307	1	320	1	300	2	150
	重点项目	2	577	3	319	2	604	4	1240	1	330	14	8429
	其他	5	1090	11	2089.6			5	1300	5	244	3	279
	小计	35	3147	59	4972.4	36	3608.3	47	4964	51	4386	48	10504.5
科技部	973/重点研发计划	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			1	271	1	283	2	56	1	30		
	其他	1	230	1	1800	7	13535.6	5	280	4	235		
	小计	7	1517.4	8	12391.6	12	15794.6	11	1362.8	12	1411.1	0	0
中科院	百人计划	1	200										
	西部系列	4	546	2	400			3	145			1	10
	创新系列							1	80			1	80
	重点部署项目									1	300	3	2565
	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	4	360	14	1147	11	5895	20	2892.2	5	702.15	5	230
	小计	10	1356	18	1755	17	7190.4	46	16174.7	9	2708.15	10	2885
其他	博士后科学基金	2	26	1	8	2	16	1	8			2	30
	国际合作	2	255	2	499			2	275	3	102		
	各级实验室开放基金	16	148.2	7	81.2								
	所级					2	41	1	10	4	165	5	290
	地方	28	4969.58	47	3314.3	26	6223.56	18	3669.6	6	2402	11	3701
	其他	34	3742.58	7	481.5	19	1420.05	4	710.5	9	1723		
	小计	82	9141.36	64	4384	49	7700.61	26	4673.1	22	4392	18	4021
总计		134	15161.76	149	23503	114	34293.9	130	27174.6	94	12897.3	76	17410.5

4. 结题项目统计

基金类别		2021 年			2020 年			2019 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	21	1432.1	115.3	13	702	10	28	2037.7	53.4
	地区科学									
	杰青							1	400	
	青年基金	8	202.84	10.1	7	171	8	14	347	23
	优秀青年	1	150					1	200	
	重大项目	1	425					1	50	
	重大研究计划	3	380		3	164		4	215	
	重点项目	2	610		5	1421		2	680	101.16
	其他	2	103.2		7	287	25.5			
	小计	38	3303.14	125.4	35	2745	43.5	51	3929.7	177.56
科技部	973/重点研发计划	7	3843	425	6	1156.5	33	2	1031	
	科技支撑计划									
	重大科学研究计划				1	50				
	国家基础性工作专项									
	其他				2	55				
	小计	7	3843	425	9	1261.5	33	2	1031	0
中科院	百人计划	1						2	570	
	西部系列	2	65	5				2	30	10
	创新系列									
	重点部署项目	4	640	88	4	840	65			
	STS 计划	1	35	10.5				1	200	64
	先导专项				2	150		5	729	6
	其他	1	80		15	3080.7	487	8	535.16	9.9
	小计	9	820	103.5	21	4070.7	552	18	2064.16	89.9
其他	博士后科学基金	1	8	8						
	国际合作									
	各级实验室开放基金	3	26	10						
	所级				1	135	30	2	21	15
	地方	6	2239	857.5	17	2180	494	13	2536	50
	其他	16	2345	950.15	8	391.2	140.3	4	581.5	168.5
	小计	26	4618	1825.65	26	2706.2	664.3	19	3138.5	233.5
总计		80	12584.14	2479.55	91	10783.4	1292.8	90	10163.4	500.96

六、年度数据统计

基金类别		2018 年			2017 年			2016 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	18	1634	97.5	12	940	130	10	489	145.2
	地区科学							1	50	
	杰青									
	青年基金	12	677		10	202	71.4	10	182	11.9
	优秀青年									
	重大项目	1	340					2	390	40
	重大研究计划	5	462.6	50	2	200	30			
	重点项目	3	640	84	2	155		1	350	105
	其他	2	140		2	320	20			
	小计	41	3893.6	231.5	28	1817	251.4	24	1461	302.1
科技部	973/重点研发计划	2	713.5		6	1950	335	1	95	0
	科技支撑计划				4	792	20	2	66	34
	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	5	1001.9	28.4	14	5407	375	3	161	34
中科院	百人计划	3	450		1	150	50			
	西部系列	4	65	35	2	30	5	2	60	10
	创新系列	1	100	50						
	重点部署项目				3	385		1		65
	STS 计划	1	100		1	540	180	1	145	45
	先导专项	3	6.33	6.33	9	1243.4	11	3	211.15	25
	其他	6	1030	185	2	130	30	8	489	139.49
	小计	18	1751.33	265	18	2478.4	276	15	905.15	284.49
其他	博士后科学基金	1	2.5		5	8	5	5	28	15
	国际合作	1	45	45	2	320	15			
	各级实验室开放基金	4	86	31						
	所级	1	10					8	281.5	65
	地方	12	3094	116.7	13	1672	101	11	233	65.4
	其他	6	1809	795.2	10	338	70	2	21	0
	小计	25	5046.5	987.9	30	2338	191	26	563.5	145.4
总计		89	11693.3	1512.8	90	12040.4	1093.4	68	3090.65	765.99

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
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

4 月	- 藏东南站接待“一带一路”国际科学组织联盟（ANSO）主席、原中国科学院院长白春礼院士
7 月	- 科技部部长王志刚和中科院白春礼院士到天山冰川站调研，对我站开展的冰川观研究工作给予赞扬和指导。
9 月	- 天山冰川站首次举办“冰冻圈野外观测精品培训班”。
10 月	- 10 月 11 日，科技部发布了国家野外科学观测研究站的通知（国科发基〔2021〕295 号），纳木错站正式进入国家站建设名单，标志着纳木错站在经过 16 年的初创和建设期，正式进入了国家级野外台站的发展阶段。 - 天山冰川站站主办了第十三届“天山杯”学术论坛，线下线上共 500 多人参加。

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	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
2	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
3	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
4	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
5	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@igsnrr.ac.cn
6	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
7	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@igsnrr.ac.cn
8	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
9	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
10	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
11	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
12	青海湖国家级自然保护区联合科研基地	中科院计算机网络信息中心	罗 泽	010-58812718	luoze@cnic.cn
13	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
14	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
15	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
16	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
17	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
18	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
19	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
20	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
21	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