

高寒区地表过程与环境观测研究网络

High-cold region **O**bservation and **R**esearch Network for Land surface
processes & Environment of China (HORN)

2020 年报

Annual Report 2020



2021 年 02 月 北京

目录

一、基本情况	1
二、发展动态	2
三、观测研究进展	6
1. 大气物理观测研究	6
2. 大气环境观测研究	10
3. 冰川/湖泊观测研究	12
4. 植被生态系统研究	35
5. 土壤/冻土观测研究	63
四、试验示范	72
五、公众服务	82
六、年度数据统计	91
1. 论著统计	91
2. 在研项目统计	92
3. 新增项目统计	94
4. 结题项目统计	95
5. 人才培养统计	97
七、大事记	98
八、组织机构	99
九、联系方式	100

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-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、那曲站（地理所）、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。在“十三五”发展期间，围绕院“创新 2020”和“一三五”规划的总体目标和战略任务，根据国家第二次青藏高原科学考察研究专项、中科院战略性科技先导专项、科技部重点研发专项、科技基础性工作专项、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，依托国家青藏高原科学数据中心建立了数据信息开放共享系统。

2020 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 127 项，经费总额为 21761.2 万元。科研成果持续产出，共发表论文和论著 599 篇，其中 SCI 引文 429 篇。

科研团队与人才建设继续发展，人才争取方面，依托纳木错站，侯居峙研究员获得国家自然科学基金委杰出青年基金项目“青藏高原湖泊与古环境”资助；依托天山冰川站，董志文副研究员开展中国西部沙尘气溶胶和雪冰化学研究，获得了 2020 年国家自然科学基金优秀青年科学基金资助。天山冰川站参加的“西北干旱区水循环与生态水文研究”成果获得了中国科学院杰出科技成就奖，其中李忠勤获得研究集体突出贡献者奖。2020 年，高寒网参与的“青藏科考重大突破”和“西北干旱区水循环与生态水文研究”，入选中国科学院“率先行动”计划第一阶段 49 项重大科技成果及标志性进展。此外，纳木错站参与申请的纳木错国际大陆钻探计划（ICDP）已于 2020 年 6 月获批。各台站依托“高寒网”共培养研究生 466 人，其中博士研究生 251 人，硕士研究生 215 人。

二、发展动态

1. 纳木错站在长岩芯钻探方面取得突破性成果

2020 年 8 月 3 日下午, 由纳木错站站长王君波研究员负责的纳木错长岩芯钻探科考队首次在青藏高原纳木错中心湖区水深 94.5m 的采样点成功钻进 153.44m, 获取了采集率为 96% 的高质量岩芯, 实现了钻探深度和岩芯长度的双突破, 创造了我国湖泊岩芯钻探的新记录, 对我国湖泊钻探技术与古湖泊学的研究具有重要的推动意义。新华社、央视、人民日报、中科院官网、西藏电视台等媒体进行了持续报道, 引起了广泛的社会关注, 具有良好的科学传播效果。与此同时, 由纳木错站朱立平研究员和王君波研究员联合德国等多国科学家共同申请的纳木错 ICDP 项目于 2020 年 6 月正式获批, 该项目计划在纳木错钻取 5 个点位共计 2250 米长的沉积物 (其中单孔设计最深为 700m), 用于研究过去一百万年以来第三极地区的气候环境状况。

连续的湖泊沉积岩芯是开展高分辨率古环境演化研究的重要地质档案。然而, 我国湖泊岩芯钻探多年来未有较大的突破, 青藏高原湖泊沉积物研究多以 20m 级别以下的为主, 时间尺度一般不超过 3 万年。更长尺度的湖芯钻探则只能依靠国际大陆科学钻探计划 (ICDP) 的资助以及国外的钻探团队完成, 我国科学家参与程度与贡献相对较少。

本次纳木错岩芯钻探工作利用自主设计和集成的水上平台和二爪锚固定装置以及深水套管系统, 克服了纳木错较大风浪的不利影响, 在水深 94.5m 的采样点成功在同一孔位连续钻进 153.44m (单次进尺 2.5m 左右), 获取了总采集率为 96% 的高质量岩芯, 从而实现了钻探深度和岩芯长度两个方面的突破。从采样技术的角度来说, 这是我国科学家首次在高海拔深水湖泊中获取百米以上岩芯, 对我国湖泊钻探与古湖泊学的研究具有重要的推动意义。从古环境研究的角度来说, 利用本岩芯可以恢复青藏高原中部地区近 15 万年来的高分辨率气候环境变化序列, 重建深海氧同位素 5 阶段以来冰期-间冰期的气候旋回及特征事件, 为青藏高原气候变化及机制研究提供科学依据。

纳木错岩芯钻探过程中, 特别是钻进达到 100m 以及最后完成 153m 的钻进深度后, 中央电视台 (含《新闻联播》)、新华社、人民日报、中科院官网、西藏本地电视台等多家主流新闻媒体在第一时间进行了报道。青藏所也发布了相关的新闻通稿, 全国媒体转载报道量非常大, 《学习强国》平台也转发了相关信息, 引起了广泛的社会关注, 起到了很好的科普宣传的作用。新华社等媒体也在国际上进行了该进展的发布, 受到了该领域中国际同行的一致认可。本次岩芯钻探工作从科学研究的实际需求出发, 对已有的平台和钻探系统提出了更高的要求, 经过多次尝试和大量的改进, 最终成功完成了该项工作,

树立了一个科学需求驱动技术改进的典型范例，为地球科学领域科学和技术的结合发展模式做出了一定的贡献。整套钻探系统对青藏高原大型深水湖泊岩芯钻探作业具有很好的适应性，在湖泊钻探技术研发方面具有明显的先进性，目前已提交材料申请专利。这项工作的完成对于未来在纳木错开展更长尺度的岩芯钻探打下了坚实的技术基础，为实施 ICDP 项目积累了成功经验，为今后高水平研究奠定了基础，不仅大大提高了中国科学家在合作项目中的话语权，也是对中国古湖泊学研究的实质性贡献。

纳木错岩芯钻探工作由中国科学院战略性先导科技专项（XDA20070101）和第二次青藏高原综合科学考察研究（2019QZKK0202）资助联合。本项工作的负责人是纳木错站站长王君波研究员，钻探工作主要由湖泊与环境变化团队组织开展，在经过了大量周密的准备工作后，2020 年终于完成了既定目标，在深水湖泊岩芯钻探方面取得了突破。

2. 天山冰川站冬奥会雪冰保障技术研究助力冬奥会

第 24 届冬季奥林匹克运动会将于 2022 年由北京市、张家口市两地联合举办。雪上项目是冬奥会的主要内容，在 2022 年冬奥会全部 109 枚金牌中，雪上项目占了 76 枚。因此，雪务工作是确保雪上项目赛事成功举办的重要基础和前提，是本次冬奥会环境保护技术与应用最核心的问题之一。冬奥会雪务工作主要包括造雪及储雪、赛道制作、赛道监测和预报以及风险应对四个方面内容。但雪质参数极大依赖于局地气象条件和人工赛道技术。因此，必须因地制宜，开展属地化试验和研究。为此，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，专门开展了冬奥会储雪技术试验和不同气象条件下滑雪场赛道雪质风险评估研究。

竞技型滑雪场赛道雪质动态监测及其气候变化风险评价：通过在张家口市崇礼区万龙滑雪场 2017 年 3 月 3 日至 3 月 19 日开展的雪质观测试验，以及对 1960-2014 年 2 月 2 日至 3 月 13 日（冬奥会和冬残奥会赛时）间的气象数据分析初步得出：冬奥会期间万龙滑雪场的多年平均气温为 $-17.7\sim 3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最高、最低气温符合赛事标准；赛道厚度为 $58.6\sim 120.0\text{ cm}$ ，满足冬奥会赛事要求的标准赛道厚度；赛道密度为 $410\sim 550\text{ kg/m}^3$ ，基本符合雪上项目要求，但易受外界因素影响。雪密度值上下波动，稳定性较差；赛道密度达标时，雪层含水率为 $0.79\%\sim 2.54\%$ ，属于潮雪，不满足雪上项目中着落区、停止区等对赛道相对湿度的要求。后期赛道密度随气温的升高而减小，雪层含水率增大，赛道剖面物理指标不达标，影响了赛道硬度。

赛道雪质最关键的参数是雪硬度和赛道厚度，雪硬度由雪密度、雪温度、雪含水率以及雪粒之间的烧结作用决定。人造雪粒可以影响赛道雪粒之间的相互作用，在制作冰状雪特殊赛道时可以采用细孔径造雪机，制作粒径小、相对湿度小的积雪，并采用干雪

平铺—放置烧结—注水的方式来制作赛道，以此提高赛道硬度、密度和可持续性。

冬奥会储雪关键技术和科学储雪方案：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，储雪是重大冰雪运动举办的重要保障，在温哥华和索契冬奥会中均起到了关键作用。但是到底需要储存多少雪？在什么地点储雪？储雪保存率是多少？是否需要跨季储雪？何种保温材料效果最佳？目前上述问题仍然得不到科学的答案。因此，针对这些问题，近期在阿尔泰山地区通过开展一系列试验研究。以其对储雪地点的选择，保存率预测，最佳覆盖材料评估，不同地区的形状调整等提供科学依据。目前，这项工作处于观测试验阶段。以上述研究结果为主要内容已向北京冬奥组委、科技部和体育总局提交了多份考察报告和咨询报告。

3. 拉萨站组织编制《科技支撑草业发展三年行动计划（2020-2022 年）》由西藏自治区人民政府办公厅印发

2020 年 6 月 15 日，拉萨站作为主要编制单位编制的《科技支撑草业发展三年行动计划（2020-2022 年）》（以下简称“行动计划”）由西藏自治区人民政府办公厅印发（藏政办发〔2020〕15 号）。该行动计划已于 5 月 14 日获得西藏自治区人民政府常务会议通过，目前西藏自治区正在编制 2020 年工作实施方案。

近年来，西藏自治区党委政府把加快农牧业结构调整、推进农牧业产业发展作为巩固提升脱贫攻坚成果和实施乡村振兴战略的重要抓手。2020 年 3 月份起，受西藏自治区人民政府办公厅和科技厅委托，拉萨站提交了西藏草业发展建议；4 月 1 日，拉萨站执行站长余成群研究员向西藏自治区人民政府副主席孟晓林作了“加快推进西藏草业供给侧结构性改革的初步建议”的专题汇报，并陪同孟晓林一行调研了全区草业科技工作。之后，拉萨站作为主要编制单位参与了行动计划的起草、修改与完善，并成为行动计划中科技支撑的具体实施单位。

拉萨站自 2007 年承担首个草业领域的国家科技支撑项目以来，在相关国家重大科技项目、中科院科技扶贫项目和西藏科技重大专项的持续支持下，致力于西藏草业关键技术研发与集成示范，先后获得西藏科学技术一等奖 4 项，组建的“西藏高原草业工程技术研究中心”成为西藏协同创新的典范。

4. 拉萨站完成 2020 年度西藏脱贫攻坚成效评估工作

2020 年 12 月 3 日-12 月 4 日，2020 年国家精准扶贫工作成效第三方评估，西藏组 55 人在拉萨市集中，召开为期两天的启动培训会，启动培训会。评估培训的主要内容

与实地调查程序、国家精准扶贫工作成效第三方评估大数据平台及精评通 APP 操作讲解、现场答疑、所有评估组成员均成绩合格。12 月 5-11 日，西藏评估组分三组从拉萨出发，分别前往西藏贡布江达县、当雄县和安多县开展实地评估工作。12 月 6 日-10 日，西藏组正式开展实地入户第三方评估工作，共完成建档立卡户问卷 537 份，非建档立卡户问卷 346 份、县问卷 3 份，村问卷 26 份，开展 3 次县级座谈访谈，乡村座谈访谈 26 次。超额完成工作目标。此次评估正值西藏条件最为艰苦的冬天，西藏组克服极高海拔、极低气温等种种困难，在疫情防控的关键时期，人人佩戴口罩，严格遵守评估纪律和要求，12 月 11 日，评估组所有队员均安全返回拉萨，圆满完成 2020 年国家精准扶贫工作成效第三方评估重大任务。

该工作获得了西藏自治区政府的高度认可，中科院地理资源所拉萨农业生态站获得国务院扶贫开发领导小组办公室《先进集体奖》，孙维和王江伟获得国务院扶贫开发领导小组办公室《先进个人奖》。

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）

评估并优化了影响青藏高原冻融过程的过冷水和冻土渗透参数化方案： 针对陆面模式冻融过程模拟偏差较大问题，基于 Noah-MP 模式，对两种过冷水参数化方案（KorenSW 和 NYSW）及两种冻土渗透参数化方案（KorenPM 和 NYPM）在高原的适用性进行了交叉敏感性试验。并根据模拟的土壤温度、土壤液态水含量、地表感热通量、潜热通量等物理量评估了 4 组试验的模拟效果。

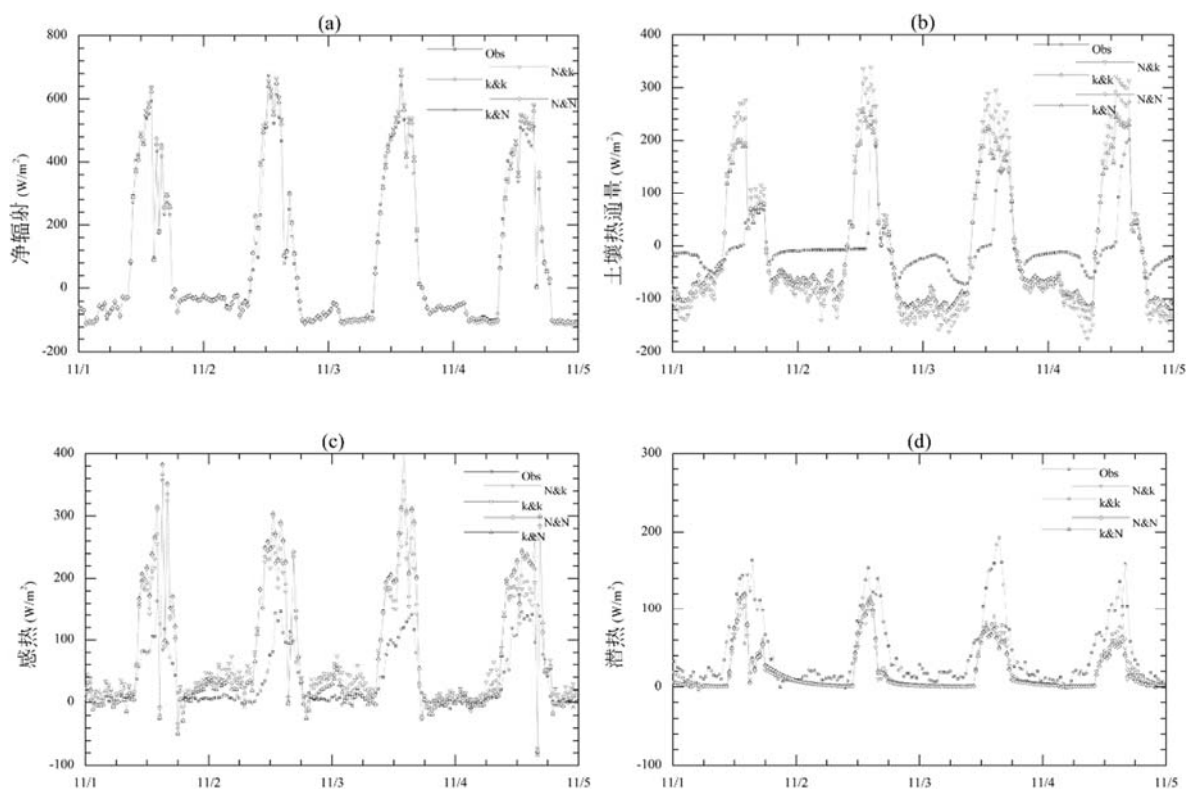


图 1.1.1 冻结阶段四组试验模拟的地表能量通量与观测值的比较

(a) 净辐射, (b) 土壤热通量, (c) 感热, (d) 潜热

研究表明，相对于过冷水参数化方案，冻土渗透率参数化方案对冻融过程期间土壤温度的模拟更为敏感，过冷水参数化方案不同会导致冻融过程期间土壤液态水含量模拟

值差异显著。地表能量通量的模拟在冻结阶段、冻结稳定阶段、融化阶段均存在显著差异。冻融过程参数化方案的敏感性试验和效果评估,有助于解决陆面模式对冻融过程模拟偏差较大的问题,提高对青藏高原多年冻土区地气相互作用的定量理解。【刘火霖,胡泽勇*,韩赓,裴昌春。基于 Noah-MP 模式的影响青藏高原冻融过程参数化方案评估[J]。高原气象, 2020, 39 (1): 1-14。DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00009】

建立了首套青藏高原地-气相互作用逐小时长时间序列综合观测数据集: 为弥补青藏高原综合观测资料严重不足的问题,深入理解气候变化条件下该区域地表各圈层间的相互作用过程与机制,那曲站联合中科院青藏高原所“地气作用与气候效应团队”马耀明研究员等,经过二十余年艰苦努力,建立了覆盖高寒草甸、高寒荒漠戈壁、高寒荒漠草原等高原典型下垫面的青藏高原地-气相互作用综合观测研究平台。对青藏高原不同下垫面大气边界层、土壤水热变化以及地-气间能量水分交换规律等进行了长期观测研究。并在此基础上,建立了一套由长期气象梯度观测、四分量辐射观测、土壤水热特征观测以及大气湍流特征观测构成的高时间分辨率青藏高原地-气相互作用综合观测数据集。在此基础上,那曲站胡泽勇研究员联合中科院青藏高原所马耀明研究员等科研院所学者在 Earth System Science Data (ESSD)上发表了题为“A long-term (2005-2016) dataset of hourly integrated land-atmosphere interaction observations on the Tibetan Plateau”的论文,系统地介绍了青藏高原地-气相互作用综合观测研究平各站点 2005-2016 年逐小时气象梯度数据、辐射、土壤和大气湍流等观测数据。该数据集是目前发布的青藏高原时间分辨率最高、观测序列最长、观测要素最齐全的野外台站综合观测资料,已在国家青藏高原科学数据中心和中国科学院科学数据存储库公开发布。可广泛应用于青藏高原气象要素特征分析、遥感产品评估和遥感反演算法的发展、数值模式的评估和发展等地球系统科学研究。为地球系统科学集成、关键区域对全球变化的影响与响应,以及国家和地方开展青藏高原及其邻近地区的生态安全屏障建设等提供坚实可靠的科学依据。【Ma Yaoming*, Hu Zeyong, Xie Zhipeng*, Ma Weiqiang, Wang Binbin*, Chen Xuelong, Li Maoshan, Zhong Lei, Sun Fanglin, Gu Lianglei, Han Cunbo, Zhang Lang, Liu Xin, Ding Zhangwei, Sun Genhou, Wang Shujin, Wang Yongjie, Wang Zhongyan. A long-term (2005-2016) dataset of hourly integrated land-atmosphere interaction observations on the Tibetan Plateau [J]. Earth System Science Data, 2020, 12: 2937-2957. DOI: 10.5194/essd-12-2937-2020. (SCI, JCR Q1, IF=9.197)】

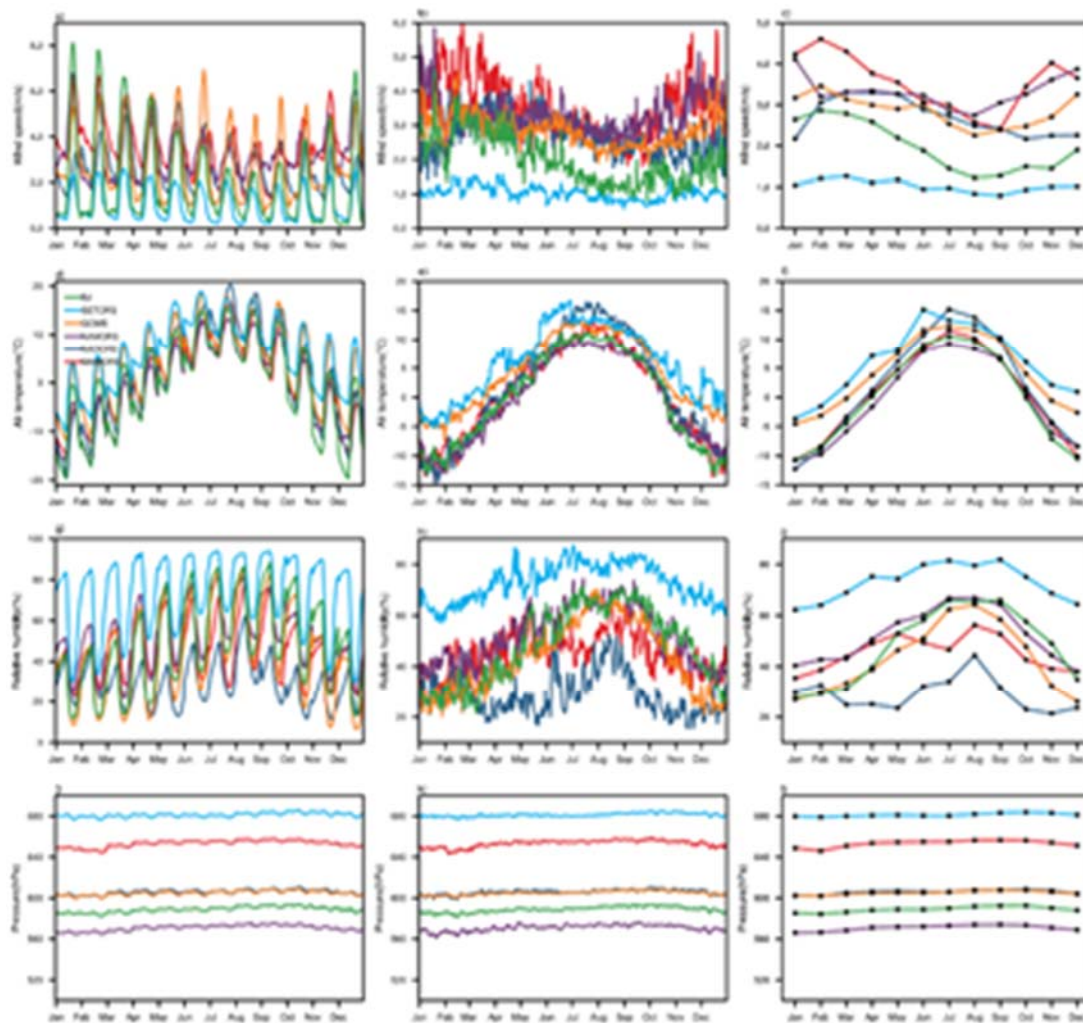


图 1.1.2 各台站风速、气温、相对湿度和气压的多年平均日变化、日平均和月平均特征

旱地扩张加快可调节旱地总初级生产力的未来变化：旱地的生产力对于支持人类至关重要，在年度碳循环中也起着至关重要的作用。它们帮助地球呼吸，每年春天随着植物的生长而吸收 CO_2 ，然后在秋天进入休眠状态时将其呼出。由于旱地生态系统对降雨和温度的变化非常敏感，因此，各种生态系统中旱地受到碳循环逐年变化的影响最大。了解它们在未来碳循环中的作用可以帮助研究人员确定如何最好地保护高碳吸收的区域。

那曲站气候变化团队成员于海鹏博士与兰州大学黄建平教授团队及美国华盛顿州立大学刘和平副教授团队合作，在国际著名期刊《Nature Communications》发表“Accelerated dryland expansion regulates future variability in dryland gross primary production”一文。研究表明，由于未来的气候变化，世界各地的干旱地区将以更快的速度扩张，其平均生产力可能会降低。这些地区主要包括热带稀树草原、草原和灌木林，对放牧和非灌溉农田至关重要。它们也是全球碳循环的重要组成部分，占地球陆地面积

的 41%，可支持 38%的人口。【Yao Jingyu, Liu Heping*, Huang Jianping*, Gao Zhongming, Wang Guoyin, Li Dan, Yu Haipeng, Chen Xingyuan. Accelerated dryland expansion regulates future variability in dryland gross primary production [J]. Nature communications, 2020, 11(1): 1665. DOI: 10.1038/s41467-020-15515-2. (SCI, JCR Q1, IF=12.121)】

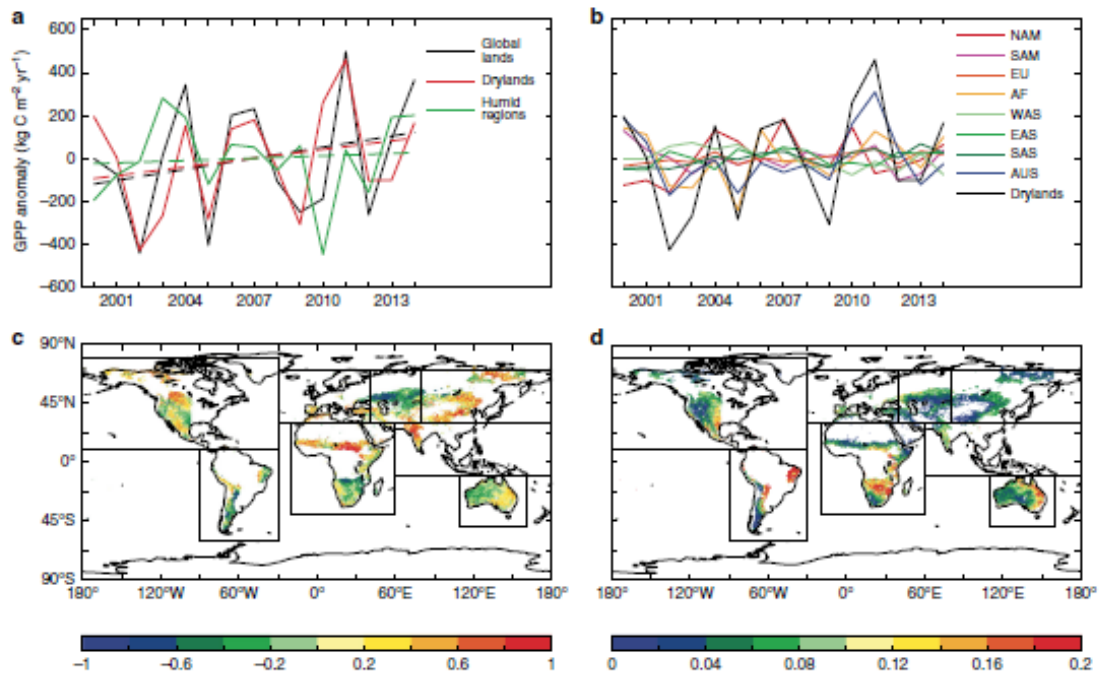


图 1.1.3 利用 MODIS 数据推算的 2000-2014 年旱地 GPP 趋势及变化

➤ 珠峰站

首套青藏高原地气相互作用过程逐小时长时间序列综合观测数据集发布：在“青藏高原二次科考”、中科院专项 A 等项目支持下，2020 年地气团队新建立了 9 个大气边界层综合观测研究站，建立了覆盖整个青藏高原的对流层大气微波辐射计观测网，构建了青藏高原陆面、边界层大气、对流层大气的综合立体观测系统。基于团队多年来的陆气相互作用过程的研究，与国内学者全面回顾了青藏高原地气交换对高原和我国东部天气的影响 (Fu and Ma* et al. 2020 NSR)。基于多年来收集、维护的 TORP 观测网数据，团队成员对所有观测站 15 年来的数据进行了质量控制，发布了首套青藏高原地气相互作用过程高时间分辨率长时间序列综合观测数据集 (Ma et al. 2020 ESSD; Nieberding et al. 2020 ESSD)。利用这些观测资料，分析得到青藏高原高山草甸碳水交换耦合过程的特征 (Wang et al. 2020 TAAC)，定量揭示了一次干旱过程对青藏高原碳吸收的影响 (Wang et al. 2020 IJB)。基于多年在泛三极地区建立的地气观测网络，得到尼泊尔三种不同下垫面的水热交换特征 (Joshi et al 2020 TAAC)。

泛第三极地区区域地表特征参数与热通量及湖泊蒸发的准确定量遥感：研究团队结合卫星遥感和青藏高原观测平台资料，得到了青藏高原 75 个大型湖泊的结冰过程、湖泊蒸发量空间分布以及湖泊蒸发总量等数据，首次给出青藏高原湖泊蒸发总量为每年 517 ± 21 亿吨，其中 75 个大型湖泊的蒸发总量为每年 294 ± 12 亿吨，湖泊冬季冰面升华水量大约占湖泊年蒸发量的 12.3-23.5%，是湖泊水量平衡研究重要的组成部分，青藏高原南部湖泊的非结冰期长度和湖泊蒸发量都显著高于北部湖泊，该新方法可准确估算青藏高原湖泊蒸发量，并可应用于估算世界其它地区湖泊蒸发量 (Wang et al. 2020 Science Advances)。另外研究团队将多年累积的青藏高原地气作用遥感方法应用到“泛三极”地区，利用遥感手段对“泛三极”尼泊尔、巴基斯坦地区的气候变化进行了归因分析 (Regmi et al. 2020 AEES; Latif et al. 2020 TAAC)，定量分析了中巴经济走廊一带的冰、雪融水对当地水资源的影响 (Latif et al. 2020 Atmosphere)，利用高分辨率卫星资料得到尼泊尔灌溉区的季节蒸发量，为当地水资源的合理利用提供参考 (Wasti et al. 2020 AOSL)，量化了一带一路“非洲屋脊”地区的区域辐射交换特征 (Tegegne et al. 2020 TAAC)。

青藏高原强雪灾过程的准确模拟：研究人员对青藏高原区域性强降雪过程进行了诊断分析研究，采用定量诊断与 WRF 模拟相结合的综合分析方法，系统揭示了青藏高原一次大尺度强降雪过程的环流背景、水汽条件、热力条件和动力条件。研究发现，区域性强降雪过程发生在有利的大尺度环境背景下，其中巴尔喀什湖冷涡、青藏高原南支槽和高原北部的横切变线是此次过程的主要影响系统。这些都为降雪过程的发生、发展和演变，提供了有利的动力、热动力和水汽条件。而喜马拉雅山脉强地形性抬升运动、越山气流下山发生风速辐合和充沛的水汽供应，克服了对流稳定性大气层结的不利影响，为青藏高原南部极端降雪过程的发生提供了触发机制 (Liu and Ma* et al. 2020 CD)，这项研究加深了青藏高原强降雪过程发生、发展和演变过程的认识，并为准确预报青藏高原地区短期强降雪和发展可持续畜牧业提供了理论参考和科学依据，提高防灾减灾能力。与此同时，团队成员揭示了青藏高原陆面模式、局地大气环流和春节沙尘暴长序列变化机理 (Xu et al., 2020 JC; 胡伟等 2020, 高原气象)。

2. 大气环境观测研究

➤ 藏东南站

青藏高原森林区含氮气溶胶的化学形态、来源传输和沉降通量：2020 年 6 月 16 日，美国化学学会 (ACS) 旗下的国际环境领域顶级期刊《Environmental Science and Technology》(环境科学与技术，简称 ES&T) 公布了 2019 年度最佳论文名单。依托藏东

南站长期开展观测研究的中科院青藏高原所高寒环境质量与安全团队丛志远研究员与合作者利用在藏东南站的观测结果完成的论文“Nitrogen Speciation and Isotopic Composition of Aerosols Collected at Himalayan Forest (3326 m a.s.l.) Seasonality, Sources, and Implications”从1500多篇论文中脱颖而出，被评为环境科学类最佳论文，排名第一。ES&T主编Julie Beth Zimmerman教授特意发来贺信。

该论文第一作者为中科院青藏高原所2016级研究生Hemraj Bhattarai，通讯作者为丛志远研究员，藏东南站副站长王永杰是合作者。其他合作者来自南京信息工程大学、天津大学、中科院西北生态环境资源院、中山大学、日本中部大学、印度Banaras Hindu大学、加拿大魁北克大学等诸多知名学术机构。观测数据来源于藏东南站2013~2014年的观测，文章最后对藏东南站工作人员的工作表示致谢。

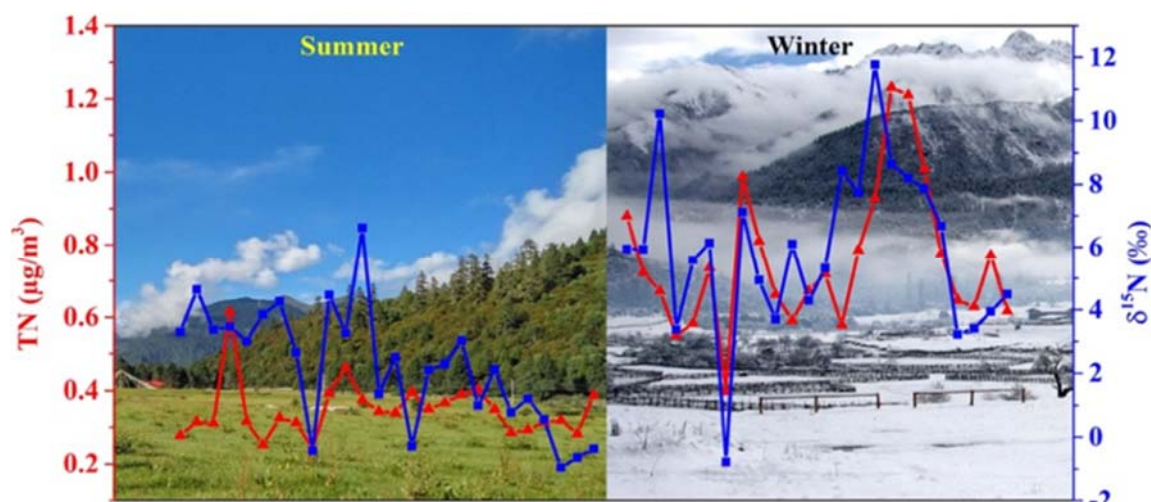


图 1.2.1 以藏东南站自然景观为背景的含氮气溶胶季节变化图

氮是大气气溶胶的重要组成部分，在全球生物地球化学循环以及气候系统中发挥着重要作用。青藏高原生态环境敏感而脆弱，但对于大气气溶胶的氮组分认识非常匮乏。该论文主要依据在藏东南站获取的观测结果，深入研究了青藏高原森林区含氮气溶胶的化学形态、来源传输和沉降通量，揭示了南亚冬季生物质燃烧通过长距离输送对高原的影响，探讨了潜在的生态效应。该研究为评估人类活动对青藏高原影响提供了新认识，为优化生态安全屏障建设提供了理论依据，为国家环境外交提供了重要科学支撑。此次入选ES&T年度最佳论文，充分体现了国际学术界对南亚大气污染物向青藏高原跨境传输这一科学问题的关注，也说明对该研究结果创新性和可靠性的高度认可。

3. 冰川/湖泊观测研究

➤ 纳木错站

青藏高原湖泊透明度时空变化特征及原因研究取得新进展：湖泊水质是青藏高原区域水环境和水生生态系统的重要组成要素，是“第二次青藏高原综合科学考察研究”专项中评估亚洲水塔功能的重要研究内容。目前，对青藏高原湖泊水质的大范围长时间序列调查极为缺乏。利用水质遥感（水色遥感）方法对水质参数进行反演，在海洋水色、内陆其它地区湖泊水质研究中已得到广泛应用，但在青藏高原地区的研究尚未可见，其原因在于缺乏实测水质数据、实测水色光谱和卫星遥感数据之间建立的可靠反演模型及其充分验证。

中科院青藏高原所湖泊与环境变化团队基于 2012-2019 年野外工作采集的 100 多个湖面反射光谱及水质数据，利用 Google Earth Engine 遥感大数据云处理平台，验证了青藏高原湖泊透明度遥感反演模型，并分析了过去 20 年湖泊透明度时空变化特征及原因。结果表明：MODIS-MODOCGA 反射率产品的蓝绿波段较好地指示了青藏高原湖泊水面反射率($r > 0.91$, $MAPE < 23\%$)，湖泊透明度反演模型达到较高精度($r = 0.94$, $MAPE = 28\%$)。反演结果显示，湖泊透明度主要介于 3-10 米之间，并且与湖泊面积呈现显著的正相关关系。2000-2019 年期间，大于 50 平方千米的 152 个湖泊透明度主要呈上升趋势，平均变化速率为 0.033 米/年。湖泊透明度年际变化受降水影响较大，并与水体光学组分悬浮物，fDOM，叶绿素 a 浓度存在不同强度的相关性。该研究将有助于进一步理解气候变化背景下青藏高原及内陆水体透明度变化特征，并且为湖泊水-气界面热量交换相关研究提供基础数据与研究参考。

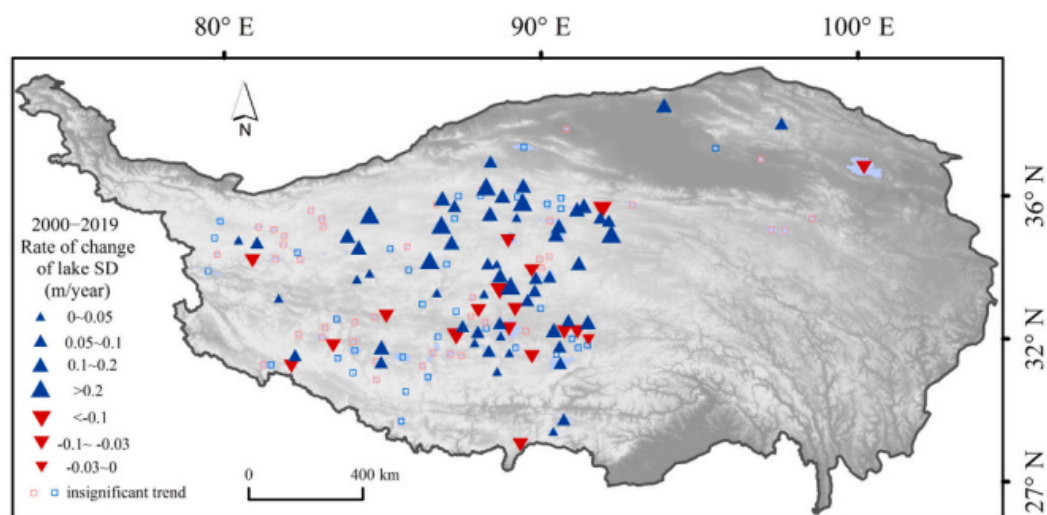


图 1.3.1 青藏高原 152 个大于 50 km² 湖泊透明度 2000-2019 年际变化速率

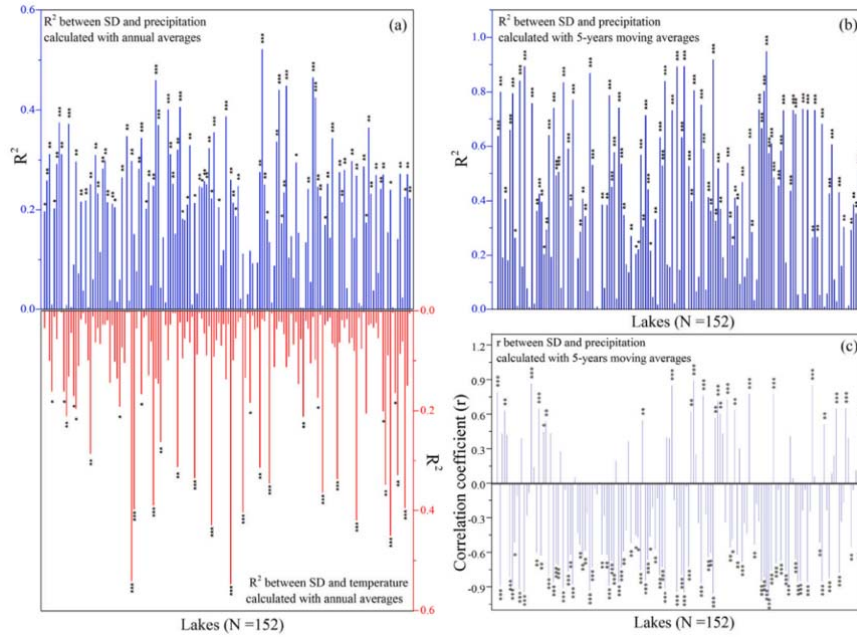


图 1.3.2 青藏高原 152 个大于 50 km^2 湖泊透明度年际变化与流域降水、温度之间相关性

该成果以 “The increasing water clarity of Tibetan lakes over last 20 years according to MODIS data” 为题发表在《Remote sensing of environment》。纳木错站学术站长朱立平研究员为该论文通讯作者，在读博士生刘翀为第一作者及共同通讯作者。本研究获得中科院 A 类战略性先导科技专项“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”(XDA2002010201)，国家自然科学基金重点项目(41831177)，第二次青藏高原综合科学考察研究专项(2019QZKK0202)等资助。

溶解性无机碳 (DIC) 控制青藏高原湖泊微生物固碳潜力研究取得新进展： 气候变暖导致湖泊蒸发量增加，叠加降水减少和格局变化，加剧了全球内陆湖泊水量减少和盐度增加，溶解性无机碳 (dissolved inorganic carbon, DIC) 含量随之升高。湖泊盐度增加会显著抑制固碳微生物多样性及固碳潜力，而 DIC 含量增加会提高微生物固碳潜力，由此，盐度和 DIC 含量增加对水体微生物固碳潜力具有截然相反的作用。但目前尚未有相关研究二者叠加如何影响湖泊固碳微生物及其固碳潜力，限制了人们对内陆湖泊微生物固碳潜力对气候变化的响应和适应机制的深入理解。

为此，中科院青藏高原所生态系统功能与全球变化团队孔维栋研究员等，以青藏高原湖泊为研究对象，采用稳定碳同位素 ($\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$) 标记培养方法，系统研究了不同盐度及 DIC 含量湖泊中的固碳微生物群落分布特征及固碳潜力 (以初级生产力速率为指标)。研究结果表明，青藏高原不同盐度的湖泊微生物固碳潜力差异巨大，其中盐湖 (盐度: 1% ~ 30%) 固碳潜力最高，达到 $190.1 \mu\text{g C L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ；其次是超盐湖 (盐度 > 30%，

36.1 $\mu\text{g C L}^{-1} \text{d}^{-1}$); 淡水湖固碳潜力最低 (盐度 $<1\%$, 3.5 $\mu\text{g C L}^{-1} \text{d}^{-1}$)。湖泊固碳微生物生物量和固碳潜力均随着水体 DIC 增加而显著增加。偏相关分析结果表明, DIC 对固碳微生物生物量的促进效应, 抵消了盐度升高对微生物固碳潜力的抑制效应。青藏高原湖泊固碳潜力与固碳微生物数量、尤其与 form ID 类固碳微生物数量呈显著正相关。结构方程模型分析结果表明, DIC 含量主要通过提高 ID 类固碳微生物数量, 间接促进青藏高原湖泊微生物固碳潜力。硅藻 (ID 类固碳微生物) 是青藏高原各类湖泊中主要固碳微生物类群。该研究揭示了 DIC 含量升高对湖泊微生物固碳潜力的正效应, 明确了硅藻在青藏高原湖泊固碳中的重要地位。在未来气候变暖和降水减少的情境下, 即使盐度增加, 内陆湖泊 DIC 增加反而会提高微生物固碳潜力。

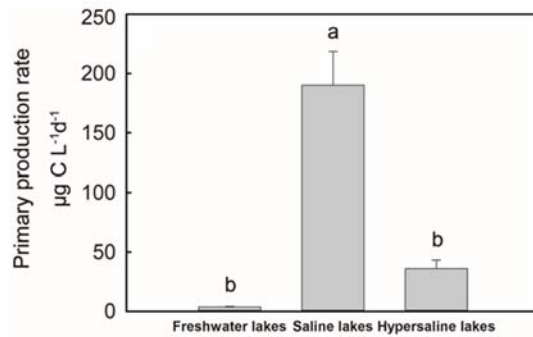


图 1.3.3 青藏高原淡水湖、盐湖及超盐湖微生物固碳潜力

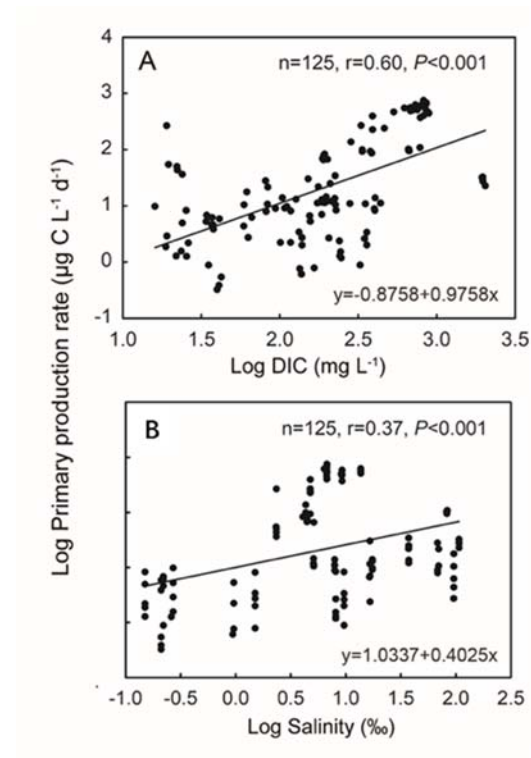


图 1.3.4 湖泊微生物固碳潜力随可溶性无机碳 (DIC) 和盐度显著增加

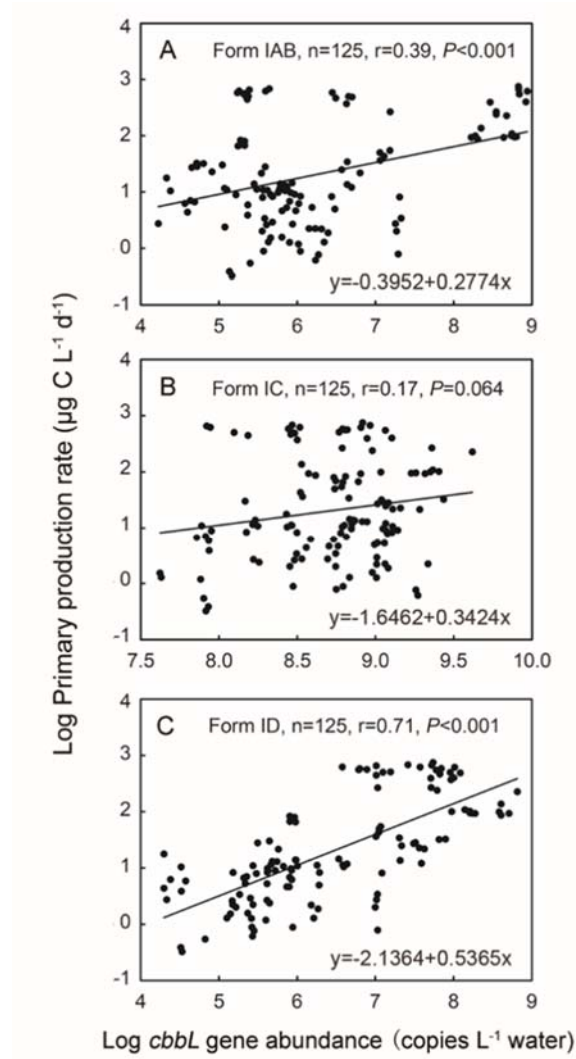


图 1.3.5 青藏高原湖泊微生物固碳潜力与不同类群固碳微生物数量相关性分析

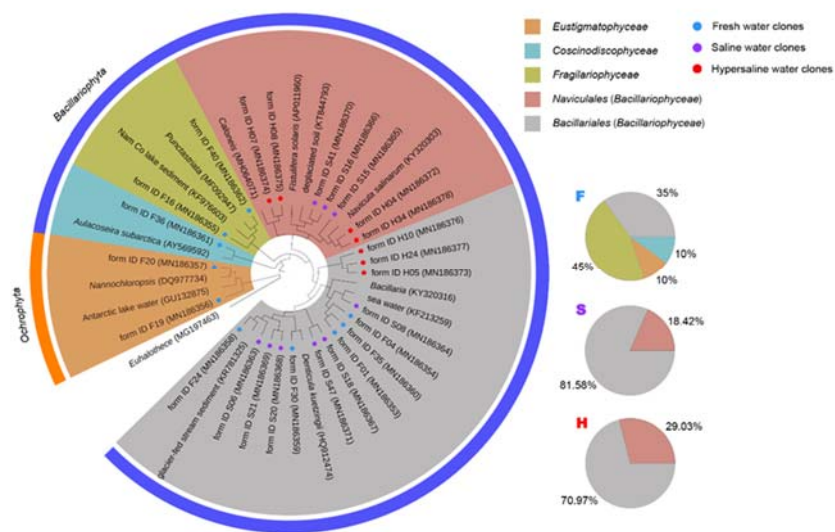


图 1.3.6 青藏高原湖泊 form ID *cbbL* 基因系列的系统发育

该成果以“Dissolved inorganic carbon determines the abundance of microbial primary producers and primary production in Tibetan Plateau lakes”为题发表于《FEMS microbiology ecology》。本研究获得中科院 A 类战略性先导科技专项“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”(XDA19070304、XDA20050101)、中科院重点部署项目(KZZD-EW-TZ-14)和国家自然科学基金项目(41471054)等资助。

➤ 青海湖站

青海湖水生态系统健康现状评估：通过现场调查、资料收集和遥感影像解译，分析了青海湖水质及刚毛藻分布特征的变化。研究表明，2011—2019 年间青海湖主要水质指标保持动态稳定，整体水质未呈现显著变化趋势。2019 年现场调查发现，近岸浅水区域存在数量可观的刚毛藻分布，其中以鸟岛和布哈河口周边区域刚毛藻生物量最大，8 月的平均生物量达到 5213.4 g/m^2 。遥感影像分析显示，刚毛藻主要分布在青海湖西部及西北部湖湾及入湖河口附近，1987—2019 年间刚毛藻覆盖面积呈先下降后上升趋势。分析表明，近年来刚毛藻生物量增加和覆盖面积扩大与青海湖水位不断上涨以及新生浅水淹没区范围的扩大有关。气候变化特别是降雨增加是导致刚毛藻增长加快的原因。特别是新生淹没区、鸟类栖息地淹没都导致营养物特别磷浓度升高。后续需进一步关注气候变化与人类活动双重影响下青海湖的水生态系统健康问题。详细分析结果的论文已发表于 2020 年《青海湖刚毛藻分布特征变化及成因分析》和《Cladophora reblooming after half a century: effect of climate change-induced increases in the water level of the largest lake in Tibetan Plateau》。

为积极应对青海湖水位上涨后出现的新生环境问题，针对近两年在鸟岛、布哈河等水域刚毛藻繁殖加快和二郎剑湖滨无名小水体出现紫色微囊藻水华现象，为切实做好青海湖部分水域绿藻疯长原因及态势分析，科学研究遏制青海湖绿藻疯长、修复水域生态。经过青海湖水生态系统健康现状评估及鸟岛绿藻（刚毛藻）水华治理项目经费的支持，青海湖保护区开展了人工打捞、内源清理（牛羊粪）等通过多项措施的实施，有效控制了刚毛藻水华，局部区域治理取得显著成效。

➤ 天山冰川站

人工措施与冰川消融研究：在全球变暖的背景下，如何有效应对冰川的快速消融，已经成为当今社会上十分关注的热点问题。中国的山地冰川在数量上以小冰川（面积小于 1 km^2 ）为主，占到冰川总数的 80%。数量众多的小冰川应对气候变暖，尤为脆弱。一旦小冰川呈现全面消融，如不加人工干预，则难以逆转最终消亡的现实。

冰川的消融与冰川表面的能量平衡密切相关，实施人工降雪直接在冰面不仅能直接

增加雪物质也能增大表面的反照率。2018 年 8 月，研究人员在新疆阿勒泰木斯岛冰川开展了人工降雪减缓消融的相关试验。首先，利用雷达探测大范围的区域系统云系和木斯岛冰川局地对流云系特点，研究如何选择最有利的作业时机，点燃地面碘化银烟炉，达到预期的增雪效果。然后，研究降雪前后冰川的物质平衡变化，观测实施人工降雪前后的冰川物质平衡，研究两者差异，评估人工降雪减缓冰川消融的效果。结果显示，降雪后一周花杆观测到的物质平衡与前一周相比，平均增加了 41 mm 水当量，人工降雪约占同期（降雪后的一周）总消融的 50%。

通过本项研究，形成人工措施减缓冰川消融的关键技术，研究成果已经在国际冰冻圈专业期刊 TOP5% *The Cryosphere* 发表。下一步拟在我国其他地方进行小范围的技术推广，然后再不断凝练经验，进行大范围的技术示范。



图 1.3.7 在新疆木斯岛冰川利用碘烟炉开展人工降雪减缓冰川消融的试验

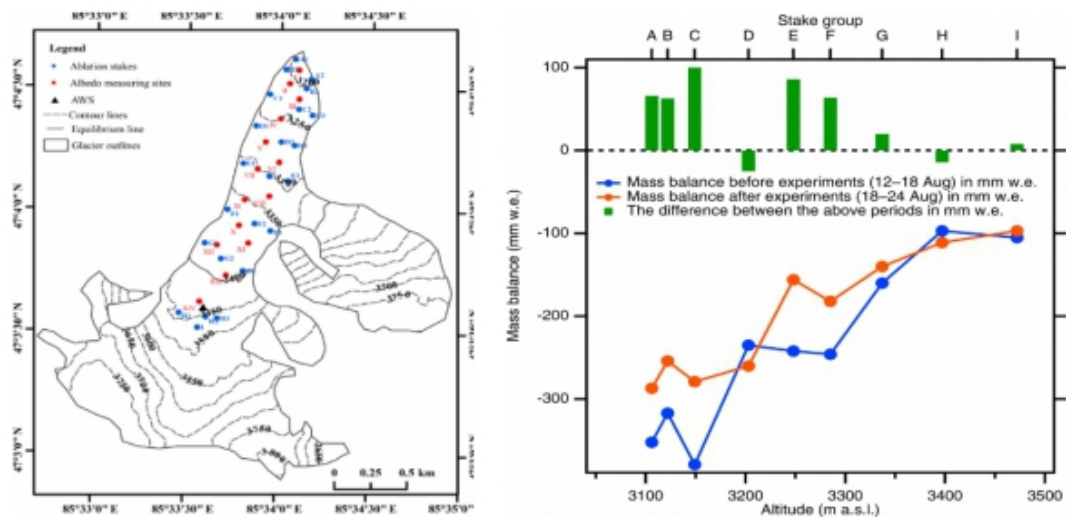


图 1.3.8 新疆木斯岛冰川消融花杆位置（左图）及试验效果（右图）

冰川变化与水文水资源效应研究：重建两条定位观测冰川长时间序列物质平衡数据，并成功完成复杂能量物质平衡模型的探索应用研究。为了弥补西北干旱区长序列冰川物

质平衡资料缺失，天山站科研人员利用不同精度与复杂程度的模型，对物质平衡模拟计算开展了全面理论与应用探索。一方面，搭建气温指数模型系统，以局地气候参数为驱动，重建天山中段哈希勒根 51 号冰川（1998/99~2014/15 年）与祁连山十一冰川（1963/64~2016/17 年）物质平衡和季节物质平衡，并揭示其变化规律和控制因素。该研究为西北干旱区冰川物质平衡观测增添了珍贵的长序列数据。另一方面，开展冰川能量—物质平衡模拟研究，利用目前国际上最为复杂的能量物质平衡模型 COSIMA 与 COSIPY 模型在乌源 1 号冰川上实施单点及分布式能量平衡模拟。该研究结果对量化评估在气候变化条件下，流域尺度未来水资源利用具有重要作用。

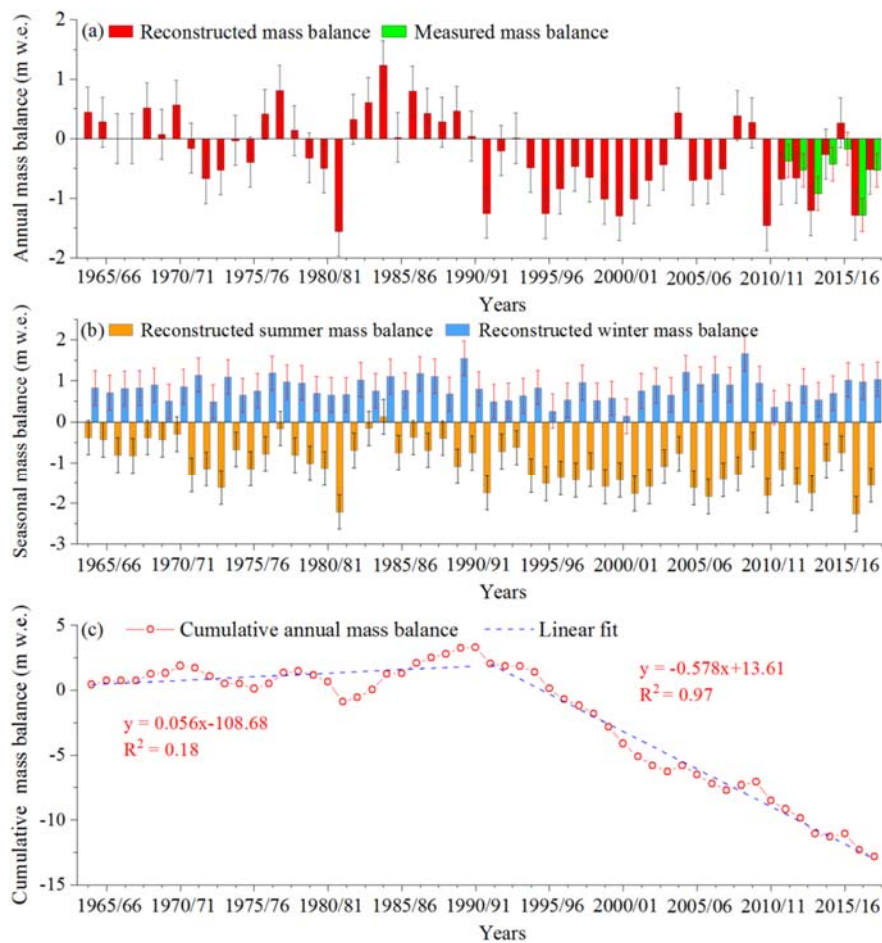


图 1.3.9 祁连山十一冰川物质平衡重建

冰川径流对气候变化影响研究方面取得突破性成果，获取乌鲁木齐河流域径流拐点信息。以乌源 1 号冰川流域为研究对象，基于 1959~2018 年实测径流数据，研究流域径流及其组分对气候变化的响应情况。结果表明，1 号冰川流域径流主要由冰川径流和非冰川区降水径流组成，分别占 70%和 30%。其中冰川径流又可分为冰川区降水径流和冰川融水径流，分别占 44%和 26%。60 年间，冰川径流整体呈上升趋势，1992 年之后阶

梯式上升态势明显, 2000~2007 年达到峰值, 之后波动下降。以上结果说明, 冰川径流峰值似成过去, 近期量值下降的原因除了降水有所减少之外, 冰川面积减小的影响也不可忽视。该研究为冰川径流长期变化过程的认识提供重要参考。

联合发布第三版全球冰川厚度观测数据库 (GlaThiDa v3.0)。冰川厚度是各项冰川研究重要的边界条件与初始条件。由于不能直接借助遥感手段获取, 而实地观测极为困难, 近十年来本站在相关研究方面付出巨大努力, 2020 年与世界冰川观测网络(WGMS)联合发布第三版全球冰川厚度观测数据库 (GlaThiDa v3.0)。该数据库汇集全球约 3000 条冰川观测信息, 囊括 3,854,279 条冰川厚度观测数据, 覆盖全球冰川面积的 14%, 较第二版数据库 (仅包含约 1100 条冰川数据, 覆盖全球 4%冰川面积) 在数据容量与覆盖面积上均有大幅提升。目前该数据库为全球唯一冰川厚度数据库, 可从以下链接免费下载(<https://doi.org/10.5904/wgms-glathida-2020-10>)。以上成果发表于《Climate dynamics》、《Journal of Glaciology》、《Earth System Science Data》等国际冰川学一流期刊。

雪冰和大气化学研究: 通过在中国西北地区天山和祁连山采集的雪样, 并结合西安、兰州和乌鲁木齐的地面大气监测资料, 系统研究了日本福岛核事故放射性物质传输、沉降和在冰川记录形成的过程。研究发现, 放射性物质在发生泄漏后二周左右时间即可传输到中国西部, 沉降到冰川表面, 然后这些物质经历过成冰作用后, 最终在冰川中形成了稳定记录。利用黑碳仪在纳木错湖地区、天山中部乌河流域开展连续观测, 分析了大气黑碳气溶胶、冰川雪冰表面碳组分和粉尘的浓度、光学特征及潜在来源研究。研究结果揭示了纳木错湖地区黑碳的平均浓度十年以来增加了约 50%。除当地人为活动外, 来自中亚的污染容易影响到天山地区大气本底, 尤其在夏秋两季。研究了西北典型城市气态污染物和颗粒物 (PM₁₀、PM_{2.5} 和 PM₁) 的浓度、组分特征和污染来源, 发现水溶性无机离子和矿物粉尘是西北地区 PM 主要组成成份, 粉尘和二次无机气溶胶分别是粗颗粒和细颗粒的主要污染源 (~30%)。以上成果发表在国际主流环境类 SCI 期刊《Environmental Research Letters》、《Ecotoxicology and Environmental Safety》、《Atmospheric Pollution Research》等。其中英国《卫报》以“揭秘雪冰中福岛事情”为题对冰芯定年参照层的研究进行了专门报道, 认为本研究所发现的“福岛参照层”将和切诺尔贝利核泄漏事件一样, 成为冰芯定年的重要参照层, 未来将在北半球冰芯研究中发挥重要作用。

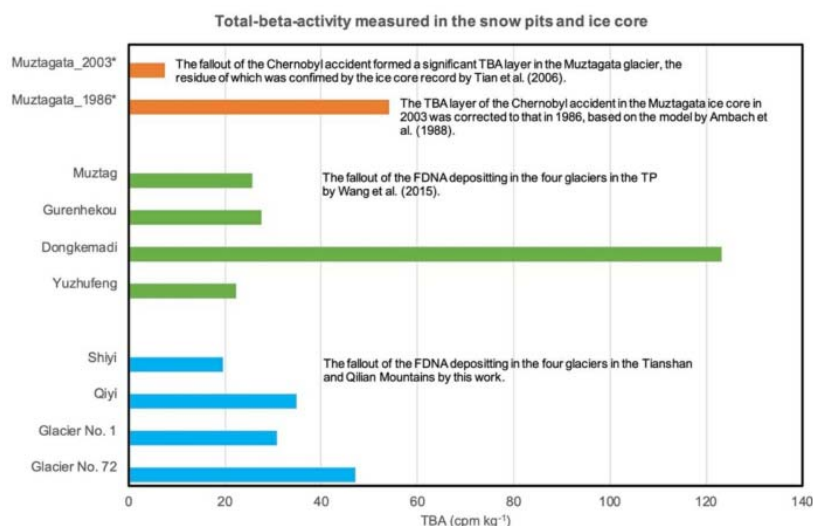


图 1.3.10 切尔诺贝利事故和福岛第一核电站事故在高亚洲冰川中 TBA 沉积的影响比较

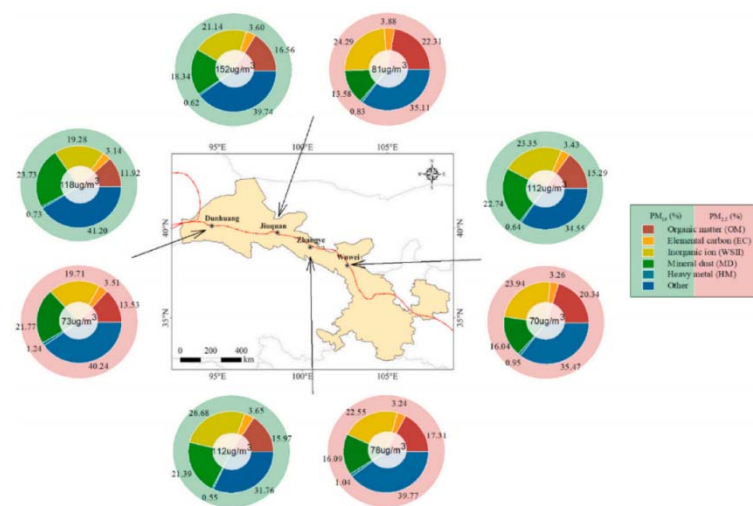


图 1.3.11 西北四城 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度和质量重建

极地研究: 参与格陵兰 NEEM 深冰芯研究, 重建过去 11 万年生物活性元素铁序列, 填补了“Fe 假说”北半球深冰芯数据空白。该研究由冰冻圈科学国家重点实验室、北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室等单位联合开展。研究发现, 过去 11 万年中, 格陵兰 NEEM 冰芯中铁元素序列与粉尘浓度同步变化; 且高纬度格陵兰 NEEM 冰芯与黄土记录在冰期—间冰期尺度存在一致性, 间接证实了中亚粉尘对北半球大尺度粉尘输送的贡献; 两者记录的关联性主要是由北半球 65° N 太阳辐射所驱动的; “铁施肥”效应在千年时间尺度具有显著的不确定性: 在冰期 (包括显著冷阶段) 时期, 生物活性元素铁的施肥效应更显著, 而在全新世与间冰阶 “铁施肥”效应相对较小; 工业革命以来人类活动排放了大量的污染物, 但人类活动排放的污染物并未导致 NEEM 冰芯内铁的显著增加。该成果对认识长时间尺度上北半球大尺度粉尘 Fe 传输与海洋碳泵效

应相关研究具有重要借鉴意义。此外，对该领域的定量研究以及估算人类活动污染物排放的Fe施肥效应也具有一定启发。研究发表于《国家科学评论》(National Science Review, NSR, 影响因子 16.693) 期刊。

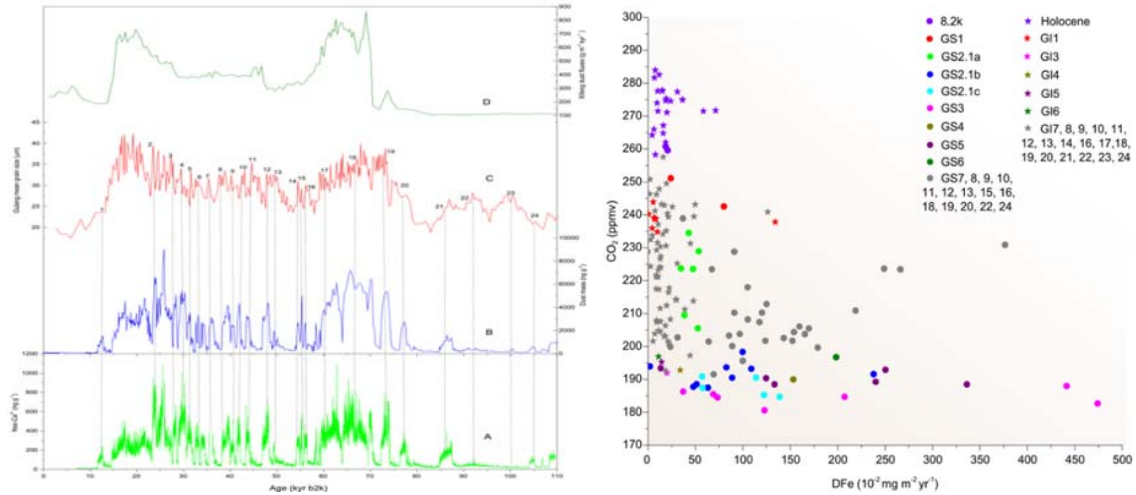


图 1.3.12 左图：过去 11 万年格陵兰 NEEM 冰芯 Nss-Ca²⁺ (A)、粉尘质量浓度 (B) 与中国黄土粉尘记录 (古浪 (C) 与西峰 (D))，右图：NEEM 冰芯中生物活性元素铁与 CO₂ 浓度的对应关系

首次针对东南极汞的生物地球化学循环过程进行了重点研究，厘清了影响东南极典型区域汞的生物地球化学循环的环境要素及控制机理。依托于在东南极中山站连续获取的两年的大气气溶胶样品，对痕量金属汞的季节变化及其影响机理进行了分析。首先，大气气溶胶中颗粒态汞呈现显著的季节变化，表现为春季和夏季两个峰值，其中春季的峰值主要源于海冰区释放的卤代烃在春季太阳辐射作用下对大气中气态单质汞的氧化作用所致，其中奇数汞同位素呈现显著的负值，且 $\Delta^{199}\text{Hg}/\Delta^{201}\text{Hg}$ 斜率接近 1，指示大气氧化还原反应是近岸带颗粒态汞生成的主要机理；而夏季的峰值则可能与源自内陆地区的物质输入有关。为了进一步探讨内陆地区对东南极近岸带颗粒态汞的贡献情况，本项目对中山站至 Dome A 断面雪冰中汞的时空分布特征进行了深入研究。结果显示，东南极内陆地区是大气汞沉降影响最为显著的地区，Dome A 地区表层雪中汞的含量达到已知的南极自然条件下雪冰中最高的浓度值。另外，奇数汞同位素非质量分馏 (MIF) 所呈现的异常值也是南极积雪中的最低值。研究显示，东南极内陆地区是大气汞传输和沉积的重要汇区，源于长距离传输的大气汞以及南极内陆地区所特有的降水 (钻石尘) 和物质积累方式 (霜花) 是造成上述结果的重要原因。夏季增强的下降风可携带更多的二价汞至近岸带地区，进一步增加了近岸带区域颗粒态汞的浓度。相关研究发表于 SCI 期刊《Environmental Science and Technology》上。

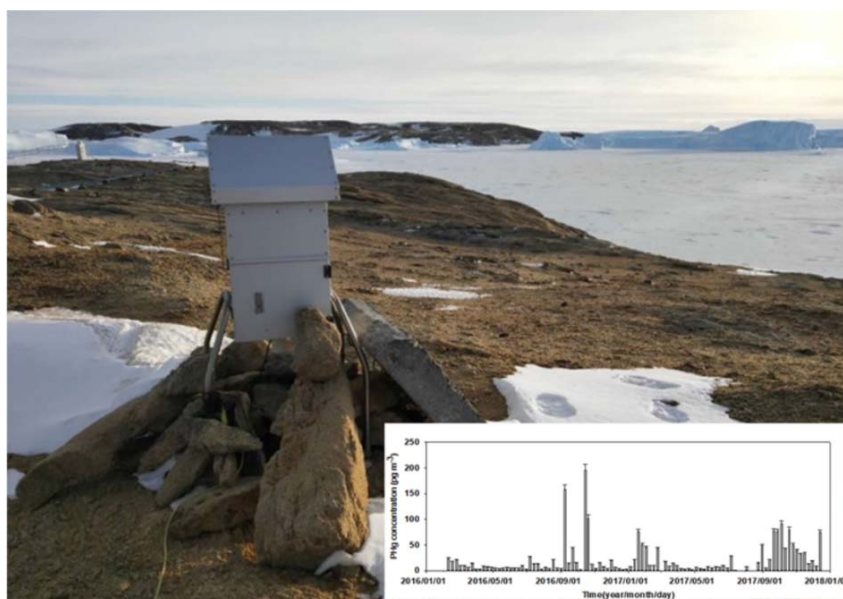


图 1.3.13 南极东部沿海中山站大气 2 粒子中汞及其同位素的季节变化

对东南极中山站—Dome A 断面不同区域雪层中氢氧同位素的分馏机理进行了研究，为更好的解译东南极雪层中气候环境信息提供了研究基础。水稳定同位素比率（ $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD ）是冰芯气候研究的基础参量，可以用来指示温度变化及水汽源区。然而，这种气候环境记录解译的准确性会受到气象及地形等影响的沉积后过程的扰动。为了更好的揭示同位素所包含的气候信息，对东南极中山站—Dome A 考察断面上获取的一系列表层雪和雪坑样品的行星水线(MWL, 表示为 $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ 的斜率)的时空分布进行了研究。结果显示，行星水线的斜率随着向内陆距离的增加逐渐降低，其中最低的斜率位于东南极冰盖最高点-Dome A。长距离的水汽传输过程及内陆地区特殊的降水方式是造成斜率最低值的主要原因。积雪沉积后，随着埋藏深度的增加，行星水线也会逐渐降低，其原因是源于雪层内部由于不同层位温差的存在，水汽升华后在雪层中传输和再凝结过程的影响。相较于内陆地区，近岸带雪层中也存在行星水线的变化，但变化幅度较内陆地区偏小（图 20）。该研究发表于《Journal of Glaciology》。

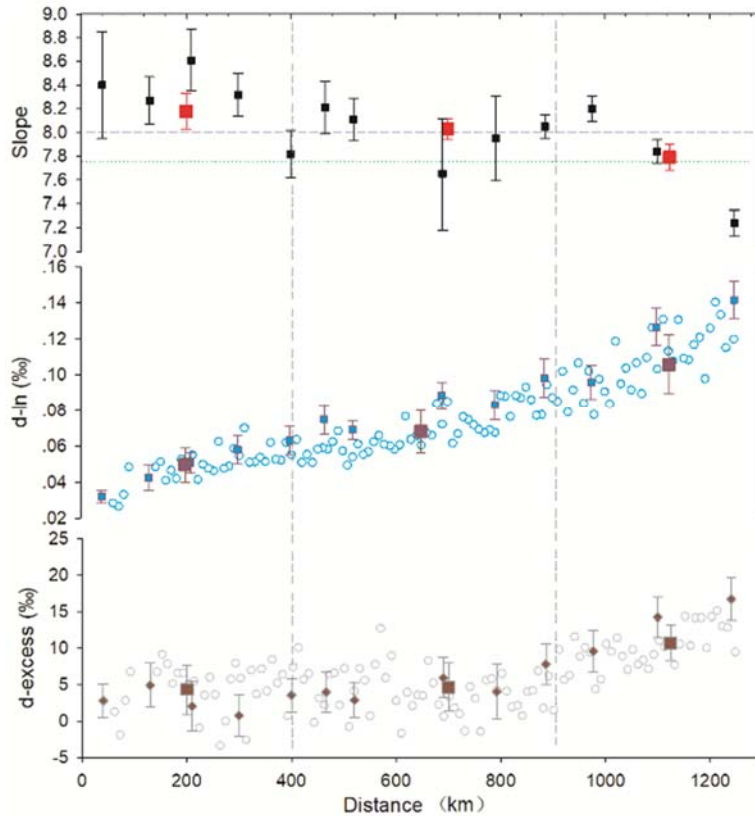


图 1.3.14 东南极中山站—Dome A 断面积雪中行星水线（上）、对数过量氘及
过量氘空间分布

➤ 藏东南站

利用高精度无人机技术结合地面实测首次揭示了藏东南海洋性冰川季节性动态变化规律：杨威研究员课题对帕隆 4 号冰川开展了多期同步无人机、冰面测杆、表面差分 GPS 的综合测量工作。无人机技术作为冰川监测的新手段，其覆盖范围广、观测时间灵活和产品精度高的优势克服了传统冰川观测方法的缺陷。通过地面控制点验证，无人机航测精度达到水平和垂向精度 1-2 个象元即分米级，完全满足冰川季节及年际尺度变化研究。研究首次发现以藏东南帕隆 4 号冰川为代表的海洋性冰川消融区存在明显的冰通量补给，冷季冰面由于上游冰量补充导致冰面高程显著增加（平均增加 2.0 米），而暖季由于强烈消融导致冰面高程强烈下降（平均减薄 4.7 米），因此导致冰川末端整体高程减薄约 2.7 米。冰川消融区呈现明显的冷季冰通量补给而暖季强烈消融的季节性变化。上游冰量补充占整个消融区冰川消融减薄量的 55%。同时利用多期正射影像数据进行了冰川表面运动速度时空变化规律研究，发现帕隆 4 号冰川消融区号冰川消融区夏季平均运动速度约为 9 厘米/天而非消融期速度约为 6 厘米/天，空间上呈现由冰川末端向冰川中部逐渐增大的趋势。

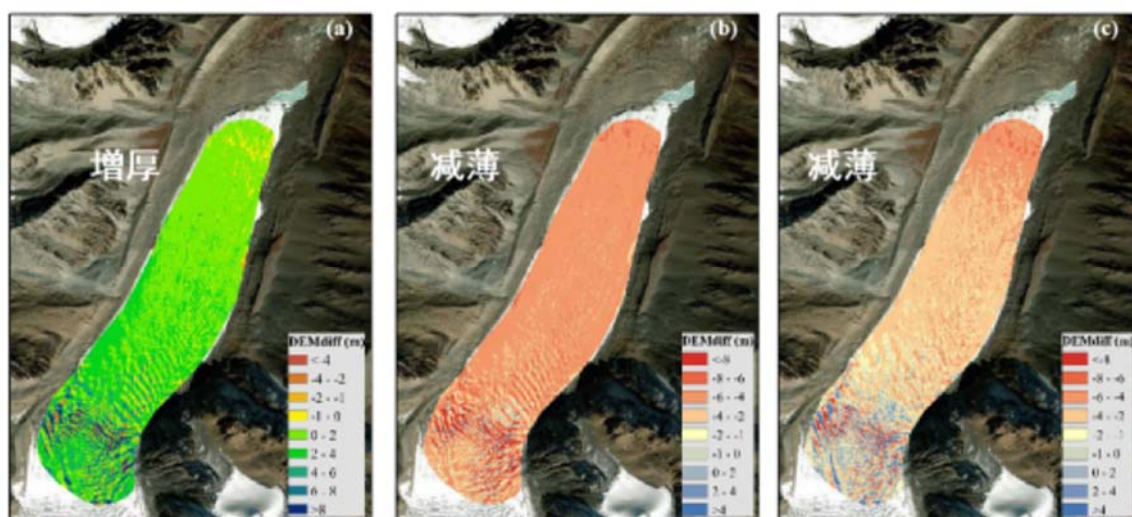


图 1.3.15 基于无人机航测获得的藏东南帕隆 4 号冰川高程的季节性变化

该区冰川特殊的补给方式及动态过程可能导致冰川变化的空间差异，以帕隆 4 号冰川为例的典型海洋性运动冰川而言，如果仅在模型中计算累积消融量导致的冰川高程，则长时间的累积（20 年尺度以上），高程误差约 70 米左右，则可能导致表面温度估算发生明显的差异。海洋性冰川消融及物质平衡模型中，建议更新不同时期的冰川 DEM 数据或者考虑冰川动力补给过程。该研究成果发表在遥感学杂志 *Remote Sensing* 之上。研究成果首次利用高精度无人机技术精确刻画了青藏高原冰川季节性动态变化过程，有助于全面理解海洋性冰川未来变化幅度与趋势。相关研究成果发表在国际期刊 *Remote Sensing*. 2020, 12(15), 2389, 论文题目：Seasonal Dynamics of a Temperate Tibetan Glacier Revealed by High-Resolution UAV Photogrammetry and In Situ Measurements。中国科学院青藏高原研究所杨威研究员是第一作者兼通信作者，藏东南学术站长姚檀栋院士为共同作者。

➤ 阿里站

第三极气候变暖及冰冻圈变化：第三极的冰雪融水哺育亚洲的大江大湖。作为“亚洲水塔”，第三极在其周边众多国家和地区水安全和社会积极可持续发展中起着关键作用。半个世纪以来，第三极地区增暖效应超过北半球和全球同期平均，且高海拔地区升温更为显著。在此背景下，第三极地区积雪天数和积雪深度减少、多年冻土活动层增大和活动层底部温度升高、冰川面积萎缩和物质亏损加剧。青藏高原的暖湿化气候，不仅导致内流区湖泊的快速扩张；同时与冰川相关的灾害风险增加，对当地及周边地区人民的生产生活带来重要影响。为此，面对第三极冰冻圈变化，有必要监测第三极冰冻圈变化从而理解其对水资源的影响，并提出适应与应对策略。相关研究进展发表于 WMO

Bulletin 和 Earth-Science Reviews。

➤ 慕士塔格站

东帕米尔高原冰川物质平衡模型研究：以帕米尔高原位于亚洲中部，发育有面积约12260km²的冰川。这些冰川不仅是研究气候环境变化的重要载体，同时也为当地社会经济发展提供重要的淡水资源，因此帕米高原的冰川变化尤其是物质平衡变化受到广泛的重视。鉴于帕米尔高原冰川的重要性，研究者做了大量关于这一区域冰川变化的研究工作。诸多研究利用模型数据如 DEM（数字高程模型）研究显示，帕米尔高原及周边区域的冰川变化具有很强的空间差异，但对于冰川物质平衡变化的原因并没有做深入的探讨；也有研究分析了近几十年来冰川物质平衡变化的数据，发现年降水量是影响冰川变化的重要因素；另外也有研究认为，在帕米尔高原部分地区，相对于降水来说，气温对影响物质平衡变化影响更加显著。

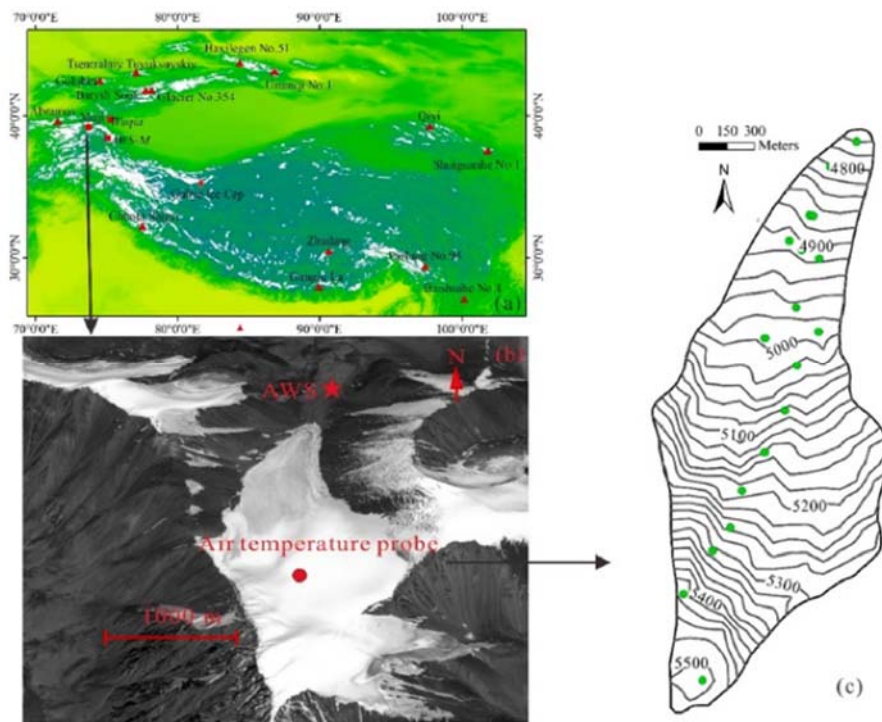


图 1.3.16 木吉冰川地理位置和冰川等高线图

本研究以位于帕米尔高原东北部的木吉冰川为研究对象，利用实测的冰川物质平衡和气象数据，基于能量-物质平衡模型，分析该地区冰川物质平衡变化的机制。实测结果显示，该冰川 2011-2017 年的平均物质平衡变化为-267 mm 水当量。模拟结果与实测结果具有较高的一致性，敏感性试验分析认为相对于温度而言，冰川消融期的降水量对冰川物质平衡变化的影响更加显著。

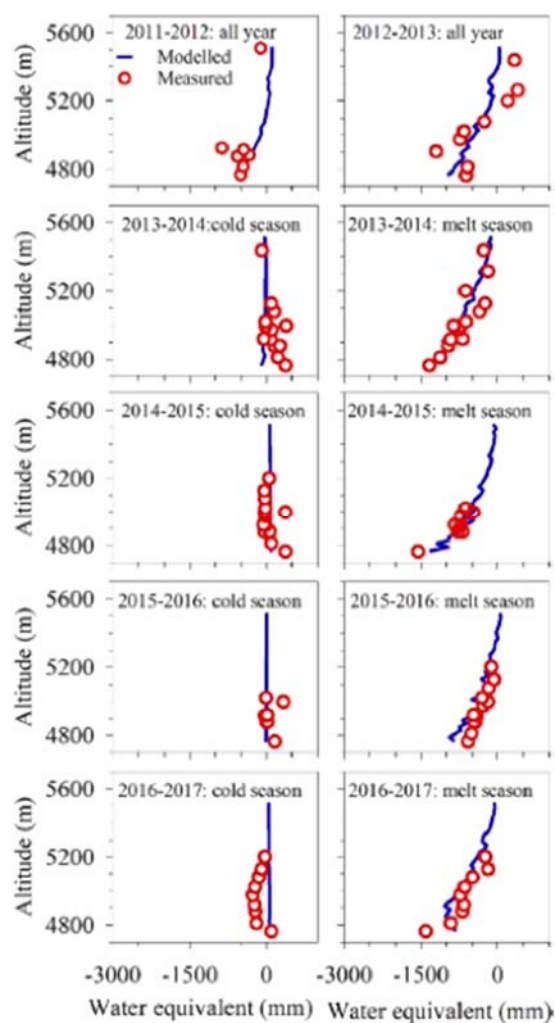


图 1.3.17 木吉冰川物质平衡变化模拟和实测结果对比

► 玉龙雪山站

建立距亚欧大陆距赤道最近、时间序列最长的海洋型冰川物质平衡数据集：冰川物质平衡是联系冰川与气候作用关系的纽带，物质平衡的监测对于理解冰川对气候作用机理至关重要。随着青藏高原气候变暖，该地区冰川也发生不同程度的响应行为。1952-2017 年，玉龙雪山白水河 1 号冰川物质平衡波动变化明显，其物质平衡介于 1.94~2.26 m w.e.。然而，1979 年的冰川物质亏损最为强烈。此外，1 号冰川 1952-2017 年的累计物质平衡为 27.45 m w.e.，表明过去几十年冰川物质亏损极其严重。从变化趋势分析，整个研究期以 2002 年为节点，分为前后两期：1952-2002 和 2002-2017。其中，1952-2002 年，冰川物质平衡亏损每年以 0.016 m w.e./a 的速度增加 ($p = 0.10$)；2002-2017 年，冰川物质亏损速率增加至 0.099 m w.e./a。由此可见，白水河 1 号冰川物质平衡在 2002 年发生明显变化，即 2002 年之后的冰川物质亏损速率明显加快，冰川呈加速消融趋势 (Wang et al., 2020)。

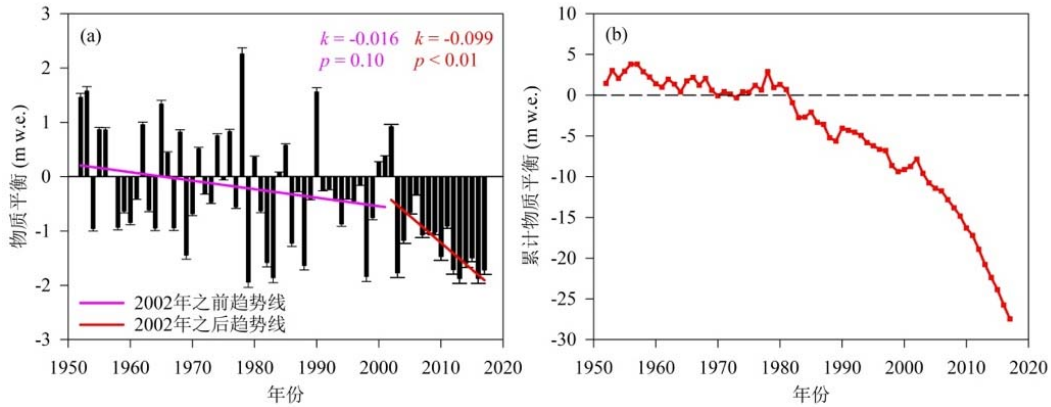


图 1.3.18 1957-2017 年白水河 1 号冰川物质平衡变化特征

在此，以 1959 年作为冰川物质平衡的参照年，将白水河 1 号冰川与乌源 1 号、中国冰川、全球参照冰川物质平衡进行对比分析。白水河 1 号冰川、乌源 1 号冰川以及中国和全球参照冰川均有相似的冰川物质平衡亏损趋势。其中，白水河 1 号冰川物质亏损速率为 0.03 m w.e./a ，乌源 1 号冰川物质亏损速率为 0.02 m w.e./a ，中国冰川物质亏损速率为 0.02 m w.e./a ，全球参照冰川平均物质亏损速率为 0.01 m w.e./a 。因此，白水河 1 号冰川物质亏损速率明显高于乌源 1 号冰川、高于中国和全球冰川的亏损速率。此外，就累计物质平衡而言，白水河 1 号冰川的累计物质平衡变化曲线与全球参照冰川变化接近，但波动较为显著。1959-1980 年，中国冰川累积物质平衡的波动不显著，1990 年后下降趋势非常明显，而全球冰川在 1980s 后呈明显的下降趋势。1959-2015 年期间，中国冰川总的累积物质亏损为 -14.74 m w.e. ，而全球冰川 1959-2012 年累积物质亏损为 -19.14 m w.e. 。此外，还可发现：过去几十年，中国冰川年物质平衡亏损速率 (-0.015 m w.e./a , $p < 0.0001$) 大于全球冰川的亏损速率 (-0.013 m w.e./a , $p < 0.0001$)，即中国冰川加速消融的速率高于全球冰川平均的加速消融速率。综上所述，白水河 1 号冰川加速消融退缩的趋势明显快于乌源 1 号冰川，同时也快于中国和全球参照冰川物质亏损的速率 (Wang et al., 2020)。

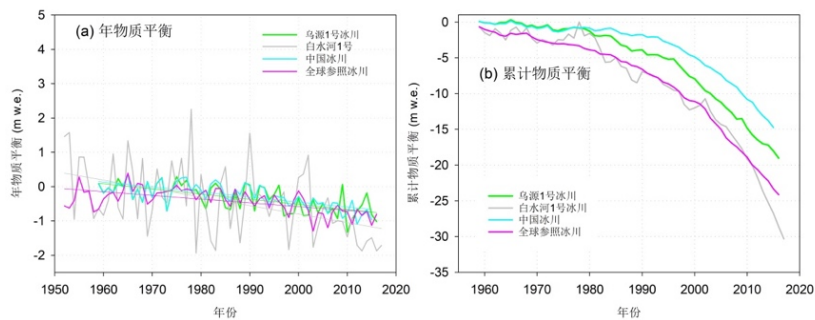


图 1.3.19 中国冰川物质平衡与其它冰川物质平衡变化对比

海洋型冰川区雪冰中冰尘颗粒的微观形貌和化学组成研究：利用带 X 射线能谱的场发射扫描电镜分析了样品中颗粒物的微观形貌和化学组成。雪冰中的微粒包括飞灰颗粒、石英颗粒、矿物颗粒和生物颗粒。这些颗粒的形貌各不相同，飞灰颗粒呈现圆球形、表面光滑、透明状，石英颗粒和矿物颗粒在雪冰中的含量较为丰富，形状不规则。生物颗粒呈圆球形、表面带有小孔。飞灰颗粒主要来自人类活动排放和生物质燃烧。石英颗粒和矿物颗粒代表天然源，玉龙雪山富含各种矿物和石灰岩，故雪冰微粒中有大量的石英和矿物颗粒。

生物质颗粒主要反映了雪冰中有微生物的生长及生物残体的富集和存留。带能谱的电镜扫描结果显示，碳和氧元素在颗粒物中主导着其他元素，其他元素的丰富次序为：氧>钙>碳>金>硅>铝>铜>锌>镁>钠>钾>铁。这种趋势反映了玉龙雪山冰川冰中碳酸盐、烟尘（黑碳）、焦油球颗粒物的存在。研究表明，黑碳颗粒一般以小粒径球粒聚合在一起的链状或者大粒径球粒聚合簇的形式存在。这些典型的颗粒主要来源于汽油或者柴油燃烧的废气。碳质颗粒物一般呈圆球形、不定形、是典型的不聚合微粒，主要来自烟尘颗粒。硅及铝、钠、钙、铁等元素，在矿物（不规则形状，天然源：土壤尘埃、由于人为的工程建设和交通导致的再悬浮）中以粘土、长石颗粒的形式存在。

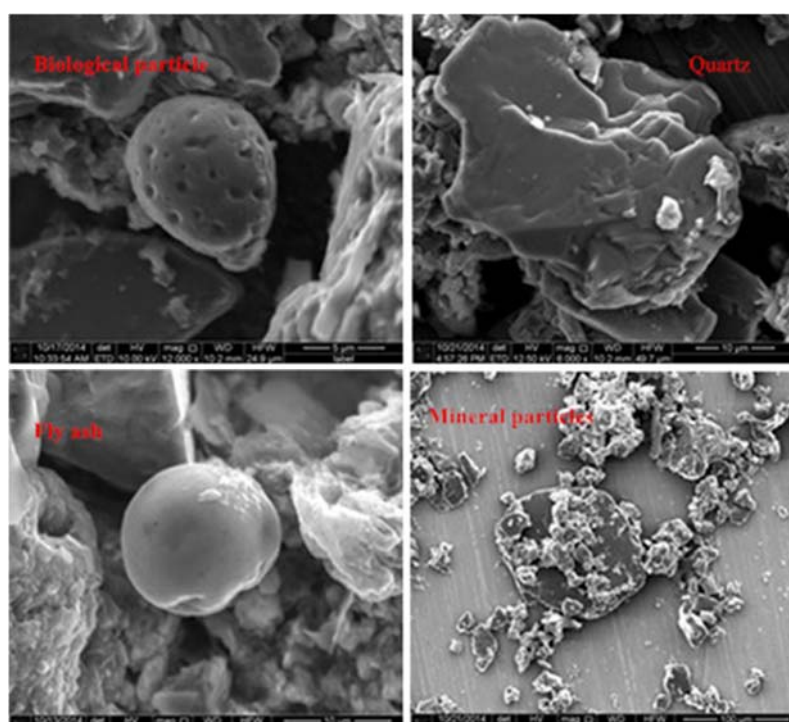


图 1.3.20 玉龙雪山雪冰中微粒的微观形貌

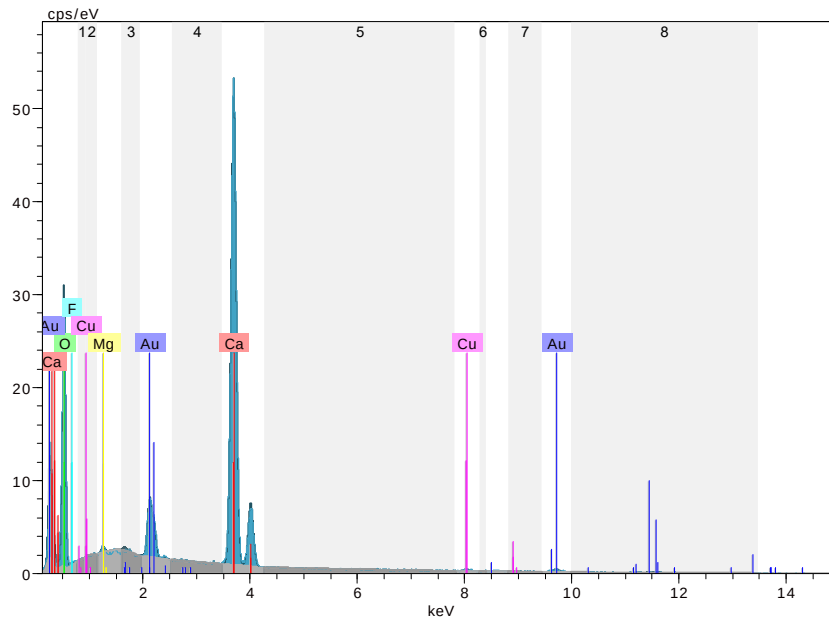


图 1.3.21 雪冰中微粒的能谱分析及元素组成

表 1.3.1 SEM-EDX 分析的玉龙雪山雪冰中冰尘的颗粒类型及其化学组成

分类	比例 (%)	各种化学元素所占的质量比 (%)										
		Ca	Au	Cu	C	Si	Al	Fe	K	Mg	Zn	N
富 Ca 型	45.4	45.2	6.6	1.2	-	-	-	-	-	0.2	-	-
富 Si-Cu 型	31.36	-	10.8	12.8	6.2	18.4	4.98	3.9 8	1.0 7	1.43	7.6 1	-
富 Si-Au 型	33.23	-	12	-	-	20.9	9.63	7.7 3	5.1	-	-	9. 3
富 Si-C-Au 型	46.1	0.9	12.1	-	14.4	19.6	8.94	7.3 6	2.9 2	1.21	-	-
富 Ca-C 型	52.9	41.2	-	1.2	8.5	1.5	0.82	0.6 4	-	-	-	-

表 1.3.2 已鉴定颗粒类型的混合特征、潜在来源的分类标准

颗粒类型	元素组成	混合状态	潜在来源
生物颗粒	K、S、Fe、Mg、Ca、C，以及其他氧化物	与其他颗粒物内混合或外混合、有机物质	花粉、孢子、藻类、真菌、昆虫和叶子的碎片，昆虫的排泄物

飞灰颗粒	富 Si、Al、Fe、S 元素	粉煤灰与盐（硝酸盐、硫酸盐），金属氧化物、含少量铁、锰和其他金属的硅酸盐混合	火力发电厂、重工业和炼油厂
黑碳颗粒	碳（C）主导、富 O	富含 C 的矿物颗粒与有机物、富 S 和 K 的物质	生物质燃烧、化石燃料燃烧
矿物颗粒	富 Si、Ca、Al、Mg、Fe，例如，石英、粘土、长石、，钠长石、及其他氧化物	矿物质聚集的并与黑碳和盐混合	矿物粉尘、表土、沙漠沙

雪坑连续采样活动开始于 2016 年 5 月 3 日，最大雪坑厚度为 2.4 m。从 2016 年 5 月 11 日至 6 月 17 日，雪坑的厚度从 2.1 m 急剧减少至 1.4 m。玉龙雪山冰川上的粒雪由于快速融化，2016 年 5 月和 6 月期间雪层厚度大幅度减薄，除 2016 年 6 月 6 日偶尔出现新降雪事件，使得雪坑厚度达到 2.0 m。2015 年 5 月开挖的雪坑其最大深度从 5 月 16 日的 1.6 m 降至 6 月 21 日的 0.8 m。随着冰川表层雪的迅速融化，吸光性杂质暴露在冰川的表面，吸收更多的太阳能从而加速冰川消融。在冰川物质快速损失和较高的环境温度 and 强劲的山谷风的条件下，白水河冰川物质的损失和衰减主要由强烈消融所致，而大量吸光性杂质的出现加剧了其消融的程度。每个雪坑厚度的逐渐减薄，主要是由于冰川表面雪的密实化过程和吸光性杂质的沉降以及雪坑消融使得其厚度自然减小的结果。



图 1.3.22 2015 年 5-6 月（绿线）和 2016 年 5-6 月（红线）白水河冰川雪层深度的变化

2016 年 5 月和 6 月在玉龙雪山连续采集的雪坑中吸光性杂质浓度以及 OC/EC 比率

的统计结果显示,黑碳、有机碳、粉尘的平均浓度在不同雪坑中的差异很大。从2016年5月3日到5月20日,每个雪坑中黑碳和有机碳的平均含量显著降低,而从2016年5月20日到6月17日,黑碳和有机碳的平均含量逐渐增加。

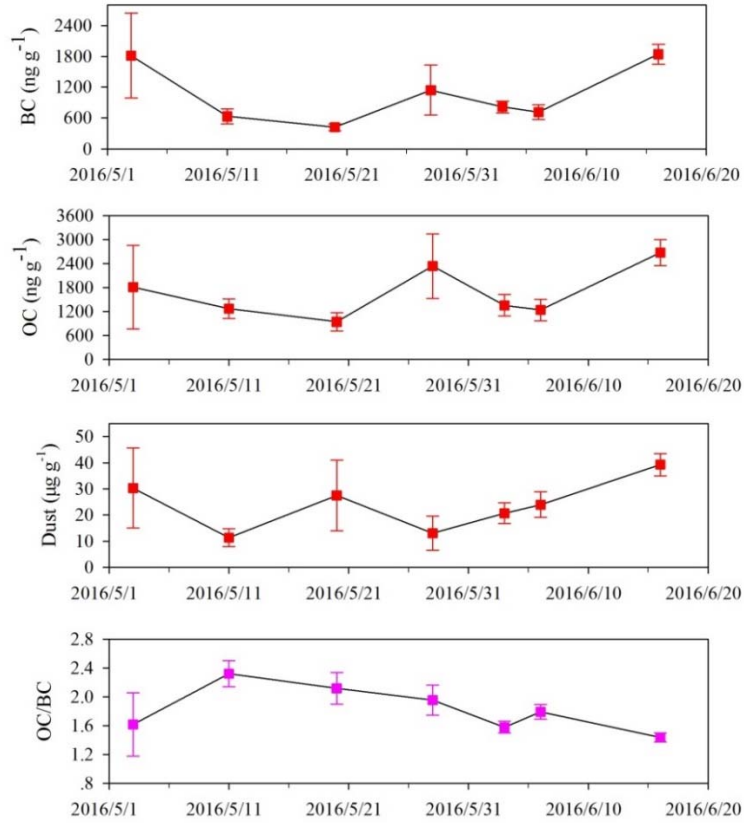


图 1.3.23 2016 年 5 月和 6 月雪坑中平均黑碳、有机碳和粉尘浓度的变化

每个雪坑中粉尘平均浓度的变化大致与黑碳和有机碳含量的变化趋势一致。即是在整个采样期间,特别是在5月20日之后直到观测结束之前,每个雪坑中吸光性杂质的平均浓度总体呈上升趋势。雪坑中吸光性杂质浓度的差异很大程度上与不同杂质的亲水性和雪坑融化速率相关。某些杂质浓度的增强也可以归因于融化放大效应。但是,在整个采样和观测期间,黑碳和有机碳比值(OC/EC)的时间变化与黑碳和其他杂质的变化趋势相反。雪坑中平均OC/EC比值首先从5月3日的1.61上升到2016年5月11日的2.32,然后随着时间的推移持续下降,表明有机碳和黑碳的变化从一个剖面到另一个剖面截然不同。2016年5月11日雪坑中黑碳和其他杂质浓度的降低以及OC/EC比率增加主要是由于5月11日之前发生了新降雪事件。与老雪或粒雪相比,新降雪中的杂质浓度较低。此外,新降雪之后,雪坑强烈的消融没有在5月11日重新开始。但是,2016年5月11日之后雪坑中平均OC/EC比率下降意味着冰川雪坑中有机碳的清除或黑碳富集效应的贡献较大,因为雪坑融水清除了更多亲水性的有机碳,而雪坑中富集了较多的

黑碳 (Niu et al., 2020)。黑碳和有机碳的清除效率和扩增因子在先前的研究中有详细的估算。但是,使用观测数据准确量化在雪坑中被冰雪融水清除和富集的黑碳和有机碳的质量具有挑战性。连续的雪坑采样和相应的测量使得研究 2016 年 5 月和 6 月雪坑中吸光性杂质的平均浓度和 OC/BC 的平均比值的演化过程成为可能。显然,随雪坑融化的持续,雪坑的深度显著变薄,并且在 5 月至 6 月雪坑强烈消融期,每个雪坑中吸光性杂质的平均浓度逐渐增加。

青藏高原不同地区重金属含量及主控因素: 水体中微量元素是评估水环境的重要指标。本研究在青藏高原东南缘玉龙雪山地区采集不同水体样品(雪、河水和地下水),分析水体中主要的微量元素(Al, Mn, Fe, Cr, Ni, Cu, Zn, As, Pb),与青藏高原其他地区雪冰中微量元素含量进行了对比研究,揭示了青藏高原雪冰中微量元素含量的空间差异,指出人类活动对青藏高原南部区域的影响显著,并以玉龙雪山为例,建立水循环过程中微量元素的来源及其变化,揭示了微量元素在青藏高原冰川流域中的循环变化与影响机制。

1) 雪坑、表层雪中微量元素的浓度及来源

雪坑和表层雪中, Fe、Zn 和 Al 的浓度高于 $10 \mu\text{g/L}$, Mn 元素的浓度在 $1\sim 10 \mu\text{g/L}$ 之间波动,其他元素(Cr、Ni、Cu、As、Hg 和 Pb)浓度低于 $1 \mu\text{g/L}$ 。就雪坑而言,微量元素随着雪坑深度表现出不同的变化趋势。雪坑上部 Al 和 Zn 的浓度高于下部, Fe 和 Pb 则表现为上部低、底部突增的趋势, Cr、Cu、Mn 和 Ni 浓度在雪坑上部多变、下部逐渐增大,除 170-180cm 处和表层外, As 的浓度几乎为 0。白水河 1 号冰川雪坑剖面微量元素变化与藏东南东嘎冰川、仁龙巴冰川、德木拉冰川、阿扎冰川等不同,主要是由于微量元素来源不同及其消融过程引起的。

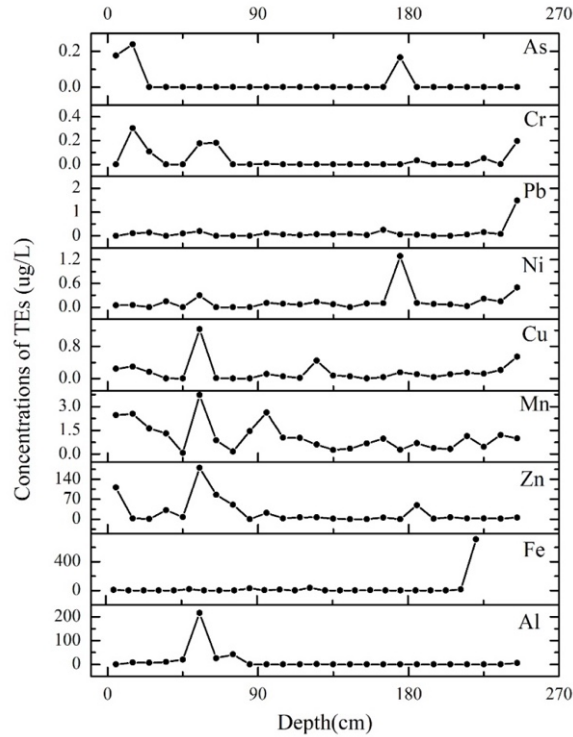


图 1.3.24 雪坑剖面微量元素随深度的变化 (0 代表雪坑表层)

雪坑中金属元素的富集因子 (EF 值) 不同: Mn、Fe、Cr 和 As 的 EF 值小于 1, Cu、Pb 和 Ni 的 EF 值在 10~100 之间, Zn 元素的 EF 值大于 1000, 表明 Zn 元素受人类活动的影响最大, Pb、Cu 和 Ni 元素受人类活动的影响次之, Mn、Fe、Cr 和 As 则主要表现为自然源。此外, 表层雪中大部分元素的 EF 值普遍高于雪坑 EF 值, 指示了微量元素在表层雪中的富集。就玉龙雪山地区降水和气溶胶而言, Zn、Pb 和 As 受人类活动的微弱影响 ($10 < \text{EF 值} < 100$), Mn、Fe、Cr、Ni 和 Cu 主要为自然源。研究发现, 人类活动的影响包括远距离传输和当地人类活动排放, 即玉龙雪山地区雪冰中微量元素一方面受到南亚排放的影响, 一方面受当地旅游活动、工农业活动等的影响。

本研究对比了青藏高原不同地区雪坑中微量元素的分布。从空间变化来看, 青藏高原中部和北部微量元素浓度相对较高, 青藏高原南部微量元素浓度相对较低。然而, 青藏高原南部雪坑中微量元素的富集因子 (EF 值) 较中部和北部较高, 这主要是因为青藏高原南部区域人类活动显著, 且南部受到南亚远距离输送的污染物影响。

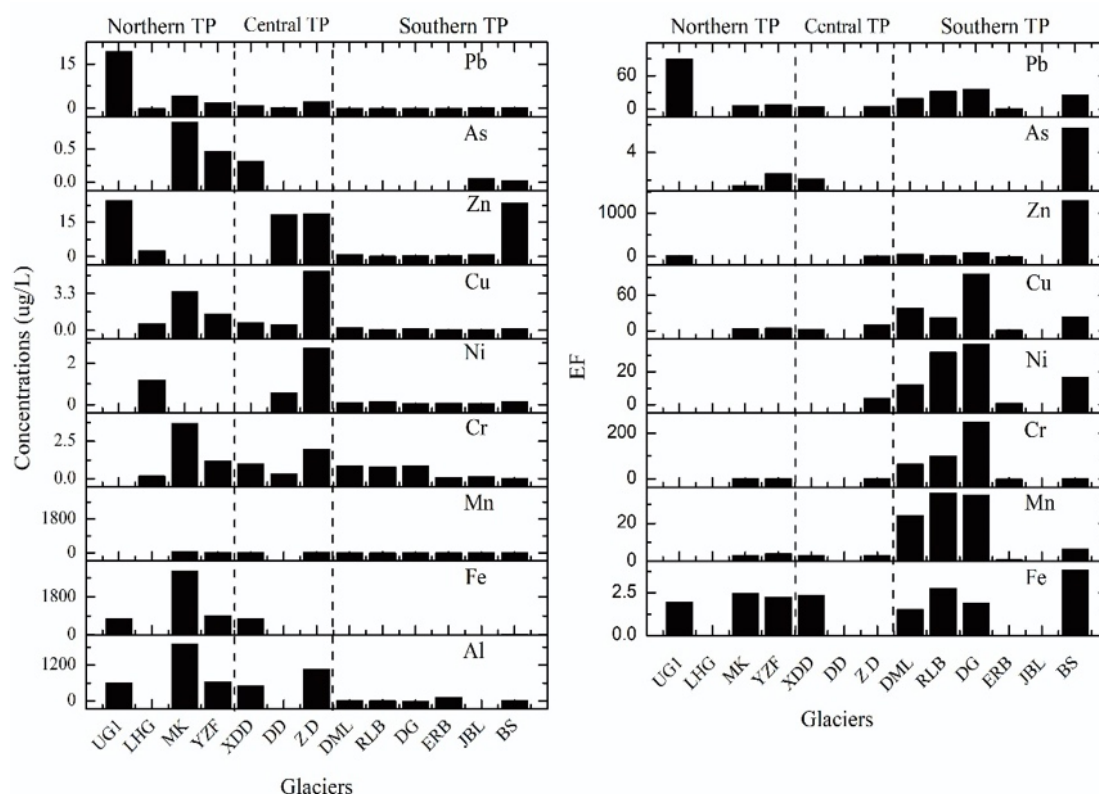


图 1.3.25 青藏高原雪坑微量元素对比

(a) 浓度; (b) 富集因子 (EF). 天山乌源 1 号冰川 (UG1) 数据源自 Li et al. (2007), 老虎沟冰川 (LHG) 数据源自 Dong et al. (2015), 煤矿冰川 (MK)、玉珠峰冰川 (YZF)、小冬克玛底冰川 (XDD) 来自 Huang et al. (2018), 冬克玛底 (DD) 源自 Dong et al. (2015), 扎当冰川 (ZD) 源自 Huang et al. (2013), 德木拉冰川 (DML)、仁龙巴冰川和东嘎冰川源自 Zhang et al. (2016), 东绒布冰川 (ERB) 源自 Lee et al. (2008), Gyabrag 冰川 (JBL) 源自 Liu et al. (2011), 白水河 1 号冰川 (BS)

2) 河水、地下水中微量元素的分布及概念模型

河水中 Zn 的平均浓度为 $758.3 \mu\text{g/L}$, Fe 和 Al 平均浓度高于 $10 \mu\text{g/L}$, Mn 和 As 平均浓度在 $1\sim 10 \mu\text{g/L}$ 之间波动, Cr、Ni 和 Cu 平均浓度小于 $1 \mu\text{g/L}$, Pb 含量低于检测限。玉龙雪山地区河水中微量元素的浓度普遍低于世界平均水平, 这主要是受玉龙地区土壤发育较弱、喀斯特地貌有关以及河水的 pH 值较高有关。根据富集因子的大小可以判定, 流经或者离人类聚居区近的河水中部分元素受到了污染, 例如漾弓江和美泉村河的 Fe 和 Zn。此外, 白水河中 Zn 富集, 主要是因为白水河流域冰雪融水是白水河的主要补给源, 而冰雪中富集 Zn 元素。

地下水中 Cr 浓度与河水相似, Al、Mn、Fe、Cu 和 As 浓度比河水低, 而 Ni、Zn 和 Pb 低于检测限。除 As 以外, 地下水中微量元素的 EF 值均低于 10。EF 值表明, 地下水目前未受到人类活动的影响, 以自然源为主。以世界卫生组织和中国国家标准的饮用水准则为标准, 分析了玉龙雪山地区的水质总体较好, 微量元素含量均低于以上两个标准

的上限。然而，部分河水和水库水的 WQI 值大于 1，表明其受到了人类活动的轻微污染，应引起足够的重视。

据此，研究建立了以下概念模型以阐述微量元素在冰川流域水循环中的来源及其循环变化：首先，大气降水中微量元素以自然源为主，个别元素受到了人类排放的影响，而高海拔地区雪中微量元素含量表现出富集的特征，其人为源主要包括长距离传输的南亚排放及其当地人类活动；其次，玉龙雪山地区土壤特性（喀斯特区域）及河水较高的 pH 值导致河水中微量元素含量较低，河水中微量元素主要源自水岩相互作用、补给源的贡献及人类活动。此外，补给地下水的大气降水和积雪融水中微量元素含量、水岩作用及与地下水频繁转换的河水是地下水微量元素的主要来源。

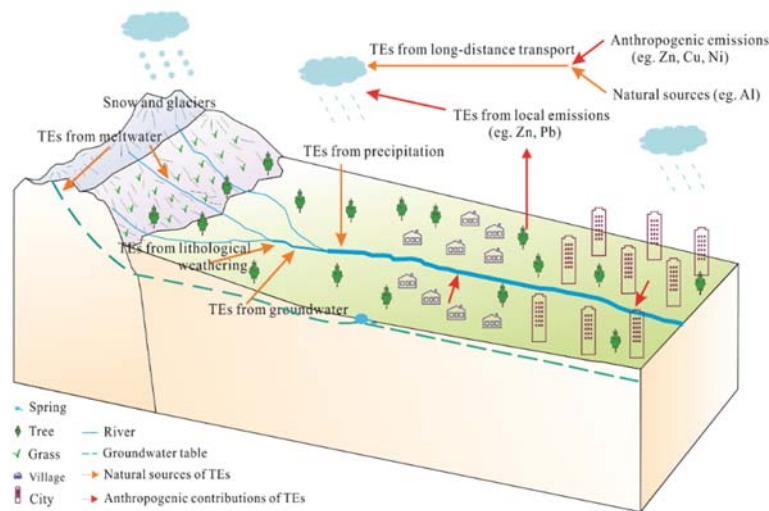


图 1.3.26 水循环过程中微量元素来源与变化的概念模型图

4. 植被生态系统研究

➤ 贡嘎山站

贡嘎山旅游资源的研究、保护开发和利用：贡嘎山高山、极高山山地旅游资源的吸引力和资源的独具特色是低山、中山不可比拟的，符合世界旅游趋势求新、求异、求知的需求。1987年5月，贡嘎山站完成了四川省人民政府组织的贡嘎山地区风景资源科考后，率先提出在贡嘎山地区建风景旅游区，但景区建成至今存在几个突出问题。1) 旅游资源的开发与生态环境之间的矛盾越来越凸显，有些景点过度开发；2) 对旅游资源如森林垂直带谱、土壤垂直分布缺乏系统完善的研究；3) 冰川退缩的严重性和具体的退缩数据缺乏；4) 开发带来的资源快速减少以及自然景观不断受到破坏。针对贡嘎山海螺沟旅游生态环境的保护和可持续发展等系列问题，在贡嘎山海螺沟旅游自然资源与环境本底调查的基础上，系统开展了贡嘎山大海螺沟地区旅游自然资源的研究，为资源保护和可

持续发展提供重要的科学依据，也为今后申报世界遗产提供了科学支撑；推动了贡嘎山海螺沟生态旅游区的建立。全面开展贡嘎山海螺沟原始森林资源和生态环境研究，长期监测了贡嘎山海螺沟地区生态环境的变化，发现了海螺沟冰川退缩区原生演替序列的连续性和完整性，构建了 GFSM 贡嘎山海螺沟森林演替模型。开发了农旅结合特色产业，通过研发和集成特色玫瑰园建设技术、观赏玫瑰、金银花种植技术以及建设核心技术示范区，为景区农民脱贫致富寻找到有效途径，为少数民族地区消除贫困、建设全面小康提供试验示范；贡嘎山海螺沟景区近 5 年累计新增产值 56.20 亿元。建成了包括玫瑰花和金银花资源化技术研究与推广示范基地 3 个、玫瑰庄园 1 个。上述成果获得 2020 年四川省科技进步奖二等奖 1 项。

青藏高原蒸散发和水分利用效率时空变异规律及驱动因素：蒸散发约占陆地生态系统降雨的 2/3，在陆地生态系统水循环中起到极其关键的作用。由于蒸散发过程的复杂性，陆地生态系统蒸散发的观测和模拟一直是水文学科研究的热点和难点。目前，虽然已有很多模型用于对实际蒸散发的估算，但是这些模型在模拟实际蒸散发时并没有考虑冻土融化过程的能量消耗，进而高估了实际蒸散发。很多研究已经表明非线性互补关系模型能够很有效地模拟实际蒸散发，该方法也已被应用于不同的植被类型和不同的时空尺度。贡嘎山站研究人员将冻土融化过程冰相变所消耗的能量加入到非线性互补关系式中。通过对不同空间尺度模拟值与观测值的比较，发现改进后的非线性互补关系式能更准确地模拟青藏高原的实际蒸散发（与原始模拟相比降低了 8.88%）。然后，利用改进后的非线性互补关系式对青藏高原实际蒸散发的时空变化进行了模拟。通过比较不同时期实际蒸散发的变化速率，认为冻土区的融化加速了青藏高原蒸散发的增长。

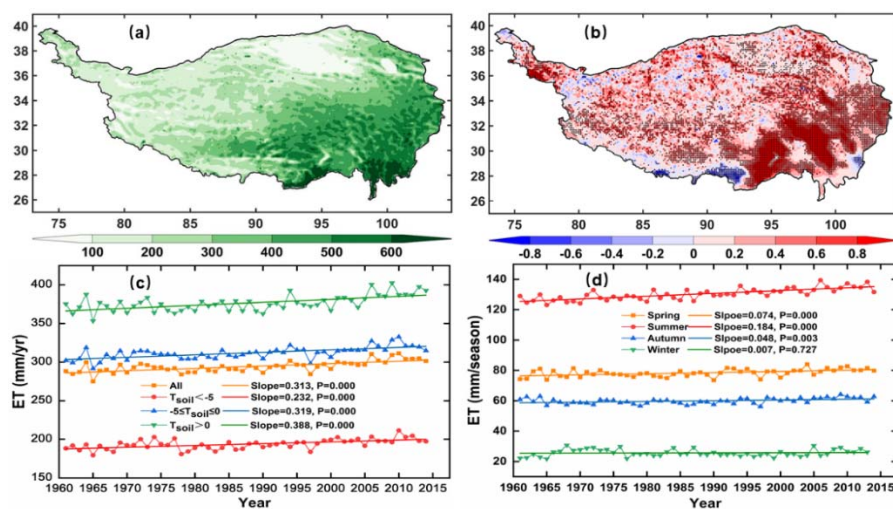


图 1.4.1 青藏高原 1961-2014 年实际蒸散发的 (a) 多年平均值及 (b) 变化速率的空间变化；(c) 不同区域及 (d) 不同季节的年际变化

此外，水分利用效率提供了有关陆地生态系统碳水耦合关系的重要信息。明晰青藏高原水分利用效率的时空变异特征和驱动因素可以帮助我们预测青藏高原碳水过程对气候变化的响应。利用通用陆面模型 CLM4.5 分析了青藏高原水分利用效率的时空变化及其对环境因素（例如大气 CO₂ 浓度、气候和土地利用变化）的响应。结果表明，青藏高原的年水分利用效率约为 0.38 g C kg⁻¹ H₂O，不同植被类型的年水分利用效率存在差异，森林的水分利用效率最高，而高山植被以及高寒草原的水分利用效率较低。在 1979-2010 年间，青藏高原的年水分利用效率显著增加（0.001 g C kg⁻¹ H₂O yr⁻¹，P<0.01），青藏高原上约 40% 的区域的水分利用效率呈显著增加趋势，而水分利用效率呈显著减少的区域仅占青藏高原面积的 7%。在研究期内，水分利用效率增加的区域主要位于青藏高原的南部地区，而水分利用效率减少的区域则位于青藏高原的西北部地区。

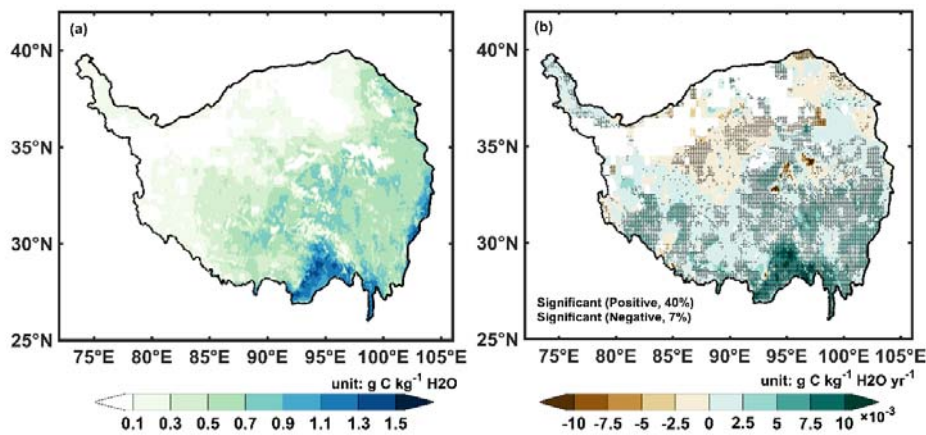


图 1.4.2 (a) 水分利用效率的空间分布特征，(b) 1979-2010 年水分利用效率趋势的空间分布特征

全球变化研究指出，亚高山是气候变化的高度敏感区，而亚高山暗针叶林又是对气候变化响应敏感的植被类型。因此，揭示亚高山暗针叶林 WUE 的时空格局及其影响机制，对科学评估和指定应对气候变化的策略具有重要意义。以贡嘎山海拔 2800~3700m 的暗针叶林为研究对象，利用叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素和 AVIM2 模型相结合的方法，系统分析了区域内暗针叶林的 WUE 变化特征。结果表明，生长季的 WUE 大于非生长季。固碳和蒸散发对气象要素（如月降水量、空气温度、VPD 和净辐射）的差异性响应关系决定了 WUE 的月变化。进一步研究发现，全球多数区域的暗针叶林 WUE 均具有随海拔梯度增加而增大的现象，但把这些结果放在一起进行分析时，并无限制性的全球性海拔梯度变异规律，因此认为简单的 meta 分析不能揭示区域的暗针叶林 WUE 变异规律。

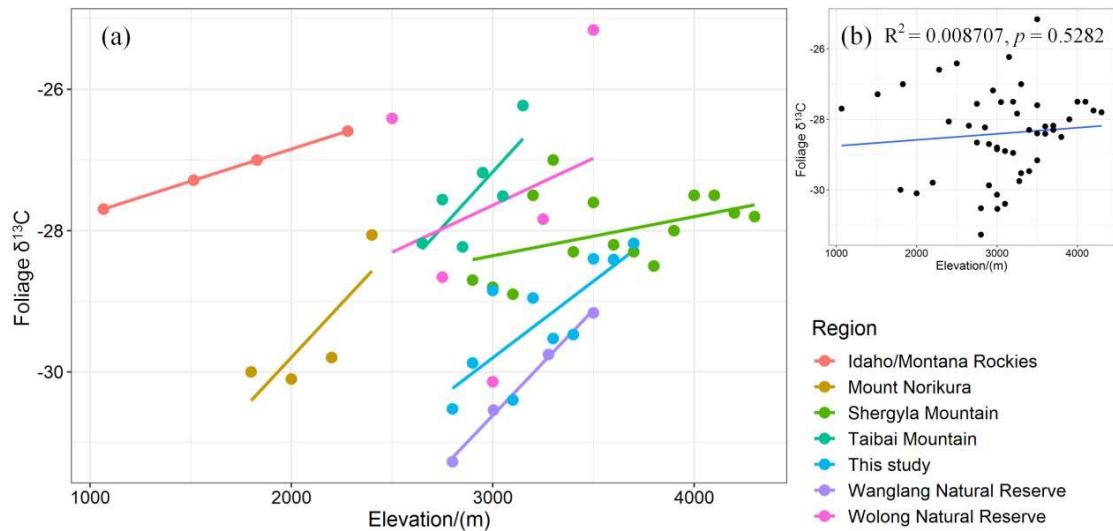


图 1.4.3 全球尺度峨眉冷杉 WUE 海拔梯度变化规律

上述成果论文发表于 *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*（自然指数期刊）和水文学主流期刊 *Journal of Hydrology*。

冰川动态及冰缘生态系统演替: 基于 1988-2018 年长时间序列冰川动态的遥感监测，对喜马拉雅山北坡龙巴萨巴冰川冰湖扩张、冰川退缩以及冰川流动速度变化开展了深入详细的分析。结果发现，冰川的持续减薄并未导致冰川运动速度减缓，冰舌段流速曾发生较大的年际波动，自 2012 年以来表现出显著的持续加速趋势。分析发现，冰川流速变化与冰川末端崩解速率成正相关，加速最为显著的区域总是一般发生在靠近冰湖的冰舌段，并随着冰湖扩张而向冰川上游方向延伸。对于此类冰川/冰湖系统中冰-湖相互作用及其动态演化过程，基于长时间序列的连续监测鲜有报道。该研究充分证实末端冰湖对入湖冰川动态的影响，对进一步理解冰川-冰湖相互作用过程及其机制具有重要意义。

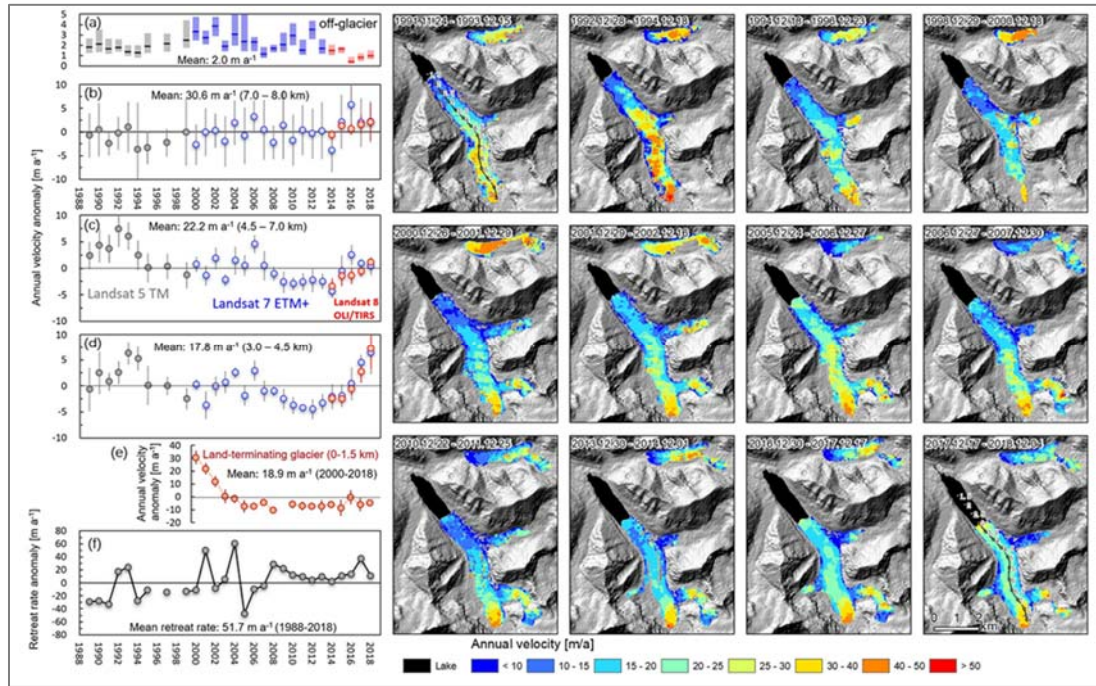


图 1.4.4 龙巴萨巴冰川流速多年变化过程对比图

冰川加速退缩，氮元素往往成为冰川前缘裸地植被发育的重要限制因子。固氮植物是自然生态系统氮元素的主要来源，然而亚高山生态系统中先锋固氮植物的生态效应有待深入研究。在贡嘎山海螺沟冰川前缘裸地，探究了先锋固氮植物对裸地土壤环境和后续演替物种的影响。发现，相比于非固氮植物，固氮植物黄芪显著改善了表层土壤微气候以及表层和根际土壤养分的生物有效性，而另一固氮植物沙棘对表层和根际土壤性质 and 养分有效性影响较小，与非固氮植物无显著差别。黄芪显著提高了伴生共生非固氮植物的株高和密度，对非固氮植物群落的建立起到显著促进作用；而沙棘则未显著影响伴生非固氮植物的株高，并显著降低伴生非固氮植物密度，对非固氮植物群落的建立起到抑制作用。可见，固氮植物对非固氮植物（包括后续演替物种）群落建立的影响因种而异。

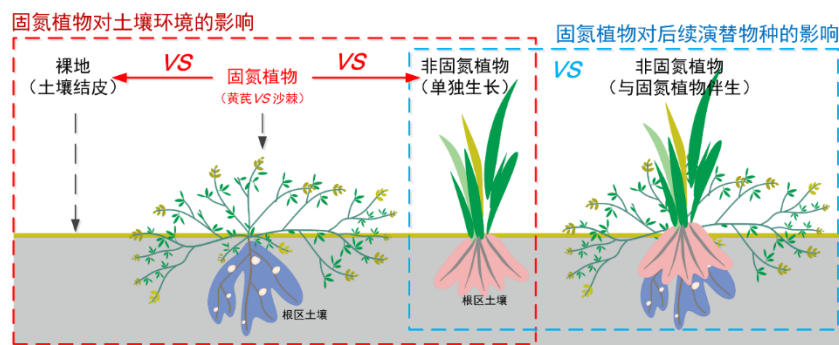


图 1.4.5 冰川退缩演替序列固定那植物对土壤环境的影响

上述成果发表在国际知名地学期刊《Earth and Planetary Science Letters》（自然指数期刊）以及土壤学知名期刊 Plant Soil 上。

➤ 拉萨站

西藏饲草品种选育获得突破：西藏各类草原资源丰富，但高原气候对牧草品种适应性要求较高，驯化、培育、育成适宜西藏气候条件的草品种难度较大。草专项研究团队一直致力于选择、培育适应性好、抗逆性强、产量高和品质优的草种，攻坚克难，久久为功，积累了丰富的育种经验。此次通过的 5 个草品种（巴青垂穗披碱草、藏苜 1 号紫花苜蓿、雪莎 1 号葫芦巴、藏饲 1 号小黑麦、藏饲 1 号黑麦 5 个草品种）。以上新品种是针对西藏高寒地区需求选育的饲草品种，既有适于草原生态修复、也有适于人工草地的品种，填补了我区草品种育种工作的空白，对加快我区牧草种子产业化进程，破解制约我区畜牧业发展的饲草供应不足的瓶颈因素具有重要推动作用，值得在整个青藏高原高寒地区的推广。

➤ 三江源站

三江源区野生动物研究取得进展

1) 三江源国家公园内的野生动物恢复：中国国家公园建设的目标是保护生态系统的原真性和完整性，实现人与自然的和谐发展。由于人类活动的高强度，生态系统的原真性在过去几十年中发生了偏离。随着人们生态保护意识的增强和立法体系的完善，三江源国家公园的野生动物种群、食物链和荒野都在迅速恢复和完善。三江源国家公园正在成为亚洲乃至全球观察野生动物的理想场所。三江源国家公园野生动物恢复现状表明，三江源国家公园内野生动物的数量、多样性均有所增加。国家公园野生动物种群已恢复，截至 2017 年，藏羚羊约 6 万只，藏原羚约 6 万只，藏野驴约 3.6 万头，野牦牛约 1 万头，白唇鹿约 1 万头。然而，随着有蹄类和家畜数量的增加，高寒草地存在过度放牧现象。管理者必须明白，如果存在过度放牧，将牲畜放牧限制在可持续水平是更合理的方法。应进一步加强对三江源国家公园草地承载力及其利用策略的研究，为三江源国家公园草地适应性管理提供技术支持。

2) 青藏高原藏野驴与家驴肠道微生物群的比较研究：西藏野驴是青藏高原上唯一的野生奇蹄目物种，被列入国际自然保护联盟（IUCN）2012 年濒危物种红色名录。因此，了解藏野驴肠道菌群的组成和功能，可以为野生动物的就地保护提供理论依据未来。我们采用 4N-HCL 酸不溶性灰分法测定干物质消化率，并对 V3-V4 区 16s rDNA 基因进行高通量测序，分析野生驴和家驴肠道菌群。结果表明，野生驴的干物质消化率显著高于家驴（ $P < 0.05$ ）。

表 1.4.1 藏野驴和家驴的干物质消化率

Indexes	Groups		P value
	TWAs	NPDDs	
AIA in faeces	0.41 ± 0.05 ^b	0.47 ± 0.01 ^a	0.000
AIA in herbage	0.17 ± 0.04 ^b	0.24 ± 0.02 ^a	0.274
Dry matter digestibility	58.90 ± 8.21 ^a	50.46 ± 3.71 ^b	0.043

Notes.
AIA, Acid-insoluble ash.

两组间 α 多样性无显著差异。 β 多样性分析表明，野生驴的细菌群落结构与家养驴有明显差异。在门水平上，藏野驴的拟杆菌门和厚壁菌门均显著高于家驴。在属的水平上，藏野驴的瘤胃菌科 (*Ruminococaceae*)、考拉杆菌属 (*Phascolarctobacterium*)、真杆菌属成员 (*Coprostanoligenes_group*)、扭链瘤胃球菌 (*Lachnospiraceae*) 和艾克曼菌属 (*Akkermansia*) 显著高于家养驴。

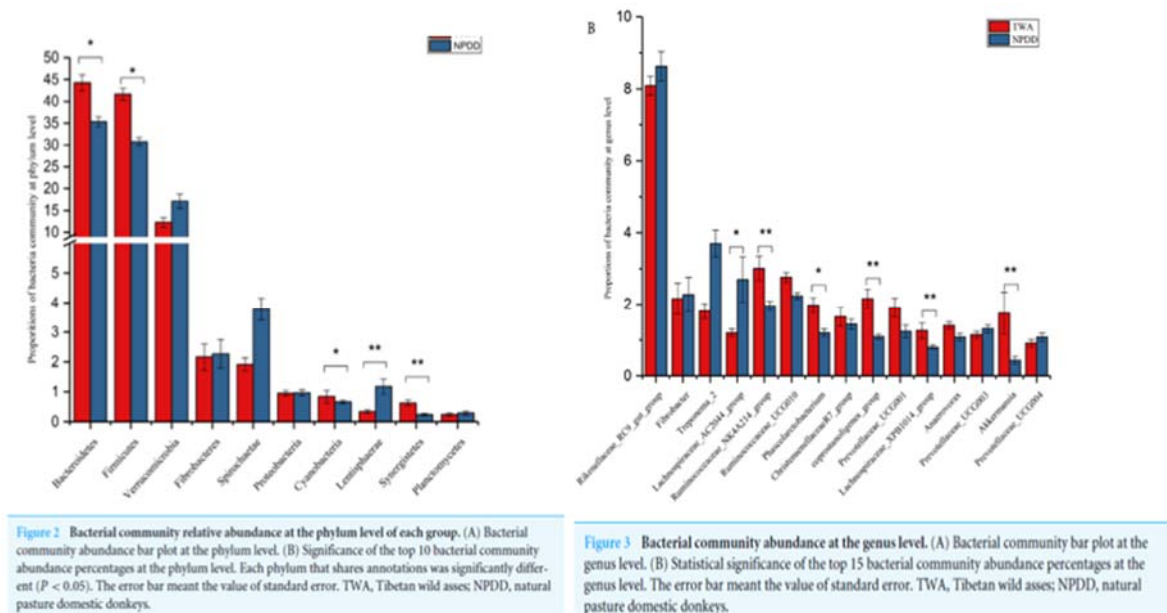


图 1.4.6 门水平（左图）和属水平上（右图），藏野驴和家驴肠道微生物丰度

此外，统计比较显示，40 种不同的代谢途径表现出显著差异。其中 29 条途径在藏野驴体内的含量较家驴丰富，主要包括氨基酸代谢、碳水化合物代谢和能量代谢。值得注意的是，网络分析表明，藏野驴比家养驴拥有一个相对更复杂的细菌网络，这可能反映了肠道细菌群落通过物种相互作用的特定生态位适应。

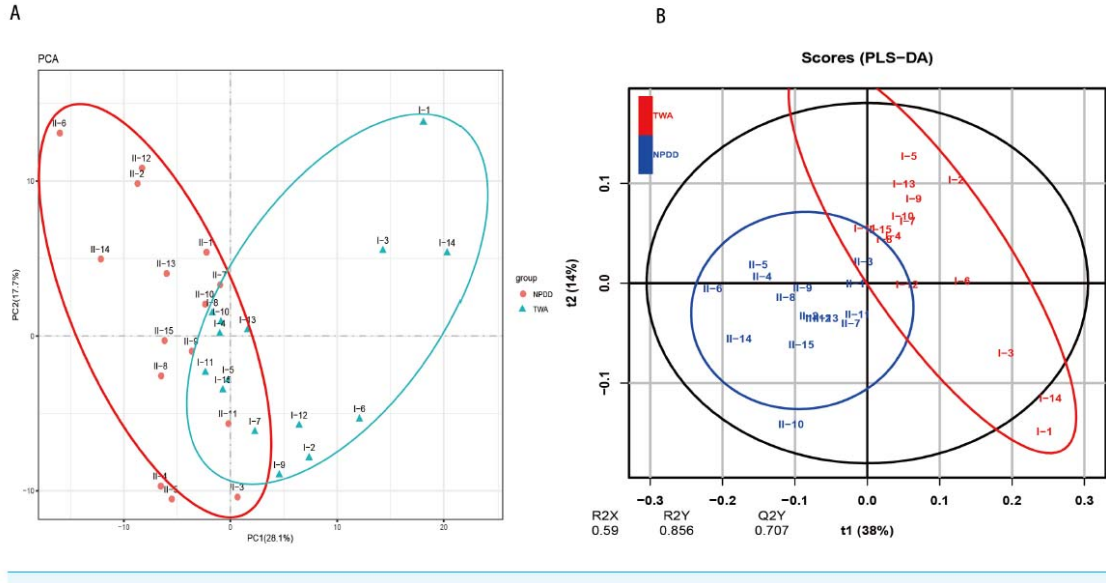


图 1.4.7 肠道微生物的代谢通路分析

综合分析表明，藏野驴在干物质消化、肠道微生物群落组成和功能等方面均优于家养驴，藏野驴具有独特的肠道菌群以适应青藏高原高海拔地区。

3) 高原鼠兔和牦牛肠道微生物研究：对高原鼠兔和牦牛这两种同域草食性哺乳动物的 16s rDNA 和 shotgun 亚基因组 DNA 进行了序列分析，并进一步比较了夏季和冬季的序列。结果表明，在夏季和冬季，鼠兔和牦牛的群落结构明显不同。在鼠兔中检测到疣菌和变形杆菌的过度表达，在牦牛中检测到古菌和拟杆菌的过度表达。厚壁菌和放线菌，与能量有效获取有关，在冬季显著富集。微生物群落的多样性是由寄主与季节的交互作用决定的。宏基因组分析表明，夏季牦牛体内甲烷代谢相关途径明显丰富，而鼠兔体内某些致病途径更为丰富。在冬季，鼠兔和牦牛的脂肪降解能力都较高。冬季食物短缺时，鼠兔和牦牛共有较多的 OTU，导致肠道微生物组成和功能趋同。从冬季到夏季，鼠兔的网络模块数由 1 个增加到 5 个，牦牛的网络模块数有所不同。我们的研究表明，宿主是形成微生物群落的主导因素，季节性促进了基于宿主物种特性的饮食质量的差异或趋同。

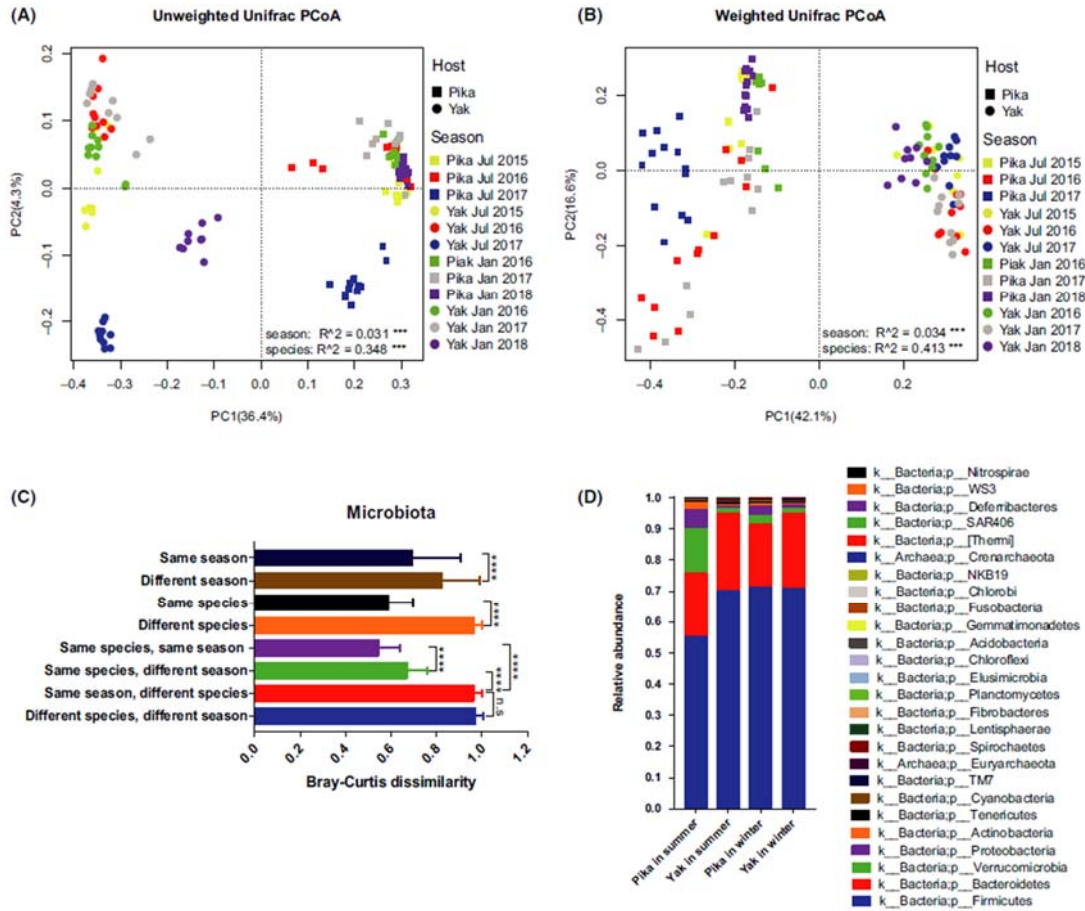


图 1.4.8 高原鼠兔和牦牛不同季节肠道微生物群的结构

4) 鹅喉羚和藏系绵羊肠道微生物研究：为了揭示野生动物和家畜在共同居住区的肠道菌群适应性，以柴达木盆地鹅喉羚（长尾黄羊）和藏系绵羊的肠道功能为基础，评估了其肠道菌群的多样性。结果显示野生种和家养种的 α -和 β -多样性存在显著差异。具体来说，鹅喉羚的 α 多样性较低。我们推测鹅喉羚的营养和栖息地状况更差。基于KEGG数据库，鹅喉羚肠道微生物群的功能在新陈代谢和细胞过程中得到了丰富。综上所述，推断肠道微生物群在营养缺乏的情况下，可以通过其功能来维持能量，从而提高鹅喉羚的适应性。这些发现强调了肠道微生物多样性的重要性，提高了鹅喉羚的适应能力，为保护鹅喉羚奠定了基础。

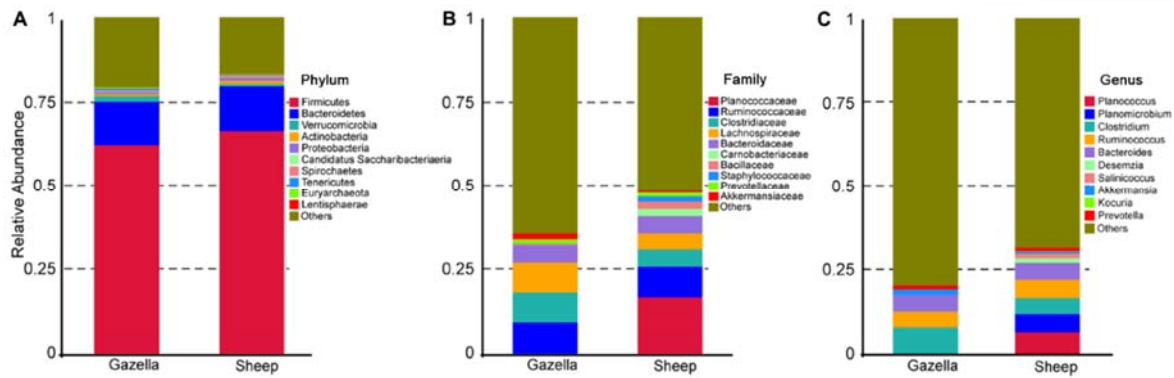


图 1.4.9 不同分类水平上，鹅喉羚和藏系绵羊肠道微生物群落结构

三江源高寒草地牧草营养研究

1) 三江源高寒草地牧草营养时空分布：草地的产草量和牧草品质影响着草地载畜量和草食动物的营养状况、生命活动及生产性能。以三江源及其周边地区的天然草地不同生长期(返青期、盛草期、枯黄期)牧草为对象，分析草地产草量及牧草品质的时空格局。结果显示：从整个区域看，草地生产力、可食牧草产量以及粗蛋白产量(Crude Protein, CP) 分布均具有较明显的地域差异性，三者的高值区大多分布在三江源东部及南部的高寒草甸区，三者的低值区主要在三江源中部和西部的草甸及高寒草原区；大部分地区总生产力和可食牧草产量盛草期显著高于枯黄期，枯黄期显著高于返青期。粗蛋白产量在大部分地区呈现出盛草期显著高于返青期和枯黄期，返青期和枯黄期差异不明显，少数地区返青期显著高于盛草期和枯黄期，盛草期显著高于枯黄期(如：可可西里)；CP 含量及产量在三江源区空间上的分布，均为南部地区高于北部地区，东部农牧交错区高于西部无人区；所有区域 CP 含量的返青期为最高，枯黄期为最低，而其他养分含量在不同区域的季节波动并不一致；盛草期牧草 CP 含量随海拔升高先增加后减小，粗灰分随着海拔升高而显著增加，中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维和酸性洗涤木质素含量随着海拔升高呈降低趋势。结论：三江源及周边地区牧草生产力、可食牧草产量以及 CP 产量较高，可食性较好；三江源多数地区高寒草地牧草营养质量相对较好，牧草在返青期营养价值最高(蛋白高，纤维低)，到盛草期，牧草产量及营养物质输出量达到最高峰，进入枯黄期的牧草营养质量低劣，此时应进行补饲，以提高家畜生产性能。三江源区可利用草地主要集中在东部、南部和东南部，该区牧草品质较高、利用潜力(粗蛋白产量)较大，可适度利用开发。

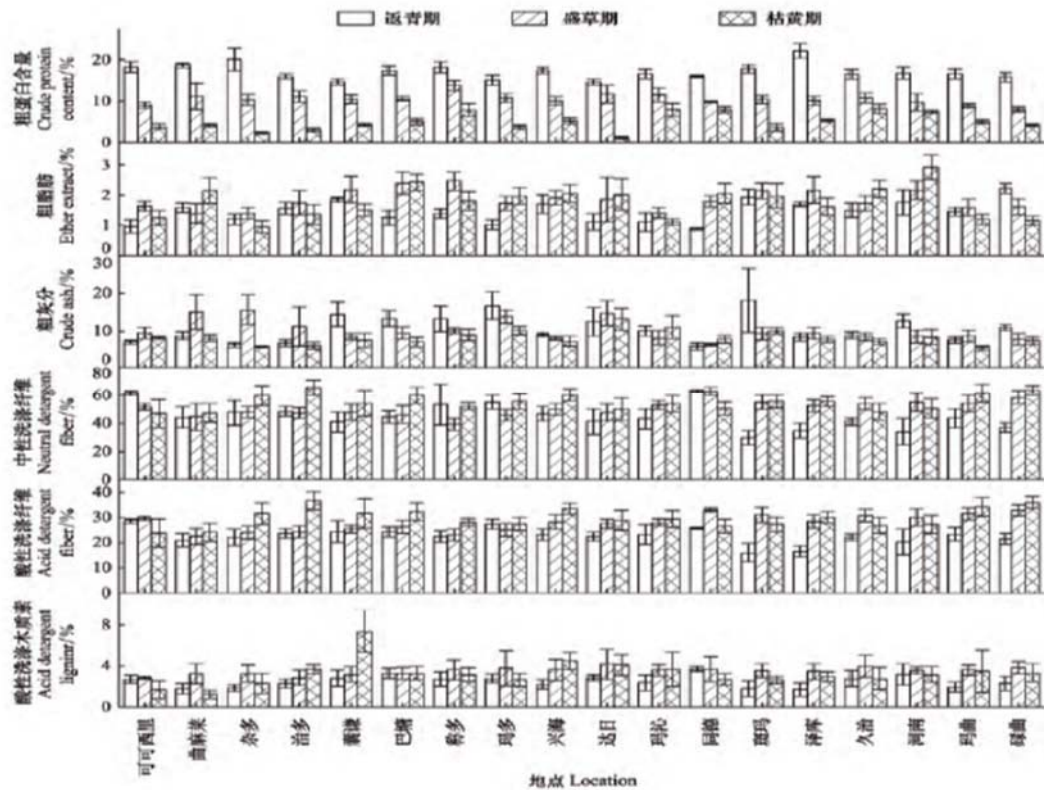


图 1.4.10 三江源各营养成分含量不同时期变化

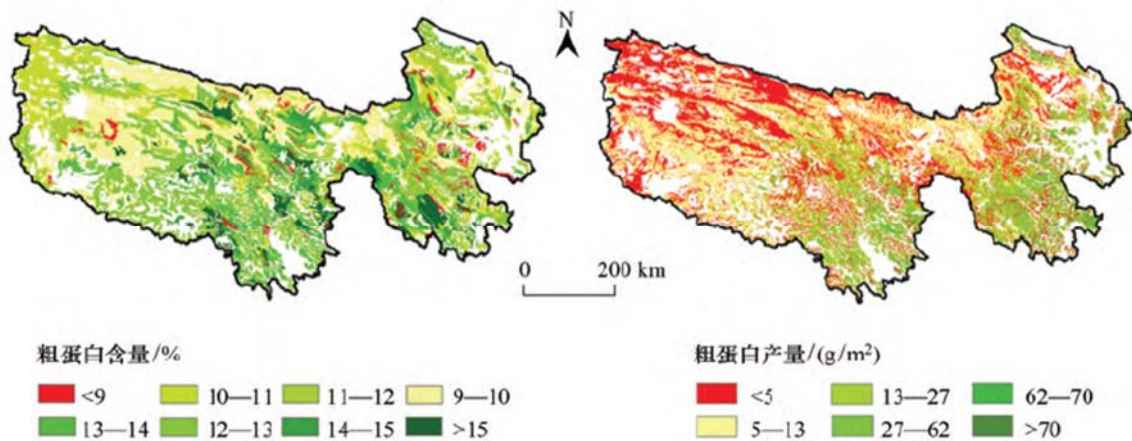


图 1.4.11 三江源区盛草期粗蛋白含量和粗蛋白产量的空间分布

2) 三江源高寒草地牧草养分的影响因子提取：为了探讨青藏高原高寒草地牧草产量和质量的影响因素，为青藏高原高寒草地的生态保护和畜牧业的可持续发展提供科学依据。分析了三江源的两个山体样带（拉脊山，36° 21' N，101° 27' E，3389 - 3876 m a.s.l.和黑土山，34° 22' N，100° 30' E，4121 - 4268 m a.s.l.）的土壤和植物养分含量。分析结果表明，无论海拔>4000 m a.s.l.或<4000 m a.s.l.的山地，牧草产量均随海拔的

升高而显著下降，低海拔地区牧草产量受环境因素影响较大，而高海拔地区受环境因素影响较小。海拔<4000 m a.s.l.的山体带，牧草养分主要受海拔高度和土壤有机碳（SOC）的影响（ $p<0.01$ ），海拔>4000 m 的山地，纤维和木质素主要受土壤 pH 和 SOC 的影响，粗蛋白主要受土壤 pH 和 TP 的影响（ $p<0.05$ ）。总体而言，随着海拔的升高，饲草粗蛋白和粗脂肪含量增加，中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量下降，说明气温升高可能导致饲草品质下降，进而影响畜牧业的安全。此外，土壤无机氮和总磷对牧草粗蛋白和粗纤维含量的影响大于土壤有机碳和土壤全氮。

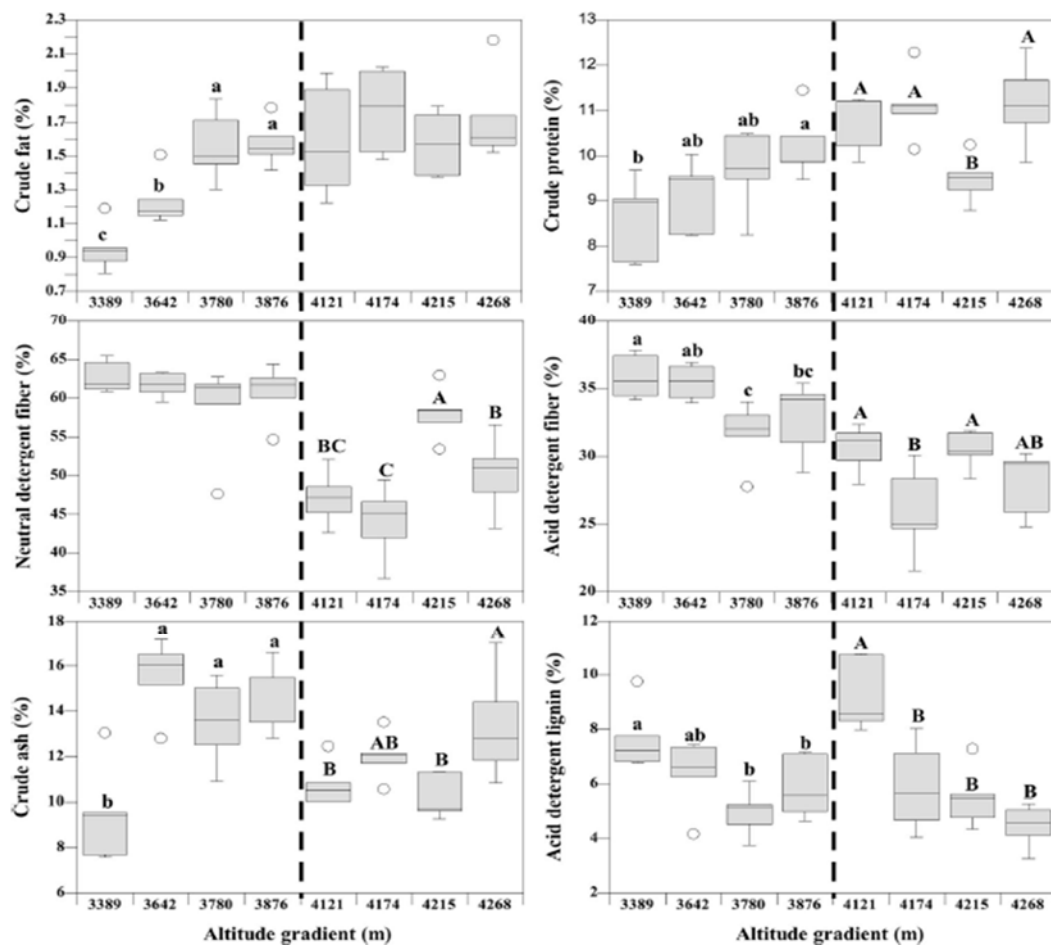


图 1.4.12 不同海拔梯度的牧草养分变化

以牧草营养因子、海拔高度、生物量（地上和根系）、土壤因子为数据源，应用 RDA 进行排序分析，得到排序图。结果表明，虽然 3780 和 3876 两个采样点存在部分重叠，但大多数采样点基于所测指标上有明显的区分，表明不同环境下的测量指标有较大差异。影响两山体带牧草营养的因素不同。在海拔<4000m a.s.l.的山体带，牧草养分主要受海拔（对 CP 和 CF 有正向影响）和土壤有机碳（对 NDF、ADF 和 ADL 有正向影响）的影响。而当海拔>4000m a.s.l.，牧草纤维和木质素主要受土壤 pH 和 SOC 的影响，而 CP

则受土壤 pH 和 TP 的影响。综合分析表明,海拔对 AGB、物种丰富度 (SR)、CP、CF、NDF 和 ADF 有显著影响。此外,AGB 主要受 SR、SOC 和土壤 pH 的影响,CP 主要受 SR、SIN 和 TP 的影响,纤维和木质素主要受 SR、pH 和 AGB 的影响。【陈懂懂,等. Variations of Forage Yield and Nutrients with Altitude Gradients and Their Influencing Factors in Alpine Meadow of Sanjiangyuan, China. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2020; 贺福全,等. 三江源高寒草地牧草营养时空分布, 2020, 生态学报】

三江源草地多功能性及其调控途径: 草地管理成败与环境和社会问题息息相关,已经引起各界关注。为了提高牧民生活水平、实现美好生活愿望、保护草原生态环境,决策者和管理者制定了相应方案和措施,付出了诸多努力。通过对三江源草地管理的现状、问题和需求的综合分析,提出了基于草地生态系统服务和人类对草地“生产—生态—生活”多目标需求的多重管理目标及管理框架,建立三江源区域草地进行多重目标管理的调控途径及技术支撑;以期对三江源生态可持续发展、国家公园建设和黄河流域生态保护和高质量发展及后续相关政策的制定提供一定的启示。

1) 三江源草地管理存在的问题: 三江源植被生产力增长的速率在缓慢降低,无人区好于家畜与野生动物活动重叠区: 三江源地区 1988-2018 年草地地上生物量呈增加趋势,且自 2005 年三江源生态保护和建设工程实施以来,三江源地区草地地上生物量明显增加。在气候变暖变湿的背景下,三江源国家公园草地生产力整体呈现增加的趋势,但变化速率趋于变小。其中 2000-2012 年有明显的增加趋势,而 2012 年之后有稍微的下降;草地地上生物量自东南向西北逐渐减少,其减少的区域主要发生在人类活动较为密集的区域。

2) 三江源区仍然存在超载过牧,放牧仍然是草地管理的主要问题: 减畜工程的实施明显减轻了三江源全区的载畜压力。2003-2012 年平均载畜压力指数是 1988-2002 年的 63.9%。但即使是在实施减畜措施后,2003-2012 年三江源草地平均载畜压力指数为仍 1.46 (即草地超载约 46%),处于超载状态。同时,草地退化态势好转仅表现在地上生产力上,草地的群落结构并未向顶级群落演替。

3) 草地治理中违背自然规律、追求短期成效,生态代价增大: 草地治理的关键是恢复植被、增加盖度。三江源一期工程实践证明,对于“黑土滩”等通过近自然措施难以恢复的重度退化草地,重建植被是最有效的措施。然而,在个别地区,借草地恢复治理的旗号,违背自然规律,“大水大肥”地种植、“穿衣戴帽”地维护,不计成本,变绿即可,追求短期成效。这些措施影响了生态系统的水分和能量循环,破坏了已有的循环结构,增加了生态代价。

4) 大面积的围栏建设对生态系统保护作用有限：围栏建设在特定历史时期、特定情况下对草地管理发挥了重要作用。但随着围栏密度越来越大，压缩了野生动物生存空间，阻断了野生动物正常迁徙和扩散。如在三江源多次发现野生动物尸体挂在带有刺丝的围栏上。此外，大量研究表明长期的围封禁牧对草地生产力、物种丰富度、生态系统固碳等生态服务功能会带来负面影响。

5) 三江源草地多重管理目标：三江源草地的可持续发展，有序利用是草地生态功能的主要目标，有序利用草地也是实现草地生产功能的必要条件，而生活功能是生态和生产功能有机结合的产物，是二者功能的综合体现。

6) 生态功能：三江源在黄河流域、乃至全国的生态保护和建设中具有非常重要的作用。三江源的生态功能不仅体现在草地生态系统的支持服务和调节服务，也体现在黄河上游的生态屏障功能和水源涵养功能，是黄河流域生态保护和水源涵养能力提升的核心区。

7) 生产功能：维系三江源生产功能的关键是提升生产功能的同时保持其生态功能，协调保护与发展的关系，协调国家公园家畜与野生动物的数量，为了解决这些问题需要关注区域间的资源配置、家畜生产均衡养殖、畜产品提质增效和草产品加工等技术和模式。

8) 生活功能：生活功能主要是指与生活功能相关的草地生态系统服务，为生活在三江源草地上的藏民族提供社会、经济等方面的保障、文化传承和发展，以及休闲旅游、科普教育等功能。确保生活功能需要保持三江源草地生态系统的原真性和完整性，积极扩展生产功能，增强对三江源生态环境的认知能力，运用互联网、VR 和 AR 等新型技术衍生教育、科普和数字相关产业。

9) 管理目标设定：三江源草地多重目标管理的核心问题是草地可持续管理。以维持生态系统的原真性和完整性和资源持续利用为目标的生态畜牧业发展模式，是实现三江源草地生态、生产和生活功能等多重目标重要途径。按照三江源热量、降雨量、地形地貌等自然条件，各业生产连续性及生产潜力和抵御自然灾害的能力及对农牧各业适宜性等依据，根据三江源土地利用及相应的生态系统服务价值变化规律，为了实现三江源草地管理目标，将三江源地区划分为 3 个区：草地牧业区（如长江源牧区、黄河源牧区），农牧交错区（如三江源东北部的贵南县、同德县、玉树县）与河谷农业区（如共和县、贵德县、尖扎县、同仁县）。在不同区划内根据存在问题、主要目标而采取相应的措施，以实现三江源草地生态、生产和生活功能等多重目标。

10) 三江源草地多重管理目标实现途径：三江源草地多重管理目标实现，就是如何

平衡在相关区域各项功能之间的关系。基于三江源草地管理存在的问题和设定的三大功能，依据多层次多目标的适应性管理原理，三江源草地多重管理目标总体目标聚焦于以生态功能为优先的多重目标管理，关注生态、生产和生活功能在三江源 3 个分区中有序发展，明确主次；以山水林田湖草发展理念和生态文明建设的总体要求，明晰在三大功能有序发展过程中的问题、变化和需求，考虑怎样将三大功用融合在生态保护和高质量发展中；以问题为导向，制定解决问题的方案和生态保护与高质量发展行动计划。在实施行动计划过程中，充分考虑环境变化和人类活动所产生的草地生态压力，监测和分析草地生态变化，结合设定目标进行动态管理，建立预测模型，进行目标评估。管理者和决策者依据评估结果，完善、更新或重新设计研究方案和实施计划。

► 申扎站

生态工程实施对高寒植被调控作用凸显：近几十年来，青藏高原高寒草地经历了显著的气候暖湿化和人类管理模式变化。理解和研究高寒草地植被变化的驱动力，对适应和减缓气候变化对高寒牧场生产力的影响一直是科学界极为关注的优先性科学问题，对西藏畜牧业发展也至关重要。通过系统的遥感数据提取、机理模型模拟数据集分析和地面统计数据分析，研究结果表明遥感数据和 15 个机理模型均证实了气候暖湿化利于高寒植被的生长，总体利于畜牧业发展。然而，气候因子在 2000 年对遥感资料的解释程度逐步减弱，表明人类活动或管理模式的影响加重。通过分析西藏自治区 72 个县的统计数据，我们发现青藏高原高寒草地与放牧强度之前存在显著的负相关，并呈显著“东部正相关-西部负相关”的独特现象。同时，还发现这一负相关趋势在 2000 年之后有显著增强趋势，这与 2004 年左右启动的退牧还草和围栏等重大生态工程息息相关。后续深入分析证实了气候变化和人类活动管理之间的补偿效应，并明确人类活动或管理主要通过调节植被对温度的依赖性影响对气候变化的整体响应。通过集成多达 18 套独立的监测数据系统认识了青藏高原高寒草地人类活动管理效应增强的现象，表明生态工程对调节大区域尺度高寒植被对气候变化的响应具有重要影响，未来放牧强度的管控将有利于高寒植被在气候暖湿化下的持续恢复和畜牧业可持续发展。成果发表在环境管理权威期刊 *Journal of Environmental Management*。

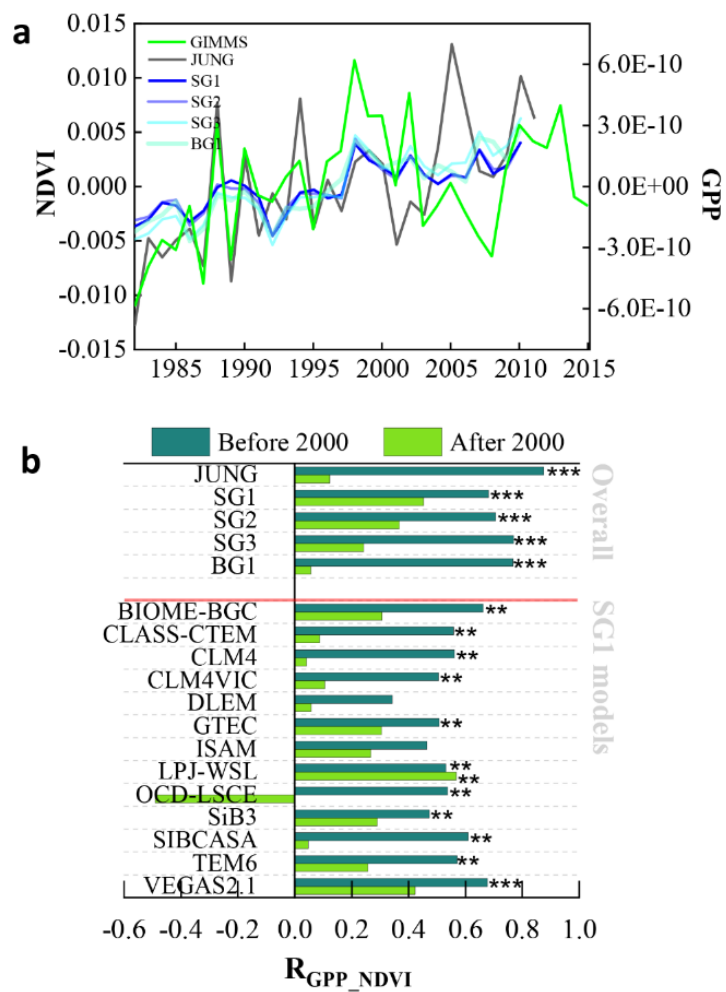


图 1.4.13 (a) 青藏高原高寒草地 NDVI 和 GPP 年际变化; (b) 2000 前和 2000 后机理模型对遥感观测数据资料的解释力变化。

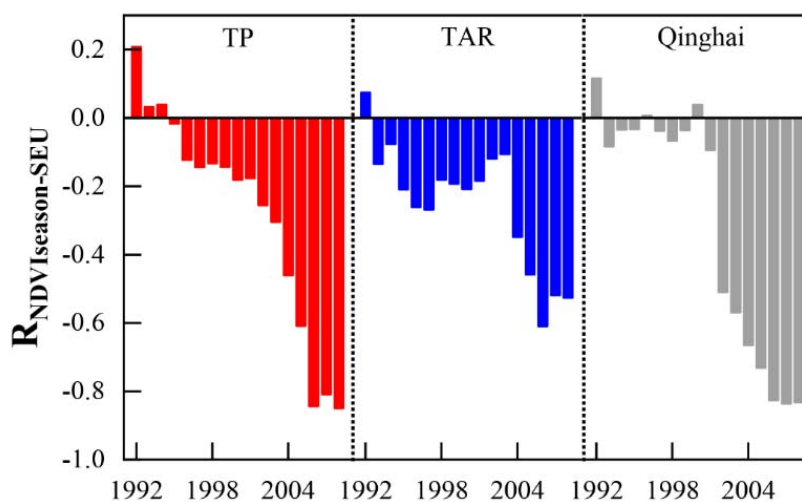


图 1.4.14 放牧强度与生长季初期表观生长量关系的滑动分析 (15 年窗口)

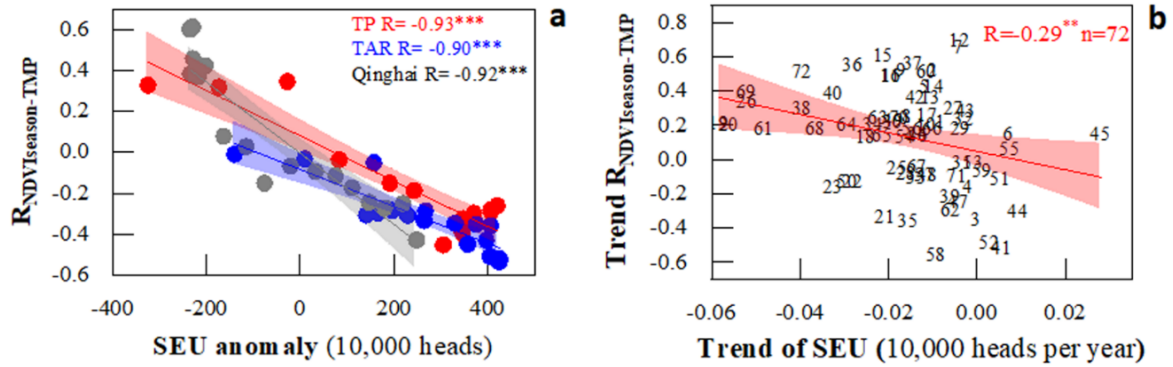


图 1.4.15 (a) 放牧活动强度变化对高寒草地温度依赖性的影响；(b) 基于 72 个县的放牧强度变化影响高寒草地温度依赖性

草地围栏工程使表层土壤呈现酸化趋势：土壤酸碱度一般用 pH 来表征，该指标与生物地球化学循环和物种多样性维持密切相关。野外控制试验和模拟试验均已证明土壤 pH 调控着有机质的积累、微生物活性以及温室气体排放等环节。除此之外，土壤酸化会致使阳离子大量损失以及降低生物多样性，从而对生态系统产生级联效应。草地生态系统约占全国土地面积的 40%，青藏高原分布面积最广植被类型也是草地。随着放牧强度的逐渐增强，很多地区草地呈现不同程度的退化。为缓解草地退化的趋势，各级政府随后实施了一系列的禁牧、休牧和轮牧措施，而围栏工程就是最为普遍的一项工程。以往研究主要集中于比较围栏内外碳汇功能、生物多样性、生物量等指标的变化，对土壤酸碱度的关注不足。单个地点的草地围栏工程研究很难从大尺度以及长时间序列上评估土壤阳离子交换过程。通过采样调查和文献综述等方法，研究发现草地围栏工程使得土壤呈现酸化趋势，围栏内凋落物量、氮转化过程和根际分泌物变化可能是引起土壤 pH 变化的重要因素。围栏内凋落物分解的初期，羧化作用以及氮氨化作用可能会短暂促进土壤 pH 的提高。但随着凋落物的持续分解，硝化作用会居于主导从而降低土壤 pH。另一方面，根际分泌物(例如： H^+ 、 OH^- 和 HCO_3^-)会协助植物调节根际 pH 以提高养分吸收。因此，表层土壤 pH 下降率 (0-20cm) 显著高于深层土壤 (20-100cm)。气候因子、生物量变率、土壤碳和氮累积量是决定草地围栏内土壤 pH 变化量的重要因素。值得注意的是，降水丰富地区草地围栏工程造成的土壤 pH 下降率最高。主要原因有：1) 湿润区域淋溶作用较强，会造成阳离子的大量损失；2) 湿润地区土壤初始 pH 较低 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 阳离子含量低)，抵抗土壤酸化的缓冲能力弱；3) 湿润地区围栏提升植物群落和凋落物生物量增率最高。研究还发现，中等围栏年限 (5-15 年) 土壤 pH 下降率显著高于短期 (≤ 5 年) 和长期围栏 (≥ 15 年)，特别是土壤酸化后增加了 Al^{3+} 和 Mn^{2+} 的移动性，会增加植物中毒风险，该结果为后续围栏工程优化提供了参考依据。成果发表在退化生

态修复权威期刊 Land Degradation and Development。

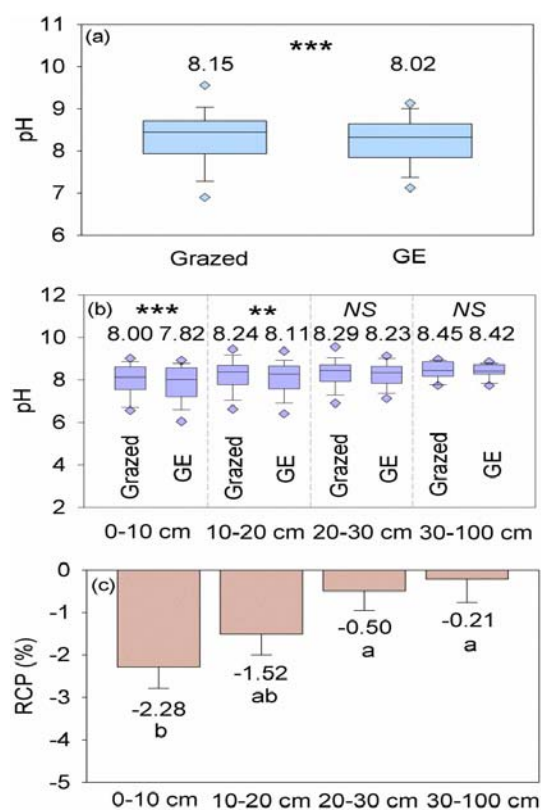


图 1.4.16 围栏对不同深度土层 pH 的影响 (a, b) pH 变化绝对值 (c) pH 变化率

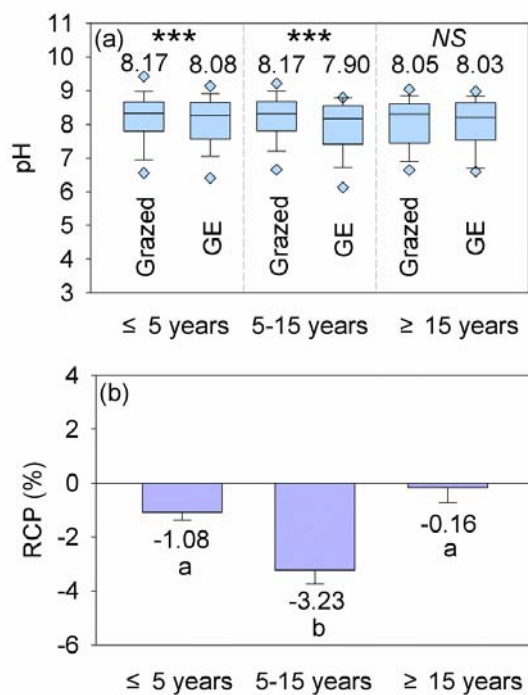


图 1.4.17 不同围栏年限土壤 pH 变化 (a) pH 变化绝对值 (b) pH 变化率

高寒草原凋落物分解：植物凋落物分解是全球陆地生态系统 C 收支的关键环节，对全球气候变化和生物地球化学循环具有重要的反馈作用。然而目前对高寒生态系统温度和凋落物质量（低质量：高 C:N 比和木质素含量；高质量：低 C:N 比和木质素含量）调控其分解和养分动态的影响机制还不清楚。在藏北开展了为期五年的增温和凋落物分解联合试验，试验对象包括高寒草原典型物种紫花针茅（低质量）、青藏苔草（低质量）、昆仑蒿（高质量）和从生黄芪（高质量）。结果显示：四种凋落物在试验前两年快速分解，紫花针茅、青藏苔草、昆仑蒿和从生黄芪质量损失率分别为 20.60-24.58%、24.57-33.15%、24.22-40.26%和 29.70-43.38%。试验初期增温对低质量凋落物分解没有显著影响，但在试验末期增温对四种凋落物质量损失具有显著抑制作用，可能与增温样方内土壤水分下降而导致微生物活性受到抑制有关。低质量凋落物在分解初期存在净 N 固定（质量损失 20% 时净 N 固定值最高），分解中后期逐渐损失，而高质量凋落物 N 在分解全程均呈现出净损失。高寒生态系统由于气温极低、降水稀少，严酷的自然环境限制了土壤氮素矿化，而低质量凋落物 N 含量较低无法提供充足的养分供微生物分解利用，因此低质量凋落物需要固定 N，以弥补养分供应的不足。高质量凋落物由于自身养分含量较高，不需要额外固定 N 供土壤微生物利用。低质量和高质量凋落物 P 含量在分解全程均呈现出净损失。本研究使用的凋落物包含植物枯黄叶和茎、成熟种子、枯萎花等器官，其中生殖器官 P 含量较高，可以为凋落物分解不断提供养分，因此四种凋落物分解过程中 P 元素均出现净损失。混合效应模型分析表明：5 年增温对四种凋落物 N 和 P 含量影响很微弱，仅在第二年和第五年，增温对 N 含量影响具有显著性（第二年：P=0.034；第五年：P=0.031）。一方面，长期的增温可能导致土壤细菌和真菌等微生物对温度的适应性提高。另一方面，增温虽然会提高土壤无机 N 含量，从而影响土壤微生物养分供给和利用。但微生物群落对有机 N 的吸收利用通常具有多元化的策略（包括无机 N 和有机 N），进一步提升了增温后微生物对土壤养分利用的复杂性。在增温和不增温情况下，P 元素可能在凋落物分解过程中均被大量回收利用。研究结果有助于理解全球变暖背景下高寒生态系统生物地球化学循环过程与反馈机制。成果发表在生态学权威期刊 *Science of the Total Environment*。

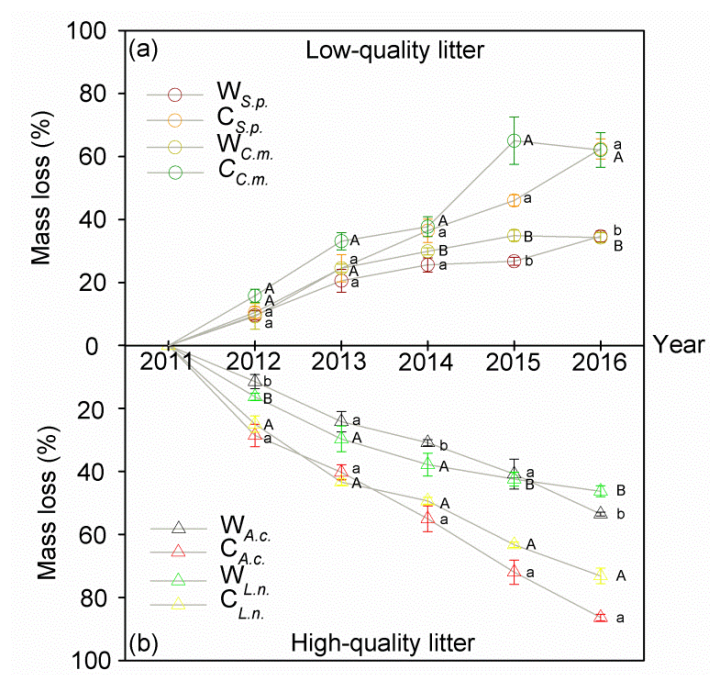


图 1.4.18 增温对凋落物质量损失的影响

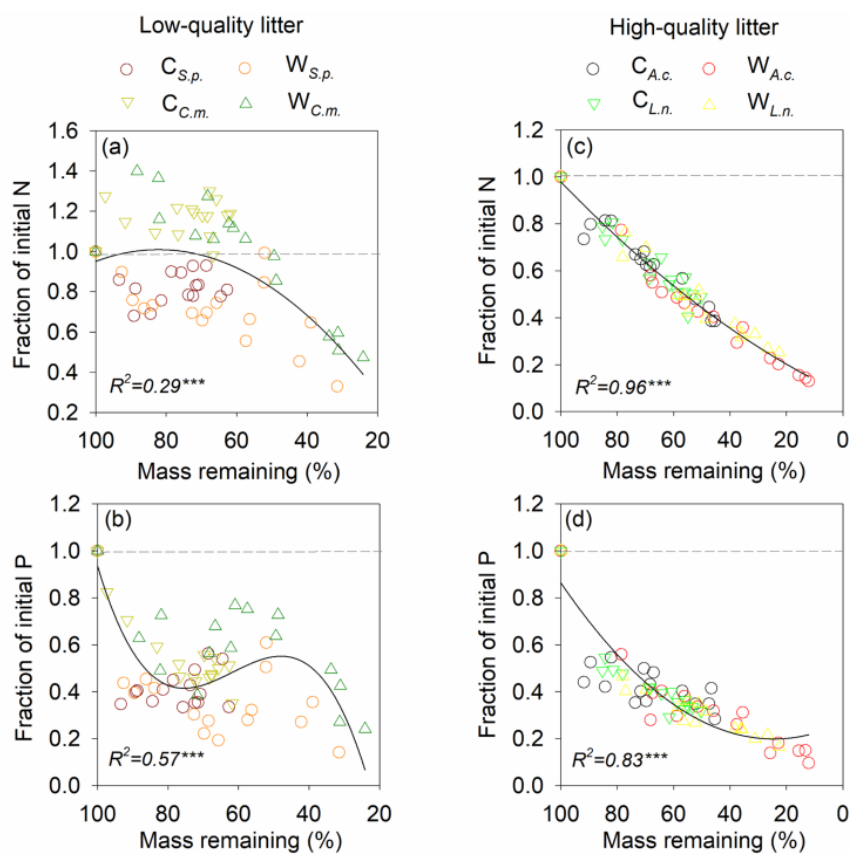


图 1.4.19 凋落物养分存量比与质量存量百分数之间的相关关系

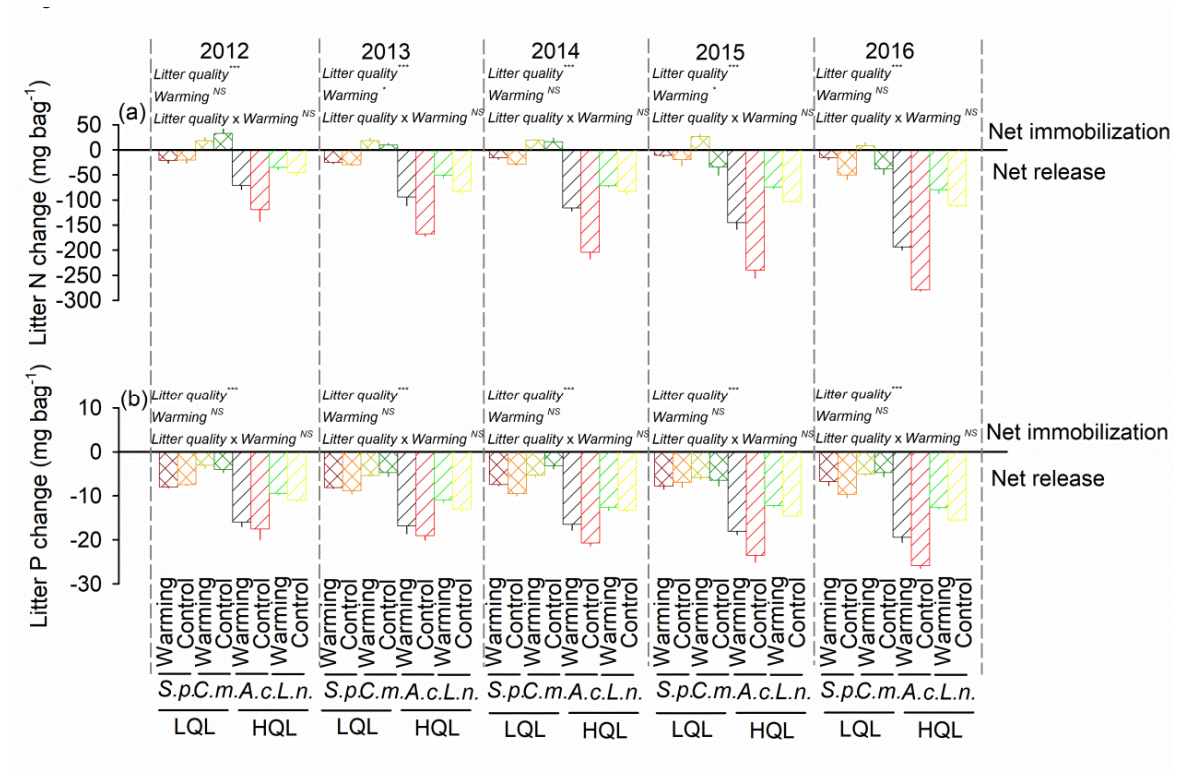


图 1.4.20 高寒草原凋落物类型与增温对 N 和 P 损失的影响

➤ 那曲站（地理所）

全球变化对高寒草地群落结构和土壤碳稳定性的影响：通过那曲高寒草甸开展的增温、CO₂ 加富以及 N 添加控制实验，研究发现低水平增温对植物物种丰富度和系统发育/功能群落结构均无影响，而高水平增温显著降低了物种丰富度。增温幅度越高，环境过滤作用越强，最终导致物种组成和群落结构发生变化。高增温过滤掉与现存物种在功能上不相似或远亲的物种，驱动系统发育/功能群落结构从过度分散向随机。研究强调需要结合系统发育和功能的特性，以获得对气候变暖下植物群落反应的更全面的理解。

此外，研究人员发现 CO₂ 和 N 添加对高寒草甸物种多样性、群落结构和生物量具有协同作用。单独添加 CO₂ 和 N 没有改变群落生物量、物种多样性和物种组成；而同时添加两种资源显著提高了群落生物量，降低了多样性，改变了群落物种组成。物种多样性的下降，主要归因于 CO₂+N 增加了生物量，降低了土壤水分，促使一些个体大和比叶面积小的物种丢失（图 1.4.21）。研究指出高寒草地群落生物量和群落结构可能受到大气 CO₂ 和土壤 N 营养的共同限制。

尽管土壤总碳库无显著变化，但升高的 CO₂ 会显著改变不同土壤碳在不同土壤组分的分配，以及提高土壤的碳氮矿化潜力。通过改变土壤微生物的组成（刺激真菌生长）并增强水解酶的活性，升高的 CO₂ 显著加速了土壤有机质的矿化速率，并刺激微生物对

“老碳”的利用。这主要是因为 CO_2 富集加剧生态系统的 N 限制，而土壤中的“老碳”含氮丰富，微生物对“老碳”加速分解可以有效缓解 N 限制。此外，在 CO_2 富集背景下施 N 会改变土壤碳分解过程，如增加真菌与细菌的比率 (F/B)，降低粗粒有机质含量 (cPOM) 和水解酶的活性，这表明 N 添加会抵消 CO_2 的施肥作用。总体而言，升高的大气 CO_2 浓度存在降低土壤有机质稳定性的可能性，而氮的有效性在 CO_2 富集背景下是驱动土壤碳周转的关键因素。

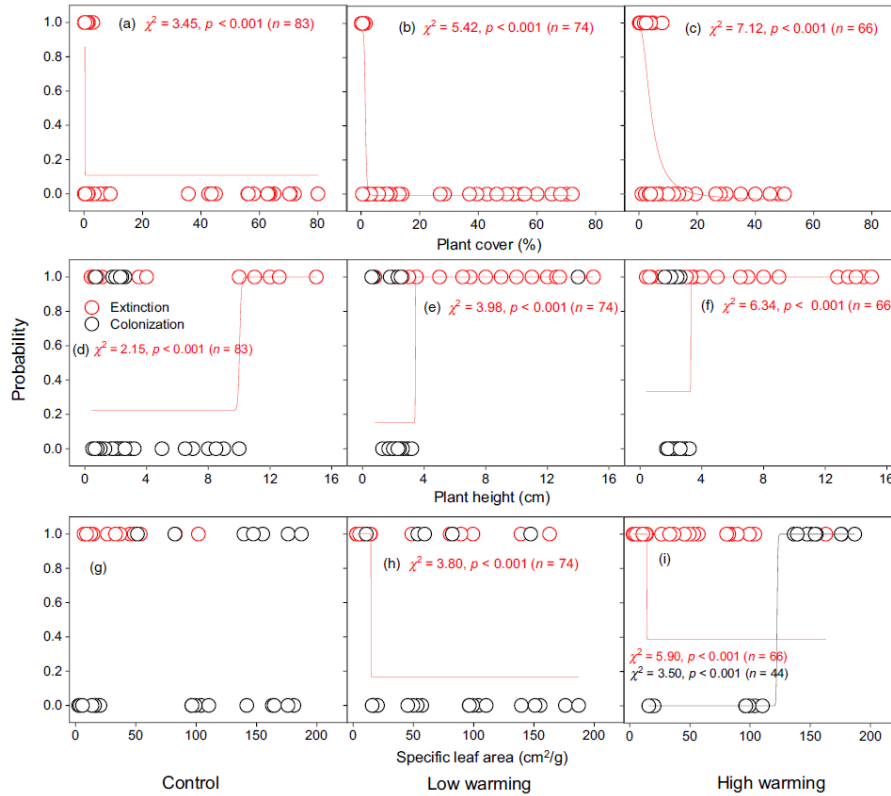


图 1.4.21 增温下物种丢失和定殖的可能性

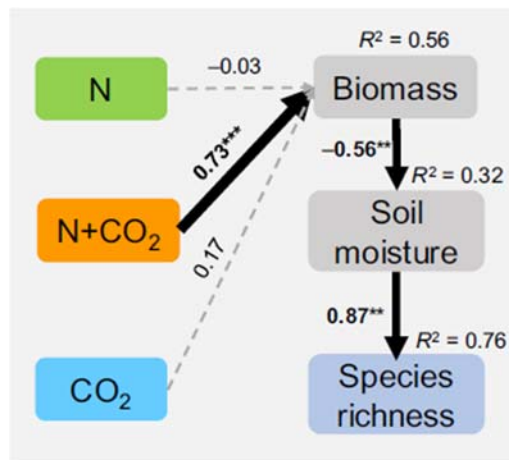


图 1.4.22 结构方程模型

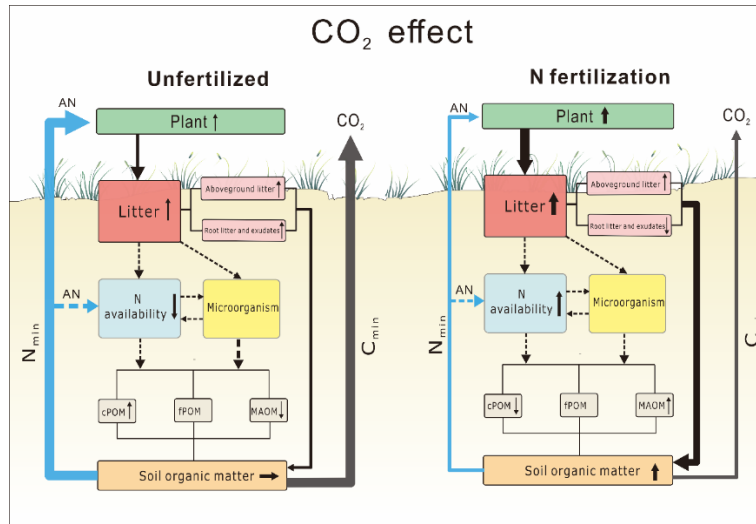


图 1.4.23 CO₂ 富集背景下氮添加对土壤有机碳周转影响的概念图

青藏高原变暖对生态系统碳利用效率的多尺度负影响：那曲站多梯度增温结果和整合青藏高原 OTC 实验结果一致发现，增温显著降低生态系统碳利用效率 (CUEe; NEP/GEP)。基于那曲点和当雄点通量数据及 TRENDY 模型数据和 MODIS 数据计算的 CUEe/CUE，在景观尺度和区域尺度也发现 CUEe/CUE 与温度的负相关关系，一定程度上支持了增温实验结果。深入分析进一步揭示，与线性模型相比，非线性模型能更准确拟合 CUEe 对增温所表现出的“先稳定降低后显著降低”的非线性响应过程，其趋势变化阈值点大约在增温 1.5-2.0 °C (W2) 范围内。多源数据揭示增温显著增加 GEP vs. Reco 的斜率值，而显著降低 GEP vs. NEP 的斜率，并且 CUEe 非线性响应梯度增温中的生物和非生物因子的变异，二者共同解释了 CUEe 对增温的非线性响应过程。

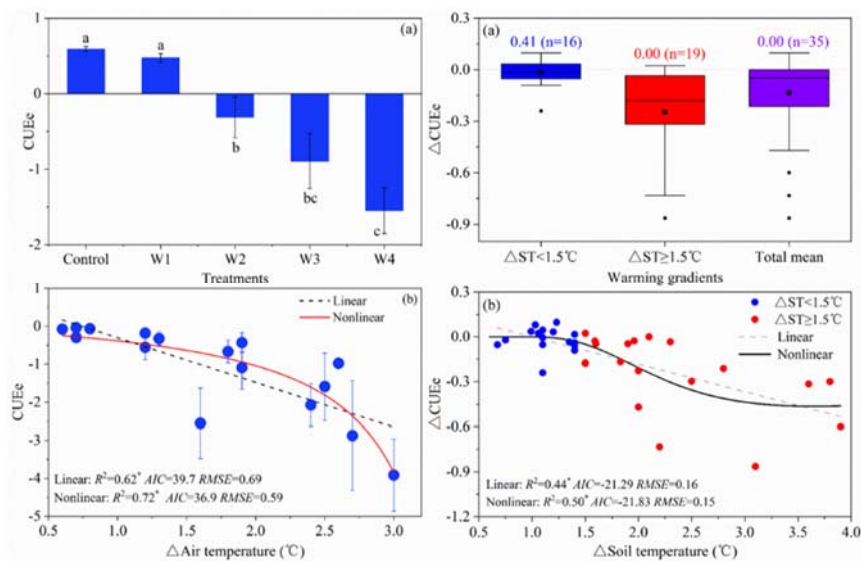


图 1.4.24 基于单因素方差和配对样本 t 检验分析那曲布设的 5 梯度增温实验数据（左）及整合整个青藏高原 OTC 增温实验数据（右）的生态系统碳利用效率对多梯度增温响应

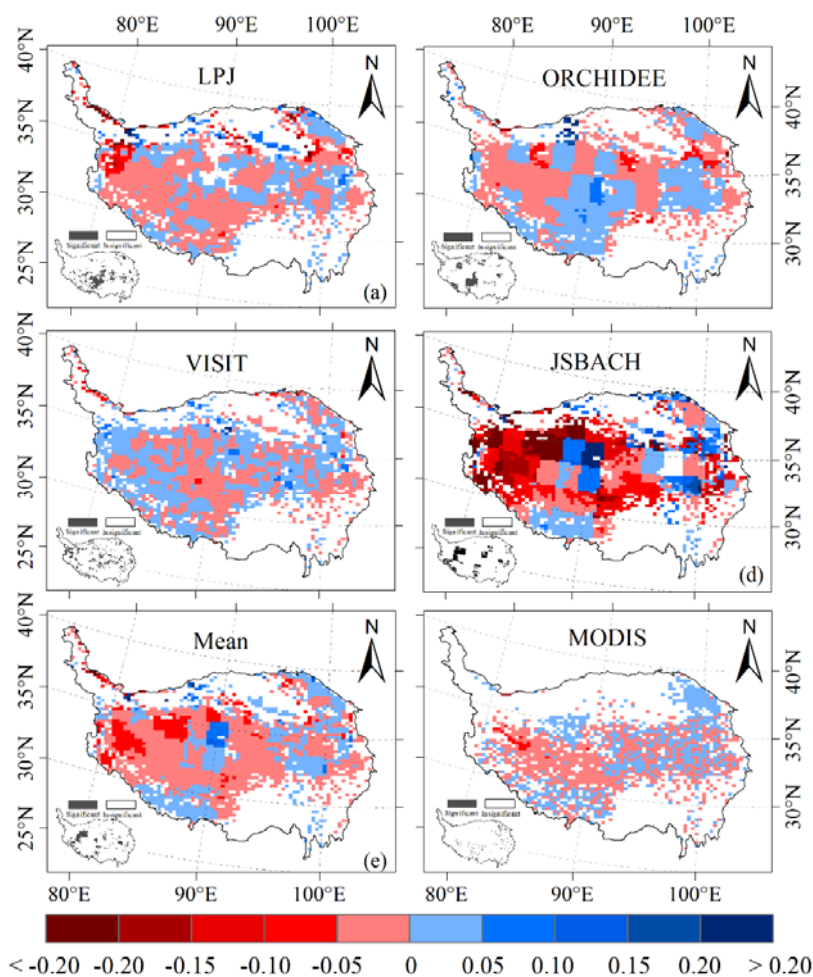


图 1.4.25 2000-2015 年 CUEe 和 CUE 与温度间关系的相关系数空间分布

➤ 祁连山站

高原鼠兔扰动对植被物种多样性的影响机制：以典型高寒草地为研究对象，在疏勒河源区采用无人机航拍-地面样方同步调查取样的方法，以无人机航拍照片和样方中植物出现的频率为基础，计算得到各群落多样性指数，建立了无人机航拍-地面样方的物种多样性回归模型。在此基础上分析了高原鼠兔密度与草地生物多样性的关系，揭示了高原鼠兔扰动对高寒草地植被多样性的维持机制。研究结果显示无人机航拍法获取的丰富度指数（N）、Shannon-Wiener 多样性指数（H）、Simpson 多样性指数（D）和物种均匀度 Pielou 指数（E）和样方实地调查法获取的植物多样性具有很好的相关性，表明无人机航拍可用于样地尺度长期定点的高寒草地生物多样性监测研究，且该方法快速无损。在样地尺度高原鼠兔密度与物种丰富度指数（N）、Shannon-Wiener 多样性指数（H）和 Simpson 多样性指数（D）具有显著的正相关关系，但与物种均匀度 Pielou 指数（E）呈显著的负相关关系，表明高原鼠兔的扰动有利于高寒草地植物多样性的维持。

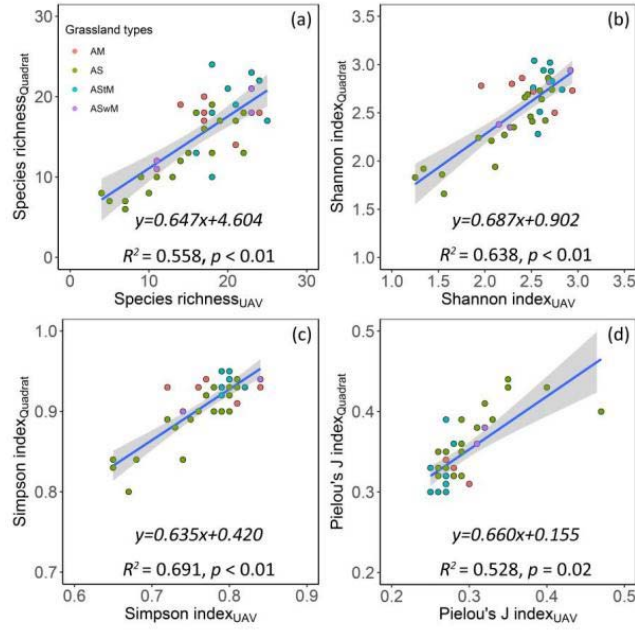


图 1.4.26 疏勒河传统样方法（Traditional Quadrat）和无人机方法（UAV Belt）获取的（a） species richness、（b） Shannon index、（c） Simpson index 和（d） Pielou's J index 对比

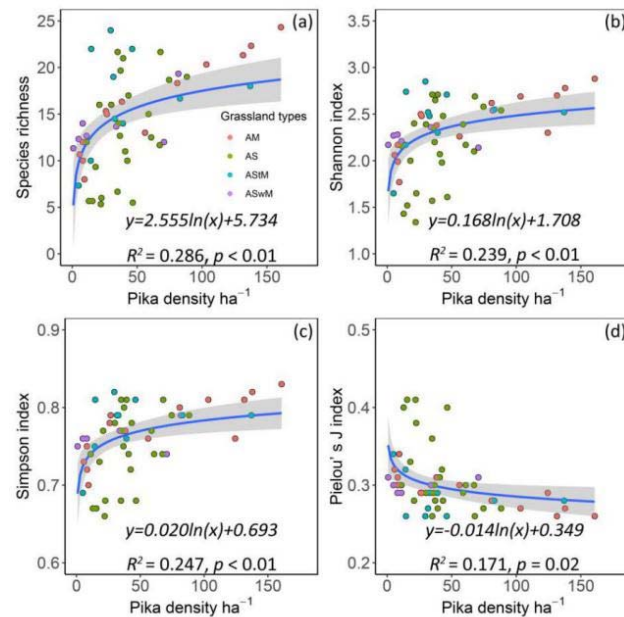


图 1.4.27 高原鼠兔密度与 species richness（a）、Shannon index（b）、Simpson index（c）和 Pielou's J index（d）的相关性

通过进一步分析了鼠丘和原状植被斑块土壤微生境特征，结果显示高原鼠兔的挖掘活动降低了土壤硬度，促进了水分的入渗。鼠丘和原状植被斑块植被物种显著不同，四种典型高寒草地两种地表类型平均共有植被物种不足 3 个；尽管原状植被斑块物种丰富度显著高于鼠丘，但是同时包含鼠丘和植被斑块的样方拥有最高的物种丰富度。我们的

研究表明高原鼠兔挖掘活动为种子萌发创造了良好的土壤环境，同时挖掘形成的土丘为植物的建植和演替提供了空生态位，有利于高寒草地植被物种多样性的增加。

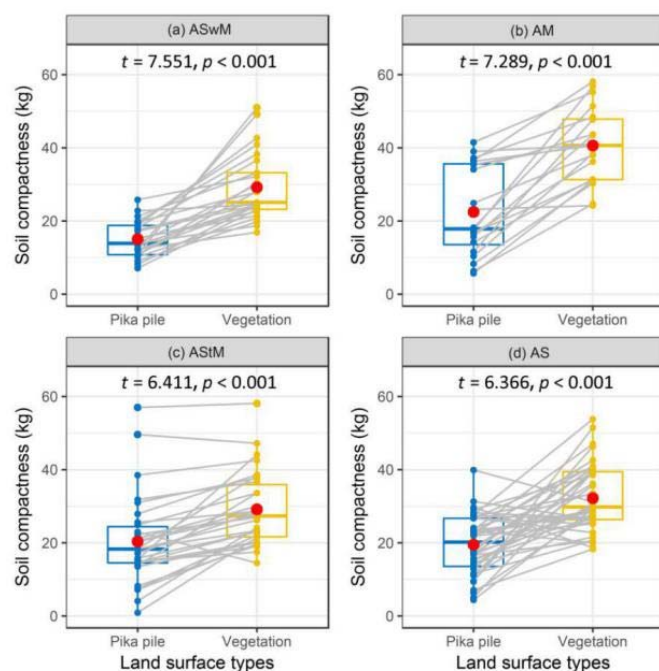


图 1.4.28 沼泽草甸 (a)、高寒草甸 (b)、草原化草甸 (c) 和高寒草原 (d) 鼠丘和原状植被斑块土壤硬度

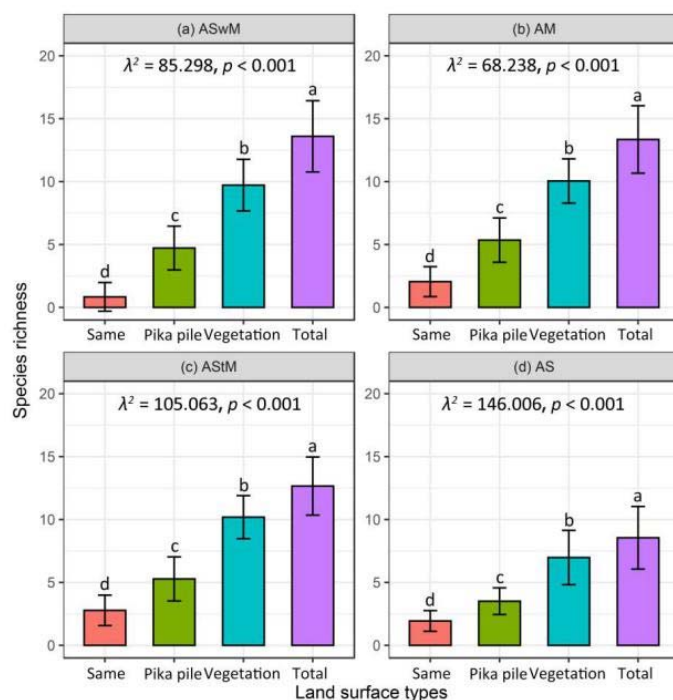
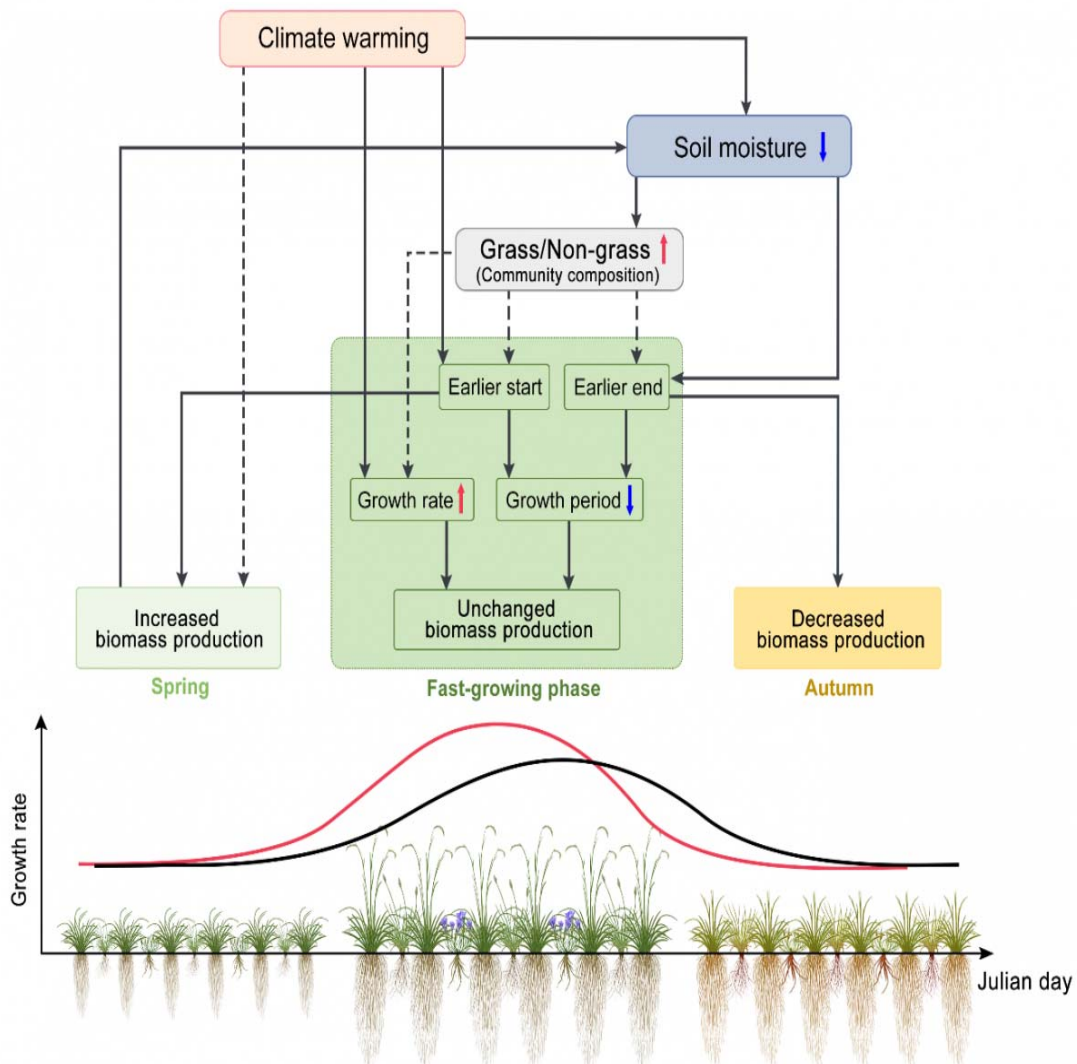


图 1.4.29 沼泽草甸 (a)、高寒草甸 (b)、草原化草甸 (c) 和高寒草原 (d) 鼠丘和原状植被斑块物种丰富度

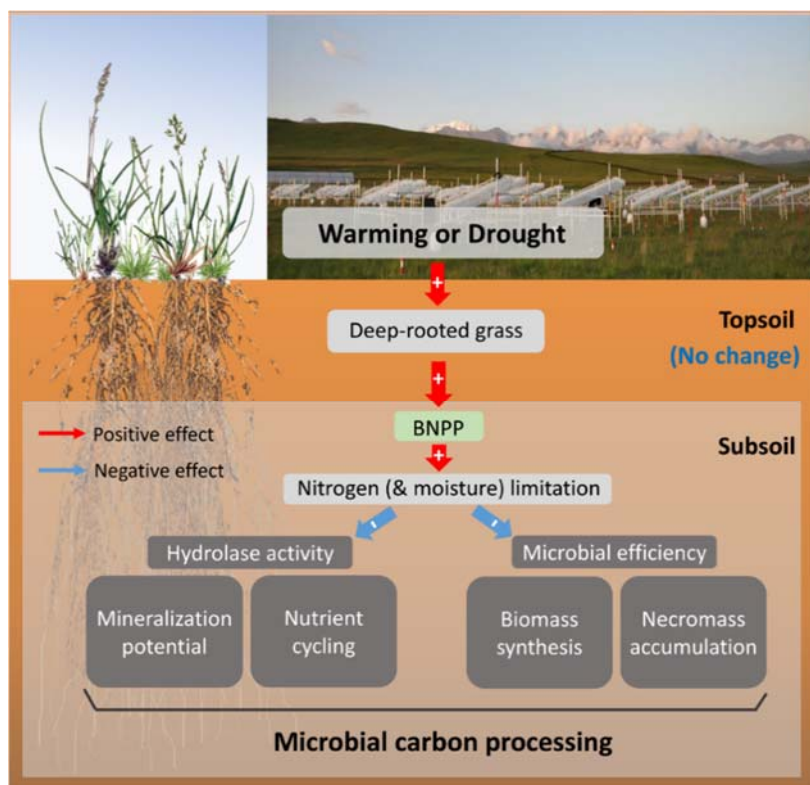
➤ 海北站

长期气候变化对青藏高原高寒草地植被生长格局的影响机制：通过对海北站 1980-2014 年高寒草地植物地上生物量季节动态的长期监测，揭示了气候变化对高寒草地植被生长格局的影响机制。研究发现，过去 35 年以来的气候变化，导致了高寒草地植被生长“更早、更快，但最适时长缩短”，整体上对年生物量生产无显著影响。气候变暖促进了“快速生长期”开始提前，导致春季生物量生产增加；生长季中期生长速率加快，但土壤水分亏缺加快了“快速生长期”的结束，导致秋季生物量生产降低。植物最大生长速率加快和“快速生长期”时段的缩短，主要归因于禾草和杂类草“快速生长期”的缩短并趋于同步化。这些发现首次为高寒草地植被生长格局的长期变化提供了直接观测证据，表明物候提前和生长加速共同重塑了全球变暖背景下的植被生长格局。该结果已发表于国际著名期刊 *Ecology Letters* 上。



1.4.30 长期气候变化对青藏高原高寒草地植被生长格局的影响机制

增温和干旱对高寒草地底层土壤微生物过程的影响：全球一半以上的土壤有机碳贮存在深度超过 30cm 的底层土壤中，底层土壤碳库对气候变化的响应是当前全球变化生态学的研究焦点之一。近期研究表明，高寒草地表层和底层土壤有机质的降解及新碳封存对增温和干旱具有不同响应。然而，增温和干旱对底层土壤微生物碳过程的影响尚不明确。本研究利用青藏高原海北站的长期增温控水实验平台，结合添加 ^{13}C 标记凋落物的土壤培养实验，通过微生物活体和残体标志物 ^{13}C 与胞外酶活性分析，对比研究了表底层土壤微生物作为土壤有机碳“分解者”和“贡献者”的响应。研究发现，与对照相比，五年的增温和干旱处理显著抑制了底层土壤中有机氮水解酶（亮氨酸氨基肽酶）的活性，降低了无机氮素（及水分）的可利用性，从而增强了微生物氮限制。通过以上影响，增温和干旱处理进一步抑制了底层土壤微生物对土壤有机碳以及植物凋落物的矿化能力，并且降低了微生物碳利用效率和残体积累效率，而对表层土壤微生物过程没有影响。以上结果表明，在增温和干旱条件下，高寒草地底层（而非表层）土壤微生物变得“又懒又低效”。由于增温提高了该地区高寒草地的地下生产力，因此增加的植物根系输入和减弱的微生物活性都有利于底层土壤碳库积累。在底层土壤氮限制加剧的背景下，植物生产力和底层土壤碳库积累的可持续性仍值得进一步研究。该研究成果发表于国际学术期刊 *Global Change Biology* 上。



1.4.31 增温和干旱对高寒草地底层土壤微生物过程的影响及其关键途径

5. 土壤/冻土观测研究

➤ 格尔木站

阐明了全球气候变暖导致冰冻圈灾害增加的机理并提出了减缓措施：通过对全球大气冰冻圈、海洋冰冻圈和陆地冰冻圈的范围、特征和影响进行了系统分析，阐述了不同类型的冰冻圈灾害的时空分布特征，指出了冰冻圈退化会导致冰冻圈灾害增加的机理。大气冰冻圈灾害方面，欧亚大陆的霜冻和冰雹灾害关注较多，而北美冬季寒潮关注更多。过去几十年来，霜冻、冰雹随着变暖呈减少趋势，但昼夜温差变化增大会导致霜冻增加，而且目前植物的物候变化情况还不清楚。同时，已有气候模式还无法预测冰雹概率、冰雹直径大小和总量。与冰雹类似，冻雨频率在统计上随气候变暖而减少，但冻雨的冰量、持续时间在未来如何变化还不清楚。此外，北半球的在未来会呈“暖北极、冷大陆”的模式，因而冬季寒潮的影响会增加。考虑到人口数量和财产的增加，大气冰冻圈灾害损失在未来会增加。海洋冰冻圈灾害主要包括海冰灾害、冰山灾害、北极海岸带侵蚀和海平面上升。海冰冻结会堵塞航道，造成海上设备的损坏，海冰快速融化也可能会海岸带侵蚀，造成部分水域盐度快速变化从而影响渔业生产。海冰快速消退后，人类活动包括渔业、航运、油气开采和旅游观光也会不断向海冰区扩展，因而海冰灾害会更严峻。冰山在未来会随着冰架冰山的崩解而数量增多，加上人类活动增多，冰山与船只和海上设施碰撞的风险也会增加。海冰退化，海水温度升高，沿海多年冻土退化和海浪的增强都会进一步加剧北极海岸带的侵蚀。陆地冰冻圈灾害受到的关注最多。按照灾害的成因，可以分为冰川、积雪和多年冻土灾害，但是实际上很多灾害是多个过程同时形成的。以冰川灾害为例，在全球范围来看，欧洲阿尔卑斯山地区的冰川泥石流关注最多，而亚洲喜马拉雅山脉和青藏高原的冰川洪水的关注最多。加拿大和阿拉斯加也因为其广泛发育的冰川而有较多的冰川洪水和冰川泥石流灾害报道。气候变暖使积雪范围呈减少趋势，但这并不意味着暴雪的频率降低，在有些地区，暴雪频率反而增加，说明未来暴雪灾害更有可能增加。受到春季温度升高的影响，很多地区的雪崩风险会增加。受到积雪融化时间提前和降水增加的影响，积雪洪水在未来仍可能会是重要的灾害。多年冻土灾害主要是因为多年冻土融化后造成的一系列灾害。在高山地区，多年冻土融化会降低山体结构的稳定性，造成山体崩塌、滑坡等灾害。地下冰融化后导致地表沉降，强烈的冻融作用会给多年冻土区的工程如公路、铁路等造成影响。这些灾害会随着多年冻土的退化而更为严重。值得注意的是，近年来发现平坦地势下多年冻土的退化也会造成湖泊的溃决，从而引起重大灾害风险。

研究团队还提出了冰冻圈灾害的减缓措施。对于大气冰冻圈灾害，需要加强短期天

气预报的能力，部分地区的冰雹减灾可以通过人影工程来实施。海洋冰冻圈的减缓措施需要发展海冰和冰山的高精度监测方法并建立数据库，对于海岸带侵蚀，尽管工程成本较高，但一些工艺比如钢丝网笼对于保持沿岸带的陡坡的稳定性具有较好的效果。海平面上升的应对方案还应该遵循 IPCC 1990 年提出的策略，即按照信息收集、意识提升、计划和设计、执行、监测与评估来应对。陆地冰冻圈的灾害减缓需要加强监测，特别是随着遥感技术的发展，冰湖溃决灾害已经有了一些成功的预报范例。但是，建立陆地冰冻圈，特别是高山冰冻圈地区的灾害分布图是非常必要的 (Ding et al., 2020, Earth-Science Reviews)。

系统总结了青藏高原多年冻土退化影响碳循环的过程：通过对已有报道的采样点分布、土壤有机碳测定方法、多年冻土区面积的界定、土壤有机碳的空间扩展技术环节综合分析，指出青藏高原多年冻土区表层 2m 土壤碳储量为 19.0 ± 6.6 Pg。这些土壤有机碳对气候变化敏感，容易被微生物分解，不同植被类型下土壤有机碳分解的温度敏感性系数为 9.2 ± 7.1 。在高原尺度上，全球变暖增加了局部地区土壤碳的释放，但变暖又促进了植被生长，从而吸收更多的碳。综合青藏高原不同地区模拟升温及监测结果，发现不同湿度条件下土壤生态系统碳释放对升温的响应不同。目前青藏高原总体表现为碳汇，但未来气候变化可能增加多年冻土碳释放速率，减弱其碳汇功能。

团队重点分析了热喀斯特地貌演化对多年冻土碳循环的影响。现有地球系统模式主要关注多年冻土缓慢升温过程。但在富冰多年冻土区，多年冻土退化会导致地表沉降、滑塌或热融侵蚀，形成热喀斯特景观。这些过程比较复杂而未被充分研究，因而还没有被纳入到耦合模型中，导致碳循环的评估具有很大不确定性。通过野外监测分析表明，青藏高原热融滑塌和热融湖塘发育是影响温室气体释放的重要过程，由于遥感技术限制，目前还缺少区域尺度扩展和整体反馈效应评估。为降低多年冻土区土壤有机碳储量及其对升温响应的不确定性，未来研究需要进一步探索基于有机质来源和沉积过程对土壤有机碳分解释放的温度敏感性的影响，并量化多年冻土退化过程中养分的有效性在调节土壤有机碳动力学和生态系统恢复中发挥的作用 (Mu et al., 2020, Earth-Science Reviews)。

揭示了影响青藏高原土壤水热模拟的关键陆面过程并预估了多年冻土的时空变化：陆面过程模型是研究多年冻土变化及其与大气相互作用的有效工具。由于青藏高原特殊性，目前大多数陆面模式在土壤水热模拟方面存在低估现象。针对以上问题，团队以多年冻土区唐古拉（高寒草原）和北麓河（高寒草甸）观测场为研究站点，借助多参数化陆面过程模式 Noah-MP，揭示了影响青藏高原土壤水热模拟的关键陆面过程，并集成了相关改进方案，结果发现：1) 模型耦合了由风导致的积雪升华的 Gordon 方案，有效改

善了 Noah-MP 对积雪的高估，进而改善了浅层土壤温度的冷偏差；2）针对青藏高原特殊的湍流过程，提出冷季裸地热力学粗糙度方案与暖季稀疏植被冠层下空气动力阻抗方案相结合的组合方案，显著改善了土壤温度的低估，且提出的组合方案比单个方案在不同植被盖度下垫面有更高的适用性；3）已有陆面模式普遍高估土壤冻结时的导热率，更准确的土壤导热率方案能有效改善冷季深层土壤温度的低估。4）考虑土壤有机质能够在一定程度上改善模型的干偏差，在土壤颗粒较粗的唐古拉改进则更为显著。青藏高原多为砂质土壤，模拟时应充分考虑土壤有机质对土壤水分的影响（Li et al., *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 2020）。

团队使用统计学和机器学习相结合的方法对整个青藏高原多年冻土热状况和活动层厚度进行模拟，旨在验证组合方法在青藏高原中的适用性，并定量评估青藏高原多年冻土的现状和未来变化情况。研究显示，统计模型和机器学习方法相结合，可以快速获取青藏高原上多年冻土的热状态变化。通过验证发现，组合法具有较高的模拟精度，MAGT 和 ALT 的均方根误差分别为 0.53°C 和 0.69 m 。模拟结果表明，当前 2000-2015 年，青藏高原上的多年冻土面积约为 $1.04 \times 10\text{ km}^2$ 。多年冻土区平均 MAGT 为 $-1.35 \pm 0.42^{\circ}\text{C}$ ，ALT 为 $2.3 \pm 0.60\text{ m}$ 。在未来（2061-2080 年），最大多年冻土区面积可能减少到 $0.44 \times 10\text{ km}^2$ 。从空间分布和统计数值上看，多年冻土区年平均地温和活动层厚度的变化将非常显著，同时存在较大的区域差异。不稳定多年冻土主要分布在多年冻土区的边缘，未来青藏工程走廊附近地区约有一半的多年冻土将面临消失的危险（Ni et al., *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 2020）。

➤ 若尔盖站（成都生物研究所）

海拔梯度上湿地甲烷排放的分布模式及控制因素：在喜马拉雅山脉南坡选取位于山麓和中山地带的两处典型湿地作为野外定位研究对象，开展了长期的温室气体排放监测，在已获取的数据基础之上，分析发现了土壤温度是影响湿地甲烷排放的关键控制因素。通过对全球不同海拔湿地相关数据的分析，建立了可比较的梯度序列，首次发现了湿地甲烷排放最适温度随海拔升高而降低的趋势，阐释了海拔梯度上甲烷排放随温度季节变化的趋同性规律，同时提出了甲烷排放的温度敏感性在海拔梯度上呈现出的趋异性单峰模式。上述研究工作联合了尼泊尔、印度、巴基斯坦、不丹等喜马拉雅地区多国学者共同实施开展，部分成果近期以 *Methane emissions respond to soil temperature in convergent patterns but divergent sensitivities across wetlands along altitude* 为题发表在 *Global Change Biology*。

青藏高原沼泽在不同冻融期甲烷排放（四年的测量）：利用 LI-7700 甲烷监测仪对

红原日干乔泥炭地进行连续监测, 研究结果发现该泥炭地在不同冻融阶段均表现为甲烷排放状态, 且不同冻融阶段昼夜动态变化相似, 峰值出现在 12:00-18:00。融化期的累积排放占全年的 69.1%至 88.6%, 远高于其余时期, 而冻融期和融冻期累积甲烷排放也达到 18.9%, 对于准确评估高寒泥炭地甲烷收支不可忽视。路径分析结果表明, 土壤温度和水分条件是影响甲烷排放的最重要因素, 但不同冻融阶段影响甲烷排放的因素存在差异。相关成果以“Methane emissions during different freezing-thawing periods from a fen on the Qinghai-Tibetan Plateau: Four years of measurements”为题发表于 Agricultural and Forest Meteorology。

➤ 若尔盖站（西北研究院）

高寒半湿润区水分和海拔梯度群落草毡层土壤有机碳密度和储量：在高寒地区土壤碳库研究中, 特别强调 0~30 cm 草毡层的重要性。比较了水分梯度沼泽 (SW)、退化沼泽 (DS)、沼泽化草甸 (SM)、湿草甸 (WM)、干草甸 (UM)、退化草甸 (DM) 和海拔梯度 3550 m 亚高山草甸 (SM1)、3650 m 亚高山草甸 (SM2)、3750 m 亚高山灌丛草甸 (SSM)、3850 m 高山灌丛草甸 (ASM1)、3950 m 高山灌丛草甸 (ASM2)、4050 m 高山草甸 (AM) 的有机碳密度和碳储量, 高寒草甸草毡层有机碳密度和碳储量可达到 24 kg C/m² 和 240 t C/hm², 不同群落碳密度和碳储量随着土壤水分有效性的降低而降低。灌丛草甸有机碳密度比草甸高 15%, 灌丛草甸的固碳生态功能大于草甸, 但灌丛草甸的生产功能降低。发现高寒草甸草毡层有机碳含量低于 30 g/kg 时, 草甸就开始退化。

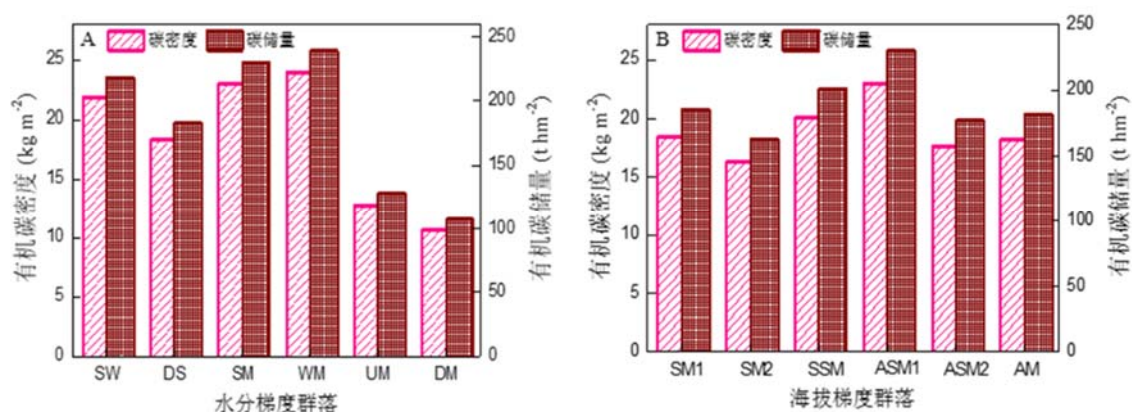


图 1.5.1 高寒半湿润区土壤有机碳密度和储量

CLM5.0 模式在青藏高原地区评估与改进：基于青藏高原不同气候区四个站点的气象要素、土壤和通量观测资料以及高原 67 个气象台站的土壤温度观测数据评估了 CLM4.5 和 CLM5.0 模型在青藏高原的适用性, 结果表明, 模拟的土壤温度与观测值较一致, CLM5.0 在干旱和半干旱地区对土壤温度模拟稍好。CLM5.0 高估四个通量站点

的土壤湿度（5 厘米、10 厘米、20 厘米、40 厘米），但改进了融化期土壤湿度的模拟。土壤湿度的高估主要是由于 CLM5.0 中引入干表层（DSL）土壤蒸发阻抗参数化，从而影响土壤蒸发的模拟，特别是在半干旱区域。此外，也利用北京师范大学发布的土壤属性数据替换土壤属性数据来进一步说明不同版本模型中影响土壤水分和传热的因素。结果表明土壤属性数据在 CLM5.0 中的土壤水分和热传导过程中起主要作用。

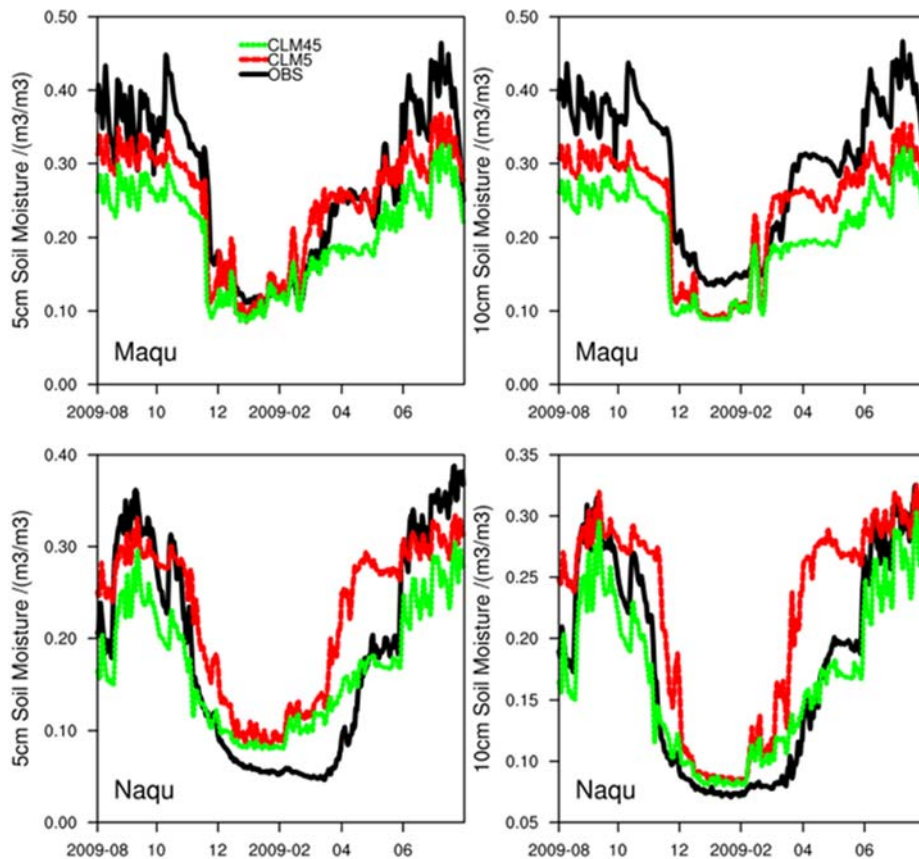


图 1.5.2 利用 CLM4.5 和 CLM5.0 模拟的土壤湿度与观测对比（a,b 为玛曲土壤湿度观测网 5cm 和 10cm 的对比；c,d 为那曲土壤湿度观测网 5cm 和 10cm 对比）

近 55 年来青藏高原季节性冻土冻融变化研究：季节性冻土冻融变化是气候变化重要的指示器。以 1960-2014 年观测的季节性冻土日冻结深度为基础，分析了冻结深度和冻融期的时空特征和变化趋势，并探讨了其与气候、地理因素的关系。进一步采用多元回归函数对区域冻融变化进行了预估。结果表明，多年平均最大冻土层深度、冻融期、冻融开始日期和冻融结束日期具有明显的气候带分布特征。1960-2014 年青藏高原最大冻深和冻融期呈下降趋势。冻结开始日推后，而融化结束日期提前较多。由于较强的相关性，土壤水热条件对土壤冻融变化的显著影响可以用海拔和纬度或气温和降水来预估。由于大部分观测站点位于较低海拔地区，基于气象因子和地理因素估算的最大冻结深度

和冻融期的区域平均明显大于气象站观测数据的平均值。2000 年以来, 整个青藏高原最大冻结深度和冻融期急剧下降。土壤的暖湿条件导致青藏高原大部分地区季节冻土的最大冻结深度和冻融期显著减小, 而藏东南部部分地区的土壤变干导致该区域季节性冻土最大冻结深度和冻融期略有增加。

➤ 那曲站 (青藏所)

全球氮沉降对土壤碳储量有巨大影响: 张更新研究员团队选取青藏高原高寒草原作为试验地点, 开展为期两年的人为多梯度氮添加 ($0, 10, 20, 40, 80$ 和 $160 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) 试验, 选取土壤不稳定有机质 (LF-SOM, 密度 $\leq 2.25 \text{ g/cm}^3$), 进一步研究高寒土壤有机质的动态变化机制。结果显示, LF-SOM 含量与微生物生物量, LF-SOM 中有机化合物的含量和与之对应的功能基因丰度, 以及 LF-SOM 含量与生态系统碳净交换量之间均存在显著相关关系, 表明 LF-SOM 不仅是微生物的主要利用组分, 同时也是土壤中对氮添加响应最敏感的组分。此外, 我们发现, LF-SOM 对氮添加梯度存在非线性响应, 其含量随着施氮梯度的增加呈现: 先增加 ($10 \sim 20 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) 后减少 ($40 \sim 160 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) 的趋势。尽管在 $160 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 处, LF-SOM 含量与空白对照相比仍减少, 但是与其在 $80 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 处相比, 其减少量有所减弱。通过进一步研究发现, 造成上述非线性响应主要是由于氮添加对植被输入与微生物降解之间平衡的扰动造成的。根据上述结果, 我们预测, 当青藏高原氮沉降量再增加 $10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 时, 不稳定组分碳储量与现在相比将增加 170%。该研究结果发表于 *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*。

全球变暖伴随着降雨的改变同样对土壤碳库有显著影响: 张更新研究员团队在高寒草原地区开展为期三年的人为增温 (高于环境温度 2°C) 及增水 (高原环境降水 15% 及 30%) 试验, 进一步研究青藏高原土壤有机质对未来气候变暖的响应。研究结果显示, 单独增水处理有助于植被生产力的增加, 因此促进了 LF-SOM 的累积。在 LF-SOM 中, 植被来源化合物 (包括: 木质素、长链烷基类化合物、多糖和酚类化合物) 相比于微生物来源化合物 (包括: 短链烷基类化合物、含氮化合物和几丁质) 及芳香族化合物 (包括: 芳烃和多环芳烃), 对土壤水分增加的响应更敏感。相反, 单独增温处理会加剧高寒草原生态系统中的干旱效应, 对植被及微生物的生长均有抑制作用, 因此不利于 LF-SOM 的降解。而增温增水共同作用不仅缓解了由单独增温引起的水分缺失, 同时增加了土壤温度, 更有利于微生物活性的增加 (LF-SOM 中微生物来源化合物与土壤温度正相关), 因此促进了 LF-SOM 的降解。本文预测, 在未来气候变化下, 增温伴随着降水的增加将有助于微生物活性的增加, 进而促进高寒草原 LF-SOM 的降解。该研究结果发表于 *Science of the Total Environment*。

全球变暖背景下积雪融化对青藏高原土壤碳库的影响：积雪是地球系统不可或缺的成员之一，它一方面敏感地响应于气候变化，另一方面对气候系统和生态系统也产生着深远的影响。为探究积雪对青藏高原草地生态系统碳源汇功能的影响，我们首先对积雪变化的特征及其驱动因素进行了研究。该研究利用卫星遥感观测积雪数据结合再分析产品，分析了 1967-2018 年欧亚大陆春季积雪的年际变化特征，并从气温、降水、大气内部变率、海表温度和北极海冰变化等多角度系统揭示了积雪变化背后的驱动因素。结果显示欧亚大陆春季积雪年际变化的前两个主导模态分别表现为全区一致型和东西偶极型格局。分析表明春季地表气温和降雪量的变化是形成积雪异常模态的最直接影响因素。由于气温和降雪的变化是大气环流异常的产物，该研究于是对欧亚地区主要的大气遥相关型进行了分析，发现欧亚积雪第一模态受到春季北极涛动、极地-欧亚型和西太平洋型遥相关引起的异常大气环流的显著影响；而第二模态则与东大西洋-西俄罗斯型遥相关有密切联系。此外，研究还发现北大西洋马蹄形海温异常和巴伦支-喀拉海域海冰变化分别激发的横贯欧亚大陆的波列式环流能够促进积雪变化第二模态的形成。该研究进一步利用上述发现的影响因子结合多元线性回归方法建立了经验模型，并较好的重建出了积雪变化前两个模态的时间序列，说明该研究的结果能够有效地提高对欧亚大陆春季积雪变化的认识 (Zhang et al., 2021)。

随着全球气候变暖，积雪消融，冻土也经历着显著的增温和融化过程，这一过程很可能会加速冻土中有机碳的分解释放，其后果不仅会深刻改变陆地生态系统碳源汇功能，还将对大气 CO₂ 浓度及全球气温变化产生重大影响。然而，目前学术界对于冻土中土壤碳的释放潜力及其与气候变暖反馈关系的认识还存在很大不确定性。基于这一问题，我们搜集整理了北半球土壤碳分解的温度敏感性(Q10)数据，并结合气候、植被、土壤等属性探讨了北半球 Q10 的空间分布格局及其驱动因子，发现北半球 Q10 表现出极大的空间异质性，变化范围从 0.8 到 7.1，平均值为 2.51 ± 1.13 ；高纬度和高海拔的冻土分布区土壤碳分解的温度敏感性更高，尤其是冻土分布区的深层土壤碳分解的温度敏感最高，其均值比非冻土地区高出近 18%。此外，研究还发现净初级生产力 (NPP) 是表层 Q10 (0-30 cm) 空间格局的主要控制性因素，而土壤碳氮比是深层 Q10 (30-100 cm) 的主要驱动因子，基于 Q10 与上述影响因子的经验关系，利用机器学习的手段外推得到北半球地区不同土壤深度 Q10 的空间分布图，结果显示 Q10 随纬度升高呈现明显的增加趋势，且在不同的区域中，高纬度冻土区 (2.95)、青藏高原地区 (2.25)、以及非冻土区 (2.16) 的 Q10 值依次递减，进一步印证了北半球高寒地区土壤碳分解对气候变暖最为敏感。考虑到冻土分布区巨大的碳储量和快速的气候变暖，未来有关陆地碳循环及其与

气候变暖反馈的研究应该着重关注这些地区 (Ren et al., 2020)。

积雪融水是发源于青藏高原的大江大河的重要的补给水源,在未来快速升温背景下,青藏高原积雪和降水的巨大变化对下游地区河流径流有怎样的影响目前尚不明确。基于此,我们从印度季风与西风协同作用是主导青藏高原水圈变化的核心思想出发,定量构建了“环流异常-降水变化-径流变化”这一大气圈到水圈的链式响应过程,据此约束了参与第五次和新一轮国际耦合模式比较计划 (CMIP5 和 CMIP6) 中地球系统模式对湿季降水和径流的未来预估,绘制了包括印度河、恒河、雅鲁藏布江、怒江、湄公河、长江和黄河等主要河流上游人均水资源量分布图。结果表明:全球 2°C 升温情景下,青藏高原将持续变湿,且季风区降水增加 (3.9%) 显著高于西风区 (0.8%); 湿季主要河流径流总量增加 4.1%,其中恒河上游增加最大 (10.8%)、印度河上游增加最小 (1.2%),冰川融水则主要导致了印度河上游径流的增加。虽然“亚洲水塔”供水增加,但并不总能增加上游区域人均可用水量:长江和黄河上游流域未来人口下降使这些区域人均可用水量增加,而印度河和恒河上游未来人口增加将抵消径流增加的正面影响。该研究对于改善水资源管理,保障水和粮食安全,并实现区域可持续发展目标,具有重要的科学意义 (Wang et al., 2021)。

► 祁连山站

高原鼠兔种群密度及其采食和挖掘活动对高寒草地生物量和土壤有机碳的影响:高原鼠兔被认为是高寒草地的关键种,但是前期研究工作主要集中在样方尺度,无法客观评估高原鼠兔扰动在高寒草地的作用。本研究基于无人机航拍和实地调查的方法,在样地尺度分析了不同高寒草地高原鼠兔的分布特征,估算了高原鼠兔的采食和挖掘活动对高寒草地生物量、土壤侵蚀和有机碳的影响。结果表明高原鼠兔分布具有高度的空间异质性,高寒草甸总鼠洞 (TPB)、有效洞口 (APB)、鼠兔密度 (PD) 和洞道长度 (PBL) 均高于其他三种草地类型。在样地尺度高原鼠兔年采食量占整个草地生物量的 21-40%,挖掘活动导致的生物量的减少小于 1%,表明采食是高原鼠兔影响生物量的主要方式。鼠兔的挖掘会导致大约 1-5 T 的疏松土壤堆积在地表,其中有机碳和全氮的含量分别为 $20-70\text{ kg ha}^{-1}$ 和 $2-6\text{ kg ha}^{-1}$ 。这种疏松的土壤容易受到侵蚀的影响,因而会导致有机碳和全氮的流失。

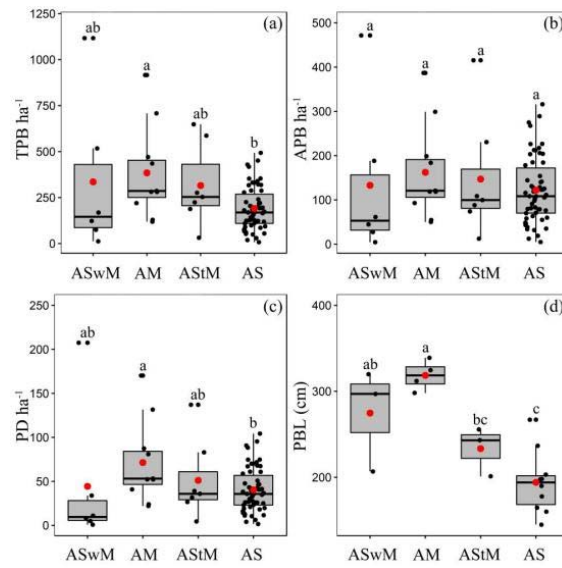


图 1.5.3 典型高寒草地总鼠洞 (TPB) (a)、有效洞口 (APB) (b)、鼠兔密度 (PD) (c) 和洞道长度 (PBL) (d) 特征

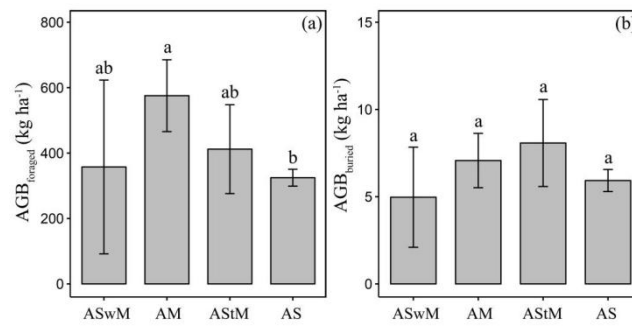


图 1.5.4 高原鼠兔采食的生物量 (a) 和挖掘活动覆盖的生物量 (b)

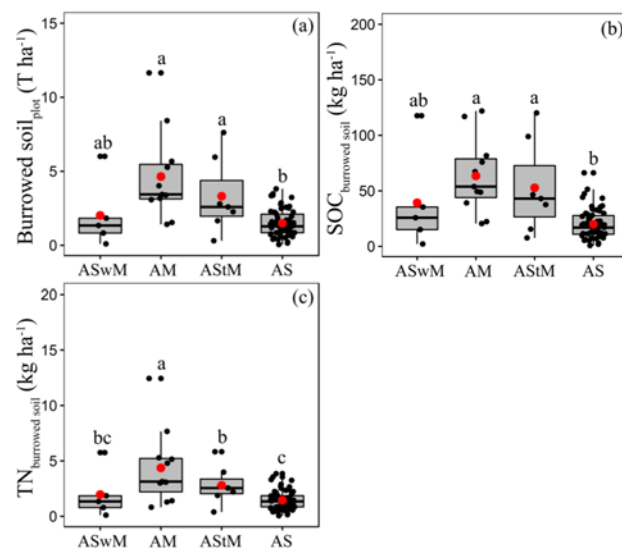


图 1.5.5 高原鼠兔挖掘土量 (a)、挖掘土有机碳 (b) 和全氮储量 (c)

四、试验示范

➤ 天山冰川站

冰川水资源预估评价成套技术

天山冰川站利用以 TGS 冰川模型为核心的冰川水资源预估评价成套技术，对吉木乃县水资源未来变化趋势进行了分析评价，结果表明，吉木乃水资源还将继续恶化，未来 30 年，该区的冰川将大量消失，造成地表水资源急剧减少，直接威胁到该区的生态环境和群众的生产、生活安全，形成“一方水土无法养育一方人”的局面。因此，天山冰川站提出保护冰雪水资源和加强跨流域调水、合理分配生态与生产用水等多项措施，得到地方政府采纳，对吉木乃县的扶贫决策产生了重要影响。2019~2020 年，天山冰川站参与吉木乃县“万驼园”产业园建设项目该项目把骆驼自然放养与科学人工饲养结合在一起，集骆驼良种繁育、饲草料种植、旅游观光于一体。天山冰川站针对该项目涉及的区域用水保障、生态旅游等关键问题，联合国内相关研究机构进行了多次论证，为其持久运行发展提供了科学依据。

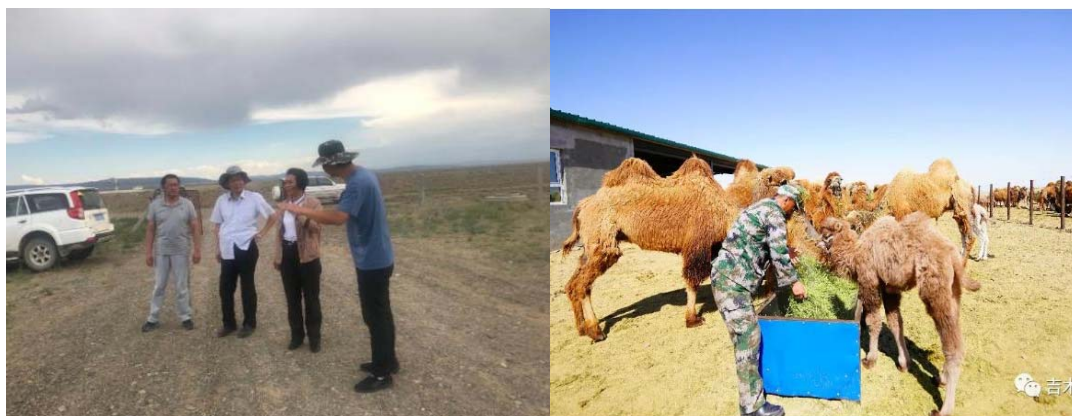


图 4.1 现场论证



图 4.2 吉木乃使用的巨型喷管技术

➤ 海北站

草地恢复技术示范

1) 放牧制度的改变

放牧调整是最经济、最直接的高寒草甸功能提升的手段。

禾草矮嵩草群落状态草地应为高寒矮嵩草草甸的理想状态，现主要处于健康亚状态，在管理上应以适度放牧，采取隔年推迟入场、提早转场时间为主的放牧制度调整，以保障禾本科牧草的种子成熟、着床与萌发。放牧强度管理上应以“取半留半”的原则。该状态草地绝对不能实行禁牧。

处于矮嵩草状态草地，考虑到协调保障家庭生活与草地功能恢复的需求，在管理上应以减半放牧（现有放牧强度的 1/2），辅以隔年推迟入场、提早转场时间和隔年轮牧放牧制度的调整为主，以保障禾本科牧草的种子成熟、着床与萌发。同时可以通过养分的外源叶面追肥，提高禾本科优势种群的盖度和草地生产力。放牧强度管理上应以“取半留半”的原则。不宜采取禁牧措施，长时段的绝对禁牧会由于凋落物的累积，影响牧草种子的着床和光照，而引起生物多样性降低发生退化，进而导致草地的退化。

对处于小嵩草群落草毡表层加厚状态草地的管理，应以禁牧或 2-3 年轮牧放牧制管理，同时辅以草皮层的划破为主要措施。切忌牦牛的继续啃食。对地面的牦牛粪便应进行人工捡拾或破碎摊撒。

对处于小嵩草开裂状态草地管理，应以禁牧或冬季短期放牧为主。家畜类群应以羊为主，忌牦牛的啃食。同时辅以推迟入场、提早转场时间的管理措施。

2) 外源养分的调控

养分对植物优势种群的调控作用，与草地所处的状态特别是养分是否能够顺利进入土壤、不同植物类群对养分的敏感性和土壤种子库的组成有关。天然高寒草地养分的外源添加，只有依靠叶面追肥，必须在下雨前或雨后立刻进行，否则很容易造成烧苗。禾本科牧草为喜氮植物，生长对氮的需求比较大，氮素的外源补充，可有效提高禾本科牧草的比例和生物量，而嵩草属植物对氮素的补充反应较为迟钝。对处于禾草-矮嵩草群落和矮嵩草群落状态的高寒矮嵩草草甸，由于禾本科牧草是草地的优势种群，外源养分的添加是草地草地功能提升的有效措施，且时效较短。而对于以小嵩草群落为优势群落的草地，外源养分添加的效应较为缓慢与迟滞。外源养分添加对土壤养分的提升作用较小。外源氮磷养分添加可显著提高土壤速效养分含量，同时可提高土壤几丁质酶活性和纤维素酶活性，促进土壤有机质矿化作用，补充土壤速效养分。一般采用尿素 112.5 kg/hm² 作为追肥、雨后撒施。EM 菌和纤维素分解菌的施入，增加了土壤速效氮含量，

但对速效钾和速效磷养分的改善作用微弱。受高寒气候的影响，外来菌种难以适应，活性甚微，针对高寒草地有益土著微生物分离、培养尚需要做进一步探索。

3) 老化草毡表层破解

处于小嵩草群落时期，特别是草毡表层加厚期的草地，进行草毡表层的破解是草地功能提升的关键，可采用圆盘耙进行划破，辅以禾本科牧草种子的补充，具有极好的提升效果。而对处于小嵩草群落草毡表层开裂状态的草地，由于草毡表层开裂较多，在裂缝内，禾本科牧草易于着床，水分、养分条件相对较好，禾本科牧草生长茂密，成为草地恢复的契机与加厚草毡表层破解的自然动力。籍予外源微生物酶活性对老化草毡表层和死亡生物结皮的破解目前尚没有好的菌种，以外源磷肥的添加，激发土壤纤维素酶的活性，加速土壤有机物质的分解，可做以尝试。

4) 人工草地的建植

处于杂类草-“黑土滩”次生裸地状态的退化草地，原生植被消失，底土裸露，毒杂草丛生。进行该类草地的恢复只有通过人工植被的恢复与重建。人工草地可以大幅度提高草地生产力，使牧草产量提高 5~10 倍，是治理黑土滩退化草地的重要途径。青海草地早熟禾、青海冷地早熟禾，青海中华羊茅和无芒雀麦，可作为杂类草-黑土型次生裸地恢复的选用品种。一般采用施二铵 225 kg/hm^2 作为底肥，尿素 112.5 kg/hm^2 作为追肥、分两次，在雨后撒施。人工草地生态系统功能的稳定维持时效一般低于 5 年，经过 12-16 年的持续保护，禾本科、矮嵩草盖度生物量及重要值呈增大的变化过程，可演替到稳定的地带性植被，对人工重建草地的植被保护是杂类草-黑土型次生裸地功能提升的关键。

➤ 贡嘎山站

(1) 秦巴山区食用菌循环种植模式

贡嘎山站张丹研究员自 2020 年开始在利州区开展中科院和四川省科技厅重大专项项目“秦巴山区食用菌循环种植模式建立和创新”，举办了数次科普和培训讲座，建立了白朝专家大院，帮助菇农解决了灵芝、香菇和羊肚菌生产管理中出现的一些具体问题，帮助广元利州区利元公司建立了组培室，通过组培室选育新的高产优质食用菌品种，并将新的食用菌品种进行示范、推广和应用。因其突出的工作成效，张丹研究员入选首批“利州英才”，并代表成都分院“利州英才服务团”在四川省广元市利州区举行的“利州英才”命名表扬大会暨“利州英才服务团”授旗仪式上发言。



图 4.3 张丹研究员开展秦巴山区食用菌循环种植模式

(2) 大渡河干暖河谷植被恢复技术与试验示范

大渡河干暖河谷及其所在的横断山区是独特的自然、气候和地理单元，具有地质作用强烈，水土流失严重，滑坡、泥石流、崩塌等山地灾害频繁，以及生态环境脆弱等特点。过去长期的过量森林砍伐，落后的农、牧业生产方式，导致水土流失、草场退化、森林退化严重，生态服务功能低下。开展大渡河干暖河谷植被恢复技术与试验示范可开发、集成干暖河谷植被恢复技术，可为干暖河谷区植被恢复、水土保持和自然灾害防治提供技术支撑。

贡嘎山站朱万泽研究员带领其团队在开展国家重大研发计划专题“干暖河谷退化植被恢复与稳定性技术试验示范”过程中，筛选干热河谷区优势乡土物种，依据立地基底、立地形态特征、立地表层特征和生物气候条件等因素划分立地类型，并针对不同立地类型开发集成有针对性的植被恢复技术，并展示推广示范。

表 4.1 大渡河干暖河谷区植被恢复典型模式

立地类型	植被恢复模式		树种选择
荒山缓坡阶地中 轻度退化立地类 型	针阔叶混交模式	侧柏+刺槐，侧柏+黄连 木，侧柏+合欢	侧柏、刺槐、黄连 木、合欢
		辐射松+刺槐，辐射松+ 合欢	辐射松、刺槐、合 欢
	阔叶林模式	合欢、黄连木、青香木、 刺桐	合欢、黄连木、青 香木、刺桐
荒山陡坡中度以 上退化立地类型	灌丛模式	羊蹄甲、车桑子、山蚂 蝗、紫麻	羊蹄甲、车桑子、 山蚂蝗、紫麻
	针阔叶混交模式	云南松+羊蹄甲	云南松，羊蹄甲



图 4.4 乡土树种筛选

专题组结合当地干旱半干旱地区生态综合治理项目的实施，在汉源县富林镇清富村营造植被恢复试验示范 200 亩，树种选择为黄连木、合欢，株行距为 $2\text{m} \times 3\text{m}$ ，种植密度为 110 株/亩，种植成活率在 95% 以上。



图 4.5 苗圃内黄连木和合欢幼苗

(3) 海螺沟适宜天麻种植技术筛选及推广

天麻是我国传统的名贵中药材，以块茎入药，主要含天麻素、多糖等有效成分，可用于头痛眩晕、肢体麻木、癫痫抽搐等症，具有极大的药用及养生价值。近年来，在经济利益的驱动下，贡嘎山地区的野生天麻被大量无序采挖，野生天麻资源日益匮乏，已濒于灭绝。贡嘎山站冉飞高级工程师利用在甘孜州海螺沟景区管理局科技处挂职的机会，申请了甘孜州科技局专项资金的支持，通过在贡嘎山东坡海螺沟流域开展天麻的引种栽培，并比较设施栽培、大田栽培和仿野生栽培这三种栽培模式对天麻品质、产量及售价的影响，进而根据投入产出比筛选出适宜在海螺沟推广示范的天麻种植模式。项目的实施，不仅有效促进当地农民增收，还能对贡嘎山地区的野生天麻资源起到一定的保护作用，具有较好的经济效益、社会效益和生态效益。



图 4.6 指导农民开展天麻种植

► 拉萨站

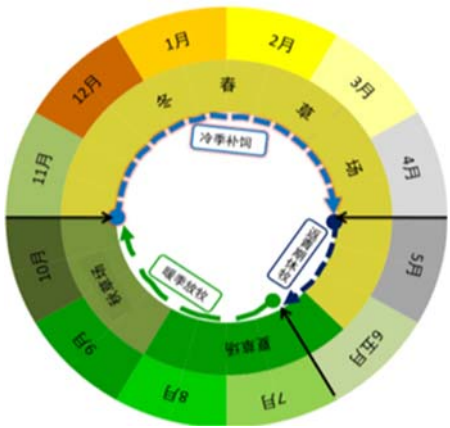
研发了复合丸粒化草种的生产加工工艺。分别研制了中华羊茅与冷地早熟禾、披碱草与扁茎早熟禾的两种复合种子加工工艺。这两项工艺分别使得两种重量大小差异很大的种子在一个丸粒种子的比例可达到 1:1.1 或 1:1 比例。加工得到中华羊茅种子和冷地早熟禾种子的复合丸粒颗粒，同时再加工得到披碱草和扁茎早熟禾种子的复合丸粒颗粒，使这两种复合丸粒种子颗粒在大小、重量等方面尽量接近。应用时可以按照一定比例将两种复合丸粒种子颗粒混合后进行草地补播，从而确保 4 种种子的混播比例。利用复合丸粒化草种混合播种与直接将四种种子分别丸粒化后混合播种相比，补播草地的生物量和物种数无明显差异，但是前者播种出苗后的均匀度比后者提高了 76%；利用技术丸粒化后的种子发芽率与采用普通丸粒化技术丸粒后的种子相比无明显差异。

► 三江源站

(1) 天然草地牧草返青期休牧和季节性配置技术

基于天然草场中度放牧利用原则，结合牛羊数量、草场面积和健康状况，因地制宜

制订了三江源区天然草场季节性放牧利用优化技术方案：农历四、五月实施牧草返青期休牧，休牧期间牦牛、藏羊于畜棚进行舍饲；暖季六至九月于夏秋草场放牧，冷季十至翌年三月于冬春草场进行放牧+补饲。上述技术方案在贵南县森多镇嘉仓生态畜牧业专业合作社示范实施多年，对草地恢复效果显著。



指标类型	返青期短期休牧	返青期连续放牧	平均增幅/%
群落高度/cm	8.13±0.86 a	3.24±0.53 b	105.92
植被覆盖度/%	95.83±4.07 a	76.62±8.11 b	25.08
植被地上生物量/(g/m ²)	379.46±67.41 a	176.93±53.74 b	114.54
植被地下生物量/(g/m ²)	2791.36±649.40 a	1965.31±681.07 b	42.04

图 4.7 天然草地牧草返青期休牧技术及成效

(2) 优质高产人工草地建植技术

饲草供给能力不足是导致高寒草地畜牧业系统效率低和经营效益差的主要原因。草产业是实现高寒地区草牧业可持续发展的必由之路，利用青藏高原农区和农牧交错区水热资源建设优质高产人工草地，大幅提高优质牧草产量，为家畜营养均衡生产提供优质饲草资源。基于草地资源置换理论，建植小面积优质人工草地生产优质饲草，可以实现大面积天然草地保护、恢复与适度利用，实现高寒草地生产功能与生态功能双赢。结合青藏高原草牧业生产实际，优质人工草地建植领域需加强高寒地区适宜优良草种筛选、人工草地建植管理技术优化、禾/豆混播丰产栽培技术优化等工作。

由于豆科牧草具有较高的蛋白质、钙和磷，禾本科牧草具有较高的碳水化合物。基于牧草种植基地土壤养分监测和评价，制订了有机-无机搭配组合施肥策略；同时，引入箭筈豌豆与燕麦进行混播，以充分利用不同物种的生态位、发挥豆科牧草固氮功能，既能增加产草量，同时增加牧草蛋白质含量，并且改善牧草适口性和土壤结构，提高土壤肥力。

（3）高寒牧区青贮技术

冷季饲草数量和营养匮乏是制约家畜营养均衡生产的重要因素。建植优质人工草地有效提高了高寒地区冷季饲草储备，然而传统储存方式下(青干草捆)的牧草营养成分损失大，不利于发挥家畜生长潜力和提高饲草转化效率。近年来实践发现，对建植人工草地的优质牧草而言，在生长旺盛期将其刈割并调制加工成优质青贮草，可有效延长牧草保存时间，大幅降低冷季存储过程中的牧草营养流失。

近年来，青贮技术在高寒农牧交错区得到较好的推广运用，有效缓解了冷季饲草营养品质差的问题。为了推动优良牧草青贮技术应用，我们先后开展了牧草最佳收获时间优化、适宜青贮菌剂筛选、捆裹青贮示范和青贮壕青贮示范等工作，制定了区域适宜青贮技术流程。2016年以来依托当地的畜牧业合作社、家庭联营牧场和牧户累计完成优良牧草青贮示范 6000 余吨。



图 4.8 青藏高原高寒地区捆裹青贮与青贮壕青贮

（4）家畜营养均衡饲养模式

提高家畜生产效率和饲草转化率，是实现高寒地区草牧业提质增效的关键。在青藏高原农区和农牧交错区，结合家畜营养需求标准，通过饲草精准配置优化家畜舍饲日粮，因地制宜开展家畜“暖牧冷饲”两段式管理和短期舍饲出栏技术，缩短家畜饲养周期，提高草牧业生产效率、饲草转化效率和家畜出栏率。实现以较低的资源代价获得优质畜产品和提升草牧业经营收益，切实提高农牧民的家庭收入，同时缓解冬春草场放牧压力，促进高寒草地资源合理利用。技术应用效果表明：采用高营养日粮开展冷季舍饲养殖，可使牦牛和藏系绵羊的冷季增重分别达到 82.40 kg/牛和 25.33 kg/羊，对应日均增重分别达到 610.37 g/d 和 187.65 g/d，对应冷季养殖收益分别达到 1016.71 元/牛和 205.01 元/

羊。因地制宜开展家畜冷季舍饲快速出栏，对实现黄河源区草牧业营养均衡生产和促进农牧民增收具有重要的推动作用。

（5）区域功能耦合发展优化模式

基于草畜资源优化配置，实现草地牧业区、农牧交错区与河谷农业区耦合发展，促进高寒地区草牧业提质增效。为推动草地生态保护和生态草牧业协调发展，需充分考虑各功能区的特征和优势，从转变生产方式入手，通过不同功能区资源优化配置，形成区域耦合发展优化模式。

基于自然禀赋和生产功能建立的区域功能耦合发展模式，能够推动各区域间的草畜资源优化配置，充分发挥草地牧业区（生态功能）、农牧交错区（生态功能、生产功能）和河谷农业区（生产功能）的生态生产功能，促进实现以较低的资源环境代价获得较多的优质产品和经营收益，切实推进黄河源区草地生态保护与生态草牧业协调发展。

（6）生态草牧业生产组织模式

目前，青藏高原农牧交错区逐步形成了区域适宜的“企业+基地+牧户”生态草业模式、藏系绵羊产业模式和牦牛产业模式。1)“企业+基地+牧户”生态草业模式，指以“农牧交错区土地流转-优质高产人工草地建植-优质草产品加工-草产品供给保障-家畜营养均衡饲养-抗灾保畜饲草储备”等为一体的草产业发展模式。例如：青海省现代草业发展有限公司，通过流转农牧民闲置土地，开展优质人工饲草基地建植和草产品（捆裹青贮、草颗粒、草块、营养型日粮等）加工，显著提高高寒地区冷季饲草储备，在青海省家畜营养均衡生产、区域饲草调配和冷季抗灾保畜等方面发挥着重要作用。在草业发展中积极引入农牧民开展人工草地建植、田间管理、饲草运输及草产品加工等环节，积极带动了周边农牧民增收。2) 藏系绵羊产业模式，指以“天然草场季节轮牧-优质人工草地建植-优质牧草青贮-饲草料精准配置-藏系绵羊营养均衡饲养-特色农畜产品加工-产业融合发展”等为一体的藏系绵羊产业发展模式。例如：青海省贵南县森多嘉仓畜牧业专业合作社，该合作社按照农牧民技能水平进行分组和分工，优化草畜资源配置并开展规范化生产。在开展天然草地适度利用的同时，通过建植人工草地和饲草料配置开展藏系绵羊“暖牧冷饲”两段式饲养和羔羊短期舍饲出栏，提升草牧业系统效率和经营收益。同时合作社注重产业融合发展，先后开发了传统酸奶、曲拉、酥油和人参果等特色藏式产品，开办了农畜产品体验店、打字复印店、洗车行和特色餐饮店等，通过生态草牧业产业链有效带动了合作社牧民增收。3) 牦牛产业模式，指以“天然草地适度利用—优质人工草地建植—优良牧草青贮—饲草料精准配置—牦牛营养均衡饲养—特色畜产品精深加工”等为一体的牦牛产业发展模式。例如：贵南县塔秀雪域诺央畜牧业合作社，通过人

工草地建植和草产品加工为牦牛营养均衡饲养提供饲草保障，通过“暖牧冷饲”两段管理显著提升牦牛生产效率和社员的经营收益。



图 4.9 青海省贵南县嘉仓生态畜牧业专业合作社分红

五、公众服务

► 三江源站

2020 年 5 月，连新明研究员通过中科院公开课给大家讲述可可西里无人区的野生动物（腾讯视频播放）；2020 年 8 月，央视《远方的家》录制组进入三江源进行跟踪报道；2020 年 9 月 4 日，青海东部祁连山最东端首次拍到雪豹，被新华社、科技日报、自媒体、潇湘晨报等媒体相继报道；2020 年 10 月 3 日央视综合频道《开讲啦》，赵新全研究员讲述他与三江源的故事；2020 年 12 月 23 日中央科普节目《我爱发明》-“空中管家”，赵新全研究员展示新技术的应用；2020 年 12 月底及 2021 年 1 月初，央视新闻频道、中国新闻网、新华网、青海日报等媒体相继报道了三江源国家公园首次利用直升机完成冬季综合科学考察。

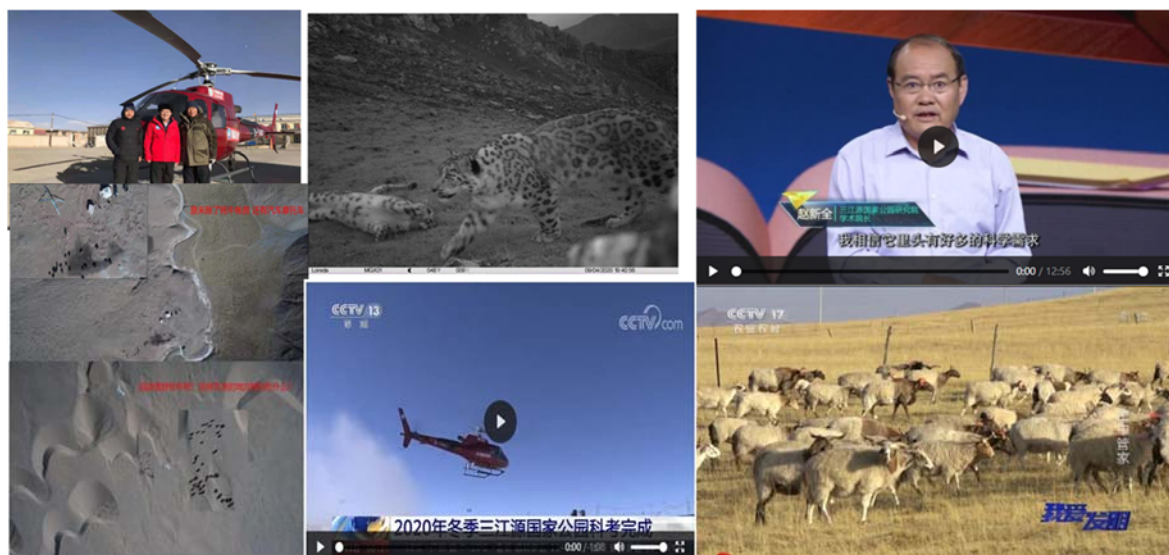


图 5.1 媒体关注

► 天山冰川站

协办第七届全国治理高峰论坛“新发展格局与北京冬奥”峰会

为深入学习党的十九届五中全会精神，贯彻落实习近平总书记关于做好 2022 年北京冬奥会、冬残奥会筹办工作系列重要讲话、重要论述精神，为冬奥会筹办和冬奥文化传播营造良好氛围，12 月 3 日，由北京冬奥组委、人民日报社指导，人民日报社人民论坛杂志社、人民日报社《国家治理》周刊主办，北京北奥集团承办的第七届全国治理高峰论坛“新发展格局与北京冬奥”峰会在人民日报社举行，天山冰川站作为协办单位在第四单元“激活新发展动能：北京冬奥与引领未来的前沿科技议题”单元发言。王飞腾研究员介绍说：在北京冬奥组委支持下，启动了“科技冬奥”专项工作，开始组建冰雪

产业科技创新联合团队。可以预计在未来 5 到 10 年，通过加强冰雪科学基础研究，进而带动应用研究，冰雪产业科研创新能力必将得到大力提升。作为科研团队，希望通过参与、完成冬奥赛事科技保障任务，研发出适合中国冰雪产业发展的一体化解决方案，为后冬奥时代我国冰雪产业的发展以及 3 亿人参与冰雪运动作出贡献。



图 5.2 王飞腾研究员参加“激活新发展动能—北京冬奥与引领未来的前沿科技议题”专题讨论

在四川达古冰川开展的减缓冰川消融试验受到国内外媒体的广泛关注

达古冰川属于青藏高原东缘，属于典型的海洋性冰川，对气候变化的响应尤为敏感。研究发现，过去的 50 余年时间，达古冰川的面积缩减了 70%，因此应用人工手段减缓冰川消融尤为迫切。2020 年 8~10 月，我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消融试验，并取得了预期的效果。由于，达古冰川是四川黑水县重要的旅游资源，冰川的消失对该县的财政收入有重要的影响，因而这项工作得到了当地政府的高度重视，并将该工程形象的称为给冰川“盖被子”。IPCC（政府间气候变化专业委员会）和 WMO（世界气象组织）在其网站上都做了相关报告，国内新华社、人民日报和中央电视台等进行了大量报道，并连续三天占据百度热搜榜前十名。



图 5.3 给冰川盖被子试验得到了国内外媒体的广泛报道

➤ 格尔木站

2020 年 4 月 1 日,中国科学院西北生态环境资源研究院与蒙古科学院地理与地球生态研究所通过视频会议的形式,对国家自然科学基金委员会与蒙古国科技基金合作研究项目“蒙古多年冻土对气候变化的响应及其生态影响研究”的顺利实施做了充分交流和沟通。会议由中方项目负责人吴通华研究员主持,蒙古科学院地理与地球生态研究所 Battogtokh Dorjgotov 所长、Adiya Saruulzaya 博士、Dashtseren Avirmed 博士和西北研究院李韧研究员、吴晓东研究员,兰州大学牟翠翠教授及相关科研人员参加了此次会议。此次会议有效促进了中蒙双方就蒙古多年冻土研究的深入认识,并就即将开展的工作做了合理部署和调整,确保项目顺利推进。



5.4 中蒙合作项目视频会议现场

2020年6月8日上午，本站与阿拉斯加大学费尔班克斯分校 Franz J. Meyer 教授团队举行了学术交流网络视频会议。阿拉斯加大学费尔班克斯分校 Simon Zwieback 博士和我站部分职工、学生参加了此次会议。期间，吴通华研究员介绍了本站开展的研究工作和已经开展的国际合作情况，Franz J. Meyer 教授介绍了团队的研究方向和开展的工作情况。Simon Zwieback 博士与陈杰博士分别就 InSAR 在多年冻土应用的研究工作进行了汇报交流。最后，双方团队就 InSAR 在北极和青藏高原多年冻土区的应用进行了深入的探讨，并达成了初步的合作意向。Franz J. Meyer 是阿拉斯加大学费尔班克斯分校教授、Alaska Satellite Facility 首席科学家，主要从事雷达遥感技术在地球科学问题中的应用，具体研究内容有：星载雷达成像传感器和数据处理技术，用于全球火山活动、地震、冻土变化和自然灾害等的监测、估计对流层水汽和电离层关键要素的相关参数，还研究开发了一套灾害监测和响应系统。



5.5 视频会议现场

➤ 玉龙雪山站

台站与共建单位丽江玉龙雪山省级旅游开发区管理委员会共建冰川地质博物馆，每年不定期对游客进行较大规模得科普宣传和环境教育，以促进台站在科普、环境教育与科技服务方面的功能。近年，台站还参与了米堆冰川科普馆和达古冰川科普栏的制作、旅游景区管理层面的科普活动，以及冰川旅游方面的宣讲和推介活动。同时，站通过网站宣传、提供实践机会、台站设施开放和科普教育展示等多种方式开展面向大众的科普服务工作。2020 年间，本站接待大学生暑期实践实习和科技夏令营 100 多人次；为景区管理人员、游客及中小学生约 3000 人次提供科普宣传服务。同时，对玉龙雪山社区进行多次科普活动。通过这些科普活动的开展，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。

➤ 贡嘎山站

(1) 打造山地生态环境研究生教学实习基地

2020 年 10 月，中科院成都山地所联合贡嘎山站组织 2020 级博士研究生、2019 级直博生赴贡嘎山海螺沟开展“山地科学概论”课程的野外科考实践活动。实地考察山地生态系统结构与格局、山地环境要素特征、地貌特征、滑坡和泥石流发育特征和防治工程、第四纪冰川地貌和构造特征以及生物和气候垂直地带分布特征等，给研究生普及贡嘎山地形地貌、植被分布情况以及冰川演替历史等方面的知识。成都山地所博士生专业基础课“山地科学概论”作为中国科学院大学数字精品课程之一，始终重视科研理论学习与野外考察实践相结合，促进学科知识的融会贯通，提升实践与创新能力。为配合课堂教学，提高研究生培养质量，成都山地所已连续多年开展了具有山地学科特色的野外科科学考察实践活动，并形成了贡嘎山和螺髻山两条实践考察线路，2020 年荣获得中国科学院大学教育成果奖二等奖，具有一定的社会影响力。



图 5.6 研究生野外科考实践活动

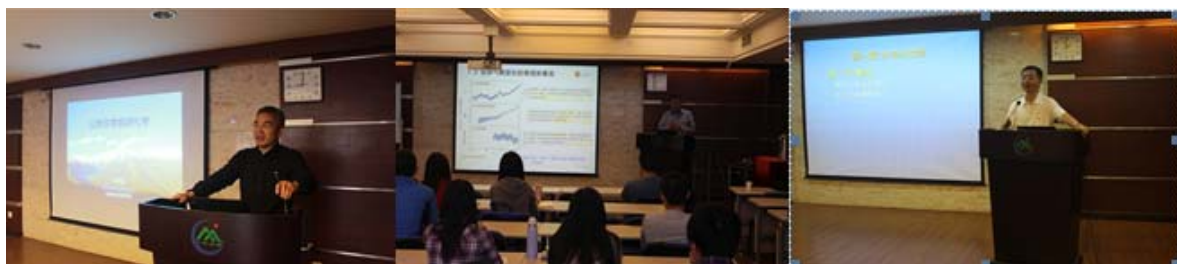


图 5.7 “山地科学概论”精品课程

进一步强化了四川大学、武汉大学、兰州大学等大学中有关水文学与水资源专业和环境学专业本科生与硕士研究生教学实习工作；同时，进一步提升了对北京大学、清华大学、四川农业大学、中山大学、四川大学、等有关植物学、生态学以及全球变化方面本科与研究生教学实习基地等的服务功能。特别是协助北京大学生态学专业设立了亚高山森林生态演替进程的长期观测试验基地。此外，英国诺丁汉大学宁波-马来西亚分校、西南民族大学、西南交通大学、北京中关村中学也同贡嘎山站联合开展了一系列研学活动。



图 5.8 研学活动

（2）积极开展科普工作

加强科学技术普及教育，提高民族科学素质，已成为持续增强国家创新能力和国际竞争力的基础性工程。广泛开展社会科学技术普及活动是推进我国科普工作的重要任务，是大力实施科教兴国战略、全面推进素质教育的重要举措。大力开展科普工作，不但利于普及科技文化知识，提高广大公民的科学素质，而且有利于在全社会营造学科学、爱科学的氛围，调动公民学科学的积极性。

2020 年 11 月 26 日，由贡嘎山站协助甘孜州海螺沟景区管理局申报的“甘孜州海螺沟高山生态科普基地”正式获得四川省科技厅批准，成为四川省第十二批省级科普教育基地。该基地的获批，是贡嘎山站与当地政府紧密合作的又一典型成功案例，有助于加

强当地科普设施建设，提升科普服务能力，推进科普工作的社会化、群众化和经常化，为传播科学思想，弘扬科学精神，倡导科学方法，提升科技素质，推广科学技术知识应用等发挥积极的作用。该科普基地年均科普受众可达 60-100 万人次。

2020 年 11 月 10 日，贡嘎山站张文敬研究员向四川省广元市捐赠的“张文敬科普阅览室”举行首开仪式，该阅览室占地面积近 300 平方米，共展出张文敬先生考察南级、北极、珠穆朗玛峰的工作、生活用品、部分标本、图片，以及所取得的科普成就、原创科普图书、获得荣誉等实物资料 780 余件，很多展品都是他在艰苦条件下探索大自然存留的孤品，供市民免费参观阅览。张文敬科普阅览室是经旺苍县委、县政府批准筹建，旺苍县图书馆建设完成，是当地目前唯一的科普阅览室，旨在努力提高当地人民的科学文化素质，为当地深入实施“科教兴县”战略，培育全社会创新精神发挥重要作用。



图 5.9 “张文敬科普阅览室”举行首开仪式

积极参与“2020 年山地科学优秀大学生线上夏令营活动”，拍摄了台站宣传视频，通过 vlog 展现了野外台站的科研条件、历史贡献、研究内容等，既有美景也有硬核的学术科普内容，还有研究生在台站的科研生活介绍。此次活动由成都山地所研究生部牵头，科普与基地处和野外台站全力配合，圆满完成了各项任务，顺利结束。



图 5.10 贡嘎山站宣传视频

2020 年 11 月，配合湖南卫视《新闻当事人》栏目组拍摄《把论文写在大地上》电视专题，展现贡嘎山站作为国家野外科学观测研究站的发展现状、研究成果和科学家风貌，弘扬和传播科研精神，取得较好的社会反响。



图 5.11 《把论文写在大地上》电视专题

2020 年，贡嘎山站继续为海螺沟景区、达古冰川、亚丁景区等提供职员与导游的科普讲座和培训工作，讲解海螺沟冰川的基础知识、冰川的形成过程、冰川的类型、冰川的总体特征。又从海拔、气候、植物带等方面，对贡嘎山地区的植被分布情况进行了详细讲解。让学员们对冰川和植被知识有了概念性的了解。另外，贡嘎山站张丹研究员、罗辑研究员、刘巧副研究员等多次国内高校和中学的邀请，举办有关青藏高原科考、海螺沟海洋性冰川特征、冰川退缩区植被原生演替动态、土壤修复中大型真菌的运用等方面的科普报告。贡嘎山站 2020 年度接待各类科普、研学和自然教育团体 5 个，先后举办各类科普讲座 10 场，受众 800 余人，极大地激发了广大听众对科学的兴趣，同时也扩大了贡嘎山站的社会影响力。



图 5.12 科普报告

➤ 拉萨站

举办西藏乡村振兴草业科技扶贫培训班

2020 年 11 月 12 日,由西藏自治区人力资源和社会保障厅主办、拉萨站具体承办的乡村振兴草业科技扶贫培训班顺利举办。余成群研究员、沈振西研究员、钟志明高级工程师与孙维高级工程师分别就西藏乡村振兴与脱贫成果巩固路径与政策设计、草业发展战略与技术路径、西藏乡村振兴战略实施背景与模式、草业新型经营主体经营与关联机制等方面对学员进行了知识与技能培训授课。来自西藏自治区各地市(区)乡村干部(乡村振兴专干、精准扶贫专干)、基层科技人员、草业企业管理人员、草牧业合作社管理人员、建档立卡贫困户等共计 94 人参加了此次培训。

此次培训结合国家及西藏自治区乡村振兴国家战略、精准扶贫战略与草业科技发展动向,对学员进行草业科技发展稳定脱贫成果的机制、路径与模式、草业企业经营管理、技术创新与路径选择、牧草品种选择、栽培管理与草产品加工等方面的知识与技能培训。通过知识与技能培训,将进一步提高西藏典型乡村现代草业科技的推广应用,提高草业发展水平,夯实乡村振兴稳定脱贫的功效与作用。



图 5.13 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						
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
2015 年	第一标注	20	71	60	151	2.599	1	72	10	3	237	5
	第二标注	5	17	6	28	3.194	1	18			47	
	其他标注	8	19	8	35	3.591		6			41	
	总计	33	107	74	214	3.128	2	96	10	3	325	5

2. 在研项目统计

基金类别		2020 年(经费单位: 万元, 下同)			2019 年(经费单位: 万元, 下同)			2018 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	72	4657.4	864.5	71	4780.7	851.11	64	4605.7	659
	地区科学	0	0	0				0	0	0
	杰青	5	1850	0	3	1100		4	1550	0
	青年基金	34	853	53.5	31	796	113.64	28	720	102.2
	优秀青年	2	270	0	1	150	78	1	130	0
	重大项目	6	1862.5	484.3	3	914.04	204.46	3	780	247
	重大研究计划	2	435	128	9	1366	399.55	12	1665	80
	重点项目	16	4052	1365.4	8	2444	666.04	8	2447.3	12.4
	其他	11	1534.6	586.7	1	550	105	9	988.3	216
	小计	148	15514.5	3482.4	127	12100.7	2417.8	129	12886.3	1316.6
科技部	973/重点研发计划	45	20553.9	6697	43	9165.25	1683.86	28	6463.4	503.3
	科技支撑计划	6	13056.4	2703.6	1	45	16			
	重大科学研究计划	5	5258	1123.6				5	1299.6	230.1
	国家基础性工作专项	2	69	16	2	63		3	219	36
	其他	10	8769	702	11	8898	1503	6	1287.7	585.2
	小计	68	47706.3	11242.2	57	18171.3	3202.86	42	9269.7	1354.6
中科院	百人计划	1	200	200	4	1400	440	2	470	40
	西部系列	6	495	85	1	50	20	1	20	20
	创新系列							1	80	20
	重点部署项目	5	1240	240	9	4155	926	6	1400	130
	STS 计划				3	1288		2	1048	28.8
	先导专项	37	24799	2566.4	37	18406.6	2892.39	17	9017.6	1873.3
	其他	35	8648.9	1208.2	44	10656.8	2159.37	15	2739	731.2
	小计	84	35382.9	4299.6	98	35956.3	6437.76	44	14774.6	2843.3
其他	博士后科学基金	4	26	16	1	5		2	28	0
	国际合作	1	4192		6	828	164.18	10	3098.1	520.5
	各级实验室开放基金	4	71.2	71.2				1	10	0
	所级	1	10	10	2	195	50	7	545	77
	地方	49	9022.6	3873.4	61	9825.83	2426.45	36	5696.8	2222.1
	其他	27	2113	674.4	10	813.55	109	8	1242.5	583.3
	小计	86	15434.8	4645	80	11667.4	2749.63	64	10620.4	3402.9
总计		386	114038.5	23669.2	362	77895.7	14808.1	279	47551	8917.4

六、年度数据统计

基金类别		2017 年			2016 年			2015 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	56	4449.28	710.42	38	3277	701.9	71	5269	1150.1
	地区科学	2	89	44.5	2	100	25	6	236	49.49
	杰青	2	800					3	800	90
	青年基金	15	398.25	60.25	17	829	92	52	1228	371.8
	优秀青年	1	130					2	200	50
	重大项目	8	1537	307	1		14	4	420	116
	重大研究计划	5	695.8	20	6	847.3	154	3	830	165
	重点项目	5	1406.28	150	8	4629.5	880.8	6	1387	281.5
	其他	7	690	238.4	8	980.2	30	1	25	25
	小计	101	10195.6	1530.57	80	10663	1897.7	148	10395	2298.89
科技部	973/重点研发计划	4	1231.5	211.5	8	1466.5	290	15	5366	1154
	科技支撑计划	3	657		5	884	30	21	4390.5	345
	重大科学研究计划	6	1904	36	3	1514	448	0	0	0
	国家基础性工作专项	1	33		3	1415	23.6	5	1656	265
	其他	23	9160.6	1412.32	6	1555.91	186	6	454	442
	小计	37	12986.1	1659.82	25	6835.41	977.6	47	11866.5	2206
中科院	百人计划	2	330	60	3	600	40	3	470	110
	西部系列	10	145	52	5	100	40	12	725	158
	创新系列	1	80	20	2	180	50	3	740	100
	重点部署项目	9	1735	320	7	925	175	5	945	235
	STS 计划	2	310	60	2	180	50	6	1760	530
	先导专项	5	5		14	465.5	142.84	27	4051.66	523.37
	其他	13	3002	1124.8	11	1952.5	703	14	466	378.65
	小计	42	5607	1636.8	44	4403	1200.84	70	9157.66	2035.02
其他	博士后科学基金	2	30	10	4	33	31	7	58	16
	国际合作	6	2499.3	490.5	2	186	50.4	15	838.32	484.57
	各级实验室开放基金							7	237.5	127.5
	所级	8	476	62	12	754.6	281.6	15	1188.4	356.63
	地方	29	4645.7	1075.6	21	4077.7	1547.9	30	1700.4	600.8
	其他	8	1711.39	400.95	5	1217.24	166.8	25	1342	658.9
	小计	53	9362.39	2039.05	44	6268.54	2077.7	99	5364.62	2244.4
总计		233	38151.1	6866.24	193	28170	6153.84	364	36783.8	8784.31

3. 新增项目统计

基金类别		2020 年		2019 年		2018 年		2017 年		2016 年		2015 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	26	1402.8	25	1583.8	24	1483	20	1370	18	1153.5	24	1921.02
	地区科学							2	56	1	39	1	50
	杰青	2	800	1	400			3	1150			1	350
	青年基金	17	361	4	105	11	287	17	446	9	224	9	211.5
	优秀青年			2	240	1	150					1	130
	重大项目			1	368.5	1	184	2	490	1	230	0	0
	重大研究计划			1	307	1	320	1	300	2	150	6	1242.3
	重点项目	3	319	2	604	4	1240	1	330	14	8429	1	348.28
	其他	11	2089.6			5	1300	5	244	3	279	0	0
	小计	59	4972.4	36	3608.3	47	4964	51	4386	48	10504.5	43	4253.1
科技部	973/重点研发计划	4	9522	4	1976	3	483.8	6	1076.1			1	448
	科技支撑计划	2	798.6									0	0
	重大科学研究计划					1	543	1	70			0	0
	国家基础性工作专项	1	271	1	283	2	56	1	30			0	0
	其他	1	1800	7	13535.6	5	280	4	235			0	0
	小计	8	12391.6	12	15794.6	11	1362.8	12	1411.1	0	0	1	448
中科院	百人计划											2	210
	西部系列	2	400			3	145			1	10	2	35
	创新系列					1	80			1	80	0	0
	重点部署项目							1	300	3	2565	0	0
	STS 计划	1	200	2	375	3	144	2	1140			2	60
	先导专项	1	8	4	920.4	19	12913.5	1	566			0	0
	其他	14	1147	11	5895	20	2892.2	5	702.15	5	230	2	55
	小计	18	1755	17	7190.4	46	16174.7	9	2708.15	10	2885	8	360
其他	博士后科学基金	1	8	2	16	1	8			2	30	3	20
	国际合作	2	499			2	275	3	102			2	135
	各级实验室开放基金	7	81.2									3	37.5
	所级			2	41	1	10	4	165	5	290	3	390
	地方	47	3314.3	26	6223.56	18	3669.6	6	2402	11	3701	8	139
	其他	7	481.5	19	1420.05	4	710.5	9	1723			11	2594.64
	小计	64	4384	49	7700.61	26	4673.1	22	4392	18	4021	30	3316.14
总计		149	23503	114	34293.9	130	27174.6	94	12897.3	76	17410.5	82	8377.24

4. 结题项目统计

基金类别		2020 年			2019 年			2018 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	13	702	10	28	2037.7	53.4	18	1634	97.5
	地区科学									
	杰青				1	400				
	青年基金	7	171	8	14	347	23	12	677	
	优秀青年				1	200				
	重大项目				1	50		1	340	
	重大研究计划	3	164		4	215		5	462.6	50
	重点项目	5	1421		2	680	101.16	3	640	84
	其他	7	287	25.5				2	140	
	小计	35	2745	43.5	51	3929.7	177.56	41	3893.6	231.5
科技部	973/重点研发计划	6	1156.5	33	2	1031		2	713.5	
	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					3	288.4	28.4
	小计	9	1261.5	33	2	1031	0	5	1001.9	28.4
中科院	百人计划				2	570		3	450	
	西部系列				2	30	10	4	65	35
	创新系列							1	100	50
	重点部署项目	4	840	65						
	STS 计划				1	200	64	1	100	
	先导专项	2	150		5	729	6	3	6.33	6.33
	其他	15	3080.7	487	8	535.16	9.9	6	1030	185
	小计	21	4070.7	552	18	2064.16	89.9	18	1751.33	265
其他	博士后科学基金							1	2.5	
	国际合作							1	45	45
	各级实验室开放基金							4	86	31
	所级	1	135	30	2	21	15	1	10	
	地方	17	2180	494	13	2536	50	12	3094	116.7
	其他	8	391.2	140.3	4	581.5	168.5	6	1809	795.2
	小计	26	2706.2	664.3	19	3138.5	233.5	25	5046.5	987.9
总计		91	10783.4	1292.8	90	10163.4	500.96	89	11693.3	1512.8

基金类别		2017 年			2016 年			2015 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	12	940	130	10	489	145.2	21	1232	145.25
	地区科学				1	50		1	58	10
	杰青									
	青年基金	10	202	71.4	10	182	11.9	12	343	79.3
	优秀青年							1	100	50
	重大项目				2	390	40			
	重大研究计划	2	200	30						
	重点项目	2	155		1	350	105			
	其他	2	320	20				6	136	42.6
	小计	28	1817	251.4	24	1461	302.1	41	1869	327.15
科技部	973/重点研发计划	6	1950	335	1	95	0	1	83	
	科技支撑计划	4	792	20	2	66	34	7	2507.5	140
	重大科学研究计划	2	854	20						
	国家基础性工作专项	1	1355							
	其他	1	456					2	220	
	小计	14	5407	375	3	161	34	10	2810.5	140
中科院	百人计划	1	150	50						
	西部系列	2	30	5	2	60	10	6	600	190
	创新系列							5	800	70
	重点部署项目	3	385		1		65	1	80	30
	STS 计划	1	540	180	1	145	45			
	先导专项	9	1243.4	11	3	211.15	25	7	1788.2	94
	其他	2	130	30	8	489	139.49	6	426.5	233.75
	小计	18	2478.4	276	15	905.15	284.49	25	3694.7	617.75
其他	博士后科学基金	5	8	5	5	28	15	3	28	8
	国际合作	2	320	15				9	161.4	20
	各级实验室开放基金							4	77.5	32.5
	所级				8	281.5	65			
	地方	13	1672	101	11	233	65.4	19	325.2	
	其他	10	338	70	2	21	0	3	424.4	56.38
	小计	30	2338	191	26	563.5	145.4	38	1016.5	116.88
总计		90	12040.4	1093.4	68	3090.65	765.99	114	9390.7	1201.78

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
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
2014 年	硕士	42	88	37	167
	博士	21	85	36	142
	总数	63	173	73	309

七、大事记

8 月	- 8 月 3 日，纳木站湖泊与环境变化团队首次在青藏高原纳木错中心湖区近百米水下成功获取 144.79 米岩芯，钻探深度达 153.44 米，有望重建近 15 万年连续气候环境记录。
9 月	- 9 月 4 日，三江源站人员在青海东部祁连山最东端首次拍到雪豹，被新华社、科技日报、自媒体、潇湘晨报等媒体相继报道。 - 9 月 15 日，由科技部引智司牵头的“2020 年科普援藏活动”工作组到纳木错站调研科普工作。 - 9 月 26 日，藏东南站承办首届“中国生态学会高寒生态专业委员会年度会议暨第三届西藏高原生态安全论坛”。
10 月	- 中科院成都山地所联合贡嘎山站组织 2020 级博士研究生、2019 级直博生赴贡嘎山海螺沟开展“山地科学概论”课程的野外科考实践活动。
11 月	- 11 月 10 日，贡嘎山站张文敬研究员向四川省广元市捐赠的“张文敬科普阅览室”举行首开仪式。 - 11 月 12 日，由西藏自治区人力资源和社会保障厅主办、拉萨站具体承办的乡村振兴草业科技扶贫培训班顺利举办。 - 11 月 13 日，藏东南站协办“京沪地球联盟 2020 学术研讨会”邀请贾承造等 3 位院士及 60 多名专家参会，并到站参观交流。 - 11 月 26 日，由贡嘎山站协助甘孜州海螺沟景区管理局申报的“甘孜州海螺沟高山生态科普基地”正式获得四川省科技厅批准，成为四川省第十二批省级科普教育基地。
12 月	- 12 月 3 日，天山冰川站作为协办单位参与由北京冬奥组委、人民日报社指导，人民日报社人民论坛杂志社、人民日报社《国家治理》周刊主办，北京北奥集团承办的第七届国家治理高峰论坛“新发展格局与北京冬奥”峰会。 - 12 月底，央视新闻频道、中国新闻网、新华网、青海日报等媒体相继报道了三江源国家公园首次利用直升机完成冬季综合科学考察。

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（筹）
	张宪洲	中科院地理科学与资源研究所
	赵 林	中科院西北生态环境资源研究院（筹）
	周凌晞	中国气象科学研究院
	康世昌	中科院青藏高原研究所
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
项目主管：彭 萍，010-84249107，pengping@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（筹）	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@igsnr.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@igsnr.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（筹）	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（筹）	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（筹）	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（筹）	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（筹）	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