科学通报 2021 年 第 66 卷 第 22 期: 2775 ~ 2784
观 点
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

拉萨河流域典型区域保护、修复、治理技术示范体系

安宝晟[1*], 姚檀栋[1,2*], 郭燕红[1], 王伟财[1,2], 李久乐[1], 李新[2,3], 王忠彦[1]

1. 中国科学院青藏高原研究所, 中国科学院青藏高原环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101;
3. 中国科学院青藏高原研究所, 国家青藏高原科学数据中心, 北京 100101
* 联系人, E-mail: anbaosheng@itpcas.ac.cn; tdyao@itpcas.ac.cn

青藏高原是世界屋脊、亚洲水塔, 是地球第三极, 是我国重要的生态安全屏障[1], 是地球上最独特的地质-地理-生态单元, 是开展地球与生命演化、圈层相互作用及人地关系研究的天然实验室[2]. 近50年, 青藏高原自然与社会环境发生了剧烈变化, 气候变暖幅度约是同期全球平均值的2倍[3], 是全球变暖背景下环境变化不确定性最大的地区; 青藏高原生态环境和水循环格局的重大变化, 如冰川退缩[4]、冻土退化[5]、冰湖溃决[6]、冰崩[7]、草地退化[8]、泥石流频发[9]等对人类生存环境和经济社会发展造成了重大影响[10].

为了查清青藏高原环境变化与影响, 制定科学应对方案, 2017年8月19日, 第二次青藏高原综合科学考察研究正式启动, 至今已在亚洲水塔变化与影响及应对[11~13]、生态系统与生态安全屏障[14~16]、人类高原适应与可持续发展[17~19]、高原生长与演化[20,21]等方面取得系列有影响的世界科技前沿成果. 2020年8月28~29日, 中央第七次西藏工作座谈会议提出要将青藏高原打造成为全国乃至国际生态文明高地, 要揭示青藏高原环境变化机理, 准确把握全球气候变化和人类活动对青藏高原的影响, 在应用基础研究上提出保护、修复、治理的系统方案和工程举措. 由此可见, 只有深入开展科学研究并提出解决方案, 才能有效增强青藏高原可持续性发展的能力. 这也是2014年国际科学理事会(ICSU)和国际社会科学理事会(ISSC)发起“未来地球(Future Earth)”科学计划的目标, 即通过动态地球、全球发展、向可持续发展的转变3个方向的研究, 进一步深化对地球系统的科学认识和提升服务人类社会发展的能力[22].

青藏高原是地球上唯一完整发育岩石圈、生物圈、水圈、冰冻圈、大气圈和人类圈六大圈层的地区(图1). 通过学科交叉, 研究青藏高原这一特殊的多圈层相互作用, 开展青藏高原生态环境保护、修复、治理研究, 探索其技术体系、实践经验和示范模式, 既是科技前沿研究的需求, 也是青藏高原生态文明建设和绿色可持续发展的重大需求. 一直以来, 中央和地方政府高度重视青藏高原生态文明建设, 积极开展了多项山水林田湖草保护修复试点工程[23], 包括土地沙化治理[24,25]、水土流失治理[26]、矿山综合治理[27]、生态修复[28~30]等工程. 但由于青藏高原具有独特的自然地域格局、脆弱的生态环境本底、重要的生态安全地位, 其保护、修复、治理更需要完整性、系统性和可持续性[23]. 同时, 由于青藏高原地球系统多圈层链式响应过程的复杂性, 系统的保护修复治理技术和工程亟需科学支撑. 因此, 系统开展青藏高原保护、修复、治理研究, 梳理出一套操作性强、科学合理的技术体系, 探索多层次、多要素、多维度、多尺度的示范模式, 对青藏高原生态文明建设具有重要科学意义.

拉萨河流域地处藏中南核心区, 是西藏基础设施最为完备、产业发展基础最好、生产要素最集中、资源环境承载最大、未来发展潜力最强的区域[23,31]. 拉萨河流域不仅包括大气圈、冰冻圈、水圈、生物圈、岩石圈等五大圈层的自然要素, 更涵盖了西藏人口最密集、人类活动扰动最大区域



安宝晟 中国科学院青藏高原研究所研究员级高级工程师, 第二次青藏高原综合科学考察研究队办公室主任, 中国青藏高原研究会常务理事. 主要从事青藏科考服务发展研究, 负责拉萨地球系统多维网科考平台建设. 开展了西藏生态承载力和生态足迹变化、青藏铁路开通后对西藏生态承载力影响等研究.



姚檀栋 中国科学院院士, 第二次青藏高原综合科学考察研究队队长, 中国科学院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”首席科学家. 中国青藏高原研究会理事长、“第三极环境(TPE)”国际计划主席、美国地球物理联合会(AGU)会士. 长期从事冰川与环境变化和地球系统科学研究.

© 2021《中国科学》杂志社



图 1 青藏高原圈层作用的地球系统过程
Figure 1 Earth system process of the Tibetan Plateau multisphere interaction

的人类圈层要素. 因此, 在拉萨河流域开展地球系统科学多圈层相互作用基础科学研究和面向保护、修复、治理举措的应用基础研究十分必要. 茶巴朗小流域位于拉萨河流域下游, 是受自然过程和人类活动叠加影响的典型区域, 流域内水土流失类型多、面积广, 土地沙化现象严重, 人类活动影响下的重大工程扰动对流域内生态环境产生了重要影响. 因此, 在茶巴朗小流域开展保护、修复、治理技术示范体系研究, 可为适应自然过程和人类活动叠加影响下的生态环境保护提供科学示范. 本研究选择茶巴朗小流域为具体研究对象, 提炼地球系统多圈层保护、修复、治理的监测研究技术实施体系, 评估前期水土保持综合治理示范区建设对流域生态环境治理的成效, 提出流域生态环境保护和修复治理的建议, 填补青藏高原地球系统多维度观测研究理念的空白, 为青藏高原系统开展保护、修复、治理提供科学依据和技术示范.

1 拉萨河流域地球系统多维观测研究

1.1 拉萨河流域概况

拉萨河发源于念青唐古拉山中段南麓, 沿途流经墨竹工卡、拉萨, 最终于曲水县城东面河口汇入雅鲁藏布江(图2). 拉萨河全长568 km, 是雅鲁藏布江5大支流之一, 年均径流量约110×10^8 m^3. 拉萨河流域面积约32871 km^2, 流域平均海拔超过4500 m, 平均坡降2.9‰[32]. 拉萨河流域属于高原温带半干旱气候. 近几十年来, 流域气候变化显著, 1980~2019年拉萨、当雄、墨竹工卡三站气温显著上升, 升温率分别为0.6、

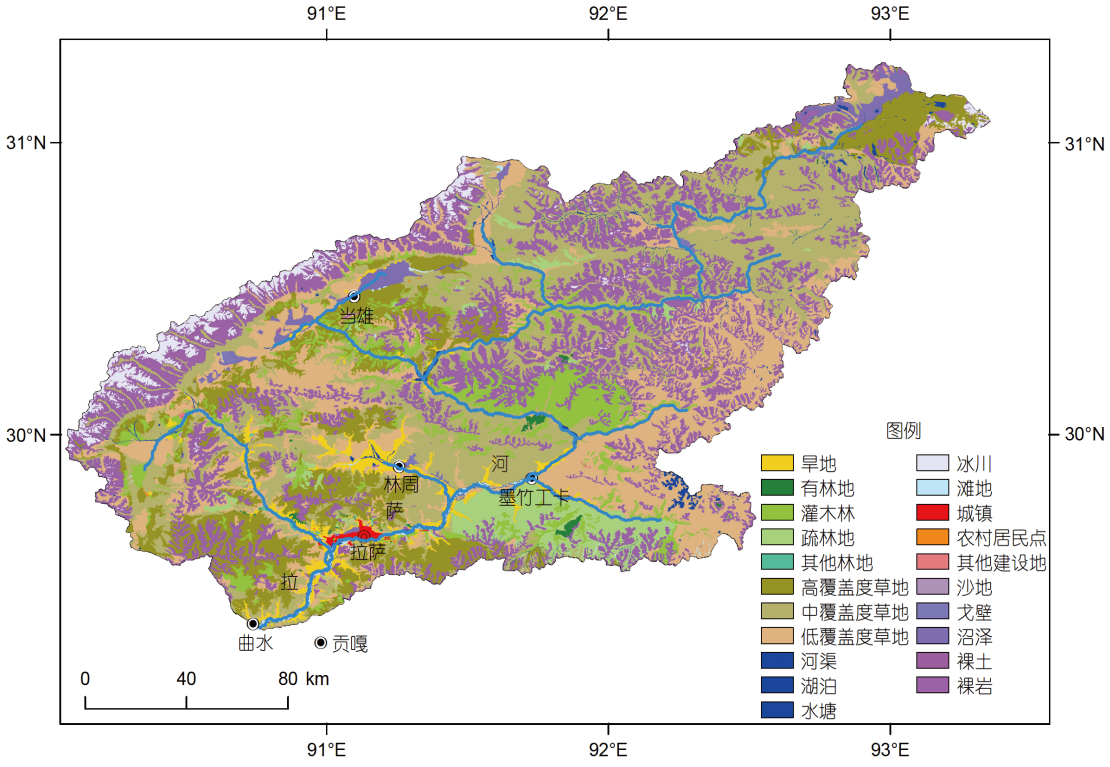


图 2 拉萨河流域及土地利用图(2015年)
Figure 2 Map of the Lhasa River Basin and land use types (2015)

0.5、0.5°C/10 a; 1980~2019年拉萨、当雄、墨竹工卡三站降水量变化呈增加趋势, 增长率分别为3.2、1.0、2.4 mm/a, 其中, 拉萨站降水增加趋势显著. 流域内土地利用(2015年, 30 m分辨率, 数据来源于"中国科学院资源环境科学与数据中心", http://www.resdc.cn/Default.aspx)类型以草地为主, 占流域总面积的56.7%, 其次是未利用土地和林地, 分别占25.8%和10.7%(图2). 流域内2005和2015年两期土地利用对比发现, 耕地、林地和草地面积分别减少了4.09%、0.17%和0.07%, 而由于人类活动的加剧, 流域内城镇、农村和建设用地面积增加了40.8%.

1.2 拉萨地球系统多维网

拉萨地球系统多维网是第二次青藏高原综合科学考察研究队正在拉萨河流域建立的圈层作用多维度、技术应用多维度、研究时空多维度和研究内容多维度的观测研究体系. 其中, 圈层作用多维度是指考察研究内容涉及大气圈、水圈、冰冻圈、生物圈、人类圈和岩石圈等六大圈层. 技术应用多维度是指科考过程中将充分利用卫星、系留浮空器、直升机、无人机、地面与水下机器人、地面观测塔与大数据存储和分析技术开展空-天-地立体化观测、数据实时分析与可视化展示. 研究时空多维度是指在区域不同地点开展万年、千年、百年、现代与未来尺度研究. 研究内容多维度是指开展基础研究、应用研究、示范研究, 并形成科学考察研究的示范性工程举措.

拉萨地球系统多维网将基于拉萨河流域生态环境特点, 开展保护、修复、治理的科学功能分区研究与工程示范(图3). 针对不同环境功能区, 因地施策开展相应的科学观测, 提出相应的保护、修复或治理科学方案, 并选取典型区域, 实施不同人类生存环境区域的保护、修复或治理工程举措. 具体包括: (1) 在流域上游的廓琼岗日冰川、纳木错和麦地卡湿地等区域, 以冰川、湖泊和湿地保护为主题, 开展冰冻圈、大气圈、水圈、生物圈等自然过程主导区的科学观测研究与保护示范; (2) 在流域中下游的当雄地区、羊八井-大竹卡沿线、茶巴朗小流域等区域, 以生态修复和土地沙化、水土流失治理为主题, 开展水圈、岩石圈、人类圈等自然过程和人类活动叠加区的科学观测研究与保护修复治理示范; (3) 在流域下游的拉萨市区、柳梧新区、拉萨河谷及沿线等区域, 以大气污染、水污染和河谷沙化治理为主题, 开展水圈、生物圈、人类圈等人类活动影响区的科学观测研究与修复治理示范.

2 茶巴朗小流域保护、修复、治理示范体系

2.1 茶巴朗小流域概况

茶巴朗小流域位于念青唐古拉山脉南坡的曲水县境内(图4(a)), 流域面积为78.6 km^2, 总体地势为西北高东南低, 海拔3590~5380 m. 流域内主要河流为普夏拉曲, 主干道长16.16 km, 沿普夏拉曲两岸发育有Ⅰ~Ⅲ级阶地, 阶地下宽上

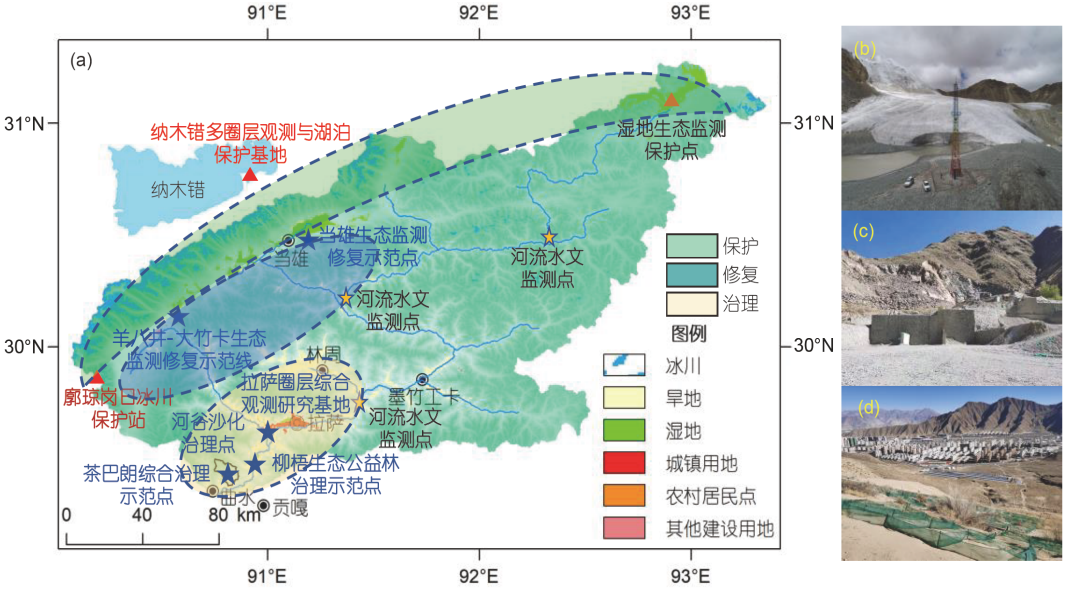


图 3 拉萨地球系统多维网. (a) 拉萨地球系统多维网建设内容; (b) 廓琼岗日冰川保护区; (c) 茶巴朗自然过程和人类活动叠加区; (d) 柳梧人类活动影响区

Figure 3 Lhasa earth system multidimensional network. (a) Construction contents of Lhasa earth system multidimensional network; (b) Kuoqionggangri glacier conservation area; (c) Chabalang natural process and human activity superposition area; (d) Liuwu human activity influence area

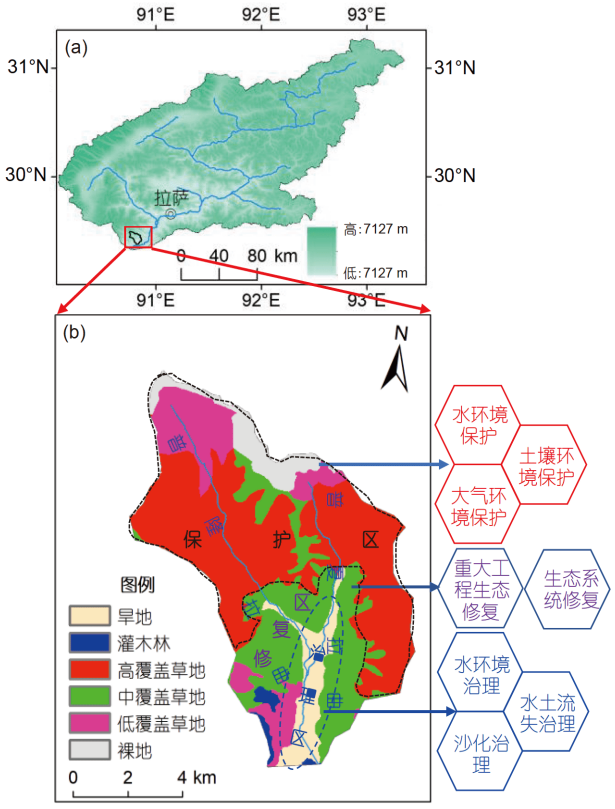


图 4 拉萨河流域典型区域茶巴朗小流域保护、修复、治理示范体系. (a) 茶巴朗小流域位置; (b) 茶巴朗小流域保护、修复、治理示范体系

Figure 4 Demonstration system for protection, restoration, and governance of the Chabalang small watershed, a typical region in the Lhasa River Basin. (a) Location of the Chabalang small watershed; (b) demonstration system for protection, restoration, and governance of the Chabalang small watershed

窄, 最宽处约1.5 km, 阶地两侧为高山, 冲沟发育[33]. 茶巴朗小流域邻近的贡嘎站1980~2019年气象观测资料显示, 多年平均气温8.8°C, 多年平均降水量403.4 mm, 5~9月降水量占全年降水量的95.1%, 多年平均风速为1.8 m/s, 多年平均相对湿度为46%. 流域内植被主要为自然植被, 以高寒草甸为主. 流域内土地利用类型以草地和未利用土地为主, 分别占流域面积的68.17%和27.83%[33]. 流域内水土流失现象严重, 水力侵蚀是流域水土流失的主要形式, 主要分布在普夏拉曲两岸沟谷侵蚀地带和山坡, 面积达71.1 km^2, 重度、中度和轻度侵蚀面积分别占流域面积的15.8%、28.4%和19.8%[33,34].

2.2 小流域保护、修复、治理示范体系

针对茶巴朗小流域生态环境现状, 在流域上游植被覆盖较好的水源涵养区以保护为主, 开展大气环境、水环境和土壤环境监测和保护; 在流域中下游中低植被覆盖区和重大工程扰动区以生态修复为主, 通过人工播种、移栽、新种等手段开展生态修复; 在流域中下游人类活动密集, 水污染、土地沙化和水土流失严重的普夏拉曲河谷区以治理为主, 开展水环境、土地沙化和水土流失的治理(图4(b)).

2.2.1 保护

(ⅰ) 大气环境保护. 按照国家相关标准, 在茶巴朗小流域建立大气环境监测站, 在线实时自动监测大气PM_{10}颗粒物、$PM_{2.5}$颗粒物、一氧化碳(CO)、臭氧(O_3)、氮氧化物(NO-N_2O-NO_2)、二氧化硫(SO_2)等6类大气环境指标, 监测评估流域大气环境质量现状, 解析大气环境污染物排放源, 研究提出流域大气环境保护和大气污染防治科学方案.

(ⅱ) 水环境保护. 按照国家相关标准, 在茶巴朗小流域普夏拉曲建立水文和水环境监测断面, 在线实时自动监测水位和水温、pH、溶解氧、电导率、浊度、高锰酸盐指数、氨氮、总磷、总氮等9类水环境质量指标. 分析流域水环境特征, 评价流域水质类别, 解析流域普夏拉曲水污染物来源, 研究提出流域水环境保护和水污染治理科学方案.

(ⅲ) 土壤环境保护. 按照国家相关标准, 在茶巴朗小流域典型下垫面(耕地、林地、草地、沙地、裸土地、居民点用地等)布设土壤样品采样网络, 定期(每年1次)采集土壤样品, 实验室分析流域典型下垫面土壤pH、阳离子交换量、镉、铬、汞、砷、铅、铜、锌、镍、六六六、滴滴涕等指标含量, 评价流域土壤环境质量, 解析流域典型下垫面土壤污染物来源, 研究提出流域土壤污染物治理科学方案, 为流域土壤环境保护提供科学支撑.

2.2.2 修复

(ⅰ) 工程扰动修复. 茶巴朗小流域内拉日铁路等工程建设导致流域原有地貌和水文特点被改变, 原有植被和土壤基质完全或局部被破坏, 植被与生物多样性完全或局部丧失, 丧失或基本丧失自我恢复能力, 导致坡地稳定性下降, 植被和景观整体性破坏, 水土流失加剧, 可能产生水力、风力及冻融侵蚀, 乃至局部的滑坡等重力侵蚀等. 通过实地调研, 利用无人机航拍技术, 结合高分影像资料, 划分工程建设造成的扰动区类型(岩质边坡、土质边坡或土石混合边坡、弃土弃渣堆垫面、施工硬化地表、一般施工占压扰动面等), 全面开展流域植物物种调查, 根据扰动类型和区域环境特点, 针对不同扰动破坏区, 制定相应的植被恢复技术和物种选择.

(ⅱ) 生态系统退化修复. 通过实地植被样方调查, 利用无人机航拍技术, 结合高分影像资料, 摸清流域生态系统格局, 系统、准确评估流域内植被退化及破坏的现状, 根据实际情况, 制定合理的规划与修复方案. 通过人工播种、移栽、新种等手段开展流域生态系统修复, 在生态系统稳定性提高之后, 引导生态系统向自我修复的方向发展, 形成工程治理和自然过程修复相结合的生态修复新理念.

2.2.3 治理

(ⅰ) 沙化治理. 通过实地调研, 利用无人机航拍技术, 结合高分影像资料, 明确流域内土地沙化范围和沙化程度. 在

流域内流动沙丘和平缓沙坡地带，设置1 m×1 m的草方格开展机械沙障治沙，草方格可以削弱近地表层的风速，减少气流中的输沙量，延缓或阻止沙丘前移，保水蓄水，促进各类植被生长. 同时，在草方格内引植生命力顽强、耐干旱、耐瘠薄、生长快的沙棘. 沙棘根系发达、枝叶繁茂，防风固沙力强，沙棘林可降低风速，阻挡风沙流入侵[35]. 利用引水滴灌技术，提高沙棘成活率，通过机械沙障人工治沙和引植沙棘自然治沙相结合的方法，提高流域内治沙效率.

(ⅱ) 水土流失治理. 通过实地调研，利用无人机航拍技术，结合高分影像资料，明确流域内水土流失类型和程度. 选择流域典型水土流失区，建立坡面径流场，同时开展降水、蒸散发、土壤温湿度、坡面产流量和产沙量观测，利用坡面水量平衡，研究坡面水分传输、存储和产流过程，分析降水、植被覆盖、蒸散发、坡度等要素对产流和产沙过程影响，明确流域坡面产流和产沙特征，率定坡面产流和产沙的主控因子，阐明流域水土流失机制. 根据流域不同类型水土流失特点采取不同治理措施，形成封禁治理、林草植被恢复、坡改梯、改土培肥等系统的水土流失治理措施.

(ⅲ) 水环境治理. 定期定点开展流域内不同水体(河水、地下水等)样品采集，通过实验室分析，评估流域水环境污染现状，解析水体污染物来源，根据水环境污染特点，制定系统的流域水环境治理方案，开展河道疏浚、垃圾清理、污染源管控等治理举措. 同时，利用水生生态修复等新兴治理技术，通过培养复合微生物、栽培水生植物等措施净化水体中的污染物，提升水环境的自我修复能力.

3 茶巴朗小流域现有体系保护、修复、治理成效和存在问题

3.1 现有体系保护、修复、治理成效

茶巴朗小流域由于土地沙化、水土流失的典型性和代表性，针对其治理问题前期已开展了很多研究工作，取得了重要的进展. 张敏和李宝平[36]利用半隐蔽式沙障治沙方法在茶巴朗小流域开展了3年(1997、2000、2001年)的治沙试验，发现草方格治沙方法可有效地改变近地表层的风吹沙流结构，控制沙地风蚀基准面，减少沙丘或沙坡的移沙量，辅以播撒适当的治沙草种和树种，对控制沙丘、改变气候有很好的生态效果，治沙效果比较显著. 草方格麦草腐烂后，下雨天吸足水、保水蓄水，遇到5~8 d的干旱，能有效保证植被需水量，对于草方格内培育植被有很好的作用. 迷玛次仁等人[34]针对茶巴朗小流域水土流失特点，提出了开展生态移民、控制牲畜规模、调整土地利用结构、实施退耕还林还草、科学布局小水电站开发项目、构建以电代柴生态补偿机制、加强土壤侵蚀动态监测研究、完善工程项目水土保持管理的防治对策.

为进一步探索西藏水土流失治理经验和模式，西藏自治区水土保持局选择在茶巴朗小流域建立了西藏首个水土保持综合治理示范区，示范区于2010年开工建设，2012年竣工，2014年2月被批准为国家水土保持科技示范园区[37]. 示范区主要分为综合治理工程区、生物措施区、科研示范区及相关附属工程等四大功能区. 示范区建成后，基本解决了流域农业灌溉问题，改善了流域内生态环境，为西藏水土保持治理和生态环境保护建设提供了经验. 郭凯歌[37]通过流域内土壤样品采集和植被调查，评价了茶巴朗小流域水土保持生态效应，发现水土保持措施条件下土壤含水量、土壤有机质等指标明显提高，植被多样性和植被覆盖情况明显改善.

为进一步评估茶巴朗综合治理示范区的治理成效，本研究利用青藏高原生态资产评估遥感反演植被覆盖度数据[38,39](2000~2017年，空间分辨率为250 m，数据来源于“国家青藏高原科学数据中心”，http://data.tpdc.ac.cn)和中国土壤侵蚀预报模型计算获取的青藏高原土壤侵蚀强度数据集[40](2005和2015年两期，空间分辨率为300 m，数据来源于“国家青藏高原科学数据中心”，http://data.tpdc.ac.cn)分析了茶巴朗小流域内植被覆盖度和土壤侵蚀强度的变化，进而评估茶巴朗综合治理示范区建设带来的成效.

3.1.1 流域植被覆盖度变化

由图5(a)可知，整体而言，2000~2017年茶巴朗小流域植被覆盖度呈微弱的下降趋势，速率为0.15%/a；由图5(b)可知，2000~2017年茶巴朗小流域邻近的贡嘎站气温呈微弱上升趋势，而降水呈微弱下降趋势，速率为6.5 mm/a. 同时，由图5可见，流域植被覆盖度变化与降水量变化相关性较好，2000~2004年，由于降水偏多(年均524.3 mm)，流域植被覆盖度较好(年均69.7%)；2005~2009年，由于降水量偏少(年均359.0 mm)，流域植被覆盖度较差(年均64.0%)；需要强调的是，2010~2012年降水量偏少(年均350.1 mm)，且降水量逐年减少，然而流域内植被覆盖度却明显好转，由2010年的60.0%上升到2012年的71.8%. 这是因为2010~2012年茶巴朗综合示范区建设期间，通过开展坡改梯、人工种植和引水灌溉等一系列工程治理举措带来的显著成效. 茶巴朗综合示范区建成后，由于缺乏有效的管理和高效的运营，人工治理措施停止，2013年开始流域植被覆盖变化又与降水量变化一致，此间流域植被覆盖度以每年0.73%的速率下降.

3.1.2 流域土壤侵蚀强度变化

表1给出了2005和2015年茶巴朗小流域内土壤侵蚀强度面积变化，其变化反映了茶巴朗综合示范区建设的成效. 由表1可见，茶巴朗小流域微度土壤侵蚀面积由2005年的69.2%增加到2015年的72.0%，增加面积约2.2 km^2；流域轻度土壤侵蚀面积由2005年的22.4%减少到2015年的15.6%，减少面积约1.9 km^2；流域中度土壤侵蚀面积基本保持不变，维持在6.3%左右；流域重度土壤侵蚀面积略有减少，由2005年的2.1%减少到2015年的1.4%，减少面积约0.5 km^2. 整体而言，重度和轻度土壤侵蚀面积略有减少，中度土壤侵蚀面积保持不变，微

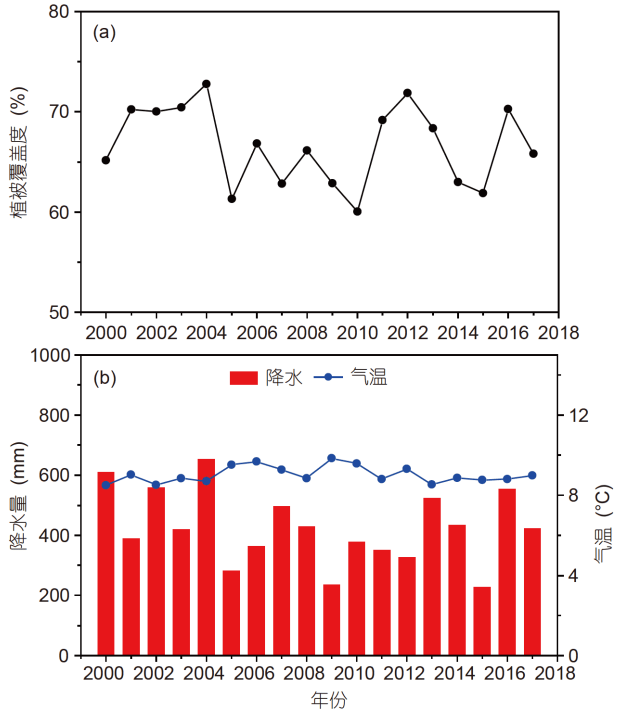


图 5 2000~2017年茶巴朗小流域植被覆盖度及周边气象要素变化. (a) 流域植被覆盖度变化; (b) 流域周边贡嘎站气温和降水变化

Figure 5 Changes in vegetation coverage and surrounding meteorological factors in the Chabalang watershed from 2000 to 2017. (a) Changes in vegetation coverage in the watershed; (b) changes in temperature and precipitation at the Gongga meteorological station near the Chabalang small watershed

表 1 茶巴朗小流域土壤侵蚀强度面积变化

Table 1 Area changes in soil erosion intensity in the Chabalang small watershed

土壤侵蚀强度[a)]	2005年		2015年		变化面积 (km^2)
	比例(%)	面积(km^2)	比例(%)	面积(km^2)	
微度侵蚀	69.2	54.4	72.0	56.6	2.2
轻度侵蚀	22.4	17.6	20.0	15.7	−1.9
中度侵蚀	6.3	5.0	6.6	5.2	0.2
重度侵蚀	2.1	1.6	1.4	1.1	−0.5

a) 土壤侵蚀强度分级标准按照中华人民共和国水利部发布的《土壤侵蚀分类分级标准SL190-96》

度土壤侵蚀面积略有增加.

3.2 存在问题

(1) 流域监测体系有待完善. 流域内现有监测体系主要是针对沙化治理和水土流失治理建立了自动气象站、人工模拟降雨场、坡面径流观测场, 缺少系统的多圈层相互作用过程综合观测体系. 如大气环境监测、水环境监测、土壤环境监测、河水径流观测、植被样方调查等. 即便针对水土流失治理建立的径流场, 也缺少配套的降水观测、蒸散发观测和土壤温湿度观测等.

(2) 基础科学研究亟须加强. 针对水土流失问题, 虽然流域内已建立了人工模拟降雨场、坡面径流观测场, 然而却缺少高质量、长时间的产流和产沙基础研究科学数据, 流域内坡面产流和产沙特征尚不明确, 坡面产流和产沙主控因子尚不清晰, 流域内水土流失机制有待阐明, 水土流失治理缺少基础研究的科学支撑.

(3) 管理机制需要健全. 示范区建成后, 缺乏有效的管理机制, 自动气象站、人工模拟降雨场等监测设施和设备缺少维护, 损坏严重; 河道垃圾堆积, 水质污染严重, 亟须疏浚河道、净化水质; 拉日铁路等重大工程遗留的采石场等生态修复措施不当.

(4) 修复治理模式需要加强集成. 茶巴朗小流域是由地球系统多圈层多要素组成的复杂系统, 各要素相互影响、相互制约. 单要素、分部门、分散、无序的修复治理模式导致顾此失彼, 局部效果较好但整体效果较差, 存在修复治理工程碎片化和生态系统性破损的风险, 无法保障流域保护、修复、治理工程举措系统、全面、高效、有序的实施.

4 结论和建议

拉萨河流域地处西藏社会经济发展的核心区, 涵盖了大气圈、冰冻圈、水圈、生物圈、岩石圈、人类圈等六大圈层所有要素, 受自然变化和人类活动的双重影响. 近几十年, 拉萨河流域气候变化显著, 表现为气温升高、降水量增加; 人类活动影响加剧, 城镇用地、重大工程扰动等面积增加, 导致耕地、林地、草地面积减少, 给拉萨河流域生态环境保护和可持续发展带来挑战. 因此, 在拉萨河流域开展地球系统科学多圈层相互作用过程研究并提出面向生态环境保护、修复、治理举措具有重要意义. 本研究以西藏拉萨河流域典型区茶巴朗小流域为研究对象, 利用2000~2017年植被覆盖度和两期(2005、2015年)土壤侵蚀强度数据, 系统评估了流域水土保持综合治理示范区建设对流域生态环境的影响. 结果发现, 2010~2012年综合示范区建设期间, 由于坡改梯、人工种植和引水灌溉等系列工程举措, 尽管降水量偏少, 流域内植被覆盖度明显好转, 也发现综合示范区建设前后流域轻度和重度土壤侵蚀面积略有减少; 针对流域生态环境特点, 提出了流域(大气环境、水环境、土壤环境)保护、(工程扰动、生态系统退化)修复、(土地沙化、水土流失、水环境)治理的技术体系. 最后, 针对流域综合示范区存在的问题, 本研究提出以下建议.

(1) 完善流域内观测研究和技术示范体系. 依托茶巴朗综合示范区已有的自动气象站、人工模拟降雨场、径流观测场等观测基础, 利用无人机、在线实时分析仪等新技术、新手段和新方法, 开展流域大气环境、水环境、土壤环境、降水梯度、河水径流、坡面产流(产沙)、蒸散发、土壤温湿度

等多圈层综合观测研究, 形成多维度、立体化的综合观测研究网络, 严格按照行业部门观测规范, 开展观测研究.

(2) 加强基础科学研究. 充分发挥第二次青藏高原综合科学考察研究队优势科研力量, 吸纳西藏本土科研院校科技人才深度参与, 加强茶巴朗小流域大气污染特征及来源解析、水环境变化及其驱动力、土壤污染现状及成因、风沙特征及形成机理、流域坡面产流(产沙)过程及机制等基础领域的科学研究, 为流域开展大气环境、水环境、土壤环境保护, 重大工程生态修复, 沙化治理和水土流失治理等提供科学支撑.

(3) 建立多部门协同联动机制. 生态环境保护、修复、治理工程涉及环保、国土、水利、林草、气象等多个部门, 不同部门发展规划侧重点不同, 难以实行统一高效的管理. 多部门、多领域的综合联动机制能够有效凝聚各部门力量形成合力, 有助于保护、修复、治理工程举措的深入实施.

(4) 强化技术示范体系的应用推广. 基于茶巴朗小流域多维网建设的经验与技术积累, 推动地球系统多维网科学示范工程在青藏高原的大江大河、重大工程沿线等区域推广应用. 针对不同区域的生态环境特征, 形成科学合理的保护、修复、治理系统解决方案, 有针对性地实施大气-水-植被-土壤等保护、生态系统退化-工程扰动区等修复和土地沙化-水土流失-大气与水环境污染等治理的系统科学观测研究与应对工程举措.

致谢 感谢第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0201)和中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA20100000)资助. 感谢国家青藏高原科学数据中心提供的数据支持.

推荐阅读文献

1 Sun H L, Zheng D, Yao T D, et al. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau (in Chinese). Acta Geogr Sin, 2012, 67: 3–12 [孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. 地理学报, 2012, 67: 3–12]
2 Yao T, Wu F, Ding L, et al. Multispherical interactions and their effects on the Tibetan Plateau's earth system: A review of the recent researches. Natl Sci Rev, 2015, 2: 468–488
3 Chen D L, Xu B Q, Yao T D, et al. Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 3025–3035 [陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来. 科学通报, 2015, 60: 3025–3035]
4 Yao T, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. Nat Clim Chang, 2012, 2: 663–667
5 Cheng G D, Zhao L, Li R, et al. Characteristic, changes and impacts of permafrost on Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 2783–2795 [程国栋, 赵林, 李韧, 等. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响. 科学通报, 2019, 64: 2783–2795]
6 Liu J K, Zhang J J, Gao B, et al. An overview of glacial lake outburst flood in Tibet, China (in Chinese). J Glaciol Geocryol, 2019, 41: 1335–1347 [刘建康, 张佳佳, 高波, 等. 我国西藏地区冰湖溃决灾害综述. 冰川冻土, 2019, 41: 1335–1347]
7 Wu G J, Yao T D, Wang W C, et al. Glacial hazards on Tibetan Plateau and surrounding alpines (in Chinese). Bull Chin Acad Sci, 2019, 34: 1285–1292 [邬光剑, 姚檀栋, 王伟财, 等. 青藏高原及周边地区的冰川灾害. 中国科学院院刊, 2019, 34: 1285–1292]
8 Zhang Y L, Liu L S, Wang Z F, et al. Spatial and temporal characteristics of land use and cover changes in the Tibetan Plateau (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 2865–2875 [张镱锂, 刘林山, 王兆锋, 等. 青藏高原土地利用与覆被变化的时空特征. 科学通报, 2019, 64: 2865–2875]
9 Cui P, Su F H, Zou Q, et al. Risk assessment and disaster reduction strategies for mountainous and meteorological hazards in Tibetan Plateau (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 3067–3077 [崔鹏, 苏凤环, 邹强, 等. 青藏高原山地灾害和气象灾害风险评估与减灾对策. 科学通报, 2015, 60: 3067–3077]
10 Yao T, Xue Y, Chen D, et al. Recent Third Pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: Multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis. Bull Am Meteorol Soc, 2019, 100: 423–444
11 Gao J, Yao T, Masson-Delmotte V, et al. Collapsing glaciers threaten Asia's water supplies. Nature, 2019, 565: 19–21
12 Immerzeel W W, Lutz A F, Andrade M, et al. Importance and vulnerability of the world's water towers. Nature, 2020, 577: 364–369
13 Zhang G, Yao T, Xie H, et al. Response of Tibetan Plateau lakes to climate change: Trends, patterns, and mechanisms. Earth-Sci Rev, 2020, 208: 103269
14 Ouyang Z, Song C, Zheng H, et al. Using gross ecosystem product (GEP) to value nature in decision making. Proc Natl Acad Sci USA, 2020, 117: 14593–14601
15 Zhang J, Fu B, Stafford-Smith M, et al. Improve forest restoration initiatives to meet Sustainable Development Goal 15. Nat Ecol Evol, 2020, 5: 10–13

16 Quan Q, Tian D, Luo Y, et al. Water scaling of ecosystem carbon cycle feedback to climate warming. Sci Adv, 2019, 5: eaav1131
17 Chen F, Welker F, Shen C C, et al. A late Middle Pleistocene Denisovan mandible from the Tibetan Plateau. Nature, 2019, 569: 409–412
18 Zhang D, Xia H, Chen F, et al. Denisovan DNA in Late Pleistocene sediments from Baishiya Karst Cave on the Tibetan Plateau. Science, 2020, 370: 584–587
19 Ning C, Li T, Wang K, et al. Ancient genomes from northern China suggest links between subsistence changes and human migration. Nat Commun, 2020, 11: 2700
20 Zheng T, He Y, Ding L, et al. Direct structural evidence of Indian continental subduction beneath Myanmar. Nat Commun, 2020, 11: 1944
21 Zan J, Fang X, Kang J, et al. Spatial and altitudinal variations in the magnetic properties of eolian deposits in the northern Tibetan Plateau and its adjacent regions: Implications for delineating the climatic boundary. Earth-Sci Rev, 2020, 208: 103271
22 Zhou T J, Chen X L, Wu B. Frontier issues on climate change science for supporting Future Earth (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 1967–1974 [周天军, 陈晓龙, 吴波. 支撑“未来地球”计划的气候变化科学前沿问题. 科学通报, 2019, 64: 1967–1974]
23 Wang Z B, Li J X, Guo Y Q, et al. Ecological protection and restoration model of multi-ecological elements in Qinghai-Tibet Plateau: A case study of Lhasa River Basin (in Chinese). Acta Ecol Sin, 2019, 39: 8966–8974 [王振波, 李嘉欣, 郭义强, 等. 青藏高原山水林田湖草生态保护修复模式——以拉萨河流域为例. 生态学报, 2019, 39: 8966–8974]
24 Ma P F, Zhang Z C, Lunzhu Q, et al. Analysis on the sand transport wind power conditions and suggestions on the sand disaster preventions in the middle reaches of Yarlung Zangbo River, China (in Chinese). J Desert Res, 2021, 41: 1–9 [马鹏飞, 张正偲, 论珠群培, 等. 雅鲁藏布江曲水-泽当段风沙活动动力条件分析与风沙灾害防治建议. 中国沙漠, 2021, 41: 1–9]
25 He P Z, Wan X, Fan F Y, et al. Practice and exploration of desertification land management in Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). Urban Rural Dev, 2015, (2): 84–85 [何培铮, 万绪, 范芳玉, 等. 青藏高原沙化土地治理实践与探索. 城乡建设, 2015, (2): 84–85]
26 He M Y, Cai C X, Ma S Z. Characteristics of soil and water loss in Meiquzangbu River Basin of Tibet and its regional control measures (in Chinese). Soil Water Conserv China, 2017, (1): 56–58 [何明月, 蔡春祥, 马松增. 西藏美曲藏布流域水土流失特点及分区防治对策. 中国水土保持, 2017, (1): 56–58]
27 Zhang J H, Wang K Y, Xu Y N, et al. A study of the effect of mine exploitation on alpine grassland and its vegetation restoration technology (in Chinese). Geol Bull China, 2018, 37: 2260–2263 [张江华, 王葵颖, 徐友宁, 等. 矿采对高寒草地的影响及植被恢复技术. 地质通报, 2018, 37: 2260–2263]
28 Hu Y Y. Study on fragile ecological restoration and protection of Qinghai-Tibet Plateau—A case study of alpine grassland (in Chinese). Agric Technol Eq, 2020, 365: 73–74 [胡洋洋. 青藏高原脆弱生态修复与保护研究——以高寒草地为例. 农业技术与装备, 2020, 365: 73–74]
29 He X S, Xu Z G, Liu M J. Discussion on ecological restoration of grassland in Lake Manasarovar National Wetland Reserve: A case study of *Elymus dahuricus* turcz. in Pulan County (in Chinese). Cent South Forest Inventory Plan, 2019, 38: 42–45 [何旭升, 徐志高, 刘敏杰. 西藏玛旁雍错国家级湿地自然保护区草地生态修复的探讨——以普兰县披碱草试种为例. 中南林业调查规划, 2019, 38: 42–45]
30 Zeng X D, Sun Q H, Mu Q Y, et al. Discussion on slope restoration technology in Northeast Tibet Plateau (in Chinese). Soil Water Conserv China, 2019, (4): 28–30 [曾晓东, 孙其河, 穆秋月, 等. 青藏高原东北地区边坡恢复技术探讨. 中国水土保持, 2019, (4): 28–30]
31 An B S, Cheng G D. Dynamic analysis of the ecological footprint and carrying capacity of Tibet (in Chinese). Acta Ecol Sin, 2014, 34: 1002–1009 [安宝晟, 程国栋. 西藏生态足迹与承载力动态分析. 生态学报, 2014, 34: 1002–1009]
32 Zhang H F, Liu H, Su H D, et al. Analysis on trend and driving force for water environmental change of the Lhasa River basin (1995–2014) (in Chinese). Acta Ecol Sin, 2019, 39: 770–778 [张惠芳, 刘欢, 苏辉东, 等. 1995–2014年拉萨河流域水环境变化及其驱动力. 生态学报, 2019, 39: 770–778]
33 Xie H F, Huangfu D L, Guo F F, et al. Study on comprehensive management model of small watershed in Tibet Plateau—A case study of Chabalang Watershed (in Chinese). Soil Water Conserv China, 2011, (1): 15–16 [谢后凤, 皇甫大林, 郭芬芬, 等. 西藏高原小流域综合治理模式研究——以茶巴朗小流域为例. 中国水土保持, 2011, (1): 15–16]
34 Mima C, Gong Y B, Jiang G Z. Soil erosion and countermeasures for prevention and control of Chabalang Watershed in Tibet (in Chinese). Soil Water Conserv China, 2012, (12): 55–58 [迷玛次仁, 宫渊波, 姜广争. 西藏茶巴朗流域的土壤侵蚀及防治对策. 中国水土保持, 2012, (12): 55–58]
35 Lan G Y, Huang C Y. The role of seabuckthorn forest in the management of Lhasa River Basin (in Chinese). Tibet Sci Technol, 2007, (11): 23–25 [兰公宇, 黄川友. 论沙棘林在拉萨河流域治理中的作用. 西藏科技, 2007, (11): 23–25]
36 Zhang M, Li B P. Experiment and research on sand control using the grass square in Chabalang Basin, Qushui County, Tibet (in Chinese). Sichuan Forest Explor Design, 2005, (1): 55–56 [张敏, 李宝平. 西藏曲水县茶巴朗草方格治沙试验与研究. 四川林勘设计, 2005, (1): 55–56]
37 Guo K G. Study on ecological effect evaluation of soil and water conservation on slope scale in typical small watershed of Tibet (in Chinese). Master Thesis. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017 [郭凯歌. 西藏地区典型小流域坡面尺度水土保持生态效应评价研究. 硕士学位论文. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017]
38 Liu W J. FVC dataset of remote sensing for ecological assets assessment in Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). A Big Earth Data Platform for

Three Poles, 2019, doi: 10.11888/Ecolo.tpdc.270530. CSTR: 18046.11.Ecolo.tpdc.270530 [刘文俊. 青藏高原生态资产评估遥感反演植被覆盖度数据. 时空三极环境大数据平台, 2019, doi: 10.11888/Ecolo.tpdc.270530. CSTR: 18046.11.Ecolo.tpdc.270530]

39 Wu B F, Yuan Q Z, Yan C Z, et al. Land cover change of China from 2000 to 2010 (in Chinese). Quat Sci, 2014, 34: 723−731 [吴炳方, 苑全治, 颜长珍, 等. 21世纪前十年的中国土地覆盖变化. 第四纪研究, 2014, 34: 723−731]

40 Zhang W B. Dataset of soil erosion intensity with 300 m resolution in Tibetan Plateau (1992, 2005, 2015) (in Chinese). National Tibetan Plateau Data Center, 2019, doi: 10.11888/Disas.tpdc.270224. CSTR: 18046.11. Disas.tpdc.270224 [章文波. 青藏高原300米分辨率土壤侵蚀强度数据集(1992、2005、2015). 国家青藏高原科学数据中心, 2019, doi: 10.11888/Disas.tpdc.270224. CSTR: 18046.11.Disas.tpdc.270224]

Summary for “拉萨河流域典型区域保护、修复、治理技术示范体系”

Protection, restoration, and governance technology demonstration system in the typical regions of the Lhasa River Basin

Baosheng An[1*], Tandong Yao[1,2*], Yanhong Guo[1], Weicai Wang[1,2], Jiule Li[1], Xin Li[2,3] & Zhongyan Wang[1]

[1] *Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*
[2] *Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*
[3] *National Tibetan Plateau Data Center, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*
* Corresponding authors, E-mail: anbaosheng@itpcas.ac.cn; tdyao@itpcas.ac.cn.

The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (“STEP Program”) has made significant progress in the world’s most influential frontier sciences. Based on the STEP Program, scientists are able to conduct theoretical and practical earth system science research that is fundamental to implementing exemplary solutions to basin protection (e.g., of atmosphere, water, and soil), restoration (e.g., of construction-disturbed areas, ecosystem degradation), and governance (e.g., of water environment degradation, land desertification, and soil erosion), particularly across ecologically fragile high-altitude areas. The Lhasa River Basin, located in the social and economic heartland of Tibet, encompasses the six spheres of earth system science and has been subjected to the dual substantial environmental impact from natural climate changes and human activities. Therefore, it is important to conduct fundamental applied scientific research on the protection, restoration, and governance of natural process-prevalent areas, natural process-human activity overlapping areas, and human activity areas. In this study, the Chabalang small watershed, a typical tributary in the Lhasa River Basin, was selected as the research object, and the effect of the early comprehensive governance demonstration area construction on the ecological environment of the watershed was systematically evaluated. The results showed that during the construction of the comprehensive demonstration area from 2010 to 2012, although the regional precipitation was low, the vegetation coverage in the basin significantly improved because of a series of engineering measures such as slope-to-terrace, artificial planting, and water diversion irrigation. The areas of severe soil erosion and mild soil erosion in the basin were also slightly reduced, according to the soil erosion intensity data for 2005 and 2015. There are several problems in the comprehensive demonstration area, such as lack of systematic observation (e.g., only automatic meteorological observation and slope runoff observation), lack of basic scientific research (e.g., the process and mechanism of runoff and sediment generation are unclear), lack of effective management (e.g., the equipment for automatic meteorological observation and artificial simulated rainfall observation are seriously damaged), and lack of comprehensive restoration and governance integration (e.g., the restoration and governance are scattered and disordered because of being conducted by different departments). Considering the existing problems in the comprehensive demonstration area, we propose a scientific solution to improve the scientific scheme of watershed protection, restoration, and governance. The technology system for protection, restoration, and governance in the Chabalang small watershed should include the protection of the atmosphere, water, and soil, the restoration of construction-disturbed areas and ecosystem degradation, the governance of water environment degradation, land desertification, and soil erosion. We present the following suggestions: improving the system of observation, research, and technology demonstration in the basin, strengthening the basic scientific research, establishing a multi-department coordination mechanism, and strengthening the application and popularisation of technology demonstration systems from the basin to the Tibetan Plateau. This will fill the gap in multi-dimensional observation research and provide a reference for the ecological environment of the Tibetan Plateau.

Tibetan Plateau, STEP Program, Lhasa River, Chabalang Basin, protection-restoration-governance, ecological environment

doi: 10.1360/TB-2021-0022