祁连山绿色发展: 从生态治理到生态恢复

李新^{1,2*}, 勾晓华³, 王宁练^{2,4}, 盛煜⁵, 金会军⁵, 祁元⁵, 宋晓谕⁵, 侯扶江⁶, 李育³, 赵长明⁷, 邹松兵³, 王宏伟⁵, 郑东海¹, 陈莹莹^{1,2}, 牛晓蕾¹

1. 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;

2. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101;

3. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000;

4. 西北大学资源环境学院, 西安 710127;

5. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000;

6. 兰州大学草地农业科技学院, 兰州 730000;

7. 兰州大学生命科学学院, 兰州 730000

* 联系人, E-mail: xinli@itpcas.ac.cn

2019-06-17 收稿, 2019-09-05 修回, 2019-09-06 接受, 2019-09-26 网络版发表

第二次青藏高原综合科学考察研究(XDA2006700)和中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA20100100)资助

摘要 在祁连山生态环境经重锤整治、生态恢复初显成效之际, 第二次青藏高原综合科学考察之“祁连山综合考察”全面开启。优先围绕生态系统与生态安全、固体水库动态变化、人类活动变化与生态生计影响三大关键任务, 开展天-空-地一体化考察, 定量核算了生态环境整治后局部的生态环境收益与经济损失, 并基于远程耦合方法核算了祁连山的全局生态系统服务价值。研究发现: 生态环境整治提升了生态环境服务价值; 暖湿化背景下生态系统整体向好, 珍稀物种种群扩大, 但对局部草原过牧管控不力导致退化; 冰川冰储量亏损加剧, 冰川融水径流贡献率将越过临界点; 过去10多年冻土融化释放的水量约为 $1.18 \text{ km}^3/\text{a}$, 相当于祁连山出山河流年径流总量的10%; 祁连山全局生态系统服务估算价值高达 $10676(\pm 1601)$ 亿元, 远高于2017年区域经济损失的53.09亿元。鉴于祁连山对于全国的巨大生态价值, 建议国家加大生态补偿力度, 实现祁连山生态生计双赢的绿色发展。祁连山综合科学考察成果可为祁连山国家公园建设, 以及“山水林田湖草”系统保护与修复提供详实数据和决策依据, 为“丝绸之路经济带”沿线国家流域治理提供典型案例和科学支撑。

关键词 祁连山, 生态生计双赢, 冰川储量, 多年冻土释水量, 生态系统与生物多样性

祁连山是“第二次青藏高原综合科学考察研究”^[1]的五大综合区之一。她矗立在青藏高原的东北部, 像哨兵般捍卫着青藏高原的生态安全。同时, 阻挡着巴丹吉林、腾格里、库姆塔格和柴达木四大沙漠的汇合与向东南前移。因此, 在我国“两屏三带”生态安全战略中, 祁连山同时发挥了“青藏高原生态屏障”和“北方防沙带”的作用(图1)。

祁连山也是我国重点生态功能区中的“水源涵养重要区”^[2]。她抚育了河西走廊石羊河、黑河、疏勒河3个流域, 青海省的青海湖流域、柴达木盆地流域, 以及大通河-湟水河等黄河支流流域, 是这些流域“山水林田湖草”系统的生命之源(图1)。祁连山生态优美, 生物多样性丰富, 是西北地区重要的生物种质资源库和野生动物迁徙的重要廊道。祁连山及其所孕育的中下游地

引用格式: 李新, 勾晓华, 王宁练, 等. 祁连山绿色发展: 从生态治理到生态恢复. 科学通报, 2019, 64: 2928–2937

Li X, Gou X H, Wang N L, et al. Tightening ecological management facilitates green development in the Qilian Mountains (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 2928–2937, doi: [10.1360/TB-2019-0209](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0209)

图 1 祁连山区位图。祁连山总面积约224100 km²，位于青藏高原东北缘和“丝绸之路经济带”的咽喉地段(a)，是第二次青藏高原综合科学考察五大综合区之一(b)，是6个流域的水源地(c)

Figure 1 The Qilian Mountains, with the total area of about 224100 km², are located in the northeastern margin of the Tibetan Plateau and the vital area of the Silk Road Economic Belt (a); one of the five key investigation areas selected for the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition Program (b); and the headwater area of six river basins (c)

区位于丝绸之路经济带的咽喉地段，其自然地理特征和水资源问题与“陆上丝绸之路”沿线所经过的一系列内陆河流域十分相似，也都面临着社会经济可持续发展受到水资源禀赋不足的严峻挑战。随着“一带一路”重大倡议的全面实施，祁连山地区更成为我国与“丝绸之路经济带”沿线国家和地区基础设施互联互通的必经之途，也成为绿色丝路建设的试金石。

然而，过去10多年来，受矿产资源粗放开发、水电水资源无序利用、旅游活动无视生态服务功能、过度放牧和水土资源超载等人类活动影响，祁连山局部生态环境破坏问题十分突出，严重影响了祁连山整体、长期的生态服务功能和生态屏障作用^[3]。针对祁连山生态环境保护的突出问题，党和国家领导人多次做出重要批示。中共中央办公厅、国务院办公厅在2017年

对外公布了《甘肃祁连山国家森林公园生态环境问题的通报》^[4]，严厉批评祁连山违法违规开矿和水电设施违建等行为。为了理顺和改革祁连山生态系统保护和综合治理的体制机制，中央全面深化改革领导小组第36次会议审议通过了《祁连山国家公园体制试点方案》。2018年10月祁连山国家公园管理局正式成立，并先后设立“环境资源保护巡回审判法庭”和完成《祁连山国家公园管理条例(初稿)》，进一步加大了对祁连山生态环境保护的力度。

随着以上重锤整治措施的实施，祁连山生态环境整治已初见成效，但区域经济和农牧民生计的可持续性发展问题也日益凸显。因此，科学评估祁连山生态环境整治成效及其对区域经济发展的影响，有助于构建祁连山生态环境整治的长效机制，协调区域生态环境

整治与社会经济发展间的关系, 探寻生态生计双赢的绿色发展路径。

在此背景下, 第二次青藏高原综合科学考察研究组织了祁连山综合科学考察, 优先围绕生态系统与生态安全、祁连山固体水库动态变化、人类活动变化及其生态生计影响三大关键任务, 深入开展研究。包括: (1) 祁连山生态系统及生物多样性的变化特征考察, 分析不同生态系统和重点物种变化规律及其影响因素, 提出生态善治的调控对策; (2) 祁连山固体水库关键要素冰川和冻土的冰储量和释水量估算以及变化分析, 预估其未来变化对水资源的影响, 为流域水资源安全管理提供科技支撑; (3) 主要人类活动(工矿、水电、旅游)变化与影响的精细考察, 谋划生态生计双赢的绿色发展策略。祁连山综合科学考察研究对祁连山生态环境保护和国家公园建设具有重要意义, 可为“丝绸之路经济带”沿线国家流域治理提供典型示范, 为绿色护航“丝绸之路”建设提供科技支撑。

1 祁连山综合科学考察概述和研究方法

1.1 祁连山综合科学考察概述

祁连山综合科学考察围绕人类活动变化与影响、固体水库、生态系统与生物多样性变化3个任务开展综合考察和生态环境整治评估(图2)。人类活动变化与

影响方面, 基于天-空-地一体化的监测体系, 精细调查生态环境整治前后人类活动变化, 并采用集成生态系统服务模拟(InVEST)模型和环境经济核算方法(SEEA), 分析整治后的局地环境收益与经济损益, 基于远程耦合思路核算全局生态系统服务价值。固体水库动态变化方面, 开展多条冰川的雷达测厚、物质平衡观测, 结合遥感和冰川编目数据, 分析近50年祁连山冰川面积、冰储量变化及其对水资源的影响。查明了祁连山多年冻土分布特征及其变化规律, 核对了多年冻土地下冰发育的环境条件, 估算了地下冰储量及其融化释水量。生态系统与生物多样性变化方面, 查明了森林灌丛生态系统林线、树木生长、群落结构和生物量的变化情况; 调查了草原面积及其生产力时空变化格局, 分析了不同时空尺度湖泊动态变化特征, 开展了雪豹等珍稀保护物种的野外监测与动态变化分析。

1.2 天-空-地一体化综合考察

本次科考综合利用遥感、无人机观测、野外和社会经济调查相结合的天-空-地一体化考察方法, 开展祁连山生态系统与生物多样性、固体水库和人类活动的时空变化综合考察。

(1) 野外科考。本次科考累计参与人员约200人, 历时260多天, 考察行程超过47500 km(图2)。人类活动变化方面, 开展了祁连山南北坡不合理人类活动(如违法

图2 祁连山综合科学考察野外科考路线与科考点一览表

Figure 2 An overview of the field investigation routes and sites for the comprehensive scientific investigation in the Qilian Mountains

违规开矿)和12个生态环境整治点的样方调查。固体水库变化方面,开展了多条冰川的雷达测厚,获取了13个断面、581个监测点冰厚数据。开展了196眼多年冻土钻孔编录资料的信息核实和补充,考察各区域多年冻土分布下界,形成了多年冻土与地下冰数据库。生态系统与生物多样性变化考察方面,开展了祁连山5个纵向主样带与3个横向带的森林灌丛样方调查,收集了35个采样点7种草原类型140个样方的植物、土壤样品和4个主要湖泊的水样。并使用红外相机阵列监测雪豹活动踪迹,通过样线法和样点法调查黑颈鹤的数量和分布。

(2) 卫星遥感。分别采用Landsat(1985~2010年)以及高分一号/二号数据(20世纪60年代和2018年)精细监测生态环境整治前后祁连山人类活动变化,基于Google Earth Engine云平台分析森林和草原NDVI(normalized difference vegetation index)时序变化,并结合2015年祁连山冰川编目^[5]和两期中国冰川编目数据(1960和2007年)^[6,7]分析祁连山冰川时空变化。

(3) 无人机多传感器精细监测。利用激光雷达、高光谱、CCD相机等多传感器相结合的无人机监测方法,对祁连山生态环境保护重点区域45个典型性的不合理人类活动点开展精细考察。重点考察不合理人类活动点的整治规模、工程类型及植被恢复程度,以精准检验不合理人类活动的整治成效。

(4) 社会经济和网络问卷调查。为了分析生态环境整治对农牧户、区域、全域三方面的影响,设计农牧民生计资本问卷,开展大范围入户调查。获取调查问卷600余份,收集研究区社会经济统计年鉴、水资源公报、环境公报、矿产资源开发公报等资料100余册。通过设计祁连山生态系统保护支付意愿的调查问卷,采用分层与随机抽样结合的采样方法,依托互联网社交软件,开展全国范围内不同人群对祁连山生态系统保护支付意愿的问卷调查。

1.3 多年冻土地下冰储量估算

地下冰含量较高的多年冻土主要发育在第四纪松散沉积物中,沉积类型是决定多年冻土地下冰储量的根本要素。因此,可以通过各类型沉积物分布范围及地下冰含量,估算多年冻土中的地下冰储量。下式给出了估算地下冰储量(V_{ice} , m^3)的基本原理^[8]:

$$V_{ice} = \sum \sum \theta_{ij} \times \Delta h_j \times S_i, \quad (1)$$

其中, θ_{ij} 为第*i*类沉积物在第*j*层深度的平均体积含冰量($m^3 m^{-3}$), Δh_j 为第*j*层厚度(m), S_i 为第*i*类沉积物的面积(m^2)。

将祁连山区第四纪沉积物归为河流冲积物、洪积物、冰碛物和冰水沉积物四类,并将占据面积最大的风化基岩为主的山地统一归类为基岩。根据祁连山区196眼多年冻土钻孔资料,分别统计各类沉积物地层钻孔中的岩性厚度及相对应的含水量,通过厚度加权平均得到祁连山区各类沉积物及基岩覆盖区的平均体积含冰率。基于祁连山区地质图得到祁连山区各类沉积物的分布面积,结合其体积含冰率、多年冻土厚度,即可估算出祁连山多年冻土区的地下冰储量。

1.4 生态环境整治效益分析

祁连山生态环境整治导致的土地利用变化和区域产业结构调整,增加了区域生态系统服务供给、减少了工业排污,对本地区生态安全与环境质量提升起到积极作用。同时祁连山生态系统服务通过物质流、信息流的转移对其他区域产生重要影响,具有典型的远程耦合特征^[9,10]。为了全面评估生态环境整治的成效,对祁连山整治的成效分析中,既注重了整治对祁连山本区域的影响(局地),也兼顾了祁连山生态系统服务对其他区域的价值(全局)。

局地核算方面,采用InVEST模型,对研究区整治前(2015年)和整治后(2018年)的水源供给、水土保持、水质净化、固碳等生态系统服务开展模拟,分析整治后的生态系统服务增量。综合各类统计数据核算整治前后区域矿产资源开采量变化,结合全国第一次污染源普查中的生产排污系数,核算区域整治后的主要环境污染减排量。在此基础上,采用影子工程、替代成本等方法,估算了本区域新增生态系统服务和减排污染物的货币价值,分析整治对本区域产生的局地生态环境效益。然而,上述核算面向的是生态环境整治对本地区的直接影响,并未考虑祁连山提供的生态系统服务对相关区域的贡献(如生态屏障作用)。为了全面反映祁连山生态系统服务对其他区域的全局价值,基于远程耦合思路,采用全民对祁连山生态系统服务保护的支付意愿表征其全局生态系统服务价值。根据网络问卷调查获取的全国31个省(市、区)适龄居民对祁连山生态系统保护的支付意愿数据,结合全国各省(市、区)人口数据,核算全国范围内的整体支付意愿,用以表征祁连山全局生态系统服务价值。

2 祁连山自然生态系统变化特征

2.1 生态系统与珍稀物种变化

伴随气候暖湿化趋势^[11],在1961~1980年间祁连山地区青海云杉树木生长整体呈上升趋势;2000年以后树木生长明显加快^[12,13].通过对祁连山西营河、寺大隆和隆畅河区域青海云杉林线进行调查与分析,发现近100年来(1921~2018年)祁连山森林上线抬升较为明显,且自东向西抬升幅度减小.由于人类活动减缓,部分区域森林下线下移明显,灌木林具有整体扩展态势.森林上线抬升的同时,林缘区树木生长速度、碳密度、水源涵养等生态水文功能在增强.水分是树木生长的限制因子,由东向西青海云杉树木生长的气候敏感性增强.增温停滞、区域降水增多,以及生长季延长共同促进了树木生长^[13~15],区域植被整体向好.

近25年来,特别是1999年国家实施一系列草原生态建设重大工程以来,祁连山草原生态系统总体稳定.但是,中东部局部草原因管控不力导致过牧退化的趋势尚未扭转.祁连山草原面积呈现逐年递增的趋势,2015年比1992年增加约3.3%.祁连山草原产草量的变化,稳定区(面积占89.8%)年际变化 $< 10 \text{ kg/km}^2$,轻度变化区(包括恢复区和退化区,分别占7.3%和2.9%)年际变化在 $10\sim 50 \text{ kg/km}^2$ 之间.祁连山中东部部分草原(面积占10.5%)过牧严重,单位面积载畜量高于 1.5 羊/ha ,导致NDVI指数局部呈下降趋势,建议草原载畜量标准控制在 0.85 羊/ha ^[16].

祁连山地区主要湖泊:青海湖、哈拉湖、苏干湖、托素湖、克鲁克湖,在1986~2016年间呈扩张趋势,明显地响应了祁连山地区气候暖湿化趋势.降水量增加以及增温引起的冰雪融水量增加是祁连山地区湖

泊面积扩张的主要因素.然而,农耕灌溉引起的地下水超采导致共和盆地地下水水位下降,引起过去几十年共和盆地内部英德海、达连海、更尕海等湖泊面积减少.

雪豹是欧亚高山上的标志性伞护物种,也是西部环境变化的指示物种.本次科考中,使用红外相机矩阵法记录到雪豹夏季在祁连山针叶林中的活动踪迹(图3),判断雪豹栖息地有向森林带扩张的趋势.根据调查结果和收集的资料,分析了祁连山地区雪豹种群数量近50年的变化规律,发现雪豹在1960~1989年受到人类捕猎等影响,种群数量减少;1990年至今,祁连山保护区建立后加大了对雪豹的保护,雪豹种群数量稳中有升;2016年实施生态环境整治(关停矿山、生态移民)等措施进一步减少了人类活动干扰,雪豹表现出活动范围增大,栖息地类型多元化现象.

总体而言,暖湿化背景下祁连山地区主要生态系统整体向好.建立祁连山保护区与实施生态环境整治进一步减少了人类活动干扰.然而,局部草原管控不力导致过牧退化,农耕灌溉对地下水的超采引起更尕海等湖泊面积萎缩.

2.2 冰川和冻土变化

祁连山冰川过去50年间总体上处于物质亏损状态,普遍退缩减薄^[17~19].截至2015年,祁连山共有冰川2748条,冰储量为 $81.7\pm 7.4 \text{ km}^3$.与20世纪60年代相比,祁连山冰川面积萎缩了 $20.5\%\pm 6.04\%$ ($396.9\pm 116.9 \text{ km}^2$),冰储量损失了约 25.7 km^3 (23.9%).1960~2007年间祁连山冰川冰储量亏损速率约为 $4.41\%/10 \text{ a}$,而2007~2015年间亏损速率为 $5.82\%/10 \text{ a}$,亏损速率明显增加.图4给出了祁连山各流域2015年的冰川冰储量,及过去10年间

图3 雪豹在针叶林中活动的照片

Figure 3 Photos showing the activity of a snow leopards in coniferous forests

图4 祁连山各流域冰川冰储量与年亏损率以及多年冻土地下冰储量与年释水率

Figure 4 Glacier ice storage and annual degradation rate, as well as ground-ice storage and annual water release rate of permafrost in six river basins of the Qilian Mountains

冰储量的亏损率情况。结果表明,祁连山西段的疏勒河流域和柴达木盆地两个冰川规模较大的流域损失最大,分别达到了8.3和9.2 km³。通过模拟发现,河西内陆河流域冰川融水对河川径流的调节作用将越过临界点^[20],石羊河流域冰川融水量可能已经达到峰值^[21]。对疏勒河径流形成及其变化的模拟研究发现,过去40年冰川融水对径流的贡献率持续增加,平均贡献率约为23.6%;未来情景模拟显示,到21世纪末冰川融水对疏勒河径流的贡献率将小于5%^[22],河流类型将由最初的“降水-冰川补给型”演变为“降水补给型”河流。

祁连山多年冻土整体也处于退化过程,主要表现为浅层地温升高和多年冻土上限埋深下降。调查发现,目前祁连山多年冻土面积约为8.04×10⁴ km²,初步估算在10 m深度范围内,多年冻土中地下冰储量约为65.8 km³,单位面积上的地下冰储量约为0.82 m³ m⁻²。多年冻土上限下降是地下冰融化的主要模式。利用各类地表条件下监测的多年冻土上限年平均融化下降深度数据,结合上限附近不同沉积类型地层的体积含冰率及其分布面积,初步估算近10年来祁连山多年冻土上限地下冰融化释放的水量约为11.8 km³,平均每年释放水量相当于祁连山出山河流年径流总量的10%左右。预计50年后10 m深度范围内的多年冻土完全退化。需要注意的是,多年冻土融化释水量并不能全部释放形

成径流,其产流量需要根据过剩冰含量、地形和地层岩性等因素综合评估。图4给出了祁连山各流域多年冻土地下冰储量及年释水率估算结果。

总体而言,在气候变暖背景下,祁连山冰川冰储量亏损加剧,冰川融水径流贡献率将越过临界点。本次科考也突破了祁连山多年冻土地下冰储量及其融化释水量的估算难题,估算了祁连山多年冻土在10 m深度范围内地下冰储量及近10年融化释水量。

3 祁连山人类活动变化与生态环境整治评估

3.1 人类活动变化与生态环境整治进程

天-空-地一体化监测表明,祁连山自然保护区和国家公园等重点区域内人类活动从1985~2016年不断增加,2016年生态环境整治后不合理人类活动迅速减少。祁连山地区工矿、居住、交通用地面积在1985~2016年之间整体上不断增加,至2016年达到最大强度。其中工矿用地增幅最为显著,由1985年的5.97 km²增加到2016年的69.37 km²,面积扩大了近11倍。祁连山生态环境整治以来,祁连山重点区域内存在的违法违规开矿、水电设施违建、偷排偷放、整改不力等行为得到了彻底改变(表1)。相比2016年,2018年祁连山重点区域内不合理人类活动点位数大幅减少。其中,工矿点位数

表1 祁连山重点生态环境问题及生态环境整治成效监测结果

Table 1 Eco-environment problems and benefits after tightening the eco-environmental management in the Qilian Mountains

问题	生态环境问题典型案例	整治前典型图	生态环境整治成效监测结果	整治后典型图
违法违规开发矿产资源	保护区内存在144宗探、采矿权,其中14宗是保护区划界后违法违规审批延续		保护区内144宗探采矿项目100%关停,其中81.3%开展修复治理,修复面积达5.8 km ²
部分水电设施违法建设、违规运行	共建有水电站150余座,其中42座位于祁连山保护区内,部分水电站生态流量设计考虑不足,水生态系统破坏严重		保护区内水利水电项目100%完成整改,其中85.7%完成项目区及周边环境整治和生态修复,14.3%完全退出,修复面积达1 km ²
周边企业偷排偷放	部分企业环保投入严重不足,污染治理设施缺乏,偷排偷放现象突出		100%改造环保设施,建立企业污染源数据监测网,污染源在线监测数据传输有效率达92.6%
生态环境突出问题整改不力	对公开约谈内容重视力度不够,瞒报、漏报31个探采矿项目,生态修复和整治工作进展缓慢		全面加强生态环境监管,采取和制定最严格的保护措施与制度,践行生态优先、绿色发展理念

量减少近一半,旅游用地、水电站占地面积和水库面积都有不同程度减少。总体上,生态环境整治工程的实施有效减弱了祁连山重点区域内不合理的人类活动强度。

3.2 生态环境整治成效价值化分析

生态环境整治增加了区域生态系统服务供给,同时减少了因生产产生的环境污染物排放。InVEST模型结果表明,整治后区域新增局地生态系统服务价值(ecosystem service, ES)为0.05亿元/a(图5)。其中新增固碳价值为0.03亿元,新增水源供给价值为0.017亿元。采用环境经济核算账户分析发现,区域工业废气、废水、废渣排放大量减少,减排带来的环境收益达到1.73亿元/a(图5)。综合上述二者,整治产生的生态环境收益为1.78亿元/a。从结果上看,生态系统服务增量的价值变化较小,其原因是修复的工业用地面积较为有限,同时当前修复区的植被处于演替初期,其提供的新增生态系统服务总量有限。

图5 基于远程耦合的生态环境整治成效评估

Figure 5 Evaluation of eco-environmental renovation based on telecoupling method

整治前,祁连山部分地区的发展、财政收入主要依赖矿产、水电等资源开发项目,群众生活以放牧等传统畜牧业为主。生态环境整治对区域内不合理的采矿、水电及过度放牧进行了治理,使得祁连山区域经济增长产生了一定的、但应该是短期的负面影响。其中,甘肃省武威市、张掖市和青海省海北藏族自治州、海西蒙古族藏族自治州四市州2017年工业增加值较2016年总体下降53.09亿元(图5)。2018年以来,祁连山周边区域经济情况已明显改善,受影响出现下滑的张掖、武威市工业增加值较2017年增长3%。虽仍未达

到2016年水平, 但已扭转了下滑的局面。

祁连山全局生态系统服务价值核算过程中, 通过两轮互联网抽样调查, 获取有效问卷4119份。同时保证全国除港澳台地区外的每个省份(市、自治区)问卷数大于50份, 确保调查结果在2%的允许误差和95%的置信水平。基于对支付意愿互联网调查结果的分析计算, 全国范围内99.25%的受访者认为, 有必要对祁连山开展生态环境治理, 73%的受访者愿意为祁连山生态系统服务保护付费, 人均支付意愿达到1281.7元/a。进一步结合各省20~59岁适龄支付人口数量对总体支付意愿进行估算, 计算得到祁连山生态系统服务价值高达10676(± 1601)亿元/a, 明显高于传统方法计算的局地生态系统服务核算价值(1.78亿元/a)。同时也远高于区域的年国民生产总值, 以及整治造成的经济损失(53.09亿元/a)。这一结果充分说明祁连山生态环境治理与保护的必要性, 体现出祁连山的绿水青山是全国人民的金山银山(图5)。

总体上看, 生态环境整治有效控制了祁连山区不合理的人类活动, 遏制并扭转了生态环境恶化的趋势, 治理取得了初步成效。同时随着植被的进一步恢复与演替, 区域的生态系统服务供给将进一步增加。但另一方面, 整治也对区域经济造成了短期冲击, 部分敏感人群的生计风险增高。从生态环境整治的经济环境价值损益来看, 2017年局地经济损失高于局地生态环境收益, 但是考虑到祁连山区生态系统服务巨大的远程耦合作用, 从全局角度考虑的生态环境效益远高于局地经济损失。因此, 通过建立有效的生态补偿制度, 实现生态资产向金融资产的转化是实现祁连山生态与生计双赢的关键问题。

4 结论与建议

祁连山综合科学考察精细调查了生态系统和珍稀物种、固态水库(冰川、冻土)冰储量和释水量的变化特征, 以及主要人类活动变化与生态生计影响; 检验了祁连山生态保护——特别是2016年生态环境整治以来的成效, 并在生态环境整治成效价值化分析的基础上, 提出了实现生态生计双赢的绿色发展建议。主要结论和建议如下。

(1) 祁连山生态系统在暖湿化背景下整体向好发展, 林线爬升、草原整体稳定、湖泊扩张、雪豹等珍

稀物种种群扩大。但是, 林缘区人类活动频繁导致灌丛遭到破坏, 局部草原管控不力导致过牧退化。基于以上认识, 建议: 林灌保护以自然恢复优先, 林缘区严格禁牧, 并开展合理的灌木林人工恢复; 以0.85羊/ha为载畜量的红线标准, 据此制定各生态区草原载畜量, 实施退化草原生态修复工程。

(2) 祁连山冰川冰储量亏损加剧, 冰川融水径流贡献率将越过临界点。“降水-冰川补给型”河流到21世纪末将演变为“降水补给型”河流。祁连山多年冻土地下冰储量亏损加剧, 气候变暖背景下融化速度加快。预计50年后, 10 m深度范围内的多年冻土完全退化。建议冰川冻土的保护应避免过多人为干预, 在此前提下, 加强调查、监测和研究能力, 提高气候变暖背景下冰川消融和多年冻土退化引起的环境问题的预警能力, 合理制定应对预案。

(3) 祁连山生态环境整治后不合理的人类活动强度明显减弱。祁连山全局生态系统服务价值高达10676(± 1601)亿元/a, 远大于限制采矿、水电、旅游开发等造成的短期经济损失(53.09亿元/a)。鉴于祁连山对于全国的巨大生态价值以及生态环境整治对区域经济造成的影响, 建议国家加大生态补偿力度。通过转移支付弥补区域经济损失, 并进一步以多元化补偿方式, 提升区域农牧民各项生计资本, 实现区域发展中的生态与生计双赢。

总体上, 祁连山综合科学考察以及相关的前期研究成果^[23,24], 即可为祁连山国家公园建设以及祁连山六大流域的“山水林田湖草”系统保护与修复提供科学依据、详实数据和决策支持; 也可作为“丝绸之路经济带”沿线国家流域治理提供典型案例和科学支撑。

当前, 祁连山已逐步从生态治理转入生态恢复阶段^[25]。通过制度建设, 形成长效机制, 将被动治理转化为主动保护, 是祁连山走向生态文明的必由之路。通过绿色发展提升居民生计水平是保障区域生态环境长期向好的基石。要让居民分享生态保护的绿色红利, 需要将祁连山巨大的远程耦合生态服务价值货币化。一方面通过外部加大生态补偿弥补区域保护的经济损失; 另一方面通过合理开发绿色高端旅游激发区域发展的内生动力, 内外结合实现区域绿色发展。这一发展模式的建立可以为“一带一路”建设中内陆河保护与发展、为绿色护航“丝绸之路”建设提供可以借鉴的“祁连山经验”。

致谢 祁连山综合科学考察得到甘肃省和青海省相关各级政府部门和研究机构的大力支持。在前期论证、启动以及后期的成果总结方面得到姚檀栋、程国栋、陈发虎院士,以及第二次青藏高原综合科学考察研究办公室的支持,参与人员约200余人,在此一并感谢。

参考文献

- 1 Yao T. Tackling on environmental changes in Tibetan Plateau with focus on water, ecosystem and adaptation. *Sci Bull*, 2019, 64: 417
- 2 Ministry of Environmental Protection, Chinese Academy of Sciences. National Ecological Function Zoning (Revised Edition) (in Chinese). Beijing: Ministry of Environmental Protection, Chinese Academy of Sciences, 2015 [环境保护部, 中国科学院. 全国生态功能区划(修编版). 北京: 环境保护部, 中国科学院, 2015]
- 3 Ding W G, Gou X H, Li Y. Green Book of Qilian Ecosystem: Annual Report on the Development of Qilian Ecosystem (in Chinese). Beijing: Social Sciences Academic Press, 2018 [丁文广, 勾晓华, 李育. 祁连山生态绿皮书: 祁连山生态系统发展报告. 北京: 社会科学文献出版社, 2018]
- 4 General Office of the CPC Central Committee and General Office of the State Council of the People's Republic of China issued a circular on the eco-environment of Qilian Mountains National Nature Reserve in Gansu Province (in Chinese). The People's Daily, July 21, 2017 [中办国办就甘肃祁连山国家级自然保护区生态环境问题发出通报. 人民日报, 2017年7月21日]
- 5 He J, Wang N, Chen A. et al. Glacier changes in the Qilian Mountains, northwest China, between the 1960s and 2015. *Water*, 2019, 11: 623
- 6 Wang Z T, Liu C H, You G X, et al. Glacier Inventory of China Qilian Mountains (in Chinese). Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 1981 [王宗太, 刘潮海, 尤根祥, 等. 中国冰川目录(I) 祁连山区. 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 兰州, 1981]
- 7 Guo W, Liu S, Xu J, et al. The second Chinese glacier inventory: Data, methods and results. *J Glaciol*, 2015, 61: 357–372
- 8 Wang S, Sheng Y, Li J, et al. An estimation of ground ice volumes in permafrost layers in Northeastern Qinghai-Tibet Plateau, China. *Chin Geogr Sci*, 2018, 28: 61–73
- 9 Liu J, Hull V, Batistella M, et al. Framing sustainability in a telecoupled world. *Ecol Soc*, 2013, 36: 7870–7885
- 10 Liu J, Mooney H, Hull V, et al. Systems integration for global sustainability. *Science*, 2015, 347: 1258832
- 11 Shi Y, Shen Y, Kang E, et al. Recent and future climate change in northwest China. *Clim Change*, 2007, 80: 379–393
- 12 Fang K, Gou X, Chen F, et al. Response of regional tree-line forests to climate change: Evidence from the northeastern Tibetan Plateau. *Trees*, 2009, 23: 1321–1329
- 13 Gao L, Gou X, Deng Y, et al. Increased growth of Qinghai spruce in northwestern China during the recent warming hiatus. *Agric For Meteorol*, 2018, 260–261: 9–16
- 14 Gou X, Deng Y, Gao L, et al. Millennium tree-ring reconstruction of drought variability in the eastern Qilian Mountains, northwest China. *Clim Dyn*, 2015, 45: 1761–1770
- 15 Gou X, Gao L, Deng Y, et al. An 850-year tree-ring based reconstruction of drought history in the western Qilian Mountains of northwestern China. *Int J Climatol*, 2015, 35: 3308–3319
- 16 Wang Y, Hou F, Sun Y, et al. Grazing management options for restoration of alpine grasslands on the Qinghai Tibet Plateau. *Ecosphere*, 2018, 9: 1–17
- 17 Yao T, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nat Clim Change*, 2012, 2: 663–667
- 18 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 Amer Meteorol Soc*, 2019, 100: 423–444
- 19 Wang N, Liu S, Wu Q, et al. Recent progress in the study of the change of cryosphere in the northern hemisphere and its impacts on climate and environment (in Chinese). *China Bas Sci*, 2015, 2: 9–14 [王宁练, 刘时银, 吴青柏, 等. 北半球冰冻圈变化及其对气候环境的影响. 中国基础科学, 2015, 2: 9–14]
- 20 Gao X, Zhang S, Ye B, et al. Recent changes of glacier runoff in the Hexi Inland River Basin. *Adv Water Sci*, 2011, 22: 344–350
- 21 Zhang S, Gao X, Zhang X. Glacial runoff likely reached peak in the mountainous areas of the Shiyang River Basin, China. *J Mt Sci*, 2015, 12: 382–395
- 22 Zhang Z, Deng S, Zhao Q, et al. Projected glacier meltwater and river runoff changes in the upper reach of the Shule River Basin, northeastern edge of the Tibetan Plateau. *Hydrol Proc*, 2019, 33: 1059–1074
- 23 Cheng G, Li X, Zhao W, et al. Integrated study of the water-ecosystem-economy in the Heihe River Basin. *Natl Sci Rev*, 2014, 1: 413–428
- 24 Li X, Cheng G, Ge Y, et al. Hydrological cycle in the Heihe River Basin and its implication for water resource management in endorheic basins. *J Geophys Res Atmos*, 2018, 123: 890–914
- 25 Guan Y, Kang R, Liu J. Evolution of the field of ecological restoration over the last three decades: A bibliometric analysis. *Restor Ecol*, 2019, 27: 647–660

Summary for “祁连山绿色发展：从生态治理到生态恢复”

Tightening ecological management facilitates green development in the Qilian Mountains

Xin Li^{1,2*}, Xiaohua Gou³, Ninglian Wang^{2,4}, Yu Sheng⁵, Huijun Jin⁵, Yuan Qi⁵, Xiaoyu Song⁵, Fujiang Hou⁶, Yu Li³, Changming Zhao⁷, Songbing Zou³, Hongwei Wang⁵, Donghai Zheng¹, Yingying Chen^{1,2} & Xiaolei Niu¹

¹ National Tibetan Plateau Data Center, 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 College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

⁴ College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China;

⁵ Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

⁶ College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

⁷ School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

* Corresponding author, E-mail: xinli@itpcas.ac.cn

The Qilian Mountains Scientific Expedition was launched under the framework of the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition Program after tightening eco-environmental management in the Qilian Mountains. The expedition focused on three key areas: (1) Ecosystem diversity and security, (2) dynamic changes in glaciers and permafrost, and (3) changes in human activities and their corresponding eco-livelihood impacts.

In this scientific expedition, a comprehensive investigation was conducted according to an integrated space–drone–ground-based field survey and a socioeconomic survey. More than 200 researchers participated in this expedition that lasted for 260 d and spanned 47500 km. First, investigations were performed for changes in human activities before and after tightening eco-environmental management in the Qilian Mountains. The local eco-environmental benefits and economic losses after the tightening eco-environmental management were analyzed by adopting the Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs model and the System of Integrated Environmental and Economic Accounting method. Additionally, the telecoupling values of the overall ecosystem services of the Qilian Mountains were estimated using an innovative method. Second, investigations were performed for several glaciers located in the Qilian Mountains to evaluate the characteristics of glacier distribution and variations in glacier changes. The glacier ice storage and annual degradation rate were further estimated using data derived from a glacier inventory and Landsat images. Moreover, the characteristics of permafrost distribution in the Qilian Mountains were comprehensively analyzed. Furthermore, an innovative method was developed to estimate ground ice storage and the annual water discharge rate from permafrost in the six river basins of the Qilian Mountains. Lastly, investigations were performed on changes in the forest line in a coupled forest and shrub ecosystem using a drone and field surveys. Further, the spatial and temporal grassland patterns and the associated productivity were analyzed. Moreover, dynamic changes in the five main lakes in the Qilian Mountains were assessed at different spatial and temporal scales, and the activities of the key rare species such as the snow leopard were monitored regularly using infrared cameras.

The key findings of the Qilian Mountains Scientific Expedition were as follows: (1) The ecological service functions of the Qilian Mountains are promoted by tightening eco-environmental management; (2) the ecosystem of the Qilian Mountains is recovering under a warm and wet climate, and the population of rare species is expanding; however, localized overgrazing is causing grassland degradation in some areas; (3) the glacier loss rate is accelerating, and the contribution of glacial melt to river runoff is expected to exceed the critical point; (4) over the past 10 years, the meltwater from permafrost has been as high as 1.18 km³/a, which is equivalent to 10% of the annual runoff into the Qilian Mountain rivers; (5) the value of the overall ecosystem services in the Qilian Mountains has been estimated to be as high as 1067.6 (±160.1) billion Yuan, which is much higher than the regional economic loss observed in 2017. It is suggested that the government should markedly increase ecological compensation to achieve a win-win situation for green development regarding ecological livelihood in the Qilian Mountains. The findings from this scientific expedition provide comprehensive datasets and decision-making support for the establishment and management of the Qilian Mountain National Park and the protection of the ecosystems of the Qilian Mountains. Such expeditions can provide scientific support for watershed management in states or regions located along the Silk Road Economic Belt.

Qilian Mountains, win-win green development of ecological livelihoods, glacier storages, meltwater from permafrost, ecosystem and biodiversity

doi: [10.1360/TB-2019-0209](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0209)