

三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估

邵全琴¹, 樊江文¹, 刘纪远¹, 黄麟¹, 曹巍¹, 徐新良¹, 葛劲松²,
吴丹³, 李志强², 巩国丽⁴, 聂学敏², 贺添¹, 王立亚⁵, 邢龙飞⁶,
李其江⁷, 陈卓奇⁸, 张更权⁹, 张良侠¹⁰, 杨永顺¹¹, 杨帆¹,
周万福¹², 刘璐璐¹, 祁永刚¹³, 赵国松¹, 李愈哲¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 青海省生态环境遥感监测中心, 西宁 810007;
3. 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042; 4. 山西省环境规划院, 太原 030024;
5. 青海省草原总站, 西宁 810008; 6. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016;
7. 青海省水文水资源勘测局, 西宁 810001; 8. 北京师范大学, 北京 100875;
9. 青海省林业调查规划院, 西宁 810008; 10. 南京信息工程大学, 南京 210044;
11. 青海省环境监测中心站, 西宁 810007; 12. 青海省气象科学研究所, 西宁 810001;
13. 青海省水土保持局, 西宁 810001)

摘要: 基于生态系统结构—服务动态过程趋势分析, 针对生态保护与建设工程预期目标, 构建了由生态系统结构、质量、服务及其变化因素构成的生态成效评估指标体系, 研究发展野外观测、遥感监测和生态过程定量模拟一体化的监测评估技术体系, 评估了三江源生态保护和建设一期工程的生态成效。结果表明: 工程实施8年以来, 三江源区宏观生态状况趋好但尚未达到1970s比较好的生态状况, 草地持续退化趋势得到初步遏制但难以达到预期“草地植被盖度提高平均20%~40%”的目标, 水体与湿地生态系统整体有所恢复, 生态系统水源涵养和流域水供给能力提高, 区域水源涵养量达到了增加13.20亿m³目标; 重点工程区内生态恢复程度好于非工程区, 除了气候影响以外, 工程的实施对促进植被恢复具有明显而积极的作用; 然而, 草地退化局面没有获得根本性扭转, 工程实施尚未遏制土壤水蚀增加趋势, 一期工程局部性和初步性特点突显出三江源区生态保护任务的长期性和艰巨性。

关键词: 三江源区; 生态保护和建设工程; 生态监测与评估; 生态成效

DOI: 10.11821/dlxb201601001

1 引言

受到气候与人类活动的共同影响, 三江源地区生态系统持续退化, 受到了社会各界

收稿日期: 2015-05-08; 修订日期: 2015-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571504); 国家科技支撑项目(2013BAC03B00); 中国科学院科技服务网络计划(KFJ-EW-ST5-005-04); 青海省项目“2005-2012年三江源自然保护区生态保护和建设工程生态成效综合评估” [Foundation: National Nature Sciences Foundation of China, No.41571504; National Key Technology Research and Development Program, No.2013BAC03B00; Science and Technology Service Network Initiative of Chinese Academy of Sciences, No.KFJ-EW-ST5-005-04; Program of Qinghai Province "Integrated assessment on the ecological effects of ecological conservation and restoration project in Sanjiangyuan Nature Reserve, 2005-2012"]

作者简介: 邵全琴(1962-), 女, 研究员, 主要从事陆地生态系统综合监测与评估、区域环境变化探测与模拟、国家重大生态工程效果评估、西部重点生态区综合治理规划等研究。E-mail: shaoqq@igsnr.ac.cn

通讯作者: 刘纪远(1947-), 男, 研究员, 主要从事资源环境遥感与土地利用/覆被变化及其宏观生态效应研究。E-mail: liujy@igsnr.ac.cn

的关注。2005年,国务院批准了《青海三江源自然保护区生态保护和建设总体规划》(简称《规划》),投资75亿在三江源自然保护区开展生态保护和建设一期工程^[1]。通过生态保护和建设先期工程,遏制保护区生态环境恶化,完善和巩固生态保护和建设成果,为后期大规模实施生态保护和建设奠定基础。因此,科学全面及时掌握三江源生态保护和建设工程的生态成效,是《规划》有效实施和科学管理的重要内容。

国内外开展了大量生态监测与评估,比如联合国MA方法提出了生态评估的新理念,确立概念框架评估生态系统服务,基于文献资料定性判断但不具有时空针对性^[2]。美国通过生态系统分布与格局、化学与物理特征、产品与服务、景观格局、物种等核心指标开展了国家生态系统状况评估^[3],并于2011年开始构建“国家生态观察网络(NEON)”监测地球生物圈^[4]。加拿大构建生态监测与评估网络,利用长期生态监测数据对生态环境进行评估^[5]。在国内,多通过生物丰度、植被覆盖度、水网密度、土地退化和污染负荷等指标,基于权重法和归一化方法计算生态环境质量指数,此法简单易行,但缺少生态系统服务相关指标^[6-8];也开展了基于生态站点、区域和全国不同尺度的生态系统评估,比如西部生态系统综合评估,但是没有发展出一套系统、全面的评估指标体系^[9]。

国际上重点生态工程始于1934年的美国“罗斯福工程”,还有前苏联“斯大林改造大自然计划”、北非“绿色坝工程”、加拿大“绿色计划”、日本“治山计划”、法国“林业生态工程”、菲律宾“全国植树造林计划”、印度“社会林业计划”、韩国“治山绿化计划”、尼泊尔“喜马拉雅山南麓高原生态恢复工程”等^[10]。国际上针对生态工程的评价始于20世纪50年代,前苏联、美国、法国、日本相继开展森林生态效益的定位观测和评价探索^[11-12],多从可持续发展的角度,强化生态、经济、社会三大效益^[13],从以前的定性评价发展到如今的定量评价。中国于1989年开始试点开展林业生态工程综合效益评价,此后针对三北防护林体系、退耕还林、天然林保护等重大生态工程,构建各类评价指标体系,或采用站点监测数据对比,或利用NDVI、植被覆盖度等参数^[14],或从生态系统服务实物量和价值量方面^[15],或以水源涵养、水土保持、防风固沙、改善小气候、农业面源污染控制等生态服务指标^[16-17],或者通过实证调查、层次分析、价值估算等方法^[18],对工程效果进行评价。行业部门颁布了评价相关的国家标准^[19-20],并发布了工程效益评价的国家报告^[15]。但是,目前大量生态工程评估缺乏针对性和系统性,难以全面回答工程规划之初设定的目标,难以从格局、质量、服务等全面反映生态系统变化,缺乏空间针对性,且多把工程实施的前一年作为“本底年”,比较两个时间片段的监测数据,而导致工程效果的高估或低估及缺乏科学性的问题。

为了有效开展三江源一期工程生态成效监测和评估,青海省环保厅与水利厅、农牧厅、林业厅、气象局等单位共同组成三江源生态监测工作组,以中国科学院地理科学与资源研究所作为技术牵头单位,综合应用地面观测、遥感监测和模型模拟相结合的技术方法,针对生态工程预期目标和区域生态环境特征,在构建生态系统结构、质量、服务综合评估指标体系和动态过程本底的基础上,完成了一期工程生态成效综合评估。具有时空针对性的评估结果能反映生态系统退化与恢复状况,是形成今后生态保护与生态修复策略的重要前提,为二期大规模实施生态保护和建设提供科学依据。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

青海三江源区地处青藏高原腹地,是长江、黄河、澜沧江三大河流的发源地,三条

江河每年向下游供水400亿 m^3 左右,被誉为“中华水塔”。三江源区以冰川、冰缘、高山、高地平原、丘陵地貌为主,海拔在2800~6564 m之间,海拔5000 m以上分布冰川地貌。三江源区面积36.3万 km^2 ,其中草地约占65%,水体与湿地约占8.5%,森林约占4.7%,农田约占0.3%^[21]。该区草地以高寒草甸和高寒草原为主,分别占草地总面积的76%和23%。三江源生态保护和建设一期工程自2005年开始,到2012年已经实施了8年,工程包括生态保护与建设、农牧民生产生活基础设施建设、支撑等3大类22个子项目。工程实施范围即三江源自然保护区,包括6个片区、18个自然保护分区(图1),总面积达15.23万 km^2 ,占青海省总面积的21%,占三江源地区总面积的42%。

2.2 工程生态成效评估指标体系

考虑科学性、重要性、可操作性等原则,结合区域特点与生态定位,基于三江源区草地生态系统综合评估指标体系^[22],参照《三江源生态保护和建设生态效果评估技术规范》^[23],构建了针对工程目标的三江源生态保护和建设工程生态成效评估指标体系(表1),设计了生态系统结构、质量、服务与生态系统变化的影响因素4大指标群,包括15个一级指标和75个二级指标。

2.3 监测与评估数据获取及处理

2.3.1 地面监测与野外观测

三江源区地面生态监测体系由492个站点组成(图2),主要用于草地、森林、湿地、荒漠生态监测样点(区),水文水资源观测、水土保持综合监测、气象要素观测、环境空气质量监测、生活饮用水水质监测、地表水质监测、土壤环境质量监测等。自2005年至2012年通过连续多年观测,已取得生态系统植被生产力、植物组成结构、土壤特性、草地退化、水文、气象等各类监测数据上百万个。此外,连续7年开展了LUCC和草地退化遥感解译验证野外调查^[21, 24],土壤持水力、土壤侵蚀¹³⁷Cs^[25-26]及土壤理化性状取样调查,用于草地生产力和产草量模拟结果验证的草地样方调查^[27-28],以及用于遥感和地面尺度转换的5个5 km \times 5 km循环采样草地大样地数据^[29],连续多年采集地上、地下生物量数据2430个和2916个,土壤样品4131个。

2.3.2 遥感解译与遥感参数反演

基于地学、气候学和生态学知识,依据20世纪70年代MSS、90年代与2004年TM、2012年环境小卫星4期影像数据,经图像精纠正和拉伸处理后,进行土地利用/覆被遥感解译,并判读4期之间土地利用/覆被变化^[21],在此基础

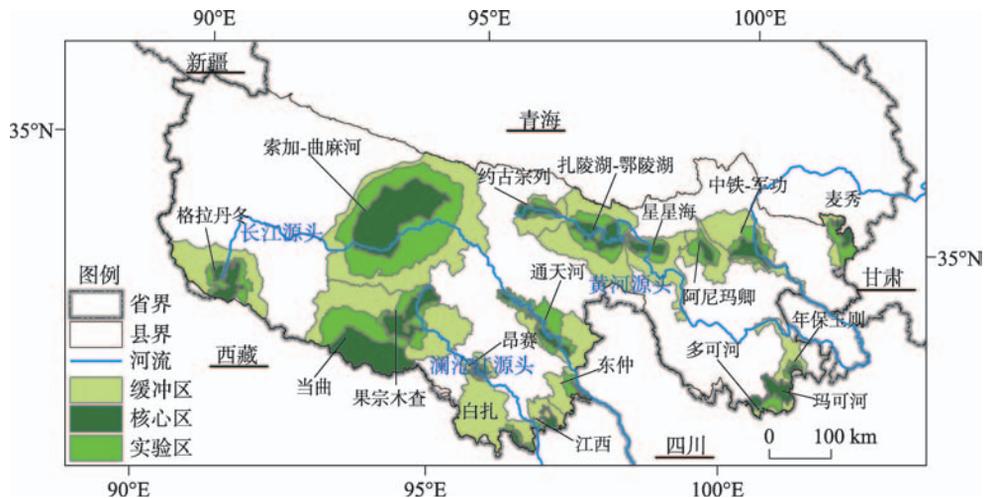


图1 青海三江源自然保护区分布图

Fig. 1 The distribution of Sanjiangyuan Nature Reserve in Qinghai Province

表1 三江源生态保护和建设工程生态成效评估指标体系

Tab. 1 The index series to assess the ecological effectiveness of Sanjiangyuan ecological conservation and restoration projects

指标类别	评估指标	
	一级指标	二级指标
生态系统宏观结构	生态系统宏观结构	生态系统分类面积、变化率、动态度(S)
	生态系统宏观结构变化指数(EMSCI)	
生态系统质量	草地退化与恢复	草地退化与恢复分类面积、草地退化与恢复分类面积占比、草地退化状况变化指数(GDCI)
	植被状况	植被生物量、植被覆盖度(F)、植被净初级生产力(NPP)、植被状况变化指数(VCCI)
	宏观生态状况	土地覆被状况指数(LCSI)、土地覆被转类指数(LCCI)
	植物物种多样性	物种丰富度、物种重要值(P)、多样性指数(H')、均匀度指数(J)
	环境质量	地表水环境质量指数(WI)、土壤环境质量指数(SI)、环境空气质量指数(AI)
	多年冻土上限深度	
	生态系统质量变化指数(EQCI)	
生态系统服务	水源涵养	枯水季河流径流量、水源涵养量(W)、水源涵养服务保有率(WP)、夏汛期河流径流调节系数(RS)
	土壤保持	河流径流含沙量、土壤水蚀模数(A)、土壤保持量(SK)、土壤保持服务保有率(SP)
	防风固沙	土壤风蚀模数(SL)、防风固沙量(FS)、防风固沙服务保有率(FP)
	牧草供给	草地产草量(GY)、草地理论载畜量(C)
	水供给	河流径流量、湖泊面积、湖泊水量、冰川面积、地下水资源量
		生态系统服务变化指数(ESCI)
生态系统变化的影响因素	气候变化	气温、降水、湿润系数
	人类活动	生态工程、草地载畜压力指数(I _p)
		生态系统变化的工程影响指数(EPECI _e)
	生态工程和气候变化贡献率	评价参数(植被净初级生产力、水源涵养服务、土壤保持服务、防风固沙服务)变化的生态工程贡献率(EPC)
		评价参数(植被净初级生产力、水源涵养服务、土壤保持服务、防风固沙服务)变化的气候变化贡献率(CEPC)

上,生成森林、草地、农田、水体与湿地、聚落、其他生态系统类型空间分布数据,进而对生态系统类型空间数据进行统计分析,综合评价各生态系统类型的变化趋势。采用形态与成因相结合的草地退化/恢复遥感分类系统^[24],遥感解析得到了三江源区1:10万1970s-1990年、1990-2004年草地退化空间数据与退化草地生态系统变化态势空间数据。通过生态状况变化指数(土地覆被转类指数),解决了动态度指数模型不能反映生态系统转好还是转坏的问题^[30]。

利用Spot Vegetation 10天间隔的1 km NDVI数据产品,基于归一化植被指数的植被覆盖度计算模型,获取了三江源区1998-2012年最大植被覆盖度空间数据。

2.3.3 模型模拟 在改进遥感生产力模型(GLOPEM)的基础上,基于大样地循环采样获得的数据进行了具有区域针对性的模型参数调试,完成了模型参数的区域本地化^[28]。利用3种不同尺度的归一化植被指数(NDVI)数据(TM 30 m、MODIS 250 m和1 km),建立3种尺度间的转换关系,并将此尺度关系应用于模型参数化和模拟结果验证^[31]。模拟了三江源区1988-2012年每16天1 km的植被NPP时空数据。基于GLOPEM模型和地下生产力模型的草地产草量估算方法^[27]和基于生态模型的草地载畜压力指数算法^[32],结合草地类型空间数据、草地季节草场空间数据、分县家畜统计数据、第一次草地资源调查和三江源草地资源监测等数据,模拟得到1988-2012年草地产草量数据和草地载畜压力指

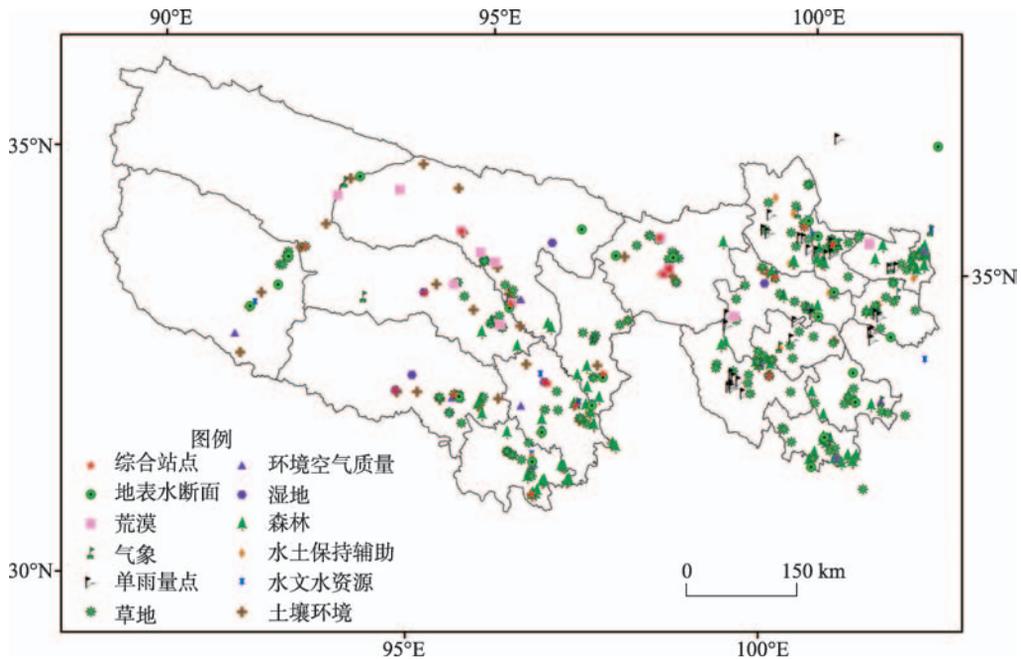


图2 三江源生态评估地面监测体系分布

Fig. 2 The distribution of ecosystem field monitoring networks in Sanjiangyuan Region

数数据。

采用降水贮存量法计算三江源区森林、草地、湿地生态系统水源涵养量,针对该方法中产流降水量占降水总量的比例 K 值(南方取值0.6,北方取值0.4)不能反映区域生态系统的空间差异问题,提出了 K 值修正方法,采用地面调查、遥感和气象数据,以及多年均河川径流系数空间数据,建立了1 km分辨率的 K 值空间数据。同时,采用了该地区坡面径流实测数据,确定了高寒草甸生态系统与裸地相比减少径流的效益系数 R 值^[33]。

三江源区土壤水蚀量的估算采用美国的修正通用水土流失方程(RUSLE),对于方程中的降雨侵蚀力、土壤可蚀性、坡长、坡度、覆盖和管理,以及水土保持措施等因子进行了参数本地化。为了避免用年降雨侵蚀力与年草地覆盖因子计算因时间不同步而造成结果误差较大的问题,利用16天降雨侵蚀力和16天草地覆盖因子计算;在坡长计算中把生态系统类型边界、道路、河流、沟塘湖泊等地表要素考虑为径流的阻隔因素,改进了传统算法中通过相邻栅格间的坡向以及坡度变化率确定坡长终止点的方法,避免了坡长因子的高估。利用长江、黄河的4个主要水文站年输沙量对估算结果进行了相关性验证, R^2 为0.72。

土壤风蚀量估算采用美国的修正风蚀方程(RWEQ),对该方程中的气候因子(风因子、土壤湿度、雪盖因子)、土壤可蚀性因子、土壤结皮因子、地表粗糙度因子、植被因子等进行了参数本地化,考虑了月尺度和春冬季枯萎覆盖度等,提高了估算精度。利用¹³⁷Cs地面调查数据对估算结果进行了相关性验证, R^2 为0.85^[34]。

2.3.4 其他数据 收集了三江源区17个国家气象台站1975-2012年气温、降水量、蒸发量、日照时数等10个气象要素的逐日观测数据,同时基于青海省及周边省份气象站点观测数据利用AUSPLINE插值得到1 km气温、降水量空间分布数据。收集了唐乃亥站、吉迈站、直门达站、沱沱河站1975-2011年流量、含沙量日观测数据^[35],2005-2012年13个

监测断面水质监测数据。

2.4 工程生态成效评估方法

以空间信息技术为支撑,以“自下而上”和“自上而下”相结合的方法,实现野外观测数据、生态模型模拟数据和遥感对地观测数据的集成分析,通过多源数据融合、尺度转换与地面—空间数据相互验证,形成三江源区生态系统结构和草地退化/恢复的分布格局及变化科学认识,追踪全区生态系统服务变化轨迹,提炼生态系统变化过程的规律。

本评估提出了“动态过程生态本底”的概念,明确了生态本底是指生态保护和恢复工程实施前的区域生态状况,既包括了工程实施前5~10年的生态系统平均状况,也包括过去20~30年生态系统的变化趋势。“动态过程生态本底”不仅解决了因降水周期性导致的生态工程生态成效评价不确定性问题,而且可以准确判断生态系统的变化过程和趋势,从而使生态成效评估具有科学性。

基于“动态过程本底”和工程目标,开展一期工程生态成效综合评估。参照《三江源生态保护和建设生态效果评估技术规范》^[23],对比分析生态系统宏观结构、质量、服务等各项指标在工程实施前后,以及自然保护区(重点生态工程区)内外的平均状况和变化趋势^[36],并采用控制模型气候参数的方法进行模拟对比,给出气候变化背景下工程生态成效的科学结论,评价《规划》实施的生态成效。

根据不同指标和评估目标,评估时段主要划分为:工程实施前30年(1970s中期-2004年)、前14年(1990-2004年)、前8年(1997-2004年)和工程期(2004-2012年)。

2.5 生态系统变化的影响因素厘定

气候变化与生态工程是三江源区生态系统变化的主要影响因素。为了厘定这两个因素对生态系统变化的贡献率,在GLOPEM、RULSE、水源涵养模型中,输入多年平均气候要素,估算平均气候状况下的NPP、土壤水蚀量、水源涵养量,由于气候要素不变,可以认为此类估算量的变化与气候变化无关,主要反映生态工程的影响。而真实气候状况下的变化量反映了气候变化和生态工程的综合影响。因此,对比平均气候状况和真实气候状况下工程实施前、后的指标量,可以厘定出生态工程和气候变化对生态系统变化的贡献率。具体公式如下:

$$C_{project} = \frac{G_{AI} - G_{Ap}}{|G_{RI} - G_{Rp}|} \quad (1)$$

$$C_{nature} = \frac{G_{RI} - G_{Rp}}{|G_{RI} - G_{Rp}|} - C_{project} \quad (2)$$

式中: $C_{project}$ 是生态工程的贡献率; C_{nature} 是自然因素(气候变化为主)的贡献率; G_{AI} 、 G_{Ap} 分别是平均气候状况下工程实施后和实施前的指标量; G_{RI} 、 G_{Rp} 分别是真实气候状况下工程实施后和实施前的指标量。

3 结果与分析

3.1 三江源区生态系统时空变化特征

3.1.1 宏观生态状况变化

生态工程实施以来,三江源地区水体局部扩张,荒漠生态系统局部向草地生态系统转变,生态系统结构逐渐向良性方向发展。工程实施前30年,三江源区草地总面积净减少1389.9 km²,水体与湿地总面积净减少375.14 km²,荒漠面积净增加674.38 km²。工程期8年,三江源区草地面积净增加123.70 km²,水体与湿地面积净增

加 279.85 km²，荒漠生态系统的面积净减少 492.61 km²。生态状况变化指数表明全区在工程实施前 30 年宏观生态状况呈转差趋势，而工程期 8 年宏观生态状况则呈好转趋势（图 3）。

与工程实施前 8 年相比，工程期三江源区多年平均植被覆盖度明显提高（图 4），植被覆盖度增长地区的总面积占全区土地面积的 79.18%；其中植被覆盖度轻微好转、明显好转的面积分别占全区土地面积的 43.67%、35.51%。

3.1.2 草地退化/恢复趋势 根据生态本底调查结果，三江源区草地退化的格局在 1970s 已基本形成。1970s-2004 年，三江源区持续发生不同程度退化的草地面积占草地总面积的 40.1%。与工程前 30 年的草地退化状况相比，工程期 8 年退化状态不变的面积占退化草地总面积的 68.52%，轻微好转、明显好转和新退化发生类型的面积分别占 24.85%、6.17%、0.12%，退化加剧发生类型的面积仅占 0.34%（图 5）。

工程实施前 16 年三江源区草地平均产草量为 533 kg/hm²，草地总体超载 1.42 倍，而冬春场草地更是超载 2.5 倍左右。工程期 8 年，草地平均产草量为 694 kg/hm²，相比产草量提高了 30.31%；同时在退化严重地区实施的“生态移民”和全区减畜工作取得明显成效，平均减畜比例超过 20%；“草丰、畜少”的共同作用下，草地的载畜压力指数明显降低，平均载畜压力指数降低了 36.1%（图 6）。

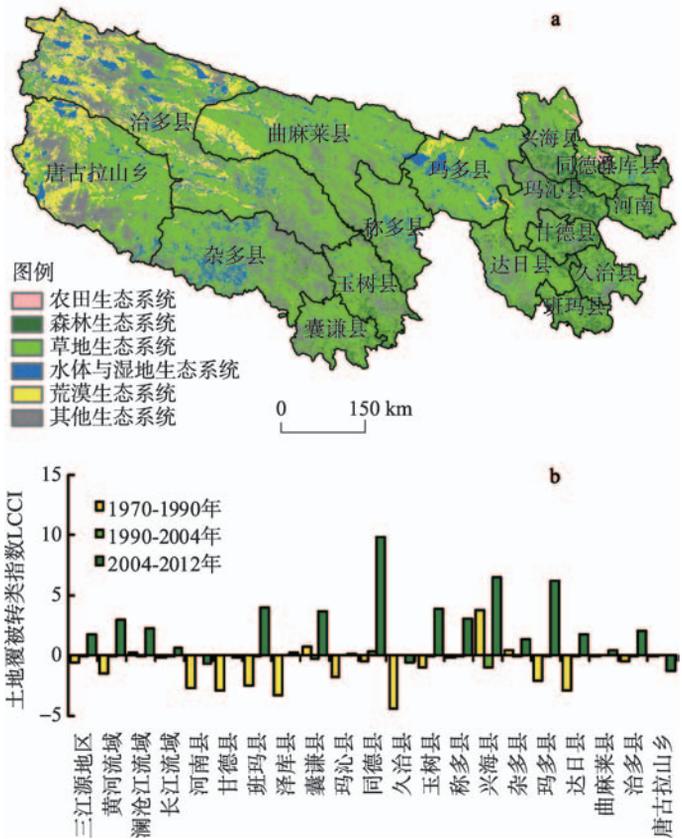


图 3 三江源区 2012 年生态系统类型分布(a)与 1970s-2012 年生态状况变化指数(b)

Fig. 3 The distribution of ecosystem type in Sanjiangyuan in 2012 (a) and ecological change index from 1970s to 2012 (b)

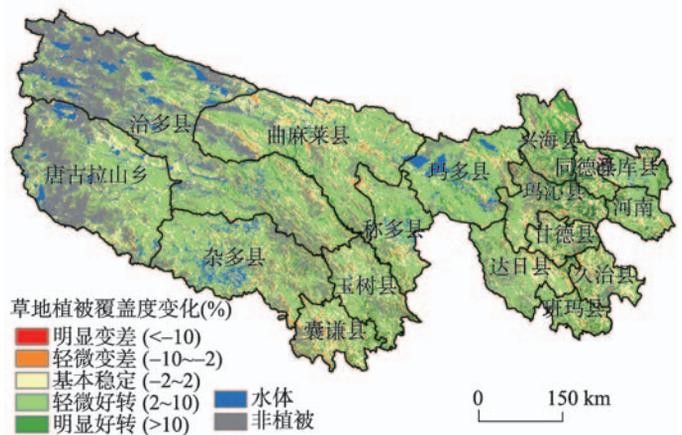


图 4 三江源区工程实施前后多年平均植被覆盖度变化
Fig. 4 The changes of average vegetation coverage before and after the implementation of the project in Sanjiangyuan

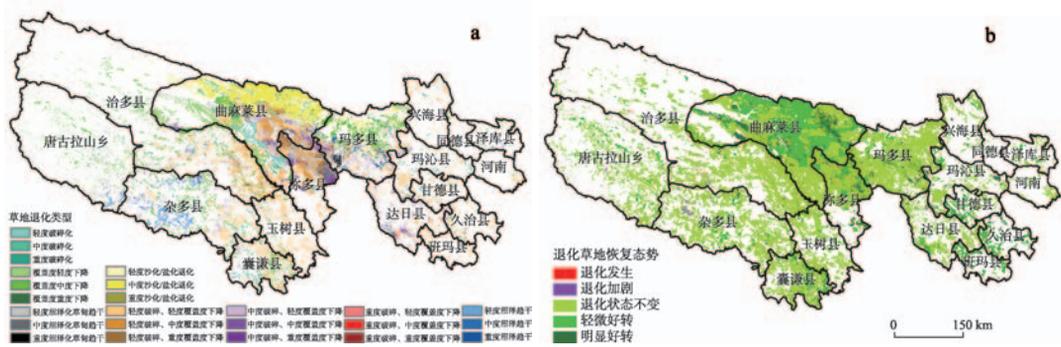


图5 三江源区1990-2004年草地退化(a)和2004-2012年退化草地恢复态势(b)

Fig. 5 The distribution of grassland degradation in 1990-2004 (a) and grassland restoration from 2004 to 2012 (b) in Sanjiangyuan

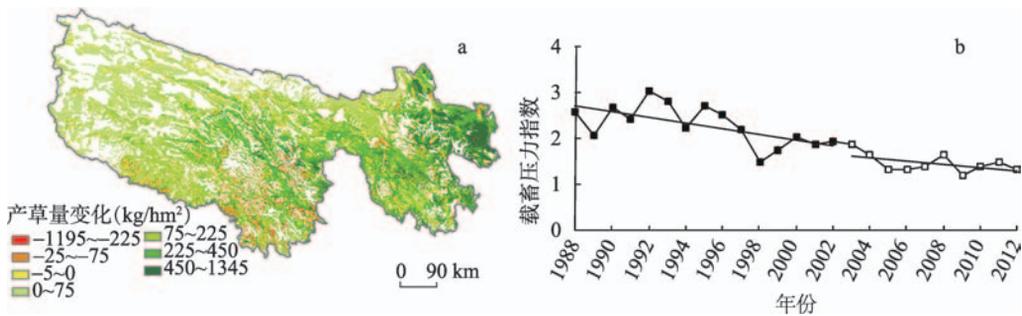


图6 三江源区工程实施前后草地产草量变化空间分布(a)与草地载畜压力指数年际变化(b)

Fig. 6 The change of grassland yield compared before and after the implementation of the project (a) and annual variation of livestock pressure index (b) in Sanjiangyuan

2005-2012年,三江源区天然草地植被覆盖度为69%~83%,总体上呈增加趋势,特别是温性草原类明显增加。结果表明,三江源区草地退化趋势得到初步遏制,工程实施对草地覆盖度的提高产生了直接的和较好的正面作用,但高寒草地的天然特性决定了提高幅度有限,达到《规划》“草地植被盖度提高平均20%~40%”预期目标十分困难。

3.1.3 水源涵养和流域水供给服务 1997-2012年,三江源区森林、草地生态系统水源涵养服务在波动中有所提升(图7),多年平均年水源涵养量为153.60亿m³,每年单位面积水源涵养量为430.67 m³/hm²。工程实施前8年林草生态系统多年平均年水源涵养量为142.49亿m³,变化趋势为1.66亿m³/10a,工程期8年为164.71亿m³,水源涵养量增加趋势为19.35亿m³/10a,水源涵养量相比增加了15.60%。长江、黄河、澜沧江流域林草生态系统水源涵养量在生态工程实施后均有所提高,分别增加了9.23亿m³/a、10.48亿m³/a和1.30亿m³/a。

与2004年相比,2012年三江源区水体与湿地面积净增加279.85 km²,增加了9.11%,水体与湿地生态系统水源涵养量由242.39亿m³增至244.24亿m³,增加了1.85亿m³。区域水源涵养量达到了《规划》增加13.20亿m³的目标。

黄河流域河川径流量在工程期恢复较快,与工程实施前8年比较,唐乃亥站平均年径流量增加了36.9亿m³,吉迈站增加了17.1亿m³(图8),达到了黄河径流增加12亿m³的目标,对资源性缺水的黄河流域生态安全作出了重要贡献。但从长时间趋势看,黄河流域年径流量的下降趋势仍未得到扭转。由于气候变暖、冰雪加速融化,长江流域沱沱

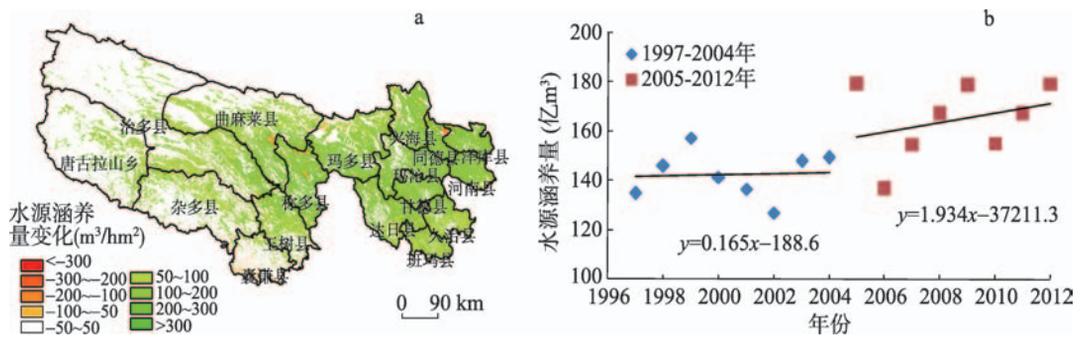


图7 工程实施前后三江源区森林、草地生态系统水源涵养量变化空间分布与年际变化趋势

Fig. 7 The changes and annual variation of water conservation volume of forest and grassland ecosystem before and after the implementation of the project

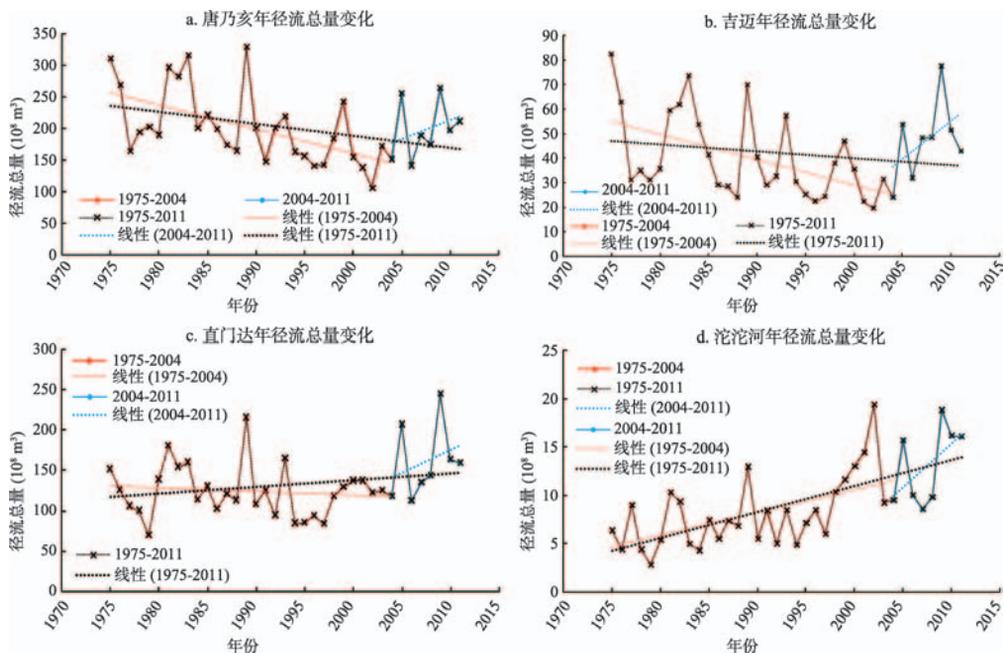


图8 黄河源唐乃亥、吉迈和长江源直门达、沱沱河水文站年径流总量变化趋势

Fig. 8 The annual total runoff of major hydrological stations in the source regions of the Yangtze and the Yellow rivers

河水文站年径流量持续增加,直门达水文站径流量在工程期恢复较快,与工程实施前8年比较,平均年径流量增加了39.2亿 m^3 (图8),且从长时间尺度看,长江流域年径流量的下降趋势已初步得到遏制。

2005-2012年,绝大部分监测断面的水质属于一类和二类,在12个监测断面中,仅隆宝滩断面在4个年份为三类水,所有断面水质均达到了预期保护目标。

3.1.4 土壤保持与防风固沙服务 1997-2012年三江源区多年平均土壤保持量为6.35亿t,呈持续上升趋势(图9)。工程实施前8年,多年平均土壤保持量为5.46亿t,工程期8年为7.23亿t,增加了1.77亿t(1.39亿 m^3),增长了32.5%,反映出工程实施后因植被盖度增加使得生态系统土壤保持能力有所增强。但是,1997-2012年全区年土壤侵蚀量仍呈微弱上升趋势(图10)。工程期8年,多年平均土壤侵蚀量为3.2亿t,较工程前8年增加了

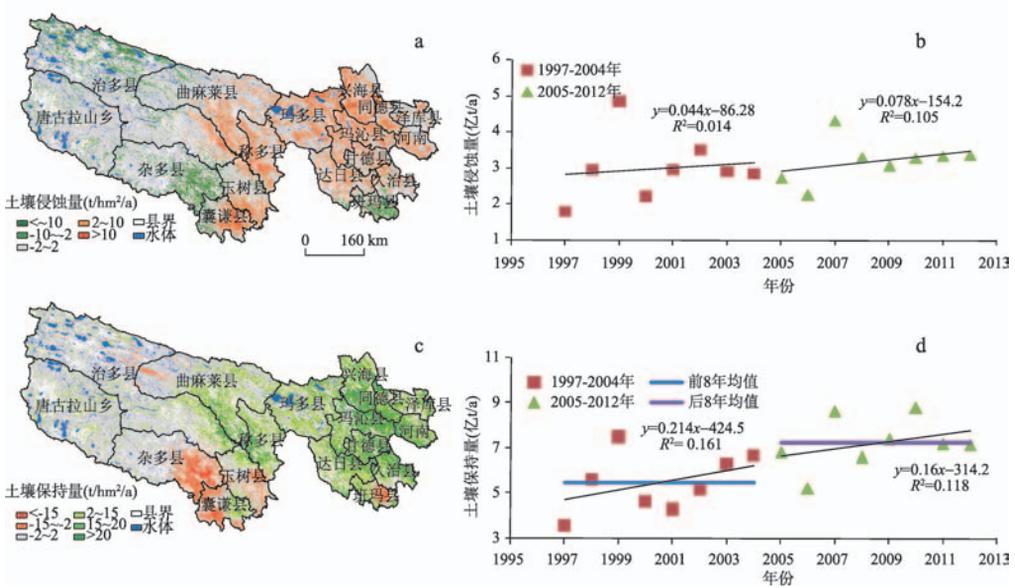


图9 工程实施前后三江源区土壤侵蚀量(a、b)、土壤保持量(c、d)变化的空间分布与年际趋势
 Fig. 9 Changes and annual variation of soil erosion (a, b) and conservation (c, d) volume before and after the project implementation

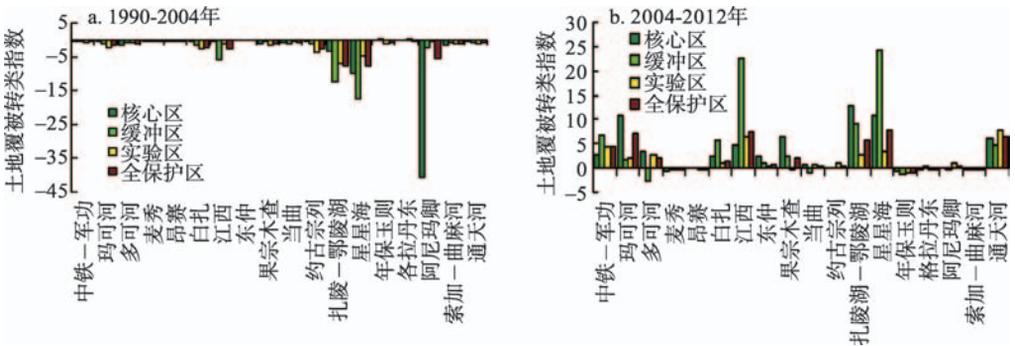


图10 1990-2004年和2004-2012各自然保护区生态状况变化指数
 Fig. 10 The ecological change index of nature reserves in Sanjiangyuan during 1990-2004 and 2004-2012

0.2亿t (0.16万m³), 未达到《规划》的预期目标。主要原因是区域降雨增加虽然明显促进了植被的生长与恢复, 但同时使得降雨侵蚀力增强, 导致土壤水蚀有所增加。

3.2 重点工程区生态状况变化分析

工程实施前14年, 三江源自然保护区内, 森林、草地、湿地和水体等优良生态系统面积净减少386 km², 荒漠和其他生态系统面积净增加389.2 km²; 保护区外, 优良生态系统面积净减少98.8 km², 荒漠和其他生态系统面积净增加97.4 km²。工程期8年, 保护区内优良生态系统面积净增加了252.2 km², 而保护区外仅净增加173 km²; 保护区内荒漠和其他面积净减少了252.2 km², 而保护区外仅净减少180.8 km² (表2)。

工程实施前14年, 18个自然保护分区的生态状况变化指数均为负值, 表明该时段内各保护分区生态状况均趋差; 其中阿尼玛卿的转差最为明显, 其次为星星海和扎陵湖—鄂陵湖。工程期8年, 除年保玉则的生态状况有所转差以外, 17个自然保护分区的生态状况变化指数均为正值, 表明其生态状况好转, 特别是星星海、扎陵—鄂陵湖、江西和

表2 工程实施前后保护区内外生态系统类型面积变化(km²)

Tab. 2 The area changes of ecosystems in and outside the reserves before and after the implementation of the project

时段	空间范围	农田	森林	草地	湿地	荒漠	其他
1990-2004年 (工程前)	保护区内	-3.22	-12.8	-362.4	-10.8	+387.6	+1.6
	保护区外	+1.32	-0.7	-83.4	-14.7	+43.8	+53.6
	内外比较	内减 外增	内减 外减	内减 外减	内减 外减	内增 外增	内增 外增
2004-2012年 (工程后)	保护区内		+12.1	+135.2	+104.9	-192.1	-60.1
	保护区外	+7.84	+3.3	-11.4	+181.1	-300.5	+119.7
	内外比较	内不变 外增	内增 外增	内增 外减	内增 外增	内减 外减	内减 外增
工程后与工 程前比较	保护区内	先减 后不变	先减 后增	先减 后增	先减 后增	先增 后减	先增 后减
	保护区外	连续 增加	先减 后增	连续 减少	先减 后增	先增 后减	连续 增加
	内外比较	内好于外	内好于外	内好于外	内好于外	内好于外	内好于外

注:表中“-”表示减少,“+”表示增加;“内”表示保护区,“外”表示保护区外。

通天河等(图10)。

工程实施前14年,三江源自然保护区退化草地面积43490.67 km²,是全区退化草地面积的49.4%。工程期8年,保护区退化草地明显好转的面积占保护区退化草地面积的7.30%,高于非保护区的5.05%和整个三江源区的6.16%(表3)。

工程实施前14年,三江源自然保护区多年平均植被覆盖度比非保护区高5.57个百分点,工程期8年,保护区比非保护区高6.19个百分点;工程实施前8年,保护区多年平均植被NPP比非保护区高46.02 gC/m²,工程期8年,保护区比非保护区高58.86 gC/m²(表4)。

与工程实施前相比,工程期植被覆盖度变化倾向率在中铁一军功等9个自然保护分区表现为先减少后增加趋势,东仲等9个保护分区表现为持续地增加。其中,当曲、江西、玛可河保护分区后期增幅低于前期,说明在这3个自然保护分区内气候对生态系统的影响起到主要作用。东仲、扎陵湖—鄂陵湖、昂赛、星星海、果宗木查等7个自然保护分区的植被覆盖度增幅高于非工程区,说明工程起到了积极作用。与工程实施前相比,工程期各自然保护分区植被NPP皆表现为增加(图11)。与非保护区相比,部分自然保护分区植被NPP增加趋势更为明显,说明除气候影响以外,工程具有积极的正面作用。

表3 工程实施后2004-2012年退化草地明显好转面积

Tab. 3 The restoration areas of grassland after the implementation of the project during 2004-2012

区域	工程前退化草地		工程后明显好转草地	
	面积 (km ²)	占全区退化草 地面积比例%	面积 (km ²)	占各区退化 草地面积比例%
整个保护区	43490.67	49.4	3173.00	7.30
非保护区	44591.40	50.6	2252.81	5.05
三江源区	88082.07	100	5425.81	6.16

表4 工程实施前后保护区与非保护区植被覆盖度和净初级生产力

Tab. 4 Comparison of the vegetation coverage and NPP in and outside the reserves before and after the implementation of the project

时段	区域	植被覆盖 度(%)	NPP (g C/m ²)
1997-2004年	整个保护区	47.15	246.86
	非保护区	41.58	200.84
	保护区与非保护区差值	5.57	46.02
2005-2012年	整个保护区	50.34	306.23
	非保护区	44.15	247.37
	保护区与非保护区差值	6.19	58.86
后一阶段与前 一阶段差值	整个保护区	3.19	59.37
	非保护区	2.57	46.53
	保护区与非保护区差值	0.62	12.84

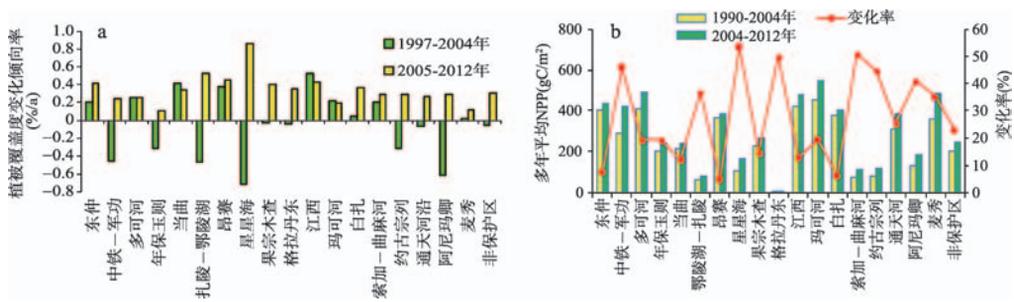


图 11 工程实施前后各保护区植被覆盖度(a)和净初级生产力(b)变化统计

Fig. 11 The changes of vegetation coverage (a) and NPP (b) in nature reserves before and after the project implementation

3.3 生态系统变化的归因分析

3.3.1 生态工程对生态系统的影响 生态保护和建设工程的实施对生态恢复产生了重要作用。通过生态移民和减畜措施，草地载畜压力有效降低，黑土滩治理、退耕还林草和封山育林、沙漠化防治、草原鼠害防治及水土保持工程、天然草地改良等工程的实施，都对严重退化区生态恢复、退化趋势的遏制和生态系统良性发展做出了积极的贡献。

根据模型运算结果，对于整个三江源区域而言，气候因素（含人工增雨工程）对植被恢复占主导作用，工程措施（除人工增雨外）对植被恢复起到了积极作用。在工程区，特别是以黄河源区为代表的重点生态工程区，工程措施对生态系统恢复的贡献更加直接和显著。

在重点工程区，生态工程措施相对集中，对生态系统恢复发挥了重要作用：退牧还草工程使得工程区家畜数量减少，草地现实载畜量明显下降；黑土滩退化草地治理和鼠害防治工程，有利于已经退化草地的恢复和防止新的草地退化发生；封山育林保护工程使得森林面积、郁闭度、蓄积量均有所增加；湿地封育保护避免了人类扰动对湿地的影响；生态移民、建设养畜、太阳能利用等措施有利于减小自然保护区的人类干扰，降低土地利用强度；人工增雨作业，增加了土壤水分，扩大了湖泊湿地面积。草地恢复和草地生产力的提高，提高了草地的理论载畜量，增加了水源涵养和调节能力，对下游地区的生态和生产发挥了重要作用。

3.3.2 气候变化对生态系统的影响 三江源区的气温和降水均呈现从东南向西北递减的分布趋势。该区气温持续变暖，年降水量变化则存在周期性规律。工程实施前（1975-2004年），多年平均年均温为 $-0.58\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、年降水量为 470.6 mm ，年均温变化倾斜率 $0.42\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、年降水量变化倾斜率为 $-9.3\text{ mm}/10\text{a}$ ，呈现暖干化的趋势。工程期（2004-2012年）多年平均年均温为 $0.48\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、年降水量为 518.66 mm ，年均温变化倾斜率为 $0.19\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，年降水量变化倾斜率为 $68.44\text{ mm}/10\text{a}$ ，有明显的暖湿化趋势（图 12）。在空间上，三江

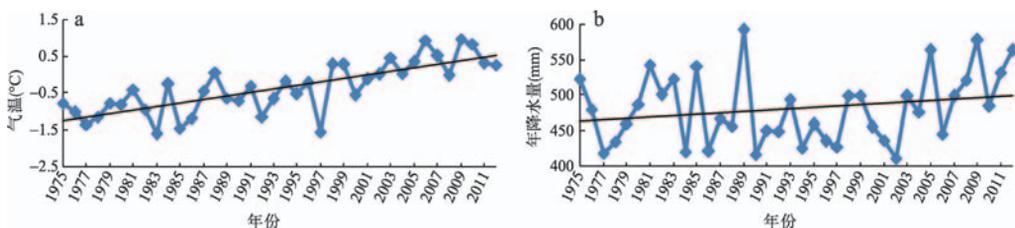


图 12 1975-2012年三江源区年平均气温(a)、降水量(b)变化趋势

Fig. 12 The variation of annual average temperature (a) and annual precipitation (b) in Sanjiangyuan during 1975-2012

源区中东部黄河流域升温幅度最大,西北部升温幅度最低;中西部整个长江流域和黄河源头降水量增加明显(图13)。因此,工程期的气温变暖导致植被返青期提前、冰川冻土融水增多,同时降水增加,对植被生长起到了促进作用,使得荒漠化进程减缓,荒漠面积减少,水体面积增加,十分有利于区域生态的恢复。

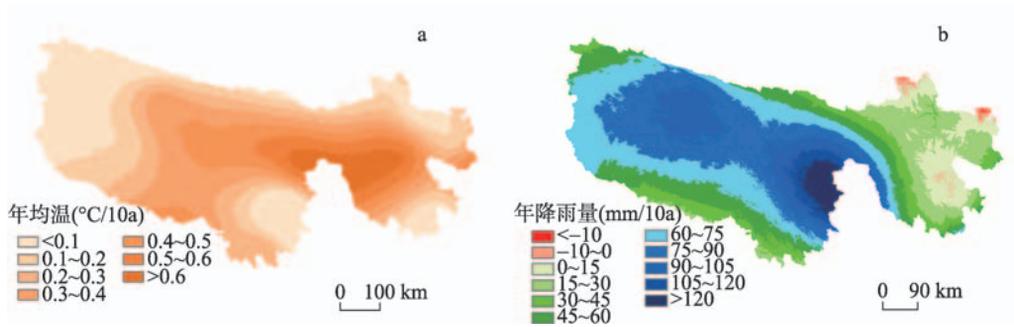


图13 2004-2012年三江源区年均温(a)、年降水量(b)变化倾斜率空间分布

Fig. 13 The variation trends of annual average temperature (a) and annual precipitation (b) in Sanjiangyuan during 2004-2012

3.3.3 生态工程与气候变化对生态系统变化的贡献率 真实与平均气候状况下,工程实施前、后NPP变化量分别为 $21.79 \text{ g C/m}^2 \cdot \text{a}$ 和 $13.49 \text{ g C/m}^2 \cdot \text{a}$ (表5),因而NPP增加的生态工程贡献率为61.9%,而气候变化等自然因素的影响为38.1%。两种气候状况下,工程实施前、后水源涵养量变化量分别为22.22亿 m^3/a 和5.34亿 m^3/a ,说明生态工程对三江源区林草生态系统水源涵养服务增加的贡献率是24%,而气候变化贡献了76%。两种气候状况下,工程实施前、后土壤水蚀量变化量分别为2000 t/a和-1600 t/a,说明生态工程实施后由于植被好转从而减少土壤水蚀的贡献达到80%,然而降水量增加导致降水侵蚀力增强从而增加土壤水蚀量,因此气候变化对土壤水蚀的影响达到180%。

表5 真实和平均气候状况下工程实施前、后评估指标量归因统计

Tab. 5 The statistics of indexes before and after the project implementation under actual and average climate conditions

评估指标	工程实施前、后的变化量		生态工程贡献率(%)	气候变化贡献率(%)
	真实气候状况	平均气候状况		
NPP($\text{g C/m}^2 \cdot \text{a}$)	21.79	13.49	61.9	38.1
水源涵养量(亿 m^3/a)	22.22	5.34	24	76
土壤水蚀量(t/年)	2000	-1600	-80	180

三江源区植被恢复实际受生态工程与气候变化(降水增加、气温上升)两方面的影响。尽管平均气候状况下,工程实施前、后的气候要素不变,但GLOPEM、RULSE、水源涵养模型中均有植被因子的输入。因此,几个指标的变化量仍然部分反映了气候变化的影响,生态工程的贡献率可能高估,下一步研究中将对贡献率厘定方法作进一步改进。

4 结论与讨论

4.1 结论

本研究综合评估三江源生态保护和建设一期工程实施以来的生态成效,可以概括为:

(1) 生态系统退化趋势得到初步遏制。生态工程实施以来,三江源区水体局部扩张,荒漠局部向草地转变,生态系统结构逐渐向良性方向发展。多年平均植被覆盖度明

显提高,全区宏观生态状况趋好,但尚未达到1970s比较好的生态状况。草地退化趋势得到初步遏制,工程实施对草地覆盖度的提高产生了直接的和较好的正面作用,但高寒草地的天然特性决定了提高幅度有限,达到《规划》“草地植被盖度提高平均20%~40%”预期目标十分困难。水体与湿地整体有所恢复,生态系统水源涵养和流域水供给能力提高,区域水源涵养量达到了《规划》增加13.2亿 m^3 目标。黄河流域河川径流量达到了黄河径流增加12亿 m^3 的目标。土壤保持服务量持续上升,生态系统土壤保持能力有所增强,然而,工程期多年平均土壤水蚀量比工程前增加了0.2亿t,未达到《规划》目标。

(2)重点工程区生态状况好转程度好于非工程区,但不同分区有所差异。在气候影响以外,生态保护和建设工程的实施对促进自然保护区植被的恢复起到了明显而积极的作用。植被的恢复和生态系统质量的提高,有效提升了生态系统服务,野生动植物栖息地环境质量明显改善,加之“减人减畜”的作用,野生动物种群数量明显增加。这一点在黄河源头区的表现尤为突出。与非保护区相比,部分自然保护区草地植被净初级生产力增加趋势更为明显,说明除气候影响以外,生态保护和建设工程具有积极的正面作用。

(3)三江源区生态环境“初步遏制,局部好转”成效的取得是“天帮忙、人努力”综合作用的结果。结果表明,对于整个三江源区而言,气候因素(含人工增雨工程)对植被恢复占主导作用,工程措施(除人工增雨外)对植被恢复起到了积极作用。在工程区,特别是以黄河源区为代表的重点生态工程区,工程措施对生态系统恢复的贡献更加直接和显著。

通过青海三江源自然保护区生态保护与建设工程的实施,三江源区域生态环境总体表现出“初步遏制,局部好转”的态势,宏观生态状况总体呈好转趋势,多年平均植被覆盖度明显提高,草地的载畜压力指数明显降低,水体与湿地生态系统整体有所恢复,生态系统水源涵养和流域水供给能力提高,野生动物栖息地环境明显改善,且重点工程区内生态恢复程度好于整个区域,生态保护成效显著,《规划》预期目标基本实现。

4.2 讨论

三江源生态保护和建设一期工程的覆盖范围仅占三江源区的40%。工程实施8年以来,草地退化态势明显好转的面积仅占原有退化草地面积6.17%,且仅是长势好转,群落结构尚未明显好转;草地退化态势遏制(即原退化状况不变)的面积占原有退化草地面积的68.52%。与1970s草地相比,黄河源和长江源仍存在大面积的退化草地,其中,玛多县、曲麻莱县、以及称多县北部和治多县的东南部,退化草地面积比例最大。可见,自工程实施以来,虽然三江源区草地退化得到初步遏制,但草地退化局面并没有获得根本性扭转,退化草地的恢复与治理,仍然是一项长期的艰巨任务。

工程实施以来,三江源区草地植被覆盖度明显提高,特别是黄河源区植被覆盖度明显好转。然而,将2005-2012年多年平均草地覆盖度与1980s同类型草地覆盖度进行比较可以发现(图14),草地覆盖度差值在

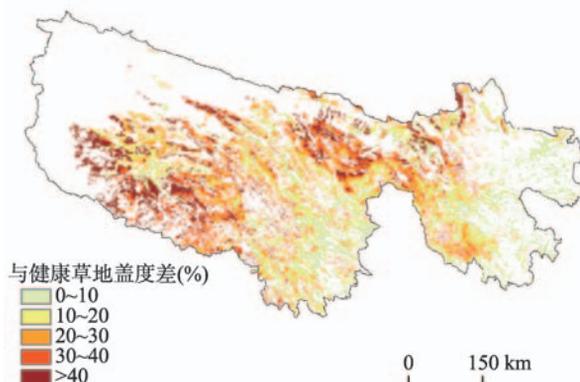


图14 2005-2012年三江源区草地平均植被覆盖度与1980s草地的差值空间分布

Fig. 14 The difference of grassland vegetation coverage in Sanjiangyuan during 2005-2012 compared with the 1980s

10%以上草地面积达34.87%，即仍有约35%草地需要进一步恢复。

工程实施以来，虽然草地面积净增加了123.70 km²，仅占工程实施前30年净减少草地面积的8.9%。虽然荒漠面积净减少了492.61 km²，占工程实施前30年净增加面积的73%。虽然湿地和水体面积净增加287.87 km²，占工程实施前30年净减少面积的76.7%。

尽管黄河流域河川径流量在工程实施后有较快的恢复，但唐乃亥水文站径流量尚未恢复到20世纪70年代和80年代的水平(表6)。长江源沱沱河水文站年径流量一直处于增加中，主要因为气温上升导致该区冰川、永久积雪和冻土加速融化造成了径流增加，但从长远的角度，是不可持续的。

工程的实施尚未遏制土壤水蚀增加的趋势，与工程实施前8年相比，工程实施后8年全区多年平均年土壤流失量增加了1572.33万m³。根据各水文站观测的累计输沙量年际变化(图15)，可以得知2004-2012年土壤水蚀总体上呈增加的趋势。这是因为三江源草地退化有大量的土壤层剥蚀，尽管目前草地植被有所恢复，其覆盖度和生产力有所提高，但是基于三江源地区较严酷的生态环境，对于水土保持意义重大的植被根系土壤层恢复却极其缓慢，土壤理化性状的恢复则更为缓慢。这主要表现在，植被根系层浅，根系生长缓慢，植物根系的固土能力弱，土壤生成能力差。从区域生态系统的分布格局和生态条件看，三江源地区的植被生态系统十分脆弱，特别是由东南至西北更趋脆弱。这一现象也说明三江源地区的生态恢复是一项长期、艰巨的工作，需要进行持续的努力。另一方面，降雨量在促进植被生长的同时，也造成了降雨侵蚀力的明显提高，使得土壤水蚀量有所增加，因此，建议今后科学部署人工增雨工程。同时，鼠害治理的形势依然严峻，需要继续探索长期有效治理途径。

综上所述，三江源自然保护区生态保护和建设工程(一期)的实施仅是起步，具有局部性、初步性特点，三江源区生态保护和建设任务的长期性、艰巨性凸显。

参考文献(References)

- [1] The People's Government of Qinghai Province. The General Planning on Ecological Protection and Construction in Qinghai Sanjiangyuan Nature Reserve. 2005. [青海省人民政府. 青海三江源自然保护区生态保护和建设总体规划. 2005.]
- [2] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being. Washington: Island Press, 2003.
- [3] The State of Nation's Ecosystems 2008: Measuring the Lands, Waters, and Living Resources of the United States. The

表6 长江、黄河流域主要控制水文站年径流量变化(亿m³)

Tab. 6 The variations of annual runoff at the major control hydrological stations of the Yangtze River basin and the Yellow River basin (10⁸ m³)

时段	黄河		长江	
	唐乃亥站	吉迈站	直门达站	沱沱河站 (仅5-10月)
1975-1980年	221.21	46.26	115.85	4.85
1975-1990年	236.10	47.90	131.37	6.14
1975-2004年	200.65	39.87	124.29	7.52
1975-2011年	201.40	41.90	132.40	9.10
1991-2004年	165.20	31.26	116.20	9.11
1997-2004年	161.00	30.20	122.10	11.70
2004-2011年	197.90	47.30	161.30	13.10

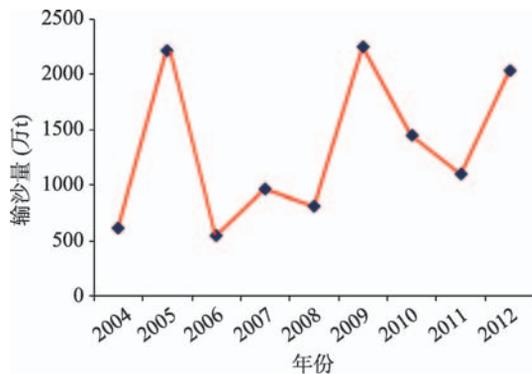


图15 2004-2011年三江源区各水文站累计输沙量变化

Fig. 15 The variation of cumulative sediment amount at hydrological stations in Sanjiangyuan during 2004-2011

- H. John Heinz III Center for Science, Economics and the Environment, 2008.
- [4] Abbot M, Dawson T, Clark J, et al. NEON Science Capability Assessment [Internet]. Boulder (CO): NEON, Inc.; 2015 February 23. 19p. Available from: <http://www.neoninc.org>.
- [5] Vaughan H, Brydges T, Fenech A, et al. Monitoring long-term ecological changes through the Ecological Monitoring and Assessment Network: Science-based and policy relevant. *Environ. Monit. Assess.* 2001, 67(1/2): 3-28.
- [6] The Environmental Protection Industry Standard of People's Republic of China. Technical Criterion for Eco-environmental Status Evaluation (HJ/T 192-2006). Beijing: China Environmental Science Press, 2006. [中华人民共和国环境保护行业标准. 生态环境状况评价技术规范(HJ/T 192-2006). 北京: 中国环境科学出版社, 2006.]
- [7] China National Environmental Monitoring Centre. Study on Ecological Environmental Quality Assessment China. China Beijing: China Environmental Science Press, 2004. [中国环境监测总站. 中国生态环境质量评价研究. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.]
- [6] Li Shidong, et al. China Ecological Status Report 2005: Ecological Comprehensive Index & Ecological Status Assessment. Beijing: Science Press, 2006. [李世东, 等. 中国生态状况报告 2005: 生态综合指数与生态状况基本判断. 北京: 科学出版社, 2006.]
- [9] Liu Jiyuan, Yue Tianxiang, Ju Hongbo, et al. Integrated Ecosystem Assessment in Western China. Beijing: China Meteorological Press, 2006. [刘纪远, 岳天祥, 鞠洪波, 等. 中国西部生态系统综合评估. 北京: 气象出版社, 2006.]
- [10] Li Shidong. World's Important Ecological Engineering. Beijing: Science Press, 2007. [李世东. 世界重点生态工程研究. 北京: 科学出版社, 2007.]
- [11] Wang Lixian, Wang Binrui, et al. Forestry Ecological Engineering. Beijing: China Forestry Publishing House, 2000. [王礼先, 王斌瑞, 等. 林业生态工程学. 北京: 中国林业出版社, 2000.]
- [12] Xu Xiaoqing. Integrated Evaluation on Synthetical Efficiency of Forest. Beijing: China Forestry Publishing House, 1992. [徐孝庆. 森林综合效益计量评价. 北京: 中国林业出版社, 1992.]
- [13] Liu Yong. Study on post-evaluation of theory and application of the forest ecological engineering in China [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006. [刘勇. 中国林业生态工程后评价理论与应用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.]
- [14] Cai Bofeng. Study on the Monitoring and Evaluation of the Three North Shelterbelt Project. Beijing: Chemical Industry Press, 2009. [蔡博峰. 三北防护林工程监测和评价研究. 北京: 化学工业出版社, 2009.]
- [15] State Forestry Administration. National Report on the Ecological Benefits of Grain for Green Program in 2013. Beijing: China Forestry Publishing House, 2014. [国家林业局. 2013退耕还林工程生态效益监测国家报告. 北京: 中国林业出版社, 2014.]
- [16] Xiao Wenfa, Huang Zhilin, Tang Wanpeng, et al. Monitoring and Evaluation of Ecological Benefits of National Land Conversion Program in Three Gorges Reservoir Area. Beijing: Science Press, 2012. [肖文发, 黄志霖, 唐万鹏, 等. 长江三峡库区退耕还林工程生态效益监测与评价. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [17] Yu Xinxiao, Gu Jiancai, Yue Yongjie, et al. Benefit evaluation on forestry ecological projects. Beijing: Science Press, 2010. [余新晓, 谷建才, 岳永杰, 等. 林业生态工程效益评价. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [18] Hu Yunfeng, Liu Jiyuan, Qi Yongqing, et al. Positivist analysis on the effects of ecological projects in the farming-pastoral transition belt of Inner Mongolia Autonomous Region. *Geographical Research*, 2010, 29(8): 1452-1460. [胡云锋, 刘纪远, 齐永青, 等. 内蒙古农牧交错带生态工程成效实证调查和分析. *地理研究*, 2010, 29(8): 1452-1460.]
- [19] National standards of the People's Republic of China. Evaluation in Project for the Construction of Conversion of Cropland to Forest (GB/T23233-2009). Beijing: Standards Press of China, 2009. [中华人民共和国国家标准. 退耕还林工程建设效益监测评价(GB/T23233-2009). 北京: 中国标准出版社, 2009.]
- [20] State Forestry Administration. Technical Specification on Evaluation of the Three North Shelterbelt Project (LY/T 2411-2015). Beijing: Standards Press of China, 2015. [国家林业局. 三北防护林工程评估技术规程(LY/T 2411-2015). 北京: 中国标准出版社, 2015.]
- [21] Xu Xinliang, Liu Jiyuan, Shao Quanqin, et al. The dynamic changes of ecosystem spatial pattern and structure in the Three-river Headwater region in Qinghai Province during recent 30 years. *Geographical Research*, 2008, 27(4): 829-838. [徐新良, 刘纪远, 邵全琴, 等. 30年来青海三江源生态系统格局和空间结构动态变化. *地理研究*, 2008, 27(4): 829-838.]
- [22] Liu Jiyuan, Shao Quanqin, Fan Jiangwen. The integrated assessment indicator system of grassland ecosystem in the Three-River Headwaters region. *Geographical Research*, 2009, 28(2): 273-283. [刘纪远, 邵全琴, 樊江文. 三江源区草地生态系统综合评估指标体系. *地理研究*, 2009, 28(2): 273-283.]
- [23] Local Standard of Qinghai Province. Technical Specification of Ecological Effects Assessment of Ecosystem Protection

- and Recovery Projects in Sanjiangyuan Region (DB63/T1342-2015). 2014. [青海省地方标准. 三江源生态保护和建设生态效果评估技术规范(DB63/T1342-2015). 2014.]
- [24] Liu Jiyuan, Shao Quanqin, Xu Xinliang. The spatial and temporal characteristics of grassland degradation in the Three-River Headwater's Region in Qinghai Province. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(4): 364-376. [刘纪远, 邵全琴, 徐新良. 近30年来青海三江源地区草地退化的时空特征. *地理学报*, 2008, 63(4): 364-376.]
- [25] Shao Quanqin, Xiao Tong, Liu Jiyuan, et al. Soil erosion rates and characteristics of typical alpine meadow using ^{137}Cs technique in Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56. doi: 10.1007/s11434-011-4477-0. [邵全琴, 肖桐, 刘纪远, 等. 三江源区典型高寒草甸土壤侵蚀的 ^{137}Cs 定量分析. *科学通报*, 2011, 56(13): 1019-1025.]
- [26] Sun Wenyi, Shao Quanqin, Liu Jiyuan, et al. The variation characteristics of soil organic carbon of typical alpine slope grasslands and its influencing factors in the "Three-River Headwaters" Region. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(12): 2072-2087. [孙文义, 邵全琴, 刘纪远, 等. 三江源典型高寒草地坡面土壤有机碳变化特征及其影响因素. *自然资源学报*, 2011, 26(12): 2072-2087.]
- [27] Fan Jiangwen, Shao Quanqin, Liu Jiyuan, et al. Dynamic changes of grassland yield in Three River Headwater Region from 1988 to 2005. *Acta Agrestia Sinica*, 2010(1): 5-10. [樊江文, 邵全琴, 刘纪远, 等. 1988-2005年三江源草地产草量变化动态分析. *草地学报*, 2010(1): 5-10.]
- [28] Wang Junbang, Liu Jiyuan, Shao Quanqin, et al. Spatial-temporal patterns of net primary productivity for 1988-2004 based on GLOPEM-CEVSA model in the "Three-river Headwaters" region of Qinghai Province, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(2): 254-269. [王军邦, 刘纪远, 邵全琴, 等. 基于遥感—过程耦合模型的1988-2004年青海三江源区净初级生产力模拟. *植物生态学报*, 2009, 33(2): 254-269.]
- [29] Bing Longfei, Shao Quanqin, Wang Junbang. Heterogeneity and error estimation of grassland biomass based on cyclic sampling approach. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, 20(2): 257-267. [邴龙飞, 邵全琴, 王军邦. 大样地循环采样的草地生物量空间异质性及误差分析. *草地学报*, 2012, 20(2): 257-267.]
- [30] Zhao Zhiping, Liu Jiyuan, Shao Quanqin. Characteristic analysis of land cover change in Nature Reserve of Three River's Source Regions. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(3): 415-420. [赵志平, 刘纪远, 邵全琴. 三江源自然保护区土地覆被变化特征分析. *地理科学*, 2010, 30(3): 415-420.]
- [31] Chen Zhuoqi, Shao Quanqin, Liu Jiyuan, et al. Analysis of net primary productivity of terrestrial vegetation on the Qinghai-Tibetan Plateau, based on MODIS remote sensing data. *Science China Earth Science*, 2012, 42(3): 402-410. doi: 10.1007/s11430-012-4389-0. [陈卓奇, 邵全琴, 刘纪远, 等. 基于MODIS的青藏高原植被净初级生产力研究. *中国科学(地球科学)*, 2012, 42(3): 402-410.]
- [32] Fan Jiangwen, Shao Quanqin, Wang Junbang, et al. An analysis of temporal-spatial dynamics of grazing pressure on grassland in Three Rivers Headwater Region. *Chinese Journal of Grassland*, 2011, 33(3): 64-72. [樊江文, 邵全琴, 王军邦, 等. 三江源草地载畜压力时空动态分析. *中国草地学报*, 2011, 33(3): 64-72.]
- [33] Wu Dan. Research on water regulation service of the main terrestrial ecosystems in China [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences [D], 2014. [吴丹. 中国主要陆地生态系统水源涵养服务研究[D]. 北京: 中国科学院, 2014.]
- [34] Gong Guoli. Research on the spatial-temporal changes of wind erosion in northern China and the influence factors [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2014. [巩国丽. 中国北方土壤风蚀时空变化特征及影响因素分析[D]. 北京: 中国科学院, 2014.]
- [35] Bing Longfei, Shao Quanqin, Liu Jiyuan, et al. Runoff characteristic in flood and dry seasons in source regions of Changjiang River and Huanghe River based on wavelet analysis. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(2): 232-238. [邴龙飞, 邵全琴, 刘纪远, 等. 基于小波分析的长江和黄河源区汛期、枯水期径流特征. *地理科学*, 2011, 31(2): 232-238.]
- [36] Shao Quanqin, Liu Jiyuan, Huang Lin, et al. Integrated assessment on the effectiveness of ecological conservation in Sanjiangyuan National Nature Reserve. *Geographical Research*, 2013, 32(9): 1645-1656. [邵全琴, 刘纪远, 黄麟, 等. 2005-2009年三江源自然保护区生态保护和建设工程生态成效综合评估. *地理研究*, 2013, 32(9): 1645-1656.]

Assessment on the effects of the first-stage ecological conservation and restoration project in Sanjiangyuan region

SHAO Quanqin¹, FAN Jiangwen¹, LIU Jiyuan¹, HUANG Lin¹, CAO Wei¹,
XU Xinliang¹, GE Jinsong², WU Dan³, LI Zhiqiang², GONG Guoli⁴, NIE Xuemin²,
HE Tian¹, WANG Liya⁵, BING Longfei⁶, LI Qijiang⁷, CHEN Zhuoqi⁸,
ZHANG Gengquan⁹, ZHANG Liangxia¹⁰, YANG Yongshun¹¹, YANG Fan¹,
ZHOU Wanfu¹², LIU Lulu¹, QI Yonggang¹³, ZHAO Guosong¹, LI Yuzhe¹

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Remote Sensing Monitoring Center of Ecosystem and Environment, Qinghai Province, Xining 810007, China; 3. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China; 4. Shanxi Academy for Environmental Planning, Taiyuan 030024, China; 5. Grassland Station in Qinghai Province, Xining 810008, China; 6. Institute of Applied Ecology, CAS, Shenyang 110016, China; 7. Hydrology and Water Resources Survey Bureau in Qinghai Province, Xining 810001, China; 8. Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 9. Qinghai Institute of Forestry Investigation and Planning, Xining 810008, China; 10. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 11. Qinghai Environmental Monitoring Station, Xining 810007, China; 12. Qinghai Institute of Meteorological Science, Xining 810001, China; 13. Bureau of Soil and Water Conservation in Qinghai Province, Xining 810001, China)

Abstract: In this paper, we developed a series of assessment indexes based on the evaluation of ecological effects, which consists of the ecosystem structure, qualities, services, and main impacting factors for these changes. Comprehensive monitoring and assessment methods that focused on the planning objectives of ecological conservation and restoration project were developed based on field observation, remote sensing monitoring and quantitative simulation of ecological processes. Then we assessed the ecological effects of the first-stage of ecological conservation and restoration project in Sanjiangyuan region by adopting the trend analysis of dynamics in ecosystem structure and services. The results showed that since the beginning of the project eight years ago, the macro-situation of ecosystem in this region has been getting better but not reached the best situation in the 1970s. The continued degradation trends of grassland have been initially contained, but it is difficult to achieve the expected objective of "the vegetation coverage of grassland increasing by an average of 20%-40%". The wetland and water-body ecosystems have been restored. The water conservation service of ecosystem and water supply capacity of watershed were increased, and the volume of ecosystem water conservation reached the objective of increasing by 1.32 billion m³. The ecological restoration in the project regions tended to be better than that outside the project regions. In addition to climate change, implementation of the ecological conservation and restoration project had obvious and positive effects on vegetation restoration. However, the degradation situations of grassland were not fundamentally reversed, and the implementation of the project has not been curbing the increasing trend of soil erosion. Therefore, the local and preliminary characteristics of the first-stage of the project highlighted the long-term and arduous ecosystem conservation and protection in the Sanjiangyuan region.

Keywords: Sanjiangyuan region; ecological conservation and restoration; ecosystem monitoring and assessment; ecological effects