

# 三江源地区林草生态系统水源涵养服务评估

吴丹<sup>1,2</sup>, 邵全琴<sup>2</sup>, 刘纪远<sup>2</sup>, 曹巍<sup>2</sup>

(1. 环境保护部 南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042;

2. 中国科学院 地理科学与资源研究所地表格局与模拟院重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** [目的] 分析青海省三江源地区生态工程实施前后生态系统水源涵养服务的变化情况, 客观评估生态工程的效果。[方法] 采用降水贮存量法估算三江源地区林草生态系统的水源涵养量。[结果] 1997—2012 年三江源地区林草生态系统水源涵养服务在波动中有所提升, 平均水源涵养量为  $1.54 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ , 单位面积水源涵养量为  $430.67 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。三江源生态保护与建设工程实施后(2005—2012 年)林草生态系统年平均水源涵养量比前期(1997—2004 年)增加了 15.60%。从空间格局而言, 三江源地区林草生态系统涵养水源能力自东南向西北逐渐递减。单位面积水源涵养量澜沧江流域最高, 其次为黄河流域, 长江流域最低。真实气候条件和平均气候状况下, 生态工程实施后的区域林草生态系统水源涵养量均比前期高。前期主要受到区域气候变化的影响, 后期则叠加了生态工程的驱动作用。两种情况下, 生态工程实施后三江源地区林草生态系统水源涵养量的线性变化趋势分别为  $1.94 \times 10^9$  和  $4.64 \times 10^8 \text{ m}^3/10 \text{ a}$ 。[结论] 生态工程对三江源地区水源涵养服务提升的贡献率约为 23.98%。

**关键词:** 生态系统服务; 水源涵养量; 降水贮存量法; 三江源地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)03-0206-05

中图分类号: S718.5

**文献参数:** 吴丹, 邵全琴, 刘纪远, 等. 三江源地区林草生态系统水源涵养服务评估[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 206-210. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.03.035

## Assessment of Water Regulation Service of Forest and Grassland Ecosystems in Three-River Headwaters Region

WU Dan<sup>1,2</sup>, SHAO Quanqin<sup>2</sup>, LIU Jiyuan<sup>2</sup>, CAO Wei<sup>2</sup>

(1. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection,

Nanjing, Jiangsu 210042, China; 2. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** [Objective] To analyze changes in ecosystem water regulation services before and after the implementation of ecological projects in the Three-River headwaters region, Qinghai Province, and to evaluate the ecological effect of these projects objectively. [Methods] This paper calculated the water regulation amount of forest and grassland ecosystems with rainfall storage capacity method. [Results] The water regulation services of forest and grassland ecosystems increased in fluctuations from 1997 to 2012, with the averaged value of  $1.54 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$  within the region and  $430.67 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  per unit area. The regulated amount of water in the later period(2005—2012) increased by 15.60% than that in the earlier period(1997—2004). Spatially, water regulation service capacity gradually decreased from southeast to northwest. Water regulation amount per unit area of different basins in descending order was Lantsang River basin > Yellow River basin > Yangtze River basin. Water regulation amount after the implementation of ecological projects was higher than before under both real climate conditions and mean climate conditions. In the earlier period, the water regulation service was mainly affected by regional climate change. While in the later period, it was overlaid the effects of ecological projects. In these two conditions, the linear trend of water regulation amount from 2005 to 2012

收稿日期: 2015-04-13

修回日期: 2015-08-19

资助项目: 国家科技支撑计划项目“国家生态系统观测评估技术系统集成研究与示范”(2013BAC03B00); 国家自然科学基金项目(4157011492); 青海省重大科技专项(2015-SF-A4-1); 中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-EW-ST5-005-04)

第一作者: 吴丹(1988—), 女(汉族), 江苏省常州市人, 博士, 助理研究员, 研究方向为生态系统服务。E-mail: cumtwudan@163.com。

通讯作者: 邵全琴(1962—), 女(汉族), 江苏省常州市人, 博士, 研究员, 研究方向为生态 GIS。E-mail: shaoqq@lreis.ac.cn。

was  $1.94 \times 10^9 \text{ m}^3/10 \text{ a}$  and  $4.64 \times 10^8 \text{ m}^3/10 \text{ a}$ , respectively. [Conclusion] Implementation of the ecological projects had certain positive effects on improvement of water regulation service, with a contribution rate of about 23.98%.

**Keywords:** ecosystem service; amount of water regulation; rainfall storage capacity method; the Three-River headwaters region

20世纪90年代以来,生态系统服务已成为当今国际生态学和经济学研究的前言和热点<sup>[1-2]</sup>。水源涵养是陆地生态系统重要的服务之一,是植被层、枯枝落叶层和土壤层对降雨进行再分配的复杂过程<sup>[3-5]</sup>。植被以其繁茂的林冠层、林下的灌草层、枯枝落叶层和疏松而深厚的土壤层,构建了截留、吸收和贮存大气降水的良好环境,发挥陆地生态系统的水源涵养服务,起到削弱降雨侵蚀力,改善土壤结构,削减洪峰流量、减少地表径流、调节河川流量等作用<sup>[6-8]</sup>。

近年来,青海三江源地区因受全球气候变暖和人类活动加剧的双重作用,生态状况持续退化,受到了全国各界的广泛关注<sup>[9-12]</sup>。该区生态系统群落结构简单,生态环境较为敏感和脆弱,生态系统结构、功能与服务极易受到自然和人为因素的影响<sup>[13-14]</sup>。为此,2005年国家批准了《青海三江源自然保护区生态保护和建设总体规划》,投资  $7.5 \times 10^9$  元开展生态工程建设。本研究以生态系统涵养水源量为评估指标,通过分析三江源地区生态工程实施前后全区、流域水源涵养服务的变化情况,厘定气候变化和人类活动对水源涵养服务的贡献,客观评估生态工程的效果,以期生态工程的长期规划与科学部署提供科学依据。

## 1 研究区概况

三江源地区( $31^{\circ}39' - 36^{\circ}12' \text{N}$ ,  $89^{\circ}45' - 102^{\circ}23' \text{E}$ )位于青海省南部,地处青藏高原腹地,是长江、黄河、澜沧江3大河流的发源地,素有“中华水塔”之称。行政区域涉及青海省玉树、果洛、海南、黄南4个藏族自治州的16个县和格尔木市的唐古拉山乡,总面积为  $3.63 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。

三江源地区以山地地貌为主,山脉绵延、山势高耸、地形复杂,海拔4000~5800m的高山是该区地貌的主要骨架。区内气候属典型的高原大陆性气候,表现为冷热两季交替、干湿两季分明、年温差小、日温差大、日照时间长、辐射强烈的气候特征。冷季为青藏冷高压控制,热量低、降水少、风沙大;暖季受西南季风影响产生热气压,水汽丰富、降水量多。年平均降水量262.2~772.8mm,其中6—9月降水量约占全年降水量的75%。区内河流密布,湖泊、沼泽众多,雪山冰川广布,是世界上海拔最高、湿地面积最大、湿地类型最为丰富的地区。其特殊的地理位置、

独特的气候特征、典型的高寒植被系统和丰富的物种资源,使其在全国甚至全球生态系统中占有非常突出的战略地位。

根据LUCC遥感解译与生态系统类型信息获取,2012年三江源地区生态系统类型以草地为主,草地生态系统面积占三江源地区总面积的65.44%;其次为由裸土地、裸岩砾石地、荒漠等构成的其他生态系统类型,面积占比为21.13%,集中分布在中、西部高海拔地区;森林生态系统面积占4.70%,主要分布在东部及中南部降水较为充沛的区域;水体与湿地生态系统面积占8.46%;农田和城镇生态系统在三江源地区分布较少,面积占比分别为0.26%和0.02%。

## 2 研究方法 with 数据

### 2.1 研究方法

本研究以降水贮存量法来衡量生态系统涵养水分的能力<sup>[15]</sup>,国内学者亦采用该方法对区域或国家尺度森林、草地生态系统的水源涵养量进行了估算研究<sup>[16-18]</sup>。该方法用公式可表示为:

$$Q = A \times J \times R \quad (1)$$

$$J = J_0 \times K \quad (2)$$

$$R = R_0 - R_g \quad (3)$$

式中:Q——与裸地相比较,森林、草地等生态系统涵养水分的增加量( $\text{m}^3$ );A——生态系统面积( $\text{hm}^2$ );J——研究区年产流降雨量(mm); $J_0$ ——研究区年降雨量(mm);K——研究区产流降雨量占降雨总量的比例;R——与裸地相比较,生态系统减少径流的效益系数; $R_0$ ——产流降雨条件下裸地降雨径流率; $R_g$ ——产流降雨条件下生态系统降雨径流率。

### 2.2 数据来源与处理

三江源地区年均降雨量通过对该区及其周边气象站点的观测数据插值而成。

产流降雨量是指发生产流的降雨量总和。研究发现,并非所有的降雨都能形成径流,只有在降雨量和雨强满足一定的条件后才有可能产流。通过搜集已公开发表文献中用径流小区实测的降雨产流临界值,根据点位信息,以临近国家气象台站实测日降雨数据修正同时期热带降雨测量卫星(tropical rainfall measuring mission, TRMM)逐日3h降雨量数据,累积单次降雨量大于降雨产流临界值的数值,得到单

点产流降雨量占降雨总量的比例( $K$ 值);将上述 $K$ 值与该点河川径流系数建立线性关系,通过该线性关系,基于径流系数分布图即可得到区域 $K$ 值的空间分布。

三江源地区森林生态系统降雨径流率主要通过已有的文献资料收集得到;草地生态系统降雨径流率 $R_g$ 通过草地植被覆盖度 $f_c$ 计算得到<sup>[19]</sup>:

$$R_g = -0.3187 \times f_c + 0.36403 \quad (4)$$

该区高寒草甸面积较大,植物种类繁多,植株低矮,生长密集,其土壤具有良好的涵养水源能力。不同植被覆盖度下高寒草甸的降水产流特征采用李元寿等<sup>[20]</sup>在长江和黄河源区的研究结果。

## 3 结果与分析

### 3.1 真实气候条件下三江源地区林草生态系统水源涵养服务变化

3.1.1 区域水源涵养服务变化 为分析三江源生态保护和建设工程的实施效果,使数据具有可比性,本部分以生态工程实施前(1997—2004年)后(2005—2012年)各8a生态系统的水源涵养量进行生态工程成效评估(图1)。

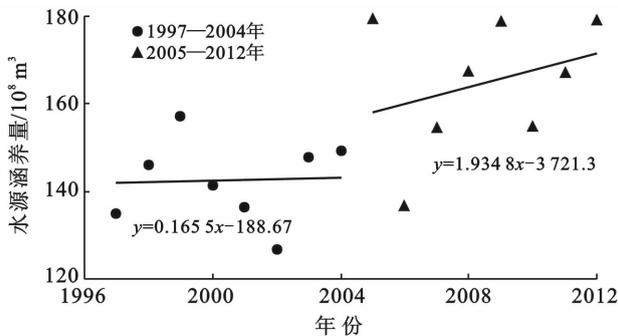


图1 1997—2012年三江源地区林草生态系统水源涵养量

如图1所示,1997—2012年三江源地区林草生态系统平均水源涵养量为 $1.54 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ ,单位面积水源涵养量为 $430.67 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。三江源生态保护与建设工程实施前8a(1997—2004年)林草生态系统平均水源涵养量为 $1.43 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ ,工程实施后8a(2005—2012年)平均水源涵养量为 $1.65 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ ,相比增加了 $2.22 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ (15.60%)。从空间分布上看,工程实施后三江源地区大部分范围年平均水源涵养量均高于工程实施前。

三江源地区生态工程实施前(1997—2004年)林草生态系统水源涵养服务变化趋势为 $1.66 \times 10^8 \text{ m}^3/10 \text{ a}$ ,工程实施后(2005—2012年)水源涵养服务增加趋势更为明显,变化趋势为 $1.94 \times 10^9 \text{ m}^3/10 \text{ a}$ 。

3.1.2 流域水源涵养服务变化 如图2所示,三江

源地区长江、黄河、澜沧江流域林草生态系统水源涵养服务分布差异明显,1997—2012年平均水源涵养量分别为 $6.12 \times 10^9$ , $6.29 \times 10^9$ 和 $2.55 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ 。就单位面积水源涵养量而言,以降水最为丰富的澜沧江流域最高,为 $690.02 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ;其次为降水和气温相对理想的黄河流域,为 $624.77 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ;而降水较少、气温较低、海拔较高、以荒漠分布为主的长江流域最低,为 $371.59 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。与整个三江源地区林草生态系统涵养水源能力相比较,澜沧江流域和黄河流域分别高60.22%和45.07%,长江流域则低13.72%。

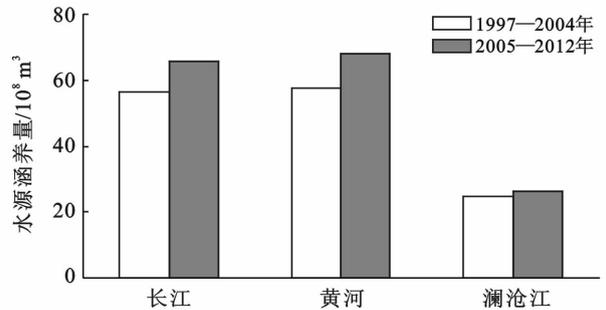


图2 生态工程实施前后三江源地区分流域林草生态系统水源涵养量

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 $9.23 \times 10^8$ , $1.05 \times 10^9$ 和 $1.30 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

### 3.2 平均气候状况下三江源地区林草生态系统水源涵养服务变化

3.2.1 区域水源涵养服务变化 为消除年际间气候波动对估算结果的影响,本文采用了多年平均气象插值数据参与计算(图3)。

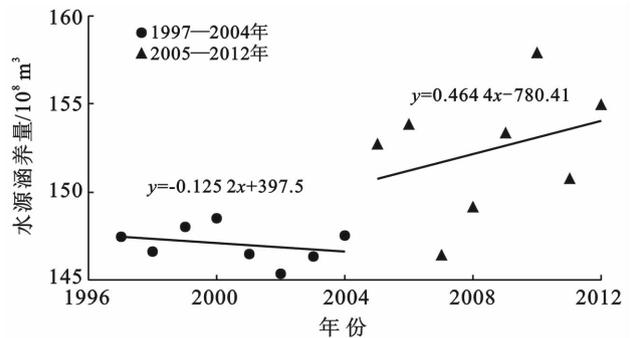


图3 平均气候状况下,1997—2012年三江源地区林草生态系统水源涵养量

如图3所示,1997—2012年三江源地区林草生态系统平均水源涵养量为 $1.50 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ ,单位面积水源涵养量为 $419.77 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。三江源生态保护与建设工程实施前8a(1997—2004年)林草生态系统平均水源涵养量为 $1.47 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ ,工程实施后8a

(1997—2004年)平均水源涵养量为  $1.52 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ , 相比增加了  $5.35 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  (3.63%)。

三江源地区生态工程实施前(1997—2004年)林草生态系统水源涵养服务变化趋势为  $-1.25 \times 10^8 \text{ m}^3/10 \text{ a}$ , 工程实施后(2005—2012年)水源涵养服务变化趋势为  $4.64 \times 10^8 \text{ m}^3/10 \text{ a}$ 。

3.2.2 流域水源涵养服务变化 如图4所示,1997—2012年三江源地区长江、黄河、澜沧江流域林草生态系统平均水源涵养量分别为  $5.92 \times 10^9$ ,  $6.15 \times 10^9$  和  $2.51 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ 。单位面积水源涵养量排序为:澜沧江流域 > 黄河流域 > 长江流域,依次为 678.63, 610.90 和  $359.84 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。与平均气候状况下三江源地区林草生态系统涵养水源能力相比较,澜沧江流域和黄河流域分别高 61.66% 和 45.53%, 长江流域则低 14.28%。

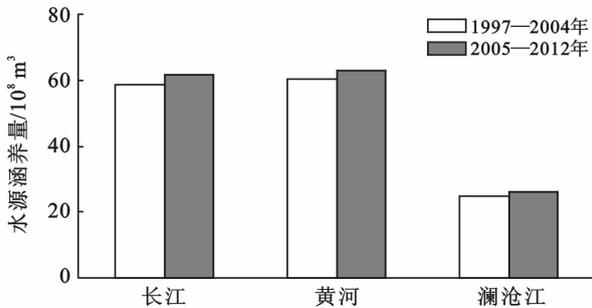
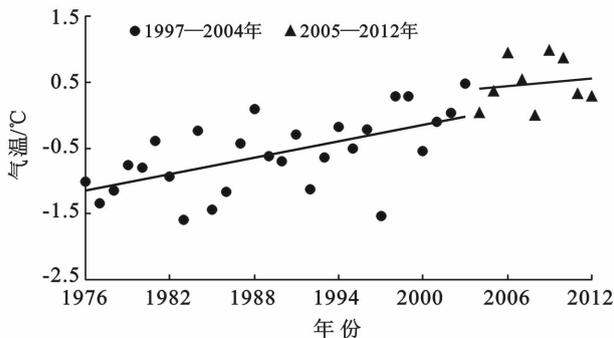


图4 平均气候状况下,生态工程实施前后三江源地区分流域林草生态系统水源涵养量

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  $2.96 \times 10^8$ ,  $2.79 \times 10^8$  和  $1.12 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

### 3.3 气候变化和人类活动对生态系统水源涵养服务影响的厘定

三江源自然保护区生态保护和建设各项工程总



投资 75 亿元,内容包括退牧还草、退耕还林、草地鼠害治理、森林草原防火、生态搬迁工程、人工增雨工程等 22 个子项目。旨在通过对自然保护区和生态功能区生态保护和建设的分步实施,基本上扭转整个三江源地区生态环境恶性循环的趋势,保护和恢复源区林草植被,遏制草地植被退化、沙化等高原生态系统失衡的趋势,增加保持水土、涵养水源能力的生态目标。

根据历年《青海三江源自然保护区生态保护和建设生态监测报告》,截止到 2012 年,保护区内共完成退牧还草  $6.31 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,黑土滩治理  $1.85 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,退耕还林  $1.02 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,封山育林  $2.43 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,沙漠化防治  $4.41 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,草原鼠害防治  $7.85 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。三江源地区于 2005 年开始实施人工增雨工程项目,共计投资  $1.60 \times 10^8$  元。截止到 2011 年,该项目共增加降水量  $3.89 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。

在 2004 年进入生态建设工程期后,三江源地区气候正由前期(1976—2004 年)以暖干为主进入后期(2005—2012 年)以暖湿为主的阶段(图 5)。全区年平均气温持续上升,加之人工增雨的作用,后期降水量进入一个充沛期,生态系统湿润状况有所改善,区域气候变化有利于生态系统的恢复。

同时,生态移民和减畜措施减轻了草地载畜压力,降低了土地利用强度,生态系统结构变化速度趋缓,草地退化趋势在一定程度上得到遏制;鼠害防治和黑土滩草地治理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;封山育林工程增加了森林郁闭度和蓄积量;湿地封育保护避免了人类扰动对湿地的影响;沙化草原治理、草地围栏、人工增雨等工程措施亦对区域植被恢复产生了一定的积极作用,提高了草地覆盖度和生产力,增加了草地的理论载畜量。一系列重点项目的实施对区域生态系统恢复、生态状况改善、生态系统服务的提升发挥了重要作用。

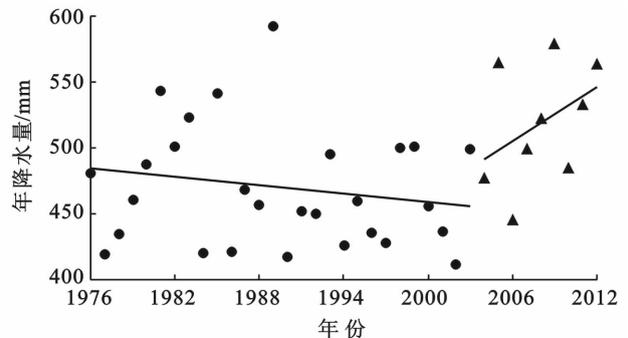


图5 三江源地区年平均气温、年降水量变化

## 4 讨论与结论

真实气候条件下,1997—2012 年三江源地区林

草生态系统平均水源涵养量为  $1.54 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ 。三江源生态保护与建设工程实施后(2005—2012 年)年平均水源涵养量比前期(1997—2004 年)增加了

15.60%。从空间格局而言,三江源地区林草生态系统涵养水源能力自东南向西北逐渐递减。单位面积水源涵养量澜沧江流域最高,其次为黄河流域,长江流域最低。

三江源地区生态保护与建设工程的实施对区域水源涵养服务的提升具有一定的正向作用,一系列重点项目措施及降水增加有利于生态系统的恢复与生态状况的改善。真实气候条件和平均气候状况下,生态工程实施后的林草生态系统水源涵养量均比前期高。前期主要受到区域气候变化的影响,后期则叠加了生态工程的驱动作用。两种情况下,生态工程实施后三江源地区林草生态系统水源涵养量的线性变化趋势分别为  $1.94 \times 10^9$  和  $4.64 \times 10^8 \text{ m}^3/10 \text{ a}$ ,生态工程对三江源地区水源涵养服务提升的贡献率约为 23.98%。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997,387(6630):253-260.
- [2] 傅伯杰,吕一河,高光耀. 中国主要陆地生态系统服务与生态安全研究的重要进展[J]. *自然杂志*, 2012,34(5):261-272.
- [3] 张洪江,孙艳红,程云. 重庆缙云山不同植被类型对地表径流系数的影响[J]. *水土保持学报*, 2006,20(6):11-45.
- [4] Brauman K A, Freyberg D L, Daily G C. Forest structure influences on rainfall partitioning and cloud interception: A comparison of native forest sites in Kona, Hawaii[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010,150(2):265-275.
- [5] Pert P L, Butler J R, Brodie J E, et al. A catchment-based approach to mapping hydrological ecosystem services using riparian habitat: a case study from the Wet Tropics, Australia[J]. *Ecological Complexity*, 2010,7(3):378-388.
- [6] 陈东立,余新晓,廖邦洪. 中国森林生态系统水源涵养功能分析[J]. *世界林业研究*, 2005,18(1):49-54.
- [7] Descheemaeker K, Nyssen J, Poesen J, et al. Runoff on slopes with restoring vegetation: a case study from the Tigray highlands, Ethiopia[J]. *Journal of Hydrology*, 2006,331(1):219-241.
- [8] Tang Jia, Fang Jiangping, Li Ping, et al. The Function and Value of Water Conservation of Forest Ecosystem in Gongbo Nature Reserve of Tibet[J]. *Asian Agricultural Research*, 2012,4(1):68-70.
- [9] 赵新全,周华坤. 三江源区生态环境退化、恢复治理及其可持续发展[J]. *中国科学院院刊*, 2005,20(6):471-476.
- [10] 刘纪远,徐新良,邵全琴. 近 30 a 来青海三江源地区草地退化的时空特征[J]. *地理学报*, 2008,63(4):364-376.
- [11] Huang Lin, Liu Jiyuan, Shao Quanqin, et al. Changing inland lakes responding to climate warming in Northeastern Tibetan Plateau[J]. *Climatic Change*, 2011,109(3):479-502.
- [12] Yi Xiangsheng, Li Guosheng, Yin Yanyu. Temperature variation and abrupt change analysis in the Three-River Headwaters Region during 1961-2010[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012,22(3):451-469.
- [13] Fan Jiangwen, Shao Quanqin, Liu Jiyuan, et al. Assessment of effects of climate change and grazing activity on grassland yield in the Three Rivers headwaters region of Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010,170(1/2/3/4):571-584.
- [14] 胡光印,董治宝,逯军峰,等. 近 30 a 来长江源区沙漠化时空演变过程及成因分析[J]. *干旱区地理*, 2011,34(2):300-308.
- [15] 赵同谦,欧阳志云,贾良清,等. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价[J]. *生态学报*, 2004,24(6):1101-1110.
- [16] 姜立鹏,覃志豪,谢雯,等. 中国草地生态系统服务功能价值遥感估算研究[J]. *自然资源学报*, 2007,22(2):161-170.
- [17] 刘军会,高吉喜. 北方农牧交错带生态系统服务价值测算及变化[J]. *山地学报*, 2008,26(2):145-153.
- [18] 方瑜. 区域森林生态系统水文调节功能空间特征评价[D]. 北京:中国科学院生态环境研究中心,2012.
- [19] 朱连奇,许叔明,陈沛云. 山区土地利用/覆被变化对土壤侵蚀的影响[J]. *地理研究*, 2003,22(4):432-438.
- [20] 李元寿,王根绪,王一博,等. 长江黄河源区覆被变化下降降水的产流产沙效应研究[J]. *水科学进展*, 2006,17(5):616-623.