

DOI: 10.5846/stxb201807311629

曹巍, 刘璐璐, 吴丹, 黄麟. 三江源国家公园生态功能时空分异特征及其重要性辨识. 生态学报, 2019, 39(4): - .

Cao W, Liu L L, Wu D, Huang L. Spatial and temporal variations and the importance of hierarchy of ecosystem functions in the Three-river-source National Park. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(4): - .

# 三江源国家公园生态功能时空分异特征及其重要性辨识

曹 巍<sup>1</sup>, 刘璐璐<sup>2,\*</sup>, 吴 丹<sup>3</sup>, 黄 麟<sup>1,\*</sup>

1 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101

2 成都大学建筑与土木工程学院, 成都 610106

3 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042

**摘要:**三江源国家公园的建立有利于在该区域实行最严格的生态保护, 筑牢国家生态安全屏障。为摸清三江源国家公园生态本底, 基于遥感数据, 地理信息系统平台及生态评估模型模拟等技术手段, 分析了三江源国家公园生态系统类型, 2000—2015 年生态功能的时空分异特征及变化趋势, 辨识其重要性, 并对其变化驱动因素进行初探。结果表明: (1) 三江源国家公园以草地、荒漠、水体与湿地生态系统为主, 面积占比达到 99.8%。(2) 三江源国家公园水源涵养、土壤保持及防风固沙极重要区的占比分别为 15.3%、13.7% 和 22.4%。(3) 整体呈现东部以水源涵养、中部以土壤保持、西部以防风固沙为核心生态功能的空间格局。(4) 2000—2015 年, 水源涵养功能量总体下降, 但提升区域面积占比达 84.5%, 极重要区呈现下降态势; 土壤保持功能量总体提升, 年变化趋势为 987 万 t/a, 全区超过 95% 的地区均呈上升趋势; 防风固沙功能由于风速减小及植被覆盖度的降低, 出现下降态势, 为 -356 万 t/a。(5) 气候暖湿化以及三江源生态保护工程的实施是三江源国家公园生态功能总体提升的主要原因, 然而草地退化态势尚未完全遏制, 局部地区植被覆盖度仍有所下降。为实现国家公园和自然资源的严格保护和永续利用, 需对其进行统筹规划、科学布局, 在科学把握生态系统自然规律的基础上, 分区、分级对其进行生态保护和修复。

**关键词:**生态功能; 时空变化; 重要性分级; 三江源国家公园

## Spatial and temporal variations and the importance of hierarchy of ecosystem functions in the Three-river-source National Park

CAO Wei<sup>1</sup>, LIU Lulu<sup>2,\*</sup>, WU Dan<sup>3</sup>, HUANG Lin<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China

2 School of Architecture and Civil Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China

3 Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China

**Abstract:** The establishment of the Three-river-source National Park is beneficial because the strictest ecological protection extended to this area helps to strengthen the sustainable protection of the "Chinese water tower" and to enhance the national ecological security barrier. In order to understand the ecological background of the Three-river-source National Park, the spatial distribution of the ecosystem, the temporal and spatial variation of ecological functions from 2000 to 2015, and the importance hierarchy of the ecosystem functions were analyzed by using remote sensing data, a geographical information system, and model simulations. The results showed that: (1) Grassland, desert, water, and wetland ecosystems are the main ecosystem types in the Three-river-source National Park, and they accounted for 99.8% of the total area. (2) Areas

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0506404)

收稿日期: 2018-07-31; 修订日期: 2018-12-25

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liululu@cd.cn

with extremely important water regulation, soil conservation, wind prevention/sand fixation functions accounted for approximately 15.3%, 13.7%, and 22.4% of the total area in the Three-river-source National Park, respectively. (3) In the eastern, central, and western parts of the Three-river-source National Park, the core ecosystem functions were the water conservation, soil conservation, and wind prevention/sand fixation functions, respectively. (4) From 2000 to 2015, the water conservation volume decreased overall, while the increased area accounted for 84.5% of the total area, and the area of extremely important site decreased. The overall improvement of the soil conservation function was significant both in volume with a change of  $9.87 \times 10^6$  t/a and in the improved area, which was more than 95%. However, the wind prevention/sand fixation function showed a declining trend, because of the decline in wind speed and vegetation coverage, with a change of  $-3.56 \times 10^6$  t/a. (5) A warm and wet climate and the implementation of the ecological protection project were the main reasons for the improvement of ecosystem functions in the Three-river-source National Park. However, grassland degradation was not fundamentally reversed, and vegetation coverage still declined regionally. Thus, the restoration of degraded grassland must be prioritized and the integrated capacity of ecosystem functions remains to be improved. For the strict protection and sustainable use of the Three-river-source National Park and its natural resources, overall planning and scientific layout should be scrutinized, and classifications and subarea protection should be implemented based on the natural law of the ecosystem.

**Key Words:** ecosystem functions; spatial-temporal variation; importance hierarchy; the Three-river-source National Park

三江源区是我国青藏高原生态安全屏障的重要组成部分,然而其生态环境脆弱,在全球气候变暖和人类活动加剧的多重影响下,近几十年来生态系统持续退化<sup>[1]</sup>。三江源国家公园的建立,可加强对三江源区生态系统完整性、原始性的保护,重点解决保护地交叉重叠、多头管理、管理不到位等突出问题<sup>[2]</sup>。三江源国家公园的定位遵循生态系统整体保护、系统修复理念,以一级功能分区明确空间管控目标,以二级功能分区落实管控措施<sup>[3]</sup>。科学合理的功能分区有助于自然资源保护和平衡各方利益<sup>[4]</sup>,但目前体制试点区尚存在保护环境类型不够全面、保护区域不连续等薄弱之处<sup>[5]</sup>。

目前,针对国家公园的研究多从体制建设<sup>[6]</sup>、制度创新、发展模式<sup>[7]</sup>、旅游开发<sup>[8]</sup>等角度开展,从生态角度针对国家公园的评估相对较少<sup>[9]</sup>。目前多以三江源区、自然保护区或单一流域为研究区,开展包括重要生态功能指标如水源涵养<sup>[10]</sup>、土壤保持<sup>[11]</sup>、碳固定、生物多样性<sup>[12]</sup>、植被覆盖度<sup>[13]</sup>等物质量、价值量时空分布状况,生态补偿机制研究<sup>[14]</sup>,三江源生态工程的效益评估<sup>[15]</sup>,生态系统服务的变化机理<sup>[16]</sup>等方面的有益探索。从地理空间上看,尽管三江源国家公园与自然保护区范围重叠较大,但它们在环境条件上差异明显<sup>[5]</sup>。

资源评估是国家公园功能区划的重要方法之一<sup>[4]</sup>,目前多是针对某一年份的评估分析<sup>[4,17]</sup>。然而因降水周期等外界环境的影响变化,单一年份评估结果存在一定不确定性,不能真实反应生态资源概况<sup>[1]</sup>。建立国家公园动态过程生态本底,即定量分析建立国家公园体制前一段时长内该区生态功能基础状况及其时空变化特征,对于支撑国家公园体制实施方案的管理决策,强化自然资源资产管理,指导该区生态保护的统筹规划、科学布局、分区管控,明确后续环境影响评价和效益预估,后期进一步争取中央加大财政转移支付力度,探索生态补偿机制具有重要意义。

本文利用遥感、地理信息系统、生态评估模型等数据与方法,对三江源国家公园生态系统类型及其功能状况的空间分异特征,2000—2015年生态功能时空变化趋势进行定量分析,厘清国家公园的生态系统本底状况,辨识生态功能的重要性,可为科学划分国家公园管理分区、实行差异化保护提供科学依据,在构建我国国家公园体制的顶层设计等方面具有科学和实践意义。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

三江源国家公园包括黄河源园区、长江源园区、澜沧江源园区(图1),总面积为12.31万 km<sup>2</sup>,占青海三江

源区总面积的 31.16%。其中,黄河源园区位于果洛州玛多县境内,包括三江源国家级自然保护区的扎陵湖—鄂陵湖和星星海 2 个自然保护分区,面积 1.91 万  $\text{km}^2$ ;长江源园区(可可西里)位于玉树藏族自治州治多、曲麻莱两县,包括可可西里国家级自然保护区与三江源国家级自然保护区的索加—曲麻河自然保护分区,面积 9.03 万  $\text{km}^2$ ;澜沧江源园区位于玉树藏族自治州杂多县,包括三江源国家级自然保护区的果宗木查、昂赛 2 个自然保护分区,面积 1.37 万  $\text{km}^2$ 。

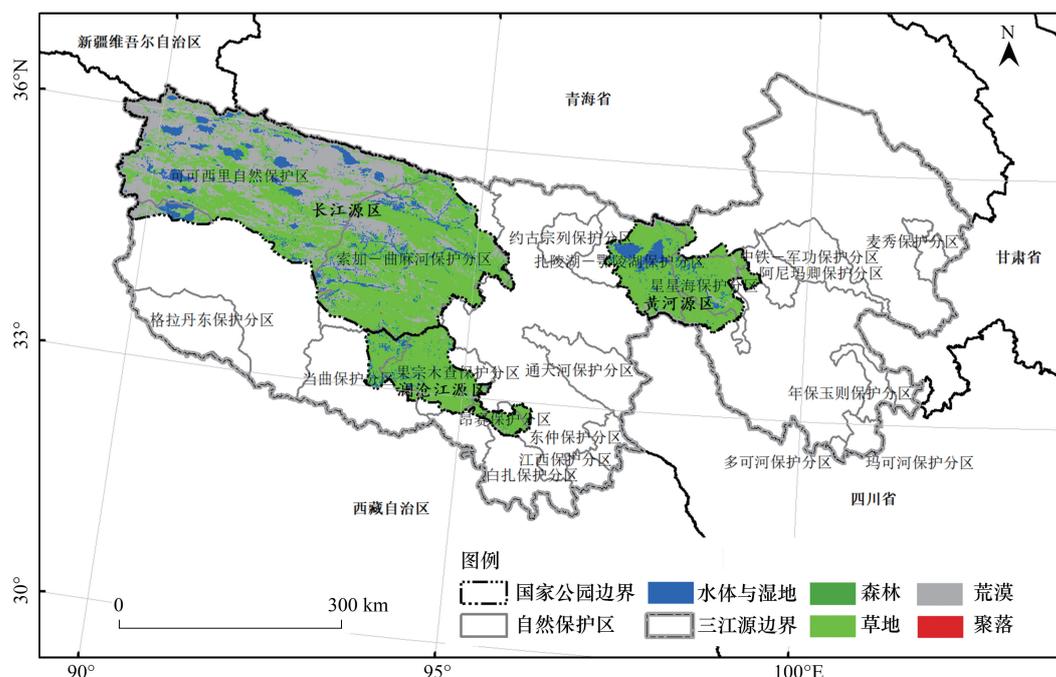


图 1 三江源国家公园地理位置、范围及其与自然保护区的空间关系

Fig.1 Location/scope and the relation between the Three-river-source National Park and National Nature Reserves

## 1.2 数据收集与处理

**生态系统类型:**基于多源卫星遥感数据,经辐射定标、大气校正、几何精纠正等预处理后,判读解译获得土地利用/覆被数据,在此基础上,生成森林、草地、水体与湿地、荒漠、聚落生态系统空间分布数据。遥感解译成果精度达到 95%左右,满足研究需求<sup>[18]</sup>。

**归一化植被指数(NDVI):**收集了 MODIS 2000—2015 年的 NDVI 时间序列数据产品(MOD13Q1)。该数据空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 天。利用 Savitzky—Golay 滤波对长时间序列 NDVI 数据进行处理,以去除云和大气等噪声的影响。

**气象观测数据:**来源于国家气象科学数据共享平台 2000—2015 年的日值观测数据,主要包括日均风速、风向、降水、温度、日照时数等。采用 ANUSPLINE 对站点观测数据进行插值得到空间分辨率为 1 km 的栅格数据。

**地形数据:**SRTM(Shuttle Radar Topography Mission,航天飞机雷达地形测绘任务)数字高程模型(DEM)数据(V4.1),空间分辨率为 90 m,来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站。

**土壤数据:**来源于中国科学院资源环境科学数据中心的 1:100 万中国土壤数据库,为空间矢量数据,主要包括土壤类型、土壤颗粒含量、土壤有机质含量等属性。

## 1.3 生态功能评估方法

### 1.3.1 水源涵养

水源涵养量计算采用的是降水贮存量法,它通过生态系统的水文调节效应来衡量涵养水分的能力,具体公式如下:

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

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

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

式中,  $Q$  表示与裸地相比较, 森林、草地、农田、荒漠等生态系统涵养水分的增加量 ( $\text{m}^3$ );  $A$  表示生态系统面积 ( $\text{hm}^2$ );  $J$  表示计算区多年均产流降雨量 ( $\text{mm}$ );  $J_0$  表示计算区多年均降雨总量 ( $\text{mm}$ );  $R_0$  表示产流降雨条件下裸地 (或皆伐迹地) 降雨径流率;  $R_g$  表示产流降雨条件下生态系统降雨径流率;  $K$  表示计算区产流降雨量占降雨总量的比例;  $R$  表示与裸地 (或皆伐迹地) 相比, 生态系统减少径流的效益系数。

在计算过程中, 将  $K$  值利用实测日降水值、TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission, 热带降雨监测计划) 数据、多年均河川径流系数等, 修正为 1 km 分辨率的空间分布数据; 森林  $R_g$  通过文献收集得到; 草地  $R_g$  与草地植被覆盖度建立关系, 以得到其空间分布数据<sup>[10]</sup>。

利用直门达、沱沱河、吉迈、唐乃亥水文站 1997—2012 年的实测径流量数据, 对 4 个流域估算结果进行相关性验证,  $R^2$  系数均超过 0.6。

### 1.3.2 土壤保持

土壤保持量为潜在土壤侵蚀量与真实土壤侵蚀量的差值, 本研究土壤侵蚀量采用修正的通用土壤流失方程 (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE) 计算。具体公式如下:

$$A_{\text{真实}} = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (4)$$

$$A_{\text{潜在}} = R \times K \times L \times S \times C_{\text{潜在}} \quad (5)$$

$$A_{\text{保持}} = A_{\text{潜在}} - A_{\text{真实}} \quad (6)$$

式中,  $A$  为土壤侵蚀模数 ( $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ );  $R$  为降雨侵蚀力因子 ( $\text{MJ mm hm}^{-2} \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$ );  $K$  为土壤可蚀性因子 ( $\text{t hm}^2 \text{h hm}^{-2} \text{MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$ );  $L$  为坡长因子, 无量纲;  $S$  为坡度因子, 无量纲;  $C$  为土地覆盖和管理因子, 取值范围为 0—1, 无量纲;  $P$  为水土保持措施因子, 取值范围为 0—1, 无量纲。

降雨侵蚀力因子采用章文波等<sup>[19]</sup>提出的基于日降雨量估算半月降雨侵蚀力的方法计算。土壤可蚀性因子采用诺谟图<sup>[20]</sup>模型计算。坡度因子综合采用 RUSLE 方程和刘宝元等<sup>[21]</sup>的研究成果进行计算, 当坡度小于等于 18% 时, 采用 RUSLE 的计算公式; 当坡度大于 18% 时, 采用刘宝元等<sup>[21]</sup>改进后的计算公式。坡长因子采用 RUSLE 的计算公式。覆盖和管理因子通过与植被覆盖度建立关系式<sup>[22]</sup>进行计算。水土保持措施因子反映作物管理措施对土壤流失量的影响, 结合前人研究成果<sup>[23-26]</sup>及三江源国家公园实地概况, 根据三江源国家公园土地利用数据, 林地和草地取 1, 水体与沼泽取 0, 居民地与建设用地取 0, 旱地取 0.4, 沙地与盐碱地取 1。

通过搜集称多县及德念沟 2 个地面监测点的土壤侵蚀实测资料 (2006—2009 年) 与本研究土壤侵蚀模拟结果进行对比,  $R^2$  系数达到 0.62。利用沱沱河、吉迈以及直门达 3 个水文站 1996—2004 年 5—10 月的逐日输沙量数据对估算结果进行相关性验证,  $R^2$  为 0.89<sup>[27]</sup>。

### 1.3.3 防风固沙

防风固沙量为潜在土壤风蚀量与真实土壤风蚀量的差值, 土壤风蚀量采用修正的土壤风蚀方程 (Revised Wind Erosion Equation, RWEQ) 计算。具体公式如下:

$$SL = Q_x / x \quad (7)$$

$$Q_x = Q_{\text{max}} [1 - e^{-(x/s)^2}] \quad (8)$$

$$Q_{\text{max}} = 109.8 (WF \cdot EF \cdot SCF \cdot K' \cdot COG) \quad (9)$$

$$s = 150.71 (WF \cdot EF \cdot SCF \cdot K' \cdot COG)^{-0.3711} \quad (10)$$

式中,  $SL$  表示土壤风蚀模数,  $x$  表示地块长度,  $Q_x$  表示地块长度  $x$  处的沙通量 ( $\text{kg/m}$ );  $Q_{\text{max}}$  表示风力的最大输沙能力 ( $\text{kg/m}$ );  $s$  表示关键地块长度 ( $\text{m}$ );  $WF$  表示气象因子;  $EF$  表示土壤可蚀性因子;  $SCF$  表示土壤结皮因子;  $K'$  表示土壤糙度因子;  $COG$  表示植被因子, 包括平铺、直立作物残留物和植被冠层。

雪盖因子利用从寒区旱区科学数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn>) 下载的中国雪深长时间序列数据集进行计算。土壤可蚀性因子为土壤表层直径小于 0.84 mm 的颗粒的含量,利用 Fryear 等<sup>[28]</sup>建立的方程进行计算。土壤结皮因子的计算过程中需利用实测数据将土壤质地资料进行转换。土壤糙度因子取决于自由糙度和定向糙度,采用滚轴式链条法来测定地表糙度。植被因子用来确定植被残茬和生长植被的覆盖对土壤风蚀的影响,利用照片法定点进行实地观测与计算。

根据文献收集地面测定的不同地区的风蚀模数结果对本估算结果进行验证,结果尚好<sup>[29-30]</sup>。

## 1.4 数据分析

### 1.4.1 变化趋势分析方法

采用最小二乘法分析生态系统水源涵养、土壤保持以及防风固沙等功能,及植被覆盖度、气象要素的年度变化趋势:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n m_i X_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \sum_{i=1}^n X_i}{\sum_{i=1}^n m_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n m_i \right)^2} \quad (11)$$

式中, $S$  为变化斜率, $X_i$  为水源涵养、土壤保持以及防风固沙等功能及植被覆盖度、气象要素, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ,  $m_i$  为年份序号, $m_1 = 1, m_2 = 2, m_3 = 3, \dots, m_n = n$ 。

### 1.4.2 生态功能重要性辨识方法

利用《生态保护红线划定指南》<sup>[31]</sup>中关于生态系统服务重要性的分级方法,分别对三江源国家公园生态系统水源涵养、土壤保持和防风固沙功能值进行从高到底的排序并累加,将累加功能值占生态功能总值比例的 50% 与 80% 所对应的值,作为生态功能评估分级的分界点,以此将生态功能重要性分为 3 级,即极重要、重要和一般重要 3 个等级。分级结果中,极重要区累积功能值占功能总值的 50%,重要区累积功能值占比为 30%,一般重要区累积功能值占比为 20%。

## 2 结果与分析

### 2.1 三江源国家公园生态系统类型空间分布格局

三江源国家公园以草地、荒漠、水体与湿地生态系统为主(图 2),面积分别为  $6.9 \times 10^4$ 、 $4.34 \times 10^4$  和  $1.04 \times 10^4$   $\text{km}^2$ ,分别占国家公园总面积的 56.2%、35.2% 和 8.4%;森林及聚落生态系统分别占国家公园总面积的 0.16%、0.004%。其中:

长江源园区以草地与荒漠生态系统为主,分别占长江源园区面积的 48.0% 和 43.2%。草地主要分布在该园区东南部,荒漠主要分布在该园区西北部,园区内还分布着大量的湖泊与湿地,面积约占园区面积的 8.8%,占三江源国家公园水体与湿地面积的 76.7%(图 2)。

黄河源园区以草地生态系统为主,面积约占该园区面积的 72.5%;其次是荒漠生态系统,约占该园区面积的 17.8%;园区内同样分布着以扎陵湖与鄂陵湖为代表的众多高原湖泊以及湿地生态系统,面积约占国家公园水体与湿地生态系统的 17.3%(图 2)。

澜沧江源园区的草地生态系统的面积占比最高,为 88.1%,其次是荒漠、水体与湿地生态系统,面积占比均不足 10%。该园区南部分布少量森林生态系统,面积约占国家公园森林生态系统的 63.8%;聚落生态系统约占国家公园聚落面积的 41.5%(图 2)。

### 2.2 三江源国家公园生态功能及其重要性空间格局

#### 2.2.1 水源涵养

2000—2015 年,三江源国家公园多年平均水源涵养量约为  $65.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,单位面积水源涵养量为 6.4 万  $\text{m}^3/\text{km}^2$ ,呈西北低东南高的空间格局(图 3)。从水源涵养总量来看,长江源园区最大,为  $33.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,其次是

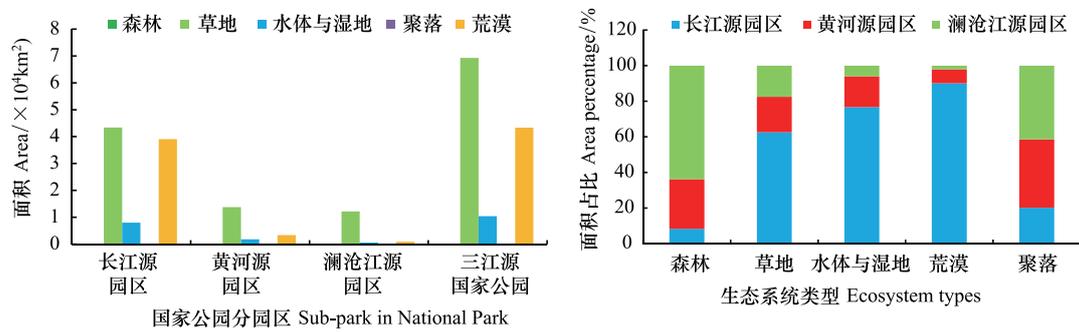


图2 三江源国家公园各分园区不同生态系统类型面积及占比

Fig.2 Area and its percentage of different ecosystem in each sub-park in the Three-river-source National Park

黄河源园区,为  $21.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,澜沧江涵养水量为  $10.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;从单位面积量来看,黄河源园区最高,为  $11.9 \text{ 万 m}^3/\text{km}^2$ ,其次是澜沧江源园区,为  $8.0 \text{ 万 m}^3/\text{km}^2$ ,长江源园区为  $5.2 \text{ 万 m}^3/\text{km}^2$ (图3)。

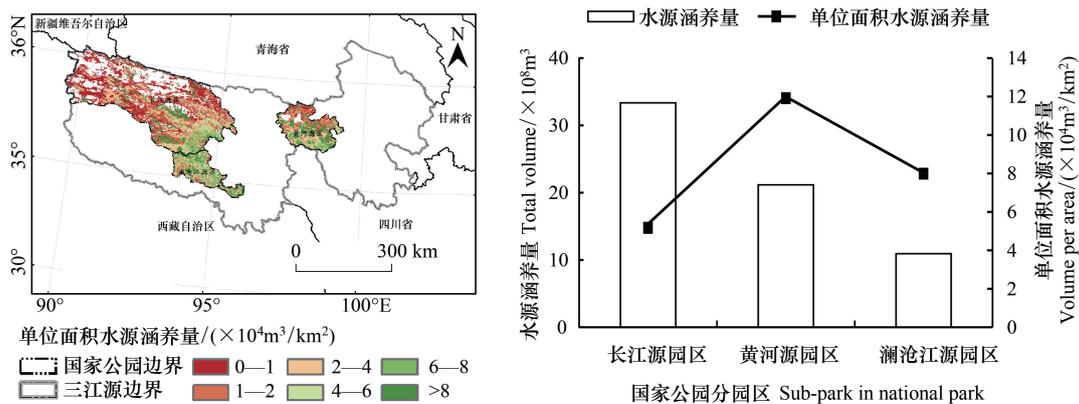


图3 三江源国家公园生态系统水源涵养功能空间分布和各园区水源涵养量及单位面积量

Fig.3 Spatial distribution of water regulation function in the Three-river-source National Park and the total and per area volume in each sub-park

三江源国家公园区生态系统水源涵养功能一般重要区面积占比为 74.6%,主要分布于全区的西北部,其中长江源园区面积占比最大,为 74%,其次为黄河源园区,面积占比为 16%,澜沧江源园区面积占比为 10%;重要区面积占比 10.1%,主要分布于全区中部,其中澜沧江源园区面积占比最大,为 45%,其次为长江源园区,面积占比为 36%,黄河源园区面积占比为 18%;极重要区面积占比 15.3%,主要分布于长江源园区中部、南部,黄河源园区中部,澜沧江源园区北部和南部,其中长江源园区面积占比最大,为 52%,其次为黄河源园区,面积占比为 34%,澜沧江源园区面积占比为 14%(图4)。

### 2.2.2 土壤保持

2000—2015年,三江源国家公园多年平均土壤保持量约为  $1.52 \times 10^8 \text{ t}$ ,单位面积土壤保持量为  $13.5 \text{ t}/\text{hm}^2$ ,呈中部高西北部低的空间格局(图5)。从土壤保持总量来看,长江源园区最大,为  $1.01 \times 10^8 \text{ t}$ ,其次是澜沧江源园区,为  $0.35 \times 10^8 \text{ t}$ ,黄河源园区保持土壤量为  $0.16 \times 10^8 \text{ t}$ ;从单位面积量来看,澜沧江源园区最高,为  $26.4 \text{ t}/\text{hm}^2$ ,其次是长江源园区,为  $12.3 \text{ t}/\text{hm}^2$ ,黄河源园区为  $9.2 \text{ t}/\text{hm}^2$ (图5)。

三江源国家公园区生态系统土壤保持功能一般重要区面积占比为 73.5%,主要分布于西北部,其中长江源园区面积占比最大,为 75%,其次为黄河源园区,面积占比为 17%,澜沧江源园区面积占比为 8%;重要区面积占比为 12.8%,主要分布于中部,其中长江源园区面积占比最大,为 69%,其次为黄河源园区,面积占比为 16%,澜沧江源园区面积占比为 15%;极重要区面积占比 13.7%,主要分布于长江源园区中东部,澜沧江源园

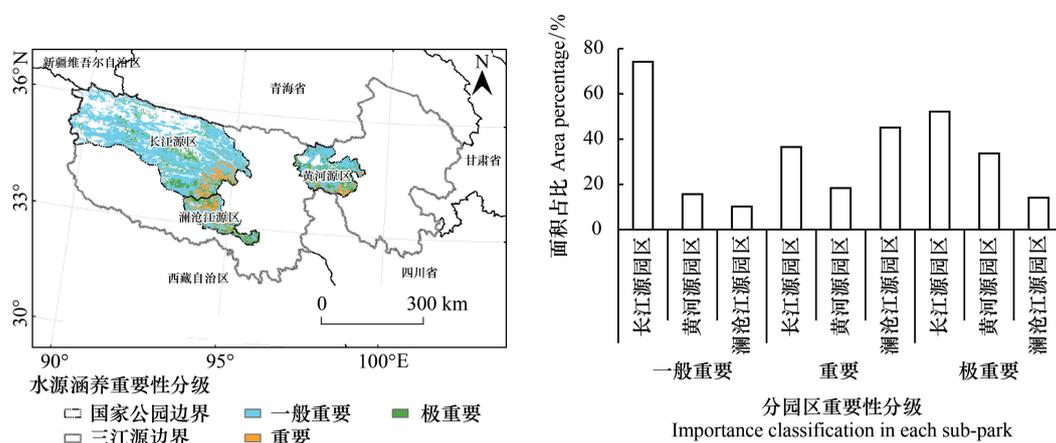


图 4 三江源国家公园水源涵养重要性分级及各园区面积占比概况

Fig.4 Importance classification of water regulation function in the Three-river-source National Park and area percentage of different important levels in each sub-park

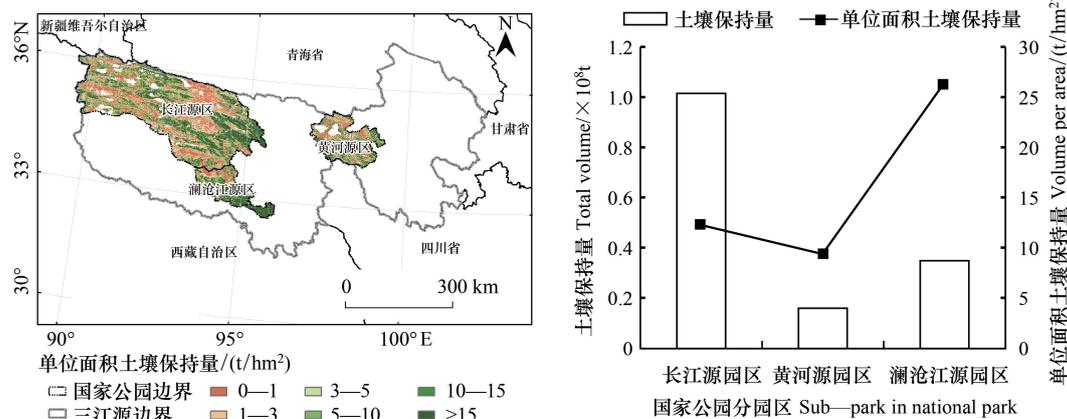


图 5 三江源国家公园生态系统土壤保持功能空间分布和各园区土壤保持量及单位面积量

Fig.5 Spatial distribution of soil conservation function in the Three-river-source National Park and the total and per area volume in each sub-park

区南部,其中长江源园区面积占比最大,为 67%,其次为澜沧江源园区,面积占比为 26%,黄河源园区面积占比为 8%(图 6)。

### 2.2.3 防风固沙

2000—2015 年,三江源国家公园多年平均防风固沙量约为  $4.80 \times 10^8 t$ ,单位面积防风固沙量为  $42.6 t/hm^2$ ,呈西高东低的空间格局(图 7)。从防风固沙总量来看,长江源园区最大,为  $4.37 \times 10^8 t$ ,其次是澜沧江源园区,为  $0.36 \times 10^8 t$ ,黄河源园区防风固沙总量为  $0.07 \times 10^8 t$ ;从单位面积量来看,长江源园区最高,为  $53.1 t/hm^2$ ,其次是澜沧江源园区,为  $27.0 t/hm^2$ ,黄河源园区为  $4.1 t/hm^2$ (图 7)。

三江源国家公园区生态系统防风固沙功能一般重要区面积占比为 53.0%,主要分布于黄河源园区、澜沧江源园区南部以及长江源园区中北部,其中长江源园区面积占比最大,为 55%,其次为黄河源园区,面积占比为 29%,澜沧江源园区面积占比为 16%;重要区面积占比 24.6%,主要分布于长江源园区南部及澜沧江源园区北部,其中长江源园区面积占比最大,为 87%,其次为澜沧江源园区,面积占比为 13%,黄河源园区无;极重要区面积占比 22.4%,主要分布于长江源园区中西部地区,其中长江源园区面积占比最大,为 99%,其次为澜沧江源园区,面积占比为 1%,黄河源园区无(图 8)。

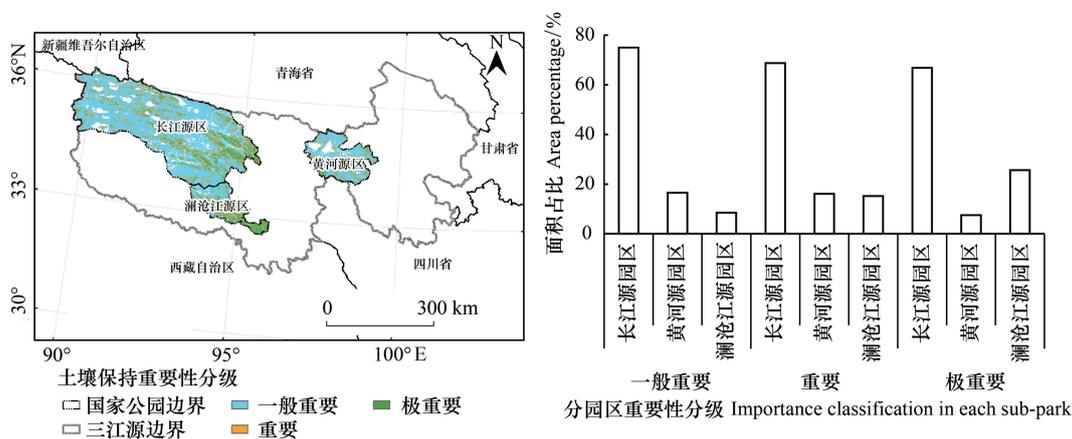


图6 三江源国家公园土壤保持重要性分级及各园区面积占比概况

Fig.6 Importance classification of soil conservation function in the Three-river-source National Park and area percentage of different important levels in each sub—park

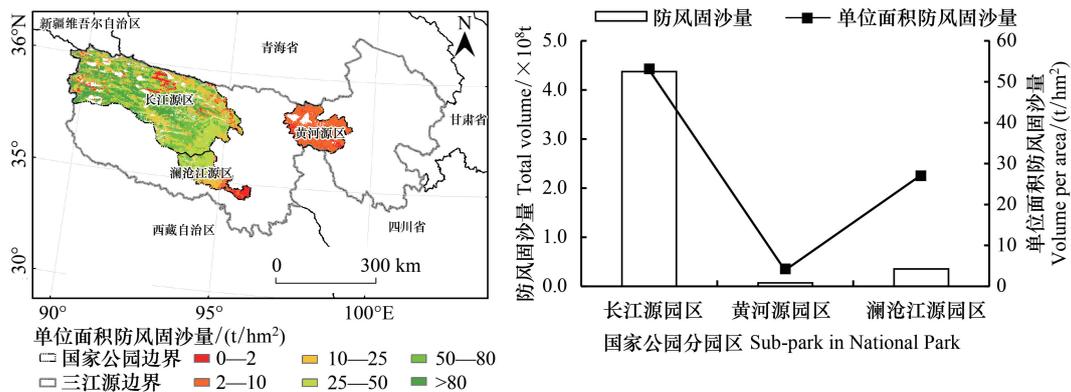


图7 三江源国家公园生态系统防风固沙功能空间分布和各园区防风固沙量及单位面积量

Fig.7 Spatial distribution of wind prevention/sand fixation function in the Three-river-source National Park and the total and per area volume in each sub-park

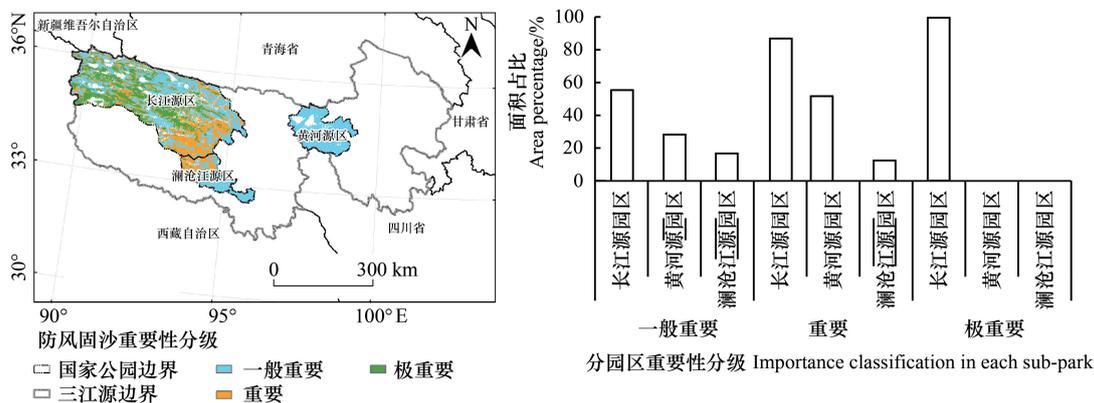


图8 三江源国家公园防风固沙重要性分级及各园区面积占比概况

Fig.8 Importance classification of wind prevention/sand fixation function in the Three-river-source National Park and area percentage of different important levels in each sub-park

### 2.2.4 生态功能重要性总体评价

三江源国家公园生态功能极重要区约占全区面积的 51.4%,其中水源涵养极重要区主要位于东部,土壤保持极重要区主要位于中部,防风固沙极重要区主要位于西部(图 9)。

从不同生态功能极重要区能力来看,黄河源园区的水源涵养极重要区能力最强,为  $35.9 \text{ 万 m}^3/\text{km}^2$ ;澜沧江园区的土壤保持极重要区能力最强,为  $68.4 \text{ t}/\text{hm}^2$ ;长江源园区的防风固沙极重要区能力最强,为  $95.1 \text{ t}/\text{hm}^2$ (图 10)。

分园区来看,黄河源园区中,生态功能极重要区约占该分区面积的 32.9%,其中水源涵养极重要区在该区面积占比最高,为 26.0%,因此该分区核心生态功能为水源涵养;澜沧江源园区中,生态功能极重要区约占该分区面积的 45.6%,其中土壤保持极重要区在该区面积占比最高,为 29.9%,因此该分区核心生态功能为土壤保持;长江源园区中,生态功能极重要区约占该分区面积的 54.1%,其中防风固沙极重要区在该区面积占比最高,为 30.5%,因此该分区核心生态功能为防风固沙(图 10)。

由此,三江源国家公园形成了东部以水源涵养、中部以土壤保持、西部以防风固沙为核心生态功能的空间格局。

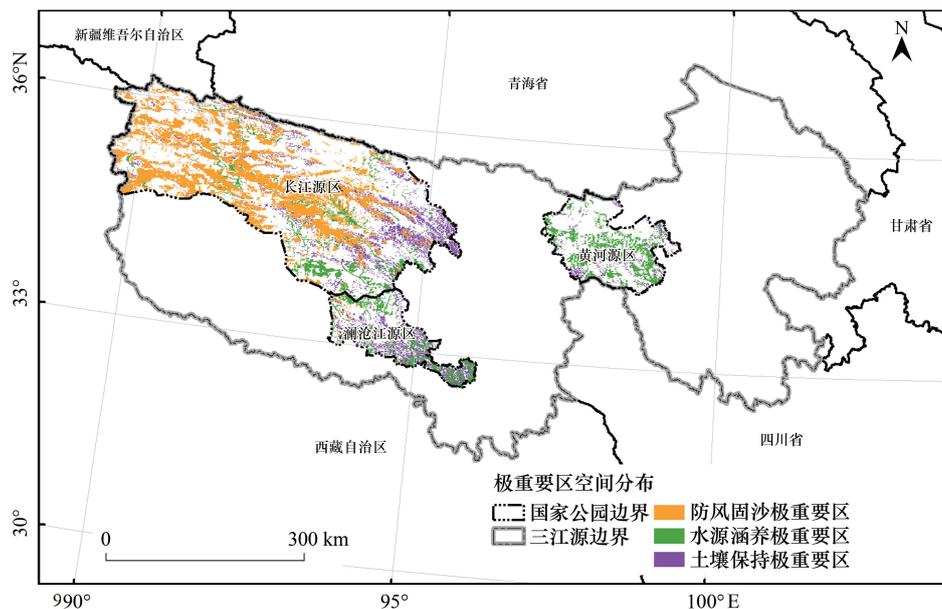


图 9 三江源国家公园生态功能极重要区空间分布

Fig.9 Spatial distribution of ecosystem functions with the utmost importance in the Three-river-source National Park

## 2.3 2000—2015 年三江源国家公园生态功能变化态势

### 2.3.1 2000—2015 年水源涵养功能变化

2000—2015 年,三江源国家公园水源涵养量呈波动下降态势,年变化趋势约为  $-0.56 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,单位面积水源涵养量变化趋势约为  $-617 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (图 11)。其中,黄河源园区变化趋势有所上升,约为  $78 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,长江源园区和澜沧江源园区均有所下降,分别为  $-671 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和  $-1229 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。极重要区单位面积水源涵养量的平均变化趋势明显下降,约为  $-5067 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,一般重要区和重要区有所上升。

从不同变化态势的分布来看,国家公园水源涵养功能主要呈转好态势,约有 84.5%的地区水源涵养量呈上升趋势,仅有 14.6%的地区呈下降趋势,3 个源区水源涵养量增加的地区也均超过各源区面积的 80%,但因升幅不高,导致全区年均水源涵养总量呈下降趋势。极重要区水源涵养量增加的地区超过其面积的 53.8%,减少区域占 45.4%,一般重要区和重要区均以增加为主(图 11)。

### 2.3.2 2000—2015 年土壤保持功能变化

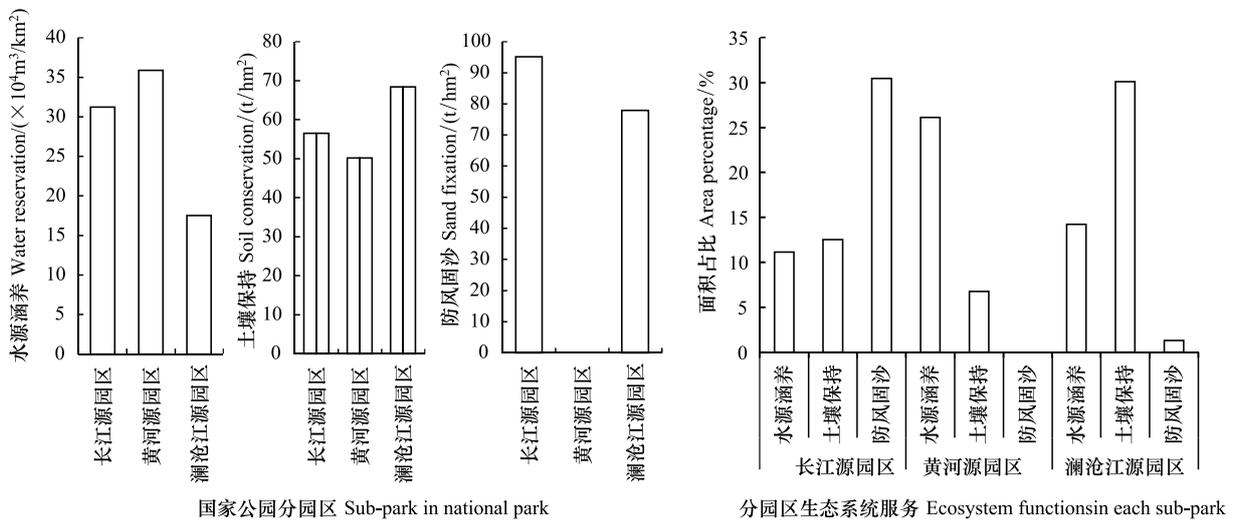


图 10 各园区生态功能极重要区单位面积功能量及面积占比

Fig.10 Ecosystem functions volume per unit area and area percentages in each sub-park

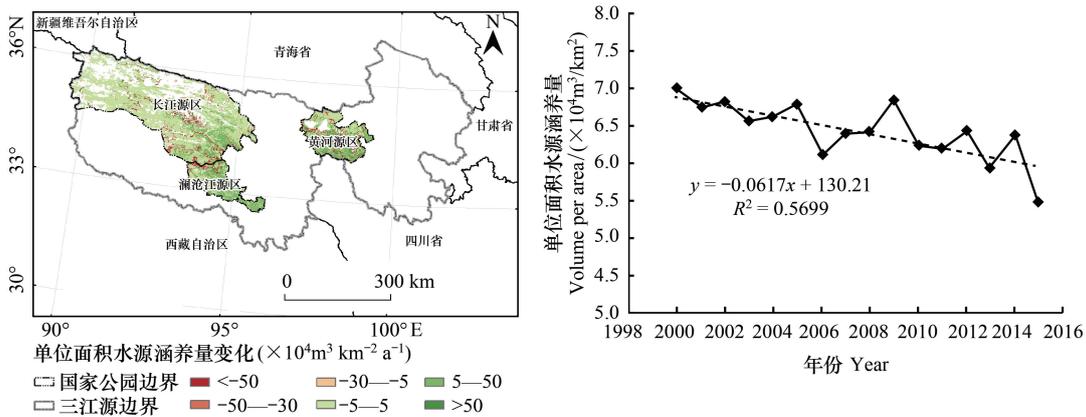


图 11 三江源国家公园水源涵养功能变化态势时空分布概况

Fig.11 Change trend of water regulation function in the Three-river-source National Park

2000—2015 年,三江源国家公园土壤保持量呈波动上升态势,年变化趋势约为 987 万 t/a,单位面积土壤保持量变化趋势约为  $0.88 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (图 12)。其中,澜沧江源园区的变化趋势最大,约为  $2.52 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,长江源园区与黄河源园区相当,分别为  $0.69 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和  $0.50 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。极重要区单位面积土壤保持量的平均变化趋势明显上升,约为  $3.69 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,一般重要区和重要区也有所上升。

全区超过 95%的地区土壤保持量均呈上升趋势,其中长江源园区 94.4%的区域呈上升趋势,黄河源园区及澜沧江源园区分别达到 98.6%及 99.5%。极重要区土壤保持量增加的地区占其总面积的 97.3%,一般重要区和重要区也均以增加为主(图 12)。

### 2.3.3 2000—2015 年防风固沙功能变化

2000—2015 年,三江源国家公园防风固沙量呈波动下降态势,年变化趋势约为-356 万 t/a,单位面积防风固沙量呈波动变化态势,变化趋势约为  $-0.32 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (图 13)。其中,长江源园区和黄河源园区均有所下降,变化趋势均为  $-0.36 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,澜沧江源园区基本不变。极重要区单位面积防风固沙量的平均变化呈下降趋势,约为  $-1.41 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,一般重要区有些许下降,重要区有所上升。

全区 39.3%的地区防风固沙量有所上升,56.0%的地区则出现了下降。下降幅度较大的地区主要集中在长江源园区西部以及黄河源园区东部。长江源园区出现上升和下降的区域面积相当,分别为 45.2%和 49.

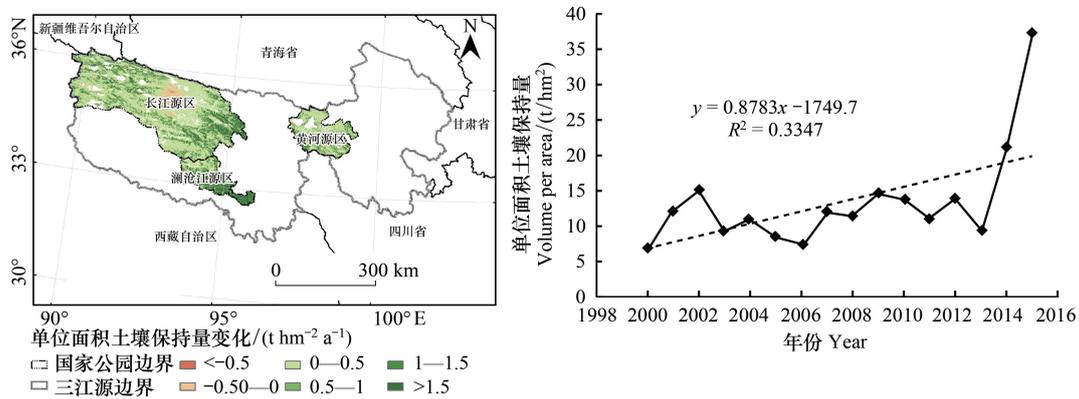


图 12 三江源国家公园土壤保持功能变化态势时空分布概况

Fig.12 Change trend of soil conservation function in the Three-river-source National Park

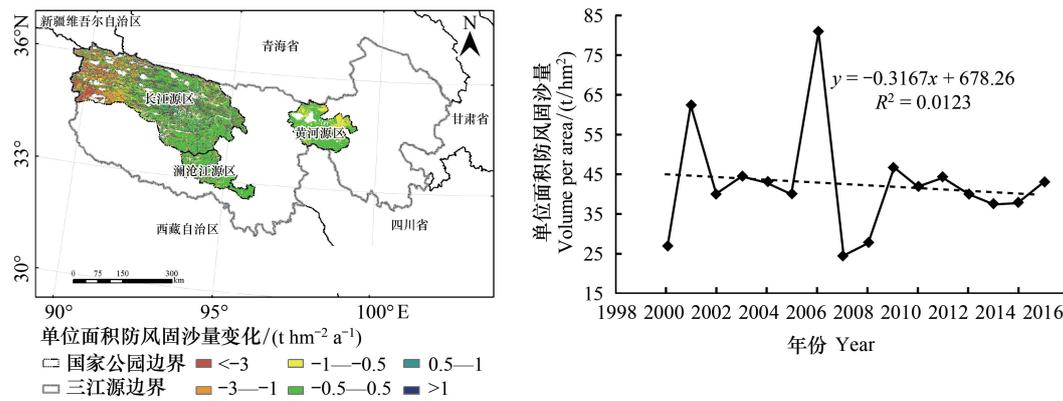


图 13 三江源国家公园防风固沙功能变化态势时空分布概况

Fig.13 Change trend of wind prevention/sand fixation function in the Three-river-source National Park

2%;而黄河源园区下降的区域超过了90%。极重要区防风固沙量增加的地区占其面积的35.3%;重要区以增加为主,增加区域占其面积的56.8%;一般重要区以减少为主,减少区域占其面积的58.6%(图13)。

#### 2.4 驱动因素初探

2000—2015年,三江源国家公园温度及降水量分别以 $0.05^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 和 $2.10\text{ mm}/\text{a}$ 的变化趋势波动上升,其中,黄河源园区增加最快,分别为 $0.053^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 和 $5.26\text{ mm}/\text{a}$ ,其次是长江源园区,分别为 $0.053^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 和 $1.56\text{ mm}/\text{a}$ ,澜沧江源园区的温度及降水增加趋势不显著,分别为 $0.039^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 和 $1.40\text{ mm}/\text{a}$ (图14)。气候暖湿化有助于植被返青期提前、生长期延长,进而提高植被覆盖度<sup>[32]</sup>。此外,三江源区实施了大量生态保护与修复工程,至2012年累计完成退牧还草 $631.22\text{ 万 hm}^2$ ,封山育林 $42.34\text{ 万 hm}^2$ ,治理黑土滩 $18.46\text{ 万 hm}^2$ ,治理沙漠化土地 $4.41\text{ 万 hm}^2$ ,草原鼠害防治面积 $785.41\text{ 万 hm}^2$ <sup>[1]</sup>。在暖湿化气候与生态工程的共同作用下,三江源国家公园草地退化趋势有所遏制,森林面积、郁闭度、蓄积量有所增加,草地退化态势基本遏制<sup>[1]</sup>,区域内生态系统状况得到较明显改善。过去15年间,三江源国家公园植被覆盖度呈波动上升趋势,为 $1.55\%/10\text{a}$ ,其中,黄河源园区植被覆盖度上升趋势最明显,为 $2.29\%/10\text{a}$ ,其次是长江源园区,为 $1.58\%/10\text{a}$ ,澜沧江源园区仅 $0.49\%/10\text{a}$ (图14)。综上,水源涵养及土壤保持功能主要呈转好态势。

防风固沙功能的下降主要由风速的减小及植被覆盖度的局部降低造成。过去15年间,三江源国家公园风速总体以 $-0.01\text{ m}/\text{s}/10\text{a}$ 的趋势波动下降,黄河源园区下降最明显,为 $-0.11\text{ m}/\text{s}/10\text{a}$ ,其次是长江源园区,为 $-0.007\text{ m}/\text{s}/10\text{a}$ ,澜沧江源园区平均风速呈上升趋势,为 $0.11\text{ m}/\text{s}/10\text{a}$ (图14)。风速降低会造成潜在土壤风蚀量减少,进而有可能造成防风固沙量的降低。同时,通过植被覆盖度及防风固沙量空间变率数据的耦合

可以发现,防风固沙量的降低主要发生在植被覆盖度降低的区域,尤其在长江源园区的西北区域最为明显。

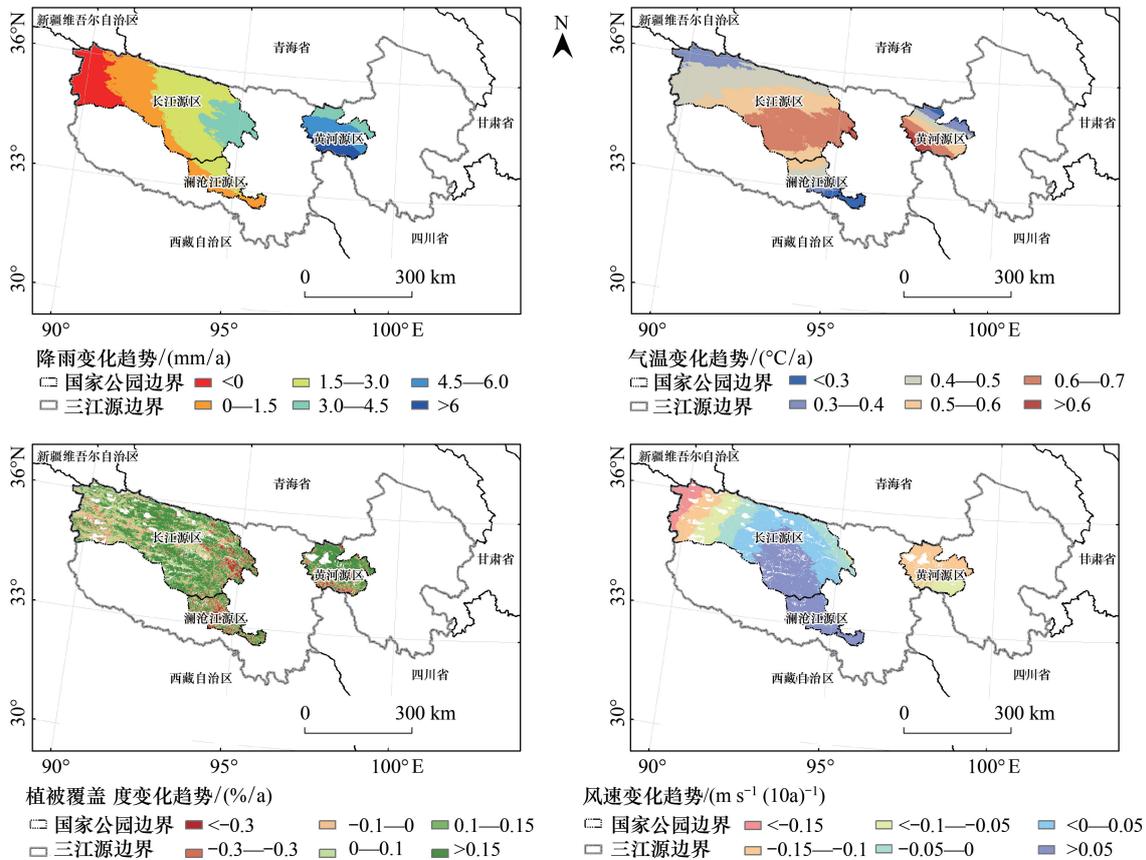


图 14 2000—2015 年三江源国家公园降雨、气温、植被覆盖度、风速变化趋势空间分布

Fig.14 Change trends of the precipitation, temperature, vegetation coverage, wind speed from 2000 to 2015 in the Three-river-source National Park

### 3 讨论

生态功能极重要区对于三江源国家公园生态功能的发挥具有重大意义。2000—2015 年间,三江源国家公园生态功能虽整体呈现好转态势,但防风固沙功能及极重要区水源涵养功能呈明显下降趋势。草地退化态势尚未完全遏制,局部地区植被覆盖度仍有所下降,而且植被根系层的恢复极其缓慢,尤其在气候条件相对较差的西部地区,要进一步加强退化草地的修复。Liu 等<sup>[13]</sup>预测,由于气温上升趋势显著高于降水,随着气温的进一步升高,潜在蒸散量将随之增加,三江源区暖湿化趋势将有所减弱<sup>[33]</sup>,促使其呈现暖干化趋势,进而抑制植被的生长。

在黄河源园区,尽管植被覆盖度上升趋势明显,但其好转仅表现在长势上,群落结构并未发生好转<sup>[15]</sup>;在长江源园区,西北区域植被覆盖度存在大面积的降低,同时温度的升高会造成冰川、永久积雪和冻土加速融化,一旦打破该地区生态系统的平衡状态,将会严重威胁其生态安全;在澜沧江源园区,气候暖湿化趋势并不明显,同时植被覆盖度增速缓慢,生态系统未见明显好转。因此,三江源国家公园总体规划目标的实现仍任重道远。

在未来的研究中,将围绕高寒地区生态系统服务维持机理与提升技术中的关键科学问题,以生态系统服务提升、水土资源协调利用为主线,通过生态系统格局—过程—服务的有机结合,更加深入研究高寒地区生态系统服务形成过程、人为与自然驱动机制,为三江源国家公园山水林田湖草重要生态系统原真性、完整性的永续保护提供科学依据。

## 4 结论

本文分析了三江源国家公园生态系统类型及其功能状况的时空分异特征,追溯了 2000—2015 年生态功能时空变化趋势,进行生态功能重要性辨识,有助于三江源国家公园建立生态本底、科学划分管理分区与分级。得到主要结论如下:

(1)三江源国家公园生态系统类型以草地、荒漠、水体与湿地生态系统为主。其中,长江源园区以草地与荒漠生态系统为主;黄河源园区以草地生态系统为主;澜沧江源园区以草地生态系统为主,同时该园区南部分布少量森林生态系统。

(2)生态系统水源涵养功能呈现西北低、东南高的空间分布态势,其中黄河源园区单位面积量最高,其次是澜沧江源园区,长江源园区最低;土壤保持功能呈现中部高、西北部低的分布态势,其中澜沧江源园区单位面积量最高,其次是长江源园区,黄河源园区最低;防风固沙功能呈现西部高、东部低的分布态势,其中长江源园区单位面积量最高,其次是澜沧江源园区,黄河源园区最低。

(3)三江源国家公园形成了东部以水源涵养、中部以土壤保持、西部以防风固沙为核心生态功能的空间格局,其中黄河源园区以水源涵养为主,水源涵养极重要区在该区面积占比为 26.0%;澜沧江源园区以土壤保持为主,土壤保持极重要区在该区面积占比为 29.9%;长江源园区以防风固沙为主,防风固沙极重要区在该区面积占比为 30.5%。

(4)2000—2015 年,三江源国家公园生态系统水源涵养功能从量上看呈下降趋势,年变化趋势约为 $-0.56 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,但从变化态势的空间分布来看,提升区的面积占比达到 84.5%,总体提升,极重要区呈现下降态势;土壤保持功能总体提升,年变化趋势为 987 万  $\text{t}/\text{a}$ ,转好区面积超过 95%;防风固沙功能则出现下降态势,年变化趋势为 $-356 \text{ 万 t}/\text{a}$ ,仅 39.3%的地区防风固沙量有所上升。

(5)气候暖湿化以及三江源生态保护工程的实施是三江源国家公园生态系统水源涵养及土壤保持功能呈现转好态势的主要原因。防风固沙功能的下降主要由风速的减小及植被覆盖度的局部降低造成。

三江源国家公园的规划建设,应遵循生态系统整体保护、系统修复理念,依照各分园区生态系统特点、核心生态功能类型及其重要性分级分布,分区施策,因地制宜。在黄河源园区,应以草地及湿地的保护为主,采取以禁牧、围栏封育为主的自然修复措施。在长江源园区,除草地外,还应注重雪山、冰川及荒漠的保护,严格限制冰川雪山周边的人类生产经营活动。在澜沧江源园区,除草地外,还应以森林生态系统的保护为主,应以公益林补偿、封山育林等综合保护措施为主。最后,在加强保护力度的基础上,需要加强生态工程的管理利用,充分发挥广大农牧民群众生态保护的主体作用,尽快设立生态管护公益岗位。

### 参考文献(References):

- [ 1 ] Shao Q Q, Cao W, Fan J W, Huang L, Xu X L. Effects of an ecological conservation and restoration project in the Three-River Source Region, China. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(2): 183-204.
- [ 2 ] 何跃君. 关于三江源国家公园体制试点的做法、问题和建议. *中国生态文明*, 2016, (6): 74-79.
- [ 3 ] 国家发展和改革委员会. 三江源国家公园总体规划. (2018-01-12). <http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbghwb/201801/W020180117588510391412.pdf>.
- [ 4 ] 付梦娣, 田俊量, 朱彦鹏, 田瑜, 赵志平, 李俊生. 三江源国家公园功能分区与目标管理. *生物多样性*, 2017, 25(1): 71-79.
- [ 5 ] 乔慧捷, 汪晓意, 王伟, 罗振华, 唐科, 黄燕, 杨胜男, 曹伟伟, 赵新全, 江建平, 胡军华. 从自然保护区到国家公园体制试点: 三江源国家公园环境覆盖的变化及其对两栖爬行类保护的启示. *生物多样性*, 2018, 26(2): 202-209.
- [ 6 ] 黄宝荣, 王毅, 苏利阳, 张丛林, 程多威, 孙晶, 何思源. 我国国家公园体制试点的进展、问题与对策建议. *中国科学院院刊*, 2018, 33(1): 76-85.
- [ 7 ] 窦亚权, 李娅. 我国国家公园建设现状及发展理念探析. *世界林业研究*, 2018, (1): 75-80.
- [ 8 ] 向宝惠, 曾瑜哲. 三江源国家公园体制试点区生态旅游系统构建与运行机制探讨. *资源科学*, 2017, 39(1): 50-60.
- [ 9 ] 陈耀华, 陈远笛. 论国家公园生态观——以美国国家公园为例. *中国园林*, 2016, 32(3): 57-61.

- [10] 吴丹, 邵全琴, 刘纪远, 曹巍. 三江源地区林草生态系统水源涵养服务评估. 水土保持通报, 2016, 36(3): 206-210.
- [11] 林慧龙, 郑舒婷, 王雪璐. 基于 RUSLE 模型的三江源高寒草地土壤侵蚀评价. 草业学报, 2017, 26(7): 11-22.
- [12] 梁健超, 丁志锋, 张春兰, 胡慧建, 朵海瑞, 唐虹. 青海三江源国家级自然保护区麦秀分区鸟类多样性空间格局及热点区域研究. 生物多样性, 2017, 25(3): 294-303.
- [13] Liu X F, Zhang J S, Zhu X F, Pan Y Z, Liu Y X, Zhang D H, Lin Z H. Spatiotemporal changes in vegetation coverage and its driving factors in the Three-River Headwaters Region during 2000-2011. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2): 288-302.
- [14] 孙发平, 曾贤刚. 中国三江源区生态价值及补偿机制研究. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [15] 刘纪远, 邵全琴, 樊江文. 三江源生态工程的生态成效评估与启示. 自然杂志, 2013, 35(1): 40-46.
- [16] Jiang C, Zhang L B. Climate change and its impact on the Eco-environment of the three-rivers headwater region on the Tibetan Plateau, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2015, 12(10): 12057-12081.
- [17] 陈丹. 台湾国家公园对大陆自然保护区建设管理的启示. 林产工业, 2015, 42(5): 58-60.
- [18] 徐新良, 庞治国, 于信芳. 土地利用/覆被变化时空信息分析方法及应用. 北京: 科学技术文献出版社, 2014.
- [19] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
- [20] Wischmeier W H, Johnson C B, Cross B V. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil & Water Conservation*, 1971, 26(5): 189-193.
- [21] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes. *Transactions of the ASAE*, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [22] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 黄丽, 张光远. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19-24.
- [23] 彭建, 李丹丹, 张玉清. 基于 GIS 和 RUSLE 的滇西北山区土壤侵蚀空间特征分析——以云南省丽江市为例. 山地学报, 2007, 25(5): 548-556.
- [24] 李天宏, 郑丽娜. 基于 RUSLE 模型的延河流域 2001-2010 年土壤侵蚀动态变化. 自然资源学报, 2012, 27(7): 1164-1175.
- [25] 孙文义, 邵全琴, 刘纪远. 黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价. 自然资源学报, 2014, 29(3): 365-376.
- [26] 怡凯, 王诗阳, 王雪, 姚洪莉. 基于 RUSLE 模型的土壤侵蚀时空分异特征分析——以辽宁省朝阳市为例. 地理科学, 2015, 35(3): 365-372.
- [27] 曹巍, 刘璐璐, 吴丹. 三江源区土壤侵蚀变化及驱动因素分析. 草业学报, 2018, 27(6): 10-22.
- [28] Fryrear D W, Krammes C A, Williamson D L, Zobeck T M. Computing the wind erodible fraction of soils. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1994, 49(2): 183-188.
- [29] 黄麟, 曹巍, 吴丹, 巩国丽, 赵国松. 2000—2010 年我国重点生态功能区生态系统变化状况. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2758-2766.
- [30] 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: 中国科学院大学, 2014.
- [31] 环境保护部办公厅, 发展改革委办公厅. 生态保护红线划定指南. (2017-05-27). <http://mp.ofweek.com/emc/a545663828646>.
- [32] Shen M G, Piao S L, Dorji T, Liu Q, Cong N, Chen X Q, An S, Wang S P, Wang T, Zhang G X. Plant phenological responses to climate change on the Tibetan Plateau: research status and challenges. *National Science Review*, 2015, 2(4): 454-467.
- [33] 徐维新, 古松, 苏文将, 江莎, 校瑞香, 肖建设, 张娟. 1971—2010 年三江源地区干湿状况变化的空间特征. 干旱区地理, 2012, 35(1): 46-55.