

# 三江源地区 2000—2020 年水土保持服务 时空变化及驱动因素

余欢<sup>1</sup>, 李鹏<sup>1,2</sup>, 王孝康<sup>3</sup>, 肖列<sup>1,2</sup>, 王周<sup>3</sup>, 杨秀玲<sup>4</sup>, 宁静<sup>4</sup>, 张泽宇<sup>1,2</sup>

(1.西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2.旱区生态水文与灾害防治国家林业和草原局重点实验室, 陕西 西安 710048; 3.国家林业和草原局西北林业调查规划院, 陕西 西安 710001; 4.青海省林业和草原局, 青海 西宁 810008)

**摘要:** [目的] 探究三江源地区水土保持服务时空变化及成因, 为该地区环境保护及可持续发展提供科学依据与数据支撑。[方法] 基于 NPP 法定量评估 2000—2020 年三江源地区水土保持服务能力, 并采用参数最优地理探测器对其进行驱动因素分析。[结果] ①2000—2020 年, 三江源地区的土地利用发生了一定的变化, 耕地、草地、水域和建设用地面积不断扩大, 林地和未利用地面积双双减小; 三江源地区主要以草地为主, 其次是水域和林地。20 a 间植被覆盖度基本呈现平稳增加的趋势, 整体呈“东高西低”的空间分布格局。②2000—2020 年, 三江源地区水土保持服务能力指数呈现 N 形的变化趋势, 但总体上呈现增加趋势, 增速为 26.13%, 水土保持服务能力显著提高; 水土保持服务能力分布较为一致, 整体呈现“东高西低”的空间分布格局。2000—2020 年三江源地区重心始终在玛沁县的西部, 水土保持能力向西北方向增大且多方向外延, 工程实施效果显著。③植被覆盖度、地均 GDP、放牧强度对于水土保持服务影响较大。植被覆盖度与地均 GDP、年平均降雨、放牧强度等多个因子交互作用解释力均较强。[结论] 三江源地区应继续实施天然林保护工程, 开展森林保育和修复大力提升森林蓄积量; 采取合理放牧、建设人工草地、围栏封育、补播等措施对生态进行保护。

**关键词:** 水土保持服务; 时空演变; 地理探测器; 驱动因素; 三江源地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)01-0286-10

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 余欢, 李鹏, 王孝康, 等. 三江源地区 2000—2020 年水土保持服务时空变化及驱动因素[J]. 水土保持通报, 2025, 45(1): 286-295. She Huan, Li Peng, Wang Xiaokang, et al. Spatial and temporal changes and its driving factors of soil and water conservation services in Sanjiangyuan region during 2000—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 286-295. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.030; CSTR:32312.14.stbctb.2025.01.030.

## Spatial and temporal changes and its driving factors of soil and water conservation services in Sanjiangyuan region during 2000—2020

She Huan<sup>1</sup>, Li Peng<sup>1,2</sup>, Wang Xiaokang<sup>3</sup>, Xiao Lie<sup>1,2</sup>, Wang Zhou<sup>3</sup>, Yang Xiuling<sup>4</sup>, Ning Jing<sup>4</sup>, Zhang Zeyu<sup>1,2</sup>

(1.State Key Laboratory of Ecological Water Conservancy in Northwest Dry Region,

Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2.Key Laboratory of Ecological

Hydrology and Disaster Prevention in Arid Region, State Forestry and Grassland Administration, Xi'an, Shaanxi

710048, China; 3.Northwest Forestry Survey and Planning Institute of State Forestry and Grassland Administration,

Xi'an, Shaanxi 710001, China; 4.Forestry and Grassland Bureau of Qinghai Province, Xining, Qinghai 810008, China)

**Abstract:** [Objective] The spatial-temporal changes and their causes of soil and water conservation services in the Sanjiangyuan region were explored in order to provide scientific evidence and data support for environmental protection measures and sustainable development in the area. [Methods] The soil and water conservation service capacity of the Sanjiangyuan region from 2000 to 2020 was quantitatively assessed using the net primary productivity (NPP) method and a driver factor analysis was performed using the optimal parameter geographical detector. [Results] ① From 2000 to 2020, land use in the Sanjiangyuan region underwent significant changes. The cultivated land, grassland, water bodies, and construction land

收稿日期: 2024-08-01

修回日期: 2024-11-14

采用日期: 2024-11-18

资助项目: 陕西省 2023 年重点研发计划项目“陕西典型地貌单元植被—土壤—水体固碳能力评估与监测关键技术研究”(2023-ZDLSF-65)

第一作者: 余欢(1999—), 男(汉族), 甘肃省天水市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持措施优化配置。Email: 17743406126@163.com。

通信作者: 李鹏(1974—), 男(汉族), 山东省烟台市人, 博士, 教授, 主要从事水土资源与环境方面的研究。Email: lipeng74@163.com。

continuously expanded, whereas the forest land and unused land areas decreased. The region is mainly dominated by grassland, followed by water bodies and forest land. Over the 20 year period, vegetation coverage showed a generally stable increasing trend with an overall spatial distribution pattern of “higher in the east and lower in the west.” ② From 2000 to 2020, the soil and water conservation service capacity index followed an N-shaped trend, but overall, the index had an increasing trend over the time period with a growth rate of 26.13%, indicating a significant improvement in the soil and water conservation service capacity. The distribution of the soil and water conservation service capacity was relatively consistent, displaying an overall “higher in the east and lower in the west” spatial distribution pattern. Throughout this period, the gravity center in the Sanjiangyuan region remained in the western part of Maqin County, with increased soil and water conservation capacity towards the northwest and multidirectional extension. This result indicated the engineering projects that had been implemented had significantly improved soil and water conservation service capacity. ③ Factors, such as vegetation coverage, GDP per unit area, and grazing intensity, had considerable impacts on soil and water conservation services and the interactions between vegetation coverage and GDP per unit area, average annual rainfall, grazing intensity, and other factors explained a considerable proportion of the change. [Conclusion] It is essential to continue implementing natural forest protection projects and promote forest conservation and restoration to significantly enhance the forest stock. Furthermore, measures, such as rational grazing, construction of artificial grasslands, fencing, and reseeded, should be adopted to protect ecosystems.

**Keywords: soil and water conservation service; space-time evolution; geographic detector; driving factor; Sanjiangyuan region**

生态系统服务是人们从生态系统中享有的各种益处<sup>[1]</sup>,是人类社会存续与进步的根本,对人类幸福生活具有关键影响<sup>[2]</sup>。水土保持是对人为活动和自然因素造成的水土流失进行预防和治理,通过增加地表植被覆盖、抬高侵蚀基准面、拦截径流泥沙等途径控制土壤侵蚀,改善区域生态环境,促进生态系统碳库的累积,产生巨大的碳汇效益<sup>[3-4]</sup>。因此,对区域水土保持服务进行定量评估,深入探究水土保持服务能力的时空演变规律及其驱动因素,对提升生态系统服务功能,增进人类福祉以及促进地区生态环境良性发展具有重要意义<sup>[5]</sup>。

在《生态保护红线划定指南》(试行)(环办生态〔2017〕48号)附录中,针对生态服务有两种评价方法,分别是模型法和净初级生产力(NPP)法。其中,NPP是评价生态系统服务能力指数、生态承载力和可持续发展的重要指标<sup>[6]</sup>。学者们广泛开展了基于NPP法的生态系统服务研究,如Zarei等<sup>[7]</sup>基于NPP法探究了坦桑尼亚草原生态系统可持续性;Gong等<sup>[8]</sup>探究了共享与耦合效应下三北防护林规划区NPP的时空变化趋势;Li等<sup>[9]</sup>基于NPP法分析了生态工程导向下黄土高原生态系统容量指数变化及驱动因素。综上,基于NPP法对于生态服务的计算已趋向成熟,因此,本文基于NPP法计算水土保持服务能力。

对于生态服务的评价研究已日渐成熟,有学者<sup>[10]</sup>开始关注生态服务的驱动因素研究。如魏雷哈

冰等<sup>[11]</sup>基于InVEST模型定量评估1990—2020年窟野河流域生态服务功能,并采用地理探测器分析其驱动因素。周建伟等<sup>[12]</sup>基于高精度土地利用数据,分析了拉萨河流域2000—2020年土地利用和生态系统服务价值(ESV)时空演变特征,并借助PLUS模型和地理探测器分别探索了土地利用变化和ESV空间分异的驱动因素。林晨宇<sup>[13]</sup>基于福建省2010—2020年土地利用遥感监测数据,通过土地利用变化测算、地理探测器与地理加权回归对生态系统服务价值进行定量评估,分析福建省生态系统服务价值时空演变特征及其驱动因子。综上,对于生态系统服务驱动因素的研究已取得了不错的成绩,然而仍有需要改进的地方:①以往研究大多整个生态服务驱动因素进行研究,而对于单一的生态服务驱动因素的探究较为少见;②学者们集中于研究流域<sup>[14]</sup>、市域<sup>[15]</sup>及地区等<sup>[16]</sup>的生态服务驱动因素,却忽略了大江大河源头这一重要的研究区。③在探究影响因素方面,多采用地理探测器探测其时空变化的驱动力<sup>[17-18]</sup>,但地理探测器一般根据经验知识对连续型自变量分级,人为主观性较强,很大程度上会影响驱动因子的解释力<sup>[5]</sup>。因此,有必要借助R语言运用参数最优地理探测器针对大江大河源头区域去研究水土保持服务的驱动因素。这样能够避免主观因素对结果的影响,更加精确地探测水土保持服务空间异质性的驱动力。

三江源地区是青藏高原生态屏障的关键区域,确

保了我国长江和黄河流域地区自然环境持久稳固,社会经济持续繁荣<sup>[19]</sup>,在我国生态文明建设中占据关键角色<sup>[20]</sup>。其水土保持功能对中国及其周边地区生态安全具有重大意义<sup>[21]</sup>。此外,三江源分别在 2005 和 2014 年开始实施生态补偿及三江源区生态保护和建设一期工程、二期工程,分别于 2014 和 2020 年竣工。目前,针对三江源地区生态服务功能的研究大多集中于对其量的时空变化,缺乏对于驱动生态服务的因素的探究,如杨祎等<sup>[21]</sup>基于修正通用土壤流失方程(RUSLE)和修正通用土壤风蚀方程(RWEQ)模拟 1979—2018 年三江源区草地水土保持与防风固沙功能临界植被覆盖度并分析了其时空变化;李付杰等<sup>[22]</sup>基于卫星遥感影像、地面生态监测、统计数据等分析 2000—2015 年三江源地区径流调节、水源供给、水土保持、生态固碳、物种保育等生态系统服务功能。鉴于此,本研究选择三江源地区为研究区,通过对其水土保持服务变化情况进行分析其工程实施效果,运行 NPP 法对三江源地区 2000—2020 年的水土保持服务功能的时空变化特征进行分析,采用参数最优地理探测器对其进行驱动因素分析,研究结果可为三江源生态环境保护及可持续发展提供科学依据与数据支撑。

## 1 研究区概况

三江源地区是中国长江、黄河流域以及澜沧江等大江大河的主要源头,是青藏高原的腹地,位于  $89^{\circ}24' - 102^{\circ}23'E$ ,  $31^{\circ}39' - 36^{\circ}16'N$ , 总面积达  $3.95 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,包括黄南、海南、果洛、玉树藏族自治州 4 个州,共 18 个县以及海西州格尔木市,平均海拔 3 500~4 800 m。最高气温在 7 月,平均气温  $6.4 \sim 13.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,极端最高温为  $28.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;最低气温在 1 月,平均气温  $-6.6 \sim 13.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,极端最低温为  $-48 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。降水主要集中在暖季的 6—9 月,约占全年降水量的 80%,年均降水量介于 262.2~772.8 mm。研究区自然地理环境特殊,地貌错综复杂,属典型的高原大陆性气候,气候特点主要体现在冷暖二季相间、干旱二季分明、月温差小、日温差大、日照时数长、辐射强。降水量高度集中,雨热同期。区域土壤呈现显著的垂直地带性分布现象,随着海拔由低到高,土壤类型依次为山地森林土、栗钙土、灰褐土、山地草甸土高山草原土、高山草甸土和高山寒漠土<sup>[22]</sup>。

## 2 数据来源

本文选取 2000,2005,2010,2015 和 2020 年 5 期数据进行探讨研究。三江源地区边界来源于中国科学院环境与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>)。

NPP 数据来自 MODIS 的 MOD17A3 数据产品。数字高程模型(DEM)数据来自地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>)。土壤数据来自国家冰川与冻土科学数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn/portal/>)。归一化植被指数(NDVI)来自 MOD13A1500m 分辨率植被指数 16d 合成产品。土地利用数据来源于武汉大学学者在 GEE 平台制作的源于 Landsat 的年度中国土地覆盖数据集(<http://irsip.whu.edu.cn/publications>)。土壤湿度数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://doi.org/10.11888/Terre,tpdc,272994>)。人工林数据集来源于北京大学郭庆华课题组发布中国植被数据产品集 v1.0(<https://www.3decology.org/>)。年末牲畜存栏量数据来源于青海省统计局编制的《青海统计年鉴》(<http://tjj.qinghai.gov.cn/tjData/qhtjnj/>)。GDP 数据均来源于中国科学院环境与数据中心(<https://www.resdc.cn/>);人口密度数据来源于橡树岭国家实验室(<https://landscan.ornl.gov/>)。

## 3 研究方法

### 3.1 水土保持服务能力评估

三江源区土壤侵蚀非常严重,有必要对其近年来的水土保持服务功能进行评估,为该地区的土壤保护工作提供战略咨询。结合《生态保护红线划定指南》及已有的研究成果<sup>[9]</sup>,可以发现,NPP 法能够通过中间物质与最终服务的关系来评估生态服务的重要性,此方法仅需少数参数,操作简单便捷,虽不能精确模拟生态流程及评估生态服务,但其利用简洁算法实现了生态服务评估的科研价值与实践应用双重考量。故此,本文以 NPP 法计算的水土保持服务能力指数来衡量水土保持服务,其评估模型与土壤可蚀性因子计算公式如下。

3.1.1 评估模型 水土保持服务是生态系统运用自身的构造及运作机制,有效减轻水流引发的土壤侵蚀,植物根茎有效地将泥土稳固,降低雨水冲刷地表土层,避免其汇入沟渠的效能,是自然系统所赋予的至关重要的调和功能之一。水土保持服务能力指数的计算需要 3 个重要的影响因子,分别为多年植被净初级生产力平均值( $NPP_{\text{mean}}$ ),土壤可蚀性因子( $K$ ),坡度因子( $F_{\text{slo}}$ )。该指数凸显了植被绿化、地貌特征及土壤构造在维护水土资源中的关键功能,明确展现生态系统水土保持功效的根本空间分布特征,计算公式<sup>[9]</sup>为:

$$S_{\text{pro}} = NPP_{\text{mean}} \times (1 - K) \times (1 - F_{\text{slo}}) \quad (1)$$

式中: $S_{\text{pro}}$ 为水土保持服务能力指数; $NPP_{\text{mean}}$ 为多年

植被净初级生产力平均值;  $F_{slo}$  为坡度因子;  $K$  为土壤可蚀性因子。

3.1.2 土壤可蚀性因子计算 土壤可蚀性因子是指土壤颗粒被水力分离和搬运的难易程度, 主要与土壤质地、有机质含量、土体结构、渗透性等土壤理化性质有关, 计算公式<sup>[17-19]</sup>为:

$$K = (-0.0383 + 0.51575K_{EPIC}) \times 0.1317 \quad (2)$$

$$K_{EPIC} = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256m_c(1 - m_{silt}/100)]\} \times [m_{silt}/(m_c + m_{silt})]^{0.3} \times \{1 - 0.25 \text{orgC}/[\text{orgC} + \exp(3.72 - 2.95 \text{orgC})]\} \times \{1 - 0.7(1 - m_s/100)/\{1 - m_s/100\} + \exp[-5.51 + 22.9(1 - m_s/100)]\} \quad (3)$$

式中:  $K_{EPIC}$  为修正前的土壤可蚀性因子;  $K$  为修正后的土壤可蚀性因子;  $m_c$ 、 $m_{silt}$ 、 $m_s$ 、 $\text{orgC}$  分别为黏粒、粉粒、砂粒和有机碳的百分比含量。

3.1.3 坡度因子计算 坡度因子是地形对于土壤侵蚀强度的影响, 基于数字高程模型 DEM 提取坡度因子, 计算公式<sup>[17-19]</sup>为:

$$F_{slo} = \begin{cases} 10.8 \sin \alpha + 0.03 & (\alpha < 5^\circ) \\ 16.8 \sin \alpha - 0.50 & (5^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ) \\ 21.9 \sin \alpha - 0.96 & (\alpha > 10^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $S$  为坡度因子;  $\alpha$  为坡度( $^\circ$ )。

### 3.2 标准差椭圆及重心模型

标准差椭圆和重心计算可获取水土保持服务能力高值重心及其时空移动轨迹, 可体现其空间形态演变、主要驱动方向及要素空间分布的集散性<sup>[23]</sup>。根据重心点分布状况得到重心点中心, 以中心为圆心得到重心聚集区, 选取 2000, 2005, 2010, 2015 和 2020 年为典型年份构建重心迁移路径, 探索水土保持服务能力高值的时空变化规律。该区域重心的地理坐标表示为:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i x_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (5)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i y_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (6)$$

式中:  $x_i$ 、 $y_i$  分别为第  $i$  个区域重心坐标的  $x$ 、 $y$  轴;  $M_i$  为该子区域的属性值。

### 3.3 最优地理探测器模型

地理探测器是探测空间分异性, 并揭示其背后驱动力的一组统计学方法。其内核是一种探测和利用空间分异性的工具<sup>[5]</sup>。最优参数地理探测器利用 R4.2.1 语言中地理探测器“GD”包<sup>[26]</sup>, 对连续型因子进行离散化处理, 计算每个连续变量在不同分级方式(相等区间、自然区间、分位数区间、几何区间和标准差分类方法)的  $q$  值,  $q$  值最大的参数组合为该自变量最优离散组合。

因子探测是通过分析因变量  $Y$  自身的空间分异性和各影响因子  $X$ , 对  $Y$  的空间分异性解释力强度, 利用  $q$  值表示强度程度<sup>[5, 24]</sup>,  $q$  值在  $[0, 1]$ , 且随着  $q$  值的增大, 因子对水土保持服务的解释力增强。计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sum \delta_h^2}{N \delta^2} \quad (7)$$

式中:  $h$  为因变量  $Y$  或影响因子  $X$  的分层 ( $h = 1 \dots L$ ), 即分类或分区;  $N_h$ 、 $N$  分别为层  $h$  和全区的单元数;  $\sigma_h^2$ 、 $\sigma^2$  分别为层  $h$  和全区的  $Y$  值的方差。

交互作用探测用于分析多个影响因子共同作用时, 是提升还是降低了对因变量  $Y$  的解释力。交互作用探测判断方法和类型详见表 1。

表 1 影响因子交互作用类型

Table 1 Interaction patterns of driving factors

判据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	双因子加强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

### 3.4 驱动因素

结合三江源地区的自然与社会经济状况, 本文选取气候、植被、地形、土壤等自然因素, 人口、经济、土地利用、生态保护等人为因素, 其中, 选取年平均气温与年平均降水量来反映气候因素, 高程和坡度表征地形因素, 植被覆盖度表征植被因素, 土壤湿度表征土

壤因素; 地均 GDP 表征经济因素, 人口密度表征人口因素, 放牧强度表征人类活动强度因素, 植树造林面积表征生态保护因素(表 2)。

3.4.1 植被覆盖度 植被覆盖度是指植被垂直投影在地面的面积与研究区总面积的比例, 是评估植被状况的关键因素, 其计算公式为:

$$f_{vc} = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (8)$$

式中： $f_{vc}$  为植被覆盖度； $NDVI_{\max}$ 、 $NDVI_{\min}$  为 NDVI 的最大值和最小值。

3.4.2 人类活动强度 人类活动强度为某一区域受人类活动带来的变动程度<sup>[25]</sup>，考虑到三江源地区人类活动对生态的主要影响是放牧，因此，本文用放牧强度来衡量人类活动强度。放牧活动对草地的影响程度称为放牧强度<sup>[26]</sup>，其计算公式为：

$$GI_i = \frac{\sum_{a=1}^k (r_a L_a)}{S} \times \frac{n \sum_{t=1}^t u_{it}}{\sum_{i=1}^n \sum_{b=1}^t u_{ib}} \quad (9)$$

式中： $GI_i$  为第  $i$  个栅格的放牧强度； $k$  为研究区牲畜的种类数； $r_a$  为第  $a$  种牲畜标准羊单位折算系数； $L_a$  为第  $a$  种牲畜的数量； $n$  为研究区放牧范围内草地栅格的数量； $t$  为影响因子的数量； $u_{ib}$  为第  $i$  个栅格中第  $b$  个影响因子的影响力值。

表 2 三江源地区水土保持能力驱动因素

Table 2 Driving factors of soil and water conservation capacity in Sanjiangyuan region

影响因素	解释变量	代码	
自然因素	气候因素	年平均气温/°C	$X_1$
		年平均降雨/mm	$X_2$
	植被因素	植被覆盖度/%	$X_3$
	地形因素	高程/m	$X_4$
		坡度/(°)	$X_5$
	土壤因素	土壤湿度/%	$X_6$
人为因素	经济因素	地均 GDP/(元·km <sup>-2</sup> )	$X_7$
	人口因素	人口密度/(人·km <sup>-2</sup> )	$X_8$
	人类活动	放牧强度	$X_9$
	生态修复	植树造林面积/km <sup>2</sup>	$X_{10}$

## 4 结果与分析

### 4.1 土地利用与植被覆盖度时空变化特征

4.1.1 土地利用时空变化特征 从时间变化来看(图 1),2000—2020 年三江源地区的土地利用状况发生了一定的变化,耕地、草地、水域和建设用地面积不断扩大,林地和未利用地面积均呈减小趋势。2000—2020 年三江源有 195.57 km<sup>2</sup> 的草地转化为建设用地,15.19 km<sup>2</sup> 的耕地转化为建设用地,导致建设用地的面积增加,2020 年建设用面积仅为 318.04 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 0.84%。未利用地的面积明显减少,有 21 503.10 km<sup>2</sup> 的未利用地转化为草地,也有一部分转化为建设用地,这与封牧封育、草畜平衡管理等荒漠化治理措施有关。此外,有

1 145.34 km<sup>2</sup> 的林地转化为草地,可能是土地分类和用途的变化所致。

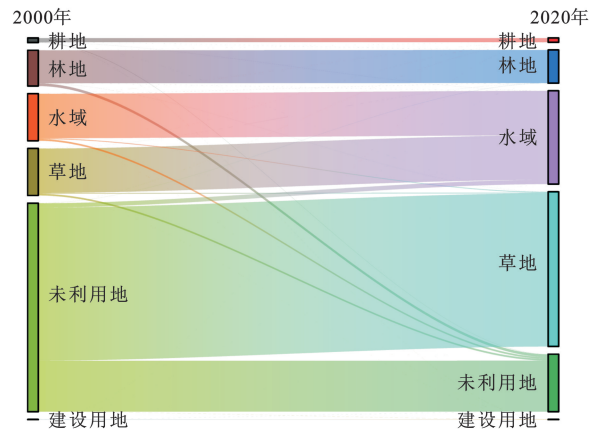


图 1 三江源地区 2000—2020 年土地利用转移特征  
Fig.1 Characteristics of land use transfer in Sanjiangyuan region from 2000 to 2020

从空间分布来看(图 2),三江源地区主要以草地为主,两者占三江源地区总面积的比例大于 89%,其次是水域和林地,约占研究区总面积的 10% 左右其中,草地在三江源大部分地区均有分布,未利用地主要分布在三江源西北部,水域主要分布在三江源东北部和西部的一些区域零散分布,林地在三江源地区西南部和东部零散分布较为集中。

4.1.2 植被覆盖度时空变化特征 从植被覆盖度长时间序列特征来看(图 3),三江源地区近 20 a 来的植被覆盖度基本呈现平稳增加的趋势,平均以 0.38%/a 的平均速率增加。在 2000 年三江源地区植被平均覆盖度为 57.85%,到 2020 年的植被平均覆盖度稳定在 65.42% 左右。三江源地区 2000—2020 年植被覆盖始终在 60% 左右,这得益于研究区的水热条件优势以及较高的林草覆盖率。从空间分布来看,植被覆盖度整体呈“东高西低”的空间分布特点。其中,高植被覆盖度主要集中分布在研究区东部的班马县、久治县、河南县等以及囊谦县、玉树市等部分地区;少部分低植被覆盖度主要集中于西部的格尔木市以及治多县西北部。此外,2000—2020 年三江源地区低植被覆盖度的面积明显减少,表明研究区绿化覆盖率增大,生态质量明显提升,生态承载能力增强。

### 4.2 水土保持服务能力时空变化特征

4.2.1 水土保持服务能力时空分布 2000—2020 年三江源地区水土保持服务能力指数空间分布如图 4 所示。2000,2005,2010,2015 和 2020 年水土保持服务能力指数分别为 35.11,59.62,62.07,37.29 和 44.29,呈现 N 形的变化趋势,但总体上呈现增加趋势,增速为 26.13%,水土保持服务能力显著提高。从

空间分布上看,三江源地区 2000—2020 年水土保持服务能力分布较为一致,整体呈现“东高西低”的空间分布格局,这主要是由于东部的植被覆盖度、地均

GDP 和放牧强度等均高于西部,此外,研究区西北部土地利用类型以未利用地为主,这也是西北部水土保持服务能力较低的原因。

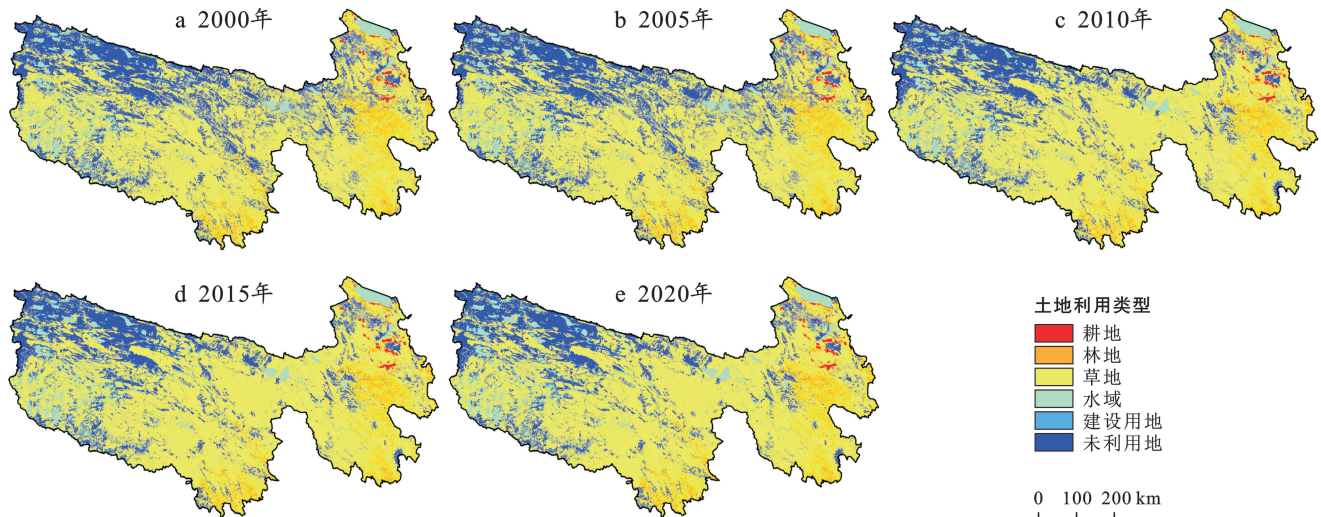


图 2 三江源地区 2000—2020 年土地利用类型空间分布

Fig.2 Spatial distribution of land use types in Sanjiangyuan region from 2000 to 2020

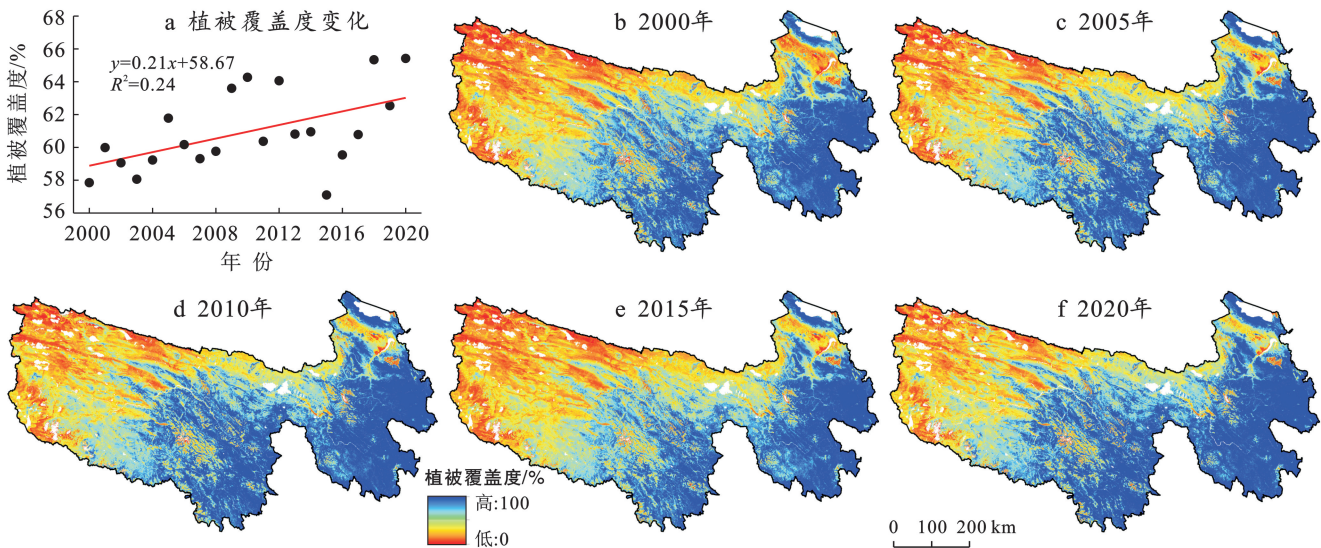


图 3 三江源地区 2000—2020 年植被覆盖度空间分布

Fig.3 Spatial distribution of vegetation coverage in Sanjiangyuan region from 2000 to 2020

4.2.2 水土保持服务能力重心迁移 借助重心模型与标准差椭圆描述各期水土保持能力重心时空移动轨迹(图 5)。2000—2020 年三江源地区重心始终在玛沁县的西部,2000—2010 年向北移动,2005—2010 年向西北移动,2010—2015 年东北移动,2015—2020 年向西北移动,整体向西北转移,说明西北方向的水土保持能力近年来不断提升,这与玛沁县西北部草场恢复力度的加大相关。2000 年开启天然林工程以来,研究区东部整体水土保持能力优于西部,标准差椭圆面积自 2000 年  $1.50 \times 10^5 \text{ km}^2$  增长至 2020 年  $1.54 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,表明水土保持能力向西北方向增大

且多方向外延,工程实施效果显著。标准差椭圆扁率无显著变化,多年均值为 53.85,水土保持能力重心区域总体仍沿东南—西北方向倾斜分布。

### 4.3 水土保持服务能力驱动因素分析

4.3.1 单因子探测 水土保持颇为复杂,既受气候、植被、地形、土壤等自然因素的影响,又受人类经济活动影响,各因素相互交织,复杂互动,共同塑造。10 个驱动因子都通过了多重共线性检验,采用参数最优地理探测器的因子探测识别单因子对三江源地区水土保持服务空间异质性的解释力(表 3), $0 \leq q \leq 1$ , $q$  值越大,说明因子影响耦合协调度的解释力越

强。植被覆盖度、地均 GDP 和放牧强度对水土保持服务空间异质性解释力最强,2000,2005,2010,2015 和 2020 年平均解释力分别为 0.752,0.724 和 0.624,最低的因子为坡度,平均解释力仅有 0.138,对水土保

持服务空间格局的解释力极为有限。各驱动因子按  $q$  值大小降序排列顺序为:植被覆盖度>地均 GDP>放牧强度>年降雨量>气温>人口密度>植树造林面积>土壤湿度>高程>坡度。

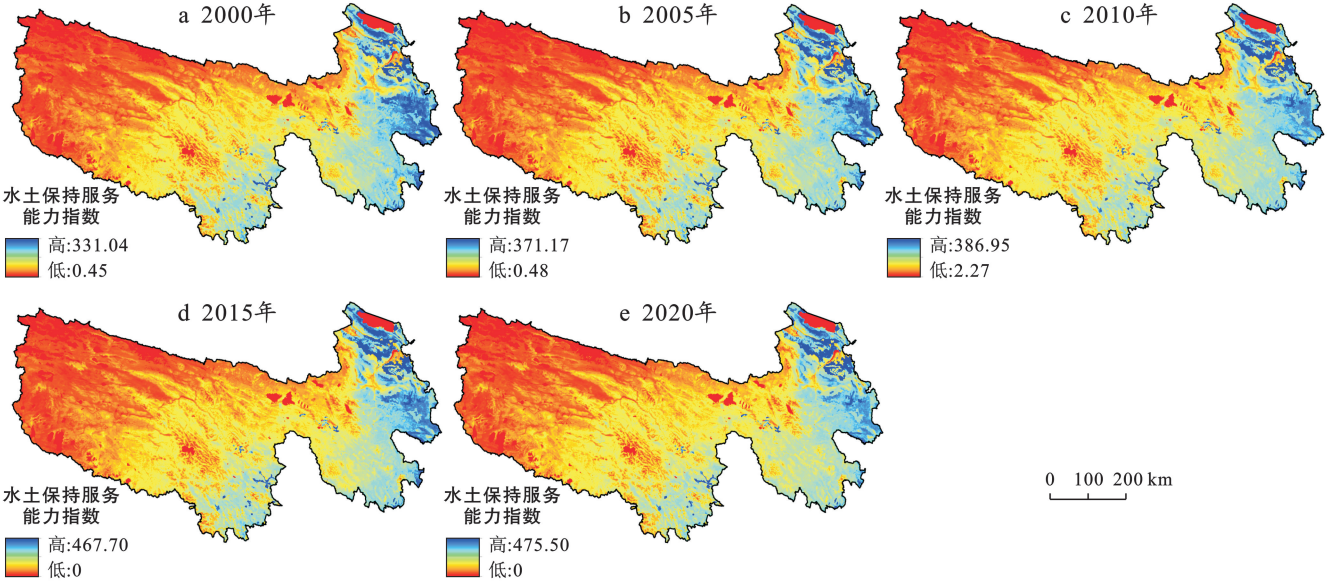


图 4 三江源地区 2000—2020 年水土保持服务能力指数空间分布

Fig.4 Spatial distribution of soil and water conservation service capacity index in Sanjiangyuan region from 2000 to 2020

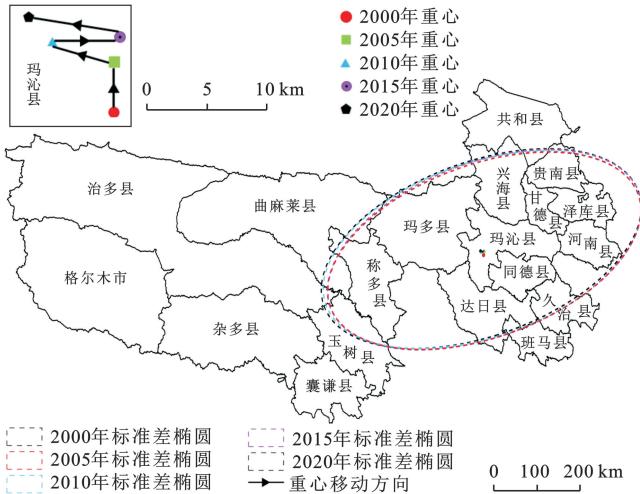


图 5 三江源地区 2000—2020 年水土保持能力标准差椭圆重心迁移轨迹

Fig.5 Migration trajectory of standard deviation elliptical gravity centers of soil and water conservation capacity in Sanjiangyuan region from 2000 to 2020

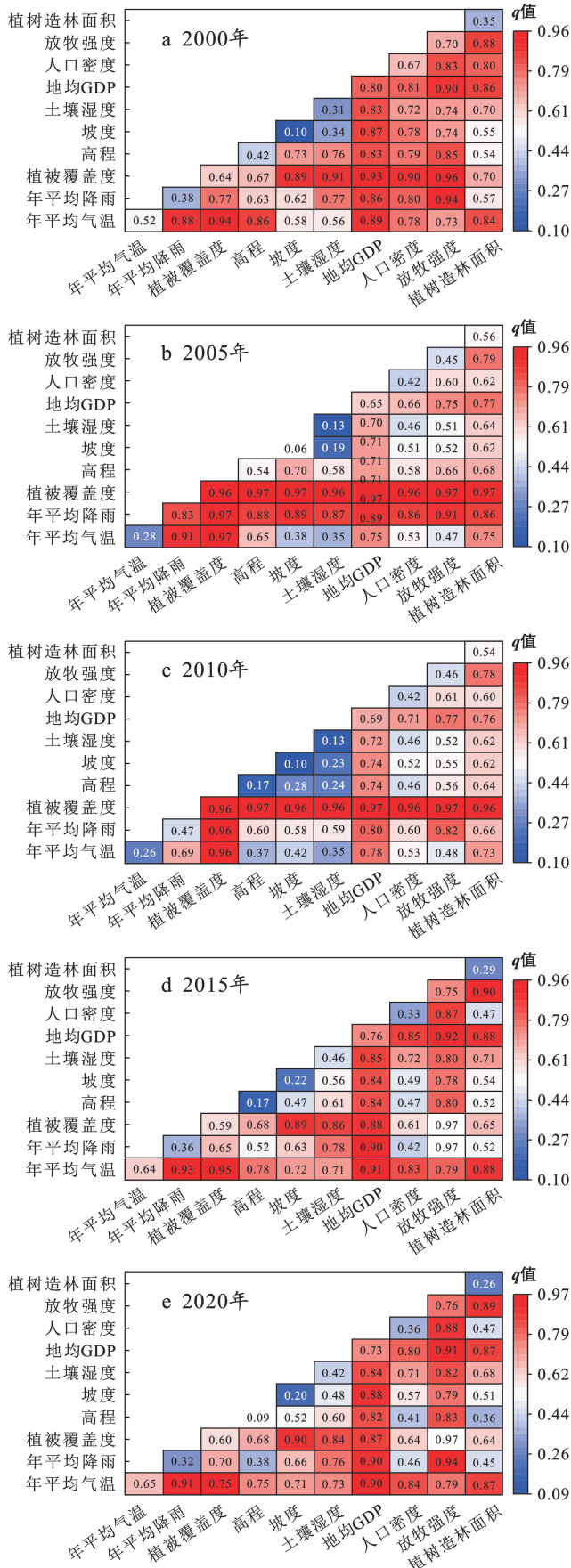
4.3.2 交互因子探测 水土保持服务的空间格局实际是由多种驱动因子之间复杂的相互作用而共同形成的。从交互作用探测结果来看(图 6),研究区域内驱动因子交互作用的解释力明显高于单个因子对水土保持服务空间分布格局异质性的解释力。不同年份交互作用的解释力产生差异,2000 年植被覆盖度、地均 GDP 和放牧强度与各因子的解释力均较强,其

中,植被覆盖度和地均 GDP 的交互作用解释力最强,为 0.96;2005 年植被覆盖度、年平均降雨与其他因子的交互作用解释力都较强,均在 0.80 以上;2010 年植被覆盖度与其他因子交互作用的解释力为 0.96 或 0.97;2015 年放牧强度与植被覆盖度和年平均降雨的解释力最高,均为 0.97;2020 年植被覆盖度与放牧强度的解释力最高,为 0.97。综上所述,20 a 间植被覆盖度与地均 GDP、年平均降雨、放牧强度等多个因子交互作用解释力均较强,植被覆盖度与地均 GDP、年平均降雨、放牧强度等因子在三江源地区水土保持服务空间分异方面影响较大。

表 3 驱动因子探测结果( $q$  值)

Table 3 Probe results of driving factors

影响因素	解释变量	$q$ 值				
		2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
气候因素	年平均气温	0.517	0.276	0.261	0.641	0.647
	年平均降雨	0.375	0.834	0.469	0.363	0.322
植被因素	植被覆盖度	0.643	0.962	0.959	0.591	0.605
地形因素	高程	0.422	0.537	0.173	0.172	0.086
	坡度	0.101	0.065	0.100	0.224	0.198
土壤因素	土壤湿度	0.308	0.133	0.135	0.464	0.422
经济因素	地均 GDP	0.800	0.645	0.688	0.756	0.730
人口因素	人口密度	0.666	0.418	0.417	0.331	0.363
人类活动	放牧强度	0.698	0.448	0.458	0.755	0.761
生态修复	植树造林面积	0.354	0.557	0.540	0.286	0.262



## 5 讨论

### 5.1 三江源地区水土保持服务演化特征

水土保持服务对于保持土壤养分,遏制土地退化,缓解河流泥沙淤积等起着关键作用。通过对三江源地区 2000—2020 年水土保持服务的评估,研究表明,三江源地区水土保持服务可以分为 3 个阶段:2000—2010 年增加,2010—2015 年减少,2015—2020 年增加。研究区整体水土保持服务变化与生态保护工程和人类活动息息相关,植被覆盖度与地均 GDP、年平均降雨、放牧强度等因子都对水土保持服务有一定的影响。2005 年,天然林资源保护工程正式启动,在 2000—2010 年期间实施效果显著,水土保持服务有明显的增加。2010—2015 年,草原过度放牧引发生态恶化,水域缩小,经济增速加快,水土保持服务指标呈现下滑趋势。2015—2020 年,随着退耕还林工程、三江源自然保护区建设项目及生态文明政策出台与执行,草地复苏重生,水土保持服务不断提升。综合来看,20 a 间三江源地区在生态保护,生态文明建设上所做出的来努力,使得的土保持服务得到了明显的提升。

### 5.2 三江源地区水土保持服务驱动因素

对于三江源地区水土保持服务的驱动因素进行分析,研究区水土保持服务主要受植被覆盖度、地均 GDP 和放牧强度等的影响较多。首先,植被覆盖度为最主要的因素,三江源地区东南部植被覆盖度较高,使得研究区东南部具有较高的水土保持服务指数,而西部的格尔木市于治多县属三江源区风蚀最严重,与可可西里自然保护区重叠,环境恶劣,实际植被覆盖度低于 40%,说明该地区自然状态难以维持水土保持功能,植被退化趋势还未得到根本遏制。其次的驱动因素为地均 GDP,2000 年地均 GDP 对于水土保持服务的解释力为 0.800,到 2020 年降至 0.730,随着 GDP 的增长,政府和社会可能能够投入更多的资金和技术用于水土保持工作,例如通过实施水土保持工程措施和植物措施,来减轻水土流失,保护土地资源。此外,经济的发展也可能促使社会对环境保护的重视增加,从而推动水土保持工作的进步。排名第三的驱动因素为放牧强度,三江源地区牧业较为发达,然而,过度放牧会导致草地退化、土壤侵蚀。不合理的放牧方式和强度会加速水土流失,值得一提的是,2000—2020 年放牧强度与年降雨量的交互作用解释力均值为 0.904,远高于放牧强度单独作用时的解释力 0.624,说明当放牧遭遇降雨等自然因素时,水土流失会更加严重。

图 6 三江源地区 2000—2020 年水土保持服务能力交互因子探测  
Fig.6 Interactor detection of soil and water conservation service capability in Sanjiangyuan region from 2000 to 2020

### 5.3 基于驱动因素分析的水土保持服务提升建议

(1) 加强森林、草原、耕地和水域的保护,提升植被覆盖度,植被覆盖增加能够促进区域水土保持服务总体提升,因此,应继续实施天然林保护工程,开展森林保育和修复大力提升森林蓄积量。切实加强耕地保护,严守耕地红线完善耕地占补平衡制度,坚持“以补定占”。加强草原和湿地的生态保护和修复,提升草原综合植被覆盖度,严格控制占用湿地构建湿地保护体系。

(2) 三江源地区主要以草地为主,放牧活动是草地生态系统主要的人类活动之一。合理的放牧活动能够促进草原生物量增多,生物多样性指数增大。不合理的放牧活动影响生态环境的自我调节能力,进而引发草地生物量、生物多样性减小等问题,使得草地生态系统功能退化,生产力下降。因此,需要采取合理放牧、建设人工草地、围栏封育、补播等措施对生态进行保护。

本文将对于计算水土保持服务时的土壤数据以及驱动因素中的高程和坡度,均作为始终不变的数据,然而,土壤有机质随着植被覆盖增大而逐步提升,土壤肥力的提升导致土壤性质发生了转变,地形微调同步进行,因此,地形与土壤保持原状,计算结果可能受其影响而产生偏差,在后续研究中,需关注地形与土壤变迁对水土保持服务的潜在影响,确保计算精度提升。

## 6 结论

(1) 2000—2020年,三江源地区土地利用发生较大变化,耕地、草地、水域和建设用地面积不断扩大,林地和未利用地面积双双减小;三江源地区主要以草地为主,其次是水域和林地,而耕地和建设用地面积占比较小。20 a 间植被覆盖度呈现平稳增加的趋势,整体呈“东高西低”的空间分布格局。

(2) 2000—2020年,三江源地区水土保持服务能力指数呈现 N 形的变化趋势,但总体上呈现增加趋势,水土保持服务能力显著提高;20 年间水土保持服务能力分布较为一致,整体呈现“东高西低”的空间分布格局。2000—2020 年三江源地区重心始终在玛沁县的西部,整体向西北转移,标准差椭圆面积自 2000 年  $1.50 \times 10^5 \text{ km}^2$  增长至 2020 年  $1.54 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,水土保持能力向西北方向增大且多方向外延,生态保护工程实施效果显著。

(3) 各驱动因子按  $q$  值大小降序排列为:植被覆盖度 > 地均 GDP > 放牧强度 > 年降雨量 > 气温 > 人口密度 > 植树造林面积 > 土壤湿度 > 高程 > 坡度。

20 a 间植被覆盖度与地均 GDP、年平均降雨、放牧强度等多个因子交互作用解释力均较强,植被覆盖度与地均 GDP、年平均降雨、放牧强度等因子在三江源地区水土保持服务空间分异方面具有较大的影响。

### 参考文献 (References)

- [1] Assesment M E. Ecosystems and human well-being: Synthesis [J]. *Physics Teacher*, 2005, 34(9): 534-534.
- [2] Paletto A, Favargiotti S. Ecosystem services: The key to human well-being [J]. *Forests*, 2021, 12(4): 480.
- [3] Schuur E A G, McGuire A D, Schädel C, et al. Climate change and the permafrost carbon feedback [J]. *Nature*, 2015, 520(7546): 171-179.
- [4] 李智广, 王隽雄, 王海燕. 区域水土保持碳汇能力评估的指标体系 [J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2023, 21(1): 64-72.  
Li Zhiguang, Wang Junxiong, Wang Haiyan. Index system for evaluating the carbon sink capacity of regional soil and water conservation [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023, 21(1): 64-72.
- [5] 祁玉馨, 赵聪聪, 申沛鑫, 等. 哈尔滨市土壤保持服务价值时空演变及其驱动力 [J]. *水土保持通报*, 2024, 44(1): 357-367.  
Qi Yuxin, Zhao Congcong, Shen Peixin, et al. Spatio-temporal evolution of soil conservation founction value and its driving forces in Harbin City [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(1): 357-367.
- [6] Li R, Zheng H, O'Connor P, et al. Time and space catch up with restoration programs that ignore ecosystem service trade-offs [J]. *Sci Adv*, 2021, 7(14): eabf8650.
- [7] Zarei A, Chemura A, Gleixner S, et al. Evaluating the grassland NPP dynamics in response to climate change in Tanzania [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107600.
- [8] Gong Haibo, Cao Li, Duan Yafeng, et al. Multiple effects of climate changes and human activities on NPP increase in the Three-north Shelter Forest Program area [J]. *Forest Ecology and Management*, 2023, 529: 120732.
- [9] Li Yuan, Mao Zhongyuan, Xu Bin, et al. Analysis of changes in ecosystem capacity index and driving factors in the Loess Plateau under ecological engineering orientation [J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2024, 12: 1404424.
- [10] 陈丹, 曾卫, 郭凯睿, 等. 2000—2020 年三峡库区生态系统服务时空演变及驱动力研究 [J]. *西部人居环境学刊*, 2023, 38(4): 127-134.  
Chen Dan, Zeng Wei, Guo Kairui, et al. Study on spatio-temporal evolution and driving forces of ecosystem services in the Three Gorges Reservoir area from 2000

- to 2020 [J]. *Journal of Human Settlements in West China*, 2023,38(4):127-134.
- [11] 魏雷哈冰,时鹏,魏勇,等.窟野河流域生态系统服务功能变化及其驱动因素分析[J].*水土保持学报*,2024,38(4) 222-235.  
Wei L, Shi Peng, Wei Yong, et al. Analysis of ecosystem service function changes and their driving factors in the Kuye River basin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024,38(4):222-235.
- [12] 周建伟,罗君,马雪洋.拉萨河流域土地利用与生态系统服务价值时空演变及驱动因素[J].*干旱区研究*,2024,41(6):1021-1031.  
Zhou Jianwei, Luo Jun, Ma Xueyang. Spatio-temporal evolution and driving factors of land use and ecosystem service value in the Lhasa River basin, China [J]. *Arid Zone Research*, 2024,41(6):1021-1031.
- [13] 林晨宇,宋羽,叶玲兰.福建省生态系统服务价值时空演变及驱动因素[J].*自然保护地*,2024,4(2):81-94.  
Lin Chenyu, Song Yu, Ye Linglan. Spatiotemporal evolution and its driving factors of ecosystem service value in Fujian Province [J]. *Natural Protected Areas*, 2024,4(2):81-94.
- [14] 李荣杰,李惠梅,武非非,等.青海湖流域生态系统服务空间分异规律及驱动力研究[J].*生态环境学报*,2024,33(2):301-309.  
Li Rongjie, Li Huimei, Wu Feifei, et al. Study on the spatial differentiation pattern and driving force of ecosystem services in Qinghai Lake basin [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2024,33(2):301-309.
- [15] 史鑫明.临沂市生态系统服务时空变化特征及驱动因素研究[D].江苏 南京:南京林业大学,2023.  
Shi Xinming. Study on the spatial otemporal change characteristics and driving factors of ecosystem services in Linyi City [D]. Nanjing, Jiangsu: Nanjing Forestry University, 2023.
- [16] 马伟波,杨帆,王楠,等.长三角城市群地区生态系统服务价值时空演变及驱动因素研究[J].*生态与农村环境学报*,2022,38(11):1365-1376.  
Ma Weibo, Yang Fan, Wang Nan, et al. Study on spatial-temporal evolution and driving factors of ecosystem service value in the Yangtze River delta urban agglomerations [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022,38(11):1365-1376.
- [17] 邵志豪,牟风云,黄淇,等.重庆市土壤保持服务空间分布及影响因素分析[J].*科学技术与工程*,2023,23(1):100-108.  
Shao Zhihao, Mu Fengyun, Huang Qi, et al. Spatial distribution and influencing factors analysis of soil conservation services in Chongqing [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023,23(1):100-108.
- [18] 张薇,王凤春,万虹麟,等.基于 In VEST 模型的土壤保持服务时空变化及其影响因素分析:以密云水库上游流域河北张承地区为例[J].*地球物理学进展*,2022,37(6):2339-2350.  
Zhang Wei, Wang Fengchun, Wan Honglin, et al. Spatiotemporal variations and influencing factors of soil conservation service based on in VEST model: A case study of Miyun Reservoir upstream basin of Zhangcheng area in Hebei [J]. *Progress in Geophysics*, 2022,37(6):2339-2350.
- [19] 刘纪远,邵全琴,樊江文,等.中国西部地区生态保护建设路径的探讨[J].*中国人口·资源与环境*,2013,23(10):38-43.  
Liu Jiyuan, Shao Quanqin, Fan Jiangwen, et al. Exploration on the path of ecological protection and construction in Western China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2013,23(10):38-43.
- [20] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,等.青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J].*地理学报*,2012,67(1):3-12.  
Sun Honglie, Zheng Du, Yao Tandong, et al. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012,67(1):3-12.
- [21] 杨祎,王根绪,李阳,等.三江源草地水土保持与防风固沙功能临界植被覆盖度时空变化分析[J].*山地学报*,2024,42(2):143-153.  
Yang Yi, Wang Genxu, Li Yang, et al. Analysis of the temporal change of critical vegetation coverage in soil and water conservation and windbreak and sand fixation in Sanjiangyuan headwaters [J]. *Journal of Mountain Studies*, 2024,42(2):143-153.
- [22] 李付杰,孙倩莹,王世曦,等.2000—2015 年三江源区生态系统服务评估[J].*环境工程技术学报*,2020,10(5):786-797.  
Li Fujie, Sun Qianying, Wang Shixi, et al. Valuation of ecosystem services in Three-River Headwaters Region from 2000 to 2015 [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020,10(5):786-797.
- [23] 柴文雯,贾夏,赵永华,等.黄土高原人类活动强度与植被覆盖的时空关联[J].*生态学报*,2024,44(15):6708-6721.  
Chai Wenwen, Jia Xia, Zhao Yonghua, et al. Spatio-temporal correlation between human activity intensity and vegetation cover on the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,44(15):6708-6721.

- [J].地球信息科学学报,2020,22(12):2358-2370.
- Zhao Dandan, Jin Shengtian, Bao Bingfei, et al. Analysis of spatial-temporal evolution and influencing factors of green land use efficiency in Central China based on geographic detector [J]. Journal of Geo-Information Science, 2020,22(12):2358-2370.
- [22] Huang Bo, Wu Bo, Barry M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010,24(3):383-401.
- [23] 丁一,郭青霞,秦明星.黄河流域资源型城市土地绿色利用效率时空演变及影响因素[J].农业工程学报,2021,37(19):250-259.
- Ding Yi, Guo Qingxia, Qin Mingxing. Temporal-spatial evolution and influencing factors of land green use efficiency of resource-based cities in the Yellow River Basin, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(19):250-259.
- [24] Liu Shuchang, Xiao Wu, Li Linlin, et al. Urban land use efficiency and improvement potential in China: A stochastic frontier analysis [J]. Land Use Policy, 2020,99:105046.
- [25] Li Weiming, Cai Zhaoyang, Jin Leshan. Urban green land use efficiency of resource-based cities in China: Multidimensional measurements, spatial-temporal changes, and driving factors [J]. Sustainable Cities and Society, 2024,104:105299.
- [26] 胡碧霞,李菁,匡兵.绿色发展理念下城市土地利用效率差异的演进特征及影响因素[J].经济地理,2018,38(12):183-189.
- Hu Bixia, Li Jing, Kuang Bing. Evolution characteristics and influencing factors of urban land use efficiency difference under the concept of green development [J]. Economic Geography, 2018,38(12):183-189.
- [27] 温柔,李洪义,吴儒练,等.基于多源数据的江西省县域土地绿色利用效率时空分异及影响因素分析[J].地域研究与开发,2023,42(4):136-142.
- Wen Rou, Li Hongyi, Wu Rulian, et al. Temporal and spatial differentiation and influencing factors analysis of land green use efficiency at county scale in Jiangxi Province based on multi-source data [J]. Areal Research and Development, 2023,42(4):136-142.
- [28] Ma Ming, Liu Yuge, Wang Bingyi, et al. Spatial-temporal evolution and driving mechanism of urban land use efficiency based on T-DEA model: A case study of Anhui Province, China [J]. Sustainability, 2023,15(13):10087.
- [29] 陈红梅,张彩莉,李建豹.长三角地区新型城镇化对城市土地绿色利用效率的影响及空间效应[J].长江流域资源与环境,2024,33(7):1382-1396.
- Chen Hongmei, Zhang Caili, Li Jianbao. Research on influence and spatial effect of new-type urbanization on urban land green use efficiency in the Yangtze River delta region [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024,33(7):1382-1396.
- ~~~~~
- (上接第 295 页)
- [24] 彭大力,张斌,吴林蓬,等.龙川江流域近 20 年土壤侵蚀时空变化及驱动因素分析[J].水土保持学报,2024,38(4):29-37.
- Peng Dali, Zhang Bin, Wu Linpeng, et al. Analysis of spatial and temporal changes and driving factors of soil erosion in Longchuan River basin in recent 20 years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(4):29-37.
- [25] Wen Ying. Preliminary discussion on the method of quantitative assessment of human activity intensity [J]. Impact of Science on Society, 1998,4:55-61.
- [26] 胡志斌,何兴元,李月辉,等.岷江上游地区人类活动强度及其特征[J].生态学杂志,2007,26(4):539-543.
- Hu Zhibin, He Xingyuan, Li Yuehui, et al. Human activity intensity and its spatial distribution pattern in upper reach of Minjiang River [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007,26(4):539-543.