

雅鲁藏布江流域生态系统服务评估及其权衡/协同关系

石晓蕊, 信忠保

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: [目的] 探究雅鲁藏布江流域生态系统服务随海拔梯度的时空变化特征及权衡/协同关系, 协调区域经济发展与生态保护, 推动区域可持续发展。 [方法] 采用 InVEST 模型对 2000—2020 年流域内生境质量、产水、土壤保持、固碳和粮食供给 5 种生态系统服务进行时空变化评估和不同海拔梯度量化分析, 并结合 Spearman 相关性分析和地理加权分析揭示生态系统服务权衡/协同关系变化。 [结果] 1) 2000—2020 年, 生态系统服务供给量高值区主要分布在雅鲁藏布江流域下游地区, 生境质量普遍维持在 0.80 左右, 碳储量显著增加。土壤保持量上升 12.43%, 而产水量受降水减少影响下降 1.26%。2) 生境质量、土壤保持量和碳储量显著增加 ($p < 0.05$), 显著变化区域分别占流域的 30.24%、42.58% 和 65.40%。各生态系统服务随海拔升高而降低并存在明显海拔阈值 (生境质量 $> 4\ 800\text{ m}$, 产水 $> 3\ 800\text{ m}$, 土壤保持 $> 3\ 800\text{ m}$, 碳储量 $> 2\ 800\text{ m}$)。3) 数量分析表明, 粮食供给与产水、土壤保持与生境质量呈低协同上升趋势, 产水与土壤保持协同度最高, 约为 0.83, 其余协同度约为 0.56, 粮食供给与生境质量呈显著权衡关系 ($p < 0.05$); 空间分析表明, 碳储量-生境质量协同区占比最大, 约占 31.12% ($p < 0.05$)。 [结论] 研究结果揭示雅鲁藏布江流域生态系统服务供给能力和随海拔变化的态势, 以及从数量和空间上揭示生态系统服务之间的权衡协同度, 为雅鲁藏布江流域生态保护修复提供科学依据。

关键词: 雅鲁藏布江流域; 生态系统服务; 权衡与协同; InVEST 模型

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)05-0209-10

Ecosystem Services Evaluation and Their Trade-Offs/Synergies in Yarlung Tsangpo River Basin

SHI Xiaorui, XIN Zhongbao

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the spatiotemporal variations and trade-off/synergistic relationships of ecosystem services along altitudinal gradients in the Yarlung Tsangpo River basin, coordinate regional economic development and ecological conservation, and promote regional sustainable development. [Methods] The InVEST model was applied to evaluate the spatiotemporal variations of five critical ecosystem services (habitat quality, water yield, soil retention, carbon sequestration, and food supply) in the basin from 2000 to 2020, with quantitative analysis across different altitudinal gradients. Spearman correlation analysis and Geographically weighted regression were also used to reveal the changes in the trade-off/synergistic relationships among ecosystem services. [Results] 1) From 2000 to 2020, high-value areas of ecosystem service supply are mainly distributed in the lower reaches of the Yarlung Zangbo River basin. Habitat quality maintained consistently high levels, averaging approximately 0.8, accompanied by a significant increase in carbon sequestration. Notably, soil retention capacity demonstrated a substantial increase of 12.43%, while water yield experienced a marginal decline of 1.26%, due to reduced precipitation. 2) Habitat quality, soil retention, and carbon storage exhibited

收稿日期: 2025-01-08

修回日期: 2025-02-25

录用日期: 2025-03-06

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-06-06

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFF1302903)

第一作者: 石晓蕊 (1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: xiaoruish2024@163.com

通信作者: 信忠保 (1978—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持研究。E-mail: xinzhongbao@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

significant increases ($p < 0.05$), with substantial changes observed across 30.24%, 42.58%, and 65.40% of the watershed area, respectively. All ecosystem service values declined with increasing elevation, demonstrating distinct altitudinal thresholds: $>4\ 800\text{ m}$ for habitat quality, $>3\ 800\text{ m}$ for water yield, $>3\ 800\text{ m}$ for soil retention, and $>2\ 800\text{ m}$ for carbon storage. 3) Quantitative analysis revealed that food supply showed a weakly increasing synergistic trend with water yield, while soil retention showed a similar trend with habitat quality. The most pronounced synergy was observed between water yield and soil retention (approximately 0.83), while other synergies averaged 0.56. Notably, a significant trade-off relationship was identified between food supply and habitat quality. Spatial analysis demonstrated that synergistic areas between carbon storage and habitat quality constituted the largest proportion of the study area (31.12%, $p < 0.05$). [Conclusion] The results elucidate the ecosystem service supply capacity across the Yarlung Tsangpo River basin, its altitudinal variation patterns, and the quantitative and spatial trade-offs/synergies among ecosystem services. This research provides a scientific foundation for ecological conservation and restoration.

Keywords: Yarlung Tsangpo River basin; ecosystem services; trade-offs and synergies; InVEST model

Received: 2025-01-08

Revised: 2025-02-25

Accepted: 2025-03-06

Online(www.cnki.net): 2025-06-06

生态系统服务是生态系统及其过程所创造并维持的,是对人类生存至关重要的自然环境条件与效益^[1],生态系统服务是一个动态变化的网络,了解生态系统服务之间的关系,越来越受到科学家和政策制定者的认可^[2],其中权衡与协同关系在不同尺度上持续演变,以满足人类社会多元而复杂的需求^[3],当2种生态系统服务呈现一种服务增加而另一种服务减少的态势时,它们之间便表现为权衡关系;若二者同时增加或减少,则呈现协同效应^[4]。人类福祉与环境条件密切相关,由于不断增长的人口对自然资源的需求不断增加,全球生态系统服务的消费一直处于不可持续的状态^[5],地球上大约60%的生态系统服务正在经历退化,厘清生态系统服务之间的复杂关系,确保生态系统的健康发展越来越成为人类的共同追求^[6]。雅鲁藏布江流域是青藏高原的重要生态保护区,平均海拔超过4 000 m,高原的生态系统非常脆弱,是世界上对气候变化最敏感的地区之一,量化生态系统服务及厘清服务之间的关系,有效识别生态系统服务供给及权衡高风险区域^[7],为制定完善的生态系统服务管理政策、实现人与自然和谐发展提供依据。

生态系统服务权衡与协同的研究起源于20世纪90年代,旨在应对生物多样性保护这一全球性的挑战^[8]。进入21世纪后,特别是联合国发布的《千年生态系统服务评估报告》^[9]明确指出,生态系统供给服务的增长可能伴随其他类型服务的减少,此研究结果极大地推动了生态系统服务权衡与协同研究的发展。现有研究^[10]多集中于全球或区域尺度,对特定流域和跨区域尺度的关注不足,由于生态系统服务种类繁多且关系复杂,其权衡与协同关系随时空尺

度变化,而动态变化的研究仍显不足^[11]。相关性分析可量化生态系统服务之间动态的线性关系(正/负相关),地理加权回归可以揭示空间异质性,捕捉不同区域服务关系的差异性^[12]。研究生态系统服务的模型较多,InVEST模型由斯坦福大学等机构开发,较为成熟^[13]。所以,本研究以雅鲁藏布江流域为对象,采用InVEST模型基于海拔量化生态系统服务功能的时空变化,结合Spearman相关分析和地理加权回归(GWR),揭示不同服务在时空及海拔尺度上的相互作用模式,明确权衡与协同时空变化,为流域生态文明建设提供科学依据。

雅鲁藏布江流域作为全球重要的高海拔生态系统,其生态安全对青藏高原及周边地区具有深远影响^[7]。近年来,受高原气候持续变暖的影响,流域生态环境发生显著变化,表现为雪线上升、冻土退化、湿地干化、湖泊萎缩及过度放牧导致的土地沙化等问题^[14]。在当前环境急剧变化的背景下,量化评估其生态系统服务对缓解环境供需矛盾具有重要意义。现有关于雅鲁藏布江地区生态系统服务的研究多局限于单一服务或生态系统服务价值评估^[15]。本文基于海拔梯度,对流域内5种关键生态系统服务进行时空尺度的量化评估,为揭示流域生态系统服务的整体状况提供新视角,为雅鲁藏布江生态恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

雅鲁藏布江,其源头可追溯至西藏西南部喜马拉雅山北麓的杰马央宗冰川,河流自西向东穿越西藏南部,境内全长达2 057 km,流域面积广阔,约28.5

万 km²^[16]。流域属高原温带半湿润季风气候,生态环境脆弱,是生态环境演变的敏感区域^[17]。因此,深入研究雅鲁藏布江流域生态系统服务及其交互关系,对于指导区域生态保护、资源管理、灾害防治、经济发展和跨境合作具有重要的科学意义,是实现该区域可持续发展的基础保障(图 1)。

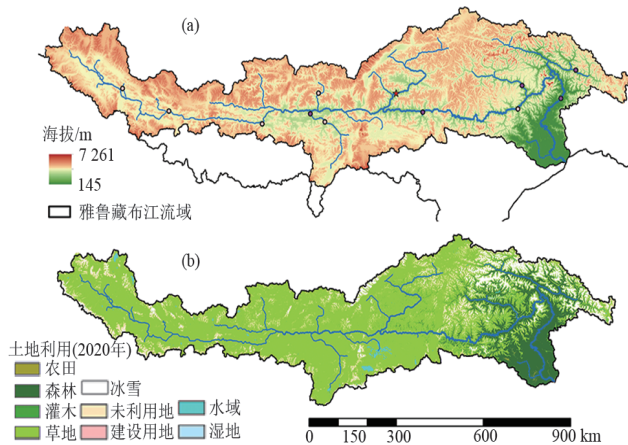


图 1 研究区示意
Fig. 1 Schematic diagram of the study area

1.2 数据来源与处理

本研究使用的数据主要包括自然和社会经济数据,包括土地利用、气象、碳量、道路、高程等数据,主要来源于地理空间数据云和中国科学院资源环境科学与数据中心等(表 1)。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务变化趋势分析 为研究雅鲁藏布江流域各种生态系统服务功能的变化趋势及其空间分布特征,采用一元线性回归法^[19],逐像元对各种服务功能的变化趋势进行分析,反映其空间变化特征,计算公式为:

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times v_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n v_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2} \quad (1)$$

式中:Slope 为回归方程的斜率,即各种服务功能的变化趋势;*i* 为年变量;*n* 为时序列长度;*v_i* 为第 *i* 年各个生态系统服务像元值。Slope>0 为各个生态系统服务值在研究时段内增加情况,增加越多,反之则减少(表 2)。

表 1 基础数据
Table 1 Basic data

数据名称	类型	分辨率	数据来源	用途
数字高程数据	栅格	90 m	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)	产水、土壤保持
土地利用数据	栅格	30 m	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)	产水、土壤保持、固碳、生境质量、粮食供给
降水	栅格	1 km	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/)	产水
作物参考蒸散量	栅格	1 km	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/)	产水
世界土壤数据集	栅格	1 km	国家冰川冻土沙漠科学数据中心(https://www.crensded.ac.cn/portal/)	产水、土壤保持
归一化植被指数 (NDVI)	栅格	250 m	MOD13Q1 V6.1	粮食供给
土壤固碳效率			GAO 等 ^[18]	固碳
粮食生产	统计数据		西藏统计年鉴	粮食供给

注:表中所有数据都基于 ArcGIS 软件转换为统一的投影坐标系(WGS_1984_UTM_zone_49N),并重采样为 90 m 的空间分辨率。

表 2 生态系统服务变化趋势等级划分
Table 2 Classification of changing trends of ecosystem services

斜率变化趋势	划分范围	等级
Slope<0	<i>p</i> <0.01	极显著减少
Slope<0	0.01< <i>p</i> <0.05	显著减少
Slope<0	<i>p</i> >0.05	不显著减少
Slope>0	<i>p</i> >0.05	不显著增加
Slope>0	0.01< <i>p</i> <0.05	显著增加
Slope>0	<i>p</i> <0.01	极显著增加

1.3.2 生态系统服务研究方法

1) 产水量

采用 InVEST 模型中产水量模块,其基于水量平衡法,即降雨量减去实际蒸发量的差值计算得到^[20]。

$$WY_n = \left(1 - \frac{AET_n}{MAP_n}\right) \times MAP_n \quad (2)$$

式中:WY_{*n*} 为栅格 *x* 的年产水量,mm;AET_{*n*} 为栅格 *x* 的年实际蒸发量,mm;MAP_{*n*} 为栅格 *x* 的年降雨量,mm。

2) 土壤保持

基于 InVEST 模型修正通用土壤流失方程,即潜在侵蚀量与实际侵蚀量的差值^[21]。

$$SEDRET_x = RKLS_x - USLE_x \quad (3)$$

$$RKLS_x = R \times K \times LS \quad (4)$$

$$USLE_x = R \times K \times LS \times C \times P \quad (5)$$

式中:SEDRET_{*x*} 为栅格 *x* 的土壤保持量;RKLS_{*x*} 为栅格 *x* 的土壤潜在侵蚀量;USLE_{*x*} 为栅格 *x* 的土壤

实际侵蚀量; R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; LS 为坡长坡度因子, 该因子在 InVEST 模型中会自动完成计算; C 为植被覆盖因子; P 为水土保持因子。 C 、 P 值参照 InVEST 中文手册及文献^[22]来确定。

3) 生境质量

采用 InVEST 模型构建生境质量模块, 公式为:

$$Q_{xj} = H_j \left(1 - \frac{Q_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \tag{6}$$

式中: Q_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境质量; H_j 为土地利用类型 j 的生境适应性; D_{xj} 为 j 类土地利用类型中栅格单元 x 的生境退化度; 参考相关研究对流域的威胁因子的权重和距离及敏感性因子赋值^[23]; k 为半饱

和常数, 取最大生境退化的 0.5 倍; z 反映空间异质性, 通常取 2.5。关于胁迫因子相关参数取值问题结合 LIU 等^[24]的研究及本地的实际状况(表 3、表 4)。

表 3 雅鲁藏布江流域生境威胁因子最大距离及其权重
Table 3 Maximum distances and weights of habitat threat factors in Yarlung Tsangpo River basin

威胁因子	权重	最大影响距离/km	衰减类型
农田	0.70	4	指数衰减
建设用地	1.00	8	指数衰减
国道	1.00	6	线性衰减
省道	0.85	4	线性衰减
高铁	0.80	2	线性衰减
铁路	0.80	2	线性衰减
裸地	0.40	4	指数衰减

表 4 雅鲁藏布江流域不同土地利用类型生境适宜度及其对威胁因子的敏感度

Table 4 Habitat suitability of different land use types and their sensitivity to threat factors in Yarlung Tsangpo River basin

土地利用类型	生境适宜度	农田	建设用地	国道	省道	铁路	高铁	裸地
农田	0.40	0.25	0.40	0.40	0.40	0.30	0.40	0.50
林地	1.00	0.70	0.80	0.80	0.80	0.75	0.80	0.20
灌木	1.00	0.50	0.80	0.80	0.80	0.75	0.50	0.80
草原	1.00	0.70	0.80	0.80	0.80	0.75	0.50	0.30
水体	0.80	0.65	0.65	0.65	0.65	0.60	0.65	0.50
裸地	0	0	0	0	0	0	0	0
建设用地	0	0	0	0	0	0	0	0

4) 碳固存

采用 InVEST 模型中碳储量模块, 计算地上碳储量、地下碳储量、土壤碳密度值及死亡有机物碳密度的和为经验数据^[18]。

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \tag{7}$$

式中: C_{tot} 为生态系统碳总量, t/hm^2 ; C_{above} 为地上碳储量, t/hm^2 ; C_{below} 为地下碳储量, t/hm^2 ; C_{soil} 为土壤碳密度值, t/hm^2 ; C_{dead} 为死亡有机物碳密度, t/hm^2 。

5) 粮食供给

相关研究^[25]表明, 粮食产量与植被指数具有显著的线性相关。

$$G_i = G_{\text{sum}} \times \frac{\text{NDVI}_i}{\text{NDVI}_{\text{sum}}} \tag{8}$$

式中: G_i 为耕地栅格 i 的粮食产量; G_{sum} 为研究区内粮食、稻谷、小麦、冬小麦、青稞的总产量; NDVI_i 为第 i 个耕地栅格的归一化植被指数; NDVI_{sum} 为研究区耕地归一化植被指数的和。

1.3.3 生态系统服务双变量权衡/协同

1) 生态系统服务对之间的相关性分析

使用 Spearman 的非参数相关分析来确定生态系统服务对之间的权衡/协同作用($p < 0.05$), 用于确定这些交互关系的方向和强度, ES 对之间的正相关意味着协

同, 而生态系统服务对之间的负相关表示权衡^[26]。

2) 地理加权回归分析

运用地理加权回归(GWR)来识别生态系统服务对的空间交互相关性, GWR 在传统回归框架的基础上进行修改, 使其能够检验空间非平稳性^[27], 此方法的应用与生态系统服务(ES)之间权衡/协同作用的形成机制之间高度契合, 即多个生态系统服务可能同时受到共同驱动因素的作用^[28]。

$$y_i = \beta_0(\mu_i, \nu_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(\mu_i, \nu_i) x_{jk} + \epsilon_i \tag{9}$$

式中: (μ_i, ν_i) 为点 i 的空间位置; p 为自变量的数量; y_i 为因变量; x_{jk} 为独立变量; ϵ_i 为随机误差; $\beta_0(\mu_i, \nu_i)$ 为 i 点处的截距; $\beta_k(\mu_i, \nu_i)$ 为回归系数。与 Spearman 相关分析类似, 正回归系数表明空间协同, 而负回归系数表明空间权衡。采用 R 4.0 软件中的“GWmodel”包^[29]进行分析。

2 结果与分析

2.1 空间分布

雅鲁藏布江流域生态系统服务功能呈显著的空间分布, 下游地区是产水、碳储量、土壤保持等功能高值分布区, 上游地区呈逐渐递减趋势。雅鲁藏布江流域生境质量呈全流域高值状态, 粮食供给主要分布在日喀则、林芝、拉萨市、山南市等河谷地带, 仅占流域面积的 1.23%(图 2)。

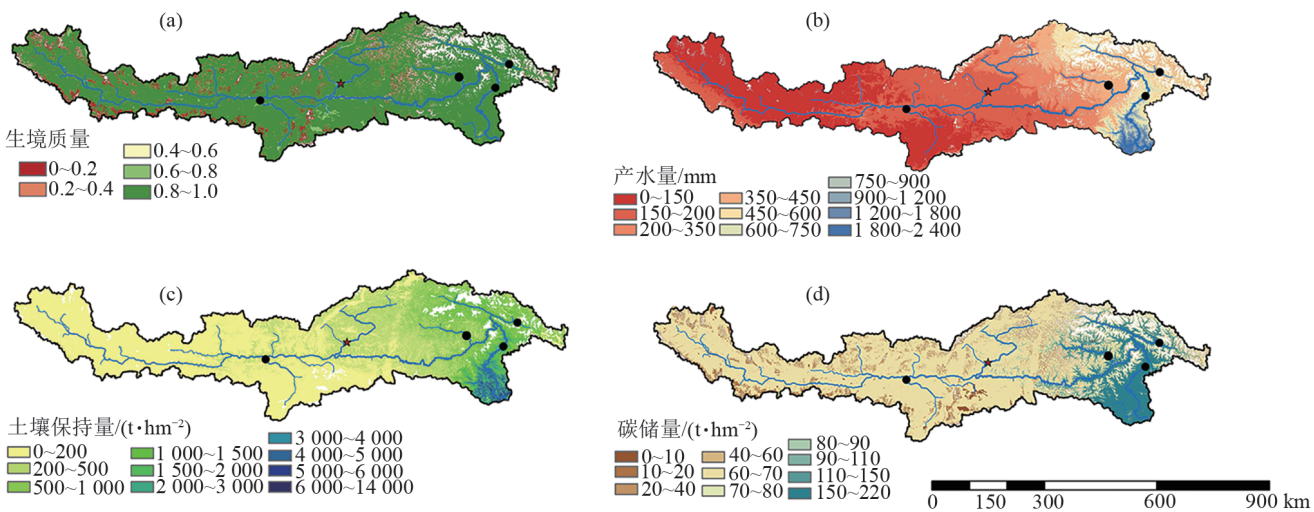


图 2 2000—2020 年雅鲁藏布江生态系统服务功能空间分布格局

Fig. 2 Spatial distribution pattern of ecosystem service functions in Yarlung Tsangpo River basin from 2000 to 2020

雅鲁藏布江流域地势起伏较大,且高海拔广泛分布于中上游地区,包括日喀则市和拉萨市等。低海拔地区分布在东南下游地区,主要城市有林芝。雅鲁藏布江流域海拔主要分布在 3 000~7 000 m,各种生态系统服务变化趋势随着海拔的高低而存在差异(图 3)。生境质量在 T_1 海拔 $>4\,800\text{ m}$,呈现随海

拔上升下降的态势,产水和土壤保持深度在 T_2 海拔 $>3\,800\text{ m}$ 时,下降比较剧烈,在 $1\,000\sim3\,800\text{ m}$ 时下降速度比较平缓。碳储量在海拔 $>2\,800\text{ m}$,呈现随海拔升高下降的态势。其中土壤保持在 $145\sim1\,000\text{ m}$ 时土壤保持量随海拔升高,土壤保持量呈逐渐增加态势。

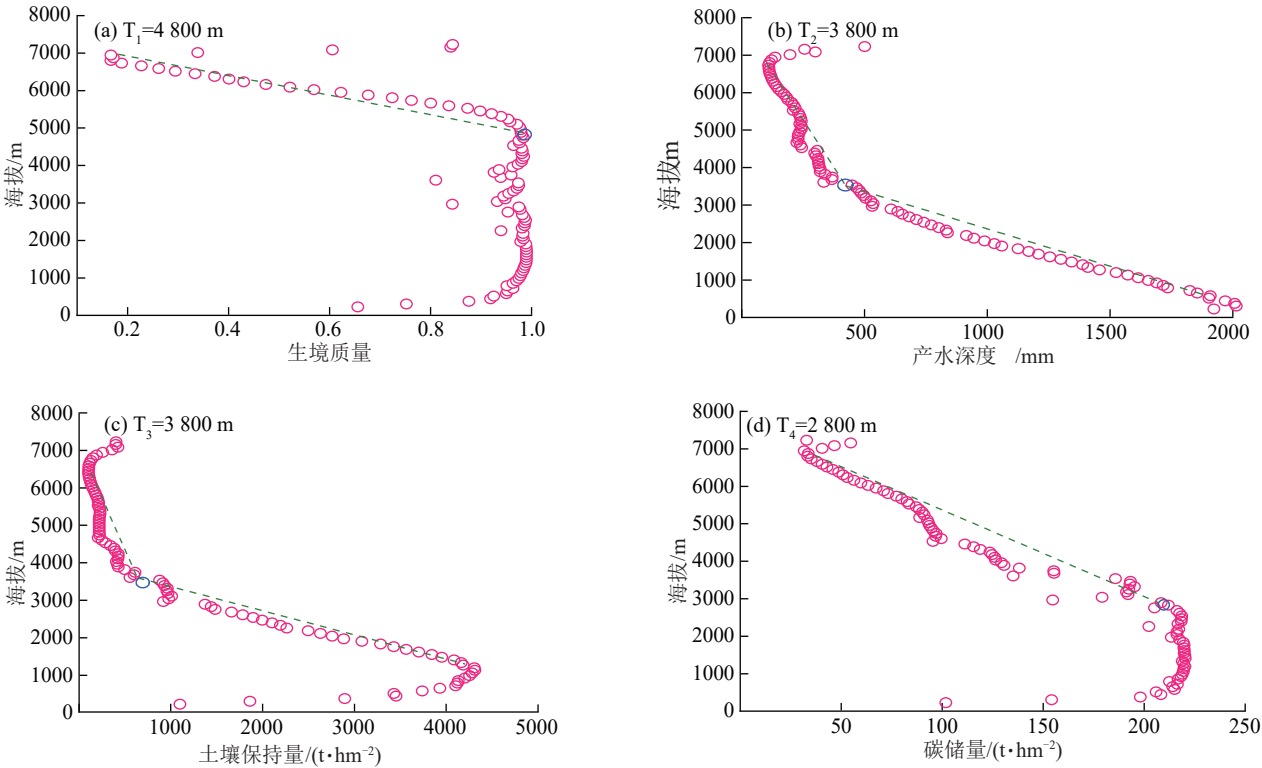


图 3 2000—2020 年雅鲁藏布江流域生态系统服务变化在不同海拔上的分布

Fig. 3 Distribution of ecosystem service changes across different elevation gradients in Yarlung Tsangpo River basin from 2000 to 2020

2.2 年际变化

通过计算 2000—2020 年生态系统服务功能的变

化,得到雅鲁藏布江流域生态系统服务变化情况(图 4)。2000—2013 年,雅鲁藏布江流域生境质量呈

波动下降趋势,随着国家“十一五”生态政策的制定,生态环境得到好转;2013—2020 年生境质量呈波动上升趋势,2000—2020 年产水量以 0.01 mm/a 呈波动下降趋势。在雅鲁藏布江水土保持工程实施及植被覆盖增加的情况下,水土保持量在 2000—2020 年以

0.01 t/(hm²·a)波动上升,在相关政策因素影响下粮食供给量以 0.02 t/(hm²·a)波动下降。雅鲁藏布江流域生境质量基本稳定在 0.80,碳储量平均值为 103~104 t/hm²波动变化,其中 2019 年出现降雨量最低值,所以产水和土壤保持在 2000—2020 年出现最低值。

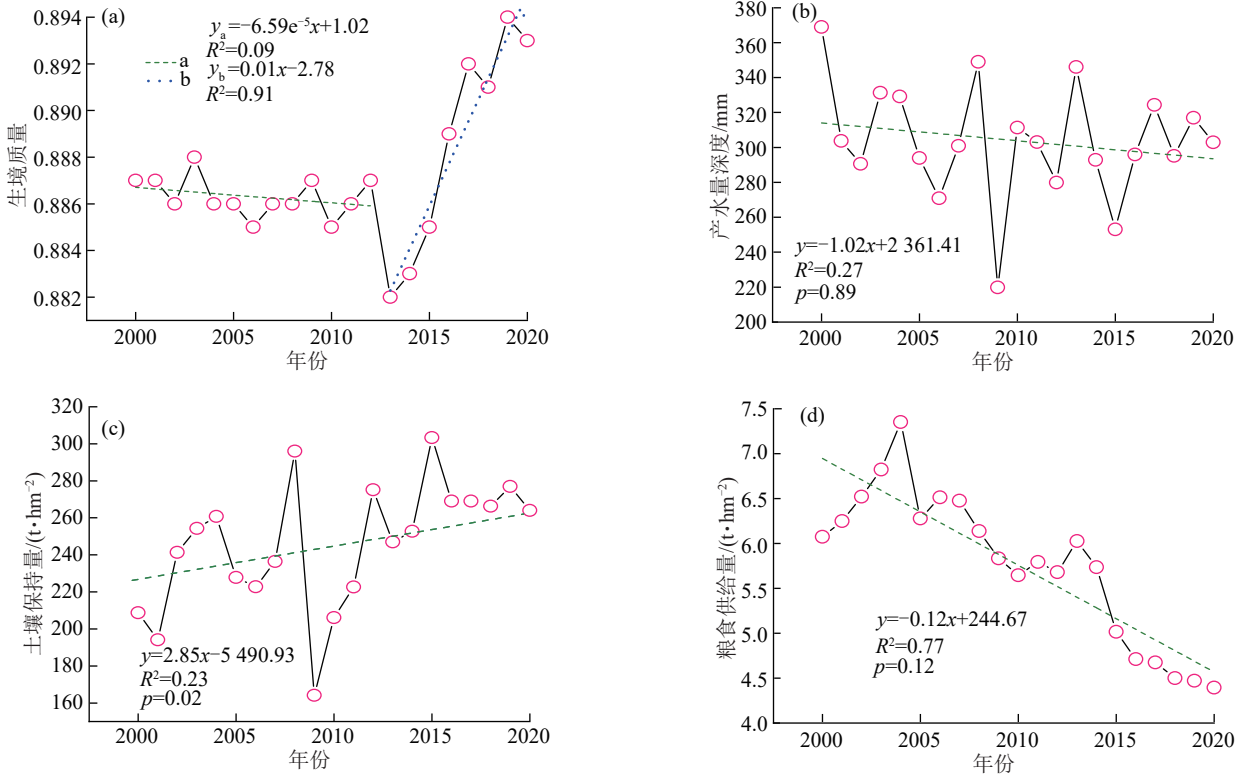


图 4 2000—2020 年雅鲁藏布江流域生态系统服务年平均值

Fig. 4 Annual mean of ecosystem services in Yarlung Tsangpo River basin from 2000 to 2020

从表 5 可以看出,雅鲁藏布江流域产水、水土保持、粮食供给量平均值由 2000—2009 年的 305.82 mm、230.64 t/hm²、6.42 t/hm²变为 2010—2020 年的 301.96 mm、259.32 t/hm²、5.15 t/hm²,变化量分别为

—3.86、28.68、—1.28,变化率分别为—1.26%、12.43%、—19.85%。可知,雅鲁藏布江流域生境质量得到改善,土壤保持功能有所提升,而产水量和粮食产量呈下降趋势。

表 5 雅鲁藏布江流域生态系统服务变化

Table 5 Changes in ecosystem services in Yarlung Tsangpo River basin

年份及变化	生境质量	产水量/mm	土壤保持量/t	碳储量/(t·hm ⁻²)	粮食供给/(t·hm ⁻²)
2000—2009	0.88±0	305.82±40.13	230.64±34.94	103.28±0.09	6.42±0.41
2010—2020	0.88±0.01	301.96±22.97	259.32±25.46	103.69±0.50	5.15±0.60
变化量	0	—3.86	28.68	0.41	—1.28
变化率/%	0.10	—1.26	12.43	0.40	—19.85

注:表中数据为平均值±标准差。

2.3 时空变化

由表 6 可知,雅鲁藏布江流域生境质量、产水量、土壤保持量、碳储量、粮食供给量等面积显著增加,分别为 8.68 万、1.32 万、12.13 万、18.64 万、0.19 万 km²,分别占研究区总面积的 30.24%、4.63%、42.58%、65.40%、2.28%(*p*<0.05)。生境质量增加的面积广布雅鲁藏布江流域,道路是退化生境质量的分布区,说明道路对于生态环境的影响较大。产

水增加区域分布在中上游地区,水土保持增加区域广布在雅鲁藏布江流域,且增加的面积大于减少的面积,说明土壤保持生态功能恢复良好。碳储量增加区主要分布在中上游地区,减少区主要分布在东南部下游地区。雅鲁藏布江流域粮食供给量整体增加趋势并不显著,且总面积占比较少。

2.4 生态系统服务与权衡关系

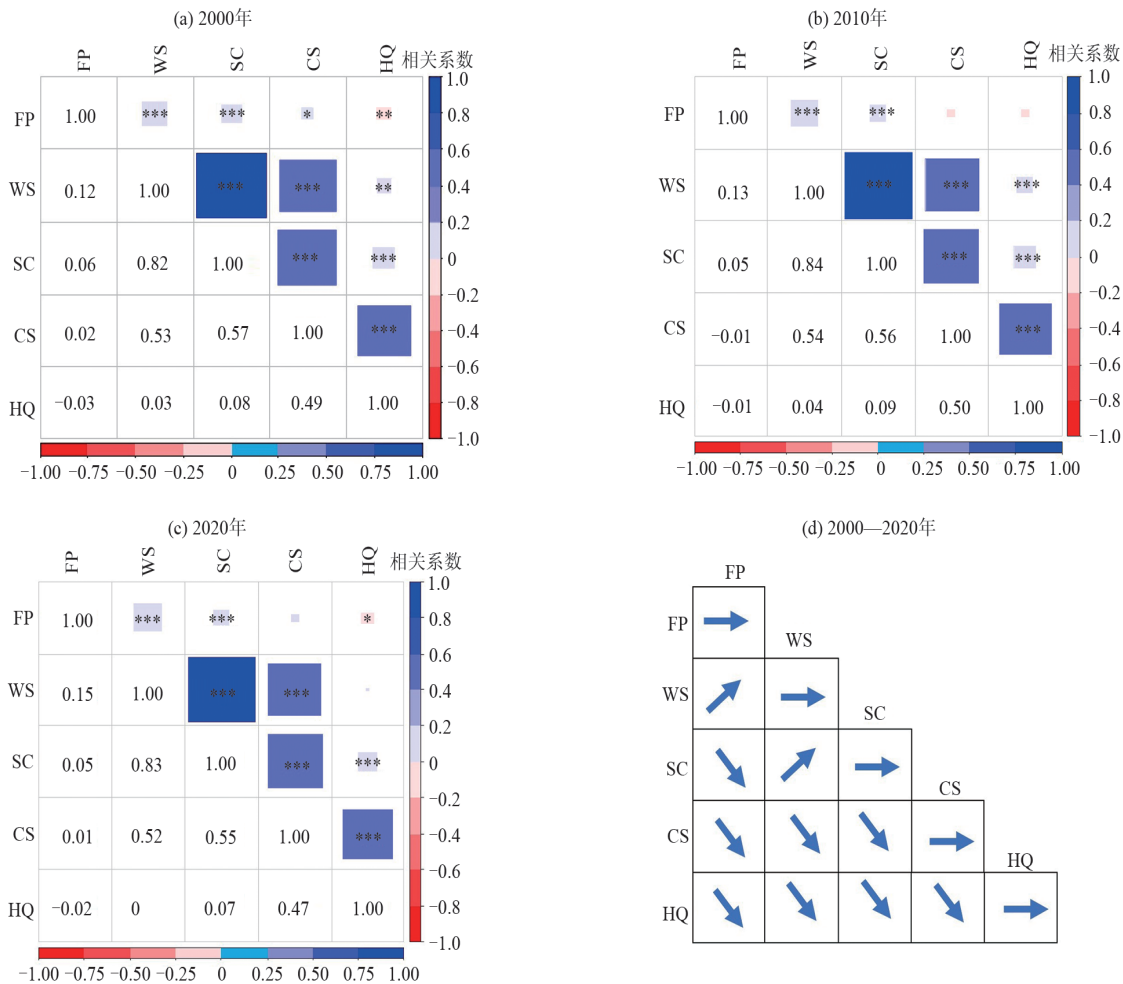
2.4.1 生态系统服务之间的相关性分析 在 2000 年、2010 年、2020 年 3 个时间尺度上对 5 个生态系统服务

功能的相关性进行分析(图 5)。雅鲁藏布江流域生境质量、产水、碳储量、土壤保持和粮食供给之间均存在 9 个正相关($p<0.05$),即各服务之间是协同关系,生境质量和粮食供给之间是权衡关系。2000 年、2010 年、2020 年最高的协同效应出现在产水和土壤保持之间。

从相关性变化可以看出,从 2000—2020 年,雅鲁藏布江流域 10 种服务的协同度均大部分出现下降趋势,只有土壤保持和产水、产水和粮食供给之间的协同呈上升趋势,但产水和粮食供给之间的协同度较低,在 2000 年、2010 年、2020 年分别为 0.12、0.13、0.15。

表 6 2000—2020 年雅鲁藏布江生态系统服务功能的时空变化

Table 6 Spatiotemporal changes of ecosystem service functions in Yarlung Tsangpo River basin from 2000 to 2020				
生态系统服务类型	显著上升面积/万 km ²	显著上升面积比例/%	显著下降面积/万 km ²	显著下降面积比例/%
生境质量	8.68	30.46	5.85	20.53
产水量	1.31	4.63	0.49	0.02
土壤保持量	12.13	42.58	0.01	0
碳储量	18.64	65.40	5.30	18.58
粮食供给量	0.19	2.28	0.24	2.88



注:***、**和*分别表示在 0.001、0.01、0.05 水平上差异显著。

图 5 雅鲁藏布江流域生态系统服务相关性

Fig. 5 Correlation of ecosystem services in Yarlung Tsangpo River basin

2.4.2 地理加权逻辑回归模型 在雅鲁藏布江流域的生态系统服务评估中(图 6),产水-土壤保持(WS-SC)之间的协同区域横跨流域多个地带,量化分析揭示该区域 WS 与 SC 间存在显著的同步变化趋势,协同区面积达 2.59 万 km²,占流域总面积的 9.09%。相

比之下,权衡区面积为 3.26 万 km²,占比 12.67%。对于产水-碳储量(WS-CS)组合,在保护环境法规和植被增加的情况下,其协同区主要聚焦于流域的东中上部,而权衡区则分散于西中上部及东南部。协同区面积占比 4.21%,权衡区面积占比 3.79%。产水-

生境质量(WS-HQ)在流域内的协同区集中于东南部和中上部,权衡区则偏向东部地区。协同区面积占流域总面积的12.11%,权衡区面积占8.63%。

在土壤保持-碳储量(SC-CS)的评估中,协同区广泛分布于流域东部,权衡区则位于西部。协同区面积占比9.47%,权衡区面积占比9.93%。对于土壤

保持-生境质量(SC-HQ),协同区同样集中在流域东部,权衡区则位于西部。协同区面积占比6.32%,而权衡区面积占比6.56%。碳储量-生境质量(CS-HQ)协同区分布在东南部,面积占比为31.12%,权衡区面积占比1.05%。由于粮食供给分布仅集中在东南部且分布面积较小,所以未作讨论。

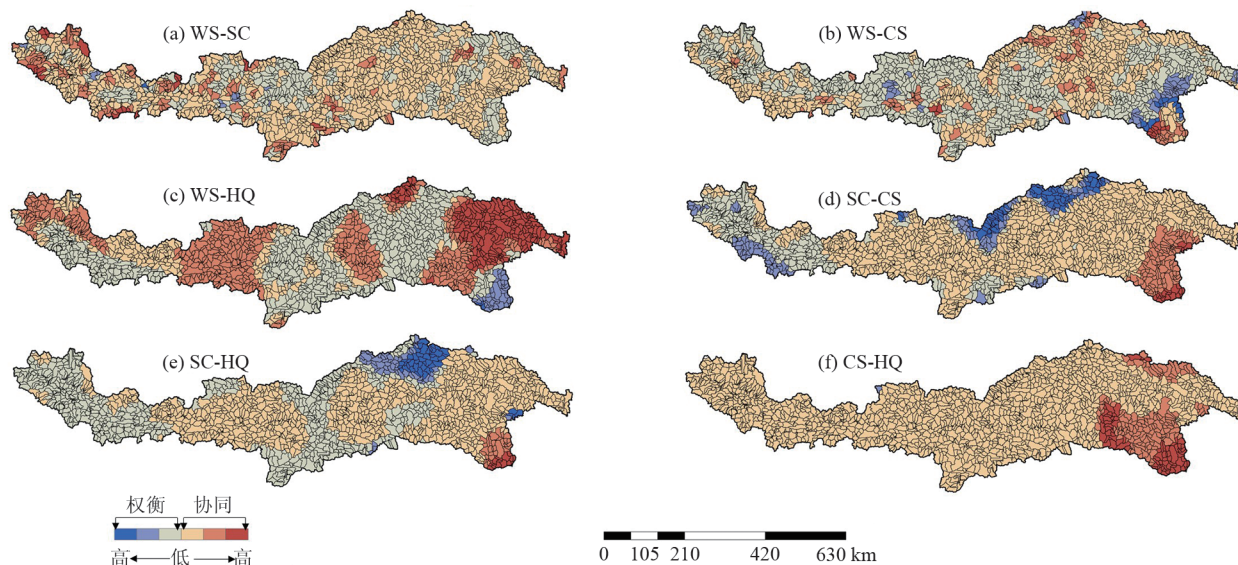


图6 雅鲁藏布江流域生态系统服务权衡与协同空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of trade-offs and synergies of ecosystem services in Yarlung Tsangpo River basin

3 讨论

3.1 生态系统服务时空分异变化

本研究揭示,雅鲁藏布江流域生态系统服务供给呈现显著的空间异质性。东南部下游地区集中5种主要生态系统服务的高值区,且生境质量较好,其退化区主要分布于道路邻近区域,表明道路建设对生境质量具有显著影响。流域西部地区产水、土壤保持、碳储量和粮食供给等服务指标普遍处于低值水平,反映生态系统服务供给的危险区主要分布在中上游区域,各服务指标随海拔的升高呈递减趋势。此空间分异主要受高原气候制约、降水稀少、干旱严重等自然因素限制植被生长和生态系统服务供给能力。碳储量和水土保持量呈逐年增长趋势,是因为下游实行生态保护措施,植被增加^[30],有效减少雅江下游的土地沙化问题,其中碳储量模块参照GAO等^[18]的研究工作,水土保持模块与兰泽凡等^[31]研究结果类似。产水量呈波动下降趋势,是因为年降水量逐年减少,与赖明等^[32]研究结果相似。目前该流域应对水资源供给减少的状况,如山南市、拉萨、日喀则、林芝等地出台雅鲁藏布江保护条例,实行跨市联动保护雅江环境和严格水资源管理制度^[33],为维持下游地区产水服务提供政策保障。雅鲁藏布江中游地区土地沙化严重,中游地区气候干旱,植被稀

疏,生态环境脆弱^[34],但中游地区是西藏经济发达区,所以中游地区供需矛盾突出,亟须提升产水、土壤保持、生境质量、碳储量、粮食供给量等关键生态系统服务的供给。上游地区被认为是中国、印度、不丹和孟加拉国等地水资源的重要源头地区,人为干扰少^[35],但受水坝建设影响,需重点加强水源涵养功能和原生生境保护。粮食供给服务主要集中在下游地区,上游高寒地理条件限制农业发展,威胁区域粮食安全。粮食供给基于Matlab进行的运算,林芝、山南、拉萨、日喀则4个地区在2000年、2005年、2010年、2015年、2020年的粮食总产量分别为4.86、4.53、4.31、5.03、5.33 t/hm²,验证了结果的可靠性。雅鲁藏布江流域生态系统服务供给存在显著的区域不均衡性,亟须通过系统性的生态保护措施,实现生态系统服务供给的稳定性和可持续性,促进区域人与自然和谐共生。

3.2 生态系统服务权衡与协调

本研究表明,雅鲁藏布江流域生态系统服务间以协同关系为主导,其中东部中下游地区协同关系显著,而权衡关系主要分布于中上游区域。此种空间分异格局与流域自然地理条件、气候特征及人类活动强度密切相关^[36]。基于此,建议在中下游地区重点实施植被恢复与水土保持工程,推广生态农业模式;上游地区则应减少人为干扰,控制水土流失,以全面提升生态系统服务供给能力。具体而言,粮

食供给与生境质量在2000年、2010年、2020年主要表现为权衡关系,碳储量与粮食供给在2010年也呈显著权衡特征,禁牧政策的实施和草地生态系统恢复显著提升碳储量和土壤保持能力^[32]。然而,农田的不合理开垦利用对碳储量、生境质量和粮食供给间的权衡关系产生显著影响^[37]。因此,未来流域生态管理应着重优化土地利用结构,推进退耕还林和禁牧政策,协调供给服务与调节服务的关系,实现生态保护与经济发展的协同增效。本流域产水和土壤保持之间相互增益作用最强,且权衡区域零星分布,说明本地的植被覆盖度高,水源涵养能力和土壤保持能力强,应继续加强水资源管理和实施水土保持工程。综上,雅鲁藏布江地区上游区域(中上游)以权衡关系为主(如粮食供给与生境质量、碳储量的冲突),中下游区域则以协同关系为主导,人类活动强度与自然承载力不匹配,需通过差异化治理(如退耕还林、禁牧政策)实现生态保护与经济协调发展。

3.3 措施建议

根据雅鲁藏布江本身的生境条件,提出生态保护策略有:1)政策方面。实施跨市联动保护策略,统筹上下游生态保护与经济发展;完善生态补偿政策,制定和完善流域生态环境保护相关法律法规,强化执法力度。2)生态保护与恢复方面。建立跨部门、跨区域的数据共享机制,为科学决策提供数据支持;划定生态保护红线并建立自然保护区;减少水利工程对生态系统的干扰;针对土地沙化、湿地干化、冻土退化等问题,实施植被恢复、湿地保护及冻土稳定化工程。3)可持续资源利用策略。推行轮牧、休牧制度;发展生态旅游;通过植被恢复和湿地保护,增强流域碳汇能力,助力实现碳中和目标。

4 结论

1)2000—2020年雅鲁藏布江流域粮食供给量、产水量呈波动下降趋势,水土保持量呈波动上升趋势,生境质量为0.80,碳储量呈增长趋势,且5种服务量的高值区均在雅江流域东南地区。

2)2000—2020年,雅鲁藏布江流域生境质量、土壤保持量、碳储量显著增加面积分别为8.68万、12.13万、18.64万 km²,分别占研究区总面积为30.24%、42.58%、65.40%。各种生态系统服务呈随海拔下降趋势并存在显著变化的海拔阈值。

3)雅鲁藏布江流域内生态系统服务整体呈现协同效应,其中产水-水土保持协同度最高,且协同区域分布在中下游,权衡区域分布在中上游。

参考文献:

- [1] ZHAO Y Y, LIU Z F, WU J G. Grassland ecosystem services: A systematic review of research advances and future directions[J]. *Landscape Ecology*, 2020, 35(4): 793-814.
- [2] CORD A F, BARTKOWSKI B, BECKMANN M, et al. Towards systematic analyses of ecosystem service trade-offs and synergies: Main concepts, methods and the road ahead[J]. *Ecosystem Services*, 2017, 28: 264-272.
- [3] JERRETT M, GALE S, KONTGIS C. Spatial modeling in environmental and public health research[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2010, 7(4): 1302-1329.
- [4] HUANG J M, ZHENG F Y, DONG X B, et al. Exploring the complex trade-offs and synergies among ecosystem services in the Tibet Autonomous Region[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 384: e135483.
- [5] HOWE C, SUICH H, VIRAB, et al. Creating win-wins from trade-offs? Ecosystem services for human well-being: A meta-analysis of ecosystem service trade-offs and synergies in the real world[J]. *Global Environmental Change*, 2014, 28: 263-275.
- [6] CHE L, ZHOU L, XU J G. Integrating the ecosystem service in sustainable plateau spatial planning: A case study of the Yarlung Zangbo River basin[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2021, 31(2): 281-297.
- [7] SHI W, QIAO F W, ZHOU L. Identification of ecological risk zoning on Qinghai-Tibet Plateau from the perspective of ecosystem service supply and demand[J]. *Sustainability*, 2021, 13(10): e5366.
- [8] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [9] 冯漪, 曹银贵, 李胜鹏, 等. 生态系统服务权衡与协同研究: 发展历程与研究特征[J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(1): 11-25.
- [9] FENG Y, CAO Y G, LI S P, et al. Trade-offs and synergies of ecosystem services: Development history and research characteristics[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 399(1): 11-25.
- [10] XIA H, YUAN S F, PRISHCHEPOV A V. Spatial-temporal heterogeneity of ecosystem service interactions and their social-ecological drivers: Implications for spatial planning and management[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 189: e106767.
- [11] 陈竹安, 陈雅斯, 刘子强. 江西省生态系统服务权衡协同关系时空演变与预测[J]. *环境科学*, 2025. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202410030>.
- [11] CHEN Z A, CHEN Y S, LIU Z Q. Spatio-temporal simulation of ecosystem services, trade-offs, and synergies in Jiangxi Province based on the SD-PLUS mode[J]. *Environmental Science*, 2025. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202410030>.

- 13227/j.hjlx.202410030.
- [12] 李洪庆,杨瑀,张俊红.雅鲁藏布江山南宽谷流域生态安全格局构建[J].干旱区地理,2023,46(9):1503-1513.
LI H Q, YANG Y, ZHANG J H. Construction of ecological security pattern in Shannan wide valley basin of Yarlung Zangbo River[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(9):1503-1513.
- [13] WANG Y F, YE A Z, PENG D Z, et al. Spatiotemporal variations in water conservation function of the Tibetan Plateau under climate change based on InVEST model[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 41: e101064.
- [14] WANG Y, LÜ Y, LÜ D, et al. Climate change and its ecological risks are spatially heterogeneous in high-altitude region: The case of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Catena, 2024, 243: 108140.
- [15] CHEN Y, KANG Y J, LI J J, et al. Study on the spatiotemporal changes and driving factors of habitat quality in the Yarlung Zangbo River from 2000 to 2020[J]. Ecology and Evolution, 2025, 15(2): e70807.
- [16] JI H Y, PENG D Z, GU Y, et al. Snowmelt runoff in the Yarlung Zangbo River basin and runoff change in the future[J]. Remote Sensing, 2023, 15(1): e55.
- [17] 苏立彬,郭永刚,吴悦,等.基于DEM的尼洋河流域地貌形态分析[J].中国水土保持科学,2020,18(3):12-21.
SU L B, GUO Y G, WU Y, et al. Analysis of geomorphology of Niyang River basin based on digital elevation model[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(3): 12-21.
- [18] GAO M N, XU R H, HUANG J L, et al. Increase of carbon storage in the Qinghai-Tibet Plateau: Perspective from land-use change under global warming [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 414: e137540.
- [19] 常璿予,武志涛,李琪,等.京津风沙源生态系统服务时空分布及冷热点分析[J].水土保持学报,2024,38(3):216-226.
CHANG J Y, WU Z T, LI Q, et al. Spatiotemporal distribution of ecosystem services and analysis of cold and hot spots in Beijing-Tianjin sandstorm source region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3): 216-226.
- [20] 陈安,李景吉,王茂生,等.西藏“一江两河”流域生态系统服务变化及权衡与协同关系研究[J].水土保持研究, 2022, 29(2): 313-319.
CHEN A, LI J J, WANG M S, et al. Research for change of ecosystem service and the trade off-synergy relation of the YLN basin in the Tibet Autonomous Region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2): 313-319.
- [21] 邵雅静,杨悦,员学锋.黄河流域城镇化与生态系统服务的时空互动关系[J].水土保持学报,2022,36(3):86-93.
SHAO Y J, YANG Y, YUAN X F. Spatiotemporal interaction between urbanization and ecosystem services in the Yellow River basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 86-93.
- [22] CHEN S, ZHU S C, WEN X, et al. Mapping potential soil water erosion and flood hazard zones in the Yarlung Tsangpo River basin, China[J]. Atmosphere, 2023, 14(1): e49.
- [23] 尚俊,蔡海生,龙月,等.基于InVEST模型的鄱阳湖区生境质量时空演化及其变迁特征分析[J].长江流域资源与环境,2021,30(8):1901-1915.
SHANG J, CAI H S, LONG Y, et al. Temporal-spatial distribution and transition of habitat quality in Poyang Lake Region based on InVEST model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(8): 1901-1915.
- [24] LIU Y X, LIU S L, WANG F F, et al. Responses of habitat quality and animal biodiversity to grazing activities on the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2021, 9: e681775.
- [25] 刘伟,张帆,魏云浩,等.珠三角城市群区域生态系统服务供需均衡关系[J].生态学报,2023,43(11):4461-4472.
LIU W, ZHANG F, WEI Y H, et al. The balance between ecosystem services supply and demand in the Pearl River Delta Urban Agglomerations area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11): 4461-4472.
- [26] DOU H S, LI X B, LI S K, et al. Mapping ecosystem services bundles for analyzing spatial trade-offs in Inner Mongolia, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 256: e120444.
- [27] GAO J B, ZUO L Y. Revealing ecosystem services relationships and their driving factors for five basins of Beijing [J]. Journal of Geographical Sciences, 2021, 31(1): 111-129.
- [28] BENNETT E M, PETERSON G D, GORDON L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services[J]. Ecology Letters, 2009, 12(12): 1394-1404.
- [29] GOLLINI I, LU B B, CHARLTON M, et al. GW model: An R package for exploring spatial heterogeneity using geographically weighted models [J]. Journal of Statistical Software, 2015, 63(17): 1-50.
- [30] 唐永发,熊东红,张宝军,等.雅江河谷中段典型防沙治沙生态工程对沙地持水性能的改良效应[J].山地学报, 2021, 39(4): 461-472.
TANG Y F, XIONG D H, ZHANG B J, et al. Water holding capacity of aeolian sandy land impacted by different typical vegetation ecological projects in the middle reach of the Yarlung Zangbo River Valley, Tibet, China [J]. Mountain Research, 2021, 39(4): 461-472.
- [31] 兰泽凡,田小靖,牛祎凡,等.基于RUSLE模型的雅鲁藏布江流域土壤侵蚀评价[J].水土保持研究,2024,31(3):20-29.
LAN Z F, TIAN X J, NIU Y F, et al. Evaluation on soil erosion based on RUSLE model in the Yarlung Zangbo River basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 20-29.

(下转第 233 页)

- from NEX-GDDP CMIP6 model simulations [J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): e151.
- [20] SUN Y K, ZHU R, WANG T. Projection of extreme climate change in the Asian arid region and the Tibetan Plateau in the early and middle 21st century based on NEX-GDDP-CMIP6 [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2025, 18(3): e100534.
- [21] JIANG F S, WEN S S, GAO M N, et al. Assessment of NEX-GDDP-CMIP6 downscale data in simulating extreme precipitation over the Huai River basin [J]. Atmosphere, 2023, 14(10): e1497.
- [22] YANG B G, WEIL X, TANG H Y, et al. Future changes in extremes across China based on NEX-GDDP-CMIP6 models [J]. Climate Dynamics, 2024, 62(10): 9587-9617.
- [23] GUO J H, HUANG G H, WANG X Q, et al. Evaluating the added values of regional climate modeling over China at different resolutions [J]. Science of the Total Environment, 2020, 718: e137350.
- [24] SHI Y, GAO X J, WU J, et al. Changes in snow cover over China in the 21st century as simulated by a high resolution regional climate model [J]. Environmental Research Letters, 2011, 6(4): e045401.
- [25] 吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1102-1111.
- WU J, GAO X J. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(4): 1102-1111.
- [26] YANG F, LU H, YANG K, et al. Evaluation of multiple forcing data sets for precipitation and shortwave radiation over major land areas of China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(11): 5805-5821.
- [27] TAYLOR K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D7): 7183-7192.
- [28] TEBALDI C, KNUTTI R. The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections [J]. Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2007, 365(1857): 2053-2075.
- [29] MARTINEZ A, IGLESIAS G. Climate change impacts on wind energy resources in North America based on the CMIP6 projections [J]. Science of the Total Environment, 2022, 806: e150580.
- [30] MCVICAR T R, RODERICK M L, DONOHUE R J, et al. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation [J]. Journal of Hydrology, 2012, 416: 182-205.
- [31] DENG K Q, AZORIN-MOLINA C, MINOLA L, et al. Global near-surface wind speed changes over the last decades revealed by reanalyses and CMIP6 model simulations [J]. Journal of Climate, 2021, 34(6): 2219-2234.
- [32] URIA M R, JOHNSON M, SHAN R. US hydropower market report (January 2021 edition) [R]. Oak Ridge National Laboratory (ORNL), 2021.
- [33] LU K D, ARSHAD M, MA X Y, et al. Evaluating observed and future spatiotemporal changes in precipitation and temperature across China based on CMIP6-GCMs [J]. International Journal of Climatology, 2022, 42(15): 7703-7729.
- (上接第218页)
- [32] 赖明, 陈仁升, 刘玖芬, 等. 雅鲁藏布江下游产水量时空演变及对气候和土地利用变化的响应 [J]. 草业科学, 2022, 39(12): 2516-2526.
- LAI M, CHEN R S, LIU J F, et al. Temporal and spatial evolution of water yield in the lower reaches of the Yarlung Zangbo River and its response to climate and land use change [J]. Pratacultural Science, 2022, 39(12): 2516-2526.
- [33] 刘琳, 张宝军, 熊东红, 等. 雅江河谷防沙治沙工程近地表特性: 林下植被特性、生物结皮及土壤养分变化特征 [J]. 中国环境科学, 2021, 41(9): 4310-4319.
- LIU L, ZHANG B J, XIONG D H, et al. Variation characteristics of vegetation characteristics, biological crusts and soil nutrients under the main vegetation configuration modes in the process of sand control in the Yarlung Zangbo River valley [J]. China Environmental Science, 2021, 41(9): 4310-4319.
- [34] FISCHER S, PIETRONI J, BRING A, et al. Present to future sediment transport of the Brahmaputra River: Reducing uncertainty in predictions and management [J]. Regional Environmental Change, 2017, 17(2): 515-526.
- [35] LIU S N, YAO Y Y, KUANG X X, et al. A preliminary investigation on the climate-discharge relationship in the upper region of the Yarlung Zangbo River basin [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: e127066.
- [36] HU F P, ZHAO J, SUN Z Y, et al. Study on spatiotemporal changes and driving mechanisms of ecosystem service interaction in Shiyang River basin [J]. Arid Land Geography, 2019, 47(10): 1755-1766.
- [37] 林静, 江洪, 岳辉, 等. 长汀县生态系统服务权衡与协同关系 [J]. 海南大学学报(自然科学版), 2024, 42(3): 301-311.
- LIN J, JIANG H, YUE H, et al. Trade-offs and synergies among ecosystem services in Changting County [J]. Journal of Hainan University (Natural Science), 2024, 42(3): 301-311.