

DOI: 10.20103/j.stxb.202408292069

袁正蓉, 赵慧, 强巴克珠, 梁钰凌, 王小丹. 青藏高原色林错流域生态服务权衡与协同及驱动因素. 生态学报, 2025, 45(11): 5216-5228.

Yuan Z R, Zhao H, Qiangba K Z, Liang Y L, Wang X D. Trade-offs/synergies and driving factors of ecosystem services in Selinco Basin of Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(11): 5216-5228.

青藏高原色林错流域生态服务权衡与协同及驱动因素

袁正蓉^{1,2}, 赵慧^{1,*}, 强巴克珠³, 梁钰凌^{1,2}, 王小丹¹

1 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610299

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 西藏自治区生态环境遥感监测中心, 拉萨 850000

摘要: 色林错流域是青藏高原内流区中湖泊分布最密集的子流域, 其生态功能决定区域生态环境稳定性。明确其生态功能空间分布及变化, 了解生态服务间的权衡协同关系对流域的保护与管理至关重要。基于 InVEST 和权衡与协同关系等模型分析了色林错流域 2000—2020 年土地利用和主要生态服务的现状与变化及其影响因素。结果表明: 2000—2020 年水域面积增加明显, 增大了 147.09 km²。年均产水、土壤保持、固碳和生境质量分别为 56.23 mm, 218.78 t/km², 132.01 g C/m² 和 0.71, 产水呈东北高西南低, 土壤保持中部低、两侧高, 固碳从西南向东北依次降低, 生境质量空间异质性较小。二十年来, 产水略微降低, 土壤保持和固碳服务稳中有升, 呈增加趋势区域占色林错流域的 28.33%—58.21%, 生境质量较为稳定, 87.93% 的区域基本保持不变。产水与三种生态服务整体呈权衡关系, 东北部权衡关系明显; 土壤保持、固碳服务和生境质量三种服务之间呈协同关系。色林错流域生态服务主要受由气温、降水和植被的空间分布不均影响, 其中温度和降水对产水的解释力最高, 海拔对土壤保持和生境质量的解释力最高; NDVI 对固碳的解释力最高。研究为色林错流域生态保护和生态管理提供数据支撑和理论支持, 助力于青藏高原生态屏障区生态保护建设。

关键词: 青藏高原; 色林错流域; 生态服务; 权衡与协同; 驱动因素

Trade-offs/synergies and driving factors of ecosystem services in Selinco Basin of Tibetan Plateau

YUAN Zhengrong^{1,2}, ZHAO Hui^{1,*}, QIANGBA Kezhu³, LIANG Yuling^{1,2}, WANG Xiaodan¹

1 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Ecology and Environment Remote Sensing Monitoring Center of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, China

Abstract: The Selinco Basin, a sub-basin with the highest concentration of lakes in the endorheic region of the Tibetan Plateau, plays a crucial role in determining the stability of the regional ecological environment. Understanding the spatial distribution and spatiotemporal changes in its ecosystem functions, as well as the complex trade-offs and synergies among key ecosystem services, is essential for developing science-based conservation strategies and sustainable management practices. By integrating the InVEST model with spatial statistics and geodetector analyses, we systematically assessed land use patterns and four key ecosystem services—water yield, soil retention, carbon sequestration, and habitat quality—over the past two decades (2000—2020). Furthermore, we conducted a multidimensional analysis to quantify the factors driving these changes. The results indicate that: From 2000 to 2020, the water area within the basin experienced the most significant change, increasing by approximately 147.09 km². The annual average values for water yield, soil retention, carbon sequestration, and habitat quality were 56.23 mm, 218.78 t/km², 132.01 g C/m², and 0.71, respectively. Water yield was highest in the northeast and lowest in the southwest, soil retention was lowest in the center and highest on both sides, carbon sequestration decreased from southwest to northeast, and habitat quality was relatively stable with small spatial heterogeneity. Over the past two decades, water yield slightly decreased, soil retention and carbon sequestration services showed a slight increase, and the area showing an increasing trend accounted for 28.33%—58.21% of the Selinco Basin. Habitat quality was relatively stable, with 87.93% of the area remaining basically unchanged. Water yield and the three ecosystem services overall showed a trade-off relationship, with a clear trade-off relationship in the northeast; soil retention, carbon sequestration, and habitat quality services showed a synergistic relationship. Ecosystem services in the Selinco Basin were primarily affected by uneven spatial distribution of temperature, precipitation, and vegetation, with temperature and precipitation having the highest explanatory power for water yield, altitude having the highest explanatory power for soil retention and habitat quality, and NDVI having the highest explanatory power for carbon sequestration. The study provides data support and theoretical support for ecological protection and management of the Selinco Basin, contributing to ecological protection and construction in the ecological barrier zone of the Tibetan Plateau.

基金项目: 青藏高原第二次综合科学考察与研究(2019QZKK0404); 西藏科技厅重大专项(XZ202201ZD0005G02)

收稿日期: 2024-08-29; **网络出版日期:** 2025-04-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaohui@imde.ac.cn

carbon sequestration and habitat quality in the Selinco Basin are 56.23 mm, 218.78 t/km², 132.01 g C/m² and 0.71, respectively. Water yield decreases from northeast to southwest; soil retention is lower in the central region and higher on the sides; carbon sequestration decreases from southwest to northeast; and habitat quality shows minimal spatial heterogeneity. Over the past 20 years, water yield decreased slightly, soil retention and carbon sequestration showed a slight increasing trend, with area of increasing trend accounting for 28.33%—58.21% of the Selinco Basin. Habitat quality was relatively stable, with 87.93% of the area remaining unchanged. There was a trade-off relationship between water yield and the other three ecosystem services, particularly evident in the northeast region. Additionally, there was a synergistic relationship among soil retention, carbon sequestration, and habitat quality. The spatial distribution of ecosystem services is mainly influenced by the uneven distribution of natural factors like temperature, precipitation, and vegetation. Temperature and precipitation best explain water yield, while elevation is the most significant factor for soil retention and habitat quality. NDVI has the strongest explanatory power for carbon sequestration. This study provides data and theoretical support for ecological protection and management in the Selinco Basin, and contribute to the construction of ecological protection in the ecological barriers on the Tibetan Plateau.

Key Words: Tibetan Plateau; Selinco Basin; ecosystem services; trade-offs and synergies; driving factors

生态服务是指自然生态系统直接或间接为人类生存提供的各种物质和惠益,是人类永续发展的基础^[1],也是政府决策的重要依据^[2]。研究表明,由于自然、气候和社会环境的变化,约 60% 的生态服务都在经历退化^[3]。减缓生态服务退化最有效的措施是制定政策对生态服务进行科学管理,而评估生态服务关系及影响因素是制定相关切实可行的生态服务保护和管理政策的关键^[4]。

近年来,随着遥感技术的迅猛发展,生态服务的研究不断深化,常用的评估模型主要包括 InVEST、SolVES 和 ARIES 模型^[5-6]。其中,InVEST 模型能够量化多种生态服务,如产水服务,生境质量,土壤保持服务等,是一个综合性的评估模型。相比于其他模型,具有需求数据少、计算速度快等优点,且在描述多种生态服务方面展现了显著的有效性而被广泛应用^[7]。例如 Li 等^[8],王世豪等^[9],Huang 等^[10]分别基于 InVEST 模型对喀斯特山区、东北黑土区和西藏自治区的主要生态服务进行评估,明确主要生态服务的时空分布格局,并分析其主要影响因素。定量分析生态服务及其影响因素,可为生态系统保护政策制定提供数据支撑,对促进区域生态系统的有效管理和保护具有关键作用^[11-12]。

生态服务关系是指生态服务间存在正相关或负相关等关系,包括权衡、协同和中性关系^[13]。对其正确的认知是制定可持续发展管理决策的前提^[12]。如果政策制定者忽视了生态服务之间的权衡和协同作用,希望追求一个生态服务功能最大化,就有可能导致某个生态服务功能大幅降低。目前,权衡协同关系研究方法主要包括制图叠加法、统计分析法和情景分析法,其中相关性分析最为常用^[2, 14]。一些研究通过斯皮尔曼和皮尔逊相关系数得到成对的生态服务权衡与协同关系^[4, 15],这种方法虽然能够揭示生态服务之间的相关性,但可能无法全面捕捉它们之间复杂的相互作用和动态变化;也有一些研究通过研究周期的起止年份的生态服务间的关系来分析整个时间段的生态服务关系^[16],这种方法可能忽略了生态服务关系在时间上的非线性和空间异质性,导致难以准确表征生态服务关系的时空变化细节。由于生态服务间的关系极为复杂,会因时空尺度、区域位置和其他因素的不同而不同^[7],仅依据某个区域成对生态服务间的一个相关系数或只分析研究周期起止年份的生态服务间的关系来代表整个研究期的生态服务关系都难以准确表征生态服务关系的时空变化细节。目前,具有时空连续性的生态服务关系研究较少。因此,定量表征具有时空连续性的生态服务关系可为生态服务保护和管理提供科学支撑。

色林错流域内色林错湖通过河流与众多的湖泊相连,形成封闭的内陆湖泊群,流域内水循环对周边水资源的联系具有关键作用^[17]。流域内植被主要为低覆盖度高寒草原,属青藏高原典型生态系统^[18]。当前研究多集中于湖泊面积、水位和水量的气候响应^[17, 19]以及流域积雪覆盖变化及其对流域尺度水储量的影响

等^[20-21],对色林错流域水资源的变化引起的生态正负反馈研究较少。遵循《青藏高原生态屏障区生态保护和修复重大工程建设规划(2021—2035年)》的指导方针,流域的生态可持续发展应综合考虑环境和资源的保护,并对区域生态功能的现状进行充分了解。本文针对青藏高原色林错流域生态服务时空分异规律及驱动因素尚不清晰和长时序生态服务关系尚不明确的科学问题,从生态服务权衡协同关系入手,通过全面定量评估色林错流域产水服务、土壤保持服务、固碳服务和生境质量,深入分析和探讨生态服务间的权衡协同关系和影响因素,填补了该区域基于长时序生态服务及变化的权衡与协同关系的研究空白,为决策者针对色林错流域的生态保护和生态管理提供数据支撑和理论支持,助力青藏高原生态屏障区生态保护和建设。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

色林错流域位于青藏高原腹地,那曲市中部(30°01′—33°35′N,87°39′—92°26′E),涉及西藏自治区那曲市的申扎县、尼玛县、双湖县、班戈县、安多县和青海省格尔木市海西蒙古族藏族自治州,面积约59638.25 km²,平均海拔高度约4900 m,地势中部低南北高(图1)。流域内有大小湖泊20余个,水域总面积约767.31 km²,众多的湖泊通过河流串通形成西藏最大的内陆湖水系。气候以半干旱气候为主,年降水量东北高西南低,降水量范围200—600 mm;年均温中部高,东北部低,平均气温约为0.8—1.0℃^[22]。流域内主要有4条河经常年径流补给湖泊,分别为波曲藏布、阿里藏布、扎根藏布和扎加藏布^[23]。

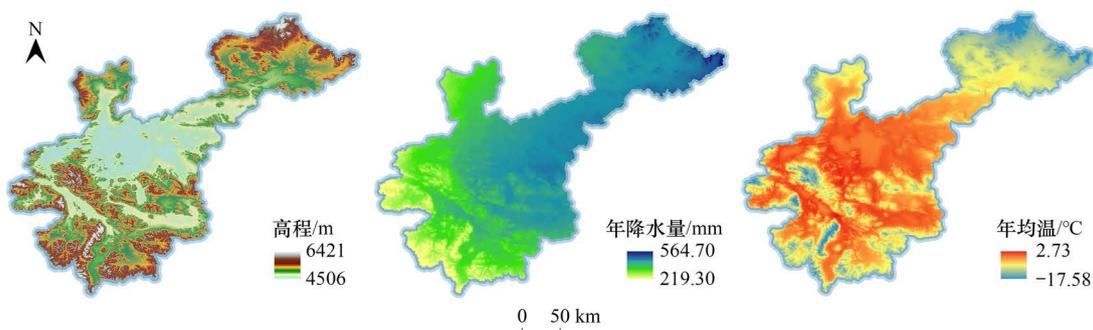


图1 色林错流域基本概况

Fig.1 Study area

1.2 方法

1.2.1 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵可用于量化研究时段始末土地利用类型的现状和结构,以及研究时段始、末各土地利用类型的转移方向和过程,较为直观地呈现了土地利用的变化特征^[24]。因此,本文采用马尔可夫转移矩阵描述2000和2020年色林错流域土地利用类型的结构和变化特征。

1.2.2 植被变化趋势

趋势分析法是将变量与时间做线性回归分析,来预测其变化趋势的方法,其计算方法如下^[25]:

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

式中,Slope为回归方程的斜率, n 为研究的时间跨度, NDVI_i 为第 i 年的NDVI的平均值。当Slope>0时,表示NDVI为增加趋势,反之,则NDVI呈降低趋势;当Slope=0,表示NDVI基本不变。

1.2.3 产水

产水服务在一定程度上表征生态系统在一定时间和空间范围内生态系统保持水分的过程和能力。InVEST 模型的产水模块主要采用降水和蒸散发数据基于水量平衡原理和其他参数计算产水量,产水模块成功运行输入的数据为:降水量、蒸散发、根系限制深度、植被可利用水率、土地利用/覆被、生物物理系数表、 Z 参数(水文地质特征和降水的季节分布的表征,数值通常在 1—30 之间,将结果与对应区域水资源公报数据进行对比验证最终确定 Z 的值,本文取值为 11)和流域边界,所有数据栅格数据在输入模型前,需重采样至 1 km。产水的计算原理如下^[26]:

$$Y_x = \left(1 - \frac{AET_x}{P_x}\right) P_x \quad (2)$$

式中,当土地利用/覆被类型为 j 时, Y_x 为栅格 x 的年产水量(mm), AET_{xj} 为栅格 x 的实际年均蒸散发量(mm); P_x 为栅格 x 的年降水量(mm)。

1.2.4 土壤保持

土壤保持服务是生态系统对土壤的储积保持和侵蚀调控能力^[27]。InVEST 模型的土壤保持模块修正了传统的通用土壤流失方程,同时考虑不同覆被类型的泥沙持留量,进一步保证了评估结果的精确性和真实性。具体计算原理如下^[16]:

$$USLE = R \times K \times LS \times C \times P \quad (3)$$

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

$$SR = (RKLS - USLE) + \text{ups_retention} \quad (5)$$

式中:USLE 是自然状态下土地潜在土壤侵蚀量($t \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$), R 是降雨侵蚀力因子($\text{MJ mm hm}^{-2} \text{ a}^{-1} \text{ h}^{-1}$), K 是土壤可蚀因子($\text{hm}^2 \text{ t h hm}^{-2} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}$), LS 是坡度坡长因子, C 是作物管理因子, P 是水土保持措施因子, $RKLS$ 是裸地的潜在土壤侵蚀量, SR 是土壤保持量, ups_retention 是上游沉积物的保留量。

1.2.5 固碳(CS)

固碳服务是调节大气中二氧化碳的重要功能,表示了生态系统对碳元素的固持能力。本文以净初级生产力(NPP)为基础评价色林错流域的固碳服务。NPP 数据来自于 Google Earth Engine (MODIS/006/MOD17A3HGF)单位(g C/m^2)。根据光合作用方程,植被积累 1 kg 干物质时会从大气中吸收 1.63 kg 二氧化碳,主要计算原理如下^[28]:

$$CS = 1.63 \times \text{NPP} \quad (6)$$

1.2.6 生境质量(HQ)

生境质量在一定程度上反映了生态系统为物种的生存和繁殖提供必要条件的潜力,是生物多样性保护的关键^[29]。采用 InVEST 模型中的生境质量模块(Habitat Quality)估算色林错流域生境质量,计算原理如下^[26]:

$$Q_{xj} = H_j \left(1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z - K^z}\right)\right) \quad (7)$$

式中,当 j 为生境类型时, Q_{xj} 为栅格 x 的生境质量指数; H_j 为生境适宜性; K 为半饱和常数,默认值为 0.05,通常设置为 D_{xj} 最大值的一半; D_{xj} 为栅格 x 在生境类型为 j 时的退化指数; z 是一个标准化常数,通常设置为 2.5。

1.2.7 权衡与协同

为了揭示色林错流域 2000—2020 年长时间序列的生态服务权衡与协同效应。采用一种基于栅格单元的生态服务间具有时空连续性的权衡与协同关系及强度的定量评价方法。计算公式为^[7]:

$$TS = \frac{\text{Slope}_{ES_i}}{\text{Slope}_{ES_j}} \quad (8)$$

式中, TS 是生态服务权衡与协同的判定系数; Slope_{ES_i} 和 Slope_{ES_j} 分别是生态服务 i 和 j 2000—2020 年的变化趋势。如果 TS 的值为正,表明 ES_i 和 ES_j 具有相同变化趋势,则 ES_i 和 ES_j 被确定为协同作用,否则,它们之间存

在权衡。

$$RESI = TS \times \left(1 - \left| \frac{\text{Slope}_{ES_i_x} - \text{Slope}_{ES_i_{\min}}}{\text{Slope}_{ES_i_{\max}} - \text{Slope}_{ES_i_{\min}}} - \frac{\text{Slope}_{ES_j_x} - \text{Slope}_{ES_j_{\min}}}{\text{Slope}_{ES_j_{\max}} - \text{Slope}_{ES_j_{\min}}} \right| \right) \quad (9)$$

式中, RESI 是生态服务 i 与 j 权衡与协同的强度, 其中 $\text{Slope}_{ES_i_x}$ 和 $\text{Slope}_{ES_j_x}$ 是生态服务 i 和 j 的任意值, $\text{Slope}_{ES_i_{\min}}$ 和 $\text{Slope}_{ES_j_{\min}}$ 分别是生态服务 i 和 j 的最小值, $\text{Slope}_{ES_i_{\max}}$ 和 $\text{Slope}_{ES_j_{\max}}$ 分别是生态服务 i 和 j 的最大值。

1.2.8 影响因素分析

地理现象的空间异质性可通过地理探测器来探究其主要驱动因素。地理探测器假设: 如果一个自变量对因变量产生影响, 那么它们在空间分布上将呈现出一致性^[30]。本研究通过“因子探测器”探究各生态服务的驱动因子, 选取用于分析的因子主要分为四类, 包括气候因子(降水和气温), 植被因子(归一化植被指数和生态系统类型), 地形地貌因子(海拔), 人类活动因子(人类足迹)和土壤属性因子(土壤湿度和土壤有机碳)为自变量。因子探测器公式如下^[27, 30]:

$$q = 1 - \frac{\sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (10)$$

$$SSW = \sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2 \quad (11)$$

$$SST = N \sigma^2 \quad (12)$$

式中, q 值大小表明自变量对因变量的解释力强弱, i 表示自变量或因变量的分层; N_i 表示 i 层的单元数量, N 表示全域的单元数量; σ_i^2 表示层 i 内因变量的方差, σ^2 表示全域内因变量的方差; SSW 为不同层方差之和; SST 为全区总方差。

1.3 数据来源

本文利用多源数据(表1)评估了产水、土壤保持、固碳服务和生境质量, 并分析了色林错流域生态服务的权衡与协同及驱动因素。

表1 数据源

Table 1 Data source

| 数据名称 Data name | 分辨率 Resolution | 来源 Source | 网址 Web site |
|--|-------------------|--------------|---|
| 土地利用/土地覆被 Land use/land cover | 1 km | 资源环境科学数据平台 | https://www.resdc.cn/ |
| 植被类型 Vegetation type | — | | |
| 基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集 (v1.1) China soil map based harmonized world soil database (v1.1) | 1 km | 国家青藏高原科学数据中心 | http://data.tpdac.ac.cn/zh-hans/ |
| 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index (NDVI) | 1 km | 谷歌地球引擎 | https://code.earthengine.google.com/ |
| 净初级生产力 Net primary productivity (NPP) | 500 m | | |
| 数字高程模型 Digital elevation model (DEM) | 30 m | 地理空间数据云 | https://www.gscloud.cn/ |
| 气象数据(降水、温度、蒸发) Meteorological data (precipitation, temperature, evaporation) | 1 km | 国家地球系统科学数据中心 | http://data.cma.cn/ |
| 人类足迹 Human footprint | 1 km | 国际地球科学信息网络中心 | http://www.ciesin.org/ |

HWSD: 世界土壤数据库 Harmonized world soil database

2 结果与分析

2.1 色林错流域生态系统变化

色林错流域主要为草地、未利用地和水域,2000—2020 年水域面积增加最多,约为 147.09 km²,主要是由草地和未利用地转变而来(表 2),分别为 63.85 km²和 154.45 km²,集中在流域东部(图 2),同时,水域有 35.65 km²和 36.35 km²的分别转化为草地和未利用地。未利用地减少 103.16 km²,其中 122.69 km²和 154.45 km²分别转化为草地和水域,另有 136.85 km²和 36.35 km²的草地和水域转化为未利用地;草地减少 43.55 km²,主要有 136.85 km²和 63.85 km²转化为未利用地和水域。

表 2 色林错流域土地利用转移矩阵(2000—2020 年)
Table 2 Land use transfer matrix in Selinco Basin (2000—2020)

| 2020 年 | 2000 年 | | | | | | | | | | | | 总计 Total/ km ² |
|----------------------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|---------------------------------|
| | 草地 Grassland | | 水域 Water | | 未利用地 Unutilized land | | 林地 Forest | | 耕地 Cropland | | 其他 Other | | |
| | 面积 Area/ km ² | 比例 Ratio/% | |
| 草地 Grassland | 31407.66 | 99.26 | 35.65 | 0.47 | 122.69 | 0.65 | 33.52 | 2.28 | 0.07 | 0.84 | 0.00 | 0.15 | 31599.59 |
| 水域 Water | 63.85 | 0.20 | 7450.99 | 99.00 | 154.45 | 0.81 | 3.80 | 0.26 | — | — | — | — | 7673.09 |
| 未利用地 Unutilized land | 136.85 | 0.43 | 36.35 | 0.48 | 18696.53 | 98.46 | 15.59 | 1.06 | 0.07 | 0.80 | 0.01 | 1.47 | 18885.40 |
| 林地 Forest | 33.61 | 0.11 | 3.00 | 0.04 | 14.49 | 0.08 | 1418.79 | 96.40 | 0.02 | 0.30 | — | — | 1469.91 |
| 耕地 Cropland | 0.07 | 0.00 | — | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 7.88 | 96.15 | — | — | 8.03 |
| 其他 Other | 1.10 | 0.00 | — | 0.00 | 0.34 | 0.00 | — | — | 0.16 | 1.91 | 0.64 | 98.38 | 2.23 |
| 总计 Total | 31643.14 | 1.00 | 7526.00 | 1.00 | 18988.56 | 1.00 | 1471.71 | 1.00 | 8.19 | 100.00 | 0.65 | 1.00 | 59638.25 |

色林错流域 NDVI 呈南部和东北部高,中部低的空间分布特征(图 3)。近 20 年来的 NDVI 呈稳中有增的趋势(图 4),东北部和南部 NDVI 呈增加趋势,约占 46.29%,中部呈降低趋势,约占 47.72%。

2.2 生态服务时空变化特征

基于 2000—2020 年的产水、土壤保持、固碳服务和生境质量的综合评估结果,分析了各生态服务的空间分布及年际变化趋势(图 5)。2020 年色林错流域平均产水量为 56.23 mm,空间上呈东北部高,西南部低的特征,且由东北部向西北部递减;2000—2020 年产水略有降低,降低趋势为 -0.62 mm/a (图 6);在空间上,增加趋势的区域约占 28.33%,主要在西南部,呈降低趋势的区域约占 49.05%,主要分布在东北部。2020 年平均土壤保持量为 218.78 t/km²,土壤保持呈东北部和南部高,中部低的特征,呈现从中部向东北部和南部递增的特征;2000—2020 年土壤保持呈增加趋势,年平均增加幅度为 5.07 t/km²,空间上呈增加趋势的区域约占 47.03%,主要在南部区域,呈降低趋势区域约占 26.03%,主要在中部和东北部区域。2020 年平均固碳量为 132.01 g C/m²,固碳服务呈西南部高东北部较低的特征,且由西南部向东北部递减;2000—2020 年固碳量稳中有增,年增加趋势为 0.65 g C/m²,呈增加趋势的区域约占 58.21%,主要在北部和东北部区域,呈降低趋势的区域约占 20.41%,主要在西南部区域。2020 年平均生境质量指数为 0.71,生物多样性整体处于较高水平,区域差异较小;二十年来生境质量基本稳定,约 87.93%的区域生物多样性基本不变,局部区域有较小变化,呈增加趋势的

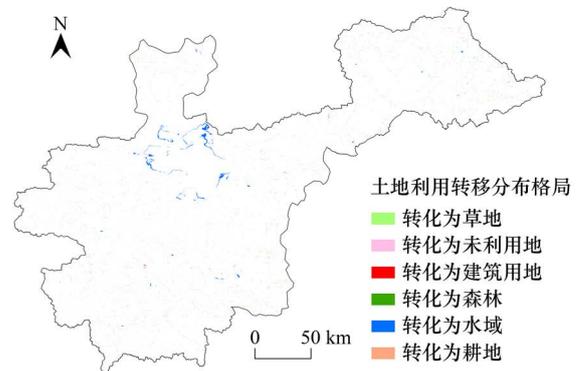


图 2 土地利用转移分布格局(2000—2020 年)
Fig.2 Distribution pattern of land use transfer (2000—2020)

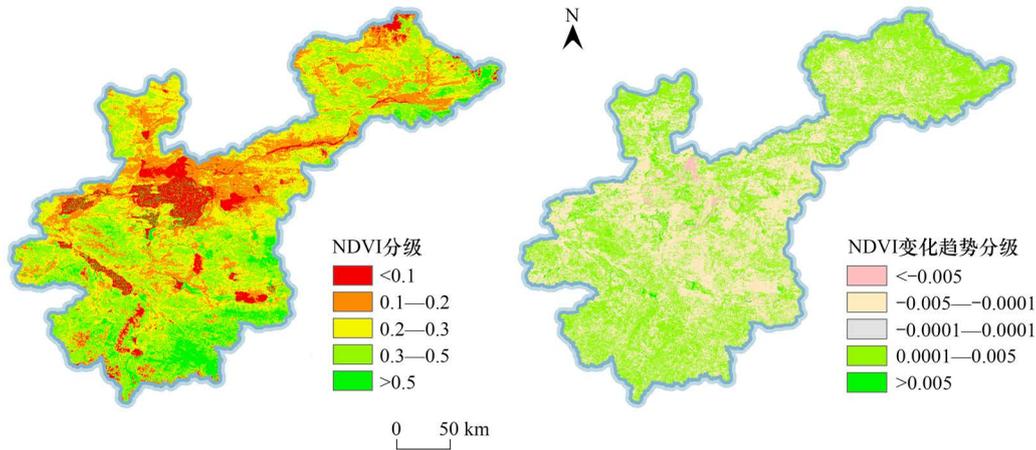


图3 色林错流域 NDVI 空间分布特征(2020 年)及变化趋势(2000—2020 年)

Fig.3 Spatial distribution of NDVI in Selinco Basin (2020) and its changing trend (2000—2020)

区域约占 3.11%,呈降低趋势的区域约占 8.96%。

2.3 生态服务权衡与协同

基于生态服务栅格数据,采用长时序生态服务权衡与协同计算方法,衡量了色林错流域生态服务间的权衡与协同关系(图 7)。产水与土壤保持、产水与固碳、产水与生境质量主要呈权衡关系,权衡区域集中在东北部和中部,面积占 73.33%—81.11%,协同关系主要分布在西南部,占 14.61%—19.19%。土壤保持与固碳、土壤保持与生境质量、固碳与生境质量主要呈协同关系,土壤保持与固碳呈协同关系面积约 79.33%,土壤保持与生境质量主要呈弱协同关系,面积约占 84.40%,固碳与生境质量呈权衡关系的面积约占 12.75%。

2.4 生态服务驱动因素分析

图 8 展示了影响生态服务的因子的风险空间分布以及对生态服务影响强度,分高(红)、中(灰)和低(蓝)三类。风险探测结果表明,各变量的空间分布格局趋同,但局部模式有所差异。高产水量的关键因子范围为:降水量>493 mm,年均温 ≤ -8.24 °C,NDVI 在 0.08—0.17 之间,低覆盖度草地生态系统,海拔>6328 m,人类足迹在 3.55—4.24 之间,土壤湿度>0.34,土壤有机碳在 2.02—2.70 g/kg 之间。降水和温度最适宜时,产水量超过 300 mm 区域分布在流域东北部;NDVI 最适宜时主要分布在北部及东北部区域,与产水最密切的海拔范围分布在东北部和西南部。高土壤保持量关键因子范围为:降水量>493 mm,温度 ≤ -11.2 °C,NDVI 在 0.35—0.43 之间,低覆盖度草地生态系统,海拔>5376 m,人类足迹在 2.76—3.55 之间,土壤湿度 ≤ 0.14 ,土壤有机碳在 1.26—1.41 g/kg 之间;土壤保持高值区与产水具有相似的降水分布范围,主要分布在流域东北部,高固碳量关键因子范围为:降水量在 382—409 mm 之间,温度在 -3.35 — -1.51 °C 之间,NDVI>0.53,草甸生态系统,海拔在 4978—5111 m 之间,人类足迹>11.80,土壤湿度>0.34,土壤有机碳在 1.41—1.65 g/kg 之间。当 NDVI 达到最适时,固碳能力超过 150 g C/m²,主要分布在流域南部。高生境质量关键因子范围为:降水量在 409—437 mm 之间,温度>0.21 °C,NDVI ≤ 0.08 ,海拔 ≤ 4626 m,人类足迹 ≤ 0.81 ,土壤湿度 ≤ 0.14 ,土壤有机碳在 0.98—1.00 g/kg 之间。

地理探测器的结果表明,色林错流域各生态服务的驱动因素存在差异(图 9)。对于产水服务,温度是解

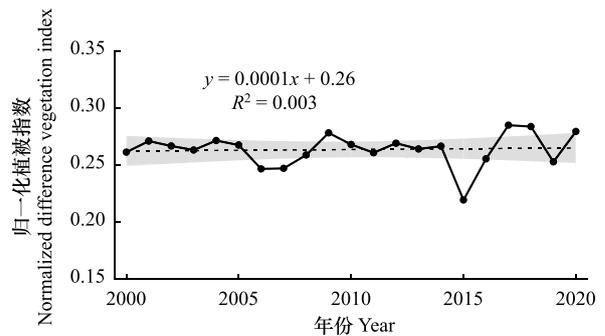


图4 色林错流域 NDVI 年际变化(2000—2020 年)

Fig.4 Interannual changes of NDVI in Selinco Basin (2000—2020)

图中灰色阴影代表线性回归的置信区间为 95%的置信带

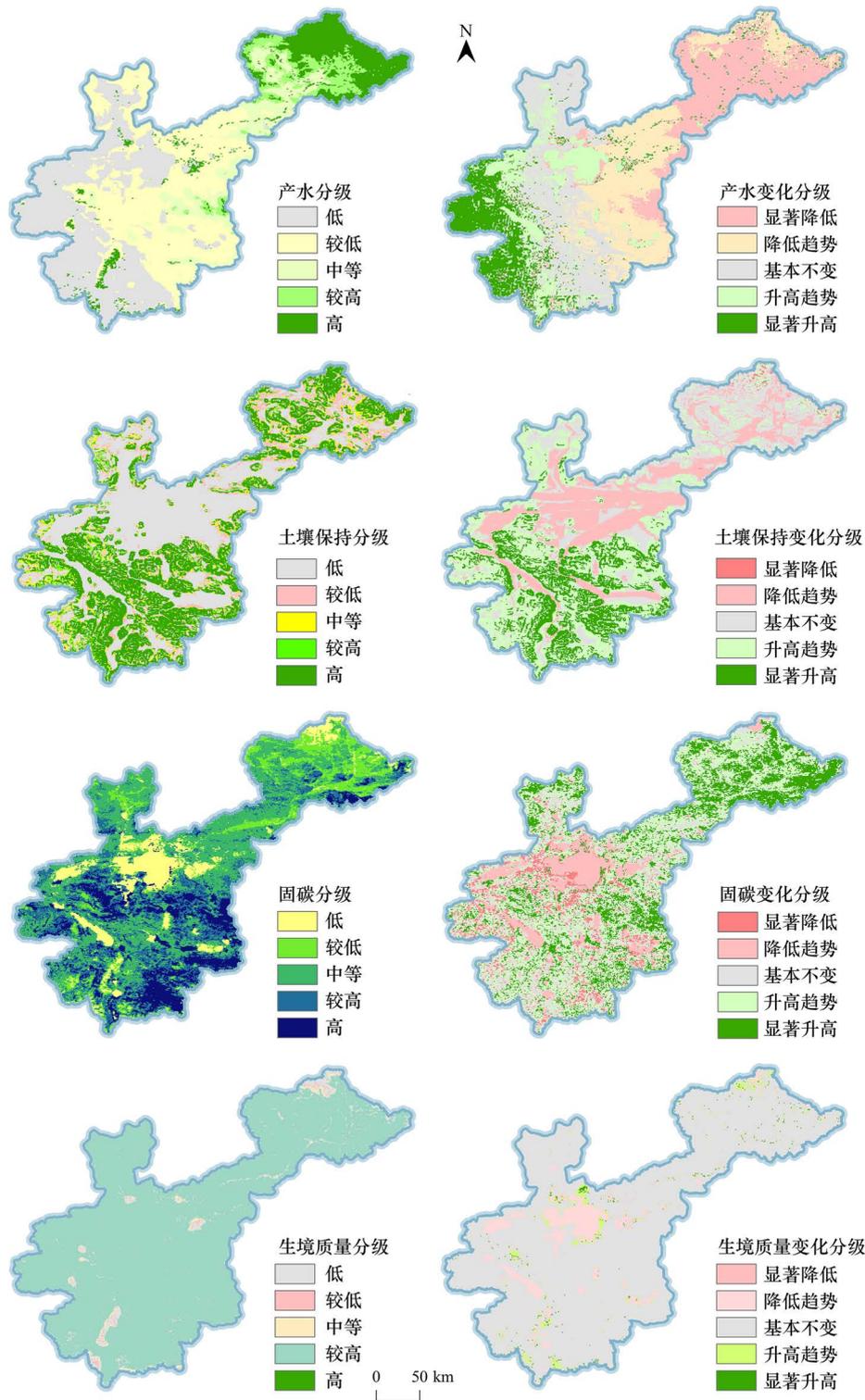


图 5 色林错流域生态服务空间分布特征(2020 年)及变化趋势(2000—2020 年)

Fig.5 Spatial distribution of ecosystem services in Selinco Basin (2020) and their changing trend (2000—2020)

释力最强的单因子为 0.41,其次是降水(0.18);温度与降水的交互作用对产水具有最高的解释力(0.52),其次为降水与 DEM 的交互作用(0.47)。对于土壤保持,DEM 是解释力最强的单因子(0.14),温度与 DEM 的交互作用对土壤保持具有最强的解释力,为 0.19;对于固碳服务,NDVI 是解释力最强的单因子(0.65),其次是土壤

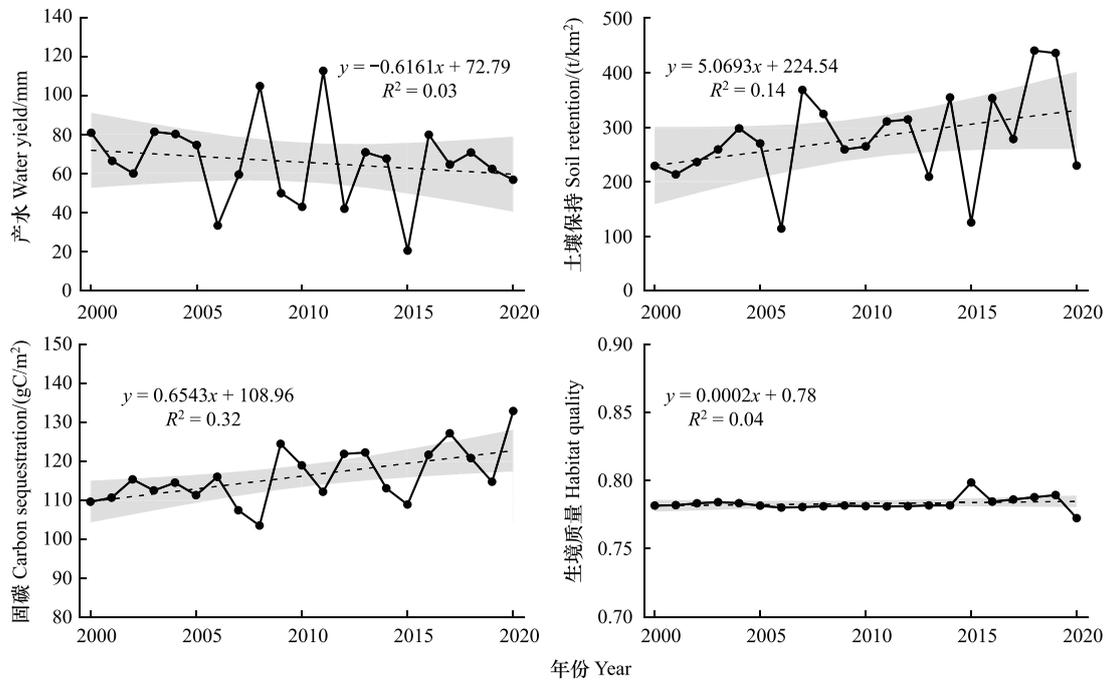


图 6 色林错流域生态服务年际变化 (2000—2020 年)

Fig.6 Changes of ecosystem services in Selinco Basin (2000—2020)

图中灰色阴影代表线性回归的置信区间为 95% 的置信带

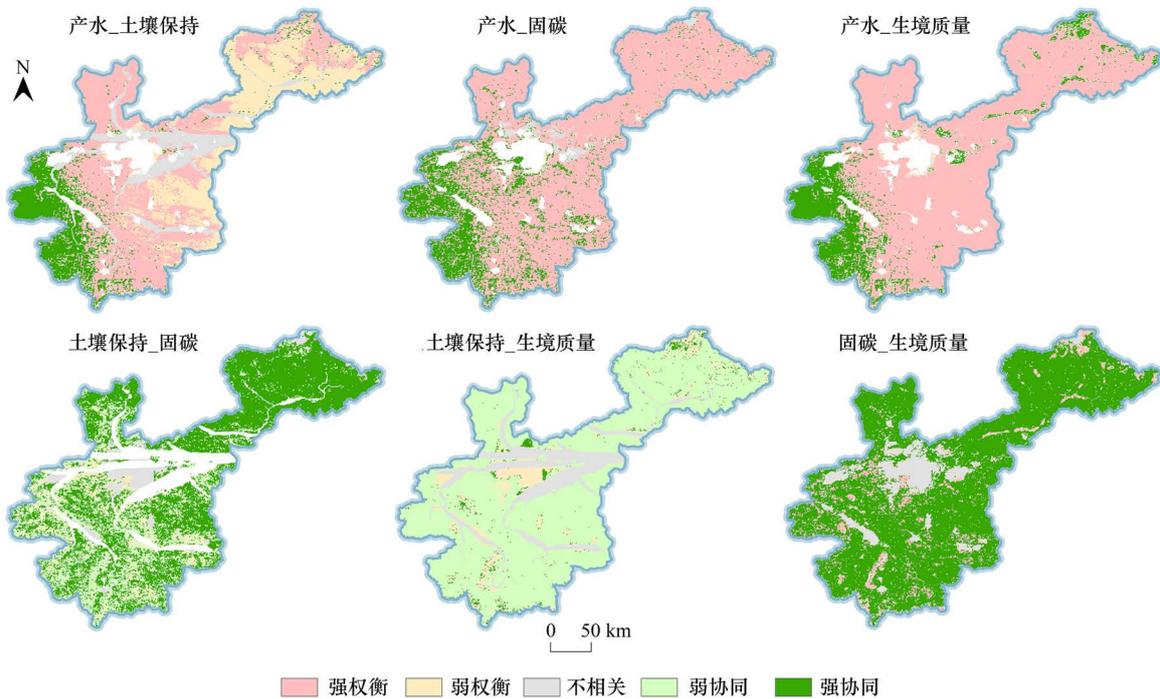


图 7 色林错流域生态服务权衡与协同

Fig.7 Trade-offs and synergies relationships of ecosystem services in Selinco Basin

有机碳(0.31), NDVI 与温度的交互作用具有最强的解释力, 为 0.72。对于生境质量, DEM 是解释力最强的单因子, 为 0.21, 其次是温度(0.20); NDVI、生态系统类型、土壤有机碳、温度和 DEM 与其他因子间的相互作用

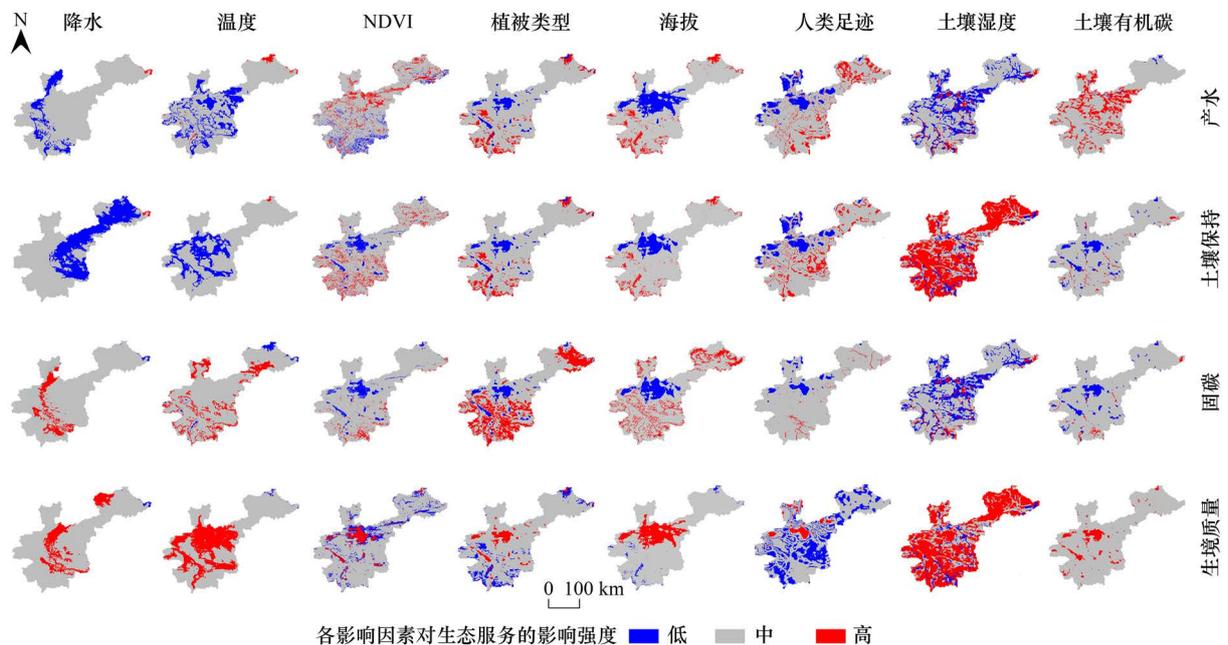


图 8 生态服务主要影响因素范围及分布

Fig.8 Scope and distribution of main influencing factors of ecosystem services

NDVI:归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index

对生境质量的解释力大小不相上下,均处于较高水平。

3 讨论

3.1 湖泊面积动态分析

色林错湖泊面积增长可能与温度和蒸散影响下的供水源变化有关。色林错流域内众多的湖泊通过河流串通形成西藏最大的内陆湖水系,湖泊面积和水量显著影响区域生态稳定性^[20]。本研究分析 2000 年和 2020 年两期土地利用数据,发现 2000—2020 年水域面积增长了 147.09 km²,主要因湖泊面积整体增加,与宋玉芝等^[17]的结果基本一致,但因数据源、精度和研究范围不同而存在一定差异。湖泊扩张是由多种供水来源驱动的,包括但不限于净降水量、上游地区的降水导致的径流量、积雪和冰川的融化过程^[31],但因地形地貌、温度、距离等因素的间接影响,不同的供水来源对每个湖泊的影响也不同。2000 年以来,青藏高原太阳净辐射增强,气温升高^[32],研究表明气温升高与色林错流域湖泊面积扩大呈正相关^[33]。随着气温上升,降水量呈现出明显的上升趋势,这与湖泊水位变化的空间分布特征基本一致^[34]。此外,研究表明 2002—2019 年藏北高原蒸发呈降低趋势,蒸发降低也是湖泊面积增大的原因^[35]。

3.2 生态服务变化分析

生态服务变化可能与气候变化导致的植被改善密切相关。2000—2020 年色林错流域的产水、土壤保持、固碳服务和生境质量的结果在数值上与前人的研究结果基本一致^[7, 36]。其中,产水服务呈轻微降低趋势,这可能是由于近年来藏北地区呈暖湿化的趋势^[37-38],降水量增加^[37, 39],植被覆盖度增加^[40],地表截留能力增强,产水主要进入生态系统,生态系统的水源涵养能力增强,从而导致地表产水量呈轻微的降低趋势。2000—2020 年,土壤保持和固碳服务均呈稳中有增的趋势,这也可能是藏北地区在暖湿化的气候变化背景下^[37, 39],环境条件更利于植被生长,植被长势良好,植被通过光合作用能固定更多空气中的二氧化碳,固碳服务增加,由被植被根系截留的泥沙也增加,土壤保持服务增强。1993 年来,色林错实施生态保护区^[41],有效地遏制了草地退化,生物生存的环境得以保护与维持,因此生境质量基本保持不变。

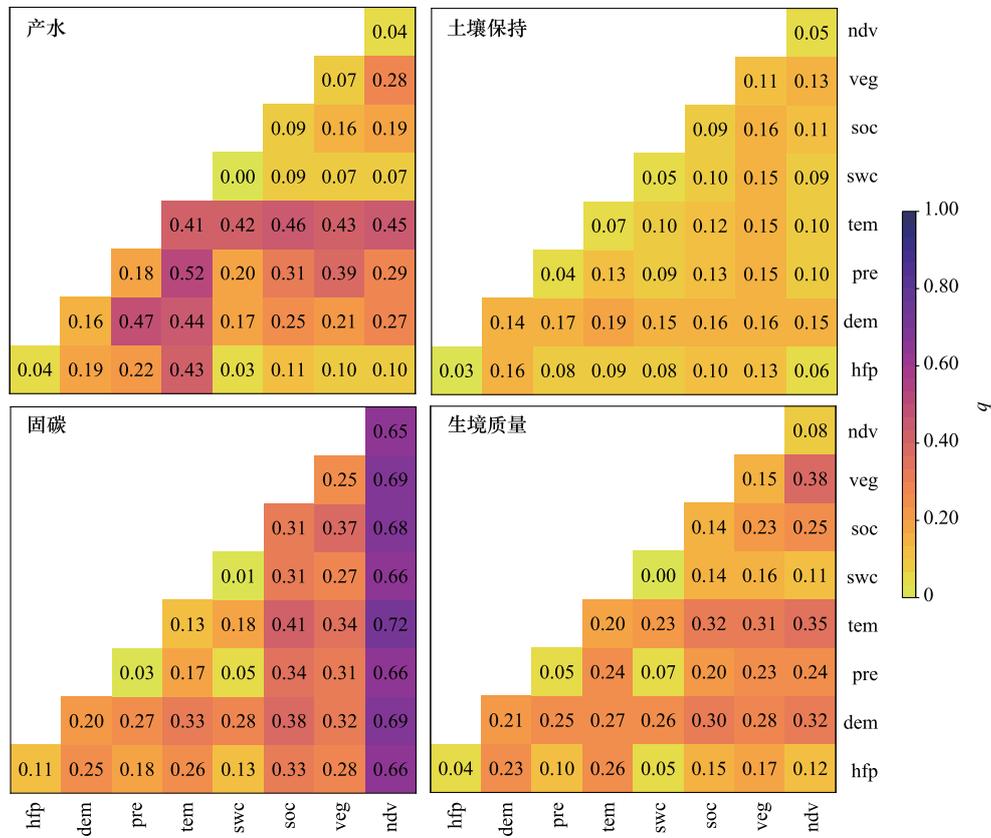


图9 生态服务主要驱动因素分析

Fig.9 Contributions of driving factors of ecosystem services

hfp:人类足迹 Human footprint; dem:数字高程模型 Digital elevation mode; pre:降水 Precipitation; tem:温度 Temperature; swc:土壤湿度 Soil water content; soc:土壤有机碳 Soil organic carbon; veg:生态系统类型 Vegetation type; ndv:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; q:解释力

生态服务主要受植被生长发育不可或缺的条件影响。对色林错流域生态服务驱动因素进行分析,流域内产水服务受温度影响较多,藏北地区气候变暖^[37],导致区域降水增加,加速冰川积雪的融化^[34],因此温度与产水服务的影响较为密切。而流域内水土保持服务主要受到DEM和温度影响,流域中部地区地势较为平坦,但在西南部和东北部区域地势较高,在气候变暖作用的影响下,冰川融化^[34],可能土壤侵蚀作用会更加明显,因此DEM和温度对水土保持的影响较大。固碳服务和生境质量受NDVI、生态系统类型、温度和土壤有机碳的影响较大,这是因为固碳服务和生境质量主要受到土地覆被空间格局的影响,温度、降水和土壤有机碳等都是植被发育不可或缺的生长条件。

3.3 局限性与不足

本研究虽揭示了色林错流域生态服务权衡协同关系及影响因素,但仍存在一定的局限性与不足。首先,选取的四种关键生态服务不能全面的表征研究区生态服务,未来将加入更多生态服务类型,开展多尺度评估。其次,生态服务年际统计,受限于遥感数据时间跨度短,致统计趋势不显著,后续将通过多源数据,扩大时间尺度以增强数据统计意义。再者,在模型评估中,InVEST模型简化了水文过程,忽略了地表水与地下水的相互作用和地形的影响^[36];水土保持评估依赖USLE模型,只表征河流/河流间侵蚀,未涵盖大规模侵蚀过程^[42];基于NPP评估生态系统固碳,该方法依赖具有较强的时空异质性的气候、土壤和植被等外部环境条件,可能导致结果的不确定性,且受数据质量、空间分辨率影响较大;由于缺乏物种分布数据,生境质量模块主要通过土地利用来设置模型参数,未考虑不同物种对生境的适宜性和对威胁源的敏感性不同^[43]。此外,由于研究区

地处高原腹地,气候恶劣,流域内气象站点稀缺,且空间分布不均匀等问题^[44],本研究只能在有限的监测站点数据基础上进行相关研究。本研究中,地理探测器只能定量分析气候、地形、人类活动、植被和土壤等因子对生态服务的影响,但无法解释其交互作用机制^[27]。尽管存在一定不足,但我们认为本研究仍具有重要的科学价值,研究结果可为政府决策者理解色林错流域生态服务时空变化特征、相互关系和驱动因素,进而制定更有针对性的生态保护措施以应对全球气候变化。

4 结论

(1) 2000—2020 年水域面积增加了约 147.09 km²,主要是由草地和未利用地转变而来。20 年来 NDVI 总体稳中有增,东北部和南部呈增加趋势,约占 46.29%,中部呈降低趋势,约占 47.72%。

(2) 2000—2020 年流域的单位面积年平均产水、土壤保持、固碳和生境质量分别为 56.23 mm, 218.78 t/km², 132.01 g C/m² 和 0.71, 呈不同的空间分布特征,产水东北高西南低,土壤保持呈中部低两侧高,固碳呈西南向东北递减,生境质量空间异质性较小;二十年来,产水、土壤保持和固碳呈现增加趋势的区域占流域的 28.33%—58.21%,生境质量较为稳定,约 87.93% 的区域生物多样性基本保持稳定。

(3) 各生态服务间的权衡与协同关系存有所不同,产水与土壤保持、固碳、生境质量在西南部呈协同关系,约占 73.33%—81.11%,在东北部呈权衡关系,约占 14.61%—19.19%,而土壤保持与固碳、生境质量,固碳与生境质量呈协同关系,其中固碳与生境质量整体呈强权衡关系。

(4) 流域生态服务主要受气温、降水和植被等因素影响,温度和降水是产水的主要驱动因素,海拔是土壤保持和生境质量的主要驱动因素,植被是固碳的主要驱动因素。本研究关注色林错流域长时序生态服务趋势,增进对色林错生态系统发展演变规律的理解,有利于全面分析其权衡与协同关系,对于维护区域生态安全和促进生态服务的可持续供应具有重要意义。

参考文献 (References):

- [1] Mea. Millenium Ecosystem Assessment: Ecosystems and Human Well-Being-Synthesis. 2005.
- [2] 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. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 189: 106767.
- [3] Schaller L, Targetti S, Villanueva A J, Zasada I, Kantelhardt J, Arriaza M, Bal T, Fedrigotti V B, Giray F H, Häfner K, Majewski E, Malak-Rawlikowska A, Nikolov D, Paoli J C, Piorr A, Rodríguez-Entrena M, Ungaro F, Verburg P H, van Zanten B, Viaggi D. Agricultural landscapes, ecosystem services and regional competitiveness—Assessing drivers and mechanisms in nine European case study areas. *Land Use Policy*, 2018, 76: 735-745.
- [4] Chen W X, Chi G Q, Li J F. The spatial aspect of ecosystem services balance and its determinants. *Land Use Policy*, 2020, 90: 104263.
- [5] Hanna D E L, Tomscha S A, Ouellet Dallaire C, Bennett E M. A review of riverine ecosystem service quantification: Research gaps and recommendations. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 55(3): 1299-1311.
- [6] 夏哲一, 刘黎明, 袁承程, 魏雪, 黄家嗣, 王怡. 基于社会-生态耦合视角的城市边缘区生境服务评估与分区. *生态学报*, 2024, 44(4): 1501-1513.
- [7] Yuan Z R, Liang Y L, Zhao H, Wei D, Wang X D. Trade-offs and synergies between ecosystem services on the Tibetan Plateau. *Ecological Indicators*, 2024, 158: 111384.
- [8] Li Q, Bao Y, Wang Z T, Chen X T, Lin X. Trade-offs and synergies of ecosystem services in Karst multi-mountainous cities. *Ecological Indicators*, 2024, 159: 111637.
- [9] 王世豪, 徐新良, 黄麟, 师华定, 谷庆宝, 刘寒冰. 东北黑土区生态系统服务权衡与协同. *生态学报*, 2024, 44(21): 9504-9519.
- [10] Huang J M, Zheng F Y, Dong X B, Wang X C. Exploring the complex trade-offs and synergies among ecosystem services in the Tibet Autonomous Region. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 384: 135483.
- [11] Bai Y, Wong C P, Jiang B, Hughes A C, Wang M, Wang Q. Developing China's Ecological Redline Policy using ecosystem services assessments for land use planning. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3034.
- [12] Deng Z Y, Cao J S. Incorporating ecosystem services into functional zoning and adaptive management of natural protected areas as case study of the Shennongjia region in China. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 18870.
- [13] Xi Y, Peng S S, Liu G, Ducharme A, Ciais P, Prigent C, Li X Y, Tang X T. Trade-off between tree planting and wetland conservation in China. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1967.
- [14] Shen J, Zhao M D, Tan Z D, Zhu L N, Guo Y H, Li Y F, Wu C Y. Ecosystem service trade-offs and synergies relationships and their driving factor analysis based on the Bayesian belief Network: a case study of the Yellow River Basin. *Ecological Indicators*, 2024, 163: 112070.
- [15] Vallet A, Locatelli B, Levrel H, Wunder S, Seppelt R, Scholes R J, Oszward J. Relationships between ecosystem services: comparing methods for

- assessing tradeoffs and synergies. *Ecological Economics*, 2018, 150: 96-106.
- [16] Feng Z, Jin X R, Chen T Q, Wu J S. Understanding trade-offs and synergies of ecosystem services to support the decision-making in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Land Use Policy*, 2021, 106: 105446.
- [17] 宋玉芝, 德吉玉珍. 近30年色林错湖面变化特征及其对气候变化的响应. *南京信息工程大学学报: 自然科学版*, 2023, 15(1): 24-33.
- [18] Ma N, Zhang Y S, Guo Y H, Gao H F, Zhang H B, Wang Y F. Environmental and biophysical controls on the evapotranspiration over the highest alpine steppe. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 980-992.
- [19] 刘金凤, 田碧青, 吴常雪, 丁莹莹, 高鹏, 穆兴民. 1976—2021年纳木错和色林错湖泊面积变化及驱动因素分析. *盐湖研究*, 2024, 32(3): 61-68.
- [20] 柳林, 江利明, 相龙伟, 汪汉胜, 孙亚飞, 许厚泽. 青藏高原色林错流域区冰川消融对湖泊水量变化的影响. *地球物理学报*, 2019, 62(5): 1603-1612.
- [21] 邵雪楠, 王宁练, 吴玉伟, 张玉杰. 近20a色林错湖冰物候变化特征及其影响因素. *湖泊科学*, 2022, 34(1): 334-348.
- [22] 刘志伟, 李胜男, 郭燕红, 马宁, 张寅生. 青藏高原色林错流域高寒草原坡面产流特征及其影响因素. *生态学杂志*, 2021, 40(8): 2388-2399.
- [23] 杜鹃, 杨太保, 何毅. 1990—2011年色林错流域湖泊-冰川变化对气候的响应. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(12): 88-93.
- [24] 贾静, 宿星, 张军, 路常亮. 1985—2020年甘肃省通渭县滑坡区土地利用变化及驱动力. *应用生态学报*, 2024, 35(10): 2833-2841.
- [25] 胡仁杰, 陈璇黎, 陈金, 张世荣, 匡依利, 于红妍, 吉汉忠, 赵晓军, 宜树华, 孟宝平, 李猛. MODIS NDVI饱和性和性对高寒草甸草地生物量遥感估测的影响. *生态学报*, 2024, 44(14): 6357-6372.
- [26] Natural Capital Project, 2024. InVEST 3.14.2. Stanford University, University of Minnesota, Chinese Academy of Sciences, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, Stockholm Resilience Centre and the Royal Swedish Academy of Sciences. (2024) <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>
- [27] Peng J, Tian L, Zhang Z M, Zhao Y, Green S M, Quine T A, Liu H Y, Meersmans J. Distinguishing the impacts of land use and climate change on ecosystem services in a Karst landscape in China. *Ecosystem Services*, 2020, 46: 101199.
- [28] Li J, Zhou Z X. Natural and human impacts on ecosystem services in Guanzhong - Tianshui economic region of China. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2016, 23(7): 6803-6815.
- [29] Sun X Y, Jiang Z, Liu F, Zhang D Z. Monitoring spatio-temporal dynamics of habitat quality in Nansihu Lake basin, Eastern China, from 1980 to 2015. *Ecological Indicators*, 2019, 102: 716-723.
- [30] Wang J F, Li X H, Christakos G, Liao Y L, Zhang T, Gu X, Zheng X Y. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127.
- [31] Zhang G Q, Yao T D, Chen W F, Zheng G X, Shum C K, Yang K, Piao S L, Sheng Y W, Yi S, Li J L, O'Reilly C M, Qi S H, Shen S S P, Zhang H B, Jia Y Y. Regional differences of lake evolution across China during 1960s—2015 and its natural and anthropogenic causes. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 221: 386-404.
- [32] Li N, Cuo L, Zhang Y X, Ding J. The synthesis of potential factors contributing to the asynchronous warming between air and shallow ground since the 2000s on the Tibetan Plateau. *Geoderma*, 2024, 441: 116753.
- [33] Wang Y H, Yang K, Jia T F, Luo Y. Influence of natural factors and land use change on changes in the main lake area in China over the past 30 years. *Ecological Indicators*, 2023, 155: 111005.
- [34] 陈军, 刘延昭, 曹立国, 胡建茹, 刘水林. 青藏高原湖泊变化遥感监测及水量平衡定量估算研究进展. *冰川冻土*, 2022, 44(4): 1203-1215.
- [35] 余文君, 赵林, 李艳忠, 南卓铜, 赵拥华. 基于互补相关理论的青藏高原蒸发散发时空变化及其影响因素. *生态学报*, 2024, 44(12): 5024-5039.
- [36] Wang Y H, Dai E F. Spatial-temporal changes in ecosystem services and the trade-off relationship in mountain regions: a case study of Hengduan Mountain region in Southwest China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 264: 121573.
- [37] Yu Y F, You Q L, Zhang Y Q, Jin Z, Kang S C, Zhai P M. Integrated warm-wet trends over the Tibetan Plateau in recent decades. *Journal of Hydrology*, 2024, 639: 131599.
- [38] 陈发虎, 谢亭亭, 杨钰杰, 陈圣乾, 陈峰, 黄伟, 陈婕. 我国西北干旱区“暖湿化”问题及其未来趋势讨论. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53(6): 1246-1262.
- [39] Yao T D, Thompson L, Yang W, Yu W S, Gao Y, Guo X J, Yang X X, Duan K Q, Zhao H B, Xu B Q, Pu J C, Lu A X, Xiang Y, Kattel D B, Joswiak D. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nature Climate Change*, 2012, 2(9): 663-667.
- [40] Ma S, Wang L J, Jiang J, Chu L, Zhang J C. Threshold effect of ecosystem services in response to climate change and vegetation coverage change in the Qinghai-Tibet Plateau ecological shelter. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 318: 128592.
- [41] 朱美媛. 近42a西藏色林错流域湿地变化与生态脆弱性评价[D].北京:中国地质大学(北京), 2020.
- [42] Marques S, Campos F, David J, Cabral P. Modelling sediment retention services and soil erosion changes in Portugal: a spatio-temporal approach. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, 10: 262.
- [43] Tang F, Wang L, Guo Y Q, Fu M C, Huang N, Duan W S, Luo M, Zhang J J, Li W, Song W. Spatio-temporal variation and coupling coordination relationship between urbanisation and habitat quality in the Grand Canal, China. *Land Use Policy*, 2022, 117: 106119.
- [44] Li D, Yang K, Tang W J, Li X, Zhou X, Guo D L. Characterizing precipitation in high altitudes of the western Tibetan Plateau with a focus on major glacier areas. *International Journal of Climatology*, 2020, 40(12): 5114-5127.