

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.021

刘静, 项嘉仪, 张东海, 等. 基于多源地理数据的西南高山峡谷区生态系统服务评估及权衡与协同关系[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 214-223.

LIU Jing, XIANG Jiayi, ZHANG Donghai, et al. Evaluation of ecosystem services and tradeoff and synergy in the alpine and canyon region of Southwest China based on multi-source geographic data[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 214-223.

基于多源地理数据的西南高山峡谷区生态系统 服务评估及权衡与协同关系

刘 静, 项嘉仪, 张东海, 兰梦瑶, 关颖慧

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘 要: [目的] 西南高山峡谷区是国家“三区四带”重要生态安全屏障, 对保障国家生态安全和区域高质量发展具有重要作用, 但目前尚不明确该区生态系统服务及其权衡与协同关系。[方法] 基于 InVEST 模型、RUSLE 模型和 WR 指数, 结合多源地理数据集, 系统评估了西南高山峡谷区 2000—2020 年 3 种典型生态系统服务, 并揭示其权衡与协同关系。[结果] (1) 2000—2020 年, 西南高山峡谷区固碳和水源涵养服务稳步提升, 年均固碳服务由 $1\ 927\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 增加到 $1\ 985\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, WR 指数从 0.062 升至 0.067。空间上固碳从西北向东南逐渐递增, 水源涵养呈较强的空间异质性; 土壤保持服务整体处于恶化态势, 从 $263.50\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 降至 $226.25\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 其中滇西北高山峡谷生态维护区降幅达 27.50%。(2) 2000—2020 年, 生态系统服务热点区面积占比增加 5.41%, 整体呈“一类热点区 > 非热点区 > 二类热点区 > 三类热点区”的分布规律。(3) 固碳服务与水源涵养服务、固碳服务与土壤保持服务整体表现为协同关系, 协同关系面积占比分别为 54.91%, 44.46%, 主要位于藏东南高寒高山峡谷生态维护区和藏东、川西高山峡谷生态维护水源涵养区; 水源涵养服务与土壤保持服务整体表现为权衡关系, 协同关系面积占比仅为 20.14%。[结论] 研究结果可为西南高山峡谷区科学制定和实施生态保护政策, 优化资源管理策略提供必要参考。

关键词: 西南高山峡谷区; 生态系统服务; 权衡; 协同

中图分类号: K903

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)06-0214-10

Evaluation of Ecosystem Services and Tradeoff and Synergy in the Alpine and Canyon Region of Southwest China Based on Multi-source Geographic Data

LIU Jing, XIANG Jiayi, ZHANG Donghai, LAN Mengyao, GUAN Yinghui

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

Abstract: [Objective] The alpine and canyon region of Southwest China is a crucial ecological security barrier within the national “Three Zones and Four Belts” strategy, and it plays an essential role in ensuring national ecological security and promoting regional high-quality development. However, the ecosystem services and their trade-offs and synergies in this area remain unclear. [Methods] Three typical ecosystem services in the alpine and canyon region of southwest China from 2000 to 2020 were systematically evaluated using the InVEST model, RUSLE model, and WR index, in combination with multi-source geographic datasets. [Results] (1) From 2000 to 2020, carbon sequestration and water retention services in the alpine and canyon region of southwest China were steadily improved, with annual carbon sequestration increasing from $1\ 927\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ to $1\ 985\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, and the WR index rising from 0.062 to 0.067. Spatially, carbon sequestration gradually increased from northwest to southeast, while water retention exhibited strong spatial heterogeneity. In contrast, soil retention services was overall deteriorated, decreasing from $263.50\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ to $226.25\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, with a reduction of 27.50% in the northwest Yunnan alpine canyon ecological

收稿日期: 2024-07-01

修回日期: 2024-08-04

录用日期: 2024-08-10

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-12-09

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFF1302905, 2022YFF1302900)

第一作者: 刘静 (1998—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事生态系统服务、水土保持效益评估研究。E-mail: liujingx77@163.com

通信作者: 关颖慧 (1988—), 女, 博士, 副教授, 主要从事气候变化与水沙关系、土壤侵蚀与植被恢复研究。E-mail: gyh@bjfu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

maintenance zone. (2) The proportion of the area of ecosystem service hotspot areas increased by 5.41%, following a distribution pattern of the first-class hotspot areas > the non-hot spot areas > the second-class hotspot areas > the third-class hotspot areas from 2000 to 2020. (3) Carbon sequestration services exhibited a synergistic relationship with both water retention services and soil retention services, with synergy areas accounting for 54.91% and 44.46% of the total area, respectively. These synergies were mainly located in the southeastern Tibetan alpine canyon ecological maintenance zone and the eastern Tibetan-western Sichuan alpine canyon ecological maintenance and water retention zone. However, water retention and soil retention services displayed a trade-off relationship, with the synergy area accounting for only 20.14% of the total area. [Conclusion] The results can provide necessary references for scientifically formulating and implementing ecological protection policies and optimizing resource management strategies in the alpine and canyon region of Southwest China.

Keywords: the alpine and canyon region of southwest China; ecosystem services; tradeoff; synergy

Received: 2024-07-01

Revised: 2024-08-04

Accepted: 2024-08-10

Online(www.cnki.net): 2024-12-09

生态系统服务是指生态系统与生态过程所形成的、维持人类生存的自然环境条件及其效用^[1],它包括人类从生态系统中直接和间接得到的所有收益^[2]。随着全球环境变化和人类活动的加剧,生态系统服务在不同程度上退化^[3]。在此背景下,如何量化和评估生态系统服务及其权衡协同关系,实现区域可持续发展并提升人类福祉成为全球的热点问题。

生态系统服务的概念最早由 COSTANZA 等^[2]提出,并于 1997 年首次对其进行全球评估。此后,国内外学者基于不同尺度(流域^[3]、区域^[4]、国家^[5])和土地利用类型(如草地^[6]、林地^[7]、湖泊^[8]、湿地^[9]、农田^[10]等)对生态系统服务物质和价值量进行了详细评估。随着研究的深入,人们发现生态系统服务之间往往存在复杂的权衡与协同关系。深入理解不同生态系统服务之间的相互关系,不仅有助于优化生态系统管理策略,还能为实现生态系统服务的可持续供给提供科学依据。为准确衡量生态系统服务之间的权衡与协同作用,庞彩艳等^[3]采用相关性分析和空间自相关分析的方法,评估了黄河上段流域生态系统服务的权衡协同关系,发现黄河上段流域具有显著的空间异质性和尺度效应;XUE 等^[11]从综合的角度提出了一个新的框架,可以在空间上识别生态系统服务之间的权衡协同关系并定量描述其强度;XIA 等^[12]则基于网格尺度和流域尺度,对钱塘江流域生态系统服务权衡协同关系、生态系统服务簇、驱动因子间的差异进行分析,并制定了不同空间尺度的空间规划策略。目前,针对生态系统服务权衡与协同关系量化识别,可以划分为 3 类,即基于关系识别和具体表征的权衡分析、基于权衡模拟预测和模型量化分析及基于生态系统服务权衡管理优化的多准则分析^[13]。总体来看,学者们运用多种方法,在生态系统服务权衡与

协同的关系识别方面取得诸多成就,但研究区域主要集中在城市群或经济带^[14]及热点流域^[3]等。

西南高山峡谷区是国家“三区四带”重要生态安全屏障,覆盖大横断“七脉六江”,岭谷落差极大,海拔 3 500 m 以上高山区约 65%,气候垂直地带性特点显著,生态系统极其脆弱。近年来,西南高山峡谷区也面临着日益严重的生态退化风险,特别是在复杂地形地质约束、复合侵蚀营力(水力—冻融—重力)驱动、少数民族聚集区耕种活动扰动、水电开发利用等影响下,该区生态系统退化的态势尚未得到有效遏制。全面评估该区域的生态系统服务,可科学、有效地指导该区生态系统修复与管理。然而,关于西南高山峡谷区的研究还存在一定的不足:从研究内容上看,目前主要集中在地质灾害评价、植被对气候变化的响应^[15-16]、土壤侵蚀空间分异^[17]等方面;从研究区域上看,相关研究多集中在青藏高原^[18]、怒江流域^[19]、喀斯特区域^[20]等复杂地理单元或者特定行政区域^[4]。因此,迫切需要厘清西南高山峡谷区生态系统服务的时空格局及其权衡与协同关系,以全面评估生态系统功能的变化趋势,应对和缓解该区域的生态退化风险。

鉴于此,本研究以西南高山峡谷区为研究对象,基于多源地理数据,采用 InVEST、RUSLE 和 WR 指数,系统揭示 2000—2020 年该区固碳、水源涵养、水土保持 3 种重要生态系统服务的时空分异特征及其权衡与协同关系。研究结果将补充和扩展西南高山峡谷区关于生态系统服务权衡与协同关系的理论支撑和数据依据,为该区域科学制定和实施生态保护政策、优化资源管理策略提供必要参考。

1 研究区概况

西南高山峡谷区(24°58′07″—32°51′25″N,91°23′

48°—104°13′44″E)位于我国西南边陲,涉及藏、川、滇三省,面积约 60 万 km²,该区地处大横断“七脉六江”,岭谷高差极为悬殊,海拔 3 500 m 以上高山区约 65%,2 000~3 500 m 的中山区约 25%,2 000 m 以下中低山河谷区约 10%(图 1)。研究区气候空间分异显著,多年平均气温为-2.98~21.89℃,平均降水量为 296.62~2 302.90 mm,均呈北低南高的空间分布^[15]。复杂多变的地形和气候条件造就西南高山峡谷区的植被多样性^[17]。灌木和针叶林是研究区内最广泛分布且面积占比最大的植被类型,构成主要的植被群落。研究区北部主要覆盖草甸、草原和高山植被,而南部则以针阔混交林和阔叶林为主。根据《全国水土保持区划》^[21]二级区划并考虑到研究区行政单位的完整性,将西南高山峡谷区划分为 4 个区域。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

研究数据主要包括土地利用、净初级生产力(NPP)、土壤、气象、DEM、NDVI 等数据。数据预处理过程为:将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水体、城

镇用地及未利用地 6 种^[22];利用 ArcGIS 10.6 提取土壤数据的部分属性,即沙含量、淤泥含量、黏土含量、土壤质地分类和有机碳含量;基于月 NDVI 数据采用最大法合成提取出年度 NDVI 数据。在对数据进行裁剪后,分辨率统一为 250 m,投影坐标统一设置为 Asia_South_Albers_Equal_Area_Conic。数据详细介绍见表 1。

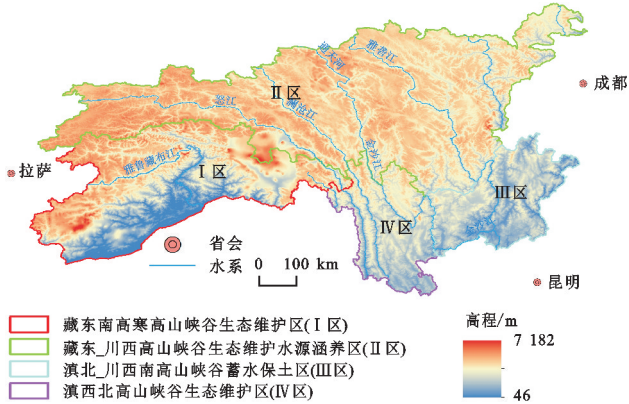


图 1 西南高山峡谷区分区

Fig.1 Overview of the subdivisions of the alpine and canyon region of Southwest China

表 1 西南高山峡谷区基础数据信息与来源

Table 1 Basic data information and sources of the alpine and canyon region of Southwest China

数据类型	来源	分辨率/m	数据用途
土地利用数据	GlobeLand30(http://globeland30.org/)	30	计算固碳服务、P 因子
NPP 数据	资源环境与科学数据中心(https://www.resdc.cn/Default.aspx)	250	计算 WR 指数
土壤数据	世界土壤数据库 HWDSD(https://www.fao.org/)	250	计算土壤渗流因子、K 因子
气象数据	国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn/)	—	计算平均降水量因子、R 因子
DEM 数据	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)	90	提取 LS 因子
NDVI 数据	美国国家航空和航天局(https://www.nasa.gov/)	250	计算 C 因子

2.2 研究方法

2.2.1 固碳服务 生态系统固碳服务主要包括植物固碳和土壤碳储存 2 部分。InVEST 模型^[23]是目前广泛应用于评估生态系统固碳服务的方法,原理为:

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (1)$$

式中, C_{total} 为总碳储量; C_{above} 为地上植被碳储量(kg/m²); C_{below} 为地下植被碳储量(kg/m²); C_{soil} 为土壤碳储量(kg/m²); C_{dead} 为有机质的碳储量(kg/m²)。

碳密度的确定通过收集地方性相关文献的研究成果和全国性的地类碳密度数据。由于研究区过大,本研究搜集了甘肃、成渝地区、云贵等地^[23-25]的碳密度数据,参照《2010 年中国陆地生态系统碳密度数据集》^[26],经过选择和取均值法后,最终确定各土地利用类型碳密度,见表 2。

2.2.2 水源涵养服务 常见的评估水源涵养服务的方法有 InVEST 模型法,但 InVEST 模型参数众多,而西南高山峡谷区地形复杂多变,区域差异显著,模

型调参和本地化校准具有一定的复杂性和挑战性。相比之下,水源涵养服务能力指数(WR 指数)能够避免西南高山峡谷区区域差异导致的参数适用性问题。因此,本研究选择生态环境部 2015 年印发的《生态功能红线划定技术指南》^[27]中提出的 WR 指数评价水源涵养服务能力。该模型表示为:

$$WR = NPP_{mean} \times F_{sic} \times F_{pre} \times (1 - F_{slo}) \quad (2)$$

式中:WR 为水源涵养服务能力指数(无量纲); NPP_{mean} 为研究区多年净初级生产力平均值(无量纲); F_{sic} 为土壤渗流因子(无量纲); F_{pre} 为多年平均降水量因子(无量纲); F_{slo} 为坡度因子(无量纲),在 4 种因子计算完毕后,均进行归一化处理。

2.2.3 水土保持服务 本研究采用修正土壤流失方程(RULSE)来计算水土保持服务^[28],计算原理为:

$$A_1 = R \times K \times L \times S \quad (3)$$

$$A_2 = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (4)$$

$$A = A_1 - A_2 \quad (5)$$

式中: A 为土壤保持量 $[t/(hm^2 \cdot a)]$; A_1 为潜在土壤侵蚀量 $[t/(hm^2 \cdot a)]$; A_2 为实际土壤侵蚀量 $[t/(hm^2 \cdot a)]$; R 为降雨侵蚀力 $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$; K 为土壤可蚀性因子 $[(t \cdot hm^2 \cdot h)/(MJ \cdot mm \cdot hm^2)]$; LS 为坡长坡度因子; C 为植被覆盖因子; P 为水土保持措施因子。

表 2 不同土地利用类型各部分的碳密度
Table 2 Carbon density of each part of different land use types

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机物碳密度
耕地	2.24	4.07	10.09	0.10
林地	6.11	14.49	20.65	0.35
草地	2.93	5.29	13.51	0.10
水域	2.14	7.13	11.33	0.10
建设用地	2.26	13.69	17.18	0.00
未利用地	0.33	4.38	9.65	0.10

2.2.4 生态系统服务热点区识别 为评估生态系统服务热点区,本研究采用基于多年均值的分类方法。若某一栅格点上的 3 种生态系统服务均超过其多年均值,则该点识别为 3 类热点区;若有 2 种生态系统服务超过其多年均值,则该点识别为 2 类热点区;若仅有 1 种生态系统服务超过其多年均值,则该点识别为 1 类热点区;若 3 种生态系统服务均未超过其多年均值,则识别为非热点区,即 0 类热点区。本研究使用 ArcGIS 10.6 软件,通过空间叠置分析工具识别西南高山峡谷区的生态系统服务热点区,得到 2000—2020 年生态系统服务热点分布图。

2.2.5 生态系统权衡与协同关系 基于 3 种生态系统服务的计算结果,从像元尺度计算两两生态系统服务的皮尔逊相关系数。若相关系数为正,则 2 种服务关系判断为协同关系;若相关系数为负,则 2 种服务关系判断为权衡关系,并且根据相关系数的绝对值大小判断相关性程度^[3]。

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中: R_{xy} 为变量 x 和 y 的相关系数; x_i 、 y_i 分别为第 i 年 2 种生态系统服务的数值; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 为 2 种生态系统服务 n 年来的平均值。若 2 种服务的相关系数 R_{xy} 为负,则 2 种生态系统服务表现为权衡关系;反之,则表现为协同关系。计算结果根据自然断点法划分权衡与协同等级。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务的时空演变分析

3.1.1 固碳服务 2000 年、2010 年和 2020 年固碳量分别为 1 927,1 952,1 985 $g/(m^2 \cdot a)$,固碳量稳步递增。从空间上看(图 2),西南高山峡谷区固碳服务整体呈东南高、西北低的空间格局。不同水土保持分区中(图 3),Ⅳ区的固碳服务最高,年平均值为 2 225 $g/(m^2 \cdot a)$,Ⅱ区的固碳服务最低,年平均固碳服务仅为 1 824 $g/(m^2 \cdot a)$ 。Ⅱ区为藏东—川西高山峡谷生态维护水源涵养区,海拔高达 4 261.78 m,年平均温度低至 0.76 $^{\circ}C$,属于高寒冻融区,该区域植被覆盖度较低,固碳服务功能偏弱。

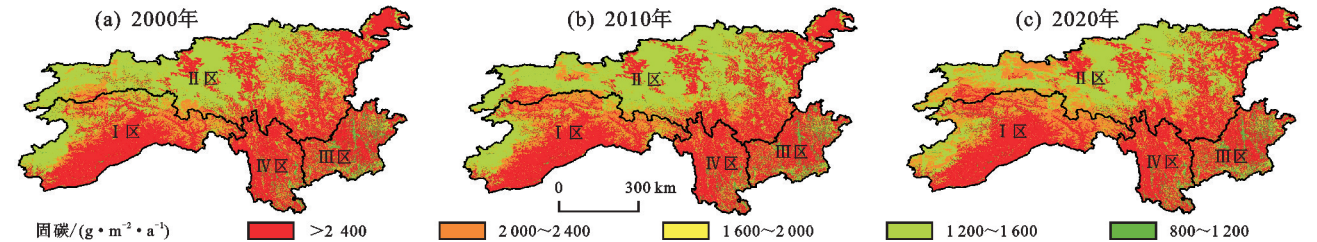


图 2 西南高山峡谷区 2000—2020 年固碳服务变化情况

Fig.2 Changes in carbon sequestration services of the alpine and canyon region of Southwest China from 2000 to 2020

3.1.2 水源涵养服务 西南高山峡谷区 2000 年、2010 年、2020 年 WR 指数年平均值分别为 0.062, 0.057, 0.067,水源涵养服务经历先降低后增加的变化过程。2000—2020 年,西南高山峡谷区水源涵养服务由最初的“西北高、东南低”逐步演变为“西高东低”的地理格局(图 4),空间异质性明显。同时期内,各水土保持分区之间的水源涵养服务能力存在较大差异,Ⅰ区的水源涵养能力始终最高,在 2020 年高达 0.123,是Ⅲ区的 4.6 倍。

3.1.3 土壤保持服务 西南高山峡谷区土壤保持服务整体处于恶化趋势。2000 年、2010 年、2020 年研

究区土壤保持服务分别为 263.50,261.74,226.25 $t/(km^2 \cdot a)$,地理空间格局为中间低、四周高(图 5)。土壤保持服务在 2000—2010 年降低 0.67%,2010—2020 年则降低 13.56%,说明近 10 年西南高山峡谷区的水土流失问题愈发严重。从水土保持分区上看(图 3),Ⅳ区的土壤保持服务恶化趋势最为严重,降低幅度达到 27.5%。

3.2 生态系统服务的增减分析

结合图 6 来看,2000—2020 年西南高山峡谷区固碳和水源涵养服务呈增加趋势的像元数占比分别为 90.90%和 80.07%,整体表现为增加;土壤保持服

务整体以减少的像元为主,减少的像元个数占比为 86.28%。固碳服务增加的区域几乎覆盖整个研究区(图 7)。在各个时间段中,水源涵养服务增加的区域均与土壤保持减少的区域存在大面积重叠,尤其在 2000—2020 年,水源涵养减少的区域和土壤保持服务

增加的区域在空间上具有高度重合性。从侧面反映出水源涵养服务和土壤保持服务在空间分布上存在一定的权衡关系。此外,水源涵养服务和土壤保持服务在 2010—2020 年的变化规律与 2000—2020 年类似,说明近 10 年的变化程度相较前 10 年有所加剧。

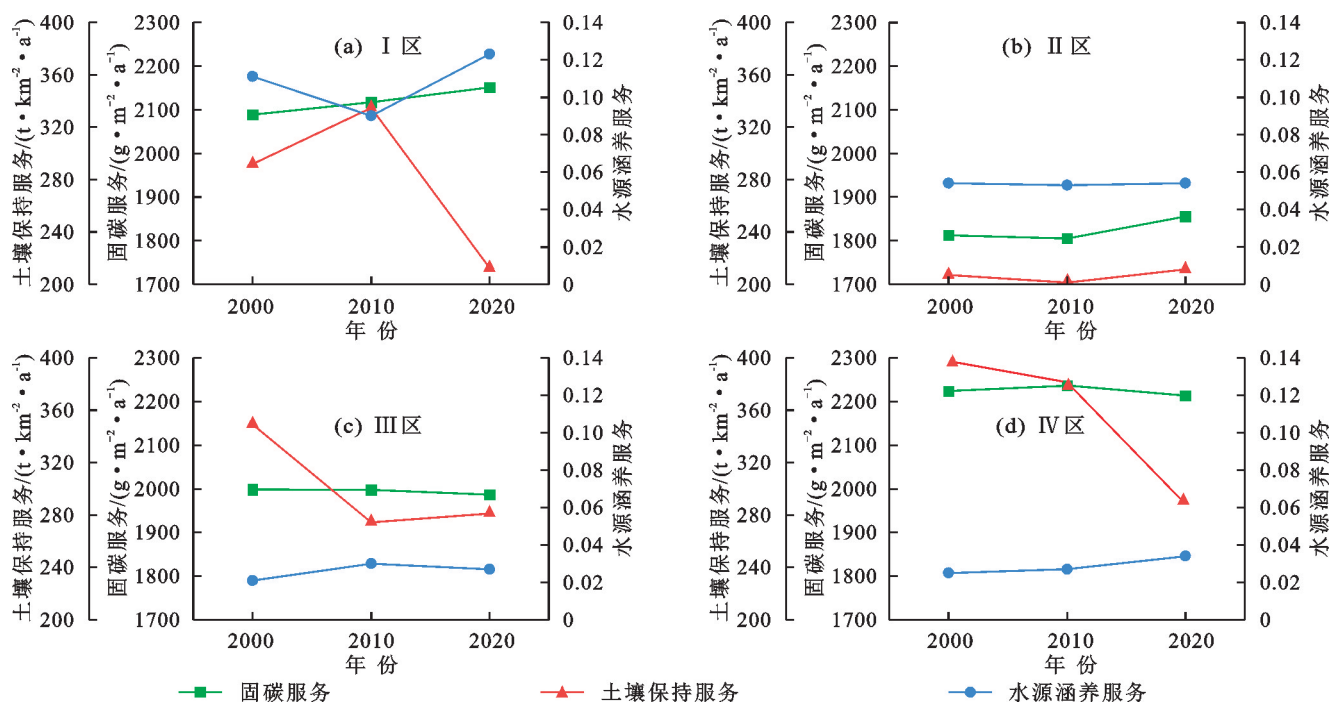


图 3 西南高山峡谷区 2000—2020 年不同分区生态系统服务变化特征

Fig.3 Characteristics of ecosystem service changes in different regions of the alpine and canyon region of Southwest China from 2000 to 2020

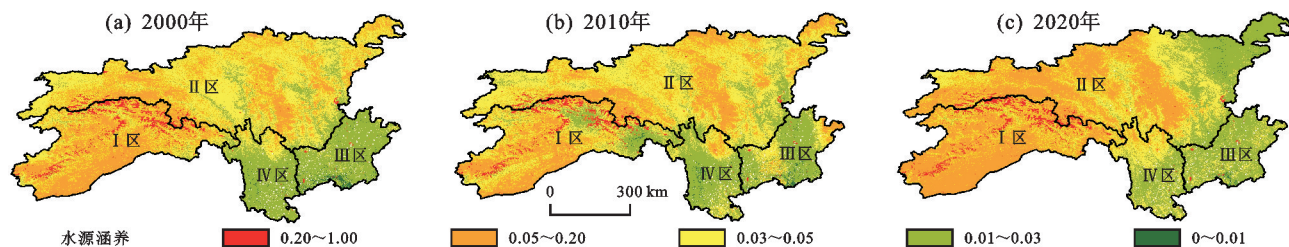


图 4 西南高山峡谷区 2000—2020 年水源涵养服务变化

Fig.4 Changes in water conservation service of the alpine and canyon region of Southwest China from 2000 to 2020

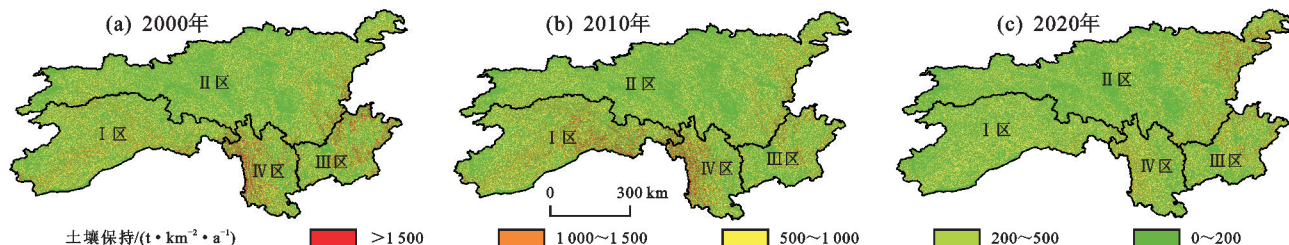


图 5 西南高山峡谷区 2000—2020 年土壤保持服务变化

Fig.5 Changes in soil conservation services of the alpine and canyon region of Southwest from 2000 to 2020

3.3 生态系统服务的热点分析

由图 8 可知,一类热点区在区域内部面积占比最大,年平均占比为 52.09%,且分布区域最为广泛,主要分布在 II、III 和 IV 区。二类热点区面积则呈现逐年递增趋势,面积占比由 2000 年的 18.18% 增长到

2010 年的 19.06%,进而增长到 2020 年的 20.67%,主要集中在 I 区。三类热点区面积占比最小,年平均占比 0.99%,零星分布于研究区。2000 年、2010 年和 2020 年非热点区面积占比分别为 30.46%, 27.32%, 25.05%,呈持续下降趋势。总体而言,西南

高山峡谷区热点区面积呈“一类热点区>非热点区>二类热点区>三类热点区”的规律。

3.4 生态系统服务的权衡与协同关系分析

西南高山峡谷区 3 种生态系统服务中,固碳服务与水源涵养服务、固碳服务与土壤保持服务以协同关系为主,水源涵养与土壤保持服务则表现为权衡关系(图 9)。固碳服务与水源涵养服务表现为协同关系的面积占比达到 54.91%,其中强协同区域面积占比达到 39.90%,主要位于研究区西部,即I和II区(图 9、表 3)。固碳服务与土壤保持服务表现为协同关系和权衡关系的面积占比分别为 44.46%和 28.90%,空间上呈协同和权衡关系的区域交错分布在I和II区。

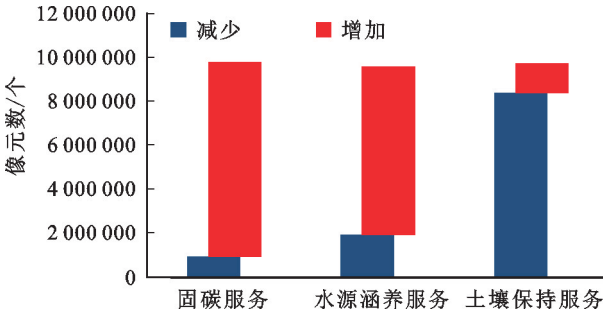


图 6 西南高山峡谷区 2000—2020 年生态系统服务像元尺度增减性变化

Fig.6 Changes in ecosystem services at the pixel scale in the alpine and canyon region of Southwest China from 2000 to 2020

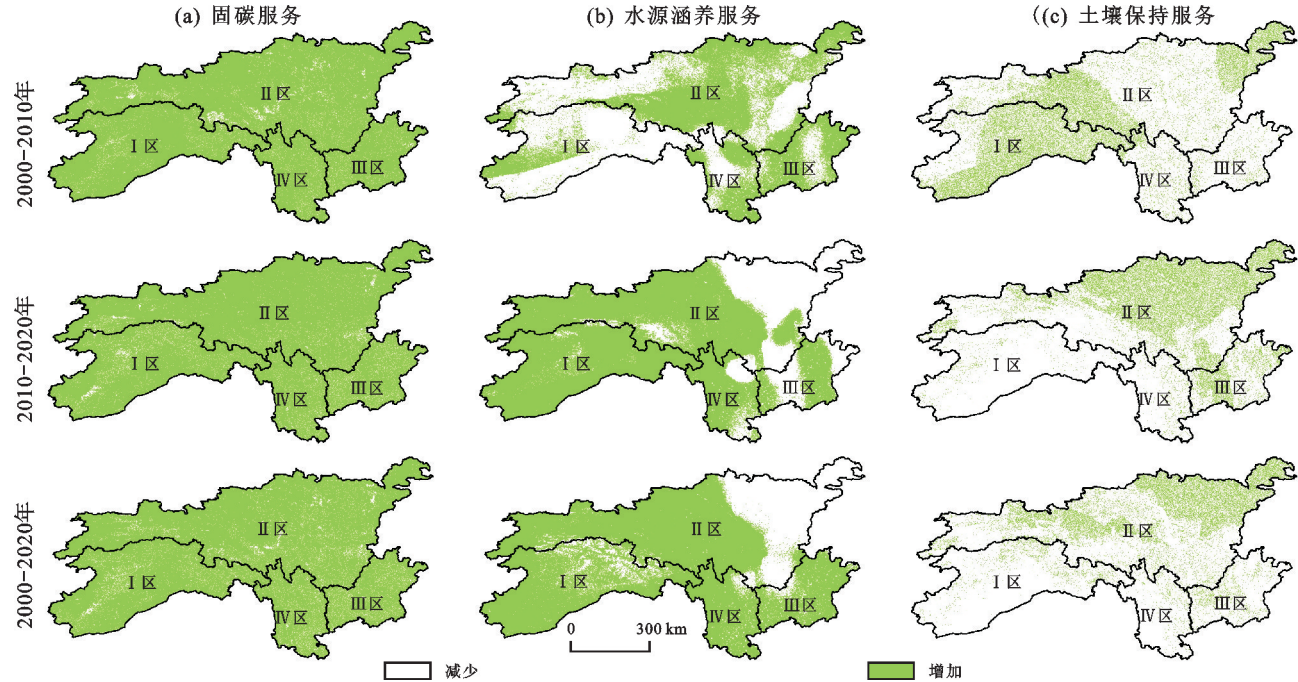


图 7 西南高山峡谷区 2000—2020 年生态系统服务区域尺度增减性变化

Fig.7 Changes in the increase and decrease of ecosystem services in the alpine canyon region of Southwest China from 2000 to 2020

水源涵养与土壤保持服务整体表现出明显的权衡关系,其中强权衡面积占比达 54.56%。空间上,权衡关系主要分布在除了研究区中部的大部分西南高山峡谷区,尤其是 I、III 和 IV 区。

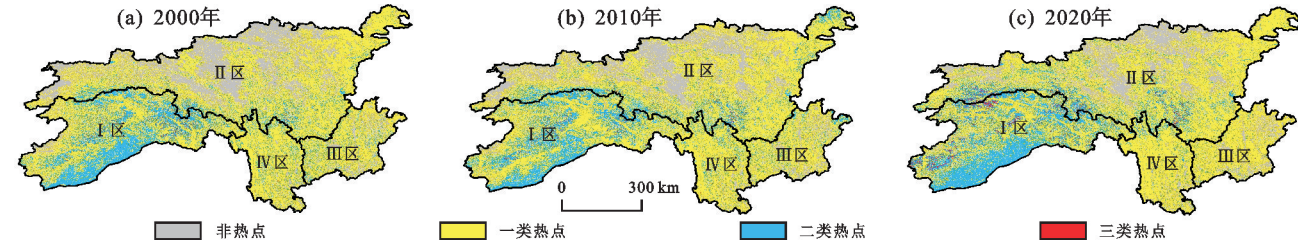


图 8 西南高山峡谷区 2000—2020 年生态系统服务热点区域分布

Fig.8 Regional distribution of ecosystem service hotspots in the alpine and canyon region of Southwest China from 2000 to 2020

4 讨论

4.1 生态系统服务时空异质性解析

本研究通过对 2000—2020 年西南高山峡谷区固碳、水源涵养和土壤保持 3 种典型生态系统服务评估后发现,西南高山峡谷区的固碳分布特征与甘孜

州^[28]的研究成果相似。西南高山峡谷区固碳服务递增,这一趋势在过去几年中表现出稳定且持续的特征,这种增长趋势与研究区 NDVI 的增加密不可分。为了验证这一现象,本研究基于对遥感监测数据分析后发现,西南高山峡谷区 2000—2020 年的 NDVI 呈

明显增加趋势,由 2000 年的 0.60 增加至 2020 年的 0.69(图 10);另一方面,固碳服务的增长也体现当地生态系统管理和保护策略的逐步优化,反映社会对于减缓气候变化和实现碳中和目标的努力。

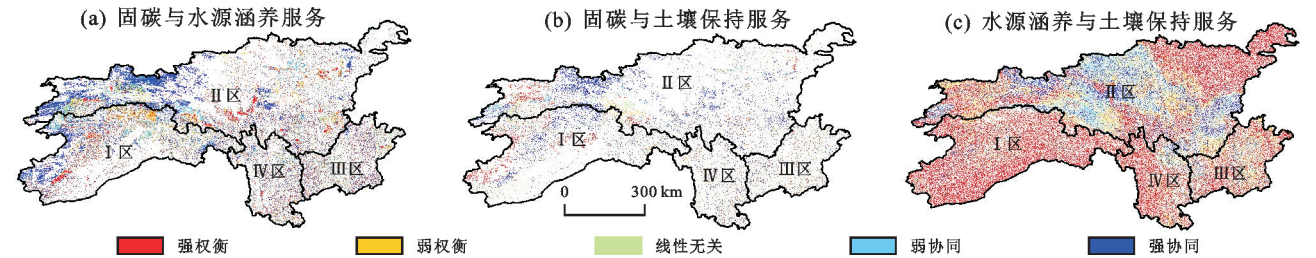


图 9 西南高山峡谷区生态系统服务权衡与协同关系空间分布

Fig.9 Spatial distribution of ecosystem services tradeoff and synergy in the alpine and canyon region of Southwest China

表 3 西南高山峡谷区生态系统服务权衡与协同区域面积占比

Table 3 The proportion of ecosystem service tradeoff and synergy regional area classification in the alpine and canyon region of Southwest China %			
相关性 分级	固碳与 水源涵养	固碳与 土壤保持	水源涵养 与土壤保持
强协同	39.90	35.57	11.50
弱协同	15.01	8.89	8.64
线性无关	10.70	26.64	10.46
弱权衡	12.91	7.29	14.84
强权衡	21.48	21.61	54.56

2000—2020 年,西南高山峡谷区的水源涵养服务经历先降低后增加的变化过程。事实上,水源涵养的波动主要受限于当地降水量的变化,而降水在年际间表现出显著差异,这种差异性导致水源涵养的不稳定性,与黎猛等^[28]的研究较吻合。尽管黎猛等^[28]使用的是水源涵养量作为评估指标,而本研究使用的是 WR 指数,但二者的趋势是一致的。陈文华等^[29]的研究表明,水源涵养量与 WR 指数反映的水源涵养重要性空间格局基本一致,进一步验证了 WR 指数作为水源涵养服务评价指标的有效性和可靠性。

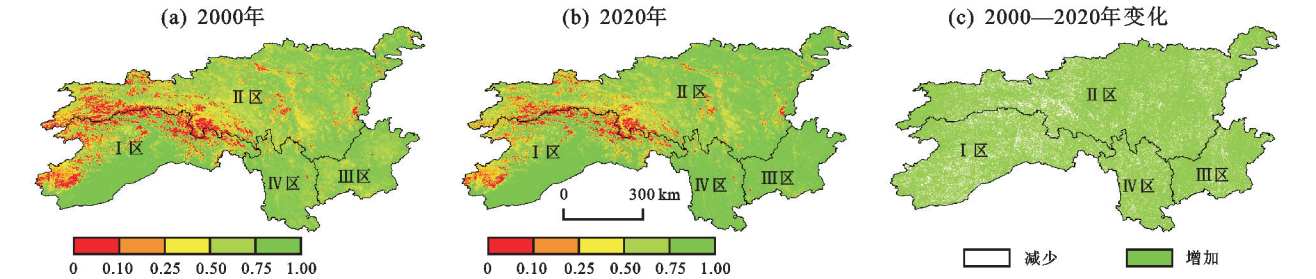


图 10 西南高山峡谷区 2000—2020 年 NDVI 空间分布及变化量

Fig.10 Spatial distribution and variation of NDVI in the alpine and canyon region of Southwest China from 2000 to 2020

西南高山峡谷区土壤保持服务在 2000—2020 年呈下降趋势,年递减率为 1.85 t/(km²·a),与昌都地区的有关研究^[30]成果基本一致,但本研究所测得的区域平均土壤保持量递减速率约为昌都市的 1/3,这一差异可能源于区域边界和土地利用数据的不同。2010—2020 年,土壤保持服务的恶化程度加剧,这与土地利用类型发生较大变化及气候变异有关。在城镇化和人口增长的双重因素影响下,西南高山峡谷区的耕地增加 8.76%。研究区平均海拔为 3 693 m,耕地主要为坡耕地,在坡地上,重力对水流和土壤颗粒的作用更为显著,导致水流下坡时的动能增加,对土壤的剥蚀能力增强,更易造成土壤颗粒的脱离和迁移,加重土壤侵蚀^[31]。另外,由于川藏铁路、公路等重大基础设施工程的修筑,导致研究区建设用地和裸地面积增加 27 660.93 km²,同时草地面积减少 39 100.37 km²(表 4)。

建设活动往往伴随着土壤结构的破坏和植被覆盖的减少,改变原有的地形和水流路径,增加土壤侵蚀风

险。诸多研究^[32-33]表明,青藏高原及我国西南地区的降雨量在过去几十年均呈增加趋势,尤其是极端降水事件的增多。极端降水改变坡面土壤入渗—产流特征,更易引发地表径流,并加剧土壤侵蚀^[34-35]。可见,研究区土壤保持服务的降低是由多种自然和人为因素共同作用的结果,虽然固碳服务和水源涵养服务整体有所提升,但是土壤保持服务的恶化从侧面揭示西南高山峡谷的生态环境并非呈现良好发展态势^[36],未来需采取针对性的管理措施来有效控制和减轻土壤侵蚀,增加土壤保持服务功能。

4.2 生态系统服务权衡与协同的驱动机制

本研究发现,西南高山峡谷区固碳服务与水源涵养、固碳服务与土壤保持服务以协同关系为主,与已有研究^[37-40]结果一致。而水源涵养减少的区域与土壤保持服务增加的区域具有高度一致性,反映生态系统内部的复杂互动关系,证实不同生态系统服务之间的相互影响,最终导致水源涵养与土壤保持服务呈高

权衡性,可能与研究区草地面积的大量减少有关。FENG 等^[41]研究表明,草地面积的增减直接影响着生态系统服务权衡的程度;徐铭璟等^[42]研究发现,草地是生态系统服务权衡与协同的主要驱动因素。本研究仅探讨 3 种典型生态系统服务的权衡与协同关系,未对其驱动因素进行分析,深入研究这种现象背后的机制和影响因素,有助于更好地理解生态系统功能之间的相互关联性,为生态环境保护和可持续土地利用提供科学依据。

表 4 2000—2020 年西南高山峡谷区土地利用面积及变化率
Table 4 Land use area and change rate in the alpine valley region of Southwest China from 2000 to 2020

土地利用 类型	土地利用面积/km ²			2000—2020 年	
				面积变化/km ²	变化率/%
耕地	25 868.37	25 549.31	28 133.76	2 265.39	8.76
林地	260 254.28	255 160.74	260 241.06	-13.22	-0.01
草地	260 128.20	252 507.28	221 027.83	-39 100.37	-15.03
灌木	17 574.60	19 709.79	19 455.17	1 880.58	10.70
湿地	398.89	334.37	369.61	-29.28	-7.34
水体	2 233.83	2 106.22	3 036.51	802.68	35.93
建设用地	634.52	821.08	1 702.33	1 067.82	168.29
裸地	7 170.83	7 652.15	33 763.94	26 593.11	370.85
冰雪	30 324.35	40 357.78	43 629.87	13 305.52	43.88

因此,未来研究中应深入分析生态系统服务权衡协同的驱动机制,计算生态系统服务簇,并建立栅格—流域—县域—区域多级尺度的评估体系,全面细致地刻画西南高山峡谷区各项生态服务功能的演变过程和权衡协同关系,为西南高山峡谷区国土空间规划及生态政策制定提供科学依据。

5 结 论

2000—2020 年,西南高山峡谷区固碳、水源涵养服务稳步提升;土壤保持服务呈恶化趋势,尤其是 2010—2020 年愈发严重,与多种自然和人为因素的共同作用有关。空间上,固碳从西北向东南逐渐递增,水源涵养由“西北高、东南低”逐步演变为“西高东低”的地理格局,土壤保持服务为中间低、四周高。2000—2020 年,生态系统服务热点区总体呈递增趋势,非热点区面积持续缩减。固碳服务与水源涵养服务、固碳服务与土壤保持服务整体表现为协同关系,主要分布在藏东南高寒高山峡谷生态维护区和藏东_川西高山峡谷生态维护水源涵养区西部;水源涵养与土壤保持服务整体表现为权衡关系,空间上主要分布于主要位于藏东南高寒高山峡谷生态维护区、滇北_川西南高山峡谷蓄水保土区和滇西北高山峡谷生态维护区。西南高山峡谷区生态系统内部存在复杂的互动关系,尽管固碳和水源涵养服务整体有所提升,但土壤保持服务的恶化并

且与水源涵养服务表现为权衡关系,从侧面揭示该区生态环境并非呈良性发展,未来需采取针对性的管理措施来减轻土壤侵蚀,增加土壤保持服务功能。

参考文献:

[1] DAILY G C. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems[M]. Washington DC: IslandPress, 1997: 3-6.

[2] 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.

[3] 庞彩艳,文琦,丁金梅,等.黄河上游流域生态系统服务变化及其权衡协同关系[J].生态学报,2024,44(12): 5003-5013.

PANG C Y, WEN Q, DING J M, et al. Ecosystem services and their trade-offs and synergies in the upper reaches of the Yellow River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(12): 5003-5013.

[4] 林子雁,肖燚,饶恩明,等.中国西南地区不同类型生态系统服务的关系[J].应用生态学报,2020,31(3): 978-986.

LIN Z Y, XIAO Y, RAO E M, et al. Relationships among different types of ecosystem service in Southwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(3): 978-986.

[5] 谢高地,张彩霞,张昌顺,等.中国生态系统服务的价值[J].资源科学,2015,37(9): 1740-1746.

XIE G D, ZHANG C X, ZHANG C S, et al. The value of ecosystem services in China[J]. Resources Science, 2015, 37(9): 1740-1746.

[6] 谢高地,鲁春霞,肖玉,等.青藏高原高寒草地生态系统服务价值评估[J].山地学报,2003,21(1): 50-55.

XIE G D, LU C X, XIAO Y, et al. The economic evaluation of grassland ecosystem services in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Mountain Research, 2003, 21(1): 50-55.

[7] 余新晓,鲁绍伟,靳芳,等.中国森林生态系统服务功能价值评估[J].生态学报,2005,25(8): 2096-2102.

YU X X, LU S W, JIN F, et al. The assessment of the forest ecosystem services evaluation in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(8): 2096-2102.

[8] 崔丽娟.鄱阳湖湿地生态系统服务功能价值评估研究[J].生态学杂志,2004,23(4): 47-51.

CUI L J. Evaluation on functions of Poyang Lake ecosystem [J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(4): 47-51.

[9] 辛琨,肖笃宁.盘锦地区湿地生态系统服务功能价值估算[J].生态学报,2002,22(8): 1345-1349.

XIN K, XIAO D N. Wetland ecosystem service valuation: A case researches on Panjin area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(8): 1345-1349.

[10] 杨志新,郑大玮,文化.北京郊区农田生态系统服务功能价值的评估研究[J].自然资源学报,2005,20(4): 564-571.

YANG Z X, ZHENG D W, WEN H. Studies on service

- value evaluation of agricultural ecosystem in Beijing Region [J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(4): 564-571.
- [11] XUE C L, CHEN X H, XUE L R, et al. Modeling the spatially heterogeneous relationships between tradeoffs and synergies among ecosystem services and potential drivers considering geographic scale in Bairin Left Banner, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 855: e158834.
- [12] 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.
- [13] TIAN Y C, WANG S J, BAI X Y, et al. Trade-offs among ecosystem services in a typical Karst watershed, SW China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 566: 1297-1308.
- [14] 李悦, 李晓青. 长江经济带生态系统服务时空变化及权衡/协同关系研究 [J]. *人民黄河*, 2024, 46(5): 104-110.
- LI Y, LI X Q. Study on spatiotemporal changes of ecosystem services and trade-off/synergy relationships in the Yangtze River economic belt [J]. *Yellow River*, 2024, 46(5): 104-110.
- [15] 赖金林, 齐实, 廖瑞恩, 等. 2000—2019 年西南高山峡谷区植被变化对气候变化和人类活动的响应 [J]. *农业工程学报*, 2023, 39(14): 155-163.
- LAI J L, QI S, LIAO R E, et al. Vegetation change responses to climate change and human activities in southwest alpine canyon areas of China from 2000 to 2019 [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(14): 155-163.
- [16] 赖金林, 齐实, 崔冉冉, 等. 西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析 [J]. *环境科学*, 2023, 44(12): 6833-6846.
- LAI J L, QI S, CUI R R, et al. Analysis of vegetation change and influencing factors in southwest alpine canyon area [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(12): 6833-6846.
- [17] 丁琳, 黄婷婷, 秦伟, 等. 西南高山峡谷区土壤侵蚀空间分异特征 [J]. *泥沙研究*, 2023, 48(6): 51-58.
- DING L, HUANG T T, QIN W, et al. Spatial variation of soil erosion in southwest alpine canyon area [J]. *Journal of Sediment Research*, 2023, 48(6): 51-58.
- [18] 陈心盟, 王晓峰, 冯晓明, 等. 青藏高原生态系统服务权衡与协同关系 [J]. *地理研究*, 2021, 40(1): 18-34.
- CHEN X M, WANG X F, FENG X M, et al. Ecosystem service trade-off and synergy on Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Geographical Research*, 2021, 40(1): 18-34.
- [19] 赵俊彦, 刘国华, 李佳佳, 等. 生态系统服务权衡强度与生态恢复优先区的空间差异: 以怒江流域施甸县为例 [J]. *生态学报*, 2024, 44(11): 4517-4526.
- ZHAO J Y, LIU G H, LI J J, et al. Spatial difference between ecosystem service tradeoff intensity and priority areas for ecological restoration: A case study of Shidian County, Nu River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(11): 4517-4526.
- [20] 张欣蓉. 西南喀斯特区生态系统服务权衡与供需平衡分析 [D]. 西安: 长安大学, 2020.
- ZHANG X R. Analysis on balance of ecosystem services and supply and demand in southwest Karst area [D]. Xi'an: Changan University, 2020.
- [21] 中华人民共和国水利部. 水利部办公厅关于印发《全国水土保持区划(试行)》的通知 [EB/OL]. [2024-09-05]. http://www.mwr.gov.cn/zwgk/gknr/201212/t20121214_1442828.html.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Notice from the General Office of the Ministry of Water Resources on Issuing the "National Soil and Water Conservation Zoning (Trial)" [EB/OL]. [2024-09-05]. http://www.mwr.gov.cn/zwgk/gknr/201212/t20121214_1442828.html.
- [22] 黄韬, 刘素红. 基于 PLUS-InVEST 模型的福建省土地利用变化与碳储量评估 [J]. *水土保持学报*, 2024, 38(2): 246-257.
- HUANG T, LIU S H. Evaluation of land use change and carbon storage in Fujian Province based on PLUS-InVEST model [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(2): 246-257.
- [23] 宋子衿. 基于 InVEST 模型土地利用变化下的甘孜州 2000—2020 年陆地碳储量时空特征 [D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2022.
- SONG Z J. Spatial and temporal characteristics of land carbon storage in Ganzi prefecture from 2000 to 2020 under land use change based on InVEST model [D]. Yaan, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2022.
- [24] 伍丹, 朱康文, 张晟, 等. 基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的成渝经济区碳储量演化分析 [J]. *三峡生态环境监测*, 2022, 7(2): 85-96.
- WU D, ZHU K W, ZHANG S, et al. Evolution analysis of carbon stock in Chengdu-Chongqing economic zone based on PLUS model and InVEST model [J]. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2022, 7(2): 85-96.
- [25] 张美琪, 陈波, 赵敏. 贵州省湿地碳储量与碳中和潜力分析 [J]. *地质科技通报*, 2023, 42(2): 315-326.
- ZHANG M Q, CHEN B, ZHAO M. Analysis of the carbon stock and carbon neutral potential of wetlands in Guizhou Province [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(2): 315-326.
- [26] 徐丽, 何念鹏, 于贵瑞. 2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集 [J]. *中国科学数据*, 2019, 4(1): 90-96.
- XU L, HE N P, YU G R. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems (2010s) [J]. *China Scientific Data*, 2019, 4(1): 90-96.
- [27] 中华人民共和国生态环境部. 关于印发《生态保护红线划定技术指南》的通知 [EB/OL]. [2024-09-05]. <https://www.stbcbx.alljournal.com.cn>

- mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201505/t20150518_301834.htm.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Notice on the Issuance of the "Technical Guidelines for Ecological Protection Red Line Delineation" [EB/OL]. [2024-09-05]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201505/t20150518_301834.htm.
- [28] 黎猛,李雅琪,樊敏,等.基于“水-土-碳”动态耦合的甘孜州生态系统服务综合评估[EB/OL]. [2024-07-30] <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202405240>.
LI M, LI Y Q, FAN M, et al. Comprehensive Evaluation of Ecosystem Services in Garzê Prefecture Based on the Dynamic Coupling Relationship of Water-soil-carbon [EB/OL]. [2024-07-30] <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202405240>.
- [29] 陈文华,徐娟,李双成.滇西山地城市水源涵养功能研究:以保山市为例[J].北京大学学报(自然科学版), 2021,57(6):1153-1160.
CHEN W H, XU J, LI S C. Water conservation function of mountainous city in western Yunnan: A case study of Baoshan City[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2021,57(6):1153-1160.
- [30] 戴雪,余钟波.藏东南高原-藏东南高山峡谷过渡区多角度生态系统综合评估:以西藏昌都为例[J].地理研究, 2023,42(7):1971-1984.
DAI X, YU Z B. Integrated ecosystem assessment for the transition areas between the east plateau zone and the southeast mountain-canyon zone of the Tibetan Plateau: A case study in Qamdo city, Tibet, China[J]. *Geographical Research*, 2023,42(7):1971-1984.
- [31] 肖继兵,孙占祥,蒋春光,等.辽西地区农耕地土壤侵蚀影响因素及相关关系[J].水土保持学报, 2015,29(5): 13-19.
XIAO J B, SUN Z X, JIANG C G, et al. Influencing factors and their correlations of soil erosion on sloping farmland in western Liaoning[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015,29(5):13-19.
- [32] 徐勇,黄雯婷,窦世卿,等.2000—2020年西南地区植被NDVI对气候变化和人类活动响应特征[J].环境科学, 2022,43(6):3230-3240.
XU Y, HUANG W T, DOU S Q, et al. Responding mechanism of vegetation cover to climate change and human activities in Southwest China from 2000 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2022,43(6):3230-3240.
- [33] 耿堃鑫,易桂花,张廷斌,等.青藏高原气候变化对草地碳汇/源格局的影响[J].自然资源学报, 2024,39(5): 1208-1221.
GENG Y X, YI G H, ZHANG T B, et al. Impacts of climate change on grassland carbon sink/source patterns in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2024,39(5):1208-1221.
- [34] CHEN H, ZHANG X P, ABLA M, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2018,170:141-149.
- [35] DUAN J, LIU Y J, TANG C J, et al. Efficacy of orchard terrace measures to minimize water erosion caused by extreme rainfall in the hilly region of China: Long-term continuous in situ observations[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021,278:e111537.
- [36] 陈田田,王钰茜,曾兴兰,等.西南地区生态系统服务关系特征及其与植被覆盖的约束效应[J].生态学报, 2023, 43(6):2253-2270.
CHEN T T, WANG Y X, ZENG X L, et al. Characteristics and the constraint relationship between ecosystem services and vegetation coverage in the Southwest China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(6):2253-2270.
- [37] 何刘洁,郑博福,万炜,等.长江经济带生态系统服务权衡与协同及其驱动因素[J].环境科学, 2024, 45(6): 3318-3328.
HE L J, ZHENG B F, WAN W, et al. Trade-off and synergy of ecosystem services in the Yangtze River economic belt and its driving factors[J]. *Environmental Science*, 2024,45(6):3318-3328.
- [38] 韩磊,杨梅丽,刘钊,等.黄土高原典型退耕区生态系统服务权衡与协同关系研究:以延安市为例[J].生态学报, 2022,42(20):8115-8125.
HAN L, YANG M L, LIU Z, et al. Ecosystem service tradeoffs and synergies in typical farmland conversion area of the Loess Plateau: Taking Yan'an City as an example[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(20):8115-8125.
- [39] 王耕,冯妍.辽宁太子河流域生态系统服务权衡/协同关系时空变化与情景预测[J].生态学报, 2024,44(1):96-106.
WANG G, FENG Y. Spatio-temporal variation and scenario prediction of ecosystem service tradeoffs/synergies in the Taizi River Basin, Liaoning Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,44(1):96-106.
- [40] 陈登帅,李晶,杨晓楠,等.渭河流域生态系统服务权衡优化研究[J].生态学报, 2018,38(9):3260-3271.
CHEN D S, LI J, YANG X N, et al. Trade-offs and optimization among ecosystem services in the Weihe River basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018,38(9):3260-3271.
- [41] FENG Q, DONG S, DUAN B. The effects of land-use change/conversion on trade-offs of ecosystem services in three precipitation zones [J]. *Sustainability*, 2021, 13(23):e13306.
- [42] 徐铭瑶,冯强,吕萌.生态系统服务权衡及其影响因素:以黄河流域山西段为例[J].干旱区研究, 2024,41(3): 467-479.
XU M J, FENG Q, LYU M. Tradeoffs of ecosystem services and their influencing factors: A case study of the Shanxi Section of the Yellow River Basin [J]. *Arid Zone Research*, 2024,41(3):467-479.