

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.05.002

CSTR:32310.14.stbxb.2026.05.002

吕春良,曹雪峰,王金凤,等.黄土丘陵沟壑区县域生态系统服务权衡协同关系演变及驱动因素分析[J].水土保持学报,2026,40(5):351-363.

Lü Chunliang, Cao Xuefeng, Wang Jinfeng, et al. Analysis of evolution and driving factors of trade-offs and synergies of ecosystem services at county scale in hilly-gully region of Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(5): 351-363.

黄土丘陵沟壑区县域生态系统服务权衡 协同关系演变及驱动因素分析

吕春良^{1,2,3}, 曹雪峰⁴, 王金凤⁵, 胡永宁⁶, 曹 扬⁵

(1.中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,水土保持与荒漠化整治全国重点实验室,陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院大学,北京 100049; 4.黄河水利委员会

黄河上中游管理局,西安 710021; 5.西北农林科技大学林学院,陕西 杨凌 712100;

6.内蒙古自治区林业科学研究院,呼和浩特 010010)

摘 要: [目的] 揭示黄土丘陵沟壑区县域尺度生态系统服务权衡协同关系的时空分异特征及其驱动因素,为县域生态修复分区优化与精细化生态管理提供科学依据。[方法] 基于多源遥感与地理空间数据,集成 InVEST 模型、权衡协同分析方法与偏最小二乘路径模型(PLS-PM),对 2000—2020 年永寿县碳固存、生境质量、土壤保持和水源涵养 4 项生态系统服务的变化特征、权衡协同格局及其驱动因素进行定量分析。[结果] 1)永寿县土地利用格局总体表现为林地增加、草地减少、建设用地扩张、耕地相对稳定,主要土地利用转化体现为草地向林地转化及耕地与草地间的相互转移。2)碳固存总量持续增长,生境质量总体下降,土壤保持与水源涵养总量呈增强-下降-恢复的波动变化,4 项服务高值区均稳定分布于永寿县北部及西北部。3)县域范围内所有服务对关系呈显著协同且逐渐增强,各服务对关系空间格局特征以低强度权衡协同关系斑块交错分布为主。4)坡度对土壤保持、降水与潜在蒸散发对水源涵养均构成稳定的影响;而土地利用对各类服务的影响发生多次方向性逆转,是区域生态系统服务变化不确定性的主要原因;归一化植被指数(NDVI)对各项服务的直接影响呈衰减趋势。[结论] 永寿县生态系统服务及其关系格局受自然条件约束与人为干扰共同影响,其中土地利用变化是影响生态服务关系稳定性的关键人为因素。

关键词: 生态系统服务; 黄土丘陵沟壑区; 权衡协同; 驱动因素

中图分类号: X171.1; S157

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0351-13

Analysis of Evolution and Driving Factors of Trade-offs and Synergies of Ecosystem Services at County Scale in Hilly-Gully Region of Loess Plateau

Lü Chunliang^{1,2,3}, Cao Xuefeng⁴, Wang Jinfeng⁵, Hu Yongning⁶, Cao Yang⁵

(1.State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4.Upper and Middle Yellow River Bureau, Yellow River Conservancy Commission, Xi'an 710021, China; 5.College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 6.Inner Mongolia Academy of Forestry Sciences, Hohhot 010010, China)

Abstract: [Objective] This study reveals the spatiotemporal differentiation characteristics of trade-offs and synergies among ecosystem services at the county scale in the hilly-gully region of the Loess Plateau, as well as their driving factors, thereby providing a scientific basis for optimizing ecological restoration zoning and promoting refined ecological management at the county level. [Methods] Based on multi-source remote sensing and

收稿日期: 2026-02-03

修回日期: 2026-03-04

录用日期: 2026-03-10

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-06-25

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(42130717)

第一作者: 吕春良(1999—),男,硕士研究生,主要从事生态系统服务研究。E-mail: lvchunliang23@mails.uca.ac.cn

通信作者: 曹扬(1977—),男,博士,副研究员,主要从事森林生态学研究。E-mail: yang.cao@nwsuaf.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

geospatial data, the InVEST model, trade-off and synergy analysis, and the PLS-PM model were integrated to quantitatively analyze the variation characteristics, trade-off and synergy patterns, and driving factors of four ecosystem services in Yongshou County: carbon storage, habitat quality, soil conservation, and water yield from 2000 to 2020. [Results] 1) The land use pattern in Yongshou County was characterized by an increase in forest land, a decrease in grassland, expansion of construction land, and relative stability in cultivated land. The main land use conversions were reflected in the conversion of grassland to forest land and the mutual conversion between cultivated land and grassland. 2) Total carbon sequestration increased continuously, whereas habitat quality generally declined. Soil conservation and water yield exhibited a fluctuating "increase-decrease-recovery" pattern. The high-value areas of all four ecosystem services remained stably concentrated in the northern and northwestern parts of Yongshou County. 3) At the county scale, all pairwise relationships among ecosystem services showed significant synergies that gradually strengthened over time, with their spatial patterns characterized mainly by interlaced patches of low-intensity trade-off and synergy relationships. 4) Slope exerted a stable influence on soil conservation, while precipitation and potential evapotranspiration had stable effects on water yield. In contrast, land use underwent multiple directional reversals in its impacts on carbon sequestration, habitat quality, and water yield, representing a key source of uncertainty in ecosystem service changes. The direct effects of the normalized difference vegetation index on ecosystem services showed a weakening trend. [Conclusion] The ecosystem services in Yongshou County and their relational patterns are shaped by both natural constraints and human interference, among which land use change serves as the key anthropogenic factor affecting the stability of these service relationships.

Keywords: ecosystem services; loess hilly-gully region; trade-offs and synergies; driving factors

Received: 2026-02-03

Revised: 2026-03-04

Accepted: 2026-03-10

Online(www.cnki.net): 2026-06-25

生态系统服务作为连接人类福祉与生态系统的关键桥梁,其状态深刻反映区域生态环境的质量与可持续性^[1]。相关研究^[2]指出,在人类活动过度干预下,已有 1/2 以上的生态系统服务呈显著退化趋势,对区域生态环境造成严重威胁。近年来,在“绿水青山就是金山银山”的绿色发展理念普及深化的背景下,不同区域的生态系统服务研究在理论与实践层面均取得全新进展^[3]。然而,现有研究虽已在揭示生态系统服务的时空变化特征等方面取得丰富成果,但针对县域尺度多项生态系统服务权衡协同关系及其驱动因素的研究仍相对不足。相较于仅关注生态系统服务时空动态变化,生态系统服务权衡协同关系研究能够进一步揭示不同生态系统服务之间是表现为协同增效还是潜在权衡。尤其在生态修复持续推进的背景下,辨析多项生态系统服务之间的权衡协同关系及其空间分异格局,是有效实现区域生态管理目标从“单一服务提升”向“多服务协同优化”转变的重要基础。当前研究在厘清驱动因素的作用路径及其阶段性差异方面同样存在不足,部分研究^[4]采用地理探测器和回归模型等方法,有效量化各类因子对生态系统服务的影响程度,但对于驱动因素的作用路径(直接/间接效应和过程)及其随时间变化的特征仍缺乏清晰认识,使得研究发现难以转化为

具有明确科学依据的区域管控方案,极大削弱了决策支持的有效性。因此,全面解析影响区域生态系统服务动态的驱动因素是当前研究领域亟须解决的问题。

黄土丘陵沟壑区是中国乃至全球水土流失与环境退化最严重的区域之一,其生态系统稳定性关乎黄河中下游生态安全与区域可持续发展^[5]。为应对严峻的生态退化趋势,国家自 20 世纪起实施退耕还林(草)、淤地坝建设等大规模生态修复工程^[6],这些举措重塑土地利用与生态过程,使该地区成为研究人类活动影响下生态系统变化的重要场所^[7]。目前,黄土丘陵沟壑区生态系统服务研究多集中于流域、省域等大尺度区域^[8]。生态学“尺度效应”表明,生态系统格局、过程与服务在不同尺度上存在显著差异^[9]。相较于流域、省域等大尺度研究,县域尺度更有利于识别局地异质性及多种生态系统服务之间的复杂交互关系。已有研究^[10]表明,县域作为生态政策落地实施的基本单元,能够更直接关联地方治理实践,并为生态修复分区、土地利用优化和国土空间管理提供更具针对性的科学依据。因此,在县域尺度开展精细评估,能更精确捕捉局部生态过程,为生态管理的精准规划与区域可持续发展提供更准确的科学支撑。

综上所述,黄土丘陵沟壑区生态系统服务之间可能呈现复杂的权衡和协同关系格局。从县域尺度开展生态系统服务权衡协同关系研究,不仅有助于深化对生态脆弱区生态过程耦合特征的认识,更能有效指导生态修复分区优化、土地利用格局及生态管理举措调整。与此同时,进一步解析各驱动因素对生态系统服务及其权衡协同关系的影响变化,能够明确不同服务间关系格局形成与演变的关键影响因素,从而为县域尺度多目标协同管理和差异化调控提供更加精准的决策依据。基于此,本研究以黄土高原典型丘陵沟壑区陕西省永寿县为例,选取2000年、2005年、2010年、2015年和2020年5个时期,综合运用InVEST模型、权衡协同分析方法与偏最小二乘路径模型,重点回答的问题有:1)研究期内碳固存、生境质量、土壤保持和水源涵养4项关键生态系统服务呈现何种时空变化特征;2)不同生态系统服务之间是否表现为整体协同与局部权衡并存,其权衡协同关系的空间分异格局如何演变;3)自然因素与人为因素如何共同影响生态系统服务及其权衡协同关系的动态变化。研究结果可为黄土丘陵沟壑区县域生态修复与国土空间优化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

永寿县(34°29′~35°51′N,107°56′~108°21′E)位于陕西省中部偏西,地处黄土高原丘陵沟壑区(图1)。该地区属温带大陆性季风气候,年平均气温10.8℃,年平均降水量601.6 mm,降雨主要集中在7—9月。裸地蒸发量807.4 mm,年平均日照时间

2 166.2 h^[11]。该县地形地貌复杂,整体地势北高南低,沟壑纵横、坡面破碎,水土流失问题突出,生态环境较为敏感脆弱。永寿县历史上长期人为扰动致使生态系统结构受损,稳定性下降。自1998年实施退耕还林(草)等生态修复工程后,生态退化趋势得到一定遏制,但县域植被类型偏单一,以刺槐等人工林为主,生态系统稳定性偏弱^[12]。

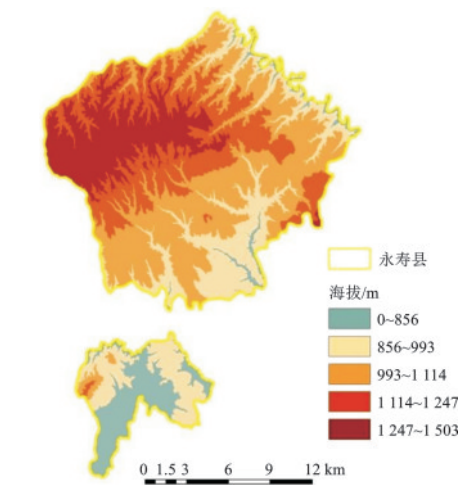


图1 永寿县地理位置
Fig.1 Geographic location of Yongshou County

1.2 数据来源与处理

本研究中使用的气候数据、归一化植被指数数据、人口密度数据、地形数据和土地利用数据全部为栅格类型数据,具体数据来源见表1。由于数据来源不同,通过将所有栅格类型数据进行重采样,数据分辨率统一为30 m;同时将所有数据投影统一为Krasovsky_1940_Albers。碳密度数据则来源于相关研究^[13]。

表1 不同数据格式与来源
Table 1 Different data formats and sources

数据类型	尺度	数据来源
气候数据(降水量、气温、潜在蒸散发等)	1 km×1 km(栅格)	Google Earth Engine平台(TerraClimate气候数据集)
归一化植被指数数据(NDVI)	250 m×250 m(栅格)	Google Earth Engine平台(MODIS植被指数产品)
人口密度数据	1 km×1 km(栅格)	Google Earth Engine平台(WorldPop人口栅格数据集)
地形数据(DEM)	30 m×30 m(栅格)	Google Earth Engine(SRTM数字高程模型)
土地利用数据	30 m×30 m(栅格)	中国土地覆被数据集(CLCD)、武汉大学(https://zenodo.org/records/12779975)

1.3 研究方法

通过InVEST模型核算永寿县4项生态系统服务结果,采用Spearman相关性分析法和权衡协同准则与权衡协同指数结合量法分析生态系统服务对的权衡协同关系,最后采用PLS-PM结构方程模型对各类生态系统服务驱动机制进行解析。所有空间分布结果均在ArcGIS 10.8软件中进行分析。

1.3.1 碳固存服务

碳固存服务反映陆地生态系统对该服务的承载能力。在本研究中,采用InVEST模型的碳固存模块对区域碳储量进行量化评估,该模块综合考虑4类碳库,即地上生物量、地下生物量、土壤有机碳及枯死有机质^[14]。总碳储量(C_{total})的计算公式为:

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \tag{1}$$

式中: C_{total} 为总碳储量, t/hm^2 ; C_{above} 、 C_{below} 、 C_{soil} 和 C_{dead} 分别为储存在地上生物量、地下生物量、土壤及枯死有机质中的碳储量, t/hm^2 。

1.3.2 土壤保持服务

采用 InVEST 模型的泥沙输送比 (SDR) 模块评估土壤保持服务。该模块以通用土壤流失方程 (USLE) 为基础, 在栅格尺度纳入坡上泥沙滞留过程, 从而提高计算精度^[15]。针对每个栅格单元分别计算潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量, 并以二者差值作为土壤保持量。

$$\text{SR} = \text{RKLS} - \text{USLE} \quad (2)$$

$$\text{RKLS} = R \times K \times LS \quad (3)$$

$$\text{USLE} = R \times K \times LS \times C \times P \quad (4)$$

式中: SR 为土壤保持量, t/hm^2 ; RKLS 与 USLE 分别为潜在土壤侵蚀量和实际土壤侵蚀量, t/hm^2 ; R 为降雨侵蚀力因子, $(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$; K 为土壤可蚀性因子, $(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$; LS 为坡长坡度因子; C 为植被覆盖与管理因子; P 为水土保持措施因子, 其中, LS、C 和 P 均为无量纲的因子。

1.3.3 水源涵养服务

采用 InVEST 模型的水源涵养模块对水源涵养服务进行计算。该模块基于水量平衡原理, 并结合 Budyko 耦合水热平衡假设, 将水源涵养量表示为降水量与实际蒸散量之间的差值, 以表征研究区水源涵养能力^[16]。计算公式为:

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{\text{AET}_{xj}}{P_x}\right) \times P_x \quad (5)$$

式中: Y_{xj} 为栅格单元 x 中土地利用类型 j 的年水源涵养量, mm ; P_x 为栅格单元 x 的多年平均年降水量, mm ; AET_{xj} 为栅格单元 x 中土地利用类型 j 的年实际蒸散量, mm 。

1.3.4 生境质量服务

采用 InVEST 模型的生境质量模块对该服务进行核算。该模块从 2 个方面对生境质量进行评估: 外部威胁的强度及受威胁生态系统自身的敏感性。一般而言, 生境质量较高的区域往往对应受胁迫因素较少、结构较为稳定的自然生态系统。生境质量指数能够对生境状况进行定量表征^[17]。计算公式为:

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

式中: Q_{xj} 和 D_{xj} 分别为栅格单元 x 中土地利用类型 j 的生境质量与威胁水平; H_j 为土地利用类型 j 的生境适宜度; z 为归一化常数, 通常取 2.5; k 为半饱和常数。

1.3.5 生态系统服务权衡协同关系分析

1) 生态系统服务对总体权衡协同关系 Spearman 相关分析是一种非参数统计方法, 用于在不假设数据服从特定分布的条件下, 衡量 2 个变量之间关联关系的强度与方向。该方法对非正态数据具有较强稳健性, 尤其适用于顺序变量或等级变量。当数据已转换为秩次形式时, 其计算过程相对简便, 且易于实现。在本研究中, 为消除量纲影响, 首先对数据进行基于极差的归一化处理, 使其无量纲化; 随后采用 Spearman 相关分析识别不同生态系统服务之间的权衡与协同关系^[18]。计算公式为:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X})(Y_{ij} - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y})^2}} \quad (7)$$

式中: R_{xy} 为相关系数, 取值为 $-1 \sim 1$; 当 $R_{xy} > 0$ 时, 表明 2 项生态系统服务之间呈协同关系; 当 $R_{xy} < 0$ 时, 则表明 2 项生态系统服务之间存在权衡关系。 X_{ij} 与 Y_{ij} 分别表示不同生态系统服务的值。

2) 生态系统服务对空间权衡协同关系 为进一步阐明不同生态系统服务之间在空间上的权衡协同关系, 本研究结合权衡协同准则 (TSC) 与权衡协同指数 (TSI), 对不同空间位置上各类生态系统服务之间的关系进行分析^[19]。

$$\text{TSC} = \frac{\text{ESC}_{i,t_2} - \text{ESC}_{i,t_1}}{\text{ESC}_{j,t_2} - \text{ESC}_{j,t_1}} \quad (8)$$

$$\text{TSI} = 1 - \left| |\Delta \text{ES}_i| - |\Delta \text{ES}_j| \right| \quad (9)$$

式中: ESC_{i,t_2} 与 ESC_{i,t_1} 分别为生态系统服务类型 i 在 t_2 与 t_1 时期的值; ESC_{j,t_2} 与 ESC_{j,t_1} 分别为生态系统服务类型 j 在 t_2 与 t_1 时期的取值。当 TSC 的结果 > 0 时, 表明 2 类生态系统服务在 2 个时期之间的变化方向一致, 因此, 服务对 ES_i 与 ES_j 判定为协同关系; 反之, 则表明二者之间存在权衡关系。 ΔES_i 与 ΔES_j 分别为生态系统服务类型 i 与 j 在 2 个时期的变化差值。 TSI 为权衡协同指数, 取值为 $0 \sim 1$, 数值越高, 表示生态系统服务之间的权衡或协同强度越强。

1.3.6 驱动因素分析

本研究采用偏最小二乘路径结构方程模型 (PLS-PM) 探究永寿县不同类型生态系统服务的驱动机制。该模型通过结合主成分分析、多元回归及迭代估计技术, 揭示观测变量与潜变量之间的关联关系^[20]。

所有统计分析、模型估计、bootstrap 抽样及模型验证均在 RStudio (4.5.1; R Core Team, 2023, Vienna, Austria) 中完成。 PLS-PM 结构方程模型分析使用 plsmpm 0.5 软件包实现。本研究选取与永寿县相关的 8

个影响因素,用于分析生态系统服务的驱动机制,具体包括气温、降水、土地利用、人口密度、潜在蒸散发、归一化植被指数及地形因素(高程与坡度)等。

2 结果与分析

2.1 土地利用变化特征

2000—2020 年,永寿县土地利用格局整体呈林地增加、草地减少、建设用地扩张、耕地相对稳定的变化特征(图 2)。研究期内,全县土地利用类型中耕地始终占据主导地位(表 2),面积维持在 564.72~

586.89 km²,虽有阶段性波动,但整体变化幅度较小;林地面积持续增加,由 141.56 km²增至 199.40 km²,表明区域生态恢复和植被建设成效较为显著。与之相对,草地面积持续下降,由 167.89 km²减少至 103.59 km²。建设用地扩张最为明显,由 2.54 km²增至 17.13 km²,反映出研究后期人为建设活动持续增强。水域面积整体小幅增加,灌木地面积总体较小且呈波动变化。总体来看,永寿县的土地利用转化主要表现为从草地向林地转化及耕地与草地间的相互转移。

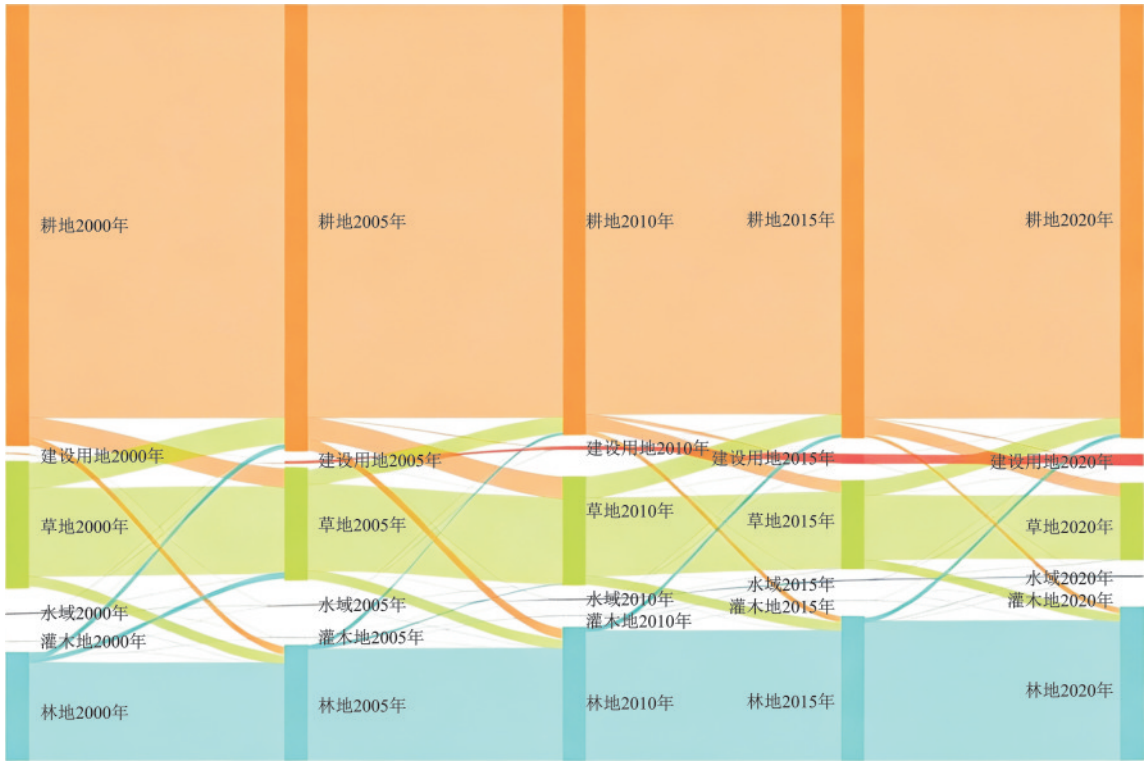


图 2 不同时期土地利用类型转移桑基图

Fig.2 Sankey diagram of land use transition in different periods

表 2 不同时期土地利用类型面积变化

Table 2	Area of different land-use types in different periods					km ²
土地利用类型	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	
耕地	577.999	586.892	564.721	569.465	569.405	
林地	141.560	150.467	174.355	188.062	199.402	
灌木地	0.637	1.462	1.019	0.724	0.268	
草地	167.891	148.152	144.719	119.043	103.599	
水域	0.659	0.898	1.033	1.044	1.487	
建设用地	2.548	3.423	5.446	12.957	17.134	

2.2 生态系统服务时空动态特征

碳固存总量在研究期内持续增加,由 2000 年的 5.86×10^6 t 增至 2020 年的 6.22×10^6 t,增幅约 6.14%,年际变化平稳(表 3)。空间上高值区主要分布在北部和西北部,沿沟壑与坡面呈片状或条带状

分布;低值区位于中南部地势平缓区。5 个时期高值区位置总体稳定,整体强度有所提高(图 3)。相反,生境质量总体呈下降趋势,且后期降幅更为明显。空间上高值区主要分布在西部及西北部,呈连续斑块状聚集;低值区在东部及中南部分布更广。高值区位置变化不大,但连续性与强度整体趋于减弱。

表 3 不同时期各生态系统服务总量

Table 3	Total amounts of different ecosystem services in different periods			
年份	土壤保持/ (10 ⁷ t)	碳固存/ (10 ⁶ t)	水源涵养/ (10 ⁸ m ³)	平均生境 质量指数
2000	2.22	5.86	3.14	0.418
2005	2.52	5.91	3.50	0.417
2010	2.83	6.10	3.87	0.415
2015	2.05	6.16	2.93	0.384
2020	2.45	6.22	3.49	0.374

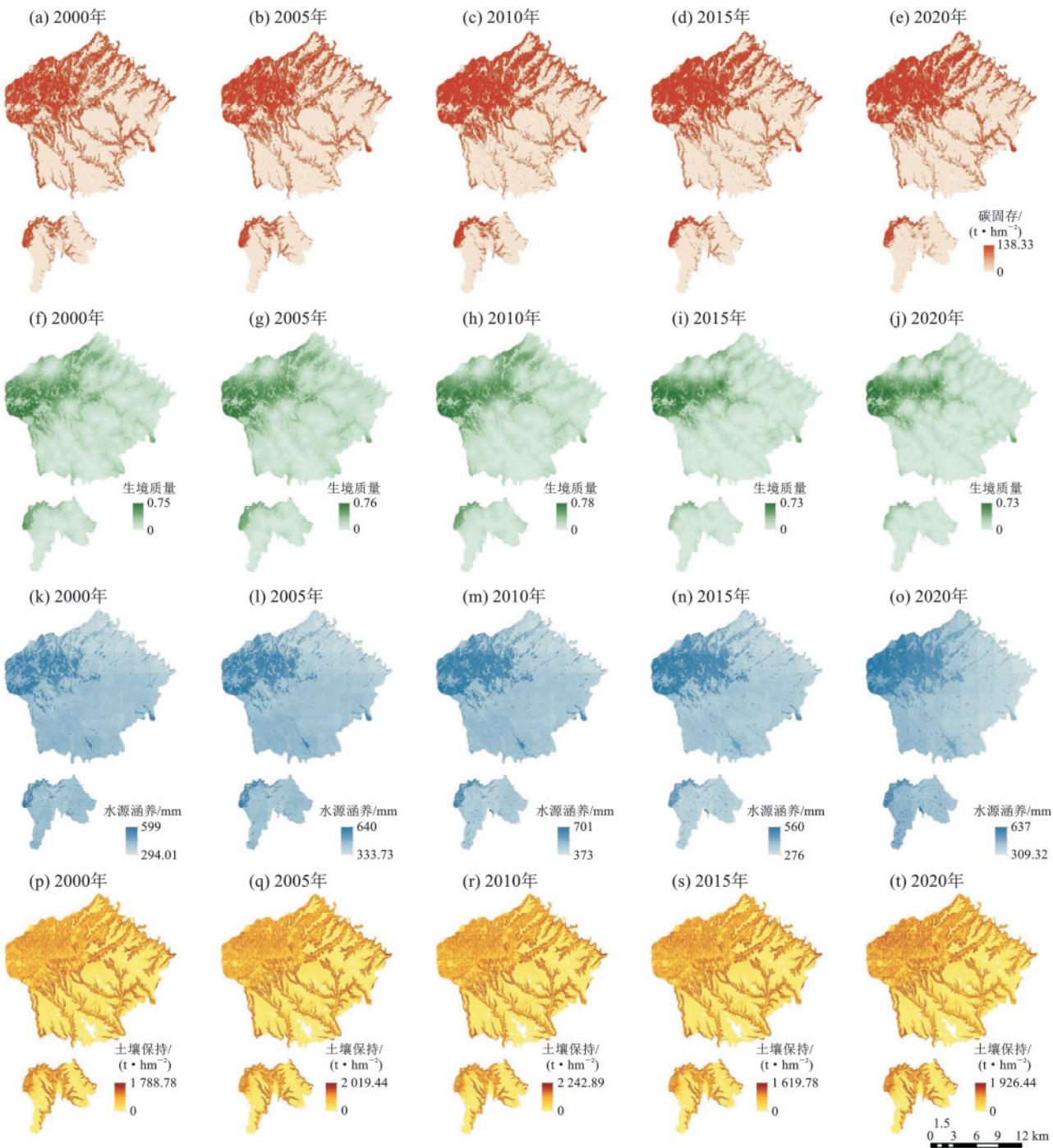


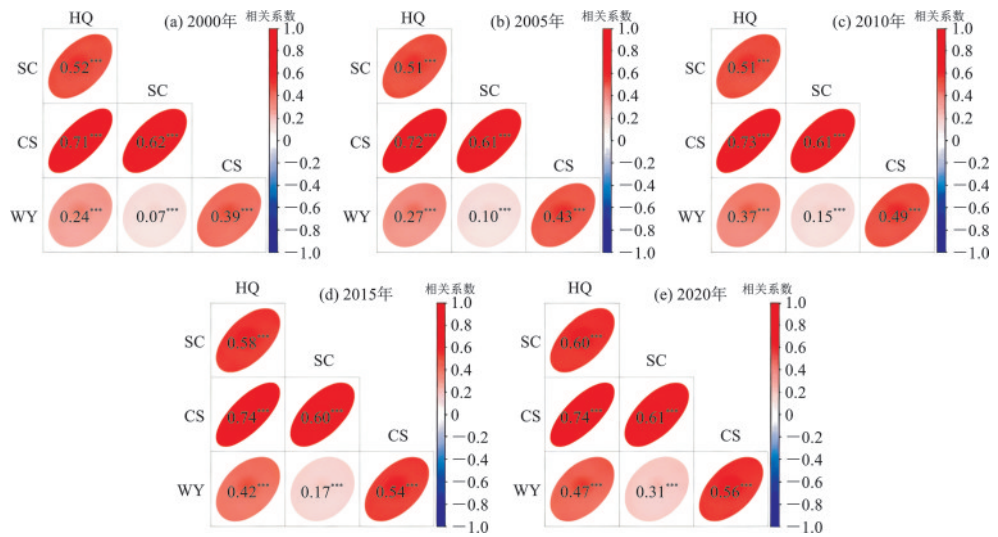
图 3 各类生态系统服务在不同时期的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution results of different ecosystem services in different periods

水源涵养服务呈明显的增强-下降-恢复阶段性波动变化,其高值区分布与碳固存服务类似,而部分年份则扩展形成相对连续斑块;低值区更多分布于东南部及南部。高值区分布总体保持稳定,但高值强度波动变化较显著。土壤保持同样呈增强-下降-恢复的波动特征,从空间上看,高值区沿北部-东北部及西北部坡面和沟壑呈条带状分布;低值区集中于中南部平缓区,整体分布无显著变化,但高值区强度同样存在阶段性变化。

2.3 生态系统服务间权衡协同关系

2.3.1 生态系统服务权衡协同关系动态 2000—2020年,永寿县生态系统服务间整体关系以协同为主,未出现显著的权衡关系。碳固存与生境质量、土壤保持间相关性水平最高,各时期相关系数均稳定超过0.60;生境质量与土壤保持相关性呈微弱增强趋势;水源涵养与其他服务的关系以中高协同为主且持续增强,其中水源涵养与生境质量相关性系数由0.24增至0.47(图4)。综合来看,各生态系统服务对全部呈显著协同关系,且水源涵养与其他服务的协同关系在后期显著增强。



注:CS为碳固存;SC为土壤保持;HQ为生物多样性;WY为水源涵养;*表示 $p<0.05$;**表示 $p<0.01$;***表示 $p<0.001$ 。

图 4 永寿县 2000—2020 年生态系统服务对相关性

Fig. 4 Correlation coefficients of ecosystem service pairs in Yongshou County from 2000 to 2020

2.3.2 生态系统服务权衡协同关系空间格局 永寿县各生态系统服务的权衡协同关系在空间上具有明显异质性,整体呈现以低等级关系为主导、不同等级斑块交错镶嵌的格局特征(图 5)。

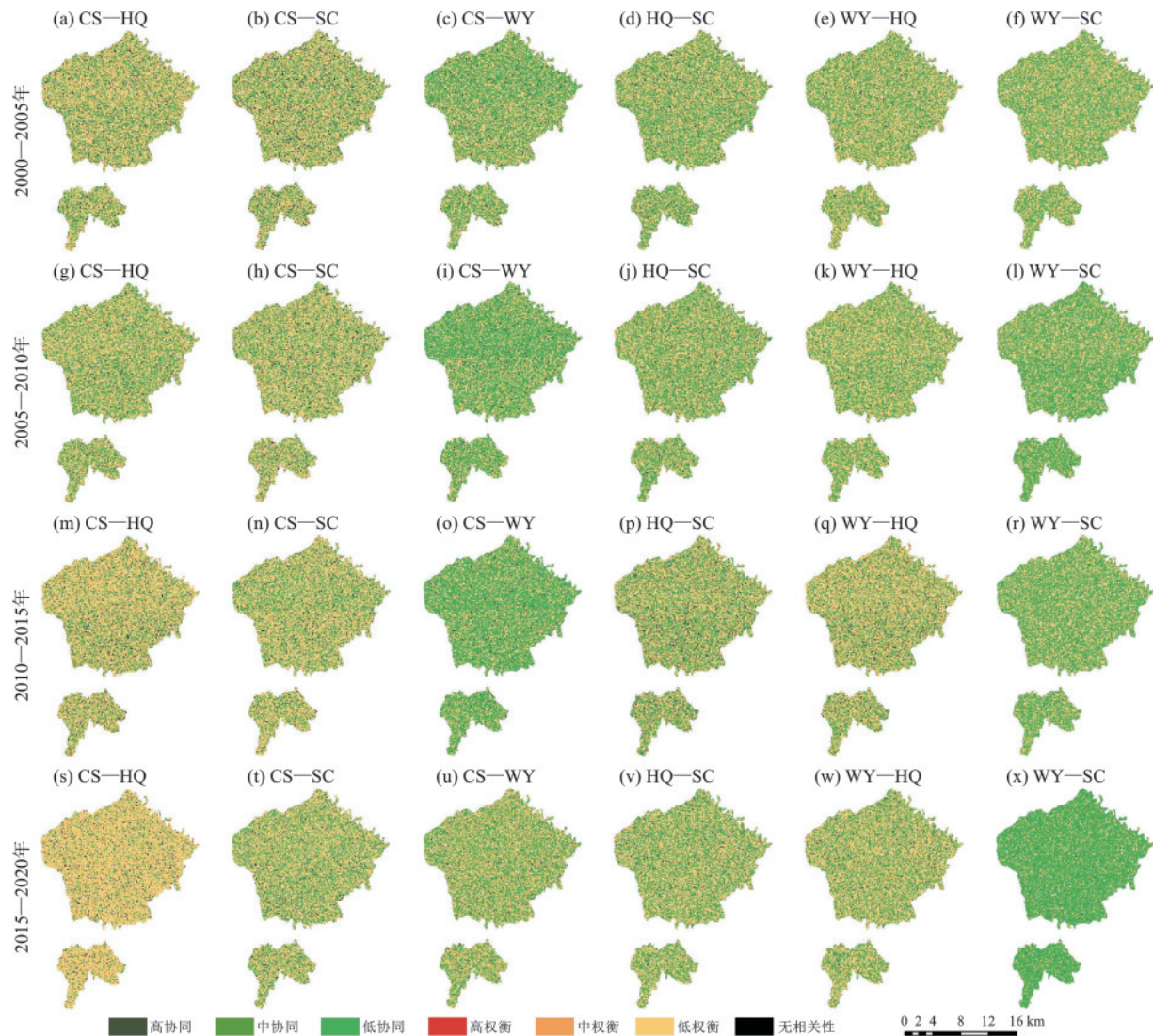


图 5 生态系统服务对权衡协同关系空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of trade-off and synergy relationships between ecosystem service pairs
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

总体上,低协同和低权衡区域构成主要空间格局,覆盖范围广,而中高等级关系区域面积占比较小,多表现为零散分布的小斑块,未形成大范围连续

集聚区(表4)。说明永寿县生态系统服务对关系的空间特征以弱强度、广覆盖的特征为主,而强协同或强权衡关系仅在局部出现。

表4 生态系统服务对各等级关系面积占比
Table 4 Area proportions of ecosystem service pair relationships at each level

年份	等级	CS_WY	CS_HQ	CS_SC	WY_HQ	WY_SC	HQ_SC	%
2000—2005	高协同	1.62	1.54	0.77	0.79	0.49	0.88	
	高权衡	0.03	0.40	0.59	0.24	0.15	0.45	
	低协同	56.18	37.60	41.71	48.84	55.67	51.35	
	低权衡	37.34	53.26	49.86	44.44	40.32	40.73	
	中协同	3.07	3.80	1.64	3.42	1.83	2.97	
	中权衡	0.07	0.87	1.24	1.34	1.05	1.78	
	无关系	1.71	2.53	4.20	0.92	0.49	1.83	
2005—2010	高协同	0.60	1.12	0.37	0.70	0.71	0.66	
	高权衡	0.01	0.11	0.28	0.21	0.27	0.46	
	低协同	66.28	44.18	43.02	50.42	66.21	53.61	
	低权衡	29.96	49.27	52.66	43.81	30.72	39.35	
	中协同	1.39	3.44	0.46	3.34	1.16	2.18	
	中权衡	0.11	0.17	0.27	1.07	0.77	2.50	
	无关系	1.76	1.82	3.07	0.55	0.28	1.33	
2010—2015	高协同	0.46	1.94	0.63	1.03	0.81	1.01	
	高权衡	0.16	0.16	0.12	1.03	0.09	1.29	
	低协同	69.66	29.86	41.83	39.77	63.16	46.42	
	低权衡	26.93	59.29	54.12	50.30	34.36	42.05	
	中协同	1.23	5.49	0.75	3.55	1.25	2.75	
	中权衡	0.50	0.67	0.17	2.27	0.40	3.81	
	无关系	1.18	2.69	2.49	2.17	0.04	2.77	
2015—2020	高协同	0.67	1.03	0.51	0.35	0.55	0.22	
	高权衡	0.12	0.34	0.32	0.67	0.13	0.59	
	低协同	47.92	20.49	45.63	45.84	81.21	50.22	
	低权衡	42.19	73.50	50.66	47.32	13.82	45.46	
	中协同	4.55	2.38	0.55	2.16	3.54	0.92	
	中权衡	3.60	0.21	0.29	2.57	0.71	1.26	
	无关系	1.07	2.17	2.15	1.20	0.15	1.42	

碳固存与水源涵养在4个时期均以协同关系占主导,前3个时期协同面积占比均超过60%。空间上,协同关系区覆盖范围较广,其主要分布于中部、北部的林草地和耕地等植被覆盖丰富区;权衡关系区面积较小,主要以零散小斑块镶嵌分布于协同区之间;2015—2020年,协同占比有所下降,但整体仍以协同格局为主。水源涵养与土壤保持同样表现出显著的协同主导特征,协同面积占比由57.99%持续升至85.30%,其中低协同占比高达81.21%。空间上,低协同区域分布最广且连续性最强,其扩展态势随时间不断增强,而权衡区域则仅零星分布于局部地段,空间破碎度较高。

碳固存与生境质量表现为明显的权衡主导格局,权衡面积占比由54.53%增至74.05%,且始终以低权衡区域为主。空间上,低权衡区覆盖广、分布较连续,是该服务对关系最主要的空间特征;反之,协同区面积较小,多呈零散斑块状分布的特点。碳固存与土壤保持虽同样以权衡面积略占优势,但比例始终维持在51%~55%,协同与权衡区域在空间上均呈细碎交错分布,未表现出明显的单一关系主导集聚区,说明二者关系整体较为均衡,但空间破碎化特征明显。

水源涵养与生境质量在前期以协同面积略占优势,后期则被权衡面积反超,表现出阶段性转变的特征;空间上,该服务的关系在各个时期则始终以明显

的低强度协同与权衡斑块交错分布为主。生境质量与土壤保持在研究期间协同面积占比略高于权衡面积,但差距较小,各等级关系区域变化幅度有限。空间上,协同与权衡区域均较为分散,未形成显著集聚中心。综合来看,永寿县生态系统服务关系在空间上呈“低等级广布、强关系零散、协同与权衡区域镶嵌并存”的基本特征,其中水源涵养相关服务对更易形成连续协同区,而涉及生境质量的服务对则更易表现出分散的局地权衡空间格局。

2.4 生态系统服务驱动因素分析

2000—2020年5个时期的PLS-PM模型分析表明,PLS-PM模型对关键驱动因素与生态系统服务具有较强解释能力(图6)。4项生态系统服务的解释度总体较高,其中土壤保持服务 R^2 为0.94~0.95,生境质量服务 R^2 为0.67~0.73,碳固存服务 R^2 由0.59提升至0.72,水源涵养服务 R^2 由0.52提升至0.82,说明模型在各时期均能较好识别各类生态系统服务的主要驱动因素。

驱动机制结果显示,2条作用路径发生显著变化:1)“降水-归一化植被指数-服务”的路径系数持续降低,即降水对归一化植被指数的促进作用逐期减弱,归一化植被指数对各服务的促进作用也同步下降,导致以植被为中介的路径影响日益减弱。2)“人口密度-土地利用-服务”的影响路径呈阶段性方向转变;人口密度对土地利用的作用由负向转为正向,同时土地利用对植被和各项服务的作用在不同时段出现反转,表明土地利用既可通过直接路径影响服务变化,也通过作用于植被状态间接影响服务变化。“温度-潜在蒸散发-植被/服务”的影响路径变化波动显著,说明气候因素对服务的整体影响较为复杂。

总体而言,水源涵养服务主要受水分收支过程稳定约束,降水与潜在蒸散发分别呈稳定的促进和抑制作用,且在后期具体表现为对降水补给的依赖增强、潜在蒸散的抑制影响相对减弱;土壤保持服务则表现出典型的“地形主导”特征,坡度在各时期均为主导作用,表明其空间格局主要由地形条件奠定,其他因素则起到局部调节的作用;土地利用对碳固存的影响最为敏感且出现多次正负方向反转,并且植被的促进作用持续存在但日益减弱;生境质量的驱动机制相对稳定,温度与降水分别维持长期抑制与促进作用,但土地利用影响的阶段性波动同样是导致其不同时期出现显著差异的关键原因。

研究期内永寿县4项生态系统服务呈现出明显差异化变化,从而引起不同生态系统服务间关系亦呈不同演变趋势。结合驱动因素分析结果可知,

不同服务对关系的变化与各单项生态系统服务对驱动因素的响应差异密切相关:水源涵养和土壤保持间关系受降水、地形及植被恢复等因素影响表现出较强一致性,而与碳固存、生境质量存在关联的服务关系则由于土地利用变化和气候因子的综合影响表现出更明显的差异化响应。

总体来看,生态系统服务权衡协同关系的变化,与各项服务变化方向、变化幅度及其对驱动因素的响应一致性密切相关。

3 讨论

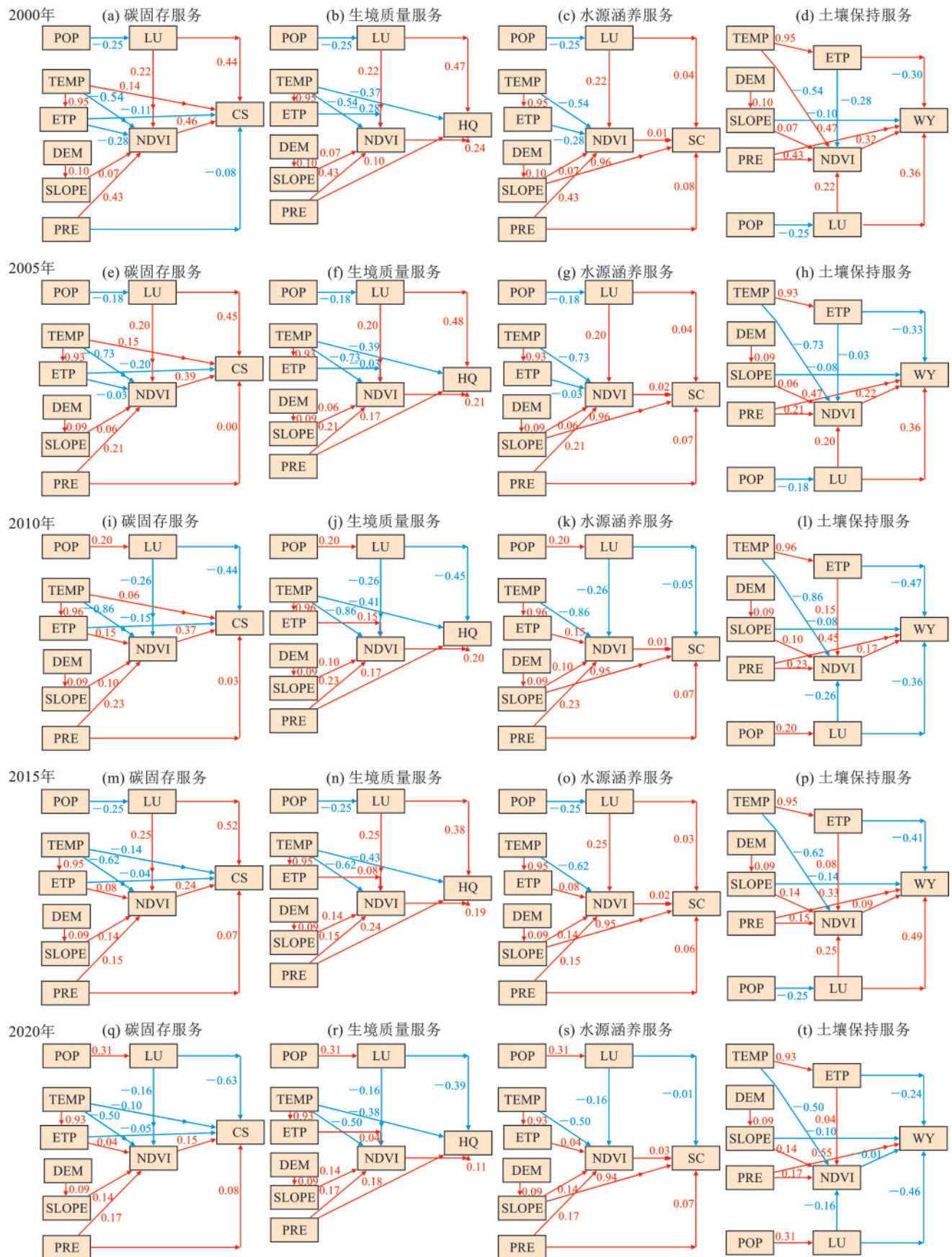
3.1 生态系统服务时空动态演变

2000—2020年,永寿县4项生态系统服务的演变轨迹差异显著,这是自然与人为因素共同作用的结果。碳固存高值区集中分布在北部和西北部植被密集区,其持续增长主要得益于退耕还林(草)等生态工程的推进,有效促进植被恢复与生物量累积,与张祎等^[21]的研究结论相吻合,充分印证以植被恢复为核心的生态治理对提升黄土高原碳汇能力具有持续积极作用。

生境质量总体下降反映气候变化与人类活动的叠加压力。Tang等^[22]在黄河流域人口密集区的研究表明,城镇扩张会显著压低生境质量并加剧退化趋势;Sun等^[23]以松嫩平原为例研究指出,自然因素与人为扰动共同决定生境质量,且在局地尺度人类扰动效应可能超过自然因素并随时期发生变化。因此,永寿县局部植被恢复的正向效应难以完全抵消人为扰动的总体胁迫,最终导致县域生态环境质量水平整体下降。

土壤保持与水源涵养均表现为“增强-下降-恢复”的波动过程,提示其年际变化可能受到气候水分条件与生态治理过程的共同影响,与Chen等^[24]的研究结论相似。Chen等^[24]指出,黄土高原土壤保持服务受到土地利用与气候因素(降雨、温度)的共同主导,且后者的年际变异性可导致服务的显著波动;同时Bai等^[25]研究表明,植被重建对土壤侵蚀的抑制效果随林龄和群落成熟度变化,因此2项服务的变化趋势与气候效应变化及生态工程效益波动紧密关联。

综上所述,4项服务的时空动态是自然因素波动、生态工程效益变化及持续人为干扰叠加的综合体现。碳固存对植被恢复响应积极而持续,生境质量对人类干扰更为敏感,2项水土保持服务则处于动态平衡之中,表明在生态脆弱区,生态服务功能的巩固是一个长期且极易反复的过程。



注: CS为碳固存; SC为土壤保持; HQ为生境质量; WY为水源涵养; TEMP为温度; ETP为潜在蒸散发; PRE为降水量; NDVI为归一化植被指数; DEM为高程; SLOPE为坡度; POP为人口密度; LU为土地利用。

图6 不同时期各生态系统服务驱动机制结果

Fig.6 Driving mechanism results of different ecosystem services in different periods

3.2 生态系统服务时空权衡协同关系动态演变

2000—2020年永寿县生态系统服务总体以协同为主且后期协同关系增强,与Yu等^[26]基于黄土高原退耕还林(草)工程的研究一致,即生态工程通过提升植被覆盖度,能够强化多项服务之间的正向关联与协同关系。需要指出的是,已有研究^[27]发现,流域尺度下植被恢复在提升碳固存过程的同时可能伴随径流下降,并强化“水-碳”权衡关系。本研究发现,水源涵养与碳固存协同关系显著增强,说明不同区域的水-碳关系可能受空间尺度、水热条件及下垫面差异影响而呈现差异化响应,实际管理中应关注植被恢复的水资源承载力阈值与潜在转折风险。

永寿县各服务对关系的空间格局呈显著异质性。Chang等^[28]研究指出,各服务间关系对空间尺度及土地利用结构差异高度敏感。本研究中碳固存与生境质量存在较广泛的低强度权衡区,可能与人工林占比高有关;刘建利等^[29]研究发现,人工刺槐林的林分结构与林下植物多样性受密度和立地条件制约,难以形成复杂林下生境,从而易诱发“碳固存提升-生境质量改善”的局地冲突,表明永寿县碳固存与土壤保持、水源涵养总体呈协同关系,但空间上夹杂细碎的权衡斑块。此格局的形成受坡度、土壤厚度及土地利用类型等多因素耦合调控。

水源涵养与土壤保持的协同关系逐步增强,反映二者在区域尺度上的变化趋于一致。前人^[30]研究证明,在工程干预或水土保持措施作用下,径流与输沙过程会被同步削弱,从而导致土壤保持与水分保持效应的共同变化。相比之下,生境质量与其他服务间的关系在空间上则呈现更强的不稳定性,说明生境质量更易受人类活动强度等局地因素扰动,空间格局异质性更显著。

综上可知,永寿县生态系统服务间关系呈“整体协同增强”与“局部权衡显现”并存的特征。表明区域生态工程在整体上取得显著协同增效成果,但也在局部引起服务间的潜在竞争。因此,未来生态管理应从追求单一服务或面积增长,转向注重景观尺度的空间优化,以实现区域生态系统服务的可持续均衡提升。

3.3 生态系统服务及其权衡协同关系变化的驱动因素分析

综合驱动因素分析结果可知,永寿县生态系统服务及其权衡协同关系的演变,并非由单一因素直接决定,而是在自然条件约束下,不同生态系统服务对人为干扰表现出差异化响应的结果。总体而言,自然因素构成各类服务变化的稳定框架,而土地利用变化等人为因素则是导致服务趋势波动、关系转变及局地不稳定的重要干扰来源^[12]。同时,植被对

各类服务的促进作用虽持续存在,但整体呈减弱趋势,表明区域生态修复效应在后期更易受到土地利用调整和外部扰动影响。

从单一生态系统服务看,碳固存总体持续增加,其驱动因素结果与黄土高原既有研究总体一致,即耕地向林地与草地转化有利于碳库累积^[31]。本研究进一步发现,后期土地利用对碳固存的影响更为敏感且负向作用增强,说明当前用地调整与人为扰动可能已对既有碳库稳定性造成冲击,且生态恢复带来的碳增益仍可能受到气候变化负面影响^[31]。生境质量持续下降,表明其更易受到气候胁迫与人为干扰等叠加影响,与已有研究^[23]结论一致。土壤保持服务呈“地形与降水主导、人为调节”特征,其宏观格局主要受坡度和降水控制^[32],而植被恢复和土地利用变化更多在局部尺度上调节服务强度。水源涵养服务则受“气候控制-下垫面响应调节”共同作用,降水和潜在蒸散发是其基础约束,而人类活动通过改变下垫面状态进一步重塑其波动特征^[33],因此其变化相较其他服务更不稳定。

不同生态系统服务对驱动因素的响应差异,进一步影响权衡协同关系的演变。当2类服务在变化方向及驱动响应上较为一致时,更易形成协同关系;当其响应方向、作用强度或阶段性敏感性存在差异时,则更易表现为权衡,甚至由协同转向权衡。水源涵养与土壤保持是协同增强最明显的服务对,说明其在降水补给、坡度条件及生态修复措施作用下具有较强一致性响应。碳固存与生境质量则表现为最典型的持续权衡扩张型,前者持续增加而后者持续下降,表明在土地利用调整和植被恢复推动碳积累的同时,区域生境质量并未同步改善,进而导致二者间权衡关系不断强化。水源涵养与生境质量由前期弱协同转为后期弱权衡,也反映出在研究后期土地利用变化和人为扰动增强背景下,2类服务的响应差异进一步扩大。相较之下,其余3类服务对整体变化幅度较小,更多表现为空间关系格局的平稳波动。

总体来看,永寿县生态系统服务权衡协同关系的演变,与不同生态系统服务对驱动因素的响应是否一致,以及各服务在自然约束和人为扰动共同作用下变化方向与幅度是否匹配密切相关。因此,在黄土丘陵沟壑区县域生态修复和国土空间优化过程中,应更加重视多种生态系统服务之间的协同配置与潜在权衡,避免仅以单项生态系统服务提升作为管理目标,并通过稳定、可持续的土地利用政策提升区域生态功能的长期稳定性^[8]。

4 结 论

1) 研究期内,永寿县土地利用格局总体表现为林地增加、草地减少、建设用地扩张和耕地相对稳定。土地利用转化主要体现为草地向林地转移及耕地与草地间的相互转移,说明区域生态恢复措施持续推动生态用地结构优化。

2) 生态系统服务时空演变趋势差异显著。碳固存持续增长;生境质量总体下降且高值区强度减弱;土壤保持与水源涵养均呈增强-下降-恢复波动,各项服务的高值区主要分布于永寿县北部及西北部地区。

3) 生态系统服务关系呈整体协同增强与局部权衡凸显特征。县域尺度所有服务对关系显著协同且增强。空间上多数服务对以低等级权衡协同关系为主,除水源涵养与土壤保持等服务对形成连续协同集聚区外,其余服务对无显著空间聚集特征,而碳固存与生境质量间低强度权衡区域的广泛存在,揭示单一人工植被管理可能引发各服务间的局部冲突。

4) 驱动机制结果揭示自然因素稳定作用与人为干扰影响的主要特征。自然因素奠定区域生态系统服务的基本格局;坡度对土壤保持具有绝对稳定主导作用;降水与潜在蒸散发是水源涵养的决定性控制因素。土地利用作为关键人为因素,对各项生态系统服务的影响发生多次剧烈变化,是导致各项服务出现阶段性波动的关键干扰源;植被因素对多项服务的直接影响呈衰减趋势。

综上可知,永寿县生态系统服务演变受自然与人为因素共同驱动。未来生态管理应在自然环境条件改善的基础上,通过优化土地利用、调控人为活动强度以降低干扰和波动影响,推动区域生态管理修复向可持续性与高质量转型,实现区域生态系统服务长期均衡与持续提升。

参考文献:

- [1] 贾芳芳.基于InVEST模型的赣江流域生态系统服务功能评估[D].北京:中国地质大学(北京),2014.
Jia Fangfang. Invest model based ecosystem services evaluation with case study on Ganjiang River basin [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.
- [2] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [3] 吕倩,高紫妍,雒瑶,等.京津冀县域生态系统固碳服务“供-需-流”时空格局与碳补偿分区[J].环境科学,2026, 47(6): 3993-4006.
Lü Qian, Gao Ziyang, Luo Yao, et al. Spatiotemporal pattern and carbon compensation zoning of the "supply-demand-flow" ecosystem carbon sequestration services in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Environmental Science, 2026, 47(6): 3993-4006.
- [4] Li Yingjie, Zhang Liwei, Yan Junping, et al. Mapping the hotspots and coldspots of ecosystem services in conservation priority setting [J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(6): 681-696.
- [5] Fu Bojie, Wang Shuai, Liu Yu, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2017, 45: 223-243.
- [6] Lü Yihe, Fu Bojie, Feng Xiaoming, et al. A policy-driven large scale ecological restoration: Quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China [J]. PLoS One, 2012, 7(2): e31782.
- [7] 张琨,吕一河,傅伯杰.黄土高原典型区植被恢复及其对生态系统服务的影响[J].生态与农村环境学报,2017, 33(1): 23-31.
Zhang Kun, Lü Yihe, Fu Bojie. Vegetation restoration and its influences on ecosystem services in areas typical of the Loess Plateau [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, 33(1): 23-31.
- [8] 王诗琦,刘焱序,李琰,等.近20年黄土高原生态系统服务研究进展[J].生态学报,2023, 43(1): 26-37.
Wang Shiqi, Liu Yanxu, Li Yan, et al. Research progress on the ecosystem services on the Loess Plateau during the recent 20 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1): 26-37.
- [9] Liu Qi, Qiao Jiajun, Li Mengjuan, et al. Spatiotemporal heterogeneity of ecosystem service interactions and their drivers at different spatial scales in the Yellow River basin [J]. Science of the Total Environment, 2024, 908: e168486.
- [10] 文惠,邓西鹏,李颖,等.整合生态空间的县域生态安全格局识别与构建:以武夷山市为例[J].生态学杂志, 2023, 42(5): 1197-1204.
Wen Hui, Deng Xipeng, Li Ying, et al. Identification and construction of county-level ecological security pattern integrating ecological space: A case study of Wuyishan City [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(5): 1197-1204.
- [11] 袁坤宇,曹扬,杨洁,等.黄土残塬沟壑区不同林龄与坡向人工刺槐林生态系统服务协同关系[J].水土保持通报, 2020, 40(5): 97-105.
Yuan Kunyu, Cao Yang, Yang Jie, et al. Synergy relation between ecosystem services of *Robinia pseudoacacia* plantation with different age and slope aspects in residual gully region of Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 97-105.
- [12] Zhang Jing, Qu Mei, Wang Cheng, et al. Quantifying landscape pattern and ecosystem service value changes: A case study at the county level in the Chinese Loess Plateau [J].

- Global Ecology and Conservation, 2020, 23: e01110.
- [13] 张晶. 永寿县景观格局变化及生态系统服务功能评价[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- Zhang Jing. Landscape change and ecosystem service function evaluation in Yongshou County [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.
- [14] Zubaida M. Trade-offs and synergies between ecosystem services in Yutian County along the Keriya River basin, northwest China [J]. Journal of Arid Land, 2024, 16(7): 943-962.
- [15] Liang Youjia, Liu Lijun. An integrated ecosystem service assessment in an artificial desert oasis of northwestern China [J]. Journal of Land Use Science, 2017, 12(2/3): 154-167.
- [16] Hamel P, Guswa A J. Uncertainty analysis of a spatially explicit annual water-balance model: Case study of the Cape Fear basin, North Carolina [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(2): 839-853.
- [17] Zhang Jiayi, Zhang Zhengyong, Liu Lin, et al. Scaling effects of ecosystem service trade-off and synergy in arid inland river basins: A case study of the Manas River basin of Xinjiang, China [J]. Ecological Indicators, 2025, 173: e113358.
- [18] Gou Mengmeng, Li Le, Ouyang Shuai, et al. Identifying and analyzing ecosystem service bundles and their socio-ecological drivers in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 307: e127208.
- [19] Xue Chenli, Chen Xinghua, Xue Lirong, et al. Modeling the spatially heterogeneous relationships between trade-offs 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.
- [20] Hair J F, Hult G T M, Ringle C M, et al. Partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM) using R: A workbook [M]. Cham: Springer International Publishing, 2021.
- [21] 张玮, 李鹏, 肖列, 等. 黄土高原丘陵区地形和土地利用对土壤有机碳的影响 [J]. 土壤学报, 2019, 56(5): 1140-1150.
- Zhang Yi, Li Peng, Xiao Lie, et al. Effects of topography and land use on soil organic carbon in hilly region of Loess Plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(5): 1140-1150.
- [22] Tang Jianjun, Zhou Liang, Dang Xuewei, et al. Impacts and predictions of urban expansion on habitat quality in the densely populated areas: A case study of the Yellow River basin, China [J]. Ecological Indicators, 2023, 151: e110320.
- [23] Sun Xiuli, Li Yuehui, Hu Yuanman, et al. Human and natural factors affect habitat quality in ecologically fragile areas: Evidence from Songnen Plain, China [J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: e1444163.
- [24] Chen Jingshu, Chen Yiping, Wang Kaibo, et al. Impacts of land use, rainfall, and temperature on soil conservation in the Loess Plateau of China [J]. Catena, 2024, 239: e107883.
- [25] Bai Ruihua, Wang Xiaozhen, Li Jiwei, et al. The impact of vegetation reconstruction on soil erosion in the Loess Plateau [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 363: e121382.
- [26] Yu Ziyue, Deng Xiangzheng, Cheshmehzangi A. The grain for green program enhanced synergies between ecosystem regulating services in Loess Plateau, China [J]. Remote Sensing, 2022, 14(23): e5940.
- [27] Yuan Yujie, Gao Xuerui, Huang Kejing, et al. Evolution of the water-carbon relationship at basin scale under the background of a vegetation restoration program [J]. Land Degradation and Development, 2023, 34(10): 2975-2989.
- [28] Chang Yaowen, Wang Yunpeng, Yuan Li, et al. Spatial scale effects on the trade-offs and synergies of ecosystem services in China's Huaihe River basin [J]. Scientific Reports, 2025, 15: e22301.
- [29] 刘建利, 李凯荣, 易亮, 等. 黄土高原丘陵区人工刺槐林林分结构及林下植物多样性研究 [J]. 水土保持通报, 2008, 28(3): 49-52.
- Liu Jianli, Li Kairong, Yi Liang, et al. Structure of *Robinia pseudoacacia* plantation and undergrowth plant diversity in the hilly area of the Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(3): 49-52.
- [30] Yang Haiyan, Wang Taihua, Yang Dawen, et al. Runoff and sediment effect of the soil-water conservation measures in a typical river basin of the Loess Plateau [J]. Catena, 2024, 243: e108218.
- [31] Deng Lei, Shangguan Zhouping, Sweeney S. "Grain for Green" driven land use change and carbon sequestration on the Loess Plateau, China [J]. Scientific Reports, 2014, 4: e7039.
- [32] Sun Wenyi, Shao Quanqin, Liu Jiyan, et al. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China [J]. Catena, 2014, 121: 151-163.
- [33] Hui Le, Wang Hao, Liu Jiamin, et al. Assessing the spatiotemporal changes and drivers of ecological security by integrating ecosystem health and ecosystem services in Loess Plateau, China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2025, 35(3): 459-482.