

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.01.021 CSTR:32310.14.stbcbx.2026.01.021

李婷,支若晨,张超.延河流域生态系统服务时空演变特征及权衡协同关系[J].水土保持学报,2026,40(1):120-131,143.

LI Ting, ZHI Ruochen, ZHANG Chao. Spatiotemporal evolution characteristics and trade-off/synergy relationships of ecosystem services in the Yanhe River basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1):120-131,143.

延河流域生态系统服务时空演变特征及权衡协同关系

李婷^{1,2}, 支若晨^{1,2}, 张超^{1,2,3}

(1.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所),陕西杨凌712100; 2.西北农林科技大学水土保持与荒漠化整治国家重点实验室,陕西杨凌712100; 3.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌712100)

摘要: [目的] 探究延河流域生态系统服务的时空演变及权衡/协同关系,为该流域开展针对性水土流失治理,实现区域高质量发展提供科学依据。 [方法] 基于1980—2020年土地利用数据、土壤数据、气象数据和数字高程模型(DEM)数据等多源数据,运用ArcGIS和InVEST等模型,评估该流域1980—2020年4种生态系统服务的时空演变格局及其权衡/协同关系。 [结果] 1)研究期内,流域的产水量年际平均值为 $2.04 \times 10^8 \text{ m}^3$ (径流深26.55 mm),呈“几”字形变化趋势,单位面积产水量先升后降再升。空间分布上,延河流域的产水量整体呈中游高上下游低的分布特征。2)土壤保持总量总体呈“U”形波动增加趋势,单位面积最高值在2010—2020年增速较快。空间分布上,土壤保持量高值区分布较为分散,表现出南部高北部低的分布规律。3)碳储量逐年增长,单位面积碳储量高值区由南向北逐步扩散,表现出南高北低的分布规律。4)流域平均生境质量指数变化呈逐年下降趋势,整体生境质量较低,南部林区生境质量较好,低值区沿河道呈条带状分布。5)流域内4种生态系统服务间存在显著相关性($p < 0.01$),产水量-碳储量及产水量-生境质量呈显著权衡关系,土壤保持、碳储量和生境质量间互呈协同关系,产水量-土壤保持在1980年为权衡关系,随后转为协同关系,在2010年转为权衡关系,大部分区域没有明显的权衡和协同关系。从整体看,流域内的协同区域不断缩小,权衡区域面积不断扩大。各生态系统的高-高协同主要分布在中下游地区,低-低协同主要分布在上游地区,权衡关系则主要分散在中上游地区。 [结论] 研究结果通过定量评估揭示延河流域的生态系统服务的时空演变格局及其权衡/协同关系,为黄土高原生态系统服务综合效益的提升与资源配置优化提供科学依据。

关键词: 生态系统服务; InVEST模型; 权衡协同; 延河流域

中图分类号: X826.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2026)01-0120-12

Spatiotemporal Evolution Characteristics and Trade-off/Synergy Relationships of Ecosystem Services in the Yanhe River Basin

LI Ting^{1,2}, ZHI Ruochen^{1,2}, ZHANG Chao^{1,2,3}

(1. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] This study investigates the spatiotemporal evolution characteristics and trade-off/synergy relationships of ecosystem services in the Yanhe River basin, aiming to provide a scientific basis for targeted soil and water conservation and regional high-quality development. [Methods] Based on multi-source data, including land use data, soil data, meteorological data, and digital elevation model (DEM) data from 1980 to 2020, this study applied ArcGIS and the InVEST model to assess the spatiotemporal evolution patterns and trade-off/synergy relationships of four ecosystem services in the Yanhe River basin during this period. [Results] 1) During

收稿日期: 2025-06-29 修回日期: 2025-07-26 录用日期: 2025-08-31 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-09-25

资助项目: 国家重点研发计划课题项目(2023YFF1305103)

第一作者: 李婷(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态系统服务研究。E-mail: ting18376557163@163.com

通信作者: 张超(1985—), 男, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事生态恢复及环境效应研究。E-mail: zhangchaolynn@163.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

the study period, the average annual water yield in the basin was $2.04 \times 10^8 \text{ m}^3$ (with a runoff depth of 26.55 mm), showing an Ω -shaped trend, with the water yield per unit area increasing first, followed by a decline, and finally increasing again. Spatially, the water yield was generally higher in the middle reaches and lower in the upper and lower reaches. 2) The total soil conservation displayed a U-shaped fluctuating increasing trend, with the highest per-unit-area values rising rapidly during 2010—2020. Spatially, high-value zones of soil conservation were scattered, following a distribution pattern of higher in the south and lower in the north. 3) Carbon storage increased year by year, with high-value zones of carbon storage per unit area progressively expanding from south to north, showing a distribution pattern of higher in the south and lower in the north. 4) The average habitat quality index of the basin showed a continuous decreasing trend annually, with overall low habitat quality. The habitat quality in the southern forested areas was relatively good, while low-value zones were distributed in strip patterns along river channels. 5) Significant correlations ($p < 0.01$) were observed among the four ecosystem services in the Yanhe River basin. Water yield and carbon storage, as well as water yield and habitat quality, demonstrated significant trade-off relationships. Soil conservation, carbon storage, and habitat quality demonstrated synergistic relationships with each other. The water yield-soil conservation relationship was a trade-off in 1980, then shifted to synergy, and returned to trade-off in 2010. Most regions exhibited no pronounced trade-offs or synergies. Overall, synergistic areas within the basin progressively diminished, while trade-off areas expanded. High-high synergy clusters were primarily concentrated in the mid-lower reaches, low-low synergy was mainly in the upper reaches, and trade-off relationships were predominantly scattered in the mid-upper reaches. [Conclusion] The quantitative assessment of this study reveals the spatiotemporal evolution patterns and trade-off/synergy relationships of ecosystem services in the Yanhe River basin, providing a scientific basis for enhancing the integrated benefits of ecosystem services and optimizing resource allocation on the Loess Plateau.

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

Received: 2025-06-29

Revised: 2025-07-26

Accepted: 2025-08-31

Online(www.cnki.net): 2025-09-25

黄土高原是世界上水土流失最严重的地区之一,长期不合理的人类活动是植被覆盖度降低,引起水土流失的重要原因^[1]。延河流域是黄土高原丘陵沟壑区的典型区域,自20世纪70年代起,延河流域开展大范围的水土流失综合治理,2020年,延河流域的植被覆盖度超过87.8%^[2],水土流失得到基本控制。作为全国最早、最快实施该项生态工程的区域^[3],以延河流域为研究区的研究被视为黄土高原综合治理的典型代表,其治理经验和模式对于其他区域具有重要的借鉴意义。

生态系统服务是生态质量情况的反映,对人类可持续发展起到重要作用^[4]。各生态系统服务间普遍存在着相互作用,具有此消彼长的权衡关系与相互增益的协同关系。已有研究^[5-6]表明,近60%的已知生态系统服务由于人类不合理的开发利用在过去显著退化,对区域的生态发展产生影响。近年来,随着国内外重视生态系统功能,定量化评估区域生态系统服务,研究生态系统服务间的权衡/协同关系对于区域的发展具有重要意义。

近年来,针对延河流域生态系统服务进行大量

研究^[7-10],主要集中于流域内单项的水源涵养、土壤保持等服务,研究结果因尺度、时段的不同而异。何佳瑛等^[11]研究表明,延河流域的土壤保持与土壤侵蚀效应与土地利用变化息息相关;张建香等^[12]基于空间相关分析法确定延河流域各生态系统服务的阈值效应。而针对长序列多时段的多重生态系统服务评估及权衡/协同关系的研究较少,有待进一步研究。系统评估延河流域各生态系统服务的空间格局,量化生态系统服务间的相互关系,对于黄土高原区域发展规划研究与资源的优化配置利用具有重要意义。

基于此,本研究采用InVEST模型,通过多源数据定量评估1980—2020年延河流域在水源涵养、土壤保持、固碳及生境质量等关键生态系统服务的时空演变格局,分析其相互作用关系,并探讨长时间序列下生态系统服务的演变和相互关系对黄河流域整体生态治理,开展区域性水土流失治理的启示,以期黄土高原流域生态保护修复规划和生态环境综合治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

延河(36°23'~37°17'N, 108°45'~110°28'E)是黄河的一级支流,发源于靖边县天赐湾镇周山,全长286.9 km,由西北向东南注入黄河,是陕北的第2条大河(图1)。延河流域面积7 845.11 km²,属于黄土丘陵沟壑区。地势西北高东南低,从上游至下游,地貌依次为崩梁丘陵沟壑区、崩状丘陵沟壑区,及破碎平原区,以黄绵土为主,海拔高度为495~1 795 m,平均海拔1 200 m。该流域为暖温带半干旱大陆性季风类型,年平均气温8.8~10.2℃,年平均降水量500 mm,春季干旱多风,夏季高温多雨,秋季凉湿多雨,冬季寒冷干燥。流域土地利用类型较多,主要有林地、草地、灌木、耕地、建筑用地、水域和裸地。受降雨和地形影响,易遭受水土流失,近年来采取一系列的水土保持措施及植被覆盖措施,流域内生态状况逐渐好转。

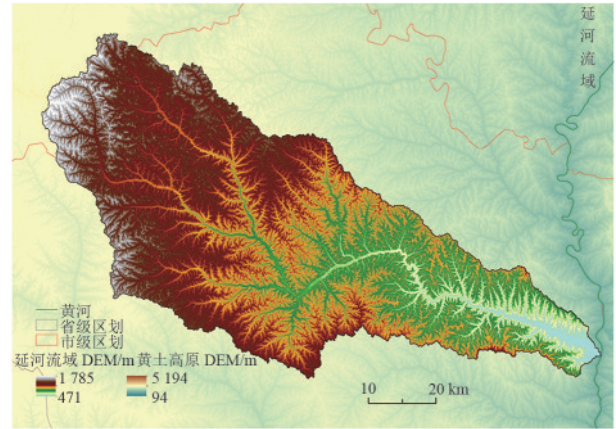


图1 延河流域地理概况

Fig. 1 Geographical overview of the Yanhe River basin

1.2 数据来源与处理

本研究使用的数据主要包括数字高程模型(DEM)、土壤数据、气候数据、水文数据、行政区划和土地利用数据、社会经济数据等,所有数据均重采样为30 m分辨率,统一投影为WGS_1984_Albers,研究时间自1980年开始,10 a为1期间隔,具体来源见表1。

表1 数据来源分析

Table 1 Analysis of data sources

数据类型	尺度	数据来源	指标因子
行政区划数据	矢量	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)	研究区范围
土地利用数据 ^[13] (CNLUCC)	30 m×30 m	中国科学院资源环境科学数据平台(https://www.resdc.cn/)	土地利用类型
水文气象数据	Excel表格 1 km×1 km	国家气象科学数据共享服务平台(https://data.cma.cn/) 国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/) 《黄河年鉴》(1981—1999) ^[14] 《中国河流泥沙公报》(2000—2020) ^[15]	年平均降水量、年平均气温、潜在蒸散发量、逐月降水量、地表径流和泥沙模数
地形、土壤数据	30 m×30 m 1 km×1 km	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/) 国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/)	高程、流域、坡度、砂粒、粉粒、黏粒和土壤有机碳、根系深度
碳密度数据	Excel表格	国家生态系统科学数据中心(https://www.cern.ac.cn/)	碳密度

土地利用数据来自中国科学院资源环境科学数据平台的CNLUCC数据集,选取1980年、1990年、2000年、2010年、2020年的土地利用数据,将地类进行重分类(图2),空间分辨率为30 m。

1.3 研究方法

本研究采用InVEST模型,结合GIS空间分析技术和空间自相关方法,对延河流域1980—2020年4项关键生态系统服务功能(即产水量、土壤保持量、碳储量和生境质量)进行时空演变格局分析,探讨多重生态系统服务的权衡/协同关系。InVEST模型因其量化生态系统服务,可视化表达性强及对多源数据的兼容性,被广泛应用于全球范围内的生态系统服务评估研究。

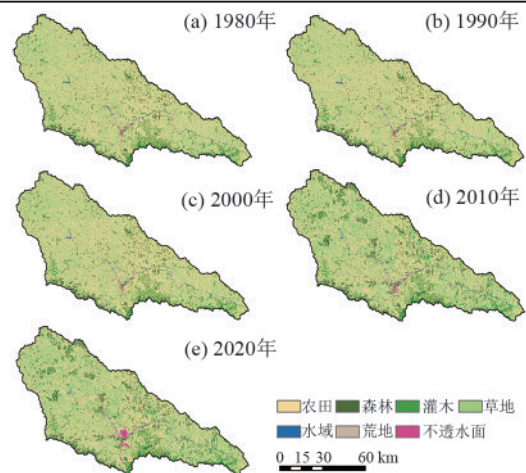


图2 1980—2020年延河流域土地利用类型

Fig. 2 Land use types in the Yanhe River basin from 1980 to 2020

1.3.1 产水量估算

本研究采用 InVEST 模型中的产水量模块,基于 Budyko 水热耦合平衡假设和水量平衡原理,考虑地形、气候、土壤、植被等多种因素,评估研究区栅格单元的产水能力。计算公式为:

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}\right) \times P_x \quad (1)$$

式中: Y_{xj} 为不同景观类型 j 中单元格 x 上的年水源供给量, mm; AET_{xj} 为不同景观类型 j 中单元格 x 上的年实际蒸散量, mm; P_x 为单元格 x 上的年降水量, mm。本研究参考已有相关研究^[15]确定该区域的生物物理系数表。

1.3.2 土壤保持计算

本研究采用 InVEST 模型的土壤保持模块 (SDR) 计算延河流域土壤侵蚀量, 该模块基于美国通用水土流失方程 (USLE), 考虑地块本身拦截上游沉积物的能力, 对土壤保持量的计算更为精确。计算公式为:

$$SDR = R_x \times K_x \times LS_x \times (1 - C_x \times P_x) \quad (2)$$

式中: R 为降雨侵蚀力因子, $(MJ \cdot mm) / (hm^2 \cdot h \cdot a)$; K 为土壤可蚀性因子, $(t \cdot hm^2 \cdot h) / (hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$; LS 为坡度坡长因子; C 为植被覆盖因子; P 为土壤保持措施因子。

根据研究区的逐月降水量数据, 采用 Wischmeier 方法计算降雨侵蚀力因子, 公式为:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{1.51g \frac{P_i^2}{P} - 0.8188} \quad (3)$$

式中: P 为年平均降雨量, mm; P_i 为月平均降雨量, mm。

根据研究区的土壤类型, 采用 EPIC 模型计算土壤可蚀性因子并进行修正。植被与经营管理因子 (C) 与土地利用类型、植被覆盖度等密切相关。水土保持措施因子 (P) 采取水土保持措施的坡耕地的土壤流失量与未采取任何措施的坡耕地的土壤流失量之比, 取值为 0~1, 无量纲。本文以研究区的植被覆盖与水土保持措施情况为基础, 结合相关文献与 InVEST 模型用户手册, 对研究区的 C 和 P 因子进行赋值。

1.3.3 碳储量估算

生态系统碳储量主要由地上生物碳库、地下生物碳库、土壤碳库、死亡有机碳库组成。确定各碳库的碳密度值是计算生态系统碳储量功能的关键, 根据全国不同土地利用类型碳密度估算成果, 采用降水修正因子的校正方法对碳密度进行修正, 计算公式为:

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (4)$$

$$C_{BP} = 6.798 \times e^{0.00541P} (R^2 = 0.70) \quad (5)$$

$$C_{SP} = 3.3968 \times P + 3996.1 (R^2 = 0.11) \quad (6)$$

$$K_B = \frac{C'_{BP}}{C''_{BP}} \quad (7)$$

$$K_S = \frac{C'_{SP}}{C''_{SP}} \quad (8)$$

式中: C_{above} 、 C_{below} 、 C_{soil} 和 C_{dead} 分别为地上生物量、地下生物量、土壤和死亡有机碳的碳密度, t/hm^2 ; C_{BP} 和 C_{SP} 分别为生物碳密度和土壤碳密度, t/hm^2 ; P 为年平均降水量, mm; K_B 为地上、地下碳密度的修正系数; K_S 为土壤密度的修正系数; C' 和 C'' 分别为流域、全国的碳密度。本文根据研究区的土地利用类型, 参考延河流域及黄土高原地区耕地、林地、草地等不同地类的碳密度研究成果, 经过修正得到本研究使用的碳密度, 各地类的碳密度乘以各土地利用类型的面积求和, 即为延河流域的总碳储量。

1.3.4 生境质量估算

生境质量取决于一个生境对人类土地利用和土地利用强度的可接近性。通过 InVEST 模型的生境质量模块, 分析土地利用类型对各威胁源的敏感程度, 依此来计算生境质量。通常而言, 生境质量的退化被看成是附近的土地利用强度增加的结果。地区整体性好, 受人类活动影响小, 则生境质量越好, 生物多样性水平越高。具体计算过程为:

$$Q_{xy} = H_j \left(1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z}\right) \quad (9)$$

式中: Q_{xy} 为生境质量, 其值为 0~1, 越接近 1 则表示生境质量越好; H_j 为各土地利用类型的生境适宜度; D_{xj} 为生境退化度; z 为归一化指数, 一般取 2.5; K 为半饱和参数, 通常取 D_{xj} (生境最大退化值) 的 1/2, 模型默认 0.5。

本研究将生境质量视作一个连续变量, 充分考虑土地覆被方式和土地覆被格局变化对生境质量的影响, 选取耕地、不透水面和荒地作为生境威胁因素。

1.3.5 生态系统服务权衡与协同关系相关性分析

1) 相关性分析

为反映流域内任意 2 种生态系统服务权衡/协同关系的总体特征。本研究利用 ArcGIS 软件在延河流域内生成 9 500 个样本点, 并提取各样本点对应的 5 期 4 种生态系统服务的估算值, 通过 Min-Max 标准值的方法消除量纲的影响, 利用 R 语言, 采用 Pearson 相关性分析法探讨 1980—2020 年延河流域 5 期的产水服务、土壤保持服务、碳储量服务和生境质量服务的权衡/协同关系。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (10)$$

式中： r 为相关系数，若为正值表示协同，反之则为权衡； x_i 和 y_i 为2列变量； \bar{x} 和 \bar{y} 为样本的平均值； n 为样本量。对关系变化的显著性进行 F 检验，选取 $p < 0.05$ （显著）、 $p < 0.01$ （极显著）、 $p > 0.05$ （不显著）3个置信度。

2) 双变量空间自相关分析

为进一步揭示生态系统服务在空间上的分布特征及其异质性，本研究引入全局自相关分析(Global Moran's I)和局部自相关分析(LISA)。该方法能够识别生态系统服务在空间上的集聚或离散特征，从而揭示其在不同区域内的权衡与协同关系。

全局自相关分析用于评估整个研究区域中生态系统服务的空间分布是否具有集聚性。 I_n 取值为 $[-1, 1]$ ，若 $I_n > 0$ 则表示区域内存在正相关性，即高值区倾向于与高值区相邻，低值区倾向于与低值区相邻，反之则存在负相关性，即高值区与低值区相邻，形成空间上的交错分布。 $I_n = 0$ 则表示空间不相关，空间随机分布。局部自相关分析(LISA)则用于识别生态系统服务在局部区域内的空间集聚特征。LISA > 0 表示2种生态系统服务在空间上呈“高-高”(High-High)或“低-低”(Low-Low)的协同关系，“高-高”协同则表现为该区生态表现良好，“低-低”协同则表现为该区为生态薄弱带；LISA < 0 表示

生态系统服务要素两两间呈“高-低”(High-Low)或“低-高”(Low-High)的权衡关系，该区域某些服务表现优异的同时，其他服务存在一些不足。计算公式为：

$$I_n = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (11)$$

$$LISA_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{S^2} \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (12)$$

式中： $S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2$ ； $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ ， n 为研究区的单元数量； W_{ij} 为空间权重矩阵； x_i 和 x_j 为空间单元 i 和 j 的属性值。

2 结果与分析

2.1 产水量时空演变特征

延河流域1980—2020年的产水量见图3a。1980—2020年单位面积产水量平均值先升后降再升，其最高值由254.8 mm提升至314.2 mm后又回升至362.4 mm，产水总量分别为 1.44×10^8 、 2.74×10^8 、 1.60×10^8 、 1.80×10^8 、 2.63×10^8 m^3 ，变化幅度也随之先慢后快，平均变化幅度为26.95%。从单位面积产水量看，2020年的平均产水量较1980年上升至13.97 mm，增幅83.15%。1990年平均产水量比1980年增加15.26 mm。2000年平均产水量较1990年下降13.28 mm，降幅41.4%。2000—2020年平均产水量持续上升11.99 mm，增幅63.82%。

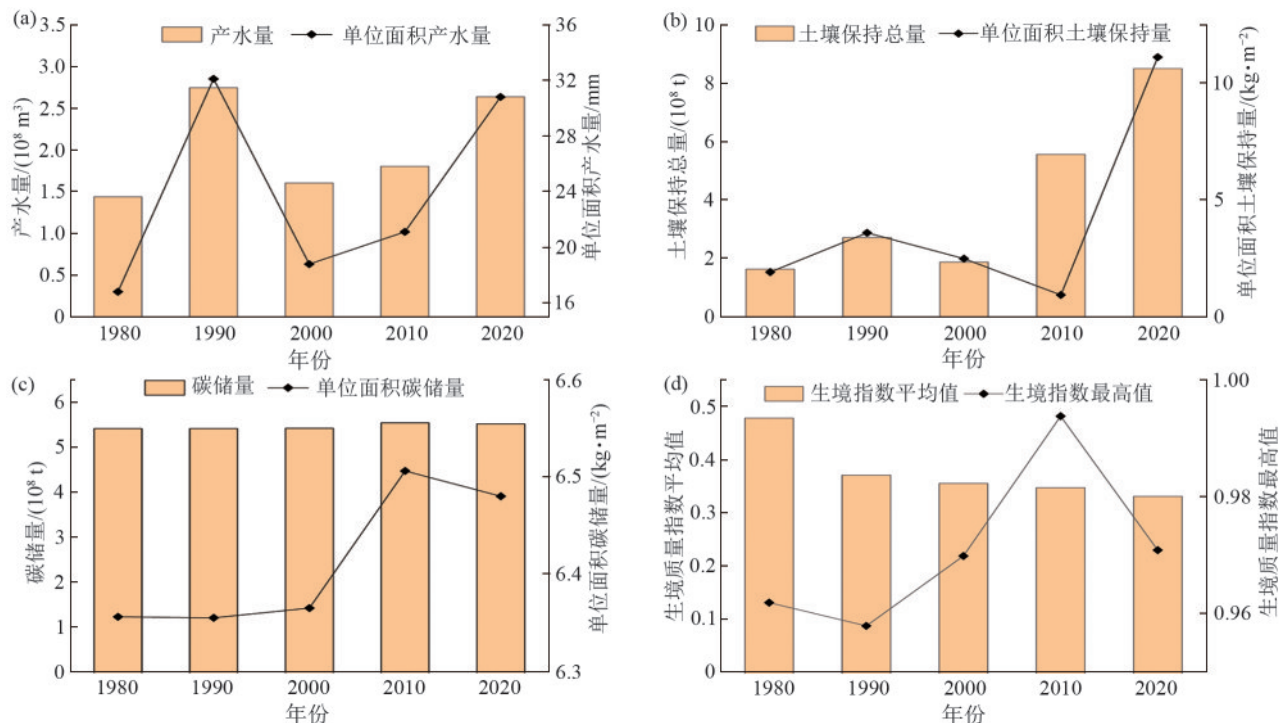


图3 延河流域4种生态系统服务变化

Fig. 3 Variation trends of four ecosystem services in the Yanhe River basin

空间分布上,延河流域产水量整体呈中游高上下游低的分布规律,并表现为延河下游产水量逐渐升高趋势(图 4)。其中,1990 年和 2020 年流域内整体产水量较高,而 2000 年流域内整体产水量较低,高值区集中于延河中游的中心地带,2020 年流域内的产水量高值增加显著,高值区沿着河流流向显著向延河中游发散扩大,与 1980—2020 年时间尺度的产水量高低表现一致。

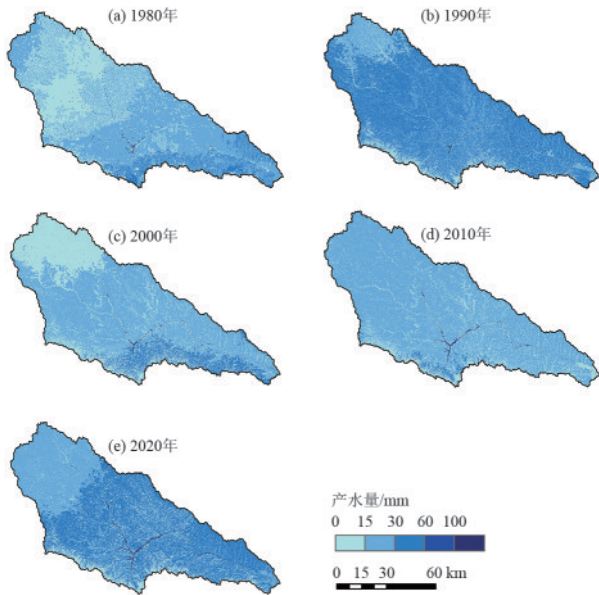


图 4 延河流域产水量地理空间分布格局

Fig. 4 Spatial distribution patterns of water yield in the Yanhe River basin

2.2 土壤保持服务时空演变

土壤保持功能是土壤在生态中被保护以防止土壤流失,减轻对土壤侵蚀的功能。由图 3b 可知,从时间上看,延河流域 1980—2020 年土壤保持总量总体呈波动增加趋势,由 1.62×10^8 t 增加至 8.48×10^8 t,平均值为 3.00×10^8 t。单位面积最高值变化幅度较大,从 1980 年的 146.92 kg/m^2 提高至 2020 年的 625.4 kg/m^2 ,成倍增长。其中,1990 年比 1980 年增加 77.76 kg/m^2 ,2000 年较 1990 年下降,减少量为 70.71 kg/m^2 ,降幅 31.47%,2010 年较 2000 年上升,增加量 22.09 kg/m^2 ,增幅 14.35%,2010—2020 年土壤保持量增速较快,变化显著。

空间分布上,流域内土壤保持量高值区分布较为分散,多为植被覆盖度较高的区域,整体表现出南部高北部低的分布规律(图 5)。低值区多分布于地势低的地带,多数为城镇中心,与当地的植被覆盖度及人类活动相关。1990 年和 2020 年流域内整体土壤保持量较高,与时间尺度的产水量高低表现一致。

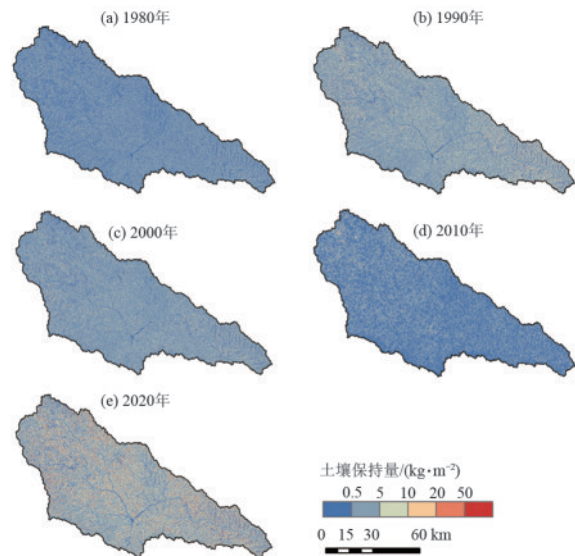


图 5 延河流域土壤保持地理空间分布格局

Fig. 5 Spatial distribution patterns of soil conservation in the Yanhe River basin

2.3 碳储量服务时空演变

在研究时间段,该地区碳储量整体保持相对稳定,逐渐增长(图 3c)。延河流域 5 个时期的碳储量分别为 5.43×10^8 、 5.43×10^8 、 5.44×10^8 、 5.56×10^8 、 5.54×10^8 t,平均碳储量为 5.55×10^8 t,其单位面积碳储量分别为 6.357 、 6.356 、 6.366 、 6.507 、 6.481 kg/m^2 。2020 年较 1980 年增长 1.97%,净增加 10.7×10^6 t,2000—2010 年碳储量增速最快,达到 2.22%,其碳储量服务和生态系统稳定性显著增强。

流域内单位面积的碳储量变化见图 6。延河流域单位面积碳储量的蓝色高值区主要分布于南部的山地中,植被覆盖度高,黄色低值区位于沟底和水域地区,受人类活动影响较大,整体表现出南高北低的分布规律,与土壤保持量空间分布规律相似。1980—2020 年,流域内单位面积碳储量高值区由南向北逐步扩散,遍布在流域各处。

2.4 生境质量时空演变

1980—2020 年,延河流域平均生境质量指数变化呈逐年下降趋势(图 3d),平均值为 0.377,整体的生境质量较低。从 1980 年的生境质量值为 0.48 到 2020 年的生境质量值为 0.332,逐年下降,降幅为 31.25%。

由图 7 可知,流域内生境质量指数在空间上呈南部高北部低的分布规律,高值区广泛分布于南部林区,南部林区植被覆盖度较高,生境质量较好,低值区主要分布在地势较低的城镇中心,沿河道呈条带状分布,受人类活动影响较大,但也不能忽视城镇地带生境质量的提升。

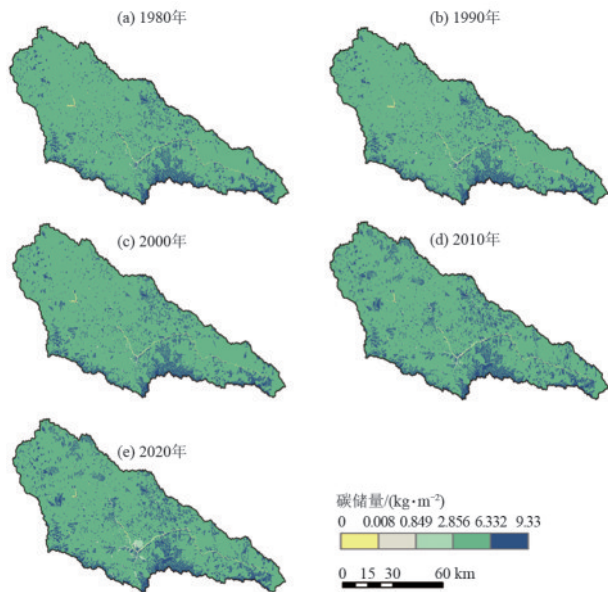


图 6 延河流域碳储量地理空间分布格局

Fig. 6 Spatial distribution patterns of carbon storage in the Yanhe River basin

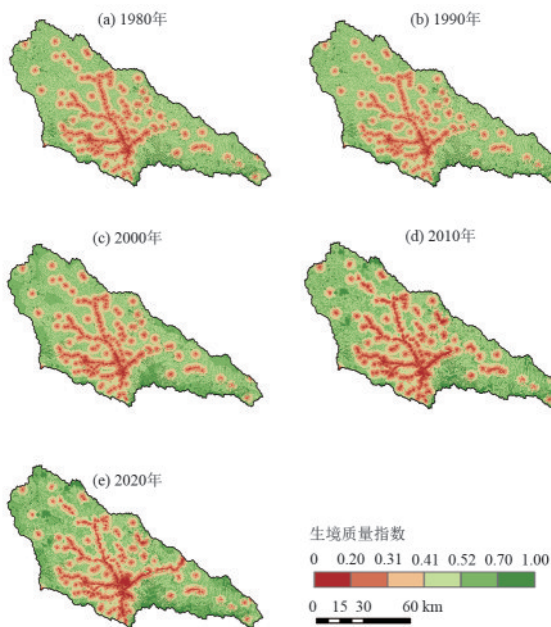


图 7 延河流域生境质量地理空间分布格局

Fig. 7 Spatial distribution patterns of habitat quality in the Yanhe River basin

2.5 延河流域生态系统服务权衡/协同关系

2.5.1 生态系统服务权衡/协同关系的关联特征
对延河流域 1980—2020 年产水量(WY)、土壤保持量(SDR)、碳储量(CS)和生境质量(HQ)4 种典型生态系统服务进行两两相关性分析(图 8),在研究期内,除 2000 年和 2010 年的产水服务和土壤保持服务,2010 年的土壤保持服务和碳储量服务外,各项生态系统服务均通过显著性检验($p < 0.01$)。

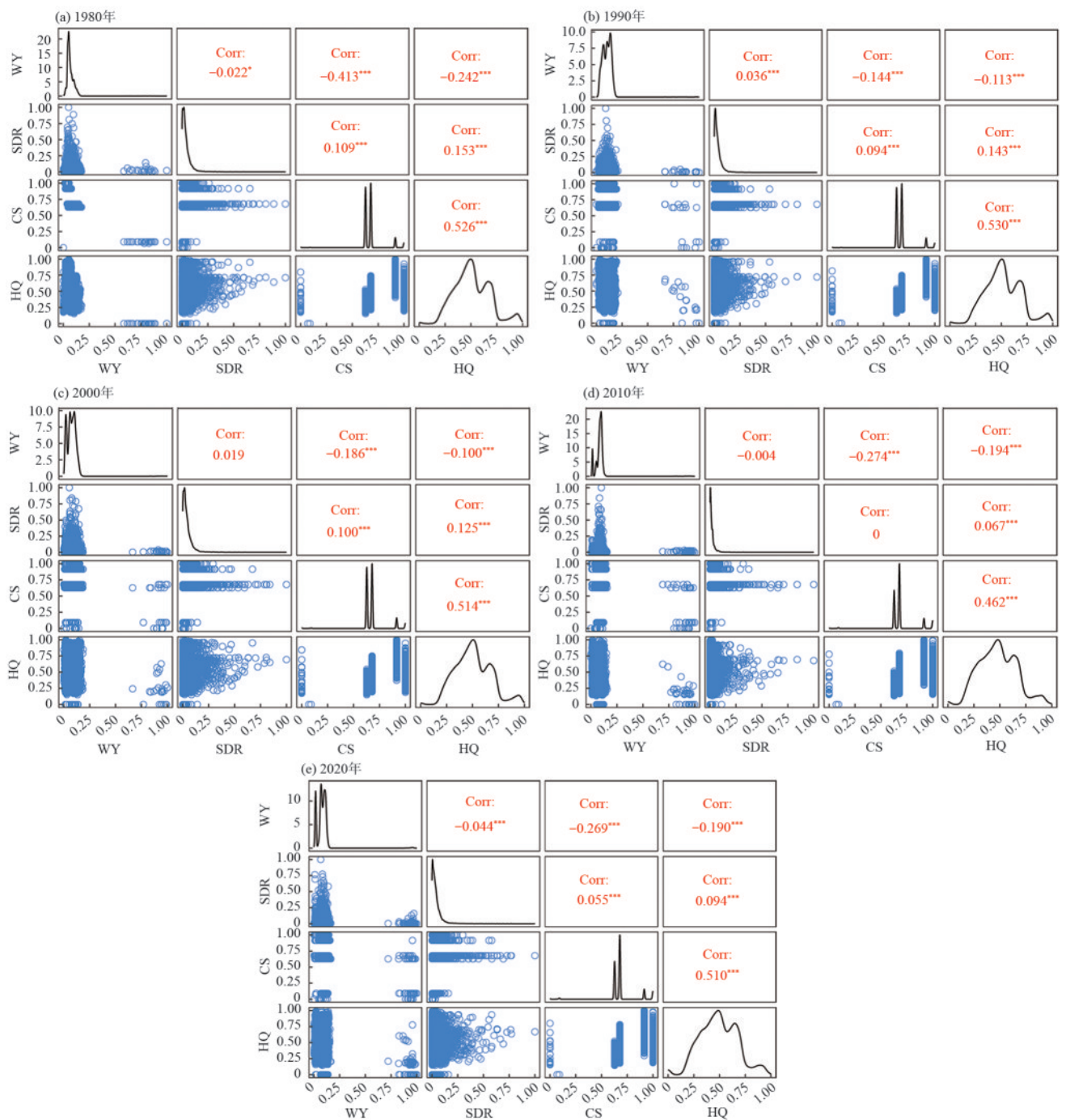
延河流域产水量和碳储量,产水量和生境质量

间的相关系数始终为负值,存在显著的权衡关系,且权衡关系逐渐减弱,二者呈现“几”字形变化,而碳储量和生境质量间始终为明显的协同关系,在 2010 年协同关系达到最低。研究期间,产水量和土壤保持的相关系数由负值转为正值又为负值,呈倒“U”形变化,且二者的权衡关系逐渐加强。与此同时,碳储量和生境质量的相关系数保持相对稳定趋势,由 1980 年的 0.526 波动为 2020 年的 0.510。而土壤保持和碳储量则呈小幅波动,相关系数平均值为 0.071 6,变化不大;土壤保持和生境质量的协同程度及变化幅度与土壤保持和碳储量类似,相关系数先降后升,平均值为 0.116 4,变化区间为 ± 0.02 ,说明二者的轻度协同关系较为稳定。

2.5.2 生态系统服务权衡/协同关系的地理空间格局
为探讨流域内不同生态系统服务在空间上的权衡协同关系(图 9),以子流域为单位,使用双变量空间自相关分析表征 1980—2020 年延河流域 4 种生态系统服务两两间的空间集聚和分异特征。高-高集聚与低-低集聚均表示协同关系,高-低集聚与低-高集聚均表示权衡关系。

流域内各项生态系统服务间的权衡协同关系在不同尺度上表现出不一样的空间异质性。延河流域大部分区域没有明显的权衡和协同关系,部分子流域存在显著的空间异质性特征,且流域内的协同区域不断缩小,权衡面积不断扩大,与张建香等^[12]研究结果一致。产水量和土壤保持的协同关系主要集中于流域的中下游地带,随着时间的推移,其协同关系逐渐减弱,权衡关系逐渐增强,与时间尺度的表征一致。产水量、土壤保持分别与碳储量的空间关系比较一致,协同关系均集中于流域的上中游并逐渐往中游聚集,权衡关系则集中于中游地带,具有显著的空间异质性。产水和生境质量的空间协同关系表征在流域的中游和下游,权衡关系集中于研究区的中部。1980—1990 年,土壤保持和生境质量呈权衡关系,1990—2000 年,二者的协同关系主要分布在中上游地区,随着时间推移,流域内协同区域的面积逐渐缩小,2000—2020 年,其以权衡关系为主,分布在流域的上游和中游地区。碳储量和生境质量在空间上呈显著协同关系,在流域的中游和上游产生协同关系。

从区域整体看,延河流域各生态系统的高-高协同主要分布在中下游地区,低-低协同主要分布在上游和中部,权衡关系则主要分散在流域的中上游地区。



注:***表示 $p < 0.01$ 。

图 8 1980—2020年延河流域相关系数散点图

Fig. 8 Scatter plots of correlation coefficients in the Yanhe River basin from 1980 to 2020

3 讨论

3.1 流域生态系统服务变化

流域内生态系统服务格局与土地利用情况密切相关。1980—2020年,延河流域的土地利用方式发生较大转变,退耕还林还草政策的实施,导致农田逐年减少,而建筑用地和林地增多,此变化不仅影响土地利用的空间分布,也深刻影响生态系统服务的能力。南部的林地集中,受人类活动影响程度低,其分布从流域的南部逐步向北部扩散,植物根系往深层土壤扎

根,土壤有机碳储量得到进一步的提高,最终提高流域内的碳储量。建筑用地沿着河道呈条带状分布,在延河流域的中游,城镇化较为明显,其地表的不透水性程度影响水流下渗,间接影响区域产水量的多少。

本研究表明,1980—2020年延河流域产水量呈“几”字形变化趋势,与前人^[16]研究基本一致,该变化主要受降水和蒸散发的共同影响。在研究期内,流域内的产水量先升后降再升,整体呈上升趋势,最低值在1980年出现,与前人^[17-18]的研究结果相吻合。

降水量和蒸散发作为流域内计算产水量的重要指标,直接影响流域的产水总量^[19-20]。1990年为延河流域的丰水期,2000年为枯水期^[17,21],而同期实际蒸散发变化幅度较低,进而1990年的产水量较大,而2000年的产水量较低,此变化与流域内植被覆盖的变化密切相关。由于流域南部的林地蒸散发较大,

在降水量差距不大的情况下,其产水量也相对较低。由于延河流域疏松瘠薄的土层特质,在降水量较多时易达到饱和,产流系数急剧升高,地表径流增加,进而增加流域产水量。2020年由于延安市城区扩建,城镇地区由于地表硬化和水流下渗量降低,地表径流增加,相应的产水量也随之增加。

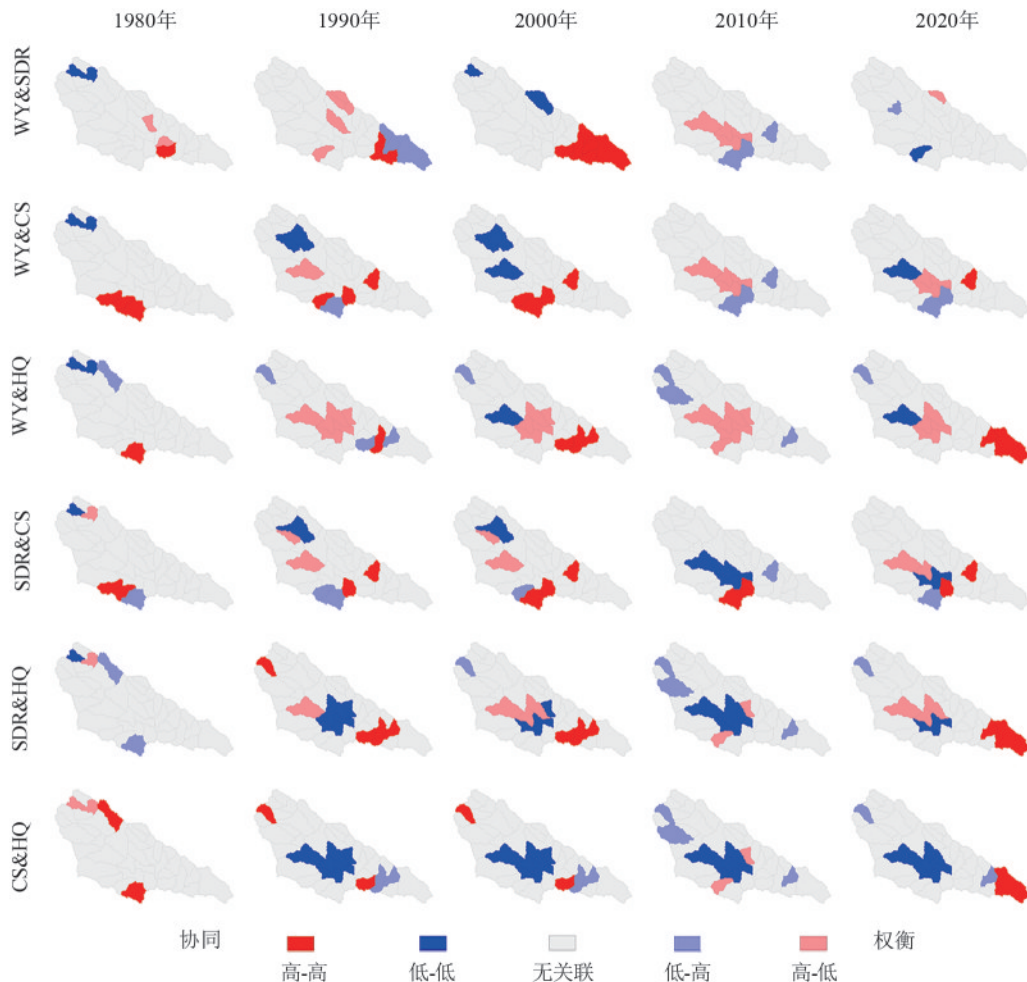


图9 1980—2020年延河流域权衡/协同关系空间格局

Fig. 9 Spatial patterns of trade-off/synergy relationships in the Yanhe River basin from 1980 to 2020

土壤保持是生态系统修复过程的重要一环,对维持土壤养分,减轻河流泥沙淤积,防止土地退化等具有重要作用^[22]。1980—2020年,延河流域的土壤保持服务得到显著提升,呈“U”形波动变化,主要得益于退耕还林工程和水土保持措施的实施。从地势上看,流域下游为残垣沟壑区,土层深厚,地面平坦,灌草根系固定表层土壤,有着较高的土壤保持量。而中游为丘陵沟壑区,人类扰动频繁,因而土壤保持量较低。上游为黄土覆盖的山地,陡坡较多,易受土壤侵蚀的影响,通过退耕还林工程及水土保持工程措施的实施,土壤保持功能得到有效地提升,与张琨等^[23]、刘婷等^[24]的研究结果相吻合。土壤保持量高的区域与水源涵养量高的区域存在部分重合,说明植被覆盖对土壤固定和侵蚀控制具有重要作用。

流域的碳储量整体保持相对稳定,其变化主要是由于生态工程引起的土地利用类型的影响。研究期内,流域内大量农田、草地转为建筑用地和碳密度较高的林地,植被覆盖度增加,其根系深层固定加强,提高土壤有机碳储库,从而显著提升固碳能力,相关学者^[12,25-26]结论与该结果一致。然而,流域内碳密度的选取是根据已有研究并根据延河流域温度和降水进行修正得到,不是实际测量所得,存在一定的估算误差,也是部分结果与实际有差别的缘由。

土地利用类型的变化是导致生境质量变化的重要驱动因素。流域内的生境质量普遍处于低值水平,与延河流域地处干旱半干旱地区,降水较少,干旱严重等自然因素限制生态系统功能有关。流域内高值区逐渐增多,表征在南部山地,说明流域南部林

地得到良好的保护。而土地利用程度加深,城镇化建设加快,人类活动干扰使得研究区的生境胁迫因子增加,生境质量出现小幅下降,该结论也与以往许多研究^[27-29]一致。生境质量的变化还受到植被覆盖度、土壤类型和水分条件等多因素的综合影响。延河流域灌草的根系主要分布集中于0~50 cm,植被恢复后根系和凋落物增加,优先在表层累积,锁定区域的生物量上限,间接影响生境质量情况。

3.2 流域生态系统服务权衡/协同关系

生态系统服务的权衡协同演变关系是多种因素共同影响作用的结果,相互影响,共同促进。延河流域产水量和碳储量,产水量和生境质量两组存在显著的权衡关系,植被盖度的增加使得需水量上升,从而产水量降低,碳储量增加^[30-32]。一方面,植被恢复(如退耕还林还草)显著提升区域碳储量,通过增加植被生物量和土壤有机碳质量分数,增强碳固定能力;另一方面,植被覆盖度的增加也导致蒸散发量上升,从而减少地表径流量,使得产水量下降。“碳汇”与“供水”间的权衡关系在干旱半干旱地区尤为明显,因为该区域的水分承载力有限,植被需水量的增加加剧了水资源的紧张状况。鞠琴等^[33]研究表明,该权衡关系主要受降水等自然因素的调控,而人类活动(如土地利用变化)则进一步强化了此非线性关系。

土壤保持、碳储量和生境质量间互为协同关系,且后二者的协同程度逐渐下降,主要归因于植被恢复对土壤结构和生态系统功能的综合改善。植被覆盖度的提升与根系凋落物的增加不仅有助于土壤颗粒的固定,从而减少水土流失,还通过增加土壤有机质质量分数,提升碳储量。植被恢复还改善土壤的理化性质,使土壤有效深度逐年“往下迁移”,增强其持水能力和养分循环效率,进而对生境质量产生积极影响。然而,随着人类活动(如城镇化和农业扩张)的加剧,生态系统受到干扰,导致生境退化速度加快,削弱土壤保持、碳储量和生境质量间的协同效应。土壤保持能力较高的区域通常与碳储量和生境质量的高值区存在空间重叠,表明植被恢复在多个生态系统服务中具有协同增益作用。

研究期间,产水量和土壤保持在协同与权衡关系间相互转换,由协同向权衡关系转变的趋势尤为显著。在早期阶段,土壤保持量高的区域与产水量高的区域有部分重合,退耕还林还草政策的实施,使得土壤保持能力增强,同时由于降水增加,产水量也有所上升,二者呈协同关系;然而,随着气候变暖加剧蒸发,植被盖度的进一步增加提高该地区的需水量,植被根系的深层储水不足将放大干旱风险,导致地表径流减少,产水量下降,而流域地处干旱半干旱

地区,水分承载力是有一定限度的,从而削弱二者间的协同效应,使得权衡作用更加明显^[34]。

从空间角度分析,延河流域的生态系统服务权衡与协同关系呈明显的尺度效应。由于地势平坦、植被覆盖稳定,流域各生态系统的高-高协同主要分布在中下游地区,低-低协同主要分布在上游和中部。而流域的中上游地区由于黄土丘陵地貌和人类活动干扰较强,生态系统服务间的权衡关系更为显著。随着时间的推移,流域内协同面积逐渐减少,权衡区域逐渐增多。该空间分异格局是自然地理条件(如坡度、土壤类型)和人类活动(如土地利用变化)共同作用的结果。已有研究^[33,35]表明,协同关系易受降水等自然因素影响,而权衡关系受人类活动影响更多,与本研究一致。与此同时,人类活动在延河流域生态系统服务的演变中扮演关键角色。流域中下游地区较为平坦,各生态系统服务较为稳定,而上游为黄土覆盖的山地,人类活动对生态系统的干扰更为明显。水资源管理政策(如梯田建设、淤地坝治理等)在一定程度上缓解水土流失问题,但其效果在不同区域和不同时期存在差异。人为干预措施在短期内可能带来局部生态效益,但长期来看,若缺乏科学规划,可能加剧生态系统服务间的权衡关系。

4 结论

1) 延河流域 1980—2020 年的年际平均值为 $2.04 \times 10^8 \text{ m}^3$ (径流深 26.55 mm),呈“几”字形变化趋势。空间分布上,延河流域产水量整体呈中游高上下游低的分布规律。

2) 流域内土壤保持总量总体呈波动增加趋势,多年平均值为 $3.04 \times 10^8 \text{ t}$,呈“U”形增长趋势,变化显著。空间分布上,流域内土壤保持量高值区分布较为分散,多为植被覆盖度较高的区域,整体表现为南部高北部低的分布特征。

3) 该流域的碳储量整体保持相对稳定,逐年增长,生态系统稳定性显著增强。流域内单位面积碳储量高值区由南向北逐步扩散,遍布在流域各处。高值区是流域南部的林地,低值区位于沟底地区,整体表现出南高北低的分布规律,与土壤保持量空间分布规律相似。

4) 延河流域平均生境质量指数变化呈逐年下降趋势,整体的生境质量较低。在空间上呈南部高北部低的分布规律,南部林区植被覆盖度较高,生境质量较好,低值区沿河道呈条带状分布,受人类活动影响较大。

5) 流域产水量、土壤保持、碳储量、生境质量 4 种生态系统服务间存在显著的相关性($p < 0.01$),产水量-碳储量及产水量-生境质量呈显著权衡关系,土壤保持、碳储量和生境质量间互呈协同关系,产水量-土壤保持在 2010 年由协同关系转变为显著权衡关

系。大部分区域没有明显的权衡和协同关系,从整体看,流域内的协同区域不断缩小,权衡区域面积不断扩大。各生态系统的高-高协同主要分布在中下游地区,低-低协同主要分布在上游及中部,权衡关系则分散在流域的中上游地区。

参考文献:

- [1] 李宗善,杨磊,王国梁,等.黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J].生态学报,2019,39(20):7398-7409.
LI Z S, YANG L, WANG G L, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: Present situations, problems, and counter-solutions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7398-7409.
- [2] LIU H Y, CHEN Y, DU P F, et al. Analysis of the changes and causes of runoff and sediment load in the middle reaches of the Yellow River from 1950 to 2022 [J]. *Land*, 2024, 13(9): e1482.
- [3] 何佳瑛,蒋晓辉,雷宇昕.黄土高原生态工程对关键生态系统服务时空变化的影响:以延河流域为例[J].生态学报,2023,43(12):4823-4834.
HE J Y, JIANG X H, LEI Y X. Effects of ecological engineering on spatio-temporal changes of key ecosystem services on the Loess Plateau: A case study in the Yanhe River basin, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(12): 4823-4834.
- [4] 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 F F. InVEST model based ecosystem services evaluation with case study on Ganjiang River basin [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2014.
- [5] 李双成,刘金龙,张才玉,等.生态系统服务研究动态及地理学研究范式[J].地理学报,2011,66(12):1618-1630.
LI S C, LIU J L, ZHANG C Y, et al. The research trends of ecosystem services and the paradigm in geography [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(12): 1618-1630.
- [6] 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: 253-260.
- [7] 盖莹莹,赵衡,王富强.黄河流域生态系统服务供需变化及其驱动因素分析[J].环境科学,2025,46(6):3672-3680.
GAI Y Y, ZHAO H, WANG F Q. Changes and driving factors of ecosystem services supply and demand in the Yellow River basin [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(6): 3672-3680.
- [8] 赵雪雁,丁静,马平易.人类活动对黄土高原生态系统服务权衡/协同关系影响的多尺度研究[J].地理学报,2025,80(7):1920-1936.
ZHAO X Y, DING J, MA P Y. Multi-scale effects of human activities on trade-off/synergy relationships of ecosystem services on the Loess Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2025, 80(7): 1920-1936.
- [9] 支若晨.黄土高原土地利用转变驱动生态系统服务功能变化特征研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2023.
ZHI R C. Characterizing changes in ecosystem service functions driven by land use change on the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [10] 员学锋,施林童,杨悦,等.陕北黄土丘陵沟壑区人类活动和植被覆盖对关键生态系统服务的影响[J].应用生态学报,2024,35(12):3235-3246.
YUAN X F, SHI L T, YANG Y, et al. Impacts of human activities and vegetation cover on key ecosystem services in the loess hilly-gully region of northern Shaanxi, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(12): 3235-3246.
- [11] 何佳瑛,任立清,蒋晓辉,等.延河流域土壤侵蚀对LUCC的响应及驱动力[J].水土保持研究,2022,29(4):184-191.
HE J Y, REN L Q, JIANG X H, et al. Response of soil erosion to LUCC and driving forces in Yanhe River basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4): 184-191.
- [12] 张建香,汪亚峰,张耀宗,等.延河流域生态系统服务权衡/协同关系阈值效应[J].生态学报,2024,44(23):10573-10581.
ZHANG J X, WANG Y F, ZHANG Y Z, et al. Threshold effects of trade-offs and synergies among ecosystem services in the Yanhe basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(23): 10573-10581.
- [13] 徐新良,刘纪远,张树文,等.中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)[DS/OL].资源环境科学数据注册与出版系统,2018. <https://noda.ac.cn/rsgs>.
XU X L, LIU J Y, ZHANG S W, et al. China multi-period land-use remote-sensing monitoring dataset (CNLUCC) [DS/OL]. Resource and Environment Science Data Registration and Publication System, 2018.
- [14] 黄河水利委员会.黄河年鉴(1981—1999)[M/OL].郑州:黄河水利出版社.
Yellow River Conservancy Commission. Yellow river year-book (1981—1999) [M/OL]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press.
- [15] 中华人民共和国水利部.中国河流泥沙公报(2000—2020)[R/OL].北京:中国水利水电出版社.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China river sediment bulletin (2000—2020) [R/OL]. Beijing: China Water and Power Press.
- [16] 黄哲.延河流域径流对未来气候和土地利用变化的响应[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2023.
HUANG Z. Runoff response to future land use and climate change in the Yanhe River basin on the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.

- [17] 郭婷. 延河流域水文过程与国土空间的耦合机制及协同优化研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.
GUO T. A study on the mechanism and collaborative optimization of hydrological processes and land space in the Yanhe basin [D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.
- [18] 陈瑞东, 温永福, 高鹏, 等. 极端降水条件下延河水沙特征对比分析及其影响因素[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 1920-1929.
CHEN R D, WEN Y F, GAO P, et al. Comparative analysis of flow and sediment characteristics of the Yanhe River under extreme rainfall conditions and research on influence factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 1920-1929.
- [19] 侯晋星, 潘换换, 杜自强, 等. 山西黄河流域水生态系统服务时空分析[J]. 干旱区地理, 2024, 47(6): 1047-1060.
HOU J X, PAN H H, DU Z Q, et al. Spatiotemporal analysis of water ecosystem services of the Yellow River basin in Shanxi Province[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(6): 1047-1060.
- [20] 郑续, 魏乐民, 郭建军, 等. 基于地理探测器的干旱区内陆河流域产水量驱动力分析: 以疏勒河流域为例[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1477-1485.
ZHENG X, WEI L M, GUO J J, et al. Driving force analysis of water yield in inland river basins of arid areas based on geo-detectors: A case of the Shule River[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1477-1485.
- [21] 花东文. 延河流域土地利用景观格局变化对径流输沙的影响[D]. 陕西 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2015.
HUA D W. Effects of land-use landscape pattern change on the runoff and sediment in Yanhe River watershed[D]. Yangling, Shaanxi: Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, 2015.
- [22] 饶恩明, 肖焱. 四川省生态系统土壤保持功能空间特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2018, 38(24): 8741-8749.
RAO E M, XIAO Y. Spatial characteristics and effects of soil conservation service in Sichuan Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24): 8741-8749.
- [23] 张琨, 吕一河, 傅伯杰, 等. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 949-960.
ZHANG K, LYU Y H, FU B J, et al. The effects of vegetation coverage changes on ecosystem service and their threshold in the Loess Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 949-960.
- [24] 刘婷, 周自翔, 朱青, 等. 延河流域生态系统土壤保持服务时空变化[J]. 水土保持研究, 2021, 28(1): 93-100.
LIU T, ZHOU Z X, ZHU Q, et al. Spatiotemporal change of soil conservation service in Yanhe watershed [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(1): 93-100.
- [25] 毕帆帆, 武志涛, 梁寒雪, 等. 基于PLUS-InVEST-Geo-Detector模型的黄河中游碳储量时空变化及驱动因素[J]. 环境科学, 2025, 46(08): 4742-4753.
BI F F, WU Z T, LIANG H X, et al. Spatio-temporal changes and driving factors of carbon storage in the middle reaches of the Yellow River based on PLUS-InVEST-GeoDetector model[J]. Environmental Science, 2025, 46(08): 4742-4753.
- [26] 黄艳, 刘晓曼, 袁静芳, 等. 2000—2020年华北干旱半干旱区碳储量变化特征及影响因素[J]. 环境科学研究, 2024, 37(4): 849-861.
HUANG Y, LIU X M, YUAN J F, et al. Spatial and temporal changes of carbon storage and its influencing factors in arid and semi-arid region of north China from 2000 to 2020[J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(4): 849-861.
- [27] 张锦鑫, 付航, 傅宇钟, 等. 基于InVEST模型的西柳沟流域生境质量现状[J]. 水土保持学报, 2025, 39(4): 331-341.
ZHANG J X, FU H, FU Y Z, et al. Current status of habitat quality in Xiliugou basin based on InVEST model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4): 331-341.
- [28] SONG S X, LIU Z F, HE C Y, et al. Evaluating the effects of urban expansion on natural habitat quality by coupling localized shared socioeconomic pathways and the land use scenario dynamics-urban model[J]. Ecological Indicators, 2020, 112: e106071.
- [29] TERRADO M, SABATER S, CHAPLIN-KRAMER B, et al. Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning [J]. Science of the Total Environment, 2016, 540: 63-70.
- [30] 张宇洁, 张晓萍, 孙伟楠, 等. 1970—2020年北洛河流域产水、保土、固碳生态系统服务时空演变特征与权衡/协同关系[J]. 水土保持学报, 2025, 39(2): 365-377.
ZHANG Y J, ZHANG X P, SUN W N, et al. Spatio-temporal evolution characteristics and trade-offs/synergies of water yield, soil conservation, and carbon storage ecosystem services in the Beiluo River basin from 1970 to 2020[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(2): 365-377.
- [31] 温昕, 王继军, 韩晓佳. 基于地理分区的陕北黄土高原生态系统服务权衡/协同的尺度效应研究[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 305-315.
WEN X, WANG J J, HAN X J. Scale effects of ecosystem service tradeoffs/synergies in the Loess Plateau of northern Shaanxi based on geo-graphical regions [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 305-315.

(下转第143页)