

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 Yujie, ZHANG Xiaoping, SUN Weinan, et al. Spatiotemporal 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.

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

张宇洁¹, 张晓萍^{1,2}, 孙伟楠¹, 耿文亮¹, 安泽锋¹, 陈庆伟³

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 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. 国网山东省电力公司经济技术研究院, 济南 250021)

摘要: [目的] 探究北洛河流域生态系统服务时空演变特征与权衡/协同关系, 为该区资源的合理配置和可持续发展提供科学依据。[方法] 基于1970—2020年6期土地利用/覆被数据、气象数据、土壤数据、数字高程模型(DEM)等多源数据, 运用InVEST和CSLE等模型, 定量评估分析北洛河流域1970—1990年土地利用相对稳定期、2000年左右的过渡期和2010—2020年生态恢复期的不同时期内产水量、土壤保持和碳储量3种典型关键生态系统服务的时空变化特征及其权衡/协同关系。[结果] 1) 流域总产水量表现为先增加后波动下降的趋势, 2000年降至最低。土地利用稳定期产水总量的年代际平均值为 $10.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ (37.75 mm), 过渡期降低36.9%, 而生态恢复期降低25.53%。林、耕、草3种土地利用类型中, 耕地产水总量和产水深始终最大, 林地的产水深始终最小。2) 土壤保持总量整体呈波动增加趋势, 2010年达到最高值。土地利用稳定期内, 土壤保持总量的年代际平均值为 $305.62 \times 10^6 \text{ t}$ (113.57 t/hm^2), 过渡期上升至 $364.52 \times 10^6 \text{ t}$, 生态恢复期显著增加至 $426.19 \times 10^6 \text{ t}$ (157.75 t/hm^2), 相较于第1时期增加38.9%。林地保持能力远高于耕地, 梯田等工程措施的建设使耕地土壤保持功能大幅提升。3) 碳储总量呈先稳定后持续增加趋势, 2000年后开始显著增长, 2020年较1970年增长24.09%。林地是主要的碳库, 其碳储量显著增加, 而草地和耕地碳储量随面积的减少而降低。4) 在空间格局变化上, 产水量减少、土壤保持和碳储量增加的地区主要集中在高原沟壑区和丘陵沟壑区。5) 在流域尺度上, 1970—2020年北洛河流域产水量与土壤保持、碳储量之间存在权衡关系, 土壤保持与碳储量呈协同关系。土壤保持与碳储量的协同度随时间降低, 而产水量与其他二者的权衡关系相对稳定。[结论] 随着植被恢复, 流域产水、土壤保持和碳储量等生态系统服务功能具有明显的时间和空间变化特征, 具有相对稳定的权衡协同关系, 研究结果可为黄土高原生态系统服务综合效益的提升提供科学依据。

关键词: 生态系统服务; InVEST模型; CSLE模型; 权衡与协同; 北洛河流域

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0365-13

Spatiotemporal 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

ZHANG Yujie¹, ZHANG Xiaoping^{1,2}, SUN Weinan¹, GENG Wenliang¹, AN Zefeng¹, CHEN Qingwei³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Economic & Technology Research Institute of State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250021, China)

收稿日期: 2024-10-17

修回日期: 2024-11-13

录用日期: 2024-11-19

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-02-21

资助项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目(5200-202416091A-1-1-ZN)

第一作者: 张宇洁(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态系统服务研究。E-mail: zhangyujie0821@nwf.edu.cn

通信作者: 张晓萍(1971—), 女, 博士, 教授, 主要从事土地利用、水土流失规律及水土保持研究。E-mail: zhangxp@ms.iswc.ac.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

Abstract: [Objective] This study aimed to investigate the spatiotemporal changes and trade-offs/synergies of ecosystem services within the Beiluo River basin to provide a scientific foundation for rational resource allocation and sustainable development. [Methods] Utilizing multi-source data and models, such as InVEST and CSLE, to quantitatively assess and analyze the spatiotemporal variations and trade-offs/synergies of three key ecosystem services-water yield, soil conservation, and carbon storage-across different periods. These periods include the relatively stable land use period from 1970 to 1990, the transitional period around 2000, and the ecological restoration period from 2010 to 2020. [Results] 1) The overall water yield of the basin initially showed an increasing trend, followed by fluctuating decline, bottoming out in the 2000. During the first period, the average water yield was $10.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ (37.75 mm), which decreased by 36.9% during the second period and by 25.53% during the third period compared to the initial period. Among the three land use types of forests, cropland, and grassland, the total water yield and water yield depth of cropland are always the highest, while the water yield depth of forest was always the lowest. 2) The total soil conservation displayed an upward trend with fluctuations, peaking in the 2010. Over the first period, the average annual soil conservation was $305.62 \times 10^6 \text{ t}$ (113.57 t/hm^2), which increased to $364.52 \times 10^6 \text{ t}$ in the transition period and significantly increased to $426.19 \times 10^6 \text{ t}$ (157.75 t/hm^2) during the third period. The soil conservation capacity of forests was significantly greater than that of cropland, and the construction of terraces and other engineering measures have greatly enhanced the function of cropland. 3) The total carbon storage remained stable and then continued to increase, with a notable increase from the 2000 onwards, and a 24.09% increase in the 2020 when compared with the 1970. Forests were the main carbon reservoirs, with their carbon storage significantly increasing, whereas that in grassland and cropland have decreased due to the reduction in their areas. 4) Regarding changes in the spatial pattern, the areas experiencing a decrease in water yield and an increase in soil conservation and carbon storage were mainly concentrated in the high plateau and gully areas, as well as the hilly and gully regions. 5) At the basin scale, there was a trade-off between water yield and soil conservation, as well as carbon storage. Soil conservation and carbon storage, however, exhibited a synergistic relationship. The degree of synergy between soil conservation and carbon storage decreased over time, while the trade-off between water yield and the other two remained relatively stable. [Conclusion] With the restoration of vegetation, the three key ecosystem service exhibited significant temporal and spatial variation characteristics, possessing relatively stable trade-off and synergistic relationships. The research results can provide a scientific basis for enhancing the comprehensive benefits of ecosystem services on the Loess Plateau.

Keywords: ecosystem services; InVEST Model; CSLE Model; trade-offs and synergies; Beiluo River basin

Received: 2024-10-17

Revised: 2024-11-13

Accepted: 2024-11-19

Online (www.cnki.net): 2025-02-21

生态系统服务(ecosystem service)是指自然生态系统及其物种提供的人类赖以生存的条件和过程^[1],涵盖人类从生态系统及其生态过程中直接或间接获取的各种惠益^[2],不仅可为人类生存与发展提供相应的物质资料,同时还为维持生物地球化学循环、生物多样性和地球生态系统的平衡与稳定提供重要支撑^[1]。长期以来人类对生态系统服务的认识不够全面,导致对生态环境不合理的开发利用,生态环境遭到严重破坏,全球范围内约占60%的生态系统服务正处于退化或不可持续利用状态^[3]。近20 a来,生态系统服务功能受到前所未有的重视,联合国千年生态系统评估项

目的落地、国际生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台的正式建立,以及多种生态修复工程的实施,有效推动在全球和各区域等不同尺度的生态系统服务研究。对于区域尺度而言,定量化评估其区域生态系统服务,研究不同生态系统服务间的权衡/协同关系,对于该区自然资源的合理配置利用及实现区域可持续发展具有极其重要的意义。

黄土高原位于黄河流域中游,地理条件复杂,植被覆盖度低,降水集中且多暴雨,长期受人类活动侵扰,面临着严重的生态环境退化问题,是世界上水土流失最严重的地区^[4]。多年来,为全面提高生

态环境质量,该地区投入大量资源,实施一系列生态治理项目,尤其是自1999年我国启动退耕还林(草)工程后,黄土高原的植被覆盖情况得到显著恢复^[5],下垫面情况发生深刻变化,导致各项生态系统服务在不同程度上发生改变^[6-7]。北洛河流域位于黄土高原腹地,跨越黄土高原主要的植被、土壤、气候和地貌类型区,也是全国水土流失重点防治区和治理区之一^[8]。全面深入的生态修复工程和措施,影响全流域的生态系统服务空间格局。不同的土地利用类型具有提供不同类型、数量、质量的生态系统服务的能力,必然对流域的生态系统服务及其权衡/协同关系产生重要影响。在当下“双碳”战略实施背景下,不仅要关注流域的水土资源保护,而且也要关注流域的碳固存^[9]。目前,对于北洛河流域的研究,大多见于黄河流域^[10]、黄土高原^[4]、渭河流域^[11]和陕西省^[12]等大尺度、短时段的分析,而基于精细化、多源数据、长序列的多重生态系统服务及其权衡/协同关系的研究较少,有待进一步深入研究。

基于上述背景,本文以黄土高原北洛河流域为研究区,综合利用1970—2020年6期土地利用/覆被数据、气象数据、土壤数据、数字高程模型(DEM)等多源数据,运用InVEST和CSLE等模型,定量评估分析产水量、土壤保持和碳储量3种典型关键生态系统服务的时空变化特征并揭示其不同时期的时空异质性,探讨多种生态系统服务之间的权衡/协同关系。研究结果可为多源数据基础下的长时间序列生态系统服务研究进行历史演变视角的判断和分析,为实现黄土高原地区资源的生态修复和可持续发展提供参考和理论依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

北洛河流域($34^{\circ}39'55''\sim 37^{\circ}18'22''N$, $107^{\circ}33'33''\sim 110^{\circ}10'54''E$)是黄河二级支流,渭河一级支流,全长680.3 km,发源于陕西省定边县境内,自西北向东南,流经陕西省和甘肃省5个地(市)18个县(区),于大荔县三河口汇入渭河。流域总面积为 $2.69\times 10^4\text{ km}^2$,海拔304~1 883 m(图1b),属暖温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温 $7.9\sim 10.6^{\circ}\text{C}$,多年平均降水量512 mm,其中5—9月占全年降水量的76.2%,降水多以暴雨形式出现。流域土壤类型以黄绵土和风沙土为主,还分布有黑垆土、灰褐土和水稻土等土壤类型。流域地貌类型丰富多样,涵盖黄土高原的主要地貌类型。流域上游为黄土丘陵沟壑区,面积约占1/4,地形破碎,植被覆盖度低,是流域粗泥沙的集中来源地;中游包括高塬沟壑区和土石

山林区,其中高塬沟壑区塬面平整,沟谷重力侵蚀活跃,面积约占流域面积的20%,土石山林区属暖温带落叶阔叶林区,包括子午岭林区和黄龙山林区,水土流失较为轻微,占流域面积的40%;下游为阶地平原区,地势平坦开阔,沟壑稀疏且发育较浅,侵蚀程度低。1970—2020年,流域内的土地利用类型始终以耕地、林地和草地为主。21世纪以前,耕地、林地和草地面积比例相对稳定,维持在1.0:1.1:0.6,耕地集中于阶地平原区和高塬沟壑区,林地主要分布在土石山林区和高塬沟壑区,草地分布在丘陵沟壑区。经过长期生态修复和水土流失治理后,尤其随着1999年后退耕还林/草工程的大力实施及多种生态修复工程的不断开展,该流域植被覆盖情况得到显著改善,全流域林地面积显著增加,迅速增长至2020年的58.7%。与此同时,耕地面积占比下降至22%,上游丘陵沟壑区和中游的高塬沟壑区的土地利用变化最为剧烈,严重的水土流失状况得到有效控制。

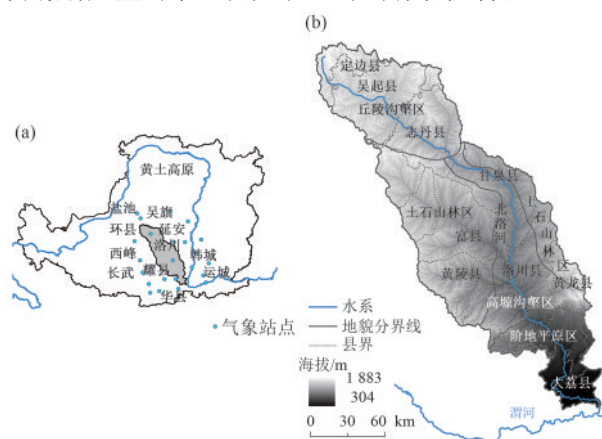


图1 北洛河流域地理概况及气象站点分布

Fig. 1 Geographical overview of the Beiluo River basin and the distribution of meteorological stations

1.2 数据来源与处理

本研究使用的数据主要包括土地利用/覆被数据、气象数据、土壤数据、数字高程模型(DEM)等。数据来源为:

1)土地利用/覆被数据:来源于课题组积累,利用GEE平台提供的1985—2019年Landsat影像,参考《土地利用现状分类》标准,依据研究区土地利用现状和特点,划分为5种土地利用类型(耕地、林地、草地、水域和建设用地),选取相应样本点,训练随机森林模型进行土地利用分类。根据美国地质调查局(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)下载的KeyHole卫星图像,对80年代的土地利用数据进行修改,生成1970年土地利用图。经验证,数据整体精度在78%~84%,最终获得1970年、1980年、1990年、

2000年、2010年、2019年6期分辨率30 m的土地利用数据集^[13]。根据土地利用变化情况,将6期土地利用划分为土地利用稳定期(1970—1990年)、过渡期(2000年)、生态恢复期(2010—2020年)3个时段。

2)气象数据:来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),选取北洛河流域内及周边23个气象站点(图1a)的1965—2020年气象日值数据(包括降雨量、气温、气压、风速、相对湿度、日照时间等资料),运用Penman-Monteith公式估算站点潜在蒸散发量,参考第一次全国水利普查水土保持情况普查水力侵蚀普查^[14]中提出的冷暖季日降水量估算模型计算站点降雨侵蚀力。根据土地利用/覆被数据时间,同时为避免单一年份数据的突变性,以1965年数据为起点,以每10 a划分时间段并进行多年平均后,利用Kriging空间插值获取流域1970年代(1965—1974年)、1980年代(1975—1984年)、1990年代(1985—1994年)、2000年代(1995—2004年)、2010年代(2005—2014年)和2020年代(2015—2020年)的6期降水量、降雨侵蚀力及潜在蒸散发量数据。

3)土壤数据:来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)^[15],空间分辨率为90 m,包括土壤厚度、土壤粉粒、土壤黏粒、土壤砂粒和土壤有机碳。利用周文佐^[16]提出的经验公式,分层计算植被可利用质量含水率,采用梯形计算法加权平均,得到最终植物可利用质量含水率。

4)数字高程模型(DEM):陕西省部分(分辨率5 m)来源于陕西省测绘地理信息局。12.5 m分辨率DEM数据,数据范围为整个研究区,来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心。

以上栅格数据统一使用WGS_1984_UTM_Zone_49N投影,数据重采样为30 m。

2 研究方法

2.1 产水量估算

本研究采用InVEST模型中的Water Yield模块,基于水量平衡原理和Budyko水热耦合平衡假设,考虑气候、地形、土壤、植被等多种因素,评估栅格单元的产水能力,即栅格单元的产水量 Y_x 为该栅格单元年平均降雨量与年平均实际蒸散量的差值,计算公式为:

$$Y_x = (1 - \frac{AET_x}{P_x}) \times P_x \quad (1)$$

$$\frac{AET_x}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_x}{1 + \omega_x R_x + 1/R_x} \quad (2)$$

$$\omega_x = Z \frac{AWC_x}{P_x} + 1.25 \quad (3)$$

$$AWC = \text{Min}(\text{Rest. Layer. depth, Root. depth}) \times PAWC \quad (4)$$

$$R_x = \frac{K_{cx} ET_0}{P_x} \quad (5)$$

式中: Y_x 为栅格单元 x 的年产水量,mm; AET_x 为栅格单元 x 的年平均实际蒸散发量,mm; P_x 为栅格单元 x 的年平均降雨量,mm; ω_x 为自然气候-土壤性质的非物理参数; R_x 为Budyko干燥指数; Z 为季节常数(ZHANG常数)。根据《陕西省水资源公报》数据进行率定, Z 取14时,模型计算1970—2020年平均值与公报提供的数据平均值误差为1.3%,可以满足精度要求。 AWC_x 为植被可利用含水量,mm,由植物可利用含水率(PAWC)及土壤的最大根系埋藏深度和植物根系深度的最小值决定; K_{cx} 为不同土地利用类型的作物蒸散发系数,是实际蒸散发量与参考蒸散发量的比值; ET_0 为栅格单元 x 的参考蒸散发量。本文参考已有的相关研究^[17]确定模型运行所需的生物物理系数表。

2.2 土壤保持量计算

本研究采用充分考虑中国坡面侵蚀特点和治理土壤侵蚀所实施的生物措施、工程措施和耕作措施建立的中国土壤流失方程CSLE(Chinese Soil Loss Equation)^[18]来估算北洛河流域的土壤保持量,即土壤在没有植被覆盖和人为管理情况下的潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量二者之差,其计算公式为:

$$A = RKLSBET \quad (6)$$

$$A_p = RKLS \quad (7)$$

$$A_c = A_p - A \quad (8)$$

式中: A 为单位面积内的实际土壤侵蚀量, $t/(hm^2 \cdot a)$; A_p 为单位面积内的潜在土壤侵蚀量, $t/(hm^2 \cdot a)$; A_c 为单位面积内的土壤保持量, $t/(hm^2 \cdot a)$; 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, $(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$,采用第一次全国水利普查水土保持情况普查成果^[14]; L 为坡长因子; S 为坡度因子;采用“土壤侵蚀模型地形因子计算工具”^[19],计算 LS 因子; B 为植被覆盖和生物措施因子; E 为工程措施因子; T 为耕作措施因子。HE等^[20]研究表明,CSLE模型在本流域中的应用,决定系数 R^2 达到0.89,NSE为0.72,作为本文公式中因子取值参考。

2.3 碳储量估算

InVEST模型中碳储量模块根据各个土地利用类型为基础评估单元,通过对地上生物量碳库、地下

生物量碳库、土壤碳库和死亡有机物碳库这4种碳库的碳密度乘以各地类的面积并求和,最终得到北洛河流域的总碳储量。其计算公式为:

$$C_m = C_{m_above} + C_{m_below} + C_{m_soil} + C_{m_dead} \quad (9)$$

$$C_{total} = \sum_{m=1}^n C_m A_m \quad (10)$$

式中: m 为某一土地利用类型; C_m 为土地利用类型 m 总的碳密度, t/hm^2 ; C_{m_above} 为土地利用类型 m 的地上生物量的碳密度, t/hm^2 ; C_{m_below} 为土地利用类型 m 的地下生物量的碳密度, t/hm^2 ; C_{m_soil} 为土地利用类型 m 的土壤碳密度, t/hm^2 ; C_{m_dead} 为土地利用类型 m 的死亡有机质的碳密度, t/hm^2 ; A_m 为土地利用类型 m 的区域总面积, hm^2 ; C_{total} 为区域内总的碳储量, t ,其中碳密度数据参考北洛河流域及黄土高原区域耕地^[21-22]、林地^[23]和草地^[17]等不同的碳密度研究成果^[24]。

2.4 生态系统服务权衡与协同关系分析

生态系统服务种类多样,在空间上也存在分布不均衡的问题。同时由于人类出于目的偏好选择使用生态系统服务,从而使生态系统服务之间出现此消彼长的权衡和相互增益的协同复杂关系。权衡是指某些类型生态系统服务的增加导致其他类型生态系统服务供给减少的状况,而协同则是指2种或多种生态系统服务同时增强或者同时减少的情形^[25]。

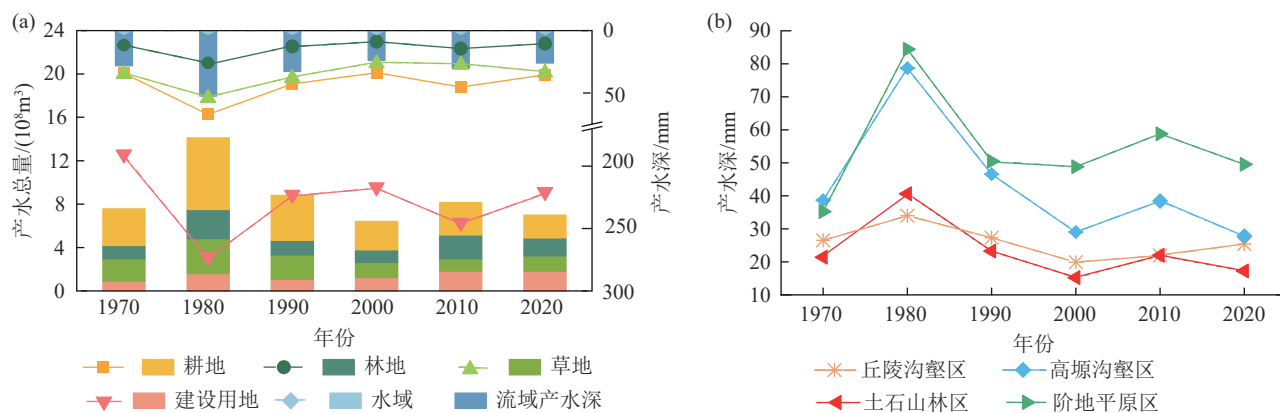


图2 北洛河流域1970—2020年不同土地利用类型产水量及不同地貌类型区产水深

Fig. 2 Changes in water yield volume under different land use types and water yield depth under different landform types in the Beiluo River basin from 1970 to 2020

就不同土地利用类型而言,耕地产水总量总体虽呈下降趋势,但始终占比最大;草地产水总量由于其面积的减少而波动下降至 $1.41 \times 10^8 m^3$;林地产水总量则呈波动上升趋势,最终增加至 $1.65 \times 10^8 m^3$ 。建设用地产水总量在2000年前占比最小,约12.00%,在2000年后占比上升至约23.00%,是流域内建设用地面积扩张所导致。对于各时期不同土地利用类型的产水深而言,除水域之外,在4种用地类型中,建设用地的产水深始终保持最大,其次为耕地和草地,最小为林地。

本文利用 ArcGIS 软件在北洛河流域内随机生成 10 000 个样本点,并提取各样本点对应的 6 期 3 种生态系统服务的估算值,并分别采用 Min-Max 标准化方法对提取值进行预处理(值域为 $[0,1]$)以消除各生态系统服务间不同量纲的影响,随后运用 Origin 软件,利用 Pearson 相关系数法^[26]对 1970—2020 年北洛河流域和流域不同地貌区的 6 期产水量服务、土壤保持服务、碳储量服务 3 种典型生态系统服务的权衡与协同关系进行探讨,若 2 种服务之间的相关系数为正值,且通过显著性检验,则 2 种服务为协同关系;若为负值,二者则为权衡关系。

3 结果与分析

3.1 产水量时空变化特征

运用 InVEST 模型的 Water Yield 模块估算得到北洛河流域 1970—2020 年 6 期总产水量(图 2a)。流域总产水量在 1970—2020 年呈先增加后波动下降趋势,1970 年代流域总产水量为 $7.56 \times 10^8 m^3$,1980 年代分别大幅上升至 $14.11 \times 10^8 m^3$,达到最大值,增幅近 1 倍,2000 年过渡期为研究期内最低,降至 $6.41 \times 10^8 m^3$,在接下来的生态修复期间,先上升后下降,最终达到 2020 年的 $6.98 \times 10^8 m^3$ 。相应的产水深,从 1970 年的 28.11 mm 上升至 1980 年的 52.43 mm,而后下降至 2020 年的 25.95 mm。

1970—2020 年北洛河不同地貌区产水深及产水量空间分布情况(图 2b、图 3)表明,流域产水深整体位于中游高原沟壑区的洛川县、富县和下游阶地平原区的白水县、澄城县等,区域相对较高,向流域西北方向辐射递减。丘陵沟壑区和高原沟壑区产水量高值区范围和强度均随时间逐渐缩减,但高原沟壑区的减少幅度远大于丘陵沟壑区,其值分别减少约 28.15% 和 4.22%,2020 年二者接近;土石山林区的产水量也呈小幅下降趋势,于 2020 年降至 17.26 mm;产水量增加的区域主要集中于阶地平原区,涨幅约 40.64%。

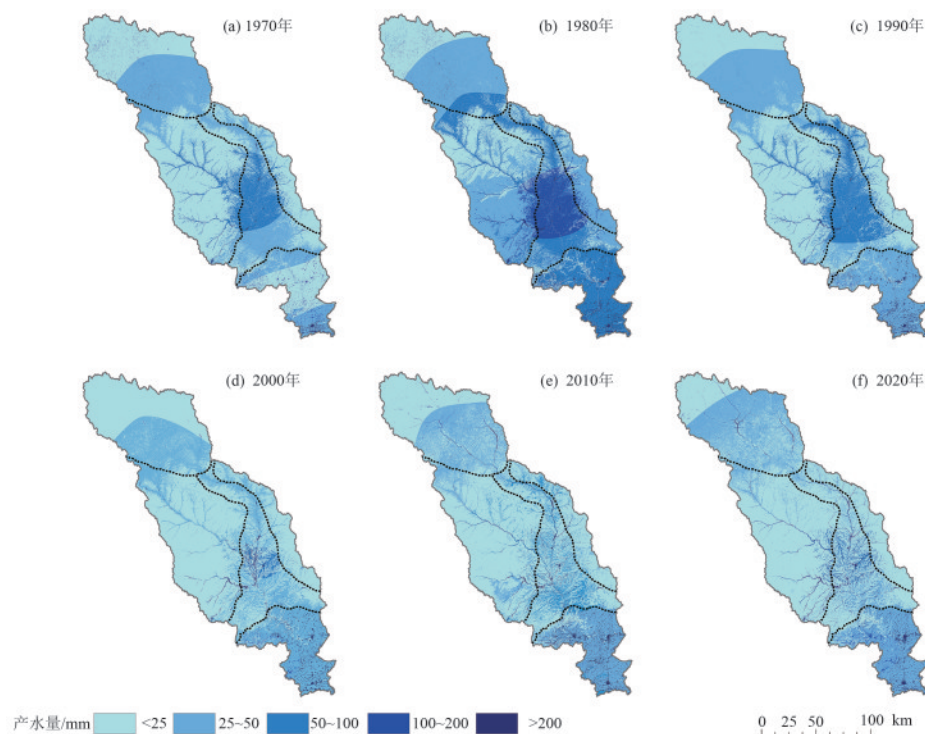


图3 北洛河流域 1970—2020 年产水量空间分布格局

Fig. 3 Spatial distribution pattern of water yield in the Beiluo River basin from 1970 to 2020

3.2 土壤保持服务时空变化特征

基于 CSLE 模型估算北洛河流域 1970—2020 年 6 期土壤保持总量,其总体呈增加趋势(图 4a)。该流域 1970 年的土壤保持总量约为 267.40×10^6 t,波动上升至 2010 年并达到最高值,约为 458.17×10^6 t,随

后在 2020 年小幅下降至 394.21×10^6 t。研究期间,流域土壤保持总量共增加 126.81×10^6 t,增幅为 47.4%;流域单位面积土壤保持量则从 20 世纪 70 年代的 99.38 t/hm² 波动增加至 2020 年的 146.53 t/hm²。

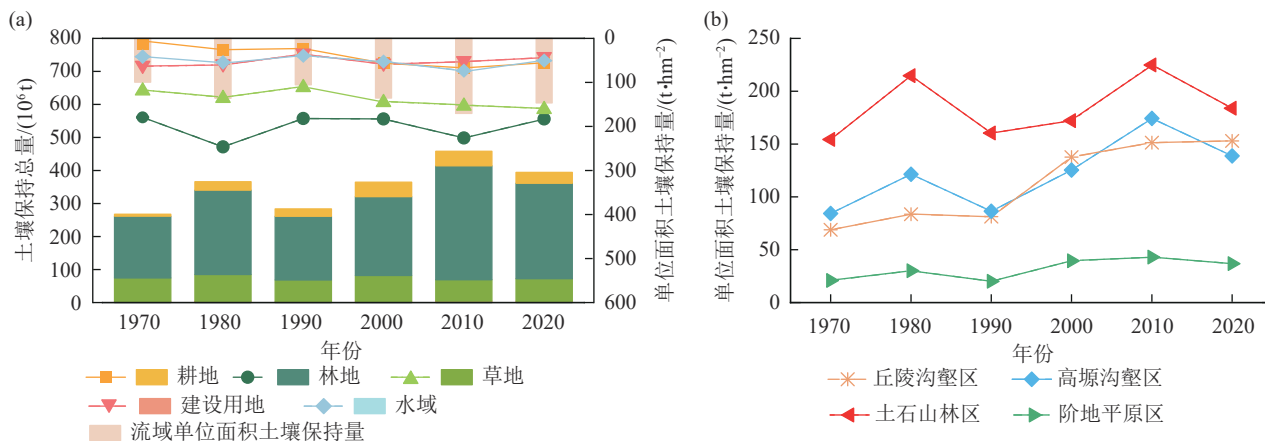


图4 北洛河流域 1970—2020 年不同土地利用类型土壤保持量及不同地貌类型区土壤保持量

Fig. 4 Changes in soil conservation under different land use types and different landform types in the Beiluo River basin from 1970 to 2020

流域主要的 3 种土地利用类型为林地、草地和耕地。林地的土壤保持总量占比在研究期间一直居高,增加量约 102×10^6 t,占总增长量的 80.48%,草地的土壤保持总量有所降低,减少约 4.15%。多年来,林地和草地的土壤保持总量约占流域总量的 90% 以上,表明 2 种土地利用类型在流域土壤保持方面起着主导作用;

就耕地而言,其土壤保持总量仍呈明显波动提升趋势,2020 年为 32.78×10^6 t,相较于 1970 年的 5.71×10^6 t 增加约 4.7 倍。图 4a 为研究期间不同土地利用类型单位面积土壤保持量的变化。其中,林地远高于耕地,保持稳定波动;草地呈上升趋势,于 2020 年增加至 159.17 t/hm²,逐渐接近于林地;耕地的土壤保持功能

则大幅上升,由 5.8 t/hm² 上升至 55.39 t/hm²。

1970—2020 年北洛河流域土壤保持生态系统服务不同地貌区单位面积土壤保持量和流域空间分布格局见图 4b 和图 5。单位面积土壤保持量整体呈中部东西两侧高、南北部低的空间特征,不同地貌区均表现出不同程度的增长。上游丘陵沟壑区 2020 年的单位面积土壤保持量较 1970 年明显提升,增加约

1 倍,达到 152.97 t/hm²,但其西北部相对稳定,未有明显变化;高原沟壑区的单位面积土壤保持量也显著增强,除该区域塬面的耕地外,其余部分均有不同程度的提升,总体约增加 54.46 t/hm²;土石山林区的土壤保持功能则保持波动上升,2020 年增加至 183.89 t/hm²;阶地平原区北部的单位面积土壤保持量有所增加,总体保持小幅上升。

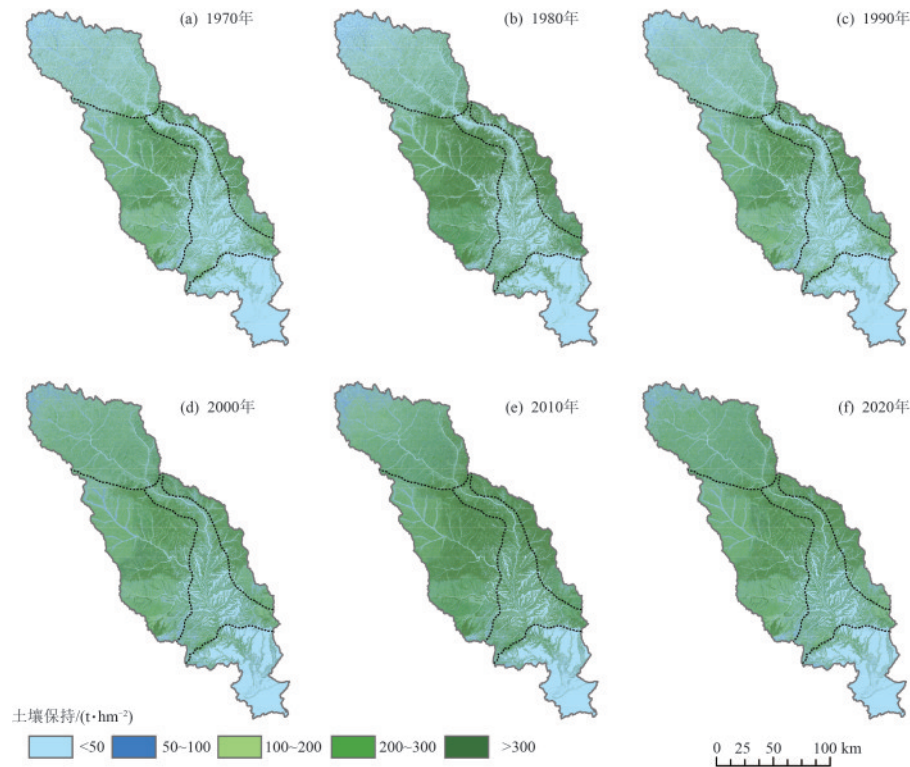


图 5 北洛河流域 1970—2020 年土壤保持空间分布格局

Fig. 5 Spatial distribution pattern of soil conservation in the Beiluo River basin from 1970 to 2020

3.3 碳储量服务时空变化特征

运用 InVEST 模型的 Carbon storage 模块计算得北洛河流域 6 个时期的碳储量,分别为 243.80×10⁶、243.25×10⁶、245.81×10⁶、272.75×10⁶、296.17×10⁶、302.52×10⁶ t,其单位面积碳储量分别为 90.62、

90.46、91.36、101.39、110.08、112.45 t/hm²(图 6a)。在土地利用稳定期内,该地区碳储量相对保持稳定,之后呈增加状态。2020 年较 1970 年增长 24.09%,净增加 58.72×10⁶ t,其碳汇功能和生态系统稳定性明显增强。

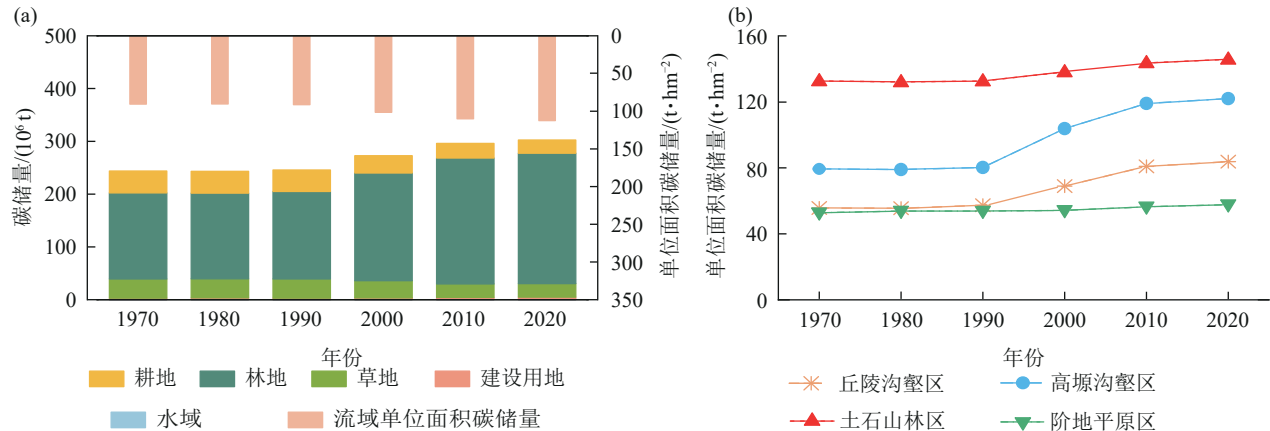


图 6 北洛河流域 1970—2020 年不同土地利用类型碳储量及不同地貌类型区碳储量

Fig. 6 Changes in carbon storage under different land use types and different landform types in the Beiluo River basin from 1970 to 2020

就不同地类的碳储量而言,林地、耕地、草地是流域重要的碳库。林地碳储量由 1970 年的 163.09×10^6 t 持续增加至 2020 年的 247.11×10^6 t, 上升约 51.52%; 草地和耕地的碳储量均随其面积减少而降低, 2020 年分别为 25.60×10^6 t 和 24.91×10^6 t, 减少 29.51% 和 39.85%; 建设用地的碳储量随着城市的扩张有所提升, 从 1970 年的 2.62×10^6 t 稳定增长至 2020 年的 4.55×10^6 t; 水域碳储量在研究期间基本保持稳定, 约为 0.34×10^6 t。

不同地貌区的单位面积碳储量变化见图 6b。流域的单位面积碳储量和土壤保持量空间分布变化规律相似(图 7)。21 世纪 90 年代前, 流域单位面积碳储量分布格局基本保持稳定, 2000 年后, 丘陵沟壑区和高塬沟壑区的固碳能力明显增强, 而位于丘陵沟壑区西北部的部分区域变化不大, 高值区域始终集中于中游两侧的土石山林区, 且其单位面积碳密度也有小幅增加; 阶地平原区低值区面积增加, 但单位面积碳储量保持稳定。

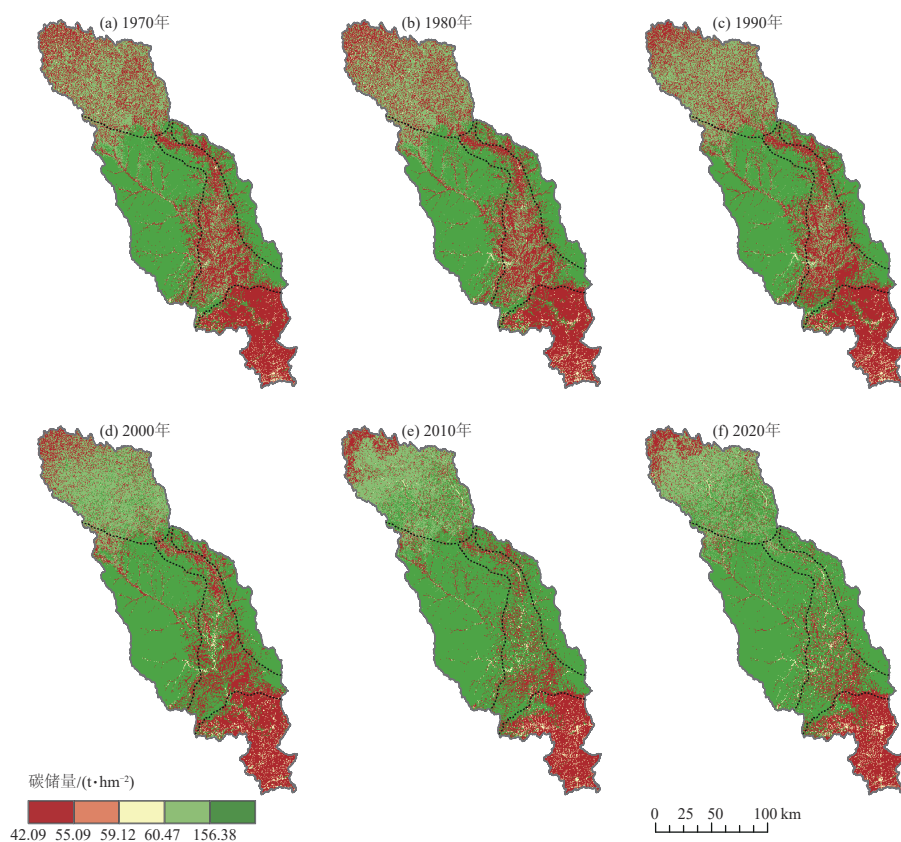


图 7 北洛河流域 1970—2020 年碳储量空间分布格局

Fig. 7 Spatial distribution pattern of carbon storage in the Beiluo River basin from 1970 to 2020

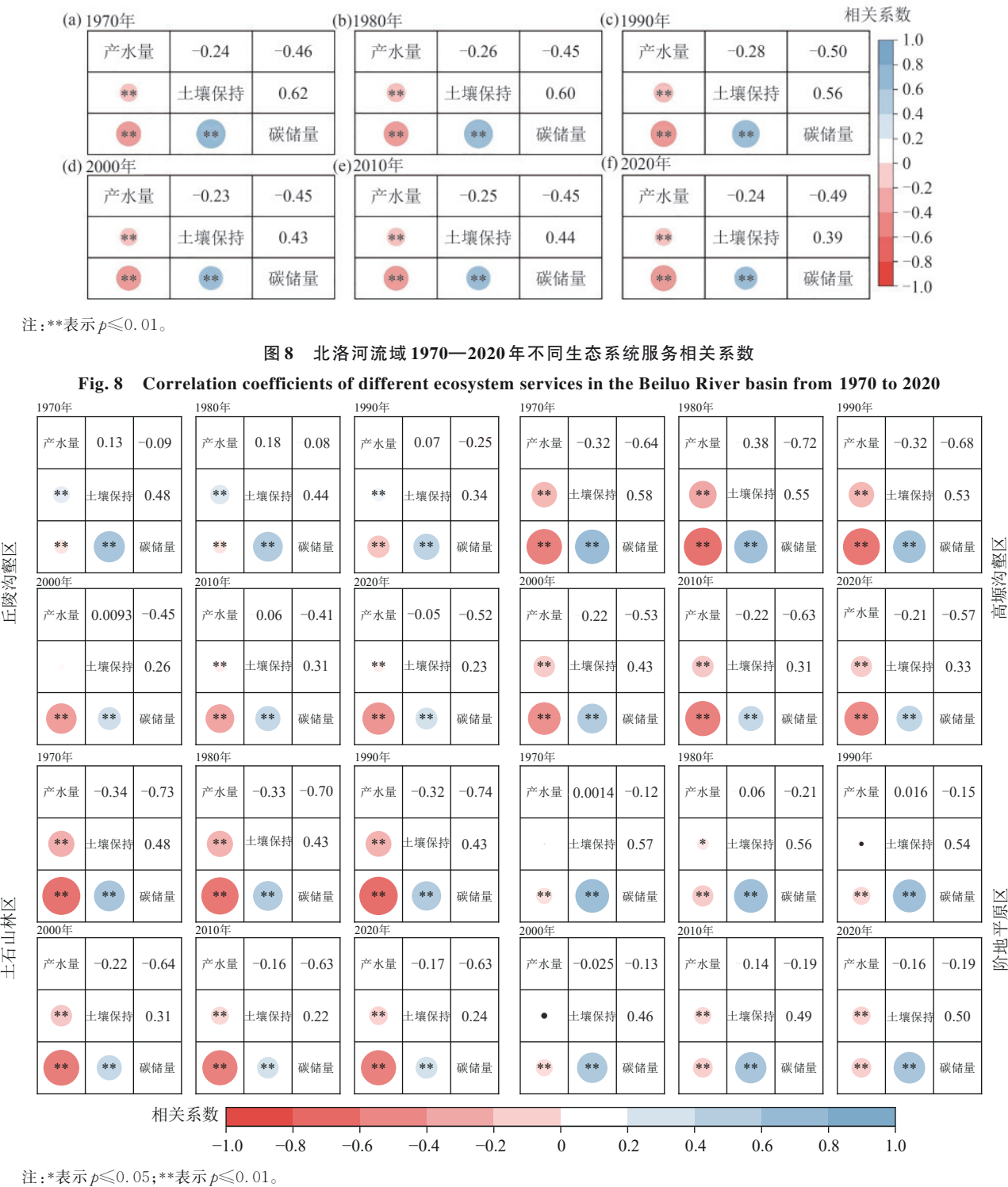
3.4 北洛河流域生态系统服务权衡/协同关系

对北洛河流域 1970—2020 年产水量、土壤保持和碳储量 3 种典型生态系统服务两两一组进行相关性分析, 均通过显著性检验 ($p \leq 0.01$) (图 8)。北洛河流域产水量与土壤保持和碳储量之间相关系数均为负值, 始终存在显著权衡的关系, 同时产水量和碳储量的相关系数绝对值始终大于产水量和土壤保持, 说明碳储量与产水量之间的权衡程度也始终大于土壤保持与产水量, 而土壤保持和碳储量之间相关系数为正值, 始终存在显著协同的关系。

研究期间, 土壤保持与碳储量的相关系数呈现持续下降的趋势, 绝对值由 1970 年的 0.62 下降至 2020 年的 0.39, 随着时间变化, 其协同程度有所降

低, 可能是由于 2000 年后降雨增加, 降雨侵蚀力增加, 但碳储量变化相对较小; 而产水量和碳储量的作用关系则呈小幅平稳波动, 相关系数绝对值为 0.25, 其权衡程度变化不大; 产水量和土壤保持的权衡程度变化幅度与产水量和碳储量类似, 其相关系数绝对值为 0.45~0.50, 说明 2 组生态系统服务的权衡关系较为稳定。

同时根据流域不同的地貌区划分, 提取地貌区内的样本点, 分析不同地貌区内的权衡与协同关系(图 9)。1970—2020 年, 除丘陵沟壑区 2000 年的产水量和土壤保持、阶地平原区 1970 年、1990 年和 2000 年的产水量和土壤保持未通过显著性检验外, 其余均通过显著性检验。



由图 9 可知,在 4 个地貌区中,水土保持和碳储量之间始终为显著协同的关系,同时相关系数均呈不同程度的下降趋势,其中二者在高原沟壑区和阶地平原区上的协同度高于其在丘陵沟壑区和土石山林区上的协同度。2000 年前,不同地貌区内二者的协同程度均小于整个流域,而 2000 年后则有所不同,阶地平原区内二者的协同度始终大于整个流域。产

水量和水土保持之间的关系在 4 个地貌区中则各有不同,丘陵沟壑区于 2010 年后由协同向权衡转变,但权衡程度较低;高原沟壑区和土石山林区的权衡程度相近,在 2000 年后均有所降低;在阶地平原区同样也表现出权衡的关系,且权衡度有所增加。丘陵沟壑区的产水量与碳储量之间的相关系数始终为负值,且表现出持续增加的趋势,2020 年其绝对值上升至

0.52,二者的权衡关系明显加强;高塬沟壑区内产水量与碳储量在研究期间始终表现出权衡关系,其程度波动起伏,小幅降低;土石山林区内二者的权衡程度相较于其他3个地貌区和整个流域来说最强,与高塬沟壑区一样均呈小幅降低趋势;阶地平原区则与高塬沟壑区和土石山林区完全相反,权衡程度有所上升。

4 讨论

4.1 流域生态系统服务变化

从水量平衡角度,降水和蒸散发是影响水分供给的2个核心因素,直接影响流域产水能力和产水总量。北洛河流域产水总量1970—1980年急剧增加,可能与该时期降水量明显增加54.58 mm,而同期平均实际蒸散发量增加幅度较小有关。随着退耕还林工程的实施,虽然降水量有波动增加,但1990—2020年流域总产水量呈波动降低趋势。丘陵沟壑区林地面积增加幅度最为显著,相较于1970年,虽然后期降雨大幅增加,但其产水量仍表现为降低趋势。而在降雨量前后未有明显变化的情况下,由于林地面积的增加,高塬沟壑区产水量显著下降。由于建设用地的扩张,在降雨量减少的情况下,阶地平原区的产水量有所增加,与孙小银等^[27]分析结果基本相同。就不同土地利用类型的产水深来说,其产水深的波动变化与不同时期的降水量和蒸发量关系密切。

1970—2020年,流域的土壤保持服务得到显著提升,丘陵沟壑区和高塬沟壑区增长尤为明显,说明2000年后推动流域林地面积大量增加的退耕还林工程和梯田等一系列水土保持治理措施的实施,有效减少地表产沙,对提升土壤保持功能有明显的促进作用,与周杰等^[28]和张琨等^[5]的研究结果吻合。就不同土地利用类型而言,林、草地的土壤保持能力相对最强。植被可以固结土壤,提升土壤团聚体结构的稳定性并改良土壤结构。草地和地表枯枝落叶层能够有效缓冲降水对黄土的直接击溅和冲刷^[29]。林木冠层在截留降水和降低降水强度等方面也发挥重要作用。

流域碳储量服务在土地利用稳定期保持相对稳定。在退耕还林工程实施后,由于土地利用类型的转移以碳密度低的耕地向碳密度高的林地转化为主,植被显著恢复,流域土地利用结构的变化促使碳储量表现出持续增加的态势,流域的固碳能力显著提升,与土壤保持变化范围和趋势类似。上游的丘陵沟壑区和中游的高塬沟壑区由于林地面积的扩张而增加明显,碳储量的变化与土地利用变化关系密切,姚楠等^[30]和安健吉等^[31]的研究表现出相似的结果。而阶地平原区内的碳储量低值区面积增加是城市化的推进和建设用地面积扩张所导致。

4.2 流域生态系统服务权衡/协同关系

在流域尺度上,土壤保持和碳储量之间存在显著协同关系。林地发挥着吸收储存二氧化碳、释放氧气、固持土壤和减少水土流失的作用,随着植被覆盖度的提高,不仅提升土壤保持效益,流域的固碳能力也随之提升,庞彩艳等^[32]在黄河上游的研究具有相同的结论。产水量与土壤保持之间存在显著权衡的关系,是由于土壤侵蚀的过程和地表产流产沙关系密切,径流的增加可能带走更多的泥沙,但在祁连山地区内,产水量与土壤保持之间呈显著的协同关系^[33],究其原因可能是在气候,土壤及人类活动等方面存在差异。产水量与碳储量之间也表现出显著的权衡关系,植被的增加直接导致需水量变大,截留降水作用加强,进而产水能力降低,流域碳储量增加,与陈登帅等^[34]研究结果相同。

在地貌区尺度上,生态系统服务间的差异主要表现在产水量和土壤保持之间,2000年前丘陵沟壑区内二者表现为协同关系,而其余地貌区内二者则主要为权衡关系,随后二者在丘陵沟壑区内又转为显著权衡的关系,但权衡程度相对较低,其转变原因还有待进一步深入探究。

4.3 不足与展望

本研究存在一定的不足,产水量和碳储量相关参数的设置参考已有文献资料获得,可能与研究区域实际情况有所不同,导致研究结果存在着一定的不确定性,其中,Z常数的取值后续可考虑根据流域实际气候情况进行分区取值。土壤保持服务则由于CSLE模型模拟的局限性,存在着在部分地区模拟精度较低的情况,但整体来说模拟精度良好。除此之外,仅对6期产水量、土壤保持和碳储量3种生态系统服务进行评估,并研究两两之间的权衡和协同关系,对连续时序下的生态系统服务的动态变化和驱动因素研究不够。下一步拟将深入探讨连续时间序列下生态系统服务的变化,及权衡协同关系转变的内在原因,加强对北洛河流域生态系统服务的全面评估,并为流域的可持续协调发展提出更为有效和灵活的管理策略及自然资源配置建议。

5 结论

1)北洛河流域总产水量在研究期间表现出先增加后波动下降的趋势,2000年降至最低。1970—1990年的土地利用稳定期,其产水总量的年代际平均值为 $10.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ (37.75 mm),2000年的过渡期降低36.9%,而2010—2020年的生态恢复期的平均值则相较于第1时期降低25.53%。主要土地利用类型中,耕地产水总量和产水深始终保持最大,林地的

产水深最小。研究区产水量呈现中下游向西北递减的格局。高塬沟壑区产水量减少幅度最大,阶地平原区产水量增加。

2)1970—2020年,土壤保持总量波动增加,2010年达到最高值。第1时期的土壤保持总量的年际平均值为 $305.62 \times 10^6 \text{ t}$ (113.57 t/hm^2),过渡期上升至 $364.52 \times 10^6 \text{ t}$,生态恢复的第3时期年际平均值显著上升至 $426.19 \times 10^6 \text{ t}$ (157.75 t/hm^2),较第1时期增加38.9%,主要原因是林地面积的增加。流域单位面积土壤保持能力显著上升,林地保持能力远高于耕地,梯田等工程措施的建设使耕地土壤保持功能大幅提升。流域中部的林区土壤保持量较高,南北部较低。不同地貌区土壤保持量均明显增长,尤以丘陵沟壑区和高塬沟壑区增加显著。

3)流域总碳储量整体呈先稳定后持续增加趋势,2000年的过渡期后开始显著增长,第3时期较第1时期增长24.09%。作为主要碳库,林地碳储量显著增加,而草地和耕地碳储量随面积减少而降低。单位面积碳储量空间分布与土壤保持量相似,第1时期内保持稳定,随后丘陵沟壑区和高塬沟壑区固碳能力明显增加。

4)流域产水量、土壤保持和碳储量3种生态系统服务之间存在显著的相关性($p \leq 0.01$)。产水量与碳储量和土壤保持之间存在显著的权衡关系,且与碳储量的权衡程度大于与土壤保持的权衡程度。而土壤保持与碳储量之间则表现出显著的协同关系。土壤保持和碳储量的协同程度随着时间而下降,产水量和土壤保持,及其与碳储量之间的权衡关系变化均比较稳定。不同地貌区协同与权衡关系程度有差别,但总体上与整个流域保持一致。

致谢:西北农林科技大学何亮、王浩嘉、王妙倩、王祎宸、喻恺阳、汪楷、刘璇皓,河海大学薛帆等人在文章思路、数据处理、绘图及后期文章撰写修改过程中提供指导和帮助,在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] DAILY G C. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems[M]. Washington D C: Island Press, 1997.
- [2] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387: 253-260.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: Synthesis [M]. Washington D C: Island Press, 2005.
- [4] 汪晓珍, 吴建召, 吴普侠, 等. 2000—2015年黄土高原生态系统水源涵养、土壤保持和NPP服务的时空分布与权衡/协同关系[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 114-121. WANG X Z, WU J Z, WU P X, et al. Spatial and temporal distribution and trade-off of water conservation, soil conservation and NPP services in the ecosystems of the Loess Plateau from 2000 to 2015 [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 114-121.
- [5] 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.
- [6] 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 S Q, LIU Y X, LI Y, 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.
- [7] WEN X, WANG J J, HAN X J. Impact of land use evolution on the value of ecosystem services in the returned farmland area of the Loess Plateau in northern Shaanxi [J]. Ecological Indicators, 2024, 163: e112119.
- [8] 水利部. 水利部发布公告公布42个国家级水土流失重点防治区[EB/OL]. [2024-10-09]. http://www.gov.cn/gzdt/2006-05/09/content_276081.htm. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. The Ministry of Water Resources issues a public announcement naming 42 national-level key soil and water erosion control areas [EB/OL]. [2024-10-09]. http://www.gov.cn/gzdt/2006-05/09/content_276081.htm.
- [9] 魏雷哈冰, 时鹏, 魏勇, 等. 窟野河流域生态系统服务功能变化及其驱动因素分析[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 222-235. WEI L, SHI P, WEI Y, et al. Analysis of ecosystem service function changes and their driving factors in the Kuye River basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 222-235.
- [10] LI G Y, JIANG C H, ZHANG Y H, et al. Whether land greening in different geomorphic units are beneficial to water yield in the Yellow River basin? [J]. Ecological Indicators, 2021, 120: e106926.
- [11] 李子, 张艳芳. 基于InVEST模型的渭河流域干支流生态系统服务时空演变特征分析[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 178-185. LI Z, ZHANG Y F. Spatiotemporal evolution of ecosystem services in the main and tributaries of Weihe River basin based on InVEST model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 178-185.
- [12] 荀斌, 郑莹, 范蓉, 等. 生态系统服务权衡/协同关系的阈值识别研究[J/OL]. 生态学报, 2024, 1-14. [2024-09-27]. <https://doi.org/10.20103/j.stxb.202309222055>. XUN B, ZHENG Y, FAN R, et al. Assessment of

- trade-off/synergy relationships between ecosystem services and identification of ecological restoration thresholds [J/OL]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024: 1-14. [2024-09-27]. <https://doi.org/10.20103/j.stxb.202309222055>.
- [13] 邹亚东,何亮,张晓萍,等.基于GEE数据平台的北洛河流域1970—2019年土地利用结构变化特征[J].水土保持通报,2021,41(6):209-219.
ZOU Y D, HE L, ZHANG X P, et al. Characteristics of land use structure change in Beiluo River basin during 1970—2019 based on google earth engine[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(6):209-219.
- [14] 刘宝元,郭索彦,李智广,等.中国水力侵蚀抽样调查[J].中国水土保持,2013(10):26-34.
LIU B Y, GUO S Y, LI Z G, et al. China water erosion sampling survey [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2013(10):26-34.
- [15] LIU F, WU H, ZHAO Y, et al. Mapping high resolution national soil information grids of China [J]. *Science Bullen*, 2022, 67(3):328-340.
- [16] 周文佐.基于GIS的我国主要土壤类型土壤有效含水量研究[D].南京:南京农业大学,2003.
ZHOU W Z. Study on soil available water content of major soil types in China based on GIS [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2003.
- [17] 杨洁.黄河流域草地生态系统服务功能及其权衡协同关系研究[D].兰州:甘肃农业大学,2021.
YANG J. Research on the ecosystem service functions and their trade-off and synergistic relationships in the grassland of the Yellow River basin [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021.
- [18] LIU B Y, ZHANG K L, XIE Y. An empirical soil loss equation [C]// Proceedings of the 12th International Soil Conservation Organization Conference. Beijing: Tsinghua University Press, 2002:2-15.
- [19] 符素华,刘宝元,周贵云,等.坡长坡度因子计算工具[J].中国水土保持科学,2015,13(5):105-110.
FU S H, LIU B Y, ZHOU G Y, et al. Calculation tool of topographic factors [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(5):105-110.
- [20] HE L, GUO J W, ZHANG X P, et al. Vegetation restoration dominated the attenuated soil loss rate on the Loess Plateau, China over the last 50 years [J]. *Catena*, 2023, 228:e107149.
- [21] 张圣民.黄土高原农田土壤有机碳储量及固碳能力研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.
ZHANG S M. Study on the organic carbon storage and carbon sequestration capacity of farmland soil in the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2018.
- [22] 许小明,张晓萍,何亮,等.黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征[J].环境科学,2022,43(11):5263-5273.
XU X M, ZHANG X P, HE L, et al. Carbon sequestration characteristics of different restored vegetation types in loess hilly region [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(11):5263-5273.
- [23] 许小明,张晓萍,王浩嘉,等.黄土高原子午岭植被自然恢复下的固碳特征[J].环境科学,2023,44(5):2756-2766.
XU X M, ZHANG X P, WANG H J, et al. Carbon sequestration characteristics under natural vegetation restoration in Ziwuling area of the Loess Plateau [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(5):2756-2766.
- [24] 徐丽,何念鹏,于贵瑞.2010s中国陆地生态系统碳密度数据集[DB].(2018-05-20).<http://www.sciencedb.cn/dataSet/handle/603>.
XU L, HE N P, YU G R. Dataset of carbon density of China's terrestrial ecosystems in the 2010s [DB]. (2018-05-20). <http://www.sciencedb.cn/dataSet/handle/603>.
- [25] 李双成,张才玉,刘金龙,等.生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题[J].地理研究,2013,32(8):1379-1390.
LI S C, ZHANG C Y, LIU J L, et al. The tradeoffs and synergies of ecosystem services: Research progress, development trend, and themes of geography [J]. *Geographical Research*, 2013, 32(8):1379-1390.
- [26] 韩晓佳,王继军,温昕.退耕区域生态系统服务作用关系尺度效应及分异机制:以安塞区为例[J].生态学报,2024,44(5):1791-1807.
HAN X J, WANG J J, WEN X. The scale effect and differentiation mechanism of the relationship between ecosystem services in the grain for green area: A case study of Ansai District [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(5):1791-1807.
- [27] 孙小银,郭洪伟,廉丽姝,等.南四湖流域产水量空间格局与驱动因素分析[J].自然资源学报,2017,32(4):669-679.
SUN X Y, GUO H W, LIAN L S, et al. The spatial pattern of water yield and its driving factors in Nansi Lake basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(4):669-679.
- [28] 周杰,杨洁,张文柳.甘南州生态系统服务时空变化及权衡协同关系[J].环境科学,2025,46(4):2398-2409.
ZHOU J, YANG J, ZHANG W L. Spatiotemporal variation and trade-off synergistic relationship of ecosystem services in Gannan prefecture [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(4):2398-2409.
- [29] 李澳,于志静,王德富,等.黄土高原地区水土流失对土地利用和降水变化的响应[J].水土保持学报,2024,38(4):95-102.
LI A, YU Z J, WANG D F, et al. Response of soil and

- water loss to land use and precipitation changes on the Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(4): 95-10.
- [30] 姚楠, 刘广全, 姚顺波, 等. 基于 InVEST 模型的黄土丘陵沟壑区退耕还林还草工程对生态系统碳储量的影响评估[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(5): 329-336.
- YAO N, LIU G Q, YAO S B, et al. Evaluating on effect of conversion from farmland to forest and grassland project on ecosystem carbon storage in loess hilly-gully region based on InVEST model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(5): 329-336.
- [31] 安健吉, 员学锋, 杨悦, 等. 退耕还林还草工程对陕北地区生态系统服务的影响[J]. *环境科学*, 2025, 46(4): 2410-2427.
- AN J J, YUAN X F, YANG Y, et al. Effect of the grain for green program on ecosystem services in northern Shaanxi, China[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(4): 2410-2427.
- [32] 庞彩艳, 文琦, 丁金梅, 等. 黄河上游流域生态系统服务
- (上接第 337 页)
- [28] 张建鹏, 陈诗一. 金融发展、环境规制与经济绿色转型[J]. *财经研究*, 2021, 47(11): 78-93.
- ZHANG J P, CHEN S Y. Financial development, environmental regulations and green economic transition[J]. *Journal of Finance and Economics*, 2021, 47(11): 78-93.
- [29] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952—2000[J]. *经济研究*, 2004, 39(10): 35-44.
- ZHANG J, WU G Y, ZHANG J P. The Estimation of China's provincial capital stock: 1952—2000[J]. *Economic Research Journal*, 2004, 39(10): 35-44.
- [30] 郭沛, 梁栋. 低碳试点政策是否提高了城市碳排放效率: 基于低碳试点城市的准自然实验研究[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(7): 1876-1892.
- (上接第 364 页)
- [31] 郭晓雯, 向贵琴, 张发朝, 等. 生物炭和秸秆还田对咸水滴灌棉田土壤微生物群落特征及功能差异的影响[J]. *环境科学*, 2024, 45(6): 3571-3583.
- GUO X W, XIANG G Q, ZHANG F C, et al. Effects of biochar and straw return on soil microbial community characteristics and functional differences in saline water drip irrigation cotton fields[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(6): 3571-3583.
- [32] RAN T S, LI J, LIAO H K, et al. Effects of biochar amendment on bacterial communities and their function predictions in a microplastic-contaminated *Capsicum annuum* L. soil[J]. *Environmental Technology and Innovation*, 2023, 31: e103174.
- [33] CHEN Y, JIANG Y M, HUANG H Y, et al. Long-term and high-concentration heavy-metal contamination
- 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.
- [33] 钟绍卓, 孙浩源. 不同情景下祁连山国家级自然保护区生态系统服务时空变化及权衡与协同关系[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(5): 358-369.
- ZHONG S Z, SUN H Y. Assessment on spatiotemporal variation and synergies/tradeoffs relationships of ecosystem services in Qilian Mountain national nature reserve under different scenarios[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(5): 358-369.
- [34] 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.
- GUO P, LIANG D. Does the low-carbon pilot policy improve the efficiency of urban carbon emissions: Quasi-natural experimental research based on low-carbon pilot cities[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(7): 1876-1892.
- [31] 国家统计局. 中国城市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007—2021.
- National Bureau of Statistics. China urban statistics yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2007—2021.
- [32] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007—2021.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. China urban construction statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2007—2021.
- strongly influences the microbiome and functional genes in Yellow River sediments[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 637: 1400-1412.
- [34] 郎乾乾, 李艳梅, 夏宇, 等. 玉米秸秆水热生物炭施用对土壤重金属Cd生物有效性和微生物群落的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(6): 1303-1311.
- LANG Q Q, LI Y M, XIA Y, et al. Effects of corn stalk hydrothermal biochar application on the Cd bioavailability and microbial community in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(6): 1303-1311.
- [35] KRUCZYŃSKA A, KUŹNIAR A, PODLEWSKI J, et al. Bacteroidota structure in the face of varying agricultural practices as an important indicator of soil quality: A culture independent approach[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2023, 342: e108252.