

王舒民, 刘招, 管子隆, 等. 油坊沟流域典型生态系统服务权衡与协同关系研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(5): 71-00. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.006

WANG Shumin, LIU Zhao, GUAN Zilong, et al. Study on the trade-offs and synergistic relationships of typical ecosystem services in the Youfanggou Watershed [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(5): 71-00. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.006

# 油坊沟流域典型生态系统服务权衡与协同关系研究

王舒民<sup>1,2,3</sup>, 刘招<sup>1,3</sup>, 管子隆<sup>4</sup>, 肖瑜<sup>5</sup>, 张晋霞<sup>1,3</sup>, 申思齐<sup>1,3</sup>

(1. 长安大学水利与环境学院, 陕西 西安 710064; 2. 湖州南太湖水利水电勘测设计院有限公司, 浙江 湖州 313000; 3. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 4. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 5. 陕西水务发展科技集团, 陕西 西安 710065)

**摘要:**【目的】黄河流域在气候变化和人类活动影响下所面临的生态环境与经济发展之间的矛盾日益突出。为黄河流域高质量发展,对黄土台塬区典型小流域油坊沟流域生态系统服务关系进行研究。【方法】通过无人机实测高程数据及气象、土地利用等多源数据,运用 InVEST 模型,探究油坊沟流域的产水、土壤保持、碳储量以及生境质量共 4 项生态系统服务;采用 Pearson 相关系数计算 4 项生态系统服务之间的相关系数以厘清其相关性;同时基于不同土地类型对生态系统服务权衡协同关系的时空变化进行研究,对研究区的多重生态系统服务进行识别。【结果】结果显示:2001—2020 年油坊沟流域产水服务和土壤保持都呈现先增后减再增的趋势,碳储量持续上升,生境质量基本稳定。各生态系统服务之间主要表现为协同关系,碳储量和产水量之间表现出区域性权衡关系,在耕地、林地、草地和水域以土壤保持功能为主,生态系统服务的热点区主要集中在流域北部的林地地区。【结论】结果表明:植被恢复提高了生态系统服务水平,但对不同生态系统服务影响有时空差异,应对其分区管理以提出相应的保护对策;不同类型生态系统服务高值区的空间分布特征与流域土地利用格局密切相关,在规划管理流域生态系统服务时,需优化土地利用结构以提升服务效益;生态系统服务的冷热点区变化表现出林地在提供生态系统服务方面扮演着越来越重要的角色,在制定生态保护和管理策略时,应充分考虑不同生态系统服务间的相互关系以及空间分布特征,实现生态系统的可持续发展。通过此次对油坊沟流域生态系统服务功能的量化研究,阐明生态系统服务功能时空演变规律,为该区生态环境评价和可持续发展评价提供理论支撑。

**关键词:** 生态系统服务; 权衡与协同; 黄土台塬区; 小流域; InVEST 模型; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.006

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: X171.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)05-0071-15



与作者互动  
请扫描二维码

收稿日期: 2024-10-24; 修回日期: 2025-01-03; 录用日期: 2025-01-14; 网络出版日期: 2025-02-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(42207084); 国家自然科学基金项目(42372288); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2003-JC-QN-0372)

作者简介: 王舒民(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事生态水文方面研究。E-mail: 747199105@qq.com

通信作者: 刘招(1975—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: lz975@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

## Study on the trade-offs and synergistic relationships of typical ecosystem services in the Youfanggou Watershed

WANG Shumin<sup>1,2,3</sup>, LIU Zhao<sup>1,3</sup>, GUAN Zilong<sup>4</sup>, XIAO Yu<sup>5</sup>, ZHANG Jinxia<sup>1,3</sup>, SHEN Siqi<sup>1,3</sup>

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Huzhou Southern Taihu Lake Design Institute of Water Conservancy & Hydroelectric Power, Huzhou 313000, Zhejiang, China; 3. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region, Ministry of Education, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 4. PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 5. Shaanxi Water Development Group, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

**Abstract:** [Objective] Under the influence of climate change and human activities, the Yellow River Basin is increasingly facing contradictions between the ecological environment and economic development. This study aims to investigate the ecosystem service relationships in the typical small watershed of Youfanggou in the Loess Plateau region for high-quality development of the Yellow River Basin. [Methods] Using real-time elevation data measured by drones and multi-source data such as meteorology and land use, the InVEST model was employed to explore four ecosystem services in the Youfanggou Watershed: water yield, soil retention, carbon storage, and habitat quality. The Pearson correlation coefficient was used to calculate the correlation coefficients among the four ecosystem services to clarify their interrelationships. Additionally, the spatiotemporal variations in the trade-offs and synergies of ecosystem services based on different land types were studied to identify multiple ecosystem services in the research area. [Results] The results showed that from 2001 to 2020, water yield and soil retention services in the Youfanggou Watershed initially increased, then decreased, and finally increased again, while carbon storage continued to rise and habitat quality remained relatively stable. The ecosystem services mainly exhibited a synergistic relationship, with a regional trade-off relationship observed between carbon storage and water yield. Soil retention was dominant in cultivated, forest, grassland, and water areas. The hotspots of ecosystem services were mainly concentrated in the forested areas in the northern part of the watershed. [Conclusion] The results indicate that vegetation restoration has improved ecosystem services, but its impacts on different ecosystem services exhibit spatiotemporal differences, necessitating zonal management to propose corresponding protection measures. The spatial distribution characteristics of high-value areas of different ecosystem services are closely related to the land use patterns of the watershed. Optimizing the land use structure to enhance service benefits is essential when planning and managing the watershed's ecosystem services. The changes in cold and hot spots of ecosystem services demonstrate that forest land is increasingly important in providing ecosystem services. In formulating ecological protection and management strategies, the interrelationships and spatial distribution characteristics among different ecosystem services should be fully considered to achieve sustainable ecosystem development. This quantitative study of the ecosystem service functions in the Youfanggou Watershed clarifies the spatiotemporal evolution patterns of ecosystem service functions, providing theoretical support for ecological environment evaluation and sustainable development evaluation in this area.

**Keywords:** ecosystem services; trade-offs and synergistic relationships; Loess Plateau Area; small watersheds; InVEST model; influencing factors

## 0 引言

生态系统服务来源于生态系统,是人类赖以生存和发展的自然条件,其结构、功能、价值和服务能够直接或间接地为人类带来利益,也会影响到生态环境的质量和可持续发展<sup>[1-3]</sup>;国际上将生态系统服务分为供给型、调节型、支持型和文化型四类<sup>[4]</sup>。由于其独特的空间异质性及复杂的生态过程,导致生态系统服务间的相互作用呈现出此消彼长、相互促进的特点<sup>[5]</sup>。因此,准确理解区域内不同类型生态系统服务之间的内在联系,有助于合理且有效地改善生态环

境质量,对各种生态系统服务更为规范化的管理具有推动作用<sup>[6]</sup>。

对于生态系统服务的评估方法,近几年,国内外学者以许多理论为基础开发出了大量评估模型,如 Rusle(Revised Universal Soil Loss Equation)、InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)、SolVES(Social Values for Ecosystem Services)等<sup>[7]</sup>。其中,InVEST模型最为成熟,相对于其他模型其优势在于具有一定的空间开源性、精确性、定量化和可视化<sup>[8-10]</sup>。而评估生态系统服务权衡与协同关系的方法主要有四类,分别是空间分析法、统计描述

法、模型模拟法和情景分析法。近年来诸多学者开展生态系统服务关系的研究,如马世瑛等<sup>[11]</sup>研究黄土高原生态系统服务时空演化特征及不同服务之间的权衡-协同关系,辨识出区域生态系统服务的热区。张自正等<sup>[12]</sup>探讨清江流域生态系统服务的权衡-协同效应,并利用地理检测器解析其驱动因子。杨阳等<sup>[13]</sup>对生态系统服务进行定量评价,揭示植被恢复对生态系统服务功能的影响机制。张锦琳等<sup>[14]</sup>综合运用地形起伏度模型和 InVEST 模型探究武夷山国家公园武夷山九曲溪流域主要生态系统服务、生态系统服务簇及其权衡与协同关系对地形起伏度的响应规律。尽管生态系统服务权衡与协同关系的研究已经取得进展,但关于权衡与协同关系演化规律等方面的研究仍需加强,对于中国生态脆弱区小流域的多重生态服务之间关系还研究甚少。同时,生态系统服务的评估方法仍存在不足,如数据获取困难、评估指标不够全面、评估结果的可靠性和准确性有待提高等。基于以上研究进展和不足,本文通过相关实测数据提高结果的准确性和可靠性,使研究成果更好地服务于区域可持续发展和生态保护。

在气候变化和人类活动影响下,黄河流域面临着生态环境保护与水资源可持续利用、生态系统质量提升与发展方式转型之间的矛盾,黄河流域生态保护和高质量发展也成为我国的重大国家战略<sup>[15-17]</sup>。黄土台塬地区不仅在黄土高原中占据着举足轻重的地位,更是华夏文明主要的起源地,同时也是典型的生态环境脆弱区和气候敏感区,该地区气候干燥,降雨稀少且密集,地形破碎,植被退化,土壤质地疏松,水土流失日趋严重,导致了生态环境与经济发展之间的矛盾越来越大,给该地区的水文生态建设与社会经济的发展造成了极大的阻碍<sup>[18-19]</sup>。小流域作为黄土高原地区人民生产生活的基本单元,也是流域水沙形成和产生的主要源头,以小流域作为研究区,研究其生态系统服务,对该地区的水资源和生态环境的恢复具有很大价值。鉴于此,开展对黄土台塬小流域植被恢复条件下生态系统服务合理评估,为黄河流域高质量发展提供理论支撑,助力西部生态环境建设等重大国家需求具有重要意义。

本文将黄土高原植被恢复 2001—2020 年作为研究背景<sup>[13]</sup>,在黄土台塬区选取典型小流域油坊沟流域进行研究。由于黄土台塬区的水资源相对匮乏,通过研究产水服务,可以评估生态系统在水分循环和调节方面的作用,为水资源管理提供科学依据。土壤保持服务有助于减少水土流失,提高土壤肥力,从而保

障农业生产的稳定性和可持续性。生境质量则关系到生物多样性保护和生态平衡的稳定。因此,本文以 2001—2020 年五期的遥感影像、土壤、气象等多源数据为基础,利用实测数据和遥感解译数据,应用 InVEST 模型,开展黄土塬区生态系统服务功能(产水量、土壤保持、碳储量、生境质量)的量化研究,阐明黄土塬区生态系统服务功能的时空演变规律,为该区域生态环境评价和可持续发展评价提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

油坊沟流域地处黄土高原淳化县东部耀县西部,东经 108°38′—108°44′,北纬 34°45′—34°53′之间,为清河上游支流冶峪河的支沟,流域面积约 46.6 km<sup>2</sup>(见图 1)。地形北高南低,地貌类型为塬梁沟壑为主,土壤以黄土为主,质地疏松,抗蚀能力弱。在径流等自然条件下,土壤容易被冲刷,导致水土流失严重。海拔高度在 652~1 246 m 之间,流域气候属温带季风气候,夏季炎热昼长,最高温度至 24.9℃,冬季寒冷漫长,最低气温低至-1.1℃,多年平均气温为 12.8℃,小流域降水量的年际变化很大,多年平均降水量 539.3 mm,年内分布差异明显,其中 7—9 月的降水量占全年降水量的一半以上。由于气候干旱和降雨较少,导致水资源供需失衡,地下水资源相对匮乏。此外,由于不合理的土地利用,植被退化在加剧水土流失的同时,也降低了生态系统的稳定性和生物多样性,影响流域的可持续发展。

### 1.2 数据来源与处理

所需数据包括以下五种:(1)土地利用数据(1 m):由武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室制作(<https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2023-87/>),将其划分为 5 个一级类别(林地、草地、耕地、水域、建设用地),已经视觉解释集验证。(2)土壤数据(1 km):来源于联合国粮农组织发布的世界土壤数据库(<https://iiasa.ac.at>),基于土壤的砂粒、粉粒、以及有机碳含量等参数,通过特定的经验估算模型来计算可利用含水量。(3)降水量数据:来源于中国科学院资源环境科学数据中心的淳化气象站数据(<https://www.resdc.cn>),后结合 DEM 数据进行克里金插值处理生成研究区降水数据,降水年均值为 539 mm。(4)土壤含水量:在油坊沟流域进行实地土壤含水量测定,采集样品后回到实验室通过烘干箱法进行验证。实地共测定了 33 个点位,统计得出土壤下 30 cm 的土壤含水量在 10.31%~17.10%。

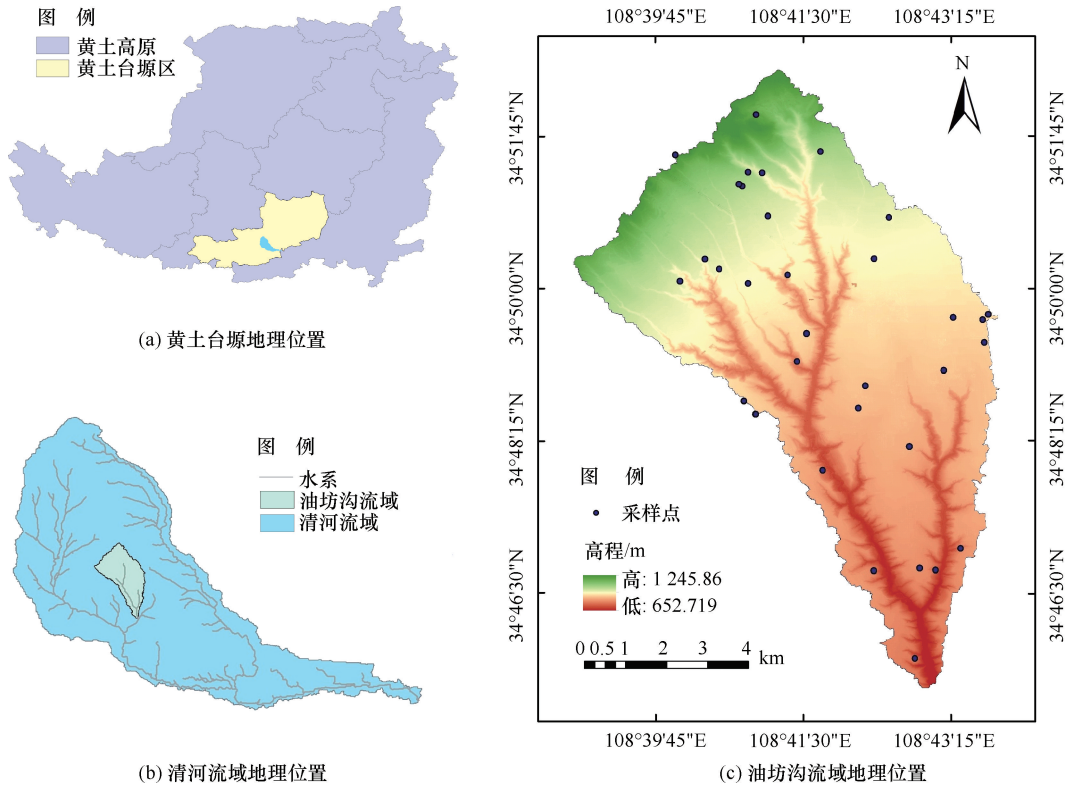


图 1 研究区域地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

(5) DEM 数据: 来自于无人机遥感实测, 考虑到模型计算和分辨率影响, 将原始的高程数据进行重采样至分辨率为 30 m。加载 RTK 实地采集检测点对生成的表面高程模型进行精度检测, 绝对精度大于 95%。  
 (6) 蒸发数据: 由中国气象科学数据共享服务网下载得到中国地面基本气象观测数据 (<http://data.cma.cn>), 后又通过 ANUSPLIN 插值, 统计潜在蒸发量年均值为 871 mm。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 产水服务

产水量是衡量生态用水总量的重要指标, 它的数值越大, 反映的生态用水量越少。其计算公式为

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

式中,  $Y_{xj}$  代表栅格  $x$  上土地利用类型  $j$  的年产水量 ( $\text{mm/a}$ );  $AET_{xj}$  代表在栅格  $x$  上土地利用类型  $j$  的年平均蒸散量 ( $\text{mm/a}$ );  $P_x$  为栅格  $x$  上的年降水量 ( $\text{mm/a}$ )。

#### 1.3.2 碳储量

碳储量主要由五个部分组成, 相互影响、相互转化, 共同维持着土壤的碳储量和碳循环。因为精确测定大气中的碳含量是困难的, 因此本文将将其排除在

外。根据前人研究设定有关输入参数<sup>[20-21]</sup>(见表 1), 其计算公式为

$$C_{tot} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (2)$$

式中, 从左到右依次表示为总碳存储量、地上碳存储、地下碳存储、土壤碳存储和死亡有机质碳存储, 单位皆为  $\text{t/hm}^2$ 。

表 1 油坊沟流域土地利用类型碳密度参数

Table 1 Carbon density parameters of land use types in the

Youfanggou Watershed  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$

土地利用类型	地上碳密度 <sup>[21]</sup>	地下碳密度 <sup>[21]</sup>	土壤碳密度 <sup>[20-21]</sup>	死亡有机质碳密度 <sup>[20-21]</sup>
耕地	4.70	0.00	33.46	0.00
林地	30.17	10.40	68.79	13.00
草地	3.37	7.48	44.36	4.47
水域	3.25	0.00	0.00	0.00
建设用地	2.50	0.08	78.00	0.00

#### 1.3.3 土壤保持

基于 InVEST 模型中土壤侵蚀模型和一般的土壤流失方程<sup>[22]</sup>, 考虑了不同气象条件下的降水强度和持续时间以及地形对水流路径和速度的影响, 可以模拟不同气象及地形条件下的径流和土壤侵蚀过

程, 提高了研究成果的真实性和可信度。其计算公式为

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

式中,  $RKLS$  和  $USLE$  分别代表潜在侵蚀量和实际侵蚀量;  $R$  为根据章文波等<sup>[23]</sup>研究基础上提出的土壤侵蚀力系数;  $K$  为土壤可蚀性因子, 由 EPIC 模型得到;  $LS$  为坡长坡度因子;  $C$  和  $P$  为植被覆盖管理因子和土壤保持措施因子; 从参考文献<sup>[24-27]</sup>确定相关参数。

### 1.3.4 生境质量

该模块是以土地利用数据和相关生物多样性威胁因素等信息为基础, 计算威胁因素对不同地类的影响得到生境退化程度, 从而得到生境质量指数以此评估研究区的生物多样性现状, 为生态系统的保护和恢复提供科学依据。生境质量值越大说明生境质量越好, 生境质量越好代表能够提供物种生存和繁衍的能力越强, 生境质量越低代表当地的生物多样性持续性和可恢复性降低。其公式为

$$Q_{xj} = H_j \left[ 1 - \left( \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z} \right) \right] \quad (4)$$

式中,  $Q_{xj}$  代表生境  $j$  中栅格  $x$  的生境质量;  $H_j$  为生境  $j$  的生境适宜度;  $z$  是标准化常量;  $K$  为半饱和系数, 此处取 0.5。

生境质量值受威胁源权重等相关参数影响, 退化源权重是指退化源对所有生境的相对破坏性, 权重值越大代表其影响程度越深, 威胁程度越高; 栅格单元与威胁源距离越大, 威胁程度往往会随之减小; 土地利用类型对威胁源敏感性越高, 生境类型对威胁源越敏感, 更易受胁迫影响而退化, 越是天然环境, 对威胁源的敏感度越高, 后天人为打造的生态环境对威胁源的敏感性微乎其微甚至可以忽略。基于以上原则, 考虑研究区的实地条件并结合其他学者的研究得到模型输入数据<sup>[28-32]</sup>, 如表 2 和表 3 所列。

表 2 威胁源的权重和最大影响距离

Table 2 Weights and the maximum influence distances of threat sources

威胁源	最大威胁距离/km	权重
耕地	6	0.6
建设用地	9	0.9

### 1.3.5 生态系统服务权衡与协同分析

基于生态系统服务量值正态分布特征和 Pearson 相关系数, 在 arcgis 中创建 100 个随机样本点, 在此基础上, 提取各点位的生态服务价值, 并进行相关性

表 3 各土地利用类型对威胁源的敏感度

Table 3 Sensitivity of each land use type to threat sources

土地利用类型	生境适宜度	敏感度	
		耕地	建设用地
耕地	1	0.0	0.7
林地	1	0.6	0.7
草地	1	0.5	0.5
水域	1	0.4	0.6
建设用地	0	0.0	0.0

分析。当两者之间的相关系数为负值时, 说明两者之间存在着一种权衡关系, 若相反, 两者之间存在着一种协同关系<sup>[33]</sup>。计算公式为

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (5)$$

## 2 结果分析

### 2.1 产水量功能评估

以淳化站径流数据为基础, 通过水文比拟年值对模型进行验证, 结果显示模拟值与水文比拟值有着较好的线性关系( $R$  值为 0.9987), 表明模型能较好地模拟油坊沟流域产水量。从时间上看, 在 2001 年到 2020 年之间, 油坊沟流域单位面积产水量呈现先增加后减少再增加的趋势, 最低单位面积产水量在 2001 年, 为 552.7 mm, 2005 年单位面积产水量最高, 达到 646.3 mm, 这与 2005 年降雨量较多有关, 2005 年降雨量均值比 2001 年增大了 63 mm(见图 2)。2005 年之后, 产水量有所下降, 尤其是 2015 年较 2010 年有明显减少, 主要是降水量的减少和蒸散发影响造成径流减少。从空间分布上分析, 各个年份的单位面积产水量较高值在空间上的分布相对均匀且主要集中在流域的东部, 原因可能受到土地利用变化因素的影响, 此区域内建设用地分布广泛, 而城市建设用地大多是水泥硬化路面, 使得降雨没有很大的下渗量。

### 2.2 土壤保持功能评估

图 3 中显示了油坊沟流域从 2001—2020 年土壤保持量的逐年变化。时间上来看, 呈现先增加再减少的趋势, 2001 年的时候土壤保持量最小, 为  $1.02 \times 10^7$  t, 2005 年油坊沟流域的土壤保持量达到峰值, 为  $1.32 \times 10^7$  t, 2001—2020 年土壤保持总量增加了  $0.13 \times 10^7$  t, 增幅为 12.91%, 从整体上看, 土壤保护功能有所提高。研究期内油坊沟流域土壤保持量的变化主要和降雨量大小和土地利用变化相关,

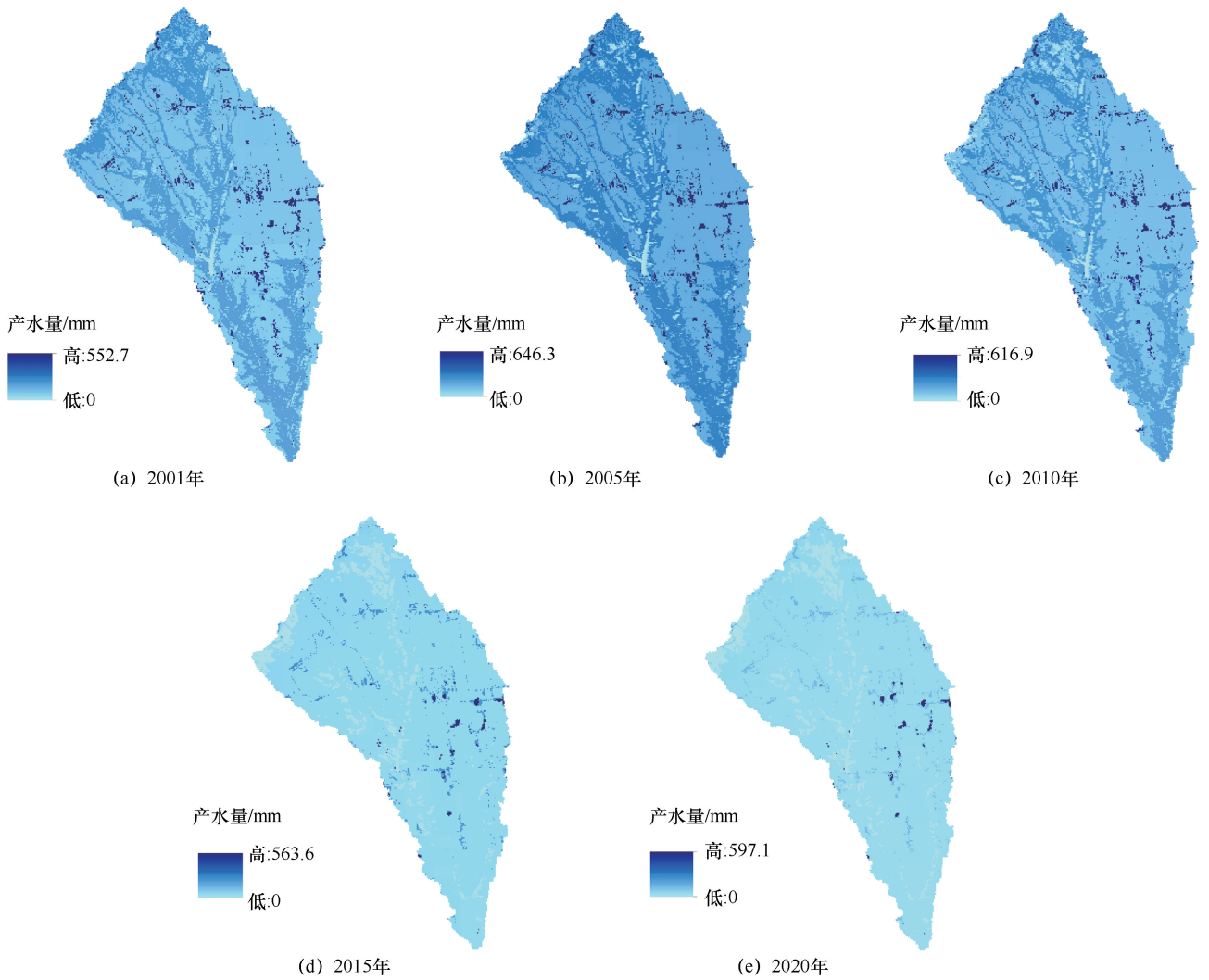


图2 2001—2020年油坊沟流域产水量时空分布

Fig. 2 Spatiotemporal distribution of water yield in the Youfanggou Watershed (2001—2020)

2005年研究区的降雨量最大,其土壤保持量也最大,考虑原因是由于当更多的雨水渗入土壤时,土壤会更为湿润,有利于土壤中的植物生长且有利于维持土壤结构稳定,减少土壤侵蚀的可能性。从空间分布上来看,研究区的土壤保持空间分布基本没有变化。

### 2.3 碳储量功能评估

通过 arcgis 分区统计计算,可以得出油坊沟流域的碳储量从2001年  $2.01 \times 10^5$  t 持续增加至2020年的  $2.15 \times 10^5$  t (见表4),碳储量呈现逐年增长的趋势,波动并不是很大,对于不同的用地类型其碳储量也各不相同,与李妙宇等<sup>[34]</sup>对黄土高原地区生态系统碳储量空间分布的研究结果一致。耕地的碳储量在2005年最高,达到  $1.54 \times 10^5$  t,2005年后持续减少到2020年的  $1.45 \times 10^5$  t,研究期内共减少5.84%。林地的碳储量在2001年和2005年相同,但在2005年后持续增加到2020年的  $0.40 \times 10^5$  t,主要原因是

退耕还林还草的实施,林地面积增加导致研究区的固碳能力有所增强。草地的碳储量逐年减少,占比在10%~20%。水域和建设用地的碳储量很少,原因是这两种土地利用类型本身的面积占比就小。从空间分布上分析,油坊沟流域的碳储量与其土地利用类型的空间分布格局基本保持一致,较高的碳储存区域与植被覆盖较为密集的区域相对应,主要为林地和草地,而碳储存较低的区域大多在水域或建设用地的地区(见图4)。

### 2.4 生境质量评估

生境质量在一定程度上可以反映出当地的生物多样性,油坊沟流域在研究期内的生境质量值保持在0.89,基本没有变化,生境质量均值的增幅为1.93%。本文将油坊沟流域的生境质量从低到高依次分为低(0~0.2),较低(0.2~0.4),中等(0.4~0.6),较高(0.6~0.8)和高(0.8~1)五个级别(见

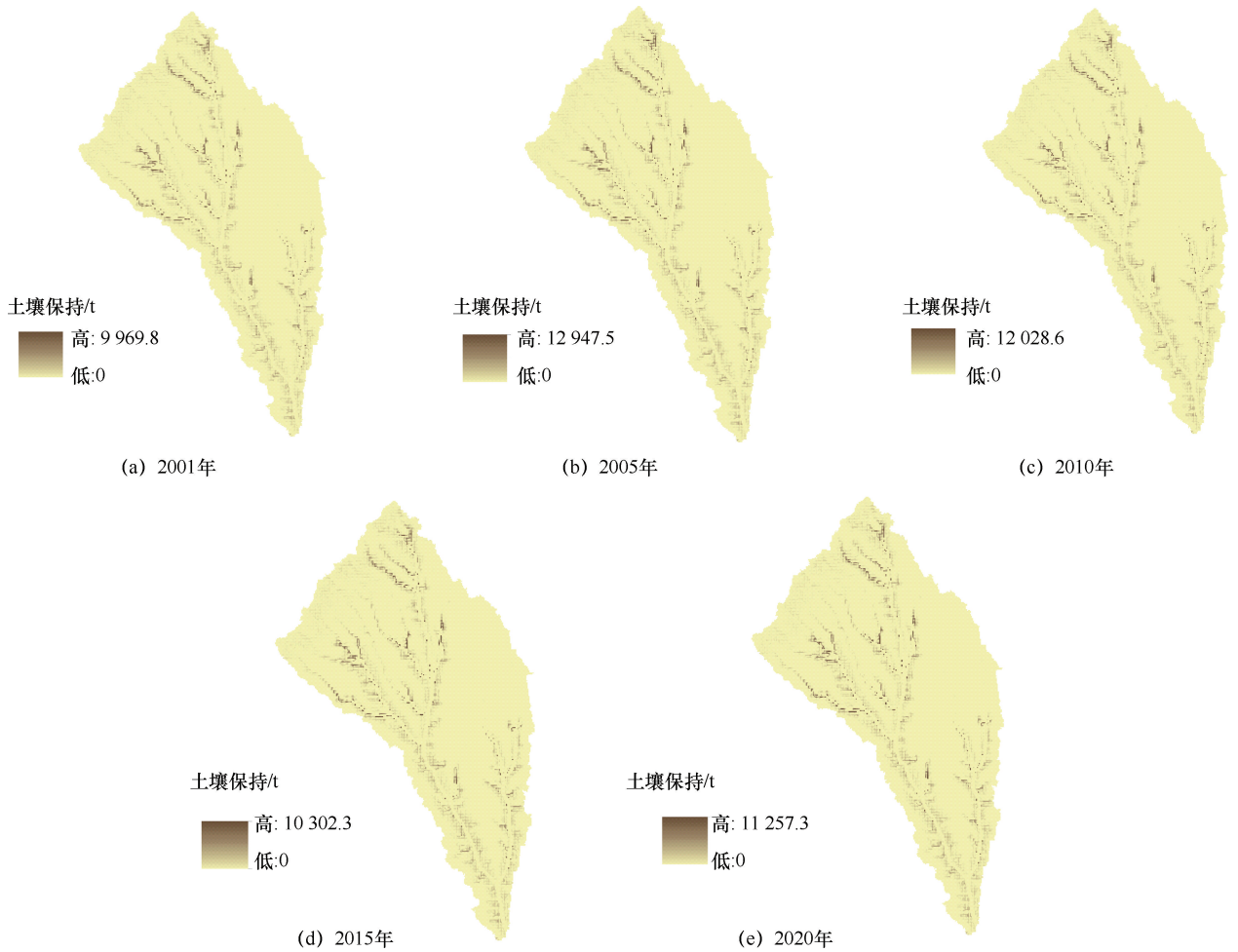


图3 2001—2020年油坊沟流域土壤保持服务时空分布

Fig. 3 Spatiotemporal distribution of soil conservation services in the Youfanggou Watershed (2001—2020)

表4 2001—2020年油坊沟流域各土地利用类型碳储量

Table 4 Carbon storage of different land use types in the Youfanggou Watershed(2001—2020)

年份	项目	土地利用类型						小计
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	
2001	总量/ $10^5$ t	1.49	0.17	0.35	0.00	0.00	0.00	2.01
	占比/%	74.13	8.46	17.41	0.00	0.00	0.00	100.00
2005	总量/ $10^5$ t	1.54	0.17	0.33	0.00	0.00	0.00	2.04
	占比/%	75.50	8.33	16.17	0.00	0.00	0.00	100.00
2010	总量/ $10^5$ t	1.50	0.42	0.21	0.00	0.01	0.00	2.14
	占比/%	70.10	19.63	9.80	0.00	0.50	0.00	100.00
2015	总量/ $10^5$ t	1.45	0.45	0.26	0.00	0.02	0.00	2.18
	占比/%	66.51	20.65	11.94	0.00	0.90	0.00	100.00
2020	总量/ $10^5$ t	1.45	0.40	0.28	0.00	0.02	0.00	2.15
	占比/%	67.44	18.60	13.03	0.00	0.93	0.00	100.00

表5)。经过 arcgis 软件重分类处理并统计,可以发现低等级生境质量面积占比很小,于2015年达到最大0.46%。油坊沟流域不存在较低等级的生境质量,中等生境面积占总面积比例呈现先减少再增加的趋势,在2020年最大,达到14.62%。较高等级生境质量面积占总面积比例的变化趋势与中等级生境质量相

反,呈现先升后降的趋势,在2010年达到最大值为74.10%,高等级生境面积呈先降后升态势。从空间分布格局上来看,除了在流域东部低等级生境质量面积增多,其余区域无明显变化(见图5),高值区集中在流域北部,此区域的主要地类为森林和草地,有利于控制土壤侵蚀和水土流失,生境质量等级高。低值

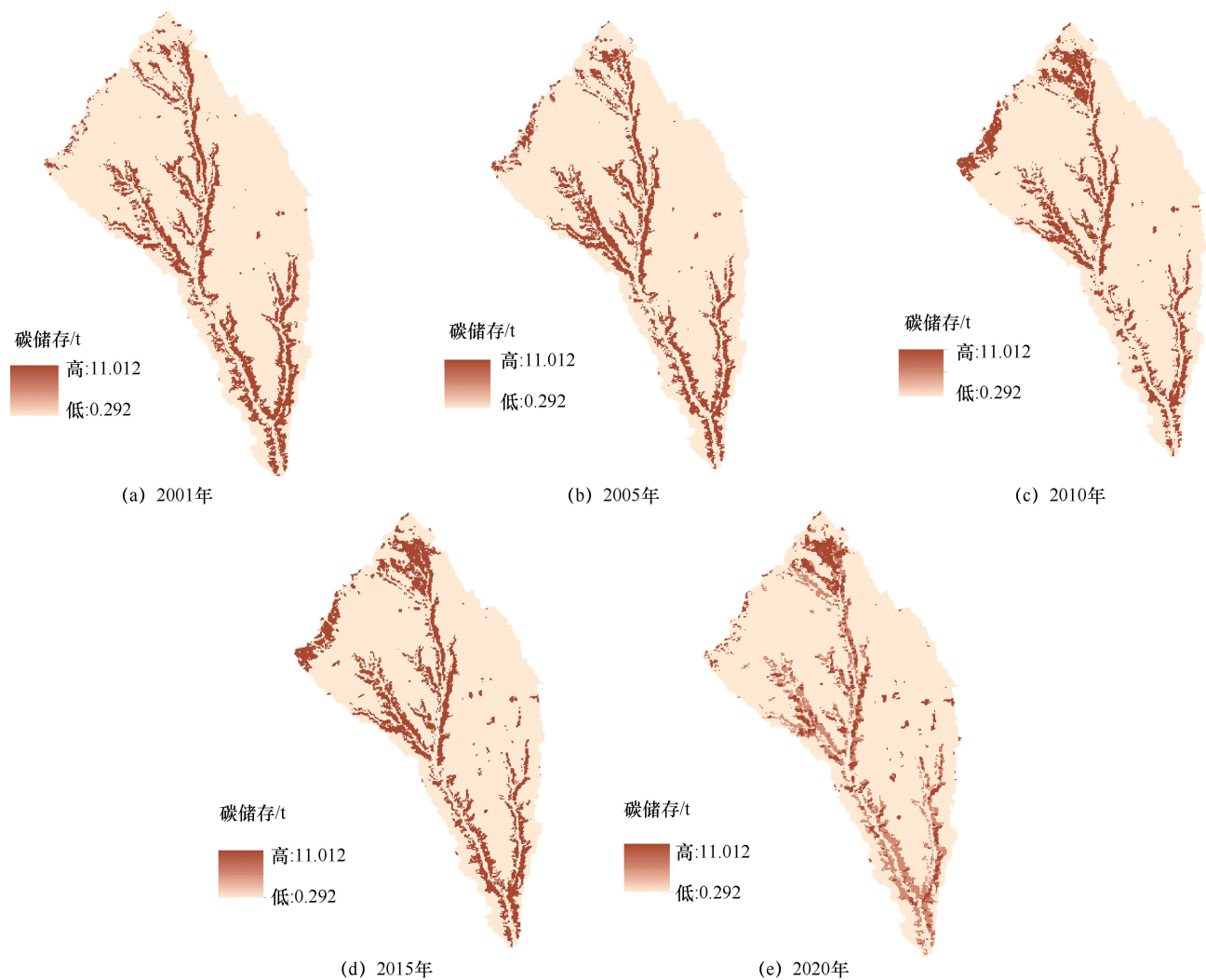


图4 2001—2020年油坊沟流域碳储量时空分布

Fig. 4 Spatiotemporal distribution of carbon storage in the Youfanggou Watershed (2001—2020)

表5 2001—2020年油坊沟流域生境质量各等级面积占比变化表

Table 5 Changes in area proportions of different habitat quality grades in the Youfanggou Watershed (2001—2020)

生境等级	指数区间	各生境质量等级在不同年份所占的比例/%				
		2001年	2005年	2010年	2015年	2020年
低	0~0.2	0.10	0.11	0.17	0.46	0.00
较低	0.2~0.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
中等	0.4~0.6	14.12	13.63	11.98	13.81	14.62
较高	0.6~0.8	69.56	70.56	74.10	72.27	70.77
高	0.8~1.0	16.21	15.70	13.84	13.46	14.61

区与较低值区均集中于小流域的中心地带, 该区域内建设用地多, 人类活动影响大, 原有生态环境被破坏, 因此生境质量差。总体上来看, 油坊沟流域的生境质量良好, 尽管其数值增幅不大, 但也表明当地的生态环境有一定程度上的改善。由于生境质量计算的关键数据源于用地类型, 因而考虑生境质量变化可能

与近些年当地的保护区建立、自然保护措施实施等因素有关。

### 2.5 生态系统服务的权衡与协同分析

由图6可知2001—2020年油坊沟流域的产水量、土壤保持和生境质量之间每两项服务间相关系数都显著为正, 存在协同关系。碳储量与土壤保持及生境质量之间也存在协同关系。碳储量与产水量相关系数显著为负, 说明碳储量与产水量之间是权衡关系。研究期内油坊沟流域除了2015年和2020年产水量与生境质量间的协同关系年际变化幅度比较大以外, 其中, 具有协同作用的服务类型中, 以碳储量与生境质量的相关性最好, 植被密集的区域碳储备相对高, 而植被覆盖率高的区域往往具有更好的生境质量。产水量与水土保持之间的相关程度较低, 而水土保持力与固碳能力相关性最小, 但其协同作用并未发生变化。2001—2020年油坊沟流域的产水量和土壤保持的相

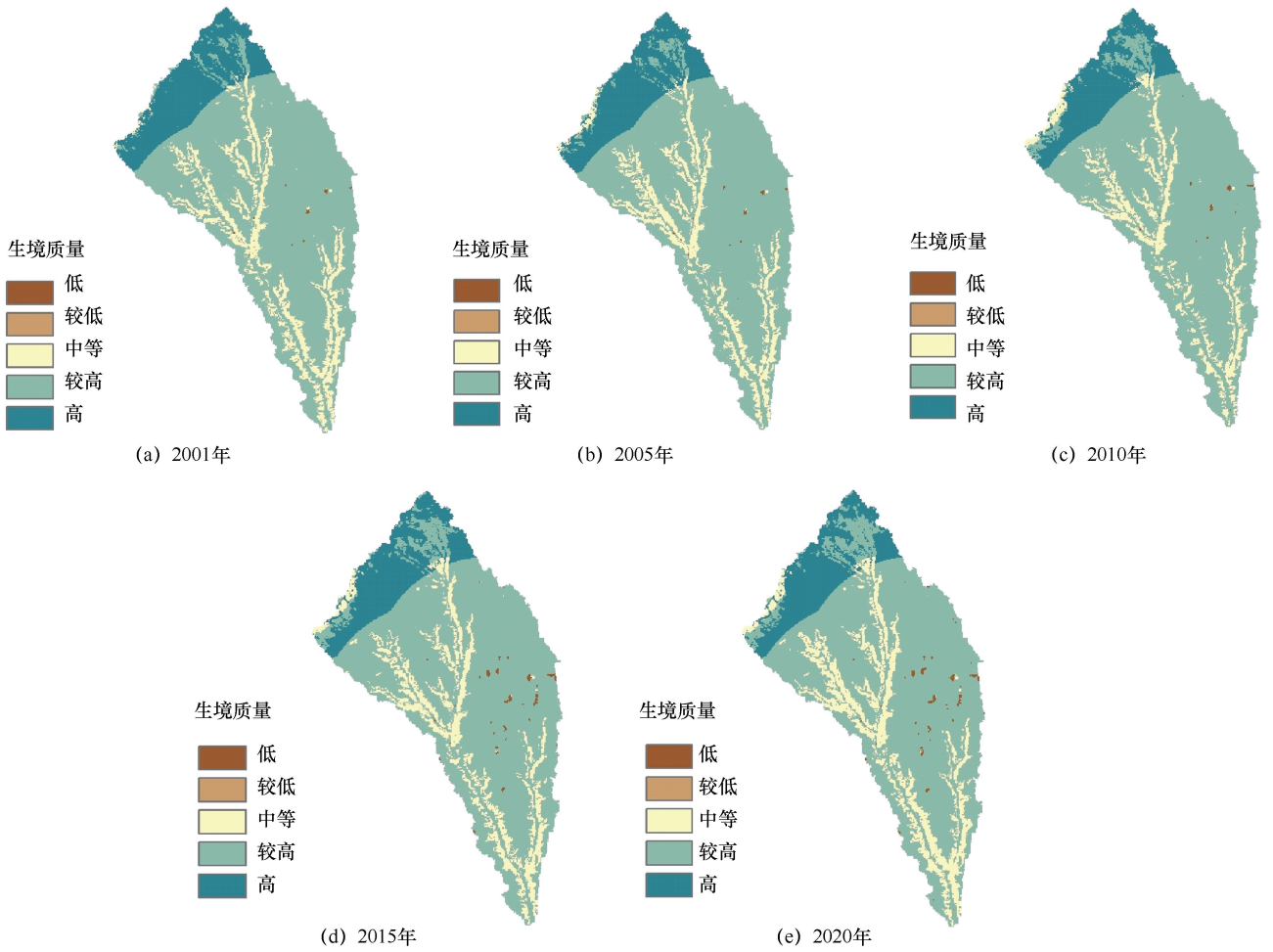


图 5 2001—2020 年油坊沟流域生境质量时空分布

Fig. 5 Spatiotemporal distribution of habitat quality in the Youfanggou Watershed (2001—2020)

<b>WY</b>	0.258*	-0.274*	0.286*
0.258*	<b>SC</b>	0.090*	0.198*
-0.274*	0.090*	<b>CS</b>	-0.531**
0.286*	0.198*	-0.531**	<b>HQ</b>

(a) 2001年

<b>WY</b>	0.312**	-0.287*	0.391**
0.312**	<b>SC</b>	0.265*	0.280*
-0.287*	0.265*	<b>CS</b>	-0.535**
0.391**	0.280*	-0.535**	<b>HQ</b>

(b) 2005年

<b>WY</b>	0.367**	-0.312*	0.446**
0.367**	<b>SC</b>	0.315*	0.258*
-0.312*	0.315*	<b>CS</b>	-0.486**
0.446**	0.258*	-0.486**	<b>HQ</b>

(c) 2010年

<b>WY</b>	0.243*	-0.278*	0.836**
0.243*	<b>SC</b>	0.146*	0.279*
-0.278*	0.146*	<b>CS</b>	-0.639**
0.836**	0.279*	-0.639**	<b>HQ</b>

(d) 2015年

<b>WY</b>	0.273*	-0.323*	0.757**
0.273*	<b>SC</b>	0.061*	0.304**
-0.323*	0.061*	<b>CS</b>	-0.587**
0.757**	0.304**	-0.587**	<b>HQ</b>

(e) 2020年

\* 显著相关,  $P < 0.05$ ; \*\* 显著相关,  $P < 0.01$ 。  
 WY: 产水量; SC: 土壤保持;  
 CS: 碳储量; HQ: 生境质量

图 6 2001—2020 年油坊沟流域生态系统服务相关系数

Fig. 6 Correlation coefficient of ecosystem services in the Youfanggou Watershed (2001—2020)

关系系数从 0.258 上升至最高 0.367 后又降为 0.273; 生境质量与水土保持的相关性较小, 表现为先增大后减小再增大的趋势。产水量与生境质量之间的相关系数呈不断上升趋势, 且整体上呈现出不同程度的波动。产水量与碳储量之间的相关性呈现出先降低后增加再降低的趋势, 但在年际间波动较小且基本保持不变; 碳储量与水土保持的相关性由 0.090 降低到 0.061, 二者的相关性呈上升趋势且协同性逐渐减弱。总体来看, 2001—2010 年, 四种生态系统服务间的协同作用有所加强, 但 2010—2020 年间, 协同关系有所弱化, 但权衡关系呈现出先弱后强的趋势。

为更直观地展示多种生态系统服务之间权衡与协同关系的空间分异特性, 利用 arcgis 软件中的栅格计算器功能将 2001 年和 2020 年的四种生态系统服务进行相减, 得到生态系统服务结果的正或负值, 利用空间叠置法得到近 20 年间的两两生态系统服务的空间变化(见图 7)。其中, 正向与负向变化区是两种服务增减趋势相同的区域, 显示出它们之间的一致变化关

系, 即协同关系; 而相反变化区则是两种服务增减趋势相反的区域, 表明它们之间存在一种对立的关系, 即权衡关系。结果表明, 产水与碳储关系中, 相同变化区和相反变化区的面积占比分别为 0.88% 和 17.72%, 在研究区北部、西部及东南地区集中分布; 产水与生境质量变化关系的空间格局较产水与碳储类似, 相反变化区和负向变化区的面积占比分别为 14.55% 和 84.77%, 主要表现为协同关系; 产水与水土保持的正向变化区零散分布, 主要集中在人为活动大的区域, 正向变化区面积占比达到了 10.06%; 水土保持与碳储的正向变化区和负向变化区分别为 3.65% 和 89.01%, 正向变化区集中在研究区北部, 与 2020 年碳储量较 2001 年变化较大的区域也处于北部的现象一致; 碳储与生境质量的相反变化区和负向变化区的面积占比分别为 12.99% 和 86.80%, 主要以协同关系为主, 集中在人为活动多的区域。随着碳储量的减少, 生态系统中的生物多样性也会得到相应的降低; 水土保持与生境质量的正向变化区和负向变

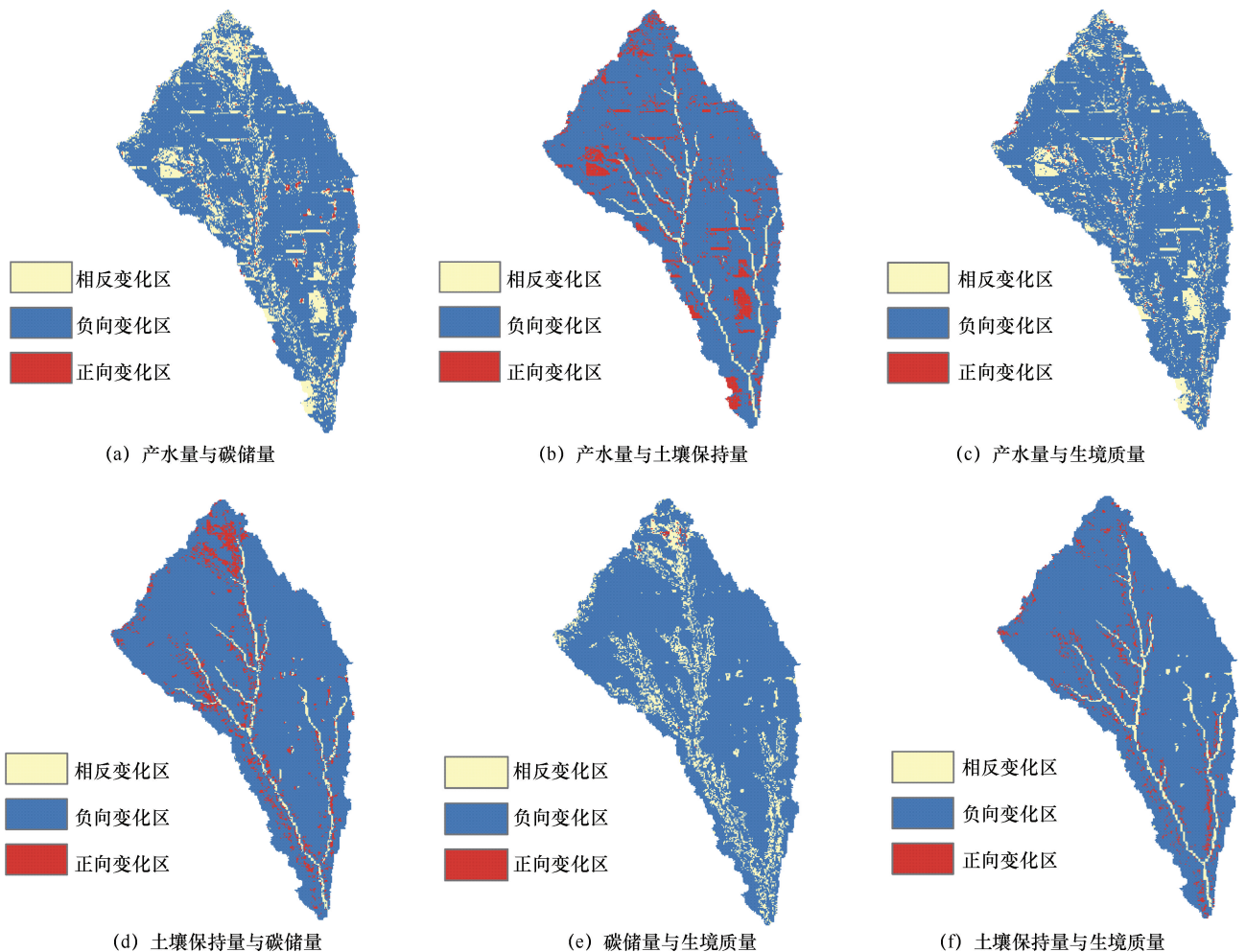


图 7 2001—2020 年油坊沟流域生态系统服务关系的空间格局

Fig. 7 Spatial pattern of ecosystem service relationships in the Youfanggou Watershed (2001—2020)

化区的面积占比分别为 4.37% 和 91.15%，主要表现为负向的协同关系。原因可能是土壤退化导致土壤肥力下降、水分保持能力减弱和植被生长受限。在这种情况下，土壤保持与生境质量之间的权衡关系表现为一种负面效应，即土壤退化导致生境质量下降，进而影响生态系统的稳定性和可持续性。

## 2.6 基于土地利用类型的生态系统服务权衡与协同时空变化

本研究通过绘制玫瑰图对不同用地类型下的生态系统服务功能进行定量描述。首先，本项目拟采用 arcgis 中的空间统计方法，计算 4 种生态系统服务的均值，考虑到 4 种生态系统服务单元、数量级的差异，计算难度很大，采用 SPSS 进行均值归一化<sup>[35]</sup>。通过对 5 个年份同类用地类型的 4 种生态系统服务进行识别，并基于 origin 对各土地利用类型的生态系统服务数据制作不同土地利用类型生态系统服务风向玫瑰图(见图 8)，以便于分析和直观化。结果表明，耕

地在 2005 年产水量最大，其余年份都较小，而碳储量在 2005 年值最大，其他年份较小，表明对于耕地，产水量和碳储存呈现此消彼长的变化方式。在林地中，产水、碳储量和生境质量三项服务基本相似，土壤保持功能一直很好。在草地中，土壤保持功能较好，其于三种生态系统服务增加和减少都具有同步性，表现出协同关系。当土地利用类型为水域时，产水功能、碳储量和生境质量三者都均等，无较大差异。在建设用地上，产水功能一直很好，而土壤保持功能在逐年增强。

## 2.7 生态系统服务空间冷热点分析

通过对不同类型生态系统服务功能指标的调查，确定不同类型生态系统服务功能指标的均值，并将其作为该区域的重点区域。能够提供 4 个功能类型的被认为是“热点”，其中 3 个被认为是“次热点”，2 个被认为是“次冷点”，1 个的视为冷点区，以此绘制油坊沟流域冷热点分析图<sup>[36]</sup>(见图 9)。统

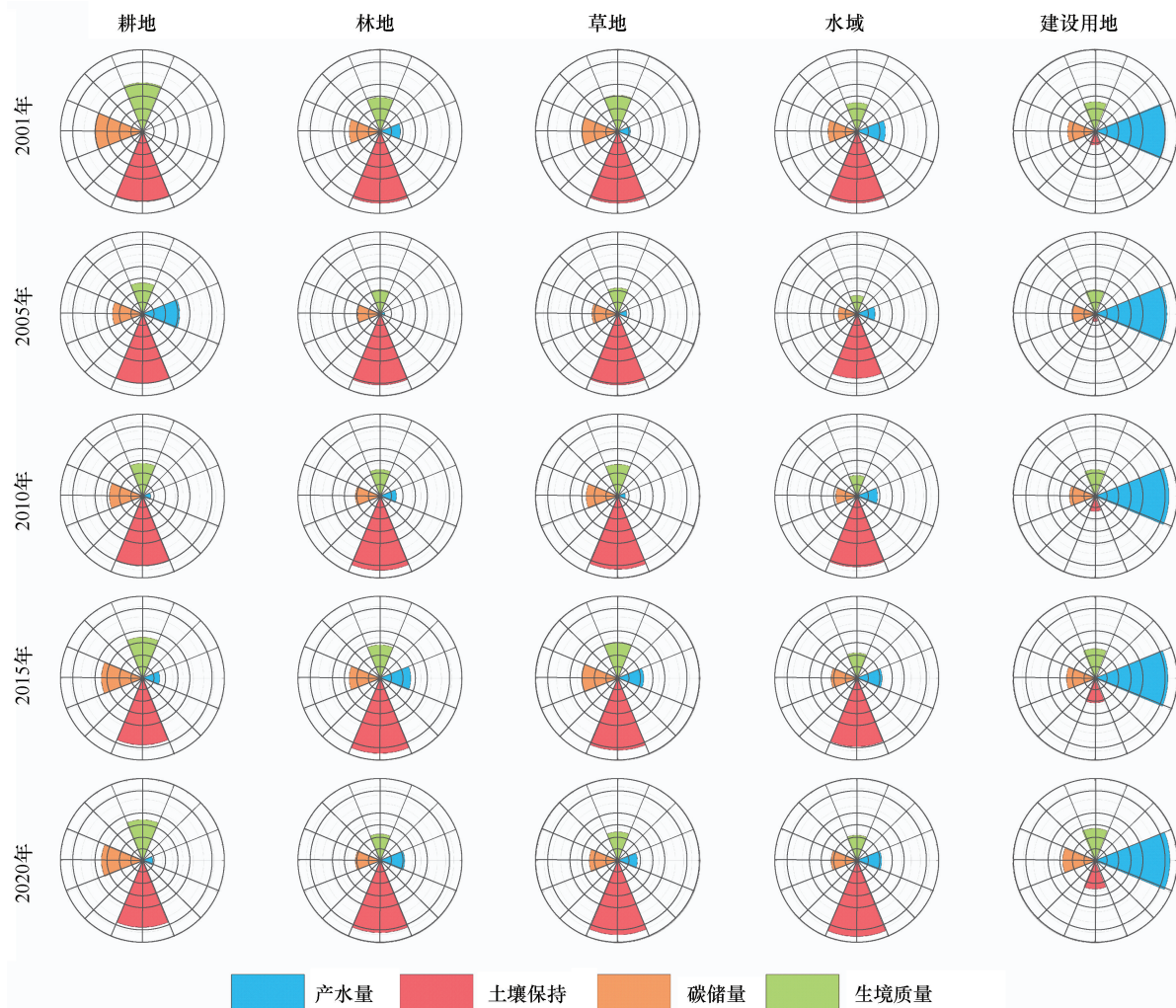


图 8 2001—2020 年油坊沟流域不同地类生态系统风向玫瑰图

Fig. 8 Rose maps of ecosystem services of ecosystem services in different land use types in the Youfanggou Watershed (2001—2020)

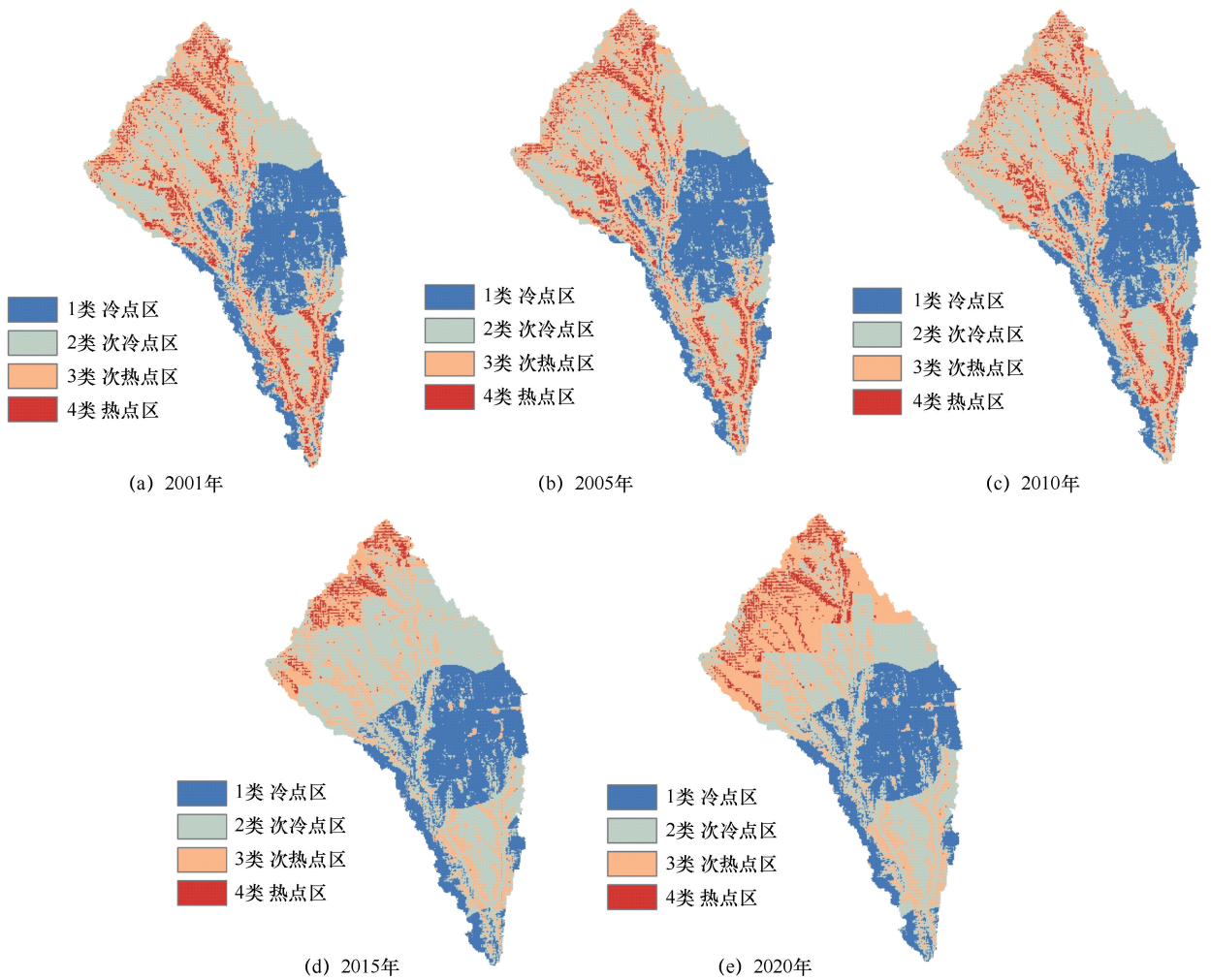


图9 2001—2020年油坊沟流域多重生态系统服务热点区

Fig. 9 Multiple ecosystem service hotspots in the Youfanggou Watershed (2001—2020)

计结果表明, 2001年、2005年、2010年、2015年、2020年的三类服务热点区分别占8.93%、8.83%、7.53%、2.99%、5.12%, 2001—2020年, 热点区的占比先小后大, 表示研究区的生态环境在2001—2015年逐渐变差, 2015—2020年开始有所改善。从空间分布上来看, 流域中部地区能提供的生态系统服务种类为0, 研究期内占比分别为24.86%、24.78%、24.63%、27.94%、25.53%, 为研究区生态系统服务的冷点区, 整体生态系统服务能力较弱; 2001—2010年流域由上到下能提供3种生态系统服务的热点区分布较为规律, 但从2015年开始, 仅在流域北部有所体现; 次冷点区和次热点区的分布基本不随年际变化, 趋于稳定。从总体上看, 油坊沟流域植被状态良好, 不受人为活动影响的区域, 其生境质量和碳储量都比较好, 是多重服务热点区。

### 3 讨论

近几年, 随着“双碳”、高质量发展等国家战略的不断出台, 反映了我国对黄土高原生态环境保护的重视, 也引起了人们对区域生态系统服务的关注<sup>[37-40]</sup>。研究表明, 产水量在2005年达到最大, 与2005年降雨量增大相关<sup>[41]</sup>。此外, 该地区的土壤保持率也很高, 这是因为该地区在退耕还林(草)后, 土壤的营养与品质得到了显著提升, 同时, 植物光合、根系固碳等功能也提高了, 从而提升了土壤的固碳能力, 土壤的肥力和保水能力也得到了保证<sup>[42]</sup>。在本研究期间, 植被逐渐恢复, 林地面积显著增大, 据分析, 2001—2020年林地面积增长比例为65.53%。流域产水量的增加意味着更多的水资源可用于农业灌溉, 从而保障了农作物的正常生长和发育, 对区域生态系统服务功能的改善起到了积极的推动作用。对于生态系统服务的权衡协同关系, 政策制

定者应重视这些生态系统服务的整体性和关联性。针对土壤保持和生境质量的协同提升, 应加大生态保护和修复工程的投入力度; 碳储量与土壤保持及生境质量之间的协同关系表明, 通过改善土壤质量和提升生境质量, 有助于增加碳储量。因此, 政策应鼓励采用有利于碳储存的农业和林业管理措施, 如退耕还林、植树造林等, 以应对气候变化; 由于碳储量与产水量之间存在权衡关系, 政策制定者需要在保障水资源安全的同时, 通过优化水资源配置、提高水资源利用效率等措施, 减少因水资源开发对碳储量的负面影响。政策制定者应充分考虑生态系统服务之间的协同和权衡关系, 制定综合性的生态系统管理政策, 以实现流域的可持续发展。

本文以黄土高原台塬区小流域—油坊沟为研究对象, 探讨其不同时期的生态系统服务权衡与协同关系, 但目前尚缺乏对其在不同尺度下的综合评估和协调机制的认识<sup>[43-46]</sup>。在此背景下, 生态系统服务间的相互关系随着时间的推移而不断发生着变化, 需要进一步加强对其持续、动态转换特性的研究。此外, 由于生物、物理、化学等多个过程的耦合作用, 缺乏对其驱动机制的深入研究, 限制了对其驱动机制的理解。生态系统服务的权衡与协同关系增强或减弱受研究区空间尺度的影响, 且两项服务间不仅只存在线性关系, 应在今后的研究中从多个尺度上解析二者之间的权衡/协同关系, 探索各种服务之间的线性或非线性关系, 揭示其内在机理, 为区域生态系统服务研究提供科学依据。

## 4 结 论

(1) 2001—2005年, 黄土台塬典型小流域油坊沟流域的产水量和土壤保持都呈现增加的趋势, 且都在2005年达到各自的峰值, 2005—2015年开始逐年降低, 2015—2020年又开始呈现回升的趋势, 但增幅较小。碳储量在2015—2020年持续上升但涨幅不大, 生境质量在研究期内基本维持0.89左右, 说明当地生态环境还较为良好。需要进一步加强生态保护和管理工作以促进流域的可持续发展。

(2) 在2001—2020年期间, 由于受到自然和人类活动的影响, 不同生态系统服务间存在着明显的协同效应, 仅在碳储量与产水量间存在着区域性的权衡关系。究其原因, 是因为植被恢复导致了各种生态系统服务水平的提高, 但在时空上的增加量不一样, 呈现出以协同作用为主的格局。为此, 应根据不同生态系统服务间的相互关系, 对其进行分区, 并提出相应

的保护对策。

(3) 不同类型生态系统服务高值区的空间分布特征与流域土地利用格局存在着紧密的联系, 由于油坊沟流域各个用地类型的水体涵养能力较强, 导致产水量较小, 同时其具有较高的生物多样性, 受人为干扰程度低。而在建筑用地方面, 有大量的水泥硬化路面, 雨水入渗少, 为高值区。因此, 在规划和管理流域生态系统服务时, 必须充分考虑土地利用格局的影响, 通过优化土地利用结构来提升生态系统服务的整体效益。

(4) 生态系统服务的热点区在2001—2010年分布较为广泛, 在2015—2020年集中在流域北部林地地区。表明林地在提供生态系统服务方面扮演着越来越重要的角色, 可能是由于林地的恢复或保护措施得当, 导致其生态系统服务功能得到增强; 冷点区在2001—2020年主要分布在流域中部, 以建设用地为主, 多年来无明显变化。反映了建设用地对生态系统服务的负面影响较大, 且多年来这一状况并未得到显著改善, 建设用地通常伴随着大量的硬化表面和人为活动, 这导致生态系统服务的减少或丧失; 次热点区主要分布在流域的北部、中部和南部, 在流域东部分布较少, 以草地为主。表明草地在一定程度上提供生态系统服务, 但其重要性不如林地。

## 参考文献 (References):

- [1] ANDERSSON E, MCPHEARSON T, KREMER P. Cultural ecosystem services as a gateway for improving urban sustainability [J]. *Ecosystem Services*, 2015, 12: 165-168.
- [2] GARCIA A M, SANTE I, MIRANDA D. Green infrastructure spatial planning considering ecosystem services assessment and trade-off analysis [J]. *Ecosystem Services*, 2020, 43: 101115.
- [3] MILANOVIC M, KNAPP S, PYSEK P. Linking traits of invasive plants with ecosystem services and disservices [J]. *Ecosystem Services*, 2020, 42: 101072.
- [4] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and nature capital [J]. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [5] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 等. 生态系统服务权衡/协同研究进展与趋势展望 [J]. *地球科学进展*, 2015, 30(11): 1250-1259.  
DAI E F, WANG X L, ZHU J J, et al. Progress and perspective on ecosystem services trade-offs [J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(11): 1250-1259.
- [6] 钱彩云, 巩杰, 张金茜, 等. 甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系 [J]. *地理学报*, 2018, 73(5): 868-879.  
QIAN C Y, GONG J, ZHANG J Q, et al. Change and tradeoffs-synergies analysis on watershed ecosystem services: A case study of Bailongjiang Watershed, Gansu [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5): 868-879.

- [7] HOWE C, SUIH H, VIRA B, et al. Ecosystem services for human well-being: A meta-analysis of ecosystem service trade-offs and synergies in the real world[J]. *Global Environment Change*, 2014, 28: 263-275.
- [8] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 等. 生态系统服务权衡: 方法、模型与研究框架[J]. *地理研究*, 2016, 35(6): 1005-1016.  
DAI E F, WANG X L, ZHU J J, et al. Methods, tools and research framework of ecosystem service trade-offs [J]. *Geographical Research*, 2016, 35(6): 1005-1016.
- [9] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法[J]. *资源科学*, 2016, 38(1): 1-9.  
FU B J, YU D D. Trade-off analyses and synthetic integrated method of multiple ecosystem services [J]. *Resources Science*, 2016, 38(1): 1-9.
- [10] DAWSON M, GROGAN K, MARTIN A, et al. Environment justice research shows the importance of social feedbacks in ecosystem service trade-offs[J]. *Ecosystem and Society*, 2017, 22(3): 12.
- [11] 马世瑛, 陈英, 裴婷婷, 等. 黄土高原生态系统服务时空变化及权衡与协同研究[J]. *甘肃农业大学学报*, 2023, 58(6): 189-200.  
MA S Y, CHEN Y, PEI T T, et al. Investigation of spatio-temporal changes and trade-offs and synergies of ecosystem services in the Loess Plateau[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2023, 58(6): 189-200.
- [12] 张自正, 张蕾, 孙桂英, 等. 清江流域生态系统服务权衡时空效应及驱动因素[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(4): 1051-1062.  
ZHANG Z Z, ZHANG L, SUN G Y, et al. Spatial and temporal effect and driving factors of ecosystem service trade-off in the Qingjiang River Basin, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(4): 1051-1062.
- [13] 杨阳. 黄土高原典型小流域植被与土壤恢复特征及生态系统服务功能评估[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.  
YANG Y. Vegetation and Soil Restoration Characteristics and Ecosystem Service Function Assessment in Typical Small Watershed on the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019.
- [14] 张锦琳, 游巍斌, 蔡新瑜, 等. 武夷山小流域生态系统服务(簇)权衡/协同及对地形起伏度的响应[J]. *生态学报*, 2023, 43(12): 4892-4903.  
ZHANG J L, YOU W B, CAI X Y, et al. Trade-offs and synergies among ecosystem service Bundles in response to relief degree of land surface in a small watershed of Mount Wuyi [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(12): 4892-4903.
- [15] FENG X M, FU B J, LU N, et al. How ecological restoration alters ecosystem services: An analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3(1): 2486.
- [16] FENG X M, FU B J, PIAO S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [17] LU Y, FU B, FENG X, 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-e31782.
- [18] LI L J, ZHANG L, WANG H, et al. Assessing the impact of climate variability and human activities on streamflow from the Wuding River basin in China[J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(25): 3485-3491.
- [19] LI Z, LIU W, ZHANG X, et al. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 377(1): 35-42.
- [20] 杨殊桐, 时鹏, 李占斌, 等. 大理河流域退耕还林工程对生态系统服务功能的影响[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(6): 251-258.  
YANG S T, SHI P, LI Z B, et al. Effect of grain for green project on ecosystem service in Dali River Basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(6): 251-258.
- [21] 刘孟竹, 王彦芳, 裴宏伟. 退耕还林(草)背景下中国北方农牧交错带土地利用及碳储量变化[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(1): 174-182.  
LIU M Z, WANG Y F, PEI H W. The changes of land use and carbon storage in the northern farming-pastoral ecotone under the background of returning farmland to forest (grass) [J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(1): 174-182.
- [22] 王晓萌, 潘佩佩, 王晓旭, 等. 基于土地利用的河北省生态系统服务权衡/协同关系研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2021, 37(1): 80-88.  
WANG X M, PAN P P, WANG X X, et al. Research on ecosystem service trade-off/synergy relationship in Hebei Province based on land use[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2021, 37(1): 80-88.
- [23] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. *资源科学*, 2003(1): 35-41.  
ZHANG W B, FU J S. Rainfall Erosivity Estimation Under Different Rainfall Amount[J]. *Resources Science*, 2003(1): 35-41.
- [24] 李明月. 秦岭丹江流域水源涵养与土壤保持功能评价[D]. 西安: 西北大学, 2021.  
LI M Y. Functional Evaluation of Water Retention and Soil Conservation in Danjiang River Basin of Qinling Mountains [D]. Xi'an: Northwest University, 2021.
- [25] 李妙莹. 基于 InVEST 模型的黄土高原人工灌草系统土壤保持功能评估[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.  
LI M Y. The Evaluation of the Soil Conservation Function of Shrub and Grassland System Based on the InVEST Model in Loess Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
- [26] 陈浩. 黄土高原退耕还林前后流域土壤侵蚀时空变化及驱动因素研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.  
CHEN C. Spatial and Temporal Changes of Soil Erosion and Its Driving Factors Before and After the "Grain for Green" Project in the Loess Plateau [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019.
- [27] 刘宇林. 黄土高原土壤侵蚀对植被恢复的响应[D]. 杨凌: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2020.  
LIU Y L. Responses of Soil Erosion to Vegetation Restoration on the Loess Plateau [D]. Yangling: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [28] 刘春艳, 朱康文, 刘吉平. 三峡库区重庆段土地覆盖和生物多样性功能演化及预测[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(19): 258-267.  
LIU C Y, ZHU K W, LIU J P. Evolution and prediction of land cover and biodiversity function in Chongqing section of Three Gorges Reservoir Area [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(19): 258-267.

- [29] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 黄河流域生境质量时空演变及其影响因素[J]. 中国沙漠, 2021, 41(4): 12-22.  
YANG J, XIE B P, ZHANG D G. Spatial-temporal evolution of habitat quality and its influencing factors in the Yellow River Basin based on InVEST model and GeoDetector[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(4): 12-22.
- [30] 朱增云, 阿里木江·卡斯木. 基于地理探测器的伊犁谷地生境质量时空演变及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3408-3420.  
ZHU Z Y, ALIMUJIANG K. Spatial-temporal evolution of habitat quality in Yili Valley based on geographical detector and its influencing factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(10): 3408-3420.
- [31] ZHANG X, SONG W, LANG Y, et al. Land use changes in the coastal zone of China's Hebei Province and the corresponding impacts on habitat quality[J]. Land Use Policy, 2020, 99: 104957.
- [32] ZHANG X R, ZHOU J, LI G N, et al. Spatial pattern reconstruction of regional habitat quality based on the simulation of land use changes from 1975 to 2010[J]. Journal of Geographical Sciences, 2020, 30(12): 601-620.
- [33] 刘华妍, 肖文发, 李奇, 等. 北京市生态系统服务时空变化与权衡分析[J]. 生态学杂志, 2021, 40(1): 209-219.  
LIU H Y, XIAO W F, LI Q, et al. Spatiotemporal variations and trade-offs of ecosystem services in Beijing[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(1): 209-219.
- [34] 李妙宇, 上官周平, 邓蕾. 黄土高原地区生态系统碳储量空间分布及其影响因素[J]. 生态学报, 2021, 41(17): 6786-6799.  
LI M Y, SHANGGUAN Z P, DENG L. Spatial distribution of carbon storages in the terrestrial ecosystems and its influencing factors on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(17): 6786-6799.
- [35] 武文欢, 彭建, 刘焱序, 等. 鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析[J]. 地理科学进展, 2017, 36(12): 1571-1581.  
WU W H, PENG J, LIU Y X, et al. Tradeoffs and synergies between ecosystem services in Ordos City[J]. Progress in Geography, 2017, 36(12): 1571-1581.
- [36] 戴路炜, 唐海萍, 张钦, 等. 北方农牧交错带多伦县生态系统服务权衡与协同关系研究[J]. 生态学报, 2020, 40(9): 2863-2876.  
DAI L W, TANG H P, ZHANG Q, et al. The trade-off and synergistic relationship among ecosystem services: A case study in Duolun County, the agro-pastoral ecotone of Northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(9): 2863-2876.
- [37] 傅伯杰, 吕一河, 高光耀. 中国主要陆地生态系统服务与生态安全研究的重要进展[J]. 自然杂志, 2012, 34(5): 261-272.  
FU B J, LYU Y H, GAO G Y. Major research progresses on the ecosystem service and ecological safety of main terrestrial ecosystems in China[J]. Nature Magazine, 2012, 34(5): 2012.05.003.
- [38] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 等. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征[J]. 地理学报, 2017, 72(11): 2064-2078.  
WANG P T, ZHANG L W, LI Y J, et al. Spatio-temporal characteristics of the trade-off and synergy relationships among multiple ecosystem services in the Upper Reaches of Hanjiang River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(11): 2064-2078.
- [39] 傅伯杰. 国土空间生态修复亟待把握的几个要点[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(1): 64-69.  
FU B J. Several key points in territorial ecological restoration[J]. Strategy & Policy Decision Research, 2021, 36(1): 64-69.
- [40] 傅伯杰, 田汉勤, 陶福祿, 等. 全球变化对生态系统服务的影响研究进展[J]. 中国基础科学, 2020, 22(3): 25-30.  
FU B J, TIAN H Q, TAO F L, et al. Progress of the impact of global change on ecosystem services[J]. China Basic Science, 2020, 22(3): 25-30.
- [41] 管子隆. 变化条件下黄土台塬地区小流域水文生态演变机理及保护研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.  
GUAN Z L. Study on Hydro-Ecological Evolution Mechanism and Protection of Small Watershed in Loess Tableland under Changing Conditions[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [42] 许煜麟, 赵雅萍, 赵雨晴, 等. 黄土高原退耕还林(草)前后土壤有机碳密度变化及其对气候变化和人类活动的响应[J]. 环境科学, 2023.  
XU Y L, ZHAO Y P, ZHAO Y Q, et al. Changes in soil organic carbon density and its response to climate change and human activities before and after the grain for green project on the Loess Plateau[J]. Environmental Science, 2024, 45(8): 4696-4708.
- [43] 井新, 贺金生. 生物多样性与生态系统多功能性和多服务性的关系: 回顾与展望[J]. 植物生态学报, 2021, 45(10): 1094-1111.  
JING X, HE J S. Relationship between biodiversity, ecosystem multifunctionality and multiserviceability: Literature overview and research advances[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(10): 1094-1111.
- [44] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障: 在2024年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2024, 24(1): 1-10.  
LI G Y. Improved water security for China's efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization: Speech at the 2024 National Water Conservancy Work Conference[J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(1): 1-10.
- [45] 李国英. 深入贯彻落实党的二十大精神 扎实推动新阶段水利高质量发展: 在2023年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2023, 23(1): 1-11.  
LI G Y. Thoroughly implement the spirit of the 20<sup>th</sup> National Congress of the Communist Party of China and solidly promote the high-quality development of water conservancy in the new stage: Speech at the National Water Conservancy Work Conference in 2023[J]. Water Resources Development Research, 2023, 23(1): 1-11.
- [46] 吴丰昌. 我国水体污染控制与治理成效、科技支撑与展望[J]. 水利发展研究, 2023, 23(12): 1-8.  
WU F C. Effectiveness, scientific and technological support, and prospects for water pollution control and management in China[J]. Water Resources Development Research, 2023, 23(12): 1-8.

(责任编辑 王海锋)