

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.031.

魏仪媛, 张乐涛, 王清源, 等. 河南省水土保持投资对农业经济及生态系统服务价值的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 265-275.

Wei Yiyuan, Zhang Letao, Wang Qingyuan, et al. Influence of Soil and Water Conservation Investment on the Agricultural Economy and Ecosystem Service Value in Henan Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 265-275.

# 河南省水土保持投资对农业经济及生态系统服务价值的影响

魏仪媛, 张乐涛, 王清源, 何梦真, 郑泽豪

(河南大学 地理与环境学院, 环境与规划国家级实验教学示范中心, 河南 开封 475004)

**摘要:** [目的]探究水土保持投资状况对区域景观格局、生态系统服务价值及农业经济的影响, 可为区域后续生态建设和高质量发展提供参考。[方法]基于河南省 2009—2020 年水土保持投资和土地利用数据, 运用 C-D 函数、景观格局指数、当量因子法等, 研究了水土保持投资驱动下的农业经济增长、景观格局变化、生态系统服务价值(ESV)的时空演变。[结果]2009—2020 年, 河南省水土保持投资在农业领域的经济效益和投入产出比(ROI)整体均呈上升趋势, 投资效率逐年下降, 在 2018 年下降至最低值。ESV, TA, PD 和 COHESION 与 ROI 均在 0.01 水平上显著相关。林草斑块景观连通性、聚集度降低, 破碎化程度加剧。ESV 的变化以 2012 年为转折点呈先减后增趋势, 其中 2012—2017 年增长最多, 年均增加 8.42 亿元。空间上, 结合等高线和自然地貌分区的边界连接成一条“人”字形曲线, 景观格局和 ESV 均沿此线发生变化, 各分区内部保持较强一致性。[结论]水土保持投资对改善农业生产自然环境的作用逐渐超过其在农业领域创造经济价值的作用, 优化投资配置可以更好促进该区域生态环境的恢复和改善。

**关键词:** 水土保持; 投入产出比; 景观格局; 生态系统服务价值; 时空演变; 河南省

中图分类号: X171.1; F329.9

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0265-11

## Influence of Soil and Water Conservation Investment on the Agricultural Economy and Ecosystem Service Value in Henan Province

Wei Yiyuan, Zhang Letao, Wang Qingyuan, He Mengzhen, Zheng Zehao

(National Demonstration Center for Experimental Environment and Planning Education,

College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng, Henan 475004, China)

**Abstract:** [Objective] The study aims to explore the effects of soil and water conservation investment on regional landscape patterns, ecosystem services value (ESV), and the agricultural economy. This investigation can provide rational reference for regional ecological construction and high-quality development. [Methods] The data focusing on soil and water conservation investment and land use from 2009 to 2020 in Henan Province were utilized. The contribution of this investment to the agricultural economy was measured through Cobb-Douglas production function and an evaluation method of input-output performance. The evolution of landscape patterns, transformations in different land use patterns, and the spatial-temporal variation of ESV in Henan Province were analyzed using landscape pattern indices, land use transfer matrix, and the equivalent factor method. [Results] A general upward trend was found in the economic benefits and the input-output ratio (ROI) of soil and water conservation investment in agriculture sector of Henan Province between 2009 and 2020. However, the investment efficiency exhibited a decrease trend, reaching its lowest point in 2018. A significant correlation was observed between the ESV, patch area index, patch

收稿日期: 2023-07-22

修回日期: 2023-08-12

资助项目: 河南省自然科学基金项目(232300421245); 国家自然科学基金项目(41807066; 42371223)

第一作者: 魏仪媛(1996—), 女, 河南南阳人, 硕士生, 研究方向为水土保持和生态经济研究。E-mail: wyyuan@henu.edu.cn

通信作者: 张乐涛(1989—), 男, 山东临沂人, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail: letao20062006@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

density index, patch cohesion index, and the ROI of soil and water conservation investment exhibited a significant correlation. The connectivity and aggregation of forest and grass patch landscapes experienced a decline, contributing to an intensification of landscape fragmentation. The ESV exhibited a trend of initial decrease followed by subsequent increase, with the most increase occurring between 2012 and 2017, accompanied by an average annual growth of CNY 842 million. Spatially, changes in landscape pattern and ESV occurred along a herringbone curve that combines contour lines with the boundaries of natural geomorphic zones. However, landscape pattern and ESV changed little within the area divided by the curve. [Conclusion] The role of soil and water conservation investment in enhancing the natural environment of agriculture is gradually surpassing its role in generating economic value within the agricultural sector. Optimizing the investment structure can enhance the restoration and improvement of the ecological environment in this region.

**Keywords:** soil and water conservation; input-output ratio; landscape pattern; ecosystem service value; spatiotemporal evolution; Henan Province

水土保持是指对自然因素和人为活动造成水土流失所采取的预防和治理措施,是人类干预生态系统的有效手段。作为生态环境建设的重要内容<sup>[1]</sup>,水土保持对改善生态环境和农业生产条件、促进社会经济可持续发展具有重要作用<sup>[2-5]</sup>。水土保持的生态系统服务功能是生态系统服务价值的重要组成部分<sup>[6-7]</sup>,不同水土保持措施的生态系统服务功能测算及评价受到国内外学者的广泛关注。A.J. Hernández 等<sup>[8]</sup>评估了不同管理措施下橄榄园的水土保持生态效益情况,发现草本植物组成的覆盖层的水土保持效益最佳。余新晓等<sup>[9]</sup>在 Costanza 评价生态系统服务功能价值的基础上估算了水土保持生态服务功能的价值量,认为在各项价值中保持与改良土壤和保持与涵养水源的价值最突出。王兵等<sup>[10]</sup>采用 DPSIR-mDSS 模型、灰色关联度等方法评价了黄土高原丘陵区水土保持综合治理的生态恢复环境效应,认为退耕还林还草的实施极大地改善了生态环境状况。王国振等<sup>[11]</sup>基于 TOPSIS 模型评价了丹江口库区及上游水土保持工程的生态效益,认为各项治理措施的水土保持生态效益在逐步提升。已有研究在水土保持综合效益评价方面成果显著,对水土保持生产实践具有重要指导意义。然而,水土保持作为政府主导的生态建设活动,往往容易重视宏观生态效益而忽视其创造的直接经济效益<sup>[12-13]</sup>。在生产实践中,水土保持功能主要通过直接或间接的农业措施实现,其产生的主要直接效益也集中在农业内部<sup>[14]</sup>,而农业作为直接影响自然环境的产业,加强农业环境治理,可以充分发挥其生态服务功能。此外,水土保持投资作为主动型投资活动,是引导人类进行水土保持生态建设的首要动力,植树造林、修建基本农田、封禁治理等水土保持综合治理措施影响着土地利用的结构和布局,进而影响区

域生态环境、生态系统服务价值<sup>[15-17]</sup>。据估算,2010—2015 年,由于不同用地类型之间的转变,河南省生态系统服务价值(ESV)减少了 10.03 亿元。然而,在此期间,在水土保持投资驱动下进行的植树造林和修建基本农田创造了 122.67 亿元的 ESV。由此可见,水土保持投资在创造生态系统服务价值中起着不可或缺的作用。因此,进一步对水土保持的投资效益进行客观评价,一方面可以明确其为农业生产领域创造的直接经济效益;另一方面,可以衡量其对改善农业生产自然条件的作用,量化水土保持投资对生态系统服务价值的贡献。

基于此,本文以河南省为例,以该省 2009—2020 年水土保持投资数据和土地利用数据为基础,综合采用 Cobb-Douglas 生产函数、投入产出绩效评价法、景观格局指数、土地利用转移矩阵和当量因子法,系统研究 2009—2020 年水土保持投资对农业 GDP 的贡献(即在农业领域的经济效益)、景观格局变化和生态系统服务价值的时空演变及其与水土保持投资的关系,以期优化该区后续生态建设投资布局、提高生态建设水平、促进该区生态保护和经济高质量发展提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

河南省位于华北平原南部的黄河中下游地区(31°23'—36°22'N, 110°21'—116°39'E),下辖 17 个地级市,157 个区县,总面积 16.7 万 km<sup>2</sup>。地势西高东低,北、西、南三面太行山、伏牛山、桐柏山和大别山沿省界呈半环形分布,西南部为南阳盆地,中东部为黄淮海冲积平原,地形平坦开阔,土层深厚,耕地广布。地跨长江、黄河、淮河和海河四大流域。大部分

地区为暖温带,南部秦岭以南为亚热带,属于大陆性季风气候,四季分明、雨热同期。植被类型地带性分异明显,北部以温带落叶林为主,南部以亚热带常绿阔叶林和暖温带落叶阔叶林为主。水土流失主要发生在山区、丘陵区及黄土区,其中,轻度水土流失主要发生在豫西伏牛山、豫北太行山深山区及豫南桐柏山、大别山区,中度水土流失主要发生在植被较好的丘陵区,强度水土流失主要发生在植被破坏严重的浅山丘陵区,极强度水土流失发生在豫西黄土地区。2009年以来,经过持续不断的水土保持投入和水土流失治理实践,河南省水土流失面积持续减少,水土保持生态环境状况得到改善。

## 1.2 数据来源

水土保持投资数据来源于2009—2020年《河南省统计年鉴》和《河南省财政决算》,本文在对其进行整理和汇总的基础上,提取相关指标的数值。为保证口径统一,用“农林水支出”作为财政支农投入( $I$ );用“农业物质消耗”作为农业物质资本( $K$ );劳动力( $L$ )为当年从事农业生产的年末劳动力数量;水土保持投资( $\Delta I$ )为支农财政投资中的水土保持投入部分。河南省2009—2020年土地利用类型数据来源于武汉大学黄昕团队公布的数据集<sup>[18]</sup>,空间分辨率为30 m×30 m。水土流失综合治理数据来源于《河南省水土保持公报》。河南省粮食价格和单位面积产量数据根据2009—2020年《河南省统计年鉴》、《中国农村统计年鉴》及中国国家粮食局、中国国家发展和改革委员会的相关资料计算得出。

## 1.3 研究方法

1.3.1 水土保持投资对农业经济的贡献 C-D生产函数是由柯布和保罗·道格拉斯针对投入和产出的关系问题提出的经济数学模型<sup>[19]</sup>,其基本形式为:

$$Y = AK^\alpha L^\beta \mu \quad (1)$$

式中: $Y$ 表示工业总产值; $A$ 表示综合技术水平; $K$ 表示投入的资本,一般由固定资产净值表示; $L$ 表示投入的劳动力数量。 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\mu$ 分别表示资本产出的弹性系数、劳动力产出的弹性系数和随机干扰的影响。

农业经济的发展主要是技术进步、农业资本投入和劳动力投入等多因素共同作用的结果<sup>[20-21]</sup>,由于技术难以量化,所以采用常数项来衡量资本和劳动力以外投入要素的影响,将资本分为物质资本投入和财政支农投入两部分<sup>[14]</sup>,则农业C-D生产函数表示为:

$$Y = AK^\alpha L^\beta I^\lambda \quad (2)$$

式中: $Y$ 表示农业GDP(亿元); $A$ 表示农业生产技术水平; $K$ 表示农业物质资本投入(亿元); $L$ 表示农业劳动力数量(亿人); $I$ 表示财政支农投入(亿元)。 $\alpha$ 、 $\beta$ ,

$\lambda$ 表示各投入要素的产出弹性系数。

变形可得水土保持投资对农业经济的贡献为:

$$\Delta Y = \lambda \cdot Y \cdot \frac{\Delta I}{I} \quad (3)$$

式中: $\Delta Y$ 表示农业GDP的变化量(水土保持投资对农业经济的贡献)(亿元); $\lambda$ 表示支农财政投资的产出弹性系数; $Y$ 表示当年农业GDP(亿元); $\Delta I$ 表示水土保持投资(亿元); $I$ 表示支农财政投资(亿元)。

投入产出比是衡量投资项目经济效果的评价指标,其值越小,表明经济效果越好<sup>[22]</sup>,表达式为:

$$ROI = K / IN \quad (4)$$

式中: $ROI$ 表示投入产出比; $K$ 表示项目投资总额,即水土保持投资; $IN$ 表示项目投资收益现值,即水土保持投资对农业的贡献。

1.3.2 景观格局分析 基于土地利用数据,在景观组成上选取林地、草地、建设用地、耕地、水域和未利用地6种土地利用类型。参考已有研究成果<sup>[23-27]</sup>,在类型水平和景观水平两个尺度上选取能够反映景观异质性、破碎程度及聚集程度的斑块面积(TA)、斑块密度(PD)、景观形状指数(LSI)、景观连接度指数(CONNECT)、斑块粘合度指数(COHESION)、香农多样性指数(SHDI)等6个对水土流失敏感的景观格局指数,利用FRAGSTATS 4.2对选取的指标进行计算。

1.3.3 生态系统服务价值估算 本研究参考谢高地修订的中国生态系统单位面积ESV当量因子表<sup>[28]</sup>,根据河南省2009—2020年内粮食单产的市场均价,并按平均粮食单产市场价值的1/7计算单位面积农田生态系统服务价值<sup>[29]</sup>。通过查阅《河南省统计年鉴》《中国农村统计年鉴》及中国国家粮食局、中国国家发展和改革委员会的相关资料,计算得到河南省2009—2020年平均粮食单位面积产量为6100.55 kg/hm<sup>2</sup>,粮食均价为2.36元/kg。结合河南省不同土地利用类型面积的测算结果,计算河南省不同土地利用类型单位面积生态系统服务价值(表1),并得到河南省不同土地利用类型的ESV。在ESV的计算中,面向省域的微观尺度研究多以网格作为评价单元<sup>[30-31]</sup>,本文经过反复试验,以10 km×10 km的格网创建土地利用类型的格网样本,根据各格网内的土地利用类型,计算得到每个格网的ESV,完成ESV的空间化。

$$ESV = \sum_i A_i \times C_i \quad (5)$$

式中: $A_i$ 为*i*类型的土地面积; $C_i$ 为生态系统服务价值系数,表示*i*类型土地单位面积生态系统服务价值。

由式(5)可得生态系统服务价值损益公式:

$$P_{ij} = (C_j - C_i) \times A_{ij} \quad (6)$$

式中: $P_{ij}$ 为第*i*类土地利用类型转化为第*j*类土地

利用类型后的生态系统服务价值损益; $C_i, C_j$  分别为第  $i, j$  类土地利用类型的生态系统服务价值系数; $A_{ij}$  为第  $i$  类土地利用类型转化为  $j$  类土地利用类型的面积。

表 1 河南省不同土地利用类型单位面积 ESV

Table 1 The per unit area ESV of different land use types in Henan Province							元/hm <sup>2</sup>
生态系统类型	耕地	林地	草地	建设用地	水域	未利用地	
供给服务	食物生产	2275.27	519.91	480.45	0	1647.25	10.30
	原料生产	504.47	1194.26	706.95	0	473.59	30.89
	水资源供给	-2687.08	617.72	391.22	0	17069.60	20.59
调节服务	气体调节	1832.57	3927.67	2484.60	0	1585.48	133.84
	气候调节	957.47	11752.10	6568.42	0	4715.26	102.95
	净化环境	277.97	3443.79	2168.88	0	11427.81	422.11
	水文调节	3078.30	7690.61	4811.35	0	210518.80	247.09
支持服务	土壤保持	1070.71	4782.18	3026.83	0	1914.93	154.43
	维持养分循环	319.16	365.48	233.36	0	144.14	10.30
	生物多样性	350.04	4354.92	2752.28	0	5250.61	144.14
文化服务	美学景观	154.43	936.87	2017.88	0	1801.68	967.76
合计		8133.31	39585.50	25642.20	0	256549.20	2244.38

2 结果与分析

2.1 水土保持投资对农业经济的贡献

通过相关性检验和模型参数检验得到  $\alpha, \beta$  和  $\lambda$  分别为 0.621, -0.057, 0.146, 得出水土保持投资的农业经济效益及其投入产出比(表 2)。2009—2020 年河南省水土保持投资呈增加趋势, 年均增长率为 35.25%, 其带来的农业经济效益也随之增加, 年均增

长率为 29.76%, 投资的年均增长率高于效益的年均增长率。ROI 整体也呈增加趋势, 表明获得单位经济效益需要投入的成本越来越高, 即水土保持投资在农业生产领域的投资效率越来越低, 其效益逐渐转向生态效益。其中, 2010 年的水土保持投资效率最高, 投入产出比为 0.87, 即每增加 1 亿元的经济效益需要投入 0.87 亿元; 2018 年的水土保持投资效率最低, 投入产出比为 1.59。

表 2 河南省 2009—2020 年水土保持投资对农业经济的贡献

Table 2 The contribution of soil and water conservation investment to agricultural economy in Henan province from 2009 to 2020							
年份	农业 GDP/ 亿元	财政支农/ 亿元	物质资本 投入/亿元	劳动力/ 亿人	水土保持 投资/亿元	对农业经济的 贡献/亿元	投入 产出比
2009	2666	361.6	2103	0.277	0.222	0.239	0.93
2010	3127	399.2	2476	0.271	0.245	0.280	0.87
2011	3349	480.5	2706	0.267	0.295	0.300	0.98
2012	3577	551.7	2910	0.263	1.386	1.312	1.06
2013	3827	629.9	3139	0.256	1.716	1.522	1.13
2014	3988	661.9	3287	0.265	2.635	2.318	1.14
2015	4016	791.6	3293	0.259	2.287	1.693	1.35
2016	4064	807.1	3360	0.258	2.191	1.611	1.36
2017	4139	916.8	3252	0.249	2.776	1.830	1.52
2018	4311	1001.0	3257	0.237	6.772	4.258	1.59
2019	4635	1060.0	3969	0.228	6.427	4.104	1.57
2020	5354	1145.0	4583	0.223	6.145	4.193	1.47

2.2 土地利用及景观格局特征

2.2.1 土地利用变化 由图 1 可以看出, 河南省土地利用类型变化 2009—2012 年主要表现为耕地的转出和建设用地的转入, 耕地净转出 2 232.41 km<sup>2</sup>, 占总转出面积的 66.7%, 其中 61.4% 转向建设用地; 建设用地净转入 1 432.85 km<sup>2</sup>, 占总转入面积的 42.8%; 耕

地、草地和水域总面积减少, 建设用地和林地总面积增加。2012—2017 年主要表现为耕地和林地的转出, 建设用地、林地和耕地的转入, 耕地净转出 4 198.83 km<sup>2</sup>, 净转入 1 336.09 km<sup>2</sup>, 总面积减少 2 862.75 km<sup>2</sup>; 林地净转出 828.96 km<sup>2</sup>, 净转入 1 501.98 km<sup>2</sup>, 总面积增加



673.02 km<sup>2</sup>;建设用地净转入 2 293.45 km<sup>2</sup>,总面积增加 2 168.21 km<sup>2</sup>。2017—2020 年主要为耕地和草地的转出,建设用地和林地的转入,耕地净转出 2 018.41 km<sup>2</sup>,草地净转出 829.92 km<sup>2</sup>;建设用地净转入 1 111.8 km<sup>2</sup>,林地净转入 958.68 km<sup>2</sup>;建设用地、林地和水域总面积增加,草地和耕地总面积减少。2009—2020 年转移面积共 10 706 km<sup>2</sup>,主要表现为耕地和草地的转出,建设用地和林地的转入,其中,耕地转出面积占总转出面积的 68.4%,主要转向建设用

地和林地,林地净转入的 79%由耕地贡献,建设用地的净转入几乎全部由耕地贡献。自 2012 年以来,随着水土保持投资力度的加大,林地面积也相应增加,2012—2017 年林地面积年均增加 134.4 km<sup>2</sup>,2017—2020 年林地面积年均增加 83.85 km<sup>2</sup>。研究期内,河南省耕地、草地和未利用地总面积减少,耕地面积减少的最多,达 4 851.1 km<sup>2</sup>,草地面积减少 833.72 km<sup>2</sup>;其他用地类型面积均增加,建设用地面积增加的最多,达 4 583.36 km<sup>2</sup>,林地面积增加 1 004.59 km<sup>2</sup>。

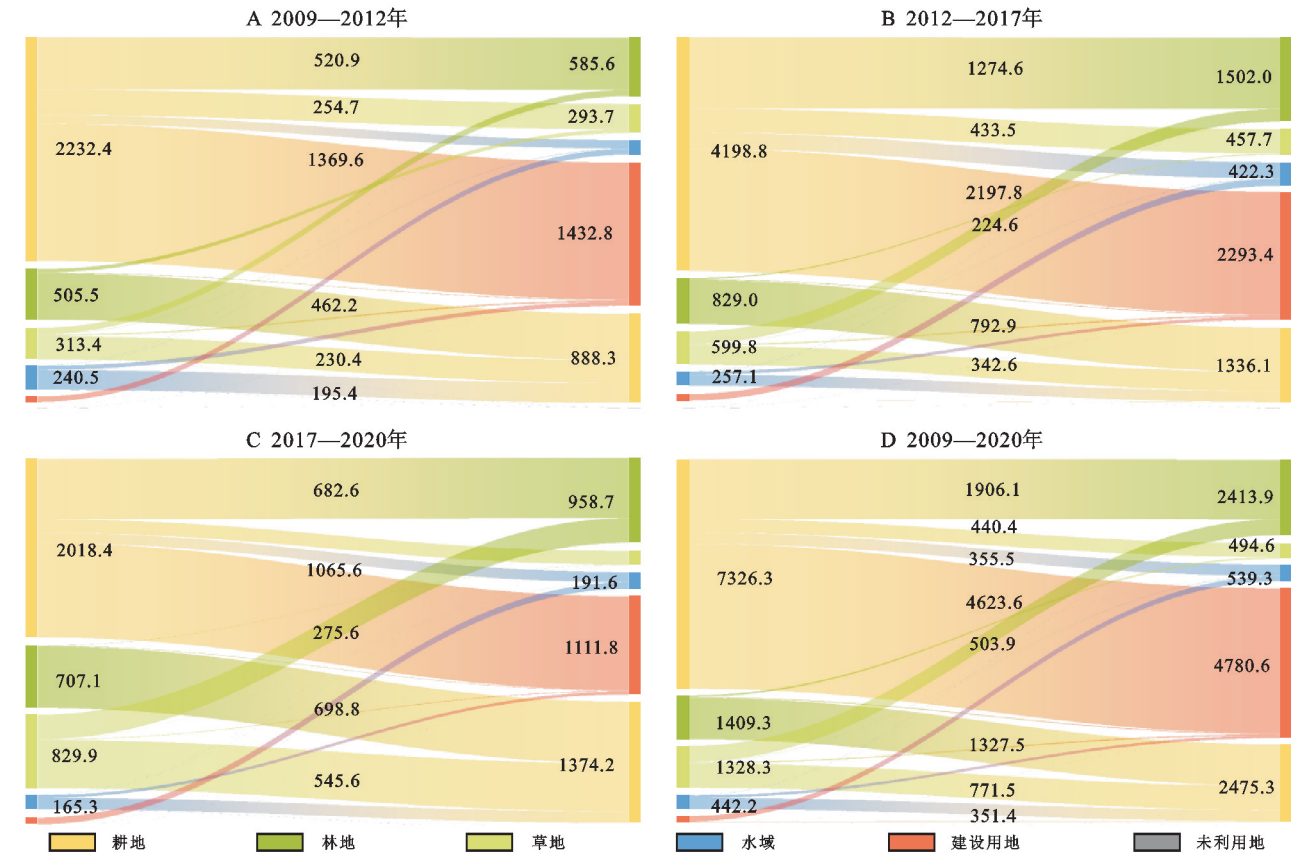


图 1 河南省 2009—2020 年土地利用转移桑基图

Fig. 1 Sankey diagram of land transfer during 2009–2020 in Henan province

2.2.2 景观格局变化 由表 3 和表 4 可知,在景观水平上,研究期内河南省斑块密度逐渐增加,表明景观破碎度加剧,稳定性降低;景观形状指数逐渐增大,表明景观形状趋于复杂化;景观粘合度指数则呈下降趋势,表明斑块离散程度上升;香农多样性指数逐渐增加,表明各类型斑块所占比例差异减小,景观多样性提高。在类型水平上,林地的斑块面积、斑块密度、景观形状指数呈上升趋势,景观连接度指数和斑块粘合度指数呈下降趋势,表明林地面积增加但景观趋于破碎化、景观形状逐渐复杂、连通性和聚集程度下降。草地的斑块面积、斑块密度、景观形状指数和斑块粘合度指数均呈下降趋势,表明草地在面积减少的同时更加破碎分散。根据地形、地貌可将河南

省划分三大自然地貌区:西部山区、南部盆地和东部平原。结合等高线和各分区的边界可连接成一条“人”字形曲线,河南省 2009—2020 年林草斑块密度空间分布差异明显(图 2),呈现以“人”字形曲线为高值中心向西部和东部递减的空间分布格局。林草斑块密度高值区集中分布在中部地区,西部和东部变化微弱,低值区广泛分布于东部平原地区、西部伏牛山区和南阳盆地。从时间尺度来看,河南省林草斑块密度 2009—2012 年整体变化较小,在高值中心附近向外略微扩展,各分区内部则保持不变;2017—2020 年仍然以“人”字形曲线为高值中心向外扩张,嵩山东部和大别山北部的林草斑块密度上升尤为明显,其他区域基本保持稳定。

表 3 景观水平指数

Table 3 Landscape index at landscape level

年份	PD	LSI	COHESION	SHDI
2009	0.568	149.283	99.862	0.933
2012	0.566	152.970	99.863	0.945
2017	0.570	159.899	99.857	0.973
2020	0.559	160.797	99.861	0.969

2.3 生态系统服务价值损益及时空演变

由表 5 可知,2009—2012 年河南省 ESV 减少了 32.46 亿元,草地、水域的转出导致 ESV 分别减少 2.76 亿元和 60.04 亿元。2012—2017 年 ESV 变化最大,增

长了 42.09 亿元,年均增长 8.42 亿元,水域、林地和草地的转入使得 ESV 分别增加 105.82 亿元、42.62 亿元和 7.02 亿元。2017—2020 年 ESV 减少了 5.77 亿元,年均减少 1.92 亿元,水域、林地和草地的转入使得 ESV 分别增加 48.18 亿元、25.21 亿元和 2.44 亿元。2009—2020 年 ESV 共增长 3.86 亿元,主要发生在耕地向水域、林地和草地的转移,耕地面积的转出促进水域、林地和草地 ESV 分别增长 88.31 亿元、59.95 亿元和 7.71 亿元,而水域、林地和草地向耕地的转移导致 ESV 分别减少 87.28 亿元、41.75 亿元和 13.51 亿元。

表 4 类型水平景观指数

Table 4 Landscape index at type level

年份	类型	指数					类型	指数				
		TA	PD	LSI	CONNECT	COHESION		TA	PD	LSI	CONNECT	COHESION
2009	林地	28651	0.043	95.37	0.033	99.54	耕地	113442	0.054	164.40	0.025	99.97
2012		28721	0.044	97.03	0.032	99.53		112122	0.057	169.70	0.024	99.97
2017		29384	0.048	99.72	0.029	99.54		109238	0.065	180.50	0.022	99.97
2020		29646	0.049	100.90	0.029	99.55		108615	0.067	184.50	0.022	99.97
2009	草地	2766	0.061	124.80	0.020	73.26	水域	1971	0.032	71.12	0.013	83.37
2012		2735	0.060	124.30	0.020	72.94		1870	0.028	67.18	0.015	83.75
2017		2614	0.057	121.90	0.022	73.61		2040	0.028	66.69	0.016	85.65
2020		1929	0.048	108.00	0.023	70.00		2055	0.025	63.21	0.017	86.66
2009	建设用地	19030	0.379	284.30	0.004	77.92	未利用地	3	0.001	5.54	0.403	12.36
2012		20411	0.377	285.40	0.004	81.39		4	0.001	5.85	0.645	19.29
2017		22584	0.372	286.90	0.004	86.61		3	0.000	5.00	0.985	4.66
2020		23613	0.371	286.40	0.004	88.17		4	0.000	5.77	0.379	14.45

从空间分布图来看(图 3),河南省 ESV 年均变化分区明显,以“人”字形曲线为界线,东部平原地区以减少为主,西部山区及沿线地区以增加为主。2009—2012 年,ESV 整体呈减少态势,大别山区 ESV 减少尤为明显,年均下降 0.21%~14.17%;仅有“人”字形曲线沿线地带的 ESV 在增加,年均增长率在 0.86%~7.09%。2012—2017 年,ESV 呈显著增长态势,西部伏牛山区、南部桐柏山区和大别山区增加明显,年均

增长率在 0.38%~33.06%;东部平原地区及南阳盆地地区的 ESV 依然减少。2017—2020 年,西部 ESV 持续增加,东部和南阳盆地整体小幅减少,太行山区 ESV 减少明显,年均下降 0.16%~10.14%。整体来看,2009—2020 年河南省生态系统服务价值呈西加东减的分布特征,西部山区整体呈增加态势,东部平原及南部盆地的 ESV 整体减少零星增加,年均增长率最高达 15%。

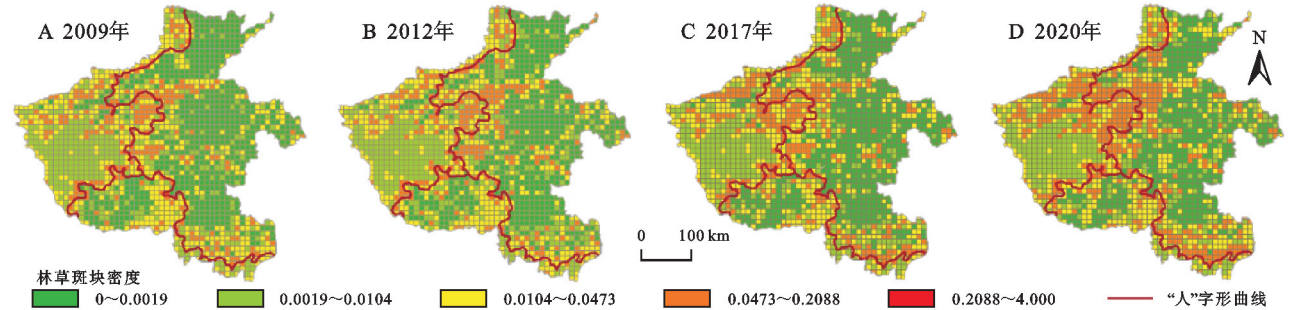


图 2 河南省 2009—2020 年林草斑块密度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of PD from woodland and grassland in Henan province during 2009—2020

2.4 景观格局、ESV 与水土保持投资的关系

由表 6 和图 4 可知,研究期内河南省的 ESV 随着 ROI 的增加呈上升趋势,ESV 与 ROI 呈显著线性正相

关关系( $p<0.01$ , 相关系数  $R=0.951$ ),表明水土保持投资在农业领域创造经济价值的效率下降,但其对改善农业生产自然环境的作用越来越明显,促进了生态环境质

量的提高,直接表现为生态系统服务价值的增加。随着 ROI 的上升,林草地面积增加,但其景观却趋于破碎化,TA,PD 与 ROI 呈显著线性正相关关系( $p<0.01$ ,相关系数分别为  $R=0.875,R=0.867$ );林草斑块的聚集程

度则随着 ROI 的上升呈下降趋势,COHESION 与 ROI 呈负相关( $p<0.01$ ,相关系数  $R=-0.761$ ),呈对数函数关系,表明水土保持生态建设同时也使林草地的破碎度上升,连通性和粘合度下降。

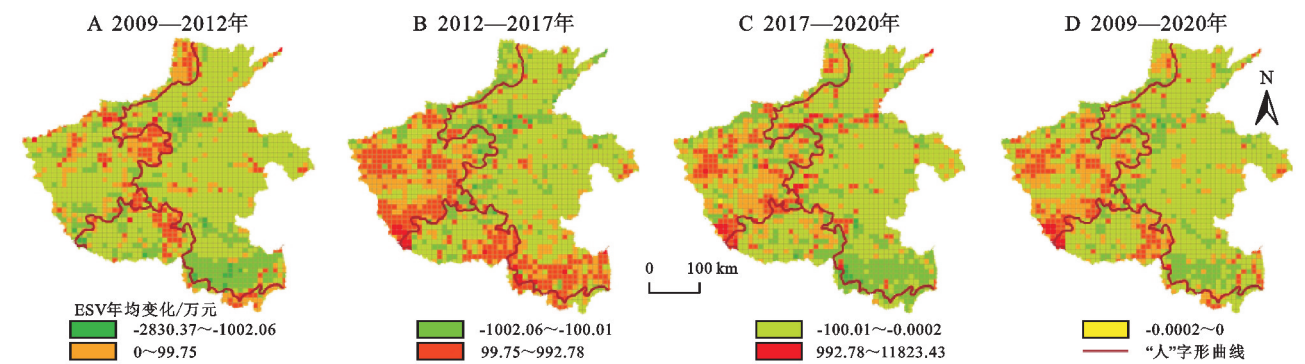


图 3 河南省 2009—2020 年 ESV 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of ESV in Henan Province during 2009—2020

表 5 河南省生态系统服务价值损益矩阵

Table 5 Profit-loss matrix of ecosystem service value in Henan Province							亿元
2009 年	2012 年						
	草地	耕地	建设用地	林地	水域	未利用地	转出合计
草地	0.00	−4.03	−0.38	0.89	0.79	−0.02	−2.76
耕地	4.46	0.00	−11.14	16.38	21.66	0.00	31.36
建设用地	0.00	0.00	0.00	0.00	14.23	0.00	14.23
林地	−0.52	−14.54	−0.23	0.00	0.00	0.00	−15.29
水域	−0.29	−48.53	−10.82	−0.20	0.00	−0.19	−60.04
未利用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.04
合计	3.65	−67.11	−22.57	17.07	36.71	−0.21	−32.46
2012 年	2017 年						
	草地	耕地	建设用地	林地	水域	未利用地	转出合计
草地	0.00	−6.00	−0.67	3.13	1.28	−0.02	−2.28
耕地	7.59	0.00	−17.88	40.09	72.74	0.00	102.54
建设用地	0.00	0.02	0.00	0.00	31.56	0.00	31.58
林地	−0.32	−24.94	−0.51	0.00	0.08	0.00	−25.69
水域	−0.26	−49.11	−14.18	−0.60	0.00	−0.07	−64.22
未利用地	0.01	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.16
合计	7.02	−80.02	−33.24	42.62	105.81	−0.09	42.09
2017 年	2020 年						
	草地	耕地	建设用地	林地	水域	未利用地	转出合计
草地	0.00	−9.55	−0.19	3.84	0.22	−0.01	−5.68
耕地	2.69	0.00	−8.67	21.47	28.92	0.00	44.41
建设用地	0.00	0.00	0.00	0.00	18.99	0.00	18.99
林地	−0.04	−21.98	−0.21	0.00	0.00	0.00	−22.23
水域	−0.21	−32.21	−8.56	−0.11	0.00	−0.22	−41.31
未利用地	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.05
合计	2.44	−63.74	−17.63	25.21	48.18	−0.24	−5.77
2009 年	2020 年						
	草地	耕地	建设用地	林地	水域	未利用地	转出合计
草地	0.00	−13.51	−1.09	7.03	2.19	−0.02	−5.40
耕地	7.71	0.00	−37.61	59.95	88.31	0.00	118.36
建设用地	0.01	0.20	0.00	0.00	44.24	0.00	44.45
林地	−0.74	−41.75	−1.10	0.00	0.27	0.00	−43.32
水域	−0.25	−87.28	−21.91	−0.85	0.00	−0.09	−110.40
未利用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.17
合计	6.73	−142.34	−61.72	66.13	135.18	−0.11	3.86



表 6 景观格局、ESV 与 ROI 的相关性

Table 6 Correlation between Landscape Pattern and ROI, ESV and ROI

参数	ESV	TA	PD	COHESION
皮尔逊相关性	0.951 **	0.875 **	0.867 **	-0.716 **
显著性(双尾)	0.000	0.000	0.000	0.009
样本数	12.000	12.000	12.000	12.000

注: \*\* 表示在 0.01 水平(双尾)上显著相关。

### 3 讨论

水土保持投资是财政支农投入的重要组成部分,其主要目标是改善生态环境和生产条件,由于水土保持措施主要是在农业系统内实施,客观上具有促进农业经济发展的作用<sup>[32-34]</sup>。研究期内,河南省 ESV 与

水土保持投资的投入产出比呈显著线性正相关关系,即水土保持投资对改善农业生产自然环境的作用逐渐超过创造直接经济的作用。这体现了水土保持是一项以政府为主导的公共事业,水土保持投资不以牺牲生态或经济任一方面利益而达到其他方面利益最大化为目标,而是要实现生态、经济和社会高质量协调发展。尤其是 2012 年以来,投资效益越来越显现在生态环境等外部性上,意味着进入新时代以来,新中国发展战略,即社会经济发展模式逐渐由牺牲环境质量促进经济增长转为投入更多生态资本提高生态环境质量,河南省成为该发展战略的缩影。在未来的水土保持建设投资中可适宜地控制在农耕区的投资,加大在山区、丘陵区 and 黄土区等水土流失地区的投资,以更好地促进生态环境的恢复和改善。

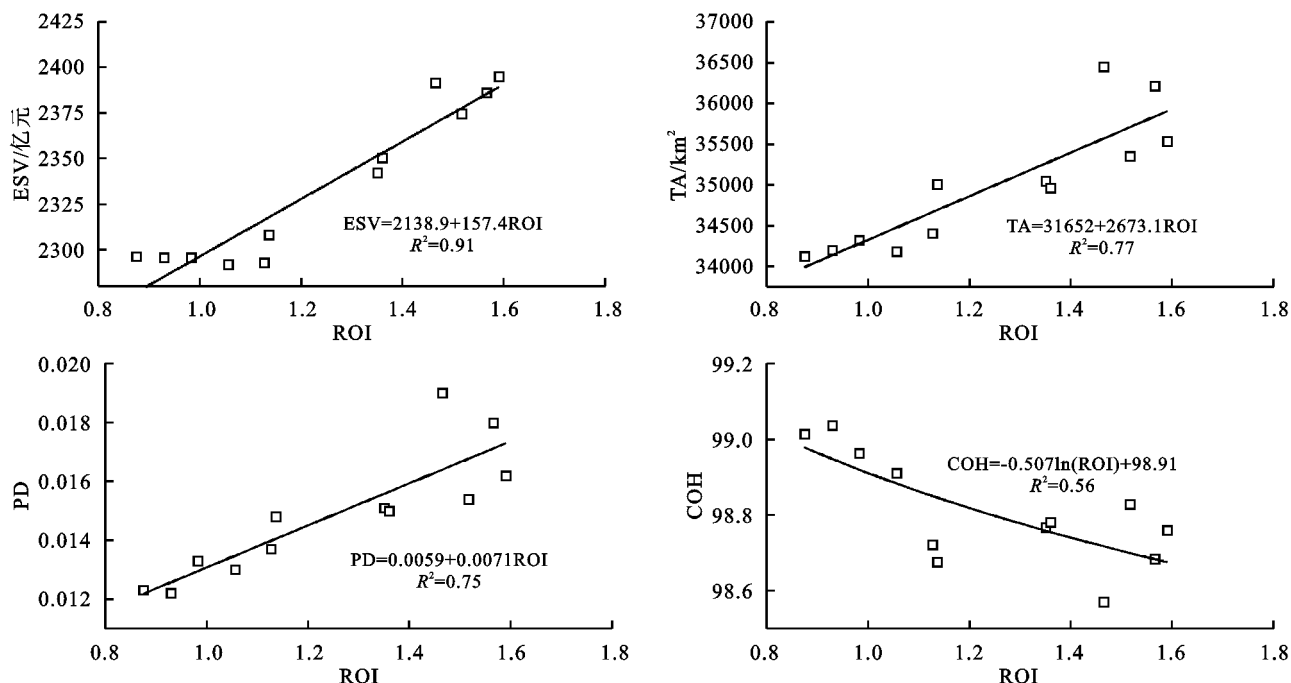


图 4 景观格局、ESV 与 ROI 的关系

Fig. 4 Regression Relationship between Landscape Pattern and ROI, ESV and ROI

2009—2020 年河南省林地面积增加,耕地、草地面积减少,破碎度上升,连通性和粘合度下降。主要原因是退耕还林还草等生态保护措施的实施及城镇化进程,使得林地和建设用地斑块入侵耕地斑块,造成耕地面积减少及其破碎化程度加剧;林地面积增加的同时伴随着斑块数量的增加,破碎化程度上升。已有研究证实林草地越集中,斑块破碎度越低、连通性越高,滞留水沙的效果越好<sup>[35-37]</sup>,因此,研究期内景观指数的变化并不利于林草地水土保持功能的发挥。在未来的水土保持投资布局中,可对水土流失区进行集中连片式的生态建设投资,提高林草的粘合度,以提升林草地的水土保持功能。

景观格局和生态系统服务价值均沿“人”字形曲线

发生变化,而各分区内部则保持较强的一致性。表明山地、平原和盆地各分区内部景观格局、生态结构及功能具有稳定性,而各分区的交错带因人口密集而易受人类活动影响。同时,山丘区的水土流失治理与生态恢复亦可以创造更多的生态价值。因此,在未来的生态建设中,可加大对水土流失区的生态建设投入,并对“人”字形交错区进行生态投资结构的优化,以促进水土流失治理、提高生态建设效率,更好践行“绿水青山就是金山银山”的发展理念,实现社会经济高质量发展。

### 4 结论

(1) 2009—2020 年,河南省水土保持投资在农业生产领域创造了一定的经济效益,但投资效率呈逐



年下降趋势。研究期内水土保持投资创造了 23.66 亿元的农业 GDP,然而,投入产出比自 2012 年起大于 1,产出经济效益无法覆盖投入成本,投资效益逐渐转向生态效益。

(2) 研究期内,河南省景观格局的变化不利于林草措施充分发挥其水土保持功能。主要表现为林地面积增加,草地面积减少,但林草植被种植较为分散,使该斑块景观连通性、聚集度的降低以及破碎化程度加剧。

(3) 河南省生态系统服务价值呈先减后增趋势,在空间上,各分区内部保持较强一致性。以 2012 年为转折点,2009—2012 年 ESV 减少 32.46 亿元,2012—2020 年增加 36.32 亿元;空间上,西部山地丘陵区的 ESV 呈增长态势,东部平原地区整体较为稳定,南部山区呈下降趋势。

(4) 河南省生态系统服务价值、景观格局的变化均与水土保持投资显著相关。其中,ESV,TA,PD 与 ROI 为线性正相关关系,COHESION 与 ROI 为负相关,呈对数函数关系。

#### 参考文献(References):

- [1] 唐克丽,史立人,史德明.中国水土保持[M].北京:科学出版社,2004.  
Tang K L, Shi L R, Shi D M. Soil and Water Conservation in China[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [2] Zhao Y, Wang Z G, Sun B P, et al. A study on scheme of soil and water conservation regionalization in China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2013,23(4):721-734.
- [3] 赵晓翠,王继军,乔梅,等.水土保持技术对农业产业—资源系统的耦合路径分析[J].生态学报,2019,39(16):5820-5828.  
Zhao X C, Wang J J, Qiao M, et al. Coupling path analysis of soil and water conservation technology to the agricultural industry-resource system[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(16):5820-5828.
- [4] 李怡凤,王继军,马理辉,等.“进则全胜”的生态经济学基础及其与水土保持的关系[J].水土保持研究,2023,30(3):470-476.  
Li Y F, Wang J J, Ma L H, et al. Eco-economic basis of progress leading to victory and its relationship with soil and water conservation[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(3):470-476.
- [5] 卢江勇.水土保持、经济增长与减贫[D].北京:中国农业科学院,2008.  
Lu J Y. Soil and water conservation, economic growth and poverty reduction[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008.
- [6] 李恒凯,李淑芳,郑春燕,等.基于生态系统服务功能的东江流域关键性生态空间识别[J].农业工程学报,2022,38(3):257-266,323.  
Li H K, Li S F, Zheng C Y, et al. Identification of the critical ecological spaces in the Dongjiang River Basin based on ecosystem service function[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(3):257-266,323.
- [7] 王秀明,刘谓承,龙颖贤,等.基于改进的 InVEST 模型的韶关市生态系统服务功能时空变化特征及影响因素[J].水土保持研究,2020,27(5):381-388.  
Wang X M, Liu X C, Long Y X, et al. Spatial-temporal changes and influencing factors of ecosystem services in Shaoguan city based on improved InVEST[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(5):381-388.
- [8] Hernandez A J, Lacasta C, Pastor J. Effects of different management practices on soil conservation and soil water in a rainfed olive orchard[J]. Agricultural Water Management, 2005,77:232-248.
- [9] 余新晓,吴岚,饶良懿,等.水土保持生态服务功能价值估算[J].中国水土保持科学,2008,6(1):83-86.  
Yu X X, Wu L, Rao L Y, et al. Assessment on the ecological services value of soil and water conservation[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008,6(1):83-86.
- [10] 王兵,张光辉,刘国彬,等.黄土高原丘陵区水土流失综合治理生态环境效应评价[J].农业工程学报,2012,28(20):150-161.  
Wang B, Zhang G H, Liu G B, et al. Ecological and environmental evaluation for water and soil loss comprehensive harness in Loess hilly region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012,28(20):150-161.
- [11] 王国振.丹江口库区及上游水土保持工程生态效益评价[D].陕西杨凌: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.  
Wang G Z. Evaluation of ecological benefits of Danjiangkou reservoir area and upstream soil and water conservation project[D]. Yangling, Shaanxi: Center for Soil and Water Conservation and Ecological Environment, ministry of Education, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [12] 毕安平,朱鹤健.基于 PSR 模型的水土流失区生态经济系统耦合研究:以朱溪河流域为例[J].中国生态农业学报,2013,21(8):1023-1030.  
Bi A P, Zhu H J. Research of coupling of eco-economic systems of soil erosion regions based on the PSR model: A case study of Zhuxi River Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013,21(8):1023-1030.
- [13] 许丁,张卫民,管晓.基于生态产品价值实现的生态修复项目经济生态效益评价研究[J].干旱区资源与环境,2023,37(7):57-65.  
Xu D, Zhang W M, Guan X. Evaluation on economic and ecological benefits of ecological restoration projects based on the value realization of ecological products[J].

- Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023,37(7):57-65.
- [14] 毕安平.水土流失区生态—经济系统耦合效应[D].福州:福建师范大学,2011.
- Bi A P. Coupling effects of eco-economic system in soil erosion region[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2011.
- [15] 江文甲,林满红,翁佩莹,等.福建省安溪县土地利用时空演变规律及其关键驱动因素[J].生态学报,2022,42(2):513-527.
- Jiang W J, Lin M H, Weng P Y, et al. Spatio-temporal evolution of land use and its key driving factors in Anxi county of Fujian province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(2):513-527.
- [16] 袁和第,信忠保,侯健,等.黄土高原丘陵沟壑区典型小流域水土流失治理模式[J].生态学报,2021,41(16):6398-6416.
- Yuan H D, Xin Z B, Hou J, et al. Models of soil and water conservation in the loess hilly region of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(16):6398-6416.
- [17] 高磊,杨现坤,胡海珠,等.重庆市退耕还林工程实施的生态和经济效益分析[J].水土保持研究,2019,26(6):353-358.
- Gao L, Yang X K, Hu H Z, et al. Analysis on ecological and economic benefits of implementing the project of returning farmlands to forests in Chongqing city[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(6):353-358.
- [18] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021,13(8):3907-3925.
- [19] Cobb C W, Douglas P H. A theory of production[J]. the American Economic Review, 1928,18:139-165.
- [20] 陈菁泉,信猛,马晓君,等.中国农业生态效率测度与驱动因素[J].中国环境科学,2020,40(7):3216-3227.
- Chen J Q, Xin M, Ma X J, et al. Chinese agricultural eco-efficiency measurement and driving factors [J]. China Environmental Science, 2020,40(7):3216-3227.
- [21] 王国运,陈波.新一轮农地确权与中国农业增长:基于面板工具变量法的实证研究[J].中国农村经济,2022(12):54-72.
- Wang G Y, Chen B. The effects of the new round of agricultural land titling on China's agricultural growth: An empirical study based on panel instrument variables approach[J]. Chinese Rural Economy, 2022(12):54-72.
- [22] Lange O. The output-investment ratio and input-output analysis[J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1960,28(2):310-324.
- [23] 涂雯,吴静雯,马理辉,等.水土保持措施驱动村域土地利用景观格局变化:以米脂县高西沟村为例[J].水土保持学报,2023,37(3):147-154.
- Tu W, Wu J W, Ma L H, et al. Soil and water conservation measures drive the change of land use landscape pattern in the village[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(3):147-154.
- [24] 陈万旭,梁加乐,卞娇娇,等.黄河流域景观破碎化对土壤保持服务影响研究[J].地理科学,2022,42(4):589-601.
- Chen W X, Liang J L, Bian J J, et al. Impact of landscape fragmentation on soil conservation services in the Yellow River Basin[J]. Scientia Geographica Sinica, 2022,42(4):589-601.
- [25] 张金茜,柳冬青,巩杰,等.流域景观破碎化对土壤保持服务的影响研究:以甘肃白龙江流域为例[J].资源科学,2018,40(9):1866-1877.
- Zhang J X, Liu D Q, Gong J, et al. Impact of landscape fragmentation on watershed soil conservation service: A case study on Bailongjiang Watershed of Gansu[J]. Resources Science, 2018,40(9):1866-1877.
- [26] 李莹,黄岁樑.滦河流域景观格局变化对水沙过程的影响[J].生态学报,2017,37(7):2463-2475.
- Li Y, Huang S L. Effects of landscape pattern change on flow and sediment processes in the Luanhe River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(7):2463-2475.
- [27] 盛菲,刘士余,张婷,等.濛水流域降雨变化和景观格局演变的径流效应[J].应用生态学报,2023,34(1):196-202.
- Sheng F, Liu S Y, Zhang T, et al. Runoff effect of precipitation variation and landscape pattern evolution in Lianshui watershed, Jiangxi, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(1):196-202.
- [28] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].自然资源学报,2008,23(5):911-919.
- Xie G D, Zhen L, Lu C X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China[J]. Journal of Natural Resources, 2008,23(5):911-919.
- [29] 张鹏岩,耿文亮,杨丹,等.黄河下游地区土地利用和生态系统服务价值的时空演变[J].农业工程学报,2020,36(11):277-288.
- Zhang P Y, Geng W L, Yang D, et al. Spatial-temporal evolution of land use and ecosystem service value in the lower reaches of the Yellow River Region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(11):277-288.
- [30] 侯孟阳,姚顺波,邓元杰,等.格网尺度下延安市生态服务价值时空演变格局与分异特征:基于退耕还林工程的实施背景[J].自然资源学报,2019,34(3):539-552.
- Hou M Y, Yao S B, Deng Y J, et al. Spatial-temporal evolution pattern and differentiation of ecological service value in Yan'an city at the grid scale based on sloping land conversion program[J]. Journal of Natural Resources, 2019,34(3):539-552.
- [31] 危小建,辛思怡,张颖艺,等.不同格网尺度下生态服务

- 价值空间分异及其影响因素差异探析:以大南昌都市圈为例[J].生态学报,2023,43(18):1-13.
- Wei X J, Xin S Y, Zhang Y Y, et al. Spatial difference of ecological services and its influencing factors under different scales: Taking the Nanchang Urban Agglomeration as an example[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(18):1-13.
- [32] 严立冬,刘昊昕,邓远建,等.农业生态资本投资水平及其空间溢出效应研究[J].中国地质大学学报:社会科学版,2021,21(6):77-90.
- Yan L D, Liu H X, Deng Y J, et al. Study on the level of agricultural ecological capital investment and its spatial spillover effect[J]. Journal of China University of Geosciences: Social Sciences Edition, 2021,21(6):77-90.
- [33] 邹亚东,张晓萍,何亮,等.退耕还林(草)背景下黄土丘陵沟壑区农业生态经济系统耦合发展态势:以陕西省吴起县为例[J].水土保持通报,2022,42(3):217-224,238.
- Zou Y D, Zhang X P, He L, et al. Coupling development situation of agricultural eco-economic system in loess hilly and gully areas as farmland is returned to forest(grass)land[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(3):217-224,238.
- [34] 蒋碧瑶,史兴民,秦语晗.水土保持增加了沙漠—黄土过渡带农户福祉吗:基于 PSM 的实证研究[J].干旱区资源与环境,2023,37(4):37-44.
- Jiang B Y, Shi X M, Qin Y H. Does soil and water conservation increase the farmer's well-being in desert-loess transition zone? [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023,37(4):37-44.
- [35] Bautista S, Mayor Á G, Bourakhouadar J, et al. Plant spatial pattern predicts hillslope runoff and erosion in a semiarid mediterranean landscape [J]. Ecosystems, 2007,10(6):987-998.
- [36] 刘宇,吕一河,傅伯杰.景观格局—土壤侵蚀研究中景观指数的意义解释及局限性[J].生态学报,2011,31(1):267-275.
- Liu Y, Lu Y H, Fu B J. Implication and limitation of landscape metrics in delineating relationship between landscape pattern and soil erosion[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011,31(1):267-275.
- [37] 高艳丽,李红波.汉江流域景观格局变化对土壤侵蚀的影响[J].生态学报,2021,41(6):2248-2260.
- Gao Y L, Li H B. Influence of landscape pattern change on soil erosion in Han river basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(6):2248-2260.

~~~~~

(上接第 264 页)

- [19] 齐月,阳伏林,姚玉璧,等.甘肃省春玉米灾损风险评估[J].水土保持研究,2019,26(2):352-358.
- Qi Y, Yang F L, Yao Y B, et al. Risk assessment of spring maize disaster in Gansu Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(2):352-358.
- [20] 刘荣花.河南省冬小麦干旱风险分析与评估技术研究[D].南京:南京信息工程大学,2008.
- Liu Ronghua. Study on drought risk analysis and evaluation technology of winter wheat in Henan Province [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2008.
- [21] 张前东,史春彦,张晓平,等.长清区农业干旱灾害风险评价与区划[J].中国人口·资源与环境,2016,26(S2):341-344.
- Zhang Q D, Shi C Y, Zhang X P, et al. Risk assessment and regionalization of agricultural drought disaster in Changqing district[J]. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2016,26(S2):341-344.
- [22] 宫清华,黄光庆,郭敏,等.基于 GIS 技术的广东省洪涝灾害风险区划[J].自然灾害学报,2009,18(1):58-63.
- Gong Q H, Huang G Q, Guo M, et al. GIS-based risk zoning of flood hazard in Guangdong Province [J]. Journal of Natural Disasters, 2009,18(1):58-63.
- [23] 王惠贞,唐红艳,韩雪,等.内蒙古大豆秋季霜冻风险指数分析及灾害风险区划研究[J].中国农业资源与区划,2022,43(2):23-32.
- Wang H Z, Tang H Y, Han X, et al. Research of the risk index of disaster and the risk zones of the autumn frost disaster of soybean in the Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022,43(2):23-32.
- [24] 程雪青,孙贝贝,巴馨瑶.阜阳市夏玉米气象灾害及防御措施[J].南方农业,2022,16(4):204-207.
- Cheng X Q, Sun B B, Ba X Y. Meteorological disasters and prevention measures of summer maize in Fuyang [J]. South China Agriculture, 2022,16(4):204-207.
- [25] 彭晓丹.广州市雷雨大风灾害风险区划[J].广东气象,2020,42(1):64-66.
- Peng X D. Risk zoning of thunderstorm and wind disaster in Guangzhou [J]. Guangdong Meteorology, 2020,42(1):64-66.
- [26] 李树岩,薛昌颖,张守林,等.夏玉米倒伏气象等级指标构建[J].中国农业气象,2021,42(12):1042-1056.
- DLi S Y, Xue C Y, Zhang S L, et al. Construction of meteorological grade index for summer maize lodging [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2021, 42(12):1042-1056.