

刘昊, 李琪颖, 狄巍榕, 等. 河南省沿黄地区“三生”空间生态环境效应及驱动因素[J]. 环境科学与技术, 2024, 47(8): 186–196. Liu Hao, Li Qiyang, Di Weirong, et al. Land-use transformation of production-living-ecology space along Yellow River in Henan Province: eco-environment effect and driving factors[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 47(8): 186–196.

河南省沿黄地区“三生”空间生态环境效应及驱动因素

刘昊¹, 李琪颖¹, 狄巍榕¹, 路捷^{1,2}, 蔚霖^{1,2*}

(1. 河南农业大学资源与环境学院, 河南 郑州 450046;

2. 河南省土地整治与生态重建工程技术中心, 河南 郑州 450046)

摘要: 文章基于“三生”空间视角, 通过生态环境质量指数和生态贡献率等方法, 测度2000–2020年河南省沿黄8个地市多尺度土地利用转型的生态环境效应, 并运用地理探测器模型揭示生态环境质量变化的驱动因素。结果表明: (1) 2000–2020年河南省沿黄地区“三生”空间用地结构呈现出生态、生产用地总体减少, 生活用地持续增加的态势, 以各类生活用地和工矿生产用地的增加和农业生产用地的减少最为显著。(2) 2000–2020年研究区在生态环境正效应和负效应的共同影响下, 生态环境质量呈现先下降后上升的“U”型变化特征, 农业生产用地转变为生态用地是生态环境改善的主要原因; “三生”空间变化图斑呈现明显聚集性, 黄河干流沿线以正效应贡献图斑为主, 郑州市、三门峡市以负效应贡献图斑为主; 济源市贡献率经历了由正到负的转变, 开封市和洛阳市经历了由负到正的转变, 其他地市贡献率无质的变化。(3) 夜间灯光、经济发展水平和人口密度是影响生态环境质量的主要驱动因子; 因子的交互作用大于单因子对生态环境效应的影响, 以夜间灯光和碳排放量的交互作用最为显著。研究结果可为河南省沿黄地区统筹社会经济发展与生态环境保护提供参考。

关键词: 土地利用转型; “三生”空间; 生态环境效应; 地理探测器; 河南省沿黄地区

中图分类号: X821 **文献标志码:** A **doi:** 10.19672/j.cnki.1003-6504.0554.24.338 **文章编号:** 1003-6504(2024)08-0186-11

Land-use Transformation of Production-Living-Ecology Space along Yellow River in Henan Province: Eco-environment Effect and Driving Factors

LIU Hao¹, LI Qiyang¹, DI Weirong¹, LU Jie^{1,2}, YU Lin^{1,2*}

(1. College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China;

2. Henan Engineering Technology Center of Land Consolidation and Ecological Reconstruction, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: From the perspective of production-living-ecology space, this paper elaborated on the measuring the eco-environmental effect of multi-scale land-use transformation in eight cities and prefectural towns along the Yellow River in Henan Province during 2000–2020 by means of eco-environmental quality index and ecological contribution rate, and the geo-detector model to reveal the driving factors of eco-environmental quality change was used in the meantime. Consequently, it was showed that the spatial structure in the areas along the Yellow River in Henan Province during 2000–2020 showed a land-use trend featuring overall decreases of productive and ecological areas of land, and meantime a continuous increase of land-use areas for living; the increases of various land-use areas for living and industrial/mining production, and the decline of land-use areas of agricultural production were notable in particular. Comprehensively affected by the positive and negative eco-environmental circumstances during 2000–2020, the status of eco-environment quality in the study areas presented a U-shaped characteristics, i.e., firstly decreased and then increased; the transformation of agricultural arable land into ecological land was the major reason of the improvement of ecological environment, and the spatial variation pattern spots showed an evident aggregation status, the positive contribution pattern spots distributed mainly along the River stem, but on the other hand, the pattern spots in cities of Zhengzhou and Sanmenxia showed negative contribution, and the contribution rate of Jiyuan City had experienced a change from positive to negative, while cities of Kaifeng and Luoyang had experienced a change from being negative to positive in terms of contribution rate, and the contribution rate of other cities has no qualitative change; and the

《环境科学与技术》编辑部: (网址) <http://hjks.chinajournal.net.cn> (电话) 027-87643502 (电子信箱) hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期: 2024-04-15; 修回 2024-05-24

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(23A630011); 河南省自然科学基金项目(222300420465); 国家自然科学基金项目(42171058)

作者简介: 刘昊(1997–), 男, 硕士研究生, 研究方向为土地生态保护与修复, (电子信箱) 15239170121@163.com; *通讯作者, (电子信箱) yulin8323@163.com。

night lights, the level of economic development and the population density were the main driving factors which affected the quality of ecological environment, and as to the eco-environmental effects, the influence of the interaction of factors was greater than that of single factors, and the interaction between night light and carbon oxide emission was most remarkable. It is expected that the research achievement could provide references for the overall social and economic development and eco-environmental protection in Henan Province's areas along the Yellow River.

Key words: land-use function change; production-living-ecology space; eco-environment effect; geo-detector; Henan Province's areas along the Yellow River

随着工业化、城镇化进程的快速推进,我国土地利用经历了深刻转型和空间重构,对区域生态环境产生了较大影响甚至威胁到区域生态安全^[1]。土地利用转型研究是土地利用/土地覆被变化综合研究的常规途径,自21世纪初龙花楼^[2]将其引入中国以来,结合中国社会经济特点的土地利用转型研究成果大量涌现,主要以理论基础与研究框架^[3]、转型产生的效应^[4]、驱动机制^[5]、某种或某类土地利用的转型^[6,7]等为研究内容。党的十八大报告首次提出“生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀”的发展导向,“十四五”规划也对“三生”空间的优化和保护提出了明确要求。结合现有研究,发现土地利用转型是引发生态环境变化的重要因素^[8],研究土地利用转型的生态环境效应是了解区域生态环境质量状况与变化特征的途径之一^[9],而土地利用转型引发的生态环境问题本质上是由于“三生”空间失衡所导致的^[10]。因此,将土地利用转型与“三生”空间视角结合是应对“三生”空间失衡问题的重要研究角度。

准确把握区域“三生”空间用地转型的生态过程及其驱动机制是解决生态环境问题的重要途径^[1]。在生态效应的测度方面,通常采用遥感生态指数^[11]、生态系统服务价值模型^[12]和生态环境质量指数^[13]等测度方法。生态环境质量指数因能建立起土地利用/土地覆被与区域生态环境质量的关联,定量分析区域生态环境变化^[14],而被广泛应用于土地利用转型的生态环境效应研究中。驱动因素方面,现有研究主要采用地理加权回归分析^[15]、偏最小二乘法^[1]和地理探测器模型^[16]等方法。其中,地理探测器模型不仅能对单一影响因子进行有效探测,且能对因子间的交互作用及其强弱进行判别^[17],在影响因子探测方面具有独特优势。研究尺度方面,多从县域^[18]、省市^[19]、城市群^[20,21]、流域^[22]等单一尺度展开,鲜有将流域和市域结合下的多尺度研究。流域作为一种特殊地理组成单元,其转型及生态环境效应变化更为复杂^[23],将流域与市域相结合能更好地反映流域生态环境质量变化与行政区“三生”空间用地转型之间的联系,也便于后续保护工作的开展。2021年发布的《黄河流域生态保护和高质量

发展规划纲要》中提出“到2035年,实现黄河流域生态环境全面改善,生态系统健康稳定”的发展目标。然而黄河流域一直存在生态本底差、水资源短缺、水土流失严重、资源环境承载能力弱等问题,河南省沿黄地区作为黄河流域中下游的转折点,更面临中游水土流失严重和下游生态流量偏低的双重压力^[24],研究其“三生”空间用地变化及生态环境质量非常紧迫。

综上,本文采用与国土空间规划更为契合^[25]的“三生”空间的研究视角,以2000、2010和2020年3期土地利用现状遥感数据为数据基础,定量研究流域与市域结合下的河南省沿黄地区“三生”空间用地时空演变特征,利用生态环境质量指数和生态贡献率对其生态环境效应进行研究区、图斑和市域的多尺度分析,通过地理探测器模型对可能影响生态环境质量的因素进行探测,以期为区域生态保护和高质量发展提供依据。

1 研究区概况

河南省沿黄地区(33°31'~36°12'N, 110°21'~116°05'E)位于黄河流域中下游,包含三门峡、洛阳、济源、焦作、郑州、新乡、开封和濮阳8个地市(图1),总面积约为57 217 km²,占河南省总面积的34.6%。研究区位于中国第二、三阶梯过渡地带,整体地势西高东低,地形为山地—丘陵—平原,为大陆性季风气候,年均温为12~15℃,年均降雨量为500~900 mm。截至2020年,河南省沿黄地区常住总人口约为4 083万,占全省的41.1%,GDP约为28 445亿元,占全省的51.7%。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及处理

本文遥感影像数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn>),其中2000年、2010年、2020年3期土地利用遥感/植被覆盖数据集为Landsat遥感影像,分辨率30 m,数据集总体精度为89%;研究区矢量边界数据来自中国科学院资源环境

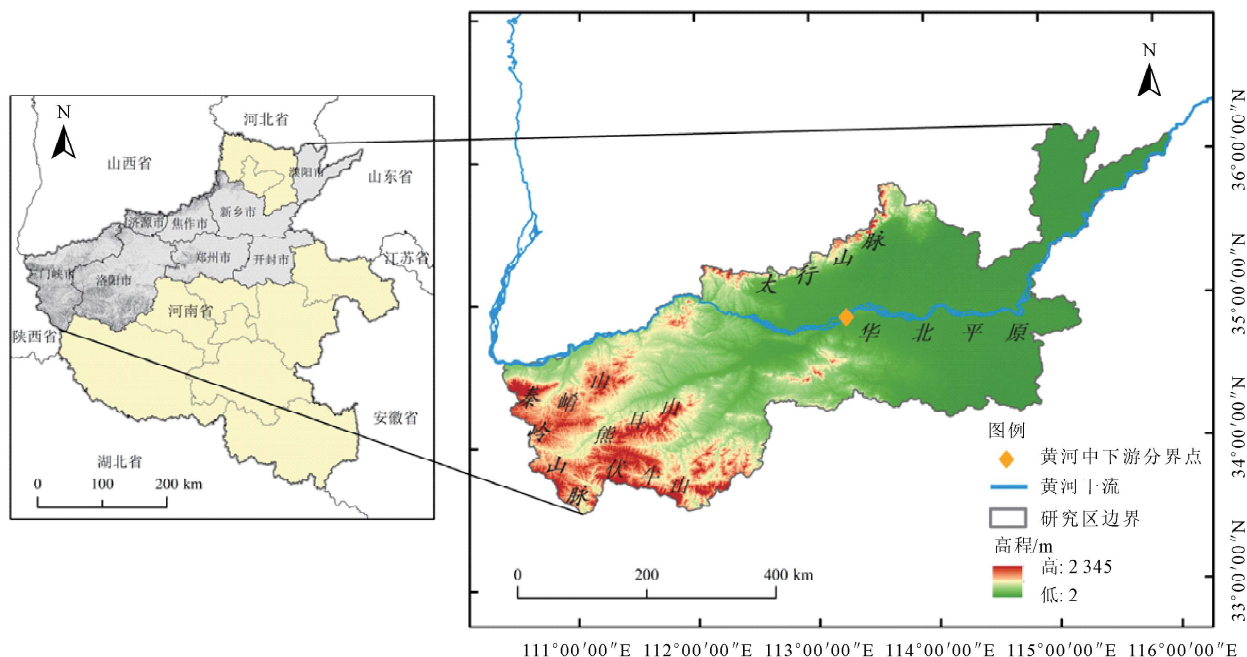


图1 河南省沿黄地区地理位置及区域概况

Fig.1 Geographical location and regional overview in Henan Province along the Yellow River area

数据中心(<http://www.resdc.cn>),济源市由于行政区划调整,其2000年边界数据采用行政区划的济源市市域边界。其他社会经济数据来自河南省统计局网站

2001–2021年统计年鉴(<https://tjj.henan.gov.cn>)。借鉴李晓文等^[14]的研究成果,结合面积加权法为各地类进行生态环境质量赋值(表1)。

表1 “三生”空间分类及其生态环境质量指数

Table 1 Spatial classification of production-living-ecological space and its eco-environment quality index

“三生”空间土地利用分类		土地利用类型	生态环境质量指数
一级分类	二级分类		
生活用地	城镇生活用地(UL)	城镇用地	0.200
	农村生活用地(RL)	农村居民点	0.200
生产用地	农业生产用地(AL)	水田、旱地	0.254
	工矿生产用地(IP)	其他建设用地	0.150
生态用地	牧草生态用地(PE)	高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地	0.641
	林地生态用地(FE)	有林地、灌木林地、疏林地、其他林地	0.863
	水域生态用地(WE)	河渠、湖泊、水库和坑塘、冰川和永久积雪地、海涂、滩地	0.550
	其他生态用地(OE)	沙地、戈壁、盐碱地、沼泽地、裸土地、裸岩石砾地	0.174

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵是指将各地类土地利用转移面积按照矩阵的形式进行排列,以表现出不同地类之间面积的转变情况^[8]。计算公式为:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, S 为某一地类面积; i, j 分别为研究初期与末期不同土地利用类型; n 为土地利用类型数量。

2.2.2 生态环境质量指数

根据不同“三生”空间用地所具有的面积比例及其对应的生态环境质量指数,对不同时期生态环境质

量状况进行计算^[9]。公式为:

$$EV_t = \sum_{i=1}^n \frac{A_{ki}}{A_k} \times R_i \quad (2)$$

式中, EV_t 为区域第 t 时期生态环境质量指数; n 为土地利用类型数目; A_{ki} 表示第 t 时期用地类型 i 的面积; A_k 为区域总面积; R_i 为第 i 种用地类型的生态环境质量指数。

2.2.3 “三生”空间用地转型图斑尺度生态贡献率

图斑尺度的生态贡献率表示某一地区的生态环境质量对土地利用类型的变化响应,用于定量分析不同功能用地间的相互转换对区域生态环境的影响^[26]。公式为:

$$LEI = (LE_{t+1} - LE_t) \frac{LA}{TA} \quad (3)$$

式中,LEI为土地利用功能转型的生态贡献率;LE_i为某种土地利用变化类型所反映的变化初期生态环境质量指数;LE_{t+1}为末期土地利用类型生态环境质量指数;LA为该变化类型的面积;TA为区域总面积。

2.2.4 “三生”空间用地转型市级尺度生态贡献率

对市内各图斑的生态贡献率进行求和可得土地利用功能转型市级尺度的生态贡献率。公式为:

$$LEI = \sum_{i=1}^n (LE_{t2} - LE_{t1}) \frac{LA_i}{TA_c} \quad (4)$$

式中,LEI为*t*时期该市的生态贡献率;TA_c为该市的土地总面积。

2.2.5 生态环境质量驱动因素分析

2.2.5.1 驱动因子

区域环境变化涉及到自然和社会多种因素的影响,从研究区特点出发,结合已有研究^[23,25,27],从自然环境和社会经济2个维度选取8个指标作为驱动因子。各驱动因子及获取方法见表2。

表2 河南省沿黄地区生态环境质量驱动因子

Table 2 Driving factors of ecological environment quality in Henan Province along the Yellow River area

准则	指标	获取方式	变量说明
自然环境	高程	地理空间数据云 (https://www.gscloud.cn)	不同高程下土地利用类型差异较大,且在地形影响下土地转换类型也有差异,从而间接影响地区生态环境质量
	植被覆盖	国家生态数据中心 (http://www.nesdc.org.cn)	植被覆盖(NDVI)会影响局部气候及生物多样性,从而对地区生态环境质量造成影响
	距水系距离	中国科学院资源环境数据中心 (http://www.resdc.cn)	区域水系分布情况会在一定程度上影响人们对土地资源的利用方式,不同方式对生态环境质量的影响具有差异
	年均降水量	国家气象科学数据中心 (http://data.cma.cn)	降水为区域气候的主要表现形式之一,不同降水条件下地区生态环境质量可能具有一定差异
社会经济	夜间灯光	美国国家地球物理数据中心 (http://www.ngdc.noaa.gov)	夜间灯光可反映人类活动的空间分布,其与区域人类活动强度的关系密切
	人口密度	中国科学院资源环境数据中心 (http://www.resdc.cn)	人口密度会影响区域资源需求程度和生活用地占比,从而对区域土地利用方式和强度
	国内生产总值	中国科学院资源环境数据中心 (http://www.resdc.cn)	经济发展水平能一定程度上表征地区产业结构和城镇化发展水平,从而反映经济发展阶段对地区生态环境的影响
	碳排放量	中国碳核算数据库 (https://www.ceads.net.cn)	表示区域工业化发展水平、工业污染和路网密度对生态环境质量的影响

2.2.5.2 地理探测器

(1)因子探测器。地理探测器是研究地理要素空间分异背后驱动因素的统计学模型^[17],本文应用因子探测器对影响河南省沿黄地区生态环境质量空间分异的因子的作用程度进行识别。具体模型如下:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (5)$$

式中,*q*为生态环境质量空间分异影响因素的解释力;*L*为因变量和自变量的分层;*N_h*为分层对应的样本量;*N*为研究区总样本量(*N*=995);σ_{*h*}²为第*h*层的方差;σ²为生态环境质量总体方差。

(2)交互探测器。利用交互探测器对因子之间交互作用的强弱关系进行判断。交互探测结果类型见表3。

表3 交互作用类型

Table 3 Interaction types

判断依据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

3 结果与分析

3.1 “三生”空间用地时空演变特征

3.1.1 “三生”空间用地时空特征

参照表1,结合2000–2020年3期遥感影像数据,分析河南省沿黄地区“三生”空间分布格局及其演变特征(图2、表4)。结果表明:河南省沿黄地区生活用地以各地市为单位面状聚集分布或散点状分布于各村落,呈持续扩张的趋势,研究期内生活用地面积共增加2 040.15 km²;生产用地主要分布在沿黄中下游平原和崤山、熊耳山山麓平原地区,整体呈减少态势,20年共计减少1 558.63 km²;生态用地集中分布在西南秦岭山脉和北部太行山地区,20年内面积先减少后增加,总面积减少550.38 km²。

在二级地类的空间分布上,以农业生产用地、农村生活用地和城镇生活用地分布最为广泛。农业生产用地集中分布在黄河中下平原地区和西南秦岭山麓平原地区;农村生活用地与农业生产用地分布具有较强一致性,呈散点状分布于农业生产用地中;城镇生活用地多呈团块状集中分布。在二级地类的结构变化上,2000–2020年城镇生活用地扩张面积最大,净增加1 243.45 km²,其次为农村生活用地,净增加

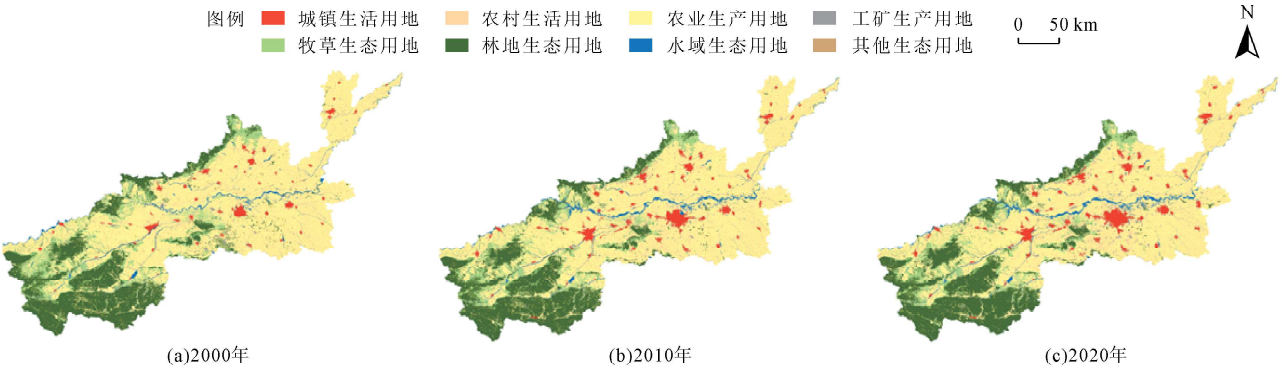


图2 2000-2020年河南省沿黄地区“三生”空间分布

Fig.2 Spatial distribution pattern of production-living-ecological space in Henan Province along the Yellow River area during 2000-2020

表4 河南省沿黄地区“三生”空间面积及变化

Table 4 The land area and its change of production-living-ecological space in Henan Province along the Yellow River area (km²)

类型	2000年	2010年	2020年	2000-2010年	2010-2020年	2000-2020年
一级地类	生活用地	4 957.61	6 391.42	6 997.76	1 433.81	606.34
	生产用地	33 363.38	32 619.7	31 804.75	-743.68	-814.95
	生态用地	18 907.58	18 218.17	18 357.2	-689.41	139.03
二级地类	城镇生活用地	980.18	1 863.21	2 223.63	883.03	360.42
	农村生活用地	3 977.43	4 528.21	4 774.14	550.78	245.93
	农业生产用地	33 095.01	32 196.49	30 989.96	-898.52	-1 206.53
	工矿生产用地	268.38	423.21	814.79	154.83	391.58
	牧草生态用地	5 214.54	4 647.46	4 627.9	-567.08	-19.56
	林地生态用地	12 425.67	12 109.76	12 187.1	-315.91	77.34
	水域生态用地	1 209.57	1 446.57	1 526.99	237.00	80.42
	其他生态用地	57.80	14.39	15.22	-43.41	0.83

796.71 km²,工矿生产用地净增加 546.41 km²,在所有用地中增幅最大,增幅为 203.60%;牧草、林地和其他生态用地面积研究期内均有减少,分别减少 586.64 km²、238.57 km²和 42.58 km²。相较其他用地,农业生产用地减少总量最多,2000-2020年净减少 2 105.05 km²,其他生态用地减少幅度最大,下降幅度为 73.67%。

综合来看,河南省沿黄地区“三生”空间用地结构变化受到社会经济发展、城镇化建设和人口规模变化的影响显著,集中表现在全国大力发展经济和中部地区崛起战略的背景下,伴随生产力提升、城镇化推进和人口增加带来的通过挤占农业生产用地和生态用地空间以满足生产生活需要的现象。

3.1.2 “三生”空间用地转型特征

依据 2000-2020 年“三生”空间用地转移矩阵(表 5、表 6),进一步分析河南省沿黄地区土地利用转型特征。结果表明:2000-2010 年,农村、城镇生活用地及工矿生产用地的增加主要来自农业生产用地,表明在中部地区崛起的政策背景下,随着社会经济发展和城镇化进程的推进,河南省沿黄地区“三生”空间用地转型强烈,人地矛盾逐渐显现。此外,向林地、牧草生态用地的转入也是造成农业生产用地大量减少的原因之一,期间虽有部分生态用地向农业生产用地的转入,但总体上入不敷出,退耕还林政策初见成效。2010-2020 年,农业生产用地的主要转出方向虽仍是

表5 2000-2010年河南省沿黄地区“三生”空间用地转移矩阵

Table 5 Production-living-ecological space transfer matrix in Henan Province along the Yellow River area during 2000-2010 (km²)

2000年	2010年							
	城镇生活用地	工矿生产用地	林地生态用地	牧草生态用地	农村生活用地	农业生产用地	其他生态用地	水域生态用地
城镇生活用地	940.22	1.78	0.24	1.47	3.33	31.78	-	1.37
工矿生产用地	47.00	64.58	1.74	2.14	48.88	73.84	0.00	30.19
林地生态用地	14.61	29.93	11 840.67	42.91	81.03	386.26	0.05	29.33
牧草生态用地	3.32	33.53	104.79	4 450.69	96.96	487.27	3.33	34.46
农村生活用地	177.89	28.70	6.52	5.39	2 842.52	904.41	0.00	11.85
农业生产用地	656.58	254.92	142.28	139.52	1 445.16	30 045.37	0.27	409.68
其他生态用地	-	1.64	2.72	0.06	0.45	25.92	10.25	16.75
水域生态用地	23.59	8.10	9.64	5.01	9.72	240.16	0.46	912.60

注:-表示未发现。下同。

表6 2010–2020年河南省沿黄地区“三生”空间用地转移矩阵

2010年	2020年							
	城镇生活用地	工矿生产用地	林地生态用地	牧草生态用地	农村生活用地	农业生产用地	其他生态用地	水域生态用地
城镇生活用地	1 831.18	0.56	0.20	0.45	16.61	13.67	—	0.33
工矿生产用地	19.91	359.56	4.19	1.27	8.68	26.68	0.27	1.31
林地生态用地	0.28	9.37	11 688.18	127.96	11.13	225.19	5.56	26.11
牧草生态用地	0.88	12.62	134.43	4 401.21	5.30	82.26	0.58	7.28
农村生活用地	58.76	14.08	5.66	3.88	4 280.32	162.54	0.14	2.15
农业生产用地	293.78	413.48	330.01	87.62	447.01	30 387.48	0.33	146.10
其他生态用地	—	0.01	2.23	0.21	0.02	2.65	8.32	0.50
水域生态用地	18.81	4.58	8.41	4.13	4.08	55.96	0.03	1 325.53

城镇、农村生活用地和工矿生产用地,但转出量已有明显下降,建设用地扩张速度放缓,这可能与河南省耕地占用指标收紧、存量建设用地再开发等政策的实施有关。随着退耕还林政策在该阶段的进一步实施,生态用地面积总体上有所增加,林地、牧草生态用地持续减少的情况得到了一定缓解。总体上看,河南省沿黄地区“三生”空间用地转型在当地自然本底条件、城镇化发展速度及政策调控等因素的影响下,其趋势由冲突、对抗逐渐向协调发展转变。

3.2 “三生”空间转型的生态环境效应

3.2.1 研究区尺度生态环境效应分析

依据式(2)计算得出河南省沿黄地区“三生”空间3期生态环境质量指数,分别为0.422 32、0.414 77、0.414 80(图3),整体变化幅度较小,呈先下降后上升的特征。为揭示各类用地转化对生态环境质量的影响,对生态环境质量贡献率进行计算(表7)。结果表明,2000–2010年农业生产用地转入水域和林地生态用地是研究区生态环境正效应的主要来源;生态环境

负效应的主要来源为林地、牧草生态用地转为农业生产用地。

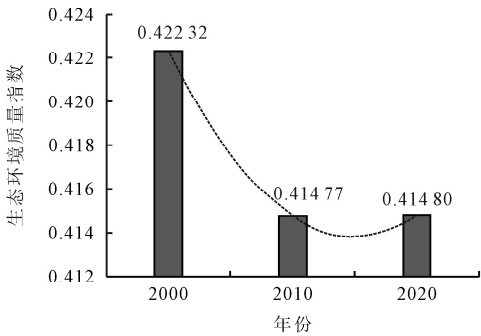


图3 2000-2020年河南省沿黄地区生态环境质量指数
Fig.3 Eco-environmental quality index of Henan Province along the Yellow River area during 2000-2020

与2000–2010年相比,2010–2020年促使生态环境改善的因素虽仍以农业生产用地向水域、林地生态用地的转化为主,但农业生产用地向林地生态用地转化所带来的贡献率较2000–2010年提升了41.7个百分点,说明随着生态文明理念的不断深化,退耕还林带来的生态效益逐渐显现。20年间各类生态用地向农村、

表7 影响生态环境质量的主要用地转换类型及贡献率
Table 7 Main land conversion types and contribution rates affecting ecological environment quality

模式	2000–2010年			2010–2020年		
	转换类型	生态环境质量指数	占比/%	转换类型	生态环境质量指数	占比/%
生态环境 正效应	AL–WE	0.002 11	32.0	AL–FE	0.003 37	63.6
	AL–FE	0.001 45	21.9	AL–WE	0.000 69	13.1
	AL–PE	0.000 88	13.3	PE–FE	0.000 47	8.8
	RL–AL	0.000 84	12.7	AL–PE	0.000 38	7.2
	PE–FE	0.000 39	5.8	RL–AL	0.000 09	1.7
	IP–WE	0.000 21	3.2	RL–FE	0.000 05	1.0
	IP–AL	0.000 13	2.0	IP–FE	0.000 05	0.9
	OE–WE	0.000 11	1.7	IP–AL	0.000 04	0.8
	总计	0.006 12	92.6	总计	0.005 14	97.1
生态环境 负效应	FE–AL	–0.004 05	28.6	FE–AL	–0.002 26	42.0
	PE–AL	–0.003 24	22.9	AL–IP	–0.000 74	13.8
	AL–RL	–0.001 34	9.5	FE–PE	–0.000 44	8.2
	WE–AL	–0.001 23	8.7	AL–RL	–0.000 36	6.6
	FE–RL	–0.000 94	6.6	PE–AL	–0.000 33	6.2
	PE–RL	–0.000 75	5.3	AL–UL	–0.000 27	5.0
	AL–UL	–0.000 61	4.3	WE–AL	–0.000 23	4.3
	AL–IP	–0.000 46	3.3	FE–WE	–0.000 14	2.6
	总计	–0.012 62	89.2	总计	–0.004 77	88.7

城镇生活用地的转出对生态环境质量造成了一定负面影响,工矿生产用地对农业生产用地的侵占造成的负效应也逐渐上升,城镇化、工业化进程的推进带来的负面影响使得退耕还林、湿地保护、森林国家公园建设等生态保护修复措施取得的成效总体上并不明显。总体而言,研究区生态环境质量改善主要通过以林地、水域为主的生态用地的扩张来实现,而各类生活用地与工矿生产用地的扩张往往会掩盖生态恢复措

施带来的正效应,区域生态环境质量有改善趋势,但改善效果有限。

3.2.2 图斑尺度生态环境贡献率分析

根据式(3)计算得出各图斑的生态环境效应贡献率,运用自然断点法,结合研究区数据实际情况进行调整后得到正效应高贡献区、正效应低贡献区、负效应低贡献区和负效应高贡献区,空白处为生态环境效应贡献率为0的地区(图4)。

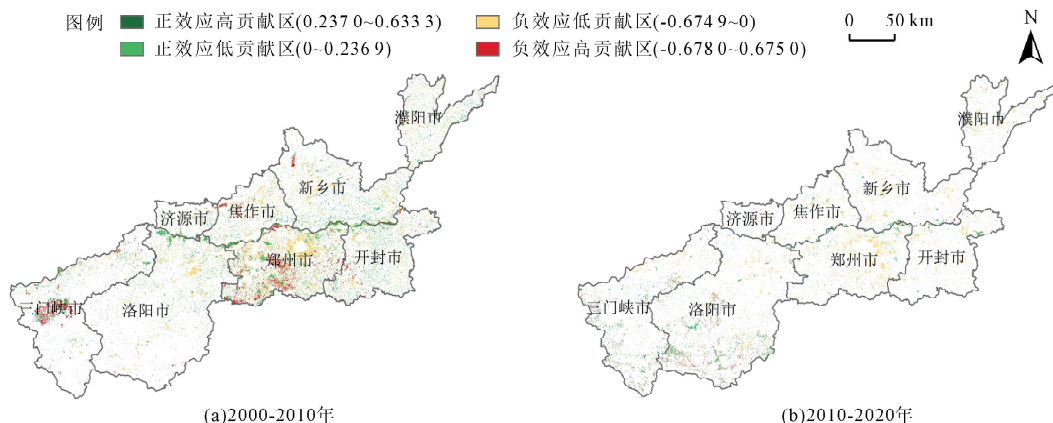


图4 2000-2020年河南省沿黄地区图斑尺度生态环境效应空间分布
Fig.4 Spatial distribution of patch-scale eco-environmental effects during 2000-2020

2000—2010年正效应贡献主要来自农业生产用地向水域、林地和牧草生态用地的转入,其中黄河干流沿线为正效应主要高贡献区,土地转换类型主要为农业生产用地转换为水域生态用地;负效应高贡献区集中出现在郑州市中南部和三门峡市中部地区,来源主要为牧草、林地生态用地向农业生产用地的转入;负效应低贡献斑块各地均有分布,以郑州市最为密集,主要原因是城市化快速发展导致各城市建成区周围的建设用地及农村生活用地规模扩大。

2010—2020年,正向生态环境效应主要分布在黄河沿线及西部伏牛山地区,黄河干流沿线土地转换类型为农业生产用地转换为水域生态用地,主要表现为沿黄水域斑块面积的扩大,这可能与沿黄地区湿地公园、自然保护区建设有关,伏牛山地区主要贡献来源于农业生产用地向林地生态用地的转入。负效应高贡献区主要分布在伏牛山地区,地类转换以林地生态用地向农业生产用地的转入为主;负效应低贡献区分布较为零散,以农业生产用地向农村生活用地的转入为主要变化特征。这一阶段总体上正负效应之间的转换较为均衡,生态用地在转为生产用地的同时也得到了生产用地及其他用地的补充,说明在城市化持续推进、人口增加的背景下,出于政策调控、城市化发展阶段变化等原因,生态环境质量下降的趋势得到了一定遏制。

3.2.3 市级尺度生态环境贡献率分析

根据式(4)计算得出各地市的生态环境效应贡献率,运用自然断点法,结合研究区数据实际情况进行调整后得到正效应高贡献区、正效应低贡献区、负效应低贡献区和负效应高贡献区(图5)。

2000—2010年,生态环境效应贡献率在空间分布上以郑州市为中心由内向外递增。济源市为正效应低贡献区,主要出于牧草生态用地向林地生态用地的转入;郑州市为负效应高贡献区,主要出于农业生产用地对林地和牧草生态用地的挤占;其他地市生态环境效应下降的主要原因是以林地为主的生态用地向农业生产用地的转入,次要原因是农业生产用地向农村生活用地的转入。

2010—2020年,各地市生态环境效应贡献率差异扩大,并呈现出不同的变化趋势。洛阳市与开封市为正效应贡献区,正效应贡献主要来自农业生产用地向林地生态用地的转入;负效应高贡献区为郑州市、濮阳市、济源市和新乡市,济源市是由于水域、牧草生态用地转入农业生产用地,其余地市为生活用地挤占农业生产用地;负效应低贡献区为三门峡市和焦作市,三门峡市是由于林地生态用地向农业生产用地的转入,焦作市可能与当地煤炭产业的迅速发展导致农业生产用地向工矿生产用地转入有关。

3.3 生态环境质量影响因素分析

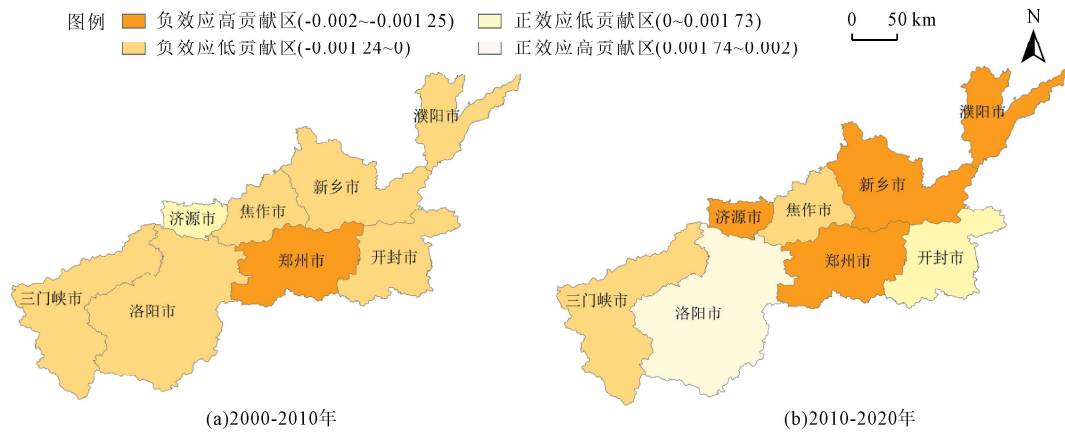


图5 2000-2020年河南省沿黄地区市级尺度生态环境效应空间分布
Fig.5 Spatial distribution of municipal-scale eco-environmental effects during 2000-2020

3.3.1 单因子探测分析

以县城几何中心点生态环境质量指数为因变量,以自然环境和社会经济因素为自变量(表2),对研究区2020年各影响因子进行单因子探测并排序(表8),因子探测结果均通过显著性检验($P<0.05$)。结果显示:自然环境和社会经济因素对河南省沿黄地区的生

态环境质量指数均有影响,但作用程度相差较大。从均值来看,社会经济因素的平均解释力(0.552 4)大于自然环境因素(0.228 4),说明社会经济因素对研究区生态环境质量影响较为显著,这可能与研究区人口数量大、城镇化发展迅速、各类建设用地需求旺盛的社会经济条件有关。

表8 2020年河南省沿黄地区单因子探测结果
Table 8 Single factor detection results along the Yellow River in Henan Province in 2020

探测因子	高程	年均降水量	植被覆盖	距水系距离	国内生产总值	人口密度	夜间灯光	碳排放量
q	0.337 9	0.131 9	0.361 8	0.081 8	0.550 2	0.535 5	0.971 5	0.152 4
排序	5	7	4	8	2	3	1	6

其中,夜间灯光是影响生态环境质量的主导因子,国内生产总值和人口密度是重要因子,说明研究区生态环境质量与人口数量、分布及区域经济发展水平密切相关;植被覆盖和高程在自然环境因素中解释力较强,解释力均大于30%,为次要因子。一方面,河南省为人口大省,人口众多,沿黄地区大部分位于华北平原,平坦地势利于建设用地的扩张,在经济发展、城市化、工业化推进的背景下,人类活动的强度和规模也逐渐增强和扩张,社会经济因素的影响也持续增强;另一方面,河南省沿黄地区整体地势西高东低,西部山区与中东部平原地区植被覆盖差异明显,这一自然本底为地区生态环境的空间差异奠定了基础,加之山地相较平原地区开发利用不便,受人类活动干扰较少,生态环境质量差异较为明显。相比之下,年均降水量和距水系距离影响较小,为一般因子。河南省沿黄地区总体上为大陆性季风气候,研究区内降水差异较小,加之地形平坦,中下游水系分布也较为均匀,因此对生态环境质量的差异影响较小。此外,碳排放量作为社会经济因素中的一般因子,说明研究区工业化水平和交通运输对生态环境质量变化的直接影响较小。

3.3.2 多因子交互探测分析

交互探测结果(图6)显示,研究区各因素交互探测结果为双因子增强和非线性增强2种,不存在独立或减弱关系,任意因子与其他因子交互产生的影响均大于单一因子。这一结果表明,研究区生态环境质量是由不同因子间的协同作用所影响和决定的,单一影响因子并不能对其生态环境质量起决定性作用。具体来看,夜间灯光 $\cap$ 碳排放量对河南省沿黄地区生态环境质量具有最强的解释力,说明在经济发展过程中人类对土地的开发建设和污染排放等活动是影响研究区生态环境质量的主导因素。此外,夜间灯光与其他因子交互产生的 q 值也都较高,进一步说明了人类对土地的开发利用活动在较大程度上影响了区域生态环境质量。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1)2000-2020年,河南省沿黄地区“三生”空间用地面积由大到小依次为生产、生态和生活用地,其中,生活用地面积持续增加,共计增加2 040.15 km²,生态用地面积先减少后增加,总面积减少550.38 km²,生产用地持续大幅减少,共计减少1 558.63 km²。

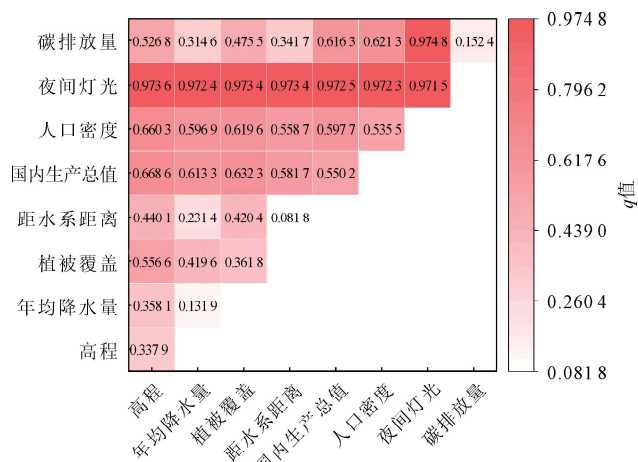


图6 2020年河南省沿黄地区多因子交互探测结果
Fig.6 Multi-factor interaction detection results in the Yellow River area of Henan Province in 2020

(2)2000—2020年,河南省沿黄地区“三生”空间二级地类转型活跃,农业生产用地转出面积总量最大,净减少2 105.05 km²,占总转出面积的70.81%,其他生态用地减少幅度最大,下降幅度为73.67%;转入面积最多的是城镇生活用地,共增加1 243.45 km²,占总转入量的42.82%,工矿生产用地面积增幅为203.60%,在所有用地类型中增幅最大;其他地类均有一定程度的相互转换。

(3)2000—2020年,河南省沿黄地区生态环境质量正负效应相互转化,生态环境质量指数整体变化较小,但具有先下降后回升的变化特征。2000—2010年产生生态环境负效应的主要原因是农业生产用地对林地、牧草生态用地的挤占,2010年后伴随生态文明理念的不断深化和退耕还林政策的进一步落实,研究区生态环境效应有所改善。各类生活用地与工矿生产用地的扩张在一定程度上掩盖了生态保护修复措施带来的正效应,区域生态环境质量有改善趋势,但改善效果有限。

(4)2000—2020年,河南省沿黄地区“三生”空间用地变化图斑呈现出明显的聚集性,集中分布在郑州市、三门峡市以及黄河干流沿线地区。2000—2010年贡献率以郑州市为中心向外递增,2010—2020年各地市贡献率差异扩大;研究期内郑州市为负效应高贡献区,济源市贡献率经历了由正到负的转变,开封市和洛阳市经历了由负到正的转变。

(5)社会经济因素对研究区生态环境质量指数变化作用较为明显,夜间灯光是主导因子,国内生产总值和人口密度是重要因子,研究区生态环境质量与人口数量、分布及区域经济发展水平密切相关。研究区生态环境质量由不同因子间的协同作用所影响和决定,因子间的相互作用增强了其对生态环境质量的影响,以夜间灯光和碳排放量的交互作用最为显著,说

明经济发展过程中人类对土地的开发利用和污染排放等活动是影响研究区生态环境质量的主导因素。

4.2 讨论

本文基于河南省沿黄地区“三生”空间用地转换情况,对其产生的生态环境效应进行分析,其中土地利用转型情况与肖东洋等^[24]的黄河流域(河南段)土地利用格局时空演变研究结果趋同,故基于此进行的生态环境效应研究具有可信性。在生态环境效应分析中,河南省沿黄地区3期生态环境质量指数分别为0.422 32、0.414 77、0.414 80,总体变动较小,表明区域生态环境质量总体稳定,但并不表示区域生态环境在该阶段没有发生变化,区域生态环境质量变化往往伴随正效应和负效应的同时发生,正负效应间的相互抵消使生态环境质量总体维持稳定^[22,23],研究期内以农业生产用地与城镇、农村生活用地为主的二级地类转型活跃,给研究区生态环境质量造成了一定负面影响,而水域、林地等生态用地增加带来的正效应一定程度上改善了生态环境质量下降的趋势。因此,未来河南省沿黄地区在落实中原经济区战略,建设全国工业化、城镇化和农业现代化协调发展示范区的同时,应继续践行生态文明理念,统筹区域经济发展与环境保护。具体而言,首先要对位于三门峡市和洛阳市的秦岭生态屏障地区进行保护,在海拔较高、坡度较大等的不宜耕作区实施“退耕还林”等生态保护政策,保障区域生态安全;以郑州市、新乡市为主的中下游平原地区应集约利用生活用地,继续实施城市存量建设用地挖潜、旧村改造等政策,合理引导生活空间布局,减小因生活用地过度扩张对地区生态环境带来的负面影响;此外,各地市还应贯彻落实国土空间规划,对不合理的土地开发利用活动及污染排放行为进行限制,以实现区域“三生”空间有机结合的高质量发展。

在本文生态环境效应测算中,生态环境质量指数是在参考前人研究的基础上赋值获得的,虽已利用面积加权法进行修正,但仍具有一定的主观性,在后期研究中需要对生态环境质量指数进行完善以增强其客观性。在地理探测器模型驱动因素指标的选取方面,本文以自然环境和社会经济此类显性形态因素作为评价指标,得出以人为活动为主的社会经济因素是影响区域生态环境质量的主导因素的结论,这一结果与前人研究^[23,25]具有一致性,但缺乏对难以量化但对区域生态环境质量具有影响的政策因素的考量,未来研究应考虑将该类影响区域土地利用的隐性因素纳入评价指标体系进行更为科学的驱动因素分析。

[参考文献]

- [1] 董建红,张志斌,笄晓军,等. “三生”空间视角下土地利用转型的生态环境效应及驱动力:以甘肃省为例[J]. 生态学报, 2021,41(15):5919–5928.
Dong Jianhong, Zhang Zhibin, Da Xiaojun, et al. Eco-environmental effects of land use transformation and its driving forces from the perspective of production–living–ecological spaces: a case study of Gansu Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(15):5919–5928.
- [2] 龙花楼. 土地利用转型的解释[J]. 中国土地科学, 2022,36(4):1–7.
Long Hualou. Explanation of land use transitions[J]. *China Land Science*, 2022,36(4):1–7.
- [3] 曲艺,龙花楼,曹林森. 城镇化背景下土地利用转型的环境与经济效益耦合研究框架构建[J]. 地理科学进展, 2024,43(4):799–809.
Qu Yi, Long Hualou, Cao Linsen. Construction of a research framework for coupling environmental and economic effects of land use transition under urbanization[J]. *Progress in Geography*, 2024,43(4):799–809.
- [4] 韦绍音,陆汝成,张利国,等. 碳中和目标下的广西边境地区“三生”空间转型及碳储量效应[J]. 水土保持通报, 2023,43(1):399–408.
Wei Shaoyin, Lu Rucheng, Zhang Liguang, et al. Transition of production–living–ecological space and carbon storage effect in Guangxi border area under carbon neutrality goal[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(1):399–408.
- [5] 周贵鹏,龙花楼. 土地利用转型机理与国土空间格局优化:基于土地利用效益空间函数视角的分析[J]. 自然资源学报, 2023,38(10):2447–2463.
Zhou Guipeng, Long Hualou. The mechanism of land use transitions and optimization of territorial spatial development patterns: analysis based on the spatial functions of land use benefits[J]. *Journal of Natural Resources*, 2023,38(10):2447–2463.
- [6] 陈韵凌,王茂军. 泰安市设施农用地的时空格局演变与影响因素[J]. 地理科学进展, 2023,42(1):116–130.
Chen Yunling, Wang Maojun. Spatial and temporal patterns of facility agricultural land in Tai'an City and influencing factors[J]. *Progress in Geography*, 2023,42(1):116–130.
- [7] 王永洵,王亚飞,张静文,等. 海岸带土地利用转型及其生态环境效应:以福建海岸带为例[J]. 环境科学学报, 2021,41(10):3927–3937.
Wang Yongxun, Wang Yafei, Zhang Jingwen, et al. Land use transition in coastal area and its associated eco-environmental effect: a case study of coastal area in Fujian Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021,41(10):3927–3937.
- [8] 冯新惠,李艳,余迺,等. 环太湖城市群土地利用转型及其生态环境效应[J]. 长江流域资源与环境, 2023,32(6):1238–1253.
Feng Xinhui, Li Yan, Yu Er, et al. Land use transition and associated eco-environmental effects in the Taihu Lake city cluster[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023,32(6):1238–1253.
- [9] 杨清可,段学军,王磊,等. 基于“三生空间”的土地利用转型与生态环境效应:以长江三角洲核心区为例[J]. 地理科学, 2018,38(1):97–106.
Yang Qingke, Duan Xuejun, Wang Lei, et al. Land use transformation based on ecological–production–living spaces and associated eco-environment effects: a case study in the Yangtze River Delta[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018,38(1):97–106.
- [10] 勾蒙蒙,刘常富,李乐,等. “三生空间”视角下三峡库区土地利用转型的生态系统服务价值效应[J]. 应用生态学报, 2021,32(11):3933–3941.
Gou Mengmeng, Liu Changfu, Li Le, et al. Ecosystem service value effects of the Three Gorges Reservoir Area land use transformation under the perspective of production–living–ecological space[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021,32(11):3933–3941.
- [11] 唐文家,张紫萍,张志军,等. 2000–2020年青海省生态环境质量时空变化[J]. 环境科学与技术, 2023,46(5):229–237.
Tang Wenjia, Zhang Ziping, Zhang Zhijun, et al. Spatial–temporal changes of ecological environment quality in Qinghai Province from 2000 to 2020[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023,46(5):229–237.
- [12] 刘希朝,李效顺,陈姜全,等. 江苏沿海地区“三生”功能空间演化及生态效应[J]. 生态经济, 2023,39(8):156–164.
Liu Xichao, Li Xiaoshun, Chen Jiangquan, et al. production–living–ecological space evolution in Jiangsu coastal area and associated ecological effects[J]. *Ecological Economy*, 2023,39(8):156–164.
- [13] 冯雨柯,翟石艳,姜昕彤,等. 中原城市群“三生”空间模拟及生态效应评估:基于未来土地利用模拟模型和共享社会经济路径情景[J]. 生态学报, 2023,43(20):8292–8308.
Feng Yuke, Zhai Shiyan, Jiang Xintong, et al. Simulating spatio-temporal pattern of production–living–ecological space and evaluating eco-environmental effects in Zhongyuan Urban Agglomeration based on FLUS model and shared socioeconomic pathways[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(20):8292–8308.
- [14] 李晓文,方创琳,黄金川,等. 西北干旱区城市土地利用变化及其区域生态环境效应:以甘肃河西地区为例[J]. 第四纪研究, 2003,23(3):280–290.
Li Xiaowen, Fang Chuanglin, Huang Jinchuan, et al. The urban land use transformations and associated effects on eco-environment in northwest China arid region: a case study in Hexi Region, Gansu Province[J]. *Quaternary Sciences*, 2003,23(3):280–290.

- [15] 葛石冰,宋晓君,陈润,等. 近30年天山北坡改进型遥感生态指数时空变化及其驱动因素[J]. 生态与农村环境学报, 2024,40(7):865-876.
- Ge Shibing, Song Xiaojun, Chen Run, et al. The spatiotemporal changes and driving factors of ERSEI on the northern slope of Tianshan Mountain in the past 30 years[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024,40(7):865-876.
- [16] 黄晶,薛东前,董朝阳,等. 干旱绿洲农业区土地利用转型生态环境效应及分异机制:基于三生空间主导功能判别视角[J]. 地理科学进展, 2022,41(11):2044-2060.
- Huang Jing, Xue Dongqian, Dong Chaoyang, et al. Eco-environmental effects and spatial differentiation mechanism of land use transition in agricultural areas of arid oasis: a perspective based on the dominant function of production-living-ecological spaces[J]. Progress in Geography, 2022, 41(11):2044-2060.
- [17] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017,72(1):116-134.
- Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.
- [18] 王世清,冀正欣,许月卿,等. 农牧交错区“三生”用地格局演变及其生态环境效应:以冀北山区张北县为例[J]. 中国农业资源与区划, 2023,44(7):161-171.
- Wang Shiqing, Ji Zhengxin, Xu Yueqing, et al. Evolution of production-living-ecological land use pattern and its eco-environmental effects in counties of agropastoral ecotern: a case study of Zhangbei County[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023,44(7):161-171.
- [19] 刘海元,韩俊扬,罗雷. 基于“三生”空间的土地利用功能转型及其生态环境效应研究:以天津市为例[J]. 国土与自然资源研究, 2023(1):45-51.
- Liu Haiyuan, Han Junyang, Luo Lei. Based on production-living-ecological space studies land function transformation of land use and ecological environment effect: a case study of Tianjin[J]. Territory & Natural Resources Study, 2023(1): 45-51.
- [20] Li K, Zhang B Y, Xiao W D, et al. Land use transformation based on production-living-ecological space and associated eco-environment effects: a case study in the Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. Land, 2022,11(7):1076.
- [21] 迟宏旭,陈宇,杨旭,等. 东北三省土地利用及生境质量的时空演变效应[J]. 环境科学与技术, 2023,46(6):187-196.
- Chi Hongxu, Chen Yu, Yang Xu, et al. The spatio-temporal evolution effect of land use function change and habitat quality in the three northeastern provinces of China[J]. Environmental Science & Technology, 2023,46(6):187-196.
- [22] 畅田颖,张仲伍,乔旭宁,等. 黄河流域2000-2020年“三生”空间土地利用转型及其生态环境效应[J]. 水土保持通报, 2021,41(4):268-275.
- Chang Tianying, Zhang Zhongwu, Qiao Xuning, et al. Land use transformation and its eco-environment effects of ecological-production-living spaces in Yellow River Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(4):268-275.
- [23] 黄鑫,程文仕,李晓丹,等. 干旱内陆河流域土地利用转型的生态环境效应变化特征及其驱动因素探测[J]. 水土保持研究, 2023,30(2):324-332.
- [24] 肖东洋,牛海鹏,闫弘轩,等. 1990-2018年黄河流域(河南段)土地利用格局时空演变[J]. 农业工程学报, 2020,36(15):271-281.
- Xiao Dongyang, Niu Haipeng, Yan Hongxuan, et al. Spatiotemporal evolution of land use pattern in the Yellow River Basin (Henan Section) from 1990 to 2018[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(15):271-281.
- [25] 董冬,罗毅,顾康康. “三生空间”视角下长三角城市群土地利用转型生态环境效应时空分异及驱动力[J]. 长江流域资源与环境, 2023,32(8):1664-1676.
- Dong Dong, Luo Yi, Gu Kangkang. Spatio-temporal differentiation and driving forces of eco-environmental effects of land use transformation in Yangtze River Delta economic zone: a perspective of production-living-ecological spaces [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(8):1664-1676.
- [26] 刘金花,丛中笑,王治军. 基于三生空间转型的生态环境效应多尺度研究:以黄河流域山东段为例[J]. 中国环境科学, 2023,43(5):2519-2530.
- Liu Jinhua, Cong Zhongxiao, Wang Zhijun. Ecological effects of production-living-ecological space transformation at multi-scales: a case study on the Shandong Section of the Yellow River Basin[J]. China Environmental Science, 2023, 43(5):2519-2530.
- [27] 王志远,万鼎,廖建军,等. 洞庭湖生态经济区“三生空间”转型的生态环境效应及其驱动因素[J]. 科学技术与工程, 2023,23(9):3876-3888.
- Wang Zhiyuan, Wan Ding, Liao Jianjun, et al. Ecological environment effect and driving factors of transformation of production-living-ecological space in Dongting Lake Eco-economic Zone[J]. Science Technology and Engineering, 2023,23(9):3876-3888.
- [28] 高星,刘泽伟,李晨曦,等. 基于“三生空间”的雄安新区土地利用功能转型与生态环境效应研究[J]. 生态学报, 2020,40(20):7113-7122.
- Gao Xing, Liu Zewei, Li Chenxi, et al. Land use function transformation in the Xiong'an New Area based on ecological-production-living spaces and associated eco-environment effects[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(20): 7113-7122.