李 涛,蒋 琼,杨亚琳,等.基于生态足迹模型的中原城市群生态安全评价及驱动因素分析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(12):6841-6857.
Li T, Jiang Q, Yang Y L, et al. Evaluation of ecological security and analysis of driving factors based on ecological footprint model in Central Plains Urban Agglomeration [J]. China Environmental Science, 2025,45(12):6841-6857.

基于生态足迹模型的中原城市群生态安全评价及驱动因素分析

李 涛[1,2,3,4*],蒋 琼[1],杨亚琳[1],黄雅婷[1] (1.河南大学地理科学与工程学部地理科学学院,河南 郑州 450046；2.河南大别山森林生态系统国家野外科学观测研究站,河南 郑州 450046；3.土壤重金属污染控制与修复河南省工程研究中心,黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室,河南 开封 475004；4.信阳生态研究院,河南 信阳 464000)

摘要：基于生态足迹模型,分析了 2010~2021 年中原城市群自然资本利用特征和综合生态安全状况.运用加权 Voronoi 图进行生态安全分区,并利用偏最小二乘回归法分析主要驱动因素.结果表明:(1)中原城市群人均生态足迹不断增加(增幅 11.27%),人均生态承载力相对稳定.人均生态足迹广度分布在 0.289~0.300hm^2/人之间,生态足迹深度分布在 2.595~2.928 之间且呈上升趋势.(2)生态压力指数、生态协调指数、存量流量利用比、生态足迹多样性指数表明生态安全状况逐渐恶化,生态利用效率的提高有效遏制生态恶化趋势,综合生态安全指数总体处于“中度不安全”状态.(3)基于加权 Voronoi 图将中原城市群划分为中部核心发展区、西部转型发展区、北部优化发展区、东部保护发展区和南部绿色发展区.(4)第一产业产值占比和能源消费总量在大多地区属于重要的正向驱动因素,其他因素在不同地区对生态安全的影响程度存在明显差异.

关键词：生态足迹；生态安全；加权 Voronoi 图；PLS；中原城市群
中图分类号：X196 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)12-6841-17

Evaluation of ecological security and analysis of driving factors based on ecological footprint model in Central Plains Urban Agglomeration.

LI Tao[1,2,3,4*], JIANG Qiong[1], YANG Ya-lin[1], HUANG Ya-ting[1] (1.College of Geographical Sciences, Faculty of Geographical Science and Engineering, Henan University, Zhengzhou 450046, China；2.Henan Dabieshan National Field Observation and Research Station of Forest Ecosystem, Zhengzhou 450046, China；3.Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions, Ministry of Education, Henan Engineering Research Center for Control & Remediation of Soil Heavy Metal Pollution, Kaifeng 475004, China；4.Xinyang Academy of Ecological Research, Xinyang 464000, China). *China Environmental Science*, 2025,45(12)：6841~6857

Abstract：Based on the the ecological footprint model, this paper analyze the characteristics of natural capital utilization and comprehensive ecological security situation in CPUA from 2010 to 2021. The weighted Voronoi diagram was used for ecological security zoning, and partial least squares regression was employed to identify the main driving factors. The results revealed that: (1) the per capita ecological footprint (ef) of CPUA increased by 11.27%, while the per capita ecological carrying capacity (ec) remained relatively stable. The per capita ecological footprint size (EF_{size}) ranged from 0.289~0.300hm^2/cap, whereas the ecological footprint depth (EF_{depth}) ranged between 2.595~2.928 and maintain an upward trend. (2) The ecological pressure index, ecological coordination index, stock-flow usage ratio, and ecological footprint diversity index demonstrated a gradual decline in ecological security situation. The improvement of ecological utilization efficiency contained the trend of ecological deterioration effectively. The comprehensive ecological security index was generally in a “medium insecurity” state. (3) Based on the weighted Voronoi diagram, the CPUA was divided into central core development zone, western transformation development zone, northern optimization development zone, eastern protection development zone, and southern green development zone. (4) The proportion of primary industry output value and the total energy consumption were important positive driving factors in most regions, while the influence of other factors on ecological security varied significantly in different regions.

Key words：ecological footprint；ecological security；weighted Voronoi diagram；Partial Least-squares Regression(PLS)；Central Plains Urban Agglomeration (CPUA)

城市群是现代社会经济发展的重要载体,人口和产业集聚为区域发展创造有利条件的同时,也带来了城市扩张、资源环境超载等负面影响.中原城市群作为人口和经济活动高度密集区,在社会经济发展驱动下,资源和能源消耗不断增加,生态安全压力逐渐加重[1].因此,掌握中原城市群生态安全现状及

收稿日期：2025-05-05
基金项目：信阳生态研究院开放课题(2023DBS02);中原学者工作站资助项目(234400510026);河南省科技攻关项目(242102320251)
* 责任作者, 副教授, taodeny@163.com

其驱动因素,有针对性地提出改善对策,对推动中原城市群高质量发展有重要意义.

目前,国内外关于生态安全的研究主要集中在生态安全概念解析[2]、评价指标体系构建[3]、生态服务功能评价[4]等方面,主要研究方法有生态系统服务模型[5]、数学模型[6]、景观生态学模型[7]、生态足迹模型[8]等.其中,生态足迹模型由于具有评价结果相对客观综合[6]、方法普适性强[9]、应用灵活性强[10]等优势,被广泛用于区域自然资源利用和生态安全测度.生态足迹是Rees[11]在1992年提出的概念,指区域能够提供资源或消纳废物的生物生产性土地面积总和.此后,国内外学者先后提出了二维生态足迹模型[12]、三维生态足迹模型[13],并结合能值分析[14]、投入产出分析[15]、净初级生产力[16]等方法对模型进行改进.生态足迹模型将不同土地类型的自然资源统一核算,通过研究自然资源供给与人类需求的关系来衡量区域可持续发展程度,进而判断区域生态安全状况[17].

生态安全分区有利于合理规划和利用自然资源,进而实现针对性施策和精细化管理[18].目前,生态安全分区常基于四象限聚类法[19]、K-means 聚类[20]、图件叠置法[21]、主导因素法[22]、SOM 模型的集成[23]等方法识别生态安全区.但以上方法多为定性研究,且多聚焦区域社会经济特征,较少考虑评价对象的空间关系,忽视生态安全调控政策的可操作性和针对性.

科学识别和评估生态安全驱动因素,可为区域高质量发展提供决策依据[24].当前研究已涵盖流域[25]、城市群[26]、省域[27]、地级市[28]等多维空间尺度,且方法集中在地理探测器[29]、主成分分析(PCA)[30]、LMDI 模型[31]、GTWR 模型[32]等.然而,生态安全驱动因子常交叉影响,如经济密度同时关联资源消耗与污染排放,PCA 方法要求载荷矩阵满足简单结构,实际常出现跨成分高载荷,导致归因困难;多数采用 LMDI 模型的生态安全分解结果对数据质量和时段选择敏感,如数据缺失或时段划分不当可能影响结果稳健性;GTWR 模型在解析驱动因素空间异质性时由于计算负荷高、变量的多重共线性敏感导致结果偏差.

整体来看,国内外学者对生态安全进行了大量研究,但仍存在一些局限:(1)目前大部分生态足迹核算采用全球公顷参数,一定程度上会掩盖区域生产力差异.且生态安全评价多采用单一或有限的指标体系,无法全面客观地评估区域生态安全状况.(2)缺乏对生态安全空间分布特征及驱动因素的分析和探讨,基于人类社会经济活动与区域自然资本利用相互关系的生态安全分区研究更是鲜见报道.(3)缺乏统筹考虑地方经济社会发展现状、资源禀赋、政策规划和功能区定位的针对性建议,不利于精细化管理.基于此,本文采用生态足迹模型分析 2010~2021 年中原城市群自然资本利用特征,构建多维评价体系,整合生态压力指数、生态利用效率、生态协调指数、存量流量利用比、生态足迹多样性指数以及综合生态安全指数等指标定量评价区域生态安全状况,利用加权 Voronoi 图进行生态安全分区,实现从“数值评价”到“空间管控”的跨越;采用 PLS 模型分析不同区域生态安全时空差异的主要驱动因素,旨在为中原城市群制定因地制宜的科学决策提供理论依据.

1 研究方法和数据来源

1.1 研究区域

中原城市群地处我国中东部,位于 31°52'N~36°50'N,110°15'E~118°10'E,是连接南北、协调东西的核心枢纽,对支撑中部崛起、乃至促进全国区域协同发展具有重要意义[33].根据《中原城市群发展规划》,中原城市群包含河南省、河北省、山西省、山东省和安徽省 5 省共 30 个地级市,面积约 28.7 万 km^2.地势西高东低,地形多为平原、山地,是我国重要的粮食主产区之一.截至 2021 年,中原城市群常住人口达到1.64亿人,地区生产总值为88682.70亿元,三次产业占比分别为 10.10%、41.65%、48.24%.随着社会经济发展和城镇化进程加快,中原城市群人地矛盾扩大,产生了化石能源消耗持续增加、建设用地供需矛盾突出、土地生态服务功能减弱等一系列生态环境问题[34],生态安全状况令人担忧.

1.2 研究方法

1.2.1 全国平均产量 全国平均产量表示一个国家单位面积土地的生物生产力[35],是将人类的资源消费转化为生物生产土地面积的基准.计算公式如下:

$$\mathrm{ep}_i = \frac{p_i}{s_i} \tag{1}$$

式中:ep_i表示第 i 种产品的全国平均产量, kg/hm^2;p_i是第 i 种产品的全国产量,kg;s_i是第 i 种产品的全国生产面积,hm^2.

1.2.2　生态足迹和承载力　生态足迹是指人类发展所需各种资源以及吸纳人类产生废物所必需的生物生产性土地面积[11].生态承载力表示区域能够为人类社会发展提供的各类生物生产性土地的总面积[36].本文生物生产用地分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和化石能源用地六大类,前四类属于生物资源账户,后两类属于能源消耗账户.由于自然生态系统中不存在专门用于吸纳化石能源燃烧排放 CO_2 的土地类型,因此公式(2)中 j 取 6,公式(3)中j取 5.根据世界环境与发展委员会的建议,生态承载力应保留 12%用于生物多样性保护[37].计算公式如下:

$$\mathrm{EF} = \sum_{j=1}^{6}\left[r_j \cdot \sum_i \left(\frac{c_i}{\mathrm{ep_i}}\right)\right] \tag{2}$$

$$\mathrm{EC} = (1-12\%) \times \sum_{j=1}^{5}(A_j \times r_j \times y_j) \tag{3}$$

$$\mathrm{ED} = \mathrm{EF} - \mathrm{EC} \tag{4}$$

式中:EF、EC 和 ED 分别为生态足迹、生态承载力和生态赤字,hm^2;i 为不同类型的消费产品;j 为不同土地类型;r_j为均衡因子;c_i为第i种产品的消耗量;$\mathrm{ep_i}$为第 i 种产品的全国平均产量;A_j为第 j 类土地的实际面积,hm^2;y_j为产量因子.

人均生态足迹、人均生态承载力和人均生态赤字计算公式如下:

$$\mathrm{ef} = \frac{\mathrm{EF}}{N} \tag{5}$$

$$\mathrm{ec} = \frac{\mathrm{EC}}{N} \tag{6}$$

$$\mathrm{ed} = \frac{\mathrm{ED}}{N} \tag{7}$$

式中:ef、ec 和 ed 分别为人均生态足迹、人均生态承载力和人均生态赤字,hm^2/人;N 为该地区的总人口.

1.2.3　生态足迹广度和深度　Niccolucci 等[13]提出三维生态足迹模型,用生态足迹广度和生态足迹深度分别表示人类对自然资本流量的占用程度和自然资本存量的消耗程度[38].在此基础上我国学者方恺[9]为克服不同土地类型间赤字转移问题对三维模型进行了改进.计算公式如下:

$$\mathrm{EF_{size}} = \sum_{j}^{6}\min\left(\mathrm{EF}_j, \mathrm{EC}_j\right) \tag{8}$$

$$\mathrm{EF_{depth}} = 1 + \frac{\sum_{j=1}^{6}\max(\mathrm{EF}_j - \mathrm{EC}_j, 0)}{\sum_{j}^{n}\mathrm{EC}_j} \tag{9}$$

式中:$\mathrm{EF_{size}}$ 为生态足迹广度,hm^2;$\mathrm{EF_{depth}}$ 为生态足迹深度(无量纲);EF_j 和 EC_j 为第 j 种生物生产性土地的生态足迹和承载力.当 $\mathrm{EF_{depth}}$=1 时,处于自然原长状态,表示区域自然资本流量能够满足人类消费需要;当 $\mathrm{EF_{depth}}$>1 时,表示自然资本流量的消耗无法满足人类消费需要,需要动用自然资本存量.

1.2.4　生态安全评价指标　单一评价指标难以全面客观地评价区域生态安全状况[39].因此,本文从区域生态压力、资源利用效率、生态发展协调、自然资本利用结构和土地利用结构等方面选择生态压力指数、生态利用效率、生态协调指数、存量流量利用比和生态足迹多样性指数进行区域生态安全评估,并通过熵权法确定每个指标的权重来计算综合生态安全指数.参照其他研究[40-41]及本文所得数据分布特征,采用自然断点法对生态安全等级进行划分.相关指标计算公式、意义及分级标准见表 1.

1.2.5　偏最小二乘回归法　偏最小二乘回归法是集合普通线性回归、主成分分析和典型相关分析等方法特点于一体的数据统计分析方法.该方法不仅可以避免样本量少、自变量存在多重共线性等问题,且在成分提取时对信息进行了重组,提高了自变量对因变量的解释效应[42].变量投影重要性常用于驱动因素重要性判断.若 VIP>1.0,表示自变量是因变量的极重要驱动因素;0.8<VIP<1.0,表示自变量是因变量的一般重要驱动因素;VIP<0.8,表示自变量是因变量的不重要驱动因素[35].

区域生态安全水平受诸多因素影响,其中自然资源禀赋和社会经济因素是驱动其变化的关键因素[43].基于此,结合中原城市群实际情况并参考相关研究成果[28],本文以综合生态安全指数作为因变量(Y)来表征生态安全状态,从自然禀赋、城市规模、经济发展、社会消费和能源消耗方面共筛选 14 项因子作为自变量(表 2),应用 SIMCA−14.1 软件进行 PLS 分析.

表 1 基于生态足迹的生态安全相关指标计算公式、意义及分级标准

Table 1 Calculation formula, significance and classification criteria of ecological security related indicators based on EF

指数	计算公式	意义	生态安全等级划分标准		
			等级	数值范围	安全状态
EPI	$EPI=\frac{ef}{ec}$	EPI:生态压力指数,用来衡量区域生态环境的压力.EPI 越大表示区域安全越差.	Ⅰ	<0.5	很安全
			Ⅱ	0.5~0.8	较安全
			Ⅲ	0.8~1.0	轻度不安全
			Ⅳ	1.0~1.5	中度不安全
			Ⅴ	1.5~2.0	高度不安全
			Ⅵ	>2.0	极端不安全
EUE	$EUE=\frac{EF}{GDP}$	EUE:生态利用效率,反映单位经济产出消耗的生态足迹.EUE 越大,资源利用效率越低.	Ⅰ	<0.1	高效率
			Ⅱ	0.1~0.2	较高效率
			Ⅲ	0.2~0.4	中等效率
			Ⅳ	0.4~0.6	轻微低效率
			Ⅴ	0.6~1.0	非常低效率
			Ⅵ	>1.0	极端低效率
ECI	$ECI=\frac{EF+EC}{\sqrt{EF^2+EC^2}}$	ECI:生态协调指数,用于反映区域社会经济发展与生态环境之间的协调程度.ECI 在 1~1.414 的范围内.ECI 越接近 1,区域协调性就越差;越接近 1.414,区域协调性越好.	Ⅰ	1.0~1.15	极端不协调
			Ⅱ	1.15~1.2	高度不协调
			Ⅲ	1.2~1.25	中度不协调
			Ⅳ	1.25~1.3	轻度不协调
			Ⅴ	1.3~1.35	较协调
			Ⅵ	1.35~1.414	很协调
R_{flow}^{stock}	$R_{flow}^{stock}=\frac{EF-EF_{size}}{EF_{size}}=EF_{depth}-1$	R_{flow}^{stock}:存量流量利用比,表示存量资本领先于流量资本的程度. R_{flow}^{stock}越大,存量资本消耗越严重,区域可持续性越弱.	Ⅰ	<0.5	相对可持续
			Ⅱ	0.5~1.0	轻微可持续
			Ⅲ	1.0~2.0	轻微不可持续
			Ⅳ	2.0~4.0	中度不可持续
			Ⅴ	4.0~6.0	高度不可持续
			Ⅵ	>6.0	极端不可持续
EFDI	$EFDI=-\sum_{j=1}^{6}\left(p_j\times\ln p_j\right)$	EFDI:生态足迹多样性指数,反映区域不同土地利用类型的比例情况和生态足迹的分配情况.EFDI 越大,区域生态足迹分配越均衡.	Ⅰ	<0.4	极端不均衡
			Ⅱ	0.4~0.6	高度不均衡
			Ⅲ	0.6~0.8	中度不均衡
			Ⅳ	0.8~1.0	轻度不均衡
			Ⅴ	1.0~1.2	较均衡
			Ⅵ	>1.2	很均衡
IESI	$ESI=0.116\times EPI+0.310\times EUE+0.112\times ECI+0.127\times R_{flow}^{stock}+0.335\times EFDI$	IESI:综合生态安全指数,表示区域总体生态安全水平.IESI 越大,区域生态安全状况越差.	Ⅰ	<0.6	很安全
			Ⅱ	0.6~0.8	较安全
			Ⅲ	0.8~1.0	轻度不安全
			Ⅳ	1.0~1.4	中度不安全
			Ⅴ	1.4~1.8	高度不安全
			Ⅵ	>1.8	极端不安全

注:p_j为第j类土地利用类型的生态足迹在总生态足迹中所占的比例.

1.2.6 加权 Voronoi 图 基于扩展的城市断裂点理论,Voronoi 图成为地理空间区域划分的常用方法,包括常规和加权两种类型[44].常规 Voronoi 图以空间中给定的点为发生元,根据发生元的距离和其他条件的影响范围划分区域[45].加权 Voronoi 图是常规方法的扩展,打破了常规方法中把发生元的影响范围和重要性都视为同等规模(或相同权重)的思路,将发生元的强度和规模大小纳入模型之中,更能体现空间分割的实际意义和科学性.基于此,以每个城市综合生态安全指数的平方根为权重,构建基于加权 Voronoi 图的生态安全分区模型.计算公式如下:

$$V_n(P_i,\lambda_i)=\prod_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{I}\left\{P\left|\frac{d(P,P_i)}{\lambda_i}<\frac{d(P,P_j)}{\lambda_j}\right.\right\},(i=1,2,n) \tag{10}$$

$$d_A/d_B=\sqrt{\mathrm{IESI_A}/\mathrm{IESI_B}}\ \text{且}\ a_A/a_B=\sqrt{\mathrm{IESI_A}/\mathrm{IESI_B}} \tag{11}$$

式中:P_i 为二维欧氏空间中的点集;λ_i 为点的强度和规模大小(即权重);d_A、d_B 为断裂点到 A、B 城市的距离;$\mathrm{IESI_A}$、$\mathrm{IESI_B}$ 为 A、B 城市的综合生态安全指数;a_A、a_B 为 A、B 城市的影响范围(或影响力扩张速度).

表 2　生态安全驱动因素指标体系

Table 2　Indicator system of ecological security driving factors

目标层	指标层	自变量
自然禀赋	耕地面积(km^2)	X_1
	森林覆盖率(%)	X_2
城市规模	年末常住人口(万人)	X_3
	城镇化率(%)	X_4
	城市建成区面积(km^2)	X_5
经济发展	人均 GDP(元)	X_6
	第一产业产值占比(%)	X_7
	第二产业产值占比(%)	X_8
	第三产业产值占比(%)	X_9
社会消费	社会消费品零售总额(亿元)	X_{10}
	城镇居民人均可支配收入(元)	X_{11}
	农村居民人均可支配收入(元)	X_{12}
能源消耗	能源消费总量(万 t 标准煤)	X_{13}
	煤炭消费占比(%)	X_{14}

1.3　数据来源

本文主要选取 2010~2021 年中原城市群 30 个城市的生物资源生产、能源消耗、土地利用和社会经济数据.由于贸易数据不可得,在计算生态足迹时,本文使用农产品、动物产品、林产品和水产品的产量来代替消费量进行计算[46].生物资源生产、能源消耗和社会经济数据来源于各省、市《国民经济和社会发展统计公报》、《统计年鉴》以及《中国城市统计年鉴》、《中国农村统计年鉴》.生态足迹中均衡因子和产量因子来源于刘某承等人[47].土地利用数据来源于武汉大学杨杰和黄昕教授[48]在谷歌地球引擎(GEE)平台上发布的中国土地覆盖数据,空间分辨率为 30m×30m.根据本文需求,将其整合归纳为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地六大类土地类型.

2　结果与分析

2.1　中原城市群生态足迹和生态承载力

2.1.1　人均生态足迹、生态承载力和生态赤字时间变化　2010~2021 年中原城市群一直处于生态赤字状态,人均生态足迹是人均生态承载力的 2.61 倍,这表明区域资源消耗速率远超出自然资本产出,生态安全状况不容乐观(图 1).人均生态足迹分布在 0.998~1.127hm^2/人之间,总体呈波动上升趋势,增幅为 11.27%.人均生态承载力相对稳定在 0.400~0.417hm^2/人之间,总体呈下降趋势,降幅为 2.96%.2010~2021 年人均生态赤字变化趋势与人均生态足迹基本一致,分布在 0.581~0.718hm^2/人之间,增幅为 21.48%,可以看出生态足迹增加是生态赤字增加的主要原因.

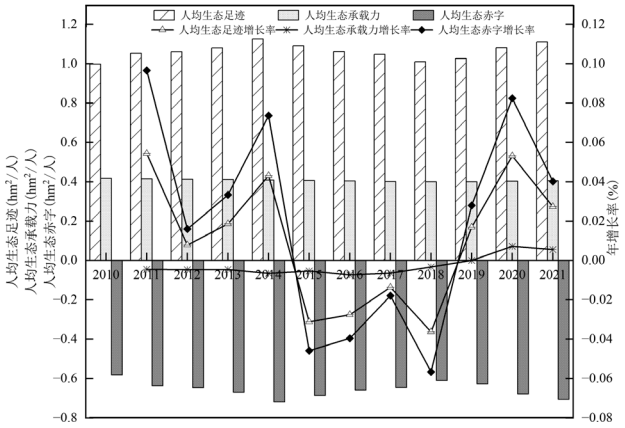


图 1　2010~2021 年中原城市群人均生态足迹、生态承载力和生态赤字时间变化

Fig.1　Temporal changes of ef, ec, ed in CPUA from 2010 to 2021

2.1.2　人均生态足迹、生态承载力和生态赤字空间变化　中原城市群大多数城市都表现为人均生态足迹增加、人均生态承载力减少和人均生态赤字扩大,且在空间分布上具有较大差异(图 2).人均生态足迹总体呈西北部偏高、中部南部偏低的分布状态,东南部个别城市(如淮北)人均生态足迹也较高.长治和晋城人均生态足迹增长尤其迅速,分别由 2010 年的 1.883 和 1.086hm^2/人增长到 2021 年的 5.425 和 8.218hm^2/人,这与两地化石能源消耗量快速增长有关(增幅分别为 194.48%和 778.25%).中部和北部个别城市(如郑州、洛阳、焦作、安阳)人均生态足迹呈下降趋势,这可能是由于这些城市产业结构调整、

重工业外迁等原因.人均生态承载力总体呈西高东低的分布状态,南部个别城市(如信阳、驻马店)人均生态承载力也处于较高水平.这主要是由于西部和南部地区山地面积较大,森林覆盖率高,且人口相对其他地区较少.除郑州外,中原城市群大多数城市人均生态承载力均较为稳定.而郑州作为河南省省会城市、国家中心城市,研究期内其人口增长 47.11%,大大拉低了人均生态承载力(降幅为 31.63%).人均生态赤字总体呈北高南低的分布状态.2010 年和 2021 年,信阳是唯一一个处于生态盈余的城市.这主要是由于信阳位于桐柏-大别山生态屏障区,严格的资源环境政策促进了区域生态文明建设.由于大多数城市人均生态承载力较为稳定,因此人均生态赤字和人均生态足迹的时空变化较为一致.

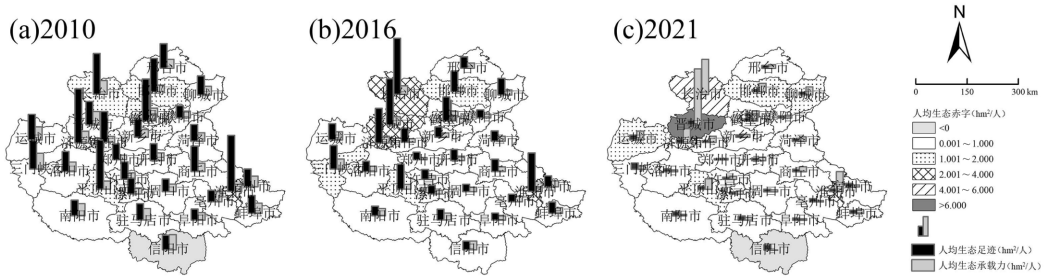


图 2 2010~2021 年中原城市群人均生态足迹、生态承载力和生态赤字空间变化

Fig.2 Spatial changes of ef, ec and ed in CPUA from 2010 to 2021

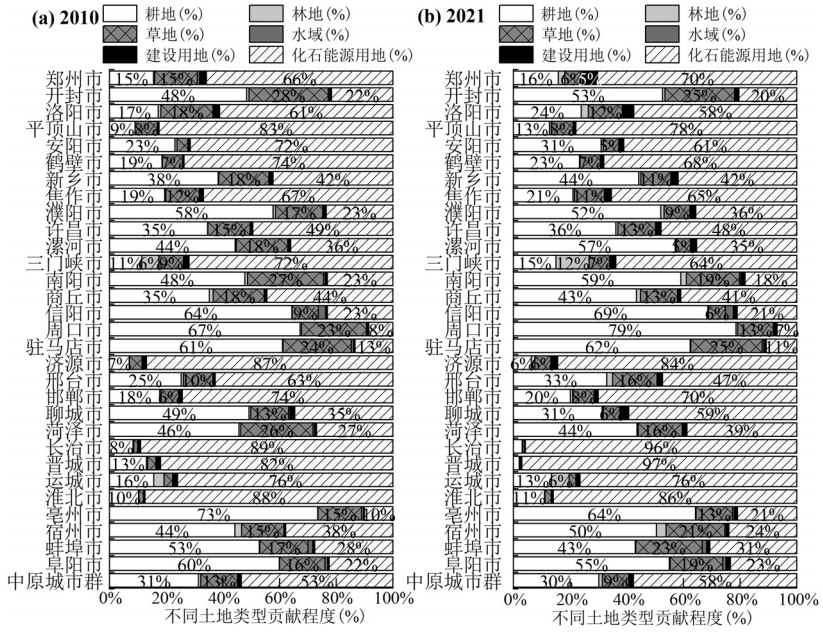


图 3 中原城市群生态足迹构成分析

Fig.3 Composition analysis of EF in CPUA

2.1.3 生态足迹构成分析 中原城市群不同土地类型对生态足迹的平均贡献程度差异较大(图 3),排序为:化石能源用地(55.64%)>耕地(30.62%)>草地(11.12%)>建设用地(1.13%)>林地(1.08%)>水域(0.41%).具体来看,化石能源用地生态足迹贡献率由 2010 年的 53.44%增加到 2021 年的 57.59%,且是生态足迹增长的最大贡献者,占增长总量的 84.96%.化石能源用地生态足迹贡献率过半的城市大多为资源型城市(如平顶山、鹤壁、邢台、邯郸、长治、晋城、运城、淮北)和工业型城市(如安阳、济源),大量化石能源的消耗导致化石能源用地生态足迹居高不下.除化石能源用地外,耕地是生态足迹贡献次高的土地类型(平均贡献率为 30.62%).这是由于中原城市群是全国重要粮食生产基地,大多数城市

位于适宜发展农业的平原地区,耕地面积广阔.周口、亳州、信阳、驻马店耕地生态足迹平均贡献率分别为 74.60%、66.63%、65.18%、62.20%,这表明农业生产仍是这些城市重要的自然资源利用方式.其他土地类型中,林地生态足迹占比由 0.79%上升到 1.23%,这可能是由于近些年来林地面积增加导致林产品产量上升、林地生态足迹占比增大.建设用地生态足迹占比有所上升(从 0.95%到 1.38%),草地生态足迹占比有所下降(从 12.98%到 9.35%).这与人口增长和城镇化发展、建设用地需求持续增加、城市建设不断侵占草地面积有关.相比 2010 年,2021 年草地面积减少了 25.71%,草地生态足迹占比随着草地向建设用地转化而有所下降.水域面积增长了 7.15%,水域生态足迹占比下降主要是由于水产品产量减少.

2.2　中原城市群生态足迹广度和生态足迹深度

2.2.1　人均生态足迹广度和生态足迹深度时间变化　2010~2021 年中原城市群人均生态足迹广度变化不大,相对稳定,生态足迹深度呈上升趋势(图 4).具体来看,人均生态足迹广度分布在 0.289~0.300hm^2/人之间,生态足迹深度分布在 2.595~2.928 之间.这表明中原城市群对自然资本流量的占用处于相对稳定状态,而对自然资本存量的消耗不断增加,生态压力不断增大.从城市层面来看,人均生态足迹广度和生态足迹深度差异性显著.驻马店、信阳、南阳、蚌埠、亳州、宿州等城市人均生态足迹广度较大,均值分别为 0.466、0.448、0.411、0.398、0.381、0.372hm^2/人,远高于中原城市群平均值(0.296hm^2/人),说明这些城市自然资源利用水平较高.郑州是人均生态足迹广度最小且降幅最大的城市,均值仅为 0.105hm^2/人,降幅为 44.88%.这主要是由于郑州人口稠密且自然资源相对匮乏.淮北是平均生态足迹深度最高的城市,均值为 9.077,是中原城市群均值(2.786)的 3.26 倍.这主要是由于淮北是我国重要的能源基地,长期大量的化石能源使用使得自然资本存量过度消耗.晋城和长治生态足迹深度增长速度最快,研究期内增幅分别为 430.39%和 127.46%.2021 年,晋城的生态足迹深度达到了中原城市群最高值 13.067,表明晋城 1a 的消耗需要 13.067a 的自然资本积累.整体来看,人均生态足迹广度较高的城市生态足迹深度较低,这表明较高的自然资本流量占用一定程度上缓解了自然资本存量消耗.

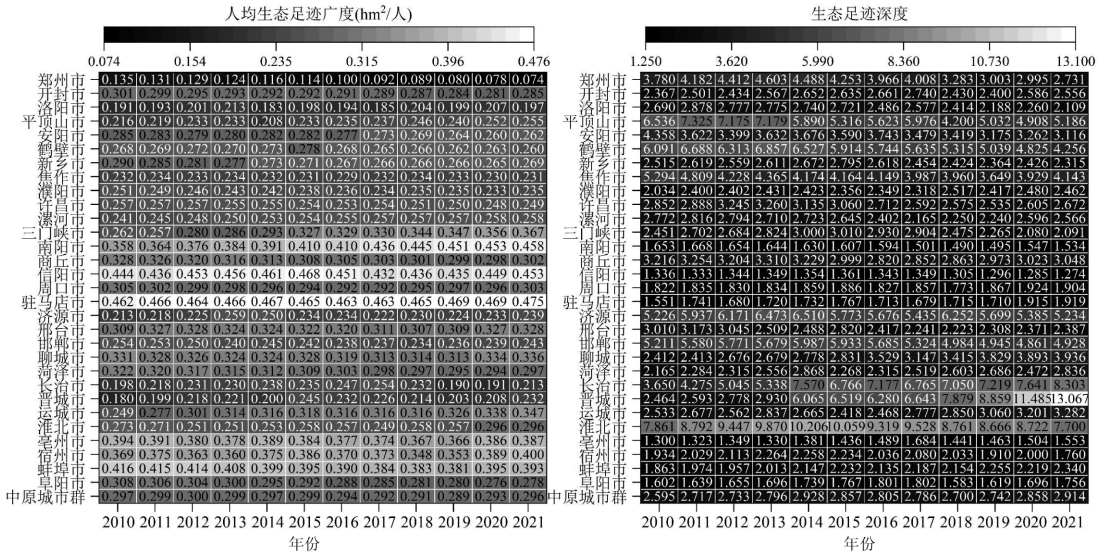


图 4　2010~2021 年中原城市群人均生态足迹广度和生态足迹深度时间变化

Fig.4　Temporal changes of EF_{size} and EF_{depth} in CPUA from 2010 to 2021

2.2.2　人均生态足迹广度和生态足迹深度空间变化　从空间分布来看,中原侧灰姑娘是去年人均生态足迹广度呈四周高、中间低的分布状态,高值区集中在南部,生态足迹深度呈北高南低的分布状态,高值区集中在北部(图 5).这说明南部地区自然资本流量占用率高,对存量资本的消耗较少,整体生态可持续性较好.研究期内,人均生态足迹广度高值区(>0.300hm^2/人)数量减少,中值区(0.200~0.300hm^2/人)

和低值区(<0.100hm^2/人)数量增加.其中,郑州的降幅尤其明显,为 44.88%.西部的运城、三门峡、南阳等城市人均生态足迹广度有所增加,东部的开封、菏泽、阜阳、蚌埠等城市明显减小.2010~2021 年中原城市群大多城市的生态足迹深度呈上升趋势.高值区(>8.000)较为分散,北部、中部和东部均有分布,北部城市的生态足迹深度增长速度较快.低值区(1.200~2.000)集中分布在南部且数量有所减少.中原城市群各城市生态足迹深度均大于 1,都需要消耗自然资本存量来满足社会经济发展.特别是长治和晋城的生态足迹深度向更高等级变动,表明对自然资本存量的消耗程度进一步加剧.

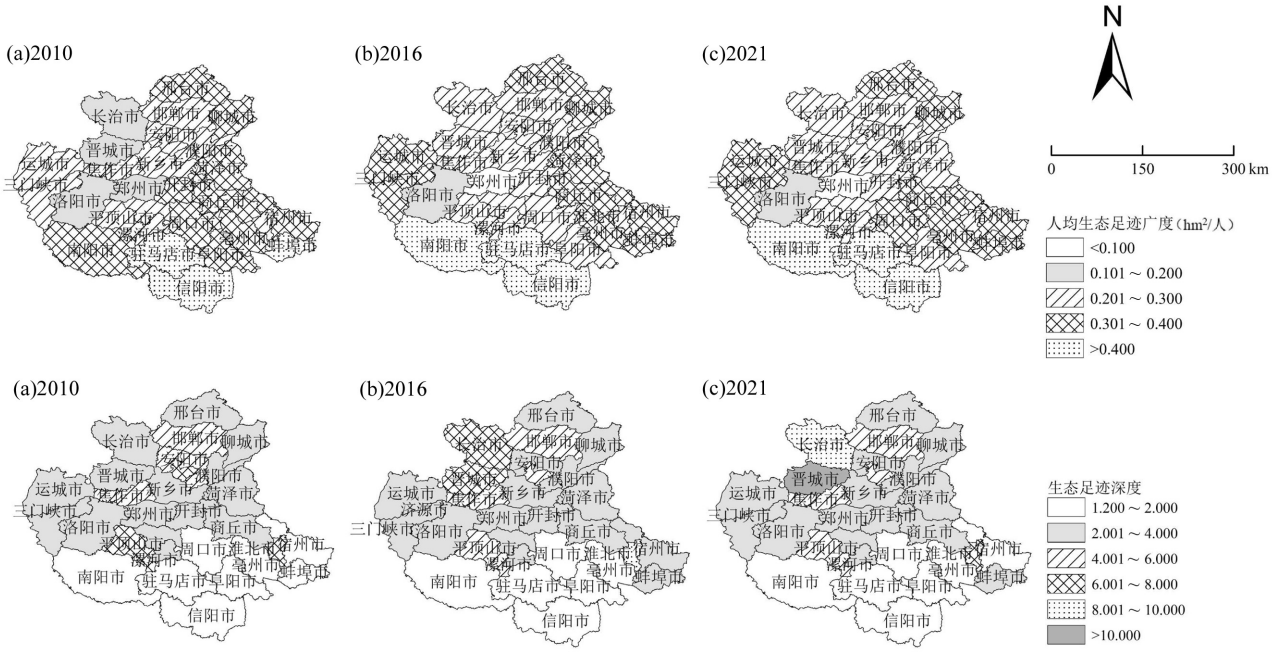


图 5 2010~2021 年中原城市群人均生态足迹广度和生态足迹深度空间变化

Fig.5 Spatial changes of EF_{size} and EF_{depth} in CPUA from 2010~2021

2.2.3 中原城市群自然资本利用格局分析 分别以人均生态足迹广度和生态足迹深度为横、纵坐标,以中原城市群 2010、2016、2021 年的人均生态足迹广度和生态足迹深度为参考线,将 30 个城市自然资本利用状况分为四类,用来反映中原城市群自然资本利用格局(图 6).其中,Ⅰ类城市:人均生态足迹广度和生态足迹深度均较大,自然资本流量占用和存量消耗程度均较高,生态持续性较弱;Ⅱ类城市:人均生态足迹广度较小、生态足迹深度较大,自然资本流量占用低,自然资本存量消耗严重,生态持续性最弱;Ⅲ类城市:人均生态足迹广度和生态足迹深度均较小,自然资本流量占用和存量消耗程度均较低,生态持续性较强;Ⅳ类城市:人均生态足迹广度较大、生态足迹深度较小,自然资本流量占用高,自然资本存量消耗程度较低,生态持续性最强.

从图 6 可以看出,中原城市群大多数城市为Ⅱ、Ⅳ类城市,说明各城市自然资本利用差异较大.部分城市自然资本利用类型变化频繁,说明这些城市资本利用水平不稳定.商丘一直为Ⅰ类城市,但其自然资本流量占用水平呈降低趋势;聊城在 2016 年由Ⅳ类城市变为Ⅰ类城市,生态足迹深度快速增长,自然资本存量消耗速度加快;运城经历两次变化,从Ⅲ类变为Ⅳ类,又变为Ⅰ类,其自然资本流量占用增加也没有减缓自然资本存量的消耗;淮北在 2021 年由Ⅱ类城市变为Ⅰ类城市,其生态足迹深度依然高居不下,但人均生态足迹广度有少量增长.平顶山、安阳、鹤壁、焦作、济源、邯郸、长治等城市一直为Ⅱ类城市,这类城市一般人口密度较高,较低的人均生态足迹广度不足以维持地区可持续发展,且多个城市为资源型城市,其经济发展高度依赖自然资本,自然资本存量消耗严重;晋城在 2016 年由Ⅲ类城市变为Ⅱ类城市,且其生态足迹深度在 2021 年增加至中原城市群最高,生态可持续性持续减弱.仅新乡、濮阳一直为Ⅲ类城市,但许多城市后来转变为Ⅲ类.开封

和阜阳在 2016 年由Ⅳ类城市变为Ⅲ类城市,说明当地的自然资本流量占用减少.洛阳、许昌和漯河在 2016 年由Ⅱ类变为Ⅲ类,郑州在 2021 年由Ⅱ类变为Ⅲ类,这些城市本就处于参考线附近,自然资本存量消耗程度降低后自然资本利用类型就有所变化.一直为Ⅳ类城市的有南阳、信阳、驻马店、菏泽、亳州、宿州、蚌埠等,多位于中原城市群南部,资源较为富足,较高的自然资本流量占用程度减缓了自然资本存量的消耗.周口 2010 年为Ⅳ类城市,2016 年变为Ⅲ类城市,后在 2021 年又变为Ⅳ类城市,其自然资本流量占用水平与存量消耗水平均较为稳定,但由于其人均生态足迹广度处于参考线附近,微小的变化也能造成城市类型的变动.三门峡和邢台均由其他类型变为Ⅳ类城市,从其变化轨迹可以看出,自然资本流量占用程度的提升是其自然资本利用类型变化的主要原因.

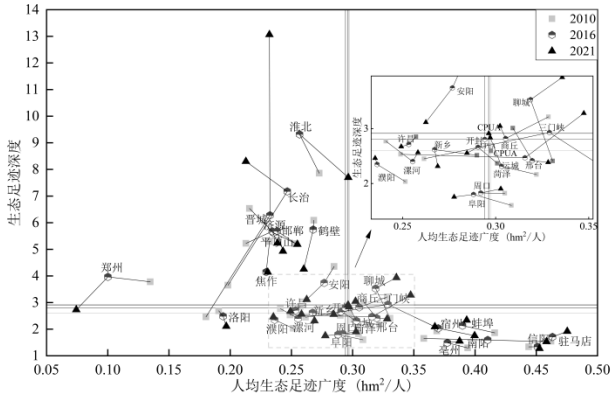


图 6　2010~2021 年中原城市群人均生态足迹广度和生态足迹深度象限分布图

Fig.6　Quadrant distribution of EF_{size} and EF_{depth} in CPUA from 2010 to 2021

2.3　中原城市群生态安全评价

2.3.1　单一生态安全指标时间变化　2010~2021 年中原城市群生态压力指数总体呈上升趋势,且数值均大于 2,处于“极端不安全”状态,说明中原城市群整体生态压力不断增大,生态安全形势严峻(图 7(a)).大多数城市生态压力指数分布在 2~4 之间,且年际变化不大,多分布在中东部地区.信阳是生态压力指数最小的城市,其值分布在 0.927~1.047 之间,淮北是生态压力指数最大的城市,其值分布在 7.521~9.974 之间,后者均值为前者的 9.07 倍.长治和晋城是生态压力指数增长幅度较大的城市,研究期内分别增长了 156.63%和 607.55%,主要由两个城市生态足迹快速增长造成.

2010~2021 年中原城市群万元GDP生态足迹下降趋势明显,由 0.454hm^2/万元下降到 0.205hm^2/万元,总体逼近“较高效率”等级(图 7(b)).这表明随着经济社会高速发展,区域资源消耗水平不断加大,但由于科学技术、规模效益和管理水平的不断提升,资源利用效率显著提高.只有聊城、长治和晋城的万元 GDP 生态足迹呈上升趋势,说明这些城市生态足迹增长速度要大于经济增长速度,消耗的资源没有创造出与其匹配的经济价值.

2010~2021 年中原城市群生态协调指数呈小幅下降趋势,由 1.308(“较协调”状态)下降至 1.282(“轻度不协调”状态),总体降幅 2.01%(图 7(c)).这表明生态环境与社会经济发展之间的协调程度有所减弱.研究期内,各城市的生态经济协调程度差异较大.17 个城市生态协调指数均值大于 1.300,处于“较协调”状态.其中,南阳、信阳、周口、驻马店、亳州、宿州、阜阳生态协调指数均值大于 1.350,处于"很协调"状态.具体来看,信阳生态协调指数分布在 1.413~1.414 之间,均值为 1.414,表明生态经济协调程度最好.淮北生态协调指数分布在 1.095~1.123 之间,均值为 1.106,表明生态经济协调程度最差.

存量流量利用比可以反映区域生态可持续性和自然资本存量流量结构变化.2010~2021 年中原城市群存量流量利用比分布在 1.595~1.928 之间(“轻微不可持续”状态),总体呈上升趋势(图 7(d)).但大多数城市存量流量利用比呈下降趋势.这主要是由于长治、晋城等城市存量流量利用比增长过快,影响城市群整体可持续性.具体来看,淮北(8.077)、晋城(5.463)、长治(5.400)、平顶山(4.862)、济源(4.814)、鹤壁(4.767)和邯郸(4.407)是存量流量利用比较高的地区(均值>4.000),处于“高度不可持续”状态,这些城市的自然资本存量消耗严重,生态可持续性弱,生态安全面临严重威胁.

2010~2021 年中原城市群生态足迹多样性指数分布在 1.033~1.069 之间,总体呈下降趋势(降幅为 3.27%),这表明各种自然资源的利用与分配有向“不均衡”状态发展的趋势(图 7(e)).其中,15 个城市的生态足迹多样性指数大于 1.000,达到生态足迹分配

“较均衡”状态.长治(0.302)、晋城(0.373)、淮北(0.426)和济源(0.552)是仅有的生态足迹多样性指数较低的地区(均值<0.600),这可能与区域自然资源利用严重失衡有关.这些城市均为资源型城市或工业型城市,化石能源用地生态足迹能贡献率达 80%左右,生态足迹和自然资源分配极不均衡.

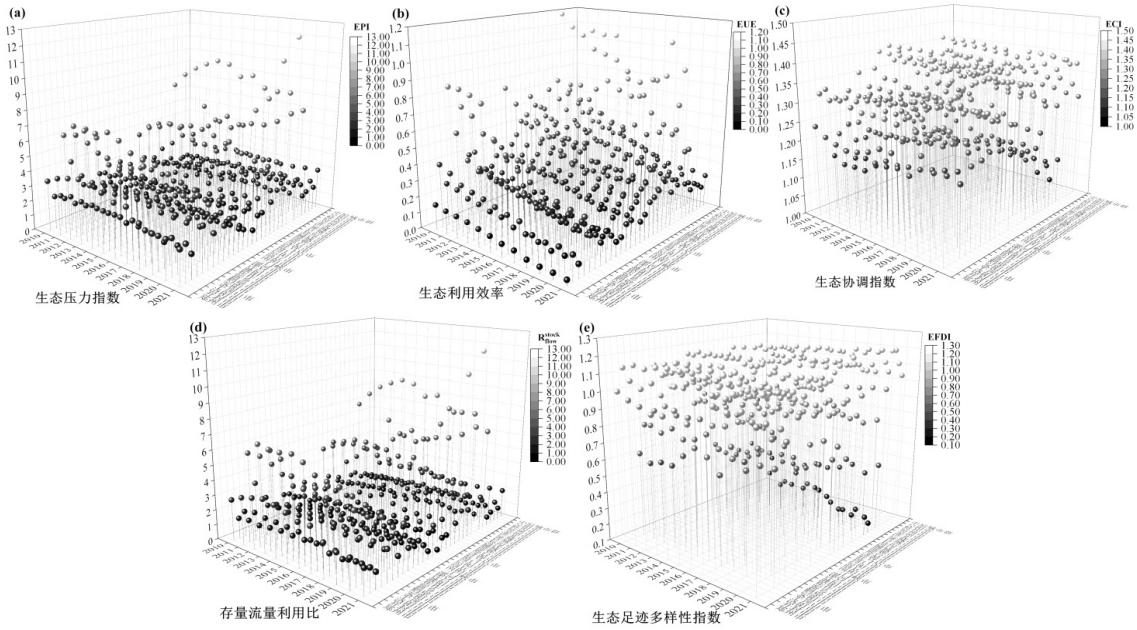


图 7 2010~2021 年中原城市群单一生态安全指标时间变化

Fig.7 Temporal changes of single ecological security indicator in CPUA from 2010 to 2021

2.3.2 综合生态安全指数分析 利用熵权法求得每个单一指标的权重,进一步构建综合生态安全指数,对中原城市群生态安全状况进行评价(图 8).2010~2021 年中原城市群综合生态安全指数分布在 1.071~1.165 之间,总体呈波动下降趋势(降幅为 0.89%),生态安全状况略有改善,但仍处于“中度不安全”状态.研究期内,信阳(0.707)、亳州(0.764)、周口(0.791)是综合生态安全指数较小的城市(均值<0.800),总体处于“较安全”状态.这些城市农业资源丰富、第一产业占比较高,在国家农业绿色发展和当地耕地生态承载力约束条件下,农业资源开发利用合理,加上化石能源用地生态足迹较小,生态安全状况整体较好.淮北(2.571)、长治(1.846)、晋城(1.837)是综合生态安全指数较大的城市(均值>1.800),总体处于“极端不安全”状态.这些城市煤炭资源富集、相关产业能耗高、经济发展方式较为粗放,资源消耗累积导致其生态安全状况整体较差.通过对比可以发现,大多数城市综合生态安全指数的变化趋势与生态足迹和生态足迹深度基本一致.具体来看,17 个城市的综合生态安全指数、生态足迹和生态足迹深度同时呈下降趋势,8 个城市的综合生态安全指数、生态足迹和生态足迹深度同时呈增长趋势.除此之外,开封、周口、驻马店、济源和阜阳 5 个城市生态足迹和生态足迹深度呈增长趋势,但其综合生态安全指数却呈下降趋势.这可能是由于生态利用效率在综合生态安全指数中所占权重较大,生态利用效率的提升对生态安全状况的改善作用显著.

2.3.3 生态安全空间变化 中原城市群 30 个城市单一生态安全指标和综合生态安全指数空间分布具有显著的差异性(图 9).生态压力指数呈北高南低的分布状态,且高值区低值区之间的差距持续扩大.这主要是由于长治和晋城的经济发展愈发依赖资源能源、生态足迹与生态承载力差距日益扩大,进而导致生态压力指数不断提高.2010 年,中原城市群除郑州外的大多数城市万元 GDP 生态足迹均较高,资源利用效率整体较低,粗放型生产方式带来的经济效益不高.2021 年,除晋城(0.940)、长治(0.740)、淮北(0.438)和运城(0.435)的万元 GDP 生态足迹较高外,其他城市万元 GDP 生态足迹均低于 0.400hm^2,处于"中等效率"及以上水平,生态利用效率大大提高,具有较好的经济发展潜力.生态协调指数呈南高北低的分布状态,低值区主要为几个典型的资源型

城市和工业型城市,自然资源的大量开采使用导致供需不平衡,高值区主要为南部生态条件较好的几个城市.存量流量利用比呈北高南低分布状态,但高值区增加、低值区减少,表明中原城市群的生态可持续性并不乐观.生态足迹多样性指数高值区和低值区分布较为分散,前者相对集中在中东部地区,后者相对集中在西北部地区.两者数量均呈增长趋势,说明地区间生态足迹分配情况的差异性扩大.通过单一指标的空间分析,不难得出综合生态安全指数呈北高南低的空间分布状态.综合生态安全指数高值区和低值区的数量基本维持不变,但数值上表现出高值区更高、低值区更低的变化趋势.高值区城市需要重点关注区域生态安全状况,采取措施从多方面保护和恢复生态环境,提高生态可持续发展能力.

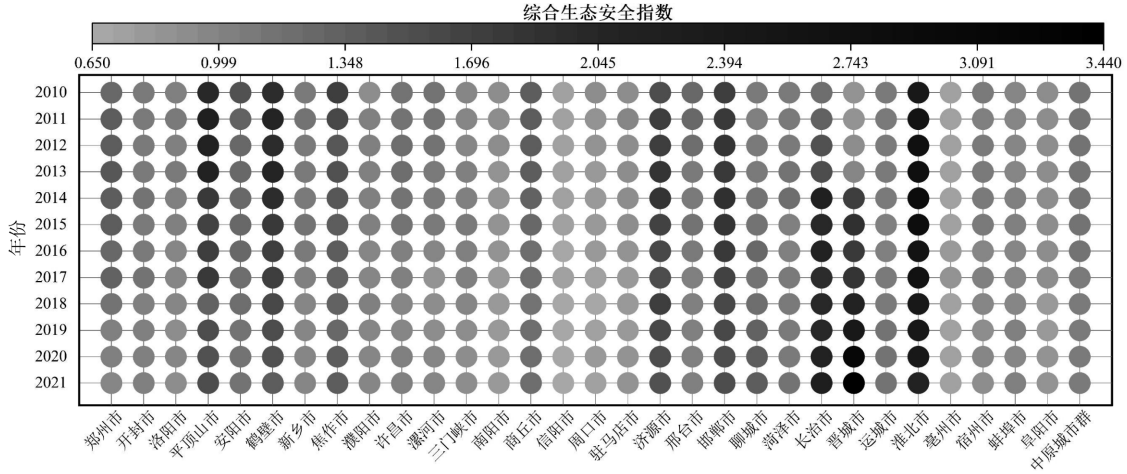


图 8　2010~2021 年中原城市群综合生态安全指数时间变化

Fig.8　Temporal changes of IESI in CPUA from 2010 to 2021

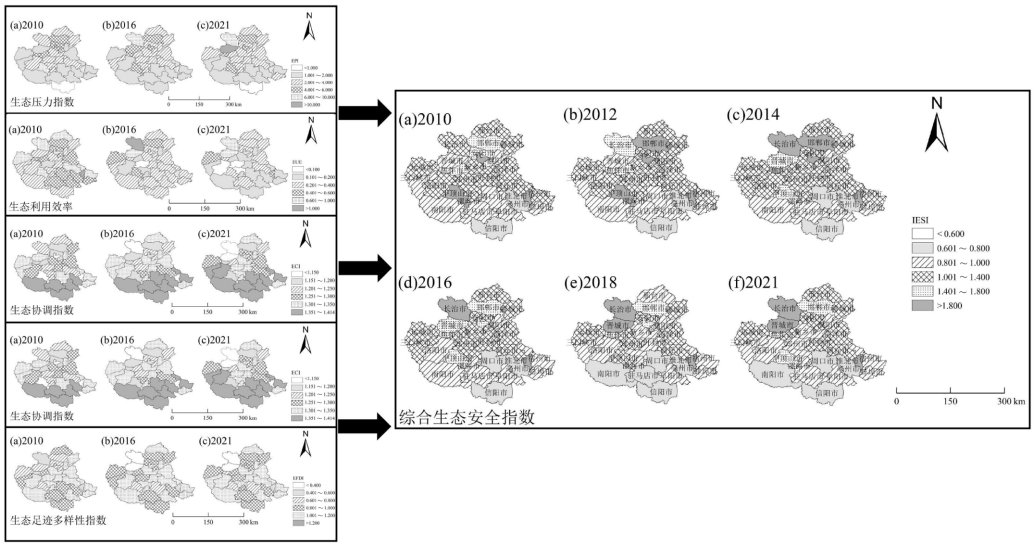


图 9　2010~2021 年中原城市群生态安全空间变化

Fig.9　Spatial changes of ecological security in CPUA from 2010 to 2021

2.4　中原城市群生态安全分区

2.4.1　**中心城市选择**　开展中原城市群生态安全分区,首先需确定各个区域的中心城市.利用 ArcGIS 软件提取各个城市的质心,在点要素图中代表各城市.采用 Delaunay 三角剖分邻域关系的空间约束,并基于 2010 年、2012 年、2014 年、2016 年、2018 年和 2021 年中原城市群生态安全评价结果对 30 个城市进行空间聚类,划分为 5 类城市(图 10(a)).由于部分分组空间跨度较大,且分区考虑因素不够全面,为了使空间聚类结果更加合理,在第一次空间聚类

的基础上进行第二次空间聚类,并考虑社会、经济、环境等因素进行人工调整,得到第二次空间聚类结果(图 10(b)).根据最终空间聚类结果将中原城市群分成 5 类城市组团,选取 I~V 类城市组团中综合实力较强的城市作为其分组的中心城市,分别为洛阳、安阳、郑州、菏泽和周口(表 3).

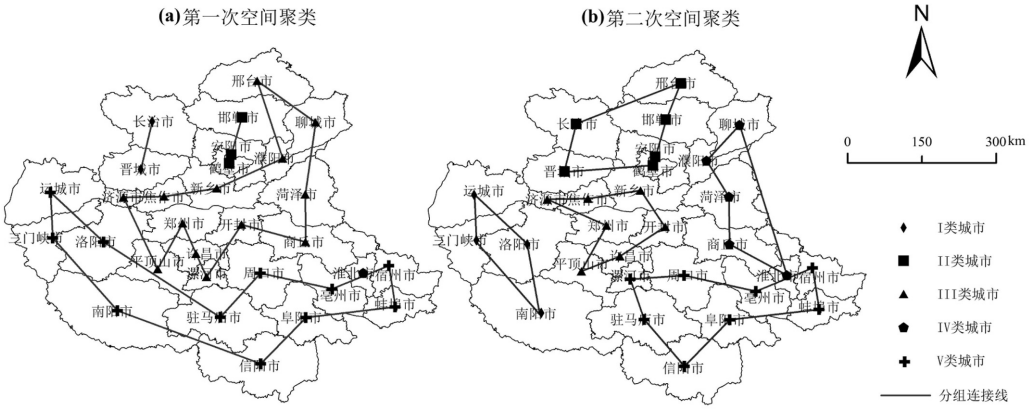


图 10 中原城市群空间聚类结果

Fig.10 Spatial clustering results of CPUA

表 3 城市分组与中心城市选择

Table 3 City grouping and selection of central cities

城市类型	城市	中心城市
Ⅰ	洛阳,南阳,三门峡,运城	洛阳
Ⅱ	安阳,长治,邯郸,鹤壁,晋城,邢台	安阳
Ⅲ	开封,平顶山,焦作,济源,新乡,许昌,郑州	郑州
Ⅳ	菏泽,淮北,聊城,濮阳,商丘	菏泽
Ⅴ	蚌埠,亳州,阜阳,漯河,宿州,信阳,周口,驻马店	周口

2.4.2 基于加权 Voronoi 图的生态安全分区 基于确定的 5 个中心城市,以其 2010 年、2012 年、2014 年、2016 年、2018 年和 2021 年综合生态安全评价结果均值的平方根为权重,在 ArcGIS 中绘制加权 Voronoi 图,确定 5 个中心城市 IESI 的理论影响界线(图 11(a)).其中,中部和东部区域多个城市被理论边界分割,需结合行政区划、区域发展战略及定位等进一步调整完善(图 11(b)).

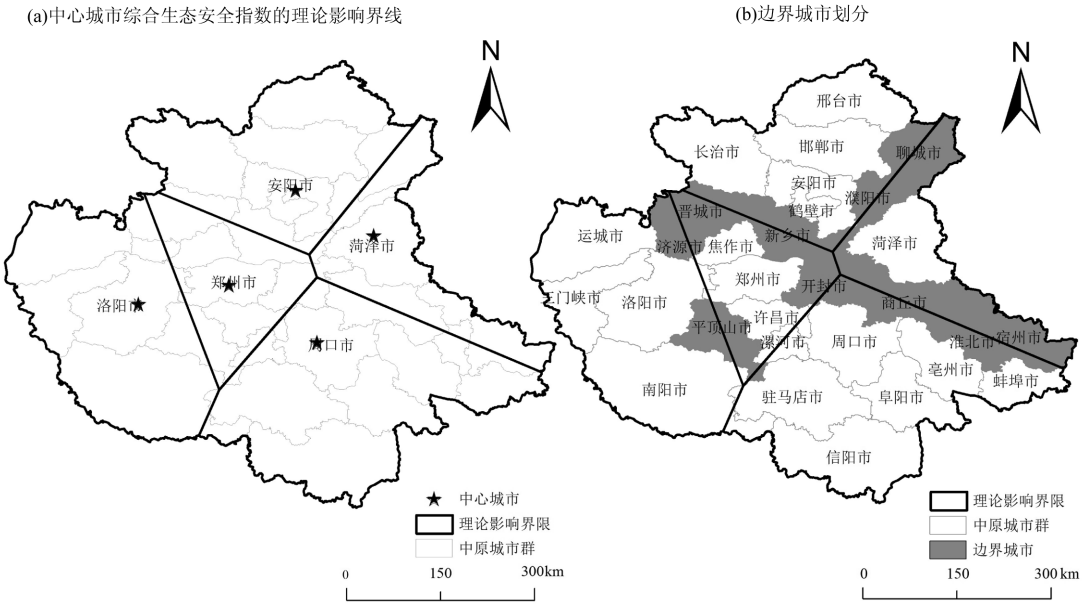


图 11 中原城市群综合生态安全指数加权 Voronoi 图

Fig.11 Weighted Voronoi diagrams of IESI in CPUA

《中原城市群发展规划》、《促进中部崛起“十三五”规划》、《河南省国土空间规划(2021-2035

年)》、《郑州都市圈国土空间规划(2022−2035 年)》等各级各类战略规划的获批和实施对中原城市群空间资源配置和区域功能划定具有深刻影响.因此,本文在进行生态安全分区时考虑相关规划部署,顺应政府统筹管理,推进中原城市群现代化生态治理.其中,开封、平顶山、新乡、济源 4 个边界城市作为郑州都市圈的一部分,区域内各城市产业体系分工协作、生态环境共保联治,和郑州、焦作、许昌一并划入中部核心发展区.洛阳、三门峡、南阳、运城生态安全水平相近,且同属伏牛山国家生态安全保障区,区域内资源较为丰富,划为西部转型发展区.晋城作为资源型城市,和安阳、鹤壁、邢台、邯郸、长治一样,化石能源消耗量大,产业结构不合理,生态环境态势严峻,一并划入北部优化发展区.聊城、濮阳、商丘、淮北、宿州和菏泽位于中原城市群东部,均属于粮食生产区.除淮北综合生态安全指数过高外,其他城市综合生态安全指数基本处于同一水平,区域发展受制于耕地和永久基本农田保护红线,因此一并划为东部保护发展区.其余南部城市,漯河、周口、驻马店、信阳、阜阳、亳州、蚌埠依托桐柏−大别山生态屏障,生态环境良好,是生态安全水平最高的区域.该区域应合理开发利用资源,推进产业绿色转型,因此划为南部绿色发展区.如图 12 所示.

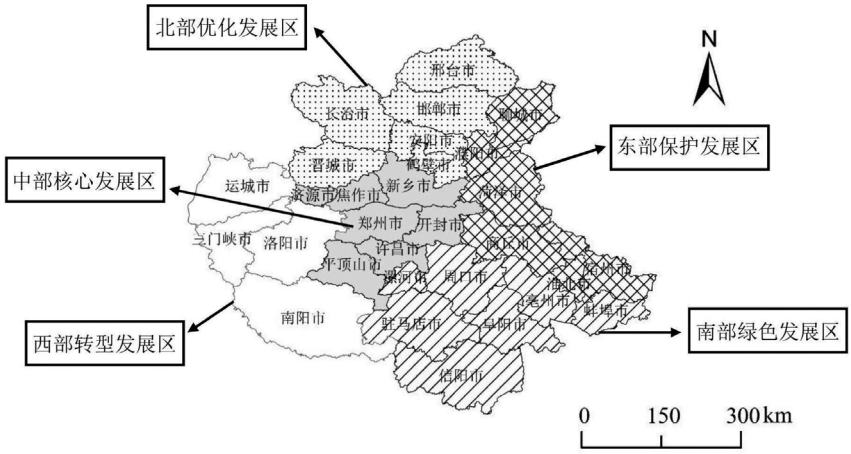


图 12　中原城市群生态安全分区

Fig.12　Zoning of ecological security in CPUA

2.5　驱动因素

为定量研究不同分区生态安全的驱动因素,为中原城市群生态环境治理及自然资源合理利用提供科学依据,本文从自然禀赋、城市规模、经济发展、社会消费和能源消耗等方面选择了 14 个指标(X_1~X_{14})作为自变量,将综合生态安全指数作为因变量,构建 PLS 模型.由 PLS 模型回归精度可知(表 4),中原城市群 5 个分区的 PLS 模型提取的有效成分对 X 和 Y 的解释能力均较强且各成分累计交叉有效性较高,表明模型拟合度较高,可靠性较强.特异点识别结果显示各地区样本点均位于特异点识别的椭圆图内部,表明选取的样本质量较高,达到建模要求.为进一步探析各项指标与区域生态安全的相关性和影响程度,利用 SIMCA−14.1 软件计算得到各指标的回归系数和 VIP 值(图 13).

表 4　中原城市群各分区 PLS 模型精度

Table 4　Accuracy of PLS models for each zone in CPUA

区域	有效成分	R_{2x}	R_{2y}	Q^2
中部核心发展区	3	0.984	0.986	0.961
西部转型发展区	3	0.956	0.969	0.889
北部优化发展区	3	0.968	0.984	0.969
东部保护发展区	3	0.976	0.948	0.905
南部绿色发展区	2	0.849	0.833	0.728

PLS 模型回归结果表明,14 项驱动因子对区域生态安全有不同程度影响,甚至同一指标在不同区域的影响差异悬殊.这表明区域生态安全状况往往是由多种因素综合作用的结果,分区域进行影响因素分析是区域间社会经济状况与资源环境差异的必然要求.总体来看,仅第一产业产值占比(X_7)、能源消费总量(X_{13})的回归系数为正值,说明中原城市群 5 个分区这两项指标均与综合生态安全指数呈正相关关

系.且西部转型发展区、北部优化发展区和南部绿色发展区第一产业产值占比(X_7)的 VIP 均大于 1,除南部绿色发展区外其他地区能源消费总量(X_{13})的 VIP 大于 1,是这些地区生态安全极重要的驱动因素.这是由于第一产业中耕地、林地、草地、水域等生物生产性土地产生的生物生态足迹与能源消费产生的能源生态足迹是生态足迹的主要贡献者,对大多数地区的生态安全具有较大影响.煤炭消费占比(X_{14})同理,在中部核心发展区、西部转型发展区和北部优化发展区等工业较为发达的地区,煤炭消费占比(X_{14})是极重要的正向驱动因素,在东部保护发展区为不重要的正向驱动因素,在南部绿色发展区为不重要的负向驱动因素.这是由于南部绿色发展区能源生态足迹占总生态足迹的比值不足 20%,远低于其他地区(>50%),对区域生态安全状况影响较小.在中部核心发展区,城市建成区面积(X_5)也是极重要的负向驱动因素,这是由于城市建设与产业集聚将人们的生产生活向城市集中,提高了生态资源的集约利用水平.在北部优化发展区,年末常住人口(X_3)是除第一产业产值占比(X_7)、能源消费总量(X_{13})、煤炭消费占比(X_{14})外极重要的驱动因素,并且其回归系数为负值,这是由于人口聚集对自然资源利用产生规模效应从而促进区域生态安全状况向好.南部绿色发展区 VIP 大于 1 的指标较多.其中,耕地面积(X_1)是极重要的正向驱动因素,耕地面积越大,生产的农作物就越多,与第一产业产值占比(X_7)一样,对区域生态安全具有较大的负面影响.城市规模目标层中的 3 个指标(X_3、X_4、X_5)均为极重要的负向驱动指标,这表明在南部绿色发展区城镇化与人口聚集产生的生态利好比其他地区更加显著.人均 GDP(X_6)与第三产业产值占比(X_9)是极重要的负向驱动因素.如前文分析,万元 GDP 生态足迹逐渐降低,资源利用效率增长速度高于生态安全恶化速度,这一点在除北部优化发展区外的其他地区均一致.第三产业与第一、第二产业相比,其发展对资源与能源的需求较小,其在产业结构中越来越高的占比能够改善区域生态安全状况.社会消费目标层中的 3 个指标(X_{10}、X_{11}、X_{12})均为极重要的负向驱动指标,这可能是由于该区域经济发展弱于其他地区,且影响收入的不确定因素较多,居民预防性储蓄动机较强,消费意愿较低[49].

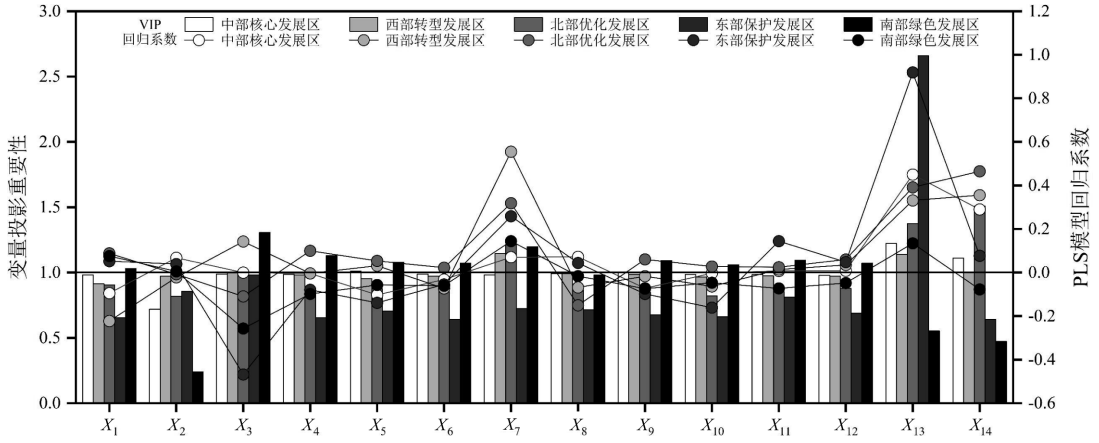


图 13 中原城市群不同分区影响因素的 VIP 和回归系数

Fig.13 VIP and regression coefficients of driving factors for different zones in CPUA

3 讨论

本文采用改进后的三维生态足迹模型,分析了人类活动对自然资本流量和存量的实际占用程度.与传统二维生态足迹相比,消除了不同土地类型之间生态赤字与生态盈余相互抵消的可能性,提高了测算结果的可靠性和适用性[1].同时,采用全国平均产量和中国本地化参数避免了传统研究采用基于全球公顷参数的局限性[8].在国家以下尺度应用全球公顷会掩盖区域生产力差异,无法准确量化自然资本消耗.通过采用本地化参数更准确地量化中原城市群生态足迹,进而得到更为准确的生态安全评价结果.最后,通过加权 Voronoi 图,基于各城市地理位置和综合生态安全指数水平相似性对中原城市群进行生态分区,并结合行政区划、区域发展战略及功能定位等一系列因素进行优化调整,使得分区调

控更有针对性.

为促进地区生态与经济协调发展,结合生态安全评价结果和影响因素分析,本文针对 5 个分区生态安全和发展特点提出以下政策建议.(1)中部核心发展区作为中原城市群综合实力最强、辐射影响范围最大的区域,其社会经济发展水平相对较高,长期较大的资源能源消耗给生态环境带来巨大压力.未来应依托较好的经济基础与人才储备,提升科技创新能力,促进资源节约集约利用.进一步巩固金融及商贸中心、综合交通枢纽和现代服务业中心等定位,加快第一、第二产业转型.(2)西部转型发展区以山地丘陵为主,资源较为丰富,但长期发展高能耗、高污染的重工业导致区域生态压力持续增加.未来应探索产业发展新路径,强化节能减排和环境保护,持续优化产业发展的生态基底.同时,加强产业分工协作,推动新型工业化产业示范基地建设,打造具有竞争力的优势产业集群.(3)北部优化发展区均为重要的资源型城市和工业城市,矿产资源丰富.但过度开发利用导致生态环境态势严峻,且产业结构偏重,发展过于依赖资源产出.未来应加大钢铁、煤炭等传统支柱产业的绿色升级和落后过剩产能淘汰,提升资源利用效率.在提高效益、降低消耗、保护生态环境的基础上,增强产业集聚能力,提升核心地区综合功能.(4)东部保护发展区是重要的粮食主产区,其社会经济发展主要依托资源禀赋,资源产出效率较低.未来应严格落实耕地保护制度,全面划定永久基本农田,高水平推进粮食生产功能区、重要农产品保护区建设,提高农业综合生产能力.同时,因地制宜发展资源环境可承载的适宜产业.加快农业结构调整,推进一二三产业融合发展,提升资源利用效率,推进新型农业现代化发展.(5)南部绿色发展区依托桐柏-大别山生态屏障,生态环境条件良好,经济社会发展水平相对较低.未来应严守生态保护红线,引导人口逐步有序向城镇转移,促进自然资源集约利用.将生态移民和加强空间治理、资源管理有机结合,推动建立横向生态补偿机制,加大区域生态环境建设投入.同时,依托丰富的生态资源,促进生态农林业与旅游业融合.

受限于数据可得性、方法普适性与区域异质性等,本文还存在以下不足:(1)使用生物资源产品生产量代替消费量,未考虑进出口贸易造成的影响,计算结果与实际情况可能存在偏差[51].且过多的产品流入和流出可能导致生态压力转移[52],忽略这部分计算对生态安全状况判定及公平性分析具有一定影响.(2)本文生态足迹核算分为生物资源账户和能源消耗账户两大账户,但人类使用的自然资源不止这些,还包括水资源利用、污染物消纳等资源的消耗和生态空间的占用[53].未来在足迹账户的选择上应更加全面,使生态安全现状评估更加准确.(3)影响区域生态安全状况的因素复杂多样,本文仅从自然禀赋、城市规模、经济发展、社会消费和能源消耗 5 个层面选取了 14 项具有代表性的指标,但这些指标并不能完全涵盖外源驱动和内源驱动的所有方面.因此,未来应该考虑更多其他驱动因素,科学、全面探索影响生态安全变化的机制.

4　结论

4.1　2010~2021 年中原城市群人均生态足迹分布在 0.998~1.127hm^2/人之间,总体呈波动上升趋势,在空间上呈西北部偏高、中部南部偏低的分布状态;人均生态承载力分布在 0.400~0.417hm^2/人之间,总体呈下降趋势,在空间上呈西高东低的分布状态;人均生态赤字分布在 0.581~0.718hm^2/人之间,总体呈上升趋势,在空间上呈北高南低的分布状态.不同土地类型平均贡献程度为化石能源用地>耕地>草地>建设用地>林地>水域,且化石能源用地生态足迹贡献率超过其他土地类型总和.

4.2　2010~2021 年中原城市群人均生态足迹广度分布在 0.289~0.300hm^2/人之间,相对稳定,在空间上呈四周高、中间低的分布状态;生态足迹深度分布在 2.595~2.928 之间,总体呈上升趋势,在空间上呈北高南低的分布状态.中原城市群自然资本利用状况可分为 4 类,不同城市自然资本利用差异较大,且自然资本利用类型变化频繁.

4.3　2010~2021 年中原城市群生态压力指数和存量流量利用比总体呈上升趋势,区域生态压力增大,可持续性减弱.生态协调指数和生态足迹多样性指数总体呈下降趋势,生态经济协调程度和生态足迹均衡程度均有所下降.万元 GDP 生态足迹下降趋势明显,生态利用效率的提高有效遏制了中原城市群生态恶化趋势.综合生态安全指数略有下降,总体处于“中度不安全”状态.基于综合生态安全评价结果,

采用加权 Voronoi 图将中原城市群划分为中部核心发展区、西部转型发展区、北部优化发展区、东部保护发展区和南部绿色发展区.

4.4 生态安全驱动因素结果表明,第一产业产值占比(X_7)是西部转型发展区、北部优化发展区和南部绿色发展区的极重要正向驱动因素,能源消费总量(X_{13})是除南部绿色发展区外其他地区的极重要正向驱动因素,煤炭消费占比(X_{14})是除东部保护发展区和南部绿色发展区外其他地区的极重要正向驱动因素.此外,城市建成区面积(X_5)是中部核心发展区的极重要负向驱动因素,年末常住人口(X_3)是北部优化发展区的极重要的负向驱动因素,耕地面积(X_1)是南部绿色发展区的极重要正向驱动因素,而人均GDP(X_6)、第三产业产值占比(X_9)、城市规模指标(X_3、X_4、X_5)和社会消费指标(X_{10}、X_{11}、X_{12})均为南部绿色发展区的极重要负向驱动因素.

参考文献:

[1] Jin K X, Zhang S, Yang Y L, et al. Evaluation of water- carbon-ecological footprints and its spatial-temporal pattern in the central plains urban agglomeration [J]. Ecological Indicators, 2023,155:15.

[2] 王悦露,董 威,张云龙,等.基于生态系统服务的生态安全研究进展 [J]. 生态学报, 2023,43(19):7821-7829.
Wang Y L, Dong W, Zhang Y L, et al. Research progress andprospect of ecological security based on ecosystem services [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(19):7821-7829.

[3] Lai X D, Xiao Z H. A research on urban eco-security evaluation and analysis: complex system's brittle structure model [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020,27(20):24914-24928.

[4] Jiang M, Jiang C, Huang W M, et al. Quantifying the supply-demand balance of ecosystem services and identifying its spatial determinants: A case study of ecosystem restoration hotspot in Southwest China [J]. Ecological Engineering, 2022,174:14.

[5] Ran Y J, Lei D M, LI J, et al. Identification of crucial areas of territorial ecological restoration based on ecological security pattern: A case study of the central Yunnan urban agglomeration, China [J]. Ecological Indicators, 2022,143:12.

[6] Ke X L, Wang X Y, Guo H X, et al. Urban ecological security evaluation and spatial correlation research-based on data analysis of 16cities in Hubei Province of China [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,311:9.

[7] Kedron P J, Frazier A E, Ovando-Montejo G A, et al. Surface metrics for landscape ecology: a comparison of landscape models across ecoregions and scales [J]. Landscape Ecology, 2018,33(9):1489-1504.

[8] Liu T, Wang H Z, Wang H Z, et al. The spatiotemporal evolution of ecological security in China based on the ecological footprint model with localization of parameters [J]. Ecological Indicators, 2021,126:11.

[9] 方 恺,高 凯,李焕承.基于三维生态足迹模型优化的自然资本利用国际比较 [J]. 地理研究, 2013,32(9):1657-1667.
Fang K, Gao K, Li H C. International comparison of natural capitaluse: A three-dimensional model optimization of ecological footprint [J]. Geographical Research, 2013,32(9):1657-1667.

[10] Wu Y Z, Zhang T C, Zhang H, et al. Factors influencing the ecological security of island cities: A neighborhood-scale study of Zhoushan Island, China [J]. Sustainable Cities and Society, 2020,55:102029.

[11] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out [J]. Environment and Urbanization, 1992,4(2):121-130.

[12] Wackernagel M. Ecological footprint and appropriated carrying capacity: A tool for planning toward sustainability [M]. University of British Columbia, 1994.

[13] Niccolucci V, Bastianoni S, Tiezzi E B P, et al. How deep is the footprint? A 3D representation [J]. Ecological Modelling, 2009, 220 (20):2819-2823.

[14] Zhao S, Li Z Z, Li W L. A modified method of ecological footprint calculation and its application [J]. Ecological Modelling, 2005, 185(1):65-75.

[15] Bicknell K B, Ball R J, Cullen R, et al. New methodology for the ecological footprint with an application to New Zealand economy [J]. Ecological Economics, 1998,27(2):149-160.

[16] Venetoulis J, Talberth J. Refining the Ecological footprint [M]. Boca Raton: Crc Press-Taylor & Francis Group, 2010.

[17] Yang Y, Ling S, Zhang T, et al. Three-dimensional ecological footprint assessment for ecologically sensitive areas: a case study of the southern Qin Ling piedmont in Shaanxi, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2018,194:540-553.

[18] Yang Z K, Zhang X S, Hu X R, et al. Spatial-temporal evolution of agricultural carbon balance at township scale and carbon compensation zoning: A case study of guangshui city, hubei province [J]. Land, 2024,13,820.

[19] Zhang Y, Jiang Y N, Wei T T, et al. A quantitative analysis framework for analyzing impacts of climate change on water-food-energy-ecosystem nexus in irrigation areas based on WEAP-MODFLOW [J]. Journal of Cleaner Production, 2024,470,143315.

[20] Zhang J Y, Qiao X N, Yang Y J, et al. Ecological security driving mechanisms and optimization of zoning in Chinese urban agglomerations: A case study of the central plains urban agglomeration [J]. Ecological Indicators, 2025,171,113190.

[21] Fan W P, Song X Y, Liu M N, et al. Spatio-temporal evolution of resources and environmental carrying capacity and its influencing factors-A case study of shandong peninsula urban agglomeration [J]. Environmental Research, 2023,234,116469.

[22] 翟羽佳,王丽婧,郑丙辉,等.基于系统仿真模拟的三峡库区生态承载力分区动态评价 [J]. 环境科学研究, 2015,28(4):559-567.
Zhai Y J, Wang L J, Zheng B H, et al. Dynamic zoned assessment of ecological carrying capacity of Three Gorges Reservoir area based on system simulation [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(4):559-567.

[23] 孙 茜.空间信息技术支持下的区域资源环境承载力时空分异及驱动机制研究 [D]. 焦作:河南理工大学, 2017.
Sun Q. Research on spatio-temporal differentiation and driving mechanism of regional resource environment carrying capacity supported by spatial information technology [D]. Jiaozuo:Henan Polytechnic University, 2017.

[24] Xia C Y, Guo M, Zhao J, et al. Dynamic responses of ecosystem services to urbanization at multi-spatial scales in the beijing-tianjin-hebei region [J]. Acta Ecological Sinica, 2023,43.

[25] 赵政楠,茹少峰,薛 飞.黄河流域生态韧性的时空格局与分布动态演进:基于能值生态足迹模型的分析 [J]. 中国人口·资源与环境, 2024,34(8):136-147.
Zhao Z N, Ru S F, Xue F. Spatio-temporal pattern and dynamic evolution of ecological resilience in the YellowRiver Basin:based on the analysis of emergy ecological footprint model [J]. China population, resources and environment, 2024,34(8):136-147.

[26] 杨 屹,杨凤仪,蔡梓萱.黄河流域城市群资源环境承载力演变特征及驱动因素研究-以关中平原城市群为例 [J]. 环境科学学报,

2022,42(2):476−485.
Yang Y, Yang F Y, Cai Z X. Evolutionary characteristics and driving factors of the resources and environmental carrying capacity of the urban agglomeration in the Yellow River Basin−A case study of the Guanzhong Plain urban agglomeration [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022,42(2):476−485.

[27] 焦士兴,王安周,陈林芳,等.中国省域三维水生态足迹及其驱动研究 [J]. 世界地理研究, 2022,31(5):988−997.
Jiao S X, Wang A Z, Chen L F, et al.Three−dimensional water ecological footprint measurement and its driving factorsin China's provinces [J]. World Regional Studies, 2022,31(5):988−997.

[28] 徐秋怡,颜凤芹,丁　智,等.基于三维生态足迹的长江经济带生态安全动态评价 [J]. 地理科学进展, 2024,43(6):1184−1202.
Xu Q Y, Yan F Q, Ding Z, et al. Dynamic assessment of ecological security in the Yangtze River Economic Belt based on three−dimensional ecological footprint [J]. Progress in Geography, 2024, 43(6):1184−1202.

[29] 杨良健,曹开军.新疆 85 个县市旅游生态安全时空格局演变及驱动机制 [J]. 生态学报, 2021,41(23):9239−9252.
Yang L J, Cao K J. Spatiotemporal pattern and driving mechanism of tourism ecological security in 85counties and cities of Xinjiang [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(23):9239−9252.

[30] Wang Z Y, Shi P J, Zhang X B, et al. Research on Landscape Pattern Construction and Ecological Restoration of Jiuquan City Based on Ecological Security Evaluation [J]. Sustainability, 2021,13(10):5732.

[31] Feng J R, Gu C N, Li S Z, et al. Assessment of water resource utilization and analysis of driving factors in Zhoushan City based on water footprint theory and LMDI Model [J]. Water, 2024,16(3):385.

[32] He J, Huang B. Estimating global anthropogenic CO_2 emissions through satellite observations [J]. Environmental Research, 2025:121767.

[33] 郭爱君,毛锦凰.丝绸之路经济带建设中的我国节点城市产业定位与协同发展研究 [J]. 西北大学学报(哲学社会科学版), 2015,45(4):18−27.
Guo A J, Mao J H. A study on the industry positioning and synergetic development of the node cities of China on the silk−road economic belt [J]. Journal of Northwest University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2015,45(4):18−27.

[34] 周桂芳,周彦兵,胡　涛.中原城市群县域碳排放时空演变及影响因素分析 [J]. 管理学刊, 2023,36(3):19−34.
Zhou G F, Zhou Y B, Hu T. Analysis on temporal and spatial pattern evolution and influencing factors of county carbon emission in Zhongyuan Urban agglomeration [J]. Journal of Management, 2023, 36(3):19−34.

[35] Li P H, Zhang R R, Wei H, et al. Assessment of physical quantity and value of natural capital in China since the 21st century based on a modified ecological footprint model [J]. Science of the Total Environment, 2022,806:150676.

[36] 王雨枫,江清阳,王　玮,等.基于生态足迹的耕地生态安全时空测度及影响要素 [J]. 中国环境科学, 2025,45(8):4524−4530
Wang Y Y, Jiang Q Y, Wang W, et al. Spatio−temporal measurement of arable land ecological security and its influencing factors based on ecological footprint [J]. China Environmental Science Science, 2025, 45(8):4524−4530.

[37] Burton I. Report on Reports: Our Common Future [J]. Environment: Science and Policy for Sustainable Development, 1987,29(5):25−29.

[38] Bi M L, Yao C Y, Xie G D, et al. Improvement and application of the three−dimensional ecological footprint model [J]. Ecological Indicators, 2021,125:107480.

[39] 唐志强,秦　娜.张掖市新型城镇化与生态安全耦合协调发展研究 [J]. 干旱区地理, 2020,43(3):786−795.
Tang Z Q, Qin N. Coupling development of new type urbanization and ecological security in Zhangye City [J]. Arid Land Geography, 2020,43(3):786−795.

[40] Zhang M N, Ao Y, Liu M, et al. Ecological security assessment based on ecosystem service value and ecological footprint in the Pearl River Delta urban agglomeration, China [J]. Ecological Indicators, 2022, 144:109528.

[41] Zhang R Q, Li P H, Xu L P. Evaluation and analysis of ecological security based on the improved three−dimensional ecological footprint in Shaanxi Province, China [J]. Ecological Indicators, 2022,144:109483.

[42] Guo J, Wei Z, Xie X R, et al. Dynamic change and driving force of natural capital in Qinghai Province based on the three−dimensional ecological footprint, China [J]. Ecological Indicators, 2022,145:109673.

[43] 董建红,张志斌,张怀林,等.生态脆弱区自然资本可持续利用及驱动机制−以宁夏为例 [J]. 中国人口·资源与环境, 2021,31(2):162−173.
Dong J H, Zhang Z B, Zhang H L, et al. Sustainable utilization and driving mechanism of natural capital in ecologically fragileareas [J]. China Population, Resources and Environment, 2021,31(2):162 −173.

[44] 闫卫阳,秦耀辰,郭庆胜,等.城市断裂点理论的验证、扩展及应用 [J]. 人文地理, 2004,19(2):12−16.
Yan W Y, Qin Y C, Guo Q S, et al. Expanding, validation and application of urban breaking−point theory [J]. Human Geography, 2004,19(2):12−16.

[45] Fan W P, Song X Y, Liu M N, et al. Spatio−temporal evolution of resources and environmental carrying capacity and its influencing factors: A case study of Shandong Peninsula urban agglomeration [J]. Environmental Research, 2023,234:116469.

[46] Dong H W, Li P, Feng Z M, et al. Natural capital utilization on an international tourism island based on a three−dimensional ecological footprint model: A case study of Hainan Province, China [J]. Ecological Indicators, 2019,104:479−488.

[47] Liu M C, Li W H, Zhang D, et al. The calculation of equivalence factor for ecological footprints in China: a methodological note [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2015,9(6):1015−1024.

[48] Yang J, Huang X. The 30m annual land cover datasets and its dynamics in China from 1990 to 2021 [J]. Earth System Science Data, 2022,13(8):3907−3925.

[49] 谢紫晗.河南省城乡居民预防性储蓄动机分析 [D]. 郑州:河南财经政法大学, 2021.
Xie Z H. Analysis of precautionary savings motive of urban and rural residents in Henan Province [D]. Zhengzhou: Henan University of Economics and Law, 2021.

[50] Li J X, Chen Y N, Xu C C, et al. Evaluation and analysis of ecological security in arid areas of Central Asia based on the emergy ecological footprint (EEF) model [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,235: 664−677.

[51] 杨　屹,梁砺波,张景乾.关中城市群生态足迹演变趋势及公平性评价 [J]. 自然资源学报, 2017,32(8):1360−1373.
Yang Y, Liang L B, Zhang J Q. Evolution trend and fairness evaluation of ecological footprint in Guanzhong City Group [J]. Journal of Natural Resources, 2017,32(8):1360−1373.

[52] 赵政楠,茹少峰.黄河流域生态补偿的时空格局、区域差异及分布动态演进 [J]. 环境科学, 2024,45(10):5853−5867.
Zhao Z N, Ru S F. Spatio−temporal situation, regional differences, and dynamic evolution of the distribution of ecological compensation in the Yellow River Basin [J]. Environmental Science, 2024,45(10): 5853−5867.

[53] Wang Z H, Yang L, Yin J H, et al. Assessment and prediction of environmental sustainability in China based on a modified ecological footprint model [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 132:301−313.

作者简介：李　涛(1985−),男,河南济源人,副教授, 博士,主要从事资源环境经济方面的研究.发表论文 30 余篇.taodeny@163.com.