

引用格式: 张国兴, 张婧钰, 周桂芳. 黄河流域资源型城市生态安全等级边界及演化趋势[J]. 资源科学, 2023, 45(4): 762-775.  
[Zhang G X, Zhang J Y, Zhou G F. Ecological security level of resource-based cities in the Yellow River Basin and trend of change  
[J]. Resources Science, 2023, 45(4): 762-775.] DOI: 10.18402/resci.2023.04.07

# 黄河流域资源型城市生态安全等级边界及演化趋势

张国兴<sup>1,2</sup>, 张婧钰<sup>1</sup>, 周桂芳<sup>3</sup>

(1. 华北水利水电大学管理与经济学院, 郑州 450046; 2. 华北水利水电大学黄河流域生态经济系统可持续发展研究中心, 郑州 450046; 3. 河南中医药大学管理学院, 郑州 450046)

**摘要:**【目的】本文旨在研究黄河流域资源型城市生态安全等级边界, 分析其在不同时空下所体现出的生态安全等级转移规律及收敛特征, 以期资源型城市高质量发展提供参考。【方法】基于状态-胁迫-免疫(SDI)模型构建黄河流域资源型城市生态安全评价体系, 通过模糊物元模型测算黄河流域资源型城市生态安全等级边界; 结合核密度曲线与莫兰指数分析其时空分布特征, 利用传统马尔科夫链与空间马尔科夫链分析其时空转移规律, 通过 $\sigma$ 收敛与绝对 $\beta$ 检验研究其收敛特征。【结果】本文界定了黄河流域资源型城市生态安全等级边界值; 黄河流域资源型城市生态安全等级尚存在很大提升空间, 生态安全在时间上呈现波动型发展趋势, 在地理位置上呈现“高-低-高”的分布格局; 黄河流域资源型城市生态安全等级转移具有路径依赖性和自身锁定效应, 生态安全转变通常发生在相邻的等级之间; 黄河流域资源型城市生态安全差异性存在明显的追赶效应, 下游与中值区的资源型城市追赶效应更为突出。【结论】基于黄河流域资源型城市生态安全等级普遍不高的现状, 在考虑发展差异性的基础上应分区制定发展政策; 基于黄河流域资源型城市生态安全等级转移规律, 应注重生态安全等级较高城市的发展带动作用; 基于黄河流域资源型城市生态安全存在追赶效应的状况, 在加强区域协调性发展的基础上应实现资源型城市互补发展。

**关键词:** 生态安全; 状态-胁迫-免疫(SDI)模型; 模糊物元模型; 资源型城市; 黄河流域

DOI: 10.18402/resci.2023.04.07

## 1 引言

黄河流域自然生态安全是事关中国高质量发展的题中应有之义。历经数十年的高速发展, 中国经济势必要从高速增长阶段转向高质量发展阶段。在发展过程中, 人类生产生活活动已经触及自然生态安全底线, 守住自然生态安全边界势在必行。党的十九届五中全会提出生态文明要实现新的进步, 首次提出“守住自然生态安全边界”的要求。黄河流域作为青藏高原、黄土高原以及华北平原之间的联系纽带, 其生态安全重要性不言而喻,

而资源型城市在该区域内生态安全压力最为突出。因此, 要想筑牢黄河流域生态安全基础, 首先要守住黄河流域资源型城市的生态安全底线, 使资源、生产与消费等要素相互协调, 促进经济、生态、社会三方面共同发展。

黄河是中华民族的母亲河, 自古以来就是中国经济和文化的中心, 也是国家发展治理的重难点<sup>[1]</sup>。近年来, 在全球气候变化和人类活动的共同作用下, 黄河流域水资源供需矛盾逐渐尖锐, 绿色发展相对于全国平均水平明显落后<sup>[2]</sup>。黄河上游部分地

收稿日期: 2022-11-22; 修订日期: 2023-03-07

基金项目: 国家社会科学基金项目(21BJY016); 河南省高校哲学社会科学创新团队支持计划项目(2022-CXTD-10); 河南省哲学社会科学规划项目(2021BJJ062)。

作者简介: 张国兴, 男, 河南许昌人, 博士, 教授, 主要研究方向为资源经济。E-mail: zgxrz@163.com

通讯作者: 周桂芳, 女, 河南平顶山人, 硕士, 教授, 主要研究方向为管理经济。E-mail: 1106052633@qq.com

2023年4月

区生态系统受损严重,中游地段水土流失依然险峻,下游地区面临多重生态胁迫<sup>[3]</sup>,因此黄河流域高质量发展必须将生态安全放在首当其冲的地位。黄河流域半数以上的城市属于资源型城市或是老工业城市,城市支撑产业结构较为单一,资源诅咒负面影响严重,生态安全对资源型城市的胁迫作用较之其他区域更为突出<sup>[4]</sup>。资源型城市作为一种特殊的城市类型,引起了众多学者关注<sup>[5,6]</sup>,研究方向主要集中于资源型城市的产业升级<sup>[7]</sup>、转型绩效<sup>[8]</sup>、高质量发展水平测度<sup>[9]</sup>、可持续发展进程<sup>[10]</sup>以及三生空间<sup>[11]</sup>等方面。资源型城市生态安全边界指在不影响人类正常生产生活与生态环境稳定健康发展的前提下确定的资源型城市经济社会生态阈值,是多种因素共同作用的结果<sup>[12]</sup>。守住资源型城市生态安全边界有利于提高城市核心竞争力,可以使资源型城市更为灵活地面对未来环境变化、气候干扰的冲击。然而,关于生态安全边界的研究较少,大多数研究集中于生态安全的测度与评价方面。如武彦斌等<sup>[13]</sup>较早进行了定量化测度,以淮南市作为典型研究对象从压力-状态-响应三方面构建了评价体系;颀茂华等<sup>[14]</sup>应用Meta模型,以城市居民支付意愿作为切入点对资源型城市自然生态环境进行价值评价;王静等<sup>[15]</sup>由“潜在”与“现实”两方面相结合构建资源环境承载力评价指标,以烟台市作为研究对象,分析两方面资源承载力指数的相关关系;王回苗等<sup>[16]</sup>基于生态格局识别生态廊道和关键点,根据优先程度设计资源型城市工矿用地恢复方案;法子薇等<sup>[17]</sup>结合煤矿型城市特有的生态因素,利用云模型对资源型城市进行生态风险评价。已有资源型城市生态安全研究多集中于单个城市或单一类别城市,针对性较强,评价维度与指标倾向于静态研究。

随着国家对黄河流域资源型城市高质量发展支持工作的深入开展,相关学者已经从不同角度结合不同方法对资源型城市进行分析研究,但仍存在一些问题:首先,现有研究多集中于资源型城市转型发展与生态安全评价预警两方面,关于资源型城市生态安全边界的研究相对较少,对承载了国家重大战略的黄河流域资源型城市生态安全边界的相关研究更为欠缺;其次,资源型城市生态安全并不

是一成不变的,其生态脆弱具有一定的积累性,而资源型城市生态安全动态演化相关研究较为不足。鉴于以上分析,本文在前人研究基础上选用模糊物元模型(fuzzy object element model),对黄河流域资源型城市生态安全等级边界值进行测算,并对其时空演变趋势及收敛性进行分析,以期为资源型城市高质量发展提供理论参考与实践借鉴。

## 2 研究区、数据与方法

### 2.1 研究区概况及数据来源

黄河流域地貌类型多样,自然生态条件的重要性和敏感性高度叠加。黄河流域治理一直是中国发展建设的重点,在经济增长和生态治理方面都取得了重大进步,但是也存在一些典型问题。根据中华人民共和国生态环境部公开数据,2021年1—12月国家地表水考核断面水环境质量状况排名后20名的城市中,黄河流域有8座(占比40%),其中资源型城市5座。2021年1—12月168个重点城市空气质量排名后20位城市中,黄河流域城市有17座(占比85%),其中资源型城市8座。因此,选择黄河流域资源型城市作为研究对象具有鲜明的区域典型特征和学术研究价值。

研究区域的确定遵循“以自然黄河流域为基础、尽可能保持地区级行政区划单元的完整性和考虑地区经济发展与黄河的直接关联性”<sup>[18]</sup>三原则。根据《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020年)》《黄河流域综合规划(2012—2030年)》的分类,黄河流域共涉及36个资源型城市(图1),作为本文研究对象。本文基础数据来源于《中国城市统计年鉴》(2011—2021)、黄河流域区域内各省市统计年鉴、各省市国民经济和社会发展统计公报与生态环境状况公报,部分缺失数据通过移动平均法进行填补。

### 2.2 指标体系构建

#### 2.2.1 黄河流域资源型城市生态安全状况评价指标体系

当前关于生态安全指标体系的构建主要集中于PSR模型以及NES模型,这两种模型均能很好地反映生态安全当前现状。但是对于资源型城市来说,其生态环境受损主要来源于资源开采及利用,



图1 黄河流域资源型城市分布图

Figure 1 Distribution of resource-based cities in the Yellow River Basin

这种影响是一种动态、累积的影响,因此,本文以“状态-胁迫-免疫模型”(state-danger-immunity,简称SDI)为基础进行指标体系构建。SDI模型将生态安全演变分解成生态环境状态、生态环境胁迫与生态环境免疫三方面,该模型最早被用于生态安全预警<sup>[19]</sup>,后主要被用于生态安全评价<sup>[20]</sup>。

生态环境状况指资源型城市当前的基本状况,主要涉及资源环境与人文社会两方面,是生态安全稳定的基础;生态环境胁迫是指由于人类生产生活对资源的不正当不充分利用从而给周围生态环境所造成的压力,是一种动态的影响过程;生态环境免疫是指人们通过采取一些手段,例如环保、教育等方式提高生态韧性从而增强抵御风险的能力。具体指标体系如表1所示。其中,人口密度反映了单位面积土地上所能承载的人口数量,人口密度越大土地承载压力就越大。单位面积废水排放量、单位面积SO<sub>2</sub>排放量以及单位面积工业粉尘排放量体现出资源型城市在发展过程中所要释放的环境污染物数量,可以体现出城市发展过程中的环境压力。人均日生活用水量是每一位社会公民在一天之内所要使用的水资源量,可以体现出资源型城市的水资源压力。城镇登记失业率可以反映出该城市当前经济活力状况,体现出城市发展过程中社会压力的大小。

## 2.2.2 黄河流域资源型城市生态安全等级标准

为了方便对黄河流域资源型城市生态安全等级进行划分,首先要确定不同等级之间的边界值,通过将各资源型城市的生态安全状况值同临界值进行比较,从而划分该资源型城市的生态安全等级。本文参考了《全国资源型城市可持续发展规划》《国家环境保护模范城市考核指标及其实施细则(第六阶段)》《国家生态园林城市标准》《生态县、生态市、生态省建设指标(修订版)》,并且参考了相关研究成果<sup>[21-23]</sup>,将生态安全划分为 $L_1$ (差)、 $L_2$ (中)、 $L_3$ (良)、 $L_4$ (优)4个级别,具体分级标准见表2。

## 2.3 模型构建

### 2.3.1 模糊物元模型

生态安全边界在进行测算时涉及指标数量较多,并且指标之间存在一定互相影响,而物元理论以促进事物转化与解决内部不相容问题为核心<sup>[24]</sup>,因此本文选择模糊物元模型对黄河流域资源型城市生态安全边界进行测算。

#### (1) 构造模糊物元

在物元分析中将所描述的事物 $D$ 、事物特征 $C$ 以及对应的量值 $X$ 组成物元 $R=(D, C, X)$ ,对于黄河流域资源型城市2010—2020年18个指标进行汇总即可得到复合模糊物元 $R_{mn}$ <sup>[25]</sup>。



表1 黄河流域资源型城市生态安全状况评价指标体系

Table 1 Evaluation indicator system of ecological security of resource-based cities in the Yellow River Basin

目标层	准则层	分准则层	指标层	属性	权重
黄河流域 资源型城 市生态安 全状况	生态环境状态	环境	人均公园绿地面积/(m <sup>2</sup> /人)	+	0.038
			空气质量大于二级天数	+	0.051
		资源	人均水资源量/(m <sup>3</sup> /人)	+	0.047
			人均城市道路面积/(m <sup>2</sup> /人)	+	0.116
	生态环境胁迫	人文	人口密度/(人/km <sup>2</sup> )	-	0.081
			人均GDP/(万元/人)	+	0.035
			单位面积废水排放量/(万 t/km <sup>2</sup> )	-	0.052
		环境	单位面积SO <sub>2</sub> 排放量/(t/km <sup>2</sup> )	-	0.073
			单位面积工业粉尘排放量/(t/km <sup>2</sup> )	-	0.028
			人均日生活用水量/(L/人)	-	0.045
	生态安全免疫	人文	人口自然增长率/%	-	0.068
			城镇登记失业率/%	-	0.051
			污水集中处理率/%	+	0.046
		环境	生活垃圾无害化处理率/%	+	0.045
			建成区绿化覆盖率/%	+	0.052
			产业结构合理化指数	+	0.056
		经济	每万人拥有普通高等学校专任教师数/人	+	0.075
			科学支出占万元GDP比重/%	+	0.041

表2 黄河流域资源型城市生态安全指标等级评价标准

Table 2 Evaluation standards of ecological security indicators of resource-based cities in the Yellow River Basin

指标	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>
人均水资源量	(0, 500]	(500, 1000]	(1000, 1700]	(1700, 3000]
人均城市道路面积	(0, 15]	(15, 20]	(20, 25]	(25, 30]
人均公园绿地面积	(0, 4]	(4, 7]	(7, 10]	(10, 16]
空气质量大于二级天数	(0, 255]	(255, 274]	(274, 310]	(310, 328]
人口密度	(1500, 2750]	(750, 1500]	(500, 750]	(0, 500]
人均GDP	(0.0, 0.7]	(0.7, 3.0]	(3.0, 5.0]	(5.0, 10.0]
单位面积废水排放量	(80, 120]	(55, 80]	(20, 55]	(0, 20]
单位面积SO <sub>2</sub> 排放量	(900, 1500]	(400, 900]	(100, 400]	(0, 100]
单位面积工业粉尘排放量	(450, 700]	(200, 450]	(50, 200]	(0, 50]
人均日生活用水量	(250, 350]	(150, 250]	(100, 150]	(0, 100]
人口自然增长率	(6, 10]	(4, 6]	(2, 4]	(0, 2]
城镇登记失业率	(4.5, 5.5]	(3.5, 4.5]	(2.5, 3.5]	(0.0, 2.5]
污水集中处理率	(0, 30]	(30, 50]	(50, 70]	(70, 90]
生化垃圾无害化处理率	(0, 70]	(70, 75]	(75, 85]	(85, 95]
绿化覆盖率	(0, 15]	(15, 20]	(20, 28]	(28, 35]
产业结构合理化指数	(0.0, 0.2]	(0.2, 0.3]	(0.3, 0.4]	(0.4, 0.6]
每万人拥有普通高等学校专任教师数	(0, 3]	(3, 5]	(5, 10]	(10, 20]
科学支出占万元GDP比重	(0.0, 0.5]	(0.5, 1.0]	(1.0, 2.0]	(2.0, 3.0]

$$R_{mn} = \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & \cdots & d_n \\ c_1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ c_2 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_m & x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (m=18, n=36) \quad (1)$$

(2)构建从优隶属度模糊物元

从优隶属度,即事物的各项特征相应的模糊量值从属于该特征最优模糊量值的隶属程度,根据指标特性进行分别计算<sup>[26]</sup>。

正向指标计算方法:

$$u_{ij} = \frac{x_{ij} - x_i^{\min}}{x_i^{\max} - x_i^{\min}} \quad (2)$$

负向指标计算方法:

$$u_{ij} = \frac{x_i^{\max} - x_{ij}}{x_i^{\max} - x_i^{\min}} \quad (3)$$

式中:  $x_{ij}$  为第  $j$  个城市第  $i$  个评价指标的特征值;  $x_i^{\max}$ 、 $x_i^{\min}$  分别为第  $i$  个评价指标的最大值和最小值。

基于此可以得到从优隶属度模糊物元,即:

$$R_{mn}^* = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{m1} & u_{m2} & \cdots & u_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

(3)构造标准模糊物元与差平方模糊物元

标准模糊物元由各评价指标从优隶属度最大值或最小值确定,本文选用最大值加以确定。用  $\Delta_{ij}$  来表示标准模糊物元与从优隶属度模糊物元的差的平方和,最终得到差平方模糊物元  $R_{\Delta}$  如下所示:

$$R_{\Delta} = \begin{bmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{12} & \cdots & \Delta_{1n} \\ \Delta_{21} & \Delta_{22} & \cdots & \Delta_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta_{m1} & \Delta_{m2} & \cdots & \Delta_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

(4)欧式贴近度

欧式贴近度  $\rho H_j$  表示事物特征与设定的样本等级之间的接近程度,贴近度的值越高说明黄河流域资源型城市生态安全越是稳定。具体公式如下:

$$\rho H_j = 1 - \sqrt{\sum_{i=1}^{18} \omega_i \Delta_{ij}}, j=1, 2, \cdots, 36 \quad (6)$$

式中:  $\omega_i$  为评价指标权重,本文选用熵权法对指标权重进行计算(表1)。最后得出黄河流域资源型城市生态安全各等级边界值如表3所示。

### 2.3.2 核密度模型

核密度估计是一种常用的非参数估计方法,主要根据样本信息实现对研究数据的拟合估计。本文通过核密度曲线的中心、峰值及拖尾情况等来揭

示生态安全演化过程。具体公式<sup>[27]</sup>如下:

$$f_h(y_j) = \frac{1}{36h} \sum_{j=1}^{36} K\left(\frac{y_j - \bar{y}}{h}\right) \quad (7)$$

式中:  $f_h(y_j)$  为核密度函数;  $K$  为高斯核密度函数;  $y_j$  为黄河流域资源型城市  $j$  的生态安全值;  $\bar{y}$  为  $y_j$  的均值;  $h$  为带宽。

### 2.3.3 马尔科夫链

马尔科夫链对于研究黄河流域资源型城市生态安全边界动态变化具有一定优势,因为生态安全状态的转变具有马尔科夫过程的性质:①区域内部不同生态安全等级之间可以相互转化;②生态安全等级转化之间的关系难以用具体的函数关系来表示<sup>[28]</sup>。马尔科夫链表达式为:

$$p_{ab} = n_{ab}/n_b \quad (8)$$

式中:  $p_{ab}$  为从  $t$  年份状态  $a$  到  $t+1$  年份状态  $b$  变化的转移概率;  $n_{ab}$  为从  $t$  年份到  $t+1$  年份状态  $a$  变化到状态  $b$  的资源型城市数量;  $n_b$  为所有  $t$  年份状态为  $b$  的资源型城市总数。空间马尔科夫链是通过引入空间滞后算子的概念来揭示在生态环境相互影响的前提下,不同资源型城市生态安全等级变化的空间作用<sup>[29]</sup>。其公式如下:

$$Lag = \sum_{j=1}^{36} y_j w_{jq} \quad (9)$$

式中:  $Lag$  表示空间滞后算子;  $w_{jq}$  表示城市  $j$  和城市  $q$  之间的空间权重。本文采用邻接原则构建空间权重矩阵,即城市  $j$  和城市  $q$  之间相邻时认为空间权重为1,若不相邻则赋值为0。考虑到城市附近存在  $N$  个相邻城市,则每个城市对应的权重为标准化后的  $1/N$ 。

### 2.3.4 收敛性检验

收敛理论是由资本边际报酬递减与规模报酬不变引申出的推论,后常被用于研究国家或地区间经济差距的追赶效应<sup>[30]</sup>。本文采用  $\sigma$  收敛与绝对  $\beta$  收敛对不同河段与不同安全等级区域之间的生态安全进行分析。 $\sigma$  收敛指各分区生态安全值的离散水

表3 黄河流域资源型城市生态安全等级划分

Table 3 Ecological security classification of resource-based cities in the Yellow River Basin

等级	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$
生态安全值	[0.000, 0.222)	[0.222, 0.403)	[0.403, 0.566)	[0.566, 1.000)

2023年4月

平随着时间发展呈现逐渐缩小的趋势,本文通过变异系数法对其进行衡量;绝对 $\beta$ 收敛意味着安全水平等级较低的城市对安全等级较高的城市存在一定追赶效应。 $\sigma$ 收敛值的计算参考文献[31],具体公式如下:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^{H_j} (y_{zj} - \overline{y_{zj}})^2 / H_j}}{\overline{y_{zj}}} \quad (10)$$

$$\ln\left(\frac{y_{j,t+1}}{y_{j,t}}\right) = \alpha + \beta \ln y_{j,t} + \varepsilon_{j,t} \quad (11)$$

式中:  $H_j$  为  $j$  城市所在区域内资源型城市的个数;  $y_{zj}$  为区域  $z$  中第  $j$  个资源型城市的生态安全值;  $\overline{y_{zj}}$  为所有资源型城市生态安全均值;  $y_{j,t}$  和  $y_{j,t+1}$  分别为处于第  $t$  年和第  $t+1$  年时第  $j$  个城市生态安全值;  $\alpha$  为截距项;  $\beta$  为收敛系数;  $\varepsilon_{j,t}$  为误差项。

### 3 结果与分析

#### 3.1 黄河流域资源型城市生态安全时空演化分析

##### 3.1.1 时序演变

由图2可知,2010—2020年黄河流域资源型城市生态安全均值大体上呈现波动性发展趋势。黄河流域近年来不断推行生态保护建设与高质量绿色发展,在一定程度上缓解了黄河流域生态压力,但其瓶颈问题并未得到根本解决。黄河流域生态功能仍未实现根本性扭转的关键在于水土流失问题。周边环境空间的不均衡、海岸系统的失衡与煤炭开采等因素都会加剧水沙问题的恶化。再加上

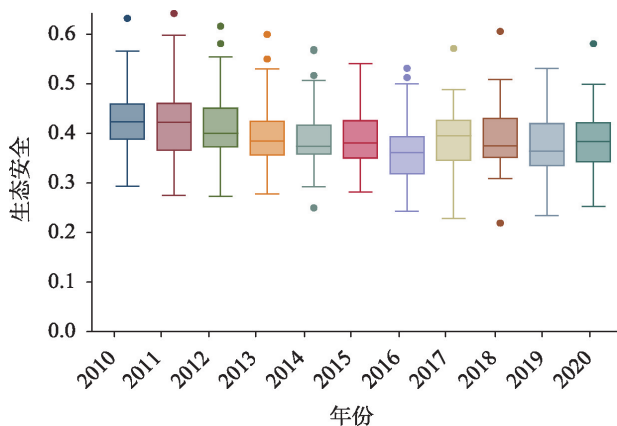


图2 2010—2020年黄河流域资源型城市生态安全箱线图

Figure 2 Boxplot of ecological security of resource-based cities in the Yellow River Basin, 2010-2020

周围资源型城市主导产业大部分仍以开采加工为主,导致黄河流域资源型城市整体生态安全均值有所下降。2017年,中国共产党第十九次全国代表大会首次提出高质量发展的新表述。资源型城市开始注重产业升级与创新驱动,减少高耗能产业,生态安全有所好转。

从中位数来看,2010—2012年发展平均状况较好,中位数均高于0.4,其余年份中位数有所下降。从集中程度来看,2011年和2019年较为分散,其余年份箱体长度较短,整体更为集中。从对称性来看,2011、2016和2017年呈现明显的右偏趋势,2010、2013和2020年分布较为均匀,其余年份呈现左偏趋势,表明黄河流域资源型城市生态安全内部发展存在差异。从极值来看,随着时间发展,不管是极大值还是极小值都有所下降。

为进一步揭示生态安全的时序动态演进特征,以2010年、2015年和2020年作为时间节点进行核密度分析。由图3可知,从分布位置来看,与2010年相比2020年核密度曲线重心明显左移,表明黄河流域资源型城市生态安全水平有所下降;从分布态势看,核密度曲线峰值下降,宽度有所增加,表明流域内城市生态安全最高值有所下降,并且生态安全差异有所增加;从分布延展性来看,2010年主要呈现右拖尾趋势,表明流域存在生态安全值较高的城市且与其他城市差距较大。2020年拖尾情况有所缓解,整体更向中心值靠拢。受益于黄河流域一体化政策的实施,黄河流域上中下游开展多领域合

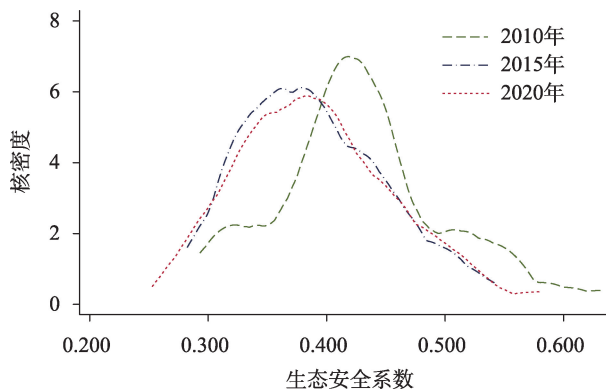


图3 2010、2015、2020年黄河流域资源型城市生态安全核密度图

Figure 3 Kernel density map of ecological security of resource-based cities in the Yellow River Basin, 2010, 2015, and 2020

作,使得部分生态安全较差的城市生态水平有所提高。

### 3.1.2 空间分布

箱线图与核密度图仅能从时间维度上分析黄河流域资源型城市生态安全特征与演变趋势,因此,本文选用全局莫兰指数来刻画黄河流域资源型城市生态安全空间分布特征。由表4可知,2010—2020年莫兰指数均为正值且呈现波动性上升的趋势,在2019年达到最高点0.477,最低点在2015年为0.151。所有年份莫兰指数均至少在 $P=0.05$ 的显著性水平上显著,自2016年后均在 $P=0.01$ 的显著性水平上显著。综上,黄河流域资源型城市生态安全存在显著正向空间相关性,并且相关性不断增强,符合地理学第一定律。因此,黄河流域资源型城市生态安全提升需要打破行政区划的局限,各研究单元之间应该协同抓好区域生态文明建设,推动生态保护一体化建设。

从空间分布特征上看,黄河流域总体上生态安全等级有所下降并且存在明显的地区异质性。2010年黄河流域资源型城市安全等级为中的城市有10座,约占27.78%;评级为良的城市有24座,约占66.67%。2020年黄河流域资源型城市安全等级为中的城市有22座,占比61.11%;评级为良的城市有13座,占比36.11%。评级为差的城市只在2018年出现过一次;评级为优的城市由2010年的东营市、淄博市到2020年改变为鄂尔多斯市。

上游资源型城市生态安全主要集中在中及以上级别。2010年上游城市生态安全类型为良的城市占比约75%,级别为中的城市占比的25%,没有评级为差的城市。2020年,除鄂尔多斯市生态安全等级有所上升,其余城市生态安全等级保持不变。中

游资源型城市随着时间发展,生态安等级逐渐变为以中级为主。2010年时中游地区资源型城市良与中比例近乎1:1;自2012年以后评级为良的城市逐渐减少;2016年时中游地区几乎全部评级为中,仅有2座城市评级为良;自2018年中游生态安全值开始轻微回升,但临汾市评价等级下降为差;2020年没有评级为差的城市,评级为良的城市与2018年平齐,整体呈现向好趋势。下游地区资源型城市生态安全等级主要集中在优良级别,后期下降到良、中级别。2010年除了极个别城市以外,下游资源型城市评级均在良好以上,东营市、淄博市更是评级为优;自2012年以后生态安全等级呈现下降趋势,到2016年仅有一个城市评级为良,其余城市评级为中;2020年生态安全状况有所回升(表5)。因此,整体来看黄河流域资源型城市生态安全呈现“高-低-高”的分布特征。且生态安全状况存在空间转移的情形,生态安全评级为优的城市从下游逐渐转移到上游。其原因在于受地理位置影响,黄河流域上游地区河水清澈,水资源丰富,生态基础较为优越。但自黄河流域中段开始,河水含沙量逐渐增高,水流量不断减少,并且下游人类经济活动干预较多,生态安全等级缓慢下降,从而使生态安全等级为优的城市向上游不断倾斜。

### 3.1.3 空间转移

上述空间自相关检验与空间分布特征均表示黄河流域资源型城市生态安全存在空间关联性,但其在时间与空间上存在着怎样的转移过程未曾得知。因此,本文选用传统和空间马尔科夫链对其生态安全等级转移规律进行探索。

由表6可知,对角线上元素值表示资源型城市生态安全没有发生变化的概率,非对角线上的元素

表4 2010—2020年黄河流域资源型城市生态安全全局莫兰指数

Table 4 Global Moran's  $I$  index of ecological security of resource-based cities in the Yellow River Basin, 2010-2020

年份	Moran's $I$	Z值	P值	年份	Moran's $I$	Z值	P值
2010	0.175	2.297	0.022	2016	0.207	2.648	0.008
2011	0.219	2.797	0.005	2017	0.372	4.553	0.000
2012	0.159	2.126	0.034	2018	0.431	5.234	0.000
2013	0.227	2.920	0.004	2019	0.477	5.666	0.000
2014	0.184	2.426	0.015	2020	0.335	4.102	0.000
2015	0.151	2.008	0.045				



2023年4月

表5 2010—2020年黄河流域分区域生态安全等级及均值表

Table 5 Sub-regional ecological security level and mean table of the Yellow River Basin, 2010-2020

区域	等级	2010	2012	2014	2016	2018	2020
上游	$L_1$	0	0	0	0	0	0
	$L_2$	2	4	3	4	2	2
	$L_3$	6	3	3	4	5	5
	$L_4$	0	1	2	0	1	1
	均值	0.442	0.441	0.440	0.424	0.461	0.461
中游	$L_1$	0	0	0	0	1	0
	$L_2$	7	14	16	18	14	15
	$L_3$	13	6	4	2	5	5
	$L_4$	0	0	0	0	0	0
	均值	0.401	0.391	0.368	0.337	0.358	0.364
下游	$L_1$	0	0	0	0	0	0
	$L_2$	1	2	4	7	4	5
	$L_3$	5	5	4	1	4	3
	$L_4$	2	1	0	0	0	0
	均值	0.478	0.462	0.405	0.366	0.421	0.392

表6 黄河流域资源型城市生态安全等级马尔科夫转移概率矩阵

Table 6 Markov transition probability matrix of ecological security level of resource-based cities in the Yellow River Basin

$t/(t+1)$	$n$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$
$L_1$	1	0.000	1.000	0.000	0.000
$L_2$	205	0.005	0.902	0.093	0.000
$L_3$	143	0.000	0.217	0.755	0.028
$L_4$	11	0.000	0.000	0.455	0.545

表示资源型城市生态安全等级之间发生转移的概率,可得出资源型城市生态安全动态演化特征如下:①黄河流域资源型城市生态安全等级随时间变化程度最高在2016—2017年,共有11个资源型城市生态安全等级发生转移变化<sup>①</sup>。生态安全等级上升程度最高在2016—2017年,为10个城市,生态安全等级下降最多在2011—2012年,为8个城市。黄河流域资源型城市生态安全等级变化程度呈现为中游>下游>上游,其中变化程度最大的城市为晋中市。②黄河流域资源型城市生态安全等级 $L_3$ 、 $L_4$ 对角线上的元素值大于非对角线上的元素值,说明 $L_3$ 、 $L_4$ 等级俱乐部趋同效应具有一定的稳健性。而 $L_1$ 、 $L_2$ 两个级别非对角线上的数值更大,表明黄河流域资源型城市生态安全存在一定的不稳定性,当级别为 $L_1$ 、 $L_2$ 时,向其他级别变化的概率较高。

③非对角线上的元素除了低等级向高一等级转变和高等级向低一等级转变以外,其余概率值均为0,表明黄河流域资源型城市生态安全转变通常发生在相邻的等级之间,极少出现跨等级变化的情况。④ $L_4$ 等级维持等级不变的概率为0.545,向下一等级转移的概率为0.455,两者概率较为接近,因此,应该警惕该等级向下转移的状况。 $L_3$ 等级保持原有等级的概率为0.755,向上转移与向下转移的概率分别为0.028和0.217,向下转移的概率更大,应对此加以重视,引导该等级资源型城市维持原状或向上一等级发展。 $L_2$ 等级维持不变的概率为0.902,向上转移与向下转移的概率分别为0.093和0.005,处于该等级的资源型城市更容易保持稳定。

传统马尔科夫链只关注生态安全等级之间的变化,没有考虑周边城市对其等级变化的影响。根

① 受篇幅限制,本文未把全部研究结果放入表格内,如有需要可向作者索取。



据地理学第一定律,任何事物与其他事物都具有相关性,相近的事物联系更为紧密。由上文全局空间莫兰指数结果可知,黄河流域资源型城市生态安全存在正的空间相关性,这意味着资源型城市的生态安全等级不仅受内部作用的影响,也会受到周围其他城市的溢出效应。因此,本文在传统马尔科夫链的基础上加入空间滞后项,探讨在周围不同城市等级背景下生态安全等级转移的影响,具体如表7所示。

对比传统马尔科夫转移矩阵,在不同邻域条件下,黄河流域资源型城市生态安全等级转移概率发生明显变化,具体特征如下:①就 $L_1$ 而言,当其邻域为 $L_2$ 的时候,其向上转移的概率为1.000,表明周围城市对等级 $L_1$ 的城市具有很强的带动作用。②当城市安全等级为 $L_2$ 时,在邻域分别为 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 和 $L_4$ 的条件下,其安全等级不变的概率0.600、0.919、0.897和0.000;其安全等级提升的概率分别为0.400、0.075、0.103和1.000;只有在邻域状况为 $L_2$ 时出现向下转移,概率为0.006,在不同的邻域背景下, $L_2$ 级别多呈现上升趋势。③当城市安全等级为 $L_3$ 时,在邻域分别为 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 和 $L_4$ 的条件下,其安全等级不变的概率0.400、0.762、0.758和0.889;其

安全等级下降的概率分别为0.600、0.238、0.182和0.111。随着邻域安全等级的提高,安全等级为 $L_3$ 的城市等级不变的概率也随之提高,等级下降概率逐渐减少。当城市安全等级为 $L_4$ 时,邻域为 $L_3$ 的情况下安全等级不变和下降的概率相同,邻域为 $L_4$ 的情况下安全等级不变的概率为1.000。④当邻域为 $L_2$ 时,处在 $L_2$ 等级城市不变的概率为0.919,大于不考虑空间滞后因素的0.902。当邻域为 $L_3$ 时,处在 $L_3$ 等级城市不变的概率为0.758,大于不考虑空间滞后因素的0.755。当邻域为 $L_4$ 时,处在 $L_4$ 等级城市不变的概率为1.000,大于不考虑空间滞后因素的0.545。因此,在不同的邻域背景下黄河流域资源型城市生态安全等级演变具有显著差异。

### 3.2 黄河流域资源型城市生态安全收敛性分析

#### 3.2.1 $\sigma$ 收敛

本文将36个资源型城市按照地理位置与生态安全等级依次分为上中下游与高中低值3个区域,分别对整体、上中下游以及高中低值区域收敛性进行研究。

由图4a可以看出,黄河流域资源型城市整体 $\sigma$ 收敛波动较大,且收敛数值从2010年的0.174到2020年的0.172,下降幅度较小, $\sigma$ 收敛并不明显。

表7 黄河流域资源型城市生态安全等级空间马尔科夫转移概率矩阵

Table 7 Spatial Markov transition probability matrix of ecological security level of resource-based cities in the Yellow River Basin

邻域类型	$t/(t+1)$	$n$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$
$L_1$	$L_1$	0	0.000	0.000	0.000	0.000
	$L_2$	5	0.000	0.600	0.400	0.000
	$L_3$	5	0.000	0.600	0.400	0.000
	$L_4$	0	0.000	0.000	0.000	0.000
$L_2$	$L_1$	1	0.000	1.000	0.000	0.000
	$L_2$	160	0.006	0.919	0.075	0.000
	$L_3$	63	0.000	0.238	0.762	0.000
	$L_4$	0	0.000	0.000	0.000	0.000
$L_3$	$L_1$	0	0.000	0.000	0.000	0.000
	$L_2$	39	0.000	0.897	0.103	0.000
	$L_3$	66	0.000	0.182	0.758	0.060
	$L_4$	10	0.000	0.000	0.500	0.500
$L_4$	$L_1$	0	0.000	0.000	0.000	0.000
	$L_2$	1	0.000	0.000	1.000	0.000
	$L_3$	9	0.000	0.111	0.889	0.000
	$L_4$	1	0.000	0.000	0.000	1.000

2023年4月

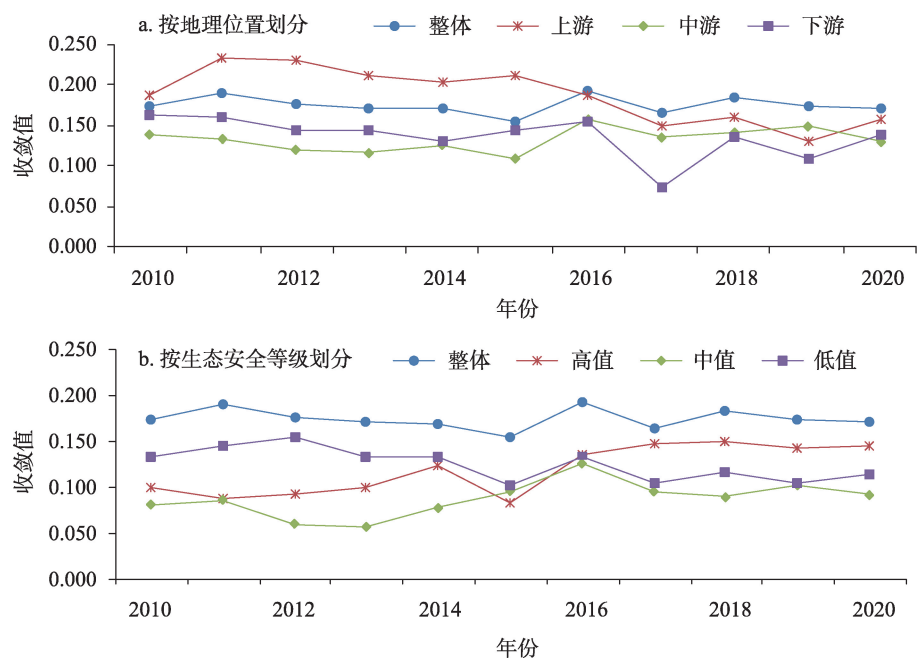


图4 2010—2020年黄河流域资源型城市生态安全 $\sigma$ 收敛演变趋势

Figure 4 Evolution trend of  $\sigma$  convergence in ecological security of resource-based cities in the Yellow River Basin, 2010-2020

上中下游都呈现出 $\sigma$ 收敛的趋势,但收敛幅度存在较大差异。上游资源型城市 $\sigma$ 收敛从2010年的0.187到2020年的0.155,降幅达到17.01%;中游仅为6.6%,且中游 $\sigma$ 收敛趋势与整体最为接近;下游下降幅度为14.22%。并且以2016年为分界点,2016年以前上游 $\sigma$ 收敛一直高于整体流域,2016年时上游 $\sigma$ 收敛与整体十分接近,自2017年以后上游 $\sigma$ 收敛明显下降,低于整体 $\sigma$ 收敛值。

由图4b可以看出,生态安全等级高中低值区 $\sigma$ 收敛相对于地理位置划分明显降低,且都低于整体流域的 $\sigma$ 收敛值。但其中呈现明显 $\sigma$ 收敛趋势的仅有低值区,从2010年的0.133到2020年的0.115,下降幅度达到13.67%。中高值区域 $\sigma$ 收敛不降反升,

其原因可能在于中高值区域资源型城市生态安全与社会经济发展已经取得了相对较好的平衡状态,并且当地政府十分重视城市生态安全健康,为城市生态安全发展打下良好基础。由于城市区位、当地环境等不可改变因素的制约,使一些生态安全状况较好的城市愈加向好,另一些城市受到制约后发展速度逐渐放缓,使原本生态安全状况相近的资源型城市之间的生态差距越来越大。反倒是低值区资源型城市生态安全发展处于起步阶段,受限制较小,从而使低值区资源型城市发展呈现明显收敛趋势。

### 3.2.2 绝对 $\beta$ 收敛

表8表明了黄河流域资源型城市生态安全绝对

表8 黄河流域资源型城市生态安全绝对 $\beta$ 收敛检验

Table 8 Absolute  $\beta$  convergence test of ecological security of resource-based cities in the Yellow River Basin

变量	整体	地理位置			生态安全		
		上游	中游	下游	高值	中值	低值
常数项 $\alpha$	-0.518***	-0.336***	-0.570***	-0.540***	-0.563***	-0.618***	-0.356***
系数 $\beta$	-0.542***	-0.407***	-0.556***	-0.595***	-0.508***	-0.606***	-0.450***
FE/RE	FE	FE	FE	FE	FE	FE	FE
Adjusted- $R^2$	0.294	0.185	0.303	0.346	0.273	0.327	0.249

注:FE为固定效应模型,RE为随机效应模型。

$\beta$ 收敛检验结果,本文根据 Huasman 检验选择固定效应空间面板对其进行分析。结果显示,收敛系数  $\beta$  均在 1% 的水平上显著为负,说明不管是黄河流域整体还是依照地理或生态安全分区,其生态安全均存在绝对  $\beta$  收敛趋势,即在该区域内生态安全较低的城市相对于生态安全较高的城市具有更快的增长率。对于地理分区,黄河上游绝对收敛系数小于整体收敛系数,中下游系数均大于整体,并且下游收敛系数最高。其原因主要在于黄河流域上游资源型城市生态环境更为薄弱,城市生态发展后劲不足,使地区内城市生态发展差距逐渐拉大。

对于生态安全分区来看,高值区与低值区收敛系数小于整体收敛系数,中值区收敛系数要高于整体收敛系数,且中值区收敛系数最高。相对于高值与低值区域而言,中值区域不论是生态安全发展环境或是发展经验都更为完善。高值区资源型城市生态安全发展底子较好,生态安全发展路径基本确定,发展较缓的城市很难在短时间内超越发展较好的城市。低值区资源型城市发展环境更不稳定,发展路径存在可变性,发展经验更为薄弱,该区域内生态安全发展较慢的城市仍处在起步阶段,未来发展具有很大的不确定性。中值区域相对来说生态安全发展环境更为优越,在之前的发展中也取得了一定经验,并且同为发展中城市发展区别较小,发展较慢的城市有一定概率超越发展较快的城市。

总体来说,黄河流域整体以及分区域的收敛情况反映出中国实施区域协调发展取得了一定成果。综合检验结果可以看出,2010—2020 年间,上中下游区域与高中低值板块之间的生态安全发展存在绝对  $\beta$  收敛,下游相对于中上游,中值区相对于其他区域,实现了更高的增长率,表明中国多层次、多角度的区域协调发展格局更加完善。

## 4 结论与政策建议

### 4.1 结论

本文以黄河流域资源型城市作为研究对象,以 2010—2020 年作为研究区间,通过模糊物元模型算出城市生态安全不同等级区间边界值并据此对城市进行分级,在此基础上通过核密度曲线、马尔科夫链以及收敛检验等多种分析方法对其生态安全

时空特征及动态演化过程进行分析,得到结论如下:

(1)界定了黄河流域资源型城市生态安全等级边界值。本文根据状态-胁迫-免疫模型计算出黄河流域资源型城市生态安全边界值为 0.222、0.403 与 0.566,分别对应中、良以及优 3 个级别边界值。2010—2020 年间大多数黄河流域为中、良级别,评价为差或是优的城市相对较少。

(2)黄河流域资源型城市生态安全等级尚存在很大提升空间,其在地理位置上呈现“高-低-高”的分布格局。时间上看,黄河流域资源型城市生态安全均值大体上呈现先上升后下降的波动趋势;空间上看,黄河流域资源型城市生态安全存在显著正向空间相关性,并且相关性不断增强。

(3)黄河流域资源型城市生态安全等级转移具有路径依赖性和自身锁定效应。生态安全转变通常发生在相邻的等级之间,极少出现跨等级变化的情况。并且当资源型城市生态安全等级有所提高时,往往会促进周边相邻城市生态安全发展,尤其是对评级为差的资源型城市带动作用更为明显。

(4)黄河流域资源型城市生态安全差异性存在明显的追赶效应,下游与中值区的资源型城市追赶效应更为突出。在地理位置上呈现收敛趋势,即上中下游发展差异有所改善;在生态安全等级方面仅有低值区收敛,可见黄河流域资源型城市生态安全差异有所增加。

### 4.2 政策建议

黄河流域生态保护和高质量发展是国家重大区域战略,资源型城市生态安全有利于促进整个流域生态文明建设、贯彻国家意志。结合本文结论与资源型城市现状,提出如下建议:

(1)基于黄河流域资源型城市生态安全等级普遍不高的现状,在考虑发展差异性的基础上应分区制定发展政策。上游是黄河流域的发源地,水力资源丰富,生态安全水平良好。应在维持生态安全的前提下提高绿色发展能力,减少资源型城市环境发展代价。中游地区承上启下,人口众多,发展活力强。应在作好水土保持工作的基础上,引进高端人才促进战略性新兴产业发展,争创绿色发展示范城市。下游资源型城市区位优势明显,人才聚集性较



2023年4月

强。应在生态安全的基础上打造中心城市群,提高经济和人口承载能力,建造新时代产业体系。

(2)基于黄河流域资源型城市生态安全等级转移规律,应注重生态安全等级较高城市的发展带动作用。生态安全等级较高的城市能够吸收周边地区的要素资源以弥补自身短板,在集聚到一定规模时就能够通过扩散作用,为周边地区提供技术、资金、人才等资源,形成较为紧密的经济生态联系。周边地区通过发展配套产业、提供配套服务等促进本地全方位的发展,由此产生更大空间范围的生态腹地。

(3)基于黄河流域资源型城市生态安全存在追赶效应的状况,在加强区域协调性发展的基础上应实现资源型城市互补发展。黄河流域作为一个有机的整体,应建立多层级多类型的区域合作机制,协调解决跨区域生态问题。为避免协同发展中的资源浪费与重复建设,资源型城市应以需求为主,提出产业发展清单或意向,促进各类资源要素流通,打破城市边界实现加速发展。

## 参考文献(References):

- [1] 张佰发,苗长虹.黄河流域土地利用时空格局演变及驱动力[J].资源科学,2020,42(3):460-473.[Zhang B F, Miao C H. Spatio-temporal changes and driving forces of land use in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(3): 460-473.]
- [2] 于法稳,方兰.黄河流域生态保护和高质量发展的若干问题[J].中国软科学,2020,(6):85-95.[Yu F W, Fang L. Issues regarding the ecological protection and high-quality development of Yellow River Basin[J]. China Soft Science, 2020, (6): 85-95.]
- [3] 傅伯杰,王帅,沈彦俊,等.黄河流域人地系统耦合机理与优化调控[J].中国科学基金,2021,35(4):504-509.[Fu B J, Wang S, Shen Y J, et al. Mechanisms of human-natural system coupling and optimization of the Yellow River Basin[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(4): 504-509.]
- [4] 卢硕,张文忠,李佳铭.资源禀赋视角下环境规制对黄河流域资源型城市产业转型的影响[J].中国科学院院刊,2020,35(1):73-85.[Lu S, Zhang W Z, Li J M. Influence of environmental regulations on industrial transformation of resource-based cities in the Yellow River Basin under resource endowment[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(1): 73-85.]
- [5] Burdge R J, Vancly F. Social impact assessment: A contribution to the state of the art series[J]. Impact Assessment, 1996, 14(1): 59-86.
- [6] Long R Y, Chen H, Li H J, et al. Selecting alternative industries for Chinese resource cities based on intra- and inter-regional comparative advantages[J]. Energy Policy, 2013, 57: 82-88.
- [7] 李博,秦欢,孙威.产业转型升级与绿色全要素生产率提升的互动关系:基于中国116个地级资源型城市的实证研究[J].自然资源学报,2022,37(1):186-199.[Li B, Qin H, Sun W. Interaction mechanism between industrial transformation and upgrading and green total factor productivity improvement: An empirical study based on 116 China's prefecture-level resource-based cities[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(1): 186-199.]
- [8] 谭俊涛,张新林,刘雷,等.中国资源型城市转型绩效测度与评价[J].经济地理,2020,40(7):57-64.[Tan J T, Zhang X L, Liu L, et al. Research on the urban transformation performance of China's resource-based cities[J]. Economic Geography, 2020, 40(7): 57-64.]
- [9] 石涛.黄河流域经济高质量发展水平及科技创新驱动要素分析[J].创新科技,2020,20(4):78-84.[Shi T. Analysis on the high-quality economic development degree and scientific & technological innovation-driven factors in the Yellow River Basin[J]. Innovation Science and Technology, 2020, 20(4): 78-84.]
- [10] 汪涛,张家明,禹湘,等.资源型城市的可持续发展路径:以太原市创建国家可持续发展议程示范区为例[J].中国人口·资源与环境,2021,31(3):24-32.[Wang T, Zhang J M, Yu X, et al. Sustainable development pathway of resource-based cities: A case study of Taiyuan Innovation Demonstration Zone for national sustainable development agenda[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(3): 24-32.]
- [11] 李江苏,孙威,余建辉.黄河流域三生空间的演变与区域差异:基于资源型与非资源型城市的对比[J].资源科学,2020,42(12):2285-2299.[Li J S, Sun W, Yu J H. Change and regional differences of production-living-ecological space in the Yellow River Basin: Based on comparative analysis of resource-based and non-resource-based cities[J]. Resources Science, 2020, 42(12): 2285-2299.]
- [12] 姚珺,李华晶,周佳睿.“双碳”目标下资源型城市韧性研究动态与展望[J].创新科技,2022,22(5):42-56.[Yao J, Li H J, Zhou J R. Research trends and prospects of resource-based urban resilience under the “Dual Carbon” goals[J]. Innovation Science and Technology, 2022, 22(5): 42-56.]
- [13] 武彦斌,彭苏萍.淮南市持续发展的生态安全评价[J].中国人口·资源与环境,2006,(3):107-112.[Wu Y B, Peng S P. Ecological security assessment for sustainable development in Huainan City[J]. China Population, Resources and Environment, 2006, (3): 107-112.]
- [14] 颜茂华,孙佳文,刘铁鑫.中国资源型城市生态系统服务价值评价:基于Meta模型视角[J].干旱区地理,2022,45(6):1949-1957.[Xie M H, Sun J W, Liu T X. Evaluation of ecosystem service value of resource-based cities in China: Based on the perspective of Meta model[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(6): 1949-1957.]



- [15] 王静,袁昕怡,陈晔,等.面向可持续城市生态系统管理的资源环境承载力评价方法与实践应用:以烟台市为例[J].自然资源学报,2020,35(10):2371-2384. [Wang J, Yuan X Y, Chen Y, et al. Evaluation method and application for resources-environment carrying capacity towards sustainable urban ecosystem management: A case study of Yantai City[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(10): 2371-2384.]
- [16] 王回茜,李汉廷,谢苗苗,等.资源型城市工矿用地系统修复的生态安全格局构建[J].自然资源学报,2020,35(1):162-173. [Wang H H, Li H T, Xie M M, et al. Construction of ecological security pattern for systematic restoration of industrial and mining land in resource-based cities[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 162-173.]
- [17] 法子薇,李新春.基于云模型的煤矿资源型城市生态风险评价研究[J].科技管理研究,2021,41(9):190-194. [Fa Z W, Li X C. Study on ecological risk assessment of coal-mining cities based on cloud model[J]. Science and Technology Management Research, 2021, 41(9): 190-194.]
- [18] 李敏纳,蔡舒,覃成林.黄河流域经济空间分异态势分析[J].经济地理,2011,31(3):379-383. [Li M N, Cai S, Qin C L. An analysis of situation of economic spatial dissimilarity in the Yellow River Valley[J]. Economic Geography, 2011, 31(3): 379-383.]
- [19] 张强,薛惠锋,张明军,等.基于可拓分析的区域生态安全预警模型及应用:以陕西省为例[J].生态学报,2010,30(16):4277-4286. [Zhang Q, Xue H F, Zhang M J, et al. Early-warning model based on extension analysis for ecological security and its application: Case study of Shaanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(16): 4277-4286.]
- [20] 王治和,黄坤,张强.基于可拓云模型的区域生态安全预警模型及应用:以祁连山冰川与水源涵养生态功能区张掖段为例[J].安全与环境学报,2017,17(2):768-774. [Wang Z H, Huang K, Zhang Q. Early-warning model for the ecological security and its application based on the extension-liaible theory: A case study of Zhangye section of Qilian Mountain Glacier and Water Conservation Ecological Function Area[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(2): 768-774.]
- [21] 李天宇,董增川,韩锐.基于模糊物元法的黑龙江干流区生态健康评价[J].人民长江,2017,48(23):40-44. [Li T Y, Dong Z C, Han R. Ecological health assessment of Heilongjiang River Basin based on fuzzy matter element method[J]. Yangtze River, 2017, 48(23): 40-44.]
- [22] 吴艳霞,邓楠.基于RBF神经网络模型的资源型城市生态安全预警:以榆林市为例[J].生态经济,2019,35(5):111-118. [Wu Y X, Deng N. Ecological security warning for resource-based cities based on RBF neural network model: Taking Yulin City as an example[J]. Ecological Economy, 2019, 35(5): 111-118.]
- [23] 唐莲,刘子西,齐娅荣.宁夏水资源安全综合评价[J].安全与环境学报,2019,19(5):1810-1816. [Tang L, Liu Z X, Qi Y R. Comprehensive evaluation of urban water resources security in Ningxia Autonomous Region[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(5): 1810-1816.]
- [24] 李银久,李秋华,焦树林.基于改进层次分析法、CRITIC法与复合模糊物元VIKOR模型的河流健康评价[J].生态学杂志,2022,41(4):822-832. [Li Y J, Li Q H, Jiao S L. River health evaluation based on improved analytic hierarchy process, CRITIC method and compound fuzzy matter-element VIKOR model[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(4): 822-832.]
- [25] 刘倩倩,张鑫,吴寒青.基于模糊物元模型旅游生态安全测度及障碍因子分析:以安徽省为例[J].林业经济,2022,44(8):42-60. [Liu Q Q, Zhang X, Wu H Q. Evaluation on tourism ecological security and diagnosis of its obstacle indicators based on fuzzy matter-element model: Example of Anhui Province[J]. Forestry Economics, 2022, 44(8): 42-60.]
- [26] 徐少癸,左逸帆,章牧.基于模糊物元模型的中国旅游生态安全评价及障碍因子诊断研究[J].地理科学,2021,41(1):33-43. [Xu S G, Zuo Y F, Zhang M. Evaluation of tourism ecological security and diagnosis of obstacle factors in China based on fuzzy object element model[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(1): 33-43.]
- [27] 刘华军,乔列成,孙淑惠.黄河流域用水效率的空间格局及动态演进[J].资源科学,2020,42(1):57-68. [Liu H J, Qiao L C, Sun S H. Spatial distribution and dynamic change of water use efficiency in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 57-68.]
- [28] 张赫,黄雅哲,王睿,等.中国县域碳排放脱钩关系及其时空特征演变[J].资源科学,2022,44(4):744-755. [Zhang H, Huang Y Z, Wang R, et al. Decoupling and spatiotemporal change of carbon emissions at the county level in China[J]. Resources Science, 2022, 44(4): 744-755.]
- [29] 穆学青,郭向阳,明庆忠,等.黄河流域旅游生态安全的动态演变特征及驱动因素[J].地理学报,2022,77(3):714-735. [Mu X Q, Guo X Y, Ming Q Z, et al. Dynamic evolution characteristics and driving factors of tourism ecological security in the Yellow River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(3): 714-735.]
- [30] 何刚,王莹莹,阮君,等.基于Dagum基尼系数的生态安全区域差异及收敛度研究:以淮河生态经济带安徽段为例[J].水土保持研究,2021,28(6):348-355. [He G, Wang Y Y, Ruan J, et al. Study on regional differences and convergence of ecological security based on Dagum Gini coefficient: Taking Anhui section of Huaihe Eco-economic Belt as an example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(6): 348-355.]
- [31] 许欣,张文忠.中国四大区域板块:增长差异、比较优势和“十四五”发展路径[J].经济地理,2021,41(7):1-9. [Xu X, Zhang W Z. Economic growth differentiation: Competitive advantage and development pathway of the 14th Five-Year Plan in four regions of China[J]. Economic Geography, 2021, 41(7): 1-9.]

# Ecological security level of resource-based cities in the Yellow River Basin and trend of change

ZHANG Guoxing<sup>1,2</sup>, ZHANG Jingyu<sup>1</sup>, ZHOU Guifang<sup>3</sup>

(1. School of Management and Economics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. The Research Center for the Sustainable Development of Eco-Economic System in the Yellow River Basin, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 3. School of Management, Henan University of Chinese Medicine, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** [Objective] This study aimed to examine the boundary of ecological security level of resource-based cities in the Yellow River Basin, and analyze the transfer rule and convergence characteristics of ecological security level reflected in different time and space, in order to provide a reference for the high-quality development of resource-based cities. [Methods] The ecological security evaluation system of resource-based cities in the Yellow River Basin was established based on the state-stress-immunity (SDI) model, and the ecological security class boundary of these cities was estimated by the fuzzy matter-element model. The spatial and temporal distribution characteristics were analyzed based on the kernel density curve and Moran's I index, the spatiotemporal transfer rules were analyzed by the Markov chain and spatial Markov chain, and the convergence characteristics were studied by convergence and absolute test. [Results] This paper defines the boundary value of ecological security level of resource-based cities in the Yellow River Basin. The ecological security level of resource-based cities in the Yellow River Basin still has a large space for improvement, and it presented a V-shaped development trend temporally and a high-low-high distribution pattern spatially. The transfer of ecological security level of these cities were path-dependent and showed a lock-in effect, and the change of ecological security usually occurred between adjacent levels. The difference of ecological security of resource-based cities in the Yellow River Basin showed obvious catch-up effect, which was more prominent in the lower reaches and the medium-value areas. [Conclusion] Based on the current situation that the ecological security level of resource-based cities in the Yellow River Basin is generally low, development policies should be formulated in different areas considering differences in development stage. Based on the transfer pattern of ecological security level of these cities, attention should be paid to the leading role of cities with higher ecological security level. Based on the catch-up effect of ecological security of these cities, complementary development of resource-based cities should be realized on the basis of strengthening regional coordinated development.

**Key words:** ecological security; state-stress-immunity (SDI) model; fuzzy matter-element model; resource-based cities; Yellow River Basin