

# 耕地生态安全动态评价及障碍因子诊断

## ——以黄河下游沿黄县区为例

韩 磊, 宋子言

(山东财经大学 公共管理学院, 山东 济南 250014)

**摘 要:** [目的] 对黄河流域下游耕地生态安全进行动态评价, 并诊断其人为障碍因子, 旨在发现人类不合理行为对下游耕地生态安全造成的危害, 为黄河下游生态保护和高质量发展提供现实科学依据。[方法] 以黄河下游沿黄 49 县区为研究对象, 基于 PSR 模型构建耕地生态安全评价指标体系, 运用物元可拓、马尔科夫链模型等方法开展研究。[结果] ①2000—2018 年黄河下游沿黄县区耕地生态安全等级整体呈上升趋势, 由Ⅳ级提升到Ⅰ级, 其中 2010 年后变化尤为明显; ②2000—2018 年各县区耕地生态安全等级由不定向稳定过渡, 在空间上呈现由东北部高, 中西部低向东北—西南部高, 中部低转变的特征, 且空间差异持续缩小; ③人均耕地面积、人口密度、单位耕地面积化肥使用量是影响黄河下游沿黄县区耕地生态安全等级的主要人为障碍因子。[结论] 研究期内黄河下游沿黄县区耕地生态安全等级总体呈上升趋势, 各县区耕地生态安全等级空间差异持续缩小, 受人类活动因素影响较大。未来应从壮大新型农业经营主体、实施归雁工程、构建智慧耕地平台三方面促进黄河流域耕地生态安全等级的提高。

**关键词:** 耕地生态安全; 黄河下游沿黄县区; 动态评价; 人为障碍因子

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2021)06-0148-09

**中图分类号:** X826

**文献参数:** 韩磊, 宋子言. 耕地生态安全动态评价及障碍因子诊断[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 148-156. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.021; Han Lu, Song Ziyuan. Dynamic evaluation and obstacle factor diagnosis of cultivated land ecological security [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 148-156.

## Dynamic Evaluation and Obstacle Factor Diagnosis of Cultivated Land Ecological Security

— A Case Study at Counties Along Lower Yellow River

Han Lu, Song Ziyuan

(School of Public Administration and Policy, Shandong University of Finance and Economics, Ji'nan, Shandong 250014, China)

**Abstract:** [Objective] The ecological security of cultivated land in the lower reaches of the Yellow River was dynamically evaluated to diagnose the factors of man-made obstacles, in order to discover the harm caused by unreasonable human behaviors to the ecological security of cultivated land and provide realistic scientific basis for ecological protection and high-quality development of the lower reaches of the Yellow River. [Methods] The cultivated land ecological security evaluation index system was established based on PSR model in 49 counties along the lower reaches of the Yellow River, and matter-element extension and Markov chain model were used in the analysis. [Results] ① From 2000 to 2018, the ecological security level of cultivated land in counties along the lower reaches of the Yellow River showed an overall upward trend, from level Ⅳ to level Ⅰ, especially after 2010. ② From 2000 to 2018, the cultivated land ecological security level of each county and district had a transition from unstable to stable, showing a spatial transition from higher in the northeast and lower in the central and western regions to higher in the northeast-southwest and lower in the central region, and the spatial differences continued to shrink. ③ Per capita arable land area, population density, and the amount of chemical fertilizer used per arable land area were the main human obstacles affecting the ecological

security of cultivated land in the lower reaches of the Yellow River. [Conclusion] During the study period, the ecological security level of cultivated land along the lower reaches of the Yellow River showed an upward trend, and the spatial difference of cultivated land ecological security level in each county continued to narrow, which was greatly affected by human activities. In the future, we should promote the improvement of cultivated land ecological security level in the Yellow River basin from three aspects: expanding new agricultural management subjects, implementing geese returning project and constructing intelligent cultivated land platform.

**Keywords:** ecological security of cultivated land; counties along the lower reaches of the Yellow River; dynamic evaluation; human obstacle factor

保障耕地数量和质量是国家粮食安全的根本,中国作为人口大国,耕地和种子是推动其粮食安全的关键要素,也是 2021 年确定的两大重点。近年来,日益频繁的人类活动,加重了对耕地广度与深度的不合理利用,出现了耕地数量骤减、投入产出效率不高、生态环境恶化等一系列问题<sup>[1]</sup>。黄河下游是中国的粮产基地与生态屏障,在社会经济与生态文明的顶层设计中具有重要地位<sup>[2]</sup>。但目前,黄河下游存在着资源约束与环境约束的双重压迫,在资源约束方面,黄河下游依靠 13% 的耕地资源和 1.2% 的水资源支撑着全中国近 15% 人口的粮食需求;在环境约束方面,大量农药、化肥、地膜等投入带来诸多环境污染问题。2020 年国务院印发《关于防止耕地“非粮化”稳定粮食生产的意见》,文件提出不能简单的以经济效益决定耕地用途,必须科学合理利用耕地资源,防止其无序发展<sup>[3]</sup>。因此,在“十四五”期间如何有效诊断人为限制因素,提升黄河下游耕地生态安全等级,促进全流域粮食安全、经济繁荣、人地和谐可持续成为亟待解决的课题。如何评价耕地生态安全是农学、土壤学和地理学关注的热点,国内外学者对耕地生态安全评价的研究主要集中在以下方面:①概念内涵。最初学者们<sup>[4]</sup>认为耕地生态安全是耕地生态系统自身处于健康且不被破坏的状态,该定义更倾向于耕地生态系统自身的状态。随着学科发展,越来越多的学者<sup>[5-6]</sup>着眼于人地关系,认为耕地生态安全是保证耕地生态系统结构与功能不被损坏前提下,又能为人类可持续发展提供稳定的生态与物质服务。目前,更多文献<sup>[7]</sup>基于人地协调视角,提出耕地生态安全是在自然系统、经济系统、社会系统相互耦合的作用下,耕地生态系统结构与功能不被损坏前提下,并满足人类可持续发展所需要的状态。②指标体系。学者们尝试从单一视角<sup>[8]</sup>向 PSR(压力—状态—响应)<sup>[9-10]</sup>、DPSIR(驱动力—压力—状态—影响—响应)<sup>[11-12]</sup>、EES(经济—环境—社会)等<sup>[13-14]</sup>综合视角转变,从经济发展条件、人口、社会、资源环境等多维度构建评价

指标体系。③评价方法。早期文献<sup>[15]</sup>多以定性研究为主,为耕地生态安全评价提供理论基础。当前,耕地生态安全评价多用定性与定量研究相结合的方法,且由静态评价逐渐过渡到动态评价。常用的评价方法主要包括综合指数法<sup>[16]</sup>、生态足迹模型<sup>[17]</sup>、投影寻踪模型<sup>[18]</sup>、景观生态模型等<sup>[19]</sup>。总体而言,现有文献针对流域尺度耕地生态安全的文献较少,尤其对黄河流域耕地生态安全的研究不多见。同时,黄河下游作为粮食主产区,虽耕地质量较高,但人地关系失调、农田面源污染突出等人为问题已经成为阻碍其社会经济可持续发展的主要因素。鉴于此,本文以黄河流域流经下游沿黄 49 县区为研究对象,基于 PSR(压力—状态—响应)模型建立指标体系,根据物元可拓模型、马尔科夫链模型等方法,对黄河流域下游 2000—2018 年耕地生态安全进行动态评价,并诊断其人为障碍因子,旨在发现人类不合理行为对下游耕地生态安全造成的危害,为黄河下游生态保护和高质量发展提供科学依据。

## 1 研究区概况

黄河下游从河南郑州市桃花峪开始划分到山东垦利区注入渤海,考虑到河南省布局规划的完整性,故将黄河中游的三门峡市、洛阳市、济源市三市的沿黄县区一同列为研究对象。因此,本文选取黄河下游(山东省、河南省)直接流经的 49 个县区为研究区域,原因是黄河下游虽作为黄河流域最发达区域,但受制于人口密度较大、长期不合理土地资源开发与利用、水土侵蚀等问题,耕地生态系统受到较大威胁。研究尺度为县域尺度更符合耕地的特性,将生态宏观问题寓于微观角度加以剖析,则更能刻画黄河流域与流经县区耕地生态安全的相互影响关系,以探究应对生态问题的提升路径。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

本文选取 2000, 2005, 2010, 2015 和 2018 年作为

研究时间点,与国民经济五年规划相结合。本文使用的数据均来自 2001,2006,2011,2016 和 2019 年《山东统计年鉴》《河南统计年鉴》《中国县域统计年鉴》以及各地级市统计局官方网站,部分县区耕地数据来自县区《土地利用总体规划》,土壤数据来自耕地质量等级数据库,针对个别县区数据缺失问题,采用相邻年份数据代替。

## 2.2 研究方法

**2.2.1 数据标准化处理** 因文中各指标单位之间存在差异,故须为原始数据做标准化处理,运用极差法能减少各个指标中数量级间差异。指标分为正向、负向指标,其中正向指标表示随着指标数值升高,耕地生态安全等级也随之变高;负向指标表示随着指标数值的降低,耕地生态安全等级同样变高。

**2.2.2 指标权重确定** 相较于主观赋权法,客观性更强的熵权法是依据各项指标的变异等级确定其指标权数,其中信息熵能准确地反映出指标的信息量,能够更科学合理地解释所得到的结果。因此,本文采用该方法<sup>[13,16]</sup>对耕地生态安全各项指标进行赋权,具体权重结果详见表 1。

**2.2.3 模型构建** 物元模型将评价对象不相容的矛盾问题转为相容问题,在对整体对象进行评价的同时又能对各个指标进行分异,对于受自然、经济、社会等多要素指标影响的耕地生态安全评价具有较强的客观性与可适性。

(1) 确立耕地生态安全物元。耕地生态安全物元  $R=(N, c, v)$ ,其中  $N$  为描述的对象,即耕地生态安全评价; $c$  为特征向量,即耕地生态安全评价的各个指标; $v$  为特征量值,即各个评价指标的实际数值。

$$R = \begin{pmatrix} N & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

(2) 确立经典域和节域物元。

$$R_{or} = \begin{pmatrix} N_{or} & c_1 & \langle a_{or1}, b_{or1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{or2}, b_{or2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{orn}, b_{orn} \rangle \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$R_p = \begin{pmatrix} N_p & c_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: $R_{or}$  为耕地生态安全的经典域物元; $N_{or}$  为第  $r$  个评价等级; $c_n$  为第  $n$  个评价指标; $\langle a_{orn}, b_{orn} \rangle$  为关于评价指标  $c_n$  对应等级  $r$  的取值范围; $R_p$  为节

域物元; $\langle a_{pn}, b_{pn} \rangle$  为评价指标  $c_n$  的总取值范围。

(3) 确立关联函数和关联度。

$$K(x_j) \begin{cases} \frac{-\rho(x, X_o)}{d_x} & (x \in X_o) \\ \frac{\rho(x, X_o)}{\rho(x, X_p) - \rho(x, X_o)} & (x \notin X_o) \end{cases} \quad (4)$$

其中:

$$\rho(x, X_o) = \left| x - \frac{1}{2}(a+b) \right| - \frac{1}{2} \quad (5)$$

式中: $\rho(x, X_o)$  为点  $x$  与对应的评价指标的有限区间即  $X_o=[a, b]$  的距离; $\rho(x, X_p)$  为点  $x$  与对应的评价指标节域的有限区间即  $X_p=[a, b]$  的距离; $x$  为待评价物元的取值; $X_o$  为经典物元取值范围; $X_p$  为节域物元取值范围。

(4) 确立综合关联度和评价等级。

$$K_r(N_x) = \sum_{j=1}^n W_j K_r(x_j) \quad (6)$$

式中: $K_r(N_x)$  为耕地生态安全关于等级  $r$  的综合关联度; $W_j$  为耕地生态安全各项指标的权重; $K_r(x_j)$  为单项指标关于等级  $r$  的关联度。

$0 \leq K(x) < 1$ , 表示评价对象符合评价等级,数值越大则表明对应的评价等级越稳定; $-1 \leq K(x) \leq 0$ , 表示评价对象不完全符合评价等级,但是具备向评价等级转变的条件,同时,随着数值的增大,转化可能性也增大;若  $K(x) < -1$ , 表示评价对象不符合标准等级要求。确定评价指标最终属于哪个等级采取最大值标准,即  $K_{rj} = \max[K_r(x_j)]$ , 则表示各评价指标等级为  $r$  级; $K_{rx} = \max[K_r(N_j)]$ , 则表示评价事物  $N_x$  等级为  $r$  级。

**2.2.4 马尔科夫链** 耕地生态安全等级之间会相互转化,耕地生态安全格局的动态变化符合马尔科夫过程,能够有效的反映等级的变化过程<sup>[20-21]</sup>。具体为:

$$M = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & \cdots & M_{1q} \\ M_{21} & M_{22} & \cdots & M_{2q} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{p1} & M_{p2} & \cdots & M_{pq} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中: $M_{pq}$  为年份  $t$  中生态安全等级为  $p$  的县区转换到安全等级为  $q$  的概率,  $M_{pq} = \frac{C_{pq}}{C_p}$ , 其中  $C_{pq}$  为年份  $t$  中安全等级为  $p$  类型的县区下一年转移到  $q$  安全等级的所有县区之和; $C_p$  为所有年份中属于  $p$  安全类型县区之和。若某一县区在  $t$  年份和下一年份中耕地生态安全等级不变,则说明该县区的耕地生态安全等级转移较为稳定;若耕地生态安全等级提升,则转移矩阵向上移动,反之,向下移动。

**2.2.5 障碍因子诊断** 障碍度模型作为诊断区域生

态安全的重要方法,已在诸多领域得到应用<sup>[22-24]</sup>。障碍度模型包括因子贡献度( $R_j$ )、指标偏离度( $P_{ij}$ )、障碍度( $M_{ij}$ )3个指标。

$$M_{ij} = \frac{R_j \cdot P_{ij}}{\sum_{j=1}^n (R_j \cdot P_{ij})} \times 100\% \quad (8)$$

式中: $M_{ij}$ 为第  $j$  项指标对第  $i$  年耕地生态安全的障碍度; $R_j$ 为各项指标的权重; $P_{ij} = 1 - y_{ij}$ 表示指标与发展目标之间的偏差; $y_{ij}$ 为各指标的标准化值。

2.2.6 指标体系构建 基于已有研究,本文将耕地生态安全定义为当耕地资源所处的生态环境处于不被损害的健康状态下,耕地生态系统既可以维持自身功能结构正常运行,又可以满足人类社会经济可持续发展的需求。PSR 模型以因果关系为基础,能够客观说明经济社会发展与生态环境之间的协调程度,为耕地生态安全评价提供了理论基础。文中在参考已有文献的基础上<sup>[8,10-14,20-21,25-26]</sup>,从社会—经济—自然 3 方面出发,遵循科学性与代表性原则,根据黄河下游耕地的实际情况,重点选取 19 个指标建立耕地生态安全指标体系(表 1)。

①压力层反映了人口增长、社会经济发展对耕地生态系统造成较好与较坏的影响。人口自然增长率与人口密度表示人口对耕地生

态系统施加的负荷,两者的数值越高,耕地生态安全压力越大;单位耕地面积地膜、化肥、农药使用量指在粮食生产过程中耕地生态系统内部遭到的破坏,三者是土壤有机质流失、重金属增加、酸化的重要原因;人均 GDP 和城镇化率表征经济高速发展对耕地生态系统带来的影响。

②状态层反映了耕地生态系统目前所处的状态。人均耕地面积与耕地面积比重反映了耕地资源被建设用地占用、撂荒的状况,突出了其稀缺程度;单位耕地面积粮产量代表了粮食保障供给能力以及粮食数量安全程度;农民人均可支配收入表示了农民的耕地生产收益;土壤容重、pH 值、有机质含量反映了耕地质量的自然属性。

③响应层反映了人类根据耕地生态系统目前的压力与状态所做出的举措。水土协调度表示水利基础设施建设对耕地旱情的缓解程度;耕地旱涝保收率突出了政府对耕地旱涝灾害的治理力度;单位耕地农业机械化水平表示了农业生产条件和技术水平对耕地生态系统的影响,其农业技术水平越高,对耕地生态系统的损害越小;农业从业人员投入反映了高素质农业技术人员对耕地生态系统的提升作用;第一产业占 GDP 比重反映了耕地资源受第二、三产业的驱动变化情况。

表 1 耕地生态安全评价指标体系

目标层	准则层	指标层	趋势	权重
耕地生态安全	压力层	$C_1$ 人均 GDP(元/人)	正	0.058
		$C_2$ 人口自然增长率/%	负	0.055
		$C_3$ 人口密度/(人·km <sup>-2</sup> )	负	0.063
		$C_4$ 单位耕地面积地膜使用量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	负	0.043
		$C_5$ 单位耕地面积化肥使用量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	负	0.058
		$C_6$ 单位耕地面积农药使用量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	负	0.049
		$C_7$ 城镇化率/%	正	0.066
	状态层	$C_8$ 人均耕地面积(hm <sup>2</sup> /人)	正	0.074
		$C_9$ 耕地面积比重/%	正	0.065
		$C_{10}$ 单位耕地面积粮产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	正	0.046
		$C_{11}$ 农民人均可支配收入(元/人)	正	0.048
		$C_{12}$ 土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	负	0.031
		$C_{13}$ 土壤 pH 值	正	0.035
	响应层	$C_{14}$ 土壤有机质含量/%	正	0.042
		$C_{15}$ 水土协调度/%	正	0.063
		$C_{16}$ 耕地旱涝保收率/%	正	0.045
		$C_{17}$ 单位耕地农业机械化水平/%	正	0.044
		$C_{18}$ 农业从业人员投入/(人·hm <sup>-2</sup> )	正	0.056
		$C_{19}$ 第一产业占 GDP 比重/%	正	0.059

2.2.7 耕地生态安全经典域和节域物元的确定 根据耕地生态安全的可拓性,将其划分为安全(I级)、较安全(II级)、临界安全(III级)、较不安全(IV级)、不安全(V级)。

经典域的范围确定一般要参考相关国际或国家

的行业标准,但目前对耕地生态安全评价指标没有统一的参考标准,因此本文主要依据《河南省省级生态县建设指标》《山东省省级生态文明建设示范区指标》、现有研究成果<sup>[8,12-14,25-28]</sup>来确定经典域与节域,具体标准详见表 2。



表 2 耕地生态安全评价指标经典域与节域取值范围

指标	经典域取值区间					节域取值区间
	安全(I)	较安全(II)	临界安全(III)	较不安全(IV)	不安全(V)	
$C_1$	[70 000,150 000)	[40 000,70 000)	[26 500,40 000)	[12 000,26 500)	[0,12 000)	[0,150 000)
$C_2$	[0,4)	[4,7)	[7,12)	[12,18)	[18,30)	[0,30)
$C_3$	[0,200)	[200,400)	[400,590)	[590,800)	[800,1 600)	[0,1 600)
$C_4$	[0,6)	[6,12)	[12,19)	[19,30)	[30,70)	[0,70)
$C_5$	[0,200)	[200,400)	[400,550)	[550,800)	[800,1 500)	[0,1 500)
$C_6$	[0,3)	[3,5)	[5,8)	[8,20)	[20,140)	[0,140)
$C_7$	[80,100)	[80,60)	[60,40)	[40,20)	[0,20)	[0,100)
$C_8$	[0.25,0.5)	[0.1,0.25)	[0.05,0.1)	[0.03,0.05)	[0,0.05)	[0,0.5)
$C_9$	[0,25)	[25,45)	[45,65)	[65,80)	[80,100)	[0,100)
$C_{10}$	[10 000,12 000)	[8 000,10 000)	[6 000,8 000)	[4 000,6 000)	[2 000,4 000)	[0,12 000)
$C_{11}$	[10 000,15 000)	[7 000,10 000)	[5 500,7 000)	[2 500,5 500)	[0,2 500)	[0,15 000)
$C_{12}$	[1,1.25)	(0,1),[1.25,1.35)	[1.35,1.45)	[1.45,1.55)	[1.55, +∞)	[0, +∞)
$C_{13}$	[6,7.9)	[5.5,6)	[5.5,5.5)	[4.5,5)	[0,4.5)	[0,7.9)
$C_{14}$	[40,100)	[30,40)	[20,30)	[10,20)	[0,10)	[0,100)
$C_{15}$	[80,100)	[60,80)	[45,60)	[25,45)	[0,25)	[0,100)
$C_{16}$	[80,100)	[60,80)	[45,60)	[20,45)	[0,20)	[0,100)
$C_{17}$	[24,30)	[18,24)	[13,18)	[6,13)	[0,6)	[0,30)
$C_{18}$	[3,6)	[1.5,3)	[1,1.5)	[0.1,1)	[0,0.1)	[0,6)
$C_{19}$	[30,60)	[15,30)	[10,15)	[6,10)	[0,6)	[0,60)

### 3 结果与分析

#### 3.1 黄河下游耕地生态安全等级时间变化

将指标数据输入公式(4),得到各个指标的关联度,再将各指标关联度和权重输入公式(5),计算出2000—2018年黄河下游沿黄县区耕地生态安全的评价等级(表3)。整体而言,2000—2018年黄河下游沿黄县区耕地生态安全等级从Ⅳ级向Ⅰ级转变,耕地生态安全等级持上升趋势。其中,2000与2005年黄河下游沿黄县区耕地生态安全等级为Ⅳ级,2000年综合关联度在 $[-1,0]$ 之间,属于不稳定的Ⅳ级;2005年的综合关联度在 $[0,1]$ 之间,属于稳定的Ⅳ级,耕地生态安全

等级有所改善。2010年耕地生态等级跃升到Ⅱ级,这是因为该年是“十一五规划”的收官之年,各县区在政策驱动下更好地贯彻了国家提出的耕地红线、倡导生态文明建设等一系列政策和建议,为其耕地生态安全等级提升起到了积极影响。2015与2018年的安全等级均为Ⅰ级,并且 $K_j(N_{2018}) > K_j(N_{2015})$ ,说明与Ⅰ级的综合关联不断提高,这是由于“十三五”规划明确提出要从根本解决生态环境污染、耕地土壤退化等问题,凸显了农业绿色发展的重要性,耕地生态安全持续向安全转化。虽然2000—2018年黄河下游沿黄县区总体耕地生态安全等级不断提高,但数值仍在 $[-1,0]$ 之间,安全等级不够稳定,有等级下滑的风险。

表 3 黄河下游耕地生态安全整体评价结果

综合关联度	生态安全等级					转化方向
	I	II	III	IV	V	
$K_j(N_{2000})$	-0.404	-0.211	-0.315	-0.145	-0.317	向Ⅳ转化
$K_j(N_{2005})$	-0.510	-0.257	-0.227	0.021	-0.167	Ⅳ
$K_j(N_{2010})$	-0.430	-0.102	-0.224	-0.128	-0.332	向Ⅱ转化
$K_j(N_{2015})$	-0.232	-0.411	-0.463	-0.396	-0.512	向Ⅰ转化
$K_j(N_{2018})$	-0.230	-0.376	-0.398	-0.385	-0.484	向Ⅰ转化

以黄河下游沿黄各县区为单位,将各县区指标数据带入上述公式得到黄河下游沿黄各县区耕地生态安全综合关联度,详见表4。结果表明,2000—2018年处于Ⅴ等级和Ⅳ等级的县区不断减少,处于Ⅲ等级

和Ⅰ等级的县区不断增加,处于Ⅱ等级的县区先增加后减少,高等级耕地生态安全县区数量不断增加,低等级耕地生态安全县区数量不断减少,呈不断改善的趋势。

表4 各县区耕地生态安全等级分布

年份	各等级耕地生态安全县区数量					总数
	I	II	III	IV	V	
2000	0	2	2	39	6	49
2005	0	4	6	39	0	49
2010	3	11	9	26	0	49
2015	7	11	14	17	0	49
2018	12	5	21	11	0	49

注:2014年开封县更名为祥符区;撤销开封市龙亭区、金明区,合并成新的龙亭区。

### 3.2 黄河下游耕地生态安全等级空间变化

3.2.1 耕地生态安全空间格局变化 利用GIS可视化分析,得到2000—2018年黄河下游沿黄各县区耕地生态安全等级分布图(图1)。整体看来,2000—2018年黄河下游沿黄县区耕地生态安全等级在空间上呈现出东北—西南高,中部低的分布格局,安全等级较高县区集中在济南、东营、三门峡、开封市的县

区,等级较低县区集中在菏泽、滨州、濮阳、洛阳等县区,呈现由发达县区向较不发达县区扩展的梯度等级分布特征。其中,2000年耕地生态安全为IV级的县区占比较大,且遍布全域;2005年II与III等级县区小幅度增加,主要位于黄河下游中部的开封市(开封县、龙亭区)以及东部的济南市(槐荫区、长清区等)、东营市(河口区),其耕地生态安全等级有所提升;2010年黄河下游沿黄县区等级较高区域由2005年的东北部向东北—西南部方向发展;2015—2018年,IV等级县区不断减少,等级较高区域稳定在东北—西南部区域,多数县区从IV级转化到III级和I级。总体而言,黄河下游沿黄县区耕地生态安全等级呈逐渐改善趋势,但其等级提升速度不一致,如东营区、天桥区、东阿县、惠民县、兰考县等提升较快;东平县、惠民县、中牟县、濮阳县等提升较慢,各县区耕地生态安全等级仍有较大的提升空间。

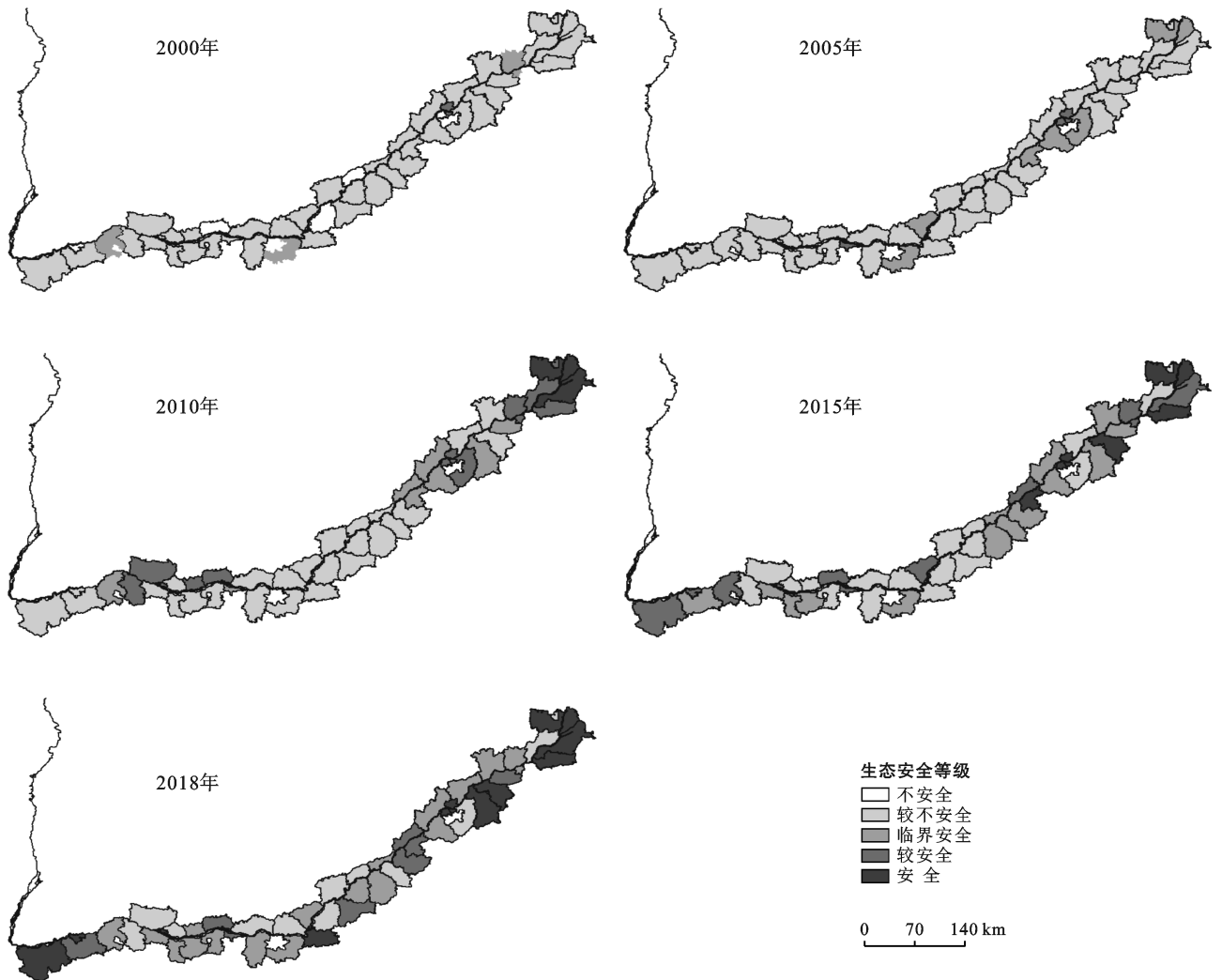


图1 黄河下游沿黄县区2000—2018年耕地生态安全等级空间格局变化

3.2.2 空间转移特征 运用传统 Markov 链模型构建黄河下游沿黄县区 2000—2005 年, 2005—2010 年, 2010—2015 年, 2015—2018 年耕地生态安全 Markov 概率转移矩阵, 将各县区在 5 个时间断点的耕地生态安全等级从不安全到安全, 分成 5 个等级类型(表 5), 对角线位置的数据代表各县区耕地生态安全等级不发生转移的可能性, 非对角线位置上的数据代表各县区耕地生态安全等级发生转移的可能性<sup>[20]</sup>。

2000—2005 年, 对角线上的数据并非完全大于非对角线上的数据, 这表明各县区耕地生态安全等级并不稳定; V 级向 IV 级、II 级转移的概率分别为 0.833 和 0.166 7, IV 级向 III 级、II 级转移概率分别为 0.158 和 0.026, 表明黄河下游沿黄各县区耕地生态安全等级呈跳跃式发展, 即有跨等级转移概率发生。2005—2010 年, 对角线位置上的数据均大于非对角线位置上的数据, IV 级不发生转移的概率较之前下降 0.21,

III 级不发生转移的概率增加 0.09, V 级、II 级、I 级不发生转移概率不变, 各县区耕地生态安全等级保持一致概率减少, 且 IV 级与 III 级跨等级转移概率增加, 表明各县区耕地生态安全等级流动性加强, 持续性减弱, 耕地生态安全等级空间差异增大。2010—2015 年, 对角线位置上的数据未全部大于非对角线位置上的数据, IV 级、II 级不发生转移的概率相较于之前分别下降 0.165 和 0.228, IV 级向 III 级、I 级转移概率增加, II 级向下转移概率同样增加, 表明各县区之间的等级转移更加频繁, 耕地生态安全等级趋向不稳定状态, 其空间差异进一步增大。2015—2018 年, 虽对角线上的数据未全部大于非对角线上的数据, 但各个等级同水平转移概率较之前都有所增加。各县区耕地生态安全等级保持不变概率增大, IV 级、III 级向上移动概率减少, I 级向下移动概率减少, 各安全等级在县区之间转换减弱, 持续性增强, 耕地生态安全等级空间差异缩小。

表 5 黄河下游沿黄县区 2000—2018 年耕地生态安全等级转移概率矩阵

年份	安全等级	转移概率				
		不安全	较不安全	临界安全	较安全	安全
2000—2005	不安全	0	0.833 333 3	0	0.166 666 7	0
	较不安全	0	0.815 789 5	0.157 894 7	0.026 315 8	0
	临界安全	0	0.333 333 3	0.333 333 3	0.333 333 4	0
	较安全	0	0.5	0	0.5	0
	安全	0	0	0	0	0
2005—2010	不安全	0	0	0	0	0
	较不安全	0.026 315 8	0.605 263 2	0.131 579 0	0.210 526 3	0.026 315 8
	临界安全	0	0.285 714 3	0.428 571 4	0.142 857 1	0.142 857 1
	较安全	0	0	0.25	0.5	0.25
	安全	0	0	0	0	0
2010—2015	不安全	0	0	0	0	0
	较不安全	0	0.44	0.4	0.12	0.04
	临界安全	0	0	0.444 444 4	0.444 444 4	0.111 111 1
	较安全	0	0.454 545 5	0	0.272 727 3	0.272 727 3
	安全	0	0	0	0.333 333 3	0.666 666 7
2015—2018	不安全	0	0	0	0	0
	较不安全	0	0.588 235 3	0.352 941 2	0	0.058 823 5
	临界安全	0	0.071 428 5	0.785 714 3	0.071 428 6	0.071 428 6
	较安全	0	0	0.363 636 3	0.272 727 3	0.363 636 4
	安全	0	0	0	0.142 857 1	0.857 142 9

### 3.3 耕地生态安全障碍因子诊断

黄河下游作为中国重要粮产基地, 耕地质量水平较高, 但由于人类不恰当的行为导致其生态系统不断遭到破坏, 因此诊断黄河下游耕地生态安全的人为障碍因子是十分必要的。本文筛选出障碍度位于前 5 的指标作为主要人为障碍因子, 选取  $C_1$ — $C_{11}$ ,  $C_{15}$ — $C_{19}$  共 16 个人为因素指标进行障碍度计算(表 6), 以

期对提高黄河下游耕地生态安全等级提出准确有效的政策建议。由表 6 可知, 阻碍黄河下游沿黄县区耕地生态安全等级的前 3 人为障碍因子在 20 a 内基本一致, 从强到弱依次为人均耕地面积( $C_8$ )、人口密度( $C_3$ )、单位耕地面积化肥使用量( $C_5$ )。山东、河南省人口密度在 2000—2018 年呈不断上升趋势, 人口密度的增高导致与人类密切相关的用地需求也不断升

高,使得商业区、城镇住宅区、农村居民点范围不断外延,耕地资源面临较大的占有压力,人地关系矛盾凸显,耕地承载力超载。同时,黄河下游沿黄县区农业发展极度依赖水源,高密度人口使各县区在耕地灌溉方面加剧了对黄河水的利用强度,造成水资源短缺与污染,破坏了耕地生态系统稳定性。据年鉴数据统计,黄河下游沿黄 49 县区单位耕地面积化肥使用量在 2000、2010 和 2018 年的均值使用量分别为 637、671、684 kg/hm<sup>2</sup>。化肥使用量的增加虽减少了农作物虫害出现的概率,但会使土壤金属成分增加,造成土壤板结化,这加大了耕地生态系统恶化的风险性。其他主要人为障碍因子如单位耕地农药使用量(C<sub>6</sub>)、水土协调度(C<sub>15</sub>)的障碍度近几年呈下降趋势;第一产业占 GDP 比重(C<sub>19</sub>)、农业从业人员投入(C<sub>18</sub>)的障碍度近几年呈上升趋势,对耕地生态安全等级的提升也会产生不同程度的制约作用。其中,农业从业人

员投入(C<sub>18</sub>)障碍度较高的区域集中在滨州、菏泽、焦作市的县区,其原因是该 3 市县区的就业环境与社会服务环境相较于山东与河南的其他区域稍显匮乏,人才流失严重。此外,从事农业的人员年龄偏大且专业素质较低,人才数量与质量的不足制约着其农业的可持续发展。第一产业占 GDP 比重(C<sub>19</sub>)障碍度较高的区域集中在济南、郑州、洛阳和新乡市的县区。其中,2000 年以来随着城镇化的迅速发展,众多的项目涌入济南市促使其产业结构转变与升级,城市空间的快速膨胀,基础设施不断完备,第二、三产业值在研究期内分别扩大了 8 与 11 倍,导致建设用地规模需求增大,加剧了对耕地的占用;河南段沿黄县区是能源产业集聚地带,其二、三产业较多,尤其是郑州、洛阳、新乡作为中原重要核心城市,其沿黄县区建设用地和工业用地需求持续增加,使耕地生态等级变化受二、三产业占比驱动较强。

表 6 耕地生态安全保障因子、障碍度排序

区域	年份	项目	指标排序				
			1	2	3	4	5
黄河下游	2000	障碍因子	C <sub>8</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>17</sub>
		障碍度/%	12.60	12.28	11.63	10.64	7.42
	2005	障碍因子	C <sub>8</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>15</sub>
		障碍度/%	12.72	12.64	11.76	8.73	8.31
	2010	障碍因子	C <sub>5</sub>	C <sub>8</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>15</sub>
		障碍度/%	13.08	12.89	12.31	8.21	7.54
	2015	障碍因子	C <sub>5</sub>	C <sub>8</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>15</sub>
		障碍度/%	13.69	13.67	13.26	7.14	6.33
	2018	障碍因子	C <sub>8</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>19</sub>	C <sub>18</sub>
		障碍度/%	12.65	12.56	12.12	7.19	6.36

## 4 结论与政策建议

### 4.1 结论

(1) 时间变化上,2000—2018 年黄河下游沿黄县区耕地生态安全等级整体呈上升趋势,由Ⅳ级提升到Ⅰ级,其中 2010 年后变化尤为明显。各县区耕地生态安全等级逐步提升,处于Ⅴ等级和Ⅳ等级的县区不断减少,Ⅲ等级和Ⅰ等级的县区不断增加。

(2) 空间变化上,2000—2018 年各县区耕地生态安全等级由不稳定状态向稳定状态过渡,在空间上呈现由东北部高,中西部低向东北—西南部高,中部低转变的特征,且空间差异持续减小。

(3) 通过障碍因子诊断可知,黄河下游沿黄县区的前 3 人为障碍因子近 20 a 基本一致,依次是人均耕地面积、人口密度、单位耕地面积化肥使用量。同时,

第一产业占 GDP 比重、农业从业人员投入的障碍度近几年呈上升趋势,对耕地生态安全等级的提升也会产生不同程度的制约作用。

(4) 耕地生态安全评价是一项复杂的系统工程,科学建立经典域与节域是耕地生态安全评价的基础根基,但目前对于经典域与节域的研究尚不完整,多数情况需要人为确定耕地生态安全阈值,存在一定主观性。因此如何更准确的选取符合地区典型性的经典域与节域取值范围,在今后有待进一步的改进与完善。

### 4.2 政策建议

(1) 壮大新型农业经营主体,推动粮食绿色生产。黄河下游各县区农业发展仍以“小农经济”为主,单一的小农户很难在资源与环境约束双重压迫下做出低碳化、规模化、绿色化的粮食生产,导致其经营方式粗放、高碳,抵抗风险能力较差。因此,第一方面要



壮大各种新型农业经营主体,新型农业经营主体更加注重粮食产业绿色低碳、生态高值农业等其他模式的发挥,以及发挥模范带头作用,引导小农采取节肥、节药等亲环境农业技术以及采用微生物肥料、生物农药等新型绿色农资,从而改善各县区的耕地生态安全状况。第二方面是积极实行农业托管服务,通过农业托管组织规模化、专业化的特点,将低碳新技术、新方法融入到粮食生产过程中,实现“一控两减三基本”的目标,促进农业生产与资源环境相互协调,提高农业生产绿色效率。

(2) 实施归雁工程,提升耕地保护积极性。随着城乡二元体制的户籍壁垒被逐渐打破,大量青壮年农民流入城市,农业空心化严重,导致农业从业人员投入在数量和活力方面较欠缺,侧面限制了耕地生态安全等级的提升。为了有效应对农业从业人员不足问题,一是培育新型职业农民,将少数从城市回流到农村的青少年当作中国未来农业的主力军。二是实施“归雁工程”,吸引更多高素质人才回归家乡,同时各县区积极搭建服务平台为“归雁工程”提供保障。三是实行多元主体农技推广,在各县区成立农技推广机构等社会服务组织,既守护好“农业科技最后 1 公里”,又确保粮食安全底线不触碰,充分调动农业人员的积极性,推动一群在农业、社会服务业领域的技术人员到农村进行创业。

(3) 构建智慧耕地平台,从会种地到“慧”种地。如果能为粮食生产与耕地保护插上“互联网”的翅膀,既可以减少劳动力投入,降低无用的成本约束;又提升了水资源、耕地资源等资源的利用效率,在破解当前黄河下游自然资源短缺、劳动力不足等问题时提供了一条全新的解决路径。一是依托物联网推动粮食生产与耕地保护的“智慧化”,打造农业无线管理系统、耕地保护监管系统、粮食育种信息系统,构建“天上看、地上巡、网上查”的整体互联网体系,能够帮助农民精准灌溉、施肥等精细化操作,从而有效节约水资源以及降低耕地面源污染,缓解黄河下游沿黄县区的耕地生态安全压力。二是实现云计算的信息共享,将黄河流域自然资源、市场供给、气象变化等方面的信息收集起来,建立一个专门的信息共享数据库平台,通过网络途径传递给农户以及新型农业经营主体,从而提高耕地利用效率以及绿色生产。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] 陈先鹏,方恺,吴次芳,等.2009—2015 年中国耕地资源利用时空格局变化研究:基于粮食安全与生态安全双重视角[J].水土保持通报,2019,39(3):291-296,306,315.  
[2] 韩球,何佟佟,杨勇.城市群高质量发展与土地利用效率

耦合协调度评价:基于黄河流域七大城市群的实证分析[J].河南师范大学学报(哲学社会科学版),2021,48(1):95-101.  
[3] 本刊综合.耕地保护与粮食安全:中央一号文件中的关键词和硬举措[J].中国农业综合开发,2021(3):12-16.  
[4] 张传华.耕地生态安全评价研究[D].重庆:西南大学,2006.  
[5] 李智国,杨子生.中国土地生态安全研究进展[J].中国安全科学学报,2007,17(12):5-12,197.  
[6] 李昊,李世平,银敏华.中国土地生态安全研究进展与展望[J].干旱区资源与环境,2016,30(9):50-56.  
[7] 王军.石家庄市耕地动态变化与生态安全评价研究[D].河北 石家庄:河北师范大学,2009.  
[8] 余健,房莉,仓定帮,等.熵权模糊物元模型在土地生态安全评价中的应用[J].农业工程学报,2012,28(5):260-266.  
[9] Pieri C J M G. Land quality indicators [M]. World Bank Publications, 1995.  
[10] 马年圣,支晓娟,宋雨婷.基于 PSR 和 GM(1,1)模型的西藏耕地生态安全评价与预测[J].干旱区资源与环境,2018,32(11):81-86.  
[11] 王文莹,李明孝.基于 DPSIR 的湖南省土地生态安全时空变化[J].生态学杂志,2020,39(8):2724-2736.  
[12] 张凤太,王腊春,苏维词.基于物元分析-DPSIR 概念模型的重庆土地生态安全评价[J].中国环境科学,2016,36(10):3126-3134.  
[13] 王大海,张荣群,艾东,等.基于 EES-PSR 的土地生态安全物元模型评价方法实证研究[J].农业机械学报,2017,48(S1):228-237.  
[14] 李子君,王硕,马良,等.基于熵权物元模型的沂蒙山区土地生态安全动态变化及其影响因素研究[J].土壤通报,2021,52(2):425-433.  
[15] 曹新向,郭志永,雒海潮.区域土地资源持续利用的生态安全研究[J].水土保持学报,2004,18(2):192-195.  
[16] 李洁,赵锐锋,梁丹,等.兰州市城市土地生态安全评价与时空动态研究[J].地域研究与开发,2018,37(2):151-157.  
[17] Sun Tong, Feng Zhiming, Yang Yanzhao, et al. Research on land resource carrying capacity: Progress and prospects [J]. Journal of Resources and Ecology, 2018,9(4):331-340.  
[18] 李明薇,陈伟强,鄢雨旱,等.基于投影寻踪模型的河南省耕地生态安全评价[J].水土保持研究,2018,25(4):257-263,269.  
[19] Li Xiaobing, Tian Meirong, Wang Hong, et al. Development of an ecological security evaluation method based on the ecological footprint and application to a typical steppe region in China [J]. Ecological Indicators, 2014,39:153-159.

- tion Biology, 2010,16(5):1212-1222.
- [10] 李舒,齐青松.基于 IHA-RVA 法的人类活动对窟野河流域水文情势影响评估[J].水电能源科学,2021,39(4):24-26,63.
- [11] Mwedzi T, Katiyo L, Mugabe F T, et al. A spatial assessment of stream-flow characteristics and hydrologic alterations, post dam construction in the Manyame catchment, Zimbabwe [J]. Water SA, 2016, 42(2): 194-202.
- [12] 胡娜,林凯荣,何艳虎,等.东江上游龙川站水文情势变化分析[J].水电能源科学,2014,32(5):10-13.
- [13] 胡晓张,刘壮添,孙倩雯,等.东江中下游河道近期洪水水文情势变化分析[J].人民珠江,2016,37(11):1-7.
- [14] Richter B D, Baumgartner J V, Braun D P, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network [J]. River Research & Applications, 1998,14(4):329-340.
- [15] Richter B D, Baumgartner J V, Powell J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems [J]. Conservation Biology, 1996, 10(4): 1163-1174.
- [16] Richter B D, Braun D P, Mendelson M A, et al. Threats to imperiled freshwater Fauna [J]. Conservation Biology, 2010,11(5):1081-1093.
- [17] 李兴拼,黄国如,江涛.RVA 法评估枫树坝水库对径流的影响[J].水电能源科学,2009,27(3):18-21.
- [18] 罗志勇,杨炳良,管晓祥,等.不同水文模型在金溪流域的模拟与适应性研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(3):6-12.
- [19] 李紫妍,刘登峰,黄强,等.基于多种水文学方法的汉江子午河生态流量研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2017,38(1):8-12.
- [20] 薛联青,张卉,张洛晨,等.基于改进 RVA 法的水利工程对塔里木河生态水文情势影响评估[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(3):189-196.
- [21] 张文浩,瞿思敏,徐瑶,等.泼河水库对黄河径流过程及水文情势的影响[J].水资源保护,2021,37(3):61-65.
- [22] 王鸿翔,赵颖异,卓志宇,等.基于 IHA-RVA 法的资水流域水文情势评估[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2019,40(2):16-21,51.
- [23] 任影,周明迪,马朝霞.出山店水库建设后水文情势变化对鱼类资源的影响[J].河南水利与南水北调,2020,49(12):42-44.
- [24] 郭文献,李越,王鸿翔,等.基于 IHA-RVA 法三峡水库下游河流生态水文情势评价[J].长江流域资源与环境,2018,27(9):2014-2021.
- [25] 邹多录.江西省寻鄱水的鱼类资源[J].动物学杂志,1988,23(3):15-17.
- [26] 邓风云,张春光,赵亚辉,等.东江源头区鱼类物种多样性及群落组成的特征[J].动物学杂志,2013,48(2):161-173.

(上接第 156 页)

- [20] 赵宏波,马延吉.东北粮食主产区耕地生态安全的时空格局及障碍因子:以吉林省为例[J].应用生态学报,2014,25(2):515-524.
- [21] 匡丽花,赵小敏,郭熙.基于乡镇尺度的耕地生态安全时空格局演变:以鹰潭市为例[J].江苏农业学报,2019,35(5):1144-1153.
- [22] 徐少葵,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.
- [23] Wang Yang, Feng Yining, Zuo Jian, et al. From “traditional” to “low carbon” urban land use: Evaluation and obstacle analysis [J]. Sustainable Cities and Society, 2019,51(11):1-9.
- [24] 吕添贵,孔安妮,汪立.基于 PSR 模型的生态文明示范区生态安全评价及其障碍诊断[J].水土保持研究,2021,28(2):343-350.
- [25] 郭利刚,冯珍珍,刘庚,等.基于物元模型的汾河流域土地生态安全评价[J].生态学杂志,2020,39(6):2061-2069.
- [26] 陈伊多,杨庆媛,杨人豪,等.基于熵权物元模型的土地生态安全评价:重庆市江津区实证[J].干旱区地理,2018,41(1):185-194.
- [27] 陈文广,孔祥斌,温良友,等.基于需求—功能—维度的耕地健康评价指标体系构建与应用[J].中国农业大学学报,2021,26(5):106-117.
- [28] 宋聚,罗志军,赵越,等.基于耕地综合质量及聚类关系的耕地保护分区[J].西南农业学报,2019,32(10):2390-2397.