

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.01.029.

范树平, 李鹏, 张红梅, 等. 粮食主产区耕地生态安全保障诊断及调控策略[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 408-417.

FAN Shuping, LI Peng, ZHANG Hongmei, et al. Study on Obstacle Diagnosis and Regulation Strategy of Cultivated Land Ecological Security in Main Grain Producing Areas[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 408-417.

# 粮食主产区耕地生态安全保障诊断及调控策略

范树平<sup>1</sup>, 李鹏<sup>1</sup>, 余波平<sup>1</sup>, 米逸诗<sup>1</sup>, 张红梅<sup>2</sup>, 吴楠<sup>3</sup>, 蔡擎宇<sup>1</sup>

(1.安徽农业大学 经济管理学院, 合肥 230036; 2.安徽省土地勘测规划院,

江淮耕地资源保护与生态修复自然资源部重点实验室, 合肥 230601; 3.安徽省环境科学研究院, 合肥 230071)

**摘要:**生态安全作为耕地“三位一体化”的核心保护任务,越来越得到政府、公众及学术界广泛关注,耕地生态安全评价视为关键技术及重要依据。基于PSR模型构建耕地生态安全评价指标体系,以国家粮食主产区安徽省为例,综合运用改进熵权法、TOPSIS模型、ESDA模型及障碍诊断模型,评价安徽省2000年以来,以及分市级2000年、2010年、2018年3个年份的耕地生态安全度,剖析耕地生态安全时空分异特征,进一步诊断耕地生态障碍因子及对应调控策略。结果表明:(1)安徽省耕地生态安全度具有一定波动性,总体呈现上升趋势,由2000年的0.2341增至2018年的0.7247,大致分为低位震荡阶段、快速增长阶段及高位爬坡阶段;(2)近20年来耕地生态安全状态进一步呈现不平衡、不均衡演变趋势,导致全省耕地生态安全空间格局差异显著,尤其是以高风险、安全两类区域分布空间集中区域发生很大改变,基本呈现皖南地区安全程度高并由皖中地区过渡至皖北地区风险程度高的空间梯度格局,耕地生态安全空间集聚情况并未显著;(3)从全省维度分析,障碍因子以建成区绿化覆盖率、污水处理率等响应准则层为主,逐渐转变至复种指数、单位耕地粮食产量、人均建设用地面积、人口密度及城镇化水平等状态准则层、压力准则层等为主;从市级维度分析,省会及沿江城市群障碍因子以经济密度、城镇化水平及人均资源占比为主,皖北、皖西及皖东耕地集中连片区域障碍因子以单位耕地农膜负荷、农药化肥负荷、人均水资源量等为主,皖南及皖西山地区丘陵陵区障碍因子以人均耕地面积、耕地垦殖率、复种指数等为主。研究提出落实耕地总量动态平衡、差异化推进全域综合整治、提高耕地生态安全保护意识及落实耕地生态安全补偿等提升耕地生态安全调控策略。

**关键词:**耕地;生态安全;障碍诊断;调控策略;粮食主产区;安徽省

中图分类号:F304.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)01-0408-10

## Study on Obstacle Diagnosis and Regulation Strategy of Cultivated Land Ecological Security in Main Grain Producing Areas

FAN Shuping<sup>1</sup>, LI Peng<sup>1</sup>, YU Boping<sup>1</sup>, MI Yishi<sup>1</sup>, ZHANG Hongmei<sup>2</sup>, WU Nan<sup>3</sup>, CAI Qingyu<sup>1</sup>

(1.School of Economics and Management, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;

2.Key Laboratory of JiangHuai Arable Land Resources Protection and Eco-restoration, Anhui Provincial Institute of Land Surveying and Planning, Hefei 230601, China; 3.Anhui Academy of Environmental Science, Hefei 230071, China)

**Abstract:** As the core protection task of ‘three integration’ of cultivated land, ecological security has attracted more and more attention from the government, the public and academia. Cultivated land ecological security evaluation is regarded as the key technology and important basis. The cultivated land ecological security evaluation index system was constructed based on the PSR model. Taking Anhui Province, the main national grain producing area, as an example, we comprehensively used the improved entropy weight method,

收稿日期:2021-11-12

修回日期:2021-11-27

**资助项目:**国家自然科学基金面上项目(71873003);安徽省自然科学基金项目(1908085QG310);安徽农业大学校繁荣发展哲学社会科学资助项目(2018zs12zd);安徽农业大学引进与稳定人才项目(yj2018-60);安徽省级大学生创新创业训练计划项目(S202010364071);安徽省级大学生创新创业训练计划项目(S202010364078);安徽省级大学生创新创业训练计划项目(S202010364063)安徽省自然资源科技项目(2022-K-6);安徽省自然资源科技项目(2021-K-5)

**第一作者:**范树平(1984—),男,安徽芜湖人,博士,硕士生导师,主要研究方向为土地利用管理及生态环境评价。E-mail: fanshupingnm@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

TOPSIS model, ESDA model and obstacle diagnosis model to evaluate the cultivated land ecological security in Anhui Province since 2000 and three years at the municipal level in 2000, 2010 and 2018, and to analyze the temporal and spatial differentiation characteristics of cultivated land ecological security, further to diagnose cultivated land ecological barrier factors and corresponding control strategies. The results show that: (1) the ecological security of cultivated land in Anhui Province had a certain fluctuation, showing an upward trend, from 0.234 1 in 2000 to 0.724 7 in 2018, which could be roughly divided into low shock stage, rapid growth stage and high climbing stage; (2) over the past 20 years, the state of cultivated land ecological security had further shown an unbalanced and unbalanced evolution trend, resulting in significant differences in the spatial pattern of cultivated land ecological security in the whole province; in particular, the spatial concentration areas of high-risk and security areas had changed greatly, basically showing a spatial gradient pattern of high security in southern Anhui and transition from central Anhui to northern Anhui, the spatial agglomeration of cultivated land ecological security was not significant; (3) from the perspective of the whole province, the obstacle factors were mainly the response criteria layer such as greening coverage rate and sewage treatment rate of built-up areas, and gradual change to the status criteria layer and pressure criteria layer such as multiple cropping index, grain output per unit cultivated land, per capita construction land area, population density and urbanization level; from the perspective of city level, the obstacle factors of provincial capitals and urban agglomerations along the Yangtze River were mainly economic density, urbanization level and per capita resource proportion; the obstacle factors of concentrated and contiguous areas of cultivated lands in northern, western and eastern Anhui were mainly agricultural film load, pesticide and chemical fertilizer load per unit cultivated land, per capita water resources, etc.; the obstacle factors of mountainous and hilly areas in southern and western Anhui were per capita cultivated land area, cultivated land reclamation rate and multiple cropping index, etc. This research puts forward the regulation strategies to improve the ecological security of cultivated land, such as implementing the dynamic balance of the total amount of cultivated land, promoting the comprehensive improvement of the whole region, improving the awareness of cultivated land ecological security protection and exploring the implementation of cultivated land ecological security compensation.

**Keywords:** cultivated land; ecological safety; obstacle diagnosis; regulation strategy; main grain producing areas; Anhui Province

土地是人类赖以生存和文明发展的物质基础,耕地资源是土地资源的精华,具有生产、生活、承载及生态环境等多种功能的复合体,更是粮食生产的重要保障<sup>[1-2]</sup>。中国工业化、城镇化的快速推进及土地资源开发利用强度的逐步提高,特别是城镇用地、工矿用地等集聚扩展而导致耕地资源总量减少、质量下降及生态环境整体恶化,促使人地矛盾进一步恶化及耕地生态安全将面临严峻挑战,可能对国家粮食安全、农业现代化、生态环境乃至综合国力构成严重威胁<sup>[3-4]</sup>。耕地生态安全对保障国家粮食安全、经济安全和社会安全具有重要作用,特别是处于国家粮食主产区的耕地生态安全战略意义更为重要<sup>[5-6]</sup>。党的十八大以来,将生态文明建设提升至“五位一体”的战略高度,生态安全越来越受到政府部门及广大群众的高度关注,耕地生态安全研究逐渐成为近年来研究热点及难点。纵观国内外研究,关于耕地生态安全研究已受到

诸多学者广泛关注。国外学者侧重与可持续发展相结合的农地生态研究,分析粮食安全与生态平衡的协调关系并提出改善农业生态系统的有效措施<sup>[7]</sup>,也有改进传统生态安全评价并运用至土壤生态安全评价<sup>[8-9]</sup>。中国耕地生态安全研究起步较晚,针对土地生态安全评价<sup>[10]</sup>及其空间格局<sup>[11]</sup>逐步过渡到耕地生态安全研究<sup>[12]</sup>,聚焦耕地生态安全评价<sup>[13-14]</sup>、空间格局演化<sup>[15]</sup>、障碍因子分析等<sup>[16]</sup>层面,空间尺度涵盖中国<sup>[2,16]</sup>、跨区域<sup>[5,11,13,17]</sup>、省级<sup>[12,14-15,18-19]</sup>、市县级<sup>[20-21]</sup>甚至乡镇级<sup>[22]</sup>,且以定量化研究为主。纵观分析,国内外学者运用多种模型算法,从多学科、多尺度开展耕地生态安全评价及其影响分析,同时综合考虑多维空间尺度,以及分区域类型探究障碍因子及其提出差别化调控策略研究尚属少见,深入此方面研究显得尤为重要。

在此,选取国家粮食主产区的安徽省为研究对象,

基于 PSR 模型构建耕地生态安全评价指标体系,运用改进熵权法确定其指标权重,综合采用 TOPSIS 模型、ESDA 模型、障碍度模型,分步测算耕地生态安全度及其时空分异,诊断障碍因子及对应提出调控策略,以期为深化耕地生态安全研究提供技术路径,同时为安徽省及类似省份耕地生态安全提升提供决策参考。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

安徽省地处长江、淮河中下游,长江三角洲腹地,全省地势西南高、东北低,地形南北迥异,复杂的气候条件和自然地理造就生态系统与生物物种的多样性。全省国土面积 14.01 万 km<sup>2</sup>,辖 16 个地级市,耕地面积 587.66 万 hm<sup>2</sup>,占国土面积 41.93%,人均耕地 0.088 hm<sup>2</sup>,仅为全国平均水平 86.18%。作为全国粮食主产区的省份之一,安徽省粮食总产量居全国前列,同时长三角一体化安徽行动计划已全面启动,绿色生态发展成为农业生产发展的永恒主题,严把耕地生态安全亦是安徽省生态文明建设示范区的重要举措。随着社会发展可能导致生态环境保护日益突出,水土资源污染越发加剧,尤其是耕地生态安全面临严峻挑战,研究具有典型代表区域,对保障区域生态环境安全、粮食安全及绿色高质量发展具有重要现实意义。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 TOPSIS 模型** TOPSIS 原理是通过计算备选方案与理想解和负理想解的相对距离排序进而对评价对象优选,已广泛应用于系统工程决策分析的科学技术<sup>[23]</sup>。在此,为确保评价结果客观科学,采用熵值法确定评价指标权重,从而改进传统 TOPSIS,由于篇幅限制,熵值法不再赘述。

(1) 数据标准化。采用极值标准化法对评价指标数据进行标准化处理,以确定评价指标实际值在该指标权重所处位置,直接利用熵值法确定标准化结果。

(2) 构建决策矩阵。通过熵值法确定的指标权重向量  $w_j$ ,加权规范化决策矩阵  $X=(X'_{ij})_{m \times n}$  通过矩阵  $R$  的每一行与其相应的权重相乘得到

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} r_{11} \cdot w_1 & r_{12} \cdot w_1 & \cdots & r_{1n} \cdot w_1 \\ r_{21} \cdot w_2 & r_{22} \cdot w_2 & \cdots & r_{2n} \cdot w_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} \cdot w_m & r_{m2} \cdot w_m & \cdots & r_{mn} \cdot w_m \end{bmatrix}$$

(3) 确定正、负理想解。 $X^+$  表示最偏好的方案(正理想解), $X^-$  表示最不偏好的方案(负理想解),则有

$$X^+ = \{ \max_{1 \leq i \leq m} v_{ij} \mid i=1,2,\cdots,m \} = \{X_1^+, X_2^+, \cdots, X_m^+\}$$

$$X^- = \{ \min_{1 \leq i \leq m} v_{ij} \mid i=1,2,\cdots,m \} = \{X_1^-, X_2^-, \cdots, X_m^-\}$$

(4) 计算距离。分别计算每个评价对象的评价向量到正理想解的距离  $D^+$  和负理想解的距离  $D^-$

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (X_{ij} - X_i^+)^2}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (X_{ij} - X_i^-)^2}$$

式中: $X_{ij}$  为第  $i$  评价对象第  $j$  项指标的加权规范化值; $X_i^+$ ,  $X_i^-$  分别为第  $i$  评价对象在评价对象系统中的最偏好值和最不偏好值。

(5) 计算评价对象与最优方案的贴近度  $C_i$ 。

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+}$$

式中: $C_i$  越大,表明第  $i$  评价对象耕地生态安全值越接近最优水平。贴近度  $C_i$  的值介于 0~1,当  $C_i=1$  时,耕地生态安全值水平最高,耕地生态处于最为安全状态;当  $C_i=0$  时,耕地生态处于无安全状态,耕地生态安全已受到严重威胁或危机警戒。

**1.2.2 空间数据探索分析** 综合运用全局空间自相关(GSA)和局部空间自相关(LISA),深入挖掘耕地生态安全空间格局及其演变规律特征。

(1) 全局空间自相关(GSA)。全局空间自相关的指标有 Moran's  $I$ , Geary's  $C$  和 Getis's  $G$  等,考虑到不易受偏离正态分布影响,在此采用较为广泛 Moran's  $I$  指标描述全局空间自相关情况。

$$\text{Moran's } I = \frac{N}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

式中: $N, n$  表示评价对象的数目; $x_i$  为观测值; $\bar{x}$  为  $x_i$  的平均值。以空间权重矩阵元素  $W_{ij}$  表示第  $i$  空间单元和第  $j$  空间单元之间的连接关系,一般为对称矩阵。Moran's  $I$  值介于 -1~1,大于 0 为正相关,小于 0 为负相关,绝对值越大表示空间分布的关联性越大,空间上有强聚集性或强相异性;反之,绝对值越小表示空间分布关联性小,当值趋向于 0 时,即代表空间分布呈随机性。

(2) 局部空间自相关(LISA)。全局空间自相关指标只能反映区域整体基本情况,难以体现局部区域差异性,局部空间自相关指标能够表达区域之间的分异情况。在此,采用 Local Moran's  $I$  衡量局部空间相关度,其实是将表达区域总体的 Moran's  $I$  分解到

每个空间单元,计算公式如下:

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S^2} \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x})$$
$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

式中: $W_{ij}$  同前式,若两区邻接, $W_{ij}=1$ ,若两区不邻接, $W_{ij}=0$ 。Moran's  $I$  大于零时,表示特征值相似的区域存在集聚(高值或低值的集聚);当 Moran's  $I$  指数小于零时,表示特征值不相似的区域存在集聚(低高或高低的集聚)。

1.2.3 障碍度模型 通过耕地生态安全值的时空分析,能够较为显著得到耕地总体时序变化及空间集聚情况,但为了针对性提出对策建议,需要进一步分析耕地生态安全的障碍因子,为此构建耕地生态安全障碍度模型,分别测算贡献度、偏离度及障碍度,具体计算公式如下:

$$A_j = \frac{r_{ij} \times W_j}{\sum_{i=1}^n r_{ij} \times W_j} \times 100\%$$
$$r_{ij} = 1 - X_{ij}$$

式中: $A_j$  为指标障碍度; $r_{ij}$  为指标偏离度; $X_{ij}$  为指标标准化值; $W_j$  为指标因子贡献度,即各项指标的权重。

1.3 指标体系及权重确定

采用“压力—状态—响应”(PSR)模型诊断生态系统的持续性,能够有效剖析生态系统内在因果关系,可全面系统反映耕地生态系统与经济发展、社会活动之间的相互作用关系,具有很强因果逻辑性及说服能力。其中,压力指标( $P$ )涉及人均耕地面积、经济密度、人口密度、城镇化水平及人均水资源量等人类活动对耕地资源开发利用自身情况,以及单位耕地化肥负荷、单位耕地农药负荷、单位耕地农膜负荷等耕地资源开发利用对周边生态环境造成影响情况;状态指标( $S$ )从耕地资源受到压力之后导致人类利用耕地资源及耕地自身生态环境表现形态,具体包括森林覆盖率、耕地垦殖率、复种指数、人均建设用地面积、人均粮食产量、单位耕地粮食产量及第一产业占 GDP 比重 7 个指标;响应( $R$ )从人类为了改变耕地生态环境而做出措施或者手段的响应路径,具体包括建成区绿化覆盖率、工业固体废物综合利用率、第三产业比重、农民人均纯收入、污水处理率及单位耕地农业机械动力 6 个指标。上述指标数据资料来源于《安徽省统计年鉴(2000—2019 年)》及安徽省社会经济统计公报,以及安徽省统计局网站公布部分信息资料整理。

根据熵权法分步确定指标权重并加以分析,状态层所占权重最大,达到 0.387 8,涉及耕地垦殖率、森

林覆盖率、第一产业占 GDP 比重所占权重相对较大;压力层权重次之,但也达到 0.377 2,其中,人均耕地面积、人口密度、单位耕地农药负荷三项指标权重居前;最低为响应层,仅为 0.235 0,其中农民人均纯收入所占权重相对较高,且在整个指标体系位居第三,可见对耕地生态安全影响较高(表 1)。

表 1 安徽省耕地生态安全评价指标体系及其权重				
目标层	准则层	指标层	权重	属性
耕地生态安全评价	压力(P) (0.3772)	人均耕地面积( $P_1$ )	0.1104	正向
		单位耕地化肥负荷( $P_2$ )	0.0435	负向
		单位耕地农药负荷( $P_3$ )	0.0558	负向
		单位耕地农膜负荷( $P_4$ )	0.0221	负向
		经济密度( $P_5$ )	0.0232	负向
		人口密度( $P_6$ )	0.0568	负向
		城镇化水平( $P_7$ )	0.0203	负向
		人均水资源量( $P_8$ )	0.0451	正向
	状态(S) (0.3878)	森林覆盖率( $S_1$ )	0.0547	正向
		耕地垦殖率( $S_2$ )	0.1416	正向
		复种指数( $S_3$ )	0.0442	正向
		人均建设用地面积( $S_4$ )	0.0437	负向
		人均粮食产量( $S_5$ )	0.0211	正向
		单位耕地粮食产量( $S_6$ )	0.0313	正向
		第一产业占 GDP 比重( $S_7$ )	0.0512	正向
		响应(R) (0.2350)	建成区绿化覆盖率( $R_1$ )	0.0131
	工业固体废物综合利用率( $R_2$ )		0.0263	正向
	第三产业比重( $R_3$ )		0.0321	正向
农民人均纯收入( $R_4$ )	0.0863		正向	
	污水处理率( $R_5$ )	0.0465	正向	
	单位耕地农业机械动力( $R_6$ )	0.0307	正向	

2 结果与分析

2.1 耕地生态安全时间变化特征

综合运用熵值法、TOPSIS 模型,测算安徽省 2000 年以来耕地生态安全度,由表 2 可见全省耕地生态安全度总体呈现上升趋势,由 2000 年的 0.234 1 增至 2018 年的 0.724 7,结合实际情况可划分为 3 个阶段,第一阶段为 2000—2006 年,属于低位波动阶段;第二阶段为 2007—2013 年,属于快速增长阶段;第三阶段为 2014—2018 年,属于高位爬坡阶段。

第一阶段,安徽省耕地生态安全增减幅度较大,由 2000 年的 0.234 1 降至 2001 年 0.209 8,减少幅度达到 10% 以上,随后连续 2 a 缓慢增长,至 2004 年减少幅度达到 12.66%,降至 2000 年以下最低点 0.202 5,可能原因在于人均耕地、人均水资源量、耕地垦殖率等正向指标总体减少,单位耕地化肥负荷、单位耕地农药负荷、单位耕地农膜负荷、经济密度、人均建设用地



面积等负向指标却在增加,进而导致全省耕地生态安全降低,但森林覆盖率、单位耕地粮食产量、农民人均纯收入、单位耕地农业机械动力等正向指标增长而减缓安全度下降趋势。

第二阶段,安徽省耕地生态安全总体呈现快速增长阶段,年平均增长率高达 15.91%,以 2010 年增长尤为突出,达到 25.40%。随着农村农业税取消及家庭承包经营更加深入,新型农业经营主体对种植业更加积极,全省垦殖率高达 41.933 8%,人均耕地面积高达 1.270 8,耕地农业机械化普遍推广,人均粮食产量、农民人均纯收入等大幅度提升,单位耕地化肥、农药、农膜等危害耕地生态安全均不同程度下降;二是,政府部门在农业、农村、农民等“三农问题”上主动作为,突出耕地资源数量、质量及生态全方位保护,体现在森林覆盖率持续增长,减缓人均建设用地增长幅度,加大工业生产生态环保投入,工业固体综合利用率、污水处理率等稳步提升,间接保护改善耕地及其周边生态安全及生态环境。

第三阶段,安徽省耕地生态安全程度处于高位缓慢爬坡阶段,甚至 2017 年还存在下降 0.31%,从各指标情况分析可见,诸如耕地面积、水资源量、森林资源等自然资源,以及耕地垦殖率、复种指数等反映其综合开发利

用表征已接近极限,以及单位耕地化肥、农药及农膜等要求持续下降已较为困难,工业固体处理、污水处理等已接近全部达标。由此可见,全省耕地生态安全若要持续提升,加大生态环境科技投入、优化耕地资源空间格局及完善监管机制体制势在必行。

表 2 安徽省耕地生态安全评价结果汇总

年份	$D_i^+$	$D_i^-$	$C_i$	年份	$D_i^+$	$D_i^-$	$C_i$
2000	0.0414	0.0127	0.2341	2010	0.0316	0.0186	0.3703
2001	0.0416	0.0111	0.2098	2011	0.0305	0.0191	0.3855
2002	0.0408	0.0113	0.2172	2012	0.0279	0.0219	0.4400
2003	0.0407	0.0123	0.2319	2013	0.0266	0.0240	0.4742
2004	0.0406	0.0103	0.2025	2014	0.0190	0.0307	0.6180
2005	0.0395	0.0106	0.2114	2015	0.0168	0.0332	0.6634
2006	0.0387	0.0105	0.2134	2016	0.0155	0.0360	0.6996
2007	0.0370	0.0119	0.2426	2017	0.0163	0.0376	0.6974
2008	0.0351	0.0137	0.2810	2018	0.0157	0.0413	0.7247
2009	0.0342	0.0143	0.2953				

2.2 耕地生态安全空间格局演变

综合运用熵值法、TOPSIS,分市测度 2000 年、2010 年、2018 年耕地生态安全数值,应用 ArcGIS 软件评价单元空间关联及其自然断裂法(Jenks),显示安徽省耕地生态安全空间格局演变并分析其规律及演变特征(图 1)。

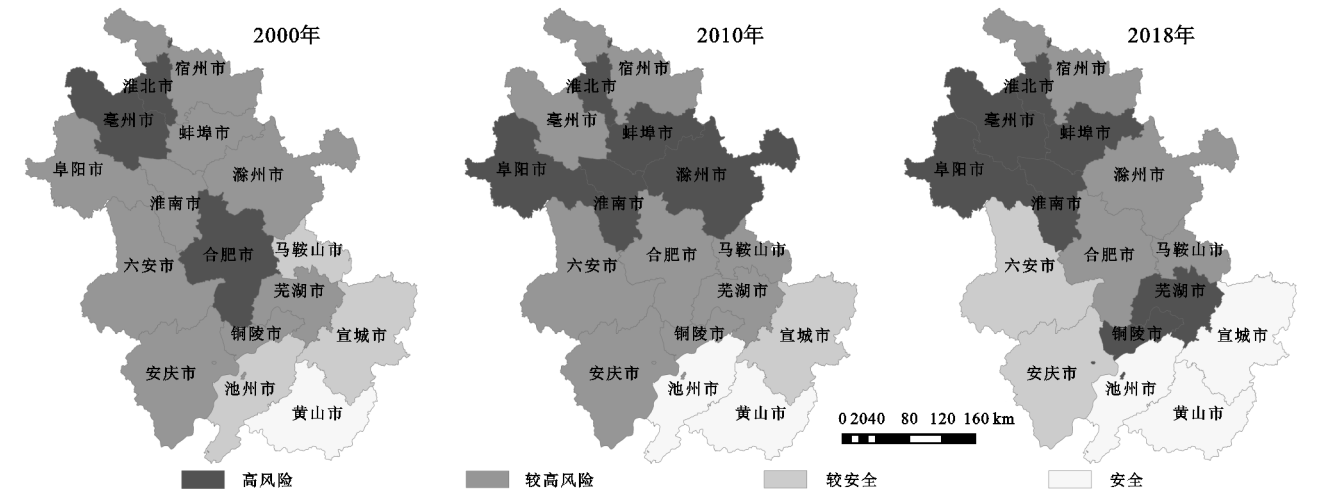


图 1 安徽省耕地生态安全空间格局变化

2000 年,高风险区域涉及合肥市、亳州市、淮北市,其中,合肥市由于人口密度、城镇化发展及人均建设用地较高等社会经济因素,亳州市、淮北市受水资源量、森林生态资源等资源禀赋约束;安全、较安全区域涉及黄山市、池州市、宣城市及马鞍山市,依靠生态资源集中分布的皖南山区为主,耕地生态安全度整体较高;皖北、皖中及皖西大别山区等诸多区域均属于较高风险区域,说明安徽省耕地生态安全整体水平偏低,且风险区域呈现集中连片态势。

2010 年,最为显著变化特征就是高风险区域进

一步扩大,包括淮南市、阜阳市、蚌埠市、滁州市,均由较高风险提升至高风险类型区域,合肥市及亳州市受到耕地垦殖率、农民人均纯收入等正向指标大幅提高而导致由高风险区域降为较高风险区域;整体来看,全省高风险区域范围进一步扩大,主要由于随着工业化、城镇化等社会经济发展极大限制耕地生态空间,以及生态环境治理及建设尚未积极跟进,化肥、农药及地膜等耕地污染尚未明显减量化。

2018 年,随着地方政府、广大公众等对耕地生态安全重视,黄山市、池州市在继续保持安全等级情况

下,全省安全区域进一步扩大至宣城市;滁州市由高风险降为较高风险情况下,亳州市由于人均耕地面积、森林覆盖率等正向指标急剧减少,经济密度、城镇化水平等负向指标大幅提高而导致成为高风险区域,并呈现皖北集中连片态势;与此同时,芜湖市、铜陵市由较高风险升至高风险区域,六安市、安庆市却由高风险降为较安全区域。

整体来说,近 20 年来是以自然条件比较优势相对明显、原有农业基础发展相对较好,耕地生态环境能够得到逐步改善,耕地生态安全得到缓慢提升。安徽省耕地生态安全状态进一步呈现不平衡、不均衡演变趋势,导致全省耕地生态安全空间格局差异显著,尤其是以高风险、安全两类区域分布空间集中区域发生很大改变,基本呈现皖南地区安全程度高并由皖中地区过渡至皖北地区风险程度高的空间层级格局。

2.3 耕地生态安全空间集聚判定

(1) 全局空间集聚情况。从压力指数分析,自 2000 年以来,均呈现为负相关性,且绝对值有增大趋势,表明相异性趋强,特别是反映压力的人均耕地面积、人均水资源量等自然资源条件,全省存在明显地域差异性,以及各市级层面经济密度、人口密度及城镇化发展亦存在相互之间差异显著特征,综合各种原因导致压力指数 Moran's *I* 指数为负值情况,进一步说明缓解安徽省耕地生态安全压力要重点考虑尊重自然资源禀赋,以及统筹协调推进各区域之间社会经济发展水平(表 3)。

表 3 安徽省耕地生态安全 Moran's *I* 指数

年份	压力指数	状态指数	响应指数	综合指数
2000 年	-0.090	-0.060	0.317	0.051
2010 年	-0.019	0.191	0.031	0.079
2018 年	-0.206	0.602	-0.007	0.312

从状态指数分析,在 2000 年的 -0.060 基础上稳步提至 2018 年的 0.602,空间格局逐步呈现正相关性及趋势越加明显,表现为强集聚性特征,并在压力指数负相关性情况下,未有影响状态指数的强集聚性特征,从耕地垦殖率、复种指数、森林覆盖率等农业生产方式及自然条件,以及粮食产量、第一产值等农业生产效率等都具有空间集聚性,同样表明虽然压力存在空间负相关性,但不影响状态指数空间趋强的正相关性。

从响应指数分析,近 20 a 来绝对值有趋向于零的趋势,表明政府对耕地生态安全直接影响或间接影响的生态环境治理投入,空间近邻效应尚不明显,亦可能地市之间差异性显著及响应耕地生态安全态度情况亦存在明显差异。

从综合指数分析,总体呈现正相关性,但表现并不是很明显,尤以 2018 年达到 0.312 最为显著,各市耕地生态安全呈现空间集聚性较强效应,一定程度说明从空间整体角度,整合地市比较优势资源并统筹推进跨地市的耕地生态安全措施,积极培育政策措施空间集聚效果并加以体现。

(2) 局部空间集聚情况。Moran's *I* 指数反映全局整体情况,无法进行局部空间分析,运用 LISA 进一步分析 2000 年、2010 年、2018 年的耕地生态安全局部空间自相关程度(图 2)。

从压力指数分析,集聚不显著区域占据绝对优势,仅表现有 2000 年、2010 年芜湖市、合肥市属于高度集聚区域,2000 年阜阳市、蚌埠市属于中度集聚区域,滁州市除了 2010 年以外均属于低度集聚区域;压力指数并没有表现较为明显的局部空间相关性,耕地生态安全并未随着社会经济发展而出现局部相关,相反局部相关性呈现更加不明显趋势。

从状态指数分析,总体呈现越来越显著特征,高度集聚区域由 2000 年仅有芜湖市而逐渐扩展至以皖南地区为主的铜陵市、宣城市、池州市,低度集聚区域由皖北的阜阳市、蚌埠市扩展至亳州市、淮北市、淮南市等形成皖北、淮河沿线集中连片区域,以长江以南为主的皖南地区高度集聚中心,以皖北、淮河沿岸等集中连片的低度集聚区域而形成鲜明对比。

从响应指数分析,从局部空间相关性的系列图分析,没有形成明显局部相关性,池州市、铜陵市、淮北市、安庆市等均出现高度集聚区域情况,变化较快且不稳定,宣城市、马鞍山市、宿州市等均亦出现低度集聚区域情况,但也同样动态变化之中,整体上看,响应指标并未显现明显局部空间集聚特性。

从综合指数分析,局部相关性并不显著,从时序演变情况分析,高度集聚区域逐渐由合肥市为中心逐渐向芜湖市、铜陵市及池州市转移,高度集聚区域具有自然资源禀赋及生态环境本底较好区域转移倾向;低度集聚区域逐渐呈现向阜阳市、淮南市、蚌埠市及淮北市等皖北地区集中,该区域也是安徽省耕地集中连片区域,耕地资源比较丰富,应更加注重耕地生态安全措施,在保障耕地数量、质量的前提下,尤其注重耕地生态环境保护、维护及修复。

2.4 耕地生态安全障碍诊断

(1) 全省维度。综合运用熵值法及障碍度模型,诊断安徽省 2000 年以来耕地生态安全障碍度(表 4)。2000—2002 年,排名前 5 位的指标因子以响应

准则层为主,包括建成区绿化覆盖率、污水处理率、单位耕地农业机械动力、工业固体废物综合利用率等指标因子,表明这段时间耕地生态安全主要受政府生态环境建设投入影响乃至生态环境保护意识认知,生态环境保护响应较为滞后。2003—2005 年,人均粮食产量、单位耕地粮食产量乃至森林覆盖率逐渐成为制约耕地生态安全的重要影响因子,说明安徽省作为粮食主产区在耕地生态环境较低情况,地均粮食生产、人均粮食产量逐步成为耕地生态安全状态的制约因子。2006—2013 年,以单位耕地化肥负荷、单位耕地农药负荷、单位耕地农膜负荷、经济密度及人口密度等为主要障碍因子的压力准则层,表明以农户为主的耕地生产方式方法及耕作模式逐渐成为耕地生态安

全提升的制约因素,应加强农业科技水平投入、农业耕地生态绿色化耕种,以及注重由于社会经济发展带来经济增长及人口集聚,加重耕地生态安全压力。2014—2018 年,复种指数、单位耕地粮食产量、人均建设用地面积、人口密度及城镇化水平逐渐成为耕地生态安全常态化及稳定的制约因子,由于复种指数降低及拉低单位粮食产量是以农业生产方式,以及建设用地规模扩张、人口集聚、城镇化等人地关系剧烈变化是传导耕地生态安全的重要作用途径。由此可见,应从积极培育农户耕种及提升耕地复种指数达到提高单位耕地粮食产量为切入点,积极遏制建设用地盲目扩张及严控建设用地总规模,尤其注重人口集聚的城镇地区周边耕地生态安全维护及保护建设。

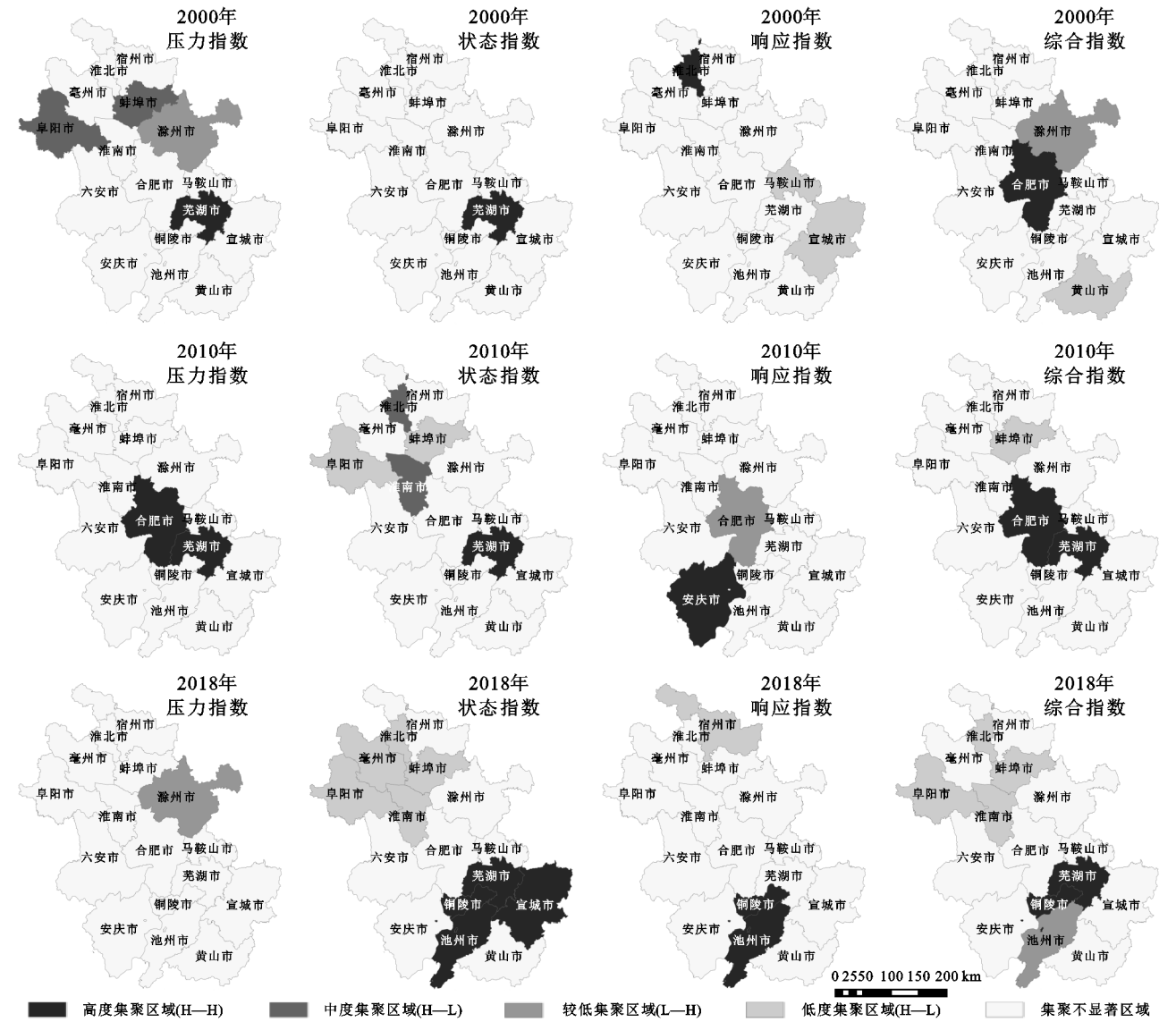


图 2 安徽省耕地生态安全 LISA 图

(2) 市级维度。同样运用障碍度模型,以 2018 年为时间点,分别测算市级耕地生态安全障碍度,并以各因子障碍度为指标,进一步采用 SPSS 软件进行

聚类分析(表 5),结果显示,合肥市、马鞍山市、芜湖市、铜陵市并为第一类,宣城市、池州市、安庆市、黄山市并为第 2 类,淮北市、亳州市、宿州市、蚌埠市、阜阳



市、淮南市、滁州市、六安市并为第 3 类。

第一类区域涵盖省会合肥市,以及芜马铜城市群,区域总体特征表现为社会经济发展基础较好,发展水平较高,城镇化、工业化及产业化优势相对明显,障碍度较高涉及经济密度、城镇化水平、人均水资源量、人均建设用地面积、人均粮食产量、单位粮食产量、第一产业占 GDP 比重等指标因子。一方面,以城镇化发展、工业化推进等带动经济密度及城镇化水平提高,以及建设用地规模增加、工农业及生活用水总量大等对耕地生态安全造成制约影响,是该区域耕地生态安全提升的障碍所在;另一方面,以农业生产为代表的人均粮食产量下降,单位耕地粮食产量较低也是影响耕地生态安全重要因子。

表 4 2000—2018 年安徽省耕地生态安全主要障碍因子

年份	指标排序(名称代码)					指标排序(障碍度/%)				
	第 1	第 2	第 3	第 4	第 5	第 1	第 2	第 3	第 4	第 5
2000	R <sub>1</sub>	R <sub>5</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>6</sub>	R <sub>3</sub>	12.56	12.01	10.72	10.53	10.48
2001	R <sub>1</sub>	R <sub>6</sub>	R <sub>2</sub>	S <sub>6</sub>	R <sub>5</sub>	23.01	9.89	9.66	8.65	8.27
2002	R <sub>5</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>6</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>4</sub>	10.56	10.35	9.10	8.72	7.76
2003	S <sub>6</sub>	R <sub>5</sub>	S <sub>5</sub>	R <sub>6</sub>	R <sub>2</sub>	10.91	10.29	10.08	8.26	8.22
2004	R <sub>5</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>6</sub>	R <sub>2</sub>	S <sub>5</sub>	10.77	7.55	7.53	7.00	6.47
2005	R <sub>5</sub>	S <sub>1</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>8</sub>	S <sub>5</sub>	9.24	0.09	0.57	0.05	7.60
2006	R <sub>5</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>4</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	8.22	8.08	7.26	6.73	6.32
2007	R <sub>5</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	P <sub>4</sub>	10.60	7.50	6.97	6.92	6.38
2008	P <sub>3</sub>	R <sub>5</sub>	P <sub>2</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>3</sub>	9.59	7.96	7.70	6.49	5.71
2009	P <sub>3</sub>	P <sub>2</sub>	R <sub>5</sub>	R <sub>4</sub>	P <sub>4</sub>	9.21	8.00	7.20	6.31	6.01
2010	P <sub>3</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>6</sub>	R <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	10.46	8.54	8.50	7.83	7.19
2011	P <sub>3</sub>	P <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>6</sub>	10.62	9.38	9.26	8.84	6.91
2012	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	P <sub>6</sub>	10.46	10.41	9.72	9.06	7.97
2013	P <sub>4</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>5</sub>	S <sub>4</sub>	11.53	10.66	10.11	8.40	7.94
2014	S <sub>3</sub>	P <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>4</sub>	P <sub>6</sub>	15.42	9.64	9.08	8.50	8.08
2015	S <sub>3</sub>	P <sub>7</sub>	P <sub>5</sub>	S <sub>4</sub>	P <sub>6</sub>	15.42	10.96	10.49	9.23	8.41
2016	S <sub>3</sub>	P <sub>7</sub>	P <sub>5</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>6</sub>	15.66	13.63	11.70	9.39	9.13
2017	P <sub>7</sub>	S <sub>3</sub>	P <sub>5</sub>	S <sub>4</sub>	P <sub>6</sub>	15.75	15.66	13.56	9.67	9.01
2018	P <sub>7</sub>	P <sub>5</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	P <sub>6</sub>	17.93	16.17	16.13	10.24	9.51

第 2 类区域集中分布于皖北平原广域范围,以及皖东滁州市及皖西六安市,该区域社会经济发展相对落后,且耕地及永久基本农田集中规模较大、占地比例较高,影响耕地生态安全较为重要因子涉及单位耕地农膜负荷、农药及化肥负荷,人均水资源量、森林覆盖率、建成区绿化覆盖率、农民人均纯收入等指标因子。该区域是安徽省产粮重点市域及重点区域,对全省粮食安全至关重要,障碍因子主要体现在,一是,耕地耕种方式过程中使用农膜、化肥及农药等对耕地自然生态环境影响很大,应从改变及降低使用量及单位

使用减少对耕地及周边环境破坏;二是,由于自然本底及资源禀赋限制导致人均水资源量及森林覆盖率,以及体现区域生态绿化的建成区绿化覆盖率,均是制约该区域耕地生态环境并对生态安全造成一定影响,应加大低丘缓坡地植树造林、农田绿色防护,以及诸如引江济淮等大型跨区域调水工程、农田水利工程等建设实施运行,以及积极开展农业、工业、生活的节约集约用水;三是,该区域粮食产量集中连片,农民人均纯收入亦同时相对较低,可能传导至农户并对耕地生态安全认识降低,以及主动投入并运用绿色、生态等农业生产方式方法及技术引进受到阻碍,在此应加大种粮、产粮等政府补贴及财政转移支付,积极扩大农户种粮增产且增收的有效渠道。

第 3 类区域集中分布于皖南山区、皖西大别山区等以山区、丘陵为主,自然生态环境资源本底良好、耕地资源相对稀缺且分布较为零散,人均耕地面积、耕地垦殖率、复种指数、人均粮食产量、单位粮食产量、污水处理率及单位耕地农业机械动力等作为耕地生态安全比重相对较高影响因子。由此可见,一是,从自然条件分析,受地形地貌影响及耕地资源禀赋限制,导致耕地面积不足及比重较低,以及山区耕地粮食产出率较低;二是,同样可能受到山区丘陵地形地貌影响而导致污水处理率、农业机械化推广及运行程度难以提高,都是造成该区域耕地生态安全进一步提高的障碍因子。

2.5 耕地生态安全提升调控策略

耕地生态安全涉及到诸多方面,提升调控策略亦体现多维度及多元化,结合安徽省耕地生态安全研究案例,确保耕地数量及耕地质量为基础条件,提升耕地生态为目标,完善体制机制是核心,系统提出耕地生态安全提升调控策略。

从保持耕地数量视角,落实耕地总量动态平衡。安徽省作为粮食生产大省,确保耕地总量达到一定规模是稳定耕地生态安全的根本保障。随着城镇化发展、工业化推进及基础设施建设等占用大量耕地资源,不仅对耕地数量受到影响,同样影响耕地周边环境,应坚持落实耕地总量动态平衡,严格落实耕地占补平衡政策,特别是以皖南山区及皖西大别山区耕地稀缺地区更要强化缓解耕地资源减少趋势、尽量提高复种指数,广大皖北地区耕地集中连片区域更要保障耕地资源数量稳中有升、更加集中连片。而在这一过程中,不仅仅是要保持耕地总体数量的动态平衡,还要确保耕地质量与原先基本保持一致,保持全省人均耕地面积不减少,只有这样才能从根本上维护



耕地的生态安全。

从保持耕地质量视角,差异化推进全域综合整治。结合耕地自然禀赋条件,特别是地形地貌、土壤、水文及气候等区域特征,应以耕地数量、质量及生态三位一体化保护要求,积极推进以耕地保护为中心的耕地综合整治,转变原有传统的土地整治模式,快速

推进农田水利以及高标准农田建设,特别是皖北平原地区农业供水保障能力,集中改造中低产田,扩大农林防护网络建设及水资源跨区域联动优化配置;针对皖南及大别山区特殊地形地貌,强化小微地形整治修复,逐步提高局部农业机械化水平,在保护耕地生态环境前提下稳定提高粮食产量。

表 5 市级耕地生态安全障碍度汇总

%

区域类型	行政单元	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$
第一类	合肥	6.96	3.11	0.00	11.54	20.74	9.70	14.69	7.51	7.85	5.13	10.72	16.64	8.18	8.67	11.81	5.19	14.57	3.03	0.93	0.00	9.28
	马鞍山	6.75	3.39	6.90	8.36	13.70	11.25	11.78	7.21	7.24	6.50	8.88	9.90	7.14	6.82	10.99	4.06	5.95	6.99	0.00	1.49	9.01
	芜湖	7.36	9.48	0.36	3.04	15.93	4.14	10.61	7.27	7.11	6.18	10.75	11.36	8.69	9.06	11.38	6.82	19.05	6.10	0.65	11.12	10.06
	铜陵	8.50	7.73	5.45	2.37	12.22	5.71	6.31	7.33	6.19	9.10	5.86	10.79	8.94	6.96	11.35	3.02	6.73	8.98	6.30	15.31	8.30
	淮北	6.70	8.96	4.46	0.64	10.37	9.10	10.43	7.66	8.61	2.21	1.17	11.01	4.67	1.71	9.23	1.83	5.54	8.56	7.91	1.37	0.00
第 2 类	亳州	5.51	4.70	2.76	4.84	2.59	10.99	0.00	7.93	8.72	0.00	1.82	0.00	3.60	2.73	0.99	13.79	0.94	5.70	8.68	5.94	3.76
	宿州	5.79	6.44	14.70	12.82	2.96	8.73	0.75	7.47	8.41	2.95	0.00	0.70	4.77	4.20	1.76	10.23	2.56	4.29	9.30	2.29	3.58
	蚌埠	4.90	13.80	4.26	10.96	7.41	5.79	7.01	7.36	8.63	1.60	2.39	9.33	3.88	4.51	4.63	7.37	2.76	6.27	6.16	3.62	1.63
	阜阳	8.05	6.26	1.54	15.04	3.33	5.95	0.99	8.03	8.57	1.50	1.39	0.72	7.09	3.19	0.00	9.77	3.06	7.67	9.52	1.49	6.55
	淮南	5.82	14.56	15.06	1.27	4.81	5.40	9.99	7.61	8.79	2.09	2.29	5.35	2.55	0.00	5.74	2.47	14.41	6.64	7.81	0.00	3.47
第 3 类	滁州	0.00	4.47	0.01	0.99	1.85	3.03	5.37	6.58	7.41	4.14	9.86	3.02	0.00	6.45	4.52	7.96	6.32	9.71	8.20	6.07	7.56
	六安	5.65	0.00	1.12	3.42	0.37	9.19	2.19	5.65	4.40	8.64	7.73	0.85	5.61	6.06	2.00	6.48	0.00	5.94	9.19	2.19	6.21
	宣城	5.68	3.95	3.19	5.58	1.11	6.07	6.14	3.59	2.32	11.96	12.51	3.62	7.31	9.10	6.17	7.62	6.56	7.40	5.24	12.29	8.33
	池州	6.00	2.39	14.96	0.00	0.37	1.15	5.66	2.73	1.46	12.85	11.17	4.60	8.16	10.21	5.62	5.01	2.66	4.69	6.17	12.39	7.93
	安庆	7.09	5.38	7.54	5.55	2.22	3.80	3.55	6.07	4.30	10.07	6.15	3.05	8.55	9.24	6.05	8.39	3.83	8.02	8.18	16.33	9.38
	黄山	9.25	5.37	17.69	13.57	0.00	0.00	4.52	0.00	0.00	15.09	7.30	9.06	10.85	11.08	7.75	0.00	5.06	0.00	5.77	8.10	4.94

从保持耕地生态视角,提高耕地生态安全保护意识。耕地生态安全保护,不仅仅是从宏观层面考虑的国家及政府部门,同样涉及直接参与到耕地生产及耕作方式的农户。涉及农户生产行为的农药、化肥、农膜等为代表的农业生产过程行为,是直接影响耕地及周边生态环境并对耕地生态安全。要从维护耕地生态安全考虑,应加强绿色发展及耕地生态环保的宣传力度,提倡、鼓励及奖励农业绿色产生、无公害种植,政府部门可适当提倡农业绿色种植补贴政策及措施,以及将耕地生态安全评价结果纳入政府考评体系。将原先只关注耕地数量及质量的整治方式转变为注重耕地的生态保护及建设,提高农田生态林地保护范围。

从完善体制机制视角,重点探试落实耕地生态安全补偿。随着国家、地方政府及公众对耕地生态安全问题的重视程度越来越高,相关的法律法规也愈发完善,这也是耕地生态安全走向较安全程度的重要因素。为此,耕地生态安全补偿机制的建立,需要建立相关法律法规明确耕地生态服务的直接受益群体,充分发挥政府的主导作用,给直接负担耕地生态保护成本的个人或群体给与经济补偿,逐步提高农户或农民的收入水平,达到耕地生态得到保护同样可以得到较

好经济收入;精准落实耕地生态补偿方式、方法及措施,真正落实耕地生态安全补偿机制,此已得到诸多学者广泛呼吁<sup>[24-25]</sup>。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

耕地生态安全涉及到自然条件、生态环境及社会经济等诸多方面,是一个开放系统及复杂机理的动态变化过程。基于 PSR 模型及结合安徽省实际情况,构建耕地生态安全评价指标体系并加以全省、市级二维空间尺度研究,耕地安全度评价结果较为合理,且障碍度诊断及其区域类型划分亦较为理想,但由于市级单元尺度较大而可能导致空间聚类分析效果相对较差。下一步研究深入,一方面,在空间尺度上进一步缩小,并结合地方实际情况,选择更加切合实际评价指标;另一方面,建议结合粮食主产区的粮食产量情况及社会经济发展区域差异,分区域类型构建差别化评价指标及其评价结果判定标准,以此实现既能保障国家及地方粮食安全及生态安全,又能够满足社会经济发展要求。另外,如何通过耕地生态安全评价结果并进一步建立全区域、全要素并融入人类行为学的

耕地生态安全监测预警框架体系及其运行机制,也是未来很有值得研究方面。

3.2 结 论

(1) 安徽省耕地生态安全度具有一定波动性,但总体呈现上升趋势,由 2000 年的 0.234 1 增至 2018 年的 0.724 7,可大致分为低位震荡阶段、快速增长阶段及高位爬坡阶段。

(2) 近 20 年来耕地生态安全状态进一步呈现不平衡、不均衡演变趋势,导致全省耕地生态安全空间格局差异显著,尤其是以高风险、安全两类区域分布空间集中区域发生很大改变,基本呈现皖南安全程度高并由皖中过渡至皖北风险程度高的空间层级格局;从全局、局部两维视角,耕地生态安全空间集聚情况均并不是很明显。

(3) 从全省维度分析,障碍因子以建成区绿化覆盖率、污水处理率等响应准则层为主,逐渐转变至复种指数、单位耕地粮食产量、人均建设用地面积、人口密度及城镇化水平等状态准则层、压力准则层等为主;从市级维度分析,省会及沿江城市群障碍因子以经济密度、城镇化水平及人均资源占比为主,皖北、皖西及皖东耕地集中连片区域障碍因子以单位耕地农膜负荷、农药化肥负荷、人均水资源量等为主,皖南及皖西山地丘陵区障碍因子以人均耕地面积、耕地垦殖率、复种指数等为主。

参考文献:

[1] 孔祥斌.中国耕地保护生态治理内涵及实现路径[J].中国土地科学,2020,34(12):1-10.

[2] 王文旭,曹银贵,苏锐清,等.我国耕地保护政策研究:基于背景、效果与未来趋势[J].中国农业资源与区划,2020,41(10):40-51.

[3] 张一达,刘学录,任君,等.基于耕地多功能权衡与协同分析的耕地利用转型研究:以北京市为例[J].中国农业资源与区划,2020,41(6):25-33.

[4] 刘利花,张丙昕,刘向华.粮食安全与生态安全双视角下中国省域耕地保护补偿研究[J].农业工程学报,2020,36(19):252-263.

[5] 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.

[6] 金贵,王占岐,姚小微,等.国土空间分区的概念与方法探讨[J].中国土地科学,2013,27(5):48-53.

[7] Rasul G, Thapa G B. Sustainability analysis of ecological and conventional agricultural systems in Bangladesh [J]. World Development, 2003,31(10):1721-1741.

[8] Faber J H, Van Wensem J. Elaborations on the use of the ecosystem services concept for application in ecologi-

cal risk assessment for soils[J]. Science of the Total Environment, 2012,415:3-8.

[9] Rodriguez-Robayo K J, Merino-Perez L. Contextualizing context in the analysis of payment for ecosystem services[J]. Ecosystem Services, 2016,23:259-267.

[10] 余文波,蔡海生,张莹,等.湖北省土地生态安全预警评价及调控[J].环境科学与技术,2018,41(2):189-196.

[11] 麦丽开·艾麦提,满苏尔·沙比提,张雪琪.叶尔羌河平原绿洲耕地生态安全评价及预警分析[J].中国农业资源与区划,2019,40(7):135-144.

[12] 范胜龙,杨玉珍,陈训争,等.基于 PSR 和无偏 GM(1,1)模型的福建省耕地生态安全评价与预测[J].中国土地科学,2016,30(9):19-27.

[13] 任平,洪步庭,周介铭.长江上游农业主产区耕地生态安全评价与空间特征研究[J].中国人口·资源与环境,2013,23(12):65-69.

[14] 王千,金晓斌,周寅康.河北省耕地生态安全及空间聚集格局[J].农业工程学报,2011,27(8):338-344.

[15] 聂艳,彭雅婷,于婧,等.基于量子遗传投影寻踪模型的湖北省耕地生态安全评价[J].经济地理,2015,35(11):172-178.

[16] 张锐,刘友兆.我国耕地生态安全评价及障碍因子诊断[J].长江流域资源与环境,2013,22(7):945-951.

[17] 杨俊,宋振江,李争.基于 PSR 模型的耕地生态安全评价:以长江中下游粮食主产区为例[J].水土保持研究,2017,24(3):301-307,313.

[18] 陈磊,田双清,张宽,等.基于耗散结构理论的四川省耕地生态安全测度分析[J].水土保持研究,2017,24(2):307-313.

[19] 崔宁波,巴雪真.黑龙江省耕地生态安全压力与农业经济发展的脱钩分析[J].水土保持研究,2021,28(5):308-315.

[20] 郑媛媛,余敦,孙聪康,等.基于状态空间模型的耕地生态安全评价:以江西省鄱阳县为例[J].水土保持研究,2020,27(3):218-224,237.

[21] 贾书楠,孙睿,夏显力,等.西安市耕地生态安全测度及影响因素分析[J].水土保持研究,2016,23(3):164-169.

[22] 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.

[23] 鲁春阳,文枫,杨庆媛,等.基于改进 TOPSIS 法的城市土地利用绩效评价及障碍因子诊断:以重庆市为例[J].资源科学,2011,33(3):535-541.

[24] 樊鹏飞,梁流涛,许明军,等.基于虚拟耕地流动视角的省际耕地生态补偿研究[J].中国人口·资源与环境,2018,28(1):91-101.

[25] 阮熹晟,李坦,张藕香,等.基于生态服务价值的长江经济带耕地生态补偿量化研究[J].中国农业资源与区划,2021,42(1):68-76.