

# 2007—2017年洞庭湖平原耕地生态安全评价及障碍因子诊断

文高辉<sup>1,2</sup>, 袁泉<sup>1</sup>, 赵懿<sup>1</sup>, 熊子昕<sup>1</sup>, 张漫<sup>1</sup>

1.湖南师范大学地理科学学院, 湖南长沙410081;

2.地理空间大数据挖掘与应用湖南省重点实验室, 湖南长沙410081)

**摘要:** [目的] 研究洞庭湖平原耕地生态安全状况, 并诊断其障碍因子, 为区域耕地合理利用和耕地污染治理提供参考依据。[方法] 基于 DPSIR 模型构建洞庭湖平原耕地生态安全评价指标体系, 从县域尺度, 采用基于熵权的改进 TOPSIS 模型测度洞庭湖平原 2007—2017 年耕地生态安全指数, 并采用障碍度模型诊断耕地生态安全状态的主要障碍因子。[结果] 2007—2017 年洞庭湖平原整体耕地生态安全程度处于临界状态, 整体安全指数在研究期内波动上升但增速缓慢; 不同县(区、市)耕地生态系统安全变化特征不一; 中低产田改良比例、秸秆还田比例、测土配方施肥比例、农药使用强度、地膜使用强度、化肥施用强度、农业自然灾害成灾比例等是制约耕地生态安全的主要障碍因子。[结论] 为改善洞庭湖平原耕地生态安全状况, 应大力实施全域土地综合整治, 加强农业面源污染治理。

**关键词:** 耕地; 生态安全; 障碍因子; 洞庭湖平原

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2021)02-0178-10

**中图分类号:** F301.21

**文献参数:** 文高辉, 袁泉, 赵懿, 等. 2007—2017 年洞庭湖平原耕地生态安全评价及障碍因子诊断[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 178-187. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.02.024; Wen Gaohui, Yuan Quan, Zhao Yi, et al. Ecological security evaluation and obstacle factors diagnosis of cultivated land in Dongting Lake plain from 2007 to 2017 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 178-187.

## Ecological Security Evaluation and Obstacle Factors Diagnosis of Cultivated Land in Dongting Lake Plain from 2007 to 2017

Wen Gaohui<sup>1,2</sup>, Yuan Quan<sup>1</sup>, Zhao Yi<sup>1</sup>, Xiong Zixin<sup>1</sup>, Zhang Man<sup>1</sup>

1.College of Geographic Science, Hunan Normal University, Changsha, Hu'nan 410081, China;

2.Hunan Key Laboratory of Geospatial Big Data Mining and Application, Changsha, Hu'nan 410081, China)

**Abstract:** [Objective] The ecological security status of cultivated land was evaluated and its obstacle factors were diagnosed in Dongting Lake plain, in order to provide reference for rational utilization and pollution control of cultivated land. [Methods] The ecological security evaluation index system of cultivated land in Dongting Lake plain was established based on DPSIR model. From the county scale, the improved TOPSIS method based on entropy weight was used to calculate the cultivated land ecological security status in Dongting Lake plain from 2007 to 2017. And the obstacle degree model was employed to diagnose the main obstacle factors of cultivated land ecological security status. [Results] The ecological security degree of cultivated land in Dongting Lake plain was in a critical state from 2007 to 2017. The comprehensive index of cultivated land ecological security fluctuated and increased slowly during the study period. The change characteristics of cultivated land ecosystem security in different counties were different. The main obstacle factors restricting the ecological security of the cultivated land system included the improved proportion of medium and low yield field, the proportion of straw returning, the proportion of soil testing and formulated

收稿日期: 2020-09-09

修回日期: 2020-12-22

资助项目: 国家自然科学基金项目“耕地利用生态效率评价、驱动因子及提升机制研究: 以洞庭湖平原为例”(41801190); 湖南省自然科学基金项目“耕地利用生态效率的空间格局与空间效应: 以洞庭湖平原为例”(2019JJ50390); 湖南省哲学社会科学基金项目(18YBQ097); 湖南省教育厅创新平台开放项目(19K062); 湖南省创新创业教育中心—资源环境创新创业教育中心项目(201813)

第一作者: 文高辉(1990—), 男(汉族), 江西省萍乡市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土地经济与管理方面的研究。Email: wengao-hui360101@sina.com。

fertilization, the intensity of pesticide use, the intensity of plastic film use, the intensity of fertilizer use, and the proportion of agricultural natural disasters. [Conclusion] To improve current ecological security status of cultivated land in Dongting Lake plain, comprehensive land consolidation should be implemented and agricultural non-point source pollution control should be strengthened.

**Keywords:** cultivated land; ecological security; obstacle factors; Dongting Lake plain

耕地是重要的农业生产资料,也是保障我国粮食安全的重要物质基础<sup>[1]</sup>。然而随着经济社会的快速发展、人口的持续增长及城市化工业化的快速推进,人地矛盾日益尖锐,耕地生态安全受到严重威胁。耕地生态安全关乎国家粮食安全战略和社会稳定,维护耕地生态安全是生态文明建设的重要内容,是实现乡村振兴、建设美丽乡村的重要手段。因此,耕地生态安全问题受到各级政府和社会各界高度关注<sup>[2-3]</sup>。近年来,学术界持续关注耕地生态安全问题,并取得了丰富的成果。国外学者主要关注耕地数量的变化,以及耕地利用活动对土壤、水文等的影响<sup>[4-5]</sup>。例如,Gibson 等<sup>[6]</sup>分析了社会政治对伊拉克耕地面积变化的影响;Bateman 等<sup>[7]</sup>研究了气候变化对耕地利用的直接影响,以及诱发耕地利用变化对自然环境的间接影响。国内学者对耕地安全的研究主要关注耕地数量、质量和生态安全等方面。例如,邓楚雄等<sup>[8]</sup>分析了长株潭城市群地区耕地数量时空变化及其驱动因素;刘洪彬和吕杰<sup>[9]</sup>基于农户微观视角分析了大城市郊区耕地土壤质量变化的驱动因素;郑华伟等<sup>[10]</sup>采用集对分析法诊断了 1999—2013 年四川省耕地生态安全状况。特别是在生态文明建设的背景下,国内学者开始更加关注耕地生态安全问题。刘宝涛等<sup>[11]</sup>评价了 2000—2016 年吉林省耕地生态安全状况;袁零和杨庆媛<sup>[12]</sup>评价了生态退化区甘肃省环县 2005—2016 年耕地生态安全变化状况;韩磊等<sup>[13]</sup>和马年圣等<sup>[14]</sup>分别评价了云南和西藏地区耕地生态安全状况并进行了预测;韩逸等<sup>[4]</sup>则以南方丘陵地区为研究区域,进一步分析了耕地生态安全的影响因素;也有学者从粮食安全和生态安全等视角来探讨区域耕地资源安全等问题<sup>[15]</sup>。在耕地生态安全评价方法选择方面,主要采用熵值法<sup>[16]</sup>、物元分析法<sup>[2]</sup>、能值生态足迹模型<sup>[17]</sup>、随机森林算法等<sup>[18]</sup>方法;耕地安全评价指标体系也主要是依据 PSR<sup>[10,12-14,19]</sup>模型进行构建。PSR 模型反映了人类活动对耕地生态环境造成的压力、耕地生态系统状态变化以及人类对于耕地生态系统状态变化的响应三者之间的关系,但随着自然环境与社会经济等方面的关系越来越紧密,以及自然环境的自身特征和属性的复杂性,PSR 模型不能科学而准确地反映经济、社会、自然之间的关系与存在的问

题<sup>[20]</sup>。因此,本文在 PSR 模型基础上加入驱动力因素与影响力因素,建立基于 DPSIR 模型耕地生态安全评价指标体系。

洞庭湖平原是中国重要的商品粮基地,但同时存在着严重的农业面源污染问题,极大影响了长江经济带生态文明建设。党和政府高度重视洞庭湖区域生态文明建设。湖南省启动并实施 3 个“洞庭湖生态环境专项整治三年行动计划”和洞庭湖水环境治理五大专项行动等系列工程。因此,研究洞庭湖平原耕地生态安全状况具有重要现实意义。总体来讲,耕地生态安全相关研究取得积极进展,但仍然存在一些不足之处。①现有研究大多分析某一研究区域耕地生态安全的时间规律,以县级尺度为评价单元来揭示耕地生态安全状况的空间格局的研究较少,而以县(区、市)为单位的研究可更直观地反映洞庭湖平原耕地生态安全状况;②基于 DPSIR 模型对耕地生态安全评价的研究较少。基于此,本文以洞庭湖平原湖南省部分的 21 个县(区、市)为研究区域,基于 DPSIR 模型构建耕地生态安全评价指标体系,从县域尺度采用改进的 TOPSIS 模型和障碍度模型评价洞庭湖平原耕地生态安全时空状况,并诊断其障碍因子,以期对洞庭湖平原耕地合理利用和耕地污染治理提供参考依据。

## 1 研究概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

洞庭湖平原是以洞庭湖为中心的河湖冲积平原区,位于湖南省东北部和长江中游荆江以南,地跨湘、鄂两省,北部与江汉平原相接,面积约  $1.88 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。本文以洞庭湖平原湖南省部分的 21 个县(区、市)为研究区域。洞庭湖平原属亚热带季风湿润气候,光照充足、雨水充沛,是我国重要的商品粮生产基地,素有“鱼米之乡”的美誉。研究区域 21 县(区、市)粮食总产量由 2007 年的  $8.00 \times 10^6 \text{ t}$  增至 2017 年的  $8.22 \times 10^6 \text{ t}$ ,农林牧渔业生产总值由 2007 年的 701.19 亿元提高至 2017 年的 1 330.15 亿元。洞庭湖平原区域城镇化、工业化和农业现代化快速发展,耕地生态安全面临严峻挑战,存在着严重的农业面源污染问题。有研究表明,1991—2015 年,洞庭湖 TN 和 TP 浓度呈显

著上升趋势<sup>[21]</sup>;根据统计年鉴数据汇总,研究区域 21 县(区、市)农用化肥、农药和农膜投入强度一直处于高位,单位农作物播种面积化肥、农药和农膜使用量分别由 2007 年的 1 131.56,15.64 和 10.38 kg/hm<sup>2</sup> 变化至 2017 年的 1 170.99,14.17 和 10.98 kg/hm<sup>2</sup>。因此,研究洞庭湖平原的耕地生态安全问题对保障国家粮食安全和社会稳定具有重要意义。

## 1.2 数据来源

本文所需数据主要来源于《2008—2018 年湖南省统计年鉴》《2008—2018 年湖南省农村统计年鉴》,以及各县(区、市)《国民经济和社会发展公报》。

## 2 研究方法

### 2.1 利用 DPSIR 模型构建指标体系

耕地是一个自然、经济、社会的经济综合体。耕地生态安全评价指标体系的建立的准确性、科学性和合理性程度,会直接影响到评价结果的科学性以及提

出对策的全面性。当前关于土地生态安全评价的模型有很多,其中欧洲环境署于 1993 年基于 PSR 和 DSR 框架的基础上建立起来的“驱动力—压力—状态—影响—响应”(DPSIR)模型具有综合性强、逻辑清晰的优点,该模型还强调经济方面对生态安全的影响和两者之间的联系,能更好地揭示人类的活动与生态之间的关系(图 1),现该模型在生态安全研究领域已得到广泛应用<sup>[20-22]</sup>。故本文依据 DPSIR 模型构建耕地生态安全评价指标体系(表 1)。

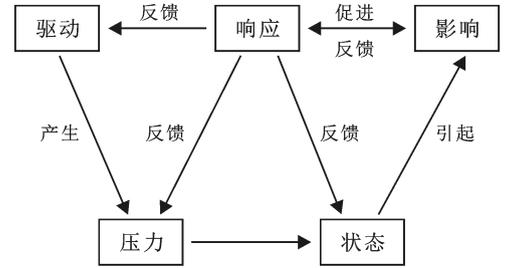


图 1 “驱动力—压力—状态—影响—响应”(DPSIR)概念模型

表 1 耕地生态安全评价指标

目标层	准则层	指标层	指标解释	安全趋向
驱动力 D		D <sub>1</sub> 人口密度/(人·km <sup>-2</sup> )	总人口/总土地面积	-
		D <sub>2</sub> 人均地区生产总值(万元/人)	地区生产总值/总人口	-
		D <sub>3</sub> 城镇化率/%	城镇人口/总人口	-
		D <sub>4</sub> 第三产业产值比重/%	第三产业产值/地区生产总值×100%	+
压力 P		P <sub>1</sub> 化肥施用强度/(kg·hm <sup>-2</sup> )	化肥施用量/农作物总播种面积	-
		P <sub>2</sub> 农药施用强度/(kg·hm <sup>-2</sup> )	农药施用量/农作物总播种面积	-
		P <sub>3</sub> 地膜使用强度/(kg·hm <sup>-2</sup> )	地膜使用量/农作物总播种面积	-
		P <sub>4</sub> 农业自然灾害成灾比例/%	自然灾害成灾面积/农作物总播种面积×100%	-
状态 S		S <sub>1</sub> 耕地垦殖率/%	耕地总面积/土地总面积×100%	+
		S <sub>2</sub> 有效灌溉率/%	有效灌溉面积/耕地总面积×100%	+
		S <sub>3</sub> 人均耕地面积(hm <sup>2</sup> /人)	耕地总面积/总人口	+
		S <sub>4</sub> 人均粮食占有量(kg/人)	粮食总产量/总人口	+
		S <sub>5</sub> 复种指数/%	总播种面积/耕地总面积×100%	+
影响 I		I <sub>1</sub> 农民人均纯收入(元/人)	-	+
		I <sub>2</sub> 粮食单产/(kg·hm <sup>-2</sup> )	粮食总产量/耕地总面积	+
响应 R		R <sub>1</sub> 中低产田改良比例/%	中低产田改良累计总面积/耕地总面积×100%	+
		R <sub>2</sub> 测土配方施肥比例/%	测土配方施肥面积/耕地总面积×100%	+
		R <sub>3</sub> 秸秆还田比例/%	秸秆还田面积/耕地总面积×100%	+

(1) 驱动力(driving forces, D)是指引起耕地生态安全发生变化的潜在原因。选取人口密度、人均地区生产总值、城镇化率、第三产业产值比重 4 个指标来反映人口变化和经济社会发展对耕地生态安全的潜在驱动力。

(2) 压力(pressure, P)是指人类活动和自然环境等因素对耕地生态安全的直接影响。选取化肥施用强度、农药施用强度、地膜使用强度、农业自然灾害

成灾比例 4 个指标来反映了农业污染和自然灾害对耕地造成的压力。

(3) 状态(state, S)是指在驱动力和压力的共同作用下,耕地生态安全的现实状态。选取耕地垦殖率、有效灌溉率、人均耕地面积、人均粮食占有量、复种指数 5 个指标来反映耕地资源利用现状。

(4) 影响(impact, I)是指耕地生态安全状态发生变化给社会经济带来的影响。选取农民人均纯收

人、粮食单产 2 个指标来反映耕地资源利用带来的经济效益和农业生产效果。

(5) 响应(responses,  $R$ )是指为了实现耕地生态安全,人类所提出的应对措施和对策。选取中低产田改良比例、测土配方施肥比例、秸秆还田比例 3 个指标来反映农户对耕地可持续利用所采取的措施。

本文依据 DPSIR 模型的内涵和相关文献<sup>[1,19,23]</sup>对耕地生态安全评价指标体系的安全趋势进行综合研判。耕地生态安全的评价指标体系的含义及安全趋势详见表 1。

## 2.2 改进的 TOPSIS 方法

逼近理想排序法(TOPSIS),是一种有限方案、多目标决策分析方法<sup>[1]</sup>。它依据评价指标的最优、最劣值分别构成正、负理想解,计算各评价目标与正负理想解的距离,进而获得各方案与理想解的贴近度,并进行排序,以此判断方案的优劣<sup>[1]</sup>。鉴于此,本文采用 TOPSIS 模型来测算洞庭湖平原各县(区、市)耕地生态安全程度。结合本文的特点,在传统的 TOPSIS 方法的基础上进行如下改进:耕地生态安全评价决策矩阵的建立不是直接基于评价指标层,而是基于驱动力、压力、状态、影响、响应这 5 个准则层。

2.2.1 指标数值标准化 由于各项指标性质不同,其单位和数量级也有一定差异,没有可比性,因此要对指标数值标准化处理。本文采用极差标准化对原始数据进行标准化处理,将评价指标分为正向、负向 2 类指标,分别表示指标对耕地生态安全的影响是积极或者消极的,计算公式为:

正向指标:

$$r_{ij} = (x_{ij} - x_{j\min}) / (x_{j\max} - x_{j\min}) \quad (1)$$

负向指标:

$$r_{ij} = (x_{j\max} - x_{ij}) / (x_{j\max} - x_{j\min}) \quad (2)$$

式中: $r_{ij}$ 为标准化的指标值,其值在 $[0,1]$ 区间; $x_{ij}$ 为第  $i$  个评价单元第  $j$  个指标的原始值; $x_{j\max}$ 为评价指标  $j$  的最大值; $x_{j\min}$ 为评价指标  $j$  的最小值。

2.2.2 权重的确定 鉴于熵权法客观性较强,不受决策者主观意识的影响,故采用熵权法确定各指标的权重。

$$\omega_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (3)$$

$$d_j = 1 - e_j \quad (4)$$

$$e_j = \frac{1}{\ln m} \times \sum_{r=1}^m (z_{ij} \times \ln z_{ij}) \quad (5)$$

式中: $\omega_j$ 为评价指标的权重; $d_j$ 为信息冗余程度; $e_j$ 为指标信息熵; $m$ 为评价年数; $n$ 为指标个数; $z_{ij}$ 为第  $t$  年第  $j$  个指标的指标值比例。

2.2.3 构建规范化决策矩阵 利用权重对各指标加权求和,建立规范化决策矩阵。

$$K_D = \sum_{j=1}^4 r_{ij} \omega_j \quad (i=1,2,3) \quad (6)$$

$$K_P = \sum_{j=5}^8 r_{ij} \omega_j \quad (i=1,2,3) \quad (7)$$

$$K_S = \sum_{j=9}^{13} r_{ij} \omega_j \quad (i=1,2,3) \quad (8)$$

$$K_I = \sum_{j=14}^{15} r_{ij} \omega_j \quad (i=1,2,3) \quad (9)$$

$$K_R = \sum_{j=16}^{18} r_{ij} \omega_j \quad (i=1,2,3) \quad (10)$$

式中: $K_D$ 为驱动力安全指数; $K_P$ 为压力安全指数; $K_S$ 为状态安全指数; $K_I$ 为影响安全指数; $K_R$ 为响应安全指数; $t=1,2,3$ 表示 2007,2012,2017 年; $r$ 和  $\omega$  的含义同上。

2.2.4 确定正负理想解 在决策矩阵中找出各指标的最优值为正理想解( $K^+$ ),最劣值为负理想解( $K^-$ )。

$$K^+ = \{\max K_{if} \mid f=1,2,\dots,5\} \quad (11)$$

$$K^- = \{\min K_{if} \mid f=1,2,\dots,5\} \quad (12)$$

式中: $K_{if}$ 为表示第  $i$  个评价单元的第  $f$  个安全指数; $i=1,2,\dots,q$ ( $q$ 为评价单元个数); $f=1,2,\dots,5$ ,分别表示为驱动力安全指数、压力安全指数、状态安全指数、影响安全指数、响应安全指数。

2.2.5 确定评价对象与正负理想解的距离  $D^+$  和  $D^-$

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{f=1}^5 (K_{if} - K_f^+)^2} \quad (i=1,2,\dots,q) \quad (13)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{f=1}^5 (K_{if} - K_f^-)^2} \quad (i=1,2,\dots,q) \quad (14)$$

式中: $D_i^+$ 越小,说明第  $i$  个评价单元耕地生态安全程度距离正理想解越近; $D_i^-$ 值越小,说明第  $i$  个评价单元耕地生态安全程度距离负理想解越近。

2.2.6 计算评价对象与理想解的贴近度  $C_i$ :

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (15)$$

式中: $0 \leq C_i \leq 1$ , $C_i$ 越大,表明耕地生态安全程度越高。当  $C_i=0$  时,表示耕地生态安全程度最低; $C_i=1$  时,表示耕地生态安全程度最高。

## 2.3 耕地生态安全等级标准

运用基于熵权的改进 TOPSIS 模型测算得到耕地生态安全程度(即贴近度)数值在  $0 \sim 1$  之间,分值越接近 1 表明耕地生态安全程度越高;分值越接近 0,表明耕地生态安全程度越低。在参考相关文献对生态安全的分级标准<sup>[1]</sup>的基础上,并结合研究区域的实际情况,基于“均分原则”<sup>[23]</sup>将洞庭湖平原耕地生态安全程度划分为 5 个等级,由低至高依次为非常危险、较危险、临界状态、较安全、非常安全(表 2)。

表 2 洞庭湖平原耕地安全评价分级标准

贴适度	安全等级	安全状态
[0,0.2]	I	非常危险
(0.2,0.4]	II	较危险
(0.4,0.6]	III	临界状态
(0.6,0.8]	IV	较安全
(0.8,1.0]	V	非常安全

## 2.4 障碍度模型

在耕地生态安全评价的基础上,本文采用障碍度模型对耕地生态安全状况进行病理诊断,挖掘出影响耕地生态安全程度的障碍因子,为进一步提高洞庭湖平原耕地生态安全水平提供决策参考。障碍度模型主要采用因子贡献度、指标偏离度、障碍度 3 个指标来分析诊断。因子贡献度( $U_j$ )为单项指标对总目标的权重( $w_j$ );指标偏离度( $I_j$ )为单项指标与耕地生态安全的理想解为 1 的差距;障碍度( $Y_j, y_j$ )分别为分类指标和单项指标对耕地生态安全的影响程度<sup>[24]</sup>。计算公式为:

$$y_j = \frac{I_j \times w_j}{\sum_{j=1}^{18} (I_j W_j)} \times 100\%, \quad Y_j = \sum y_j \quad (16)$$

式中: $I_j = 1 - r_j$ ;  $w_j$  为指标  $j$  的极差标准化值。

## 3 结果与分析

### 3.1 洞庭湖平原耕地生态安全时空分析

**3.1.1 耕地生态安全驱动力指数时空规律** 2007 年 10 月印发的《湖南省“十一五”农业发展规划》指出,湖南省耕地面积减少,地力下降,农田水利基础设施严重老化,环境污染、自然灾害、生物灾害仍然是农业发展的制约因素;该文件同时提出了增产增收、提高化肥农药利用率等发展目标,提出了加强农田基础设施建设等主要任务。2012 年 4 月印发的《湖南省“十二五”农业发展规划》提出了主要农产品综合生产能力不断增强、资源综合利用和循环使用水平不断提高、农业生态环境进一步改善、资源循环利用水平进一步提高、农业抵御自然灾害的能力进一步增强等发展目标。2016 年 8 月印发的《湖南省“十三五”农业现代化发展规划》指出,湖南省农业现代化发展仍然存在着农业结构性矛盾突出,抗御自然风险的能力较弱,农业经营管理水平不高,资源环境约束趋紧,农业发展支撑能力不强,农产品质量安全形势严峻,农民持续增收困难等问题和挑战,并据此提出了健全现代农业产业体系,大规模推进高标准农田建设,构建新型农业经营体系,完善农产品质量安全体系,加强农业产地环境治理,强化现代农业支撑体系等主要任

务。从湖南省十一五、十二五和十三五 3 个时期农业发展规划文件可以看出,湖南省日趋重视耕地保护,采取了推进农田基础设施建设、高标准农建设、中低产田改造、农业面源污染治理等重要举措,农业生态环境得到了积极改善,但耕地生态安全形势依然严峻。同时考虑到洞庭湖平原县级层面数据的可获得性,本文选取用 2007 年、2012 年、2017 年为研究时点来分析洞庭湖平原在十一五、十二五和十三五 3 个时期初期的耕地生态安全空间格局。2007—2017 年洞庭湖平原耕地生态安全驱动力指数整体呈下降趋势。2007 年洞庭湖平原各县(区、市)平均耕地生态安全驱动力指数为 0.796,2012 年降至 0.754,2017 年进一步降至 0.732(图 2)。基于 ArcGIS 工具,依均分原则将耕地生态安全评价各子系统安全指数指标分为 5 个等级。

由图 3 可知,洞庭湖区耕地生态安全驱动力指数较低的地区四散分布于研究区外围。从县域尺度来看,在 3 个研究时点,武陵区及岳阳楼区的耕地生态安全驱动力指数均明显低于洞庭湖平原平均水平,这与它们均为地级市的政治经济文化中心关系较大。其中,武陵区为常德市的政治经济文化中心,其耕地生态安全驱动力指数整体水平较低,且恶化趋势明显,从 2007 年的 0.500 降至 2017 年的 0.236,现已成为全域内耕地生态安全驱动力指数最低地区,这与当地快速增长的人口及较高的城镇化率密切相关;岳阳楼区为岳阳市的政治文化中心,其耕地生态安全驱动力指数在研究期内总体呈“先降后升”变化趋势,由 2002 年的 0.392 降至 2012 年的 0.279,此后岳阳楼区人地矛盾问题引起地方政府重视,政府大力推进新型城镇化,优化产业结构,2017 年驱动力指数微幅提升至 0.306。此外,2007—2017 年,汨罗市、君山区、湘阴县、阮江市、南县等地耕地生态安全驱动力指数均出现降级,人地矛盾问题在洞庭湖平原日渐凸显。

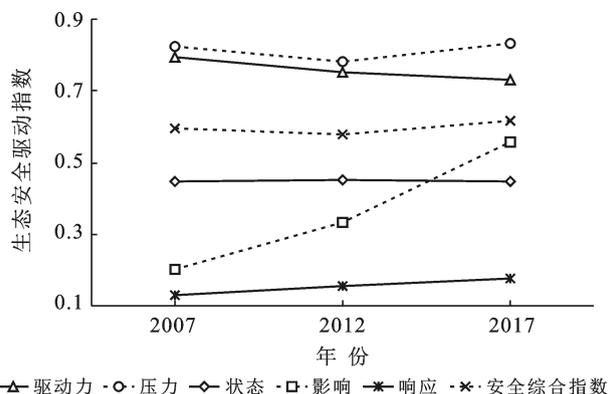


图 2 洞庭湖平原 2007—2017 年耕地生态安全变化趋势

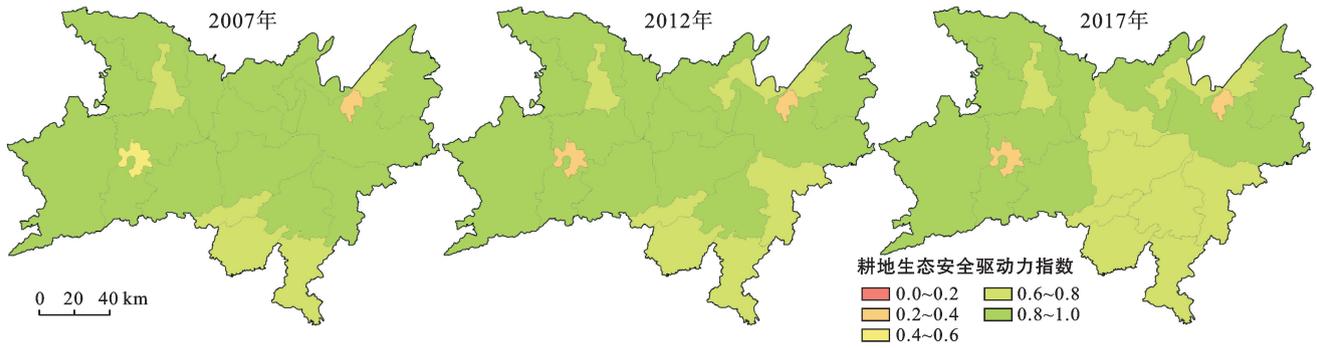


图3 洞庭湖平原 2007—2017年耕地生态安全驱动力指数空间格局

3.1.2 耕地生态安全压力指数时空规律 2007—2017年洞庭湖平原耕地生态安全压力指数整体呈“先降后升”变化趋势。2007年洞庭湖平原各县(区、市)平均耕地生态安全压力指数为0.824,2012年降至0.783,2017年升至0.832(图2)。由图4可知,洞庭湖平原北部耕地生态安全压力指数偏低,东部及南部地区耕地生态安全压力指数较高。从县域尺度来看,在3个研究时点华容县耕地生态安全压力指数均明显低于洞庭湖平原平均水平。这与大量使用农药、化肥、地膜密切

相关,资本密集型耕作方式不利于地力养护,直接影响耕地生态系统平衡。此外,2007—2012年,南县、汨罗市、湘阴县、鼎城区、澧县、安乡县、临澧县等地耕地生态安全压力指数明显下降,2012—2017年,汉寿县、沅江市、临澧县、安乡县等地耕地生态安全压力指数显著上升。洞庭湖平原整体耕地生态安全压力状态经历了一个先恶化后改善的过程,这与国家和政府实施测土配方精准施肥、化肥农药零增长行动、有机肥推广,以及农民养地意识的提高等密切相关。

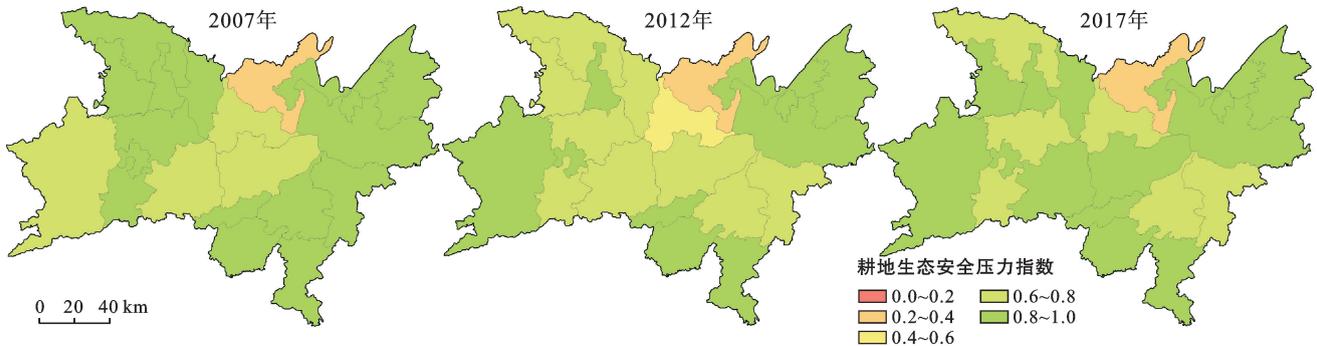


图4 洞庭湖平原 2007—2017年耕地生态安全压力指数空间格局

3.1.3 耕地生态安全状态指数时空规律 2007—2017年洞庭湖平原耕地生态安全状态指数相对稳定。2007,2012和2017年洞庭湖平原各县(区、市)平均耕地生态安全状态指数均为0.449(图2)。由图5可知,洞庭湖平原大部分县(区、市)耕地生态安全状态指数处于0.4~0.6区间内。从县域尺度来看,在3个研究时点,岳阳楼区、云溪区、武陵区等地耕地生态安全状态指数均低于洞庭湖平原平均水平。其中,岳阳楼区耕地生态安全状态指数在研究期内升幅明显,由2007年的0.107提升至2017年的0.250,相对升幅达134%。这一变化特征与岳阳楼区驱动力安全指数的上升互为映照,说明当地政府在重新认识人地矛盾及耕地生态安全现状后采取的一系列耕地生态安全改善措施开始显现成效。此外,2007—2017

年,安乡县、沅江市、鼎城区等地耕地生态安全状态指数明显下降,桃源县等地耕地生态安全状态指数显著上升。耕地生态安全状态指数的空间分布差异与洞庭湖平原耕地数量、质量异质性密切相关。

3.1.4 耕地生态安全影响指数时空规律 2007—2017年洞庭湖平原耕地生态安全影响指数整体呈上升趋势。2007年洞庭湖平原各县(区、市)平均耕地生态安全影响指数为0.201,2012年升至0.334,2017年升至0.558(图2)。由图6可知,洞庭湖平原耕地生态安全影响状态得到显著改善,各县(区、市)表现出不同程度升幅,这一变化特征与近年来洞庭湖平原耕作条件改善、农户耕地利用效率提高密切相关。从县域尺度来看,在3个研究时点,望城区耕地生态安全影响指数明显高于洞庭湖平原平均水平,在2007—

2017 年增幅最为显著,相对增幅达 222%。这一变化与望城撤县设区、在政策扶持下实现经济社会快速发

展密切相关,具体表现在粮食单产提高、农民人均纯收入显著增长。

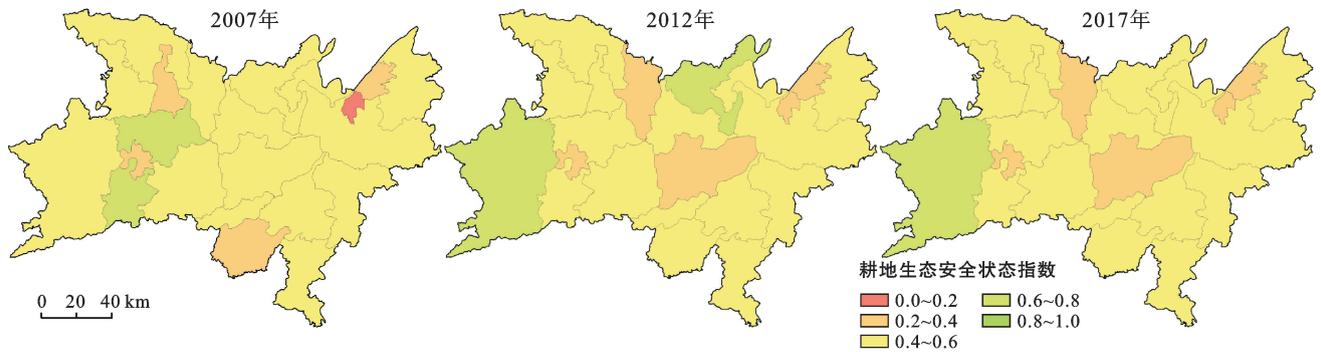


图 5 洞庭湖平原 2007—2017 年耕地生态安全状态指数空间格局

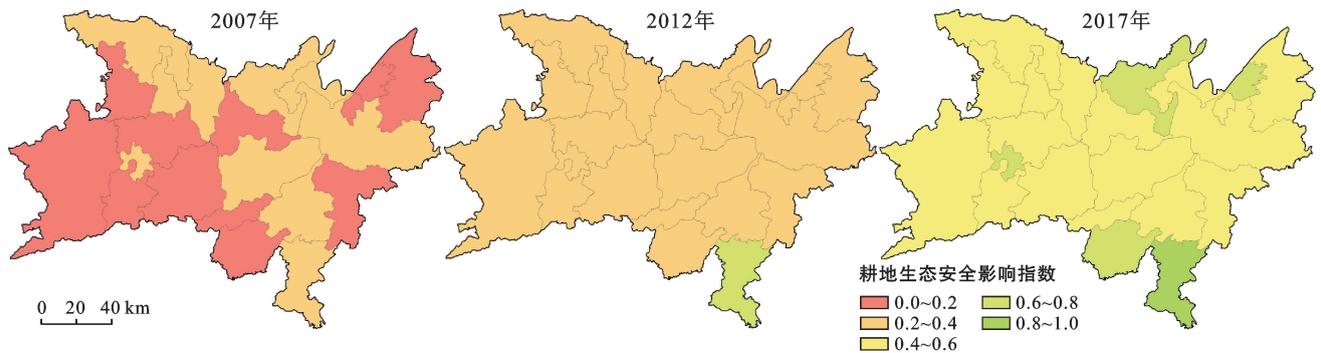


图 6 洞庭湖平原 2007—2017 年耕地生态安全影响指数空间格局

3.1.5 耕地生态安全响应指数时空规律 2007—2017 年洞庭湖平原耕地生态安全响应指数整体呈上升趋势。2007 年洞庭湖平原各县(区、市)平均响应指数为 0.128,2012 年为 0.154,2017 年升至 0.174 (图 2)。洞庭湖平原耕地生态安全响应指数上升趋势与政府及农户耕地保护意识的提高密切相关,近年来,国家和湖南省高度重视洞庭湖平原的农地综合整治(含中低产田改造)、测土配方施肥、秸秆还田等工作,为洞庭湖平原耕地生态安全状况的改善创造

了条件。由图 7 可知,洞庭湖平原耕地生态安全响应指数空间分异日趋明显。从县域尺度来看,在 3 个研究时点,澧县、华容县、临湘市、汨罗市等地耕地生态安全响应指数均呈“先升后降”变化趋势,上述县(区、市)在 2007—2012 年,耕地生态安全响应指数攀升至 0.2~0.4 区间内,在 2012—2017 年降级回跌。此外,在 2012—2017 年,沅江市、资阳区、岳阳县、临澧县耕地生态安全响应指数显著上升,平均增幅为 86%。

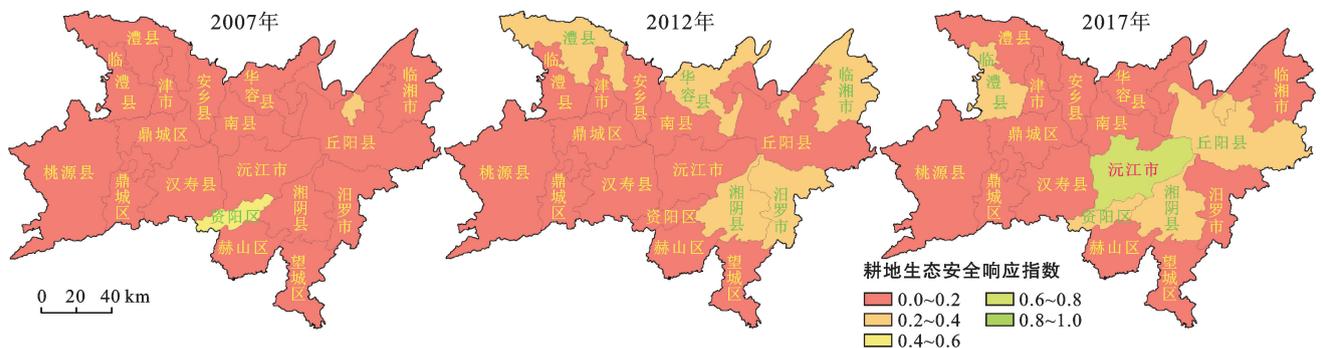


图 7 洞庭湖平原 2007—2017 年耕地生态安全响应指数空间格局

3.1.6 耕地生态安全综合指数时空规律 2007—2017 年洞庭湖平原耕地生态安全水平整体呈波动上升趋势,2007 年洞庭湖平原各县(区、市)平均耕地生态安全综合指数为 0.594,2012 年为 0.580,2017 年为 0.618,10 a 内耕地生态安全综合指数升幅为 3.98% (图 2)。由图 8 可知,2007—2012 年,多数县(区、市)耕地生态安全水平处于安全临界状态;2012—2017

年,阮江市、临澧县、桃源县、汉寿县、赫山区等地耕地生态安全程度从临界状态越至较安全及以上状态。其中,阮江市耕地生态安全综合指数在 2017 年达 0.809,实现非常安全状态。而华容县耕地生态安全程度在 2007 年处于非常危险状态,2012 年和 2017 年耕地生态安全综合指数虽略有上升,但仍处于较危险状态。

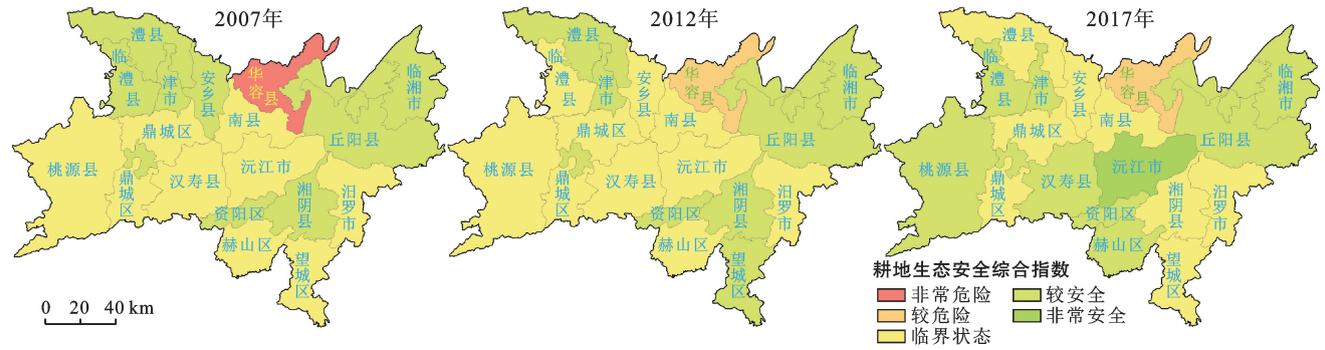


图 8 洞庭湖平原 2007—2017 年耕地生态安全综合指数空间格局

### 3.2 洞庭湖平原耕地生态安全障碍因子诊断

3.2.1 准则层障碍因素 由表 3 可知,洞庭湖平原耕地生态安全准则层的障碍度各有不同且变化趋势也有所不同。总体而言,阻碍耕地生态安全状况改善的主要障碍因素为响应子系统,其次是压力、状态、驱动力和影响子系统。地方政府和农户以往更多的是注重耕地的经济产出,忽视了对耕地质量和健康的生态保护,近年来特别是生态文明建设以来,地方政府更加清晰地认识到生态保护的重要性,为改善洞庭湖平原耕地生态安全采取了诸如测土配方施肥等新型农业生产技术、农业面源污染治理、中低产田改造等举措,但实施力度不够大,仍需继续加强。未来,为切实提高洞庭湖平原耕地生态安全水平,首要是加强并改进耕地生态安全响应举措,加强洞庭湖平原“山水林田湖草”综合整治,加大农业面源污染治理力度,同时要缓解耕地生态系统面临的压力,确保耕地长期处于一个健康可持续的利用状态。

表 3 洞庭湖平原 2007—2017 年耕地生态安全准则层指标障碍度

年份	驱动力	压力	状态	影响	响应
2007 年	4.29	19.12	10.54	0.87	65.19
2012 年	5.06	23.92	10.31	0.71	60.00
2017 年	5.94	20.70	11.45	0.53	61.39

3.2.2 指标层障碍因子 由于评价指标较多,根据指标层障碍度大小,本文仅列出排序前 50% 的障碍因子(表 4)。通过对比可得出,2007—2017 年,洞庭湖

平原耕地生态安全障碍度排序前三的因子均为响应措施。障碍度最大因子均为中低产田改良比例( $R_1$ ),其障碍度虽有所下降,但仍占最大比重。虽然党和国家以及湖南省人民政府高度重视洞庭湖平原等粮食主产地区的土地综合整治建设,投入了大量财政资金,但当前洞庭湖平原中低产田改良工程和农田水利设施建设的力度仍应继续加大,以提升农田粮食综合生产能力。障碍度第 2 位的因子为秸秆还田比例( $R_3$ ),国家大力提倡秸秆还田,这是由于秸秆还田具有培肥地力、改善土壤养分状况、改善农业生态环境、减少因秸秆焚烧造成的大气污染等好处。但倘若秸秆还田方式不当,也会造成一些负面影响,因而很多农户并未全面实施秸秆还田。对于秸秆还田措施,应加强技术指导与培训,进而充分发挥秸秆还田的正向效应。障碍度第 3 位的因子为测土配方施肥比例( $R_2$ ),当前测土配方施肥并未在洞庭湖平原全面开展,只有少部分地区实施了测土配方施肥技术。测土配方施肥技术可有效解决作物需肥与土壤供肥之间的矛盾,针对性地补充农作物所需的营养元素,提高肥料利用率,减少肥料流失带来的农业面源污染。障碍度第 4 位的因子为农药施用强度( $P_2$ ),洞庭湖平原农药施用量占全省总量的 1/3,而耕地面积却只占全省的 1/4,农药施用量过大,严重影响耕地生态安全。障碍度第 5 位的因子为地膜使用强度( $P_3$ ),地膜使用是提高产量的重要手段,但随着地膜使用年限的增加,残留地膜回收率低,造成极大的污染。障碍度第 6 位的因子为化肥施用强度( $P_1$ ),化肥使用过

量是土壤污染的重要因素,易造成土壤板结、地下水污染等。障碍度第 7 位的因子为农业自然灾害成灾比例( $P_4$ ),可直接导致耕地质量下降或数量减少,防治自然灾害是今后工作的重中之重。障碍度第 8 位的因子为复种指数( $S_5$ ),当前洞庭湖平原平均复种指数为 2.85,明显高于湖南省平均复种指数 2.11 的水

平,较高的复种指数通常具有较高的耕地利用效率,但洞庭湖平原的耕地也不能一直处于高压利用状态,应适时实行稻油、稻肥等轮作方式,改良土壤,提高地力。障碍度第 9 位的因子为人均耕地面积( $S_3$ ),快速的城镇化进程及人口增长不断加剧洞庭湖平原人地矛盾,需优化土地利用结构,提高土地利用效率。

表 4 2007—2017 年洞庭湖平原耕地生态安全指标层主要障碍因子及障碍度

%

年份	项目	排序								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
2007	障碍因子	$R_1$	$R_3$	$R_2$	$P_2$	$P_3$	$P_1$	$P_4$	$S_5$	$S_1$
	障碍度	42.91	11.82	10.46	5.23	4.70	4.65	4.54	3.54	2.38
2012	障碍因子	$R_1$	$R_3$	$R_2$	$P_4$	$P_2$	$P_1$	$P_3$	$S_5$	$S_3$
	障碍度	41.62	9.97	8.41	7.21	6.87	4.96	4.89	3.35	2.62
2017	障碍因子	$R_1$	$R_3$	$R_2$	$P_2$	$P_3$	$P_1$	$S_5$	$P_4$	$S_3$
	障碍度	41.37	11.54	8.47	6.65	5.41	5.41	3.80	3.22	2.87

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

(1) 2007—2017 年洞庭湖平原整体耕地生态安全水平处于临界状态,耕地生态安全综合指数在研究期内波动上升但增速缓慢。对于洞庭湖平原耕地生态安全各子系统,影响和响应子系统安全指数呈不同程度的上升趋势,状态子系统安全指数相对稳定,压力子系统安全指数呈“先降后升”变化趋势,而驱动力子系统安全指数呈下降趋势。

(2) 洞庭湖平原各县(区、市)耕地系统生态安全变化特征不一。多数县(区、市)耕地生态安全水平在研究期内处于安全临界状态,阮江市为研究期内唯一实现非常安全状态的地区。

(3) 从准则层来看,影响洞庭湖平原耕地生态安全程度的主要障碍因子集中在响应子系统。从指标层来看,中低产田改良比例、秸秆还田比例、测土配方施肥比例、农药使用强度、地膜使用强度、化肥施用强度、农业自然灾害成灾比例、人均耕地面积等是制约洞庭湖平原耕地生态安全的主要障碍因子。

### 4.2 建议

(1) 大力实施全域土地综合整治。积极推进中低产田改良工程、高标准农田和农田基础设施建设,增加有效耕地面积,提高人均耕地面积,增强农业抵御自然灾害的能力,改善农业生产条件,提升农田粮食综合生产能力。

(2) 加强农业面源污染治理。大力实施减药控肥行动,强化农药残留超标治理,全面推广测土配方施肥技术,提高化肥农药利用率,实现化肥农药零增

长;开展农作物秸秆、畜禽粪污资源化综合利用,提高地膜回收率,降低地膜残留量;大力推广绿肥种植、增施有机肥等措施,提高耕地质量,进而实现农产品质量安全。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 匡丽花,叶英聪,赵小敏,等.基于改进 TOPSIS 方法的耕地系统安全评价及障碍因子诊断[J].自然资源学报,2018,33(9):1627-1641.
- [2] 张锐,郑华伟,刘友兆.基于 PSR 模型的耕地生态安全物元分析评价[J].生态学报,2013,33(16):5090-5100.
- [3] 刘贤生,徐珊,张震,等.黑龙江省耕地资源安全研究[J].中国农学通报,2019,35(30):99-105.
- [4] 韩逸,郭熙,江叶枫,等.南方丘陵区耕地景观生态安全影响因素及其空间差异[J].生态学报,2019,39(17):6522-6533.
- [5] 张智波.基于改进灰靶模型的耕地生态安全评价及影响因素研究[D].四川 成都:四川师范大学,2018.
- [6] Gibson G R, Campbell J B, Zipper C E. Sociopolitical influences on cropland area change in Iraq, 2001—2012 [J]. Applied Geography, 2015,62:339-346.
- [7] Bateman I, Agarwala M, Binner A, et al. Spatially explicit integrated modeling and economic valuation of climate driven land use change and its indirect effects [J]. Journal of Environmental Management, 2016,181:172-184.
- [8] 邓楚雄,李晓青,向云波,等.长株潭城市群地区耕地数量时空变化及其驱动力分析[J].经济地理,2013,33(6):142-147.
- [9] 刘洪彬,吕杰.基于农户微观视角下的大城市郊区耕地土壤质量变化驱动机制研究[J].自然资源学报,2015,30(7):1129-1140.
- [10] 郑华伟,夏梦蕾,张锐,等.基于熵值法和灰色预测模型

- 的耕地生态安全诊断[J].水土保持通报,2016,36(3):284-289,296.
- [11] 刘宝涛,王鑫森,刘帅,等.基于正态云模型的吉林省耕地生态安全诊断[J].地域研究与开发,2019,38(3):119-124,129.
- [12] 袁零,杨庆媛.基于 PSR 框架的甘肃省环县耕地生态安全评价[J].西南师范大学学报(自然科学版),2019,44(6):60-68.
- [13] 韩磊,潘玉君,高庆彦,等.基于 PSR 和无偏 GM(1,1)模型的云南省耕地生态安全评价与预测[J].生态经济,2019,35(2):148-154.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 李春华,李宁,史培军,等.基于信息熵的江苏省耕地安全系统演化分析[J].资源科学,2008,30(1):43-51.
- [17] Li Jiaxiu, Chen Yaning, Xu Changchun, 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.
- [18] Chen Zhaoya, Ma Lijun, Guo Fengyu, et al. Internet of Things Technology in Ecological Security Assessment System of Intelligent Land [J]. IEEE Access, 2020,8:99772-99782.
- [19] 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.
- [20] 王怡然,张大红,吴宇伦.基于 DPSIR 模型的森林生态安全时空变化研究:以浙江省 79 个县区为例[J].生态学报,2020,40(8):2793-2801.
- [21] 林日彭,倪兆奎,郭舒琨,等.近 25 年洞庭湖水质演变趋势及下降风险[J].中国环境科学,2018,38(12):4636-4643.
- [22] 黄烈佳,杨鹏.长江经济带土地生态安全时空演化特征及影响因素[J].长江流域资源与环境,2019,28(8):1780-1790.
- [23] 郑华伟,张锐,孟展,等.基于 PSR 模型与集对分析的耕地生态安全诊断[J].中国土地科学,2015,29(12):42-50.
- [24] 文高辉,杨钢桥,李文静,等.基于农民视角的农地整理项目绩效评价及其障碍因子诊断:以湖北省毛嘴等 3 个项目为例[J].资源科学,2014,36(1):26-34.

(上接第 169 页)

- [20] 马小雪,卞子浩,李娜,等.秦淮河流域 1980—2010 年土地利用变化及驱动机制[J].水土保持通报,2015,35(6):272-276.
- [21] 卢晓宁,黄玥,洪佳,等.基于 Landsat 的黄河三角洲湿地景观时空格局演变[J].中国环境科学,2018,38(11):4314-4324.
- [22] 曹灿,张飞,阿依尼格尔·亚力坤,等.艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨[J].环境科学,2018,39(4):1568-1577.
- [23] 丛文翠,孙小银.基于 GIS 和 InVEST 模型的日照市固碳能力研究[J].水土保持通报,2018,38(5):200-205.
- [24] 张春华,居为民,王登杰,等.2004—2013 年山东省森林碳储量及其碳汇经济价值[J].生态学报,2018,38(5):1739-1749.
- [25] 梁丰.我国典型农田土壤固碳效率的时空差异特征及驱动因素[D].北京:中国农业科学院,2018.
- [26] 李卉.山东半岛沿海地区土地利用/覆被变化对生态系统碳储量的影响特征分析[D].山东烟台:鲁东大学,2019.
- [27] 贾大周,赵喜鹏,刘少博,等.基于灰色关联度模型的生
- 态敏感区贫困化成因分析:以南水北调中线河南省水源区贾营小流域为例[J].水土保持通报,2020,40(1):191-197.
- [28] 冯舒,孙然好,陈利顶.基于土地利用格局变化的北京市生境质量时空演变研究[J].生态学报,2018,38(12):4167-4179.
- [29] 焉恒琦,朱卫红,毛德华,等.长江三角洲国际重要湿地人为胁迫遥感解析[J].中国环境科学,2020,40(8):3605-3615.
- [30] 郑慧祯,陈燕红,潘文斌,等.河口湿地表面温度扰动特征及其关键影响因素[J].生态学杂志,2018,37(8):2463-2473.
- [31] 杜培军,陈宇,谭琨.江苏滨海湿地土地利用/覆盖变化与地表温度响应遥感监测[J].国土资源遥感,2014,26(2):112-120.
- [32] 李文清.基于 ISO 14031 的玉清湖水库环境绩效评估研究[D].山东济南:山东大学,2008.
- [33] 胡乃利.玉清湖水库水质评价及预测研究[D].山东济南:山东大学,2008.