

# 2009—2019 年山东省耕地生态安全评价及障碍因子诊断

王立业<sup>1</sup>, 师春春<sup>1</sup>, 张文信<sup>2</sup>, 刘艳芳<sup>1</sup>, 刘耀林<sup>1,3</sup>, 关梅<sup>2</sup>

(1.武汉大学 资源与环境科学学院, 武汉 430079; 2.山东省国土空间规划院, 济南 250014; 3.武汉大学 地理信息系统教育部重点实验室, 武汉 430079)

**摘 要:**耕地生态安全是国家 and 区域生态安全的重要组成部分。为了明确认识耕地生态安全及其障碍因子、促进耕地生态与农业发展,利用 PSR 模型构建耕地生态安全的指标体系,基于第三次国土调查和第二次土地调查数据,评估了山东省 2009—2019 年的耕地生态安全变化,同时利用障碍度模型,诊断了影响耕地生态安全的障碍因子。结果表明:(1) 山东省 2009—2019 年耕地生态安全整体上呈现下降的态势,生态安全指数由 0.27 下降至 0.14;(2) 2009—2019 年不同地级市耕地生态安全状况变化不同,5 个地级市呈现上升的趋势,4 个地级市耕地安全基本稳定,7 个地级市出现不同程度的下降;(3) 二三产业从业人员比重、二三产业产值比重、农村居民人均可支配收入、耕地平均海拔和复种指数在 2009—2019 年是影响耕地生态安全的主要障碍因子。综上,2009—2019 年山东省耕地生态安全出现下降的趋势,存在多个影响耕地生态安全的障碍因子。研究认为加强耕地污染治理、发展生态农业、缓解产业结构不平衡是改善耕地生态安全的关键措施。

**关键词:**耕地; 生态安全; PSR 模型; 山东省; 障碍因子

中图分类号:F301.21

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0138-08

## Evaluation of Cropland Ecological Security and Diagnosis of Its Obstacle Factors in Shandong Province in 2009—2019

WANG Liye<sup>1</sup>, SHI Chunchun<sup>1</sup>, ZHANG Wenxin<sup>2</sup>, LIU Yanfang<sup>1</sup>, LIU Yaolin<sup>1,3</sup>, GUAN Mei<sup>2</sup>

(1.School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2.Shandong Territorial Spatial Planning Institute, Jinan 250014, China; 3.Key Laboratory of

Geographic Information System, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** Cropland ecological security is an important part of national and regional ecological security. In order to have a clear understanding of cropland ecological security and its driving forces and to promote cropland use and agricultural development, this study developed an index system according to Pressure-State-Response (PSR) model and based on the second and third national land survey data, evaluated the changes of cropland ecological security in Shandong Province in 2009—2019. Additionally, this study diagnosed the obstacle factors of cropland ecological security with the help of obstacle degree model. The results showed that: (1) The cropland ecological security in Shandong Province showed a downward trend from 2009 to 2019. According to the models used, the cropland ecological security score decreased from 0.27 to 0.14; (2) From 2009 to 2019, the changes of cropland ecological security in various prefecture level cities are different. Five prefecture level cities show an upward trend, and four prefecture level cities have a generally stable cropland ecological security, while seven prefecture level cities have decreased to varying degrees; (3) The proportion of employees in secondary and tertiary industries, the proportion of output value of secondary and tertiary industries, per capita disposable income of rural residents, average altitude of cropland and multiple cropping index are the main obstacle factors affecting the cropland ecological security from 2009

收稿日期:2021-09-12

修回日期:2021-09-27

资助项目:国家自然科学基金“多尺度聚类知识挖掘与应用”(41771432)

第一作者:王立业(1994—),男,山东滨州人,博士研究生,研究方向为土地利用变化与生态系统服务。E-mail:lywang@whu.edu.cn

通信作者:关梅(1978—),女,内蒙古呼和浩特人,博士,中级经济师,主要从事调查监测、确权登记等研究工作。E-mail:1724016453@qq.com

to 2019. In conclusion, in 2009—2019, the cropland ecological security in Shandong Province displayed a decreasing pattern and there were several factors that affected it. This study pointed out that strengthening cropland pollution control, developing ecological agriculture, alleviating the imbalance of industrial structure were important measures to improve the cropland ecological security.

**Keywords:** cropland; ecological security; PSR model; Shandong Province; obstacle factors

耕地一直是维持人类社会生存和发展的重要生产资料,是保证粮食安全的基础,耕地数量的多少、质量的高低关系着我国的国家安全与社会的和谐稳定,是社会主义和谐社会建设不可或缺的一环,也是实现共同富裕的重要组成部分。耕地资源具有稀缺性,随着城市化的加快以及人口增长,耕地面临着来自多方面的压力,人地矛盾更加凸显<sup>[1]</sup>。一方面建设用地的不断扩张占用了大量的耕地,造成了耕地数量的下降<sup>[2]</sup>,同时建设用地周边的耕地,具有较高的生产力,一般来讲,建设用地扩张模式较多的是蔓延式(摊大饼式)扩张<sup>[2]</sup>,通过转变其周边的高生产力的耕地来达到面积增加的目的,因此建设用地扩张导致耕地总体质量的降低<sup>[3]</sup>;另一方面,城市化带来了社会经济的发展、人口的增长、饮食结构提升,进一步扩大了人们对粮食的需求<sup>[4]</sup>。同时,根据已发表的相关数据得知,2017 年我国约有  $2.6 \times 10^5 \text{ km}^2$  的耕地已经受到农药或重金属污染,因此,耕地生态安全问题受到国家和社会的广泛关注。

作为分布最多、最广的人造地类,耕地生态安全成为学术界十分重要的议题。国外学者有关于耕地生态安全的研究,一般主要是从土地利用变化的角度,对耕地的生态安全的威胁<sup>[5]</sup>,耕地扩张或耕地集约化利用对气候<sup>[6]</sup>、土壤<sup>[7]</sup>、生物多样性<sup>[8]</sup>、生态系统服务<sup>[9]</sup>、自然栖息地流失等<sup>[10]</sup>。如 Zabel 等<sup>[8]</sup>对全球 2030 年的耕地扩张和集约利用进行了预测,并分析了耕地的未来利用对生物多样性的影响;Nzabarinda 等<sup>[11]</sup>评估了非洲各国耕地集约利用对自然植被的影响程度;Ngoma 等<sup>[12]</sup>对赞比亚的耕地利用所导致的森林退化问题进行了讨论。国内学者主要从关注单一方面的因素对耕地生态安全产生影响发展到关注综合因素对耕地生态安全的影响。单一方面的因素包括耕地数量<sup>[13]</sup>、质量<sup>[14]</sup>、生态等<sup>[15]</sup>因素的改变分析耕地安全状况,耕地综合安全的关注点在于耕地资源的综合评价<sup>[16]</sup>、耕地系统的整体安全评估<sup>[17]</sup>以及有关驱动机制等<sup>[18]</sup>方面,如匡丽花等<sup>[17]</sup>从资源禀赋、经济发展、社会因素、本底质量、耕作条件、自然因素、环境因素、其他 8 个方面对整个耕地系统的安全状况做出了评估;李楠等<sup>[16]</sup>基于突变计数法评价了辽宁省的耕地资源安全状况。又如文高辉等<sup>[19]</sup>基于

DPSIR 与 TOPSIS 模型讨论了洞庭湖地区的耕地生态安全;袁零等<sup>[20]</sup>以甘肃省环县为例分析了生态退化区的耕地生态安全状况。学者们也采用了不同的方法和指标体系来评价耕地生态安全,主要包括加权分析法<sup>[21]</sup>、熵值法<sup>[22]</sup>、生态足迹模型<sup>[23]</sup>、随机森林模型<sup>[24]</sup>、TOPSIS 模型<sup>[17]</sup>、物元分析法等<sup>[25]</sup>。

2021 年 8 月 25 日,第三次全国国土调查(简称“三调”)数据公布,全国耕地数量达  $1.278 6 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,比第二次全国土地调查(简称“二调”)时  $1.353 8 \times 10^6 \text{ km}^2$  略有降低。“三调”数据公布后,除耕地数量变化外,2019 年耕地生态安全的情况如何?相比较 2009 年有哪些变化?影响耕地生态安全的障碍因子是否出现变化?这些关键问题有待解决。因此,借鉴前人研究,以农业大省——山东省为例,基于“三调”和“二调”数据,结合 PSR 模型,构建指标体系,系统地评估山东省 2009—2019 年的耕地生态安全变化情况,同时利用障碍度模型,对影响山东省耕地生态安全的障碍因子进行识别,以期对山东省耕地的合理利用、耕地生态安全的保障和农业的可持续发展做出指导。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

山东省位于北纬  $34^{\circ}22.9'$ — $38^{\circ}24.01'$ ,东经  $114^{\circ}47.5'$ — $122^{\circ}42.3'$ ,华北平原东部、黄河下游,半岛地区北靠渤海、东临黄海,内陆地区自南而北分别与江苏省、安徽省、河南省和河北省接壤。山东省地势呈现出“一中多极”的分布格局:“一中”是指山东省中部丘陵地区,“多极”是指东北部、东南部、东部分布的部分山地与丘陵,山地、丘陵和平原在省内占比分别达到 15.5%,13.2%,55%。山东省是我国著名的农业大省,根据第三次国土调查数据,山东省耕地面积为  $6.462 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,占土地总面积的 40.87%,2020 年农林牧渔业产值达 10 190.6 亿元,成为全国第一个农业总产值突破万亿的省级行政区,连读多年农业总产值位于全国第一,耕地的作用在山东省显得尤为重要。生态安全是国家或区域安全的重要组成部分,是一个区域生态水平的重要表征,是人类能够生存、发展的必要条件,在耕地分布如此广泛的山东省,耕地生态安全是山东省生态安全的重要组成部分。

### 1.2 数据来源

本文所需数据主要包括两类:山东省土地利用数据与社会经济统计数据。土地利用数据为山东省第三次国土调查和第二次土地调查数据,为矢量数据。统计数据来自《2020 年山东省统计年鉴》以及各市、县 2020 年统计年鉴。

## 2 研究方法

### 2.1 指标体系构建

科学的评价指标体系是耕地生态安全评价的基础,是评价结果是否准确、可靠、科学的先决条件<sup>[17]</sup>。不同区域具有不同的自然资源,其对于土地的利用水平和方式与其自然环境和社会经济的发展态势具有较强的相关性,因此,耕地生态安全是一个相对的概念,反映区域内耕地生态相对安全的程度。指标的选取要具有针对性,要结合研究区的特点,既要体现区域内耕地生态的现状,又要具有前瞻性,体现未来耕地生态的发展,同时要表征社会经济发展对其的影响过程<sup>[20]</sup>。当前,对于土地生态安全的评价模型层出不穷,自联合国环境规划署(United Nations Environment Programme, UNEP)和经济合作与发展组织(Organization for Economic Co-operation and Development, OECD)提出“压力-状态-响应”(Pressure-State-Response, PSR)

模型以来,因其逻辑清晰、综合性强、操作简单等特性,同时能够融入人与环境之间的交互,被广泛的作为指标选取的框架<sup>[19-21]</sup>。

运用 PSR 模型构建耕地生态安全评价的基本框架是:耕地生态环境由于人类活动对其施加的影响而发生了一定变化,表征为压力(P),压力的来源有人口增长、耕地数量减少、社会发展等;耕地作为一种自然资源,其本身具有一定的状态(S),其状态可以从产出、面积、质量等方面来进行识别;对耕地施加影响后,耕地为减轻其受到的压力和影响会做出一定的变化,人类社会会识别或感受到这种变化,同时会针对这种变化做出一定的改变,成为响应(R),响应主要来源于人类的政策,例如加大农用投资、耕地投入、改善耕地环境等<sup>[19,21,25]</sup>。压力、状态、响应三者相互促进、相辅相成,如当耕地生态压力增加时,会影响改变耕地生态状态,而耕地生态状态的改变会促进人们对于耕地生态的响应,即采取措施、行动来缓解耕地生态压力、改善耕地状态;耕地生态状态的改善和响应政策的提出使得耕地又能够承担更大的生态压力,促进人口增长和社会发展。

以前人的研究成果为基础,基于 PSR 模型,遵循评价指标选取的全面性、科学性和可操作性的基础上,把生态安全的主要的构成要素作为出发点,构建耕地生态安全评价指标体系(表 1)。

表 1 山东省耕地生态安全评价指标体系

目标层	准则层	指标层	计算方法	指标属性
耕地生态安全	压力(P)	城市化水平(C <sub>1</sub> )	城镇人口/总人口	负向
		二三产业产值比重(C <sub>2</sub> )	(第二产业产值+第三产业产值)/地区生产总值	负向
		二三产业从业人员比重(C <sub>3</sub> )	(第二产业从业人口+第三产业从业人口)/总人口	负向
		废水排放量(C <sub>4</sub> )		负向
		单位耕地化肥超出阈值量(C <sub>5</sub> )	化肥实际施用量/耕地面积-单位耕地化肥负荷阈值	负向
		25°以上耕地面积比例(C <sub>6</sub> )	25°以上耕地面积/耕地总面积	负向
	状态(S)	粮食作物单位面积产量(C <sub>7</sub> )		正向
		农村居民人均可支配收入(C <sub>8</sub> )		正向
		单位耕地农业用水总量(C <sub>9</sub> )	农业用水总量/耕地面积	正向
		耕地连片度(C <sub>10</sub> )	区域内耕地之间的距离小于 30 m 的耕地图斑面积比重	正向
		耕地平均海拔(C <sub>11</sub> )		负向
		复种指数(C <sub>12</sub> )	农作物播种面积/耕地面积	正向
		全年日照时数(C <sub>13</sub> )		正向
		有效灌溉面积比重增幅(C <sub>14</sub> )	有效灌溉面积/耕地面积-研究期初有效灌溉面积/研究期初耕地面积	正向
	响应(R)	单位耕地农业机械动力增幅(C <sub>15</sub> )	农业机械动力/耕地面积-研究期初农业机械动力/研究期初耕地面积	正向
		工业固体废物综合利用率增幅(C <sub>16</sub> )	工业固体废物综合利用量/工业固体废物产生量-研究期初工业固体废物综合利用量/研究期初工业固体废物产生量	正向
		生活垃圾无害化处理率增幅(C <sub>17</sub> )	生活垃圾无害化处理率-研究期初生活垃圾无害化处理率	正向

压力(P)表征的是人类活动或社会经济发展对耕地生态安全产生的直接影响。选择城市化水平来反映城镇人口和经济活动对耕地减少的压力,选择二三产业产值比重、二三产业从业人员比重表征区域内

产业结构和劳动人口比重对于耕地过度开垦或者劳动力减少的压力,选择废水排放量、单位耕地化肥超出阈值量以及 25°以上耕地面积比例作为外界环境对于耕地生态环境压力<sup>[17]</sup>。

状态(S)是指在目前耕地生态安全的现状。从粮食作物单位面积产量、农村居民人均可支配收入、单位耕地农业用水总量、耕地连片度、耕地平均海拔、复种指数以及全年日照时数 7 个指标来衡量耕地资源的利用现状,即耕地生态状态<sup>[1,16]</sup>。

响应(R)是指人类为了耕地生态安全的实现,所采取的措施与政策。从人类对于耕地灌溉、农业机械投入、固体废弃物、生活垃圾 4 个方面选取与之相对应的 4 个指标表示人类对维持耕地生态安全所进行的调整,指标分别为:有效灌溉面积比重增幅、单位耕地农业机械动力增幅、工业固体废物综合利用率增幅、生活垃圾无害化处理率增幅<sup>[18-20]</sup>。

## 2.2 指标标准化处理

由于各指标所衡量的方面和角度存在差异,需要消除各个指标之间的量纲、数量级的影响,同时指标之间正向指标和负向指标对于研究问题的影响也存在差异,因此,采用标准差法对指标值做标准化,见公式(1):

$$M_{ij} = \left| \frac{m_{ij} - \bar{m}_j}{\delta_j} \right| \quad (1)$$

式中: $i, j$  分别为第  $i$  年和第  $j$  个指标; $M_{ij}$  为标准化后的指标值; $m_{ij}, \bar{m}_j, \delta_j$  分别为指标的原始值、平均值以及标准差。

## 2.3 指标权重确定

由于指标体系中各指标所涉及的方面较广,不同指标对生态安全水平变化的敏感度不同,因此为了能够准确评估山东省耕地生态安全水平,需要科学地确定各指标相应的权重<sup>[16,19]</sup>。变异系数法(Coefficient of variation method, CVM)具有可观性强、操作简单等优点,不受决策者主观意识的影响<sup>[26]</sup>。CVM 是根据各个指标在所有被评价对象上数值的变异程度大小来对其赋权。变异包括横向和纵向两方面内容,即时间序列数据和截面数据均可作为确定权重依据。CVM 对指标权重赋值原理主要是:对于数值变异程度大的指标,说明其不稳定性较大,给予较大的权重,反之则赋予较小的权重。CVM 的计算公式如下:

$$W_j = \frac{V_j}{\sum_{j=1}^n V_j} \quad (2)$$

$$V_j = \frac{\delta_j}{\bar{m}_j} \quad (3)$$

式中: $W_j$  为指标  $j$  的权重; $V_j$  为指标  $j$  的变异系数。

## 2.4 耕地生态安全评价计算

本文中,耕地生态安全评价涉及到两个方面的评价,一是压力、状态、响应 3 个子系统的综合评价,二是耕地生态安全的综合评价。因此两者计算方式略有不同。

3 个子系统的综合评价方式如下:

$$F_n = \sum_{j=1}^m W_j \cdot M_{ij} \quad (4)$$

式中: $F_n$  为子系统的综合得分分值(压力、状态、响应); $m$  为该子系统所具有的指标个数; $W_j, M_{ij}$  的含义如上文所示。

耕地生态安全的综合评价得分的计算方式如公式(5)所示。

$$F = \sum_{n=1}^3 F_n \quad (5)$$

## 2.5 耕地生态安全障碍因子分析

障碍度模型是基于综合评价模型的基础上,是对事物或目标造成影响的障碍因子进行诊断的数学模型<sup>[17,19]</sup>。基于综合评价模型的结果利用障碍度模型诊断并发现对耕地生态安全影响的主要障碍因子,从而可以科学地、有针对性地提出改进策略,进而达到提高耕地生态安全的作用。障碍度的分析主要根据因子贡献度、指标和子系统 3 个方面进行判断,其计算公式如下:

$$F_{ij} = \sum P_{ij} \quad (6)$$

$$P_{ij} = \frac{I_j \cdot J_{ij}}{\sum_{j=1}^p (I_j \cdot J_{ij})} \times 100\% \quad (7)$$

式中: $F_{ij}$  为压力、状态、响应 3 个子系统对耕地生态安全的障碍度; $P_{ij}$  为单项指标对该年份耕地生态安全的障碍度; $J_{ij} = 1 - M_{ij}$  为指标偏离度; $I_j$  为因子贡献度,即其权重。

# 3 研究结果

## 3.1 山东省耕地生态安全指数演变

从图 1 可以看出,2009—2019 年山东省耕地生态安全指数略有下降,由 0.27 降至 0.14,下降幅度为 48%,说明山东省整体耕地生态安全水平状况一定程度上有所恶化。从各子系统指数变化来看,山东省压力等级指数上升,说明耕地生态系统面临的压力有所减弱。状态等级指数在 2009—2019 年下降,说明在此期间耕地的生态状态恶化。响应等级指数在 2009—2019 年由 0.10 降至 0.02,说明该段时期山东省在耕地保护方面有所松懈,没有发挥响应政策应有的作用,进而影响了山东省耕地生态状态。

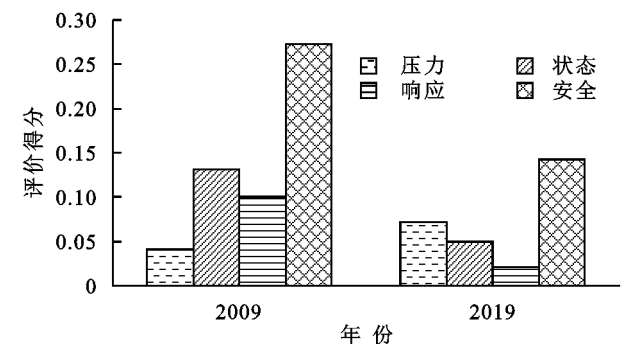


图 1 耕地生态安全压力指数、状态指数、响应指数和综合指数的变化

### 3.2 山东省耕地生态安全指数时空演变格局

3.2.1 耕地生态安全压力指数时空演变格局 由表 2 可知,2009—2019 年山东省多数城市的耕地生态系统压力指数提高,其中威海市、枣庄市、淄博市和青岛市的压力指数增幅较大,通过观察压力指标变化值,发现上述 4 个城市在 2009—2019 年耕地化肥施用量均大幅减少,因此耕地生态系统面临的压力有明显的降低。此外,有 8 个地级市的压力指数降低,说明在 2009—2019 年这 8 个城市的耕地生态系统面临的压力提升,耕地生态安全保护难度加大,压力指数降幅较大的地区有菏泽市和东营市。从地区差异角度来看,2019 年各市压力等级指数方差和极差比起 2009 年均增加,反映出全省各地区之间面临的耕地保护压力差异性有所扩大。

表 2 2009—2019 年山东省各市耕地压力子系统指数结果			
城市	2009 年	2019 年	变化率/%
济南市	0.3474	0.3563	2.56
青岛市	0.3623	0.4870	34.43
淄博市	0.2925	0.3997	36.63
枣庄市	0.2417	0.3496	44.65
东营市	0.4345	0.2430	−44.07
烟台市	0.2606	0.2139	−17.91
潍坊市	0.2883	0.2172	−24.65
济宁市	0.2404	0.2487	3.44
泰安市	0.1822	0.1852	1.61
威海市	0.2628	0.6415	144.13
日照市	0.2634	0.2507	−4.81
临沂市	0.3039	0.2227	−26.71
德州市	0.3408	0.2497	−26.74
聊城市	0.3026	0.3551	17.32
滨州市	0.1759	0.1621	−7.83
菏泽市	0.5134	0.2140	−58.32
极差	0.3376	0.4794	
方差	0.0070	0.0151	

3.2.2 耕地生态安全状态指数时空演变格局 由表 3 可知,2009—2019 年山东省各市状态等级指数极差和方差基本保持稳定,说明全省各地区之间耕地生态

系统安全状况差异基本保持原状。具体城市来看,日照、临沂、聊城、滨州和菏泽市状态等级指数不断增加,说明其耕地生态安全状况越来越好;而济南、烟台、潍坊的状态等级指数不断降低,其耕地生态安全状况堪忧,需要进一步改善。

由表 3 可知,2009—2019 年山东省多数城市 的耕地生态系统状态指数提高,其中日照市、烟台市的 状态指数增幅较大,通过观察状态指标变化值,发现 这两个地区在 2009—2019 年耕地复种指数、农民人 均可支配收入均有大幅提高,因此耕地生态系统的 状态明显得到改善。此外,有 8 个地级市的状态指数 降低,说明在 2009—2019 年这 8 个城市的耕地生态 系统的状态有所恶化,需要采取措施进一步改善。其 中,状态指数降幅较大的地区有济南市、泰安市、青 岛市和淄博市。从地区差异角度来看,2019 年各市 状态等级指数方差和极差比起 2009 年均减小,反映 出全省各地区的耕地生态系统状态的差异呈缩小趋 势。

表 3 2009—2019 年山东省各市耕地状态子系统指数结果			
城市	2009 年	2019 年	变化率/%
济南市	0.3022	0.2179	−27.89
青岛市	0.4479	0.3413	−23.80
淄博市	0.3785	0.2962	−21.74
枣庄市	0.2846	0.3051	7.20
东营市	0.4554	0.3835	−15.79
烟台市	0.3613	0.4679	29.51
潍坊市	0.1931	0.2225	15.22
济宁市	0.2232	0.2276	1.96
泰安市	0.2960	0.2245	−24.14
威海市	0.4748	0.4854	2.23
日照市	0.3124	0.4363	39.67
临沂市	0.3627	0.3640	0.37
德州市	0.5290	0.4364	−17.50
聊城市	0.4293	0.4040	−5.90
滨州市	0.2907	0.3111	6.99
菏泽市	0.4009	0.3675	−8.33
极差	0.3359	0.2674	
方差	0.0083	0.0076	

3.2.3 耕地生态安全响应指数时空演变格局 由表 4 可知,2009—2019 年山东省多数城市的耕地生态 系统响应指数有所提高,其中德州市、济宁市和菏泽 市的响应指数增幅较大,通过观察响应指标变化值, 发现上述地区在 2009—2019 年单位耕地农业机械 动力均大幅提高,因此耕地生态系统的响应程度提 高。此外,有 8 个地级市的响应指数降低,说明在 2009—2019 年这些地区对保护耕地生态系统的 响应措施没有发挥相应的作用,还有较大提升空间。 其中,响应

指数降幅较大的地区有枣庄市、潍坊市和烟台市。从地区差异角度来看,2019 年各市响应等级指数方差和极差比起 2009 年均减小,反映出全省各地区的对保护耕地生态系统的响应的差异呈缩小趋势。

表 4 2009—2019 年山东省各市耕地响应子系统指数结果

城市	2009 年	2019 年	变化率/%
济南市	0.2143	0.2095	-2.26
青岛市	0.0643	0.0343	-46.73
淄博市	0.1075	0.1642	52.70
枣庄市	0.1405	0.0247	-82.43
东营市	0.1327	0.1057	-20.31
烟台市	0.1220	0.0530	-56.56
潍坊市	0.0884	0.0242	-72.62
济宁市	0.0523	0.1009	93.06
泰安市	0.0812	0.0838	3.14
威海市	0.3234	0.2705	-16.37
日照市	0.1043	0.1323	26.91
临沂市	0.0507	0.0413	-18.59
德州市	0.0945	0.2680	183.64
聊城市	0.0811	0.1375	69.68
滨州市	0.2663	0.1641	-38.38
菏泽市	0.1200	0.2138	78.15
极差	0.2727	0.2463	
方差	0.0056	0.0064	

3.2.4 耕地生态安全综合指数时空演变格局 从表 5 可以看出,2009—2019 年山东省地市间耕地生态安全水平指数极差由 0.545 0 增至 0.933 4,方差由 0.027 8 增至 0.045 0,表明该段时期各地市间耕地生态系统安全状况内部差异逐渐扩大,存在两极分化趋势。根据研究区域的地域特点,按照耕地生态安全在 2009—2019 年的变化率(Q)进行分类,将山东省各市分为 5 大类,即快速下降区( $Q < -20\%$ )、慢速下降区( $-20\% \leq Q < -5\%$ )、基本稳定区( $-5\% \leq Q \leq 5\%$ )、慢速上升区( $5\% < Q \leq 20\%$ )和快速上升区( $Q > 20\%$ )。从图 2 可以看出,2009—2019 年山东省耕地生态安全空间格局变化较大,全省 16 个地级市有 2 个为耕地生态安全指数快速下降区,即东营市和菏泽市,此外还有 2 个快速上升区即威海市和日照市。从所选指标探究耕地生态安全指数下降的原因,发现东营和菏泽在 2009—2019 年,废水排放量增加以及工业固体废物综合利用率增幅、生活垃圾无害化处理率增幅降低。由此推测,随着全省的工业和经济发展,产生的废水、固体废物和生活垃圾均大幅增加,其利用率和处理率不高,导致自然资源被污染、浪费,耕地生态平衡状态遭破坏。观察威海市和日照市的各项指标,发现单位耕地农业机械动力增幅有所增加,说明两市对于农业的扶持政策发挥了作用,其耕

地空间结构进一步优化,农民的耕作条件也更好,均有利于耕地生态安全的加强。

表 5 2009—2019 年山东省各市耕地生态安全水平指数结果

城市	2009 年	2019 年	变化率/%	变化分区
济南市	0.8640	0.7837	-9.29	慢速下降区
青岛市	0.8746	0.8626	-1.36	基本稳定区
淄博市	0.7785	0.8601	10.48	慢速上升区
枣庄市	0.6668	0.6794	1.89	基本稳定区
东营市	1.0226	0.7323	-28.39	快速下降区
烟台市	0.7439	0.7348	-1.22	基本稳定区
潍坊市	0.5698	0.4639	-18.58	慢速下降区
济宁市	0.5159	0.5772	11.88	慢速上升区
泰安市	0.5594	0.4934	-11.79	慢速下降区
威海市	1.0610	1.3973	31.70	快速上升区
日照市	0.6800	0.8194	20.49	快速上升区
临沂市	0.7173	0.6280	-12.44	慢速下降区
德州市	0.9643	0.9541	-1.06	基本稳定区
聊城市	0.8130	0.8966	10.28	慢速上升区
滨州市	0.7329	0.6372	-13.05	慢速下降区
菏泽市	1.0343	0.7953	-23.11	快速下降区
极差	0.5450	0.9334	0.71	
方差	0.0278	0.0450	0.62	

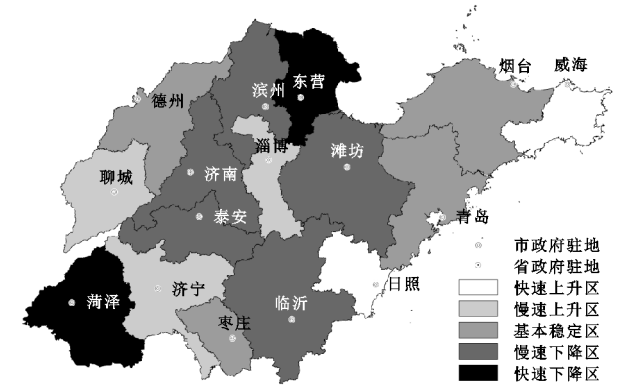


图 2 2009—2019 年山东省各市耕地生态安全时空变化格局

### 3.3 山东省耕地生态安全障碍因子分析

3.3.1 准则层障碍因子分析 由图 3 可知,2009 年山东省首位障碍度为状态障碍度,2019 年转为压力障碍度,2009—2019 年,压力障碍度和响应障碍度均有所增加,状态障碍度下降,山东省耕地资源面临的生态压力增强成为制约全省耕地生态安全水平提升的关键因素,耕地生态系统的状态对生态安全水平的障碍逐渐较少,响应障碍度略有增加,反映出 10 a 来山东省耕地生态安全状态有所改善,但仍需要采取有效的耕地生态保护措施和增加耕地生态保护投入,全省耕地生态安全水平仍有较高提升空间。

由表 6 可知,2009—2019 年以压力为首位障碍度的城市由 8 座增加至 12 座,以状态为首位障碍度的城市由 8 座减少至 4 座,没有以响应为首位障碍度的城市。济南、青岛、淄博、烟台、潍坊、济宁、德州在

2009—2019 年压力障碍度一直都是首位障碍度,说明上述地区应更加重视减轻耕地生态系统面临的社会经济压力和自然条件压力。威海、日照、临沂在 2009—2019 年状态障碍度一直都是制约本地耕地生态安全水平的首位障碍度,反映了其耕地安全状态有一定提升空间。

3.3.2 指标层障碍因子分析 运用公式(7)计算 2009—2019 年指标层障碍度,由于指标较多,在此选取前 7 个障碍度较大的指标为主要障碍因子(累计障碍度超过 69%),结果见表 7。可以发现,二三产业从业人员比重( $C_3$ )、二三产业产值比重( $C_2$ )、农村居民人均可支配收入( $C_8$ )、耕地平均海拔( $C_{11}$ )和复种指数( $C_{12}$ )均为

不止一个年份的主要障碍因子。其中,2009 年、2019 年的首要障碍因子都是二三产业从业人员比重。

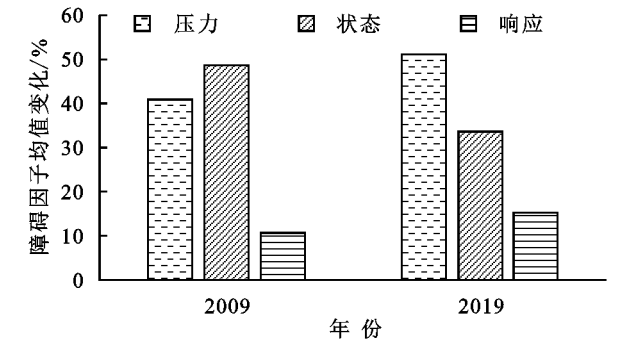


图 3 2009—2019 年山东省耕地生态安全水平障碍因子均值变化

表 6 2009—2019 年山东省各市首位障碍因子分布情况

年份	压力障碍度分布城市	状态障碍度分布城市	响应障碍度
2009	济南、青岛、淄博、烟台、潍坊、济宁、泰安、德州	枣庄、东营、威海、日照、临沂、聊城、滨州、菏泽	—
2019	济南、青岛、淄博、枣庄、东营、烟台、潍坊、济宁、德州、聊城、滨州、菏泽	泰安、威海、日照、临沂	—

注:“—”代表未发现。

表 7 2009—2019 年山东省主要障碍因子障碍度

年份	主要障碍因子障碍度大小排序						
2009	$C_3$	$C_8$	$C_2$	$C_7$	$C_{11}$	$C_9$	$C_{12}$
	13.90%	12.56%	12.35%	8.84%	8.21%	7.55%	6.69%
2019	$C_3$	$C_2$	$C_{14}$	$C_4$	$C_{11}$	$C_8$	$C_{12}$
	25.09%	9.68%	7.68%	7.48%	6.81%	6.79%	6.33%

(1) 2009—2019 年,二三产业从业人员比重的障碍度从 13.90%增至 25.09%,说明该因子对山东省耕地生态安全的制约程度有所增加。据此推测,随着全省经济发展,由于二三产业的收入更高,人们在选择就业方向时更偏向于二三产业的工作,导致务农人数减少,耕地缺乏劳动力耕作和打理,因此二三产业从业人员比重逐渐成为制约山东省耕地生态安全水平的首要原因。

(2) 2009—2019 年,二三产业产值比重的障碍度从 12.35%降至 9.68%,说明该因子对山东省耕地生态系统安全的制约程度有所减弱。随着农村工业化和乡村城镇化的快速发展,工业用地和建设用地大量增加,耕地的供给和需求矛盾尖锐,严重影响了耕地资源可持续发展,制约了耕地生态安全的改善。虽然 10 a 间其制约程度逐渐减弱,但仍有较高提升空间,需要对二三产业侵占耕地现象进行进一步整治。

(3) 2009—2019 年,农村居民人均可支配收入的障碍度从 12.56%降至 6.79%。10 a 间,随着山东省经济发展,农村居民人均可支配收入大幅提高,从 2009 年的 6 119 元增至 2019 年的 18 753 元,农民生活水平有了明显提高。同时,由于山东省政府一系列农业补贴政策的实施,鼓励享受补贴的农民做到不撂荒、地力不下降、不露天焚烧等,推进农业供给侧结构

性改革,促进绿色发展,增加农民收入,因此收入对耕地生态安全的制约逐渐减弱。

(4) 2009—2019 年,耕地平均海拔的障碍度从 8.21%降至 6.81%。10 a 间,山东省耕地平均海拔由 74.02 m 降至 66.76 m,一部分耕地转移至海拔较低的地方,地势变得平坦开阔,更有利于耕种,因此海拔对耕地生态安全的制约逐渐减弱。

(5) 2009—2019 年,复种指数的障碍度从 6.69%降至 6.33%。10 a 间,山东省大力推进高标准农田建设,节约集约利用耕地,耕地复种指数由 0.94 增至 1.46,土地利用结构得到有效改善。因此复种指数对耕地生态安全的制约有所减弱。

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

(1) 2009—2019 年,山东省耕地生态安全总体上呈现出下降的态势。压力、状态、响应子系统的具体表现为耕地生态压力增加,生态状态下降,响应水平降低。城市化水平、二三产业从业人员比重、二三产业产值比重是制约山东省耕地生态安全的重要原因。

(2) 山东省不同地级市耕地生态安全状态变化特征存在差异。16 个地级市中有 12 个地级市位于

基本稳定区、慢速上升区与慢速下降区,仅有2个地级市位于快速上升区,分别为威海和日照,说明农业扶持政策有较大成效,单位耕地农业机械动力增幅两市均有所增加,同时有2个地级市位于快速下降区,分别东营和菏泽,这两市主要是由于废水排放量增加以及工业固体废物综合利用率增幅、生活垃圾无害化处理率增幅降低等问题所导致耕地生态安全出现较大幅度下降。

(3) 不同年份影响山东省耕地生态安全的准则层和指标层的障碍因子存在差异。从准则层来看,2009 山东省的首位障碍度为状态,2019 年转为压力,各地级市的首位障碍度主要为压力,在 2009—2019 年,压力为首位障碍度的城市由 8 座增加至 12 座;从指标层来看,二三产业从业人员比重、二三产业产值比重、农村居民人均可支配收入、耕地平均海拔和复种指数在 2009—2019 年是影响耕地生态安全的主要障碍因子,其中二三产业从业人员比重在两个时期内均为制约耕地生态安全的最主要障碍因子。

## 4.2 建议

(1) 调整二三产业从业人员和二三产业产值比重,缓解城乡二元差距。不断扩大的城乡二元收入差距是造成二三产业从业人员、二三产业产值比重失调和影响耕地生态安全的深层次原因,协调推进新型城镇化和新农村建设,发展生态农业、优质农业,缩小城乡差距,增加农业创收。

(2) 加强耕地污染治理是耕地生态安全保证的必要环节。工业“三废”、生活垃圾、农业污染是影响耕地生态安全的重要祸端,必须加强污染治理。加强生态农业建设,减少化肥、农药的施用量,加强秸秆还田力度,增加生物有机肥料施用量,农用薄膜回收制度,降低农膜残留,从而提高耕地生态状态。

## 参考文献:

[1] 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.

[2] Tu Y, Chen B, Yu L, et al. How does urban expansion interact with cropland loss: A comparison of 14 Chinese cities from 1980 to 2015[J]. Landscape Ecology, 2021, 36:243-263.

[3] Wang L, Zheng W, Tang L, et al. Spatial optimization of urban land and cropland based on land production capacity to balance cropland protection and ecological conservation[J]. Journal of Environmental Management, 2021,285:112054.

[4] Kastner T, Rivas M, Koch W, et al. Global changes in diets and the consequences for land requirements for food[J]. Proceedings of the National Academy of

Sciences of the United States of America, 2012, 109(18):6868-6872.

[5] Wei S, Liu M. Farmland conversion decreases regional and national land quality in China[J]. Land Degradation & Development, 2017,28(2):459-471.

[6] Tilman D, Balzer C, Hill J, et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011,108(50):20260-20264.

[7] Tesfaye A, Brouwer R, Pieter V D Z, et al. Assessing the costs and benefits of improved land management practices in three watershed areas in Ethiopia[J]. International Soil & Water Conservation Research, 2016,4(1):20-29.

[8] Zabel F, Delzeit R, Schneider J M, et al. Global impacts of future cropland expansion and intensification on agricultural markets and biodiversity[J]. Nature Communications, 2019,10(1):1-10.

[9] Tang L, Ke X, Zhou T, et al. Impacts of cropland expansion on carbon storage: A case study in Hubei, China[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 265:110515.

[10] Ke X, Vliet J V, Zhu T, et al. Direct and indirect loss of natural habitat due to built-up area expansion: A model-based analysis for the city of Wuhan, China[J]. Land Use Policy, 2018,74:231-239.

[11] Nzabarinda V, Bao A, Xu W, et al. Impact of cropland development intensity and expansion on natural vegetation in different African countries[J]. Ecological Informatics, 2021,64:101359.

[12] Ngoma H, Pelletier J, Mulenga B P, et al. Climate-smart agriculture, cropland expansion, and deforestation in Zambia: Linkages, processes, and drivers[J]. Land Use Policy, 2021,107:105482.

[13] 马文博,李世平,陈昱.耕地数量变化与经济发展动态关系研究:以陕西省为例[J].干旱区资源与环境,2012,26(5):181-186.

[14] 俞海,黄季焜,Scott Rozelle,等.中国东部地区耕地土壤肥力变化趋势研究[J].地理研究,2003,22(3):380-388.

[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(011):172-178.

[16] 李楠,汪景宽,裴久渤.基于突变级数法的辽宁省耕地资源安全评价研究[J].中国人口·资源与环境,2012,22(S1):153-157.

[17] 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.

- dynamics and its response to climate change on the Tibetan Plateau[J]. *Ac Ta Acculturation Silica*, 2016, 25(1):13-21.
- [13] 李志,赵西宁.1961—2009年黄土高原气象要素的时空变化分析[J].*自然资源学报*,2013,28(2):287-299.
- [14] Zhang J, Zuo X A, Zhao X Y, et al. Effects of rainfall manipulation and nitrogen addition on plant biomass allocation in a semiarid sandy grassland[J]. *Reports*, 2020,10(1):14962.
- [15] Li J Z, Lin San, Taube F, et al. Above and below ground net primary productivity of grassland influenced by supplemental water and nitrogen in Inner Mongolia [J].*Dinette and Soil*,2011,340:253-264.
- [16] Sun Y F, Yang Y H, Zhao X, et al. Global patterns and climatic drivers of above- and belowground net primary productivity in grasslands[J]. *Science China: Life Sciences*,64(5):739-751.
- [17] 李晓刚,朱志红,周晓松,等.刈割、施肥和浇水对高寒草甸物种多样性、功能多样性与初级生产力关系的影响[J].*植物生态学报*,2011,35(11):1136-1147.
- [18] 车力木格,刘新平,何玉惠,等.半干旱沙地草本植物群落特征对短期降水变化的响应[J].*草业学报*,2020,29(4):19-28.
- [19] Hoover D L, Lauenroth W K, Milchunas D G, et al. Sensitivity of productivity to precipitation amount and pattern varies by topographic position in a semiarid grassland[J]. *Biosphere*,2021,12(2):e03376.
- [20] Robinson T M P, Pierre K J L, Concordance M A, et al. Seasonal, not annual precipitation drives community productivity across ecosystems[J].*Oikos*,2013,122:727-738.
- [21] 孙一梅,田青,郭爱霞,等.水、氮施用量对科尔沁沙地植被特征和叶性状的影响[J].*中国沙漠*,2020,40(6):223-232.
- [22] 孙一梅,田青,吕朋,等.科尔沁沙地沙质草地与固定沙丘植物群落结构对极端干旱的响应[J].*中国沙漠*,2021,41(1):129-136.
- [23] Eziz A, Yan Z B, Di T, et al. Drought effect on plant biomass allocation: A meta-analysis[J]. *Ecology and Evolution*, 2017,7(24):11002-11010.
- [24] 张彬,朱建军,刘华民,等.极端降水和极端干旱事件对草原生态系统的影响[J].*植物生态学报*,2014,38(9):1008-1018.
- [25] 高亚敏.气候变化对通辽草甸草原草本植物物候期的影响[J].*草业科学*,2018,35(2):423-433.
- [26] Zhou J T, Zhang Y J, Li Y J. Effects of short-term grazing exclusion on plant phenology and reproductive succession in a Tibetan alpine meadow[J]. *Scientific Reports*, 2016,6:27781.
- [27] 阿舍小虎.模拟增温与降水改变对川西北高寒草甸植物物候及初级生产力的影响[D].成都:成都理工大学,2013.
- [28] 范广洲,刘雅星,赖欣.中国木本植物物候变化特征分析[J].*气象科学*,2012,32(1):68-73.
- [29] Landholder H W. Growing season changes in the last-century [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006,137(1/2):1-14.
- [30] 陈效述,李惊.内蒙古草原羊草物候与气象因子的关系[J].*生态学报*,2009,29(10):5280-5290.
- [31] 叶鑫,周华坤,刘国华,等.高寒矮生嵩草草甸主要植物物候特征对养分和水分添加的响应[J].*植物生态学报*,2014,38(2):147-158.

(上接第145页)

- [18] 宋戈,王越,雷国平.松嫩高平原黑土区耕地利用系统安全影响因子作用机理研究:以黑龙江省巴彦县为例[J].*自然资源学报*,2014,29(1):13-26.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 张加磊.恩施州耕地生态安全评价及障碍因子研究[D].武汉:华中师范大学,2020.
- [22] 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.
- [23] 凡哲,付伟,张旭杰,等.基于生态足迹模型的云南省生态安全评价[J].*西南林业大学学报:社会科学*,2021,5(4):104-110.
- [24] Chen Z, Ma L, Guo F, et al. Internet of things technology in ecological security assessment system of intelligent land[J]. *Ieee Access*, 2020,8:99772-99782.
- [25] 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.
- [26] 刘舒馨,唐祥云,张燚,等.基于熵权和变异系数组合赋权法的耕地质量评价实证研究[J].*国土与自然资源研究*,2016(4):45-50.