

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.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2019.05.021

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

匡丽花, 赵小敏, 郭 熙

(江西农业大学鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室, 江西 南昌 330045)

摘要: 耕地生态安全是保证耕地健康可持续利用的基础。本研究从乡镇尺度构建基于 PSR 模型的耕地生态安全评价指标体系, 综合运用灰色关联模型和熵权组合法, 动态评估鹰潭市 1995–2015 年耕地生态安全状况, 并结合 Markov 链模型和热点分析对其时空格局演变进行分析。结果表明: (1) 鹰潭市大部分乡镇耕地生态安全压力和状态呈恶化趋势, 在响应措施的综合作用下, 鹰潭市整体耕地生态安全呈现上升趋势。(2) 临界安全级和比较安全级乡镇数量增多, “两极分化” 日趋显著, 临界安全级乡镇主要位于行政中心所在地及周边重要乡镇。(3) 空间格局上, 冷点聚类区向中西部扩大, 热点聚类区集中于南北部且范围不断向中心城镇延伸。研究结果为提升耕地生态安全水平和协调区域耕地可持续利用提供借鉴。

关键词: 耕地生态安全; 乡镇尺度; 空间格局

中图分类号: F301.24

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2019)05-1144-10

Spatial-temporal pattern of cultivated land ecological security at a township scale in Yingtan city

KUANG Li-hua, ZHAO Xiao-min, GUO Xi

(Key Laboratory of Poyang Lake Watershed Agricultural Resources and Ecology of Jiangxi Province, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: The ecological security of cultivated land is the basis for ensuring the healthy and sustainable use of cultivated land. In this study, the evaluation index system of cultivated land ecological security was constructed on the township scale based on PSR model. The comprehensive assessment of cultivated land ecological security in Yingtan city from 1995 to 2015 was conducted by using the grey system theory and entropy weight-hierarchical analysis group method. The Markov chain model and hotspot analysis method was used to analyze the spatio-temporal pattern. The results showed that the cultivated land ecological security pressure and state of most towns and villages in Yingtan city were deteriorating, and the overall ecological security of the cultivated land in Yingtan city showed a rising trend under the comprehensive action of the response measures. The number of critical safety level and safer level towns was increasing, and the "polarization" phenomenon was becoming increasingly significant. The critical safety level towns were mainly located in the important towns of the administrative center and surrounding areas. In the spatial pattern, the cold point clustering zone was expanding to the central and western regions. However, the hotspot clustering area was concentrated in the north and south area and extended to the central town. These results can provide reference for the improvement of ecological security level and sustainable utilization of cultivated land.

收稿日期: 2019-04-11

基金项目: 江西省赣鄱英才“555”领军人才项目(201295)

作者简介: 匡丽花(1989-), 女, 江西吉安人, 博士, 讲师, 主要从事土地资源可持续利用研究。(E-mail) kuanglihua.1228@163.com

通讯作者: 赵小敏, (E-mail) zhaoxm889@126.com

central and western regions. However, the hotspot clustering area was concentrated in the north and south area and extended to the central town. These results can provide reference for the improvement of ecological security level and sustainable utilization of cultivated land.

Key words: cultivated land ecological security; township scale; spatial-temporal pattern

改革开放以来,中国的经济和城市化建设发展迅速,从1995–2015年的20年间,中国城市化率提升将近30%。与此同时,为了满足生存和发展的需要,不可避免地出现建设占用耕地等行为。中国庞大的人口基数和匮乏的人均可利用耕地资源,使得人们对耕地利用的广度和深度增加,造成耕地数量减少、质量降低和生态环境恶化的后果,耕地生态安全和可持续利用受到威胁,甚至关系到中国的粮食安全、社会安全和经济安全。耕地生态系统是自然-社会-经济复合系统^[1],研究耕地生态安全问题,对于缓解人地矛盾、保障粮食安全、维护社会稳定和促进耕地可持续利用意义重大。

在耕地生态安全的研究中,国外学者主要与农业可持续利用相结合,如Andrea等根据土壤生态系统服务来确定最适合的土壤管理方式,促进农业生态系统可持续发展^[2];Bender等证明了土壤生物多样性可促进耕地生态系统功能,因此可通过提升土壤生物多样性和耕地管理力度来促进农业可持续利用^[3]。中国关于耕地生态安全研究主要集中在耕地生态安全的内涵^[4]、耕地生态安全评价^[5-6]、耕地生态安全影响因素^[7-8]和耕地生态安全格局^[9-10]等方面。在耕地生态安全评价的方法中,主要有多因素综合加权法^[11]、量子遗传投影寻踪模型^[5]、集对分析法^[12]、物元模型法^[6]等,在耕地生态安全评价体系大多基于PSR(Pressure-State-Responses)理论框架,研究重点多是对区域耕地生态安全现状进行分析,且研究结论多以县级以上行政区为单元进行结果统计分析,这难以体现耕地生态安全的空间差异,而运用景观生态学方法进行耕地生态安全研究的,缺乏考虑社会经济因素的影响,仅从空间格局上反映变化方向,难以解释原因^[13]。在当今互联网飞速发展时代,县级以上行政区域在网信息数据丰富,信息量大,获取方便,而乡镇区域在网信息匮乏,乡镇尺度的耕地生态安全评价极少。基于乡镇一级尺度的耕地生态安全研究可结合社会经济因素更精确反映空间差异,更准确地解释变化原因,基于此,本研究以鹰潭市为研究区域,选取鹰潭市37个乡镇为研究对象,基于PSR模型构建鹰潭市耕地生态安全评价体系,运用灰色关联模型、Markov链模型和GIS空间分析法对鹰潭市1995–2015年耕地生态安全的时空格局演变进行分析,旨在为耕地资源的可持续利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鹰潭市地处江西省东北部,北纬 $27^{\circ}35' \sim 28^{\circ}41'$ 、东经 $116^{\circ}41' \sim 117^{\circ}30'$,地势东南部高西北部低,属中亚热带湿润季风温和气候,多年平均气温 18.4°C ,年平均降水量 $1\,881.8\text{ mm}$,境内有信江横穿而过,水利设施丰富,灌排渠系纵横有致。鹰潭市属于鄱阳湖流域,是江西省重要的商品粮基地和经济区,土地肥沃,矿产资源比较丰富,全市总面积 $355\,670\text{ hm}^2$,其中耕地 $125\,038\text{ hm}^2$ 、林地 $174\,950\text{ hm}^2$ 、建设用地 $31\,446\text{ hm}^2$,分别占全市面积的35.12%、49.14%、8.83%,鹰潭市辖月湖区、贵溪市、余江县,考虑研究时长跨度20年,乡镇行政区域分割合并和乡镇名更改等原因,现统一按照当今行政区划情况进行统计,共有37个乡镇,鹰潭市行政区划如图1。

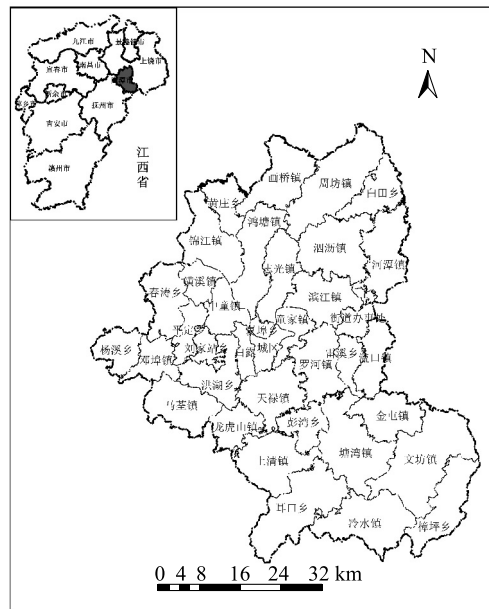


图1 鹰潭市行政区划图

Fig.1 An administrative map of Yingtan city

1.2 数据来源与处理

1.2.1 数据来源 本研究遥感影像数据从地理空间数据云获取,1995年、2005年遥感影像来源于Landsat4-5 TM,2015年遥感影像来源于Landsat8 OLI,空间分辨率均为30 m;重金属数据从江西省农业厅的重金属采样化验数据中获取;社会经济数据

从 1995–2016 年《鹰潭市统计年鉴》、《月湖区统计年鉴》、《贵溪市统计年鉴》、《余江县统计年鉴》以及县级农业局、统计局等相关部门统计数据和乡镇调查数据中获取。

1.2.2 数据预处理 对遥感影像进行几何精校正、配准、裁剪等预处理后,采用监督分类和目视解译相结合的方法,解译鹰潭市 1995–2015 年 3 期遥感影像,解译成 6 大类:耕地、林地、草地、建设用地、水域和未利用地。最后在分类结果图中,随机选择 200 个点,进行分类精度验证,遥感影像分类的 Kappa 系数分别达到 0.854 9、0.893 4、0.916 5,满足使用要求。对重金属样点数据,采用高斯克吕格插值方法,得到研究区域重金属空间分布,并计算内梅罗污染指数作为土壤综合污染指数^[14-15]。最后依托 ArcGis 平台进行数据的空间链接,将解译的土地利用图、行政区划图、土壤综合污染指数结合统计资料等社会经济数据进行空间叠加和链接。

1.3 研究方法

1.3.1 评价体系 耕地生态系统是一个功能多样、动态发展以及具有高度耦合性的社会-经济-生态复合系统,是研究人为活动与自然系统之间相互联系的领域^[16-17]。耕地生态安全是指在一定的时间和空间维度上,耕地处于自身结构稳定和功能正常,同时能满足人类健康生存和社会经济可持续发展需要的一种状态^[4]。

PSR 模型框架是使用最广泛的因果链框架^[18],遵循“原因-效应-响应”逻辑,体现一种人类活动与生态环境之间的因果链关系。利用 PSR 框架构建的指标体系能综合灵活地反映指标间的因果关系,因此,本研究借助 PSR 模型来构建耕地生态安全评价框架(图 2)。社会经济发展及人口增长对耕地的需求给耕地生态系统带来巨大压力(P);人类在利用耕地的过程中,过度挖潜和带来污染物,干扰系统的功能和结构,改变原有耕地生态系统状态(S);耕地生态系统通过系统固有的自我调节能力作出反应,正负反馈于人类社会,同时人们为了耕地生态系统的可持续发展,作出环境保护、政策调整等一系列优化措施与对策的响应活动(R)。根据耕地生态系统 P-S-R 的过程分析,遵循选取指标科学性、可比性、数据可获得性及系统性等原则,在现有研究成果基础上^[6, 11-12, 17],结合研究区域特征,初步确定基于 PSR 模型的耕地生态安全评价指标体系,再做指标 Pearson 相关性分

析进行筛选,最终构建评价指标体系(表 1)。

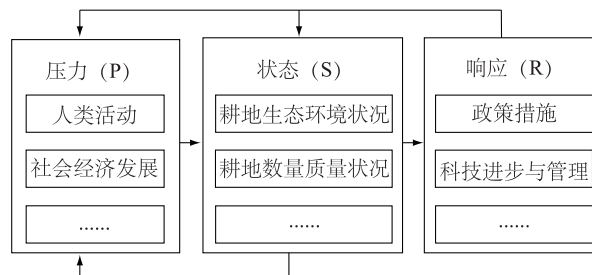


图 2 耕地生态安全评价 PSR 基本框架

Fig.2 PSR framework for evaluation on the cultivated land ecological security

1.3.2 权重确定 在权重的确定方法中,层次分析法为主观性较强,熵权法是根据指标值的变异程度及提供信息量的大小来反映指标的重要程度,以此确定权重,客观性强,缺点是欠考虑决策者的意愿,容易出现不重要的指标却有较大权值的情况。基于以上 2 种方法的优缺点,本研究采用层次分析法^[19]和熵权^[20]组合平均法来确定指标权重,使结果既能反映决策者主观意愿,又趋客观性,合理可靠,结果见表 1。

1.3.3 灰色关联度模型 耕地生态系统受社会、经济和自然环境等诸多不确定性和不完全性因素影响,具有一定灰色性。灰色关联方法是灰色系统理论中分析方法之一,可定量描述和比较系统发展的态势,首先选取一组理想状态的数据列作为比较参考数据列,再将若干统计数据列与参考数据列进行对比,比较其几何形状的相似程度,通过关联度来判断,关联度能反映各评价对象与理想状态的接近程度(或称优劣程度),形状越接近,关联度越高。此方法克服了传统数学模型方法的局限性^[21]。

1.3.3.1 评价指标标准化 本研究中每个指标都存在生态安全基准值,基准值的设定主要参考生态环境部制定的《生态县、生态市、生态省建设标准(2008 年修订稿)》以及中国、江西省、鹰潭市的平均水平(表 1)。正向指标大于基准值,或逆向指标小于基准值时,指标处于安全状态。设研究区有 m 个乡镇, n 个评价指标,矩阵 A 为耕地生态安全,则:

$$A = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}, A = \{x_{ij}\}_{m \times n} \quad (1)$$

其中 $0 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq n$ 。

表 1 耕地生态安全指标体系

Table 1 The evaluation index system of cultivated land ecological security

目标层	准则层	指标层	计算公式	权重	基准值	基准值依据
耕地生态安全	压力	每 1 km ² 人口密度 (D_1) (人)	总人口/土地面积	0.052 0	200	标准
		人均耕地面积 (D_2) (hm ²)	耕地面积/总人口	0.055 4	0.08	中国平均水平
		城市化水平 (D_3) (%)	城镇人口/总人口	0.060 2	50	标准
		每 1 km ² 经济密度 (D_4) ($\times 10^4$ 元)	GDP/土地面积	0.069 9	850	标准
		化肥负荷 (D_5) (kg/hm ²)	化肥施用量/耕地面积	0.045 7	250	标准
		农药负荷 (D_6) (kg/hm ²)	农药施用量/耕地面积	0.038 3	30	标准
		重金属污染指数 (D_7)	—	0.021 7	0.7	标准
	状态	森林覆盖率 (D_8) (%)	—	0.063 5	45	标准
		耕地垦殖率 (D_9) (%)	耕地面积/土地面积	0.042 0	26.49	江西省平均值
		耕地水土流失面积比例 (D_{10}) (%)	水土流失面积/耕地面积	0.055 1	10	标准
		大于 25° 耕地面积比例 (D_{11}) (%)	大于 25° 耕地面积/耕地面积	0.041 1	1.19	江西省平均值
		单位耕地粮食产量 (D_{12}) (kg/hm ²)	粮食总产量/耕地面积	0.048 6	6 400	标准
		复种指数 (D_{13}) (%)	总播种面积/耕地面积	0.051 3	187	江西省平均值
		农业结构调整 (D_{14}) (%)	农业产值/农林牧渔总产值	0.036 6	40	鹰潭市近 10 年平均值
	响应	污水集中处理率 (D_{15}) (%)	—	0.049 4	100	标准
		有效灌溉面积比例 (D_{16}) (%)	有效灌溉面积/耕地面积	0.054 8	65.8	标准
		单位耕地农业机械化水平 (D_{17}) (kW/hm ²)	机械总动力/耕地面积	0.032 8	9	文献[13]
		农民人均纯收入 (D_{18}) (元)	—	0.039 2	6 000	标准
		环境治理投资占 GDP 比重 (D_{19}) (%)	环境治理投资/GDP	0.073 0	2.5	标准
		第三产业产值占 GDP 比重 (D_{20}) (%)	第三产业产值/总 GDP	0.040 0	40	标准
		每 1 hm ² 农业技术人员投入 (D_{21}) (人)	耕地面积/农业技术人员人数	0.029 4	312.8	鹰潭市平均值

农民人均纯收入国家标准 2008 年为 6 000 元,按照价格指数换算结果为 1995 年为 4 729 元,2005 年为 5 382 元,2015 年为 7 461 元。

A_j 为第 j 列评价指标值, B_j 为该指标基准值, X_j 为第 j 列指标标准化后指标值, 则:

$$X_j \text{ 为正向指标时, } X_j = \begin{cases} 1, A_j > B_j \\ \frac{A_j}{B_j}, A_j < B_j \end{cases} \quad (2)$$

$$X_j \text{ 为负向指标时, } X_j = \begin{cases} 1, A_j < B_j \\ \frac{B_j}{A_j}, A_j > B_j \end{cases} \quad (3)$$

基准值标准化后设为 $G = (g_1, g_2, \dots, g_n)$, 则 $g_j = B_j/B_j = 1$, 生态安全状况为优^[22]。

1.3.3.2 计算关联系数 根据灰色关联公式计算第 j 个指标 X_j 与耕地生态安全标准序列 G 的关联系数 $\zeta_i(X_j, G)$, 公式如下^[21]:

$$\zeta_i(X_j, G) = \frac{\Delta \min + \rho \times \Delta \max}{\Delta L_{ij} + \rho \times \Delta \max} \quad (4)$$

式中: $\Delta \max = \max_i \max_j |X_{ij} - g_j|$, 为两级极大值; $\Delta \min = \min_i \min_j |X_{ij} - g_j|$, 为两级极小值; $\Delta L_{ij} = |X_{ij} - g_j|$; ρ 为分辨系数, $\rho \in (0, 1)$, ρ 越小, 分辨力越大, 通常 ρ 取值 0.5。

1.3.3.3 计算耕地生态安全指数 第 i 个评价对象与标准序列 G 的关联度 R , 即评价对象 i 的耕地生态安全指数, 反映区域耕地生态安全状况的优劣, 计算公式如下:

$$R = \sum_{j=1}^n w_j \times \zeta_i(X_j, G) \quad (5)$$

1.3.3.4 耕地生态安全等级划分 到目前为止, 耕地生态安全等级还没有统一的划分标准, 本研究在参考相关研究结果^[17, 22]及咨询专家的基础上, 按照评价指数从低到高将耕地生态安全划分为 7 个等级 (表 2)。

表 2 鹰潭市耕地生态安全等级划分标准

Table 2 Evaluation criterion of cultivated land ecological security in Yingtan city

项目	安全指数						
	<0.30	0.31~0.50	0.51~0.60	0.61~0.70	0.71~0.80	0.81~0.90	≥0.91
安全等级	I	II	III	IV	V	VI	VII
安全状况	恶化级	风险级	敏感级	临界安全级	一般安全级	比较安全级	安全级

1.3.4 Markov 链模型 Markov 链是时间和状态均离散的 Markov 过程,而 Markov 过程是具有“无后效性”的特殊随机运动过程。耕地生态安全格局的动态变化过程符合 Markov 过程性质^[17]:(1)在一定区域中,耕地生态安全等级之间可以相互转化;(2)耕地生态安全等级之间相互转化的过程,包含较多函数关系难以准确表述的事件^[23]。基于 Markov 链原理,不同时间段各乡镇耕地生态安全等级之间变化可以用 Markov 概率矩阵 M 表示:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & \cdots & M_{1q} \\ M_{21} & M_{22} & \cdots & M_{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{p1} & M_{p2} & \cdots & M_{pq} \end{bmatrix} \quad (6)$$

M_{pq} 为在年份 t ,安全类型为 p 的乡镇在下一年份转移到安全类型 q 的概率, $M_{pq} = \frac{C_{pq}}{C_p}$, C_{pq} 为从年份 t 中的安全类型 p 在下一年份转移到安全类型 q 的乡镇数量之和, C_p 为 t 年份中属于 p 安全类型的所有乡镇之和。若某一乡镇在 t 年份和下一年份耕地生态安全类型不变,则该乡镇的耕地生态安全类型转移为平稳;若耕地生态安全等级提升,则概率矩阵向上转移,反之则向下转移。

1.3.5 热点分析 热点分析是局部空间自相关中的一种分析判定模式,通过 Getis-Ord G_i^* 工具实现,得到数据集中高值和低值要素在空间上的聚类位置^[24]。成为热点需要满足 2 个条件:一是要素高值或低值,不一定是统计学上的显著性热点;二是需要被同样的高值或低值要素包围,才是统计学上的显著性热点^[25]。本研究采用 Getis-Ord G_i^* 局部统计来分析耕地生态安全状况局部聚类变化,计算公式为:

$$G_i^* = \frac{\sum_{i=1}^m w_{i,t} R_i - \bar{R} \sum_{i=1}^m w_{i,t}}{\sqrt{\frac{m \sum_{i=1}^m w_{i,t}^2 - (\sum_{i=1}^m w_{i,t})^2}{m-1}}} \quad (7)$$

其中 R_i 指乡镇 i 的耕地生态安全指数; $w_{i,t}$ 指乡镇 i 与 t 之间的空间权重(相邻为 1,不相邻为 0); m 为乡镇总数。 G_i^* 统计结果是 Z 得分。

2 结果与分析

2.1 鹰潭市乡镇耕地生态安全指数特征分析

根据 P-S-R 指标体系及灰色关联度模型得到 1995-2015 年鹰潭市各乡镇耕地生态安全指数(表 3),从 1995-2015 年总的变化趋势看,月湖区白露街道办事处、夏埠乡、贵溪市街道办事处、滨江镇、邓埠镇、潢溪镇、锦江镇、刘家站乡和杨溪乡耕地生态安全出现恶化,月湖区城区和黄庄乡变化不明显,其他各乡镇的耕地生态安全均有所改善。耕地生态安全压力子系统方面,贵溪市的白田乡、耳口乡、鸿塘镇等 12 个乡镇有所改善,樟坪乡、志光镇变化不明显,月湖区、余江县所有乡镇和贵溪市的河潭镇等 7 个乡镇恶化明显,表明大部分乡镇,尤其是中心城镇及周边乡镇,人口增加和经济发展对环境施加的压力逐渐增加,少数乡镇因化肥施用量和重金属污染指数降低而使得整个压力状况得到改善。鹰潭市各乡镇状态子系统除了平定乡变化不明显,耳口乡、罗河镇、塘湾镇、上清镇、志光镇和春涛乡有所改善外,其余乡镇均出现不同程度恶化,主要是因为森林覆盖率降低、耕地垦殖率普遍降低,其中贵溪市街道办事处恶化程度最明显,森林覆盖率从 59%降低至 29%,耕地垦殖率从 8.56%降至 0.10%,农业产值占农林牧渔业总产值的比例由 36%降至 21%。各乡镇耕地生态安全响应子系统均得到改善,1995 年以来,农民人均纯收入从 1 500 多元增加至 8 000 多元,污水集中治理从无覆盖到覆盖 90% 以上,环境治理投资占 GDP 总额比例增加 0.5 个百分点,以及农业科技推广,使得耕地生态安全响应态势正逐步好转。耕地生态安全压力和状态子系统在响应子系统的综合作用下,使得鹰潭市大部分乡镇耕地生态安全呈现上升趋势。

表3 鹰潭市各乡镇1995–2015年耕地生态安全指数

Table 3 Cultivated land ecological security index in towns and villages of Yingtan city from 1995 to 2015

县市区	乡镇	压力				状态				响应				综合			
		1995	2005	2015	趋势	1995	2005	2015	趋势	1995	2005	2015	趋势	1995	2005	2015	趋势
月湖区	白露街办	0.91	0.77	0.70	↓	0.74	0.80	0.67	↓	0.51	0.70	0.79	↑	0.73	0.76	0.72	↓
	城区	0.67	0.58	0.54	↓	0.77	0.69	0.71	↓	0.57	0.64	0.77	↑	0.67	0.64	0.67	→
	童家镇	0.82	0.74	0.70	↓	0.84	0.87	0.76	↓	0.50	0.66	0.78	↑	0.73	0.76	0.74	↑
	夏埠乡	0.91	0.70	0.60	↓	0.79	0.84	0.66	↓	0.52	0.64	0.83	↑	0.75	0.73	0.69	↓
贵溪市	白田乡	0.92	0.99	0.97	↑	0.96	0.95	0.88	↓	0.48	0.56	0.79	↑	0.79	0.84	0.88	↑
	街办	0.66	0.60	0.58	↓	0.91	0.77	0.71	↓	0.65	0.62	0.80	↑	0.74	0.66	0.69	↓
	耳口乡	0.93	1.00	0.95	↑	0.81	0.87	0.88	↑	0.54	0.57	0.74	↑	0.76	0.82	0.86	↑
	河潭镇	0.93	0.96	0.82	↓	0.81	0.84	0.73	↓	0.51	0.53	0.76	↑	0.75	0.78	0.77	↑
	鸿塘镇	0.88	0.93	0.89	↑	0.79	0.83	0.74	↓	0.48	0.52	0.75	↑	0.72	0.76	0.79	↑
	金屯镇	0.84	0.90	0.87	↑	0.87	0.88	0.84	↓	0.51	0.58	0.81	↑	0.74	0.79	0.84	↑
	雷溪乡	0.85	0.86	0.80	↓	0.89	0.88	0.75	↓	0.51	0.59	0.82	↑	0.76	0.78	0.79	↑
	冷水镇	0.81	0.88	0.87	↑	0.92	0.86	0.83	↓	0.57	0.61	0.77	↑	0.77	0.79	0.83	↑
	流口镇	0.85	0.92	0.90	↑	0.95	0.99	0.83	↓	0.50	0.55	0.76	↑	0.77	0.83	0.83	↑
	龙虎山镇	0.84	0.82	0.75	↓	0.93	0.94	0.88	↓	0.55	0.62	0.82	↑	0.78	0.80	0.81	↑
	罗河镇	0.85	0.75	0.71	↓	0.71	0.84	0.75	↑	0.48	0.52	0.77	↑	0.68	0.71	0.74	↑
	彭湾乡	0.91	0.97	0.99	↑	0.89	0.95	0.86	↓	0.50	0.55	0.73	↑	0.77	0.83	0.86	↑
	上清镇	0.94	1.00	0.97	↑	0.79	0.82	0.85	↑	0.50	0.54	0.75	↑	0.75	0.79	0.86	↑
	泗沥镇	0.93	0.95	0.91	↓	0.88	0.91	0.77	↓	0.48	0.51	0.74	↑	0.77	0.79	0.81	↑
	塘湾镇	0.86	0.91	0.91	↑	0.87	0.95	0.89	↑	0.49	0.53	0.77	↑	0.74	0.80	0.86	↑
	文坊镇	0.85	0.99	1.00	↑	0.92	0.89	0.90	↓	0.48	0.54	0.74	↑	0.76	0.81	0.88	↑
	天禄镇	0.90	0.93	0.95	↑	0.93	1.00	0.91	↓	0.48	0.53	0.75	↑	0.78	0.82	0.87	↑
	樟坪乡	1.00	1.00	1.00	→	0.83	0.87	0.80	↓	0.53	0.56	0.76	↑	0.79	0.82	0.86	↑
	志光镇	0.91	0.95	0.91	→	0.73	0.79	0.82	↑	0.48	0.52	0.74	↑	0.71	0.76	0.83	↑
	周坊镇	0.94	0.98	0.96	↑	0.85	0.89	0.83	↓	0.48	0.51	0.75	↑	0.76	0.80	0.85	↑
余江县	滨江镇	0.91	0.74	0.69	↓	0.84	0.87	0.67	↓	0.55	0.62	0.80	↑	0.77	0.75	0.70	↓
	春涛乡	0.94	0.94	0.87	↓	0.79	0.82	0.81	↑	0.46	0.49	0.65	↑	0.74	0.76	0.78	↑
	邓埠镇	0.68	0.61	0.49	↓	0.96	0.90	0.76	↓	0.54	0.66	0.80	↑	0.73	0.73	0.68	↓
	画桥镇	0.96	0.93	0.95	↓	0.87	0.86	0.82	↓	0.48	0.52	0.67	↑	0.77	0.78	0.82	↑
	黄庄乡	0.94	1.00	0.92	↓	0.97	0.99	0.82	↓	0.49	0.56	0.66	↑	0.80	0.86	0.80	→
	潢溪镇	0.89	0.85	0.65	↓	0.84	0.88	0.79	↓	0.49	0.55	0.67	↑	0.75	0.77	0.70	↓
	锦江镇	0.93	0.87	0.90	↓	0.95	0.97	0.81	↓	0.47	0.52	0.62	↑	0.79	0.79	0.78	↓
	刘家站乡	0.87	0.93	0.76	↓	0.73	0.74	0.70	↓	0.54	0.57	0.68	↑	0.72	0.75	0.71	↓
	马荃镇	0.89	0.90	0.88	↓	0.98	1.00	0.89	↓	0.48	0.52	0.61	↑	0.79	0.81	0.80	↑
	平定乡	0.86	0.87	0.82	↓	0.77	0.80	0.77	→	0.47	0.52	0.69	↑	0.70	0.74	0.76	↑
	杨溪乡	0.92	0.95	0.87	↓	1.00	1.00	0.81	↓	0.53	0.60	0.65	↑	0.82	0.85	0.78	↓
	中童镇	0.92	0.92	0.82	↓	0.72	0.74	0.66	↓	0.49	0.58	0.76	↑	0.72	0.75	0.75	↑
	洪湖乡	0.98	0.97	0.96	↓	0.83	0.79	0.75	↓	0.48	0.51	0.62	↑	0.77	0.76	0.78	↑

2.2 鹰潭市耕地生态安全空间变化特征

2.2.1 耕地生态安全空间格局变化 利用 GIS 空间分析,得到 1995-2015 年鹰潭市乡镇耕地生态安全等级空间分布图(图 3)。结合各乡镇耕地生态安全类型空间变化(表 4),1995 年耕地生态安全等级为 V 级的乡镇占全部乡镇比重较大,基本遍布全域;2005 年,耕地生态安全等级为 VI 级的乡镇从 2 个增加至 10 个,主要位于贵溪市和余江县的南部,耕地生态安全水平有所提升;2015 年耕地生态安全等级空间分异更明显,耕地生态安全等级为 V 级的乡镇持续减少,IV 级和 VI 级的乡镇增加,分别增加 3 个和 7 个,其中 IV 级耕地主要分布于城镇中心及周边区

域,鹰潭市中心一带、余江县政府所在地邓埠镇和贵溪市中心及周边的滨江镇,表明经济的发展和人口的集聚对耕地生态安全产生一定影响。耕地生态安全等级为 VI 级的乡镇占比最大,达 46% 左右,主要集中分布于贵溪市,贵溪市是全国百强县中江西上榜三县之一,经济的发展、农民纯收入水平提高、生态环境保护的投入以及农业科技的发展等都对耕地生态安全起到积极促进作用,区域总体耕地生态安全水平处于中上水平,但耕地生态安全出现两极分化发展趋势,敏感级乡镇比重增加 8%,环境保护不容忽视。

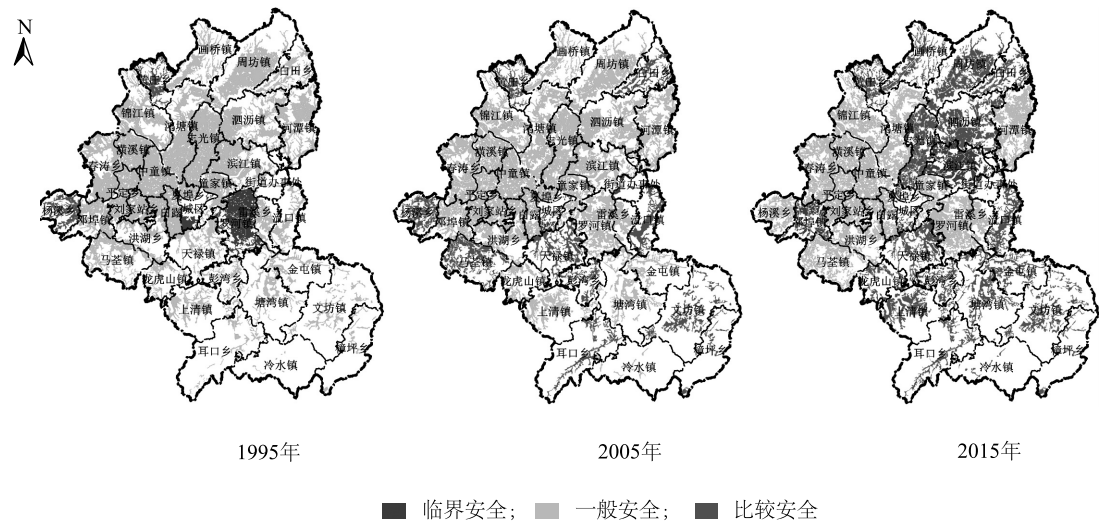


图 3 1995-2015 年鹰潭市乡镇耕地生态安全等级空间分布图
Fig.3 Spatial pattern of cultivated land ecological security level in towns and villages of Yingtan city from 1995 to 2015

表 4 鹰潭市 1995-2015 年乡镇耕地生态安全等级空间变化
Table 4 Spatial changes of cultivated land ecological security level in towns and villages of Yingtan city from 1995 to 2015

安全等级	1995 年		2005 年		2015 年	
	乡镇数量	百分比 (%)	乡镇数量	百分比 (%)	乡镇数量	百分比 (%)
IV	2	5.41	2	5.41	5	13.51
V	33	89.19	25	67.57	15	40.54
VI	2	5.41	10	27.03	17	45.95

2.2.2 耕地生态安全空间转移特征 运用 Markov 链模型构建 1995-2005 年、2005-2015 年鹰潭市乡镇耕地生态安全 Markov 转移概率矩阵(表 5),其中对角线上元素表示乡镇耕地生态安全等级未

发生变化的概率,非对角线元素表示耕地生态安全等级之间发生变化概率。1995-2005 年,对角线元素非全部大于非对角线元素,说明鹰潭市各乡镇耕地生态安全水平并不稳定。2005-2015 年,对角线元素均大于非对角线元素,鹰潭市乡镇耕地生态安全等级不发生转移的概率大于发生转移的概率,一般安全级和比较安全级不发生转移概率相比 1995-2005 年均有所下降,说明乡镇耕地生态安全等级保持同一水平概率减少,其中一般安全级和比较安全级不发生转移的概率相比分别下降 20.73% 和 20.00%,不同等级之间的转移相比之下更频繁,鹰潭市乡镇耕地生态安全水平空间差异扩大。

表5 鹰潭市1995–2015年乡镇耕地生态安全等级Markov转移概率矩阵

Table 5 Markov matrix of transition probability for cultivated land ecological security level in towns and villages of Yingtan city from 1995 to 2015

安全等级	1995–2005 年			2005–2015 年		
	IV	V	VI	IV	V	VI
IV	50.00	50.00	0	100.00	0	0
V	3.03	72.73	24.24	12.00	52.00	36.00
VI	0	0	100.00	0	20.00	80.00

2.2.3 耕地生态安全热点分布 鹰潭市1995–2015年耕地生态安全热点分布如图4,黑色为热点即高值聚类区域,浅灰色为冷点即低值聚类区域。在研究期间,鹰潭市耕地生态安全空间自相关性逐渐增强,热点分析在空间分布上直观地说明了鹰潭市南北部耕地生态安全整体提高的同时,低值区域以扩大趋势从中部向中西部方向延伸。

鹰潭市乡镇耕地生态安全空间格局演变存在一定规律性,冷点区域主要位于重要行政中心城镇并

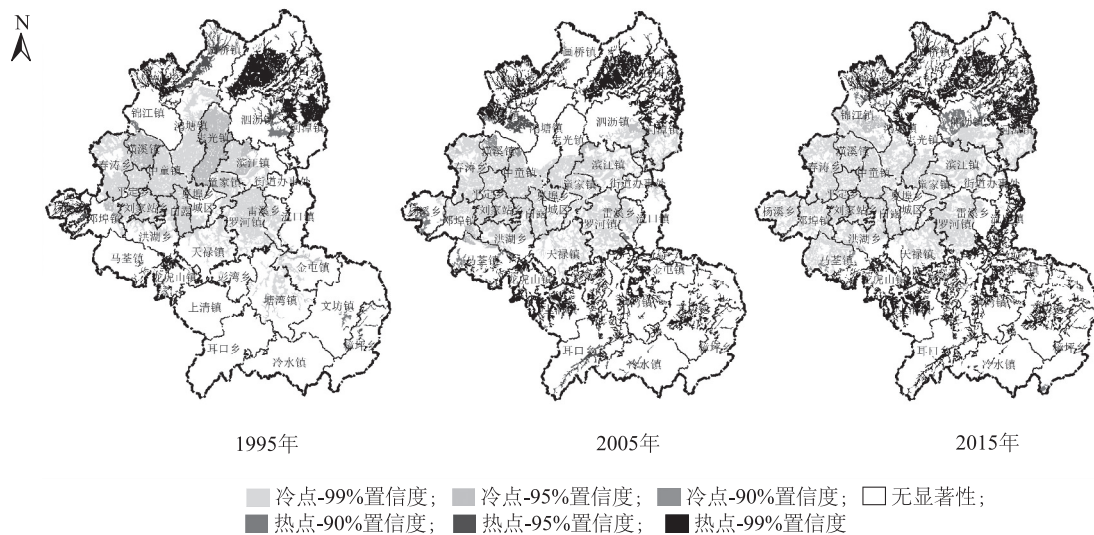


图4 1995–2015年鹰潭市乡镇耕地生态安全热点分布图

Fig.4 Hot spot analysis of cultivated land ecological security level in towns and villages of Yingtan city from 1995 to 2015

不断向余江方向扩展,结合表3可知月湖区所有乡镇、贵溪市街道办事处、雷溪乡、罗河镇、滨江镇和邓埠镇的响应安全程度优于压力和状态指标,主要由区域经济发展不平衡所致,这些区域分别是鹰潭市中心城区和贵溪市和余江县的政府所在地及周边重要乡镇,经济发展水平相对较高,第三产业发展快,环境保护政策实行较好,环境治理投资大,人们环保意识更强,但城市化进程中较高的人口密度和较快的经济发展速度对耕地的压力过大以及农药化肥不合理利用导致的农业面源污染造成耕地生态安全总体水平偏低。贵溪市是全国百强县中江西上榜三县之一,对耕地生态安全的

响应程度要远大于余江县,因此贵溪市2015年的冷点区域较2005年有所降低,而余江县表现低值范围扩大。

热点区域主要分布在远离中心城镇的非行政中心乡镇,并不断向中心城镇方向延伸。非行政中心乡镇受资源分配等限制,响应措施提升力度相对偏小,但2015年相比2005年得到非常大的改善,污水集中处理率从0到90%以上,有效灌溉面积和单位机械化水平提高,环境治理和科技投入加大,在压力和状态子系统整体劣于1995年和2005年的情况下,2015年大部分乡镇耕地生态安全水平得到提升,说明鹰潭市在推进生态文明建

设上取得一定成效。然而耕地生态安全压力和状态子系统在不断恶化的问题不容忽视,在社会经济发展的同时,重视生态文明建设,严守耕地保护红线,科学合理耕作,减少单位耕地农药、化肥负荷,减少农业面源污染。

3 讨论

本研究从乡镇视角对鹰潭市 1995–2015 年耕地生态安全状况进行评估,并对其时空格局演变进行分析。研究表明:(1)鹰潭市大部分乡镇耕地生态安全压力和状态指数呈恶化趋势,在响应措施的综合作用下,鹰潭市整体耕地生态安全指数呈现上升趋势。(2)临界安全级和比较安全级乡镇数量增多,一般安全级乡镇数量减少,不同等级之间的转移越来越频繁,“两极分化”日趋显著。2015 年,比较安全级乡镇占比最大,有 17 个,主要位于贵溪市。临界安全级乡镇包括月湖区城区、夏埠乡、贵溪市城区、滨江镇和邓埠镇,主要是行政中心所在地及周边重要乡镇。(3)空间格局上,表现为耕地生态安全等级空间分异更明显,冷点聚类区向中西部扩大,热点聚类区集中于南部且范围不断向中心城区延伸。

耕地生态安全问题的研究是耕地可持续利用的关键,掌握耕地生态安全空间格局的变化对耕地保护具有理论和现实意义。在鹰潭市的发展过程中,大量占用耕地对耕地生态安全产生消极影响,经济的快速发展和人口增加带来的压力逐渐提高。要改善生态环境状况和提升耕地生态安全水平,从研究结果来看,加大对环境保护的经济投入是必不可少的,同时,要缓解社会经济发展对耕地的压力,改进农业耕作技术和方法,扩大农业科技投入,科学分析所需农药化肥量,减少盲目超量投入,减少或尽量避免农业面源污染,改善耕地生态环境。

耕地生态安全问题是动态且持续的,制约耕地生态环境的因素间存在非常复杂的关系,一套完善的评价指标体系是耕地生态安全研究的基础,本研究根据耕地生态系统自然-社会-经济复合系统性质,基于 P-S-R 概念框架构建了由 21 个指

标构成的鹰潭市耕地生态安全评价指标体系,由于实际操作中受限于乡镇数据获取的难度,以及研究方法自身的局限性,本研究在评价指标体系确定和研究方法的选取上尚不完善,仍有待更深入的研究,还可结合地理学、生态学等学科,建立完善的生态监测体系,系统地综合研究耕地生态安全的演替过程。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] ANDREA F, BINI C, AMADUCCI S. Soil and ecosystem services: current knowledge and evidences from Italian case studies [J]. Applied Soil Ecology, 2018,123:693-698.
- [3] BENDER S F, WAGG C, VAN DER HEIJDEN M G A. An underground revolution: biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability [J]. Trends Ecol Evol, 2016,31(6):440-452.
- [4] 朱红波. 我国耕地资源生态安全的特征与影响因素分析[J]. 农业现代化研究, 2008(2):194-197.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 张冰洁,宋 戈. 松嫩高平原黑土区典型地域耕地生态安全评价及驱动力分析——以黑龙江省绥化市为例[J]. 水土保持研究, 2012,19(3):215-220.
- [9] 樊鹏飞,孟 悦,梁流涛,等. 耕地生态安全评价及时空格局分析——以传统农业区河南省周口市为例[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2017,47(1):16-23.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 裴 欢,魏 勇,王晓妍,等. 耕地景观生态安全评价方法及其应用[J]. 农业工程学报, 2014,30(9):212-219.
- [14] 胡 森,吴家强,彭佩钦,等. 矿区耕地土壤重金属污染评价模型与实例研究[J]. 环境科学学报, 2014,34(2):423-430.

- [15] 孙 华, 张桃林, 孙 波. 江西省贵溪市污水水田重金属污染状况评价研究[J]. 农业环境保护, 2001(6):405-407.
- [16] 白琳红, 王 卫, 张 玉. 河北省县域农田生态系统供给功能的健康评价[J]. 生态学报, 2012, 32(7):2033-2039.
- [17] 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.
- [18] ZHOU D, LIN Z, LIU L, et al. Assessing secondary soil salinization risk based on the PSR sustainability framework[J]. J Environ Manage, 2013, 128:642-654.
- [19] 匡丽花, 叶英聪, 赵小敏, 等. 基于农用地分等修正的土地整治项目对耕地质量的影响评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17):198-205.
- [20] 严 超, 张安明, 吴仕海. 基于 GM(1,1) 模型的土地生态安全动态分析与预测——以安徽省池州市为例[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(2):103-109.
- [21] 张凤太, 苏维词, 周继霞. 基于熵权灰色关联分析的城市生态安全评价[J]. 生态学杂志, 2008(7):1249-1254.
- [22] 张家其, 吴宜进, 葛 咏, 等. 基于灰色关联模型的贫困地区生态安全综合评价——以恩施贫困地区为例[J]. 地理研究, 2014, 33(8):1457-1466.
- [23] 薛 亮, 任志远. 基于空间马尔科夫链的关中地区生态安全时空演变分析[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1):114-118.
- [24] 赵冬玲, 何珊珊, 杨建宇, 等. 基于限制因素和热点分析的耕地整治质量潜力测算[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2):158-164.
- [25] 杨晓明, 戴小杰, 田思泉, 等. 中西太平洋鲑鱼围网渔业资源的热点分析和空间异质性[J]. 生态学报, 2014, 34(13):3771-3778.

(责任编辑:陈海霞)