

# 基于 PSR-可拓云模型的湖南省怀化市 农业生态安全评价

周子英<sup>1,2</sup>, 刘伏英<sup>1</sup>

(1.湖南工程学院 管理学院, 湖南 湘潭 411104; 2.湖南农业大学, 资源环境学院, 湖南 长沙 410128)

**摘要:** [目的] 对湖南省怀化市农业生态安全进行评价, 为推动该市农业健康可持续发展提供科学支持。[方法] 基于 PSR 指标框架, 构建了农业生态安全评价指标体系, 通过合作博弈法确定了评价指标的组合权重, 建立基于可拓云模型的农业生态安全评价模型, 并以怀化市农业生态系统作为研究对象, 综合评价该市 2010—2019 年农业生态安全状况。[结果] 2010—2019 年期间, 怀化市农业生态系统从“比较安全”状态向“安全”状态转化, 安全等级有所上升, 但是整体安全水平有待进一步提升。[结论] 为了进一步提升怀化市农业生态安全等级, 必须减少单位 GDP 能耗, 兴建农业水利设施, 提升土地产出水平, 增加农民收入, 降低农村居民恩格尔系数。同时应优化农村生活环境, 以促进怀化市农业生态系统健康安全可持续发展。

**关键词:** 农业生态系统; 安全评价; PSR 模型; 可拓云模型; 怀化市

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2021)02-0267-08

**中图分类号:** F323.22

**文献参数:** 周子英, 刘伏英. 基于 PSR-可拓云模型的湖南省怀化市农业生态安全评价[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 267-274. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.02.035; Zhou Ziyong, Liu Fuying. Evaluation of agricultural ecological security in Huaihua City of Hu'nan Province based on PSR and extension cloud model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 267-274.

## Evaluation of Agricultural Ecological Security in Huaihua City of Hu'nan Province Based on PSR and Extension Cloud Model

Zhou Ziyong<sup>1,2</sup>, Liu Fuying<sup>1</sup>

(1.College of Management, Hu'nan Institute of Engineering, Xiangtan, Hu'nan 411104, China;

2.College of Resources & Environment, Hu'nan Agricultural University, Changsha, Hu'nan 410128, China)

**Abstract:** [Objective] The agricultural ecological security of Huaihua City, Hu'nan Province was evaluated in order to provide scientific support for promoting the healthy and sustainable development of agriculture in Huaihua City. [Methods] The evaluation index system of agricultural ecological security was constructed based on the PSR index framework, the combination weight of evaluation indexes was determined by game theory, and the evaluation model of agricultural ecological security was established based on extension cloud model. Taking the agricultural ecosystem of Huaihua City as an example, the agricultural ecological security situation of Huaihua City from 2010 to 2019 was comprehensively evaluated. [Results] The agricultural ecosystem of Huaihua City changed from “relatively safe” state to “safe” state, and the security level increased, but the overall security level needed to be further improved. [Conclusion] In order to further improve the agricultural ecological security of Huaihua City, it is necessary to reduce the energy consumption per unit GDP, build agricultural water conservancy facilities, increase land output level, increase farmers' income, reduce the Engel coefficient of rural residents, and optimize the rural living environment to promote the healthy, safe and sustainable development of Huaihua agricultural ecosystem.

收稿日期: 2020-10-15

修回日期: 2020-11-30

资助项目: 湖南省哲学社会科学基金西部项目“基于田园综合体视角的武陵山片区精准扶贫机制研究”(18YBX008); 湖南省教育厅重点项目“农村贫困代际传递及产业反贫困创新机制研究”(19A107); 国家自然科学基金项目“城乡统筹导向的乡村功能提升机理及其调控路径”(41571168)

第一作者: 周子英(1974—), 女(汉族), 湖南省辰溪县人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事农业经济管理与区域可持续发展方面的研究。  
Email: mfk978@163.com.

**Keywords:** agricultural ecosystem; safety evaluation; PSR model; extension cloud model; Huaihua City of Hu'nan Province

农业生态安全是生态安全的重要组成部分,是指农业自然资源和生态环境处于一种健康、平衡、不受威胁的状态,农业生态安全是农业可持续发展的根本保障<sup>[1]</sup>。农业生产的主要目的就是为市场提供农产品,随着人们生活水平的提高,健康、绿色、环保的农产品越来越受到市场的青睐,保障农业生态安全是绿色农业的基本要求<sup>[2]</sup>。目前,城市化与工业化的快速发展,对农业生态系统造成了很大的压力,农业生态系统不断破碎化、农业面源污染加大、生态环境恶化等,影响了农业生态系统的安全性及稳定性<sup>[3]</sup>。怀化市地处湖南省西部,经济发展较为落后,农业在三大产业结构中占据了较大的比重,对当地国民经济的发展起着十分重要的作用,因此,分析怀化市农业生态环境现状,并对当地农业生态安全性进行评价研究,对推动怀化市农业健康可持续发展具有十分重要的现实意义。近年来,一些学者对农业生态安全进行了评价研究,如吕川和阳桂前<sup>[4]</sup>基于 DPSIR 框架模型从驱动力、生态系统压力、生态环境状态、生态系统响应和人文响应 5 个方面构建了评价指标体系,并对辽河上游流域农业生态安全进行了评价研究。刘欢等<sup>[5]</sup>运用熵值法、障碍度分析模型对西安都市农业生态安全进行了评价研究。廖琪等<sup>[6]</sup>从压力、状态和响应 3 方面构建了农业生态安全评价指标体系,并利用熵权法确定各评价指标权重,采用 PSR 模型对佛山市顺德区农业生态安全进行了定量评价。龚英和陈振江<sup>[7]</sup>以重庆武隆县作为案例地,用综合指数法对其农业生态安全进行了评价。苏世燕和杨俊孝<sup>[8]</sup>基于农户土地利用行为,构建了农业生态安全评价指标体系,并采用 PSR 模型对农业生态安全进行了评价研究。从相关研究成果可以看出,学者们对农业生态安全评价均采用较为简单的层次分析法、熵权法、PSR 模型、综合指数法等,这些评价方法未能全面考虑评价过程中农业生态安全分级边界的模糊性,无法依据评价指标的变化情况掌握农业生态安全的转化趋势,从而影响了农业生态安全评价结果的准确性。因此,需要建立一个能够考虑指标间相关性的农业生态安全指标体系和考虑不确定性的农业生态安全评价模型,以完善农业生态安全评价结果,从而指导农业生产活动。针对以上问题,本文开展的农业生态安全与指标间相关性以及不确定性影响农业生态安全评价研究,旨在解决以下问题:①如何建立考虑农业生态环境状态与农业生态安全相互关系的评价指标体

系;②如何科学确定评价指标的权重,使得评价指标权重系数能够体现其对农业生态安全的影响;③如何建立一个考虑不确定性和模糊性的农业生态安全综合评价模型。针对以上问题提出以下解决方案,首先针对问题①,参考相关学者的研究成果<sup>[6,8-10]</sup>,基于 PSR 指标框架,从农业生态系统压力、状态、响应方面,构建农业生态安全评价指标体系;其次,针对问题②,由于主观权重极易受到专家知识经验、偏好的影响,具有一定的主观随意性,而客观权重依据评价指标的数值变化,突出局部差异和变化性,缺乏了主观事实经验,为了获得科学的评价指标权重值,采用基于专家经验的主观权重和基于相关系数的客观权重相结合的权重确定方法,并采用合作博弈法得到评价指标的组合权重<sup>[11-12]</sup>;最后,针对问题③,采用可拓云模型对农业生态安全评价过程中的模糊性与随机性进行处理,全面考虑农业生态安全等级分级边界的模糊性和计算过程中参数求解的随机性,利用云模型的不确定推理特性和可拓学中的物元理论兼具定性、定量分析的优点<sup>[13]</sup>,提出基于可拓云理论的农业生态安全评价模型。

## 1 研究方法

### 1.1 可拓云模型

1.1.1 云模型 李德毅教授提出的云模型是一种实现定性定量转换的不确定性数学模型<sup>[14]</sup>,该模型用数学表达式对事物本身的模糊性和随机性进行统一的描述与分析,通过构建云发生器来实现定性定量之间的映射关系。正态云模型是最基本的云模型,数学性质独特,具有普适性<sup>[15]</sup>。正态云模型通过期望(Ex)、熵(En)和超熵(He)组成云关联度函数,其计算公式为:

$$Ex = (x_{\max} + x_{\min}) / 2 \quad (1)$$

$$En = (x_{\max} - x_{\min}) / 6 \quad (2)$$

$$He = s \quad (3)$$

式中: $x_{\max}$ ,  $x_{\min}$  分别代表某一评价指标的最大值和最小值; $s$  代表经验取值,由专家组根据经验进行调整给出;期望 Ex 代表评价指标等级;熵 En 描述了属性概念的不确定程度;超熵 He 用来度量熵的不确定程度。

1.1.2 可拓云模型 可拓云模型是将云模型引入物元分析理论中的耦合模型<sup>[16]</sup>,根据物元模型的定义,结合云模型具有双重不确定性的性质,利用云模型中

的(Ex,En,He)代替物元模型中的评价指标值  $x_i$ , 则农业生态安全评价待评可拓云物元模型可表示为:

$$R = \begin{bmatrix} P & c_1 & x_1 \\ & c_2 & x_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & c_1 & (Ex_1, En_1, He_1) \\ & c_1 & (Ex_2, En_2, He_2) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (Ex_n, En_n, He_n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $P$  为农业生态安全水平;  $n$  为单指标评价等级个数;  $c_i$  为农业生态安全水平的评价指标;  $x_i$  为农业生态安全评价指标  $c_i$  的指标值。

### 1.2 合作博弈法确定组合权重

1.2.1 G1 法 G1 法是一种主观赋权法,由郭亚军提出,G1 法与层次分析法一样,均依据专家经验对各评价指标的重要性进行判断排序,求解过程类同于层次分析法,但 G1 法不同于层次分析法,无需构建判断矩阵和进行一致性检验<sup>[17]</sup>,研究中采用 G1 法确定指标  $c_i$  的主观权重  $w_i^{(1)}$ 。

1.2.2 CRITIC 法 CRITIC 法是一种客观赋权法<sup>[18]</sup>,其基于评价指标的对比强度和指标之间的冲突性来确定各评价指标权重系数,在赋权的过程中既考虑指标变异性大小,同时又兼顾指标之间的相关性。CRITIC 法客观权重求解步骤:①将农业生态安全评价指标按照指标效能进行正向或逆向标准化处理,得到标准化处理后的矩阵  $M_{ij}$ ;②计算第  $i$  个

评价指标的标准差  $S_i$ ;③计算指标  $i$  与指标  $j$  的相关系数,确定指标  $i$  与指标  $j$  的冲突性  $R_i$ ;④利用指标的标准差与冲突性,得到指标  $c_i$  的 CRITIC 权重  $w_i^{(2)}$ 。

1.2.3 熵权法 熵权法亦属于一种客观赋权法,其根据评价指标变异性的确定客观权重。熵是根据热力学第二定律引出的一个反映自发过程不可逆性的物质状态参量,用来度量系统的无序程度,指标的离散程度越大,则熵值亦越大<sup>[19]</sup>。确定农业生态安全评价指标的熵权步骤为:①如 CRITIC 法,将评价指标进行标准化处理,得到标准化矩阵  $M_{ij}$ ;②求取评价指标  $c_i$  的信息熵  $H_i$ ;③由  $H_i$  推导出评价指标  $c_i$  的熵权  $w_i^{(3)}$ 。

1.2.4 组合权重 为了提高农业生态安全评价精度,采用合作博弈法将各单一权重进行组合,以克服单一权重的不足<sup>[20]</sup>。在确定组合权重时,合作博弈法将 G1 法、CRITIC 法和熵权法获得的权重系数作为合作博弈成员,其对应的权重为  $w_i^{(d)}$  ( $d=1,2,3$ )。

输入  $d$  ( $d=1,2,\dots,e$ ) 种单一权重,计算  $w_i^{(e-d)}$ , 当  $e=3$  时:

$$\begin{cases} w_i^{(3,1)} = \frac{w_i^{(2)} + w_i^{(3)}}{2} & (d=1) \\ w_i^{(3,2)} = \frac{w_i^{(1)} + w_i^{(3)}}{2} & (d=2) \\ w_i^{(3,3)} = \frac{w_i^{(1)} + w_i^{(2)}}{2} & (d=3) \end{cases} \quad (5)$$

计算  $w_i^{(d)}$  与  $w_i^{(e-d)}$  之间的相关系数  $L_i^{(d)}$ :

$$L_i^{(d)} = \frac{\sum_{i=1}^n [w_i^{(d)} - \bar{w}_i^{(d)}][w_i^{(e-d)} - \bar{w}_i^{(e-d)}]}{\left\{ \sum_{i=1}^n [w_i^{(d)} - \bar{w}_i^{(d)}]^2 \right\}^{1/2} \left\{ \sum_{i=1}^n [w_i^{(e-d)} - \bar{w}_i^{(e-d)}]^2 \right\}^{1/2}} \quad (6)$$

式中: $\bar{w}_i^{(d)}$  为  $d$  种权重的均值;  $\bar{w}_i^{(e-d)}$  为除  $w_i^{(d)}$  外的  $e-1$  种的组合权重的均值。

计算评价指标的组合权重:

$$w_i = \sum_{i=1}^n w_i^{(d)} L_i^{(d)} \quad (7)$$

### 1.3 确定可拓云模型云关联度

根据农业生态安全评价的特点,将各项评价指标值  $x_i$  视为一个云滴,产生一个均值为 En,标准差为 He 的服从正态分布的随机数  $E_n'$ ,计算出评价指标值  $x_i$  与该正态可拓云之间的关联度  $u$  为:

$$u = \exp[-(x_i - Ex)^2 / 2(En_i')^2] \quad (8)$$

### 1.4 确定农业生态安全评价等级

整合各评价指标的云关联度矩阵与权重矩阵,得到综合云关联度,并对其进行加权平均得到农业生态安全评价等级的期望值:

$$R_k = w_i \cdot U \quad (9)$$

$$R' = \sum_{k=1}^m k P_k / \sum_{k=1}^m R_k \quad (10)$$

式中: $R_k$  为综合云关联度;  $R'$  为等级特征值;  $w_i$  为各指标组合权重值;  $U$  为各评价指标正态云关联度矩阵;  $k$  为评价等级,本研究将农业生态安全等级划分为 5 级,即  $k \in \{1,2,3,4,5\}$ 。

根据熵理论,云熵越大,表明农业生态安全水平等级的标准隶属云受影响最为均衡,运用加权平均法求出综合评判分数  $r$ ,计算公式为:

$$r = \sum_{j=1}^5 b_j f_j / \sum_{j=1}^5 b_j \quad (11)$$

式中: $f_j$  为得分值,分别对应 I—V 的评价等级;  $b_j$  为综合云关联度  $R_k$  对应的分量。在评价指标与正态云之间,由云关联度计算公式可以推出随机因素存

在的关联度  $k$ , 经过多次运算后求出综合评判分数的期望值  $E_{x_r}$  和熵  $En_r$ , 分别为:

$$E_{x_r} = \frac{r_1(x) + r_2(x) + \dots + r_m(x)}{m} \quad (12)$$

$$En_r = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [r_i(x) - E_{x_r}]^2} \quad (13)$$

式中:  $m$  为运算次数, 在本研究中取  $m = 1\ 000$ ;  $r_i(x)$  为第  $i$  次运算出的综合评判分数, 用期望值代表农业生态安全等级的评价; 用熵值来衡量评价结果分歧度, 熵值越大时, 表示结果越趋向于无序, 评价结果越分散。

评价中, 为了说明评价结果的可信度, 定义了可

信因子( $\theta$ ), 计算公式为:

$$\theta = \frac{En_r}{E_{x_r}} \quad (14)$$

## 2 评价过程及评价结果

### 2.1 评价指标体系的构建

本文从农业生态系统压力、状态、响应 3 方面构建怀化市农业生态安全评价指标体系, 借鉴农业生态安全相关研究成果<sup>[4-10, 21-22]</sup>, 结合怀化市历年农业发展现状, 基于 PSR 模型框架选取具有代表性的 22 个单项指标来构建怀化市农业生态安全评价指标体系(表 1)。

表 1 农业生态安全评价指标体系

目标层	准则层	指标层	指标效能	指标说明
农业生态安全等级 A	农业生态环境压力 (P)	$c_1$ 人口自然增长率/%	-	一年内单位时间内人口自然增长数与年平均总人数之比
		$c_2$ 城镇化率/%	-	研究区内城镇人口占总人口的比重
		$c_3$ 人口密度/(人·hm <sup>-2</sup> )	-	特定土地面积上的平均人口数目
		$c_4$ 单位农业产值物耗(万元/万元)	-	单位农业产值物质消耗
		$c_5$ 单位 GDP 能耗(t/万元)	-	单位国内生产总值能耗
		$c_6$ 酸雨率/%	-	研究区内的酸雨次数除以降雨的总次数
		$c_7$ 化肥施用强度/(kg·hm <sup>-2</sup> )	-	单位耕地面积上施用化肥量
		$c_8$ 农膜使用强度/(kg·hm <sup>-2</sup> )	-	单位耕地面积上施用农膜量
		$c_9$ 农药使用强度/(kg·hm <sup>-2</sup> )	-	单位耕地面积上施用农药量
	农业生态环境状态 (S)	$c_{10}$ 农林牧渔业总产值/亿元	+	反映一定时期内农业生产总规模和总收成
		$c_{11}$ 耕地有效灌溉率/%	+	衡量农业生产稳定程度的指标
		$c_{12}$ 土地产出水平/(万元·hm <sup>-2</sup> )	+	指单位农业用地平均年产值
		$c_{13}$ 全年空气优良率/%	+	空气质量优良率
		$c_{14}$ 森林覆盖率/%	+	研究区内森林面积占土地总面积的比率
农业生态环境响应 (R)	$c_{15}$ 污水集中处理率/%	+	经过处理的生活污水、工业废水量占污水排放总量的比重	
	$c_{16}$ 生活垃圾无害化处理率/%	+	无害化处理的垃圾量占总处理垃圾量的比率	
	$c_{17}$ 水利、环境和公共设施管理业投资占 GDP 比重/%	+	反映地区对农业及其基础设施的投入水平	
	$c_{18}$ 人均地区生产总值(万元/人)	+	研究区内按人口平均计算的社会最终产品和劳务的总值	
	$c_{19}$ 农村常住居民人均可支配收入(万元/人)	+	反映农民收入情况	
	$c_{20}$ 农村居民恩格尔系数/%	-	反映农村居民生活水平的指标	
	$c_{21}$ 人均耕地面积(hm <sup>2</sup> /人)	+	研究区内每个人所占耕地面积的大小	
	$c_{22}$ 人均粮食产量(kg/人)	+	一年内所生产的按人口平均计算的粮食总量	

注:“-”表示负向指标,“+”表示正向指标。

### 2.2 数据来源与评价标准的确定

本研究各指标的原始数据均来自于 2011—2019 年《怀化统计年鉴》、统计公报和由怀化市农业局提供的相关数据资料, 依据《农业绿色发展技术导则(2018—2030 年)》和怀化市农业发展现状以及农业生态安全评价相关研究成果<sup>[1, 7-10]</sup>, 结合专家意见, 将农业生态安全评价等级划为 I—V 级<sup>[23]</sup>, 对于一些定量指标, 参考湖南省农业发展情况, 结合农业生态国家标准对部分评价标准进行调整, 得到怀化市农业生态

安全的等级划分对应级别(详见表 2)。农业生态安全等级及表征状态详见表 3。

### 2.3 确定标准云

将农业生态安全评价的指标等级分类取值区间根据公式(1)—(3)进行转换, 咨询相关专家意见, 将  $s$  取值为 0.02, 区间值转换后得到以期望值  $E_x$ 、熵  $En$ 、超熵  $He$  表示的云物元, 兼顾农业生态安全评价等级界限值的模糊性和随机性, 实现分级区间软化, 转换之后农业生态安全评价指标的等级界限云模型详见表 4。

表 2 怀化市农业生态安全评价标准

评价指标	危险 (I)	不安全 (II)	比较安全 (III)	安全 (IV)	非常安全 (V)
$c_1$	$\geq 10$	(10,5]	(5,3.5]	(3.5,1]	$< 1$
$c_2$	$\geq 90$	(90,55]	(55,35]	(35,25]	$< 25$
$c_3$	$\geq 1000$	(800,600]	(600,400]	(400,200]	$< 100$
$c_4$	$\geq 0.8$	(0.6,0.8]	(0.4,0.6]	(0.2,0.4]	$< 0.2$
$c_5$	$\geq 0.8$	(0.6,0.8]	(0.4,0.6]	(0.2,0.4]	$< 0.2$
$c_6$	$\geq 70$	(70,55]	(55,35]	(35,25]	$< 25$
$c_7$	$\geq 250$	(250,225]	(225,200]	(200,175]	$< 175$
$c_8$	$\geq 18$	(18,15]	(15,10]	(10,8]	$< 8$
$c_9$	$\geq 9$	(7,9]	(5,7]	(3,5]	$< 3$
$c_{10}$	$\leq 150$	(150,200]	(200,250]	(250,300]	$> 300$
$c_{11}$	$\leq 40$	(40,60]	(60,70]	(70,85]	$> 85$
$c_{12}$	$\leq 2.4$	(2.4,3.5]	(3.5,4.8]	(4.8,6]	$> 6$
$c_{13}$	$\leq 60$	(60,70]	(70,85]	(85,95]	$> 95$
$c_{14}$	$\leq 30$	(30,40]	(40,60]	(60,70]	$> 70$
$c_{15}$	$\leq 60$	(60,70]	(70,85]	(85,95]	$> 95$
$c_{16}$	$\leq 60$	(60,70]	(70,85]	(85,95]	$> 95$
$c_{17}$	$\leq 0.7$	(0.7,1.2]	(1.2,1.7]	(1.7,2.2]	$> 2.2$
$c_{18}$	$\leq 0.5$	(0.5,1]	(1,1.5]	(1.5,2]	$> 2$
$c_{19}$	$\leq 1$	(1,1.2]	(1.2,1.4]	(1.4,1.5]	$> 1.5$
$c_{20}$	$\geq 50$	(50,40]	(40,30]	(30,20]	$< 20$
$c_{21}$	$\leq 1$	(1.2,1.4]	(1.4,1.6]	(1.6,1.8]	$> 1.8$
$c_{22}$	$\leq 250$	(250,400]	(400,550]	(550,700]	$> 700$

表 3 农业生态安全等级划分

安全等级	等级状态	农业生态系统安全表征状态
I	危险	农业生态系统结构残缺,功能不完善,恢复与重建均十分困难,农业生态灾害发生频繁,农产品产出数量与质量均达不到要求,给人体健康和社会经济发展带来严重威胁。
II	不安全	农业生态系统受到较大破坏,功能不全,农业生态系统在外界人工干扰条件下,需要花费大量的投入才能使农业生态系统逐步恢复,给人体健康和社会经济发展造成了较大的影响。
III	比较安全	农业生态系统受到一定程度的破坏,整个系统结构较为完整,但是有恶化趋势,如果不注意保护,有恶化的可能。
IV	安全	农业生态系统结构和功能基本完整,外界的压力不会对系统造成大的影响,农产品的质量与数量均能够达到要求。
V	非常安全	农业生态系统结构与功能非常完整,系统有较强的自我恢复能力,能够抵御外来多数干扰,是农业生态系统的理想环境。

表 4 怀化市农业生态安全评价指标的安全等级界限云模型

评价指标	危险 (I)	不安全 (II)	比较安全 (III)	安全 (IV)	非常安全 (V)
$c_1$	(12.5,0.83,0.02)	(7.5,0.83,0.02)	(3.75,0.42,0.02)	(1.75,0.25,0.02)	(0.5,0.67,0.02)
$c_2$	(95,1.67,0.02)	(72.5,5.83,0.02)	(45,3.33,0.02)	(30,1.67,0.02)	(12.5,4.17,0.02)
$c_3$	(1250,83.33,0.02)	(800,66.67,0.02)	(500,33.33,0.02)	(300,33.33,0.02)	(100,33.33,0.02)
$c_4$	(0.9,0.33,0.02)	(0.7,0.33,0.02)	(0.5,0.33,0.02)	(0.3,0.33,0.02)	(0.1,0.33,0.02)
$c_5$	(0.9,0.33,0.02)	(0.7,0.33,0.02)	(0.5,0.33,0.02)	(0.3,0.33,0.02)	(0.1,0.33,0.02)
$c_6$	(85,5,0.02)	(62.5,2.5,0.02)	(45,3.33,0.02)	(30,1.67,0.02)	(12.5,4.17,0.02)
$c_7$	(262.5,4.17,0.02)	(237.5,4.17,0.02)	(212.5,4.17,0.02)	(187.5,4.17,0.02)	(162.5,4.17,0.02)
$c_8$	(24,2,0.02)	(16.5,0.5,0.02)	(12.5,0.83,0.02)	(9,0.33,0.02)	(4,1.33,0.02)
$c_9$	(9.5,0.17,0.02)	(8,0.33,0.02)	(6,0.33,0.02)	(4,0.33,0.02)	(1.5,0.5,0.02)
$c_{10}$	(125,8.33,0.02)	(175,8.33,0.02)	(225,8.33,0.02)	(275,8.33,0.02)	(325,8.33,0.02)
$c_{11}$	(30,3.33,0.02)	(50,3.33,0.02)	(65,1.67,0.02)	(77.5,2.5,0.02)	(92.5,2.5,0.02)
$c_{12}$	(1.2,0.4,0.02)	(2.95,0.18,0.02)	(4.15,0.22,0.02)	(5.4,0.2,0.02)	(6.5,0.17,0.02)
$c_{13}$	(55,1.67,0.02)	(65,1.67,0.02)	(77.5,2.5,0.02)	(90,1.67,0.02)	(97.5,0.83,0.02)
$c_{14}$	(25,1.67,0.02)	(35,1.67,0.02)	(50,3.33,0.02)	(65,1.67,0.02)	(85,5,0.02)
$c_{15}$	(55,1.67,0.02)	(65,1.67,0.02)	(77.5,2.5,0.02)	(90,1.67,0.02)	(97.5,0.83,0.02)
$c_{16}$	(25,1.67,0.02)	(35,1.67,0.02)	(50,3.33,0.02)	(65,1.67,0.02)	(85,5,0.02)
$c_{17}$	(0.45,0.083,0.02)	(0.45,0.083,0.02)	(0.45,0.083,0.02)	(0.45,0.083,0.02)	(0.45,0.083,0.02)
$c_{18}$	(0.25,0.083,0.02)	(0.75,0.083,0.02)	(1.25,0.083,0.02)	(1.75,0.083,0.02)	(2.25,0.083,0.02)
$c_{19}$	(0.75,0.083,0.02)	(1.1,0.083,0.02)	(1.3,0.083,0.02)	(1.45,0.017,0.02)	(1.65,0.05,0.02)
$c_{20}$	(55,1.67,0.02)	(45,1.67,0.02)	(35,1.67,0.02)	(25,1.67,0.02)	(15,1.67,0.02)
$c_{21}$	(0.5,1.67,0.02)	(1.3,0.33,0.02)	(1.5,0.33,0.02)	(1.7,0.33,0.02)	(1.9,0.33,0.02)
$c_{22}$	(175,25,0.02)	(325,25,0.02)	(475,25,0.02)	(625,25,0.02)	(775,25,0.02)

## 2.4 确定评价指标组合权重

利用 G1 法、CRITIC 法和熵权法得到怀化市农业生态安全评价指标分权重,然后利用合作博弈法将各分权重进行组合,得到评价指标的组合权重。具体内容详见表 5。

## 2.5 怀化市农业生态安全评价结果

依据可拓云理论,将其中每一个评价指标视为一个云滴,根据公式(11)计算云物元与各个等级的关联度,在 Matlab 2017 a 平台编程对关联度进行多次计算,为排除偶然性的影响,对每年的数据均进行 1 000 次计算,然后进行平均,得到怀化市 2010—2019 年农业生态安全等级的综合云关联度、生态安全级别和可信因子(表 6)。由表 6 可知,2010—2019 年,怀化市农业生态安全状况处于比较安全(Ⅲ)、安全(Ⅳ)两种状态,整体安全状况有待提升。在 2010—2014 年,怀化市农业生态系统处于比较安全级别,但是在 2010—2012 年期间,整个农业生态系统有向不安全变化的趋势,而 2013 年和 2014 年则是处于向安全级别转变的态势;在 2015—2019 年,怀化市农业生态安全级别为安全(Ⅳ),同样安全态势变化各异,其中,2015—2016 年,农业生态系统有向比较安全转化的趋势,而 2018 年和 2019 年农业生态系统有向非常安全转化的趋势,由此可见,怀化市农业生态安全得到了一定程度的提升,但是还不十分稳定,如果不采取

措施进行科学管理与监控,整个农业生态系统有逆向转化的可能,从而影响农业生态系统的平衡。

表 5 怀化市农业生态安全评价指标权重

指标	G1	CRITIC	熵权	组合权重
$c_1$	0.037 0	0.049 3	0.023 5	0.037 0
$c_2$	0.037 0	0.021 9	0.024 4	0.029 5
$c_3$	0.037 0	0.034 5	0.030 4	0.034 6
$c_4$	0.044 4	0.041 0	0.037 5	0.041 7
$c_5$	0.044 4	0.034 5	0.040 6	0.040 6
$c_6$	0.055 6	0.067 6	0.041 5	0.055 4
$c_7$	0.051 9	0.044 6	0.047 0	0.048 6
$c_8$	0.051 9	0.055 4	0.063 5	0.055 9
$c_9$	0.051 9	0.059 6	0.053 4	0.054 5
$c_{10}$	0.044 4	0.060 0	0.051 5	0.050 7
$c_{11}$	0.044 4	0.010 4	0.049 0	0.035 9
$c_{12}$	0.040 7	0.040 9	0.051 8	0.043 6
$c_{13}$	0.037 0	0.022 0	0.046 3	0.035 1
$c_{14}$	0.037 0	0.034 3	0.046 1	0.038 6
$c_{15}$	0.055 6	0.067 7	0.053 9	0.058 6
$c_{16}$	0.040 7	0.039 2	0.058 8	0.044 9
$c_{17}$	0.037 0	0.035 9	0.021 9	0.032 8
$c_{18}$	0.048 1	0.079 1	0.041 4	0.055 2
$c_{19}$	0.055 6	0.062 3	0.054 0	0.057 1
$c_{20}$	0.059 3	0.060 2	0.068 0	0.061 8
$c_{21}$	0.048 1	0.035 4	0.048 4	0.044 6
$c_{22}$	0.040 7	0.044 3	0.047 3	0.043 4

表 6 怀化市 2010—2019 年农业生态安全综合评价结果

云关联度	安全级别					安全级别	变化趋势	可信因子
	I	II	III	IV	V			
$k_j(R_{2010})$	-0.478 2	-0.272 0	0.309 7	-0.331 4	-0.630 2	III	II	0.001 3
$k_j(R_{2011})$	-2.083 4	-0.342 7	0.244 8	-1.156 8	-1.010 6	III	II	0.001 6
$k_j(R_{2012})$	-1.359 4	-0.069 2	0.133 9	-0.429 5	-0.790 2	III	II	0.000 4
$k_j(R_{2013})$	-0.644 5	-0.301 5	0.305 6	-0.048 0	-1.279 5	III	IV	0.001 9
$k_j(R_{2014})$	-0.805 2	-0.350 8	0.397 5	-0.033 2	-0.487 2	III	IV	0.001 3
$k_j(R_{2015})$	-0.462 5	-0.384 4	-0.243 0	0.445 4	-1.690 8	IV	III	0.001 6
$k_j(R_{2016})$	-1.298 6	-0.485 5	-0.329 7	0.601 0	-0.736 0	IV	III	0.000 4
$k_j(R_{2017})$	-0.200 3	-0.721 0	-0.626 6	0.444 8	-0.093 0	IV	V	0.001 9
$k_j(R_{2018})$	-1.210 0	-0.710 9	-0.382 9	0.125 1	-0.267 1	IV	V	0.001 1
$k_j(R_{2019})$	-0.984 8	-0.535 7	-0.464 5	0.217 8	-0.319 5	IV	V	0.000 1

## 2.6 怀化市农业生态安全准则层评价结果

依据评价指标各等级隶属度矩阵,结合准则层权重,得到怀化市农业生态安全压力系统、状态系统和响应系统安全隶属度矩阵,采用最大隶属度原则确定准则层生态安全评价等级(表 7)。

2.6.1 农业生态系统—压力系统 研究区压力系统只有 2015 年与 2019 年处于安全状态,其余各年均处

于比较安全状态,变化趋势处于 II—IV 之间波动。从各指标的原始数据可以发现,怀化市人口增长率除 2019 年为 3.72%,处于基本安全级别,其余各年均处于不安全区间。研究区单位 GDP 能耗处于 0.7~0.9 区间范围,其中 2010—2012 年,单位 GDP 能耗均高于 0.8,达到了危险级别,在 2013 年后,均处于不安全等级状态;由于农业种植带来的经济收益不及二、三产

业收益,使得农业难以吸引社会投资,怀化市农业生态系统多采用传统的耕种方式,同时,农民进行农业耕种的兴趣日益下降,大部分青壮农民选择外出就业或者到城市兼业,投入到农业耕种的时间进一步缩短,有机肥料进入农业生态系统的数量日益减少,化

肥使用强度与农药使用强度处于不安全级别,且逐年加大。

2019 年研究区化肥使用强度达到历年最高值,土壤有机质含量下降,农产品的品质下降速度较为明显,造成整个农业生态系统压力逐年增大。

表 7 怀化市农业生态安全准则层评价结果

年份	农业生态系统—压力系统		农业生态系统—状态系统		农业生态系统—响应系统	
	安全级别	变化趋势	安全级别	变化趋势	安全级别	变化趋势
2010	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅱ
2011	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅱ
2012	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅱ
2013	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ
2014	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ
2015	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅲ
2016	Ⅲ	Ⅱ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅲ
2017	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅲ
2018	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅲ
2019	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅴ

2.6.2 农业生态系统—状态系统 状态系统经历了比较安全到安全的变化过程,其变化趋势在 2010—2012 年、2014 年呈逆向变化,其余各年均呈正向变化。从各评价指标原始数据可知,在 2010 年,怀化市农林牧渔业总产值为 163.06 亿元,处于不安全等级,在 2011—2012 年,农林牧渔业总产值处于比较安全级别,2013—2014 年期间,农林牧渔业总产值处于安全级别,而 2015—2019 年,农林牧渔业总产值得到了较快的增长,处于非常安全级别;怀化市农业科技投入缺乏,土地产出水平低,在 2010 年和 2011 年,土地产出水平分别为 2.45 万元/hm<sup>2</sup>,3.04 万元/hm<sup>2</sup>,处于不安全级别,在 2012—2015 年,土地产出水平从 3.63 万元/hm<sup>2</sup> 增长到 4.62 万元/hm<sup>2</sup>,处于比较安全级别,而在 2016—2019 年,土地产出水平从 5.03 万元/hm<sup>2</sup> 增长到 5.93 万元/hm<sup>2</sup>,处于安全级别;由于怀化市工业较少,森林覆盖率高,空气质量好,全年空气优良率达到了安全级别,状态系统评价结果显示,相对于压力系统,状态系统安全等级稳定性更高,具有更大的正向发展潜力。

2.6.3 农业生态系统—响应系统 响应系统安全等级相对高于压力系统,但不及状态系统。由于怀化市经济发展较慢,人民生活水平较低,农村污水集中处理率和农村生活垃圾无害化处理率均处于较低水平,导致怀化市整体污水集中处理率和生活垃圾无害化处理率较低,在 2010—2012 年,均处于不安全等级,2013—2019 年,由于精准扶贫的开展,对农村生态环境进行了针对性的整治,农村污水集中处理率和农村

生活垃圾无害化处理率有所上升,但是整体还只是处于比较安全等级,安全等级有待上升;2010 年和 2011 年怀化市人均 GDP 分别为 1.44 万元和 1.76 万元,分别处于比较安全和安全等级,在 2013—2019 年,人均 GDP 均高于 2 万元,处于非常安全等级;农村常住居民人均可支配收入在 2019 年为 1.09 万元,为不安全等级,其余各年均处于危险等级;在 2010—2012 年,怀化市农村居民恩格尔系数均大于 50%,处于危险等级,自 2013 年国家进行精准扶贫以来,农村居民恩格尔系数有了较快的下降,下降到 30%~40% 区间范围内,处于比较安全等级;怀化市人均耕地面积与人均粮食产量分别处于危险等级与不安全等级。由响应系统可以发现,除了 2013 年、2014 年和 2019 年响应系统安全等级具有正向变化的趋势,其余各年均呈逆向的变化趋势。

### 3 结论

(1) 本文通过建立基于 PSR-可拓云模型的农业生态安全评价模型,对怀化市 2010—2019 年农业生态安全进行了评价,发现该地区农业生态系统从比较安全状态到安全状态转化,农业生态安全等级有所上升,但农业生态系统极易受到外界的干扰,整体安全水平仍不稳定,安全水平有待于进一步提升。评价过程与评价结果表明,PSR-可拓云模型能够在考虑环境因素与指标间的模糊性与随机性的同时,可以对农业生态安全做出科学合理的评价。

(2) 怀化市农业生态系统承受着较大的压力,从

评价结果发现压力系统安全级别从比较安全状态到安全状态转化,但只有 2015 年与 2019 年处于安全状态,其余各年均处于比较安全状态。除了 2014 年、2017 年和 2018 年呈正向的转变趋势,其余各年均呈逆向变化,可见压力系统很不稳定,安全等级有较大的下降可能,主要原因在于人口的增加、单位 GDP 能耗过高以及农药、化肥的过量使用,使得整个农业生态系统承受了较大的压力。为了减少压力系统的压力状况,需要减少单位 GDP 能耗和农药、化肥的使用量,同时,增加农业高科技投入,大力发展绿色生态农业,有效减小农业生态系统环境压力。

(3) 状态系统在 2010—2012 年、2014 年呈逆向变化态势,其余各年均是呈正向的变化态势,从评价结果来看,相比较于压力系统,状态系统安全等级更高,但是整个农业生态系统要进一步提升安全等级,需要加大农业科技投入,增加土地产出水平,同时,兴修足够的农田水利设施,提升耕地有效灌溉率。

(4) 响应系统安全等级相对高于压力系统,但不及状态系统。响应系统除了 2013、2014 和 2019 年呈正向变化的趋势,其余各年均呈逆向变化,究其原因主要在于怀化市的农村污水集中处理率和农村生活垃圾无害化处理率较低,同时,由于怀化市山地多,平地少,耕地数量十分有限,农民可支配收入少,农村恩格尔系数较大,但随着国家精准扶贫战略和乡村振兴战略的实施,相信这种状态会有一定程度的好转。

#### [参 考 文 献]

- [1] 姬翠梅.生态—经济—社会系统视角下的山西省农业生态安全评价[J].中国农业资源与区划,2019,40(5):174-179.
- [2] 李文军,郝明德,牛育华.黄土高原沟壑区王东沟流域农业生态经济系统演变过程[J].水土保持通报,2016,36(1):298-302.
- [3] 卓志清,兴安,孙忠祥,等.东北旱作区农业生态系统协同发展与权衡分析[J].中国生态农业学报,2018,26(6):892-902.
- [4] 吕川,阳桂前.基于 DPSIR 模型的农业生态安全评价指标体系的构建:以辽河源头流域为例[J].安全与环境学报,2011,11(6):122-125.
- [5] 刘欢,周忠学,齐爱荣.西安市都市农业生态安全动态评价及空间分异[J].干旱地区农业研究,2013,31(6):225-231,237.
- [6] 廖琪,袁兰,胡小飞,等.基于 P-S-R 模型的农业生态安全定量评价:以佛山市顺德区为例[J].江苏农业科学,2015,43(12):415-418.
- [7] 龚英,陈振江.喀斯特地区农业生态安全评价及发展路径探究:以重庆武隆县为研究区域[J].科技管理研究,2016,36(21):247-250,262.
- [8] 苏世燕,杨俊孝.基于农户土地利用行为的农业生态安全评价:以奇台县为例[J].中国农业资源与区划,2017,38(12):197-204.
- [9] 肖薇薇,谢永生,王继军.黄土丘陵区农业生态安全评价指标体系的建立[J].水土保持通报,2007,27(2):146-149.
- [10] 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.
- [11] 王建宗,郑志学,李长明,等.基于博弈论—可拓云模型的隧道围岩稳定性评价[J].铁道标准设计,2018,62(11):118-124.
- [12] 周子英,向昌盛,米振华.长株潭城市群都市农业可持续发展综合评价[J].水土保持通报,2019,39(5):278-284.
- [13] 阮永芬,陈赵慧,吴龙,等.基于可拓云理论的泥炭质土地场地沉降风险评价[J].安全与环境学报,2020,20(1):59-67.
- [14] 纪蕾,郭树荣,丛旭辉,等.基于 OWA 算子和可拓云模型的 PPP 项目绩效评价:以经营性 PPP 项目为研究对象[J].计算机工程与应用,2018,54(16):220-226.
- [15] 曲朝阳,王健,吴云,等.基于可拓云模型的电力生产安全综合评估方法[J].安全与环境工程,2015,22(3):94-98.
- [16] 王晓玲,戴林瀚,吕鹏,等.基于 DSR-可拓云的渗流安全综合评价研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2019,52(1):52-61.
- [17] 李刚,王斌,周立斌,等.基于标准差修正 G1 组合赋权的人的全面评价模型及实证[J].系统工程理论与实践,2012,32(11):2473-2484.
- [18] 戚伟,李威,李振阳,等.基于 CRITIC-CW 法的地下矿岩体质量评价[J].黄金科学技术,2020,28(2):264-270.
- [19] 陈星霖.广西农业生态脆弱性评价及区划研究[J].中国农业资源与区划,2020,41(3):212-219.
- [20] 张志君,陈伏龙,龙爱华,等.基于可拓云模型的干旱区水资源安全评价:以石河子垦区为例[J].干旱区研究,2020,37(4):847-856.
- [21] 樊伟,齐鹏,马丁丑.基于 PSR 模型的张掖市农业生态安全评价[J].国土与自然资源研究,2020(1):12-17.
- [22] 邓远建,肖锐,陈杰.生态脆弱地区农业生态资本运营安全调控机理分析[J].中国地质大学学报(社会科学版),2015,15(5):62-70.
- [23] 王治和,黄坤,张强.基于可拓云模型的区域生态安全预警模型及应用:以祁连山冰川与水源涵养生态功能区张掖段为例[J].安全与环境学报,2017,17(2):768-774.