

徐 丹, 韦 群, 王 辉, 等. 基于云模型的农业面源污染敏感性等级评价[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(2): 180–186.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.02.032

基于云模型的农业面源污染敏感性等级评价

徐 丹¹, 韦 群², 王 辉³, 丁鸣鸣⁴, 邵光成¹

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 江苏南京 210098; 2. 江苏省南京市浦口区水务局, 江苏南京 211800;

3. 江苏省宿迁市宿城区水务局, 江苏宿迁 223800; 4. 江苏省南京市水务局, 江苏南京 210036)

摘要:对农业面源污染的地区进行敏感性等级划分, 从而针对不同等级的地区因地制宜地开展不同标准、不同力度的治理工作。选取化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)排放强度作为农业面源污染敏感性等级评价的 3 个指标, 按照不敏感(Ⅰ)、轻度敏感(Ⅱ)、中度敏感(Ⅲ)、高度敏感(Ⅳ)4 个等级确定分级标准, 采用熵权法确定各指标权重, 提出了一种基于云模型的农业面源污染敏感性等级评价方法, 并引用某流域 28 个县(区、市)的数据进行实例验证与分析。结果表明, 对最大隶属原则有效度属于最低效范围的结果施行加权平均原则, 可提升评价结果的可信度; 采用云模型进行农业面源污染敏感性等级评价, 可信度达 96.4%; 相比 GIS 技术, 云模型对中度、高度敏感级别的模糊评价更倾向严格, 对这些地区的面源污染治理要求提出更高标准。研究结果表明该方法具有可行性, 可为农业面源污染地区科学制定治理措施、配置治理资源提供有益参考。

关键词:云模型; 农业面源污染; 敏感性等级; 熵权法

中图分类号: X592 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)02-0180-07

污染问题一直是我国经济社会发展过程中关注的重点, 其中, 农业面源污染问题更是随着农业

生产的快速发展日益突出。农业面源污染是在农业生产过程中不合理使用或排放的化肥、农药、畜禽粪便以及农村生活垃圾等对农业和农村生态环境所造成的大面积污染, 具有分散性、随机性、隐蔽性和难测性等特点^[1]。农业面源污染不仅影响当地的农业生产和生态安全, 也威胁着经济、社会的可持续发展^[2]。

对农业面源污染进行评价, 有助于决策部门掌握当地农业面源污染状况, 并依据各地区污染程度

收稿日期: 2020-04-11

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 517006712); 国家自然科学基金(编号: 518035511)。

作者简介: 徐 丹(1996—), 女, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要从事农业水资源高效利用研究。E-mail: 734994545@qq.com。

通信作者: 邵光成, 博士, 教授, 主要从事农业水资源高效利用研究。E-mail: sgcln@126.com。

[7] 张叶笑, 冯广京. 基于时空锥理论的“多规冲突”和“多规合一”机理研究[J]. 中国土地科学, 2017, 31(5): 3–11.

[8] 宫昌华, 张 洁. 关于“多规合一”工作的探索研究[J]. 环球人文地理, 2017(2): 269.

[9] 孟 鹏, 冯广京, 吴大放. “多规冲突”根源与“多规融合”原则——基于“土地利用冲突与‘多规融合’研讨会”的思考[J]. 中国土地科学, 2015(8): 72.

[10] 张卢奔. 空间—规模约束下的城市开发边界划定研究[D]. 南京: 南京大学, 2015.

[11] 王永强. 基于城市增长边界的耕地保护研究——以保定市莲池区与竞秀区为例[D]. 保定: 河北农业大学, 2016.

[12] Zhou R, Zhang H, Ye X Y, et al. The delimitation of urban growth boundaries using the CLUE-S land-use change model: study on Xinzhuang Town, Changshu City, China[J]. Sustainability, 2016, 8(11): 1182.

[13] 任 君, 刘学录, 岳健鹰, 等. 基于 MCE-CA 模型的嘉峪关市

城市开发边界划定研究[J]. 干旱区地理, 2016, 39(5): 1111–1119.

[14] Aithal B H, Ramachandra T V. Visualization of urban growth pattern in Chennai using geoinformatics and spatial metrics[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2016, 44(4): 617–633.

[15] 沈思思, 陈 健, 耿楠森, 等. 快速城镇化地区的城市开发边界划定方法探索——以榆林市为例[J]. 城市发展研究, 2015, 22(6): 103–111.

[16] 曹 靖, 李星银, 陈婷婷, 等. 基于空间增长模拟的安庆城市开发边界划定方法及管控策略[J]. 规划师, 2016, 32(6): 23–30.

[17] 韩春建, 梁朝信, 吴克宁, 等. 基于 GIS 技术的灰色关联度法土壤肥力综合评价[J]. 农业工程学报, 2008(增刊 1): 53–56.

[18] 吴元奇, 冯荣扬. 聚类分析计算方法的理论及结果比较[J]. 湛江海洋大学学报, 2002, 22(1): 57–63.

的不同,因地制宜地采取不同标准、不同力度的治理措施,从而提高治理工作的效率。国内已有很多关于农业面源污染评价方面的研究,史小春等采用源强系数法和输出系数法对涪江流域(射洪境内)进行面源污染综合评价^[3]。陶双骏等基于多分类有序离散选择模型进行小流域面源污染风险评估研究^[4]。杨飞翔运用主成分-聚类分析方法,对新疆塔城地区进行农业面源污染风险等级评估^[5]。林雪原等应用 GIS 技术基于主要污染源污染物对南四湖流域各县(市、区)进行农业面源污染评价^[2]。这些方法都有一定的参考价值,但目前农业面源污染评价在指标选取、等级划分等方面还没有统一标准,使得评价过程具有模糊性和随机性,这些方法不能很好地兼顾二者^[6]。而云模型理论在兼顾模糊性和随机性方面具有较好的适用性,已广泛应用于城市水安全评价^[7]、水土保持效益评价^[8]、地下水水质评价^[9]、滨海小流域生态文明评价^[10]等模糊评价中。因此,本研究引入云模型理论,对农业面源污染进行敏感性等级评价,以期得到合理、有可信度的评价结果,为决策部门进行农业面源污染治理战略规划提供参考。

1 材料与方法

1.1 评价指标及分级标准

农业面源污染的主要污染源有农村生活、农田化肥、畜禽养殖、水产养殖、农药、作物秸秆、农膜等^[11],产生的污染物主要有化学需氧量(COD, a1)、总氮(TN, a2)、总磷(TP, a3)等。

基于农业面源污染的主要污染物,参考相关文献^[12],本研究选取 COD 排放强度、TN 排放强度、TP 排放强度 3 个指标构建农业面源污染敏感性等级评价指标体系,按不敏感(Ⅰ)、轻度敏感(Ⅱ)、中度敏感(Ⅲ)、高度敏感(Ⅳ)4 个级别对农业面源污染进行等级划分,参考文献^[2]中各级别的数据以及相关标准^[13],确定各指标的分级标准(表 1)。

表 1 评价指标分级标准

指标	分级标准(kg/hm ²)			
	不敏感(Ⅰ)	轻度敏感(Ⅱ)	中度敏感(Ⅲ)	高度敏感(Ⅳ)
a1	≤72	72~88	88~108	>108
a2	≤32	32~41	41~50	>50
a3	≤4.5	4.5~5.5	5.5~6.5	>6.5

1.2 权重确定

采用熵权法计算指标体系中 3 个指标的权重,

该方法是一种客观赋权法,依据各指标所携带的信息量来确定权重。指标所携带的信息量由其熵值来反映,熵值越小,信息量越大,最终被赋的权重就越大^[14]。熵权法确定权重的计算步骤如下:

假设有 m 个评价对象, n 个评价指标(本研究中 $n=3$), b_{ij} 为第 i 个评价对象的第 j 个评价指标的数值,则评价对象的评价指标数值矩阵 B 为:

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1j} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2j} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{i1} & b_{i2} & \cdots & b_{ij} & \cdots & b_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mj} & \cdots & b_{mn} \end{pmatrix}$$

(1) 归一化处理。利用公式(1)对原数值进行处理,得到处理后的矩阵 E 。

$$e_{ij} = (b_{ij} - \min b_j) / (\max b_j - \min b_j) \quad (1)$$

式中: e_{ij} 为归一化处理后的数据。

(2) 根据公式(2)、公式(3)计算各指标的熵 H_j 。

$$H_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad (2)$$

其中:

$$f_{ij} = \frac{1 + e_{ij}}{\sum_{i=1}^m (1 + e_{ij})} \quad (3)$$

(3) 根据公式(4)计算各指标的权重 W_j 。

$$W_j = H_j / \sum_{j=1}^n H_j \quad (4)$$

1.3 云模型

云模型的概念是由李德毅等在 1995 年首次提出的^[15],是一种可以实现定性概念与定量表示之间不确定性转换的模型^[16]。云模型中的任意一个数据点的位置都体现了所描述对象的模糊性和随机性,每 1 个数据点都相当于 1 个云滴,若设定这些云滴呈正态分布,所形成的云即为正态云,本研究采用的就是这种正态云模型。

正态云的数字特征可以用期望值 Ex 、熵 En 、超熵 He 来表示^[17]:期望值 Ex 表示论域区间内的中心值,体现在正态云的中心定位上;熵 En 表示定性概念的模糊度,值越大,定性概念越模糊,体现在正态云指标数值方向的宽度上;超熵 He 表示熵的熵,值越大,隶属度的随机性越大,是模糊性和随机性的集合反映,体现在正态云的厚度上。

云的生成算法被称为云发生器,有正向云发生器和逆向云发生器 2 种,其中,正向云发生器可以实

现定性到定量的转换。对于本研究中的某一待评价对象来说,须要将它的农业面源污染敏感性等级这个“定性”概念转换为指标数值对各敏感性等级的最终隶属度这个“定量”表示,所以采用的是正向云发生器。

1.4 基于云模型的农业面源污染敏感性等级评价方法

1.4.1 云模型参数计算 根据已经确定的评价指标以及分级标准,利用公式(5)、公式(6)可求解各组单指标在单等级下对应云模型的数字特征(期望值 Ex 、熵 En 、超熵 He)。

期望值 Ex 的计算公式为:

$$Ex = (B_{min} + B_{max}) / 2。 \tag{5}$$

农业面源污染敏感性等级区间的边界值作为相互过渡的临界值,应隶属于 2 个等级并且确定度相等,即满足:

$$\exp\{- (B_{max} - B_{min})^2 / [8(En')^2]\} = 0.5。$$

熵 En 的计算公式为:

$$En = (B_{max} - B_{min}) / 2.355。 \tag{6}$$

超熵 He 一般根据指标等级实际情况或者经验取值。

1.4.2 算法步骤 利用 MATLAB 编写正向云的生成算法,实现农业面源污染敏感性等级评价中定性概念到定量数值的转换。实现步骤如下^[7]: (1) 生成以 En 为期望值、 He^2 为方差的正态随机数。(2) 生成以 Ex 为期望值、 En 为方差的正态随机数。(3) 通过公式(7)计算对评价等级的确定度 δ^2 。

$$\delta_i = \exp\{- (x_i - Ex)^2 / [2(En')^2]\}。 \tag{7}$$

(4) 形成在某个区间(评价指标分级中的边界值)内的一个云滴 (x_i, δ_i) 。(5) 重复步骤(1)~(4) N 次,产生 N 个云滴形成正态云,本研究中选取 $N = 3\ 000$ 。

1.4.3 数据处理

1.4.3.1 单一指标隶属度与综合隶属度 利用 MATLAB 编写的云发生器的算法,得出单个评价指标数据 x_0 隶属于单个等级的确定度,即单一指标隶属度。结合各评价指标的权重以及单个等级下所有评价指标的隶属度,按公式(8)可得出某个待评价对象对于单个等级的综合隶属 U_k 。

假设有 n 个评价指标, p 个评价等级(本研究中 $n = 3, p = 4$), δ_{jk} 为单个评价指标 $X_j (j = 1, 2, \cdots, n)$ 对于单个等级 $D_k (k = 1, 2, \cdots, p)$ 的隶属度,则

$$U_k = \sum_{j=1}^n (\delta_{jk} \omega_j)。 \tag{8}$$

式中: U_k 表示某个待评价对象对于等级 D_k 的综合隶属度; ω_j 表示评价指标 X_j 的权重。

1.4.3.2 最大隶属原则和加权平均原则 对于某个待评价对象,通常基于最大隶属原则,比较其对于 p 个评价等级的综合隶属度 (U_1, U_2, \cdots, U_p) ,将综合隶属度最大的等级作为最终等级。但是,超过一定范围时,根据最大隶属原则进行等级评定会损失太多信息,有效程度并不高,因此,须要进行最大隶属原则的有效度验证^[18]。

利用公式(9)可计算出有效度 α 的值,有效度范围见表 2。

$$\alpha = \frac{p \frac{\max U_k}{\sum_{k=1}^p U_k} - 1}{\frac{2 \sec U_k}{\sum_{k=1}^p U_k} (p - 1)}。 \tag{9}$$

式中: $\max U_k$ 为某指标对于各评价等级的综合隶属度中的最大值; $\sec U_k$ 为某指标对于各评价等级的综合隶属度中的第 2 大值。

表 2 有效度范围

有效度	α
完全有效	$+\infty$
非常有效	$1 \sim \infty$
比较有效	$0.5 \sim 1.0$
最低效	$0 \sim 0.5$
无效	0

当施行最大隶属原则最低效或者无效时,可采用加权平均原则进行等级评定。以等级 D_k 作为变量(本研究中 D_k 为 I、II、III、IV,这里可以量化为 1、2、3、4),以对于等级 D_k 的综合隶属度 U_k 作为权重,利用公式(10)得出待评价对象隶属的等级值。

$$A = \frac{\sum_{k=1}^p U_k D_k}{\sum_{k=1}^p U_k}。 \tag{10}$$

计算得出的等级值 A 通常不是整数,须要取整作为最终等级,本研究中,级数越大,敏感性越强,地区农业面源污染程度越高,所以处理 A 时选择“向上取整”。

1.4.4 评价流程 基于云模型的农业面源污染敏感性等级评价的总体流程见图 1。

2 数据来源与计算方法

2.1 数据来源

选取文献[2]中某流域的相关数据资料[包括 28 个县(区、市)的 COD、TN、TP 排放量和排放强度],

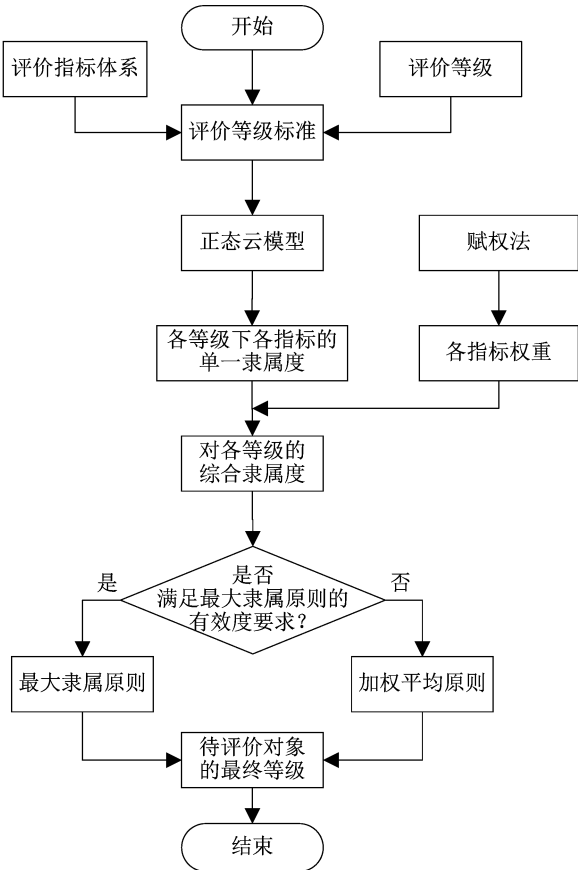


图1 农业面源污染敏感性等级评价流程

同时参考《济宁统计年鉴 2012》《菏泽统计年鉴 2013》《泰安统计年鉴 2013》《枣庄统计年鉴 2013》，基于云模型,对该流域的 28 个县(区、市)进行农业面源污染敏感性等级评价,将评价结果与文献[2]中运用 GIS 技术得出的结果进行比较,以期验证本研究所述评价模型的可行性。

该流域 28 个县(区、市)的各指标值见表 3。

2.2 计算指标权重

基于熵权法,得出各指标的权重,计算结果见表 4。

2.3 构建云模型

根据表 1 的分级标准和公式(5)、公式(6)所列方法,建立各组指标 - 等级的云模型参数(表 5)。

3 结果与分析

利用 MATLAB 编写算法生成各指标的云模型(图 2),图 2 - a 至图 2 - c 分别为指标 a1 ~ a3 在各等级下的云模型,每个子图中从左到右依次是该指标在 I ~ IV 等级下对应的云。根据程序运行结果,得出各县(区、市)在各等级下的单一指标隶属度,如

表 3 某流域 28 个县(区、市) COD、TN、TP 3 种污染物的排放强度

县(区、市) 代号	排放强度(kg/hm ²)		
	COD(a1)	TN(a2)	TP(a3)
1	80. 81	40. 12	6. 00
2	100. 58	36. 46	4. 11
3	83. 23	22. 03	9. 53
4	95. 82	36. 13	10. 31
5	76. 53	43. 78	6. 07
6	102. 85	54. 75	6. 88
7	126. 17	53. 46	5. 72
8	82. 02	35. 34	4. 64
9	123. 63	64. 41	7. 67
10	102. 83	47. 76	6. 61
11	140. 88	58. 78	8. 40
12	78. 43	27. 11	4. 15
13	113. 99	62. 81	6. 99
14	119. 30	62. 98	5. 94
15	120. 87	59. 79	6. 55
16	110. 09	58. 80	5. 65
17	92. 53	43. 51	5. 51
18	113. 92	53. 69	6. 52
19	137. 69	60. 61	7. 89
20	137. 91	62. 30	8. 50
21	118. 02	61. 05	6. 94
22	87. 76	24. 64	5. 28
23	96. 59	35. 03	5. 56
24	62. 23	51. 30	3. 35
25	81. 41	46. 54	4. 01
26	50. 49	15. 13	2. 35
27	109. 79	53. 82	5. 92
28	104. 99	45. 13	5. 53

表 4 农业面源污染敏感性等级评价指标权重

指标	权重
a1	0. 316
a2	0. 293
a3	0. 391

表 6 所示。结合表 4 中的指标权重,计算各等级下的综合隶属度。按公式(10)验证最大隶属原则的有效度,若属于最低效和无效范围,采用加权平均原则确定最终等级;否则,采用最大隶属原则确定最终等级。评级结果见表 7。

从表 7 可以看出,基于云模型对 28 个县(区、市)进行农业面源污染敏感性等级评价,若只施行最大隶属原则,则 28 个待评县(区、市)中,有 11 个的评价结果和采用 GIS 技术的评价结果不一致。对

表 5 各组指标 - 等级的云模型参数

指标	云模型参数(E_x, E_n, H_e)			
	不敏感(Ⅰ)	轻度敏感(Ⅱ)	中度敏感(Ⅲ)	高度敏感(Ⅳ)
a1	(36.00,30.57,1.00)	(80.00,6.79,1.00)	(98.00,8.49,1.00)	(119.50,9.77,1.00)
a2	(16.00,13.59,0.50)	(36.50,3.82,0.50)	(45.50,3.82,0.50)	(55.50,4.67,0.50)
a3	(2.25,1.91,0.10)	(5.00,0.42,0.10)	(6.00,0.42,0.10)	(7.00,0.42,0.10)

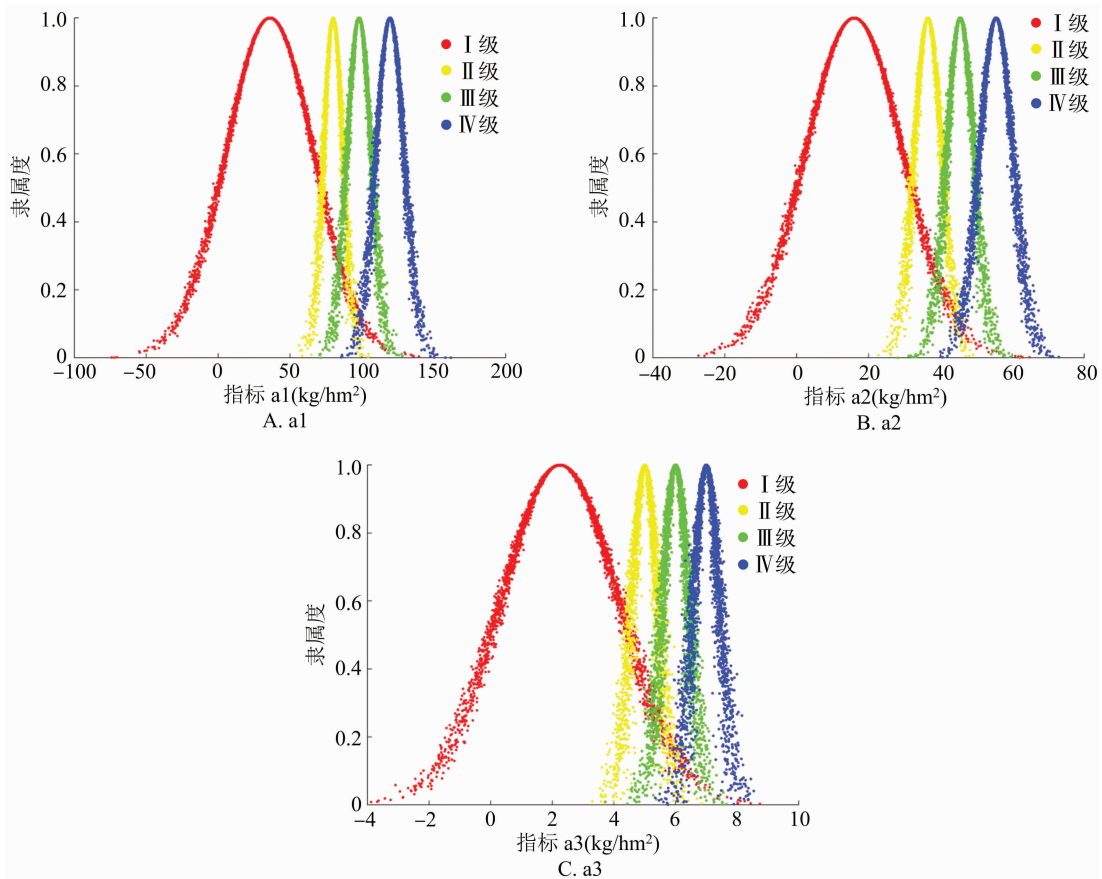


图2 不同指标的云模型

最大隶属原则进行有效度验证后,发现 11 个不一致结果中有 8 个都是最低效的。采用加权平均原则后,重新得出的这 8 个待评县(区、市)的结果中有 7 个和采用 GIS 技术的结果达成一致;仅有县(区、市)28 的结果没有达成一致,但是其敏感性级别变高,相比只施行最大隶属原则,对地区的面源污染治理工作更具积极意义。因此,对最大隶属原则进行有效度验证后,综合考虑最大隶属原则和加权平均原则,有利于大大提升评价结果的可信度和参考价值。

从表 7 可以看出,将采用云模型得到的最终结果和采用 GIS 技术得到的结果进行整体上的比较,28 个结果中有 22 个是完全一致的;另外 6 个不一致结果中有 5 个都是采用云模型判定的敏感级别比

采用 GIS 技术更高 1 级,且都属于Ⅲ、Ⅳ(中、高度敏感)级别的地区;仅有 1 个不一致结果[县(区、市),24 号]是采用云模型判为Ⅰ级,而采用 GIS 技术判为Ⅱ级,属于误判。因此,采用云模型进行农业面源污染敏感性等级评价,可信度可达 96.4%;相比 GIS 技术的的评价结果,云模型对中度、高度敏感级别的模糊评价更倾向于严格,会对这些地区的面源污染治理工作提出更高的标准。

4 结论

将云模型理论引入农业面源污染敏感性等级评价中,基于熵权法确定各指标权重,验证最大隶属原则的有效度,判别施行最大隶属原则和加权平均原则,得到最终等级。通过实例验证,该方法具有

表 6 不同县(区、市)的单一指标隶属度

县(区、市) 代号	a1 的隶属度				a2 的隶属度				a3 的隶属度			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
1	0.302 3	0.858 7	0.303 4	0.000 2	0.286 6	0.947 5	0.149 3	0.000 1	0.168 6	0.208 4	0.935 6	0.101 9
2	0.112 1	0.010 0	0.967 8	0.156 8	0.292 7	0.998 5	0.096 0	0.000 1	0.761 5	0.085 8	0.000 1	0.000 1
3	0.320 5	0.901 5	0.245 7	0.000 2	0.902 6	0.001 0	0.001 0	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1
4	0.140 0	0.070 0	0.954 3	0.080 0	0.389 1	0.901 0	0.040 0	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1
5	0.446 1	0.769 0	0.054 3	0.000 1	0.115 2	0.180 5	0.912 6	0.067 6	0.144 4	0.150 2	0.982 9	0.140 9
6	0.092 2	0.001 0	0.867 6	0.276 2	0.020 0	0.000 1	0.117 4	0.940 6	0.071 1	0.026 2	0.244 4	0.895 4
7	0.010 0	0.000 1	0.005 0	0.800 9	0.049 3	0.001 0	0.480 3	0.536 0	0.147 9	0.135 0	0.985 9	0.150 3
8	0.318 5	0.964 2	0.226 0	0.001 0	0.394 4	0.875 3	0.014 9	0.000 1	0.413 3	0.845 4	0.062 0	0.001 0
9	0.020 0	0.000 1	0.020 0	0.922 1	0.001 0	0.000 1	0.001 0	0.168 2	0.025 7	0.000 1	0.028 8	0.382 4
10	0.102 3	0.014 5	0.899 4	0.177 5	0.252 0	0.910 9	0.165 9	0.010 0	0.155 6	0.179 1	0.974 8	0.121 7
11	0.001 0	0.000 1	0.000 1	0.095 8	0.014 1	0.000 1	0.048 0	0.996 2	0.010 0	0.000 1	0.000 1	0.083 0
12	0.366 4	0.958 1	0.076 9	0.001 0	0.766 5	0.039 6	0.000 1	0.000 1	0.653 1	0.139 4	0.001 0	0.000 1
13	0.458 1	0.691 7	0.058 7	0.000 1	0.050 0	0.010 0	0.772 7	0.257 3	0.487 4	0.563 4	0.034 9	0.000 1
14	0.312 4	0.936 6	0.205 8	0.001 0	0.138 4	0.184 9	0.945 6	0.086 9	0.636 4	0.195 4	0.001 0	0.000 1
15	0.357 5	0.999 1	0.113 4	0.001 0	0.252 2	0.796 5	0.237 1	0.001 0	0.559 5	0.310 5	0.001 0	0.000 1
16	0.374 3	0.972 9	0.123 0	0.001 0	0.206 6	0.577 8	0.384 7	0.009 9	0.652 4	0.155 6	0.001 0	0.000 1
17	0.557 3	0.291 2	0.010 0	0.000 1	0.549 5	0.380 8	0.010 0	0.000 1	0.630 6	0.193 6	0.001 0	0.000 1
18	0.375 9	0.989 0	0.115 5	0.001 0	0.324 2	0.996 1	0.136 3	0.001 0	0.548 8	0.379 2	0.025 6	0.000 1
19	0.208 7	0.305 2	0.677 8	0.014 9	0.149 7	0.283 9	0.724 6	0.040 0	0.327 6	0.947 5	0.173 6	0.005 7
20	0.058 8	0.000 1	0.300 1	0.701 1	0.007 4	0.000 1	0.077 8	0.999 8	0.010 0	0.000 1	0.001 0	0.206 8
21	0.602 0	0.218 3	0.001 0	0.000 1	0.327 0	0.999 4	0.113 8	0.010 0	0.706 5	0.071 9	0.002 9	0.000 1
22	0.246 4	0.556 7	0.413 6	0.010 0	0.762 1	0.040 6	0.000 1	0.000 1	0.531 9	0.398 4	0.050 0	0.000 1
23	0.175 7	0.080 0	0.972 2	0.090 4	0.287 5	0.946 8	0.158 5	0.010 0	0.501 3	0.516 3	0.029 5	0.000 1
24	0.753 7	0.010 0	0.000 1	0.000 1	0.062 2	0.007 9	0.687 8	0.373 8	0.930 4	0.000 1	0.000 1	0.000 1
25	0.363 2	0.990 3	0.154 9	0.001 0	0.074 0	0.063 8	0.925 2	0.191 4	0.678 0	0.129 6	0.001 0	0.000 1
26	0.907 0	0.001 0	0.000 1	0.000 1	0.997 9	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.998 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1
27	0.050 0	0.000 1	0.438 6	0.555 5	0.020 0	0.000 1	0.115 0	0.941 4	0.123 9	0.074 7	0.852 2	0.253 0
28	0.099 5	0.010 0	0.705 0	0.353 5	0.091 8	0.295 8	0.737 2	0.012 0	0.172 8	0.209 8	0.920 3	0.065 6

有可行性,可为地区制定农业面源污染治理措施提供科学有效的参考。

对于已基于云模型确定出农业面源污染敏感性等级的县(区、市)来说,可直接采用建立好的评价模型,对其下辖各镇(街道)再进行敏感性等级划分,有助于县(区、市)内部更细化、更有侧重地推进治理工作,优化县(区、市)内部的治理资源配置。

本研究仅选取 COD、TN、TP 排放强度作为评价指标进行云模型的运用阐述,后续研究中可以增加与其他污染物(如 5 日生化需氧量 BOD₅、铵态氮 NH₄⁺ - N 等)有关的指标,或者基于对污染机制更深层次的研究,引入污染物之外的指标,从而完善评价指标体系。另外,在进行指标赋权的实践中,

可以再结合对相关地区农业面源污染研究较多专家的意见,进行组合赋权。

参考文献:

[1] 丘雯文,钟涨宝,李兆亮,等. 中国农业面源污染排放格局的时空特征[J]. 中国农业资源与区划,2019,40(1):26-34.

[2] 林雪原,荆延德. 山东省南四湖流域农业面源污染评价及分类控制[J]. 生态学杂志,2014,33(12):3278-3285.

[3] 史小春,敖天其,黎小东,等. 涪江流域(射洪境内)面源污染综合评价[J]. 水土保持研究,2018,25(4):375-379,385.

[4] 陶双骏,邵光成,苏江霖,等. 小流域面源污染风险评估研究——基于多分类有序离散选择模型[J]. 农业环境科学学报,2017,36(7):1293-1299.

[5] 杨飞翔. 新疆塔城地区农业面源污染风险评价及防控体系[J]. 土地开发工程研究,2019,4(10):66-72.

表 7 不同县(区、市)的综合隶属度及评价结果对比

县(区、市) 代号	综合隶属度				最大隶属 原则 的有效度	评价结果			
	I	II	III	IV		最大隶属 原则	加权平均 原则	最终	GIS 技术
1	0.245 4	0.630 4	0.505 4	0.039 9	0.362 9	II	III	III	II
2	0.418 9	0.329 3	0.334 0	0.049 6	0.271 4	I	III	III	III
3	0.365 8	0.285 2	0.078 0	0.000 1	0.428 9	I	II	II	II
4	0.158 3	0.286 2	0.313 3	0.025 3	0.273 8	III	III	III	III
5	0.231 2	0.354 6	0.668 8	0.074 9	0.632 5	III	III	III	II
6	0.062 8	0.010 6	0.404 1	0.713 0	0.685 2	IV	IV	IV	III
7	0.075 4	0.053 1	0.527 8	0.468 9	0.350 4	III	IV	IV	IV
8	0.377 8	0.891 7	0.100 0	0.000 7	0.969 0	II	II	II	II
9	0.016 7	0.000 1	0.017 9	0.490 2	13.396 9	IV	IV	IV	IV
10	0.167 0	0.341 5	0.714 0	0.106 6	0.745 1	III	III	III	III
11	0.008 4	0.000 1	0.014 1	0.354 6	12.264 1	IV	IV	IV	IV
12	0.595 7	0.368 9	0.024 7	0.000 4	0.629 5	I	II	I	I
13	0.350 0	0.441 8	0.258 6	0.075 5	0.305 4	II	III	III	III
14	0.388 1	0.426 6	0.342 5	0.025 8	0.224 7	II	III	III	II
15	0.405 6	0.670 5	0.105 7	0.000 6	0.616 2	II	II	II	II
16	0.433 9	0.537 6	0.152 0	0.003 3	0.393 1	II	II	II	II
17	0.583 7	0.279 3	0.006 5	0.000 1	0.874 2	I	II	I	I
18	0.428 3	0.752 6	0.086 4	0.000 6	0.678 0	II	II	II	II
19	0.237 9	0.550 1	0.494 4	0.018 7	0.303 2	II	III	III	III
20	0.024 7	0.000 1	0.118 0	0.595 4	2.320 4	IV	IV	IV	IV
21	0.562 3	0.389 9	0.034 8	0.003 0	0.538 2	I	II	I	I
22	0.509 2	0.343 6	0.150 3	0.003 2	0.499 8	I	II	II	II
23	0.335 8	0.504 6	0.365 2	0.031 5	0.356 6	II	III	III	III
24	0.620 1	0.005 5	0.201 6	0.109 6	1.276 3	I	II	I	II
25	0.401 6	0.382 3	0.320 4	0.056 4	0.194 2	I	III	III	II
26	0.969 3	0.000 4	0.000 1	0.000 1	1 260.477 9	I	II	I	I
27	0.070 1	0.029 3	0.505 5	0.550 3	0.344 9	IV	IV	IV	IV
28	0.125 9	0.171 9	0.798 6	0.140 9	1.898 1	III	III	III	III

[6]王 晶,任 丽,杨联安,等. 基于云模型的西安市蔬菜区土壤肥力综合评价[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(10):183-189.

[7]孙雅茹,董增川,徐 瑶,等. 基于云模型的城市水安全评价[J]. 人民黄河,2019,41(8):52-56,67.

[8]林建琳. 基于组合赋权-云模型水土保持效益评价[J]. 水利技术监督,2019(2):82-85.

[9]朱志强,唐金平,张 强,等. 基于博弈论组合赋权的正态云模型在地下水水质评价中的应用[J]. 节水灌溉,2019(6):43-46.

[10]季晓翠,王建群,傅杰民. 基于云模型的滨海小流域水生态文明评价[J]. 水资源保护,2019,35(2):74-79.

[11]张华美. 南四湖流域非点源污染输出风险评估及其对土地利用变化的响应[D]. 曲阜:曲阜师范大学,2018:1-2.

[12]王文章,敖天其,史小春,等. 基于输出系数模型的射洪县农村面源污染负荷估算[J]. 环境工程,2018,36(1):173-177.

[13]国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准:GB 3838—2002[S]. 北京:中国环境科学出版社,2002.

[14]杨建宇,欧 聪,李 琪,等. 基于云模型的耕地土壤养分模糊综合评价[J]. 农业机械学报,2018,49(1):251-257.

[15]李德毅,孟海军,史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展,1995,32(6):15-20.

[16]杜湘湖,尹全军,黄柯棣,等. 基于云模型的定性定量转换方法及其应用[J]. 系统工程与电子技术,2008,30(4):772-776.

[17]刘常昱,李德毅,杜 鹄,等. 正态云模型的统计分析[J]. 信息与控制,2005,34(2):236-239,248.

[18]邱 东. 最大隶属原则的有效度与加权平均原则的应用——模糊统计评判中判评原则的比较分析[J]. 统计研究,1989(2):50-54.