

DOI: 10.5846/stxb201808221790

方娜,游清徽,刘玲玲,李菊媛,卢成芳,张琍,杨涛,余紫萍,吕泽兰,阳文静.基于云模型的鄱阳湖秋季周边湿地水体富营养化评价.生态学报, 2019,39(17): - .

Fang N, You Q H, Liu L L, Li J Y, Lu C F, Zhang L, Yang T, Yu Z P, Lü Z L, Yang W J. Evaluation of eutrophication in Poyang Lake wetland during autumn based on the cloud model. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): - .

基于云模型的鄱阳湖秋季周边湿地水体富营养化评价

方 娜^{1,2}, 游清徽⁴, 刘玲玲^{1,2}, 李菊媛^{1,2}, 卢成芳^{1,2}, 张 琍^{1,2,3}, 杨 涛^{1,2,3},
余紫萍^{1,2}, 吕泽兰^{1,2}, 阳文静^{1,2,3,*}

1 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 南昌 330022

2 江西师范大学地理与环境学院, 南昌 330022

3 江西师范大学江西省鄱阳湖综合治理与资源开发重点实验室, 南昌 330022

4 江西师范大学生命科学学院, 南昌 330022

摘要:针对水体富营养化评价过程中存在随机性和模糊性的特点,基于鄱阳湖周边湿地 30 个采样点的实测水质数据,选取叶绿素 a(Chl-a)、总磷(TP)、总氮(TN)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})及透明度(SD)为水质评价因子,生成云模型对鄱阳湖周边湿地水体进行富营养化评价,并与综合营养状态指数评价结果进行比较。结果表明:两种方法的评价结果存在一定差异,但都反映了鄱阳湖周边湿地水体总体上处于轻度富营养化状态。该方法能为鄱阳湖湿地水体富营养化评价提供重要的方法和手段。

关键词:云模型;富营养化;水质评价;鄱阳湖湿地

Evaluation of eutrophication in Poyang Lake wetland during autumn based on the cloud model

FANG Na^{1,2}, YOU Qinghui⁴, LIU Lingling^{1,2}, LI Juyuan^{1,2}, LU Chengfang^{1,2}, ZHANG Li^{1,2,3}, YANG Tao^{1,2,3},
YU Ziping^{1,2}, LV Zelan^{1,2}, YANG Wenjing^{1,2,3,*}

1 Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

2 School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

3 Jiangxi Provincial Key Laboratory of Poyang Lake Comprehensive Management and Resource Development, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

4 College of Life Sciences, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

Abstract: With the fast-growing human population and attendant human activities, eutrophication has become a severe problem in fresh as well as coastal waters in many regions of the world. Evaluation of eutrophication can provide critical information for the governance and management of water resources. However, two basic and significant uncertainties, i.e. randomness and fuzziness, are ubiquitous in water quality evaluation. The cloud model method has been proposed to address the two uncertainties based on the principle of maximum entropy (POME) and engineering fuzzy set theory (EFST). Poyang Lake is the largest fresh water lake in China with one of the most important wetlands in the world, recognized by the International Union for the Conservation of Nature (IUCN). Poyang Lake has been severely disturbed by human activities, such as sewage discharge and sand mining, which has caused a severe degradation of water quality. Previous evaluations of

基金项目:国家自然科学基金项目(41561097, 41701514);江西省重大生态安全问题监控协同创新中心建设经费(JXS-EW-00);江西省自然科学基金项目(20161BAB213074, 20142BAB213023);江西省教育厅科学研究项目(GJJ170199, GJJ150334);鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室开放基金项目(PK2017004)

收稿日期:2018-08-22; 网络出版日期:2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangwenjing@jxnu.edu.cn

eutrophication have mainly focused on the central areas of Poyang Lake, whereas the surrounding wetland has much been neglected. In this study, we aimed to develop a cloud model to assess eutrophication in Poyang Lake wetland. We also employed the widely used comprehensive trophic level index (TLI) and tested whether the two methods generated different results. We conducted field surveys to obtain the data on water quality at 30 sample sites in Poyang Lake wetland during September 25 and October 31, 2016. Five key physico-chemical parameters, i.e., chlorophyll-a (Chl-a), Secchi disk depth (SD), chemical oxygen demand using manganese (COD_{Mn}), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) were analyzed in the laboratory and used as the input data for the cloud model and TLI. The clouds of each water quality parameter at five eutrophication levels (i.e., oligotrophic, mesotrophic, light eutrophic, middle eutrophic, and hyper eutrophic) were generated in Matlab based on the criteria for eutrophication level classification proposed by the Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. The eutrophication level at each sample site was then determined by the maximum degree of certainty. Both of the two methods indicated that Poyang Lake wetland was overall in a light eutrophic state. The cloud model showed that seven sample sites were classified as mesotrophic, seventeen as light eutrophic, five as middle eutrophic, and one as hyper eutrophic, whereas the TLI indicated that twelve sample sites were classified as mesotrophic, fifteen as light eutrophic, and three as middle eutrophic. The reason for the difference between the two sets of results was that water physico-chemical parameters were weighted differently in the two methods. Highest weights were given to TN and TP in the cloud model, whereas Chl-a concentration was the most important variable in the TLI. Nitrogen and phosphorus were the main pollutants in Poyang Lake, whereas Chl-a concentration was not high, because the fast flow of water, as well as the high concentration of suspended sediment, limited the growth of phytoplankton. We thus considered that the cloud model method was more appropriate for eutrophication evaluation in Poyang Lake wetland.

Key Words: cloud model; eutrophication; water quality evaluation; Poyang Lake wetland

湿地是介于陆地与水生生态系统之间的过渡地带,具有涵养水源、调节径流、降解污染及保护生物多样性等重要功能^[1-2]。因受围垦、污水排放等人类活动的影响,会导致湿地环境恶化、生物多样性降低、湿地生态服务功能减弱等问题^[3-4]。水体富营养化是湿地水环境评价的关键,湿地水体的富营养化评价可以较为准确地反映湿地的水质状况和健康程度,为湿地的保护和修复提供科学依据^[5]。

常用的水体富营养化程度评价方法有卡尔森营养状态指数、综合营养状态指数、模糊数学法、灰色聚类法、人工神经网络模型、云模型等方法^[6-11]。其中,营养状态指数法计算简便,但其主要突出单项指标的作用,而水体富营养化评价通常需要考虑多个评价因子的综合影响^[12];模糊综合评价法排除评价边界隶属模糊的影响,却存在隶属函数选择的随机性;灰色聚类法精确度高而结果分辨率低;人工神经网络模型的应用性较差^[13]。水体富营养化评价过程存在分类标准的模糊性、水质指标多变和难以定量描述等问题,使评价过程具有明显的随机性和模糊性^[5]。基于云模型的富营养化评价方法可以有效解决上述问题,使水质评价结果更为客观。云模型是李德毅院士提出的一种定性概念与其定性数值相互转换模型,能综合考虑评价过程中评价标准的非线性、评价因子的多样性以及评价过程之中的模糊性与随机性等特点^[14]。在大气环境质量评价、地震风险综合评价、旅游发展评估等多方面得到广泛应用^[13,15-16]。在水质评价方面有丁昊等利用云模型对湖库的富营养化状况进行了评价,并验证了其可行性^[11]。

鄱阳湖作为中国最大的淡水湖泊,是典型的浅水型湖泊,在平水期、枯水期洲滩大片裸露,形成大面积的湿地,以其独特的生境与复杂的气候、水文条件形成了鄱阳湖极具特色的湿地生态系统^[17-18]。近年来,受周边居民生活、养殖业及流域内工农业生产等人类活动的影响,鄱阳湖水质状况不断下降,富营养化程度加剧^[19-20]。目前关于鄱阳湖富营养化状况的研究主要集中在鄱阳湖主湖区^[21-23],对鄱阳湖周边湿地水质进行富营养化评价的研究还较少。富营养化评价能让管理者更直观地了解鄱阳湖湿地的水质状况,以便及时采取相应的保护管理措施。本研究旨在基于云模型对鄱阳湖周边湿地水体进行富营养化评价,同时与应用较广泛

的富营养化评价方法综合营养状态指数法进行对比,分析两种方法评价结果的异同,以期为鄱阳湖湿地水质评价提供重要的方法和手段。

1 材料与方法

1.1 数据采集与处理

2016年9—10月于鄱阳湖周边随机选取了30个典型湿地进行采样(图1),在采样点的开阔水域利用塞氏盘测量水体的透明度(Secchi disk depth, SD),并采集3份250 mL的水样,用冷藏保温箱保存后带回实验室,进行叶绿素a(chlorophyll-a, Chl-a)、总磷(total phosphorus, TP)、总氮(total nitrogen, TN)、高锰酸盐指数(chemical oxygen demand using manganese, COD_{Mn})等水质参数的测定。Chl-a采用丙酮萃取法测定,参考《水和废水监测分析方法》(第4版)^[24],TP和TN采用紫外分光光度法测定,COD_{Mn}采用碱性高锰酸钾法测定。

1.2 研究方法

1.2.1 云模型评价

(1)评价指标及标准

本文选择使用较广泛^[23,25-26]的Chl-a、TP、TN、COD_{Mn}、SD等5个水质评价因子进行鄱阳湖湿地水体的富营养化评价,水体营养状态分级标准^[27]见表1。

(2)确定评价因子权重

本文根据评价因子的实测浓度和各营养分级标准浓度来计算评价因子权重。设评价因子 $X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]$,它的权重矩阵为 $A = [a_1, a_2, a_3, a_4, a_5]$,权重计算公式为:

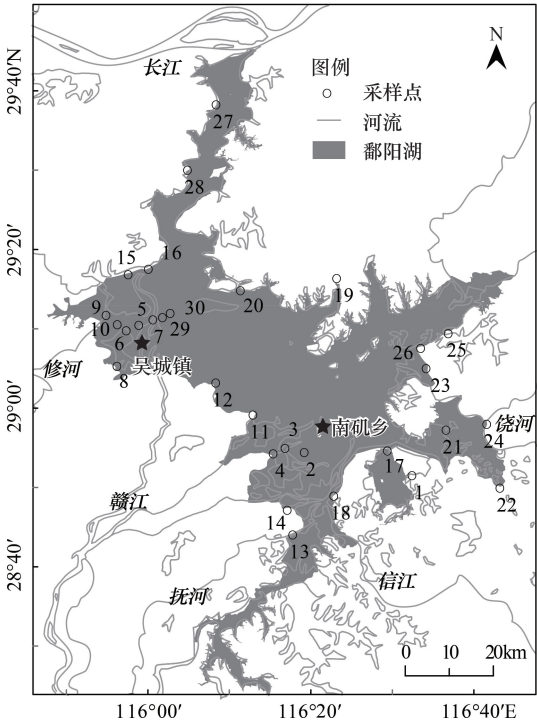


图1 鄱阳湖湿地采样点分布图
Fig.1 Locations of sample sites in Poyang Lake wetland

表1 富营养化评价参数及分级标准
Table 1 Water quality parameters for eutrophication evaluation and their classification standards

营养分级 Nutritional level	Chl-a/ (mg/m ³)	TP/ (mg/m ³)	TN/ (mg/m ³)	COD _{Mn} / (mg/L)	SD/m
I 贫营养 Oligotrophic	≤2	≤10	≤100	≤1	≥3
II 中营养 Mesotrophic	≤10	≤50	≤500	≤4	≥1
III 轻度富营养 Light eutrophic	≤26	≤100	≤1000	≤8	≥0.5
IV 中度富营养 Middle eutrophic	≤64	≤200	≤2000	≤10	≥0.4
V 重度富营养 Hyper eutrophic	>64	>200	>2000	>10	<0.4

Chl-a:叶绿素 a Chlorophyll-a; TP: 总磷 Total phosphorus; TN: 总氮 Total nitrogen; COD_{Mn}: 高锰酸盐指数 chemical oxygen demand using manganese;SD:透明度 Secchi disk depth

$$a_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

(1)

$$w_i = \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m c_i}{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k S_{ik}}$$

(2)

式中, n 为评价因子个数, m 为水体样本数, c_i 为 x_i 的实测质量浓度, a_i 为评价因子 x_i 的权重, S_{ik} 为 x_i 的第 k

级标准值, w_i 为第 i 个评价因子的 m 个水体样本的平均实测浓度值与该评价因子的 S_{ik} 值的平均值之比。

(3) 确定云模型参数

云模型用期望 Ex 、熵 En 和超熵 He 共 3 个数字特征来整体表征一个概念^[14]。 Ex 表示云滴在论域空间分布的期望,是概念在论域空间的中心值,最能够代表定性概念; En 表示一个定性概念可被度量的范围,熵越大可被度量的范围越广; He 表示云图上云滴的离散程度,超熵将模糊性和随机性相关联,反映了云滴的厚度^[11,28]。

假设水体评价因子的富营养评价类别对应的特征值范围具有上下边界 $[B_{\min}, B_{\max}]$, 则富营养评价类别的云模型的 3 个数字特征可以通过下式计算:

$$\begin{cases} Ex = (B_{\min} + B_{\max}) / 2 \\ En = (B_{\max} - B_{\min}) / 6 \\ He = k \end{cases} \quad (3)$$

式中, $B_{\min}$ 、 $B_{\max}$ 分别表示富营养评价类别对应的特征值范围的最小与最大边界。 k 为常数,本文中设 k 为 0.01,不同等级云模型数字特征的具体计算方法参照文献方法^[11]。设水质指标的 5 个营养等级评价区间分别为 I (0, a], II (a, b], III (b, c], IV (c, d], V (d, +∞), 云模型参数的计算规则见表 2。

表 2 云模型的数字特征计算方法

Table 2 Numerical characteristics of the cloud model

营养分级 Nutritional level	Ex	En	He
I	$E_{x1} = 0$	$E_{n1} = (E_{x2} - E_{x1}) / 3$	0.01
II	$E_{x2} = (a + b) / 2$	$E_{n2} = (E_{x2} - E_{x1}) / 3$	0.01
III	$E_{x3} = (b + c) / 2$	$E_{n3} = (E_{x3} - E_{x2}) / 3$	0.01
IV	$E_{x4} = (c + d) / 2$	$E_{n4} = (E_{x4} - E_{x3}) / 3$	0.01
V	$E_{x5} = d + e$	$E_{n5} = (E_{x5} - E_{x4}) / 3$	0.01

Ex : 期望 Expected value; En : 熵 Entropy; He : 超熵 Hyper Entropy

(4) 生成云模型

根据确定的云模型数字特征参数,使用 MATLAB 软件编写正态云及半云发生器程序^[29-30],分别生成 5 个评价因子的云模型。

(5) 计算综合确定度

各评价因子隶属于某级别的确定度相加,乘以相应的评价因子权重 A ,得到该水体位于某一级别的确定度之和,然后比较得到最大确定度,最大确定度所在的级别即为各采样点所属的富营养化级别。

1.2.2 综合营养状态指数

综合营养状态指数法是中国环境监测总站推荐使用的湖泊(水库)富营养化评价方法^[31]。基于 Chl-a、TP、TN、COD_{Mn} 和 SD 等水质指标对水体富营养化程度进行评价,计算公式如下:

$$TLI(\sum) = \sum W_j \cdot TLI(j) \quad (4)$$

式中, $TLI(\sum)$ 表示综合营养状态指数; W_j 表示第 j 种参数的营养状态指数的相关权重; $TLI(j)$ 表示第 j 种参数的营养状态指数。

以 Chl-a 为基准参数,则第 j 中参数的归一化相关权重计算公式为:

$$W_j = \frac{r_{ij}^2}{\sum_{j=1}^m r_{ij}^2} \quad (5)$$

式中, r_{ij} 表示第 j 中参数与基准参数 Chl-a 的相关系数; m 表示评价参数的个数。

营养状态指数公式如下:

$$TLI(\text{Chl-a}) = 10(2.5 + 1.086 \ln \text{Chl-a}) \quad (6)$$

$$TLI(TP) = 10(9.436 + 1.624 \ln TP)$$

(7)

$$TLI(TN) = 10(5.453 + 1.694 \ln TN)$$

(8)

$$TLI(COD_{Mn}) = 10(0.109 + 2.661 \ln COD_{Mn})$$

(9)

$$TLI(SD) = 10(5.118 - 1.94 \ln SD)$$

(10)

式中,SD 单位为 m,Chl-a 单位为 mg/m^3 ,其他指标单位均为 mg/L 。采用 0—100 的一系列连续数字对水体营养状态进行分级,指数值越高,营养程度越重。TLI 在 30 以下为贫营养,30—50 为中营养,大于 50 为富营养,其中 50—60 为轻度富营养,60—70 为中度富营养,大于 70 为重度富营养。

2 研究结果

2.1 云模型评价结果

将营养状态分级标准值(表 1)和各采样点的评价因子的实测值代入(1—2)式中,可以得到各评价因子的权重: $A = [0.13, 0.26, 0.35, 0.21, 0.05]$,从左到右分别为 Chl-a、TP、TN、 COD_{Mn} 、SD 的权重。其中 TN 的权重最大,其次是 TP、 COD_{Mn} ,权重最小的是 Chl-a、SD。

根据云模型数字特征参数的计算方法(表 2),计算各水质因子的云模型参数。因 SD 分级标准与其他评价因子有异,其云模型数字特征参数单独列出(表 3)。在 MATLAB 软件中生成 5 个评价因子的云模型如图 2 所示。横坐标代表评价因子浓度,纵坐标代表评价因子对应各个营养级别云的确度,横坐标从左到右分别代表从贫营养到重度富营养所对应的云,评价因子 SD 从右到左分别代表从贫营养到重度富营养所对应的云。每个评价因子的实测值,在云模型图上都有对应的确定度。

表 3 透明度的云模型数字特征
Table 3 Numerical characteristics of the cloud model for Secchi disk depth

营养分级 Nutritional level	<i>Ex</i>	<i>En</i>	<i>He</i>	营养分级 Nutritional level	<i>Ex</i>	<i>En</i>	<i>He</i>
I	3	0.67	0.01	IV	0.4	0.13	0.01
II	1	0.17	0.01	V	0	0.13	0.01
III	0.5	0.03	0.01				

计算各采样点 5 个水质因子对应各营养级别的综合确定度(表 4),云模型评价结果显示,本研究的 30 个鄱阳湖周边湿地采样点中,有 7 个采样点的水质处于中营养,17 个采样点处于轻度富营养,5 个处于中度富营养,仅 1 个采样点处于重度富营养。根据云模型富营养化评价结果,鄱阳湖周边湿地水质总体上处于轻度富营养。

2.2 综合营养状态指数评价结果

鄱阳湖周边湿地水质综合营养指数范围是 40.79—62.96(表 4),其中有 12 个采样点的综合营养指数小于 50,水质处于中营养;15 个采样点的综合营养指数处于 50—60 之间,水质呈轻度富营养;3 个采样点的综合营养指数处于 60—70 之间,其水质处于中度富营养。根据综合营养状态指数评价结果,鄱阳湖周边湿地水质整体上处于轻度富营养。

3 讨论

水体富营养化评价指标及标准的选取对水体富营养化评价结果有重要影响,但目前还没有完全统一的划分营养类型的标准,评价指标也较多^[8,32]。本研究选用参照了中国环境监测总站推荐使用的 水质指标及营养分级标准。多数学者认为氮磷是浮游藻类生长的主要营养物质,可以作为水体富营养化的重要指标^[33]。此外,水体富营养化的最直观表现是浮游藻类数量增多和种类变化,水体 Chl-a 含量及透明度也可以直接地反映水体营养状态水平,是湖泊水体营养状态的指示指标^[34]。 COD_{Mn} 反映的是水体有机物的含量,营养物质的增加可能会导致藻类大量繁殖,从而使水体有机物含量增加^[35]。本文通过参考大量文献^[8,27,31,36],采用的评

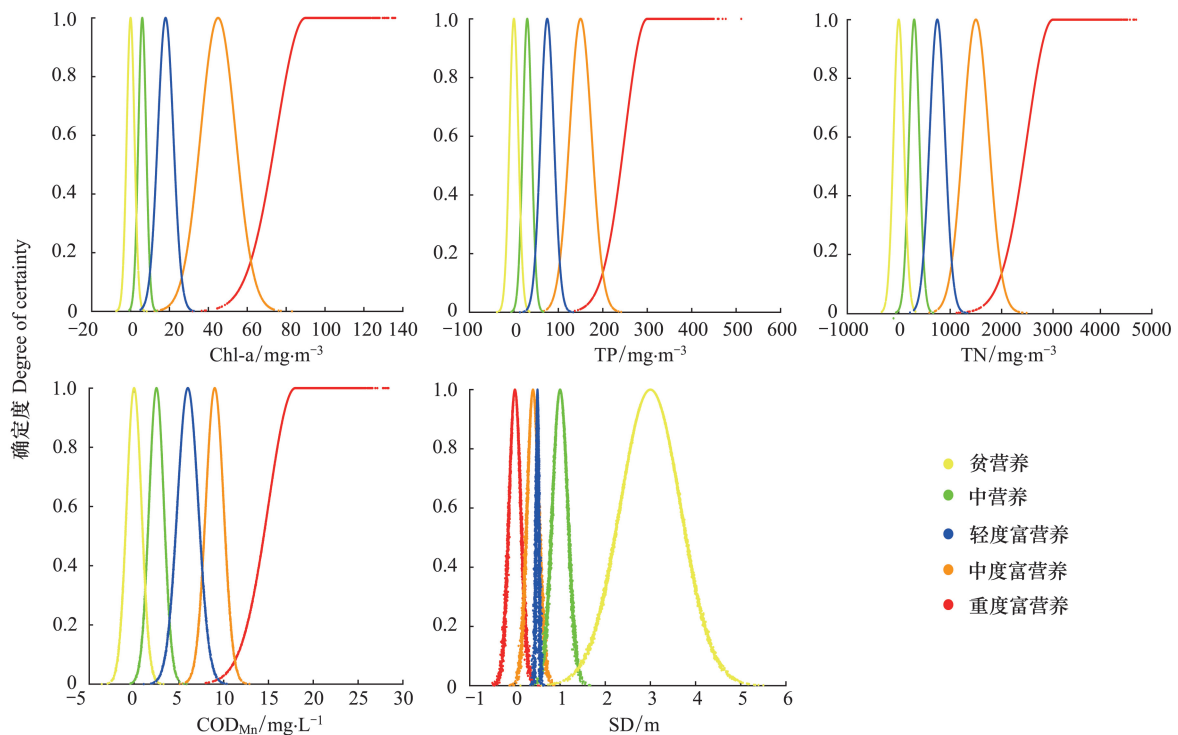


图2 各评价因子对应各营养级别的云模型

Fig.2 The integrated cloud for each water quality parameter

价指标及分级方法使用广泛,这样可缩小同一水体富营养化评价结果之间的差距,也使得不同湖泊之间的评价结果具有可比性。

本研究使用云模型和综合营养状态指数分别对鄱阳湖周边湿地水体进行富营养化评价,两种方法的评价结果皆反映鄱阳湖周边湿地水体总体上处于轻度富营养状态,与前人在主湖区的研究结果一致^[22-23]。但两种方法的评价结果也存在差异,如位于赣江入湖口北支的采样点7,其云模型评价结果为重度富营养,综合营养状态指数评价结果为中营养,评价结果相差较大。综合营养状态指数将水质参数之间的关系定量化,用数学式来表示参数之间的内在联系,以Chl-a为基准参数,根据一些湖泊调查结果中基准参数与其余水质参数的相关关系得到经验公式,从而推导出其余参数的营养状态指数^[7]。云模型基于概率论及模糊集合理论,运用了正态分布和正态隶属函数的普适性,没有强调精确的函数表示,而是利用3个数字特征表示概念的不确定性,通过特定的计算机算法来实现定性概念和定量表示的不确定转换,克服了富营养化评价的随机性及模糊性^[14]。鄱阳湖水体氮磷含量较高,Chl-a含量较低,这是由于鄱阳湖水体流动性大、悬浮泥沙含量较高不利于浮游藻类的生长^[37]。因此,单个Chl-a含量指标并不能真实地反映鄱阳湖水体富营养化的程度。我们构建的云模型中,TN、TP的权重较高,而Chl-a含量权重较低,符合鄱阳湖水质的实际情况^[38]。与此相反,综合营养状态指数对Chl-a含量的依赖度较高,因此两种方法会得出不同的结果。由此也可以看出,尽管综合营养状态指数法使用简便,但没能很好地结合鄱阳湖湿地水体的实际情况,云模型比综合营养状态指数更适用于鄱阳湖湿地水体的富营养化评价,评价结果更客观可靠。

鄱阳湖湿地水质污染因子较多,且各采样点水质污染情况存在较大的差距。云模型除了能较好的反映水质级别的模糊性与随机性外,也可反映出各因子共同作用下的水质状况,不至于因某项参数超标而使综合指标偏高,依照采样点各评价因子的隶属度,可以直观地对鄱阳湖湿地水体营养化程度进行判别^[11]。基于云模型的水体富营养化评价方法不仅可以了解水体富营养化级别,对隶属于同一级别的水体也可以通过确定度的大小而分辨其水体富营养化的程度^[39]。如采样点13、16根据评价结果都属于中度富营养,但采样点16的确定度大于采样点13(表4),根据确定度的大小可以判断采样点16水体富营养化程度更高。由此可见,基于云

模型的水体富营养化程度评价方法可在鄱阳湖湿地水体富营养化评价中得到应用。

表 4 鄱阳湖周边湿地水质营养等级评价结果
Table 4 Eutrophication evaluation for 30 sampling sites in Poyang Lake wetland

采样点 Sample sites	云模型评价法 Cloud model					评价结果 Evaluation results	综合营养状态指数法 Comprehensive trophic level index	
	富营养化级别确定度 Degree of certainty of eutrophication level						TLI 综合营养状态指数 Comprehensive trophic level index	评价结果 Evaluation results
	I	II	III	IV	V			
1	0.04	0.30	0.38	0.05	0.00	轻度富营养	44.25	中营养
2	0.03	0.29	0.46	0.01	0.03	轻度富营养	49.52	中营养
3	0.00	0.05	0.51	0.01	0.04	轻度富营养	58.59	轻度富营养
4	0.04	0.35	0.39	0.05	0.00	轻度富营养	45.92	中营养
5	0.00	0.06	0.49	0.02	0.02	轻度富营养	55.66	轻度富营养
6	0.00	0.26	0.20	0.05	0.00	中营养	52.15	轻度富营养
7	0.07	0.21	0.18	0.15	0.25	重度富营养	40.79	中营养
8	0.00	0.05	0.47	0.01	0.03	轻度富营养	58.90	轻度富营养
9	0.00	0.00	0.33	0.16	0.04	轻度富营养	62.96	中度富营养
10	0.00	0.10	0.57	0.04	0.05	轻度富营养	61.76	中度富营养
11	0.00	0.11	0.56	0.04	0.03	轻度富营养	50.79	轻度富营养
12	0.00	0.02	0.61	0.03	0.03	轻度富营养	53.32	轻度富营养
13	0.00	0.29	0.14	0.30	0.03	中度富营养	49.83	中营养
14	0.00	0.26	0.32	0.13	0.03	轻度富营养	47.13	中营养
15	0.00	0.07	0.17	0.14	0.08	轻度富营养	58.38	轻度富营养
16	0.00	0.02	0.36	0.37	0.03	中度富营养	54.09	轻度富营养
17	0.00	0.16	0.33	0.05	0.05	轻度富营养	53.38	轻度富营养
18	0.00	0.02	0.19	0.32	0.03	中度富营养	54.90	轻度富营养
19	0.01	0.22	0.02	0.30	0.04	中度富营养	51.36	轻度富营养
20	0.02	0.27	0.10	0.23	0.04	中营养	47.35	中营养
21	0.00	0.02	0.33	0.09	0.04	轻度富营养	60.78	中度富营养
22	0.07	0.22	0.17	0.36	0.03	中度富营养	41.15	中营养
23	0.03	0.28	0.04	0.01	0.11	中营养	46.15	中营养
24	0.03	0.27	0.19	0.12	0.03	中营养	44.48	中营养
25	0.01	0.46	0.12	0.05	0.00	中营养	43.02	中营养
26	0.00	0.24	0.44	0.04	0.03	轻度富营养	49.03	中营养
27	0.01	0.25	0.17	0.23	0.06	中营养	53.53	轻度富营养
28	0.02	0.31	0.27	0.02	0.05	中营养	56.46	轻度富营养
29	0.00	0.05	0.30	0.13	0.00	轻度富营养	51.24	轻度富营养
30	0.00	0.11	0.55	0.07	0.00	轻度富营养	50.02	轻度富营养

4 结论

本研究利用云模型对鄱阳湖周边湿地水体富营养化状况进行评价,评价结果显示鄱阳湖周边湿地水体总体上呈轻度富营养化状态。云模型在实现水体富营养化等级和评价指标数值之间的不确定转换方面具有优势,保留了富营养化评价过程中的随机性和模糊性,可以客观真实地反映鄱阳湖湿地水体富营养化状态。

参考文献 (References):

- [1] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康研究进展. 生态学杂志, 2001, 20(3): 31-36.
- [2] Mcinnes R J. Recognizing ecosystem services from wetlands of international importance: an example from Sussex, UK. Wetlands, 2013, 33(6):

- 1001-1017.
- [3] 徐丽婷, 阳文静, 游清徽, 杨涛, 黄琪, 王野乔. IBI 应用于湿地生态健康评价的研究进展. 江西师范大学学报: 自然科学版, 2017, 41(1): 104-110.
- [4] Abell J M, Özkundakci D, Hamilton D P, Miller S D. Relationships between land use and nitrogen and phosphorus in New Zealand lakes. *Marine and Freshwater Research*, 2011, 62(2): 162-175.
- [5] 武士蓉, 徐梦佳, 陈禹桥, 刘艳霞, 李志明, 赵彦伟. 基于水质与浮游生物调查的汉石桥湿地富营养化评价. 环境科学学报, 2015, 35(2): 411-417.
- [6] 鲍广强, 尹亮, 余金龙, 刘畅, 邱小琮. 基于综合营养状态指数和 BP 神经网络的黑河富营养化评价. 水土保持通报, 2018, 38(1): 264-269.
- [7] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范(第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [8] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. 中国环境监测, 2002, 18(5): 47-49.
- [9] Pan J, Liu Y, Li C H, Wang J. Eutrophication assessment of reservoir based on matter-element and extension. *Advanced Materials Research*, 2012, 599: 229-232.
- [10] Yan H Y, Huang Y, Wang G Y, Zhang X R, Shang M S, Feng L, Dong J H, Shan K, Wu D, Zhou B T, Yuan Y. Water eutrophication evaluation based on rough set and petri nets: a case study in Xiangxi-River, Three Gorges Reservoir. *Ecological Indicators*, 2016, 69: 463-472.
- [11] 丁昊, 王栋. 基于云模型的水体富营养化程度评价方法. 环境科学学报, 2013, 33(1): 251-257.
- [12] 尹星, 李如忠, 杨继伟, 钱靖, 董玉红. 基于延拓盲数的湖库水体富营养化评价模型. 环境科学学报, 2014, 34(4): 1045-1053.
- [13] 赵建平, 姚天雨, 王明虎, 戴东波, 张振洋. 基于云模型的长沙市大气环境质量评价. 环境工程, 2017, 35(11): 149-154.
- [14] 李德毅, 刘常显. 论正态云模型的普适性. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28-34.
- [15] 杨洪, 徐小飞. 基于云模型旅游发展绩效评估——以武陵山片区为例. 经济地理, 2018, 38(2): 220-224.
- [16] 张秋文, 章永志, 钟鸣. 基于云模型的水库诱发地震风险多级模糊综合评价. 水利学报, 2014, 45(1): 87-95.
- [17] Han X X, Chen X L, Feng L. Four decades of winter wetland changes in Poyang Lake based on Landsat observations between 1973 and 2013. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 156: 426-437.
- [18] Yang W J, You Q H, Fang N, Xu L T, Zhou Y, Wu N X, Ni C Y, Liu Y, Liu G H, Yang T, Wang Y Q. Assessment of wetland health status of Poyang Lake using vegetation-based indices of biotic integrity. *Ecological Indicators*, 2018, 90: 79-89.
- [19] 夏少霞, 于秀波, 刘宇, 贾亦飞, 张广帅. 鄱阳湖湿地现状问题与未来趋势. 长江流域资源与环境, 2016, 25(7): 1103-1111.
- [20] 徐丽婷, 阳文静, 吴燕平, 游清徽, 黄琪, 徐羽, 王野乔. 基于植被完整性指数的鄱阳湖湿地生态健康评价. 生态学报, 2017, 37(15): 5102-5110.
- [21] 胡春华, 周文斌, 肖化云, 龙智勇, 刘娟娟. 鄱阳湖富营养化现状及其正态分布特征分析. 人民长江, 2010, 41(19): 64-68.
- [22] 毛玉婷, 周晓宇, 王毛兰. 枯水期鄱阳湖水体富营养化状态评价. 南昌大学学报: 理科版, 2014, 38(6): 596-599.
- [23] 王志强, 田娜, 缪建群, 王海伦, 王海, 黄国勤. 基于组合可拓综合分析法的鄱阳湖流域水质富营养化评价. 生态学报, 2017, 37(12): 4227-4235.
- [24] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [25] 姜雅萍. 基于水质标识指数法的湖泊富营养化评价方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [26] 刘林峰, 周先华, 高健, 刘梅群, 潘晓斌, 贺磊, 蔡世耀, 赵以军, 潘超, 王卉君, 张佳敏, 叶有旺, 刘伟. 神农架大九湖湿地浮游植物群落结构特征及营养状态评价. 湖泊科学, 2018, 30(2): 417-430.
- [27] 邓大鹏, 刘刚, 李学德, 汤锋, 花日茂. 湖泊富营养化综合评价的坡度加权评分法. 环境科学学报, 2006, 26(8): 1386-1392.
- [28] 杨洁, 王国胤, 刘群, 郭毅可, 刘悦, 淦文燕, 刘玉超. 正态云模型研究回顾与展望. 计算机学报, 2018, 41(3): 724-744.
- [29] 陈昊, 王代萍, 张莉. 扩展的正态云发生器. 湖北大学学报: 自然科学版, 2011, 33(2): 251-255.
- [30] 刘桂花, 宋承祥, 刘弘. 云发生器的软件实现. 计算机应用研究, 2007, 24(1): 46-48.
- [31] 陈小华, 李小平, 王菲菲, 陈无歧, 刘晓臣. 苏南地区湖泊群的富营养化状态比较及指标阈值判定分析. 生态学报, 2014, 34(2): 390-399.
- [32] Liu W Z, Li S Y, Bu H M, Zhang Q F, Liu G H. Eutrophication in the Yunnan Plateau lakes: the influence of lake morphology, watershed land use, and socioeconomic factors. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, 19(3): 858-870.
- [33] Beyhan M, Kaçikoç M. Evaluation of water quality from the perspective of eutrophication in lake Eğirdir, Turkey. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2014, 225(7): 1994.
- [34] Liu W Z, Zhang Q F, Liu G H. Lake eutrophication associated with geographic location, lake morphology and climate in China. *Hydrobiologia*, 2010, 644(1): 289-299.
- [35] Liu J T, Fang S W, Sun J J. Nutrient zoning of Poyang Lake based on aquatic eco-environment indices. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(1): 61.
- [36] Guo J B, Zhang C J, Zheng G C, Xue J, Zhang L H. The establishment of season-specific eutrophication assessment standards for a water-supply reservoir located in Northeast China based on chlorophyll-a levels. *Ecological Indicators*, 2018, 85: 11-20.
- [37] 陈晓玲, 张媛, 张翔, 陈莉琼, 陆建忠. 丰水期鄱阳湖水体中氮、磷含量分布特征. 湖泊科学, 2013, 25(5): 643-648.
- [38] 吴召仕, 张路, 刘宝贵, 陈宇炜. 鄱阳湖丰水期水体中叶绿素 a 含量空间分布及其与环境因子的关系. 湿地科学, 2014, 12(3): 286-292.
- [39] 胡尊芳, 孙建峰, 宋印胜, 王仕昌, 韩玉珍. 基于云模型的东平湖枯水期地下水水质评价. 水资源保护, 2016, 32(5): 74-78.