

殷雪妍,严广寒,汪星,等.不同水质评价方法在通江湖泊中的适用性:以洞庭湖为例[J].环境工程技术学报,2023,13(3):1070-1078.

YIN X Y, YAN G H, WANG X, et al. Applicability of different water quality evaluation methods in river-connected lakes: a case study of Dongting Lake[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(3): 1070-1078.

## 不同水质评价方法在通江湖泊中的适用性 ——以洞庭湖为例

殷雪妍<sup>1,2,3</sup>, 严广寒<sup>1,2,3</sup>, 汪星<sup>1,2,3\*</sup>, 黄代中<sup>4</sup>, 李利强<sup>4</sup>

1.湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 中国环境科学研究院

2.国家环境保护饮用水水源地保护重点实验室, 中国环境科学研究院

3.国家环境保护洞庭湖科学观测研究站, 中国环境科学研究院

4.湖南省洞庭湖生态环境监测中心

**摘要** 三峡工程运行使得通江湖泊与长江原有的江湖关系发生明显变化,进而影响通江湖泊水环境,如何有效评价长江流域最大的通江湖泊洞庭湖的水质显得尤为重要。在洞庭湖湖区设置15个采样点,选取9项水质参数,运用单因子指数法、主成分分析(PCA)法、内梅罗污染指数法及Shannon-Weaver多样性指数法对2019年1—12月洞庭湖水质进行综合评价。结果显示,单因子指数法可快速准确评价水质类别,内梅罗污染指数法计算简单并在水质评价中得到广泛应用,但这2种方法均无法准确给出不同采样点间受污染程度的差异,而Shannon-Weaver多样性指数法评价结果与部分采样点实际情况不符。综合考虑不同评价方法的适用性和准确性,推荐使用PCA法开展洞庭湖水质评价,该方法既能反映各主要污染指标及其贡献率,也能对不同区域水体受污染程度进行排序,且评价结果客观实际,更适用于洞庭湖区域的水质评价工作。但是在水质评价管理工作中,建议结合单因子指数法对水质类别进行判定,以保证管理的实效性。

**关键词** 洞庭湖;水质评价;单因子指数法;内梅罗污染指数法;主成分分析(PCA)法

**中图分类号**: X524 **文章编号**: 1674-991X(2023)03-1070-09 **doi**: 10.12153/j.issn.1674-991X.20220397

## Applicability of different water quality evaluation methods in river-connected lakes: a case study of Dongting Lake

YIN Xueyan<sup>1,2,3</sup>, YAN Guanghan<sup>1,2,3</sup>, WANG Xing<sup>1,2,3\*</sup>, HUANG Daizhong<sup>4</sup>, LI Liqiang<sup>4</sup>

1.National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration,  
Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2.State Environmental Protection Key Laboratory of Drinking Water Source Protection,  
Chinese Research Academy of Environmental Sciences

3.State Environmental Protection Scientific Observation and Research Station for Lake Dongting,  
Chinese Research Academy of Environmental Sciences

4.Ecological and Environmental Monitoring Center of Dongting Lake, Hunan Province

**Abstract** The operation of the Three Gorges Project has significantly changed the relationship between the river-connected lakes and the Yangtze River, thus affecting the water environment of the river-connected lakes. It was particularly important to effectively evaluate the water quality of Dongting Lake, the largest river-connected Lake in the Yangtze River basin. In 2019, monthly monitoring data were collected at 15 sampling sites in Dongting Lake, including nine water quality factors. The single factor index method, principal components analysis (PCA) method, Nemerow pollution index method and Shannon-Weaver biodiversity index method were used to evaluate the water quality of Dongting Lake. The single factor index method could quickly and accurately evaluate water quality categories, and the Nemerow pollution index method was simple to calculate and widely used in water quality evaluation. However, the two methods could not accurately give the difference of pollution degree between different

收稿日期:2022-04-26

基金项目:社会公益类科研机构改革专项项目(2020-JY-009);洞庭湖江湖生态监测重点站项目(JJ2021)

作者简介:殷雪妍(1994—),女,工程师,研究方向为湖库生态保护与修复, yinx@ craes.org.cn

\* 责任作者:汪星(1983—),男,副研究员,研究方向为湖库富营养化控制与治理, wangxing@craes.org.cn

sampling points, and the Shannon-Weaver diversity index evaluation results were not consistent with the actual situation of some sampling points. To comprehensively consider the applicability and accuracy of different evaluation methods, it was recommended to use the PCA method to carry out Dongting Lake water quality evaluation. PCA method could not only reflect the main pollution index and its contribution rate, but also rank the pollution degree of different regional water bodies, and the evaluation results were objective and practical, so it was more suitable for the water quality evaluation of Dongting Lake region. However, in the daily work of water quality evaluation management, it was suggested that the single factor index method should be combined to determine the water quality categories, so as to ensure the effectiveness of management.

**Key words** Dongting Lake; water quality evaluation; single factor index method; Nemer pollution index method; principal components analysis (PCA) method

通江湖泊指与河流相通,有江河水自由入湖或湖水自由入江河的湖泊。我国长江两岸 10 km<sup>2</sup> 以上的湖泊多数原为通江湖泊,数量超过 100 个,但由于大坝、堤坝、水闸的修建,目前绝大多数通江湖泊与长江的自然联系已被切断。三峡工程运行以来,持续影响着长江中下游情势,使得通江湖泊与长江原有的江湖关系发生明显变化,进而影响通江湖泊水环境。根据 2010 年原环境保护部全国重点湖泊水库生态安全调查及评估专项的研究结果<sup>[1]</sup>,水文情势变化及其带来的一系列影响成为洞庭湖等通江湖泊的重要生态安全问题,洞庭湖出现湿地面积萎缩、湿地生态服务功能下降等问题,水体处于中-轻度富营养化水平,局部湖区发生水华,水质恶化的风险不容忽视。同时,长江经济带及洞庭湖流域社会发展可能增加的水资源消耗、常规和特征污染物排放,使得洞庭湖来水的水量和水质堪忧。因此,有效开展洞庭湖水环境质量评价尤为重要和迫切。

科学有效评估水环境现状及时空变化特征是通江湖泊水污染防治的基础工作,可为通江湖泊水环境治理与管理提供科学依据<sup>[2]</sup>。目前,国内外用于评价湖泊水质状况的方法较多,涵盖物理、化学及生物等多种类型,如基于分级标准的单因子指数评价法<sup>[3]</sup>、内梅罗污染指数法<sup>[4]</sup>、营养状态指数法<sup>[5-6]</sup>、基于统计学分析的主成分分析(PCA)法<sup>[3,7]</sup>、灰色关联法<sup>[3]</sup>、基于水生生物群落分布的物种多样性指数及耐污指数法等<sup>[8-9]</sup>。近年来,研究人员采用不同评价方法对河流湖库开展水质评价,如刘宇等<sup>[3]</sup>利用单因子指数评价法、PCA法和灰色关联法开展云南高原湖泊抚仙湖、星云湖和杞麓湖水质污染及变化趋势研究,结果显示单因子指数评价结果较另外 2 种方法差,且 PCA 法所得结果稍优于灰色关联法;夏凡等<sup>[7]</sup>对丹江口水库入库河流开展水质评价,结果表明不同评价方法的河流水质状况评价结果和污染因子排序略有不同,单因子评价法只能给出评价类

别,综合污染指数法和 PCA 法适用于不同时空的水质变化比较。然而,针对通江湖泊开展基于物理、化学及生物的多类型综合水质评价和方法的适用性分析鲜见报道。笔者选用广泛应用的单因子指数法、PCA法、内梅罗污染指数法和 Shannon-Weaver 多样性指数法,基于洞庭湖 2019 年监测数据开展水质评价,并探讨不同评价方法对洞庭湖水质评价的准确性和适用性,以期构建一套准确度高、适应性强的水质评价方法,为今后通江湖泊水质评价提供方法借鉴以及湖区精准管控措施制定提供支撑。

## 1 研究区与研究方法

### 1.1 研究区概况

洞庭湖位于长江中游荆江南岸,跨湖南、湖北两省,由东洞庭湖、西洞庭湖和南洞庭湖组成。洞庭湖北部吸纳长江的藕池、松滋、太平(“三口”)来水,西部和南部接纳湘、资、沅、澧(“四水”)入湖,由东北部的城陵矶注入长江。洞庭湖流域面积为 25.72 万 km<sup>2</sup>,平水期湖泊面积为 2 625 km<sup>2</sup>,总容积为 174 亿 m<sup>3</sup>,平均水深为 6.7 m<sup>[10]</sup>,是我国第二大淡水湖,也是长江流域乃至全国重要的淡水资源储备地和饮用水水源地。洞庭湖流域排放污染物的重点行业包括造纸、纺织、石油化工、食品和机械等,流域农业面源污染问题也较为突出<sup>[11]</sup>。此外,洞庭湖环湖覆盖岳阳市、益阳市、常德市范围内的 20 个县(市),区域内人类活动频繁,大量工业废水与生活污水直接或间接排放,造成洞庭湖水体氮、磷超标<sup>[12]</sup>。尽管近年来湖南省政府大力推动洞庭湖生态环境综合治理并取得积极成效,洞庭湖水质已趋稳向好但未得到根本性改善,富营养化趋势未得到有效遏制<sup>[13]</sup>。

### 1.2 采样点与采样方法

在洞庭湖设置 15 个采样点,其中,入湖河流采样点 4 个,分别为樟树港(S1)、万家嘴(S2)、坡头(S3)和沙河口(S4);西洞庭湖区 4 个,分别是南嘴

(S5)、蒋家嘴(S6)、小河嘴(S7)和万子湖(S8);南洞庭湖区 2 个,分别为横岭湖(S9)和虞公庙(S10);东洞庭湖区 4 个,分别为鹿角(S11)、东洞庭湖(S12)、岳阳楼(S13)和大小西湖(S14);出湖口采样点 1 个(S15)。采样点分布如图 1 所示。

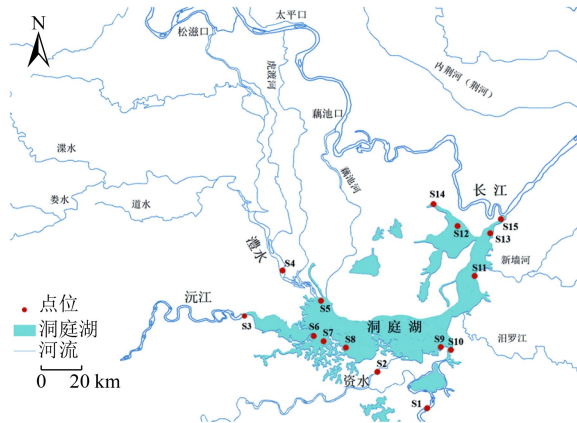


图 1 洞庭湖采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Dongting Lake

### 1.3 样品测试方法

采样时间为 2019 年 1—12 月,每月采样 1 次。采用多参数水质分析仪(美国维赛 YSI professional plus)现场测定水温、pH、溶解氧(DO)浓度等指标;采集表层 0.5 m 水样 1 L,带回实验室用于测定高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、化学需氧量(COD<sub>Cr</sub>)、五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)及总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)浓度。参照《水和废水监测分析方法》<sup>[14]</sup>,采用酸性高锰酸钾法测定 COD<sub>Mn</sub>,重铬酸钾法测定 COD<sub>Cr</sub>,碱性过硫酸钾-紫外分光光度法测定 TN 浓度,钼酸铵分光光度法测定 TP 浓度,纳氏试剂分光光度法测定 NH<sub>3</sub>-N 浓度。另取 1 L 表层水样用鲁哥试剂固定藻类带回实验室,采用显微镜法测定藻细胞密度与种类。

### 1.4 水质评价方法

#### 1.4.1 单因子指数法

单因子指数法是将每个污染因子单独进行评价,根据评价时段内该断面参评的指标中类别最高的一项来确定该断面水质类别。在所有参评水质指标中,如有 1 项指标超标,则所属水域不符合相应的水质标准。

#### 1.4.2 内梅罗污染指数法

内梅罗污染指数法是一种兼顾极值和平均值的计权型多因子评价指数,该方法通过将各水质监测指标数据与 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》进行对比,得到各指标的污染指数,然后采用数学运算(公式见文献[15])得到水质综合指数( $I$ ),并用

$I$ 作为水质评价的依据。 $I$ 划分标准: $I < 1$ ,清洁; $1 \leq I < 2$ ,轻污染; $2 \leq I < 3$ ,中污染; $3 \leq I < 5$ ,重污染; $I \geq 5$ ,严重污染。

#### 1.4.3 主成分分析法

PCA 是把多个指标变量转变成少数几个综合指标,通过综合指标反映原来的多个指标变量携带的大部分信息,其目的是对高维变量进行处理达到降维效果<sup>[11]</sup>。主要步骤如下:1)建立原始变量矩阵  $X$ ;2)对  $X$  进行标准化处理;3)计算标准化数据的相关系数矩阵及其特征根,确定主成分个数;4)确定主成分  $F_i(i=1, 2, \dots, n)$ ;5)确定综合评价函数( $F$ )。 $F_i$ 及  $F$  表达式如下:

$$F_1 = a_{11}ZX_1 + a_{21}ZX_2 + \dots + a_{n1}ZX_n \quad (1)$$

$$F_2 = a_{12}ZX_1 + a_{22}ZX_2 + \dots + a_{n2}ZX_n \quad (2)$$

$$F_n = a_{1m}ZX_1 + a_{2m}ZX_2 + \dots + a_{nm}ZX_n \quad (3)$$

$$F = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n} F_1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n} F_2 + \dots + \frac{\lambda_n}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n} F_n \quad (4)$$

式中: $a_{1m}$ 、 $a_{2m}$ 、 $\dots$ 、 $a_{nm}$ 为  $X$  的协方差矩阵的特征值对应的特征向量; $ZX_1$ 、 $ZX_2$ 、 $\dots$ 、 $ZX_n$ 为  $X$  经过标准化处理后的值; $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\dots$ 、 $\lambda_n$ 分别为  $ZX_1$ 、 $ZX_2$ 、 $\dots$ 、 $ZX_n$ 的特征值; $m$ 为样本个数; $n$ 为评价因子个数。

#### 1.4.4 Shannon-Weaver 多样性指数法

Shannon-Weaver 多样性指数( $H'$ )<sup>[16]</sup>主要从浮游藻类多样性的角度评价水质状况,计算公式如下:

$$H' = - \sum P_j \log_2 P_j \quad (5)$$

$$P_j = n_j / N \quad (6)$$

式中: $P_j$ 为第  $j$  种藻类个体数与总个体数的比值; $n_j$ 为第  $j$  种个体数; $N$ 为所有藻类的个体数。 $H'$ 评价标准<sup>[16]</sup>: $H' > 3$ ,水体清洁; $H'$ 为 2~3,轻度污染; $H'$ 为 1~2,中度污染; $H'$ 为 0~1,严重污染。

### 1.5 数据分析

运用单因子指数法、内梅罗污染指数法、PCA 法和 Shannon-Weaver 多样性指数法进行水体受污染程度分析,根据洞庭湖水域环境功能与保护目标<sup>[17]</sup>,选择 GB 3838—2002 中 III 类标准作为水质标准, COD<sub>Mn</sub>、COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TN 以及 TP 的水质标准分别为 6、20、4、1、1、0.05 mg/L;在进行 PCA 分析前对 DO 浓度进行标准化处理。

采用 Excel 2013、Origin 2021 和 SPSS 20 软件进行数据的处理和分析。洞庭湖枯水期为 1—3 月、12 月,平水期为 4—5 月、10—11 月,丰水期为 6—9 月,不同水期指标值取月均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单因子指数评价法结果

采用单因子指数法评价的洞庭湖各采样点的水

质结果见表1和表2。整体来看,2019年洞庭湖的首要污染物为TN,其次是TP,这与《长江三峡工程生态与环境监测公报(2015—2018)》<sup>[13]</sup>和张光贵等<sup>[17]</sup>的研究结果一致。

表1 2019年洞庭湖各采样点水质单因子指数评价结果(TN不参与评价)

Table 1 Single factor evaluation results of water quality at different sampling points in Dongting Lake in 2019 (TN was not involved in the evaluation)

湖区	采样点	枯水期		平水期		丰水期		年均值	
		水质类别	主要污染物	水质类别	主要污染物	水质类别	主要污染物	水质类别	主要污染物
入湖河流	S1	II		II		II		II	
	S2	II		II		II		II	
	S3	II		II		II		II	
	S4	II		II		II		II	
西洞庭湖	S5	IV	TP	IV	TP	IV	TP	IV	TP
	S6	III	TP	IV	TP	IV	TP	IV	TP
	S7	IV	TP	IV	TP	IV	TP	IV	TP
	S8	III	TP	IV	TP	IV	TP	IV	TP
南洞庭湖	S9	IV	TP	IV	TP	IV	TP	IV	TP
	S10	IV	TP	IV	TP	IV	TP	IV	TP
东洞庭湖	S11	IV	TP	IV	TP	IV	TP	IV	TP
	S12	IV	TP	IV	TP	IV	TP	IV	TP
	S13	IV	TP	IV	TP	IV	TP	IV	TP
	S14	IV	TP, COD <sub>Cr</sub>	V	TP, COD <sub>Cr</sub> , COD <sub>Mn</sub>	V	TP, COD <sub>Cr</sub> , COD <sub>Mn</sub>	IV	TP, COD <sub>Cr</sub>
出湖口	S15	IV	TP	IV	TP	IV	TP	IV	TP

表2 2019年洞庭湖各采样点TN和TP评价结果

Table 2 TN and TP evaluation results of sampling sites in Dongting Lake in 2019

水期	主要污染物	不同水质类别对应的采样点			
		III类	IV类	V类	劣V类
年均值	TN		S4, S7	S1, S5, S6, S8~S15	S2
	TP		S5~S15		
枯水期	TN		S7	S3~S5, S8, S9, S11~S15	S1, S2, S10
	TP	S6, S8	S5, S7, S9~S15		
平水期	TN		S3, S5~S9, S13	S1, S4, S10, S11, S14, S15	S2
	TP		S5~S7, S9~S13, S15	S8, S14	
丰水期	TN		S1, S4, S7, S13, S15	S2, S3, S5, S6, S8~S12, S14	
	TP		S5~S13, S15	S14	

从空间变化来看, TN不参与评价时, 入湖河流各采样点均达到II类水质, 湖区各采样点均达到IV类水质, 定类项目为TP和COD<sub>Cr</sub>(表1)。TN参与评价时, 从年均值来看, S4和S7采样点为IV类水质, S2采样点为劣V类, 其他采样点均为V类, 定类项目为TN(表2)。S2采样点承接上游资水来水, 其TN浓度超标。不同湖区TN和TP污染程度依次为东洞庭湖>南洞庭湖>西洞庭湖, 其TN浓度平均值分别为1.78、1.68、1.55 mg/L, TP浓度平均值分别为0.072、0.067、0.061 mg/L, 不同湖区TN和TP污染程度与王丽婧等<sup>[18]</sup>的研究结果一致。

从水期变化来看, TN不参与评价时, 湖区除了S14采样点平水期和丰水期为V类水质外, 其他采样点各水期均达到IV类水质, 定类项目为TP(表1); TN参与评价时, 除了S1与S10采样点枯水期、S2采样点枯水期和平水期为劣V类水质外, 其他采样点各水期水质均为IV类或V类, 定类项目为TN(表2)。

### 2.2 内梅罗污染指数评价结果

根据各水质监测指标的实测浓度, 计算洞庭湖

2019 年各采样点的  $I$ , 结果如图 2 所示。从水期变化来看, 洞庭湖各采样点水质总体变化平稳, 入湖河流和东洞庭湖丰水期水质略好于平水期, 枯水期水质较差。从空间变化来看, S14 采样点污染程度相对较高, S2 采样点次之, 其余采样点污染程度相对较轻, S4 和 S7 采样点水质较好。入湖河流中 S2 采样点  $I$  最高, 说明资水来水水质相对较差; 湖区 S14 采样点水质最差, 主要原因是该采样点位于岳阳市君山区钱粮湖镇, 属于回水区, 水体流速缓慢, 且营养负荷堆积程度较高; S4 采样点  $I$  最低, 说明澧水来水水质良好。

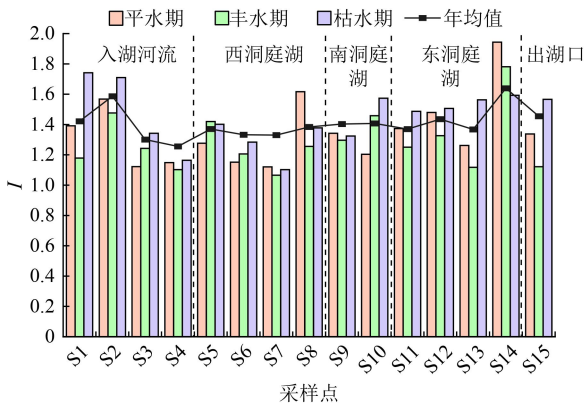


图 2 2019 年洞庭湖各采样点  $I$  变化

Fig.2 Nemerow pollution index of Dongting Lake sampling sites in 2019

整体来看, 洞庭湖各采样点  $I$  为 1.25~1.64, 水质污染程度均为轻污染, 不同湖区污染程度表现为东洞庭湖>南洞庭湖>入湖河流>西洞庭湖, 这与张

光贵等<sup>[17]</sup>的研究结果一致。张光贵等<sup>[17]</sup>对 1996—2013 年洞庭湖水质进行评价时, 得到  $I$  为 1.10~2.20, 平均值为 1.63, 水质属于轻污染到中污染, 可见, 2019 年洞庭湖水质相较于 1996—2013 年有所改善。

### 2.3 主成分分析评价结果

#### 2.3.1 2019 年不同水期主成分分析

将不同水期各采样点水质监测数据标准化处理后, 在 SPSS 20 软件中进行主成分分析。为使每个主成分的意义更加明确, 采用 Varimax 最大方差法对因子进行旋转, 按照特征值( $\lambda$ )大于 1 的原则, 每个水期均提取出了 3 个主成分, 其中主成分 1(PC1) 携带的信息最多, 丰水期、平水期和枯水期的 PC1 贡献率分别达到 54.27%、59.04% 和 36.13%, PC1、主成分 2(PC2) 和主成分 3(PC3) 的累计贡献率分别达到 83.07%、88.39% 和 79.85%。

各水期监测指标旋转后提取的前 3 个主成分的因子载荷量如表 3 所示。由表 3 可知, 丰水期与 PC1 关联度较高的是水温、DO 浓度、 $COD_{Mn}$ 、 $COD_{Cr}$ 、 $BOD_5$  和 TP 浓度, 载荷量为 0.79~0.94, 与 PC2 和 PC3 关联度较高的分别是 pH 和  $NH_3-N$  浓度, 其载荷量分别为 0.73 和 0.72; 平水期与 PC1 关联度较高的是水温、DO 浓度、 $COD_{Mn}$ 、 $COD_{Cr}$ 、 $BOD_5$ 、 $NH_3-N$  和 TP 浓度, 载荷量为 0.74~0.95, 与 PC2 关联度较高的是 pH, 其载荷量为 -0.83, 结果与丰水期基本一致; 枯水期与 PC1 关联度较高的是  $COD_{Mn}$ 、 $COD_{Cr}$  和  $NH_3-N$  浓度, 其载荷量分别为 0.79 和 0.71, 与 PC3 关联度较高的是水温, 其载荷量

表 3 不同水期旋转后的因子载荷量

Table 3 Rotated component matrix in different water periods

因子	丰水期			平水期			枯水期		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
水温	<b>-0.86</b>	-0.16	-0.30	<b>-0.83</b>	0.05	0.44	-0.11	0.59	<b>0.72</b>
pH	0.24	<b>0.73</b>	0.52	0.17	<b>-0.83</b>	0.45	-0.40	0.46	0.33
DO浓度	<b>0.79</b>	-0.22	-0.33	<b>0.82</b>	-0.21	0.43	-0.61	0.55	-0.17
$COD_{Mn}$	<b>0.95</b>	-0.18	-0.10	<b>0.94</b>	0.23	0.09	<b>0.79</b>	0.57	-0.12
$COD_{Cr}$	<b>0.94</b>	-0.18	-0.12	<b>0.95</b>	0.15	0.11	<b>0.71</b>	0.68	-0.03
$BOD_5$	<b>0.89</b>	0.21	0.18	<b>0.88</b>	-0.26	0.04	0.49	0.60	-0.53
$NH_3-N$ 浓度	-0.11	-0.45	<b>0.72</b>	<b>0.89</b>	0.23	0.12	<b>0.77</b>	-0.13	0.44
TP浓度	<b>0.94</b>	-0.05	0.02	<b>0.74</b>	0.19	-0.38	0.54	-0.47	-0.37
TN浓度	0.22	0.70	-0.37	-0.18	0.69	0.66	0.68	-0.41	0.50
特征值	4.88	1.41	1.18	5.31	1.45	1.19	3.25	2.41	1.53
方差百分比/%	54.27	15.68	13.12	59.04	16.12	13.23	36.13	26.73	16.99
累计方差百分比/%	54.27	69.95	83.07	59.04	75.16	88.39	36.13	62.86	79.85

注: 黑体数字为环境因子在不同主成分中的载荷超过 0.70 的值。

为0.72。

根据式(1)、式(2),得出15个采样点不同水期的主成分得分(图3),即能定量描述各采样点的水质污染程度。由图3可知,各水期S14采样点F1显著高于F3,表明该采样点受水温、DO浓度、COD<sub>Mn</sub>、COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N和TP浓度的影响较强。

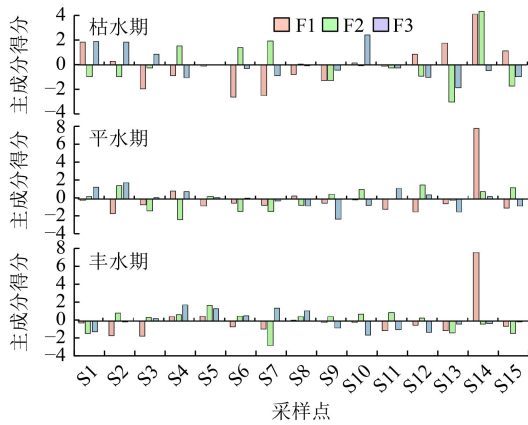


图3 2019年不同水期各采样点主成分得分分布

Fig.3 Principal component score distribution of each sampling section in different periods in 2019

### 2.3.2 2019年年均值主成分分析

2019年监测指标旋转后按照λ大于1的原则提取前2个主成分的因子载荷量,结果如表4所示。由表4可知,PC1携带的信息最多,贡献率达57.27%,PC1、PC2累计贡献率达77.21%。与PC1关联度较高的是水温、DO浓度、COD<sub>Mn</sub>、COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub>和TP浓度,其载荷量为0.70~0.98;与PC2关联度较高的是pH和TN浓度,其载荷量分别为-0.74和0.82。由此可知,PC1反映来自工业废水和生活污水的有机污染物及磷营养盐的污染程度,PC2反映水体中理化特性和氮营养盐的污染程度。

表4 年均值旋转后的因子载荷量

Table 4 Rotated component load matrix of annual mean

项目	PC1	PC2
水温	-0.86	0.21
pH	0.25	-0.74
DO浓度	0.77	-0.23
COD <sub>Mn</sub>	0.96	0.17
COD <sub>Cr</sub>	0.98	0.14
BOD <sub>5</sub>	0.92	-0.23
NH <sub>3</sub> -N浓度	0.61	0.59
TN浓度	-0.06	0.82
TP浓度	0.82	0.17
特征值	5.15	1.79
方差百分比/%	57.27	19.94
累计方差百分比/%	57.27	77.21

注:同表3。

洞庭湖各采样点的主成分得分分布如图4所示。由图4可知,主成分得分在洞庭湖各采样点间呈显著的空间变化。S14采样点F1显著高于F2,表明该采样点水质受水温、DO浓度、COD<sub>Mn</sub>、COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub>和TP浓度的影响较强,而受pH和TN浓度的影响较弱。S1、S2、S3和S4采样点分别为湘、资、沅、澧(“四水”)来水的监测断面,F2显著高于其他采样点,表明“四水”来水TN浓度较高。该结果与张光贵等<sup>[17]</sup>得出的“四水”是洞庭湖TN的主要来源以及秦迪岚等<sup>[16]</sup>得出的“四水”TN输入占洞庭湖总输入量的74%的结论一致。由此可见,主成分得分的筛选结果与各采样点的实际水质状况基本一致。

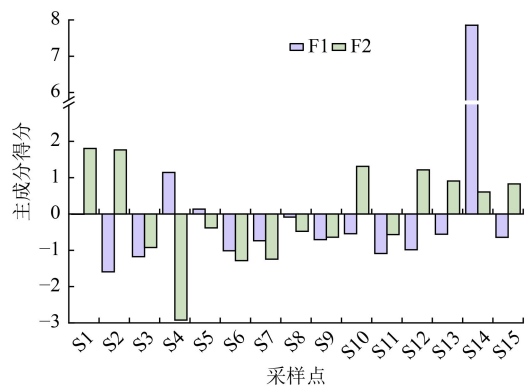


图4 2019年洞庭湖各采样点的主成分得分分布

Fig.4 Spatial distribution of principal component scores in sampling sections of Dongting Lake in 2019

### 2.3.3 主成分分析评价结果

图5为洞庭湖PCA评价结果。主成分得分为-1.08~5.98,15个采样点中S14采样点的水质最差,S1、S4、S5和S10采样点次之,S3采样点的水质最好。从评价结果来看,对S14采样点水质影响最显著的因子是COD<sub>Mn</sub>和COD<sub>Cr</sub>,表明该采样点受有机污染严重。其原因是湖南省第二大经济体岳阳市坐落于此,人类活动频繁,产生的工业废水和生活污水对水质造成影响;另外S14采样点属于回水区域,因其独特的地理位置,容易出现污染物富集<sup>[19]</sup>。钟振宇等<sup>[20]</sup>研究表明,西洞庭湖区水质污染程度最轻,而南洞庭湖区和东洞庭湖区的水质污染相对较重,这与本研究的结果一致。

### 2.4 Shannon-Weaver多样性指数评价结果

2019年不同水期洞庭湖各采样点H'变化如图6所示。由图6可知,各采样点H'年均值为1.70~2.71,平、丰、枯3个水期和年均值分别为2.85、1.40、2.49和2.24。依据H'的水质评价标准,洞庭湖总体处于轻度污染状态。从水期变化来看,丰水期水质最差,

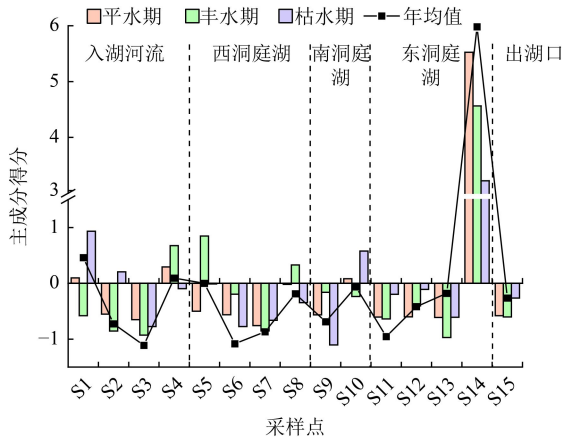


图 5 2019 年洞庭湖 PCA 评价结果

Fig.5 Evaluation results of Dongting Lake by PCA in 2019

处于中度污染状态,平水期和枯水期处于轻度污染状态。从空间变化来看,丰水期入湖河流水质优于湖区。整体来看,水质污染程度为南洞庭湖>西洞庭湖>入湖河流>东洞庭湖,其中东洞庭湖的 S14 采样点水质较好,这与前 3 种方法得到的评价结果不一致。S14 采样点属于回水区域,该区域水文水质条件促进藻类生长,部分蓝绿藻如铜绿微囊藻成为优势类群,引发蓝藻水华,最终导致该区域藻类生物多样性降低,而非评价结果中显示的多样性较高。

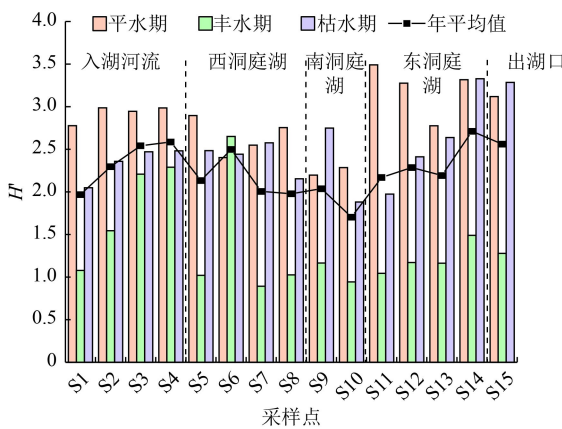


图 6 2019 年不同水期洞庭湖各采样点 H' 变化

Fig.6 Changes of H' at different water quality monitoring sections of Dongting Lake in different periods in 2019

### 2.5 4 种评价方法的适用性对比分析

研究结果显示,4 种评价方法对洞庭湖水质评价的结果整体上存在一致性,具体优缺点表现在: 1) 单因子指数法较为简单,操作性强,能够快速确定超标指标,对于单个指标有较好的评价意义,但其一票否决的判定方式,使评价结果过于保守。本研究结果显示, TN 不参与评价时,入湖河流各采样点均达到 II 类水质,湖区各采样点均达到 IV 类水质,采用该方法无法准确区分处于同一水质类别的采样点污染程度,以及优先防控次序。2) 内梅罗污染指数法是

GB/T 14848—93《地下水环境质量标准》推荐的水质评价方法,计算简单且在水质评价中得到了广泛应用,但该方法考虑最大污染因子的影响,评价结果取单因子指数的平均值,过分依赖最大值,忽略了次高值,造成评价指数偏小,结果过于乐观。本研究评价结果显示各采样点水质均为轻度污染,而单因子评价结果显示各采样点的水质类别为 II~V 类不等,该方法无法准确给出不同采样点的水质类别及其受污染程度差异。3) PCA 法能从众多变量中识别并筛选出主要污染因子,减少工作复杂度,各主成分的权数为其贡献率,这样确定权数较为客观、合理,克服了某些评价方法中人为确定权数的缺陷,在保留原始主要信息的同时能有效减少主观误差,但 PCA 法是基于数理统计的评价方法,适用于范围较大,指标较多的水质评价,难以对少量或单组数据进行评价,且不能确定水质类别<sup>[21]</sup>。本研究中,PCA 法将 9 项水质指标简化为 2 个主成分,解释了 80% 以上的结果,较为客观地反映了洞庭湖水质的基本情况。4) 浮游藻类作为水体主要的初级生产者,具有分布广和生活周期短等特点,水环境的变化会直接影响其群落结构的变化,因此可以通过研究其变化对水体的水质进行一定的评价<sup>[22]</sup>。然而,Shannon-Weaver 多样性指数仅能在大的时空尺度上对水体受污染程度进行初步判定,对不同位置水体受污染程度无法作出进一步区分<sup>[23-24]</sup>,无法准确开展水质评价。本研究利用 Shannon-Weaver 多样性指数进行评价,结果发现 S14 采样点的水质较好,这与其他 3 种评价方法的结果相悖,也与该区域实际环境情况不符。本研究统计分析发现,内梅罗污染指数法和 PCA 法评价结果之间具有较高的线性相关性 ( $R^2=0.41$ ),且相关性显著 ( $P<0.05$ ) (图 7),可见二者评价结果的重叠度较高,水质评价时选择其一即可。

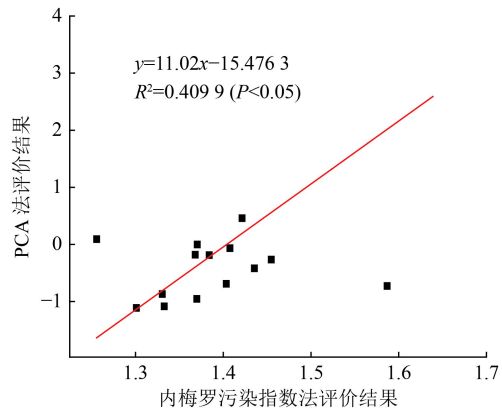


图 7 内梅罗污染指数法与 PCA 法评价结果线性相关性

Fig.7 Linear correlation between evaluation results of Nemero pollution index method and PCA method

### 3 结论

(1)单因子指数评价结果显示,洞庭湖首要污染物为TN,其次是TP。内梅罗污染指数法评价结果显示,洞庭湖水质整体呈轻污染状态,各湖区污染程度排序为东洞庭湖>南洞庭湖>入湖河流>西洞庭湖,其中东洞庭湖区大小西湖采样点水质最差。PCA评价结果与内梅罗污染指数法结果基本一致,并且显示大小西湖采样点主要超标因子为 $COD_{Mn}$ 和 $COD_{Cr}$ 。Shannon-Weaver多样性指数法评价结果表明,洞庭湖各湖区水质污染程度排序为南洞庭湖>西洞庭湖>入湖河流>东洞庭湖,且大小西湖采样点水质较好,这与大小西湖水质较差的实际情况不符。

(2)通过对不同方法的对比研究,建议使用PCA法开展洞庭湖水质评价,该方法既能反映各主要污染指标及其贡献率,也能对不同区域水体受污染程度进行排序,且评价结果客观实际,适用于洞庭湖区域的水质评价工作。在水质评价管理实际工作中,还建议结合单因子指数评价法对水质类别进行判定。

### 参考文献

- [1] 中国环境科学研究院. 湖泊生态安全调查与评估[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [2] WU T, WANG S R, SU B L, et al. Understanding the water quality change of the Yilong Lake based on comprehensive assessment methods[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 126: 107714.
- [3] 刘宇, 吉正元, 刘淑娟, 等. 三种方法在高原湖泊水质评价中的应用与比较[J]. 海洋湖沼通报, 2020(2): 166-174.  
LIU Y, JI Z Y, LIU S J, et al. Application and comparison of three methods in water quality evaluation of plateau lakes[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2020(2): 166-174.
- [4] 郑利杰, 高红杰, 宋永会, 等. 我国典型城市地表水水质综合评价与分析[J]. 环境工程技术学报, 2016, 6(3): 252-258.  
ZHENG L J, GAO H J, SONG Y H, et al. Comprehensive evaluation and analysis of surface water quality for typical cities of China[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2016, 6(3): 252-258.
- [5] 邹伟, 朱广伟, 蔡永久, 等. 综合营养状态指数(TLI)在夏季长江中下游湖库评价中的局限及改进意见[J]. 湖泊科学, 2020, 32(1): 36-47.  
ZOU W, ZHU G W, CAI Y J, et al. The limitations of comprehensive trophic level index (TLI) in the eutrophication assessment of lakes along the middle and lower reaches of the Yangtze River during summer season and recommendation for its improvement[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(1): 36-47.
- [6] 韩雪梅, 富国, 刘庆庆, 等. 变权综合营养状态指数( $TLI_{CW}$ )评价方法及其在三峡库区支流龙河的应用[J]. 环境工程技术学报, 2018, 8(6): 627-634.  
HAN X M, FU G, LIU Q Q, et al. Changed weight trophic level index method and its application to Longhe tributary of the Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2018, 8(6): 627-634.
- [7] 夏凡, 胡圣, 龚治娟, 等. 不同水质评价方法的应用比较研究: 以丹江口水库入库河流为例[J]. 人民长江, 2017, 48(17): 11-15.  
XIA F, HU S, GONG Z J, et al. Comparative study on application of different water quality evaluation methods: a case study of inflow rivers in Danjiangkou Reservoir area[J]. *Yangtze River*, 2017, 48(17): 11-15.
- [8] 王丑明, 张屹, 石慧华, 等. 洞庭湖大型底栖动物群落结构和水质评价[J]. 湖泊科学, 2016, 28(2): 395-404.  
WANG C M, ZHANG Y, SHI H H, et al. Macrozoobenthic community structure and bioassessment of water quality in Lake Dongting, China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(2): 395-404.
- [9] 张欢, 张佳磊, 刘德富, 等. 三峡水库水温对浮游植物群落演替和多样性的影响[J]. 环境工程技术学报, 2017, 7(2): 134-139.  
ZHANG H, ZHANG J L, LIU D F, et al. The influence of water temperature on phytoplankton community succession and diversity in Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2017, 7(2): 134-139.
- [10] 中国环境科学研究院. 2017年三峡工程生态与环境监测系统-洞庭湖江湖生态监测重点站技术报告[R]. 北京: 中国环境科学研究院, 2018.
- [11] 杨芳, 杨盼, 卢路, 等. 基于主成分分析法的洞庭湖水质评价[J]. 人民长江, 2019, 50(增刊2): 42-45.  
YANG F, YANG P, LU L, et al. Water quality assessment of Dongting Lake based on Principal Component Analysis[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(Suppl 2): 42-45.
- [12] 王丽婧, 田泽斌, 李莹杰, 等. 洞庭湖近30年水环境演变态势及影响因素研究[J]. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1140-1149.  
WANG L J, TIAN Z B, LI Y J, et al. Trend and driving factors of water environment change in Dongting Lake in the last 30 years[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(5): 1140-1149.
- [13] 生态环境部. 长江三峡工程生态与环境监测公报(2015—2018)[R]. 北京: 生态环境部, 2015—2018.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境出版社, 2002.
- [15] 范志平, 王琼, 孙学凯, 等. 辽河流域湿地水质污染特征及净化效果实证评估[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(6): 1050-1056.  
FAN Z P, WANG Q, SUN X K, et al. Water pollution characteristics in wetlands and empirical evaluation of purification effect in Liaohe River Basin[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, 10(6): 1050-1056.
- [16] SHANNON C E, WEAVER W. The mathematical theory of communication[M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949.
- [17] 湖南省环境保护局, 湖南省质量技术监督局. 湖南省主要水系



- 地表水环境功能区划: DB43/023—2005[S/OL]. (2005-04-01) [2022-05-20]. <https://www.renrendoc.com/paper/161706246.html>.
- [ 18 ] 王丽婧, 汪星, 刘录三, 等. 洞庭湖水质因子的多元分析[J]. 环境科学研究, 2013, 26(1): 1-7.  
WANG L J, WANG X, LIU L S, et al. Multivariate analysis of water factors in Dongting Lake[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(1): 1-7.
- [ 19 ] 王旭, 肖伟华, 朱维耀, 等. 洞庭湖水位变化对水质影响分析[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(5): 59-62.  
WANG X, XIAO W H, ZHU W Y, et al. Effects of water level variation on water quality in Dongting Lake[J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(5): 59-62.
- [ 20 ] 钟振宇, 陈灿. 洞庭湖水质及富营养状态评价[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(7): 169-173.  
ZHONG Z Y, CHEN C. Water quality and eutrophication analysis in Lake Dongting[J]. Environmental Science and Management, 2011, 36(7): 169-173.
- [ 21 ] 梁明奇, 王敏, 朱江龙. 基于主成分分析法的五排水库水质评价[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2021, 43(2): 163-169.  
LIANG M Q, WANG M, ZHU J L. Water quality evaluation of Wupai Reservoirs based on Principal Component Analysis[J]. Journal of Hubei University (Natural Science), 2021, 43(2): 163-169.
- [ 22 ] 李文攀, 朱擎, 李东一, 等. 集中式饮用水水源地水质评价方法研究[J]. 中国环境监测, 2015, 31(1): 24-27.  
LI W P, ZHU Q, LI D Y, et al. The study of assessment method of centralized source water[J]. Environmental Monitoring in China, 2015, 31(1): 24-27.
- [ 23 ] 赵梦瑶, 梁恩航, 陈颖, 等. 黄河玛曲至临河段硅藻群落组成及水质评价[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2022, 58(1): 169-176.  
ZHAO M Y, LIANG E H, CHEN Y, et al. Diatom community structure and water quality evaluation in the Maqu-Linhe section of the Yellow River[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2022, 58(1): 169-176.
- [ 24 ] 张新月, 蔡鑫鹏, 李翌, 等. 天津子牙河浮游植物群落结构特征及水质评价[J]. 湖南生态科学学报, 2022, 9(1): 70-76.  
ZHANG X Y, CAI X P, LI Z, et al. Characteristics of phytoplankton community structure and water quality assessment in Ziya River of Tianjin[J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2022, 9(1): 70-76. ◇