

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2018013104

郭晶, 王丑明, 黄代中, 等. 洞庭湖水污染特征及水质评价[J]. 环境化学, 2019, 38(1): 152-160.

GUO Jing, WANG Chouming, HUANG Daizhong, et al. Pollution characterization and water quality assessment of Dongting Lake [J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(1): 152-160.

洞庭湖水污染特征及水质评价*

郭晶** 王丑明 黄代中 李利强 连花

(湖南省洞庭湖生态环境监测中心, 岳阳, 414000)

摘要 于 2016 年 4 月—2017 年 3 月对洞庭湖区 11 个监测断面 396 个表层水样进行采集, 选取 8 个水质指标进行因子特征分析, 并采用单因子评价法、综合污染指数法和主成分分析法对洞庭湖水质进行综合评价。洞庭湖水体呈弱碱性, 总氮(TN)和总磷(TP)为超标污染物。单因子评价法结果表明, TN 和 TP 为洞庭湖水质的主要限制因子, TN 参与评价时, 洞庭湖水质为 V 类或劣 V 类。综合污染指数法结果表明, 洞庭湖水质状况为中污染, 平水期水质优于枯水期和丰水期, 主要污染因子为 TN、TP、五日生化需氧量(BOD_5)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})。主成分分析结果表明, 洞庭湖水质主要受 pH、溶解氧(DO)、氨氮(NH_3-N)和 TN 等指标影响, 西洞庭湖水质较好, 南洞庭湖次之, 东洞庭湖较差。3 种方法是定性和定量评价的有机结合, 评价结果不完全一致, 故采用多种评价方法来开展水质评价十分重要。

关键词 洞庭湖, 水质评价, 单因子评价法, 综合污染指数法, 主成分分析法。

Pollution characterization and water quality assessment of Dongting Lake

GUO Jing** WANG Chouming HUANG Daizhong LI Liqiang LIAN Hua

(Ecological and Environmental Monitoring center of Dongting Lake of Hunan, Yueyang, 414000, China)

Abstract: Three hundred and ninety-six water samples were collected in the Dongting Lake from April 2016 to March 2017. Factor characteristics analysis were performed using pH, dissolved oxygen (DO), ammonia nitrogen (NH_3-N), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), permanganate index (COD_{Mn}), chemical oxygen demand (COD_{Cr}) and five-day biochemical oxygen demand (BOD_5) as the physicochemical factors. Single-factor assessment method, comprehensive pollution index method and principal component analysis method were applied to evaluate the water quality of Dongting Lake. The water body presented weak alkalinity with TN and TP as excessive pollutants. The single-factor assessment indicated that the first restrictive factors of water quality were TN and TP, while the water quality of Dongting Lake was in Class V or lower V. The results of comprehensive pollution index assessment showed that the water quality was in a moderate pollution condition, with better water quality in normal period than in other two periods. TN, TP, BOD_5 and COD_{Mn} were the main pollution factors. The principal component analysis method showed that indexes such as pH, DO, NH_3-N and TN, etc, greatly influenced the water quality of Dongting Lake. Water quality of East Dongting Lake was inferior to South Dongting Lake, and South Dongting Lake was inferior to the West Dongting Lake. The three methods were a combination of qualitative and

2018 年 1 月 31 日收稿 (Received: January 31, 2018).

* 2015 年湖南省环境保护科技计划项目 (2015015) 资助。

Supported by Environmental Protection Science and Technology Program of Hunan Province (2015015).

** 通讯联系人, Tel: 0730-8879683, E-mail: happy.guojing@163.com

Corresponding author, Tel: 0730-8879683, E-mail: happy.guojing@163.com

quantitative evaluation. The results of each method were not identical with each other. So it is very important to work on water quality assessment using various methods.

Keywords: Dongting Lake, water quality assessment, single-factor assessment method, comprehensive pollution index method, principal component analysis method.

洞庭湖是我国第二大淡水湖,位于湖南省东北部,长江中游荆江段南岸,承纳湘、资、沅、澧“四水”和长江松滋、太平、藕池“三口”来水的汇入,经湖泊调蓄后,由城陵矶注入长江.近年来,随着洞庭湖区人口迅速增加,周边工业及养殖业的发展和长江上游大型水利设施的兴建,洞庭湖生态环境遭到严重破坏^[1-3],已引起了国家有关部门的重视和社会的广泛关注,因此采用合适的方法对洞庭湖水质现状进行科学评价和摸清污染特征具有十分重要的意义.目前,常用的水质评价方法主要有单因子评价法^[4-5]、综合污染指数法^[6-7]、综合水质标识指数法^[8-9]、模糊综合评判法^[4,10]、主成分分析法^[11-13]、灰色关联系数法^[14]等.这些评价方法各有优缺点,侧重点也不同,因此,将多种评价方法有机结合更能科学合理地评价洞庭湖的水质状况.

迄今为止,针对洞庭湖水质多采用单一或少数几种方法进行评价,运用多种方法进行综合评价和对比研究的案例并不多见^[11,15-16].本研究选取洞庭湖区的 11 个监测断面进行表层水样的采集与分析,进行年均和不同水期的统计分析,再分别采用单因子评价法、综合污染指数法和主成分分析法进行定性和定量评价,查明洞庭湖的主要污染因子,以期对洞庭湖的水污染防治及持续健康发展提供参考依据.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 样品采集

样品采集于 2016 年 4 月至 2017 年 3 月的每月上旬完成,共设有 11 个国控监测断面(图 1),包括西洞庭湖的南嘴(S1)、蒋家嘴(S2)和小河嘴(S3);南洞庭湖的万子湖(S4)、横岭湖(S5)和虞公庙(S6);东洞庭湖的鹿角(S7)、扁山(S8)、东洞庭湖(S9)、岳阳楼(S10)和洞庭湖出口(S11).每个监测断面设左、中、右 3 条垂线,分别采集表层(0.5 m)水样.

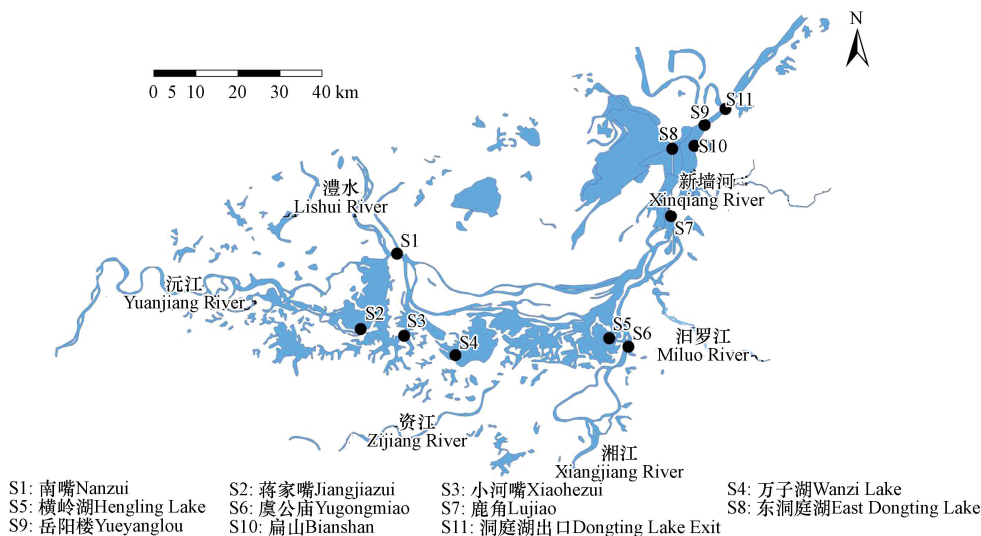


图 1 洞庭湖采样断面
Fig.1 Sampling sections in Dongting Lake

1.2 测定方法

本研究测定了洞庭湖区 11 个监测断面 396 个水样的 8 项水质指标.其中,pH 采用玻璃电极法(GB/T 6920—1986)测定;溶解氧(DO)采用碘量法(GB 7489—1987)测定;高锰酸盐指数(COD_{Mn})采用酸性法(GB 11892—1989)测定;化学需氧量(COD_{Cr})采用重铬酸钾法(GB 11914—1989)测定;五日

生化需氧量(BOD_5)采用稀释与接种法(HJ 505—2009)测定;氨氮(NH_3-N)采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009)测定;总磷(TP)采用钼酸铵分光光度法(GB 11893—1989)测定;总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636—2012)测定.为保证分析数据准确可靠,采集样品时,全程序空白和平行双样的覆盖率占 10%以上.实验室分析质量控制措施主要包括校准曲线、空白样品、平行样测定、加标回收和有证标准物质测定等,且测量分析的相对标准偏差均保持在 10%以内,加标回收率在 75.8%—121.6%之间.

1.3 数据处理与评价方法

采用 IBM SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析.为了体现评价方法的一致性,本研究中单因子评价法、综合污染指数法和主成分分析法均选取 8 个评价指标进行分析.根据洞庭湖的水文节律,6—9 月为丰水期;4—5 月和 10—11 月为平水期;12 月和次年 1—3 月为枯水期^[17].

1.3.1 单因子评价法

单因子评价法采用一票否决法原则,即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.在所有的参评水质指标中,如有某一项指标超标,则所属水域不符合相应的水质标准^[18].

1.3.2 综合污染指数法

综合污染指数法有多种方法,本研究选取等权重综合污染指数评价洞庭湖各个断面的相对污染程度,即采用各水质指标的实测值与其评价标准之比,作为单项污染指数(P_i),然后通过等权重平均得到一个综合污染指数(P_j),计算公式为:

$$P_j = 1/n \sum_{i=1}^n P_i, P_i = C_i/S_i$$

式中: P_j 为 j 断面(水体)的综合污染指数; n 为参加评价的污染物项数; P_i 为第 i 项污染物的污染分指数; C_i 为第 i 项污染物的年均值; S_i 为第 i 项污染物的水质标准值,具体见《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)表 1 中的Ⅲ类水质标准限值.综合污染指数对应的水质分级如下: $P \leq 0.25$,清洁; $0.25 < P \leq 0.40$,较清洁; $0.40 < P \leq 0.50$,轻污染; $0.50 < P \leq 0.99$,中污染; $P \geq 1$,重污染.

1.3.3 主成分分析法

主成分分析法是通过原有变量的线性组合以及各个主成分的求解来实现变量降维.它的主要目的不是将那些不太重要的指标简单去掉,而是通过全面分析各项指标所携带的信息,筛选出比原始指标少,能解释大部分资料的综合性指标^[11].

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 水质因子特征

为更好地了解洞庭湖各采样断面的水质状况,取各采样断面丰、平和枯水期水质指标分析结果的平均值并作标准偏差分析.结果见图 2.

2.1.1 理化和营养盐指标

由图 2 可知,洞庭湖各采样断面 pH 值范围为 7.39—7.65,呈弱碱性,总体表现为枯水期>平水期>丰水期. $\rho(NH_3-N)$ 全年平均值范围在 0.128—0.307 $mg \cdot L^{-1}$ 之间,均低于 0.50 $mg \cdot L^{-1}$ (Ⅱ类水质标准限值),东洞庭湖各断面的枯水期 NH_3-N 均高于其他水期. $\rho(TN)$ 全年平均值均高于 1.0 $mg \cdot L^{-1}$ (Ⅲ类水质标准限值),变化范围在 1.617—2.337 $mg \cdot L^{-1}$ 之间,东洞庭湖各断面的 TN 总体表现为枯水期>平水期>丰水期. $\rho(TP)$ 全年平均值范围为 0.060—0.107 $mg \cdot L^{-1}$,均高于 0.05 $mg \cdot L^{-1}$ (Ⅲ类湖库水质标准限值),其中 S1 断面 $\rho(TP)$ 平均值最大,为 0.107 $mg \cdot L^{-1}$,高于 0.10 $mg \cdot L^{-1}$ (Ⅳ类湖库水质标准限值).西洞庭湖各断面的 TP 总体表现为丰水期>平水期>枯水期,东洞庭湖的则为平水期>枯水期>丰水期.就 NH_3-N 和 TN 而言,东洞庭湖各点位水期之间差异较西洞庭湖和南洞庭湖显著.

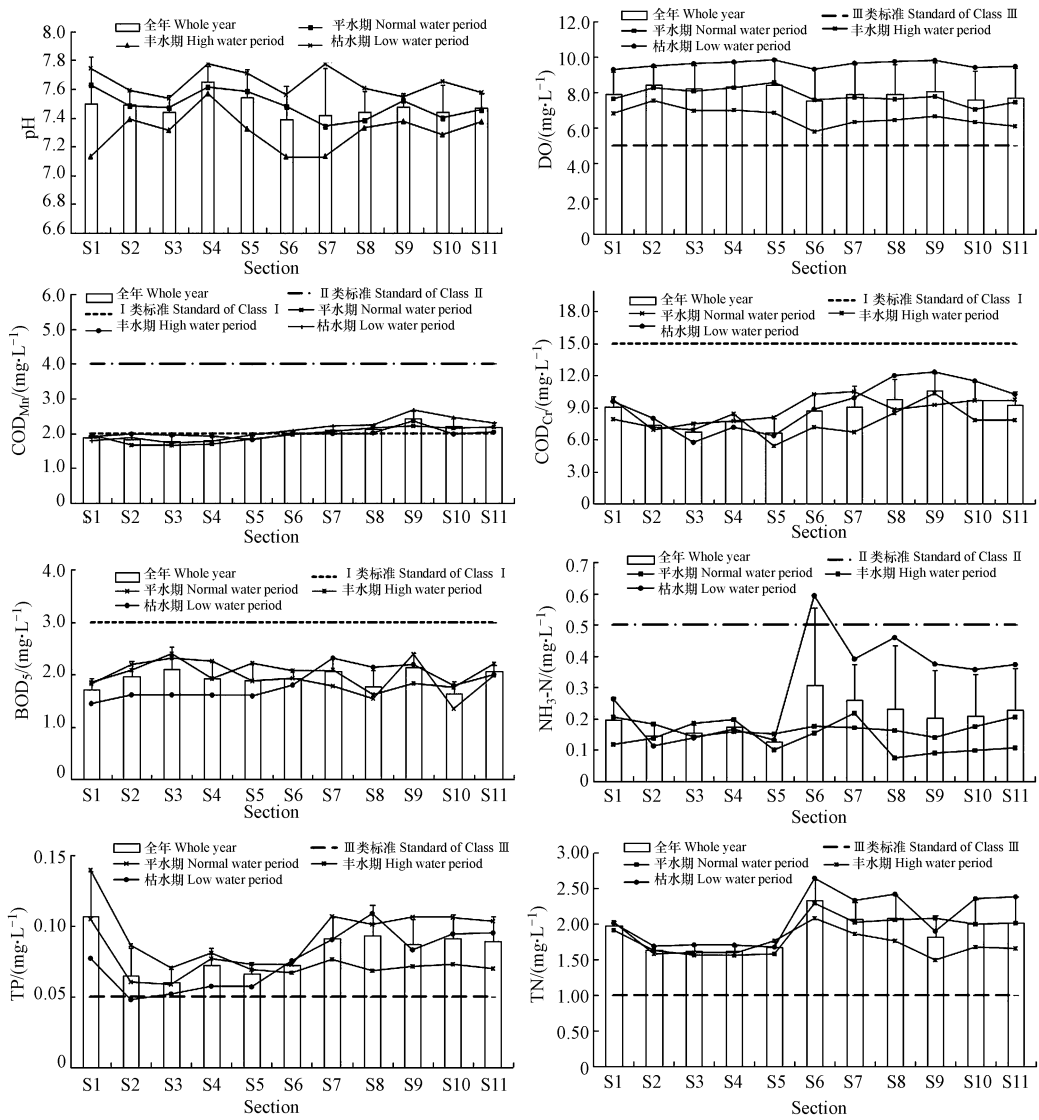


图 2 洞庭湖各监测断面水质指标年平均值

Fig.2 Average values of water quality monitoring data in sampling sections of Dongting Lake

2.1.2 有机污染指标

各采样断面 $\rho(\text{DO})$ 平均值范围为7.56—8.43 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均高于7.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (I类水质标准限值),总体表现为枯水期>平水期>丰水期. $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 平均值均低于4.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (II类水质标准限值),45.45%断面平均值低于2.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (I类水质标准限值). $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 平均值变化范围在6.62—10.64 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均低于15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (I类水质标准限值). $\rho(\text{BOD}_5)$ 平均值均小于3.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (I类水质标准限值),西洞庭湖和南洞庭湖各断面的枯水期 BOD_5 相对较低.就 COD_{Mn} 和 COD_{Cr} 而言,东洞庭湖各点位水期之间差异较西洞庭湖和南洞庭湖显著.

总体来说,洞庭湖水体呈弱碱性, $\rho(\text{TN})$ 和 $\rho(\text{TP})$ 超标严重,东洞庭湖各点位大多数指标水期之间差异较西洞庭湖和南洞庭湖显著.这与秦迪岚^[19]得出的总氮和总磷为洞庭湖区的特征污染物的结论相一致.秦迪岚的研究表明,洞庭湖区的氮磷污染主要来源于农业面源和城镇生活污染,这与太湖^[20]的氮磷污染来源有所不同.

与国内其他淡水湖相比(表1)^[20-23],洞庭湖 $\rho(\text{TN})$ 与太湖和巢湖 $\rho(\text{TN})$ 范围最接近,最小值均超过1.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (III类水质标准限值),鄱阳湖和洪泽湖 $\rho(\text{TN})$ 范围分别为0.40—3.88 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和0.792—2.259 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.洞庭湖 $\rho(\text{TP})$ 与太湖 $\rho(\text{TP})$ 范围最接近,最小值均高于0.05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (III类湖库水质标准限值).除了洪泽湖的主要污染指标为TN、TP和 COD_{Cr} 外,国内其他淡水湖的主要污染指标均为TN和

TP,可见 TN 和 TP 已成为淡水湖的共同污染指标.

表 1 洞庭湖主要污染指标与国内其他淡水湖的比较

Table 1 Comparison of main pollution factors in Dongting Lake with other freshwater lakes

研究区域 Study area	TN/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)	主要污染指标 Main pollution factors	参考文献 References
洞庭湖 Dongting Lake	1.617—2.337	0.060—0.107	TN、TP	本研究
鄱阳湖 Poyang Lake	0.40—3.88(1.58)	0.033—0.694(0.172)	TN、TP	[21]
太湖 Taihu	1.60—2.80	0.06—0.11	TN、TP	[20]
洪泽湖 Hongze Lake	0.792—2.259	0.098—0.142	TN、TP、COD _{Cr}	[22]
巢湖 Chaohu Lake	1.59—2.46	0.100—0.257	TN、TP	[23]

2.2 单因子评价结果

采用单因子评价法对各采样断面的水质类别进行评价,TN 不参与评价时,除了 S1 断面为 V 类水质外,其他断面均为 IV 类,定类项目均为 TP.TN 参与评价时,全部断面均为 V 类或劣 V 类水质,V 类和劣 V 类水质断面比例分别为 54.55%和 45.45%,定类项目均为 TN.

从 3 个不同水期的水质评价结果来看,TN 不参与评价时,除了枯水期有 9.09%的断面能达到 III 类水质标准外,其他断面和其他水期全部断面均为 IV 类或 V 类水质,定类项目均为 TP.平水期水质最差,IV 类和 V 类水质断面比例分别为 54.55%和 45.45%.枯水期水质相对较好.TN 参与评价时,除了丰水期有 9.09%的断面为 IV 类外,其他断面和其他水期全部断面均为 V 类或劣 V 类水质.平水期和枯水期水质相对较差,丰水期相对较好,这与秦建新等^[24]的研究结果基本相符.

由此可见,TN 和 TP 是洞庭湖水质的限制性因子,在各个水期对洞庭湖水质有重要的影响.

2.3 综合污染指数评价结果

采用综合污染指数法对洞庭湖 11 个采样断面全年及不同水期的综合污染指数进行计算,结果见表 2.由表 2 可知,从全年的综合污染指数来看,11 个断面水质级别均为中污染,综合污染指数在 0.583—0.765 之间,其中西洞庭湖区的 S1 断面综合污染指数最高(0.765),污染最严重,S3 断面最低(0.583),污染最轻.从不同水期来看,平、丰和枯水期的综合污染指数范围分别为 0.439—0.571,0.620—0.835 和 0.551—0.543,其中平水期 36.36%的断面综合污染指数小于 0.5,为轻污染,其他断面和其他水期全部断面水质都为中污染,综合污染指数均在 0.5 以上,可见平水期水质整体上优于枯水期和丰水期.可能是由于枯水期水量小,主要由湘、资、沅、澧“四水”入湖水量控制,水环境容量较小,水体自净能力弱,水体更替速度很慢,汇入的点源污染物不能及时被稀释,水质较差.丰水期尽管水环境容量增大,但面源污染严重,点源与面源的共同作用导致丰水期水质也较差.洞庭湖的 11 个采样断面中,除 S₂、S₃ 和 S₄ 外,其他断面综合污染指数水期之间差异显著(标准偏差>5%),且东洞庭湖区综合污染指数随水期变化比西洞庭湖区和南洞庭湖区明显.

表 2 洞庭湖各采样断面综合污染指数

Table 2 Comprehensive pollution index in sampling sections of Dongting Lake

湖区 Lake region	断面 Section	全年 Whole year	平水期 Normal water period	丰水期 High water period	枯水期 Low water period
西洞庭湖区 West Dongting Lake	S1	0.765	0.564	0.835	0.699
	S2	0.589	0.533	0.644	0.551
	S3	0.583	0.560	0.630	0.543
南洞庭湖区 South Dongting Lake	S4	0.610	0.549	0.664	0.583
	S5	0.599	0.439	0.620	0.568
	S6	0.742	0.571	0.701	0.812
东洞庭湖区 East Dongting Lake	S7	0.752	0.442	0.680	0.819
	S8	0.755	0.534	0.635	0.883
	S9	0.727	0.454	0.632	0.752
	S10	0.739	0.526	0.640	0.822
	S11	0.749	0.450	0.661	0.819

选取的 8 项指标的污染分担率见图 3.TN 和 TP 的污染分担率明显高于其他指标,洞庭湖各断面的全年 TN 单项污染指数范围为 1.617—2.337,污染分担率均在 30% 以上.全年 TP 单项污染指数范围为 1.20—2.14,污染分担率范围在 24.26%—34.97%之间.BOD₅和 COD_{Mn}的污染分担率次之,污染分担率范围分别在 6.90%—11.33%和 6.91%—9.15%之间.其他指标的污染分担率占比很小,均在 7% 以下.各断面 TN、TP、BOD₅和 COD_{Mn}的污染分担率之和基本达到 80%,说明这四种指标对洞庭湖水质影响较大,应特别关注.

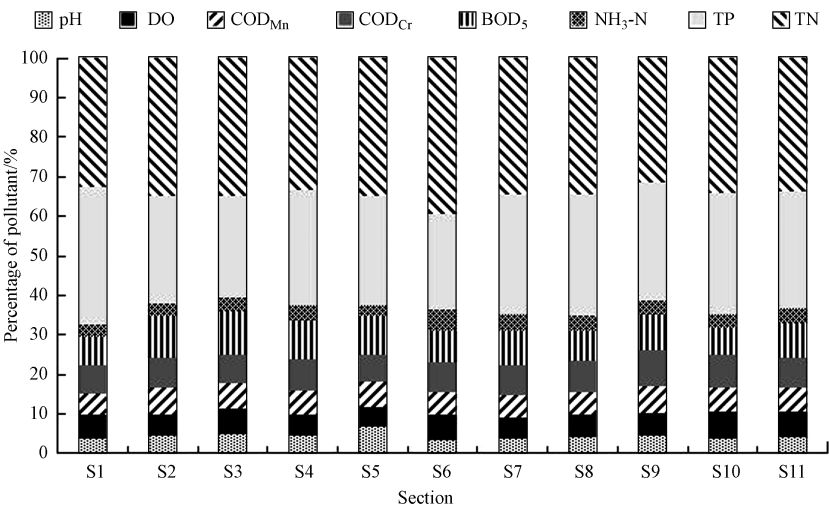


图 3 洞庭湖各采样断面污染分担率

Fig.3 Percentages of pollutant in sampling sections of Dongting Lake

2.4 主成分分析评价结果

为了克服不同变量数值差异过大而造成主成分的分析误差,先在 SPSS 19.0 软件中将洞庭湖各断面的 8 个指标的数据进行标准化处理,再进行主成分分析.为使每个主成分的意义更加明确,采用最大方差法进行因子旋转,表 3 为旋转后提取出的前三个主成分的因子载荷量.按照特征值(λ)大于 1 的原则选取前三个成分进行分析,PC1、PC2 和 PC3 的累积贡献率达到 89.216%.PC1 携带的信息最多,占 39.734%,与其相关联的主要因子是 pH、 $\rho(\text{DO})$ 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 和 $\rho(\text{TN})$,载荷绝对值范围为 0.821—0.886,反映洞庭湖的理化特性以及水体受到营养盐的影响;与 PC2 相关联的主要因子是 $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 和 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$,对应的载荷量分别为 0.747、0.890 和 0.919,该主成分是在 PC1 的基础上进一步反映水体受到营养盐和有机污染物的影响;与 PC3 相关联的主要因子是 $\rho(\text{BOD}_5)$,其载荷量最高,达到 0.962,反映了洞庭湖水体中的耗氧型有机污染物.

表 3 旋转后的因子载荷量

Table 3 Rotated component matrix

项目 Index	PC1	PC2	PC3
pH	-0.848	-0.089	0.154
$\rho(\text{DO})$	0.821	0.384	0.265
$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$	0.291	0.890	-0.184
$\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$	0.338	0.919	0.121
$\rho(\text{BOD}_5)$	-0.044	-0.020	-0.962
$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	0.872	0.327	0.026
$\rho(\text{TN})$	0.886	0.328	0.251
$\rho(\text{TP})$	0.199	0.747	0.514
特征值 Characteristic value(λ)	3.179	2.564	1.395
方差百分比 Percentage of variance/%	39.734	32.047	17.436
累计方差百分比 Cumulative percentage of variance/%	39.734	71.781	89.216

再根据成份得分系数矩阵等相关方程和公式得出 11 个监测断面的主成分综合得分,即能定量描述各断面的水质污染程度.综合得分越高,水质越差.结果见图 4.从评价结果可知,水质较差的断面为 S6 和 S10;水质较好的断面是 S5 和 S3.S6 断面掌握湘资合流水质,农业发达的湘阴境内产生大量的非点源污染物直接或间接排入湘资流域内.S10 断面位于东洞庭湖区域,河道采砂和航运等人类活动较频繁,大量点源和非电源污染物直接或间接排入此水域中,致使水质较差.S3 断面受沅江来水影响,与沅江流域地方政府对水环境保护有力、湖泊水体受外来污染和人为干扰较少有关.从各湖区来看,西洞庭湖水质优于南洞庭湖,南洞庭湖水质优于东洞庭湖.这结论与钟振宇^[25]和周泓等^[26]的研究结论相吻合.王丽婧等^[11]研究表明,西洞庭湖区的水质最好,南洞庭湖区和东洞庭湖区水质均较差,这与该研究结论也基本相符.各湖区水质存在一定差异,一方面与水体在湖区的迁移流向有关,另一方面与湖区周边及湖区的污染排放有关.洞庭湖为吞吐性湖泊,水流方向大致为西洞庭湖→南洞庭湖→东洞庭湖→长江^[27].西洞庭湖水质好与它处于上游位置,湖体自我净化能力较强等密不可分.东洞庭湖区的水环境容量虽大,湖区周边人口多,经济发展快,随着人口与工业企业的增加及城镇规模化扩张,各种点面污染源向湖内排放的工业废水与生活污水也在不断的增加,导致湖区的局部水质污染较严重.另外东洞庭湖区离洞庭湖出湖口近,因长江水的顶托易使污染物在出湖口附近富集^[28].

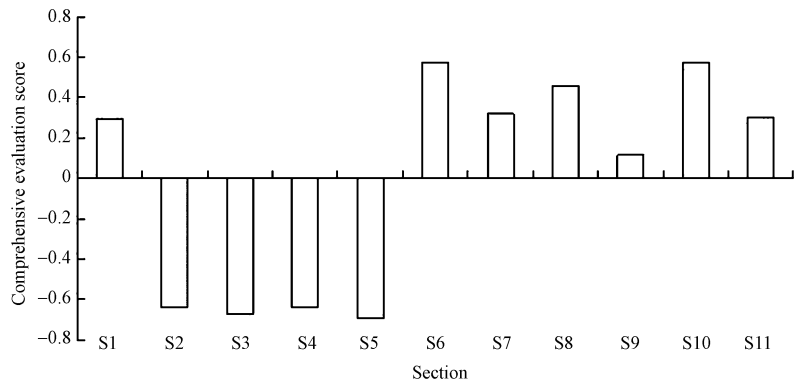


图 4 洞庭湖各断面水质综合评价结果

Fig.4 Assessment results of sampling sections in Dongting Lake

2.5 三种方法的对比

单因子评价法简单直观,能够对洞庭湖水质进行定性评价,判定各断面的水质等级,不能对同一等级水质类别的断面进行更详细的优劣排序.综合污染指数法和主成分分析法计算相对复杂,不能对各断面的水质等级进行判定,但能对水质进行定量分析,很好地对各断面水质情况进行优劣排序.这两种方法均能很清楚地反映洞庭湖某断面的污染程度,其中南嘴、虞公庙断面和岳阳楼断面污染最为严重,污染比较轻的断面为蒋家嘴、小河嘴、万子湖和横岭湖.但在洞庭湖区污染因子的筛选中有所差别,综合污染指数法得出 TN、TP、BOD₅和 COD_{Mn}对洞庭湖水质影响极大的结论,而主成分分析法根据方差累计贡献率大小筛选出了 pH、DO、NH₃-N 和 TN 等四个因子,得出洞庭湖水质主要受这四个因子的影响.造成主要污染因子差距的关键原因在于因子的权重,综合污染指数法没有考虑因子的权重,采取均权处理方式,而主成分分析法则根据方差累计贡献率作为因子权重进行处理的.这 3 种方法各有优缺点,从不同角度反映洞庭湖水质各断面的水质污染状况,综合采用多种评价方法能更客观全面地反映某区域水质状况与污染特征.

3 结论 (Conclusion)

- (1) 洞庭湖水体呈弱碱性,TN 和 TP 为超标污染物,同时也是洞庭湖水质的限制性因子.TN 参与评价时,V类和劣V类水质断面比例分别为 54.55%和 45.45%,丰水期水质优于平水期和枯水期.
- (2) 洞庭湖 11 个断面的全年综合污染指数在 0.583— 0.765 之间,水质级别均为中污染,南嘴断面污染最严重,小河嘴断面污染最轻.平水期水质好于枯水期和丰水期水质.且东洞庭湖区综合污染指数

随水期变化比西和南洞庭湖区明显.TN 和 TP 的污染分担率之和占 60%左右,BOD₅和 COD_{Mn}次之,这 4 种指标对洞庭湖水水质影响较大,应引起足够重视.

(3)主成分分析法筛选出了 pH、DO、NH₃-N 和 TN 等 4 个因子,说明洞庭湖水水质主要受这四个因子的影响大.综合评价得分指出水质较差的断面为虞公庙和岳阳楼;水质较好的断面是横岭湖和小河嘴.西洞庭湖水水质优于南洞庭湖,南洞庭湖水水质优于东洞庭湖.

(4)单因子评价法采取的是“一票否决”制的定性评价,综合污染指数法和主成分分析法能对各断面水质的优劣进行定量分析.三种评价方法得出的评价结果不完全一致,不同方法评价结果从定量和定性的不同方式反映水质特征,综合采用多种方法能更好地刻画水质及其污染特征.

参考文献 (References)

- [1] CHEN X, MCGOWAN S, XU L, et al. Effects of hydrological regulation and anthropogenic pollutants on Dongting Lake in the Yangtze floodplain[J]. *Ecohydrology*, 2016, 9(2): 315-325.
- [2] 郭晶, 李利强, 黄代中, 等. 洞庭湖表层水和底泥中重金属污染状况及其变化趋势[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(1): 44-51.
GUO J, LI L Q, HUANG D Z, et al. Assessment of heavy metal pollution in surface water and sediment of Dongting Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(1): 44-51(in Chinese).
- [3] 张光贵, 张屹. 洞庭湖区城市饮用水源地水环境健康风险评估[J]. *环境化学*, 2017, 36(8): 1812-1820.
ZHANG G G, ZHANG Y. Water environmental health risk assessment in urban drinking water sources in Dongting Lake region[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(8): 1812-1820(in Chinese).
- [4] 杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 等. 基于模糊综合评判法的洮河水环境质量评价[J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(S1): 380-386.
YANG H, ZHANG G Z, YANG X N, et al. Comprehensive evaluation on water environment quality of the Tao River based on fuzzy comprehensive method[J]. *Environment Science & Technology*, 2016, 39(S1): 380-386(in Chinese).
- [5] LIU C, HE H, TAN X H, et al. Establishment and application of water quality assessment Model for Jiaozhou Bay Basin[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 1793(518): 1165-1170.
- [6] 王文静, 高鹏程, 李婕, 等. 丹江口水库典型入库支流水质评价与趋势分析[J]. *水资源保护*, 2016, 32(3): 127-130.
WANG W J, GAO P C, LI J, et al. Water quality assessment and trend analysis of typical tributaries of Danjiangkou Reservoir[J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(3): 127-130(in Chinese).
- [7] 孙涛, 张妙仙, 李苗苗, 等. 基于对应分析法和综合污染指数法的水质评价[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(4): 185-190.
SUN T, ZHANG M X, LI M M, et al. River water quality evaluation based on correspondence analysis and comprehensive pollution index method[J]. *Environment Science & Technology*, 2014, 37(4): 185-190(in Chinese).
- [8] 林涛, 徐盼盼, 钱会, 等. 黄河宁夏段水质评价及其污染源分析[J]. *环境化学*, 2017, 36(6): 1388-1396.
LIN T, XU P P, QIAN H, et al. Assessment of water quality and analysis of pollution source in Ningxia section of the Yellow River[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(6): 1388-1396(in Chinese).
- [9] LIU X B, LI G F, LIU Z G, et al. Water pollution characteristics and assessment of Lower reaches in Haihe River Basin[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 199-206.
- [10] 于淑玲, 李秀军, 李晓宇, 等. 小兴凯湖水质评价[J]. *湿地科学*, 2013, 11(4): 466-469.
YU S L, LI X J, LI X Y, et al. Evaluation of water quality of Xiaoxingkai Lake[J]. *Wetland Science*, 2013, 11(4): 466-469(in Chinese).
- [11] 王丽婧, 汪星, 刘录三, 等. 洞庭湖水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(in Chinese).
- [12] ZHANG L P, PANG J, KE L, et al. SPSS for water pollution contribution of Tonghui River in Beijing based on principal component analysis[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 1464(343): 483-489.
- [13] 解文静, 王松, 娄山崇, 等. 山东南四湖上级湖水水质变化评价(2008-2014 年)及成因分析[J]. *湖泊科学*, 2016, 28(3): 513-519.
XIE W J, WAGN S, LOU S C, et al. Evaluation of temporal water quality change (2008-2014) and the cause analysis in the upper-reach lakes of Lake Nansi, Shangdong Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(3): 513-519(in Chinese).
- [14] 王小煥, 邵景安, 王金亮, 等. 三峡库区长江干流入库水质评价及其变化趋势[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(1): 554-565.
WANG X H, SHAO J A, WANG J L, et al. Water quality assessment and its changing trends in the reservoir inflow and outflow along the Yangtze River mainstream in the Three Gorge Reservoir Area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(1): 554-565(in Chinese).
- [15] 申锐莉, 张建新, 鲍征宇, 等. 洞庭湖水水质评价(2002-2004 年)[J]. *湖泊科学*, 2006, 18(3): 243-249.
SHEN R L, ZHANG J X, BAO Z Y, et al. Water quality assessment in Lake Dongting(2002-2004), China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18(3): 243-249(in Chinese).
- [16] ZENG Z Q, ZHANG C M, LI X Q, et al. Study on the water quality and protection measures of Dongting Lake[J]. *Asian Agricultural*

- Research, 2015, 7(1): 57-60.
- [17] 来红州, 莫多闻, 苏成. 洞庭湖演变趋势探讨[J]. 地理研究, 2004, 23(1): 78-86.
LAI H Z, MO D W, SU C. Discussion on the evolutionary trend of Lake Dongting[J]. Geographical Research, 2004, 23(1): 78-86(in Chinese).
- [18] 尹海龙, 徐祖信. 我国单因子水质评价方法改进探讨[J]. 净水技术, 2008, 27(2): 25-40.
YIN H L, XU Z X. Discussion on China's single-factor water quality assessment method[J]. Water Purification Technology, 2008, 27(2): 25-40(in Chinese).
- [19] 秦迪岚, 罗岳平, 黄哲, 等. 洞庭湖水环境污染状况与来源分析[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(8): 193-198.
QIN D L, LUO Y P, HUANG Z, et al. Pollution status and source analysis of water environment in Lake Dongting[J]. Environment Science & Technology, 2012, 35(8): 193-198(in Chinese).
- [20] 钱益春, 何平, 等. 1998—2006 年太湖水水质变化分析[J]. 江西农业大学学报, 2009, 31(2): 370-374.
QIAN Y C, HE P, et al. An Analysis on the changes in the water quality in Taihu Basin during 1998—2006[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2009, 31(2): 370-374(in Chinese).
- [21] 李艳红, 葛刚, 胡春华, 等. 基于聚类分析和因子分析的鄱阳湖流域水质时空变化特征及污染源分析[J]. 南昌大学学报(理科版), 2016, 40(4): 360-365.
LI Y H, GE G, HU C H, et al. Spatiotemporal variation and pollution sources analysis of Poyang Lake basin by cluster and factor analysis[J]. Journal of Nanchang University(Natural Science), 2016, 40(4): 360-365(in Chinese).
- [22] 崔彩霞, 花卫华, 袁广旺, 等. 洪泽湖水水质现状评价与趋势分析[J]. 中国资源综合利用, 2013, 31(10): 44-47.
CUI C X, HUA W H, YUAN G W, et al. Assessment and trend analysis on water quality in Hongze Lake[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2013, 31(10): 44-47(in Chinese).
- [23] 丁虹. 巢湖 2005-2014 年湖水水质状况[J]. 水资源开发与管理, 2016(3): 57-59.
DING H. Water quality conditions of Chaohu Lake during 2005-2014[J]. Water resources development and management, 2016(3): 57-59(in Chinese).
- [24] 秦建新, 尹晓科. 洞庭湖区湿地生态环境问题与对策[J]. 人民长江, 2009, 40(19): 12-14.
QIN J X, YIN X K. Ecological environment problems of wetland in the Dongting Lake area and countermeasures[J]. Yangtze River, 2009, 40(19): 12-14(in Chinese).
- [25] 钟振宇, 陈灿. 洞庭湖水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(in Chinese).
- [26] 周泓, 欧伏平, 刘妍. “十一五”期间洞庭湖水环境质量状况及变化趋势分析[J]. 湖南理工学院学报: 自然科学版, 2011, 24(2): 88-90.
ZHOU H, OU F P, LIU Y. The analysis of the water quality and its change trend of Dongting Lake during the period of “Eleventh Five-Year”[J]. Journal of Hunan Institute of Science and Technology (Natural Sciences), 2011, 24(2): 88-90(in Chinese).
- [27] 张光贵, 卢少勇, 田琪. 近 20 年洞庭湖总氮和总磷浓度时空变化及其影响因素分析[J]. 环境化学, 2016, 35(11): 2377-2385.
ZHANG G G, LU S Y, TIAN Q. Analysis of spatial-temporal variations of total nitrogen and total phosphorus concentrations and their influencing factors in Dongting Lake in the past two decades[J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(11): 2377-2385(in Chinese).
- [28] 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 Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(5): 59-62(in Chinese).