

鄱阳湖蝶形湖泊水体氮磷等的变化及污染初步评价^{*1}

刘新¹ 许梦文¹ 赵珍^{1, 2} 蒋豫³ 蔡永久² 唐晓岚^{1*}

(1. 南京林业大学生物与环境学院, 江苏南京 210037;

2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏南京 210008;

3. 江苏省生态环境评估中心, 江苏南京 210036)

【摘要】: 分别于2014年夏季7月和冬季12月对鄱阳湖蝶形水域的9个湖泊进行了采样, 并对湖泊水质基础性指标TN、TP、NH₃-N、NO₃-N、NO₂-N、溶解性磷酸盐、TOC、COD_{Mn}和叶绿素a进行了测定与分析。据此同时运用单因素评价法、均值型指数综合评价法和营养状态指数法对鄱阳湖蝶形水域的地表水水环境的污染现状和污染程度进行了评价, 以更全面和准确地反映鄱阳湖蝶形水域的水质状况。结果显示: (1) 鄱阳湖蝶形水域水质总体符合GB3838-2002 III类水标准; (2) 7月水质总体优于12月水质。12月总氮含量和总磷含量基本都高于7月, 叶绿素a含量除中湖池12月值略低于7月外, 其它点位12月值均高于7月。7月总氮值为0.6~1.3 mg/L, 总磷值为0.02~0.15 mg/L, 叶绿素a为2.2~6.7 mg/L; 12月总氮值为0.6~2.0 mg/L, 总磷值为0.04~0.19 mg/L, 叶绿素a为3.8~34.7 mg/L; (3) 7月和12月水质营养状态介于中营养和轻度富营养, 水体主要污染物质为总氮和总磷。7月蚌湖营养状态为轻度富营养, 其它点位为中营养, 12月除常湖、梅溪湖和大汉湖营养状态为中营养, 其它点位均为轻度富营养; (4) 位于南部的象湖、常湖、白沙湖和大汉湖水质整体较其它蝶形湖泊差, 主要是受到工业废水、生活污水和农业面源污染的赣江和饶河的污染输入影响所致。基于以上调查测试结果提出保护和改善鄱阳湖水环境的可行性措施, 以促进鄱阳湖蝶形水域水资源的开发利用, 实现经济与环境及资源的协调可持续发展。

【关键词】: 鄱阳湖; 蝶形水域; 水环境质量评价; 营养状态评价

【中图分类号】: X824 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2017)08-1189-10

DOI: 10. 11870 /cjlyzyyhj201708009

¹ 收稿日期: 2017-02-21; 修回日期: 2017-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(31270746) [the National Natural Science Foundation of China (31270746)]; 江苏省六大人才高峰(2013-JZ-014) [Six Talents Peak Project of Jiangsu Province (2013-JZ-014)]; 住房和城乡建设部科学技术项目计划(2016-R2-068) [Science and Technology Project of Ministry of Housing and Urban-rural Development (2016-R2-068)]; 江苏省高校优势学科建设工程资助项目[A Project Funded by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions]

作者简介: 刘新(1968~), 男, 硕士, 副教授, 主要从事水污染防治与修复研究. E-mail: xin126mail@126.com

*** 通讯作者** E-mail: xiaolant@163.com

上世纪 80 年代以来,随着鄱阳湖地区人口的快速增长和工业化、城镇化进程的加快,湖区生态环境遭到严重破坏,并面临着日益严峻的水污染和湿地退化威胁^[1, 2]。气象卫星遥感监测显示鄱阳湖及其附近水域面积在逐渐减小^[2]。近年来湖泊水质监测评价结果显示中国湖泊水质处于下降趋势^[3],且湖泊营养状态多介于中营养和中度富营养^[3],水源污染问题日益突出。鄱阳湖是长江的重要调蓄湖泊,年均入江水量约占长江径流量的 15.6%^[4],湖区水环境状况对鄱阳湖生态安全有着极为重要的意义^[5],其水量、水质的持续稳定直接关系到鄱阳湖周边乃至长江中下游地区的用水安全^[4, 6],也是本研究对鄱阳湖水环境进行调查分析的目的。

鄱阳湖是一种特殊的湖泊,具有典型的过水性、吞吐性和季节性特征,蝶形湖泊就形成于水位的这种季节性变化。高低不一、分布广泛的蝶形湖泊在鄱阳湖水位高低变化中起到过渡作用,能够缓解主湖区强烈水位变化带来的冲击,保持系统的稳定^[7]。以往的研究主要集中在鄱阳湖演变历史^[8]、湿地生态服务功能价值及其保护^[9, 10]、水文特征对水质的影响^[11]和水质状况等方面^[12, 13],较少关注蝶形湖泊水质,对于鄱阳湖丰、枯水期蝶形湖泊的水质状况的比较研究更少,在此背景下,本研究选取了鄱阳湖流域的 9 个蝶形湖泊作为采样点,并确定 7 月和 12 月这两个代表性时期为采样时间。对于数据的分析,在查阅近年来相关文献后发现湖泊水质评价方法较多,没有统一的评价方法,且各种评价方法都有自身的优缺点,为更全面和准确地反映研究区域水质状况,本研究采用单因素评价法、均值型指数综合评价法和营养状态指数法这 3 种常见且成熟的水质分析方法对水污染现状与程度进行分析,以实现评价方法的优势互补,为区域水污染治理与水环境保护提供更科学、更具代表性和针对性的基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

鄱阳湖是中国最大淡水湖,位于江西省北部、长江中下游南岸,介于北纬 28° 22' ~ 29° 45',东经 115° 47' ~ 116° 45',汇集赣江、修河、饶河、信江和抚河等水注入长江^[14]。其蝶形湖泊是指鄱阳湖湖盆区内枯水季节显露于洲滩之中的季节性湖泊,丰水期(4 ~ 9 月)蝶形湖泊融入主湖体,鄱阳湖呈现大湖特征,9 月以后,水位开始消落,蝶形湖依次显露,当达到一定的水位时出现孤立的水域,其与主湖区没有直接的水联系。湖面面积平水位(14~15 m)时为 3 150 km²,高水位(20 m)时为 4 125 km² 以上,低水位(12m)时为 500 km²^[15, 16]。

1.2 采样点的布设及水样的采集和保存

本研究选取鄱阳湖的 9 个蝶形湖泊即常湖、象湖、蚌湖、梅溪湖、白沙湖、大汉湖、大湖池、中湖池和朱市湖为研究对象并将其分别定为 1、2、3、4、5、6、7、8 和 9 号采样点,如图 1 所示,表 1 为采样点经纬度信息。



图 1 鄱阳湖蝶形湖泊采样点位图

Fig. 1 Sampling Point Map of Butterfly Lakes in Poyang Lake

表 1 采样点位置信息

Tab. 1 Locations of Sampling Points

	常湖	象湖	蚌湖	梅溪湖	白沙湖	大汉湖	大湖池	中湖池	朱市湖
位置	江西省南昌市新建县	江西省南昌市青云谱区	江西省九江市星子县	江西省九江市永修县	江西省南昌市新建县	江西省上饶市万年县	江西省九江市永修县	江西省九江市永修县	江西省九江市永修县
经纬度	28°54'N, 116°16'E	28°37'N, 115°53'E	29°10'N, 115°55'E	29°13'N, 116°3'E	28°55'N, 116°20'E	28°52'N, 116°49'E	29°8'N, 115°56'E	29°9'N, 116°0'E	29°10'N, 115°58'E
海拔(m)	12.01	16.02	14.02	12.01	10.01	18.83	12.01	11.01	13.64

使用便携式多参数水质分析仪采集水面下 0.5 m 处的水样，每个采样点平行采集 3 组水样，共约 600 ml。于 7 月丰水期和 12 月枯水期这两个具有代表性的时间点进行采样。样品采集后装于聚乙烯瓶中迅速带回实验室，并加硫酸酸化，置于温度设为 4℃ 的冰箱中冷藏保存并于 24 h 内完成对水样基本理化性质的测定。

1. 3 实验仪器与方法

实验中主要用到的仪器为紫外可见分光光度计、高压蒸汽灭菌器、总有机碳分析仪（非色散红外分析仪、燃烧管）、便携式多参数水质分析仪、离心机、过滤器、研钵、实验室精密电子秤和水浴锅等。

针对鄱阳湖蝶形水域污染源及主要污染物质，选取 TN、NH₃-H、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、TP、溶解性磷酸盐、TOC、COD_{Mn}、叶绿素 a 这几种水质监测项目作为评价因子进行研究分析，各种水质指标均采用国标法^[17]测定。

2 结果与分析

根据《地表水环境质量标准》（GB3838-2002），III 类水体水质可作为饮用水水源，并可满足一般湖泊水库的防洪、灌溉、

养殖和航运等大部分功能，故以它为评价鄱阳湖蝶形湖泊水环境质量的依据，具体限值如表 2 所示。

表 2 水质监测项目、分析及评价标准

Tab. 2 Items of Water Quality Monitoring, Analysis Method and Evaluation Standard

监测分析项目	实验分析方法	评价标准	标准值 (mg/L)
总氮(TN)	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	GB3838-2002	≤1.0
氨氮(NH ₃ -N)	纳氏试剂法	GB3838-2002	≤1.0
硝酸盐氮(NO ₃ ⁻ -N)	紫外可见分光光度法	GB3838-88	≤20
亚硝酸盐氮(NO ₂ ⁻ -N)	α-萘胺钼-锑-抗分光光度法	GB3838-88	≤0.15
总磷(TP)	钼酸铵分光光度法	GB3838-2002	≤0.05
溶解性磷酸盐(Soluble Phosphate)	钼锑抗分光光度法	GB3838-88	≤0.1
总有机碳(TOC)	燃烧氧化-红外吸收法	/	/
高锰酸盐指数(COD _{Mn})	酸性法	GB3838-2002	≤6
叶绿素(Chl.a)	丙酮分光光度法	/	/

2. 1 鄱阳湖蝶形湖泊水质特征及季节差异

根据上述实验方法，将采集到的鄱阳湖 9 个蝶形湖泊的水样进行处理并测定分析，并对平行的 3 组实验数据进行算数平均，结果如图 2~ 图 6 所示。

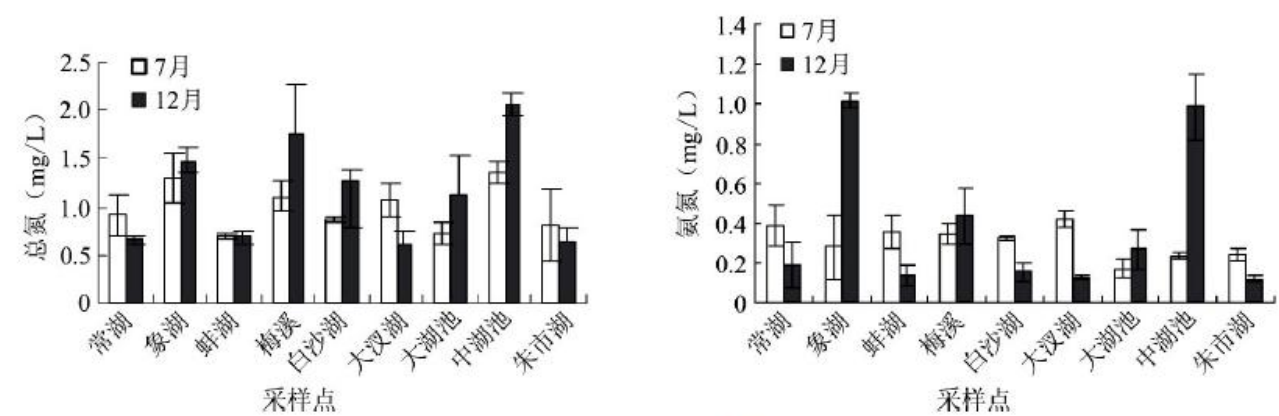


图 2 7 月和 12 月湖区总氮和氨氮含量

Fig. 2 Total Nitrogen Content and Ammonia Nitrogen Content in July and December

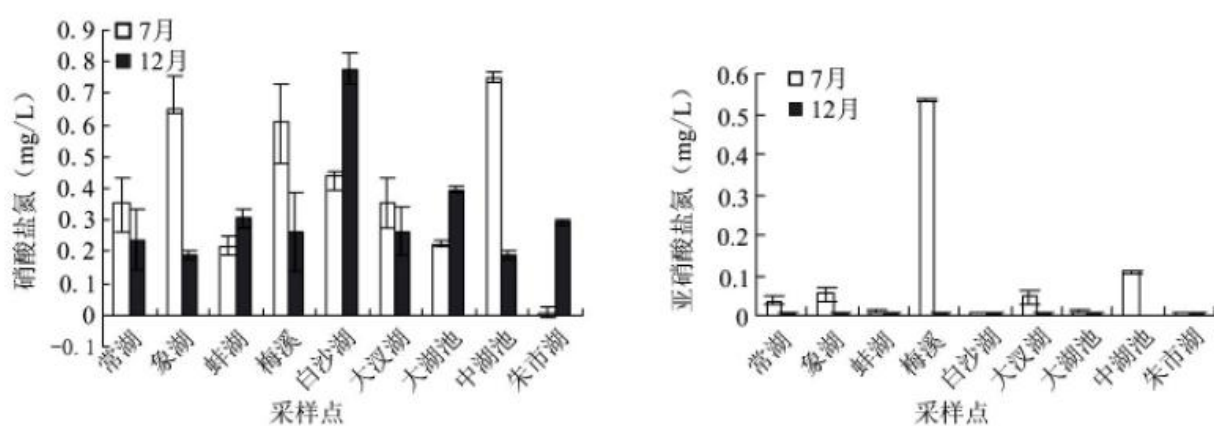


图 3 7 月和 12 月湖区硝酸盐氮和亚硝酸盐氮含量

Fig. 3 Nitrate Nitrogen Content and Nitrite Nitrogen Content in July and December

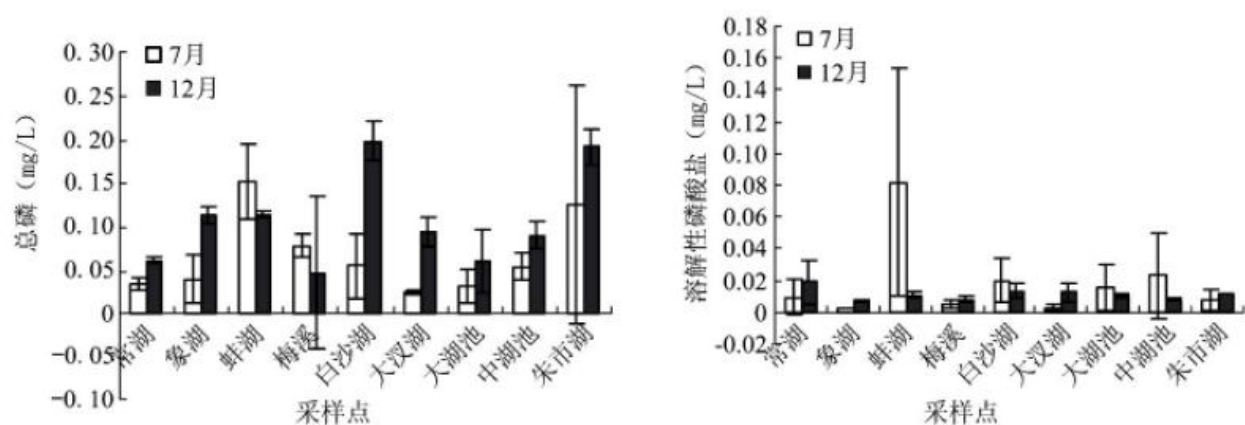


图 4 7 月和 12 月湖区总磷和溶解性磷酸盐含量

Fig. 4 Total Phosphorus Content and Soluble Phosphate Content in July and December

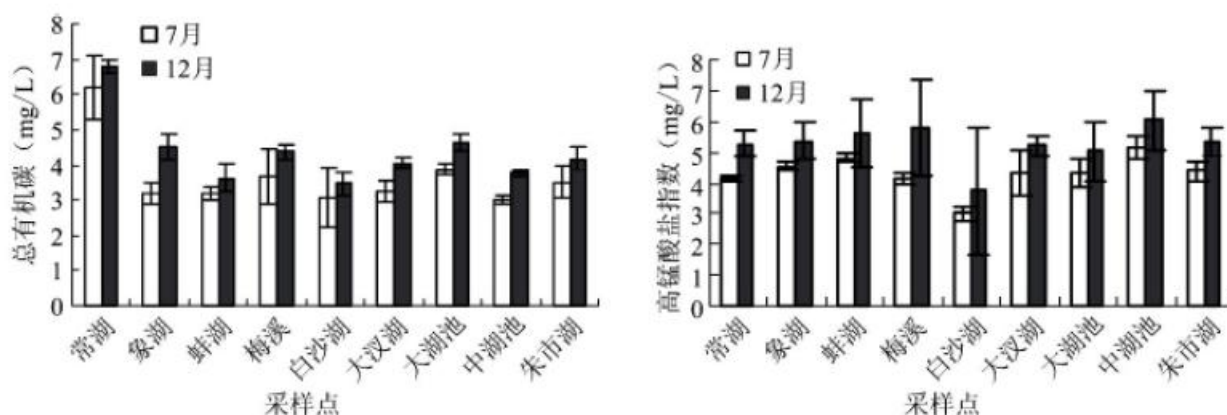


图 5 7 月和 12 月湖区 TOC 含量和 COD_{Mn} 含量

Fig. 5 Total Organic Carbon Content and COD_{Mn} Content in July and December

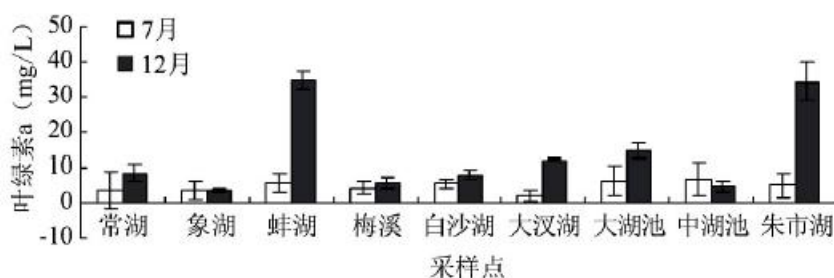


图 6 7 月和 12 月湖区叶绿素 a 含量

Fig. 6 Chl. a Content in July and December

由图 2 ~ 6 可知,鄱阳湖蝶形水域不同湖区的水质指标差异较大,污染物空间分布不均且 7 月和 12 月水质指标差异较大。

7 月总氮含量中湖池最高,总磷含量蚌湖最高,氨氮含量大汉湖最高。象湖、梅溪湖和中湖池硝态氮含量较高,中湖池亚硝态氮含量远大于其它湖区,梅溪湖和中湖池高锰酸盐指数较高,常湖 TOC 含量最高,约为其它湖区的 2 倍,各湖泊叶绿素 a 含量基本都低于 10 mg /L。12 月总氮含量中湖池最高,沙湖和朱市湖总磷含量较高,氨氮含量象湖最高,高锰酸盐指数中湖池最高,蚌湖和朱市湖叶绿素 a 含量较高,达到 35 mg /L 左右,大汉湖和大湖池叶绿素 a 含量略大于 10 mg /L,其它点位的叶绿素 a 值均低于 10 mg /L。

2. 2 鄱阳湖蝶形湖泊水质指标时空差异的驱动力分析

2. 2. 1 鄱阳湖蝶形湖泊水质单因素分析评价^[18, 19]

单项污染指数计算方法: $P_i = C_i / S_i$ (1)

式中: C_i 为指标 i 的实测浓度; S_i 为指标 i 的评价标准值。 $P_i > 1$ 说明该污染物超标, $P_i \leq 1$ 说明该污染物没有超标。

通过对鄱阳湖水体的总体状况和湖泊水域功能的调查研究,发现该水体主要用于灌溉、渔业和防洪等,故确定 TN、NH₃-H、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、TP、溶解性磷酸盐、COD_m这几个水质因子作为评价指标。表 3 为水质指标单因素评价结果。

表 3 7 月和 12 月水质指标单因素评价结果
Tab. 3 Results of Single-Factor Evaluation of Water Quality Indicators in July and December

7 月	总氮	氨氮	硝态氮	亚硝态氮	总磷	溶解性磷酸盐	高锰酸盐指数	12 月	总氮	氨氮	硝态氮	亚硝态氮	总磷	溶解性磷酸盐	高锰酸盐指数
1	0.928 4	0.388 4	0.017 6	0.242 6	0.654 0	0.095 0	0.806 0	1	0.658 4	0.185 7	0.011 9	0.052 6	1.192 0	0.189 0	0.875 5
2	1.304 2	0.280 2	0.032 6	0.352 6	0.760 0	0.025 0	0.829 1	2	1.488 4	1.014 9	0.009 3	0.060 6	2.252 0	0.072 0	0.896 0
3	0.695 4	0.358 3	0.010 8	0.052 6	3.004 0	0.818 0	0.893 5	3	0.688 3	0.138 7	0.015 2	0.052 6	2.252 0	0.109 0	0.933 3
4	1.110 5	0.348 6	0.030 4	3.558 0	1.534 0	0.053 0	0.921 1	4	1.762 1	0.437 8	0.013 1	0.054 6	0.904 0	0.082 0	0.964 3
5	0.876 6	0.326 6	0.022 1	0.056 0	1.076 0	0.199 0	0.612 0	5	1.275 2	0.156 3	0.038 8	0.053 3	3.936 0	0.133 0	0.624 0
6	1.074 1	0.423 6	0.017 6	0.303 3	0.469 4	0.030 0	0.793 8	6	0.617 1	0.127 0	0.013 2	0.050 0	1.838 0	0.123 0	0.866 6
7	0.737 8	0.169 9	0.011 2	0.053 3	0.598 0	0.153 0	0.800 3	7	1.148 2	0.268 6	0.019 7	0.056 0	1.184 0	0.102 0	0.835 5
8	1.374 0	0.235 7	0.037 5	0.729 3	1.058 0	0.228 0	0.965 1	8	2.050 2	0.986 9	0.009 5	0.008 6	1.760 0	0.080 0	1.004 3
9	0.811 4	0.238 5	0.000 1	0.048 0	2.464 0	0.074 0	0.820 5	9	0.626 9	0.120 9	0.014 5	0.052 6	3.818 0	0.116 0	0.893 3

7 月象湖、梅溪湖、大汉湖和中湖池总氮超标,蚌湖和朱市湖总磷超标,梅溪湖、白沙湖和中湖池总磷微超标。12 月象湖、梅溪湖、白沙湖、大湖池和中湖池总氮超标,常湖和大湖池总磷微超标,梅溪湖总磷接近标准值,其它点位总磷超标较严重。12 月象湖氨氮和中湖池 COD_{Mn} 微超标。12 月总氮含量和总磷含量基本都高于 7 月,部分点位如常湖、大汉湖和朱市湖 7 月总氮量略高于 12 月,蚌湖 7 月总氮量与 12 月基本相同,蚌湖和梅溪湖 7 月总磷量略高于 12 月。7 月亚硝态氮含量较 12 月高,但未超标。7 月和 12 月水质指标总体达到 GB3838-2002III 类水标准。

2. 2. 2 鄱阳湖蝶形湖泊水质均值型指数综合评价^[19]

由于各采样点水体污染源和污染类型不同,为综合评价各湖区的水质状况,故采用均值型指数综合评价法进行评价,根据所得的综合污染指数,查询表 4^[20]得到其污染级别,结果如表 5 所示,表 5 还示出了单因素评价法中的超标污染物。

表 4 地表水质量分级标准
Tab. 4 Classification of Surface Water Quality Standards

水质指数	污染级别	分级依据
<0.2	清洁	多数项目未检出,个别项目检出也在标准内
0.2~0.4	尚清洁	检出值均在标准内,个别接近标准
0.4~0.7	轻污染	个别项目检出值超过标准
0.7~1.0	中污染	至少有两项检出值超过标准
1.0~2.0	重污染	有相当一部分检出值超过标准
>2.0	严重污染	相当一部分检出值超过标准值数倍或几十倍

表 5 7 月和 12 月水质指标均值型指数

Tab. 5 Average Index of Water Quality in July and December

7 月	均值型综合污染指数	污染级别	超标污染物	12 月	均值型综合污染指数	污染级别	超标污染物
1	0.447 4	轻污染	无	1	0.4521	轻污染	总磷
2	0.511 9	轻污染	总氮	2	0.8276	中污染	总氮、氨氮、总磷
3	0.833 2	中污染	总磷	3	0.5984	轻污染	总磷
4	1.079 3	重污染	总氮、亚硝态氮、总磷	4	0.6025	轻污染	总氮
5	0.452 6	轻污染	总磷	5	0.8881	中污染	总氮、总磷
6	0.444 5	轻污染	总氮	6	0.5192	轻污染	总磷
7	0.360 5	尚清洁	无	7	0.5162	轻污染	总氮、总磷
8	0.661 1	轻污染	总氮、总磷	8	0.8428	中污染	总氮、总磷、高锰酸盐指数
9	0.636 6	轻污染	总磷	9	0.8060	中污染	总磷

$$P = \left(\sum_{i=1}^n P_i \right) / n \quad (2)$$

综合污染指数计算方法：

式中：P_i为单项污染指数； P 为综合污染指数； n 为所选取的指标个数。

由表 5 可知鄱阳湖蝶形湖泊大多为轻污染，总体符合地表水 GB3838-2002III类水标准，主要污染物为总氮和总磷，这与以前的研究结果一致。7 月除蚌湖和梅溪湖外其它湖泊污染程度均在轻污染以下。12 月象湖、白沙湖、中湖池和朱市湖为中污染，其余湖泊为轻污染。故冬季污染程度总体比夏季严重，这与单因素分析评价法得到的结论相一致。

表 5 显示 7 月常湖和蚌湖及 12 月朱市湖的均值型指数综合评价结果与单因素评价结果不一致，其它评价结果均吻合。这主要是由于当部分水质指标未超标但接近标准值时，会使得均值型指数综合评价结果较单因素评价结果差，而当水质指标微超标时，会使得单因素评价结果较均值型指数综合评价结果差。均值型指数法计算结果是一种综合值，综合了各种因素对水质的影响，但隐藏了分项指标的数值，不利于提出具体的污染控制目标。其误差整体较小，在满足评价精度与准确性基础上，大大简化了计算过程。单因素评价法对污染最重因子赋予 100%权重，评价结果表现为过保护，但评价过程简单，可根据评价结果提出具体的控制措施。故本文将这两种方法结合使用可实现双赢。

2. 2. 3 营养状态指数法综合评价鄱阳湖蝶形湖泊富营养化程度

藻类会增加沉积氮、磷的循环通量^[21]，在水中保留大量的营养物质，导致富营养化的反馈并刺激藻类生长，而水生植物的大量繁殖会加速湖泊淤积和沼泽化过程^[22]。

据湖泊富营养化评价的相关研究^[23]，最能表征湖泊营养程度的因子是叶绿素 a，其浓度反应了浮游植物的生物量^[24]，被称为基准因子，总磷是湖泊富营养化的限制因子，被称为重要因子。根据我国湖泊的实际情况，按照相关性、可操作性、科学性和简洁性相结合的原则，选取叶绿素 a(Chl. a)、总磷(TP)、总氮(TN)、透明度(SD)和高锰酸盐指数(CODMn) 5 个参数为评价因子，进行相关加权营养状态指数评价。

各评价因子营养状态指数采用修正的卡尔森指数^[25]计算方法：

$$TLI(Chl.a) = 10(2.5 + 1.086 \ln Chl.a) \quad (3)$$

$$TLI(TP) = 10(9.436 + 1.624 \ln TP) \quad (4)$$

$$TLI(TN) = 10(5.453 + 1.694 \ln TN) \quad (5)$$

$$TLI(SD) = 10(5.118 - 1.94 \ln SD) \quad (6)$$

$$TLI(COD_{Mn}) = 10(0.109 + 2.661 \ln COD_{Mn}) \quad (7)$$

$$TLI(\sum) = \sum_{j=1}^n W_j \times TLI(j) \quad (8)$$

$$W_j = r_{ij}^2 / \sum_{j=1}^n r_{ij}^2 \quad (9)$$

式中: $TLI(\sum)$ 为综合营养状态指数; W_j 为第 j 种参数营养状态指数的相关权重; $TLI(j)$ 为第 j 种参数的营养状态指数; r_{ij} 为第 j 种参数与基准参数 $Chl.a$ 的相关关系^[26], 如表 6 所示, n 为评价参数个数。

表 6 相关关系参数 r_{ij} 和 r_{ij}^2

Tab. 6 Correlation Parameter r_{ij} and r_{ij}^2

各水质参数与 Chl.a 的相关关系	叶绿素 a	总磷	总氮	透明度	高锰酸 盐指数
r_{ij}	1	0.84	0.82	-0.83	0.83
r_{ij}^2	1	0.705 6	0.672 4	0.688 9	0.688 9

表 7 综合营养状态指数评价标准

Tab. 7 Assessment Standard of Eutrophication by
Comprehensive Eutrophication State Index

营养状态	贫营养	中营养	富营养		
$TLI(\sum)$	<30	30~50	轻度富营养	中度富营养	重度富营养
			50~60	60~70	>70

根据得到的综合营养状态指数, 查询表 7^[25], 可得各湖泊的营养状况, 如表 8 所示。

表 8 夏季 7 月和冬季 12 月营养状态综合评价结果

Tab. 8 Results of Comprehensive Evaluation of Nutritional Status in July and December

时间	点位	单因子营养状态指数 $TLI(j)$					综合营养状态指数 $TLI(\sum)$	营养状态
		TP	TN	COD_{Mn}	SD	Chl. a		
7 月	1	38.813 0	53.271 4	43.029 7	51.180 0	38.769 7	44.431 8	中营养
	2	41.252 4	59.029 0	43.783 7	47.642 9	39.558 8	45.620 5	中营养
	3	63.572 4	48.376 2	45.772 2	55.508 9	44.050 9	50.910 1	轻度富营养
	4	52.658 0	56.305 4	46.583 6	47.642 9	41.189 4	48.223 4	中营养
	5	46.898 8	52.298 9	35.702 6	64.627 0	43.682 4	48.207 3	中营养
	6	33.426 9	55.740 9	42.624 9	47.642 9	33.746 2	41.801 4	中营养
	7	37.359 2	49.378 8	42.841 9	55.508 8	45.391 9	45.984 5	中营养
	8	46.624 9	59.912 2	47.825 2	49.330 9	45.731 5	49.482 3	中营养
	9	60.354 3	50.989 6	43.504 1	47.642 9	42.794 2	48.580 0	中营养
12 月	1	48.561 5	47.450 0	45.230 6	47.642 9	48.422 4	47.546 0	中营养
	2	58.893 2	61.267 0	45.846 5	49.330 9	39.550 2	50.021 0	轻度富营养
	3	58.893 2	48.202 3	46.932 2	54.332 8	63.538 2	55.185 7	轻度富营养
	4	44.070 2	64.126 6	47.802 2	49.330 9	43.870 3	49.257 1	中营养
	5	67.960 7	58.648 1	36.219 3	68.956 8	47.738 8	55.269 9	轻度富营养
	6	55.594 2	46.352 6	44.960 8	49.330 9	52.114 2	49.913 8	中营养
	7	48.452 2	56.871 0	43.986 2	53.223 9	54.088 9	51.516 3	轻度富营养
	8	54.890 0	66.691 8	48.883 7	51.186 4	42.213 5	51.846 7	轻度富营养
	9	67.466 4	46.619 5	45.767 2	49.330 9	63.435 2	55.354 3	轻度富营养

由表 8 可知, 鄱阳湖蝶形湖泊营养状态介于中营养和轻度富营养, 且季节性变化明显, 冬季营养状态高于夏季。同一季节不同湖区营养状态差异也较大, 7 月蚌湖富营养化程度最大, 大汉湖最小, 两者相差 9. 10, 12 月朱市湖富营养化程度最大, 常湖最小, 两者相差 7. 81。在 5 个评价因子中, 总氮和总磷的营养状态在 7 月和 12 月都较高, 部分湖区总氮和总磷已经达到中度富营养状态, 尤其在 12 月, 最大值接近重度富营养状态。叶绿素 a 在 7 月总体处于中营养状态, 在 12 月总体处于轻度富营养状态。

2. 2. 4 鄱阳湖蝶形湖泊水质变化的驱动力分析

鄱阳湖污染物主要来自入湖五河河水^[27]及鄱阳湖周边地区^[28], 按来源分为城市生活污水源、工业废水源、农业非点源与地表径流源以及其它人类活动源。

内因: 枯水期水位和湖泊水面面积远低于丰水期, 而枯、丰水期的污染物排放量无太大变化, 即丰水期纳污能力大于枯水期, 使得 7 月水质整体优于 12 月。鄱阳湖水体水量交换系数大, 湖泊富营养化风险低^[29], 故湖泊营养状态介于中营养与轻度富营养。

外因: ①温度: 夏季温度高, 湖泊中溶解氧含量较低, 易呈现还原性氛围, 生成亚硝态氮, 故 7 月各湖泊亚硝态氮含量高于 12 月。受水位和气温等条件的影响, 枯水期湖泊大量水生植物枯萎和死亡, 对水体污染物净化能力减弱, 这也是 12 月水质较 7 月差的原因之一。已有研究表明气候变化对鄱阳湖自然生态有明显广泛的影响^[30]。水温升高会使底泥营养盐释放量加大, 对水质产生负面影响, 故部分点位如常湖和大汉湖 7 月总氮较 12 月高, 蚌湖和梅溪湖 7 月总磷较 12 月高。②城镇化: 象湖位于青云谱区, 该区工业基础雄厚, 第三产业发达。周边有朝阳农场和昌南工业园, 致使养殖废水和城市工业废水排放量较大。该区城市化水平较其它点位高, 有较多酒店、饭馆、社区、学校和砖瓦厂等建筑物, 且该区建了一个著名景点——象湖公园。城镇化破坏了该区域正常的水循环, 使得年降水量下降^[31, 32], 原有透水区域不断被混凝土建筑及沥青路面所取代, 减少了雨水

的下渗,增加了地表径流速,地表径流的侵蚀和搬运能力增加,引起受纳水体的面源污染。③地理位置:采样湖泊分布较广,环境参数差异性较大。且湖区人口密度和经济发展程度存在差异,排放的污染物类型和含量差异较大。人为因素的影响也使得各水质指标波动较大。常湖、象湖、白沙湖和大汉湖总体污染程度高于其它蝶形湖泊,即蝶形湖泊营养盐浓度呈现南高北低分布,这与之前的研究结果相一致,可能是由于常湖、象湖和白沙湖受南部污染较重的入湖支流赣江影响,大汉湖受污染较重的入湖支流饶河影响。④农业面源污染:不合理的化肥农药施用方法及时间使得氮磷出现较高盈余,随地表径流最终进入鄱阳湖水域,使得水体富营养化进程加快。饶河养殖业发达,向水体排入大量悬浮物质和营养盐,使得大汉湖含氮量明显偏高。大湖池周围有大量农田,在秋收后田内土壤中营养物缺乏农作物等植物的固定而流失进入水体,这可能是大湖池 12 月总氮超标、总磷微超标的主要原因。环鄱阳湖区面源污染存在显著的空间分异特征,高负荷区在南昌市辖、南昌县和新建县,这与耕地的分布相符,这也是导致象湖 7 月和 12 月总氮超标的原因之一。⑤城市生活污水污染:生活污水中氮、磷含量高,直接排放或超标排放会使水体水质严重下降。赣江为最大入湖河流,沿岸城镇较多,其下游流经人口基数较大的南昌市,使得城市用水对象湖总磷的贡献较大,这也可能是 12 月象湖氨氮微超标和中湖池高锰酸盐指数微超标的原因之一。

3 讨论

(1) 湖泊管理方式的改进研究

①保护优先:湖泊生态功能与其管理方式密切相关,不同管理模式的蝶形湖泊在生物多样性水平和承载越冬候鸟能力上有较大的差异^[7]。②合理开发利用:控制湿地开发规模,稳定湿地面积。保持主湖区必要的生态水位,遏制湿地植被生态系统退化和蝶形湖泊自然干涸现象。③建立系统的监测体系:连续监测,认识湿地生态系统现状及其演化规律,及时科学地调整湿地开发利用模式。

(2) 湖泊污染治理方法的研究

①改变污染控制方式,全盘考虑,综合管理,实现以源头控制为主、末端治理为辅的污染控制方式。②转变经济发展模式,改变粗放式增长方式和不合理的产业结构。③转变农业发展模式,合理规划养殖区域和规模,开展农业养殖污染控制,推广农药、化肥及地膜科学使用模式。④健全保护机制:设立水质保护机构,建立保护基金,加大环境保护人力和物资的投入。⑤对周边企业加大监管力度,监督企业相关治污设施的正常运转。⑥在考虑鄱阳湖的环境容量基础上,结合鄱阳湖周边及上游城市的经济、技术状况等对其污水处理设施进行优化升级。⑦加大宣传教育力度。

4 结论与展望

(1) 鄱阳湖蝶形湖泊水质指标单因素分析法和均值型指数综合评价法的分析结果基本一致,皆表明 2014 年鄱阳湖蝶形水域夏季 7 月和冬季 12 月的水质总体符合 GB3838-2002III 类水标准,湖区水体主要污染物质为总氮和总磷,水质时空差异较大。

(2) 营养状态指数法分析表明该水域营养状态介于中营养和轻度富营养,冬季营养程度明显高于夏季。

(3) 虽然鄱阳湖蝶形水域水质总体达到了 GB3838-2002III 类水标准,但根据全国地表水水质月报中鄱阳湖历史水质数据,发现其污染程度是在逐渐加重的且其水域面积在不断地缩小。从演变过程来看,氮磷的积累会加快湖泊的逆向自然演替,这应引起我们足够的重视。

鄱阳湖作为中国第一大淡水湖泊,其资源、环境、生态及经济意义重大。本文只讨论了鄱阳湖 2014 年 7 月和 12 月 9 个蝶形湖泊的水质状况,没有涉及其它年份水质状况,得出的结论有一定的局限性,为获得对鄱阳湖蝶形湖泊水质污染来源及水质状况时空差异的全面认识,未来研究工作可拓展研究的时间尺度和空间尺度,进行年间水质情况的比较研究及扩大研究区域

范围,同时可进行鄱阳湖五大入湖河流水质与蝶形湖泊水质的比较研究,为更好地保护和开发利用鄱阳湖打下坚实的科学基础。

参考文献:

- [1] 余进祥,刘娅菲,钟晓兰,等. 鄱阳湖水体富营养化评价方法及主导因子研究[J]. 江西农业学报,2009,21(4):125—128.
- 【YU J X, LIU Y F, ZHONG X L, et al. Evaluation method of eutrophication in Poyang Lake and its leading factors [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2009, 21(4): 125—128.】
- [2] 王苏民,窦鸿身. 中国湖泊志 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- 【WANG S M, DOU H S. China Lake [M]. Beijing: Science Press, 1998.】
- [3] 黄文钰,吴延根,舒金华. 中国主要湖泊水库的水环境问题与防治建议 [J]. 湖泊科学, 1998, 10(3): 83—90.
- 【HUANG W Y, WU Y G, SHU J H. Hydrographical environmental problems and countermeasures of main lakes and reservoirs in China [J]. Journal of Lake Science, 1998, 10(3): 83—90.】
- [4] 郎少杰,彭游. 建设环鄱阳湖生态经济区的策略研究—以九江市为例 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(8): 4200—4201, 4281.
- 【LANG S J, PENG Y. Study on the strategies about the construction of surrounding ecological-economic zone of Poyang Lake [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(8): 4200—4201, 4281.】
- [5] XIE H L, WANG P, HUANG H S. Ecological risk assessment of land use change in the Poyang Lake eco-economic zone [J]. China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2013, 10(1): 328—346.
- [6] 金斌松,聂明,李琴,等. 鄱阳湖流域基本特征、面临挑战和关键科学问题 [J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(3): 268—275.
- 【JIN B S, SHE M, LI Q, et al. Basic characteristics, challenges and key scientific questions of the Poyang Lake basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(3): 268—275.】
- [7] 胡振鹏,张祖芳,刘以珍,等. 碟形湖在鄱阳湖湿地生态系统的作用和意义 [J]. 江西水利科技, 2015, 41(5): 317—323.
- 【HU Z P, ZHANG Z F, LIU Y Z, et al. The function and signification of the Shallow-Lakes in the Poyang Lake wetland ecosystem [J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2015, 41(5): 317—323.】
- [8] 刘志刚,倪兆奎. 鄱阳湖发展演变及江湖关系变化影响 [J]. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1265—1273.
- 【Liu Z G, Ni Z K. The rules and the effects of varing river-lake relationships on the evolution of Poyang

Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(5) : 1265—1273】

[9] 胡振鹏, 葛刚, 刘成林, 等. 鄱阳湖湿地植物生态系统结构及湖水位对其影响研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(6) : 597—605.

【HU Z P, GE G, LIU C L, et al. Structure of Poyang Lake wetland plants ecosystem and influence of lake water level for the structure [J]. *Resources and Environmental in the Yangtze Basin*, 2010, 19(6) : 597—605. 】

[10] 谢冬明, 邓红兵, 王丹寅, 等. 鄱阳湖湿地生态功能重要性分区 [J]. 湖泊科学, 2011, 23(1) : 136—142.

【XIE D M, DENG H B, WANG D Y, et al. Zoning of ecological function importance for Lake Poyang wetlands [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(1) : 136—142. 】

[11] 张琍, 陈晓玲, 张媛, 等. 水文地貌分区下鄱阳湖丰水期水质空间差异及影响机制 [J]. 中国环境科学, 2014, 34(10) : 2637—2645.

【ZHANG L, CHEN X L, ZHANG Y, et al. Spatial distribution of water quality and its impacting factor in the wet season of Poyang Lake using the hydro-geomorphological partitions [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(10) : 2637—2645. 】

[12] 王圣瑞, 舒俭民, 倪兆奎, 等. 鄱阳湖水污染现状调查及防治对策 [J]. 环境工程技术学报, 2013, (4) : 342—349.

【WANG S R, SHU J M, NI Z K, et al. Investigation on pollution situation and countermeasures in Poyang Lake [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2013, 3(4) : 342—349. 】

[13] 郭秋平, 张婷, 张建. 鄱阳湖枯水期水体主要污染物时空分布差异性研究 [J]. 江西水利科技, 2016, 42(2) : 103—107.

【GUO Q P, ZHANG T, ZHANG J. Researches on the spatial and temporal distribution of primary water pollutants during dry season in Poyang Lake [J]. *Jiangxi Hydraulic Science&Technology*, 2016, 42(2) : 103—107. 】

[14] 谢冬明, 严岩, 邓红兵, 等. 江西省“五河”流域水文特征初步研究 [J]. 江西农业大学学报, 2009, 31(2) : 364—369.

【XIE D M, YAN Y, DENG H B, et al. A study on the hydrological characters in the Five River-catchments in Jiangxi Province [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2009, 31(2) : 364—369. 】

[15] 熊小群. 江西水系 [M]. 武汉: 长江出版社, 2007.

[16] 马海良, 肖钰田, 梁雨欣. 鄱阳湖水质评价及治理对策分析 [J]. 安徽农业科学, 2013, 41(30) : 12129—12131.

【MA H L, XIAO Y T, LIANG Y X. Evaluation of Poyang Lake's water quality and control measures [J]. *Journal*

of Anhui Agri. Sci, 2013, 41(30) : 12129—12131. 】

[17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[18] 彭文启, 张祥伟. 现代水环境质量评价理论和方法 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 32—39.

[19] 牟春友, 徐坤. 在评价微污染水体中均值污染指数评价方法和活性污染指数评价方法的比较 [J]. 中国环境监测, 2009, 25(3) : 104—106.

【MOU C Y, XU K. The comparison of light polluted water quality assessment by using the average pollution index and the active pollution index [J]. Environmental Monitoring in China, 2009, 25(3) : 104—106. 】

[20] 贺克雕. 滇池水质状况综合评价及变化趋势分析 [J]. 人民长江, 2012, 43(12) : 37—41.

【HE K D. Comprehensive evaluation and trend analysis for water quality of Dianchi Lake [J]. Yangtze River, 2012, 43(12) : 37—41. 】

[21] 申哲民, 张涛, 马晶, 等. 富营养化与温度因素对太湖藻类生长的影响研究 [J]. 环境监控与预警, 2011, 3(2) : 1—4.

【SHEN Z M, ZHANG T, MA J, et al. Study of effects of eutrophication and temperature on algal growth in Taihu Lake [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2011, 3(2) : 1—4. 】

[22] 戴国飞, 张伟, 彭宁彦, 等. 枯水期鄱阳湖及其滨湖水体氮磷等污染物分布与藻华风险研究 [J]. 生态环境学报, 2015, 24(5) : 838—844.

【DAI G F, ZHANG W, PENG N Y, et al. Study on distribution of N and P pollutants and risk of cyanobacteria bloom in Poyang Lake and Waters around the Lake during drought periods [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(5) : 838—844. 】

[23] 霍守亮, 陈奇, 席北斗, 等. 湖泊营养物基准的候选变量和指标 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(6) : 1445—1451.

【HUO S L, CHEN Q, XI B D, et al. Candidate variables and indicator for lake nutrient criteria [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(6) : 1445—1451. 】

[24] LAU S S S, LANE S N. Biological and chemical factors influencing shallow lake eutrophication: A long-term study [J]. Science of the Total Environment, 2002, 288(3) : 167—181.

[25] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准 [J]. 中国环境监测, 2002, 18(5) : 47—49.

【WANG M C, LIU X Q, ZHANG J H. Evaluate method and classification standard on lake entrophication [J]. Environmental Monitoring in China, 2002, 18(5) : 47—49. 】

-
- [26] 金相灿. 中国湖泊环境 [M]. 北京: 海洋出版社, 1995.
- [27] 邓燕青, 张志章, 赵义君, 等. 鄱阳湖综合水环境特征研究 [J]. 江西水利科技, 2016, 42(2): 108—114.
- 【DENG Y Q, ZHANG Z Z, ZHAO Y J, et al. Researches on the water environments of Poyang Lake [J]. Jiangxi Hydraulic Science&Technology, 2016, 42(2): 108—114. 】
- [28] 李荣昉, 张颖. 鄱阳湖水质时空变化及其影响因素分析 [J]. 水资源保护, 2011, 27(6): 9—13, 18.
- 【LI R F, ZHANG Y. Analysis of spatial and temporal variation of water quality and its influencing factors in Poyang Lake [J]. Water Resources Protection, 2011, 27(6): 9—13, 18. 】
- [29] 胡春华, 周文斌, 肖化云, 等. 鄱阳湖富营养化现状及其正态分布特征分析 [J]. 人民长江, 2010, 41(19): 64—68.
- 【HU C H, ZHOU W B, XIAO H Y, et al. Eutrophication state and normal distribution features of Poyang Lake [J]. Yangtze River, 2010, 41(19): 64—68. 】
- [30] 殷剑敏, 苏布达, 陈晓玲. 鄱阳湖流域气候变化影响评估报告 [M]. 北京: 气象出版社, 2011.
- 【YIN J M, SU B D, CHEN X L. Report on the impact assessment of climate change in Poyang Lake basin[M]. Beijing:China Meteorological Press, 2011. 】
- [31] YE X C, ZHANG Q, LIU J, et al. Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang Lake catchment, China [J]. Journal of Hydrology, 2013, 494(6): 83—95.
- [32] YAN D, SCHNEIDER U A, SCHMID E, et al. Interactions between land use change, regional development, and climate change in the Poyang Lake district from 1985 to 2035 [J]. Agricultural Systems, 2013, 119(70): 10—21.