

白洋淀水环境质量评价

杨丽伟^{1,2}, 陈诗越^{2,3}

(1. 聊城大学 环境与规划学院, 山东 聊城 252059; 2. 江苏师范大学 城市与环境学院, 江苏 徐州 221116;
3. 山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂大学, 山东 临沂 276000)

摘要: 由于流域人类活动和气候干旱化的影响, 白洋淀水体污染与富营养化日趋严重。通过对白洋淀湖水化学成分的分析, 并运用与湖泊富营养化关系最为密切的 Chl_a、TN、TP、COD_{Mn}和 SD 作为评价参数, 采用综合营养指数法确定湖水营养类型。湖水水质监测数据分析表明, 白洋淀为重碳酸类钠组 0 型水的偏碱性湖泊, 综合营养指数法确定湖水为中富营养级湖泊水体。主成分分析法结果显示, 湖泊污染的主要因子是 TP。借助硅藻及其组合分析了湖泊富营养化状况, 发现白洋淀硅藻属种以耐营养种梅尼小环藻 *Cyclotella meneghiniana* (20.43%) 和 *Cyclostephanos tholiformis* (25.40%) 为组合特征, 表明湖泊水体已处于富营养化状态, 水环境状况堪忧。

关键词: 白洋淀; 水质特征; 主成分分析; 湖泊富营养化; 沉积硅藻

中图分类号: X542 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)03-0457-06

Assessment of water environment quality of Baiyang Lake

YANG Liwei^{1,2}, CHEN Shiyue^{2,3}

(1. School of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China;

2. School of City and Environment, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China; 3. Key Laboratory of

Soil & Water Conservation and Environment Preservation in Shandong Province, Linyi University, Linyi 276000, China)

Abstract: The impacts of human activities and dry climate aggravate the water pollution and eutrophication in the Baiyang Lake. Through the analysis of hydrochemical compositions of the water, five indexes [Chl_a, TN, TP, COD_{Mn}, and SD], which are related to water eutrophication, are selected as evaluation parameters, and the comprehensive nutrition index method is adopted to determine the water eutrophication type. The results of water quality monitoring data show that the type of water is CN_{II}, and the lake is in mesotrophic or eutrophic state determined by the comprehensive nutrition index method. The principal component analysis results show that TP is the main factor to cause water pollution in the lake. According to the analysis of diatom and its combination, the diatom in the lake is characterized by the combination of eutrophic species *Cyclotella meneghiniana* (20.43%) and *Cyclostephanos tholiformis* (25.40%), which indicates that the lake is in the eutrophication state and water environment is in danger.

Key words: Baiyang Lake; water quality characteristics; principal component analysis; lake eutrophication; sedimentary diatoms

水是人类社会发展的基础性自然资源和战略性经济资源, 是支撑地球生命系统的关键要素和生态系统良性运行的控制因子^[1]。但随着工业化、城镇化以及人口的增加, 水质污染持续加剧, 水体富营养化日趋严重。环境保护部最近发布的《2012 中国环境状况公报》表明我国富营养化湖泊(水库)达 25.0%。湖泊水环境状况是区域生态环境健康与否的标志, 关系着区域生态环境演化的方向, 影响着流域人民群

众的生活和地方工农业的生产, 对区域的可持续发展具有极为重要的意义^[2]。

白洋淀是中国海河平原上最大的湖泊, 处于京、津、石三大城市的中心地带, 主要承接上游萍河、府河、漕河、唐河、瀑河、孝义河、潞龙河及白沟引河 8 条河流的洪沥水, 是华北地区最大的淡水浅湖草本沼泽型湿地生态系统, 在调洪蓄水、灌溉生产、航运渔业和调节生态平衡方面起着巨大的作

收稿日期: 2014-07-14 修回日期: 2015-04-09 网络出版时间: 2015-05-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150513.1512.005.html>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“全新世以来东平湖变迁与黄河洪水关系及动力机制研究”(41072258); 山东省水土保持与环境保育重点实验室开放基金“人类活动对山东典型湖库生态环境影响的定量研究”(STKF2012001)

作者简介: 杨丽伟(1986-), 女, 山东成武人, 主要从事湖泊生态与环境方面研究。E-mail: Yangliwei2013a@126.com

用³⁾。从历史来看,白洋淀曾经水质良好,生态环境优良。有研究表明^[4-5],自 1970 年以后,由于淀区及流域工农业的迅速发展以及旅游养殖业的兴起,人口剧增,大量的工业废水、生活污水随地表径流直接排入湖中,再加上降水减少导致补给水量锐减,湖泊水位下降,湖水自净能力逐渐降低,湖泊富营养化程度越来越高,生态平衡遭到严重破坏。因此,科学客观的评价白洋淀水质状况,判断其营养类型,对湖区的水质管理及其富营养化的控制具有重要的理论与现实意义。本文首先对白洋淀湖水化学成分进行分析,并运用综合营养指数法确定湖泊的营养状况,然后通过主成分分析法确定湖泊污染的主要环境因子,进一步借助硅藻对湖泊营养状况的指示意义开展对白洋淀水环境的研究,以期运用多种方法相结合的手段更确切的揭示白洋淀水环境质量的状况,为白洋淀湖泊水质与环境保护提供参考。

1 样品采集与研究方法

1.1 样品采集

2010 年按 4 个季节在水下 20 cm 处采集水样,具体采样地点见表 1。现场测量了透明度(SD)、pH 值、和表层水温度(T)等指标,室内测试则在中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境国家重点实验室进行测试分析,分析项目包括氨态氮(NH₃-N)、亚硝态氮(NO₂-N)、硝态氮(NO₃-N)、总氮(TN)、PO₄³⁻、总磷(TP)、叶绿素 a(Chla)、化学耗氧量(COD)、CO₃²⁻、HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺等。

另外,采集了表层 0.5 cm 泥样,用于硅藻分析。对硅藻样品采用标准方法处理^[6],取 0.5 g 左右泥样先加少量浓 HCl 去处碳酸盐;稍后加 30% 的 H₂O₂ 去除有机质;待反应结束后,加满蒸馏水清洗 3 次并离心,提取硅藻浓缩液硅藻制片后在 Leica 生物显微镜下进行鉴定和计数。硅藻鉴定根据 Krammer 和 Lange Bertalot 的分类系统^[7]。每个样品统计至少 500 粒,属种丰度用百分比表示。

表 1 采样点位置及时间

Tab. 1 Location of sampling sites and sampling time

湖名	经纬度	采样时间	备注
白洋淀	115° 59.238' E; 38° 55.576' N	2010 04 15	
	116° 02.280' E; 38° 50.913' N	2010 08 02	全是水草,发臭
	116° 02.220' E; 38° 51.043' N	2010 10 10	底部水草丰富
	116° 02.255' E; 38° 50.867' N	2010 12 10	

1.2 富营养化评价方法

与水体富营养化相关的指标主要包括水温、溶解氧(DO)、叶绿素(Chla)、透明度(SD)、总磷(TP)、总氮(TN)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、流速等^[8]。本文选取了 Chla、TP、TN、SD、COD_{Mn} 五项指标,运用综合营养指数法^[9],对白洋淀水体富营养化状态进行评价,所用公式如下:

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI(j) \quad (1)$$

式中:TLI 表示水体的综合营养状态指数;W_j 表示第 j 种参数营养状态指数权重;TLI(j) 表示第 j 种参数营养状态指数。

以 Chla 作为基准参数,则第 j 种参数的归一化的相关权重计算公式为

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

式中:r_{ij} 为第 j 种参数与基准参数 Chla 的相关系数;m 为评价参数的个数。中国湖泊的 Chla 与其它参数之间的相关系数 r_{ij} 及 r_{ij}² 见表 2。

表 2 中国湖泊部分参数与 Chla 的相关系数 r_{ij} 及 r_{ij}² 值

Tab. 2 The correlation coefficient values of r_{ij} and r_{ij}² between the lake parameters in China and Chla

参数	Chla /(ug · L ⁻¹)	TP /(mg · L ⁻¹)	TN /(mg · L ⁻¹)	SD /m	COD _{Mn} /(mg · L ⁻¹)
r _{ij}	1.00	0.84	0.82	-0.83	0.83
r _{ij} ²	1.0000	0.7056	0.6754	0.6889	0.6889

营养状态指数计算公式为:

$$TLI(Chla) = 10(215 + 11086 \ln C_{Chla}) \quad (3)$$

$$TLI(TP) = 10(91436 + 11624 \ln C_{TP}) \quad (4)$$

$$TLI(TN) = 10(51453 + 11694 \ln C_{TN}) \quad (5)$$

$$TLI(SD) = 10(51118 - 1194 \ln C_{SD}) \quad (6)$$

$$TLI(COD) = 10(0.109 + 2.66 \ln C_{COD_{Mn}}) \quad (7)$$

式中:C 表示各种指标的浓度;C_{Chla} 的浓度单位为 μg/L;SD 单位为 m;其他指标浓度单位为 mg/L。

为明确说明湖泊的富营养程度,根据 TLI(Σ) 的一系列连续数值对湖泊的富营养程度进行分级,分级标准见表 3。

表 3 湖泊水体的营养指数分级

Tab. 3 Classification of the nutrition index in the lake

营养级别	贫营养	中营养	富营养	轻度富营养	中度富营养	重度富营养
营养状态指数 TLI(Σ)	< 30	30~ 50	> 50	50~ 60	60~ 70	> 70

1.3 主成分分析方法

湖泊水质系统是多因子组成的复杂系统,各污染因子间具有不同程度相关性,且可反映水质质量的某一方面,因此水质评价将受诸多因子的影响^[10]。主成分分析方法是一种降维多元统计分析方法,广泛用于水质污染的综合评价,主成分分析法的主要分析步骤见文献[11]。

2 结果与分析

2.1 水质监测结果分析

从水质监测结果表 4 来看,白洋淀湖水中主要离子为重碳酸根、钠离子,两者分别占阴离子毫克当量总数的 38.8% 和 50.5%;阴离子浓度依次为 HCO₃⁻ > Cl⁻ > SO₄²⁻ > CO₃²⁻,阳离子中 Na⁺ > Mg²⁺ > Ca²⁺ > K⁺,按 O. A 阿列金分类,白洋淀湖水属于重碳酸类钠组 0 型水。湖水电导率平均为 917.8 us/cm, pH 值平均为 8.36,为偏碱性湖泊,较适宜大量藻类的繁殖,引起湖泊水质的下降^[12]。湖水矿化度全年平均为 750.11 mg/L,总硬度为 14.5 德国度,属中矿化度中等硬水。湖水中有有机物耗氧量平均为 13.12 mg/L,冬季较低,夏季较高,这可能与旅游业的发展及渔业网箱养殖有关^[13]。夏季旅游业较旺盛,生活垃圾污染严重引起有机耗氧量增加;夏季发展的渔业网箱养殖,其大量的鱼蟹饵料的过量投放引起有机耗氧量的迅速增加。另外,大量死

亡藻类也会导致 COD 值的升高。

白洋淀湖水中 TP 含量不高,全年 TP 浓度范围在 0.021~0.044 mg/L,平均为 0.032 mg/L,且可溶性磷酸盐含量也很低,全年平均为 0.002 mg/L。湖水 TN 平均为 1.005 mg/L,主要以无机氮为主,占总氮的 84.4%,有机氮只占 15.6%。无机氮中 NO₃⁻-N 略高,为 0.448 mg/L, NH₃⁻-N 次之 0.388

mg/L, NO₂⁻-N 较低为 0.011 mg/L。硅藻的生长主要利用 NH₃⁻-N 和 NO₃⁻-N^[14],有研究发现, N: P 比在 10: 1~ 15: 1 是藻类生长正常范围,而当 N: P > 15 时,藻类生长将受到磷的限制;当 N: P < 10 时,藻类生长将受到氮的限制^[15,16]。白洋淀湖水 N: P 比值为 34.6,说明白洋淀湖水中氮供应充分,藻类的生长受到了磷的限制。

表 4 水质监测结果

Tab. 4 Water quality monitoring data

月份	pH	水深 /m	NH ₃ ⁻ -N / (mg·L ⁻¹)	NO ₂ ⁻ -N / (mg·L ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N / (mg·L ⁻¹)	PO ₄ ³⁻ / (mg·L ⁻¹)	SiO ₂ / (mg·L ⁻¹)	TN / (mg·L ⁻¹)	TP / (mg·L ⁻¹)	Chla / (ug·L ⁻¹)	COD _{Mn} / (mg·L ⁻¹)	电导率 / (us·cm ⁻¹)
4	8.46	3.00	0.344	0.024	0.258	0.001	2.010	1.249	0.044	19.210	13.35	1070
8	8.17	1.70	0.855	0.004	0.325	0.002	5.924	0.869	0.024	6.297	17.62	800
10	8.57	1.96	0.123	0.006	0.373	0.004	6.730	1.132	0.027	37.00	13.22	980
12	8.24	1.90	0.231	0.012	0.837	0.001	2.82	0.772	0.021	2.06	8.30	821
均值	8.36	2.14	0.389	0.012	0.448	0.002	4.371	1.006	0.029	16.142	13.12	917.8

月份	SD /m	T (°C)	CO ₃ ²⁻ / (mg·L ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ / (mg·L ⁻¹)	Cl ⁻ / (mg·L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ / (mg·L ⁻¹)	Ca ²⁺ / (mg·L ⁻¹)	Mg ²⁺ / (mg·L ⁻¹)	K ⁺ / (mg·L ⁻¹)	Na ⁺ / (mg·L ⁻¹)	矿化度 / (mg·L ⁻¹)	总硬度 (德国度)
4	0.90	14.5	3.33	298.29	178.92	197.69	49.65	53.56	7.22	163.22	951.88	19.3
8	1.05	30.0	0.00	246.77	102.17	123.02	43.19	26.12	7.41	114.88	663.56	12.1
10	1.40	18.0	13.97	218.34	103.84	110.48	47.99	28.85	9.52	98.02	631.01	12.1
12	1.20	3.0	0.00	272.27	116.77	146.37	56.71	29.56	11.73	120.59	754.00	14.8
均值	1.14	16.4	4.325	258.92	125.43	144.39	49.39	34.52	8.97	124.18	750.11	14.6

2.2 湖泊营养类型评价

利用公式(1)至公式(7) 计算得出白洋淀综合营养状态指数,然后依据表 3 进行营养级别划分,得到白洋淀的营养级别(表 5),将其确定为中-富营养级湖泊水体。其中,白洋淀春夏秋冬都为轻度富营养,冬季为中营养级,表明白洋淀冬季水质相对较好。这可能与白洋淀冬季入湖水源少,进而所携带的入湖营养物质少有关。此外,冬季旅游业进入淡季,直接排入湖体的生活垃圾也随之减少。而且,进入冬季,渔业网箱养殖活动停止,入湖营养物质大减,亦促进湖泊水质的好转。

表 5 营养类型评价结果

Tab. 5 The evaluation results of trophic level

月份	营养状态指数 TLI (Σ)	营养级别
4	56.447 580 48	轻度富营养
8	51.079 025 28	轻度富营养
10	54.934 698 42	轻度富营养
12	42.932 381 37	中营养
均值	53.086 956 35	轻度富营养

2.3 主成分分析与评价

将表 4 中的 pH、TN、TP、Chla、COD_{Mn}、SD、矿化度和总硬度水质监测数据输入 SPSS17.0 统计分析软件进行分析,得到的结果见表 6、表 7。在计算结果中以特征值大于 1 为准则,共抽取 3 个主成分(累计贡献率达 100%),作为湖泊水质分析对象。从表 6 可以看出,前 2 个主成分提供了原有数据信息的 83.478%,特征根分别为 3.968 和 2.711,满足特征值大于 1、累计贡献率大于 80%的因子提取原则,说明前 2 个主成分能够很好地说明白洋淀水体环境信息。

表 6 白洋淀水质主成分

Tab. 6 The principal components of water quality in the Baiyang Lake

成份	初始特征值		
	合计	占方差百分比(%)	累积贡献率(%)
1	3.968	49.595	49.595
2	2.711	33.884	83.478
3	1.322	16.522	100.000
4	2.842E-16	3.553E-15	100.000
5	5.523E-17	6.903E-16	100.000
6	-7.252E-17	-9.065E-16	100.000
7	-1.387E-16	-1.734E-15	100.000
8	-2.759E-16	-3.449E-15	100.000

表 7 白洋淀因子载荷矩阵表

Tab. 7 The factor loading matrix of the Baiyang Lake

指标	成分		
	1	2	3
TP	0.990	-0.007	0.142
总硬度	0.868	-0.414	-0.273
矿化度	0.857	-0.475	-0.200
TN	0.856	0.493	0.159
Chla	0.346	0.937	0.044
pH	0.559	0.804	-0.205
SD	-0.579	0.732	-0.359
COD _{Mn}	0.024	0.101	0.995

由表 6 和表 7 可知,第一主成分贡献率为 49.595%,反映信息量最大,与其关联的主要是 TP、矿化度、硬度和 TN,而 SD 与其呈反相关。N、P 是限制藻类生长繁殖的主要影响因素,因此第一主成分主要反映湖水的富营养化程度及理化性质(矿化度和硬度是水生环境的表达^[16])。湖泊水环境

被污染,致使藻类大量繁殖,光的穿透性减弱,SD 值降低。

第二主成分贡献率 33.884%, 与其相关联的主要是 Chla, pH, 其次是 SD, 三种因子均影响藻类的生长^[17], 因此该主成分主要反映了浮游藻类的生境状况。Chla 反映水体的营养状况, 是浮游植物现存量的重要指标; pH 值可改变硅藻的组成; 而较低的 SD 可抑制藻类的生长, 藻类的密度分布与 SD 具有很高的相关度^[8]。

通过主成分分析及其载荷矩阵表可知, 白洋淀湖泊污染及其富营养化的主要影响因子是 TP 和 TN。这与白洋淀区工业废水及生活污水的大量排放、周边农业活动大量化肥及农药的使用极大相关。废水、污水直接排入水体, 农业化肥及农药通过径流进入水体, 这些将大大增加 TP 和 TN 的含量。同时, N、P 两种成分也是供应藻类繁殖的主要营养元素^[5], 致使藻类大量繁殖, 引起湖泊的富营养化。

2.4 沉积硅藻组合特征

硅藻是自养生物, 几乎广泛存在于不同类型水体中, 其每年产生的生物量约占地球总生物量的 25%, 是重要的初级生产者^[19]。硅藻对水环境条件变化及其敏感, 且许多属种对水环境指标(如 pH 值、盐度、温度、营养盐等)都有特定的最佳值及忍耐值, 因此在水体营养状况、水体酸化及水质污

染等问题的研究中对沉积硅藻组合特征特别关注^[20,21]。许多研究表明^[22,24], 梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)、*Cyclotella atomus*、*Stephanodiscus minutulus* 等是富营养湖泊的指示种, 而 *Cyclotella tholiformis*、*Cy. dubius*、*Aulacoseira granulata* 等属种大量存在于中营养、中一富营养型湖泊中, 可指示湖泊发生潜在的富营养化, 菱形藻属可存在于各种营养阶段的水体中。

白洋淀硅藻以浮游种和底栖种为主, 其中浮游种是绝对优势种(64.48%), 而附生种的属种多样性较高。浮游种以小环藻属(28.06%)和环盖藻属(27.35%)为主要属种, 底栖种则是菱形藻属(11.19%)和丹形藻属(4.09%)为主。浮游种梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)和 *Cyclotella tholiformis* 是白洋淀的绝对优势种, 所占比例分别为 20.43% 和 25.40%。另外, 伴随着 *Cyclotella atomus*(7.10%)、*Nitzschia palea*(6.04%)、*Nitzschia sp.*(4.62%)、*Aulacoseira granulata*(4.26%)等属种的多数存在以及 *Stephanodiscus minutulus*(0.71%)、*Steph. Parvus*(0.36%)等属种少量存在, 具体如表 8 及图 1 所示。由此可知, 白洋淀处于中一富营养级水平, 与前面湖泊营养等级评价的结果相一致。

表 8 白洋淀主要硅藻属种组合及其生境条件

Tab. 8 The main diatom combination and habitat conditions of the Baiyang Lake

分类	硅藻属	硅藻种	比例(%)	硅藻属的生境条件
浮游 64.48%	小环藻属 28.06%	<i>Cyclotella meneghiniana</i>	20.43	多为浮游种类, 广泛分布于流水缓慢的浅水湖泊等淡水水体, 早春时大量出现
		<i>Cyclotella atomus</i>	7.10	
		<i>Cyclotella radiosa</i>	0.36	
		<i>Cyclotella ocellata</i>	0.18	
	环盖藻属 27.35%	<i>Cyclostephanos tholiformis</i>	25.40	大多营浮游生活, 也有底栖生活的, 淡水、半咸水中生活
		<i>Cyclostephanos dubius</i>	1.07	
		<i>Cyclostephanos invisitatus</i>	0.89	
	浮生直链藻属 7.99%	<i>Aulacoseira granulata</i>	4.26	主要淡水浮游藻类之一, 多数种类普遍分布, 水流缓慢的浅水湖泊、河流域
		<i>Aulacoseira alpigae</i>	2.13	
		<i>Aulacoseira ambigua</i>	1.42	
<i>Aulacoseira sp.</i>		0.18		
冠盘藻属	<i>Stephanodiscus minutulus</i>	0.71	多为淡水浮游种, 生长在池塘、浅水湖泊、沟渠、沼泽、水流缓慢河流及溪流中	
	<i>Steph. parvus</i>	0.36		
底栖 17.58%	菱形藻属 11.19%	<i>Nitzschia palea</i>	6.04	生长于淡水、咸水或海水中
		<i>Nitzschia sp.</i>	4.62	
		<i>Nitzschia agnita</i>	0.36	
	丹形藻属 4.09%	<i>Nitzschia levidensis</i>	0.18	
		<i>Navicula sp.</i>	1.95	
附生 7.46%	双眉藻属	<i>Navicula cryptocephala</i>	1.78	种类极多, 生长在淡水、半咸水以及海水中, 多为浮游种类, 沿岸带常见
		<i>Navicula cryptotenella</i>	0.36	
		<i>Amphora libyca</i>	2.31	
	曲壳藻属	<i>Achnanthes minutissima</i>	2.49	主产于海洋, 淡水种类多着生于丝状藻类、沉水植物或其他基质上、或亚气生
		<i>Synedra ulna v. acus</i>	1.42	
	针杆藻属	<i>Synedra nana</i>	0.36	大多数种类生长在淡水, 少数是沿海底部生长的
		<i>Fragilaria sp.</i>	1.07	
	脆杆藻属	<i>Fragilaria capucina</i>	0.36	生长在池塘、沟渠、湖泊、流速缓慢的河流中
		<i>Gomphonema parvulum</i>	1.42	
	异极藻属	<i>Cymbella sp.</i>	0.18	主要为淡水种类, 多生长在沿岸区、水底底部与草丛
桥弯藻属	<i>Caloneis bacillum</i>	0.18	多数生活在淡水中, 在沿岸带与草丛中多见	
美篦藻属			生活在淡水、半咸水或海水中, 浮游或附生	

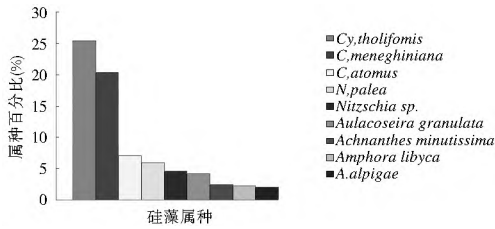


图 1 白洋淀硅藻优势种及主要属种组合

Fig. 1 The dominant diatom species and main species combinations in the Baiyang Lake

3 结论与建议

对白洋淀水化学成分分析,白洋淀湖水属于重碳酸盐钠组0型水,pH值平均为8.36,为偏碱性湖泊,这种偏碱性的水体反应了白洋淀水质的下降。此外,白洋淀的COD值,表现出夏季较其他季节高。白洋淀相对较高的N:P比值(34.6),说明湖水中氮含量供应充分,植物、藻类的生长受到磷的限制。

运用综合营养指数法确定白洋淀为中富营养级湖泊水体。为进一步分析引起白洋淀湖泊污染的主要因子,使用了主成分分析法。通过主成分分析法选择了两个主成分,第一主成分主要反映湖水的富营养化程度及理化性质,第二主成分主要反映的是浮游藻类的生境状况。两个主成分中,TP得分最高,白洋淀水质污染的最主要因子就是TP。

借组硅藻对水环境的指示意义,分析了白洋淀硅藻的组合状况。白洋淀硅藻的属种以浮游种梅尼小环藻 *Cyclotella meneghiniana* (20.43%) 和 *Cyclostephanos tholiformis* (25.40%) 为绝对优势组合属种。富营养指示种 *Cyclotella meneghiniana* 和潜在富营养化的指示属种 *Cyclostephanos tholiformis* 大量存在说明白洋淀一定程度上发生了富营养化。此外,白洋淀中存在含量相对较少但种类较多的中营养与中一富营养的属种,指示着白洋淀水体大体是处于中一富营养型水平。

总体研究表明,白洋淀水质不容乐观,水体环境处于恶化之中,湿地生态系统稳定性趋向脆弱,需进一步加强白洋淀污染的防治工作,以确保白洋淀水环境安全。

致谢

中国科学院南京地理与湖泊研究所潘红玺副研究员、聊城大学陈永金副教授和姚敏博士参加了野外采样和室内分析工作,特此感谢。

参考文献(References):

[1] 中国科学院地学部地球科学发展战略研究组. 21世纪中国地球科学发展战略报告[R]. 北京: 科学出版社, 2009: 360-363. (Earth Science Development Strategy Research Group, Institute of Geography, Chinese Academy of Science. Strategy Report: China's Earth Science Development for 21st Century [R]. Beijing: Science Publishing House, 2009: 360-363. (in Chinese))

[2] 杨桂山, 马荣华, 张路, 等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略[J]. 湖泊科学, 2010, 22(6): 799-810. (YANG Guishan, MA Ronghua, ZHANG Lu, et al. Lake status, major

problems and protection strategy in China[J]. Journal of Lake Science, 2010, 22(6): 799-810. (in Chinese))

[3] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 308-311. (WANG Su min, DOU Hong shen. An addition to the Lakes of China [M]. Beijing: Science Publishing House, 1998: 308-311. (in Chinese))

[4] 陈芳. 白洋淀水质时空变化分析及应对措施[J]. 河北水利, 2011, (2): 24, 43. (CHEN Fang. The water quality analysis of space and time changes and countermeasure of Baiyang Lake [J]. Hebei Water Resources, 2011, (2): 24, 43. (in Chinese))

[5] 田美影, 王学东, 马雪姣, 等. 白洋淀气候变化及对生态系统的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(2): 76-80. (TIAN Mei ying, WANG Xue dong, MA Xue jiao, et al. Climate change in the Baiyang Lake and its impact on ecological system [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(2): 76-80. (in Chinese))

[6] Ter Braak C J F, Looman W N. Weighted averaging, logistics regression and the Caussian response model. Vegetatio, 1985 (65): 3-11.

[7] Krammer K, Lange Bertalot H. Bacillariophyceae (F4Teil). Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 1986-1991.

[8] 邓春光. 三峡库区富营养化研究[M]. 北京: 环境科学出版社, 2007. (DENG Chun guang. Study on the Eutrophication of the Three Gorges Reservoir [M]. Beijing: Environmental Science Press, 2007. (in Chinese))

[9] 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 Ming cui, LIU Xue qin, ZHANG Jian hui. Lake eutrophication assessment method and graded standard [J]. Environmental Monitoring of China, 2002, 18(5): 47-49. (in Chinese))

[10] 徐光宇, 柴国平, 徐明德, 等. 主成分分析方法在汾河太原城区段水质评价中的应用[J]. 环境工程, 2014, (6): 122-124, 113. (XU Guang yu, CHAI Guo ping, XU Ming de, et al. Application of principle component analysis in water quality evaluation of river in Taiyuan City [J]. Environmental Engineering, 2014, (6): 122-124, 113. (in Chinese))

[11] 李森, 丁贤荣, 潘进. 基于主成分分析的太湖水质时空分布特征研究[J]. 环境科技, 2012, 25(3): 44-47. (LI Sen, DING Xian rong, PAN Jin. The spatially and temporally dynamic variation of water quality in Tai Lake based on principle component analysis [J]. Environmental Science and Technology, 2012, 25(3): 44-47. (in Chinese))

[12] 丁蕾, 支崇远. 环境对硅藻的影响及硅藻对环境的监测[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2006, 24(3): 13-16. (DING Lei, ZHI Chong yuan. Environmental effects on diatom and its monitor of environment [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2006, 24(3): 13-16. (in Chinese))

[13] 刘兴荣. 基于环境影响的硅藻研究进展[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(6): 3092-3093, 3104. (LIU Xing rong. Research progress on diatom based on effects of environment [J]. Journal of Anhui Agri Sci, 2010, 38(6): 3092-3093, 3104. (in Chinese))

[14] 朱媛, 王薇, 俞美香, 等. 针对太湖蓝藻危机的水质监测[J]. 环境科技, 2009(S1): 27-29. (ZHU Yuan, WANG Wei, YU Mei xiang, et al. The water quality for the bloom in Lake Taihu [J]. Environmental Science and Technology, 2009(S1): 27-29.

- (in Chinese)
- [15] 王振强, 刘春广, 乔光建. 氮、磷循环特征对水体富营养化影响分析[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(6): 82-85, 87. (WANG Zhen-qiang, LIU Chun-guang, QIAO Guang-jian. Effect of nitrogen and phosphorus cycling characteristic on eutrophication of water body[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(6): 82-85, 87. (in Chinese))
- [16] 刘双爽, 陈诗越, 姚敏, 等. 天津地区团泊洼水库和七里海沼泽水质研究[J]. 湿地科学, 2014, 2(12): 257-261. (LIU Shuang-shuang, CHEN Shi-yue, YAO Min, et al. Water quality of Tianpowa Reservoir and Qilihai Marshes in Tianjin Area[J]. Wetland Science, 2014, 2(12): 257-261. (in Chinese))
- [17] 姚敏, 刘倩, 李艳玲, 等. 南京市两个小型富营养湖泊浮游硅藻的季节性变化[J]. 湖泊科学, 2009, 2(5): 693-699. (YAO Min, LIU Qian, LI Yan-ling, et al. Seasonal change of planktonic diatom of two small shallow eutrophic lakes in Nanjing[J]. Journal of Lake Science, 2009, 2(5): 693-699. (in Chinese))
- [18] 梁淑轩, 王云晓, 秦哲. 白洋淀叶绿素 a 及其水质因子分析[J]. 海洋湖沼通报, 2012(3): 66-73. (LIANG Shu-xuan, WANG Yun-xiao, QIN Zhe. Chlorophyll a and analysis of water quality of Lake Baiyangdian[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2012(3): 66-73. (in Chinese))
- [19] 沈吉, 薛滨, 吴敬禄, 等. 湖泊沉积与环境演化[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 289-308. (SHEN Ji, XUE Bin, WU Jing-lu, et al. The Lacustrine Record and Environmental Evolution[M]. Beijing: Science Publishing House, 2010: 289-308. (in Chinese))
- [20] 徐信, 支崇远, 马健荣, 等. 硅藻在水质监测和古环境重建中的应用[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(9): 5216-5217, 5386. (XU Xin, ZHI Chong-yuan, WANG Xing, et al. Application of diatoms in water quality monitoring and reconstruction of palaeo-environment[J]. Journal of Anhui Agri. Sci. 2011, 39(9): 5216-5217, 5386. (in Chinese))
- [21] 李国忱, 刘录三, 汪星, 等. 硅藻在河流健康评价中的应用研究进展[J]. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2617-2624. (LI Guo-chen, LIU Lu-san, WANG Xing, et al. Applications of diatom in river health assessment: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(9): 2617-2624. (in Chinese))
- [22] 董旭辉, 羊向东, 潘红玺. 长江中下游地区湖泊现代沉积硅藻分布基本特征[J]. 湖泊科学, 2004, 16(4): 298-304. (DONG Xu-hui, YANG Xiang-dong, PAN Hong-xi. Distribution of modern lake sediment diatoms in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River Catchment[J]. Journal of Lake Science, 2004, 16(4): 298-304. (in Chinese))
- [23] 李亚蒙, 赵琦, 冯广平, 等. 白洋淀硅藻分布及其与水环境的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(17): 4559-4570. (LI Ya-meng, ZHAO Qi, FENG Guang-ping, et al. The diatom assemblages and their response to different environments of Baiyangdian Lake, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(17): 4559-4570. (in Chinese))
- [24] 胡胜华, 叶艳婷, 贺锋, 等. 武汉月湖近代沉积物中的硅藻组合与环境关系研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(3): 490-498. (HU Sheng-hua, YE Yan-ting, HE Feng, et al. Relationship between diatom assemblage in modern sediments and the environment of Yuehu Lake in Wuhan[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(3): 490-498. (in Chinese))

(上接第 452 页)

- [13] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类—系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (HU Hong-jun, WEI Yin-xin. The freshwater algae of China—systematics, taxonomy and ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [14] 张觉民, 何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册[K]. 北京: 农业出版社, 1991. (ZHANG Jue-min, HE Zhi-hui. Inland water fisheries natural resources survey manual[K]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [15] 况琪军, 马沛明, 胡征宇, 等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(2): 89-90. (KUANG Qi-jun, MA Pei-ming, HU Zheng-yu, et al. Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology[J]. Journal of Safety and Environment, 2005, 5(2): 87-91. (in Chinese))
- [16] Shannon E. Weaver W. The mathematical theory of communication[M]. London: The University of Illinois Press, 1949.
- [17] 高远, 慈海鑫, 元树财, 等. 沂河 4 条支流浮游植物多样性季节动态与水质评价[J]. 环境科学研究, 2009, 22(2): 177-179. (GAO Yuan, CI Hai-xin, YUAN Shu-cai, et al. Seasonal changes of phytoplankton diversity and assessment of water quality in four tributaries of Yi River[J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(2): 177-179. (in Chinese))
- [18] 王大鹏, 陈晓汉, 张益峰, 等. 合浦水库浮游植物及营养现状评价[J]. 水产学杂志, 2009, 22(1): 56-67. (WANG Da-peng, CHEN Xiaohan, ZHANG Yi-feng, et al. Phytoplankton and trophic levels in Hepu Reservoir[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2009, 22(1): 56-67. (in Chinese))
- [19] 日本生态学会环境问题专门委员会. 卢全章译. 环境和指示生物(水域分册)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1987. (Ecological Society of Japan Panel on Environment. LU Quan-zhang translated. The environment and biological indicator: Water volume[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1987. (in Chinese))