·调查与评价·

淀山湖富营养化驱动力初探

张玉平，张丹，刘金金
（上海市水产研究所，上海　200433）

摘　要：通过 2015—2019 年在淀山湖布设 5 个采样点，监测总氮、总磷等 12 项水质指标，运用综合营养状态指数法和潜在性富营养化评价法对该水域富营养化水平进行分析，采用主成分分析法初步确定影响该水域富营养化水平的主要驱动因子。结果表明：监测期间淀山湖水质因子时空分布差异显著。综合营养状态指数法评价结果表明，淀山湖富营养化在轻—中度富营养化水平，并且季节变化规律明显；潜在性富营养化法评价结果表明，监测期间淀山湖以磷限制潜在性富营养为主。驱动因子分析表明硝酸盐氮是该水域富营养化最主要的驱动因子。

关键词：富营养化；驱动因子；主成分分析；淀山湖
中图分类号：X524；X824　　**文献标志码**：B　　**文章编号**：1006－2009(2021)05－0026－05

Analysis of Eutrophication Driving Force in Dianshan Lake

ZHANG Yu-ping, ZHANG Dan, LIU Jin-jin
(*Shanghai Fisheries Research Institute*, *Shanghai* 200433, *China*)

Abstract: 12 water quality indexes such as TN and TP, etc. from 5 sampling sites in Dianshan Lake were detected from 2015 to 2019, and the eutrophication level was analyzed by trophic level index (TLI) and potential eutrophication assessment. The main driving factors of eutrophication were determined by principal component analysis (PCA). The results showed that the spatial-temporal distribution of water quality indexes had significant differences. The results of TLI indicated that Dianshan Lake was in mild to moderate eutrophication level and had obvious seasonal variation. The limitation of phosphorus in potential eutrophication was dominated in Dianshan Lake based on potential eutrophication assessment. Nitrate nitrogen was the main driving factor of eutrophication by driver analysis.

Key words: Eutrophication; Driving factor; Principal component analysis; Dianshan Lake

湖泊是地表极其珍贵的水资源，在我国湖泊资源尤为珍贵且受损严重。其中，水体富营养化造成湖泊生态退化问题非常突出[1]。为更好地保护湖泊水资源，应对湖泊水质及富营养化水平开展持续性监测与评估。

淀山湖地处长江中下游，具有长江中下游湖群共有的特质，即淡水资源丰富，人类活动强度大，湖泊保护与开发的矛盾大，富营养化问题久治不愈[1]。近 30 年来，淀山湖富营养化水平经历了从加重到减缓的过程，1985 年 8 月淀山湖首次暴发较大面积水华[2]，1999 年以后进入重度富营养化阶段[3]，2005 年淀山湖全面禁止围网养殖，水体富营养化趋势得到有效遏制[4]，2008 年以后水质持续稳定向好，保持在轻—中度富营养化水平[5-7]。而近 5 年淀山湖水体富营养化状况鲜有追踪报道。今探究 2015—2019 年淀山湖水质及富营养化水平的时空分布特征，采用主成分分析法初步确定影响该水域富营养化水平的主要驱动因子，为有效遏制淀山湖水体污染、加强水资源保护提供数据支撑。

收稿日期：2020－08－31；**修订日期**：2021－07－16
基金项目：国家自然科学基金青年基金资助项目（51709172）；上海市科技兴农重点攻关基金资助项目（沪农科攻字〔2015〕第 6－3－3 号）
作者简介：张玉平（1979—），男，山东安丘人，正高级工程师，硕士，主要从事渔业环境评价及生态修复研究工作。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

淀山湖属于典型过水性湖泊,位于江苏、浙江和上海两省一市交界处[5],水域面积 60 km^2,平均水深约 2.1 m,西纳太湖来水,东南达黄浦江,水文情势同时受上游来水和下游潮水的影响,全年进、出水量约 1.7×10^8 m^3,急水港和大朱厍是淀山湖的主要进水口,占总进水量的 68%,拦路港是淀山湖的主要出水口,占总出水量的 71%[3]。淀山湖作为太湖流域洪涝水下泄的主要通道及区域重要的水资源蓄集涵养地,其水质条件对于周边饮水安全及生态环境具有重要意义[8]。

1.2　样品采集

参照《水质　采样方案设计技术规定》(HJ 495—2009),根据淀山湖形态特征及水文情势,共布设 5 个采样点,分别是位于入湖口的急水港桥(E120° 55′ 13. 1″, N31° 06′ 36. 8″)和白石矶桥(E120°54′17. 9″,N31°05′3. 5″),位于湖心的四号航标(E120°56′28. 4″,N31°06′8. 5″),以及位于出湖口的拦路港(E120°58′43. 4″,N31°05′37. 8″)和西闸(E120°59′32. 9″,N31°06′48. 2″)。参照《水质湖泊和水库采样技术指导》(GB/T 14581—93)《水质　样品的保存和管理技术规定》(HJ 493—2009)进行样品的采集、保存及运输。2015—2019 年,每年的冬季(2 月)、春季(5 月)、夏季(8 月)和秋季(11 月)各采样 1 次,每次采集 5 个样点的混合水样,共计 100 个样品。

1.3　水质指标监测

水样中水温(T)、溶解氧(DO)用 WTW 便携式分析仪现场测定;透明度(SD)、叶绿素 a(Chl-a)、亚硝酸盐氮(NO_2^- - N)及可溶性活性磷酸盐(DIP)按《水和废水监测分析方法》(第四版)的规定分析[9],SD 采用塞氏盘法,Chl-a 采用紫外分光光度法,NO_2^- - N 采用 *N* - (1 - 萘基) - 乙二胺光度法,DIP 采用钼锑抗分光光度法;高锰酸盐指数(I_{Mn})、总氨氮(TAN)、硝酸盐氮(NO_3^- - N)、总氮(TN)及总磷(TP)按《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的规定进行分析,I_{Mn}采用酸性高锰酸钾法,TAN 采用水杨酸分光光度法,NO_3^- - N 采用紫外分光光度法,TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,TP 采用钼酸铵分光光度法;无机氮(DIN)是 TAN、NO_2^- - N 和 NO_3^- - N 的总和。

1.4　研究方法

采用综合营养状态指数法和潜在性富营养化法[10]对淀山湖水域富营养化水平进行评价。采用主成分分析法开展该水域的富营养化驱动力分析。

1.4.1　综合营养状态指数(TLI)法

根据《地表水环境质量评价办法(试行)》,采用 0 ~ 100 的连续数字对湖泊营养状态分级,TLI < 30 为贫营养;30 ≤ TLI ≤ 50 为中营养;TLI > 50 为富营养,其中,50 < TLI ≤ 60 为轻度富营养,60 < TLI ≤ 70 为中度富营养,TLI > 70 为重度富营养。

1.4.2　潜在性富营养化法

潜在性富营养化评价法由郭卫东等[10]提出,是判定水域潜在富营养化水平的方法,选用 DIN、DIP、N/P(DIN 与 DIP 的质量比)为评价指标,评价标准见表 1。

表 1　潜在性富营养化评价标准

Table 1　Evaluation criterion of potential eutrophication level

级别	营养等级	DIN ρ/(mg · L^{-1})	DIP ρ/(mg · L^{-1})	N/P
Ⅰ	贫营养	< 0.20	< 0.030	4 ~ 14
Ⅱ	中度营养	0.20 ~ 0.30	0.030 ~ 0.045	4 ~ 14
Ⅲ	富营养	> 0.30	> 0.045	4 ~ 14
$Ⅳ_P$	磷限制中度营养	0.20 ~ 0.30		> 14
$Ⅴ_P$	磷中等限制潜在性富营养	> 0.30		14 ~ 27
$Ⅵ_P$	磷限制潜在性富营养	> 0.30		> 27
$Ⅳ_N$	氮限制中度营养		0.030 ~ 0.045	< 4
$Ⅴ_N$	氮中等限制潜在性富营养		> 0.045	2 ~ 4
$Ⅵ_N$	氮限制潜在性富营养		> 0.045	< 2

1.4.3　富营养化驱动力分析

利用统计分析软件 SPSS 22.0 对淀山湖水体水质进行主成分分析,结合 Spearman 相关性分析结果初步确定影响该水域富营养化水平的主要驱动因子。

2　结果与讨论

2.1　水质因子的时空变化

监测期间淀山湖水域各水质指标的质量浓度变化范围见表 2。100% 的采样点 TAN 达到地表水Ⅲ类,96% 的采样点 I_{Mn}达到地表水Ⅲ类,62.67% 的采样点 TN 劣于Ⅴ类,65.33% 的采样点 TP 处于

Ⅴ类,数据离散程度较大。采用箱须图分析水质因子的时空分布,见图 1(a)—(l)。

从季节分布上看,各水质因子的季节之间阶梯状变化非常明显。T 在冬季较低,春季快速上升,夏季达到全年最高,秋季回落,呈现出显著的季节性差异;I_{Mn}、Chl-a 的季节变化趋势与 T 一致,均表现出春夏高、秋冬低的规律;相关性分析表明,T 与 I_{Mn}、Chl-a 均为极显著正相关($P<0.01$),表明随着 T 及有机物浓度升高,浮游植物的生物量也相应升高。各采样点的 DO、TAN、NO_3^- - N、DIN 及 TN 的季节变化规律与 T 相反,表现出春夏低、秋冬高的规律;相关性分析表明,T 与各形态氮均为极显著负相关($P<0.01$)。可见,T 对水体中氮的季节性分布起着关键性作用。

从空间分布上看,入湖口 TAN、NO_2^- - N、NO_3^- - N、DIN、TN 和 I_{Mn} 显著高于出湖口,表明监测期间淀山湖水体具有一定的净化能力,而该净化能力归因于水体自净能力还是稀释作用仍须进一步分析。各水质因子的相关性分析结果表明,上述水质因子间变化趋势不尽相同,故可认为监测期间淀山湖水体氮及有机物浓度的降低不全是稀释等简单的物理过程,生物化学循环在其中也发挥着显著作用,进一步证明淀山湖尚且具备一定的自净能力。

与长江中下游其他湖泊比较,湖面大、水浅的太湖[11]、阳澄湖[12]、滆湖[13]及长荡湖[14]氮磷浓度低于淀山湖,这可能是大湖面有利于光合作用,使氮磷吸收转换更加高效且充分。而巢湖[15]作为城市综合纳污湖泊氮磷浓度高于淀山湖。与 2010—2015 年淀山湖[5]氮磷营养盐浓度相比,监测水域水质基本稳定,无较大差异。

2.2　富营养化状况评价

表 3 为淀山湖富营养化评价结果。

表 2　2015—2019 年淀山湖水质因子的监测结果　mg/L

Table 2　Monitoring results of water quality indexes in Dianshan Lake from 2015 to 2019　mg/L

季节	TAN	NO_2^- - N	NO_3^- - N	DIN	DIP	TN	TP	I_{Mn}
冬季	0.16 ~ 0.98	0.02 ~ 0.16	1.92 ~ 5.68	2.32 ~ 6.82	0.06 ~ 0.36	2.67 ~ 7.59	0.09 ~ 0.67	3.11 ~ 3.82
春季	0.07 ~ 0.71	0.01 ~ 0.17	0.40 ~ 5.24	0.72 ~ 5.92	0.01 ~ 0.11	1.34 ~ 7.12	0.06 ~ 0.23	2.12 ~ 5.47
夏季	0.02 ~ 0.77	0.01 ~ 0.19	0.21 ~ 2.13	0.33 ~ 3.00	0.06 ~ 0.25	0.94 ~ 3.69	0.11 ~ 0.30	2.62 ~ 7.09
秋季	0.06 ~ 0.96	0.02 ~ 0.11	0.98 ~ 2.90	1.06 ~ 3.74	0.03 ~ 0.10	1.55 ~ 4.13	0.04 ~ 0.10	2.77 ~ 3.81

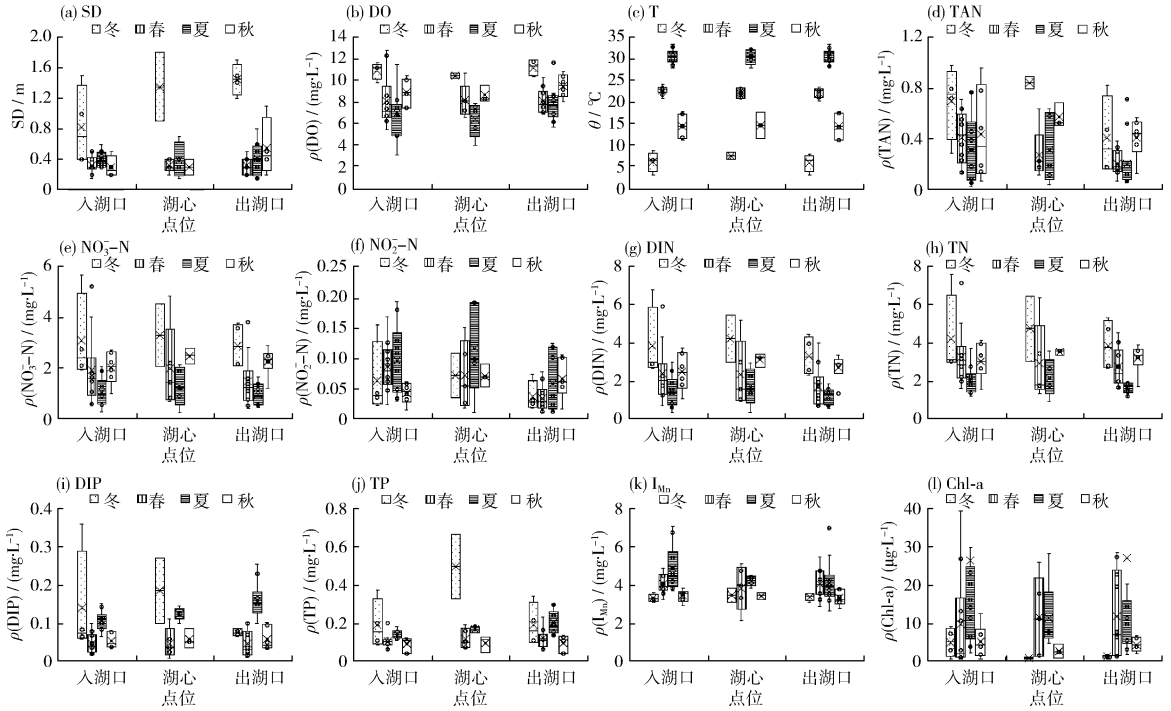

图 1　2015—2019 年淀山湖水质因子的时空分布

Fig. 1　Spatial-temporal distribution of water quality indexes in Dianshan Lake from 2015 to 2019

表 3　淀山湖富营养化评价结果

Table 3　Eutrophication assessment results of Dianshan Lake

季节	综合营养状态指数法评价结果					潜在性富营养化评价结果				
	TLI		占比/%			N/P		占比/%		
	范围	平均值	中营养	轻度富营养	中度富营养	范围	平均值	富营养	磷中等限制潜在性富营养	磷限制潜在性富营养
冬季	43.99 ~ 63.74	55.12 ± 5.10	16	60	24	11.06 ~ 60.45	39.37 ± 16.31	10	10	80
春季	41.93 ~ 58.58	49.34 ± 5.51	60	40	0	7.30 ~ 294.69	80.36 ± 76.70	20	8	72
夏季	43.75 ~ 57.15	52.72 ± 3.90	26.7	73.3	0	4.50 ~ 30.38	12.34 ± 7.14	68	28	4
秋季	47.58 ~ 68.67	57.91 ± 4.66	4	64	32	27.74 ~ 95.90	53.28 ± 21.54	0	0	100

由表 3 可知,2015—2019 年淀山湖 TLI 变化范围为 41.93 ~ 68.67。其中,20% 采样点为中营养,61.3% 为轻度富营养,18.7% 为中度富营养。秋冬两季 TLI 值显著高于春夏($P < 0.05$),秋冬季处于中度富营养占比分别为 32%、24%,春夏两季均处于轻度富营养及以下。可见,监测期间淀山湖水体稳定处于轻—中度富营养水平,且季节变化规律明显,呈现出春夏富营养化水平低、秋冬高的趋势,这与氮营养盐的季节变化规律一致。

潜在性富营养化评价结果显示,监测期间淀山湖富营养化以磷限制潜在性富营养为主,其中,冬、春及秋季磷限制潜在性富营养占比分别为 90%、80% 及 100%。一方面在风浪掀沙作用的影响下,水体中泥沙等悬浮物较多,DIP 极易被吸附,导致水体中 DIP 浓度降低,氮磷比值升高;另一方面,上游陆域农业生产活动中多以氮肥为主磷钾肥为辅,地表径流把未被利用的过量氮肥带入河流,使氮浓度剧增,磷酸盐相对减少,氮磷比值进一步增高。

2.3　富营养化驱动力分析

选取 SD、T、DO、TAN、NO_2^- - N、NO_3^- - N、DIN、DIP、TN、TP、I_{Mn} 和 Chl-a 等 12 个水质因子,对淀山湖水域开展富营养化水平的主成分分析[16-17]。监测期间 5 个采样点四季与上述 12 个水质因子共同构成一个 100 × 12 的矩阵,数据经过方差最大化正交旋转,筛选出前 4 种主成分,共解释了 78.65% 的结果,基本反映了原监测数据所包含的信息。第一主成分对总方差的贡献率为 36.07%,DIN、TN 及 NO_3^- - N 在第一主成分上有较高载荷;第二主成分贡献率为 18.99%,NO_2^- - N、DO 在第二主成分上有较高载荷;第三主成分贡献率为 13.41%,DIP、TP 在第三主成分上有较高载荷;第四主成分贡献率为 10.18%,Chl-a 在第四主成分上有较高载荷。主成分表达式见式(1)—式(4):

$$y_1 = 0.205x_1 - 0.34x_2 + 0.10x_3 + 0.298x_4 + 0.142x_5 + 0.438x_6 + 0.453x_7 + 0.018x_8 + 0.438x_9 + 0.209x_{10} - 0.254x_{11} - 0.16x_{12} \quad (1)$$

$$y_2 = -0.36x_1 + 0.383x_2 - 0.534x_3 + 0.169x_4 + 0.538x_5 + 0.098x_6 + 0.14x_7 + 0.159x_8 + 0.14x_9 + 0.087x_{10} + 0.15x_{11} + 0.125x_{12} \quad (2)$$

$$y_3 = 0.321x_1 + 0.107x_2 + 0.074x_3 - 0.043x_4 - 0.028x_5 - 0.095x_6 - 0.095x_7 + 0.666x_8 - 0.124x_9 + 0.626x_{10} + 0.047x_{11} + 0.077x_{12} \quad (3)$$

$$y_4 = 0.11x_1 + 0.008x_2 + 0.291x_3 - 0.159x_4 + 0.024x_5 + 0.214x_6 + 0.159x_7 - 0.174x_8 + 0.151x_9 + 0.046x_{10} + 0.524x_{11} + 0.69x_{12} \quad (4)$$

式中:y_1—y_4 分别代表第一主成分—第四主成分得分;x_1—x_{12} 分别代表上述 12 个水质因子的标准化数据。

根据上述表达式,以方差贡献率为权重,计算主成分综合得分。结果显示,主成分综合得分由高到低依次为冬季(1.647 ± 1.20)、秋季(0.141 ± 0.560)、春季(-0.178 ± 0.879)及夏季(-0.565 ± 0.649),且秋冬季显著高于春夏季($P < 0.05$),波动范围冬季最大,呈现显著"春夏低、秋冬高"的季节变化趋势,与监测期间水体中氮的季节变化规律一致。入湖口综合得分(0.027 ± 1.037)高于出湖口(-0.114 ± 0.978),与水体中氮的空间分布规律一致。可见,主成分综合得分与水体中氮的时空分布特征一致,并且与综合营养状态指数法评价结果一致,表明主成分综合得分的时空分布特征能够在一定程度上反映该水域的富营养化水平。

运用主成分分析法可以有效筛选出富营养化的理化驱动因子[18]。对 12 个水质因子与 4 个主成分得分及主成分综合得分作 Spearman 相关性分析,结果见表 4。DIN 与 y_1、T 与 y_2、DIP 与 y_3、I_{Mn} 与 y_4 相关性最为显著,与主成分综合得分相关性最为

显著的是 NO_3^- - N。因此,淀山湖富营养化的驱动因子依据重要性由重到轻依次为 NO_3^- - N、DIN、T、DIP 及 Chl-a,NO_3^- - N 是主成分综合得分变化的主要驱动因子,NO_3^- - N 可以基本反映该水域营养盐载荷的总体特征。除了氮以外,T 与主成分综合得分为极显著正相关($P < 0.01$)。有研究表明[19],T 通常是影响水体中浮游植物发育和繁殖的限制因子,是决定优势种、丰度及生物量的重要环境因子,可以认为 T 通过影响浮游植物的生长与控制,进一步影响水体的富营养化水平。可见,淀山湖富营养化状况是多重因素协同作用下的结果,而 NO_3^- - N 是该水域富营养化最主要的驱动因子。

表 4　各水质因子与主成分得分及主成分综合得分的相关系数

Table 4　Correlation coefficients of water quality indexes and scores by PCA

指标	y_1	y_2	y_3	y_4	主成分综合得分
SD	-0.108	0.447①	0.247②	-0.068	0.139
T	0.008	0.898①	-0.091	0.008	0.396①
DO	-0.430	-0.641	0.341①	0.416①	-0.481
TAN	0.621①	-0.104	-0.104	-0.404	0.462①
NO_2^- - N	0.535①	-0.670	0.123	0.168	0.270②
NO_3^- - N	0.928①	0.143	-0.240	-0.048	0.857①
DIN	0.962①	0.035	-0.200	-0.117	0.821①
DIP	-0.326	-0.171	0.914①	-0.051	-0.142
TN	0.934①	0.023	-0.294	-0.145	0.732①
TP	-0.004	-0.118	0.850①	0.071	0.157
I_{Mn}	-0.240	-0.313	0.021	0.799①	-0.130
Chl-a	-0.346	-0.150	0.166	0.575①	-0.153

①为极显著相关,$P < 0.01$;②为显著相关,$P < 0.05$。

3　结论

(1)淀山湖水质因子时空分布差异显著。在时间上,T、I_{Mn}及 Chl-a 季节变化趋势一致,均表现出春夏高、秋冬低的规律;DO、TAN、NO_3^- - N、DIN 和 TN 的季节变化规律则相反,均表现出春夏低、秋冬高的规律。在空间上,入湖口 TAN、NO_2^- - N、NO_3^- - N、DIN、TN 和 I_{Mn}浓度显著高于出湖口,淀山湖尚且具备一定的自净能力。

(2)综合营养状态指数法评价结果表明,淀山湖水体稳定处于轻—中度富营养化水平,富营养化季节变化规律明显,呈现出春夏低、秋冬高的趋势;潜在性富营养化评价法评价结果表明,淀山湖以磷限制潜在性富营养为主。

(3)经驱动因子分析可知,氮磷营养盐、Chl-a 和 T 构成淀山湖水体富营养化的内驱动力,NO_3^- - N 是该水域富营养化最主要的驱动因子。

[参考文献]

[1] 朱广伟,许海,朱梦圆,等. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素[J]. 湖泊科学,2019,31(6):1510-1524.

[2] 阮仁良,王云. 淀山湖水环境质量评价及污染防治研究[J]. 湖泊科学,1993,5(2):153-158.

[3] 杨漪帆,朱永青,林卫青. 淀山湖蓝藻水华及其控制因子的模型研究[J]. 环境污染与防治,2009,31(6):58-63,88.

[4] 李宏祥,田华,梁国康. 淀山湖富营养化现状及生态修复措施分析[J]. 水资源保护,2012,28(3):83-87.

[5] 张玉平,张丹,孙振中. 上海市淀山湖水域春夏季水质特征及环境容量分析[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(6):90-96.

[6] 郑晓红,汪琴. 淀山湖水质状况及富营养化评价[J]. 环境监测管理与技术,2009,21(2):68-70.

[7] 陈小华,李小平,王菲菲,等. 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[J]. 生态学报,2014,34(2):390-399.

[8] 康丽娟. 淀山湖富营养化进程及水生态效应研究[J]. 环境科学与管理,2020,45(6):171-174.

[9] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社,2002.

[10] 郭卫东,章小明,杨逸萍,等. 中国近岸海域潜在性富营养化程度的评价[J]. 台湾海峡,1998,17(1):64-70.

[11] 卢仁杰,张晓婕,黄佳慧,等. 太湖水质氮素质量浓度时空差异特征及影响因素分析[J]. 环境监测管理与技术,2020,32(3):63-67.

[12] 吕文,孙瑞瑞,王诚,等. 阳澄湖西湖水源地富营养化时空变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(3):87-90.

[13] 张莉,王美蓉,邹宏海,等. 滆湖水质现状及动态变化趋势研究[J]. 淮阴工学院学报,2018,27(1):30-35.

[14] 王菲菲,李小平,陈小华,等. 长荡湖近 15 年营养状态评价及限制因子研究[J]. 环境科学与技术,2012,35(6 Ⅰ):353-357.

[15] 奚姗姗,周春财,刘桂建,等. 巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征[J]. 环境科学,2016,37(2):542-547.

[16] 陈昭明,王伟,赵迎,等. 改进主成分分析与多元回归融合的汉丰湖水质评估及预测[J]. 环境监测管理与技术,2020,32(4):15-19.

[17] 王霞,刘雷,何跃,等. 洪泽湖水体富营养化时空分布特征与影响因素分析[J]. 环境监测管理与技术,2019,31(2):58-61.

[18] 褚帆,刘宪斌,刘占广,等. 天津近岸海域海水富营养化评价及其主成分分析[J]. 海洋通报,2015,34(1):107-112.

[19] 蓝天. 淀山湖浮游植物与环境因子的相关性研究[D]. 上海:上海师范大学,2014.