

太湖不同湖区水质状况及其随水温变化的比较

叶羽婷¹, 佟一帆², 刘茂松^{1*}

(1. 南京大学生命科学学院, 江苏南京 210046; 2. 江苏省环境科学研究院, 江苏南京 210036)

摘要 温度对湖泊中氮磷营养盐等主要水环境因子和蓝藻生长起着重要作用, 从而影响湖泊富营养化状态。通过长期监测数据, 以太湖的北部梅梁湾和邻近的湖心区、入湖口为主要研究对象, 采用因子分析法, 比较分析不同湖区水质状况的主要影响因子; 并采用营养状态指数法和 Pearson 相关性分析, 分析并探讨水温对水体富营养化的影响及其在不同湖区间的差异性。结果表明, 梅梁湾、湖心区、河口区 3 个湖区影响水质的主要因子存在区位差异。其中, 梅梁湾和湖心区影响水质的最主要因子都与磷元素、Chl-a 和 COD_{Mn} 有关; 而河口区影响水质的最主要因子与 TN、NH₄⁺-N 和水温有关。水温与 3 个湖区综合营养状态指数均存在极显著相关, 但具有区位差异。在梅梁湾和河口区, 随着水温的升高, 富营养化程度加剧; 而在湖心区, 富营养化程度会随着水温的升高有所缓解。随着水温的升高, 氮素在各湖区的营养负荷都有所降低。总体来说, 水温与湖泊富营养化存在显著相关, 但对不同指标及不同湖区间的影响存在差异。

关键词 太湖; 因子分析; 综合营养状态指数; 温度

中图分类号 X524 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)23-0093-06

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2019.23.028



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Comparison of Water Quality in Different Areas in Taihu Lake and Its Change Rule with Water Temperature

YE Yu-ting¹, TONG Yi-fan², LIU Mao-song¹ (1. School of Life Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210046; 2. Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Nanjing, Jiangsu 210036)

Abstract Temperature is important to the growth of cyanobacteria and concentrations of major water environmental factors, such as nitrogen and phosphorus, thus affecting the condition of eutrophication of lakes. Based on long-term monitoring data of Meiliang Bay and central lake of Taihu Lake, the main influencing factors to water quality in different lake areas were discussed with Factor Analysis. The effect of water temperature on water eutrophication and its difference in different lake areas were analyzed and discussed by using the nutritional status index method and Pearson correlation analysis. The results showed that there were regional differences in the main factors affecting water quality. In Meiliang Bay and central lake, phosphorus, Chl-a and COD_{Mn} were the most important factors affecting water quality, while TN, NH₄⁺-N and water temperature were the most important factors affecting water quality in estuary. There was a significant correlation between the water temperature and the condition of eutrophication, but there were regional differences. In Meiliang Bay and estuary, the degree of eutrophication increased with the increase of water temperature, while in center lake, the degree of eutrophication decreased. With the increase of water temperature, the nutrient load of nitrogen decreased. Overall, this study showed that there was a significant correlation between water temperature and eutrophication, but the impacts on different indicators and different lake areas were different.

Key words Taihu Lake; Factor analysis; Comprehensive nutritional status index; Temperature

湖泊富营养化是指水体中由于营养盐的增加而导致蓝藻生产力增加、水质下降等一系列变化的现象。温度是生态系统中各种物理、化学、生物反应过程的基本条件, 对湖泊各水环境因子和蓝藻生长起着重要作用。在富营养化湖泊中, 水温会影响沉积物的吸附解析^[1-2]、营养盐的循环与利用效率^[3-5]、微生物的代谢速率^[6]、浮游植物与沉水植物的生长等^[7-8], 从而影响湖泊富营养化状态。

太湖是我国第三大淡水湖, 面积 2 338 km², 平均水深 1.9 m, 是典型的亚热带浅水湖泊。随着长江三角洲地区的工业发展和城市化进程的加速, 太湖氮磷浓度居高不下, 湖体富营养化严重。其中梅梁湾位于西太湖北部, 靠近无锡市, 是太湖富营养化较严重的湖区之一^[9]。笔者通过长期监测数据, 以太湖北部梅梁湾和邻近的湖心区和入湖口为主要研究对象, 采用因子分析法, 比较分析不同湖区水质状况及主要影响因子的差异, 并采用营养状态指数法, 计算不同湖区的综合营养状态指数及其随水温的变化特征, 初步探讨水温对不同水质特征水体富营养化的影响。

1 数据来源及分析方法

1.1 数据来源 数据来源于“国家地球系统科学数据共享服务平台——湖泊流域科学数据中心”, 选择 1999—2006 年 8 年间的监测数据。水质指标主要有水温(WT)、透明度(SD)、悬浮质(SS)、酸碱度(pH)、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、叶绿素 a(Chl-a)、总磷(TP)、总氮(TN)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)、氨氮(NH₄⁺-N)、亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)、磷酸盐(PO₄³⁻)。采样频次为每 30 d 1 次, 月中采样。各物理化学变量获取与分析均采用国家标准方法, 可参见相关研究^[9-10]。

监测站点有 8 个(图 1)。站点 0 是太湖北端梁溪河口的入湖口; 站点 1、3、4、5 全部位于梅梁湾; 站点 6 位于直湖港口的太湖北端; 站点 7、8 位于湖心区。

1.2 分析方法

(1) 采用聚类分析, 以水质指标为依据对 1999—2006 年 8 个监测站点进行分类; 采用 One-Way ANOVA 分析各水质指标在不同类别湖区间的差异性。

(2) 采用因子分析, 分析各湖区影响水质的主要因子及内部关系, 并比较不同湖区间的差异性。

(3) 计算各湖区的综合营养状态指数(TLI)及各水质指标(j)的营养状态指数 TLI(j), 具体计算方法可参考文献[11]。以每 1 °C 为单位计算营养状态指数在水温上的分布

作者简介 叶羽婷(1994—), 女, 江苏南京人, 硕士研究生, 研究方向: 湿地生态学。* 通信作者, 副教授, 博士, 从事湿地生态学、景观生态学研究。

收稿日期 2019-05-19

特征值,并采用 Pearson 相关性分析,探究不同湖区富营养化状态随水温的变化规律。

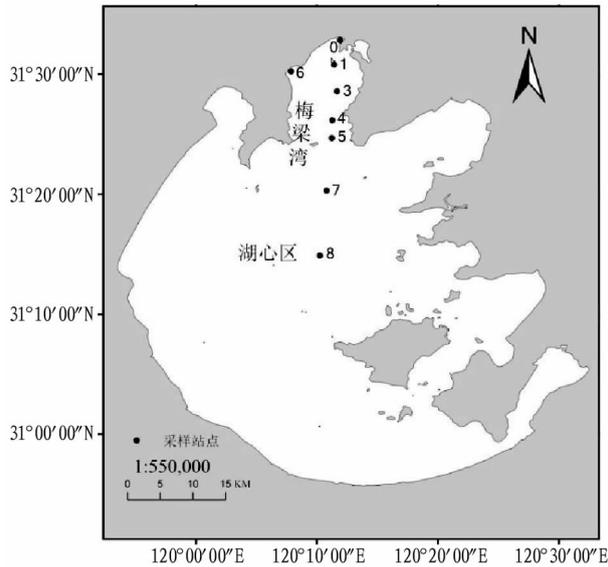


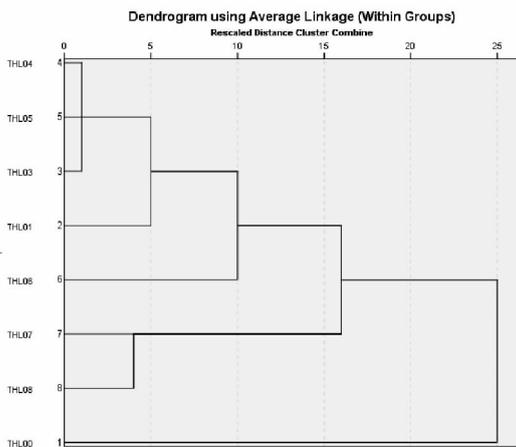
图1 太湖采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling points in Taihu Lake

2 结果与分析

2.1 水质空间分布特征 聚类分析结果见图2,以距离10为基准,可将全部监测点分为4类。第一类包括站点1、3、4、5,该4类站点全部位于梅梁湾;第二类为站点6,站点6位于直湖港口的太湖北端;第三类为站点7、8,位于湖心区;第四类为站点0,是太湖北端梁溪河口的入湖口。

将第一类中的站点1、3、4、5作为“梅梁湾”进行研究,第三类中的站点7、8作为“湖心区”进行研究;虽然站点0、6都是河口区,但由于位于不同的人湖口,聚类分析结果显示差异性较大,而站点6与第一、三类站点有较大相似性。为充分了解不同水质特征的湖区间差异,选择与第一、三类别距离较远的第四大类的站点0作为“河口区”进行研究。



注:“THL”表示站点

Note:“THL” stands for site

图2 各监测站点聚类分析结果

Fig.2 Cluster analysis result of each site

质指标的差异性(图3)。结果显示,水温在3个湖区间无显著差异,均值在18℃左右。Chl-a、COD_{Mn}、TN、TP、NH₄⁺-N在3个湖区间均存在显著差异,其浓度高低均为河口区>梅梁湾>湖心区。NO₂⁻-N、PO₄³⁻表现为河口区浓度显著高于梅梁湾和湖心区。NO₃⁻-N表现为河口区和梅梁湾区浓度显著高于湖心区。SS表现为湖心区显著高于河口区和梅梁湾。DO、pH表现为梅梁湾、湖心区显著高于河口区。

从各水质指标来看,河口区氮、磷浓度都居3个湖区之首,应与人为污染源的大量排入有关^[12]。有研究显示,湖泊具有一定的自净能力,在水体流入的过程中,可以逐渐将水体中氮、磷、有机物等富营养物质或有害物质予以吸收、转化、沉积再分配,从而使水体净化^[13]。湖心区远离河口,水质相对较好,但是其悬浮质较高,应与水动力扰动有关。研究表明,湖心区处于水面开阔的开敞湖区,风浪扰动能够轻易使底泥悬浮,从而提高悬浮质、降低透明度^[12]。

2.2 不同湖区水环境主成分的比较分析 分别对3个湖区的水质指标进行因子分析。根据检验结果,梅梁湾、湖心区、河口区的巴特利特球度检验(Bartlett test of sphericity)统计量的相应概率都为0.000<0.05,KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)值分别为0.582、0.594和0.574,表明数据具有一定的相关性,适合进行因子分析^[14]。

梅梁湾、湖心区、河口区的因子分析见表1、2、3(包括入选因子的贡献率及旋转后的因子载荷)。梅梁湾提取了5个主成分因子,累积贡献率为82.82%;湖心区提取了4个主成分因子,累积贡献率为74.98%;河口区提取了5个主成分因子,累积贡献率为78.73%,3个湖区提取的因子都能够充分代替整体因子的情况。

分析梅梁湾提取的5个主成分(表1),第一主成分主要与COD_{Mn}、Chl-a、TP高度正相关,与pH中度正相关,该因子可以表征由磷元素主导的蓝藻繁殖状况;第二主成分主要与水温高度负相关,与DO高度正相关,与NH₄⁺-N中度正相关,可以表征由水温、DO等影响的基本水环境条件和与之相关的氮元素变化状况;第三主成分主要与NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TN、NO₂⁻-N高度正相关,可以表征湾区整体氮浓度及氮素之间转化的变化;第四主成分主要与PO₄³⁻高度正相关,同时与TP、NH₄⁺-N中度正相关,氮磷元素间存在相互作用,该因子可以表征与氮有关的磷浓度变化;第五主成分主要与SS高度正相关,同时与TP低度正相关,与pH低度负相关,可以表征由悬浮作用引起的水质变化,特别是与磷元素有关的悬浮质的变化。

分析湖心区提取的4个主因子(表2),第一主成分主要与TP、Chl-a、COD_{Mn}高度正相关,该因子可以表征由磷元素主导的蓝藻繁殖状况;第二主成分主要与水温高度负相关,与DO高度正相关,同时与SS中度正相关,该因子可以表征由水温、DO等影响的基本水环境条件和与之相关的悬浮质的变化;第三主成分主要与NO₃⁻-N、TN、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N高度正相关,可以表征湖心区氮素浓度及氮素之间转化的变化;第四主成分主要与PO₄³⁻和pH高度正相关,可以表征pH

采用 One-Way ANOVA 差异性分析,比较3个湖区各水

相关的磷酸盐变化。

分析河口区提取的 5 个主因子(表 3),第一主成分主要与 TN、 NH_4^+ -N 高度正相关,与水温高度负相关,该因子可以表征水温相关的氮浓度变化;第二主成分主要与 pH、 COD_{Mn} 、Chl-a 高度正相关,该因子可以表征蓝藻的生长状况;第三主

成分分别与 PO_4^{3-} 和 TP 高度、中度正相关,与 DO 中度负相关,该因子可以表征 DO 状况和磷污染状况;第四主成分主要与 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 正相关,该因子可以表征不同氮素形式的浓度状况;第五主成分主要与 SS 高度正相关,该因子可以表征 SS 的状况。

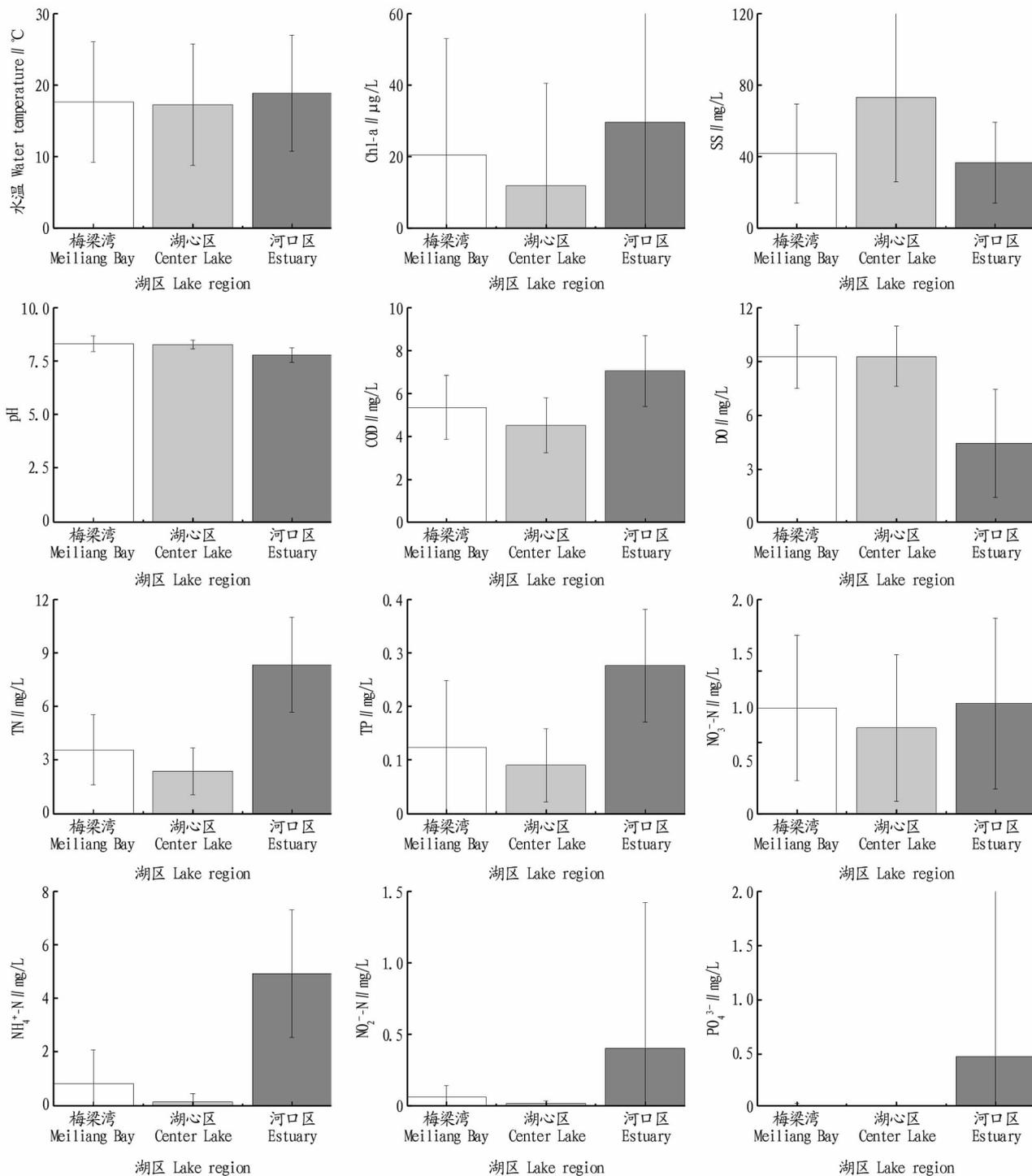


图 3 3 个湖区各水质指标浓度均值

Fig. 3 Mean concentration of water quality indicators in the three lakes

比较分析 3 个湖区影响水质的主要因素,发现梅梁湾和湖心区有较大相似性。其影响水质的第一主成分因子都包括 COD_{Mn} 、Chl-a 和 TP,表明在这 2 个湖区由磷主导的蓝藻生长状况对水质影响最大;第二主成分因子都有水温和 DO;

第三主成分都与氮浓度和氮素之间的相互转化有关。不同的是,第二主成分中,仅湖心区有 SS 这一水质指标。

而河口区影响水质的主要因素与梅梁湾和湖心区有较大差异。第一主成分因子主要影响因子包括 TN、 NH_4^+ -N 和

表1 梅梁湾水质指标旋转后的因子载荷及因子贡献率

Table 1 Factor load and factor contribution rate after rotation of water quality index in Meiliang Bay

水质指标 Water quality index	旋转后成分载荷率 Factor load rate after rotation				
	1	2	3	4	5
COD _{Mn}	0.901	0.036	0.053	0.196	0.055
Chl-a	0.879	-0.151	0.033	-0.018	0.063
TP	0.700	-0.044	0.003	0.495	0.370
pH	0.587	-0.112	-0.357	-0.401	-0.373
DO	0.126	0.838	0.004	-0.342	-0.095
WT	0.431	-0.830	-0.030	-0.041	-0.021
NH ₄ ⁺ -N	-0.018	0.566	0.511	0.477	-0.070
NO ₃ ⁻ -N	-0.231	0.116	0.790	-0.243	0.080
TN	0.081	0.518	0.737	0.286	0.137
NO ₂ ⁻ -N	0.281	-0.315	0.696	0.142	-0.103
PO ₄ ³⁻	0.159	-0.143	-0.001	0.862	-0.021
SS	0.129	-0.058	0.019	-0.016	0.952
特征根 Characteristic root	2.80	2.16	2.04	1.70	1.24
单独贡献率 Individual contribution rate//%	23.36	17.96	17.04	14.13	10.34
累积贡献率 Accumulating contribution rate//%	23.36	41.32	58.36	72.48	82.82

表2 湖心区水质指标旋转后的因子载荷及因子贡献率

Table 2 Factor load and factor contribution rate after rotation of water quality index in Central Lake

水质指标 Water quality index	旋转后成分载荷率 Factor load rate after rotation			
	1	2	3	4
TP	0.953	0.172	0.074	-0.060
Chl-a	0.935	-0.125	-0.032	-0.113
COD _{Mn}	0.905	0.091	0.011	0.192
WT	0.041	-0.964	-0.044	-0.027
DO	0.020	0.947	-0.027	-0.022
SS	0.299	0.475	0.291	0.164
NO ₃ ⁻ -N	-0.140	-0.062	0.869	-0.155
TN	0.462	0.170	0.819	-0.093
NH ₄ ⁺ -N	0.056	0.393	0.609	0.106
NO ₂ ⁻ -N	-0.045	-0.017	0.558	0.233
PO ₄ ³⁻	0.074	0.140	0.161	0.800
pH	-0.189	-0.491	-0.330	0.560
特征根 Characteristic root	2.97	2.55	2.34	1.13
单独贡献率 Individual contribution rate//%	24.77	21.28	19.48	9.45
累积贡献率 Accumulating contribution rate//%	24.77	46.05	65.53	74.98

表3 河口区水质指标旋转后的因子载荷及因子贡献率

Table 3 Factor load and factor contribution rate after rotation of water quality index in Estuary

水质指标 Water quality index	旋转后成分载荷率 Factor load rate after rotation				
	1	2	3	4	5
TN	0.924	0.020	0.058	0.177	0.079
NH ₄ ⁺ -N	0.855	-0.161	0.225	0.013	0.037
WT	-0.809	0.175	0.223	0.350	0.118
pH	-0.200	0.826	-0.068	-0.112	-0.158
COD _{Mn}	0.336	0.811	0.002	0.144	0.180
Chl-a	-0.370	0.798	-0.121	0.300	-0.062
PO ₄ ³⁻	-0.021	-0.173	0.823	0.037	-0.303
DO	-0.119	0.552	-0.587	-0.078	-0.291
TP	0.478	0.261	0.581	0.036	0.170
NO ₂ ⁻ -N	-0.055	0.038	0.102	0.879	0.058
NO ₃ ⁻ -N	0.236	0.177	-0.358	0.455	-0.382
SS	0.061	-0.053	-0.095	0.029	0.899
特征根 Characteristic root	2.83	2.47	1.63	1.27	1.25
单独贡献率 Individual contribution rate//%	23.61	20.60	13.58	10.55	10.38
累积贡献率 Accumulating contribution rate//%	23.61	44.21	57.79	68.35	78.73

水温,表明氮素污染及其与水温相关的变化对河口区水质的影响最大。第二主成分中包括 pH、COD_{Mn} 和 Chl-a,表明蓝藻生长是影响其水质的次要因素,且磷元素在该主成分中并非主要的相关因子;第三主成分为磷元素及其与溶解氧相关的变化。

在 3 个湖区的主成分因子中,水温与河口区的第一主成分因子、梅梁湾和湖心区的第二主成分因子分别显著相关,表明水温对水体水质有重要影响。其中,河口区的第一主成分和梅梁湾的第二主成分水温都与氮素有关,表明水温与水体中的氮素浓度有重要的内在联系。

2.3 综合营养状态指数随水温的变化特征 计算并比较分析 3 个湖区综合营养状态指数(TLI),梅梁湾和湖心区综合营养状态指数分别为 58.70 和 55.49,为轻度富营养化;河口

区综合营养指数为 66.77,为中度富营养化,One-Way ANOVA 分析显示 3 个湖区具有极显著差异。

分析水温与各营养状态指数的相关性(表 4),随水温变化 3 个湖区的富营养化状态的改变有所不同。在梅梁湾,综合营养状态指数与水温极显著正相关,约 18 °C 后综合营养状态指数由轻度富营养化转为中度富营养化,表明梅梁湾富营养化状况随水温升高而加剧。相似地,在河口区,综合营养状态指数与水温呈极显著正相关,随水温的上升呈波动升高趋势(图 4),在 12 °C 左右和水温大于 30 °C 时上升至 70 以上,为重度富营养化,表明河口区随水温升高富营养化状态同样有所加剧。而在湖心区,综合营养状态指数与水温呈极显著负相关,且始终处于轻度富营养化状态,表明湖心区富营养化状态随水温的升高而有所减缓。

表 4 3 个湖区各指标营养状态指数(TLI)与水温的相关性

Table 4 Correlation between nutritional status index and water temperature

湖区 Lake region	TLI	TLI(SD)	TLI(TN)	TLI(TP)	TLI(COD _{Mn})	TLI(Chl-a)
梅梁湾 Meiliang Bay	0.334 **	0.019	-0.060	0.094	0.158 **	0.255 **
湖心区 Central Lake	-0.196 **	-0.176 *	-0.251 **	-0.057	-0.058	0.050
河口区 Estuary	0.325 **	-0.263 *	-0.019	-0.040	0.214 *	0.038

注: ** 表示极显著相关; * 表示显著相关

Note: ** indicates extremely significant correlation; * indicates significant correlation

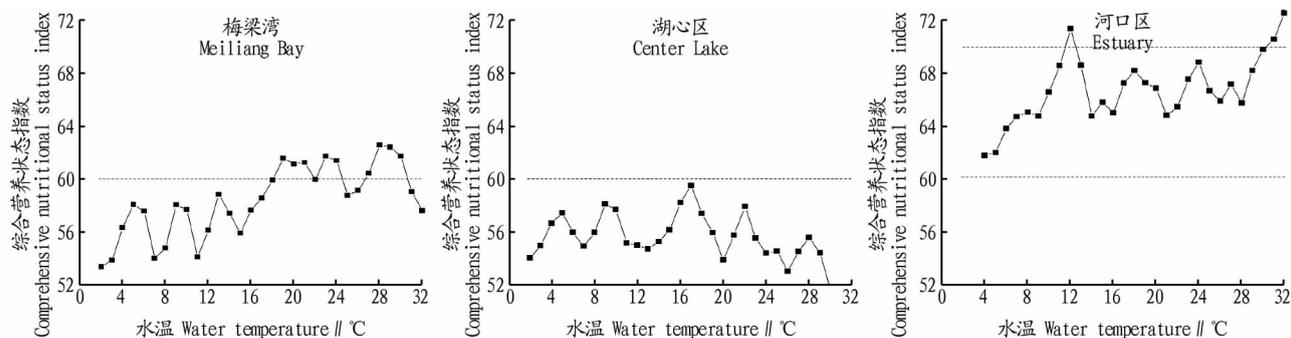


图 4 3 个湖区综合营养状态指数随水温的变化趋势

Fig. 4 Trend of comprehensive nutrition state index with water temperature in three lake regions

具体分析各水质指标营养状态指数,在梅梁湾 TLI(Chl-a)和 TLI(COD_{Mn})与水温呈极显著相关,TLI(TN)与水温呈不显著的负相关,其余指数与水温呈不显著的正相关,表明在梅梁湾随水温升高,富营养化状态加剧,与 Chl-a 和 COD_{Mn} 营养指数的升高有关。在湖心区,除 TLI(Chl-a)与水温呈不显著的正相关,其余指数均与水温呈负相关,其中 TLI(SD)和 TLI(TN)有显著相关性,表明在湖心区随着水温的升高,虽然 Chl-a 营养指数有所上升,但是其余水质指标特别是 TN 和 SD 营养状态的下降,使其富营养化状态有所减缓。在河口区,TLI(Chl-a)和 TLI(COD_{Mn})与水温呈正相关,其中 TLI(COD_{Mn})与水温具有显著相关性,其余指标与水温呈负相关,其中 TLI(SD)与水温呈显著负相关,表明在河口区,随着水温的升高,富营养化状态加剧主要与 COD_{Mn} 营养状态的上升有关。

各水质指标营养状态指数与水温的相关性中,3 个湖区的 Chl-a 与水温均呈现正相关,其中梅梁湾显著正相关,表

明随着水温的升高,水体中 Chl-a 浓度上升,应与温度升高有助于蓝藻生长有关^[15-16]。

3 个湖区 TN 与水温呈现出一致的负相关,表明随着水温的升高,氮负荷有所缓解。有研究显示,在梅梁湾、湖心区和入湖河流,氮浓度的变化趋势均是冬季升高,夏季降低^[17],与该研究结果相似。有研究者认为这可能与高温时降雨量较大从而稀释水体,浮游植物生长吸收氮素以及反硝化作用有关^[12]。但有研究显示^[13],汛期河道氮素输入总量远高于汛前和汛后,因此汛期降雨不能对太湖氮素浓度起到稀释作用;且浮游植物对氮素的同化吸收,再经衰亡降解等一系列过程,更多的是氮素形态的变化,并不能很好地解释夏季水体中总氮浓度的下降,故在太湖反硝化作用可能是夏季太湖总氮和硝态氮浓度降低的最重要原因。随着水温的升高水体中反硝化作用加剧^[18],从而减轻水体氮负荷^[13]。

3 结论

(1)河口区、梅梁湾、湖心区的水质富营养化存在显著差

异,除悬浮质浓度在湖心区最高外,总体上各水质指标浓度表现为河口区>梅梁湾>湖心区。3个湖区影响水质的主要因子存在空间差异。其中,梅梁湾和湖心区有一定相似性,其影响水质的最主要因子都与磷元素、Chl-a和 COD_{Mn} 有关;但同时,梅梁湾中氮素也有重要影响,而湖心区中SS具有重要影响。河口区与梅梁湾、湖心区有较大差异,其影响水质的最主要因子与 TN 、 NH_4^+-N 和水温有关。

(2)水温与3个湖区综合营养状态指数均存在极显著相关,但具有区位差异。在梅梁湾和河口区,随着水温的升高,富营养化程度加剧;而在湖心区,富营养化程度会随着水温的升高有所缓解。

(3)随着水温的升高,氮素在各湖区的营养负荷都有所降低。总体来说,水温与湖泊富营养化存在显著相关,但对不同指标及不同湖区间的影响存在差异。

参考文献

- [1] MALMAEUS J M, BLENCKNER T, MARKENSTEN H, et al. Lake phosphorus dynamics and climate warming: A mechanistic model approach[J]. Ecological modelling, 2006, 190(1/2): 1-14.
- [2] BACHMANN R W, HORSBURGH C A, HOYER M V, et al. Relations between trophic state indicators and plant biomass in Florida lakes[J]. Hydrobiologia, 2002, 470(1): 219-234.
- [3] WITHERS P J A, JARVIE H P. Delivery and cycling of phosphorus in rivers: A review[J]. Science of the total environment, 2008, 400(1): 379-395.
- [4] STANFORD G, DZIENIA S, VANDER POL R A. Effect of temperature on denitrification rate in soils[J]. Soil science society of America journal, 1975, 39(5): 867-870.
- [5] MARTIN T L, KAUSHIK N K, TREVORS T J, et al. Review: Denitrification

in temperate climate riparian zones[J]. Water, air and soil pollution, 1999, 111(1/2/3/4): 171-186.

- [6] 秦伯强, 高光, 朱广伟, 等. 湖泊富营养化及其生态系统响应[J]. 科学通报, 2013, 58(10): 855-864.
- [7] 谭啸, 孔繁翔, 于洋, 等. 升温过程对藻类复苏和群落演替的影响[J]. 中国环境科学, 2009, 29(6): 578-582.
- [8] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 589-595.
- [9] CHEN Y W, FAN C X, TEUBNER K, et al. Changes of nutrients and phytoplankton chlorophyll- α in a large shallow lake, Taihu, China: An 8-year investigation[J]. Hydrobiologia, 2003, 506(1/2/3): 273-279.
- [10] 陈宇炜, 秦伯强, 高锡云. 太湖梅梁湾藻类及相关环境因子逐步回归统计和蓝藻水华的初步预测[J]. 湖泊科学, 2001, 13(1): 63-71.
- [11] 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.
- [12] 朱广伟. 太湖水质的时空分异特征及其与水华的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(5): 439-445.
- [13] 陈小锋, 揣小明, 曾巾, 等. 太湖氮素出入湖通量与自净能力研究[J]. 环境科学, 2012, 33(7): 2309-2314.
- [14] 曾庆慧, 秦丽欢, 程鹏, 等. 1990年以来北京密云水库主要水环境因子时空分布特征[J]. 湖泊科学, 2016, 28(6): 1204-1216.
- [15] KARLSSON-ELFGREN I, BRUNBERG A K. The importance of shallow sediments in the recruitment of *Anabaena* and *Aphanizomenon* (Cyanophyceae) [J]. Journal of phycology, 2004, 40(5): 831-836.
- [16] CAO H S, TAO Y, KONG F X, et al. Relationship between temperature and cyanobacterial recruitment from sediments in laboratory and field studies[J]. Journal of freshwater ecology, 2008, 23(3): 405-412.
- [17] XU H, PAERL H W, QIN B Q, et al. Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China[J]. Limnology and oceanography, 2010, 55(1): 420-432.
- [18] MCCARTHY M J, LAVRENTYEV P J, YANG L Y, et al. Nitrogen dynamics and microbial food web structure during a summer cyanobacterial bloom in a subtropical, shallow, well-mixed, eutrophic lake (Lake Taihu, China) [J]. Hydrobiologia, 2007, 581(1): 195-207.

(上接第75页)

- [8] 周明, 王占岐. 基于耕地质量和空间聚类的县域基本农田划定: 以湖北省团风县为例[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5): 316-321.
- [9] 贾旭飞, 孟超, 刘晨. 河北省宁晋县高标准基本农田建设布局研究[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4): 145-151.
- [10] 樊润. 中国土地整理事业发展的回顾与展望[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 246-251.
- [11] CAI W M, YAN H Y, SHI Y. Research of the basic farmland delimitation based on fuzzy decision making model[J]. Advances in management of technology, 2010, 17(1): 198-203.
- [12] 张凤荣, 徐艳, 安萍莉, 等. 农用地分等成果在土地利用总体规划中的应用探讨[J]. 中国土地科学, 2006, 20(6): 21-25.
- [13] 国务院. 基本农田保护条例[J]. 中华人民共和国国务院公报, 1998

(34): 1279-1284.

- [14] 彭茹燕, 张蕾娜, 程锋, 等. 农用地分等成果在土地利用总体规划中的应用探讨[J]. 资源与产业, 2006, 8(5): 20-23.
- [15] 任艳敏, 唐秀美, 刘玉, 等. 考虑耕地生态质量的基本农田划定方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 298-307.
- [16] 奉婷, 张凤荣, 李灿, 等. 基于耕地质量综合评价的县域基本农田空间布局[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 200-210.
- [17] 郭贝贝, 金晓斌, 杨绪红, 等. 基于农业自然风险综合评价的高标准基本农田建设区划定方法研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(3): 377-386.
- [18] MARULLI J, MALLARACH J M. A GIS methodology for assessing ecological connectivity: Application to the Barcelona Metropolitan Area [J]. Landscape and urban planning, 2005, 71(2): 243-262.