

阳澄西湖叶绿素 a 的时空分布及其与环境因子的关系^{*1}

葛优¹ 周彦锋² 吕大伟¹ 尤洋^{1, 2*}

(1. 南京农业大学无锡渔业学院, 江苏无锡 214081;

2. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 农业部淡水渔业和种质资源利用重点实验室, 江苏无锡 214081)

【摘要】:根据 2015 年 3 月~2016 年 2 月对阳澄西湖水体叶绿素 a 和水质理化因子的逐月监测结果表明, 阳澄西湖叶绿素 a 浓度存在着明显的季节变化, 其全年变化范围为 11.93 $\mu\text{g/L}$ ~66.67 $\mu\text{g/L}$, 平均值为 27.54 $\mu\text{g/L}$ $\pm$ 20.34 $\mu\text{g/L}$ 。最小值出现在 2016 年 1 月, 最大值出现在 2015 年 8 月。叶绿素 a 在空间分布上也存在着差异, 叶绿素 a 在断面 I 浓度最高, 其次是断面 II 和断面 IV, 断面 III 最低。根据综合营养状态指数法计算阳澄西湖营养状态, 得出综合营养状态指数范围为 50.7~59.3, 年平均值为 55.6, 水体总体处于“轻度富营养”状态。综合 pearson 相关系数和逐步回归方程, 结果表明叶绿素 a 与水温呈极显著正相关, 与溶解氧呈极显著负相关, 与透明度呈极显著负相关。结合生产实践对阳澄西湖总氮(TN)、总磷(TP)和氮磷比(N/P)取对数进行 pearson 相关性分析并建立一元线性回归方程, 结果表明叶绿素 a 浓度与总氮无相关关系, 与总磷呈极显著正相关, 与氮磷比呈极显著负相关, 阳澄西湖可能是一定程度的磷限制湖泊。

【关键词】:阳澄西湖; 叶绿素 a; 环境因子; 相关分析

【中图分类号】:X824 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004-8227(2017)07-1068-08

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201707013

湖泊富营养化是由于过量的营养物输入湖泊, 导致藻类等浮游植物大量繁殖, 水质变坏, 进而引起湖泊生态系统的一系列变化^[1]。氮、磷是导致湖泊发生富营养化的重要营养元素^[2], 是湖泊藻类生长的重要营养来源^[3]。在湖泊富营养化研究中, 氮、磷与藻类生物量之间的关系一直是重要的研究内容之一。叶绿素 a 最能表现水体富营养化状态进程, 其浓度与藻类生物量之间有着密切的关系^[4], 叶绿素 a 不仅是水体理化和生物指标之间综合作用的表现, 同时还受环境因子的制约, 因此, 研究叶绿素

¹收稿日期:2016-11-18; 修回日期:2017-03-07

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201303056-02) [Public Welfare Industry(Agriculture)Special Scientific Research(201303056-02)]; 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2015JBFM03) [Special Funds for Basic Research and Business Expenses of Central Level Public Welfare Scientific Research Institutions(2015JBFM03)]

作者简介:葛优(1991~), 男, 硕士研究生, 从事渔业资源环境保护的研究. E-mail:1406183258@qq.com

***通讯作者** E-mail:youy@ffrc.cn

a 含量的时空分布及其与环境因子的相互关系,对筛选湖泊富营养化过程起关键作用的环境因子具有重要意义。

阳澄湖为太湖流域第三大浅水湖泊,面积 119km²,它不仅是苏州市区和昆山市各个沿湖乡镇的饮用水水源地,还对工业用水、农业灌溉和渔业资源等有着深远的影响^[5]。阳澄湖水生生物资源量丰富,生物物种多样性高,是水生生物栖息、觅食、育肥和繁衍的理想水域。20 多年来,国内网围养殖发展迅速,养殖模式经历了从粗放型向集约型和效益型发展的过程。然而,随着养殖规模不断扩大,养殖区域营养盐含量和结构发生了变化,溶解无机磷、无机氮大幅度上升,氮磷比值发生变化。研究表明,高密度网围养殖加速了湖泊的富营养化进程^[6]。而阳澄湖是长江下游地区具有代表性的浅水草型湖泊,由于网围养殖过度开发,导致水环境遭到破坏,水草覆盖率大大降低。阳澄西湖相比较阳澄东湖与中湖而言,沉水植物更是零星可见。为治理阳澄湖水体富营养化问题,苏州市政府于 2008 年首先将阳澄西湖围网全部拆除,并于 2009 年开始实行增殖放流。实行增殖放流后的阳澄西湖属于生态养殖模式,而关于阳澄湖在这种生态养殖模式下的相关研究相对较少。

本研究中通过对阳澄西湖 2015~2016 年的叶绿素 a 和水质理化因子的监测、分析,掌握该湖区叶绿素 a 的时空变化特征,并根据该湖区营养盐的时空分布对其作出营养状态评价,探讨水体中叶绿素 a 与环境因子之间的相互关系,并建立逐步回归方程,筛选影响叶绿素 a 浓度的环境因子,以期为围网拆除后的阳澄西湖实现生态修复与治理提供科学依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域为苏州市阳澄湖西湖,阳澄西湖为阳澄湖的一部分。依据阳澄西湖的地理形态和水文条件,对阳澄西湖 4 个断面进行了调查,并结合样点设置规范^[7],选取 12 个采样点(31° 23' 26.8" ~31° 28' 55.1" N, 120° 42' 13.3" ~120° 45' 32.8" E),编号采样点分别设置为断面 I (S1、S2、S3)、断面 II (S4、S5、S6)、断面 III (S7、S8、S9)和断面 IV (S10、S11、S12) (图 1)。

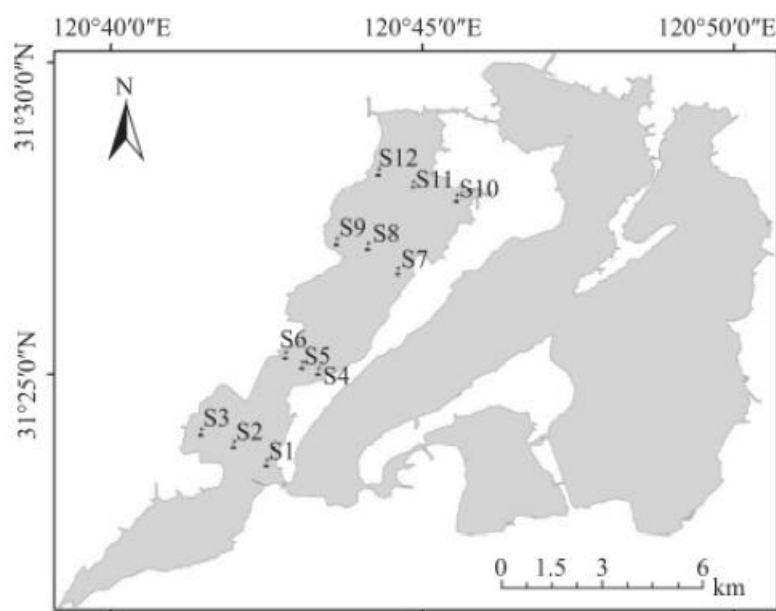


图 1 采样点示意图

Fig. 1 Sketch Map of Sampling Points

1.2 样品采集

样品采集方法按照《湖泊富营养化调查规范》进行^[1]，采样时间为2015年3月~2016年2月，逐月采样，GPS定位。按水样采集规范，根据湖泊水面的宽度，各断面分别设置1~3个采样点，采集0.5m以上表层水，带回实验室进行测定。

1.3 水质分析方法

水体理化监测项目为水温(T)、pH、溶解氧(DO)、浊度(Tur)、透明度(SD)、水深(h)、总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)、总氮(TN)、氨氮(NH₄-N)、亚硝酸盐氮(NO₂-N)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、叶绿素a(Chl-a)共13项。其中T、pH、DO、Tur、SD和WD采用多功能水质检测仪进行现场检测；TP和DTP采用钼酸铵分光光度法；TN和DTN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法；NH₄-N采用纳氏试剂分光光度法；NO₂-N采用紫外分光光度法；COD_{Mn}采用酸式滴定法；Chl-a采用丙酮提取分光光度法测定。水质数据按照地表水环境质量标准(GB3838-2002)来进行分析^[8]。

1.4 水质营养评价方法

采用综合营养状态指数法(TLI)评价阳澄西湖的营养化类型，采用0~100一系列连续的数字对湖泊富营养状态进行分级，评价标准为：TLI(Σ)<30为贫营养，30≤TLI(Σ)≤50为中营养，50<TLI(Σ)≤60为轻度富营养，60<TLI(Σ)≤70为中度富营养，TLI(Σ)>70为重度富营养^[9]。

$$\begin{aligned} TLI(Chl. a) &= 10 \times (2.5 + 1.086 \times \ln Chl. a) \\ TLI(TP) &= 10 \times (9.436 + 1.624 \times \ln TP) \\ TLI(TN) &= 10 \times (5.453 + 1.694 \times \ln TN) \\ TLI(SD) &= 10 \times (5.118 - 1.94 \times \ln SD) \\ TLI(COD_{Mn}) &= 10 \times (0.109 + 2.661 \times \ln COD_{Mn}) \end{aligned}$$

式中：叶绿素a(Chl. a)单位为μg/m³，透明度(SD)单位为m；其他指标单位均为mg/L。

综合营养状态指数计算公式：

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \times TLI(j) ; W_j = r_{ij}^2 / \sum_{j=1}^m r_{ij}^2$$

式中：TLI(Σ)为综合营养状态指数；m为评价参数的个数；TLI(j)为第j种参数的营养状态指数；W_j为第j种参数的营养状态指数的相关权重；r_{ij}为第j种参数与基准参数Chl-a的相关系数。

1.5 数据处理与结果分析

通过SPSS22.0统计软件，利用单因素方差分析(ANOVA) LSD检验阳澄西湖全年及4个季节不同断面之间的显著性差异；采用pearson相关性分析和逐步回归分析对阳澄西湖叶绿素a与环境因子进行相关性和逐步回归分析并建立回归方程。

2 结果与分析

2.1 阳澄西湖叶绿素 a 的周年变化及季节差异

阳澄西湖叶绿素 a 的浓度呈现明显的季节变化, 季节变化特征为夏季>秋季>春季>冬季。春季叶绿素 a 浓度开始上升, 夏季逐渐增大并达到最大值, 秋季叶绿素 a 浓度逐渐减少, 冬季达到最小值。叶绿素 a 浓度全年变化范围为 $11.93 \mu\text{g/L} \sim 66.67 \mu\text{g/L}$, 平均值为 $27.54 \mu\text{g/L} \pm 20.34 \mu\text{g/L}$; 最小值出现在 2016 年 1 月, 最大值出现在 2015 年 8 月(图 2)。

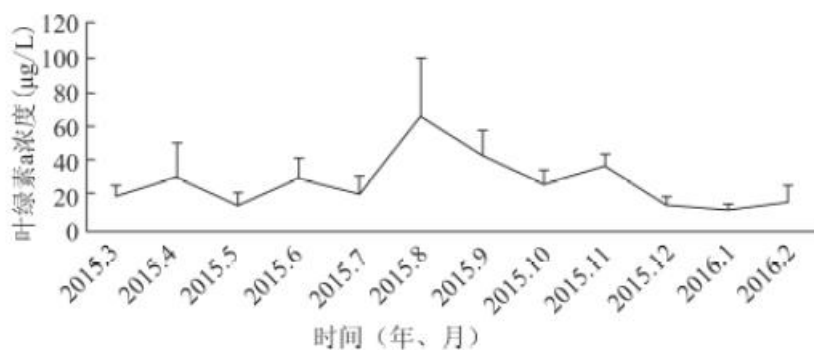


图 2 阳澄西湖叶绿素 a 浓度季节变化

Fig. 2 Seasonal Variation of Chlorophyll-a Concentration in Yangcheng West Lake

阳澄西湖就年平均值而言, 叶绿素 a 浓度在断面 I 最大($36.50 \mu\text{g/L} \pm 26.55 \mu\text{g/L}$), 其次是断面 II ($26.42 \mu\text{g/L} \pm 16.71 \mu\text{g/L}$) 和断面 IV ($24.39 \mu\text{g/L} \pm 18.31 \mu\text{g/L}$), 断面 III 最低($23.08 \mu\text{g/L} \pm 17.02 \mu\text{g/L}$)。春季和冬季叶绿素 a 浓度较低, 空间分布存在差异(图 3)。春季表现为断面 I > 断面 II > 断面 IV > 断面 III; 冬季表现为断面 I > 断面 II > 断面 IV > 断面 III。而夏季和秋季叶绿素 a 浓度较高, 也存在着一定的差异, 夏季表现为断面 I > 断面 II > 断面 III > 断面 IV, 秋季表现为断面 I > 断面 IV > 断面 II > 断面 III。通过单因素方差分析得出, 春季断面 I 与断面 III ($P < 0.05$)、断面 IV ($P < 0.05$) 存在显著差异; 冬季断面 I 与断面 II ($P < 0.05$)、断面 III ($P < 0.05$)、断面 IV ($P < 0.05$) 均存在显著差异; 在夏季和秋季不同断面之间均不存在显著差异。

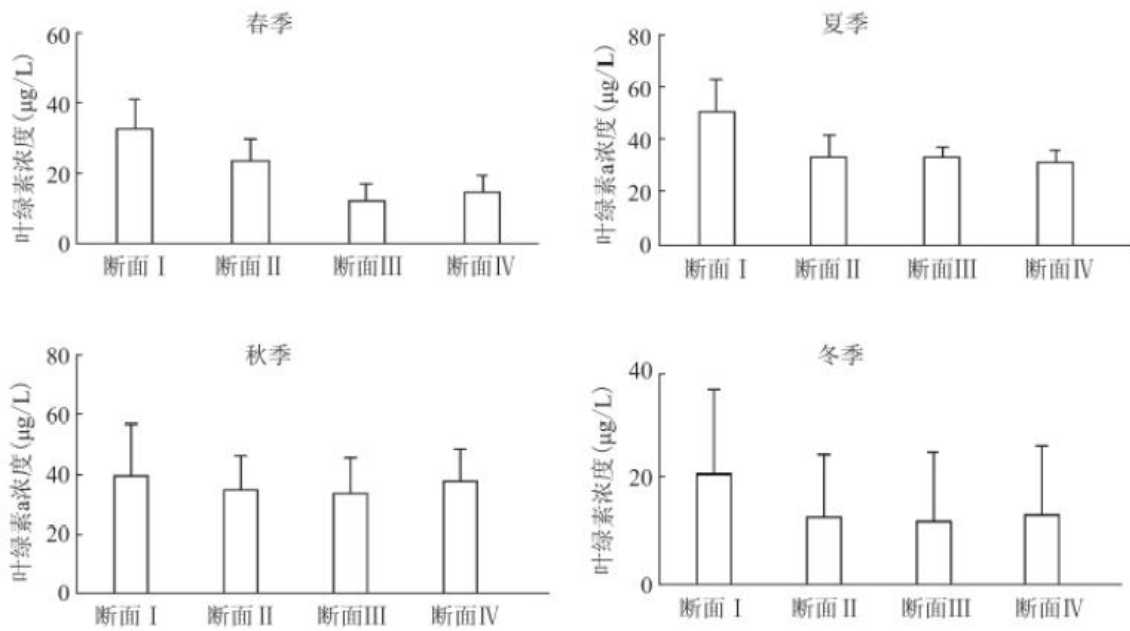


图 3 不同季节阳澄西湖叶绿素 a 浓度的空间分布

Fig. 3 Spatial Distribution of Chlorophyll-a Concentration in Yangcheng West Lake in Different Seasons

2.2 阳澄西湖叶绿素 a 与环境因子的相关关系

根据 2015 年 3 月~2016 年 2 月一年的监测数据,采用 pearson 指数分析阳澄西湖叶绿素 a 浓度与理化因子之间的相关性(表 1),分析结果表明,叶绿素 a 与氨氮、COD Mn、pH 和浊度在各个断面及全湖无显著相关性;叶绿素 a 与 TN 在断面 IV 和全湖呈显著负相关($P<0.05$);叶绿素 a 与 DTN 在断面 IV 和全湖呈极显著负相关($P<0.01$);叶绿素 a 与亚硝酸盐氮在断面 IV 呈显著负相关($P<0.05$),其余断面及全湖无显著相关性;叶绿素 a 与 TP 在断面 III 呈显著正相关($P<0.05$),在断面 IV 和全湖呈极显著正相关($P<0.05$);叶绿素 a 与 DTP 在断面 III 和断面 IV 以及全湖均呈极显著正相关($P<0.01$);叶绿素 a 与水温在断面 III 无显著相关,在其余断面均呈现显著正相关($P<0.05$),并且在全湖范围内呈极显著正相关($P<0.01$);叶绿素 a 与 DO 在断面 I 呈显著正相关($P<0.05$),其余断面及全湖呈极显著正相关($P<0.01$);叶绿素 a 与水深和 SD 在各断面均无显著相关,在全湖范围内,呈现与水深显著正相关($P<0.05$),与 SD 极显著负相关($P<0.01$)。

表 1 阳澄西湖不同断面及全湖叶绿素 a 与
理化因子的相关性

Tab. 1 Correlation of Chlorophyll-a and Physical and Chemical
Factors in Different Sections of Yangcheng West Lake

理化指标	断面 I	断面 II	断面 III	断面 IV	阳澄西湖
TN (mg/L)	-0.143	-0.192	-0.159	-0.414*	-0.186*
DTN (mg/L)	-0.253	-0.001	-0.229	-0.566**	-0.248**
氨氮 (mg/L)	-0.201	-0.062	0.136	-0.093	-0.067
亚硝酸盐氮 (mg/L)	-0.317	0.004	0.102	-0.408*	-0.109
TP (mg/L)	0.070	0.198	0.383*	0.471**	0.268**
DTP (mg/L)	0.229	0.262	0.516**	0.54**	0.371**
COD _{Mn} (mg/L)	0.109	0.113	0.278	-0.249	0.105
水温 (WT) (℃)	0.418*	0.370*	0.294	0.336*	0.344**
pH	-0.047	0.019	-0.004	-0.02	0.019
溶解氧 (DO) (mg/L)	-0.384*	-0.530**	-0.495**	-0.472**	-0.402**
浊度	-0.135	0.035	0.167	0.098	0.064
水深 (WD) (m)	0.308	0.248	0.034	0.175	0.196*
透明度 (SD) (cm)	-0.039	-0.214	-0.315	-0.129	-0.235**

注: * $P < 0.05$, 相关显著; ** $P < 0.01$, 相关极显著 (双尾检验)。

2.3 叶绿素 a 与水质因子的逐步回归分析

阳澄西湖各断面及全湖的叶绿素与环境因子的逐步回归分析结果见表 2。由表 2 可知, 各断面筛选出的对叶绿素 a 有显著影响的环境因子各不相同。入选各断面及全湖回归方程的环境因子有水温 (WT)、溶解氧 (DO)、水深 (WD)、透明度 (SD)、浊度、DTP、COD_{Mn}、NO-2-N 和 DTN。不同断面入选环境因子不同, 断面 I 有水温 (WT)、溶解氧 (DO) 和水深 (WD) 3 个因子入选, 复相关系数为 0.61; 断面 II 有溶解氧 (DO)、透明度 (SD) 和浊度 3 个因子入选, 复相关系数为 0.668; 断面 III 有 DTP、溶解氧 (DO)、透明度 (SD) 和 COD_{Mn} 4 个因子入选, 复相关系数为 0.79; 断面 IV 有 DTP、水温 (WT)、溶解氧 (DO) 和 NO-2-N 4 个因子入选, 复相关系数在各断面间最高, 为 0.851; 全湖有溶解氧 (DO)、水温 (WT)、透明度 (SD) 和 DTN 入选, 复相关系数为 0.585。根据阳澄西湖各断面及全湖综合逐步回归方程分析可知, 影响阳澄西湖叶绿素 a 的环境因子在各断面及全湖有所不同, 但主要的影响因子有水温 (WT)、溶解氧 (DO) 和透明度 (SD)。

表2 阳澄西湖各断面及全湖叶绿素 a 与
环境因子的回归方程

Tab. 2 Regression Equation of Chlorophyll-a and
Environmental Factors in Different Sections
of Yangcheng West Lake

断面	多元回归方程	复相关系数	F 值
I	$Y_{(Chla)} = 9.512 + 1.182X_{(WT)} - 3.211X_{(Do)} + 17.209X_{(WD)}$	0.61	6.322
II	$Y_{(Chla)} = 128.067 - 4.74X_{(Do)} - 0.431X_{(SD)} - 2.116X_{(NTU)}$	0.668	8.581
III	$Y_{(Chla)} = 62.941 + 130.213X_{(DTP)} - 4.6X_{(Do)} - 0.225X_{(SD)} + 7.279X_{(CODMn)}$	0.79	12.85
IV	$Y_{(Chla)} = 41.344 + 305.552X_{(DTP)} - 2.877X_{(Do)} + 0.824X_{(WT)} - 28.550X_{(NO2-)}$	0.851	20.383
阳澄西湖	$Y_{(Chla)} = 80.057 - 3.509X_{(Do)} + 0.603X_{(WT)} - 0.192X_{(SD)} - 6.35X_{(DTN)}$	0.585	18.06

2.41g(Y_{Chla})与lg(X_{TN})、lg(X_{TP})和lg(TN/TP)的相关分析

通过逐步回归分析,筛选出对叶绿素 a 影响相对重要的水质因子为水温,溶解氧、和透明度,并且叶绿素 a 与水温呈极显著正相关,与溶解氧呈极显著负相关,与透明度呈极显著负相关。

表3 阳澄西湖lg(Y_{Chla})与lg(X_{TN})、lg(X_{TP})和
lg(TN/TP)的相关关系

Tab. 3 Correlation between lg(Y_{Chla}), lg(X_{TN}), lg(X_{TP})
and lg(N/P) in Yangcheng West Lake

	lg(Y_{Chla})	lg(X_{TN})	lg(X_{TP})	lg(TN/TP)
lg(YChla)	1			
lg(XTN)	-0.162	1		
lg(XTP)	0.408 **	0.062	1	
lg(TN/TP)	-0.449 **	0.39 **	-0.895 **	1

注:* $P < 0.05$, 相关显著; ** $P < 0.01$, 相关极显著。(双尾检验)。

本研究对叶绿素 a、TN、TP、氮磷比(N/P)的浓度取对数后,进行相关性分析,结果如表3所示。Lg(Y_{Chla})与lg(X_{TN})无相关

关系，与 $\lg(X_{TP})$ 呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，相关系数为 0.408；与 $\lg(TN/TP)$ 呈极显著负相关 ($P < 0.01$)，相关系数为 0.449。由此建立线性回归方程如图 4、图 5 所示，分别是 $\lg(Chla) = 0.63537\lg(TP) + 1.9687$ ； $\lg(Chla) = -0.64474\lg(TN/TP) + 2.213$ 。

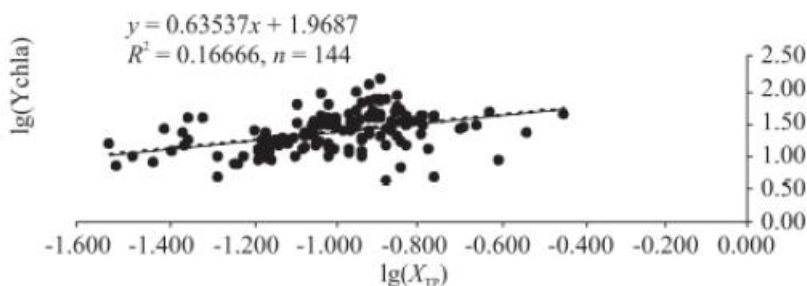


图 4 $\lg(Y_{Chla})$ 与 $\lg(X_{TP})$ 的相关关系

Fig. 4 Correlation between $\lg(Y_{Chla})$ and $\lg(X_{TP})$

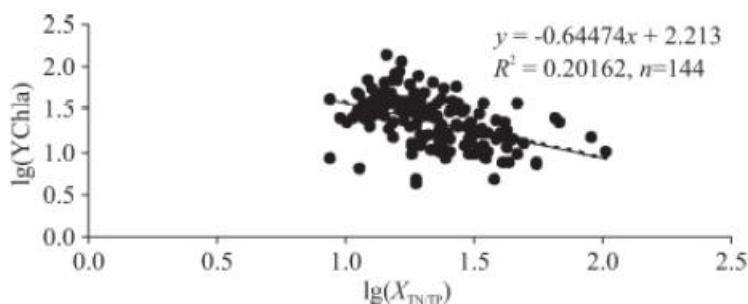


图 5 $\lg(Y_{Chla})$ 与 $\lg(X_{TN/TP})$ 的相关关系

Fig. 5 Correlation between $\lg(Y_{Chla})$ and $\lg(X_{TN/TP})$

3 讨论

3.1 阳澄西湖营养状态评价

阳澄湖近年来由于湖区周围人口密度的增加和工农业发展，排放入湖的工业废水、生活污水迅速增加，加上湖面养殖规模扩大和投饵量增大等，使湖水化学成分发生一系列变化。翁建中等^[11]的研究表明，阳澄湖在 2002~2007 年之间，处于“轻度富营养”状态，并且有加重的趋势。2009 年桂智凡等^[12]对阳澄湖水质的调查研究表明，阳澄西湖的营养状态指数均值为 91.0，处于“重度富营养”状态。本研究采用的方法为综合营养状态指数法，综合营养状态指数范围为 50.7~59.3，均值为 55.6，水体总体处于“轻度富营养”状态。阳澄西湖由“重度富营养”状态转变为“轻度富营养”状态这一变化在一定程度上归功于阳澄西湖围网的拆除并进行增殖放流。

3.2 环境因子对叶绿素 a 的影响

有关研究表明，浮游植物的生长速度会随着水温的升高而加快，水温是影响浮游植物的生长、进行光合作用的关键因子^[13]。钱昊钟等^[14]在太湖的研究表明，各站点叶绿素 a 与水温相关显著，相关系数最高达 0.473。在淀山湖，叶绿素 a 与水温呈显著正相关，表明水温对浮游植物具有一定的促进作用^[15]。本研究中水温随着季节变化而变化，夏季达到最大值，冬季达到最小值。

随着水温的升高,叶绿素 a 的浓度也逐渐增大,并在冬季达到最小值,二者的季节变化规律基本一致。一般情况下,随着水中叶绿素 a 浓度的升高,浮游植物的光合作用会增强,水体中的溶解氧也会增加。但本研究的相关关系表明,叶绿素 a 与溶解氧呈极显著负相关,出现在这一现象的原因可能是来源于两方面,一方面,部分采样期间的叶绿素 a 浓度过低,浮游植物光合作用产生的溶解氧小于浮游动物的耗氧量^[17];另一方面,水体中的有机质大量分解,不断消耗水体中的溶解氧。此外,浮游植物的呼吸作用也会消耗水中的溶解氧。湖泊水体的透明度往往因为浮游植物的聚集而降低,在蓝藻爆发期间的淀山湖,透明度与叶绿素 a 呈极显著负相关^[16]。这一结果与本研究关于阳澄西湖叶绿素 a 与透明度的相关关系一致。

3.3 营养盐因子对叶绿素 a 的影响

氮、磷对湖泊藻类生长和水华暴发具有重要的影响,是导致湖泊发生富营养化的重要营养元素^[17]。许多学者认为氮磷比(N/P)与藻类生长有更直接的关系,是水体浮游植物营养结构特点的重要反应。若 $N/P < 7 \sim 10$, 氮为藻类生长的限制因子; $N/P > 22.6 \sim 30$, 磷为藻类生长的限制因子^[18~20]。本研究结果显示,阳澄西湖 2015 年 3 月到 2016 年 2 月总氮(TN)和总磷(TP)的平均浓度为 2.366mg/L 和 0.113mg/L,氮磷比(N/P)的平均值为 25.28,表明磷可能是影响阳澄西湖藻类生长的限制因子。结合之前关于阳澄湖的研究得出总氮浓度维持不变,总磷(TP)浓度有所降低。这一结果表明,阳澄西湖总氮的浓度已经趋于饱和,磷为是影响湖泊藻类生长的限制因子。综合本研究关于阳澄西湖营养状态评价可知,阳澄西湖由“重度富营养化”转为“轻度富营养化”的原因可能是由于作为限制因子的磷降低造成的。阮晓红等^[15]在对苏州平原河网区浅水湖泊的调查研究发现,叶绿素 a 浓度的对数与 TP 的浓度对数呈显著正相关,与氮磷比(N/P)呈显著负相关。江敏等^[21]在对滴水湖水体叶绿素 a 研究结果表明, $\lg(Y_{Chla})$ 与 $\lg(X_N)$ 无相关关系,与 $\lg(X_{TP})$ 呈极显著正相关,而与 $\lg(N/P)$ 呈显著负相关。通过对淀山湖蓝藻水华高发期叶绿素 a 的研究结果表明,淀山湖可能是磷限制的湖泊。淀山湖的叶绿素 a 浓度的对数与 TP 浓度的对数呈显著正相关,叶绿素 a 与氮磷比(N/P)也存在着相关关系^[16]。本研究通过对叶绿素 a 浓度的对数与 TN、TP 及氮磷比(N/P)对数的相关性分析发现,叶绿素 a 浓度的对数与 TP 浓度和氮磷比(N/P)的对数呈一元线性相关,叶绿素 a 浓度与 TP 呈极显著正相关($r=0.408$, $P<0.01$),与氮磷比(N/P)呈极显著负相关($r=-0.449$, $P<0.01$),而与 TN 无显著相关。这一结果也表明了阳澄西湖可能是磷为藻类生长限制因子的湖泊。而在对太湖叶绿素 a 的研究中,不仅出现了叶绿素 a 浓度与 TP 浓度的对数呈极显著正相关,与氮磷比(N/P)的对数呈极显著负相关的结果,叶绿素 a 浓度的对数还与 TN 浓度的对数呈显著负相关^[22]。在对南京秦淮河的叶绿素 a 的研究中发现^[23],磷可能是影响秦淮河叶绿素 a 浓度的限制因子,叶绿素 a 浓度的对数与 TP 的浓度存在着一定的正相关关系,相关系数为 0.354;而与氮磷比(N/P)的对数呈负相关,相关系数为-0.239。这些结果都与本研究得到的结果一致,阳澄西湖可能是磷为藻类生长限制因子的湖泊。

4 结论

(1) 阳澄西湖叶绿素 a 浓度季节变化特征明显,春季叶绿素 a 浓度开始上升,夏季逐渐增大并达到最大值,秋季叶绿素 a 浓度逐渐减少,冬季达到最小值。在空间上,叶绿素 a 浓度变化也存在着差异。春季断面 I 与断面 III、断面 IV 存在显著差异;冬季断面 I 与断面 II、断面 III、断面 IV 均存在显著差异;而在夏季和秋季不同断面之间差异不显著。

(2) 阳澄西湖综合营养状态指范围为 50.7~59.3,均值为 55.6,水体总体处于“轻度富营养”状态。由围网拆除前的“重度富营养”状态转变为“轻度富营养”状态。

(3) 不同环境因子对叶绿素 a 浓度的影响各不相同。总体而言叶绿素 a 浓度与 TN、DTN、DO 和 SD 呈显著负相关;与 TP、DTP、水温和水深呈显著正相关。通过逐步回归方程分析可知,影响阳澄西湖叶绿素 a 的环境因子在各断面及全湖有所不同,但主要的影响因子有水温、DO 和 SD。

(4) 对 Chla、TN、TP、TN/TP 取对数进行相关性分析并建立一元线性回归方程: $\lg(Y_{Chla})$ 与 $\lg(X_N)$ 无显著相关关系,与 $\lg(X_{TP})$ 呈极显著正相关;与 $\lg(TN/TP)$ 呈极显著负相关。线性回归方程分别是 $\lg(Chla)=0.63537\lg(TP)+1.9687$; $\lg(Chla)=-$

0.644741g(TN/TP)+2.213。结果表明, 阳澄西湖可能是一定程度的磷限制性湖泊。

参考文献:

- [1] 金相灿, 屠清英. 湖泊富营养化调查规范 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 198—210.
- 【JIN X C, TU Q Y. The standardization of lake eutrophication research [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 198—210. 】
- [2] 杨威, 邓道贵, 张赛, 等. 洱海叶绿素 a 浓度的季节动态和空间分布 [J]. 湖泊科学, 2012, 24(6): 858—864.
- 【YANG W, DENG D G, ZHANG S, et al. Seasonal dynamics and spatial distribution of chlorophyll a concentration in Erhai Lake [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24 (6) : 858 —864. 】
- [3] 杨志岩, 李畅游, 张生, 等. 内蒙古乌梁素海叶绿素 a 浓度时空分布及其与氮、磷浓度关系 [J]. 湖泊科学, 2009, 21(3): 429—433.
- 【YANG Z Y, LI C Y, ZHANG S, et al. Inner Mongolia Wuliangsuhai Lake chlorophyll a concentration distribution in time and space and with the concentration of nitrogen and phosphorus [J]. Journal of Lake Science, 2009, 21(3) : 429—433. 】
- [4] LAMON E C, KENNETH H R, KARL E H. Using generalized additive models for prediction of chlorophyll in Lake Okeechobee, Florida. Lakes and Reservoirs: Research and Management, 1996, 2: 37—46.
- [5] 楚敏明. 浅议保护阳澄湖水质的对策措施 [J]. 江苏水利, 2004(12): 36—37.
- 【CHU M M. Discussion on the protection of Yangcheng Lake water quality measures [J]. Jiangsu water conservancy, 2004(12) : 21—25. 】
- [6] 景明, 李继影, 刘孟宇, 等. 阳澄湖浮游植物群落结构与环境因子的典范对应研究 [J]. 环境科学与管理, 2014, 39(11): 145—148.
- 【JING M, LI J Y, LIU M Y, et al; A model of Yangcheng Lake phytoplankton community structure and environmental factors corresponding [J]. Environmental science and management, 2014, 39(11) : 145—148. 】
- [7] 陈伟民, 黄祥飞, 周万平. 湖泊生态系统观测方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
- 【CHEN W M, HUANG X F, ZHOU W P. The observation method of lake ecosystem [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2005. 】
- [8] 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: 第 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 243—280.

【State Environmental Protection Administration of the water and waste-water monitoring and analysis method editorial. Water and waste-water monitoring and analysis methods: Fourth Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 243 —280. 】

[9] 杨梅林, 胡忠军, 刘其根, 等. 利用综合营养状态指数和修正的营养状态指数评价千岛湖水质变化 [J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(2) : 240—245.

【YANG M L, HU Z J, LIU Q G, et al. Evaluation of the water quality change of Qiandao Lake by using the index of comprehensive nutritional status and the modified trophic state index [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2013, 22 (2) :240—245. 】

[10] 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. Evaluation method and classification standard of lake eutrophication [J]. China environmental monitoring, 2002, 18(5) : 47—49. 】

[11] 翁建中, 李继影, 徐恒省, 等. 阳澄湖浮游植物研究及其富营养化评价 [J]. 环境科学与管理, 2009, 34(10) : 41—44, 49.

【WENG J Z, LI J Y, XU H X, et al. Study on the phytoplankton in Yangcheng Lake and eutrophication evaluation [J]. Environmental science and management, 2009, 34(10) : 41— 49, 49. 】

[12] 桂智凡, 薛滨, 姚书春, 等. 阳澄湖水质现状及原因探讨 [J]. 地理科学, 2011, 31(12) : 1487—1492.

【GUI Z F, XUE B, YAO S C, et al. Discussion on current situation and reasons of the water quality of Yangcheng Lake [J]. geographical science, 2011, 31(12) : 1487—1492. 】

[13] 阮晓红, 石晓丹, 赵振华, 等. 苏州平原河网区浅水湖泊叶绿素 a 与环境因子的相关关系 [J]. 湖泊科学, 2008, 20(5) : 556—562.

【RUAN X H, SHI X D, ZHAO Z H, et al. In plain river network areas of Suzhou shallow lakes of chlorophyll a and environmental factor correlation [J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(5) : 556—562. 】

[14] 钱昊钟, 赵巧华, 钱培东, 等. 太湖叶绿素 a 浓度分布的时空特征及其影响因素 [J]. 环境化学, 2013, 32(5) : 789—796.

【QIAN H Z, ZHAO Q H, QIAN P D, et al. Spatial and temporal characteristics of the distribution of chlorophyll a concentration in Taihu and its influencing factors [J]. environmental chemistry, 2013, 32(5) : 789—796. 】

[15] 吴阿娜, 朱梦杰, 汤琳, 等. 淀山湖蓝藻水华高发期叶绿素 a 动态及相关环境因子分析 [J]. 湖泊科学, 2011, 23(1) : 67—72.

【WU A N, ZHU M J, TANG L, et al. Analysing Dianshan Lake cyanobacteria bloom period of high chlorophyll a

dynamic and related environmental factors [J]. Journal of Lake Science, 2011, 23(1) : 67—72. 】

[16] 黄岁樑, 臧常娟, 杜胜蓝, 等. pH, 溶解氧、叶绿素 a 之间相关性研究 II: 非养殖水体 [J]. 环境工程学报, 2011, 5(8) : 1681—1688.

【HUANG S L, ZANG C J, DU S L, et al. Study on the correlation between dissolved oxygen and chlorophyll a in pH [J]. Journal of environmental engineering, 2011, 5 (8) : 1681 —1688. 】

[17] 陈永根, 刘伟龙, 韩红娟, 等. 太湖水体叶绿素 a 含量与氮磷浓度的关系 [J]. 生态学杂志, 2007, 26 (12) : 2062 —2068.

【CHEN Y G, LIU W L, HAN H J, et al. The relationship between chlorophyll a concentration and nitrogen and phosphorus concentrations in the water body of Taihu Lake [J]. Journal of ecology, 2007, 26 (12) : 2062—2068.】

[18] LI Z. GUO J S, FANG F, et al. Potential iimpact of TN/TP ratio on the cycling of Three Gorges R eservoir. Journal of Lake Science, 2009, 21(4) : 509—517.

[19] PENG J X, CHEN H J. Eutrophication and Water Quality Protection. Beijing: China Environmental Science Press, 1988:15—47.

[20] GUILDFORD S J, HEEKY R E. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in Lakes Limnology and Oceanography, 2000, 45(6) : 1213—1223.

[21] 江敏, 卢柳, 邢斌, 等. 滴水湖水体叶绿素 a 与水质因子的多元分析 [J]. 上海海洋大学学报, 2011, 20(3) : 451 —456.

【JIANG M, LU L, XING B, et al. Multivariate analysis of chlorophyll a and water quality factors in the lake water [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2011, 20 (3) : 451 —456. 】

[22] 王震, 邹华, 杨桂军, 等. 太湖叶绿素 a 的时空分布特征及其环境因子的相关关系[J]. 湖泊科学, 2014, 26(6) : 567 —575.

【WANG Z, ZOU H, YANG G J, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of chlorophyll a and its environmental factors in Taihu Lake [J]. Journal of Lake Science, 2014, 26(6) : 567—575. 】

[23] 周贝贝, 王国祥, 徐瑶, 等. 南京秦淮河叶绿素 a 空间分布及其与环境因子的相关关系 [J]. 湖泊科学, 2012, 24(2) : 267—272.

【ZHOU B B, WANG G X, XU Y, et al. The spatial distribution of chlorophyll a and its relationship with environmental factors in the Qinhuai River, Nanjing [J]. Lake Science, 2012, 24(2) : 267—272. 】