

文章编号: 1004 - 7271(2008)01 - 0058 - 07

淀山湖水体叶绿素 a 与水质因子的多元分析

王丽卿, 张军毅, 王旭晨, 彭自然, 王 岩

(上海水产大学生命科学与技术学院, 上海 200090)

摘要:根据 2004 年 1 月 - 2006 年 12 月逐月对淀山湖水体叶绿素 a 含量及水质理化因子的测定结果, 分析了叶绿素 a 的时空分布, 评价了淀山湖水体营养状态, 找出与叶绿素 a 显著相关的环境因子, 并建立了多元逐步回归方程。3 年期间, 淀山湖叶绿素 a 含量均值为 29.98 mg/m³, 变幅 3.48 ~ 141.63 mg/m³; 每年分别在 4 - 5 月和 7 - 9 月出现峰值; 水平分布上, II 站点金家庄附近叶绿素 a 含量最高, V 站点进水口和 I 站点出水口含量较低。基于叶绿素 a、透明度和总磷等参数, 依据修正的卡尔森营养状态指数公式, 计算得出淀山湖 TSI 平均值为 71.6 (> 53), 全湖处于富营养化状态。应用 SPSSWin 和 DPS 等统计分析软件进行相关性分析结果表明叶绿素 a 与水温、pH、高锰酸盐指数、BOD₅、硝酸氮呈极显著相关, 而与磷酸盐呈极显著负相关; 与氨氮、亚硝酸氮呈显著相关, 而与总磷呈显著负相关。综合逐步回归方程表明, 影响淀山湖叶绿素 a 的主要环境因子有高锰酸盐指数、BOD₅、硝酸氮、溶氧、透明度和水温。

关键词: 淀山湖; 叶绿素 a; 相关性分析; 多元逐步回归

中图分类号: S 912 文献标识码: A

Multianalysis between chlorophyll-a and environmental factors in Dianshan Lake water

WANG Li-qing, ZHANG Jun-yi, WANG Xu-chen, PENG Zi-ran, WANG Yan

(College of Aqua-life Science and Technology, Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China)

Abstract: The correlation and regression equation between chlorophyll-a (chl_a) and some environmental factors were analyzed in this paper respectively, based on the monthly monitoring data in the Dianshan Lake from Jan. 2004 to Dec. 2006. And modified Carlson trophic state index for all the sampling sites was also calculated to assess the water condition of Dianshan Lake. The results showed that the concentration of chlorophyll-a in Dianshan Lake ranged from 3.48 mg/m³ to 141.63 mg/m³, and the mean was 29.98 mg/m³. Two peaks of Chl_a concentration occurred in Apr. to May (early summer) and Jul. to Sept. (autumn). Chl_a concentration was higher in II Jinjiazhuang than those in V (water inlet) and I (water outlet) sampling sites. Based on the modified Carlson trophic state index (TSI_M = 71.6), the whole lake was in eutrophic state. The multianalysis results showed that the significant environmental affecting factors for chlorophyll-a were different. However, the relationships between chlorophyll-a and WT, pH, COD_{Mn}, BOD₅ and NO₃-N were positive, and that between chlorophyll-a and PO₄-P, TP was negative.

收稿日期: 2007-03-21

基金项目: 上海市重点学科建设项目 (Y1101)

作者简介: 王丽卿 (1970 -), 女, 浙江东阳人, 副教授, 主要从事水生生物生态学和生态修复方面的研究。E-mail: lqwang@shfu.edu.cn

通讯作者: 王 岩, E-mail: wangyan@shfu.edu.cn

环境因子进行逐步回归^[9]。逐步回归模型的诊断依据:(1)方程的方差分析 F 值的显著水平 p 要小于等于 0.05,否则建立的回归方程不能使用,(2)各个回归系数的偏相关系数的显著水平最好也小于等于 0.05;(3)Durbin-Watson 统计量 d 是否接近于 2。

1.4 营养状态评价

基于叶绿素 a 含量、透明度、总磷等参数,采用修正的卡尔森营养状态指数(TSI_M)来评价淀山湖的营养化类型。修正的卡尔森营养状态指数法采用 0~100 的一系列数字对湖泊营养状态分级, TSI 指数在 37 以下为贫营养,38~53 为中营养,54 以上为富营养^[10-12]。

$$TSI_M(\text{Chl a}) = 10 \times (2.46 + 1n\text{Chl a}/1n2.5)$$

$$TSI_M(\text{SD}) = 10 \times [2.46 + (3.69 - 1.531n\text{SD}/1n2.5)]$$

$$TSI_M(\text{TP}) = 10 \times [2.46 + (6071 + 1.151n\text{TP}/1n2.5)]$$

$$\text{综合 } TSI = [TSI_M(\text{Chla}) + TSI_M(\text{SD}) + TSI_M(\text{TP})]/3$$

式中, $TSI_M(\text{Chla})$ 、 $TSI_M(\text{SD})$ 、 $TSI_M(\text{TP})$ 分别是以叶绿素 a、透明度、总 P 为基准的营养状态指数,Chla、SD、TP 分别为叶绿素 a 值(mg/m^3)、透明度(m)、总 P 浓度(mg/L)。

2 结果与讨论

2.1 淀山湖叶绿素 a 含量

3 年调查期间,淀山湖叶绿素 a 平均值为 $29.98 \text{ mg}/\text{m}^3$,变幅为 $3.48 - 141.63 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。从年度变化看,2004 年叶绿素 a 含量均值为 $40.58 \pm 20.66 \text{ mg}/\text{m}^3$,全湖六个采样点的平均值月变幅为 $14.31 - 95.61 \text{ mg}/\text{m}^3$;2005 年均值为 $25.98 \pm 7.1 \text{ mg}/\text{m}^3$,变幅 $8.20 - 58.39 \text{ mg}/\text{m}^3$;2006 年均值为 $23.06 \pm 9.06 \text{ mg}/\text{m}^3$,变幅为 $5.06 - 42.84 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。2004-2006 年期间,淀山湖叶绿素 a 含量的月变化见图 2。从月变化看,叶绿素 a 含量低值均出现在每年度的 1 月、2 月和 12 月(冬季),高值则出现在 4-6 月份之间(春夏之交),这可能与水温以及相应月份水体中繁殖的藻类种类组成有关。淀山湖叶绿素 a 在时间上的分布同刘东燕在苏州河^[6]、翁笑艳在山仔水库^[7]测定的结果。从叶绿素 a 含量水平分布看(图 3),2004 年,II>III>VI>IV>I>V;2005 年,II>VI>III>I>IV>V;2006 年,II>VI>IV>III>V>I,综合三年的水平分布,II 金家庄附近的叶绿素含量最高,VI 湖南区中心次之,V、I 进水口和出水口叶绿素含量均较低,根据 t 检验,II 和 V 站点之间叶绿素 a 含量差异极显著,II 和 I、II 和 VI 站点之间差异显著,其余各站点之间叶绿素 a 含量差异不显著。

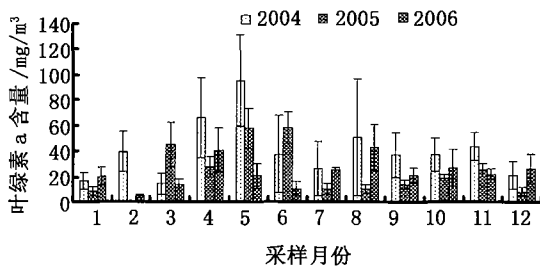


图 2 2004-2006 年淀山湖叶绿素 a 月变化
Fig. 2 Monthly variation of chlorophyll a in Dianshan Lake during 2004-2006

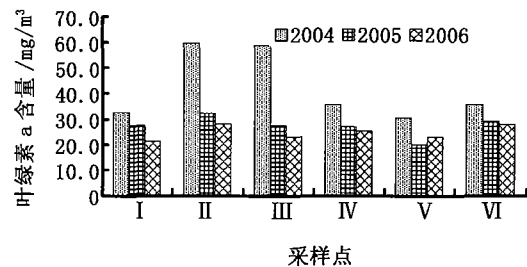


图 3 淀山湖六个采样点叶绿素 a 年平均含量分布情况
Fig. 3 The annual variation of chlorophyll a in six sampling sites of Dianshan Lake during 2004-2006

2.2 淀山湖的营养状况评价

叶绿素 a 是反映藻类数量多少的综合指标,在实际工作中常被作为评价水体富营养化状况的主导因子,但由于水体生态系统以及富营养化过程的复杂性,目前多采用多因子评价方法对水体富营养化状况进行评价。修正的卡尔森营养状态指数就是基于叶绿素 a 的多因子评价指数。淀山湖在

2004 - 2006 年期间各月份的 TSIM 值计算结果见图 4。由图 4 可知,淀山湖水体的综合 TSI 值均大于 53,处于富营养化状态。淀山湖 6 个站点的卡尔森综合指数在 2004 - 2006 年期间的均值见表 1,从表 1 可见,6 个站点综合卡尔森指数均大于 70,全湖处于富营养化水平,与王旭晨等的研究结果相同^[2]。各站点的营养状况比较:V 急水港的综合卡尔森指数最大,为 73.7, I 淀峰出水口和 VI 急水港进水口的综合指数最低分别为 70.9 和 70.8,可见进水口急水港的水质富营养化程度比出水口淀峰附近高, III 站点比 VI 站点高,说明淀山湖富营养化程度北区比南区高。

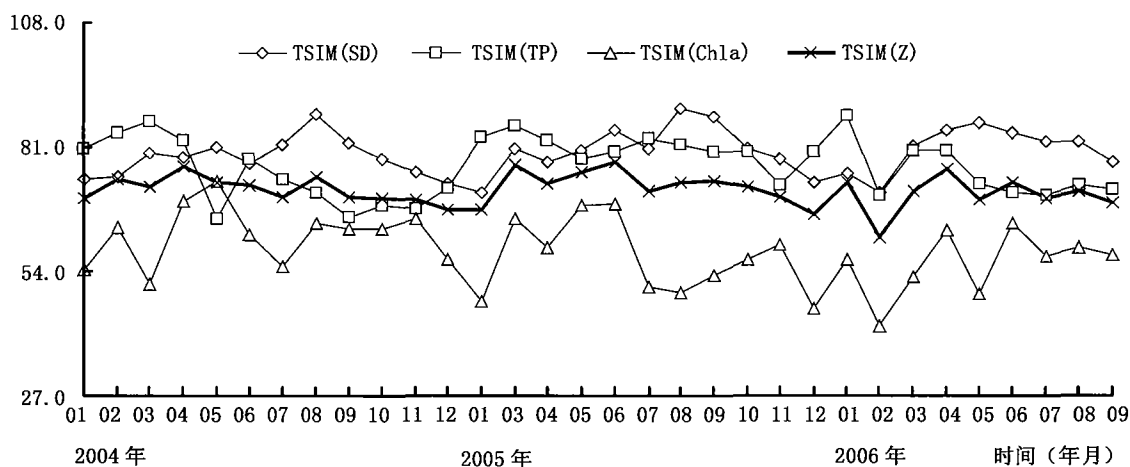


图 4 淀山湖 2004 - 2006 年期间卡尔森指数的月变化

Fig. 4 the monthly variation of modified trophic state index in Dianshan Lake during 2004 - 2006

表 1 淀山湖 2004 - 2006 年期间 6 站点的卡尔森指数

Tab. 1 the mean of modified trophic state index for all sampling sites of Dianshan Lake during 2004 - 2006

站点	TSI _M (SD)	TSI _M (TP)	TSI _M (Chla)	综合指数
I	79.5	76.5	56.7	70.9
II	79.5	74.2	59.8	71.2
III	79.5	74.8	59.7	71.3
IV	78.4	75.1	58.9	70.8
V	83.0	81.3	56.7	73.7
VI	79.7	77.5	58.4	71.8

备注:样本数 29

2.3 叶绿素 a 含量与环境因子的相关分析

淀山湖叶绿素 a 含量与水质环境因子有着直接或间接的关系。淀山湖各站点、不同年份以及 3 周年总叶绿素 a 含量与水质环境因子的 Pearson 相关系数及其双尾检验结果见表 2。由表 2 可知,淀山湖叶绿素 a 含量除 I 站点外,各站点均与硝酸氮含量成极显著相关; I、II、III 站点的叶绿素 a 与高锰酸盐指数和 BOD₅ 呈显著或极显著相关;而各站点叶绿素 a 与水深、透明度、溶解氧、氨氮、亚硝酸盐、总磷等都无极显著相关性。根据全湖年际叶绿素 a 与环境因子的相关性分析,2004、2005、2006 年的叶绿素 a 值均与 BOD₅ 呈极显著性相关,与其它因子的相关性却各不相同。2004 年叶绿素 a 与 pH、亚硝酸氮、硝酸氮呈极显著相关,与水温显著相关,而与磷酸盐呈显著性负相关;2005 年叶绿素 a 与 pH、高锰酸盐指数呈极显著相关,与磷酸盐呈极显著负相关,与氨氮显著相关;2006 年叶绿素 a 与高锰酸盐指数呈极显著相关,与水温呈显著相关,而与透明度和硝酸氮呈显著性负相关。综合 3 周年数据的相关性分析结果表明,叶绿素 a 与水温、pH、高锰酸盐指数、BOD₅、硝酸氮呈极显著相关,而与磷酸盐呈极显著负相关,与氨氮、亚硝酸氮呈显著相关,而与总磷呈显著负相关。淀山湖叶绿素 a 与环境因子之间的相关系数的值在 0.149 - 0.681 之间,叶绿素 a 与单个因子之间的相关系数均较低,表明淀山湖叶绿素 a 含量变化是

受多个因子共同影响。

表 2 淀山湖叶绿素 a 含量与环境因子之间的相关系数及检验结果

Tab. 2 Correlation coefficients between chlorophyll a and some environmental factors in Dianshan Lake

采样点	I	II	III	IV	V	VI	2004	2005	2006	3 年
水温(℃)	0.139	0.368 *	0.360 *	0.073	0.351	0.121	0.274 *	0.229	0.271 *	0.241 **
水深(m)	-0.15	-0.001	-0.049	-0.145	-0.139	-0.208	0.146	-0.125	0.092	-0.03
透明度 SD(cm)	-0.094	-0.2520	-0.06	-0.173	-0.319	-0.024	-0.073	-0.241	-0.292 *	-0.114
pH	0.475 **	0.397 *	0.392 *	0.181	0.262	0.168	0.408 **	0.530 **	0.149	0.338 **
溶解氧(mg/L)	0.089	0.05	0.262	0.042	-0.089	-0.068	0.1	0.06	-0.036	0.099
高锰酸盐指数(mg/L)	0.514 **	0.497 **	0.510 **	0.19	-0.001	0.434 *	0.145	0.630 **	0.522 **	0.410 **
BOD ₅ (mg/L)	0.507 **	0.603 **	0.470 *	0.197	0.274	0.186	0.429 **	0.598 **	0.548 **	0.401 **
氨氮(mg/L)	0.196	0.261	0.14	0.296	0.115	0.04	0.16	0.327 *	-0.106	0.154 *
亚硝酸盐(mg/L)	0.292	-0.003	0.325	-0.03	-0.09	0.019	0.414 **	0.194	-0.022	0.152 *
硝酸盐(mg/L)	0.29	0.481 **	0.681 **	0.476 **	0.557 **	0.464 **	0.481 **	0	-0.279 *	0.467 **
磷酸盐(mg/L)	-0.216	-0.391 *	-0.453 *	-0.231	-0.21	-0.08	-0.305 *	-0.363 **	-0.109	-0.301 **
总磷(mg/L)	-0.076	-0.178	-0.186	-0.167	-0.096	0.103	-0.191	-0.132	0.019	-0.149 *

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

关于理化因子和叶绿素 a 含量的关系存在诸多不同的观点,但总体而言,在淡水湖泊或水库中,叶绿素 a 含量或藻类的生长是由多因素控制的,一般地,影响藻类生长的因子主要有水动力条件、气象条件、营养盐等。国际经合组织(OECD)对理化因子和叶绿素 a 动态变化的相互关系进行了大量的研究表明,水体磷为唯一主导因子的占 80%,氮为主导因子的占 11%,其余 9% 的水体为氮和磷共同起作用^[13]。黄文钰对中国主要湖泊叶绿素 a 与总磷的关系进行研究,50 个主要湖泊的叶绿素含量与总磷具有显著相关性^[14]。淀山湖叶绿素 a 含量则与硝酸盐浓度变化呈极显著相关。通常浮游植物倾向吸收水体中氨、亚硝酸盐及硝酸盐三种氮源中的氨来合成细胞所需要的氨基酸等物质^[15],但是淀山湖叶绿素 a 含量与氨氮的相关性不如硝酸盐,这可能与淀山湖的氨氮含量较高(达 2.304 mg/L),超过了富营养化水体无机氮含量范围 0.65 - 1.5 mg/L^[16],并且在总的无机氮组成中氨氮占了 72.3% 等有关,氨氮不是淀山湖浮游植物生长的限制因子。许多学者认为氮磷的比值与藻类的生长有更直接的关系,藻类正常代谢所需的 N/P 为 7,当 N/P 大于 7 时,P 是可能的限制性营养盐;当 N/P 小于 7 时,则 N 可能是限制性营养盐。在本研究期间淀山湖 DIN/TP = 11.28,因此 P 可能是淀山湖浮游植物生长潜在的限制因子。然而淀山湖的总磷和可溶性磷含量分别为 0.270 和 0.156 mg/L,均大大于富营养湖泊标准(总磷 > 0.05 mg/L,活性磷 > 0.03 mg/L)。因此,在富营养化湖泊,浮游植物和 N、P 的关系以及 N/P 比值与限制营养盐的确认应该根据水体所处的营养状态进行区别对待。淀山湖叶绿素 a 含量与硝酸盐呈显著相关、与总磷浓度变化呈显著负相关的结论与富营养化水域苏州河、山仔水库取得的结果一致^[6-7]。淀山湖叶绿素 a 和总磷浓度的负相关,可能是由于浮游植物生长旺盛,其生长代谢吸收大量的营养盐,营养盐被高度利用而得不到及时的补给,从而使总磷和叶绿素 a 呈现负相关关系。

叶绿素 a 含量与水质因子之间的关系除了与不同站点之间的营养物来源和消耗机理有关外,与样本数的组合和大小有关。全湖年际的叶绿素 a 与环境因子之间相关性检验的样本为 165 - 200,而各站点的样本数则为 26 - 32。

2.4 叶绿素 a 与环境因子的逐步回归分析

各种环境因子对叶绿素 a 的影响作用各不相同,逐步回归分析可以筛选出与叶绿素 a 相对重要的水质影响因子,建立最优多元线性回归方程,并可进行方程显著性检验。根据逐步回归方程的诊断依据,确立淀山湖各监测站点、各年际之间、3 年综合的叶绿素与环境因子的逐步回归分析结果见表 3、4。由表 3 可知,各站点与叶绿素 a 之间的回归方程分别由 COND_{Mn}、BOD₅、NO₃-N、TP、SD 等 5 个因子入选,不同站点入选因子不同,IV 站点没有因子入选,因为 p 值超过 0.05,建立的方程没有意义;III 站点有

COD_{Mn}和NO₃-N两个因子入选,复相关系数在6个站点中最高,达0.9184。年际之间分别有COD_{Mn}、BOD₅、DO、pH、WT、NO₂-N等因子入选,见表4。3年期间的综合逐步回归方程分别有COD_{Mn}、BOD₅、NO₃-N、DO等4个因子入选。根据各站点之间、年际之间以及3年期间的综合逐步回归方程可以得知,影响淀山湖叶绿素a的环境因子因不同站点、不同年份会各有所不同,但是主要的影响因子有COD_{Mn}、BOD₅、NO₃-N、DO、SD和WT。

表3 各站点叶绿素 a 和环境因子的回归方程

Tab.3 Stepwise multiple regression between chlorophyll a and environmental factors in each sampling site in Dianshan Lake during 2004 - 2006

	多元回归方程	复相关系数	F 值	Df	P
I	Chla = -16.2866 + 7.2576 × COD r(COD) = 0.75357, p = 0.00041	0.7536	19.7119	1,15	0.0005
II	Chla = 29.0419 + 5.2568 × BOD + 14.0233 × NO ₃ - 195.2782 × TP r(BOD) = 0.7851, p = 0.0004, r(NO ₃) = 0.6360, p = 0.0101 r(TP) = -0.59837, p = 0.0175	0.8394	10.3393	3,13	0.0009
IV	Chla = -20.2005 + 5.8092 × COD + 30.6991 × NO ₃ r(COD) = 0.7652, p = 0.0007, r(NO ₃) = 0.8755, p = 0.00001	0.9184	35.0108	2,13	0
IV	Chla = -9.9689 + 7.4668 × COD r(COD) = 0.4175, p = 0.1354	0.4175	2.5338	1,12	0.1374
V	Chla = 9.04666 + 1.3412 × BOD + 23.9978 × TP r(BOD) = 0.4057, p = 0.1175, r(TP) = 0.4686, p = 0.0658	0.6263	4.5183	2,14	0.0306
VI	Chla = 58.4774 - 24.0533 × S + 3.5513 × COD r(S) = -0.4293, p = 0.0956, r(COD) = 0.4255, p = 0.0989	0.5246	2.6584	2,14	0.105

表4 各年度叶绿素 a 和环境因子之间的多元回归方程及检验

Tab.4 Stepwise multiple regression between chlorophyll a and environmental factors and their tests in Dianshan Lake in 2004, 2005, 2006

	多元回归方程	复相关系数	F 值	Df	p
2004	Chla = -15.437 + 6.5306 × DO + 111.7040 × NO ₂ r(DO) = 0.6273, p = 0.0013; r(NO ₂) = 0.5920, p = 0.0028	0.7897	17.40	(2,21)	0
2005	Chla = -208.8486 + 27.8271 × pH + 2.84741 × BOD r(pH) = 0.4167, p = 0.0157; r(BOD) = 0.4567, p = 0.0074	0.7105	15.80	(2,31)	0
2006	Chla = -43.0228 - 0.5635 × WT + 11.8491 × COD + 2.9238 × BOD r(WT) = -0.3240, p = 0.047; r(BOD) = 0.5621, p = 0.0002 r(COD) = 0.5542, p = 0.0003	0.7546	15.86	(3,36)	0

2004 - 2006 年期间,淀山湖叶绿素 a 与各环境因子之间的多元回归方程如下:

$$Y = -24.8981 + 1.7912DO + 4.6834COD + 1.8113BOD + 6.6332NO_3$$

$$r(DO), p = 0.03895; r(COD), p = 0.00002; r(BOD), p = 0.00229; r(NO_3), p = 0.00265$$

$$\text{复相关系数 } R = 0.65365, \text{ F 值} = 17.34399, \text{ Df} = (4, 93), p = 0$$

3 结论

根据2004年1月-2006年12月三年的连续监测资料,淀山湖叶绿素a含量变幅为3.48-141.63 mg/m³,平均值为29.98 mg/m³;每年有两个峰值,分别出现在4-5月或7-9月。水平分布上,II站点金家庄附近的站点叶绿素a含量最高,V站点进水口、I站点出水口含量较低。

依据修正的卡尔森营养状态指数公式,计算得出淀山湖TSI平均值为71.6(>53),全湖处于富营养化状态。V站点进水口急水港的水质富营养化程度比I站点出水口淀峰附近高,淀山湖北区富营养化程度比南区高。

叶绿素a与环境因子之间的相关系数比较低(0.149-0.681),表明淀山湖叶绿素a含量变化是受

多个因子共同影响。综合 3 周年数据的相关性分析结果表明,叶绿素 a 与水温、pH、高锰酸盐指数、BOD₅、硝酸氮呈极显著相关,而与磷酸盐呈极显著负相关,与氨氮、亚硝酸氮呈显著相关,而与总磷呈显著负相关。

叶绿素 a 与环境因子的逐步回归分析表明,在不同的站点,对藻类有显著影响的环境因子各不相同。3 年期间的综合逐步回归方程有 COD_{Mn}、BOD₅、NO₃-N 等因子入选。根据各站点之间、年际之间以及 3 年期间的综合逐步回归方程可以得知,影响淀山湖叶绿素 a 的环境因子因不同站点、不同年份会各有所不同,但是主要的影响因子有 COD_{Mn}、BOD₅、NO₃-N、DO、SD 和 WT。

参考文献:

- [1] 阮仁良,王 云. 淀山水体环境质量评价及污染防治研究[J]. 湖泊科学,1993,5(2):153-158.
- [2] 王旭晨,王丽卿,彭自然,等. 灰色聚类法评价淀山水质状况[J]. 上海水产大学学报,2006,15(4):497-502.
- [3] 谢允田,魏 民,吕 军,等. 南湖叶绿素 a 含量与湖水理化性质的多元分析[J]. 东北水利水电,1999,(1):43-45.
- [4] 吕唤春,王飞儿,陈英旭,等. 千岛湖水体叶绿素 a 与相关环境因子的多元分析[J]. 应用生态学报,2003,14(8):1347-1350.
- [5] 葛大兵,吴小玲,朱伟林,等. 岳阳南湖叶绿素 a 及其水质关系分析[J]. 中国环境监测,69-71.
- [6] 刘冬燕,宋永昌,陈德辉. 苏州河叶绿素 a 动态特征及其与环境因子的关联分析[J]. 上海环境科学,2003,22(4):264.
- [7] 翁笑艳. 山仔水库叶绿素 a 与环境因子的相关分析及富营养化评价[J]. 干旱环境监测,2006,20(2):73-78.
- [8] 钱天鸣,陈 超,程咏旻. 杭州西湖水体生态环境参数的相互关系[J]. 中国环境监测,2002,18(3):41-46.
- [9] 唐启义,冯明光. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [10] Carlson R E. A trophic state index for lakes[J]. Limnol Ocean,1997,(22):361-369.
- [11] Ceballos R S, Konig A, Oliverra J F. Dam reservoir eutrophication: A simplified technique for a fast diagnosis of environmental degradation [J]. Water Res,1998,(32):3477-3483.
- [12] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京:中国环境科学出版社,1995.
- [13] 世界经济合作与发展组织. 水体富营养化监测评价与防治[M]. 北京:中国环境科学出版社,1989.
- [14] 黄文钰. 中国主要湖泊叶绿素与总磷的关系[J]. 污染防治技术,1997,10(1):11-12.
- [15] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [16] 何志辉. 中国湖泊和水库的营养分类[J]. 大连水产学院学报,1987,7(1):1-10.