

巢湖东半湖蓝藻水华暴发时空动态及成因

吴 珺¹, 李 浩¹, 曹德菊^{1*}, 黄祥明², 赵富贵², 王光宇³, 闫晓明³

(1.安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2.安徽省巢湖市环保局环境监测站, 合肥 238006; 3.安徽省农业科学院, 合肥 230031)

摘 要:为了探讨巢湖东半湖蓝藻水华暴发时空分布规律及其成因,对 2008—2009 年巢湖东半湖蓝藻密度、叶绿素含量及相关水质指标进行研究。采用逐步剔除法和逐步回归法进行分析,获得巢湖东半湖蓝藻水华暴发时空分布图。结果表明,巢湖东半湖蓝藻暴发存在明显的时空分布差异,藻华形成(叶绿素 a 含量、蓝藻密度)与透明度、高锰酸钾指数、氨氮以及总氮显著相关,结合多元回归分析可知,影响水华暴发的环境因子有水温、pH、透明度和总氮。

关键词:蓝藻暴发;时空分布;相关性分析;多元回归;巢湖

中图分类号:X171.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2013)10-2035-07 **doi:**10.11654/jaes.2013.10.019

Tempo-spatial Dynamics and Cause of Cyanobacterial Blooms in East-half Part of Lake Chaohu

WU Jun¹, LI Hao¹, CAO De-ju^{1*}, HUANG Xiang-ming², ZHAO Fu-gui², WANG Guang-yu³, YAN Xiao-ming³

(1.School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2.Chaohu Environmental Protection Bureau of Environmental Monitoring Station, Hefei 238006, China; 3.Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: To explore the tempo-spatial dynamics and cause of the cyanobacterial blooms in the east-half part of Lake Chaohu, the density of cyanobacterial, chlorophyll a, water temperature, total nitrogen, total phosphorus and pH were measured during 2008—2009. Cyanobacterial blooms generally appeared between June and August, and near the center (Zhongmiao) of the Lake. Cyanobacterial blooming (chlorophyll a content and algal density) was significantly correlated with transparency index, permanganate index, ammonia nitrogen and total nitrogen in water. Nitrogen in water was a critical factor leading to cyanobacterial blooming. Suitable temperature facilitated this phenomenon.

Keywords: cyanobacterial bloom; spatial and temporal dynamic; correlation analysis; multiple regressions; Lake Chaohu

水华已成为世界范围内的环境灾害,赤潮频繁发生在中国西南沿海水域^[1]。近年来巢湖流域经济的快速发展,湖泊水体富营养化等环境问题也日益严重^[2]。国际上关于蓝藻水华发生的机制已开展的研究,主要集中在在水华发生的藻类生物学和种群动力学等方面,研究认为影响水华发生的主要因子有营养盐(主要为 N、P)、pH 及蓝藻悬浮机制等^[3-5]。朱广伟对太湖富营养化现状及成因进行研究^[6],李颖等研究了九龙江流域上游浅水湖泊富营养化机制^[7]。但对巢湖东半湖蓝

藻的暴发时空动态规律及成因鲜有报道。本文结合 2008—2009 年巢湖东半湖 4—9 月水环境监测结果,分析了巢湖水体蓝藻暴发时空动态规律,探讨了蓝藻密度、叶绿素 a 含量与水体温度、透明度、溶解氧之间关系,分析巢湖蓝藻水华暴发的形成原因,为巢湖水体蓝藻水华预警提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 材料

1.1.1 研究区域

巢湖流域处于安徽省中部,长江淮河之间,东经 116°24'28"至 118°00'00"、北纬 30°58'40"至 32°06'00"之间(图 1),流域总面积 13 486 km²,其东西长、南北窄、中部低洼平坦^[8]。巢湖流域属于副热带季风气候,

收稿日期:2013-02-27

基金项目:国家科技支撑计划项目(2012BAD14B13);安徽省农业科学院科技创新团队项目(13C0203)

作者简介:吴 珺(1987—),女,江苏昆山人,在读硕士,主要研究方向为环境评价与规划。E-mail:sleepjun126@126.com

* 通信作者:曹德菊 E-mail:cdj@ahau.edu.cn

气候温润,年平均气温 15~16℃,1月平均气温最低,7月平均气温最高;极端最高气温 39.2℃,极端最低气温 -20.6℃^[9]。流域内夏季以东南风为主导风向,冬季以东北风为主导风向。年平均降水量约为 1100 mm,流域各站最大年降水均值为 1450 mm,最小年均值为 630 mm。巢湖全年分为枯水期、平水期和丰水期,枯水期为 1—2 月和 11—12 月,平水期为 3—5 月和 9—10 月,丰水期为 6—8 月。

1.1.2 仪器设备

HH-6 数显恒温水浴锅、便携式溶氧仪、720 s 可见分光光度计、显微镜、水温计、PHS-25 型 pH 计、Ohaus Scout SE602F 电子天平。

1.2 研究方法

1.2.1 采样时间与采样点的设置

样品采集主要集中于巢湖东半湖,根据水文特征,巢湖船厂、巢湖坝口、中埠乡、东半湖湖心、忠庙和兆河入湖区 6 个采样点。

采样时间为 2008 年 5—9 月和 2009 年 5—8 月。水质指标包括高锰酸盐指数、溶解氧、总氮、总磷、藻密度、水温、透明度、pH 等,由安徽省巢湖环境保护局环境监测站分析。

1.2.2 水质指标测定^[10]

水温、pH 和透明度采用仪器探头直接给出各参数值,水中总氮测定采用过硫酸钾分光光度法,总磷测定采用钼酸铵分光光度法,氨氮测定采用纳氏试剂分光光度法,高锰酸盐指数采用重铬酸钾法^[11],藻密度的测定方法依照《水和废水监测分析方法》(第四版)进行检测。

1.2.3 湖泊营养状况分析

采用中国环境监测总站推荐的“湖泊水库富营养化评价方法”,即综合营养状态指数法^[12]。综合营养状

况指数(TLI)是对叶绿素 a、透明度、高锰酸钾指数、总氮和总磷五个指标营养状态指数加权后的求和:

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

式中:TLI(Σ)是综合营养状态指数;TLI_j是第 j 种参数的营养状态指数;W_j是第 j 种参数的营养状态指数的相关权重。

各参数的营养状态指数的相关权重,由某一评价参数作为基准参数,对其他评价参数进行相关分析后,对相关系数归一化得出。

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

采用 0~100 的一系列连续数值并结合我国湖泊营养化分级标准以及张之源等^[13]的研究,确定巢湖水体营养状态的分级,如表 1。营养状态指数大于 50 时,认为水体处于富营养状态;在同一营养状态下,指数值越高,其营养程度越重。

表 1 水体的营养状态指数分级

Table 1 The classification of water nutrition index

分级	贫营养	中营养	轻度富营养	中度富营养	重度富营养
TLI(Σ)	<30	30~50	50~60	60~70	>70

1.2.4 多元回归模型

通过 SAS 软件建立多元回归模型探究巢湖东半湖水体理化指标对水体叶绿素 a 的贡献,以巢湖“叶绿素 a”为被解释变量,“水温”、“透明度”、“pH”、“高锰酸钾指数”、“氨氮”、“总磷”、“溶解氧”、“总氮”为解释变量,所进行的多元线性回归一般模型为:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \cdots + \beta_k X_k + \varepsilon$$

式中:Y 为可观察的随机变量;X₁、X₂、……、X_k 为可观察的一般变量;β₁、β₂、……、β_k 为待定模型的参数;β₀ 为截距;ε 为不可观察的随机误差^[14]。

据此,可以令叶绿素 a 为 Y,水温为 X₁、透明度为 X₂、pH 为 X₃、高锰酸钾指数为 X₄、氨氮为 X₅、总磷为 X₆、溶解氧为 X₇ 以及总氮为 X₈。

2 结果与分析

2.1 巢湖东半湖蓝藻暴发的时空规律

2008 年 5—8 月和 2009 年 5—9 月的蓝藻密度结果(图 2)显示,2008 年巢湖东半湖蓝藻的密度明显高于 2009 年,且 2008 年蓝藻暴发时间出现在 7 月下旬到 8 月上旬,高峰期出现在 7 月 28 日;2009 年巢

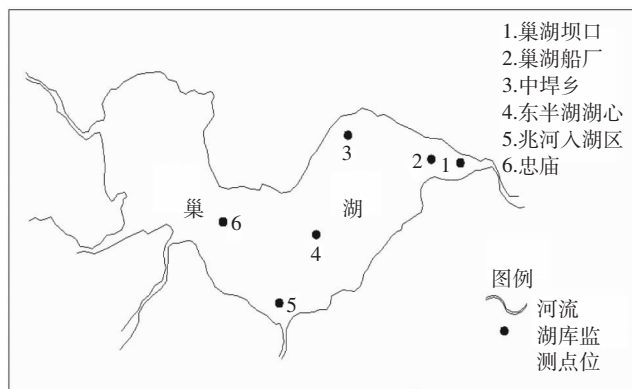


图 1 巢湖监测点分布

Figure 1 Location of the sampling sites in Lake Chaohu

湖东半湖水体的蓝藻密度较低,且波动较大,忠庙区蓝藻暴发有两个高峰期,分别为 6 月 15 日和 7 月 27 日,蓝藻密度分别达到 31.3×10^4 、 42.9×10^4 个 $\cdot L^{-1}$ 。巢湖东半湖蓝藻水华暴发显示出较强的区域特征,2008 年主要以忠庙和中埠乡的蓝藻暴发最为严重,高峰期出现在 7 月 28 日,蓝藻密度分别为 452×10^4 、 328×10^4 个 $\cdot L^{-1}$,如图 2(a)所示。图 2(b)显示,2009 年忠庙的蓝藻密度明显高于其他区域,且暴发的时间出现在两个时间段,与 2008 年不同,2009 年中埠乡蓝藻密度没有明显的峰值。这主要与忠庙区域农业生产及船舶渔业发展有关,另外光照等其他环境因子也可能对蓝藻水华在空间分布产生一定影响^[15]。另外,忠庙在地域上接近安徽省省会城市合肥,其工农业生产的经济发展水平较高,这都可能成为该区域水体污染重的原因。

2.2 巢湖东半湖营养状态特征

有研究表明,在中营养条件下狐尾藻和金鱼藻的单株最大生物量分别较富营养条件下高出 39%

和 22%^[16];在中营养条件下,苦草的生长情况最佳^[17]。因此,探索巢湖水体的营养状态对研究水华的暴发所产生的作用具有一定实践意义。通过分析巢湖东半湖 2008 年、2009 年的监测数据,蓝藻暴发指标与 SD、COD_{Mn}、TN 和 TP 的相关系数分别为: $r_{12}=-0.439$, $r_{13}=0.340$, $r_{14}=-0.105$, $r_{15}=0.362$ 。利用公式(2)所得 Chla、SD、COD_{Mn}、TN、TP 的权重分别为 0.701 5、0.135 2、0.081 1、0.007 7、0.074 5。

根据湖泊富营养化评价方法及分级技术规定^[11],确定各参数营养状态指数分别为:

$$TLI(chla)=10(2.5+1.086\ln chla)$$

$$TLI(SD)=10(5.118-1.94\ln SD)$$

$$TLI(COD_{Mn})=10(0.109+2.661\ln COD)$$

$$TLI(TN)=10(5.453+1.694\ln TN)$$

$$TLI(TP)=10(9.436+1.624\ln TP)$$

利用综合营养状态指数法(式 1)对巢湖东半湖的营养程度进行评价,2008 年和 2009 年 5 月—8 月巢湖东半湖的营养化程度如图 3。由图 3(a)可见,巢

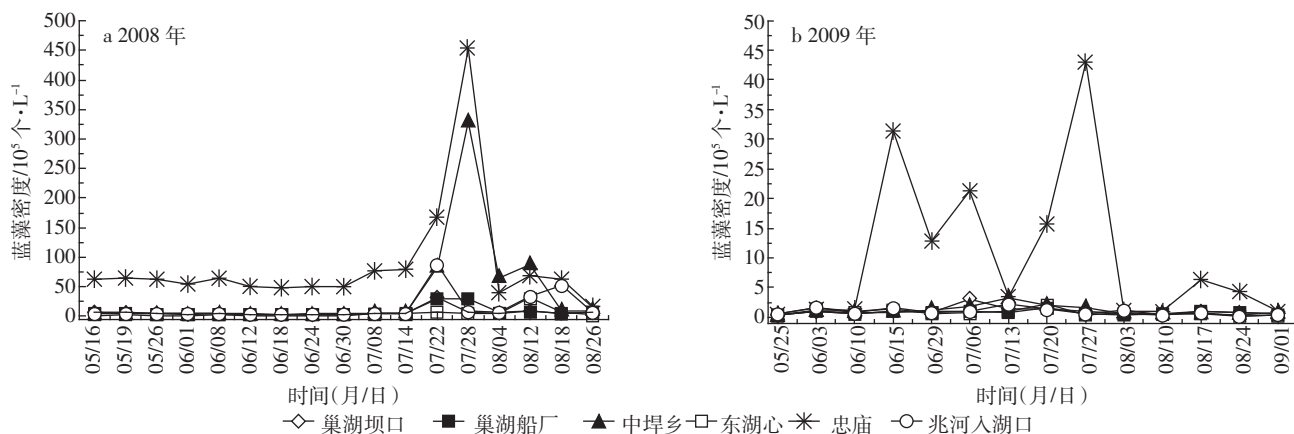


图 2 巢湖东半湖水体蓝藻时空动态

Figure 2 The space-time dynamic of the cyanobacterial in east-half part of Lake Chaohu

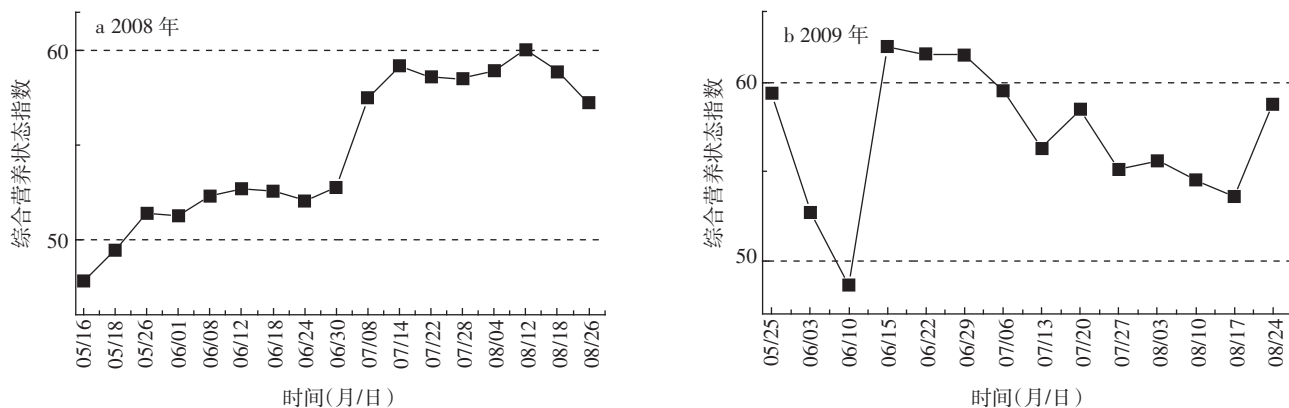


图 3 巢湖东半湖水体综合营养状态变化动态

Figure 3 The trend of TLI in east-half Chaohu Lake

湖东半湖水体的营养状态处于较高水平,2008 年绝大部分时段处于轻度富营养化,仅 5 月中旬综合营养状态指数低于 50,为中营养水平;图 3(b)指示 2009 年巢湖东半湖水体综合营养状态指数波动较大,总体处于轻度富营养化水平,但 6 月 10 日综合营养状态指数出现低水平。这可能与水温上升及水层扰动及沉积物泥水界面的营养释放等原因有关^[18],另外可能有人为控制营养盐进入巢湖^[13]。Chuai 等报道,湖泊的营养程度受气候变化和人为活动的综合影响^[19]。

图 4 显示综合营养状态指数地域分布,结果表明,巢湖东半湖不同区域营养水平均处于较高水平,均达到轻度富营养化,其中忠庙监测点富营养化程度相对更重,达到中度富营养化。而上文巢湖东半湖蓝藻暴发的时空分布中,在忠庙监测点蓝藻密度也是最高,即忠庙的营养水平与图 2 显示的蓝藻密度空间分布规律是一致的,说明其营养程度与蓝藻的生长存在一定关系。从图 3(b)可知,2009 年 6 月中下旬发生富营养化的风险较高,水中的营养盐充足,但水体蓝藻密度并不高,孔繁翔等^[20]认为湖泊富营养化过程的早期,磷作为藻类的生长限制性因子,其含量的增加导致藻类的大量生长。但是一旦磷进入湖泊的量剧增,引起水华暴发的因子已发生转换,磷可能已不再是藻类生长的限制因子。据美国生态学家 Odum 的观点,限制因子规律,只有在严格的稳定条件下才能应用。研究结果显示巢湖东半湖营养盐水平已超过一定浓度,可能已不足以成为蓝藻暴发的限制因子。

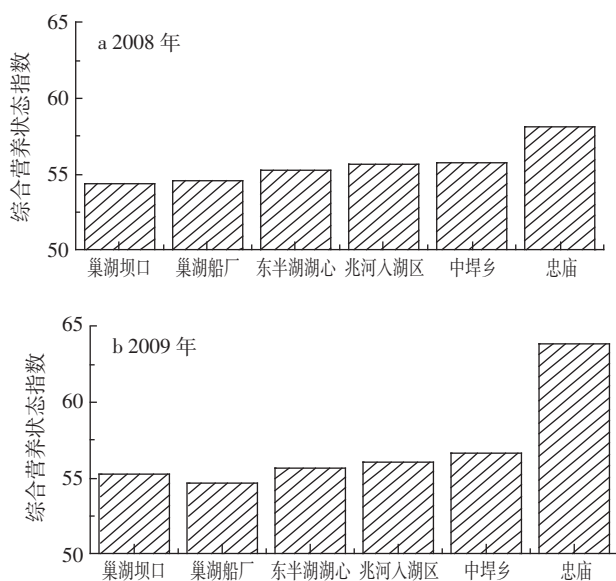


图 4 巢湖东半湖水体综合营养状态指数

Figure 4 The TLI in east-half part of Lake Chaohu

2.3 蓝藻东半湖水华与水质因子的相关分析

巢湖东半湖 2008 年、2009 年叶绿素 a 含量、蓝藻密度与水质因子采用 Pearson 相关系数法进行相关性分析以及双侧检验,结果见表 2。

表 2 巢湖东半湖叶绿素 a 含量、蓝藻密度与因子之间的相关系数及检验结果

因子	叶绿素 a		蓝藻密度	
	2008 年	2009 年	2008 年	2009 年
水温/°C	0.777**	0.082	0.333**	0.088
pH	0.137	0.147	-0.205*	0.160
透明度/m	-0.344**	-0.508**	-0.286**	-0.285**
DO 值/mg·L ⁻¹	-0.320**	0.328**	-0.115	0.304**
高锰酸盐指数/mg·L ⁻¹	0.592**	0.296**	0.469**	0.255*
氨氮/mg·L ⁻¹	0.393**	0.440**	0.440**	0.242*
总氮/mg·L ⁻¹	0.412**	0.517**	0.323**	0.481**
总磷/mg·L ⁻¹	-0.193	0.398**	0.043	0.107

注: * $P < 0.05$, 相关显著; ** $P < 0.01$, 相关极显著。

由表 2 可知,巢湖东半湖叶绿素 a 值、蓝藻密度与水体透明度、高锰酸盐指数、氨氮、总氮之间均呈显著性相关,与其他因子的相关性存在差异。水温、pH、溶解氧和总磷在不同年份出现不同的相关结果。水温与蓝藻水华指标叶绿素 a、与蓝藻密度 2008 年均显示较显著相关性,而 2009 年蓝藻密度监测结果与水温之间并无显著相关。pH 值与水华指标的叶绿素 a 无显著相关,而与蓝藻密度两年的结果出现偏差,可能是在一定的 pH 范围内^[21],蓝藻水华与其无相关性。也就是说在巢湖东半湖自然 pH 下,与蓝藻水华无直接关系。溶解氧与水华指标叶绿素 a、蓝藻密度的关系存在偏差,说明 DO 不是蓝藻暴发的主要原因。总磷与水华指标相关性也出现不一致情况,朱广伟^[6]认为蓝藻水华与水体磷素有关,但表 2 结果显示的相关系数较低,仅 2009 年叶绿素 a 含量与总磷呈极显著正相关。这可能因巢湖东半湖的水质相对恶化,造成磷素营养过高,已远超过蓝藻生长所需,可能不足以成为蓝藻水华暴发的限制因子。

表 2 的相关性分析结果表明,巢湖东半湖叶绿素 a 与各因子之间相关系数值在 0.137~0.592 之间;蓝藻密度与各因子之间相关系数值在 0.205~0.481 之间。叶绿素 a、蓝藻密度与单个因子之间的相关系数均较低,表明巢湖叶绿素 a 含量和蓝藻密度的变化是受多个因子共同作用的结果。淡水湖泊或者水库中,

叶绿素 a 含量或蓝藻的生长密度是由多个因素共同控制的,一般而言,影响藻的生长因子主要包括水动力条件、营养盐、气象条件等^[22-23]。

吴阿娜等对淀山湖蓝藻水华叶绿素 a 与环境因子关系的研究发现,叶绿素 a 与水温、pH、溶解氧存在显著正相关,与透明度存在极显著负相关性^[24]。与本文叶绿素 a 不与 pH 呈显著相关,却与高锰酸盐指数、总氮呈显著正相关有一定差别,说明不同湖体蓝藻水华暴发存在一定差异,即巢湖东半湖高锰酸盐指数、总氮值仍然处于蓝藻水华极限水平之下,其数值变化仍会直接影响水华暴发程度。

2.4 巢湖东半湖蓝藻暴发影响因子多元回归模型建立

因蓝藻密度与叶绿素 a 存在显著相关性^[25],后续分析选取叶绿素 a 的含量作为藻华分析指标,以叶绿素 a 作为因变量,水温、透明度、pH、高锰酸盐指数、氨氮、总磷、溶解氧、总氮作为自变量,对 2008 年 5—8 月巢湖 6 个监测点的 102 个数据,进行多元回归的逐步剔除法和逐步回归法模型拟合,筛选因子。拟合模型的 $R^2=0.743\ 9$, $P<0.000\ 1$,即部分因子与叶绿素 a 相关性不显著,因此予以剔除。首先剔除的是 X_7 ,因其 P 值最大为 $0.7(>0.05)$ 。依此类推,逐步剔除的因子为 $X_7(\text{DO})$ 和 $X_5(\text{氨氮})$,最后拟合结果达到显著, $R^2=0.737\ 9$, $P<0.000\ 1$,模型 1 为:

$$Y=-73.122+1.865X_1-21.585X_2+4.803X_3+1.249X_4-45.036X_6+4.077X_8$$

式中: Y 为叶绿素 a, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; X_1 为水温, $^{\circ}\text{C}$; X_2 为透明度, m; X_3 为 pH; X_4 为高锰酸钾盐, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; X_6 为总磷, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; X_8 为总氮, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

采用逐步回归法进行回归分析,最先引入的是变量 X_1 ,此时建立的模型 $R^2=0.613\ 1$, $P<0.000\ 1$;依次逐步引入变量 X_1 (水温)、 X_8 (总氮)、 X_3 (pH)、 X_2 (透明度),该拟合的模型方程 $R^2=0.721\ 7$, $P<0.000\ 1$ 。逐步回归法得出拟合模型 2 为:

$$Y=-74.897+2.166X_1-24.164X_2+3.94X_3+5.936X_8$$

式中: Y 为叶绿素 a, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; X_1 为水温, $^{\circ}\text{C}$; X_2 为透

度, m; X_3 为 pH; X_8 为总氮, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

将模型 1 和模型 2 比较后可知,两个模型 P 均小于 0.01 ,模型极显著。但从方差分析结果(表 3)中能看出存在一定的差别:模型 1 的剩余平方和(Error sum of square)为 $1\ 434.212$,模型 2 的剩余平方和为 $1\ 308.314$,即模型 2 小于模型 1,根据回归方程中包含的自变量越多,剩余平方和也就越小,模型的预测性也就较为精确^[26],可见模型 2 的预测值相对更接近于实际值。模型 2 说明叶绿素 a 的含量受到水温、透明度、pH 以及总氮 4 个因子的影响。

采用多元回归中逐步回归法得到 2008 年蓝藻水华模型 2,最先引入的因子为水温,其次是总氮。水温对蓝藻水华的产生影响较大,即温度是蓝藻藻密度增长、叶绿素 a 含量增多的关键因子;其次,总氮是影响巢湖东半湖蓝藻水华形成的原因之一。

综合分析模型 1、2,采用模型 2 反映巢湖水体中的叶绿素 a 含量变化的影响因素,得出影响巢湖东半湖蓝藻密度的环境因子主要有水温、pH、透明度和总氮,即巢湖东半湖蓝藻水华成因为水温、pH、透明度和总氮 4 个环境因子。

3 讨论

3.1 巢湖东半湖水体营养状况与蓝藻暴发期关系

2008 年和 2009 年巢湖东半湖水体的营养化水平平均已达到富营养化水平,这是蓝藻水华发生的条件之一;2008 年 7 月初至 8 月中旬巢湖东半湖的营养程度相对较高,蓝藻密度也较大,已造成蓝藻暴发。然而 2009 年巢湖东半湖营养状态较高,6 月甚至达到中度富营养化水平,可蓝藻水华并没有完全暴发。孔繁翔等认为营养盐在较高水平下,极大超过蓝藻生长所需,已不能成为蓝藻水华暴发的限制因子^[20]。综合分析蓝藻暴发原因,巢湖东半湖水体富营养化非常严重,已不能以蓝藻水华来预警水体污染了。

3.2 巢湖东半湖水华的影响因子

2008 年 7 月忠庙和中埠乡两个监测点蓝藻密度

表 3 关于叶绿素 a 影响因子模型 1、2 的方差分析

Table 3 The analysis of variance about chlorophyll a influence factor in model 1 and model 2

序号 Number	来源 Source	自由度 DF	平方和 Sum of square	均方和 Mean square	F 值 F value	$Pr>F$
1	Model	4	3 557.85	889.46	60.1	<0.000 1
	Error	97	1 434.21	14.79		
	Corrected total	101	4 992.06			
2	Model	6	3 683.75	613.96	44.6	<0.000 1
	Error	95	1 308.31	13.77		
	Corrected total	101	4 992.06			

较大,而且蓝藻密度与水温呈极显著相关性,较高的水温造成蓝藻大量繁殖,与赵梦绪等^[27]的研究吻合。但是边归国等^[28]发现在福建某河流水温过高对藻类的生长也存在一定的抑制作用。

透明度与蓝藻密度、叶绿素 a 均呈现显著负相关。王立前等^[29]对云南的湖库提出了透明度 I 类为 5.0 m、II 类为 2.5 m、III 类为 1.0 m、IV 类和 V 类均为 0.5 m 的控制指标,以此为标准,巢湖东半湖水透明度都低于 V 类,原因可能是由于浮游植物生物量大、水华的暴发。巢湖的水华也可通过制定结合透明度的指标来控制。这为今后巢湖蓝藻水华的治理提供方向。

有学者指出太湖微囊藻水华的暴发虽然与氮、磷等营养盐浓度值过高存在一定的关系,但并没有显著的相关关系。研究结果显示,巢湖东半湖水体内总氮含量与蓝藻暴发存在极显著相关性。根据研究结果,巢湖东半湖监测点中蓝藻水华严重的忠庙与中埠乡,其水质为 IV 类,这可能为蓝藻的生长提供氮源,而蓝藻有效地利用水下光的有效光辐射^[30],通过光合作用合成氨基酸等物质,以供生长所需。

3.3 拟合模型的比较分析

选择适宜的模型是正确分析水华成因的保证^[30]。吴阿娜等^[24]仅分析淀山湖蓝藻水华高发期叶绿素 a 与环境因子的相关性。本文采用多元回归分析中的逐步剔除法(模型 1)和逐步回归法(模型 2)分析 2008 年 5 月—8 月巢湖东半湖的叶绿素 a 的影响因子。虽然两种回归都能分析叶绿素 a 的影响因子,但逐步剔除法把所有的因子都引入方程,计算量大,而逐步回归法则是逐步引入对叶绿素 a 影响显著的因子。

模型 1 比模型 2 增加了高锰酸盐指数和总磷两个影响因子,但是实际效果并不理想,其剩余均方和(1 434.21)比模型 2 的(1 308.21)大。根据周文芳等^[26]剩余平方和越小则模型预测越精确的观点,模型 1 的预测精确度低于模型 2,故选择模型 2 能增强模拟预测的正确性。且模型 2 包含因子数少,在实际监测过程中,减少高锰酸钾指数和总磷指标,简化了试验程序,起到了模型对生产实际的指导作用。

4 结论

巢湖东半湖蓝藻暴发在时空上存在一定规律,2008 年 7—8 月为蓝藻暴发期,水体叶绿素 a 含量高达 $37 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,以忠庙监测点的蓝藻密度最高,最高可达 $452 \times 10^4 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 。2009 年巢湖水体也存在水体蓝藻

浓度较高现象,但 2008 年水体蓝藻密度相对较低,且分为两个明显时间段,峰值最大分别为 31.3×10^4 、 $42.9 \times 10^4 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

从 2008、2009 年巢湖东半湖水体中蓝藻水华暴发与各因子的相关性分析,叶绿素 a、蓝藻密度两度量指标均与透明度、高锰酸钾指数、氨氮以及总氮呈显著相关性,表明这些因子对水体叶绿素 a 含量、蓝藻密度影响显著。

通过比较逐步剔除法和逐步回归法两种方法建立的拟合模型得出影响巢湖东半湖蓝藻暴发的环境因子主要有水温、pH、透明度和总氮,巢湖东半湖的高营养盐水平,已不能成为蓝藻水华暴发的限制因子。

参考文献:

- [1] Liu C L, Tang D L. Spatial and temporal variations in algal blooms in the coastal waters of the western South China Sea[J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2012, 6(3):239-247.
- [2] 姜霞,王书航,钟立香,等.巢湖藻类生物量季节性变化特征[J]. *环境科学*, 2010, 31(9):2056-2062.
JIANG Xia, WANG Shu-hang, ZHONG Li-xiang, et al. Seasonal variation characteristics of algae biomass in Chaohu Lake[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(9):2056-2062.
- [3] Ahn C Y, Chung A S, Oh H M. Rainfall, phycocyanin, and N:P ratio related to cyanobacterial blooms in a Korean large reservoir[J]. *Hydrobiology*, 2002, 474:117-124.
- [4] 崔莉凤,游亮,黄振芳,等.北京城区水华发生氮磷比变化趋势及原因分析[J]. *环境科学与技术*, 2007, 30(10):47-49.
CUI Li-feng, YOU Liang, HUANG Zhen-fang, et al. TN/TP ratio of lake water and its implication in algae bloom of Beijing's Urban Lake[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 30(10):47-49.
- [5] Paerl H W, Fulton R S, Moisaner P H, et al. Harmful freshwater algal blooms, with an emphasis on cyanobacteria[J]. *The Scientific World Journal*, 2001, 1:76-113.
- [6] 朱广伟.太湖富营养化现状及原因分析[J]. *湖泊科学*, 2008, 20(1):21-26.
ZHU Guang-wei. Eutrophic status and causing factors for a large, shallow and subtropical Lake Taihu, China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(1):21-26.
- [7] 李颖,曹文志,张玉珍,等.九龙江流域上游浅水湖泊富营养化机制[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(5):906-911.
LI Ying, CAO Wen-zhi, ZHANG Yu-zhen, et al. A Study on the mechanisms of eutrophication of a shallow upstream lake in the Jiulong River Catchment[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(5):906-911.
- [8] 环境保护部.巢湖流域水污染防治“十二五”规划编制大纲. 2010.
- [9] 高蓉蓉,张利民,邹敏.巢湖流域水质现状及保护对策的调研报告[J]. *污染防治技术*, 2003, 16(3):88-96.
GAO Rong-jing, ZHANG Li-min, ZOU Min. Investigation report on current water quality and protection countermeasures of Chao Lake Basin[J]. *Pollution Control Technology*, 2003, 16(3):88-96.

- [10] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [11] 奚旦立, 孙裕生, 刘秀英. 环境监测[M]. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 2004: 59–66.
- [12] 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. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2002, 18(5): 47–49.
- [13] 张之源, 王配华, 张崇岱. 巢湖营养化状况评价及水质恢复探讨[J]. 环境科学研究, 1999, 12(5): 45–48.
ZHANG Zhi-yuan, WANG Pei-hua, ZHANG Chong-dai. Study on the eutrophication in Chaohu Lake and its remediation[J]. *Research of Environmental Sciences*, 1999, 12(5): 45–48.
- [14] 郭志刚. 社会统计分析方法——SPSS 软件应用[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2002: 29–36.
- [15] 田泽斌, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾夏季蓝藻水华成因研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(11): 2083–2089.
TIAN Zhe-bin, LIU De-fu, YANG Zheng-jian, et al. Cyanobacterial bloom in Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(11): 2083–2089.
- [16] 刘 燕, 王圣瑞, 金相灿, 等. 水体营养水平对3种沉水植物生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 57–63.
LIU Yan, WANG Sheng-rui, JIN Xiang-can, et al. Effects of different nutritional condition on the growth and antioxidant enzyme activity of three submerged macrophytes[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(1): 57–63.
- [17] 李 佩, 谢从新, 何绪刚, 等. 水体营养水平及附着藻类对苦草生长的影响[J]. 渔业现代化, 2012, 39(1): 11–16.
LI Pei, XIE Cong-xin, HE Xu-gang, et al. Effects of water nutritional condition and epiphytic algae on the growth of *Vallisneria spiralis* [J]. *Fishery Modernization*, 2012, 39(1): 11–16.
- [18] 王 霞, 吕宪国, 张学林, 等. 松花江富营养现状及其影响因素分析[J]. 湿地科学, 2004, 2(4): 273–278.
WANG Xia, LÜ Xian-guo, ZHANG Xue-lin, et al. Eutrophication aspects and effective factors analysis in Songhua Lake[J]. *Wetland Science*, 2004, 2(4): 273–278.
- [19] Chuai X, Chen X, Yang L, et al. Effects of climatic changes and anthropogenic activities on lake eutrophication in different ecoregions[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2012, 9(3): 503–514.
- [20] 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): 589–594.
KONG Fan-xiang, GAO Guang. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 589–594.
- [21] 刘春光, 金相灿, 孙 凌, 等. pH 值对淡水藻类生长和种类变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 294–298.
LIU Chun-guang, JIN Xiang-can, SUN Ling, et al. Effects of pH on growth and species changes of algae in freshwater[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2): 294–298.
- [22] 周 敏, 刘正文. 氮、磷对热带浅水湖泊惠州西湖蓝藻的控制[J]. 生态科学, 2012, 1(2): 115–120.
ZHOU Min, LIU Zheng-wen. Nitrogen and phosphorus control the cyanobacteria of Huizhou West Lake, a tropical shallow lake[J]. *Ecological Science*, 2012, 31(2): 115–120.
- [23] 王兆群, 张宁红, 张 咏. 洪泽湖藻类与环境因子逐步回归统计和蓝藻水华初步预测[J]. 中国环境监测, 2012, 28(4): 17–20.
WANG Zhao-qun, ZHANG Ning-hong, ZHANG Yong. Prediction of blue-green algae bloom using stepwise multiple regression between algae & related environmental factors in Hongze Lake[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2012, 28(4): 17–20.
- [24] 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 E-na, ZHU Meng-jie, TANG Lin, et al. Dynamics of chlorophyll a and analysis of environmental factors in Lake Dianshan during summer and autumn[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(1): 67–72.
- [25] 于海燕, 周 斌, 胡尊英, 等. 生物监测中叶绿素 a 浓度与藻类密度的关联性研究[J]. 中国环境监测, 2009, 25(6): 40–42.
YU Hai-yan, ZHOU Bin, HU Zun-ying, et al. Study on correlation between chlorophyll a and algal density of biological monitoring[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2009, 25(6): 40–42.
- [26] 周文芳, 李 明. 逐步回归分析法的一点不足之处[J]. 西北水电, 2004(4): 49–50.
ZHOU Wen-fang, LI Ming. Discussion on shortcomings of stepwise regression analysis[J]. *Northwest Hydropower*, 2004(4): 49–50.
- [27] 赵孟绪, 韩博平. 汤溪水库蓝藻水华发生的影响因子分析[J]. 生态学报, 2007, 25(7): 1554–1560.
ZHAO Meng-xu, HAN Bo-ping. Analysis of factors affecting cyanobacteria bloom in a tropical reservoir (Tangxi Reservoir, China) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 25(7): 1554–1560.
- [28] 边归国, 陈 宁, 胡征宇, 等. 福建某河流甲藻水华与污染指标的关系[J]. 湖泊科学, 2010, 22(3): 405–410.
BIAN Gui-guo, CHEN Ning, HU Zheng-yu, et al. A river in Fujian algal dinoflagellate relationship with the pollution index[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(3): 405–410.
- [29] 王立前, 张榆霞. 云南省重点湖库水体透明度和叶绿素 a 建议控制指标的探讨[J]. 湖泊科学, 2006, 18(1): 86–90.
WANG Li-qian, ZHANG Yu-xia. Suggestions on the SD and chl a control standards in major lakes of Yunnan Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18(1): 86–90.
- [30] 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 Xiao-hong, SHI Xiao-dan, ZHAO Zhen-hua, et al. Correlation between chlorophyll a concentration and environmental factors in shallow lakes in plain river network areas of Suzhou[J]. *Journal of Lake Science*, 2008, 20(5): 556–562.