

巢湖叶绿素 a 与环境因子耦合效应的多元分析

官 滢^{1,2}, 高大文¹, 任南琪¹

(1. 哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 150090 哈尔滨, di.guan@yahoo.com.cn;

2. 哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院, 150001 哈尔滨)

摘 要: 针对巢湖西半湖富营养化情况, 利用实测资料, 通过相关分析和多元逐步回归统计, 分析环境多元耦合效应与水体叶绿素 a 质量浓度之间的关系, 找出显著环境因子, 建立多元逐步回归方程, 预测叶绿素 a 质量浓度变化. 结果表明, 巢湖西半湖叶绿素 a 质量浓度夏季高冬季低, 其变化受多个环境因子共同影响, 相关性较显著的为气温、水位、COD_{Mn}等. 在各环境因子间的多元耦合效应下, 水文气象因子对水华的驱动作用较强. 研究结果可为巢湖水华控制预报工作提供科学依据.

关键词: 巢湖; 水华; 叶绿素 a; 多元耦合; 多元逐步回归

中图分类号: X524

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)12-0068-04

Multivariate analysis between chlorophyll-a and coupling of environmental factors in Chaohu Lake

GUAN Di^{1,2}, GAO Da-wen¹, REN Nan-qi¹

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, di.guan@yahoo.com.cn; 2. College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, 150001 Harbin, China)

Abstract: Based on the eutrophication appeared in Chaohu Lake, we analyzed the relation between the multi-factor coupling and chlorophyll-a (Chla) with monitor data from 2005 to 2009 in western lake, and by correlation analysis and stepwise multiple regression, we inferred the dominant factors of algal blooms and established the prediction model of Chla variation. The results indicated that seasonal trend of Chla concentration was greater in summer and lower in winter in western lake. The Chla biomass was influenced by multiple effects of environmental factors, in which the dominant ones were air temperature, water level and COD_{Mn}. Under multifactor coupling environment, meteorologic and hydrologic factors were most significant to algal blooms. These results might provide scientific foundations for prediction and control of harmful algal blooms in Chaohu Lake.

Key words: Chaohu Lake; harmful algal blooms; Chlorophyll-a; multifactor coupling; stepwise multiple regression

安徽省当地管理部门的监测结果显示, 巢湖富营养化水面已占全湖的 70%, 其中临近合肥的

西半湖长期处于重富营养或极富营养状态, 本世纪已出现了 10 余次较为严重的蓝藻水华, 城乡饮水安全存在较大隐患. 水华的产生受多方水质、气象、水文条件等影响^[1-3]. 由于巢湖具有面积广、支流多、生态系统复杂等特点, 影响水华藻类生长的各类环境因子之间存在不同量度的统计依赖性, 即耦合作用. 目前, 已有很多学者针对巢湖藻类与各环境因子间的相互关系作出深入研究^[4-5], 但多以特定因子为研究对象, 未考虑多方环境因子间的耦合效应与藻类生长的关系.

收稿日期: 2010-10-15.

基金项目: 国家创新研究群体基金项目(50821002); 城市水资源与水环境国家重点实验室开放研究项目(ESK201021); 黑龙江省科学技术计划项目(GB08C204-01); 中央高校基本科研业务费资助项目(HEUCF100213); 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(11553049).

作者简介: 官 滢(1981—), 女, 讲师, 博士研究生;
高大文(1967—), 男, 教授, 博士生导师;
任南琪(1959—), 男, 博士生导师, 中国工程院院士.

本文利用巢湖西半湖 2005~2009 年间的监测资料,以叶绿素 a 质量浓度作为水华藻类生物量的表征,将水质、气象、水文等各类指标作为水华影响环境因子,统计叶绿素 a 与环境因子间的相关性,分析多元耦合效应与叶绿素 a 的关系;并在此基础上建立多元回归预测模型,找出驱动水华发生的显著因子,同时描述叶绿素 a 质量浓度的时空分布情况,为巢湖蓝藻水华的防治提供理论依据。

1 研究方法

1.1 数据来源

本研究所用的水质数据来源于合肥市环境监测中心站 2005 年 1 月~2009 年 12 月间在南淝河入湖区、十五里河入湖区、塘西入湖区、派河入湖区、新河入湖区、西半湖湖心等 6 个水质监测站的连续记录,气象数据来自合肥气象局,水文数据来自合肥水文资源局。分析采用的环境指标主要包括生物因子:叶绿素 a (Chla);水质因子:总氮(TN)、总磷(TP)、BOD、DO、pH、氨氮、高锰酸钾指数(COD_{Mn});气象因子:气温(T_A)、风速(v_w)、气压(P_A)、相对湿度(H_R)、相对日照时数(S_R);水文因子:水位(L_w)等,共 13 项理化因子。各项的分析均采用标准方法^[6]。

1.2 统计分析

利用 SPSS.PASW.Statistics 软件计算变量间的相关性并进行多元逐步回归统计分析。两个变量间的线性相关关系度量采用 Pearson 相关系数,同时计算偏相关系数,即在封闭环境中,排除其他变量条件下两变量之间的线性相关性度量^[7]。数据的多元统计分析以叶绿素 a 为因变量,其他环境理化因子为自变量,选择临界值 95% 的显著水平筛选自变量中对叶绿素 a 影响作用较大的环境因子,建立反映叶绿素 a 变化趋势的回归方程,并对得到的参数以及线性关系的显著性进行检验,检验通过后利用得到的叶绿素 a 样本回归方程对实际观测数值进行拟合,比较预测值与实测值的差异^[7]。

2 结果与讨论

2.1 叶绿素 a 质量浓度的时空分布

由图 1 可知,叶绿素 a 的质量浓度存在明显的季节性变化。2005 年 1 月至 2009 年 12 月期间,巢湖西半湖叶绿素 a 质量浓度总体变化趋势为每年 5~10 月数值偏高,11~12 月和次年 1~4 月数值偏低。由于藻类的生长同时受到水体营养物质和水文气象等因素影响,在冬季低温且光照不足

的环境中,藻类生物量较低,多呈休眠状态;而在春末夏初之时,水温提高,风浪扰动频繁,底泥中的营养盐和底泥表面的藻类休眠体开始上浮进入水体。根据有关部门 2004~2005 年的监测资料,巢湖春季以蓝藻门的密集念珠藻、硅藻门为主,夏季以蓝藻门的铜绿微囊藻、绿藻门的丝藻为主。夏季因适宜的水动力和环境条件,在局部湖区生物量急剧增长,可爆发形成很厚的蓝藻水华层,而蓝藻门的密集念珠藻在阳光充足时极易爆发春季水华^[8]。

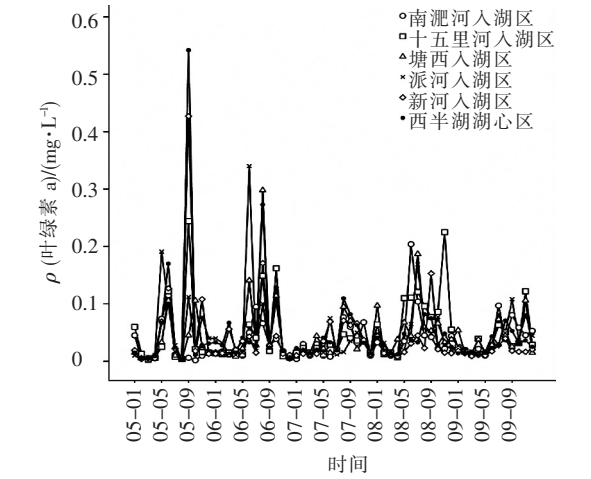


图 1 巢湖西半湖各测点叶绿素 a 质量浓度时空分布

同时,由于水华爆发消耗掉大量营养物质和溶解氧导致藻类生物量迅速下降^[9]。从图 1 中可以看出,水中叶绿素 a 质量浓度在达到峰值后都会出现明显下降趋势。根据 6 个监测点位水环境背景的不同,各点记录的叶绿素 a 质量浓度峰值及其出现时间也有一定差异。在 2005~2006 年间,南淝河入湖区和十五里河入湖区的叶绿素 a 质量浓度较低,此后逐年变化较平稳,夏季峰值在 0.2 mg/L 左右;塘西入湖区和派河入湖区的叶绿素 a 质量浓度稍高,在 2006 年夏季出现最大值 0.3 mg/L 左右,此后逐年峰值呈下降趋势;而新河入湖区和湖心区前两年的叶绿素 a 质量浓度偏高,在 2005 年夏季湖心区峰值超过 0.5 mg/L,此后峰值明显逐年降低。

2.2 叶绿素 a 质量浓度与环境因子的相关分析

巢湖西半湖各监测点位叶绿素 a 质量浓度及相关平均值与各单项因子之间的 Pearson 相关系数分析结果见表 1。巢湖西半湖水体叶绿素 a 质量浓度与环境因子之间的相关系数在 0.014~0.478,叶绿素 a 与单个因子之间的相关系数均较低,表明叶绿素 a 质量浓度变化受多个因子共同影响。水华驱动因子在不同监测点位的筛选结果有部分重合,水文气象因子驱动作用相对较强。西半湖入湖区叶绿

素 a 与气温、COD_{Mn} 等显著正相关,与气压显著负相关;湖心区叶绿素 a 与水位、气温、TN 等显著正相关;6 监测点位平均值显示西半湖叶绿素 a 与气温、水位、COD_{Mn} 等显著正相关.

考虑环境因子间具有相互依赖的耦合效应,在叶绿素 a 与单因子相关性分析外,进行了任意两环境影响因子间的相关性度量,其中气温和气压显著负相关(相关系数-0.951),和 DO 显著负相关(相关系数-0.686).在建立预测模型时,可适当排除此类冗余环境因子.本文分析了水体叶绿素 a 质量浓度与任意一个或多个环境理化因子的相关关系强弱,即计算叶绿素 a 与水质、气象、水文各组因子和各单因子的偏相关性度量.由表 1 可知,在分组分析中,水体叶绿素 a 分别与各组因

子中的 TN、COD_{Mn}、气温、水位等显著正相关,与气压显著负相关;在单因子分析中,水体叶绿素 a 分别与 TN、COD_{Mn}、水位等显著正相关.在偏相关分析中,水华的主要影响因子集中为水质因子.

水体的 N、P 等与藻类生长有密切关系^[10-12],并不是藻类生长的限制因子而仅是主要营养源^[13].根据本文的分析结果,在过滤掉其他因子的依赖性影响后,巢湖西半湖水中 TN 对叶绿素 a 质量浓度相关性较强;如果加上多环境因子之间的耦合作用,则气温、水位等水文气象因子呈现出对叶绿素 a 质量浓度有较强的影响作用.已有研究表明,水温升高能够促进藻类活性,加快营养盐的迁移转化过程,为藻类生长提供推动力^[14].

表 1 2005~2009 年巢湖西半湖叶绿素 a 质量浓度和环境理化因子的相关系数

环境理化因子	南淝河入湖区	十五里河入湖区	塘西入湖区	派河入湖区	新河入湖区	西半湖湖心	入湖区 5 点位平均	6 点位平均		
	入湖区	入湖区	入湖区	入湖区	入湖区	入湖区	简单相关	分组偏相关	单因子偏相关	
TN	-0.109	0.035	-0.018	0.269	0.265	0.309	0.042	0.193	0.530	0.449
TP	0.074	0.131	0.277	0.195	0.356	0.264	0.187	0.234	0.216	0.075
BOD	0.093	0.130	0.251	0.360	0.076	0.132	0.184	0.131	-0.022	-0.134
DO	-0.134	-0.090	-0.241	-0.125	-0.115	-0.179	-0.267	-0.215	0.136	0.167
pH	0.123	0.239	0.296	0.131	0.114	0.086	0.129	0.200	0.221	0.205
氨氮	-0.092	-0.176	0.104	-0.099	-0.056	0.100	-0.187	-0.059	0.154	-0.193
COD _{Mn}	0.131	0.264	0.612	0.478	0.254	0.294	0.448	0.309	0.388	0.432
气温	0.394	0.270	0.376	0.342	0.305	0.316	0.458	0.386	0.418	0.265
风速	-0.064	-0.232	-0.067	0.032	0.014	-0.045	-0.081	-0.060	-0.036	-0.135
气压	-0.421	-0.171	-0.312	-0.317	-0.213	-0.222	-0.379	-0.291	-0.337	0.155
相对湿度	0.211	0.158	0.116	0.086	0.151	0.128	0.192	0.159	0.006	0.093
日照时数	0.069	0.060	0.251	0.129	0.025	0.097	0.147	0.120	0.252	0.112
水位	-0.078	0.311	0.088	-0.068	0.389	0.422	0.205	0.375	0.412	0.412

2.3 叶绿素 a 与环境因子的逐步回归分析

从以上相关性分析中可以看出,在不同监测点位各环境理化因子对湖水中藻类叶绿素 a 质量浓度的影响各异,为了找到相对重要的影响因子,通过逐步回归分析方法,以叶绿素 a 质量浓度为因变量,各影响因子为自变量,建立多元线性回归方程,并对得到的参数以及线性关系的显著性进行检验(方差分析 F 值显著水平 $P \leq 0.05$).

巢湖西半湖各监测点位叶绿素 a 质量浓度与环境影响因子的逐步回归结果见表 2.从入湖区 5

监测点位平均值和 6 点位平均值来看,对叶绿素 a 质量浓度影响较显著的驱动因子集中为水位、COD_{Mn}、气温、TN 等.水位在南淝河入湖区、新河入湖区和湖心区呈正相关,COD_{Mn} 在十五里河入湖区、塘西入湖区和派河入湖区呈正相关,气温在塘西入湖区、新河入湖区和湖心区呈正相关,TN 在新河入湖区和湖心区呈正相关,氨氮在派河入湖区和新河入湖区呈负相关;此外还有风速和气压在南淝河入湖区呈负相关,pH 在塘西入湖区呈正相关,TP 在新河入湖区呈正相关等.

表 2 巢湖西半湖 2005~2009 年各样点叶绿素 a 质量浓度和水体理化因子的多元回归统计

监测点	回归方程式	复相关系数	修正 R^2	F
南淝河入湖区	$\rho(\text{Chla}) = 2.452 - 0.036r_w - 0.002P_A$	0.511	0.235	10.051
十五里河入湖区	$\rho(\text{Chla}) = -0.393 + 0.042L_w + 0.009\text{COD}_{Mn}$	0.445	0.170	7.035
塘西入湖区	$\rho(\text{Chla}) = -0.319 + 0.032\text{pH} + 0.013\text{COD}_{Mn} + 0.001T_A$	0.720	0.493	20.128
派河入湖区	$\rho(\text{Chla}) = -0.02 - 0.038\rho(\text{NH}_4\text{-N}) + 0.014\text{COD}_{Mn}$	0.559	0.288	12.949
新河入湖区	$\rho(\text{Chla}) = -0.637 + 0.065L_w + 0.093\rho(\text{TP}) + 0.003T_A + 0.022\rho(\text{TN}) - 0.03\rho(\text{NH}_4\text{-N})$	0.738	0.502	12.917
西半湖湖心	$\rho(\text{Chla}) = -0.95 + 0.097L_w + 0.026\rho(\text{TN}) + 0.004T_A$	0.413	0.521	5.857
入湖区平均	$\rho(\text{Chla}) = -0.424 + 0.027L_w + 0.018\text{pH} + 0.008\text{COD}_{Mn} + 0.001T_A$	0.695	0.446	12.854
全平均	$\rho(\text{Chla}) = -0.752 + 0.075L_w + 0.018\rho(\text{TN}) + 0.007\text{COD}_{Mn} + 0.002T_A$	0.747	0.525	17.333

以入湖区平均方程作为简单预测模型,计算 2005~2009 年间巢湖入湖区平均叶绿素 a 质量浓度预测值,结果见图 2.从入湖区平均叶绿素 a 质量浓度预测曲线叶绿素 a 质量浓度实测曲线的相符程度来看,夏季叶绿素 a 预测值较实测峰值偏低,在其他季节预测值则与实测值较为近似.原因可能是夏季水华爆发时,除了以上驱动因子,藻类还同时受其他因素影响,如风浪搅动使浅水湖泊中的悬浮质释放磷、氮等营养元素促进藻类生长等^[15].

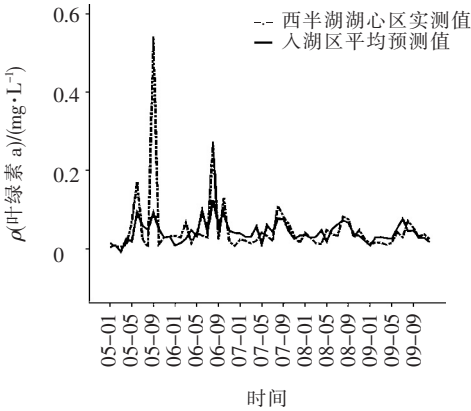


图 2 2005~2009 年巢湖西半湖叶绿素 a 平均预测值与实测值比较

3 结 论

1)巢湖西半湖叶绿素 a 的逐月监测结果呈现季节特征,峰值多在每年 5~10 月出现,且各检测点位上叶绿素 a 质量浓度逐年变化趋势不同.

2)叶绿素 a 质量浓度与单个环境因子之间的相关系数均较低,可见其变化受多个环境因子共同作用影响.在多元耦合作用下,叶绿素 a 质量浓度与气温、水位、气压、COD_{Mn} 等显著相关,即水文气象因子表现出对水华有较强驱动作用.

3)在水华预测方程中,各监测点位对水体叶绿素 a 质量浓度有较显著影响的环境理化因子为水位、TN、COD_{Mn} 和气温等.多因子间的相互依赖形成耦合效应,产生统计冗余变量,在分析水华显著驱动因子和建立水华预测模型时应考虑去除此类冗余环境因子.

参考文献:

[1] QIN B Q, XU P Z, WU Q L, *et al.* Environmental issues of Lake Taihu, China[J]. *Hydrobiologia*, 2007, 58:3-14.

[2] PAERL H. Doing battle with the green monster of Taihu Lake[J]. *Science*, 2007, 317:1166.

[3] SMAYDA T J. Turbulence, watermass stratification and harmful algal blooms; an alternative view and frontal zones as “pelagic seed banks” [J]. *Harmful Algae*, 2002, 1:95-112.

[4] ZHU G W, QIN B Q, ZHANG L, *et al.* Geochemical forms of phosphorus in sediments of three large, shallow lakes of China[J]. *Pedosphere*, 2006, 16(6): 726-734.

[5] WEI C, BAO S, ZHU X, *et al.* Spatio-temporal variations of the bacterioplankton community composition in Chaohu Lake, China[J]. *Progress in Natural Science*, 2008, 18(9): 1115-1122.

[6] 国家环保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].3 版.北京:中国环境科学出版社, 1989: 248-370.

[7] JOHNSON R A, WICHERN D W. Applied multivariate statistical analysis [M]. Beijing: Pearson Education North Asia Limited and Tsinghua University Press, 2001:284-331.

[8] DENG D G, XIE P, ZHOU Q, *et al.* Studies on temporal and spatial variations of phytoplankton in Lake Chaohu[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2007, 49(4):409-418.

[9] HEISLER J, GLIBERT P M, BURKHOLDER J M. Eutrophication and harmful algal blooms; a scientific consensus[J]. *Harmful Algae*, 2008, 8:3-13.

[10] CHEN Y W, FAN C X, TEUBNER K, *et al.* Changes of nutrients and phytoplankton chlorophyll-a in a large shallow lake, Taihu, China: an 8-year investigation [J]. *Hydrobiologia*, 2003, 506: 273-279.

[11] HAI X, PAERL H W, QIN B, *et al.* Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China[J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, 55: 420-432.

[12] SCHINDLER D W, VALLENTYNE J R. The algal bowl: overfertilization of the world’s freshwaters and estuaries[M]. Edmonton, Alberta, Canada: University of Alberta Publications, 2008.

[13] 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*, 2005, 21(4): 69-71.

[14] JÖHNK K, HUISMAN J, SHARPLES J, *et al.* Summer heatwaves promote blooms of harmful Cyanobacteria [J]. *Global Change Biology*, 2008, 14: 495-512.

[15] 朱永春,蔡启铭.风场对藻类在太湖中迁移影响的动力学研究[J]. *湖泊科学*, 1997, 9(2): 152-158.

(编辑 刘 彤)