

微宇宙环境下藻类生长与理化因子回归研究

梁 恒, 陈忠林, 瞿芳术, 田家宇, 李圭白

(哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090, hitliangheng@163.com)

摘 要: 为考察水库水中藻类生长与理化因子的相关性, 用微宇宙环境模拟藻类生长过程并监测理化因子变化, 建立相关回归统计方程. 以微宇宙环境中鱼腥藻、微囊藻和适度营养状态水体中藻类的生长为研究对象, 考察藻类生长过程中理化因子的变化, 建立藻生长与环境因子的线性相关矩阵, 并建立相关预测方程. 实验结果表明: 总磷和水温是影响藻类生长显著因子; 通过总磷和水温建立起的相关预测方程, 能够预测水体内藻细胞浓度变化. 微宇宙环境下基于理化因子所建立起的藻类生长预测方程有助于水厂准确预测藻类浓度, 及时调整水处理工艺.

关键词: 微宇宙环境; 藻类生长; 理化因子; 回归分析

中图分类号: TU991.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)06-0841-04

Regression equations between algae propagation and physico-chemical factors under microcosm environment

LIANG Heng, CHEN Zhong-lin, QU Fang-shu, TIAN Jia-yu, LI Gui-bai

(State Key Laboratory of Urban Water Resources and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, hitliangheng@163.com)

Abstract: In order to investigate the correlation between algae propagation and physico-chemical factors for reservoir water, the algae propagation was modelled and the factors were monitored under the microcosm environment for building regression equations. The linear matrix based on the biomass of anabaena (ACD), microcystis (ACM) and algae (AC) in moderate eutrophic situation was built. Results showed that the reservoir is phosphorous-limited and relative to total phosphorous (TP) and temperature. The prediction equations based on TP and temperature can predict algae concentration variations. The prediction equations built under microcosm conditions can help water plants predict algae concentrations and adjust water treatment processes according to the equations' results.

Key words: microcosm environment; algae propagation; physico-chemical factors; regression analysis

伴随着近年来经济快速发展, 湖泊水库氮、磷污染不断积累, 造成蓝藻水华大量爆发^[1-3]. 富营养化问题不但制约了水源资源的开发利用, 而且直接影响着人类的健康生存和社会可持续发展. 为了研究水库藻类爆发的机理, 可采用水生微宇宙来模拟天然环境中水体富营养化的过程, 通过

观测氮磷等指标的变化, 研究它们的变化规律及相关关系, 从而探讨富营养化的形成原理^[4-7], 并据此确定藻类生长的显著限制因子, 提出水库水体富营养化防控的重点.

本研究以微宇宙环境中鱼腥藻 (ACD)、微囊藻 (ACM) 和适度营养状态水体中藻类 (AC) 的生长为研究对象, 考察藻类生长过程中理化因子的变化, 建立藻生长与环境因子的线性相关矩阵, 监测水体中与藻类生长密切相关的理化因子的变化, 并建立相关预测方程, 为当地水厂掌握藻类浓度变化趋势以及及时调整水处理工艺提供基础.

收稿日期: 2010-03-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50808051); 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室开放基金资助项目 (HIT-ES200803).

作者简介: 梁 恒 (1979—), 男, 博士, 讲师;

陈忠林 (1967—), 男, 教授, 博士生导师;

李圭白 (1931—), 男, 教授, 中国工程院院士.

1 实 验

1.1 实验装置及方法

微宇宙环境实验的模拟装置为 1.3 m×1.2 m×1.2 m 的水族箱,1.6 cm 厚的玻璃板.取广东省开平市大沙河水库中层水放入玻璃缸内,箱体底部铺设 7 cm 厚的取自于水库底部的底泥,并将玻璃缸置于室外,模拟水库水的自然生长条件.

控制水族箱处于稳定的自然生长环境下,分析藻类生长的重要影响因子及影响规律.应用 SPSS11.0 软件计算统计量 F 值,根据 F 值后退式筛选各相关因子,建立相关预测模型;调整相关影响因子参数,获得不同初始条件下藻类生长预测模型.

在本研究中,大沙河水库原水曾出现 2 次优势藻大量繁殖,分别为鱼腥藻(685 万/L)和微囊藻(765 万/L).且优势藻峰值数密度均达到或超过藻细胞总数密度的 75%.考虑到藻类生长的差异性

和选择性,不同的优势藻与各因子的相关程度会有差别.因而,以鱼腥藻为优势藻的原水和以微囊藻为优势藻的原水及中营养状态原水作为水族箱试验的研究对象,分别考察其影响因子及影响规律.

1.2 检测方法

每天 2 次记录各样本中的 pH、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、总氮、总磷、温度、 COD_{Mn} 、DO 和藻细胞数密度(AC、ACD 和 ACM).检测方法依据标准办法进行,实验周期为 20 d.

2 结果与讨论

2.1 鱼腥藻生长与理化因子回归统计研究

由表 1 可知,本研究中的微宇宙环境理化因子中与鱼腥藻生物量具有显著关系的因子包括总磷、水温和 pH.水族箱微宇宙环境为藻类提供了稳定的生长环境,研究结果表明大沙河水库在鱼腥藻爆发时,属磷限制型污染.

表 1 鱼腥藻生物量与微宇宙环境理化因子线性相关矩阵

相关因子	ACD	DO	pH	$\text{NH}_3\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	总氮	总磷	温度	COD_{Mn}
ACD	1.00									
DO	0.037	1.00								
pH	0.765 *	-0.005	1.00							
$\text{NH}_3\text{-N}$	-0.079	-0.456	-0.389	1.00						
$\text{NO}_2\text{-N}$	0.112	-0.165	-0.156	0.345	1.00					
$\text{NO}_3\text{-N}$	-0.334	-0.067	-0.073	0.397	0.239	1.00				
总氮	-0.189	0.238	-0.009	0.589	0.329	0.459	1.00			
总磷	0.709 *	0.199	0.166	0.345	0.237	0.165	0.075	1.00		
温度	0.571 *	-0.235	0.727 *	0.189	0.178	0.231	0.278	0.495	1.00	
COD_{Mn}	0.321	0.234	0.009	0.156	0.109	0.308	0.390	0.298	-0.099	1.00

* 表示显著相关($P<0.01$)

pH 和水温具有显著相关关系,回归方程为
$$\text{pH} = 2.10 \times 10^{-4} T^3 - 3.337 \times 10^{-3} T^2 + 1.985 \times 10^{-2} T + 6.994 \quad (R=0.749).$$

适宜的水温适合藻类的生长,而藻类的光合作用过程能够改变水体 pH,因而 pH 和水温通过藻类具有间接性相关作用.在此,将 pH 考虑为受变因子,其变化受藻类生长影响,而非藻类生长的影响因子.

综合考虑主要相关因子,将测试结果用自然对数法进行标准化($\ln(x+1)$).在非营养盐外源控制条件下,鱼腥藻浓度与鱼腥藻的藻类预测模型为

$$\ln(n_{\text{ACD}}+1) = 1.33 \ln(T+1) + 6.78 \ln(\rho_{\text{P}}+1) - 3.33 \quad (R=0.787).$$

其中: n_{ACD} 为鱼腥藻细胞数密度, T 为温度, ρ_{P} 为

总磷质量浓度.

由于鱼腥藻爆发周期较短,且浓度较低,当地又无鱼腥藻爆发历史数据,因而,针对预测模型的检验,仅在微宇宙环境做了 8 次.预测结果见如图 1.

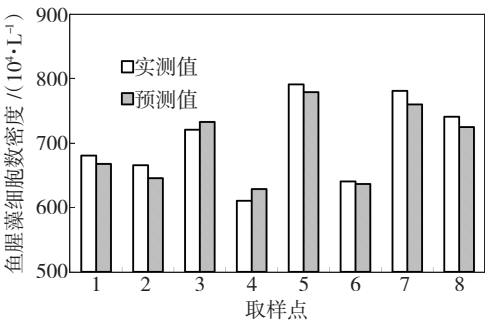


图 1 微宇宙环境鱼腥藻细胞密度实测值与预测值比较

由图 1 可知,预测模型能够较准确地预测出鱼腥藻浓度的变化,鱼腥藻浓度预测峰值与实测值相符.然而,由于模型的预测结果仅在微宇宙环境下进行检验,鱼腥藻浓度范围较稳定,因而预测结果理想.在实际水体的预测中,鱼腥藻的浓度会由于水体环境的变化而出现波动,尤其会出现高低浓度的突变,需进一步检验模型的准确性,并引

入修正因子,对模型进行修正^[8].

2.2 微囊藻生长与理化因子回归统计研究

大沙河水库于 2004 年和 2005 年两次出现微囊藻爆发,导致水厂需增加混凝剂投量方能满足耗氧量去除要求.本研究中,微宇宙环境下的微囊藻生长稳定,对微囊藻生物量与微宇宙环境理化因子作相关分析,结果见表 2.

表 2 微囊藻生物量与微宇宙环境理化因子线性相关矩阵

相关因子	ACM	DO	pH	NH ₃ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	总氮	总磷	温度	COD _{Mn}
ACM	1.00									
DO	0.098	1.00								
pH	0.882 *	0.103	1.00							
NH ₃ -N	0.299	-0.312	-0.269	1.00						
NO ₂ -N	0.012	-0.263	-0.058	0.212	1.00					
NO ₃ -N	0.256	-0.212	0.134	0.233	0.154	1.00				
总氮	-0.222	0.112	-0.123	0.334	0.226	0.215	1.00			
总磷	0.821 *	0.234	0.349	0.333	0.234	0.227	0.156	1.00		
温度	0.678 *	0.131	0.411	0.239	0.256	0.003	0.321	0.552	1.00	
COD _{Mn}	0.545 *	0.237	0.125	0.223	0.216	0.237	0.114	0.324	-0.002	1.00

* 表示显著相关($P < 0.01$)

本研究中的微宇宙环境理化因子中与微囊藻生物量具有显著关系的因子包括总磷、水温、pH 和 COD_{Mn}.如上所述,COD_{Mn}和 pH,均是由于藻细胞浓度的变化而引起其发生的变化,均为受变因子,而非藻类生长的诱变因子,因而同样在预测模型中未纳入变量.

综合考虑主要相关因子水温和总磷,将测试结果用自然对数法进行标准化($\ln(x+1)$).在非营养盐外源控制条件下,微囊藻生物量预测方程如下:

$$\ln(n_{ACM}+1)=2.13\ln(T+1)+5.94\ln(T_p+1)-2.98\quad(R=0.912).$$

微囊藻生物量预测方程能够预测微宇宙环境下微囊藻的生长态势和峰值(见图 2).微囊藻生物量的预测方程在实践应用中,可进一步考察水库水动力学特征,建立综合因子预测方程,从而能够满足不同条件下的预测要求.

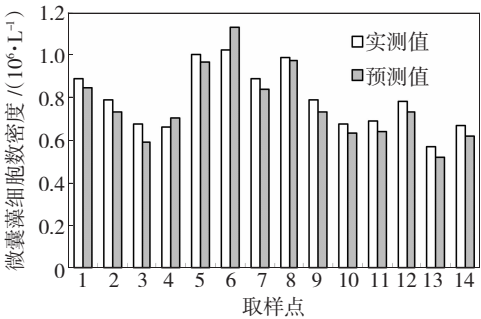


图 2 微宇宙环境微囊藻细胞密度实测值与预测值比较

2.3 中营养水体藻生长与理化因子回归统计研究

大沙河水库常年处于中营养状态,通过建立中营养水体的藻生长与环境因子的线性相关矩阵,可监测水体中与藻类生长密切相关的理化因子的变化,并建立相关预测方程,了解水体藻类含量及营养状态,调整水处理工艺参数,为可能爆发的藻类污染做好技术储备,并为大沙河水库水源管理提供参考.

本研究期间,用于微宇宙环境模拟研究的中营养水库水藻类数密度平均为 $220 \times 10^4 \sim 385 \times 10^4$ L. 由表 3 可知,本研究中的微宇宙环境理化因子中与藻细胞生物量具有显著关系的因子包括总磷和水温.与前面提到的微囊藻和鱼腥藻不同,pH 和耗氧量等理化因子与藻细胞并无明显相关关系.这是因为中营养状态下水体藻细胞生长态势稳定,藻细胞光合作用不强烈,对水环境 pH 值变化贡献较小.而耗氧量的增加则与藻细胞释放和死亡相关,该水体的藻细胞生长未对耗氧量的变化构成影响^[9-10].

中营养水体内,亚硝氮的含量与溶解氧显著相关,这是因为溶解氧含量对硝化进程具有显著影响.而硝氮含量对水体中总氮贡献最大,因而其与总氮的相关性显著.

综合考虑主要相关因子水温和总磷,在非营养盐外源控制条件下,中营养水体藻细胞生物量

预测方程如下:

$$\ln(n_{AC} + 1) = 1.88 \ln(T + 1) + 4.53 \ln(\rho_p + 1) + 0.43 \quad (R = 0.855).$$

在中营养状态的水体藻细胞浓度预测中,该预

测方程能够较准确反映水体营养状态变化(见图 3). 由于中营养状态下水库水文条件相似,在预测方程中可作为常数拟合,因而,水库水文对中营养状态水体中藻细胞量预测影响较小.

表 3 藻细胞生物量与微宇宙环境理化因子线性相关矩阵

相关因子	AC	DO	pH	NH ₃ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	总氮	总磷	温度	COD _{Mn}
AC	1.00									
DO	0.085	1.00								
pH	0.239	0.334	1.00							
NH ₃ -N	-0.089	-0.237	-0.331	1.00						
NO ₂ -N	0.181	-0.539 *	-0.088	0.324	1.00					
NO ₃ -N	-0.201	-0.348	-0.078	0.398	0.221	1.00				
总氮	-0.121	-0.053	0.139	0.425	0.455	0.587 *	1.00			
总磷	0.509 *	0.022	0.153	0.309	0.411	0.304	0.322	1.00		
温度	0.449 *	-0.128	0.039	0.332	0.138	0.342	0.398	0.347	1.00	
COD _{Mn}	0.145	0.323	0.689 *	0.097	0.229	0.118	0.545 *	0.383	0.177	1.00

* 表示显著相关($P < 0.01$)

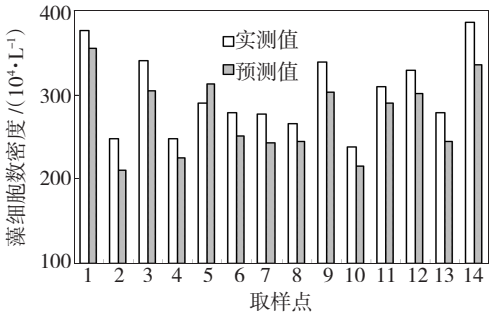


图 3 微宇宙环境藻细胞密度实测值与预测值比较

3 结 论

- 1)在对以鱼腥藻、微囊藻和中营养状态的水库水的研究中发现,总磷和水温是影响藻类生长显著因子;
- 2)通过总磷和水温建立起的相关预测方程,能够预测水体内藻及优势藻细胞浓度变化.而预测方程在实践中能够指导保护水源,根据藻类生长态势控制磷营养盐的输入.

参考文献:

[1] HALLEGEFF G M. A review of harmful algal bloom and their apparent global increase [J]. *Phycologia*, 1993, 32(2):79-99.

[2] CLARK S, SMITH D W. Cyanobacteria Toxins and the current state of knowledge on water treatment options: A review[J]. *J Environ Eng Sci*, 2004(3):155-185.

[3] HENDERSON R, PARSONS S A, JEFFERSON B. The

impact of algal properties and pre-oxidation on solid-liquid separation of algae [J]. *Water Res*, 2008, 42: 1827-1845.

[4] 王凌云. 景观水体富营养化过程的微宇宙模拟及其修复研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学. 2006.

[5] TAUB F B. Standardized aquatic microcosms[J]. *Environ Sci Technol*,1989, 23(9):1064-1066.

[6] WEBBER E C, DEUTSCH W G, BAYNE D R, *et al.* Ecosystem-level testing of a synthetic pyrethroid insecticide in aquatic mesocosms[J]. *Environ Toxicol Chem*, 1992,11(1):87-105.

[7] MCKEE D, ATKINSON D, COLLINGS S E. Response of freshwater microcosm communities to nutrients, fish, and elevated temperature during winter and summer[J]. *Limnol Oceanogr*, 2003, 48(2): 707-722.

[8] LIEBIG M, SCHMIDT G, BONTJE D. Direct and indirect effects of pollutants on algae and algalivorous ciliates in an aquatic indoor microcosm[J]. *Aquatic Toxicology*, 2008, 88:102-110.

[9] RIBEIRO R, TORGO L. A comparative study on predicting algae blooms in Douro River, Portugal[J]. *Ecological Modelling*, 2008, 212:86-91.

[10] BEARON R N, GRUNBAUM D. From individual behaviour to population models: A case study using swimming algae[J]. *J Theoretical Biology*, 2008, 251(4): 679-697.

(编辑 杨 波)