

· 环境预警 ·

doi:10.3969/j.issn.1674-6732.2011.04.001

洋河水库蓝藻水华爆发预测影响因子研究

丁薇¹, 揣小明¹, 钱新¹, 胡志新¹, 储昭升², 杨柳燕¹

(1. 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京大学环境学院, 江苏 南京 210046; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要:为了预测洋河水库富营养化变化趋势和蓝藻水华爆发的风险,对洋河水库水体进行采样,分析其环境质量。研究表明,近年来洋河水库叶绿素 a 含量处于高位,氮、磷含量不断上升,特别是总氮质量浓度在 5 mg/L 左右,主要以硝态氮的形式存在,富营养化程度不断加剧,具有大规模爆发蓝藻水华的风险。对洋河水库藻华爆发的环境条件进行分析,提出了蓝藻水华爆发的主要水质参数和关键的水文、气象要素,研究表明洋河水库近期爆发鱼腥藻水华的可能性较低,爆发微囊藻水华的可能性依然存在。通过对洋河水库藻华爆发风险进行预测,可以为减轻藻华爆发所引发的生态灾害提供技术支持。

关键词:洋河水库;总氮;总磷;富营养化;藻华预测

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

文章编号:1674-6732(2011)-04-0001-05

Study of Impact Factor of Forecasting Algal Bloom in Yanghe Reservoir

DING Wei¹, CHUAI Xiao-ming¹, QIAN Xin¹, HU Zhi-xin¹, CHU Zhao-sheng², YANG Liu-yan¹

(1. State Key Laboratory of Pollution Control & Resource Reuse, School of Environmental Science, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210046, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China)

ABSTRACT: To forecast the trends of eutrophication and the risk of algal bloom in Yanghe Reservoir, analyzed the environmental quality in this water system. The results showed that the content of Chla was high recently, and the concentrations of phosphorus and nitrogen increased continuously. Especially, The concentration of total nitrogen was around 5 mg/L, and the main existence form was nitrate-nitrogen. All these indicated that eutrophication became worse and the risk of algal bloom was high in Yanghe Reservoir. In addition, the analysis of the environmental conditions of algal bloom proposed important indicators for algal bloom as water quality, hydrological, and meteorological conditions. Based on these parameters, the possibility of *Microcystis* bloom existed and that of *Anabaena* bloom is low. The forecasting provided technical methods for reducing the ecological disaster caused by outbreaks of algal bloom.

KEY WORDS: Yanghe Reservoir; total nitrogen; total phosphorus; eutrophication; algae bloom forecast

洋河水库位于秦皇岛市抚宁县境内,1962年建成并投入使用,平均来水 1.8 亿 m³,面积 14 km²,集水面积 755 km²,总库容为 3.86 亿 m³,平均水深 5.7 m,是秦皇岛市及北戴河地区的重要饮用水源地。洋河水库表层底泥厚度 0.1~1.75 m,底泥蓄积总量 6.27×10⁶ m³,底泥分布面积约 7.89 km²,占水库水面面积的 60.69%^[1]。自 20 世纪 80 年代以来,洋河水库富营养化现象日趋严重,水华爆发严重影响了水库的生态环境并直接影响到饮用水安全。2007 年夏季,洋河水库发生以鱼腥藻(*Anabaena*)和微囊藻(*Microcystis*)为优势种的水华,产生有毒有害物

质异味土嗅素(Geosmin)和微囊藻毒素(MCRR),螺旋鱼腥藻产生的土嗅素质量浓度最高达 7 100 ng/L,85%~97%的土嗅素存在于细胞内;微囊藻毒素质量浓度最高达 100 μg/L,主要也存在于细胞内^[2]。蓝藻水华爆发可能对人体健康构成潜在危害^[3]。本

收稿日期:2011-03-17;修订日期:2011-04-19

基金项目:环保公益性行业科研专项项目(200809145)。

作者简介:丁薇(1985—),女,硕士,从事湖泊富营养化方面的研究。

研究在对洋河水库水环境进行调查的基础上,结合洋河水库富营养化发展历程,分析影响蓝藻水华爆发的因素,提出与洋河水库蓝藻水华爆发相关的预测指标,为应对洋河水库蓝藻水华爆发可能对饮用水安全产生的威胁提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 样品采集

在洋河水库选取北库心(Y1)、西洋河口(Y2)、东洋河口入口(Y3)、库中心(Y4)、坝前出口(Y5)、取水口(Y6)6个采样点(图1),分别在2010年9月11—13日进行连续采样3次。每个采样点分别采集表层50 cm水样和沉积物上覆水50 cm水样,采水样量为500 mL,带回实验室低温保存,同时对有关水质参数进行现场测定。

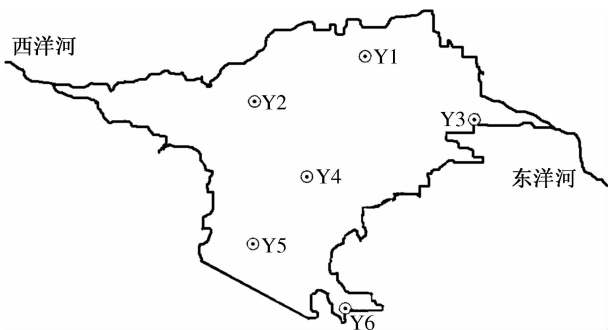


图1 洋河水库采样监测位点

1.2 分析方法

利用YSI多参数水质分析仪对洋河水库水质参数进行现场测定,测定的参数包括温度、pH、溶解氧(DO)、盐度和浊度。叶绿素a(Chla)、总氮(TN)、总磷(TP)的监测分析按照文献[4]、[5]进行。采用丙酮萃取分光光度法测定Chla;采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定TN;采用钼酸铵分光光度法测定TP;对水样进行过滤后,采用钼酸铵分光光度法直接测定上清液中磷酸根为溶解性总磷(TDP);采用纳氏试剂分光光度法测定氨氮(NH₃-N);采用紫外分光光度法测定硝氮(NO₃-N);采用N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定亚硝氮(NO₂-N)。

2 结果与讨论

2.1 洋河水库水体理化性质

洋河水库水体的水质参数如表1所示。洋河

水库各采样位点下层水体的温度、pH、DO都低于上层水体。盐度分层不明显,基本维持在0.20%左右。上层水体的浊度小于下层水体,主要是由于下层水体接近水-沉积物界面,风浪扰动作用使得下层水体的浊度较高。各采样位点Chla浓度差异较大,其中取水口(Y6)位点处表层水体Chla质量浓度最高,达到7.070 μg/L,而北库心(Y1)、西洋河口(Y2)位点处表层水体Chla质量浓度较低,分别为4.425 μg/L和5.250 μg/L。西洋河口(Y2)和东洋河口入口(Y3)处上下层水体Chla浓度差异较大,其余各位点上下层水体的Chla浓度差异不明显(图2)。藻类的光合作用会消耗二氧化碳,使得水体pH值升高,同时产生氧气,增加水体DO的含量,因此,坝前出口(Y5)的pH值与Chla浓度均较高,DO含量也比其他位点略高。

表1 洋河水库水环境质量参数

位点	温度/°C	pH	ρ(DO)/(mg·L ⁻¹)	盐度/×10 ⁻³ %	浊度/NTU	
Y1	上层	25.67	8.67	9.47	0.19	1.6
	下层	22.99	8.13	4.10	0.21	2.9
Y2	上层	25.08	8.91	9.71	0.19	2.3
	下层	23.41	8.18	4.84	0.22	4.6
Y3	上层	23.79	8.85	9.68	0.19	3.5
	下层	23.58	8.29	5.77	0	4.3
Y4	上层	24.62	8.90	10.10	0.19	1.6
	下层	23.61	8.63	8.71	0.19	4.8
Y5	上层	25.38	8.78	9.88	0.19	5.0
	下层	23.76	8.03	6.50	0.20	9.1
Y6	上层	24.90	8.85	10.42	0.19	4.8
	下层	23.63	8.04	5.45	0.21	6.8

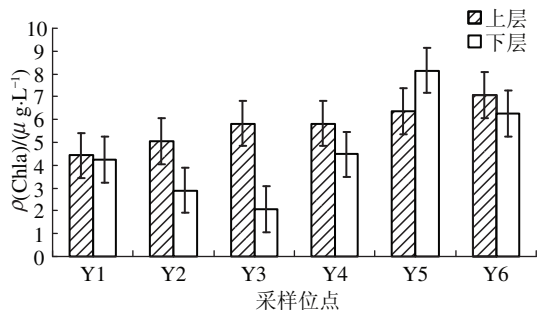


图2 洋河水库水体Chla质量浓度

2.2 洋河水库水体氮磷营养盐浓度和变化趋势

洋河水库水体TN和各种形态氮的质量浓度如图3所示。各采样位点水体TN质量浓度差异不显著,均在5 mg/L左右。在北库心(Y1)、西洋

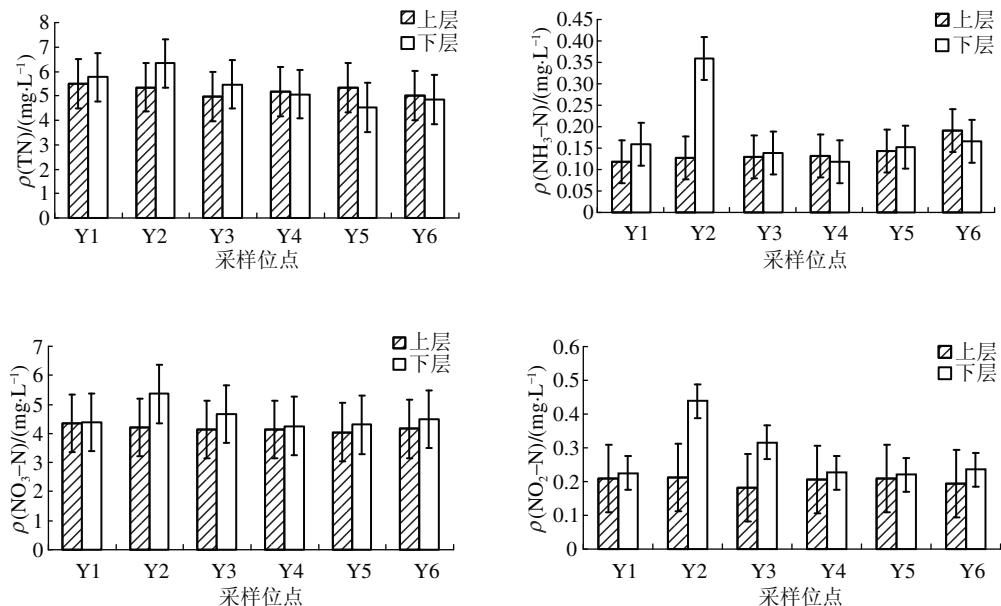


图3 洋河水库水体不同形态氮质量浓度空间差异

河口(Y2)和东洋河口入口(Y3)处,下层水体的 TN 浓度高于表层水体;库中心(Y4)、坝前出口(Y5)、取水口(Y6)位点处,表层水体的 TN 浓度高于下层水体。TN 浓度在洋河水库上下层水体中差异不大,并主要以 $NO_3^- - N$ 的形式存在, $NH_3 - N$ 和 $NO_2^- - N$ 浓度较低。尽管水体中的无机氮和有机氮之间以及无机氮各形态之间存在着相互转化关系,但 $NH_3 - N$ 和 $NO_3^- - N$ 是无机氮存在的主要形态,也是水体中非固氮藻类可直接利用的两种最主要的无机氮^[6]。在富营养化严重的洋河水库中,大型水生植物基本消失,而大型水生植物易吸收利用 $NO_3^- - N$ ^[7],这可能是水体中 $NO_3^- - N$ 含量高的原因之一。另外,水体中的部分 $NO_3^- - N$ 可以通过硝化细菌氧化 $NH_3 - N$ 或者 $NO_2^- - N$ 得到。9 月份温度相对较高,洋河水库水体中的硝化作用强烈, $NH_3 - N$ 被氧化为 $NO_3^- - N$,所以水体中 $NO_3^- - N$ 含量很高。

洋河水库水体中 TP 的空间变化和分层情况如图 4 所示。各采样位点的 TP 浓度差异显著,其

中北库心(Y1)、库中心(Y4)的 TP 浓度较低,北库心(Y1)下层水体 TP 质量浓度最低为 0.012 mg/L。由于库心受水库周边环境的影响较小,所以 TP 浓度较低。而西洋河口(Y2)、东洋河口入口(Y3)、坝前出口(Y5)、取水口(Y6)的 TP 浓度较高,主要是由于洋河水库上游有东、西洋河二条入库河流,西洋河和东洋河地表径流是水库的主要污染源。其中坝前出口(Y5)表层水体的 TP 质量浓度最高,达到 0.023 mg/L。库区各个采样位点表层和底层水体的 TP 浓度差异不大,TDP 浓度较低,TP 主要以颗粒磷形式存在。在西洋河口(Y2)、东洋河口入口(Y3)、库中心(Y4)处,下层水体的 TP 浓度高于表层水体,北库心(Y1)、坝前出口(Y5)、取水口(Y6)位点处表层水体的 TP 浓度高于下层水体,这同 Chla 在洋河水库的空间分布特点相一致,表明藻类中磷占水体 TP 的比例较大,藻类的空间分布影响水体 TP 和 TDP 的空间差异性。

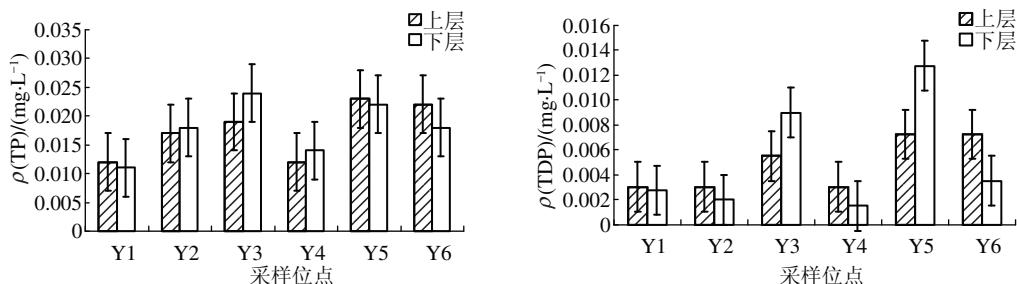


图4 洋河水库水体 TP 和 TDP 质量浓度空间差异

2.3 洋河水库水体富营养化状态评价

根据地表水环境质量和水体富营养化评价指标体系, 洋河水库水体水质为劣 V 类, 处于藻浊型富营养化状态。由洋河水库近年来的氮磷营养盐含量的年际变化趋势可知(表 2), 水库富营养化日益严重, 已经从 20 世纪 90 年代的中度营养化发展到重度营养化^[8], 导致 2009 年 Chla 平均质量浓度达到 17.2 $\mu\text{g/L}$ 。2010 年 9 月, 各采样位点水体 TN 质量浓度达 5 mg/L 左右, 表层水体 TP 质量浓度最高达 0.023 mg/L, 与水体富营养的标准值($\rho(\text{TN})$ 为 1.0 mg/L, $\rho(\text{TP})$ 为 0.025 mg/L) 比较, 表明洋河水库氮污染较严重, TP 接近富营养化标准值, 处于蓝藻水华爆发的风险之中。

表 2 洋河水库水体 TN、TP 平均质量浓度年际变化

年份	$\rho(\text{TN})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
1990—1991	0.61	0.025
1999—2000	1.50	0.049
2008	2.00	0.030
2009	3.93	0.058

2.4 洋河水库水体富营养化原因分析

洋河水库富营养化及藻华的大面积爆发, 导致水质性缺水日趋严重。由于人类活动的影响, 营养盐的大量输入是水库富营养化的主要驱动因子。此外, 湖泊水库氮磷营养盐的内源释放也是不能忽略的因素。研究显示, 在外源污染得到控制的情况下, 水体藻华依然频频爆发^[9]。在夏季, 洋河水库水体在坝前深水区存在跃温层, 跃温层下的水体的 DO 含量较低, 有利于磷的释放^[10]。磷通常是湖泊富营养化的关键因素之一, 湖泊沉积物释放的磷进入水体中将导致水华爆发^[11]。氮磷比值表明, 磷是洋河水库初级生产力的限制因子, 洋河水库的营养状态是磷控制型的。东洋河、西洋河的地表径流和西洋河上游淀粉废水的直接排放等是洋河水库氮磷营养盐的主要来源^[12]。

3 洋河水库蓝藻水华爆发预测

各种环境条件如洋河水库的地形、营养盐浓度、温度等决定水库浮游植物的种类和数量, 浮游植物反过来影响营养盐、DO 的浓度和它们的时空分布。根据浮游植物不同生理生化和生态学特点, 可以预测蓝藻水华爆发的种类和强度。同时, 鱼类结构组成也影响浮游植物的种类, 鲢、鳙鱼数

量下降, 也会导致蓝藻水华大爆发^[13]。

3.1 洋河水库温度与蓝藻水华爆发

2007 年导致洋河水库产生异味的物质是土嗅素, 主要由优势种鱼腥藻分泌产生。鱼腥藻生长的最适温度为 22~26 $^{\circ}\text{C}$, 微囊藻生长的最适温度在 28 $^{\circ}\text{C}$ 左右^[14], 因此在春夏交替或春秋交替时容易爆发鱼腥藻水华, 而温度高的夏季容易爆发微囊藻水华。

3.2 洋河水库氮浓度与蓝藻水华爆发

鱼腥藻具有固氮能力, 在氮浓度较低的水体中容易成为优势种群, 适合其生长的水体 TN 质量浓度在 2 mg/L 左右, TP 质量浓度在 0.04~0.08 mg/L。因此, 2007 年由于洋河水库 TN 浓度较低, 导致鱼腥藻水华爆发。而微囊藻适合在 TN 质量浓度大于 2.5 mg/L, TP 质量浓度为 0.195 mg/L 左右的水体中生长^[14], 微囊藻不具有固氮能力, 在氮浓度高的水体中容易形成微囊藻水华。2008 年以来, 洋河水库水体中 TN 质量浓度不断上升, 从 2008 年的 2.00 mg/L 上升到 2009 年的 3.93 mg/L (表 2), 同时呈现夏季浓度高, 冬春季浓度低的特点。2010 年 9 月 TN 质量浓度在 5 mg/L 左右, 与此同时, 洋河水库中微囊藻成为优势种群, 鱼腥藻种群数量呈下降趋势。洋河水库爆发鱼腥藻水华的可能性小, 爆发微囊藻水华的可能性增大。因此, 在预测洋河水库蓝藻水华爆发过程中, 水体中磷浓度是决定蓝藻 Chla 浓度的决定因素, 而氮浓度常常决定优势蓝藻的种类。

3.3 洋河水库气候、气象条件与蓝藻水华爆发

近期洋河水库来水量下降, 水库水力停留时间延长, 同时夏季水温上升, 为藻华爆发提供了有利条件。爆发蓝藻水华的气象条件为暴雨, 暴雨发生时, 水体中衰老的藻类被去除, 优势的蓝藻具备同步生长的基础; 同时暴雨造成的径流带来大量的氮磷营养盐, 有利于藻类爆发式生长。洋河水库 7—8 月的主导风向为西南风和南风, 如果夏季较长时间风速在 3 m/s 以下, 光照充足, 那么 4~5 d 后就容易爆发蓝藻水华, 这时藻华高密度区域常常位于西洋河口附近。而在初秋季节, 洋河水库地区以北风和西北风为主, 蓝藻水华高密度区域常常位于洋河水库的取水口附近。

3.4 洋河水库温跃层与蓝藻水华爆发

洋河水库夏季产生温跃层^[13], 下层水体有机

物的厌氧分解导致水生态系统食物链恶化,营养盐滞留时间延长,营养盐浓度增加。洋河水库在坝前形成温跃层,导致下层水体中DO浓度下降,有利于沉积物厌氧放磷。藻类通过垂直迁移,能主动吸收大量的从沉积物中释放的磷,形成蓝藻水华爆发式增长。由于温跃层的存在,暴雨径流进入洋河水库后形成表层流,带入的大量氮磷停留在洋河水库表层水体中,为藻类提供大量营养,因此,暴雨后常常会出现蓝藻水华的爆发。

3.5 洋河水库蓝藻水华爆发预测模型

为了有效预测洋河水库水环境变化趋势和藻华爆发的可能性,在洋河水库设立在线自动监测系统,监测水体的水质参数,同时根据预报的气象变化趋势,对蓝藻水华爆发进行预测,然后利用卫星遥感结果进行实时修正,从而实现对洋河水库的蓝藻水华爆发的监测预警。目前中国对于蓝藻水华监测预警还处在初级阶段,对水源地蓝藻的预测建立在水质监控的基础上,卫星遥感技术和水质自动监测技术的发展应用能为水质监测提供实时数据。近年来研究人员做了大量关于水体藻类变化预测模型的研究,如三维水动力—水质—浮游植物耦合模型和人工神经网络模型等^[15,16],这些模型可以预测水库水质的变化趋势,为水库富营养化和蓝藻水华的控制提供决策依据。蓝藻水华的形成机理复杂,简单水质监测不能满足对于蓝藻水华预测的需求,因此,针对洋河水库水质的管理需求,构建蓝藻(鱼腥藻与微囊藻)爆发模型,在了解水体蓝藻水华爆发的季节性规律的基础上,对洋河水库水华藻类的变化趋势采用ELCOM-CAEDYM进行定量或者半定量预测,为管理者提供迅速的、可视化的藻华爆发预测平台,从而为管理决策提供依据。

总之,洋河水库水环境还处于十分严重的富营养化状态,近年TN浓度不断上升,洋河水库近期爆发鱼腥藻水华的可能性较低,爆发微囊藻水华的可能性依然存在。因此,应加强对洋河水库水环境质量的检测,并对藻华的爆发进行预测,为更好地利用洋河水库水资源提供技术支持。

[参考文献]

[1] 蔡金榜,李文奇,刘娜,等. 洋河水库底泥污染特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 886-893.

- [2] LI Z L, YU J W, YANG M, et al. Cyanobacterial population and harmful metabolites dynamics during a bloom in Yanghe Reservoir, North China[J]. Harmful Algae, 2010(9): 481-488.
- [3] CODD G A, BELL S G, KAYA K, et al. Cyanobacterial toxins, exposure routes and Human health[J]. European Journal of Phycology, 1999, 34: 405-415.
- [4] 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 [M]. 3版. 北京: 中国环境科学出版社, 1997: 446-457.
- [5] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范 [M]. 2版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 211-230.
- [6] HERBERT R A. Nitrogen cycling in coastal marine ecosystems [J]. FEMS Microbiology Reviews, 1999, 23: 563-590.
- [7] 曾巾, 杨柳燕, 肖琳, 等. 湖泊氮素生物地球化学循环及微生物的作用[J]. 湖泊科学, 2007, 19(4): 382-389.
- [8] 李文奇, 蔡金榜, 逢勇, 等. 洋河水库富营养化评价及防治对策[J]. 水资源保护, 2007, 23(2): 16-19.
- [9] BOSTROM B, AHLGRER I, BELL R. Internal nutrient loading in a eutrophic lake, reflected in seasonal variations of some sediment parameters [J]. Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie, 1985, 22: 3335-3339.
- [10] 李文奇, 刘娜, 周怀东, 等. 洋河水库底泥磷的释放规律研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(2): 104-108.
- [11] MURPHY T, LAWSON A, KUMAGAI M, et al. Release of phosphorus from sediments in Lake Biwa [J]. Limnology, 2001(2): 119-128.
- [12] 戴礼, 李凤彬. 洋河水库富营养化污染负荷分析及治理对策[J]. 水科学与工程学报, 2004(6): 39-40.
- [13] 高天珩, 钱新, 储昭升, 等. 气候、水文和生态过程对洋河水库富营养化影响研究[J]. 水生态学杂志, 2010, 3(3): 27-31.
- [14] 吴和岩, 苏瑾, 施玮. 铜绿微囊藻的生长及产毒条件研究[J]. 环境与健康, 2006, 23(4): 304-307.
- [15] ROBSON B J, HAMILTON D P. Three-dimensional modeling of a *Microcystis* bloom event in the Swan River estuary, Western Australia [J]. Ecological Modelling, 2004, 174: 203-222.
- [16] JOSEPH H W L, YAN H, MIKE D, et al. Neural network modelling of coastal algal blooms [J]. Ecological Modelling, 2003, 159: 179-201.