

福建省山仔水库富营养化特征

周亮进^{1,2}, 由文辉¹

(1. 华东师范大学资源与环境科学学院, 上海 200062; 2. 福州市环境科学研究所, 福建 福州 350011)

摘要:通过水质主要指标的时空变化以及气象、水文条件等因素, 研究山仔水库富营养化特征。研究表明, 山仔水库 1997~2005 年年平均质量浓度总氮为 0.59~2.89 mg/L, 总磷为 0.035~0.063 mg/L, 总氮、总磷从 1997 年开始呈现下降趋势, 2001 年后又有所回升, 水库的进口、支流入口的总磷、总氮、COD、藻类数量相对较高。在 1 年内藻类种群冬、春季以硅藻为主, 其余季节以蓝藻为主, 水花微囊藻为优势种群持续的时间最长, 每年的春末、秋初有 2 个藻类生长的高峰期。枯水年份水库水体滞留时间长, 水力交换能力差, 是导致 2000~2004 年水库水华频繁暴发的主要原因。

关键词:富营养化; 浮游植物; 水华; 山仔水库

中图分类号: X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-6933(2008)02-0026-04

Eutrophication characteristics of Shanzi Reservoir in Fujian province

ZHOU Liang-jin^{1,2}, YOU Wen-hui¹

(1. School of Resources and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Fuzhou Institute of Environmental Science, Fuzhou 350011, China)

Abstract: The characteristics of eutrophication in Shanzi Reservoir were studied through the spatial and temporal variation of water quality indices and meteorological and hydrological conditions. The average concentrations of total nitrogen and total phosphorus in Shanzi Reservoir from 1997 to 2005 were, respectively, 0.59~2.89 mg/L and 0.035~0.063 mg/L. These concentrations declined from 1997 to 2000, then rose slowly from 2001 onward. The concentrations of total nitrogen and total phosphorus, COD and algae were higher in some areas of Shanzi Reservoir, like inlets of the reservoir and input areas of branches, than in others. The dominant species of phytoplankton changed from season to season, Bacillariophyta species in spring and winter and Cyanophyta species in other seasons. Microcystis flosaquae predominated for a longer time than others. There were two annual peaks for algal blooms, late spring and early autumn. The causes of frequent algal blooms from 2000 to 2004 were long retention time and low water transportation capacity in dry years.

Key words: eutrophication; phytoplankton; algal bloom; Shanzi Reservoir

湖泊、水库水体流动缓慢, 氮、磷营养物质不断聚积, 给藻类提供了大量养料, 在适宜的气候条件下, 水体中的藻类容易迅速生长, 使得水体浊度增大, 透明度降低, 导致“水华”的暴发。我国云南的滇池、安徽的巢湖、天津的于桥水库、长江流域大型水库等均发生富营养化现象^[1-4]。山仔水库从 2000 年开始在库湾水浅、流缓的七里、小沧、日溪等处出现蓝藻“水华”, 水库已出现富营养化现象^[5]。2001 年以后, 政府加大治理力度, 水库库区的网箱养殖、生

猪养殖场被取缔, 减少了直接进入水库的污染物质, 其后几年由于持续干旱, 每年水库均发生蓝藻“水华”暴发。由于水库富营养化不仅与氮、磷等营养物质水平, 而且与水文条件、气候条件等因素有关, 山仔水库富营养化的研究, 多集中在水质、叶绿素 a、环境因素等方面^[5-7], 但综合研究富营养化特征的文献尚不多见。本文通过研究山仔水库水质、浮游植物的时空动态及其气象、水文变化等, 分析山仔水库富营养化特征和“水华”暴发的成因。

作者简介: 周亮进(1965—), 男, 福建周宁人, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事城市生态学研究。E-mail: fzhkszj@163.com

1 研究区概况

山仔水库位于敖江流域福州市连江县境内,水库中心的坐标是北纬 26°17'51",东经 119°21'35"。该水库于 1994 年 11 月蓄水发电,水库调节库容 1.06 亿 m³,水面面积 6.639 km²,平均水深 25 m,坝头最深处约 50 m,上游集水面积 1 646 km²,多年平均径流量 18.57 亿 m³。流域年降水量在 1 000 ~ 1 800 mm 之间,土壤主要是花岗岩发育的红壤为主,植被群系属闽中的戴云山-鹭峰山常绿槭类照叶林小区,流域植被覆盖率 65 % 以上。

2 采样和分析方法

监测点位有水库进口(傍尾)、皇帝洞、七里、日溪、水库库心、水库坝前(图 1)。监测项目主要有水温、pH 值、DO、TN、TP、COD_{Mn}、NH₄-N 等。浮游植物调查包括种类和数量,采样月份为 2006 年 3 月至 11 月。以采集水库库心水样进行叶绿素 a 分析,时间为 2006 年 3 月至 11 月。

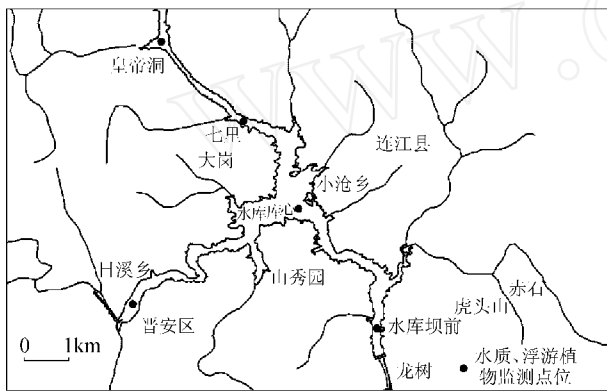


图 1 山仔水库水质和藻类调查布点

水质采样及分析方法依据《水和废水监测分析方法》^[8]。浮游藻类样品用福尔马林固定,沉淀浓缩后在光学显微镜下进行定量和定性的分析鉴定。叶绿素 a 的测定是取 2 500 mL 水样用 Whatman GF/C 微孔玻璃纤维滤膜(0.45 μm)抽滤,滤膜低温干燥后,用 90 % 丙酮低温萃取,离心后取上清液测定光密度,实验方法和计算按规范进行^[9]。

3 结果与分析

3.1 山仔水库水质的变化特征

根据福州市环境监测站对山仔水库 1997 ~ 2005 年常规监测统计数据,山仔水库水质除总磷、总氮外大部分指标可以达到地表水 Ⅲ 类水质标准,1997 ~ 2005 年总氮年平均质量浓度 0.59 ~ 2.89 mg/L,总磷质量浓度为 0.035 ~ 0.063 mg/L,超过地表水 Ⅲ 类水质标准。从多年水库总氮、总磷等指标看,山仔水库

总氮、总磷已达到富营养化的临界质量浓度(总磷 0.02 mg/L,总氮 0.2 mg/L)。1994 年山仔水库建库蓄水初期,水体中总氮、总磷浓度较高,随后逐步降低,到 2001 年达到一个低谷,2002 年以后总氮质量浓度基本维持在 0.5 ~ 1.0 mg/L,总磷质量浓度 0.038 ~ 0.063 mg/L,并且有上升趋势,见图 2。

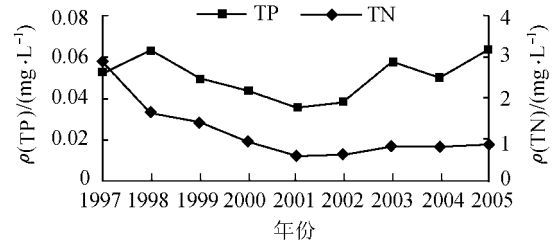
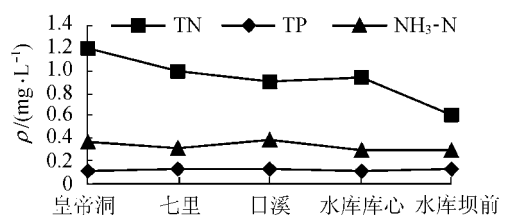


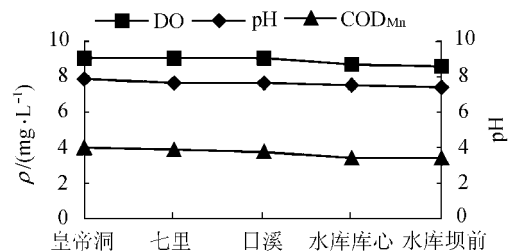
图 2 总磷、总氮的年际变化曲线

山仔水库建库蓄水初期的总磷、总氮浓度较高,是因为该水库功能原来以发电、灌溉等为主,蓄水前未彻底清库,造成大量的植被、腐殖质等有机质腐烂,消解后进入水体中,使得水库在蓄水初期水质氮磷浓度较高,在外源增加不明显,随着时间推移,水库中的污染物逐步通过水体交换而带出水库,总氮、总磷浓度逐年降低,到 2001 年, TN、TP 浓度达到低点。2002 年以后,山仔水库的总磷、总氮浓度又有增加的趋势,主要原因是 2002 年以后的几年连续出现枯水年份,造成入库水量减少,水位维持在低水位,水体交换能力差,致使外源性污染物在水库中累积的缘故。

山仔水库 2006 年全年逢单月的水质主要指标监测统计情况见图 3,它们存在比较明显的空间分布特征。山仔水库皇帝洞、七里、日溪等汇流口断面, TP、TN、NH₄-N、COD_{Mn} 等浓度均相对高于水库库心和水库坝前,说明支流携带的污染物是水库的主



(a) 总氮、总磷、氨氮质量浓度变化



(b) 溶解氧、酸碱度、化学需氧量质量浓度变化

图 3 水质指标空间变化趋势

要污染物来源。皇帝洞断面有一条支流汇入,该支流上游尚有一些养猪场,附近水域形状呈狭长,水位低,近年观察发现,其藻类数量较高,氨氮、总氮的浓度相对较大,如总氮质量浓度在 1.0~4.9 mg/L,氨氮质量浓度在 0.3~1.5 mg/L。

3.2 山仔水库浮游植物群落的特征

3.2.1 浮游植物种类结构的年份变化

根据 1996 年敖江流域水样调查,检出浮游植物种类共 127 种,分别属于 6 个门类,藻类种类组成最多的为绿藻门、硅藻门和蓝藻门,隐藻门、裸藻门其次,甲藻门为偶见种。据 2001 年山仔水库浮游藻类调查,共镜检出浮游植物 7 个门 29 属 47 种,优势种群主要是绿藻、硅藻和隐藻,其中以绿藻门的小球藻 (*Chlorella vulgaris*),隐藻门的尖尾蓝隐藻 (*Chroomonas acuta*)、齿蚀隐藻 (*Cryptomonas Erosa*),硅藻门的狭形颗粒直链藻 (*Melosira granulata var. angustissima*) 和尖针杆藻 (*Synedra acus*) 的种类相对占优势。2006 年 7 月从山仔水库各采样点共鉴定出浮游植物 5 个门 34 属 52 种,优势种群主要是硅藻、绿藻和蓝藻。总体上看,近几年来山仔水库的藻类种类呈现减少的趋势,多样性指数呈下降趋势,见表 1。

表 1 水库浮游藻类种类组成

取样时间	绿藻	硅藻门	蓝藻门	隐藻门	甲藻门	裸藻	金藻	总种数
1996-07	56	45	15	5	2	4		127
2001-02	14	21	3	3	4	1	1	47
2006-07	19	23	6	2	2			52

资料来源:福建省环境保护科学研究所,福州市二水源引水工程环境影响报告书,1997. 福州市环境科学研究所,敖江流域福州段水环境保护研究,2002.

3.2.2 浮游植物种类组成的年内变化

山仔水库库区浮游植物属于季节更替型,主要以蓝藻门、硅藻门和隐藻门为主。山仔水库的浮游植物 1 年内有 2 个高峰期,分别在每年的春末、秋初发生,优势种均为湖库富营养化的特征种蓝藻。年内藻类种群的演替规律也较为明显,冬、春季以硅藻为主,其余季节尤其是藻类暴发的季节以蓝藻为主,在 1 年内以水花微囊藻为优势种群的时间最长,见表 2。第 1 个藻类暴发的高峰期在 4 月,这时天气开始转暖,水体中营养盐丰富,特别适宜藻类的生长,由于藻类疯长消耗水体中的氮、磷,随后的数月藻类的数量维持在较低位置,水体中的氮、磷慢慢恢复到较高的水平时,到 9 月又出现一个藻类暴发的高峰期,这时的温度比较适宜蓝藻的生长。从浮游植物的优势种来看,3 月以硅藻门的藻类为主,4 月水样中出现蓝藻门固氮鱼腥藻 (*Anabaena azotica*) 优势种群,其数量高达 960.1 万个/L,从 5 月到 11 月,基本上以蓝藻门的水华微囊藻 (*Microcystis flos-aquae*) 为

优势种,仅在 6 月出现以隐藻门的齿蚀隐藻 (*Cryptomonas ovata*)、卵形隐藻 (*Cryptomonas erosa*) 优势种,12 月优势种变成硅藻门的颗粒直链藻 (*Melosira granulata*)。

表 2 2006 年山仔水库藻类优势种的年内变化

月份	藻类个体数/ (万个 L ⁻¹)	优势种	优势种个体数 百分比/%
3	6.9	硅藻门	75.4
4	960.1	固氮鱼腥藻	100.0
5	41.3	水花微囊藻	79.9
6	43.2	齿蚀隐藻	48.6
7	66.5	水花微囊藻	90.2
8	17.0	水花微囊藻	47.1
9	102.8	水花微囊藻	80.7
10	77.2	水花微囊藻	82.9
11	50.5	水花微囊藻	40.4
12	35.8	颗粒直链藻	86.9

从 2006 年藻类调查情况看,在支流入口处、水流比较缓慢的地方,藻类的数量较多,如 6 月支流入库口的日溪、七里,而水库库心、水库坝前藻类个体数量相对较少(表 3)。9 月藻类数量明显增大,如日溪、七里,水库库心、水库坝前藻类个体数量相对较少,但分布情况大体一致,说明山仔水库藻类数量的空间分布与水库的营养源分布和水文特征相一致。水库的支流汇流口如七里、日溪等地,由于上游携带的营养物质较充分,且水深一般较浅,底层流速大于表层,底层的泥沙中氮、磷容易受到底层紊流的影响而释放出来,增加水体中氮磷的浓度,而库心、水库坝前污染物经过净化、澄清后,其浓度相对较低。河流汇入口处既有营养物质,且水流缓慢,特别适宜藻类的生长,藻类数量相对较高,并且是水华较早出现的地方。

表 3 2006 年各断面浮游植物个体数量 万个/L

监测点位	月份	硅藻门	绿藻门	蓝藻门	隐藻门	甲藻门	总计
皇帝洞	6	1.90	1.30	3.00	2.40	2.10	10.70
	9	10.60	3.50	169.20	62.65	0.40	246.85
七里	6	6.30	0.50	15.00	12.00	1.20	35.00
	9	12.20	6.00	85.80	14.00	0.30	118.30
日溪	6	0.25	0.15	29.00	42.30	1.65	73.35
	9	0.65	0.30	30.00	84.00	3.00	117.70
水库库心	6	1.30	0.05	20.20	11.70	0.60	33.85
	9	7.70	5.80	83.00	6.00	0.30	102.80
水库坝前	6	3.60	0.00	13.27	8.07	0.17	25.10
	9	16.30	4.30	29.60	6.00	0.10	56.30

3.2.3 叶绿素特征

叶绿素 a 质量浓度是反映富营养化的一项重要指标。研究发现,山仔水库中的叶绿素 a 质量浓度具有明显的季节变化特征,见图 4。2006 年山仔水库的叶绿素 a 质量浓度在 4~9 月比较高,3 月、10 月、11 月的叶绿素 a 质量浓度则明显较低,其范围

为 $1 \sim 4 \text{ mg/m}^3$ 。山仔水库叶绿素 a 的质量浓度在春末(4月)、秋初(9月)出现峰值,分别为 211 mg/m^3 和 93 mg/m^3 。这与实际水面观测“水华”出现的情况比较相符的。近年来,山仔水库一般在夏秋两季出现比较明显的“水华”现象,主要原因是夏秋季日照强,水温高,营养物质循环加快,可溶性氮、磷含量增高,促进蓝藻的大量生长繁殖。

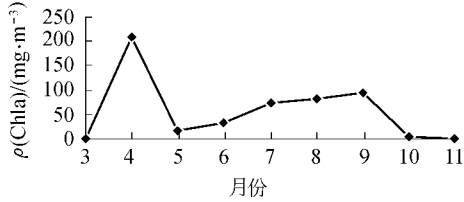


图4 2006年山仔水库叶绿素 a 质量浓度变化

3.3 气温、水文变化对山仔水库富营养化的影响

2000年以来,福州市政府加强对第二水源的保护,采取强制搬迁取缔水库周边的养猪场,陆续投入3000多万元,修建污水处理设施、水库沿岸隔离带等工程。但是要恢复水库正常的生态系统,抑制藻类的疯长,还需要一个较长的过程,特别是藻类的生长不仅与营养盐有关,还与水文、气象因素有关。气象因素如气温对藻类的暴发影响较大,主要体现在影响藻类生长的季节性变化,如每年的春末、秋初,气温较高,易形成第2个藻类暴发高峰。

水文因素对藻类生长主要表现在年际的水量变化。根据山仔水库管理处的水文资料,从1997年以后,山仔水库的进水量逐年降低,从1997年的22.21亿 m^3 到2004年达到7.8亿 m^3 (图5)。在2000年前山仔水库水体滞留时间在2周左右,2000年以后水体滞留时间在3周或1个月以上,而2000~2004年,由于径流量少,特别是2003年、2004年属特枯年份,滞留时间最长,水库常年维持在较低的水位,水力交换能力差。虽然2000年后福州市政府采取了措施加强山仔水库的周边污染源控制,但是由于恰逢枯水年份,降雨少,气候炎热,导致藻类一直维持在较高的水平。2000年首次山仔水库发现蓝藻“水华”,随后几年陆续发现这种现象,这些都说明山仔水库水体滞留时间长,水力交换能力差,是导致2000~2004年水库藻华频繁暴发的原因。

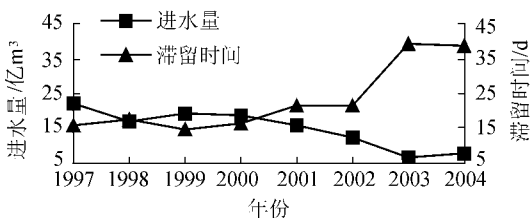


图5 1997~2004年山仔水库进水量和滞留时间

4 讨论

a. 文献[10]研究认为发生“水华”的水域要同时具备以下特征:氮、磷营养物质水平达到湖泊富营养化标准水平,水深不超过10m,平均流速小于 0.05 m/s ,而且水温在适宜藻类生长的范围内,气候温暖,日照充足等。山仔水库的进口、支流入口水体中的总磷、总氮、COD、藻类数量相对较高,氮、磷已到达富营养化的临界浓度,浮游藻类以蓝藻门的“水华”微囊藻、硅藻门的颗粒直链藻等优势种为主体,藻类种类呈现逐年减少的趋势,多样性指数下降,说明水库水体已达到富营养化的程度。河流汇入口处有营养物质,且水流缓慢,特别适宜藻类的生长,藻类数量相对较高,并且是“水华”较早出现的地方。山仔水库水体浮游藻类生长呈现季节更替型特点,在每年的春末、秋初有2个高峰期。

b. 营养物质是水华暴发的物质基础,而水文、气象等环境因素是水库水华发生的重要外部条件。气象因素主要体现在每年的季节变化,影响着藻类生长的季节性变化,如山仔水库在春末、秋初,气温较高,形成第2个藻类暴发高峰。苏玉萍等[7]试验中发现,在温度 $20 \sim 30$ 范围内“水华”微囊藻有较高的比增殖速率,其中 30 比增殖速率最大,但过低和过高的温度都抑制了“水华”微囊藻生长。Straskraba等[11]分析世界各地的水库发现,年平均滞留时间对水库的水动力学、化学(营养盐)和生物过程有直接的相关性。Osni等[12]对Asahi水库研究表明,当水滞留时间超过2周以上时,浮游植物才能维持较高的种群数量。王孟等[2]研究长江流域红枫水库、百花水库等水库发现,因水量变化而导致水库水滞留时间变长容易发生“水华”。

参考文献:

- [1] 金相灿,刘鸿亮,屠清瑛,等. 中国湖泊富营养化[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990:31-50.
- [2] 王孟,邬红娟,马经安. 长江流域大型水库富营养化特征及成因分析[J]. 长江流域资源与环境,2004,13(5):477-481.
- [3] 王朝晖. 广东省典型水库浮游植物群落特征与富营养化研究[J]. 生态学报,2005,24(4):402-405.
- [4] 刘霞. 密云水库水体富营养化研究[D]. 北京:首都师范大学,2001.
- [5] 刘用凯. 山仔水库水质富营养化防治对策[J]. 福建环境,2001,18(1):13-14.
- [6] 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.

(下转第44页)

将数据首先代入多目标模型,利用 MATLAB 遗传算法工具箱优化求解^[7],调整工业各行业规模,使经济效益、水资源利用量及环境排污三者达到最佳组合,然后再将优化结果代入系统动力学模型,实现水资源在工业利用系统中的连续性,进而得出调整后工业各行业规模以及水资源在这些行业中的分配情况,具体结果见表 2。

表 2 优化后的 2010 年工业行业规模及用水情况

行业类别	行业规模		用水情况	
	增加值/亿元	百分率/%	用水量/万 m ³	百分率/%
电子	1149	31.8	9194	8.9
机械	528	14.6	21633	21.2
石化	322	8.9	15761	15.3
冶金	87	2.4	4077	4.0
医药	163	4.5	3415	3.3
纺织	116	3.2	4973	4.8
食品饮料	275	7.6	8515	8.3
电力热力	379	10.5	16697	16.2
其他	596	16.5	18486	18.0
合计	3615	100.0	102751	100.0

通过本模型优化后,2010 年天津市工业增加值总体规模达到 3615 亿元,与优化前的 3259 亿元相比提高了 10.9%;而水资源使用量却由原来的 11.6 亿 m³ 缩减为 10.3 亿 m³,降低了 11.6%,水资源供需比为 1.04,消除了供需矛盾,能够保证工业正常运行;工业万元增加值用水量由优化前的 36 m³/万元降低到优化后的 28 m³/万元,从这一指标看,效果也很明显。

从工业各行业规模分析,在上述主要研究的 8 个工业行业中,电子和医药制造业的规模明显增大,分别变为原来的 1.95 和 4.53 倍,在工业总增加值中所占的比重分别从 18.1%和 1.1%提高到 31.8%和 4.5%;食品饮料和电力热力生产供应业的规模在优化前后基本没有变化;规模明显变小的行业有机械、石化、冶金和纺织业,其中纺织业规模优化后的增加值仅为优化前的 49%。由于电子行业属于

低耗水、低污染、高产出行业,而机械、石化、冶金和纺织等行业单位增加值用水量且污染物排放量大,因此在目前水资源短缺,环境污染压力大,限制高耗水、高污染行业扩展规模,优先发展科技密集型产业,同时又满足各产业间结构不致失衡的情况下,系统模型将各产业规模向表 2 所列方向调整,实现水资源在系统中的合理配置。

3 结 语

工业作为国家的经济命脉,一方面它的整体发展水平直接影响着我国现代化建设进程和综合国力,另一方面它受水资源的制约程度也越来越大。不同地区水资源承载力不同,这就要求在制定工业发展规划前期,必须全面衡量各工业行业对水资源的依赖程度,以及它们的产出效益、污染排放等众多因素,采用科学、合理的方法,确定与之匹配的产业结构,才符合可持续发展的要求。

参考文献:

- [1] 付春,冯尚友.水资源持续利用(生态水利)原理的探讨[J].水科学进展,2000,11(4):436-440.
- [2] 吴泽宁,索丽生.水资源优化配置研究进展[J].灌溉排水学报,2004,23(2):1-5.
- [3] 韩俊丽,段文阁.基于 SD 模型的干旱区城市水资源承载力模拟与预测[J].干旱区资源与环境,2005,19(4):188-191.
- [4] 王丽婧,郭怀成,王吉华,等.基于 IMOP 的流域环境-经济系统规划[J].地理学报,2005,60(2):219-228.
- [5] 黄大英.浅谈北京市水资源的合理配置[J].水资源保护,2005,21(4):68-69.
- [6] 翁文斌,王忠静,赵建世.现代水资源规划:理论、方法和技术[M].北京:清华大学出版社,2004:131-140.
- [7] 曹卫华,郭正.最优化技术方法及 MATLAB 的实现[M].北京:化学工业出版社,2005.

(收稿日期:2006-11-30 编辑:徐娟)

(上接第 29 页)

- [7] 苏玉萍,陈娜蓉,曾招平,等.环境因子对福建省山仔水库浮游植物优势种水华微囊藻(*Microcystis flos-aquae*)生长的影响[J].植物资源与环境学报,2005,14(3):42-47.
- [8] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [9] 黄祥飞,陈伟民,蔡启铭.湖泊生态调查观测与分析[M].北京:中国标准出版社,1999.
- [10] SCHINDLER D W. The cumulative effects of climate warming

and other human stresses on Canadian freshwaters in the new millennium[J]. Can J Fish Aquat Sci,2001,58:18-29.

- [11] STRASKRABA M, DOSTAL KOVA I. The effects of reservoir on phosphorus concentration[J]. Int Revue Ges Hydrobiol, 1995,80:403-413.
- [12] OSMI K, EISAKU Y. A study on the role of hydraulic retention time in eutrophication of the Asahi River Dam reservoir[J]. Wat Sci Tech,1998,37:245-252.

(收稿日期:2007-03-18 编辑:高渭文)