

水库温排水增温模拟及其对富营养化影响分析

徐梦佳¹, 于磊², 赵彦伟^{1*}, 梁振明³

(1.水环境模拟国家重点实验室,北京师范大学环境学院,北京 100875; 2.北京市水利科学研究所,北京 100048; 3.中国电力工程顾问集团华北电力设计院工程有限公司,北京 100120)

摘要: 温排水导致的水库增温及衍生富营养化是水库生态学领域的研究热点。以承纳温排水的北方某浅水水库为例,利用 MIKE21 模型构建平面二维水温模拟模型,针对可能出现的调水量和气温极端情况,设定 4 个情景,分别模拟不同情景下水库水温时空分布规律,对温升带来的富营养化及水华爆发风险进行了分析。结论如下:(1)受温排水口位置、温排水流向及水深共同影响,水库水温呈西高东低,北高南低的分布规律;(2)气温对水库水温的影响较水深更为强烈,取水口 1 处水域年均温升最大,取水口 1 和取水口 2 处水域温升波动较大;(3)调水量和气温等条件变化会导致水华爆发风险变化:除取水口 2 附近水域外,相对于情景 1,情景 2 和情景 3 高风险发生时间提前一个月;情景 4 增温幅度较大,导致东支和取水口 1 附近高风险延续时段比情景 1 短一个月。
关键词: 温排水;浅水水库;水温;情景模拟;富营养化

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)06-1180-09

The Simulation of Reservoir Water Warming by Thermal Discharge and Research on Reservoir Eutrophication

XU Meng-jia¹, YU Lei², ZHAO Yan-wei^{1*}, LIANG Zhen-ming³

(1.State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2.Beijing Hydraulic Research Institute, Beijing 100048, China; 3.North China Power Engineering Co.,Ltd of China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China)

Abstract: Reservoir water warming and eutrophication caused by thermal discharge is a hot issue in the field of reservoir ecology. A shallow reservoir in North China receiving warm-water discharge was chosen as the study area, and MIKE21 was used to construct a two-dimensional water temperature model. In view of the extreme conditions of air temperature and water transfer, four scenarios were set to simulate the temporal and spatial distribution of water temperature. The eutrophication and risk of algal bloom were analyzed under the four scenarios. The following conclusions were reached.(1)The water temperature in western and northern water area was higher than that in eastern and southern water area, respectively. The main influencing factors were the location of warm-water discharging spot, flow direction of warm water and water depth.(2)The influence of air temperature on water temperature was more significant than that of water depth, and the annual mean water temperature rise in water intake 1 was the greatest, meanwhile the water temperature fluctuation in water intakes 1 and 2 was relatively obvious.(3)The change of air temperature or transferred water volume would change algal bloom risk; under scenarios 2 and 3, the occurring time of high risk of algal bloom was one month earlier than that under scenario 1; under scenario 4, the duration of high risk of algal bloom near the eastern boundary and water intake 1 was one month shorter than that under scenario 1, owing to the higher water temperature rise.

Keywords: warm-water; shallow reservoir; water temperature; scenarios simulation; eutrophication

温排水一般温升约 8~10℃,会促进湖泊、水库内水流流动,容易在排水口附近局部水域造成热富集,

导致水体溶解氧浓度下降,自净能力降低^[1]。温升还会促进藻类的生长繁殖,在 20~35℃范围内,生物量随温升有较大增加,加剧水体富营养化。因此,温排水对水环境及水生态的影响受到国内外学者关注^[2-6]。盛连喜等指出热污染对水环境的影响主要表现在水温的频繁变化、水平和纵向上温差明显以及改变水生物的群落结构^[7]。盛连喜和孙刚选择 3 个水库,研究了温排水对水体理化性质、浮游动物群落和鱼类繁殖

收稿日期:2011-12-26

基金项目:国家自然科学基金项目(50979006);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07209-009)

作者简介:徐梦佳(1986—),男,硕士研究生,主要从事生态水文研究。

E-mail:xumengjia001@163.com

* 通讯作者:赵彦伟 E-mail:awei-a@163.com

的影响^[8]。徐晓群等通过浮游动物分布调查和优势种半致死温度耐热性实验,评估了温排水对浮游动物的影响程度,认为温排水对排水口附近活动能力强、质量大的浮游动物分布影响较大^[9]。

利用数学模型等定量化手段,研究温排水对水温、水环境的影响,目前已有较多开展^[10-14]。但就相关文献来看,对外部环境变化及其导致的水温变化考虑较少。在研究温排水对水温及水环境影响的模型中,MIKE21 模型以其科学性逐渐得到公认,并在近年研究中得到一定应用。王庆改等应用 MIKE21 FM,预测了两种工况条件下温排水对河流水环境影响过程,得出不同温升线包络范围及不同来水情况下温排水对河流水环境影响程度^[15]。陈沐松和宋兰兰利用 MIKE21 模型,模拟了长江常熟段 3 种水文情景下垃圾发电厂温水团的运移扩散过程,并定量预测了温排水影响范围和程度^[16]。但将 MIKE 模型用于温排水对水库水温及其衍生水环境影响的研究却不多见。

研究区位于我国北方平原地区,是一座以防洪为主,兼顾生产生活供水的大型浅水水库,水面面积约 11 km²,总库容 5.12 亿 m³。基于历史原因,水库周边建有电厂,并将水库作为冷却池,年均循环水量达 11.4 亿 m³(2001 至 2009 年统计数据),温排水汇入加之水库自身库容较小、水深较浅,使水库水体增温极为显著。近年来,非点源输入逐年增加,与温排水形成复合影响,加重了水库富营养化,2007 年到 2009 年连续 3 a 皆有小规模水华爆发,不仅给水体环境带来不利影响,也给居民饮用水安全带来极大危害。研究于 2010 年 4 月对水库进行了采样分析。根据水质分析结果,分别采用“中国水库富营养化评分与分级标准”^[17]和综合营养指数法进行富营养化现状评价,两种方法的评价结果表明,4 月份库区整体分别处于中富营养状态和中营养状态。因此,急需明确水库增温规律及其环境影响特点,为水库富营养化控制提出针对性对策。

本文利用 MIKE21 模型构建了平面二维水动力模型,针对水库调水量和气温可能出现的极端情况,设定不同情景对水体水温进行模拟,掌握不同情景下水库水温时空分布规律与差异,对升温导致的水华爆发风险进行分析,为水库水环境管理提供依据。

1 材料与方法

研究区属浅水型水库,平均水深 3 m 左右,无明显分层,水体垂向混合比较均匀,采用 MIKE21 构建

平面二维模型可满足研究需要。模型利用交替方向隐式迭代方法(ADI 法)二阶精度的有限差分法对动态流连续方程和动量守恒方程求解,所得矩阵方程用追赶法求解,各微分项和重要系数均采用中心差分格式。

1.1 地形文件建立

将 1:5 000 水库地形图(TIF 格式)在 MapInfo7.0 中校准拼接,对等高线进行数字化;将数字化结果经格式转换导入 ArcGIS 9.2 中,利用 3D Analyst 模块中的 Create TIN from features 命令创建 TIN 表面,经栅格化后转换成.xyz 文件;最后利用 MIKE Zero 中的 Mesh Generator 工具建立水库计算网格(图 1),并利用散点地形数据进行差值得到水库地形图(图 2)。为保证模拟精度,计算网格采用三角形网格并对温排水口附近网格加密处理,生成地形文件,共计 1 313 个节点,2 422 个网格。

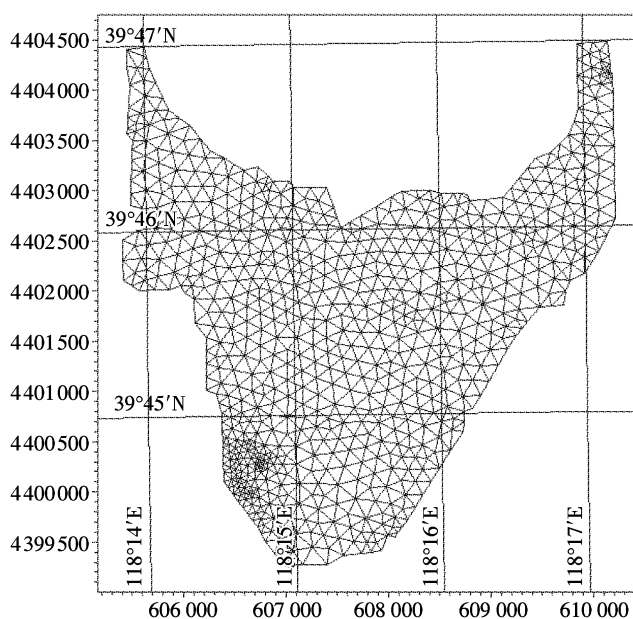


图1 模型计算网格(温排水口局部加密)

Figure 1 Computing grid of study area(grid encryption near the outfall)

1.2 边界及边界条件设定

结合水库周边情况,对模型边界及源汇项进行概化与设定(图 2)。模型共设两个入流边界(东边界和西边界)和一个出流边界(下边界);两个点汇项(取水口 1 和取水口 2),一个点源项(温排水口)。

以入/出库实测流量为出入流边界,取水口及排水口采用历史流量数据。水温边界条件及取水口、排

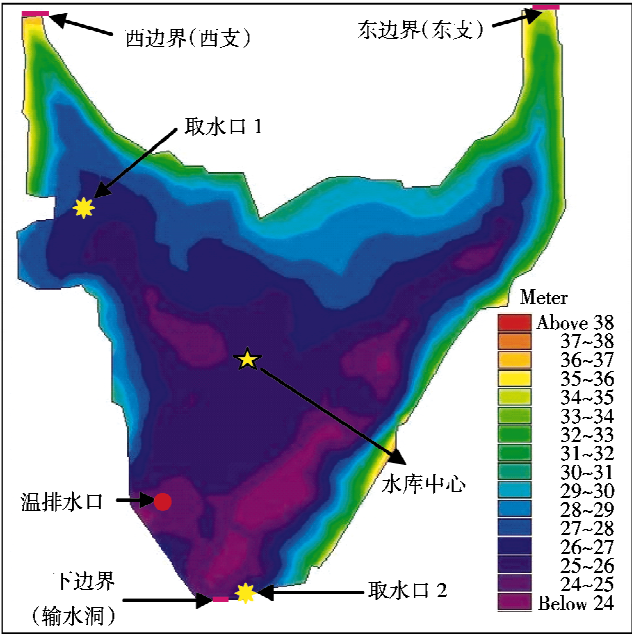


图 2 水库地形、模型边界和源汇项位置

Figure 2 Map of reservoir terrain, model boundaries, and the position of source and sink

口水口水温输入条件采用历史水温数据。

气温、风速、相对湿度等逐日气象数据来源于中国气象科学数据网,清晰度系数设定为常数 60%。

1.3 模型率定和验证

以“天”为时间步长进行模型率定和验证。选取 2008 年 5 月 16 日至 2008 年 10 月 31 日作为率定期,2009 年 5 月 16 日至 2009 年 10 月 31 日作为验证期。主要率定参数包括糙率、涡粘系数、道尔顿常数、道尔顿风力系数,率定变量为水位和水温,其余参数参照相关文献^[18-19]或模型推荐值设定。采用相关系数平方(R^2)^[20]及 Nash-Sutcliffe 效率系数(E_{NS})^[21]对模型精度进行评价,Nash-Sutcliffe 效率系数计算公式如下:

$$E_{NS}=1-\frac{\sum_{i=1}^n(Y_i-Y_{si})^2}{\sum_{i=1}^n(Y_i-\bar{Y})^2}$$

(1)

式中: Y 为实测值; Y_i 为模拟值; $\bar{Y}$ 为实测值均值; n 为测值个数。

R^2 介于 0 到 1 之间,数值越大表示模拟效果越好。 E_{NS} 值在 $-\infty$ 到 1 之间, E_{NS} 越小表示模拟效果越差。

研究共选取了 7 个关心点位对模型进行率定和验证,整体率定和验证效果较好(表 1)。总体来说,模

表 1 模型率定和验证效果

Table 1 Results of calibration and validation of the model

项目	指标	点位	R^2	E_{NS}
率定	水位		0.97	0.93
	水温	库心	0.95	0.89
		取水口 1	0.93	0.83
		取水口 2	0.94	0.85
		温排水口	0.87	0.80
		输水洞	0.89	0.87
		东支	0.78	0.76
验证	水位	西支	0.88	0.82
			0.94	0.80
	水温	库心	0.92	0.85
		取水口 1	0.97	0.86
		取水口 2	0.90	0.88
		温排水口	0.89	0.86
		输水洞	0.85	0.84
		东支	0.80	0.79
		西支	0.78	0.77

型精度可满足研究需要,模型参数具有较好可移植性。图 3 是水位和部分关心点位水温的率定和验证结果。

1.4 情景设定

水库水温主要受气温、温排水温升、水位(库容量)的共同影响,而温排水温升由热源工作状态决定,波动幅度不大,基本保持稳定,气温和水位变化对水库水温的波动起关键作用。研究区自产水量较小,水库水位受用水量 and 外来调水量影响极大。

基于上述分析,针对水库气温、外来调水量可能出现的各种情况,设定 4 个模拟情景(表 2)。模拟时段为一整年(1 月 1 日至 12 月 31 日),起始水位及水温分别设为 32 m 和 0 ℃,排水口温升为 9 ℃。水库取水量按平常年份计算。

表 2 情景模拟条件设定

Table 2 Simulation scenarios

情景	气温	调水量
情景 1	平常年	平常年
情景 2	平常年	极端少年
情景 3	极端高年	平常年
情景 4	极端高年	极端少年

注:根据历史数据,1975 年平均气温 12.4 ℃,为近 30 a 最高气温年,将此年份作为气温极端高年。以 1974 年作为气温平常年,年均气温为 11.1 ℃。受限于电厂最低运行水位要求,将调水量为平常年的 80% 的年份作为调水量极端少年,以 2008 年为调水量平常年。

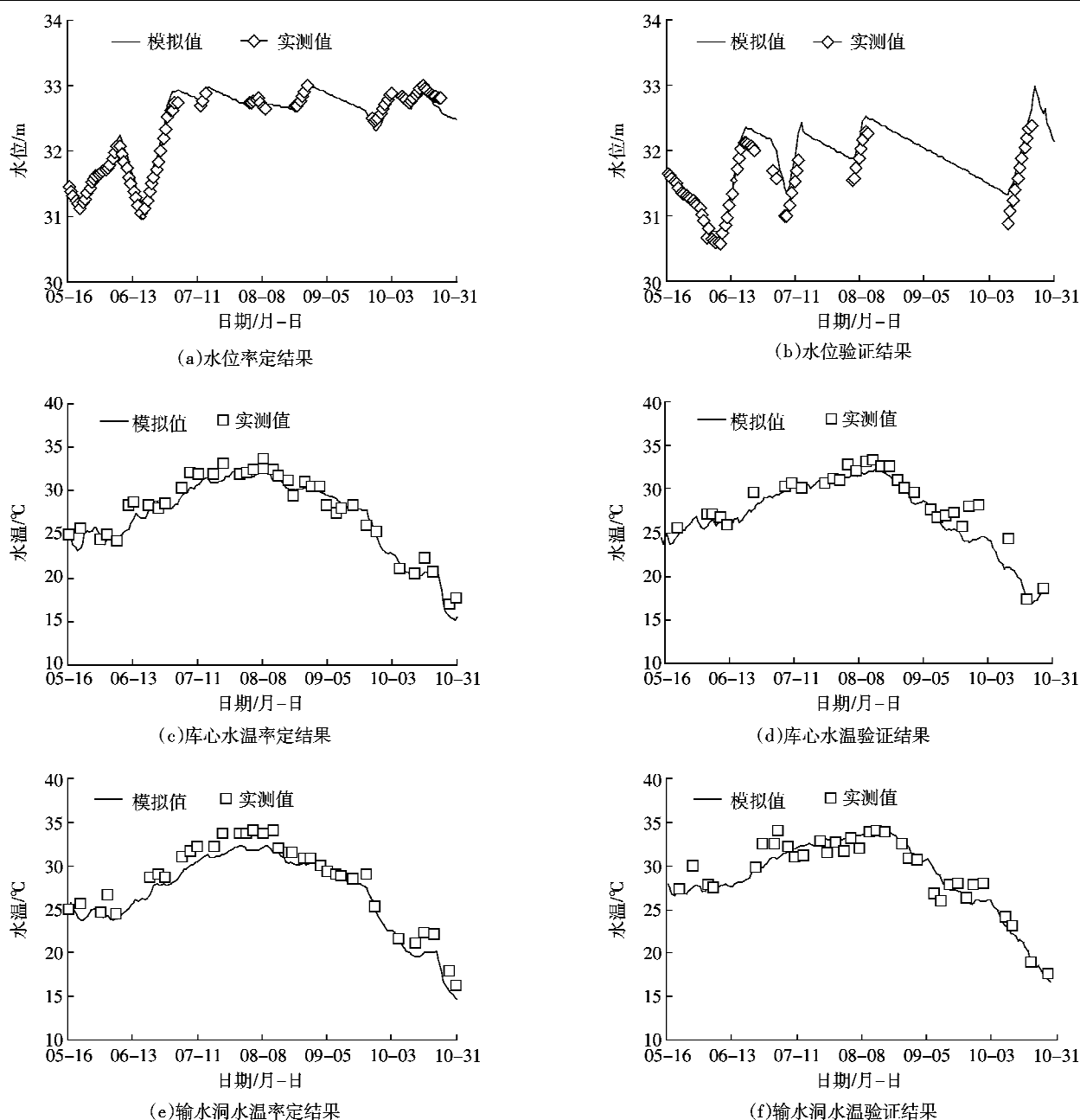


图3 模型率定和验证结果

Figure 3 Comparison of simulated and observed data for calibration and validation periods

2 结果与讨论

2.1 情景1 水库水温变化

对库心、东支、取水口1、取水口2四个主要关心点位水域的月均和年均水温进行分析。由表3可知,取水口1处水域的年均水温最高,取水口2处水域的年均水温最低。由图4可知,水库水体水温受温排水口位置、温排水流向及水深的共同影响,呈现西高东低、北高南低的分布规律,温排水对温排水口附近水

域水温影响剧烈。3月份水库各关心点位水域温差最大,为 21°C ,其中最高水温 27°C ,最低 6°C ,在下边界附近出现一段狭长的低温区;7月份温差最小,为 8.4°C ,其中最高水温 39.6°C ,最低 31.2°C 。

模拟结果显示,平常年份水库春季水温在 $17.0\sim 30.4^{\circ}\text{C}$ 之间,基本接近于北方水体初夏水温水平;夏季水温在 $28.6\sim 36.0^{\circ}\text{C}$ 之间,远远高于其他北方水体盛夏高温。水库月均水温也高于同期北方无温排水影响的水库水温:对比水库与临近的洋河水库,未建成

表 3 情景 1 水库主要关心点位水域月均水温

Table 3 Monthly average water temperature of the concerning points in Scenario 1

关心点位	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年平均
库心	2.8	3.6	9.0	17.4	25.1	29.2	33.2	33.2	29.6	20.1	9.9	3.4	18.0
东支	2.0	2.3	8.5	17.7	24.9	28.6	33.1	32.8	29.0	19.2	9.1	3.0	17.6
取水口 1	7.6	8.7	15.3	22.9	30.4	32.4	36.0	35.5	34.0	23.7	13.6	4.9	22.1
取水口 2	2.0	2.4	7.3	17.0	24.9	29.1	32.6	32.6	29.3	20.2	9.1	3.3	17.3

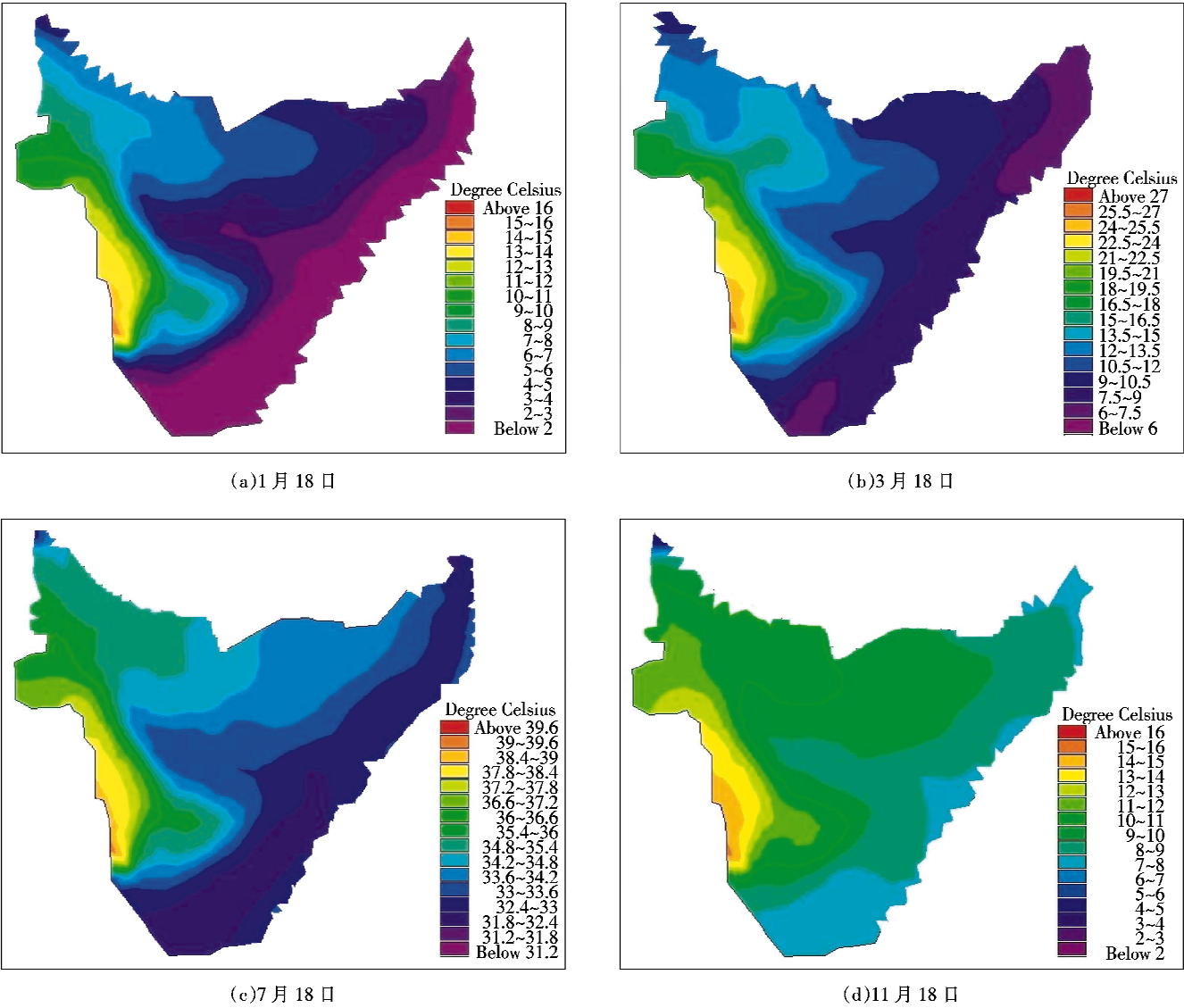


图 4 情景 1 典型日期水库水温分布(°C)
Figure 4 Distribution of water temperature in Scenario 1(°C)

温排水口时,水库年均水温变化与洋河水库基本相同,且年均水温比洋河水库还低 0.7℃^[22];情景 1 模拟的平常年份水库年均水温比洋河水库高 2.8~4.8℃,可见温排水对水库水温影响十分明显。总体来说,春季温排水对水库水温影响较夏季更为明显。

2.2 其他情景水库水温变化

从其他情景各点相对情景 1 年均水温温升来看(表 4),情景 4,即气温升高和调水量减少情景,水体增温最为显著,相对情景 1 年均水温温升 1.27℃;情景 3,即年均气温升高 1.3℃情景,水体年均水温温升

表4 其他情景相对情景1年均温升(°C)

Table 4 Yearly average water temperature rise of other scenarios compared with scenario 1(°C)

情景	库心	东支	取水口1	取水口2
情景2	0.4	0.5	0.8	0.3
情景3	1.0	1.0	1.1	0.9
情景4	1.2	1.3	1.4	1.1

1.02 °C;情景2,即调水量减少20%,导致年均水位降低约1 m的情景,水体增温效果最不明显,年均水温温升仅0.5 °C。与水深相比,气温对水库水体水温的影响更强烈。从各关心点位水域来看,取水口1处水域年均温升最大,取水口2处水域年均温升最小,与情景1水库模拟结果一致。

从各月份来看(图5),情景2中,水温随水库水位的下降(图6),在7月份达到最大值后开始缓慢下降;情景3和情景4在4、10月和11月水温温升较大,1、2、5月和8月水温温升较小,这与气温极端高年相对于平常年的气温差值变化相一致(图7)。从各关心点位水域来看,库心处水域因水体较深且水体流动较为缓慢,温升较小且保持相对稳定;取水口1和

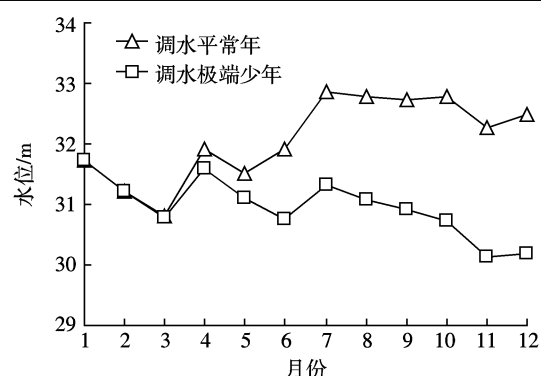


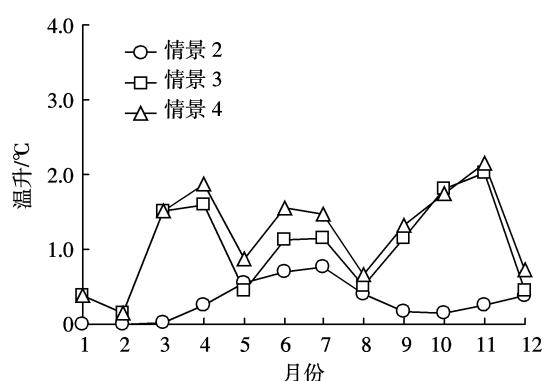
图6 不同调水量条件下月均水位变化

Figure 6 Monthly water level changes in different water transfer scenarios

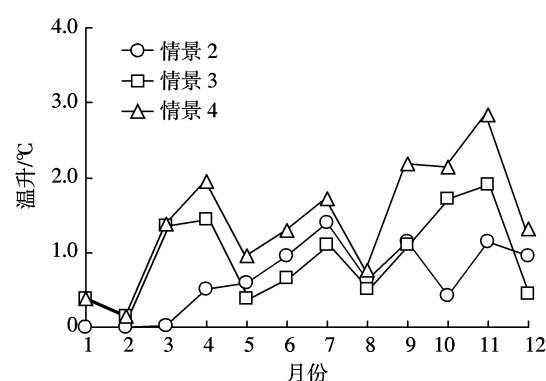
取水口2处水域由于受到取水和放水的影响,水体交换剧烈,并加剧了水体与大气的热交换,温升波动剧烈。

2.3 增温对水库富营养化的影响

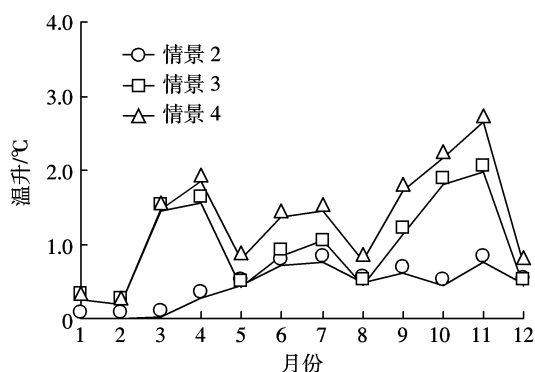
水体增温会促进有机物分解,水中无机盐浓度增高,水体溶解氧下降,增加底泥中N、P的释放;并会使水中浮游植物繁殖加快,数量、细胞密度、生物量明



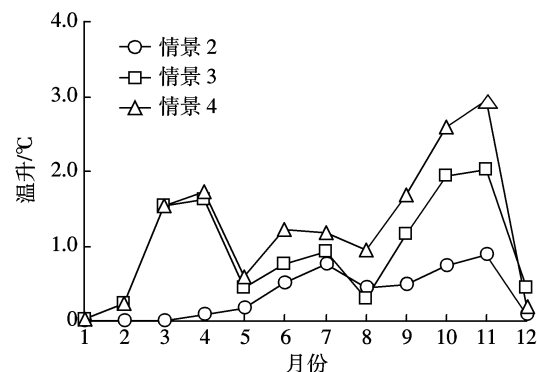
(a)库心



(b)取水口1



(c)取水口2



(d)东支

图5 其他情景月均水温相对情景1月均水温温升变化

Figure 5 Changes of monthly water temperature rise of other scenarios compared with scenario 1

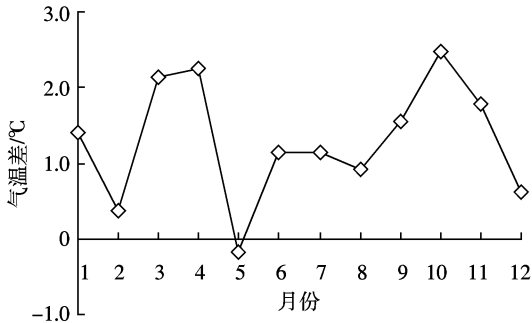


图 7 气温极端年相对平常年气温差值变化

Figure 7 Changes of monthly temperature difference between extreme maximum year and normal year

显增加,喜温的蓝、绿藻数量异常增多,易形成水华。根据研究区 2008 年和 2009 年的水质监测数据,研究区水体中总氮、总磷浓度范围分别为 0.46~3.93 mg·L⁻¹, 0.01~0.07 mg·L⁻¹,氮磷比介于 37~271 之间。参照“中国水库富营养化评分与分级标准”^[17]和 Redfield 定律^[23],研究区水体处于中富营养到富营养状态,磷是水库富营养化的限制性因素。

研究表明,水体增温、溶解氧下降、上覆水扰动皆可增加底泥释磷^[24-27]。后 3 种情景中,水体增温幅度均不大,但对底泥释磷的影响不可忽视,尤其是情景 4,水体增温加之水库水位下降可能会导致上覆水体扰动剧烈,进一步加大底泥释磷量,进而加剧水库富营养化;随着水体中磷浓度的增加,氮磷比逐渐下降,如果该比值下降到藻类生长最佳氮磷比值范围(10:1~25:1)内^[28-29],水华爆发的风险会大大增加。

根据监测结果,研究区浮游藻类的优势种主要有绿藻门、蓝藻门和硅藻门,尤以绿藻门的优势程度最为明显。研究表明,水温在 25~35 ℃范围内,叶绿素 a 含量与水温呈正相关关系,水温越高水体生物量越大,物种多样性越低^[30-31]。相对于情景 1,其他情景的水体增温可能会进一步加快藻类尤其是蓝绿藻的生长速率,降低水体物种多样性,加剧水库富营养化。2007—2009 连续 3 a 的监测数据表明,水华爆发时水温大致处于 26~34 ℃之间,这一水温范围为水华爆发的高风险期,调水量和气温等条件的变化可能会改变水华爆发的高风险时段,不同情景下,水库关心点位水域水温介于 26~34 ℃的时段及水域见表 5。由表 5 可知,与情景 1 相比,情景 2 和情景 3 除取水口 1 附近水域外,库心、东支及取水口 2 附近水域水华爆发的高风险时段均比情景 1 中相应点位区域提前了一个月;情景 4 因增温幅度较大,东支和取水口 1 附近

表 5 不同情景下水华爆发的高风险水域及时段

Table 5 Period and area with high risk of algal bloom in different scenarios

情景	水域	月份
情景 1	库心、东支、取水口 2	6、7、8、9
	取水口 1	5、6、9
情景 2 和情景 3	库心、东支、取水口 2	5、6、7、8、9
	取水口 1	5、6
情景 4	库心、取水口 2	5、6、7、8、9
	东支	6、8、9
	取水口 1	5、6

水域水华爆发的高风险时段比情景 1 中相应点位区域少一个月。

3 结论

本文利用 MIKE21 构建了研究区平面二维水动力模型,设定 4 个情景,模拟了温排水对北方某浅水水库的增温规律,对升温可能导致的水环境问题及水华爆发风险进行了分析。主要研究结论如下:

(1)模拟平常年份水库水温变化的情景 1 中,受温排水口位置、温排水流向及水深的共同影响,水温呈现西高东低、北高南低的分布规律,春季温排水对水库水温的影响较夏季更为明显;一年中水库 7 月和 8 月水温最高,1 月和 12 月水温最低;从各关心点位水域来看,取水口 1 处水域年均水温最高,取水口 2 处水域年均水温最低。

(2)模拟水库气温和外来调水量出现极端状况时水温变化的情景 2、3、4 中,情景 4 水体增温最大,情景 2 最小,与水深相比,气温对水库水体水温的影响更为强烈;不同关心点位水域中,取水口 1 处水域年均温升最大,取水口 2 处水域年均温升最小,库心处水域月均温升变化平稳,取水口 1 和取水口 2 处水域由于水体交换剧烈,温升波动较大。

(3)不同情景水体增温对水体富营养化影响较大,突出表现在增加底泥释磷,加快藻类生长等方面。相对而言,情景 4 不仅增温最大,同时调水量减少导致水库水位降低,水体上下扰动剧烈,共同作用可能会对底泥磷的释放造成较大影响。

(4)若以水温为控制条件来界定水华爆发的高风险时段,则水量和气温等条件的变化可能会改变水华爆发的高风险时段,水库关心点位附近水域中,情景 2 和情景 3,相对于情景 1,除取水口 2 附近水域外,其余点位水华爆发高风险时间会提前一个月,而情景

4 由于增温幅度较大,东支和取水口1附近水华爆发高风险时段比情景1短一个月。

本文只对4种情景的水温状况进行了模拟。由于水华爆发机理非常复杂,存在随机性、不确定性和非线性特征^[32-33],应进一步做较长时间尺度、多变量情景的模拟研究,以便进一步研究水温对水库水华爆发预测预警的重要作用,并进一步从生态系统整体考虑,综合水动力、营养盐、浮游动植物等因素开展水库水华预测预警研究。

参考文献:

- [1] 潘超,朱法华,王圣.区域电网火电厂对水环境影响评价指标研究[J].环境科学研究,2006,19(6):110-114.
PAN Chao, ZHU Fa-hua, WANG Sheng. Study on the water environmental impact assessment index of thermal power plants within a regional power Net[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(6): 110-114.
- [2] Poornima E H, Rajadurai M, et al. Impact of thermal discharge from a tropical coastal power plant on phytoplankton[J]. *Journal of Thermal Biology*, 2005, 30:307-316.
- [3] Chuang Yi-Li, Yang Hsiao-Hui, Lin Hsing-Juh. Effects of a thermal discharge from a nuclear power plant on phytoplankton and epiphyton in subtropical coastal waters[J]. *Journal of Sea Research*, 2009, 61:197-200.
- [4] Tatiana Pires Teixeira, Leonardo Mitrano Neves, Francisco Gerson Araújo. Effects of a nuclear power plant thermal discharge on habitat complexity and fish community structure in Ilha Grande Bay, Brazil[J]. *Marine Environmental Research*, 2009, 68:188-193.
- [5] 黄向阳,谢磊.江水源热泵系统温排水对江水水温及水质的影响[J].水电能源科学,2010,28(7):34-36.
HUANG Xiang-yang, XIE Lei. Effect of warm water discharge of river water resources heat pump system on water temperature and water quality[J]. *Water Resources and Power*, 2010, 28(7):34-36.
- [6] 何玲,张蕾,张家福.广州新塘热电站温排水数值模拟研究[J].水利科技与经济,2011,17(7):4-6.
HE Ling, ZHANG Lei, ZHANG Jia-fu. Numerical simulation study on direct discharging type cooling water of the heat power station in Xintang Area[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2011, 17(7):4-6.
- [7] 盛连喜,刘伟,王振堂,等.热污染对陡河水库鱼类及其水环境的影响[J].环境科学学报,1990,12(4):454-457.
SHENG Lian-xi, LIU Wei, WANG Zhen-tang, et al. Effects of thermal pollution on aquatic environment and fish in Douhe Reservoir[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1990, 12(4):454-457.
- [8] 盛连喜,孙刚.电厂热排水对水生生态系统的影响[J].农业环境保护,2000,19(6):330-331.
SHENG Lian-xi, SUN Gang. Effects of thermal discharge from power plant on aquatic ecosystems[J]. *Agro-environmental Protection*, 2000, 19(6):330-331.
- [9] 徐晓群,曾江宁,曾淦宁,等.滨海电厂温排水对浮游动物分布的影响[J].生态学杂志,2008,27(6):933-939.
XU Xiao-qun, ZENG Jiang-ning, ZENG Gan-ning, et al. Effects of thermalwater discharged from coastalpower plant on distribution of zooplankton[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(6):933-939.
- [10] Ozturk I, Sarikaya H Z, et al. A simplified model for thermal discharges[J]. *Water Science and Technology*, 1995, 32(2):183-191.
- [11] 陈凯麒,李平衡,密小斌.温排水对湖泊、水库富营养化影响的数值模拟[J].水利学报,1999(1):22-26.
CHEN Kai-qi, LI Ping-heng, MI Xiao-bin. The numerical simulation on impact of thermal discharge on eutrophication in lakes and reservoirs[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999(1):22-26.
- [12] John M Hamrick, William B Mills. Analysis of water temperatures in Conowingo Pond as influenced by the Peach Bottom atomic power plant thermal discharge[J]. *Environmental Science & Policy*, 2000, 3:197-209.
- [13] 李平衡,陈凯麒,鲁光四,等.温排水对陡河水库富营养化影响的预测研究:电厂温排水对陡河水库富营养化影响研究之二[J].水资源保护,2001(2):15-16.
LI Ping-heng, CHEN Kai-qi, LU Guang-si, et al. Prediction of impact of thermal discharge on eutrophication of Douhe Reservoir[J]. *Water Resources Protection*, 2001(2):15-16.
- [14] 华维娜,张根广,李雪江.南迪普电站温排水影响数值模拟研究[J].人民长江,2011,42(13):87-89.
HUA Wei-na, ZHANG Gen-guang, LI Xue-jiang. Numerical simulation on influence of thermal discharge from Nandipur Power Plant[J]. *Yangtze River*, 2011, 42(13):87-89.
- [15] 王庆戴,戴文楠,赵晓宏,等.基于Mike21FM的来宾电厂扩建工程温排水数值模拟研究[J].环境科学研究,2009,22(3):332-336.
WANG Qing-gai, DAI Wen-nan, ZHAO Xiao-hong, et al. Numerical model of thermal discharge from Laibin Power Plant based on Mike21FM[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(3):332-336.
- [16] 陈沐松,宋兰兰. Mike 21 在垃圾发电厂温排水数值模拟中的应用[J].安徽农业科学,2011,39(15):9221-9223.
CHEN Mu-song, SONG Lan-lan. Application of Mike 21 in the numerical simulation of thermal discharge from garbage power plant[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2011, 39(15):9221-9223.
- [17] 黄文钰,舒金华,吴延根.中国主要水库富营养化评价[J].贵州环保科技,1992,2:12-16.
HUANG Wen-yu, SHU Jin-hua, WU Yan-gen. Eutrophication assessment of main reservoirs in China[J]. *Guizhou Environment Protection Science and Technology*, 1992, 2:12-16.
- [18] 曹永中.龙羊峡水库水温模拟及其对下游河道水温影响研究[D].西安:西安理工大学,2008.
CAO Yong-zhong. Research on the water temperature simulation for Longyangxia Reservoir and influence on temperature of river downstream[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008.
- [19] 张华丽.刘家峡水库水温影响回顾评价研究[D].西安:西安理工大学,2008.
ZHANG Li-hua. Post project environment impact assessment research

- on the water temperature simulation of Liujiaxia Reservoir[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008.
- [20] Legates D R, McCabe J G. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation[J]. *Water Resources Research*, 1990, 35(1):233-241.
- [21] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles [J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3):282-290.
- [22] 徐镜波, 虞瑞兰. 电厂温排水对水库生态环境的影响[J]. 重庆环境科学, 1992(4):34-35.
- XU Jing-bo, YU Rui-lan. Effects of thermal discharge from power plant to ecologic environment of reservoir[J]. *Chongqing Environmental Science*, 1992(4):34-35.
- [23] Redfield A C. On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton[M]. James Johnstone Memorial Volume, 1934, Liverpool University Press:176-192.
- [24] 韩伟明. 底泥释磷及其对杭州西湖富营养化的影响[J]. 湖泊科学, 1993, 5(1):71-77.
- HAN Wei-ming. Phosphorus release from the sediments of west lake in Hangzhou and its effects on lake eutrophication[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1993, 5(1):71-77.
- [25] Gonsiorczyk T, Casper P, Koschel R. Variations of phosphorus release from sediments in stratified lakes[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 1997, 99(1-4):427-434.
- [26] 隋少峰, 罗启芳. 武汉东湖底泥释磷特点[J]. 环境科学, 2001(1):102-105.
- SUI Shao-feng, LUO Qi-fang. Release character of phosphorus from the sediments of East Lake, Wuhan[J]. *Environmental Science*, 2001(1):102-105.
- [27] 文威, 孙学明, 孙淑娟, 等. 海河底泥氮磷营养物静态释放模拟研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1):295-300.
- WEN Wei, SUN Xue-ming, SUN Shu-juan, et al. Release of phosphorus and nitrogen from Haihe River sediments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1):295-300.
- [28] Smith V H. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by bluegreen algae in lake phytoplankton[J]. *Science*, 1983, 221:669-671.
- [29] 荆红卫, 华蕾, 孙成华, 等. 北京城市湖泊富营养化评价与分析[J]. 湖泊科学, 2008, 20(3):357-363.
- JIN Hong-wei, HUA Lei, SUN Cheng-hua, et al. Beijing city lake eutrophication evaluation and analysis[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(3):357-363.
- [30] 李巍. 电厂温排水对陡河水库浮游生物的影响[D]. 吉林:东北师范大学, 2006.
- LI Wei. The impact of thermal discharge from an electric power plant on plankton of Douhe Reservoir[D]. Jilin:Northeast Normal University, 2006.
- [31] 邓河霞, 夏品华, 林陶, 等. 贵州高原红枫湖水库叶绿素a浓度的时空分布及其与环境因子关系[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(8):1630-1637.
- DENG He-xia, XIA Pin-hua, LIN Tao, et al. Temporal and spatial distribution of chlorophyll-a concentration and its relationship with environmental factors in Hongfeng Reservoir, Guizhou Plateau, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(8):1630-1637.
- [32] 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):590-592.
- KONG Fan-xiang, GAO Guang. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3):590-592.
- [33] 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, 2005, 25(7):1556-1560.
- ZHAO Meng-xu, HAN Bo-ping. Analysis of factors affecting cyanobacteria bloom in a tropical reservoir (Tangxi Reservoir, China) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7):1556-1560.