

# 湖水源热泵系统冷排水对浮游植物影响试验研究

周 健<sup>1</sup>, 黄向阳<sup>1,2</sup>, 刘 杰<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400030; 2. 长江大学 城市建设学院, 湖北 荆州 434023)

**摘 要:**针对湖泊热环境容量小, 生态系统脆弱的特征, 以三峡库区重庆段湖泊水体为研究对象。采用物理模拟的方法, 对湖水源热泵系统冷排水对湖泊藻类及叶绿素含量的影响进行了系统的研究。结果表明:冷排水对藻类总量增长有明显抑制作用, 试验水体藻类正负增长的临界温度在 4.5~6.2 °C 之间;冷排水对湖泊优势藻类种群及比例变化有较为明显的影响, 并且会使藻类种群数减少;冷排水显著降低湖泊叶绿素 a 的含量, 对浮游植物总量增长有较大影响, 且原水氮磷含量越高其影响程度也越大。

**关键词:**水源热泵; 湖泊; 冷排水; 浮游植物; 影响

中图分类号: X503 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2010)01-0116-04

## Effects of Cold Discharge of Lake Water Source Heat Pump Systems on Lake Phytoplankton

ZHOU Jian<sup>1</sup>, HUANG Xiang-yang<sup>1,2</sup>, LIU Jie<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Eco-Environments of Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. School of Urban Construction, Yangtze University, HuBei, Jingzhou 434023, P. R. China)

**Abstract:** According to small environmental capacity and fragile ecosystem of lake, the lakes in Chongqing Section of Three Gorges Reservoir Region were taken as a case. The effects of cold water discharge of lake water source heat pump systems on lake algae and Chla were studied with the method of physical simulation. It was found that cold discharge discouraged the growth of algae, and the critical temperature of algae growth was between 4.5°C and 6.2°C. There was significant impact of cold discharge on dominant populations and its proportional change of algae. And it would reduce the number of algal populations and the content of Chla. Furthermore, the cold discharge would have great influence on total quantity of phytoplankton. And the higher the content of nitrogen and phosphorus of raw water was, the greater of the effect extent was.

**Key words:** water source heat pump; lakes; cold water discharge; phytoplankton; effect

在国家大力倡导节能减排的大背景下, 地表水源热泵作为新兴节能环保技术, 得到了强劲的推动。地表水源热泵系统夏季排水温度较水源水温高 3~8 °C, 而冬季排水温度较水源水温低 3~7 °C<sup>[1-2]</sup>。地表水源热泵系统取水量较大, 涉及水域广, 社会关注程度较高, 无论其尾水对水环境影响程度如何, 都必须通过科学研究得到一个确切的结论。相对于江

河来说, 湖泊受到的影响显然更大, 因为湖泊容量相对较小, 并且缺乏流动性, 生态系统比较脆弱, 尾水排放对其水温变化影响更大。而湖泊浮游植物的数量及种类与湖泊富营养化进程密切相关, 因此, 系统研究湖水源热泵尾水排放对湖泊浮游植物的影响是十分必要和紧迫的。通过研究可以为水源热泵尾水污染评价提供支撑, 并且为进一步的尾水污染防治

收稿日期: 2009-07-20

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目 (2007BAB21B03-1)

作者简介: 周健 (1964-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事污水处理及水污染控制的研究, (E-mail) zhoujiantt@126.com。

及湖泊生态修复研究提供依据<sup>[3]</sup>。

有关地表水源热泵系统尾水排放对水环境安全的影响问题,国内有少量报导<sup>[4-6]</sup>,但缺乏系统研究。水温对水质及水生生物的影响国外研究也较少<sup>[7-8]</sup>,而电厂温排水对水环境的影响在国内外研究中较多<sup>[9-14]</sup>。电厂全年排出的都是热水,而地表水源热泵系统冬季排水温度较水源水温低,这一点与电厂温排水有所不同。在地表水源热泵系统设计中普遍认为尾水对水环境影响较小,因此未加以重视。国内外也极少有这一方面的系统研究,尤其冬季冷排水对水环境可能造成的影响研究更是空白。

该研究根据热平衡相似原理,建立物理试验模型,模拟湖水源热泵系统冬季冷水排放,并用2种不同湖泊水质作平行试验,以自然水温作参比。通过对试验水体藻类数量、种群分布,以及叶绿素a含量的监测与对比,研究水源热泵系统冬季冷水排放对浅水型湖泊浮游植物生长的影响程度。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验模型设计原则

在物理模型试验装置的设计上,主要考虑水流运动的相似性和水面散热能力的相似性,因此模型必须满足重力相似、粘滞力相似和热平衡相似。即模拟装置与湖泊原型相比,雷诺数相等、密度弗氏数相等。如果设平面尺寸比例为 $L_r$ ,由于水深必须满足最小值要求,所以水深比例 $Z_r < L_r$ ,根据相似准则,此时冷排水出流速度 $V_r = Z_r^{1/2}$ ,流量 $Q_r = L_r Z_r^{1.5}$ 。

### 1.2 试验装置

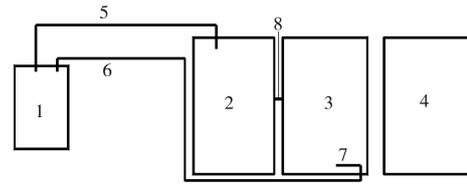
试验主要模拟浅水湖泊,为简化模型,原型湖泊取长宽高的平均值分别为350 m、150 m、5 m,模型长度比例为300:1,深度比例10:1,则冷排水流速比例为3.16,流量比例约为10 000:1。

试验分2组进行,试验装置见图1,每组由3个长方体模拟水池组成,试验水池尺寸为: $L \times B \times H = 0.58 \text{ m} \times 0.51 \text{ m} \times 0.50 \text{ m}$ ,每个水池有效容积145升,3个水池分别装满水,其中1个作为参比水池,另2个水池并联在一起且底部用UPVC50给水管连通,目的是增大容量并且连通管有过渡作用,使得2个水池有一定的温度梯度。

模拟试验用到的主要仪器设备是RO-1HP型激光冷水机组和LDO-101型溶解氧测定仪。冷水机组技术参数见表1。

表1 试验用冷水机组技术参数

型号	制冷量/ (kcal·h <sup>-1</sup> )	冷冻水量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	冷冻水箱/ m <sup>3</sup>	冷却风量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	压缩机功率/ kW
RO-1HP	2 528	0.51	0.028	1 000	0.75



1- 激光冷水机; 2- 回水区; 3- 出水区; 4- 参比区;  
5- 回水管; 6- 冷水出水管; 7- 冷水排放口; 8- 连接管

图1 试验装置流程图

### 1.3 试验水质

试验用水采用市区某湖泊与水库水混合配制而成,根据三峡库区重庆段湖泊水库水质现状,第1组试验用水水质模拟中富营养化湖泊水质,

第2组试验用水模拟接近重庆地区一般湖库水质均值。2组试验初始水质如表2所示。

表2 试验初始水质

组别	TN/ (mg·L <sup>-1</sup> )	NH <sub>3</sub> -N/ (mg·L <sup>-1</sup> )	TP/ (mg·L <sup>-1</sup> )	pH/ (mg·L <sup>-1</sup> )	COD <sub>Mn</sub> / (mg·L <sup>-1</sup> )
1	2.55	0.74	0.098	7.55	6.5
2	2.20	0.55	0.055	7.32	5.2

### 1.4 试验方法

试验经过1周调试以后正式启动,第1组从2008年12月12日开始,第2组从12月19日开始。根据地表水源热泵工程运行特点,设定冷水机出水温度5.0℃~6.0℃(视气温情况调整),冷排水采用水面上方射流排放方式,每天冷水机运行时间约为6~8 h,视气温和水温情况调整。定期检测各个单元的藻类分布情况以及叶绿素a含量。通过模拟试验的方法,研究冷排水对湖泊局部水域浮游植物(藻类)的影响程度。藻类测定采用显微镜计数测量法,叶绿素a的测定采用丙酮提取分光光度法<sup>[15]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 冷排水对藻类总量的影响

冷排水前模拟装置藻类监测结果见表3,冷排水后2组试验装置藻类数量变化情况如图2和图3。尽管该试验在冬季水温较低情况下进行,但是从试验期间天气情况来看,在2008年12月10日—12月19日和2009年1月8日—1月12日阳光较为充足,另外加上风力作用,藻类生长速度很快,尤其是参比区。由图2和图3可知,藻类生物量随时间变化情况,参比区藻类呈现指数增长趋势,而其它试验区的藻类生物量则先下降后上升,但藻类总量明显低于参比区,并且随时间推移相差越来越大。分析认为主要由于从2008年12月19日—12月28日,

气温相对较低,平均气温在 5~7 °C 左右,加之冷排水使水温更低,所以当水温低于某个值时藻类总量呈现负增长状态。根据试验实测水温,在上述时间段试验区水温大约为 4.5~6.2 °C,藻类正负增长的临界温度应该就在这个温度范围之内。

从 2 组对比试验还可以看出,第 1 组藻类总量冷排水前较第 2 组多,冷排水后出水区与参比区藻类总量差别也更大。这表明原水藻类总量越多,冷排水对藻类抑制作用越强。

表 3 冷排水前模拟装置藻类监测结果/(10<sup>4</sup>·L<sup>-1</sup>)

门类	第 1 组			第 2 组		
	出水区	回水区	参比区	出水区	回水区	参比区
绿藻	122.5	113.1	131.2	98.2	106.5	101.8
蓝藻	48.1	55.4	65.3	29.7	28.8	42.5
硅藻	96.2	103.7	18.4	62.5	65.4	53.9
隐藻	15.2	16.1	14.8	10.6	9.2	12.4
裸藻	12.3	14.9	12.8	6.1	7.3	8.1
其它	33.5	29.6	34.7	21.9	18.7	22.5
总藻	327.8	332.8	377.2	229.0	235.9	241.2

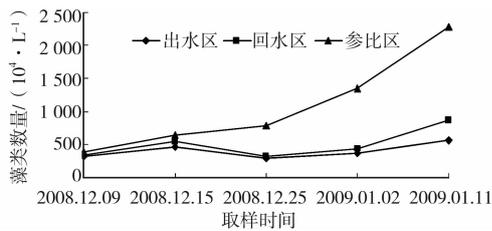


图 2 冷排水期间第 1 组试验装置藻类数量变化曲线

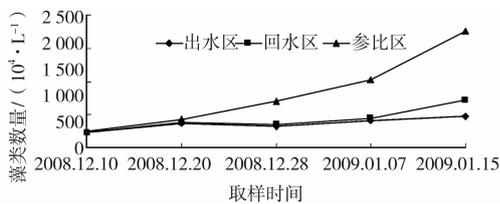


图 3 冷排水期间第 2 组模拟装置藻类数量变化曲线

### 2.2 冷排水对藻类优势种群的影响

冷排水之前,优势藻类及其占总藻百分比见图 4,试验启动后 2 组试验优势藻类及百分比均发生了一定的变化,2008 年 12 月 25 日和 2009 年 1 月 11 日,第 1 组模拟装置出水区与参比区优势藻类及占总藻百分比见图 5 和图 6,2008 年 12 月 28 日和 2009 年 1 月 15 日,第 2 组模拟装置出水区与参比区优势藻类及占总藻百分比见图 7 和图 8。

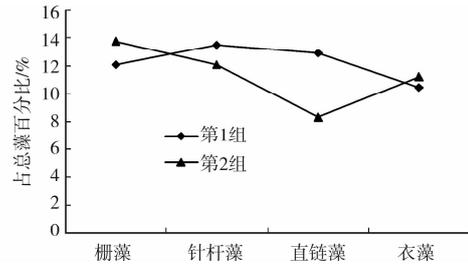


图 4 冷排水前模拟装置中优势藻类种群分布

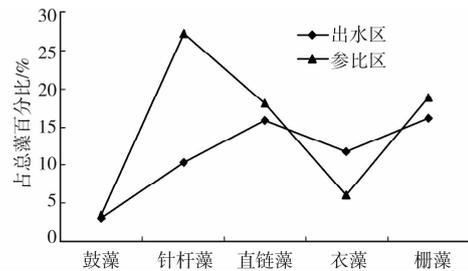


图 5 冷排水后第 1 组优势藻类种群分布(12 月 25 日)

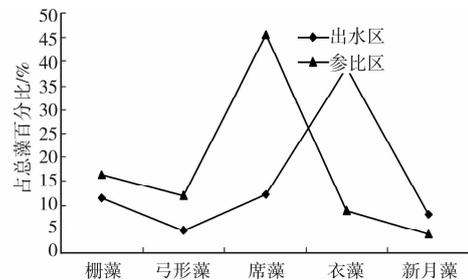


图 6 冷排水后第 1 组优势藻类种群分布(1 月 11 日)

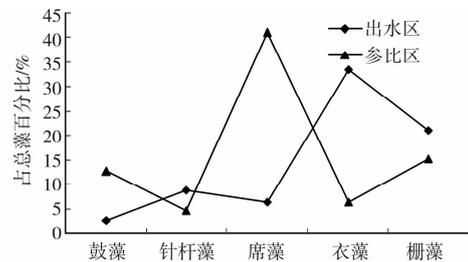


图 7 冷排水后第 2 组优势藻类种群分布(12 月 28 日)

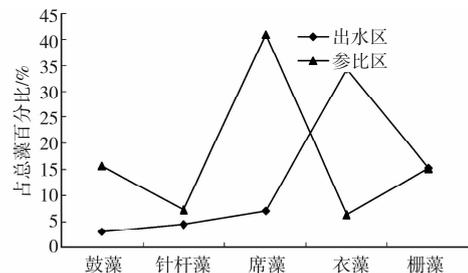


图 8 冷排水后第 2 组优势藻类种群分布(1 月 15 日)

### 2.3 冷排水对叶绿素 a 的影响

2 组试验叶绿素的 a 监测结果如图 9 和图 10 所示。

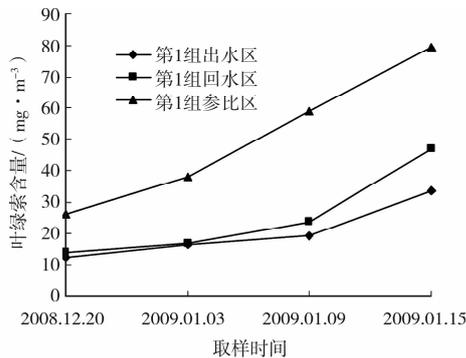


图 9 冷排水对第 1 组装置叶绿素 a 的影响

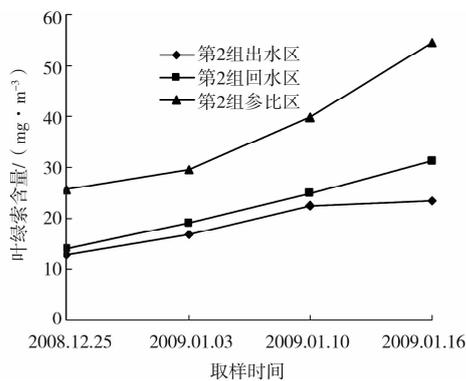


图 10 冷排水对第 2 组装置叶绿素 a 的影响

由图 9 和图 10 可知,叶绿素 a 含量变化曲线与藻类变化曲线非常相似,各试验单元叶绿素 a 含量均呈增长趋势,参比区增速明显大于出水区。在同组中,由于冷排水作用,出水区水温始终低于参比区,叶绿素 a 含量相差较大。第 1 组,出水区叶绿素 a 浓度甚至不到参比区一半,第 2 组出水区也比参比区低 50%~60%。表明冷排水对浮游植物总量增长有较大影响。将 2 组试验横向比较,发现在冷排水量及平均水温接近,而试验水质不同的情况下,叶绿素 a 浓度的变化量也有差异。因此,对水质本底值不同的水体,冷排水对其叶绿素 a 浓度的影响程度也不同,本底值越高,影响程度越大。主要原因是在冷排水作用下,浮游植物生长速率下降,而水质本底值越高,浮游植物生长速率下降越快。

## 3 结 论

1)冷排水接纳水域的藻类生物量呈现先下降后上升趋势,而自然状态下藻类则呈现指数增长趋势。冷排水接纳水域藻类总量明显低于自然生长区,并且冷排水时间越长相差越大。表明冷排水对藻类总

量增长有明显抑制作用。试验区水体藻类正负增长的临界温度在 4.5~6.2℃之间。

2)冷排水对冷排水接纳水域的优势藻类种群及比例有一定的影响。冷排水区衣藻比例上升幅度最大,其次是席藻,直链藻比例下降最多。同时,冬季自然水温在 10℃以下,当有冷排水进入使得水温进一步降低时,绿藻会迅速成为优势藻类,且主要以栅藻、衣藻为主。冷排水还影响了藻类的多样性,使接纳水域的藻类种群数减少。

3)冷排水显著降低湖泊叶绿素 a 的含量。对水质本底值不同的湖泊,冷排水对其叶绿素 a 浓度的影响程度也不同,氮和磷的本底值越高,影响程度越大。

### 参考文献:

- [1]李志浩. 2005 年全国空调与热泵节能技术交流会综述[J]. 暖通空调, 2005, 35(12): 1-5.  
LI ZHI-HAO. Review of the national air conditioning and heat pump energy technology symposium 2005[J]. Heating Ventilation and Air condition, 2005, 35(12): 1-5.
- [2] CHEN XIAO, ZHANG GUO-QIANG, PENG JIAN-GUO, et al. The performance of an open-loop lake water heat pump system in south China[J]. Applied Thermal Engineering, 2006(12): 2255-2261.
- [3]黄向阳,周健,刘月红. 地表水源热泵系统尾水对水环境影响研究综述[J]. 科学技术与工程, 2009; 9(5): 1210-1216.  
HUANG XIANG-YANG, ZHOU JIAN, LIU YUE-HONG. Effects of surface water heat pumps discharges on water environment [J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(5): 1210-1216.
- [4]王子云,付祥钊,王勇,等. 重庆市发展长江水源热泵的水源概况分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(1): 92-94.  
WANG ZI-YUN, FU XIANG-ZHAO, WANG YONG, et al. Analysis of yangtze river water as a potential source for developing a water source heat pump in Chongqing[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(1): 92-94.
- [5]苏洋,付祥钊,王勇. 地表水源热泵接纳水体温升对水生生态系统的影响[C]//2008 铁路暖通空调学术年会论文集, 江苏苏州, 2008.
- [6]卢军,赵炎. 水源热泵排水对江水温度影响的模拟分析[C]//全国暖通空调制冷 2008 年学术年会, 重庆, 2008.
- [7] ROBERT ARFI. The effects of climate and hydrology on the trophic status of selingue reservoir mali, West Africa[J]. Lakes & Reservoirs Research and Management, 2003, 8: 247-257.

(下转第 130 页)

- 97-105.
- [14] 苑宏英, 员建, 徐娟, 等. 碱性 pH 条件下增强剩余污泥厌氧产酸的研究[J]. 中国给水排水, 2008, 24(9): 26-29.  
YUAN HONG-YING, YUAN JIAN, XU JUAN, et al. Study on enhanced anaerobic acidogenesis of excess sludge at alkaline Ph[J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(9): 26-29.
- [15] MONTGOMERY H A C, DYMOCK J F, THOM N S. The rapid colorimetric determination of organic acids and their salts in sewage-sludge liquor [J]. The Analyst, 1962, 87: 949-955.
- [16] 朱南文, 闵航, 陈美慈, 等. TTC—脱氢酶测定方法的探讨[J]. 中国沼气, 1996, 14(2): 3-5.  
ZHU NAN-WEN, MIN HANG, CHEN MEI-CI, et al. The study of determination on TTC-Dehydrogenase activity[J]. China Biogas, 1996, 14(2): 3-5.
- [17] GUANG-HUI YU, PIN-JING HE, LI-MING SHAO, et al. Toward understanding the mechanism of improving the production of volatile fatty acids from activated sludge at pH 10.0[J]. Water Research, 2008, 42: 4637-4644.
- [18] 李军, 杨秀山, 彭永臻. 微生物与水处理工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 376-382.
- [19] THIRDK A B, NEWLANDGM. Long-term aeration management for improved N-removal via SND in a sequencing batch reactor[J]. Wat. Res., 2005, 3: 8-17.
- [20] 李基东. 反硝化脱氮补充碳源选择与研究[D]. 上海: 同济大学, 2007: 49.
- [21] LIN JIH-GAW, MA YING-SHIH, HUANG CHUN-CHIH. Alkaline hydrolysis of the sludge generated from a high-strength, nitrogenous-wastewater biological-treatment process [J]. Bioresource Technology, 1998, 65: 35-42.

(编辑 胡英奎)

(上接第 119 页)

- [8] JOHN M. HAMRICK. Analysis of water temperature in Conowingo Pond as influenced by the peach Bottom atomic power plant thermal discharge [J]. Environmental Science & Policy, 2000(3): 145-149
- [9] 蔺秋生, 金琨, 黄莉. 电厂温排水影响数学模型研究及应用[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(1): 29-32.  
LIN QIU-SHENG, JIN KUN, HUANG LI. Research and application of mathematical modeling of thermal discharge from power plant [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(1): 29-32.
- [10] 孙艳涛, 王惠民, 吴修锋. 温排水对水体生态环境影响的分析及处理[J]. 水资源保护, 2008, 24(2): 70-72.  
SUN YAN-TAO, WANG HUI-MIN, WU XIU-FENG. Impacts of thermal discharge on aquatic ecological environment and the countermeasures [J]. Water Resources Protection, 2008, 24(2): 70-72.
- [11] CHUANG YI-LI, YANG HSIAO-HUI, LIN HSING-JUH. Effects of a thermal discharge from a nuclear power plant on phytoplankton and periphyton in subtropical coastal waters[J]. Journal of Sea Research, 2009, 61(4): 197-205.
- [12] LANGFORD T E L. Thermal discharges and pollution [G]// JOHNH STEELE, AKRL K, TUREKIAN, et al. Encyclopedia of Ocean Sciences (Second Edition). New York: Elsevier Science Pub. Co, 2009: 2933-2940.
- [13] PAUL R HOLLAND, ANTHONY KAY, VINCENZO BOTTE. Numerical modeling of the thermal bar and its ecological consequences in a river-dominated lake [J]. Journal of Marine Systems, 2003(43): 61-81
- [14] CHENCW, WEINTRAUB LHZ, HERR J. Impacts of a thermal power plant on the phosphorus TMDL of a reservoir [J]. Environmental Science & Policy, 2000(3): 217-223.
- [15] 陈伟民, 黄祥飞, 周万平, 等. 湖泊生态系统观测方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.  
CHEN WEI-MIN, HUANG XIANG-FEI, ZHOU WAN-PING, et al. The observation method of lake ecosystem [M]. Beijing: China environment scientific press, 2005.

(编辑 王秀玲)