

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.01.023

湖水源热泵温(冷)排水三维温度场数值模拟

祝悦,韩龙喜

(河海大学环境学院,江苏 南京 210098)

摘要:结合南京某湖水源热泵工程项目,利用三维数学模型对系统运行时温(冷)排水温度场进行数值模拟,预测温(冷)排水扩散范围及温升(降)程度。结果表明:该项目造成的湖泊温升(降)满足地表水环境质量标准要求;温、冷排水受密度影响,从湖泊表层排放后扩散情况不同,温排水对湖泊表层水温影响较大,排放口附近区域水温层趋水平方向分布,而冷排水对湖泊底层水温影响较大,排放口附近区域水温层趋垂直方向分布;相同排放流量、排水方式情况下,冷排水对湖泊水温的影响更大。

关键词:湖水源热泵;温(冷)排水;三维温度场;数值模拟
中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2016)01-0130-05

Numerical simulation of three-dimension thermal environmental impact of lake-water source heat pump warm/cold water discharge

ZHU Yue, HAN Longxi
(College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In combination with Lake-water source heat pump project in Nanjing, three-dimensional modeling was established to simulate the thermal environmental impact of warm/cold water discharge when the system is operating, and predict the range of warm/cold water discharge diffusion and the extent of temperature rise/drop. The results show that: the lake-water temperature rise/drop caused by the project meets the requirement of environmental quality standards for surface water. Affected by water density, thermal diffusion of discharged warm water is different from cold water and the discharged warm water has a greater impact on the temperature of surface lake-water and water temperature layering appear to be horizontal near the outfall area, while the discharged cold water has a greater impact on bottom water and the water temperature layering appear to be vertical near the outfall area. With the same emission load and the same emissions way, cold water discharge has greater impact on the water temperature of the lake.

Key words: lake-water source heat pump; warm/cold water discharge; three-dimensional temperature field; numerical simulation

地表水源热泵是一种以江、河、湖、海等地球表面的水体作为热源进行制冷/制热循环的热泵,在制热的时候以水作为热源,在制冷的时候以水作为排热源^[1]。地表水源热泵技术是一种可再生能源利用技术,具有运行稳定、环境效益显著、高效节能等优势,近年来被大力推广^[2-3]。湖水源热泵作为地表水源热泵的一种,其应用方案的可行性已经在实际应用中得到证明^[4-6],但其研究主要集中在技术应用

上,而针对湖水源热泵温(冷)排水在受纳水域的温度扩散规律的研究很少。
关于温排水对自然水体的影响,国内外研究多集中于发电厂冷却水对海洋热环境影响方面^[7-9],而有关冷排水造成受纳水域温降对水环境的影响的研究较少。对温排水的数值模拟,目前多集中在沿垂向积分的平面浅水二维模型上,但二维模型由于深度平均的缘故,无法估计排水口附近水温层厚度,模

拟温(冷)排水时,可能会导致平面上温升(降)区面积偏小^[10]。

笔者结合南京某湖水源热泵工程项目,利用三维数学模型对温(冷)排水热扩散情况进行数值模拟,预测温(冷)排水扩散范围及温升(降)程度,分析排水口附近区域水温层分布特征,探讨温排水和冷排水对排水口附近区域水温的不同影响,旨在为湖水源热泵系统的设计和运行提供参考。

1 工程概况

1.1 建筑和气候概况

南京某度假中心项目总建筑面积 90 999 m²,是集旅游、度假、休闲、运动、商务、生活为一体的综合建筑群。其酒店与部分商务楼空调系统设计采用以地表水为冷(热)源的水源热泵系统。该系统就近利用项目附近湖泊水的低温低位热能资源,利用热泵技术,通过少量的高位电能输入,实现低位热能向高位热能的转移,进行夏季制冷,冬季供暖,并兼供热水。

项目所在区域常年平均气温为 15.1℃,较高的 1961 年平均气温为 16℃,较低的 1969 年平均气温为 14.3℃。2012 年最低月平均气温为 2.2℃(1 月),最高月平均气温为 29.2℃(7 月)。全年无霜降期为 228 d,平均气压为 101.55 kPa,略高于海平面标准气压。境内最多风向为东风,夏季多东风和东南风,多年平均风速 2.8 m/s;冬季多东北风和西北风,多年平均风速为 2.3 m/s。多年平均降水量为 999.8 mm,多年平均蒸发量为 1 459.6 mm。

1.2 冷热源方案

对项目取水口附近的 3 个采样点进行水质监测,湖水水质为Ⅱ~Ⅲ级,满足水源热泵系统对水质的要求。湖水由取水口泵送经简单处理后,进入热泵主机的换热器,在封闭环路中循环后排入湖内。取水量和退水量相等,没有水的损耗,水质基本无变化,夏季排水水温温升 3℃,冬季排水水温温降 2℃。退水实施分散浅排,可减小对湖泊水体的影响^[11]。

湖水源热泵系统负担夏季冷负荷 4 393.07 kW,冬季热负荷 2 907.24 kW。夏季空调制冷期间,设计取水量为 750 m³/h,每天开机 12 h,制冷期为 120 d;冬季供暖期间,取水量为 750 m³/h,每天开机 12 h,供暖期为 90 d;春秋季节基本停用,仅启新风和辅助加热水。

2 三维水温数值模拟

为实现温(冷)排水的精细模拟,笔者建立三维水温数学模型,分别对温排水和冷排水热扩散情况

进行数值模拟。

2.1 模型介绍

笔者采用 MIKE3 建立数学模型,对温(冷)排水热扩散情况进行数值模拟。MIKE3 软件由丹麦水资源及水环境研究所(DHI)研发,可用于模拟港口、河流、湖泊水库、河口和海洋的水动力、水质、泥沙输移问题,具有先进的前后处理功能和友好的用户界面。MIKE3 模型的数学基础是雷诺平均化的 N-S 方程,它包括了紊流影响及密度变化,同时包含了盐度及温度平衡方程,其水动力学模块采用交替方向隐式迭代法(ADI 方法)对质量及动量守恒方程进行积分,对其产生的数学矩阵采用双精度扫描法(DOUBLE SWEEP)进行求解^[12]。

2.2 模拟范围和网格构建

为探讨湖水源热泵温(冷)排水对受纳湖泊水温结构的影响,以整个湖区为模拟范围,但重点关注排放口附近水温变化情况。本研究受纳湖泊面积约 8.8 km²,平均水深约 8 m,采用该湖泊 2013 年实测水下地形作为模型计算条件,离散得到各个节点的湖底高程,见图 1。为了较精确拟合天然水域的复杂边界,水平方向上采用无结构三角网格划分计算区域,在排水口附近区域适当加密以提高模型的计算精度,非加密区域网格边长约 100 m,加密区域网格边长约为 50m,垂直方向上采用均匀分层模式,即任何两层网格的间距与总水深的比值相等,垂直方向上分为 5 层,研究区域平面网格布置如图 2 所示。

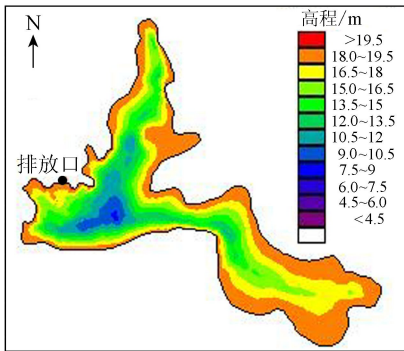


图 1 研究区域地形(单位:m)

2.3 定解条件及参数取值

2.3.1 定解条件

a. 初始水位。根据该项目湖泊水文站 1980—2001 年水文监测资料,该湖泊多年平均水位 22.8 m。据 2012 年 1 月至 2013 年 9 月逐月水位监测数据,2012 年最高水位 23.51 m(9 月),最低水位 22.18 m(7 月),平均水位 23.03 m,2013 年最高水位 23.57 m(6 月),最低水位 22.43 m(9 月),平均水位 23.17 m。采用多年平均水位作为模拟的初始水位条件。

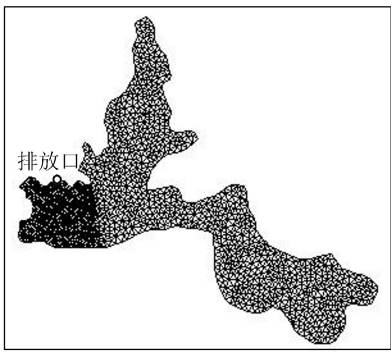


图2 平面网格布置

b. 初始水温。根据下关长江水文站资料,南京地区夏季7、8月份平均水温一般在30℃,冬季1、2月份平均水温一般在7℃,可作为该项目附近湖泊月平均水温。实测该湖泊水温,2014年1月4日水温为6.3℃,2014年1月10日水温为5.6℃,与南京地区相同季节时的地表水温基本一致。由于湖泊表层水温和底层水温相差不大,为着重探讨温(冷)排水对湖泊的水温结构影响,不考虑湖泊自然水温分层,采用南京地区夏季和冬季平均水温分别作为模拟的初始水温条件。

c. 流量边界条件。排水处所在计算单元的流量边界条件根据实际退水情况给定;出库流量边界采用自由出流边界条件。

d. 水温边界条件。排水处所在计算单元的水温边界条件根据实际退水水温变化情况给定;出库水温边界条件设定为湖泊自然水温。

2.3.2 参数取值

a. 糙率。依据资料,预测区域糙率取值范围为0.020~0.033,本项目糙率取为0.028。

b. 热扩散系数。在MIKE3软件中,热扩散系数是按照比例系数乘以紊动黏性系数计算得出,其中,紊动黏性系数由软件在进行模拟计算时自动算出,比例系数由人为给定,取软件用户手册推荐值1.0。

c. 风场摩擦力。本次模拟考虑静风条件下温(冷)排水热扩散情况。

2.4 模型验证

水体的水动力特征是分析研究温(冷)排水热扩散特征的基础,由于该湖水源热泵系统还未建成使用,尚无热泵系统运行时流场实测资料,故对湖泊原流场进行数值模拟,并利用排放口附近代表性测点实测资料进行水动力模型的率定和验证。排放口附近,平行于岸边各测点(离岸80m)表层流场流速验证见图3,垂直岸边各测点表层流场流速验证结果见图4。从模型流场的验证结果来看,代表性测点流速平均误差小于15%。

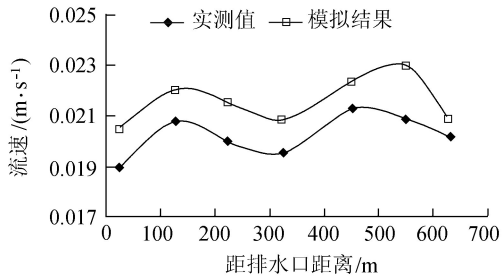


图3 平行于岸边各测点流速验证结果

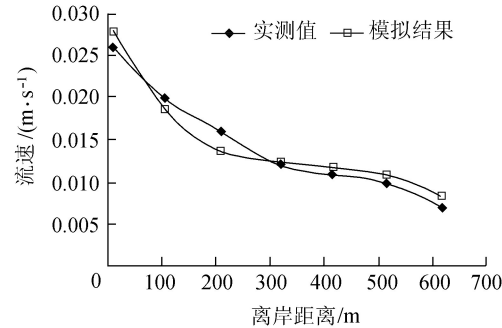


图4 垂直岸边各测点流速验证结果

2.5 模拟结果与分析

2.5.1 夏季温度场

夏季热泵系统排水量750 m³/h,排水温升3℃,湖水自然水温30℃,连续运行一周后湖体温升分布情况如图5所示。模拟结果是在忽略土壤与湖体换热基础上得出的,并且考虑机组连续运行情况,所以实际湖体热扩散范围更小,温升(降)更小。

由图5可知,夏季温排水对湖泊表层水温影响范围和影响程度最大,影响随着水深的增加显著减小。表层最大温升区域温升约为0.46℃,中层最大温升区域温升约为0.21℃,底层最大温升区域温升约为0.15℃。在排放口附近区域温度梯度很大,距离越远温度梯度越小。

退水对湖体造成的温升均小于1℃,满足地表水环境质量标准要求;人为造成的环境温度变化应限制在:周平均最大温升≤1℃^[13]。

2.5.2 冬季温度场

冬季热泵系统排水量750 m³/h,排水温降2℃,湖水自然水温7℃,运行一周后湖体温降分布情况如图6所示。

由图6可知,除极靠近排水口处,冬季冷排水对湖泊底层水温影响范围和影响程度最大,影响范围随着水深的增加而增加。但由于冷排水从湖泊表层排放,最大温降区域在湖泊表层靠近排水口处,最大温降约为0.63℃,中层最大温降区域温降约为0.33℃,底层最大温降区域温降约为0.30℃,但冷排水对底层的影响范围最大。与温排水相似,冷排水在排放口附近区域温度梯度很大,距离越远,温度

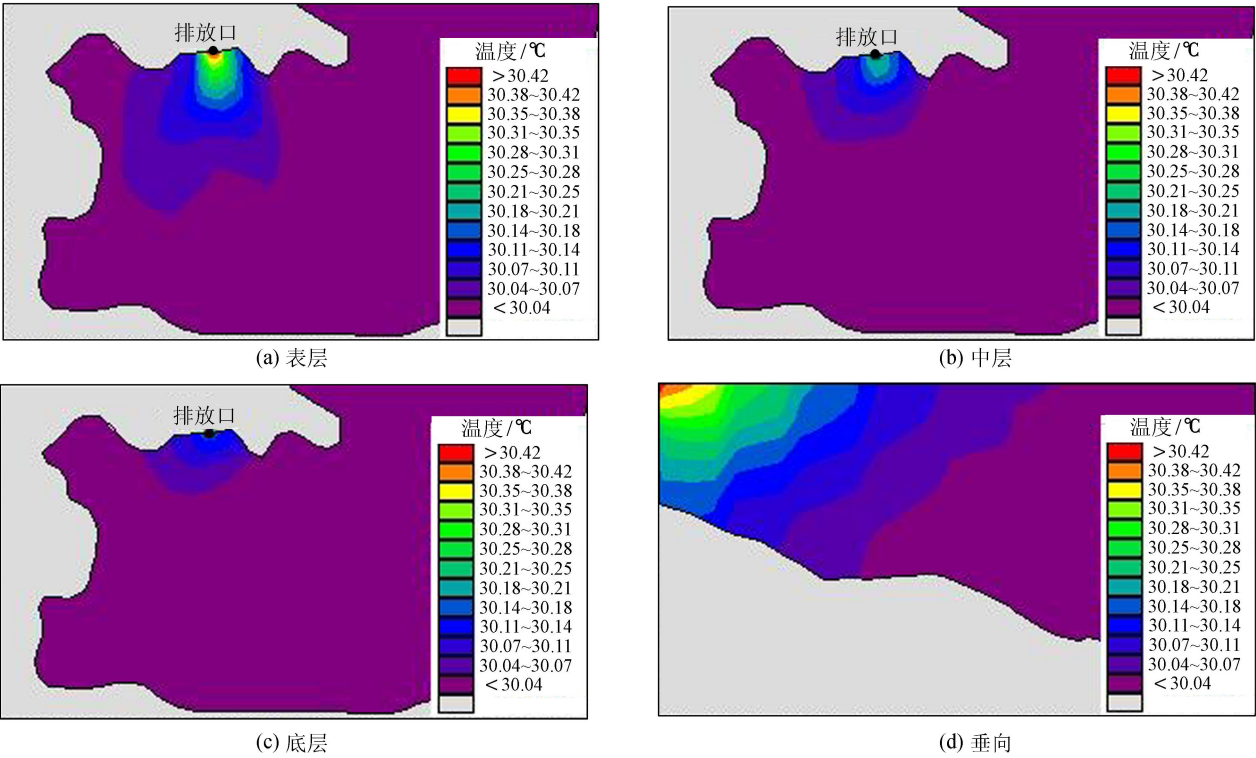


图5 夏季各层温升分布

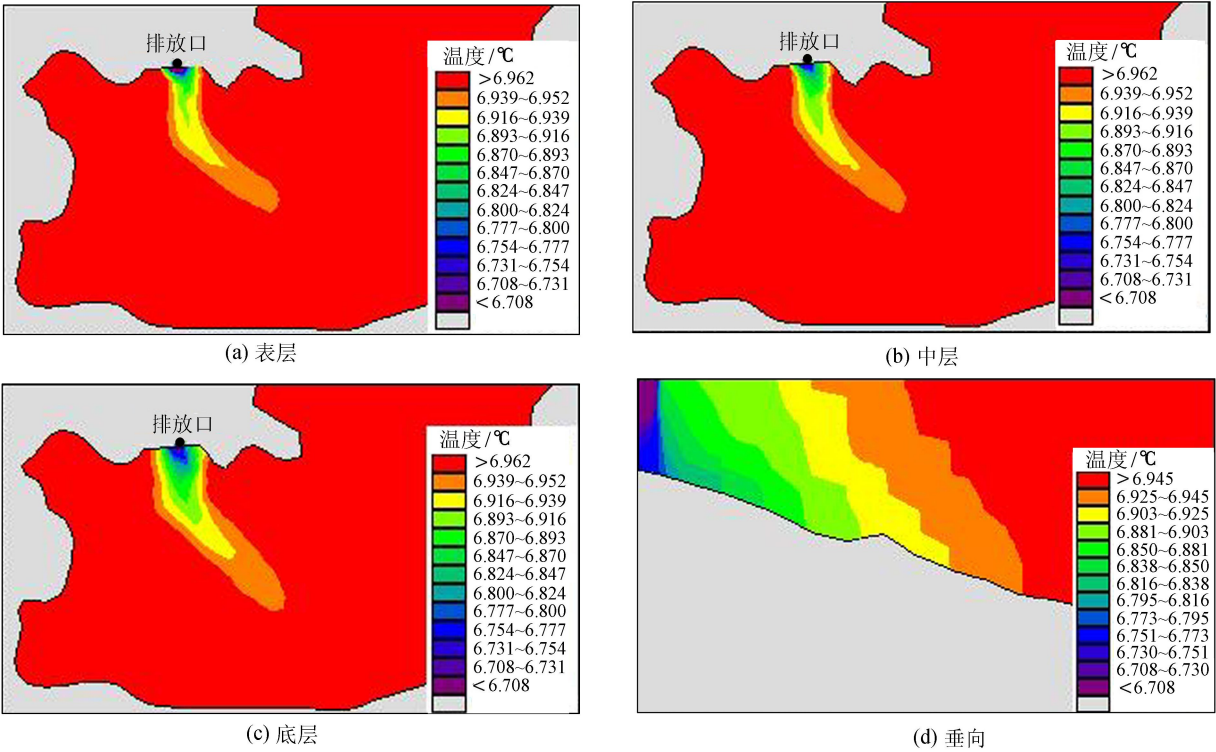


图6 冬季各层温降分布

梯度越小。

退水对湖体造成的温降均小于 2℃, 满足地表水环境质量标准要求, 即人为造成的环境水温变化应限制在周平均最大温降 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ [13]。

2.5.3 夏季温度场和冬季温度场比较

图 5 和图 6 对比可以看出, 由于夏季温排水密

度比自然水体密度小, 从湖泊表层排放后, 温排水主要分布在湖泊表层, 随水流向四周扩散, 热扩散呈辐射状, 对湖泊表层水温影响较大, 排放口附近区域水温层趋水平方向分布; 而冬季冷排水密度比自然水体密度大, 从湖泊表层排放后, 沉降的同时随水流向坝址处流动, 扩散距离较远, 且对湖泊底层水温影响

范围较大,排放口附近区域水温层趋垂直方向分布。

排放流量相同、排水方式相同情况下,温排水(温升 3°C)造成湖泊最大温升约为 0.46°C ,冷排水(温降 2°C)造成湖泊最大温降约为 0.63°C ,且冷排水对湖泊底层造成较大影响。可见冷排水对湖泊水温的影响更为严重,原因在于温排水分布在湖泊表层,有利于与外界进行热交换,冷排水的沉降特征导致与外界的热交换减少。

3 结 论

- a. 依照该项目水源热泵空调系统的规模,夏季温排水造成湖泊最大温升约为 0.46°C ,冬季冷排水造成湖泊最大温降约为 0.63°C ,满足地表水环境质量标准要求。
- b. 温(冷)排水受密度影响,从湖泊表层排放后扩散情况不同,温排水对湖泊表层水温影响较大,排放口附近区域水温层趋水平方向分布;冷排水对湖泊底层水温影响较大,排放口附近区域水温层趋垂直方向分布。
- c. 排放流量相同、排水方式相同的情况下,冷排水对湖泊水温的影响更大,在进行湖水源热泵系统的设计和运行时,应重点考虑冷排水对湖泊的影响。
- d. 设计时,排水口应尽量靠近水体表面,分散浅排,有利于温(冷)排水与外界进行热交换,减小对湖泊的影响。

参考文献:

[1] 张军. 地表水源热泵的发展现状以及面临的问题[J]. 制冷空调与电力机械,2007,28(6): 73-77. (ZHANG Jun. Application status and problems of surface water heat pumps for the present[J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2007, 28(6): 73-77. (in Chinese))

[2] 孙强. 浅谈水源热泵技术的国内外发展现状及趋势[J]. 佳木斯大学学报: 自然科学版,2007,25(3): 433-434. (SUN Qiang. On the development of water loop source heat pump technology [J]. Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition, 2007, 25(3): 433-434. (in Chinese))

[3] 狄彦强,王清勤,袁东立,等. 水源热泵的应用与发展[J]. 制冷与空调,2006,6(5): 1-4. (DI Yanqiang, WANG Qingqin, YUAN Dongli, et al. Discussion about the application and development of water source heat pumps [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2006, 6(5): 1-4. (in Chinese))

[4] 刘婷婷,彭建国,张国强,等. 湖水水源热泵空调系统在湖南省的应用实例分析[J]. 建筑热能通风空调,2004,23(6): 40-44. (LIU Tingting, PENG Jianguo, ZHANG Guoqiang, et al. Application of lake water heat pump

system in Hunan Province [J]. Building Energy & Environment, 2004, 23(6): 40-44. (in Chinese))

[5] 陈金华,刘勇,丁勇,等. 重庆开县人民医院湖水源热泵空调系统实测分析[J]. 制冷与空调,2008,38(8): 111-114. (CHEN Jinhua, LIU Yong, DING Yong, et al. Test and analysis for lake-water source heat pump air conditioning system in People's Hospital of Kaixian, Chongqin[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2008, 38(8): 111-114. (in Chinese))

[6] 刘有势,马满英,李志仁,等. 株洲市神农城湖水源热泵空调系统的应用技术提炼[J]. 应用能源技术,2014(9): 6-10. (LIU Youshi, MA Manying, LI Zhiren, et al. Application technology extraction of lake-water-source heat pump air-conditioning system in Zhuzhou Shennong town [J]. Applied Energy Technology, 2014(9): 6-10. (in Chinese))

[7] 石继香,官云兰,赵利民,等. 国内外温排水热影响监测与评价研究方法探讨[J]. 江西科学,2014,32(1): 73-77. (SHI Jixiang, GUAN Yunlan, ZHAO Limin, et al. The investigation of monitoring and evaluation methods on thermal impact of thermal discharge from NPPs in domestic and abroad [J]. Jiangxi Science, 2014, 32(1): 73-77. (in Chinese))

[8] ARIELI R N, ALMOGI-LABIN A, ABRAMOVICH S, et al. The effect of thermal pollution on benthic foraminiferal assemblages in the Mediterranean shoreface adjacent to Hadera power plant (Israel) [J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62: 1002-1012.

[9] TATIANA P T, LEONARDO M N, FRANCISCO G A. 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: 188-195.

[10] 端木琳,李震,蒋爽,等. 大连星海湾海水源热泵空调系统热扩散数值模拟研究 [J]. 太阳能学报,2008,29(7): 832-836. (DUANMU Lin, LI Zhen, JIANG Shuang, et al. Numerical simulation of the thermal discharge in Xinghai bay seawater source heat pump project [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2008, 29(7): 832-836. (in Chinese))

[11] 卿晓霞,崔相楠,周健,等. 江水源热泵尾水排放方式优选试验研究[J]. 土木建筑与环境工程,2011,33(7): 105-110. (QING Xiaoxia, CUI Xiangnan, ZHOU Jian, et al. Experimental analysis on optimal tail water discharge method of river water source heat pump [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(7): 105-110. (in Chinese))

[12] 马腾,刘文洪,宋策,等. 基于 MIKE3 的水库水温结构模拟研究[J]. 电网与清洁能源,2009,25(2): 68-71. (MA Teng, LIU Wenhong, SONG Ce, et al. Application of MIKE3 in prediction analysis of the water temperature of reservoir [J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(2): 68-71. (in Chinese))

[13] GB 3838—2002 地表水环境质量标准[S].
(收稿日期:2015-03-26 编辑:彭桃英)