

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.07.013

江水源热泵排水系统温度场分析及优化策略

丁 勇, 钟云翔, 韩沐辰

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘 要: 研究对系统夏季排水渠段及入江口沿岸不同距离处水温开展了动态测试, 针对某江水源热泵工程的排水系统的温降构成问题, 总结了从排水口到沿江各距离的排水温降趋势, 分析得出排水温度场的分布规律。通过分析三种明渠排水形式的排水降温过程, 分析了排水热扩散范围, 探索了江水源热泵排水渠形式对排水水温下降程度的影响, 结果表明, 江水源热泵系统排水对水域的热污染扩散半径约为 50 m, 基本呈扇形扩散; 对排水渠形式而言, 渠道最佳长度为 5~10 m, 梯级式渠道相对挡板式渠道降温效果好。

关键词: 水源热泵; 排水温度; 排水形式; 热污染

中图分类号: TU83

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2014)07-098-06

Analysis on tail-water temperature of river water-source heat pump and its optimization

DING Yong, ZHONG Yunxiang, HAN Muchen

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment,
Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The temperature field diffusion issue of a water source heat pump drainage system in a certain river is studied, and dynamic tests to the water temperature of the drainage canal sector and the outfall area are carried out. The temperature drop trends of the drainage from the outfall down the river are summarized, and the distribution rule of the temperature field of the outfall is analyzed. Through modeling three different types of open canal drainages and analyzing the temperature drop process of each model, the paper explores how different kinds of drainage canal used in the river water source heat pump influence the drop extent of the water temperature. Results show that the thermal pollution to the water area caused by water source heat pump system drainage basically emerges as a fan-shaped diffusion with the radius of approximately 50 m. Compared with the baffle-type canal, the cascade-type canal provides better cooling effect, and its best length is of 5 to 10 m.

Key words: water source heat pump; temperature of tail-water; drainage form; thermal pollution

中国长江流域多属于典型夏热冬冷地区气候, 最热月平均气温在 27~30 °C, 最冷月平均气温在 4~8 °C^[1], 对空调系统要求夏季供冷, 兼顾冬季供热。重庆市位于嘉陵江下游, 长江上游地区, 具有丰富水资源, 由于空调需求旺盛, 加之良好的资源条件, 该地区成为发展江水源热泵技术的重点地域之一^[2]。

江水源热泵应用对受纳水体产生影响, 系统排水会引起局部水温变化, 温排水对于受纳水域的影响有多

收稿日期: 2014-02-15

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2012BAJ02B06)

作者简介: 丁勇(1975-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 工学博士, 主要从事可持续建筑环境与建筑节能研究, (E-mail) dinyongqq@163.com。

方面问题:从生态环境方面考虑,硅藻在水温为 25 ℃ 时,即会被绿藻代替,水温为 33~35 ℃ 时,绿藻又会为大多数鱼类所回避的蓝藻所代替^[3]。水体升温加速了有机物的分解而导致水中溶解氧减少,促进藻类生长繁殖,水体呈现缺氧状态,厌氧菌繁殖加快了有机物的分解速度,藻类生长速度也相应加快,从而加快水体富营养化进程^[4-8],同时温排水会对鱼类生长繁殖产生抑制作用^[9-13],会对受纳水域的鱼类种群结构产生影响^[14]。从能源利用方面考虑,受纳水域温度上升,对于江水源热泵而言,将导致机组冷凝温度上升,系统能效比不断下降,弱化系统的节能效果;而如果水温高于空气湿球温度,以江水作为冷却水时相对于冷却塔的节能性已经不明显^[15],因为温升会降低水体的节能使用潜力或进一步使用的空间,因此,如何减少长期运行的江水源热泵系统及江水源热泵布局规划对其附近水域的生态影响逐渐成为江水源热泵系统的一个必须解决的问题,使用地表水源热泵系统需要考虑如何在进入水体前尽可能降低排水温度。

笔者在对系统排水口温度场进行测试后,分析总结了系统回水的降温趋势,进而对系统排水的降温方式进行分析研究,根据文献^[16]提出的建议回水多点排放,根据地形采取原位冷却及水体修复等措施,及文献^[17]提出的水源热泵系统尾水表面式出流比淹没式出流对水体环境温升影响较小的观点,笔者结合原位冷却方式及表面式出流,就尾水排水为明渠排水形式进行了进一步的效果研究。

1 工程概况

本工程为重庆市某临江广场式建筑,总建筑面积为 29 094 m²,空调面积约为 14 840.68 m²,利用江水作为热泵机组的冷热源,设计制冷量为 2 029 kW,制热量为 1 028 kW,工程紧邻长江,水质较好。

热泵系统江水侧采用开式水系统,取水方式为浮船取水,趸船位于排水渠与江水的交汇口上游 170 m 处,江水通过船体上安装的取水泵直接送至水处理设备,经除沙等处理进入水源热泵机组,用以供热和供冷,取水管路按照摇臂式安装设置。

系统排水口位于该建筑所在岸堤上端,岸堤较长,导致该工程修筑长达 55 m 的排水明渠,渠道内设计为长台阶形式,系统排水由管路送至排水口暴露在空气中,由排水渠流至岸堤下端的交汇口进入长江。

该系统主要用于该建筑大部分区域白天空调和小型电影院夜间空调,运行时间为 8:00—17:00 和 19:30—22:00,系统晚上运行时间少于白天运行时间,系统在全天范围内间歇运行,机组运行时设计排水流量为 187 m³/h。

2 水温测试结果与分析

2.1 排水口沿岸水温测试

课题组 2012 年 9 月 6 日至 8 日对系统排水口沿岸水温进行了测试,由于岸边水流基本静止,为较准确地测量江水流动引起的水温变化,测点布置距岸边 3 m,水面下 0.1 m,以交汇口为起点,向上下游分散布开共 19 个测点,分别为交汇口处、上下游距交汇口 1、2、3、5、10、30、40、50、80 m 处,如图 1 所示。

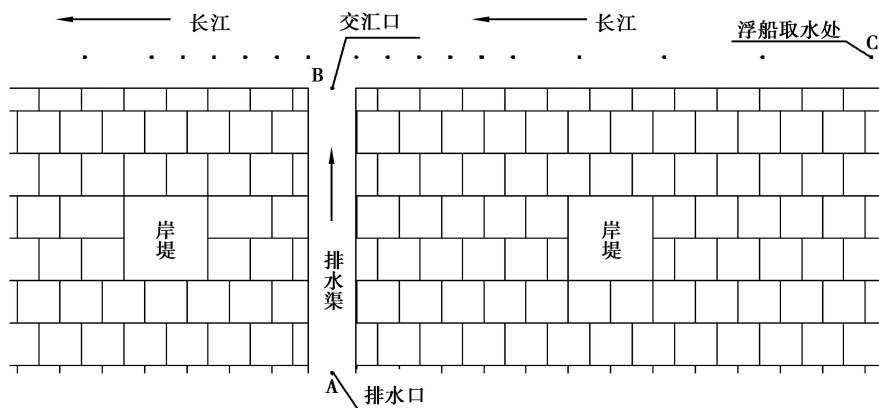


图 1 排水渠布局及测点布置

由于机组处于间歇运行,系统启动时排水口水温持续上升,水温数据使用水银温度计与 HOBOWare 测温仪在系统启动后且排水口水温稳定后取得,沿堤岸各距离测点的温度分布取 3 d 测试数据平均值如图 2 所

示。室外气象参数由 Dwyer 手持式温湿度计在江水测试过程中同步采集,当天的室外温度、相对湿度取平均值如表 1 所示。

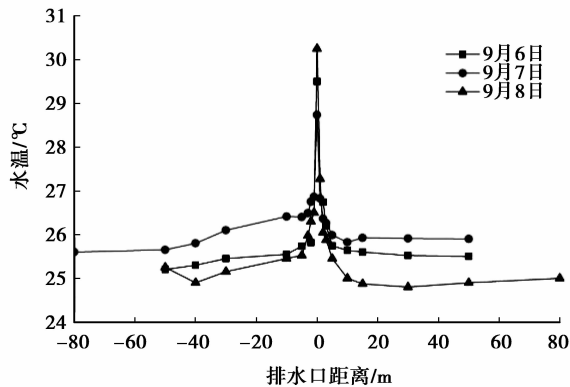


图 2 沿岸水温随测点位置变化

表 1 室外气象参数

日期	干球温度/°C	相对湿度/%
9月6日	37.8	41.2
9月7日	37.7	45.2
9月8日	26.2	88.1

江水初始温度取排水口上游 170 m 取水口处水温,测试结果显示,全天水温中下午最高,温差在 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内,3 d 水温对比,6 日与 7 日平均水温维持在 $25.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,8 日由于降雨,平均水温则降至 $24.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

从图 2 中可以看出,江水源热泵的排水在交汇口存在明显的温降现象,其中排水口 3 m 内局部温降最大,降幅可达到 $2.3\sim 4.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,3 m 外降温较缓,降幅为 $0.3\sim 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。依次看各降温段,沿上游方向,3 m 处温降可达总温降的 81.7%, $0\sim 3\text{ m}$ 段温降梯度为 $1.458\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$,10 m 处温降达总温降的 96.5%, $3\sim 10\text{ m}$ 段温降梯度为 $0.125\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$,15 m 处温降达总温降 97.5%,该段温降梯度为 $0.025\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$,30 m 处达总温降 99.5%,该段温度梯度为 $0.005\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$,上游 40 m 水温已降至原始温度;沿下游方向,3 m 处温降为总温降的 71.7%, $0\sim 3\text{ m}$ 段温度梯度为 $0.75\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$,10 m 温降达 74.5%,该段温度梯度为 $0.0156\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$,30 m 处温降为 84.1%,该段温降梯度为 $0.015\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$,40 m 温降为 93.6%,温降梯度为 $0.015\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$,50 m 温降达 98.4%,该段温降梯度为 $0.011\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$,80 m 降至原始温度,由此明显看出在流动水体中,夏季系统排水对交汇口上下游水体均有升温效果,温降梯度也随着排水的扩散而降低。测试期间,同时对水体流速进行了测试,测得水流速度平均约为 $0.2\text{ m}/\text{s}$,流速较低,对系统排水热污染的扩散造成了一定的影响,排水对流动水体的热污染基本呈现扇形状态,该工程热污染扩散半径为 50 m,热污染通过交汇口水流形成的涡流将热量传至上游。对比排水口上下游的水温可发现,由于江水的流动性,下游的水温受系统排水的影响相比上游大,温降趋势较缓,下游 50 m 处温降可达系统回水与原始江水温差的 59.3%。

2.2 排水渠段测试

该江水源热泵系统排水渠段水平长 54.6 m,高差 27.45 m,宽 1.1 m,渠道内呈台阶形式,如图 3 所示。机组停机后渠内无积水,太阳可以直射渠道。机组运行稳定后,对上端排水口测试得排水水温保持在 $30.2\sim 31.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,由 HOBOWare 测温仪和 LS10 型旋桨式流速仪测得水深 0.1 m,流速为 $0.4\sim 0.5\text{ m}/\text{s}$ 。

由于排水口对其下游水温影响比上游明显,笔者重点分析从排水渠段至下游 80 m 处的水温数据,测试数据如图 4 所示, $0\sim 55\text{ m}$ 为排水渠段, $55\sim 135\text{ m}$ 为下游沿岸。

由图 4 可以看出,排水渠段降温能力对减小热污染作用不可忽略,其整段排水渠的降温幅度达到 $2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,

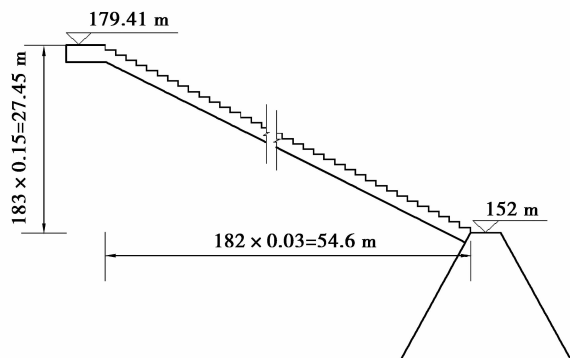


图 3 排水渠纵面图

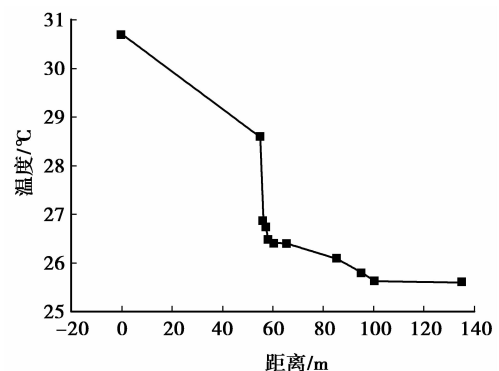


图 4 排水渠至下游水温变化

取交汇口上游 170 m 的取水口处的水温 $25.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为自然水温,该降幅为排水口水温与自然水温总温差的 41.2%,降温幅度接近排水在下游 80 m 范围内总降幅,交汇口温降可达总温降的 33.4%。排水在渠内流动时,由于阶梯之间高差,水流在重力作用下形成瀑布状,撞击下一阶梯形成水雾,该过程增强了排水流动过程中的蒸发,通过汽化潜热带走热量,降温能力与当地的湿球温度、气压有直接关系,其次与该段的长度、渠内水流形式有密切关系,而排水口处的温降大小,决定于排水与江水的温差,原始温度越低,排水温度越高,排水口处的温度陡降越剧烈。

以上实测数据得出,江水源热泵系统排水散热的整个温度场分为两个降温阶段:排水渠段和排水口 50 m 内水域。因此,降低系统排水对受纳水体的热污染,须针对这两阶段采取降温措施。

通过实测数据可见,在整个降温过程中,温降最剧烈的阶段发生在排水口 3 m 内,混合后温降幅度达到总温降的 33.4%,温差幅度达 $2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,依据文献[18],该区域为弱增温区($\Delta T < 3\text{ }^{\circ}\text{C}$),此温度增幅会导致浮游生物种类的增多,对水体上层的鲢、鳙等鱼类影响较大,因此,系统排水在汇入江水前必须降低自身温度,减少与江水水温的温差;同时排水入江前降温,可以缩小排水热污染的范围,缩短排水降温需要的沿程距离,缩短排水口上下游布置江水源热泵取水口需预留的距离,因此,如何建立合理的排水渠形式,对于研究系统对环境的影响和系统自身节能潜力有着重要的意义。

3 优化分析

3.1 模型建立

工程实例实测数据表明排水渠段降温能力很强,但由于排水渠中段水流在阶梯上的撞击致使排水中包含大量气泡,温度数据无法测得,为进一步研究排水渠内水温变化的趋势,笔者采用模拟的方法进行分析,考虑增强温排水的汽化和扰动,同时结合实际工程应用,明渠排水常见形式有梯级式、挡板式、瀑布式等,由此确定梯级和挡板两种渠道模型,梯级模型根据实际工程设定,挡板模型根据控制工程成本方法,确定单个挡板尺寸和挡板间距,为对比两种形式的换热效果,增加空白坡道模型,具体参数如下所述。

挡板模型渠段水平长 54.6 m,高差 27.45 m,宽 1.1 m,渠道内呈挡板形式,如图 5 所示。挡板高 0.2 m,中间挡板宽 0.5 m,两侧挡板宽 0.25 m,挡板间水平距离为 0.5 m,渠壁高为 0.4 m。

平板模型渠段水平长 54.6 m,高差 27.45 m,宽 1.1 m,渠道内呈滑梯形式,如图 6 所示。

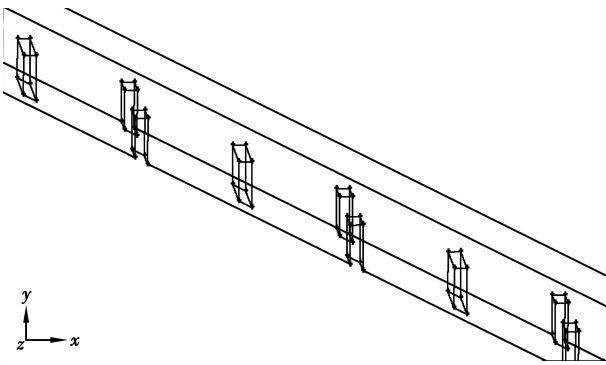


图 5 挡板模型局部图

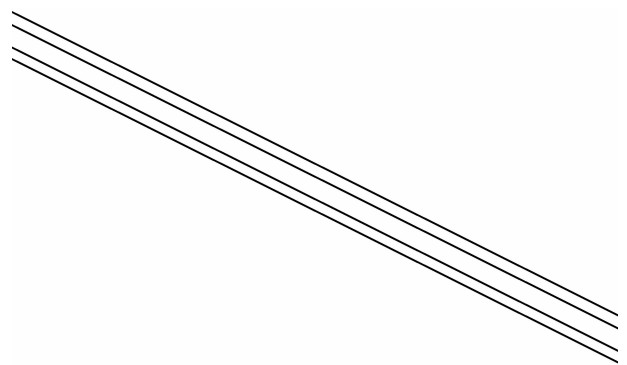


图 6 平板模型局部图

3.2 参数选择

分析重点针对水流在各类渠内实现温降的距离和渠内温降分布,模拟选用不可压缩流体模型,流态为稳态流动,利用有限体积法求解定常连续性方程和雷诺时均 N-S 方程,阶梯和挡板型渠道采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型封闭方程组,平板型渠道采用 Laminar 层流模型方程,使用非均匀结构化网格,进行部分近壁面流动采用标准的壁面函数法。方程的离散采用标准格式,压力与速度的耦合采用 SIMPLE 算法(压力耦合方程组的半隐式方法),当连续性限差达到 10^{-5} ,能量限差达到 10^{-7} [19]时认为模拟结果收敛。

本课题组由红外测温仪读取渠内各边界温度,由水银温度计读取出水水温,根据实测数据确定初始参数,由于机组间歇运行,停机后渠内无积水,渠底和内壁温度恢复至原温度,因此假设为恒壁温墙体,温度为 302.15 K ($29.0\text{ }^{\circ}\text{C}$),渠内流体使用 VOF 模型,水流入口设定为速度入口,高度尺寸根据实际测试设定 0.1 m,

进口温度 303.7 K(30.7 °C)、速度 0.48 m/s,空气入口高度尺寸为 0.3 m,与渠壁封闭为压力入口,渠上边界与大气热交换界面为压力入口,出口设置为自由出口。空气温度为 310.4 K(37.4 °C),相对湿度为 45.2%,查表得湿球温度为 300.0 K(27.0 °C)。

3.3 结果分析

经过分析计算,3种渠各断面温度变化如图7所示。从梯级式分析结果可看出,梯级降温出口处水温为 28.5 °C,与实测结果基本吻合,分析结果具有一定的说明性。对比平板式排水渠,梯级式排水渠 0~5 m段已基本完成降温,降幅为 1.8 °C,挡板式排水渠降温过程分为两个阶段,0~5 m段降幅为 1.6 °C,可能由于挡板发挥肋片散热作用,30~45 m段继续降温,降幅为 0.6 °C,出水最终低于梯级式。

如果以评价指标降温达到总温降的 95%及以上视为达到效果^[20]来评价各渠的降温性能,以各渠最终所能达到的水温为最终效果,当降温温差达至总温差的 95%视为降温达标,那么梯级式渠道仅需要 5 m即可,挡板式渠道需 45 m,但从总温降效果看,挡板式要比梯级式高 17.9%。

3类渠内形式研究表明,排水在梯级式和挡板式渠入口 0~5 m段水温下降梯度最大,分别为 0.36 °C/m和 0.32 °C/m,挡板式排水渠后期虽还有部分降温段,但该区需 15 m长度才能达到 0.6 °C温降,温降梯度过小,仅有 0.04 °C/m,该段的降温效果与修建成本不协调,因此,江水源热泵系统工程修建排水明渠长度最佳长度应在 5~10 m,修筑渠道过长会造成工程浪费,结合该工程实际情况合理设计该排水渠,应根据该江段常年水位,确定 10 m排水渠布局,铺设排水管道将排水送至明渠入水口。以该长度明渠降温效果看,梯级式水温降幅大于挡板式水渠,故渠内降温形式以梯级式为佳。

4 结 论

通过对江水源热泵排水渠及排水口沿岸温度场实测,总结了江水源热泵排水的温降规律,通过 fluent 模拟对排水口区域内的温度场进行了分析,同时对比分析了其他两种类型的排水渠形式的排水温度场分布,形成主要研究结论如下。

采用排水渠的江水源热泵系统排水整体散热过程主要为两个阶段:排水渠段和排水口 50 m内水域。排水渠段温降达到总温降的 41.2%,排水口 50 m内水域可达总降幅的 59.3%,下降最剧烈的阶段发生在排水口 3 m内,该处与江水温差最大,混合后温降幅度达到总温降的 33.4%。

江水源热泵系统排水对该处江水水域的热污染基本呈现扇形扩散,扩散半径为 50m,由于水体流动,热污染对下游沿岸的水温影响略微大于上游,由此可对取水和排水口布置间距提供依据,同时对于规划在局部水域内多个项目采取水源热泵系统形式,项目之间的合理间距也有一定的参考价值。

明渠排水可有效的降低进入水体的水温,减少水源热泵对手接纳水体的热污染,挡板式排水渠整体降温效果优于梯级排水渠,但要求排水渠长度较长,挡板式降温第一阶段降温能力与梯级式基本相当,第二阶段降温梯度较缓,工程性价比偏低。

梯级排水渠有效降温长度为 5~10 m,在该范围内,系统排水水温随着距离的增加显著降低,之后换热并不能随着排水渠长度的增加而增加,因此在实际工程设计中,要注意合理选取排水段的施工长度,以免增加不必要的资金浪费。

笔者只对 3 种类型的排水形式进行了模拟。由于模型的边界条件进行了一定的传热学定义,且未完全考虑水容量变化问题,需进一步开展大尺度、多变量情景的研究,以便形成江水源热泵系统水源技术体系。

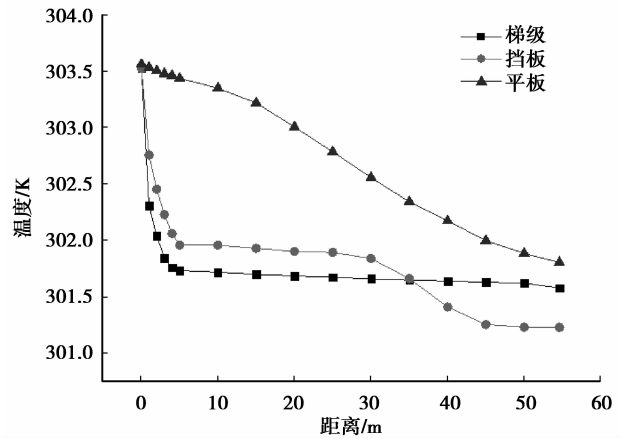


图 7 3种渠各断面温度变化

参考文献:

- [1] 重庆市专业气象服务台,重庆市唯胜气象信息公司.重庆市气候资源[EB/OL].[2013-09-23] <http://www.121.cq.cn/service/cqweather.htm>.
- [2] 丁勇,连大旗,单金龙,等.重庆市江水源热泵技术应用基础数据库建设[J].暖通空调,2011,41(1):95-98,32.
DING Yong, LIAN Daqi, SHAN Jinlong et al. Construction of basic database for application of river water-source heat pump in Chongqing[J]. Journal of HV&AC, 2011, 41(1): 95-98, 32.
- [3] 谢允田,魏民,石岩,等.热排水对浮游藻类季节变化影响的研究[J].水电站设计,1997,13(3):66-68.
XIE Yuntian, WEI Min, SHI Yan, et al. Thermal drainage of planktonic algae research on the effects of seasonal change[J]. Design of Hydroelectric power station, 1997, 13(3): 66-68.
- [4] 黄向阳,刘月红.地表水源热泵系统尾水对水环境安全影响研究进展[J].水资源与水工程学报,2009,20(1):24-28.
HUANG Xiangyang, LIU Yuehong. Research progress of safty impact on water environment by the discharges of surface water heat pump system[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2009, 20(1): 24-28.
- [5] 黄向阳,周健.湖水源热泵系统尾水排放对湖泊富营养化进程的影响研究[J].环境工程学报,2010,4(9):1945-1949.
HUANG Xiangyang, ZHOU Jian. Lake water source heat pump system of tail water discharge process of eutrophication of impact study[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(9): 1945-1949.
- [6] 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 Xiangyang, ZHOU Jian, LIU Yuehong. Effects on water environment of surface water heat pumps discharges[J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(5): 1210-1216.
- [7] 徐梦佳,于磊,赵彦伟,等.水库温排水增温模拟及其对富营养化影响分析[J].农业环境科学学报,2012,31(6):1180-1188.
XU Mengjia, YU Lei, ZHAO Yanwei, et al. The simulation of reservoir water warming by thermal discharge and research on reservoir eutrophication[J]. Journal of Agro-environment Science, 2012, 31(6): 1180-1188.
- [8] 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].水力学报,1999,29(1):22-26.
CHEN Kaiqi, LI Pingheng, MI Xiaobin. The numerical simulation on impact of thermal discharge on eutrophication in lakes and reservoirs[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 29(1): 22-26.
- [9] 乐佩琦,陈宜瑜.中国濒危动物红皮书(鱼类)[M].北京:科学出版社,1998.
LE Peiqi, CHEN Yiyu. China red data book of endangered animals(fish)[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [10] 陈宜瑜,褚新洛,罗云林,等.中国动物志:硬骨鱼纲,鲤形目(中卷)[M].北京:科学出版社,2000.
- [11] 姜礼燾.热污染对鱼类呼吸及心转率的影响[J].环境科学,1985,6(3):15-19.
JIANG Lifan. Thermal pollution effects on fish breathing and heart rate, 1985, 6(3): 15-18.
- [12] Regier H A, Holmes J A, Pauly D. Influence of temperature changes on aquatic ecosystems an interpretation of empirical data[J]. Transaction of the American Fisheries Society, 1990, 119(2): 374-389.
- [13] Turnpenny A W H, Clough S C, Holden S D J, et al. Thames tideway strategy: experimental studies on the dissolved oxygen requirements of fish[R]. [S.l.]: Thames Water Utilities Ltd, 2004.
- [14] 林昭进,詹海刚.大亚湾核电站温排水对邻近水域鱼卵、仔鱼的影响[J].热带海洋,2000,19(1):44-51.
LIN Zhaojin, ZHAN Haigang. Effects of thermal effluent on fish eggs and larvae in waters near Daya Bay nuclear plan [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2000, 19(1): 44-51.
- [15] 马宏权,龙惟定.水源热泵应用与水体热污染[J].暖通空调,2009,39(7):66-70.
MA Hongquan, LONG Weiding. Application of water-source heat pump and water heat pollution[J]. Journal of HV & AC, 2009, 39(7): 66-70.
- [16] 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 Xiangyang, 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.
- [17] 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(1):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(1): 105-110.
- [18] 盛连喜,刘伟,王振堂,等.热污染对徒河水库鱼类及其水环境的影响[J].环境科学学报,1990,10(4):453-463.
SHENG Lianxi, LIU Wei, WANG Zhentang. Thermal pollution effects on Tu He reservoir fish and water environment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1990, 10(4): 453-463.
- [19] 王福军.计算流体力学分析[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [20] 西安建筑科技大学.中国工程建设标准化协会标准冷却塔验收测试规程 CECS118:2000[S].北京:中国工程建设标准化协会,2000.