

# 江水源热泵尾水排放方式优选试验研究

卿晓霞, 崔相楠, 周 健, 张景尧, 梁汉超, 吴 常

(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:**为研究江水源热泵尾水在不同排放方式下对江河水域温升的影响,利用数字式温度传感器构建实时温度传感器网络,针对江水源热泵尾水淹没式、表面式和射流式3种排水方式及其在12种出流方式下江河水域的温升情况进行了模拟试验研究。对各种排放方式下的温升均值、温升方差、最高温升值、超温升均值点数等指标项采用加权平均法计算优选值,并结合三维温升图对试验结果进行了分析。结果表明,从整体上看射流式排放方式优于表面式和淹没式排放方式,双口出流方式优于单口出流方式,其中对河道水域温升影响最小的排放方式为表面式排水顺流双口出流方式。

**关键词:**热泵系统;排水;加权平均法;江水源

**中图分类号:**TU833.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2011)01-0105-06

## Experimental Analysis on Optimal Tail Water Discharge Method of River Water Source Heat Pump

QING Xiao-xia, CUI Xiang-nan, ZHOU Jian,  
ZHANG Jin-yao, LIANG Han-chao, WU Chang

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

**Abstract:** In order to study the influence on water temperature raise of river water source heat pump tail water discharged in different methods, the real sensor network is established by using digital temperature sensors. The simulation experiments of different discharging methods of river water source heat pump are carried out, including submerged-type discharge, surface-type discharge and jet-type discharge with 12 effluent ways. By using weighted average method, the preferred values of such factors as the average temperature raise, the temperature raise variance, the biggest temperature raise value, and the number of temperature measure points above the temperature raise average value are calculated. Moreover, the experiment results are analyzed by the three-dimensional figures of water temperature raise, which shows that jet-type discharge is better than submerged-type discharge and surface-type discharge, and the double-port way is better than single-port way. In addition, the double-port way along with the current in surface-type discharge method is the one that exerts least influence on river water temperature raise.

**Key words:** heat pump systems; discharge; weighted average method; river water source

水源热泵技术由于其高效节能,在建筑供暖空调领域得到了越来越多的应用和前所未有的发展机遇<sup>[1-2]</sup>。然而,随着水源热泵系统运行的日益增多,

其尾水排放对水环境影响的问题日渐显现。研究表明,大量的这类温排水进入水环境所造成的“热污染”,会引起水体的多项水质指标的变化,如溶解氧

收稿日期:2010-06-08

基金项目:国家“十一·五”科技支撑计划资助课题(2007BAB21B03-1)

作者简介:卿晓霞(1963-),女,副教授,博士,主要从事水处理自动控制技术研究,(E-mail)qxx118@126.com

降低,  $\text{NH}_3$ 、TN 及 TP 浓度增加等<sup>[3]</sup>, 并导致一系列的影响<sup>[4-10]</sup>; 如造成水生生物的发育受阻甚至死亡; 引起浮游生物群落组成的改变并减少其多样性; 使一些毒物的毒性增强、某些致病微生物的活性增强, 引起水生动物染病率和死亡率增加等。

目前, 水源热泵技术应用及热泵尾水对水环境影响的研究正成为热点, 而针对热泵尾水排放相关研究的报道很少, 且主要涉及温度扩散数值模拟的研究, 如 F. X. Ma 等<sup>[11]</sup>采用浮力修正的三维  $k-\epsilon$  湍流数学模型, 对尾水瞬时(一次性)射流排放和连续排放方式对水环境的影响进行了三维数值模拟; S. Suyambazhaha 等<sup>[12]</sup>等采用标准  $k-\epsilon$  湍流数学模型, 对在水平方向上 2 个不等温的尾水排放口射流排放引起的温度震荡特征进行了数值模拟。张文宇<sup>[13]</sup>基于非恒定流  $k-\epsilon$  双方程紊流数学模型, 模拟了上海世博园江水源热泵尾水对黄浦江水体在三维空间上的影响范围。

由于江水源热泵尾水排入江河水体时, 其排放方式将直接影响排放口附近水域的温升分布, 但关于江水源热泵不同尾水排放方式对江河水域温升的影响问题, 尚无相关研究报道, 因此, 有必要针对江水源热泵在不同排水方式及出流方式下尾水排放对江河水域环境温度的影响进行试验研究, 以确定对水环境影响较小的排放方式。研究根据相似性原理构建重庆嘉陵江化龙桥段河道物理模型, 并按照淹没式、表面式和射流式等 3 种典型的热泵尾水排放方式(共 12 种出流方式)布置排水管道。用数字式温度传感器在模拟河道中布置三维测温网络, 通过连续向模拟河道注入温水, 连续排水, 记录系统在不同排放方式下的温升情况, 并对温升均值、温升方差、最高温升值、超温升均值点数等 4 个指标项, 采用加权平均法进行试验数据分析, 求取优选值, 从而确定出较优的排放方式。

## 1 试验装置及方法

### 1.1 试验装置

试验装置如图 1 所示, 研究接纳河流模拟重庆嘉陵江化龙桥段, 模拟河道长 $\times$ 宽 $\times$ 深为  $6\text{ m}\times 2\text{ m}\times 0.9\text{ m}$ ; 尾水排放量、水温模拟文献<sup>[14]</sup>的热泵系统。试验装置设置高位水池贮存温水, 水温维持比模拟河道的水温高  $6.15\text{ }^\circ\text{C}$ 。通过连续向模拟河道注入流速为  $0.5\sim 1\text{ m/s}$  的温水, 并连续向外排水, 以模拟实际河道的水流情况。装置共设 3 层排水管道, 分别模拟淹没式(出水口低于水面  $200\text{ mm}$ )、表面式(出水口高出水面  $10\text{ mm}$ )和射流式(出水口

高出水面  $100\text{ mm}$ )3 种排水方式。每种排水方式又分为普通单口(双口)、垂向单口(双口)、横向单口(双口)、竖向单口(双口)、顺流单口(双口)和逆流单口(双口)等共计 12 种出流方式。单口出流方式采用管径为  $50\text{ mm}$  的单根排水管道, 位于图 1 中排水管道 3 位置; 双口出流方式采用间距  $100\text{ cm}$ , 管径为  $25\text{ mm}$  的 2 根排水管道, 位于图 1 中排水管道 1、2 位置。

试验装置的实时测温系统为 LTM8662 智能温度采集系统, 采用美国 DALLAS 数字温度传感器, 测温范围  $-55\sim +125\text{ }^\circ\text{C}$ , 测温精度  $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ , 分辨率  $\pm 0.0625\text{ }^\circ\text{C}$ 。温度传感器与上位机间采用 RS-485 通信, 通信端口采取隔离电源、看门狗(Watchdog)技术, 以确保模块的安全及抗干扰性。如图 1 所示, 温度传感器采用  $4\times 5\times 3$  的三维布置方式, 每层按  $4\times 5$  布置, 共 20 个, 即沿池长方向布置 5 列, 间距  $500\text{ mm}$ ; 沿池宽方向布置 4 行, 间距分别为  $200\text{ mm}$ ,  $300\text{ mm}$  和  $200\text{ mm}$ ; 距池底  $300\text{ mm}$ 、 $600\text{ mm}$ 、 $900\text{ mm}$  深度共布置 3 层。其中, 下层温度传感器编号为 1、4、7、10、13、16、19、22、25、28、31、34、37、40、43、46、49、52、55 和 58; 中层温度传感器编号为 2、5、8、11、14、17、20、23、26、29、32、35、38、41、44、47、50、53、56 和 59; 上层温度传感器编号为 3、6、9、12、15、18、21、24、27、30、33、36、39、42、45、48、51、54、57 和 60。

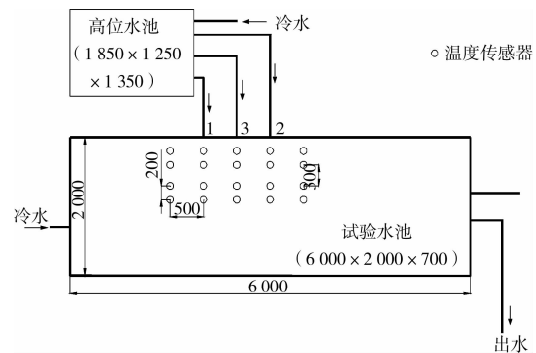


图 1 试验装置图

### 1.2 试验方法

考察淹没式、表面式和射流式 3 种江水源热泵尾水排水方式及其在 12 种出流方式下对江河水域温升的影响。在排放水量和水温相同的条件下, 测试不同排水方式及出流方式在排放口附近水域的温度分布。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验数据分析原则

温升均值反映了模拟河道温升的平均值; 温升

方差用来度量温升值在其均值周围的分散程度,当大部分温升值密集在它的均值附近时,其方差就较小,温升的幅度也较小,反之,温升的幅度范围则较大;超温升均值的点数表述了温排水对水体温度影响的范围,最高温升值表示了温排水对水体环境的最大影响值。

研究对温升均值、温升方差、最高温升值、超温升均值点数等 4 个指标项进行分析。并按照由好到差的顺序对 4 个指标项从小到大进行排序<sup>[15]</sup>。根据各指标项的重要性,对其赋予不同的权值系数,采用加权平均法求取优选值。将温升均值、温升方差、最高温升值、超温升均值点数的权值系数分别取 40%、15%、20%和 25%。

主要计算式如下:

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i \quad (1)$$

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - E)^2 \quad (2)$$

$$P = \sum_{j=1}^4 (X_j \times f_j) \quad (3)$$

式中: $E$ 为温升均值,℃; $E_i$ 为第*i*点的温升值,℃; $n$ 为监测点数; $D$ 为温升方差; $P$ 为优选值; $X_j$ 为第*j*个指标项; $f_j$ 为第*j*个指标项的权值系数;

按照优选值从小到大的原则选取排水(出流)方式,即优选值越小,该方式对水体环境的影响越小,也就越合理。

## 2.2 淹没式排放方式对江河水域温升的影响

试验中淹没式排放方式出水口深入到水层下面 200 mm。模拟河道平均水温 24.270 83℃,热水温度 32.737 5℃,温差 6.149 2℃,水流速度 0.085 m/s。表 1 为排水 10 min 时的温升数据。根据 2.1 节优选值的选择原则,淹没式排水的优选出流方式是顺流单口。此时,其温升均值为 0.274 ℃,温升最高值为 0.375 ℃,温升方差值 0.001 054,表明温升较小,均匀性好。

表 1 淹没式排水方式的比选

出流方式	温升均值/℃	温升方差	最高温升值/℃	超温升均值点数	优选值
垂向单口	0.365 6	0.005 967	0.562 5	34	3.2
垂向双口	0.419 8	0.004 309	0.625 0	31	5.25
横向单口	0.462 7	0.010 263	0.875 0	21	9.25
横向双口	0.441 7	0.014 180	0.812 5	23	8.30
逆流单口	0.431 2	0.005 707	0.625 0	34	5.45
逆流双口	0.424 0	0.004 179	0.562 5	35	4.10
普通单口	0.523 0	0.033 188	1.125 0	19	11.55
普通双口	0.476 1	0.016 793	1.000 0	20	10.40
竖向单口	0.373 1	0.023 703	1.125 0	27	6.95
竖向双口	0.410 4	0.010 204	0.625 0	32	5.05
顺流单口	0.274 0	0.001 054	0.375 0	22	3.15
顺流双口	0.253 1	0.001 482	0.375 0	11	3.90

图 2 是基于 LabVIEW<sup>[16]</sup>绘制的淹没式排水顺流单口出流方式的温升三维图,其中温度传感器沿 X 轴方向布置 4 行,沿 Y 轴方向布置 5 列,坐标原点位于 1(或 2,3)传感器处,(a)、(b)、(c)分别为上、中、下层水体温升图。顺流单口方式出水时,上层水体的温升均值为 0.287 5℃,中层水体的温升均值为 0.271 9℃,下层水体的温升均值为 0.262 5℃。由图 2 可知,温排水对河道水域上层的温升影响较大,经水流紊动以及水温扩散,逐渐渗透到河流中层区域,图 2(a)、(b)表现出明显的热扩散现象。下层水域温升值较小,除远离排放口的外沿还存在热扩

散的影响外,其余基本稳定在 0.25 ℃。分析表明:淹没式排水方式下,热泵尾水不受空气流动的影响,水体温升分布主要取决于热水与冷水的热交换。由于双口出流易产生热水窝积的现象,引起热量累积,而顺流单口出流方式能较好地发挥水流的纳热能力,热交换更加充分,有效抵消热污染造成的影响。

## 2.3 表面式排放方式对江河水域温升的影响

表面式排放方式出水口高出水面 10 mm,模拟河道平均水温 24.696 88℃,热水温度 30.852 5℃,温差 6.155 6℃,尾水流速 0.079 m/s。排水 10 min 时的温升试验结果见表 2 及图 3。

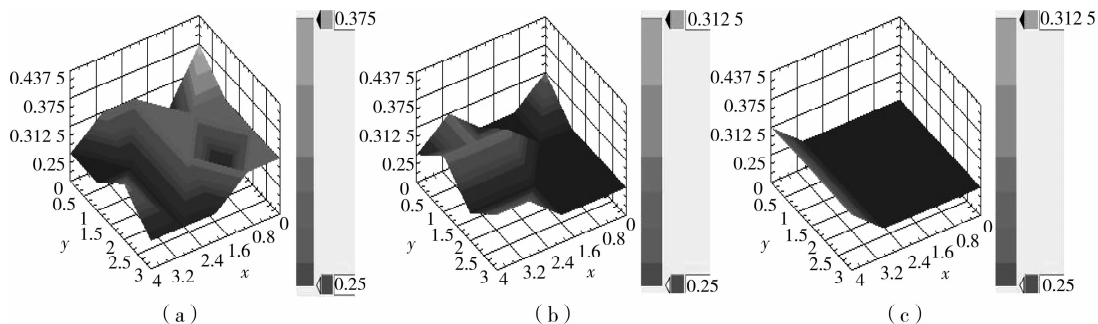


图 2 淹没式排水顺流单口出流温升三维图

表 2 尾水表面式排放方式的比选

出流方式	温升均值/ $^{\circ}\text{C}$	温升方差	最高温升值/ $^{\circ}\text{C}$	超温升均值点数	优选值
垂向单口	0.364 6	0.006 781	0.562 5	32	5.55
垂向双口	0.402 1	0.005 779	0.625 0	25	6.95
横向单口	0.357 4	0.018 371	1.000 0	22	7.55
横向双口	0.340 6	0.025 596	0.812 5	15	7.75
逆流单口	0.359 4	0.005 942	0.562 5	33	4.75
逆流双口	0.407 3	0.006 950	0.625 0	28	7.55
普通单口	0.461 4	0.021 628	0.875 0	21	9.95
普通双口	0.385 4	0.016 707	0.875 0	15	8.95
竖向单口	0.339 7	0.046 080	1.562 5	13	8.80
竖向双口	0.313 6	0.022 324	0.750 0	20	6.35
顺流单口	0.311 4	0.001 627	0.375 0	47	1.75
顺流双口	0.238 5	0.001 496	0.312 5	42	1.25

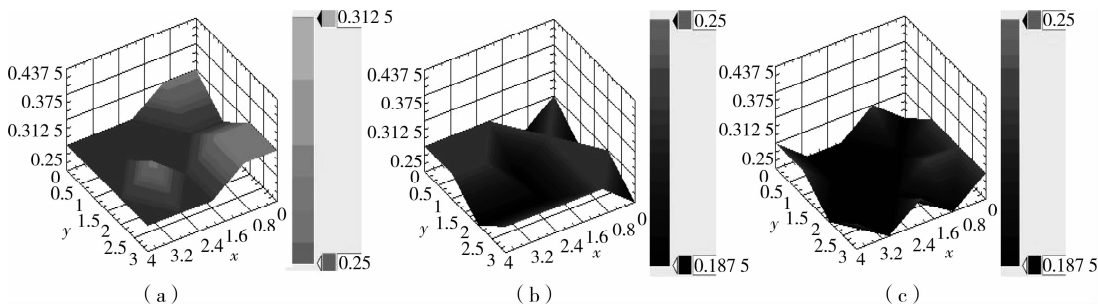


图 3 表面式排水顺流双口出流上层温升三维图

如表 2 所示,根据 2.1 节优选值选择原则,其优选出流方式是顺流双口。此时,温升均值为  $0.238 5^{\circ}\text{C}$ ,温升最高值仅为  $0.312 5^{\circ}\text{C}$ ,温升方差值  $0.001 496$ ,各项指标均明显优于其它几种出流方式。从温升分布看,上层水体的温升均值为  $0.271 9^{\circ}\text{C}$ ,中层水体的温升均值为  $0.228 1^{\circ}\text{C}$ ,下层水体的温升均值为  $0.215 6^{\circ}\text{C}$ 。温度扩散效果明显体现出来。

图 3 是其温升三维图。由图可知,表面排放方式热交换主要发生在水体表面,温升分布受到水体

表面热交换作用和空气气流作用的共同影响,呈现出不规则的水温扩散效果,也更有利于水温的扩散。采用双口出流可以加大水体表面热交换的有效作用面积,使热量在受纳水体中的分布更加均匀。

#### 2.4 射流式排放方式对江河水域温升的影响

射流式排放方式出水口高出水面  $100 \text{ mm}$ ,模拟河道平均水温  $25.521 88^{\circ}\text{C}$ ,热水温度  $31.675^{\circ}\text{C}$ ,温差  $6.153 1^{\circ}\text{C}$ ,水流速度  $0.085 \text{ m/s}$ 。排水  $10 \text{ min}$  时的温升试验结果见表 3 及图 4。

表 3 尾水射流式排放方式的比选

出流方式	温升均值/ $^{\circ}\text{C}$	温升方差	最高温升值/ $^{\circ}\text{C}$	超温升均值点数	优选值
垂向单口	0.256 2	0.003 933	0.437 5	16	3.5
垂向双口	0.300 0	0.009 242	0.687 5	27	3.95
横向单口	0.347 9	0.011 96	0.875 0	26	6.70
横向双口	0.331 2	0.026 92	0.750 0	17	6.90
逆流单口	0.505 2	0.009 440	0.687 5	22	7.65
逆流双口	0.434 4	0.008 134	0.625 0	34	5.50
普通单口	0.403 1	0.026 01	0.750 0	23	7.05
普通双口	0.426 0	0.013 04	0.750 0	29	6.55
顺流单口	0.307 3	0.002 422	0.437 5	42	2.55
顺流双口	0.263 5	0.000 939 0	0.312 5	15	3.65

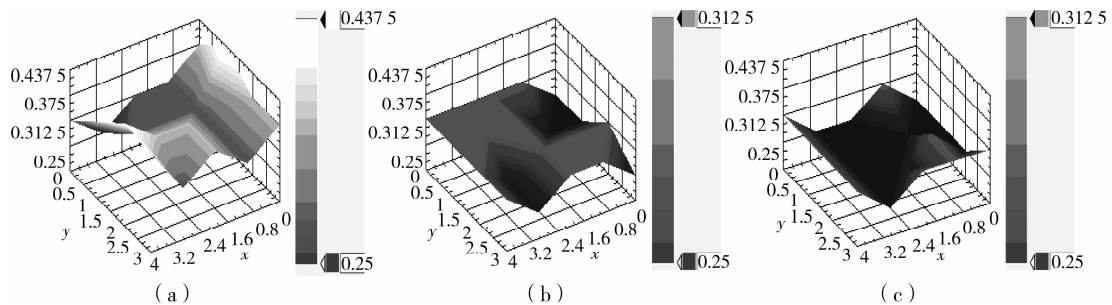


图 4 射流式排水顺流单口出流上层温升三维图

射流排放方式在射流过程中由于受到空气阻力的影响,使得尾水的热量与动量都有所减少,较之淹没式排放和表面式排放,其最高温升值更小,均小于  $0.9^{\circ}\text{C}$ 。尾水进入水体之后,立即受到环境水流的冲击作用(主要影响表面的水温分布情况),随后向河流下游以及中下层水域 2 个方向扩散。

由表 3 所示,根据 2.1 节优选值选择原则,射流式排水的优选出流方式是顺流单口。在该出流方式下,温升均值为  $0.307 3^{\circ}\text{C}$ ,温升最高值为  $0.437 5^{\circ}\text{C}$ ,温升方差为  $0.002 422$ ,但超温升均值点数高达 42 点。其中,上层水体的温升均值为  $0.293 8^{\circ}\text{C}$ ,下层水体的温升均值为  $0.278 1^{\circ}\text{C}$ 。表明河道水域上下层水体温度扩散梯度较大。

由图 4 可知,射流式排水顺流单口出流方式对

上层水域温升影响较大,此时除排水口处所受冲击较大外,温升区域随环境水流向外扩大,在 60 传感器处达最高温升值  $0.437 5^{\circ}\text{C}$ 。中、下层水域的温升则明显减小,最高温升值、温升均值不断下降。表明顺流单口出流方式对受纳水体的扰动较大,热交换作用也更充分,水流冲击效应改变了热泵尾水的影响深度。

按照优选值选择原则,将上述 3 种排水方式当中优选出的对水体环境影响较小的出流方式,再作进一步优选,如表 4 所示,可判断对河道水环境温升影响较小的排放方式依次为:表面式排水顺流双口出流方式,射流式排水顺流单口出流方式和淹没式排水顺流单口出流方式。

表 4 3 种优选排放方式的综合比选

排放方式	温升均值/ $^{\circ}\text{C}$	温升方差	最高温升值/ $^{\circ}\text{C}$	超温升均值点数	优选值
淹没式顺流单口	0.274 0	0.001 054	0.375 0	22	3.15
表面式顺流双口	0.238 5	0.001 496	0.312 5	42	1.25
射流式顺流单口	0.307 3	0.002 422	0.437 5	42	2.55

### 3 结论

江水源热泵尾水进入河流后,江河水域的温升

分布会受到排放方式的影响。通过对上述试验结果分析,结论如下:

1) 淹没式排放时,热泵尾水不受空气流动的影响

响,水温升分布主要取决于热水与冷水的热交换。由于双口出流易产生热水窝积的现象,引起热量累积。顺流单口出流方式能较好地发挥水流的纳热能力,热交换更加充分,有效抵消热污染造成的影响,为较优的排放方式。

2)表面式排放时,由于热交换主要发生在水体表面,温升分布受到水体表面热交换作用和空气气流作用的共同影响。采用双口出流可以加大水体表面热交换的有效作用面积,使热量在受纳水体中的分布更加均匀。根据优选值选择原则,顺流双口出流为较优的双口排放方式。

3)射流排放方式在射流过程中由于受到空气阻力的影响,使得尾水的热量与动量都有所减少。由于顺流单口出流方式对受纳水体的扰动较大,热交换作用也更加充分,是较优的排放方式。

4)将上述3种排水方式中优选出的出流方式,再按照优选值从小到大排序,得到对河道水环境温升影响较小的出流方式依次为:表面式排水顺流双口出流方式,射流式排水顺流单口出流方式和淹没式排水顺流单口出流方式。

#### 参考文献:

- [1] 张承虎,李桂涛,庄兆意,等. 地表水源热泵技术在我国的应用前景分析[J]. 节能技术, 2007, 25(2): 102-105.  
ZHANG CHENG-HU, LI GUI-TAO, ZHUANG ZHAO-YI, et al. Application prospect analysis of surface water source heat-pump in China [J]. Energy Conservation Technology, 2007, 25(2): 102-105.
- [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, 26(17/18): 2255-2261.
- [3] 孙艳涛,王惠民,吴修锋,等. 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, et al. Impacts of thermal discharge on aquatic ecological environment and the countermeasures [J]. Water Resources Protection, 2008, 24(2): 70-72.
- [4] 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 HONG-QUAN, LONG WEI-DING. Application of water-source heat pump and water heat pollution [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2009, 39(7): 66-70.
- [5] 王新兰. 热污染的危害及管理建议[J]. 环境保护科学, 2006, 32(6): 69-71.  
WANG XIN-LAN. Harm of the thermal pollution and its management advices [J]. Environmental Protection Science, 2006, 32(6): 69-71.
- [6] YILI CHUANG, HSIAOHUI YANG, HSINGJUHLIN. 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.
- [7] LANGFORD T E L. Thermal Discharges and Pollution. [M]. Netherlands: Kluwer Academic Pub, 1991.
- [8] 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 thermal water discharged from coastal power plant on distribution of zooplankton [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(6): 933-939.
- [9] BÜYÜKALACA O, EKINEI F, YILMAZ T. Experimental investigation of Seyhan River and dam lake as heat source-sink for a heat pump[J]. Energy, 2003, 28(2): 308-316.
- [10] ZENG PING, CHEN HUI-QUAN, AO BAI-CHUAN et al. Transport of waste heat from a nuclear power plant into coastal water[J]. Coastal Engineering, 2002, 44: 301-309.
- [11] F X Ma C, W LI. 3D numerical simulation of ambient discharge of buoyant water [J]. Applied Mathematical Modelling, 2001, 25: 375-384.
- [12] S SUYAMBAZHAHAN, SARIT K, DAS T SUNDARARJAN. Numerical study of flow and thermal oscillations in buoyant twin jets [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2007, 34: 248-258.
- [13] 张文宇. 上海世博园大型地表水源热泵对黄浦江水环境的影响分析[D]. 上海: 同济大学, 2007: 49-51.
- [14] 陈金华,付祥钊,丁勇,等. 重庆市开县人民医院湖水源热泵空调系统实测分析[J]. 暖通空调, 2008, 38(8): 111-114.  
CHEN JIN-HUA, FU XIANG-ZHAO, DING YONG, et al. Test and analysis for lake-water source heat pump air conditioning system in Peoples Hospital of Kaixian, Chongqing [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2008, 38(8): 111-114.
- [15] YIN LIUZHI, YU YAO. Weighted estimator with new weight values and analysis of its variance[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2008, 38(11): 1268-1275.
- [16] National Instruments. LabVIEW Evaluation Guide [M]. Hong Kong: National Instruments, 1998.

(编辑 胡英奎)