

## 典型平原河网地区河道温排水影响研究

胡琦玉<sup>1</sup>, 杨金艳<sup>2</sup>, 徐 勇<sup>2</sup>, 高晓平<sup>2</sup>

(1. 南京大学环境规划设计研究院股份公司, 江苏 南京 210093;  
2. 江苏省水文水资源勘测局苏州分局, 江苏 苏州 215000)

**摘要:** 研究以苏南某市蓄水包围区为研究对象, 建立了一维河网水动力水温数学模型, 根据蓄水包围区的调度方案和能源站的排水特征, 制定了 3 组计算方案。计算结果表明: 能源站温排水对于蓄水包围区的影响具有两面性, 排水会对包围内多条河道水温产生影响, 又可为蓄水包围创造一个活水水源。通过对周围的控制闸站进行合理调度, 能源站温排水带来的温升影响可被有效降低, 同时蓄水包围内水体流动性也可得到增加。

**关键词:** 蓄水包围区; 河网; 水动力; 数学模型; 温排水; 调度

**中图分类号:** TV137      **文献标识码:** B      **文章编号:** 1007-7839 (2018) 10-0041-08

### Study on influence of warm water drainage in typical plain river network region

HU Qiyu<sup>1</sup>, YANG Jinyan<sup>2</sup>, XU Yong<sup>2</sup>, GAO Xiaoping<sup>2</sup>

( 1. Academy of Environmental Planning & Design Co., Ltd., Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu; 2. Suzhou Hydrology and Water Resources Investigation Bureau of Jiangsu Province, Suzhou 215000, Jiangsu )

**Abstract:** Taking the water storage encircling area of a city in Southern Jiangsu as the research object, a mathematical model of hydrodynamic temperature of the one-dimensional river network was established. According to the scheduling scheme of the water storage encircling area and the drainage characteristics of the energy station, 3 groups of calculation schemes had been formulated. The calculation results showed that the influence of temperature drainage on the water storage encircling area had two sides. On the one hand, the drainage would affect the water temperature of many rivers surrounding the river. On the other hand, it could create a living water source. By reasonable dispatching of the surrounding control gate stations, the temperature rise effect caused by the temperature drainage of the energy station could be effectively reduced, and the flow of water could be increased at the same time.

**Key words:** water storage encircling area; river network; hydrodynamics; mathematical model; warm water drainage; dispatching

## 0 引言

随着我国城镇化进程的加快, 城市基础配套

设施建设及技术更新速度也不断增加。为集中解决苏南某市滨江新城中心区建筑的冷暖空调及生活热水的功能问题, 同时响应国家节能号召, 提高

收稿日期: 2018-04-24

作者简介: 胡琦玉 (1990—), 女, 工程师, 主要研究方向为水资源规划与保护。

能源利用效率,保护和改善生态环境,结合当地丰富的水资源条件,滨江新城中心区拟建设一座绿色能源站提供供冷供热服务,并就近选择附近河道的地表水作为水源,产生的温(冷)排水亦就近进入周边河道。退水口位于平原河网区常见的蓄水大包围内,内部河流交织呈网状,河道地势变化较小,水流缓慢,闸坝调度频繁,河道水流复杂,流向多变,研究能源站温(冷)排水对蓄水包围内河道水温的影响变得较为复杂。

常用的河道水温计算方法为公式法和数学模型法,前者计算简单,但只适用于某些特殊情况,精度较差。后者通过分析影响水温的主要因子,由热量、质量平衡原理建立数学模型,具有一定的普遍性,但计算较为复杂。日常见的水温预测数学模型分为很多种,河口、海湾等开阔水体非恒定流流场的三维紊流数值模拟已取得了很多研究成果<sup>[1-4]</sup>,并在温度场的模拟中得到应用<sup>[5-6]</sup>,成熟的商业软件中,二维和三维水动力、水质数学模型中已包含温度场模块,对本次研究的平原河网尚无简单实用的水温预测模型。庄春义<sup>[7]</sup>建立了适用于长河段、长时段非恒定流计算的一维非恒定流数学模型及其计算方法;吴时强<sup>[8]</sup>等人针对平原河网地区采用直排冷却方式的电厂温排水影响,建立了平面二维水流温度场数值模型;卢士强等<sup>[9]</sup>人利用 MIKE11ECO 模块开发了适用于平原地区河网的水温预测模式。

本文针对能源站排放的温(冷)排水排入蓄水大包围内引起的水温变化问题,采用一维河网水动力模型,耦合温排水预测模块,对温排水带来的区域性河道影响进行了预测,并对大包围内的闸坝控制提出了要求,在减少温(冷)排水带来的水温影响的同时优化区域的水动力条件。

## 1 数据与方法

### 1.1 区域概况

研究区域地处长江下游南侧,属北亚热带南部湿润气候,季风盛行,温暖湿润,四季分明,雨量充沛,气候温和,日照充足,冬无严寒,夏无酷暑,气候宜人。多年平均气温 15.4℃,历年最高气温 41.1℃,历年最低气温 -12.7,多年平均风速 3.6 m/s。

滨江新城中心区蓄水包围位于区域排水骨干河道常浒河和徐六泾之间,面积约 3.4 km<sup>2</sup>,内部

河道全长 12.2 km,正常蓄水位约 3.2 m,该水位下水域面积 0.203 km<sup>2</sup>,包围内地面平均高程约 5.1 m。整个包围由 4 座节制闸控制,常浒河边建有 2 座闸门,分别为北小塘闸和王巷河闸,均为 4 m 节制闸,其中王巷河闸处还建有 1 座单向引水泵站(引常浒河水入蓄水包围);通往徐六泾的河道也由 2 座闸门控制,分别为余家坝涵闸和北小塘兴庆路闸,均为 4 m 节制闸。

蓄水包围主要功能为蓄水,正常情况下,包围内水位高于外河,汛期水位差约 0.2 m,非汛期水位差约 0.5 m。4 座闸门大部分时间为关闭状态,仅在常浒河及徐六泾引水,包围外水位抬高时打开闸门引水入包围;另外王巷河闸处还建有一座单向引水泵站,必要时可引常浒河水进入包围。

### 1.2 一维河网水动力水温数学模型构建

#### 1.2.1 水动力模型基本方程

水动力模型基本方程建立在质量守恒和动量守恒基础上,遵循水力学上著名的圣维南方程组,并在方程组的基础上增加考虑了漫滩和旁侧入流,以流量  $Q(x, t)$  和水位  $Z(x, t)$  为未知变量,方程组如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + B_w \frac{\partial Z}{\partial t} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + 2u \frac{\partial Q}{\partial x} + (gA - Bu^2) \frac{\partial A}{\partial x} + g \frac{n^2 |u| Q}{R^{4/3}} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $Q$ —流量, m<sup>3</sup>/s;  $B_w$ —调蓄宽度,是包括滩地在内的全部河宽, m;  $q$ —旁侧入流流量,入流为正值,出流为负值, m<sup>3</sup>/s;  $A$ —主槽过水断面面积, m<sup>2</sup>;  $B$ —主流断面宽度, m;  $R$ —水力半径, m;  $u$ —断面平均流速, m/s;  $Z$ —水位, m;  $g$ —重力加速度, m/s<sup>2</sup>;  $n$ —河床糙率;  $x, t$ —沿水流方向的空间坐标和时间坐标, m, s;

方程组求解方法: Abbott-Ionescu 六点隐式有限差分法。按照网格点的计算顺序交替计算水位或流量,两类计算点又被称为  $h$  点和  $Q$  点。首先求解各节点处的水位,然后将各节点水位回代至单一的河道方程中,并最终求得各单一河道各微断面水位及流量。

#### 1.2.2 水温模型控制方程

水体温度场的基本方程为一维对流扩散方程。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = K \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{Q}{H\rho_w C_w} - FT \quad (2)$$

式中,  $T$ —水体温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $H$ —水深(m);  $C_w$ —水的热容( $\text{J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ );  $Q$ —水体输入(或输出)的热量(J);  $u$ —流速( $\text{m/s}$ );  $K$ —紊动扩散系数( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $F$ —综合考虑长波辐射、蒸发和水面与大气热量交换的温度衰减系数( $\text{d}^{-1}$ );  $\rho_w$ —水的密度。

其中水面与空气之间的热交换,即上式中“FT”项采用交换速率的概念来计算,展开表达式为:

$$\frac{dT}{dt} = -86400E(T-A)/(STCT \times 10^6 \cdot H) \quad (3)$$

式中,  $E$ —表层综合热交换系数( $\text{Watt/m}^2/^{\circ}\text{C}$ );  $T$ —水体温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $A$ —周围水体的温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $STCT$ —水的热容( $\text{MJ/m}^3/^{\circ}\text{C}$ );  $H$ —水深(m)。

其中表层综合热交换系数采用《工业循环冷却水设计规范》(GB/T 50102-2014)中推荐公式进行取值。

### 1.2.3 河网概化

由于河网内部河道多而复杂,一般都属天然河道。为了便于计算,构建模型时将河道进行概化,形成一个有河道、有节点的概化河网。将天然河网进行合并、概化,概化河道为水平底坡、梯形断面,概化断面用底高、底宽和边坡 3 个要素来描述。概

化时将主要的输水河道纳入计算范围,将次要的河道和水体根据等效原理,归并为单一河道和节点,使概化前后河道的输水能力相等、调蓄能力不变。当这些次要的平行河道具有断面资料,且首末节点相同时,可以用水力学的方法,根据过水能力相同的原理,求得合并概化河道的断面参数。对于水系内不参加水流输送的一些小河、池塘等,其调蓄作用不可忽视,采用调蓄不变原则模拟概化河网以外的调蓄作用,使概化前后河道的总调蓄容积不变。本次研究范围内河道概化情况见图 1。

### 1.2.4 计算参数选取

根据地区同类河流研究成果,河道糙率  $n$  取值为 0.03; 根据环境水力学推荐的扩散系数取值方法,纵向扩散系数  $E_x = 5.93h\sqrt{ghI} \approx 1\text{m}^2/\text{s}$ ; 根据《工业循环冷却水设计规范》(GB/T 50102-2014),表面综合散热系数取值为  $30\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

根据常许河长序列水温资料统计可知,常许河夏季多年平均水温为  $33^{\circ}\text{C}$ ,冬季多年平均水温为  $8.5^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.2.5 计算水文条件

本次拟建项目退水口所在的河段位于蓄水包

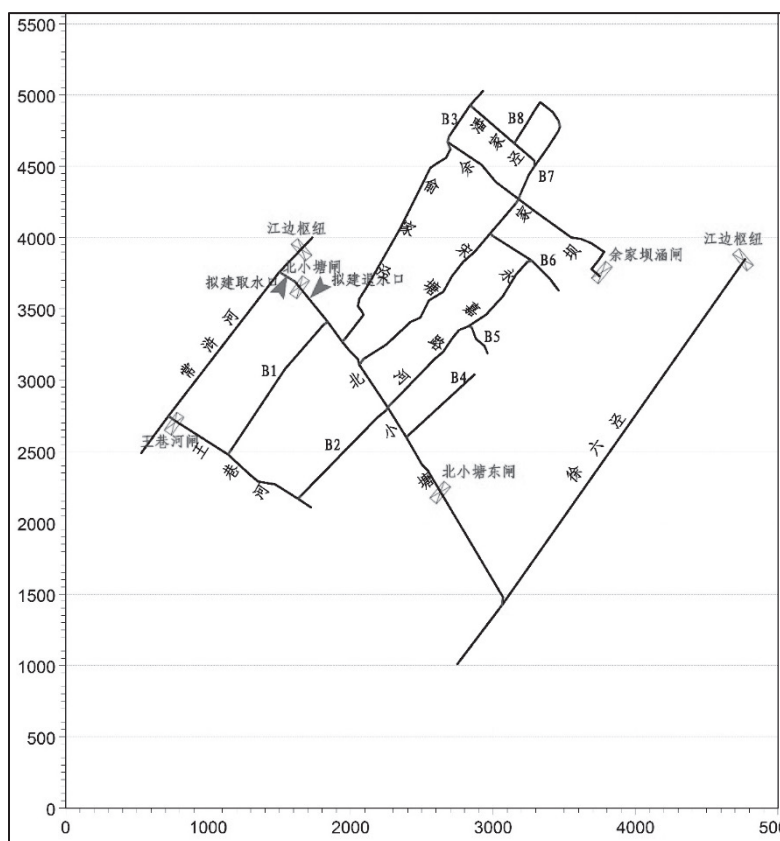


图 1 研究范围河网概化图

围内,区内小型河道交织成网,外包围均设闸门控制,闸门仅在排涝时开启。因此,正常情况下,外包围闸门关闭,圩区内水体基本处于滞流状态,本次选择 2016 年 5 月实地开展的蓄水包围内河流水文要素为计算水文条件。

1.3 计算方案制定

本文中制定的计算方案主要根据蓄水包围的调度方案和排水特征进行设置。

1.3.1 调度方案

蓄水包围内的调度方案一共有 5 种:

(1) 在正常蓄水状态下,蓄水包围外围的 4 座闸门均关闭,能源站尾水全部停留在蓄水包围内。

(2) 随着能源站尾水不断排入蓄水包围,包围内水位将缓慢上涨,当包围内水位与常浒河水位差超过 0.5/0.2 m (非汛期 / 汛期) 时,考虑适当开启王巷河闸 (其余 3 座闸门仍保持关闭),蓄水包围内河水向西自流进入常浒河。

(3) 当蓄水包围内水位与常浒河水位差超过 0.5/0.2 m (非汛期 / 汛期) 时,考虑适当开启北小塘东闸 (其余 3 座闸门仍保持关闭),蓄水包围内河水向东自流进入徐六泾。

(4) 当蓄水包围内外水位差过高,或汛期遇强降水,王巷河闸、北小塘东闸及余家坝涵闸全部打开,为防止能源站尾水排放直接影响到取水口,北小塘闸仍保持关闭,能源站尾水经蓄水包围内河道排入外河。

(5) 当常浒河及徐六泾引水时,二者水位较高,蓄水包围 4 座闸门均开启,向包围内引水,能源站排放尾水全部停留在蓄水包围内。根据统计,常浒河及徐六泾单次引水时间约 4 h,因此蓄水包围引水时间也不会超过 4 h。

1.3.2 排水特征

能源站主要在夏季制冷,冬季供热,夏季、冬季正常情况下 24 h 排水,其中冬季在水温 5℃ 以下时因全部采用燃气辅热故无退水产生,春秋

仅在制备生活热水时产生退水。本文主要研究夏季温排水的影响。夏季排水量见表 1。

表 1 夏季日排水量表

时间段	退水量 (m <sup>3</sup> )	时间段	退水量 (m <sup>3</sup> )
00:00 ~ 01:00	1765.0	12:00 ~ 13:00	3085.8
01:00 ~ 02:00	1765.0	13:00 ~ 14:00	3085.8
02:00 ~ 03:00	1911.9	14:00 ~ 15:00	3085.8
03:00 ~ 04:00	1911.9	15:00 ~ 16:00	3085.8
04:00 ~ 05:00	1911.9	16:00 ~ 17:00	3085.8
05:00 ~ 06:00	2800.4	17:00 ~ 18:00	3085.8
06:00 ~ 07:00	2335.8	18:00 ~ 19:00	2951.7
07:00 ~ 08:00	2764.9	19:00 ~ 20:00	2010.3
08:00 ~ 09:00	2990.0	20:00 ~ 21:00	1967.1
09:00 ~ 10:00	3085.8	21:00 ~ 22:00	1337.8
10:00 ~ 11:00	3085.8	22:00 ~ 23:00	440.2
11:00 ~ 12:00	3085.8	23:00 ~ 24:00	440.2
日退水量	57076.4		

1.3.3 计算方案

根据蓄水包围闸门调度方案,在闸门全部开启引水或排水期间,区域内水动力条件相对较好,有利于降低温升,因此本次选取较不利的 3 个调度方案,结合夏季能源站温排水排放特征,共制定 3 组计算方案,详见表 2。

2 研究结果与分析

计算结果表明:夏季能源站温排水的排放将会对蓄水包围以及外围相关联河道水温产生一定的影响。蓄水包围内主要河道受影响情况见表 3,影响范围示意图见图 2 (注:河道里程均为自南向北、自西向东)。

表 2 计算方案一览表

方案	蓄水包围调度情况	蓄水包围引排水情况	排水特征	
			水量 (m <sup>3</sup> /s)	排水温度 (℃)
1	所有闸站均关闭,背景水温 33℃	不引不排	见表 1	40
2	王巷河闸开启,其余闸站关闭,背景水温 33℃	排水	见表 1	40
3	北小塘东闸开启,其余闸站关闭,背景水温 33℃	排水	见表 1	40

表 3 蓄水包围内各河道温升计算结果表 (°C)

河流名称	河道里程( m )	方案 1	方案 2	方案 3	温升沿程变化
北小塘	10	1.567	0.873	1.567	
	175	3.249	2.359	3.249	
	409	3.187	2.297	3.187	
	675	3.034	1.995	3.033	
	1004	2.299	1.339	2.057	
	1230	2.101	0.946	1.119	
	1373	1.272	0.389	1.108	
	1415	0.453	0.117	0.45	
王巷河	206	0.864	1.547	0.862	
	412	1.926	1.241	1.921	
	544	1.822	0.486	1.816	
	676	1.748	0.341	1.741	
	817	1.675	0.339	1.658	
	959	1.531	0.38	1.317	
	979	1.425	0.289	1.165	
	1029	0.857	0.101	0.595	
余家坝	1058	0.6	0.06	0.4	
	0	1.093	0.423	1.044	
	125	0.927	0.358	0.885	
	250	0.853	0.324	0.8	
	404	0.856	0.317	0.781	
	559	0.97	0.35	0.861	
	968	0.432	0.157	0.387	
	1377	0.2	0.09	0.1	
B1	0	1.926	1.241	1.921	
	313	2.357	2.283	2.354	
	625	2.743	2.199	2.741	
	812	3.021	2.304	3.019	
	999	3.207	2.338	3	



(续表 3)

河流名称	河道里程(m)	方案 1	方案 2	方案 3	升温沿程变化
B2	0	1.531	0.38	1.317	
	296	1.711	1.085	1.133	
	591	1.996	1.209	1.441	
	690	2.134	1.27	1.684	
	789	2.299	1.339	2.057	
俞家泾	0	3.171	2.224	3.17	
	488.5	2.34	1.441	2.324	
	977	1.767	0.947	1.739	
	1209.5	1.491	0.697	1.453	
	1442	1.093	0.423	1.044	
宋塘	0	3.034	1.995	3.033	
	494	2.301	1.377	2.28	
	988	1.807	0.911	1.769	
	1182	1.634	0.77	1.603	
	1188	1.371	0.601	1.362	
	1200	1.356	0.589	1.341	
	1316	1.213	0.478	1.131	
	1431	0.97	0.35	0.861	
永嘉路河	0	2.299	1.339	2.057	
	358	0.903	0.48	0.613	
	717	0.278	0.141	0.26	
	936	0.342	0.168	0.438	
	1156	0.457	0.217	0.583	
	1223	0.508	0.239	0.637	
	1290	0.571	0.266	0.704	
B3	0	1.093	0.423	1.044	
	133	0.946	0.322	0.857	
	267	0.707	0.208	0.596	
	334	0.557	0.135	0.429	
	402	0.34	0.08	0.08	

(续表 3)

河流名称	河道里程(m)	方案 1	方案 2	方案 3	升温沿程变化
B4	0	2.101	0.946	1.119	
	260	1.772	0.583	0	
	521	0.8	0.25	0	
B5	0	0.278	0.141	0.26	
	75	0.137	0.069	0.128	
	150	0.08	0.05	0.05	
B6	0	1.388	0.613	1.385	
	136	0.978	0.444	1.092	
	272	0.571	0.266	0.704	
	393	0.275	0.128	0.339	
	514	0.1	0.05	0.1	
潘家泾	0	0.707	0.208	0.596	
	183	0.605	0.188	0.516	
	366	0.625	0.2	0.533	
	383	0.634	0.204	0.541	
	400	0.645	0.207	0.549	
	471	0.692	0.224	0.59	
	543	0.745	0.245	0.638	
B7	0	0.97	0.35	0.861	
	103	0.859	0.295	0.748	
	207	0.745	0.245	0.638	
	253	0.708	0	0.605	
	300	0.676	0	0.577	
	407	0.625	0	0.532	
	515	0.601	0	0.511	
B8	0	0.625	0	0.533	
	238	0.542	0	0.462	
	476	0.601	0	0.511	



图2 方案1、2、3温升影响范围示意图(从左向右依次为方案1、2、3的计算结果)

根据计算结果可知:在蓄水包围闸门全部关闭的情况下(方案1)对包围内部分河流会产生一定的影响,以北小塘、王巷河等为代表的11条河流部分或全部河段都将会出现温升大于 $1^{\circ}\text{C}$ 的情况,最大温升达 $3.25^{\circ}\text{C}$ ,出现在退水口附近位置。

在开启王巷河闸的情况下(方案2),包围内水体流动性增强,本项目对包围内水体的影响将会减小,温升超过 $1^{\circ}\text{C}$ 的范围将会缩减,仅7条河流部分或全部河段将会出现温升大于 $1^{\circ}\text{C}$ 的情况,最大温升为 $2.36^{\circ}\text{C}$ ,出现在退水口附近位置;温排水对常浒河也会产生一定的影响,但由于温排水在进入常浒河之前在包围中经过了一段时间的扩散与热交换,进入常浒河的排水水温已经较低,因此对常浒河的影响较小,至能源站取水口处温升仅为 $0.1^{\circ}\text{C}$ ,基本不会对能源站取水产生影响。

在开启北小塘东闸的情况下(方案3),包围内水体流动性增加,本项目对区内水体的影响将会减小,但是减幅较小,仍有11条河流的部分或全部河段将会出现温升大于 $1^{\circ}\text{C}$ ,退水口附近最大温升仍可达 $3.25^{\circ}\text{C}$ ;温排水对徐六泾也会产生一定的影响,但由于温排水经过包围内部扩散与热交换之后,进入徐六泾的水温已经趋近于背景水温,因此对徐六泾的影响也较小,产生的最大温升不超过 $0.14^{\circ}\text{C}$ 。

### 3 结论

在以滨江新城中心区为代表的典型平原河网地区,蓄水包围虽解决了中心区蓄水和河道淤积问题,但长期关闸也会导致水体滞流,水体自净能力下降,从而导致水质变差。在此种情况下,能源站温排水的排放对蓄水包围的影响是双面的:关闸期间会对包围内多条河道水温产生影响,但是能源站

退水恰好又可为蓄水包围创造一个活水水源。通过对蓄水包围周围的控制闸站合理调度,如适当开启王巷河闸、北小塘东闸,可以有效降低能源站温排水带来的温升影响,同时增加蓄水包围内河道水体流动性,从而在一定程度上提升蓄水包围内水质及各项感官指标,美化滨江新城中心区水环境。

### 参考文献:

- [1] Meselhe, E.A, Sotiropoulos, et al. Three-dimensional numerical model for open-channels[ C ]// Waterpower'95. ASCE, 1995:2315-2324.
- [2] Sinha S K, Sotiropoulos F, Odgaard A J. Three-Dimensional Numerical Model for Flow through Natural Rivers[ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 124 (1):13-24.
- [3] 郝瑞霞,周力行,陈惠泉.天然河道湍浮力流动的数值模拟I:用隔离法实现三维复杂边界处理[ J ].水利学报, 1999 (5):6-12.
- [4] 曾平,李玉成,王小峰,等.带自由表面三维非恒定紊流场的全场数值模拟[ J ].水动力学研究与进展, 1995 (5):501-509.
- [5] 郝瑞霞,陈惠泉,周力行.天然河道湍浮力流动的数值模拟II:数学模型及其在冷却水工程中的应用实例[ J ].水利学报, 1999, 21 (6):31-38.
- [6] 郝瑞霞,韩新生.潮汐水域电厂温排水的水流和热传输准三维数值模拟[ J ].水利学报, 2004, 35 (8):66-70.
- [7] 庄春义.河道一维非恒定流水温预测模型研究[ D ].成都:四川大学, 2005.
- [8] 吴时强,吴修锋,于普兵.平原河网地区电厂温排水影响数值模拟[ C ]//中国水利学会青年科技论坛, 2005.
- [9] 卢士强,林卫青,余江,等.内陆河网温排水预测模型开发及其应用研究[ J ].上海环境科学, 2008 (5):192-195.