

# 铁山湾内电厂温排水累积热影响数值模拟

赵懿珺<sup>1</sup>,王靖宇<sup>2</sup>,陈小莉<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院水力学研究所,北京 100038;

2. 清华大学水利水电工程系,北京 100084)

**摘要:**为了解铁山湾内已有电厂与新建电厂温排水的叠加累积效应,采用 Delft3D 水动力模型进行潮流及温度场的数值模拟。通过对模型主要时空参数进行敏感性分析,确定了模拟计算时长为 25 个潮周期,最小网格尺寸为 40 m,时间步长为 15 s。流场及温度场计算结果表明:新建电厂投运后,岸线变化导致工程局局部区域流场发生改变;1℃温升线与北海电厂重叠,影响范围较北海电厂单独运行增加 21 km<sup>2</sup>;北海电厂取水温升增幅不超过 0.4℃。数学模型计算结果与同步开展的物理模型试验结果对比表明,排水口近区两者差异较大,随着温排水远离排水口,两者差异逐渐减小,在 1℃温升线附近两者基本相同。

**关键词:**铁山湾;电厂温排水;累积热影响;参数敏感性;Delft3D 水动力模型

**中图分类号:**P131.2;X145

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7647(2015)02-0047-05

**Numerical simulation of accumulated effect of thermal discharge from power plants in Tieshan Bay//ZHAO Yijun<sup>1</sup>, WANG Jingyu<sup>2</sup>, CHEN Xiaoli<sup>1</sup>(1. Department of Hydraulics, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)**

**Abstract:** To research the accumulated impact of thermal discharge from established and proposed power plants in Tieshan Bay, Delft three dimensional (Delft3D) hydrodynamic model was adopted to simulate the tidal current and temperature field. Based on sensitivity analysis of key spatial and temporal parameters, the computation time is twenty five tidal periods, the minimal mesh size is 40 meters, and the time step is 15 seconds. The numerical results showed: local current fields in the vicinity of new projects were changed due to the shoreline variation when proposed power plant is in operation; the 1 centigrade (1℃) isothermal-increment line overlapped with Beihai Power Plant; the impact area was increased by 21 square kilometers; the intake water temperature of Beihai Power Plant rose 0.4℃. Comparison between numerical model and physical model revealed that the simulation results have bigger differences in the near field, but as the thermal discharges move far away from water outlet the differences become smaller and the two models have almost the same impact area near 1℃ isothermal-increment line.

**Key words:** Tieshan Bay; thermal discharges from power plants; accumulated thermal impact; sensitivity of parameters; Delft3D hydrodynamic model

半封闭海湾处于陆海交界处,湾口狭窄,水深变化复杂,潮流进出通道及湾口多为冲刷深槽<sup>[1]</sup>,湾内水体与外海水体交换缓慢,海洋生态系统脆弱。近些年,为适应我国沿海经济的快速发展,滨海地区火电、核电的建设数量与规模突飞猛进,许多半封闭海湾也出现数座电厂并存的局面。采用直流供水系统的火、核电厂常年源源不断地将高于环境水温 6~11℃的温排水排入受纳海域,必然会对环境水生态系统产生热影响,乃至热污染。

由于水体自净能力弱、潮余流复杂、人类活动频

繁、生态保护目标敏感,半封闭海湾的热影响问题受到学者广泛关注。周巧菊<sup>[2]</sup>采用 POM 模式建立了大亚湾潮流数值模型,并对大亚湾内核电站的温排水进行了模拟研究;林军<sup>[3]</sup>应用 ECOMSED 模式并耦合实时热通量模块模拟了象山港海域潮流及温度场;陈春亮等<sup>[4]</sup>为了解温排水排入湛江湾后的随潮输移扩散,应用 ECOMSED 海洋模式计算温排水的时空输移路径及温升范围。近些年,环保问题日益凸显,半封闭海湾内温排水的累积与叠加影响成为研究重点<sup>[5]</sup>,数学模型作为主要的模拟手段也得到

广泛应用,但关于时空参数的敏感性研究相对较少。铁山湾属于典型的半封闭海湾,本文采用 Delft3D 模型模拟铁山湾潮流场,在对模型主要时空参数进行敏感性分析的基础上,对湾内已建电厂与待建电厂的累积热影响进行分析,可为铁山湾热排放的统筹规划提供依据。

## 1 铁山湾自然条件

铁山湾位于广西北海市铁山港东侧,属于典型的半封闭海湾,如图 1(水下地形采用理论深度基面)所示,海湾形状似喇叭,湾口宽阔,湾内狭窄,东西北三面被陆地环绕,南部与北部湾相通。湾内水域面积达 200 km<sup>2</sup>,平均纳潮量 1.9 亿 m<sup>3</sup>。铁山湾狭长的水道由口门向湾内延伸并逐渐变浅变窄,中间深槽,两侧浅滩。

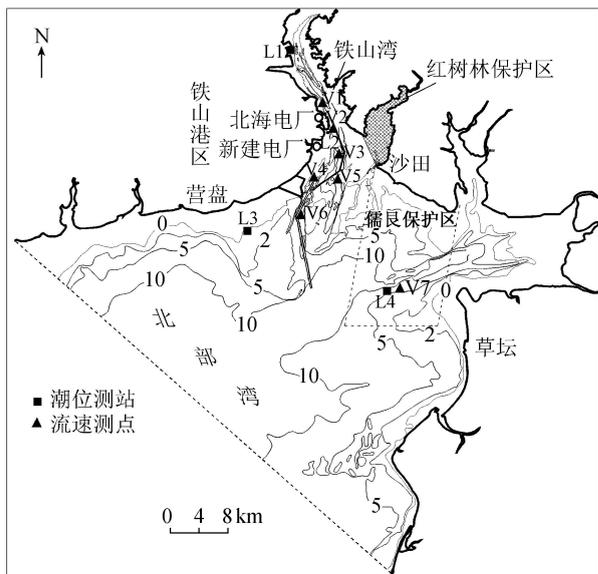


图 1 铁山湾水下地形及水文测站(单位:m)

该海区潮汐属不正规全日潮,潮汐作用强,是华南沿海潮差最大的海区之一。其潮汐有两大特点:一是潮差大,二是涨落潮历时不等。据多年实测资料统计,最大潮差为 6.25 m,多年平均潮差为 2.53 m,平均涨潮历时约 8.5 h,平均落潮历时约 7 h。湾内无大河注入,径流量小,潮流呈往复流,流向与深槽走向(北西—南东)基本一致,涨潮时流向湾内,落潮时流向湾外。转流方向由落潮转涨潮一般为顺时针方向,由涨潮转落潮一般为逆时针方向。一般情况下,落潮流速大于涨潮流速,憩流时间很短,转流较快。

铁山湾内已有北海电厂 2 台 300 MW 机组在运行。目前,在北海电厂以南 4 km 准备再新建一座火电厂,建设规模为 2 台 1000 MW 机组。两个电厂均采用直流供水系统,以铁山湾海水作为冷却水源。铁山湾东侧及湾口分别有红树林及儒艮国家级保护区,要求 1℃ 温升线不能进入保护区。

## 2 数学模型

采用荷兰 Delft 水力研究院开发的 Delft3D 水动力模型进行潮流场及温度场的模拟计算,该模型建立在 Navier-Stokes 方程基础上,并且应用了浅水简化,控制方程在交错网格上采用有限差分格式离散,求解采用 ADI 方法,在河口及海湾潮流、污染物输运模拟中均有较好的应用<sup>[6-10]</sup>。

模拟范围(图 1)大约 2500 km<sup>2</sup>,计算水边界长约 70 km。网格划分由 Delft3D 模型的前处理模块 Delft3D-rgfGrid 完成。根据计算区域的岸线特点,结合电厂取排水工程布置以及地形情况,共生成 400×454 个矩形网格,并在工程区域局部进行加密,加密后的网格单元最小精度约为 40 m。

潮流场计算的初始条件为零启动条件,即全场流速给定为零。对于岸边界,采用流速滑移条件;对于水边界采用给定潮位过程。

温度场计算的初始条件为环境水体温度。对于水陆边界,采用绝热条件;对于开边界,水流流出,边界条件由计算给出,水流流入,边界温度为环境水体温度。排水温度与取水温度关联,等于取水温度加取排水温差。北海电厂循环水流量为 23.1 m<sup>3</sup>/s,取排水温差为 8.15℃;新建电厂循环水流量为 67.8 m<sup>3</sup>/s,取排水温差为 8.5℃。

铁山湾海域水下地形呈现滩槽相间的地形格局,靠近岸边浅滩水域,在涨、落潮过程中出现低潮位露滩、高潮位被水淹没的现象。模拟计算中,对于干湿交替的网格采用临界水深法处理。设定临界水深为 0.02 m,当水深小于临界水深时,为干点,流速为 0 m/s;当水深大于临界水深时,为湿点,取计算流速值。

模型参数主要有海床糙率、物质扩散系数以及水面散热系数。海床糙率一般与水深有关,通过模型率定确定,计算过程中糙率系数取值为 0.018~0.02。物质扩散系数参照同步进行的物理模型试验结果取值,范围为 1~10 m<sup>2</sup>/s。水面综合散热系数根据厂址气象资料由 GB/T50102—2003《工业循环水冷却设计规范》推荐公式计算得到,  $K_s = 48.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{℃})$ 。

## 3 模型验证

模型验证资料选择 2012 年 4 月铁山湾水域全潮水文测验数据(测点布置见图 1,共布设 4 个潮位测站以及 7 个流速测点)。图 2、图 3 分别为大潮期间,工程附近潮位测站(L2 站)及流速测点(V2 站)的验证结果。模拟计算值与实测值比较,潮位出现高、低潮的时刻相同,最高与最低潮位偏差不超过 10 cm;模拟计算的流速、流向以及转潮点与实测资

料中垂向平均流速、流向符合良好,85%以上测点流速误差小于15%,流向偏差小于15°。

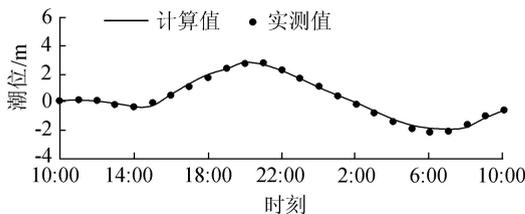
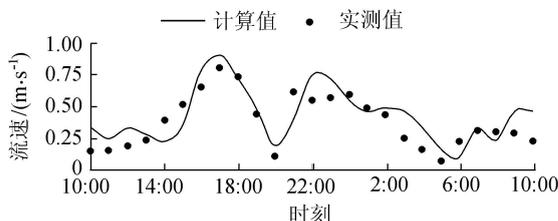
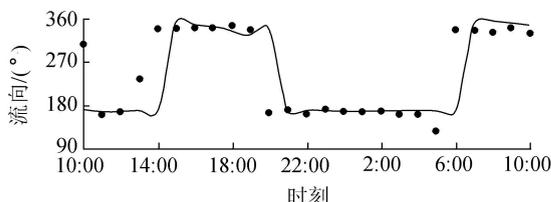


图2 潮位验证结果(L2站)



(a) 流速变化过程线



(b) 流向变化过程线

图3 流速、流向验证结果(V2站)

铁山湾涨落潮流场见图4。铁山湾内涨落潮流场主要表现为受岸线与地形控制的往复流。涨潮时,湾外开阔水域的涨潮流沿东北方向流入,并略带逆时针旋转,进入湾内后,在岸线与深槽的作用下,沿北向流至湾顶;流速分布表现为外海流速略小、湾内狭窄水道处流速较大、深槽潮流最强的特点;落潮时,湾内的落潮流经湾口流出,与安铺港的落潮流汇合后呈南西向流向外海。潮流强度自湾顶向湾口逐渐增强。岸边区域流动较弱,受地形影响,湾顶浅滩区在低潮时出现露滩。

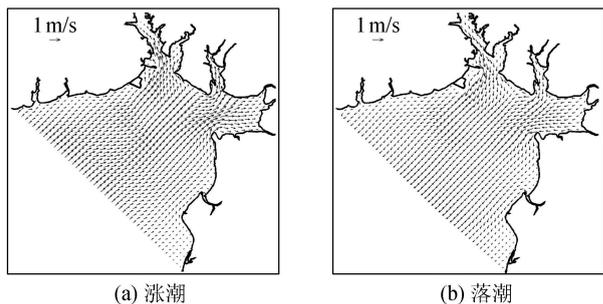


图4 铁山湾涨、落潮流场

## 4 时空参数敏感性分析

### 4.1 计算时长敏感性

为获取计算稳定后的温度场,采用60个潮周期

进行迭代计算,统计计算域内0.5℃温升全潮最大影响面积随潮周期的变化。稳定性的判别条件为0.5℃温升影响面积随潮周期变化的相对偏差小于1%。结果表明,经过20个潮周期后基本趋于稳定。

### 4.2 网格尺度敏感性

加密网格,减小网格尺度,有利于减小数值耗散,提高计算精度,但是随着网格数目的增加,计算耗时随之增长,因此,需要在耗时与精度之间做出平衡,使得精度满足工程要求的基础上耗时较少。计算时,在取排水口附近进行网格加密,选择80 m、40 m、30 m共3种最小网格尺度进行对比,计算结果表明,随着最小网格尺度增大,排水口附近掺混稀释温排水的环境水量增加,近区高温升面积减小,远区低温升区面积增大,取水温升降低。与40 m最小网格尺度相比,80 m最小网格尺度的4℃温升全潮最大影响面积减小约13%,1℃温升全潮最大影响面积增大约11%,取水温升降低幅度小于0.1℃;30 m最小网格尺度的温度场及取水温升变化则小于3%。

### 4.3 时间步长敏感性

Delft3D-Flow 稳定性好,时间步长取值可以较大,但是较大的时间步长可能带来较大的截断误差,因此必须对时间步长的敏感性进行分析。选择3种时间步长( $\Delta t=60\text{ s}$ 、 $15\text{ s}$ 、 $10\text{ s}$ )进行比较分析,计算表明,随时间步长增加,近区高温升面积减小,远区低温升区面积增大,取水温升降低。与 $\Delta t=15\text{ s}$ 相比, $\Delta t=10\text{ s}$ 条件下,4℃温升全潮最大影响面积减小1%,1℃温升全潮最大影响面积增大11%,取水温升降低幅度小于0.1℃。 $\Delta t<15\text{ s}$ 后,计算结果基本维持不变。通过敏感性分析,模拟时选择计算时长为25个潮周期,最小网格尺寸为40 m,时间步长为15 s。

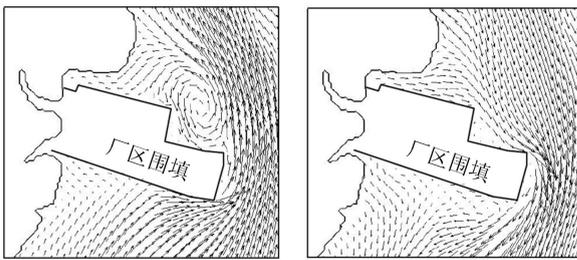
## 5 新建电厂对流场及温度场的影响

### 5.1 岸线变化对流场的影响

新建电厂厂区围填后,对于铁山湾海域的整体流动特性影响不大,涨落潮流向仍然与岸线或地形走向一致,主流呈东北-西南方向,但在厂区附近局部流场有所改变,如图5所示。涨潮时,在厂区围填区域东北角形成明显的逆时针旋转回流区;落潮时,落潮流绕经厂区东侧及南侧围堤后,在东南角形成顺时针旋转小范围回流区。

### 5.2 新建电厂对铁山湾温度场的影响

北海电厂取排水口位于铁山湾西侧水深流急的强流区,取水水域深槽稳定,水深约15 m,排水口位于取水口南侧,紧邻深槽。该电厂排热量较小,环境水体对温排水掺混稀释能力强,单独运行时,1℃温升影响范围不超过0.6 km<sup>2</sup>;同时受南北向涨落潮主流影



(a) 涨潮 (b) 落潮

图5 新建工程区域局部流场

响,温升呈伴岸窄带型分布,1℃温升线离岸约300 m。

新建电厂位于北海电厂以南4.5 km,采用厂区东侧深取、南侧浅排的取排水布置方式,取水口贴近深槽,水深可达17 m;排水口位于厂区南侧浅滩,水深约2 m。新建电厂排热量约为北海电厂的3倍,如图6所示,电厂投运后,2℃以上高温升区集中于排水口附近浅滩水域;但1℃温升影响范围与北海电厂重叠,在两个电厂温排水的共同作用下,1℃温升影响范围可达21.6 km<sup>2</sup>,与北海电厂单独运行相比,增加了21 km<sup>2</sup>;铁山湾滩槽相间的地形格局以及涨落潮主流沿深槽往复运动的潮流特点,决定了温排水的主影响区位于西侧海湾,难以影响到对岸环境敏感点。



图6 全潮最大温升分布(单位:℃)

### 5.3 新建电厂对北海电厂取水温升的影响

新建电厂与北海电厂的取水口均位于排水口北侧,温排水对取水的直接影响主要在涨潮时段,但落潮时铁山湾湾顶在涨潮阶段汇集的部分热水会随落潮流经过北海电厂取水水域,并与北海电厂温排水一起南下,经过新建电厂取水口,造成一定的取水温升。通过对新建电厂投运前后北海电厂取水温升的比较可知,由新建电厂排水造成的北海电厂取水温升增幅不超过0.4℃。考虑两个电厂的叠加影响后,北海电厂全潮最大与全潮平均取水温升分别为1.0℃与0.6℃,新建电厂全潮最大与全潮平均取水温升分别为1.4℃与0.8℃。

### 5.4 数学模型与物理模型的对比分析

本文数学模型计算结果与同步开展的物理模型试验成果对比表明:两种模型均能反映铁山湾涨落潮流场的整体态势及特点,温排水随潮输移扩散呈现出相同的运动规律;如图7所示,物理模型试验与数值模拟计算的等温升线影响面积随温升的变化规律相似;温排水口近区,物理模型由于能够充分反映温排水的三维温差浮力效应,温升影响面积较大,但在远离排水口区域,温排水水力、热力三维特性逐渐消失,温升逐渐降低,两种模拟手段的结果差异逐渐减小,4℃、3℃、2℃、1℃温升影响面积的相对误差分别为50%、35%、28%、7%,在1℃温升线附近二者的结果基本相同。

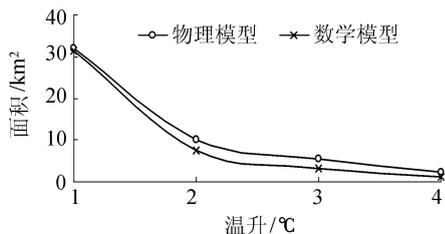


图7 影响面积随温升变化规律

## 6 结语

采用Delft3D二维水动力数学模型,对半封闭海湾铁山湾的潮流场及温度场进行了模拟计算,依据实测水文资料对模型进行了验证,潮位及潮流验证结果良好,涨落潮流场反映了海区的整体态势。研究表明,铁山湾潮差大、潮汐作用强,受地形与岸线影响,电厂所在水域潮流基本上受地形控制的往复流;新建电厂投运后,工程局局部区域流场发生改变,湾内已有电厂取水温升有所升高,两个电厂的温度场产生叠加累积影响,但温排水的主影响区集中在铁山湾西侧,不会影响到对岸。

### 参考文献:

- [1] 夏东兴,刘振夏. 中国海湾的成因类型[J]. 海洋与湖沼, 1990, 21(2): 185-191. (XIA Dongxing, LIU Zhenxia. Classification of bays in China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1990, 21(2): 185-191. (in Chinese))
- [2] 周巧菊. 大亚湾海域温排水三维数值模拟[J]. 海洋湖沼通报, 2007(4): 37-46. (ZHOU Qiaojun. A three-dimensional numerical simulation of thermal discharge in Daya Bay[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2007(4): 37-46. (in Chinese))
- [3] 林军. 象山港海洋牧场规划区选址评估的数值模拟研究;滨海电厂温排水温升的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2012, 21(5): 816-824. (LIN Jun. Numerical

- simulation study on site selection evaluation of marine ranching zone in Xiangshan Bay: effects of thermal water discharged from coastal power plants [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2012, 21 (5): 816-824. (in Chinese)
- [4] 陈春亮, 梁春林, 卢仕严, 等. 电厂温排水对湛江湾海水温升的数值模拟及生态影响评价[J]. 台湾海峡, 2012, 31(4): 530-539. (CHEN Chunliang, LIANG Chunli, LU Shiyang, et al. Numerical simulation of seawater temperature rising and the ecological evaluation of the effect of thermal discharge from a power plant in Zhanjiang Bay[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2012, 31(4): 530-539. (in Chinese))
- [5] 贺益英. 对大水电电厂群温排水环境热影响研究的认识[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(4): 27-29. (HE Yiyang. A pondering over research on environment thermal impact of cooling water discharged from groups of power plants[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(4): 27-29. (in Chinese))
- [6] 刘成, 李行伟, 韦鹤平, 等. 长江口水动力及污水稀释扩散模拟[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(5): 474-483. (LIU Cheng, LI Xingwei, WEI Heping, et al. Numerical simulation of the hydrodynamics and sewage diffusion in the ChangJiang River Estuary [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2003, 34(5): 474-483. (in Chinese))
- [7] 栗苏文, 李红艳, 夏建新. 基于 Delft3D 模型的大鹏湾水环境容量分析[J]. 环境科学研究, 2005, 18(5): 91-95. (LI Suwen, LI Hongyan, XIA Jianxin. Dapeng Bay water environment capacity analysis on the base of Delft3D model[J]. Research of Environmental Sciences, 2005, 18(5): 91-95. (in Chinese))
- [8] 张继民, 张新周, 汤红亮, 等. Delft3D 在海湾电厂温排水数值模拟中的应用[J]. 人民长江, 2009, 40(1): 59-62. (ZHANG Jimin, ZHANG Xinzhou, TANG Hongliang, et al. Application of Delft3D in numerical simulating of thermal discharge from power plant in the bay[J]. Yangtze River, 2009, 40(1): 59-62. (in Chinese))
- [9] 陆仁强, 何璐珂. 基于 Delft3D 模型的近海水环境质量数值模拟研究[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(6): 878-880. (LU Renqiang, HE Luke. Study on numerical simulation of environmental quality in coastal water based on Delft3D model [J]. Marine Environmental Science, 2012, 31(6): 878-880. (in Chinese))
- [10] 陈琴. 基于 Delft3D 的洪水污染物输移过程研究: 以钱塘江典型洪水过程为例[J]. 人民长江, 2013, 44(3): 67-74. (CHEN Qin. Study on transport of pollutant in flood by Delft3D: the case of typical flood process of Qiantang River[J]. Yangtze River, 2013, 44(3): 67-74. (in Chinese))

(收稿日期: 2013-12-26 编辑: 熊水斌)

(上接第 16 页)

- [5] 吴亚琼, 赵勇, 吴相林, 等. 初始排污权分配的协商仲裁机制[J]. 系统工程, 2003, 21(5): 70-73. (WU Yaqiong, ZHAO Yong, WU Xianglin, et al. The bargaining and arbitration mechanisms of the allocation of the initial emission permits[J]. Systems Engineering, 2003, 21(5): 70-73. (in Chinese))
- [6] 张志耀, 张海明. 污染物排放总量分配的群体决策方法研究[J]. 系统科学与数学, 2001, 21(4): 473-479. (ZHANG Zhiyao, Zhang Haiming. Study on group decision method in allocation of pollutant discharge total [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2001, 21(4): 473-479. (in Chinese))
- [7] 赵云峰, 徐大伟, 候铁珊, 等. 基于 AHP 的辽河流域排污权初始分配值测算[J]. 统计与决策, 2013(2): 50-53. (ZHAO Yunfeng, XU Dawei, HOU Tieshan, et al. The calculation of liaohu watershed emissions permits initial allocation based on AHP method [J]. Statistics & Decision, 2013(2): 50-53. (in Chinese))
- [8] 尚静石. 动态规划在河流初始排污权分配中的应用[J]. 东北水利水电, 2006(5): 9-10. (SHANG Jingshi. Application of dynamic planning in river primary below down right allocation[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2006, (5): 9-10. (in Chinese))
- [9] 王媛, 牛志广, 王伟. 基尼系数法在水污染物总量区域分配中的应用[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(3): 177-180. (WANG Yuan, NIU Zhiguang, WANG Wei. Application of gini coefficient in total waste load district allocation for surface water[J]. China Population, Resources and Environment, 2008, 18(3): 177-180. (in Chinese))
- [10] 左其亭. 和谐论: 理论·方法·应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [11] 左其亭. 人水关系的和谐论研究[J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(4): 469-477. (ZUO Qiting. Research on the harmony theory method of human-water relationship[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(4): 469-477. (in Chinese))
- [12] 左其亭. 和谐论及其应用的关键问题讨论[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(5): 101-104. (ZUO Qiting. Key problems and its application of harmony theory[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(5): 101-104. (in Chinese))
- [13] 汪斌. 淮河流域纳污能力及限制排污总量研究[R]. 蚌埠: 淮河水利委员会, 2006.

(收稿日期: 2013-12-18 编辑: 熊水斌)