

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2010.05.006

# 曹娥江至宁波引水工程平面二维水流数值模拟

叶如意<sup>1</sup>, 王攀<sup>2</sup>

(1. 宁波大红鹰学院 浙江 宁波 315175; 2. 宁波市水利局 浙江 宁波 315016)

**摘要** :曹娥江至宁波引水工程作为浙东引水工程的重要组成部分,与大库和通明船闸的运行关系密切,存在引水水流对航运条件的影响,为此建立引水工程平面二维水流动力数学模型,并用大库引水工程 1:50 模型试验资料对引水工程方案进行对比验证和优化。结果表明,通明引水工程一期和二期上下游横向流速、纵向流速和回流流速都能满足通航设计规范,工程的建设对通航影响不大,设计方案是合理的,在引水工程的进、出口横向流速最大,过往船只需注意即可。

**关键词** :引水工程;数学模型;杭甬运河;航运条件;有限元法

**中图分类号** :TV135 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-6933(2010)05-0024-05

## Two-dimensional numerical simulation of flow for water diversion project from Cao 'e River to Ningbo

YE Ru-yi<sup>1</sup>, WANG Pan<sup>2</sup>

(1. Ningbo Dahongying University, Ningbo 315175, China; 2. Ningbo Water Conservancy Bureau, Ningbo 315016, China)

**Abstract** :The water diversion project from the Cao 'e River to Ningbo is an important component of water diversion in eastern Zhejiang Province. The water diversion project is closely related to Daku and Tongming Lock, and therefore affects shipping conditions. A two-dimensional mathematical model of the diversion project was established in order to investigate the effect. The diversion project was optimized by using experimental data from the 1:50 physical model of the Daku diversion project. The results indicated that the transverse velocity, longitudinal velocity, and circulation velocity upstream and downstream of the first and second stage of Tongming Lock met the requirements of shipping design standards. No significant influence of the project construction on shipping conditions was found, and the design proposal was reasonable. The transverse velocity at the inlet and outlet of the diversion project was at its maximum, so passing ships should be cautious.

**Key words** :water diversion project; numerical model; Hangzhou-Ningbo Canal; shipping conditions; finite element method

### 1 概 况

浙东引水工程是解决浙东地区萧绍宁平原及舟山地区水资源短缺矛盾的系统水利工程,主要由浙东引水萧山枢纽及其输水河道、曹娥江大闸枢纽、曹娥江上游水库、曹娥江以东配套输水建筑物以及舟山大陆引水工程等组成。

曹娥江至宁波引水工程作为曹娥江以东配套输水建筑物之一,工程取水口位于曹娥江右岸,工程引

水线路结合杭甬运河设置,新建大库船闸段及通明船闸段旁通引水建筑物,满足工程引水要求,同时保证杭甬运河正常使用。工程设计引水流量为  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ ,进口引水闸需穿过曹娥江右岸堤防,主要由引水闸、引水河道、引水涵管、倒虹吸和流量控制闸等建筑物组成<sup>[1]</sup>。

工程引水线路由大库段引水工程及通明段引水工程组成(图 1)。引水线路进口为大库引水闸,位于曹娥江右岸,大库村上游 500m、大库船闸上游约

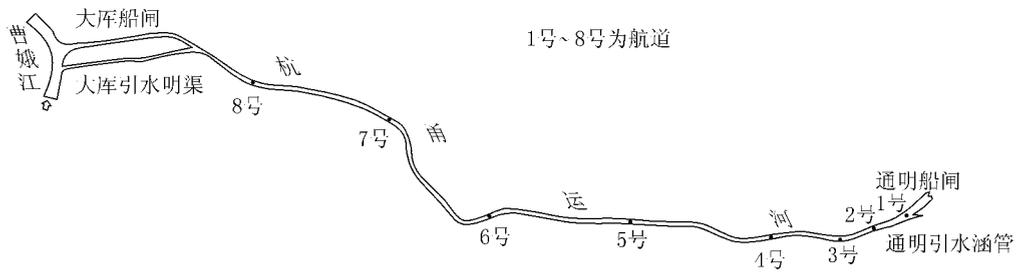


图1 曹娥江至宁波引水工程示意图

300 m 处。大库段引水工程由大库引水闸、闸前引河、跨总干渠倒虹吸、闸下一孔家湖河道、孔家湖劈山河道、孔家湖下游河道组成。通明引水工程段在通明船闸右岸新建引水涵管,主要由引水涵管、流量测井、流量控制闸等建筑物组成。大库段引水工程方案如图2所示。引水工程在曹娥江水位 3.9 m(高水位) 3.6 m(中水位) 3.3 m(低水位)条件下,利用大库船闸、通航孔的引水或新建大库引水闸引水。

由于引水渠道利用了杭甬运河,对其航运条件产生一定的影响<sup>[2]</sup>,尤其是通明段引水工程进、水口区域。为此,笔者利用平面二维数学模型在验证计算的基础上,分析通明段引水工程进口段河道流态,分析引水对通航条件的影响,提出改进措施。

## 2 二维水流数学模型及验证计算

### 2.1 基本方程

针对杭甬运河河道形状及水流特征,选用沿水深平均的平面二维水流数学模型,其基本方程如下:

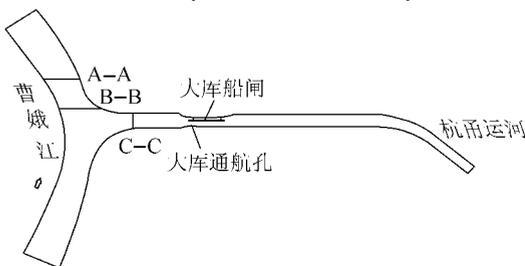
连续方程:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial uH}{\partial x} + \frac{\partial vH}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

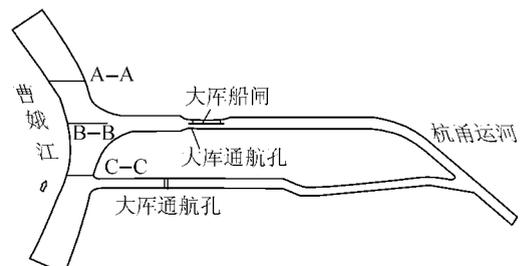
动量方程:

$$\frac{\partial uH}{\partial t} + \frac{\partial uuH}{\partial x} + \frac{\partial uvH}{\partial y} = -fvH - gH \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_t H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_t H \frac{\partial u}{\partial y} \right) - g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial vH}{\partial t} + \frac{\partial uvH}{\partial x} + \frac{\partial vvH}{\partial y} = fuH - gH \frac{\partial Z}{\partial y} +$$



(a) 船闸引水方案



(b) 引水明渠方案

图2 大库段引水方案及验证断面布置示意图

1号~8号为航道

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_t H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_t H \frac{\partial v}{\partial y} \right) - g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2} \quad (3)$$

式中: $H$ 、 $Z$ 分别为水深和水位, m; $u$ 、 $v$ 分别为 $x$ 、 $y$ 方向的流速, m/s; $\nu_t$ 为紊动黏性系数,  $m^2/s$ ;  $C$ 为谢才系数,  $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$  (其中,  $R$ 为水力半径, m;  $n$ 为河床糙率);  $f = 2\omega \sin \varphi$ 为柯氏力系数(其中,  $\omega$ 为地球自转角速度,  $\varphi$ 为计算水域所在地理纬度)。

### 2.2 定解条件

a. 初始条件:

$$\begin{cases} Z(x, y, 0) = Z_0(x, y) \\ u(x, y, 0) = u_0(x, y) \\ v(x, y, 0) = v_0(x, y) \end{cases}$$

b. 边界条件:

根据此次计算特点,上游边界给定流量边界,下游以水位作为边界条件,固定边界采用可滑动边界条件。

### 2.3 数值方法

式(1)~(3)组成的水流模型基本方程中含有非线性混合算子,可采用剖开算子法进行离散求解。这一数值方法可以根据方程所含算子的不同特性,将该方程剖分为几个不同的子算子方程,各子算子方程可采用与之适应的数值方法求解,这种方法能有效地解决方程的非线性和自由表面确定问题,具有良好的计算稳定性和较高的计算精度<sup>[3-4]</sup>。

### 2.4 模型验证计算

对大库段引水工程建立了比尺为 1:50 的模型,进行系统的模型试验<sup>[1]</sup>,考虑到大库段引水工程与

通明段引水工程为上下游引水渠道,水流参数基本一致,由于通明段缺乏水流验证基础资料,为此借用大库段模型试验成果对数学模型进行验证,在此基础上用数学模型预测通明段水流流态。验证计算区域包括长 1.5 km 曹娥江段及长 2.0 km 的大库船闸上下游河道。根据该区域水流特点和计算要求,分别对两种方案计算区域进行网格划分,对进、出水口局部区域网格适当加密。

验证计算水流条件:曹娥江上游不来水,从曹娥江下游进流  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ ,曹娥江水位 3.6 m。利用大库引水闸引水时,船闸和通航孔不过流。

对利用大库船闸、通航孔引水方案以及新建大库引水闸方案,均选取 3 个典型断面进行验证计算,典型断面布置见图 2,验证结果如图 3 及图 4 所示。由图 3、图 4 可见,各方案水流流态和流速值基本吻合,表明计算所采用的模型和参数是可靠的,可用于引水工程水力特性研究。

### 3 通明段引水工程水流计算分析

通明段引水工程计算区域包括长 2.0 km 的通明船闸上下游区域,计算方案包括一期引水箱涵方

案和二期引水箱涵方案,根据该区域的水流特点和计算要求,分开计算上下游河道水流。

#### 3.1 一期引水箱涵方案计算

通明段引水工程一期引水箱涵方案的上下游计算区域及网格划分见图 5,引水箱涵进、出口区域网格适当加密。

通明段引水工程上下游计算工况见表 1,共设计 7 组计算工况,设计引水流量为  $40 \text{ m}^3/\text{s}$  时,设计了高、中、低水位,其余工况按最不利工况低水位来进行计算,流场见图 6。通明段引水工程上游水流基本比较平顺,下游有回流现象,回流区域长 330 m,最大回流流速为  $0.14 \text{ m/s}$ 。

表 1 通明段引水工程上下游计算工况

工况	引水流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	上游水位/m	下游水位/m
工况一	20	3.3	0.93
工况二	30	3.3	0.93
工况三	40	3.3	0.93
工况四	40	3.6	1.13
工况五	40	3.9	1.33
工况六	50	3.3	0.93
工况七	55	3.3	0.93

为了定量对其分析,引水口附近布置 9 个监测

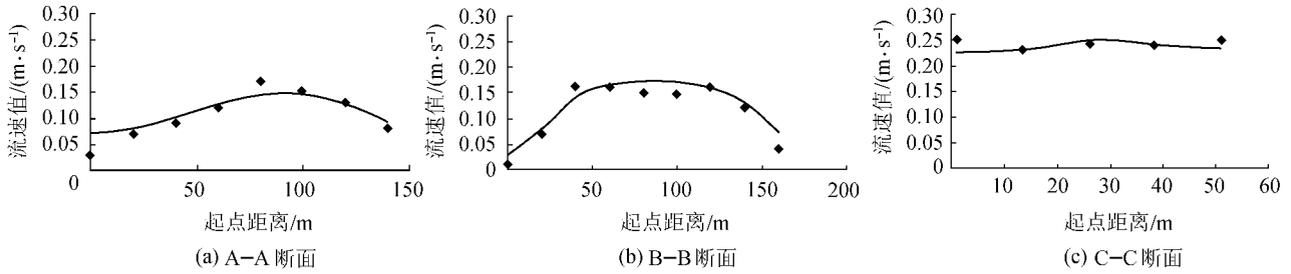


图 3 大库船闸引水方案断面流速分布验证计算

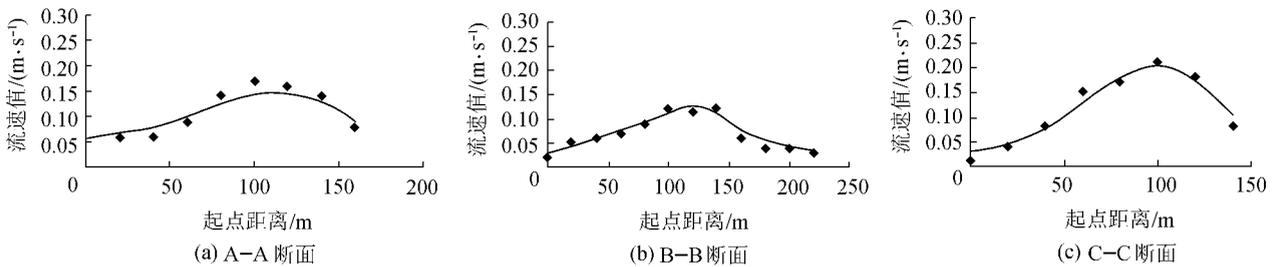


图 4 大库引水闸方案断面流速分布验证计算

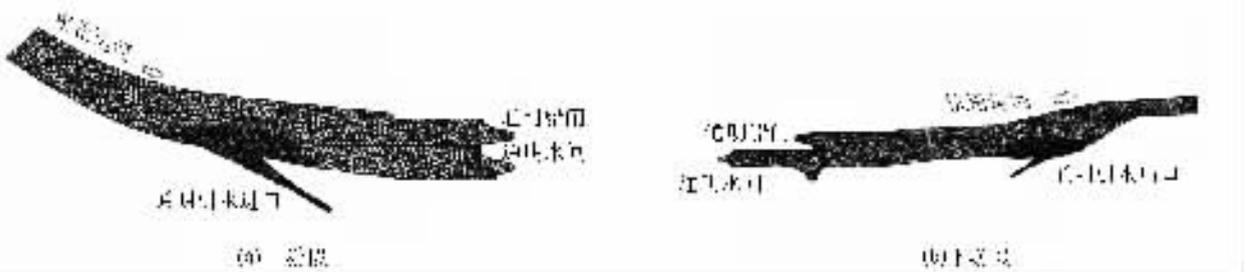


图 5 通明段计算网格布置(一期引水箱涵方案)

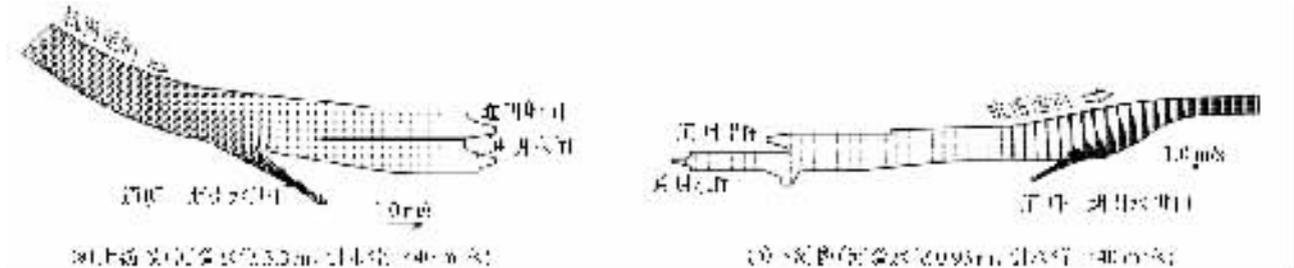


图6 通明段流场(一期引水箱涵方案)

点(图7)。由各工况每个测点流速计算结果分析可见,低水位大流量(工况七)下,上游河道监测点最大流速为0.29 m/s,最大横向流速为0.20 m/s,最大纵向流速为0.23 m/s;下游河道监测点最大流速为0.53 m/s,最大横向流速为0.25 m/s,最大纵向流速为0.47 m/s。设计引水流量为40 m<sup>3</sup>/s,低水位时(工况三),上游河道最大流速为0.21 m/s,最大横向流速为0.15 m/s,最大纵向流速为0.16 m/s;下游河道最大流速为0.39 m/s,最大横向流速为0.18 m/s,最大纵向流速为0.34 m/s。由此分析可见,设计流量为40 m<sup>3</sup>/s时能满足通航要求,后期可能扩大引水流量到55 m<sup>3</sup>/s时,也能满足通航要求,只是靠近引水出口处的横向流速稍大。

为了监测引水时水面波动影响,在通明下游布置5个监测点,如图8所示,各监测点的瞬间最大水位升降值见表2。由表2可见,监测点1号和2号波

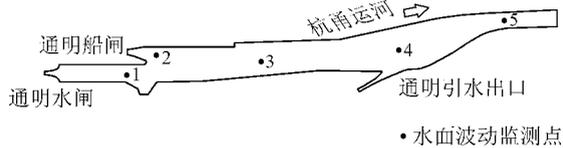


图8 通明下游水面波动监测点

表2 通明出口各监测点瞬间最大水位升降值 m

工况	监测点				
	1号	2号	3号	4号	5号
工况一	0.047	0.045	0.031	0.026	0.022
工况二	0.069	0.067	0.046	0.040	0.034
工况三	0.091	0.087	0.060	0.053	0.045
工况四	0.089	0.086	0.059	0.052	0.043
工况五	0.088	0.083	0.057	0.050	0.039
工况六	0.113	0.110	0.076	0.068	0.058
工况七	0.124	0.120	0.083	0.075	0.064

动值较大,主要是由于这两个监测点靠近岸壁,水流冲向岸边并反射使水位抬高,而4号和5号监测点位于下游,不靠岸,水位抬高值较小。工况一、二、三、六和七流量分别为20 m<sup>3</sup>/s、30 m<sup>3</sup>/s、40 m<sup>3</sup>/s、50 m<sup>3</sup>/s和55 m<sup>3</sup>/s,下游水位均为0.93 m,流量越大下游水面波动值越大。工况三、四、五流量均为40 m<sup>3</sup>/s,下游水位分别为0.93 m、1.13 m和1.33 m,随着水位升高,水面波动值略有减小。

### 3.2 二期引水箱涵方案计算分析

通明段引水工程二期引水箱涵方案的上游、下游计算区域及网格划分见图9,进出口区域网格进行适当加密。计算流场见图10。

通明段引水工程二期下游水域较一期开阔,回

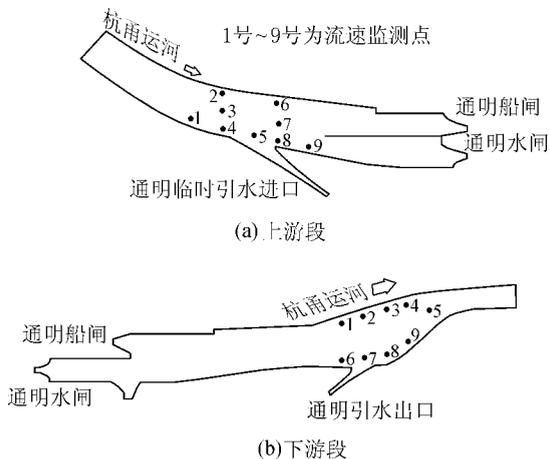


图7 通明段流速监测点布置

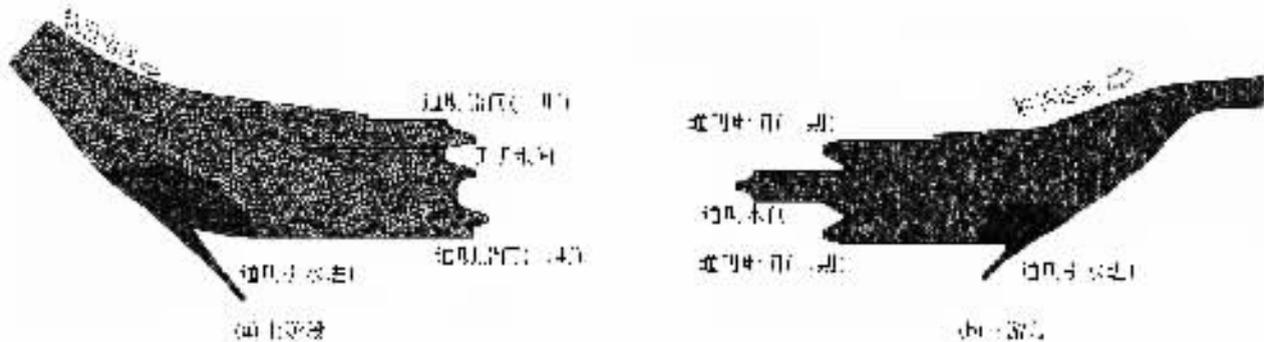


图9 通明段计算网格布置(二期引水箱涵方案)

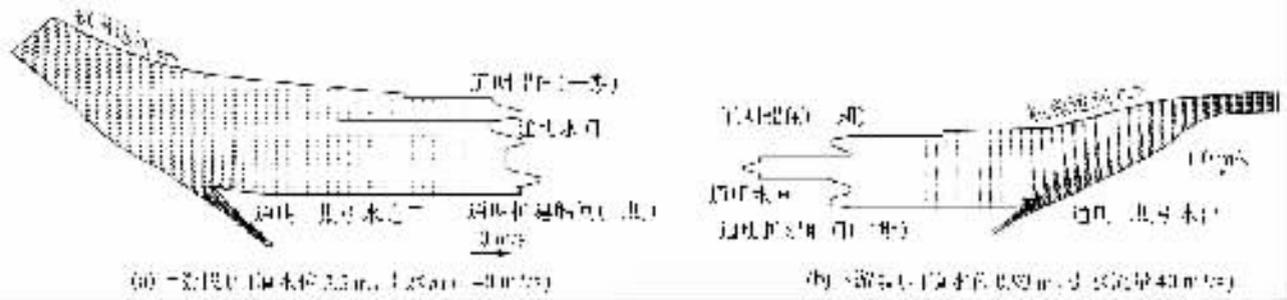


图 10 通航段流场(二期引水箱涵方案)

流流速和回流区域都有所减小,工况三回流区域长 293 m,最大回流流速为 0.09 m/s。为了定量地对其分析,在进、出水口口门区布置 9 个监测点。统计分析可见,低水位大流量(工况七)条件下,上游河道各监测点的最大流速为 0.27 m/s,最大横向流速为 0.24 m/s,最大纵向流速为 0.13 m/s;下游河道最大流速为 0.40 m/s,最大横向流速为 0.21 m/s,最大纵向流速为 0.36 m/s。对于设计引水流量为 40 m<sup>3</sup>/s、低水位(工况三)时,上游河道最大流速为 0.20 m/s,最大横向流速为 0.18 m/s,最大纵向流速为 0.10 m/s;下游河道最大流速为 0.29 m/s,最大横向流速为 0.15 m/s,最大纵向流速为 0.26 m/s。二期工程设计流量为 40 m<sup>3</sup>/s 时能够满足通航要求,后期可能扩大引水流量到 55 m<sup>3</sup>/s 时,也能满足通航要求,靠近引水口处的横向和纵向流速和一期工程比较接近,其余测点由于水域开阔横向和纵向流速都有所减小。

#### 4 结 论

通过以上计算和分析,可以得出以下结论:

a. 建立曹娥江至宁波引水工程平面二维水流动力数学模型,并用大库引水工程 1:50 模型试验资料进行对比验证,各方案水流流态和流速值吻合较好,计算所采用的模型和参数可靠,可用于引水工程的相关研究。

b. 通过对通航一期和二期引水工程的计算表明,从水流流态和流速分布角度来看,通航引水工程一期和二期的设计是合理的。通航引水工程一期和二期上、下游横向流速、纵向流速和回流流速都能满足通航设计规范,工程的建设对通航影响不大,在引水工程的进、出口横向流速最大,过往船只需注意即可。

#### 参考文献:

[1] 周辉,沙海飞.曹娥江至宁波引水工程水工模型试验研究报告[R].南京:南京水利科学研究所,2009.  
 [2] 于利均,王斌,包中进.浙东引水工程萧山枢纽进口优化数值模拟[J].水利水电技术,2009,40(3):33-35.  
 [3] 吴时强,丁道扬.剖开算子法解具有自由表面的平面紊流速度场[J].水利水运科学研究,1992(1):39-47.

[4] 吴时强,吴修锋,周辉.淮河入海水道淮安地涵枢纽河道水流数值计算[J].河海大学学报:自然科学版,2001,29(3):27-32.

(收稿日期 2010-04-18 编辑 徐娟)

(上接第 23 页)

[3] 李青山,苏保健.新立城水库藻类污染成因分析及治理对策措施[J].水文,2008,28(6):45-46.  
 [4] 杨铭威,石亚东,孙志,等.太湖蓝藻暴发引发无锡供水危机的思考[J].水利经济,2009,27(3):36-38.  
 [5] 侯俊,王超,兰林,等.我国饮用水水源地保护法规体系现状及建议[J].水资源保护,2009,25(1):79-82,85.  
 [6] SCHEFFER M. Ecology of shallow lakes[M]. Netherlands, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001: 89-307.  
 [7] NIXDORF B, DENEKE R. Why 'very shallow' lakes are more successful opposing reduced nutrient load[J]. Hydrobiologia, 1997, 342/343: 269-284.  
 [8] 于常荣,赫影,钟艳兵.新立城水库水质研究[J].吉林水利,1992(1):30-34.  
 [9] 杨爱玲.城市饮用水地表水源保护研究:以东北区为例[D].长春:中国科学院东北地理与农业生态研究所,2000.  
 [10] 沈万斌,杨育红,董德明.松花江吉林省段水环境的优化管理[J].吉林大学学报:理学版,2007,45(6):1043-1045.  
 [11] HSIEH Cheng-daw, YANG Wan-fa. Optimal nonpoint source pollution control strategies for a reservoir watershed in Taiwan[J]. Journal of Environmental Management, 2007, 85: 908-917.  
 [12] JONES L, WILLIS R, YEH W W W-G. Optimal control of nonlinear groundwater hydraulics using differential dynamic programming[J]. Water Resources Research, 1987, 23: 2097-2106.  
 [13] 肖桂义,陆继龙,蔡波,等.长春市石头口门水库水质演变及对策[J].地质与勘探,2003,39(6):61-63.  
 [14] 侯彦林,周永娟,李红英,等.中国农田氮面源污染研究:污染类型区划和分省污染现状分析[J].农业环境科学学报,2008,27(4):1271-1276.  
 [15] 国家环境保护局.环境影响评价技术导则 地面水环境(HJ/T2.3-93)【S】.1993.

(收稿日期 2009-12-30 编辑 徐娟)