

花道泡水质模拟预测研究

潘晓东^{1,3}, 唐健生¹, 田竹君², 李振兴³

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西桂林 541004; 2. 松辽流域水资源保护局, 吉林长春 130000; 3. 吉林大学, 吉林长春 130026)

摘要 Delft-3D 是由荷兰水力研究院(Delft Hydraulics)开发设计的三维或二维可视水动力-水质联合模拟软件系统,可全面仿真水体的三维或二维循环水流水质情况。该模型不仅考虑了复杂的流体力学问题和输送过程,还考虑到众多与有关水体相关的物理、化学和生物的相互作用,使仿真结果较先前使用的水质及水力模型仿真套件所作的预测更为可靠和准确。该研究以 Delft-3D 软件为技术平台,对饮用水源地花道泡引水初期的水质进行了模拟预测,初步确定了水体适合农业灌溉和生活饮用的时间,并且给当地的决策部门提出了一些建议。

关键词 Delft-3D; 水质模拟; 流体力学

中图分类号 X824 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2009)21-10104-03

Research on the Numerical Simulation of Water Quality in Huadao Reservoir

PAN Xiao-dong et al (Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004)

Abstract Delft-3D software system was designed by the water power academe of Netherlands (Delft Hydraulics). And it could be used to simulate the changes of hydraulics and water quality in two directions or three directions. The models not only think of complicated hydrodynamics questions and transportation process, but also think of many physical chemical and biological reciprocity, which makes the results more credibility and reliable. By using Delft-3D, the water quality of the first three years in Huadao Reservoir was simulated the time to irrigate and drink was defined. And some suggestions were given for local decision-making departments.

Key words Delft-3D; Simulation of water quality; Hydrodynamics

1994年8月,国务院以国函[1994]82号文件批复了《松花江、辽河流域水资源综合开发利用规划》。哈达山水利枢纽工程是规划一期开发建设的主要水源工程之一,工程计划于2010年年底完工,2011年开始使用。花道泡位于吉林省松原市,是工程的主体内容之一,工程计划将松花江的水引至花道泡,负责向周围城镇进行工农业供水。笔者基于荷兰 Delft-3D 软件为技术平台,对花道泡引水后 P=90% 年的水质浓度进行数值模拟预测^[1-2],确定了农业灌溉用水时间和城镇供水用水时间。

1 花道泡水动力数值模拟

水动力模拟是水质模拟的前提。根据模拟的目的,基于 Navier-Stokes 方程^[3],假定水流为不可压缩流体,忽略温度变化对流场的影响,进行 Boussinesq 近似^[4],建立二维水动力模型。

1.1 控制方程

1.1.1 沿水深积分的连续方程。

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \quad)u\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \quad)v\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = Q \quad (1)$$

$$Q = Hf_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E \quad (2)$$

式中, Q 为单位时间内单位面积上由于排水、引水、蒸发或降雨等引起的水量变化,即总的源或汇(m/s); u, v 为 ξ, η 方向上的水流速度(m/s); q_{in}, q_{out} 为单位时间内单位体积的局部源(流入量)、局部汇(流出量)(1/s); P 为降水量(m/s); E 为蒸发量(m/s); $G_{\xi\xi}, G_{\eta\eta}$ 为曲线坐标系转换为直角坐标的转换系数。

$$1.1.2 \text{ 动量方程。水平 } \xi \text{ 方向上: } \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \eta} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - fv = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d + \quad)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma}) + M_\xi \quad (3)$$

$$\text{水平 } \eta \text{ 方向上: } \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + fu = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d + \quad)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma}) + M_\eta \quad (4)$$

式中, u, v 为在正交曲线坐标系下 ξ, η 方向上的水流速度(m/s); $G_{\xi\xi}, G_{\eta\eta}$ 为曲线坐标系转换为直角坐标的转换系数; d 为低于参照水空间的水深(m); \quad 为参照水空间($z=0$)以上的水位(m); fu, fv 为柯氏力系数(惯性频率)(1/s); ρ_0 为水体密度(kg/m³); P_ξ, P_η 分别为 ξ, η 方向的静水压力梯度[kg/(m²·s²)]; F_ξ, F_η 为 ξ, η 方向上的紊动动量通量(m/s²); v_v 为垂向涡旋粘性系数(m²/s); M_ξ, M_η 为 ξ, η 方向上的动量源或汇(m/s²)。

1.2 模型定解条件 初始条件:以泡子现状水位作为初始水位, $H_{t=0} = H_0$; 边界条件:此次研究将进出水口都定义为给定流量边界: $Q = F_Q(t)$ 。

1.3 计算区域边界文件、空间剖分及时间离散 模型中网格(图1)是在 regrid 菜单下生成的,采用正交曲线网格对桃山水库进行剖分,共计生成 11 877 个网格,网格步长控制在 50 ~ 75 m。

时间步长 t :考虑到模拟时间跨度比较大,取 $t = 10 \text{ min}$ 。根据已有的水深资料在 quicken 菜单下编辑网格节点上的水深,然后利用三角插值得到所有网格节点的水深,生成水深文件。

基金项目 国家“948”项目(2000105)。

作者简介 潘晓东(1984-),男,山东安丘人,硕士,助理研究员,从事岩溶水资源与水环境研究。

收稿日期 2009-04-07

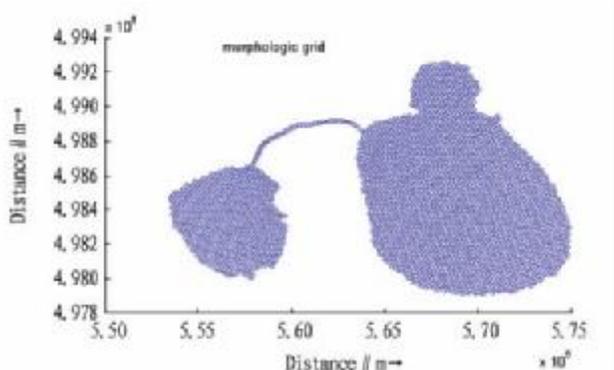


图1 花道泡网格剖分

Fig. 1 The grid subdivision of Huadao Reservoir

1.4 参数的确定 根据流量与水位关系,利用解析法 $q \cdot t = (s_0 + s_t) \cdot h_t/2$ 计算得到的近似水位与时间关系进行调参,解析解与数值解基本一致(图2),得到了符合泡子实际的参数,底部粗糙系数(曼宁系数) n :取 $n = 0.025$;水平涡动粘性系数 v_H :取 $v_H = 10 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

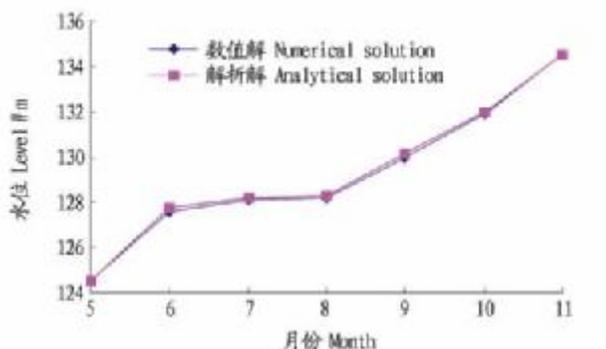


图2 2011年水位率定结果

Fig. 2 The check results of water level in 2011

1.5 预测结果及其分析 对模型进行求解,可以得到任意时刻的水位分布图和流速分布图(图3、4)。

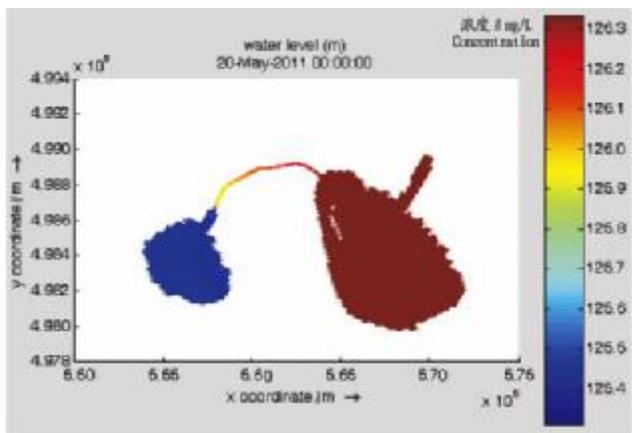


图3 枯水年5月20日水位

Fig. 3 The water level on May 20th of low water year

由图3可见,5月20日,2个泡子发生水力联系,此时2个泡子中水位相差较大。由图4可见,水流在泡子中流动呈环形,泡子中间形成漩涡。

2 花道泡水质数值模拟

2.1 指标的选取 考虑到泡子目前的水质状况以及泡子引水的目的是为城镇供水、防病改水以及农田灌溉,选取 F^- 、 Cl^- 2个超标最严重的指标进行模拟预测。

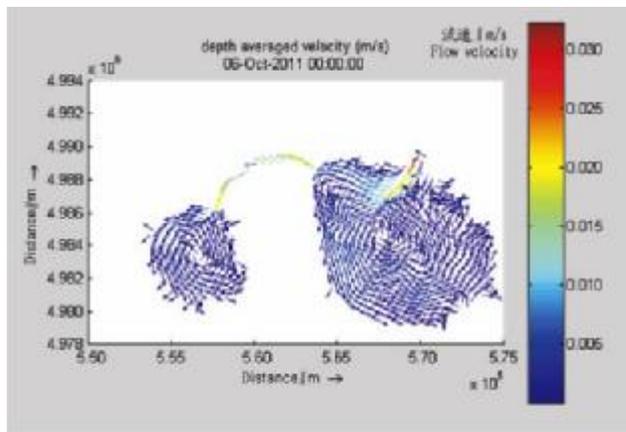


图4 预测流速

Fig. 4 The forecasted flow velocity

2.2 控制方程 模型描述污染物对流扩散输移方程为:

$$\frac{\partial(d+\zeta)c}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial[\sqrt{G_{\eta\eta}}(d+\zeta)uc]}{\partial \xi} + \frac{\partial[\sqrt{G_{\xi\xi}}(d+\zeta)vc]}{\partial \eta} \right\} = \frac{d+\zeta}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[D_H \frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial c}{\partial \xi} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[D_H \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial c}{\partial \eta} \right] \right\} - \lambda_u(d+\zeta)c + S \quad (6)$$

式中, c 为污染物浓度(kg/m^3); u,v 为 ξ,η 方向上的流速分量(m/s); D_H 为水平扩散系数(m^2/s); λ_u 为污染物的一阶衰减系数($1/\text{s}$); S 为源汇项,表示污染物的吸附、降解或沉降($\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$),此次模拟 $S=0$ 。

2.3 定解条件

2.3.1 初始条件. $t=0$ 时, $C(x,y,t) = C_0(x,y)$ 。其中, $C_0(x,y)$ 为已知的初始浓度。

假定泡子淹没5cm厚的土壤中 F^- 、 Cl^- 含量全部溶于水,再加上实测浓度,所得浓度作为本底值, F^- 、 Cl^- 土壤中浓度分别为189、236 mg/kg ,淹没面积123 km^2 ,现状蓄水量为3000万 m^3 ,土壤容重为1300 kg/m^3 ,计算可得 F^- 、 Cl^- 本底值分别为51.3、1880.0 mg/L 。

2.3.2 边界条件. 闭边界:流量和扩散均为0,且输移为零:

$$\frac{\partial c}{\partial n} = 0.$$

开边界:即水-水边界,可以选择随时间变化或不随时间变化2种。此次模拟选择浓度随时间变化边界: $C = C(t)$ 。泡子入口作为开边界处理,即引水的 F^- 、 Cl^- 浓度,采用现状测得的哈达山水库中的浓度。出口浓度为泡子中现状 F^- 、 Cl^- 浓度。

2.4 参数的确定 考虑到选取指标的性质, F^- 、 Cl^- 基本不降解,将 F^- 、 Cl^- 均作为保守物质来处理,故主要影响参数为扩散系数。实验测得,扩散系数取0.02 m^2/s 。

2.5 水质预测结果 对模型分2个阶段进行求解:农业灌溉达标前和农业灌溉达标到符合饮用前。

2.5.1 农业灌溉前. 水体中 F^- 、 Cl^- 的运移变化主要受到水流的影响,水流到某处,浓度迅速下降,之后由于局部环流和回流作用的影响,浓度上下震荡,随着时间的推移,浓度最后趋于稳定。

5月份,泡子开始引水,5月17日,水位达到126m,花敖泡与道字泡发生水力联系,如图5.7所示。11月份,不再引

水,控制点(93,27)(花道泡左下处)处 Cl^- 的浓度为 132.01 mg/L, F^- 浓度为 1.91 mg/L,达到农业灌溉用水标准要求(农业灌溉用水标准 Cl^- 为 350 mg/L, F^- 农业灌溉用水标准为 2 mg/L),不符合饮用水标准(饮用水标准浓度 Cl^- 为 150 mg/L, F^- 为 1 mg/L)。由图 6、8 可知,自 5 月 1 日开始引水,经过 4 个月,于 9 月 1 日,水质基本符合农业灌溉用水标准,此时, Cl^- 的浓度为 343 mg/L。为安全起见,将适合农业灌溉用水标准期限定义为 1 年(或达到正常蓄水位以后)。

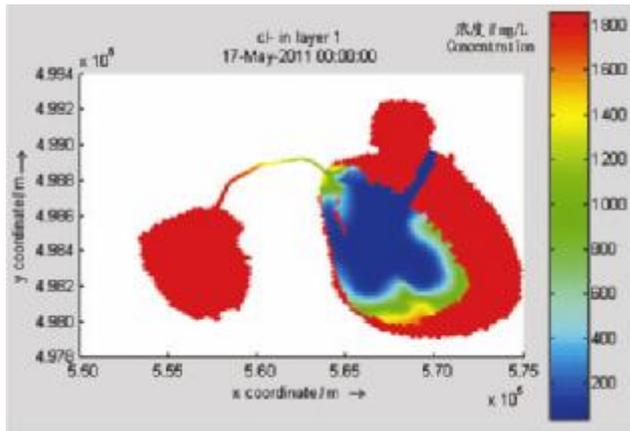


图 5 5月17日 Cl^- 分布
Fig. 5 The distributing of chloride on May 17th

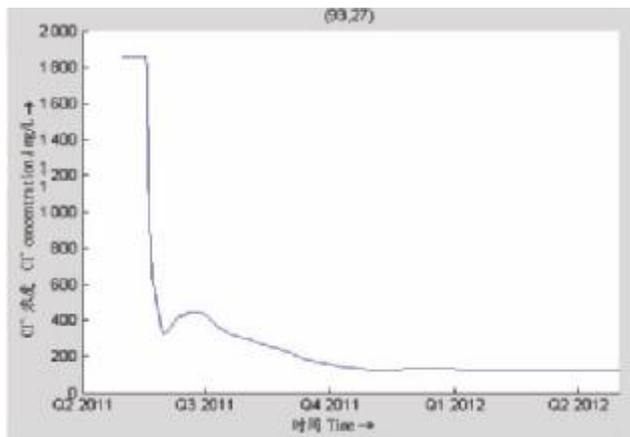


图 6 泡子左下处 Cl^- 变化曲线
Fig. 6 The change curve of chloride on the left-down position

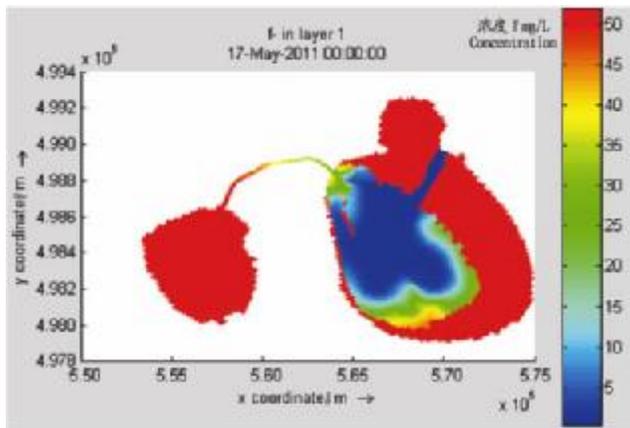


图 7 5月17日 F^- 分布
Fig. 7 The distributing of fluorin on May 17th

2.5.2 农业灌溉后。农业灌溉后,在道子泡(左侧小泡子)左上和花敖泡(右侧大泡子)右下增加了两处出水口,灌溉周围农田。图 9、10 和 11 分别为泡子 2012 年 5 月 17 日、2012

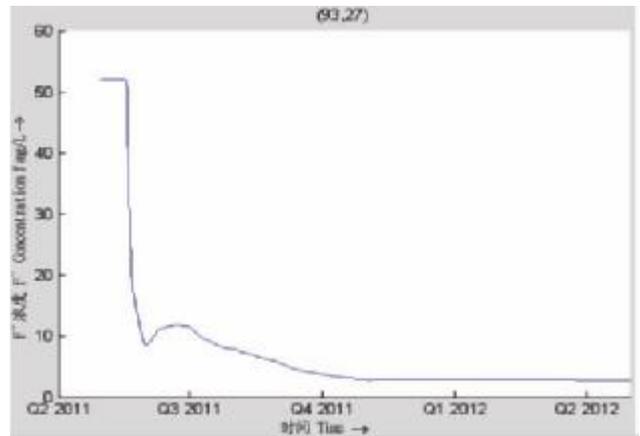


图 8 泡子左下处 F^- 变化曲线

Fig. 8 The change curve of fluorin on the left-down position
年 9 月 12 日和 2013 年 11 月 1 日的 F^- 浓度分布图。由图 11、12 可以看出,2013 年 11 月 1 日,泡子中 F^- 已经达到饮用水供水源地标准。为安全起见,笔者将城镇供水时间初步限定为 2014 年 1 月 1 日(引水 3 年后)。

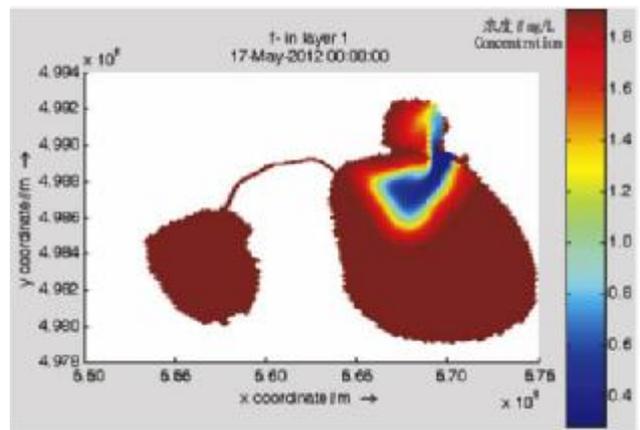


图 9 2012 年 5 月 17 日 F^- 分布
Fig. 9 The distributing of fluorin on May 17th of 2012

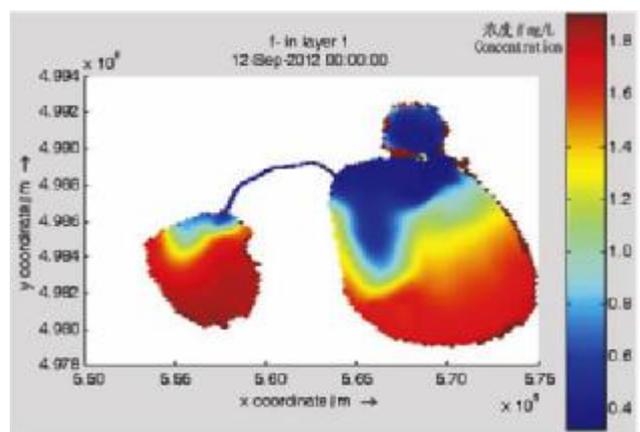


图 10 2012 年 9 月 12 日 F^- 分布
Fig. 10 The distributing of fluorin on Sept. 12th of 2012

3 结论

水体的置换时间和效果主要取决于引水量、进出水口位置和扩散作用。为尽快使泡子达到城镇供水标准,可以采取以下措施:

(1)适当调整出水口位置,可以调节流场分布。例如在道子泡左下侧和花敖泡下侧增设农业灌溉出水口。

(下转第 10108 页)

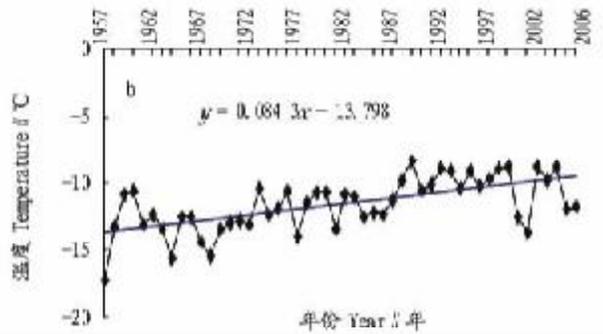
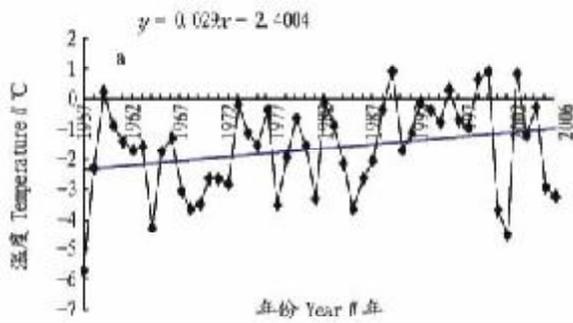


图2 1957~2006年盘锦冬季平均最高(a)、最低(b)气温变化曲线

Fig.2 The change curve of winter average minimum temperature in Panjin from 1957 to 2006

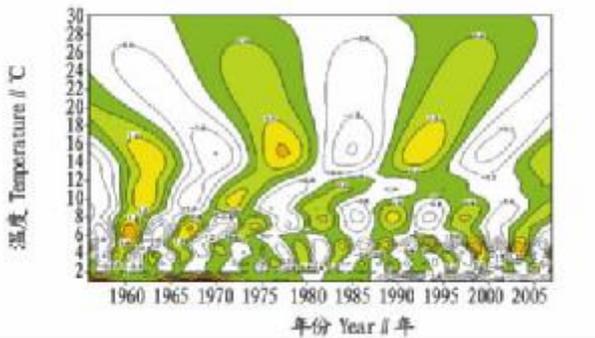


图3 盘锦冬季平均气温 morlet 小波系数

Fig.3 Morlet wavelet coefficient of winter average temperature in Panjin

的上升趋势,是盘锦冬季气温升高的主要因子。

(3)冬季平均气温在整个研究时段中,除存在明显的4年左右的振荡周期和6~8年的周期外,还存在14~16的较长周期。6~8年周期比较稳定,20世纪90年代末以来有变弱趋势,20世纪80年代中期以来5年周期比较明显。

(4)在全球气候变暖的背景下,盘锦冬季的气温呈现出上升的趋势,“暖冬”对农业、交通、商业、医疗、电业等行业都有着不同程度的影响,冬季气温的升高,应该引起人们的重视,采取相应的措施,趋利避害,将“暖冬”的不利影响降到最低。

参考文献

[1] 金巍,曲岩.近50年营口气温变化分析[J].辽宁气象,2002(1):21-22.
 [2] 邓自旺,尤卫红,林振山.子波变换在全球气候多时间尺度变化分析中的应用[J].南京气象学院学报,1997,20(4):505-510.

(上接第 10106 页)

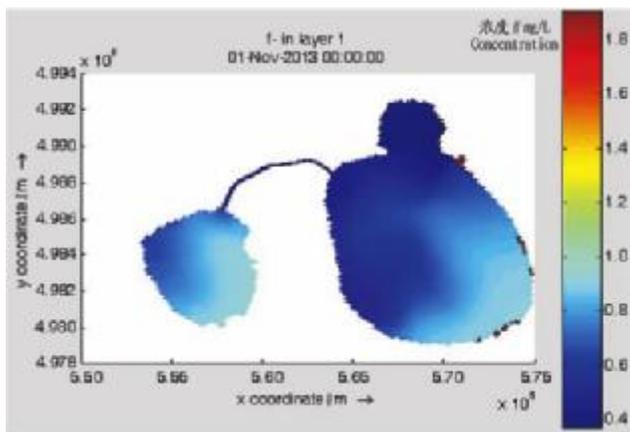


图11 2013年11月1日F⁻分布

Fig.11 The distributing of fluorin on Nov 1st of 2013

(2)对花敖泡和道子泡之间渠道进行加宽、加深处理,加强花敖泡和道子泡之间的水力联系。

(3)达到农业灌溉标准后,供水初期,适当加大后四、安子抽水站抽水量,增强农业供水和泡子引水时间的不均匀性(如晚上泡子引水、白天农田灌溉),使流场混乱,加速死角区的混合作用,均能缩短城镇供水时间。

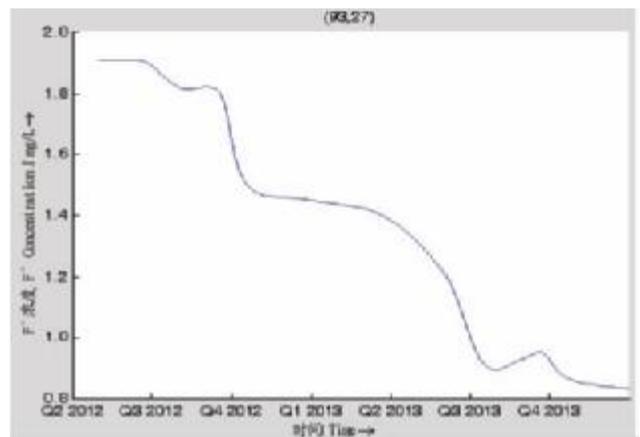


图12 道子泡左下处F⁻变化曲线

Fig.12 The change curve of fluorin on the left-down position

参考文献

[1] 吴坚.数据模拟方法在湖泊学中的应用[J].湖泊科学,1986,3(1):74-81.
 [2] 胡维平,秦伯强,濮培民.太湖水动力学三维数值试验研究[J].湖泊科学,2002,12(4):335-342.
 [3] 陶文铨.数值传热学[M].西安:西安交通大学出版社,1988.
 [4] 陈莉.三维矢量场可视化的基础算法研究[D].杭州:浙江大学,1996.