

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.04.008

# 寒冷地区供水工程引水明渠结冰问题数值模拟

景何仿<sup>1 2</sup> 李春光<sup>2</sup> 吕岁菊<sup>2</sup> 周炳伟<sup>2</sup>

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院,宁夏 银川 750021; 2. 北方民族大学数值计算与工程应用研究所,宁夏 银川 750021)

**摘要** :以宁夏吴忠金积供水工程为例 ,对在冬季寒冷地区利用引水明渠从河流或水库引水时遇到的结冰问题进行研究。利用一维非恒定水力热力耦合数学模型对 3 种典型工况下引水明渠水温分布进行数值模拟 ,得出不同水深、不同风速时的初始结冰位置。利用冰盖厚度发展数学模型对 10 a 来冰盖发展情况进行数值模拟 ,并与经验公式计算结果进行对比 ,得到了较为一致的结果。根据数值模拟结果 ,得出寒冷地区引水明渠冬季供水时渠水温度的分布规律 ,总结出影响水温分布及初始结冰位置的因素。

**关键词** :引水明渠 ;初始结冰位置 ;冰盖厚度 ;水温分布 ;数值模拟

**中图分类号** :TV133.2      **文献标识码** :A      **文章编号** :1006-7647(2009)04-0027-05

**Numerical simulation of freezing problem of open diversion canal in water supply projects in cold area** / JING He-fang<sup>1 2</sup> , LI Chun-guang<sup>2</sup> , LV Sui-ju<sup>2</sup> , ZHOU Bing-wei<sup>2</sup> ( 1. School of Civil Engineering and Water Conservancy , Ningxia University , Yinchuan 750021 , China ; 2. Research Institute of Numerical Computation and Engineering Applications , North University for Nationalities , Yinchuan 750021 , China )

**Abstract** : Taking the water supply project in Jinji Wuzhong , Ningxia as an example , the freezing problem of open diversion canals that are used to transport water from rivers or reservoirs in cold areas is studied. A one-dimensional unsteady hydraulic and thermodynamic coupled model is applied to simulate the water temperature distribution of open diversion canals under three typical operating conditions. The initial ice positions are obtained for different water depths and different wind speeds. An ice cover progression model is used to simulate the ice cover thickness over the last ten years , and the results are consistent with those of an empirical formula. Finally , the water temperature distribution of open diversion canals and the influencing factors of initial ice positions in cold areas are obtained based on the simulation results.

**Key words** : open diversion canal ; initial ice position ; ice cover thickness ; water temperature distribution ; numerical simulation

寒冷地区天然河道或人工渠道在冬季会出现结冰和融冰现象 ,这对河道或渠道的输水、防洪、航运、水力发电及周围环境都会产生一定的影响。因此 ,河冰的形成与消融以及由此产生的危害是寒冷地区水利工程建设和水资源开发利用必须考虑的一个重要因素。研究河冰的形成和演变规律 ,寻求相应的解决办法以保证在冰期安全输水成为许多国家关心的重要问题。国内外一些学者通过原型观测、物理试验和数值模拟的方法对河冰问题进行了研究 ,得到了一些有益的结论。原型观测能够为所研究的内容提供翔实的实际资料 ,可以从中总结出一些经验公式 ,可以验证物理试验和数值模拟结果的可靠性。但是 ,要深入地研究河冰形成和发展规律 ,有必要辅

以物理试验和数值试验。物理试验往往在场地、设备、材料和人力上花费较多 ,困难较大 ,试验周期较长。相对来说数值模拟研究花费少 ,周期短 ,可重复性强 ,是近年来研究河冰问题的一种较为重要的手段<sup>[1-4]</sup>。

笔者以宁夏吴忠金积供水工程为例 ,对寒冷地区供水工程引水明渠结冰问题进行数值模拟研究。根据工程布置 ,在东干渠非灌溉期采取东干渠前 4 km 明渠供水和后 12.5 km 地下输水管道供水相结合的方案 ,可以充分利用已有的灌渠在冬季输水 ,节约资源。利用一维水力热力耦合数学模型 ,模拟了宁夏吴忠金积供水工程引水明渠沿程水温分布 ,预测了引水明渠在 3 种典型工况下的初始结冰位置 ,并利用冰盖厚度发展数学模型对 10 a 来东干渠冰盖

发展厚度进行数值模拟。最后,对可能产生的结果做出合理的预测并对拟采取的工程措施提出建议。

## 1 数学模型

### 1.1 纵向一维水力模型

以水位和流量为变量,描述一维水流运动的 Saint-Venant 方程组表达式为<sup>[5]</sup>

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} + \left( gA - \frac{BQ^2}{A^2} \right) \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{Q^2}{A^2} \left( \frac{\partial A}{\partial x} \right) \Big|_z - g \frac{Q|Q|}{AC^2R} \quad (2)$$

式中: $Q$ 为流量; $x$ 为纵向坐标; $B$ 为渠宽; $z$ 为水位; $t$ 为时间; $A$ 为过水断面面积; $g$ 为重力加速度; $C$ 为谢才系数; $R$ 为水力半径。

### 1.2 纵向一维热力模型

位于水库下游的引水明渠水温往往受水库水温、水库运行调度、气象条件、水体和河床的热交换等多种因素的影响。忽略水体与河床之间的热交换以及水体内部由动能、势能和化学能所转换的热能,描述渠道一维非恒定流水温变化的控制方程形式如下<sup>[6]</sup>:

$$\frac{\partial (AT)}{\partial t} + \frac{\partial (QT)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( AE_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{B\phi_n}{\rho C_p} \quad (3)$$

式中: $T$ 为水温; $E_x$ 为纵向扩散系数; $\rho$ 为水的密度; $C_p$ 为水的比定压热容; $\phi_n$ 为单位表面积净热交换通量,表示水流与外界之间的热交换量。 $\phi_n$ 可由式(4)确定<sup>[7-9]</sup>:

$$\phi_n = \phi_{sn} + \phi_{an} - \phi_{br} - \phi_c - \phi_e \quad (4)$$

其中

$$\phi_{sn} = (1 - r)H_{si}$$

$$\phi_{an} = (1 - r_a)\sigma\xi_a(273.3 + T_a)^4$$

$$\xi_a = [1 - 0.261\exp(-0.000074T_a^2)] [1 + KC_r^2]$$

$$\phi_{br} = \sigma\epsilon_w(273.3 + T_s)^4$$

$$\phi_c = (2.8 + 3.0W_z)(T_s - T_a)$$

$$\phi_e = \beta f(W)(T_s - T_d)$$

$$\beta = 0.35 - 0.015T_0 + 0.0012T_0^2$$

$$T_0 = \frac{T_s + T_d}{2}$$

$$f(W) = 9.2 + 0.46W_z^2$$

式中: $\phi_{sn}$ 为水体净吸收的太阳短波辐射; $\phi_{an}$ 为大气长波辐射; $\phi_{br}$ 为水体长波的返回辐射,可由 Stefan-Boltzman 4 次方定律来计算; $\phi_c$ 为水面蒸发热损失; $\phi_e$ 为热传导通量; $r$ 为水面发射率, $r = 0.1$ ; $H_{si}$ 为太阳到达水面总辐射; $r_a$ 为长波反射率, $r_a = 0.03$ ; $\sigma$ 为 Stefan-Boltzman 常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ; $\xi_a$ 为大气发射率; $T_a$ 为水面以上 2 m 处气温; $K$ 为

由云层高度确定的常数, $K = 0.17$ ; $C_r$ 为云层覆盖率; $\epsilon_w$ 为水体的长波发射率, $\epsilon_w = 0.97$ ; $T_s$ 为水面温度; $W_z$ 为水面以上 10 m 处风速; $T_d$ 为露点温度; $f(W)$ 为风函数。

纵向一维水力热力耦合数学模型基于上述水力模型和热力模型,先求解式(1)和式(2)得出某一时刻的流量分布,代入式(3)求出相应时刻的水温分布。

### 1.3 冰盖厚度发展模型

当水温降至 0℃ 时即可在岸边缓流处结成不连续、薄而透明的针状微冰,随着气温的下降可在岸边形成一条固定的冰带,冰带的宽度和厚度随着气温的降低不断增加。形成冰盖后,影响冰盖底面成长速度的主要因素有结冰潜热、冰内热传导和垂直温度梯度。

#### 1.3.1 模型方程

若假定浮冰表面温度为气温,冰水交界面的温度为冰水达到平衡状态时的温度,并且浮冰表面和冰水界面之间的温度呈线性分布,则冰盖厚度的变化可由式(5)给定<sup>[10]</sup>:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{\rho_i \lambda} \frac{T_m - T_a'}{\frac{h}{k_i} + \frac{1}{H_{ia}}} \quad (5)$$

式中: $h$ 为冰盖厚度; $t$ 为时间; $T_m$ 为冰水交界面的温度; $T_a'$ 为气温; $\lambda$ 为结冰潜热; $\rho_i$ 为冰的密度; $k_i$ 为冰的导热系数; $H_{ia}$ 为冰面与大气的热交换系数, $H_{ia} = 10 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{℃)}$ 。

#### 1.3.2 经验公式

Stefan 认为河水一旦结冰,冰面温度就接近气温,冰盖底面的成长速度取决于结冰的潜热、冰内热传导和垂直温度梯度<sup>[11]</sup>。若不考虑太阳辐射等因素,假定冰盖到冰水交界面的温度变化呈线性关系,把适合于 Cook 湾的冻冰融冰度日与冰厚的关系引入东干渠中来,即<sup>[12]</sup>

$$h = \alpha \sqrt{F_{DD} - 3T_{DD}} \quad (6)$$

式中: $\alpha$ 为经验系数,一般取值在 0.7 ~ 2.7 之间; $F_{DD}$ 为日平均气温低于 0℃ 的累积冰冻度日; $T_{DD}$ 为日平均气温高于 0℃ 的累积融冰度日。

## 2 数值求解方法

### 2.1 一维水力热力耦合模型方程的数值求解方法

采用四点隐格式<sup>[13]</sup>离散一维水流连续性方程和运动方程(式(1)和式(2)),可求出某一时刻各断面的流量分布,代入水温控制方程(式(3))中。若对流项采用迎风格式,扩散项采用中心差分格式,方程离散形式如下:

$$a_i T_{i-1} + b_i T_i + c_i T_{i+1} = d_i$$

$$(i = 2, 3, \dots, m-1) \quad (7)$$

其中

$$a_i = -Q_{i-\frac{1}{2}} \Delta t - \frac{\Delta t}{\Delta x} (AE_x)_{i+\frac{1}{2}}$$

$$b_i = A_i \Delta x + Q_{i+\frac{1}{2}} \Delta t + \frac{\Delta t}{\Delta x} (AE_x)_{i+\frac{1}{2}} +$$

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} (AE_x)_{i-\frac{1}{2}}$$

$$c_i = -\frac{\Delta t}{\Delta x} (AE_x)_{i+\frac{1}{2}}$$

$$d_i = S_i \Delta x \Delta t + A_i T_{i,m} \Delta x$$

$$S_i = \left( \frac{B \phi_n}{\rho C_p} \right)_i$$

式中： $\Delta x$  为空间步长； $\Delta t$  为时间步长； $T_{i,m}$  为上一时间层（第  $n$  层）的水温。

初始条件可根据渠道水流水温的特点假设一个流量、水位及水温分布。上游水库来流流量、水温作为上游边界条件，宁夏吴忠金积供水工程进口处水温  $T_{in}=3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，进口处流量  $Q_{in}=1.55\text{ m}^3/\text{s}$ 。下游给出水位，下游水温边界条件可按自由发展边界条件来处理，即在出口处  $\frac{\partial T}{\partial x}=0$ 。离散后的代数方程组为三对角方程组，可用追赶法求解。

### 2.2 冰盖厚度发展模型方程的数值求解方法

将式（5）从第  $j$  天到第  $j+1$  天积分，可得

$$h_{j+1} = \sqrt{(B_0 + h_j)^2 + 2A(T_m - T_a')_j \Delta t} - B_0$$

$$(8)$$

其中

$$A = \frac{k_i}{\rho_i \lambda} \quad B_0 = \frac{k_i}{H_{ia}}$$

式中  $\Delta t=86\,400\text{ s}$ 。这样，给出初始冰厚  $h_0$ ，即可利用上述迭代公式依次求出以后各天的冰盖厚度  $h_j$ 。

## 3 计算实例

### 3.1 计算区域

选取东干渠前 4 km 为数值计算区域，从青铜峡大坝渠首引水口到压力泵站处渠道共长 4 km，平面示意图如图 1 所示。渠道横断面为规则的等腰梯



图 1 东干渠 0~4 km 平面示意图

形，设计水深为 3 m，渠底宽为 9 m，边坡为 1:2.5。

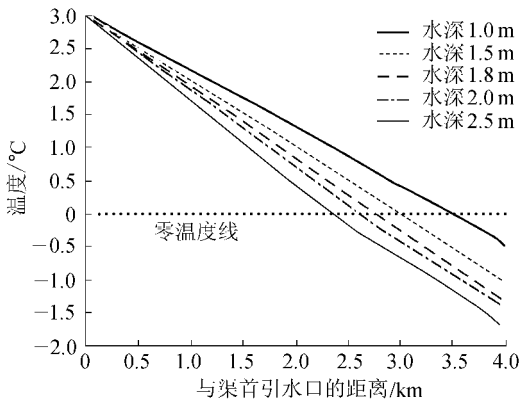
### 3.2 气象条件

根据吴忠地区过去 10 a 的气象资料，分别模拟计算了东干渠 0~4 km 段正常气温（工况 1）、较高气温（工况 2）和寒冷气温（工况 3）下的渠道水温值。

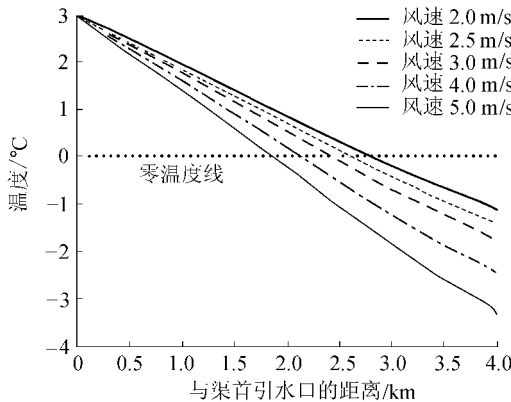
表 1 给出了 3 种工况下的气象资料。表 1 中“太阳辐射”是指每月太阳总辐射量，在实际计算时为了物理量单位的统一，并考虑到白天和晚上太阳辐射的差别，白天太阳辐射为月总辐射量  $\times 10^6/$ （当月天数  $\times$  日照时数  $\times 3\,600$ ），其余时间太阳辐射按零计算。

### 3.3 初始结冰位置预测

由于影响引水明渠结冰点位置的因素比较多，如气温、风速、水库水温、日照、水深、流量等，限于篇幅，这里只给出流量恒定时同一工况下不同水深（风速不变，取表 1 中各工况下日平均风速），不同风速（水深不变，各工况下均取 2.0 m）数值模拟结果的比较。图 2~4 给出了工况 1 至工况 3 不同水深与不同风速时的东干渠前 4 km 渠道的温度分布。



(a) 不同水深



(b) 不同风速

图 2 工况 1 初始结冰位置的比较

表 1 3 种典型工况的气象资料

| 工况 | 时间            | 日平均气温/ $^{\circ}\text{C}$ | 日最高气温/ $^{\circ}\text{C}$ | 日最低气温/ $^{\circ}\text{C}$ | 日平均云量/成 | 日照时数/h | 日平均风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | 露点温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 太阳辐射/ $(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1})$ |
|----|---------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------|--------|---------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------|
| 1  | 2002-12-21~31 | -12.55                    | -7.27                     | -16.34                    | 3.55    | 6.12   | 2.50                                  | -14.56                   | 287.38                                                  |
| 2  | 2003-01-21~31 | -3.80                     | 3.10                      | -8.90                     | 2.91    | 7.71   | 3.21                                  | -13.70                   | 305.70                                                  |
| 3  | 1975-12-12    | -17.70                    | -9.90                     | -24.00                    | 3.50    | 6.00   | 4.00                                  | -17.00                   | 287.38                                                  |

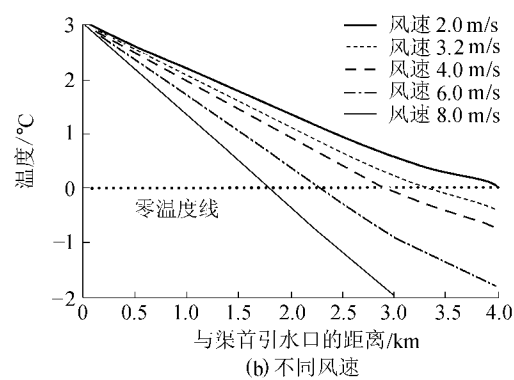
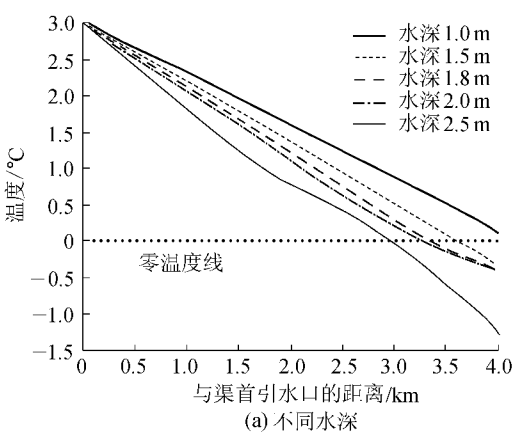


图3 工况2初始结冰位置的比较

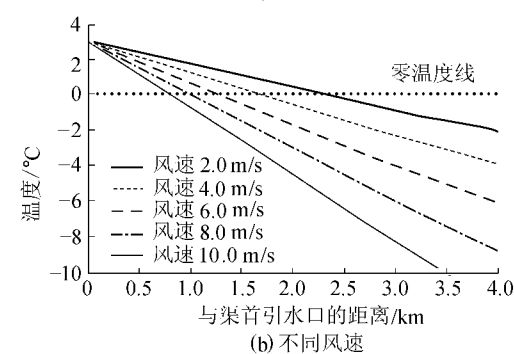
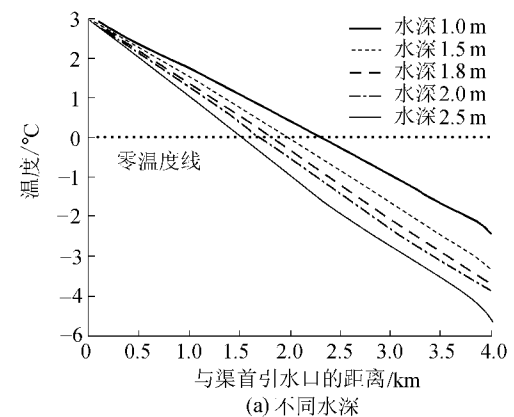


图4 工况3初始结冰位置的比较

图2~4中各条曲线与零温度线的交点被视作该工况在该水深或该风速条件下的初始结冰位置。可以看出,在气温不变的情况下,水深及风速对初始结冰位置影响较大。在正常气温(工况1)下,正常水深(1.5~2.0 m)时引水明渠初始结冰位置距渠首

引水口 2.5~3.0 km,在较高气温(工况2)下,水深在 1.5~2.0 m 时初始结冰位置距渠首引水口 3.2~3.6 km,在寒冷气温(工况3)下,水深为 1.5~2.0 m 时初始结冰位置距渠首引水口 1.5~2.0 km,在寒冷与持续大风(风速大于 5 m/s)等不利因素相互叠加的罕见气候条件下,初始结冰位置距渠首引水口 0.8~1.5 km。从总体上看,可得出以下结论:①水深越大,初始结冰位置越靠近渠首引水口;②风速越大,初始结冰位置越靠近渠首引水口。

需要说明的是,图2~4中零温度线下的负温度值是按照热力模型计算得到的,没有考虑水结成冰后会放出热量以及出现冰盖后水体与大气的热交换会减缓等因素。因此,理论上初始结冰位置以后的温度分布应当按冰水两相流进行数值模拟,限于篇幅和时间,留待以后进行更加深入的研究。

### 3.4 冰盖厚度的计算

根据吴忠地区过去 10 a(1997~2007 年)的气象资料,利用冰盖厚度发展模型方程的离散形式(式(8))计算了冬季冰盖厚度的发展变化情况,如图5所示。

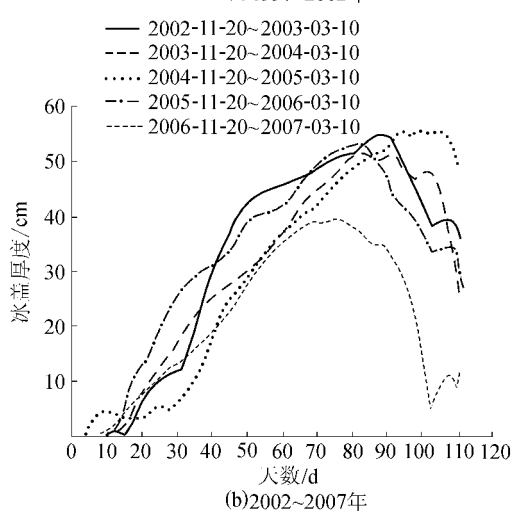
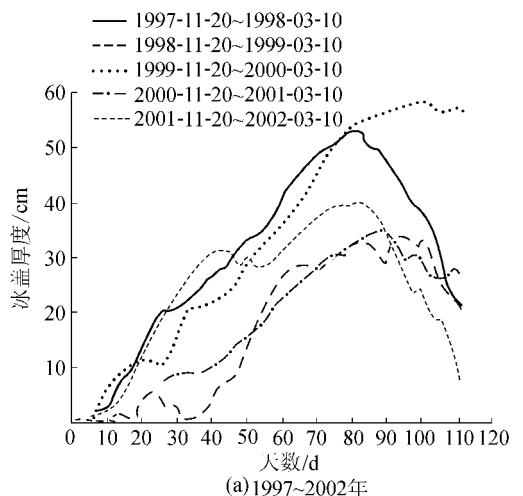


图5 1997~2007年冬季冰盖厚度发展情况

对比过去 10 a 的气象资料,1999 年是冬季最冷的一年,而实际计算结果表明,1999 年是冰盖发展最厚的一年(冰盖厚度 58.2 cm)。数值模拟结果还表明,1998 年是冬季冰盖发展最薄的一年(冰盖厚度 33.7 cm)。由于全球气候变暖,近年来气温有逐年上升的趋势,而冰盖厚度的发展呈现减小的趋势。由于模型中没有考虑形成稳定冰盖所需的时间,一般情况下模拟出来的冰盖厚度会比实际情形略大一点。当负气温积累达到一定程度,开始形成稳定的冰盖,随着负气温的进一步积累,冰盖会进一步增厚。当冰盖发展到一定程度时就不再继续发展了,如果这时气候变暖,出现正气温,冰盖开始消融,冰盖厚度逐渐减小直至冰盖消失。

利用经验公式(式(6))计算了 1999 年冬季冰盖厚度发展情况,并与数值模拟结果进行对比,见图 6。图 6 表明, $\alpha$  取值不同,冰盖厚度不同。当  $\alpha = 2.7$  时,利用经验公式计算的冰盖变化过程和数值模拟结果比较接近。由于缺乏东干渠冬季冰盖厚度的实测资料,有关冰盖厚度的模拟结果有待进一步实测验证。由数值模拟结果并结合经验公式计算结果可以看出,东干渠冬季引水出现结冰之后,冰盖厚度会随着时间的延长而缓慢增长。整个冬季(11 月 20 日至翌年 3 月 10 日)冰盖累积厚度平均约为 30~50 cm,最大不超过 60 cm。因此,若水深为 1.5~2.0 m,可以满足冬季结冰期稳定供水的要求。

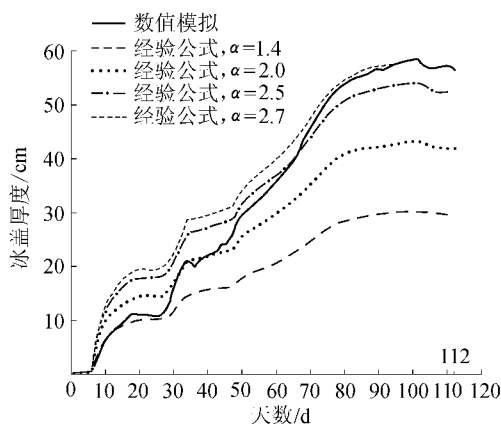


图 6 1999 年冬季冰盖厚度发展情况  
(数值模拟与经验公式计算结果的比较)

## 4 结 论

a. 宁夏吴忠金积供水工程采用东干渠 0~4 km 进行水源引水的技术方案,若配合必要的工程措施,在冬季进行正常供水应当是可行的,在理论上是有保证的。

b. 东干渠冬季供水在小流量( $Q = 1.55 \text{ m}^3/\text{s}$ )情况下必然会出现结冰现象。根据数值模拟结果,初始结冰位置在正常气温、正常水深条件下距渠首引

水口 2.5~3.0 km;较高气温、正常水深条件下距渠首引水口 3.2~3.6 km;而在寒冷天气、正常水深条件下距渠首引水口 1.5~2.0 km。

c. 寒冷地区引水明渠冬季供水时渠水温度分布规律是:沿渠道中心线(纵向)靠近渠首引水口温度较高,随水流方向水温逐渐降低,在初始结冰位置处开始结冰。

d. 影响水温分布及初始结冰位置的因素较多。在供水流量和取水口水温为恒定的情况下,按其影响程度大小依次为:气温、风速、水深等因素。一般说来,气温越低,结冰点位置越靠近渠首引水口;水深越大,结冰点位置越靠近渠首引水口;风速越大,结冰点位置越靠近渠首引水口。

e. 寒冷地区引水明渠开始结冰之后,冰的厚度会在整个冬季缓慢而稳定地增长。冰盖累积厚度一般为 30~50 cm,最大厚度不超过 60 cm。

致谢:该项目的研究得到了北方民族大学科研处的大力支持,同时也得到了宁夏回族自治区水利水电开发建设总公司和吴忠市气象局的帮助。在此笔者谨致诚挚谢意!

## 参考文献:

- [1] LAL A M W, SHEN Hung-tao. Mathematical model for river ice processes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1991, 117(7): 851-867.
- [2] LU Shu-nan, SHEN Hung-tao, CHRISSMAN R D. Numerical study of ice jam dynamics in Upper Niagara River[J]. Journal of Cold Regions Engineering, ASCE, 1999, 13(2): 78-102.
- [3] 张学成, 何素娟, 潘启民, 等. 黄河冰盖厚度演变数学模型[J]. 冰川冻土, 2002, 24(2): 203-205.
- [4] 茅泽育, 张磊, 王永填, 等. 采用适体坐标变换方法数值模拟天然河道河冰过程[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 214-219.
- [5] 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.
- [6] 唐旺. 水库及下游河道水温预测研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
- [7] 范钟秀, 张志明. 气象学与气候学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995.
- [8] 张仙娥. 大型水库纵竖向二维水温、水质数值模拟[D]. 西安: 西安理工大学, 2004.
- [9] 方荣生. 太阳能应用技术[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1995.
- [10] DALY S F. Fracture of river ice cover waves[J]. Journal of Cold Regions Engineering, ASCE, 1995, 9(1): 41-52.
- [11] 蔡琳. 中国江河水灾[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2008.
- [12] 齐顺迎. 渤海海冰数值模拟及其工程应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2001.
- [13] 槐文信, 赵明登, 童汉毅. 河道及近海水流的数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

(收稿日期 2008-08-07 编辑 骆超)