

短期水文气象资料估算哈尔滨至同江冰厚度

李志军¹, 孙万光¹, 许士国¹, 李青山², 白 炎², 王 昕¹

(1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 松辽流域水资源保护局水环境科学研究所, 吉林 长春 130021)

摘要: 为估算松花江干流哈尔滨至同江段相距 660 km 的河冰厚度分布, 用松花江干流短期实测水文和气象资料, 在静态水域斯蒂芬冰厚计算公式基础上, 引入水流流速的动能效应。假设河流内水流量相等, 建立流速同河流宽度的简单关系, 估算了一些调查断面的冰下平均流速; 用地表温度资料, 对干流域内缺少气象资料的调查断面, 在证明结冰期间属于同一天气系统的前提下, 用距离平方反比法进行空间插值。最后获得松花江干流河冰厚度统计关系式。用计算的哈尔滨至同江河冰厚度与有限的实测数据比较, 发现该方法能够体现人为调节流速对冰生长速率的影响, 对计算长距离河冰厚度具有一定精度。

关 键 词: 水文; 气象; 河流; 冰; 哈尔滨; 同江

中图分类号: P338.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2009)03-0428-06

影响河冰生消的主要因素有热力因素、动力因素、河道形态和人类活动等。河流封冻、解冻和冰塞等过程复杂, 国内外学者针对这些问题开展的数值和物理模拟研究较多^[1~4], 但当河道中形成连续冰盖后, 水体通过冰盖与大气交换热量, 这时冰盖厚度计算一般有两种方法, 一是将河道作为由大气、冰、水体和河床组成的一个完整而封闭系统, 根据系统热交换过程的详细过程和算法, 考虑能量交换而研制冰生消模型, 但需要详细而完整的水文、气象和河流几何参数^[5,6], 近期也有对各种数值预测模型的综述性报道^[7]。二是根据热交换过程推导得到的半经验公式, 到目前报道的仍然多数是基于气温资料的斯蒂芬冰厚计算公式^[8]。静水条件下的水库冰生长^[9]、冻结模型冰生长^[10], 均采用与其类似方式, 这对于小区域或单点河冰厚度计算简便易行。但对于较长的河流, 就需要修正并建立一些统计关系式^[11,12]。它们在观测资料和观测手段比较完整的黄河干流^[13,14], 发挥出作用。2005 年松花江上游发生硝基苯污染, 而松花江干流进入封冻季节, 急需回答 600 km 干流内硝基苯的冰内归宿等问题。为此, 除需要含硝基苯水的冻结实验成果外^[15,16], 还需要估算整个干流的冰厚分布, 确定污染物通过时的河冰厚度。作者在总结国内外成果的基础上, 根据松花江干流当时有限断面实测河冰厚度、冰下流速和地面温度资料, 提出计入流速动能的改进的斯蒂芬冰厚计算方法, 即给静态水域斯蒂芬冰厚计算公式附加流速效应。改进的冰厚计算表达式具有明确物理意义并以显式的形式指导拟合分析。在具体处理哈尔滨至同江全长约 660 km 的河冰厚度分布时, 对缺少水文和气象资料的冰内污染物调查断面, 利用掌握的有限资料对冰下平均流速做了估算, 而不是已报道的复杂冰下水流和水位^[17,18]; 对地面温度资料进行空间插值^[19,20]。这种应急方法虽然从理论上不够严密, 但在缺少大量连续水文气象资料的应急冰厚估算中发挥作用并具有一定精度。

收稿日期: 2008-03-19

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划资助项目 (IRT0420); 国家自然科学基金资助项目 (40676001)

作者简介: 李志军(1960-), 男, 河北崇礼人, 教授, 博士, 主要从事海冰物理和力学、海冰行为物理模拟、寒区工程环境条件和环境保护研究。E-mail: lizhijun@dlut.edu.cn

1 斯蒂芬公式的改进

1.1 斯蒂芬冰厚计算公式原理

当冰盖形成后, 冰盖厚度的热力生消过程可以通过热传导方程来描述, 假设冰内温度呈线性分布和没有雪层覆盖。因此, 冰内热传导表达式简化成^[10]:

$$\rho_i (dZ_i/dt) = K_i(T_m - T_s)/Z_i \tag{1}$$

式中 ρ_i 为冰密度, kg/m³; c_i 为冰比热, kJ/kg; Z_i 为冰厚, m; T_m 和 T_s 分别是冰层底面和表面温度, °C; K_i 为冰导热系数, W/(m·°C)。将式(1)对时间进行积分, 得到经典的静态水域斯蒂芬冰厚计算公式:

$$Z_i = (2 K_i / \rho_i c_i)^{0.5} \int_0^t (T_m - T_s) dt \tag{2}$$

该模型最大的优点是物理意义明确, 使用简便, 抓住了影响冰厚热力学生长的主因素, 在资料相对缺乏的条件下比较适用。如果温度单位采用摄氏度, 时间单位采用日, 式(2)就是广泛应用的冰厚度冻冰度日模型, 它忽略了冰与水的紊流热交换。

1.2 斯蒂芬冰厚计算公式的改进

从静态水域斯蒂芬冰厚计算公式中可以看出: 冰厚 (Z_i) 与负积温 (ST) 的平方根呈线性关系。为了适应有水流河冰条件, 假设负积温和流速共同作用下的冰生长符合式(3):

$$Z_i = aX^b \tag{3}$$

式中 X 为负积温和平均流速的函数; a 和 b 为系数。 X 的表达式为

$$X = a_1(ST)^{0.5} - a_2(mv^2/2) \tag{4}$$

式中 ST 为负积温, °C·d; v 为流速, m/s; m 为断面过水质量; a_1 和 a_2 为系数; 负积温对冰生长起正贡献, 而断面水流动能对冰生长起负贡献。把式(4)代入式(3)可得到

$$Z_i = a[a_1(ST)^{0.5} - a_3v^2]^b \tag{5}$$

式中 a_3 为与断面过水量有关的常数。式(5)即为改进的斯蒂芬冰厚计算方法的表达式。

2 水文气象参数获取方案

2.1 干流内监测断面的流速

进入冬季后, 随着江面封冻, 各个断面流速趋于稳定, 影响流速的主要因素是流量、过水断面、河床及冰底糙率等。在哈尔滨至同江 660 km 的干流内只有哈尔滨、通河、依兰、佳木斯断面设有水文观测站, 有流速资料, 其他取样断面均无实测流速。假设河宽是影响流速的主因, 可以建立哈尔滨、通河、依兰、佳木斯 4 个断面封冻后断面河宽和 2005 年 11 月底至 12 月底断面平均流速的相关关系, 其结果如图 1 所示。根据图 1 的关系式和其它断面河宽数据估算各个取样断面的平均流速, 全部结果汇总于表 1。

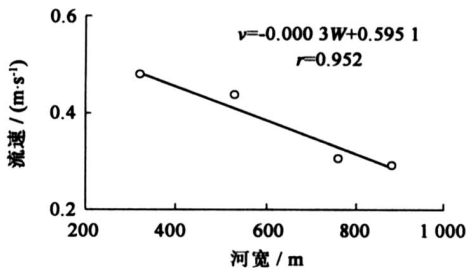


图 1 河宽与流速相关关系

Fig. 1 Relation between river width and flow velocity

表 1 监测断面的流速

m/s

Table 1 Flow velocity in monitor sites

断面	流速	断面	流速	断面	流速	断面	流速
哈尔滨	0.47	得莫利	0.36	佳木斯	0.30	西安	0.35
大顶子山	0.49	达连河	0.45	建国	0.38	富锦	0.30
柳河	0.38	依兰	0.44	桦川	0.32	平安	0.45
摆渡	0.37	大来	0.43	沿江	0.43	同江	0.35
通河	0.30	敖其	0.39	东升	0.37		

2.2 干流内监测断面的地面温度

哈尔滨至同江段沿岸城镇有7个气象站,图2给出2005年11~12月上游哈尔滨、中游佳木斯和下游同江各站逐日地面温度变化过程,其它4个气象站的过程类似。图2说明这一时段松花江干流处于同一个天气系统,另外,2005年11月23日~12月2日,各站地面温度普遍大幅降温。

根据干流内气象要素特征及气象站台分布,对7个气象站之外的取样断面的地面平均温度采用距离平方反比法进行逐日空间插值^[19]。具体措施是分别移去通河、依兰、佳木斯、桦川、富锦5个气象站数据,利用相邻站点逐日地面平均温度给它们插值,然后对实测数据和插值数据作相关性分析。根据相关系数的大小判断所用插值方法的优劣。图3以佳木斯为例给出插值结果,通河、依兰、桦川、富锦各站插值与实测值的相关系数分别为0.967、0.890、0.978和0.975。

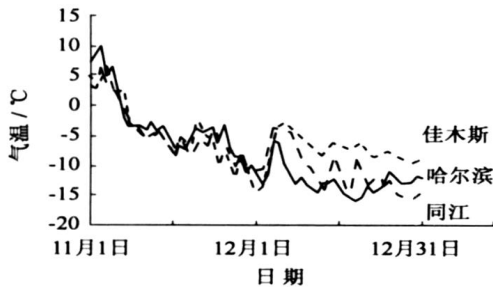


图2 2005年11~12月份松花江干流哈尔滨、佳木斯、同江逐日地面平均温度

Fig.2 Daily mean land temperatures in Harbin, Jiamusi and Tongjiang during November and December 2005

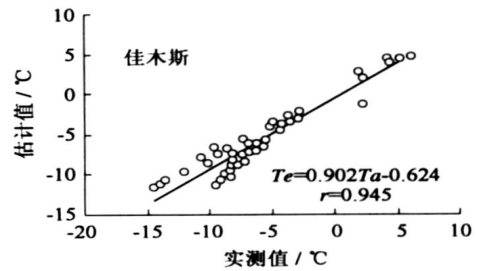


图3 佳木斯实测地面温度与距离平方反比法插值温度对比

Fig.3 Comparison between measured and evaluated temperature in Jiamusi

为了更准确地确定最佳方法,对插值效果又采用交叉验证法来检验^[20],即移去一个已知气象站点的数据,用其他站点的数据来估计该点数据以检验插值精度。检验过程中把通河、依兰、佳木斯、桦川、富锦5个气象站分别作为未知站,利用临近站进行逐日地面平均温度插值,检验结果肯定了距离平方反比法在解决本案问题的可靠性。

然后,采用距离平方反比法对干流内无气象资料的12个断面2005年11~12月的逐日地面平均温度进行空间插值。表2只给出大顶子断面的地面平均温度插值数据。其他站位是柳河、摆渡、得莫利、达连河、大来、敖其、建国、沿江、东升、西安、平安等11个断面。

表2 2005年11-12月大顶子断面逐日地面平均温度插值数据

Table 2 Daily mean land temperatures from interpolate method in Dadingzi in November and December 2005

日期	温度/	日期	温度/	日期	温度/	日期	温度/	日期	温度/
11-01	6.0	11-11	-4.1	11-21	-4.4	12-01	-11.6	12-11	-13.7
11-02	8.0	11-12	-5.6	11-22	-4.0	12-02	-13.3	12-12	-14.2
11-03	9.5	11-13	-4.4	11-23	-3.7	12-03	-11.8	12-13	-12.6
11-04	4.8	11-14	-3.8	11-24	-6.5	12-04	-5.8	12-14	-12.7
11-05	5.8	11-15	-5.5	11-25	-3.7	12-05	-5.6	12-15	-11.9
11-06	2.2	11-16	-7.1	11-26	-6.8	12-06	-9.4	12-16	-13.6
11-07	-1.8	11-17	-6.8	11-27	-8.7	12-07	-11.5	12-17	-14.6
11-08	-3.3	11-18	-7.5	11-28	-8.4	12-08	-13.1	12-18	-15.0
11-09	-3.5	11-19	-6.3	11-29	-11.3	12-09	-12.1	12-19	-15.4
11-10	-3.3	11-20	-3.6	11-30	-10.1	12-10	-13.0	12-20	-14.5
								12-31	-12.4

3 松花江干流冰厚分布估算

利用哈尔滨、通河、依兰、佳木斯水文站 2005 年冬季实测冰厚和实测相应断面平均流速、地面温度, 共 34 组资料, 对式(5)中的各个参数进行拟合, 得到松花江干流改进的斯蒂芬冰厚计算表达式:

$$Z_i = 5.26 \times 10^{-2} [(ST)^{0.5} - 45.94v^2]^{0.85} \quad r = 0.876 \quad (6)$$

式(6)的统计拟合曲面见图 4。

图 5 是哈尔滨至同江段 2005 年 11 月~12 月间 19 个冰内污染取样断面位置图。图 6 给出各个断面冰厚随时间的生长过程(图中线条左侧从上到下对应右侧各站)。从图中看出各个断面封冻初始阶段冰生长速率最快, 随着冰盖逐渐增厚, 生长速率逐渐降低。到 2005 年 12 月 31 日为止, 大顶子山断面冰厚最小, 为 0.44 m, 而富锦断面冰厚最大, 为 0.69 m, 哈尔滨至同江断面平均冰厚为 0.54 m。

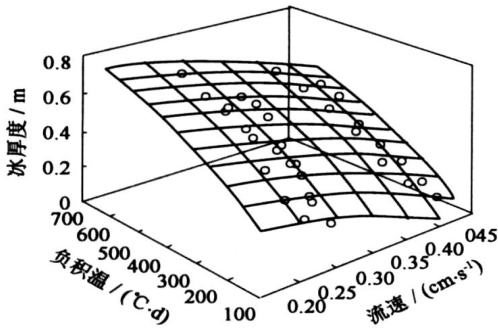


图 4 河冰厚度与冻结度日, 冰下水流的统计拟合曲面

Fig. 4 Statistical relation among river ice thickness, frozen index and flow velocity under ice

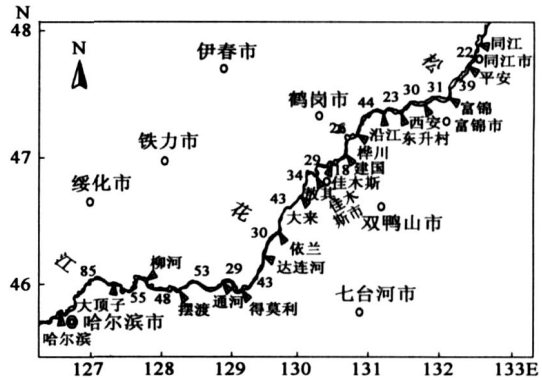


图 5 哈尔滨至同江冰内污染现场监测断面

Fig. 5 Monitor sites from Harbin to Tongjiang along Songhua River

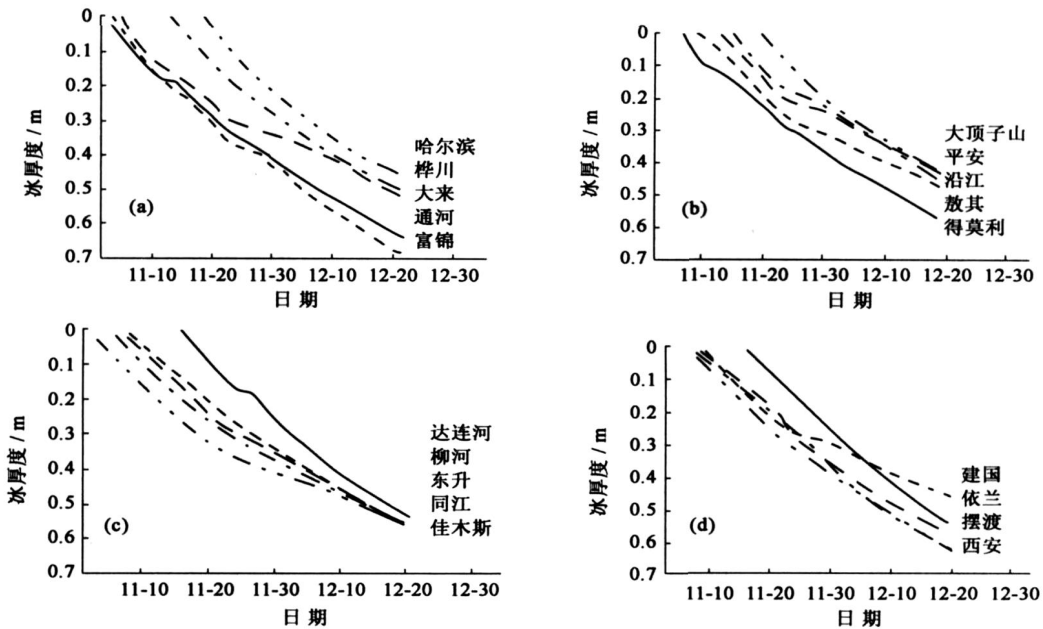


图 6 各个断面冰厚度随时间变化

Fig. 6 River ice thickness growth process in each monitor site

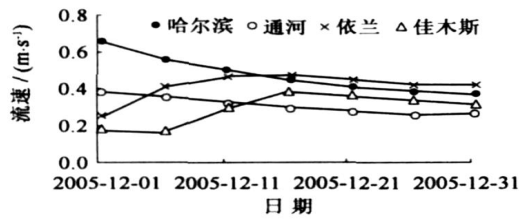


图7 不同断面处人工调水引起的流速变化

Fig. 7 Variations of flow velocities aroused by human adjusting in different sites

4 结 论

(1) 对经典的静态水域斯蒂芬冰厚计算公式增加了冰下水流速度对冰生长的负贡献效应。物理意义明确,同时考虑了负积温与流速两个因素对冰生长的影响。理论上可用于直线河道或人工渠道冰盖厚度的计算。

(2) 在缺少足够的冰下水流速度资料时,可以通过实测河流宽度来估算;如果干流内河冰生长属于同一天气系统造成的话,干流内不同位置的逐日地面平均温度能够采用距离平方反比法进行空间插值。

(3) 应用松花江干流哈尔滨至同江段的34组冰下流速、附近气象站地面温度、河冰厚度资料建立起改进的斯蒂芬冰厚计算关系式,该关系式具有较高的相关系数。

参考文献:

- [1] BELTAOS S. Progress in the study and management of river ice jams[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 51(1): 2 - 19.
- [2] BELTAOS S. Threshold between mechanical and thermal breakup of river ice cover[J]. Cold Regions Science and Technology, 2003, 37(1): 1 - 13.
- [3] 茅泽育, 吴剑疆, 张磊, 等. 天然河道冰塞演变发展的数值模拟[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 700 - 705. (MAO Ze-yu, WU Jian-jiang, ZHANG Lei, et al. Numerical simulation of river ice jam[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(6): 700 - 705. (in Chinese))
- [4] 王军, 高月霞, 尹运基, 等. 弯槽段冰塞形成及其厚度分布的试验研究[J]. 冰川冻土, 2007, 29(5): 764 - 769. (WANG Jun, GAO Yue-xia, YIN Yun-ji, et al. An experimental study of ice jam formation and its thickness distribution in a curved channel[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(5): 764 - 769. (in Chinese))
- [5] MA X Y, YOSHIHIRO F. A numerical model of the river freezing process and its application to the Lena River[J]. Hydrological Processes, 2002(16): 2131 - 2040.
- [6] 张学成, 可素娟, 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. (ZHANG Xue-cheng, KE Su-juan, PAN Qi-min, et al. Mathematical model of ice cover thickness evolution in the Yellow River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(2): 203 - 205. (in Chinese))
- [7] DALY S F. A state-space model for ice forecasting[R]. Hanover: Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 2003.
- [8] WHITE K D. Method to estimate river ice thickness based on meteorological data[R]. Hanover: Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 2004.
- [9] 肖建民, 金龙海, 谢永刚, 等. 寒区水库冰盖形成与消融机理分析[J]. 水利学报, 2004(6): 80 - 85. (XIAO Jian-min, JIN Long-hai, XIE Yong-gang, et al. Study on mechanism of formation and melting of reservoir ice cover in cold area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(6): 80 - 85. (in Chinese))
- [10] LI Zhi-jun, RISKA K. Index for estimating physical and mechanical parameters of model ice[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2002, 16(2): 72 - 82.
- [11] 程守煜, 冀鸿兰. 冰凌预报模糊优选神经网络BP方法[J]. 水利学报, 2004(6): 114 - 118. (CHENG Shou-yu, JI Hong-lan. Fuzzy optimization neural network BP approach for ice forecasting[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(6): 114 - 118. (in Chinese))
- [12] 王涛, 杨开林, 郭永鑫, 等. 神经网络理论在黄河宁蒙河段冰情预报中的应用[J]. 水利学报, 2005, 36(10): 1204 - 1208. (WANG Tao, YANG Kai-lin, GUO Yong-xin, et al. Application of artificial neural networks to forecasting of river ice condition[J]. Journal

由图6可看出,各个断面冰封冻日期在2005年12月初到12月中有一个生长缓慢段。这些断面冰情差异属于自然因素和人为因素造成的结果。图7给出哈尔滨、通河、依兰、佳木斯的流速历程线对应松花江污染发生后的丰满水库放水过程。当流速的最大值在上游哈尔滨结束时,通河开始,依兰晚10d,下游佳木斯晚15d,并且流速的峰值越往下游越小。流速的变化是影响冰生长的一个重要因素,断面流速下降后对应冰生长加快。图6和图7的联合分析成为人为调水活动对河冰生长速率效应的有力证据。

- of Hydraulic Engineering, 2005, 36(10):1204 - 1208. (in Chinese))
- [13] 丛沛桐, 王瑞兰, 李翠霞. 黄河封河期冰凌预警地电测试技术研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(6):877 - 880. (CONG Pei-tong, WANG Rui-lan, LI Cui-xia. Ground resistivity technique measurement for ice jam early warning at freeze-up period of the Yellow River[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(6):877 - 880. (in Chinese))
- [14] 姚惠明, 秦福兴, 沈国昌, 等. 黄河宁蒙河段凌情特性研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(6):893 - 899. (YAO Hui-ming, QIN Fu-xing, SHEN Guo-chang, et al. Ice regime characteristics in the Ningxia- Inner Mongolia reach of Yellow River[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(6):893 - 899. (in Chinese))
- [15] 李永峰, 刘广民, 徐菁利. 冰冻条件下水中硝基苯的变化[J]. 上海工程技术大学学报, 2006, 20(3):206 - 209. (LI Yong-feng, LIU Guang-min, XU Jing-li. Nitrobenzene changes in water under natural ice[J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2006, 20(3):206 - 209. (in Chinese))
- [16] LI Zhi-jun, WANG Xin, LI Qing-shan, et al. Study on nitrobenzene ratio in water-ice system under different conditions[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008, 51(11):2013 - 2020.
- [17] 茅泽育, 罗昇, 赵升伟, 等. 冰盖下水流垂线流速分布规律研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(2):209 - 215. (MAO Ze-yu, LUO Sheng, ZHAO Sheng-wei, et al. Study on the velocity distributions for ice-covered flow[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(2):209 - 215. (in Chinese))
- [18] 王军, 付辉, 伊明昆, 等. 冰塞水位分析[J]. 水科学进展, 2007, 18(1):102 - 107. (WANG Jun, FU Hui, YIN Ming-kun, et al. Analysis of stages under ice-covered in winter[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(1):102 - 107. (in Chinese))
- [19] 李新, 程国栋, 卢玲. 空间内插方法比较[J]. 地球科学进展, 2000, 15(3):260 - 265. (LI Xin, CHENG Guo-dong, LU Ling. Comparison of spatial interpolation methods[J]. Advance in Earth Sciences, 2000, 15(3):260 - 265. (in Chinese))
- [20] HOLDAWAY M R. Spital modeling and interpolation of monthly temperature using Kriging[J]. Climate Research, 1996(24):1835 - 1845.

Calculating river ice thickness from Harbin to Tongjiang using short-term hydrological and meteorological data^{*}

LI Zhi-jun¹, SUN Wan-guang¹, XU Shi-guo¹, LI Qing-shan², BAI Yan², WANG Xin¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Songliao River Basin Water Resources Protection Bureau, Changchun 130021, China)

Abstract: In order to calculate the river ice thickness distribution from Harbin to Tongjiang about 660 km along Songhua River, and based on the fact of the short-term hydrological and meteorological data along Songhua River, the kinetic energy effect of fluid velocity under ice cover on ice growth is added into Stefan equation which is commonly needed meteorological data for the single point ice thickness calculation under the state water conditions. In the case with scarce measured fluid velocity data under ice cover, it is assumed that water flux and roughness is same in the supposed river, then the relationship between the fluid velocity and the river width is set up, and some mean fluid velocities under ice covers at different sites are evaluated. And in the case without measured meteorological data along the river, the average daily surface temperature is interpolated by using the method of inverse distance squared if the ice forms under the same weather system during the ice period. The statistical relation is obtained following the theoretical analysis and limited hydrological and meteorological data. Based on the calculated results from Harbin to Tongjiang along Songhua River, 660 km long, it shows that the human interference in the fluid velocity affects the ice growth rate and the calculation of longer river has higher accuracy.

Key words: hydrology; meteorology; river; ice; Harbin; Tongjiang

* This project is supported by Changjiang River Scholar and Innovative Team Developing Plan (No. IRT0420) and National Natural Science Foundation of China (No. 40676001).