

黑龙江冰坝预报方法研究

曹伟征¹, 肖迪芳², 李桂芬³

(1.佳木斯水文局,黑龙江 佳木斯 154002; 2.黑河水文局,黑龙江 黑河 164300;
3.中国水利科学研究院,北京 100044)

摘要:在分析高寒山区河流水文气象特点、河道特性的基础上,探索了黑龙江冰坝的成因,计算了河槽水(冰)量、融雪径流量、融冻期降水径流量、临界冰盖强度,建立了冰坝最高水位预报模型,使以往预报方法得到了改进,并具有了物理成因理论基础,可提高预报的准确率。

关键词:冰坝凌汛;河道特征;冰坝成因;预报方法;融雪径流

中图分类号:TV124

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2014)06-0072-05

1 冰坝成因

黑龙江上游冰坝多发生江段,属高寒山区性河流,河道束狭,深浅宽窄不一,比降落差大,气候严寒,地面积雪,土壤冻结,河流封冻时间长达170d,有冻土存在时间近300d,流域大部分有永久性冻土存在,冻土水文效应明显,产汇流条件良好。每当冬春气候异常,河槽蓄水(冰)量偏大,积雪偏厚,春季气温急剧回升并伴有降雨年份,都会在上游形成强大冰凌洪水,在河道弯曲、束狭等输冰不畅江段或冰盖前缘形成冰凌卡塞和冰坝。黑龙江高寒山区性河流冰坝,是在倒开江的条件下,由融雪、融冰和降雨径流形成的冰凌洪水。冰坝形成过程是强大的水流动力,促成冰盖破裂聚集、堆积而形成的叠加组合过程^[1]。冰坝程度决定于河槽前期蓄水(冰)量、冬季积雪和融冻期降水量以及气温回升过程决定的倒开江程度和冰盖强度。

冰坝凌汛多为单一洪水过程,洪水总量可表示为:

$$W_{\text{总}}=W_{\text{冰}}+W_{\text{水}}+W_{\text{雪}}+W_{\text{雨}} \quad (1)$$

式中: $W_{\text{总}}$ 为冰坝凌汛洪水总水量; $W_{\text{冰}}$ 为河槽结冰水量; $W_{\text{水}}$ 为河槽蓄水量; $W_{\text{雪}}$ 为融雪水量; $W_{\text{雨}}$ 为融冻时降雨径流量。

黑龙江上游属山区河流,落差大,河槽蓄水量少,可忽略不计,则凌汛水量和洪峰高度决定于融雪、融冰和降雨径流量。洪峰附加壅水高度与倒开江程度和冰盖强度有关。当冰凌洪水的峰量关系单一时,冰坝最高水位可近似表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_m=H_0+\Delta H \\ H_0=f(R_{\text{雪}}+R_{\text{雨}}+R_{\text{冰}}) \\ \Delta H=f(\phi h) \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: H_m 为冰坝最高水位,以变幅计,m; H_0 为融雪、降雨、融冰径流混合过程的正常水位,m; $R_{\text{雪}}$ 、 $R_{\text{雨}}$ 、 $R_{\text{冰}}$ 分别为融雪、降雨和融冰水量, m^3 ; ΔH 为冰凌叠加和冰盖强度影响下的附加壅高水位,m; h 为临界冰厚,m; ϕ 为冰盖抗弯强度系数, kg/cm^2 。

式(2)基本反映了冰坝凌汛形成的水量平衡和热量平衡关系, ΔH 还间接反映了倒开江条件下,冰凌洪水的叠加组合形式和程度。

2 冰坝凌汛计算

2.1 融雪和降雨径流量的计算

融雪和降雨径流,多为开江期的一次混合径流过程,在黑龙江上游,为冰坝凌汛主要水量来源。分析寒区冻土水文模型^[2],水量平衡方程式采用下式:

$$R=P-E-(W_m-W_0) \quad (3)$$

式中: R 为融冻期降雨径流量,mm; P 为冬季降水量,mm; E 为蒸散发量,mm; W_m 为流域最大蓄水量,mm; W_0 为起始蓄水量,mm。

在融冻时,融雪和降雨径流的产流方式和径流量受到冻土融冻深度及土壤含水量影响,容易达到田间持水量,产流方式符合蓄满产流理论。但是受冻土特性和土壤水分动态规律的影响,产流方式和参数的定量随冻土融冻深度有所变化。在融冻期,产流层土壤可分

为融冻(包气带)层和冻结(包冰带)层。融雪和降雨径流和参数的定量与无冻期雨洪的计算存在区别。融冻期雨雪径流量的计算可表示为:

$$R_{雨雪}=f(PE+W_0) \\ =f(PE+W_{0上}+W_{0下}) \quad (4)$$

式中:PE为有效降水(雪)量;W_{0上}、W_{0下}分别为上下层计算的起始蓄水量。将流域最大蓄水容量W_m分为上下两层,从冻土融冻日起,随气温增加和冻土融冻深度变化,上层从0~W_m变化,下层则从W_m~0变化,分别计算W_{0上}和W_{0下}。令上层按蒸发能力蒸发,下层按冻土消融速度变化,则上下层起始蓄水量为:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{0上,t+1}=W_{0上}+P_t+E_t+R_t \\ W_{0下,t+1}=K_{Dt}W_{0下} \\ K_{Dt}=(1-\frac{t}{T})^a \end{array} \right. \quad (5)$$

式中:W_{0,t}和W_{0,t+1}为时段始末蓄水量,mm;K_{Dt},a为下层蓄水量消退系数和指数,经分析冻土深度变化近似于直线,a可取0.8。

运用以上公式计算,需要考虑冻土融冻期上下层最大蓄水容量的变化过程,蒸发能力随冻土过程和下垫面情况不同而变化。对常用的观测水面蒸发仪器进行器皿修正和高程修正外,还要作冻土蒸发修正。冻土之上有积雪存在时,蒸发发生在雪面,而冻土温度在冰点以下,蒸发受到抑制,冻土蒸发修正系数C从0变化到1。

根据上述方法,分析计算了大小兴安岭地区的科后、山口、北安、清溪、西沟等水文站的融雪和降雨径流关系,收到了良好的效果。可将综合的R=f(P+W₀)关系用于计算黑龙江上游冰坝凌汛水量。

2.2 河槽蓄水量计算

黑龙江上游无水利工程调节,冬季河流最小流量不足20m³/s,河槽蓄水量主要以蓄冰为主。最大蓄冰量,用断面法估算可表示为:

$$W_{冰}=\int_0^L h_m B dL \quad (6)$$

式中:h_m为最大冰厚,m;B为冰面宽度,m;L为河道长度,m。分河段计算,并考虑起始冰面不同宽度,式(6)可表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta W_{冰}=h_m \frac{B+B_c}{2} \Delta L \\ W_{冰}=\sum_1^n \Delta W_{冰} \end{array} \right. \quad (7)$$

式中:B为开始封冻时上下断面平均宽度,m;B_c为最大冰厚时,上下断面冰面平均宽度,m;h_m为上下断面平均最大冰厚m;ΔL为两断面的间距,m;n为计算河段数。

河网蓄冰量的另一种估算方法是采用无冻期断面退水曲线与冻结期退水曲线水量之差来估算^[3]。

以上估算的河槽蓄冰量与冰坝水位高度具有直接关系,但最大冰厚多出现在3月下旬前后,离4月下旬开江日期冰厚还存在升温减薄过程。如考虑临界冰厚和冰盖强度,还需进行冰盖厚度和强度的计算。

2.3 临界冰厚和冰盖强度估算

融冻期,当气温回升后,冰厚融冻减薄,冰的抗压力随之降低。令dt时间内融化的冰厚为dh,在已知冰面和冰盖下水温的情况下,冰厚随时间变化的微分方程可表示为:

$$\frac{dh}{dt}=\lambda(T_w-T_a)/\rho \cdot L \quad (8)$$

式中:L为冰的相变潜热(kal/cm³);ρ为冰的密度(g/m³);T_w、T_a为冰表面温度和冰盖下界面温度;λ为冰的热传导系数。当冰面无雪、无风,不考虑河床热辐射时,用气温θ代替T_w,并令T_a=0,对式(8)积分,得冰盖减薄厚度为:

$$h_c=K\sqrt{\sum_{i=1}^n \theta} \quad (9)$$

式中:K为反映热传导率、冰的密度和潜热的综合系数;n为以日计的时段数。

众所周知,累积气温随历时增长而增加,冰厚的减薄随积温增加,历时增长而增大。考虑积温与历时的函数关系,采用历时与气温建立冰厚减薄的关系,基本上具有同等的效率。由此采用历时因子法,拟合的融冻期冰厚减薄的关系为:

$$h_t=h_0[1-(t_n/T)^{1.5}]^2 \quad (10)$$

式中:h_t、h₀为计算t时冰厚与起始冰厚,m;t_n、T为计算h_t的历时与冰盖全部消融的总历时,d。

同样,采用历时因子法拟合的冰盖强度衰变过程如下式:

$$\varphi=\varphi_0(1-\sqrt{\frac{t}{T}})^2 \quad (11)$$

式中:φ、φ₀分别为t时刻冰盖强度系数和起算时刻强度系数(俄罗斯φ₀采用5.5kg/cm²)^[4]。

据上式即可估算开江期的临界冰盖强度φ_n。

2.3.1 冰坝稳定度估算

冰坝的稳定度决定于冰盖强度、堵塞河道长度和

壅水高度及过流能力等,与持续时间具有密切关系。1960年加林达冰坝4月27日形成,水位13.56m,至5月12日溃决,历时14d。该冰坝10m以上水位持续了8d,至上游流冰终止后仍持续了3d。冰坝水位在高水位期变幅1.6m,稳定程度很高。冰坝之所以稳定还与冰坝特性和河道特性有关。1960年俄罗斯观测到冰坝长度50km,气温低,冰盖强度大,流量在3500m³/s左右,比较稳定。该江段河道束狭,江宽400~520km,江宽随水位变化不大,江道比降上游大于下游2.5倍,又属峡谷,冰盖受热明显滞后,有利于冰坝的稳定。历年在这里发生的冰坝历时都很长,1958、1964、1971、1973年冰坝都历时在5d以上,1960、1980年冰坝历时在14d以上。

俄罗斯学者用静力平衡推算,表示冰坝稳定程度的公式为^[5]:

$$K = \frac{H \cdot 4\sqrt{B}}{\mu\sqrt{Q}} \quad (12)$$

式中: H 、 B 为水深和河宽,m; Q 为流量,m³/s; μ 为系数(取 $\mu=0.26$)。

由式(12)计算1960年加林达站冰坝稳定系数在2.40~2.80。1960年加林达站水文站冰坝稳定系数分析如图1所示。由图1可知,在水位和流量稳定时,冰坝稳定系数 K 亦较稳定;稳定系数 K 小于2.4时,冰坝溃决(图1),此时水位急剧下降,冰盖强度降低,而流量急速上涨。与实际情况比较一致。

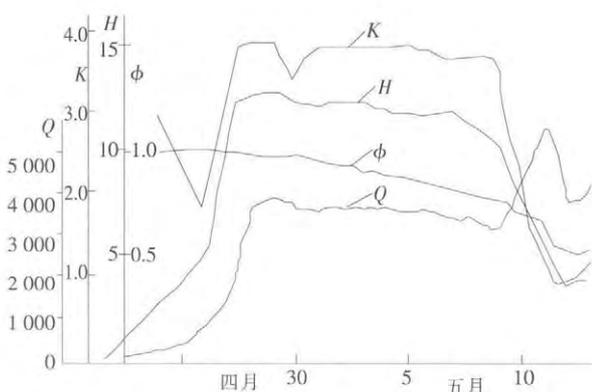


图1 1960年加林达水文站冰坝稳定系数分析图

Fig.1 Stability factor analysis of the ice dam at the Jialinda station in 1960

2.3.2 预报方案的建立

黑龙江冰坝凌汛洪水总量主要来自额尔古纳河和石勒喀河中下游和干流洛古河至鸥浦区间,根据式(3)至式(6)计算区间融雪水量 $V_{\text{雪}}$ 、降雨径流量 $V_{\text{雨}}$ 和冻结

水量 $V_{\text{冰}}$,绘制区间冰凌洪水总量和鸥浦水文站冰凌洪水总量 V_m 与冰坝水头的关系,如图2所示。图2中a线为 $V_m=f(V_{\text{雪}}+V_{\text{雨}})$ 关系,b线为 $V_m=f(V_{\text{雪}}+V_{\text{雨}}+V_{\text{冰}})$ 关系。由图2可见, V_m 与 $V_{\text{雪}}$ 、 $V_{\text{雨}}$ 、 $V_{\text{冰}}$ 之和呈正相关关系,且相关程度较高。

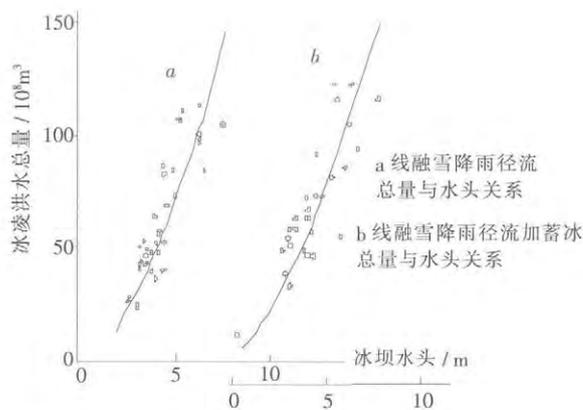


图2 鸥浦水文站冰凌洪水总量与冰坝水头关系图

Fig.2 Relation between the ice flood volume and ice dam head at the Oupu station

当考虑冰盖强度 ϕ_h 时,根据式(10)、式(11)计算漠河站冰坝最高水位(H_m)。建立漠河水文站 $\phi_h \sim H_m$ 关系如图3所示。由如图3这种关系说明了冰坝最高水位与冰盖强度有直接关系。

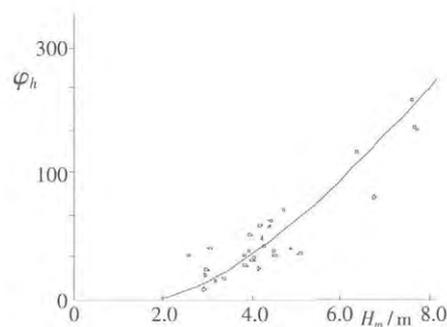


图3 漠河水文站 $\phi_h \sim H_m$ 关系图

Fig.3 The $\phi_h \sim H_m$ relation at the Mohe station

对于冰坝附加壅高水位的计算,以加林达水文站为例,先建立漠河水文站与加林达水文站冰坝凌汛最高水位相关关系,如图4所示。图中外包线假定为无冰坝卡塞的水位,即式(2)中的 H_0 , ΔH 为冰坝附加壅高水位,加林达站正常水位 H_0 由漠河站水位通过 H_0 查得, ΔH 则由加林达站实测 $H_m - H_0$ 求得。加林达站冰坝附加壅高水位 ΔH 与冰盖强度系数 ϕ 的相关图见图5。

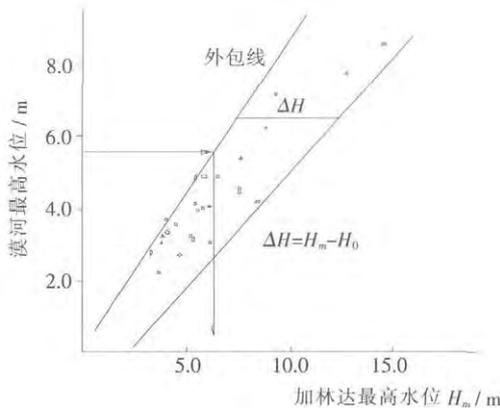


图4 漠河水文站与加林达水文站冰坝凌汛最高水位关系图

Fig.4 The relation of the highest water levels of the ice dam flood between the Mohe station and Jialinda station

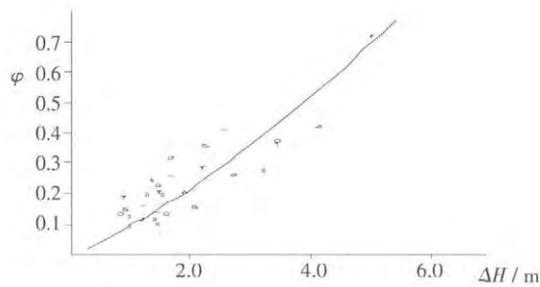


图5 加林达站 φ~ΔH 关系图

Fig.5 The φ~ΔH relation at the Jialinda I station

高寒地区山区性河流,在无水利工程调节影响下,河槽蓄水量甚微,而主要是河槽蓄冰量,这种水量决定于前秋降雨和封冻期降雪的大小,在天然条件下,由于气温低,冰盖强度大等,对冰坝水位高度具有重要作用,因此多数河流,封冻水位与冰坝最高水位的关系,具有较高精度^[6]。用来预报,预见期很长。

以上方法建立的冰坝最高水位预报关系,存在一定误差,主要原因是降雨融雪融冰区域范围欠准,雨量站稀少,而且俄方集水面积(占半数)没有雨量站,冰厚观测欠精,φ的起算日期难以确定,最高水位代表来水总量只是一个近似等。但在理论和分析方法上比以前的纯经验法前进了一大步。本文介绍的预报方法目前已在黑龙江冰凌洪水作业预报中普遍应用,对照《水情报预报规范》(GB/T22482—2008)的相关规定,各站预报方案合格率可到达80%以上。其中黑龙江漠河站和欧浦站冰坝最高水位预报成果及精度评定见表1。

3 结语

高寒山区性河流水文、气象特性和河道特性不同

表1 漠河站、欧浦站冰坝最高水位预报成果表

Table 1 The forecasted results of the highest ice jam stages at the Mohe and Oupu stations

| 站名 | 年份 | 实测最高水位 / m | 预报最高水位 / m | 误差 / m | 许可误差(±) / m | 合格否 |
|------|-------|------------|------------|--------|-------------|-----|
| 漠河 | 1960 | 97.21 | 95.48 | -1.73 | 1.89 | √ |
| | 1971 | 96.32 | 95.64 | -0.68 | 1.89 | √ |
| | 1981 | 93.69 | 94.81 | 1.12 | 1.89 | √ |
| | 1985 | 97.61 | 95.70 | -1.91 | 1.89 | × |
| | 1986 | 97.41 | 95.70 | -1.71 | 1.89 | √ |
| | 1989 | 94.34 | 93.50 | -0.84 | 1.89 | √ |
| | 1990 | 92.91 | 93.82 | 0.91 | 1.89 | √ |
| | 1991 | 95.30 | 93.94 | -1.36 | 1.89 | √ |
| | 1992 | 94.75 | 95.21 | 0.46 | 1.89 | √ |
| | 1994 | 95.42 | 95.04 | -0.38 | 1.89 | √ |
| | 2000 | 95.83 | 95.20 | -0.63 | 1.89 | √ |
| 欧浦 | 2009 | 94.68 | 94.84 | 0.16 | 1.89 | √ |
| | 2010 | 94.59 | 94.65 | 0.06 | 1.89 | √ |
| | 1958 | 97.97 | 97.22 | -0.75 | 1.56 | √ |
| | 1960 | 99.45 | 98.50 | -0.95 | 1.56 | √ |
| | 1963 | 95.90 | 97.19 | 1.29 | 1.56 | √ |
| | 1970 | 96.42 | 97.30 | 0.88 | 1.56 | √ |
| | 1984 | 97.60 | 96.53 | -1.07 | 1.56 | √ |
| | 1992 | 95.93 | 96.18 | 0.25 | 1.56 | √ |
| | 2000 | 96.82 | 98.04 | 1.22 | 1.56 | √ |
| | 2001 | 95.84 | 95.89 | 0.05 | 1.56 | √ |
| | 2002 | 97.97 | 94.93 | -3.04 | 1.56 | × |
| 2004 | 96.93 | 96.83 | -0.10 | 1.56 | √ | |
| 2009 | 97.08 | 96.82 | -0.26 | 1.56 | √ | |

于低纬度平原地区河流(如黄河),因此冰坝的成因机制也与平原地区河流有所不同,平原地区河流冰坝后续水源有限,冰坝形成机制主要是研究冰水动力与阻力的关系。而高寒山区冰坝的形成机制,除冰水动力与阻力的关系外,还决定于冰量与融雪降雨径流的汇流形式和过程。在倒开江情况下,冰凌洪水在演进过程中逐段叠加组合,在洪水所到之处的原型冰盖边缘形成卡塞重叠堆积。因此冰坝凌汛水量决定于河槽蓄冰量、融雪和降雨径流量及冰盖强度。

本文基于寒冷山区性河流的水文气象特点,在考虑冻土水文效应的基础上,根据蓄满产流的方法原理计算融雪和降水径流量,同时计算了汇入冰水量和冰盖强度,用以计算的冰坝最高水位的方法,具有一定的物理成因基础,计算和预报结果,取得了良好效果。本文的方法虽有了较大改进,但对许多因素做了简化和

概化,有的计算仍很粗糙,仍存在许多问题有待进一步完善。

冰坝凌汛,在中高纬度地区河流极为频繁而剧烈,属洪、旱、冰三大自然灾害之一。径流量占年经流量的20%左右,对水利工程调节运行,农田灌溉和航运等,具有极为重要的作用。由于冰坝凌汛形成机制的复杂性,国内外均无专门研究机构,致使这项技术的理论和方法还很薄弱,恳望政府和相关业务部门给以关注和重视,加强研究,从而使这项技术理论和方法得以提高和完善,为防凌减灾提供有效服务。

参考文献:

- [1] 肖迪芳,朱文生,王春雷. 嫩江上游冰坝成因和预报方法[J]. 东北水利水电, 1991,5. (XIAO Difang, ZHU Wensheng, WANG Chunlei. Ice dam calculations and forecasting in the upper reaches of Nenjiang River [J]. Northeast China Water Conservancy and Hydropower, 1991,5. (in Chinese))
- [2] 肖迪芳,李龙辉. 寒冷地区融雪和融冻期降雨径流模型研究[A]. 第五届全国冰川冻土学术会论文集(下)[C]. 兰州: 甘肃出版社, 1996.

- (XIAO Difang, LI Longhui. Research on rainfall runoff in snow-melting period and freeze-thaw period in cold area [A]. Proceedings of the Fifth Academic National Conference on Glaciology and Geocryology [C]. Lanzhou: Gansu Press,1996. (in Chinese))
- [3] 肖迪芳. 寒区河网冻结水量的估算 [A]. 全国第三届冰工程学会论文集[C]. 1997. (XIAO Difang. Estimation of frozen water in river network in cold area [A]. Proceedings of the Third Session of National Ice Engineering Institute [C]. 1997. (in Chinese))
- [4] P. B. 多钦科著,张瑞芳译. 苏联河流冰情[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991. (P.B.Dochik.Translator: ZHANG Ruifang. The Soviet Union River Ice Regime [M]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1991. (in Chinese))
- [5] B.N. 别尔切尼科夫. 河流冰坝形成的动力条件[A]. [苏]国家水文研究所著作集[C]. 1964. (B.N.Baer Cheney Kopf. The dynamic conditions of river ice dam formation [A]. [CCCP] Proceedings of the National Hydrology Institute [C]. 1964. (in Chinese))
- [6] 肖迪芳. “1985.4” 黑龙江特大冰坝凌汛分析 [J]. 黑龙江水专学报, 1991,(2). (XIAO Difang. Analysis of Heilongjiang extra serious ice dam flood in “1985.4” [J]. Journal of Heilongjiang College of Water, 1991,(2). (in Chinese))

How to Make Ice Dam Forecasting for Heilongjinag River

CAO Weizheng¹, XIAO Difang², LI Guifen³

(1. Jiamusi Hydrology Bureau, Jiamusi 154002, China; 2. Heihe Hydrology Bureau, Heihe 164300, China;
3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: On the basis of analyzing the river conditions, and hydrological and meteorological characteristics in cold mountain areas, this paper discussed the cause of ice dam forming, and calculated the channel flow, snowmelt runoff and rainfall runoff. And then a model was set up a model to forecast the highest level of ice dam, so as to improve the traditional forecasting methods and increase the forecasting accuracy.

Key words: ice dam flood; river characteristics; ice dam cause; forecasting method; snowmelt runoff

(上接第 71 页)

Analysis of Rainstorms and Floods Occurred in Heilongjiang and Songhuajiang River Basins in 2013

WANG Rong¹, YIN Zhijie², ZHU Chunzi²

(1. Ningxia Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Yinchuan 750001, China;
2. Bureau of Hydrology, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

Abstract: In 2013, the Heilongjiang River Basin experienced the largest flood since 1984, and so was the Songhuajiang River Basin since 1998. This paper firstly introduced the meteorological background and precipitation process of the rainstorms that led to the flood, then analyzed the flood process and composition, role of water structures, comparison with historic floods, and characteristics of the storm flood. The analysis of this paper could provide some reference for flood control in river basin.

Key words: Heilongjiang River; Songhuajiang River; rainstorm; flood