

丰满流域水利工程对径流变化规律的影响研究

李成林¹, 孙新国², 彭勇², 周惠成²

(1. 松辽水利委员会, 长春 130000; 2. 大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连, 116024)

摘要: 丰满水库流域水利工程众多, 受水利工程特别是人工控制性较差的中小水利工程影响, 流域产汇流特点发生了一些改变, 原有水文预报模型未能考虑这一变化而导致其精度下降, 不利于流域正常水文预报工作的开展, 影响了流域内水库防洪与兴利效益的发挥。在前人研究基础上, 结合实测水利工程运行资料和美国陆地资源卫星“Landsat TM/ETM+”数据, 分析了水利工程在洪水中的蓄放规律。研究发现, 水利工程初始蓄水状态、洪水发生汛期阶段和降雨量3个因素决定了水利工程的蓄放规律, 拦蓄规律为: 汛中拦洪比小, 汛末拦洪比大; 初始库容越大, 拦洪比越小, 若初始库容相近, 则汛末拦洪比大于汛初; 对于汛末洪水, 发生时间越晚, 拦洪比越大。将研究所得的拦蓄规律应用于洪水预报方案进行校正, 结果表明, 1996年9月14日和2006年8月26日两场洪水校正后的预报误差分别由校正前的146.6%和31.8%降低到8.6%和10.1%。因此, 研究所得拦蓄规律是合理的, 能显著提高丰满径流预报精度。

关键词: 丰满水库; 水利工程; 径流; 美国陆地资源卫星“Landsat TM/ETM+”

中图分类号: TV 697.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)04-0079-05

Research of Runoff Variation Impacted by Hydraulic Projects in Fengman Basin

LI Cheng lin¹, SU N Xin guo², PENG Yong², ZHOU Hui cheng²

(1. Songliao Water Resources Commission, Changchun 130000, China;

2. School of Hydraulic Engineering Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: There are many hydraulic projects in the Fengman Basin. The hydraulic projects, especially the poorly manually controlled and small to medium sized water conservancy projects, can affect the rainfall runoff conditions in the basin. The original hydrological forecasting model failed to take into account this effect and therefore resulted in decreased prediction accuracy, which can affect the implementation of normal hydrological forecasting work and the performance of flood control and profiting effect of the reservoir in the basin. Based on the previous studies, the measured hydraulic project operation data and the American land resources satellite Landsat TM/ETM+ data were used to analyze the storage and release characteristics of hydraulic project during the flood. The results showed that the initial storage condition, phase of flood season, and precipitation are the three main factors affecting the storage and release characteristics of hydraulic project. The storage and release characteristics included that (1) flood detention ratio is smaller during the flood season and bigger during the flood recession period; (2) the bigger the initial storage is, the smaller the flood detention ratio is. If the initial storage is similar, the flood detention ratio during the flood recession period is bigger than that at the beginning of flood season; and (3) the later the flood during the flood recession period occurs, the bigger the flood detention ratio is. The obtained storage and release characteristics were applied to adjust the flood forecasting in the Fengman Basin, which showed that the forecasting error decreased from 146.6% to 8.6% for the flood on September 14, 1996 and from 31.8% to 10.1% for the flood on August 26, 2006 after the adjustment. Consequently, the obtained storage and release characteristics were useful and can improve the forecasting accuracy of runoff in the Fengman Basin.

Key words: Fengman reservoir; hydraulic project; runoff; American land resources satellite Landsat TM/ETM+

收稿日期: 2013-01-21 修回日期: 2013-05-30 网络出版时间: 2013-07-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130728.1309.004.html>

基金项目: 水利部公益性行业专项(201001024); 国家自然科学基金项目(51109025); 教育部博士点基金项目(20100041120004); 中央高校基本科研业务费专项(DUT13JS06)

作者简介: 李成林(1965-), 男, 内蒙古乌兰浩特人, 教授级高级工程师, 硕士, 主要从事水库调度、水利工程运行管理工作。

通讯作者: 彭勇(1979-), 男, 湖北公安人, 副教授, 博士, 主要从事水文气象耦合不确定环境下的水电站优化调度方面研究。Email: pengyong@dlut.edu.cn

1 研究背景

丰满水库位于吉林省东南部的第二松花江上,控制流域面积为 42 500 km²,占第二松花江总流域面积的 55%。水库蓄水 112 亿 m³ 以上,多年平均降雨量 680 mm,汛期年均降雨量 521.6 mm,占全年降水的 76%。丰满水库流域面积大,流域内水利工程众多,人类活动影响复杂。2002 年丰满发电厂用卫星遥感资料进行了流域下垫面调查,绘制了流域图和水系分布图,识别了整个流域内水面面积大于 4 000 m² 的水体,发现明水水体个数达 9 335 个,其蓄水规律很难掌握。众多水利工程的拦蓄、垮坝和泄流情况已经使得流域的径流形成条件发生变化,致使过去的洪水预报方案不尽人意^[1]。目前许多学者对该问题做了很多研究,有的采用多种数理统计分析方法对降雨和径流进行趋势分析,得出降雨年际变化不明显而径流随着水利工程建设有明显的变化,从而得出水利工程对径流变化规律,例如黄强等^[2,4]对水利工程设施对径流的影响做了分析,发现北方河流的年径流量有逐渐减小的趋势;李慧贤等^[5,6]采用趋势分析法分析了水利工程对径流的影响。有的学者在考虑水利工程前后的结果对比的基础上,利用水文模型得出水利工程对径流的影响规律,如雄文生等^[7,8]构建水库群影响下的流域产流模型,并提出了考虑水利水电工程影响下的产流预报方法;冯相明^[9]提出了考虑水利工程影响的降雨径流相关模型;郭生练等^[10]在新安江三水源产流模型和的基础上将大中小型水库、塘坝、水田的拦洪库容折合成拦洪量考虑到模型土壤蓄水容量中去,提高了产流预报精度。

水利工程对径流的影响主要有两方面,一方面在汛初、久旱无雨和汛末时,水库、塘坝需要蓄水,降雨很大一部分被水利工程拦蓄,造成径流系数较低,预报产流量明显偏大;另一方面主汛期前期降雨较多,又迎来大量级降雨时,水利工程纷纷泄流放水,更有甚者,防洪级别较低的中小水利工程被动出流,造成实测径流远远大于预报值,给下游防洪安全造成威胁。以往的研究中要么对实测降雨径流系列进行分析,定性得出水利工程对径流的影响规律,要么通过假设将这一定性规律量化,从而应用于径流预报模型中去。由于中小水利工程运行资料较难获得,以往研究很少从水利工程实际运行资料中挖掘规律,而通过定性分析的规律可信度不高,径流预报结果很难用于实际洪水预报中去。为此,本文拟结合实测水利工程运行资料和 TM/ETM+ 遥感图像资料,分析水利工程对径流的影响规律,并将其应用于径流预报,进一步验证该规律的准确性。

2 流域概况

为提高水库预报精度,将丰满水库流域划分为 3 个区:丰满水库蓄水(I区)、五道沟以上(0区)与白山水库以上(0区)。2006 年的流域调查显示,0 区内共有 1 座大型水库,12 座中型水库,86 座小 I 型水库(其中 23 座有运行资料),390 座小 0 型水库及上千座塘坝,中小水利工程总库容为 6.42 亿 m³,占全流域中小型水利工程总库容 7.05 亿 m³ 的 91%。近年的洪水预报实践表明,对于一些洪水,II 区内小水库塘坝拦洪或泄洪作用明显。因此,本文以丰满 II 区为典型开展研究,流域内水系、水库与站点情况见图 1。各类水利

工程的数量、控制面积及总库容见图 2。

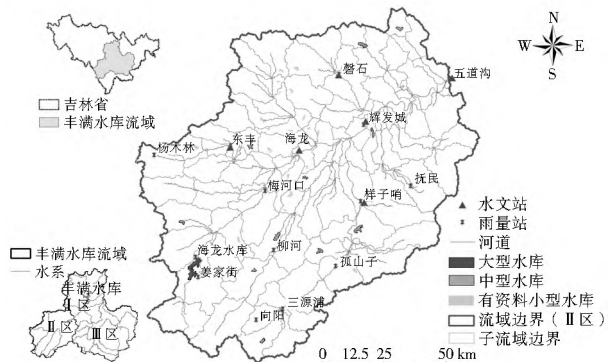


图 1 丰满 II 区流域图

Fig. 1 Map of the Fengman subarea II basin

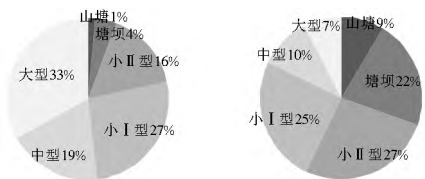


图 2 丰满 II 区流域各类水利工程库容(左图)及控制面积比例图(右图)

Fig. 2 The percentages of storage capacity (left) and drainage area (right) of different hydraulic projects in the Fengman subarea II basin

3 研究思路

对于大型水库流域来说,径流受水利工程影响程度的主要因子是该流域控制面积内的水田、山塘、塘坝以及大中小型的水库。流域内大中型水库数量不多而且运行资料齐全,调度规则明确,在洪水预报时可以人为掌控。但是数量庞大的中小水利工程的人工控制性较差,由于它们的泄水设备一般都是无闸门控制的溢洪口门,因此,当库水位超过溢洪堰顶时,上游来水全部下泄,中小水库群此时基本不起调蓄作用。流域内的中小水库群的影响方式主要是拦蓄作用在极端大洪水时,中小水库由于前期蓄水较多,面对突如其来的大水来不及泄水可能出现决堤垮坝而放流。在汛初和汛末由于用水需要而常常不合理地蓄水,到了汛中由于前期蓄水较多,面对突如其来的大暴雨,没有防洪任务的小水库塘坝又会大量泄流,给下游防洪安全和洪水预报带来诸多不确定性。中小水利工程对场次洪水径流量的影响程度与水利工程的初始库容、洪水发生阶段和降雨量密切相关。为此本文重点是利用遥感信息和实测资料获得洪水发生时中小水利工程的初始蓄量信息,从而挖掘中小水利工程对场次洪水径流量的影响规律。

遥感是在 20 世纪 60 年代初发展起来的一门新兴信息技术,具有获取信息的速度快、周期短、范围广、信息量大等特点,目前已广泛应用于农业、地质、气象、水文、环保等领域。本文以美国陆地资源卫星 Landsat 的 TM/ETM+ 数据为基础,利用曹明亮等^[11]提出的基于遥感数据的流域小水库塘坝拦洪计算方法,得出丰满 II 区流域各类小水库面积与库容的相关关系,并通过实际小水库和塘坝的库容变化与面

积变化来验证这种关系在丰满流域的适用性,面积库容相关关系见表1。由于23个已有资料小型水库大都分布在轨道号为p118r30的遥感图像覆盖范围内,因此本文以该范围作为研究领域,计算小水库塘坝对洪水的拦蓄作用。已有遥感数据清单见表2,通过每一景遥感资料获得小水库的水面面积信息,进而得到小水库的库容信息。

具体计算步骤如下。

(1) 水利工程初始库容计算。根据洪水发生时的 Landsat TM/ETM+ 数据获得小水库的初始水面面积,由水面面积

表2 已搜集到的轨道号为 p118r30 的 Landsat TM/ETM+ 数据列

Table 2 Description of the collected Landsat TM/ETM+ data (path/row: 118/30)

年份	1993	1996	1999	2000	2001	2002	2003	2005	2006
	1993-9-7	1996-8-30	1999-10-18	2000-4-11	2001-9-21	2002-4-1	2003-8-26	2005-9-8	2006-8-18
时相				2000-5-13		2002-5-19		2005-10-18	2006-9-19
				2000-9-18		2002-9-24			
				2000-10-20					

(2) 小水库塘坝蓄放量计算。针对各场洪水,认为原有的预报方案为天然状况下的洪水径流量,即降雨径流相关图法^[2]得到的预报洪量,也就是说预报洪量 $W_{\text{预报}}$ 为未受水利工程影响的洪量,实测洪量 $W_{\text{实测}}$ 为水利工程影响下的洪量,预报洪量与实测洪量之差 $\Delta W_{\text{总}}$ 为水利工程总影响量(式1),总影响量 $\Delta W_{\text{总}}$ 减去实测大中型水库影响量 $\Delta W_{\text{大中型水库}}$ 得小水库塘坝影响量 $\Delta W_{\text{小水库塘坝}}$ (式2)。

$$\Delta W_{\text{总}} = W_{\text{预报}} - W_{\text{实测}} \quad (1)$$

$$\Delta W_{\text{小水库塘坝}} = W_{\text{总}} - \Delta W_{\text{大中型水库}} \quad (2)$$

(3) 小水库塘坝蓄放比计算。步骤(2)计算的蓄放量 $\Delta W_{\text{小水库塘坝}}$ 与未受水利工程影响的场次洪水总量 $W_{\text{预报}}$ 之比即为小水库塘坝蓄放比 $\beta_{\text{小水库塘坝}}$ (式3)。总拦洪量 $\Delta W_{\text{总}}$ 与 $W_{\text{预报}}$ 之比即为水利工程总拦蓄放比 $\beta_{\text{总}}$ (式4)。蓄放比大于0为拦蓄作用,蓄放比小于0为放流作用。

$$\beta_{\text{小水库塘坝}} = \frac{\Delta W_{\text{小水库塘坝}}}{W_{\text{预报}}} \quad (3)$$

$$\beta_{\text{总}} = \frac{\Delta W_{\text{总}}}{W_{\text{预报}}} \quad (4)$$

4 水利工程对径流影响规律分析

根据上节提出的方法,利用遥感数据分析小水库塘坝拦洪规律。

表4 轨道号为 p118r30 的各时相遥感数据对应的小水库塘坝初始库容

Table 4 Initial storage capacity of ponds and small reservoirs obtained from the Landsat TM/ETM+ images data (path/row: 118/30)

遥感数据时相	对应洪号	分区初始库容		蓄水率(%)			全流域初始库容
		东丰以上	磐石以上	东丰以上	磐石以上	平均	
1993-9-7	19930915	856	1401	30.0	38.1	34	15732
	19930922						
1996-8-30	19960914	1538	2067	53.9	56.2	55	25430
2000-9-18	20001007	516	720	18.1	19.6	19	8702
2001-9-21	20011002	1315	1680	46.1	45.6	46	21197
2006-8-18	20060826	1295	2428	45.4	66.0	56	25740
	20060909						

表1 各类小水库面积库容对应关系

Table 1 Relationship between storage capacity and area of three categories of small reservoirs

水库类别	面积库容相关关系	样本数	R ²
\bar{N}	$\log(V) = 1.2359 \log(A) - 1.1728$	10	0.92
$\hat{0}$	$\log(V) = 1.245 \log(A) - 1.008$	42	0.81
$\hat{0}$	$\log(V) = 1.3387 \log(A) - 1.6563$	27	0.89

和库容的对应关系得到小水库的初始库容,大中型水库的初始库容由实测资料获得。

4.1 数据获取与整理

根据表2的遥感数据,参考丰满II区的水文气象资料,收集了7场符合要求的洪水,分别对应5景遥感数据,见表3。

4.2 水利工程初始库容计算

研究范围内有东丰、磐石两个水文站,其上游小水库塘坝总库容分别为2855万m³与3681万m³。根据遥感数据覆盖区内的东丰、磐石流量站的小水库塘坝初始库容除以总库容得到初始蓄水率,再乘以流域小水库塘坝总库容得到全流域的初始库容,见表4。

表3 轨道号为 p118r30 的遥感数据及对应场次洪水

Table 3 Description of the Landsat TM/ETM+ data (path/row: 118/30) and flood data

遥感数据时间	洪水洪号	洪水起始时间	洪水结束时间	降水量 / mm	实测径流量 / 10 ⁴ m ³
1993-9-7	19930915	1993-9-15	1993-9-21	20.2	2389
	19930922	1993-9-22	1993-9-28	26.5	3551
1996-8-30	19960914	1996-9-14	1996-9-24	55.3	7057
2000-9-18	20001007	2000-10-7	2000-10-13	29.0	1321
2001-9-21	20011002	2001-10-2	2001-10-10	32.3	963
2006-8-18	20060826	2006-8-26	2006-9-8	73.8	20237
	20060909	2006-9-9	2006-9-15	15.8	3809

4.3 小水库塘坝蓄放比计算及对径流影响规律分析

表 5 为水利工程对各场洪水的拦洪比计算结果。20001007 洪水与 20011002 洪水由于缺少对应时段的大中型水库运行资料,无法计算小水库塘坝的蓄放比,仅用于分析水利工程总蓄放比,20060909 洪水则用于小水库塘坝蓄放规律的检验。

4.3.1 小水库塘坝蓄放规律分析

小水库塘坝对洪水的蓄放受前期土壤含水量、小水库塘坝初始蓄水状态、降雨量大小、洪水发生阶段、洪水过程等多种因素影响,要准确分析水利工程对洪水径流量的影响,必须有足够的样本。由于遥感数据有限,本文收集的有效样本较少,因此仅选用小水库塘坝初始蓄水状态、洪水所处汛期阶段及降雨量这 3 个控制变量,分析水利工程对洪水径流量的影响。可以得出以下规律。

(1) 汛中小水库塘坝拦洪比小,汛末水利工程主要是拦蓄作用且拦蓄比较大。6 场洪水样本中,只有 20060826 洪水

发生在汛中阶段,小水库塘坝蓄放比为 15.9%,其余洪水样本的小水库塘坝蓄放比均超过 40%。

(2) 初始库容越大,蓄放比越小,若初始库容相近,则汛末蓄放比大于汛初。如洪号为 19960914 的洪水和 20060826 的洪水,小水库塘坝初始库容分别为 2.54 亿 m^3 与 2.57 亿 m^3 ,而蓄放比分别为 40.7% 与 15.9%,19960914 洪水由于小水库塘坝初始蓄量少,其蓄放比明显大于 20060826 洪水。

(3) 发生在汛末的洪水,降雨量越大,蓄放比越小,降雨量越小,蓄放比越大。如 19960914、19930922 与 19930915 三场洪水降雨量分别为 55.3 mm、26.5 mm 与 20.2 mm,而小水库塘坝拦洪比分别为 40.7%、45% 与 54.5%。三场洪水的蓄放比随降雨量减少而递增,但都大于 40%。

(4) 发生在汛末的洪水,洪水开始时间越晚,蓄放比越大。如 20001007 与 20011002 洪水发生在 10 月初,其蓄放比分别为 77.2% 与 87.2%,均大于 70%,明显高于其他场次洪水。

表 5 小水库塘坝对场次洪水的拦洪比计算结果

遥感数据时相	对应洪号	汛期阶段	小水库塘坝 初始库容	降水 /mm	洪量		水利工程拦洪量		拦洪比(%)		
					实测	预报	总	大中型水库	小水库塘坝	总	小水库塘坝
1993-9-7	19930915	汛末	15 732	20.2	2 389	5 336	2 947	41	2 906	55.2	54.5
	19930922	汛末		26.5	3 551	6 728	3 177	149	3 028	47.2	45.0
1996-8-30	19960914	汛末	25 430	55.3	7 057	13 688	6 631	1 067	5 564	48.4	40.7
2000-9-18	20001007	汛末	8 702	29.0	1 321	5 800	4 479			77.2	
2001-9-21	20011002	汛末	21 197	32.3	963	7 540	6 577			87.2	
2006-8-18	20060826	汛中	25 740	73.8	20 237	26 680	6 443	2 199	4 245	24.2	15.9

4.3.2 考虑预报误差的风险分析

前文分析了小水库塘坝的蓄放规律,但没有考虑预报误差的影响,下面重点分析不同预报误差对小水库塘坝的拦洪规律的影响。由于场次洪水洪量允许的预报误差为 20%,本文假定预报值分别存在 $\pm 5%$ 、 $\pm 10%$ 与 $\pm 20%$ 的

误差,分析不同预报误差对小水库塘坝蓄放规律的影响。不同预报误差对水利工程蓄放比影响的分析结果见表 6。可以看出,对应不同误差,水利工程总拦洪比与小水库塘坝拦洪比的数值有所变化,但变化规律与上述步骤(1)得出的规律类似。

表 6 不同预报误差下的水利工程拦洪比

预报误差对应洪号	水利工程总拦洪比						小水库塘坝拦洪比							
	0	5%	-5%	10%	-10%	20%	-20%	0	5%	-5%	10%	-10%	20%	-20%
19930915	55.2	52.9	57.4	50.3	59.3	44.0	62.7	54.5	52.1	56.6	49.4	58.6	43.1	62.1
19930922	47.2	44.4	49.7	41.4	52.0	34.0	56.0	45.0	42.1	47.6	38.9	50.0	31.2	54.2
19960914	48.4	45.7	50.9	42.7	53.1	35.6	57.0	40.6	37.5	43.5	34.1	46.0	25.8	50.5
20001007	77.2	76.0	78.3	74.7	79.3	71.5	81.0							
20011002	87.2	86.6	87.8	85.8	88.4	84.0	89.4							
20060826	24.2	20.2	27.8	15.7	31.0	5.2	36.8	15.9	11.5	19.9	6.6	23.6	-5.1	29.9

4.3.3 水利工程对场次洪水径流量影响规律的合理性分析

小水库塘坝等水利工程大多是为了解决局部水资源问题而兴建的,在整个汛期阶段的运行不像大中水利工程那样有计划地按照调度规则运行。张喜峰等^[14-15]也认为小水库塘坝在汛期开始时由于水库存水在非汛期已经被消耗殆尽,当汛初降雨时急于补充水库蓄量,汛初很多场次洪水产流系数较低,甚至出现了只降雨不产流的情况。随着雨季的到

来,小水库塘坝蓄量增加逐渐蓄满,汛中拦蓄能力较弱,在大暴雨过程中出现主动泄流甚至垮坝的情况,造成暴雨洪水扩大化和极端化。到了汛末,如果降雨不连续而且雨量大到威胁小水库塘坝安全的情况下,为了兴利需要,大部分水利工程都会蓄水抬高库水位,而且越到后期,雨水稀少,这种作用越明显。综上所述,小水库塘坝对场次洪水径流量的影响体现在减弱小水,增强大水,给流域洪水预报和防洪安全都带来了不利影响。本文研究的 6 场洪水中,处于汛中的

20060826号洪水拦蓄比最少,其他处于汛末的5场洪水中;洪号为19960914的洪水降雨量最大为55.3mm,拦蓄比也较小;洪号为20001007的洪水降雨量为29mm,初始库容也较小为8702万m³,拦蓄比较大。由此可以看出本文的计算结果与前人研究的定性规律一致,因此得出的水利工程对径流影响规律是合理的。

5 考虑水利工程影响的洪水预报校正

由于所有遥感数据中,仅2006年的2景数据处于完整的汛期,并且相对应的小水库运行资料较全,因此选择该

时段进行洪水预报校正。20060909号洪水时的初始库容25740万m³,与19960914号洪水初始库容基本一致,都处在汛末。考虑到20060909降雨量较小,因此在19960914洪水拦蓄比40.7的基础上增加拦蓄比,取55%,校正后的预报值见表7。可以看出原预报方案预报径流量9396万m³,相对误差高达146.6%,校正后的径流量为4138万m³,相对误差减少到8.6%。20060826号洪水的洪水总量为2.02亿m³,原洪水预报方案的预报值为2.67亿m³,相对误差为31.8%,校正后的洪量为2.23亿m³,相对误差减少到10.1%。

表7 考虑水利工程影响洪水预报方案校正

Table 7 Adjustment of the (P+Pa)~R model for the flood on August 26, 2006 and September 9, 2006 with consideration of effects of hydraulic project

洪号	实测洪量 /10 ⁴ m ³	原方案预报值							校正后的预报值			
		P /mm	Pa /mm	P+Pa /mm	径流深 /mm	流域面积 /km ²	预报径流量 /10 ⁴ m ³	相对误差 (%)	拦洪量/10 ⁴ m ³		校正后的径 流量/10 ⁴ m ³	相对误差 (%)
								大中	小水库塘坝			
20060826	20236.6	73.8	37.5	111.3	23	11600	26680	31.8	2198.7	2190.9	22290.4	10.1
20060909	3809	17.1	49.3	66.4	8.1	11600	9396	146.6	90	5167	4138	8.6

6 结论与展望

本文基于遥感数据挖掘,从丰满II区水利工程实际运行资料中分析得出水利工程对次洪径流量的影响规律,并将其应用于丰满流域洪水预报中去,得出以下结论。

(1) 水利工程特别是人工控制性较差的中小水利工程运行情况很难把握。随着流域社会经济的发展,中小水库塘坝等水利工程数量庞大,其对洪水的拦蓄和放流影响了洪水预报的精度,给流域防洪安全和水资源管理带来诸多不确定性,而信息技术的发展能够一定程度上减小这种不确定性。通过遥感数据提取水利工程在洪水发生时的水面面积,可以得知洪水发生时这些水利工程的初始蓄水状态;

(2) 水利工程对场次洪水径流量的影响与水利工程初始蓄水状态、洪水发生阶段及降雨量有一定的关系。通过挖掘初步得出水利工程对径流的拦蓄规律为:汛中拦洪比小,汛末拦洪比大;初始库容越大,拦洪比越小,若初始库容相近,则汛末拦洪比大于汛初;对于汛末洪水,发生时间越晚,拦洪比越大。

(3) 应用水利工程的径流拦蓄规律对原洪水预报方案进行校正,两场洪水校正后的误差分别由校正前的146.6%和31.8%降低到8.6%和10.1%。

由以上结论可知,结合遥感数据获得水利工程在洪水中的影响规律能够在一定程度上反映水利工程对场次洪水径流量的影响。然而由于受到遥感数据时段长度和精度的限制,样本数量较少,因此本文的研究没有涉及到水利工程在大暴雨中垮坝放流的情况,拦蓄规律也较粗糙,满足条件用于验证的洪水场次仅有两场,这些问题都有待进一步研究。

参考文献(References):

[1] 张喜峰,王进,李文龙,等.丰满水库人类活动影响研究与洪水预报实践[J].大坝与安全,2009(4):34-38. (ZHANG Xifeng, WANG Jin, LI Weirong, et al. Influence of Human Activity and Flood Forecast for Fengman Dam [J]. Dam and Safety, 2009, (4): 34-38. (in Chinese))

[2] 黄强,蒋晓辉,刘俊萍,等.二元模式下黄河年径流变化规律研究[J].自然科学进展,2002,12(8):874-877. (HUANG Qiang, JIANG Xiaohui, LIU Junping, et al. Study on the Law of Annual Runoff Variation under the Duality Model in Yellow River [J]. Progress in Natural Science, 2002, 12(8): 874-877. (in Chinese))

[3] 刘红玉,李兆富.三江平原典型湿地流域水文情势变化过程及其影响因素分析[J].自然资源学报,2005,20(4):494-501. (LIU Hongyu, LI Zhaofu. Hydrological Regime Changing Process and Analysis of Its Influencing Factors in a Typical Wetland Watershed of the Sanjing Plain [J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(4): 494-501. (in Chinese))

[4] 任立良,张炜,李春红等.中国北方地区人类活动对地表水资源的影响研究[J].河海大学学报(自然科学版),2001,29(4):13-18. (REN Liliang, ZHANG Wei, LI Chunhong, et al. Impacts of Human Activities on River Runoff in North China [J]. Journal of Hehai University (Natural Sciences), 2001, 29(4): 13-18. (in Chinese))

[5] 李慧赞,张弛,王本德,等.基于模糊聚类的丰满上游流域降雨径流变化趋势分析[J].水文,2009,29(3):28-31. (LI Huiyun, ZHANG Chi, WANG Bende, et al. Analysis of Changing Trend of Rainfall and Runoff in Upstream of Fengman Watershed Based on Fuzzy Clustering [J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(3): 28-31. (in Chinese))

[6] 曹明亮,张弛,周惠成,等.丰满上游流域人类活动影响下的降雨径流变化趋势分析[J].水文,2008,28(5):86-89. (CAO Mingliang, ZHANG Chi, ZHOU HuiCheng, et al. Change Trend of Rainfall and Runoff in Upstream of Fengman Basin under Influence of Human Activities [J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(5): 86-89. (in Chinese))

[7] 雒文生,王祥三,宋星源,等.受水库群影响流域产流模型的研究[J].武汉大学学报(工学版),1990,23(1):43-50. (LUO Wensheng, WANG Xiangsan, SONG Xiruan, et al. Research on a Model of Runoff Yield in Basins Influenced by a Group of Reservoirs [J]. Engineering Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 1990, 23(1): 43-50. (in Chinese))

(下转第88页)

- Leaves[J]. Turbine Technology, 1998, 40(4): 235-238. (in Chinese))
- [4] 梁权伟, 王正伟, 方源. 考虑流固耦合的混流式水轮机转轮模态分析[J]. 水力发电学报, 2004, 23(3): 116-119. (LIANG Quanwei, WANG Zhengwei. Considering Fluid-Structure Coupled Modal Analysis of Francis Turbine Runner[J]. Journal of Hydroelectric Power, 2004, 23(3): 116-119. (in Chinese))
- [5] 李建锋, 刘小兵, 王宏伟, 等. 基于 ADINA 的混流式水轮机流固耦合分析[J]. 水力发电, 2010, 36(4): 67-69. (LI Jianfeng, LIU Xiaobing, WANG Hongwei. Based on ADINA Analysis of Francis Turbine Coupled Fluid-Solid[J]. Hydropower, 2010, 36(4): 67-69. (in Chinese))
- [6] 王征等. 流固耦合力学的数值研究方法的发展及软件应用概述[J]. 机床与液压, 2008, 36(4): 192-195. (WANG Zheng. Mechanics of Fluid-Solid Coupled Numerical Study on Development of Methods and Software Applications[J]. Machine with Hydraulic Pressure, 2008, 36(4): 192-195. (in Chinese))
- [7] Q. W. Liang a, C. G. Rodríguez a, E. Egusquiza, et al. Numerical Simulation of Fluid Added Mass Effect on a Francis Turbine Runner[J]. Computers & Fluids, 2007, 36(6): 110-118.
- [8] PENG Guangjie, WANG Zhengwei, YAN Zongguo, et al. Strength Analysis of a Large Centrifugal Dredge Pump Case[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(1): 321-328.
- [9] 雷凡. 水下柔体结构流固耦合动力效应研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011. (LEI Fan. Flexible Underwater Structure Study on Fluid-Solid Coupling Dynamic Effect[D]. Wuhan: Wuhan University, 2011. (in Chinese))
- [10] 宋学官, 蔡林, 张华. ANSYS 流固耦合分析与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012. (SONG Xueguan, CAI Lin, ZHANG Hua. ANSYS Engineering Example for Fluid-structure Coupling Analysis[M]. Beijing: China Water Power Press, 2012. (in Chinese))
- [11] Saeed Moaveni, Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS(second edition)[M]. 2005.
- [12] 庞强. 风力机结构组件的有限元模拟与优化设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2008. (PANG Qiang, Wind Machine Finite Element Simulation and Optimal Design of Structural Components[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008. (in Chinese))
- [13] 肖燕娟, 唐俊. 风力机翼型外形图的计算机辅助设计[J]. 电脑知识与技术, 2008, (5): 967-968. (XIAO Yanyuan, TANG Jun. Wind Airfoil Shape of the Computer Aided Design[J]. Computer Literacy and Technology, 2008, (5): 967-968. (in Chinese))
- [14] 司徒钧, 郑源, 赵振宙, 等. 基于 ANSYS 风力机塔架的结构计算分析[J]. 中国新能源, 2009, (53): 9-11. (SI Jiarjun, ZHENG Yuan, ZHAO Zhenzhou, et al. Based on ANSYS Structural Analysis of Wind Turbine Tower[J]. China New Energy, 2009, (53): 9-11. (in Chinese))
- [15] 苏丽杰, 郭星辉, 聂义勇. 一维流固耦合振动问题的有限元分析[J]. 机械设计与制造, 2004, (5): 84-85. (SU Lijie, NIE Yiyong, GUO Xing. One Dimensional Finite Element Analysis of Fluid-Structure Interaction Vibration[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2004, (5): 84-85. (in Chinese))

(上接第 83 页)

- [8] 雒文生, 王祥三, 宋星源, 等. 受水利水电工程影响流域产流预报方法的探讨[J]. 水电能源科学, 1990, 8(8): 242-250. (LUO Wen sheng, WANG Xiang san, SONG Xir yuan, et al. The Approach of Forecast Method of Yield Runoff In Basins Influenced by Hydraulic and Hydroelectric Engineering[J]. International Journal HYDROELECTRIC ENERGY, 1990, 8(8): 242-250. (in Chinese))
- [9] 冯相明. 黄河三花区间水利工程对洪水、径流的影响[J]. 人民黄河, 1994, 3(3): 9-11. (FENG Xiang ming. The Influence of Flood and Runoff by The Yellow River Sanhua interval Hydraulic engineering [J]. Yellow River, 1994, 3(3): 9-11. (in Chinese))
- [10] 郭生练, 王金星, 彭辉, 等. 考虑人类活动影响的丰满水库洪水预报方案[J]. 水电能源科学, 2000, 18(2): 14-17. (GUO Shenglian, WANG Jinxing, PENG Hui, et al. A Flood Forecast Model Taking into Account the Human Activity Impact [J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2000, 18(2): 14-17. (in Chinese))
- [11] 曹明亮, 周惠成, 张弛, 等. 基于遥感数据的小水库塘坝拦洪计算方法研究与应用[J]. 中国科学, 2011, 41(8): 1063-1069. (CAO Mingliang, ZHOU Huicheng, ZHANG Chi, et al. Research and Application of Flood Detention Modeling for Ponds and Small Reservoirs Based on Remote Sensing Data[J]. Sci China Ser E Tech Sci, 2011, 41(8): 2138-2144. (in Chinese))
- [12] 水利部松辽水利委员会. 东北地区实用洪水预报方案[R]. 2003. (Songliao Water Resources Commission. Northeast Practical Flood Forecasting Program[R]. 2003. (in Chinese))
- [13] 彭勇, 韩永日, 李文龙, 等. 基于 WebService 的丰满水库防洪调度系统[J]. 水电能源科学, 2009, 27(4): 46-49. (PENG Yong, HAN Yongri, LI Wenlong, et al. Development of Fengman Reservoir Flood Control Decision Support System Based on Web Service[J]. Water Resources and Power, 2009, 27(4): 46-49. (in Chinese))
- [14] 房国忠, 王永峰, 范永思, 等. 丰满水库汛限水位的变迁及思考[J]. 大坝与安全, 2009, (4): 31-34. (FANG Guozhong, WANG Yongfeng, FAN Yongsi, et al. Change of Flood Control Level of Fengman Reservoir[J]. Dam and Safety, 2009 (4): 31-42. (in Chinese))
- [15] 尤芳, 袁帅. 丰满流域可能最大暴雨与可能最大洪水分析研究[J]. 吉林水利, 2008, (11): 33-35. (YOU Fang, Yuan Shuai. Analysis and Research for the Probable Maximum Flood and Storm in Fengman Basin[J]. Jilin Water Resources, 2008, (11): 33-35. (in Chinese))