

包神铁路黄河大桥冰凌开河期实体模型试验

于守兵,顾志刚,侯志军

(黄河水利科学研究院泥沙研究所,河南 郑州 450003)

摘要:为了研究包神铁路黄河大桥建成后在冰凌开河期对冰凌水体的壅高程度,基于冰流重力相似、冰流阻力相似、冰流量相似、浮冰运动相似等冰凌运动相似原理,采用添加少量石膏粉的石蜡作为模型冰,进行实体模型试验。试验结果表明:将模型冰块制作成不规则形状能够较好地模拟桥梁附近的卡冰现象;当开河流量为 $1\,200\text{ m}^3/\text{s}$ 、冰流密度为80%时,拟建桥梁、现状桥梁工况的上游水位壅高值分别为1.36 m和2.21 m;拟建桥梁的主跨比现状桥梁增加了近1倍,桥位断面排冰过流能力大大增强。

关键词:冰凌;开河流量;冰流密度;实体模型试验;包神铁路黄河大桥

中图分类号:TV131.61;TV882.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)04-0057-05

Ice physical model of Baoshen Railway Bridge across Yellow River in thawing period//YU Shoubing, GU Zhigang, HOU Zhijun(*Sediment Research Division, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China*)

Abstract: To study the effect by the Baoshen Railway Bridge to be built across the Yellow River on water level in thawing period, the physical model test has been applied according to similarities of ice flow gravity, ice flow resistance, ice flow volume, floating ice dynamics, using paraffin mixed with a little gypsum powder as model ice. The results show that the model ice with irregular shape can be used effectively to simulate blocking around the bridge. Additionally, under the conditions of $1200\text{ m}^3/\text{s}$ discharge and 80% ice flow density, backwater heights before the bridge to be built and the current bridge are 1.36 m and 2.21 m, respectively. Furthermore, the results also show that the bridge to be built has doubled main span compared to the current bridge, and therefore has stronger ice-passing ability.

Key words: ice; discharge at thawing period; ice flow density; physical model test; Baoshen Railway Bridge across Yellow River

黄河内蒙古河段在冬季大部分时间为稳定封冻河段,在开河期由于上下游温差较大常常出现凌汛^[1]。凌汛洪水具有凌峰流量小而水位高、流量沿程递增等特征,严重时形成冰塞或冰坝,迫使水位迅速上涨,造成堤防漫决^[2-3]。因此,应用水力学和热力学原理预报各种冰情要素是寒冷地区水文预报的一个重要课题^[4-7]。凌汛的形成受热力、动力和河势等因素的影响,而且它们彼此相互联系、相互制约,故实体模型试验成为研究冰凌运动的一个重要手段^[8-10]。宋安等^[11-12]采用尿素冰为主体的低温冷冻冰,进行了一系列冰荷载与过冰能力试验,发现边界条件对冰荷载具有较大影响。

水工建筑物的过冰和防凌问题主要研究开河期的冰凌运动,热力学的影响可以忽略不计^[13]。低温冰池试验要求的技术条件较高且试验成本较高,故

以工业石蜡为模型冰的常温试验更多地应用于工程研究。陈储军^[14]在研究水电站导流底孔的过冰能力时提出了冰流量、冰块下潜运动以及堆冰溃决的相似条件;孙肇初^[15]提出了水流条件、浮冰运动特性以及冰流量的相似条件;白世录等^[16]从浮冰运动与推移质泥沙运动规律相似出发提出开河期和流凌期两种尺度冰块的冰流量关系式。目前还难以进行严格满足各种相似条件的冰凌实体模型试验,通常根据研究目的进行适当简化。

1 工程概况

包神铁路是神府煤田外运煤炭的重要通道,近年来经济形势的发展促使运输需求日益增长,拟实施包神铁路黄河大桥扩建工程。该工程位于当前包神铁路黄河大桥上游约30 m处,拟建桥梁长3 073 m。现

状桥梁主跨为 64 m, 扩建后的主跨为 128 m。桥位河段为黄河防凌重点河段, 其上下游附近分布有包西铁路黄河特大桥、包头黄河铁路大桥、包茂高速 1 号公路桥、包茂高速 2 号公路桥、包头自来水公司取水口、达旗电厂取水口等诸多建筑物。因此, 有必要通过冰凌实体模型试验对桥位河段的冰凌运动进行研究^[17]。拟建桥梁位于黄断(黄河断面的简称, 下同)77 附近, 由于试验的目的主要是研究桥梁对冰凌水体的壅高程度, 选择桥位上游 8.4 km 至下游 3.3 km(即黄断 74~78)、总长为 11.7 km 的河段为试验范围, 模型试验平面布置如图 1 所示。

2 冰凌模型试验设计

2.1 冰凌运动相似原理

冰凌运动不仅是固-液两相水力学问题, 而且还是热力学问题, 因此理论上只有当液体相、固体相以及热力学性质都相似时, 才能达到冰凌运动相似。由于开河期的冰凌运动主要是水力学问题, 一般认为冰凌运动相似主要满足冰流重力相似、冰流阻力相似、冰流量相似、浮冰运动相似、冰块下潜相似、堆冰溃决相似^[13-15], 具体表达式如下:

冰流重力相似 $\lambda_v = \sqrt{\lambda_H}$ (1)

冰流阻力相似 $\lambda_v = \frac{1}{\lambda_n} \lambda_H^{2/3} \lambda_J^{1/2}$ (2)

冰流量相似 $\lambda_{Q_i} = \lambda_\eta \lambda_L \lambda_H \lambda_v$ (3)

浮冰运动相似 $\lambda_{p'} = 1$ (4)

冰块下潜相似 $\lambda_{v_c} = \lambda_{(p-p')/\rho}^{1/2} \lambda_L^{1/2}$ (5)

堆冰溃决相似 $\frac{\lambda_v^2}{\lambda_{R_i} \lambda_c^2} = 1$ (6)

式中: λ_v 为流速比尺; λ_L 为水平比尺; λ_v 为垂直比尺; λ_n 为糙率比尺; $\lambda_{p'}$ 为冰块密度比尺; λ_η 为冰流密度比尺; λ_{Q_i} 为冰流量比尺; λ_{v_c} 为冰块下潜临界流速比尺; λ_{R_i} 为冰块极限抗弯强度比尺; λ_J 为比降比

尺; λ_c 为谢才系数比尺。

目前, 严格地满足上述相似条件仍难以做到。对于桥梁等涉水建筑物的防洪评价问题, 主要研究建筑物上游的壅水问题, 因此冰凌运动相似以满足冰流重力相似、冰流阻力相似、冰流量相似和浮冰运动相似为主(式(1)~(4))。冰流阻力相似主要表现在沿程水位的壅高相似。浮冰运动相似要求模型冰和原型冰的密度相同。依据试验要求及场地条件确定模型水平比尺 $\lambda_L=280$, 模型河段总长约 41.8 m。考虑到模型水流的深度应满足表面张力及试验量测的要求, 取垂直比尺 $\lambda_H=60$ 。当原型流量为 600~1 200 m³/s 时, 无冰时桥位断面最大水深为 2.7~3.6 m, 模型水深为 4.5~6.0 cm, 满足不受表面张力干扰的要求, 其他主要比尺见表 1, 其中 λ_Q 、 λ_t 分别为流量比尺和时间比尺。

表 1 冰凌实体模型试验比尺

比尺	数值	依据
λ_L	280	试验场地要求
λ_H	60	满足变率限制
λ_v	7.75	重力相似
λ_Q	130 200	$\lambda_Q = \lambda_L \lambda_H \lambda_v$
λ_n	0.81	阻力相似
λ_t	36	$\lambda_t = \lambda_L / \lambda_v$
$\lambda_{p'}$	1	浮冰运动相似
λ_η	1	冰流密度相同
λ_{Q_i}	130 200	冰流量相似

2.2 模型冰的制作

制作模型冰的依据是天然原型冰的物理化学性质, 其相似性直接影响到模型试验结果的可靠性。国际上曾经出现和目前正在使用的模型冰主要有盐水冰、尿素冰、细颗粒冰(FG 冰)和乙醇、脂肪族洗涤剂 and 白糖掺合冰(EG/AD/S 冰)。本文模型试验采用添加少量石膏粉的石蜡作为模型冰, 其密度为 910 kg/m³, 与天然冰的密度 917 kg/m³ 十分接近, 满足浮冰运动相似要求^[15]。

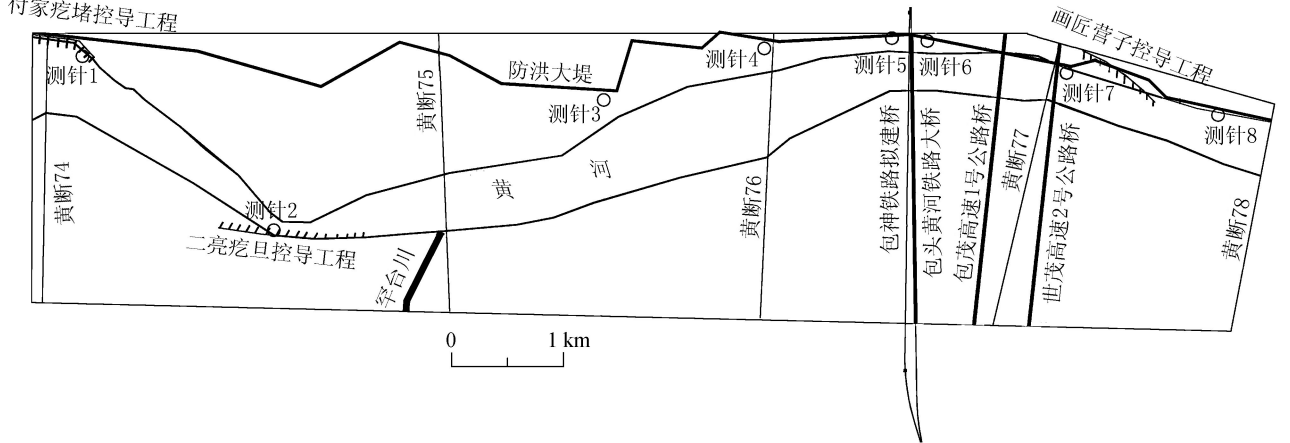


图 1 冰凌实体模型试验平面布置

根据已有经验,若将模型冰做成规则的圆形或方形,则不利于冰塞或冰坝形成^[18]。为了较准确地模拟天然冰凌运动特性,试验过程中将模型冰块制作成不规则形状,其边角极易勾结形成相对稳定结构,与实际情况较为一致。随着来冰量的增加,一旦出现较大冰块触岸或遇滩“搁浅”,便可能与上游的浮冰“黏连”叠加,由小到大,由薄而厚,冰坝体不断被充实扩大,使模型冰聚积形成冰塞,致使河道过流量减小,逐步形成横亘于河道的冰坝。

2.3 模型冰的尺寸

黄河内蒙古河段冰凌尺寸的现场观测资料很少,而距该河段最近且具有较系统的观测资料的是石嘴山水文站。1986—2003 年凌汛期冰情监测结果表明:冰块长度为 5~100 m,宽度为 3~200 m;平均长度为 25 m,平均宽度为 17 m。冰体面积为 20~6000 m²,其中仅在 1986—1987 年、1987—1988 年和 1996—1997 年冰体面积大于 1500 m²,其他年份均在 600 m² 以下。

龙羊峡等水库的运用对流量和水温有较大的调节作用,使得宁蒙河段的冰流量有较大减少,冰块尺度也相应减小。另外,石嘴山位于桥位河段上游超过 400 km 的位置,开河期冰块在运动过程中会不断发生崩裂解体,故采用的原型冰体面积为 200~600 m²。

1986—2003 年最大冰厚资料统计结果表明,河冰最大冰厚为 0.20~0.50 m,一般厚度为 0.10~0.20 m;岸冰最大厚度为 0.30~0.50 m。

模型冰块的长度和宽度控制在 0.03~0.15 m 之间,厚度控制在 0.004~0.011 m 之间。天然冰块的尺寸大小不一,存在一定的级配。但是目前缺乏现场观测的级配资料,根据以往的模型经验,平面尺寸为 0.03~0.05 m、0.05~0.10 m 和 0.10~0.15 m 的模型冰比例分别取 30%、40%、30%^[18]。

3 冰凌模型试验结果

3.1 率定试验

模型进口边界在黄断 74 上游侧,出口边界在黄断 78 下游侧。防洪大堤、付家疙堵、二亮疙旦、画匠营子控导工程、拟建大桥的平面位置和高程根据设计方案确定。断面高程采用 2008 年实测大断面资料,并参考卫星图片资料进行修正。包茂高速 1 号公路桥、包茂高速 2 号公路桥均为现状条件。包神铁路黄河大桥采用目前正在使用的现状大桥。

根据三湖河口水文站资料统计,开河期当日流量的多年平均值为 818 m³/s,最大流量为 1967 年的 2220 m³/s,最小流量为 2003 年的 428 m³/s^[8]。1986 年以来,黄河内蒙古河段不断萎缩,河段最小

平滩流量降低至 1000 m³/s^[19]。对开河期桥梁对冰凌水体的壅高程度而言,由于滩地过流的增加,漫滩时的壅高值小于非漫滩时的壅高值。另外,水库的调节作用使得蓄水量的释放变得均匀,从而减小了开河期的流量变幅,因此选择 600 m³/s、900 m³/s、1200 m³/s 这 3 种开河流量作为试验典型流量,相应地,无冰时桥位断面最大水深分别为 2.7 m、3.3 m 和 3.6 m。

一般而言,开河的标志为超过 50% 的冰盖破碎并开始移动^[10]。冰块在向下游移动的过程中,随着水流条件和封冻条件的不同,冰流密度处于不断变化中。根据现场观测,一般最大的冰流密度可达到 80%,选择该值作为率定试验的冰流密度。在试验过程中发现,将模型冰块制作成不规则形状,在桥梁上游冰块易相互搭接,较好地模拟了壅冰情况,流量为 900 m³/s 时大桥附近的卡冰情况如图 2 所示。



图2 大桥附近的卡冰情况

三湖河口水文站距离试验河段最近且具有系统的凌汛期水位观测资料,其 1960—2005 年凌汛期水位变化如图 3 所示。由图 3 可以看出,冰凌期水位壅高值为 1.30~2.20 m,平均值约为 1.6 m;在 3 种开河流量条件下平均水位壅高值分别为 1.42 m、1.65 m 和 2.08 m^[20]。

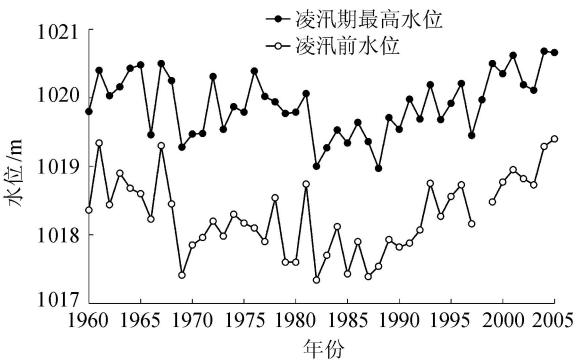


图3 三湖河口水文站历年凌汛期水位变化

试验过程中,在 3 种开河流量条件下,水位达到稳定后的壅高值分别为 1.25 m、1.79 m 和 2.21 m,这与实测的冰凌壅水高度基本一致。

3.2 试验结果及分析

模型试验有现状桥梁、拟建桥梁、双桥(施工期两桥并存)3种桥梁工况,有0(无冰)、20%和80%3种冰流密度。

对于不同的冰流密度,各种桥梁工况下卡冰和沿程水位变化趋势一致,当开河流量为 $900\text{ m}^3/\text{s}$,双桥桥梁工况下冰流密度为0、2%、8%时沿程水位变化如图4所示。当冰流密度为20%时,桥位河段冰凌下泄顺利,包神铁路桥和两个公路桥都不会卡冰;当冰流密度为80%时,3种开河流量条件下桥位河段都出现卡冰情况,水位壅高约2 m。

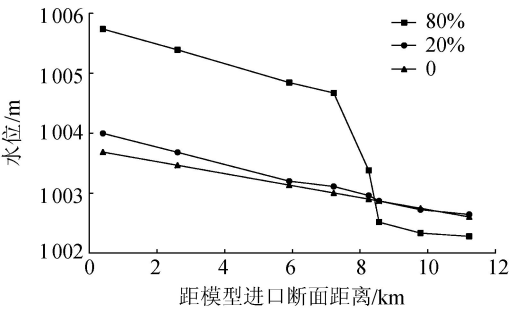


图4 双桥工况下不同冰流密度时沿程水位变化

当开河流量为 $900\text{ m}^3/\text{s}$ 、冰流密度80%时,双桥工况由于两桥并存对冰凌和水流的阻力要大于现状桥梁工况,故引起的水位壅高值也大于现状桥梁工况时的壅高值。

对于不同的开河流量,每种桥梁工况的卡冰和沿程水位变化趋势一致,当开河流量为 $1200\text{ m}^3/\text{s}$ 、冰流密度为80%时,拟建桥梁、现状桥梁与双桥桥梁工况上游(黄断76)的水位分别为1004.56 m、1005.41 m、1005.63 m,相应的壅高值分别为1.36 m、2.21 m、2.43 m,各种工况的沿程水位变化如图5所示。现状桥梁和拟建桥梁工况的桥位断面都会出现卡冰现象。拟建桥梁的主跨由现状桥梁的64 m增至128 m,桥位断面排冰过流能力大大增强,其上游壅冰、壅水高度较其他两种有明显下降。另外在双桥和现状桥梁工况下,由于开河流量大于河段平滩流量,再加上冰凌和桥梁的阻水作用,滩地漫

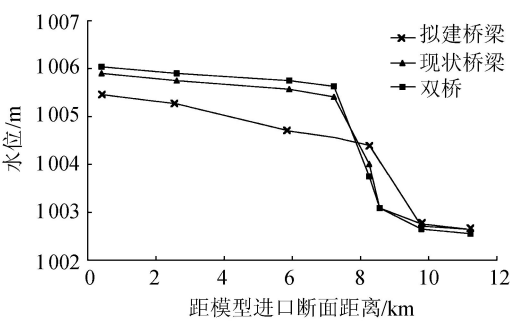


图5 3种工况下冰流密度为80%时沿程水位变化

流起到一定的分流作用,这使得两种工况下沿程水位差别不大。

4 结论

a. 对于桥梁等涉水建筑物的防洪影响评价问题,主要研究建筑物上游的壅水问题,因此开河期冰凌运动相似以冰流重力相似、冰流阻力相似、冰流量相似和浮冰运动相似为主。

b. 采用添加少量石膏粉的石蜡作为模型冰,其密度与天然冰的密度十分接近,满足浮冰运动相似要求;将模型冰块制作成不规则形状,能较好地模拟卡冰现象。

c. 当开河流量为 $1200\text{ m}^3/\text{s}$ 、冰流密度为80%时,拟建桥梁、现状桥梁与双桥工况的上游水位壅高值分别为1.36 m、2.21 m、2.43 m;拟建桥梁的主跨由现状桥梁的64 m增至128 m,桥位断面排冰过流能力大大增强。

参考文献:

[1] 可素娟,王敏,饶素秋,等. 黄河冰情研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社,2005.

[2] 蔡琳. 黄河防凌工作50年[J]. 人民黄河,1996(12): 1-7. (CAI Lin. Fifty years of ice flood protection in the Yellow River[J]. Yellow River, 1996(12): 1-7. (in Chinese))

[3] 牛运光. 凌汛危害及其防护措施[J]. 人民黄河,1997(2): 9-13. (NIU Yunguang. Harmfulness of ice flood and protection measures[J]. Yellow River, 1997(2): 9-13. (in Chinese))

[4] 茅泽育,吴剑疆,余云童. 河冰生消演变及其运动规律的研究进展[J]. 水力发电学报,2002,1(专刊): 153-161. (MAO Zeyu, WU Jianjiang, SHE Yuntong. River ice processes[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2002, 1(special issue): 153-161. (in Chinese))

[5] 徐晶,冀鸿兰,张宝森,等. 基于可变模糊综合分析的冰凌预测模型[J]. 水利水电科技进展,2011,31(3): 6-8, 26. (XU Jing, JI Honglan, ZHANG Baosen, et al. Ice forecast model based on variable fuzzy synthetic analysis[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(3): 6-8, 26. (in Chinese))

[6] 冀鸿兰,张傲姝,高瑞忠,等. 黄河内蒙古段开河日期预报模型及应用[J]. 水利水电科技进展,2012,32(2): 42-45, 88. (JI Honglan, ZHANG Aoda, GAO Ruizhong, et al. Application of the break-up date prediction model in the Inner Mongolia Reach of the Yellow River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(2): 42-45, 88. (in Chinese))

[7] 冀鸿兰,卞雪军,徐晶. 黄河内蒙古段凌流预报可变模糊聚类循环迭代模型[J]. 水利水电科技进展,2013,33

- (4): 14-17. (JI Honglan, BIAN Xuejun, XU Jing. Variable fuzzy clustering loop iteration model for ice-run forecast in Inner Mongolia reach of Yellow River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(4): 14-17. (in Chinese))
- [8] 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 Huiming, QIN Fuxing, SHEN Guochang, et al. Ice regime characteristics in the Ningxia-Inner Mongolia reach of Yellow River [J]. Advances in Water Sciences, 2007, 18(6): 893-899. (in Chinese))
- [9] 冯国华, 朝伦巴根, 闫新光. 黄河内蒙古段冰凌形成机理及凌汛成因分析研究[J]. 水文, 2008, 28(3): 74-76. (FENG Guohua, CHAOLUN Bagen, YAN Xinguang. Analysis of ice such formation mechanism and ice flood causes of Yellow River in Inner Mongolia [J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(3): 74-76. (in Chinese))
- [10] 孟闻远, 郭颖奎, 王璐. 黄河冰凌特点及防治措施[J]. 华北水利水电学院学报, 2010, 31(6): 27-29. (MENG Wen Yuan, GUO Yingkui, WANG Lu. Ice flood characteristics and prevention measures in Yellow River [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2010, 31(6): 27-29. (in Chinese))
- [11] 宋安, 汪震宇, 史庆增, 等. 冰模拟实验与水利工程[J]. 水利水电技术, 2005, 36(7): 140-143. (SONG An, WANG Zhenyu, SHI Qingzeng, et al. Ice model test and hydraulic engineering [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(7): 140-143. (in Chinese))
- [12] 宋安, 范晓雷, 史庆增, 等. 闸墩冰荷载及过冰能力的模型试验研究[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1121-1126. (SONG An, FAN Xiaolei, SHI Qingzeng, et al. Model test for ice-force acting on sluice piers and ice-passing capacity [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(9): 1121-1126. (in Chinese))
- [13] 陈储军. 利用模型试验解决工程冰凌问题综述[J]. 水文科技信息, 1997, 14(4): 1-6. (CHEN Chujun. Review on solution to ice engineering problem by model test [J]. Hydrological Scientific Information, 1997, 14(4): 1-6. (in Chinese))
- [14] 陈储军. 白山水电站导流底孔排冰的试验研究[J]. 泥沙研究, 1983(3): 42-52. (CHEN Chujun. Experimental study of ice sluicing through the division tunnel of the Baishan hydroelectric power project [J]. Journal of Sediment Research, 1983(3): 42-52. (in Chinese))
- [15] 孙肇初. 试论浮冰水力模型的相似律[J]. 人民黄河, 1985(1): 3-7. (SUN Zhaochu. On the law of similarity of hydraulic models of drift ice [J]. Yellow River, 1985, 1: 3-7. (in Chinese))
- [16] 白世录, 张力忠, 于荣海. 试论冰水力学模型的相似律[J]. 泥沙研究, 1997, 3: 66-70. (BAI Shilu, ZHANG Lizhong, YU Ronghai. A preliminary study on similarity of ice hydromechanic model [J]. Journal of Sediment Research, 1997, 3: 66-70. (in Chinese))
- [17] 田勇, 于守兵, 顾志刚. 包神铁路黄河大桥改扩建工程实体模型试验[R]. 郑州: 黄河水利科学研究院, 2012.
- [18] 王普庆. 大准增二线黄河特大桥桥位河段冰凌实体模型试验报告[R]. 郑州: 黄河水利科学研究院, 2007.
- [19] 侯素珍, 常温花, 王平, 等. 黄河内蒙古河道萎缩特征及成因[J]. 人民黄河, 2007, 29(1): 25-26. (HOU Suzhen, CHANG Wenhua, WANG Ping, et al. Characteristics and cause of formation of channel atrophy at Inner Mongolia section of the Yellow River [J]. Yellow River, 2007, 29(1): 25-26. (in Chinese))
- [20] 侯素珍. 内蒙古河段合理主槽过流能力及相应水沙条件[R]. 郑州: 黄河水利科学研究院, 2009.
- (收稿日期: 2013-07-05 编辑: 周红梅)

(上接第 38 页)

- [10] SHINOHARA Y, KUMAGAI T O, OTSUKI K, et al. Impact of climate change on runoff from a mid-latitude mountainous catchment in central Japan [J]. Hydrological Process, 2009, 23(10): 1418-1429.
- [11] TRIANA E, LABADIE J W, GATES T K. River Geo-DSS for agro-environmental enhancement of Colorado's Lower Arkansas River Basin, part I: model development and calibration [J]. Journal of Water Resources Planning and Management-asce, 2010, 136(2): 177-189.
- [12] GENGEBACH M F, WEIKARD H P, ANSINK E. Cleaning a river: an analysis of voluntary joint action [J]. Natural Resource Modeling, 2010, 23(4): 565-590.
- [13] 熊永兰, 王莉亚, 张志强, 等. 欠发达地区发展研究的国

际态势分析[J]. 科学观察, 2012(6): 38-45. (XIONG Yonglan, WANG Liya, ZHANG Zhiqiang, et al. Analysis of the international research trend of the less-developed areas [J]. Science Focus, 2012(6): 38-45. (in Chinese))

(收稿日期: 2013-07-10 编辑: 周红梅)

