

二维水流模型在滹沱河高标准行洪区防洪评价中的应用

王中华

(河北省石家庄水文水资源勘测局, 石家庄 050051)

摘要: 沿水深对三维雷诺方程进行莱布尼兹积分得到二维非恒定流运动方程, 据此建立滹沱河洪水演进数学模型。根据研究区边界条件及洪水标准, 采用合适的水动力学方法, 对河道行洪和实时洪水水位进行了计算, 并考虑了模型区内微地形的影响。在动边界处理时, 采用数组跟踪的方法, 提高了计算效率。利用滹沱河“96·8”洪水资料对模型进行了验证, 模拟水位成果与实测资料吻合较好。在此基础上, 模拟了不同标准行洪条件下, 滹沱河行洪区内高尔夫球场建设前后的洪水形势, 较好地反映了建设项目对河道行洪的影响。模拟结果表明该模型设计合理, 具有一定可靠性和实用性。

关键词: 滹沱河; 高尔夫球场; 数学模型; 应用

中图分类号: TV 124 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2013)04-0031-04

Application of Two dimensional Mathematical Flow Model in the Flood Control Impact Assessment for Construction Project in High Standard Flood Diversion Area of Hutuo River

WANG Zhong-hua

(Shijiazhuang Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Hebei Province, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: The Leibniz integral was performed on the three dimensional Reynolds equation along the water depth to obtain the two dimensional unsteady flow equation, which was used to develop the flood routing mathematical model in the Hutuo River. Based on the boundary conditions, flood standards, and the effects of tiny terrain in the study area, suitable water dynamics method was used to calculate the flood discharge and real time flood level. The method of array tracking was applied in the process of moving boundary to improve the computational efficiency. The “96·8” flood data of the Hutuo River were used to verify the model, and the results showed good agreement between the simulated and measured data. On this basis, the flood situations before and after the golf course construction were simulated in the flood diversion area of the Hutuo River under the flood discharge conditions with different standards, which can characterize the impacts of the construction project on the flood discharge. The simulation results indicated that the model design is reasonable and the model has a certain reliability and practicability.

Key words: Hutuo River; golf course; mathematical model; application

依据《中华人民共和国水法》、《中华人民共和国河道管理条例》、《河北省河道管理范围内建设项目防洪评价报告编制技术大纲》(试行)等有关法律、法规的要求, 河道管理范围内的建设项目应进行防洪评价, 建设项目实施前后的洪水水位及流场计算是防洪评价的主要内容之一。评价方法通常是根据实际情况, 选用一维或二维数学模型进行计算。一维数学模型计算方法简单、实用, 在山区河道可获得较高精度的计算结果, 但在平原区河流超标准行洪区, 由于洪水具有明显的二维流特点, 因此利用一维数学模型很难取得良好的效果, 此时应采用二维水流数学模型。二维模型可以较好地模拟平原区洪水的演进过程, 准确地计算出不同地点的洪水

位、淹没水深、流速、流向等水力要素, 为建设项目的行洪影响评价提供支撑。

本文拟建立滹沱河二维水流数学模型, 利用模型计算结果, 对滹沱河行洪区内高尔夫球场建设项目的河道行洪影响进行评价。

1 项目情况

石家庄滨河生态园高尔夫练习场地处藁城市境内, 位于机场路西侧滹沱河规划右堤以南的高标准洪水行洪滩地上, 南距石黄高速 1 800 m。石黄高速是石家庄市城市防洪堤, 防洪标准为 200 年一遇。该工程建设规模为国际标准 18 洞

收稿日期: 2012-11-27 修回日期: 2013-07-15 网络出版时间: 2013-07-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130728.1310.012.html>

作者简介: 王中华(1963-), 男, 河北藁城人, 高级工程师, 主要从事水资源分析、防洪影响评价等工作。E-mail: sjzwzh2004@163.com

高尔夫球场,总占地面积 1 213 519 m²,场区内地形起伏较大。

项目区附近现状河道宽约 6 036 m,其中主河槽宽 700~800 m,深 3 m 左右。河道左岸现有堤防,高 1.5~3 m,顶宽 4 m 左右,右岸以石黄高速公路为界。项目南侧约 300 m 为南堤埝,高 2.0 m 左右。工程附近河底平均比降 0.5‰,河道内有沙坑分布,主槽偏向左岸,右滩地比较宽阔,河滩树林及高杆作物密布,高滩地多垦为农田,且分布有大小不一的临时建筑物,秋季高杆作物及林木对漫滩洪水阻滞严重。

2 二维水流模型

2.1 基本控制方程

项目区坡面流水深较小,水力要素沿水深分布变化不大,取水深平均的二维控制方程可以较好地反映这类水流的运动特征。本文所采用的二维水流运动方程是沿水深对三维雷诺方程进行莱布尼兹积分所得,并以混长紊流模型求解紊动切应力。该模型适合较大范围洪泛区的洪水数值模拟,能较好地反映水深、水位、流速、流态、流势在每一位置、每一时刻的变化情况,可较全面模拟计算区域内水流运动过程。

模型控制方程由水流连续方程与水流运动方程组成,简述如下。

水流连续方程:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial uH}{\partial x} + \frac{\partial vH}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

水流运动方程:

$$\frac{\partial uH}{\partial t} + \beta \frac{\partial uuH}{\partial x} + \beta \frac{\partial uvH}{\partial y} = -g \frac{uH \sqrt{(u^2 + v^2)}}{C^2} - gh \frac{\partial \xi}{\partial x} + H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial vH}{\partial t} + \beta \frac{\partial uvH}{\partial x} + \beta \frac{\partial vvH}{\partial y} = -g \frac{vH \sqrt{(u^2 + v^2)}}{C^2} - gh \frac{\partial \xi}{\partial y} + H \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

式中: ξ 为水位(m); H 为总水深(m); u 、 v 为 x 、 y 向水深平均流速(m/s); C 为谢才系数, $C = \frac{1}{n} R^{2/3}$; n 为糙率; g 为重力加速度(m/s²); β 为水深平均涡黏系数, $\beta = \lambda_* H$, $\lambda_* = 1.0$;

μ_* 为摩擦流速, $\mu_* = \frac{\sqrt{g\mu}}{C}$; β 为水深平均对流项修正系数。

2.2 数值计算格式

利用控制容积离散方法(FVM)与交替隐式方法(ADI)对控制方程进行离散。控制方程物理变量的网格布置方式与控制容积的分布见图 1。

2.3 初始条件及边界条件

(1) 初始条件。对于给定的计算区域,在时间 $t = 0$ 时,令

$$\xi|_{t=0} = \xi_0(x, y)$$

$$u|_{t=0} = u_0(x, y)$$

$$v|_{t=0} = v_0(x, y)$$

(2) 进口边界条件。进口边界条件,给出进口开边界的流量过程或水位:

$$\xi(x, y, t) = \xi^{pb}(x, y, t)$$

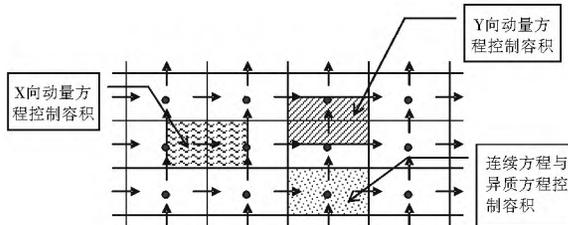


图 1 控制方程控制容积示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the control volume of governing equations

$$u(x, y, t) = u^{pb}(x, y, t)$$

$$v(x, y, t) = v^{pb}(x, y, t)$$

$$Q(t) = Q^{pb}(t)$$

式中: ξ^{pb} 、 u^{pb} 、 v^{pb} 、 Q^{pb} 分别为开边界上已知的水位或流速分量以及流量,根据计算区域以上的产汇流模型计算或由实测水文资料确定。

(3) 出口边界条件。出口开边界条件有两类,一类是自然开边界,主要是经下边界或侧边界出流的河流(或坡面),可按实测水文资料(水位-流量关系)确定。如无实测资料,则按附近河道纵坡,以均匀流(或坡面流)考虑。另一类是修建在下边界上的过水建筑物如公路桥、涵。这需要按相应的桥、涵泄流公式进行控制。

(4) 动边界处理。在计算区域内随着水流运动,洪水的纵横向传播发展,水边界也在不断变化,因此需要进行动边界处理。常见的方法有窄缝法、时间分段法、水位分段法。本次模型采用了一种新的思想,采用水边界全区自动跟踪法。该方法首先将最大可能的淹没范围包围在计算域内,设置一个跟踪指标数组 $Iwet()$ 。在计算过程中,由计算单元内的水深来判断该单元是否已淹没或露出,即 $Iwet()$ 应该赋 0 还是赋 1(0 表示露出,为陆地;1 表示淹没,为应计算的水域),凡是陆地单元均不纳入计算范围。采用干湿边界法进行干湿单元的转换。这种动边界处理方法能为程序智能的实现创造条件,尤其适合淹没及出露现象频繁的水域,计算所得到的流场更为合理,并可提高计算效率。

(5) 计算区域内的过水建筑物。模型区域内有高速公路、等级公路等穿过,将形成阻水建筑物,而公路设置的桥梁、通道等成为洪水向下游演进的通道。这些过水部分也可分为两类,一类是跨越多个网格单元的大型桥梁,可以作为自然过流考虑;另一类是小桥、通道,过水断面尺寸与网格单元相比相对较小,只能以嵌入的泄水建筑物考虑。其泄流能力以相应的水力学计算公式控制,将计算公式与模型水流方程联立求解,进而达到建筑物上、下游流场耦合处理。

根据本地区过水建筑物特征,采用下述计算方法。

a. 无压临界过流水力计算:

$$Q = M_1 b H_0^{3/2}$$

式中: M_1 为流量系数,小桥: $M_1 = 1.31 \sim 1.38$,涵洞: $M_1 = 1.34 \sim 1.54$; B 为桥孔净宽(m); H_0 为桥前总水头(m)。

b. 有压过流水力计算:

$$Q = \epsilon \omega \sqrt{2g(H_0 - h_t)}$$

式中: ω 为桥、涵洞深断面面积(m²); H_t 为桥涵净高(m); ϵ 为收缩系数,小桥: $\epsilon = 0.80 \sim 0.90$,涵洞: $\epsilon = 0.85 \sim 0.95$; φ 为

流速系数, 小桥: $\varphi = 0.85 \sim 0.90$, 涵洞: $\varphi = 0.80 \sim 0.90$ 。

(6) 内部边界处理。根据模型区内堤防、公路等高度及标准不同, 内部边界分为三类, 一是不透水边界, 在不考虑渗透的情况下, 可以认为陆地边界上法向速度为零, 如高速公路, 设计标准下的堤防; 二是可漫水但不溃决的边界等, 此类边界考虑其漫水, 但不考虑其溃决; 三是标准相对较低的堤防, 当发生该堤防标准洪水时, 按第一类不透水边界考虑, 当发生超标准洪水时, 考虑其溃决, 本次按瞬时溃堤处理。模型区域内的其他阻水建筑物如村庄房屋、企事业单位, 按当地地面高程加适当高度或增大糙率进行处理。项目区项目修建前地形采用河北省测绘局 1999 年调绘的万分之一地形图资料, 项目修建后地形采用本次实测的两千分之一地形图资料。

3 数学模型的建立

3.1 模型的范围及地形剖分

(1) 模型的范围。根据项目区附近滹沱河的河势特点及附近工程条件, 确定模型范围。模型上边界取在京珠高速公路; 为了提高计算精度, 模型下边界取在项目区下游约 12.5 km 的藁城县城东; 北边界选在正无公路; 南边界为石黄高速公路。模型计算区域东西长度约 25 km, 宽度 13.7 km 左右, 模型区面积约 343 km²。

(2) 模型的网格剖分。为了较好的反映计算区域内地形情况, 满足行洪区计算精度的要求, 模型计算网格采用非均匀网格, 对于滹沱河北堤至石黄高速公路之间的河道范围网格间距为 50 m × 50 m (包括项目区), 北堤以北区域网格间距为 50 m × 200 m, 其 I 方向网格数 $I_{\max} = 501$, J 方向网格数 $J_{\max} = 224$, 计算单元总数 112 224。

3.2 模型的上、下边界条件及初始条件

(1) 上游边界条件。模型区上游边界位于京珠高速公路, 流量边界条件分别为滹沱河 50 年一遇和 100 年一遇洪水过程。

(2) 模型下游边界条件。模型下游边界位于藁城县城东, 为自然开边界条件, 由于没有实测水位流量关系资料, 本次根据河道纵坡按均匀流公式计算。

(3) 中边界。中边界为模型区内的现状、规划堤防及公路, 根据其设计标准及现状情况的不同, 按如下方式处理: 高速公路和设计标准为 100 年一遇的堤防, 按不透水边界考虑; 规划 50 年一遇的堤防, 遇标准内洪水时按不透水边界考虑, 为充分分析项目修建后对河道行洪及周边的影响, 遇超标准洪水时按超 50 年水位后其全部溃决考虑; 为充分反应项目区对河道的影响, 现状北堤和南堤和模型区内公路按可漫水但不溃决条件考虑。

3.3 糙率确定

滹沱河属于砂质河床, 行洪时河床断面冲淤变化较大。本次根据滹沱河河道断面形态、河床质组成确定不同区域的河床糙率。

滹沱河历史洪水资料验证的河道糙率, 主水槽为 0.020, 滩地 0.05~0.06。现状滹沱河主槽内挖沙严重, 河道内沙丘和树木较多, 滩地上种有大量农作物及林木, 因此本次计算

主槽糙率采用 0.025, 滩地采用 0.055, 计算单元全部为村庄时, 取 0.12。

3.4 模型验证

在有实测资料的地区, 可以利用实测水文资料对模型进行率定, 然后进行洪水模拟分析。如果没有实测资料, 也可以利用调查洪水资料, 对模型进行率定。

滹沱河是一条洪水频发的河流, 著名的大洪水年份有 1794 年、1853 年、1917 年、1939 年、1956 年、1963 年和 1996 年, 其中 1996 年 8 月发生的洪水 (以下简称“96·8”洪水) 是最近的一次, 实测资料比较完整, 本次采用“96·8”洪水资料对模型进行率定。

根据前述的地形剖分资料, 以及选定的糙率, 对“96·8”洪水进行了反演, 验证成果见表 1。由表可知: 在 20 个计算值中, 除掉计算起始段的 1 号点误差较大, 剩余 19 个计算点中, 模型水位成果与实测成果差值小于等于 0.2 m 以内的有 11 个, 差值小于等于 0.5 m 的有 18 个, 模拟成果与实测成果吻合度较高, 说明模型参数选择比较合理, 成果可信度较高, 可以用来对设计方案进行模拟计算。

表 1 模型验证结果

Table 1 Model verification results

序号	实测水位	模拟水位	差值
1	73	72.32	-0.68
2	72.5	72.37	-0.13
3	72.23	72.41	0.18
4	71.82	71.71	-0.11
5	72.56	72.43	-0.13
6	73.16	73.6	0.44
7	73.27	73.81	0.54
8	73.49	73.99	0.5
9	73.7	74.08	0.38
10	74.11	74.25	0.14
11	73.08	73.54	0.46
12	74.97	75	0.03
13	75.29	75.1	-0.19
14	73.3	73.63	0.33
15	73.3	73.65	0.35
16	74.09	73.89	-0.2
17	74.21	74.16	-0.05
18	74.61	74.79	0.18
19	74.43	74.33	-0.1
20	74.85	75.24	0.39

4 模型计算结果分析

4.1 分析计算方案

计算区域规划防洪标准左堤 100 年一遇, 右堤 50 年一遇。

本次对规划防洪工程条件下 100 年一遇, 50 年一遇两个标准项目修建前和项目修建后两种工况下, 共计 4 种方案进行了模拟分析。

4.2 项目建设后影响分析

以规划工程实施后为边界条件, 并将项目区的地形高程按实测地形资料重新剖分, 其他条件不变, 分别对 50 年和 100 年两个标准的洪水进行了模拟计算。

模拟结果显示:当发生 50 年一遇洪水时,由于规划南堤的保护作用,项目区未上水,因此项目修建后对洪水流势流态及行洪范围均没有影响,对其它工程也未产生影响。当发生 100 年一遇洪水时,为了充分分析建设项目的影 响,规划南堤按全部溃决处理,大的洪水流势流态与项目修建前相比未发生明显变化,但由于项目区局部微地形的影响,使局部水流散乱,但影响区域不大。

(1) 水位变化分析。规划右堤修建后,项目区在右堤以外,发生 50 年一遇洪水时,洪水控制在两堤之间,因此项目区建设不会对河道行洪和其他工程产生影响。

项目修建后:当发生 100 年一遇洪水时,项目区大部分区域过水,项目修建后最大壅水高度 0.15 m,位于项目区上游西北侧,背水侧水位有所降低。由于规划北堤实施后,北堤以外滩地不参与行洪,南侧滩地行洪压力加大,滩地水深及流速均有增加,距离项目区南侧 300 m 的滹沱河南堤壅水影响范围约为 4 600 m,壅水高度在 0.01~0.09 m 之间;项目修建后对洪水主流线位置有一定的影响,壅水高度在 0.03~0.04 m 之间;同时对规划北堤位置也产生影响,但影响较小,壅水高度为 0.01~0.02 m 之间,壅水影响范围约为 3 400 m。由于周围村庄位于南堤以外或距离项目区较远,未受到影响。

(2) 流速变化分析。规划防洪工程实施条件下,50 年一遇洪水时,南堤沿沿线未上水。100 年一遇洪水时,南堤沿沿线流速大部分流速在 0.5~0.9 m/s 之间,项目建设后,项目区南侧流速较项目修建前有所增加,但增加值不大,最大增加 0.12 m/s,影响长度 1 500 m。另外,由于项目的阻水作用,在项目区上游存在不同大小的流速降低区域。

100 年一遇洪水时,机场路特大桥南北桥头附近流速稍有增加,南桥头流速增加 0.13 m/s,北桥头流速增加 0.02 m/s,对桥梁影响不大。规划北堤位置流速增加 0.01~0.02 m/s,影响长度 1 000 m。

4.3 建设项目防洪安全分析

规划情况下 50 年一遇标准洪水控制在规划两堤间,对项目区没有影响,项目区防洪标准可达到 50 年一遇。

当发生 100 年一遇洪水时,规划水利工程条件下项目区附近淹没水深 2.0 m 左右,项目区大部分上水,草地最大淹没水深 4.24 m,建筑区内水深 2.23 m。

5 结语

高标准行洪区内厂房、村落等建筑物较多,洪水流势比较复杂,采用常规的水面线法进行行洪分析,不能完全反映行洪区洪水真实的流势流态,计算结果误差较大。

二维水流数学模型是把河流地貌、洪水演进模型化,用模型模拟水流基本能够反映真实水流的运动过程,比较客观地反映了这类区域水流运动的规律。虽然模拟结果仍受模型概化网格的大小、河槽糙率等多种因素影响,但计算结果更接近实际情况。

采用数学模型进行洪水模拟时,对地形图依赖程度很高,对计算区域内变化较大的地形、地物要进行必要的补充测绘。为了提高模拟精度,尽量对模型进行应用验证。

参考文献(References):

- [1] 杨慧英,何书会.二维水流数学模型区产流、汇流问题的探讨[J].水文,2002,(4):15-18.(YANG Huǐying, HE Shūhui. Study on Runoff Yield and Flow Concentration in the Region of 2-D Flow Mathematical Model[J]. Hydrology, 2002, (4): 15-18. (in Chinese))
- [2] 刘培斌,耿六成,何书会.南水北调中线总干渠左岸区域洪水的数值模拟研究[J].水文,2000,(5):6-10.(LIU Peibin, GENG Liucheng, HE Shūhui. Mathematical Simulation Study of the Left Bank Basin Flood of the Main Canal of the South to North Water Transfer Project of China[J]. Hydrology, 2000, (5): 6-10. (in Chinese))
- [3] 黎春松,刘伟.南水北调中线小南河串流片防洪水位计算[J].南水北调与水利科技,2011,9(4):149-151.(LI Chunsong, LIU Wei. Flood Surface Calculation of Overflow-Area Section of Xiaonan River in the Middle Route of South to North Water Diversion Project[J]. South to North Water Transfer and Water Science & Technology, 2011, 9(4): 149-151. (in Chinese))
- [4] 李大鸣,管永宽,李玲玲,等.蓄滞洪区洪水演进数学模型研究及应用[J].水利水运工程学报,2011,(3):27-35.(LI Daming, GUAN Yongkuan, LI Lingling, et al. Flood Routing Mathematical Model for Flood Detention Basin[J]. Hydro Science and Engineering, 2011, (3): 27-35. (in Chinese))
- [5] 刘树坤,李小佩,李士功,等.小清河分洪区洪水演进的数值模拟[J].水科学进展,1991,(3):188-192.(LI Shūkun, LI Xiaopei, LI Shìgong, et al. Numerical Simulation of Flood Routing in the Xiaoqinghe Flood Plain[J]. Advances in Water Science, 1991, (3): 188-192. (in Chinese))
- [6] 赵连军,江恩惠,董其华,等.数学模型在黄河下游河道洪水演进预报中的应用[J].四川大学学报(工程科学版),2007,(1):6-12.(ZHAO Lianjun, JIANG Enhui, DONG Qìhua, et al. Application of a Numerical Model in Flood Routing in the Lower Yellow River[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2007, (1): 6-12. (in Chinese))
- [7] 张红武,黄远东,赵连军,等.黄河下游非恒定流水沙数学模型(0)模型验证[J].水科学进展,2002,(3):271-277.(ZHANG Hongwu, HUANG Yuandong, ZHAO Lianjun, et al. A Mathematical Model for Unsteady Sediment Transport in the Lower Yellow River(0) Model Verification[J]. Advances in Water Science, 2002, (3): 271-277. (in Chinese))
- [8] 李大鸣,陈虹,李世森.河道洪水演进的二维水流数学模型[J].天津大学学报,1998,31(4):439-446.(LI Daming, CHEN Hong, LI Shìsen. A 2-D Numerical Model of Propelling Flood in the River[J]. Journal of Tianjin University, 1998, (4): 439-446. (in Chinese))
- [9] 范玉,陈建,李大鸣.一、二维洪水演进流数学模型在滞洪区的应用[J].华北水利水电学院学报,2009,(4):12-15.(FAN Yu, CHEN Jian, LI Daming. Application of Flood Wave Advance Numeric Modeling of One Dimension and Two Dimensions in Flood Detention Area[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2009, (4): 12-15. (in Chinese))

(下转第 40 页)

- at Drought Region in China[M]. Beijing: Science Press, 1992, 53-73. (in Chinese)
- [2] 门宝辉, 刘昌明, 夏军, 等. 南水北调西线一期工程调水区径流量与影响因子关系——以达曲为例[J]. 地理科学, 2006, 26(6): 674-681. (MEN Bao hui, LIU Chang ming, XIA Jun, et al. Runoff and Its Impacting Factors in the Water exporting Rivers of the First Stage Project of the South to North Water Transfer Scheme via the Western Route: A Case Study in Daqu[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(6): 674-681. (in Chinese))
- [3] 李林, 汪青春, 张国胜, 等. 黄河上游气候变化对地表水的影响[J]. 地理学报, 2004, 59(5): 716-722. (LI Lin, WANG Qing chun, ZHANG Guo sheng, et al. The Influence of Climate Change on Surface Water in the Upper Yellow River[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(5): 716-722. (in Chinese))
- [4] Men Bao hui, Lin Chun kun, Li Zhi fei, et al. Analysis of Runoff Changes of Niqu River in Water Diversion Area of Western Route Project of South North Water Transfer Project[J]. Nature Environment and Pollution Technology, 2013, 12(1): 111-114.
- [5] MEN Bao hui. Runoff Chaotic Characteristic Analysis of the South to North Water Transfer Scheme via the Western Route in the Water Exporting Region[C]. Fifth International Conference on Natural Computation, 2009: 505-508.
- [6] YANG Nan, MEN Bao hui, LIN Chun kun. Impact Analysis of Climate Change on Water Resources[J]. Procedia Engineering, 2011, 24: 643-648.
- [7] 马正耀, 胡兴林, 蓝永超, 等. 1965-2010 年白龙江上游径流变化特征研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(3): 612-618. (MA Zheng yao, HU Xing lin, LAN Yong chao, et al. Runoff Changes in the Upper Reaches of the Bailongjiang River during 1965-2010[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(3): 612-618. (in Chinese))
- [8] 张利平, 曾思栋, 王任超, 等. 气候变化对滦河流域水文循环的影响及模拟[J]. 资源科学, 2011, 33(5): 966-974. (ZHANG Li ping, ZENG Si dong, WANG Ren chao, et al. Impacts of Climate Change on the Hydrological Cycle in the Luan River Basin[J]. Resources Science, 2011, 33(5): 966-974. (in Chinese))
- [9] 张利平, 陈小凤, 赵志鹏, 等. 气候变化对水文水资源影响的研究进展[J]. 地理科学进展, 2008, 27(3): 60-67. (ZHANG Li ping, CHEN Xiao feng, ZHAO Zhi peng, et al. Progress in Study of Climate Change Impacts on Hydrology and Water Resources[J]. Progress in Geography, 2008, 27(3): 60-67. (in Chinese))
- [10] 刘春葵, 刘志雨, 谢正辉. 近 50 年海河流域径流的变化趋势研究[J]. 应用气象学报, 2004, 15(4): 385-393. (LIU Chun kui, LIU Zhi yu, XIE Zheng hui. Study of Trends in Runoff for the Haihe River Basin in Recent 50 Years[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2004, 15(4): 385-393. (in Chinese))
- [11] 姚允龙, 吕宪国, 王蕾. 1956-2005 年挠力河径流演变特征及影响因素分析[J]. 资源科学, 2009, 31(4): 648-655. (YAO Yun long, LYU Xian guo, WANG Lei. Tendency and Periodicity of Annual Runoff of Naoli River from 1956 to 2005[J]. Resources Science, 2009, 31(4): 648-655. (in Chinese))
- [12] 王国庆, 张建云, 刘九夫, 等. 气候变化和人类活动对河川径流影响的定量分析[J]. 中国水利, 2008, (2): 55-58. (WANG Guo qing, ZHANG Jian yun, LIU Jiu fu, et al. Quantitative Assessment for Climate Change and Human Activities Impact on River Runoff[J]. China Water Resources, 2008, (2): 55-58. (in Chinese))
- [13] 燕爱玲, 黄强, 王义民. 河川径流演变的非趋势波动分析[J]. 水力发电学报, 2007, 26(3): 124. (YAN Ai ling, HUANG Qiang, WANG Yi min. Detrended Fluctuation Analysis of River Runoff Evolution[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(3): 124. (in Chinese))
- [14] 张建云, 王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (ZHANG Jian yun, WANG Guo qing. Study on the Impact of Climatic Change on Hydrology and Water Resources[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [15] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 24-25. (HUANG Jia you. Meteorological Statistical Analysis and Forecast Method[M]. Beijing: Meteorological Press, 2000: 24-25. (in Chinese))

(上接第 34 页)

- [10] 李义天, 赵明登, 曹志芳. 河道平面二维水沙数学模型[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. (LI Yi tian, ZHAO Ming deng, CAO Zhi fang. Two dimensional River Flow and Sediment Mathematical Model[M]. Beijing: China Water Power Press, 2001. (in Chinese))
- [11] 王中华, 杨彦军. 石家庄滨河生态园高尔夫练习场防洪评价报告[R]. 河北浩川工程咨询有限公司, 2012. (WANG Zhong hua, YANG Yan jun. The Flood Control Impact Assessment Reporting of Shijiazhang Riverside Ecological Park' Golf Course[R]. Hebei Hao Chuan Engineering Consulting Co., Ltd, 2012. (in Chinese))