

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2014.04.004

淮北平原分布式除涝水文模型及应用

赵宏臻^{1,2}, 陈 鸣^{1,2}, 吴永祥^{1,2}, 王高旭^{1,2}, 王希之³, 王德智³

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水文水资源及水利工程国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 中水淮河规划设计院有限公司, 安徽 蚌埠 233001)

摘要:针对目前淮北平原除涝水文计算采用的经验排模公式仅考虑了设计净雨和排水面积两个因素, 对于下垫面情况复杂的流域不能很好地反映峰量关系的情况, 应用 GIS 技术根据 DEM 进行流域划分、水流方向确定等处理, 并结合流域水文地质图、土壤分布图等建立 GIS 图层, 进而构建淮北分布式水文模型。结果表明, 该模型可用于无资料地区的排涝水文计算, 应用历史数据对模型参数进行调试, 模拟计算精度可达 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》的甲级标准。

关键词:分布式水文模型; 除涝; 水文计算; GIS; 淮北平原

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2014)04-0014-04

Research and application of distributed waterlogging control hydrological model for Huaibei Plain

ZHAO Hongzhen^{1,2}, CHEN Ming^{1,2}, WU Yongxiang^{1,2}, WANG Gaoxu^{1,2},
WANG Xizhi³, WANG Dezhi³

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. China Water Huaihe Planning, Design and Research Co., Ltd., Bengbu 233001, China)

Abstract: The current empirical drainage modeling formula for waterlogging control hydrological computation for the Huaihe Plain only considers two factors, the design net rainfall and the drainage area. It cannot reflect the relationship between peak discharge and runoff volume for complex underlying surface regions. In order to solve this problem, GIS technology was used to divide catchments according to a DEM and determine the flow direction. According to the hydrogeological map and soil profile, a GIS layer was constructed and a distributed waterlogging control hydrological model was developed. This model can be applied to waterlogging control hydrological computation in ungauged watersheds. Historical data were used to adjust the parameters of the model. The results show that the simulation accuracy can reach the criterion of Grade A stipulated in the Standard for Hydrological Information and Hydrological Forecasting.

Key words: distributed hydrological model; waterlogging control; hydrological computation; GIS; Huaibei Plain

除涝水文计算是除涝规划设计中十分重要的技术依据和支撑。目前淮北平原除涝水文计算采用的是经验排模公式。虽然经验排模公式简单易用, 并有一定的精度, 但经验排模公式只考虑了设计净雨和排水面积两个因素, 难以反映下垫面情况复杂条件下流域的峰量关系^[1]。

水文模型采用数学表达式描述流域降雨-径流过程, 将流域土壤下渗能力、流域蒸发能力、流域汇流时间等影响产汇流因素概化为模型参数。应用水文模型代替传统经验排模公式进行除涝计算不但可以计算出比较精确的产水总量, 同时可以计算相应设计断面的洪峰流量和洪水过程。近年来, 随着计

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07506-004-003); 国家自然科学基金 (51109138); 南京水利科学研究院基金 (Y512005); 水利部公益性行业科研专项 (201301002)

作者简介: 赵宏臻 (1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为洪水预报。E-mail: e_zhen@126.com

通信作者: 陈鸣, 教授级高级工程师。E-mail: mchen@nhri.cn

计算机技术、GIS 技术的发展,流域水文过程的模拟也从集总式模型扩展到分布式或者半分布式模型^[2]。笔者应用 GIS 技术根据数字高程模型 (DEM) 进行流域划分、水流方向确定等处理,并结合水文地质图、土壤分布图等建立 GIS 图层,进而构建可用于无资料地区的淮北平原分布式水文模型。

1 基于 GIS 的分布式水文模型架构

分布式水文模型是指降雨-径流模型结构中各水文要素具有空间的分布特性和随时间变化的动态特性,能描述水文循环的时空变化过程,能及时地模拟出人类活动或下垫面因素的变化对流域水文循环过程的影响^[3-4]。GIS 是一种综合分析和处理数据空间分布的新技术,可以进行详细的地理条件及气候条件空间变化分析,因此 GIS 的出现与发展为分布式降雨-径流模型水文计算的实现提供了有效工具。

利用 GIS 对流域进行数字地形分析,主要包括:①栅格水流流向确定;②流域分水线确定;③自动生成河网及子流域;④河道与子流域编码;⑤河段与子流域特性表;⑥具有水文学意义的地形参数提取。

分布式水文模型主要思路是:将流域划分成若干网格,对每个网格分别输入不同的降雨,根据各网格内植被、土壤和高程等情势,对每个网格采用不同的产流模型参数分别计算产流量;通过比较相邻网格的高程确定各网格的流向,将其径流演算到流域出口断面得到流域出口断面的径流过程。模型参数由地形、地貌数据结合实测历史洪水资料率定得到^[5-6]。基于 GIS 的分布式水文模型框架如图 1 所示。

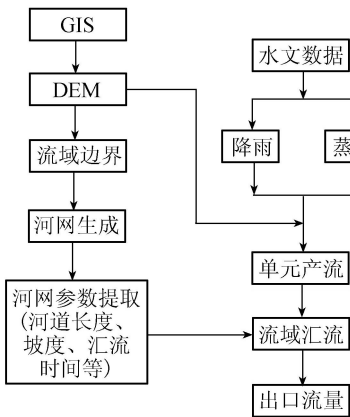


图 1 基于 GIS 的分布式水文模型框架

2 降雨-径流计算

在 GIS 划分产水单元的基础上,对每一产水单元进行产流计算,进而根据水力联系进行汇流计算,生成流域出口断面的流量过程。汾泉河降雨-径流模型是描述垂向交换为主的平原水文模型^[7-8],适合

黄淮海平原浅层地下水地区^[9-11]。

汾泉河降雨-径流模型将控制产流的土层分为上层(耕作层)和下层(包括犁底层)两部分。降雨(P)满足上层土壤持水能力(W_{nm})后形成自由水(R_1),一部分水(R_{g1})通过大孔隙下渗直接补给地下水蓄水体,一部分水(F)渗入下土层。满足上述两部分下渗后的剩余水量则作侧向运动形成表层径流(R_s),这部分水量与不透水面积上形成的地表直接径流(R_d)统称为表层和地表径流,经坡面沟道调蓄汇流后形成表层流量(Q_s)。

F 首先被下土层吸收,在下层土壤持水能力已满足的地方形成稳定入渗(R_{g2})补给地下水。 R_{g1} 与 R_{g2} 称为地下水补给量,经地下水库调蓄汇流后成地下水流量(Q_g)。表层流量与地下水流量之和为产水单元流量(Q)。

蒸发时,首先以蒸发能力蒸发上层土壤水,蒸发量为 E_1 ;上层土壤水蒸发完后开始蒸发下层土壤水,其蒸发量为 E_2 ;蒸发下层土壤水同时,由于毛细管的作用,地下水不断向下土层供水,其供水量称为潜水蒸发量(E_g)。模型结构见图 2。

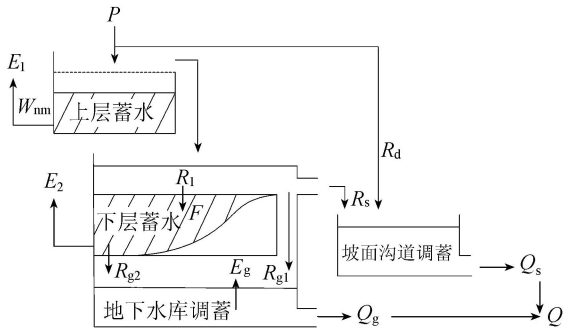


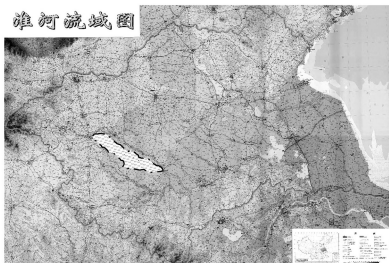
图 2 汾泉河降雨-径流模型结构

考虑到 GIS 应用以及目前水情测报系统的广泛应用,雨水情数据频次现已可达分钟级,对原汾泉河降雨-径流模型做以下两点改进:①计算时段以 1 h 为单位,通过提高时间分辨率获取真实峰现时间和洪峰量值;②坡面汇流采用 Nash 单位线进行汇流计算,其模型参数可通过流域坡度、流域下垫面等地理因子获取,以便模型在无资料地区的推广应用^[12-13]。

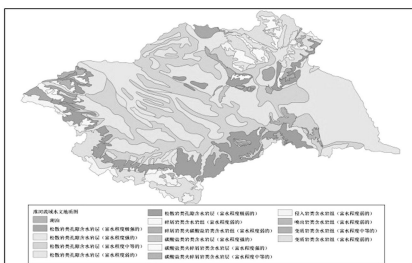
3 模型应用

3.1 GIS 图层

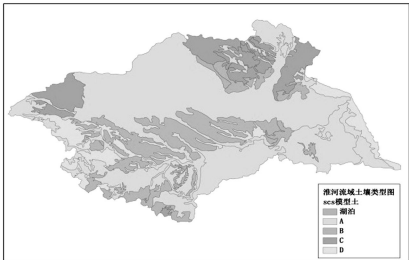
水文、地质、土壤分布等基础数据是构建分布式水文模型的基础。这些数据大多与现实中的某一特定的位置或区域(点、线或面)相联系,且具有空间属性。分布式水文模型中 GIS 的主要专题图层的构建可详见表 1、图 3。



(a) 淮河流域及汾河流域范围



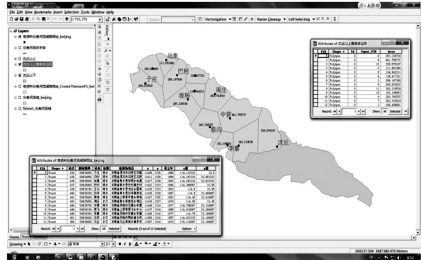
(b) 淮河流域土壤分布图层



(c) 淮河流域水文地质分布图层



(d) 淮北平原地下水埋深图层



(e) 淮河流域汾河流域各雨量站控制面积图层

图 3 淮河平原主要专题图层示意图

表 1 分布式水文模型中主要专题图层

序号	层次名称	属性数据
1	流域边界	多边形
2	水系	线
3	水文站、水位站、气象站	点
4	土壤分布	多边形
5	水文地质	多边形
6	地下水埋深	多边形

3.2 模型参数率定

收集淮北平原区内主要子流域的洪水资料,其中包括汾泉河流域中周庄站、石桥口站和沈丘站 20 场洪水资料;浍河流域中黄口集站、临涣集站 16 场洪水资料;西淝河流域中王市集站 6 场洪水资料;閾河流域中王勿桥站、包信站 24 场洪水资料以及谷河流域公桥站 15 场洪水资料,通过对模型进行调整参数和验证,模拟结果如表 2 和图 4 所示。

表 2 试验流域调整参数合格率

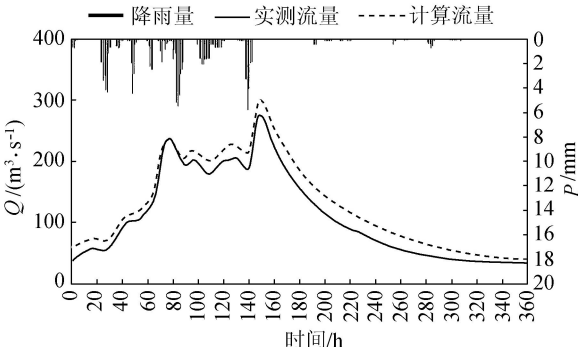
流域名称	调整参数 洪水场次数	合格场 次数	合格率/%
汾泉河	20	18	90.0
浍河	16	14	87.5
西淝河	6	5	83.3
閾河	24	21	87.5
谷河	15	13	86.7

从模拟结果可以看到模拟精度最低的是西淝河流域,其合格率为 83.3%,达到 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》的乙级标准。此外,其他流域的合格率由于均大于 85%,满足 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》甲级标准的要求。

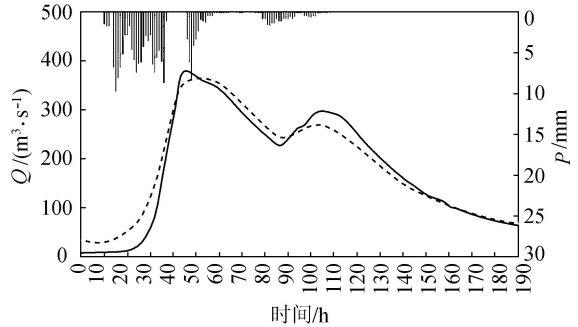
3.3 设计及超标洪水计算

3.3.1 设计洪水计算

将不同频率的设计暴雨作为模型输入计算相应



(a) 周庄站 F1982-2 洪水



(b) 周庄站 F1984-3 洪水

图 4 汾泉河流域周庄站洪水模拟计算与实测过程比较

频率的设计洪水过程,其中 10 年一遇的设计洪水模拟过程见图 5。对各个频率的最大 24 h 平均流量与现行排模公式计算的流量进行计算并比较后发现两者误差在 -2.7% ~ 16.9% 之间,最大误差控制在 20% 以内(表 3)。

3.3.2 超标洪水计算

目前淮北平原发生超标标准洪水时经常出现漫滩现象,而目前在模拟计算中常只考虑洪水在河槽中的情况,故导致模拟计算洪峰大于实际洪峰流量的情况,引入削峰系数以消除模拟计算与实际洪峰流

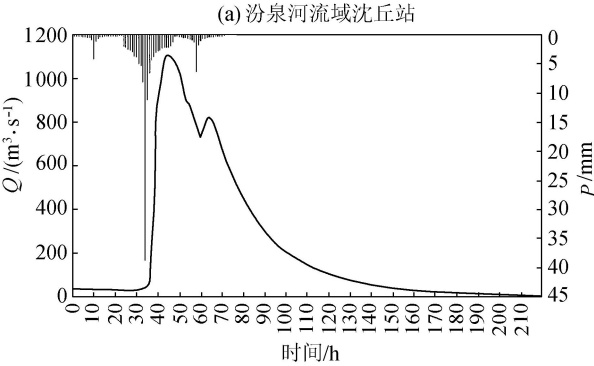
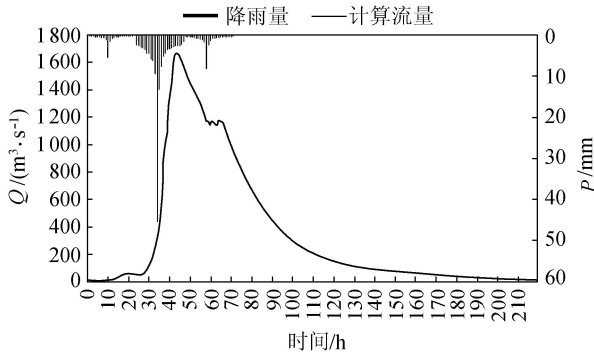


图5 10年一遇设计洪水模拟过程

表3 排模公式计算与模型计算洪峰流量比较

流域名称	流域面积/ km ²	频率/ %	设计暴雨/ mm	设计净雨/ mm	设计洪水流量		
					排模公式 计算/ (m ³ ·s ⁻¹)	模型 计算/ (m ³ ·s ⁻¹)	误差/%
沈丘	3094	5	227.3	167.3	1805	1669.4	-7.5
		10	191.8	131.8	1422	1382.9	-2.7
		20	155.3	87.3	942	1088.0	15.5
临涣	2470	5	183.7	114.6	1044	1220.0	16.9
		10	160.0	93.4	851	932.0	9.5
		20	134.8	64.9	591	637.0	7.8

量间的差异。淮北平原目前对10年一遇洪水采用的削峰系数为0.9,20年一遇的为0.85,50年一遇的为0.8^[9]。

通过对5个试验流域内共6场超标洪水资料展开分析,发现全部6场超标洪水实测过程线均呈现了峰型肥胖及退水拥堵、缓慢之势。表4反映了超标洪水模拟与实测洪峰流量之间的差异,通过计算结果表明超标准洪水的削峰系数在0.78~0.92之间,与淮北平原现行的削峰系数基本一致。

表4 超标洪水模拟与实测结果比较

洪水编号	站名	实测24h 最大平均 洪峰流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	计算24h 最大平均 洪峰流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	误差/%	削峰 系数
CF1984-1	沈丘	826.0	1064.0	28.81	0.78
CF1984-2	沈丘	781.0	899.4	15.14	0.87
CK1998-1	临淮集	466.0	536.0	15.06	0.87
GQ1973-1	公桥	285.5	309.6	8.44	0.92
WSJ1972-1	王市集	927.6	1036.0	11.68	0.90
BX1968-1	包信	668.0	738.4	10.54	0.90

4 结 论

- a. 应用GIS技术进行流域划分、水流方向确定等处理,并通过整个淮北平原的水文地质图、土壤分布图等建立GIS图层,进而构建能够用于无资料地区的分布式水文模型除涝水文计算。
- b. 应用历史数据对分布式降雨-径流模型参数进行调试,该模型不仅可较精确地计算洪量,还可以较精确地计算洪峰值和峰现时间,模拟计算精度达GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》的甲级标准。
- c. 对于超标洪水,计算过程呈较尖削型,而实际过程中,由于漫滩影响,呈现了峰型肥胖及退水拥堵、缓慢之势。采用模型模拟计算超标洪水,削峰系数在0.78~0.92之间,与现行采用的削峰系数基本一致。
- d. 本次计算设计洪水与传统经验公式计算有近17%的误差。如将本文提出分布式水文模型实际应用与除涝水文设计计算,还需收集更多的资料进行验证。

参考文献:

[1] 中水淮河规划设计院有限公司. 淮北平原除涝水文计算研究与复核工作大纲[R]. 蚌埠:中水淮河规划设计研究院有限公司,2009.

[2] SIVAPALAN M, TAKEUCHI K, FRANKS S W, et al. Iahs decade on predictions in ungauged basins (pub), 2003—2012: shaping an exciting future for the hydrological sciences[J]. Hydrological Sciences Journal, 2003, 48(6): 857-880.

[3] 芮孝芳, 黄国如. 分布式水文模型的现状与未来[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(2): 55-58. (RUI Xiaofang, HUANG Guoru. Current situation of distributed hydrological model and its future development [J]. Advances in Sciences and Technology of Water Resources, 2004, 24(2): 55-58. (in Chinese))

[4] 王中根, 刘昌明, 左其亭, 等. 基于DEM的分布式水文模型构建方法[J]. 地理科学进展, 2002, 21(5): 430-439. (WANG Zhonggen, LIU Changming, ZUO Qiting, et al. Methods of constructing distributed hydrological model based on DEM[J]. Progress in Geography, 2002, 21(5): 430-439. (in Chinese))

[5] 毛维新, 李兰, 武见, 等. 数字流域水文模拟在增江流域中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2005(5): 27-29, 32. (MAO Weixin, LI Lan, WU Jian, et al. Application of hydrological simulation of digital watershed in Zeng River watershed[J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(5): 27-29, 32. (in Chinese))

(下转第66页)

- 41-44. (in Chinese))
- [3] 蒋火华,朱建平,梁德华,等. 综合污染指数评价与水质类别判定的关系[J]. 中国环境监测,1999,15(6):46-48. (JIANG Huohua,ZHU Jianping,LIANG Dehua,et al. The relationship between comprehensive pollution index assessment and water quality type distinguishing[J]. Environmental Monitoring in China,1999,15(6):46-48. (in Chinese))
- [4] 孙靖南,邹志红,任广平. 模糊综合评价在天然水体水质评价中的应用研究[J]. 环境污染治理技术与设备,2005,6(2):45-48. (SUN Jingnan,ZOU Zhiping,REN Guangping. Study on the fuzzy synthetic evaluation for natural water quality[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control,2005,6(2):45-48. (in Chinese))
- [5] 赵志坚. 灰色聚类法在水环境质量评价中的应用[J]. 四川环境,1997,16(3):49-51. (ZHAO Zhijian. Application of grey method to water environmental quality assessment[J]. Sichuan Environment,1997,16(3):49-51. (in Chinese))
- [6] 陈德明,李祚泳. 大气环境质量的物元分析评价法[J]. 环境科学研究,1994,7(2):24-28. (CHEN Deming,LI Zuoyong. The assessment of atmospheric environmental quality based on matter element analysis[J]. Research of Environmental Science,1994,7(2):24-28. (in Chinese))
- [7] 邓新民,李祚泳. 层次分析法用于水环境质量评价[J]. 成都气象学院学报,1990(2/3):70-75. (DENG Xinmin,LI Zuoyong. Application of analytic hierarchy process (AHP) in assessment of water environmental quality[J]. Journal of Chengdu Institute of Meteorology,1990(2/3):70-75. (in Chinese))
- [8] 秦天玲,侯佑泽,郝彩莲,等. 基于主成分分析的武烈河流域水质评价研究[J]. 环境保护科学,2011,37(6):102-105. (QIN Tianling,HOU Youze,HAO Cailian,et al. Study on water quality evaluation of Wulie River Basin based on the method of PCA[J]. Environmental Protection Science,2011,37(6):102-105. (in Chinese))
- [9] 胡成,苏丹. 综合水质标识指数法在浑河水质评价中的应用[J]. 生态环境学报,2011,20(1):186-192. (HU Cheng,SU Dan. Application of comprehensive water quality identification index in water quality assessment of Hun River[J]. Ecology and Environmental Sciences,2011,20(1):186-192. (in Chinese))
- [10] 尹静章,傅静,谢营,等. 改进的模糊数学评价法在德州市地下水水质评价中的应用[J]. 治淮,2010(12):22-25. (YIN Jingzhang,FU Jing,XIE Ying,et al. Application of improved fuzzy evaluation method in Dezhou City groundwater quality evaluation[J]. Zhihuai,2010(12):22-25. (in Chinese))
- [11] 朱冬楠,李畅游,孙标,等. 改进模糊物元模型在湖泊水质评价中的应用[J]. 人民黄河,2010,32(12):127-130. (ZHU Dongnan,LI Changyou,SUN Biao,et al. Improved fuzzy matter-element model in lake water quality assessment[J]. Yellow River,2010,32(12):127-130. (in Chinese))
- (收稿日期:2014-03-10 编辑:徐娟)

(上接第17页)

- [6] 都金康,谢顺平,许有鹏,等. 分布式降雨径流物理模型的建立和应用[J]. 水科学进展,2006,17(5):637-644. (DU Jinkang,XIE Shunping,XU Youpeng,et al. Development and application of a physically-based distributed rainfall-runoff model[J]. Advances in Water Science,2006,17(5):637-644. (in Chinese))
- [7] 刘新仁,费永法. 汾泉河平原水文综合模型[J]. 河海大学学报:自然科学版,1993,21(6):10-16. (LIU Xinren,FEI Yongfa. Fenquanhe plain area comprehensive hydrologic model[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,1993,21(6):10-16. (in Chinese))
- [8] 王井泉. 淮北坡水区概念性流域水文模型[J]. 水文,1989(3):25-29. (WANG Jingquan. Conceptual hydrological model of Huaiibeipo aera[J]. Hydrology,1989(3):25-29. (in Chinese))
- [9] 唐柏林,费永法. 汾泉河平原水文模型在防洪除涝水文计算及水资源评价方面的应用[J]. 治淮,1996(3):29-30. (TANG Bolin,FEI Yongfa. Application of Fenquanhe plain hydrological model in hydrology flood control waterlogging calculation and evaluation of water resources[J]. Zhihuai,1996(3):29-30. (in Chinese))
- [10] 路伟亭,王玉山. 淮北地区除涝水文计算办法探讨[J]. 治淮,2012(5):15-16. (LU Weiting,WANG Yushan. Discussion in Huabei area hydrology waterlogging calculation method[J]. Zhihuai,2012(5):15-16. (in Chinese))
- [11] 杨传国,余钟波,郝振纯,等. 淮河流域典型洪水年流量空间分布的季节特征[J]. 河海大学学报:自然科学版,2012,40(1):33-36. (YANG Chuanguo,YU Zhongbo,HAO Zhenchun,et al. Seasonal characteristics of spatial distribution of streamflow in a typical flood year in Huaihe Basin[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2012,40(1):33-36. (in Chinese))
- [12] 张建新,惠士博,谢森传. 利用降雨入渗产流分析原理和 Nash 单位线汇流方法进行排涝模数计算的研究[J]. 水文,2002,22(3):1-4. (ZHANG Jianxin,HUI Shibo,XIE Senchuan. Study on drainage modulus in plain watersheds by using infiltration-runoff math-theoretical analysis and Nash's instantaneous unit curve method[J]. Hydrology,2002,22(3):1-4. (in Chinese))
- [13] 陈鸣,孙以三. 水库实时水情预报调度系统开发及应用[J]. 中国水利,2005(23):41-42. (CHEN Ming,SUN Yishan. Real-time forecast and regulation system of water conditions in reservoirs and its applications[J]. China Water Resources,2005(23):41-42. (in Chinese))
- (收稿日期:2014-04-01 编辑:高渭文)