

DEM 分辨率对分布式水文模拟的影响

姚 成,李致家,章玉霞

(河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:以数字高程模型为基础,采用栅格型新安江模型进行不同分辨率情况下的洪水模拟,分析了分辨率对分布式水文模拟的影响。研究表明:数字高程模型分辨率越高,流域数字化的精度相对越高,但模型的模拟结果并不一定越好;针对不同分辨率的数字高程模型,在重新率定汇流参数的情况下,栅格型新安江模型的模拟精度相当,均能取得较好的应用效果;对于中尺度流域而言,采用 30"分辨率的数字高程模型不仅能够提高模型的运行时效,也能取得较高的模拟精度。

关键词:数字高程模型;栅格型新安江模型;水文模拟;分辨率;参数估计

中图分类号:P333.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)05-0011-04

Effects of DEM resolution on distributed hydrologic simulation//YAO Cheng, LI Zhijia, ZHANG Yuxia(*College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Based on the digital elevation model (DEM), the Grid-Xin' anjiang model was employed to simulate flood events at different DEM resolutions to assess the effects of resolution on distributed hydrologic simulations. The results indicate that the simulated results may not be improved by using higher resolution DEM data while the accuracy of the watershed delineation can be enhanced. The Grid-Xin' anjiang model is able to produce comparable and promising results for different DEM resolutions with a recalibration of the routing parameters. For medium-sized watersheds, improved computational efficiency and simulation accuracy can be achieved by using the 30 arc-second DEM.

Key words: digital elevation model; grid-Xin' anjiang model; hydrologic simulation; resolution; parameter estimation

流域水文模型作为一种模拟流域内复杂水文现象的重要工具,一直是水文学研究的热点课题之一。就目前水文模型发展趋势而言,分布式水文模型由于其能够更好地考虑气候和下垫面因子的空间变异性,能够更好地利用地理信息系统(GIS)与遥感(RS)技术等空间信息模拟流域的降雨径流响应,现已成为水文模型发展的重要方向^[1-2]。

在应用分布式水文模型时,往往需要流域内部详细的水流流向、河网水系、流域形状等地形地貌特征,需要对研究流域进行数字化。随着 GIS 的应用与计算机能力的提高,利用数字高程模型(DEM)数字化流域和提取流域地貌特征的技术已得到了广泛研究,DEM 的引入大幅度促进了分布式水文模型的进一步发展^[3]。然而,在 DEM 平台上构建分布式水文模型,DEM 分辨率对流域地貌特征的提取结果以及产汇流模拟精度有着重要的影响^[4-5]。理论上,DEM 分辨率越高,所提取的流域地貌特征越接近于真实情况,但对基于 DEM 的分布式水文模型而言,

高分辨率的 DEM 会使得模型的计算负担过重,在很大程度上制约了模型的运行时效,这必将导致分布式水文模型在实际应用中受到限制。为了更真实高效地描述现实世界中的降雨径流形成机理,有必要进一步开展 DEM 分辨率对分布式水文模拟影响的研究。

本文以皖南山区呈村流域为例,在 3"、12"、21"与 30" 共 4 种 DEM 分辨率情况下,对研究流域进行了数字化,分析了分辨率对地貌特征提取结果的影响,并在此基础上,采用基于 DEM 的栅格型新安江模型^[6-8]进行呈村流域的洪水模拟,探讨了不同 DEM 分辨率对模型参数以及模拟结果的影响。

1 栅格型新安江模型

1.1 模型原理

栅格型新安江模型以流域内每个 DEM 栅格作为计算单元,并假设降雨和下垫面特征在每个单元内空间分布均匀,模型只考虑各要素在不同单元之

间的变异性。模型构建以蓄满产流原理为基础,其蒸散发、产流与分水源计算方法和新安江模型一致,采用概念性方法。因此,栅格型新安江模型属于松散结构分布式水文模型^[1]。

在模拟洪水时,对于任意栅格单元,在考虑栅格间水量交换与河道排水网络影响的基础上,分别采用3层蒸散发模型与蓄满产流原理对单元内的蒸散发 E 与产流量 R 进行计算,并采用自由水蓄水水库结构对水源进行划分,包括地表径流 R_s 、壤中流 R_i 以及地下径流 R_g 3种水源,再根据栅格间的汇流演算次序,依次将各种水源演算至流域出口。对于单元间的汇流过程模拟,采用的是逐栅格马斯京根汇流演算方法^[6-9]。图1为栅格单元内产流与分水源示意图,图中 P 为降雨量; W_M 、 S_M 分别为张力水、自由水蓄水容量; W_{UM} 、 W_{LM} 分别为上层、下层张力水蓄水容量; S 为实际的自由水含量; K_g 、 K_i 分别为地下水径流、壤中水径流的出流系数; θ_{wp} 、 θ_{fc} 、 θ_s 分别为凋萎含水量、田间持水量与饱和含水量。

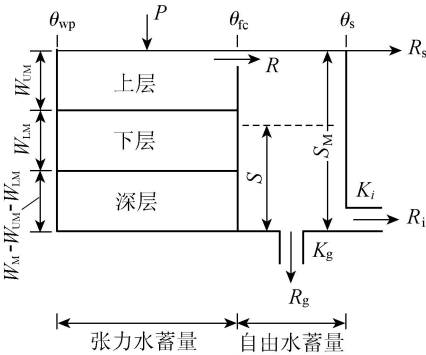


图1 栅格单元内产流与分水源示意图

1.2 模型参数

栅格型新安江模型以新安江模型为基础,其参数与新安江模型参数基本一致,如图1中的 W_M 、 S_M 、 K_g 与 K_i 等。不同的是,当利用该模型进行分布式水文模拟时,不能完全以集总的方式对模型参数赋值,而是要获得参数的空间分布。因此,不能单一地根据观测资料来率定参数,而应该在率定参数之前,先根据参数的物理意义,基于地形地貌、土壤、植被等下垫面条件,结合理论推导,合理估计出参数的空间分布^[10-12]。客观的估计方法不仅有利于筛选出敏感参数,降低参数之间的相依性,简化参数的率定工作,还可以保证模型参数在整个流域上的相容性,以更真实地模拟流域的水文响应^[13]。

以 W_M 、 S_M 、 K_g 与 K_i 4个参数为例, W_M 表示的是张力水蓄水容量,对应的土层为“全土层”,即整个包气带^[14-15],而张力水可以认为介于凋萎含水量与田间持水量之间,则有:

$$W_M = (\theta_{fc} - \theta_{wp})L_a \tag{1}$$

式中: L_a 为包气带土层厚度。 S_M 表示的是自由水蓄水容量,对应的土层为“表土层”,即腐殖质土层^[14-15],而自由水可以认为介于田间持水量与饱和含水量之间,则有:

$$S_M = (\theta_s - \theta_{fc})L_h \tag{2}$$

式中: L_h 为腐殖质土层厚度。

利用式(1)和式(2)计算每个栅格单元蓄水容量时,土壤水分常数 θ_{wp} 、 θ_{fc} 、 θ_s 可以根据每个单元对应的土壤类型估算得到,土层厚度 L_a 、 L_h 可以根据每个单元对应的地形指数及植被覆盖估算得到。利用式(1)和式(2)不仅可以获得 W_M 与 S_M 的空间分布,也可以统计得到研究流域张力水与自由水容量曲线。

两个出流系数 K_g 与 K_i 属于并联参数,其和代表自由水出流的快慢,与单元内的土壤类型有关,可以将 θ_s 与 θ_{fc} 作为衡量自由水出流快慢的指标; K_g/K_i 代表地下水与壤中流的比,该比值可以通过 θ_{wp} 来反映^[16],则有:

$$\begin{cases} K_g + K_i = \left(\frac{\theta_{fc}}{\theta_s}\right)^{m_{oc}} \\ \frac{K_g}{K_i} = \frac{m_r}{1 + 2(1 - \theta_{wp})} \end{cases} \tag{3}$$

式中: m_{oc} 与 m_r 为两个校正系数,根据已有的研究成果,在估计参数空间分布时, $m_r \approx 1$ ^[13-16],而 m_{oc} 可以通过分水源中的结构性约束(即 $K_g + K_i = 0.7$)试算得到。

当采用逐栅格马斯京根法进行单元间汇流演算时,对于其参数流量比重因子 x_e 与蓄量常数 k_e 的确定,模型暂没有考虑其空间分布不均的问题,而是利用流域内栅格单元统一赋值的方法,需要根据流域的观测资料进行率定和检验。 k_e 属于敏感参数,反映的是河道水流、地表径流、壤中流与地下径流在栅格单元内的汇流时间,由于不同的径流成分在汇流速度上存在着差异,因此在率定 k_e 时应予以区分。

2 研究流域概况

呈村流域位于皖南山区,邻近东南沿海,四季分明,气候温和,属亚热带季风气候区,流域控制面积290 km²。流域内植被良好,雨量充沛,多年平均降雨量约为2 100 mm,流域降水在年内年际分配极不均匀,为典型的湿润流域。呈村流域的植被类型主要包括常绿针叶林、落叶阔叶林、混合林、森林地、林地草原、牧草地与作物地,土壤类型主要为黏壤土。流域内有10个雨量站,具有1986—1999年32场洪水过程的时段资料,其中,前22场洪水过程用于模型参

数的率定,后 10 场洪水过程用于模型参数的检验。

3 结果分析

3.1 地貌特征提取结果

根据 3"分辨率的 DEM 数据^[17],利用最近邻算法生成 12"、21"与 30"的 DEM 数据,在这 4 种分辨率情况下,对呈村流域进行了数字化,并提取了流域地貌特征。图 2 为根据上述 4 种分辨率的 DEM 生成的流域边界及水系,生成水系时,对应图 2(a)~(d)所用的阈值(网格数)分别为 100、25、15 和 10。

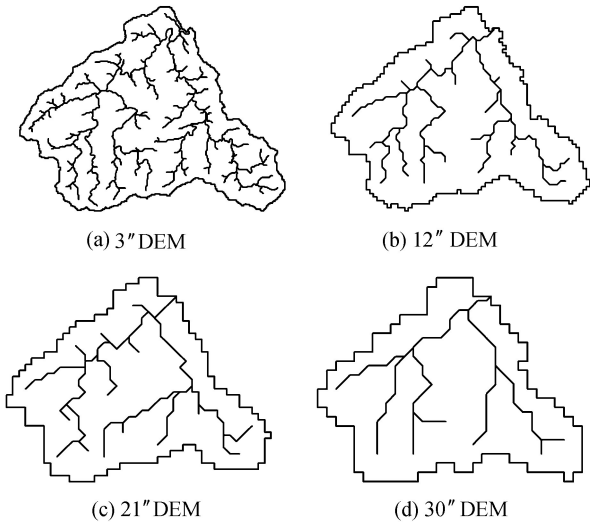


图 2 根据不同分辨率 DEM 生成的呈村流域边界与水系

由图 2 可以看出,DEM 分辨率越高,所生成的流域边界及水系越精细。分析地貌特征结果后发现,分辨率的变化对所提取的呈村流域面积影响相对较小,变化幅度在 1 km² 以内。此外,随着 DEM 分辨率的降低,流域平均高程及河道平均坡度有增大的趋势,而最大汇流路径长度有减小的趋势,三者变化幅度分别在 13 m、0.6%、12 km 以内。

3.2 洪水模拟结果

以流域数字化与地貌特征提取结果为基础,将栅格型新安江模型用于呈村流域的洪水模拟。考虑到分辨率对模型运算效率有较大影响,先针对 30"DEM,结合土壤、植被等下垫面资料,对模型产流参数的空间分布进行了估计,并在此基础上,对模型汇流参数进行了率定,其中,河道水流、地表径流、壤中流和地下径流对应的 k_e 率定结果分别为 0.06、0.10、0.60 和 1.00, x_e 的率定结果均为 0.3。然后在不改变模型参数的情况下对其他几个不同分辨率 DEM 进行了应用,结果表明,完全根据 30"DEM 对应的参数模拟呈村流域的洪水,对于 3"、12"与 21"DEM 而言,峰值会减小,峰现时间也会滞后。分辨率越高,即栅格单元越小,洪水过程的推移坦化现象越明显。分析其原因,可能主要是由于汇流参数 k_e

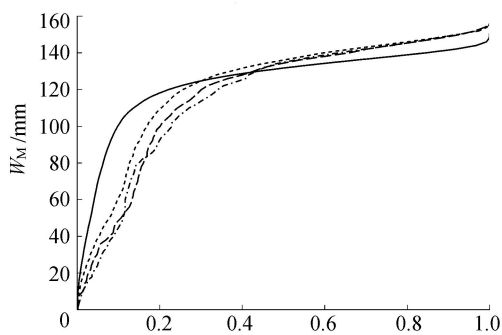
取值未作改变所造成的。 k_e 反映了不同水源在栅格单元上的汇流时间,随着 DEM 分辨率的提高,计算单元尺度减小,相应的汇流时间应有所减小,因此需要对 k_e 进行重新率定。通过对 k_e 重新率定后发现,若以 30"DEM 对应的 k_e 率定结果为准,不同分辨率对应的 $k'_e \approx k_e/n$ (n 为 DEM 分辨率变化的倍数),即可以根据计算单元的尺度对该参数进行校正。表 1 为只率定 k_e 而不改变其他参数情况下,不同分辨率 DEM 所对应的栅格型新安江模型模拟结果的合格率、平均相对误差水平以及确定性系数统计,各精度评定指标均根据 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》计算得到。由表 1 可以看出,通过对汇流参数 k_e 进行尺度校正,模型均能取得较高的模拟精度,表明流域汇流速度与总的汇流时间不受计算单元尺度的影响。

表 1 不同分辨率 DEM 对应的栅格型新安江模型模拟结果误差统计

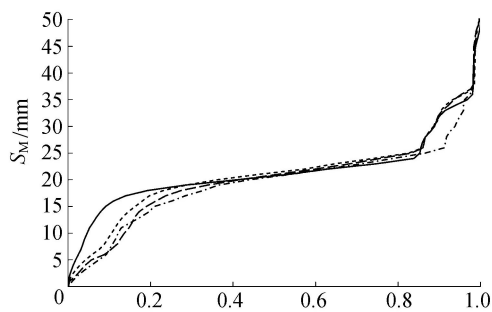
洪水期	DEM 分辨率	合格率/%			平均相对误差水平			确定性系数均值
		径流深相对误差	洪峰相对误差	峰现时差	径流深相对误差/%	洪峰相对误差/%	峰现时差/h	
率定期	3"	100	90.9	95.5	5.2	10.4	1.5	0.93
	12"	100	90.9	95.5	5.2	10.2	1.5	0.93
	21"	100	90.9	90.9	5.1	10.1	1.8	0.92
	30"	100	90.9	90.9	5.1	10.2	1.9	0.92
检验期	3"	100	80.0	90.0	4.7	14.9	1.3	0.94
	12"	100	80.0	90.0	4.7	14.6	1.3	0.94
	21"	100	90.0	90.0	4.6	14.5	1.3	0.94
	30"	100	90.0	90.0	4.6	14.3	1.3	0.94

表 1 和图 2 的应用结果表明,虽然利用高分辨率 DEM 能够获得高精度的数字流域结果,但并不一定能够获得更高精度的分布式水文模拟结果。由表 1 可以看出,在 3"、12"、21"与 30"这 4 种 DEM 分辨率情况下,栅格型新安江模型的模拟精度相当,采用 30"DEM 不仅能够提高模型的运行时效,也能取得较好的应用效果。此外,模型在进行栅格单元产流计算时,其参数可以根据每个单元内的土壤类型、植被覆盖等下垫面特征进行提取,在分析 DEM 分辨率对模型影响时,所用的土壤及植被类型数据并没有改变,因此提取的参数分布变化不大。以 W_M 与 S_M 两个参数为例,图 3 为不同分辨率 DEM 对应的蓄水容量分布曲线(横坐标为不同的 W_M 与 S_M 值所占的流域面积比例),该曲线是利用式(1)和式(2)计算每个单元对应的 W_M 与 S_M 后统计出的两者在流域上总的分布情况。图 3 表明不同分辨率 DEM 对应的张力水和自由水蓄水容量曲线相似度较高,总体趋势基本一致。由此可以看出,采用客观合理的参数估计方法能够在一定程度上降低参数对计算单元

— 3"DEM ---- 12"DEM - - - 21"DEM - · - · 30"DEM



(a) 张力水



(b) 自由水

图3 不同分辨率 DEM 对应的蓄水容量分布曲线

尺度的依赖性。

4 结 语

随着计算机、地理信息系统、遥感等新兴技术以及水文学理论的进一步发展,基于 DEM 的分布式水文模型成为水文模型新的发展方向。本文采用的栅格型新安江模型,即是以 DEM 为基础构建的松散结构分布式模型,该模型可以较好地考虑降雨和地形地貌、土壤、植被等下垫面条件的空间变异性。

考虑到在实际应用与研究中,DEM 分辨率对分布式模型有着重要的影响,以皖南山区呈村流域为例,针对 3"、12"、21"与 30"这 4 种分辨率的 DEM,探讨了分辨率对栅格型新安江模型的影响。研究结果表明,在不同分辨率情况下进行呈村流域的洪水模拟,通过对汇流参数 k_e 进行尺度校正,模型均可以取得较高的模拟精度,利用土壤、植被等下垫面特征估算模型参数有利于降低参数的尺度依赖性;此外,DEM 分辨率越高,流域数字化的精度相对越高,但模型的应用效果并不一定越好。一般而言,分辨率过高,会导致分布式模型的计算负担过重,在一定程度上会降低其实用性。对于中尺度流域而言,采用 30"DEM 不仅能够提高模型的运行时效,也能取得较好的应用效果。

栅格型新安江模型在实际应用时,只考虑了降

雨与下垫面特征在不同计算单元之间的空间变异性,而在每个单元内,则认为各个要素空间分布均匀,如何更好地考虑其在计算单元内的空间变异性,还有待更深入的研究。

参考文献:

- [1] 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. The present and future of the distributed hydrological models[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2004,24(2):55-58. (in Chinese))
- [2] 熊立华,郭生练. 分布式流域水文模型[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.
- [3] 芮孝芳,石朋. 数字水文学的萌芽及前景[J]. 水利水电科技进展,2004,24(6):55-58. (RUI Xiaofang, SHI Peng. Seeds and prospects of digital hydrology [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004,24(6):55-58. (in Chinese))
- [4] VIEUX B. Distributed hydrologic modeling using GIS [M]. Dordrecht:Kluwer Academic Publishers,2001.
- [5] BEVEN K J. Rainfall-runoff modelling: the primer[M]. West Sussex,UK:John Wiley & Sons,2012.
- [6] 李致家,姚成,汪中华. 基于栅格的新安江模型的构建和应用[J]. 河海大学学报:自然科学版,2007,35(2):131-134. (LI Zhijia, YAO Cheng, WANG Zhonghua. Development and application of grid-based Xinanjiang model[J]. Journal of Hohai University: Nature Sciences, 2007,35(2):131-134. (in Chinese))
- [7] 李致家,姚成,章玉霞,等. 栅格型新安江模型的研究[J]. 水力发电学报,2009,28(2):25-33. (LI Zhijia, YAO Cheng, ZHANG Yuxia, et al. Study on grid-based Xinanjiang model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2009,28(2):25-33. (in Chinese))
- [8] YAO Cheng, LI Zhijia, BAO Hongjun, et al. Application of a developed Grid-Xinanjiang model to Chinese watersheds for flood forecasting purpose [J]. Journal of Hydrologic Engineering,2009,14(9):923-93.
- [9] 姚成,章玉霞,李致家. 扩散波与马斯京根法在栅格汇流演算中的应用比较[J]. 河海大学学报:自然科学版,2013,41(1):6-10. (YAO Cheng, ZHANG Yuxia, LI Zhijia. Application and comparison of cell-to-cell diffusion wave and Muskingum routing methods [J]. Journal of Hohai University: Nature Sciences,2013,41(1):6-10. (in Chinese))
- [10] 芮孝芳,凌哲,刘宁宁,等. 新安江模型的起源及其进一步发展的建议[J]. 水利水电科技进展,2012,32(4):1-5. (RUI Xiaofang, LIN Zhe, LIU Ningning, et al. Origin of Xinanjiang model and its further development [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2012,32(4):1-5. (in Chinese))

(下转第 88 页)

- 2006(8):31-33. (in Chinese))
- [18] 蔡为武. 白山拱坝钻孔取芯试验成果分析与探讨[J]. 水电站设计, 1998(1):77-82. (CAI Weiwu. Test result analysis and discussion on boring for core at baishan arch dam [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1998(1):77-82, 97. (in Chinese))
- [19] 李承木. MgO 混凝土自生体积变形的长期试验研究成果[J]. 水力发电学报, 1999(2):11-19. (LI Chengmu. An experimental study of the autogenous volume deformation of the MgO concrete [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1999(2):11-19. (in Chinese))
- [20] 袁明道, 李承木, 扬光华. MgO 微膨胀混凝土自生体积变形的长期温度效应研究与仿真计算模型的探讨[C]//第18届(2002年度)科研成果学术论文报告文集. 广州:广东省水利水电科学研究院, 2003:214-223.
- [21] 李承木. MgO 微膨胀混凝土的基本性能研究[C]//陈其武, 李晓新. 氧化镁混凝土筑坝技术文集. 北京:水利水电规划设计总院, 1994:46-68.
- [22] 李承木. 铜头拱坝外掺氧化镁混凝土的基本性能研究[C]//铜头拱坝建设文集. 成都:水利水电混凝土坝信息网, 2004:71-84.
- [23] 李晓勇, 李万军, 李承木. 关于对混凝土压蒸安定性试验若干影响因素的研究[J]. 水电站设计, 2013(1):104-109. (LI Xiaoyong, LI Wanjun, LI Chengmu. Study of several factors affecting concrete compression steaming stability testing [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2013(1):104-109. (in Chinese))
- [24] 李承木. 论我国 MgO 混凝土筑坝技术的发展历史与现状[J]. 广东水利水电, 2012(9):1-7. (LI Chengmu. Development and status of MgO concrete dam technology [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2012(9):1-7. (in Chinese))

(收稿日期:2012-10-15 编辑:熊水斌)

(上接第14页)

- [11] 姚成, 纪益秋, 李致家, 等. 栅格型新安江模型的参数估计及应用[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2012, 40(1):42-47. (YAO Cheng, JI Yiqiu, LI Zhijia, et al. Parameter estimation and application of grid-based Xin'anjiang model [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012, 40(1):42-47. (in Chinese))
- [12] YAO Cheng, LI Zhijia, YU Zhongbo, et al. A priori parameter estimates for a distributed, grid-based Xinanjiang model using geographically based information [J]. Journal of Hydrology, 2012, 468/469:47-62.
- [13] ANDERSON R, KOREN V, REED S. Using SSURGO data to improve Sacramento Model a priori parameter estimates [J]. Journal of Hydrology, 2006, 320:103-106.
- [14] 赵人俊. 流域水文模拟[M]. 北京:水利电力出版社, 1984.
- [15] 赵人俊, 王佩兰. 新安江模型参数的分析[J]. 水文, 1988(6):2-9. (ZHAO Renjun, WANG Peilan. Analysis of the parameters of the Xinanjiang model [J]. Journal of China Hydrology, 1988(6):2-9. (in Chinese))
- [16] KOREN V, SMITH M, WANG D, et al. Use of soil property data in the derivation of conceptual rainfall-runoff model parameters[C]//Proceedings of the 15th Conference on Hydrology. Long Beach:AMS, 2000:103-106.
- [17] 中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据服务平台. SRTM 90 米分辨率数字高程原始数据[EB/OL]. [2012-09-28]. <http://datamirror.csdb.cn>.

(收稿日期:2012-11-28 编辑:熊水斌)

(上接第76页)

- [6] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33:379-392.
- [7] THOMAS H R, HE Y. Coupled heat-moisture transfer theory for deformable unsaturated soil and its algorithmic implementation [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1997, 40(18):3421-3441.
- [8] WONG T T, FREDLUND D G, KRAHN J. Numerical study of coupled consolidation in unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(6):926-937.
- [9] 路为, 白冰, 陈从新. 岩质顺层边坡的平面滑移破坏机制分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(2):204-207. (LU Wei, BAI Bing, CHEN Congxin. Analysis of mechanism of plane sliding failure for bedded rock slopes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2):204-207. (in Chinese))
- [10] 荣冠, 王思敬, 王恩志, 等. 强降雨下元磨公路典型工程边坡稳定性研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2008, 27(4):704-711. (RONG Guan, WANG Sijing, WANG Enzhi, et al. Stability analysis of yuanmo highway slope under intensive rainfall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4):704-711. (in Chinese))
- [11] 戚国庆, 黄润秋, 速宝玉, 等. 岩质边坡降雨入渗过程的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4):625-629. (QI Guoqing, HUANG Runqiu, SU Baoyu, et al. Numeric simulation on rainfall infiltration on rock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4):625-629. (in Chinese))
- [12] 刘俊新, 刘育田, 胡启军. 非饱和地表径流-渗流和流固耦合条件下降雨入渗对路堤边坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3):903-910. (LIU Junxin, LIU Yutian, HU Qijun. Stability of embankment slope subjected to rainfall infiltration considering both runoff-underground seepage and fluid-solid coupling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3):903-910. (in Chinese))

(收稿日期:2012-10-15 编辑:熊水斌)