HBV 模型在富春江水库流域临界致灾面雨量确定中的应用

潘娅英[1], 马得莲[2], 张 青[1], 王亚男[1], 骆月珍[1]
(1. 浙江省气象服务中心, 浙江 杭州 310017; 2. 浙江珊溪经济发展有限责任公司, 浙江 温州 325000)

摘 要: [目的] 研究分析 HBV 模型对于富春江流域径流序列模拟的适用性,并通过水位与径流量的关系,得到该流域各级水位的临界致灾面雨量,为暴雨灾害风险预警和评估业务提供服务产品,也为富春江水库的生产调度提供重要依据。[方法] 以富春江水力发电站为研究区,应用研究区气象资料和 HBV 水文模型开展研究。[结果] ①应用 HBV 水文模型模拟富春江流域径流量,在序列的率定期和验证期,模拟与实测的径流过程分布一致,模拟径流峰值区与大降水的实况分布比较一致,模拟与实测洪峰的平均相对误差小于 5%,经率定后的 HBV 模型在富春江流域的模拟效果较好。②通过建立降水、径流、水位三者的响应关系,可以确定水库在警戒水位、设计洪水位时不同前期水位的临界面雨量。[结论] HBV 水文模型在研究区具有一定的适用性。当预报有临界面雨量时,水库可以根据雨量、径流的预报信息做出对水位的科学调控。

关键词: HBV 模型; 参数率定; 临界面雨量; 富春江水库
文献标识码: B **文章编号**: 1000-288X(2018)06-0151-05 **中图分类号**: P49

文献参数: 潘娅英, 马得莲, 张青, 等. HBV 模型在富春江水库流域临界致灾面雨量确定中的应用[J]. 水土保持通报,2018,38(6):151-155. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.06.023. Pan Yaying, Ma Delian, Zhang Qing, et al. Application of HBV model in determination of critical catastrophic surface rainfall in Fuchunjiang reservoir basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(6):151-155.

Application of HBV Model in Determination of Critical Catastrophic Surface Rainfall in Fuchunjiang Reservoir Basin

PAN Yaying[1], MA Delian[2], ZHANG Qing[1], WANG Yanan[1], LUO Yuezhen[1]
(1. *Zhejiang Meteorological Service Center, Hangzhou, Zhejiang* 310007, *China*;
2. *Zhejiang Shanxi Economic Development Co. Ltd., Wenzhou, Zhejiang* 325000, *China*)

Abstract: [Objective] The applicability of HBV model to the runoff sequence simulation of Fuchun River basin was investigated, and the critical disaster-causing surface rainfall of the water level at all levels of the basin was determined through the relationship between water level and runoff in order to provide a service product for the storm disaster risk warning and evaluation and an important basis for the production scheduling of Fuchunjiang Reservoir. [Methods] Taking Fuchunjiang hydropower station as a study area, the meteorological data and HBV hydrological model of the study area were applied. [Results] ① Application of the HBV hydrological model in simulating Fuchunjiang river basin runoff, in a sequence of regular rate and validation period, showed an agreement between the simulated and measured distributions of runoff process. There also was a good relationship between the runoff peak area and live distribution of heavy precipitation. Besides, the mean relative error between the simulated and measured flood peak is less than 5%, indicated a good performance carried out by the calibrated HBV model in the study area. ② Based on the response relationships among the precipitation, runoff, and water level, the warning water level of reservoir and critical surface rainfall could be determined. [Conclusion] The HBV hydrological model performed well to a certain degree in the study area. The reservoir can make a scientific regulation in water level according to the forecast information of rainfall and runoff, when the critical surface rainfall is predicted.

Keywords: **HBV model; parameter calibration; interfacial rainfall; Fuchunjiang reservoir**

收稿日期:2018-05-07 **修回日期**:2018-06-26
资助项目:浙江省科技厅公益资助项目"基于气象—水文耦合模型的中小河流域洪水气象风险等级预报技术研究"(2017C33148)
第一作者:潘娅英(1977—),女(汉族),浙江省景宁县人,硕士,高级工程师,主要从事专业气象服务研究。E-mail:34694814@qq.com。
通讯作者:骆月珍(1963—),女(汉族),浙江省建德市人,学士,高级工程师,主要从事专业气象服务研究。Email:1515879608@qq.com。

浙江省属典型的亚热带季风气候，夏季炎热多雨，冬季低温少雨。省内江河众多，流域面积占全省陆域面积的 47%。特定的地域位置、气象条件以及地形地貌特点，决定了浙江省是一个洪涝、干旱灾害最为频繁发生的省份。另一方面，浙江省水库较多，水库调度受天气的影响极大，当发生强降水引发流域洪水时，水库水位迅速升高，如果调度不当，则将严重影响水电站的安全经济运行和水库综合效益的发挥。因此，让气象和水文信息更好地有机结合，实现流域洪涝灾害的监测预警，重点在于研究流域径流和降水的相应关系，进而确定流域的致灾临界面雨量[1-2]，为电力、水库、水文、政府等部门提供流域暴雨、径流预报以及流域洪水致灾预警，为其制定科学的防洪防汛方案提供重要参考依据。因此，本研究基于浙江省富春江流域实测径流与 HBV 模型模拟径流的对比，研究分析 HBV 模型对于富春江流域径流序列模拟的适用性，并通过水位与径流量的关系，得到该流域各级水位的临界致灾面雨量，为暴雨灾害风险预警和评估业务提供服务产品，为富春江水库的生产调度提供重要依据。

1 研究区概况

研究区富春江水力发电站位于浙江省杭州市桐庐县境内，钱塘江干流中游富春江七里垅峡谷的出口处，电站于 1968 年 12 月建成发电，是一座低水头径流式日调节水电站。水库控制流域面积 31 645 km^2，干流长 309.8 km，正常高水位 23 m，库容 4.40×10^8 m^3 刚才。电站有 6 台机组，总装机容量 3.60×10^5 kW·h，发电机组设计流量均为 500 m^3/s。溢流坝为混泥土实体重力坝，有泄洪孔 17 个，最大泄洪量 1.87×10^4 m^3/s。由于水库库容小，流域面积大，雨水充沛，洪水频繁，弃水机会多，为了开展科学的水库调度以及调节水库上下游洪涝灾害的影响，更好地发挥电站潜力，充分利用水力资源，因此需要更加合理地利用气象信息。

2 资料和方法

2.1 数据来源

气象数据包括 2001—2010 年富春江水库流域内 18 个水文站的降雨资料和 8 个气象站点（开化、江山、衢州、东阳、永康、金华、兰溪、建德）的逐日最高（低）气温、平均相对湿度、日照时数、日降水量等气象要素资料。水文数据包括 2001—2010 年富春江水电站实测的入库流量、水位资料。高程数据为分辨率 90 m 的数据，来自于中国科学院国际科学数据服务平台。土地利用数据为 1:10 万的基础数据集，流域面雨量通过各站点的降水量资料由泰森多边形法计算得到。

2.2 HBV 模型

HBV 模型[3-5]是瑞典水利气象研究中心在 20 世纪 70 年代开发研制的基于 DEM 划分子流域的半分布式概念性水文模型，目前已被应用于流域水文过程模拟和流域对不同的气候变化、水资源评估、冰川物质平衡等领域，具有输入参数少，物理意义明确，结构层次清晰，适用性强和模拟精度高等优点。模型综合考虑了多种影响径流的因素，把降雨、融雪、产汇流、模型率定和实时预报等相结合，形成了一套完整的模型预报方案。模型由气候资料插值、蒸散发估算、土壤湿度计算过程、产流过程、汇流过程等模块组成。模型充分考虑下垫面和降水空间分布的差异，将流域划分为多个子流域，分别模拟各子流域的径流过程，之后经过河道汇流形成流域出口的径流过程。模型输入数据包括：研究区 DEM、土地利用数据、土壤持水能力、日平均气温、日最低气温、日最高气温、日降水量等，输出为各子流域和总出水口的日径流深。模型参数包括积雪和融雪参数、温度阈值参数、退水系数等 30 多个有物理意义的参数，通过调整参数使模型在率定期内达到最优拟合。为了判别 HBV 模型的模拟效果，究采用 R^2 和 ME 系数来衡判别型模拟值与观测值之间的拟合程度，其表达式为：

$$R^2=\frac{[\sum(Q_{obs}-\overline{Q_{obs}})(Q_{sim}-\overline{Q_{min}})]^2}{\sum(Q_{obs}-\overline{Q_{obs}})^2\sum(Q_{sim}-\overline{Q_{sim}})^2} \quad (1)$$

$$ME=1-\frac{\sum(Q_{obs}-Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs}-\overline{Q_{obs}})^2} \quad (2)$$

式中：Q_{obs}，$\overline{Q_{obs}}$——实测径流量和实测平均径流量；Q_{sim}，$\overline{Q_{sim}}$——模拟径流量和模拟平均径流量；R^2——确定系数；ME——NASH 效率系数，取值在 0～1 之间，当 R^2 和 ME 越接近 1，说明模拟径流与实测径流的拟合程度越高，模拟效果越好[6-7]。

3 HBV 模型在富春江流域的应用

3.1 HBV 模型适用性评价

运行 HBV 模型，需要准备基础输入数据。首先利用 GIS 软件通过投影变换得到富春江流域的高程数字地形图，并对输入栅格数据 DEM 进行处理，结合水系图划分子流域，在此基础上根据不同土地利用和土壤类型的组合在每一个子流域内进一步划分水文相应单元，然后，再分别输入各子流域的土地利用数据和土壤持水力数据，通过计算逐个水文响应单元的径流量，最后得到流域的总径流量（图 1）。

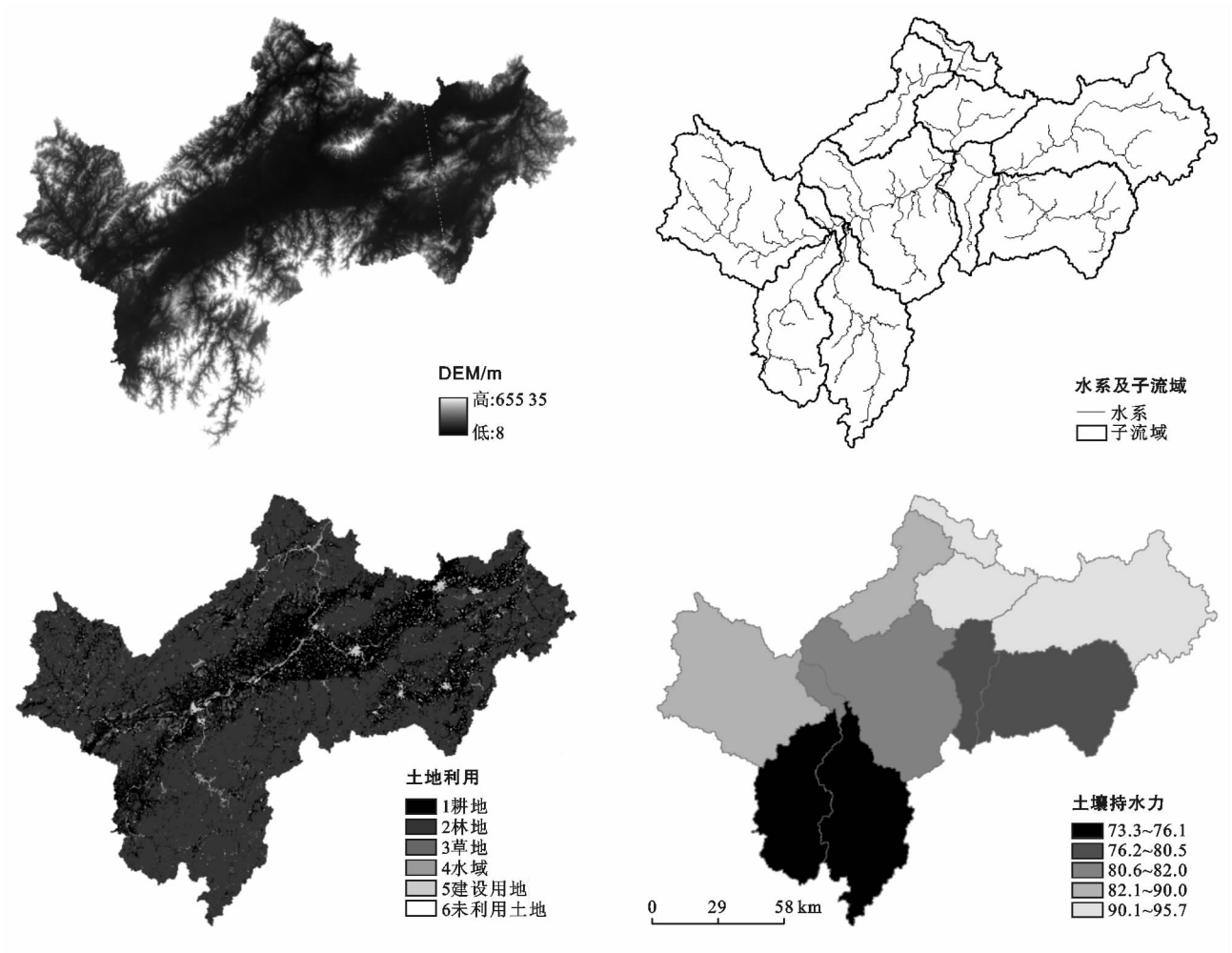


图 1　富春江流域 DEM、水系、土地利用、土壤持水力

选取富春江流域 2001 年 1 月 1 日到 2006 年 12 月 31 日的数据对模型进行率定,确定模型参数,2007 年 1 月 1 日到 2010 年 12 月 31 日为模型验证期,用于检验模型的模拟效果。

经模型率定结果显示,在率定期内模型的 NASH 系数为 0.64(图 2—3),模拟与实测径流的过程分布比较一致,模拟径流峰值区与大降水的实况分布比较一致,模拟洪峰与实测值的平均相对误差小于 5%。经过率定后的 HBV 模型在富春江流域的整体模拟效果具有较好的适用性。

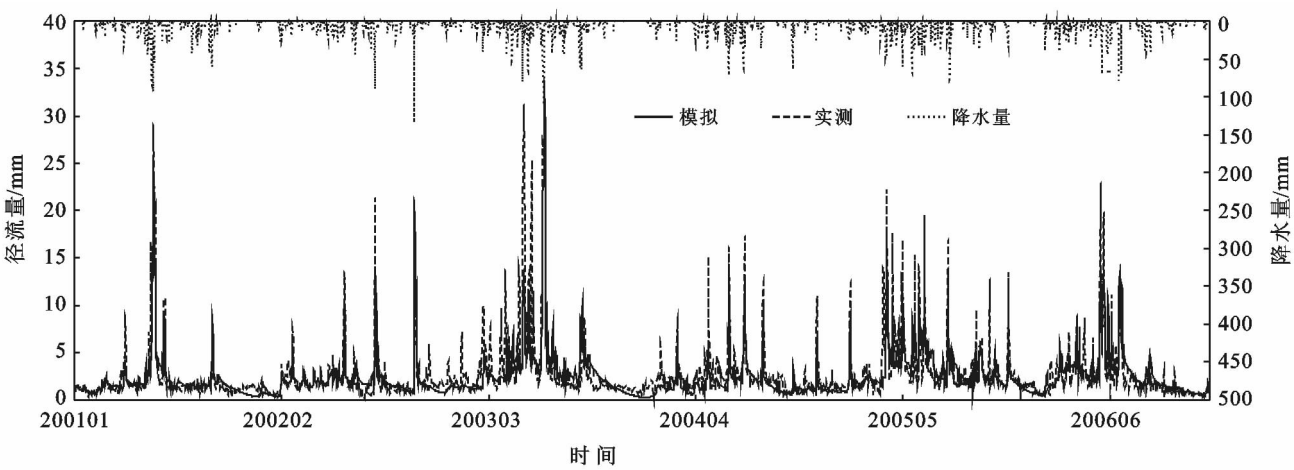


图 2　富春江流域率定期日径流模拟与实测的比较

验证期内模拟情况与率定期大致相似，验证期内模型的NASH系数为0.61，模拟径流值与实测径流分布比较一致，可见，HBV水文模型对富春江流域日径流模拟比较一致，模型在该区域具有一定的适用性。

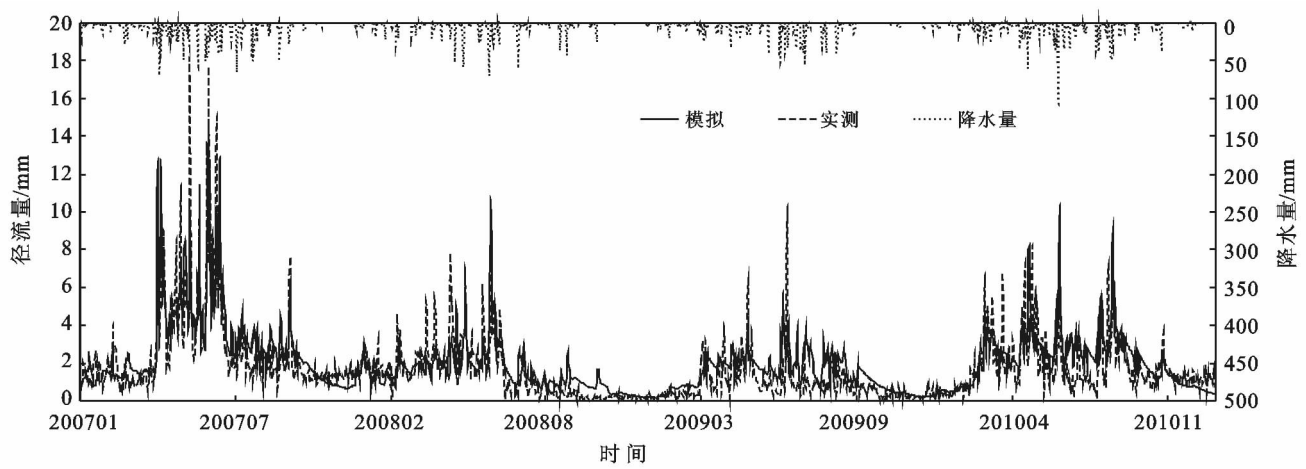


图3 富春江流域率定期日径流模拟与实测的比较

3.2 水库临界面雨量的确定

3.2.1 降水、径流与水位三者的关系 流域洪水是否达到致灾等级的标准是根据水位来判定的，水库的警戒水位就是这样一个判定洪水是否达到调度致灾预警等级的指标。利用HBV模型可以建立降水和径流的响应关系；由于水库的水位与库容的对应关系是确定的，图4为富春江水库的水位库容关系图。假设水库没有发电泄洪，其出库流量为零时，水库入库径流引起水位升高、库容增加，则此时的入库径流与库容的增量近似相等，由此可以建立径流与水位的关系；HBV模型输出的径流通过库容与水位关系得到对应的水位数据。至此建立了由降水到径流，由径流到水位三者的关系[8-9]。根据不同的警戒水位回算出对应的临界面雨量，从而为暴雨灾害风险预警和评估业务中提供重要的参考依据。

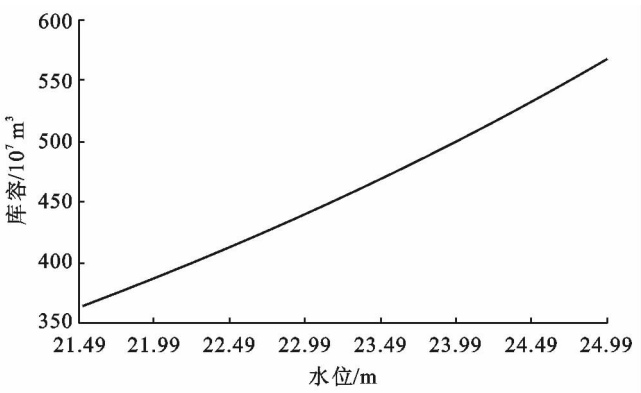


图4 富春江水库水位—库容关系

3.2.2 不同前期水位的致灾临界雨量 流域洪水灾害的发生是气象、地形、下垫面和水利防洪设施等要素共同作用的结果，而致灾临界面雨量是一个与前期水文条件、流域自身状态等多方因素密切相关的动态值[10]，首先按照图5运行HBV模型让水位升高到一定高度，该水位作为前期基础水位，然后给定一个面雨量值进行径流模拟，当模拟输出的径流对应的水位没有达到临界水位时，调整面雨量值的输入，继续通过HBV模型进行模拟，当输出的径流对应的水位达到临界水位时，就把此时对应的面雨量值作为临界雨量。

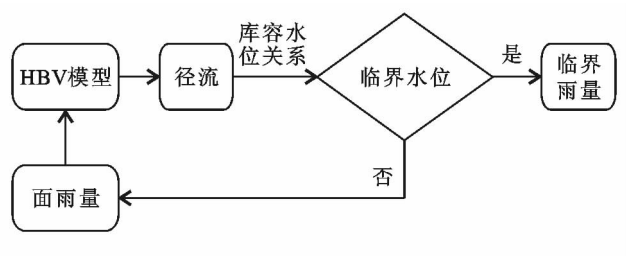


图5 HBV模型确定致灾临界面雨量流程图

富春江水库日常的生产调度水位一般控制在21.5～23.5 m之间运行，23.5m为其警戒水位，24.7 m为设计洪水位（百年一遇洪水位）。当预计水位超出23.5 m小于24.7 m时，水库一般采取发电泄洪的方式将水位下调；当预计水位超过24.7m时，则采取开闸泄洪的方式加速降低水位。因此富春江水库流域以23.5，24.7 m作为2个临界判别条件，研究得出前期不同水位下对应的24 h临界面雨量值阈值的分析结果（图6）。由此可知，临界雨量与前期水位的关系为非线性特征，临界雨量随前期基础水位升高而减小。当河流水位达到相应最高位时，河道土壤比较松软，这个时期即使有较小的降水，也有可能导致洪水致灾。

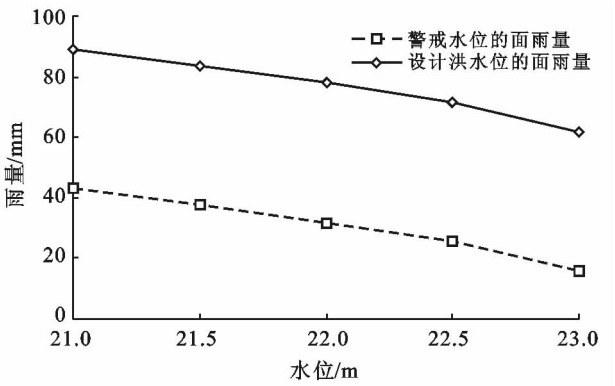


图 6　警戒水位和设计洪水水位下前期不同水位的临界面雨量

4　结 论

应用 HBV 水文模型模拟富春江流域径流量，在序列的率定期和验证期，模拟与实测的径流过程分布一致，模拟径流峰值区与大降水的实况分布比较一致，模拟与实测洪峰的平均相对误差小于 5%。经率定后的 HBV 模型在富春江流域的整体模拟效果较好。可见对于富春江流域这样面积较大，HBV 在此具有一定的适用性。

另外，通过建立降水、径流、水位三者的响应关系，确定水库在警戒水位、设计洪水位时不同前期水位的临界面雨量。该气象产品主要是针对于气象部门在暴雨灾害风险预警和评估业务中的应用研发的。当面雨量预报达到临界面雨量值时，气象部门可向水库、电力、防汛等相关单位和部门提供，雨量、径流预报信息和致灾预警信息的发布有利于水库的科学调洪和流域防洪减灾工作的开展。而对于水库来讲，雨量、径流、水位这三者的预报更加有利于水库调洪的决策需求，但因目前水库与气象部门之间尚未实时共享相关信息，气象部门暂能提供雨量和径流的实时预报产品，水位实时预测还需水库部门结合其实际水情进行科学决策制定。

[参 考 文 献]

[1] 张调风，赵全宁，时兴合，等. HBV 模型在隆务河流域洪水致灾临界面雨量研究中的应用[J]. 中国农业大学学报，2017，22(3)：69-75.

[2] 谷一，郝振纯，王国庆，等. HBV 模型在逊比拉河流域的适用性研究[J]. 水资源与水工程学报，2017，28(1)：20-25.

[3] 刘义花，鲁延荣，周强，等. HBV 水文模型在玉树巴塘河流域洪水临界雨量阈值研究中的应用[J]. 水土保持研究，2015，22(2)：224-228.

[4] 王有恒，谭丹，景元书. HBV 水文预报模型在白龙江流域的应用研究[J]. 水土保持通报，2015，35(3)：218-221.

[5] 林志强，洪健昌，尼玛吉，等. 基于 HBV 模型的尼洋曲流域上游洪水致灾临界面雨量研究[J]. 水土保持通报，2016，36(4)：2-26.

[6] 卢燕宇，田红. 基于 HBV 模型的淮河流域洪水致灾临界雨量研究[J]. 气象，2015，41(6)：755-760.

[7] 吴辰，郝振纯，基于 HBV 模型的牡丹江流域的水文过程模拟研究[J]. 中国农村水利水电，2017(5)：105-109.

[8] 邵琳，王丽萍，黄海涛，等. 水电站水库调度图的优化方法与应用：基于混合模拟退火遗传算法[J]. 电力系统保护与控制，2010，38(12)：40-49.

[9] 陈颖，陈鹏翔，江远安，等. 乌鲁木齐河流域致灾洪水临界雨量分析[J]. 沙漠与绿洲气象，2017，11(2)：8-13.

[10] 何思为，南卓铜，王书功，等. 四个概念性水文模型在黑河流域上游的应用与比较分析[J]. 水文，2012，32(3)：13-19.

(上接第 150 页)

[13] 李苏醒. 气泡混合轻质土抗冲击试验与应用在机场中的有限元分析[D]. 江苏 南京：南京航空航天大学，2012.

[14] 何国杰，丁振洲，郑颖人. 气泡混合轻质土的研制及其性能[J]. 地下空间与工程学报，2009，5(1)：18-22.

[15] 顾欢达，顾熙. 河道淤泥气泡混合轻质土的性质稳定性试验[J]. 北京工业大学学报，2010，36(4)：469-474.

[16] 顾欢达，顾熙. 河道淤泥的轻质化处理及其工程性质[J]. 环境科学与技术，2010，33(9)：63-66.

[17] Tovey N K, Krinsley D H, Dent D L, et al. Techniques to quantitatively study the microfabric of soils [J]. Geoderma, 1992, 53(3/4): 217-235.

[18] 方祥位，申春妮，汪龙，等. Q_2 黄土浸水前后微观结构变化研究[J]. 岩土力学，2013，34(5)：1319-1324.

[19] 周远忠，刘新荣，张梁，等. 红黏土微观结构模型及其工程力学效应分析[J]. 地下空间与工程学报，2012，8(4)：726-731.

[20] 骆顺成，顾欢达，陈冬青. 河道淤泥气泡混合土微观构造对其力学性能的影响[J]. 水电能源科学，2016，34(9)：131-135.

[21] 章培培，顾欢达，陈冬青. 河道淤泥气泡混合土微观构造及力学性质相关性[J]. 土木建筑与环境工程，2015，37(6)：78-86.