

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2019.0044

王东升, 胡关东, 袁树堂. 基于水文相似性的预报误差修正[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(2): 140-145, 156. WANG D S, HU G D, YUAN S T. Hydrological forecasting error corrections based on hydrological similarity[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 140-145, 156. (in Chinese)

基于水文相似性的预报误差修正

王东升, 胡关东, 袁树堂

(云南省水文水资源局, 昆明 650106)

摘要: 如何进一步提高水文预报精度, 降低预报误差, 更好的服务于防洪抢险、水资源调度是水文学重要研究方向。基于水文预报误差主要影响因素在相似流域具有相似性, 致预报误差具有相似性的特性, 以相似流域各预报站预见期不同为切入点, 优选误差修正因子, 基于二次正交回归设计, 构建了预报误差模拟模型以修正预报结果, 提高精度。经怒江道街坝水文站模拟预报检验, 修正后模拟确定性系数由 0.933 提高至 0.998, 洪峰流量平均绝对误差由 $693 \text{ m}^3/\text{s}$ 降低至 $116 \text{ m}^3/\text{s}$, 洪峰流量平均相对误差由 16% 降低至 3%, 洪峰出现时间预报误差由平均 5.4 h 降低至 0.9 h, 方案精度由乙级提升至甲级。提出的基于水文相似洪水预报修正方法结构简单、计算方便、修正效果明显, 是一种高效提高洪水预报精度的方法, 适用于相似流域不同预报站洪水过程无明显差异的情形。

关键词: 水文相似; 误差修正因子; 误差模拟模型; 预报误差修正; 怒江

中图分类号: P338 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Hydrological forecasting error corrections based on hydrological similarity

WANG Dongsheng, HU Guandong, YUAN Shutang

(Yunnan Provincial Bureau of Hydrology and Water Resources, Kunming 650106, China)

Abstract: How to further improve the accuracy of hydrological forecasting, reduce forecasting errors, better serve flood control and rescue and water resources dispatching is a hot topic in hydrology. A forecasting error correction model is constructed in this study to improve the forecasting accuracy, based on the similarity theory that the same main influencing factors of hydrological forecasting in similar watersheds result in the similarity of forecasting errors. Different forecasting periods were taken as a starting point in similar watersheds. The error correction factors were based on the quadratic orthogonal regression design. The coefficient of determination increased from 0.933 to 0.998 for the Nujiang Daojieba hydrological station application. The average absolute error of the flood peak flow decreased from $693 \text{ m}^3/\text{s}$ to $116 \text{ m}^3/\text{s}$, and the average relative error of the flood peak flow decreased from 16% to 3%. The flood peak time of forecasting error reduced from an average of 5.4 hours to 0.9 hours, and the accuracy of the scheme was upgraded from Grade B to Grade A. The hydrological similar flood forecasting correction method proposed in this paper has the advantages of simple structure, easy calculation and significant correction effects, to improve the accuracy of flood forecasting. It is also applicable to the case where the water area ratios of different forecasting sections are not much different in similar watersheds, and the flooding process is not much different.

Key words: hydrological similarity; errors correction factor; errors simulation model; hydrological forecasting errors correction; Nujiang River

收稿日期: 2018-10-17 修回日期: 2019-01-07 网络出版时间: 2019-01-31

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190129.2032.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(91547205)

作者简介: 王东升(1981—), 男, 湖南隆回人, 高级工程师, 主要从事水情报预报及山洪灾害预警等研究。E-mail: 116955105@qq.com

准确可靠的洪水预报成果对于防洪调度、应急救援抢险、水资源综合利用等具有非常重要的意义。受前期土壤含水、下垫面条件、暴雨中心位置及移动、水文模型结构^[1]、模型参数^[2]等多重因素影响,实时洪水预报存在一定误差,需要在实际作业预报过程中,使用误差修正技术来减少预报误差^[3-4]。传统的误差修正技术有自回归模型及其改进法^[5],近年学者们相继提出了抗差分析^[6]、综合修正方法^[7]、集成卡尔曼滤波技术^[8]、BP神经网络模型^[9]、产流误差动态系统响应曲线^[3-4,10-11]、产流比例系数的系统响应修正方法^[12]等,均获得了一定的修正效果。根据修正过程中修正变量的不同,预报误差修正方法可以划分为输入变量修正、参数变量修正和预报结果修正^[10],其中最常用的是对输出结果的修正。具有相同或相似的下垫面结构、状态变量特征、驱动力条件、水流动力特征等的山坡或流域,可以定义为水文相似的山坡或流域^[13],水文相似对无资料或少资料流域的水问题研究和流域特征变化机理的了解具有重要的作用^[14],在开展无资料或缺乏历史观测资料地区水文模拟时,常用水文相似确定水文参数,方法包括参数移植、参数估计及参数的区域回归方法^[15-18]等,在相似流域开展水文预报,不同预报断面预报误差是否具有相似性?若存在相似性,是否可基于预报误差的相似性及预见期的不同,利用预见期相对较短断面预报误差分析结果修正预见期相对较长断面预报成果,以提高预见期较长断面预报精度?

本研究基于相似流域下垫面结构、状态变量特征、驱动力条件、水流动力特征具有相似性的特点,认为相似流域内使用同一预报模型研制不同断面预报方案,模型输入变量误差、状态变量误差、参数变量误差具有相似性,则不同断面预报误差具有相似性,提出一种基于相似流域不同断面预报误差相似的水文预报误差修正方法,通过在怒江道街坝水文站预报误差修正的应用,来检验方法的可行性及效果。

1 研究方法

应用同一水文模型分别建立相似流域内两个预见期不同预报断面水文预报方案,使用实测资料模拟预报,分析获取预见期较长预报断面(以下简称“预报修正站”)与预见期较短预报断面(“参证站”)预报模拟误差系列,参照上下游相关^[5]选取预报因子方法,在预报修正站、参证站实测洪水过程、预报模拟过程、误差系列中,优选预报误差修正因子,使

用二次回归正交旋转设计方法,构建预报修正站误差模拟模型,并率定模型结构及参数值,以之修正预报修正站预报结果。预报误差修正计算流程见图1,具体计算步骤如下。



图1 预报误差修正计算流程

Fig. 1 Flow chart of hydrological forecasting error correction

第一步:基于同期水文监测资料,同一水文模型分别构建预报修正站、参证站水文预报方案。假定*t*时,预报修正站实测值为 Q_{hi} ,参证站实测值为 q_{hi} ,预报修正站预报方案模拟值为 Q_{hi} ,参证站预报方案模拟值 q_{hi} ,参证站预见期为*t*,预报修正站预见期为*t+Δt*,预报修正站模拟误差 $\Delta Q_{hi} = Q_{hi} - Q_{hi}$,参证站模拟误差 $\Delta q_{hi} = q_{hi} - q_{hi}$ 。参照上下游相关法,初选 Q_{hi} 、 q_{hi} 、 Q_{hi} 、 q_{hi} 、 ΔQ_{hi} 、 Δq_{hi} 、 $Q_{h(i+t)}$ 、 $q_{h(i+t)}$ 、 ΔQ_{hi+t} 、 Δq_{hi+t} 为预报误差修正因子。

第二步:基于二次正交旋转回归设计及预报误差修正因子,构建预报误差 $\Delta Q_{h(i+t+\Delta t)}$ 模拟模型,式(1)。二次回归正交旋转设计是把正交设计和回归分析结合起来,在正交设计的基础上,利用回归分析,在给出的因素和指标之间找出一个明确的函数表达式,建立因果关系的数学模型,并用该数学模型预测^[19-22]。预报误差模拟模型率定过程中,可采用逐步回归分析法^[23-25]推求最优模型结构及参数,要求逐步回归分析时,每步进行F检验,以确保变量有统计意义。本文使用DPS数据处理系统逐步回归分析法率定模型,限于篇幅,模型率定计算方法详见DPS数据处理系统^[22]关于逐步回归分析内容,在此不再复述。

$$Q_{h(i+t+\Delta t)} = \sum_{i=1}^m b_i x_i + \sum_{i=1}^m b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^j b_{ij} x_i x_j + b_0 \quad (1)$$

式中: x_i 为 Q_{hi} 、 q_{hi} 、 Q_{hi} 、 q_{hi} 、 ΔQ_{hi} 、 Δq_{hi} 、 $Q_{h(i+t)}$ 、 $q_{h(i+t)}$ 、 ΔQ_{hi+t} 、 Δq_{hi+t} 等预报误差修正因子。

第三步:修正预报修正站水文预报过程,见式(2)。

$$Q_{1h(i+t+\Delta t)}^{\text{修正}} = Q_{1h(i+t+\Delta t)} + \Delta Q_{1h(i+t+\Delta t)} \quad (2)$$

式中： $\Delta Q_{1h(i+t+\Delta t)}^{\text{修正}}$ 为预报误差修正后预报修正站预报结果。

2 实例应用

2.1 流域简介及水文相似分析

怒江云南中上段,位于横断山纵谷区,河流在高黎贡山、碧罗雪山深切河谷中行进,主流与山峰高差达 2 000~3 000 m,由于两侧山脉陡峻高大,其对水汽输送的阻挡、抬升作用,造成降水量垂直方向上河谷小、山顶大,立体型气候突出,如门工附近的河谷降水量只有 400~500 mm,而两岸山坡降水量在 600~1 000 mm 以上,贡山县平均雨量达 1 638 mm,贡山-泸水两岸较高的山顶达 3 000~4 000 mm^[26]。受交通、通信、地形等恶劣建站条件影响,怒江云南中上段历史水文气象站点均集中在河谷地区,所计算的面平均雨量整体大幅偏小,严重影响预报精度。怒江云南中上段干流从上到下分别设有贡山、六库、道街坝水文站,贡山站集水面积 101 146 km²,六库站集水面积 106 681 km²,道街坝站集水面积 110 224 km²,贡山-六库区间集水面积为 5 535 km²,贡山-一道街坝站区间集水面积为 9 078 km²。六库站上距贡山站约 260 km,下距道街坝站约 115 km,贡山站来水占道街坝站来水比重较大,但汛期区间降雨形成径流对道街坝站洪水影响很大,怒江干流云南省境内道街坝水文站以上水系站点分布见图 2。贡山-六库、贡山-一道街坝站区间均为长条高山峡谷型地形地貌,且位于同一个水文分区,下垫面条件、降水、径流特征相似,且因海拔高差大,山顶降水高值区无法监测,河谷监测到的降水整体偏少情况,形成水文预报误差的前期土壤含水、下垫面条件、降水量观测误差等具有相似性,本研究以六库站为参证站,道街坝站为预报修正站。

2.2 预报误差修正模型构建及率定

(1) 水文预报方案建模

根据贡山站实测流量过程,使用马斯京根法演算至六库站得 q_{1h} 、演算至道街坝站得 Q_{1h} ;根据区间降雨、蒸发,使用新安江模型模拟获得贡山站-六库站区间产流过程 q_{2h} 、获得贡山站-一道街坝站区间产流过程 Q_{2h} 。方案参数率定使用了 2001—2007 年 6 月至 11 月贡山、六库、道街坝水文站降水、蒸发及洪水摘录资料,2008—2010 年 6 月至 11 月贡山、六库、道街坝水文站降水、蒸发及洪水摘录资料对方案精度进行了模拟检验,方案模拟过程及精度分析见图 4 及表 1、表 2 中误差修正前预报。



图 2 怒江干流云南省境内道街坝水文站以上水系站点分布
Fig. 2 Locations of hydroclimate stations of Nujiang River in Yunnan Province (above Daojieba)

(2) 选取道街坝站预报误差修正因子

参照上下游相关法预报因子选取方法,初选 h 时道街坝站预报值 $Q_{1h} + Q_{2h}$ 、道街坝站实测值 Q_h 、预报误差 $\Delta Q_h = Q_h - (Q_{1h} + Q_{2h})$ 、六库站实测值 q_h 、六库站预报误差 $\Delta q_h = q_h - (q_{1h} + q_{2h})$ 作为预报误差修正因子,根据贡山站至六库站、道街坝站预见期分析结果,拟构建道街坝站 $h+9$ 时 ΔQ_{h+9} 预报误差模拟模型。

(3) 预报误差模拟模型建模

依据第一步建立的预报方案,对 2001—2007 年 6 月至 11 月六库站、道街坝站模拟预报,并与实测洪水过程比较,计算预报误差过程,基于第二步初选的预报误差修正因子,使用二次正交旋转回归设计计算方法,构建道街坝站 ΔQ_{h+9} 预报误差模拟模型,并率定模型结构及参数,结果见式(3)。

$$\Delta Q_{h+9} = 3.527 + 0.68355 \times \Delta Q_h + 0.47599 \times \Delta q_h - 0.000044 \times Q_h \times \Delta q_h \quad (3)$$

(4)道街坝站预报结果修正

据式(2)、式(3),道街坝站水文预报误差修正预报为式(4)。

$$Q_{h+9} = Q_{1h+9} + Q_{2h+9} + 3.527 + 0.68355 \times \Delta Q_h + 0.47599 \times \Delta q_h - 0.000044 \times Q_h \times \Delta q_h \quad (4)$$

式中: Q_{h+9} 为 $h+9$ 时道街坝站预报修正值; $Q_{1h+9} + Q_{2h+9}$ 为 $h+9$ 时道街坝站原方案预报值; ΔQ_h 为 h 时道街坝站预报误差; Δq_h 为 h 时六库站预报误差。

2.3 应用结果及分析

模型构建过程中,采用贡山站、六库站、道街坝站2001—2007年6月至11月雨量、蒸发及相应洪水摘录资料拟定,2008—2010年6月至11月雨量、蒸发及相应洪水摘录资料对模型精度进行模拟检验,道街坝站预报误差模拟结果示例见图3,经预报误差模拟模型修正前后道街坝站预报结果对比示例见图4。

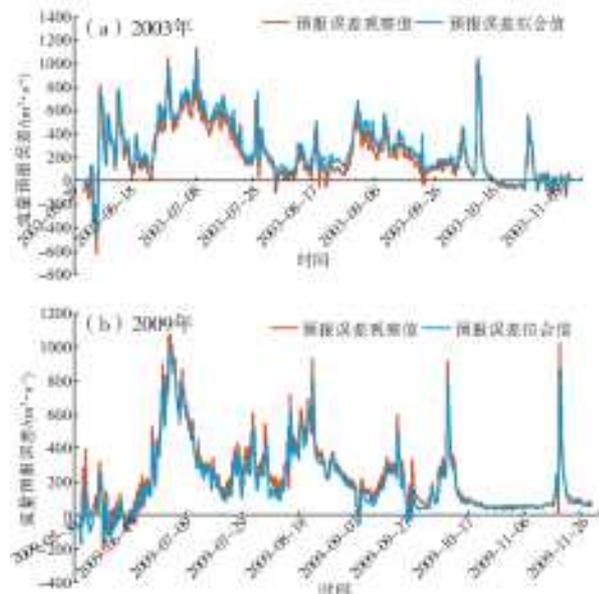


图3 2003年、2009年道街坝预报误差拟合结果
Fig.3 Forecasting errors at Daojieba station in 2003 and 2009

根据《水文情报预报规范(GBT 22482—2008)》,使用确定性系数对道街坝站预报误差的拟合结果进行检验分析,使用确定性系数、洪峰流量绝对误差、洪峰流量相对误差和峰现时间误差对道街坝站预报结果修正前后进行分析比较。

$$\text{确定性系数: } DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [y_c(i) - y_0(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [y_0(i) - \bar{y}_0]^2} \quad (7)$$

式中: DC 为确定性系数; $y_0(i)$ 为实测值; $y_c(i)$ 为预报值; \bar{y}_0 为实测值的均值; n 资料系列长度。

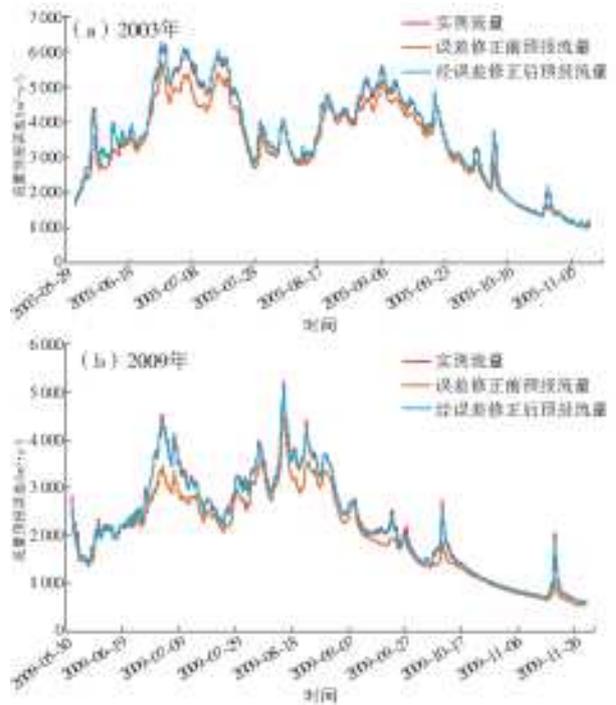


图4 2003年、2009年道街坝站误差修正前后预报结果比较
Fig.4 Comparison of forecasting results before and after error corrections at Daojieba station in 2003 and 2009

在道街坝站预报误差拟合中, DC 值最大为0.898,最小为0.728,平均为0.821,拟合效果良好,见表1。

道街坝站洪水预报结果显示,经本研究预报误差修正方法修正后, DC 平均值由0.933提高至0.998,提高0.065,即7.0%;统计2001—2010年10a内发生的64场次洪水预报结果,洪峰流量平均绝对误差由693 m^3/s 降低至116 m^3/s ,减少576 m^3/s ,减少83%,洪峰流量平均相对误差由16%降低至3%,洪峰出现时间预报误差由平均5.4 h降低至0.9 h,降低83%,预报方案精度评定由乙级上升为甲级,效果理想,见表1、2。

表1 2001—2010年道街坝站预报拟合 DC 分析结果

Tab.1 DC forecasting results from 2001 to 2010 at Daojieba station

年份	误差拟合 DC	误差修正前预报 DC	经误差修正后预报 DC
2001	0.768	0.9640	0.997
2002	0.728	0.9770	0.998
2003	0.855	0.9430	0.997
2004	0.820	0.9444	0.997
2005	0.820	0.9690	0.999
2006	0.898	0.9480	0.998
2007	0.828	0.8960	0.997
2008	0.852	0.9260	0.998
2009	0.887	0.9110	0.997
2010	0.749	0.8480	0.997
平均	0.821	0.9330	0.998

表 2 误差修正前后道街坝站场次洪水预报结果精度比较

Tab. 2 Comparison of forecasting accuracy at Daojieba station before and after error corrections

年份	洪水场次数	误差修正前预报结果			经误差修正后预报结果		
		峰现时间 误差/h	洪峰流量绝对 误差/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	洪峰流量 相对误差/%	峰现时间 误差/h	洪峰流量绝对 误差/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	洪峰流量 相对误差/%
2001	8	6.8	598	13	0.8	130	3
2002	6	4.0	541	11	1.0	41	1
2003	8	2.6	391	7	1.1	56	1
2004	7	3.3	959	18	1.3	217	4
2005	6	1.5	514	10	0.5	120	3
2006	4	6.8	813	18	0.0	158	4
2007	9	8.3	953	24	0.7	170	4
2008	6	10.0	675	15	1.5	65	1
2009	6	5.5	845	26	0.5	107	3
2010	4	5.3	607	12	2.3	72	1
全部场次	64	5.4	693	16	0.9	116	3

3 结 论

本文基于相似流域内水文特性具有相似性,则相似流域内使用同一预报模型研制的不同断面预报方案,形成预报误差的模型输入变量误差、状态变量误差、参数变量误差具有相似性,使用二次回归正交旋转设计方法,提出了一种基于相似流域不同预见期预报断面水文预报误差修正方法。经在怒江道街坝水文站预报检验,修正后模拟确定性系数由 0.933 提高至 0.998,洪峰流量平均绝对误差由 $693 \text{ m}^3/\text{s}$ 降低至 $116 \text{ m}^3/\text{s}$,洪峰流量平均相对误差由 16% 降低至 3%,洪峰出现时间预报误差由平均 5.4 h 降低至 0.9 h,方案由乙级提升至甲级。

本文提出的基于水文相似洪水预报修正方法结构简单、计算方便、修正效果明显,是一种高效提高洪水预报精度的方法,同时降低了对区间监测资料的需求,但需要注意的是,本方法适用于相似流域不同预报断面流域面积比相差不大、洪水过程无明显差异情形。

参考文献(References):

- [1] HOSHIN G, MARTYN P C, JASPER A V, et al. Towards a comprehensive assessment of model structural adequacy[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(8): 301. DOI: 10.1029/2011WR011044.
- [2] JASPER A V, HOSHIN G, LUIS A B, et al. Effective and efficient algorithm for multi-objective optimization of hydrologic models[J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(8): 12-14. DOI: 10.1029/2002WR001746.
- [3] 司伟, 余鸿慧, 包为民, 等. 面平均雨量的系统响应曲线

修正方法及其在富春江流域洪水预报中的应用[J]. *水力发电学报*, 2016, 35(1): 38-45 (SI W, YU H H, BAO W M, et al. Area-mean rainfall updating by system response curve method and application to real-time flood forecasting of Fuchunjiang basin[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(1): 38-45. (in Chinese)) DOI: 10.11660/slfdxb.20160105.

- [4] 司伟, 包为民, 瞿思敏, 等. 基于面平均雨量误差修正的实时洪水预报修正方法[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(2): 533-541. (SI W, BAO W M, QU S M, et al. Real-time flood forecast updating method based on mean areal rainfall error correction[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(2): 533-541. (in Chinese)) DOI: 10.18307/2018.0224.
- [5] 包为民. 水文预报[M]. 第五版. 北京: 中国水利水电出版社, 2017. (BAO W M. *Hydrological forecasting*. Fifth edition. Beijing: China Water & Power Press, 2017. (in Chinese))
- [6] 赵超, 洪华生, 包为民, 等. 实时洪水抗差预报系统研究[J]. *水文*, 2008, 28(2): 27-29 (ZHAO C, HONG H S, BAO W M, et al. Application of robust estimation in real time flood forecasting system[J]. *Journal of China Hydrology*, 2008, 28(2): 27-29. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2008.02.007.
- [7] 瞿思敏, 包为民. 实时洪水预报综合修正方法初探[J]. *水科学进展*, 2003, 14(2): 167-171. (QU S M, BAO W M. Comprehensive correction of real-time flood forecasting[J]. *Advances in Water Scienc*, 2003, 14(2): 167-171. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1001-6791.2003.02.008.
- [8] 岳延兵, 李致家, 李振兴. 基于集合 kalman 滤波的河道洪水预报研究[J]. *水电能源科学*, 2011, 29(1): 26-29.

- (YUE Y B, LI Z J, LI Z X. Study of river channel flood forecasting by ensemble Kalman filtering [J]. Water Resources and Power, 2011, 29 (1): 26-29. (in Chinese)) DOI:1000-7709(2011)01-0026-04.
- [9] 戴会超,何文社,曹叔尤. 基于误差修正的BP神经网络模型在河道洪水预报中的应用[J]. 水电能源科学, 2006, 24(1): 69-71. (DAI H C, HE W S, CAO S Y. Application of BP neural network model based on error correction in river flood forecasting [J]. Water Resources and Power, 2006, 24 (1): 69-71. (in Chinese)) DOI:1000-7709(2006)01-0069-03.
- [10] 司伟,包为民,瞿思敏. 洪水预报产流误差的动态系统响应曲线修正方法[J]. 水科学进展, 2013, 24(4): 497-503. (SI W, BAO W M, QU S M. Runoff error correction in real-time flood forecasting based on dynamic system response curve [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(4): 497-503. (in Chinese)) DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2013.04.001.
- [11] 包为民,司伟,沈国华,等. 基于单位线反演的产流误差修正[J]. 水科学进展, 2012, 23(3): 315-322. (BAO W M, SI W, SHEN G H, et al. Runoff error updating based on unit hydrograph inversion [J]. Advances in Water Science, 2012, 23 (3): 315-322. (in Chinese)) DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2012.03.019.
- [12] 张小琴,刘可新,包为民,等. 产流误差比例系数的系统响应修正方法[J]. 水科学进展, 2014, 25(6): 789-796. (ZHANG X Q, LIU K X, BAO W M, et al. Runoff error proportionality coefficient correction method based on system response [J]. Advances in Water Science, 2014, 25 (6): 789-796. (in Chinese)) DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2014.06.004.
- [13] 刘金涛,宋慧卿,王爱花. 水文相似概念与理论发展探析[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 288-296 (LIU J T, SONG H Q, WANG A H. Advances in the theories of hydrologic similarity: A discussion [J]. Advances in Water Science, 2014, 25 (2): 288-296. (in Chinese)) DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2014.02.012.
- [14] 戚晓明,陆桂华,吴志勇,等. 水文相似度及其应用[J]. 水利学报, 2007, 38(3): 355-360. (QI X M, LU G H, WU Z Y, et al. Hydrology similarity degree and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(3): 355-360. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:0559-9350.2007.03.017.
- [15] 姚成,章玉霞,李致家. 无资料地区水文模拟及相似性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 108-113. (YAO C, ZHANG Y X, LI Z J. Hydrological simulations and similarities in ungauged basins [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2013, 41(2): 108-113. (in Chinese)) DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.02.003.
- [16] 邓元倩,李致家,刘甲奇. 区划方法在缺资料地区水文模型参数识别的发展与展望[J]. 中国农村水利水电, 2017(11): 31-34. (DENG Y Q, LI Z J, LIU J Q. Development and prospect of hydrological model parameter identification for ungauged catchment [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(11): 31-34. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1007-2284.2017.11.008.
- [17] 伊璇,周丰,周璟,等. 区划方法在无资料地区水文预报中的应用研究[J]. 水文, 2014, 34(4): 21-27. (YI X, ZHOU F, ZHOU J, et al. Application of regionalization in hydrological forecasting for ungauged basins [J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(4): 21-27. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-0852.2014.04.004.
- [18] 施征,包为民,瞿思敏. 基于相似性的无资料地区模型参数确定[J]. 水文, 2015, 35(2): 33-38. (SHI Z, BAO W M, QU S M. Model parameters determination for ungauged basins based on similarity [J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35 (2): 33-38. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-0852.2015.02.007.
- [19] 荣延昭,李晚枕. 田间试验与统计分析[M]. 成都:四川人民出版社, 2001. (RONG Y Z, LI W Z. Field trials and statistical analysis [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2001. (in Chinese))
- [20] 彭晓霞,张振巍. 二次正交旋转组合设计法优化赤芍醇提工艺[J]. 中药材, 2010, 33(6): 991-994. (PENG X X, ZHANG Z W. Quadratic-orthogonal-rotation-combination design for optimization of ethanol extraction craft from radix paeoniae rubra [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2010, 33(6): 991-994. (in Chinese)) DOI:10.13863/j.issn1001-4454.2010.06.006.
- [21] 王连臻,杜小凤,吴传万,等. 应用二次回归正交旋转组合法进行小麦抗低温胁迫复配植物生长调节剂研发[J]. 中国农学通报, 2015, 31(9): 63-67. (WANG L Z, DU X F, WU C W, et al. The development of plant growth regulators of resistance to low temperature stress in wheat with the method of quadratic regression orthogonal rotary [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(9): 63-67. (in Chinese)) DOI:10.11924/j.issn.1000-6850.2014-2104.
- [22] 唐启义. DPS数据处理系统[M]. 北京:科学出版社, 2013. (TANG Q Y. DPS Data Processing System [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))
- [23] 王琪,张亭亭,游海林,等. 基于多元回归分析的大伙房水库径流中长期预报[J]. 水力发电, 2014, 40(5): 17-20. (WANG Q, ZHANG T T, YOU H L, et al. Mid-long term runoff forecasting model for dahuofang reservoir based on multiple regression analysis [J]. Water Power, 2014, 40(5): 17-20. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.0559-9342.2014.05.005.

- 2015 (in Chinese))
- [41] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44 (5): 892-898. DOI: 10. 2136/sssaj1980. 03615995004400050002x.
- [42] 吴擎龙,雷志栋,杨诗秀. 压力入渗仪测定导水率的理论及其应用[J]. 水利学报, 1996(2): 56-62. (WU Q L, LEI Z D, YANG S X. Theory and application of pressure infiltration instrument for measuring hydraulic conductivity[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996(2): 56-62. (in Chinese)) DOI:10. 13243/j. cnki. slxb. 1996. 02. 009.
- [43] VEREecken H, MAES J, FEYEN J, et al. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, Bulk Density, and Carbon Content[J]. Soil Science, 1989, 148 (6): 389-403. DOI: 10. 1097/ 00010694-198912000-00001.
- [44] 吴擎龙. 田间腾发条件下水热迁移数值模拟的研究[D]. 北京: 清华大学, 1993. (WU Q L. Numerical simulation of hydrothermal migration under field transpiration and evaporation conditions[D]. Beijing: Tsinghua University, 1993(in Chinese))
- [45] 张喜, 薛建辉, 生原喜久雄, 等. 黔中山地喀斯特森林的水文学过程和养分动态[J]. 植物生态学报, 2007 (5): 757-768. (ZHANG X, XUE J H, HIROHIRO INOBUCHI, et al. Distributed hydrological model and eco-hydrological effect of vegetation in Karst watershed[J]. Advances in Water Science, 2007 (5): 757-768. (in Chinese)) DOI:10. 17521/cjpe. 2007. 0097.
- [46] 张志才, 陈喜, 石朋, 等. 喀斯特流域分布式水文模型及植被生态水文效应[J]. 水科学进展, 2009(6): 806-811. (ZHANG Z C, CHEN X, SHI P, et al. Distributed hydrological model and eco-hydrological effect of vegetation in Karst watershed[J]. Advances in Water Science, 2009 (6): 806-811. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2009. 06. 003.
- [47] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. Fisheries, 1976, 1 (4): 6-10. DOI: 10. 1577/1548-8446 (1976) 001% 3C0006; IFRFFW% 3E2. 0. CO; 2.

(上接第 145 页)

- [24] 何振奇, 乔光建. 基于多项式回归模型的枯季径流预报与分析[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(5) 85-88. (HE Z Q, QIAO G J. Polynomial regressin model based on the low flow forecasting and analysis[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8 (5): 85-88. (in Chinese)) DOI:10. 3969/SP. J. 1201. 2010. 05085.
- [25] 葛朝霞, 薛梅, 宋颖玲. 多因子逐步回归周期分析在中长期水文预报中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(3): 255-257. (GE Z X, X M, SONG Y L. Application of multi-factor stepwise regression cycle analysis in medium and long-term hydrological forecast[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2009, 37(3): 255-257. (in Chinese)) DOI:10. 3876/j. issn. 1000-1980. 2009. 03. 002.
- [26] 刘冬英, 沈燕舟, 王政祥. 怒江流域水资源特性分析[J]. 人民长江, 2008, 39 (17): 64-66. (LIU D Y, SHEN Y Z, WANG Z X. Analysis of water resources characteristics of the Nujiang River basin[J]. Yangtze River, 2008, 39 (17): 64-66. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-4179. 2008. 17. 022.