

doi: 10.3724/SP.J.1201.2014.01126

基于灰色关联分析的相似洪水动态展延方法

吴业楠¹, 钟平安^{1,3}, 赵云发², 万新宇¹

(1. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098; 2. 中国长江三峡集团公司, 湖北 宜昌 443002;
3. 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 南京 210098)

摘要: 在不能高精度预测后续洪水的现状下, 对历史暴雨洪水信息进行挖掘, 对降低水库防洪调度风险具有现实意义。制定将历史洪水标准化的方法, 并根据暴雨洪水形成机制和实时信息的易获取性, 筛选出能反映洪水特征的指标体系, 并基于灰色关联分析原理构建了相似洪水动态识别办法和相似洪水展延实时洪水预报过程的展延效果评价方法。池潭水库历史暴雨洪水模拟结果表明提出的洪水展延方法对后续来水估计的总有效率高, 效果显著, 该方法应用效果、适应性、稳定性均较好。

关键词: 水库; 防洪调度; 洪水相似性; 灰色关联分析

中图分类号: TV 122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)01-0126-05

Dynamic Extending Approach of Similar Flood Based on Gray Correlation Analysis

WU Yeanan¹, ZHONG Pingan^{1,3}, ZHAO Yunfa², WAN Xin Yu¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. China Three Gorges Corporation, Yichang 443002, China; 3. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Nanjing 210098, China)

Abstract: Under the current conditions that the subsequent flood cannot be predicted with high accuracy, the study on the historical storm flood information is important as it may provide valuable information to reduce the risk of reservoir flood control. In this paper, we developed a method to standardize the historical flood and selected the index system to reflect the flood characteristics on the basis of the formation mechanism of storm flood and available real time information. Based on the gray correlation analysis theory, a dynamic identification approach of similar flood and an evaluation method of the extending effects of real time flood forecasting process of similar flood were developed. The methods were applied to simulate the storm flood in the Chitan reservoir, which showed that the flood extending method has high efficiency to estimate the subsequent flood. Overall, the method is applicable, adaptable, and stable.

Key words: reservoir; flood control regulation; flood similarity; gray correlation analysis

在水库实时防洪调度过程中, 最理想的情形是能够获取洪水的全过程。但受科技水平的限制, 目前只能提供有限预见期的洪水预报。为了延长洪水预报成果的预见期, 常采用产汇流模型与短期气象预报耦合的方法进行洪水预报。但由于降雨分配的随机性, 这种方法很难得到好的效果。实际上, 特定地域内洪水发生的时间和量级具有周期变化的特征, 历史洪水一定程度上包含了当地天气系统和下垫面变化的信息^[1-3], 因此, 当具有较长时间、较多场次的历史洪水系列时, 采用数据挖掘技术, 找出相似洪水, 可以为水库实时调

度提供决策参考。

对历史洪水归类、将历史洪水数据指标化和改进相似性识别方法是当前相似洪水研究的热点。Seth A. Veitzer等^[3]将 random self similar(RSN)模型应用于洪水宽度函数最大值查找, 取得了良好的效果; 张艳萍等^[4]通过分析暴雨洪水演化过程中的相似性指标, 对暴雨洪水的天气成因进行了定性分析, 对暴雨洪水进行了分类; 王海潮等^[5]将实时暴雨洪水与历史暴雨洪水的雨洪信息指标化, 运用距离系数法进行了相似性分析; 牛俊^[6]建立了场次暴雨洪水相似性分析的可

收稿日期: 2013-08-09 修回日期: 2013-11-18 网络出版时间: 2013-12-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3724/SP.J.1201.2014.01126.html>

基金项目: 973计划项目(2013CB036406); 国家自然科学基金项目(51179044); 全球变化研究国家重大科学研究计划(973计划)(2010CB951102)

作者简介: 吴业楠(1992-), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要从事水资源规划与管理方面研究。E-mail: wuyan1992@163.com

通讯作者: 钟平安(1962-), 男, 安徽无为, 教授, 博士, 从事水资源规划与管理研究。E-mail: pazhong@hhu.edu.cn

拓模型,对大流域场次暴雨洪水相似性进行了探讨。从已有文献看,绝大多数研究者都是从洪水全信息出发,例如张艳萍等所选暴雨总历时、洪水重现期等信息,王海潮等所选暴雨笼罩面积、洪水组成等相似性评价指标,均是在洪水全过程发生过后才可获取,难以为水库实时调度提供高效率的支持。事实上,暴雨洪水是逐步演化的自然过程,在一场洪水过程中所获取的信息是逐渐增加的,因此依据逐步呈现的暴雨洪水,能够预估未来的洪水演化情势,从而达到增长实时预报预见期的效果。因此,本文将建立表征实时洪水特征的指标体系和基于灰色关联分析的实时洪水相似性动态识别方法,进行实时洪水预报与相似性洪水展延信息的融合效益评价,并以池潭水库为例,开展实证研究。

1 基本原理

1.1 历史洪水资料标准化

历史洪水的发生时间,洪水历时与形态各不相同,为了便于开展动态的洪水相似性分析,本文设定了统一的相对时间坐标,以每一场历史洪水的降雨开始时间为时间原点,将历史洪水发生的绝对时间,转化为时序。在相似性识别时,根据面临时刻(如降雨后6h、12h等)已经出现的部分雨洪信息与历史洪水资料中相应时段的信息进行灰色关联分析,查找相似洪水。

1.2 洪水相似性指标的选择

由产汇流理论可知,影响洪水过程的主要因素包括降雨量大小及其时空分配、下垫面条件以及前期土壤含水量等因素,结合实时信息的易获取性,本文选择以下指标为洪水相似性特征评价指标。

(1) 洪水起涨流量 q_0 。初始土壤含水量是重要的产流参数,但是流域土壤含水量目前尚难以直接监测,现行的流域水文模型中初始土壤含水量均通过间接计算获得。为减少洪水相似性分析中的计算环节,本文采用洪水起涨流量替代初始土壤含水量。除去间隔很近的连续洪水,大多数情况下,洪水前期的流量主要由壤中流和地下径流形成,起涨流量的大小一定程度上能够间接反映流域初始土壤含水量大小。

(2) 阶段累积降雨量 P_t ^[79]。降雨量及其时程分配是影响洪水大小和形态的重要因素,但是降雨量的时程分配具有高度的随机性,而阶段累积降雨量不仅能反映降雨量的大小,而且能反映降雨量变化的趋势^[10],因此更便于作相似性分析,所以本文选择阶段累积降雨量过程作为降雨影响的动态表征指标。

$$P_t = \sum_{i=1}^t P_i \quad (1)$$

式中: t 为面临时刻的时序; P_t 为累积降雨量; P_i 为时段降雨量。

(3) 阶段累计水量 W_t 。降雨过程通过流域产汇流形成洪水过程,入库流量过程与降雨过程的差异,反映了流域下垫面的影响,加之水库调度中对于水量的关注高于对流量过程的关注,所以,本文选择用累计水量反映已出现部分洪水的形态,并据此表征流域下垫面特征。

$$W_t = \Delta t \sum_{i=1}^t Q_i \quad (2)$$

式中: W_t 为累计入库水量; Q_i 为时段入库流量; Δt 为时段长。

1.3 灰色关联分析基本原理

灰色关联分析是定量地比较或描述系统之间或系统中各因素之间,在发展过程中随时间或不同对象而相对变化的情况,即分析时间序列曲线的几何形状,用它们变化的大小、方向与速度等的接近程度,来衡量它们之间关联性大小^[11-13]。在系统发展过程中,如果两个比较序列关联程度较大,则表示两者的变化态势基本一致或相似,其同步变化程度较高^[14]。

1.3.1 原始数据处理

选取 n 场资料齐全的场次洪水,由每场洪水 k 个相似性指标的数据构成一个 $n \times k$ 的矩阵 $X = (x_{ij})_{n \times k}$, 其中 x_{ij} ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, k$) 为第 i 场洪水的第 j 个相似性指标的数据。由于特征指标量纲不同,数量级也可能相差悬殊,为了消除量纲和量级不同带来的影响,使数据具有可比性,首先要对数据进行预处理^[15]。本文采用初值化变换,即:

$$x'_{ij} = x_{ij} / x_{i1} \quad (3)$$

其中 x'_{ij} ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, k$) 为第 i 场洪水第 j 个特征指标经过初值化变换后的值。

1.3.2 关联度计算

为了模拟评估灰色关联分析方法在识别相似洪水中的有效性,从 $X = (x'_{ij})_{n \times k}$ 中任一场洪水的特征指标作为母序列 X_0 , 其他场次洪水的特征指标作为子序列 X_i 。计算母序列 X_0 与各子序列 X_i 每个相似性指标差的绝对值,以 $\Delta_{0i}(j)$ 表示第 i 场洪水第 j 个相似性指标与母洪水相应相似性指标之差的绝对值,即:

$$\Delta_{0i}(j) = |X_0(j) - X_i(j)| \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, k) \quad (4)$$

从矩阵 $\Delta = (\Delta_{0i}(j))_{m \times k}$ 中取差值绝对值中的最大值 Δ_{max} 与最小值 Δ_{min} , 即:

$$\Delta_{max} = \max(\Delta_{0i}(j), i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, k) \quad (5)$$

$$\Delta_{min} = \min(\Delta_{0i}(j), i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, k) \quad (6)$$

求在各个相似性指标上母序列 X_0 与各子序列 X_i 的关联系数,计算公式为:

$$L_{0i}(j) = \frac{\Delta_{min} + \rho \Delta_{max}}{\Delta_{0i}(j) + \rho \Delta_{max}} \quad (7)$$

式中: ρ 为分辨系数,一般取 $\rho=0.5$ 。

求各子序列 X_i 与母序列洪水 X_0 各特征指标关联系数的平均值,即关联度:

$$Y_{0i} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k L_{0i}(j) \quad (8)$$

式中: Y_{0i} 为第 i 场洪水与母序列洪水的关联度。

如果关联度比较大,则认为母序列洪水与子序列洪水的变化态势基本一致或相似,其同步变化程度较高,则可认为两场洪水相似。

1.4 相似洪水的选取与展延

本文将利用灰关联分析方法求得的关联度数值 λ_i 从大到小排序,取排名前 N 名的洪水作为其相似洪水集。拼接相似洪水的基本原则是:在实时洪水预报预见期内,采用实

时洪水预报的结果;在预见期外,拼接历史相似洪水。一般情况下,在开始拼接时间的相似洪水的流量总是与相应的实时预报值存在差异,本文以实时预报值为基准,将相似洪水整体平移实现拼接,(见图 1)。

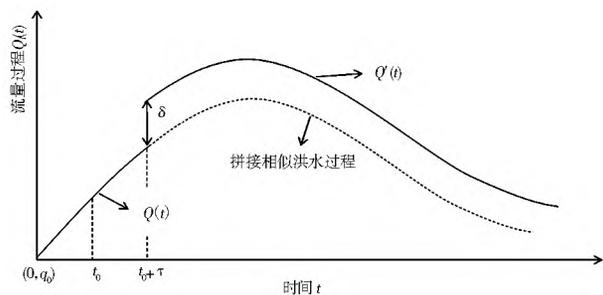


图 1 相似洪水拼接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of split joint of similar flood

具体的做法如下式:

$$\hat{Q}(t) = \begin{cases} Q(t) & t \leq t_0 + \tau \\ \hat{Q}(t) + \delta & t > t_0 + \tau \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\hat{Q}(t)$ 为利用相似洪水展延流量过程; $Q(t)$ 为实时洪水预报流量过程; $\hat{Q}(t)$ 为选定的相似洪水流量过程; δ 为 $Q(t)$ 和 $\hat{Q}(t)$ 在 $t_0 + \tau$ 的衔接差,即: $\delta = Q(t_0 + \tau) - \hat{Q}(t_0 + \tau)$; τ 为实时洪水预报预见期; t_0 为面临时刻。

通过灰关联分析选择的相似洪水集中的洪水,其历时、过程可能存在较大差异,具体选择哪一条线作为水库实时调度采用的洪水过程,应视防洪形势而定,例如在涨洪段或预报尚有较大降雨时,一般应选择历时长,洪量大的相似洪水,或取相似洪水集的上包线;如果预报本次暴雨过程即将结束,则可能选择历时短,洪量小的相似洪水,或取相似洪水集的下包线;其他情况可以选择相似洪水集的平均过程。

1.5 洪水展延效果评价

在水库调度中,洪量预报误差对水库安全的影响较大。当水库前期预报发生偏小时造成水库不恰当的蓄水,可能给后续防洪调度造成被动;而水库前期预报偏大时则会造成水库过多放水,降低经济效益。本文的主要目的在于通过相似性展延,获取一定精度的后续来水,其展延效果评价采用以下指标。

后续水量展延增益率。后续来水量是影响水库防洪调度的重要因素。所谓展延增益率是反映相似性展延对未来入库水量的预估能力比实时洪水预报提升的程度,见图 2,计算式如下:

$$\lambda = \frac{\sum_{t=t_0}^{t_0+T} \hat{Q}(t) - \sum_{t=t_0}^{t_0+T} Q(t)}{\sum_{t=t_0}^{t_0+T} Q(t)} \quad (10)$$

式中: $Q(t)$ 为实测洪水过程; T 为调度期。

(2) 确定性系数增量。确定性系数是反映洪水过程拟合程度的评价指标,本文的确定性系数增量是指经相似展延洪水的确定性系数比实时洪水预报的提高值。其计算公式如下:

$$\Delta DC = DC'' - DC \quad (11)$$

式中: ΔDC 值为确定性系数的增量值; $DC'' - DC$ 为经过相似展延洪水过程的确定性系数; DC 为实时预报洪水过程的确定

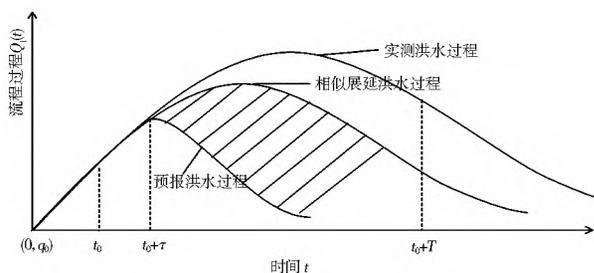


图 2 相似洪水展延示意图

Fig. 2 Schematic diagram of extending of similar flood

定性系数;

$$DC'' = 1 - \frac{\sum_{t=t_0}^{t_0+T} [\hat{Q}(t) - Q_{\text{实}}(t)]^2}{\sum_{t=t_0}^{t_0+T} [Q_{\text{实}}(t) - \overline{Q_{\text{实}}(t)}]^2}$$

$$DC = 1 - \frac{\sum_{t=t_0}^{t_0+T} [Q(t) - Q_{\text{实}}(t)]^2}{\sum_{t=t_0}^{t_0+T} [Q_{\text{实}}(t) - \overline{Q_{\text{实}}(t)}]^2} \quad (12)$$

式中: $\overline{Q_{\text{实}}(t)}$ 为实测洪水过程的平均值。

2 应用实例

2.1 计算条件

池潭水库位于闽江水系二级支流金溪中游,坝址集水面积 4 766 km²,属亚热带气候,一年中 3 月-6 月为雨季,约占全年降水量的 60%。从历史资料中筛选出 1984 年-2010 年代表性较好且暴雨洪水资料齐全的 30 场洪水过程,降雨量和洪水统计时段长为 1 h。

为了评价洪水相似性展延的动态效果,构造三个计算阶段,分别为洪水起涨后 6 h、12 h 和 18 h,分别利用洪水起涨 6 h、12 h 和 18 h 之前的累积降雨、累计水量、起涨流量等信息,查找洪水起涨 6 h、12 h 和 18 h 之后的相似洪水,例如对起涨后 6 h,采用 q_0 、 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 、 P_6 、 W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 、 W_5 、 W_6 等信息查找相似洪水,其余两个计算时段采用类似方法查找相似洪水。

2.2 结果分析

将 30 场洪水中的每一场洪水轮次作为母洪水,根据其余洪水与母洪水的关联度,取关联度前 3 场洪水作为其相似洪水进行分析。将选出的相似洪水的平均过程与实时预报洪水拼接后的洪水过程作为展延洪水,再与母洪水实测过程在调度期 48 h 内进行展延效果评价。表 1 为 30 场洪水分别作为母洪水时,不同信息支持下展延效果评价表。由表 1 可以看出以下结果。

(1) 不同信息量的洪水展延效果显著。起涨后 6 h,展延总有效率达 97% (除 100618 次洪水),相比于实时洪水预报平均增益率达 95%;起涨后 12 h,展延总有效率达 90%,相比于实时洪水预报平均增益率达 51%;起涨后 18 h,展延总有效率达 93%,相比于实时洪水预报平均增益率达 38%。

(2) 起涨初期展延增益大于后期。这是由于实时洪水预报依据的落地雨,洪水初期降雨量占次暴雨量的比重较小,后续降雨量占比重大,不考虑后续降雨量的实时预报结果严重偏小,相比之下,展延的效果就好;随着时间的推移,落地雨量的比重越来越大,实时洪水预报的结果越来越接近实测过程,相比之下,展延的效果就降低了,参见图 3- 图 5。

(3) 不同信息量展延洪水的确定性系数也有所改善。起

表 1 相似洪水展延效果评价表

Table 1 Evaluation of the extending effects of similar flood

洪号	后续水量展延增益率 (%)			确定性系数增量		
	6 h	12 h	18 h	6 h	12 h	18 h
840531	16.3	22.7	46.1	0.286	0.339	0.279
840612	223	27.1	20.4	0.147	0.347	0.329
850527	535	50.9	50.3	0.570	0.297	-0.111
860420	94.1	11.6	2.40	0.0980	0.0860	0.0210
980309	53.6	28.1	59.6	0.513	0.334	-0.061
980620	49.9	40.9	31.8	0.420	0.364	0.311
000611	69.4	26.4	29.0	0.717	0.358	0.272
010506	53.6	27.1	52.3	0.642	0.335	0.0750
010509	121	-58.5	-23.2	-0.829	-0.710	-0.165
010604	78.1	141	59.6	0.561	0.278	-0.0880
010613	155	65.6	63.2	0.00900	0.331	0.0790
020616	11.6	48.0	33.0	0.138	0.634	0.385
020701	154	43.7	60.3	0.0740	0.379	0.0830
030516	116	97.8	60.9	-0.645	-0.815	-0.440
040622	111	-33.9	-32.2	-0.830	-0.351	-0.270
040707	86.8	87.2	34.4	0.090	-0.519	0.0340
050505	156	113	28.8	0.0880	0.131	0.125
050515	115	63.0	38.7	0.506	0.559	0.365
060531	27.3	16.9	19.0	0.450	0.313	0.478
060518	51.5	138	54.3	0.512	0.0710	0.0440
060607	45.0	-7.00	35.3	0.555	0.127	0.411
070610	135	107	78.9	0.0550	-0.127	-0.0420
080731	63.1	69.6	58.5	0.638	0.475	0.299
090702	60.5	52.6	1.00	0.701	0.542	0.421
100406	109	68.9	69.0	0.0330	0.0280	-0.171
100514	71.0	63.1	43.4	0.0270	0.00800	-0.131
100523	54.1	116	66.9	0.429	-0.694	-0.471
100618	-70.7	44.5	6.70	0.531	0.414	0.0580
100623	67.7	14.3	19.4	0.621	0.162	0.310
100707	38.5	44.3	73.3	0.470	0.486	-0.069
均值	95.0	51.0	38.0	0.253	0.139	0.0790

涨后 6 h, 改善有效率为 90%; 起涨后 12 h, 改善有效率为 80%; 起涨后 18 h, 改善有效率为 37%; 确定性系数改善的有效率低于水量展延有效率, 说明洪水相似性展延对于洪水过程的改善作用的不确定性较高。

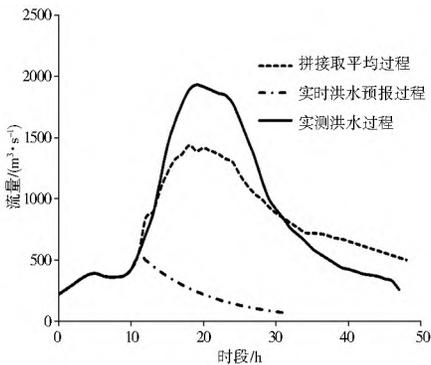


图 3 050505 次洪水起涨后 6 h 相似展延过程

Fig. 3 The extending process of similar flood after 6 hours of flood rising

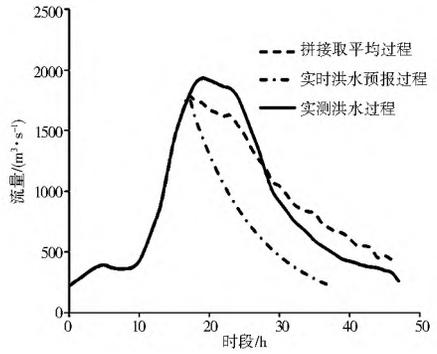


图 4 050505 次洪水起涨后 12 h 相似展延过程

Fig. 4 The extending process of similar flood after 12 hours of flood rising

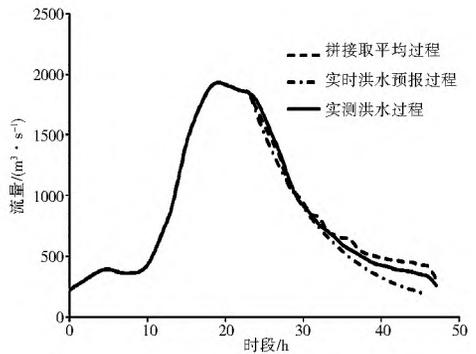


图 5 050505 次洪水起涨后 18 h 相似展延过程

Fig. 5 The extending process of similar flood after 18 hours of flood rising

3 小结

后续入库水量的预估, 对于水库实时防洪调度具有重要价值, 目前依据后续降雨预报的途径, 受技术水平的限制还难以达到实用化的程度。本文依据暴雨洪水综合相似性分析, 将灰关联原理应用到相似洪水的动态识别当中, 取得如下成果。

(1) 基于洪水过程形成机制和信息的易获取性, 建立了洪水相似性展延指标体系。

(2) 引入灰色关联分析原理, 构建了相似性洪水识别方法和洪水相似性展延效果评价方法。

池潭水库历史暴雨洪水模拟结果表明, 本文提出的洪水展延方法对后续来水估计的总有效率高, 洪水展延效果显著, 因此为后续入库水量的估计提供了一条新途径。

参考文献 (References):

[1] 刘卫林, 董增川, 梁忠民, 等. 暴雨洪水相似性分析及其应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2007, (2): 132-135. (LIU Wei lin, DONG Zeng chuan, LIANG Zhong min, et al. Flood Storm Similarly Analysis and Application Research [J]. China Rural Water and Hydropower, 2007, (02): 132-135. (in Chinese))

[2] 牛俊, 董增川, 梁忠民, 等. 流域场次暴雨相似性的综合评判物元模型[J]. 西北水力发电, 2006, (2): 16-20. (NIU Jun, DONG Zeng chuan, LIANG Zhong-min, et al. A Matter Element Model for Comprehensive Evaluation on the Similarity of Rainstorms in a River Basin [J]. Journal of Northwest Hydroelectric Pow-

- er, 2006, (2): 16-20. (in Chinese))
- [3] Veitzer S A, Gupta V K. Statistical Self-similarity of Width Function Maxima with Implications to Floods[J]. Advances in Water Resources, 2001, 24(9-10): 955-965.
- [4] 张艳平, 周惠成. 基于暴雨洪水相似性分析的洪水分类研究[J]. 水电能源科学, 2012, (9): 50-54. (ZHANG Yan ping, ZHOU Huicheng. Study on Flood Classification Based on Storm Flood Similarity Analysis[J]. Water Resources and Power, 2012, (9): 50-54. (in Chinese))
- [5] 王海潮, 董增川, 梁忠民, 等. 暴雨洪水相似性分析指标体系研究[J]. 水文, 2006, (2): 13-17. (WANG Hai chao, DONG Zeng chuan, LIANG Zhong min, et al. A Study on the Index System for Storm Flood Resemblance Analyzing[J]. Journal of China Hydrology, 2006, (2): 13-17. (in Chinese))
- [6] 牛俊. 流域场次暴雨洪水相似性分析的可拓模型构建及应用[D]. 南京: 河海大学, 2006. (NIU Jun. Development and Application of Similarity Analysis of Rainstorms and Floods Extension Model at the Basin Scale[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [7] 刘卫林, 董增川, 梁忠民, 等. 松花江流域暴雨洪水相似性分析及管理信息系统研究[J]. 中国农村水利水电. 2007, (3): 24-26. (LIU Wei lin, DONG Zeng chuan, LIANG Zhong min, et al. Songhua River Basin Flood Storm Similarity Analysis and Research on Management Information System[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007, (3): 24-26. (in Chinese))
- [8] 吴志岐, 李剑萍, 祁国梅. 固原市中雨、大雨、暴雨相似预报系统的设计与实现[J]. 安徽农业科学, 2012, (16): 9033-9035. (WU Zhi qi, LI Jian ping, QI Guo mei. Design and Realization of Similar Report System of Moderate Rain, Heavy Rain and Rainstorm in Guyuan City[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2012, (16): 9033-9035. (in Chinese))
- [9] 杜滨鹤, 郭奎英, 秦成福, 等. 鹤壁市暴雨相似预报系统[J]. 河南气象, 2003, (1): 17-18. (DU Bin he, GUO Kui ying, QIN Cheng fu, et al. Rainstorm Similarity Forecasting System[J]. Henan Meteorological, 2003, (1): 17-18. (in Chinese))
- [10] 钟元. 综合评估多元判据的大~暴雨相似预报方案[C]. 杭州: 2004. (ZHONG Yuan. Comprehensive Evaluation of Multiple Criteria of Heavy Rainfall Similar Prediction Scheme[C]. Hangzhou: 2004. (in Chinese))
- [11] Aixiang Tao. An Analysis on the Energy Consumption and Economy Increase Based on Grey Relation Theory[A]. International Conference on Engineering and Business Management[C]. 2011
- [12] 任凤, 安吉斯, 张吉春, 等. 加权多变量灰色模型在变形监测中的应用[J]. 地理空间信息, 2012, (5): 146-148. (REN Feng, AN Ji si, ZHANG Ji chun, et al. The Applications of Weighted Multivariable Grey Model in Deformation Monitoring[J]. Geospatial Information. 2012, (5): 146-148. (in Chinese))
- [13] 李龙跃, 刘付显, 刘永兰. 基于改进灰关联理论的目标类型识别模型研究[J]. 现代防御技术, 2011, (6): 163-166. (LI Long yue, LIU Fu xian, LIU Yong lan. Target Type Recognition Model Research Based on Improved Grey Relational Analysis Method[J]. Modern Defence Technology, 2011, (6): 163-166. (in Chinese))
- [14] 王学萌, 张继忠, 王荣. 灰色系统分析及实用计算程序[M]. 华中科技大学出版社, 2001. (WANG Xue meng, ZHANG Ji zhong, WANG Rong. Gray Relational Analysis Theory and the Utility Calculate Program[M]. Hua Zhong University of Science & Technology Press, 2001. (in Chinese))
- [15] 万新宇, 包为民, 荆艳东, 等. 基于主成分分析的洪水相似性研究[J]. 水电能源科学, 2007, (5): 36-39. (WAN Xin yu, BAO Wei min, JING Yan dong, et al. Study on Flood Similarity Based on Principal Components Analysis[J]. Water Resources and Power, 2007, (5): 36-39. (in Chinese))
- [14] 朱伯芳, 李玥, 张国新. 渗流场中排水孔直径、间距及深度对排水效果的影响[J]. 水利水电技术, 2008, 39(3): 27-29. (ZHU Bo fang, LI Yue, ZHANG Guo xin. The Influences of the Diameter, Spacing And Depth of Drain Holes on the Effect of Draining in the Seepage Field[J]. Water Resources And Hydropower Engineering, 2008, 39(3): 27-29. (in Chinese))

(上接第 113 页)

Science Edition), 2007, 22(2): 29-33. (in Chinese))

- [14] 陈建余. 有密集排水孔的三维饱和非饱和渗流场分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 2027-2031. (CHEN Jian yu. 3D Fem Analysis of Saturated Unsaturated Seepage Field With Densely Distributed Drainage Holes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(12): 2027-2031. (in Chinese))