

贵州后寨典型岩溶小流域水动力特征分析

束龙仓 ,刘丽红 ,陶玉飞 ,王茂枚 ,董贵明

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 ,江苏 南京 210098)

摘要 :以贵州后寨典型岩溶小流域为例 ,采用时间序列分析方法分析了岩溶含水系统的水动力特征 .分析结果表明 :后寨岩溶含水系统对降雨信号响应的敏感度从上游到下游不断减弱 ,而对降雨信号的记忆作用从上游到下游不断加强 ;流量对降雨信号的响应存在滞后性 ,滞后时间从上游到下游有规律地增加 ,上中游流量对降雨信号响应的线性化程度明显高于下游 .

关键词 :贵州后寨 ;岩溶多重介质 ;水动力特征 ;时间序列分析

中图分类号 :P641.134 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2008)04-0433-05

岩溶多重介质含水系统是由高渗透性(渗透系数 $K > 0.1 \text{ m/s}$)相互连通的管道、大裂隙和低渗透性小裂隙介质($0.01 \text{ m/s} < K < 0.1 \text{ m/s}$)组成的多重介质复杂系统 ,整个含水系统相互连通并排泄于统一出口——岩溶泉或地下河出口^[1-2] .作为系统对降雨信号的响应特征之一的岩溶泉流量 ,与系统本身的结构层次及降雨有着密切的联系 .而时间序列分析方法是研究不同时间变量周期波动间相互关系 ,分析岩溶多重介质含水系统泉水流量对降雨周期变化响应基本规律的一种有效方法^[3] .因此 ,本文以贵州后寨典型岩溶小流域为例 ,采用时间序列分析方法对岩溶多重介质含水系统的作用机理、动态表现及水力特征进行了分析 .

1 方法简介

时间序列分析方法主要利用自相关函数、互相关函数及谱分析理论进行单变量的自相关分析、双变量的互相关分析和谱分析 .

自相关函数 $R(k)$ 可以描述一个时刻随机信号与另一个时刻随机信号的相互依赖关系 ,即 t 时刻与 $t + \Delta t$ 时刻 2 个随机变量的相关性 .自相关图的滞后时间可以描述系统的记忆作用^[4] .

互相关函数可以描述输入信号与输出信号的内在联系 .互相关系数的峰值可以刻画岩溶含水系统对降雨信号响应的敏感度 ,峰值越大 ,说明系统的响应越敏感 .对于二元离散平稳随机序列 $\{X_n\}$ 和 $\{Y_n\}$,互相关函数 $R_{xy}(k)$ 和 $R_{yx}(k)$ 可以定义为

$$R_{xy} = \frac{C_{xy}(k)}{\sqrt{C_x^2(0)C_y^2(0)}} \tag{1}$$

$$R_{yx} = \frac{C_{yx}(k)}{\sqrt{C_x^2(0)C_y^2(0)}} \tag{2}$$

其中 :

$$C_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(y_{i+k} - \bar{y}) \tag{3}$$

$$C_{yx} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} (y_i - \bar{y})(x_{i+k} - \bar{x}) \tag{4}$$

$$C_x(0) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \tag{5}$$

$$C_y(0) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \tag{6}$$

收稿日期 :2007-10-10

基金项目 :国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2006CB403204)

作者简介 :束龙仓(1964 —)男 ,安徽无为 人 ,教授 ,博士生导师 ,主要从事地下水资源评价与管理、地下水与生态环境研究 .

式中: x_i, x_{i+k} —— $\{X_n\}$ 中的样本点; y_i, y_{i+k} —— $\{Y_n\}$ 中的样本点; $\bar{x}, \bar{y}$ —— $\{X_n\}$ 和 $\{Y_n\}$ 的样本均值.

根据谱分析理论^[5-6],互谱密度函数 $S_{xy}(f)$ 为相应的互相关函数的傅立叶转换,是协谱 $h_{xy}(f)$ 和四分谱 $\lambda_{xy}(f)$ 的函数. $S_{xy}(f)$ 的表达式为

$$S_{xy}(f) = h_{xy}(f) + i\lambda_{xy}(f) \tag{7}$$

式中: i ——虚数单位; $h_{xy}(f)$ ——协谱,

$$h_{xy}(f) = 2R_{xy}(0) + 2\sum_{k=1}^m [R_{xy}(k) + R_{yx}(k)]D(k)\cos(2\pi fk) \tag{8}$$

$\lambda_{xy}(f)$ ——四分谱,

$$\lambda_{xy}(f) = 2\sum_{k=1}^m [(R_{xy}(k) - R_{yx}(k))]D(k)\sin(2\pi fk) \tag{9}$$

式中: k ——滞后时间; m ——最大滞后时间; $D(k)$ ——权函数,是谱分析时进行平滑处理的平滑函数. 经过平滑处理的谱估计量可认为是无偏和有效的.

相位函数 $\theta_{xy}(f)$ 为 2 个时间序列间各频率分量的相位差,

$$\theta_{xy}(f) = \arctan \frac{\lambda_{xy}(f)}{h_{xy}(f)} \tag{10}$$

反映了序列各频率分量超前、滞后关系. 其值通常限定在 $[-\pi, \pi]$ 区间内,单位用弧度表示. 平均滞后时间 d 与相位函数 $\theta_{xy}(f)$ 之间存在如下关系:

$$\theta_{xy}(f) = 2\pi df \tag{11}$$

根据相位谱的斜率 $k' = 2\pi d$,平均滞后时间^[7]

$$d = \frac{k'}{2\pi} \tag{12}$$

相干函数 $CO_{xy}(f)$ 可以反映输出信号对输入信号响应的线性化程度,其表达式为

$$CO_{xy}(f) = \frac{S_{xy}(f)}{\sqrt{S_x(f)S_y(f)}} \tag{13}$$

式中 $S_x(f)$ 和 $S_y(f)$ 分别为 $\{X_n\}$ 和 $\{Y_n\}$ 的单序列功率谱密度函数.

若系统为线性系统^[5],则 $CO_{xy}(f) \approx 1$.

2 水动力特征分析

2.1 后寨水文地质概况

贵州省地处世界岩溶发育最复杂、类型最齐全、分布面积最大的东亚岩溶区域中心^[8],本文以贵州普定后寨岩溶小流域作为研究对象. 后寨岩溶小流域位于贵州省普定县城以南,地理位置为东经 $105^{\circ}41'27'' \sim 105^{\circ}43'28''$ 、北纬 $26^{\circ}13'3'' \sim 26^{\circ}15'3''$,面积 81 km^2 .

岩溶地下河发育,一般都有较畅通的地下排水系统. 地下水的运动一般可分为 2~3 个亚动态,其过程具有垂直和水平的双向性^[9-10]. 后寨地下河系由打油寨到冒水坑的多条地下河组成(图 1),打油寨到冒水坑的地下河为该地下河系的干流. 源头有 3 支短小地下支流汇集,在母猪洞溢出成地表河,至倒树龙潭又潜入地下. 地表河干涸,仅为雨季行洪,洪水经号营河入青山水库. 地下河伏流至老黑潭后流出地表,后又伏流地下,并分为 2 支:一支经三间房、平山及茅坑,汇入冒水坑;另一支经六谷后转成地表河,后于罗卜坑注入地下,分成数股后汇于冒水坑^[11]. 岩溶含水系统雨季储存入渗补给水,枯水季缓慢释水.

图 1 贵州普定后寨地下河流域
Fig.1 Schematic map of Houzhai underground river catchment in Guizhou Province

2.2 分析资料的选取

为了得到较好的分析结果,本文选取了上、中、下游 3 个测站较长的时间序列资料 (a)上游站点母猪洞 1991 年 5 月~1997 年 5 月共 6 个水文年的降雨和流量资料 (b)中游站点六谷由于资料缺乏,只选取了其 1991 年 5 月~1996 年 5 月共 5 个水文年的降雨和流量资料 (c)下游站点冒水坑 1991 年 5 月~1997 年 5 月共 6 个水文年的降雨和流量资料.图 2 为下游冒水坑站 6 个水文年的降雨和流量过程.

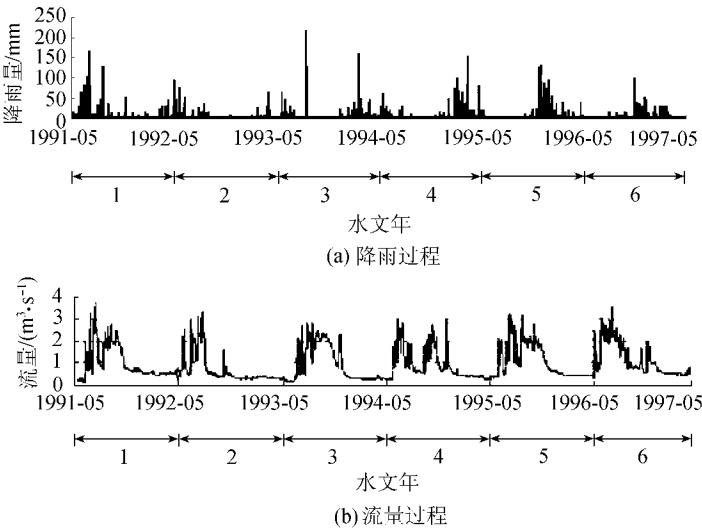


图 2 水文年(1991~1997 年)冒水坑站降雨和流量过程

Fig.2 Rainfall and discharge processes during the hydrological years 1991-1997 at Maoshuikeng station

只有平稳时间序列才能进行谱分析,而非平稳序列会产生谱的虚假成分^[12].因此,在进行谱分析之前,对 3 个站点的降雨和流量资料进行了差分处理,消除了序列中的趋势项、周期项和季节项等,从而使时间序列资料达到平稳化程度.

2.3 自相关和互相关分析

自相关系数可以反映系统的记忆性.从统计学的观点来看, $R(k)=0.2$ 时系统几乎没有记忆性.由于站点冒水坑的降雨自相关系数 $R(k)$ 几乎均小于或等于 0.2 (图 3),因此可把该站点的降雨视为纯随机函数(白噪声).站点母猪洞和六谷的降雨也存在同样的规律.

由图 4 可以看出,从上游站点母猪洞到下游站点冒水坑的流量自相关系数都随着滞后时间的增加而减小,在整个滞后时间段上,平均自相关系数由大到小的站点依次为冒水坑、六谷和母猪洞.这说明,从上游到下游,系统的记忆性增强了.

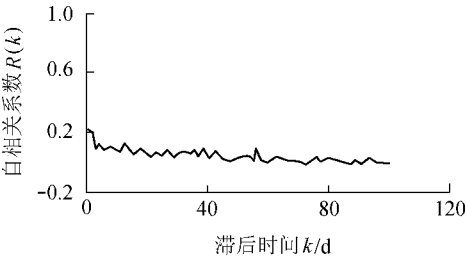


图 3 冒水坑站降雨自相关系数的变化曲线
Fig.3 Variation curve of rainfall autocorrelation coefficient at Maoshuikeng station

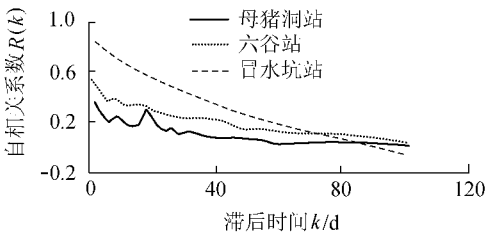


图 4 母猪洞、六谷和冒水坑站流量自相关系数的变化曲线
Fig.4 Variation curves of autocorrelation coefficient at Muzhudong, Liugu and Maoshuikeng stations

互相关系数的峰值可以反映岩溶系统对降雨信号响应的敏感度.站点母猪洞和六谷的互相关系数的最大值在 0.7~0.8 之间,而站点冒水坑的互相关系数最大值只有 0.233.这说明:上中游流量和降雨信号的相关程度较高;从上游到下游,系统对降雨信号响应的敏感度减弱了.

系统的记忆性决定于 2 个因素:汇水面积和径流速度^[13].冒水坑岩溶地下河系统的记忆性比上游母猪洞强,说明冒水坑地下河系结构复杂、补给范围广,网状管道使地下水产生多股通路,管道排水不畅通使岩溶

系统的记忆时间增长,而中游和上游的六谷和母猪洞,由于快速流的存在且快速流的比重相对较大,大管道排水迅速,大裂隙、小裂隙水循环径流速度慢,不能迅速补充管道流,系统的记忆性相对较弱.上述原因也是导致该流域中上游系统对降雨信号的响应比下游系统敏感的主要原因.

2.4 相位谱分析

相位谱能从整体上反映各周期波动的时差关系.对不太规则的波动而言,相位谱分析方法尤为合适.从图 5 可以看出,冒水坑站相位谱扭曲程度及趋势的不一致程度明显高于母猪洞和六谷站,主要原因是冒水坑快速流的比重比母猪洞和六谷小.由式(12)计算得出的上游到下游 3 个测站的流量对降雨信号响应的平均滞后时间分别为 $d_1 = 0.83\text{ d}$, $d_2 = 1.02\text{ d}$, $d_3 = 1.76\text{ d}$.从上游到下游滞后时间依次延长的主要原因是:上游的母猪洞为无覆盖的裸露岩溶多重介质含水系统,裂隙在垂向上的张开深度和宽度较大,上游的水力坡度也较下游大得多,平均坡降为 1.11%;岩溶发育以垂直形态为主,减小了降雨入渗水在垂向的运动阻力,大大缩短了滞后时间.中下游的六谷、冒水坑附近为覆盖型岩溶含水系统,地表有一定厚度的红黏土层分布,水力坡度也比上游小得多,地下河类型为网络型地下河,地下水以水平运动为主,垂直形态不甚发育,冒水坑附近的大裂隙、小裂隙的补给范围广,裂隙间的网络联系比较复杂,裂隙排水不畅.

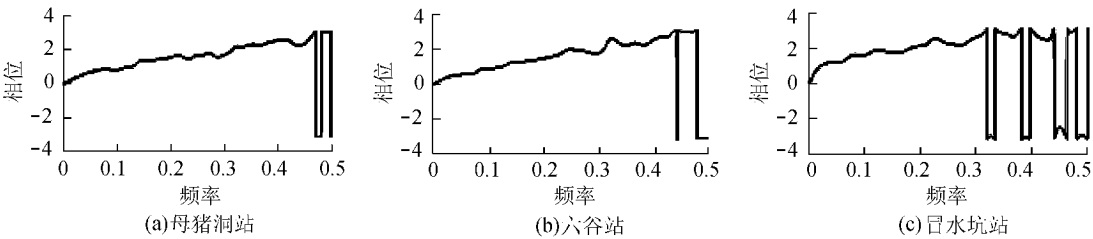


图 5 各站相位谱
Fig.5 Phase spectra at the three stations

2.5 相干谱分析

相干谱可以反映系统输入信号、输出信号的相关程度和线性化程度,而线性化程度可以反映系统内部结构对输入信号响应的敏感度.因此,利用相干函数式(13)计算了上、中、下游 3 个站降雨与流量的相干系数,得到了这 3 个站降雨与流量的相干谱,如图 6 所示.

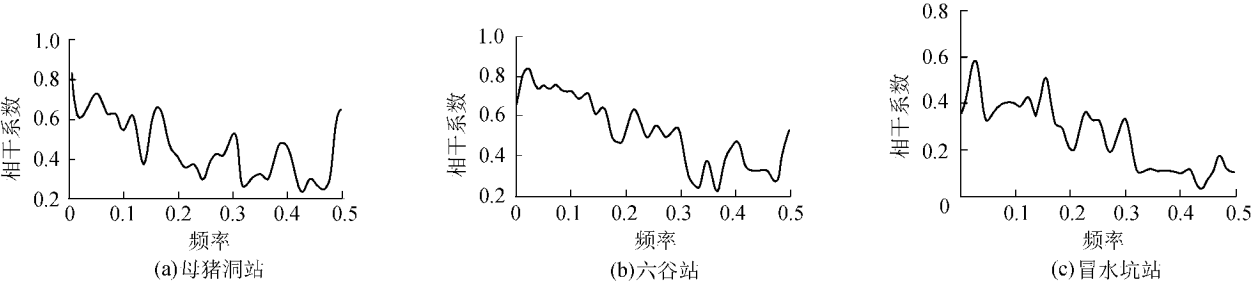


图 6 降雨与流量的相干谱
Fig.6 Plot of coherency for the three stations

由图 6 可知,母猪洞、六谷和冒水坑站相干系数的均值分别为 0.46、0.52 和 0.26.这表明上中游流量对降雨信号响应的敏感度比下游强.其主要原因是,后寨岩溶含水系统从上游到下游,地貌由裸露型渐变为覆盖型,地下含水系统空间结构由单管型地下河渐变为网络型地下河,小裂隙微裂隙补给范围由小变大,地下水运动由以垂直运动为主发展为以水平运动为主.然而,由于地下水库储水调蓄的影响,母猪洞站相干系数的均值略低于六谷站相干系数的均值.因此,研究不同岩溶地段的降雨与流量的相干谱,可以了解岩溶多重介质含水系统的内部结构形态.

3 结 论

本文利用时间序列分析方法分析了后寨典型岩溶小流域流量对降雨信号的响应规律,并得到了如下

结论：

- a. 系统的记忆性从上游到下游依次加强,对降雨信号响应的敏感度依次减弱.
- b. 上游裸露的岩溶地貌、较大的裂隙张开宽度和深度、较大的水力坡度、以垂向发育为主的岩溶形态及单管型的岩溶地下河排泄系统,使得上游对降雨信号响应的滞后时间大大缩短,而下游冒水坑较厚土层覆盖的岩溶地貌、平缓的水力坡度、以水平发育为主的岩溶形态、较大的裂隙水补给范围及网络型的岩溶地下排泄系统,使得下游流量对降雨信号响应的滞后时间大大延长.从相干谱图上也可以明显地看出,上中游流量对降雨信号响应的线性化程度明显高于下游.

参考文献：

[1] GEORGE P , NICOLAOS L. The contribution of time series analysis to the study of the hydrodynamic characteristics of the karst system : application on two typical karst aquifers of Greece(Trifilia , Almyros Crete) [J]. Journal of Hydrology , 2006 , 329 :368-376.

[2] OGNJEN B. Karst spring hydrographs as indicators of karst aquifer[J]. Hydrological Sciences , 1993 , 38(1/2) : 51-62.

[3] 杨剑明,张兆干,王祥,等.贵州普定后寨地下河流域地下含水空间结构特征[J].中国岩溶,1996,15(3) 246-252.

[4] 王燕.应用时间序列分析[M].北京:中国人民大学出版社,2005:25-29.

[5] 黄忠恕.波谱分析方法及其在水文气象学中的应用[M].北京:气象出版社,1983:1-94.

[6] LAROCQUE M , MANGIN A , RAZACK M. Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente , France) [J]. Journal of Hydrology , 1998 , 205 :217-231.

[7] ALBERTO P , ANTONIO P. Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis[J]. Journal of Hydrology , 1995 , 168 :73-89.

[8] 郎超,刘丛强,赵志琦,等.贵阳市地表水地下水组成:喀斯特水文系统水-岩反应及污染特征[J].水科学进展,2005,16(6) 826-832.

[9] 张键云,庄一鸽.岩溶地区流域水文模型的探讨及应用[J].河海大学学报,1988,16(3) 68-79.

[10] 钱孝星.岩溶地下水运动与计算的若干问题讨论[J].水利水电科技进展,1998,18(4) :18-22.

[11] 王腊春,许有鹏.贵州普定后寨地下河流域岩溶水特征研究[J].地理科学,2000,20(6) 557-558.

[12] 谢昌卫,丁永建,刘时银,等.托木尔峰南麓径流变化的气候因素分析[J].冰川冻土,2005,27(2) 269-275.

[13] 俞锦标,杨立铮,章海生,等.中国喀斯特发育规律典型研究:贵州普定南部地区喀斯特水资源评价及其开发利用[M].北京:科学出版社,1990:146-147.

Hydrodynamic characteristic analysis of Houzhai karst watershed in Guizhou Province

SHU Long-cang , LIU Li-hong , TAO Yu-fei , WANG Mao-mei , DONG Gui-ming

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : Using the Houzhai karst watershed in Guizhou Province as an example , a time series analysis method was used to study the hydrodynamic characteristics of the karst aquifer system. Results obtained through autocorrelation and cross-correlation show that the sensitivity of the Houzhai karst aquifer system to the input rainfall signal decreases gradually from upstream to downstream , but the memorizing action increases gradually from upstream to downstream. The spectrum analysis shows that there is a lag in the response of discharge to the input rainfall signal and that the lag time increases regularly from upstream to downstream. The results also indicate that the degree of the linearity of the response of discharge to the input rainfall signal in the upstream and midstream is higher than that in the downstream.

Key words : Houzhai basin in Guizhou Province ; karst multi-medium ; hydrodynamic characteristics ; time series analysis