

后寨岩溶含水系统快慢速流成分识别

刘丽红¹,王大胜²,李 娴³,鲁程鹏⁴

(1. 安徽理工大学地球与环境学院,安徽 淮南 232001; 2. 安徽省交通勘察设计院,安徽 合肥 230011;
3. 合肥工业大学土木与水利工程学院,安徽 合肥 230000; 4. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:为深入分析岩溶含水系统水动力特征,将时间序列分析中的相干谱分析和交叉振幅分析应用于后寨岩溶含水系统水动力特征研究。相干谱分析揭示岩溶含水系统中存在对降雨信号线性化程度高的快速流和对降雨信号线性化程度低的慢速流;通过交叉振幅分析,提取了岩溶含水系统对降雨输入信号的过滤方式,获得了岩溶含水系统上、中、下游不同比例的快慢速流成分。分析结果表明,相干谱和交叉振幅分析方法在岩溶含水系统水动力特征研究中具有较好的实用性。

关键词:岩溶含水系统;相干谱;交叉振幅;快慢速流;后寨岩溶

中图分类号:P641.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)05-0061-04

Research on identification of quick flow and slow flow components in Houzhai karstic water system//LIU Lihong¹, WANG Dasheng², LI Xian³, LU Chengpeng⁴ (1. College of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Anhui Provincial Communications Survey & Design Institute Co., Ltd., Hefei 230011, China; 3. College of Civil Engineering and Water Conservancy, Hefei University of Technology, Hefei 230000, China; 4. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to analyze the hydrodynamic characteristic of karstic water system, the coherency and cross-amplitude analysis are adopted to study the hydrodynamic characteristics in Houzhai karstic water system. The result of coherency analysis reveals that the existence of quick flow and slow flow components, which transmit the precipitation high linear and low linear. The cross-amplitude analysis identifies the way in which the system modified the input signal. According to the frequency width of the quick flow, the ratios of quick flow and slow flow are divided. The result shows that the coherency and cross-amplitude analysis is a practicable method for studying the hydrodynamic characteristics in karstic water systems.

Key words: karstic water system; coherency; cross-amplitude; quick flow and slow flow; Houzhai karstic

岩溶含水系统是由高渗透性相互连通的管道、大裂隙和低渗透性小裂隙介质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]。由于岩溶地层的复杂性、高度非均质各向异性和有限的水文地质观测井的局限性,岩溶含水系统的水动力特征研究非常困难。常用的一些试验方法,如抽水试验、示踪试验等,对岩溶含水系统水动力特征的研究至关重要,但这些方法的观测尺度有限,在提供不同类型流态的水流及其空间位置变化的信息方面受到一定的限制^[2]。对岩溶含水层水动力特征研究焦点之一是岩溶泉流量变化曲线或衰减曲线的分析;其二就是时间序列分析,因为各种空间分布类型的时间序列可以提供岩溶含水系统空间、时间上的重要信息且其简单易行,所需资料易于收集,结果可靠,所以时

间序列分析法被水文工作者广泛使用。

岩溶泉流量作为系统对降雨输入信号的响应特征之一,与系统本身的结构层次及降雨有密切联系,应用时间序列分析可以深入得到岩溶含水系统的动态表现及其水动力特征。本文通过时间序列分析方法中的相干谱、交叉振幅深入分析岩溶含水系统对降雨输入信号的整体响应及其滞后特征,识别后寨岩溶含水系统内部的快慢速流成分特性,并对系统中的快慢速流成分比例进行定量划分,为探究岩溶含水系统水动力特征提供依据。

1 时间序列的平稳过程及其谱分析

如果一个随机过程的均值和方差在时间过程上都是常数,并且在任何两时期的协方差值仅依赖于该两时期期间的距离或滞后,而不依赖于计算这个协

方差的实际时间,就称此随机过程为平稳的^[3]。

如果某一时间序列的自相关函数值^[4]随着滞后时间的增加而很快降低并趋近于零,可以认为该时间序列为平稳时间序列。对于一个非平稳时间序列可以通过差分分析,根据其差分后序列的自相关函数来判断其处理后的平稳性。

谱分析是相关分析的很好补充,只有平稳的时间序列才能进行谱分析。傅立叶转换把以滞后时间为自变量的自相关函数转化为以频率为自变量的单谱密度函数。谱密度函数 $S(f)$ 通过识别同时期的峰值来刻画岩溶含水系统:

$$S(f) = 2 \left[1 + 2 \sum_{k=1}^m D(k) r_k \cos(2\pi f k) \right] \quad (1)$$

其中

$$D(k) = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi k}{m} \right)$$
$$r_k = \frac{c_k}{c_0}$$

式中: c_k 为协方差; c_0 为方差; f 为频率, $f=j/2m$ ($j=1,2,\dots,m$); $D(k)$ 称为谱窗或权函数,是谱分析中进行平滑处理的平滑函数,经过平滑处理的谱估计量可以认为是无偏的和有效的估计量。

类似于谱密度函数,互谱密度函数 $S_{xy}(f)$ 是相应的互相关函数的傅立叶转换,是共谱 $h_{xy}(f)$ 和正交谱 $\lambda_{xy}(f)$ 的函数:

$$S_{xy}(f) = h_{xy}(f) - i\lambda_{xy}(f) \quad (2)$$

其中

$$h_{xy}(f) = 2 \left[r_{xy,0} + \sum_{k=1}^m (r_{xy,k} + r_{yx,k}) D(k) \cos(2\pi f k) \right]$$
$$\lambda_{xy}(f) = 2 \left[r_{xy,0} + \sum_{k=1}^m (r_{xy,k} - r_{yx,k}) D(k) \sin(2\pi f k) \right]$$

在极坐标系下,互谱密度还可以表示为振幅 $|S_{xy}(f)|$ 和相位 $\theta_{xy}(f)$ 的函数:

$$S_{xy}(f) = |S_{xy}(f)| e^{-i\theta_{xy}(f)} \quad (3)$$

振幅函数反映系统对输入信号的放大程度:

$$|S_{xy}(f)| = \sqrt{h_{xy}^2(f) + \lambda_{xy}^2(f)} \quad (4)$$

相位函数表达式如下:

$$\theta_{xy}(f) = \arctan \frac{\lambda_{xy}(f)}{h_{xy}(f)} \quad (5)$$

相位谱表示两个序列中对应频率分量相位变化的均值,反映了序列间各频率分量的相位差,即超前、滞后关系,通常限定在区间 $[-\pi, \pi]$ 内。可通过相位谱适线的斜率(斜率 $K=2\pi d$, d 为平均滞后时间)来求平均滞后时间^[5]:

$$\theta_{xy}(f) = 2\pi d f \quad (6)$$

相干函数 $G_{xy}(f)$ 反映输入信号与输出信号的线性化程度,由谱密度和互谱密度函数决定:

$$G_{xy}(f) = \frac{S_{xy}(f)}{\sqrt{S_x(f) S_y(f)}} \quad (7)$$

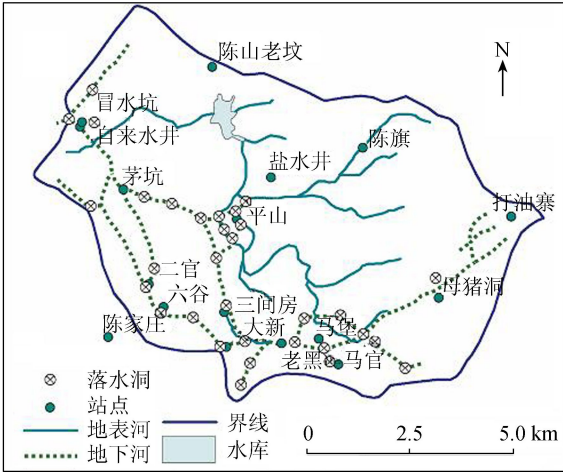
若系统为线性系统, $G_{xy}(f) \approx 1$, 输入函数改变则输出函数就会同比例改变,而非线性意味着系统中还必须考虑其他因素。

2 后寨岩溶小流域泉流量分析

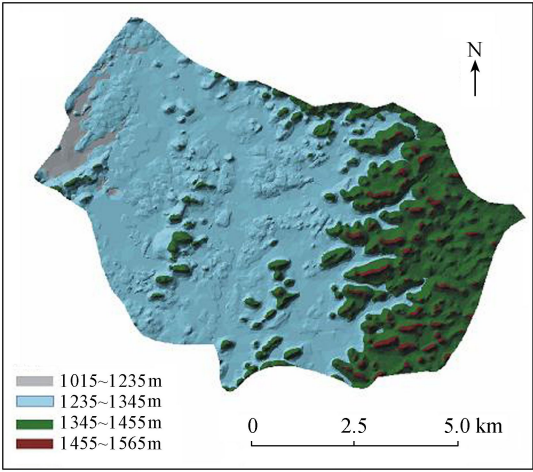
2.1 研究区概况

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^[6]。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 ; 地势东南高、西北低,海拔高度一般在 $1220 \sim 1400 \text{ m}$,最高 1585 m ,最低 1218 m ; 相对高差一般为 $250 \sim 300 \text{ m}$,最高达 367 m ^[7]。后寨岩溶小流域水系和高程如图 1 所示。

后寨岩溶小流域多年平均降水量为 1314.6 mm ,降水时空分布不均,5—10 月为雨季,降水量占全年的 80% 以上,11 月至次年 4 月为旱季。流域地貌



(a) 研究区水系



(b) 研究区高程

图 1 后寨岩溶小流域水系和高程

东部主要为峰丛洼地,西部主要为峰林盆地,流域内落水洞星罗棋布。地层为中三叠统关岭组 T_{2g} 的灰岩、白云岩,岩层倾角 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$,流域内共发育 6 条地下河,地下河流向基本上是从东至西,冒水坑为该闭合流域排泄的总出口^[8]。

2.2 资料的选取

为了能够得到较好的分析结果,需要有较长的时间序列资料,从上、中、下游分别选取 3 个测站的时间序列资料:①上游母猪洞从 1991 年 5 月至 1997 年 5 月共 6 个水文年的降雨及相应流量的观测资料;②中游六谷站由于资料缺乏,选取 1991 年 5 月至 1996 年 5 月共 5 个水文年的降雨及相应流量资料;③下游冒水坑站选取同期 1991 年 5 月至 1997 年 5 月共 6 个水文年的降雨及相应流量资料。图 2 给出了下游冒水坑站点从 1991—1997 年共 6 个水文年的降雨流量过程。

2.3 时间序列预处理及其平稳性检验

频谱分析方法适用于长序列平稳动态资料,对于非平稳的动态历时曲线,应先对序列进行平稳化改造。在交叉振幅以及相位谱和相干谱分析之前,对所分析的降雨流量时间序列进行预处理,通过二次差分去掉时间序列中的趋势项和周期项,使时间序列平稳^[9-10]。以上游母猪洞为例,二次差分后的降雨、流量自相关系数如图 3 所示,流量自相关系数从滞后时间 1 d 处的 -0.65 快速趋近于 0,因此,可认为流量时间序列在二次差分后为平稳时间序列。

2.4 相干谱分析

相干谱实际上是两个序列中频率为 f 的分量的振幅乘积的标准化均值,其取值区间为 $[0, 1]$ 。相干谱越趋近于 1,则两序列在 f 处越相关,在岩溶含

水系统分析中,可将降雨量 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 视为输入项,而将流量 $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$ 视为输出项,相干谱则可认为是 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 波动变化对 $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$ 波动变化影响程度的大小。

根据相干函数公式(7),计算上、中、下游 3 站的相干性,结果如图 4 所示。从图 4 可知,低频下相干谱值比高频下的相干谱值要高,这主要是因为岩溶含水系统中存在对降雨信号线性化程度高的快速流和对降雨信号线性化程度低的慢速流。母猪洞、六谷和冒水坑 3 个测站相干谱的平均值分别为 0.46、0.52 和 0.26;母猪洞、六谷相干谱的极大值都在 0.8 以上,而冒水坑的相干谱极大值还不足 0.6;在低频率下(频率低于 0.2),六谷相干谱值在 0.7 左右浮动,母猪洞在 0.6 左右,而冒水坑在 0.4 左右浮动,上、中游对降雨信号的线性化程度明显比下游高。

2.5 快慢速流成分划分

交叉振幅可以反映系统对输入信号的过滤方式,图 5 给出了上、中、下游 3 个代表性站点降雨流量的交叉振幅。上、中、下游站点的交叉振幅都有一个共同特点,振幅的峰值都集中在低频段,高频段振幅趋近于零。在交叉振幅图上岩溶含水系统中的快速流成分比慢速流成分有更高的交叉振幅值^[11],快速流主要出现在相互连通的管道大裂隙中且流速较快,慢速流则主要出现在连通性差且流动较慢的小裂隙和基质中,因此,低频上较高的交叉振幅主要是由岩溶含水系统内部的快速流成分控制。上游母猪洞,频域上 $f=0.33$ 频率点(即 3 d)交叉振幅值较大而不能近似为 0,表明系统在高频上能有效过滤降雨输入信号。下游冒水坑交叉振幅图与上、中游的交叉振幅图有明显的差别,较大的振幅值仅局限在

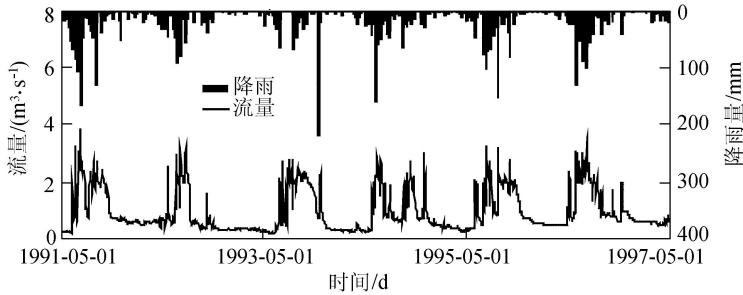


图 2 冒水坑站点 1991—1997 年降雨流量过程

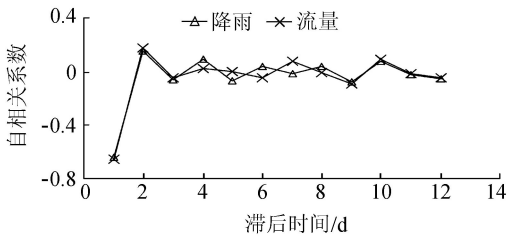


图 3 序列二次差分后的自相关系数

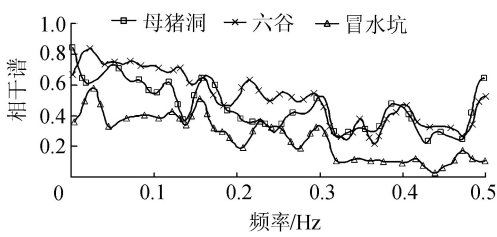


图 4 上、中、下游站点降雨流量相干谱

非常低的频率($f=0.025$)范围内,即在下游冒水坑处快速流发生在降雨后的40 d内,从快速流占的频率宽度上也能反映出快速流的比重较小,仅为总体频率宽度的5%,这与杨立铮^[12]通过衰减曲线分段得到的管道水储水体积3.2%的结论基本一致;上游的母猪洞快速流的频率宽度达总频率宽度的60%,说明在上游快速流占有相当大的比重;中游的六谷由于处于上游和下游的地表地下双重地貌空间结构的过渡带,快速流在交叉振幅上的频率宽度占总频率宽度的40%(图5(b))。

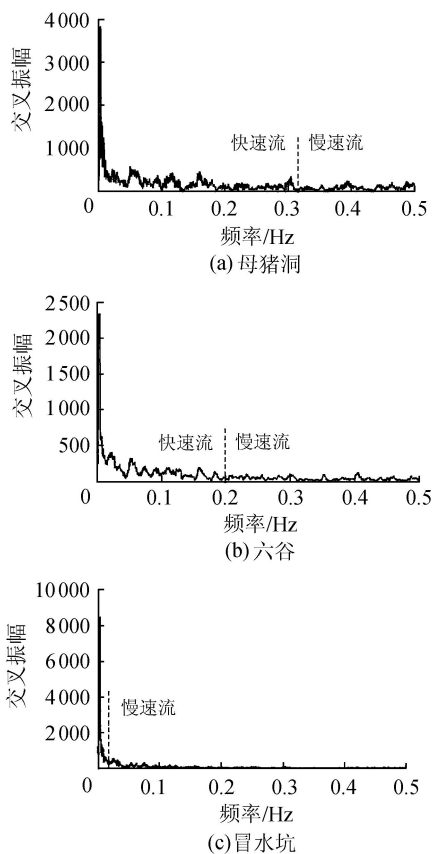


图5 上、中、下游降雨流量交叉振幅

3 结 语

通过相干谱分析发现,在低频下相干谱值明显高于高频下的相干谱值;由降雨流量双变量交叉振幅分析发现,上游母猪洞快速流主要发生在降雨后的3 d内,而下游的冒水坑快速流发生在降雨后的40 d里;从快速流占的频率宽度上得到快慢速流的比重值,下游冒水坑快速流的比重仅为5%,上游母猪洞快速流的比重为60%。时间序列中的谱分析很好地揭示了后寨岩溶含水系统水动力特征,通过谱分析中的交叉振幅对快慢速流的划分,验证了由大管道和周围裂隙介质组成的双重介质概念模型在此研究区的适用性。

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] 刘丽红, 束龙仓, 鲁程鹏. 基于管道流模型的岩溶含水系统降雨泉流量响应规律: 以贵州后寨典型小流域为例[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2010, 40(5): 1083-1089. (LIU Lihong, SHU Longcang, LU Chengpeng. Precipitation and discharge response mechanism based on conduit flow in karstic water system: application the Houzhai karstic water system of Guizhou Province [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2010, 40(5): 1083-1089. (in Chinese))
- [3] 王燕. 应用时间序列分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2005.
- [4] 周泽江, 覃光华, 于春平, 等. 若尔盖湿地黑河径流分析及预测[J]. 水电与新能源, 2013(3): 18-22. (ZHOU Zejiang, QIN Guanghua, YU Chunping, et al. Analysis and prediction of Heihe River runoff characteristics in Ruojiaergai wetland [J]. Hydropower and New Energy, 2013(3): 18-22. (in Chinese))
- [5] 束龙仓, 刘丽红, 陶玉飞, 等. 贵州后寨典型岩溶小流域水动力特征分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36(4): 433-437. (SHU Longcang, LIU Lihong, TAO Yufei, et al. Hydrodynamic characteristic analysis of Houzhai karst watershed in Guizhou Province [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(4): 433-437. (in Chinese))
- [6] 郎赞超, 刘丛强, 赵志琦, 等. 贵阳市地表水地下水化学组成: 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): 826-827. (LANG Yunchao, LIU Congqiang, ZHAO Zhiqi, et al. Chemical compositions of surface and groundwaters of Guiyang City: discussion of water-rock interaction and contamination in karstic hydrological system [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(6): 826-827. (in Chinese))
- [7] 陈洪元, 陈邦宇, 陈波. 贵州省普定后寨岩溶小流域水文特性研究[J]. 贵州地质, 2005, 22(4): 284-288. (CHEN Hongyuan, CHEN Bangyu, CHEN Bo. Lithologic characteristics of Houzhai karst small valley, Puding, Guizhou Province [J]. Guizhou Geology, 2005, 22(4): 284-288. (in Chinese))
- [8] 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. (WANG Lachun, XU Youpeng. The characteristic study of karst water at Houzhai underground basin in Puding County, Guizhou Province [J]. Scientia Geographica Sinica, 2000, 20(6): 557-558. (in Chinese))

(下转第85页)

- lines[J]. Water Science and Technology, 1995, 31(7): 213-218.
- [31] CAO Y S, ALAERTS G J. Aerobic biodegradation and microbial population of a synthetic wastewater in a channel with suspended and attached biomass[J]. Water Science and Technology, 1995, 31(7): 181-189.
- [32] ASHLEY R M, ARTHUR S, COGHLAN B P. Fluid sediment in combined sewers[J]. Water Science and Technology, 1994, 29(1/2): 113-123.
- [33] RISTENPART E, ASHLEY R M, UHL M. Organic near-bed fluid and particulate transport in combined sewers[J]. Water Science and Technology, 1995, 31(7): 61-68.
- [34] VERBANK M A. Capturing and releasing settleable solids; the significance of dense undercurrents in combined sewer flows[J]. Water Science and Technology, 1995, 31(7): 85-93.
- [35] MCGREGOR I, ASHLEY R M, ODUYEMI K O K. Pollutant release from sediments in sewer systems and their potential for release into receiving water systems[J]. Water Science and Technology, 1993, 28(8/9): 161-169.
- [36] ASHLEY R M, WOTHERSPOON D J J, COGHLAN B P, et al. The erosion and movement of sediments and associated pollutants in combined sewers[J]. Water Science and Technology, 1992, 25(8): 101-114.
- [37] MCGREGOR I, SOUTER N H, ASHLEY R M. Sewer sediments: preparation methods for enumerating bacteria[J]. Water Science and Technology, 1996, 33(9): 179-86.
- [38] BJERRE H L, HVITVED-JACOBSEN T, TEICHGRUBER B, et al. Modelling of aerobic wastewater transformations under sewer conditions in the Emscher River, Germany[J]. Water Environment Research, 1998, 70(6): 1151-1160.
- [39] VOLLERTSEN J, HVITVED-JACOBSEN T. Aerobic microbial transformations of resuspended sediments in combined sewers-a conceptual model[J]. Water Science and Technology, 1998, 37(1): 69-76.
- [40] HENZE M, GUJER W, MINO T, et al. Activated sludge models: ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3[M]. London: International Water Association Publishing Alliance House, 2000.
- [41] PAI T Y, CHANG H Y, WAN T J, et al. Using an extended activated sludge model to simulate nitrite and nitrate variations in TNCU2 process[J]. Applied Mathematical Model, 2009, 33(11): 4259-4268.
- [42] HVITVED-JACOBSEN T, VOLLERTSEN J, NIELSEN P H. A process and model concept for microbial wastewater transformations in gravity sewers[J]. Water Science and Technology, 1998, 37(1): 233-241.
- [43] HVITVED-JACOBSEN T, VOLLERTSEN J, TANAKA N. Wastewater quality changes during transport in sewers-an integrated aerobic and anaerobic model concept for carbon and sulfur microbial transformations[J]. Water Science and Technology, 1998, 38(10): 257-264.
- [44] ASHLEY R M, CRABTREE R W. Sediment origins, deposition and build-up in combined sewer systems[J]. Water Science and Technology, 1992, 25(8): 1-12.
- [45] AHYERRE M, CHEBBO G, SAAD M. Nature and dynamics of water sediment interface in combined sewers[J]. Journal of Environmental Engineering, 2001, 127(3): 233-239.
- [46] PAI T Y, SHYU G S, CHEN L, et al. Modelling transportation and transformation of nitrogen compounds at different influent concentrations in sewer pipe[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(3): 1553-1563.

(收稿日期: 2013-08-31 编辑: 熊水斌)

(上接第 64 页)

- [9] MERO F. An approach to daily hydrometeorological water balance computations for surface and groundwater basins[C]//Van den BROEK J M M, RIJNBERG T F. Integrated Surveys for River Basin Development. Delft: ITC-UNESCO Centre for Integrated Surveys, 1969: 103-110.
- [10] 李亚伟, 詹卫华, 卫东山, 等. 流域年径流时间序列的奇异谱分析[J]. 水电能源科学, 2010, 28(10): 19-22. (LI Yawei, ZHA Weihua, WEI Dongshan, et al. Application of singular spectrum analysis to annual runoff time series in river basin[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(10): 19-22. (in Chinese))
- [11] PADILLA A, PULIDO-BOSCH A. Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis[J]. Journal of Hydrology, 1995, 168: 73-89.

- [12] 杨立铮. 地下河流域岩溶水天然资源类型及评价方法[J]. 水文地质工程地质, 1982(4): 22-25. (YANG Lizheng. Karstic water natural resources types and evaluation method in groundwater basin[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1982(4): 22-25. (in Chinese))

(收稿日期: 2013-08-11 编辑: 熊水斌)

