https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.236

运用水文时间序列分析识别济南泉域岩溶发育特征

李 严[1,2],王家乐[2*],靳孟贵[1],马河宽[3],柳浩然[3],彭 涛[4]

1. 中国地质大学环境学院,湖北武汉 430074
2. 长江水利委员会长江科学院水土保持研究所,湖北武汉 430010
3. 山东省地矿局八O一水文地质工程地质大队,山东济南 250014
4. 中国气象局武汉暴雨研究所,湖北武汉 430205

摘 要: 岩溶含水层具有高度的非均质性和各向异性,为定量识别济南泉域岩溶含水层发育状况,通过选取泉域岩溶水补给区和排泄区的地下水位动态数据,采用相关分析和频谱分析,研究其对降雨补给的响应特征.地下水位-降雨量的自相关和互相关分析表明,系统对降雨输入信号的敏感程度自补给区至排泄区逐渐降低,但记忆作用逐渐增强.相位分析结果表明泉域地下水位对降雨信号的响应存在滞后现象,自补给区至排泄区滞后时间逐渐延长,补给区地下水位与降雨具有更好的线性相关性.交叉振幅分析结果表明补给区地下水流中快速流约占20%~30%,而在排泄区快速流占比减少至2.5%~10.0%.岩溶含水系统地下水动力条件主要受岩溶发育程度等介质内部结构影响,济南泉域岩溶含水层岩溶发育程度较低,含水介质和水流通道以岩溶裂隙为主,地下水运动以基质流为主.

关键词: 岩溶含水系统;时间序列分析;岩溶发育状况;济南;地下水.

中图分类号: P641.134 **文章编号:** 1000-2383(2021)07-2583-11 **收稿日期:** 2020-08-12

Hydrodynamic Characteristics of Jinan Karst Spring System Identified by Hydrologic Time-Series Data

Li Yan[1,2], Wang Jiale[2*], Jin Menggui[1], Ma Hekuan[3], Liu Haoran[3], Peng Tao[4]

1. *School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*
2. *Department of Soil and Water Conservation, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan* 430010, *China*
3. *No.* 801 *Hydrogeology & Engineering Geology Brigade, Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Jinan* 250014, *China*
4. *Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan* 430205, *China*

Abstract: Karst aquifers are characterized by highheterogeneity and spatial variability of their media. Time-series analysis of precipitation and waterlevel (as input and output functions), including correlation, spectrum analysis, were applied to the Jinan karst spring system in Shandong Province, in order to study the hydrodynamic behavior and hydraulic properties of the aquifer system. Autocorrelation and cross-correlation analysis showed that the sensitivity of the system to precipitation input signal decreased gradually from the recharge area to the discharge area, but the memory effect increased gradually. Phase analysis results show that the response of water level to precipitation signal in Jinan spring area lags behind. The lag time from recharge area to discharge area gradually prolongs, and the recharge area has better linear correlation. The results show that the quick flow accounts

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 41807219, 41877192);国家重点研发计划项目(No. 2017YFC0404504);中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(Nos. CKSF2019170/TB, CKSF2019410/TB).

作者简介: 李严(1996-),男,硕士研究生,主要从事水环境方面研究工作.ORCID: 0000-0003-0286-4067. E-mail: cugliyan1996@163.com

* **通讯作者:** 王家乐,ORCID: 0000-0002-0691-0027. E-mail: wangjiale@mail.crsri.cn

引用格式: 李严,王家乐,靳孟贵,等,2021.运用水文时间序列分析识别济南泉域岩溶发育特征.地球科学,46(7):2583-2593.

for about 20%-30% of the subsurface flow in the recharge zone, and the ratio is reduced to 2.5%-10.0% in the discharge zone. The fluctuation of water level in karst system is mainly affected by the internal structure of karstic medium. The karstification degree of the aquifer in Jinan is fairly low, and groundwater movement is dominated by matrix flow.

Key words: Karst aquifer; Time-series analysis; Karstification degrees; Jinan; groundwater.

0 引言

岩溶含水层由于岩溶发育程度的不一致性,存在着不规则的裂隙网络及导水通道,从而表现出含水介质的非均质性和各向异性,水动力条件十分复杂,给研究带来极大的困难. Katz *et al*.(1997)针对岩溶含水层复杂的水动力条件,将其中的水力流动划分为裂隙中的基质流及管道中的快速流,开创了经典概念模型的理论基础. 其中快速流代表对强降雨响应迅速,滞时短,消退迅速的大裂隙管道水流,基质流则是贮存在细小裂隙中的水流(郑雪等,2014). 了解和掌握区域岩溶含水层中的快速流、基质流占比对整个地区的地下水文循环过程具有重要的指示意义.

然而,由于岩溶含水介质的非均质性及各向异性,常用的抽水实验及示踪实验所反映的局部代表性(Lee and Lee, 2000)并不足以表征整个岩溶含水层的总体特征.

将岩溶含水层视为信息过滤系统,运用时间序列分析方法通过分析岩溶含水系统中泉流量、钻孔水位等反映岩溶水动态变化的特征参数对降雨输入的响应特征成为了定量解译岩溶含水层物理结构的新途径. Mangin *et al*.(1984)率先将时间序列分析方法引入到岩溶水文研究中,在此之后Rahnemaei *et al*.(2005)利用频谱分析计算出降雨进入含水层后的平均滞留时间,并初步划分了不同区域岩溶发育状况;Panagopoulos *et al*.(2006)利用相关分析和频谱分析比较了希腊特里菲利亚和阿尔米罗斯克里特岛两个地区含水层的岩溶发育程度;Liu *et al*.(2011)采用频谱分析定量识别了贵州省后寨地区岩溶含水层中岩溶管道和裂隙的发育特征.

由于我国南、北方气候、植被及地质条件存在着显著差异,南方岩溶常发育大型岩溶管道以及地下暗河,而北方岩溶多形成以溶蚀裂隙为主的泉域水流系统(袁道先,1993). 大部分学者基于等效孔隙介质模型(Qian *et al*., 2006; 王庆兵等, 2009; Kang *et al*., 2011)开展北方岩溶水系统的地下水数值模拟,但等效孔隙介质模型对北方岩溶水系统的适用性尚未开展准确的定量分析及评价.

济南地处我国北方碳酸盐岩岩溶发育区,区内岩溶水资源丰富,泉眼众多,是我国北方典型的岩溶泉域. 针对济南岩溶水系统,前人开展了大量的研究,如通过野外实测岩溶裂隙运用地质统计方法研究岩溶介质的空隙连通性能(陈鸿汉等, 2002; 张建国等, 2004),通过示踪试验研究岩溶水径流通道特征(邢立亭等, 2017; 迟光耀, 2019),通过泉群流量相关分析、流场特征分析等方法研究济南泉域边界条件(孙斌等, 2014),采用水化学、同位素手段研究岩溶水补给来源和循环模式(Wang *et al*., 2016; Guo *et al*., 2019),利用水文地球化学模拟和数理统计手段研究岩溶水水质形成和演化(王珺瑜等, 2017; 李常锁等, 2018). 但由于岩溶发育的非均质性和各向异性,如何定量识别济南泉域地下水动力特征和岩溶发育状况,一直是研究的难点之一.

本文以济南泉域为研究对象,应用水文时间序列分析研究岩溶水系统的地下水水文过程,选取济南泉域补给区和排泄区的地下水水位动态数据,通过相关分析和频域频谱分析解译泉域地下水水位对降雨的响应特征,定量识别济南泉域地下水动力特征和岩溶发育状况,对深入认识济南泉域岩溶水循环演化规律,以及地下水资源的合理开发利用具有重要的理论和实际意义.

1 研究区概况

济南地处鲁中山地的北缘与山前倾斜平原的交接带,地势南高北低. 南部及东南部为绵延起伏的山区,地势陡峭;中部为低山丘陵,山势坡度变缓,沟谷宽阔,冲沟发育;北部为山前倾斜平原和黄河冲积平原. 研究区地处中纬度内陆地带,属暖温带大陆性气候,济南泉域多年平均降水量为685 mm,降雨主要集中在6~9月,约占全年总降水量的77%.

济南位于泰山穹隆的北翼,地质构造在总体上是一个以古生代碳酸盐类地层为主的北倾单斜构造(图1、图2). 南部低山丘陵裸露型灰岩分布区为岩溶地下水的补给区;中部丘陵和岛状山为岩溶地

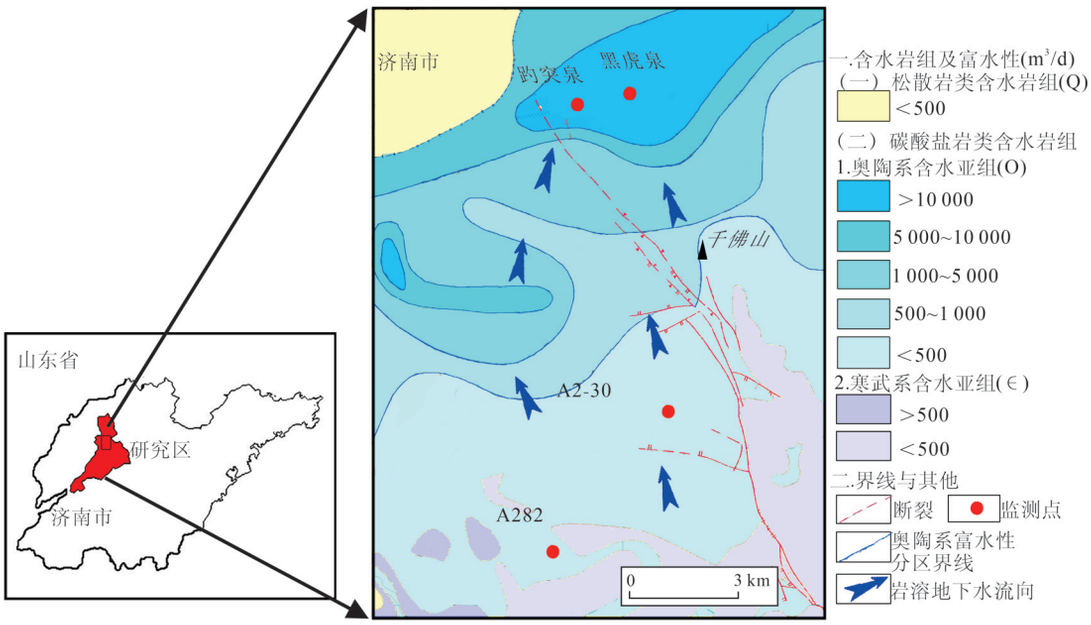

图 1　研究区地质背景及地下水监测点分布

Fig.1　Geological background and sampling point distribution in the study area

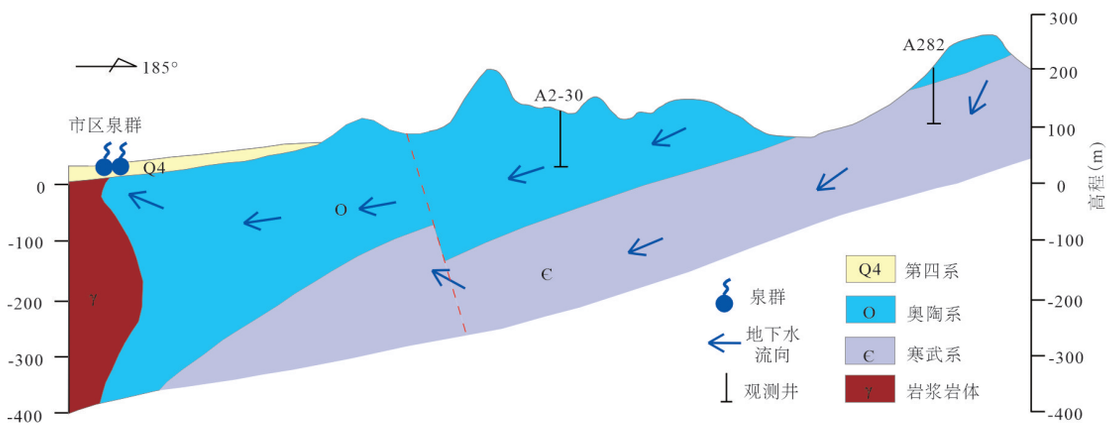

图 2　研究区水文地质剖面示意图

Fig. 2　The hydrogeological profile of the study area

下水的补给—径流区,其主要岩性为寒武系灰岩、页岩及中、下奥陶系灰岩、泥质灰岩等;北部山前倾斜平原隐伏型灰岩分布区,为岩溶地下水的汇集排泄区,趵突泉、黑虎泉等大型泉群在此出露.岩溶水自南向北径流,在济南市区以泉群形式出露,奥陶系灰岩含水岩组构成了主要岩溶含水岩组.

2　研究方法

本文采用的时间序列分析方法主要包括相关分析和频谱分析,利用地下水水位动态数据定量研究岩溶含水系统水动力特征.分别选取济南泉域地下水排泄区和补给区的地下水位监测点(图 1),其中监测点 A282 和 A2-30 位于地下水补给区、监测点趵突泉和黑虎泉位于地下水排泄区,其监测时间间隔为 1 d.

相关分析主要用于研究时间序列的结构特征、某个时段范围内的线性相关程度以及输入输出之间的联系(Lambrakis *et al.*, 2000).而频谱分析将相关函数利用傅里叶变换转换为功率谱,将时域信息转换为频域信息,主要用于研究时间序列的周期特征以及输入输出的内部响应(Mathevet *et al.*, 2004).

2.1　相关分析

本研究所采用的相关分析主要包括自相关分析和交叉相关分析.

2.1.1 自相关分析 自相关分析可以量化时间序列的线性依赖性和记忆效应(Larocque *et al.*, 1998),系统记忆效应是指过滤系统随时间增长"忘记"其初始条件的调节作用.利用自相关系数$r(k)$随滞后时间k的变化特征反映系统的调节作用,随着滞后时间k的增长,自相关系数$r(k)$减小,当滞时k增大到一定程度时,$r(k)$很小(通常为0.1~0.2),则认为x_t与x_{t+k}之间不存在任何关联,此时所对应的滞后时间k称为"系统记忆时间"(Panagopoulos and Lambrakis, 2006).若时间序列是随机序列(如降雨数据),则自相关函数$r(k)$会迅速降低,并在短时间内降至零值,呈现出白噪声特征;然而,如果时间序列具有很强的相关性和长的自相关长度,自相关函数$r(k)$会呈现一个缓慢下降的斜率和一个长时滞的非零值.从水文地质角度看,自相关函数$r(k)$的变化趋势可以反映岩溶含水层的岩溶发育程度和储水空间的信息(郑雪等,2014).

自相关系数和自协方差函数可表示为(Liu *et al.*, 2011):

$$r(k)=\frac{C(k)}{C(0)}, \tag{1}$$

$$C(k)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n-k}(x_t-\bar{x})(x_{t+k}-\bar{x}), \tag{2}$$

式中:$C(k)$为自协方差;$C(0)$为方差;$r(k)$为自相关系数;t为时间变量;k为滞后时间;n为样本数量;x_t是单个样本值;$\bar{x}$是样本的平均值.

2.1.2 交叉相关分析 交叉相关函数能够表示输入时间序列x_t和输出序列y_t之间的相互关系(Francesco and Doglioni, 2010),并提供关于输入和输出之间的因果关系和非因果关系的信息.滞后时间k趋于某一值时,r_{xy}值达到峰值,r_{xy}峰值越高,则表示输入时间序列x_t和输出序列y_t之间的相关性越好,y_t越易受到x_t的影响(Katsanou *et al.*, 2015).

互协方差函数和互相关系数可表示为(Francesco and Doglioni., 2010):

$$C_{xy}(k)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n-k}(x_t-\bar{x})(y_{t+k}-\bar{y}), k\geqslant 0, \tag{3}$$

$$C_{xy}(k)=C_{yx}(-k), k<0, \tag{4}$$

$$r_{xy}=\frac{C_{xy}(k)}{\sigma_x\sigma_y}, \tag{5}$$

式中:$C_{xy}(k)$为互协方差函数;σ_x和σ_y分别是时间序列x_t和y_t的标准偏差.

2.2 频谱分析

频谱分析作为相关分析的补充,将时域的相关性信息转化为频域的幅值信息,可以更加直观地观察系统输入和输出的相关信息.频谱分析包括功率谱(自谱密度和互谱密度)、交叉振幅、相位谱以及相干谱分析(Massei, 2006).

2.2.1 功率谱分析 功率谱分析包括自谱分析和互谱分析,自谱密度和互谱密度函数分别为自相关和互相关函数的傅里叶变换,其函数表达式分别为(刘建等,2010):

$$S(f)=2[1+2\sum_{k=1}^{m}w(k)r(k)\cos(2\pi fk)], \tag{6}$$

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

式中:$S(f)$为时间序列的自谱密度;$w(k)$为窗函数,使谱密度函数更加平滑,通常取Tukey-Hanning窗,其表达式为:

$$w(k)=\frac{1}{2}[1+\cos(\frac{\pi k}{m})]. \tag{8}$$

$S_{xy}(f)$为时间序列的互谱密度,其中$h_{xy}(f)$和$\lambda_{xy}(f)$分别代表互谱密度函数的实部和虚部,其表达式分别为:

$$h_{xy}(f)=2\left\{r_{xy}(0)+\sum_{k=1}^{m}[r_{xy}(k)+r_{yx}(k)]w_k\cos(2\pi fk)\right\}, \tag{9}$$

$$\lambda_{xy}(f)=2\left\{\sum_{k=1}^{m}[r_{xy}(k)-r_{yx}(k)]w_k\sin(2\pi fk)\right\}. \tag{10}$$

2.2.2 交叉振幅分析 交叉振幅函数$\alpha_{xy}(f)$可以表示系统对降雨周期性变化的过滤特征(Padilla and Pulida-Bosch, 1995).储水空间较大,岩溶发育均匀的含水层具有较强的调控能力,在系统上体现为在高频信号(短周期)上幅值强度被系统衰减,而在低频信号(长周期)上交叉振幅幅值(CAF)被系统增强.岩溶发育非均质程度较高的含水层调控能力较弱,其交叉振幅幅值(CAF)被系统过滤效应不明显(Rahnemaei *et al.*, 2005).

交叉振幅函数可表示为(Mathevet *et al.*, 2004):

$$\alpha_{xy}(f)=\sqrt{h_{xy}(f)^2+\lambda_{xy}(f)^2}. \tag{11}$$

2.2.3 相位谱分析 相位函数$\varphi_{xy}(f)$可以在整体上掌握输入信号和输出信号波动的超前或滞后关系(Gárfias-Soliz *et al.*, 2010).因此,分析系统的相位变化可用于了解水位波动和降雨信号之间的平均滞后时间.

相位函数可表示为(Padilla *et al.*, 1995):

$$\phi_{xy}(f)=\arctan\frac{\lambda_{xy}(f)}{h_{xy}(f)}. \tag{12}$$

2.2.4 相干谱分析 相干谱分析可以反映输入信

号中波动对输出信号波动的影响程度，即相干函数值（COF）表示输入信号与输出信号线性相关性，利用相干图谱，可以了解水位波动在不同频率下与降雨的相关程度（Delbart *et al.*, 2014）. 在交叉振幅和谱密度函数的基础上，可以得到相干谱函数 $CO_{xy}(f)$，其表达式为（Lambrakis *et al.*, 2000）：

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

3　结果与讨论

3.1　地下水位动态特征

济南泉域2006～2011年地下水位动态变化如图3所示，泉域排泄区趵突泉和黑虎泉的水位动态基本一致，年内及年际水位变幅小，黑虎泉水位略高于趵突泉，黑虎泉水位变化范围为27.10～30.16 m，趵突泉水位变化范围为27.12～30.00 m. 补给区水位变幅较大，且不同位置地下水位动态差异较大，A282水位变化范围为73.23～168.35 m，A2-30水位变化范围为62.18～138.18 m.

整体上济南泉域地下水位动态与降雨量变化具有较好的一致性，排泄区与补给区地下水位动态的差异反映了含水层岩溶发育的空间变异性.

3.2　相关分析

3.2.1　自相关分析　在进行相关分析前首先对时间序列数据进行平稳性检验，通过ADF（Augment Dickey-Fuller）检验得到地下水位及降雨时间序列的 t 统计量和临界值如表1所示，监测点地下水位时间序列的 t 统计量均介于ADF检验在1%和5%显著水平下的临界值之间，说明该序列在5%显著水平下是平稳的；降雨时间序列的 t 统计量小于ADF检验在1%、5%和10% 3种显著水平下的临界值，说明该序列在1%显著水平下是平稳的.

分别对济南泉域降雨和不同区域地下水水位动态进行自相关分析，其结果如图4所示. 随着滞后时间 k 的增加，自相关系数下降，其相关性逐渐减弱，当滞后时间 k 增大到一定程度时，A282、A2-30地下水位时间序列的自相关系数出现负值，说明这两组地下水水位波动的平稳过程含有周期分量. 降雨的自相关系数下降十分迅速，在很短的时间内接近0值，表明降雨时间序列为随机序列，呈现出白噪声特征（Rahnemaei *et al.*, 2005）. 而泉群地下水位时间序列则表现出了较长的自相关长度，自相关系数下降比较缓慢.

利用自相关函数理论模型对计算得到的地下水位时间序列自相关系数进行拟合，从而确定时间序列的自相关长度. 常见的理论模型有球状模型、高斯模型和指数模型，拟合得到各监测点地下水位时间序列自相关函数理论模型参数见表2，其具体形式分别为式（14）～（17）：

趵突泉：

表1　济南泉域地下水位及降雨时间序列的ADF检验结果

Table 1　ADF test results of groundwater level and precipitation timeseries

变量	t 统计量	临界值			检验结果
		1% level	5% level	10% level	
A282	−3.036 67	−3.449 45	−2.869 85	−2.571 27	平稳*
A2-30	−3.233 77	−3.449 45	−2.869 85	−2.571 27	平稳*
趵突泉	−3.096 72	−3.449 45	−2.869 85	−2.571 27	平稳*
黑虎泉	−3.242 34	−3.449 45	−2.869 85	−2.571 27	平稳*
降雨	−5.844 68	−3.449 45	−2.869 85	−2.571 27	平稳**

注：*为5%显著水平；**为1%显著水平.

表2　地下水位时间序列自相关函数模型及其参数值

Table 2　Auto-correlation function model and its parameter value of groundwater level timeseries

点位	模型	块金常数 C_0	拱高 C	基台值 C_0+C	自相关长度（d）	R^2	RSS
趵突泉	球状	1	−1.000	0	208	0.994	0.13
黑虎泉	球状	1	−1.005	−0.005	199	0.996	0.10
A282	指数	1	−1.228	−0.228	190	0.955	0.25
A2-30	指数	1	−1.330	−0.330	183	0.931	0.42

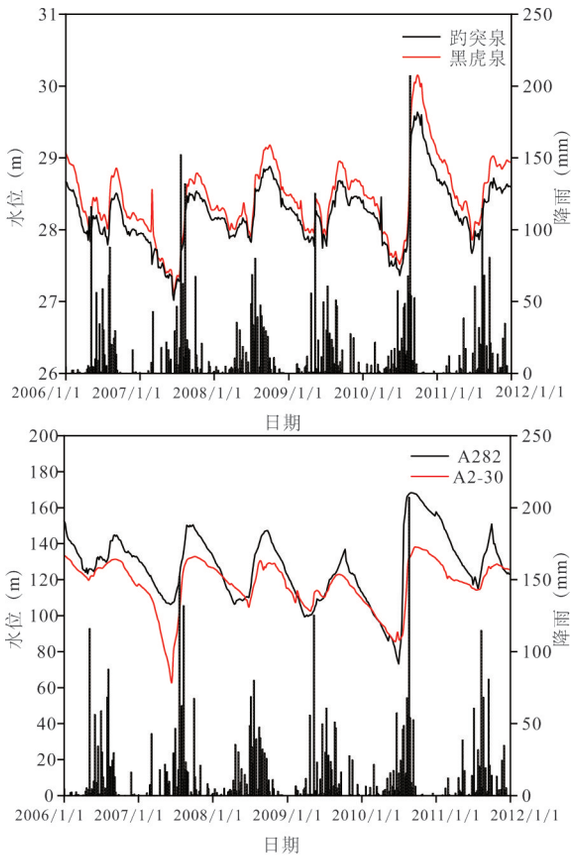

图 3　济南泉域降雨、地下水位动态曲线（2006～2011 年）

Fig. 3　Precipitation and groundwater hydrographs in Jinan (the year of 2006－2011)

$$r(k)=\begin{cases}1 & k=0\\ 1-\left(\frac{3}{2}\cdot\frac{k}{208}-\frac{1}{2}\cdot\frac{k^3}{208^3}\right) & 0<k\leqslant 208\\ 0 & k>208\end{cases},\quad(14)$$

黑虎泉：

$$r(k)=\begin{cases}1 & k=0\\ 1-1.005\left(\frac{3}{2}\times\frac{k}{199}-\frac{1}{2}\times\frac{k^3}{199^3}\right) & 0<k\leqslant 199\\ -0.005 & k>199\end{cases},\quad(15)$$

A282：

$$r(k)=\begin{cases}1 & k=0\\ 1-1.228\left(1-e^{-\frac{k}{63.4}}\right) & k>0\end{cases},\quad(16)$$

A2-30：

$$r(k)=\begin{cases}1 & k=0\\ 1-1.330\left(1-e^{-\frac{k}{61}}\right) & k>0\end{cases}.\quad(17)$$

通过对比自相关系数下降曲线形状，可以初步判断不同区域岩溶发育状况的差异：泉域补给区地下水位（A282、A2-30）的自相关系数在 20 d 内下降很快，之后缓慢地下降，这种自相关函数的双峰行为反映了补给区含水层的二元结构，其第一部分反映了含水层中较大或连续的岩溶裂隙的水动力特征，地下水在其中快速径流，即快速流；第二部分反映了不连续岩溶裂隙的水动力特征，地下水运动以裂隙基质流为主．排泄区水位（跌突泉、黑虎泉）的自相关系数曲线则与之不同，在早期并未出现明显的陡然下降趋势，整体上自相关系数下降极为缓慢．这是由于排泄区岩溶发育均匀，岩溶裂隙呈网络状分布，地下水动态稳定，地下水运动以基质流为主．

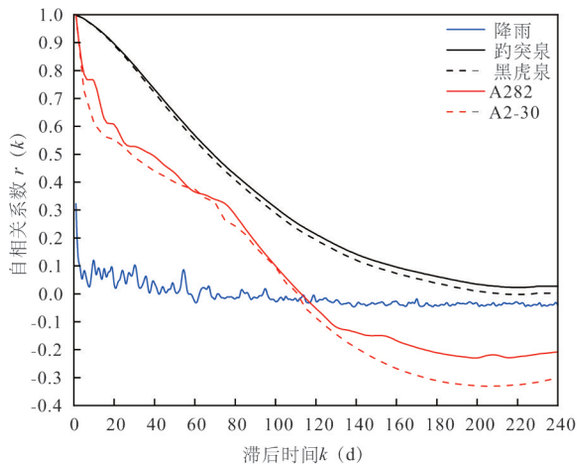

图 4　降雨、地下水位时间序列自相关图

Fig. 4　Auto - correlation function of precipitation and the groundwater level time series

3.2.2　交叉相关分析　为了确定降雨与泉域地下水位变化之间的特征关系，将降雨作为系统输入序列，地下水位变化作为系统输出序列，分别计算补给区和排泄区的降雨－地下水位互相关系数 $r_{xy}(k)$，其结果如图 5 所示．

补给区和排泄区地下水位与降雨的互相关系数峰值存在显著的差异：补给区互相关系数 $r_{xy}(k)$ 的最大峰值为 0.370（A2-30），而排泄区互相关系数 $r_{xy}(k)$ 的最大峰值仅为 0.167（跌突泉），补给区 $r_{xy}(k)$ 峰值显著大于排泄区，表明补给区的水位波动较排泄区更易受到降雨的影响，水位变幅大．

岩溶水在跌突泉、黑虎泉等泉群附近汇集排泄，含水层富水性强，降雨对地下水位波动的影响被弱化．而在补给区，岩溶发育程度较差，含水层调蓄能力弱，地下水位对降雨的响应较为明显．

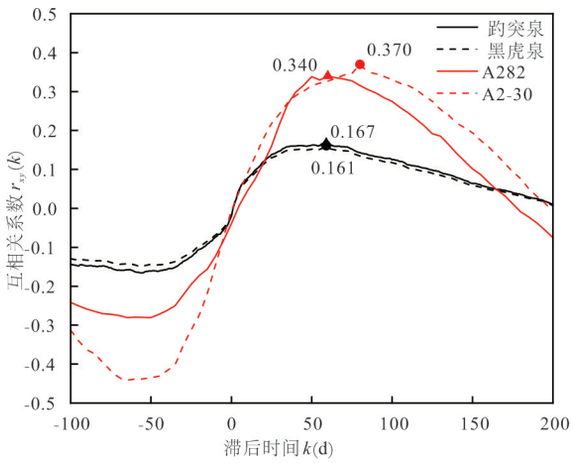

图 5　降雨、水位时间序列互相关图

Fig.5　Cross-correlation function of precipitation and the water level time series in different areas

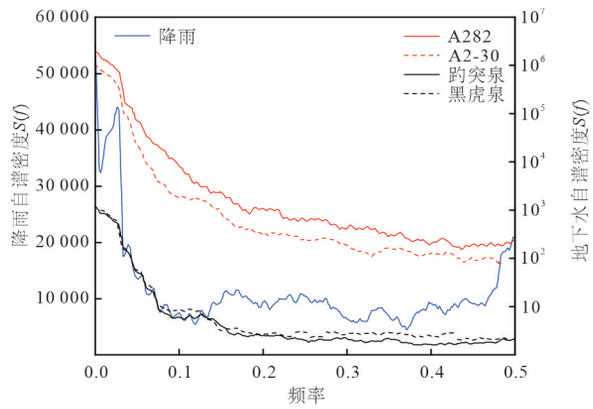

图 6　降雨、地下水位的自谱密度图谱

Fig.6　Spectral density functions of precipitation and the water level time series in different areas

3.3　频谱分析

为进一步定量识别济南泉域岩溶含水层水动力特征,分别计算补给区和排泄区地下水位时间序列的自谱密度以及各监测点水位对降雨的交叉振幅、相位以及相干图谱.

3.3.1　自谱分析　图 6 反映了降雨、补给区和排泄区地下水位的自谱密度特征(降雨自谱密度曲线为线性坐标轴数据,地下水位自谱密度曲线为对数坐标轴数据). 由图 6 可以看出,降雨在自谱密度函数在频率>0.10(周期<10 d)时呈现出围绕水平线附近的起伏波动,表现出白噪声的典型特征. 而地下水位自谱密度函数具有幂函数性质.

地下水快速流滞时短,主要为高频信息;而基质流滞时长,主要为低频信息. 排泄区泉群地下水位谱密度函数在频率>0.15(周期<6 d)时趋近于 0,表明岩溶含水系统具有过滤作用,短周期的波动(快速流信号)被过滤. 而在补给区,地下水位自谱密度曲线虽然在频率>0.18 时下降速度变缓,但相对排泄区,其函数值仍然较大,说明补给区岩溶含水层调蓄能力弱,地下水快速流占比较高.

3.3.2　交叉振幅谱分析　图 7 反映了地下水位对降雨的交叉振幅特征,补给区和排泄区交叉振幅幅值具有相同的变化趋势,其峰值均集中在低频率段,而在高频率段其幅值逐渐趋近于 0,表明济南泉域岩溶含水层具有较强的调蓄能力. 岩溶水系统中地下水快速流表现出较高的 CAF 值,而基质流表现出较低的 CAF 值(Padilla and Pulida-Bosch, 1995). 若大于某阈值频率的 CAF 值低于最高 CAF 值的 5%,则将之后频率段划分为低 CAF 值频率段. 由于快速流存在于较大岩溶管道中而基质流存在于裂隙及基质中,因此可以通过高 CAF 值和低 CAF 值所占比例定量评价含水层中岩溶发育程度(Liu *et al.*, 2011).

以图 7 中补给区 A2-30 为例:高 CAF 值区域所占比例较高,其显著不为 0 值的频率阈值为 0.14,换算为滞留时间长度为 7 d,表明在补给区有快速流的存在. 因此,依次对各区域高 CAF 值和低 CAF 值进行划分,低于此阈值时,振幅值的大范围波动被认为是由地下水快速流引起的,在此阈值之上,振幅值的波动范围很小,地下水流态以基质流为主. 由图 7 可知,补给区地下水监测点的频率阈值分别为 0.103(A282)和 0.14(A2-30),通过其阈值大小与整体频率(0.5)大小的百分比可以计算得到快速流和基质流的所占比值(Liu *et al.*, 2011). 监测点 A282 快速流和基质流所占比例分别为 20.6% 和 79.4%,A2-30 快速流和基质流所占比例分别为 28% 和 72%;排泄区地下水监测点频率阈值分别为 0.042(跳突泉)、0.014(黑虎泉),计算得到跳突泉和黑虎泉的快速流、基质流所占比例分别为 8.4%、91.6% 以及 2.8%、97.2%. 由此看出,补给区含水层岩溶发育非均质程度较高,地下水运动表现为快速流和基质流并存,表现出含水介质的二元结构;而排泄区含水层岩溶发育均匀,岩溶裂隙呈网络状分布,地下水流态以基质流为主.

3.3.3　相位谱分析　济南泉域排泄区和补给区地下水位动态对降雨变化的相位图谱如图 8 所示,由于相位函数 $\varphi_{xy}(f)$ 为线性函数,其表达式为 $\varphi_{xy}(f)=2\pi fd$,因此,依次对各区域相位图进行线性拟合,相位函数在低频率段表现出良好的线性关系,而在高

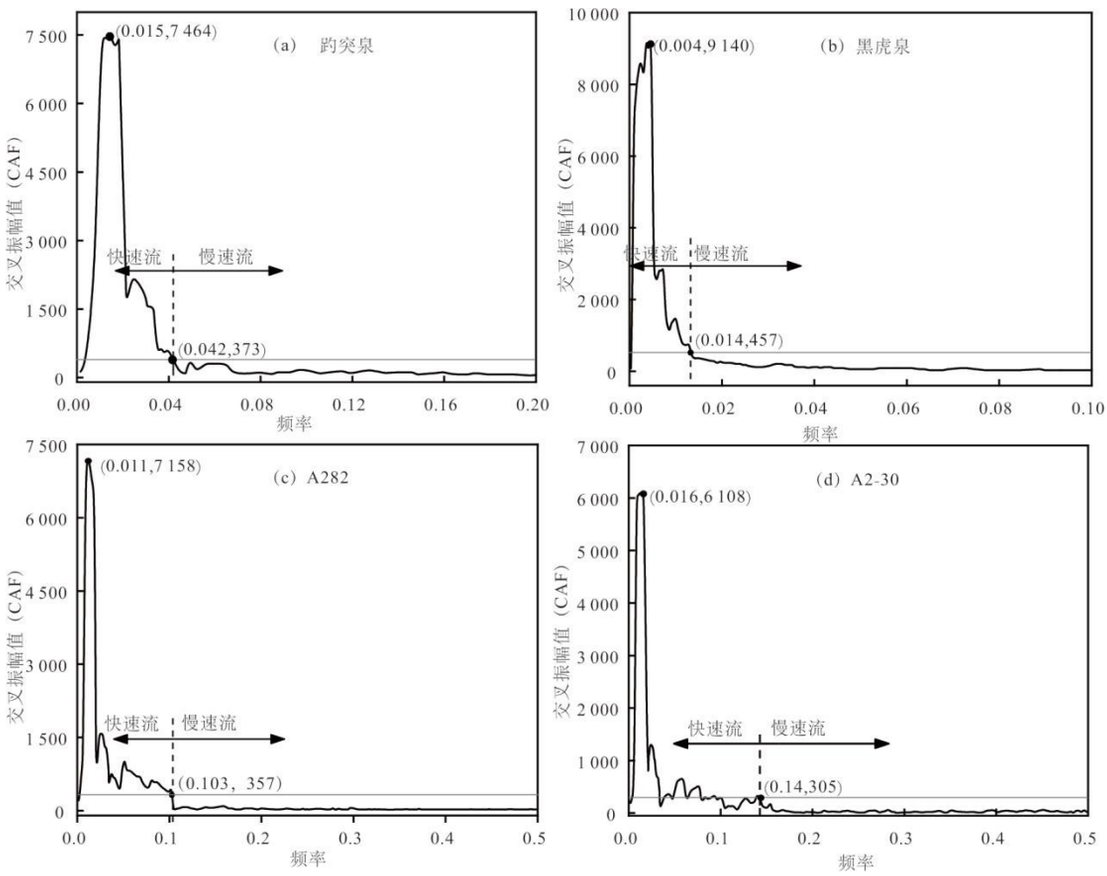

图7　地下水位对降雨的交叉振幅图谱

Fig.7　Cross-amplitude functions of precipitation and the water level time series in different areas

频率段，由于频率信号的丢失，表现出较大的失真.

地下水位波动对降雨的滞后响应时间反映了自降雨入渗开始，经地下水间接补给区、直接补给区、径流区后各观测点水位变动的多年平均时间间隔（祁晓凡等，2012），是地下水位和降雨两组时间序列相关性达到最大的时移（Chen *et al.*, 2004），可以从低频率段中线性拟合的直线斜率计算得出（Liu *et al.*, 2011），以趵突泉为例，线性拟合结果为 $y=143.54\pi x$，$r^2=0.94$，拟合效果较好，则其平均滞留时间 $d=143.54\pi/2\pi=72$ d，与前人利用小波分析、交叉相关分析等方法所得结果一致（祁晓凡等，2012；Wang *et al.*, 2016），邢立亭等（2017）在济南泉群直接补给区兴济河开展示踪试验，也得到示踪剂峰值浓度到达市区泉群的时间为64～72 d. 依次计算泉域地下水排泄区（趵突泉、黑虎泉）和补给区（A282、A2-30）地下水位波动对降雨的滞后响应时间依次为72 d、80 d、32 d、24 d，进一步反映了泉域地下水排泄区和补给区含水层岩溶发育程度以及地下水动力条件的差异.

3.3.4　相干谱分析　济南泉域排泄区和补给区地下水位动态对降雨变化的相干图谱如图9所示，地下水补给区地下水位－降雨的COF值显著高于排泄区的COF值，补给区COF均值为0.36，排泄区COF均值为0.12，这一结果表明补给区水位波动与降雨的相关性更好，更易受到降雨的影响.

从以上分析可以看出，济南泉域地下水运动以基质流为主，对于区域尺度地下水流模型可以采用等效孔隙介质模型进行简化，如Qian *et al.*（2006）、王庆兵等（2009）、Kang *et al.*（2011）采用等效孔隙介质模型建立了济南泉域三维地下水流数值模拟模型，对区域地下水流和泉群流量动态均取得了较好的模拟效果，进一步佐证了上述研究结果.

4　结论

本文采用水文时间序列分析方法分析了济南泉域补给区和排泄区地下水位波动特征及其对降雨的响应，从而定量识别了济南泉域岩溶含水系统岩溶发育状况.

自相关分析和交叉相关分析结果表明，岩溶水

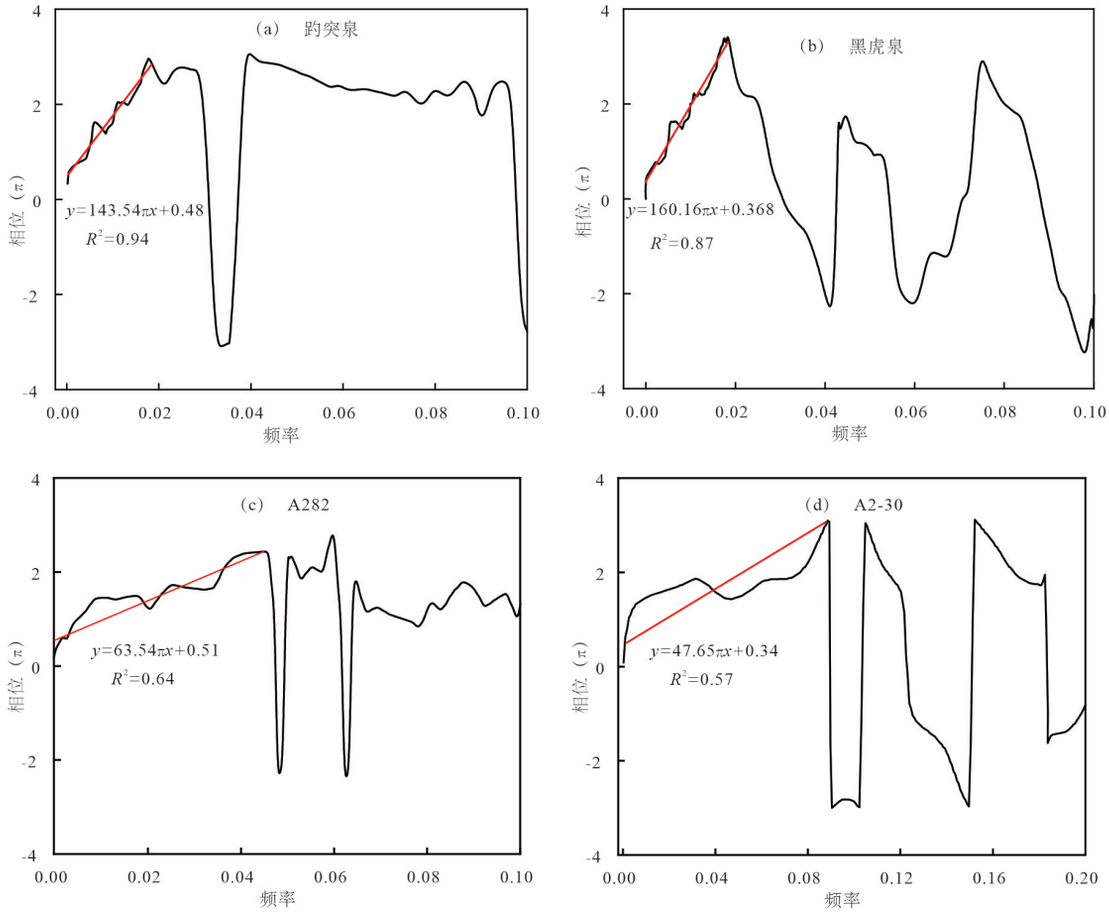

图 8　地下水位动态对降雨变化的相位图谱

Fig.8　Phase functions of precipitation and groundwater level time series in different area

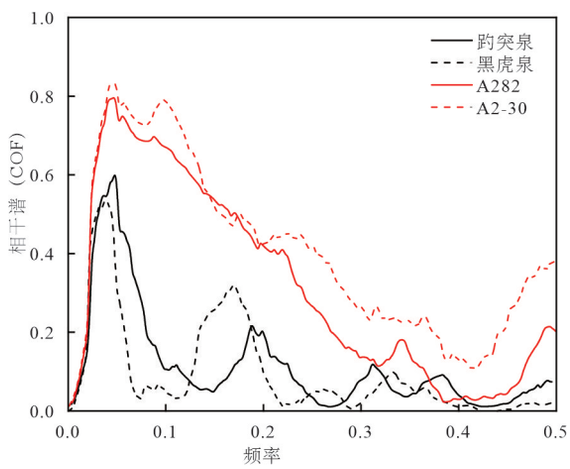

图 9　地下水位动态对降雨变化的相干图谱

Fig.9　Coherency functions of precipitation and the water level time series in different areas

系统对降雨输入信号的敏感程度从泉域的补给区至排泄区逐渐减小,地下水位自相关程度逐渐增强.

频谱分析结果进一步定量反映了济南岩溶含水层的发育程度,整体上济南泉域岩溶发育程度较低;补给区碳酸盐岩裸露,表现出地下水运动的二元性,其中快速流的最高占比为28%(A2-30);排泄区岩溶发育均匀,岩溶裂隙呈网络状分布,地下水运动以基质流为主,其占比最高可达97.2%(黑虎泉).由于补给区和排泄区地下岩溶发育程度以及储水空间的差异,排泄区地下水位波动对降雨的滞后响应时间远远大于补给区.

济南泉域岩溶地下水运动以基质流为主,当建立区域地下水流模型时,含水层的局部快速流可以忽略,进一步验证了等效孔隙介质模型在济南泉域岩溶地下水数值模拟的适用性.

本次研究利用济南泉域地下水位动态观测资料解译岩溶发育规律,下一步还应结合地质条件、水化学、同位素等水文地质信息进行综合分析,进一步提高研究结果的准确性.虽然济南泉域区域地下水流模型可以采用等效孔隙介质模型进行简化计算,但当建立精细的地下水水质模型时,则必须考虑岩溶含水层优势径流通道等含水介质非均质性的影响.

References

Chen, H. H., Zhu, Y. F., Zhou, S. Z., 2002. Aligned Indicator Conditional Simulation of Probability of Karst-Fissure Media in Karst Area of North. *Earth Science*, 27(2): 168—172(in Chinese with English abstract).

Chen, Z. H., Grasby, S. E., Osadetz, K. G., 2004. Relation between Climate Variability and Groundwater Levels in the Upper Carbonate Aquifer, Southern Manitoba, Canada. *Journal of Hydrology*, 290(1/2): 43—62. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.11.029

Chi, G. Y., 2019. Identification of Dominant Seepage Channel in Jinan Karst Springs(Dissertation). University of Ji'nan, Ji'nan(in Chinese with English abstract).

Delbart, C., Valdes, D., Barbecot, F., et al., 2014. Temporal Variability of Karst Aquifer Response Time Established by the Sliding-Windows Cross-Correlation Method. *Journal of Hydrology*, 511(6): 580—588. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.008

Francesco, F., Doglioni, A., 2010. The Relation between Karst Spring Discharge and Rainfall by Cross-Correlation Analysis (Campania, Southern Italy). *Hydrogeology Journal*, 18(8): 1881—1895. https://doi. org/10.1007/s10040-010-0666-1

Gárfias-Soliz, J., Llanos-Acebo, H., Martel, R., 2010. Time Series and Stochastic Analyses to Study the Hydrodynamic Characteristics of Karstic Aquifers. *Hydrological Processes*, 24(3): 300—316. https://doi.org/10.1002/hyp.7487

Guo, Y., Qin, D. J., Li, L., et al., 2019. A Complicated Karst Spring System: Identified by Karst Springs Using Water Level, Hydrogeochemical, and Isotopic Data in Jinan, China. *Water*, 11(5): 947. https://doi. org/10.3390/w11050947

Kang, F. X., Jin, M. G., Qin, P. R., 2011. Sustainable Yield of a Karst Aquifer System: A Case Study of Jinan Springs in Northern China. *Hydrogeology Journal*, 19(4): 851—863. https://doi.org/10.1007/s10040-011-0725-2

Katsanou, K., Lambrakis, N., Tayfur, G., et al., 2015. Describing the Karst Evolution by the Exploitation of Hydrologic Time-Series Data. *Water Resources Management*, 29(9): 3131—3147. https://doi.org/10.1007/s11269-015-0987-x

Katz, B. G., DeHan, R. S., Hirten, J. J., et al., 1997. Interactions between Ground Water and Surface Water in the Suwannee River Basin, Florida. *Journal of the American Water Resources Association*, 33(6): 1237—1254. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1997.tb03549.x

Lambrakis, N., Andreou, A. S., Polydoropoulos, P., et al., 2000. Nonlinear Analysis and Forecasting of a Brackish Karstic Spring. *Water Resources Research*, 36(4): 875—884. https://doi.org/10.1029/1999wr900353

Larocque, M., Mangin, A., Razack, M., et al., 1998. Contribution of Correlation and Spectral Analyses to the Regional Study of a Large Karst Aquifer (Charente, France). *Journal of Hydrology*, 205(3/4): 217—231. https://doi.org/10.1016/s0022-1694(97)00155-8

Lee, J. Y., Lee, K. K., 2000. Use of Hydrologic Time Series Data for Identification of Recharge Mechanism in a Fractured Bedrock Aquifer System. *Journal of Hydrology*, 229(3/4): 190—201. https://doi.org/10.1016/s0022-1694(00)00158-x

Li, C. S., Wu, X. C., Sun, B., 2018. Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Geothermal Water in Northern Ji'nan. *Earth Science*, 43(Suppl. 1): 313—325 (in Chinese with English abstract).

Liu, J., Liu, D., 2010. Research on the Response Feature of Tunnel Inflow to Precipitation in a Karstic Area. *Coal Geology & Exploration*, (2): 32—35(in Chinese with English abstract).

Liu, L. H., Chen, X. H., Xu, G. Q., et al., 2011. Use of Hydrologic Time-Series Data for Identification of Hydrodynamic Function and Behavior in a Karstic Water System in China. *Hydrogeology Journal*, 19(8): 1577—1585. https://doi.org/10.1007/s10040-011-0774-6

Mangin, A., 1984. Better Knowledge Water Systems from Spectral and Correlation Analysis. *Journal of Hydrology*, 67:25—43.

Massei, N., Dupont, J. P., Mahler, B. J., et al., 2006. Investigating Transport Properties and Turbidity Dynamics of a Karst Aquifer Using Correlation, Spectral, and Wavelet Analyses. *Journal of Hydrology*, 329(1/2): 244—257. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.021

Mathevet, T., Lepiller, M. L., Mangin, A., 2004. Application of Time-Series Analyses to the Hydrological Functioning of an Alpine Karstic System: The Case of Bange-L'Eau-Morte. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(6): 1051—1064. https://doi.org/10.5194/hess-8-1051-2004

Padilla, A., 1995. Study of Hydrographs of Karstic Aquifers by Means of Correlation and Cross-Spectral Analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 33(1): A8. https://doi.org/10.1016/0148-9062(96)87402-x

Panagopoulos, G., Lambrakis, N., 2006. The Contribution of Time Series Analysis to the Study of the Hydrodynamic Characteristics of the Karst Systems: Application on Two Typical Karst Aquifers of Greece (Trifilia, Almyros Crete). *Journal of Hydrology*, 329(3/4): 368—376. https://doi.

org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.023

Qi, X. F., Yang, L. Z., Han, Y., et al., 2012. Cross Wavelet Analysis of Groundwater Level Regimes and Precipitation-Groundwater Level Regime in Ji'nan Spring Region. *Advances in Earth Science*, 27(9): 969－978(in Chinese with English abstract).

Qian, J. Z., Zhan, H. B., Wu, Y. F., et al., 2006. Fractured-Karst Spring-Flow Protections: A Case Study in Jinan, China. *Hydrogeology Journal*, 14(7): 1192－1205. https://doi.org/10.1007/s10040-006-0061-0

Rahnemaei, M., Zare, M., Nematollahi, A. R., et al., 2005. Application of Spectral Analysis of Daily Water Level and Spring Discharge Hydrographs Data for Comparing Physical Characteristics of Karstic Aquifers. *Journal of Hydrology*, 311(1/2/3/4): 106－116. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.01.011

Sun, B., Peng, Y. M., 2014. Boundary Condition, Water Cycle and Water Environment Changes in the Ji'nan Spring Region. *Carsologica Sinica*, 33(3): 272－279(in Chinese with English abstract).

Wang, J. L., Jin, M. G., Lu, G. P., et al., 2016. Investigation of Discharge-Area Groundwaters for Recharge Source Characterization on Different Scales: The Case of Jinan in Northern China. *Hydrogeology Journal*, 24(7): 1723－1737. https://doi.org/10.1007/s10040-016-1428-5

Wang, J. Y., Wang, J. L., Jin, M. G., 2017. Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Karst Water in Jinan Spring Catchment. *Earth Science*, 42(5):821－831(in Chinese with English abstract).

Wang, Q. B., Duan, X. M., Gao, Z. D., et al., 2009. Groundwater Flow Modelling in the Ji'nan Karst Spring Area. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 36(5): 53－60(in Chinese with English abstract).

Xing, L. T., Li C. S., Zhou J., et al., 2017. The Characteristics of Karst Channel in the Spring of Ji′nan Spring Region. *Science Technology and Engineering*, 17(17): 57－65(in Chinese with English abstract).

Yuan, D. X., 1993. Karstology in China. Geological Press, Beijing, 1－8(in Chinese).

Zhang, J. G., Chen, H. H., Zhu, Y. F., et al., 2004. Study on the Method Multiply-Indicator Kriging in Karst-Fissure Medium in Jinan. *Hydrogeology & Engineering Geology*, (2): 25－28(in Chinese with English abstract).

Zheng, X., Chen, X., Zhang, Z. C., 2014. Rainfall-Runoff Response Characteristic Analysis of Chenqi Karst Watershed in Southern China. *Earth and Environment*, 42(2): 221－227(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

迟光耀, 2019. 济南岩溶大泉优势渗流通道识别(硕士学位论文). 济南: 济南大学.

陈鸿汉, 朱远峰, 邹胜章, 2002. 中国北方岩溶区含水岩溶裂隙介质的序列指示模拟研究. 地球科学, 27(2): 168－172.

刘建, 刘丹, 2010. 岩溶隧道涌水对降雨的响应特征. 煤田地质与勘探, (2):32－35.

李常锁, 武显仓, 孙斌, 等, 2018. 济南北部地热水水化学特征及其形成机理. 地球科学, 43(增刊1): 313－325.

祁晓凡, 杨丽芝, 韩晔, 2012. 济南泉域地下水位动态及其对降水响应的交叉小波分析. 地球科学进展, (9):969－978.

孙斌, 彭玉明, 2014. 济南泉域边界条件、水循环特征及水环境问题. 中国岩溶, 33(3): 272－279.

王珺瑜, 王家乐, 靳孟贵, 2017. 济南泉域岩溶水水化学特征及其成因. 地球科学, 42(5):821－831.

王庆兵, 段秀铭, 高赞东, 等, 2009. 济南岩溶泉域地下水流模拟. 水文地质工程地质, 36(5):53－60.

邢立亭, 李常锁, 周娟, 等, 2017. 济南泉域岩溶径流通道特征. 科学技术与工程, 17(17): 57－65.

袁道先, 1993. 中国岩溶学. 北京:地质出版社, 1－8.

郑雪, 陈喜, 张志才, 2014. 贵州普定陈旗喀斯特泉的降雨－径流响应特征分析. 地球与环境, 42(2):221－227.

张建国, 陈鸿汉, 朱远峰, 等, 2004. 济南泉域岩溶裂隙介质的多重指示克里格法研究. 水文地质工程地质, (2): 25－28.