

李建鸿,蒲俊兵,张陶,等.相关和频谱分析法在岩溶系统中的应用研究综述[J].中国岩溶,2020,39(3):335-344.
DOI:10.11932/karst2020y11

相关和频谱分析法在岩溶系统中的应用 研究综述

李建鸿¹,蒲俊兵¹,张陶¹,王赛男^{1,2}

(1.中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室,广西桂林541004; 2.重庆市岩溶环境学重点实验室,西南大学地理科学学院,重庆400715)

摘要:岩溶含水层由多重含水介质组成,具有高度的非均质性,从系统角度出发,将岩溶系统看作是一个过滤器,将降雨作为输入信号,泉流量、水位、电导率、浊度等物理化学参数作为输出量进行相关和频谱分析是认识岩溶系统内部结构特征的有效方法。文章综述了相关和频谱分析法在岩溶系统研究中的应用,首先介绍了相关和频谱分析法基本理论的形成、发展过程和研究意义,然后总结了如何根据不同的研究目的选择相关和频谱分析法使用的时间序列的长度、周期和类型,最后阐述了该方法应用于岩溶系统分析的局限性。

关键词:岩溶系统;相关分析;频谱分析;时间序列

中图分类号:P642.25 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2020)03-0335-10 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

岩溶流域集水面积大,且具有高度非均质性的特征,岩溶系统水动力响应的预测一直是个难题^[1-3],这也促进了全局或集中参数方法在岩溶系统研究中的应用^[3]。与其他类型的地下水系统相比,岩溶地下水系统拥有特别的优势:岩溶流域的地下水通常多集中在一个泉或地下河出口流出,这提供了研究岩溶系统水文过程的独特机会^[4]。为研究岩溶系统的功能和水动力学特征,学者们提出过许多不同的方法。最早主要根据泉水水位曲线图解释和描述岩溶含水层的作用^[5-8]。随后抽水试验^[9-10],示踪实验^[11-12],地球物理调查^[13],水化学和稳定同位素分析^[14],时间序列分析^[15-20],数值建模^[21-22]等经典技术陆续被应用到岩溶系统的研究中。相关和频谱分析法是一种常用的时间序列分析方法,可用来确定时

间序列的一些总体特征,这些特征在标准水文曲线图上可能不易被发现,其与系统的结构特性有关^[3]。相关和频谱分析法的基本原理是将岩溶系统看作是一个过滤器,将输入(降雨)和输出信号(流量、电导率、水温、化学参数、同位素和示踪剂等)等时间序列通过系统地增加它们之间的相对位移进行比较,从而达到认识岩溶系统内部特征及水文过程的目的^[3,23]。相关分析主要从时域角度对时间序列进行分析,传统的相关分析分为自相关分析(单变量)和互相关分析(多变量)两种,前者主要分析时间序列数据的个体结构,后者主要分析输入信号与输出信号的转化关系;频谱分析则是将自相关函数和互相关函数经过傅里叶变换后,将时域分析转化为频域分析^[1,16]。目前相关和频谱分析法已被广泛应用到描述岩溶系统的记忆效应,估算响应时间、平均滞留

基金项目:国家重点研发计划项目课题“断陷盆地生态环境地质分异及石漠化演变机理”(2016YFC0502501);中国地质科学院基础科研业务费(2017006,JYYWF20182801);广西自然科学基金项目“岩溶环境学”(2017GXNSFFA198006)

第一作者简介:李建鸿(1988-),男,助理研究员,研究方向岩溶环境、岩溶水文地质地球化学。E-mail:jianhongli1988@karst.ac.cn。

通信作者:蒲俊兵(1982-),男,研究员,博士,研究方向岩溶环境、岩溶水文地质地球化学。E-mail:junbingpu@karst.ac.cn。

收稿日期:2019-09-06

时间^[1]、传输速率^[15],划分水文过程(快速流、中速流,慢速流)^[16-17]等各个方面。

本文综述了相关和频谱分析法基本理论的形成和发展过程,总结了相关和频谱分析法在岩溶系统研究中的意义,并介绍了如何根据不同的研究目的选择相关和频谱分析法使用的时间序列的长度、周期和类型,以期对岩溶系统的水文过程研究和岩溶地下水的有效配置提供更多依据。

1 相关和频谱分析法的基本理论

相关和频谱分析法最早在1968年由Jenkins and Watts提出^[16],主要用于脉冲响应研究。由于水文时间序列数据相对易收集,且可提供许多有关含水层水文过程和脉冲响应的有用信息,因而相关和频谱分析法被迅速应用于水文时间序列数据的分析中^[24]。20世纪70年代末和80年代初,Mangin等^[7,25]开始将相关和频谱分析法引入到岩溶系统研究中,他从系统角度出发,将岩溶含水层看作是一个过滤器,将降雨作为输入信号,将泉流量或泉水位作为输出信号,利用相关分析法描述了泉流量对降雨过程的响应特征。随后许多研究表明,这种时间序列的分析法对认识岩溶系统特征有重要作用^[16,26-28]。

时间序列的自相关函数量化了一段时间内连续值的线性依赖关系。假设时间序列 $x_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为系统输入信号,时间序列 $y_n(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 为系统的输出信号。自相关函数可定义为^[29]:

$$r_x(k) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})}{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中: n 为时间序列 x_n 的长度; $k(k=0, \dots, m)$ 为滞时(延迟时间), m 为滞时的截断点,用来决定自相关函数分析时间段的长短,为了保证精度一般要求 $m \leq n/3$ ^[2-3]; \bar{x} 为时间序列 x_n 所有样品的平均值; x_t 为 t 时刻的样本值。

两个变量的互相关函数 $r_{xy}(k)$ 表达了时域上输入信号和输出信号的相关关系,可定义为^[7]:

$$r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sqrt{C_x^2(0)C_y^2(0)}} \quad (2)$$

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

$$C_x(0) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2 \quad (4)$$

$$C_y(0) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2 \quad (5)$$

式中: $k(k=0, \dots, m)$ 为滞时, m 为滞时的截断点; $C_{xy}(k)$ 为时间序列 x_n 和 y_n 的协方差; \bar{x} 和 \bar{y} 分别为时间序列 x_n 和 y_n 所有样品的平均值。

自相关函数经过傅里叶变换可从时域转化为频域上的单变量自谱函数,自谱函数图能更清晰展现时间序列数据的周期性,其定义为^[1,16]:

$$S_x(f) = 2 \left[1 + 2 \sum_{k=1}^m W(k) r_x(k) \cos(2\pi f k) \right] \quad (6)$$

$$W(k) = \frac{1 + \cos \pi \frac{k}{m}}{2} \quad (7)$$

式中: $k(k=0, \dots, m)$ 为滞时, m 为滞时的截断点, f 为频率($f = j/2m, j = 1, 2, \dots, m$), $0 \leq f \leq 0.5$; $W(k)$ 是Tukey-Hanning权重函数,用于保证自谱函数 $S_x(f)$ 是无偏估计,同时增强自谱函数的峰值。

如果输入信号是一个随机函数,那么互相关函数就等于传递函数,传递函数可通过将输出时间序列(泉流量)与输入时间序列(降水)进行反卷积得到。

互相关函数经过傅里叶变换可从时域转化为频域上的交叉谱密度函数。由于互相关函数是一个不对称测函数,在傅里叶变换时需要引入一个虚数单位 i ,定义为:

$$S_{xy}(f) = |\alpha_{xy}(f)| e^{-i\theta_{xy}(f)} \quad (8)$$

$$\alpha_{xy}(f) = \sqrt{\gamma_{xy}^2(f) + \lambda_{xy}^2(f)} \quad (9)$$

$$\theta_{xy}(f) = \arctan \frac{\lambda_{xy}(f)}{\gamma_{xy}(f)} \quad (10)$$

$$\gamma_{xy}(f) = 2 \left[r_{xy}(0) + \sum_{k=1}^m [(r_{xy}(k) + r_{yx}(k)) W(k) \cos(2\pi f k)] \right] \quad (11)$$

$$\lambda_{xy}(f) = 2 \left[\sum_{k=1}^m (r_{xy}(k) - r_{yx}(k)) W(k) \sin(2\pi f k) \right] \quad (12)$$

式中: $i = \sqrt{-1}$; $\alpha_{xy}(f)$ 为频率 f 的交差振幅函数; $\theta_{xy}(f)$ 为频率 f 的相位; $r_{xy}(k)$ 和 $r_{yx}(k)$ 为互相关系数; $\gamma_{xy}(f)$ 为协谱; $\lambda_{xy}(f)$ 为四分谱。

为方便研究,学者们还利用自谱函数和交差振幅函数计算了一些其他重要函数。Larocque等^[1]将系统记忆时间定义为当泉流量频率 f 趋于0,即周期趋于无穷大时最大谱密度一半所对应的时间,定义为:

$$T_{lag} = \frac{S_x(f=0)}{2} \quad (13)$$

相干函数和增益函数的定义可能会因作者的不同而有所不同,因为这些方法在许多不同的科学领域中都得到了应用^[3]。Padilla 和 Pulido-Bosch^[16]定义了相干函数(公式 14)和增益函数(公式 15)。相干函数显示了输入和输出之间的相关性随频率的变化,可用于评价系统的线性度。增益函数则主要验证输入信号通过系统过滤后是被放大 $[\psi_{xy}(f)>1]$ 的,还是被缩减 $[\psi_{xy}(f)<1]$ ^[16]。

$$\varphi_{xy}(f) = \frac{\alpha_{xy}(f)}{\sqrt{S_x(f)S_y(f)}} \quad (14)$$

$$\psi_{xy}(f) = \frac{\alpha_{xy}(f)}{\sqrt{S_x(f)}} \quad (15)$$

对相关和频谱分析法的基本理论,更详细的介绍可参考文献[29],值得注意的是水文时间序列统计分析大多建立在一系列基本假设的基础上,即序列是随机的、平稳的、无趋势的、非周期性的^[16-18,30],相关和频谱分析法也不例外,它建立在输入、输出信号是一个随机、稳定序列的基础上。但水文时间序列往往是由一个随机分量叠加在一个确定性分量变化(包括趋势和季节性)上构成的^[31],这种确定性分量常形成较强的自相关性。而这种较强的自相关性会使理论上两个不相互关联的自相关过程具有良好的相互关系,从而增加了互相关函数解释的难度^[32]。当输入信号和输出不是随机稳定序列时,在分析前需要对数据进行前处理。差分运算是相关分析数据前处理的常用方法,经过差分处理后,输入信号与输出信号之间的互相关函数与脉冲响应函数呈正比,这有利于提高互相关分析的精度^[29]。此外,使用一元线性回归方程配合离散傅里叶变换(DFT)也可去除时间序列的趋势和季节性^[19,33]。

2 相关和频谱分析在岩溶系统研究中的意义

2.1 描述岩溶系统的记忆效应

持续性是水文时间序列重要的特征之一。持续性表示先发生的事件在一段时间内对后发生的事件产生的影响,即记忆效应(系统“忘记”初始条件所需的时间)^[31]。自相关函数可量化一段时间内连续值的线性依赖关系,能有效地反映时间序列的记忆效应^[1]。对于岩溶系统而言,流量的自相关函数随滞时 k 的变化特征反映了岩溶含水层对水流的

调节作用,随着滞时 k 的增长,自相系数减小,当滞时 k 到一定程度时,自相关函数到达预定值 r_k ,则可认为序列不存在任何联系,此时对应的滞时 k 则为系统的记忆时间^[34]。Mangin^[25]建议使用 $r_k = 0.2$ 作为预定值,从那时起,多数学者使用自相关系数为 0.2 时所对应的滞时来比较不同系统的记忆效应^[17,28,35],但 Massei 等^[35]认为记忆效应应对应于自相关函数的整体形状和大小,而不仅仅是一个值,并提出应将自相关函数与分析函数拟合,量化自相关函数的下降速率,从而解释更为复杂的记忆效应。他选择 $AC = a_0 + a_1 \cdot \ln(L)$ 的对数模式对自相关函数进行拟合,式中 AC 为自相关系数, L 为滞时, a_0 为与一个单位滞时的相关振幅的参数, a_1 是自相关系数一个单位滞时内的下降速度,表示信息丢失的速度。此外,由于自谱函数是自相关函数的补充,它反映了各分量振幅间的相对比例,也有学者使用自谱函数来定义系统的记忆时间。Larocque 等^[1]将系统记忆时间定义为当泉流量频率 f 趋于 0,即周期趋于无穷大时最大谱密度一半对应的时间(公式 13)。许多研究表明,降雨是一个随机过程,记忆时间较短,其自相关函数图一般表现为:滞时接近 0 时,自相关系数急剧下降,迅速降到 0.2 以下,没有明显的周期特征^[17,35]。Mangin^[36]假设记忆时间只与系统的储蓄能力有关,并计算得到法国比利牛斯山脉 4 个不同泉水系统分别具有 14 d、22.5 d、50 d 和 70 d 的记忆时间,且验证发现,具有 70 d 记忆时间的泉的确具有较大的储蓄空间。Liu^[17]等研究发现由于受流域面积和水流速度控制,贵州后寨地下河流域内不同海拔高度的 3 个泉的流量记忆时间从上游到下游逐渐增大。此外,Cai 和 Ofterdinger^[28]通过分析爱尔兰 19 个地下水水位的时间序列发现地下水水位的记忆时间受含水层介质的影响,在相对致密的含水层介质内水体流动缓慢,需要较长的时间才能填满和排出孔隙,有较长的系统记忆时间。综上所述,对于岩溶系统而言记忆时间取决于岩溶系统的储蓄空间、流域面积和水流速度。发育成熟的岩溶系统调蓄能力较弱,系统记忆时间较短;流域面积越大,系统调蓄能力越强,系统记忆时间越长;同一岩溶流域内从上游到下游水流速度越来越慢,系统记忆时间越来越长。

2.2 估算岩溶系统的响应时间、平均滞留时间

在互相关函数图中,峰值处相关程度最高,同时

也代表输入信号和输出信号错开的时间间隔^[20]。一般将互相关函数图中最大值峰值所对应的滞时定义为系统的响应时间。此外,频谱分析中相位函数表示输入和输出信号之间不同频率的延迟,可用来定义系统的平均滞留时间。系统的平均滞留时间(d)可根据相位函数与斜率为 $2\pi d$ 的直线拟合获得,即 $\theta_{xy}(f) = 2\pi df$ ^[1]。Padilla和Pulido-Bosch^[16]通过对比西班牙4个不同发育程度的岩溶系统,发现泉流量对降雨的响应时间和平均滞留时间与流域的岩溶发育程度有关,发育越强烈,管道越发达,泉流量对降雨响应越迅速。Liu等^[17]对贵州后寨岩溶流域的研究结

果表明,同一流域内从上游到下游泉水的响应时间越来越长。而为了分析不同水文地质条件下岩溶系统的滞时特征,郑雪等^[20]综合相关和频谱分析的各种参数,建立了岩溶系统响应滞时的划分指标(表1),并结合探地雷达和入渗实验等结果把陈旗流域内3个泉水的滞时归纳为3种滞时类型,研究表明由于山坡上部表层裂隙更为发育,且表层岩溶带厚度较薄,汇流面积小,表层岩溶带发育厚度由山坡下部向上部递减,且裂隙渗透系数垂向随深度急剧减少,因此,出口断面泉流量平均滞时>坡脚泉流量平均滞时>山坡上部平均滞时。

表1 陈旗流域降雨—泉流量响应滞时特征及判断方法^[20]

Table 1 Time lag characteristics of discharge response to rainfall in Chenqi watershed and judgment method^[20]

调蓄特征	滞时/h			判别指标	判别方法
	地下河	二拉坡	张家山		
短时段响应	2	1	2	相关图峰值	互相关, $r_{xy}(k)$
	2.5~4	<3	<3	$ S_x(f) $ 趋于0	交叉振幅, $ S_x(f) $
中等时间段响应	47	6	23	相关图快速下降时段	自相关, $r(k)$
	49	9	24	相关图快速下降时段	互相关, $r_{xy}(k)$
长时段响应	176	107	198	$r(k)=0.0327$	自相关, $r(k)$
	290	143	210	$T_{reg} = \frac{S_x(f=0)}{2}$	谱密度函数, $S_x(f)$

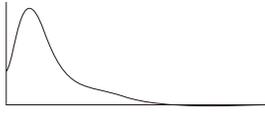
岩溶地下水水位响应时间的季节性变化规律及其原因也是岩溶系统研究的热点问题^[1-2,26,37]。Larocque^[1]的研究表明,在高水位时期,水位更高,淹没了一些高度岩溶化的裂缝,这些裂缝能更快、更直接地传递压力脉冲,而在低水位时期,这些通道是不饱和的,压力脉冲通过较深较窄的裂缝在饱和区传播较慢且均匀。Lee等^[38]研究英格兰南部的一个白垩纪含水层时发现,雨季的地下水位对降雨的响应时间较短,从非饱和带厚度的季节变化角度可解释响应时间季节性变化的原因,即当地下水位低于临界深度时,滞时显著增加,响应时间变长。但Delbart^[2]在法国西北部的一个侏罗纪石灰岩含水层中得到与Lee等^[38]相反的现象。他们基于交叉相关函数,得到了响应时间序列,发现互相关函数随时间变化,响应时间随季节变化,夏季响应时间较短,即非饱和区越厚,响应时间越短,其将这不可寻常的现象解释为岩溶地下水水位响应时间的季节性变化受降雨强度的季节变化及其对水文过程的影响的控制。夏季降水强度较高时,表层含水层迅速饱和,导致管道空隙中水流快速集中流动,从而导致响应时间的减少。

此外,高饱和度的表层岩溶诱发了位于表层岩溶上部的大型导管的注水,这些导管能更快、更直接地传递压力脉冲。

2.3 岩溶系统的比较和分类

相关和频谱分析是对时间序列进行分类的“客观”方法。Mangin^[25]建议将传递函数的特定形状与岩溶系统的结构联系起来(表2),并根据降雨和流量的相关和频谱分析尝试使用:记忆效应、谱带宽度、调节时间、传递函数4个参数对岩溶系统进行分类。Mangin假设传递函数的形状由岩溶系统的2个特征决定:(1)储蓄空间,决定系统的记忆效应,即“基流”的传递函数;(2)分层排水网络,决定快速流组成,即传递函数的峰值。真实的系统应在2种极端系统之间(表2):第一类代表排水良好的岩溶系统,具有低存储效应、谱带宽、调节时间短、传递函数高而窄的特点;第四类代表惯性岩溶系统,具有记忆效应大、谱带窄、调节时间长、传递函数平坦等特点;而第二和第三类介于第一类和第四类极端系统之间。

表 2 基于相关分析和速度分析的岩溶系统分类
Table 2 Karst system classification based on correlation and spectral analyses

类型	记忆效应 $[r(k)=0.2]/d$	谱带宽度	调节时间/d	传递函数
第一类	非常低(5)	非常高(0.3)	10~15	
第二类	低(10~15)	高(0.2)	20~30	
第三类	高(50~60)	低(0.1)	50	
第四类	非常高(70)	非常低(0.05)	70	

由于岩溶区具有多重含水介质(大型岩溶洞穴管道与网状溶蚀裂隙),受到不同强度降雨入渗补给,各类含水介质对地下水的调节作用具有明显差异,导致岩溶地下水出现快速流和慢速流(基流)2种不同流态流速的水源成分。研究快速流和慢速流的形成过程,与含水介质结构的相互关系以及如何划分这2种水源组分,不仅有助于岩溶系统基本理论的研究,而且在水资源评价与规划中也具有重要意义^[39]。1995年 Padilla 和 Pulido-Bosch^[16]提出使用增益函数进行岩溶快速流和慢速流的划分。增益函数 $\psi_{xy}(f)$ (公式15)反映输入信号经过系统过滤后被放大或衰减的情况,当 $\psi_{xy}(f)>1$ 时表示输入信号经过系统过滤后信号增强,当 $\psi_{xy}(f)<1$ 时表示输入信号经过系统过滤后信号衰减。Padilla 和 Pulido-Bosch^[16]将 $\psi_{xy}(f)>1$,定义为基流, $\psi_{xy}(f)<0.4$ 定义为快速流, $0.4<\psi_{xy}(f)<1$ 为中间流。

交叉振幅函数 $\alpha_{xy}(f)$ (公式9)与脉冲响应函数的持续时间相关联,可用于区分含水层对输入信号在短期、中期和长期的调节作用。在岩溶系统中,快速流动主要发生在导管和大裂缝中,对应交叉振幅函数的高值;慢速流常发生在狭窄的裂隙和基质中,对应交叉振幅函数的低值^[16]。Liu等^[17]提出使用交叉振幅函数划分岩溶水体水源,将 $\alpha_{xy}(f)>0$ 定义为快速流,将 $\alpha_{xy}(f)$ 趋于0定义为慢速流,通过计算得出贵州后寨岩溶流域内从上游到下游的3个泉水的快速流比例分别为66%、44%和5%。

3 相关和频谱分析时间序列的长度和周期选择

用于岩溶系统研究的时间序列的长度、周期和频率是可根据研究目的的不同而变化的。早期研究,多数学者倾向于使用长时间序列(多年连续日序列)进行分析,主要是为了对岩溶系统进行长期的统计分析,从而获取“平均”含水层水动力特征和内部结构的信息^[1,16,19,36,40]。而为了研究岩溶含水层性质的季节性变化,也有学者将长时间序列划分为不同的周期分别进行相关和频谱分析。例如, Lee^[38]将长时间序列分为3个月一个周期,而 Larocque 等和 Manga^[1,41]则将一个水文年划分为枯水期和丰水期,他们的结果均表明,具有季节性变化的相关函数和频谱函数可以更好地解释地下水水位的季节性变化。

以上研究所用的时间序列均是频率为1d的长时间序列,这些时间序列只适用于研究滞时大于1d的脉冲响应^[15]。而由于岩溶含水层是具有快速动态变化的非线性系统,其行为可能会随着系统内水文条件的变化而发生变化,相对于长时间序列分析,在极短或单一事件时间尺度上高频率的时间序列,可提供更多关于岩溶系统短期水动力行为的信息^[42]。为了研究更迅速的脉冲响应(滞时小于1d),近年来越来越多的高分辨率时间序列(h, min)被应用到岩溶系统的研究中^[15,17,35]。

为了使相关和频谱分析法适用于更高分辨率的

时间序列, Bailly 等^[15]提出了时变相关分析法, 此方法主要是将时间序列分隔成连续的小周期后进行传统分析, 是在时不变假设的基础上进行的。假设小周期内系统表现出相对稳定的行为, 或者说利用一个唯一的传递函数可以将输入的时间序列卷积后得到输出时间序列。Bailly 等使用的时变相关分析法的程序和参数如表 3, 具体步骤如下: (1) 计算原始时间序

列的自相关函数, 然后对自相关函数进行频谱分析, 绘制自相关函数的谱密度图, 再根据谱密度图的特征估计预延期周期; (2) 根据预延期周期差异对时间序列进行不同的前置过滤和滑动窗口划分; (3) 对处理后的数据进行互相关函数分析。此外, 从表 3 可知, 根据滑动窗口长度的不同可以设置不同的显著性检验。

表 3 时变相关分析法的程序和参数^[15]

Table 3 Program and parameters of time variant cross-correlation analysis^[15]

	步骤 1: 长周期	步骤 2: 中周期	步骤 3: 中周期
预延期	每 4 h 一次, 从 2~8 d	对长周期得到的结果进行滑动平均(15 d)	对中周期得到的结果进行滑动平均(5 d)
前置过滤	低通滤波器, $f_c = 1/30 \text{ d}^{-1}$	高通滤波器 $f_c = 1/10 \text{ d}^{-1}$, 驻带滤波器 $f_c = 1$, 2, 3 d^{-1}	一阶差分
滑动窗口的长度	30 d	10 d	1 d
显著性检验	$\alpha_k < w$	$\alpha_{R12} < 50\%$	$\alpha_{R12} < 50\%$

2014 年 Delbart^[2]提出了一种新的滑动窗口互相关方法, 可用于分析岩溶含水层中地下水位对降雨响应的时变特性。滑动窗口相关分析的操作步骤和基本原理如图 1 所示, 这种滑动窗口互相关方法将整个输入和输出时间序列数据分离为三个月的数据窗口集, 每个数据窗与前一个和/或后一个数据窗有一个半月的数据重叠, 然后对每

个数据窗进行互相关分析, 以揭示脉冲响应的季节变异性^[28]。

4 相关和频谱分析时间序列的类型选择

降雨、流量(或地下水位)和水温是相关和频谱分析法最先使用, 也是最常用的时间序列类型。

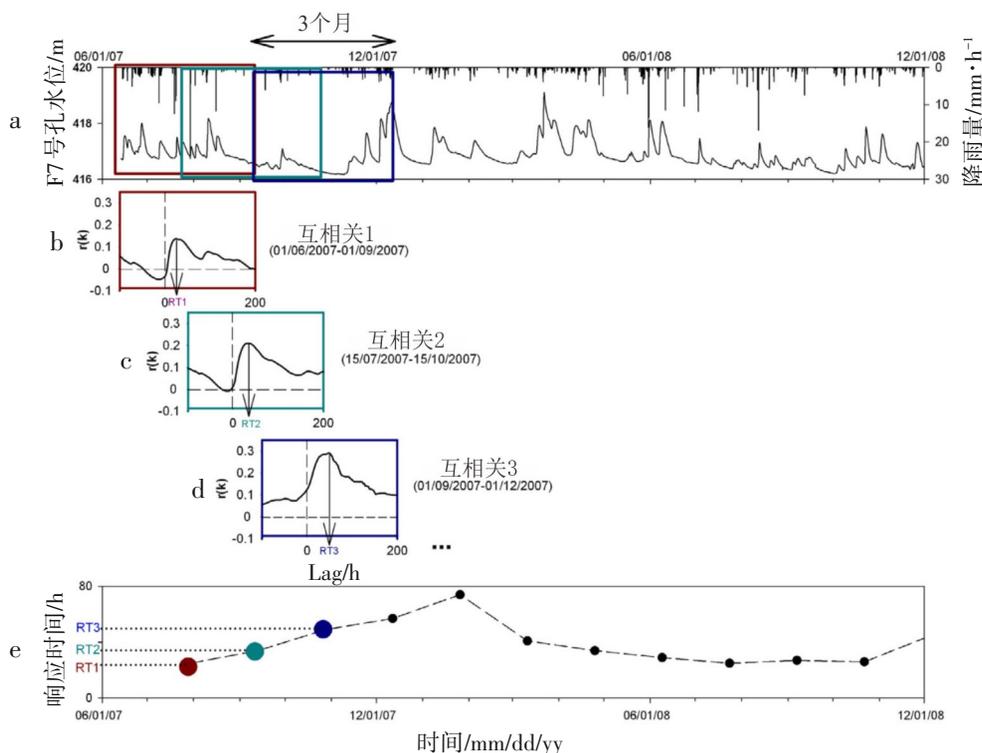


图 1 滑动窗口相关分析法原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sliding-windows cross-correlation analysis principle

但近几十年来,随着监测技术和统计分析方法的不断发展,目前地表水和地下水的其他物理化学参数,例如,pH、浊度、电导率、荧光性等都已实现了高精度、高分辨率的长期原位监测^[43],这些高分辨率的物理化学时间序列多数都已运用到岩溶系统的研究中^[15,35,40-46]。每一种物理化学参数都可能受到分散流、化学反应、泥沙输移、与围岩的水交换或其他理化特性的不同影响,因而对其进行相关和频谱分析都能提供关于输移和停留时间的独特信息^[15]。

水温作为一种天然的示踪剂已被广泛使用了60年^[47],与其他参数相比其优点主要有:(1)不会对环境造成污染,可作为地下水观测的常规观测项目,比其他物理化学参数的测量更加方便快捷,精度更高,不像化学示踪还需要在实验室中化验^[48];(2)地下水的运动能带来地质体热状态的显著变化;(3)地表水的温度能反映大气温度,可显示出昼夜和季节性变化,以及推导出中间时间尺度的变化模式。水温的频率变化是很复杂的,但这个频率范围可用来跟踪水从补给区到排泄区所需的时间^[15]。利用水温时间序列进行相关和频谱分析可估算出岩溶系统中水的滞留时间^[15,49]和获取有关岩溶管道几何形状的信息^[50-51]。

电导率是衡量液体通电能力的参数,而岩溶水体的电导率主要由岩溶系统中碳酸钙平衡控制,与水中溶解固体总量成正比关系,其变化可反映岩溶系统中不同性质的水(来自河流漏失的水、分散入渗的水和储蓄在裂隙—基岩中的水)的贡献率^[52-53]。在进行相关和频谱分析时,电导率时间序列中的波峰和波谷可分别代表支流和主管道的输入信号,利用电导率对降雨事件的响应可识别地下水的来源^[54]。

下雨期间很多岩溶泉都会出现浑浊现象,自2002年学者开始使用浊度的时间序列进行相关和频谱分析,例如,Bouchaou等^[45]将相关和频谱分析法应用于降雨的水动力响应和浊度响应的比较,Massei和Amraoui等^[35,46,55]鼓励在粒子输运领域上使用相关和频谱分析法方法,深入研究了浊度动力学分析方法,确定了区分颗粒运输和流体运输的具体过程,并对其定量值进行了比较。

每一种时间序列数据都蕴含着岩溶系统物质输移和停留时间的独特信息,但这些独特信息并不是相对立的,而是能相互补充、相互验证的,随着监测技术的不断进步,越来越多的学者倾向于使用2种或2种以上的时间序列进行对比分析^[4,15,44,49]。岩溶泉

的流量对补给事件的反应通常比泉水的物理化学性质(如温度或电吸收率)要快得多,因为补给产生的水压通过潜流(充水)管道瞬间就能传递到泉口,而泉水的物理化学性质只有补给的水实际到达泉口后才会发生变化,因此使用流量时间序列进行相关和频谱分析计算得到的岩溶系统的水力响应时间。水力响应和物理化学响应之间的时间差可应用于计算渗透水通过管道系统的传播时间^[45]。如果已知泉流量,利用水力响应和物理化学响应之间的时间差可计算岩溶管道系统的体积^[56]。Birk等^[45]通过对水温和电导率时间序列进行相关和频谱分析发现,电导率是一种较好的示踪剂,根据电导率确定的滞时可用于岩溶管道体积的估算。但Bailly等^[15]发现当两个源水的电导率差别不大时,电导率无法区分地表水和地下水,而水温,特别是日变化规律在时间序列中的衰减,提供了比电导率更好的地表水和地下水来源和混合的信息。Massei等^[35]将岩溶系统的降雨时间序列作为输入信号,将水位、电导率和浊度时间序列作为输出信号,进行相关分析、频谱分析和小波分析,其研究表明,这3种不同的时间序列对降雨的响应分别从流体动力学、溶解元素运移和悬浮物质运移3种不同的角度揭示了岩溶系统性的整体动力学和行为。

5 相关和频谱分析的局限性

相关和频谱分析是获取岩溶含水层特征数据(如系统记忆效应,响应时间、平均滞留时间和地下水流速)和进行岩溶系统分类的有效方法,但这些方法也受到了一些质疑。Grasso等^[57]将相关和频谱分析法应用于一个已知内部结构特征的岩溶实验场,通过比较水文分析提供的推论与现场已知结构,发现相关和频谱分析与降雨事件的频率关系密切,如果将总降水量作为输入信号,将流量作为输出信号,则岩溶系统既不是线性的,也不是平稳的,因而对岩溶系统的结构推断和分类效率不高。Eisenlohr等^[58]通过分析数值模型产生的流量时间序列得出与Grasso等^[57]相似的结论,发现降雨频率对岩溶系统的记忆时间的影响非常显著,这可能会导致在比较来自不同气候区域的系统时将降雨频率的影响误解为是系统储蓄能力的差异。Jeannin和Sauter^[3]综述了岩溶泉水文分析常用方法(包括相关和频谱分析)的基本原理,并指出由于岩溶泉水文分析的方法不能直接反映系统空间和时间响应的具体物理

过程,任何对流体系统特定结构的推断都是相当不确定和危险的。这些方法得到的结果可用来建立假设,但在任何情况下,这些假设都应通过确定性模型和/或直接观察来验证。此外,Bailly等^[15]也指出在受到洪峰转移前局部径流的强烈影响下,在洪峰转移过程中使用水温或电导率进行相关和频谱分析可能会造成误解。

6 展 望

相关和频谱分析在岩溶系统研究中的应用,促进了对岩溶系统的深入认识,为提高相关和频谱分析的实用性和精度,有必要对其做进一步的探讨。

(1)岩溶系统是由多种因素控制,特别是受气候、降雨综合作用影响显著,各流域之间的降雨量和降雨频率存在很大差别,但相关和频谱分析与降雨事件的频率关系密切,造成对岩溶系统结构的推断和分类效率不高的问题还没得到很好的解决,则应在不同的已知内部结构特征的实验场内进行不同降雨频率的模拟实验,明确降雨频率与相关和频谱分析的关系。

(2)受气候和地质条件的影响,中国南北方岩溶在流域面积、岩溶发育程度、含水介质、水文地质结构、调蓄功能和水化学特征等方面均存在明显的地域差异。相关和频谱分析是岩溶系统比较和分类的有效工具,可利用此方法加强中国南北岩溶泉系统的比较分析,完善岩溶系统分类的指标体系。

(3)目前岩溶系统快速流的研究主要是利用岩溶泉流量曲线图进行衰减分析,或是利用岩溶地区地表河的退水曲线做二次分隔进行分析,但大型岩溶裂隙系统的调蓄能力较强,泉水流量的衰变系数较小,单用二次分隔法很难区分快速流和慢速流,应加强相关和频谱分析法在区分岩溶系统快速流和慢速流方面的研究和应用。

(4)岩溶水资源的可利用部分,在很大程度上取决于系统的调节功能的大小,应加强相关和频谱分析法在岩溶地下水开发和管理方面的应用,可使用相关和频谱分析法掌握岩溶系统中快速流的空间赋存状态和动态规律,对岩溶系统快速流进行系统识别,评价岩溶泉或地下水补给条件和调蓄功能。

参考文献

[1] LAROCQUE M, MANGIN A, RAZACK M, et al. Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study

of a large karst aquifer (Charente, France)[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 205(3-4):217-231.

- [2] DELBART C, VALDES D, BARBECOT F, et al. Temporal variability of karst aquifer response time established by the sliding-windows cross-correlation method[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 511(1-4):580-588.
- [3] JEANNIN P-Y, SAUTER M. Analysis of karst hydrodynamic behaviour using global approaches: a review[J]. *Bull Hydrogéol(Neuchâtel)*, 1998, 16:31-48.
- [4] MANGA M. Using springs to study groundwater flow and active geologic processes[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2001, 29(1):201-228.
- [5] MAILLET E T. Essais d'hydraulique souterraine & fluviale[M]. Hermann, Paris, 1905.
- [6] DROGUE C. Analyse statistique des hydrogrammes de decrues des sources karstiques statistical analysis of hydrographs of karstic springs[J]. *Journal of Hydrology*, 1972, 15(1):49-68.
- [7] MANGIN A. Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques[M]. Université de Dijon, 1975.
- [8] BONACCI O. Karst springs hydrographs as indicators of karst aquifers[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1993, 38(1):51-62.
- [9] THRAIKILL J. Drawdown interval analysis: A method of determining the parameters of shallow conduit-flow carbonate aquifers from pumping tests[J]. *Water Resources Research*, 1988, 24(8):1423-1428.
- [10] MCCONNELL C L. Double porosity well testing in the fractured carbonate rocks of the Ozarks[J]. *Groundwater*, 1993, 31(1):75-83.
- [11] KOGOV J, PETRIÈ M. Tracing tests as a tool for the estimation of possible impacts of human activities on karst waters examples from Slovenia[J]. *Materials and Geoenvironment*, 2003, 50(1):161-164.
- [12] 赵一, 李衍青, 覃星铭, 等. 南洞地下河岩溶管道展布及结构特征的示踪试验解析[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(2):226-233.
- [13] JACOB T, BAYER R, CHERY J, et al. Absolute gravity monitoring of water storage variation in a karst aquifer on the larzac plateau (Southern France)[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 359(1-2):105-117.
- [14] 蒲俊兵, 袁道先, 蒋勇军, 等. 重庆岩溶地下河水文地球化学特征及环境意义[J]. *水科学进展*, 2010, 21(5):628-636.
- [15] BAILLY-COMTE V, MARTIN J B, SCREATON E. Time variant cross correlation to assess residence time of water and implication for hydraulics of a sink-rise karst system[J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(5):1-16.
- [16] 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(1-4):73-89.

- [17] LIU L, CHEN X, XU G, et al. Use of hydrologic time-series data for identification of hydrodynamic function and behavior in a karstic water system in China [J]. *Hydrogeology Journal*, 2011, 19(8):1577-1585.
- [18] SMITH M B, KOREN V I, ZHANG Z, et al. Runoff response to spatial variability in precipitation: an analysis of observed data [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 298 (1-4) : 267-286.
- [19] FIORILLO F, DOGLIONI A. The relation between karst spring discharge and rainfall by cross-correlation analysis (Campania, southern Italy)[J]. *Hydrogeology Journal*, 2010, 18(8):1881-1895.
- [20] 郑雪, 陈喜, 张志才. 贵州普定陈旗喀斯特泉的降雨—径流响应特征分析[J]. *地球与环境*, 2014, 42(1):221-227.
- [21] LONG A J. RRAWFLOW: Rainfall-response aquifer and watershed flow model (v1. 15)[J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, 8(3):865-880.
- [22] BEVEN K, YOUNG P. A guide to good practice in modeling semantics for authors and referees [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(8):5092-5098.
- [23] MAYAUD C, WAGNER T, BENISCHKE R, et al. Single event time series analysis in a binary karst catchment evaluated using a groundwater model (Lurbach system, Austria) [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 511 (1-4):628-639.
- [24] LEDOLTER J. The analysis of multivariate time series applied to problems in hydrology [J]. *Journal of Hydrology*, 1978, 36(3-4):327-352.
- [25] MANGIN A. Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale[J]. *Journal of Hydrology*, 1984, 67(1-4):25-43.
- [26] LEE J-Y, LEE K-K. Use of hydrologic time series data for identification of recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 229 (3-4) : 190-201.
- [27] RAHNEMAEI M, ZARE M, NEMATOLLAHI A, et al. Application of spectral analysis of daily water level and spring discharge hydrographs data for comparing physical characteristics of karstic aquifers[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 311(1-4):106-116.
- [28] CAI Z, OFTERDINGER U. Analysis of groundwater-level response to rainfall and estimation of annual recharge in fractured hard rock aquifers, NW Ireland[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 535 (3-4):71-84.
- [29] BOX G E, JENKINS G M, REINSEL G C, et al. Time series analysis: forecasting and control[M]. John Wiley & Sons, 2015.
- [30] DUFFY C, GELHAR L. A frequency domain approach to water quality modeling in groundwater: Theory[J]. *Water Resources Research*, 1985, 21(8):1175-1184.
- [31] MACHIWAL D, JHA M K. Hydrologic time series analysis: theory and practice[M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [32] JENKINS G M, WATTS D G. Spectral analysis and its applications [M]. Holden Day, San Francisco, CA, 1968.
- [33] BATH, MARKUS. Spectral analysis in geophysics [M]. Elsevier Scientific Publish, New York, 1974.
- [34] LAMBRAKIS N, ANDREOU A, POLYDOROPOULOS P, et al. Nonlinear analysis and forecasting of a brackish karstic spring[J]. *Water Resources Research*, 2000, 36(4):875-884.
- [35] MASSEI N, DUPONT J-P, MAHLER B, et al. Investigating transport properties and turbidity dynamics of a karst aquifer using correlation, spectral, and wavelet analyses [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 329(1-2):244-257.
- [36] MANGIN A. Ecoulement en milieu karstique [J]. *Annales des Mines*, 1984, 5(6):135-142.
- [37] PANAGOPOULOS G, LAMBRAKIS N. 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) [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 329(3-4):368-376.
- [38] LEE L, LAWRENCE D, PRICE M. Analysis of water-level response to rainfall and implications for recharge pathways in the Chalk aquifer, SE England [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 330(3-4):604-620.
- [39] 严启坤, 黄敬熙, 周维新. 论岩溶地下水系统中的快速流与慢速流[J]. *中国岩溶*, 1986, 5(4):319-326.
- [40] ANGELINI P. Correlation and spectral analysis of two hydrogeological systems in Central Italy [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1997, 42(3):425-438.
- [41] MANGA M. On the timescales characterizing groundwater discharge at springs[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 219(1-2) : 56-69.
- [42] BAILLY-COMTE V, JOURDE H, ROESCH A, et al. Time series analyses for Karst/River interactions assessment: Case of the Coulazou river (southern France) [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 349(1-2):98-114.
- [43] 姜光辉, 郭芳, 于爽. 岩溶水系统的水化学曲线及其在水文地质研究中的应用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2015, 45(3):899-907.
- [44] BIRK S, LIEDL R, SAUTER M. Identification of localised recharge and conduit flow by combined analysis of hydraulic and physico-chemical spring responses (Urenbrunnen, SW-Germany)[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 286(1-4):179-193.
- [45] BOUCHAOU L, MANGIN A, CHAUVE P. Turbidity mechanism of water from a karstic spring: example of the Ain Asserdoune spring (Beni Mellal Atlas, Morocco) [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 265(1-4):34-42.
- [46] AMRAOUI F, RAZACK M, BOUCHAOU L. Turbidity dynamics in karstic systems. Example of Ribaa and Bittit springs in the Middle Atlas (Morocco) [J]. *Hydrological Sciences*

- Journal, 2003, 48(6):971-984.
- [47] ANDERSON M P. Heat as a ground water tracer[J]. Ground Water, 2010, 43(6):951-968.
- [48] 吴志伟, 宋汉周. 地下水温度示踪理论与方法研究进展[J]. 水科学进展. 2011, 20(5):733-740.
- [49] MARTIN J B, DEAN R W. Karst Modeling-Temperature as a natural tracer of short residence times for groundwater in karst aquifers[J]. Karst Modeling Karst Waters Institute Special Publication, 1999, 5:236-242.
- [50] BENDERITTER Y, ROY B, TABBAGH A. Flow characterization through heat transfer evidence in a carbonate fractured medium: first approach[J]. Water Resources Research, 1993, 29(11):3741-3747.
- [51] LIEDL R, RENNER S, SAUTER M. Obtaining information about fracture geometry from heat flow data in karst systems [J]. Bulletin d'Hydrogéologie, 1998, 16:143-153.
- [52] 郭芳, 姜光辉, 刘绍华, 等. 利用泉水电导率频率分布辨别岩溶含水系统的水源组分[J]. 水科学进展, 2018, 29(2): 245-251.
- [53] MASSEI N, MAHLER B J, BAKALOWICZ M, et al. Quantitative interpretation of specific conductance frequency distributions in karst[J]. Groundwater, 2007, 45(3):288-293.
- [54] HESS J W, WHITE W B. Storm response of the karstic carbonate aquifer of southcentral Kentucky[J]. Journal of Hydrology, 1988, 99(3-4):235-252.
- [55] AMRAOUI F, RAZACK M, BOUCHAOU L. Comportement d'une source karstique soumise à une sécheresse prolongée: la source Bittit (Maroc)[J]. Comptes Rendus Geoscience, 2004, 336(12):1099-1109.
- [56] ATKINSON T C. Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills, Somerset (Great Britain)[J]. Journal of Hydrology, 1977, 35(1-2):93-110.
- [57] GRASSO D, JEANNIN P. Etude critique des méthodes d'analyse de la réponse globale des systèmes karstiques. Application au site de Bure (JU, Suisse)[J]. Bulletin d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, 1994, 13:87-113.
- [58] Eisenlohr L, Bouzelboudjen M, Király L, et al. Numerical versus statistical modelling of natural response of a karst hydrogeological system [J]. Journal of hydrology, 1997, 202(1-4): 244-262.

Review on application of correlation and spectrum analyses in karst system research

LI Jianhong¹, PU Jubing¹, ZHANG Tao¹, WANG Sainan^{1,2}

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR& GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract The karst aquifer consists of multiple water-bearing media thus is highly heterogeneous. It can be regarded as a filter, in which rainfall is input, physical and chemical parameters such as spring flow, water level, conductivity, and turbidity are output, which can be analyzed by the correlation and spectrum methods. This paper presents a review on this issue. Firstly, it introduces the formation, development process of the basic theory and research significance of correlation and spectrum analyses. Then it summarizes how to select the length, period and type of time series used in correlation and spectrum analyses according to different research purposes. Finally, it points out the limitations of these methods in application to karst system research.

Key words karst system, correlation analysis, spectrum analysis, time series

(编辑 黄晨晖)