

文章编号: 1001-1986(2010)02-0032-04

岩溶隧道涌水对降雨的响应特征

刘 建, 刘 丹

(西南交通大学环境科学与工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 引入时间序列分析方法, 以铜锣山岩溶长大隧道为例, 采用相关分析和频谱分析, 定量研究了该隧道涌水对降雨的响应特征。结果表明, 隧址区岩溶地下水系统储量十分丰富, 具有很强的调节能力和过滤作用, 致使隧道涌水与降雨的相关程度不高, 平均滞后时间长达 12.62 d, 由此推断, 隧道涌水与降雨之间的连通性较差。此研究成果可为隧道后期的防排水管理提供科学依据。

关键词: 岩溶; 隧道涌水; 时间序列; 相关分析; 频谱分析

中图分类号: P641 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.02.008

Research on the response feature of tunnel inflow to precipitation in a karstic area

LIU Jian, LIU Dan

(School of Environmental Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Introducing time series analyses method, this paper takes Tongluoshan long tunnel, constructed in a karstic area, as an example, quantifying its response characteristics to the precipitation by adopting correlation and spectral analysis. Results of this research indicate that the groundwater system has huge storage capacity in the tunnel region with strong regulation and filtering ability, which results in low correlation found between the tunnel inflow and precipitation but with a lag about 12.62 d, concluding that the connectivity between precipitation and tunnel inflow is very weak. These results can offer scientific basis to the prevention and drainage of tunnel inflow.

Key words: karst; tunnel inflow; time series; correlation analysis; spectral analysis

通常, 隧道涌水主要来源于含水层中的地下水。然而, 在水文地质条件异常复杂, 裂隙和管道甚为发育的岩溶地区, 降雨对隧道涌水的贡献亦不容忽视^[1-2]。目前, 国内外学者在河流、井泉、地下水位、浊度和矿井涌水等对降雨的响应方面开展过大量研究^[3-8], 但针对隧道涌水而言, 除少数学者定性探讨过其与降雨的关系外^[2, 9], 在定量方面还有待深入。本文以垫(江)邻(水)高速公路关键控制工程——铜锣山隧道为例, 采用相关分析和频谱分析技术, 拟定量计算隧道涌水对降雨响应的滞后时间以及二者之间的相关程度, 以期深入了解隧址区水文地质条件和优化隧道防排水管理提供科学依据, 同时也为类似工程的涌突水来源判识和渗漏水整治提供有价值的参考。

1 隧道工程 区域地质及水文地质概况

1.1 隧道工程概况

铜锣山隧道为重庆垫江至广安邻水高速公路的关键控制工程, 横穿邻水县元市镇和城南镇之间的

铜锣山背斜中段, 东距重庆约 80 km, 西至成都约 310 km, 隧道全长 5.2 km, 最大埋深 280 m, 建筑限界为高 5 m、宽 10.25 m, 洞间距 30 m, 人字形纵坡。该隧道始建于 2005 年, 已于 2008 年夏季贯通。

1.2 区域地质及水文地质概况

隧址区地貌景观主要呈一山(铜锣山)两岭(背斜两翼)夹一谷(岩溶槽谷)的特征, 出露地层主要有三叠系下统嘉陵江组(T_{1j}), 中统雷口坡组(T_{2l})和上统须家河组(T_{3x})及侏罗系(J)地层。第四系(Q)松散堆积物仅分布在槽谷和地形低洼处, 其余地层大面积出露, 岩性主要为可溶岩(灰岩及白云岩)和非可溶岩(砂岩、粉砂岩、泥岩等), 且前者(分布于槽谷)被挟持于后者(地处两岭地带)中。铜锣山隧道设计里程为 DYK32+190—DYK37+420(右洞), 其中 DYK32+190—DYK32+955、DYK37+224—DYK37+420 段地层为侏罗系中下统新田沟(J_{2x})组、自流井组(J_{1z})和珍珠冲组(J_{1zh}), 岩性以砂岩、泥岩和灰岩为主; DYK32+955—DYK33+472、DYK36+430—DYK37+224 段为三叠系上统须家河

收稿日期: 2009-10-19

基金项目: 铁道部科技研究开发计划项目(2008G030-B-3)

作者简介: 刘 建(1982—), 男, 四川威远人, 博士研究生, 主要从事工程环境控制技术研究。

组(T_{3xj})地层,岩性主要为砂岩(部分夹煤层)、泥岩;DYK33+472—DYK33+950、DYK35+870—DYK36+430 段地层为三叠系中统雷口坡组(T_{2l}),岩性主要为灰岩和白云岩;DYK33+950—DYK35+870 段为三叠系下统嘉陵江组(T_{1j})地层,岩性主要为白云岩和石灰岩。

隧址区属温潮湿气候,多年平均气温 16.9℃,多年平均降雨量 1 215.5 mm,以小雨、梅雨为主,有利于地下水的入渗补给,根据地勘报告,在背斜两翼碎屑岩地区大气降水入渗系数不超过 0.20,而在背斜核部碳酸盐岩地区大气降水入渗系数可高达 0.55。受地形和地质条件控制,隧址区内,背斜两翼须家河组砂岩中地下水以层间流为主,背斜核部嘉陵江组、雷口坡组可溶岩中地下水总体流向由北向南。

铜锣山隧道横穿铜锣山背斜中段鞍部区,平均埋深约 150 m,从隧道所处的空间位置分析,其上覆岩层可作为降雨进入隧道的有效缓冲;根据隧址

区的地质和水文地质条件,可以推断岩溶水是隧道涌水的主要来源。但鉴于隧址区背斜核部碳酸盐岩地区大气降水入渗系数较高(达到 0.55),隧道涌水和降雨之间是否存在较好的连通性还有待进一步辨识。基于此,本文借助时间序列分析方法开展有关探索。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

通常,岩溶含水层非均质各项异性十分突出,因此,无论是从抽水实验还是示踪实验获得的数据都不足以表征整个含水层的总体特征,而仅具有局部代表性。然而,泉水等地下水露头的水文过程却可有效反映出含水层对降雨的整体响应^[10]。基于此,本研究以降雨作为输入以隧道涌水为输出,采用时间序列分析方法探讨二者之间的响应特征。文中使用的降雨(P)时间序列和隧道涌水(TQ)时间序列均来源于课题组实测,其统计特征见表 1,二者的对应关系见图 1。

表 1 降雨和隧道涌水时间序列的统计特征

Table 1 Characteristics of the tunnel inflow and precipitation time series

名称及编号	监测时段	监测设备	最小值*	最大值*	平均值*	标准差*	备注
降雨(P)	2006-05-12—2007-07-31	SJ1虹吸式雨量计	0	137.5	3.45	5.26	安装位置距隧道轴线约1 km
隧道涌水(TQ)	2006-05-12—2007-07-31	矩形堰	3	80.60	18.70	5.57	隧道进出口端涌水量之和

*降雨单位为 mm, 流量单位为 L/s。

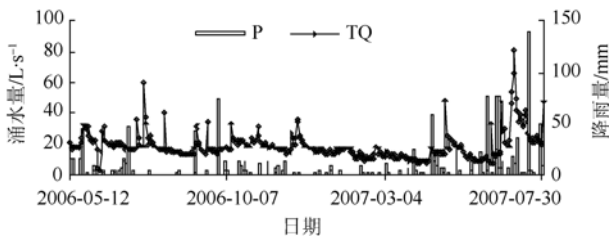


图 1 隧道涌水与降雨对应关系图

Fig. 1 Correspondent map of tunnel inflow and the precipitation

2.2 研究方法

时间序列分析方法最早由 Jenkins 和 Watts 于 1968 年提出,之后被广泛用于水文研究领域,尤其是用于研究岩溶地区的水文过程^[11-12]。时间序列分析方法主要包括相关分析和频谱分析,其中相关(包括自相关和互相关)分析可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,而频谱(包括自功率谱和互功率谱)分析作为相关分析的有效补充,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^[13]。时间序列的相关分析和谱分析原理^[14-15]简述如下。

2.2.1 相关分析

设有二元离散时间序列 $x_i(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ 和 $x_j(x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jn})$, 其自协方差和互协方差函数

$C_{xixj}(k)$ 可由下式计算:

$$C_{xixj}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_{i(t)} - \bar{x})(x_{j(t+k)} - \bar{x}), \quad k \geq 0 \quad (1)$$
$$C_{xixj}(k) = C_{xjxi}(-k), \quad k < 0, \quad i=1,2, \quad j=1,2$$

式中 n 为序列长度; k 为时滞, $k=0,1,\dots,M$, M 为截断点, $M < \frac{n}{3}$ ^[16]; i, j 为序号,取值 1 或 2,当 $i=j$ 时为自协方差, $i \neq j$ 时为互协方差。

在计算完序列的自协方差和互协方差函数后,自相关函数和互相关函数 r_{xixj} 可由式(2)导出:

$$r_{xixj} = \frac{C_{xixj}(k)}{\sqrt{C_{xixi}(0) \times C_{xjxj}(0)}}, \quad i=1,2; \quad j=1,2 \quad (2)$$

由式(1)和式(2)计算出的协方差函数和相关函数可用于时域范围内两个时间序列的相关分析,通常作为频谱分析的基础。

2.2.2 频谱分析

功率谱定义为相关函数的傅里叶变换。自功率谱和互功率谱的计算公式分别为:

$$S_i(f) = 2 \left[1 + 2 \sum_{k=1}^M w(k) r_{xixi}(k) \cos(2\pi fk) \right], \quad i=1,2 \quad (3)$$
$$S_{12}(f) = L_{12}(f) + iQ_{12}(f), \quad f = j/2M,$$

$$j = 0, 1, \dots, M, \quad (4)$$

式中 $w(k)$ 为窗函数, 通常取 Tukey 窗, 其表达式为 $w(k) = \frac{1 + \cos(k\pi/M)}{2}$; $S_i(f)$ 为序列 i 的自功率谱; $S_{12}(f)$ 为序列 1 和序列 2 的互功率谱(复数形式); $L_{12}(f)$ 为互功率谱的实部, 常称作协谱或余谱, 其表达式为:

$$L_{12}(f) = 2 \left[r_{x1x2}(0) + \sum_{k=1}^M (r_{x1x2}(k) + r_{x2x1}(k)) w(k) \cos(2\pi fk) \right], \quad (5)$$

$Q_{12}(f)$ 为互功率谱的虚部, 常称作正交谱或四分谱, 其表达式为:

$$Q_{12}(f) = 2 \left[\sum_{k=1}^M (r_{x1x2}(k) - r_{x2x1}(k)) w(k) \sin(2\pi fk) \right]. \quad (6)$$

计算互功率谱后, 可进一步计算相位谱($\phi_{12}(f)$)、幅值谱($A_{12}(f)$)以及相干谱($H_{12}(f)$), 它们的计算公式依次为:

$$\phi_{12}(f) = \arctan \left(\frac{Q_{12}}{L_{12}} \right), \quad (7)$$

$$A_{12}(f) = \sqrt{L_{12}^2(f) + Q_{12}^2(f)}, \quad (8)$$

$$H_{12}(f) = \frac{A_{12}(f)}{\sqrt{S_1(f)S_2(f)}}. \quad (9)$$

3 结果与分析

3.1 自相关及自功率谱分析

降雨(P)和隧道涌水(TQ)两个时间序列的自相关函数和自功率谱见图 2 和图 3。

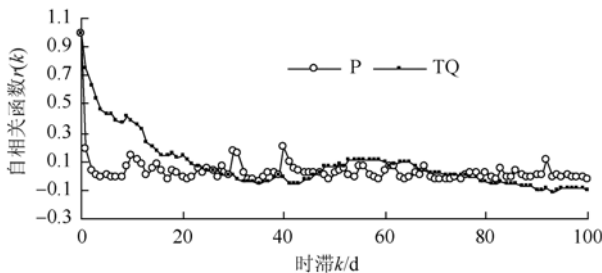


图 2 降雨和隧道涌水序列的自相关函数

Fig. 2 Auto-correlation function of precipitation and the tunnel inflow time series

由图 2 可知, 降雨时间序列的自相关函数在 $k=0$ 附近下降很快, 并且当 $k>0$ 时的所有 $r(k)$ 均小于 0.2, 由此表明降雨时间序列无记忆效应, 为纯随机序列, 这与图 3 的自功率谱分析结果(无明显峰值)相一致, 也与 Massei 等^[5]人的研究结果相同。然而, 隧道涌水时间序列却表现出完全不同的变化特征, 首先是自相关函数出现了明显的拖尾, 在 0~13 d 滞后期内 $r(k)$ 均超过 0.2, 表明在经历一次输入脉冲后系统的记忆长度可达 13 d; 其次, 从自功率谱看, $S(f)$ 在整

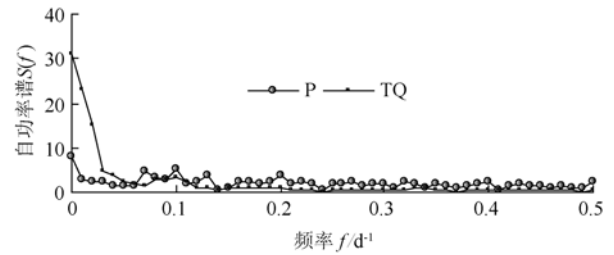


图 3 降雨和隧道涌水序列的自功率谱

Fig. 3 Auto-spectral density of precipitation and the tunnel inflow time series

个频域范围内未出现明显的峰值, 且当 $f > 0.1$ 时 $S(f)$ 基本接近于 0, 由此表明隧道涌水时间序列不存在小于 10 d 的短周期, 但不排除有大于本次观测时段长度(446 d)长周期的可能, 这从另一个侧面反映出隧址区岩溶地下水系统的调节能力较强^[4], 致使隧道涌水与降雨时间序列的结构特征出现了明显的差异。

3.2 互相关及互功率谱分析

降雨(P)与隧道涌水(TQ)时间序列的互相关函数、互功率幅值谱、相位谱和相干谱分别见图 4a—图 4d。

由图 4a 可知, 在整个时域范围内, 降雨和隧道涌水的互相关函数有 3 处比较明显的峰值, 分别出现在 k 为 5、13 和 78 时, 尤以 k 为 13 时最大(0.323 6), 但总体而言, 二者的相关性并不很强, 超过 95% 置信水平^[17]的个数仅约 1/5。

幅值谱可视为是两个时间序列之互协方差在频域范围的表征, 主要用于辨识地下水系统对降雨输入信号的整合方式^[12]。从图 4b 可以看出, 在 $f = [0, 0.1]$ 这个频段范围内的谱值较大, 而当 $f > 0.1$ 时谱值明显地小于 1, 由此说明, 在高频范围的降雨输入信号被储量十分丰富的岩溶地下水系统所模糊, 这从另一侧面反映出从降雨至隧道涌水是以“基流”为主而不是“管道流”。

相位谱用于估计一个时间序列对另一时间序列的主导作用, 如超前或滞后。由于四象限反正切变换得到的相位在 $[-\pi, \pi]$ 之间存在相位卷绕现象, 故需展开得到实际的相位变化^[18]。由 $\phi_{12}(f) = 2\pi fd$ 可知, $\phi_{12}(f)$ 为 f 的线性函数, 斜率为 $K = 2\pi d$ ^[12, 15]。据此, 通过拟合(图 4c)便可求得隧道涌水对降雨响应的

平均滞后时间 $d = \frac{K}{2\pi} = \frac{79.236}{2 \times 3.14} = 12.62$ d。铜锣山隧道最大埋深 280 m, 最小埋深不足 10 m, 若以平均埋深 150 m 计, 则可大致估算出隧址区含水层的平均垂直渗透系数为 11.89 m/d。

相干谱可以理解两个时间序列在不同频率时的关联程度, 用于表征输入和输出时间序列在某个频率处是否存在同类型的振荡, 因此可用来度量输入和输出之间的线性相干程度^[3, 12]。若相干谱值接近 1, 则说明输入信号的某个变化在输出中也得到了成

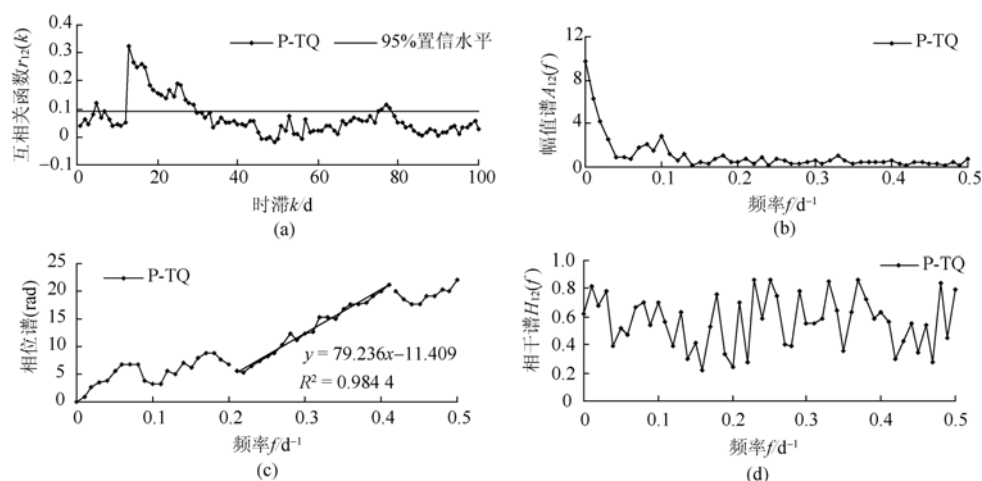


图 4 降雨与隧道涌水序列的互相关及互功率谱图

Fig. 4 Cross-correlation and cross-spectral map of precipitation and the tunnel inflow

a—互相关函数; b—幅值谱; c—相位谱; d—相干谱

比例的反映;相反,若相干谱值远小于 1,则说明系统中存在很强的非线性特征。由图 4d 可知,隧道涌水和降雨的相干系数介于 0.2~0.85,平均 0.567,表明二者之间的相干程度一般。这与互相关分析、幅值谱和相位谱反映出的信息一致。

4 结 语

时间序列分析方法在水文研究领域已得到广泛应用,鉴于其具有数据易获得、成本低和计算过程简单、便捷等优点,本文将引入并用于研究隧道涌水对降雨的响应特征。通过时间序列的相关分析和频谱分析发现,隧址区岩溶地下水系统储量十分丰富,对降雨输入信号的过滤作用较强,致使隧道涌水和降雨之间的线性相关程度不高,平均滞后时间长达 12.62 d。上述研究定量反映出隧道涌水对降雨的响应较缓慢,换言之,二者之间的连通性较差,据此推断降雨对隧道涌水的补给形式应非“注入式”补给,这与隧道所处空间位置及隧址区水文地质条件有关。

由于铜锣山隧道为已建成隧道,故本次研究成果主要用于指导该隧道后期的防排水管理,但文中提出的思路与方法对于大量新建隧道也同样适用,尤其是对于岩溶地区隧道工程,其意义更加凸显。

参考文献

- [1] 王勐,许兆义,王连俊,等. 圆梁山毛坝向斜段隧道涌水灾害及地下水的影响[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(5): 6-10.
- [2] 方俊波. 圆梁山隧道向斜地表及地下连通性分析[J]. 隧道建设, 2004, 24(5): 16-20.
- [3] RAHNEMAEI M, ZARE Z, NEMATOLLAHI A R, 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): 106-116.
- [4] PANAGOPOULOS G, LAMBRAKIS N. The contribution of time series analysis to the study of the hydrodynamic characteris-

tics of the karst system: Application on two typical karst aquifers of Greece (Trifolia, Almyros Crete)[J]. Journal of Hydrology, 2006(329): 368-376.

- [5] MASSEI N, DUPONT J P, MAHLER B J, et al. Investigating transport properties and turbidity dynamics of a karst aquifer using correlation, spectral, and wavelet analyses[J]. Journal of Hydrology, 2006(329): 244-257.
- [6] 杨永国,韩宝平,谢宪德,等. 四川南桐矿区降雨量和矿井涌水量的频谱分析[J]. 地下水, 1995, 17(2): 89-91.
- [7] 韩宝平,杨永国,于礼山,等. 红岩煤矿岩溶双重介质对降雨响应特征的研究[J]. 煤田地质与勘探, 1998, 26(1): 45-47.
- [8] 韩宝平,冯启言,杨永国,等. 红岩煤矿岩溶水对暴雨响应特征研究[J]. 水文地质工程地质, 2001, 28(1): 28-31.
- [9] 刘招伟,张民庆. 某铁路隧道岩溶突水的连通性特征[J]. 隧道建设, 2006, 26(1): 6-9.
- [10] PADILLA A, PULIDO-BOSCH A, MANGAN A. Relative importance of baseflow and quickflow from hydrographs of karst spring[J]. Groundwater, 2004, 32(2): 267-277.
- [11] 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): 217-231.
- [12] 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.
- [13] MATHEVET T, LEPILLER M, MANGIN A. Application of time-series analyses to the hydrological functioning of an Alpine karstic system: the case of Bange-L'Eau-Morte[J]. Hydrology and Earth System Science, 2004, 8(6): 1051-1064.
- [14] BOX G E, JENKINS G M, REINSEL G C. Time series analysis: forecasting and control(3rd)[M]. Englewood: Prentice Hall inc, 1994.
- [15] BAILLY-COMTE V, JOURDE H, PISTRE S. Transfer functions in a karst watershed using correlation and spectral analyses- Case of the Coulaou watershed, Aumelas-Thau karst system, South of France[C]// 13th World Water Congress. Montpellier, 2008.
- [16] MANGIN A. Pour une meilleure connaissance des systemes hydrologiques a partir des analyses corrélatrice et spectrale[J]. Journal of Hydrology, 1984(67): 25-43.
- [17] DIGGLE P. Time series: a biostatistical introduction[M]. Oxford: Oxford Science Publications, 1990.
- [18] 路伟,文玉梅. 供水管道泄露定位中基于互谱的时延估计[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(3): 504-509.