

汪莹, 宋小庆, 王飞, 等. 基于连续小波—互相关分析的降雨—地下水水位动态响应特征研究——以贵阳岩溶盆地为例[J]. 中国岩溶, 2024, 43(4): 843-853.

DOI: 10.11932/karst20240410

基于连续小波—互相关分析的降雨—地下水 水位动态响应特征研究 ——以贵阳岩溶盆地为例

汪莹^{1,2}, 宋小庆^{1,2,3}, 王飞⁴, 彭钦^{1,2}, 曹振东^{1,2}, 蒲秀超^{1,2}

(1. 贵州省地质矿产勘查开发局 111 地质大队, 贵州 贵阳 550008; 2. 贵州地质工程勘察设计院有限公司, 贵州 贵阳 550008; 3. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430078; 4. 贵阳市公共交通投资运营集团有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘 要: 为探究降雨影响下的岩溶盆地地下水水位动态的时空变化, 选取 2007—2021 年贵阳岩溶盆地 7 个地下水水位动态观测点不同时段观测资料以及降雨数据, 采用小波分析及互相关分析对贵阳岩溶盆地地下水水位动态的多时间尺度特征及其对降雨的响应进行分析。结果表明: (1) 贵阳岩溶盆地地下水水位动态存在显著的 256~512 d 的主振荡周期。(2) 贵阳岩溶盆地地下水水位动态对降雨的响应滞后性明显, 总体表现为地下水径流路径越长, 地下水水位对降雨的响应越滞后。其中径流-排泄区地下水水位对降雨的滞后时间为 2.66~7.7 d, 排泄区的滞后时间为 1.25~8.04 d。研究区内两个地下水系统的区域水文地质条件不同, 因此南北两个地下水系统对降雨响应的滞后性存在差异。南部地下水系统从径流-排泄区至排泄区地下水对降雨的响应滞后性逐渐增强。北部地下水系统, 径流-排泄区域受上游远距离降水补给的影响, 地下水水位变化较多源补给的排泄区更为滞后。

关键词: 小波分析; 互相关分析; 地下水水位动态; 岩溶盆地

创新点: 利用连续小波-互相关分析探究贵阳岩溶盆地的地下水水位对降雨响应的时滞差异及周期性特征, 结合水文地质条件分析地下水水位动态变化的原因和规律

中图分类号: P641.2 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)04-0843-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引 言

地下水水位动态是典型的时间序列^[1], 其动态变化特征可通过多年变化趋势、周期性波动、平稳随机变量来反映^[2]。而岩溶地区的地下水水位与降雨序列均为非平稳时间序列, 其非平稳性受人类活动的影

响显著。目前地下水水位非平稳性的研究方法主要有回归分析法^[3]、频谱分析法^[4-5]、小波分析法^[6-7]等。回归分析法和频谱分析法主要是对水位和降雨序列的趋势或周期单独进行分析。20 世纪 80 年代, 以傅里叶变换为基础发展起来的小波变换分析(Wavelet Transform, WT), 由于具有良好的时频局部化特征和

资助项目: 贵州省省级科技计划项目资助(黔科合支撑[2022]一般 210); 贵阳市公共交通投资运营集团有限公司科研项目(GD3-FW-YJ-03-2020-11-ZB); 黔地矿科合[2020]2 号

第一作者简介: 汪莹(1995—), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要从事水文地质环境地质研究。E-mail: 809891998@qq.com/Ying.W@cug.edu.cn。

通信作者: 宋小庆(1986—), 男, 博士研究生, 正高级工程师, 主要从事水文地质环境地质研究。E-mail: 376109559@qq.com。

收稿日期: 2023-05-25

多分辨分析能力,迅速成为分析时间序列的有效工具,被广泛应用于多个学科领域^[8-12]。而在判断水文序列是否相依以及其相依程度方面,水文序列相关分析方法是常用的方法,其中互相关分析法可用来描述两个序列的内在联系^[13]。

降雨、地形地貌、人类工程活动等诸多因素综合影响着地下水位的动态变化,其中降雨作为大多数地下水系统的主要补给来源,其时空分布特征在一定程度上决定了地下水位的动态特征,而对于某一特定的地下水系统,该系统的水资源量可能直接受地下水水位变化的制约。地下水动态的研究,对地下水资源的可持续开发利用、地表—地下水资源联合调度管理、工程建设中抗浮设防水位的确定等方面具有重要的意义^[14]。通常在地下水位与降雨的相关分析中,常用绘制降雨量与水位动态关系图,从而半定量的分析二者的相关关系。祁晓凡等^[14]在 2015 年就济南白泉泉域地下水位动态对降雨响应的年内时滞分析的研究中,通过绘制降雨量与水位动态关系图,半定量分析研究区白泉泉域岩溶水水位动态滞后于降雨 1—7 个月,孔隙水动态则为滞后降雨 3—6 个月。齐欢^[15]在 2020 年对济南趵突泉与白泉地下水相关性研究中,也通过同样的方法,半定量分析出泉水位与降雨量呈现“同升同降”的趋势,泉水位峰值与降雨量峰值之间存在 2~3 个月的滞后。但为了进一步研究地下水水位动态与降雨的响应关系通常需要定量的分析结果。而小波分析可定量地判断出降雨、地下水位的周期性^[16-19],互相关分析则可定量计算出地下水对于降雨响应的滞后性^[13, 20-21]。

本研究选取贵阳岩溶盆地内 7 个地下水位动态观测点多年观测资料及降雨资料,采用连续小波变换分析贵阳岩溶盆地地下水水位的周期性特征,结合互相关分析,探究地下水位对降雨响应的时滞差异,最后从水文地质角度分析地下水位动态变化的原因和规律。研究结果有助于进一步认识岩溶盆地区域内地下水位动态这一非线性过程,帮助完善区域内的地下水资源管理和进一步认识岩溶地下水动态变化过程。

1 研究区概况

贵阳岩溶盆地位于云贵高原东部,处于长江水系与珠江水系的分水岭地带。区内属亚热带湿润温和型气候,多年平均气温 15.3℃,极端最高气温 39.5℃,

极端最低气温-9.5℃;多年平均降雨量 1 136.96 mm,最大降雨量 1 760.8 mm (1954 年),最小降雨量 741.4 mm (2004 年),雨季一般始于每年的 4 月中旬,结束于 10 月下旬,旱季为 12 月至次年 3 月。降雨量年内分配不均,全年 60% 降雨量集中于 5~8 月。盆地内主要发育南明河,为区内地下水的排泄基准面。

贵阳岩溶盆地地势总体四周高中间低,高程在 1 000~1 400 m 间,最高点为西部的黔灵山主峰,高程 1 395 m;最低点为位于东部南明河下游出境处红岩村,高程 1 040 m,最大高差达 355 m;中部地势较为平缓,高程在 1 000~1 200 m 之间。区内碳酸盐类岩石广泛分布,盆地内部以溶蚀地貌为主,盆地周缘则以侵蚀-溶蚀地貌为主。贵阳岩溶盆地构造上为贵阳向斜北部扬起端与北东向乌当断裂构造的复合部位,出露第四系至泥盆系地层,其中,盆地内主要出露三叠系下统白云岩、白云质灰岩及灰岩地层;盆地周缘则主要出露二叠系、石炭系及泥盆系碎屑岩及碳酸盐岩夹碎屑岩地层(图 1)。受区域地质构造的影响,区内盆地周缘岩石强烈褶皱,层面裂隙密集;盆地内地层产状较为平缓。贵阳盆地内地下水埋藏较浅,水位一般 5~20 m,钻孔单位涌水量一般为 0.3~3.4 L·(s·m)⁻¹,富水性较好。

区内地下水补给源主要为大气降雨,局部区域有水库补给。岩溶盆地内,以横贯东西的南明河为界,将区内地下水分为南、北两个岩溶地下水系统,其中北部岩溶地下水系统区域内主要出露三叠系中统一统安顺组白云岩,三叠系下统大冶组灰岩以及在系统北东侧二叠系上统吴家坪组—长兴组碎屑岩,含水介质以溶洞、溶孔及溶隙为主,地下水含水不均一,该系统内地下水由北向南径流,并最终分散排泄方式排泄于南明河内;南部岩溶地下水系统,则以三叠系中统一统安顺组白云岩为主,含水介质以溶孔、溶隙为主,地下水含水较均一,系统内构造南北走向发育,主要受贵阳向斜影响,系统内地下水主要由南向北径流,最终排泄于南明河内。

2 研究方法

2.1 连续小波变换

小波变换可划分为两类,一类是适用于信号降噪与数据压缩的离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT),另一类是适用于信号特征提取的连

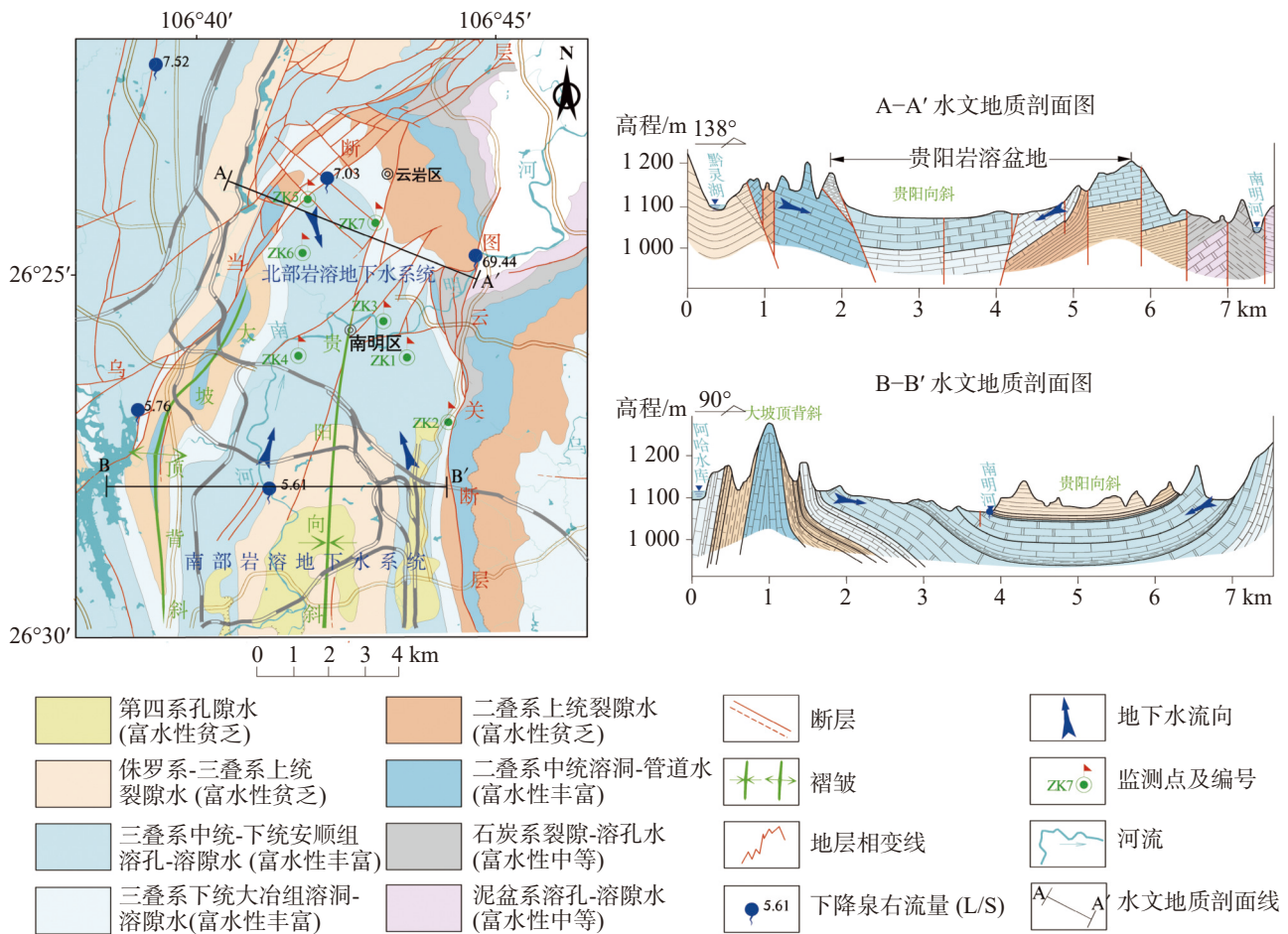


图 1 贵阳盆地区域水文地质图及地下水水位动态观测点分布图

Fig. 1 Regional hydrogeological and distribution map of observation points of groundwater level dynamics in Guiyang basin

续小波变换(Continuous Wavelet Transform, CWT)^[15]。

本文研究主要采用连续小波变换^[22],其定义为:

$$W_n^x(s) = \sqrt{\frac{\delta t}{s}} \sum_{n'=1}^N x_{n'} \psi_0 \left[(n' - n) \frac{\delta t}{s} \right]$$

式中: $W_n^x(s)$ 是小波系数, δt 是统一的时间步长, s 是小波尺度, 并且 ψ_0 是基小波函数。

基小波函数的选择是小波分析的前提^[23], 在相关的研究中, 常用的 Mexican hat 小波、Haar 小波、Morlet 小波和 Meyer 小波都可用来作为基小波函数^[2]。本研究中选择 Morlet 小波作为基小波函数进行研究, 因为 Morlet 小波可以在局部的时间频率上提供良好的平衡^[23], 并且作为复小波, 可以同时获取时间序列位相与振幅方面的信息^[2]。

Morlet 小波定义为^[22]:

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2}$$

式中: ω_0 为无量纲频率, η 是无量纲时间。

2.2 互相关分析

互相关函数可以用来描述输入时间序列 x_t 和输出序列 y_t 之间的内在联系, 揭示一个时间序列相对于另一个时间序列的滞后关系^[20], 互相关系数 $R_{xy}(k)$ 的峰值反应两个序列间信号响应的敏感程度, $R_{xy}(k)$ 值越大, 表明 y_t 越易受到 x_t 的影响^[24]。而互相关系数 $R_{xy}(k)$ 的第一个峰值对应的滞后时间, 就是一个序列滞后于另一个序列的时间^[21]。王朋辉等^[13]在 2019 年开展的关于岩溶地下水位对降雨响应的研究中, 就以降雨时间序列作为输入信号, 地下水水位时间序列作为输出信号, 以两个序列的互相关系数的峰值来反应岩溶含水系统对降雨信号响应的敏感程度。

在互相关分析中, 互协方差函数 $C_{xy}(k)$ 和互相关系数 $R_{xy}(k)$ 可以表示为^[25]:

$$R_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma(x)\sigma(y)}$$

其中,

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

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

式中: $C_{xy}(k)$ 为两个序列的互协方差, n 为时间序列长度, k 为滞后时间, $R_{xy}(k)$ 为互相关系数, $\sigma(x)$ 和 $\sigma(y)$ 分别为 X_n 和 Y_n 序列的样本标准差, $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 为 X_n 和 Y_n 的样本均值。

3 数据来源与处理

本文所用水位动态监测数据分为 5 日和 1 日两种采集频率, 各监测孔的地理位置如图 1, 所揭露的地层均为三叠系中-下统安顺组(T_{1-2a})灰岩、白云岩, 监测时间从 2007 年 1 月 5 日—2021 年 12 月 31 日(表 1), 部分监测孔受监测井改造影响, 存在数据间断。地下水位动态监测数据来源于贵州省地质环境

表 1 研究区地下水位动态监测时段及频率统计

Table 1 Monitoring period and frequency statistics of groundwater level dynamics in the study area

序号	5日监测时段/年.月.日	逐日监测时段/年.月.日
ZK1	2007.1.5—2017.5.15	2018.1.1—2021.12.31
ZK2	2007.1.5—2016.2.5	2018.1.1—2021.12.31
ZK3	无	2019.2.21—2021.12.31
ZK4	2007.1.5—2016.11.25	2018.7.1—2021.12.31
ZK5	2007.1.5—2016.11.30	无
ZK6	2007.1.5—2017.12.30	无
ZK7	2007.1.5—2017.12.30	无

监测院。降雨数据采用 2007 年 1 月—2021 年 12 月逐日观测数据, 数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所。降雨数据观测站为国家级地面气象观测基准站——贵阳站(区站号 57816), 该站点处于贵阳岩溶盆地内。
本研究主要利用 MATLAB 软件对收集整理的数据进行处理, 文中采用的连续小波变换的计算方法和程序主要参考 Torrence 等^[26] 和 Grinsted 等^[22] 关于小波分析应用的研究成果。

4 结果与讨论

4.1 地下水位波动分析

从降雨量与各监测孔水位动态图(图 2)可以看出, 不同监测孔水位的动态变幅差异明显。其中 ZK1、ZK3、ZK5 及 ZK6 处于盆地内部, 地势较为平坦, 为近地下水系统的排泄区, 因此水位变幅较小, 多年水位最大变幅约 2~7 m。ZK2、ZK4 及 ZK7 处于盆地边缘, 地形起伏较大, 受地形地貌的控制, 水位变幅较大, 多年水位最大变幅约 10~20 m。

4.2 周期性分析

将逐日降雨量及研究区地下水水位动态监测数据(除 ZK3 监测孔外其余监测孔采用 5 日监测频率数据)分别进行连续小波变换(图 3、图 4), 橙色和蓝色分别表示能量密度的峰值和谷值, 反映出主导波组分时频变换的局部性和动态性特征, 颜色深浅

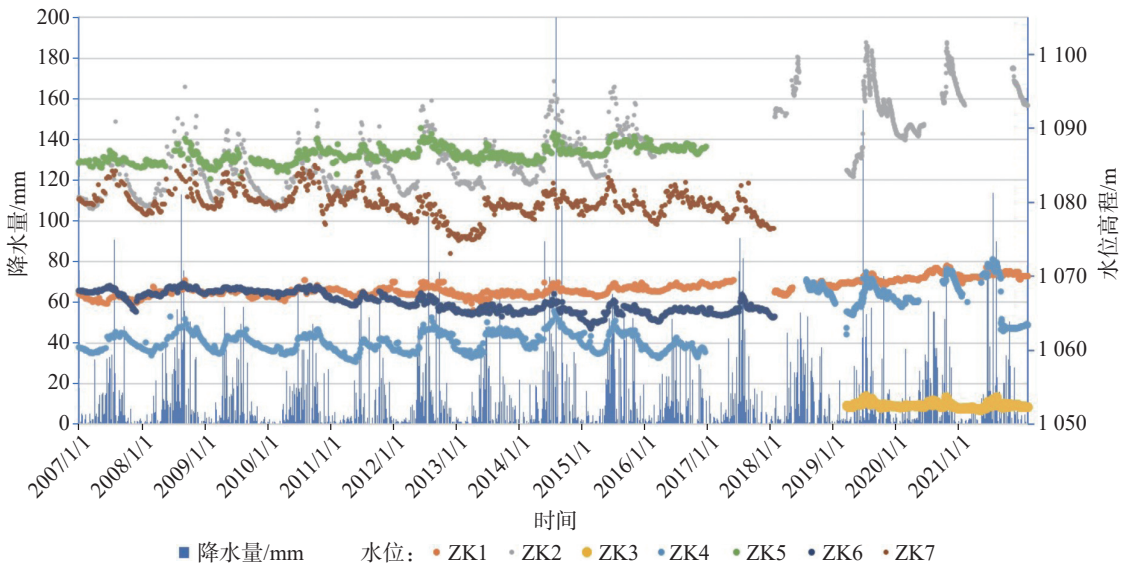


图 2 各监测点地下水水位动态及降雨量图

Fig. 2 Groundwater level dynamics at each observation point and precipitation map

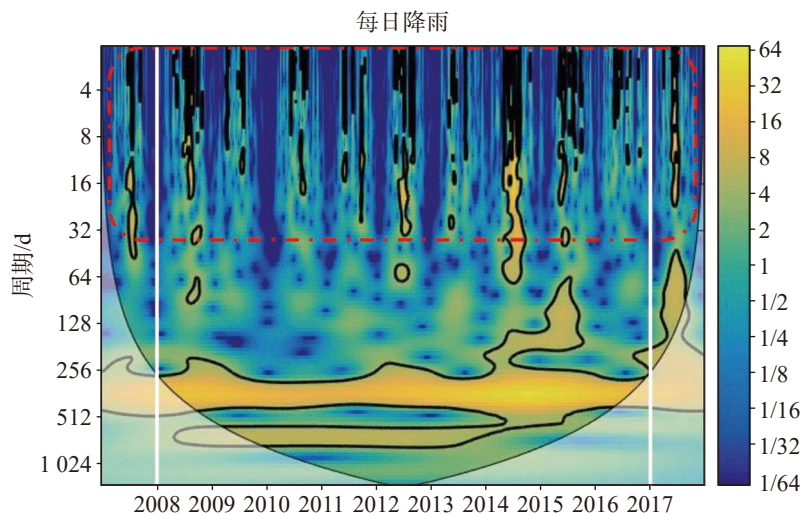


图 3 降雨连续小波变换

Fig. 3 Continuous wavelet transform of precipitation

表示能量密度的相对变化,黑色粗实线圈闭的值通过了 95% 置信水平的红噪声检验,黑色细实线下方锥形区域为小波影响锥(COI),表示连续小波变换数据边缘影响较大的区域^[22]。

降雨的连续小波变换结果如图 3,贵阳岩溶盆地区域降雨量存在 256~512 d 的主振荡周期,在 2008 年 1 月至 2017 年 1 月(图中两条白色实线的中间区域)通过了 95% 的红噪声检验,具有显著频域周期特征。降雨量连续小波变换能量密度在高频部分(图中红色虚线的区域)的变化不连续,涵盖时域短。而地下水水位监测点的连续小波变换结果如图 4,贵阳岩溶盆地区域内地下水水位同样存在 256~512 d 的主振荡周期,在高频区域内振荡周期不连续且持续时间较短,不同观测点的振荡周期具有差异(表 2)。

ZK2、ZK4 从 2009 年开始(图中白色实线)出现稳定的周期性,在 2009—2015 年间(图中白色实线与红色实线的中间区域)都表现出与降雨周期一致的 256~512 d 的振荡周期,从所处位置来看,这两个监测孔均处于贵阳市主城区的城乡结合部位,监测期内城镇开发力度较弱,人类活动对地下水的影响较小,因此地下水动态变化严格受降雨影响。ZK1 除了在 2011—2014 年(图中白色实线与红色实线中间区域)出现主振荡周期 256~512 d 外,在 2010—2012 年还出现次周期 512~1024 d(图中白色虚线与红色虚线的中间区域),该监测孔处于南部岩溶地下水系统的排泄区,出现次周期的时间段为我国西南地区的大旱年,极少降雨对排泄区水位的影响小,从而导致振荡周期变长。ZK3 位于北部系统的排泄区,在

2020 年 5 月—2021 年 7 月(图中白色实线与红色实线中间区域),其地下水的主振荡周期为 64~128 d,另外在高频区域内,于 2021.4.20—2021.10.4(图中白色虚线与红色虚线的中间区域)出现 8~64 d 次周期,该点位由于位于南明河附近,存在地表水补给,改变其地下水水位动态变化。位于贵阳岩溶盆地北部地下水系统补给径流区的 ZK5 监测点,在变换时段 2009—2016 年间,从 2013 年(图中白色实线)开始出现 256~512 d 的周期性振荡,这是由于 2013 年以前,所处区域开展市政道路(地下通道)建设,人为的排水扰动使得该监测点地下水水位不存在周期性变化,而 2013 年后,该监测点周围的地下通道建设基本结束,其地下水水位又主要受降雨控制,而表现出同降雨周期性一致的特征。ZK6 则周期性不显著,主要是该监测点位于主城区,存在城区内城市管网渗漏补给地下水(笔者在该监测点附近的贵阳市地铁三号线地下施工过程中发现城市管网渗漏补给地下水),使得该点地下水水位动态变换较大,无明显的周期性特征。ZK7 的周期性变化除在 2010 年(图中白色实线与红色实线中间区域)有 64~128 d 的变化周期外,其余时段无明显的周期特征,这主要是该区域在监测周期内多实施有基础深度较大的构建筑物(如贵州日报社大楼),从而导致局部地下水径流条件改变。

由于贵阳岩溶盆地区域内地下水及降雨的主周期均为 256~512 d,说明地下水位的周期受降雨的控制。为进一步研究地下水水位对降雨的响应情况,通过互相关分析地下水水位与降雨共同变化的显著周期,以及地下水水位对于降雨的时滞性。

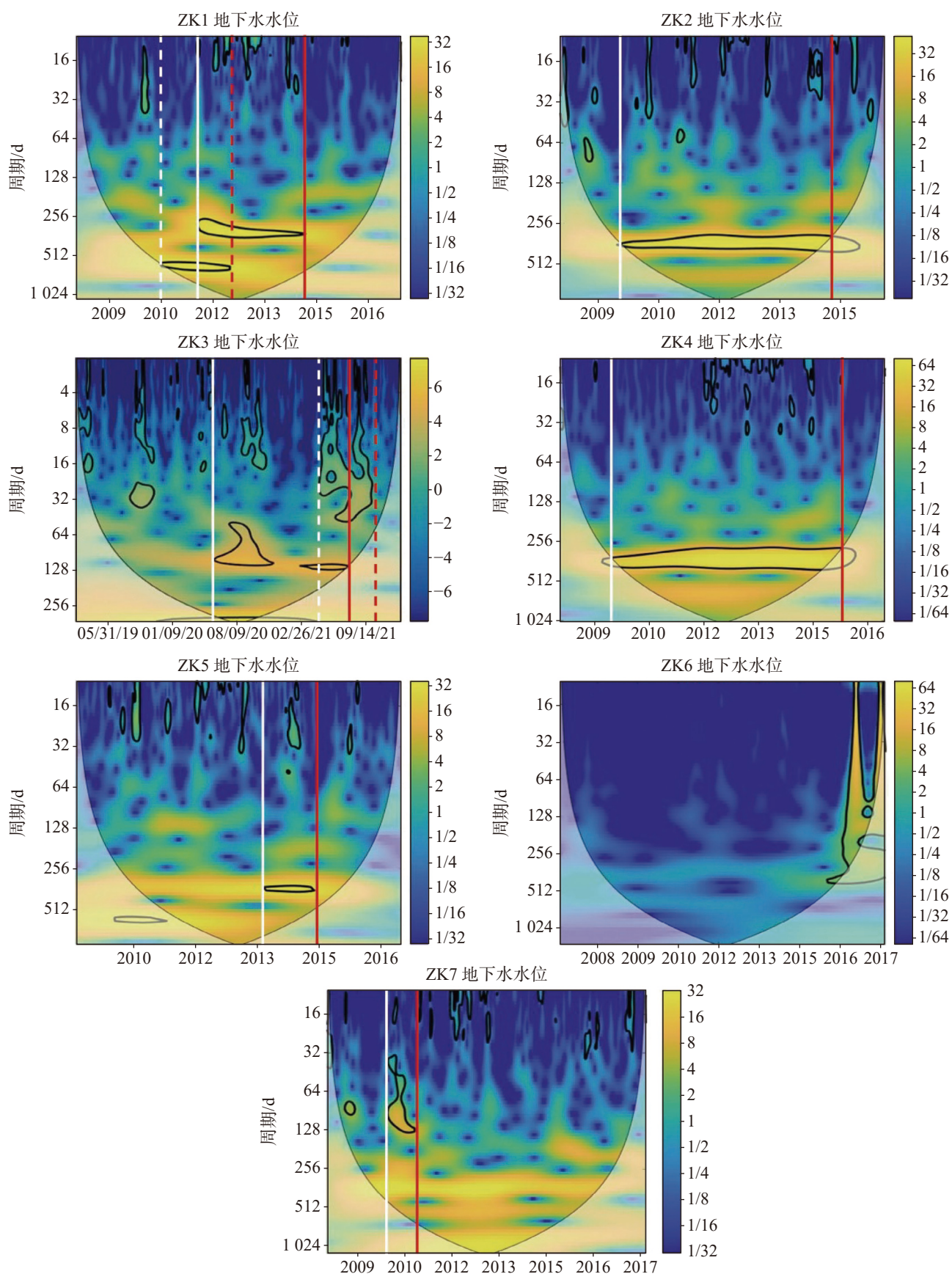


图4 地下水位连续小波变换

Fig. 4 Continuous wavelet transform of groundwater levels

表 2 地下水水位动态监测点连续小波变换的显著周期与时段

Table 2 Significant cycle and period of continuous wavelet transform of observation points of groundwater level dynamics

地下水观测点	变换时段/年.月.日	显著周期/d	显著时段/a
ZK1	2008.10.6—2017.5.2	256~512	2011—2014
ZK2	2008.10.6—2016.2.2	256~512	2009—2014
ZK3	2019.2.21—2021.12.31	64~128	2020—2021
ZK4	2008.10.6—2016.11.23	256~512	2009—2015
ZK5	2009.9.25—2016.12.3	256~512	2013—2015
ZK6	2007.1.5—2017.12.28	周期性变化不显著	—
ZK7	2008.10.6—2017.12.28	64~128	2010

4.3 地下水水位对降雨的滞后性分析

为了解地下水水位与降雨的时滞信息,对除地下水水位没有显著周期性变化的 ZK6 以外的监测点进行地下水水位—降雨的互相关分析。由于监测点 ZK1、ZK2、ZK4 地下水水位有逐日监测数据和 5 日监测数据, ZK3 只有逐日监测数据, ZK5、ZK7 只有 5 日监

测数据,所以 ZK1~ZK4 地下水水位采用逐日监测数据和降雨数据做互相关分析, ZK5、ZK7 地下水水位采用 5 日监测数据和降雨数据做互相关分析。

利用互相关分析,计算二者的互相关系数。地下水水位与降雨的互相关分析如图 5,图中结果表明 ZK1 水位对降雨的滞后时间为 3 d; ZK2 水位对降雨

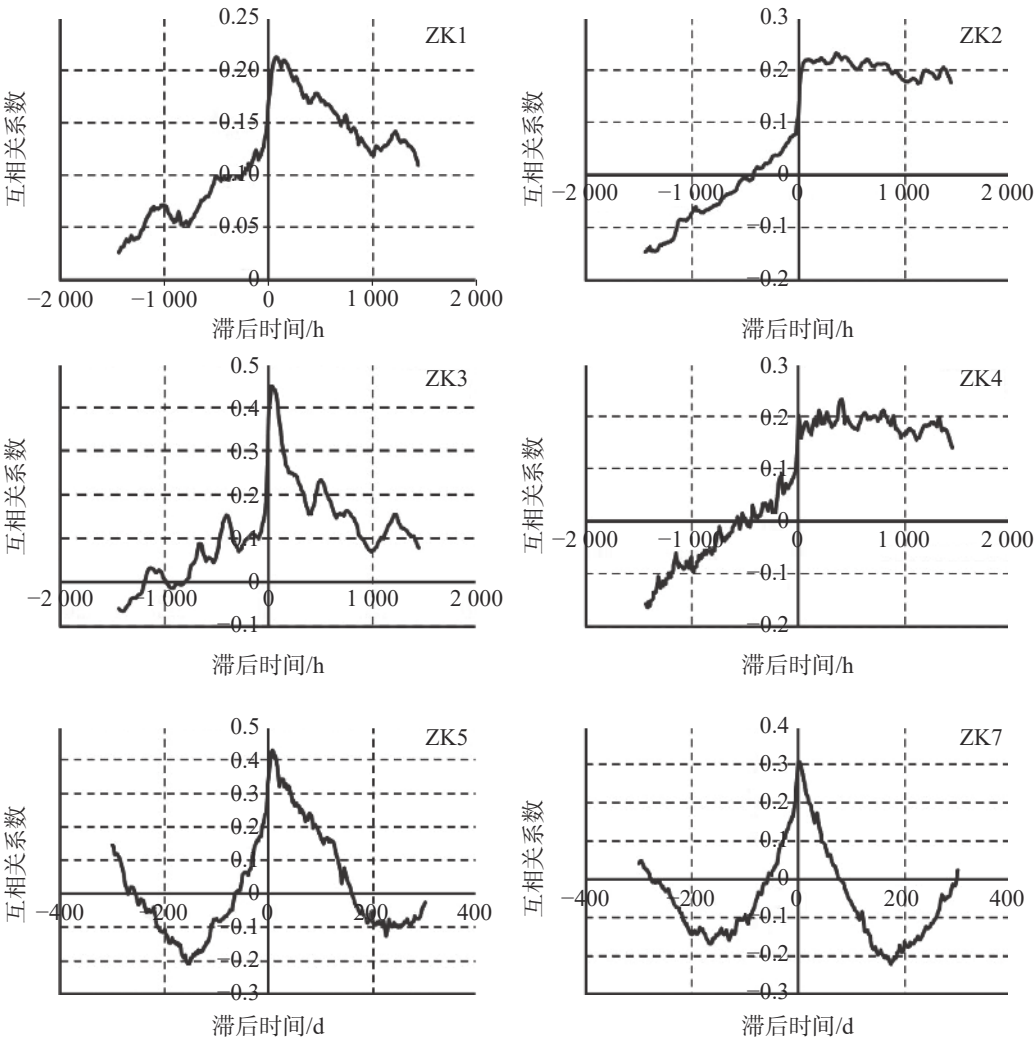


图 5 地下水水位与降雨互相关分析

Fig. 5 Correlation analysis between groundwater levels and rainfall

的滞后时间为 2.83 d; ZK3 水位对降雨的滞后时间为 1.25 d; ZK4 水位对降雨的滞后时间为 8.04 d; ZK5 水位对降雨的滞后时间为 7.7 d; ZK7 水位对降雨的滞后时间为 2.66 d。相比于常用的绘制降雨量与水位动态关系图半定量判断两者的滞后性, 互相关分析可以直接通过计算出互相关系数, 绘制互相关结果图时, 从软件中直接读取互相关系数的第一个峰值对应的滞后时间, 即水位对降雨的滞后时间, 使得定量分析的结果更为准确。

贵阳岩溶盆地的地下水位监测点以贯穿盆地东西向的南明河为分界, 划分为南、北两个岩溶地下水系统。ZK1、ZK2、ZK4 处于南部岩溶地下水系统, 其中, ZK1、ZK4 均处于排泄区, 但两者补给水的来源方向及距离都有所差异, ZK1 监测孔所处区域主要接受贵阳向斜东翼区补给, 该区域地下水径流途径较短, 补给区面积约 41 km²; ZK4 监测孔所处区域主要接受贵阳向斜西翼区补给, 该区域地下水径流途径较长, 补给面积约 60 km²; ZK2 为径流-排泄区。ZK3、ZK5、ZK7 处于北部岩溶地下水系统中, ZK5、ZK7 为径流-排泄区, ZK3 为排泄区。而同为北部系统径流-排泄区的 ZK5 水位对降雨的滞后性大于 ZK7, 这主要是由于 ZK5 的补给来源主要为乌当断裂带及其北部区域, 其来源相对于 ZK7 的补给来源更远。ZK3 作为北部系统的排泄区, 但水位对降雨的滞后时间小于北部系统的径流-排泄区, 这主要是由于 ZK3 不仅接受北北西侧的补给, 同时还接受南明河水的侧向补给所致。

通过互相关分析, 贵阳岩溶盆地地下水位与降雨的时滞性, 呈现径流-排泄区地下水水位对降雨的滞后时间为 2.66~7.70 d, 排泄区地下水水位对降雨的滞后时间为 1.25~8.04 d, 整体表现为地下水径流路径越长, 地下水水位对降雨的响应越滞后。

5 结 论

本文采用连续小波变换与互相关分析方法来探究岩溶盆地降雨-地下水水位动态变化特征, 对贵阳盆地进行实例分析, 从而定量识别区域的降雨-地下水水位周期性及时滞性。

(1) 贵阳岩溶盆地降雨量与地下水水位动态存在显著的 256~512 d 的主振荡周期, 区域地下水水位动态明显受降雨控制。

(2) 贵阳岩溶盆地地下水位动态对降雨的响应滞后性明显, 总体表现为地下水径流路径越长, 地下水水位对降雨的响应越滞后。其中径流-排泄区地下水水位对降雨的滞后时间为 2.66~7.70 d, 排泄区地下水水位对降雨的滞后时间为 1.25~8.04 d。

(3) 地下水水位动态变化的周期性主要受降雨的影响, 但其变化特征取决于区域的水文地质条件, 研究区内的两个地下水系统, 地下水水位动态变化存在差异。南部地下水系统从径流-排泄区至排泄区地下水对降雨的响应滞后性逐渐增强。而北部地下水系统, 径流-排泄区域受上游远距离降水补给的影响, 地下水水位变化较多源补给的排泄区更为滞后。

本次研究主要是利用统计学方法对贵阳盆地降雨-地下水水位周期性及时滞性进行分析讨论, 未涉及地下水系统具体的物理过程, 关于地下水水位动态变化的机制, 下一步应收集更短时间尺度的数据辅以数值模拟等手段来分析, 提高研究结果的准确性。

参考文献

- [1] 祁晓凡, 李文鹏, 李海涛, 杨丽芝. 济南岩溶泉域地下水位、降水、气温与大尺度气象模式的遥相关[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(6): 18-28.
QI Xiaofan, LI Wenpeng, LI Haitao, YANG Lizhi. Teleconnections between groundwater levels, precipitation, air temperature of the Jinan karst springs watershed and large scale climatic patterns[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(6): 18-28.
- [2] 项彩娟, 陈植华, 王涛, 黄荷, 孙帮涛, 王勇. 基于小波分析的滇东北毛坪铅锌矿充水水源识别[J]. 地质科技情报, 2019, 38(6): 231-240.
XIANG Caijuan, CHEN Zhihua, WANG Tao, HUANG He, SUN Bangtao, WANG Yong. Recognition of water source of Maoping lead-zinc mine in northeast Yunnan based on wavelet analysis[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(6): 231-240.
- [3] 杨怀德, 冯起, 郭小燕, 李勇进, 黄珊, 李会亚. 基于回归模型预测的民勤绿洲地下水位动态驱动因子分析[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(2): 98-103.
YANG Huaide, FENG Qi, GUO Xiaoyan, LI Yongjin, HUANG Shan, LI Huiya. Analysis on the variation of groundwater level and its influence factors in Minqin oasis based on the regression model[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(2): 98-103.
- [4] 李平, 卢文喜, 杨忠平. 频谱分析法在吉林西部地下水动态预报中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(4): 70-73.
LI Ping, LU Wenxi, YANG Zhongping. Application of spectrum analysis method to the prediction of groundwater regime in

- west Jilin Province[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2005, 32(4): 70-73.
- [5] Yang Y S, Li Y Y, Cui D H. Identification of karst features with spectral analysis on the seismic reflection data[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(2): 753-761.
- [6] 郭琳, 宫辉力, 朱锋, 郭小萌, 周超凡, 邱琳. 基于小波分析的地下水水位与降水的周期性特征研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2014, 30(2): 35-38.
GUO Lin, GONG Huili, ZHU Feng, GUO Xiaomeng, ZHOU Chaofan, QIU Lin. Cyclical characteristics of groundwater level and precipitation based on wavelet analysis[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2014, 30(2): 35-38.
- [7] 桑燕芳, 王中根, 刘昌明. 小波分析方法在水文学中的应用现状及展望[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(9): 1413-1422.
SANG Yanfang, WANG Zhonggen, LIU Changming. Applications of wavelet analysis to hydrology: Status and prospects[J]. *Progress in Geography*, 2013, 32(9): 1413-1422.
- [8] 祁晓凡, 王雨山, 杨丽芝, 刘中业, 王玮, 李文鹏. 近50年济南岩溶泉域地下水位对降水响应的时滞差异[J]. *中国岩溶*, 2016, 35(4): 384-393.
QI Xiaofan, WANG Yushan, YANG Lizhi, LIU Zhongye, WANG Wei, LI Wenpeng. Time lags variance of groundwater level response to precipitation of Jinan karst spring watershed in recent 50 years[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(4): 384-393.
- [9] 邵骏. 基于交叉小波变换的水文多尺度相关分析[J]. *水力发电学报*, 2013, 32(2): 22-26, 42.
SHAO Jun. Multi-scale correlation analysis of hydrological time series based on cross wavelet transform[J]. *Journal of Hydro-electric Engineering*, 2013, 32(2): 22-26, 42.
- [10] Wu D D, Di C L, Wang T J, Wang L C, Chen X. Characterization of the coherence between soil moisture and precipitation at regional scales[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, 126(8): e2020JD034340.
- [11] Yang T, Wang G. Periodic variations of rainfall, groundwater level and dissolved radon from the perspective of wavelet analysis: A case study in Tengchong, Southwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(15): 492.
- [12] Drago A F, Boxall S R. Use of the wavelet transform on hydro-meteorological data[J]. *Physics & Chemistry of the Earth*, 2002, 27(32): 1387-1399.
- [13] 王朋辉, 姜光辉, 袁道先, 汤庆佳, 张强. 岩溶地下水位对降雨响应的时空变异特征及成因探讨: 以广西桂林甑皮岩为例[J]. *水科学进展*, 2019, 30(1): 56-64.
WANG Penghui, JIANG Guanghui, YUAN Daoxian, TANG Qingjia, ZHANG Qiang. Characteristics and cause of spatial and temporal variability of karst groundwater level's response to rainfall: A case study of Zengpiyan cave site in Guilin, Guangxi, China[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(1): 56-64.
- [14] 祁晓凡, 李文鹏, 杨丽芝, 尚浩, 伊飞. 济南白泉泉域地下水位动态对降水响应的年内时滞分析[J]. *地球与环境*, 2015, 43(6): 619-627.
QI Xiaofan, LI Wenpeng, YANG Lizhi, SHANG Hao, YI Fei. The lag analysis of groundwater level anomalies to precipitation anomaly of Jinan Baiquan springs watershed[J]. *Earth and Environment*, 2015, 43(6): 619-627.
- [15] 齐欢. 济南市趵突泉与白泉地下水位相关性研究[J]. *水文*, 2020, 40(4): 79-84, 32.
QI Huan. Study on correlation between groundwater level of Baotquan Spring and Baiquan spring in Jinan City[J]. *Journal of China Hydrology*, 2020, 40(4): 79-84, 32.
- [16] 祁晓凡, 蒋忠诚, 罗为群. 典型表层岩溶水系统降水量与泉流量的交叉小波分析[J]. *地球与环境*, 2012, 40(4): 561-567.
QI Xiaofan, JIANG Zhongcheng, LUO Weiqun. Cross wavelet analysis of relationship between precipitation and spring discharge of a typical epikarst water system[J]. *Earth and Environment*, 2012, 40(4): 561-567.
- [17] 祁晓凡, 杨丽芝, 韩晔, 尚浩, 邢立亭. 济南泉域地下水位动态及其对降水响应的交叉小波分析[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(9): 969-978.
QI Xiaofan, YANG Lizhi, HAN Ye, SHANG Hao, XING Liting. Cross wavelet analysis of groundwater level regimes and precipitation-groundwater level regime in Ji'nan spring region[J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(9): 969-978.
- [18] 凤蔚, 祁晓凡, 李海涛, 李文鹏, 殷秀兰. 雄安新区地下水水位与降水及北太平洋指数的小波分析[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(6): 1-8.
FENG Wei, QI Xiaofan, LI Haitao, LI Wenpeng, YIN Xiulan. Wavelet analysis between groundwater level regimes and precipitation, North Pacific Index in the Xiongan New Area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(6): 1-8.
- [19] 齐欢. 玉符河流域地下水位与降水量的时滞分析[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(35): 54-60.
QI Huan. Time lag analysis of groundwater level and precipitation in Yufu river basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(35): 54-60.
- [20] 李严, 王家乐, 靳孟贵, 马河宽, 柳浩然, 彭涛. 运用水文时间序列分析识别济南泉域岩溶发育特征[J]. *地球科学*, 2021, 46(7): 2583-2593.
LI Yan, WANG Jiale, JIN Menggui, MA Hekuan, LIU Haoran, PENG Tao. Hydrodynamic characteristics of Jinan karst spring system identified by hydrologic time-series data[J]. *Earth Science*, 2021, 46(7): 2583-2593.
- [21] 齐欢. 平阴岩溶地下水位与降水量, 黄河水位的相关性分析[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(7): 94-100.
QI Huan. Responsive change in groundwater table in karst to precipitation and Yellow River in Pingyin county[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(7): 94-100.
- [22] Grinsted A, Moore J C, Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series[J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2004, 11: 561-566.
- [23] 孙劲松, 陈国雄, 刘天佑. 基于改进Morlet小波的MP算法在地

- 震频谱分析中的应用[J]. 地质科技情报, 2011, 30(5): 119-122.
- SUN Jingsong, CHEN Guoxiong, LIU Tianyou. MP algorithm based on improved morlet wavelet in the seismic spectrum analysis[J]. Geological Science and Technology Information, 2011, 30(5): 119-122.
- [24] Katsanou K, Lambrakis N, Tayfur G, Baba A, Describing the karst evolution by the exploitation of hydrologic time-series data[J]. Water Resources Management, 2015, 29(9): 3131-3147.
- [25] 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.
- [26] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1988, 79(1): 61-78.

Response characteristics of groundwater level dynamics to precipitation based on continuous wavelet-cross correlation analysis: A case study of the Guiyang karst basin

WANG Ying^{1,2}, SONG Xiaoqing^{1,2,3}, WANG Fei⁴, PENG Qin^{1,2}, CAO Zhendong^{1,2}, PU Xiuchao^{1,2}

(1. 111 Geological Brigade of Guizhou Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, Guiyang, Guizhou 550008, China;

2. Guizhou Geological Engineering Investigation, Design and Research Institute Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550008, China; 3. School of

Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430078, China; 4. Guiyang Public

Transport Investment and Operation Group Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract Precipitation is the main source of water supply for most groundwater systems; therefore, its spatiotemporal distributions will, to some extent, determine the dynamic characteristics of groundwater levels. Hence, conducting research on groundwater level dynamics is of great significance for the sustainable development and utilization of groundwater resources, regulation and management of surface-groundwater resources, and determination of floating resistance and anti-floating water levels in engineering construction. The Guiyang karst basin is located within the construction scope of the main urban area of Guiyang City. In order to further understand the nonlinear process of groundwater level dynamics in the karst basin area, and help improve the management of groundwater resources in this area, we collected the observation data and precipitation data of seven observation points of groundwater levels in the Guiyang karst basin in different periods from 2007 to 2021. Besides, to analyze the groundwater level dynamics on different time scales and the response of the dynamics to precipitation in the Guiyang karst basin, we adopted the continuous wavelet analysis that can quantitatively judge the periodicity of precipitation and groundwater levels, and the correlation analysis that can quantitatively calculate the lag relationship between groundwater and precipitation.

The results show as follows. (1) According to the groundwater level data from monitoring holes in the study area, the water level variations of the monitoring holes located inside the Guiyang karst basin is relatively small, with a maximum annual water level variations of about 2–7 m, because this basin, featuring relatively flat terrain, is a discharge area of the groundwater system. The edge of the Guiyang karst basin is controlled by the terrain and topography, with significant undulations. The water levels of monitoring holes located at the edge of the basin vary greatly, with the maximum variations of water level about 10–20 m over the years. In terms of the continuous wavelet transform analysis of the response characteristics of groundwater levels to precipitation in the study area, it can be concluded that the main oscillation period of precipitation is 256–512 days, which passed 95% of the red noise tests from January 2008 to January 2017, indicating significant periodic characteristics. Due to the influence of hydrogeological conditions and human activities around monitoring holes, the oscillation periods of different observation points varied. However, the groundwater level dynamics in the Guiyang karst basin were significantly controlled by precipitation, showing discontinuous and short oscillation periods in high-frequency areas, with an overall main oscillation period of 256 to 512 days. (2) In the study area, there is a significant time lag between

groundwater level variation and precipitation. That is, the longer a groundwater runoff distance is, the more hysteretic the response of groundwater level to precipitation becomes. The groundwater level variation in the runoff–discharge area lags behind precipitation by 2.66–7.7 days, by 1.25–8.04 days in the discharge area. Because the regional hydrogeological conditions of the two groundwater systems in the study area are different, the responses of the two groundwater systems in the north and south to precipitation are also different. In the southern groundwater system, the time lag of the response of groundwater level variations to precipitation gradually increases from the runoff–discharge area to the discharge area. In the northern groundwater system, due to the effect of the long-distance precipitation recharge from upstream, the groundwater level of runoff–discharge area changes more slowly than that of discharge area with multiple sources of recharge.

Key words wavelet analysis, cross correlation analysis, groundwater level dynamics, karst basin

(编辑 张玲)

(上接第 821 页)

flatland and bare land. If the test failed, multiple sets of data would be applied for non-parametric testing and multiple comparisons through the `kruskal.test` function and `PMCMRplus` package. These two groups of data were applied for the wilcoxon rank sum test by the `wilcox.test` function.

Daily dynamics of microclimate of bare land and earth flatland obviously differed on the spatial and temporal scales. When solar radiation was the strongest in summer, temperature at each spatial height of earth flatland was significantly higher than that of bare land ($P<0.05$), and the relative humidity was significantly lower than that of bare land ($P<0.05$), which led to warming and dehumidifying conditions. However, air temperature in the bottom space of earth flatland was significantly lower than that in bare land ($P<0.05$), and the relative humidity was significantly higher than that of bare land ($P<0.05$) from 10:00 to 16:00 in winter, which resulted in cooling and humidifying effects. The daily variation degree of microclimate in bare land and earth flatland was significantly different in response to different seasons. The daily temperature range of the upper layer of earth flatland was significantly higher than that of bare land ($P<0.05$) in summer, indicating that the earth flatland intensified the daily change of air temperature. However, the daily temperature and humidity range of the lower layer of the earth flatland was significantly lower than that of the bare land ($P<0.05$) in winter, showing that the earth flatland buffered the daily change of the microclimate.

At present, bedrock-exposed areas of rocky desertification are under a more severe and changeable microclimate change background. Therefore, based on the differences in the microclimate effects of heterogeneous underlying surfaces, priority should be given to introduce early fast-growing karst plants to accelerate surface vegetation coverage and improve local microclimate conditions, which would play a positive role in buffering microclimate changes in rocky desertification areas and accelerating vegetation restoration.

Key words rocky desertification, underlying surface, microclimate, temperature and humidity, vegetation restoration

(编辑 黄晨晖)