

赵振华, 罗振江, 黄林显, 等. 基于小波分析的济南西郊地下水位对降雨响应机制研究[J]. 中国岩溶, 2023, 42(5): 931-939.

DOI: 10.11932/karst20230506

基于小波分析的济南西郊地下水位 对降雨响应机制研究

赵振华¹, 罗振江¹, 黄林显^{2,3}, 邢立亭^{2,3}, 李洪涛¹, 孙虹洁¹

(1. 山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队, 山东 济南 250014;

2. 济南大学水利与环境学院, 山东 济南 250022; 3. 山东省地下水数值模拟与

污染控制工程技术研究中心, 山东 济南 250022)

摘要: 降雨是地下水的主要补给来源, 准确掌握地下水位对降雨的响应机制对地下水资源的科学管理具有重要意义。文章利用济南市西郊2010—2019年月降水资料及第四系和岩溶地下水月水位资料进行季节特征统计及小波分析, 结果表明: ①济南市秋季地下水位最高, 第四系和岩溶平均水位分别为30.28 m和29.74 m; 春季地下水位最低, 第四系和岩溶平均水位分别为29.44 m和28.78 m; ②连续小波变换分析得出降雨的主震荡周期为0.98~1.17 a, 第四系地下水的主震荡周期为0.73~1.16 a和1.17~1.74 a, 岩溶地下水的主震荡周期为0.87~1.09 a和0.46~1.23 a, 主震荡周期并不完全一致, 反映出济南市西郊地下水动态不仅受降雨的影响, 同时还受人类活动等其它因素的影响; ③交叉小波变换分析表明降雨与地下水位的主共振周期均为1 a左右; 第四系和岩溶含水层水位动态分别落后于降雨144.14 d和172.62 d, 两者仅相差28.48 d, 水力联系较为密切。以上结论说明, 济南市西郊地下水动态对降雨的响应是显著和稳定的。

关键词: 济南西郊; 降雨量; 地下水水位; 小波分析; 响应机制

中图分类号: P641.2; P426.6 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2023)05-0931-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

济南以泉而生, 泉是济南的生存源头^[1-2]。近年来, 随着社会经济的快速发展, 济南市岩溶地下水持续面临着水资源短缺、水质污染严重等各种问题, 严重威胁着泉域的保护和地下水资源的利用^[3]。降雨是岩溶地下水的主要补给来源, 但随着全球气候的异常变动和人类活动的加剧, 降雨的时空分布产生重要变化, 造成岩溶地下水动态对降雨的响应机制也随之变化^[4-5]。通过地下水动态对降雨响应机制的

研究可以揭示地下水系统动态变化的影响因素及内在机理, 能够补充对区域水文地质条件的认识, 对于提高济南市地下水资源开采潜力和进行泉域保护具有重要意义。前人对济南泉域岩溶地下水动态进行了很多研究: 孟庆晗等^[6]采用示踪实验、泉水水温、水位测定、水质指标测试及电导率频率分析等方法, 研究泉水补给来源的差异性; 徐军祥等^[7]采用数值模型模拟济南泉域岩溶裂隙介质中地下水的迁移转化规律并在此基础上提出地下水资源优化配置等保泉建议; 邢立亭等^[8]采用示踪试验、岩溶发育分析、

基金项目: 国家自然科学基金(42272288); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2019MD029); 山东省高校院所创新团队项目(2021GXRC070)

第一作者简介: 赵振华(1982—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事水文地质和环境地质研究。E-mail: 16607713@qq.com。

通信作者: 邢立亭(1966—), 男, 博士, 教授, 从事地下水科学与工程研究。E-mail: stu_jnedu@126.com。

收稿日期: 2023-04-20

水质测试等方法,研究济南泉域地下水的动态特征并揭示泉水补给来源的混合比例。上述方法虽然从不同角度对地下水动态研究进行了探讨,并取得很多有益成果,但也存在一定局限性:如电导率频率分析及水质指标测试容易受水质污染及水文地球化学作用的制约;数值法往往无法精确刻画岩溶含水层的强烈非均质性,影响其模拟精度;示踪实验具有效率低、周期长和成本高等缺点,尤其是在济南市实施地下水严格禁采措施后,此类方法更加难以进行。

随着小波理论的形成和快速发展,小波分析已被广泛应用于气象学、地学、水文学、金融学、医学等研究领域^[9-13]。小波变换方法提供了一个可以调变的时频窗口,不仅能充分揭示时间序列的周期性、趋势性及时滞性等时频特征,且能精确刻画时间序列动态变化与影响因素的关系^[14-15]。本研究首先对济南市西郊降雨和地下水水位进行分季节统计,揭示水文气象要素在不同季节的变化程度;然后分别采用连续小波变换和交叉小波变换,研究降雨与地下水位的周期特性和不同时间尺度下的相关关系,揭示济南西郊地下水系统对降水的响应机制(周期性和时滞特性等),补充对区域水文地质条件的认识。

1 研究区概况

济南泉域地处鲁中南山区北部,地势南高北低,地质构造上为一单斜构造。南部古老变质岩系组成的泰山山脉为区域地表水和地下水的分水岭,构成济南单斜构造水文地质区的南边界,东边界至东坞断裂,西边界至马山断裂(长清西关以北为透水段),北以济南岩浆岩体和石炭、二叠系煤系地层为界,面积为1486 km²^[16-17](图1)。济南市西郊位于济南泉域的东北侧,区内玉符河、沙河流域地下水补给充沛,初步估计补给量大于90万 m³·d⁻¹^[18],是济南泉域的重要补给通道,因此准确揭示济南西郊地下水对降水的响应机制对于提高济南市地下水开采潜力和进行泉域保护具有重要意义。济南西郊整体地形南高北低,地层主要为寒武纪中上统、奥陶纪下统及第四系(图2);其中第四系地层主要分布于玉符河、沙河两侧,厚度在20.0~25.0 m之间,其上层主要为黄褐色耕土(0~1.8 m)、粉质黏土(0.8~1.8 m),渗透性较差;下层主要为黄褐色砂砾石层(2.2~25.0 m),渗透性良好^[19]。研究区植被覆盖以中覆盖度为主,主要

包括耕地、草地和林地,但有部分建设用地在河道滩地和河漫滩上。

2 研究方法和数据来源

2.1 研究方法

小波分析(Wavelet Analysis)属于时频局部化分析方法,它为水文要素时间序列非平稳随机信号特征的提取提供了可能。通过对小波母函数进行平移、伸缩运算,能够准确揭示同一时间序列的时频特征及不同时间序列在时频域上的互相关关系^[20-22]。

2.1.1 连续小波变换

通过连续小波变换可以揭示两个时间序列的多时间尺度结构。连续小波变换的公式为:

$$w_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

式中: $w_f(a, b)$ 是小波的变换系数; 函数 $|a|^{-1/2} \psi \left(\frac{t-b}{a} \right)$ 是母小波 $\psi(t)$ 的尺度 a 和位移 b 的伸缩; $\psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right)$ 为 $\psi \left(\frac{t-b}{a} \right)$ 的复共轭; a 为尺度参数; $1/a$ 对应频率 $\bar{\omega}$; b 表示时间参数; 反映在时间上的平移; R 表示实数集。

2.1.2 交叉小波变换

交叉小波变换是将交叉谱分析与小波变换相结合,能够从多时间尺度揭示两个时间序列在时频域中的相互关系。交叉小波变换将两个时间序列 x_n 和 y_n 定义为 $W_{XY} = W^X W^{Y*}$, 其中 * 为复共轭, 对应交叉小波谱为 $|W_{XY}|$ 。两个时间序列的背景功率谱分别为 P_k^X 和 P_k^Y , 则具有背景功率谱的两个时间序列的交叉小波定义为:

$$D \left(\frac{|W_n^X(s) W_n^{Y*}(s)|}{\sigma_X \sigma_Y} < p \right) = \frac{Z_v(p)}{v} \sqrt{P_k^X P_k^Y} \quad (2)$$

式中: σ_X 、 σ_Y 分别为 x_n 和 y_n 的标准差; $Z_v(p)$ 是概率 P 的置信度水平。

交叉小波的平均相位角定义为:

$$a_m = \arg(X, Y) = \arg \left[\sum_{i=1}^n \cos a_i, \sum_{i=1}^n \sin a_i \right] \quad (3)$$

2.2 数据来源

地下水水位数据来源于位于济南市西郊陡沟街

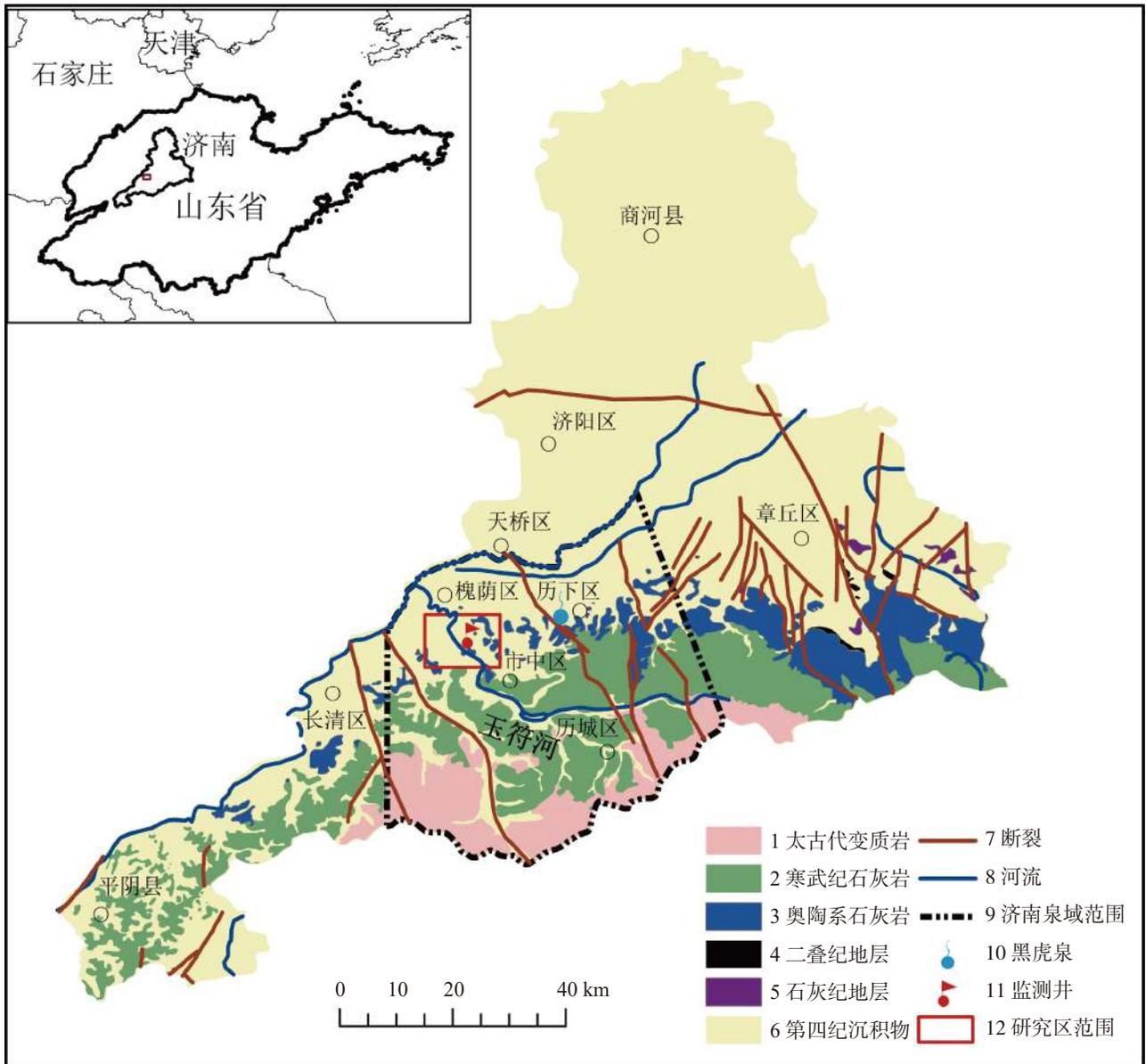


图 1 济南市水文地质图

Fig. 1 Hydrogeology of Jinan City

道红卫村的 1 口第四系监测井和 1 口岩溶水位监测井的逐月监测数据(如图 1 和图 2 所示, 两井相距 600 m 左右, 在图中用 1 个点表示), 监测序列为 2010 年 1 月至 2019 年 12 月; 降雨资料为相应的 2010 年 1 月至 2019 年 12 月逐月降水数据, 来源于中国气象科学数据中心(<http://data.cma.cn>), 降雨和地下水水位逐月监测数据如图 3 所示。

3 试验结果与分析

3.1 降雨和地下水水位分季节总体特征

前人研究指出济南泉域地下水补、径、排的演变

规律会随季节的交替而变化^[8], 所以对研究区 2010—2019 年的月均降雨量和月均地下水位值 (120 组数据) 进行分季节统计评价, 定量分析水文气象要素在不同季节的变化程度。

从表 1 可以看出, 济南市降雨主要集中在夏季, 占全年降雨量的 67.5% 左右, 其中夏季最大降雨量为 795.8 mm, 最小降雨量为 309.3 mm; 冬季降雨最少, 占全年降雨量的 4.3% 左右, 其中冬季最大降雨量为 85.4 mm, 最小降雨量为 7.9 mm; 降雨量的波动幅度夏季最大, 冬季最小。

从表 2 可以看出, 济南市不同季节秋季地下水水位最高, 其中第四系和岩溶地下水水平平均水位分别

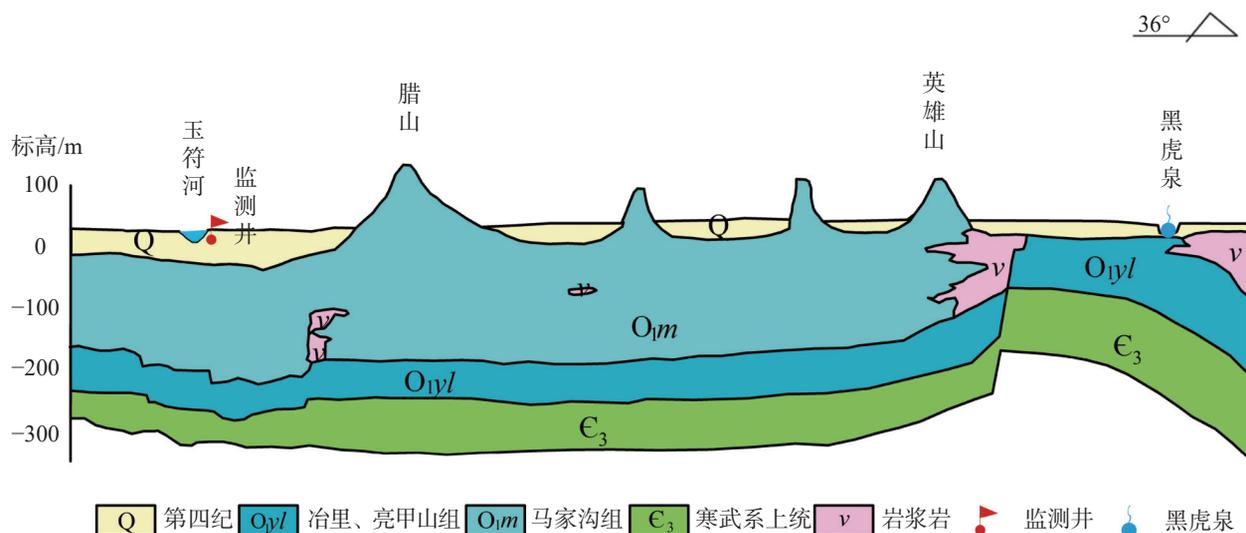


图2 研究区剖面图

Fig. 2 Cross section of the study area

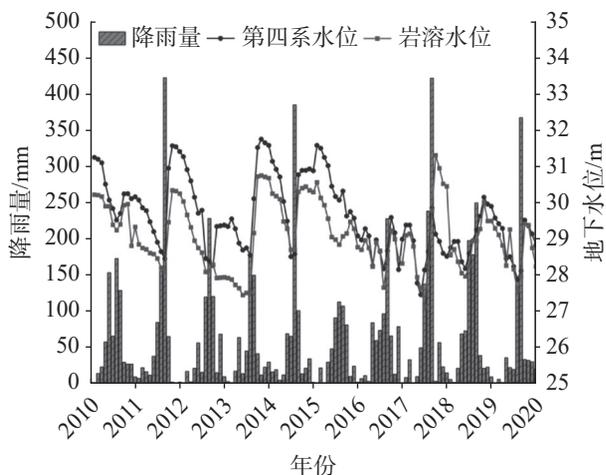


图3 降雨和地下水水位逐月监测数据统计图

Fig. 3 Monthly monitoring data of precipitation and groundwater levels

表1 2010—2019年降雨量分季节统计特征 (mm)

Table 1 Seasonal statistical characteristics of precipitation from 2010 to 2019 (mm)

时段	年均值	最大雨量	最小雨量	标准差
春季	107.16	232.10	57.60	54.43
夏季	489.52	795.80	309.30	154.18
秋季	96.85	201.90	48.60	44.88
冬季	31.19	85.40	7.90	23.98

为 30.28 m 和 29.74 m, 最高水位分别为 31.45 m 和 30.67 m, 最低水位分别为 28.62 m 和 27.92 m; 春季地下水水位最低, 其中第四系和岩溶地下水平均水位分别为 29.44 m 和 28.78 m, 最高水位分别为 30.91 m 和 29.91 m, 最低水位分别为 28.07 m 和 27.48 m。济南市地下水动态出现季节性波动是人为因素和自然

表2 2010—2019年地下水水位分季节统计特征/m

Table 2 Seasonal statistical characteristics of groundwater levels from 2010 to 2019/m

含水层	时段	年均	最高值	最低值	标准差
第四系	春季	29.44	30.91	28.07	0.93
	夏季	30.26	31.40	28.65	0.94
	秋季	30.28	31.45	28.62	1.11
	冬季	29.98	31.40	28.69	1.01
岩溶	春季	28.78	29.91	27.48	0.78
	夏季	29.59	30.54	28.10	0.79
	秋季	29.74	30.67	27.92	0.87
	冬季	29.18	30.08	27.74	0.78

因素共同作用的结果: 自3月份进入春季以后, 气温升高, 蒸发量大且降水量少, 同时随着春耕的开始, 大量抽取地下水用于农业灌溉, 导致地下水水位下降; 夏季开始后虽然降水较为丰富, 但降雨入渗补给含水层具有一定的滞后性(一般为2—5个月左右), 造成地下水水位秋季最高。

3.2 降雨和地下水水位主震荡周期分析

降雨和地下水水位在连续小波变换后得到的小波功率谱图如图4和图5所示。图中横坐标为年份, 纵坐标为周期(单位为年), 右侧图例柱代表连续小波变换系数(无量纲), 红色和蓝色分别表示小波能量密度的峰值和谷值, 揭示时频变换的动态性和局部性特征。黑色细实线下方的锥形区域为小波影响锥(COI), 该部分小波功率谱受到边缘效应的影响, 所反映出的周期特性具有很大的不确定性; 黑色粗

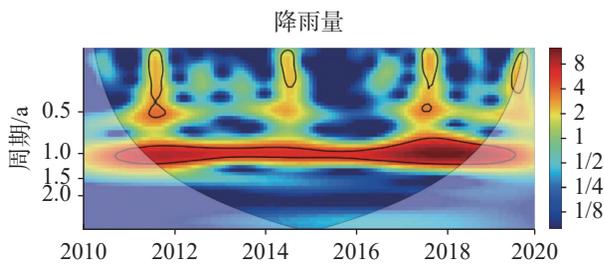


图 4 降雨连续小波变换功率谱图

Fig. 4 Power spectrum chart of continuous wavelet transform of precipitation

实线圈闭的区域表明其通过了 95% 置信水平的红噪声检验(即置信水平满足统计学意义)。

由图 4 和图 5 可知,济南市西郊降雨量存在着 0.98~1.17 a 的主振荡周期,而第四系和岩溶含水层则分别存在着 0.73~1.16 a 及 1.17~1.74 a 和 0.87~1.09 a 及 0.46~1.23 a 的主振荡周期。降雨与第四系和岩溶地下水的主振荡周期并不完全一致,反映出济南市西郊地下水动态虽然仍主要受降雨的控制,但同时还受人类活动等其它因素的影响。分析其原因:一方面随着经济的快速发展,济南市城区范围不断扩大,地下水补给区由于地面硬化造成降水入渗面积减少,使得大气降水与地下水的循环转化动态关系发生显著变化;另一方面济南泉域虽然实施了水源地禁采与地下水限采措施,目前地下水开采量大幅减少,但在春耕时期仍然存在抽取地下水用于农业灌溉的现象。

济南市西郊降雨量在 2011 年 4 月—2018 年 10

月通过了 95% 红噪声的检验,表明其具有显著的周期性特征。第四系含水层在 2011 年 4 月—2015 年 1 月通过了 95% 红噪声的检验,但从 2015 年 2 月以后没有通过 95% 红噪声的检验,说明孔隙含水层由于受人类活动等外部因素的影响,其对降雨的响应受到干扰;岩溶含水层仅在 2013 年 3 月—2014 年 10 月和 2016 年 6 月—2018 年 10 月通过了 95% 红噪声的检验,说明岩溶含水层受地下水开采及人工回补等外部因素的影响更为显著。

3.3 降雨量和地下水位的时序响应机制分析

交叉小波变换主要用来在时间-频率空间中找到时间序列里周期性强度一致的区域,可以很好地反映两个不同时间序列变化之间的相关性。为了获得济南市西郊地下水水位对降雨的时序响应机制,分别对 2010—2019 年降雨量和第四系及岩溶地下水水位进行交叉小波变换分析。图 6 为进行交叉小波变换后得到的功率谱图。

从图 6 可以看出,降雨与第四系和岩溶地下水水位在 1 a 左右的时间尺度上交叉小波变换共振关系明显,其高功率区分布连续并集中,且在大部分时间段内均通过了 95% 红噪声检验,进一步说明降雨仍然是济南市西郊地下水的主要补给来源,其地下水动态仍然主要受降雨的影响。

通过分析交叉小波变换功率谱图中箭头的方向可以揭示降水与地下水位之间的相位关系,其中当

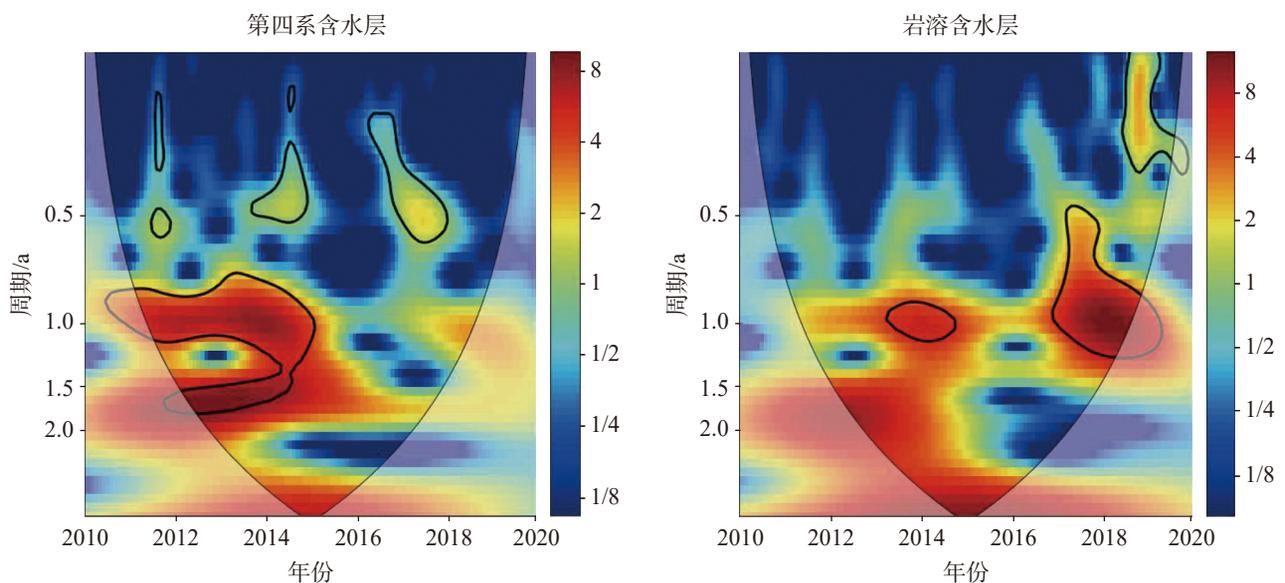


图 5 地下水水位连续小波变换功率谱图

Fig. 5 Power spectrum chart of continuous wavelet transform of groundwater level

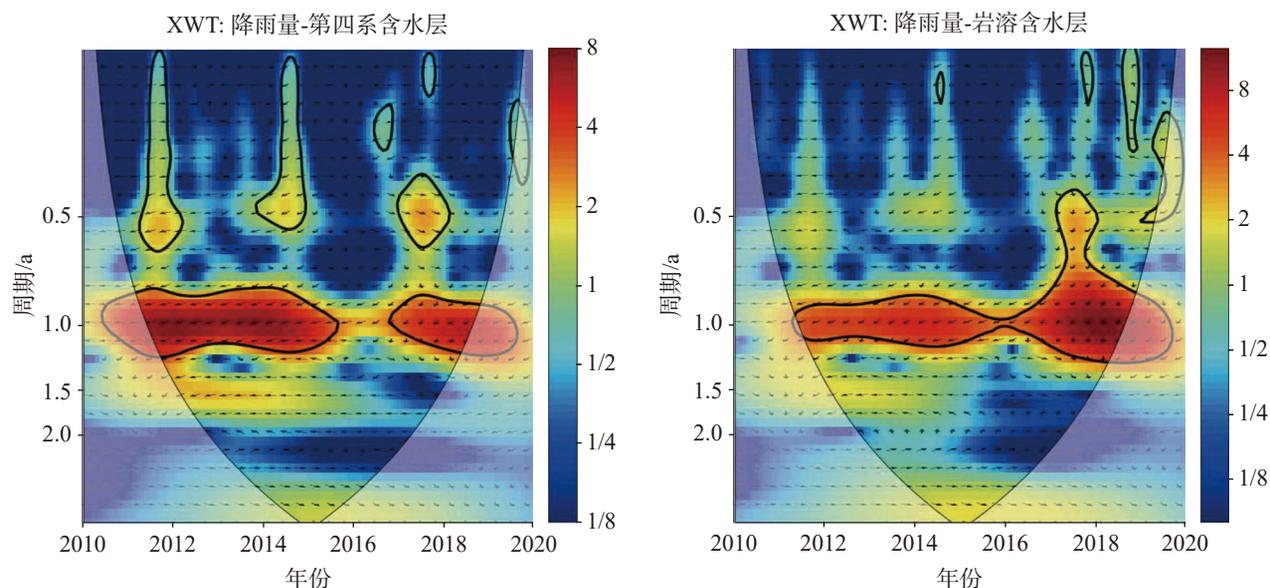


图6 降雨与地下水水位交叉小波变换功率谱图

Fig. 6 Power spectrum chart of cross-wavelet transform of precipitation and groundwater level

箭头向右时表示两者之间的相位相同;箭头向下表示地下水滞后降雨 $0.25a$ (2π 弧度代表 $1a$);箭头向左表示两者相位相反;箭头向上代表地下水水位提前降雨 $0.25a$ 。通过对两者相位关系的分析,能够

获得 2 个变量间的平均相位角差(交叉相位 \pm 卷积误差),从而可以对地下水动态对降雨的时滞特征进行定量评价,并能够进一步定性评价降雨与地下水含水层联系的紧密性。平均相位角差如表 3 所示。

表 3 降雨与地下水水位交叉小波变换统计表

Table 3 Statistics of cross-wavelet transform of precipitation and groundwater level

点组	通过95%红噪声检验时段	相位差/rad	滞后时间/d
第四系含水层	2011年1月—2015年7月 2016年10月—2018年10月	2.48 ± 0.084	144.14 ± 4.88
岩溶含水层	2011年7月—2018年11月	2.97 ± 0.102	172.62 ± 5.96

从表 3 可以看出,济南市西郊第四系地下水位对降水的滞后时间为 144.14 d。第四系地下水位对降雨的响应时间较长,分析其原因主要是因为本次研究所用到的红卫村第四系监测井距离玉符河较近,包气带厚度较大(如图 2),且包气带上层有一层粉质黏土层(0.8~1.8 m),对降水补给造成一定程度的滞缓;此外,该监测井位于红卫村中,由于建筑施工、道路硬化等也影响了降雨对地下水的有序补给。岩溶地下水位对降雨的滞后时间为 172.62 d 左右,与第四系地下水位的响应时间相差 28.48 d,相差时间较短,推测第四系含水层与岩溶含水层的水力联系较为密切,两个含水层具有较好的互补关系;通过图 3 第四系和岩溶地下水位动态曲线可以看出,两者的动态变化较为一致,岩溶地下水位的动态虽有所滞后,但滞后时间较短,进一步说明两个含水层具有较

好的互补关系;此外,研究区监测井钻孔资料也显示第四系和岩溶含水层之间没有明显的隔水层,并且岩溶含水层裂隙发育、富水性强,同时受断裂的切割,导水能力强。

3.4 讨论

(1)通过连续小波变换可以看出,地下水水位波动仍然呈现出较为明显的周期性(12个月),说明降雨仍然是地下水水位波动的主要影响因素;通过交叉小波变换可以看出,第四系和岩溶含水层水位波动的时滞时间较短,揭示出第四系含水层与岩溶含水层的水力联系较为密切。但是随着济南市经济的发展和人口的增长,其城区面积已经由 1949 年的 13.2 km^2 增加到 2015 年的 390 km^2 ,地下水补给区由于地面硬化造成降水入渗面积减少,使得地下水的

补给来源、渗流途径发生变化,导致降雨与地下水的主震荡周期并不完全一致。

(2)通过连续小波变换表明第四系含水层从 2015 年 2 月以后没有通过 95% 红噪声的检验,岩溶含水层仅在 2013 年 3 月—2014 年 10 月和 2016 年 6 月—2018 年 10 月通过了 95% 红噪声的检验;此外,通过济南西郊地下水水位和降雨分季节总体特征分析可以看出地下水水位在春季最低。上述结果一方面说明地下水含水层由于受人类活动等外部因素的影响,其对降雨的响应受到干扰;另一方面说明要进一步加强春耕时抽取地下水用于农业灌溉等活动的监测和控制。

(3)通过交叉小波变换可以看出,第四系含水层与岩溶含水层具有紧密的水力联系,因此在进行济南市西郊人工补源地点选择时,可考虑玉符河等能直接补给第四系含水层的地段进行,以此来有效提高地下水人工回灌的效率。

4 结 论

(1)济南市西郊降雨主要集中在夏季,占全年降雨量的 67.5% 左右。秋季地下水水位最高,第四系和岩溶地下水平均水位分别为 30.28 m 和 29.74 m;春季地下水水位最低,第四系和岩溶地下水平均水位分别为 29.44 m 和 28.78 m。

(2)济南市西郊降雨存在着 0.98~1.17 a 的主震荡周期,并在 2011 年 4 月—2018 年 10 月通过了 95% 红噪声的检验,表明其具有显著的周期性特征。第四系含水层存在着 0.73~1.16 a 和 1.17~1.74 a 的主震荡周期,且在 2011 年 4 月—2015 年 1 月通过了 95% 红噪声的检验;岩溶含水层存在着 0.87~1.09 a 和 0.46~1.23 a 的主振荡周期,但仅在 2013 年 3 月—2014 年 10 月和 2016 年 6 月—2018 年 10 月通过了 95% 红噪声的检验。以上结果一方面说明济南西郊地下水动态仍主要受降雨影响,同时也揭示出第四系和岩溶含水层均受地下水开采及人工回补等外部因素的影响,且岩溶含水层所受影响更为显著。

(3)降雨与第四系和岩溶地下水在 1 a 左右的时间尺度上交叉小波变换共振关系明显,大部分时间段都通过了 95% 红噪声检验;第四系地下水对降雨的滞后时间为 144.14 d 左右,而岩溶地下水对降雨的滞后时间为 172.62 d 左右,二者的时间差为

28.48 d,说明第四系含水层与岩溶含水层具有较好的互补关系。

参考文献

- [1] 冯亚伟,陈洪年,贾德旺.山东省岩溶地下水系统划分及构造模式[J].水文,2020,40(6):83-88.
FENG Yawei, CHEN Hongnian, JIA Dewang. Division and structural pattern of karst groundwater system in Shandong Province[J]. Journal of China Hydrology, 2020, 40(6): 83-88.
- [2] 王志恒,梁永平,申豪勇,赵春红,唐春雷.自然与人类活动叠加影响下晋祠泉域岩溶地下水动态特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2021,51(6):1823-1837.
WANG Zhiheng, LIANG Yongping, SHEN Haoyong, ZHAO Chunhong, TANG Chunlei. Dynamic characteristics of karst groundwater in Jinci spring under superimposed influence of natural and human activities[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(6): 1823-1837.
- [3] 王瑞青.济南趵突泉泉域岩溶地下水污染风险识别及防控区划研究[D].长春:吉林大学,2021.
WANG Ruiqing. Study on risk identification and zoning prevention and control of karst groundwater pollution in Baotu Spring area of Jinan[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [4] 赵一,邹胜章,申豪勇,周长松,樊连杰.会仙湿地岩溶地下水系统水位动态特征与均衡分析[J].中国岩溶,2021,40(2):325-333.
ZHAO Yi, ZOU Shengzhang, SHEN Haoyong, ZHOU Changsong, FAN Lianjie. Dynamic characteristics and equilibrium of water level of the karst groundwater system beneath the Huixian wetland[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(2): 325-333.
- [5] 王大伟,乔小娟,高波,贾小军.山西龙子祠岩溶泉流量动态特征与影响因素分析[J].中国岩溶,2021,40(3):420-429.
WANG Dawei, QIAO Xiaojuan, GAO Bo, JIA Xiaojun. Dynamic characteristics and influence factors of discharge of the Longzici karst spring in Shanxi Province[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(3): 420-429.
- [6] 孟庆晗,王鑫,邢立亭,董亚楠,朱恒华,武朝军.济南四大泉群补给来源差异性研究[J].水文地质工程地质,2020,47(1):37-45.
MENG Qinghan, WANG Xin, XING Liting, DONG Ya'nan, ZHU Henghua, WU Chaojun. A study of the difference in supply sources of the four groups of springs in Jinan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(1): 37-45.
- [7] 徐军祥,邢立亭.济南泉域岩溶水数值预报与供水保泉对策[J].地质调查与研究,2008,31(3):209-213.
XU Junxiang, XING Liting. Numerical prediction for the karst groundwater and spring protection in Jinan karst spring region[J]. Geological Survey and Research, 2008, 31(3): 209-213.
- [8] 邢立亭,周娟,宋广增,邢学睿.济南四大泉群泉水补给来源混

- 合比探讨[J]. 地学前缘, 2018, 25(3): 260-272.
- XING Liting, ZHOU Juan, SONG Guangzeng, XING Xuerui. Mixing ratios of recharging water sources for the four largest spring groups in Jinan[J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(3): 260-272.
- [9] Adebayo T S, Oladipupo S D, Adeshola I, Rjoub H. Wavelet analysis of impact of renewable energy consumption and technological innovation on CO₂ emissions: Evidence from Portugal[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(16): 23887-23904.
- [10] Afzal P, Ahmadi K, Rahbar K. Application of fractal-wavelet analysis for separation of geochemical anomalies[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2017, 128: 27-36.
- [11] Li Q F, He P F, He Y C, Han X Y, Zeng T S, Lu G B, Wang H J. Investigation to the relation between meteorological drought and hydrological drought in the upper Shaying river basin using wavelet analysis[J]. *Atmospheric Research*, 2020, 234: 104743-104752.
- [12] Bouri E, Shahzad S J H, Roubaud D, Kristoufek L, Lucey B. Bitcoin, gold, and commodities as safe havens for stocks: New insight through wavelet analysis[J]. *The Quarterly Review of Economics and Finance*, 2020, 77: 156-164.
- [13] Lyashenko V V. Wavelet analysis of cytological preparations image in different color systems[J]. *Open Access Library Journal*, 2017, 4(7): 1-9.
- [14] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(1): 61-78.
- [15] Walnut D F. An introduction to wavelet analysis[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013.
- [16] 侯新宇, 邢立亭, 孙蓓蓓, 李常锁. 济南市岩溶水系统分级及市区与东西郊的水力联系[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2014, 28(4): 300-305.
- HOU Xinyu, XING Liting, SUN Beibei, LI Changsuo. Karst water system classification in Jinan and hydraulic connection between downtown and east and west suburbs[J]. *Journal of University of Jinan (Science & Technology)*, 2014, 28(4): 300-305.
- [17] 徐军祥, 邢立亭, 佟光玉, 范立芹. 济南泉域地下水环境演化与保护[J]. 水文地质工程地质, 2004(6): 69-73.
- XU Junxiang, XING Liting, TONG Guangyu, FAN Liqin. Groundwater environment evolution and its conservation in Jinan spring catchment[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2004(6): 69-73.
- [18] 商广宇. 济南泉水与东、西郊地下水关系研究[J]. 水文地质工程地质, 1988(3): 52.
- SHANG Guangyu. Study on the relationship between Jinan spring and groundwater in the eastern and western suburbs[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1988(3): 52.
- [19] 管清华, 汪玉静, 陈学群, 曾桂华, 辛光明. 济南玉符河重点渗漏带岩溶地下水补给特征与保护[J]. 中国岩溶, 2023, 42(2): 233-244.
- GUAN Qinghua, WANG Yujing, CHEN Xuequn, ZENG Guihua, XIN Guangming. Recharge characteristics and protection of karst groundwater in major leakage area of Yufu river in Jinan[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(2): 233-244.
- [20] 迟光耀, 邢立亭, 侯新宇, 黄林显, 杨奕. 基于小波分析与Mann-Kendall法的岩溶大泉动态研究[J]. 中国岩溶, 2018, 37(4): 515-526.
- CHI Guangyao, XING Liting, HOU Xinyu, HUANG Linxian, YANG Yi. Study of large karst springs using the wavelet analysis and Mann-Kendall methods[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(4): 515-526.
- [21] 李传生, 祁晓凡, 王雨山, 安永会, 邢立亭. 我国北方典型岩溶地下水位对降水及气象指数的响应特征: 以鲁中地区为例[J]. 中国岩溶, 2019, 38(5): 643-652.
- LI Chuansheng, QI Xiaofan, WANG Yushan, AN Yonghui, XING Liting. Response characteristics of typical karst groundwater levels of central Shandong Province to precipitation and climatic index[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(5): 643-652.
- [22] 宋书克, 魏立巍, 辛星召, 娄渊知. 基于小波变换分析小浪底大坝渗流监测数据[J]. 人民黄河, 2013(2): 95-97.
- SONG Shuke, WEI Liwei, XIN Xingzhao, LOU Yuanzhi. Analysis on dam seepage monitoring data for Xiaolangdi project based on wavelet transformation[J]. *Yellow River*, 2013(2): 95-97.

Research on the response mechanism of groundwater level to rainfall in the western suburb of Jinan based on wavelet analysis

ZHAO Zhenhua¹, LUO Zhenjiang¹, HUANG Linxian^{2,3}, XING Liting^{2,3}, LI Hongtao¹, SUN Hongjie¹

(1. 801 Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources, Jinan, Shandong 250014, China; 2. School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan, Shandong 250022, China; 3. Engineering Technology Institute for Groundwater Numerical Simulation and Contamination Control, Jinan, Shandong 250022, China)

Abstract With the rapid development of social economy, karst groundwater in Jinan City keeps facing various problems such as water resource shortage and water pollution, which seriously threatens the protection of springs and the utilization of groundwater resources. The western suburb of Jinan City is located at the northeast edge of Jinan

spring catchment; the Yufu river and Shahe river abundant in groundwater are important recharge sources for Jinan spring catchment. Therefore, it is very important to accurately reveal the response mechanism of groundwater to precipitation in the western suburb, which can help to improve the potential of groundwater exploitation and spring protection. In this study, the monthly precipitation data from 2010 to 2019 in the western suburb of Jinan City and the monthly water level data of Quaternary and karst groundwater are used to carry out seasonal statistical characteristics and wavelet analysis.

Results show that, (1) According to the seasonal statistical characteristics of precipitation and groundwater, the precipitation in the western suburb of Jinan City mainly concentrates in summer, accounting for about 67.5% of the annual precipitation. The groundwater level is the highest in autumn, with the average water levels of the Quaternary and karst being 30.28 m and 29.74 m, respectively. The groundwater level is the lowest in spring, with the average water levels of the Quaternary and karst being 29.44 m and 28.78 m, respectively. Seasonal fluctuation of groundwater dynamics in the study area is the coupling effect of human and natural factors. Since the beginning of spring in March, precipitation has decreased and the amount of evaporation has increased along with the rise of temperature. At the same time, a large amount of groundwater has been extracted for agricultural irrigation, resulting in a drop in the groundwater level. Although the precipitation is relatively abundant after the beginning of summer, the infiltration of precipitation into the aquifer has a certain lag (generally about 2–5 months), resulting in the fact that the highest groundwater level occurs in autumn. (2) Through continuous wavelet transform analysis, it can be concluded that the main oscillation period of precipitation is 0.98–1.17 a and it passed the 95% red noise test from April 2011 to October 2018, indicating that it has significant periodic characteristics. The main oscillation period of Quaternary groundwater is 0.73–1.16 a and 1.17–1.74 a and it passed the 95% red noise test from April 2011 to January 2015. The main oscillation period of karst groundwater is 0.87–1.09 a and 0.46–1.23 a, but it passed the 95% red noise test only from March 2013 to October 2014 and from June 2016 to October 2018. The main oscillations periods are not completely consistent with groundwater level and precipitation, reflecting that the dynamics of groundwater in the study area is not only affected by precipitation, but also by other factors such as human activities. (3) Cross wavelet transform analysis shows that the main resonance period of precipitation and groundwater level is about 1 year. The groundwater level dynamics of Quaternary and karst aquifers lag behind precipitation by 144.14 d and 172.62 d, respectively, with the difference of only 28.48 d, which may reveal that the hydraulic connection between Quaternary and karst aquifer is very close. The dynamic curves of the Quaternary and karst groundwater level show that the dynamic changes of the two are relatively consistent, although the dynamics of the karst groundwater level lags behind, but with relative short lagging time, which further indicates that these two aquifers have a good complementary relationship. In addition, the drilling data of monitoring wells in the study area show that there is no obvious water-resisting layer between the Quaternary and the karst aquifer, and the karst aquifer has well-developed fissures, strong water-abundance, and is cut by faults, with strong water-conducting capacity. All the above results show that the response of groundwater level to precipitation is significant and stable.

Key words the western suburb of Jinan, precipitation, groundwater level, wavelet analysis, response mechanism

(编辑 杨杨 黄晨晖)