第 42 卷 第 5 期	E	7	国	岩	溶	Vol. 42 No. 5
2023 年 10 月	CARS	DLC	GIG	CA	SINICA	Oct. 2023

刘春伟,齐欢,林广奇,等.基于小波变换方法的济南市区泉水影响因素研究[J].中国岩溶,2023,42(5):995-1004. DOI:10.11932/karst20230510

# 基于小波变换方法的济南市区泉水影响因素研究

刘春伟<sup>1,2</sup>,齐 欢<sup>1,2</sup>,林广奇<sup>1,2</sup>,柳浩然<sup>1,2</sup>,逄 伟<sup>1,2</sup>,于令芹<sup>1,2</sup>,马河宽<sup>1,2</sup> (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(山东省地矿工程勘察院),山东济南 250014; 2.山东省地下水环境保护与修复工程技术研究中心,山东济南 250014)

摘 要:济南市区泉水的喷涌主要受大气降水和地下水开采等因素的影响,为查明降水量和地下水 开采对济南市区泉水的影响,选取济南市区、济南西郊和济南东郊的水源地十年开采量数据,以及 同期市区泉水位动态观测数据和降水量数据,采用交叉小波变换、小波相干谱和多元小波相干谱的 方法进行分析。结果表明:①市区泉水位与降水量、地下水开采量均存在约1a的频域周期,市区泉 水位滞后于降水量133.22 d,市区泉水位与济南西郊开采量和济南东郊开采量的响应时滞分别为 125.43 d和83.85 d,济南市区泉水与济南西郊地下水、济南东郊地下水存在水力联系;②济南市区泉 水位与降水量的平均小波相干值(AWC)为0.58,市区泉水位与济南西郊开采、市区开采和济南东郊 开采的AWC分别为0.47、0.40和0.32, PASC分别为13.90%、16.81%和10.09%,在研究期开采条件下, 降水量和岩溶地下水开采量对市区泉水位的影响明显,市区开采对市区泉水位的影响最大,济南东 郊开采对市区泉水位的影响最小;③在两种影响因素的作用下,降水量和济南西郊开采量、降水量 和市区开采量两种组合可以作为市区泉水位变化的最大影响因素;在三种影响因素的作用下,降水 量和济南西郊开采量、市区开采量组合可以成为市区泉水位变化的最大影响因素。

文章编号:1001-4810(2023)05-0995-10

济南因其泉水而闻名,在历史上泉水资源为济

南市的社会经济发展做出了重要贡献<sup>[1]</sup>。近年来,

随着城市人口急剧增加,城市供水压力巨大,供需

矛盾日益突出,岩溶地下水的超采导致岩溶地下 水位的降低和泉水流量的减少<sup>[2]</sup>。降水入渗是北

方岩溶地区岩溶地下水的主要补给源,泉水水位 和泉流量的变化与降水密切相关<sup>[3]</sup>。查明大气降

水和地下水开采与济南泉水的关系,对于可持续

0 引 言

地开发利用地下水资源和保护泉水的持续喷涌具 有重要的意义。

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

多年来,众多学者针对我国岩溶大泉的成因及 动态变化等做了大量研究,唐春雷等<sup>(4)</sup>对娘子关泉 的地下水动态变化规律及其特征进行了分析,并探 讨了其成因;杨晓俊<sup>[5]</sup>在对柳林泉流量动态分析的 基础上,利用时间序列分析法中的移动平均模型和 指数平滑模型预测了还原泉流量的动态变化;孙才 志等<sup>[6]</sup>应用模糊线性回归与时间序列分析方法,建 立了晋祠泉流量与各源汇项之间的模糊关系,提出

# 基金项目:第七届青年人才托举工程(2021QNRC001);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基金项目(801KY2022-2);济南市 城乡水务局趵突泉泉域水文地质深化研究项目(SDGP37010000202202000259)

第一作者简介:刘春伟(1994—),男,工程师,主要从事水文地质研究。 E-mail: 1060248967@qq.com。 通信作者:林广奇(1982—),男,高级工程师,主要从事水文地质研究。 E-mail: 271743007@qq.com。 收稿日期: 2023-04-20 节流是晋祠泉复流的重要措施。以上这些研究对岩 溶大泉的持续喷涌作出了巨大贡献。而国内外学者 针对我国北方"岩溶泉水博物馆"的泉城济南也作了 大量研究,徐源等<sup>[7]</sup>采用累积距平分析、Mann-Kendall 法、集合经验模态分解方法对济南市降水量 变化特征进行综合分析;祁晓凡等<sup>[8]</sup>采用 Mann-Kendall 趋势检验、突变检验分析、Hurst 指数分析济 南泉域地下水位与降水量的相关性:秦品瑞<sup>19</sup>采用 Visual Modflow 软件建立济南岩溶水系统地下水数 值模拟模型,计算不同降水组合下其他各岩溶地下 水水源地的最优开采量。济南泉水受大气降水和地 下水开采等因素的综合影响<sup>[10]</sup>,而以往的大多数研 究主要集中在单一影响因素的个体效应上,对于大 气降水,以及不同区域地下水开采对区域泉水位的 响应关系和影响程度却相对缺乏,难以反映多种影 响因素对市区泉水位动态的协同作用。

交叉小波变换(XWT)和小波相干谱(WTC)被 广泛应用于同步分析两个时间序列的频域和时域, 多元小波相干(MWC)<sup>[11]</sup>是在小波相干谱的基础上 发展起来的一种比较新的方法,通过与多光谱相干谱<sup>[12]</sup> 和多变量经验模态分解<sup>[13]</sup>等方法进行了比较,发现 该方法能够更好地确定非平稳和非线性地球物理时 间序列上的局部多变量和尺度特定关系,已在气象 学<sup>[14]</sup>、金融学<sup>[15]</sup>、水文学<sup>[16]</sup>等领域得到广泛应用。

本文选取济南市区、济南西郊和济南东郊的水 源地十年开采量,同期市区泉水位动态观测和降水 量数据,采用交叉小波变化、小波相干谱和多元小波 相干谱的方法对大气降水、地下水开采与济南市区 泉水的时滞关系、综合影响、影响程度等进行分析, 以期为济南市地下水开发利用、优化布局和泉水保 护提供依据。

# 1 研究区概况

趵突泉泉域面积 1 658.90 km<sup>2</sup>,北部边界为奥陶 系灰岩顶板在岩体中的-400 m 埋深界线,东部边界 为东坞断裂,西部边界为马山断裂,南部边界为地表 分水岭<sup>[7]</sup>(图 1)。地层倾向总体向北,地形南高北低,



图 1 趵突泉泉域地质构造图 Fig. 1 Geological structure of the Baotu Spring area

南部山区巨厚的石灰岩地层接受降水及地表水的入 渗补给,岩溶地下水自南向北径流,受市区附近火成 岩岩体的阻隔,沿灰岩裂隙通道上涌出地面,形成济 南市区四大泉群<sup>[17]</sup>。

历史上济南市民长期以优质的地下水为生活饮 用水源,从20世纪70年代初开始,地下水开采规模 逐渐扩大。1982年以后水源地开采布局基本稳定, 自来水公司、工业自备井的总开采量基本在55万 m<sup>3</sup>·d<sup>-1[18]</sup>。出于保泉的需要,2001年鹊山水库和玉清 湖水库建成后,济南市区水源地和西郊水源地相继 关闭或大规模减采。

# 2 研究方法

小波变换能清晰地揭示出隐藏在水文、气象等时间序列中的多种变化周期,并反映在不同时间尺度的变化趋势,对未来发展趋势进行定性估计<sup>[19]</sup>。 交叉小波变换(XWT)重点突出市区泉水位与影响因 素在时频域中高能量区的相互关系,小波相干谱 (WTC)则重点突出市区泉水位与影响因素在时频域 中低能量区的相互关系<sup>[20-21]</sup>。

# 2.1 数据来源

本次选取 1992—2001 年济南西郊(峨眉山、大 杨庄、腊山),济南市区(泉城路、解放桥、饮虎池、历 南)和济南东郊(华能路)水源地开采量数据,同期市 区泉水位动态观测数据和降水量数据,为本次研究 所能使用的最长的数据序列(图 2,表 1),后期水源 地开采量较小,难以进行有效的分析,故不被采用。 地下水开采量数据来自济南市自来水公司;市区泉 水位为山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质 工程地质大队每月1日、6日、11日、16日、21日、 26日监测数据;降水量资料来自中国气象数据网 (http://data.cma.cn)公布的降水量月累积数据。

# 2.2 交叉小波变换

对两个时间序列  $X=\{x_1,x_2,\dots,x_n\}$ 和  $Y=\{y_1,y_2,\dots,y_n\}$ 进行连续小波变换,得到结果  $W_n^X$ 和  $W_n^Y$ ,则交叉 小波谱定义为:

$$W_n^{XY}(s) = W_n^X(s) W_n^{Y*}(s)$$
(1)

$$s = \sqrt{-2\ln\left(\sqrt{X^2 + Y^2}/n\right)} \tag{2}$$

式中:\*为复共轭; | *W*<sup>XY</sup><sub>n</sub> | 为对应的交叉小波功率; *s* 为小波相位角的标准偏差。

交叉小波相位角定义为:

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

# 2.3 小波相干谱

小波相干谱可以定义为:



Fig. 2 Comprehensive chart of spring water level, groundwater exploitation, and precipitation in the Baotu Spring area from 1992 to 2001

表 1	趵突泉泉域降水量和泉水位、地下水开采量数据统计表	

Table 1 Statistics of precipitation, spring water level and groundwater exploitation quantity in the Baotu Spring area

年份	年降水 总量/mm	泉区平均 水位/m	济南西郊(峨眉山、 大杨庄、腊山水源地) 日平均开采量/万m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>	市区(泉城路、解放桥、 饮虎池、历南水源地) 日平均开采量/万m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>	济南东郊(华能路 水源地)日平均 开采量/万m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>
1992	541.10	26.22	23.26	10.45	0.00
1993	834.20	25.37	22.65	10.94	0.00
1994	872.20	27.29	25.06	11.21	0.00
1995	596.80	27.29	23.92	10.65	0.00
1996	834.00	27.47	23.00	10.58	0.00
1997	618.10	26.17	23.53	10.76	0.00
1998	772.50	26.19	22.53	11.09	1.62
1999	574.80	25.82	23.77	11.16	2.40
2000	721.20	23.84	20.81	8.99	1.83
2001	599.30	25.59	12.88	6.02	1.81

$$R_n^2(s) = \frac{\left| S\left(s^{-1} W_i^{XY}(s)\right) \right|^2}{S\left(s^{-1} \left| W_i^X(s) \right|^2 \right) \cdot S\left(s^{-1} \left| W_i^Y(s) \right|^2 \right)}$$
(4)

式中: S 为平滑窗口; s 为小波相位角的标准偏差;  $|S(s^{-1}W_i^{XY}(s))|^2$ 为两时间序列在某一频率下波振幅的 交叉积;  $S(s^{-1}|W_i^X(s)|^2)$ 和 $S(s^{-1}|W_i^y(s)|^2)$ 为两时间序列 振动波的振幅; \*为复共轭。

# 2.4 多元小波相干谱

由于一种自然现象经常会受到多种因素的共同 影响,因此有必要将小波相干谱扩展到多元小波相 干谱。设*X*为多个自变量,*Y*为一个因变量,对于尺 度*s*和位置 τ,多元小波相干谱可定义为:

$$\rho_m^2(s,\tau) = \frac{\overleftarrow{W}^{Y,X}(s,\tau)\overleftarrow{W}^{Y,X}(s,\tau)^{-1}\overleftarrow{W}^{Y,X}(s,\tau)^*}{\overleftarrow{W}^{Y,Y}(s,\tau)}$$
(5)

式中:  $\widehat{W}^{r,x}(s,\tau)$ 为自变量 *X*和因变量 *Y*的平滑交叉 小波功率谱矩阵;  $\widehat{W}^{x,x}(s,\tau)$ 为自变量 *X*的平滑自适 应交叉小波功率谱矩阵;  $\widehat{W}^{r,y}(s,\tau)$ 为因变量 *Y*的平 滑小波功率谱; \*为复共轭。本文所采用的计算方法 和程序主要参考 Grinsted<sup>[18]</sup> 和 Hu<sup>[8]</sup>等的研究成果, 小波相干谱显著性检验采用以红噪声为标准谱的 Monte Carlo 方法。

# 3 结果及分析

#### 3.1 交叉小波变换

通过进行交叉小波变换可以分析市区泉水位与 影响因素在时频域上的共振周期、显著时段和相位 关系。图 3 中右侧图例表示交叉小波功率谱密度 (无量纲),黑色的粗轮廓表示能量密度较高且通过 α=0.05 的红色噪音标准谱显著性检验,细黑弧线为 小波影响锥(COI)边界,内部为有效谱值区。通过计 算交叉小波变换的平均相位角差(交叉相位±卷积误 差),定量分析泉水位与影响因素之间的响应关系。 箭头方向反映两个时间序列的相位关系,从左向右 表示两者相位相同,说明泉水位与影响因素之间不 存在时间滞后;从右向左表示两者相位相反,说明市 区泉水位滞后于影响因素 1/2 周期;垂直向上说明市 区泉水位提前于影响因素 1/4 周期。

从交叉变换的结果可以看出(图 3):在研究期内, 市区泉水位与降水量、地下水开采量均存在约 1 a 的 频域周期。市区泉水位与降水量在通过 95% 红噪声 检验且 COI 外时段存在 0.69~1.16 a 的频域周期,在 一个水文年(即 1 a)内,市区泉水位滞后于降水量 133.22±2.31 d;市区泉水位与地下水开采量在通过 95% 红噪声检验且位于 COI 外时段存在 0.82~ 1.23 a 的频域周期,市区泉水位与济南西郊开采量和 济南东郊开采量的响应时滞分别为 125.43±12.69 d 和 83.85±6.94 d,济南市区泉水与济南西郊地下水、 济南东郊地下水存在水力联系。市区泉水位与济南 西郊开采量、市区泉水位与市区开采量的交叉小波 变换也存在 0.39~0.58 a 的分散低能量区,且通过 95% 红噪声检验,反映了济南水源地开采的季节性 特征。



图 3 市区泉水位与降水量、地下水开采量的交叉小波变换 Fig. 3 Cross-wavelet transform of urban spring water level, precipitation and groundwater exploitation quantity

# 3.2 小波相干谱

对市区泉水位与降水量、地下水开采量进行小 波相干分析,分析市区泉水位与影响因素在全时段 的变化特征。图 4 中右侧的色阶柱表示两个时间序 列的显著性(0~1),值越大两个时间序列的相关性越 强。箭头向右表示同一相位的正相关性,箭头向左 表示同一相位的负相关性,颜色越深,相关性越强。 通过计算整个小波尺度-位置域的小波相干性,可以 得出平均(或多元)小波相干值(AWC或MWC),而 通过计算 95% 显著性水平检验的平均小波相干值与 整个小波尺度-位置域的比值,可以进一步求得显著 相干性百分比面积(PASC)<sup>[11,22]</sup>。利用平均(或多元) 小波相干值(AWC或MWC)和显著相干性百分比面 积(PASC),可以评估降水量、地下水开采量在不同 尺度上对市区泉水位的影响程度。

从小波相干谱的结果可以看出(图 4):研究期内,市区泉水位、降水量和市区开采量在 0.65~1.46 a时间尺度上具有较强的连续显著相关性 且通过了 95% 的显著水平检验,相关系数达到 0.9

以上。市区泉水位滞后于降水量,是由于泉水补给 区接受大气降水和地表水的入渗补给后,地下水由 南往北运动,在市区岩体接触带以泉水的形式排泄, 地下水的径流路径越长,市区泉水位对降水量的 响应时间越长[23]。市区水源地距离泉水较近,地 下水的开采将直接导致泉水位的降低。在1.74~ 2.89 a 的长周期范围内, 市区泉水位与济南西郊、济 南东郊地下水开采量在开采时段内存在显著的相关 关系,相关系数都在0.8以上,反映了当年的地下水 开采减少了地下水的储存量,对次年的市区泉水位 产生一定影响;而在小于 0.5 a 的短周期范围内,小 波相干谱揭示了更多的局部相干性。小波相干分析 结果与研究区地下水位动态变化规律基本吻合, 1992—1998年济南西郊和市区开采量增加,泉水位 明显降低;伴随着1998年东郊水源地的开采,由于 岩溶地下水位的滞后效应,1999年泉水位明显降低, 且因 1999 年 3 月 — 2001 年 9 月降水量减少及农田 灌溉大范围开采地下水,即使市区和西郊开采量明 显减少,市区地下水位也一直处于趵突泉出流标高



图 4 市区泉水位与降水量、地下水开采量的小波相干谱 Fig. 4 Wavelet coherence spectrum of urban spring water level, precipitation and groundwater exploitation quantity

26.8 m 以下,因此,创造了济南泉水持续断流 926 d 的最高记录<sup>[24]</sup>。

通过计算 AWC 和 PASC 得出(表 2),市区泉水 位与降水量的 AWC 和 PASC 最大,分布为 0.58 和 35.39%,主要是大气降水是岩溶水系统主要的补给 来源,市区泉水位受到降水量影响直接。市区泉水 位与济南西郊开采量、市区开采量和济南东郊开采 量的 AWC 分别为 0.47、0.40 和 0.32, PASC 分别为 13.90%、16.81% 和 10.09%,当 AWC 最大时,对应的 PASC 可能不是最大的<sup>[22]</sup>。济南西郊水源地距离市 区泉水相对较远,两者之间通过隐伏于火成岩的三 山子组地层存在密切的水力联系,研究期内峨眉山、 大杨庄、腊山水源地平均 22 万 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>的岩溶地下水 开采量对市区泉水有较大的影响;市区水源地与市 区泉水距离较近,且下伏的含水岩组裂隙岩溶发育,研究期内泉城路、解放桥、饮虎池、历南水源地平均10万m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>的岩溶地下水开采量会对市区泉水产生直接影响;济南东郊华能路水源地在1998—2001年 仅有平均1.90万m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>的开采量,但整个东郊岩溶 地下水开采量可达20~25万m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>,虽然与市区泉水 之间受火成岩舌状侵入体的影响,但产生的降落漏 斗向南部补给区扩展,袭夺市区泉水的补给量<sup>[25]</sup>,也 会对市区泉水产生一定的影响。

总体而言,研究期内降水量和岩溶地下水开采 量对市区泉水位的影响明显;对于不同位置的地下 水开采,市区开采量对市区泉水位的影响最大,其次 是济南西郊开采量对市区泉水位的影响,而济南东 郊开采量对市区泉水位的影响最小。

Table 2 A WC and PASC for the wavelet concretence

变量	AWC	PASC/%	变量	AWC	PASC/%
市区泉水位-降水量	0.58	35.39	市区泉水位-市区开采量	0.40	16.81
市区泉水位-济南西郊开采量	0.47	13.90	市区泉水位-济南东郊开采量	0.32	10.09

### 3.3 多元小波相干谱

同小波相干谱相比,在多种影响因素的组合下, 多元小波相干谱存在更多的能量振荡区域<sup>[14]</sup>。多元 小波相干值(MWC)会随着控制因素数量的增加而 增加,而 PASC 不一定会增加<sup>[11]</sup>,如果一个额外的因 素导致 PASC 至少增加 5%,则被认为是显著的<sup>[26]</sup>。

本次计算两种、三种和四种影响因素组合的 MWC和PASC(图5,表3),从结果可以看出:同小波 相干谱相比,在两种影响因素的综合作用下产生的 MWC和PASC均有所增加,且PASC增长值超过 5%。降水量和济南西郊开采量组合产生的 MWC 最大,为 0.85;降水量和市区开采量组合产生的 PASC 最大,为 53.42%;表明这两种组合可以作为市区泉水 位变化的最大影响因素。在三种影响因素的综合作 用下,降水量和济南西郊开采量、市区开采量组合产 生的 MWC 达到 0.91, PASC 为 54.04%, PASC 增长 值超过 5%。在四种影响因素的综合作用下, MWC 达到最大值 0.94, 而 PASC 值却有所减少,一个原因 是由于添加额外的因素后,增加了具有统计学意义 的 PASC 阈值<sup>[27]</sup>,另一个原因是由于影响因素之间共



#### 图 5 市区泉水位与降水量、地下水开采量的多元小波相干谱

Fig. 5 Multiple wavelet coherence spectrum of urban spring water level, precipitation and groundwater exploitation quantity

表 3	多元小波相干值和显著性区域面积百分比

Table 3 MWC and PASC for the multiple wavelet coherence

变量	MWC	PASC/%
市区泉水位降水量济南西郊开采量	0.85	48.69
市区泉水位降水量市区开采量	0.83	53.42
市区泉水位降水量济南东郊开采量	0.81	52.53
市区泉水位降水量济南西郊开采量济南东郊开采量	0.90	42.01
市区泉水位降水量济南西郊开采量-市区开采量	0.91	54.04
市区泉水位降水量济南西郊开采量济南东郊开采量市区开采量	0.94	48.55

线性引起的重叠效应降低了部分因素的方差贡献<sup>[26]</sup>。 多元小波相干谱表明,在研究期开采条件下,降水量 和济南西郊开采量、市区开采量组合为市区泉水位 变化的最大影响因素。

# 4 结 论

(1)通过交叉小波变换得出市区泉水位与降水 量、地下水开采量均存在约1a的频域周期。市区泉 水位滞后于降水量133.22 d,市区泉水位与济南西郊 开采量和济南东郊开采量的响应时滞分别为125.43 d 和83.85 d。

(2)小波相干谱结果显示,市区泉水位与降水量的AWC为0.58,市区泉水位与济南西郊开采、市区 开采和济南东郊开采的AWC分别为0.47、0.40和 0.32, PASC分别为13.90%、16.81%和10.09%。在 研究期开采条件下,降水量和岩溶地下水开采量对 市区泉水位的影响明显,市区开采对市区泉水位的 影响最大,济南东郊开采对市区泉水位的影响最小。

(3)多元小波相干谱结果显示,在研究期开采条件下,两种影响因素的作用下,降水量和济南西郊开采量、降水量和市区开采量两种组合可以作为市区泉水位变化的最大影响因素;在三种影响因素的作用下,降水量和济南西郊开采量、市区开采量组合产生的 MWC 达到 0.91, PASC 增长值超过 5%,该组合可以作为市区泉水位变化的最大影响因素。

#### 参考文献

- Zhang Z X, Wang W P, Qu S S, Huang Q, Liu S, Xu Q Y, Ni L
   D. A new perspective to explore the hydraulic connectivity of karst aquifer system in Jinan spring catchment, China[J]. Water, 2018, 10(10): 1368.
- [2] 郭艺,秦大军, 王枫, 甘甫平, 闫柏琨. 基于时间序列分析法的 岩溶泉水位预测[J]. 中国岩溶, 2021, 40(4): 689-697.
  GUO Yi, QIN Dajun, WANG Feng, GAN Fuping, YAN Baikun.
  Karst spring location prediction based on time series analysis[J].
  Carsologica Sinica, 2021, 40(4): 689-697.
- [3] Xing L T, Huang L X, Chi G Y, Yang L Z, Li C S, Hou X Y. A dynamic study of a karst spring based on wavelet analysis and the Mann-Kendall trend test[J]. Water, 2018, 10(6): 698.
- [4] 唐春雷,晋华,梁永平,赵春红,申豪勇,潘尧云,景泽.娘子关泉域岩溶地下水位变化特征及成因[J].中国岩溶,2020, 39(6):810-816.

TANG Chunlei, JIN Hua, LIANG Yongping, ZHAO Chunhong, SHEN Haoyong, PAN Yaoyun, JING Ze. Characteristics and causes of karst groundwater level change in Niangziguan spring basin[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(6): 810-816.

- [5] 杨晓俊. 基于时间序列分析的柳林泉流量预测[J]. 人民黄河, 2017, 39(11): 99-102.
   YANG Xiaojun. Flow prediction of Liulin spring based on time series analysis[J]. Yellow River, 2017, 39(11): 99-102.
- [6] 孙才志, 王金生, 林学钰. 山西晋词泉在引水条件下的可再生性研究[J]. 中国岩溶, 2001, 20(1): 11-16.
   SUN Caizhi, WANG Jinsheng, LIN Xueyu. Research on the renewability of Jinci spring in Shanxi Province under water diversion[J]. Carsologica Sinica, 2001, 20(1): 11-16.
- [7] 徐源,齐欢,李传磊,赵有美,李常锁.近60年济南市降水量变 化特征分析[J].山东国土资源, 2021, 37(2): 44-49.
  XU Yuan, QI Huan, LI Chuanlei, ZHAO Youmei, LI Changsuo. Analysis on the characteristics of precipitation changes in recent 60 years in Jinan city[J]. Shandong Land and Resources, 2021, 37(2): 44-49.
- [8] 祁晓凡,李文鹏,李传生,杨丽芝,马瑜宏.济南岩溶泉域地下水位与降水的趋势性与持续性[J].灌溉排水学报,2015, 34(11):98-104.

QI Xiaofan, LI Wenpeng, LI Chuansheng, YANG Lizhi, MA Yuhong. Trends and persistence of groundwater table and precipitation of Jinan karst springs watershed[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(11): 98-104.

 [9] 秦品瑞.济南岩溶水系统数值模拟与保泉供水开采方案[J]. 水资源保护, 2018, 34(3): 30-36, 103.
 QIN Pinrui. Numerical simulation of Jinan karst water system and groundwater exploitation scheme of keeping spring spurting and water supply[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(3): 30-36, 103.

- [10] Niu Shuyao, Shu Longcang, Li Hu, Xiang Hua, Wang Xin, Portia Annabelle Opoku, Li Yuxi. Identification of preferential runoff belts in Jinan spring basin based on hydrological timeseries correlation[J]. Water, 2021, 13(22): 3255.
- [11] Hu Wei, Si Bingcheng. Multiple wavelet coherence for untangling scale-specific and localized multivariate relationships in geosciences[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20(8): 3183-3191.
- [12] Si Bingcheng. Spatial scaling analyses of soil physical properties: A review of spectral and wavelet methods[J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(2): 547-562.
- [13] Rehman N, Mandic D P. Multivariate empirical mode decomposition[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2010, 466(2117): 1291-1302.
- Li S, Liu N, Tang L, Zhang F, Liu J, Liu J. Mutation test and multiple-wavelet coherence of PM2.5 concentration in Guiyang, China[J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2021, 14(7): 955-966.
- [15] Wu Tsungpao, Wu Hungche, Liu Shubing, Hsueh Shunjen, Chen Junyan. A partial and multiple wavelet analysis of tourism

and house prices[J]. Journal of China Tourism Research, 2022, 18(2): 419-432.

- [16] Gu Xiufen, Sun Hongguang, Zhang Yong, Yu Zhongbo, Zhu Jianting. Multiple wavelet coherence to evaluate local multivariate relationships in a groundwater system[J]. Groundwater, 2021, 59(3): 443-452.
- [17] 孙斌,彭玉明.济南泉域边界条件、水循环特征及水环境问题[J].中国岩溶, 2014, 33(3): 272-279.
   SUN Bin, PENG Yuming. Boundary condition, water cycle and water environment changes in Jinan spring region[J]. Carsologica Sinica, 2014, 33(3): 272-279.
- [18] 孟庆斌, 邢立亭, 滕朝霞. 济南泉域"三水"转化与泉水恢复关系研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2008, 38(5): 82-87.
   MENG Qingbin, XING Liting, TENG Zhaoxia. The relationship of spring protection and transformation pattern between precipitation groundwater and surface water in the Jinan spring region[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2008, 38(5): 82-87.
- [19] 王涛, 霍彦峰, 罗艳. 近300a来天山中西部降水与太阳活动的 小波分析[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 708-717.
   WANG Tao, HUO Yanfeng, LUO Yan. Precipitation and sunspots in the central-west Tianshan Mountains in recent 300 years[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(4): 708-717.
- [20] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61-78.
- [21] 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.

- [22] Wang Junjie, Shi Bing, Zhao Enjin, Chen Xuguang, Yang Shaopeng. Synergistic effects of multiple driving factors on the runoff variations in the Yellow River Basin, China [J]. Journal of Arid Land, 2021, 13(8): 835-857.
- [23] 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 Jinan spring region[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(9): 969-978.

[24] 赵增文. 济南市保泉供水研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.

> ZHAO Zengwen. Research on springs protection and water supply in Jinan City[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2004.

- [25] 李铁锡,李岚,刘业筠. 济南泉水特征及影响因素系统分析[J]. 山东国土资源, 2003, 19(3): 48-51.
  LI Tiexi, LI Lan, LIU Yeyun. Systematic analysis of characteristics and effected elements of spring in Jinan City[J]. Shandong Land and Resources, 2003, 19(3): 48-51.
- [26] Hu Wei, Si Bingcheng, Biswas Asim, Chau Henry Wai. Temporally stable patterns but seasonal dependent controls of soil water content: Evidence from wavelet analyses[J]. Hydrological Processes, 2017, 31(21): 3697-3707.
- [27] Ng E K W, Chan J C L. Geophysical applications of partial wavelet coherence and multiple wavelet coherence[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2012, 29(12): 1845-1853.

# Study on the influencing factors of spring water in Jinan City based on wavelet transform method

LIU Chunwei<sup>1,2</sup>, QI Huan<sup>1,2</sup>, LIN Guangqi<sup>1,2</sup>, LIU Haoran<sup>1,2</sup>, PANG Wei<sup>1,2</sup>, YU Lingqin<sup>1,2</sup>, MA Hekuan<sup>1,2</sup> (1. 801 Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources (Shandong Provincial Geo-mineral Engineering Exploration Institute), Jinan, Shandong 250014, China; 2. Shandong Engineering Research Center for Environmental Protection and Remediation on Groundwater, Jinan, Shandong 250014, China )

Abstract In order to find out the influence of two main factors—precipitation and groundwater exploitation—on the gushing of spring in Jinan urban area, we selected the exploitation data of the western suburb in Jinan (the water source area of Emei Mountain, Dayangzhuang and Lashan), Jinan urban area (the water source area of Quancheng road, Jiefangqiao, Yinhuchi, and Linan) and the eastern suburb in Jinan (the water source area of Huaneng road). We also selected dynamic observation data of urban spring water level and precipitation during the same period. Based on cross wavelet change, wavelet coherence spectrum and multiple wavelet coherence spectrum, we analyzed the time-lag relationship, comprehensive impact and impact degree between atmospheric precipitation, groundwater exploitation and spring water in Jinan City, in order to provide a basis for the optimal allocation of groundwater development and utilization and the promotion of spring protection in this city.

The following conclusions are drawn in this study. (1) By cross wavelet transform, we analyzed the resonance

period, significant period and phase relationship between the spring level and the influencing factors in the timefrequency domain. It is found that during the research period, there was a frequency domain period of about 1 year between spring water level, precipitation and exploitation quantity of groundwater. The urban spring level and precipitation passed the 95% red noise test and there was a frequency domain period of 0.69-1.16 a outside COI. In a hydrological year, the urban spring level lagged behind the precipitation for 133.22 days. When the urban spring level and groundwater exploitation passed the 95% red noise test and there was a frequency domain period of 0.82-1.23 a outside COI, the response time lag between the urban spring level and the western suburb and the eastern suburb of Jinan was 125.43 days and 83.85 days, respectively. There existed a hydraulic relationship between spring water in Jinan urban area and groundwater in the western suburb and the eastern suburb of this city. The cross wavelet transforms between urban spring level and the exploitation quantity in the western suburb of Jinan, and between the urban spring level and the exploitation quantity in the urban area also showed a dispersed low energy region of 0.39-0.58 a, and the 95% red noise test reflected the seasonal characteristics of the exploitation of Jinan water source. (2) We carried out the wavelet coherence analysis of urban spring water level, precipitation and exploitation quantity of groundwater to explore the change characteristics of urban spring water level and influencing factors in the whole period. The wavelet coherence average value (AWC) between the urban spring level and precipitation was 0.58. The AWC value between the urban spring level and the respective exploitation quantity in the western suburb, in the city area and in the eastern suburb is 0.47, 0.40 and 0.32. PASC was 13.90%, 16.81% and 10.09%, respectively. During the research period, both precipitation and karst groundwater exploitation exerted obvious effects on urban spring levels. In terms of groundwater exploitation in different locations, the urban exploitation exerted the greatest influence on the urban spring level, followed by the western suburb. The eastern suburb of Jinan was influenced least. (3) According to exploitation conditions during the research period, the combination of precipitation and exploitation quantity in the western suburb of Jinan, and its combination in the urban area were regarded as the biggest influencing factors for the change of spring water level. Under the influence of the three factors, MWC produced by the combination of precipitation and exploitation quantities in the western suburb and the urban area reached 0.91, and PASC increased by more than 5%. Under the combined action of the four influencing factors, MWC reached the maximum value of 0.94, while PASC decreased. One reason was that the PASC threshold with statistical significance increased after additional factors were added, and the other reason was that the overlapping effect caused by collinearity among influencing factors reduced the variance contribution of some factors. Therefore, the multivariate wavelet coherence spectrum showed that the combination of precipitation and the exploitation quantities in the western suburb and the urban area is the most influential factor for the change of urban spring water level under the exploitation conditions during the research period.

**Key words** precipitation, groundwater exploitation, Jinan spring, multiple wavelet coherence, cross wavelet transform, wavelet coherence spectrum

(编辑杨杨张玲)