

齐欢,董梦宇. 基于小波分析的趵突泉地下水补给范围探讨[J]. 中国岩溶, 2023, 42(5): 1037-1046.
DOI: 10.11932/karst20230512

基于小波分析的趵突泉地下水补给范围探讨

齐欢¹, 董梦宇²

(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/山东省地下水环境保护与修复工程技术研究中心, 山东 济南 250014; 2. 中国海洋大学国际事务与公共管理学院, 山东 青岛 266100)

摘 要: 为查明济南趵突泉地下水补给范围以及市区、西郊对趵突泉的补给范围所占比例, 选取 2010—2020 年趵突泉泉域 20 个地下水长期监测点的岩溶水位数据, 采用交叉小波变换的方法对地下水位与降水量的时滞进行分析, 并结合泉水的功能分区对趵突泉地下水补给范围进行探讨, 计算市区、西郊对趵突泉的补给范围所占比例。结果表明: (1) 随着地下水径流长度的增加, 地下水位对降水时滞呈现增大的趋势, 从 78.58 d 增大至 129.22 d, 济南西郊的时滞变化梯度大于济南市区; (2) 玉符河下游地下水补给范围大, 径流路径长, 河流沿线地下水位对降水量的时滞大于两侧; 刘长山—郎茂山—万灵山一带地下水径流路径较短, 岩溶富水性较差, 地下水位对降水量的时滞小于两侧; 济南市区与西郊地下水存在水力联系; (3) 选取趵突泉水位与降水量的时滞等值线为趵突泉补给范围的北边界, 东边界为东坞断裂, 西边界为马山断裂, 南边界为地表分水岭, 趵突泉的补给范围为 1 390.54 km²。 (4) 济南西郊对趵突泉的补给范围为 1 133.09 km², 市区对趵突泉的补给范围为 257.45 km², 西郊和市区对趵突泉的补给范围面积比值为 4.4 : 1。

关键词: 趵突泉; 地下水补给范围; 地下水位动态; 小波分析

中图分类号: P641.2 **文献标识码:** A

文章编号: 1001—4810 (2023) 05—1037—10

开放科学(资源服务)标识码 (OSID):



0 引 言

济南是著名的“泉城”, 岩溶水曾是济南主要供水源, 随着社会经济的发展和人口的增加, 人工开采地下水对济南泉水造成巨大影响^[1]。为了保护泉水, 济南市相继实施了“封井保泉”、“节水保泉”、“引黄保泉”、“回灌保泉”等措施, 取得了良好效果^[2]。但如何处理好泉水持续喷涌和让市民喝上优质地下水之间的矛盾仍然是济南市政府和广大市民普遍关心的重要问题。目前对于济南市区与西郊之间的水力联系一直存在争议, 对济南市开展科学保泉、地下水资源合理开发利用造成较大的影响。

多年来, 国内学者对济南市区与西郊之间的水

力联系做了大量的研究, 侯新文等^[3]通过对岩溶含水层介质和水动力特征分析, 采用回归分析法证实了济南市区与西郊之间存在水力联系; 董咏梅等^[4]根据 2003 年西郊抽水试验资料, 分析试验期间趵突泉、宋庄地下水位与 2002 年同期水位动态变化情况, 验证了济南市区与西郊岩溶地下水之间存在密切的水力联系; 张郑贤等^[5]利用灰色关联的数学方法, 从“水位波动关联度”的角度, 证明西郊地下水与市区泉群之间存在着极强的联系; 而杨增元等^[6]、商广宇等^[7]认为市区和西郊之间有隔水火成岩体和岩溶弱发育带相隔, 济南市区和西郊分属不同的水文地质单元, 二者之间不存在水力联系。

趵突泉作为“天下第一泉”, 其形成机理^[8-9]、补

第一作者简介: 齐欢(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水文地质环境地质。E-mail: 943314446@qq.com。

收稿日期: 2023—04—20

给通道^[10-11]、动态特征^[12-13]、影响因素^[14-15]等研究成果较多,然而对于趵突泉的地下水补给范围,市区、西郊对趵突泉的补给范围所占比例的研究仍然缺乏。本文选取 2010—2020 年趵突泉泉域 20 个岩溶水位观测点的监测数据,采用交叉小波变换的方法对地下水位与降水量的时滞进行计算,结合泉水的功能分区探讨趵突泉地下水补给范围,并计算市区、西郊对趵突泉的补给范围所占比例。

1 研究区概况

趵突泉泉域北边界为奥陶系灰岩顶板 400 m 左右埋深界线,东边界为东坞断裂,西边界为马山断裂,南边界为地表水分水岭^[16],总面积为 1 658.90 km²。地势整体上南高北低,地层由老到新依次为太古界泰山群、古生界寒武系、奥陶系灰岩及新生界第四系松散沉积地层。泉域内区域地质构造发育,主要分布有 NNW 走向的马山断裂、千佛山断裂和东坞断裂,以及近 SN 向的炒米店断裂。河流主要有玉符河、北大沙河和兴济河等,水库主要有卧虎山水库、

锦绣川水库和玉清湖水库等,对济南市供水和农田灌溉起到重要的作用。根据岩溶地下水的补给、径流和排泄特征以及泉水的功能分区,趵突泉泉域自南向北可分为间接补给区、直接补给区和汇集出露区^[17]。间接补给区指泉域上游所有靠大气降水补给形成的地表水、地下水均以地表径流、地下径流形式进入直接补给区的地区;直接补给区指岩溶地下水能够直接接受大气降水及地表水渗漏补给的地区;汇集出露区为整个泉域下游岩溶地下水汇集、储存、排泄的地区^[17]。间接补给区由于受断层和沟谷切割的影响,难以形成连续稳定的地下水面;直接补给区和汇集出露区岩溶裂隙发育,碳酸盐岩厚度大且彼此连通,有利于地下水的补给、径流和富集,从而形成统一的连续地下水面,岩溶水水位观测点也多位于该区域(图 1)。

2 研究方法

2.1 数据来源

本次选取 2010—2020 年济南降水量资料和岩

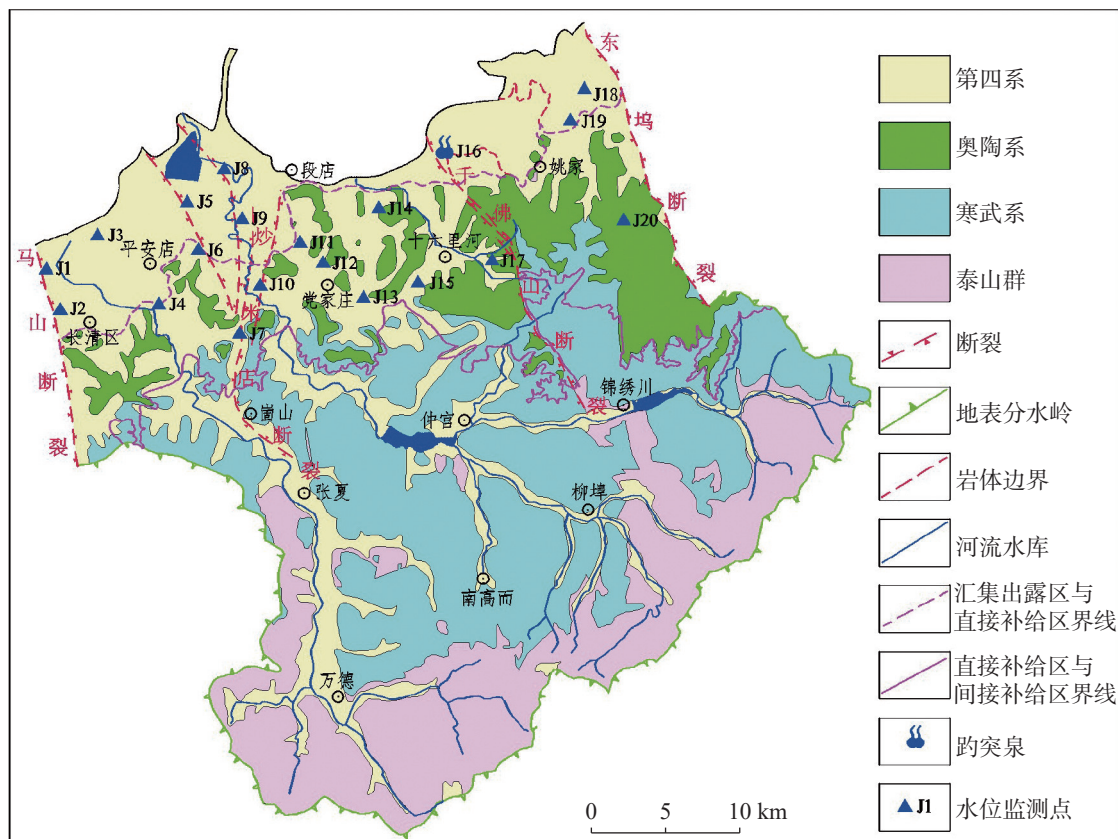


图 1 趵突泉泉域地质构造图
Fig. 1 Geological structure of the Baotu Spring area

溶地下水位动态数据,降水量资料来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>)公布的月累计数据,站号为 54823,位于趵突泉泉域的补给区;岩溶地下水位月平均数据来自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(图 1,表 1)。泉域范围内监测井是随着项目的开展陆续建立的,以前多为人工监测,随着城市的扩建,很多监测井存在数据不连续的现象。本次选取的 20 个监测点主要位于泉域的直接补给区和汇集出露区,在相同的水位观测时段内,监测时间最长、数据连续性好、覆盖面

广、分布相对均匀,同时重点考虑了泉点、岩溶弱发育带、岩溶富水地段、补源河流、构造断裂等地段,从而全面掌握泉域地下水位动态特征。从岩溶地下水流场图可以看出(图 2),泉域地下水位整体呈现南高北低,中部略高于两侧的特征;南部的水位变幅也大于北部,表明岩溶发育程度由南向北逐渐增强,且中部的发育程度小于东西两侧。

2.2 分析方法

本研究中使用交叉小波变换(XWT)来研究地下

表 1 监测点水位平均值、最小值、最大值

Table 1 Mean/min./max. values of groundwater levels from observation points

点号	水位观测时段	平均值/m	点号	水位观测时段	平均值/m
J1	2010.01—2020.12	31.12	J11	2010.01—2020.12	30.59
J2	2010.01—2020.12	31.58	J12	2010.01—2020.12	32.57
J3	2010.01—2020.12	30.58	J13	2011.01—2014.12	51.81
J4	2010.01—2020.12	32.03	J14	2011.01—2020.12	30.56
J5	2010.01—2016.12	30.66	J15	2012.01—2019.12	84.21
J6	2010.01—2019.12	31.08	J16	2010.01—2020.12	28.53
J7	2010.01—2020.12	36.36	J17	2010.01—2018.12	120.49
J8	2010.01—2020.12	29.57	J18	2010.01—2015.12	19.96
J9	2010.01—2020.12	29.64	J19	2010.01—2012.12	27.87
J10	2010.01—2020.12	31.65	J20	2016.01—2019.12	146.75

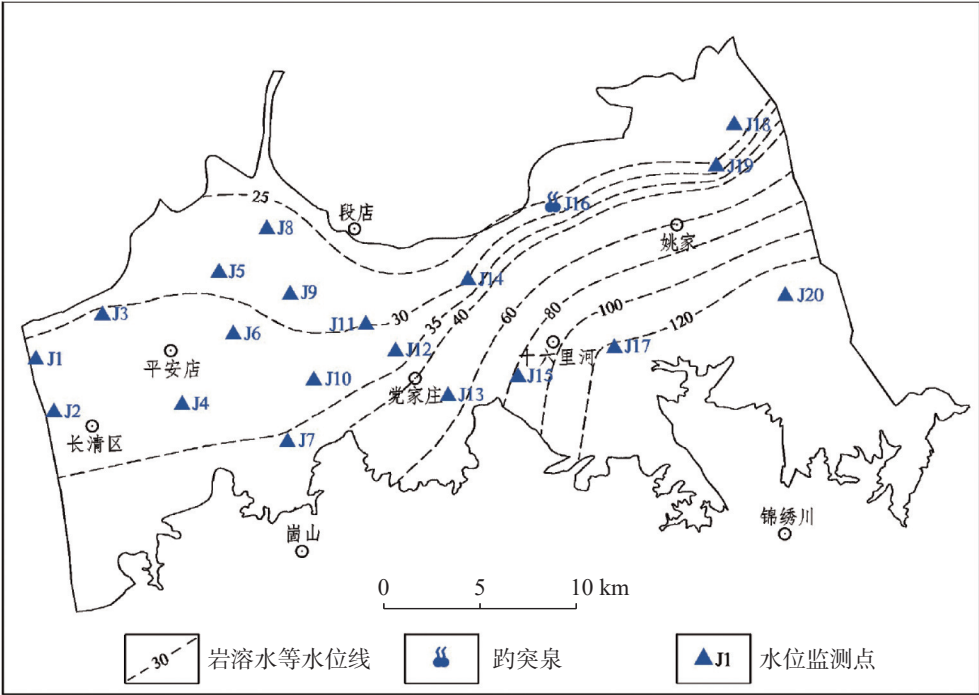


图 2 2012 年岩溶地下水流场图
Fig. 2 Map of karst groundwater flow field in 2012

水位与降水量(P)之间的响应关系, 相较传统的分析方法, 交叉小波变换不仅可以有效分析两个时间序列之间的相关程度, 而且能够反映出两者在时域和频域上的相位结构和细部特征^[18-19]。对两个长度为 n 的时间序列 X 、 Y 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:

$$W_n^{XY} = W_n^X W_n^{Y*}$$

式中: $*$ 为复共轭, $|W_n^{XY}|$ 值越大, 则两个时间序列在不同频域上的相关程度越高。

W_n^{XY} 的复角可以描述时间序列 X 、 Y 在时频域中的局部相对相位关系。设有 n 个角度 ($i=1, \dots, n$), 交叉小波相位角 α 定义为:

$$\alpha = \arg(X, Y)$$

式中: $X = \sum_{i=1}^n \cos(\alpha_i)$, $Y = \sum_{i=1}^n \sin(\alpha_i)$, α_i 为单个相位角。

交叉相位角的标准偏差 s 定义为:

$$s = \sqrt{-2 \ln(R/n)}$$

式中: $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$, 根据交叉小波变换的相位角可以定量计算泉域地下水位对降水量的响应时滞。

3 数据结果及分析

3.1 交叉小波变换

趵突泉泉域岩溶地下水位主要受降水量的影响, 地下水位动态与降水量之间存在约 1 a 的连续主震荡周期^[20], 因此可以对地下水位与降水量进行交叉小波变换, 分析两者在 1 a 时频域上的共振周期、显著时段和相位关系等(图 3, 表 2)。交叉小波变换右侧图例表示功率谱密度(无量纲), 黑色的粗轮廓表示能量密度较高且通过 $\alpha=0.05$ 的红色噪音标准谱显著性检验, 黑色的细弧线为小波影响锥边界, 其内部为有效谱值区, 表示受数据边缘效应影响较小的区域。黑色箭头方向反映了地下水位与降水量之间的相位关系, 箭头从左向右表示二者相位相同, 箭头从右向左表示二者相位相反, 箭头垂直向上表示降水量滞后于地下水位 1/4 周期, 箭头垂直向下表示降水量提前于地下水位 1/4 周期。表 2 中交叉相位角单位为弧度, “ $\pm$ ” 前弧度为平均相位角, “ $\pm$ ” 后弧度为卷积误差。交叉相位角的一个周期, 即 2π 弧度代表 1 a, 即 365 d。根据箭头的方向计算交叉小波变换的平均相位角差(交叉相

位 $\pm$ 卷积误差), 可以定量的分析地下水位对降水量的响应时滞^[18]。

根据地下水对降水量的响应时滞绘制了两者之间的时滞等值线图(图 4), 其中黑色粗虚线为趵突泉水位(J16)对降水量的时滞等值线。从图中可以看出, 从泉水的直接补给区到汇集出露区, 地下水位对降水量的时滞逐渐增大, 整体呈现出东南高西北低的变化趋势, 从 78.58 d 逐渐增大至 129.22 d, 其中西郊从 78.58 d 增大至 129.22 d, 市区从 86.10 d 增大至 113.75 d, 且西郊的时滞变化梯度大于市区。地下水位对降水量的时滞等值线在党家庄附近存在呈北西方向的“凹陷”, 而在十六里河附近存在呈北北西方向的“凸起”。

地下水对降水量的时滞受到地形地貌、岩溶富水性、地层岩性等因素的综合影响^[12, 21]。趵突泉泉域自南向北岩溶含水层厚度逐渐增加, 富水性不断增强^[21], 市区的岩溶发育程度小于西郊^[17]。济南南部为低山丘陵区, 灰岩裸露, 地下岩溶发育相对较弱, 地下储水空间较小, 降雨直接入渗补给地下水, 地下水位对降水的响应时滞较小, 水位变幅大。南部山区裂隙岩溶水在较高水头压力下, 沿地形坡向、地层产状向北部径流至市区灰岩隐伏区的过程中, 地下岩溶裂隙逐渐发育, 岩溶水的储水空间增大, 随着径流路径的增加, 地下水对降水的响应时滞逐渐增大, 地下水位变幅逐渐减小。因此西郊地下水位与降水量的时滞变化梯度大于市区, 且时滞变化梯度呈现由大到小并逐渐趋向于稳定的趋势。

玉符河流域面积较大, 地形相对平坦, 地表水径流较慢, 入渗量较大, 地下水流动速度相对较慢, 径流路径较长, 下游近南北向的炒米店断裂有利于地表水的渗漏和转化, 岩溶相对发育, 富水性较好, 因此地下水位对降水量的时滞等值线在党家庄附近呈现北西方向的“凹陷”。刘长山-郎茂山-万灵山一带为局部地表分水岭, 地表水径流较快, 入渗量较小, 地下水流动速度相对较快, 下伏奥陶系灰岩地层分布连续, 不存在区域性断裂构造, 不利于地下岩溶发育, 岩溶富水性与周边差异较大, 因此地下水位对降水量时滞等值线在十六里河附近呈现北北西方向的“凸起”。从图中也可发现, 地下水位与降水量的时滞等值线平缓连续, 没有突变, 反映了济南市区与西郊地下水存在水力联系。

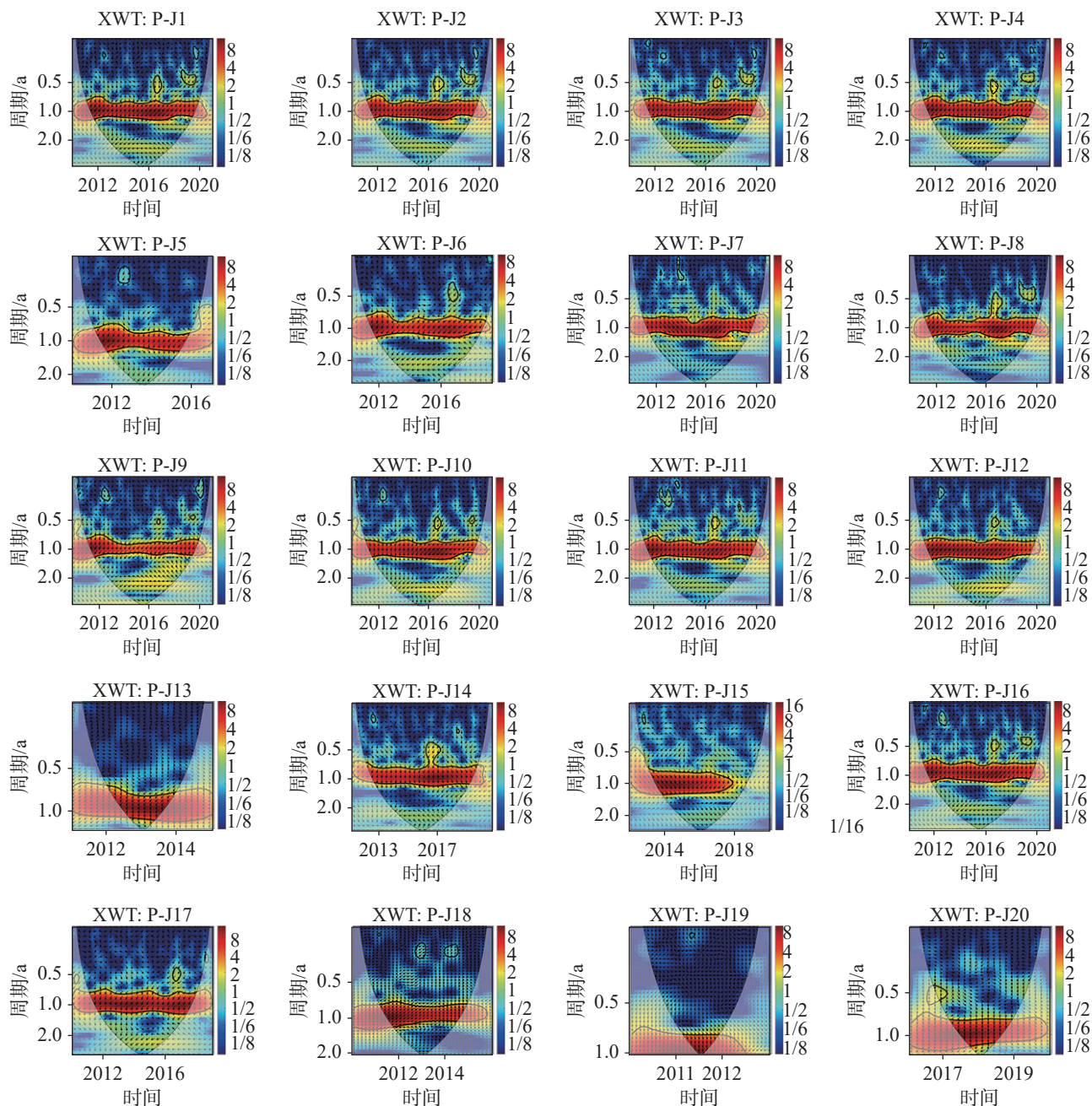


图 3 降水量与地下水位的交叉小波变换

Fig. 3 Cross wavelet transform of precipitation and groundwater level

3.2 趵突泉补给范围划定

趵突泉泉域在南部山区接受降水入渗补给后,地下水顺着岩层倾向由南向北径流,随着地下水径流长度的增加,地下水对降水量的响应时滞也在不断增大。地下水位动态对降水的响应时滞总体趋势为地下水径流路径越长,地下水位动态对降水的响应时间越长^[12]。趵突泉水位(J16)与降水量的时滞为 107.30 d,小于该时滞的区域可以更快获得南部山区降水入渗形成的地下水,对趵突泉存在潜在

的补给关系;而大于该时滞的区域获得南部山区地下水补给需要更长的径流路径,对趵突泉的地下水补给相对有限。本次研究选取 107.30 d 时滞等值线为趵突泉补给范围的北部边界,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,选取刘长山-郎茂山-万灵山一带为济南市区和西郊的界线,经分析计算,在直接补给区和汇集出露区,趵突泉的补给范围为 384.58 km²,其中西郊对趵突泉的补给范围为 127.13 km²,市区对趵突泉的

表 2 降水量与地下水位交叉小波变换统计表
Table 2 Statistics of cross-wavelet transform of precipitation and groundwater level

点组	变换时段	交叉相位角/rad	时滞/d	点组	变换时段	交叉相位角/rad	时滞/d
P-J1	2010.01—2020.12	2.090 0±0.033 2	116.63	P-J11	2010.01—2020.12	1.923 6±0.037 8	107.35
P-J2	2010.01—2020.12	2.091 1±0.037 6	116.69	P-J12	2010.01—2020.12	2.083 0±0.029 7	116.24
P-J3	2010.01—2020.12	2.099 5±0.040 9	117.16	P-J13	2011.01—2014.12	2.046 5±0.034 0	114.20
P-J4	2010.01—2020.12	2.042 0±0.052 5	113.95	P-J14	2011.01—2020.12	1.610 2±0.052 5	89.86
P-J5	2010.01—2016.12	2.178 1±0.077 9	121.55	P-J15	2012.01—2019.12	1.450 6±0.078 0	80.95
P-J6	2010.01—2019.12	2.188 3±0.050 2	122.11	P-J16	2010.01—2020.12	1.922 8±0.026 0	107.30
P-J7	2010.01—2020.12	1.408 2±0.083 2	78.58	P-J17	2010.01—2018.12	1.866 9±0.186 0	104.18
P-J8	2010.01—2020.12	2.315 6±0.051 9	129.22	P-J18	2010.01—2015.12	2.038 4±0.063 4	113.75
P-J9	2010.01—2020.12	2.026 4±0.035 3	113.08	P-J19	2010.01—2012.12	1.920 6±0.119 5	107.18
P-J10	2010.01—2020.12	2.040 9±0.075 4	113.89	P-J20	2016.01—2019.12	1.542 8±0.063 2	86.10

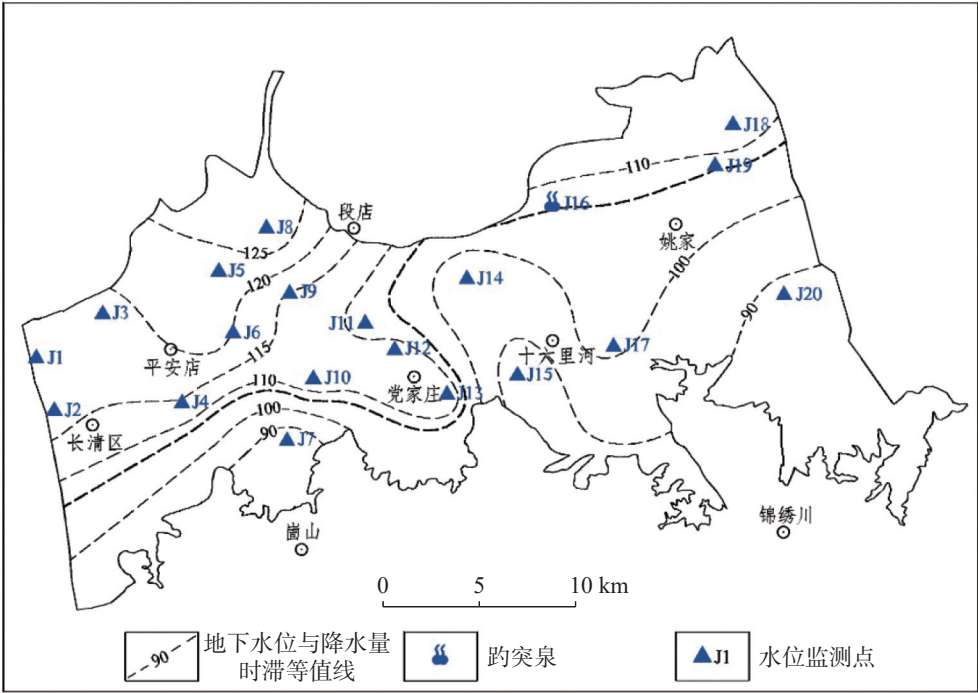


图 4 地下水位与降水量的时滞等值线图
Fig. 4 Time lag contour map of groundwater level and precipitation amount

补给范围为 257.45 km²。

间接补给区接受大气降水补给后,除一部分储存于裂隙或溶洞之中外,其余皆以泉的形式转化为地表水径流进入直接补给区,因此间接补给区可以按照地表水流域进行划分。趵突泉泉域可划分为黄河水系和小清河水系。其中北大沙河流域和玉符河流域属于黄河水系;腊山河流域、兴济河流域、广场东西沟、全福河流域、大辛河流域、韩仓河流域和张

马河流域属于小清河水系(图 5)。趵突泉泉域间接补给区面积为 1 005.96 km²,包含北大沙河流域和玉符河流域,降水入渗形成的地下水向北径流,主要补给西郊岩溶地下水。

根据该划分原则,趵突泉地下水补给范围为 1 390.54 km²,其中西郊地下水对趵突泉的补给范围为 1 133.09 km²,市区地下水对趵突泉的补给范围为 257.45 km²,西郊地下水和市区地下水对趵突泉的补

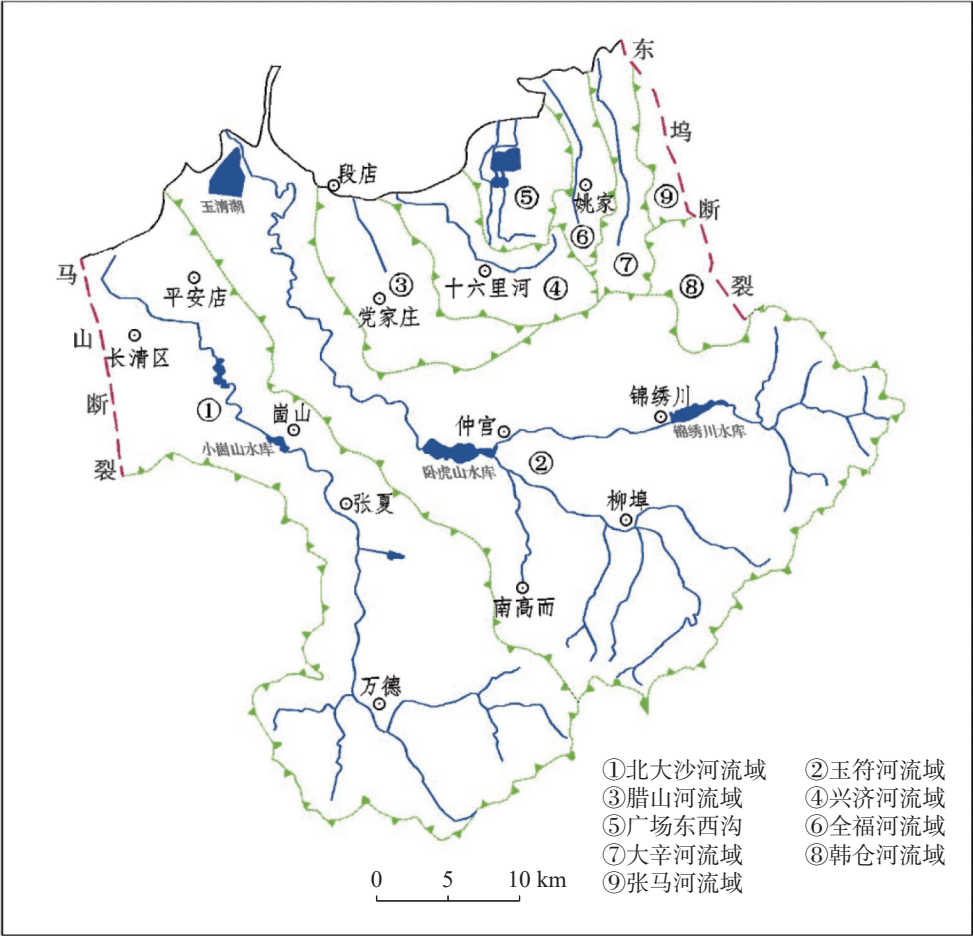


图 5 研究区地表水流域图

Fig. 5 Map of surface water catchment in the study area

给面积比值为 4.4 : 1, 西郊地下水对趵突泉的持续喷涌起到强有力的支撑作用(图 6)。

4 结论与展望

(1)趵突泉泉域从直接补给区到汇集出露区,随着地下水径流长度的增加,地下水位对降水量的时滞呈现增大的趋势,从 78.58 d 增大至 129.22 d。西郊的时滞变化梯度大于市区,且时滞变化梯度由大到小并趋向于稳定。

(2)玉符河下游地下水补给范围大、径流时间长,河流沿线地下水位对降水量的时滞大于两侧;刘长山-郎茂山-万灵山一带为局部地表分水岭,北侧与岩浆岩体接触,地下水径流路径较短,岩溶含水层富水性较差,该地段地下水位对降水量的时滞小于两侧,济南市区与西郊地下水存在水力联系。

(3)选取趵突泉水位与降水量的时滞等值线(107.30 d)为趵突泉地下水补给范围的北部边界,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,济南趵突泉补给范围为 1 390.54 km²。

(4)选取刘长山-郎茂山-万灵山一带为西郊和市区的界线,间接补给区按照地表水流域进行划分,得出西郊对趵突泉的补给范围为 1 133.09 km²,市区对趵突泉的补给范围为 257.45 km²,西郊和市区对趵突泉的补给范围面积比值为 4.4 : 1。

本次研究通过对地下水位与降水量的时滞进行分析,结合泉水的功能区划分,对趵突泉的地下水补给范围,以及市区、西郊对趵突泉的补给范围所占比例进行探讨。由于岩溶水系统是一个复杂的动态系统,地下水位对降水量的响应时滞受到降水的季节性、人类活动等因素的影响,后期可以从更小的时间尺度,或者水化学的角度对趵突泉补给范围的划分进一步完善和验证;同时加强间接补给区对直接补给区地表径流量,以及直接补给区实际入渗量的长期监测和研究工作,分析西郊和市区地下水对趵突泉流量的贡献情况。

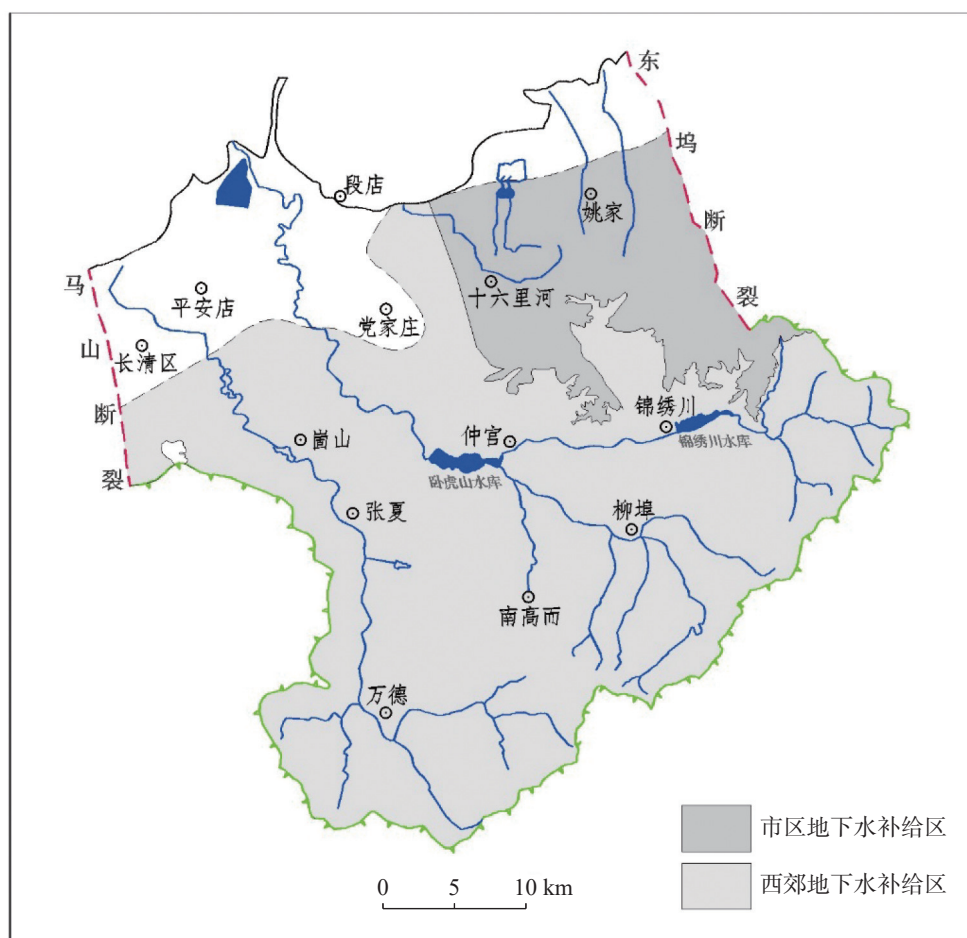


图 6 趵突泉补给范围图

Fig. 6 Map of Baotu Spring recharge range

参考文献

- [1] 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.
- [2] 李江柏, 邢立亭, 侯玉松, 邢学睿, 邓忠, 张凤娟, 孟庆哈, 武东强. 基于模糊相似优先比法的济南四大泉群补给来源[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(3): 918-926.
LI Jiangbai, XING Liting, HOU Yusong, XING Xuerui, DENG Zhong, ZHANG Fengjuan, MENG Qinghan, WU Dongqiang. Replenishment sources of four great springs in Jinan based on fuzzy similarity priority ratio[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(3): 918-926.
- [3] 侯新文, 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 Xinwen, 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.
- [4] 董咏梅, 苏光星, 李占华. 从济西抽水试验探济南泉域西边界[J]. 水资源保护, 2004(3): 58-59.
DONG Yongmei, SU Guangxing, LI Zhanhua. Exploring the western boundary of Jinan spring region from the water pumping test in Jinan[J]. Water Resources Protection, 2004(3): 58-59.
- [5] 张郑贤, 王维平, 相华, 盖燕如, 李凤丽. 基于水位波动关联度的济南西部与济南泉群地下水关系研究[J]. 水文, 2018, 38(6): 31-36, 96.
ZHANG Zhengxian, WANG Weiping, XIANG Hua, GAI Yanru, LI Fengli. Relationship between groundwater in western Jinan and Jinan spring area based on correlation degree of water table fluctuation[J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38(6): 31-36, 96.
- [6] 杨增元, 商昭诚, 商广宇, 张子森. 济南泉水与附近水文地质关系研究[J]. 水资源研究, 2016, 5(6): 613-619.
YANG Zengyuan, SHANG Zhaocheng, SHANG Guangyu, ZHANG Zisen. Protection of Jinan spring water and relation with hydrogeology at adjacent watershed[J]. Journal of Water

- Resources Research*, 2016, 5(6): 613-619.
- [7] 商广宇, 王建军. 有的放矢科学保泉: 济南泉域边界条件论证[J]. 地下水, 2002, 24(4): 191-194, 223.
- [8] 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.
- [9] Zhu Henghua, Xing Liting, Meng Qinghan, Xing Xuerui, Peng Yuming, LI Changsuo, Li Hu, Yang Lizhi. Water recharge of Jinan karst springs, Shandong, China[J]. *Water*, 2020, 12(3): 694.
- [10] 主恒祥, 邢立亭, 相华, 迟光耀, 侯新宇. 示踪试验在济南泉群优势补给径流通道研究中的应用[J]. 地下水, 2017, 39(2): 5-7.
- ZHU Hengxiang, XING Liting, XIANG Hua, CHI Guangyao, HOU Xinyu. Application of tracer test in the study of preferential runoff path of Jinan spring ground[J]. *Ground Water*, 2017, 39(2): 5-7.
- [11] Niu Shuyao, Shu Longcang, Li Hu, Xiang Hua, Wang Xin, Opoku P A, Li Yuxi. Identification of preferential runoff belts in Jinan spring basin based on hydrological time-series correlation[J]. *Water*, 2021, 13(22): 3255.
- [12] 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.
- [13] Xing Liting, Huang Linxian, Chi Guangyao, Li Changsuo, Hou Xinyu. A dynamic study of a karst spring based on wavelet analysis and the Mann-Kendall Trend Test[J]. *Water*, 2018, 10(6): 698.
- [14] 周娟, 邢立亭, 滕朝霞, 王立艳. 制约济南岩溶大泉持续喷涌的主因素阈值研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2015(3): 146-156.
- ZHOU Juan, XING Liting, TENG Zhaoxia, WANG Liyan. Study on threshold of main factors restricting Jinan large karst springs spewing[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2015(3): 146-156.
- [15] Chen Yuan, Shu Longcang, Li Hu, Opoku P A, Li Gang, Xu Zexuan, Qi Tiansong. Identification of preferential recharge zones in karst systems based on the correlation between the spring level and precipitation: A case study from Jinan spring basin[J]. *Water*, 2021, 13(21): 3048.
- [16] 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.
- [17] 齐欢. 基于经验正交函数法的趵突泉泉域地下水位动态分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(19): 52-57.
- QI Huan. Dynamic analysis of groundwater level in Baotu Spring region based on EOF method[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(19): 52-57.
- [18] 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.
- [19] Maraun D, Kurths J. Cross wavelet analysis: Significance testing and pitfalls[J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2004, 11(4): 505-514.
- [20] 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 lag variance of groundwater level response to precipitation of Jinan karst spring watershed in recent 50 years[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(4): 384-393.
- [21] 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.

A study on the groundwater recharge range of Baotu Spring based on wavelet analysis

QI Huan¹, DONG Mengyu²

(1. 801 Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources/Shandong Engineering Research Center for Environmental Protection and Remediation on Groundwater, Jinan, Shandong 250014, China; 2. School of International Affairs and Public Administration, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract As a famous "spring city", karst groundwater used to be the main source of water supply in Jinan City. However, with the acceleration of urbanization and the rapid increase of population, the pressure on urban water supply has increased, and hence the contradiction between supply and demand has become increasingly prominent.

This situation will aggravate the over-exploitation of karst groundwater, resulting in a substantial decline in the karst groundwater level and outflow of Baotu Spring. How to deal with the contradiction between the continuous gushing of spring water and the citizens' demand for drinking high-quality underground water has always been an important issue of general concern to the Jinan Municipal Government and the general public. In recent years, Jinan City has successively adopted measures such as groundwater recharge and reducing groundwater exploitation to maintain the gushing of Baotu Spring, but the situation of keeping the springs gushing in the dry season is still severe.

Scholars at home and abroad have conducted many studies on the formation mechanism, supply channels, dynamic characteristics, and influencing factors of Baotu Spring. However, there is still a lack of research on the groundwater recharge range of Baotu Spring, and on the proportion of urban and western suburbs to Baotu Spring's recharge, which has affected Jinan's scientific conservation of springs and rational development and utilization of groundwater resources. In order to find out the groundwater recharge range of Baotu Spring in Jinan City and the proportion of the recharge range of Baotu Spring in urban and western suburbs, this study selects the data on karst water levels from 20 long-term groundwater monitoring points in Baotu Spring area from 2010 to 2020 as well as the precipitation data of the same period, and analyzes the time lag of the groundwater level to the precipitation by using the method of cross wavelet transform. According to the hydrogeological conditions and the functional division of spring water, the groundwater recharge range of Baotu Spring is discussed, and the proportion of the groundwater recharge range of Baotu Spring in the urban and western suburbs is calculated.

The results show that, (1) From the direct recharge area to the exposed area of confluence in the Baotu Spring area, with the rise of the length of groundwater runoff, the time lag of groundwater level to precipitation shows an increasing trend from 78.58 days to 129.22 days. The time lag gradient in the western suburb of Jinan City is larger than that in the urban area, with the time lag gradient decreasing gradually, and then tending to be stable. (2) A large area of groundwater recharge is distributed in the lower reaches of the Yufu river, with the characteristics of relatively flat terrain, slow surface runoff, strong rainfall infiltration capacity, slow groundwater flow velocity, and long runoff path, so the time lag of groundwater level to precipitation along the river is greater than that on both sides. The area of Liuchang mountain-Langmao mountain-Wanling mountain is a local surface watershed, with fast surface runoff, weak rainfall infiltration capacity, and relatively fast groundwater flow. Therefore, the time lag of the groundwater level to the precipitation in this section is smaller than that on both sides, and there is a hydraulic connection between the urban area and the western suburb of Jinan City. (3) The time lag contour of Baotu Spring water level to precipitation (107.30 days) is taken as the northern boundary of the Baotu Spring recharge range; the eastern boundary is the Dongwu fault; the western boundary is the Mashan fault; the southern boundary is the surface watershed. The groundwater recharge range of Baotu Spring is 1,390.54 km². (4) The area of Liuchang mountain-Langmao mountain-Wanling mountain is taken as the dividing line between the urban area and the western suburb of Jinan City, and the indirect recharge area of the spring is divided according to the surface water catchment. It is calculated that the recharge range of Baotu Spring in the western suburb is 1,133.09 km², and the recharge range of Baotu Spring in the urban area is 257.45 km², with a ratio of 4.4 : 1 between the two recharge ranges. The supply of groundwater in the western suburb of Jinan has played a strong role in supporting the continuous gushing of Baotu Spring. Since the karst water system is a complex dynamic system, the response time lag of groundwater level to precipitation is affected by factors such as precipitation seasonality and human activities. Later on, the recharge range of Baotu Spring can be refined and verified by a smaller time scale, or from the perspective of water chemistry.

Key words Baotu Spring, groundwater recharge range, groundwater level dynamic, wavelet analysis

(编辑 杨 杨 黄晨晖)