

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220268

基于统计方法的济南泉域降雨补给特征 及水文单元水力联系研究

郑灿政

(济南轨道交通集团有限公司, 山东 济南 250101)

摘要: 随着城市发展, 济南城市供水与保泉问题的矛盾日益突出, 必须在保证不影响泉水的前提下合理开发地下水资源。选取济南地区 1990~2005 年的月降雨量、趵突泉泉群水位数据, 利用降雨量移动平均值法分析降雨补给特征及泉域水位对降雨量的响应滞后性特征, 在降雨量三点移动平均值时开始与泉域水位具有相关性, 降雨量十点移动平均值与泉域水位的相关性最强, 泉域水位与前十个月的综合降雨量关系密切。降雨量经十点移动平均处理后, 降雨量和泉域水位同时上下波动, 通过对比分析城区、济东、济西地下水开采量数据, 证明泉域水位与城区、济西地下水水文单元水力联系密切, 与济东地下水水文单元不存在水力联系, 可合理开采济东地下水单元。

关键词: 移动平均; 降雨补给; 滞后性; 水力联系

中图分类号: [TV11]; P333.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)03-0053-04

1 概况

济南市位于鲁中山地与鲁北平原的过渡地带, 地势南高北低、东高西低。自南向北有中山、低山、丘陵, 至市区变为山区与平原的交界地带, 相对高差达 500 多米, 这种南高北低、坡度平缓的“北倾单斜构造”(图 1), 有利于地表水和地下水向城区汇集。区域内广泛分布可溶性石灰岩, 地下岩溶极其发育, 为岩溶水存储运移提供了良好的地质条件。地下水沿岩溶通道顺势而下, 遇北部不透水岩体阻隔, 透过灰岩天窗、风化槽或土层薄弱处涌出, 形成泉水^[1]。济南的单斜构造, 使南部山区地下水向北部汇集后, 形成三大主要地下水文单元, 主要分布在城区、济东、济西^[2](图 2)。城区和济西地下水文单元之间存在一岩溶弱发育

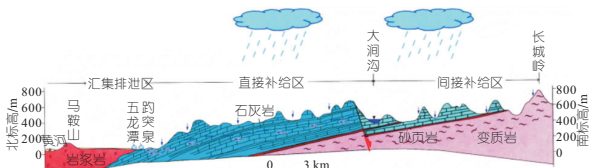


图 1 沿长城岭、大涧沟、趵突泉一线地质剖面图

Fig. 1 Geological profile along the line of Great Wall ridge, Da Jiangou and Baotu Spring

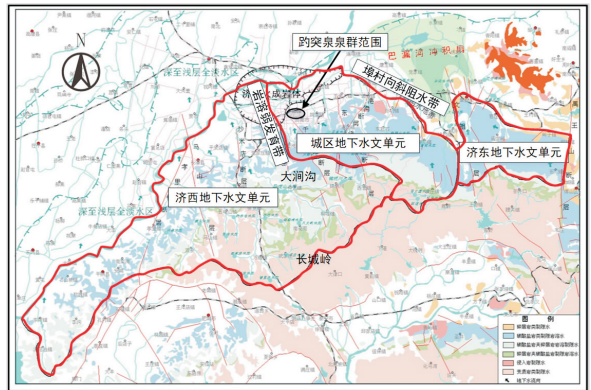


图 2 济南地区三大水文单元界线

Fig. 2 Boundary of three hydrological units in Jinan area
带, 不具有透水性, 作为两个水文单元之间的分界; 城区和济东地下水文单元以埠村向斜构造作为水文地质分隔带, 切断了两个水文单元间的联系。趵突泉泉域范围属于城区地下水文单元, 与济东、济西水文单元的水力联系均存在争议, 这一问题直接制约着济南地下水资源的开发, 是保泉问题的关键。根据地下水流向特征, 济南泉域可划分为垂直渗流补给带、水平径流带和汇集排泄带。垂直渗流补给带位于南部山区的直接补给区, 大气降水是其主要补给来源, 垂直向下补给, 达到一定深度后转为以水平运动为主。水平径流带位于山前至汇集区边缘带, 是岩溶水补给到排

收稿日期: 2022-02-16, 修回日期: 2022-06-06

基金项目: 济南市科技计划项目(201807005); 山东省交通运输厅科技计划项目(2019B11)

作者简介: 郑灿政(1990-), 男, 硕士、工程师, 研究方向为地下水渗流, E-mail: zcz1028@126. com

泄区的中间过渡带,岩溶水以水平运动为主。汇集排泄带位于岩溶水汇集区的火成岩体南缘地带,岩溶水在此汇集,排泄方式以泉水喷涌为主要形式,岩溶水水力坡度极缓,含水岩层的导水性、富水性极强,且较均匀,水位变幅相对较小。分析降雨量对地下水位影响的滞后性,研究降雨量对地下水补给的时间效应,对统计地下水资源量,使泉水持续喷涌具有重要意义。本文通过统计方法分析济南泉城降水补给特征及水文单元水力联系,以期为区域地下水开采提供参考。

2 降雨补给特征分析

选用济南地区 1990~2005 年的月降雨量,以及趵突泉泉域范围内普利门水井测得的泉域水位数据(图 3)进行分析,采用累积距平法和快速傅里叶变换(FFT)分析降雨量补给特征。

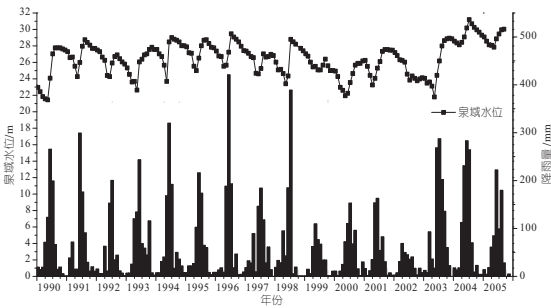


图 3 1990~2005 年月降雨量、泉域水位数据
Fig. 3 Monthly rainfall and spring water level data from 1990 to 2005

2.1 计算原理

采用累积距平曲线法直观判断降雨量变化趋势。对于序列 x ,其某一时刻 t 的累积距平 \hat{x}_t 为:

$$\hat{x}_t = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}) \quad (1)$$

其中
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

将 n 个时刻的累积距平值全部算出,即可绘出累积距平曲线。

采用快速傅里叶变换(FFT)进行低通滤波,实现曲线平滑^[3,4],进一步准确分析降雨量变化趋势。傅里叶变换的基本表达式为:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk} \quad n=0,1,\dots,N-1 \quad (2)$$

其中
$$W_N^{nk} = \exp\left(-\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad k=0,1,\dots,N-1$$

式中, $X(k)$ 为列长为 k 的输出序列,即经过傅里叶变换后的频域上的数据; $x(n)$ 为列长为 N 的输入序列。

2.2 计算结果分析

1990~2005 年月降雨量累积距平曲线及快速傅里叶变换(FFT)曲线计算结果见图 4。由图 4 可知,在一个年降雨周期内,月降雨量累积距平曲线变化幅度较大,大的累积距平值主要集中在 6~8 月,其余月份降雨量相对较小。这表明济南市月降雨量明显分布不均,丰、枯水季分化严重。根据 FFT 曲线,1990~1994 年,降雨量相对平稳。1995~2005 年,降雨量变化较大;1995~1998 年为丰水年份,月降雨量普遍高于研究期的月平均降雨量;1999~2002 年,降雨量逐年下降,甚至在 2002 年的丰水季,降雨量仍未回升;2003~2005 年,降雨量逐渐恢复正常水平。

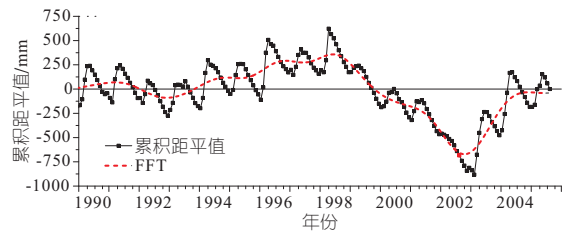


图 4 月降雨量累积距平及快速傅里叶变换(FFT)曲线
Fig. 4 Monthly rainfall accumulation anomaly and fast Fourier transform (FFT) curve

3 泉域水位响应特征分析

济南区域内的降雨通过垂直渗流补给带的入渗作用进入地下含水层,在单斜构造作用下,通过水平径流带不断向泉域汇集,因此泉域水位与区域降雨量息息相关。区域内的降雨过程虽然不连续,但它对地下水持续补给。地下水向泉域汇集过程中,考虑到地下水流速、过水断面等因素影响,及地下水非饱和带的储水作用等,降雨入渗对地下水的补给作用长期持续存在,因此降雨对地下水的补给具有滞后性,研究泉域长期水位需综合考虑前几个月的综合降雨量。

前几个月的降雨量对当月地下水汇集排泄区的补给水平需使用具有时间尺度的量来表征。某一时期的综合降雨量,采用降雨量移动平均值来表示。样本量为 n 的序列某一时期的降雨量移动平均值 \hat{x}_i 为:

$$\hat{x}_i = \frac{1}{k'} \sum_{j=i-k+1}^i x_j \quad i=1,2,\dots,n \quad (3)$$

式中, k' 为移动平均长度。

将不同移动平均长度 k' 计算出的降雨量移动平均值序列与泉域水位序列进行非参数统计相关分析-Spearman 秩相关检验。通过比较 Spearman 秩相关系数 r_s 的大小,确定降雨补给

滞后时间。

设有变量 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 、 $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ ，将其配对形成 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ 。对 x_i, y_i 各自排序，分别列出 x_i, y_i 在两个顺序变量中的名次(即秩)，分别记做 R_i, S_i ，得到 n 对秩 $(R_1, S_1), (R_2, S_2), \dots, (R_n, S_n)$ ，则 Spearman 秩相关系数 r_s 为：

$$r_s = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (4)$$

其中 $\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i; \bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i$

当 $r_s > 0$ 时为正相关, $r_s < 0$ 时为负相关, 其中, $|r_s|$ 越接近 1 时, 表示样本之间的相关程度越高, $|r_s|$ 越接近 0 时, 样本之间的相关程度越低。

为检验两个变量的相关性, 对检验问题进行假设, $H_0: \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 与 $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 不相关; $H_1: \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 与 $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 相关。通过对比 Spearman 秩相关系数 r_s 与 Spearman 秩相关系数检验临界值 r_s^a (查《Spearman 秩相关系数检验临界值表》) 的大小, 对问题的假设进行决策^[5]。

移动平均长度 k' 与 Spearman 秩相关系数 r_s 的关系曲线见图 5。由图 5 可知, 在 1% 显著性水平下, 降雨量三点至十四点移动平均值序列均与泉域水位序列正相关。降雨量三点移动平均值开始与泉域水位具有相关性, 这与图 3 中泉域水位最高点普遍滞后降雨量峰值 3 个月相对应, 反映单月降雨峰值流量流入泉群的时间普遍为 3 个月。随着移动平均长度 (k') 的增加, Spearman 秩相关系数 r_s 不断增大; 当降雨量的移动平均长度增至十点时, Spearman 秩相关系数 r_s 达到最大, 此时 $r_s = 0.84$, 因此泉域水位序列与济南地区降雨量十点移动平均值序列的相关性最强; 继续增

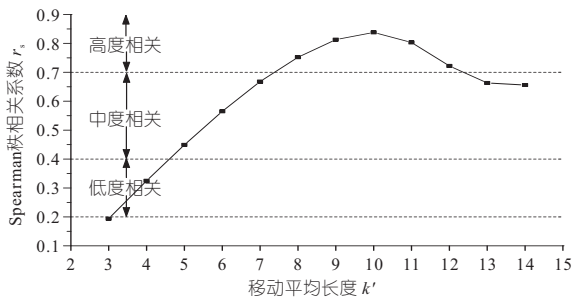


图 5 移动平均长度 (k') 与 Spearman 秩相关系数 r_s 的关系曲线

Fig. 5 Relation curve between moving average length (k') and Spearman rank correlation coefficient (r_s)

加移动平均长度, r_s 值则缓慢减小, 相关性降低。

图 6 为降雨量十点移动平均值与泉域水位关系散点图。由图 6 可知, 月降雨量经过十点移动平均处理后, 与泉域水位的相关性增强, 大部分散点集中在两条拟合曲线范围内。这表明单月降雨对泉域地下水的补给持续存在, 一般为十个月, 即研究期内, 当月泉域水位与前十个月的综合降雨量关系密切。因此, 垂直渗流补给带经水平径流带, 到达汇集排泄带的滞后周期为十个月。

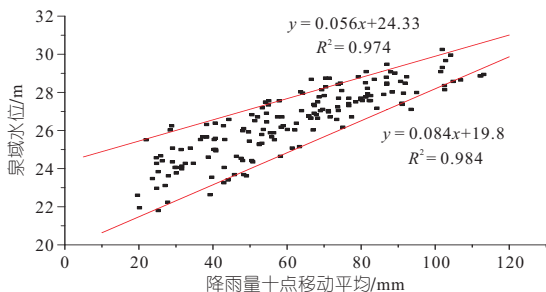


图 6 降雨量十点移动平均值与泉域水位关系散点图
Fig. 6 Scatter diagram of relationship between ten point moving average of rainfall and water level in spring area

4 水文单元水力联系

4.1 数据标准化

由于降雨量十点移动平均值序列和泉域水位数据波动较大, 为使两类数据具有统一的量化标准, 对数据进行标准化处理, 标准化处理公式^[6]为:

$$\tilde{x}_i = (x_i - \bar{x}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (5)$$

其中 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j$

式中, \tilde{x}_i 为标准化数据; x_i, x_j 为原始数据; x_{\max} 、 x_{\min} 分别为原始数据中的最大、最小值。

4.2 结果分析

根据式(4)作图 7。由图 7 可知, 经过数据标准化处理后, 降雨量十点移动平均标准值与泉域水位标准值的大小及变化趋势基本一致, 通过比较 I、II、III 区域的曲线变化, 分析三大主要水文单元间的水力联系。

(1) I 区域。自 1992 年开始, 济南市大流量开采城区、济东、济西的地下水, 导致年降雨量移动平均标准值在泉域水位标准值上方, 1993 年初变为在泉域水位标准值下方; 在城区、济西开采量维持不变的情况下, 济东地下水开采量由 16×10^4 /d 锐减至 6×10^4 /d, 这一状态持续近 3 个月。在此期间, 济南市的降雨量移动平均标准值与泉域水位标准值基本持平。这表明济东地下水单元与泉域水位无直接水力联系。

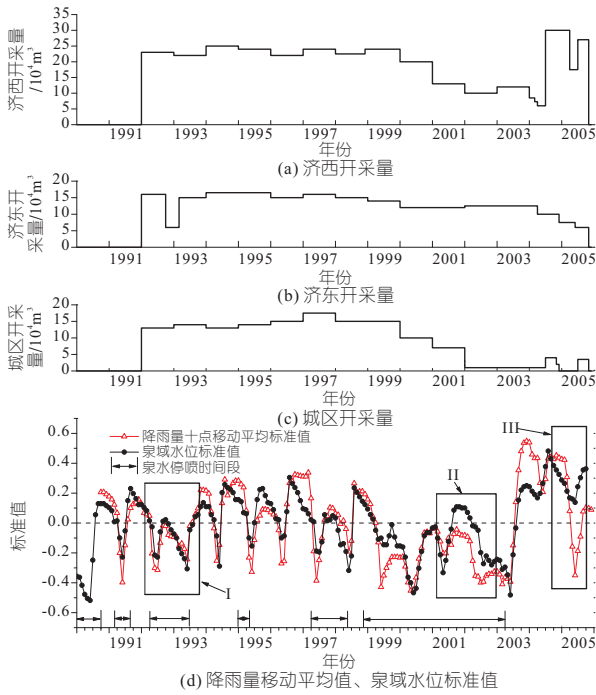


图7 1990~2005年各水文单元地下水日开采量及降雨量移动平均、泉域水位标准值数据

Fig. 7 Data of daily groundwater exploitation in each hydrological unit, moving average rainfall and standard value of spring water level from 1990 to 2005

(2) II区域。2001年初,城区、济西的地下水开采量开始减少,分别由 10×10^4 、 $22 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 减少至 7×10^4 、 $13 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,济东地下水开采量基本保持不变,在这一条件下,泉域水位的标准值开始明显高于降雨量移动平均标准值。泉域位于城区中心区域,泉域水位与城区地下水密不可分,通过分析II区域数据,有两种可能性:①城区和济西地下水均与泉域水位存在不同程度的水力联系;②仅城区地下水与泉域水位存在水力联系。

(3) III区域。2002年开始,城区地下水开始停采;2004年下半年,济西地下水开采量由 $6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 激增至 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$,泉域水位标准值与降

雨量移动平均标准值的差值逐渐增大;2005年上半年,济西地下水有三个月的时间开采量降低至 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$,泉域水位标准值反应较为明显,开始高于降雨量移动平均标准值。在排除济东地下水对泉域水位的影响后,可证实济西地下水与泉域水位存在水力联系。

以上分析表明,城区、济西地下水资源与泉域水位存在水力联系。

5 结论

a. 降雨量移动平均标准值与泉域水位相关系数数值最大,表明当前泉域水位与前十个月降雨量高度相关。

b. 泉域水位与城区、济西地下水文单元水力联系密切,与济东地下水文单元不存在水力联系。在确保“泉水万无一失”的前提下,可合理开采济东地下水资源。

c. 数据统计分析仅能从数据层面提供各数据间的内在联系,开采地下水的类型、开采井的影响半径等因素对泉域水位的影响值得进一步探讨。

参考文献:

[1] 赵延铸. 济南泉水地理[M]. 济南: 济南出版社, 2015.
 [2] 杨增元, 商昭诚, 商广宇, 等. 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.
 [3] 徐利岗, 周宏飞, 梁川, 等. 中国北方荒漠区降水多时间尺度变异性研究[J]. 水利学报, 2009, 40(8): 1002-1011.
 [4] 胡林金, 王博, 胡尚志, 等. 叶尔羌河径流量与降水量的变化特征分析[J]. 地下水, 2014, 36(4): 154-156.
 [5] 陶澍. 应用数理统计方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994.
 [6] 闫云霞, 王随继, 颜明, 等. 张掖盆地中部地下水位的时空变化及机理探讨[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(11): 90-97.

Study on Rainfall Supply and Response Characteristics of Jinan Spring Area and Hydraulic Relation of Hydrological Unit Based on Statistical Method

ZHENG Can-zheng

(Jinan Rail Transit Group Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: With the development of the city, the contradiction between urban water supply and spring protection has become increasingly prominent, and the groundwater resources must be developed reasonably under the premise of ensuring that the spring water is not affected. Monthly rainfall and water level data of Botu Spring Group from 1990 to 2005 in Jinan area were selected to analyze the characteristics of rainfall recharge and the lagging response of water level in spring area to precipitation by statistical method. When the average of three-point movement of precipitation starts to correlate with water level in spring area, the average of ten-point movement of precipitation has the strongest correlation with water level in spring area. The current spring water level is closely related to the comprehensive rainfall in the first ten months. After ten-point moving average treatment of precipitation, through comparative analysis of groundwater exploitation data in urban area, east of Jinan and west of Jinan, it is proved that water level in spring area is closely related to groundwater hydrology unit in urban area and west of Jinan, and there is no hydraulic connection with groundwater hydrology unit in east of Jinan, so groundwater unit in east of Jinan can be reasonably exploited.

Key words: average of movement; rainfall recharge; lagging response; hydraulic connection