第42卷 第5期	中国	岩	溶	Vol. 42	No. 5
2023 年 10 月	CARSOLOGI	CA	SINICA	Oct. 2	2023

孙斌,李常锁,许庆宇,等.长时间尺度下济南泉水动态特征与驱动因素演变分析[J].中国岩溶,2023,42(5):898-906,916. DOI:10.11932/karst20230503

长时间尺度下济南泉水动态特征与驱动因素演变分析

孙 斌^{1,2,3},李常锁^{1,2},许庆宇^{1,2},高 帅^{1,2},刘春伟^{1,2},邢立亭⁴,于令芹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;
3.中国海洋大学环境科学与工程学院,山东青岛266100;
4.济南大学水利与环境学院,山东济南250002)

摘 要:为识别 60 多年济南市区泉水动态变化规律,以长系列动态监测资料为基础,利用相关分析、 偏相关分析、回归分析及水均衡分析等方法,对泉水动态变化特征及其自然-人类活动等影响因素 进行分析。结果表明:济南市区四大泉群动态经历了壮观喷涌、景观衰减、长期间断断流和调控复 涌四个变化阶段,总体表现为驱动因素逐渐增多,泉水复涌前降水量影响逐渐减弱,开采量、城市建 设及水利工程影响逐渐增强,复涌后人工调控占据主导作用。定量识别出:一阶段主控因素为降水 量和开采量,平均影响量 58.17、-9.58 万 m³·d⁻¹, 二阶段主控因素降水量、开采量和水利工程,平均影 响量 52.01、-42.61、-5.98 万 m³·d⁻¹, 三阶段主控因素为开采量、降水量、水利工程和城市建设,平均影 响量 -51.82、51.42、-6.92、-2.40 万 m³·d⁻¹, 四阶段主要受控降水量、开采量、生态补源、城市建设和水 利工程,平均影响量为 55.38、-25.44、10.36、-8.99、-6.56 万 m³·d⁻¹。相关研究可为北方岩溶泉水保护 提供依据。

关键词:济南;四大泉群;泉水动态特征;驱动因素 中图分类号:P641.5 文献标识码:A 文章编号:1001-4810(2023)05-0898-09

0 前 言

北方岩溶大泉以山东和山西^[1]分布众多,泉水是 北方众多城市的供水水源,在经济社会发展中发挥 了重要作用,泉水合理开发利用与保护研究,对保障 生产、生活用水和维持生态环境意义重大。山东济 南泉水是我国北方地区岩溶大泉的典型^[2],仅在市区 环护城河一带集中分布着趵突泉、黑虎泉、五龙潭 和珍珠泉等四大泉群,泉眼 136 处。泉水是济南城 市的灵魂,在济南城市发展进程中发挥着举足轻重 的作用。在二十世纪五十年代末至六十年代初,市 区四大泉群自然出流量 30~35 万 m³·d⁻¹,具有很高的



观赏价值。然而,自1972年枯水期泉水开始出现季节性断流后,在1982、1988、1989年趵突泉竟然全年无水出流,1999—2002年泉水断流时间达926天,成为历史上断流时间最长的一次。直到2003年9月,政府部门采取了一系列措施后,市区四大泉群才得以常年喷涌,但泉流量大不如前。关于泉水流量衰减原因,许多学者主要采用统计分析^[3-4]、相关分析^[5]、回归分析^[5]、时序分析^[6-8]等方法进行分析研究,或是通过灰色系统模型、GM(1,1)分解模型、人工神经网络模型、时间序列分析、耦合法等方法^[9-12]模拟预测泉流量变化。目前,济南泉水动态研究时间跨度短^[13-14],尤其是泉水复涌之后的人类强影响时期,且

第一作者简介:孙斌(1982-),男,高级工程师,主要从事水文地质与环境地质勘察研究。Email: spinhlr@163.com。

收稿日期:2023-04-20

基金项目:国家自然科学基金(42272288, 42202294);山东省自然科学基金(ZR2021QD084)

缺乏长周期不同阶段对比分析;复杂人类活动影响 因素分析少,特别是针对城市建设影响^[5,15],多以整 个建成区面积为研究对象,忽视了径流排泄区本身 不具备入渗条件,导致硬化影响面积统计过大。为 了更全面揭露济南市区四大泉群泉水动态演化规律, 识别出影响泉水喷涌的主控因素演变,更好地指导 济南区域岩溶地下水资源开发利用和环境保护,特 对近 60 多年来泉水动态特征及成因进行研究。

1 地质背景

济南地处中纬度内陆地带,属暖温带大陆性气候, 春季干燥少雨,夏季炎热多雨,历年平均气温 14.2 ℃, 最高气温达 42.7 ℃(1942 年 7 月 6 日),最低气温达 -19.7 ℃(1953 年 1 月 17 日)。近 60 多年气象资料 显示,最大年降水量 1 194.50 mm(1964 年),最小年 降水量 340 mm(1989 年),多年平均降水量为 646.55 mm,在 6—9 月集中降水,12 月至翌年 3 月较小。济 南地处鲁中山地的北缘,南依泰山,北临黄河,地形南 高北低,变化显著。南部为绵延起伏的山区,泰山山 脉走向近东西,山势陡峻,深沟峡谷,绝对标高 500~ 600 m;北部为山前倾斜平原,绝对标高一般 25~50 m。 受自然地理条件的控制,区内发育自南而北流向的大 小河流,玉符河、北沙河汇入黄河,腊山河、兴济河、 玉清河、大辛河等属于小清河的支流或源头。

市区四大泉群所处区域属趵突泉泉域,地层由 老到新依次出露有太古界泰山岩群、古生界寒武系、 奥陶系、新生界第四系(图1),燕山期侵入的辉长岩



Fig. 1 Hydrogeological background of Baotu Spring area

体在北部隐伏第四系之下。由南向北大致划分为泉 水间接补给区、直接补给区和汇集排泄区三个功能 区。间接补给区主要接受寒武系岩溶水和泰山岩群 变质岩裂隙水补给,直接补给区主要接受奥陶系岩 溶水补给,汇集排泄区地下水受北部燕山期火成岩 体阻挡而富集,而后在市区有利位置出露形成四大 泉群。

2 资料与方法

自1959年来的泉水流量、水位数据主要依据山 东省地矿局八〇一队在济南积累的长系列实测资料。 降水量数据为年降水总量,主要收集济南市水文局 和济南市水资源公报公开资料。开采量主要包括集 中供水水源地、自备井及农灌开采总量,主要依托山 东省地矿局八〇一队在济南长期勘查统计资料及济 南市泉水保护办公室公开数据。直接补给区内城市 建设面积数据主要依据不同时期遥感影像资料解译 得到。生态补源数据主要收集济南城乡水务局部分 公开数据及媒体报道资料,经系统整理、对比分析及 插值计算,汇总形成补源量统计数据。

相关性分析^[16] 主要采用 IBM SPSS 22 的 pearson

相关分析、偏相关分析模块进行计算。动态曲线图 主要利用 grapher 10.0 软件绘制,平面图主要利用 Gis 软件绘制。水均衡分析通过公式 $Q_{13}=Q_{A}$,- $Q_{1\#}=(Q_{P}+Q_{B}-Q_{C}-Q_{R})-(Q_{D}+Q_{S})$ 计算,其中, Q_{P} 为降水 人渗补给量, Q_{B} 为生态补源量, Q_{C} 为城市建设削减 补给量, Q_{R} 为水利工程拦蓄补给量, Q_{D} 为人工开采 量, Q_{S} 为泉水流量。

3 结果与讨论

3.1 泉水流量和水位动态特征

对1959—2020年泉水动态数据统计分析,得到 了不同时期泉水流量、水位等特征统计表(表1)。 市区四大泉群流量初期基本稳定在30万m³·d⁻¹以上, 最高可达50.18万m³·d⁻¹(1962年);中期持续大幅下 降,并呈现频繁断流、甚至长时间断流;后期泉水得 以复涌,流量相对稳定,但总体仍呈缓慢下降趋势, 年均流量由25.60万m³·d⁻¹减少至13.78万m³·d⁻¹。 泉水年平均水位总体由30.48m先经历大幅下降,达 到历史最低水位20.08m^[5],在2003年以后有所恢复, 平均水位28.24m,但无法恢复至1960年水平。泉 水流量与水位具有极其相似的变化规律。

年代 -		年均泉流量/	$10^{4} \text{ m}^{3} \cdot \text{d}^{-1}$		年均泉水位/m				
	最大值	最小值	平均值	Cv	最大值	最小值	平均值	Cv	
1960s	50.18	26.13	36.66	0.24	21.86	28.75	30.48	0.04	
1970s	20.13	9.42	14.20	0.21	28.67	27.25	27.90	0.02	
1980s	9.29	0.04	3.79	0.80	27.43	24.26	26.25	0.04	
1990s	15.71	0	6.56	0.94	27.80	24.21	26.48	0.04	
2000s	25.6	0.15	13.68	0.67	28.71	25.1	27.6	0.05	
2010s	18.71	13.78	15.62	0.10	28.67	27.83	28.24	0.01	

	表 1 济南趵突泉泉域典型时期泉流量及泉水位统计表
Table 1	Statistics of spring discharge and spring water level in the typical period of Baotu Spring area in Jinan

注:变异系数(Cv)为无量纲。

Note: variation coefficient (Cv) is dimensionless.

根据济南市人民政府印发的《济南市保持泉水 喷涌应急预案》,将趵突泉泉水水位设置了黄色、橙 色和红色三个预警水位线,分别为28.15 m、28.00 m 和27.60 m。结合预警水位线和水位动态特征,将多 年泉水水位动态变化划分为四个阶段(图2),1968 年以前为大于28.5 m的壮观喷涌阶段,1968—1980 年为橙色警戒线左右震荡阶段,1981—2002 年为低 于红色警戒线的普遍断流阶段,2003年以后为略高 于黄色警戒线的复流阶段。

3.2 驱动因素与泉水动态的关系

3.2.1 降水量和开采量

降水入渗补给量(Q_P , m³)可由年降水量(P, mm)、 降水入渗补给系数(α)以及补给区面积(A, km²)计算





得出,其公式为:

$$Q_p = P \cdot \alpha \cdot \mathbf{A} \cdot 10^{-3} \tag{1}$$

其中降水入渗系数、补给区面积与城市化建设有关, 相关参数可从前人研究中收集^[15]。

为了研究泉流量与降水量或开采量的线性相关 性,先通过泉流量与降水量相关分析得出(表 2),泉 流量随降水量呈现周期性变化特征。总体看泉流量 与降水量呈弱正相关关系,且阶段一相关系数最大, 阶段四、阶段三次之,阶段二最小。阶段一相关系 数 0.857,表明降水量是影响泉流量的主导因素,后 期降水量影响减弱。再通过泉流量与开采量相关分 析得出,泉流量与开采量总体上呈强负相关关系,阶 段一、阶段二为中等负相关,且开采量影响程度逐渐 增强,即开采量越大对泉水流量影响越大。

偏相关分析,可以将引起共线性的变量剔除出 来,作为控制变量,分析存在共线性变量间的相关关 系。因此,基于泉流量与降水量、开采量的共线性关 系,分别将开采量、降水量作为控制变量,对泉流量 与降水量、泉流量与开采量进行偏相关分析。结果 表明(表 3),降水量的影响在阶段二得到显著提升, 偏相关系数 0.679,降水量影响程度随时间发展而逐 渐减弱。开采量的影响在阶段二也得到较大提升, 偏相关系数-0.746,阶段一、阶段二偏相关系数表明 开采量越大对泉流量影响越大,阶段三、四相关性不 明显。

3.2.2 城市建设

nian 济南城市建设与泉水补给量减少关系密切, 尤其是在泉水的直接补给区。由于路面硬化,改变 了下垫面条件,导致降水无法入渗。根据 1958年、 1970年、1980年、2000年、2010年、2015年不同时 期遥感资料解译,趵突泉泉域泉水直接补给区被侵 占面积(3)别为 1.99、5.72、10.35、53.27、113.45、

表 2	泉流量与降水量、开采量相关分析统计表

Table 2	Statistics of	correlation	coefficient betwee	n spring di	scharge and	l the indexes	s such as pre	ecipitation and	l exploitation

	阶段一	阶段二	阶段三	阶段四	全阶段
相关系数(降水量)	0.857**	0.344	0.560**	0.585^{*}	0.428**
相关系数(开采量)	-0.507	-0.523	0.389	0.418	-0.766**

注:*表示在0.05水平上显著相关;**表示在0.01水平上显著相关。

Note: *indicates a significant correlation at the level of 0.05; ** indicates a significant correlation at the level of 0.01.

表 3 泉流量与降水量、开采量偏相关分析统计表

Table 3 Statistics of partial correlation coefficient between spring discharge and the indexes such as precipitation and exploitation

	阶段一	阶段二	阶段三	阶段四	全阶段
偏相关系数(降水量)	0.844	0.679	0.609	0.487	0.529
偏相关系数(开采量)	-0.445	-0.746	0.471	0.219	-0.797

130.00 km²(图 3)。利用城建时序数据分析得出回归 模型 y=1E-64e^{0.0756x}, 进一步揭示出 2010 年以前城建 面积随时间呈指数增长,四阶段的平均增长速率分 别为 0.28、0.48、2.36、4.83 km²·a⁻¹。说明 1980 年以

后增速较快,影响逐渐明显,2000年以后更加显著; 但是,2010年以后增速略有减缓,说明城市南扩受到 一定限制。





3.2.3 生态补源

生态补源始于2001年卧虎山水库放水试验,取 得良好效果[17],随后开始大力实施生态补源保泉措 施。生态补源地点最初主要位于玉符河渗漏段,后 来随着地表水转地下水工程、五库联通工程建设,逐 步增加了历阳湖、玉绣河、兴济河、大辛河和水井等 补源点,水源由地表水单一水源转变为大明湖弃水、

Table 4

黄河水、长江水、地表水等多水源联合调蓄补源。 根据生态补源量统计数据(表 4),水库放水生态补源 主要发生在11月至次年6月,为了便于与其他影响 因素对比分析,统一将年补源总量折算为日补源量。 总体表明, 生态补源量呈逐年增加趋势, 补源量由2 万 m³·d⁻¹ 左右, 逐步增加至 15~20 万 m³·d⁻¹, 多年平 均补源量为 10.36 万 m³·d⁻¹。

表 4 年生态补源总量统计表/万 m³ Statistics of total amount of annual ecological supplementary sources (ten thousand m³)

					υ	11	5	<		
5	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2

年份	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
补源量	800	900	800	1 900	1 900	750	1 067	1 811	1 800	2 056
年份	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
补源量	1 848	1 969	4 104	5 986	5 976	6 992	6 325	6 513	6 695	6 595

3.3 驱动因素演变分析

为量化对比分析各阶段主控因素构成及其对济 南泉水的影响,统一计算不同阶段的各因素折算影 响量(图 4)。根据多年自然平均岩溶水补给量 53.3 万 m³·d^{-1[18]}, 对应年均降水量 679.25 mm, 可计算降水 影响量的折算系数为 0.078 5, 以四个阶段年平均降 水量折算出补给影响量分别为 58.17、52.01、51.42、 55.38万m³·d⁻¹。水利工程如水库、拦水坝、分洪滞 洪工程等通过改变径流的时空分配过程影响区域的

水循环,从而导致河川径流量的减少,相应的河道渗 漏补给地下水的量也会降低, 卧虎山水库等水利工 程拦蓄影响量,与降水量、调蓄有关联,根据以往研 究^[19] 统计。

阶段一:1959—1967年,降水量处于一个较高的 水平,多年平均降水量达到了 741.60 mm,为近一百 年以来最高,尤其是1962—1964年,降水量达到 900 mm 甚至接近 1 200 mm, 对地下水的补给作用巨 大。1936年济南趵突泉水厂投入使用,至20世纪



Fig. 4 Comparison of conversion influence quantities of various factors in the four stages

60年代市区相继建立了五大牧场、普利门、饮虎池、 解放桥、泉城路水厂和东郊的冷水沟水厂,但该时期 地下水开采量相对较小,年平均为9.58万m³·d⁻¹。城 市建设此时期影响较小,仅0.26万m³·d⁻¹,可以忽略。 趵突泉水位处于有观测记录以来的较高水平,平均 水位约30.48m。水均衡结果Q_均为11.67万m³·d⁻¹, 为正均衡。因此,该阶段大气降水为主控因素,开采 量次之,总补给量远大于排泄量,泉水流量历史 最高。

阶段二:1968-1980年,多年平均降水量为 663.30 mm, 较上一时期有所下降。随着供水需求的 加大,20世纪70年代至80年代初期,市区增建了八 里洼水厂,东郊开建了工业北路水厂,西郊开建了腊 山、峨嵋山、大杨庄水厂,开采量在这一时期表现为 陡增的变化特征,由 23.41 m³·d⁻¹ 增至 56.93 万 m³·d⁻¹, 年平均开采量 42.61 万 m³·d⁻¹, 与一阶段相比开采量 影响显著增强^[20]。城市建设发展较慢,对泉水直接 补给区破坏较小,影响量约0.57万m³·d⁻¹。水利工程 开始截留下游径流,影响入渗补给量,平均影响量 5.98万m³·d⁻¹。该时期趵突泉水位从 28.21 m(1968 年)降低至 27.4 m(1980 年), 总体呈缓慢下降趋势。 水均衡结果 Q_均为-11.35 万 m³·d⁻¹, 为负均衡。因此, 该阶段降水量、开采量为主控因素,水利工程次之, 总排泄量大于总补给量,地下水资源衰减严重,由于 前期储存量大,泉水并未形成严重断流。

阶段三:1981-2003年,多年平均降水量

627.42 mm,降水量的多年震荡变化显著,尤其是在 1981—1993 阶段为降水偏少时期, 1989 年降水量仅 340 mm 左右, 1990 年降水量达到 1 047 mm, 而在 1994—1996年,降水量显著增大,同时趵突泉水位震 荡变化明显,水位变化区间为 20.08~27.8 m。这一时 期市区及东、西郊各大水厂格局已经基本形成,用水 量持续保持较高水平,年均开采量一般维持在50万 m³·d⁻¹以上,90年代达到60万m³·d⁻¹左右,开采量变 化不大,导致相关性分析结果不符合实际。该时期 济南城市建设进入快速增长阶段,主要向南部四大 泉群正南的羊头峪、八里洼、千佛山一带奥陶纪灰 岩区扩展,影响泉水补给量约2.4万m³·d⁻¹。水利工 程平均影响量 6.92万 $m^3 \cdot d^{-1}$ 。水均衡结果 Q_{μ} 为 -14.41万 m³·d⁻¹, 为负均衡。因此, 该阶段开采量、 降水量为主控因素,水利工程次之,城市建设最小, 此阶段开采量影响超过降水量,外加降雨偏少,泉水 资源长期处于严重亏损状态,断流频发。

阶段四:2004—2020年,多年平均降水量为 705.75 mm,趵突泉流量和水位较前两个阶段有较大 恢复,平均开采量降至25.44万m^{3.}d⁻¹,这是保障泉水 复流的重要因素之一。21世纪以来直接补给区城区 建设又进入爆发式增长阶段,东郊高新技术产业开 发区、大小汉峪、孟家、中井、荆山、浆水泉、太平庄、 兴隆-土屋、金鸡岭、十六里河、九曲、七贤镇、南北 康而、腊山、党家庄及长清大学城等一带,已基本被 规划和建设为各类开发区,年均减少入渗量8.99万 $m^{3} d^{-1}$ 。水利工程在 21 世纪初又进行了扩库增容, 卧虎山水库总库容达到 1.17 亿 m³, 锦绣川水库总库 容达到 4 150 万 m³, 大大加强了上游地表水拦蓄能 力,年均截留补给量 6.56 万 m³·d⁻¹;但与此同时借助 于卧虎山水库、锦绣川水库、兴隆水库、浆水泉水库、 孟家水库等五库连通工程,在有利位置进行多水源 生态补源,这在很大程度上弥补了原水库截留的补 给量,人为地改变了自然界中"三水"转化的水循环, 增加了泉水有效补给,生态补源量达到年均10.36万 m³·d⁻¹。水均衡结果 Q_均为 7.69 万 m³·d⁻¹, 为正均衡。 因此,该阶段同时受降水量、开采量、生态补源、城 市建设和水利工程多重因素影响,显然通过大量封 停自备井以及利用引黄、引江、大明湖弃水南调等 工程实施生态补源,在很大程度上弥补了城市建设 与水利工程截留的补给量,大大改善了泉域地下水 循环,人工调控作用显著,泉水才能够实现长期复流。

总之,泉水流量影响驱动因素呈现由单一向多 元、由简单向复杂方向转化。阶段一地下水资源充 足,且开发利用程度较低,影响因素单一,主要受降 水量控制;阶段二、阶段三地下水开采监管缺失,过 度利用逐步占据主导因素,导致储存资源锐减,水库 拦蓄、城市扩张等人类活动进一步加剧地下水资源 枯竭;阶段四地下水开采受到监管,城市扩张得到一 定控制,生态补源在很大程度上修复了部分人类活 动破坏的水循环,在综合人工调控作用下,水均衡实 现由负转正。

4 结 论

(1)通过对近 60 多年来济南市区四大泉群流量 和水位分析,揭露出泉水动态经历了 4 个转折阶段: 1959—1967 年为大流量、高水位泉水壮观喷涌阶段, 1968—1980 年为小流量、低水位泉水景观衰减阶段, 1981—2002 年为极小流量、极低水位泉水长期间断 断流阶段,2003 年之后为人工调控泉水复涌阶段。 泉水平均流量由 36.66 万 m³·d⁻¹减至 14.20 万 m³·d⁻¹; 再减至 4.69 万 m³·d⁻¹,后又恢复到 17.06 万 m³·d⁻¹; 泉 水平均水位由 30.48 m 降至 27.91 m,再降至 26.25 m, 后又恢复到 28.24 m。

(2)通过相关分析、偏相关分析和回归分析,结 合水文地质条件、人类活动影响,在水均衡理论指导 下,综合识别出4个阶段泉水流量成因及影响程度 大小。1959—1967年,主要受控于降水量、开采量, 影响程度分别为58.17、9.58万m³·d⁻¹;1968—1980 年,主要受控于降水量、开采量、水利工程,影响程 度分别为52.01、42.61、5.98万m³·d⁻¹;1981—2002 年,主要受控于开采量、降水量、水利工程、城市建 设,影响程度分别为51.82、51.42、6.92、2.40万m³·d⁻¹; 2003年之后,主要受控于降水量、开采量、生态补源、 城市建设、水利工程,影响程度分别为55.38、25.44、 10.36、8.99、6.56万m³·d⁻¹。

(3)从分析结果看出,总体上降水量和开采量对 泉流量起控制作用,但 2003 年以后人类调控作用异 常显著。当下要保持泉水持续喷涌,首先应当确保 趵突泉泉域内"三水"转化能够有效进行;其次要加 强动态监测和调控管理,合理地统筹地下水开采、生 态补源以及水利工程等主控因素,依靠多部门联合 共享机制,科学细致制定地下水优化开发方案;最后, 为降低城市化对泉水的影响,要着重加强对南部泉 水补给区生态环境保护与修复,提高水资源涵养能力。

参考文献

[1] 钱学溥. 山西省岩溶泉水[J]. 水文地质工程地质, 1979(5): 47-52.
 QIAN Xuebo. Karst spring in Shanxi Province[J]. Hydrogeol-

ogy & Engineering Geology, 1979(5): 47-52.

- [2] 柏红. 济南泉水漫谈[J]. 山东国土资源, 2009, 25(10): 66-68.
 BAI Hong. Primary introduction to springs in Jinan City[J].
 Shandong Land and Resources, 2009, 25(10): 66-68.
- [3] 张效平,宋儒.洪山泉流量动态及影响因素分析[J]. 中国煤田 地质, 2002, 14(3): 31-32, 41.
 ZHANG Xiaoping, SONG Ru. Discharge dynamics of Hongshan spring and its analyses on influence factors[J]. Coal Geology of China, 2002, 14(3): 31-32, 41.
- [4] 梁永平, 高洪波, 张江华, 霍建光, 王桃良. 娘子关泉流量衰减 原因的初步定量化分析[J]. 中国岩溶, 2005, 24(3): 227-231.
 LIANG Yongping, GAO Hongbo, ZHANG Jianghua, HUO Jianguang, WANG Taoliang. Preliminary quantitative analysis on the causes of discharge attenuation in Niangziguan spring[J]. Carsologica sinica, 2005, 24(3): 227-231.
- [5] 王茂枚, 東龙仓, 季叶飞, 陶玉飞, 董贵明, 刘丽红. 济南岩溶泉 水流量衰减原因分析及动态模拟[J]. 中国岩溶, 2008, 27(1): 19-23.
 WANG Maomei, SHU Longcang, JI Yefei, TAO Yufei, DONG Guiming, LIU Lihong. Causes of spring's of flux attenuation and simulation of spring's regime: A case in Jinan karst spring area[J]. Carsologica Sinica, 2008, 27(1): 19-23.
- [6] 于苗,邢立亭,吴吉春,侯玉松,朱恒华,彭玉明,李罡.基于时

间序列分形的济南岩溶大泉动态研究[J]. 地质学报, 2020, 94(8): 2509-2519.

YU Miao, XING Liting, WU Jichun, HOU Yusong, ZHU Henghua, PENG Yuming, LI Gang. Study of large karst springs using the time series fractal method in Jinan[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(8): 2509-2519.

 [7] 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 variation of karst groundwater level in the Niangziguan spring area [J]. Carsologica sinica, 2020, 39(6): 810-816.

- [8] 陈荦,张幼宽,王长申.基于时间序列分析的辛安泉流量变化研究[J].水文地质工程地质,2012,39(1):19-23,41.
 CHEN Luo, ZHANG Youkuan, WANG Changshen. A study of evolution of the discharge of the Xin'an spring with time series analysis[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(1): 19-23, 41.
- [9] 郝永红, 王玮, 王国卿, 杜欣, 朱宇恩, 王学萌. 气候变化及人类 活动对中国北方岩溶泉的影响: 以山西柳林泉为例[J]. 地质 学报, 2009(1): 138-144.

HAO Yonghong, WANG Wei, WANG Guoqing, DU Xin, ZHU Yuen, WANG Xuemeng. Effects of climate change and human activities on the karstic springs in Northern China: A case study of the Liulin springs[J]. Acta Geologica Sinica, 2009(1): 138-144.

- [10] 王亚捷,王国卿,郝永红,李华敏,赵娇娟. 人类活动对柳林泉 域水文过程影响研究[J]. 水文, 2011, 31(3): 82-87.
 WANG Yajie, WANG Guoqing, HAO Yonghong, LI Huamin, ZHAO Jiaojuan. Effect of human activities on hydrological process of Liulin springs[J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(3): 82-87.
- [11] 李华敏, 吴敬, 赵娇娟, 郝永红, 王亚捷, 曹碧波. GM(1, 1)分解 模型与ARIMA模型在岩溶地下水模拟中的对比研究: 以柳林 泉流量模拟为例[J]. 中国岩溶, 2011, 30(3): 260-269.
 LI Huamin, WU Jing, ZHAO Jiaojuan, HAO Yonghong, WANG Yajie, CAO Bibo. Comparative study on karst groundwater simulation between GM (1, 1) decomposition model and ARIMA model: A case study on discharge simulation of the Liulin spring[J]. Carsologica sinica, 2011, 30(3): 260-269.
- [12] 王喆. 岩溶地下水系统演化的数值模拟[J]. 地质科技情报, 2013, 32(4): 201-206.
 WANG Zhe. Numerical simulation of the karst groundwater system evolution[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(4): 201-206.

- [13] 相华,封得华,蒋国民.济南四大泉群泉水出流量分析[J].山 东水利,2017(12):49-50.
- [14] 迟光耀, 邢立亭, 主恒祥, 侯新宇, 相华, 邢学睿. 大气降水与济南泉水动态变化的定量关系研究[J]. 地下水, 2017, 39(1):
 8-11.

CHI Guangyao, XING Liting, ZHU Hengxiang, HOU Xinyu, XIANG Hua, XING Xuerui. The study of quantitative relationship between the spring water and the dynamic change of the atmospheric precipitation in Jinan[J]. Ground Water, 2017, 39(1): 8-11.

- [15] 倪寒茜, 束龙仓, 韩刚, 张曼琦, 王鑫, 王小博, 余亚飞, OPOKU Portia Annabelle. 城市化对趵突泉泉域降水入渗补给的影响
 [J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(6): 64-70, 147. NI Hanxi, SHU Longcang, HAN Gang, ZHANG Manqi, WANG Xin, WANG Xiaobo, YU Yafei, OPOKU Portia Annabelle. Impact of urbanization on precipitation infiltration recharge in Baotu Spring basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(6): 64-70, 147.
- [16] 尹德超, 吴玺, 崔虎群, 王文祥, 王晓燕, 王茜, 安永会. 西北内 陆盆地浅层地下水温度场及动态类型: 以酒泉东盆地为例[J]. 地质科技通报, 2022, 41(1): 193-202.
 YIN Dechao, WU Xi, CUI Huqun, WANG Wenxiang, WANG Xiaoyan, WANG Qian, AN Yonghui. Temperature field and dynamic types of shallow groundwater in the northwest inland basin: A case study of the Jiuquan east basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(1): 193-202.
- [17] 吴兴波, 牛景海, 牛景霞, 宋星原. 人工回灌对济南泉水系统修复的影响[J]. 人民黄河, 2004(8): 20-22.
 WU Xingbo, NIU Jingtao, NIU Jingxia, SONG Xingyuan. Influence of artificial recharge of groundwater on rehabilitation of spring system in Jinan[J]. Yellow River, 2004(8): 20-22.
- [18] 刘江,李波,杨增元,杜雪梅. 卧虎山水库对济南泉水影响的定量分析[J].水资源保护, 2012, 28(1): 67-70.
 LIU Jiang, LI Bo, YANG Zengyuan, DU Xuemei. Quantitative analysis of influences of Wohushan reservoir on Jinan karst spring basin[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(1): 67-70.
- [19] 李波. 卧虎山水库对济南泉域岩溶水补给的影响[D]. 济南: 济 南大学, 2011.

LI Bo. The influence of Wohushan reservoir to Jinan karst spring basin[D]. Jinan: University of Jinan, 2011.

[20] 李传谟. 济南岩溶水资源的分析与泉水名胜的保护[J]. 中国 岩溶, 1985, 4(Suppl.1): 31-39.
LI Chuanmo. Analysis on karst resources and preservation of famous spring in Jinan[J]. Carsologica sinica, 1985, 4(Suppl.1): 31-39.

Analysis of dynamic characteristics and driving factors of Jinan spring water on a long-time scale

SUN Bin^{1,2,3}, LI Changsuo^{1,2}, XU Qingyu^{1,2}, GAO Shuai^{1,2}, LIU Chunwei^{1,2}, XING Liting⁴, YU Lingqin¹ (1. 801 Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources (Shandong Provincial Geomineral Engineering Exploration Institute), Jinan, Shandong 250014, China; 2. Shandong Engineering Research Center for Environmental Protection and Remediation on Groundwater, Jinan, Shandong 250014, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China; 4. School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan, Shandong 25002, China)

Abstract Springs of Jinan City in Shandong Province are typically large karst ones in Northern China. With 136 mouths of springs, there are four major spring groups, namely, Baotu Spring, Heihu spring, Wulongtan spring and Pearl spring, distributed around the moat in the urban area. Springs are the lifeblood of Jinan City and play an important role in the development of this city. However, since the dry season in 1972, the springs had witnessed seasonal cutoffs. Baotu Spring even experienced complete cutoffs throughout the respective year of 1982, 1988 and 1989. From 1999 to 2002, the cutoff of this spring spanned 926 days, the longest cutoff time in history. Until September 2003, thanks to a series of measures taken by the government, the four major springs began to gush all year-round, but the spring flow is much less than before.

Currently, studies usually focus on short-time-span spring dynamics in Jinan instead of long-term comparative studies on spring dynamics in different periods. Especially, the strong human influence on spring dynamics after springs gushed again needs further research. Few analyses of the influence factors of complex human activities, such as the impact of urban construction are relatively few. In these studies, the whole built-up area has been taken as the object, which ignores the fact that the runoff discharge area itself does not have the condition of infiltration, resulting in the overestimation of hardening area in statistics. In order to comprehensively explore the dynamic evolution of the four major spring groups and the main control factors affecting spring gushing, we have conducted a study on the dynamic characteristics and causes of springs over the past 60 years for the development and utilization of karst groundwater resources and environmental protection in the Jinan region.

To identify the dynamic change pattern of the four spring groups in Jinan, we have studied the dynamic change characteristics of the springs and their influencing factors such as natural-human activities, etc. through correlation analysis, partial correlation analysis, regression analysis, and water balance analysis, based on a series of monitoring data for a long term. The results indicate that the dynamics of the four springs in Jinan City have experienced four stages: stage 1 from 1959 to 1967, at which the springs gushed spectacularly with a large amount of flow at a high water level; stage 2 from 1968 to 1980, at which the landscape of springs attenuated with a small amount of flow at a low water level; stage 3 from 1981 to 2002, at which the springs experienced long-term intermittent cutoff with a very small amount of flow at a rather low water level; stage 4 from 2003 up till now, at which the springs gushed again because of the regulated restoration. At stage 4, the average flow rate of springs decreased from 366.6 thousand $m^3 \cdot d^{-1}$ to 142.0 thousand $m^3 \cdot d^{-1}$, then to 46.9 thousand $m^3 \cdot d^{-1}$, but subsequently recovered to 170.6 thousand $m^3 \cdot d^{-1}$; the average water level of springs decreased from 30.48 m to 27.91 m, then to 26.25 m, but afterward, recovered to 28.24 m.

In addition, this study quantitatively identifies the influencing factors and the degree of impact in each stage. The main control factors at stage 1 are precipitation and extraction, with an average impact degree of 581.7 thousand $m^3 \cdot d^{-1}$ and -95.8 thousand $m^3 \cdot d^{-1}$; the main control factors at stage two are precipitation, extraction and water engineering, with an average impact degree of 520.1 thousand $m^3 \cdot d^{-1}$, -426.1 thousand $m^3 \cdot d^{-1}$ and -59.8 thousand $m^3 \cdot d^{-1}$; the main

(下转第916页)

 $HCO_3 \cdot SO_4$ -Ca ·Mg. The recharging of water from the external source has a certain impact on the quality of the local karst water. The changes in the ion content of karst water in the affected area are mainly caused by the physical mixing of river water and karst water, accompanied by changes in water-rock balance. After a hydrological year, each ion gradually approaches its original content level after supplementing the source. The research results provide a basis for the scientific implementation of recharging and replenishment of the Yufu river, and have certain significance in promoting the organic unity of spring protection and water supply. This article does not consider the impact of seasonal atmospheric precipitation on groundwater hydrochemistry and isotopes. The atmospheric waterline used for isotope analysis is not the local atmospheric waterline, and these issues may have a certain impact on the results obtained, which is a topic that we need to further study.

Key words Yufu river, karst water, isotope, hydrochemistry, external water recharge, groundwater

(编辑杨杨张玲)

(上接第906页)

control factors at stage 3 are extraction, precipitation, water engineering, and urban construction, with an average impact degree of -518.2 thousand $m^3 \cdot d^{-1}$, 514.2 thousand $m^3 \cdot d^{-1}$, -69.2 thousand $m^3 \cdot d^{-1}$ and -24.0 thousand $m^3 \cdot d^{-1}$; the main control factors at stage 4 are precipitation, extraction, ecological replenishment sources, urban construction, and water engineering, with an average impact degree of 553.8 thousand $m^3 \cdot d^{-1}$, -254.4 thousand $m^3 \cdot d^{-1}$, 103.6 thousand $m^3 \cdot d^{-1}$, -89.9 thousand $m^3 \cdot d^{-1}$ and -65.6 thousand $m^3 \cdot d^{-1}$. In general, precipitation and extraction control the spring flow, but other driving factors gradually increased with the development at the four stages. Before the springs gushed again, the impact of precipitation gradually weakened, but the influence of extraction, urban construction and water conservancy projects gradually increased by degrees. After the springs gushed again, the impact of the government's regulation and control played a dominant role.

To keep a continuous gush of spring, first of all, we should ensure that Baotu Spring area 3-type water conversion can be effectively carried out. Besides, we should strengthen dynamic monitoring and regulation, rationally coordinate major factors such as groundwater mining, ecological replenishment and water conservancy projects, etc., and formulate an optimal groundwater development program in a scientific and elaborate way, relying on the sharing mechanism among different departments. Finally, in order to reduce the impact of urbanization on springs, we should strengthen the protection and restoration of ecological environmental in the recharge area of southern springs so as to improve the capacity of water resources conservation. The research results can provide basis for spring runoff protection.

Key words Jinan, four major spring groups, spring dynamic characteristics, driving factors

(编辑杨杨黄晨晖)