

孟庆晗, 邢立亭, 彭凯, 等. 基于氡同位素的济南泉域地下水更新能力研究[J]. 中国岩溶, 2025, 44(1): 38-47.
DOI: 10.11932/karst20250102

基于氡同位素的济南泉域地下水更新能力研究

孟庆晗¹, 邢立亭², 彭凯¹, 朱文峰¹, 刘连¹, 何强¹, 徐冰¹, 潘潍艳², 宋其峰³

(1. 山东省第一地质矿产勘查院, 山东 济南 250100; 2. 济南大学水利与环境学院, 山东 济南 250002; 3. 昌乐县规划编制研究中心, 山东 潍坊 262400)

摘要: 为探究济南岩溶泉域地下水更新能力, 基于泉域水文地质条件建立氡同位素衰减模型, 分析泉水及不同层位地下水年龄, 以此精确阐明地下水及泉水年龄和循环特征。结果表明: (1) 径流排泄区寒武系地下水年龄在 22~85 a, 奥陶系地下水年龄在 3~22 a, 地下水更新能力随深度递减, 深层含水层循环能力较弱, 在地下水开发和利用的过程中尤其应注意对深层地下水的保护; (2) 根据泉水优化模型测得现泉水年龄为 15 a, 且近 30 a 泉水年龄逐渐减小, 泉水贡献重心逐渐向浅部补给源转变, 这既反映现阶段人工补源措施取得一定成效, 又表明深层含水层破坏后恢复缓慢, 导致枯水期泉水水位仍逼近警戒水位。

关键词: 岩溶泉域; 氡浓度; 衰减模型; 地下水年龄; 循环特征

创新点: 济南泉域岩溶发育垂向上具有明显分带性, 采用适于岩溶极发育地区的 PFM 模型和适于岩溶发育较差地区的 EM 模型计算其泉水年龄范围较大, 均不能准确反映济南泉水更新能力, 考虑共存条件, 创建出的基于不同介质结构的 PFM-EM 模型更适用于北方岩溶泉域地下水年龄的估算。

中图分类号: P641 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810 (2025) 01-0038-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

济南泉水举世闻名, 亦是济南市经济及社会持续发展的基石。随着城镇化和工业化的发展, 水资源供需矛盾日益突出^[1], 导致 20 世纪 70 年代泉水断流, 为了保护泉水, 前人通过示踪试验^[2]、抽水试验^[3]、水动力学^[4-7]、水化学^[8-9] 同位素等实验, 在地下水排泄特征及比例^[10-11]、地下水径流特征及更新能力^[12] 方面已取得整体认识, 但以往地下水系统更新能力的研究多以整体含水层水文地质特征为基础, 仅研究泉水年龄, 忽视了不同层位地下水对泉水更新能力的影响。

地下水年龄是评价地下水系统更新能力的直接指标, 既是研究地下水系统补排机制的重要手段, 又是评价其可持续开发利用的重要指标之一^[13]。测定地下水年龄的示踪剂包括天然源与人工源, 放射性与非放射性。关于各示踪剂的特性、取样和检测等有比较系统总结^[14], 其中氡同位素(³H)是天然水的一部分, 在地下水中几乎不会受到水化学反应的影响, 能够准确指示地下水径流状态。20 世纪 80 年代, 房佩贤等^[15] 运用内插法恢复了 1953-1985 年大气降水氡浓度曲线, 并运用全混合流模型(EM 模型)计算出趵突泉、黑虎泉泉水年龄为 25 a、27 a, 随后蔡五田^[16] 基于 1952-1989 年大气降水氡浓度及泉域内划

基金项目: 国家自然科学基金项目(42272288, 42307083); 山东省第一地质矿产勘查院青年科技创新基金(QN202203)

第一作者简介: 孟庆晗(1996—), 男, 助理工程师, 硕士研究生, 研究方向为地下水科学与工程。E-mail: 1050305636@qq.com。

通信作者: 邢立亭(1966—), 男, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为地下水动态演化。E-mail: xltting596@163.com。

收稿日期: 2023-06-30

分并赋值的大气降水入渗补给系数综合建立济南泉域氡浓模型,宏观上解释了济南泉域地下水循环特征。前人研究结果均以EM与活塞流模型(PFM模型)输出结果研究地下水年龄即地下水更新能力,尽管以往模型不断细化其中参数^[16-17],但随着学者深入探究济南岩溶大泉循环机理,仅以活塞流或全混合流模型模拟已无法满足现阶段地下水更新能力研究。本文将两种模型进行优化,进一步精确探究该地区地下水更新能力,以期为其合理开发利用、科学管理地下水资源及保护泉水水质提供依据。

1 研究区概况

济南泉域位于内陆中纬度地带,属于温带季风气候,平均年降雨量为672 mm,大气降水为泉水的主要补给来源^[11]。济南泉域整体地势南高北低,以太古宇泰山群地层为基底,上覆寒武系、奥陶系地层,地层北倾,形成单斜构造(图1)。泉域主要含水层为奥陶系—寒武系三山子组及南部寒武系张夏组含水层,两者之间受九龙群崮山组与炒米店组相对隔水

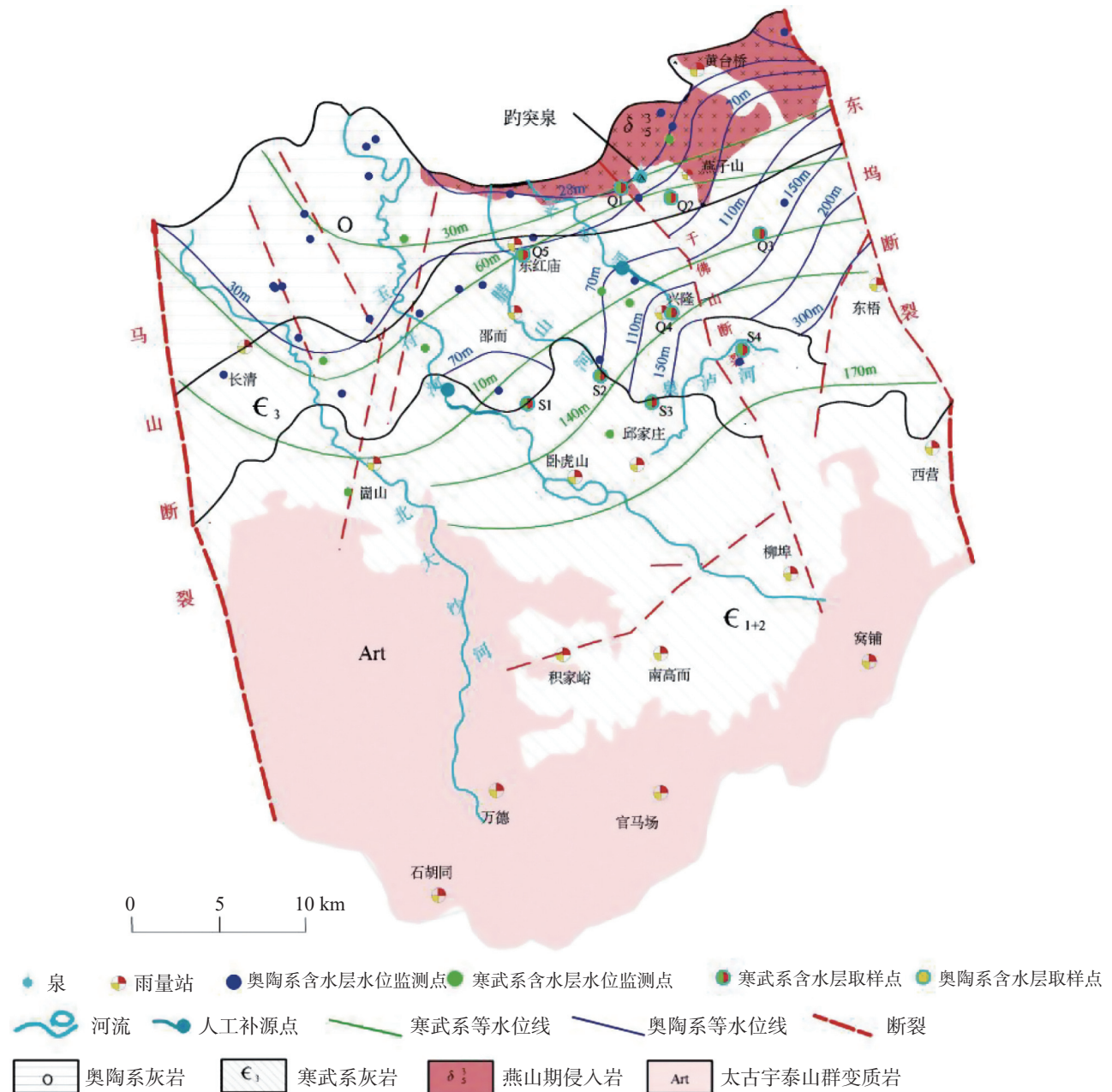


Fig. 1 Hydrogeological map of the study area

层阻挡。地下水沿地层倾向向北运移,遇到北部的燕山期侵入岩阻挡形成岩溶泉群。天然条件下泉水是岩溶水系统的主要排泄形式,1972—2003 年期间,由于过量开采地下水造成泉水间歇性断流,2003 年以来,实施人工补源、关停地下水水源地等措施^[1],基本实现了泉水持续喷涌,但泉水位尚未恢复到 20 世纪 60 年代自然状态。

2 研究方法

2.1 样品及数据采集

(1)降水量 选择济南泉域内 18 个雨量站获取 1952-2022 年日降水数据,雨量站主要分布在黄台桥、燕子山、东红庙、邵而、兴隆、东梧、西营、卧虎山、邱家庄、柳埠、窝铺、南高而、积家裕、万德、石胡同、官马场、崮山、长清。

(2)大气降水氡浓度 分别在泉域补给区采集 2020-2022 年 8 月份大气降水,委托中国地质科学院水文地质环境地质研究所检测,检测极限 1 TU,精确度 ± 0.1 TU,测得 2020-2022 年氡浓度分别为 8.5 ± 0.1 TU、 8.8 ± 0.1 TU、 9.4 ± 0.1 TU。

(3)泉水及地下水氡浓度 采集 2022 年丰水期趵突泉、黑虎泉泉水出露处水样;采集 2022 年不同含水层地下水,其中 Q1、Q2 深度在 40~50 m, Q3~Q5 深度 100~120 m, S1~S4 深度采集在 200 m 以深。委托中国地质科学院水文地质环境地质研究所检测,检测极限 1 TU,精确度 ± 0.1 TU。

2.2 大气降水氡浓度恢复方法

本研究应用全球大气降水氡浓度模型(MGMTP)模型重建研究区大气降水氡值,模型为:

$$c_p(t) = b + f_1 c_p(t, 1) + f_2 c_p(t, 2) + \varepsilon$$

式中: $c_p(t)$ 为全球任一站点年平均氡值; b 为常数项,代表回归拟合数据均值; ε 为随机误差; $c_p(t, 1)$ 、 $c_p(t, 2)$ 为公共因子得分(TU),反映全球大气降水氡值分布; f_1 、 f_2 为常数项,是公共因子得分的回归系数。

2.3 泉水年龄模型

将地下水系统视为黑箱模型,信息传递符合现行关系,内部结构概化为线性时不变集合参数系统,系统任意时刻的响应是该时刻及其以前所有响应的叠加。在稳定流条件下,仅考虑放射性衰变,用褶积

公式表示,即 LPMs^[17]:

$$C_{out(t)} = \int_0^\infty C_{in(t-\tau)} e^{-\lambda\tau} f(\tau) d\tau$$

式中: C_{out} 表示氡输出信息; C_{in} 表示氡输入信息; t 为日历时间; τ 为示踪剂滞留时间; $f(\tau)$ 为系统响应权函数; λ 为放射性核素衰变系数($\lambda_{\text{氡}} = 0.06526 \cdot a^{-1}$)。

$$C_{in(t)} = \alpha \cdot S \cdot F \cdot P \cdot \beta \cdot \psi$$

式中: α 为降水入渗系数; S 为降水补给面积; F 为降水中氡浓度; P 为年降水量; β 为 1 L 水中氡计数; ψ 为降水量换算因子。

$$C_{out(t)} = r \cdot Q_{out} \cdot y_{out} \cdot \beta$$

式中: Q_{out} 为泉年平均流量; r 为时间换算因子; y_{out} 为泉水平均氡浓度。

(1)PFM 模型

依据权函数可分为不同的模型。PFM 假定地下水在含水层中流动类似于活塞运动,相邻输入水体之前不发生混合,输出水体的年龄是其在系统中的平均传输时间。权函数为狄拉克函数(δ):

$$f(\tau) = \delta(t - \tau)$$

代入 LPMs 的 PFM^[17]:

$$y_{out(t)} = y_{in(t-\tau)} e^{-\lambda\tau}$$

(2)EM 模型

EM 假设任意时刻水体中不同年龄的水质点均匀混合,输出氡浓度是系统平均浓度:

$$C_{out(t)} = \sum_{\tau=0}^{\infty} C_{in(t-\tau)} e^{-\lambda\tau} \left(\frac{e^{-\frac{\tau}{\tau_m}}}{\tau_m} \right)$$

式中: τ_m 为氡平均滞留时间。因 1952 年前降水氡浓度很低,经过一定时间衰变对地下水系统贡献已趋于 0,故上式可简化为^[16]:

$$y_{out(t)} = \frac{\varphi}{\tau_m} \sum_{\tau=0}^{t-1952} P(t-\tau) \cdot F(t-\tau) \cdot e^{-\tau \left(\frac{1}{\tau_m} + \lambda \right)}$$

3 结果与分析

3.1 大气降水氡浓度恢复及输出模型

因前人研究济南氡同位素匮乏,缺乏大气降水氡值监测数据,因而需要重建。重建方法有吴秉钧法^[18]、MGMTP 模型法^[19]、人工神经网络法^[20]等。依据 MGMTP 模型法、吴秉均法将所得数据与已收集的济南市大气降水氡浓度数据进行相关性分析

(图 2), 相关系数 R^2 分别为 0.996 3、0.977 5, 结果表明: MGMTP 模型法与所收集氚浓度数据相关程度最高, 故采用最小二分法完善 2014—2022 年大气降水氚浓度数据, 总结出完整的研究区大气降水氚浓度

曲线(图 3)。
基于大气降水氚浓度恢复曲线, 建立 PFM、EM 模型氚浓度输出曲线(图 4, 图 5)。

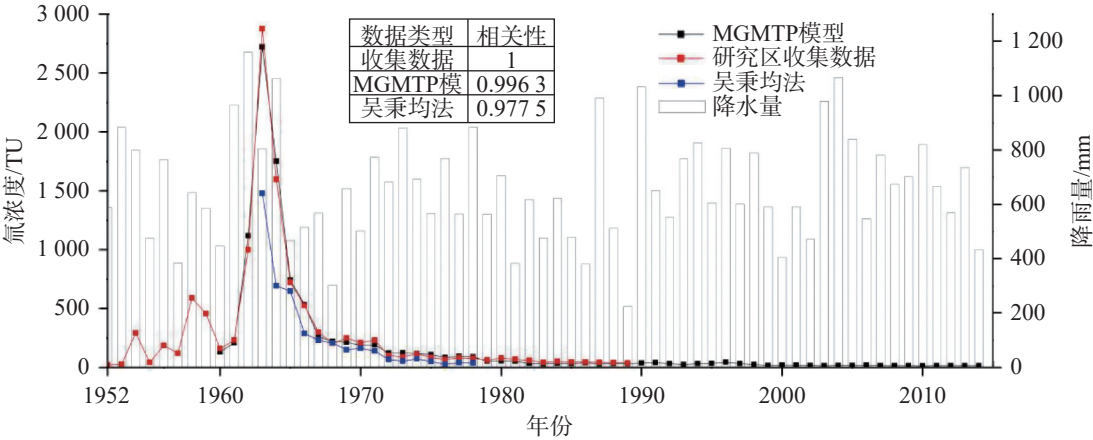


图 2 研究区大气降水及其氚浓度历时曲线图

Fig. 2 Duration curves of atmospheric precipitation and tritium concentrations in the study area

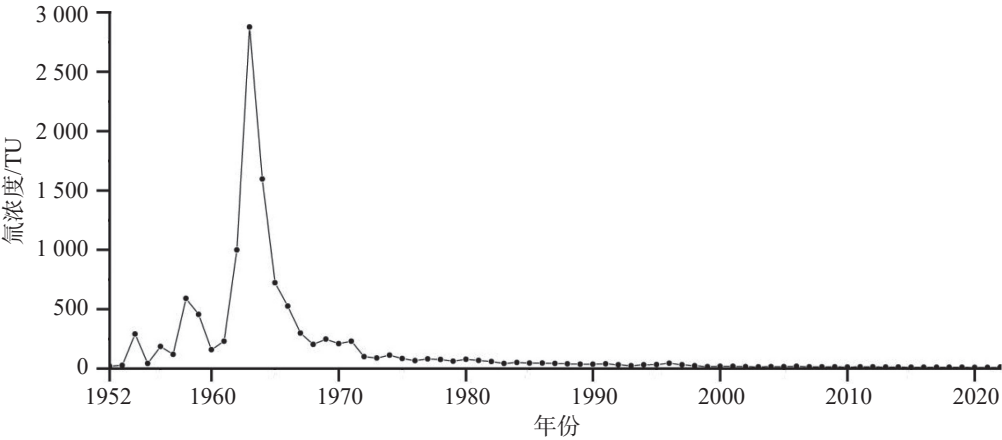


图 3 济南泉域 1952-2022 年大气降水氚浓度系列恢复结果图

Fig. 3 Series recovery results of tritium concentrations in atmospheric precipitation in Jinan spring area from 1952 to 2022

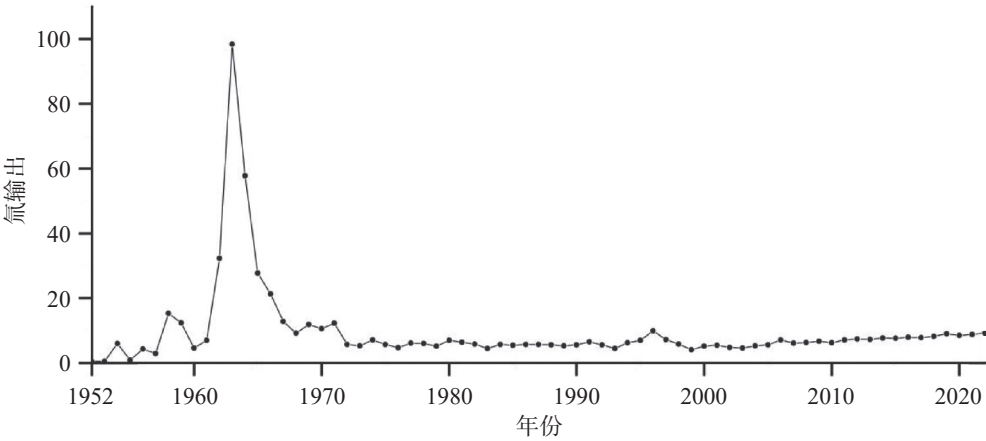


图 4 济南泉域 PFM 模型氚浓度输出曲线

Fig. 4 Curves of tritium output curve derived from PFM model in Jinan spring area

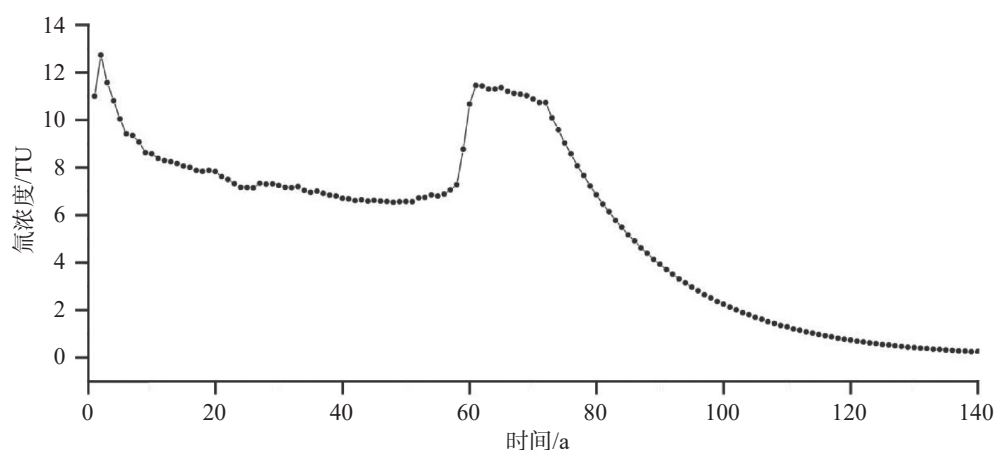


图5 济南泉域 EM 模型氚浓度输出曲线

Fig. 5 Curves of tritium concentration output derived from EM model in Jinan spring area

3.2 大气降水氚浓度输出模型优化

3.2.1 模型优化

以往所做压汞实验、岩溶含水介质渗流模拟等实验表明: 泉域含水介质空隙结构及不同层位含水层水力特征具有明显的空间分带性^[4], 且泉域直接、间接补给区所做的钻探、水力试验表明部分区域岩溶裂隙发育程度较高, 以岩溶裂隙、大裂隙为主, 存在优势渗流通道^[21-22], 故可将地下水依据所处介质特

征进行划分, 分为大裂隙—裂隙岩溶水和岩溶裂隙—孔隙水。以岩溶裂隙、大裂隙为主的地下水径流、排泄较快, 适用于 PFM 模型; 以裂隙、孔隙为主的地下水径流及排水缓慢, 适用于 EM 模型。

选取前人研究中具有代表性的 2015-2017 年水文周期中大裂隙—裂隙流、岩溶裂隙—孔隙流占泉流量的比例^[23](表 1), 取三年平均值作为 PFM 和 EM 权重, 权重分别为 57.13 及 42.87, 进而得出 PFM-EM 模型氚浓度输出曲线(图 6)。

表 1 研究区不同介质岩溶水对泉水补给比例^[23]Table 1 Proportions of karst water in different media to spring water supply in the study area^[23]

年份(水文年)	大裂隙—裂隙岩溶水补给比例/%	岩溶裂隙—孔隙水补给比例/%
2015(平)	46.15	53.85
2016(丰)	56.58	43.42
2017(枯)	68.67	31.33

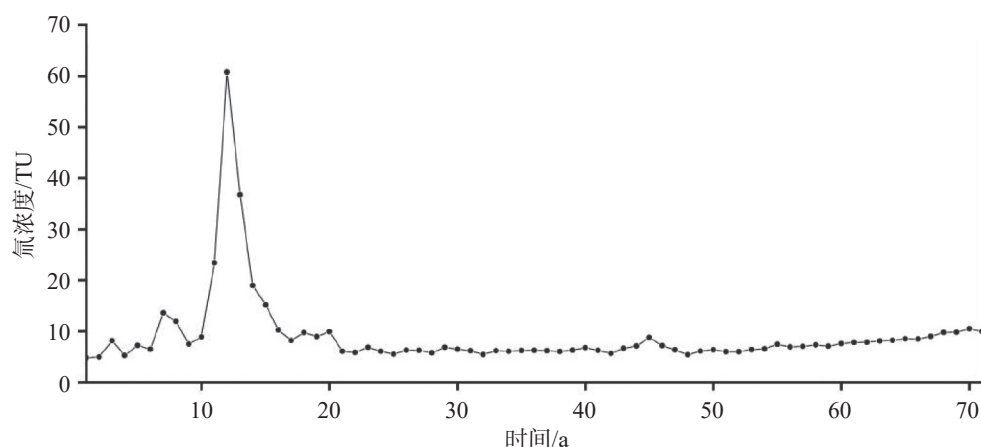


图6 PFM-EM 流模型氚浓度图

Fig. 6 Tritium concentration diagram derived from PFM-EM flow model

3.2.2 模型适宜性

泉水是历年不同层位地下水混合排泄的结果,在以往对泉水量衰减、水化学及水动力学数学模型的研究中(表 2),已明显将不同来源地下水做出区分,虽然大裂隙主要分布在浅层奥陶系地层,但北方岩溶地区岩溶发育程度普遍较低,研究区灰岩含水层以孔隙、裂隙为主,且奥陶系及寒武系含水层存在水力联系,故相比于地层划分权重,研究区更适用以介质进行划分。大裂隙、裂隙岩溶水在降水后快速补给泉水,持续释水时间较短^[21,24],地下水在该类介质中的停留时间较短,且流向相对统一,各时段地下水混合程度较低;裂隙、孔隙水的释水缓慢,在降水后释水过程可持续 1~3 个水文年^[23],地下水在该类介质中的停留时间长,流动方向复杂^[22],各时段地下水相互混合,两者径流及排泄均分别适用于 PFM、EM 模型。因此,在对混合地下水集中出露条件下的氡浓度研究中,PFM-EM 模型具有较好适用性,但对含水介质种类多样的单一含水层氡浓度研究中仍以 EM、PFM 模型进行独立分析。

3.3 地下水更新能力

氡浓度所测得泉水及地下水年龄并非确定时段,但可作为地下水更新能力的量化数值体现,进而反映泉域地下水在近年来的更新能力。为降低人工补源对含水层氡浓度测试的影响,选取在泉群南、东南及西南侧不同地下水流向点位,并避开人工补源位置,依据模型数据结果(表 3),寒武系含水层地下水年龄大于奥陶系含水层地下水年龄,寒武系地下水年龄在 22~85 a 之间,奥陶系地下水年龄在 3~22 a 之间,且奥陶系浅层层位地下水(Q1、Q2)年龄在 3~11a 之间,地下水更新能力随深度递减,模型结果与以往研究成果及实际水文地质条件相符。

综合以往丰水期氡浓度测试数据(表 4),PFM-EM 模型测得泉水年龄为 15 a,而近 30 年泉水动态年龄由 25 a 逐渐降低为 19 a(EM 模型),说明泉水补给比例或补给构成的变化。30 年前的 20 世纪 90 年代,泉域内岩溶水开采量 80 万 t·d⁻¹,区域地下水位下降,河道干涸、泉水断流,泉水的主要补给来源是大气降水入渗补给,且是唯一补给源,开采是泉域内最

表 2 研究区不同介质岩溶水模型
Table 2 Karst water models in different media of the study area

模型类型	大裂隙—裂隙岩溶水			岩溶裂隙—孔隙水		
	泉水位 衰减系数	占比/%	单次降水后持 续释水时间	泉水位 衰减系数	占比/%	单次降水后持 续释水时间
泉流量过程线拟合模型 ^[25]	0.003 6	/	/	0.000 9	/	/
水化学模型 ^[10]	/	24~60	/	/	11~32	/
EC频率分布模型 ^[26]	/	45~68	/	/	31~54	/
水位相关及频谱模型 ^[23]	/	/	12~24 d	/	/	1~3个水文年

表 3 研究区地下水样氡年龄计算结果
Table 3 Calculation results of tritium age of groundwater samples in the study area

取样编号	取样地层	取样深度/m	氡浓度/TU	地下水年龄/a	
				EM模型	PFM模型
Q1	奥陶系	40~50	9.1	8	4
Q2			8.5	11	3
Q3		100~120	7.7	21	9
Q4			7.5	22	11
Q5			7.3	21	10
S1	寒武系	≥200	7.0	57	28
S2			6.1	82	46
S3			5.9	85	51
S4			6.6	58	22

表 4 研究区泉水氚年龄计算结果
Table 4 Calculation results of tritium age in spring water in the study area

所用模型	测试时间	泉水年龄/a
EM ^[16]	1989	25
EM ^[11]	2020	19
EM	2022	19
PFM-EM	2022	15

主要的排泄项, 泉域内地下水开采量组成中既包括奥陶纪岩溶水也包括大量寒武纪岩溶水, 故地下水年龄较“老”。2003 年后关停工业自备井、关闭地下水源地开采, 人工补源量由 2003 年的 $800 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 升高至 2022 年的 $5200 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 地下水开采量降至 $18 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 以下, 且分布于泉域外围周边区域, 现状条件下泉水补给来源有大气降水入渗、水库调水补源、河道调水补源, 泉群附近开采井关闭, 泉水排泄是泉域内最主要的排泄项。与 20 世纪相比, 目前条件下地下水开采量大幅减少, 区域地下水位升高, 泉水排泄量来自于浅部局部流动系统中奥陶纪含水层的地下水比例较高, 深循环区域流动系统中的比例偏低, 故现状年龄偏“新”。虽然 2003 年后泉水能保持持续喷涌的根本原因是关闭开采并非人工补源, 但人工补源对保持泉水枯水期不断流起到重要作用, 也说明 30 多年来在人类活动影响下, 泉域水文地质条件发生一定变化。

泉水年龄的降低, 更重要的是说明泉水对外界影响的响应时间更加敏感, 在城市建成区逐步扩大的情况下, 城市地面硬化造成降水入渗面积减少, 为保持泉水持续喷涌不断流, 需限制奥陶纪岩溶水开采, 同时持续进行地下水的补源工作。地下水年龄随含水层深度递增, 表明泉水源于寒武系和奥陶系不同含水岩组补给, 鉴于寒武系地层地下水更新能力较差, 且处于开放系统中, 大气降水和人为活动直接或间接影响深层含水层, 故也应避免对寒武系含水层的强烈开采, 以免造成寒武系深层地下水对泉水补给比例的减少。此外, 人工补源对泉水补给效果明显, 应对泉域补源地区进行定期水源监测, 实时掌握地表水入渗岩溶水系统和泉水水质环境的动态变化。

4 结论与建议

(1) 通过 EM 及 PFM 氚浓度模型计算得到寒武

系地下水年龄为 22~85 a, 奥陶系地下水年龄为 3~22 a, 地下水更新能力随深度递减。寒武系地层地下水更新能力较差, 且处于开放系统中, 大气降水和人为活动直接或间接影响深层含水层, 建议避免对深层含水层的直接开采, 限制浅层地下水开采, 减少人为活动对深层地下水的影响。

(2) 根据 PFM-EM 模型测得趵突泉年水龄为 15 a, 结合以往 EM 模型数据, 发现 1989-2022 年丰水期泉水年龄逐渐减小, 泉水贡献重心逐渐向浅部补给来源转变, 其计算结果能更加准确反映济南泉域地下水更新能力。

(3) 泉水位及泉水年龄证实现有补源效果取得一定成果, 仍需持续进行地下水的补源工作, 也需对泉域补源地区进行定期水源监测, 避免地表污水入渗污染地下水和泉水。

参考文献

- [1] 彭凯, 刘文, 魏善明, 刘传娥, 陈燕, 董浩, 苏动, 袁炜, 韩琳. 基于水化学、同位素特征的济南岩溶地下水补给来源研究[J]. 中国岩溶, 2020, 39(5): 650-657.
PENG Kai, LIU Wen, WEI Shanming, LIU Chuane, CHEN Yan, DONG Hao, SU Dong, YUAN Wei, HAN Lin. Study on the recharge source of karst groundwater in Jinan city based on hydrogeochemical and isotopic characteristics[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(5): 650-657.
- [2] Zhang Zhengxian, Wang Weiping, Qu Shisong, Huang Qiang, Liu Shuai, Xu Qiaoyi, Ni Ludong. A New Perspective to Explore the Hydraulic Connectivity of Karst Aquifer System in Jinan Spring Catchment, China[J]. *Water*, 2018, 10(10): 1368.
- [3] Wang Guofu, Wu Yongxia, Lu Linhai, Li Gang, Shen Shuilong. Investigation of the geological and hydrogeological environment with relation to metro system construction in Jinan, China[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(2): 1005-1024.
- [4] 管清花, 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 Qinghua¹, 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.
- [5] CHI Guangyao, Xing Liting, Xing Xuerui, Li Changsuo, Dong Fang. Seepage characteristics of karst water system using temperature tracer technique[J]. *Earth and Space Science*, 2020, 7(8): 1-14.
- [6] 党志文, 邵景力, 崔亚莉, 李军, 宫志强, 赵良杰, 梁永升. 基于 MODFLOW-CFP 的贵州大井流域岩溶地下水数值模拟[J].

- 中国岩溶, 2023, 42(2): 266-276.
- DANG Zhiwen, SHAO Jingli, CUI Yali, LI Jun, GONG Zhiqiang, ZHAO Liangjie, LIANG Yongsheng. Numerical simulation of karst groundwater in Dajing basin of Guizhou Province based on MODFLOW-CFP[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(2): 266-276.
- [7] 邢立亭, 李常锁, 周娟, 宋广增, 邢学睿. 济南泉域岩溶径流通道特征[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(17): 57-65.
- XING Liting, LI Changsuo, ZHOU Juan, SONG Guangzeng, XING Xuerui. Characteristics of karst runoff channels in Jinan spring domain[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(17): 57-65.
- [8] Xing Liting, Huang Linxian, Chi Guangyao, Yang Lizhi, 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.
- [9] Yu Miao. Xing Liting, Wang Liyan, Zhang Fengjuan, Xing Xuerui, Li Changsuo. An improved multifractal detrended fluctuation analysis method for estimating the dynamic complexity of electrical conductivity of karst springs[J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2023, 25(2): 174-190.
- [10] 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. Discussion on mixing ratio of spring water recharge sources in four major spring groups in Jinan[J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(3): 260-272.
- [11] 孟庆晗. 济南四大泉群形成条件的差异性研究[D]. 济南: 济南大学, 2021.
- MENG Qinghan. Research on the difference of formation conditions of four spring groups in Jinan[D]. Jinan: University of Jinan, 2021.
- [12] Li Changsuo, Xing Liting, Dong Yanan, Peng Yuming, Xing Xuerui, Li Chuanlei, Zhao Zhenhua. Numerical simulation and protection of the dynamic change of Jinan karst spring based on coupling of seepage and conduit flow[J]. *Heliyon*, 2022, 8(9): E10428.
- [13] Priebe E H, Hamilton S M, Lemieux A, Rowan D J, Clark I D. Tritium across the hydrologic systems of southern Ontario, Canada: implications for groundwater age dating in the Great Lakes Basin[J]. *Hydrogeology Journal*, 2023, 31(3): 641-659.
- [14] Ian Cartwright, Dioni Cendón, Matthew Currell, Karina Meredith. A review of radioactive isotopes and other residence time tracers in understanding groundwater recharge: possibilities, challenges, and limitations[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 555: 797-811.
- [15] 房佩贤, 曹玉清, 唐克旺, 李祥之, 王绍文. 济南泉域地下水年龄计算[J]. *中国岩溶*, 1989, 8(1): 47-51.
- FANG Peixian, CAO Yuqing, TANG Kewang, LI Xiangzhi, WANG Shaowen. Calculation of groundwater age in Jinan spring area [J]. *Carsologica Sinica*, 1989, 8(1): 47-51.
- [16] 蔡五田. 济南岩溶水系统水力联系研究[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
- CAI Wutian. Research on hydraulic linkage of Jinan karst water system [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013.
- [17] 孙琦, 余翔, 周训, 陈剑杰, 高为超. 中国西北干旱区多级洼地地下水环境同位素分布特征及指示意义[J]. *现代地质*, 2011, 25(6): 1196-1200.
- SUN Qi, YU Xiang, ZHOU Xun, CHEN Jianjie, GAO Weichao. Distribution characteristics of groundwater environmental isotopes in a multilevel basin in arid area of the northwestern China and their indication[J]. *Geoscience*, 2011, 25(6): 1196-1200.
- [18] 吴秉钧. 我国大气降水中氦的数值推算[J]. *水文地质工程地质*, 1986, 4(18): 38-41, 49.
- WU Bingjun. Numerical calculation of tritium in atmospheric precipitation in China[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1986, 4(18): 38-41, 49.
- [19] 章艳红, 叶淑君, 吴吉春. 全球大气降水中年平均氦浓度的恢复模型[J]. *地质论评*, 2011, 57(3): 409-418.
- ZHANG Yanhong, YE Shujun, WU Jichun. Recovery model of global mean tritium concentration in atmospheric precipitation[J]. *Geological Review*, 2011, 57(3): 409-418.
- [20] Zhang Y, Ye S, Wu J. A modified global model for predicting the tritium distribution in precipitation, 1960-2005[J]. *Hydrological Process*, 2011, 25(15): 2379-2392.
- [21] 董亚楠. 济南泉域岩溶含水介质空隙结构的水力特性研究[D]. 济南: 济南大学, 2020.
- DONG Yanan. Research on hydraulic characteristics of karst water-bearing medium void structure in Jinan Spring domain[D]. Jinan: University of Jinan, 2020.
- [22] 武东强, 邢立亭, 兰晓荀, 孟庆晗, 侯玉松, 赵振华, 孙斌, 袁学圣. 济南岩溶含水介质孔隙结构特征[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(4): 680-688.
- WU Dongqiang, XING Liting, LAN Xiaoxun, MENG Qinghan, HOU Yusong, ZHAO Zhenhua, SUN Bin, YUAN Xuesheng. Pore structure characteristics of karst water-bearing media in Jinan[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(4): 680-688.
- [23] Meng Qinghan, Xing Liting, Liu Li, Xing Xuerui, Zhao Zhenhua, Zhang Fengjuan, Li Chuanlei. Time-lag characteristics of the response of karst springs to precipitation in the northern China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(9): 348.
- [24] 马致远, 牛光亮, 刘方, 侯光才, 党学亚, 苏艳. 陕西渭东北部岩溶地下水强径流带的环境同位素证据及其可更新性评价[J]. *地质通报*, 2006, 25(6): 756-761.
- MA Zhiyuan, NIU Guangliang, LIU Fang, HOU Guangcai, DANG Xueya, SU Yan. Environmental isotopic evidence and renewability evaluation of karst groundwater heavy runoff zone in eastern Weibei, Shaanxi[J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(6): 756-761.
- [25] 袁学圣, 邢立亭, 赵振华, 李常锁, 陈免良. 济南四大泉群流量衰减过程及其指示意义[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(7): 126-132.

YUAN Xuesheng, XING Liting, ZHAO Zhenhua, LI Changsuo, CHEN Huanliang. Flow attenuation of four spring groups in Jinan and its indicative significance[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(7): 126-132.

[26] Henghua Zhu, Liting Xing, Qinghan Meng, Xuerui Xing, Yuming Peng, Changsuo Li, Hu Li, Lizhi Yang. Water Recharge of Jinan Karst Springs, Shandong, China[J]. *Water*, 2020, 12(3): 694.

Research on groundwater renewal capacity in Jinan spring area based on tritium isotopes

MENG Qinghan¹, XING Liting², PENG Kai¹, ZHU Wenfeng¹, LIU Lian¹, HE Qiang¹, XU Bing¹, PAN Weiyan², SONG Qifeng³

(1. No.1 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Jinan , Shandong 250100, China;

2. School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan, Shandong 250002, China;

3. Changle County Planning and Compilation Research Center, Weifang, Shandong 262400, China)

Abstract The study area is located in Jinan City, Shandong Province, China, and belongs to the inland mid-latitude zone with a temperate monsoon climate. The average annual rainfall is 672 mm, and atmospheric precipitation is the main source of spring water recharge. The overall terrain of Jinan spring area is higher in the south and lower in the north, with the stratum of Archaean Taishan Group as the foundation, covered by the Cambrian and Ordovician strata. The strata incline to the north, forming a monoclinic structure. The karst development is weak. The water bearing medium is dominated by pores and fissures, supplemented by large fissures and pipelines. Groundwater tends to migrate northward along the strata and forms a karst spring group when encountering intrusion rocks from the Yanshan Period in the north. Under natural conditions, spring water is the main discharge form of karst water systems.

Due to the intensification of human activities in recent years, the water levels of springs have decreased, and some springs have even cease to flow. In order to explore the groundwater renewal capacity of the Jinan karst spring area and to propose effective recommendations for spring water protection, this paper established a tritium isotope attenuation model for the study area. Previous experiments on mercury intrusion and karst aquifer seepage simulation in the study area have shown that the pore structure of the aquifer in the spring area and the hydraulic characteristics of different aquifer layers exhibit distinct spatial zoning. Moreover, drilling and hydraulic tests conducted in the direct and indirect recharge areas of the spring area have demonstrated that some areas are highly developed with karst fissures. These areas mainly consist of karst fissures and large fissures, which create advantageous seepage channels. Therefore, groundwater can be divided into karst water from karst fissures and large fissures and water from karst fissures and pores based on the characteristics of the medium in which groundwater is located. The piston flow model (PFM) is applicable to groundwater where the aquifer medium is predominantly composed of karst fissures and large fissures. In contrast, the entirely mixed flow model (EM) is suitable for groundwater where the aquifer medium is primarily characterized by a combination of fissures and pores. Since these two models cannot simultaneously account for the hydrogeological characteristics of the study area, this study proposes a new piston flow-entirely mixed flow model (PFM-EM) to facilitate a more accurate analysis of spring water renewal time.

The model results show as follows: (1) The age of groundwater in the Cambrian Period ranges from 22 to 85 years, while the age of groundwater in the Ordovician Period ranges from 3 to 22 years. Additionally, and the annual water age of Baotu Spring is 15 years. When combined with previous EM model data, it is evident that the age of spring water gradually decreased during the abundant water period from 1989 to 2022. The decrease in the age of spring water indicates a gradual shift in the supply of spring water towards shallower strata. More importantly, it reflects an increased sensitivity in the response time of spring water to external influences. As urban built-up areas continue to expand, the hardening of urban surfaces has resulted in a reduction in the infiltration area of precipitation. To maintain a continuous flow of spring water, it is essential to limit the extraction of Ordovician karst water while

simultaneously replenishing groundwater sources. (2) The age of groundwater increases with the depth of the aquifer, indicating that spring water is supplied by different water-bearing rock formations of the Cambrian and Ordovician strata. Given that the groundwater renewal capacity of the Cambrian strata is relatively limited and they exist within an open system, atmospheric precipitation and human activities directly or indirectly affect the deep aquifers. Therefore, it is also advisable to avoid intensive exploitation of the Cambrian aquifers to prevent a reduction in the proportion of deep Cambrian groundwater contributing to spring water replenishment. While the existing replenishment effects have yielded some positive results, it remains essential to continue replenishing groundwater. Furthermore, the regular monitoring of water sources should be conducted in the spring replenishment area to prevent contamination of groundwater and spring water by surface sewage.

Key words karst spring area, tritium concentration, attenuation model, age of groundwater, cycle feature

(编辑 黄晨晖)

我国首次启动林草湿荒漠化普查

据 2024 年中国自然资源公报, 2024 年 5 月, 全国森林草原湿地荒漠化普查工作启动。普查以国土“三调”为统一底版, 以现状真实性为原则, 坚持“统一分一统”工作机制, 国家统一调查底图, 地方开展实地调查, 国家统一审核发布成果。采用图斑与样地调查相结合的方法, 一体化开展森林草原湿地普查和荒漠化沙化土地、石漠化土地调查监测, 查清全国范围内森林草原湿地资源的数量、质量、结构及其生态状况, 查清荒漠化沙化、石漠化状况及治理情况, 进一步丰富自然资源调查成果。

