

李波, 朱恒华, 吴芳, 等. 莱芜地区泉水系统特征及形成机理研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(7): 177-189. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.07.013

LI Bo, ZHU Henghua, WU Fang, et al. Characteristics and formation mechanisms of spring systems in Laiwu Region[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(7): 177-189. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.07.013

# 莱芜地区泉水系统特征及形成机理研究

李波<sup>1,2</sup>, 朱恒华<sup>3</sup>, 吴芳<sup>4</sup>, 于大路<sup>1,2</sup>, 姜秉霖<sup>1,2</sup>, 吴璇<sup>1,2</sup>,  
张翼飞<sup>1,2</sup>, 王金晓<sup>1,2</sup>

- (1. 山东省地矿工程勘察院(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 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. 山东省国土空间生态  
修复中心, 山东 济南 250014; 4. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

**摘要:**【目的】莱芜地区泉水出露众多, 但未开展过系统研究。为查清该地区泉水特征、泉水系统和形成机理, 助力泉水保护工作, 依据莱芜泉水普查工作对其进行了系统研究。【方法】采用资料利用分析、水文地质调查、地质钻探、水质分析等工作手段, 分析了泉水发育水文地质条件, 总结了泉水分布特征、水化学特征及质量特征, 进行了泉水系统划分, 探讨了泉水形成机理及控制因素。【结果】结果显示: 泉水主要分布在莱芜盆地边缘及河流沟谷地区; 按含水岩组类型可分为岩溶泉水和裂隙泉水, 以下降泉为主, 少数上升泉; 泉水水化学类型以  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  型、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$  型和  $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$  型为主, 主要离子主要来源于水岩相互作用; 82% 泉水达到地下水 III 类及以上标准, 部分为锶型、偏硅酸型天然矿泉水; 泉水形成受地形地貌、地层岩性、断裂构造等地质因素控制, 主要以浅层循环为主, 水循环速度快。【结论】莱芜地区泉水出露分布受地形变化影响明显; 整体泉水水质较好, 循环速度快, 水量与大气降水密切相关, 易受人类活动影响。通过本次对莱芜泉水系统分析, 可为当地泉水保护与城市建设和谐共生提供技术支持。

**关键词:** 泉水系统; 形成机理; 水文地质; 山东莱芜; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.07.013

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: P641

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)07-0177-13



## Characteristics and formation mechanisms of spring systems in Laiwu Region

LI Bo<sup>1,2</sup>, ZHU Henghua<sup>3</sup>, WU Fang<sup>4</sup>, YU Dalu<sup>1,2</sup>, JIANG Binglin<sup>1,2</sup>, WU Xuan<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Yifei<sup>1,2</sup>, WANG Jinxiao<sup>1,2</sup>

- (1. Shandong Provincial Geo-mineral Engineering Exploration Institute (801 Hydrogeology and Engineering Geology Brigade, Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources), Jinan 250014, Shandong, China; 2. Shandong Engineering Research Center for Environmental Protection and Remediation on Groundwater, Jinan 250014, Shandong, China; 3. Shandong Provincial Territorial Spatial Ecological Restoration Center, Jinan 250014, Shandong, China; 4. Institute

收稿日期: 2025-04-21; 修回日期: 2025-05-11; 录用日期: 2025-05-13; 网络出版日期: 2025-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(42202294); 山东省地质勘查项目(鲁勘字(2024)74号)

作者简介: 李波(1988—), 男, 高级工程师, 副主任, 硕士, 主要从事水文地质、地热地质调查评价。E-mail: 710445277@qq.com

通信作者: 王金晓(1987—), 男, 高级工程师, 主任工程师, 硕士, 主要从事区域水文地质调查评价。E-mail: 81402635@qq.com

姜秉霖(1993—), 男, 工程师, 项目经理, 学士, 主要从事地下水资源研究。E-mail: Lbj4537@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

**Abstract:** [Objective] Numerous springs emerge in the Laiwu region, yet no systematic research has been conducted. To clarify the spring characteristics, spring systems, and their formation mechanisms in this region, and to support spring protection efforts, a systematic investigation was conducted based on the spring survey in Laiwu. [Methods] Method including data utilization analysis, hydrogeological surveys, geological drilling, and water quality analysis were employed to analyze the hydrogeological conditions for spring development. The distribution, hydrochemical, and quality characteristics of the springs were summarized. The spring systems were classified, and the formation mechanisms and controlling factors were examined. [Results] The result showed that the springs were mainly distributed at the margins of Laiwu Basin and in river valleys. Based on aquifer lithology, they could be classified into karst springs and fissure springs, with descending springs being dominant and a few ascending ones. The main hydrochemical types included  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ ,  $\text{HCO}_3\text{-Ca} \cdot \text{Mg}$ , and  $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_3\text{-Ca}$ , with major ions primarily derived from water-rock interactions. 82% of the springs met or exceeded the Class III groundwater quality standards, with some being strontium-type or metasilicic acid-type natural mineral water. Spring formation was controlled by geological factors such as topography, stratum lithology, and fault structures, mainly featuring shallow circulation with rapid water cycling. [Conclusion] The spatial distribution of springs in the Laiwu Region is significantly affected by topographic variations. The springs show overall good water quality with rapid circulation. The spring discharge shows strong correlation with precipitation, making it susceptible to human activities. The systematic analysis of the spring systems in Laiwu provides technical support for the coordinated development of spring protection and urban planning in the region.

**Keywords:** spring system; formation mechanism; hydrogeology; Laiwu, Shandong Province; influencing factors

## 0 引言

济南素有“泉城”美誉，它因泉而生、因泉而建、因泉而兴；其以丰富的泉水资源和悠久的历史文 化而闻名。济南拥有众多著名的泉水景观，如趵突泉、黑虎泉、五龙潭等。泉水不仅为城市增添了生机与活力，还成为济南独特的文化象征。2019年1月，国务院正式批复将莱芜市撤市划区并入济南市，原莱芜市划分为济南市莱芜区、济南市钢城区。莱芜地区泉水类型多样、泉水资源丰富，不仅具有独特的自然景观，更具有良好的人文价值，但是却未开展过系统的泉水调查工作。因此，为加入济南“泉城”大家庭，摸清莱芜地区泉水家底，济南市城乡水务局首次系统开展了莱芜地区泉水调查工作。经过三个月调查工作，查清莱芜地区共有泉水223处，后经审查评选，选出莱芜名泉102处。至此，济南市在册泉水达到了1204处，成为名副其实的“千泉之城”。

莱芜地区地处鲁中南丘陵山区，所处莱芜盆地为鲁中南典型单斜岩溶断陷盆地<sup>[1]</sup>。盆地内部断裂构造发育、地质条件复杂，具有重要的科学研究价值。在前人的研究中，各位学者从地下水系统理论、地下水富集规律、盆地构造演化、热液成矿作用及地质环境保护等方面开展了大量工作<sup>[2-6]</sup>。刘元晴等<sup>[7]</sup>以莱芜盆地为例，探讨了沂蒙山区典型“盆—山”结构塑造的多级岩溶地下水流系统特征，丰富了该地区地

下水系统理论；周乐等<sup>[8]</sup>利用平衡剖面原理与相关资料，计算分析了莱芜盆地伸展速率与主要断裂活动速率，恢复了盆地构造演化史，并论述了岩浆岩侵入影响下的岩溶水文地质特征，阐明了区域地质构造条件与地下水复杂关系；王云燕<sup>[9]</sup>通过对牛泉覆盖区磁异常和地质特征综合研究，分析了牛泉地区矽卡岩型铁矿成矿地质条件等；李贵恒等<sup>[10]</sup>对莱芜地区地下水化学特征及水质进行了分析评价；高宗军等<sup>[11]</sup>对大汶河上游地区岩溶地下水化学特征及控制因素进行了分析，表明岩石风化是岩溶水主要离子来源，同时地下水还受到了比较明显的人为输入影响。以往研究成果主要集中在区域地质构造、蚀变成矿、地下水流系统和富集以及地下水化学特征、质量等方面；但在泉水研究方面尚处于空白区，特别是在泉水分布特征、泉域系统划分及泉水形成因素等方面尚未开展过系统调查与研究。

泉水是地下水的天然露头，泉水研究可以充分认识区域地下水条件与地下水循环过程，对泉水生态保护具有重要意义<sup>[12-14]</sup>。莱芜地区泉水大多处于盆地周边低山丘陵区，保存了较为完好的自然条件和历史人文景观，泉水清澈甘甜，成为山区内一道亮丽的自然风光。但是在自二十世纪九十年代以来，莱芜盆地内部受到生活用水、农业灌溉抽水、煤矿铁矿工业开采等人类活动影响，区域地下水地质条件遭到了严重破坏，出现了地下水水位下降、采矿塌陷、岩溶塌陷

等典型地质环境问题。特别是莱芜盆地南部高庄镇—牛泉镇一带,受地下水水位下降等影响,已有岩溶大泉出现了干涸灭失,如牛王泉、郭娘泉、东泉、清泥沟泉等现已不复存在,造成了不可逆转的泉水保护难题。

本次泉水普查工作基于上述问题对莱芜地区现有泉水位置、泉口形态、流量、水质、泉水地质条件、泉水现状及泉水人文历史等方面进行了全方位摸底,对每处泉水填写调查卡片、登记造册,为后续泉水保护研究工作取得了详实的基础资料,具有重要意义。笔者通过系统梳理莱芜地区泉水调查资料,总结泉水特征及类型,分析泉水系统空间展布特征与水文地质条件,对区内泉域系统进行了划分,并探讨了泉水主要形成控制因素,可为今后莱芜地区泉水资源保护与规划提供一定的技术支撑。

## 1 研究区概况

### 1.1 自然地理条件

莱芜位于山东省中部山区,交通便利,总面积 2 248.17 km<sup>2</sup>。属温带大陆性半湿润气候,四季分明,年平均降雨量 699.74 mm<sup>[15]</sup>。区内水系分为大汶河水系、淄河水系与沂河水系,无客水来源。主要发育牟汶河、嬴汶河等大汶河支流,由东向西径流进入泰安。莱芜盆地北、东、南三面环山,向西展布;区内地貌类型可分为中山区、低山区、丘陵区与冲洪积平原区四类。

### 1.2 区域地质构造

华北板块在克拉通破坏作用影响下拉伸形成一系列断陷盆地,后期受岩体侵入抬升造成地层倾斜剥蚀形成了现今构造格局<sup>[16]</sup>。莱芜盆地受泰山凸起、鲁山凸起与新甫山凸起抬升影响,北、东、南三面出露大面积侵入岩;盆地内沉积厚层古生界寒武—奥陶系、中生界及新生界,呈北东、北西向单斜状产出,第四系覆盖于岩层之上。盆地因多期构造运动,断裂构造发育,以近东西向、北北西向为主,大王庄断裂和铜冶店—孙祖断裂构成了盆地的“外弧断裂”,泰安—口镇断裂与兴隆山—高峪铺断裂构成了盆地的“内弧断裂”;盆地中部侵入莱芜矿山岩体,造成沉积岩地层弯曲形成矿山背斜和八里沟向斜<sup>[17-19]</sup>。

### 1.3 水文地质条件

根据含水介质岩性组合及地下水赋存特征,区内地下水可划分为松散岩类孔隙水、碎屑岩类孔隙裂隙水、碳酸盐岩类裂隙岩溶水和岩浆岩变质岩类裂隙水(见图 1)<sup>[20-21]</sup>。

区内地下水系统受内、外弧断裂及中部厚层古近系阻水影响,可分为南部地下水系统和北部地下水系统,次级断裂切割作用又致使盆地内部形成多个具有独立地下水循环的岩溶断块<sup>[7,22]</sup>。大气降水是区内地下水主要补给来源,其次为河流水。地形起伏形成的重力差致使地下水由南、北两侧向盆地中部运移,受地层及断裂阻水后赋存于碳酸盐岩之中,形成富水块段(见图 2)<sup>[23-24]</sup>。

## 2 泉水特征

### 2.1 分布特征

依据普查结果,莱芜地区共发现泉水 223 处,其中 102 处入选《济南市名泉名录》。泉水主要分布于盆地周边地区,而盆地内部泉水受人为活动影响已干涸(见图 1)。根据泉水出露含水岩组类型不同,可分为岩溶泉和裂隙泉。其中,岩溶泉主要分布于盆地南部、北部及盆地边缘的碳酸盐岩地区,泉水沿河谷、断裂分布,以下降泉为主,部分受断裂影响为上升泉;裂隙泉主要分布与大面积侵入岩区,在地势低洼及断裂发育处出露,呈线状,多为下降泉<sup>[25]</sup>。

### 2.2 水化学特征

分析泉水水化学特征可以更好的研究区内地下水循环机理<sup>[26-27]</sup>。对莱芜泉水 100 件样品进行测试分析,结果显示:在 Piper 三条线图中(见图 3),整体泉水阳离子以 Ca<sup>2+</sup> 为主,阴离子以 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 为主,其中岩溶泉水化学类型以 HCO<sub>3</sub>-Ca 型、HCO<sub>3</sub>-Ca·Mg 型为主,裂隙泉水化学类型以 HCO<sub>3</sub>-Ca 型、HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Ca 型为主;pH 值 6.6~8.27, TDS 值 152.75~982.64 mg/L,平均值 423.15 mg/L。运用 Gibbs 曲线图可以分析泉水中主要离子来源<sup>[28-30]</sup>,通过图 4 可以看出,泉水点分布在岩石风化区域,表明泉水中主要离子来源水岩相互作用。

### 2.3 质量特征

#### 2.3.1 质量综合评价

本次以《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)为评价标准,通过采用单指标评价法对泉水 22 项指标进行质量评价;再按单指标评价结果最差类别,进行泉水综合质量评价。通过泉水质量评价,可以反映区内泉水水质整体特征及主要超标项目,更好地分析泉水污染源<sup>[31-32]</sup>。

依据上述评价方法,对 100 件泉水进行水质分析,结果所示:区内泉水 II 类水 11 件、III 类水 71 件、IV 类水 16 件、V 类水 2 件,其中 II、III 类水占 82%,表明区内泉水大多数满足生活饮用水标准。



图 1 莱芜盆地水文地质及泉水分布

Fig. 1 Hydrogeology and spring distribution of Laiwu Basin

岩溶泉水Ⅱ、Ⅲ类水占比达到85%，Ⅳ、Ⅴ类水占比为15%，超标项主要为总硬度、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>及SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>；裂隙泉水Ⅱ、Ⅲ类水占比为76%，Ⅳ、Ⅴ类水占比为24%，超标项主要为总硬度、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>。由分析结果可以看出，区内泉水整体质量良好，受污染程度较低。

Ⅳ、Ⅴ类水主要分布在村镇周边，主要受人类活动影响而呈现出点状离子超标，表现在人类生活活动、农药化肥使用及煤矿开采等。

### 2.3.2 饮用天然矿泉水评价

依据100件泉水水样测试结果，指标参照《食品

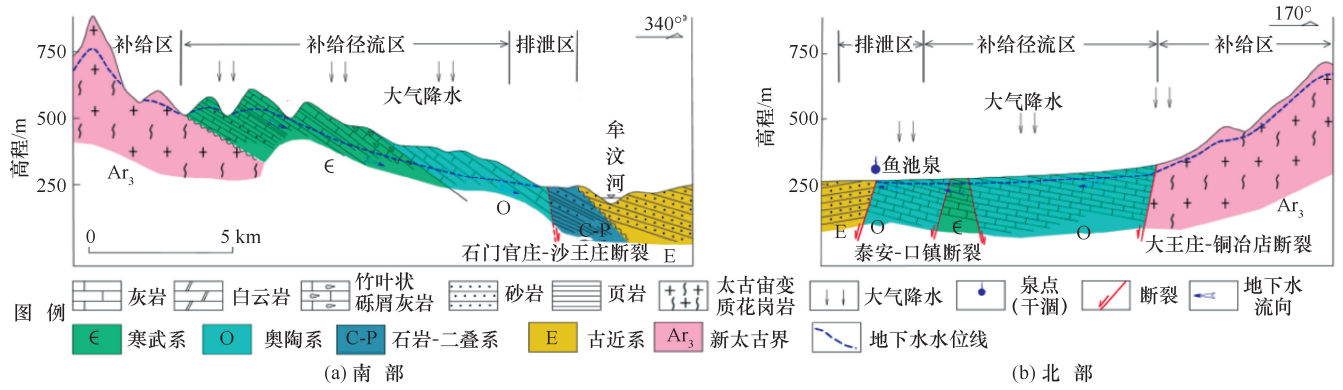


图2 莱芜盆地水文地质结构

Fig. 2 Hydrogeological structure of Laiwu Basin

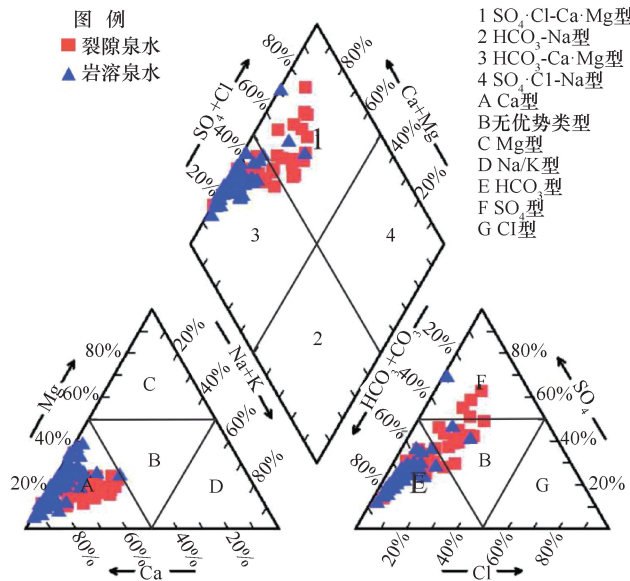


图3 泉水 Piper 三线图

Fig. 3 Piper trilinear diagram of springs

安全国家标准-饮用天然矿泉水标准》(GB 8537—2018)中的6项界限指标。结果显示:9处泉水锶含量大于标准最低值(水温低于25℃时,取0.4 mg/L),范围在0.49~5.20 mg/L,主要分布于碳酸盐岩于侵入岩接触带区域;15处泉水偏硅酸含量大于标准最低值(水温低于25℃时,取30.0 mg/L),范围在30.069~51.493 mg/L,主要分布于莱芜外弧断裂外围的岩浆岩分布区。泉水中的饮用天然矿泉水分为锶型、偏硅酸型2种类型。

### 3 泉域系统划分

#### 3.1 划分原则

(1)在山东省地下水水文地质分区基础之上,遵循系统整体性和统一性。

(2)将具有水力联系的不同含水岩组所圈闭系统

划分为同一个泉域系统。

(3)泉域系统必须是在自然条件下具有相对完整的地下水补径排条件;系统边界由完整地下(地表)分水岭或排泄边界构成。

(4)充分考虑区内泉水分布特征及形成机理,结合区内现有地形地貌、地质构造特征,进行区内泉域系统划分。

#### 3.2 划分依据

泉水是地下水在地表出露后形成,因此泉域系统划分与地下水系统划分具有同样划分依据。通常地下水系统是指具有明确边界、连续含水层、统一地下水流场、相对独立循环的地下水汇集体的统称<sup>[33-34]</sup>。地下水系统边界一般由隔水岩层、地表地下分水岭、隔水层边界及滞流边界等构成。

(1)地表分水岭边界。地表分水岭多为最高点连线,地表水系发源于地下水系统上游低山丘陵区,地表水系上游边界多为系统的地表分水岭边界。

(2)地下分水岭。相邻两个地下水系统为同一含水岩组,但地下水流分别流向不同泉口或不同排泄基准,构成不同泉域,其间必有地下分水岭,其地下水位高于两侧。

(3)隔水层边界。有一定厚度的碎屑岩、火成岩、变质岩等不透水岩层可以构成隔水层边界。

(4)滞流边界。在一些向斜盆地分布的岩溶水系统,岩溶含水层向盆地深部延伸,其上部具有厚层碎屑岩及煤系地层覆盖,深部地下水径流缓慢形成相对滞流,一般将这些位置的地面投影线作为滞流边界。

在之前研究中,莱芜盆地内岩溶发育普遍在400 m以浅<sup>[21]</sup>。因此,本次划分将碳酸盐岩含水层埋藏深度达到400 m、岩溶地下水循环缓慢地带确定为滞流性边界。

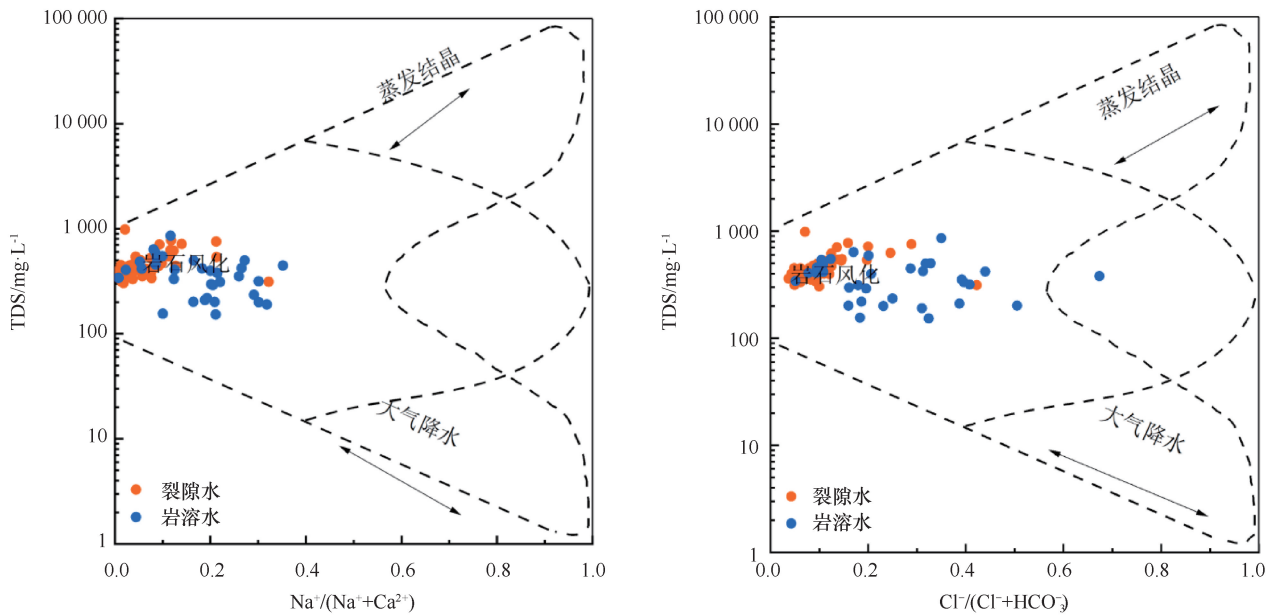


图4 研究区不同类型泉水 Gibbs 图

Fig. 4 Gibbs diagram of different types of springs in the study area

表1 研究区泉域划分

Table 1 Delineation of spring domain in the study area

序号	泉域名称	面积/km <sup>2</sup>	边界
1	牟汶河泉域	1 274. 669	南部、东部边界以地表地下水分水岭为界, 西部边界以角峪-羊流断裂、角峪岩体边缘为界, 北部边界以地下水分水岭为界
2	瀛汶河泉域	713. 823	东部、西部以地表地下水分水岭为界, 南部边界以地下水分水岭为界, 北部以岩浆岩与寒武系地层界线为界
3	沂源泉域	36. 623	西部、南部以岩浆岩与寒武系地层界线为界, 东部以行政界线为界(研究区)
4	源泉泉域	136. 377	西部边界以地表地下水分水岭、禹王山断裂为界, 南部边界以地表地下水分水岭为界, 东部、北部边界以行政界线为界(研究区)
5	百脉泉泉域	55. 195	南部边界以岩浆岩与寒武系朱砂洞组地层为界, 西部边界以文祖断裂为界, 北部、东部边界以行政界线为界(研究区)
6	白泉泉域	31. 480	南部边界以岩浆岩与寒武系朱砂洞组地层为界, 东部边界以文祖断裂为界, 北部、西部边界以行政界线为界(研究区)

### 3.3 系统划分

遵循上述划分原则及划分依据, 将研究区划分为牟汶河泉域、瀛汶河泉域、源泉泉域、沂源泉域、百脉泉泉域和白泉泉域(见表1与图5)。其中百脉泉泉域和白泉泉域为济南地区两大泉域的上游地区, 源泉泉域为源泉单斜岩溶水系统上游地区, 沂源泉域为沂水断块岩溶水系统上游地区; 本次划分只表述莱芜地区。

## 4 泉水地质成因分析

莱芜泉水受地形地貌、地质构造、地层岩性等条件影响, 在盆地外缘的岩浆岩地区、碳酸盐岩裸露区较为分布, 而在盆地内部受到人为因素影响, 地下水系统遭受破坏, 泉水基本不出露。依据前文泉水分布、质量特征及泉域系统划分, 将莱芜泉水形成机理

进行如下讨论。

### 4.1 岩溶泉与裂隙泉形成机理各具特点

碳酸盐岩区域地下水多沿岩层倾向径流, 在排泄区遇阻或河流沟谷处出露成泉。碳酸盐岩地区主要分布在盆地南部及东北部边缘一带。地下水接受岩浆岩区间接补给和裸露碳酸盐岩区直接补给。在大气降水补给后, 地下水沿地层倾向或地势高低由南向北方向径流, 沿途还接受寒武系地层地下水间接补给, 在奥陶系地层承压排泄区富集或遇地层、莱芜岩体阻挡之后上升成泉。泉水运动具有规律性、循环性和持续性。

岩浆岩区地下水整体表现为就地补给、浅部运动、短途排泄, 泉水多在河流沟谷及断层发育处出露。莱芜地区分布大面积岩浆岩, 地势起伏



图5 研究区泉域系统划分

Fig. 5 Division of spring systems in the study area

变化大, 具有广泛的补给径流区。裂隙泉水多具有季节性, 受降水影响明显。泉水在大气降水后迅速补给, 沿浅层风化裂隙或构造裂隙向地势低洼处径流出露成泉。径流途径短、补给迅速, 受降水影响明显。

#### 4.2 单斜状碳酸盐岩地层与断裂构造发育是泉水形成的地质地貌基础

莱芜地区碳酸盐岩地层呈单斜状产出, 呈现出南高北低; 岩层倾向整体呈东北、北西向, 与地势起伏基本一致。裸露碳酸盐岩构成了泉水主要补给区, 同

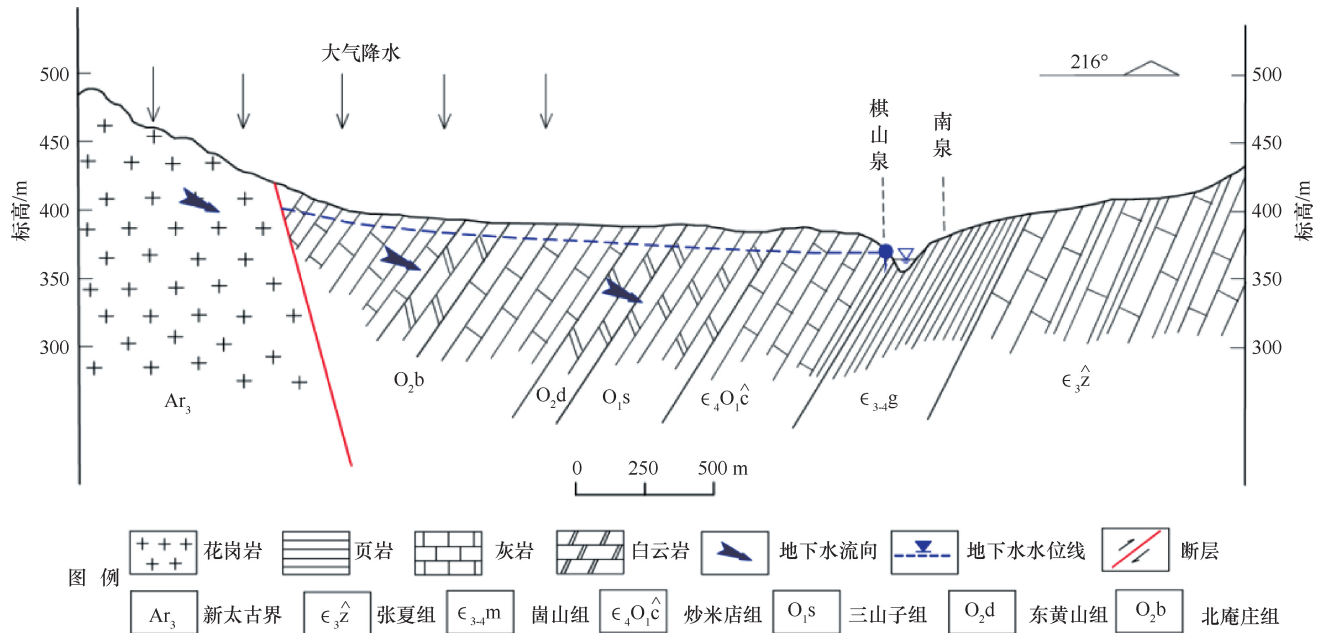


图 6 棋山泉成因地质剖面图

Fig. 6 Geological profile of Qishan Spring genesis

时接受南部岩浆岩区裂隙水间接补给。寒武-奥陶系地层受馒头组、崮山组页岩隔水层影响具有不同水力联系, 形成不同深度循环径流, 整体向排泄区富集。单斜状地层为地下水运动提供了介质, 地下水接受补给后沿地层倾向与地势方向径流, 在地势低洼处及沟谷切割处, 地下水出露形成下降泉。例如北泉村内的棋山泉, 泉水补给来源主要为南部地下水径流补给, 在河谷处受河流侵蚀出露成泉(见图6)。下降泉泉流量与大气降水关系密切, 降水后沿裂隙迅速补给地下水, 泉流量反应迅速; 依据泉水流量动态监测数据可以看出, 在丰水期内泉流量出现明显提升, 泉流量可达 233.92 m<sup>3</sup>/h(2021年8月实测), 而在枯水期泉水流量明显减弱, 泉流量为 156.78 m<sup>3</sup>/h(2022年3月实测)(见图7)。

另外, 泉域内地质构造十分发育, 多发育北西向、北东向断裂。断裂构造既造成了地层错动形成相对阻水地质条件, 又联通寒武系和奥陶系岩溶水之间水力联系, 使得寒武系地层岩溶水可以沿断层裂隙上升补给奥陶系岩溶水, 形成一个地下水上升通道, 为泉水出露提供了构造条件。如下家泉, 南北向莱芜内弧断裂造成断裂两侧岩层错动, 断层下盘馒头组地层形成阻水地层, 地下水由南向北径流后受到地层阻水沿断裂上升成泉(见图8); 同时断裂又沟通了寒武系朱砂洞组、张夏组和奥陶系三山子组之间水力联系, 形成一个统一的地下水流系统, 增加了泉水补给来源

与承压性, 泉流量与大气降水呈现明显滞后效应(见图9)。

#### 4.3 构造侵蚀形成的河流、沟谷构成了泉水出露的主要地貌条件

莱芜地区无客水来源, 多期构造运动发育, 构造侵蚀、溶蚀作用造就了现在高低起伏的低山丘陵地貌; 特别是在盆地边缘一带, 受侵入岩抬升影响, 碳酸盐岩地层零星出露, 河流沟谷发育侵蚀明显。

在河流、沟谷等地带岩层受到流水侵蚀后, 致使沟谷内地形低于区域地下水水位面, 地下水在沟谷处溢出成泉。在铜冶店—孙祖断裂、泰安—口镇断裂外围, 分布大面积岩浆岩区, 地貌类型以构造侵蚀低山区为主, 沟谷纵横发育。地下水多从山顶向山谷径流, 在沟谷处出露成泉; 在盆地碳酸盐岩和侵入岩接触地带, 受热液蚀变影响地层硬度普遍较低, 加上季节性流水侵蚀作用影响, 碳酸盐岩地层侵蚀明显, 形成侵蚀下降泉(见图10)。

## 5 结论

(1) 莱芜地区泉水资源丰富, 共发现泉水 223 处。泉水类型按含水层可分为岩溶泉水和裂隙泉水两类, 泉水主要分布在盆地边缘河流沟谷地带及南部单斜产出的碳酸盐岩裸露区, 其分布受断层、河流沟谷等地质地形条件控制明显; 泉水成因多以下降泉为主, 少量为上升泉。

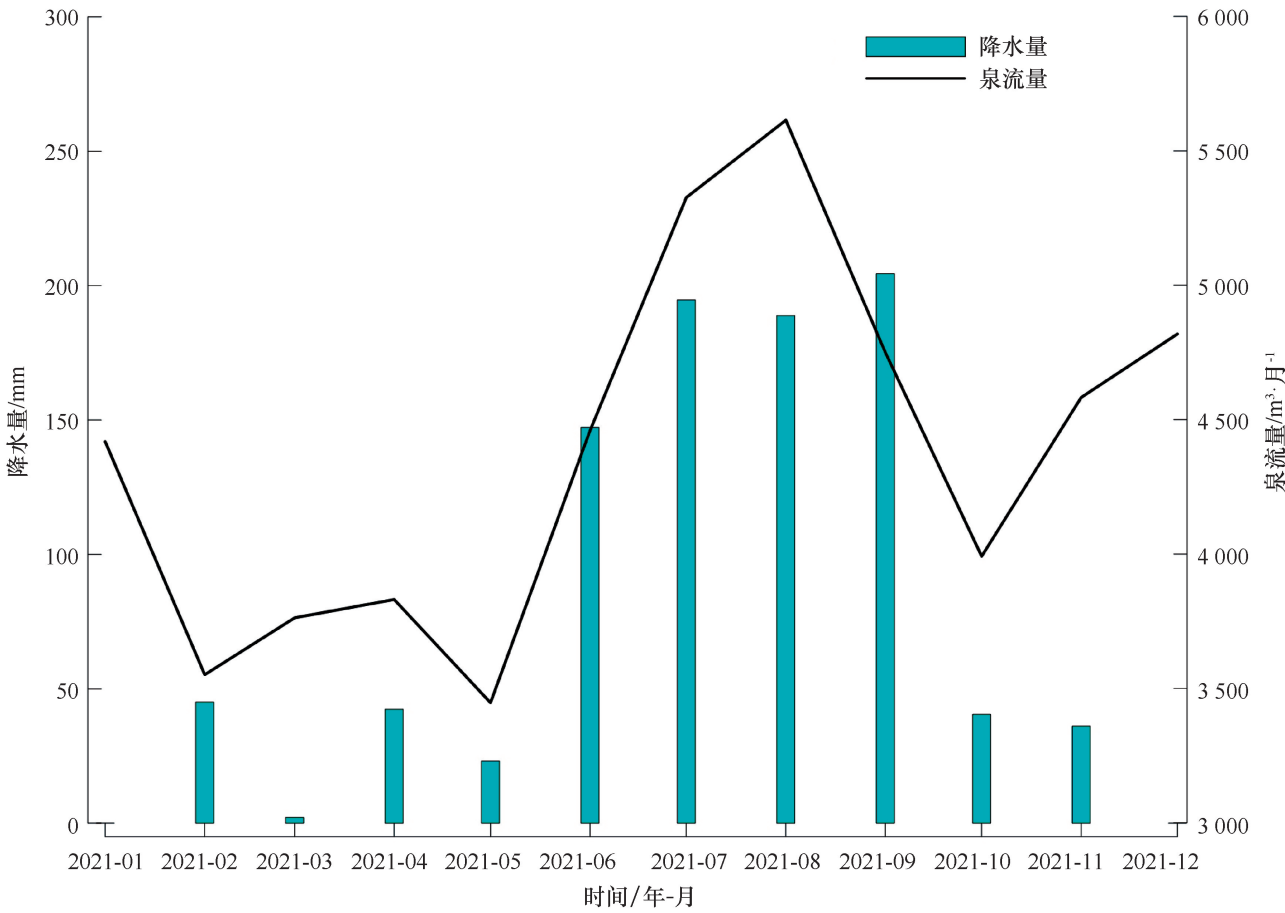


图 7 棋山泉降雨量与泉流量关系对比

Fig. 7 Comparison of relationship between precipitation and spring discharge at Qishan Spring

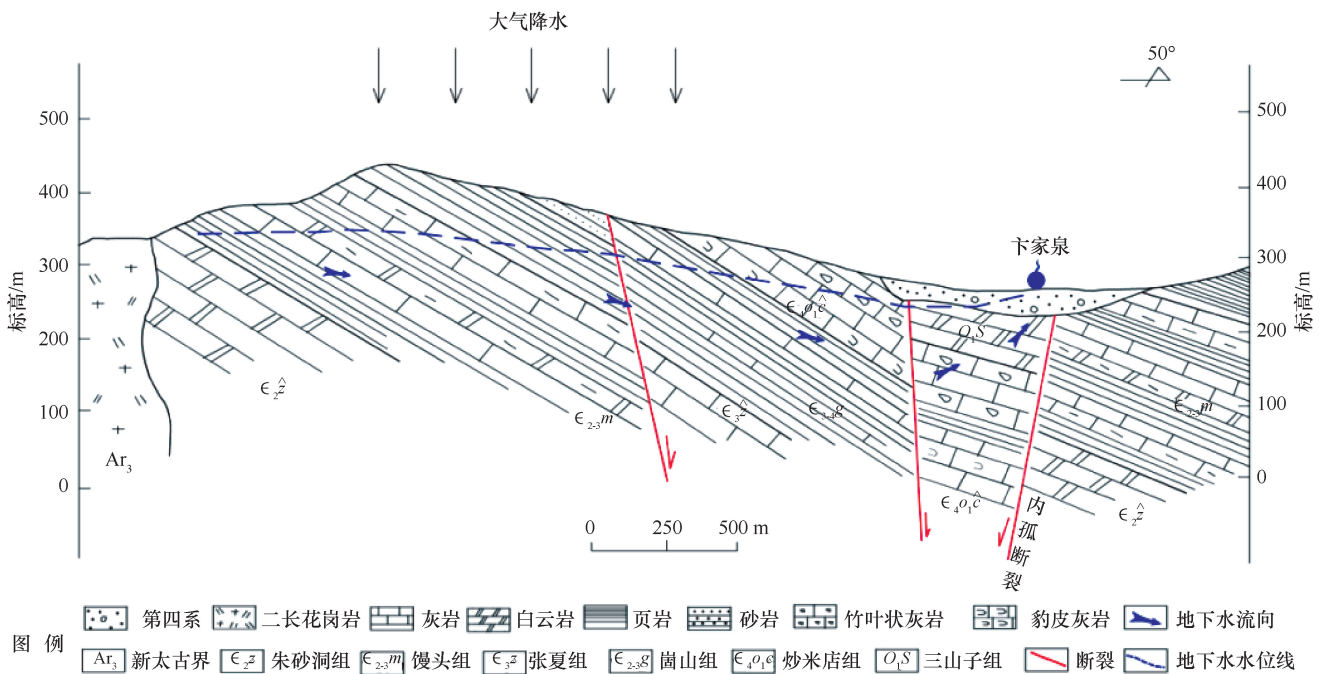


图 8 卞家泉成因地质剖面

Fig. 8 Geological profile of Bianjia Spring genesis

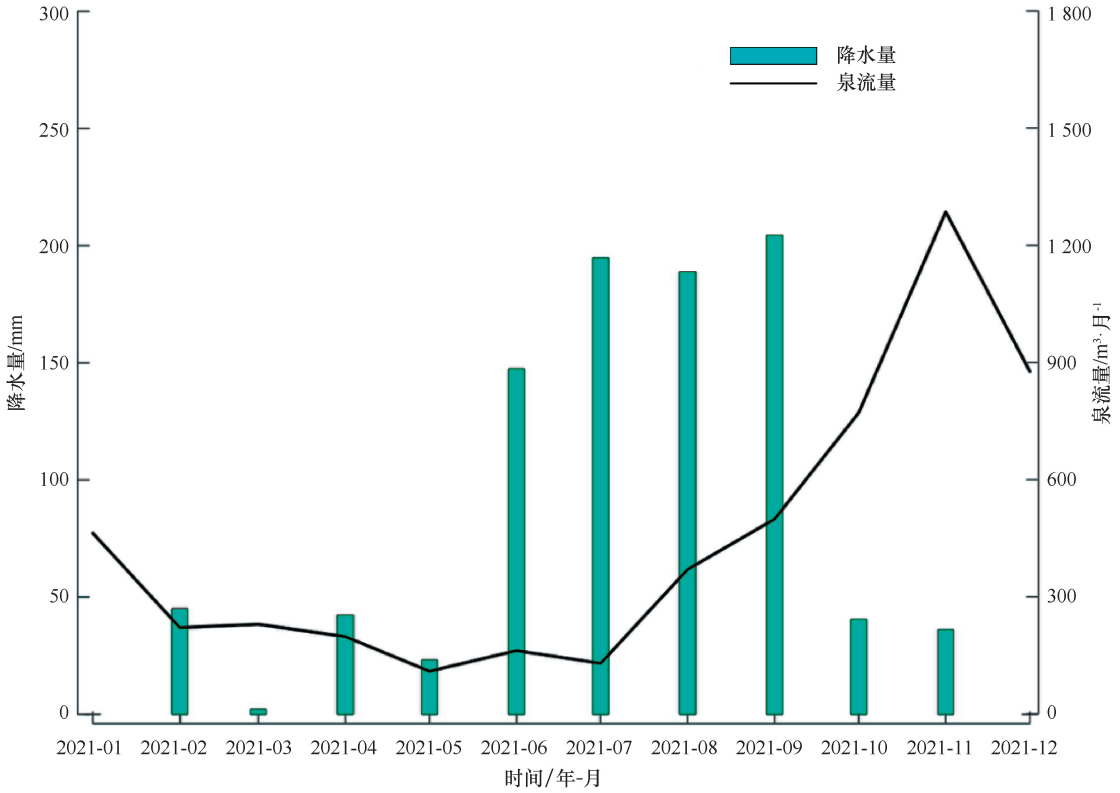


图9 卞家泉降雨量与泉流量关系对比

Fig. 9 Comparison of relationship between precipitation and spring discharge at Bianjia Spring

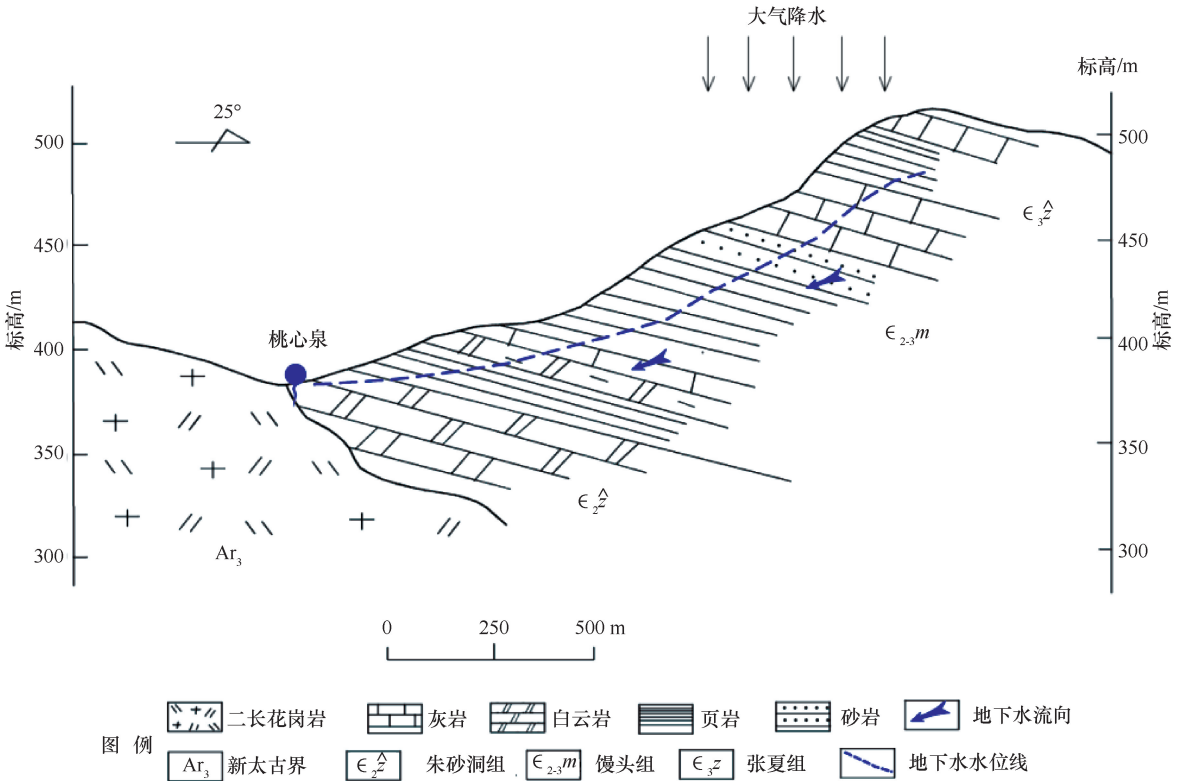


图10 桃行泉成因地质剖面图

Fig. 10 Geological profile of Taoxing spring genesis

(2) 泉水水化学类型相对简单, 主要分为  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  型、 $\text{HCO}_3\text{-Ca} \cdot \text{Mg}$  型和  $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca}$  型, 个别泉点呈现出  $\text{HCO}_3\text{-Ca} \cdot \text{Na}$  型、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl-Ca}$  型; 泉水主要离子来源于水岩相互作用。泉水水质整体良好, 82% 泉水水质达到 III 类水及以上标准, 表明区内泉水大多数满足生活饮用水标准; 部分泉水锶、偏硅酸含量可达到饮用天然矿泉水标准; 个别泉点受人类活动影响已干涸或水质较差。

(3) 莱芜地区依据区域水文地质条件、泉水特征、泉水形成等因素, 划分为牟汶河泉域、瀛汶河泉域、源泉泉域、沂源泉域、百脉泉泉域和白泉泉域六大泉域系统。

(4) 莱芜地区泉水以裂隙泉水和浅循环岩溶泉为主。单斜状构造条件为地下水径流排泄提供了良好的构造基础, 区内厚层的碳酸盐岩及浅部溶孔、溶隙发育, 为地下水赋存提供了良好的储水空间; 高低起伏的地形地貌与断裂构造等地质条件, 则为泉水出露提供了基本地质条件。

莱芜地区泉水资源丰富, 但是主要分布在盆地周边地带, 内部承压排泄区部分岩溶大泉受人类活动影响致使泉水干涸灭失, 名泉保护已刻不容缓。本文依据泉水普查结果对莱芜地区泉水特征、泉域系统划分及形成机理进行系统分析, 可为莱芜地区科学合理泉水保护与泉水资源综合管理, 提供更为高效、科学、准确的技术支撑。

## 参考文献 (References):

- [1] 贺可强, 刘炜金, 邵长飞. 鲁中南岩溶水资源综合类型及合理调蓄研究[J]. 地球学报, 2002, 23(4): 369-374.
- HE K Q, LIU W J, SHAO C F. The comprehensive type classification and proper adjustment of karst water resource in the central-south region of Shandong Province [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2002, 23(4): 369-374.
- [2] 段壮, 高明波, 高继雷, 等. 山东莱芜张家洼铁矿床金云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年及其对成矿构造背景的启示[J]. 地质学报, 2022, 96(4): 1279-1296.
- DUAN Z, GAO M B, GAO J L, et al. Phlogopite  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of the Zhangjiawa iron deposit, Laiwu District, Shandong Province: Implications for regional iron skarn mineralization of North China Craton [J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(4): 1279-1296.
- [3] 徐蒙, 刘辉, 张馨, 等. 莱芜区上王庄村水文地质参数计算及地下水水质评价[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2021, 36(4): 48-52.
- XU M, LIU H, ZHANG X, et al. Calculation of hydrogeological parameters and evaluation of groundwater quality in Shangwangzhuang

- Village, Laiwu District [J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2021, 36(4): 48-52.
- [4] 马明, 高继雷, 高明波, 等. 鲁西莱芜地区地球物理特征及富铁矿床勘查模型建立[J]. 华北地震科学, 2020, 38(2): 13-20.
- MA M, GAO J L, GAO M B, et al. Geophysical characteristics of Laiwu Area in Western Shandong Province and establishment of exploration model for iron rich deposits [J]. North China Earthquake Sciences, 2020, 38(2): 13-20.
- [5] 刘书锋. 山东莱芜地区中生代侵入杂岩特征与成矿关系[J]. 地质学刊, 2020, 44(S1): 34-47.
- LIU S F. Characteristics of the Mesozoic intrusive complexes and their relation to metallogeny in Laiwu Area, Shandong Province [J]. Journal of Geology, 2020, 44(S1): 34-47.
- [6] 王超, 张立川, 王应强, 等. 莱芜地区地下水污染研究[J]. 地下水, 2021, 43(6): 21-24.
- WANG C, ZHANG L C, WANG Y Q, et al. Study on groundwater pollution in Laiwu Region [J]. Ground Water, 2021, 43(6): 21-24.
- [7] 刘元晴, 文冬光, 吕琳, 等. 沂蒙山区典型断陷盆地岩溶地下水系统特征: 以莱芜盆地为例[J]. 地质科技通报, 2022, 41(1): 157-167.
- LIU Y Q, WEN D G, LYU L, et al. Characteristics of karst groundwater flow systems of typical faulted basins in Yimeng Mountain Area: A case study of Laiwu Basin [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(1): 157-167.
- [8] 周乐, 刘元晴, 李伟, 等. 莱芜盆地构造演化特征及水文地质意义[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(2): 519-526.
- ZHOU L, LIU Y Q, LI W, et al. Tectonic evolutionary characteristics and their hydrological geological significance in Laiwu Basin [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(2): 519-526.
- [9] 王云燕. 山东莱芜地区牛泉矽卡岩型铁矿成矿条件及找矿标志[J]. 山东国土资源, 2021, 37(10): 23-28.
- WANG Y Y. Metallogenic conditions and prospecting marks of Niuquan skarn type iron deposit in Laiwu Area in Shandong Province [J]. Shandong Land and Resources, 2021, 37(10): 23-28.
- [10] 李贵恒, 冯建国, 鲁统民, 等. 泰莱盆地地下水水化学特征及水质评价[J]. 水电能源科学, 2019, 37(4): 52-55, 121.
- LI G H, FENG J G, LU T M, et al. Hydrochemical characteristics and water quality assessment of groundwater in Tailai Basin [J]. Water Resources and Power, 2019, 37(4): 52-55, 121.
- [11] 高宗军, 万志澎, 贺可强, 等. 大汶河流域中上游地区岩溶地下水水化学特征及其控制因素分析[J]. 地质科技通报, 2022, 41(5): 264-272.
- GAO Z J, WAN Z P, HE K Q, et al. Hydrochemical characteristics and controlling factors of karst groundwater in middle and upper reaches of Dawen River Basin [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(5): 264-272.
- [12] 李国英. 进一步全面深化水利改革 为推动水利高质量发展、保

- 障我国水安全作出新的贡献:在2025年全国水利工作会议上的讲话[J].水利发展研究,2025,25(1):1-12.
- LI G Y. Further comprehensively deepen water conservancy reform to promote high-quality development of water conservancy and safeguard national water security: A speech at the 2025 national water conservancy work conference [J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(1): 1-12.
- [13] 吴丰昌.我国水体污染控制与治理成效、科技支撑与展望[J].水利发展研究,2023,23(12):1-8.
- WU F C. Effectiveness, scientific and technological support, and prospects for water pollution control and management in China[J]. Water Resources Development Research, 2023, 23(12): 1-8.
- [14] 李国英.为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障:在2024年全国水利工作会议上的讲话[J].水利发展研究,2024,24(1):1-10.
- LI G Y. Improved water security for China's efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization: Speech at the 2024 National Water Conservancy Work Conference [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(1): 1-10.
- [15] 高峰,王振涛,靳丰山,等.山东省莱芜盆地岩溶塌陷风险性评价[J].中国人口·资源与环境,2016,26(S2):359-362.
- GAO F, WANG Zhentao, JIN F S, et al. Risk assessment of karst collapse in the Laiwu of Shandong Province[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(S2): 359-362.
- [16] 张增奇,张成基,王世进,等.山东省地层侵入岩构造单元划分对比意见[J].山东国土资源,2014,30(3):1-23.
- ZHANG Z Q, ZHANG C J, WANG S J, et al. Views on classification and contrast of tectonic units in strata in Shandong Province [J]. Shandong Land and Resources, 2014, 30(3): 1-23.
- [17] 许立青,李三忠,郭玲莉,等.郯庐断裂带对鲁西隆升过程的影响:磷灰石裂变径迹证据[J].岩石学报,2016,32(4):1153-1170.
- XU L Q, LI S Z, GUO L L, et al. Impaction of the Tan-Lu fault zone on uplift of the Luxi Rise: Constraints from apatite fission track thermochronology[J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(4): 1153-1170.
- [18] 刘元晴,周乐,李伟,等.山东莱芜盆地西北缘古近系半固结含水岩组的特征及其成因[J].地球学报,2018,39(6):737-748.
- LIU Y Q, ZHOU L, LI W, et al. The characteristics and genetic analysis of the Paleogene semi-consolidated water-bearing formation on the northwestern margin of Laiwu Basin, Shandong Province [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2018, 39(6): 737-748.
- [19] 叶婷婷,颜照坤,李勇,等.渤海湾盆地沧东凹陷新生代原型盆地构造演化[J].科学技术与工程,2023,23(14):5914-5921.
- YE T T, YAN Z K, LI Y, et al. Tectonic evolution process of Cenozoic prototype basin in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(14): 5914-5921.
- [20] 李波,王金晓,吴璇,等.山东莱芜盆地东部水文地质条件及富水块段特征[J].中国岩溶,2020,39(5):637-649.
- LI B, WANG J X, WU X, et al. Hydrogeological conditions and characteristics of water-rich sections in the eastern Laiwu basin, Shandong Province[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(5): 637-649.
- [21] 李波,于大璐,王楠,等.莱芜盆地岩溶地下水富集规律[J].地质力学学报,2024,30(4):691-702.
- LI B, YU D L, WANG N, et al. Karst groundwater enrichment law in Laiwu Basin [J]. Journal of Geomechanics, 2024, 30(4): 691-702.
- [22] 孙逊,王克红,孙启堂,等.鲁中南山区岩溶裂隙水富水带类型及分布特征[J].工程勘察,2010,38(2):52-56.
- SUN X, WANG K H, SUN Q T, et al. Types and distribution of Karst fissure water in central and southern Shangdong Province [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010, 38(2): 52-56.
- [23] 马振民,刘立才,陈鸿汉,等.山东泰安岩溶水系统地下水化学环境演化[J].现代地质,2002,16(4):423-428.
- MA Z M, LIU L C, CHEN H H, et al. Hydrochemical environmental evolution of karst water system in Tai'an, Shandong Province [J]. Geoscience, 2002, 16(4): 423-428.
- [24] 李波,王金晓,赵无忌,等.莱芜盆地牟汶河流域水体同位素特征与分析[J].山东国土资源,2019,35(7):58-63.
- LI B, WANG J X, ZHAO W J, et al. Analysis on isotopic characteristics of water body of Muwen River Basin in Laiwu Basin [J]. Shandong Land and Resources, 2019, 35(7): 58-63.
- [25] 李波,李常锁,王楠,等.山东莱芜地区泉水水化学特征及形成机制[J].环境化学,2024,43(5):1621-1631.
- LI B, LI C S, WANG N, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of spring water in Laiwu, Shandong Province [J]. Environmental Chemistry, 2024, 43(5): 1621-1631.
- [26] 聂振龙,陈宗宇,程旭学,等.黑河干流浅层地下水与地表水相互转化的水化学特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2005,35(1):48-53.
- NIE Z L, CHEN Z Y, CHENG X X, et al. The chemical information of the interaction of unconfined groundwater and surface water along the Heihe River, Northwestern China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2005, 35(1): 48-53.
- [27] 秦娜,成文举,董方营,等.东平湖地区地下水化学特征及质量评价[J].科学技术与工程,2022,22(24):10434-10443.
- QIN N, CHENG W J, DONG F Y, et al. Chemical characteristics and quality evaluation of groundwater in Dongping Lake area [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(24): 10434-10443.
- [28] 汪敬忠,吴敬禄,曾海鳌,等.内蒙古河套平原水体同位素及水化学特征[J].地球科学与环境学报,2013,35(4):104-112.
- WANG J Z, WU J L, ZENG H A, et al. Characteristics of water isotope and hydrochemistry in Hetao Plain of Inner Mongolia [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, 35(4): 104-112.

- [29] 田原,余成群,雒昆利,等. 西藏地区天然水的水化学性质和元素特征[J]. 地理学报, 2014, 69(7): 969-982.  
TIAN Y, YU C Q, LUO K L, et al. Water chemical properties and the element characteristics of natural water in Tibet, China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(7): 969-982.
- [30] 蒋金沛,冯杰,张强,等. 响水溪泉岩溶地下水水化学特征及成因[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(27): 11522-11529.  
JIANG J P, FENG J, ZHANG Q, et al. Hydrochemical characteristics and genesis of karst groundwater in Xiangshuixiquan [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(27): 11522-11529.
- [31] 李亮,龚建师,周锴锴,等. 基于物元可拓的河南省柘城县浅层地下水质量综合评价[J]. 华东地质, 2022, 43(3): 355-363.  
LI L, GONG J S, ZHOU K E, et al. Application of Matter-Element and extension method in the comprehensive evaluation of groundwater environment quality of Zhecheng County, Henan Province[J]. East China Geology, 2022, 43(3): 355-363.
- [32] 孙涛,潘世兵,李永军. 人工神经网络模型在地下水水质评价分类中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(3): 58-61.  
SUN T, PAN S B, LI Y J. Application of artificial neural network model to groundwater quality assessment and classification [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, 31(3): 58-61.
- [33] 高茜,宋一心,刘博瀚,等. 山东省泰安市岩溶地下水系统划分及循环模式分析[J]. 水利水电快报, 2024, 45(2): 29-33, 43.  
GAO H, SONG Y X, LIU B H, et al. Analysis on division of karst groundwater system and its circulation model in Tai'an City, Shandong Province [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2024, 45(2): 29-33, 43.
- [34] 吴芳,马杰,刘博华,等. 六盘山西缘前庄地区水资源特征及开发利用建议[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(10): 49-58.  
WU F, MA J, LIU B H, et al. Water resources characteristics in the Qianzhuang Area, west edge of the Liupan Mountains: Suggestions for development and utilization [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(10): 49-58.

(责任编辑 王海锋)