

引用格式: 李波, 于大潞, 王楠, 等, 2024. 莱芜盆地岩溶地下水富集规律 [J]. 地质力学学报, 30 (4): 691–702. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2023166](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2023166)

Citation: LI B, YU D L, WANG N, et al., 2024. Karst groundwater enrichment law in Laiwu Basin [J]. Journal of Geomechanics, 30 (4): 691–702. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2023166](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2023166)

莱芜盆地岩溶地下水富集规律

李 波^{1,2,3}, 于大潞^{1,2,3}, 王 楠^{1,2,3}, 毕雯雯^{1,2,3}, 高 帅^{1,2,3}, 胥 芹⁴,
王昱玮^{1,2,3}, 侯 芃⁵

LI Bo^{1,2,3}, YU Dalu^{1,2,3}, WANG Nan^{1,2,3}, BI Wenwen^{1,2,3}, GAO Shuai^{1,2,3}, XU Qin⁴, WANG Yuwei^{1,2,3}, HOU Peng⁵

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 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. 山东省地矿工程勘察院, 山东 济南 250014;

4. 山东省水工环地质工程有限公司, 山东 济南 250014;

5. 山东省地矿物资有限公司, 山东 济南 250014

1. 801 Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & 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 Geo-mineral Engineering Exploration Institute, Jinan 250014, Shandong, China;

4. Shandong Hydrogeology Engineering Geology and Environment Geology Corporation, Jinan 250014, Shandong, China;

5. Shandong Geology and Mineral Resources Materials Corporation, Jinan 250014, Shandong, China

Karst groundwater enrichment law in Laiwu Basin

Abstract: [Objective] The Laiwu Basin is a typical monocline fault basin in the central and southern regions of Shandong Province. It has a complex geological structure and an uneven distribution of groundwater resources within the region. Previous researchers have conducted a large number of hydrogeological and spring water protection studies, but no relevant research has been conducted on the relationship between the development laws of fissure karst and the distribution of karst groundwater. [Methods] In this study, karstification and groundwater enrichment characteristics were investigated in the Laiwu Basin through research methods of data collection, field geological surveys, hydrogeological drilling, and rock and mineral testing. [Results] Carbonate strata are concentrated in the southern part of the Laiwu Basin, with a monoclinical structure controlled by the geological structure, which is scattered sporadically in the northern and eastern regions. Karst development is affected by many factors, such as formation lithology, geological structure, groundwater dynamic conditions, and magma intrusion. The principal surface karst features are grikes and karst valleys. In addition, the principal underground karst features were dominated by dissolution fissures and holes at 400 m depth. Karst groundwater is primarily concentrated in multistage structural fault basins, hanging walls formed by water-blocking faults, groundwater pressure discharge areas, and karst development areas on the anticlinal flank of the mine. [Conclusion] The karst water cycle in the Laiwu Basin has a general regularity of monoclinic basins but is influenced by multiple factors, forming karst water systems of varying sizes that are relatively independent. Significant differences were observed in the development characteristics and water abundance patterns of karsts in different regions. Fault structures and geological water-blocking

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 (2018) 44 号)

This research is financially supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42202294) and the Geological Exploration Project of Shandong Province (Grant No. Lukanzi (2018) 44).

第一作者: 李波 (1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地下水资源调查评价工作。Email: 710445277@qq.com

通讯作者: 王楠 (1981—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事济南泉水保护工作。Email: 878870341@qq.com

收稿日期: 2023-10-10; 修回日期: 2024-04-28; 录用日期: 2024-04-30; 网络出版日期: 2024-05-15; 责任编辑: 吴芳

areas have relatively abundant karst water, whereas the shallow karst water has a strong runoff cycle. [Significance] This study provides scientific and technical support for the exploitation and utilization of groundwater resources in water-scarce mountainous areas of central and southern Shandong Province.

Keywords: Laiwu Basin; karstification; groundwater; enrichment pattern; hydrogeology

摘要: 基于在莱芜盆地开展的水文地质调查与泉水保护工作, 通过资料收集、野外地质调查、水文地质钻探及岩矿测试, 对区内碳酸盐岩岩溶发育特征及富水规律进行研究。结果表明: 莱芜盆地碳酸盐岩分布受构造控制明显, 集中分布在盆地南部, 呈单斜状产出, 在盆地北缘、东缘地区零星分布; 岩溶发育受地层岩性、地质构造、地下水动力条件及岩浆侵入等多因素影响; 地表岩溶形态以溶沟、溶槽为主, 地下岩溶以溶蚀裂隙、溶孔溶洞为主, 主要发育 400 m 以浅; 岩溶水主要富集在多期构造断块区域、阻水断裂形成的上盘、地下水承压排泄区及莱芜矿山背斜两翼岩溶发育区。研究结果可为鲁中南缺水山区地下水资源开发与利用提供科学技术支撑。

关键词: 莱芜盆地; 岩溶发育; 地下水; 富集规律; 水文地质

中图分类号: P641 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2024) 04-0691-12

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023166

0 引言

岩溶水是中国北方城市与工农业用水的重要来源, 在水资源中占有极为重要的地位, 具有相对独立、规模大小不一、循环补给的特征(廖资生, 1985; 梁永平和王维泰, 2010; 王维泰等, 2012)。依据统计数据, 中国北方碳酸盐岩含水层分布面积约 $344 \times 10^4 \text{ km}^2$, 富含的地下水资源量约 $2034.24 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 在国民经济发展中具有重要作用(刘元晴等, 2020b; 朱君等, 2023)。山东省水资源分布极不均衡, 特别是中部丘陵山区, 水资源短缺是制约当地社会经济发展的重要因素。

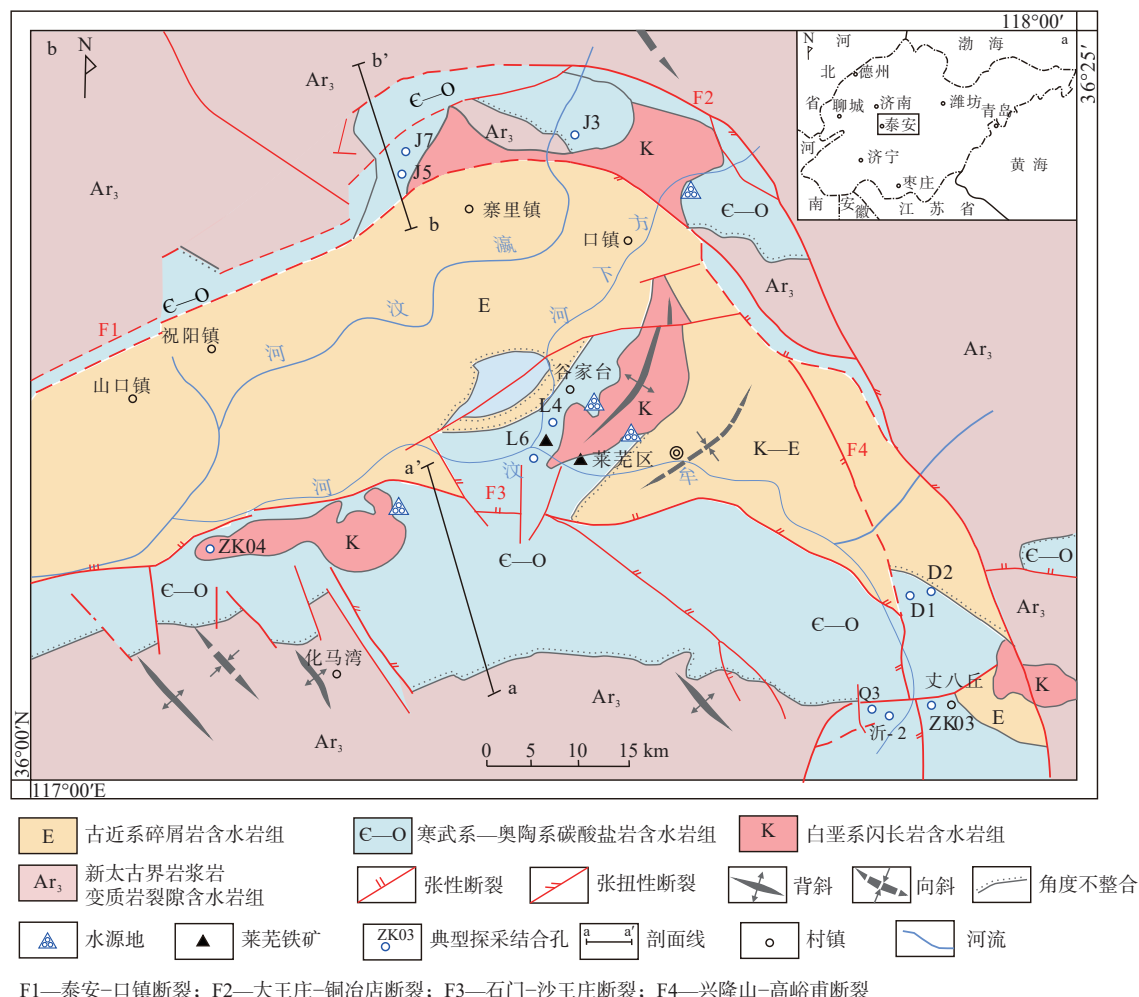
莱芜盆地地处山东省中南部山区, 是在深部地幔大规模隆起和地壳大规模伸展动力背景下形成的(周新桂等, 2004; 翟明国, 2019; 于学峰等, 2022)。受构造运动挤压抬升的影响, 盆地内发育由寒武—奥陶系灰岩组成的单斜构造。多期次地质构造运动造成了盆地内地层分布错综复杂, 地下水资源分布严重不均。已有研究成果针对莱芜盆地的构造地质环境、岩浆热液成矿及水文地质条件做了较深入的研究, 如时秀朋等(2010)从盆地沉积和古构造方面, 对莱芜地区中生代构造演化进行了研究; 段壮等(2022)对莱芜盆地地质构造背景条件进行了分析, 确定了张家洼铁矿成矿时代; 周乐等(2020)利用平衡剖面原理结合相关资料计算了莱芜盆地的伸展速率与主要断裂活动速率, 推演了盆地构造演化史; 刘元晴等(2020a)对盆地内岩浆侵入与

碳酸盐岩热液蚀变特征进行了研究, 构建了热液溶蚀模型, 并分析了热液溶蚀作用在水文地质方面的意义; 李波等(2019, 2020)对莱芜盆地东部地区水文地质条件进行了分析总结, 运用同位素手段分析了地下水运移规律, 总结了东部典型富水块段蓄水机理。但缺少莱芜盆地裂隙岩溶发育规律与岩溶地下水分布之间联系的相关研究。文章以莱芜盆地为研究区, 基于近几年开展的 1:5 万水文地质调查、环境地质调查、泉水保护研究等工作取得的数据资料, 对盆地内碳酸盐岩发育条件、分布特征及岩溶发育规律进行了系统总结, 分析了影响地下水富集的主要控制因素, 研究成果可为鲁中南缺水山区找寻地下水资源、合理开采利用地下水提供科学技术支撑。

1 研究区概况

莱芜盆地地处鲁中南中部山区, 南北长 61 km, 东西宽 58 km, 总面积 2246.21 km^2 。该区属温带大陆性半湿润气候, 四季分明, 年平均降雨量 699.74 mm(高峰等, 2016)。区内地表水系主要为大汶河水系, 发育牟汶河、嬴等支流, 水系总体由东向西南方向径流。莱芜盆地北、东、南三面环山, 呈簸箕状, 总体上由东南向西北方向倾斜。盆地北部是以香山、大山等为主的泰山余脉, 南部发育莲花山、新甫山等, 皆为山势陡峻、沟谷发育、切割强烈的中低山。区内地层出露较为齐全, 在盆地外围出露大面积新太古界岩浆岩、变质岩; 盆地南部寒武—奥

陶系碳酸盐岩地层呈单斜状产出, 在盆地内部上覆粉砂、黏土等(图 1; 马明等, 2020; 刘书锋, 2020)。厚层古近系—新近系砂岩、页岩, 地表覆盖第四系



a—区域位置示意图; b—水文地质简图

图 1 莱芜盆地构造及水文地质简图

Fig. 1 Structural and hydrogeological sketch map of Laiwu Basin

(a) Regional location map; (b) Hydrogeological sketch map

2 岩溶发育条件

2.1 碳酸盐岩分布及埋藏特征

莱芜盆地内碳酸盐岩分布面积约为 937.32 km², 约占盆地总面积的 41.29%, 主要分布于莱芜盆地南部低山丘陵地带及北部、东部盆地边缘地带。

根据碳酸盐岩地质埋藏特征不同, 将其分为裸露型、覆盖型和埋藏型三类。裸露型为碳酸盐岩地层裸露于地表, 无土层覆盖或土层厚度 < 1 m, 主要分布于盆地南部, 在盆地内外弧断裂之间亦有零星出露。覆盖型为碳酸盐岩上覆第四系, 其覆盖厚度

大于 1 m, 主要分布在莱芜区西北寨里一带、莱芜矿山背斜两翼地区及钢城区丈八丘一带。埋藏型是指在碳酸盐岩与第四系覆盖层之间存在非碳酸盐岩地层, 集中分布在盆地中西部, 非碳酸盐岩地层以古近系为主。

2.2 岩石组合类型

依据区内不同地层碳酸盐岩组合关系, 将碳酸盐岩地层分为纯碳酸盐岩组和不纯碳酸盐岩组两类(表 1)。

纯碳酸盐岩地层从老到新主要为寒武系朱砂洞组、张夏组、三山子组, 奥陶系马家沟群, 碳酸盐岩占比 > 70%, 岩性以中厚层灰岩、白云岩为主。此

表 1 岩溶层组类型划分表

Table 1 Classification of karst strata groups

岩溶层组类型	碳酸盐岩占比/%	地层	主要岩性	分布区域
纯碳酸盐岩组	>70	奥陶系马家沟群八陡组、五阳山组、北庵庄组, 寒武系张夏组	中厚层灰岩、微晶灰岩, 云斑灰岩、生物碎屑灰岩等	莱芜盆地牛泉镇—高庄镇一带
		奥陶系马家沟群阁庄组、土峪组、东黄山组, 寒武系三山子组, 寒武系朱砂洞组	中厚层白云岩、灰质白云岩	莱芜盆地牛泉镇—高庄镇一带
不纯碳酸盐岩组	30~70	寒武系炒米店组	中薄层灰岩、疙瘩状灰岩夹泥质页岩	清泥沟—老君堂
	<30	寒武系崮山组、馒头组	黄绿色、紫红色页岩夹薄层灰岩	清泥沟—老君堂

类型分布最广, 主要分布在盆地南部牛泉—高庄镇一带, 富水性好, 为研究区主要含水层。

不纯碳酸盐岩地层主要为寒武系馒头组、崮山组、炒米店组, 碳酸盐岩占比 30%~70%, 裂隙岩溶发育较弱, 富水条件较差, 仅在断裂构造发育区域富含少量地下水。

2.3 地质构造

莱芜盆地为断陷盆地, 历经多期地质构造运动, 构造条件较为复杂, 以断裂发育为主, 褶皱次之(翟明国等, 2004; 张琪琪和张拴宏, 2019)。断裂构造以近东西方向、北北西方向分布较多, 主要有大王庄—铜冶店断裂、泰安—口镇断裂、清泥沟断裂等。大王庄—铜冶店断裂为盆地的主要断裂构造, 对盆地的形成起控制作用, 断裂呈弧形展布, 有内、外弧之分(周乐等, 2020; 李三忠等, 2022)。外弧横贯莱芜盆地, 向西延伸至泰山南侧, 向南延伸至新泰市境内; 内弧向西延伸至泰山南侧, 向南在辛庄镇一带错断尖灭。八里沟向斜与莱芜矿山背斜为区内主要褶皱构造。

2.4 地下水类型及水动力条件

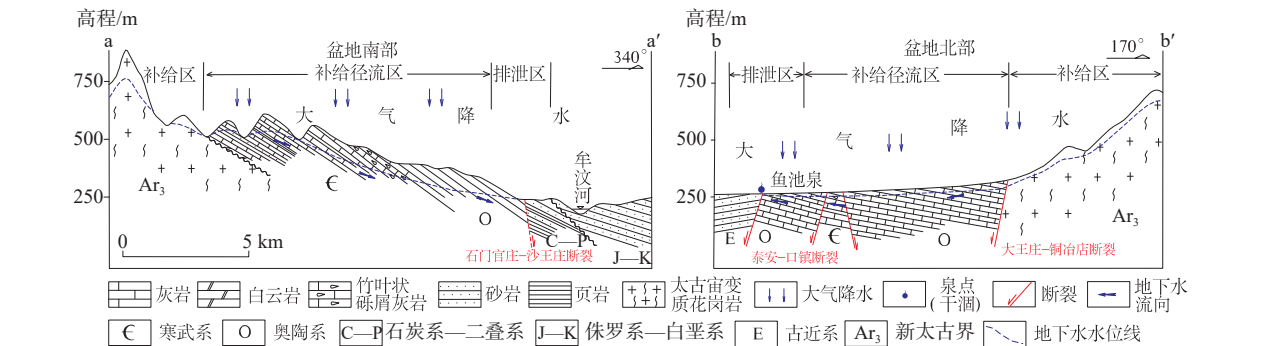
根据地下水赋存特征及含水岩组类型, 区内地

下水类型主要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及岩浆岩变质岩类裂隙水(李波等, 2019)。其中碳酸盐岩类裂隙岩溶水主要分布于盆地南北两侧的寒武—奥陶系, 其水文地质条件受地层岩性、断裂构造等因素影响(王超等, 2021)。

寒武系馒头组—炒米店组含水层, 岩性主要为灰岩、页岩互层或以页岩为主夹薄层灰岩组合。各层灰岩之间受页岩间隔, 水力联系弱、无统一水面, 储水空间条件较差, 水量不丰富。该含水层与新太古界岩浆岩一起构成了裂隙岩溶水的间接补给区。地下水运移条件受页岩的隔水及构造、地形等因素控制影响。

寒武—奥陶系马家沟群, 岩性以碳酸盐岩为主, 大面积分布于莱芜盆地南部, 在盆地北部呈块状零星分布。在岩溶水补给区, 该地层裸露于地表, 大气降水沿岩溶裂隙渗入后向地势低洼处径流, 盆地南部向北流动, 北部向南流动, 岩溶水呈“向心状”向盆地中部汇聚(图 2)。

天然状态下, 地下水径流受断裂或阻水地层阻挡难以富集, 并通过断裂破碎带上升成泉, 形成岩



a—盆地南部水文地质剖面图; b—盆地北部水文地质剖面图

图 2 莱芜盆地水文地质结构图(剖面位置见 图 1)

Fig. 2 Hydrogeological Structure Map of Laiwu Basin (The profile position is shown in Figure 1)

(a)Hydrogeological profile map of the southern basin; (b)Hydrogeological profile map of the northern basin

溶大泉。目前, 由于地下水的开采或采矿排水, 已形成稳定的岩溶水水位降落漏斗, 莱芜盆地中部岩溶大泉基本消失干涸, 岩溶水排泄方式基本全部为人工开采或采矿排水。

3 岩溶发育特征

3.1 岩溶形态特征

3.1.1 地表岩溶形态

莱芜盆地历经多期构造运动, 在碳酸盐岩中形成了错综复杂的构造节理、裂隙等。由于地表水、地下水的长期作用, 在地表和地下形成了形态各异、规模不等的岩溶形态(李波等, 2020)。在灰岩裸露分布地带, 尤其是盆地南部灰岩分布区, 如丈八丘、东泉地区南部山坡下部, 地表岩溶多发育溶沟、溶槽, 在河谷及两侧的裸露灰岩区还可见溶孔发育。

3.1.2 地下岩溶形态

地下裂隙岩溶发育主要类型有溶蚀裂隙、溶孔

及溶洞等, 盆地南北两侧碳酸盐岩地区均有发育。

溶蚀裂隙: 在丈八丘、清泥沟、东泉地区的钻孔岩芯中均可见大量溶蚀裂隙, 为岩溶地下水主要通道。溶蚀裂隙主要有两组, 一组近垂直发育, 另一组沿层面发育, 宽 1~50 mm, 裂隙面受溶蚀后凹凸不平, 常伴有溶孔、溶洞发育。溶蚀裂隙面可见黄褐色泥质浸染, 是地下水活动痕迹(图 3a)。在地下 10~150 m 深度范围内, 溶蚀裂隙一般无充填物或有少量砂土充填; 在 150 m 以下, 溶蚀裂隙发育较弱, 多被方解石脉充填。西丈八丘 ZK03 钻孔在 41~41.3 m 处见一条连续的近垂向裂隙将岩芯分成两半, 裂隙面凹凸不平, 蜂窝状溶蚀明显。

溶孔: 丈八丘、清泥沟、东泉地区钻孔岩芯中均可见。孔径一般 <10 cm, 多为 1~3 cm, 常密集成蜂窝状, 为良好储水空间(图 3b、3c)。溶孔沿溶蚀裂隙面和层面发育, 溶孔壁常有钙质薄膜, 为地下水溶蚀-沉淀作用痕迹。近地表处溶孔常被泥质充填, 地下 150 m 以下发育的溶孔常被方解石充填。

溶洞: 在东泉、莱芜矿体接触带等地区较为发



a—溶蚀裂隙; b—溶孔; c—蜂窝状溶孔; d—溶洞

图3 钻孔揭示的研究区地下岩溶类型

Fig. 3 Underground karst types revealed by drilling in study area

(a) Dissolution gap; (b) Dissolution pores; (c) Honeycomb-shaped dissolution pores; (d) Karst cave

育, 溶洞直径较大, 一般直径>10 cm, 连通性较好(图 3d)。近地表处溶洞常被泥质、砂质充填, 在 300 m 以下深度溶洞发育较少。

3.2 岩溶发育深度特征

此次工作及资料显示, 岩溶主要发育在地下 400 m 以浅深度范围内, 发育随深度增加而减弱。清泥沟、东泉水源地一带岩溶主要发育在 150 m 以上深度, 岩溶类型以溶洞、蜂窝状溶孔为主; 在水平方向上, 从补给区到排泄区岩溶发育逐渐加强; 在垂向上, 不同地层发育不尽相同, 奥陶系马家沟群

土峪组、阁庄组岩溶发育最为广泛。丈八丘水源地一带岩溶发育深度在 200 m 以浅, 以溶蚀裂隙为主, 溶孔次之, 200~300 m 深度范围内零星发育溶蚀裂隙、溶孔; 岩溶主要发育在奥陶系马家沟群。寨里一带岩溶发育深度为 30~200 m, 受外弧断裂影响, 多为蜂窝状溶孔、溶洞, 岩溶水循环较快。莱芜铁矿背斜地区岩溶发育深度相对较深, 为 40~350 m, 岩溶类型以蜂窝状溶孔、溶蚀裂隙为主, 主要发育在与侵入岩体接触的奥陶系马家沟群围岩中(图 4)。

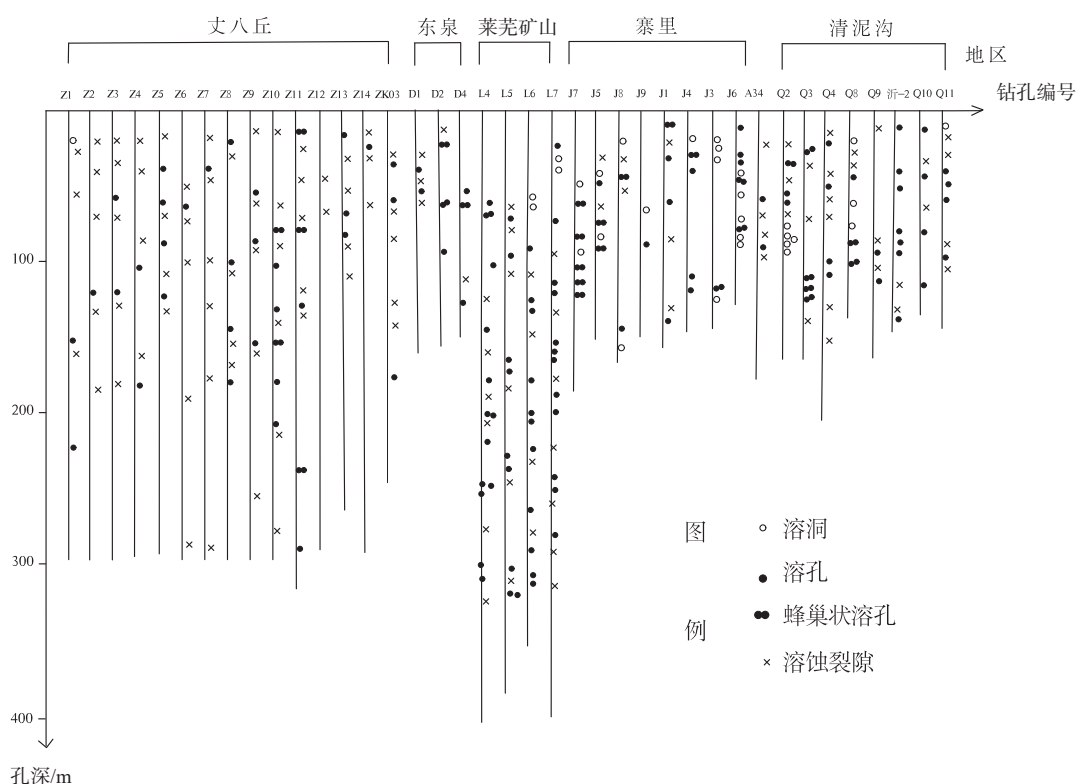


图 4 莱芜盆地深部岩溶发育特征统计

Fig. 4 Deep karst development characteristics Statistical analysis in Laiwu Basin

4 岩溶发育控制因素

4.1 岩溶发育与岩性关系

岩石可溶性是岩溶发育的一个必要条件, 厚层、质纯的碳酸盐岩更利于溶蚀的发育。岩石化学成分、含量的不同, 会造成岩溶发育的差异, 可溶岩含量较高, 岩溶发育, 反之岩溶不发育(陈朝稳等, 2021)。此次研究对通过地表取样、钻孔取芯获得的 134 组岩石样品进行了化学组分测试分析, 并对部分钻孔岩芯样品进行了线岩溶率统计。化学组

分测试在河北省地质实验测试中心完成, 测试使用的仪器为 WFX-120 原子吸收分光光度计及 UV1750 分光光度计, 测试结果见表 2。

测试结果显示, 可溶岩含量的高低对岩石岩溶发育具有明显的控制作用。整体上看, 奥陶系马家沟群与寒武系张夏组碳酸盐岩可溶岩含量较高, 岩溶发育也较强。但受地层厚度、断裂构造及岩浆侵入等因素影响, 不同层组之间岩溶发育略有差异, 岩溶发育特征也不尽相同。

4.2 岩溶发育与构造关系

岩溶发育受地质构造控制作用同样明显(刘元

表 2 岩矿测试分析结果统计表

Table 2 Statistical table of rock test analysis results

地层	主要岩性	CaO含量/%	可溶岩含量/%	可溶岩均值/%	线岩溶率/%
白垩系	安山岩、辉绿岩等	2.95~8.25	6.50~11.74	9.12	/
古近系朱家沟组	灰质砾岩、砂泥岩等	1.19~49.27	2.81~49.69	29.33	8.5
奥陶系马家沟群	灰岩、白云岩、微晶灰岩等	44.54~52.55	49.50~54.56	52.48	23.5
奥陶系三山子组	白云岩、微晶白云岩等	29.53~50.91	48.30~51.67	49.92	22.5
寒武系炒米店组	灰岩、竹叶状灰岩等	24.31~51.56	40.11~52.10	49.50	20.6
寒武系崮山组	瘤状灰岩、页岩等	42.02~52.26	38.56~52.80	46.25	17.8
寒武系张夏组	石灰岩、泥晶灰岩等	14.66~46.72	22.37~48.23	37.70	15.6
	鲕粒灰岩	46.88~52.43	47.82~53.99	51.95	22.8
寒武系馒头组	薄层页岩夹灰岩等	1.58~19.50	3.89~21.44	20.51	10.6
	泥质灰岩、灰岩等	10.66~53.32	19.48~53.81	38.48	13.5
寒武系朱砂洞组	白云岩、微晶白云岩等	25.68~46.82	38.08~53.04	47.18	19.7

晴等, 2018)。莱芜盆地内北北西、东西向断裂构造发育, 以大王庄—铜冶店断裂、泰安—口镇断裂为主

的控盆构造, 控制着盆地内碳酸盐岩分布。在羊流、口镇等地区受外弧断裂多级构造作用的影响, 形成了一系列与断裂走向一致的岩溶断块。在莱芜盆地南部北北西、东西向断裂构造将该区分割成清泥沟、东泉、丈八丘等断块, 受断裂阻水作用影响, 各断块之间形成了独立的岩溶水循环系统。

断裂构造发育处地层岩石破碎, 利于构造溶隙发育, 并为地下水运移提供了空间。不同性质断裂构造其水文性质不同, 通常情况下张性断裂相比于压扭性断裂, 裂隙空间更为发育, 更有利于岩溶发育(赵毅斌等, 2022)。如位于泰安—口镇断裂北侧的寨里镇附近的 J3 钻孔, 孔深 60.9 m, 揭示的含水层为奥陶系马家沟群, 钻遇 4 个溶洞, 溶洞总高度为 11.3 m, 单个溶洞最大高度 8.2 m, 线岩溶率高达 21.6%。

4.3 岩溶发育与岩浆岩关系

岩浆岩侵入对灰岩岩溶发育具有促进作用。一方面岩浆岩侵入造成灰岩大理岩化, 使其结构和成分产生变化, 岩石中 CaO 含量增加, 利于岩溶形成和发展(张凤岐和李博涛, 1990); 另一方面, 岩浆岩侵入会在接触带附近形成大量的构造裂隙, 裂隙为地下水赋存和流动提供了空间, 岩体与大理岩接触带成为浅层和深层地下水交替的天然通道, 为岩溶的形成和发展创造了有利条件(孙逊等, 2010)。因此, 在大理岩与侵入岩体接触部位及侵入岩体附近碳酸盐岩岩溶发育。

莱芜矿山背斜两翼奥陶系马家沟群围岩受侵入岩体影响大理岩化。根据谷家台矿区钻孔资料(刘元晴等, 2020a), 在靠近侵入岩体的钻孔中, 下部接触带区域揭露大小不等的溶洞 137 个, 溶洞最大高度 5.87 m, 大理岩线岩溶率 22.28%(图 5)。资料分析表明, 背斜两翼大理岩越靠近接触带岩溶越发育, 岩溶基本围绕岩体接触带展布, 形态以溶洞、蜂窝状溶孔为主; 远离岩体钻孔的岩溶主要分布在浅部, 发育相对较弱, 主要受浅部水循环影响。

5 岩溶地下水富集规律

受地层岩性、地形地貌、地质构造等因素影响, 莱芜盆地岩石岩溶发育不均一, 造成了地下水富集不均一(张锡明等, 2007; 李波等, 2019; 李贵恒等, 2019)。莱芜盆地岩溶水主要有以下富集特征。

5.1 断裂构造错动部位地下水富集

大型断裂构造往往伴随着规模大小不等的次级断裂构造。在莱芜盆地外弧断裂一带, 受多期构造运动影响, 形成了规模大小不一的岩溶断陷地块, 主要分布在大鱼池、百咀红等地段。断块内含水岩组为奥陶系灰岩, 被第四系孔隙含水岩组覆盖。

区内主要控盆断裂构造的次级断裂较为发育, 其以张性断裂为主, 致使碳酸盐岩地层裂隙岩溶发育、透水性好。岩溶水接受大气降水、地表水直接补给, 同时又接受北部大面积岩浆岩地区裂隙水渗漏径流补给及上层孔隙水下渗补给。特别是在大鱼池区域, 寨里河从北向南自中部穿行而过, 河床

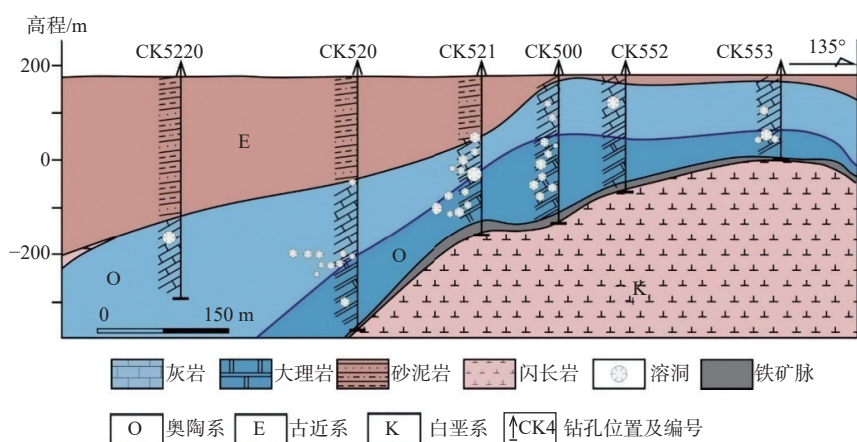


图5 谷家台侵入接触带岩溶发育示意图 (据刘元晴等, 2020a 修改)

Fig. 5 Schematic diagram of intrusion contact zone and karst development in Gujiatai (modified from Liu et al., 2020a)

内分布较厚粗砂及卵石层, 直接覆盖于灰岩之上, 致使岩溶水与孔隙水水力联系密切。同时, 断裂构造运动造成断裂两侧地层错动形成阻水作用, 利于地下水富集(汪云等, 2019), 天然状态下, 出露鱼池泉、百咀红泉等岩溶大泉, 后因岩溶水过度开采, 致使水位下降明显, 泉水干涸。

5.2 断裂阻水地区地下水富集

断裂构造运动往往造成地层错位形成天然阻水屏障(李波等, 2021)。莱芜盆地受多期构造运动影响, 形成北西向构造、东西向构造、旋转构造和

新华夏构造四个构造体系(牛树银等, 2004)。特别是在盆地南部, 大王庄-铜冶店、兴隆山-高峪甫、清泥沟等断裂将碳酸盐岩切割成了东泉、清泥沟、丈八丘等独立岩溶水系统(图6)。岩溶水主要接受大气降水补给、河水侧渗补给及孔隙水下渗补给, 沿地层倾向及地势方向由南向北径流, 在断裂发育处受断裂下盘地层阻水作用形成承压富水区(图7)。根据ZK03钻孔资料, 单井涌水量可达1686.72 m³/d。目前已建有东泉、清泥沟、丈八丘等水源地, 成为城市主要供水水源。

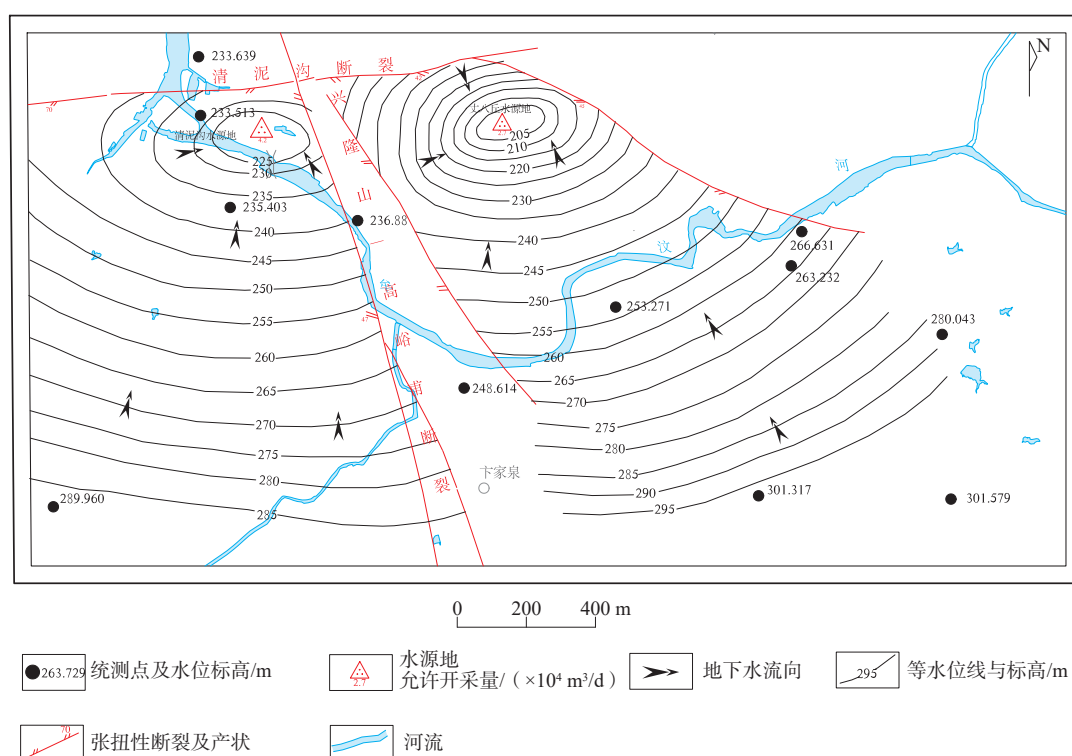


图6 清泥沟、丈八丘富水块段等水位线图

Fig. 6 Water level contours of Qingnigou and Zhangbaqiu water-rich sections

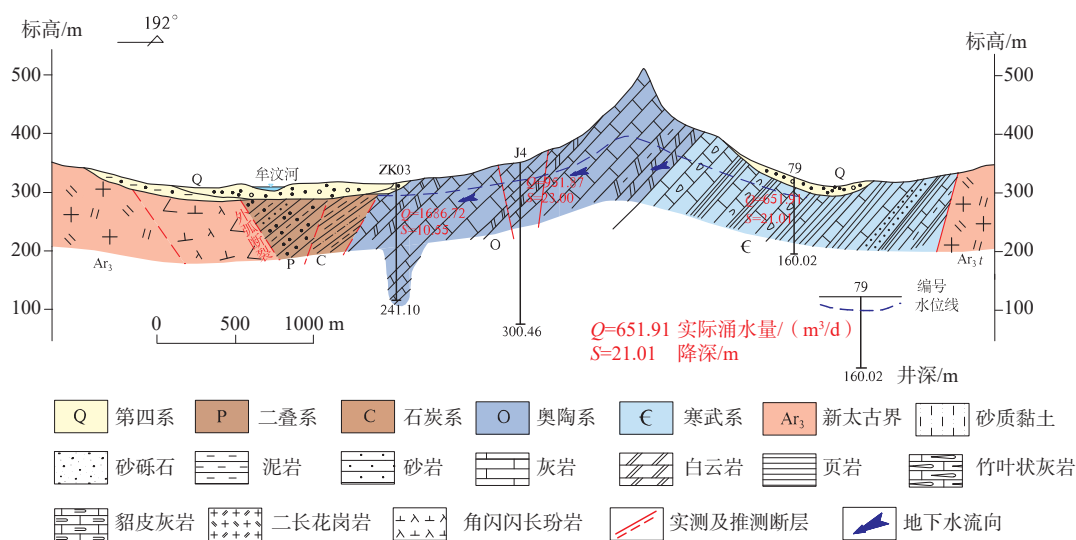


图7 丈八丘富水块段水文地质剖面图

Fig. 7 Hydrogeological profile of Zhangbaqiu water-rich section

5.3 地下水承压排泄区地下水富集

地下水排泄区与隔水阻水地层共同形成了岩溶水富集区(王延岭等, 2015)。莱芜盆地受南北向单斜状构造影响, 奥陶系隐伏于石炭系—二叠系之下。石炭系—二叠系具有隔水作用, 在盆地南部形成了岩溶水富集带。根据钻孔资料(马振民等, 2002), 在富水区内单井涌水量约 1920~2265 m³/d, 在富水区外围普遍达到 480~960 m³/d。另外, 在区域内发育多条南北向次级断裂构造, 其性质多为张性断裂, 断裂影响区域裂隙岩溶发育, 利于地下水下渗补给, 成为岩溶水主要径流通道。

5.4 侵入岩体接触带区域地下水富集

在莱芜盆地中部侵入了中生代岩体, 形成莱芜

矿山背斜褶皱构造。盆地南部山区地下水接受大气降水及地表水补给后, 沿碳酸盐岩层间裂隙及断裂构造, 由南向北径流。较深部岩溶水受闪长岩体阻水后在接触带附近富集承压, 形成地下水富集区(图8)。矿山侵入岩岩体与周边碳酸盐岩在岩浆作用下发生热液蚀变作用, 碳酸盐岩发生大理岩化, 改变了碳酸盐岩原有结构和颗粒大小; 其次在侵入过程中, 在接触带附近导致岩溶破碎又可产生构造裂隙, 皆有利于溶蚀裂隙的产生。如谷家台 CK500 钻孔发现, 大理岩化地层厚度约 101 m, 在埋深 200 m、238 m 处发育两层直径近 1 m 的溶洞。地下水自南向北径流后赋存于此, 加速了溶蚀作用, 在莱芜矿山背斜东、西两翼形成了岩溶水富集地带。

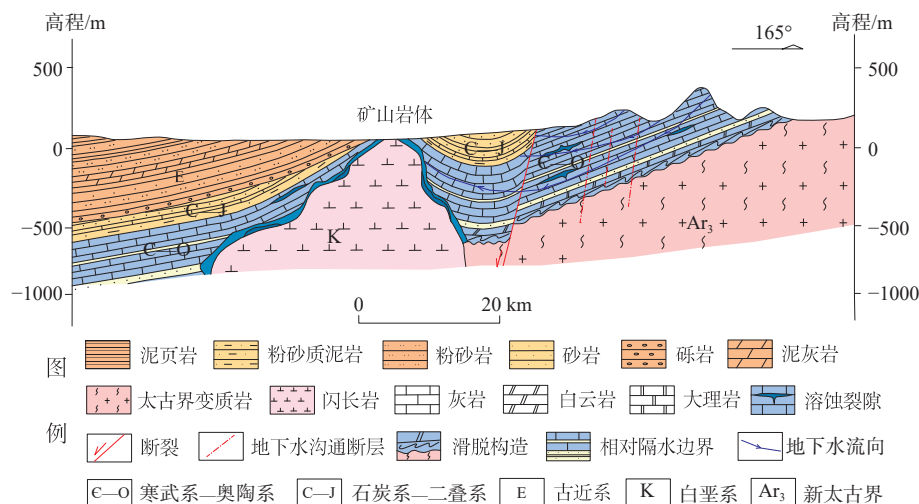


图8 侵入岩体区域地下水流模式图

Fig. 8 Groundwater flow pattern diagram in the intrusion rock mass area

5.5 浅部岩溶发育段地下水富集

莱芜盆地岩溶发育深度主要在 400 m 以浅,并呈现从上到下岩溶发育强度逐渐减弱的趋势。依据钻孔调查资料发现(李波等, 2020),除莱芜矿山周边岩溶发育较深外,总体反映在 200 m 以浅深度段岩溶较发育,岩溶水径流循环强烈,富水性较好,单井涌水量可达 1000~5000 m³/d;在 200~400 m 深度段,岩溶发育整体较弱,原生岩溶裂隙多被方解石晶簇填充,挤占了岩溶水赋存空间,富水性差。岩溶发育原因一是地表岩石长期遭受风化侵蚀,风化裂隙发育利于地表水淋滤作用,促使岩溶由表及里向下溶蚀,造成岩溶发育程度由上往下逐渐减弱;二是大部分碳酸盐岩与孔隙水含水层直接接触,促使浅部地下水交替循环强烈,加速了 CaCO₃ 溶解、迁移,从而造成浅部岩溶发育速度加快。

6 结论

(1)莱芜盆地内岩溶发育主要受地层岩性、地质构造、地下水动力条件及岩浆侵入等因素影响。岩溶发育形态地表以溶沟、溶槽为主;地下以溶蚀裂隙、溶孔溶洞为主,主要发育在 400 m 以浅深度段。

(2)莱芜盆地地质构造复杂,受岩性、断裂构造及岩体侵入等因素影响,岩溶水资源分布不均。岩溶水接受大气降水补给后,沿地形高低、地层倾向等从高往低径流,受岩溶发育程度、断裂构造等因素制约,主要集中在多期断裂构造形成的断陷断块、断裂地层阻水的上盘、地下水承压排泄区及莱芜矿山岩体东、西两翼区域。在碳酸盐岩 200 m 以浅深度段,岩溶水径流循环强烈,裂隙岩溶发育,富水性好。

References

- CHEN C W, HE X, ZAI J X, 2021. Karst development feature and control factor analysis of Jinchanghe orefield in W Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 40(4): 479-483. (in Chinese with English abstract)
- DUAN Z, GAO M B, GAO J L, et al., 2022. Phlogopite ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of the Zhangjiawa iron deposit, Laiwu district, Shandong Province: implications for regional iron skarn mineralization of North China Craton[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(4): 1279-1296. (in Chinese with English abstract)
- GAO F, WANG Z T, JIN F S, et al., 2016. Risk assessment of karst collapse in the Laiwu of Shandong Province[J]. *China Population, Resources and Environment*, 26(S2): 359-362. (in Chinese with English abstract)
- LI B, WANG J X, ZHAO W J, et al., 2019. Analysis on isotopic characteristics of water body of Muwen River Basin in Laiwu Basin[J]. *Shandong Land and Resources*, 35(7): 58-63. (in Chinese with English abstract)
- LI B, WANG J X, WU X, et al., 2020. Hydrogeological conditions and characteristics of water-rich sections in the eastern Laiwu basin, Shandong Province[J]. *Carsologica Sinica*, 39(5): 637-649. (in Chinese with English abstract)
- LI B, SONG Y X, GAO H, et al., 2021. Hydrogeological characteristics and water yield pattern of the Paleogene Zhujiagou formation in South-central Shandong Province[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(1): 117-126. (in Chinese with English abstract)
- LI G H, FENG J G, LU T M, et al., 2019. Hydrochemical characteristics and water quality assessment of groundwater in Tailai Basin[J]. *Water Resources and Power*, 37(4): 52-55, 121. (in Chinese with English abstract)
- LI S Z, SUO Y H, ZHOU J, et al., 2022. Tectonic evolution of the South China Ocean-Continent Connection Zone: transition and mechanism of the Tethyan to the Pacific tectonic domains[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(5): 683-704. (in Chinese with English abstract)
- LIANG Y P, WANG W T, 2010. The division and characteristics of karst water systems in northern China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(6): 860-868. (in Chinese)
- LIAO Z S, 1985. On the development and management of karst water resource in North China[J]. *Carsologica Sinica*, 4(1-2): 107-114. (in Chinese with English abstract)
- LIU S F, 2020. Characteristics of the Mesozoic intrusive complexes and their relation to metallogeny in Laiwu area, Shandong Province[J]. *Journal of Geology*, 44(S1): 34-47. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y Q, ZHOU L, LI W, et al., 2018. 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*, 39(6): 737-748. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y Q, ZHOU L, LI W, et al., 2020a. Characteristics and hydrogeological significance of hydrothermal dissolution in carbonate rocks from Laiwu Basin, Shandong Province[J]. *Geoscience*, 34(1): 199-206. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y Q, ZHOU L, MA X M, et al., 2020b. Environmental geological problems and causes during development and utilization of groundwater in Laiwu Basin, Shandong Province[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 34(11): 118-124. (in Chinese with English abstract)
- MA M, GAO J L, GAO M B, et al., 2020. Geophysical characteristics of Laiwu Area in western Shandong Province and establishment of exploration model for iron rich deposits[J]. *North China Earthquake Sciences*, 38(2): 13-20. (in Chinese with English abstract)
- MA Z M, LIU L C, CHEN H H, et al., 2002. Hydrochemical environmental evolution of Karst Water System in Tai'an, Shandong Province[J]. *Geoscience*, 16(4): 423-428. (in Chinese with English abstract)
- NIU S Y, HU H B, MAO J W, et al., 2004. Structure in western Shandong and its genetic mechanism[J]. *Geology in China*, 31(1): 34-39. (in Chinese with English abstract)
- SHI X P, LI L, HU Q Y, et al., 2010. Characteristics of NW-trending normal

- faults and physical modeling since Late Mesozoic in West Shandong Uplift, China[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 49(2): 130-137. (in Chinese with English abstract)
- SUN X, WANG K H, SUN Q T, et al., 2010. Types and distribution of Karst fissure water in central and southern Shandong Province[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 38(2): 52-56. (in Chinese with English abstract)
- WANG C, ZHANG L C, WANG Y Q, et al., 2021. Study on groundwater pollution in Laiwu region[J]. *Ground Water*, 43(6): 21-24, 229. (in Chinese with English abstract)
- WANG W T, LIANG Y P, WANG Z H, et al., 2012. Characteristics of climate change in northern China and its effect on groundwater in karst areas[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 39(6): 6-10, 28. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y, YANG H B, ZHENG M Q, et al., 2019. Study on characteristics of groundwater storage structures and well exploring and locating with in Tailai Basin[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 50(3): 52-65. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y L, CHEN W Q, JIANG X Z, et al., 2015. Development features and formation mechanisms of karst collapses in the Tailai Basin, Shandong Province[J]. *Carsologica Sinica*, 34(5): 495-506. (in Chinese with English abstract)
- YU X F, LI D P, SHAN W, et al., 2022. Yanshanian gold metallogenic system and metallogenic model of the Guilaizhuang gold ore field, western Shandong[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(5): 821-841. (in Chinese with English abstract)
- ZHAI M G, MENG Q R, LIU J M, et al., 2004. Geological features of Mesozoic tectonic regime inversion in eastern North China and implication for geodynamics[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 285-297. (in Chinese with English abstract)
- ZHAI M G, 2019. Tectonic evolution of the North China Craton[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(5): 722-745. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG F Q, LI B T, 1990. Karst groundwater system in North China and problems of its development and utilization[J]. *Carsologica Sinica*, 9(1): 9-16. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Q Q, ZHANG S H, 2019. Devonian magmatism in the northern margin of the North China Block and its tectonic setting[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(1): 125-138. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG X M, ZHANG Y Q, JI W, 2007. Fault distribution patterns of the luxi block, Shandong, and Mesozoic sedimentary-magmatic-structural evolution sequence[J]. *Journal of Geomechanics*, 13(2): 163-172. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO Y B, LIU Q J, HUANG X J, 2022. Characteristics of karst development and the law of groundwater enrichment in Shazhouba area of Ruijin City[J]. *East China Geology*, 43(2): 227-234. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU L, LIU Y Q, LI W, et al., 2020. Tectonic evolutionary characteristics and their hydrological geological significance in Laiwu Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 20(2): 519-526. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU X G, SUN B S, SHAO Z G, et al., 2004. Evolutionary characteristics of the boundary fault of the Wenxi Depression, Shandong, and its control on sedimentary sand bodies[J]. *Journal of Geomechanics*, 10(3): 235-244. (in Chinese with English abstract)
- ZHU J, ZHAO D P, HE Q, 2023. Study on water pressure law and structural safety of tunnel lining in Karst weakly developed strata[J]. *Railway Investigation and Surveying*, 49(5): 137-142, 157. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈朝稳, 和祥, 宰家宪, 2021. 滇西金厂河矿区岩溶发育特征及控制因素分析[J]. *云南地质*, 40(4): 479-483.
- 段壮, 高明波, 高继雷, 等, 2022. 山东莱芜张家洼铁矿床金云母⁴⁰Ar/³⁹Ar定年及其对成矿构造背景的启示[J]. *地质学报*, 96(4): 1279-1296.
- 高峰, 王振涛, 靳丰山, 等, 2016. 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*, 26(S2): 359-362.
- 李波, 王金晓, 赵无忌, 等, 2019. 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*, 35(7): 58-63.
- 李波, 王金晓, 吴璇, 等, 2020. 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*, 39(5): 637-649.
- 李波, 宋一心, 高茜, 等, 2021. 鲁中南地区古近系朱家沟组水文地质特征及富水模式[J]. *地质力学学报*, 27(1): 117-126.
- 李贵恒, 冯建国, 鲁统民, 等, 2019. 泰莱盆地地下水水化学特征及水质评价[J]. *水电能源科学*, 37(4): 52-55, 121.
- 李三忠, 索艳慧, 周洁, 等, 2022. 华南海陆过渡带构造演化: 特提斯构造域向太平洋构造域的转换过程与机制[J]. *地质力学学报*, 28(5): 683-704.
- 梁永平, 王维泰, 2010. 中国北方岩溶水系统划分与系统特征[J]. *地球学报*, 31(6): 860-868.
- 廖资生, 1985. 论北方岩溶水资源的开发与管理问题[J]. *中国岩溶*, 4(1-2): 107-114.
- 刘书锋, 2020. 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*, 44(S1): 34-47.
- 刘元晴, 周乐, 李伟, 等, 2018. 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*, 39(6): 737-748.
- 刘元晴, 周乐, 李伟, 等, 2020a. 山东莱芜盆地碳酸盐岩热液溶蚀特征及水文地质意义[J]. *现代地质*, 34(1): 199-206.
- 刘元晴, 周乐, 马雪梅, 等, 2020b. 莱芜盆地地下水开发利用中的环境地质问题及成因[J]. *干旱区资源与环境*, 34(11): 118-124.
- 马明, 高继雷, 高明波, 等, 2020. 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*, 38(2): 13-20.
- 马振民, 刘立才, 陈鸿汉, 等, 2002. 山东泰安岩溶水系统地下水化学环境演化[J]. *现代地质*, 16(4): 423-428.
- 牛树银, 胡华斌, 毛景文, 等, 2004. 鲁西地区地质构造特征及其形成机制[J]. *中国地质*, 31(1): 34-39.
- 时秀朋, 李理, 胡秋媛, 等, 2010. 鲁西隆起晚中生代以来北西向正断层特征及物理模拟[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 49(2): 130-137.

- 孙逊, 王克红, 孙启堂, 等, 2010. 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, 38(2): 52-56.
- 王超, 张立川, 王应强, 等, 2021. 莱芜地区地下水污染研究[J]. 地下水, 43(6): 21-24, 229.
- 王维泰, 梁永平, 王占辉, 等, 2012. 中国北方气候变化特征及其对岩溶水的影响[J]. 水文地质工程地质, 39(6): 6-10, 28.
- 王延岭, 陈伟清, 蒋小珍, 等, 2015. 山东省泰莱盆地岩溶塌陷发育特征及形成机理[J]. 中国岩溶, 34(5): 495-506.
- 汪云, 杨海博, 郑梦琪, 等, 2019. 泰莱盆地地下水蓄水构造特征及勘查定井研究[J]. 水利水电技术, 50(3): 52-65.
- 于学峰, 李大鹏, 单伟, 等, 2022. 鲁西归来庄金矿田燕山期金成矿系统及成矿模式[J]. 地质力学学报, 28(5): 821-841.
- 翟明国, 孟庆任, 刘建明, 等, 2004. 华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨[J]. 地学前缘, 11(3): 285-297.
- 翟明国, 2019. 华北克拉通构造演化[J]. 地质力学学报, 25(5): 722-745.
- 张凤岐, 李博涛, 1990. 中国北方岩溶地下水系统和开发利用中的几个问题[J]. 中国岩溶, 9(1): 9-16.
- 张琪琪, 张拴宏, 2019. 华北地块北缘泥盆纪岩浆活动及其构造背景[J]. 地质力学学报, 25(1): 125-138.
- 张锡明, 张岳桥, 季玮, 2007. 山东鲁西地块断裂构造分布型式与中生代沉积—岩浆—构造演化序列[J]. 地质力学学报, 13(2): 163-172.
- 赵毅斌, 刘前进, 黄旭娟, 2022. 瑞金市沙洲坝地区岩溶发育特征与地下水富集规律[J]. 华东地质, 43(2): 227-234.
- 周乐, 刘元晴, 李伟, 等, 2020. 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, 20(2): 519-526.
- 周新桂, 孙宝珊, 邵兆刚, 等, 2004. 山东汶西凹陷边界断裂演化特征及其对沉积砂体的控制[J]. 地质力学学报, 10(3): 235-244.
- 朱君, 赵东平, 和琦, 2023. 岩溶弱发育地层隧道衬砌水压规律及结构安全性研究[J]. 铁道勘察, 49(5): 137-142, 157.