

鲁中南地区古近系朱家沟组水文地质特征及富水模式

李 波^{1,3}, 宋一心², 高 菡², 吴 璇^{1,3}, 关 琴^{1,3}, 刘春伟^{1,3}
LI Bo^{1,3}, SONG Yixin², GAO Han², WU Xuan^{1,3}, GUAN Qin^{1,3}, LIU Chunwei^{1,3}

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. 山东省煤田地质规划勘察研究院, 山东 济南 250014;

3. 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
1. No. 801 Hydrogeology and Engineering Geology Brigade, Shandong Exploration Bureau of Geology and Mineral Resources, Ji'nan 250014, Shandong, China;

2. Shandong Coalfield Geological Planning Investigation and Research Institute, Ji'nan 250014, Shandong, China;

3. Shandong Engineering Research Center for Environmental Protection and Remediation on Groundwater, Ji'nan 250014, Shandong, China

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. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.01.012

Abstract: The Zhujiagou formation, a set of calcareous conglomerates of terrigenous clastic deposition, is mainly distributed along the edge of the depression basins in south-central Shandong. Taking the Zhujiagou formation in the Wenkou basin and the Xinwen basin as the study area, the hydrogeological characteristics are analyzed through 1 : 50000 hydrogeological survey, hydrogeological drilling, geophysical exploration, pumping test, water quality analysis and other technical methods. The results show that the karst morphology of the Zhujiagou formation is dominated by corrosion fissure, karst hole and karst cave, which are mainly developed in the shallow layer of 150 m. The water yield property is obviously controlled by the fracture, and the water inflow of a single well in the fracture karst development area can be more than 300 m³/d, indicating practical water supply significance. The water yield pattern of the Zhujiagou formation features fracture-karst water storage structure of fractured calcareous conglomerate and fracture structure is the main controlling factor. This pattern has universality and applicability in south-central Shandong Province, which is of guiding significance for new water supply aquifers exploration and site selection and layout for wells.

Key words: south-central Shandong; Zhujiagou formation; calcareous conglomerate; hydrogeological characteristics; water yield pattern

摘 要: 朱家沟组集中分布在鲁中南拗陷盆地边缘地带, 为一套陆源碎屑沉积的灰质砾岩。以汶口盆地、新汶盆地朱家沟组为研究对象, 通过 1 : 50000 水文地质调查、水文地质钻探、地球物理勘探、抽水试验、水质分析等技术方法, 分析其水文地质特征。研究结果表明: 朱家沟组裂隙岩溶形态以溶蚀裂隙、溶孔、溶洞为主, 主要发育在 150 m 以浅; 富水性受断裂控制明显, 裂隙岩溶发育段单井涌水量可超过 300 m³/d, 具有显著实际供水意义; 朱家沟组富水模式为断裂型灰质砾岩裂隙岩溶蓄水构造模式, 以断裂构造为主控因素, 该模式在鲁中南地区具有普遍性和适用性, 对于寻找新的供水目标含水层及找水定井工作具有指导意义。

关键词: 鲁中南地区; 朱家沟组; 灰质砾岩; 水文地质特征; 富水模式

中图分类号: P641 **文献标识码:** A

基金项目: 山东省地质勘查项目 (鲁勘字 (2018) 44 号; 鲁地环 (2018) 06 号)

第一作者简介: 李波 (1988-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事区域水文地质调查工作。E-mail: 710445277@qq.com

收稿日期: 2019-11-01; 修回日期: 2020-04-23; 责任编辑: 吴芳

引用格式: 李波, 宋一心, 高菡, 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. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.01.012

0 引言

山东省是中国北方严重缺水省份之一, 人均占有水资源不足全国平均值的 1/6。山东省地下水开发利用始于 20 世纪 70 年代, 随着经济社会快速发展, 地下水开采量急剧增加, 至 21 世纪初期地下水开采量达到了 $115 \times 10^8 \sim 120 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (徐军祥和康凤新, 2001; 刘春华和杨丽芝, 2005; 姜福红和刘文, 2017), 地下水资源已成为制约山东省社会经济发展的重大问题。

鲁中南地区在区域构造位置上属于华北地台的东南部, 总体上是一个以大型隆起为背景的地质构造单元 (云金表等, 2002; 张锡明等, 2007)。区内具有实际供水意义的主要为碳酸盐岩类裂隙岩溶含水岩组与松散岩类孔隙含水岩组 (康凤新等, 2010; 梁永平和王维泰, 2010; 孙逊等, 2010)。近年来由于两大含水岩组地下水开采量不断增加, 开采区周边出现了岩溶塌陷、地下水水质恶化等环境地质问题 (郭栋栋等, 2012; 王延岭等, 2015), 因此寻找新的供水目标含水层及富水块段对于解决鲁中南缺水难题具有重要意义。

2012 年山东省率先在鲁中南地区开展了 1:50000 水文地质调查工作, 截止到目前已覆盖了鲁中南大部分区域。在已有的水文地质工作中, 对古近系朱家沟组研究甚少, 一般将其与其他碎屑岩类一起归为碎屑岩孔隙裂隙含水岩组, 单井涌水量小于 $100 \text{ m}^3/\text{d}$, 为弱富水含水岩组, 不具有供水意义 (山东省地质局第一水文地质队, 1979)。此次通过实施的水文地质钻孔及机井调查资料发现, 在莱芜盆地、汶口盆地及新泰盆地内, 朱家沟组含水岩组浅部裂隙岩溶发育, 实施的钻孔单井涌水量达到了 $1000 \sim 4000 \text{ m}^3/\text{d}$, 有效解决了当地用水难题。基于此, 文章在 1:50000 水文地质调查工作的基础上, 以汶口盆地、新汶盆地朱家沟组含水岩组为例, 系统分析其水文地质特征, 研究裂隙岩溶发育规律, 总结地下水富水模式, 为下一步在鲁中南地区寻找新的目标含水层、找水定井工作提供技术指导。

1 研究区概况

1.1 自然地理位置

研究区主要位于山东省中部山区, 涉及泰安、

淄博、济宁、临沂等地级市。区内地势整体偏高, 以低山丘陵为主。研究区属暖温带半湿润季风气候区, 四季分明, 多年 (1956~2019 年) 平均降水量 889.7 mm。区内主要河流为柴汶河、牟汶河, 柴汶河由东向西穿过新汶盆地, 在大汶口镇附近与牟汶河汇合, 形成大汶河; 受季节性降水及蒸发量影响, 水系流量及水位变化大。

1.2 地质构造

山东省地处华北克拉通东部 (宋明春和李洪奎, 2001), 古近纪及新近纪时期由于克拉通深部地幔大规模隆起和地壳大规模伸展而处于伸展动力学背景下, 形成了一系列新生代裂陷构造盆地 (图 1; 翟明国等, 2004; 周新桂等, 2004; 翟明国, 2019)。在古近纪时期, 由于沂沭断裂带与兰聊断裂的右行走滑活动, 致使鲁中南地区形成的盆地发生掀斜式抬升 (牛树银等, 2004); 其后由于盆地边缘断裂两侧地体差异性升降幅度增大, 相继发育了朱家沟组的山麓冲洪积相类磨拉石建造; 朱家沟组沉积之后, 由于鲁中地区整体抬升, 盆地沉积时代结束, 进入长期剥蚀状态 (郑德顺等, 2013; 张琪琪和张拴宏, 2019)。

2 含水岩组水文地质特征

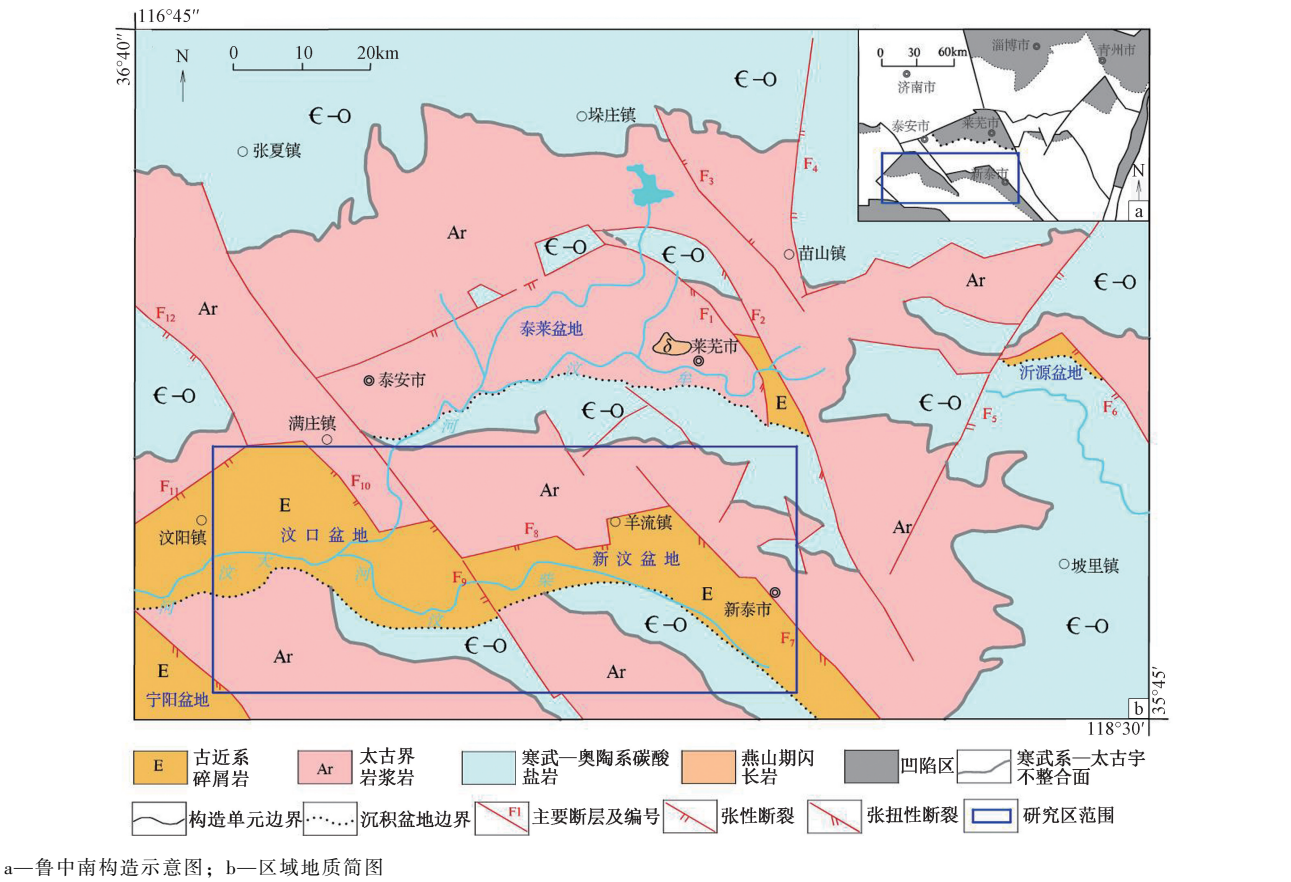
2.1 分布特征

朱家沟组由迟培星等创名 (迟培星等, 1997), 代表性剖面位于蒙阴县骑路官庄剖面。主要分布于北西向中新代沂源盆地、莱芜盆地、新泰-蒙阴盆地、汶上-泗水盆地、平邑-方城盆地, 近东西向大汶口-汶东盆地等北侧近断裂处, 呈北北西向条带状分布 (朱大岗等, 2008)。

2.2 岩性特征

朱家沟组主要为冲积扇-山麓洪积相沉积。主要岩性为灰褐、灰红色砾岩, 下部少量紫红色砂岩、砂质泥岩, 地层厚度变化大。底界以泥岩结束, 大套砾岩出现划界, 与下伏下桥组或大汶口组整合接触; 顶部裸露或与前寒武纪基底花岗岩类断层接触。

朱家沟组地层岩性、岩相较稳定, 地层厚度变化较大。在平邑-方城盆地, 中部石河村厚度 652.8 m, 方城厚度 87.0 m, 显示向盆地东西两侧变薄的趋势; 在新泰-蒙阴盆地, 主要沿新泰-垛庄断裂以南分布, 出露厚度 428.0~1012.5 m, 向



东厚度大于 380 m (未见底), 也显示向盆地东西两侧变薄的趋势; 在大汶口-汶东盆地、泗水盆地地表见零星露头, 厚度大于 150 m; 在莱芜盆地主要分布于王山子-鹏山一带, 厚 135.39 m, 岩性主要为灰质砾岩, 其下与常路组整合接触, 其上以断层与下古生界接触; 在韩四盆地, 主要分布于韩庄以北, 厚 618.64 m, 岩性以砾岩为主, 夹少量钙质砂岩, 其下与常路组整合接触, 其上以断层与前寒武纪基底接触 (王来明等, 2012)。

不同盆地中朱家沟组砾石成分受物源、搬运路径等因素影响略有差异。在汶口盆地砾石以泥灰岩为主、夹有少量花岗岩, 磨圆度差, 棱角明显, 砾径多在 5~20 cm, 个别砾径大于 30 cm; 在新汶盆地砾石以微晶灰岩为主, 磨圆度较差, 次棱角状, 砾径多为 3~8 cm, 个别砾径超过 15 cm。

2.3 富水性特征

在以往水文地质填图中, 特别是 1:200000 区域水文地质填图, 朱家沟组含水岩组富水性一般划为小于 100 m³/d, 为弱含水层。此次调查钻探发现, 该地层内地下水富水性差异较为明显, 局部地段富水性大于 300 m³/d, 在最新《水文地质编图规范 (1:50000)》中属于“丰富—极丰富”范畴, 其富水性主要受断裂构造、地形起伏、裂隙岩溶发育程度等因素影响。因鲁中南地区各盆地具有相似地质构造及水文地质条件, 文中以汶口盆地、新汶盆地为例进行说明。

在汶口盆地共有 8 眼机民井及钻孔的资料 (表 1), 面状分布于区内出露的朱家沟组 (图 2)。由表 1、图 2 可以发现, 该地区朱家沟组含水岩组单井涌水量 (Q) 多在 100 m³/d<Q<300 m³/d 范围内, 局部大于 300 m³/d; 特别是在磁窑断裂以西至高村断裂一带, 受断裂构造影响形成局部断陷, 裂隙岩溶较东部地区更为发育, 富水性更好。以 DWZK03 钻孔为例, 抽水试验结果显示, 单井涌水量达到 1251.6 m³/d, 降深 13.25 m, 其富水性远超 300 m³/d。

在新汶盆地共有 14 眼机民井及钻孔的资料 (表 2), 条带状分布于新泰-垛庄断裂西侧。由表 2 可以看出, 在该盆地内朱家沟组地下水开采深度不一, 大致可以分为三层: 0~10 m, 10~100 m,

表 1 汶口盆地朱家沟组调查点统计表

Table 1 Statistical table of survey spots of the Zhujiagou formation in the Wenkou basin

编号	位置	井深/m	地下水水位埋深/m	单井涌水量/(m ³ /d)	所处构造位置
J125	山东省泰安市宁阳县磁窑镇泊家庄村	16	3.62	2880	高村断裂以东
J165	山东省泰安市宁阳县华丰镇乔家庄村	60	21.07	192	磁窑断裂以东
J207	山东省泰安市宁阳县华丰镇胜天庄村	205	9.80	192	顺义庄断裂以东
J211	山东省泰安市宁阳县中韩家庄村	15	5.23	120	无
J213	山东省泰安市宁阳县东庄镇北石崮村	120	4.90	192	无
J214	山东省泰安市宁阳县东庄镇北石崮村	9	2.15	120	无
J215	山东省泰安市宁阳县东庄镇北石崮村	7	1.50	96	无
DWZK03	山东省泰安市宁阳县磁窑镇国家庄村	150.3	13.30	1251.6	磁窑断裂以西

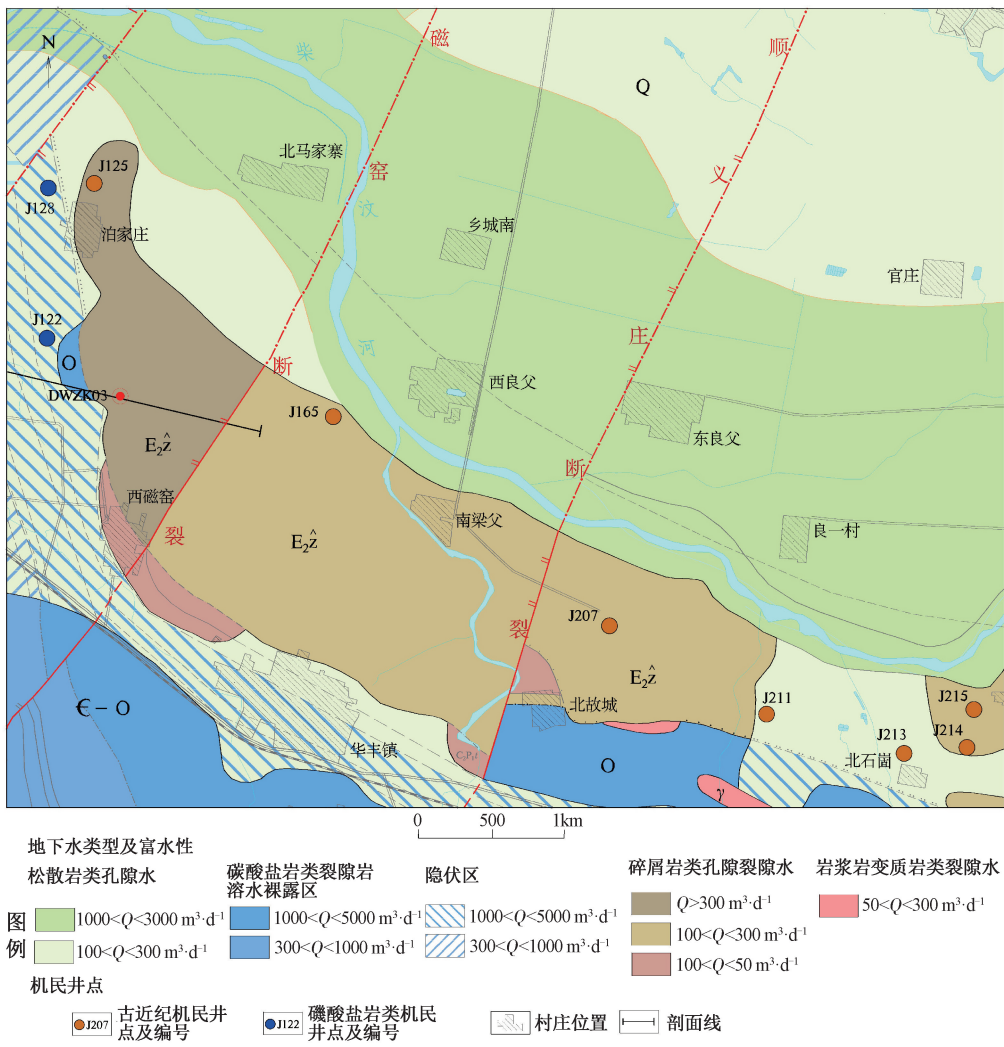


图 2 汶口盆地朱家沟组水文地质及调查点分布图
Fig. 2 Hydrogeology and survey spots of the Zhujiagou formation in the Wenkou basin

大于 100 m。不同深度单井涌水量也不尽相同，其中 0~10 m 机民井涌水量小于 100 m³/d，10~100 m 机民井涌水量 100~300 m³/d，大于 100 m 机民井涌水量大于 300 m³/d。特别是施工的 XWZK02，XTZK03 钻孔，涌水量分别达到了 927 m³/d，4944 m³/d。

2.4 裂隙岩溶发育特征

朱家沟组岩性以钙质胶结砾岩为主，砾石成

分以中生界泥晶、微晶灰岩为主，胶结物矿物组分以泥晶方解石、粘土为主（周乐等，2019）。受断裂构造等因素影响，含水层发育大小不一的裂隙，地下水沿裂隙发生溶蚀作用，形成溶孔、溶洞。不同盆地内朱家沟组裂隙、岩溶发育程度受断裂规模、胶结程度等影响略有差异。

据施工钻孔岩心及调查资料表明，研究区朱

表 2 新汶盆地朱家沟组调查点统计表

Table 2 Statistical table of survey spots of the Zhujiagou formation in the Xinwen basin

编号	位置	井深/m	地下水水位埋深/m	单井涌水量/(m ³ /d)	含水层段厚度/m
XWZK02	新泰市青云街道东杏山村	155	26.92	927	16.7
XTZK03	蒙阴县常路组白杨庄村	152	18.70	4944	41.7
XTJ36	蒙阴县常路镇杏泉村	187	32.54	768	32
XTJ175	新泰市汶南镇大官庄村	156	28.64	720	45.6
XTJ177	新泰市汶南镇双山村	225	24.30	840	28.9
XTJ179	新泰市汶南镇北岳阳村	200	23.20	960	50
XWJ186	新泰市翟镇富全庄村	3	1.20	120	1.5
XWJ197	新泰市泉沟镇高崖头村	40	10.43	144	36
XWJ199	新泰市泉沟镇新官庄村	8	2.20	72	8
XWJ200	新泰市泉沟镇新官庄村	5	1.50	72	4
XWJ201	新泰市泉沟镇小官庄村	50	14.75	72	48
XWJ239	新泰市翟镇王家寨村	10	1.35	240	8
XWJ240	新泰市翟镇小王家寨村	8	3.85	24	8
XWJ243	新泰市翟镇井家庄村	350	29.65	480	50

家沟组地层裂隙岩溶发育基本在 150 m 以浅。汶口盆地岩溶形态以蜂窝状溶孔为主, 局部发育小规模溶洞, 浅部溶洞多填充黄色粘土; 另外, 调查过程中发现在泰安市西磁窑村东侧出现朱家沟组岩溶塌陷, 物探剖面也显示在该区域浅部裂隙岩

溶发育 (图 3)。新汶盆地岩溶形态以溶隙为主, 个别地段发育大规模溶洞, 例如在新泰市东杏山下, 发育大规模溶洞群并形成地下河, 洞内发育石笋、石钟乳等岩溶形态 (图 4), 该岩溶规模在朱家沟组中实属罕见。

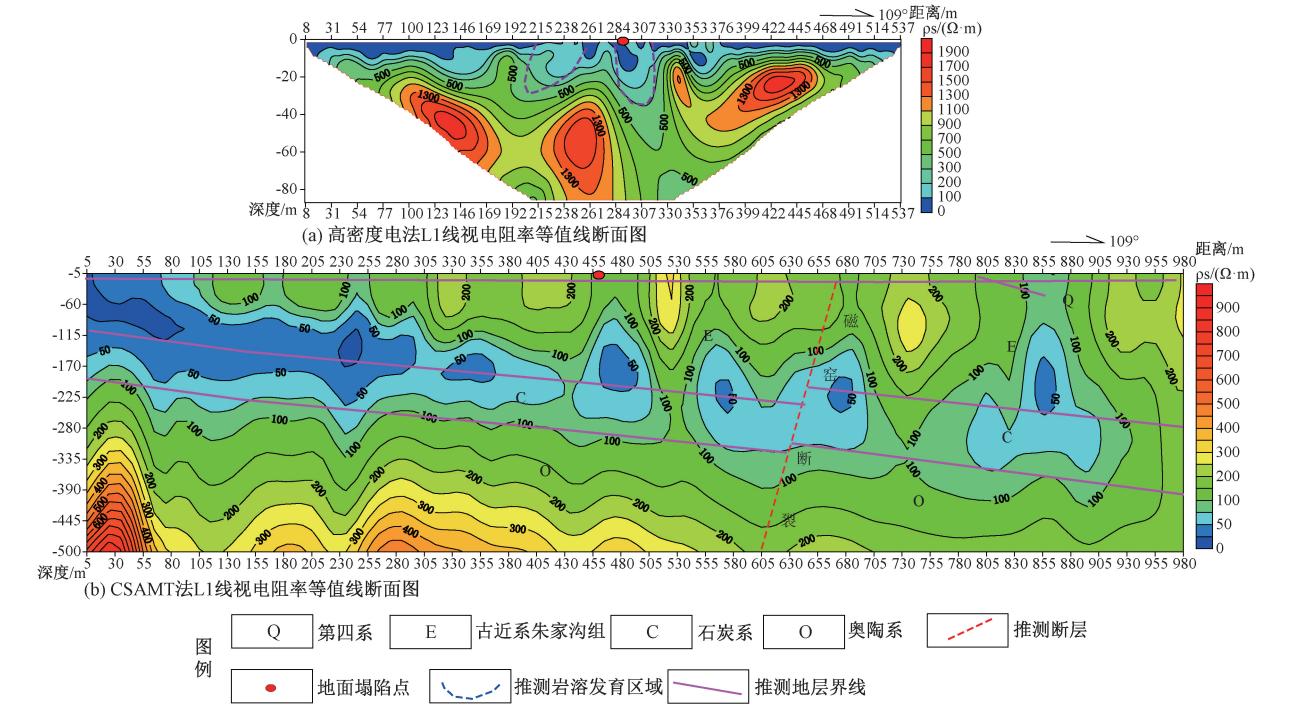


图 3 磁窑镇北部地面塌陷高密度电法和 CSAMT 剖面图

Fig. 3 High density electrical method and CSAMT profile of the surface collapse in the north of Ciyao Town

3 水化学特征

3.1 样品采集与测试

为分析研究区内朱家沟组含水岩组地下水化

学特征、水化学类型及成因, 结合此次工作条件, 对汶口盆地和新汶盆地朱家沟组地下水进行样品采集。样品经 0.45 μm 滤膜过滤后置于清洗过的聚乙烯瓶, 阳离子样品经 HNO₃ 酸化至 pH 值小于 2 后保存, 阴离子样品原样低温保存。水化学分析

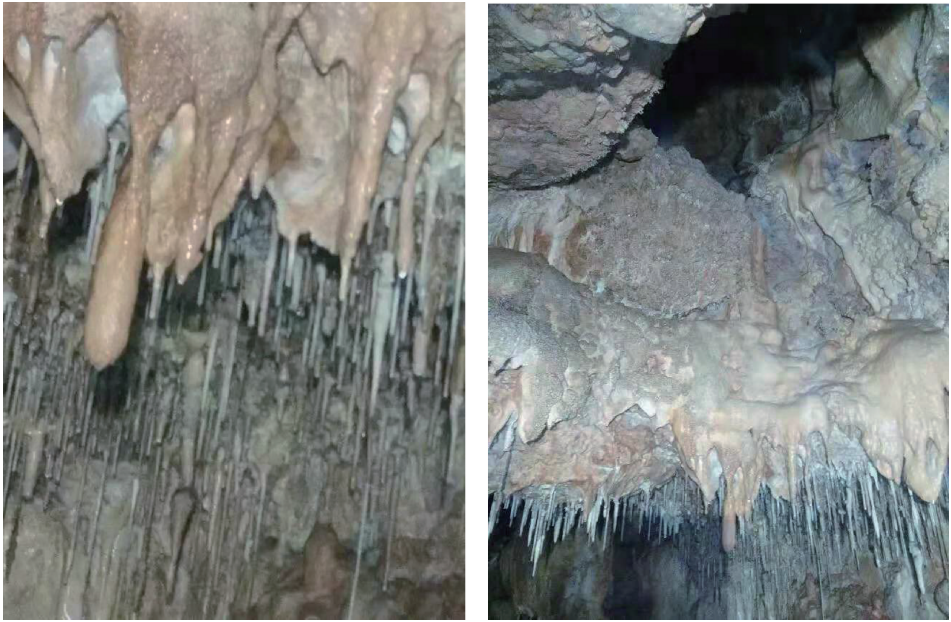


图 4 朱家沟组内发育的大规模洞穴沉积物照片（东杏山村）
Fig. 4 Large scale cave sediments developed in the Zhujiagou formation (Dongxingshan Village)

在山东省地矿工程勘察院实验测试中心完成。

3.2 水化学参数特征

根据水化学测试结果（表 3），区内朱家沟组地下水阳离子以 Ca^{2+} 为主，其次为 Na^+ ， Mg^{2+} ；主要阴离子为 HCO_3^- ，其次为 SO_4^{2-} 和 Cl^- ；地下水 pH 值为 7.5~7.9，为中性或偏碱性。不同盆地单元水化学类型略有差异，主要与外界环境影响有关。在汶口盆地，地下水化学类型以 $\text{SO}_4^{2-}\text{-Ca}^{2+}$ 型、 $\text{SO}_4^{2-}\cdot\text{Cl}^-\text{-Ca}^{2+}$ 型为主，TDS（溶解性总固体）值变化范围大，处于 1110~2100 mg/L 范围内，整体

偏高。在新汶盆地，地下水化学类型以 $\text{HCO}_3^-\text{-Ca}^{2+}$ 型、 $\text{HCO}_3^-\cdot\text{SO}_4^{2-}\text{-Ca}^{2+}$ 型为主，TDS 值在 530~828 mg/L 范围内，变化幅度不大。结合区内水化学 piper 三线图（图 5）可以看出，区内朱家沟组地下水聚集分异特征明显，主要体现在阳离子组分分布较为集中，阴离子组分分布不同盆地略有差异（王瑞久，1983；田原等，2014）。汶口盆地朱家沟组地下水与下部奥陶系岩溶水离子特征相近，表明两者水力联系密切；新汶盆地阴离子组分分布相对集中，表明地下水补给来源相对单一。

表 3 朱家沟组地下水化学数据

Table 3 Groundwater hydrochemical data table of the Zhujiagou formation

构造单元	样品编号	阳离子/(mg·L ⁻¹)				阴离子/(mg·L ⁻¹)				TDS/ (mg·L ⁻¹)	pH 值	水化学 类型
		K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻			
汶口盆地	DWZK03	1.67	97.78	281.96	29.90	310.57	216.14	297.72	73.36	1230	7.6	Cl·HCO ₃ -Ca 型
	J165	0.56	74.01	493.79	50.43	279.37	576.36	239.07	498.07	2100	7.5	SO ₄ -Ca 型
	J211	2.48	58.94	244.29	32.33	177.27	304.51	177.77	195.05	1110	7.7	SO ₄ ·Cl-Ca 型
	J207	3.15	53.48	347.89	21.75	163.08	428.91	220.68	236.20	1370	7.5	SO ₄ -Ca 型
新汶盆地	XWZK02	1.22	26.96	177.96	28.19	47.51	163.78	341.95	113.00	735	7.7	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca 型
	XTZK03	0.58	9.61	126.05	22.36	26.59	97.50	253.82	113.29	530	7.9	HCO ₃ -Ca 型
	XTJ36	0.50	9.46	137.88	24.55	30.49	107.11	253.36	122.90	570	7.7	HCO ₃ -Ca 型
	XTJ175	0.50	9.60	154.51	15.68	24.82	102.78	279.87	101.60	560	7.7	HCO ₃ -Ca 型
	XTJ177	1.19	19.18	174.35	24.79	42.54	137.85	137.85	123.24	684	7.5	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca 型
	XWJ197	0.57	22.99	217.63	23.46	38.64	221.90	423.36	77.16	828	7.5	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca 型

Gibbs 通过研究世界河流、湖泊、主要海洋等地表水体中的 TDS 值与 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 以及 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 的关系图，将天然水体的化学

形成机制分为蒸发浓缩机制、岩石风化机制和降水作用机制三种（LI et al, 2013；WANG et al, 2018）。Gibbs 图也被广泛应用于地下水研究领域，

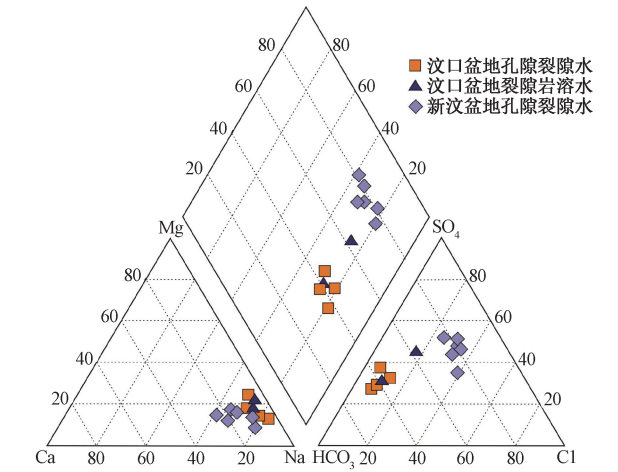


图 5 研究区地下水样品 piper 图

Fig. 5 Piper diagram of groundwater samples in the research area

以识别控制地下水化学组分的影响机制(姜体胜等, 2017)。在 Gibbs 图中, TDS 值较低且 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$

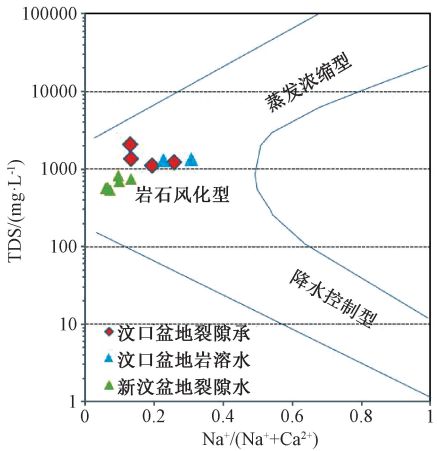


图 6 研究区地下水 Gibbs 曲线图

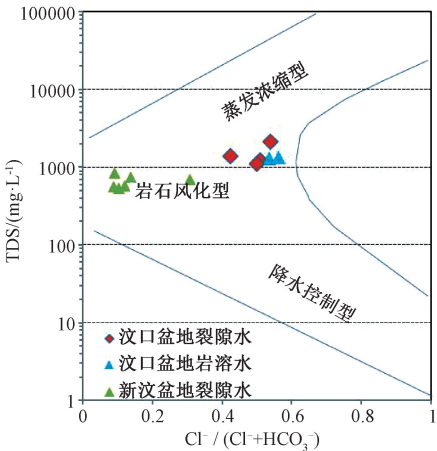
Fig. 6 Gibbs graphs of groundwater in the research area

4 地下水富水模式分析

古近系朱家沟组主要分布在鲁中南拗陷盆地边缘地带, 为一套具有磨拉石建造特征的陆源碎屑沉积物。砾石成分以古生界碳酸盐岩为主, 胶结物多为泥质、钙质胶结。泥质胶结物成分以粘土为主, 遇水后易软化分解溶蚀形成裂隙, 碳酸盐岩遇水溶蚀后形成溶孔、溶洞。钙质胶结物矿物成分多为方解石, 与砾石成分相一致, 在裂隙发育处与砾石一起溶蚀分解, 形成地下水赋存空间。

朱家沟组受控盆构造多期作用影响, 地层岩

($\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$), $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 值较高的水样点分布于图中右下角, 此类水主要受到大气降水作用控制。TDS 值中等且 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$, $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 值小于 0.5 或者在 0.5 左右的水样点, 分布在图的中部左侧, 这类水中的离子主要来源于岩石矿物(陆地可溶性岩石包括碳酸盐、硅酸盐、蒸发盐和硫化物矿物)的风化释放。TDS 值较高且 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$, $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 值也较高的水样点分布在图中右上角, 反映出水体所处区域较为干旱, 蒸发浓缩作用强烈(朱秉启和杨小平, 2007; 唐玺雯等, 2014; 孙英等, 2019; 冯建国等, 2020)。从研究区内朱家沟组地下水 Gibbs 图(图 6)可以看出, 区内朱家沟组地下水样点均处在岩石风化型区域内, 说明水-岩相互作用是形成古近系朱家沟组地下水化学的主要作用, 离子主要来源于灰质砾岩及胶结物的风化释放, 具有与岩溶水相似的化学特征。



石多裂隙发育, 为地下水赋存、岩石溶蚀提供了可能性(徐一平等, 2020)。在控盆断裂外侧多出露大面积的不同期次侵入岩, 大气降水及入渗补给的裂隙水沿地表起伏向断裂低洼处径流, 渗漏补给盆地内部的朱家沟组砾岩含水层; 另外, 在河流发育处, 地表水下渗也是主要补给来源。朱家沟组地下水受下部大汶口组、常路组砂岩、泥岩阻水后在裂隙岩溶发育段富集形成富水区域(图 7)。在盆地内部, 朱家沟组与奥陶系马家沟群不整合接触, 除接受大气降水补给和地表水下渗外, 还接受岩溶水顶托补给。目前朱家沟组地下水主要用于生活用水及农业灌溉用水, 开采方式以分散开采为主, 开采潜力较大。

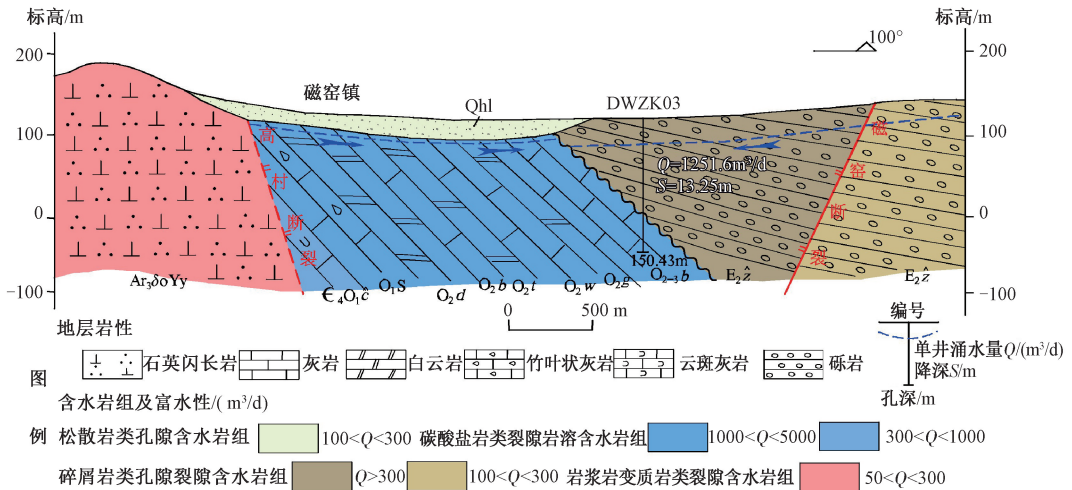


图 7 汶口盆地 DWZK03 钻孔水文地质剖面图
Fig. 7 Hydrogeological profile of the borehole DWZK03 in the Wenkou basin

在调查研究过程中发现，朱家沟组含水岩组富水性差异受断裂构造影响明显，特别是在盆地边缘地带及汶口盆地磁窑断裂与高村断裂之间。因此，朱家沟组含水岩组的富水模式是以断裂构造为主要控制因素的断裂型灰质砾岩裂隙岩溶蓄水构造模式，根据不同盆地沉积构造不同又可分为山前丘陵不整合接触蓄水模式与盆地前缘超覆构造蓄水模式。

另外，通过钻探施工发现，在主干断裂内裂隙多被粘土填充，地下水富水性较差，且成井难度大；靠近主干断裂 30~50 m 的影响带内，150 m 以浅裂隙岩溶发育，富水性较好，为良好的成井靶区，例如新汶盆地 XTZK03 钻孔，距离新泰-垛庄断裂 28 m，井深 152.2 m，最大涌水量 4944 m³/d，降深 13.86 m。

5 结论

文章依托 1：50000 水文地质调查工作，通过开展水文地质调查、水文地质钻探、水化学分析等工作手段，探讨了鲁中南朱家沟组含水岩组水文地质特征及水化学特征，分析了其富水机理与蓄水模式，形成结论如下。

- (1) 古近系朱家沟组灰质砾岩含水岩组集中分布在鲁中南坳陷盆地边缘，分布面积较小，呈条带状分布。地层岩性为钙质、泥质胶结灰质砾岩，岩性单一；裂隙岩溶形态以溶蚀裂隙、溶孔、溶洞为主，集中发育在 150 m 以浅。
- (2) 朱家沟组地下水化学类型不同区域略有

差异，阳离子以 Ca^{2+} 为主，阴离子以 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 为主，地下水补给来源较为单一，水化学类型受人类活动影响明显；依据 Gibbs 曲线图，该类地下水属于岩石风化型，离子主要来源于灰质砾岩及胶结物的风化释放，地下水类型兼具裂隙水与岩溶水特征。

(3) 朱家沟组含水岩组富水模式为断裂型灰质砾岩裂隙岩溶蓄水构造模式，可细分为山前丘陵不整合接触蓄水模式与盆地前缘超覆构造蓄水模式，受断裂控制明显，该模式在鲁中南地区具有普遍性和适用性。地下水主要补给来源为侵入岩区大气降水、裂隙水渗漏补给及地表水下渗补给，盆地南缘不整合接触地带还接受岩溶水顶托补给。

(4) 在近几年开展的 1：50000 水文地质调查工作基础上发现，朱家沟组灰质砾岩富水性受断裂构造影响差异巨大，部分地段地下水开采潜力巨大，允许开采量可达到 20000 m³/d。在岩溶水、孔隙水超采严重的现状下，朱家沟组已成为鲁中南地区一个重要目标含水层，这对于鲁中南缺水山区具有重要的实际供水意义和社会经济效益。

References

CHI P X, LUAN H Y, LIU M W, et al., 1994. On the division and Corrlation of the Cenozoic Lithostratigraphic units in Shandong province [J]. Geology of Shandong, 10 (S1): 70-86. (in Chinese with English abstract)
FENG J G, LU T M, GAO Z J, et al., 2020. Hydrochemical characteristics and causes of groundwater in Xintai city [J]. Journal

of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 39 (1): 11-20. (in Chinese with English abstract)

GUO D D, ZHAO L H, GAO Z J, 2012. Prospecting research of high density electrical method about kast ground collapse in Yanglou, Tai'an city Shandong province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 23 (4): 104-108. (in Chinese with English abstract)

JIANG F H, LIU W, 2017. Study on underground water rich property in carbonate roch in water shortage area in Yimeng area [J]. Shandong Land and Resources, 33 (7): 61-65. (in Chinese with English abstract)

JIANG T S, QI J Y, WANG M Y, et al., 2017. Seasonal Variations of hydrochemical characteristics of groundwater in Changping Plain, Beijing [J]. Journal of Resources and Ecology, 8 (6): 655-663.

KANG F X, XU J X, ZHANG Z X, 2010. Groundwater resources and its potential in Shandong province [J]. Shandong Land and Resources, 26 (8): 4-12. (in Chinese with English abstract)

LI P Y, WU J H, QIAN H, 2013. Assessment of groundwater quality for irrigation purposes and identification of hydrogeochemical evolution mechanisms in Pengyang County, China [J]. Environmental Earth Sciences, 69 (7): 2211-2225.

LIANG Y P, WANG W T, 2010. The division and characteristics of karst water systems in northern China [J]. Acta Geoscientica Sinica, 31 (6): 860-868. (in Chinese with English abstract)

LIU C H, YANG L Z, 2005. Research on the rational development of groundwater resources in Shandong province [J]. West-China Exploration Engineering, 17 (12): 270-271. (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)

SONG M C, LI H K, 2001. Study on regional geological structural evolution in Shandong province [J]. Shandong Geology, 17 (6): 12-21, 38. (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)

SUN Y, ZHOU J L, WEI X, et al., 2019. Hydrochemical characteristics and cause analysis of groundwater in the plain area of Bachu County [J]. Environmental Chemistry, 38 (11): 2601-2609. (in Chinese with English abstract)

TANG X W, WU J K, XUE L Y, et al., 2014. Major ion chemistry of surface water in the Xilin River Basin and the possible controls [J]. Environmental Science, 35 (1): 131-142. (in Chinese with English abstract)

TIAN Y, YU C Q, LUO K L, et al., 2014. Water chemical properties and the element characteristics of natural water in Tibet, China [J]. Acta Geographica Sinica, 69 (7): 969-982. (in Chinese with English abstract)

WANG L M, WANG S J, SONG Z Y, et al., 2012. Regional geology of Shandong province [R]. Shandong Institute of Geological Survey. (in Chinese)

WANG R J, 1983. Three-line diagram and its hydrological geological interpretation [J]. Geotechnical Investigation and Surveying (6): 6-11. (in Chinese)

WANG Y L, CHEN W Q, JIANG X Z, et al., 2015. Development features and formation mechanisms of karst collapses in the Tailai Basin, Shangdong province [J]. Carsologica Sinica, 34 (5): 495-506. (in Chinese with English abstract)

WANG Z R, TIAN X, WU X, 2018. Hydrochemical characteristics and quality assessment of shallow groundwater and CBM co-produced water in the Shizhuangnan block, Qinshui Basin, China [J]. Environmental Earth Sciences, 77 (3): 57.

XU J X, KANG F X, 2001. Sustainable development of groundwater resources in Shandong province, China [M]. Beijing: Ocean Press. (in Chinese)

XU Y P, XIANG X Q, YANG G L, 2020. Study on recharge, runoff and drainage of karst groundwater in Nanjiang Grand Canyon in Kaiyang [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 51 (2): 53-59. (in Chinese with English abstract)

YUN J B, PANG Q S, FANG D Q, 2002. Tectonics and regional geology in China [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press; 148-165. (in Chinese)

ZHAI M G, 2019. Tectonic evolution of the North China Craton [J]. Journal of Geomechanics, 25 (5): 722-745. (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)

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)

ZHENG D S, GAO L, LI M H, et al., 2013. Analysis on sedimentary characteristics and environments of Paleogene in Mengyin basin, southwestern Shandong province [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 32 (6): 697-702, 708. (in Chinese with English abstract)

ZHOU L, LIU Y Q, LI W, et al., 2019. Characteristics of the Paleogene water-bearing Formation in the middle and upper reaches of the Dawenhe River basin, Shandong Province [J]. Geology in China, 46 (2): 316-327. (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 B Q, YANG X P, 2007. The ion chemistry of surface and ground

waters in the Taklimakan Desert of Tarim Basin, western China [J]. Chinese Science Bulletin, 52 (15): 2123-2129.

ZHU D G, MENG X G, SHAO Z G, et al., 2008. The age of Paleogene strata in the Pingyi-Mengyin area, Shandong, China [J]. Geological Bulletin of China, 27 (7): 1085-1091. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

迟培星, 栾恒彦, 刘明渭, 等, 1997. 山东省新生代岩石地层清理意见 [J]. 山东地质, 10 (S1): 70-86.

冯建国, 鲁统民, 高宗军, 等, 2020. 新泰市地下水水化学特征及成因探讨 [J]. 山东科技大学学报 (自然科学版), 39 (1): 11-20.

郭栋栋, 赵俐红, 高宗军, 2012. 山东泰安羊娄岩溶地面塌陷的高密度电法探测应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 23 (4): 104-108.

姜福红, 刘文, 2017. 沂蒙缺水地区碳酸盐岩地下水富水性研究 [J]. 山东国土资源, 33 (7): 61-65.

姜体胜, 綦俊谕, 王明玉, 等, 2017. 北京昌平平原区地下水化学特征季节变化分析 (英文) [J]. 资源与生态学报, 8 (6): 655-663.

康凤新, 徐军祥, 张中祥, 2010. 山东省地下水资源及其潜力评价 [J]. 山东国土资源, 26 (8): 4-12.

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.

刘春华, 杨丽芝, 2005. 山东地下水资源合理开发的研究 [J]. 西部探矿工程, 17 (12): 270-271.

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.

山东省地质局第一水文地质队. 1979. 泰安市幅区域水文地质调查报告 (比例 1: 200000) [R]. 济南: 山东省地质局第一水文地质队.

宋明春, 李洪奎, 2001. 山东省区域地质构造演化探讨 [J]. 山东地质, 17 (6): 12-21, 38.

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.

孙英, 周金龙, 魏兴, 等, 2019. 巴楚县平原区地下水水化学特征及成因分析 [J]. 环境化学, 38 (11): 2601-2609.

唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 等, 2014. 锡林河流域地表水水化学主离

子特征及控制因素 [J]. 环境科学, 35 (1): 131-142.

田原, 余成群, 雒昆利, 等, 2014. 西藏地区天然水的水化学性质和元素特征 [J]. 地理学报, 69 (7): 969-982.

王来明, 王世进, 宋志勇, 等, 2012. 山东省区域地质志报告 [R]. 山东省地质调查院.

王瑞久, 1983. 三线图解及其水文地质解释 [J]. 工程勘察 (6): 6-11.

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.

徐军祥, 康凤新, 2001. 山东省地下水资源可持续开发利用研究 [M]. 北京: 海洋出版社.

徐一萍, 向喜琼, 杨根兰, 2020. 开阳南江大峡谷岩溶地下水补径排研究 [J]. 水利水电技术, 51 (2): 53-59.

云金表, 庞庆山, 方德庆, 2002. 大地构造学与中国区域地质 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社: 148-165.

翟明国, 2019. 华北克拉通构造演化 [J]. 地质力学学报, 25 (5): 722-745.

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.

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.

郑德顺, 高林, 李明龙, 等, 2013. 鲁西南蒙阴盆地古近系沉积特征及沉积环境 [J]. 河南理工大学学报 (自然科学版), 32 (6): 697-702, 708.

周乐, 刘元晴, 李伟, 等, 2019. 山东大汶河流域中上游古近系含水岩组水文地质特征 [J]. 中国地质, 46 (2): 316-327.

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.

朱秉启, 杨小平, 2007. 塔克拉玛干沙漠天然水体的化学特征及其成因 [J]. 科学通报, 52 (13): 1561-1566.

朱大岗, 孟宪刚, 邵兆刚, 等, 2008. 山东平邑-蒙阴地区古近纪地层时代讨论 [J]. 地质通报, 27 (7): 1085-1091.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 能听到作者的语音介绍及文章相关资讯

