

鲁中山区下寒武统朱砂洞组似层状含水层成因分析

刘元晴¹⁾, 周乐¹⁾, 李伟¹⁾, 吕琳¹⁾, 邓启军¹⁾, 朱庆俊¹⁾, 徐蒙²⁾, 马雪梅¹⁾, 何锦¹⁾, 王新峰¹⁾

1) 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北保定, 071051;

2) 山东省第一地质矿产勘查院, 济南, 250014

内容提要: 下寒武统朱砂洞组含水层是鲁中山区主要供水目的层之一, 多具承压性、成井率高, 地下水富集表现出“似层状”特征。通过岩石样品化学组分取样分析、水文地质调查及资料整理、实测地层剖面、滑脱构造地质点详细观测, 对朱砂洞组含水层水文地质特征进行研究。结果表明: 鲁中山区朱砂洞组含水层厚度 20~80 m, 且自东向西呈减薄趋势, 含水层多具承压性。朱砂洞组含水层碳酸盐岩可溶组分含量高达 84.6%, 构成了溶蚀发育的物质基础; 沿太古宇—寒武系不整合面发育的滑脱构造带, 朱砂洞组底部顺层形成不同规模的层间虚脱、构造带内部则发育碎裂岩带或揉皱带。外源补给、径流的地下水在溶蚀空隙、层间虚脱、碎裂岩带及揉皱层间空隙内赋存, 形成了地下水相对均一的“似层状”富集状态。

关键词: 鲁中山区; 朱砂洞组; 岩溶水; 滑脱构造; 层间虚脱

基岩地下水, 是指埋藏在第四纪以前的坚硬、半坚硬岩石中的地下水。按其储水空隙的特征可分为裂隙水和岩溶水(刘光亚, 1979)。我国北方蕴藏有 $108.8 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的岩溶地下水资源(张宗祜等, 2004), 由于其水量大、动态稳定、水质良好的特点, 是生活和工业用水的重要水源, 尤其在能源基地建设发挥着支撑性作用(袁道先, 2010; 梁永平等, 2010)。以找水为目的的供水勘查及水文地质调查研究在我国北方开展较早。20 世纪 60 年代初, 山东省完成了首轮 1:20 万水文地质调查与编图工作(姚春梅等, 2013), 近年来, 中国地质调查局在鲁中山区部署了 20 个 1:5 万标准图幅的水文地质调查项目, 在我国北方特别是鲁中山区的岩溶水文地质条件、岩溶水系统模式划分、岩溶发育控制因素等的研究方面取得了重要进展(奚德荫, 1988; 孙逊, 2010; 彭凯等, 2010)。

地质构造对岩溶发育的控制作用一直是岩溶研究领域的重点, 其对岩溶地下水及岩溶发育的影响是通过由应力场引起的岩体破裂和变形表现出来的(阎长虹等, 2008)。局部构造应力场思想已经成熟运用于岩溶地区钻井找水实践中(潘晓东等, 2015,

2018)。鲁中岩溶区是中国北方温带半干旱岩溶区中具有代表性的地区之一, 岩溶水资源具有明显的不均匀性和大面积分散补给而局部富集等特征(贺可强等, 2002)。通过水文地质调查发现, 鲁中山区岩溶水主要富集于古生界下寒武统及奥陶系碳酸盐岩含水层中, 其中下寒武统朱砂洞组含水层具有成井率高、地下水呈“似层状”富集的特点, 在浅埋区, 该含水层已作为部分县镇唯一可供集中开采的供水目的层(高明志, 1997)。本文结合鲁中山区晚侏罗世以来的伸展构造背景, 从滑脱构造对区内水文地质影响角度, 探讨朱砂洞组岩溶水“似层状”富集状态成因, 为进一步总结鲁中山区地下水富集规律和岩溶水文地质理论研究提供地质借鉴。

1 鲁中山区概况

1.1 地质构造与地层岩性

鲁中山区是指山东省中部的中低山丘陵区, 总面积 $4.1 \times 10^4 \text{ km}^2$, 构造位置属于鲁西隆起区。自晚侏罗世—早白垩世开始, 由于幔源岩浆热穹隆作用(燕守勋等, 1996; 牛树银等, 2004), 鲁西构造背景以南北向伸展活动为主, 形成了 NNW 向展布的新

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号: 41240021)和中国地质调查局水工环地质调查项目(编号: DD20190259; DD20160289; DD20179262)的成果。

收稿日期: 2018-11-03; 改回日期: 2019-04-12; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2019.03.011

作者简介: 刘元晴, 男, 1988 年生, 工程师, 主要从事沉积盆地流体方面研究, 近年来致力于基岩山区水文地质调查工作, Email: lyq198896@126.com。通讯作者: 周乐, 女, 1987 年生, 工程师, 主要从事基岩山区地下水勘查理论研究, Email: zhoule_wei@sina.com。

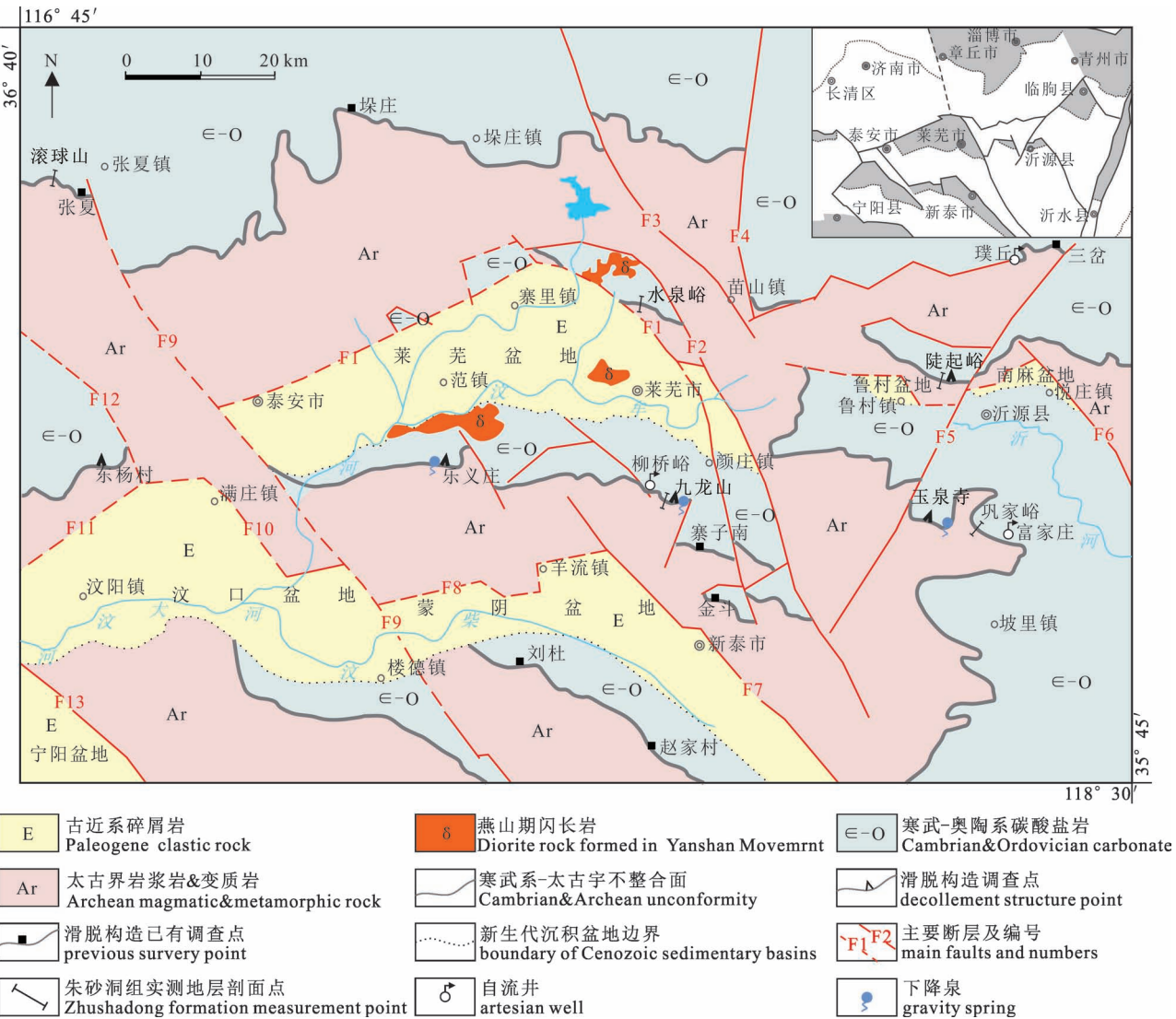


图1 鲁中山区构造及水文地质图

Fig. 1 Tectonics and hydrogeological map of the central mountain area of Shandong Province

F1—泰安—口镇断裂; F2—大王庄—铜冶店断裂; F3—文祖断裂; F4—博山断裂; F5—上五井断裂; F6—韩旺断裂; F7—新泰—垛庄断裂; F8—徂徕山断裂; F9—汶口断裂; F10—南留断裂; F11—夏张断裂; F12—肥城断裂; F13—苍山—尼山断裂

F1—Taian—Kouzhen fault; F2—Dawangzhuang—Tongyedian fault; F3—Wenzu fault; F4—Boshan fault; F5—Shangwujiang fault; F6—Hanwang fault; F7—Xintai—Duo Zhuang fault; F8—Culai Mountain fault; F9—Wenkou fault; F10—Nanliu fault; F11—Xiazhang fault; F12—Feicheng fault; F13—Cangshan—Nishan fault

生代盆—山构造格局(李三忠等,2005)。区内主要发育NW和NE向两组断裂,其中以大王庄—铜冶店断层、新泰—蒙阴断层等为代表的NW走向断层多为新生代沉积盆地边界控盆断层(李理,2018)。以夏张断层、徂徕山断层为代表的NE或NEE向断裂多表现为高角度走滑断层性质,并与NW向断裂一起控制了新生代沉积盆地的发育(李少俊等,2018)。莱芜盆地、汶口盆地、蒙阴盆地等多呈半地堑,表现为南升北陷格局,由南向北斜列分布。盆地

内部沉积了一套巨厚的古近系官庄群湖相砂页岩、砾岩及泥灰岩地层(李守军等,2003),覆盖在由寒武系和奥陶系碳酸盐岩组成的倾向北的单斜构造之上,盆地周边及基底岩性为太古宙所形成的变质花岗岩类(刘元晴等,2018)。此外,莱芜盆地内部发育不同规模燕山期闪长岩体(图1)。

1.2 水文地质概况

区内各沉积盆地北坡为太古宙变质花岗岩类,富水性弱,地下水以潜流的形式汇入盆地。盆地南

部为下古生界地层组成的单斜断块,单斜上部是以太古宙变质花岗岩类为主的地下水补给区,中部是以寒武系—奥陶系分布的地下水补给径流区,该区地下水位埋深大;单斜下部到山前碳酸盐岩隐伏区,为强富水的奥陶系碳酸盐岩含水层。各盆地腹部,下伏弱富水的石炭二叠系、白垩系、古近系碎屑岩含水岩组。大汶河流域,冲积、冲洪积层孔隙水较丰富,含水层岩性为细、中粗砂及砂砾石,含水层厚度 2~20 m,具有供水意义。

2 朱砂洞组(ϵ_{2z}) 含水层特征

2.1 岩性及分布特征

震旦纪开始,华北板块中部抬升为陆。早寒武世,海水西侵,郯城—庐江一带以西的鲁西地块成为东深西浅、南深北浅,以砂、泥坪、局限台地为主的广阔陆缘浅海环境(文琼英等,1991),区内沉积了一套含燧石结核、条带微晶白云岩夹不等厚灰岩的碳酸盐岩沉积相组合,即为朱砂洞组。该套地层全区均有分布,覆盖在太古宙变质基底之上,出露在沉积盆地南坡的北倾单斜构造端部(图 1),沿地层倾向下伏埋藏。通过笔者参加的 1:5 万水文地质调查项目在巩家峪、陡起峪、九龙山和水泉峪取得的实测地层资料,结合搜集滚球山实测地层资料(山东省地质矿产局,1995)^①对比发现:研究区内朱砂洞组地层分层厚度、岩相组合变化较大;区内朱砂洞组地层自东向西、自南向北呈厚度减薄趋势;位于沂源断隆南端的巩家峪测点朱砂洞组地层缺失底部的含砾砂岩(图 2),后文提及的“滑脱构造”可解释底部层位的缺失现象(吕朋菊等,1990)。

2.2 水文地质特征

基于 2015~2018 年在鲁中山区开展的 14 个标准图幅 1:5 万水文地质调查工作,对研究区内所有开采自寒武—奥陶系碳酸盐岩含水层岩溶水的机井进行统计,结果见表 1。可发现,朱砂洞组含水层在不同构造部位平均单井涌水量 720~1400 m³/d,富水性好,开采层位 330 m 以浅。南麻、鲁村盆地南部山区和鲁山东麓山区该含水层开采井数占比较高,分别为 49.5%和 72.7%,成为该区最主要含水层位。自莱芜盆地南部山区至汶口盆地东南部山区方向(即沿大汶河流域),奥陶系碳酸盐岩含水层开采比例增加,寒武系朱砂洞组含水层开采井数占总井数比例由 31.6%大幅度降低至 11.4%。

通过调查及钻井发现,在实际找水过程中,朱砂洞组含水层成井率较高,地下水富集“似层状”,较

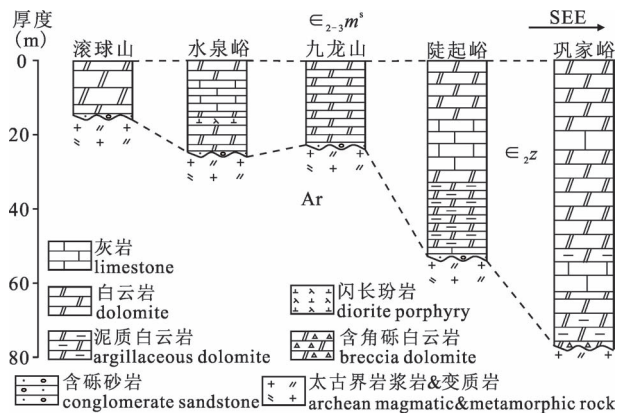


图 2 鲁中山区下寒武统朱砂洞组地层柱状对比图

Fig. 2 Columnar contrast map of the Lower Cambrian Zhushadong Formation in the central mountain area of Shandong Province

$\epsilon_{2-3}m^s$ —馒头组石店段; ϵ_{2z} —朱砂洞组;

Ar—太古宙岩浆岩和变质岩

$\epsilon_{2-3}m^s$ —Shidian section of Mantou Formation; ϵ_{2z} —Zhushadong Formation; Ar—Archean magmatic and metamorphic rocks

其他含水层的岩溶水赋存不均匀特点,该套含水层地下水富集相对均一。含水层由于上覆厚层的馒头组砂页岩,多具承压性,在钻井开采过程中可形成自流井及自流区,如沂源县璞丘、宋家庄及莱芜市柳桥峪自流井(图 1)。由于其构造位置特殊性,在与太古宙变质基底接触位置多形成岩溶大泉,如新泰市乐义庄泉、莱芜市九龙泉、沂源县宋家庄泉、刘家庄泉群及焦家上庄泉群(图 1)。

3 “似层状”含水层成因讨论

3.1 岩矿组分及溶蚀发育特征

可溶岩是岩溶发育的本体及物质基础。为对比分析鲁中山区朱砂洞组含水层碳酸盐岩可溶组分含量,结合研究区不同构造位置朱砂洞组含水层碳酸盐岩露头分布情况。由东向西马牧池凸起、沂源凸起、新甫山凸起方向集中采取含水层露头岩石样品。化学组分测试分析委托河北省地质实验测试中心完成,测试仪器为 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。可以得出,研究区朱砂洞组碳酸盐岩含水层中构成方解石及白云石矿物组分的 CaCO₃和 MgCO₃含量占比为 71.9%~94.7%,平均值 84.6%;组成陆源碎屑矿物及粘土矿物组分的 SiO₂、Al₂O₃等含量占比较低,平均含量 12.2%。由东向西 CaCO₃和 MgCO₃可溶组分含量逐

表 1 鲁中山区不同地貌及构造部位朱砂洞组含水层富水性统计表

Table 1 Water yield data of the Zhushadong Formation in different structural and landforms parts of the central mountain area of Shandong Province

地貌位置	构造部位	岩性特征	成井数 (个)	成井深度 范围(m)	占机井总数 比例(%)	平均单井 涌水量(m ³ /d)
鲁山东麓山区	鲁山—邹平断隆	纹层状泥质白云岩	8	100~180	72.7	1100
南麻、鲁村盆地南部山区	马牧池—沂源断隆	厚层状细晶白云岩	48	50~330	49.5	720
莱芜盆地南部山区	新甫山—莱芜断隆	薄—中层微晶白云岩	73	30~320	31.6	1400
汶口盆地东南部山区	蒙山—蒙阴断隆	厚层含燧石结核、条带白云岩	79	37~206	11.4	900

表 2 鲁中山区朱砂洞组碳酸盐岩化学组分含量(%)测试数据表

Table 2 Chemical component content(%) test data of Zhushandong Formation carbonate rocks in the central mountain area of Shandong Province

编号	取样点	构造位置	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	折算 CaCO ₃	折算 MgCO ₃	可溶 组分	平均 含量	可溶 组分
MZ04	诸葛镇大崖头村	马牧池 凸起	30.42	14.07	0.14	0.03	10.98	2.26	0.58	0.021	54.32	29.55	83.87	87.8	
MZ09	诸葛镇马崮峪村		50.74	1.94	0.13	0.033	2.36	0.72	0.75	0.034	90.61	4.07	94.68		
DL01	东里镇西长旺村		34.84	10.78	0.33	0.035	10.68	2.22	1.08	0.028	62.21	22.64	84.85		
YYa15	大张庄乡大洼村	沂源 凸起	31.66	14.98	0.053	0.03	9.4	1.24	0.36	0.019	56.54	31.46	87.99	84.4	
YYa04	大张庄乡玉泉寺村		39.55	9.98	0.048	0.028	7.88	0.35	0.12	0.019	70.63	20.96	91.58		
YY01	鲁村镇东台峪村		39.74	1.3	1.01	0.073	14.76	2.36	5.08	0.18	70.96	2.73	73.69		
DW33	牛泉镇李条庄	新甫山 凸起	43.29	5.79	0.082	0.018	5.97	1.74	0.59	0.057	77.30	12.16	89.46	82.4	
DW36	牛泉镇李条庄		25.68	12.40	0.094	0.031	26.39	0.54	0.67	0.041	45.86	26.04	71.90		
CL11	羊流镇乐义庄		43.25	2.86	1.17	0.050	8.60	1.48	2.15	0.028	77.23	6.01	83.24		
CL15	羊流镇龙石崖村		26.33	18.12	0.058	0.034	13.89	0.45	0.27	0.0087	47.02	38.05	85.07		

渐降低,降幅较小。

鲁中山区年降雨量一般为 600~700 mm,湿润系数 0.3~0.6,属于半干旱半湿润气候区,地表岩溶地貌形态有溶蚀剥蚀的岭山、崮山、缓丘谷地及残丘平原,岩溶个体及微形态有溶痕、溶盘、干谷、大泉等形态(彭凯等,2010)。野外调查及钻探施工结果显示,碳酸盐岩浅埋区岩溶较发育,有溶孔、溶蚀裂隙及溶洞,地下岩溶随着深度的增加而减弱。前文提

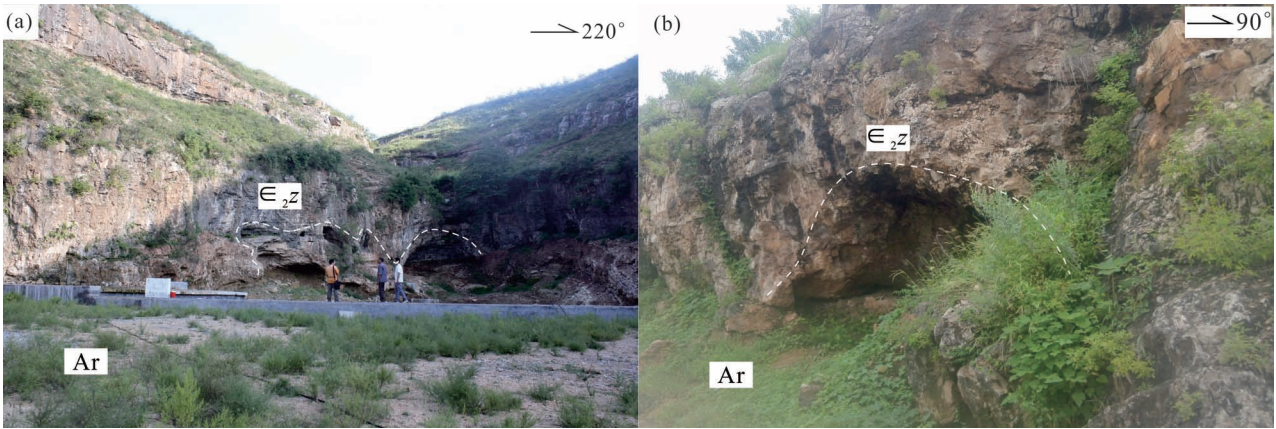


图 3 鲁中地区朱砂洞组底界碳酸盐岩溶蚀发育图

Fig. 3 Dissolution characteristics of carbonate rocks at the bottom of Zhushandong Formation in the central mountain area of Shandong Province

(a) 沂源县宋家庄村岩溶洞穴; (b) 沂源县牛郎官庄村岩溶洞穴

(a) Karst cave in Songjiazhuang, Yiyuan County; (b) karst cave in Niulangguanzhuang, Yiyuan County

及,朱砂洞组含水层由于其特殊的构造位置,直接上覆在太古宙变质类花岗岩基底之上,其裸露区和浅埋区位于地势较高的补给区和径流区起始端,TDS 及 pH 值均较低,具有较强的溶蚀能力,促进溶蚀发育,多形成岩溶洞穴及大泉,如前文提及的宋家庄大泉、焦家上庄泉群等(图 3)。综上所述,含水层碳酸盐岩岩溶发育是朱砂洞组含水层富水的基础条件。

3.2 构造成因讨论

3.2.1 滑脱构造

滑脱构造是具有全球性质的一种岩石圈内部构造。早在 20 世纪 70 年代,国内外地质学家在地壳内或盖层与基底之间发现了许多大规模滑脱构造,揭示了岩石圈内部一系列低速层及壳—幔过渡层的存在,并认为在阿尔卑斯及其他造山带演化过程中,主构造线都曾沿着岩石圈先期存在的构造层面发生过大规模的伸展运动(许志琴,1986;李理等,2008b)。马杏垣(1982,1984)认为多层次滑脱是岩石圈构造的特点,以高角度正断层表现出来的大陆内部伸展构造,向下形成产状变缓的滑脱断裂,与重力扩展相结合,可导致更大程度的侧向伸展运动。鲁西地区关于滑脱构造研究起步较早,吕朋菊等(1985,1990)指出鲁西泰山周围地区太古宇泰山群和古生界寒武—奥陶系的不整合面上普遍发育滑脱构造,该构造致使张夏地区寒武系标准剖面底部缺层。鲁西地区发育浅层次和深层次多个滑脱断面组合(王桂梁等,1992);中新生代两次伸展运动导致泰山—鲁山—沂山早寒武系与太古宇不整合界面发生浅层次的滑脱运动(燕守勋等,1996)。近年来,

国内学者对鲁西地区普遍存在的滑脱构造特别是寒武系与太古宇不整合面滑脱构造带的特征、形成时代及成因机制进行了详细论述。研究认为,鲁西地区发育的滑脱构造岩主要为碎裂岩,岩石发生强烈的破碎,薄层构造岩中揉皱普遍发育(李理等,2007);滑脱构造属于低角度伸展构造,滑动始于早白垩世(130~110 Ma)岩石圈的伸展及始新世(43~37 Ma)持续活动两期(李理等,2008b);板块碰撞引起地幔物质上涌,导致岩石圈—软流圈之间滑脱拆离,而控制了深层次和浅层次滑脱构造的产生(李理等,2012)(图 4)。

3.2.2 构造带特征

鲁西隆起区中、新生代伸展构造背景及力学特征,导致上覆在太古宙变质基底之上的寒武系碳酸盐岩盖层沿着区域构造薄弱带—角度不整合面发生重力滑脱及侧向伸展,形成区域性滑脱构造,构造带内不同位置岩层和岩体发育特有应力形变(图 5)。

笔者完成了鲁中山区陡起峪、玉泉寺、九龙庄、乐义庄、东杨村滑脱构造带 5 个野外调查点地质特征的详细观测工作(具体位置见图 1)。结合前人已完成的区内张夏—垛庄、三岔、寨子南—金斗、刘杜—赵家村滑脱构造带的观测资料(李理,2008a)。系统总结得出鲁中山区沿太古宇—寒武系不整合面发育的滑脱构造带具有如下特征:①滑脱面总体产状平缓,滑脱方向多沿 NNE 向;②滑脱构造带内岩石发生不同程度的破碎揉皱(图 6a,6b)或碎裂(图 6d),形成碎裂岩带或者揉皱带,厚度 20~80 cm 不等;③滑脱构造揉皱带内,由于岩层能干性差异,多

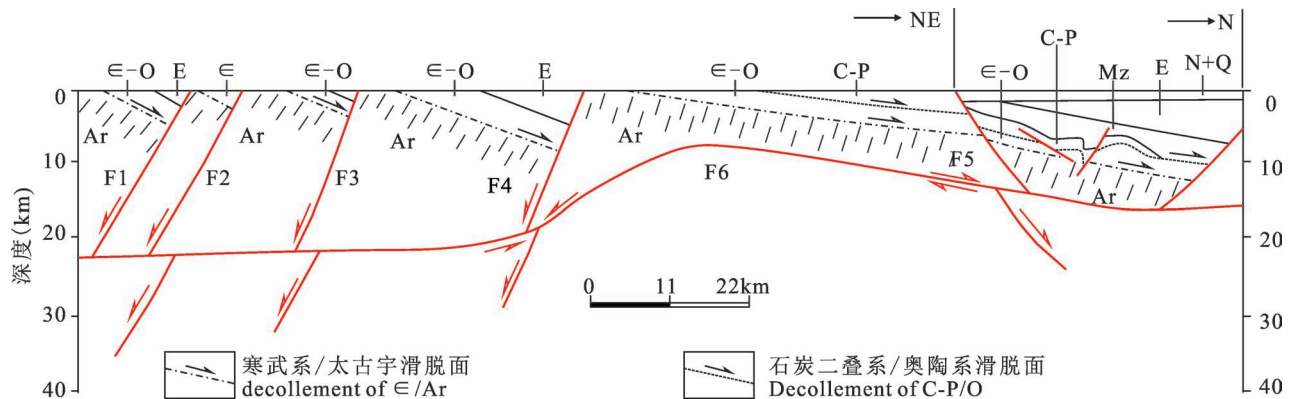


图 4 鲁西隆起和济阳拗陷伸展滑脱断块剖面图(据李理等,2012)

Fig. 4 Extensional fault and decollement of the Western Shandong Rise and Jiyang Depression(modified after Li Li et al., 2012&)

F1—汶泗断裂; F2—蒙山断裂; F3—新泰—垛庄断裂; F4—大王庄—铜冶店断裂; F5—齐广断裂; F6—深层次滑脱断裂
F1—Wensi fault; F2—Mengshan fault; F3—Xintai—Duozhuang fault; F4—Dawangzhuang—Tongyedian fault;
F5—Qiguang fault; F6—deep decollement fault

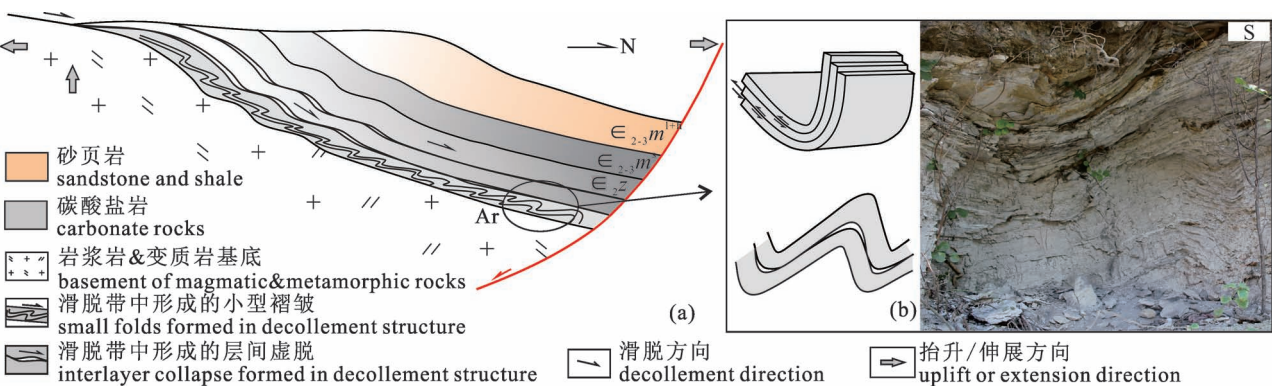


图 5 鲁中山区滑脱构造示意图
Fig. 5 Schematic diagram of decollement structure in the central mountain area of Shandong province

在能干性强的薄层碳酸盐岩褶皱转折端形成层间空隙；④由于重力卸载作用，朱砂洞组底部多顺层形成不同规模的层间虚脱（图 7a、b、c），部分层间虚脱被燕山期闪长玢岩侵入体充填（图 7d）；⑤构造滑动导致滑脱面之上的寒武系底部朱砂洞组某些层位的

缺失，如沂源县巩家峪底部含砾砂岩的缺失（图 2）。
3.2.3 滑脱构造带水文地质意义
由滑脱构造形成的层间虚脱、碎裂岩带及揉皱带内的层间空隙均可成为地下富集的空间。在朱砂洞组含水层浅埋区，由于碳酸盐岩裸露及太古宙变

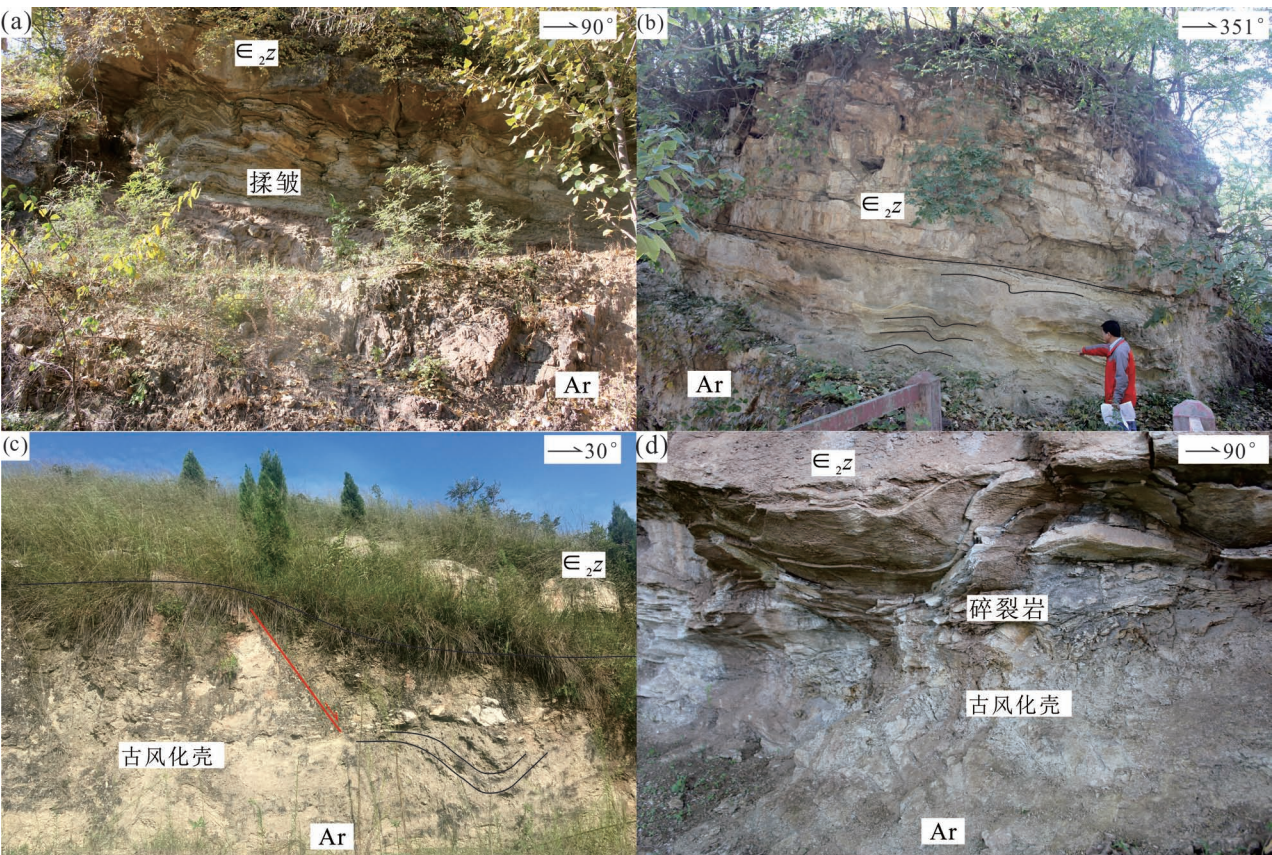


图 6 鲁中山区寒武系—太古宙滑脱构造特征
Fig. 6 Characteristics of the decollement structures along the Cambrian—Archean unconformity surface observed in the central mountain area of Shandong province
(a)、(b) 新泰市乐义庄；(c) 泰安市东杨村；(d) 莱芜市九龙庄村
(a), (b) Leyizhuang village, Xintai County; (c) Dongyang village, Taian City; (d) Jiulongzhuang village, Laiwu City

间,表现富水性质。朱砂洞组内部由于滑脱作用形成的不同规模层间虚脱,尚未被侵入岩充填的,亦可形成良好的蓄水空间,富水性受新构造运动等后期形成的导水断层沟通影响较大。未发生滑脱错动的朱砂洞组含水层富水性受岩溶发育程度控制,常表现出不均一特征。

3.3 典型滑脱地段水文地质特征

朱砂洞组埋藏较浅区域多形成富水区段,特征为井点密度较大,分布相对均匀;开采井均钻至太古宙变质基底终孔。以沂源县焦家上庄—胡家台—富家庄富水区段为例,区内钻井深度120~280 m,含水层均为下寒武统朱砂洞组,据不完全统计,区内沿河谷及两侧分布机井数量近30眼,单井涌水量720~

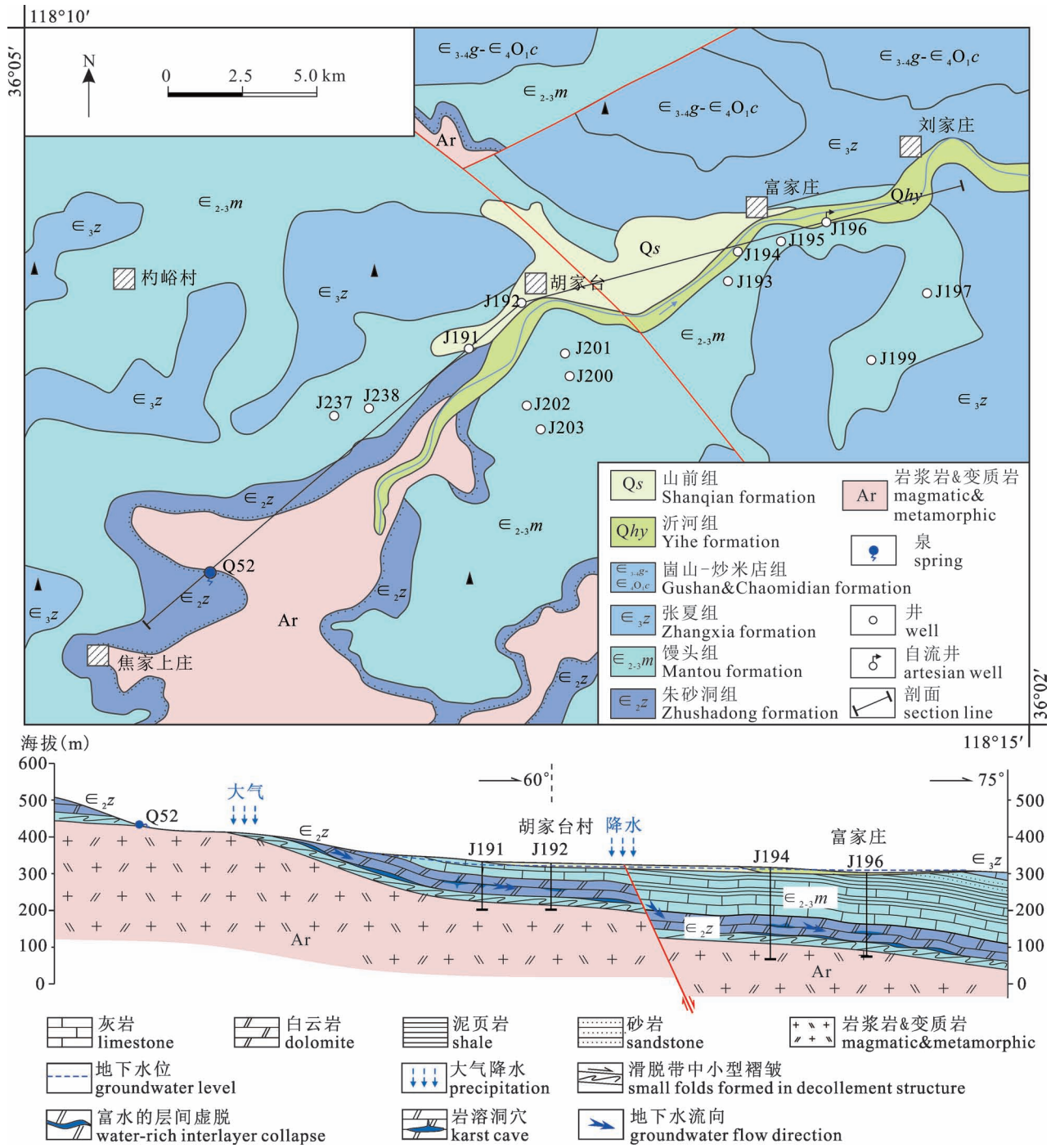


图9 焦家上庄—胡家台—富家庄富水区段水文地质平、剖面图

Fig. 9 Hydrogeological plan and profile of Jiaojia Shangzhuang—Hujiatai—Fujiazhuang water-rich sector

1440 m³/d。朱砂洞组含水层受大气降水直接补给、上部碳酸盐岩含水层沿导水断裂下渗补给及变质岩区风化裂隙水就近接触补给,地下水向东北方向经短途径流,遇层间虚脱及碎裂岩带和揉皱带空隙形成的蓄水空间组合而富集,形成“近似层状”含水体或含水层,地下水赋存表现相对均一状态(图 9)。

4 结论

在野外地质调查工作基础上,结合资料分析对鲁中山区下寒武统朱砂洞组含水层取得如下认识:

(1)鲁中山区朱砂洞组含水层在不同构造部位平均单井涌水量 720~1400 m³/d,富水性好,开采层位 330 m 以浅,地下水富集呈相对均一的“似层状”,可成为区域集中供水目的层。含水层由于上覆厚层的馒头组砂页岩,多具承压性,在钻井开采过程中可形成自流井及自流区。

(2)朱砂洞组碳酸盐岩含水层中构成方解石及白云石可溶矿物组分的 CaCO₃和 MgCO₃含量 71.9%~94.7%,平均值 84.6%,含量高,为含水层岩溶发育提供物质基础。含水层中可溶组分含量在鲁中山区由东向西呈小幅度降低趋势。

(3)鲁中山区沿太古宇—寒武系不整合面普遍发育 NNE 向运动的滑脱构造,由于重力卸载作用,朱砂洞组底部多顺层形成不同规模的层间虚脱。构造带内部岩石发生不同程度的破碎形成碎裂岩带或者揉皱带。层间虚脱、碎裂岩带及揉皱层间空隙均可形成良好的蓄水空间,富集地下水。

(4)浅埋的朱砂洞组含水层受大气降水直接补给、上部碳酸盐岩含水层沿导水断裂下渗补给及变质岩区风化裂隙水就近接触补给,地下水经短途径流在层间虚脱及碎裂岩带和揉皱带空隙形成的蓄水空间组合富集,形成“似层状”富水区段。

致谢:野外工作期间中国地质调查局水文地质环境地质调查中心“沂蒙山革命老区 1:5 万水文地质调查”项目组全体成员及山东科技大学硕士生文坦、陆瀛、陈晨、王秉顺等给予了野外工作上的支持与帮助,在此一并表示感谢。

注 释 / Note

① 山东省地质矿产局. 1995. 张夏幅、肥城幅区域地质调查报告(比例尺 1:50000).
② Shandong Bureau of Geology and Mineral Resources. 1995#. Regional Geological Survey of Xiazhang and Feicheng Maps (scale 1:50,000).

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

高明志. 1997. 山东沂源下寒武统馒头组含水层水文地质特征. 山东地质, 13(2): 74~77.

贺可强, 刘炜金, 邵长飞. 2002. 鲁中南岩溶水资源综合类型及合理调蓄研究. 地球学报, 23(4): 369~374.

李理, 张进江, 钟大赉, 王先美. 2007. 鲁西地区沿寒武系/太古宇不整合面滑脱构造的主要特征及形成机制. 地质科学, 42(2): 335~352.

李理, 钟大赉, 陈霞飞, 陈衍. 2018. 鲁西地块 NW 走向断层的活动特征及裂变迹证据. 地质学报, 92(3): 413~436.

李理, 钟大赉, 石秀朋, 唐智博, 胡秋媛, 胥颐, 李志伟. 2008b. 鲁西地区的滑脱构造及其形成的深部背景. 自然科学进展, 18(6): 651~660.

李理, 钟大赉, 石秀朋, 唐智博, 宫洪波, 胡秋媛. 2008a. 鲁西地区晚中生代以来伸展构造及其控矿作用. 地质论评, 54(4): 449~458.

李理, 钟大赉, 杨长春, 石秀朋, 胡秋媛, 赵利, 孙钰皓, 刘卉. 2012. 伸展作用序列及其深部背景: 以晚中生代以来鲁西隆起和济阳拗陷为例. 地学前缘, 19(5): 255~273.

李三忠, 王金铎, 刘建忠, 于建国, 吕海青, 侯方辉. 2005. 鲁西地块中生代构造格局及其形成背景. 地质学报, 79(4): 487~497.

李少俊, 李三忠, 李玺瑶, 索艳慧, 王鹏程, 王倩, 张剑, 周在征. 2018. 鲁西地块新生代断裂体系活动性与深部动力机制. 海洋地质与第四纪地质, 38(4): 123~134.

李守军, 郑德顺, 蔡进功, 杨永红, 孙锡文, 杨品荣. 2003. 鲁北和鲁西南地区古近纪盆地沉积特征与控制因素探讨. 地质论评, 49(3): 225~232.

梁永平, 王维泰. 2010. 中国北方岩溶水系统划分与系统特征. 地球学报, 31(6): 860~868.

吕朋菊, 王念宝. 1985. 不整合面上的滑脱构造. 山东矿业学院学报, 7(2): 81~83.

吕朋菊, 张明利, 朱兴珊. 1990. 泰山周围下古生界与泰山群不整合面上滑脱构造的发现. 地质论评, 36(5): 473~478.

刘光亚. 1979. 基岩地下水. 北京: 地质出版社: 1~215.

刘元晴, 周乐, 李伟, 朱庆俊, 徐蒙, 吕琳, 邓启军, 何锦, 王新峰. 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. 地球学报, 39(6): 737~748.

马杏垣. 1982. 论伸展构造. 地球科学—武汉地质学院学报, 7(3): 15~21.

马杏元, 索书田. 1984. 论滑覆及岩石圈内多层次滑脱构造. 地质学报, 58(3): 205~213.

牛树银, 胡华斌, 毛景文, 孙爱群, 许传诗, 侯泉林. 2004. 鲁西地区地质构造特征及其形成机制. 中国地质, 31(1): 34~39.

潘晓东, 曾洁, 任坤, 焦友军, 彭聪, 兰干江. 2018. 贵州毕节岩溶斜坡地带地下水赋存规律与钻探成井模式. 地球学报, 39(5): 606~612.

潘晓东, 唐建生, 苏春田, 孟小军, 曾洁, 杨杨. 2015. 贵州高原斜坡岩溶地区逆断层两盘地下水开采规律探讨, 地质论评, 61(1): 121~127.

彭凯, 赵有美, 李岚. 2010. 鲁中南岩溶发育的控制因素. 山东国土资源, 26(10): 26~30.

孙逊, 王克红, 孙启堂, 杨希健. 2010. 鲁中南山区岩溶裂隙水富水带类型及分布特征. 工程勘察, 28(2): 52~56.

- 王桂梁, 燕守勋, 姜波. 1992. 鲁西中生代复合伸展构造系统. 中国矿业大学学报, 21(3): 1~12.
- 文琼英, 孟繁利. 1991. 冀鲁(西)地区早古生代浅海碳酸盐岩台地成生演化. 岩相古地理, 4(5): 19~26.
- 许志琴. 1986. 陆内俯冲及滑脱构造——以我国几个山链的地壳变形研究为例. 地质论评, 32(1): 79~89.
- 奚德荫. 1988. 鲁中南地区岩溶水文地质条件及其特征. 中国岩溶, 7(3): 43~48.
- 阎长虹, 王玉英, 罗国煜, 陈明珠, 詹启伟, 陈喜, 郭军辉, 郑军. 2008. 压性构造对岩溶发育的控制作用——以贵州普定地区为例. 地质论评, 54(3): 343~347.
- 燕守勋, 王桂梁, 邵震杰, 孟宪刚. 1996. 鲁西地壳隆升的伸展构造模式. 地质学报, 70(1): 1~11.
- 姚春梅, 康凤新. 2013. 山东省水工环地质工作进展. 山东国土资源, 29(9): 1~9.
- 袁道先. 2010. 我国北方岩溶研究的形势和任务. 中国岩溶, 29(3): 219~221.
- 张宗祜, 李烈荣. 2004. 中国地下水资源. 北京: 中国地图出版社: 1~311.
- Gao Mingzhi. 1997&. Hydrogeological characteristics of karst water bearing layers in Mantou formation of lower Cambrian in Yiyuan county of Shandong province. Shandong Geologic, 13(2): 74~77.
- He Keqiang, Liu Weijin, Shao Changfei. 2002&. The comprehensive type classification and adjustment of karst water resource in the central—south region of Shandong province. Acta Geoscientica Sinica, 23(4): 369~374.
- Li Li, Zhang Jinjiang, Zhong Dalai, Wang Xianmei. 2007&. Main characteristics of the decollement structures along the Cambrian/Archean unconformity surface in western Shandong. Chinese Journal of Geology, 42(2): 335~352.
- Li Li, Zhong Dalai, Chen Xiafei, Chen Yan. 2018&. Characteristics of NW-trending faults and evidence of fission track in the Luxi block. Acta Geologica Sinica, 92(3): 413~436.
- Li Li, Zhong Dalai, Shi Xiupeng, Tang Zhibo, Hu Qiuyuan, Xu Yi, Li Zhiwei. 2008a#. The decollement structure and its deep background in western Shandong province. Progress in Natural Science, 18(6): 651~661.
- Li Li, Zhong Dalai, Shi Xiupeng, Tang Zhibo, Gong Hongbo, Hu Qiuyuan. 2008b&. Late Mesozoic extensional structure and its constrains on mineralization in western Shandong. Geological Review, 54(4): 449~458.
- Li Li, Zhong Dalai, Yang Changchun, Shi Xiupeng, Hu Qiuyuan, Zhao Li, Sun Yuhao, Liu Beng. 2012&. Extension order and its deep geological background: evidence from western Shandong rise and Jiyang depression in the Later Mesozoic—Cenozoic. Earth Science Frontiers, 19(5): 255~273.
- Li Sanzhong, Wang Jinduo, Liu Jianzhong, Yu Jianguo, Lv Haiqing, Hou Fanghui. 2005&. Mesozoic structure and its tectonci setting in the western Shandong block. Acta Geologica Sinica, 79(4): 487~497.
- Li Shaojun, Li Sanzhong, Li Xiyao, Suo Yanhui, Wang Pengcheng, Wang Qian, Zhang Jian, Zhou Zaizheng. 2018&. Activity of cenozoic fault system in the Luxi block and deep dynamics. Marine Geology & Quaternary Geology, 38(4): 123~134.
- Li Shoujun, Zheng Deshun, Cai Jingong, Yang Yonghong, Sun Xiwen, Yang Pinrong. 2003&. Sedimentary characteristics and controlling factors of basins in the north Shandong and southwest Shandong in Palaeogene. Geological Review, 49(3): 225~232.
- Liang Yongping, Wang Weitai. 2010&. The division and characteristics of karst water systems in northern China. Acta Geoscientica Sinica, 31(6): 860~868.
- Liu Guangya. 1979#. Bedrock Groundwater. Beijing: Press of Geology.
- Liu Yuanqing, Zhou Le, Li Wei, Zhu Qingjun, Xu Meng, Lv Lin, Deng Qijun, He Jin, Wang Xinfeng. 2018&. The characteristics and genetic analysis of the Paleogene Semi-consolidated water-bearing formation on the northwestern margin of Laiwu basin, Shandong Province. Acta Geoscientica Sinica, 39(6): 737~748.
- Lü Pengju, Wang Nianbao. 1985&. The detachment on the unconformable surface. Journal of Shandong Mining Institute, 7(2): 81~83.
- Lü Pengju, Zhang Mingli, Zhu Xingshan. 1990&. Discovery of sliding structures on the plane of unconformity between the lower Palaeozoic and the Taishan group in the vicinity of Taishan Mountains. Geological Review, 36(5): 473~478.
- Ma Xingyuan. 1982&. On extensional tectonics. Earth Science: Journal of Wuhan College of Geology, 7(3): 15~21.
- Ma Xingyuan. 1984&. On gliding Nappes and Multi-Level detachment structures in the lithosphere. Acta Geologica Sinica, 58(3): 205~213.
- Niu Shuyin, Hu Huabin, Mao Jingwen, Sun Aiqun, Xu Chuanshi, Hou Quanlin. 2004&. Structure in western Shandong and its genetic mechanism. Chinese Geology, 31(1): 34~39.
- Pan Xiaodong, Tang Jiansheng, Su Chuntian, Meng Xiaojun, Zeng Jie, Yang Yang. 2015&. Discussion of groundwater exploring in compressive fault zones in karst areas of Guizhou plateau slopes. Geological Review, 61(1): 121~127.
- Pan Xiaodong, Zeng Jie, Ren Kun, Jiao Youjun, Peng Cong, Lan Ganjiang. 2018&. Groundwater occurrence characteristics and drilling well models in karst slope zone, Bijie, Guizhou Province. Acta Geoscientica Sinica, 39(5): 606~612.
- Peng Kai, Zhao Youmei, Li Lan. 2010&. Controlling factors for karst development in middle and south part of Shandong province. Land and Resources in Shangdong Province, 26(10): 26~30.
- Sun Xun, Wang Kehong, Sun Qitang, Yangj Xijian. 2010&. Types and distribution of karst fissure water in central and southern Shandong province. Geotechnical Investigation & Surveying, 28(2): 52~56.
- Wang Guiliang, Yan Shouxun, Jiang Bo. 1992&. The compound extension structure system of Meso—Cenozoic in west Shandong Province. Journal of China University of Mining & Techology, 21(3): 1~12.
- Wen Qiongying, Meng Fanli. 1991&. Formation and evolution of the Early Palaeozoic shallow marine carbonate platform in the Hebei—Western Shandong area. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 4(5): 19~26.
- Xi Demeng. 1988&. The karst hydrogeological conditions and its characteristics in the central—south area of Shandong Province. Carsologica Sinica, 7(3): 43~48.
- Yan Changhong, Wang Yuying, Luo Guoyu, Chen Mingzhu, Zhan Qiwei, Chen Xi, Guo Junhui, Zhen Jun. 2008&. Compressive structure's control on the karst development. Geological Review, 54(3): 343~347.
- Yan Shouxun, Wang Guiliang, Shao Zhenjie, Meng Xiangang. 1996&. Extensional tectonic model of crustal elevation in western Shandong. Acta Geologica Sinica, 70(1): 1~11.
- Yao Chunmei, Kang Fengxin. 2013&. Progress of hydraulic engineering and environmental geological work in Shandong province. Land and

Resources in Shangdong Province, 29(9): 1~9.

Yuan Daoxian. 2010. The situation and tasks for northern karst research of our country. Carsologica Sinica, 29(3): 219~221.

Zhang Zonghu, Li Lierong. 2004. Groundwater Resource of China. Beijing: SinoMaps Press.

Genetic analysis of Lower Cambrian Zhushadong Formation layered aquifer in the central mountain area of Shandong Province

LIU Yuanqing¹⁾, ZHOU Le¹⁾, LI Wei¹⁾, LÜ Lin¹⁾, DENG Qijun¹⁾, ZHU Qingjun¹⁾,
XU Meng²⁾, MA Xuemei¹⁾, HE Jin¹⁾, WANG Xinfeng¹⁾

1) Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Baoding, Hebei, 071051;
2) No. 1 Institute of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, Jinan, 250014

Abstract: The lower Cambrian Zhushadong Formation aquifer is one of the important water supply objective aquifer in the central mountain area of Shandong Province. It is characterized by press bearing, high drilling success rate. The enrichment property of groundwater in the aquifer is showing “stratiform” state. Hydrogeological characteristics of the Zhushadong Formation aquifer were recognized based on analyzing of chemical composition of rock samples, hydrogeological surveying and data collating, measuring stratigraphic sections, observing decollement structure points in detail. The results show that the Zhushadong Formation aquifer thickness is between 20~80m with tendency of thinning from east to west, the aquifer has always pressure-bearing property. The content of soluble components in aquifer’s carbonate rocks is as high as 84.6% and constitutes the foundation of aquifer karst. Decollement structure developed along Archean—Cambrian unconformity surface forms some different scales interlayer collapses at the bottom of the Zhushadong Formation, and cataclastic rock belt and small folds belt in decollement zone. Groundwater with extraneous recharge can store in karst pores, interlayer collapses, cataclastic rock belt and interlayer fracture in small folds belt. It makes the Zhushadong Formation aquifer groundwater with the enrichment property of relatively homogeneous “stratiform” state.

Keywords: The central mountain area of Shandong Province; the Zhuashadong Formation; karst groundwater; decollement structure; interlayer collapse

Acknowledgements: This study was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41240021), and China Geological Survey (No.s DD20190259; DD20160289; DD20179262)

First author: LIU Yuanqing, male, born in 1988, master, engineer, majors in mineral prospecting and exploration specialty, engages in theoretical research of bedrock mountain area hydrogeology, Email: lyq198896@126.com

Corresponding author: ZHOU Le, female, born in 1987, master, engineer, majors in mineral prospecting and exploration specialty, engages in theoretical study on groundwater exploration in bedrock mountain area, Email: zhoule_wei@sina.com

Manuscript received on: 2018-11-03; Accepted on: 2019-04-12; Edited by: LIU Zhiqiang

Doi: 10.16509/j.georeview.2019.03.011