

doi: 10.12029/gc20190208

周乐, 刘元晴, 李伟, 朱庆俊, 李凤哲, 吕琳, 邓启军, 马雪梅, 何锦. 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.

Zhou Le, Liu Yuanqing, Li Wei, Zhu Qingjun, Li Fengzhe, Lü Lin, Deng Qijun, Ma Xuemei, He Jin. 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).

山东大汶河流域中上游古近系含水岩组水文地质特征

周乐, 刘元晴, 李伟, 朱庆俊, 李凤哲, 吕琳, 邓启军, 马雪梅, 何锦

(中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051)

摘要: 利用古近系大汶口组及朱家沟组含水岩组 5 眼施工钻孔及 55 眼井孔调查资料, 通过岩心、地下水常规离子组分及氢氧同位素样品测试结果, 研究大汶河流域中上游莱芜盆地、大汶口盆地古近系含水岩组分布特征、物性及富水性、地下水化学及补给循环特征。结果表明: 富水较好的大汶口组上段位于盆地腹部偏北, 含水层岩性为半固结砂砾岩, 水化学类型 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型为主; 朱家沟组含水岩组位于盆地边界断裂下降盘, 含水层岩性为溶蚀发育的灰质砾岩, 水化学类型复杂多变。现代大气降水作为地下水主要补给来源, 蒸发浓缩作用, 方解石、白云石和石膏溶解及人类污染活动参与了地下水化学组分的形成。归纳总结 3 种古近系不同类型含水岩组地下水富集规律: 构造裂隙控水模式、半固结含水岩组裂隙孔隙水富集模式和灰质砾岩裂隙岩溶水富集模式。

关键词: 大汶口组; 朱家沟组; 灰质砾岩; 水文地质; 富水模式

中图分类号: P641 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2019)02-0316-12

Characteristics of the Paleogene water-bearing Formation in the middle and upper reaches of the Dawenhe River basin, Shandong Province

ZHOU Le, LIU Yuanqing, LI Wei, ZHU Qingjun, LI Fengzhe,
LÜ Lin, DENG Qijun, MA Xuemei, HE Jin

(Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Baoding 071051, Hebei, China)

Abstract: Using data of 5 drill holes of the Dawenkou and the Zhujiagou Formation, combined with data from 55 drill holes obtained in hydrogeology survey, the authors studied the characteristics of distribution, physical properties, water-bearing condition, hydrochemistry and groundwater recharge cycle of the Paleogene water-bearing formation in the middle and upper reaches of the Dawenhe River basin. The results show that the watery upper section of Dawenkou Formation is distributed in the north of the basin. The lithology of the aquifer is semi-consolidated conglomerate with $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ type. The Zhujiagou Formation is distributed in the depression plate of boundary faults, with good dissolution calcareous conglomerate aquifer media and complex hydrochemical types. Modern precipitation is the main source of groundwater recharge. Evaporation and concentration, dissolution of calcite,

收稿日期: 2018-09-05; 改回日期: 2018-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41240021)和中国地质调查局水工环地质调查项目(DD20160289, DD20190259)联合资助。

作者简介: 周乐, 女, 1987 年生, 矿产普查与勘探专业, 硕士, 工程师, 主要从事于基岩山区地下水勘查理论研究;

E-mail: zhoule_wei@sina.com。

通讯作者: 刘元晴, 男, 1988 年, 工程师, 矿产普查与勘探专业, 从事于基岩山区水文地质调查工作; E-mail: lyq198896@126.com。

dolomite and gypsum and polluting activities have participated in the formation of hydrochemical components. This paper sums up 3 groundwater enrichment patterns of different Paleogene water-bearing formations: water controlled by structural fractures, fracture and pore water enrichment in semi-consolidated water-bearing formation, and fractured karst water enrichment in calcareous conglomerate.

Key words: Dawenkou Formation; Zhujiagou Formation; calcareous conglomerate; hydrogeology; groundwater enrichment pattern

About the first author: ZHOU Le, female, born in 1987, master, engineer, engages in theoretical study of groundwater exploration in bedrock mountain area; E-mail: zhoule_wei@sina.com

About the corresponding: LIU Yuanqing, male, born in 1988, engineer, engages in Hydrogeology survey in bedrock mountain area; E-mail: lyq198896@126.com.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41240021) and China Geological Survey (No. DD20160289, DD20190259).

1 引言

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(刘光亚,1979)。中国北方蕴藏岩溶水资源量 $108.8 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (张宗祜等,2004),由于其具有水量大,动态稳定,水质良好的特点,因此作为基岩地下水主要类型长期在北方城市供水、工农业生产,特别是能源基地建设中发挥着支撑性作用(梁永平等,2010;袁道先,2010)。根据地形地貌特征和含水岩组类型,将山东省划分为鲁西北平原松散岩类水文地质区,鲁中南中低山丘陵碳酸盐岩类为主水文地质区和鲁东低山丘陵松散岩、碎屑岩、变质岩类水文地质区(康凤新等,2010)。大汶河流域中上游地区处于鲁中南水文地质区内,前人对区内岩溶水文地质条件、岩溶水系统模式划分、岩溶发育控制因素等做了详细论述(奚德荫,1988;孙逊等,2010;彭凯等,2010;潘晓东等,2014)。相比较,区内莱芜盆地、大汶口盆地腹部下伏的古近系碎屑岩孔隙裂隙含水岩组研究较为局限,传统认识单井涌水量小于 $100 \text{ m}^3/\text{d}$,长期作为弱富水含水层形式出现,不具有供水意义(山东省地质局第一水文地质队,1979;康凤新等,2010;姜福红等,2017)。

2016年中国地质调查局启动的沂蒙山革命老区1:5万水文地质调查项目,在大汶河流域中上游鲁中南山区实施钻井24眼,涌水量达到 $14650 \text{ m}^3/\text{d}$,直接解决2.2万缺水群众饮水困难,切实完成地质调查项目与解决群众缺水问题的有机结合。对于莱芜盆地西北缘富水较好的古近系大汶口组半固结碎屑岩裂隙孔隙水补给、循环特征、含水岩组成因、地下水富集模式进行了分析(刘元晴等,2018)。

基于此,结合5眼古近系不同类型探采结合钻孔及55眼原有井孔现场调查资料、水化学及同位素测试数据对古近系含水岩组水文地质特征及地下水赋存规律进行系统总结,为后期古近系地层钻井找水,含水岩组富水性划分及水文地质图件编绘提供借鉴。

2 研究区概况

2.1 气象水文

山东省泰安市和莱芜市位于鲁中泰沂山区,地势总体四周高,中间低,北、东、南三面环山,中部为低缓起伏的平原,盆地内部开阔,海拔130~200 m。地处中纬度内陆地带,属温带大陆性气候,四季分明,春季干燥多风,夏季炎热多雨(高峰等,2016)。多年平均降水量为760.0 mm。区内河流主要为大汶河水系,总体为北源南流。汶河水系主要干流在莱芜市境内为牟汶河,泰安肥城市境内为大汶河,主要支流有瀛汶河、石汶河、柴汶河等,受季节性降水及蒸发量影响,水系流量及水位变化大。

2.2 地质构造

研究区位于鲁西隆起区之蒙山—蒙阴断隆和新甫山—莱芜断隆毗连位置。区内包含莱芜盆地、大汶口盆地、新甫山凸起、蒙山凸起等次一级构造单元(张增奇等,2014)。新生代以来,鲁西隆起形成了NW向断裂系和大汶口盆地、莱芜盆地等受NW向断裂控制的“北断南超”拉分盆地群(许立青等,2016)。泰安—口镇断裂、铜冶店—大王庄断裂构成莱芜盆地北部边界;故县断裂、华家岭断裂和南留断裂构成大汶口盆地北部边界。两个新生代沉积盆地内部均沉积了一套巨厚含膏岩的山麓洪积相—

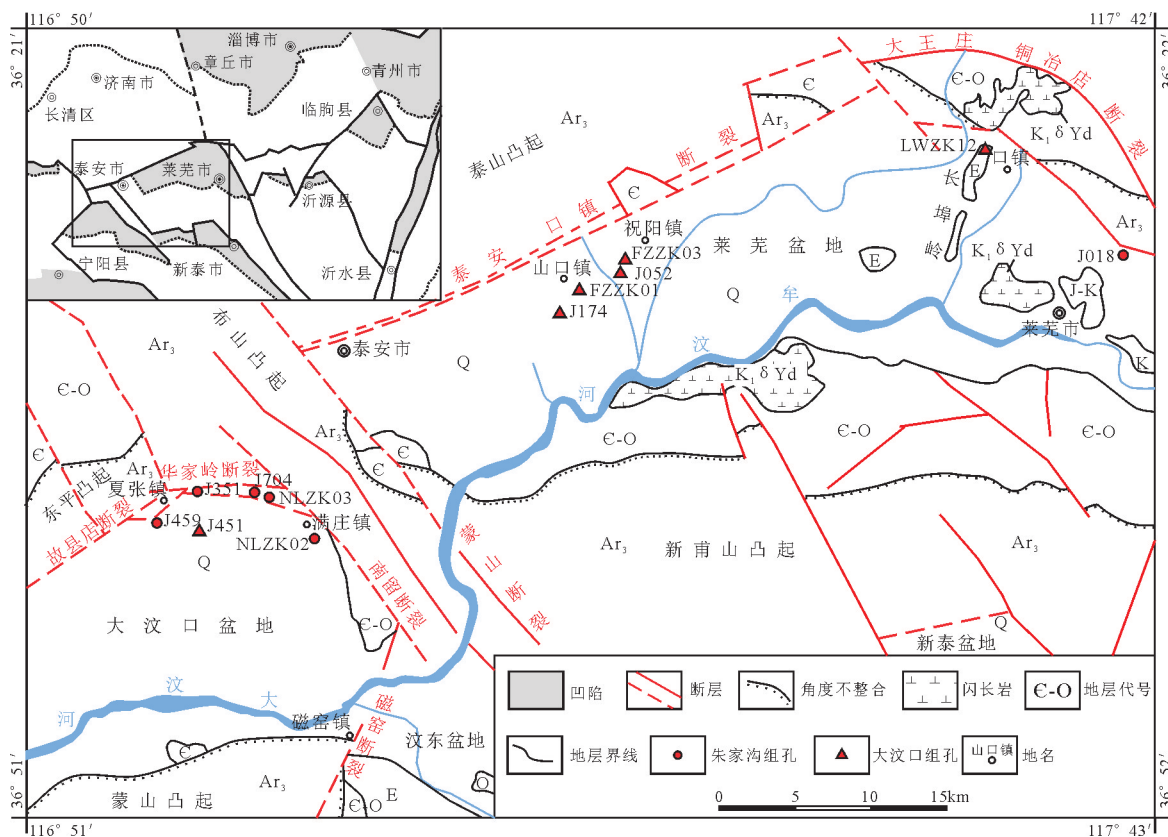


图1 研究区构造位置图

Fig.1 Tectonic location of the study area

河湖相碎屑岩官庄群地层,自下而上分为常路组(E_1c)、朱家沟组(E_2z)及大汶口组(E_{2-3d}) (大汶口盆地缺失常路组),覆盖在由寒武系奥陶系碳酸盐岩组成的倾向北的单斜构造之上(图1)。岩溶水为区内最主要地下水类型,赋存在两盆地南部山区及北部断裂带附近的寒武系和奥陶系含水层中。与盆地外围广布的太古宙岩浆岩、变质岩含水岩组一起接受大气降水入渗补给,地下水向盆地方向径流,形成对盆地内部隐伏岩溶水及古近系碎屑岩孔隙裂隙含水层的持续补给。本文所研究的古近系大汶口组含水岩组大面积分布在盆地内部;朱家沟组含水岩组则多沿盆地边界断裂呈条带状展布。

3 含水岩组水文地质特征

3.1 岩性特征

大汶口组下段(E_{2-3d}^f)地层主要分布在莱芜盆地口镇一方下镇方向,野外调查及LW-ZK12钻探结果显示,岩性主要为黄褐色砂岩夹泥岩,胶结程度高,岩心多呈长柱状,在构造不发育位置,该套地

层贫水。

富水性较好的主要位于大汶口组上段(E_{2-3d}^f)半固结含水岩组,以山口北村FZ-ZK01钻孔岩心为例,钻孔26~46 m,地层岩性为半固结的灰色粉砂岩、粉砂质砾岩,弱含水,与第四系潜水连通。100~205 m,含水岩组岩性为弱固结-半固结浅灰色灰质砾岩、砂砾岩与粉砂岩、泥质粉砂岩互层,主要出水层段(图2a),岩心不完整,砂砾石碎屑成分为碳酸盐岩(图2b),分选一般,磨圆度较好,砾石表面可见碳酸盐岩泥晶,部分砾石保留了原岩发育的溶孔溶洞,局部充填碳酸盐岩泥晶胶结物。

朱家沟组(E_2z)为山麓洪积相沉积的一套巨厚层的灰质砾岩。岩性灰褐色灰质粗-中砾岩为主,不显层理,基本不见夹层,砾石成分以古生代灰岩为主,占90%,分选差,粒径一般为10~20 cm(山东省地质调查院,2014)。以实施的NL-ZK02、NL-ZK03钻孔岩心结合野外井孔调查结果显示,该套砾岩垂向上溶蚀发育深度100 m以浅,规模不尽相同(图2c);溶蚀孔洞由于砾间胶结物溶蚀以及砾屑

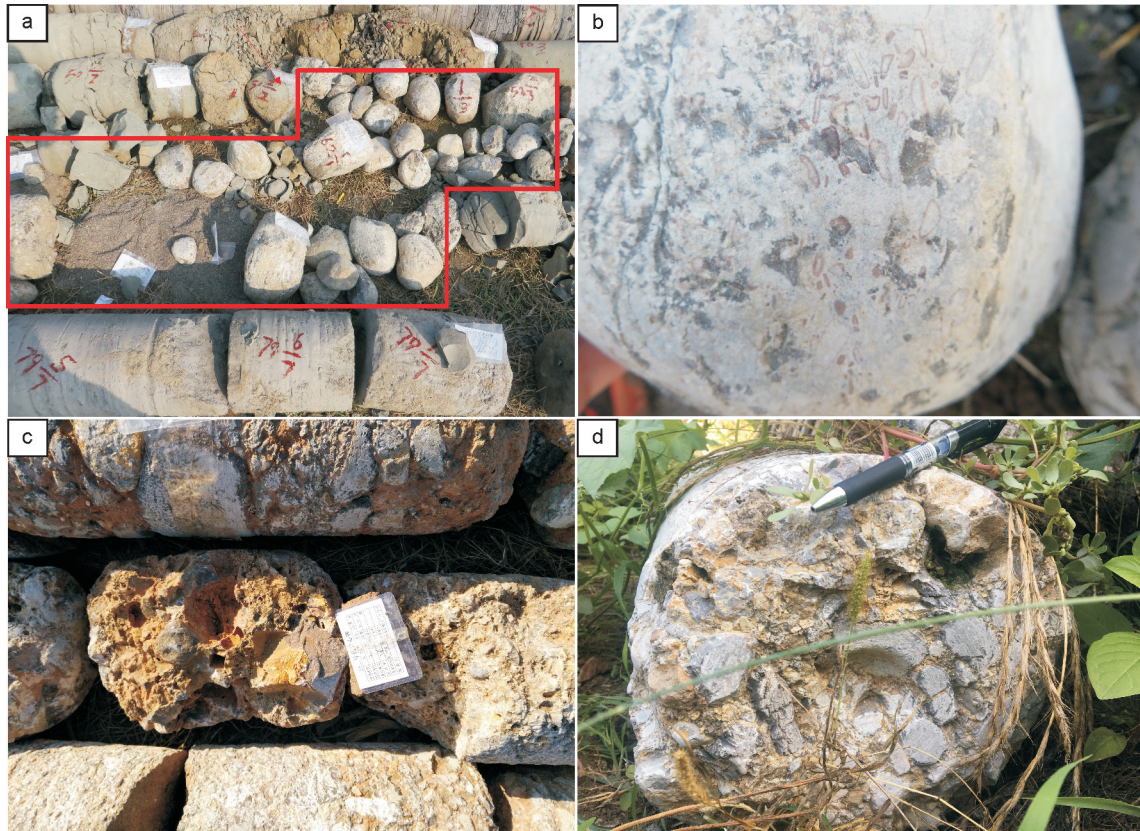


图2 古近系含水岩组主要出水层段岩性特征

a—大汶口组上段半固结砂砾岩(FZ-ZK01 钻孔深度段:160.8~178m);b—大汶口组上段的成分为紫竹叶砾屑灰岩的砾石;c—溶蚀发育的朱家沟组灰质砾岩(NL-ZK02 钻孔深度段:70.0~73.1m);d—朱家沟组砾岩溶蚀孔洞(J481 钻孔,深度不详)

Fig.2 Lithological characteristics of main water production interval of the Paleogene water-bearing Formation

a— Semi-consolidated sandy conglomerate in the upper section of the Dawenkou Formation (drill hole FZ-ZK01, 160.8~178.0m in depth);

b— Gravel of gravelly limestone in the upper section of the Dawenkou Formation;

c— Calcareous conglomerate with good dissolution in the Zhuajiagou Formation (drill hole NL-ZK02, 70.0~73.1m in depth);

d— The dissolution hole of calcareous conglomerate in the Zhujiagou Formation (well J481, depth unknown)

崩落形成,形状不规则(图2d)。

3.2 分布特征

由于莱芜盆地和大汶口盆地都发育在北升南断的断裂南侧的断陷内,边界断裂呈弧形,古近纪表现为同沉积断裂性质(李守军等,2003)。中晚始新世是郯庐断裂右旋活动最强烈的时期,其沉积速率及扭张量均较大,莱芜盆地和大汶口盆地边界断裂受此影响断裂活动加剧,沿盆地边界断裂发育了一系列的山麓洪积扇,形成类似于磨拉石建造的朱家沟组厚层砾岩,向盆地内部方向相变尖灭。晚始新世至渐新世时期,断裂活动变缓,沉积趋于稳定,进入湖盆发育阶段,盆地中沉积了一套以湖相泥灰岩、泥页岩、细粉砂岩为主的大汶口组湖相沉积物,分布广泛,沉积物粒度向湖盆中心变细。

本次研究结果显示,朱家沟组厚层砾岩靠近陈梁坡断裂、华家岭断裂和故县店断裂下降盘方向分布。富水性较好的大汶口组半固结粉砂岩及粉砂质砾岩则多位于盆地腹部偏北方向,靠近边界断裂处(表1)。

3.3 富水性特征

大汶口组上段半固结含水岩组由于具有以孔隙水为主的裂隙孔隙水特征,其富水性主要受岩相和岩性控制,变化较大。盆地北缘含水岩组粒度较粗,较盆地腹部地层更富水。以FZ-ZK01钻孔为例,最大降深 $s=32.76$ m,计算单井涌水量 $Q=1080$ m³/d,而赵家店J451井含水岩组岩性粒度相对细粒,最大降深 $s=10$ m,单井涌水量 $Q=240$ m³/d,富水性差异较大。相比较,朱家沟组灰质砾岩含水岩组富水

表1 研究区古近系含水岩组调查点统计表
Table 1 Investigation statistics of the Paleogene water-bearing Formation

井号	地理位置	井深/m	水位埋深/m	地层代号	含水岩组岩性	含水岩组厚度/m	折算单井涌水量/(m ³ /d)	所处构造位置
LW-ZK12	口镇上水河村	80.1	7.5	E ₂₋₃ d ^b	破碎的砂砾岩夹黄褐色砂岩	6.6	338.8	莱芜盆地北缘
FZ-ZK01	山口镇山口北村	222	21.7	E ₂₋₃ d ^l	半固结灰色粉砂岩、粉砂质砾岩	105	1080	莱芜盆地西北缘
FZ-ZK03	祝阳镇石龙头村	181.5	18.9	E ₂₋₃ d ^l		65	960	莱芜盆地西北缘
J052	祝阳镇石龙头村	260	7.54	E ₂₋₃ d ^l		80	600	莱芜盆地西北缘
J174	山口镇周王庄村	150	/	E ₂₋₃ d ^l		50	960	莱芜盆地腹部
J451	夏张镇赵家店村	120	6.54	E ₂₋₃ d ^l	半固结泥质粉砂岩	20	240	大汶口盆地腹部
J018	张家洼镇孝义楼村	180	25.0	E _{2z}		180	1200	陈梁坡断裂下降盘
J351	夏张镇刘家庄村	260	55.8	E _{2z}		230	1200	华家岭断裂下降盘
J459	夏张镇贾家岗村	100	9.4	E _{2z}	灰质砾岩,砾石分选、磨圆较差,钙质胶结	95	720	故县店断裂下降盘
J704	满庄镇黄家庄村	185	41.21	E _{2z}		180	1200	华家岭断裂下降盘
NL-ZK03	满庄镇黄家庄村	204.1	34.24	E _{2z}		159	1024	华家岭断裂下降盘
NL-ZK02	满庄镇北留村	282	2.6	E _{2z}		279	1728	南留断裂下降盘

性较为均一,主要受构造及溶蚀发育情况控制,平均单井涌水量 Q 可达1200 m³/d,以NL-ZK02钻孔为例,最大降深 $s=16.77$ m,计算单井涌水量 $Q=1728$ m³/d(表1),在最新《水文地质编图规范(1:50000)》中属于水量“极丰富”定性描述范畴。

4 水化学特征及同位素特征

4.1 样品采集与测试

为分析区内古近系含水岩组地下水化学特征、水化学类型及成因。结合研究区水文地质条件,对莱芜盆地和大汶口盆地不同类型含水岩组进行样品采集,取样位置见图1。在现场采样工作中使用美国in-Situ公司生产的SMARTROLLMP多参数水质分析仪现场测定水中pH、水温、电导率等参数;样品经0.45 μm滤膜过滤后置于清洗过的聚乙烯瓶,阴阳离子分装。阳离子样品用HNO₃酸化至pH值<2后保存,阴离子样品原样低温保存。水化学分析在山东省地矿工程勘察院实验测试中心进行测试,同位素样品D和¹⁸O的测试由核工业地质分析测试研究中心完成,同位素³H委托青岛地质工程勘察院试验测试中心完成。所测水样的阴阳离子电荷平衡误差在5%以内,δD的误差为±0.6‰,δ¹⁸O的误差为±0.2‰。

4.2 水化学参数特征

根据测试结果(表2),区内古近系含水岩组地

下水阳离子以Ca²⁺为主,其次为Mg²⁺和Na⁺+K⁺;主要阴离子为HCO₃⁻,其次为SO₄²⁻和Cl⁻;地下水pH值处于7.2~8.0,为中性或偏碱性。大汶口组下段裂隙水化学类型为HCO₃-Ca型水,TDS值较低,为498 mg/L;大汶口组上段半固结裂隙水化学类型以HCO₃-Ca·Mg型水为主,TDS值变化范围较大,处在370~904 mg/L范围内,TDS均值600 mg/L;朱家沟组灰质砾岩裂隙岩溶水水化学类型较为复杂,以HCO₃·SO₄-Ca·Mg型水偏多,TDS值变化较为集中,均值500 mg/L。结合研究区水化学三线图(图3),区内古近系地下水样点随含水岩组变化,于图中聚集分异特征明显,且主要体现在阴离子的相对含量上面;朱家沟组阳离子组分分布较为分散,表明其地下水补给来源具多种途径。结合古近系地下水样品Gibbs图(孙厚云等,2018;王雨山等,2018)可以看出,样点均处在“岩石风化型”区域内(图4),说明水-岩相互作用是形成古近系不同含水岩组地下水化学分异的主要原因。

由于研究区古近系含水层与碳酸盐岩含水层多为断层直接接触,因此对地下水组分有影响的矿物主要为:方解石、白云石和石膏。如图5a所示,绝大部分样点位于1:1直线以上,说明地下水化学形成的主要作用为碳酸盐岩矿物的溶解,位于直线以下的朱家沟组J351、J704与NL-ZK02样点则伴随有盐岩、石膏、芒硝等蒸发岩溶解作用(洪涛等,

表2 研究区地下水水化学及同位素数据表

Table 2 Water chemistry and isotopic data of groundwater in the study area

原始编号	孔深/m	含水岩组符号	阳离子/(mg/L)			阴离子/(mg/L)			TDS/(mg/L)	pH	水化学类型	δD V-SMOW/‰	$\delta^{18}O$ T/TU
			Na+K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻					
LW-ZK12	80.1	E _{2,3d} ³	8.5	121.9	20.2	50.9	38.6	257.9	108.1	498.0	7.4	HCO ₃ -Ca	
FZ-ZK01	222		17.9	88.8	31.1	18.4	63.8	334.7	2.2	395.0	7.7	HCO ₃ -Ca·Mg	-62.8 -7.9 7.8
FZ-ZK03	181.5		19.4	78.0	28.2	17.3	29.1	376.1	1.0	370.0	7.5	HCO ₃ -Ca·Mg	
J052	260	E _{2,3d} ¹	52.2	177.6	27.0	82.9	141.2	463.1	45.60	770.0	7.5	HCO ₃ -SO ₄ -Ca	-55.8 -7.2 20.1
J174	150		33.3	112.6	30.0	62.8	91.3	282.2	87.1	575.0	7.3	HCO ₃ -Ca·Mg	
J451	120		/	263	/	/	/	268.5	/	904.0	7.3	/	
J018	180		30.5	203.2	17.9	82.8	126.9	345.8	187.9	839.0	7.3	HCO ₃ -Ca	-57.0 -7.1 5.3
J351	260		26.8	97.2	22.4	72.3	98.9	153.3	89.7	500.0	8.0	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca·Mg	
J459	100	E _{2z}	/	158.0	/	/	/	286.8	/	673.0	7.3	/	
J704	185		53.9	143.5	23.6	117.0	149.4	273.0	35.8	670.0	7.5	HCO ₃ ·Cl·SO ₄ -Ca	
NL-ZK03	204.1		22.7	50.8	43.2	45.3	78.0	184.3	7.4	351.8	7.5	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca·Mg	-53.9 -7.3 11.7
NL-ZK02	282		64.4	77.5	64.6	91.5	158.2	298.5	6.69	625.1	7.2	HCO ₃ ·SO ₄ -Mg·Ca	

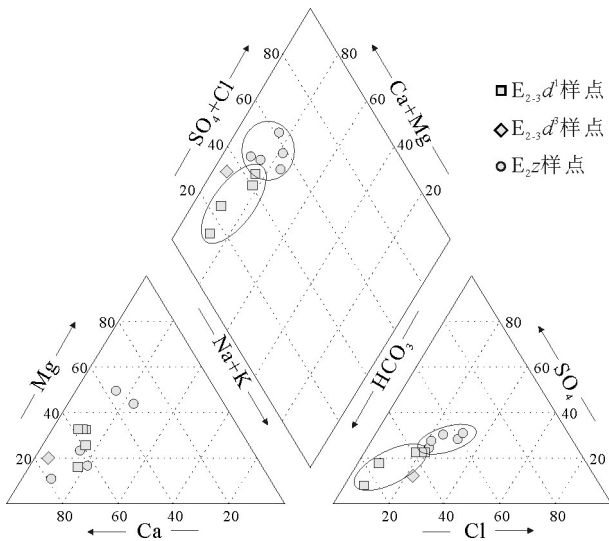


图3 地下水样品 piper 图

Fig.3 Piper diagram of groundwater samples

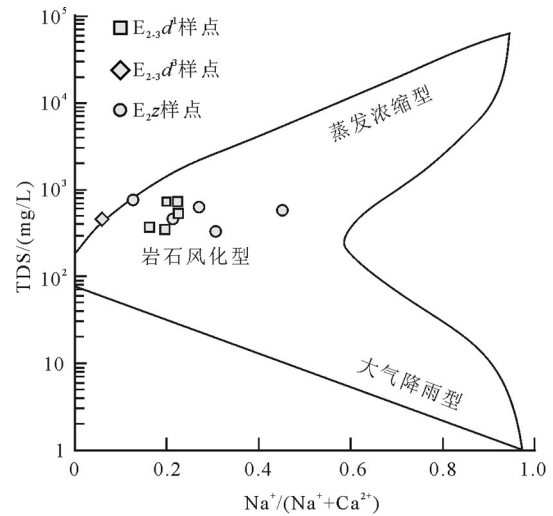


图4 地下水样品 Gibbs 图

Fig.4 Gibbs diagram of groundwater samples

2016)。如图 5b 所示,样品点近似平行于 1:1 关系线附近表明地下水中 Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻和 SO₄²⁻主要来源于碳酸盐岩和石膏溶解,而石膏溶解是地下水中 SO₄²⁻的主要来源(杨敏等,2018);偏离关系线以上的样点,以 J018 样点为例,结合 NO₃⁻较高的含量,表明有污染物或者其他水体的混入(万利勤等,2008;袁建飞等,2016)。如图 5c 所示,1:2 和 1:4 关系线分别代表方解石、白云石的溶解平衡。大部分样点分布在两平衡线之间,并偏向 1:2 平衡线,说明岩溶水中的 Ca²⁺、HCO₃⁻主要来源于方解石溶解,其次为白云石溶解(赵占锋等,2012;王珺瑜等,2017)。朱

家沟组含水层中 NL-ZK02 和 NL-ZK03 样点对于 1:4 关系线的向下偏离,说明地下水中 HCO₃⁻存在外源补偿,结合地质条件分析,推测为南留断裂下盘太古宙变质岩中铝硅酸盐矿物风化溶解所致。对于该套含水岩层中 J018 样点对 1:2 关系线的向上偏离,说明有外源 Ca²⁺补给地下水,推测为人类活动污染所致。

4.3 同位素特征

氢氧稳定同位素 D、¹⁸O 是构成天然水分子的主要部分,现已广泛应用到区域地下水补给来源及水化学演化研究中(Pradeep et al.,2005;Titia et al.,2009;殷秀兰等,2017)。结合氦盈余(*d-excess*)(*d*=

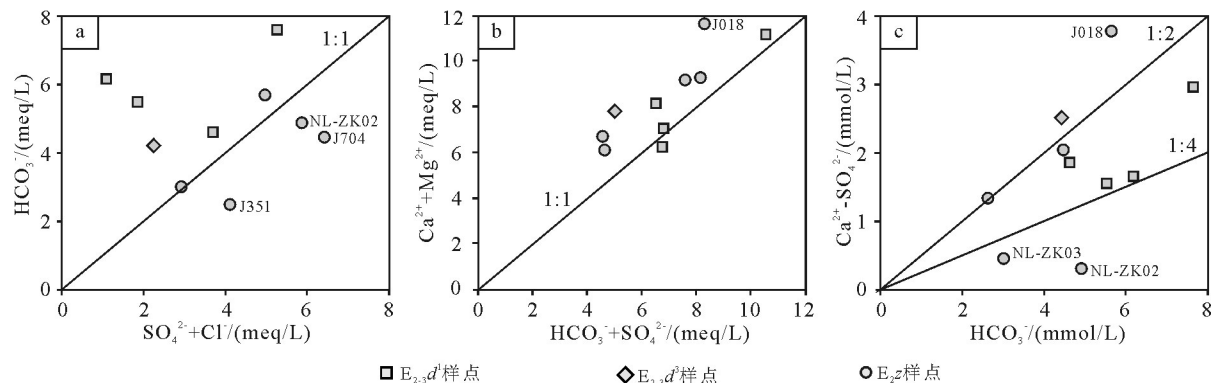
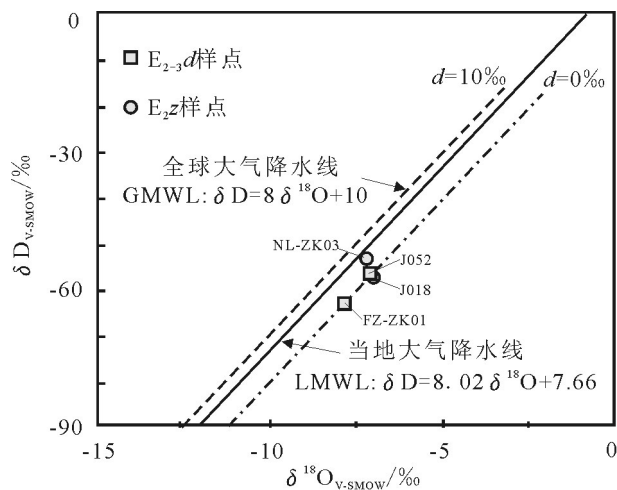


图5 地下水化学参数关系图

Fig.5 Relation diagram of hydrochemical parameters

$\delta D-8\delta^{18}O$)进行研究,可以对地下水循环特征做出有效、准确的判别(尹观等,2001)。 $d-excess < 10$,代表了大气降水除蒸发作用影响外,还广泛存在氧同位素交换的水-岩相互作用,即地下水滞留时间越长,氧同位素交换程度越高,则地下水的 $d-excess$ 值越小(尹观等,2000;2008)。氙是氢的天然放射性同位素,常用来定性估算地下水年龄的范围(Clark et al., 1997;李霞等,2017)。氙浓度在实验室检测精度下,即 $^3H < 0.8TU$,可认定为地下水补给来源于1952年之前; $^3H 0.8-4$ 认为1952年前地下水中存在近代补给新水的混入; $^3H 5-15TU$,该水样为现代水(年龄小于5~10年); $^3H 15-30TU$,该水样为现代水,且存在少部分60~70年代核爆氙地下水的混入。

图6为研究区古近系大汶口组裂隙孔隙水和朱家沟组裂隙岩溶水 δD 和 $\delta^{18}O$ 散点关系图。从图中可以看出,取样点均分布在全球大气降水线(GMWL)(浦俊兵,2013)和当地大气降水线(LMWL)(刘元晴等,2018)以下,表明降水补给地下水过程中,存在一定程度的蒸发(Clark et al., 1997;Dotsika et al.,2010)。表2可见,朱家沟组灰质砾岩含水层样点 J018 与 NL-ZK03 的氙含量分别为 5.3TU 和 11.7TU,介于5~15TU之间,属于现代水范畴;大汶口组上段 FZ-ZK01 和 J052 的氙含量分别为 7.8TU 和 20.1TU,说明 FZ-ZK01 样点水属于现代水,在 J052 现代水中混入少部分核爆氙地下水。大汶口组上段样点 FZ-ZK01 和 J052 的 $d-excess$ 值计算结果分别为 0.4 和 1.8;朱家沟组样点 J018 和 NL-ZK03 的 $d-excess$ 值计算结果分别为 -0.2 和 4.5。说明大气降水在补给大汶口组及部分朱家沟组地下

图6 研究区 δD 和 $\delta^{18}O$ 的散点关系图Fig.6 Scatter diagram between δD and $\delta^{18}O$ in the study area

水(J018样点)过程中,除经历蒸发作用外,还发生着强烈的水-岩相互作用。

5 地下水赋存规律讨论

区内古近系地下水含水岩组可归纳3种地下水赋存规律:构造裂隙控水模式、半固结含水岩组裂隙孔隙水富集模式、灰质砾岩裂隙岩溶水富集模式。

5.1 构造裂隙控水模式

在新构造运动NE向挤压应力作用下,莱芜盆地内部始新世和渐新世沉积地层普遍遭受明显的褶皱变形和剥蚀作用(山东省地质调查院,2014),表现为口镇一方下镇方向形成一系列东西向展布的宽缓复式背斜,背斜岩性为残留的大汶口组下段($E_{2-3}d$)砂泥岩层,上覆第四系厚度不足3m,潜水和地下水资源均匮乏,俗称“长埠岭”地区(图1,图

7)。新构造运动使得莱芜盆地内部形成一系列南北向断层,向北延伸消匿于控盆的泰安—口镇断裂带,该系列断层破坏了古近系地层的完整性,使得第四系潜水与古近系裂隙水之间发生水力联系(刘建茂等,2004);同时,也可作为导水断层,使得盆地北部基岩区地下水持续补给盆地内部。因此,利用地球物理探测方法,寻找第四系厚度大、南北向导水断裂发育地段作为该地区固结程度较好的古近系砂泥岩找水有利靶区。

以2016年在莱芜市口镇上水河村实施的钻孔LWZK12为例,成井深度为80.1 m,高密度解译及钻探结果显示,南北向断裂发育。该井第四系厚13.8 m,主要出水层位为40.5~47.1 m的砂砾岩层,岩心柱状,胶结程度较高,局部受断裂挤压作用形成杂砾岩、杂砂岩,计算单井涌水量 $Q=338.8\text{ m}^3/\text{d}$ (图8)。由于 NO_3^- 含量较高,该井可作农灌及部分工业使用。

5.2 半固结合水岩组裂隙孔隙水富集模式

古新世以来,莱芜盆地北部泰安—口镇断裂活动强烈,古近系大汶口组沉积时期,在断裂下降盘附近发育一系列山麓洪积扇厚层砂砾岩,砂砾石灰质成分。受喜马拉雅运动抬升影响,砂砾岩长期处在早成岩A期,即砂砾岩多成弱固结—半固结状态,碎屑颗粒多成点状接触,仅在砂砾碎屑颗粒表面见纤维状、栉壳状碳酸盐岩胶结物环边,原生孔隙保存较好。部分砂砾石继承的溶孔、溶洞与碎屑颗粒

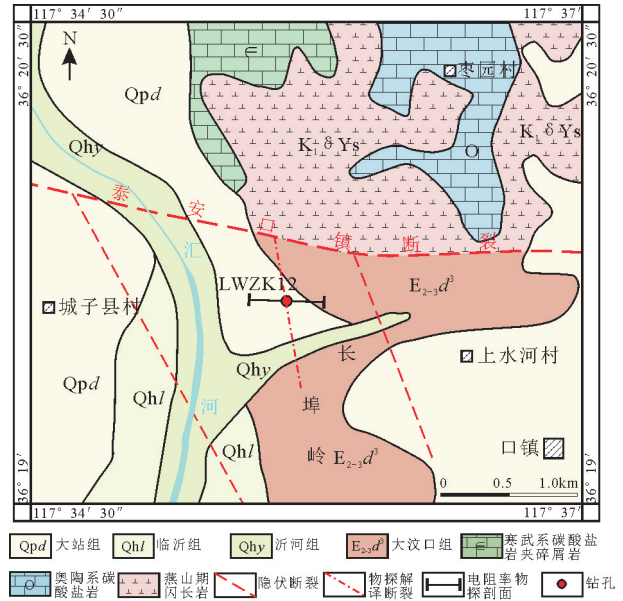


图7 上水河村周边水文地质图
Fig.7 Hydrogeological map of Shangshuihe area

间的原生孔隙均为地下水的赋存提供充足空间。在盆地内部,湖泊沉积岩相变化快,该套砂砾岩垂向上的与之上覆与下伏的粉砂质泥岩、泥页岩以及侧向上与泥页岩相变带,均构成蓄水构造隔水边界(刘元晴等,2018)。

泰安—口镇断裂以北分布大面积太古界岩浆岩及变质岩区,广泛接受大气降水,构成古近系地下水补给区;泰安—口镇断裂南北两支所夹碳酸盐岩与古近系含水岩组直接断层接触,由于处在断裂

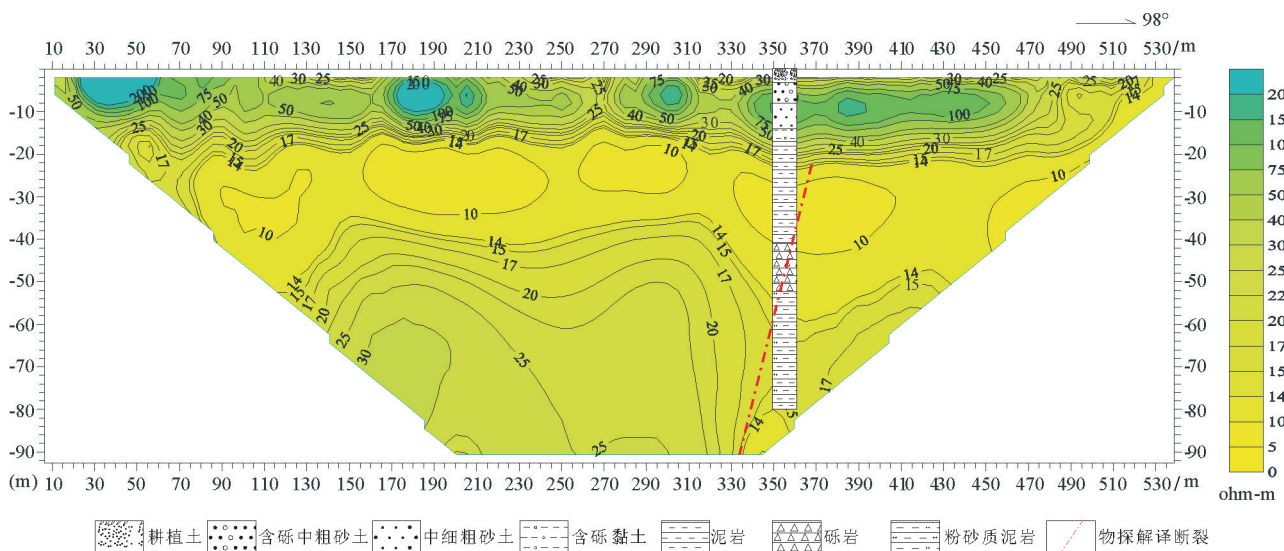


图8 上水河LW-ZK12钻孔高密度剖面图
Fig.8 High density profile of LW-ZK12 drill hole in Shangshuihe

带内部,构造裂隙及溶蚀发育,构成区域地下水的强径流带,据氡同位素分析结果显示,地下水循环更新快,为古近系半固结含水岩组提供充沛地下水补给来源(图9)(刘元晴等,2018)。

以2017年施工的山口北村FZ-ZK01为例,井深222 m,主要出水层段为100~205 m,含水岩组岩性为弱固结-半固结浅灰色灰质砾岩、砂砾岩与粉砂岩、泥质粉砂岩互层。岩心不完整,砂砾石碎屑成分为碳酸盐岩,计算单井涌水量 $Q=1080\text{ m}^3/\text{d}$,富水的古近系半固结含水层兼具裂隙与孔隙水含水层特性,以孔隙水为主。

5.3 灰质砾岩裂隙岩溶水富集模式

前文所述,莱芜盆地及大汶口盆地边界断裂附近分布大厚度朱家沟组灰质砾岩。其与马家沟群灰岩以断层或角度不整合接触。砾石成分多为中生界碳酸盐岩,分选性较差,钙、泥质胶结。钙质胶结物矿物组分为泥晶方解石,与砾石所含矿物成分相同,该类岩石中的岩溶形态与灰岩中的岩溶相近,其胶结物和砾石基本同步溶蚀。泥质胶结物矿物成分以粘土矿物为主,吸水后具微胀性,易软化崩解,形成类岩溶孔洞。盆地边界断裂具多期活动特征,断裂附近小规模构造裂隙发育,使得断裂周边地层具有不均匀透水性。盆地外围大面积太古界岩浆岩及变质岩区接受的大气降水,渗漏补给盆地内部的中生界碳酸盐岩及朱家沟组灰质砾岩含水层。当砾岩胶结充填不完全时,地下水沿充填物

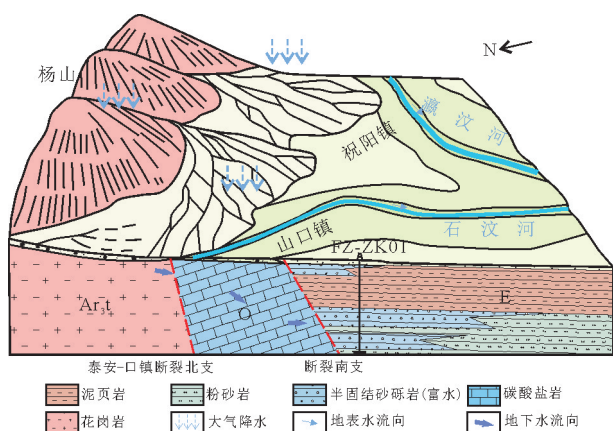


图9 古近系半固结含水岩组地下水富集模式图

Fig.9 Groundwater enrichment pattern in the Paleogene semi-consolidated water-bearing formation

中孔隙渗流过程中,溶解钙质成分的同时,泥质成分也被软化,形成沿砾石间充填物发育的不规则状溶孔。

以2017年北留村实施NL-ZK02钻孔为例,井深282.0 m。含水层岩性为灰质砾岩,块状构造;砾石分选、磨圆差,砾径3~12 cm;基底式胶结,胶结物上部为钙质,下部泥质成分增多。在7~9 m,30~32 m,66~73 m,83~90 m不同深度段发育溶蚀孔洞,为主要出水层段,计算单井涌水量 $Q=1728\text{ m}^3/\text{d}$,该类型地下水兼具裂隙水与岩溶水特性(图10,图11)。

由古近系地下水富集规律可知,利用地球物理探测方法,寻找第四系厚度大、南北向导水断裂发育地段作为莱芜盆地“长埠岭”地区固结程度较好的古近系砂泥岩找水有利靶区;地下水补给充足的盆地北缘100 m以深半固结砂砾岩层及边界断裂下降盘100 m以浅灰质砾岩溶蚀发育层段均可作为古近系含水岩组找水有利区域。

6 结 论

(1)富水性较好的大汶口组上段半固结含水岩组主要分布在盆地腹部偏北位置,埋深通常大于100 m,含水层岩性为弱固结-半固结粉砂岩、砂砾岩,受控于含水介质粒度,富水性差异较大,单井涌

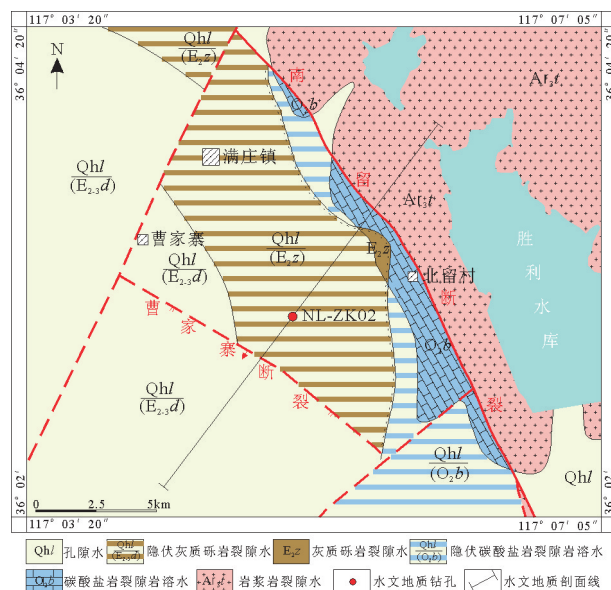


图10 北留村钻孔(NL-ZK02)水文地质图

Fig.10 Hydrogeological map of NL-ZK02 drill hole in Beiliu

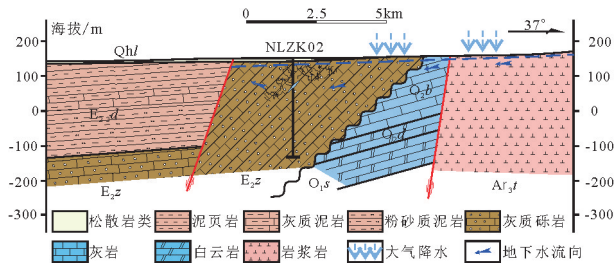


图 11 北留村钻孔(NL-ZK02)水文地质剖面图

Fig.11 Hydrogeological profile of NL-ZK02 drill hole in Beiliu

水量 240~1080 m³/d, 含水岩组具裂隙与孔隙水特征, 以孔隙水为主。朱家沟组含水岩组分布在盆地边界断裂下降盘, 含水层岩性为巨厚层灰质砾岩, 富水性受构造及溶蚀发育程度控制, 溶蚀多发育在 100 m 以浅, 水量“极丰富”, 平均单井涌水量 1200 m³/d, 地下水兼具裂隙水与岩溶水性质。

(2) 古近系不同含水岩组水化学类型及阴离子分异特征明显, 现代大气降水在补给地下水过程中除蒸发浓缩外, 方解石、白云石和石膏溶解为地下水化学成分形成的主要作用。

(3) 归纳 3 种古近系含水岩组地下水赋存规律: 构造裂隙控水模式, 半固结含水岩组裂隙孔隙水富集模式, 灰质砾岩裂隙岩溶水富集模式。

致谢: 野外地质调查得到了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”项目全体成员及山东地矿工程勘察院、山东鲁南地质工程勘察院项目组成员大力支持和帮助, 在此一并表示感谢。

Reference

Clark I D, Fritz P. 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology[M]. New York: Lewis Publishers: 1-312.

Dotsika E, Lykoudis S, Poutoukis D. 2010. Spatial distribution of the isotopic composition of precipitation and spring water in Greece[J]. Global and Planetary Change, 71(3/4): 141-149.

First Hydrogeology team of Shandong Geological Bureau. 1979. Report on the Regional Hydrogeological Survey in Tai'an(scale 1: 200,000) [R]. Jinan:First Hydrogeology team of Shandong Geological Bureau (in Chinese).

Gao Feng, Wang Zhentao, Jin Fengshan, Jin Fengshan, Zhang Xianyao, Liu shanjun. 2016. Risk assessment of karst collapse in the Laiwu of Shandong Province[J]. China Population, Resources and Environment. 26(11):359-362 (in Chinese with English abstract).

Hong Tao, Xie Yunqiu, Yu Qiwen, Zhao Yi, Zhao Guangshuai, Yang Lichao. 2016. Hydrochemical Characteristics study and genetic analysis of groundwater in a key region of the Wumeng Mountain, southwestern China[J]. Earth and Environment, 44(1):11-19(in Chinese with English abstract).

Jiang Fuhong, Liu Wen. 2017. Study on underground water rich property in Carbonate rock in Water Shortage Area in Yimeng Area[J]. Land and Resources in Shandong Province, 33(7):61-65 (in Chinese with English abstract).

Kang Fengxin, Xu Junxiang, Zhang Zhongxiang. 2010. Groundwater resources and its potential in Shandong Province[J]. Land and Resources in Shandong Province, 26(8):4-12(in Chinese with English abstract).

Li Shoujun, Zhen Deshun, Cai Jingong, Yang Yonghong, Sun Xiwen, Yang Pingong. 2003. Sedimentary characteristics and controlling factors of basins in the north Shandong and southwest Shandong in Palaeogene[J]. Geological Review, 49(3):225-232(in Chinese with English abstract).

Li Xia, Chen Wenfang, Wan Liqin, Xia Feixue, Zhang Yibo, Yuan Mengli. 2017. An analysis of hydrochemical characteristics and environmental isotopic characteristics of the groundwater in the Bedrock Mountain area in northern Songxian County, Henan Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 38(3): 403-412(in Chinese with English abstract).

Liang Yongping, Wang Weitai. 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 Guangya. 1979. Bedrock Groundwater[M]. Beijing:Geological Publishing House(in Chinese).

Liu Jianmao, Zheng Wenzhong. 2004. Neotectonic fault control on karst sinking in Laiwu iron ore field[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 17 (4):282-286(in Chinese with English abstract).

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[J]. Acta Geoscientica Sinica, 1-12(in Chinese with English abstract).

Pan Xiaodong, Tang Jiansheng, Su Chuntian. 2014. Karst groundwater system in central and southern Shandong province—A case in Daiyue district of Tai'an[J]. Journal of Guilin University of Technology, 34(1):39-44(in Chinese with English abstract).

Peng Kai, Zhao Youmei, Li Lan. 2010. Controlling factors for karst development in middle and south part of Shandong Province[J]. Land and Resources in Shandong Province, 26 (10):26-30(in Chinese with English abstract).

Pradeep K, Joel R G, Klaus F O. 2005. Isotopes in the Water Cycle: Past, Present and Future of a Developing Science[M]. Springer-Verlag New York Inc: 271-287.

- Pu Junbing. 2013. Hydrogen and oxygen isotope geochemistry of karst groundwater in Chongqing[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(6): 713–722(in Chinese with English abstract).
- Shandong Geological Survey Institute. 2014. Regional geological survey of Laiwu and Fan Zhen maps(scale 1:50,000) [R]. Jinan: Shandong Geological Survey Institute(in Chinese).
- Sun Houyun, Mao Qigui, Wei Xiaofeng, Zhang Huiqiong, Xi Yuze. 2018. Hydrogeochemical characteristics and formation evolutionary mechanism of the groundwater system in the Hami basin[J]. *Geology in China*, 45(6): 1128–1141(in Chinese with English abstract).
- Sun Xun, Wang Kehong, Sun Qitang, Yang Xijian. 2010. Types and distribution of Karst fissure water in central and southern Shandong province[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, (2):52–56(in Chinese with English abstract).
- Titia P, Kent N, Kurt K. 2009. Using stable isotopes and hydraulic head data to investigate groundwater recharge and discharge in a fractured rock aquifer[J]. *Journal of Hydrology*, 366: 35–45.
- Wan Liqin, Xu Huizhen, Yin Xiulan, Li Wengpeng, Wang Qingbing, Daun Xiuming, Gao Zhandong. 2008. Formation of hydrochemistry components of karst groundwater in Jinan[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 3:61–64(in Chinese with English abstract).
- Wang Junyu, Wang Jiale, Jin Menggui. 2017. Hydrochemical characteristics and formation causes of karst water in Jinan Spring Catchment[J]. *Earth Science*, 42(5):821–831(in Chinese with English abstract).
- Wang Yushan, Cheng Xuxue, Zhang Mengnan, Qi Xiaofan. 2018. Hydrochemical characteristics and formation mechanisms of Malian River in Yellow River basin during dry season[J]. *Environmental Chemistry*, 37(1):164–172(in Chinese with English abstract).
- Xi Demeng. 1988. The Karst Hydrogeological Conditions and its characteristics in the central–south area of Shandong Province[J]. *Carsologica Sinica*, 7(3):43–48(in Chinese with English abstract).
- Xu Liqing, Li Sanzhong, Guo Lingli, Suo Yanhui, Cao Xianzhi, Dai Linming, Wang Pengcheng. 2016. Impaction of the Tan–Lu fault zone on uplift of the Luxi Rise: Constraints from apatite fission track thermochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, (4):1153–1170 (in Chinese with English abstract).
- Yang Min, Lu Yaoru, Zhang Fenge, Zhang Sheng, Yin Miying, Wu Guoqing. 2018. Hydrochemical evolution and geochemical simulation of karst groundwater in Liulin springs[J]. *South to North Water Transfers and Water Science and Technology*, 16(1): 127–134(in Chinese with English abstract).
- Yin Guan, Fan Xiao, Guo Jianqiang, Yang Junyi. 2000. Isotope Tracer on water cycle system in Jiuzhaigou, Sichuan[J]. *Acta Geographica Sinica*, 55(4): 487–494(in Chinese with English abstract).
- Yin Guan, Ni Shijun. 2001. Deuterium excess parameter evolution in ground water[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(4): 409–411(in Chinese with English abstract).
- Yin Guan, Ni Shijun, Gao Zhiyou, Shi Zeming, Yan Qiushi. 2008. Variation of isotope compositions and deuterium excess of brines in Sichuan basin[J]. *Journal of Mineral and Rock*, 28(2): 56–62(in Chinese with English abstract).
- Yin Xiulan, Wang Qingbing, Feng Wei. 2017. Hydro– chemical and isotopic study of the karst spring catchment in Jinan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(7): 1651–1660(in Chinese with English abstract).
- Yuan Daoxian. 2010. The situation and tasks for northern karst research of our country[J]. *Carsologica Sinica*, 29 (3):219–221(in Chinese with English abstract).
- Yuan Jianfei, Deng Shiguo, Xu Fen, Tang Yeqi, Li Pengyue. 2016. The multivariate statistical analysis of chemical characteristics and influencing factors of karst groundwater in the northern part of Bijie City, Guizhou Province[J]. *Geology in China*, 43(4):1446–1456(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zengqi, Zhang Chengji, Wang Shijin, Liu Shucui, Wang Laiming. 2014. Views on classification and contrast of tectonic units in strata in Shandong Province[J]. *Land and Resources in Shandong Province*. 30(3):1–23(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zonghu, Li Lierong. 2004. Groundwater Resource of China[M]. Beijing: SinoMaps Press(in Chinese).
- Zhao Zhanfeng, Ou Lu, Qin Dajun, Teng Zhaoxia, Dong Yongmei. 2012. Factors controlling hydrochemical characteristics of karstic water in Jinan[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 7:31–37(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 高峰,王振涛,靳丰山,张宪尧,刘善军. 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(11):359–362.
- 洪涛,谢运球,喻崎雯,赵一,赵光帅,杨丽超. 2016. 乌蒙山重点地区地下水水化学特征及成因分析[J]. *地球与环境*, 44(1):11–19.
- 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.
- 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.
- 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[J]. *地质论评*, 49(3): 225–232.
- 李霞,陈文芳,万利勤,夏飞雪,张一博,袁梦丽. 2017. 河南嵩县北部基岩山区地下水水化学特征和环境同位素特征分析[J]. *地球学报*, 38(3):403–412.
- 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.
- 刘光亚. 1979. 基岩地下水[M]. 北京:地质出版社.
- 刘建茂,郑文忠. 2004. 新构造断裂对莱芜铁矿田中岩溶地面塌陷的控制作用[J]. *地质找矿论丛*, 17(4):282–286.
- 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[J]. 地球学报, 39(6): 737-748.
- 潘晓东, 唐建生, 苏春田. 2014. 鲁中南地区岩溶水系统模式——以泰安市岱岳区为例[J]. 桂林理工大学学报, 34(1): 39-44.
- 彭凯, 赵有美, 李岚. 2010. 鲁中南岩溶发育的控制因素[J]. 山东国土资源, 26(10): 26-30.
- 蒲俊兵. 2013. 重庆岩溶地下水氢氧稳定同位素地球化学特征[J]. 地球学报, 34(6): 713-722.
- 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 1:200,000)[R]. 济南: 山东省地质局第一水文地质队.
- 山东省地质调查院. 2014. 莱芜幅、范镇幅区域地质调查报告(比例尺 1:50,000) [R]. 济南: 山东省地质调查院.
- 孙厚云, 毛启贵, 卫晓峰, 张会琼, 蕙玉泽. 2018. 哈密盆地地下水系统水化学特征及形成演化[J]. 中国地质, 45(6): 1128-1141.
- 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[J]. 工程勘察, (2): 52-56.
- 万利勤, 徐慧珍, 殷秀兰, 李文鹏, 王庆兵, 段秀铭, 高赞东. 2008. 济南岩溶地下水化学成分的形成[J]. 水文地质工程地质, 3: 61-64.
- 王珺瑜, 王家乐, 靳孟贵. 2017. 济南泉域岩溶水水化学特征及其成因[J]. 地球科学, 42(5): 821-831.
- 王雨山, 程旭学, 张梦南, 祁晓凡. 2018. 黄河流域马莲河枯水期水化学特征及形成机制[J]. 环境化学, 37(1): 164-172.
- 奚德荫. 1988. 鲁中南地区岩溶水文地质条件及其特征[J]. 中国岩溶, 7(3): 43-48.
- 许立青, 李三忠, 郭玲莉, 索艳慧, 曹现志, 戴黎明, 王鹏程, 惠格格. 2016. 郟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, (4): 1153-1170.
- 杨敏, 卢耀如, 张凤娥, 张胜, 殷密英, 吴国庆. 2018. 柳林泉域岩溶水化学演化及地球化学模拟[J]. 南水北调与水利科技, 16(1): 127-134.
- 殷秀兰, 王庆兵, 凤蔚. 2017. 济南岩溶泉域泉群区水化学与环境同位素研究[J]. 地质学报, 91(7): 1651-1660.
- 尹观, 范晓, 郭建强, 杨俊义. 2000. 四川九寨沟水循环系统的同位素示踪[J]. 地理学报, 55(4): 487-494.
- 尹观, 倪师军, 高志友, 施泽明, 闫秋实. 2008. 四川盆地卤水同位素组成及氡过量参数演化规律[J]. 矿物岩石, 28(2): 56-62.
- 尹观, 倪师军. 2001. 地下水氡过量参数的演化[J]. 矿物岩石地球化学通报, 20(4): 409-411.
- 袁道先. 2010. 我国北方岩溶研究的形势和任务[J]. 中国岩溶, 29(3): 219-221.
- 袁建飞, 邓国仕, 徐芬, 唐业旗, 李鹏岳. 2016. 毕节市北部岩溶地下水水化学特征及影响因素的多元统计分析[J]. 中国岩溶, 43(4): 1446-1455.
- 张增奇, 张成基, 王世进, 刘书才, 王来明. 2014. 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, 30(3): 1-23.
- 张宗祜, 李烈荣. 2004. 中国地下水资源[M]. 北京: 中国地图出版社.
- 赵占锋, 欧璐, 秦大军, 滕朝霞, 董咏梅. 2012. 济南岩溶水水化学特征及影响因素[J]. 中国农村水利水电, 7: 31-37.