www.cagsbulletin.com

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

刘元晴¹⁾,周乐¹⁾,李伟¹⁾,朱庆俊¹⁾,徐蒙²⁾, 吕琳¹⁾,邓启军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察研究院,山东济南 250014

摘 要:通过岩心、测井、地下水常规离子组分及氢氧同位素样品测试对分布在莱芜盆地西北缘古近系半固结含水岩组物性、水化学特征及地下水补给循环特征进行研究;结合古新世以来盆地沉积演化史及含水 层成岩阶段划分,分析半固结含水层地下水富集模式。结果表明,埋深100m以下的古近系砂砾岩含水层, 长期处在早成岩 A 期,呈弱固结-半固结状态,兼具裂隙与孔隙含水层特性,且以孔隙为主。与碳酸盐岩含 水层水化学特征相似,水化学类型为 HCO₃-Ca•Mg 型,现代大气降水作为地下水主要补给来源,蒸发浓缩 作用,碳酸盐岩、石膏及盐岩溶解参与了地下水化学组分形成。在莱芜盆地北部边界断裂处,部分断裂所夹 断块可作为古近系含水岩组应急找水靶区。

关键词: 莱芜盆地; 半固结含水岩组; 早成岩 A 期; 沉积演化史; 水化学特征 中图分类号: P641.6; P641.72 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2018.080801

The Characteristics and Genetic Analysis of the Paleogene Semi-consolidated Water-bearing Formation on the Northwestern Margin of Laiwu Basin, Shandong Province

LIU Yuan-qing¹⁾, ZHOU Le¹⁾, LI Wei¹⁾, ZHU Qing-jun¹⁾, XU Meng²⁾, LÜ Lin¹⁾, DENG Qi-jun¹⁾, HE Jin¹⁾, WANG Xin-feng¹⁾

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

Abstract: The physical properties and characteristics of hydrochemistry and groundwater recharge cycle of the Paleogene semi-consolidated aquifer were recognized on the northwestern margin of Laiwu Basin based on core cataloging, logging, analyzing conventional ion components and hydrogen and oxygen isotopes. The model of groundwater enrichment in semi-consolidated aquifers was established in combination with the study of sedimentary evolution history since Paleocene and diagenesis stage division of the semi-consolidated aquifer. The results show that the Paleogene sand-gravel aquifer was in the early diagenetic stage A, which was buried more than 100 meters with the capacity of weak consolidation and semi-consolidation. The aquifer has both fracture and pore space characteristics, with the main space being pore space. The hydrochemical type is HCO₃-Ca•Mg, similar to the type of carbonate aquifers. Modern precipitation is the main source of groundwater recharge. Evaporation and concentration, dissolution of carbonate, gypsum and salt rocks participated in the formation of hydrochemical components. In the zone of boundary fault, some fracture blocks can be regarded as the emergency water exploration target area of Paleogene water bearing formation. **Key words:** Laiwu Basin; semi-consolidated water bearing formation; early diagenesis stage A; sedimentary

evolution history; hydrochemical characteristics

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

收稿日期: 2018-04-23; 改回日期: 2018-06-25; 网络首发日期: 2018-08-09。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: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。 通讯地址:071051,河北省保定市七一中路1305号。E-mail:lyq198896@126.com。

世界范围内,弱固结-半固结砂岩分布在我国 鄂尔多斯盆地东胜地区、松辽盆地钱家店铀矿床、 美国犹他东南部及科罗拉多高原地区,发育层系包 括二叠系、三叠系、侏罗系和白垩系地层。前人通 过岩相学、同位素、常量元素及稀土元素等方法对 该类砂岩的成因进行了分析(Beitler et al., 2005; 庞 雅庆等, 2007; 宋土顺等, 2014)。由于该类型砂岩具 有固结能力差、抗压能力低、孔隙度渗透率高的物 性特征,已被作为矿山地下水防治及矿山工程设计 等领域重点研究对象(张国奇等, 2017)。传统水文地 质学, 国内涉及弱固结-半固结碎屑岩含水层的研 究较少,由于其分布面积有限、含水边界不清,在 最新 1:50 000 水文地质图编制规范中,尚未出现 该类型含水岩组的划分及图面表示方法。国内学者 仅在研究河南嵩县北部基岩山区地下水化学特征时, 分析了该套浅层半固结层裂隙孔隙水化学特征及地 下水补给来源(李霞等, 2017)。1999年出版的美国地 下水图集首次将半固结砂岩含水层单独列出,并与 松散岩类含水层、砂岩含水层、碳酸盐岩含水层、 砂岩与碳酸盐岩互层含水层、玄武岩及其他类型岩 浆岩含水层组成北美地区 6 种不同含水介质的含水 层类型(Trapp and Meisler, 1992; Trapp, 1992; Miller and Renken, 1988; Miller, 1999).

本次研究区的莱芜盆地位于鲁中泰沂山区,地 势总体北高南低,北、东、南三面环山,中部为低 缓起伏的平原,西部开阔,海拔150~200 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。多年平均降水量为 760.0 mm。区内河流主要为汶河水系,总体为北源 南流。汶河水系主要干流为牟汶河,主要支流有瀛 汶河、石汶河等,受季节性降水及蒸发量影响,水 系流量及水位变化大(高峰等,2016)。

前人 1:20 万水文地质成果认为, 莱芜盆地古 近系为一套碎屑岩孔隙裂隙含水岩组, 水量贫乏, 富水性差, 不具供水意义(山东省地质局第一水文 地质队, 1979)。基于野外地质调查及物探定井工作 基础上, 中国地质调查局于 2017 年在莱芜盆地西 北缘山口北村和石龙头村成功实施了 ZK01 和 ZK02两口古近系水文地质钻孔, 对应井深222 m和 181.5 m。钻孔的实施有助于研究古近系半固结含水 层物性特征、主要富水层位, 求取含水层水文地质 参数。

由于莱芜盆地与松辽盆地钱家店地区、鄂尔多 斯盆地东胜地区、美国犹他东南部及沿海平原等地 区在大地构造属性、沉积演化和矿产资源条件等方 面存在差异,半固结砂砾岩在成因及对应含水层水 文地质特征等方面亦存在不同,因此有必要根据地 下水化学及稳定同位素测试数据,对地下水成因及 补给、循环特征进行研究。本文重点对盆地构造演 化史及成岩演化阶段进行了划分,并结合地下水补 给、循环特征对半固结砂砾岩地下水富集模式进行 了探讨。研究成果对我国东部新生代沉积盆地古近 系含水层富水性划分及水文地质图编制具一定指导 意义。

1 研究区概况

1.1 地质构造

新生代以来,鲁西隆起形成了 NW 向断裂系和 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)。莱芜盆地位于 鲁西隆起之新甫山—莱芜单斜断拱北部,盆地周边 及基底岩性为太古代所形成的变质花岗岩类,盆地 呈南升北陷格局。"左行左阶"走滑性质的泰安一口 镇断裂(F1)及大王庄—铜冶店断裂(F7)构成了莱芜 盆地北边界,盆地南部以角峪—石门官庄—沙王庄 断裂(F2)为界,盆地内沉积了一套巨厚的古近系湖 相砂页岩、砾岩及泥灰岩地层,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)。 研究区位于莱芜盆地西北缘,音频大地电磁(AMT) 反演,表明盆地北部泰安—口镇断裂由南北两支组 成。中部为寒武—奥陶系碳酸盐岩夹块,太古界花



F5-Yinjiazhuang fracture; F6-Gaozhuang fracture; F7-Dawangzhuang-Tongyedian fracture

岗岩类变质基底与该夹块以北支断裂接触;南支断裂下降盘为巨厚的古近系沉积地层(图 2)。

1.2 地层岩性

古新世以来, 莱芜盆地进入湖盆沉积, 水平方向上岩相变化快、岩性差异大; 垂向上多形成砂岩、 泥岩互层, 局部夹灰质砾岩及泥灰岩的沉积建造。 受边界断裂及内部构造格局影响, 盆地内部古近系 地层由北部泰安一口镇断裂南支及南部角峪一石门 官庄一沙王庄断裂围限。西北缘由老到新依次沉积 了常路组(E₁c)棕色砂泥岩夹砾岩, 朱家沟组(E₂z)灰 褐色厚层灰质砾岩, 大汶口组(E₂₋₃d)组灰色砂岩、泥 页岩夹泥灰岩地层, 下伏二叠系石盒子群长石石英 砂岩, 局部上覆新近系牛山组粘土岩(山东省地质 调查院, 2014)。

2 古近系半固结含水岩组新发现及其特征

2.1 含水岩组分布特征

2016—2018年,中国地质调查局在鲁中南山区 开展的1:5万水文地质调查工作,野外调查及取样 工作严格遵守《1:5万水文地质调查规范》进行。 经调查研究及成果梳理,如图3所示,富水条件较 好的古近系半固结含水岩组位于莱芜盆地西北缘, 近南北向姚庄断裂以西区域。近似平行于泰安—— 镇断裂南支,呈 NEE 向展布,南部以山口南村—吴 家庄—石龙头村为界,面积近12.0 km²。由表1可 见,水位埋深较浅,在7.54~19.8 m之间;含水岩组



200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800 2000 2200 2400 2600 2800 3000 3200 3400 3600 3800 4000 4200 4400 4600 4800 5000 5200 5400 距离/m





图 3 研究区水文地质及采样点分布图 Fig. 3 Hydrogeology in the study area and location of the sampling points

研究区古近系半固结含水岩组调查点统计表

Investigation statistics of the Paleogene semi-consolidated aquifer

Tuble 1 Investigation statistics of the Fareogene semi consolitated aquiter						
井点位置	原始编号	井深	折算涌水量/	水位埋深/标高	含水层埋深	调杏日期
)T VK	(m^3/d)	/m	/m	,,, <u>,</u> ,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,
祝阳镇石龙头村	J051	120	720	16.6/116.4	100~120	2017 年 8 月
祝阳镇石龙头村	J052	260	600	7.54/145.4	150~200	2017 年 8 月
祝阳镇东石汶村	J054	124	960	11.3/153.7	80~100	2017 年 8 月
祝阳镇西石汶村	J055	170	720	9.32/150.0	100~120, 150~170	2017年8月
山口镇夹河村	J078	95	288	17.2/141.8	70~80	2017年8月
祝阳镇大路官庄	J139	205	960	19.8/115.2	150~180	2017 年 8 月
山口镇机械厂	J149	140	1 440	不可测	>100	2017 年 8 月
山口镇苗林	J150	190	960	不可测	>100	2017 年 8 月
山口镇山口北村	J151	210	1 200	不可测	>100	2017 年 8 月
祝阳镇石龙头村	J289	60	480	13.9/142.3	50~60	2017年10月



表 1

Table 1



厚度不均,10~50m不等;且埋藏深度变化范围较大, 多数为100m以深。含水层的垂向分布的不均一性, 受古新世以来莱芜盆地湖相沉积体系相变影响。

2.2 含水岩组物性特征

以山口北村 ZK01 钻孔为例,结合钻探、测井 记录、现场岩性描述等原始资料对古近系富水层物 性特征进行分析。如图 4, ZK01 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。46—100 m,地层岩性为灰 色泥质粉砂岩、泥页岩,不含水,为局部相对隔水 层段,自然伽马测井,表现为较高的 API 值。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。富水,岩 心不完整,砂砾石碎屑成分为碳酸盐岩,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。砂砾岩层显示出高电阻率及低 API 值 特性,与粉砂岩、泥质粉砂岩夹层测井参数区分明 显。此层段整体表现为高自然电位特性。205 m以 深,地层岩性为灰色泥质粉砂岩,固结较好,不含 水,低电阻率、低自然电位、高 API 值特征,为相 对隔水层段。

现场抽水试验结果,ZK01 钻孔最大降深 s=32.76 m,计算单井涌水量 Q=1 080 m³/d,含水岩 组平均渗透系数 k=0.84 m/d,平均影响半径 R=233.36 m。综合含水岩组物性及水文地质参数特 征,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。

2.3 含水岩组水化学特征

2.3.1 样品采集与测试

为对照分析区内不同含水岩组类型地下水化 学特征,分析古近系地下水化学类型及成因。结合 研究区水文地质条件,沿地下水径流方向,对不同 类型含水岩组地下水进行取样测试,并着重对古近 系含水岩组进行加密取样,取样位置见图 3。水化 学分析在山东省地矿工程勘察院实验测试中心进行, 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‰。

2.3.2 水化学参数特征

由表 2 测试分析结果可以看出,研究区地下水 pH 值在 7.3~7.7 之间,为中性或偏碱性。盆地外围 补 给 区 岩 浆 岩 裂 隙 含 水 岩 组 水 化 学 类 型 为 HCO₃·SO₄-Ca 和 HCO₃·SO₄-Ca·Mg 型, TDS 均值 393 mg/L;与之断裂接触的隐伏碳酸盐岩裂隙溶洞

		水化学米
		Цч
	the study area	TDS/(mg/L)
究区地下水水化学及同位素数据表	y and isotopic data of groundwater in	阴离子/(mg/L)
表2 研:	ble 2 Water chemistr	阳离子/(mg/L)

	TTT I				17.80	17.80				20.06				7.80	
	$\delta^{18}O$	0W/%0			-7.4	-7.4				-7.2				-7.9	
	δD)MS-V			-54.2	-57.4				-55.8				-62.8	
	水化学类型		HCO ₃ ·SO ₄ -Ca	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca·Mg	HCO ₃ ·NO ₃ -Ca	HCO ₃ ·NO ₃ - Ca·Mg	HCO ₃ - Ca·Mg	NO ₃ - Ca	NO ₃ ·HCO ₃ ·Cl- Ca	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca	HCO ₃ - Ca·Mg	HCO ₃ ·NO ₃ -Ca	HCO ₃ ·NO ₃ - Ca·Mg	HCO ₃ - Ca·Mg	HCO ₃ - Ca·Mg
	H٩	Ы	7.7	7.6	7.5	7.6	7.6	7.3	7.4	7.5	7.5	7.5	7.6	7.7	7.5
rea	ng/L)	均值	0.00	0.066	401.6		1 355.0		423.0						
he study a	TDS/(n	数值	461.0	325.0	394.0	420.0	391.0	1 680.0	$1 \ 030.0$	770.0	415.0	556.0	394.0	395.0	370.0
lwater in t		NO_3^-	69.05	39.61	58.70	61.54	36.70	943.00	225.00	45.60	46.70	115.50	66.70	2.20	0.10
of ground	/(mg/L)	HCO_{3}^{-}	144.1	144.1	236.1	239.2	300.5	156.4	334.2	463.1	306.6	298.4	180.9	334.7	376.1
pic data	阴离子	${ m SO}_4^{2-}$	112.8	73.0	37.4	54.2	41.7	124.0	151.6	141.2	33.6	60.7	70.1	63.8	29.1
v and isoto		CI-	51.4	23.8	37.6	36.1	26.6	90.4	148.9	82.9	29.0	43.3	34.7	18.4	17.3
chemistry	(${ m Mg}^{2+}$	18.5	14.3	16.2	21.9	28.7	58.6	35.2	27.0	21.3	22.2	19.4	31.1	28.2
2 Water	觱子/(mg/L	Ca^{2+}	87.4	58.9	90.6	92.8	82.8	331.8	219.8	177.6	93.8	121.8	77.3	88.8	78.0
Table	H	$Na^{+}+K^{+}$	36.7	20.3	20.4	20.0	16.8	39.5	66.2	52.2	23.9	29.1	17.2	17.9	19.4
	含水岩	组类型	岩浆岩	岩浆岩	碳酸盐岩	碳酸盐岩	碳酸盐岩	第四系	第四系	古近系	古近系	古近系	古近系	古近系	古近系
	<u>제</u>] 涵 [Ľ		10	150	264	270	200	14	7	260	190	30	90	222	180
	国恰编号		J011	J042	J048	J077	J074	J148	J182	J052	J140	J289	J078	ZK01	ZK02
	取样抽占		户栗村农户	焦北村水厂	西张庄农田	山口镇水厂	东太平农田	施庄村农田	岔河村农田	石龙头南农户	大路官庄农田	石龙头养殖场	夹河村养殖场	山口北农田	石龙头农田



图 5 地下水样品 Piper 图 Fig. 5 Piper diagram of groundwater samples

含水岩组水化学类型为 HCO₃-Ca·Mg 型, TDS 均值 402 mg/L; 古近系半固结裂隙孔隙含水岩层水化学 类型较多, 且以 HCO₃-Ca·Mg 型为主, TDS 值变化范 围较大,在 370~770 mg/L 之间,均值 423 mg/L; 第 四系含水岩组水化学类型为 NO₃-Ca 型及 NO₃·HCO₃·Cl-Ca 型水, TDS 均值大于 1 000 mg/L。 不难看出,研究区地下水 pH 值及 TDS 均值随含水岩 组类型更迭(岩浆岩—碳酸盐岩—古近系—第四系含 水岩组方向)呈规律性变化,其中 pH 值逐渐降低, TDS 均值逐渐增大。结合研究区水化学三线图(图 5), 可以看出区内地下水阳离子以 Ca²⁺为主,其次为 Mg²⁺和 Na⁺+K⁺; 主要阴离子为 HCO₃和 SO₄²⁻。研究 区地下水化学类型随含水岩组岩性变化,于水化学 三线图中取样点聚集分异特征明显,且古近系半固结 裂隙孔隙水与碳酸盐岩裂隙溶洞水具有较为相似的 水化学性质。外源水的混入及补给途经的多样化造成 了古近系地下水 TDS 及 pH 测试结果值的分散,形成 多种水化学类型测试值。此外,根据野外取样点位置 信息反映,养殖业等人类活动造成了石龙头 J289、夹 河村 J078 等古近系部分取样点中 NO₅的高异常。

2.3.3 水化学成因分析

排除受人类活动影响的 J078 及 J289 井测试结 果,对区内古近系裂隙孔隙水与隐伏碳酸盐岩裂隙 溶洞水测试离子相关性进行统一分析。如图 5 所示, 古近系和碳酸盐岩地下水离子分布特征相近,不同 离子成分与TDS值总体呈现正相关关系;其中阴离 子 SO²⁻、Cl⁻、阳离子 Ca²⁺、Na⁺与 TDS 之间相关性 更为显著(图 6a, b), 相关系数分别为 r₁=0.91, r₂=0.99, r₃=0.99, r₄=0.98。以上表明, 古近系和碳酸 盐岩地下水化学成分受蒸发浓缩作用影响。若地下 水中溶解的 Ca2++Mg2+与 HCO3+SO4-毫克当量浓度 相等,说明以上离子主要来源于碳酸盐岩和石膏溶 解(Kumar et al., 2006; Venugopal et al., 2009), 结合 地下水样点[Ca²⁺]+[Mg²⁺]与[HCO₃]+[SO₄²⁻](meq/L)关 系图(图 6c)可以看出样点均多数分布在 1:1 关系曲 线附近,表明地下水中 Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃、 SO₄²⁻ 主要来源于碳酸盐岩和石膏的溶解, 石膏溶解 是地下水中 SO_4^2 的主要来源; 另外 $[Na^+]$ 与 [Cl](meq/L)关系图(图 6d)中,样点亦均多数分布在 1:1 关系曲线附近, 盐岩溶解则是水化学组分中 Na⁺ 和 Cl⁻的主要来源(Ma et al., 2011)。



Fig. 6 Relation diagram of hydrochemical parameters

3 成因讨论

3.1 沉积演化史

古近系以来鲁西地区处于南北向伸展状态,泰 安一口镇断裂强烈活动,南盘下降,北盘上升,在 中生代盆地基础上叠加了近东西向的莱芜新生代沉 积盆地,盆地沉降速率较高,面积变大,盆地内沉 积了巨厚的新生代地层(李临华,2009;山东省地质 调查院,2014)。

古新世常路组(E₁c)沉积时期,区内发育河流相 -浅湖相沉积体系。盆地内部除祝阳镇--水北街位置 一带的沉积中心发育一套泥灰岩外, 大面积湖盆则 形成以粉砂岩、泥岩为主的岩相组合。在盆地北部 边缘靠近边界断裂处,由于地形高差大,发育小范 围山麓洪积相,形成洪积相砾岩(图 7a)。始新世一 渐新世时期,由于盆地北部边界断裂活动加剧,盆 地持续下沉, 盆地边界地形高差增大, 沿边界发育 一系列类似于磨拉石建造的山麓洪积扇厚层砾岩。 该套砾岩厚度大,分布范围局限,砾石灰质成分为 主,分选差、磨圆一般,该套砾岩为朱家沟组(E₂z), 被后期大汶口组(E2-3d)地层覆盖。由于盆地持续稳 定下沉,湖盆水域面积达到最大,进入大汶口组沉 积时期。该时期断裂活动变缓, 沉积趋于稳定, 盆 地中充填了一套以湖相泥灰岩、泥页岩、细粉砂岩 为主的岩相组合,由南向北沉积厚度增加,仅在盆 地边缘形成小范围山麓洪积相灰质砂砾岩(图 7b)。 中新世以来,受喜马拉雅运动影响,莱芜盆地整体 抬升,湖泊萎缩,至中新世中晚期,盆地持续抬升, 湖泊消失,区内沉积以风化剥蚀为主。至全新世以 来,河流复苏,盆地内发育了一套 20~30 m 厚度第 四系河流相沉积体系(图 7c)。

3.2 成岩阶段划分

碎屑岩成岩作用是指碎屑沉积物沉积后转变 为沉积岩直至变质作用以前或因构造运动重新抬升 到地表遭受风化以前所发生的一切作用(朱筱敏, 2008)。根据碎屑沉积物所处的温度、压力、孔隙水 介质的 pH 值和 Eh 值,岩石矿物组合及结构构造等 因素的差异,又将成岩作用划分成同生成岩阶段、 早成岩阶段、中成岩阶段、晚成岩阶段和表生成岩 阶段(应凤祥等,2003)。成岩作用作为沉积盆地研究 的前沿,长期应用于含油气盆地勘探与开发领域 (张金亮等,2013)。

前文所述,中新世以来,受喜马拉雅构造影响, 莱芜盆地持续抬升,古近系地层上部碎屑沉积物上 覆第四系厚度为 20~30 m,且未发生埋藏深度持续 增大情况。除去因压实作用地层厚度缩小及中新世 以来古近系沉积表层风化剥蚀等因素,现阶段埋藏 深度(本次施工钻探深度小于 220 m 的含水岩组), 便是古近系地层上部碎屑沉积物埋藏深度最大值状 态。前人研究表明,在莱芜盆地 180~210 m 深度范



图 7 莱芜盆地古近系沉积演化剖面图 Fig. 7 Sedimentary evolution profile of Paleogene in Laiwu Basin

表 3 早成岩阶段划分标志 Table 3 Division symbols of the early diagenetic stage

早成岩	古地温	有机质成	押深	砂砾岩	砂砾岩中白生矿物	颗粒接	孔 附		
阶段		熟度	生体	固结程度	可吸引于自主可以	触类型	北欧大主		
▲ 甘田	<65°C	走山寺	<2 000 m	弱固结_半固结	未见石英加大边, 早	占状	百 生 引 階		
A 79] \05 G	15.44.200	<2 000 III	에미서 미서	期碳酸盐岩胶结环边	7.1.1.1	ML ICM			
ъ₩	65 85%	水出朝	2,000, 2,500 m	平田村 田村	可见石英加大边, 亮	上中 法中	原生孔隙、少		
D州 03~850	05~85 C	05~85℃ 十成然 20	2 000~2 300 m	十回扫-回扫	晶方解石胶结物	点叭-线扒	量次生孔隙		

围内,大地热流值 48.1 mW/m²,地温梯度 20.0 ℃/km(白嘉启等, 1998)。由此可得, 碎屑沉积 物在 200 m 埋深处, 地温值远小于 65 ℃。通过山 口北村 ZK01 钻孔岩心实物地质资料、岩性描述记 录,可以初步判断:古近系地层上部碎屑沉积物在 沉积伊始便在其上覆水体或沉积层重荷之下, 发生 水分排出、孔隙度降低、体积缩小的物理压实成岩 作用及少部分由于孔隙溶液矿物质沉淀胶结成岩作 用。结合表 3 的早成岩阶段划分标志(纪友亮等, 1995; Morad et al., 2000; 张金亮等, 2013), 可初步 判断本次钻探 220 m 以浅含水岩组均处在早成岩阶 段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、溶洞与碎屑颗粒间的 原生孔隙均可成为地下水的赋存场所。

3.3 地下水补给及循环特征

氢氧稳定同位素 D、¹⁸O 是构成天然水分子的 主要部分。自 20 世纪 50 年代初, 氢氧稳定同位素 示踪技术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)。从最后一次核爆试验至今, 经过 40 多年的热核爆氚已经被海洋吸收大幅度减少至 自然大气产物水平。由于地下水多源补给, 部分还 保存着核爆前的补给信息,多种信息的叠加和混合, 使得目前仅可定性推测地下水滞留时间(Clark and Fritz, 1997)。为了对地下水循环特征做出有效、准 确的判别,应结合氘盈余(d-excess)(d= δ D-8 δ ¹⁸O)进 行研究(尹观和倪师军, 2001)。 氘盈余反应全球大气 降水在蒸发-凝结过程中同位素分馏的差异程度 (Marfia et al., 2004; 蒲俊兵, 2013)。由于大气降水的 氚盈余 d-excess 总是恒定在一个很小的区间范围, 不受季节、高度等环境的影响,因此可被用来作为 水文地质研究中的一个重要因素。在大气降水补给 地下水后,水-岩相互作用使得水体中的氢氧同位 素与岩石发生交换。通常情况下,过低的围岩中氢 的化学组分含量,不足以影响水中δD值,但可以导 致水体中富含 δ^{18} O, 使得地下水相对于当地大气降 水的 d-excess 值有降低趋势。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)。

本文所用的氢氧同位素数据为莱芜盆地 2017 年度内多个不同监测站点 11 组大气降水测试数据 (表 4)、测试工作由核工业地质分析测试研究中心 完成。根据实测数据,用最小二乘法求得莱芜盆地 大气降水线(LMWL)公式为: δD=8.02δ¹⁸O+7.66,相 关系数 r=0.996。与全球大气降水线(GMWL)(蒲俊 兵, 2013)近于平行且有偏离。图 8 为研究区古近系 裂隙孔隙水与碳酸盐岩岩溶水 δD 和 δ¹⁸O 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)和当地大气降水线(LMWL)以下,表 明降水补给地下水过程中,存在一定程度的蒸发 (Clark and Fritz, 1997; Dotsika et al., 2010)。结合表 1, 碳酸盐岩岩溶水 δD 和 δ¹⁸O 值分别为-57.4‰ ~ -54.2‰和-7.4‰, 古近系水样品 J052 的 δD 和 δ¹⁸O 值分别为-55.8‰和-7.2‰,两者测试值相近,且于 图 8 中集中分布。相比较, 古近系 ZK01 水样点的 δD 和 δ^{18} O值分别为-62.8‰和-7.9‰,明显低于以上样 品测试值。说明碳酸盐岩样点与 J052 具有相同时 期、相近位置、相同径流过程的降水补给(Kendall and Mcdonnell, 1998), ZK01 有着不同的降水补给、 径流来源。

表 4 大气降水的 δD 和 δ¹⁸O 分析数据 Table 4 δD and δ¹⁸O analytical data of atmospheric precipitation

utiliospheric precipitation						
原始编号	δD	$\delta^{18}\mathrm{O}$		取样站点		
	V-SM	OW/‰				
YT-01	-18.0	-2.9	2017-04-16	莱芜城区		
YT-02	-11.6	-2.5	2017-04-16	莱芜城区		
YT-03	-28.1	-4.4	2017-04-16	莱芜城区		
YT-04	-32.5	-5.0	2017-04-16	莱芜城区		
YT-05	-11.8	-2.6	2017-05-22	莱芜城区		
YT-06	-42.1	-6.3	2017-06-23	莱芜城区		
YT-07	-78.9	-10.7	2017-07-15	莱芜城区		
YT-08	-83.0	-11.5	2017-08-19	莱芜城区		
YT-09	-81.2	-11.1	2017-08-19	莱芜寨里		
YT-10	-62.6	-9.1	2017-07-27	泰安徂徕山		
YT-11	-77.2	-10.1	2017-08-19	泰安满庄		



图 8 研究区 δD 和 δ¹⁸O 的散点关系图 Fig. 8 Scatter diagram between δD and δ¹⁸O in the study area

由表2可见,补给源相近的碳酸盐岩岩溶水与 J052 古近系水氚含量分别为17.80 TU和20.06 TU, 对应表5中15~30 TU的范围,即定性分析为现代 水(小于5~10年)补给,且存在少部分60~70年代核 爆氚地下水的混入。ZK01 古近系水氚含量为7.80, 介于5~15 TU之间,属现代水范畴。碳酸盐岩岩溶 水样点的*d*-excess 值通过计算分别为5.0和1.8;古 近系裂隙孔隙水*d*-excess 值计算结果分别为1.8和 0.4,相对较小。可以得出,大气降水对研究区地下 水补给过程中,除经历蒸发作用外,还发生着强 烈的水-岩相互作用。相对于碳酸盐岩含水岩组, 地下水在古近系含水岩组内滞留时间较长,循环 相对缓慢。

3.4 地下水富集模式

古新世以来,莱芜盆地北部泰安一口镇断裂活 动强烈,古近系常路组、朱家沟组及大汶口组沉积

表 5 地下水氚含量及年代定性对应表 Table 5 Qualitative corresponding table between tritium content and source age in groundwater

氚含量	年代定性				
<0.8 TU	次现代—1952年之前补给的地下水				
0.8~4 TU	1952年前补给与最近补给的混合水				
5~15 TU	现代水(小于 5~10 a)				
15~30 TU	存在核爆氚				
>30 TU	相当一部补给来自60~70年代补给的地下水				
>50 TU	主要为 60 年代补给				

时期,均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,呈弱固结-半 固结状态,孔隙发育。盆地内部,湖泊沉积岩相变 化快,垂向上,上覆与下伏的粉砂质泥岩、泥页岩; 侧向上,砂砾岩与泥页岩相变带均可构成蓄水构造 隔水边界。多期沉积的弱固结-半固结的洪积扇砂砾 岩原生孔隙及保留的母岩溶蚀孔洞,为地下水赋存 提供空间(图 9)。

泰安一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;泰安一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 带内部,构造裂隙及溶蚀发育,构成区域地下水的 强径流带,据氚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)。

3.5 盆地北缘有利区初选

重力勘探方法可以直观地反映出地质体分布、 断裂构造的展布以及深部构造特性等信息(马宗晋 等,2006;姜文亮等,2010)。根据图 10,研究区布格 重力异常平面图分析,区域重力场特征为:盆地区



图 9 古近系半固结含水岩组地下水富集模式图

Fig. 9 The model of groundwater enrichment in Paleogene semi-consolidated water-bearing formation



图 10 前旦区印宿里刀开市干面图 Fig. 10 The Bouguer gravity anomaly map in the investigation area

F3-姚庄断裂; F4-马庄断裂; F5-尹家庄断裂; F6-高庄断裂;
Ar₃t-太古界岩浆岩变质岩; E-古近系碎屑岩; C-O-寒武系一奥 陶系碳酸盐岩; O-奥陶系碳酸盐岩; K₁δYs-燕山期闪长岩 F3-Yaozhuang fracture; F4-Mazhuang fracture;
F5-Yinjiazhuang fracture; F6-Gaozhuang fracture;
Ar₃t-Archean magmatic metamorphic rocks; E-Paleogene clastic rocks; C-O-Cambrian & Ordovician carbonate rocks;
O-Ordovician carbonate rocks; K₁δYs-Yanshan Hercynian diorite

是低缓负重力场区,且重力场西北低、东南高;盆 地周边区域为波动正重力场区。在重力低的盆地西 北缘布格重力等值线呈密集带,水平梯度达到 6 mgal/km(1 mgal=1×10⁻⁵ m/s²),为莱芜盆地北部 边界泰安一口镇断裂快速活动的直观反映。通过古 近系岩(矿)石密度测定结果,结合野外调查结果, 可以很好反映出盆地内部古近系地层的空间分布轮 廓。即古近系地层沉积中心位于在山口镇一祝阳镇 一寨里镇,与北部边界断裂展布近似平行;古近系 沉积厚度向东南盆地腹部减薄,沿断裂带附近由于 地形高差大,多形成洪积扇砂砾岩沉积。

研究结果表明,富水性较好的古近系半固结裂隙孔隙含水岩组主要分布在姚庄断裂(F3)以西。姚 庄断裂以东,马庄断裂(F4)以西,未有钻探开采实例。前人1:5万区域地质调查证实,姚庄断裂(F3)、 马庄断裂(F4)、尹家庄断裂(F5)及高庄断裂(F6),均 形成于晚白垩世沉积时期,其中姚庄断裂、高庄断 裂为古近纪继承活动的同生正断层,靠近盆地北部 边界断裂处的F3、F6下降盘均接受洪积扇灰质砂 砾岩沉积;尹家庄断裂(F5)表现为张性正断层性质, 马庄断裂(F4)表现为先张性后压扭的力学性质,二 者均主要活动于新近纪时期,以上的断裂活动使得 近东西向展布的莱芜盆地内部形成"堑-垒"构造, 如图 10 所示。F3 与 F4 所夹断块、F6 断裂下降盘 由于半固结砂砾岩层埋藏较深,考虑到钻探取水成 本,未有开采价值的古近系含水岩组钻井分布。相 应的,F3 断层以西、F5 与 F6 断裂之间所夹"地垒", 半固结砂砾岩层埋藏浅,具进一步开采价值。F4 与 F5 所夹断块,由于后期 F4 力学反转,表现出断块 西端含半固结砂砾岩在内的地层发生翘倾,后期调 查结果表明,位于断块西侧的赵家汶村新施工深度 为 160 m 的 J040 钻孔,钻遇该套砂砾岩层,单井涌 水量 400 m³/d。以上表明,靠近莱芜盆地北部边界 断裂处,除姚庄断裂(F3)以西外,马庄断裂(F4) 与尹家庄(F5)断块西端、尹家庄断裂与高庄断裂(F6) 断块均可作为古近系含水岩组应急找水靶区。

4 结论

(1)莱芜盆地西北缘富水性较好的古近系半固结 砂砾岩含水岩组位于姚庄断裂以西,近似平行于泰 安一口镇断裂,呈 NEE 向展布,埋藏深度通常大于 100 m,兼具裂隙与孔隙水含水岩组特性,且以孔隙 水为主,建议划分成碎屑岩裂隙孔隙含水岩组。

(2)古近系半固结砂岩裂隙孔隙水与碳酸盐岩 裂隙溶洞水具有较为相似的水化学性质,水化学类 型为 HCO₃-Ca·Mg 型;现代大气降水作为研究区地 下水的主要补给来源,在地下水补给过程中,除经 历蒸发浓缩作用外,还发生着强烈的水-岩相互作 用。水化学组分中 Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃、SO₄²⁻主要 来源于碳酸盐岩和石膏的溶解,盐岩溶解则是 Na⁺ 和 Cl⁻的主要来源;相对于碳酸盐岩含水岩组,地下 水在古近系含水岩组内滞留时间较长,水-岩相互 作用强烈,循环相对缓慢。

(3)古新世以来, 莱芜盆地北部临近边界断裂处 在常路组、朱家沟组及大汶口组沉积时期, 均发育 了一系列山麓洪积相砂砾岩, 砂砾石为灰质成分; 中新世以来, 受喜山构造影响, 莱芜盆地持续抬升, 使得年代较新、埋藏较浅的砂砾岩长期处在早成岩 阶段 A 期; 岩石物性呈现弱固结-半固结状态, 具较 高孔隙度, 为地下水赋存提供充足空间。泰安一口 镇断裂带所夹碳酸盐岩作为地下水强径流区, 广泛 接受北部岩浆岩及变质岩区地下水补给, 并快速径 流补给古近系半固结砂砾岩含水层。

(4)结合莱芜盆地重力异常与盆地内部断裂活 动期次及力学性质研究,初步分析靠近莱芜盆地北 部边界断裂处,除姚庄断裂(F3)以西外,马庄断裂 (F4)与尹家庄断裂(F5)所夹断块西端、尹家庄断裂与 高庄断裂(F6)断块均可作为古近系含水岩组应急找 水靶区。 **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"项目组提供了工作支持与帮助,两位审稿专家 和编辑提供了宝贵意见,在此一并表示感谢!

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41240021), and China Geological Survey (No. DD20160289).

参考文献:

- 白嘉启, 王小凤, 冯向阳. 1998. 郯庐断裂带地温场研究[J]. 地 质力学学报, 4(1): 78-88.
- 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.
- 纪友亮,赵澄林,刘孟慧. 1995. 东濮凹陷沙河街组碎屑岩成岩 作用与有机质演化的关系[J]. 石油与天然气地质, 16(2): 149-154.
- 姜文亮, 张景发, 焦孟梅, 路静. 2010. 基于布格重力异常小波 多尺度分析方法研究首都圈地区构造特征[J]. 地质学报, 84(4): 457-465.
- 李临华. 2009. 鲁西中新生代盆地充填序列及盆地类型[J]. 油气 地质与采收率, 16(3): 50-53.
- 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.
- 马宗晋,高祥林,宋正范. 2006. 中国布格重力异常水平梯度图 的判读和构造解释[J]. 地球物理学报,49(1): 106-114.
- 庞雅庆,向伟东,李田港,陈晓林,夏毓亮. 2007. 钱家店铀矿 床漂白砂岩成因探讨[J]. 世界核地质科学, 24(3): 142-146.
- 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(比例尺 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.
- 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. 郑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,32(4):1153-1170.
- 股秀兰, 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 同位素组成及氘过量参数演化规律[J]. 矿物岩石, 28(2): 56-62.
- 尹观, 倪师军. 2001. 地下水氘过量参数的演化[J]. 矿物岩石地 球化学通报, 20(4): 409-411.

- 张国奇,吕晓磊,李东发,刘维福. 2017. 半固结砂岩含水层下 综放开采"两带"高度实测研究[J]. 煤炭科学技术,45(增刊 1):183-195.
- 张金亮,张鹏辉,谢俊,董紫睿,张明,丁芳,袁勇,李景哲. 2013.碎屑岩储集层成岩作用研究进展与展望[J].地球科 学进展,28(9):957-967.
- 朱筱敏. 2008. 沉积岩石学(第四版)[M]. 北京: 石油工业出版社.

References:

- BAI Jia-qi, WANG Xiao-feng, FENG Xiang-yang. 1998. The geothermal field around the Tancheng-Lujiang fault zone in east China[J]. Journal of Geomechanics, 4(1): 78-88(in Chinese with English abstract).
- BEITLER B, PARRY W T, CHAN M A. 2005. Fingerprints of fluid flow: Chemical diagenetic history of the Jurassic Navajo Sandstone, Southern Utah, USA[J]. Journal of Sedimentary Research, 75: 547-561.
- CLARK I D, FRITZ P. 1997. Environmental isotopes in Hydrogeology[M]. NewYork: 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.
- GAO Feng, WANG Zhen-tao, JIN Feng-shan, ZHANG Xian-yao, LIU Shan-jun. 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).
- JI You-liang, ZHAO Chen-lin, LIU Meng-hui. 1995. Diagenesis of clastic rocks in shahejie formation, Dongpu Depression and its relation to organic mature evalution[J]. Oil & Gas Geology, 16(2): 149-154(in Chinese with English abstract).
- JIANG Wen-liang, ZHANG Fa-jing, JIAO Meng-mei, LU Jing. 2010. Structural characteristics in the capital area using wavelet multi-scale method of Bouguer gravity anomaly[J]. Acta geologica Sinica, 84(4): 457-465(in Chinese with English abstract).
- KENDALL C, MCDONNELL J J. 1998. Isotope tracers in catchment hydrology[M]. Elsevier Science B.V: 158-161.
- KUMAR M, RMANATHAN, RAO M S. 2006. Identification and evaluation of hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Delhi, India[J]. Environmental Geology, 50: 1025-1039.
- LI Lin-hua. 2009. Mesozoic-Cenozoic sedimentary sequence and depositional basin types in western Shandong[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 16(3): 50-53(in Chinese with English abstract).
- LI Xia, CHEN Wen-fang, WAN Li-qin, XIA Fei-xue, ZHANG Yi-bo, YUAN Meng-li. 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).

- MA R, WANG Y X, SUN Z Y. 2011. Geochemical evolution of groundwater in carbonate aquifers in Taiyuan, northern China[J]. Applied Geochemistry, 26(5): 884-897.
- MA Zong-jin, GAO Xiang-lin, SONG Zheng-fan. 2006. Analysis and tectonic interpretation to the horizontal-gradient map calculated from Bouguer gravity data in the China mainland[J]. Chinese Journal of Geophysics, 49(1): 106-114(in Chinese with English abstract).
- MARFIA A, KRISHNAMURTHY R, ATEKWANA E. 2004. Isotopic and geochemical evolution of ground and surface waters in a karst dominated geological setting: a case study from Belize, Central America[J]. Applied Geochemistry, 19(6): 937-946.
- MILLER J A, RENKEN R A. 1988. Nomenclature of regional hydrogeologic units of the Southeastern Coastal Plain aquifer system[J]. Water-Resources Investigations Report: 1-21.
- MILLER J A. 1999. Ground Water Atlas of the United States-Introduction and National Summary[J]. USGS, HA-730.
- MORAD S, KETZER J M, DE ROS L F. 2000.Spatial and temporal distribution of diagenetic alterations in siliciclastic rocks: Implications of mass transfer in sedimentary basins[J]. Sedimentology, 47: 95-120.
- PANG Ya-qing, XIANG Wei-dong, LI Tian-gang, CHEN Xiao-lin, XIA Yu-liang. 2007. Disscussion on the origin of bleached sandstone of Qianjiadian uranium deposit[J]. World Nuclear Geoscience, 24(3): 142-146(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 Jun-bing. 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).
- SONG Tu-shun, LIU Li, WANG Yu-jie, LIU Na, YU Miao. 2014. Characteristics and genesis of the bleached Pisha sandstone in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 35(5): 679-684(in Chinese with English abstract).
- The First Hydrogeology Team of Shandong Geological Bureau. 1979. Report on the regional hydrogeological survey in Tai'an(scale 1: 200000)[R]. Jinan: The First Hydrogeology Team of Shandong Geological Bureau(in Chinese).
- TITIA P, KENT N, KURT K. 2009. Using stable isotopes and hydraulic head data toinvestigate groundwater recharge and discharge in a fractured rock aquifer[J]. Journal of Hydrology, 366: 35-45.

- TRAPP H, MEISLER H. 1992. The regional aquifer system underlying the Northern Atlantic Coastal Plain in parts of North Carolina, Virgmia, Maryland, Delaware, New Jersey, and New York-Summary: U.S.[J]. Regional Aquifer System Analysis, A1-A28.
- TRAPP H. 1992. Hydrogeologic framework of the Northern Atlantic Coastal Plain in parts of North Carolina, VIrginia, Maryland, Delaware, New Jersey, and New York: U.S.[J]. Geological Survey Professional Paper, G1-G31.
- VENUGOPAL T, GIRIDHARAN L, JAYAPRAKASH M. 2009. Environmental impact assessment and seasonal variation study of the groundwater in the vicinity of river Adyar, Chennai, India[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 149: 81-97.
- XU Li-qing, LI San-zhong, GUO Ling-li, SUO Yan-hui, CAO Xian-zhi, DAI Li-ming, WANG Peng-cheng, HUI Ge-ge. 2016. Impaction of the Tan-Lu Fault Zone on uplift of the Luxi Rise: Constraints from apatite fission track thermochronology[J]. Acta Petrologica Sinica, 32(4): 1153-1170(in Chinese with English abstract).
- YIN Guan, FAN Xiao, GUO Jian-qiang, YANG Jun-yi. 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 Shi-jun, GAO Zhi-you, SHI Ze-ming, YAN Qiu-shi. 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 Xiu-lan, WANG Qing-bing, FENG Wei. 2017. Hdrochemical and isotopic study of the karst spring catchment in Jinan[J]. Acta Geologica Sinica, 91(7): 1651-1660(in Chinese with English abstract).
- YIN-Guan, NI Shi-jun. 2001.Deuterium Excess Parameter Evolution in Ground Water[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 20(4): 409-411(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Guo-qi, LÜ Xiao-lei, LI Dong-fa, LIU Wei-fu. 2017. Research on in-site measure height of caving zone and fractured zone infully – mechanized top coal caving face under semi-consolidated sandstone aquifer[J]. Coal Science and Technology, 45(S1): 183-195(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Jin-liang, ZHANG Peng-hui, XIE Jun, DONG Zi-rui, ZHANG Ming, DING Fang, YUAN Yong, LI Jing-zhe. 2013. Diagenesis of clastic reservoirs: Advances and prospects[J]. Advances in Earth Science, 28(9): 957-967(in Chinese with English abstract).
- ZHU Xiao-min. 2008. Sedimentary Petrology (The Fourth Edition)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).