

水工环地质

鲁北地区热储层与深层地下水 含水层水力关联性分析

王明珠¹, 邢继飞², 冯竣琦^{3*}, 刘刚¹, 丁庆忠⁴, 刘毅¹

(1. 山东省地质矿产勘查开发局第二水文地质工程地质大队(山东省鲁北地质工程勘察院), 山东 德州 253072; 2. 山东地勘地热新能源集团有限公司, 山东 济南 250100; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 4. 山东省地矿工程勘察院(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)

摘要: 山东省鲁北地区地下水在形成过程中, 受古地理和古气候影响, 地下水水质具有垂直分带性。近年来, 该区地热水开发利用广泛, 研究地热水与上覆深层地下水含水层的水力联系, 对促进地热水开采, 分析地质环境效应影响具有重要意义。本文对比分析了热储层与上覆深层地下水含水层开采特征、地下水水流场特征、水位变化特征、水化学特征, 认为 2 个含水层水力联系极其微弱, 为 2 个独立的地下含水系统。

关键词: 水力联系; 热储层; 深层地下水; 鲁北地区

中图分类号:X143

文献标识码:A

doi:10.12128/j.issn.1672-6979.2025.10.003

0 引言

鲁北地区是山东省地热资源最丰富的地区之一, 热储类型以层状砂岩裂隙孔隙热储层为主, 主要开采层位为新近纪馆陶组和古近纪东营组热储, 开采深度在 1 200~1 500 m 之间^[1-4]。地热水开发利用始于 20 世纪 70 年代, 主要用于洗浴, 规模性利用始于 20 世纪 90 年代, 随着勘查程度不断提高和经济社会发展需要, 开采量逐年增加, 利用方式变为以供暖为主。鲁北地区深层地下水分布面积广, 富水性较大, 储存量丰富, 主要开采层位为新近纪明化镇组上段中细砂层, 开采深度多在 300~800 m 之间。深层地下水开发利用始于 20 世纪 70 年代中后期, 开采深度为 300~500 m, 2000 年以后, 开采深度逐渐加深至 500~800 m^[5-8]。

地热资源和深层地下水水平面分布范围相互重叠, 开采时间亦有重合。国内华北平原^[9]、松辽盆地^[10]等区域研究证实, 深层地热开采可能引发含水层温度场扰动与水位响应。然而, 针对鲁北地区特

有的新近系—古近系叠置型热储结构, 其水力关联性仍缺乏系统性研究, 地热储层与含水层水力联系是地热开发环境效应研究的核心问题, 将为地热水开采环境效益分析提供水文地质依据, 本文选取鲁北地区地热水开采历史悠久的德州市及开采尚属于增长阶段的聊城市进行研究。

1 地质背景

1.1 地层

鲁北地区位于华北地台的东部, 为广阔平坦的平原区, 被第四系沉积物覆盖。区内自中新世以来, 受差异性升降运动的影响, 一直缓慢下沉, 沉积了巨厚的新生代地层。

东营组: 最下段为细砂岩、粉砂岩与弱透水层互层, 底部为含砾砂岩, 厚度 165 m; 二段为弱透水层与细砂岩互层, 厚度 177 m; 上段为砾砂岩, 细砂岩夹弱透水层, 厚度 149 m。

馆陶组: 上部为细—中砂岩及弱透水层与细砂岩互层夹粉砂岩; 下部岩性为弱透水层及砂质弱透

收稿日期: 2025-03-14; 修订日期: 2025-04-28; 编辑: 曹丽丽

作者简介: 王明珠(1990—), 女, 山东平阴人, 高级工程师, 主要从事水工环地质工作; E-mail: 674758024@qq.com

* 通信作者: 冯竣琦(2001—), 男, 山东济南人, 在读博士, 水文地质学专业; E-mail: 1123956733@qq.com

水层。属河流相,厚度为200~1 000 m。

明化镇组:上部以砂质黏土、砂质弱透水层、弱透水层和粉砂岩、细砂岩为主。下部为弱透水层、细砂、中细砂岩为主,厚度600~900 m。

第四系平原组由一套疏松的河湖相、滨海相、海相及山前冲洪积相物质组成,厚度100~300 m,与下伏新近系明化镇组呈假整合接触。

1.2 水文地质条件

鲁北地区按其补径排条件、埋藏深度、水化学组成及水力性质在垂向上由浅至深,可分为浅层潜水—微承压水、中深层承压水、深层承压水^[11~15]。

浅层潜水—微承压水:埋藏于60 m以浅的地下水,直接接受大气降水、灌溉回渗和河渠侧渗等垂直入渗补给,通过蒸发、人工开采等向外排泄,相对易采易补。浅层地下水总的分布规律是从山前到平原,由古河道带至河间带,含水层颗粒由粗到细,层次由少到多,富水性由强到弱,水化学类型由简单到复杂,TDS由低到高,依次逐渐变化。

中深层承压水:埋藏于60~200 m深度内的地下水,含水介质主要为第四系中更系统。含水层由河湖相粉细砂组成,累计厚度20~30 m。受古地理沉积环境控制,由西向东,咸水体顶板由深变浅,底板由浅变深,具有水头高于含水层顶板埋深的承压性质。该含水层多为TDS大于2 g/L的咸水,目前未开采利用。

深层承压水:埋藏于200 m深度以下的地下水,主要赋存在新近系明化镇组中,含水层岩性上部

以粉细砂、细砂为主,下部为中细砂和中砂。含水层砂层厚度60~80 m,单井出水量500~1 000 m³/d左右。

1.3 地热地质条件

鲁北地区目前主要利用热储为新近纪馆陶组热储、古近纪东营组热储^[16~20]。

新近纪馆陶组热储:在鲁北地区分布广泛,总的分布规律是顶底板埋深自南向北由浅变深,大部分区域顶板埋深主要为1 000~1 700 m,地层厚度一般为250~600 m。热储含水层厚度为110~280 m,占地层厚度的30%~45%,具有良好的储水空间条件。馆陶组热储岩性主要为河流相、冲积扇相的细砂岩、粗砂岩、含砾砂岩、砂砾岩,砾石呈半圆状,磨圆度中等。孔隙度大,一般为24%~30%,特别是馆陶组下段,砂砾岩、砾岩颗粒更加粗大,孔隙度26%~36%。区内馆陶组热储层渗透性能优良,有利于地热回灌。

古近纪东营组热储:顶板埋深为1 200~1 700 m。深受基底起伏、区域构造的控制,沉积厚度和层底埋深受基底起伏和区域构造的控制,分布不稳定,自西向东、自南向北有变厚趋势。砂岩百分比较大,一般40%~50%,厚度一般140~200 m,最大可达300 m。具有良好的储水空间条件。热储岩性主要为砂岩、细砂岩、砂砾岩。孔隙度24%~30%。地层断裂构造较发育,构成良好的热储通道。热储层渗透性能优良,有利于地热回灌。

表1 鲁北地区(德州)地下水含水层位主要特征简表

层位名称	层底埋深/m	地层厚度/m	形成时间/万a	矿化度/(g/L)	水温/℃	水化学类型
浅层地下水	60	60	第四纪全新统 <1	1~7	16~18	HCO ₃ -Na·Mg, HCO ₃ ·Cl-Na· Mg,SO ₄ ·Cl-Na· Mg等
中深层地下水	300	240	第四纪平原组 1~260	5~10	18~22	Cl·SO ₄ -Na·Mg
深层地下水(开发层位主要为300~500m)	800	500	新近纪明化镇组上段 260~395	0.8~1.5	25	HCO ₃ -Na, HCO ₃ · SO ₄ -Na, HCO ₃ ·Cl- Na, HCO ₃ ·SO ₄ · Cl-Na
隔水层	1200	400				非开采层:累计厚度400~700m,泥页岩隔水层
地热水(开发层位主要为1300~1500m)	1500	300	新近纪馆陶组下段 1160~2303	4~10	45~65	Cl-Na, Cl·SO ₄ -Na

1.4 热储层与上覆盖层开采特征

鲁北地区热储层主要分布在明化镇组下段、馆陶组、东营组,其上部除中深层地下水(60~250 m)

矿化度较高,不被开发利用外,其他含水层地下水均有开发利用(图1)。0~60 m为浅层淡水系统,矿化度一般为1~1.5 g/L,与外部环境关系密切,由于

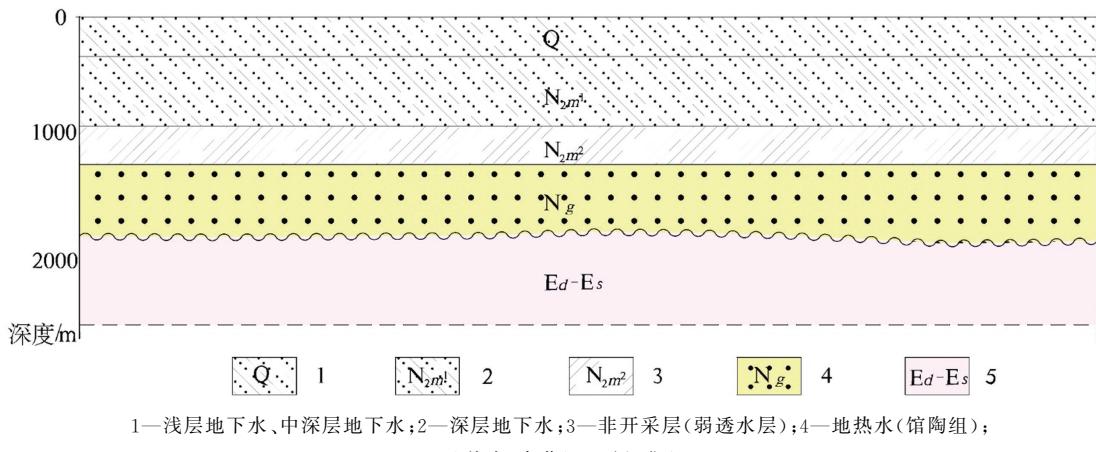


图1 深层地下水与地热水层位垂向关系示意图

地表水的广泛利用,该层仅局部地区开采。60~300 m为中深层咸水,该层矿化度一般为5~10 g/L,由于矿化度较高,目前基本没有开发利用。300~800 m为深层淡水,矿化度一般0.8~1.5 g/L,在20世纪六七十年代,开采井深度300~500 m,随着水位的下降,井深逐渐增加,最深接近800 m,2012年前后,开始对深层地下水进行限采,2016年,进一步落实限采禁采政策,至今已基本禁采。900~1 200 m为明化镇下段馆陶上段地热水,主要为泥岩,砂层较薄,出水量小,目前不开采。1 200~1 500 m为地热主要开采层位。

热储层上覆相邻含水层为深层地下水,根据以往研究成果,鲁北地区地面沉降主要成因为深层地下水的超量开采。深层地下水开采深度在300~800 m之间,属新近纪明化镇组,800~1 200 m间地层为非开采层,1 200 m以深为新近纪馆陶组孔隙热储层。热储层和深层地下水开采层之间的非开采层位厚度大,达到了400 m,该层位存在厚层的泥岩,以泥岩夹砂岩为主,累计厚度超过300 m,隔水性能良好。根据地层垂向固结理论及已有工程地质勘查成果,地层越深,固结程度越好。非开采段地层固结程度比地下水开采地层高,且该段地层含水性较差,未进行开采,在下部热储层与上部含水层之间形成了坚固的支撑层和天然的隔水层,阻挡了地热开发对深层地下水的水位、水质的影响。

2 研究方法

2.1 地下水位统测

2020年6月至2020年10月,开展深层地下

和地热水水位统测,深层地下水统测49点位、地热水统测88点位(图2)。查明了区内深层地下水及地热水流场情况,为含水层水力相关性提供数据支撑。水位统测符合《地下水动态监测规程》(DZ/T0133—1994),统测工作采用测绳、卷尺、万用表、手持GPS进行,读数精确至厘米,并保证读数记录到厘米。对每一个统测点登记档案。测量数据准确、可信。

2.2 样品采集及分析

2020年9月至2020年11月,进行深层地下水及地热水水质全分析和微量元素取样。深层地下水取样20件、地热水取样40件(图2)。查明了各含水层的水化学成分、水化学场特征等,为地热水与上部含水层水力联系提供基础资料。2020年9月至2020年11月,进行深层地下水及地热水同位素取样。深层地下水及地热水各15件,基本查明了深层地下水和地热水的成因类型、补给来源、形成年龄。

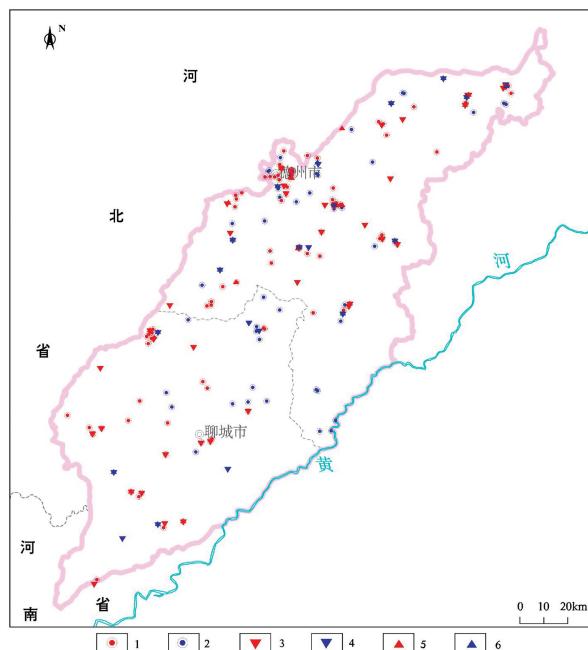
水样采集、测试等流程均符合《水样采集与送检技术要求》(GWI—B1)等规定执行。测试工作由山东省地质矿产勘查开发局第二水文地质工程地质大队实验室负责实施,符合《地下水水质分析方法》(DZ/T0064.5—2021)等相关规范。

3 热储层与上覆含水层相关系分析

3.1 地热水与深层地下水水流场对比

3.1.1 水位平面分布特征及动态变化特征分析

多年开采深层地下水,使鲁北地区形成了以主要城镇为中心的多个漏斗中心并存的流场。德州市



1—地热水统测点;2—深层地下水统测点;3—地热水全分析取样点;4—深层地下水全分析取样点;5—地热水同位素取样点;6—深层地下水同位素取样点。

图 2 水位统测及样品采集分布图

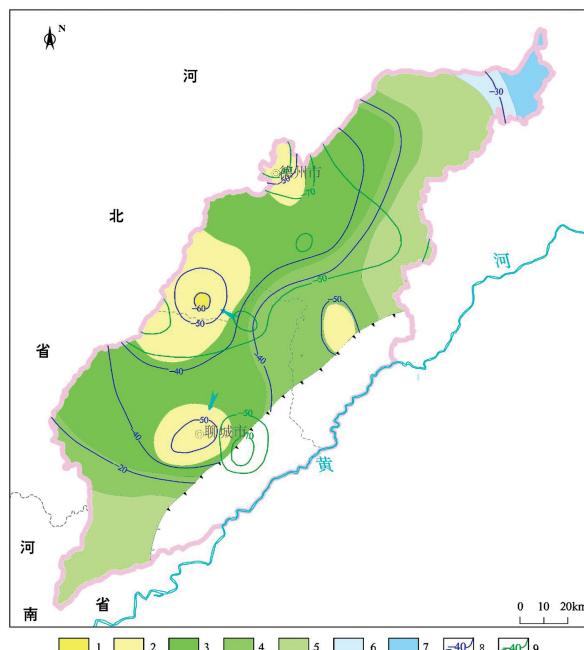
漏斗中心为德城区、平原县。聊城市漏斗中心为临清市、夏津县(德州市)—高唐县、鲁西工业园。且形成了以德城区、平原县、临清市、夏津县(德州市)—高唐县为中心的多中心区域型漏斗。

随着地热水的不断开发利用,逐步形成了以主要开采区为中心的多个漏斗中心,漏斗中心分别为德城区、夏津县、东昌府区,其中聊城市地热水位总体呈现抬升趋势,但升幅不大。德州市德城区和陵城区水位呈现下降趋势,地热水降落漏斗有所扩大。

由图 3 可知,深层地下水存在 3 个漏斗中心,分别位于德城区漏斗中心、平原漏斗中心、高唐漏斗中心,且德城区与平原已连成一个大漏斗,漏斗中心水位埋深较大,多在 100 m 以深。地热水漏斗中心相对较分散,分别位于德城区、夏津、禹城、东昌府区,地热水漏斗中心水位埋深较深层地下水浅,仅夏津在 90 m 以深,其他漏斗区均大于 80 m。根据流场对比发现,两流场的漏斗中心、流场形态均存在较大差异。

3.1.2 漏斗中心区点状水位动态变化特征分析

选取德州市深层地下水漏斗中心观测井(井深 800 m)和德州市德城区水文二队安居小区地热开采井(井深 1 479 m)的水位动态进行分析(图 4),认



1—地热水位埋深 ≥ 90 m;2—地热水位埋深 80~90 m;3—地热水位埋深 70~80 m;4—地热水位埋深 60~70 m;5—地热水位埋深 50~60 m;6—地热水位埋深 40~50 m;7—地热水位埋深 < 40 m;8—地热水水位标高等值线;9—深层地下水水位标高等值线。

图 3 地热水与深层地下水水流场对比图(2020 年度)

为地热水与深层地下水水位变幅、变化趋势、水位标高(埋深)均存在明显不同。2005 年以前,地热水水位平稳波动,同时期深层地下水由于限采禁采政策的实施,水位埋深呈波动上升趋势,说明深层地下水水位下降与地热水开发活动无关;2005 年以后,每年 11 月至次年 3 月为供暖季,地热水位总体呈波动下降趋势,下降幅度达 20 m,每年供暖期结束后,地热水位迅速上升,说明地热水位变化与地热井开采量密切相关,而同时期深层地下水漏斗中心水位多呈波动上升趋势,说明德州市地热水开发对深层地下水的水位变化影响极其微弱。

通过以上水位特征的对比,发现地热水和深层地下水水位平面分布特征有较大差异,年内和多年动态特征迥异。

3.2 地热水与深层地下水水化学对比

3.2.1 TDS 分布特征

(1) 平面分布特征

由图 5 可知,深层地下水与地热水 TDS 等值线走向基本平行,均为 EW—SW 向,且由德城区为中心呈放射状向东南方向增大。但深层地下水分布差别不大,德城区相对较低,一般在 1 000 mg/L,鲁北

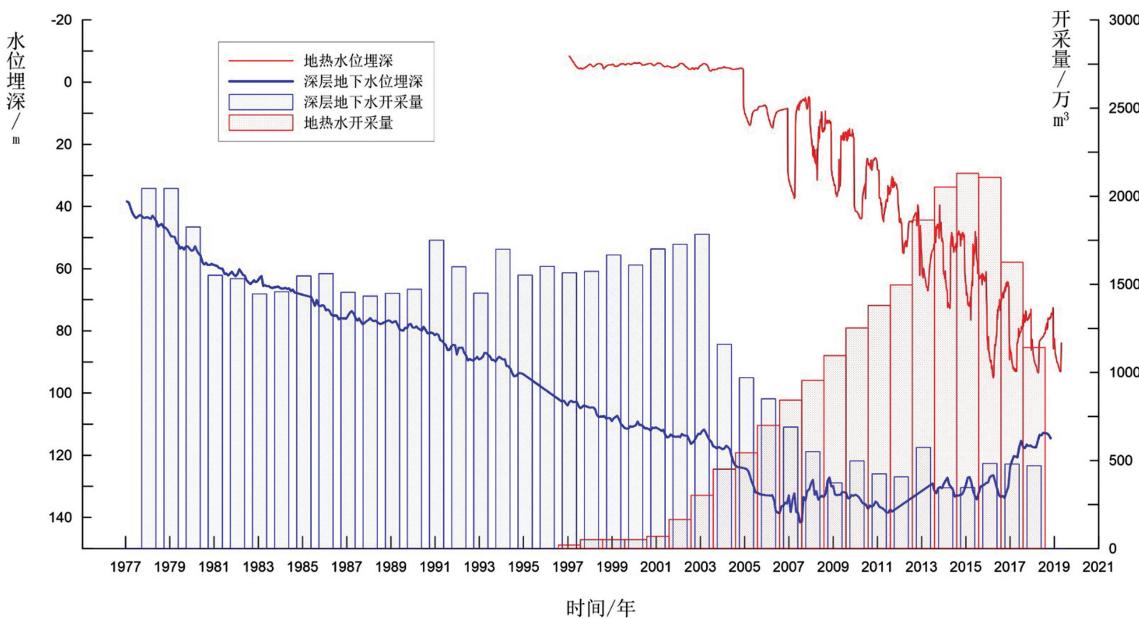


图4 深层地下水与地热水水位多年动态图

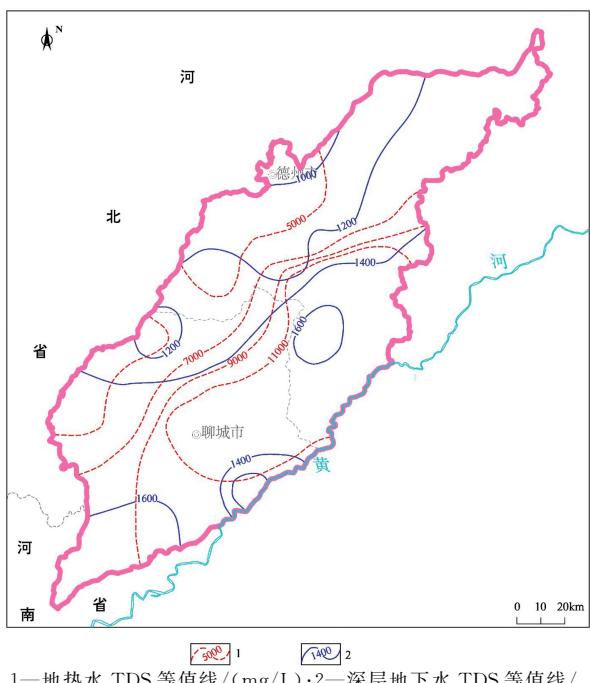


图5 区域TDS等值线图

地区TDS总变差不超过 1000 mg/L 。地热水分布区域变化大,德城区地热水TDS相对较低,一般不超过 5000 mg/L ,总变差超过 10000 mg/L 。

(2) 垂向分布特征

根据不同埋深地下水类型,可发现工作区地下水垂向分层性明显。

根据水质特征,可将其分为4层。第Ⅰ层含水

层组 $0\sim60\text{ m}$,TDS不大于 1500 mg/L ,为 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型,水质好;第Ⅱ层含水层组 $60\sim200\text{ m}$,TDS超过 4000 mg/L , $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 型水,该层为低温咸水;第Ⅲ层含水层组 $200\sim800\text{ m}$,TDS不大于 1500 mg/L ,地下水化学类型由 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}$ 过渡到 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 型再到 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型,地下水质量渐好;第Ⅳ层含水层组 $1200\sim1500\text{ m}$ (不限该深度),TDS超过 5000 mg/L , $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 型水,为地热开采的主要含水层(表2)。

3.2.2 地下水化学类型对比分析

由图6可知,深层地下水水质较好,水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型为主,其次为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Na}$ 或 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Na}$ 型等。

由图7可知,地热水为咸水,水化学类型以 Cl-Na 型和 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 型为主。因此,两者水质有着显著差异。相较于地热水,深层地下水水化学类型复杂多变,表明以往不同区域受岩溶、水解、人为活动作用更强烈。

根据水质长期动态监测资料,地热水和深层地下水主要组分多年动态曲线形态平直,没有持续上升或下降的趋势,表明其含量多年来较为稳定,变化幅度较小,即水化学动态稳定。

通过以上水化学特征的对比,发现地热水和深层地下水水质差异明显,且各自动态稳定,说明地热水和深层地下水之间无显著的水量交换。

表 2 不同埋深地下水化学组分表

单位:mg/L

深度/m	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TDS	地下水类型	含水层划分
0~60	233	69	70	191	239	560	1382	H-N	第Ⅰ层
60~200	1016	146	71	1353	1257	374	4378	LS-N	第Ⅱ层
200~300	356	70	46	338	430	261	1453	SLH-N	第Ⅲ层
300~400	348	29	22	182	277	426	1253	HS-N	
400~500	401	23	17	229	305	462	1463	HS-N	
500~600	387	20	9	222	275	426	1144	HS-N	
600~800	272	4	12	39	130	500	996	H-N	
1200~1500	1865	185	46	2145	1414	222	5838	LS-N	第Ⅳ层

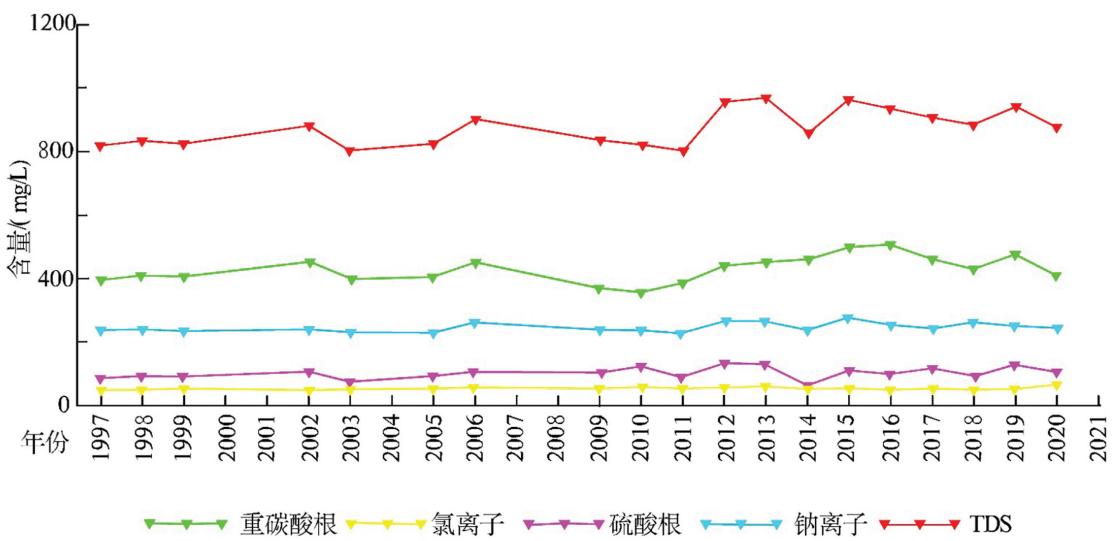


图 6 深层地下水主要组分多年动态曲线图

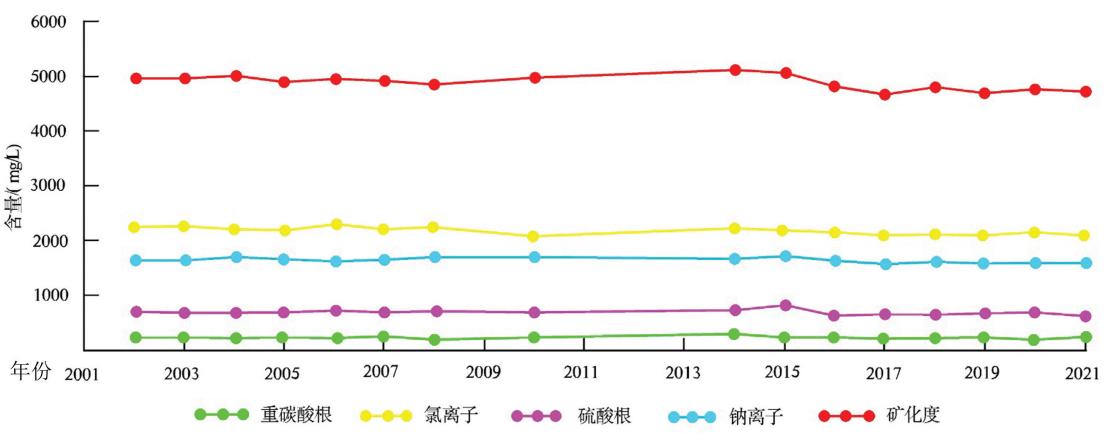
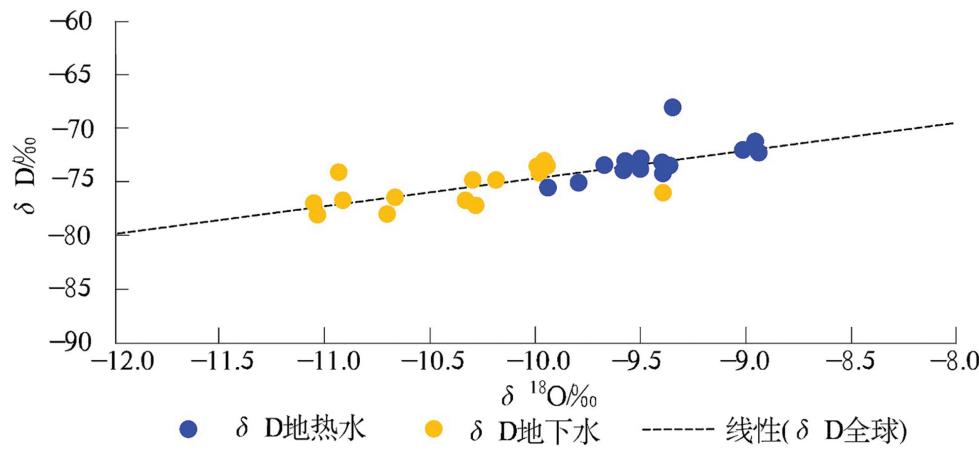


图 7 地热水主要组分多年动态曲线图

3.3 补给来源

由图 8 可知,对不同层次的地下水,深层地下水与地热水表现出较明显的差异,沿全球大气降雨线分为两组。深层地下水基本分布在全球大气降雨线附近,地热水偏离较大,说明深层地下水与大气降水

联系更亲密,地热水则更能显示出古水的特征,说明地下热水的径流速度缓慢,补给条件差,资源再生能力弱,为消耗型水源。从另一侧面反映出地热矿水的珍贵性。

图8 地热水与深层地下水 $\delta D - \delta^{18}\text{O}$ 关系图

4 结论

(1)热储层和深层地下水开采层之间的非开采层厚度大,达到了400 m,该层位存在厚层的泥岩,以泥岩夹砂岩为主,累计厚度超过300 m,隔水性能良好,可有效阻挡地热开发对深层地下水的水位、水质的影响。

(2)地热水和深层地下水水位平面分布特征有较大差异,年内和多年动态特征迥异。

(3)地热水和深层地下水水质差异明显,且各自动态稳定,说明两者之间无显著的水量交换。

(4)热储层与深层地下水含水层之间存在超过400 m的弱透水层,可有效阻断两个层位之间发生较活跃的水力联系。从两个含水层的水动力场、多年水位动态特征、水化学场、补给来源等方面看,热储层与深层地下水水力联系较弱。

参考文献:

- [1] 王明珠,赵季初,丁朋朋,等.深部砂岩热储沉降监测分层标建设与结构合理性初探:以鲁北平原深部砂岩热储沉降监测分层标组为例[J].山东国土资源,2022,38(10):53-58.
- [2] 秦耀军,张平平.山东省砂岩热储地热资源开发利用模式探讨[J].山东国土资源,2018,34(10):93-98.
- [3] 孟祥玲,王庆兵,杨培杰.山东省地热资源开发利用现状调查与问题分析[J].山东国土资源,2021,37(11):36-42.
- [4] 王明珠,万军伟,白通,等.德州市德城区砂岩热储地热资源开采对地面沉降的影响[J].华东地质,2021,42(2):202-209.
- [5] 赵季初,纪洪磊,刘欢.鲁北平原地下咸水浅层地热能开发利用条件研究[J].中国地质调查,2020,7(3):13-20.
- [6] 马兆丰,王成全.鲁西北平原浅层淡水底界面埋藏深度图[M]//山东省环境地质图集.济南:山东省地图出版社,1996:37.
- [7] 黄义海,张汉臣.鲁西北平原深层淡水顶界面埋藏深度图[M]//山东省环境地质图集.济南:山东省地图出版社,1996:39.
- [8] 贾超,李辉,周晓勇,等.山东省德州地区地下水水流场动态分析[J].水科学与工程技术,2016(4):28-30.
- [9] 王贵玲,等.华北平原深部地热资源特征与潜力评价[J].中国地质,2017,44(5),869-881.
- [10] 孙知新.松辽盆地基底地热资源评价与水热耦合模拟[J].地球科学,2020,45(12),4337-4348.
- [11] 王明珠,万军伟.山东省德州市地面沉降控沉分析及建议[J].中国地质调查,2020,7(3):96-103.
- [12] 张永伟.华北平原德州地面沉降成因机理、监测预警与可控性研究[D].济南:山东大学,2014.
- [13] 赵文涛,李亮.苏锡常地区地面沉降机理及防治措施[J].中国地质灾害与防治学报,2009,20(1):88-93.
- [14] 郑刚,曾超峰,薛秀丽.承压含水层局部降压引起土体沉降机理及参数分析[J].岩土工程学报,2014,36(5):802-817.
- [15] 朱菊艳.沧州地区地面沉降成因机理及沉降量预测研究[D].北京:中国地质大学(北京),2014.
- [16] 张平平,王秀芹.回灌水温对砂岩热储回灌效果的影响分析:以德州市地热田馆陶组热储为例[J].山东国土资源,2015,31(6):64-67.
- [17] 张平平,张东生,刘胜利,等.商河县馆陶组热储地热尾水回灌可行性研究[J].山东国土资源,2015,31(8):50-53.
- [18] 贺森,张乐,袁一鸣,等.东营市南展区砂岩热储地热回灌量与温度的关系探讨[J].山东国土资源,2018,34(1):44-48.
- [19] 王立东,于溪,姚英强,等.山东省无棣县地热资源回灌技术条件初探[J].山东国土资源,2017,33(2):47-50.
- [20] 王立东,赵季初,于溪,等.地热井抽水试验中井损的确定[J].山东国土资源,2016,32(10):65-68.

Hydraulic Correlation Analysis of Thermal Reservoir and Deep Groundwater Aquifer in Northern Shandong Province

WANG Mingzhu¹, XING Jifei², FENG Junqi³, LIU Gang⁴, DING Qingzhong⁴, LIU Yi¹

(1.No.2 Hydrogeology and Engineering Geology Brigade of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources(Lubei Geo—engineering Exploration Institute), Shandong Dezhou 253072, China; 2. Shandong Geological Exploration Geothermal New Energy Group Limited Corporation, Shandong Ji'nan 250100, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4.Shandong Provincial Geo—engineering Exploration Institute (No.801 Hydrogeological and Engineering Geological Brigade) , Shandong Ji'nan 250014, China)

Abstract: During the formation process of groundwater in Lubei area in Shandong province, due to the influence of ancient geography and climate, vertical zoning of groundwater quality has been formed. In recent years, the development and utilization of geothermal water in this area have been distributed extensively. Studying hydraulic connection between geothermal water and the overlying deep groundwater aquifer is of great significance for promoting geothermal water extraction and analyzing the impact of geological environmental effects. In this paper, the exploitation characteristics, groundwater flow field characteristics, water level change characteristics and hydrochemical characteristics of thermal reservoirs and overlying deep groundwater aquifers have been compared and analyzed. It is regarded that hydraulic connection between the two aquifers is extremely weak and constitutes two independent groundwater aquifer systems.

Key words: Hydraulic connection; thermal reservoir; deep groundwater; northern Shandong province