www.
geojournals.cn/georev

人类活动影响下胶东半岛典型蓄水构造模式研究

陈京鹏[1)],康凤新[2,3,4)],韩建江[1,3)],蒋书杰[1)],王明珠[1)],王炜龙[1)],段晓飞[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)山东科技大学地球科学与工程学院,山东青岛,266590;

3)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,济南,250014;

4)济南大学水利与环境学院,济南,250022

内容提要:胶东半岛是我国典型的缺水山区,广泛分布有岩浆岩、变质岩及白垩系弱透水性岩层,含水层富水性差异大,同时胶东半岛地区人类活动密集,水质型贫水问题同样突出,资源型缺水和水质型缺水同时存在。为揭示人类活动影响下典型缺水山区蓄水构造模式和找水方向,通过2019~2022年在胶东半岛典型缺水山区开展的水文地质调查,采用本次施工的7组钻孔数据,7组水化学和同位素分析样品,基于蓄水构造理论,结合人类活动影响下的水化学和同位素特征,对比研究不同类型蓄水构造富水性和以硝酸盐为代表的人类活动对水质的影响。提出了洼地沟谷风化壳型、接触带型、断裂型、岩溶型4种蓄水构造模式。揭示了受人类活动影响,以洼地沟谷风化型蓄水构造为代表的风化裂隙水硝酸盐含量升高,水质较差,适宜工农业生产用水;断裂型蓄水构造为代表的构造裂隙承压水,上部完整基岩作为隔水盖层减轻了人类活动对地下水质的影响,硝酸盐含量低,水质较好,适宜城镇、农村生活用水;接触带型和岩溶型蓄水构造开发利用方向则与其含水层埋深有关。

关键词:基岩地下水;蓄水构造;水化学;人类活动影响;胶东半岛

地下水是人类赖以生存的宝贵资源,是社会经济发展的重要保障,特别是缺水山区,地下水资源尤为重要(Cao Tianzheng et al., 2021;李波等,2021;魏善明等,2021)。我国基岩山区面临不同的缺水情况,一般与地形地貌、地层岩性、地质构造、降雨时间分布不均等因素相关,属于资源型缺水(刘伟朋等,2019)。同时近几十年来工农业生产等人类活动影响水文地球化学进程,高硝酸盐等水环境问题严重,造成了水质型缺水问题产生(韩聪等,2021;Liu Jiutan et al., 2021)。基岩山区缺水问题与人类活动相互依存,又相互影响,且矛盾日益突出,缺水山区多面临资源型缺水和水质型缺水的双重挑战。

在缺水基岩地区,主要通过寻找有利地下水富集的蓄水构造,缓解缺水问题。刘光亚(1978,1981)提出了基岩蓄水构造理论,以基岩山区透水体和隔水层、补排条件下开展研究,并在随后的几十年中得到了应用、发展与丰富,是我国在基岩地区找水的重要理论(袁磊等,2020)。经过全国地质系统几十年来缺水山区找水定井的理论研究和实践积累,对不同类型的基岩山区蓄水构造进行了类型归纳和细化研究。邓启军等(2020)在张北新生代玄武岩缺水山区总结了蓄水构造类型。张福存等(2022)通过近十多年来的中国地质调查局在全国缺水山区的找水实践,总结了多种蓄水构造模型,刘伟朋等(2019)研究总结了太古宇变质岩不同构造条件下地下水的赋存规律及电性特征。樊连杰等(2021)总结了乌蒙山区地下水赋存规律,并依据相应分区提出了开发利用模式。王新峰等(2018)基于在赣南红层盆地缺水地区的找水实践,提出了补给—滞留型、植被涵养型、侵入扩张输导型基于地下

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:42072331、U1906209)、泰山学者工程专项经费资助项目(编号:tstp20230626)和山东省省级公益性地质勘查项目(编号:鲁勘字[2019]46号、鲁勘字[2020]50号)的成果。

收稿日期:2023-07-13;改回日期:2023-12-17;网络首发:2024-01-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2024.01.055

作者简介:陈京鹏,男,1991年生,学士,工程师,主要从事水文地质、环境地质调查研究;Email: chenjingpeng@126.com。通讯作者:康凤新,男,1968年生,博士,研究员,主要从事水文地质地热地质研究;Email: kangfengxin@126.com。

水驱动力的蓄水构造模式,并提出了相应的找水方向。冯亚伟等(2020)、贾德旺(2020)、刘伟等(2021)、代娜等(2023)分别对山东省鲁中南山区、胶东半岛缺水地区地下水赋存规律进行总结,并提出了不同类型地区蓄水构造模式与找水定井技术。刘春伟等(2022)根据在胶东半岛开展的水文地质调查工作,提出了岩浆岩地区断裂型、接触带型、岩脉型、洼地风化带型和多期变质作用等 5 种蓄水构造模式,为本次研究提供了有益参考。以上研究为我国缺水山区蓄水构造模型的总结及找水定井提供了案例研究,但更多侧重于自然条件下缺水山区地下水蓄水构造模式和找水方向的研究,而对于人类活动影响下蓄水构造模式研究相对较少。

胶东半岛是我国典型的缺水地区,人均水资源少,广泛分布有岩浆岩与变质岩,沉积的白垩系砂岩等弱透水性地层,含水层空间分布不均,富水性差异大,是缺水的主要原因之一(图 1)。同时该地区人类活动密集,面临着水质型缺水的问题(康凤新等,2010;陈京鹏等,2022)。基于此,本文依托在胶东半岛开展的 1∶5 万区域水文地质调查工作,在蓄水构造理论的基础上,结合前人在全国各地贫水地区找水经验,综合钻孔水化学、同位素特征,总结胶东半岛典型缺水山区的蓄水构造模式和开发利用方向,以期为典型缺水山区找水定井和地下水开发利用提供建议。

1 地下水形成及赋存条件

1.1 水文气象

研究区位于我国胶东半岛中西部,属于暖温带东亚半湿润区季风型气候,多年降雨量约 660 mm,多年平均气温约 12 ℃,降雨季节性强,一般集中在夏季,地表径流多发育于山区,且涨消迅速,大气降水入渗是该地区地下水最重要的补给源。

1.2 地形地貌

地形地貌特征控制着地表水系的走向和流速,决定着大气降水在地表水的存留时间,影响着入渗系数,进而影响地下水的形成。研究区主要地貌类型以低山丘陵地区为主,低山沟谷盆地地区地势低

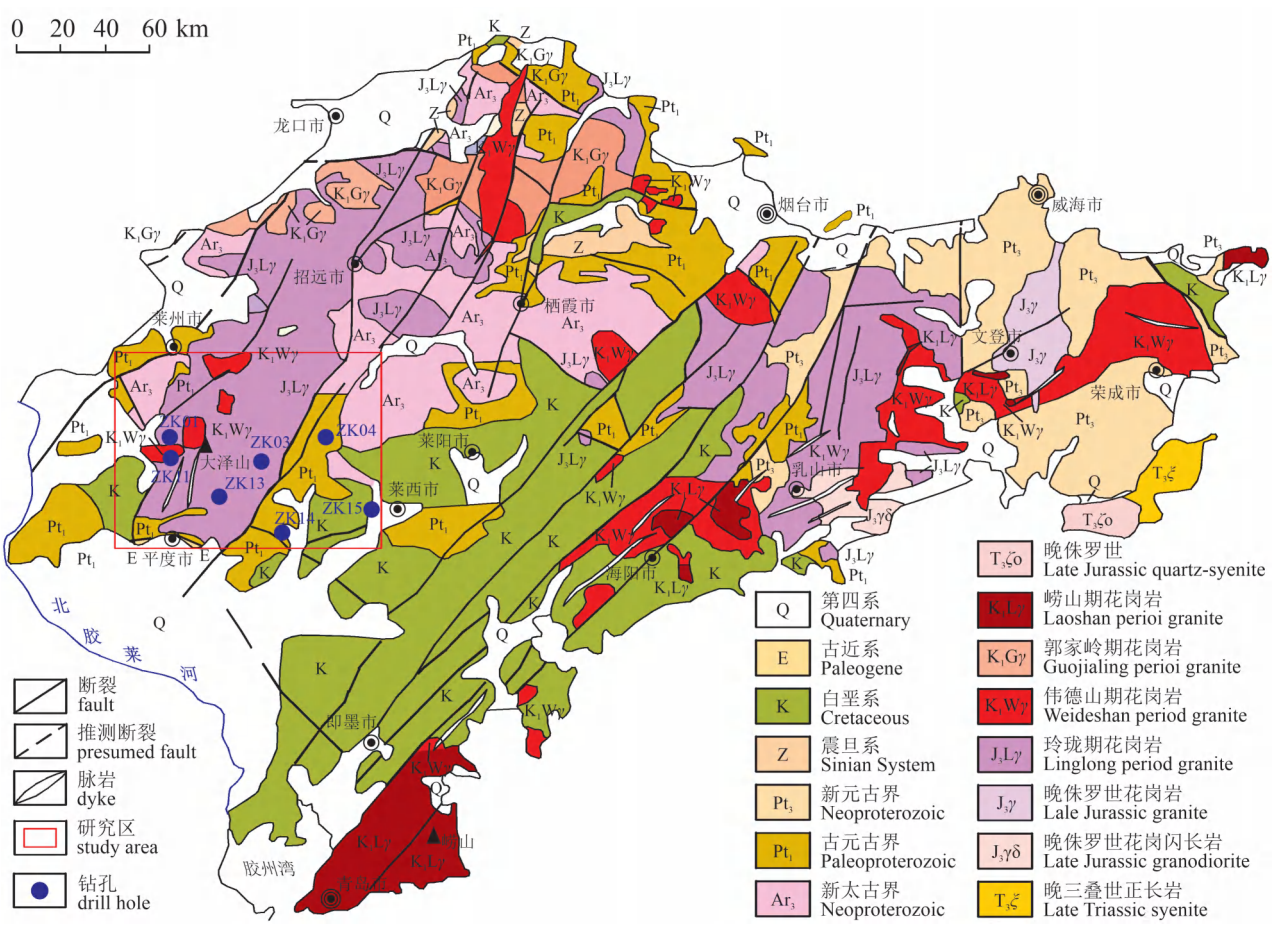

图 1 胶东地区地质简图(据王来明等,2021 修改)

Fig. 1 Geological schematic map of Jiaodong Area (modified from Wang Laiming et al., 2021&)

注,地表水和地下水由高处向低处汇聚,上层岩性风化程度高,裂隙发育,易于地表水和地下水运移和储存,易形成富水地段;而平原地区由于第四系薄层发育,开发利用程度高,同时河道截流等现象,如大沽河等河道截流,水力梯度小,蒸发强烈,导致原本富水性较强的平原地区,富水性减弱;丘陵和低山区,地下水难以聚集和储存,富水性匮乏。

1.3　地质构造

研究区位于华北板块与秦岭—大别—苏鲁造山带的叠接复合部位,划分为胶辽隆起区及胶南威海造山带两个二级构造单元,中西部被中生代陆相沉积盆地所覆盖。由于受华北与扬子板块碰撞及太平洋板块向欧亚板块俯冲影响,地质构造非常复杂,岩浆活动强烈,招远—平度断裂贯穿工作区,其他大小断裂构造发育,褶皱发育。构造发育部位或不同期侵入的岩性接触带的周边岩石破碎,裂隙发育,是地下水形成的导水通道和储水空间。

1.4　地层岩性

地层岩性是决定地下水的物质基础,其中岩石的矿物成分是地下水化学组分的来源,而地层的物理特性如硬度、孔隙等影响着地下水的形成和富集(王新峰等,2018)。研究区内大面积发育有岩浆岩、变质岩及中生代白垩系砂岩,以及新生代玄武岩等(图 1)。完整的岩石裂隙不发育,一般富水性小于 100 m^3/d,第四系厚度薄且分布范围局限在冲积平原、河流地区,一般小于 10 m,由于近年来地下水开采强度增加、大沽河河道截流等原因,第四系孔隙水富水性减少。

1.5　研究区缺水现状

地下水分为孔隙水、裂隙水和岩溶水,而在胶东山区,第四系薄层分布,大面积分布的岩浆岩、变质岩等地层,特别是缺水地区的地下水以裂隙水为主,根据地区特点,裂隙水包括风化裂隙水、成岩裂隙水和构造裂隙水。风化裂隙水分布在山间、沟谷等侵入岩、变质岩、沉积岩风化裂隙中;岩溶水在胶东地区分布较少,但岩溶发育地区易形成较好的富水地段;由于地质条件特殊性,通常完整的基岩自身裂隙不发育,成岩裂隙水多赋存于不同阶段侵入的岩层岩性接触带内,一般以接触带裂隙水为主。

综合地质及水文地质条件,研究区的基岩裂隙不发育,是缺水地层的分布区,同时胶东半岛人口密集,工农业活动发达,需水量大,人类活动又进一步影响水化学变化,加剧了缺水程度。总体上研究区存在资源型缺水和水质型缺水。

一是资源型缺水,研究区内花岗岩和变质岩分布广泛,同时花岗岩等风化层薄且地势落差大,蓄水能力差,岩浆岩和变质岩质地坚硬,降雨后随着地表水径流,无法蓄水。人类开采后地下水水位下降,补给源无法满足社会生产生活用水。

二是水质型缺水,研究区内工农业活动密集,经济发达,特别是人类在农业活动中施用化肥、工业废水、生活废水等排放,随降雨入渗进入地下水系统后,影响着地下水水化学进程,造成了水质型贫水问题的产生,高硝酸盐型水大面积分布于山区,特别是孔隙水、风化裂隙水中硝酸盐含量偏高。同时由于地质构造活动等影响,部分地区存在原生性高氟水等问题的产生。

2　研究方法

2.1　工作过程

基于上述研究区地质、水文地质条件及缺水现状,2019 年 6 月—2022 年 6 月,在胶东半岛开展了 4 幅 1∶5 万区域水文地质调查项目,在调查、物探的基础上,施工的 7 眼钻孔情况(表 1),总结了研究区内的 4 种蓄水构造类型。在 7 眼钻孔中分别采集了水质分析样品(结果见表 2),山东省鲁北地质工程勘察院实验室测定了地下水样品中 K^+,Na^+,Ca^{2+},

表 1 胶东半岛水文地质调查钻孔基本情况表

Table 1 The basic situation of the drillings for hydrogeological survey in Jiaodong Penisula

水源类型	编号	地理位置	含水层岩性	孔深(m)	单井涌水量(m^3/d)	δD(‰)	δO^{18}(‰)
风化裂隙型	ZK01	平度市北昌村	花岗岩风化层	40.6	744.4	−57	−7.9
	ZK03	平度市南大田村	花岗岩风化层	40.2	270.9	−55	−7.9
接触带裂隙水	ZK11	平度市棣家疃村	大理岩/斜长角闪岩	100.8	734.4	−54	−7.2
构造裂隙水	ZK13	平度市王家流河	斜长角闪岩	100.2	226.5	−58	−8.2
	ZK14	平度市东柳圈村	斜长角闪岩	100.4	590.4	−59	−8.1
	ZK15	莱西市后庄扶村	白垩系砂岩	120.0	847.2	−51	−7.3
岩溶裂隙水	ZK04	莱西市大东馆村	大理岩	120.0	480.0	−59	−8.2

注:δD 和 δO^{18} 测定结果以相对维也纳标准海水(V-SMOW)的千分偏差表示。

Mg^{2+},HCO_3^-,SO_4^{2-},Cl^-,NO_3^-等主要离子,并在抽水过程中采集了 D,^{18}O 等氢氧同位素样品送至中国地质科学院水文地质环境地质研究所测试中心化验,用以评价水质,分析水化学特征、补给来源。样品采集与测试过程符合《水质采样样品的保存和管理技术规定》(HJ 493-2009)、《地下水质检验方法》(DZ/T0064.5-2021)等相关规范。

2.2 研究方法

在调查、物探的基础上通过施工钻孔并开展抽水试验验证了钻孔含水层位置、水量及富水性,圈定蓄水构造及类型。

在样品采集测试的基础上,分析同位素和水化学特征,研究其地下水起源及水质情况。硝酸盐是人类活动影响地下水的特征指标之一,且对水质影响大,可导致水质型缺水问题的产生。其含量受人类活动影响较大,通过对比研究不同蓄水构造类型富水性和硝酸盐含量,研究人类活动影响下蓄水构造模式及找水方向,提出不同类型蓄水构造的开发利用建议。

3 典型蓄水构造模式

蓄水构造是指由透水层和隔水层相互结合组成的富集和储藏地下水的地质构造(张福存等,2022),形成蓄水构造和富水地区的条件需要包含补给透水层(作为含水介质,导水通道以及储水空间),隔水层作为隔水边界和补给源、排泄源。大气降水是地下水中最重要的补给源,地貌、水文、气象等是地下水补径排条件的控制因素。根据本次调查和施工钻孔情况,总结了沟谷洼地风化壳型、岩性接触带型、断裂型、岩溶型 4 种蓄水构造类型,并结合了地下水化学特征,研究区内找水和开发利用方向。

3.1 沟谷洼地风化壳型蓄水构造

主要分布在山前冲洪积地区或洼地,第四系冲积的卵砾石层及基岩全风化—强风化层是良好的导水通道和储水空间,下方完整基岩如花岗岩、白垩系砂岩层等透水性差,是天然的隔水层。地表径流、大气降水等通过降雨入渗形式补给地下水。来自不同方向的地下水补给后汇聚,易形成小型富水地段。

该种蓄水构造类型的地下水为风化裂隙水、孔隙水为主,且多为潜水,含水层和地下水水位埋藏较浅,地下水直接接受大气降水入渗的补给,密集的人类农业生产活动产生的硝酸盐随大气降水溶解后渗入含水层,并随着地下水径流富集。

本次施工的 ZK01 孔,位于平度大泽山镇北昌村西,汇水条件好,南北两侧为低山,东部为大泽山,下伏地层为多期变质岩及侵入岩等,岩石坚硬透水性差,来自大气降水和东部、南北部径流是主要的补给源,地下水在风化层中径流和富集(图 2a)。该井的水量达到 744.48 m^3/d,依据基岩地下水富水性分区,属于丰富区。但是由于含水层埋藏浅,上部无有效隔水层,水质受到了较大影响,TDS (Total dissolved solids,溶解性固体总量)达到 1328 mg/L,总硬度 966 mg/L,硝酸盐 541 mg/L,远超《地下水质量标准》(GB14848-2017)Ⅲ类水的 1000 mg/L、450 mg/L、20 mg/L 限值,仅适用于农田灌溉等,而不适宜饮用。

施工的 ZK03 孔,位于平度市旧店镇南大田村,东北两侧为低山丘陵,猪洞河自北流向南,汇水条件好,下伏地层岩性为混合花岗岩,岩石坚硬透水性差,来自大气降水和北部、东西部侧向径流是主要的补给源,地下水在深 10~20 m 的风化层中径流及富集(图 2b)。该井的水量达到 270.96 m^3/d,依据基岩地下水富水性分区,属较丰富区。但是水质受到了较大影响,水化学组分中 TDS 达到 607 mg/L,硝酸盐 90.6 mg/L,仅适用于农田灌溉等,而不适宜饮用。

表 2 钻孔主要水化学指标质量浓度统计

Table 2 Mass concentration statistics of borehole main hydrochemical index

钻孔	pH	ρ(mg/L)									
		总硬度	TDS	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-
ZK01	7.49	966.0	1328	3.25	27.59	272.54	69.26	142.51	92.46	305.10	541.0
ZK03	7.02	416.0	607	1.49	32.18	122.34	26.85	85.43	135.20	195.57	90.6
ZK11	7.79	460.37	621	2.86	21.23	115.53	41.74	85.43	105.19	238.59	108.5
ZK13	7.84	195.16	310	2.79	27.19	49.70	17.25	22.33	40.83	195.26	26.0
ZK14	8.05	935.75	1310.92	27.70	101.43	222.44	92.34	368.68	350.62	402.73	1.45
ZK15	0.05	0.36	0.32	1.61	174.48	28.06	10.94	141.80	62.44	207.47	78.5
ZK04	7.60	385.3	564	1.71	16.72	90.18	38.88	35.45	81.65	207.47	173.2

注:本文中所列硝酸盐含量均为以硝酸根计;总硬度是指钙、镁离子浓度,以 $CaCO_3$ 含量来表示。

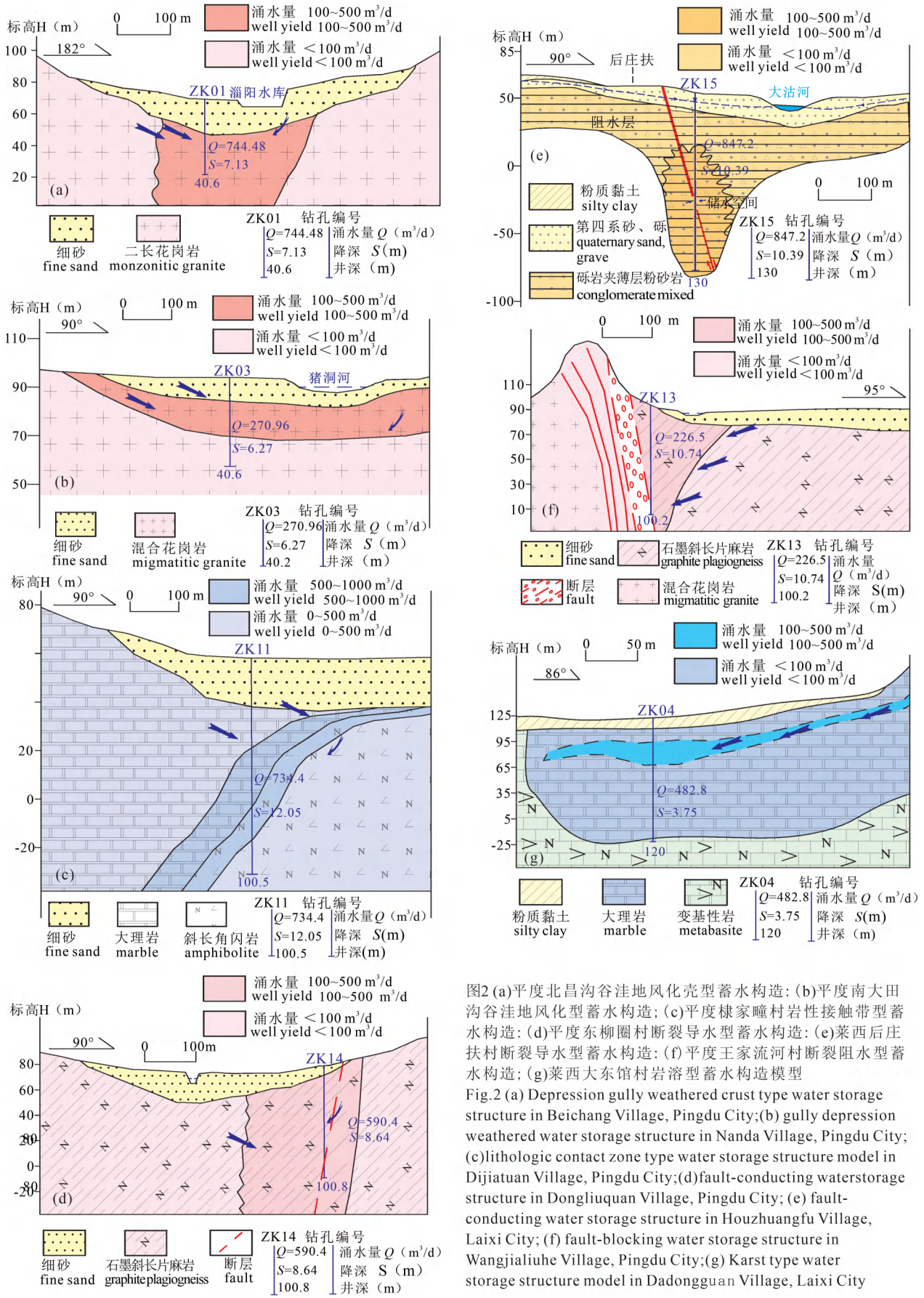

图2 (a)平度北昌沟谷洼地风化壳型蓄水构造: (b)平度南大田沟谷洼地风化型蓄水构造; (c)平度棣家疃村岩性接触带型蓄水构造: (d)平度东柳圈村断裂导水型蓄水构造: (e)莱西后庄扶村断裂导水型蓄水构造: (f)平度王家流河村断裂阻水型蓄水构造; (g)莱西大东馆村岩溶型蓄水构造模型

Fig.2 (a) Depression gully weathered crust type water storage structure in Beichang Village, Pingdu City;(b) gully depression weathered water storage structure in Nanda Village, Pingdu City; (c)lithologic contact zone type water storage structure model in Dijiatuan Village, Pingdu City;(d)fault-conducting waterstorage structure in Dongliuquan Village, Pingdu City; (e) fault-conducting water storage structure in Houzhuangfu Village, Laixi City; (f) fault-blocking water storage structure in Wangjialiuhe Village, Pingdu City;(g) Karst type water storage structure model in Dadongguan Village, Laixi City

3.2 岩性接触带型蓄水构造

岩性接触带型蓄水构造,是指由于不同时期侵入的岩浆岩、变质岩或岩脉与围岩接触带附近岩石发生挤压、拉伸导致岩石破碎,裂隙发育,形成良好的导水通道和储水空间,两侧的基岩中裂隙几乎不发育,是天然的隔水层,地下水沿接触带裂隙形成地下水富集区。该种蓄水构造主要分布于不同期次侵入岩、不同层沉积岩接触带中。

接触带型蓄水构造形成的地下水即为接触带型裂隙水,属于成岩裂隙水的一种。沿岩石破碎带的地下水径流、降雨入渗是地下水的主要补给方式。地下水潜水—承压水均存在,主要与接触带裂隙水发育的深度有关。

本次施工的 ZK11 孔,位于平度市大泽山镇棣家疃村,东侧大理岩出露,地势高,西侧为河谷冲积平原,地势平坦、地势自东向西降低,西侧及下部上覆薄层第四系后约 8~20 m,施工的钻孔位于大理岩与斜长角闪岩接触带上(图 2c),两侧基岩完整,岩溶不发育。在距地表深 70~80 m 附近接触带破碎,地下水径流沿接触带方向补给,并接受大气降水的补给。成井深度 100.5 m,水量达到 734.4 m^3/d,降深仅 12.05 m,东部大理岩分布区村内曾施工 10 余眼井均为干眼,西部地下水也均分布于上层第四系受到地表径流补给为主。水化学组分中 TDS 为 621 mg/L,总硬度 460.37 mg/L,硝酸盐 108.5 mg/L。由于该村缺水严重,地下水经适当处理后可用于生活用水。

3.3 断裂型蓄水构造

断裂型蓄水构造,包括断裂导水型蓄水构造和断裂阻水型蓄水构造(刘春伟等,2023),断裂富水性在不同岩性和不同,与构造发育情况有关,胶东半岛地区在侵入岩,特别是燕山侵入晚期,发生过多期构造运动,断裂构造广泛分布,是在胶东半岛等缺水基岩地区最重要的找水模型之一。

断裂导水型蓄水构造,一般分布在张性断裂发育地区,完整的基岩裂隙几乎不发育,透水性差,是天然的阻水体,而在断裂带附近及周边围岩发生拉伸破碎,使得裂隙发育而形成良好的导水通道和储水空间,来自远处的侧向径流和大气降水是最重要的补给来源。该种蓄水构造断裂破碎带的含水层通常埋藏较深,上部的完整基岩成为天然的隔水层,人类活动对水化学的影响较小。

ZK14 钻孔位于平度市东柳圈村东,地处丘陵地区,地势东高西低,上覆薄层第四系粉质黏土,下部及东部为荆山群石墨斜长片麻岩,施工的 ZK14 钻孔 70~90 m 有张性断裂通过,断裂带处岩石破碎,形成良好的导水通道和储水空间,断裂周边的完整岩石为隔水层,地下水侧向径流沿断裂处在此径流并富集(图 2d)。成井深度 100.8 m,降深 8.64 m 时,涌水量达到 590.4 m^3/d。水化学组分中 TDS 仅 237 mg/L,硝酸盐 1.45 mg/L。同时 Sr^{2+} 含量超过 0.2 mg/L,接近天然矿泉水标准,适宜做城镇、农村集中饮用水井。而根据在 ZK14 井附近采集 2 个调查井水样,井深分别为 26 m 和 40 m,属风化裂隙水,水中硝酸盐含量达 98 mg/L 和 108 mg/L,超过 V 类水标准,表明风化裂隙水与构造裂隙水补给来源不同,水力联系弱。

ZK15 钻孔位于莱西市后庄扶村东,大沽河西,上覆薄层第四系,下伏白垩系紫色砾岩夹细砂岩,基岩致密裂隙不发育,富水性极差,一般小于 50 m^3/d,该层沉积岩也是胶东典型不含水地层。ZK15 井深 120 m,在 80~100 m 深处隐伏张性断裂通过该处(图 2e)。张性断裂发育,岩石破碎,形成导水通道和储水空间,两侧完整的紫红色砂岩为隔水层,地下水沿断裂破碎处径流及富集。该钻孔成井深度 130 m,降深 10.39 m 时,涌水量达到 847.2 m^3/d。

断裂阻水型蓄水构造,一般分布在压扭性断裂发育地区,断裂带由于挤压而更加坚硬,断裂带被断层泥等充填,形成完整的阻水带(傅美兰,1985),压型断裂挤压导致周边岩石破碎形成导水通道和储水空间,来自大气降水和侧向径流是地下水补给最重要的来源。

本次施工的 ZK13 钻孔,位于王家流河村西,紧邻招平断裂东部,招平断裂在经历过多次时期构造运动,总体呈压扭性断裂,断层处致密,形成了良好的阻水空间,来自北部和东部的地下水侧向径流在此(图 2f),ZK13 孔深 100.2 m,水量约 226.5 m^3/d,降深 10.74 m,TDS 310 mg/L,硝酸盐含量 26 mg/L,但氟含量 2.25 mg/L,锶含量 0.94 mg/L,属于原生性水质问题。复杂的地质构造运动导致岩石发生破碎,释放了地层中 F^-,Sr^{2+} 等离子的溶解,地下水适宜在除氟后供应生活用水。

3.4 岩溶型蓄水构造

岩溶型蓄水构造主要分布在碳酸盐岩分布地区,岩溶发育(潘晓东等,2015)。胶东半岛地区碳酸盐岩分布较少,但因其易发育溶孔、溶洞,裂隙发育,并形成良好的集水地区,也同样是该地区一种重要的蓄水构造,岩溶型蓄水构造主要补给来源大气

降水和侧向径流,最终来源均为大气降水。

在莱西市大东馆村施工的 ZK04 孔,地处丘陵地区,地势东高西低,主要含水层为荆山群野头组定国寺段大理岩(Pt_1Jd^2),上覆薄层第四系,大理岩下部分布有变基性岩,20~40 m 处发育有溶洞,岩石破碎,是导水通道和储水空间,完整的大理岩和变基性岩均为不透水层作为隔水边界,地下水沿溶洞裂隙自东向西径流,形成地下水富集区域(图 2g),根据抽水试验,降深 3.75 m 时,钻孔出水量达 482.8 m^3/d。富水性相对较好,但水化学方面,TDS 含量 564 mg/L,总硬度 385.3 mg/L,硝酸盐含量达到 173.2 mg/L,仅适宜农田灌溉等用途,不适宜饮用。

4　人类活动影响下蓄水构造模式讨论

4.1　地下水同位素特征

氢氧同位素可以用来指征地下水的补给来源(熊贵耀等,2019),将研究区钻孔地下水中 δD 和 δ^{18}O 数据与全球大气降水线进行对比分析,全球大气降水线方程为 $\delta D = 7.5\delta^{18}O + 5.4$(Craig,1961)。绘制了 δ D—δ^{18}O 关系图(图 3),一般情况下,数据点落在大气降水线上或附近表明水体主要来源于大气降水,图 3 可以看出,水样同位素点均落在大气降水线附近,表明大气降水是地下水来源的最重要和直接的途径。

4.2　人类活动影响下蓄水构造识别

上述研究表明,研究区地下水起源于大气降水。

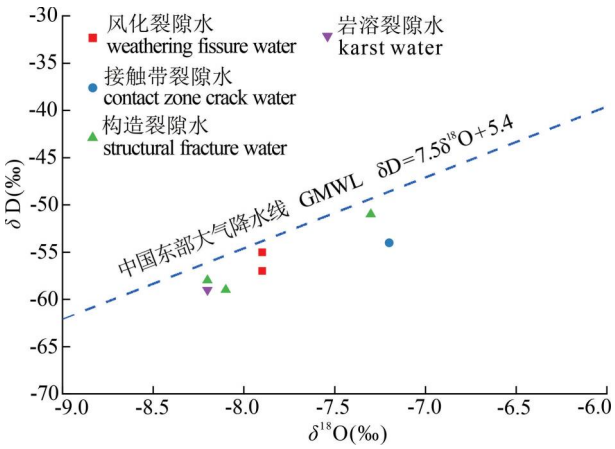

图 3 胶东半岛典型地下水的 δD—δ^{18}O 关系图

Fig. 3 Diagram of the relationship between δD—δ^{18}O in drilled groundwater in Jiaodong Peninsula

天然条件下,基岩山区地下水化学组分含量低,水质较好,寻找小型蓄水构造对于解决缺水山区供水问题有着重要的意义。但随着人类活动增加,人类活动需要大量的地下水开采,造成了地区富水性减少,含水层枯竭等问题,解决方案包括合理开采地下水,使得地下水得以可持续开采利用。对于水质的影响,主要源于工农业生产生活废水排放产生的硝酸盐等污染,造成水质型缺水问题。因此在寻找小型蓄水构造时考虑水量的同时,还需考虑水质、水化学的影响。

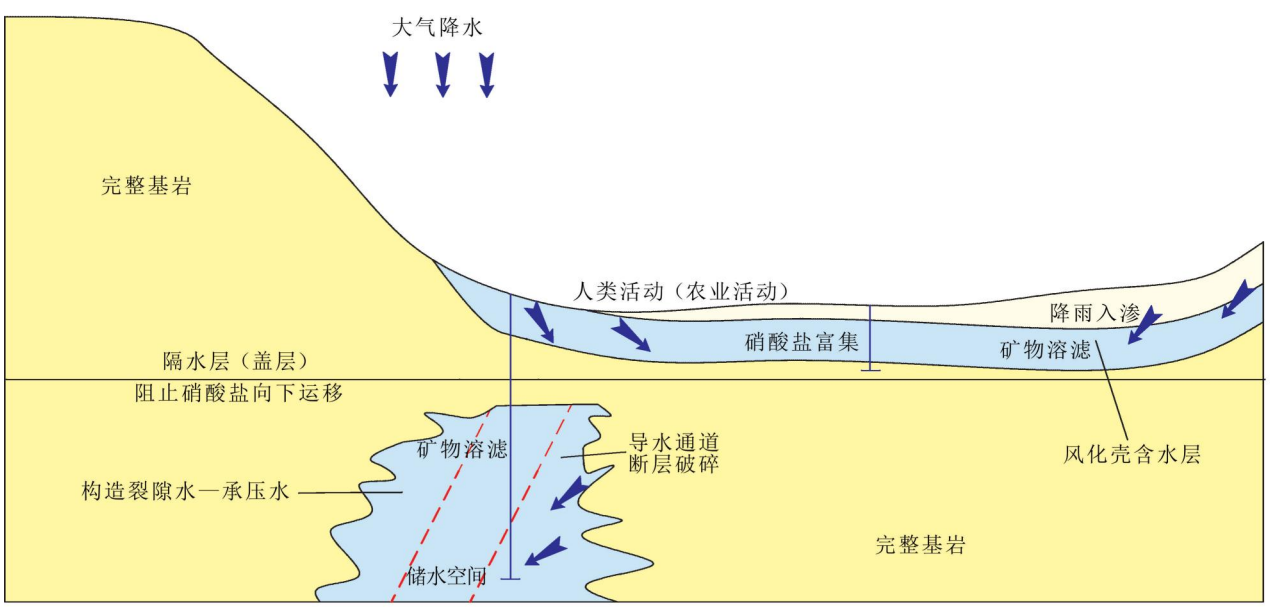

图 4 人类活动影响下蓄水构造模式及其水质特征识别

Fig. 4 Water storage structure model and water quality characteristics identification under the influence of human activities

基于此,在传统蓄水构造模式的基础上引入盖层的概念,用于在蓄水构造理论的基础上,识别不同蓄水构造模式适宜的供水方向。以断裂型蓄水构造和风化壳型蓄水构造为例,建立了人类活动影响下蓄水构造和水化学模型(图 4),可以看出,断裂型蓄水构造裂隙发育在断裂带或其附近,一般埋藏较深,形成构造裂隙水,多为承压水。上部完整基岩透水性差,是防止硝酸盐等污染物随地下水向下运移的天然盖层,地下水中硝酸盐含量、TDS 均较低,在无原生性离子超标(如 F^-,I^-)的前提下,水量和水质均得以保障,适宜作城镇、农村生活饮用水源。

沟谷洼地风化壳型蓄水构造,岩石风化破碎处均处浅层,形成的多为风化裂隙水,属潜水—微承压水,含水层埋深浅,上部无有效隔水层(盖层)阻止地下水中硝酸盐的溶解和富集,造成了硝酸盐型水的形成,通常该种类型地区具有较好的富水性,但水质较差,适宜作农田灌溉、工业用水等用途。

岩溶型和接触带型蓄水构造则与破碎带、岩溶带发育深度有关,发育较浅时一般用于工农业生产。发育深时上部有隔水层作为盖层隔离硝酸盐向下迁移,水质相对较好,可用于生活用水。

5 结论

本次研究总结了胶东半岛缺水山区 4 种蓄水构造模式;基于水化学、同位素特征,研究了人类活动对于不同蓄水构造地下水质的影响,提出了不同蓄水构造模式的地下水开发利用方向,为我国典型缺水山区特别是人类活动密集区找水方向提供借鉴。

(1)胶东典型缺水山区的蓄水构造类型主要包括沟谷洼地风化壳型蓄水构造、岩性接触带型蓄水构造、断裂型蓄水构造和岩溶型蓄水构造。

(2)人类活动影响导致以沟谷洼地风化壳型蓄水构造为代表的风化裂隙水硝酸盐含量升高,水质变差。以断裂型蓄水构造为代表的的构造裂隙承压水上部有较完整的基岩作为隔水盖层,阻止了硝酸盐等污染物向下运移,硝酸盐含量低,人类活动影响较小。

(3)区内地下水均来源于大气降水,断裂型蓄水构造的构造裂隙水水质好,富水性较好,适宜开发用于城镇、农村生活饮用供水。洼地沟谷风化壳型蓄水构造的地下水富水性好,水质较差,适宜用于农田灌溉、工业用水。

致谢:感谢项目组成员王世浩、李文强、高云雷、史健在野外调查、物探定井、钻探过程中的工作。

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)

陈京鹏, 蒋书杰, 杨询昌, 王华飞, 刘伟, 王学鹏, 谭志容. 2022. 大沽河流域上游水化学特征及其控制因素研究. 地质论评, 68(5): 1853~1862.

代娜, 郑宇轩, 陈京鹏. 2023. 胶东平度北部山区地下水蓄水构造与开采条件分区. 山东国土资源, 39(7): 7~13.

邓启军, 李伟, 朱庆俊, 马雪梅, 何锦, 马学军, 罗旋. 2020. 河北坝上张北县玄武岩区蓄水构造特征与找水实践. 地质通报, 39(12): 1899~1907.

樊连杰, 邹胜章, 解庆林, 卢丽, 林永生, 朱丹尼, 王佳, 周长松, 李军. 2021. 乌蒙山区地下水赋存独特性与开发利用模式——以昭觉地区为例. 地质学报, 95(11): 3544~3555.

冯亚伟, 陈洪年, 贾德旺. 2020. 山东省岩溶地下水系统划分及构造模式. 水文, 40(6): 83~88+39.

傅美兰. 1985. 胶东半岛变质岩区基岩裂隙水形成机理及其开发利用. 山东地质, (2): 61~69.

韩聪, 高宗军, 刘久潭, 李付全, 张永帅, 刘睿男, 冯超臣. 2021. 郯城地区地下水化学特征及针对硝酸盐的健康风险评价. 地球与环境, 49(4): 436~446.

贾德旺. 2020. 鲁南山区基岩蓄水构造类型及找水定井方法. 地质学刊, 44(3): 318~325.

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

李波, 宋一心, 高菡, 吴璇, 关琴, 刘春伟. 2021. 鲁中南地区古近系朱家沟组水文地质特征及富水模式. 地质力学学报, 27(1): 117~126.

刘春伟, 胡彩萍, 李传磊, 刘帅, 李波, 吴璇, 刘小天. 2023. 岩浆岩与变质岩分布区蓄水构造模式浅析——以胶东地区为例. 地质论评, 69(2): 526~534.

刘光亚. 1978. 基岩蓄水构造. 河北地质学院学报, (1): 19~39.

刘光亚. 1981. 基岩蓄水构造的理论与实践. 河北地质学院学报, (4): 50~56.

刘伟, 蒋书杰, 陈京鹏, 李东亮, 高云雷, 邢继飞. 2021. 莱西市基岩裂隙水赋存规律及开发利用浅析. 山东国土资源, 37(8): 28~34.

刘伟朋, 卢放, 韩振, 孟顺祥, 龚冀丛. 2019. 阜平县太古界变质岩区地下水的赋存规律与电性特征. 南水北调与水利科技, 17(6): 170~177.

潘晓东, 梁杏, 唐建生, 苏春田, 唐小军. 2015. 黔东北高原斜坡地区 4 种岩溶地下水系统模式及特点——基于地貌和蓄水构造特征. 地球学报, 36(1): 85~93.

王来明, 任天龙, 刘汉栋, 宁振国, 于晓卫, 郭瑞朋, 侯建华, 朱学强. 2021. 胶东地区中生代花岗岩划分. 山东国土资源, 37(8): 1~14.

王新峰, 宋绵, 龚磊, 肖攀, 何锦, 刘元晴. 2018. 赣南缺水区地下水赋存特征及典型蓄水构造模式解析——以兴国县为例. 地球学报, 39(5): 573~579.

魏善明, 丁冠涛, 袁国霞, 汪丽芳, 聂玉朋, 杜金亮. 2021. 山东省东汶河沂南地区地下水水化学特征及形成机理. 地质学报, 95(6): 1973~1983.

熊贵耀, 付腾飞, 韩江波, 陈广泉, 徐兴永, 徐秀丽, 刘贵群, 刘文全. 2019. 大沽河流域地下水水化学及同位素特征. 海洋科学进展, 37(4): 626~637.

袁磊, 张秋霞, 吴庭雯, 韩双宝, 李甫成, 于蕾. 2020. 安固里淖内流区基岩地下水赋存特征及蓄水构造模式. 科学技术与工程,

20(31): 12745~12752.

张福存, 王新峰, 李伟, 程旭学, 韩双宝, 潘晓东, 龚磊. 2022. 缺水基岩山区蓄水构造类型划分及其属性分析. 水文地质工程地质, 49(2): 7~16.

Cao Tianzheng, Han Dongmei, Song Xianfang, Dennis T. 2021. Subsurface hydrological processes and groundwater residence time in a coastal alluvium aquifer: Evidence from environmental tracers ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$, CFCs, ^{3}H) combined with hydrochemistry. Science of The Total Environment, 743: 140684. doi. org/10. 1016/j. scitotenv. 2020. 140684.

Chen Jingpeng, Jiang Shujie, Yang Xunchang, Wang Huafei, Liu Wei, Wang Xuepeng, Tan Zhirong. 2022&. Study on hydrochemical characteristics and controlling factors of the upper reach of Dagu river basin. Geological Review, 68(5): 1853~1862.

Craig H. 1961. Isotopic variation in meteoric waters. Science, 133 (3465): 1702~1703.

Dai Na, Zheng Yuxuan, Chen Jingpeng. 2023&. Groundwater storage structure and mining condition zoning in the northern mountainous area in Pingdu City in Jiaodong Area. Shandong Land and Resources,39(7): 7~13.

Deng Qijun, Li Wei, Zhu Qingjun, Ma Xuemei, He Jin, Ma Xuejun, Luo Xuan. 2020&. An analysis of the characteristics of water storage structure and the practice of groundwater exploration in the basalt area of Zhangbei County, Bashang, Hebei Province. Geological Bulletin of China, 39(12) : 1899~1907.

Fan Lianjie, Zou Shengzhang, Jie Qinglin, Lu Li, Lin Yongsheng, Zhu Danni, Wang Jia, Zhou Changsong, Li Jun. 2021&. Unique characteristics of groundwater occurrence and its development and utilization model in the Wumeng Mountain area—a case study of the Zhaojue area. Acta Geologica Sinica, 95(11): 3544~3555.

Feng Yawei, Chen Hongnian, Jia Dewang. 2020&. Division and structural pattern of karst groundwater system in Shandong Province. Journal of China Hydrology, 40(6): 83~88+39.

Fu Meilan. 1985&. mechanism for the formation of fissure water in bedrock and its exploitation in the metamorphic terrain of the eastern shandong peninsula, (2): 61~69.

Han Cong, Gao Zongjun, Liu Jiutan, Li Fuquan, Zhang Yongshuai, Liu Ruinan, Feng Chaochen. 2021&. Chemical characteristics of groundwater and health risk assessment of nitrate in Tancheng Area. Earth and Environment, 49(4): 436~446.

Jia Dewang. 2020&. Type of bedrock water storage structure and the method of water exploration and well determination in the southern mountainous area of Shandong. Journal of Geology, 44(3): 318~325.

Kang Fengxin, Xu Junxiang, Zhang Zhongxiang. 2010&. Groundwater resources and its potential in Shandong Province. Shandong Land and Resources, 26(8): 4~12.

Li Bo, Song Yixin, Gao Han, Wu Xuan, Guan Qin, Liu Chunwei. 2021&. Hydrogeological characteristics and water yield pattern of the Paleogene Zhujiagou formation in south—central Shandong Province. Journal of Geomechanics, 27(1): 117~126.

Liu Chunwei, Hu Caiping, Li Chuanlei, Liu Shuai, Li Bo, Wu Xuan, Liu Xiaotian. 2023&. Analysis of water storage structure model in the distribution area of magmatic and metamorphic rocks in Jiaodong Peninsula. Geological Review, 69(2): 526~534.

Liu Guangya. 1978#. Bedrock theory of water storage structure. Hebei Geological College, (1): 19~39.

Liu Guangya. 1981#. Theory and practice of basement water storage structure. Journal of Hebei University of Geology, (4): 50~56.

Liu Jiutan, Peng Yuming, Li Changsuo, Gao Zongjun, Chen Shaojie. 2021. Characterization of the hydrochemistry of water resources of the Weibei Plain, Northern China, as well as an assessment of the risk of high groundwater nitrate levels to human health. Environmental Pollution, 268, doi: 1016/j. envpol. 2020. 115947.

Liu Wei, Jiang Shujie, Chen Jingpeng, Li Dongliang, Gao Yunlei, Xing Jifei. 2021&. Study on occurrence law and exploitation and utilizationof fissure water in country rocks in Laixi City. Shandong Land and Resources, 37 (8): 28~34.

Liu Weipeng, Lu Fang, Han Zhen, Meng Shunxiang, Gong Jicong. 2019&. Occurrence law and electrical characteristics of groundwater in Archean metamorphic rock area of Fuping County. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 17(6): 170~177.

Pan Xiaodong, Liang Xing, Tang Jiansheng, Suchuntian, Tang Xiaosheng. 2015&. The patterns and characteristics of four karst groundwater systemsin northeast Guizhou slope zone based on the landscape and reservoir structure. Acta Geoscientica Sinica, 36 (1): 85~93.

Xiong Guiyao, Fu Tengfei, Han Jiangbo, Chen Guangquan, Xu Xingyong, Xu Xiuli, Liu Guiqun, Liu Wenquan. 2019&. Hydrogeochemical and isotopic characteristics of groundwater in Dagu River Basin. Advances in Marine Science, 37(4): 626~637.

Wang Laiming, Ren Tianlong, Liu Handong, Ning Zhenguo, Yu Xiaowei, Guo Ruipeng, Hou Jianhua, Zhu Xueqiang. 2021&. Division of Mesozoic granites in Jiaodong Area. Shandong Land and Resources, 37(8): 1~14.

Wang Xinfeng, Song Mian, Gong Lei, Xiao Pan, He Jin, Liu Yuanqing. 2018&. An analysis of characteristics of groundwater occurrence and typical model of water-storage structures in water-deficient areas of southern Jiangxi Province: a case study of Xingguo County. Acta Geoscientica Sinica, 39(5): 64~70.

Wei Shanming, Ding Guantao, Yuan Guoxia, Wang Lifang, Nie Yupeng, Du Jinliang. 2021&. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Yi'nan, East Wenhe River basin in Shandong Province. Acta Geologica Sinica, 95(6): 1973~1983.

Yuan Lei, Zhang Qiuxia, Wu Tingwen, Han Shuangbao, Li Fucheng, Yu Lei. 2020&. Characteristics of bedrock groundwater occurrence and structural model of water storage in Angulinao inflow area. Science Technology and Engineering, 20(31): 12745~12752.

Xiong Guiyao, Fu Tengfei, Han Jiangbo, Chen Guangquan, Xu Xingyong, Xu Xiuli, Liu Guiqun, Liu Wenquan. 2019&. Hydrogeochemical and isotopic characteristics of groundwater in Dagu River Basin. Advances in Marine Science, 37(4): 626~637.

Zhang Fucun, Wang Xinfeng, Li Wei, Chen Xuxue, Han Shuangbao, Pan Xiaodong, Gong Lei. 2022&. Classification and attribute analysis of water-storing structures in water deficient bedrock mountainous areas. Hydrogeology & Engineering Geology, 49(2): 7~16.

Acknowledgements: This paper was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42072331, U1906209), Taishan scholar project special funds (No. tstp20230626) and the provincial public welfare geological exploration project of Shandong Province (Nos. Lu Kanzi [2019]46, Lu Kanzi [2020]50)

Study on the typical water storage structure model of Jiaodong Peninsula under the influence of human activities

CHEN Jingpeng[1)], KANG Fengxin[2, 3, 4)], HAN Jianjiang[1, 3)], JIANG Shujie[1)], WANG Mingzhu[1)], WANG Weilong[1)], DUAN Xiaofei[1)]

1) *The Second Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources (Lubei Geo-engineering Exploration Institute), Dezhou, Shandong*, 253072;

2) *College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong*, 266590;

3) 801 *Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources (SPBGM), Jinan*, 250014;

4) *School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan*, 250022

Objectives: Jiaodong Peninsula is a typical water-scarce mountainous area in China, where magmatic rocks, metamorphic rocks and chalk impervious sandstones are widely distributed, and aquifers differ greatly in water richness. Meanwhile, there are intensive human activities in Jiaodong Peninsula, and the problem of poor water quality caused by poor water quality is also prominent, and resource-based water shortage and water quality poor water shortage problems exist simultaneously, In order to reveal the water storage structural model and water seeking direction of typical water-scarce mountainous areas under the influence of human activities.

Methods: The hydrogeological survey conducted in the typical water-scarce mountainous areas of Jiaodong Peninsula from 2019 to 2022, using 7 groups of borehole data, 7 groups of hydrochemical and isotope analysis samples from this construction, based on the theory of water storage structure and combined with the water chemical and isotope characteristics under the influence of human activities, the water richness of different types of water storage structures and the influence of human activities represented by nitrate on water quality were compared.

Results: In this paper, the structure of the water storage structure of the depression, the contact band, the fracture and the karst type are summarized. It is revealed that the nitrate content of the weathered fissure water represented by the weathered water storage structure in the depression and gully is increased and the water quality is poor due to human activities, It also revealed that the water is susceptible to human activity, the nitrate content is raised, the water quality is poor, the complete bedrom of the confined water layer is the influence of human activity on the groundwater, the low nitrate content and the water quality. The upper intact bedrock of structural fissure water (confined water) represented by fault-type water storage structure acts as a water barrier covering layer, which weakens the influence of human activities on groundwater, and has low nitrate content and good water quality.

Conclusions: The fault-type water storage structure-confined water is suitable for urban and rural domestic water, while the weathered water storage structure—weathered fissure water in depressions and valleys is suitable for industrial and agricultural production. The development and utilization direction of contact zone type and karst type water storage structure is related to the buried depth of aquifer.

Keywords: bedrock groundwater; water storage structure; groundwater chemistry; impact of human activities; Jiaodong Peninsula

First author: CHEN Jingpeng, male, born in 1991, bachelor, engineer, is mainly engaged in basic hydrogeology, environmental geology survey research; chenjingpeng@126.com

Corresponding author: KANG Fengxin, male, born in 1968, doctor, is mainly engaged in hydrogeological and geothermal geological research; Email: kangfengxin@126.com

Manuscript received on: 2023-07-13; Accepted on: 2023-12-17; Published online on: 2024-01-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2024.01.055 **Edited by**: ZHANG Yuxu