

基于水化学组分和环境同位素信息探讨 山东德州深层承压地下水起源

杨丽芝¹⁾, 曲万龙²⁾, 张勇³⁾, 刘春华¹⁾

1)山东省地质调查院, 山东济南 250013;

2)青岛地矿工程勘察院, 山东青岛 266071;

3)山东省物化探勘查院, 山东济南 250013

摘要: 本文针对海河流域平原长期过量开采深层水导致地下水位不断下降, 引发地面沉降等环境地质问题, 选择德州深层水分布区作为重点研究区, 以深层地下水化学组分及同位素信息作为主要研究对象, 探讨深层地下水起源与更新性。研究表明, 德州深层水主要形成于末次冰期盛期较寒冷的大气降水淋滤, 在形成及径流过程中, 遭遇较强烈的蒸发作用和阳离子交换作用, 形成以 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型水为主要成因类型, 具有高氟、高钠、低钙、偏碱性的水化学特征, 和氢氧稳定同位素低, 氘含量低的同位素特点; 深层地下水循环缓慢, 更新能力较弱。

关键词: 深层地下水; 水化学组分; 环境同位素; 起源

中图分类号: P641.11; P641.12 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2013.04.09

A Discussion on Deep Groundwater Origin of Dezhou in Shandong Province Based on Water Chemical Composition and Environmental Isotopic Information

YANG Li-zhi¹⁾, QU Wan-long²⁾, ZHANG Yong³⁾, LIU Chun-hua¹⁾

1) Shandong Institute of Geological Survey, Jinan, Shandong 250013;

2) Qingdao Geo-engineering Exploration Institute, Qingdao, Shandong 266071;

3) Shandong Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Jinan, Shandong 250013

Abstract: Aimed at solving the geo-environmental problems such as land subsidence resulting from continuous falling of water table due to over-exploitation, the authors selected the area of deep groundwater in Dezhou City as the key study area and took water chemical composition and environmental isotopic information as the study targets to discuss origin and refreshing capacity of deep groundwater. The results show that deep groundwater in Dezhou was mainly derived from precipitation in the last glacial period characterized by cold climate. During its formation, it had the characteristics of leaching and was affected by evaporation and cation exchange action. Later, it was interfered by many times of seawater invasion. It was dominated by $\text{HCO}_3\text{-Na}$ type water characterized by high fluorine, high sodium, low calcium and alkalescence, together with low concentrations of hydrogen and oxygen isotopes and low tritium content. The deep groundwater in Dezhou is recycled slowly and its refreshing capability is weak.

Key words: deep groundwater; water chemical composition; environmental isotope; origin

本文由国家 973 项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”(编号: 2006CB403401)和中国地质调查局地质大调查项目“华北平原地下水污染调查评价”(编号: 1212010634603)联合资助。

收稿日期: 2012-08-24; 改回日期: 2013-02-22。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 杨丽芝, 女, 1966 年生。博士, 研究员。长期从事地下水成因及循环演化研究一线工作。通讯地址: 250013, 济南市历下区建筑新村南路 35 号。电话: 0531-86559973。E-mail: ylz200456@163.com。

近 40 年来海河流域平原深层承压地下水严重超采, 水位降落漏斗不断扩展, 地面沉降等地质环境问题日益突出, 已经制约该区经济社会可持续发展。正确认识深层承压地下水起源及可更新性, 是该区地下水合理开发利用的重要基础。笔者根据环境同位素及相关水化学组分在地下水循环过程中特有的标记性特点(苏小四, 2004), 有针对性地采集区内地下水样品, 测试和分析地下水的 ^3H 、 D 和 ^{18}O 同位素和相关水化学组分。在此基础上, 应用环境同位素水文学方法, 研究深层承压地下水起源、循环特征与可更新性。

德州市位于山东省西北部, 北依京津塘, 南邻山东省省会济南, 西临河北省省会石家庄, 东接胜利油田和沿海经济开发区, 是环渤海经济圈的开放城市之一。研究区以德州市德城区为中心, 向东延伸至陵县, 南至平原、武城, 向西延伸至宁津, 西北、东北还包括河北省故城、景县、吴桥县部分区域。研究区属黄河下游冲积平原, 地势平坦开阔, 高程一般在 19~27 m 之间。研究区属于暖温带大陆型季风气候区, 多年平均气温 12.9 $^{\circ}\text{C}$, 多年平均降水量 553.6 mm(1953—2011 年), 多年平均蒸发量 1600~1900 mm。区内主要河流有南运河、岔河、四女寺减河和马颊河。

自中生代末期以来, 研究区接受了巨厚的新近纪—第四纪松散沉积物。区内地下水系统主要由新近系上部明化镇组和第四系组成。自上而下, 研究区地下水系统划分为 4 个孔隙含水岩组: 第 I 含水岩组, 底板埋深 40~50 m, 属于潜水, 是农业的主要开采层(孙剑锋等, 2011); 第 II 含水岩组, 底板埋深 250~300 m, 属于咸水层, 目前基本不开采; 第 III 含水岩组, 底板埋深 450~500 m; 第 IV 含水岩组, 底板埋深 800~950 m。第 III、IV 含水岩组属于承压含水层, 水头埋深 70~100 m, 水质普遍较好, 是城镇居民生活和工业用水的主要开采层, 也是本次研究的主要含水岩组。深层承压地下水在自然状态下, 自西南向东北流动, 最终排入渤海。

1 采样与测试分析方法

2007—2010 年期间, 在德州及周边地区采集深层承压地下水水化学分析样品和氢氧同位素样品 122 件(图 1)。所有地下水样品直接从井口采集, 采样前抽出井内存水的 3~5 倍的水量, 利用标定好的便携式 pH 计, 现场测定 pH 值及水温和气温。 ^{18}O 和 ^2H 样品分别采集在 500 mL 玻璃瓶中密封, 送至中国科

学院地质与地球物理研究所同位素测试中心测试, 稳定氧同位素 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 是利用 CO_2 平衡方法、稳定氢同位素 D/H 是利用锌还原方法, 通过质谱测定, 并且以 VSMOW(Vienna Standard Mean Ocean Water) 标准表示(刘存富等, 1984), δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的精度是 $\pm 1.0\%$ 和 $\pm 0.1\%$ 。放射性同位素 ^3H 样品采集在 1 L 的玻璃瓶中, 分析测试由中国地质科学院重点实验室完成, 样品首先电解浓缩后, 通过低本底正比计数计来测试, 并以氚单位(TU)表示, 测试数据的不确定度为 ± 1 TU。地下水的水化学组分测试, 按照中华人民共和国国土资源部(1993)地下水水质检验方法的要求, 由山东省地质环境监测总站实验室完成。

2 测试结果及分析

2.1 水化学组分的指示

德州深层承压地下水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型水占优势, 周边地区出现 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na}$ 或 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Cl-Na}$ 型水。阴离子中 HCO_3^- 含量 300~600 mg/L, 毫克当量百分比占 40%~70%, SO_4^{2-} 和 Cl^- 的毫克当量百分比分别占 10%~30%不等; 阳离子中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量很低, Na^+ 含量 200~400 mg/L, 毫克当量百分比占 80%~90%, 占绝对优势。深层地下水矿化度为 0.8~1.5 g/L, pH 值 8~8.5, 具有高氟、高钠、低钙、偏碱性的地下水化学特征。

表 1 统计了德州地区不同层位的地下水化学组分。随着深度的增加, 地下水化学类型由 $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na-Mg}$ 型渐变成 $\text{Cl-SO}_4\text{-Na-Mg}$ 型, 由过渡的 $\text{Cl-HCO}_3\text{-Na}$ 型变化至 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型; 阳离子 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和阴离子 Cl^- 、 SO_4^{2-} , 由小变大, 越过中间的咸水层, 又逐渐变小, 深部略有回升; 总硬度和矿化度的变化与上述离子的变化基本一致, 在 200 m 处形成峰值后回落; HCO_3^- 的含量自上而下变化不大; pH 值和 F^- 随深度的增加而逐渐升高。

德州地区处于华北平原的中东部, 其深层承压地下水化学特征与华北平原水化学特征具有良好的一致性; 就其循环途径而言, 处于径流排泄区。图 2 中 A 区是上游的石家庄地区深层承压地下水, 水化学类型显示补给区特征, 阴离子中 HCO_3^- 占优势, 阳离子中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 占优势, 表现为补给区大气降水淋滤水特征。C 区是下游东部滨州地区深层承压地下水, 阴离子中 Cl^- 占优势, 阳离子中 Na^+ 占优势, 表现为滨海地带排泄区地下水特征。B 区是德州一带深层承压地下水, 阴离子中 HCO_3^- 占优势, 表现为补给区大气降水淋滤水特征(张宗祜等, 2000); 阳离子中 Na^+ 占优势, 表

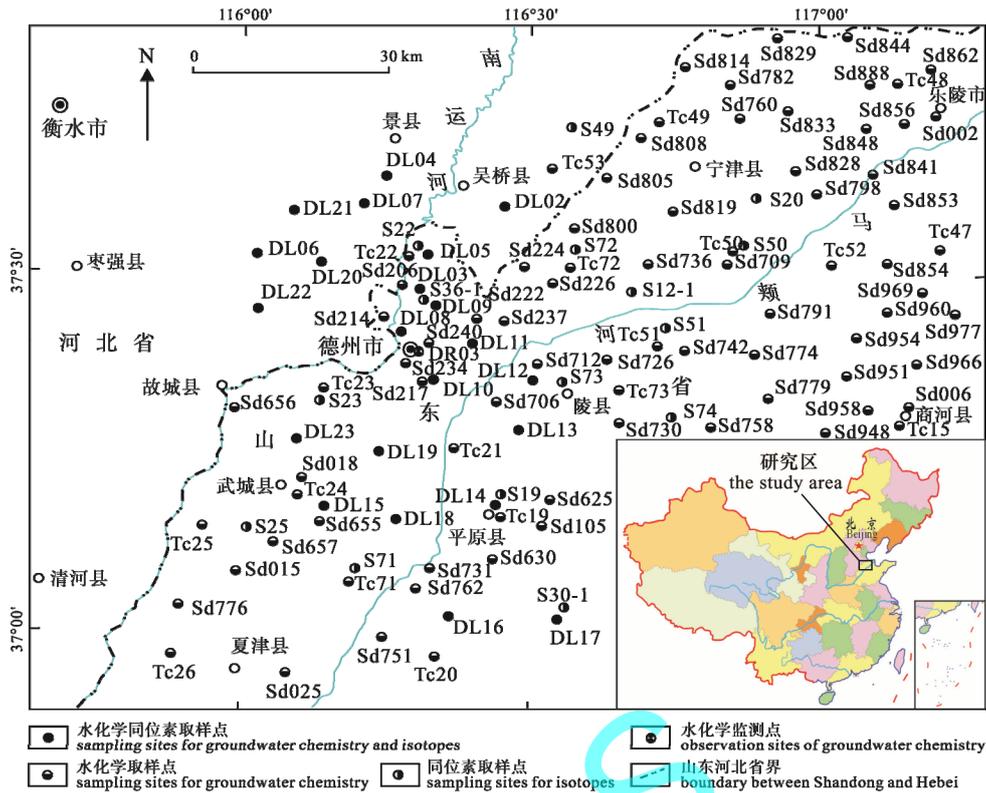


图 1 德州深层承压地下水取样点分布图
 Fig. 1 Sampling sites for deep groundwater chemistry in Dezhou depression cone area

表 1 德州漏斗地下水化学组成随深度变化表

Table 1 Variation of groundwater chemical composition with depth in Dezhou depression cone area

地下水埋藏深度 /m	化学组分含量/(mg/L)										类型
	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	F ⁻	总硬度	矿化度	pH	
0—60	233	69	70	191	239	560	0.7	428	1382	7.8	HCO ₃ ·Cl·SO ₄ -Na·Mg
60—200	1745	160	414	2092	2534	416	3.0	2103	7373	7.6	Cl·SO ₄ -Na·Mg
200—300	407	21	33	359	215	406	3.4	190	1466	8.0	Cl-HCO ₃ -Na
300—420	234	9	4	50	77	449	3.3	38	838	8.4	HCO ₃ -Na
420—500	258	7	3	52	86	449	3.3	30	865	8.3	HCO ₃ -Na
500—800	275	8	2	50	112	497	3.5	28	953	8.5	HCO ₃ -Na

明其在径流过程中或产生阳离子交换, Na⁺置换出大量的 Ca²⁺、Mg²⁺, 或遭遇多次海进干扰(陈宗宇等, 1998), 但海河平原深层承压淡水上部普遍存在的咸水层的影响也不可忽略, 其水化学类型为 Cl-Na 型, 矿化度高达 5~20 g/L。

深层承压地下水高氟的成因比较复杂, 其中比较充足的物质来源和特定的水文地质化学环境是形成高氟的基本条件。作为物质来源, 根据区内重矿物分析资料, 含水层组地层中普遍含有氟矿物, 尤以云母、磷灰石突出, 从而构成了地下水中氟的物质基础。作为水文地球化学环境条件, 主要取决于两个方面影响。第一是地下水化学成分(钱会等, 2005)。由氟化物在可溶性方面的差异(CaF₂ 溶度积

11×10⁻¹¹, MgF₂ 溶度积 6.5×10⁻⁹, NaF 溶解度为 42 g/kg), 氟由岩土向水中运移及在水中聚集, 严格受 Na/Ca 比控制。当水中的阴离子以钠为主时, 氟与钠结合成 NaF, NaF 具有极度高的溶解度, 而易在水中保存。第二是地下水介质影响, 最主要是它的酸碱环境。在碱性环境中, 随着水中[OH⁻]、HCO₃⁻的增加, 氟的溶出强度也增加。同时, 碱性水有利于碳酸平衡推向 CO₃²⁻方向, Ca²⁺与 CO₃²⁻结合成 CaCO₃ 而沉淀, 从而钙在水中缺乏, 减少了氟与钙形成 CaF₂ 沉淀的机会, 有利于氟与钠结合, 致使水中氟富集(邹环, 2011)。因此, 形成了德城区深层承压地下水在 pH 值大于 8 的偏碱性环境中, 高氟低钙的化学特征。

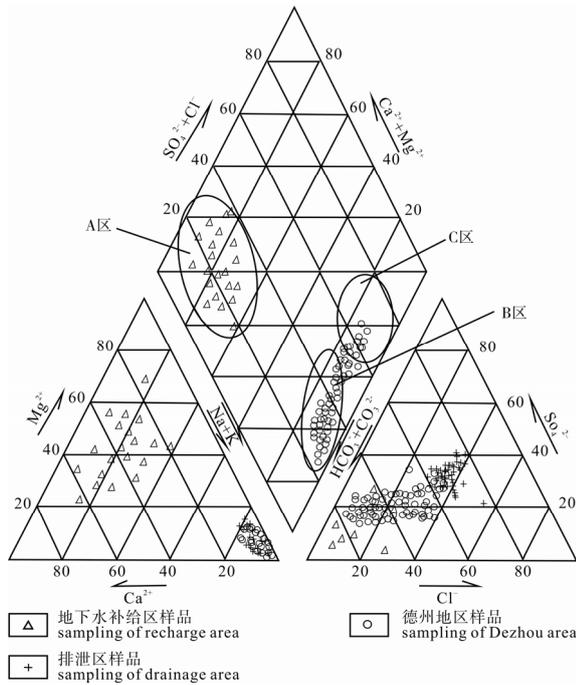


图2 德州漏斗区深层地下水水化学三线图
Fig. 2 Chemical characteristics of deep groundwater in Dezhou depression cone area

德州市一三九医院 500 m 深机井(DR03, 位置见图 1)承压地下水自 1991 年来就开始取样测试, 图 3 描述了其主要化学组分随时间的变化特征。从 20 世纪 90 年代初以来, 深层承压地下水组分未发生明显变化, 说明 深层承压地下水的径流十分缓慢或径流量十分有限, 在数十年的开采过程中, 外围的水还没有影响到其水质的变化; 德州地区深层承压地下水(、含水岩组)化学组分随深度变化不明显, 从 20 世纪 80 年代中期开始, 德州新施工的机井深度不断增加, 从 300 m 增加到 900 m, 深度的增加并没有改变地下水的化学组分; 德州地区砂层和粘性土层中的水, 水质并没有本质的差别。随着砂层水位的降低, 粘性土层压密释水补给含水层, 混合后水的化学组分并没有因此而改变。

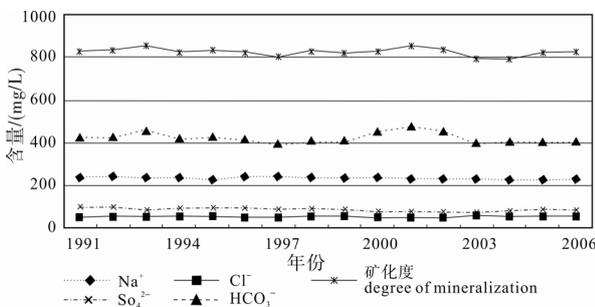


图3 德州地区深层承压地下水化学组分随时间变化曲线
Fig. 3 Variation of deep groundwater chemical composition with time in Dezhou area

2.2 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的指示

德州地区深层承压地下水具有氢氧稳定同位素低, 氚含量低的特点。 δD 值的变化区间为 -71‰ ~ -86‰ , 均值 -79‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ 变化区间为 -9.6‰ ~ -10.9‰ , 均值为 -10.2‰ (表 2); 不仅小于浅层地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值, 而且也远小于黄河水和现在大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值。其 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 关系图中, 大部分样点沿着平行于大气降水线的直线分布(图 4), 显示古气候效应(Fontes et al., 1993), 表明其大气降水成因, 且受到的蒸发作用影响远小于浅层地下水、地表水以及现在大气降水, 重同位素富集相对较轻(翟远征等, 2011)。同时, 深层承压地下水中 ^3H 含量为 $<0.5\sim 1.5$ TU, 均为低氚水。这表明, 德州地区深层承压地下水形成于地质历史时期。根据 $\delta^{18}\text{O}=0.35\text{‰}\sim 13.0\text{‰}$ (郑淑惠等, 1983), 计算的补给温度 $6.0\sim 9.7^\circ\text{C}$, 比现代平原气温低约 $3.2\sim 6.9^\circ\text{C}$ (12.9°C)。除了古气候因素可以造成地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏低外, 来自高海拔的补给也可以产生低 $\delta^{18}\text{O}$ 值现象(万军伟等, 2003)。根据现代气温和高程关系 $-0.45^\circ\text{C}/(100\text{ m})$ (张家诚, 1999), 太行山区最大降水高程为 1000 m, 计算的补给温度比山前平原低 $3.6\sim 4.5^\circ\text{C}$, 何况来自 1000 m 海拔的水仅占深层地下水补给量的一小部分, 说明高海拔降水补给不是造成贫氧同位素的主要原因。古气候研究表明, 黄土高原在末次冰期盛期比现今低 $5\sim 8^\circ\text{C}$ 。因此, 德州地区深层承压地下水是末次冰期盛期的补给, 这已经由孢粉研究和古水文研究证明。

在末次冰期时期, 由于不存在全新世地层, 现在的深层含水层埋藏较浅, 与大气降水和地表水联系密切, 水循环交替积极, 地下水流动速度快, 补给条件好, 降水及地表水的补给有足够长的时间交替出含水层中老的地下水, 使含水层中保存有距今 3 万至 1 万年的地下水。另外在向全新世过渡时期气候波动频繁。冰川退缩过程中的融水通过山前入渗或洪水补给进入含水层。随着全新世大暖期(Fontes et al., 1993)的到来, 海平面升高, 排泄基准面抬升, 伴随着地层的沉积形成, 地下水流动减缓, 冰期的地下水滞留于含水层之中而得以保存。前期 ^{14}C 同位素测试结果也表明, 区内深层地下水年龄为 0.65~2.5 万年, 大部分样点的 ^{14}C 同位素年龄为 1~2 万年(杨丽芝等, 2007, 2009)。在距今 1.5~1.8 万年的晚更新世末期, 华北平原气候相对开始转暖, 白花山冰期(大理冰期)的第二阶段进入末期, 冰川开始消融, 深层承压地下水的年龄与此相对应(陈宗宇等, 2002; 林祚顶, 2003)。

表 2 德州漏斗区深层地下水样品同位素测试数据表
Table 2 Isotopic data of deep groundwater samples from Dezhou depression cone area

样品编号	井深 /m	³ H /TU	$\delta^{18}\text{O}$ /‰	δD /‰	样品编号	井深 /m	³ H /TU	$\delta^{18}\text{O}$ /‰	δD /‰	样品编号	井深 /m	³ H /TU	$\delta^{18}\text{O}$ /‰	δD /‰
DL02	490	0.02	-10.14	-81.87	DL13	450	0.44	-9.65	-77.61	S20	300	5.5	-10.1	-81
DL03	831	0	-9.96	-79.32	DL14	800	0.17	-9.60	-77.04	S23	300	6.1	-10.8	-74.0
DL04	350	1.23	-10.23	-83.58	DL15	380	1.37	-9.85	-78.26	S25	300	4.0	-10.9	-71.0
DL05	360	0.39	-10.10	-81.54	DL16	400	1.57	-8.59	-68.78	S36-1	500	2.2	-10.6	-77.3
DL06	490	0.73	-9.98	-79.94	DL17	450	0.62	-9.22	-74.31	S49	300	<0.5	-9.9	-80.3
DL07	500	0.84	-9.96	-79.72	DL18	570	0.24	-9.72	-78.13	S50	380	<0.5	-9.7	-70.6
DL08	400	1.12	-10.05	-81.42	DL19	380	0.74	-9.73	-78.34	S51	400	<0.5	-9.6	-80.6
DL09	750	0.59	-9.90	-80.29	DL20	360	0.18	-10.08	-81.56	S71	500	<0.5	-10.3	-85.0
DL10	380	0.51	-9.97	-81.34	DL21	320	0.38	-9.77	-78.88	S72	450	6.1	-10.3	-85.4
DL11	300	0.50	-9.94	-80.43	DL22	400	0.28	-9.68	-78.76	S73	460	6.3	-10.0	-84.5
DL12	450	0.59	-9.63	-77.10	DL23	350	0.47	-9.96	-79.21	S74	380	8.7	-9.6	-86.8

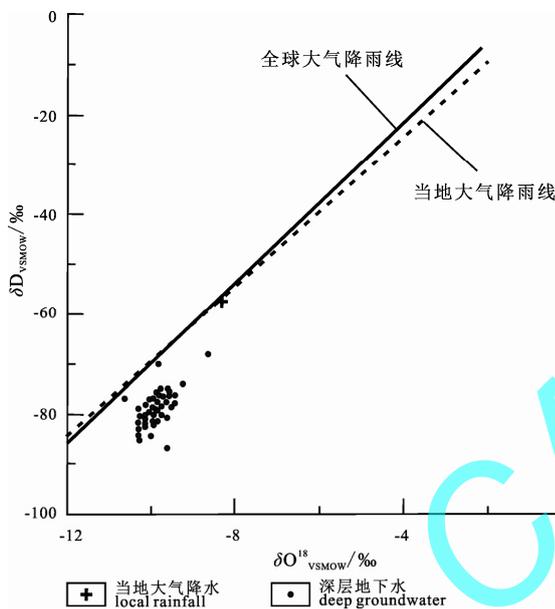


图 4 德州漏斗深层地下水 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 关系图
Fig. 4 Relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$ of deep groundwater in Dezhou depression cone area

3 深层承压地下水循环特征与可更新性

海河平原天然地下水流动是自晚更新世末期以来,伴随着冰退、海平面上升及海洋性气候的变化而调整到目前的模式(张光辉等, 2000)。在过去几十年里,大量开发深层承压地下水,天然流场被干扰,导致地下水流动模式发生变化。天然条件下,地下水流动方向为平原北部由西北向东南流,中部由西向东流,南部由西向东转为由南向北及东北流,最后经沧州、廊坊地区向天津方向流去(王金哲等, 2010)。

自 20 世纪 60、70 年代开始大量开发利用以来,深层承压地下水水位持续下降,德州及华北区域水

位降落漏斗产生并不断扩展。严重干扰了地下水自山前平原向滨海平原的径流。一般认为深层承压地下水大量开采,降落漏斗中心深层承压地下水水位快速下降,加大了深层承压地下水水力坡度,增加了深层承压地下水的排泄能力和排泄速度,势必会加速深层承压地下水径流,提高深层承压地下水的可更新能力和更新速度(张宗祜等, 1997)。但张蔚榛(2003)指出:深层承压地下水在远离山前的地区侧向补给十分微弱,尽管由于地下水的开采水位下降而诱发侧向补给,实际上也是动用邻区的地下水储存量。杨丽芝(2009)通过计算认为:深层承压地下水水力坡度加大,增加的侧向径流量实际是邻区含水层弹性释水和粘性土层压密释水量,最终导致区域地下水位的下降。

依据地下水同位素信息分析,中东部平原深层承压地下水贫氢氧重同位素、不含氦,¹⁴C 同位素年龄 1~2 万年,是末次冰期补给的古水,说明深层承压地下水的补给很少,可更新能力弱(石辉等, 2003; 王恒纯, 1990)。可再生水是指在合理的时间尺度内,能够通过水循环不断再生;不可再生水是指含水层中或其它天然水库中不能得到再补给或补给极缓慢以至大量抽取会引起采空的水。文冬光(2002)将更新时间为几十年的地下水称为可再生的,更新时间上百年的地下水具有一定的再生性,更新时间上千年的地下水再生性较差,更新时间上万年的地下水认为是不可再生的。地下水的运动是地下水水质点通过压力传导以活塞流的方式递进,理论上深层承压地下水开采随着时间增长,深层地下水会逐渐变新。华北平原深层承压地下水经历了 40 年来的强烈开采历史,但由此导致其年龄的变化,恰恰反映在其年龄的变老。华北平原除衡水漏斗区外,年老的地

下水分布区域大致与降落漏斗分布一致,反映出随着地下水位下降,开采的深部年老水比例增加。因而也认为华北深层承压地下水具有不可再生资源的属性。

4 结论

山东德州地区深层承压地下水主要起源于末次冰期盛期的大气降水,形成温度比现代温度低 $5\sim 8^{\circ}\text{C}$ 。深层承压地下水循环途径长,循环速度较慢,循环时间 $8\sim 20\text{ ka}$ 。在循环过程中,遭遇较强烈的蒸发作用和阳离子交换作用,形成以 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型水为主要成因类型。深层承压地下水补给量非常有限,可更新能力较弱。应适当缩减深层承压水的开采量,控制降落漏斗的进一步扩大,减少或控制由于过度开采深层承压地下水引发的地面沉降问题。

参考文献:

- 陈宗宇,张光辉,聂振龙,南云驹. 2002. 中国北方第四系地下水同位素分层及其指示意义[J]. 地球科学, 27(1): 97-103.
- 陈宗宇,张光辉,徐家明. 1998. 华北地下水古环境意义及古气候变化对地下水形成的影响[J]. 地球学报, 19(4): 338-345.
- 郇环,王金生,翟远征,郑洁琼. 2011. 北京平原区永定河冲洪积扇地下水水化学特征与演化规律[J]. 地球学报, 32(3): 357-366.
- 林祚顶. 2003. 同位素技术在水资源领域的应用[J]. 水利水电技术, 34(4): 6-8.
- 刘存富,王恒纯. 1984. 环境同位素水文地质学基础[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 钱会,马致远. 2005. 水文地球化学[M]. 北京: 地质出版社.
- 石辉,刘世荣,赵晓广. 2003. 稳定性氢氧同位素在水分循环中的应用[J]. 水土保持学报, 17(2): 163-166.
- 苏小四,林学钰. 2004. 银川平原地下水循环及其可更新能力评价的同位素证据[J]. 资源科学, 26(2): 29-35.
- 孙剑锋,杨丽芝,刘春华. 2011. 胜利油田陆上采油区浅层地下水与土壤有机污染特征研究[J]. 地球学报, 32(6): 725-731.
- 万军伟,刘存富,王佩仪. 2003. 同位素水文学原理与实践[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 王恒纯. 1990. 同位素水文地质学概论[M]. 北京: 地质出版社.
- 王金哲,张光辉,母海东,严明疆,聂振龙,王莹. 2010. 浅层地下水补给对人类活动影响的响应特征研究[J]. 地球学报, 31(4): 557-562.
- 文冬光. 2002. 用环境同位素论区域地下水资源属性[J]. 地球科学, 27(5): 532-533.
- 杨丽芝,刘春华,刘中业,卫政润,韩晔. 2007. 华北平原地下水可持续利用调查评价(山东)报告[R]. 济南: 山东省地质调查院.
- 杨丽芝,张光辉,刘中业,刘春华. 2009. 鲁北平原地下水同位素年龄及可更新能力评价[J]. 地球学报, 30(2): 235-242.

- 杨丽芝. 2009. 德州深层地下水位降落漏斗演变机制与可调控性研究[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 翟远征,王金生,滕彦国,左锐. 2011. 北京平原区永定河地下水系统地下水化学和同位素特征[J]. 地球学报, 32(1): 101-106.
- 张光辉,陈宗宇,费宇红. 2000. 华北平原地下水形成与区域水文循环演化的关系[J]. 水科学进展, 11(4): 415-420.
- 张家诚. 1999. 水分循环与气候背景[J]. 水科学进展, 10(3): 265-300.
- 张蔚榛. 2003. 地下水的合理开发利用在南水北调中的作用[J]. 南水北调与水利科技, 1(4): 1-7.
- 张宗祜,沈照理,薛禹群. 2000. 华北平原地下水环境演化[M]. 北京: 地质出版社.
- 张宗祜,施德鸿,沈照理,钟佐燐,薛禹群. 1997. 人类活动影响下华北平原地下水环境的演化与发展[J]. 地球科学, 18(4): 337-344.
- 郑淑惠,侯发高,倪葆龄. 1983. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. 科学通报, 28(13): 801-806.
- 中华人民共和国国土资源部. 1993. 地下水水质检验方法 DZ/T0064—93[S]. 北京: 中国标准出版社.

References:

- CHEN Zong-yu, ZHANG Guang-hui, NIE Zhen-long, NAN Yun-ju. 2002. Groundwater Isotopic Stratification and Its Implications in Northern China[J]. Earth Science, 27(1): 97-103(in Chinese with English abstract).
- CHEN Zong-yu, ZHANG Guang-hui, XU Jia-ming. 1998. Signification of Archaic Environment and Effect of Archaic Climate to Groundwater Foemation in Hebei Plain[J]. Acta Geoscientica Sinica, 19(4): 338-345(in Chinese with English abstract).
- FONTES J C, SCUTE M, SEHIOSSER P, BROECKER W S. 1993. Aquifers as archives of paleoclimate[J]. EOS Transactions American Geophysical Union, 74: 21-22.
- LIN Zuo-ding. 2003. Application of Isotope Techniques in Hydrology and Water Resources Field[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 34(4): 6-8(in Chinese with English abstract).
- LIU Cun-fu, WANG Heng-chun. 1984. Environment Isotope hydrogeology Foundation[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese).
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. 1993. The Measure of Inspection about Groundwater Qualitatively DZ/T0064—93[S]. Beijing: Chinese Standard Press(in Chinese).
- QIAN Hui, MA Zhi-yuan. Hydrogeochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- SHI Hui, LIU Shi-rong, ZHAO Xiao-guang. 2003. Application of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope in Water Circulation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 17(2): 163-166(in Chinese with English abstract).

- SU Xiao-si, LIN Xue-yu. 2004. Cycle Pattern and Renewability Evaluation of Groundwater in Yinchuan Basin: Isotopic Evidences[J]. Resources Science, 26(2): 29-35(in Chinese with English abstract).
- SUN Jian-feng, YANG Li-zhi, LIU Chun-hua. 2011. Shallow Groundwater and Soil Characteristics Studies of Organic Pollution Overland of Shengli Oil Field[J]. Acta geoscientica sinica, 19(4): 725-731(in Chinese with English abstract).
- WAN Jun-wei, LIU Cun-fu, WANG Pei-yi. 2003. Isotope hydrology Principle and Practice[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese).
- WANG Heng-chun. 1990. Isotope hydrogeology Introduction[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- WANG Jin-zhe, ZHANG Guang-hui, MU Hai-dong, YAN Ming-jiang, NIE Zhen-long, WANG Ying. 2010. Research about Characteristics of Response to Activity of Humanbeing of Shallow Groundwater Recharge[J]. Acta Geoscientica Sinica, 31(4): 557-562(in Chinese with English abstract).
- WEN Dong-guang. 2002. Groundwater Renewability Based on Environment Isotope[J]. Earth Science, 27(5): 532-533(in Chinese with English abstract).
- HUAN Huan, WANG Jin-sheng, ZHAI Yuan-zheng, ZHENG Jie-qiong. 2011. Characteristics of Groundwater Hydrochemistry and Evolution Orderliness in Alluvial Fan of Yongding River Groundwater System in Beijing[J]. Acta Geoscientica Sinica, 32(3): 357-366(in Chinese with English abstract).
- YANG Li-zhi. 2009. Form Principle and Controlling-adjusting Research about Deep Groundwater Depression Cone in Dezhou[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- YANG Li-zhi, LIU Chun-hua, LIU Zhong-ye, WEI Zheng-run, HAN Ye. 2007. The Survey and evaluation about Groundwater Sustainable development in the HuaBei Plain(in Shandong Province)[R]. Jinan: Shandong Institute of Geological Survey(in Chinese).
- YANG Li-zhi, ZHUANG Guang-hui, LIU Zhong-ye, LIU Chun-hua. 2009. Isotope Age of Groundwater in Lubei Plain and An Evaluation of Its Renewable Capacity[J]. Acta Geoscientica Sinica, 30(2): 235-242(in Chinese with English abstract).
- ZHAI Yuan-zheng, WANG Jin-sheng, TENG Yan-guo, ZUO Rui. 2001. Characteristics of Groundwater Hydrochemistry and Isotopic in Plain of Yongding River Groundwater System in Beijing[J]. Acta Geoscientica Sinica, 32(1): 101-106(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Guang-hui, CHEN Zong-yu, FEI Yu-hong. 2000. Relationship between the Formation of Groundwater and the Evolution of Regional Hydrologic Cycle in North China Plain[J]. Advances in Water Science, 11(4): 415-420(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Jia-cheng. 1999. Moisture Cycle and Climate Background[J]. Advances in Water Science, 10(3): 265-300(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Wei-zhen. 2003. Function of reasonable development in South-to-North Water Diversion project[J]. South-to-North Water Diversion and Water Science and Technology, 1(4): 1-7(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zong-hu, SHI De-hong, SHEN Zhao-li, ZHENG Zuo-xin, XUE Yu-qun. 1997. Groundwater Environment Evolution Under The Conditions of Effect From Humanity in HuaBei Plain[J]. Earth Science, 18(4): 337-344(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zong-hu, SHEN Zhao-li, XUE Yu-qun. 2000. Groundwater Environment Evolution in Huabei Plain[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ZHENG Shu-hui, HOU Fa-gao, NI Bao-ling. 1983. Research about Stable Hydrogen and Oxygen Isotope in precipitation Water in China[J]. Aviso Science, 28(13): 801-806(in Chinese with English abstract).