

章斌, 宋献方, 郭占荣, 等. 2013. 用氯和氢氧同位素揭示洋戴河平原地下水的形成演化规律[J]. 环境科学学报, 33(11): 2965-2972

Zhang B, Song X F, Guo Z R, et al. 2013. Investigation of the origin and evolution of groundwater in Yang-Dai River Plain by chlorine, oxygen 18 and deuterium[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 33(11): 2965-2972

用氯和氢氧同位素揭示洋戴河平原地下水的形成演化规律

章斌^{1, 2, 3}, 宋献方², 郭占荣³, 赵肖¹, 韩冬梅², 肖国强⁴, 杨吉龙⁴, 刘明清^{1, *}

1. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655
2. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101
3. 厦门大学海洋与地球学院, 厦门 361005
4. 天津地质矿产研究所, 天津 300170

收稿日期: 2013-06-15 修回日期: 2013-08-03 录用日期: 2013-08-03

摘要: 通过分析地表水和地下水中氯离子浓度和 δD 、 $\delta^{18}O$ 值的空间分布特征, 揭示了秦皇岛洋戴河平原地下水的形成演化规律. 结果发现, 洋戴河平原地表河水来源于中上游水库水和大气降水的混合, 且河水沿程受到 δD 、 $\delta^{18}O$ 值、氯离子浓度更低的支流或灌溉水补给, 从而使 δD 、 $\delta^{18}O$ 值、氯离子浓度呈现沿程逐渐降低的现象. 山前丘陵区地下水主要接受大气降水的直接补给, 洪积扇及山麓地带地下水受到了一定的蒸发作用影响. 除了接受丘陵区地下水的侧向补给外, 洋河附近地下水还受到洋河水库水的混合. 研究区西部咸水带的地下水由上游地下水和大泥河地热咸水混合而成, 地热咸水的混合比率约为 13%, 而东部咸水带的地下水由上游地下水、本地污水和地热咸水混合而成, 地热咸水的混合比率不超过 9%. 在海水入侵区, 地下水主要由本区地下淡水和海水(海水混合比率不超过 10%) 混合而成, 并且受到了不同程度的地表水或农田灌溉水的补给, 其中, 浦河一带是地表水或灌溉水补给较为明显的地段.

关键词: 洋戴河平原; 海水入侵; 氯离子; 氢氧同位素; 地表水; 地下水; 地热咸水; 海水; 形成演化

文章编号: 0253-2468(2013)11-2965-08 中图分类号: P641.3, X523 文献标识码: A

Investigation of the origin and evolution of groundwater in Yang-Dai River Plain by chlorine, oxygen 18 and deuterium

ZHANG Bin^{1, 2, 3}, SONG Xianfang², GUO Zhanrong³, ZHAO Xiao¹, HAN Dongmei², XIAO Guoqiang⁴, YANG Jilong⁴, LIU Mingqing^{1, *}

1. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655
2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101
3. College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005
4. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170

Received 15 June 2013; received in revised form 3 August 2013; accepted 3 August 2013

Abstract: The aim of this paper is to reveal the origin and evolution of surface water and groundwater by analyzing the spatial distribution of chloride ion concentration and δD and $\delta^{18}O$ values in surface water and groundwater in Yang-Dai River Plain. The Yang-Dai River originates from the mixing of water of reservoir and meteoric water, and river water is also from the recharge in the tributary and irrigation ditch which have much lower chloride ion concentration and δD and $\delta^{18}O$ values. Therefore, chloride ion concentration and δD and $\delta^{18}O$ values in river water decreases gradually from upstream to downstream. The groundwater in hilly area is primarily recharged by meteoric water, and the groundwater in pluvial fan and piedmont experiences evaporation partly. The groundwater in pluvial fan and piedmont is recharged not only laterally by upstream groundwater from mountainous and hilly area, but also by Yang River reservoir water. In the study area, the groundwater in the west part of salty water region is mixed between upstream groundwater

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No. 2010CB428805); 环保公益性行业科研专项经费项目(No. 201309006)

Supported by the National Basic Research Program of China (No. 2010CB428805) and the Special Research Funds Program for Public Welfare Environmental Protection Industry (No. 201309006)

作者简介: 章斌(1985—), 男, 助理工程师, E-mail: zhangbinem@gmail.com; * 通讯作者(责任作者), E-mail: liumingqing@scies.org

Biography: ZHANG Bin (1985—), male, assistant engineer, E-mail: zhangbinem@gmail.com; * Corresponding author, E-mail: liumingqing@scies.org

and salty geothermal water originated from Danihe area, with a mixing ratio of 13% salty geothermal water. In comparison, the groundwater in the east part of salty water region is mixed by upstream groundwater, sewage water and salty geothermal water, with a mixing ratio of up to 9% salty geothermal water. In the seawater intrusion region, the groundwater was mainly constituted of local fresh groundwater and intrusive seawater with a mixing ratio of up to 10% seawater, and is also partly recharged by surface water and agricultural irrigation water which have higher contribution to the groundwater recharge in Pu River area.

Keywords: Yang-Dai River Plain; seawater intrusion; chloride ion; δD ; $\delta^{18}O$; surface water; groundwater; salty geothermal water; seawater; origin and evolution

1 引言(Introduction)

地表水和地下水是流域水循环的重要组成部分,地下水的形成演化直接关系到地表水和地下水资源量的增减(宋献方等,2007).在经济发达的沿海地带,由于缺乏对地下水形成演化规律的正确认识,过量抽取地下水,破坏了滨海地带地下水的循环过程,从而造成区域地下水位下降,引发海水入侵灾害.对滨海含水层地下水的形成演化规律开展研究,有助于提升滨岸带海水入侵机理的整体认识水平,对滨海地区地下淡水资源的开采利用有着重要的指导意义.

氢氧同位素和氯离子是地下水中水化学性质稳定且保守的示踪剂(章斌等,2012),前者可以有效地揭示地下水形成演化及与不同水体的混合过程(Burnett *et al.*, 2006; 于静洁等,2007; Julie *et al.*, 2009; 张东等,2010),而后者可以有效地指示地下水盐分的来源及咸淡水的混合(Julie *et al.*, 2009).早在1983年,氢氧稳定同位素和氯离子就被 Dakin 运用于揭示加拿大不列颠哥伦比亚省 Mayne 岛地下咸水的来源(Dakin *et al.*, 1983).随后,更多的研究者陆续将氢氧同位素和氯离子运用于滨海地下水形成演化的研究,并取得了较好的效果(潘曙兰等,1997; Kima *et al.*, 2003; 卢继强等,2004; Kass *et al.*, 2005; 姚菁等,2007; 蒋方媛等,2009; Jeff *et al.*, 2010; 杨吉龙等,2009; 李忠心等,2010; 杨巧凤等,2010; Han *et al.*, 2011; 章斌等,2013).迄今为止,有关秦皇岛洋戴河平原的基础水地球化学调查和海水入侵模型研究成果较为丰富(左文喆,2006; 杨吉龙等,2009),但该区地下水的形成演化规律却未开展系统研究.因此,本文将以太皇岛洋戴河平原作为典型研究区,运用氯离子和氢氧同位素探讨该区地下水的形成演化规律.

2 研究方法(Methods)

2.1 研究区域

秦皇岛位于河北省东北部,渤海西侧,北纬 39°

$24^{\circ} \sim 40^{\circ}37'$,东经 $118^{\circ}33' \sim 119^{\circ}51'$,位于环渤海经济圈的中心区.研究区洋戴河平原位于秦皇岛市北戴河区西侧的滨海区,大部分地区处于抚宁县行政辖区内,平原面积约 234 km^2 ,是秦皇岛境内分布面积较大的第四系冲洪积平原.洋戴河平原西北东三面环山,西部陡峻而高,东北平缓且低,南部临海,中部平原略向海倾斜.研究区属于暖温带半湿润大陆性季风气候区,年内四季分明,寒暑交替明显,受季风控制,形成“春季少雨干燥、夏季湿润多雨、秋季晴朗干爽、冬季寒冷少雪”的气候特征.根据秦皇岛气象观测站1954—2011年的降水、温度和湿度数据(数据来源:中国气象科学数据共享服务网 <http://cdc.cma.gov.cn/>),研究区年平均降水量、温度和湿度分别为 640.8 mm 、 10.6°C 、 62.1% ,年内降水主要集中在6—8月(多年平均降水量 448.2 mm),12月至次年2月降水较少(多年平均降水量 11.3 mm).区内水系主要以洋河(支流浦河)和戴河为主,两河均发源于燕山山脉,洋河从研究区西北部流入,多年平均径流量 $1.11 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,戴河由研究区东北部流入,多年平均径流量 $2.74 \times 10^7 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ (仅为洋河的24.7%),两河贯穿洋戴河平原,于平原南部入海.研究区受区域多期地质构造运动的控制,主要发育的断裂带有3组,均为隐伏断裂,一组为通过平原南部基底的NE走向深大断裂—昌黎断裂,断裂属华夏构造体系,形成于古生代,中生代以后重新活动至今;另两组为NW走向的断裂,表现为独立的构造形式,断裂性质为张扭及压性反扭.研究区前第四纪地层出露较为简单,平原西部、北部和东部分别出露地层有新近系霓辉钠长混合岩(N_{nb})、中生界花岗侵入岩(γ_5)、侏罗系凝灰岩及安山岩(J_3)、太古宇片麻岩(A_{tb})、侏罗系混合花岗岩(J_h)等,第四系松散堆积层下伏基岩以太古宇片麻岩(A_{tb})和混合花岗岩(J_h)为主.

2.2 研究方法

为研究本区地下水的形成演化规律,在区域地下水整体流向上,选择洋戴河平原高庄—洋河口剖面作为研究对象,于2010年8月实施网络式系统采

样, 合计采集洋河、戴河水样 5 组, 地下水样 23 组 (井深小于 60 m 的浅层地下水样 21 组; 井深大于 60 m 的深层地下水样 2 组), 海水样 1 组, 水样合计 29 组. 其中, 地表水采自于水面以下 1 m 左右, 地下水取自还在使用中的民用水井. 水样均采用 50 mL 聚乙烯塑料瓶采集, 确保瓶内无气泡后, 用封口胶密封, 常温、避光保存. 采样点分布如图 1 所示. 在水样采集现场, 采用 Garmin GPS 60CSx 定位并记录采样点位的地理位置, 用 WTW Vario Cond 手持式盐度计测定监测水的电导率值 EC, 用水位计测定地下

水位埋深, 并调查井深和地下水类型. 水样氯离子及其他阴离子浓度分析在中国科学院地理与资源研究所理化分析中心完成, 采用离子色谱仪 (Shimadzu LC-10 AD) 测定. 氢氧稳定同位素分析在中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室完成, 采用液态水同位素分析仪 (Los Gatos Research Inc DLT-100) 测定, 测定结果以相对于维也纳标准平均海水 (Vienna Standard Mean Oceanic Water, VSMOW) 的千分偏差形式表示, 测定精度分别为 $\pm 0.6\text{‰}$ 和 $\pm 0.2\text{‰}$.

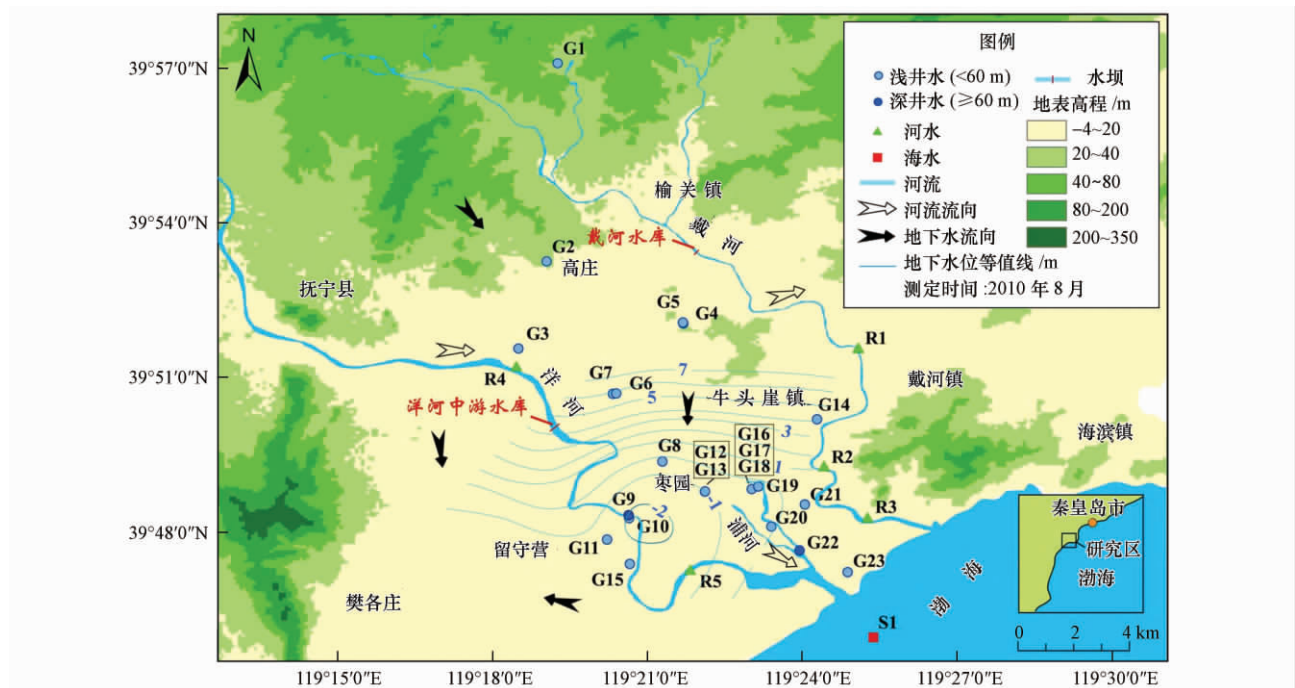


图 1 采样点分布图

Fig. 1 Sampling stations of study area

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 本地参考降水线方程的建立

由于本区没有降水同位素的观测站点, 现从国际原子能机构的全球降水同位素观测网络 GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation, <http://isohis.iaea.org>) 中选择参考站点, 综合考虑参考站点与本区地理位置、气候分区、地形地貌的一致性、主要气象因子的相关性及其同位素数据的丰富程度, 选择天津站作为本区降水同位素的参考站点. 根据 GNIP 天津站点 1985—2003 年的 64 个降水同位素数据, 可以建立本地参考降水线方程: $\delta D = 6.57\delta^{18}O + 0.31$ ($N = 64$, $R^2 = 0.8829$, $p < 0.0001$).

3.2 河水同位素的沿程变化特征及形成规律

河水是地下水的重要补给来源之一, 研究洋戴河平原地表水的变化特征及形成规律是进一步开展本区地下水形成演化规律研究的前提. 洋戴河平原洋河水 δD 、 $\delta^{18}O$ 的变化范围 (平均值) 分别为 $-70.8\text{‰} \sim -65.1\text{‰}$ ($-68\text{‰} \pm 4.0\text{‰}$)、 $-10.1\text{‰} \sim -9.2\text{‰}$ ($-9.6\text{‰} \pm 0.6\text{‰}$), 戴河水 δD 、 $\delta^{18}O$ 的变化范围 (平均值) 分别为 $-68.8\text{‰} \sim -66.2\text{‰}$ ($-67.4\text{‰} \pm 1.3\text{‰}$)、 $-9.7\text{‰} \sim -9.4\text{‰}$ ($-9.5\text{‰} \pm 0.2\text{‰}$). 通过分析洋河和戴河水的沿程同位素、EC、 Cl^- 浓度变化发现, 两河河水均表现出氢氧同位素沿程贫化, EC、 Cl^- 浓度沿程降低的现象. 此外, 在 δD - $\delta^{18}O$ 关系图 (图 2) 中, 两河河水的同位素组成均落在降水线的右下方 (距离降水线较近), 并位于同一条直线

上,说明两河水均同时接受同一种同位素更为贫化、 Cl^- 浓度和 EC 更低的水体所补给,同时还受到了一定的蒸发作用影响.笔者认为出现以上现象的原因是由于两河水沿程受到支流和灌渠水的补给所致.具体分析如下:①戴河和洋河水样采集日期是2010年8月23—24日,采样前4 d 连续降水量达100.4 mm,占8月份降水量的34%,全年降水量的15%(数据来源:中国气象科学数据共享服务网 <http://cdc.cma.gov.cn/>);②洋河和戴河沿程均分布有诸多大小支流和灌渠水的出口,这些大小支流

和灌渠水均来源于 EC 和 Cl^- 较低的降水直接补给,这使河流沿程 EC 和 Cl^- 降低;③支流和灌渠水的氢氧同位素较河水贫化,这一方面是由于洋河和戴河中游均建有水库,水库拦蓄使得河水滞留于河道的时间延长,河水受到了一定的蒸发作用影响,河水同位素较为富集;另一方面,降水过程中的降水量效应(Craig, 1961)和流域产流的滞后效应,使得在降水后期,同位素更贫化的降水汇流至主干道需要更长时间,其与干流同位素更富集的河水混合后便形成了河流同位素沿程贫化的现象.

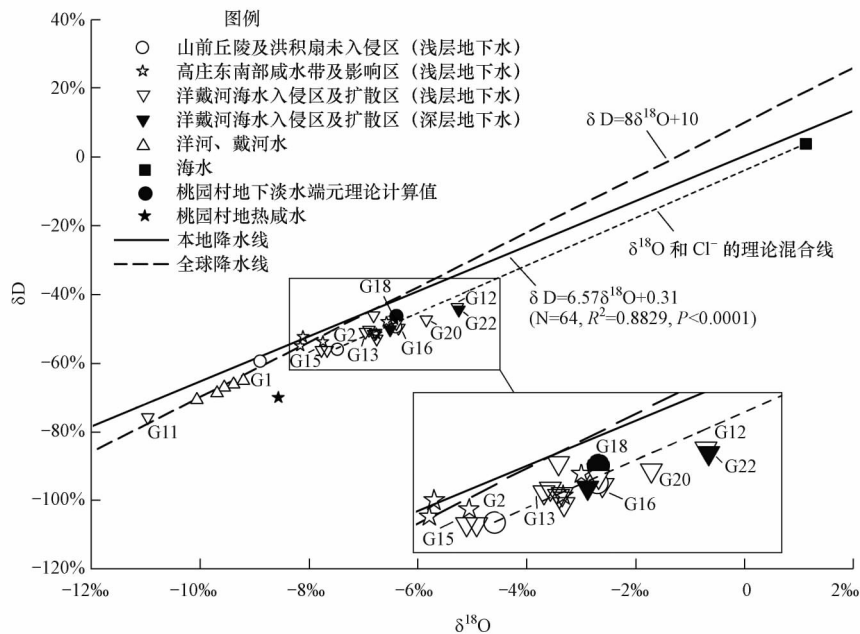


图2 研究区各水体的 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 关系图

Fig. 2 Relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$ of various water bodies in the study area

3.3 洋戴河平原地下水的形成演化规律

根据地下水整体径流方向上 Cl^- 浓度和氢氧同位素组成的总体变化特征(图3),可以将研究区划分为3个次级研究区,分别为: Cl^- 浓度低且同位素最为贫化的山前丘陵及洪积扇未入侵区; Cl^- 浓度高且同位素整体比较贫化的高庄东南部咸水带及影响区; Cl^- 浓度较高且同位素最为富集的洋戴河海水入侵区及扩散区.

3.3.1 山前丘陵及洪积扇未入侵区地下水的形成演化 G1、G2 和 G3 均采自山前丘陵及洪积扇地带的浅层地下水, Cl^- 浓度变化范围(平均值)为 $58.5 \sim 248 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($161.2 \pm 95.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围(平均值)分别为 $-59.6\text{‰} \sim -49.5\text{‰}$ ($-55.0\text{‰} \pm 5.1\text{‰}$)、 $-8.9\text{‰} \sim -6.4\text{‰}$ ($-7.6\text{‰} \pm 1.2\text{‰}$).在图2中,水样 G1 落在降水线

上,来源于降水直接补给,由于采样海拔相对较高,受降水同位素的高程效应影响(Bartarya *et al.*, 2002),同位素相对贫化些.水样 G2 和 G3 均采集于山前洪积扇,两者均落在降水线的右下方,前者同位素含量较后者贫化些,表明两者均来自降水补给,但受到了不同程度的蒸发作用.其中, G2 靠近山麓地带,接受山前丘陵区较贫化的地下水补给并受到了一定蒸发作用影响;而 G3 位于洋河附近,并位于洋河上游水库和中游水库之间,地下水明显受到了洋河水库水的补给影响,从而表现出比较富集的同位素特征.通过 G1、G2 和 G3 的 Cl^- 浓度对比可以看出, G1 和 G3 水样的 Cl^- 浓度位于 $170 \sim 248 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 内,说明地下水受到了人为轻微污染; G2 水样 Cl^- 浓度为 $58.51 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,几乎没有受到人为污染,可以作为本区天然地下水 Cl^- 浓度的代表值.

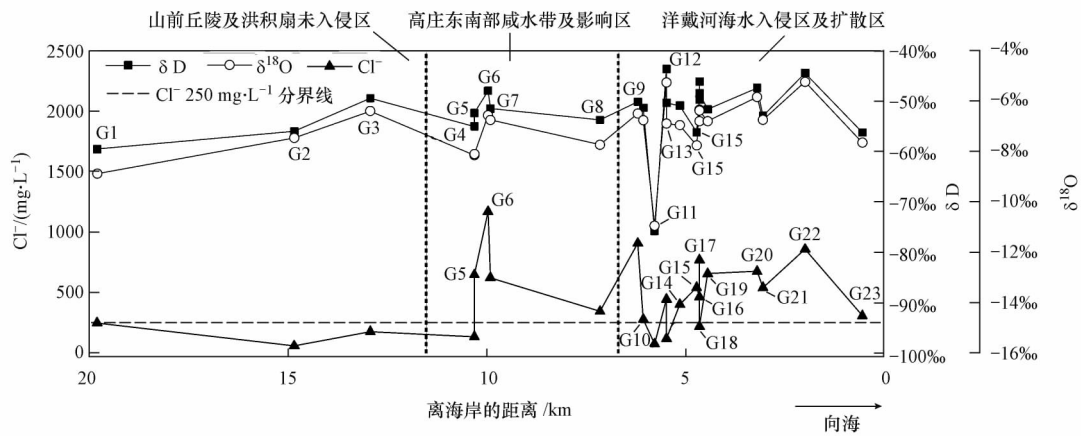


图3 地下水整体径流方向的 Cl⁻ 浓度、δD 和 δ¹⁸O 变化

Fig.3 The changes of chloride concentration, δD and δ¹⁸O of groundwater in the general groundwater flow direction

3.3.2 高庄东南部咸水带及影响区地下水的形成演化 水样 G4、G5、G6 和 G7 均采自高庄东南部的地下咸水带, Cl⁻ 浓度变化范围(平均值)为 135.4 ~ 1168.0 mg·L⁻¹ (642.8 ± 421.8) mg·L⁻¹, δD、δ¹⁸O 变化范围(平均值)分别为 -55.1‰ ~ -48.0‰ (-51.7‰ ± 2.9‰)、-8.2‰ ~ -6.6‰ (-7.4‰ ±

0.8‰)。其中,水样 G4 和 G5 采自地下咸水带东部的渠子口村,而水样 G6 和 G7 采自地下咸水带西部的桃园村。虽然同处于咸水带,但咸水带东部渠子口村地下水的同位素组成明显较咸水带西部桃园村的地下水偏负(图4),这反映了两者地下水形成演化规律的不同。

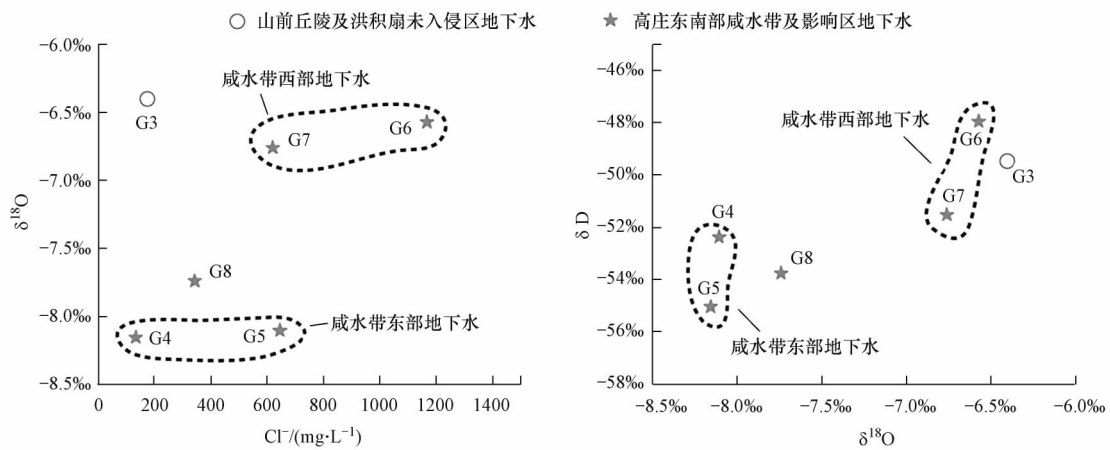


图4 咸水带地下水 Cl⁻-δ¹⁸O、δD-δ¹⁸O 关系图

Fig.4 Relationship between Cl⁻ and δ¹⁸O and between δD and δ¹⁸O of groundwater in saline water region

1) 咸水带西部桃园村地下水的形成演化

通过调查咸水带西部不同井深的地下水发现,其浅层地下水 Cl⁻ 浓度、EC 较低,而深层地下水 Cl⁻ 浓度、EC 要高得多。据文献资料(韩再生,1990;曾溅辉,1991)显示,咸水带西部(桃园村)恰好位于大泥河地热咸水带内,故咸水带西部地下咸水的形成实际上因为基底断裂带地热咸水的混入所致。选择桃园村地下咸水带地下水(δD、δ¹⁸O、Cl⁻ 浓度的平均值分别为 -49.7‰、-6.7‰、894.6 mg·L⁻¹)作

为混合水代表,曾溅辉 1987 年 9 月采集的大泥河(桃园村)地热咸水(曾溅辉,1991)(δD、δ¹⁸O、Cl⁻ 浓度平均值分别为 -70.29‰、-8.56‰、5741.84 mg·L⁻¹)作为地热咸水端元代表(图2),桃园村地下水径流区上游最近的 G3 水样(Cl⁻ 浓度 177.1 mg·L⁻¹)作为淡水端元的代表,借助氯离子质量守恒模型,可计算得到地热咸水的混合比率为 13%。根据地热咸水的混合比率 13%,借助同位素质量守恒模型,可反算淡水端元(G3)的同位素组成

为 $\delta D = -46.6\text{‰}$ 、 $\delta^{18}O = -6.4\text{‰}$ ，与 G3 的实际同位素组成 ($\delta D = -49.5\text{‰}$ 、 $\delta^{18}O = -6.4\text{‰}$) 接近，表明地热咸水混合比率计算值是合理的、可靠的。

2) 咸水带东部渠子口村地下水的形成演化

咸水带东部渠子口村不同深度的地下水调查结果表明，与桃园村类似，浅部地下水 Cl^- 浓度、EC 较低。咸水带东部渠子口村地下水 δD 、 $\delta^{18}O$ 和 Cl^- 浓度的平均值为 -53.7‰ 、 -8.1‰ 、 $391.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，同位素整体上较咸水带西部地下水贫化，说明本区地下水接受丘陵区同位素较贫化的地下水补给，而 Cl^- 浓度较低，反映了本区基底地热咸水混入较少。分析 G5 水样的水化学成分发现，其 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 浓度分别高达 $746.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $637.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，明显受到了工农业和生活污水的混合。将浅部地下水 G4 作为本区淡水端元的代表，那么根据淡水与地热咸水的混合水样 G5 和地热咸水的 Cl^- 浓度，借助氯离子质量守恒模型，可以估算得到深部地下水的地热咸水混合比率最高不超过 9%，甚至远低于这个比率值（因为通常污水中往往也富含氯离子）。因此可以认为，咸水带东部的地下水受地热咸水的影响较小，其水化学成分主要来源于工农业及生活污水，而并非地热咸水。

3.3.3 洋戴河海水入侵区及扩散区地下水的形成演化 洋戴河海水入侵区地下水 Cl^- 浓度变化范围（平均值）为 $74.3 \sim 906.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($474.6 \pm 250.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)，

δD 、 $\delta^{18}O$ 变化范围（平均值）分别为 $-75.8\text{‰} \sim -43.7\text{‰}$ ($-51.8\text{‰} \pm 7.4\text{‰}$)、 $-11.0\text{‰} \sim -5.2\text{‰}$ ($-6.9\text{‰} \pm 1.3\text{‰}$)。利用 $\delta^{18}O-Cl^-$ 关系图可用来有效地揭示地下水的形成演化及水体盐分的来源。将未受到人为污染的山前丘陵区及洪积扇区地下水 G2 作为淡水端元的代表，将海水样 S1 作为海水端元的代表，可构建 $\delta^{18}O-Cl^-$ 的理论混合曲线（图 5）。从图 5 中可以看到，洋戴河海水入侵区及扩散区的地下水水样大多分布于海水端元和地下淡水端元之间，也就是说洋戴河海水入侵区地下水主要由本区地下淡水和海水混合而成，而且海水在咸淡水混合中的比率不超过 10%。然而，海水入侵区地下水并非简单的二端元混合，通过图 5 可以明显发现，海水入侵区大部分的地下水均位于本区咸淡水 $\delta^{18}O-Cl^-$ 理论混合线的上方，这说明本区地下水普遍受到了不同程度 ^{18}O 较为富集的水体混合，尤其是 5 个地下水样（G12、G16、G18、G20 和 G22）明显向上偏离咸淡水的 $\delta^{18}O-Cl^-$ 理论混合直线，并在 $\delta D-\delta^{18}O$ 关系图中分布于淡咸水 $\delta D-\delta^{18}O$ 理论混合直线的右下方（图 2），这说明补给来源还受到了较为明显的蒸发作用，而且可以肯定不是来源于当月的河水。通过分析这些较为富集水样的空间分布发现，它们大多分布于浦河河道（推测河床下部为古河道）的两侧，根据地表水或降水补给地下水的滞后效应（补给周期平均约 4 个月），故可以推测补给主要来自

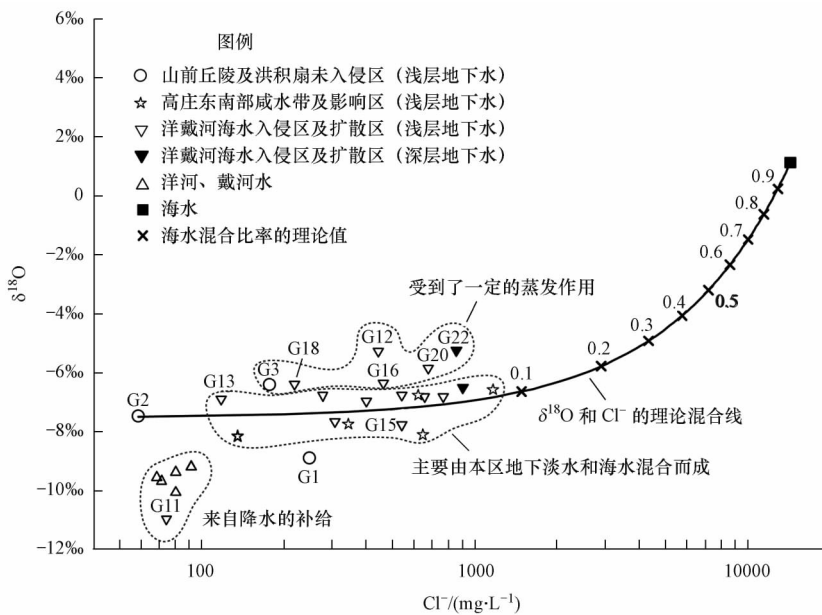


图 5 海水入侵区各水体的 $\delta^{18}O-Cl^-$ 关系图

Fig. 5 Relationship between $\delta^{18}O$ and chloride concentration of various water bodies in seawater intrusion area

源于开春以来的春灌水和地表水(河水、库水),这些灌溉水、地表水(河水、库水)本身或者引水灌溉后通过非饱和带下渗补给地下水的过程中经历了不同程度的蒸发作用从而造成了地下水同位素的富集现象,尤其是浦河一带,不仅是农田分布较为密集的地区,而且发育一套渗透性相对较好的松散堆积层,地表水对地下水的补给条件较其他地段好,补给速率更快,这使得地下水对补给来源(灌溉水或地表水)同位素富集信号的响应更快而明显。

由此可见,洋戴河海水入侵区地下水并不是地下淡水端元和海水端元的简单混合,还受到农田灌溉水和地表水(库水、河水)的混合,尤其是浦河一带,不仅是海水入侵相对较为严重的地区,而且是农田灌溉水和地表水(库水、河水)补给较为明显的地段。

4 结论(Conclusions)

通过分析洋戴河平原地表水和地下水氯离子和氢氧同位素特征,揭示了平原地下水的形成演化规律。结果表明,研究区地表水来源于中上游库水和大气降水的混合,同时沿程还受到支流和渠灌水混合。山前丘陵区地下水主要接受降水直接补给,洪积扇及山麓地带地下水除接受山前丘陵区地下水补给外,在洋河附近还受到了洋河库水的补给。在高庄东南部咸水带,西部咸水带的地下水由径流区上游地下水和大泥河地热咸水混合而成,地热咸水的混合比率约为 13%。东部咸水带的地下水由上游地下水、本地污水和地热咸水混合而成,地热咸水的混合比率不超过 9%。在洋戴河海水入侵区,地下水主要由本区地下淡水和海水(混合比率不超过 10%)混合而成,并且受到了不同程度的地表水或灌溉水补给,其中,浦河一带是农田灌溉水或地表水补给较为明显的地段。

致谢: 赵长荣、杨丽虎、龙西亭、吕航参与野外样品的采集工作,张宏志和曹磊为室内水化学和同位素测定工作给予指导与帮助,在此一并致谢。

责任作者简介: 刘明清(1966—),男,硕士,高级工程师。主要研究领域为流域污染控制、近岸海域及地下水环境保护、生态建设等,出版专著 1 部,发表文章十多篇。E-mail: liumingqing@scies.org

参考文献(References):

Bartarya S K, Bhattacharya S K, Ramesh R, *et al.* 2002. $\delta^{18}\text{O}$ and δD

- systematics in the surficial waters of the Gaula river catchment area, Kumaun Himalaya, India[J]. *Journal of Hydrology*, 167: 369-379
- Burnett W C, Aggarwal P K. 2006. Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods[J]. *Science of the Total Environment*, 367: 498-543
- Craig H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 133: 1702-1703
- Dakin R A, Farvolden R N, Cherry J A, *et al.* 1983. Origin of dissolved solids in groundwaters of Mayne Island, British Columbia, Canada [J]. *Journal of Hydrology*, 63 (3/4): 233-270
- Han D M, Kohfahl C, Song X F, *et al.* 2011. Geochemical and isotopic evidence for palaeo-seawater intrusion into the south coast aquifer of Laizhou Bay, China[J]. *Applied Geochemistry*, 26: 863-883
- 韩再生. 1990. 秦皇岛市洋河、戴河滨海平原海水入侵的控制与治理[J]. *现代地质*, 4 (2): 105-115
- 蒋方媛, 韩绘芳, 陈加红, 等. 2009. 地下水微量元素与同位素特征对海水入侵和地下水起源的指示意义——以深圳市宝安区为例[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 32 (3): 253-260
- Jeff B L, Andre S E. 2010. A multi-isotope (δD , $\delta^{18}\text{O}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, and $\delta^{11}\text{B}$) approach for identifying saltwater intrusion and resolving groundwater evolution along the Western Caprock Escarpment of the Southern High Plains, New Mexico[J]. *Applied Geochemistry*, 25: 159-174
- Julie C G, Christine V C, Adriano M, *et al.* 2009. Isotopic and geochemical characterization of salinization in the shallow aquifers of a reclaimed subsiding zone: The southern Venice Lagoon coastland [J]. *Journal of Hydrology*, 378: 46-61
- Kass A, Gavrieli I, Yechieli Y, *et al.* 2005. The impact of freshwater and wastewater irrigation on the chemistry of shallow groundwater: a case study from the Israeli Coastal Aquifer[J]. *Journal of Hydrology*, 300 (1/4): 314-331
- Kima Y, Lee K S, Koh D C, *et al.* 2003. Hydrogeochemical and isotopic evidence of groundwater salinization in a coastal aquifer: a case study in Jeju volcanic island, Korea[J]. *Journal of Hydrology*, 270: 282-294
- 李忠心, 何东, 杜中. 2010. 丹东海水入侵区域地下水同位素特征分析[J]. *辽东学院学报(自然科学版)*, 17 (2): 108-112
- 卢继强, 陈刚, 胡成. 2004. 滨海地区海水入侵的水化学和同位素证据——以沿海某市典型地段为例[J]. *勘察科学技术*, (3): 22-26
- 潘曙兰, 马凤山. 1997. 海水入侵的同位素研究[J]. *地球学报(增刊)*, 18: 310-312
- 宋献方, 刘相超, 夏军, 等. 2007. 基于环境同位素技术的怀沙河流域地表水和地下水转化关系研究[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 37 (1): 102-110
- 杨吉龙, 韩冬梅, 肖国强, 等. 2009. 秦皇岛洋河-戴河冲洪积平原第

- 四系含水层海水入侵机理分析[J]. 地质调查与研究, 32(2): 144-149
- 杨巧凤, 李文鹏, 王瑞久. 2010. 深圳沿海带浅层地下水的稳定同位素与地球化学[J]. 水文地质工程地质, 37(5): 26-32
- 姚菁, 于洪军, 王树昆, 等. 2007. 莱州湾海水入侵区地下水水化学特征[J]. 海洋科学, 31(4): 32-47
- 于静洁, 宋献方, 刘相超, 等. 2007. 基于 δD 和 $\delta^{18}O$ 及水化学的永定河流域地下水循环特征解析[J]. 自然资源学报, 22(3): 415-423
- 曾澌辉. 1991. 秦皇岛地区地下热水的地球化学[J]. 中国地质科学院水文地质工程地质研究所所刊, 7: 111-127
- 章斌, 郭占荣, 高爱国, 等. 2012. 用氢氧稳定同位素评价闽江河口区地下水输入[J]. 水科学进展, 23(4): 539-548
- 章斌, 郭占荣, 高爱国, 等. 2013. 用氢氧稳定同位素揭示闽江河口区河水、地下水和海水的相互作用[J]. 地球学报, 34(2): 213-222
- 张东, 刘丛强, 尹国勋. 2010. 基于稳定同位素和水化学的内陆地下水咸化过程研究: 以焦作市为例[J]. 地球与环境, 38(2): 177-183
- 左文喆. 2006. 秦皇岛洋戴河平原海水入侵调查与研究[D]. 北京: 中国地质大学. 5-6