DOI:10.19789/j.1004-9398.2019.06.014

天津浅层地下水海水入侵的水化学特征及氧同位素示踪研究*

赵 卫[1,2**] 梁 昊[1,2] 宫少军[1,2] 乔吉果[1,2] 彭 鑫[1,2] 李 稳[1,2]

(1. 天津市海洋地质勘查中心,天津 300170; 2. 国土资源部资源环境承载力评价重点实验室,北京 100083)

摘要: 本研究通过对天津浅层地下水进行取样调查,研究与海水入侵相关的水化学因子,并进行筛选分析,归纳天津地区浅层地下水中水质咸化的水化学特征,并以此判定天津地区浅层地下水中不同程度的入侵均有发生. 在原有咸水区的基础上,运用^{18}O同位素手段开展地下水物源示踪,氧同位素δ值整体表现由陆至海方向呈逐渐增加趋势. 最终通过同位素特征测算地下水海水混合比例,进而划分天津现代海水入侵区,并评估海水入侵的强度等级,归纳适用于天津地区现代海水入侵的判定方法.

关键词: 天津地下水; 海水入侵; 水化学特征; 同位素示踪

中图分类号: P614.69

0 引 言

天津地区第四系含水岩组属于松散岩类,孔隙含水层分布广、厚度大,在水平和垂向上岩相变化较大. 以埋藏条件、水质等水文地质特征及开发利用状况划分,将第四系孔隙水划分为4个含水组,第Ⅰ含水组属于浅层地下水系统,第Ⅱ-Ⅳ含水组属深层地下水系统[1]. 由于天津地区自晚更新世以来经历了4次规模不等的海水入侵过程,造成天津地区地下含水层中赋存着大量的古海水,并分布于第Ⅰ和Ⅱ含水组中,底界埋深一般在30~150 m[2].

受断裂构造控制,天津地下水特征基本上以北部宝坻断裂为界,北部为淡水区. 因此,海水入侵的研究范围大致为宝坻断裂以南的广大平原区,古海水和现代海水入侵均在研究区范围内,且主要发生在浅层地下水中. 虽然古海水与现代海水时代不同,但是水化学特征存在一致性,一般具有矿化度高,氯离子含量高等特征,水化学类型为单一而稳定的氯化钠型. 水质调查表明许多地区的古海水在矿化度等指标方面与现代海水非常接近,且氯离子浓度明显高于淡水特征值,反映了二者之间有非常紧密的内在关系[1]. 因此,在进行海水入侵的研究工作中,必须运用地下水示踪方法将二者加以区分.

目前天津地区的海水入侵研究工作较少,段磊和王文科[3]的研究成果表明,水同位素示踪可用于研究地下水成因、停留时间及污染源的判定等. 蔡明刚等[4]则运用氢氧同位素来研究该区沿岸地下水-海水相互作用的过程. 翁建伟等[5]同样运用氢氧同位素示踪技术分别在沿海岛屿和内陆进行不同水体的补给来源,以及地表水和地下水之间的相互转化关系的研究工作,均效果良好. 张琳怡[1]针对天津滨海地区地下水咸化问题,运用锶同位素的示踪方法,研究了地下水的迁移途径以及海水、地表水、浅层地下水、深层地下水之间的相互作用过程. 由此可见,目前国内针对地下水的同位素研究工作主要针对物源和不同水体间的相互作用方面来展开,在天津地区则尚未用于对海水入侵的直接判定.

本次工作以天津海域海水和相应地区的背景淡水为两个典型单元,采用滴定分析法分析海水入侵程度与范围. 根据国家海洋局2014年编写的《海水入侵监测与评价技术规程(试行)》及相关研究成果[6-7],选取氯离子和矿化度用于评价一个地区的海水入侵程度与范围的重要指标,此外,通过涂向阳[8]的研究成果显示,钠吸附比和咸化系数等同样是评价海水入侵的重要因子.

为区分天津浅层地下含水层中古海水和现代海水,采用同位素示踪法来划分范围和强度. 根据同位素的分馏原理,当地下水水份蒸发后,水蒸汽

收稿日期: 2018-11-05

* 天津市海洋局项目专题"天津市海水入侵现状调研"; 国土资源部资源环境承载力评价重点实验室开放课题资助课题(CCA2017.04)

** 通信作者: zhaowei1228@126.com

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

富集 $H_2^{16}O$,而残余水中则相对富集 $HD^{16}O$ 和 $D_2^{18}O$. 海洋中的水因常年蒸发而导致海水富集 $HD^{16}O$ 和 $D_2^{18}O$,同位素值偏正; 浅层地下水主要由降水补给,相对富集 $H_2^{16}O$,同位素值偏负[9-10]. 当发生海水入侵时,地下水中的稳定同位素会受到海水影响,而表现出混合水的特性,这种同位素值的差异性是示踪海水入侵的原理[11]. 以氧同位素值($\delta^{18}O$)为指标,根据质量守恒定律估算获得天津市地下水与海水混合的比例,并根据氧同位素估算的海水混合比例来划分地下水咸化程度.

1　实验部分

1.1　样品选择

选取浅层地下水 10 个实际样品和 7 个搜集样点,地下水样品分布详细位置如表 1. 采样范围基本覆盖了前人调查划分的的淡水区、古咸水区以及可能的现代海水入侵区,便于在调查数据的基础上对地下水的物源和特征进行示踪和对比分析.

表 1　地下水样品分布位置

样品分类	编号	位置
实测样品	Q1	东疆港外海域
	Q2	汉沽一汽华北产业园
	Q3	汉沽壳牌津桥加油站
	Q4	大港垃圾处理场
	Q5	塘沽四维企业监测井
	Q6	北辰区大张庄加油站
	Q7	武清区嘉都力扬公司
	Q8	宝坻区黄土坎村民家
	Q9	静海区壳牌加油站
	Q10	西青大沙窝村灌溉井
搜集样点	L1	西青区
	L2	宁河区
	L3	东丽区
	L4	宝坻区
	L5	武清
	L6	津南
	L7	滨海新区

1.2　海水入侵程度与范围分析

采用滴定分析法分析海水入侵程度与范围. 采集样品所用测试仪器为 iCAP6300 型等离子体发射光谱仪,测试环境温度 23℃,相对湿度 48%. 水化学指标与海水入侵程度的对应关系如表 2 所示,搜集样点数据来自天津华北地质勘查局地质研究所.

表 2　主要水化学指标与水质等级划分

指标	等级		
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
Cl 浓度/($mg \cdot L^{-1}$)	<250	250 ~ 1 000	>1 000
矿化度/($g \cdot L^{-1}$)	<1.0	1.0 ~ 3.0	>3.0
钠吸附比	<2.0	2.0 ~ 5.7	>5.7
咸化系数	<1.0	1.0 ~ 3.5	>3.5
入侵程度	无入侵	轻度入侵	严重入侵
水质范围	淡水	微咸水	咸水

1.3　同位素示踪法

氧同位素样品采用 MAT253 气体同位素质谱仪测定,分析误差 $\delta^{18}O \leqslant 0.3‰$. 天津海域海水的氧同位素值为 $\delta^{18}O_{海水}$,背景淡水的氧同位素值为 $\delta^{18}O_{淡水}$,调查样点处的地下水氧同位素值为 $\delta^{18}O_{样点}$,则样点地下水海水混合比例($F_{样点}$)的计算公式如下:

$$F_{样点} = \frac{\delta^{18}O_{淡水} - \delta^{18}O_{样点}}{\delta^{18}O_{淡水} - \delta^{18}O_{海水}}.$$

把海水混合比例(F) >0.5% 作为确定是否发生海水入侵的临界值. 0.5% < F < 15.0% 为早期轻微入侵区,地下水转化为微咸水; 15.0% < F < 20.0% 为中等程度入侵区,地下水水质由微咸水向咸水转化; F > 20.0% 为严重入侵区,地下水已转变为咸水.

2　实验结果

2.1　地下水水化学指标与入侵程度

各单项指标对应的水化学指标如表 3 所示. 实测样品和搜集样品的 Cl 浓度范围分别为 135.10 ~ 22 463.00 和 119.23 ~ 22 837.00 mg/L,不同程度的入侵均有; 矿化度分别为 1.45 ~ 37.55 和 0.82 ~ 36.91 g/L,不同程度的入侵均有. 实测样品的钠吸附比为 16.32 ~ 320.26,均为严重入侵; 咸化系数为 0.17 ~ 58.56,不同程度的入侵均有.

2.2　氧同位素示踪分析

根据同位素的实际调查结果,天津市浅层地下水中海水混合比例及同位素值如表 4 所示. 浅层地下水中氧同位素数值整体表现在沿陆端至海端方向上,地下水 δ 值呈逐渐增加趋势. 实际样品 Q2、Q4 和 Q5 所在的沿海地区同位素值明显偏大,介于 −4.6‰ ~ −5.7‰之间,应属于现代海水入侵区; 其余样品地下水氧同位素值与淡水区样点氧同位素数值相差不大,均介于 −8.0‰ ~ −8.7‰之间,这侧面证明了微咸水区的形成可能不是现代海水

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3 样品水化学指标与入侵程度判定

编号	指标 1		指标 2		指标 3		指标 4	
	Cl 浓度/(mg·L^{-1})	入侵程度	矿化度/(g·L^{-1})	入侵程度	钠吸附比	入侵程度	咸化系数	入侵程度
Q1	16 233.00	/	29.48	/	320.26	/	58.56	/
Q2	2 246.00	严重入侵	6.48	严重入侵	136.02	严重入侵	3.04	轻度入侵
Q3	679.20	轻度入侵	2.26	轻度入侵	36.99	严重入侵	0.97	无入侵
Q4	10 530.00	严重入侵	20.72	严重入侵	256.62	严重入侵	13.70	严重入侵
Q5	22 463.00	严重入侵	37.55	严重入侵	169.62	严重入侵	29.22	严重入侵
Q6	256.20	轻度入侵	1.51	轻度入侵	39.24	严重入侵	0.42	无入侵
Q7	135.10	无入侵	1.45	轻度入侵	16.32	严重入侵	0.17	无入侵
Q8	587.90	轻度入侵	3.39	严重入侵	30.10	严重入侵	0.81	无入侵
Q9	268.50	轻度入侵	3.12	严重入侵	41.09	严重入侵	0.27	无入侵
Q10	221.10	无入侵	1.55	轻度入侵	23.77	严重入侵	0.28	无入侵
L1	606.10	轻度入侵	2.99	轻度入侵	—	—	—	—
L2	3 374.00	严重入侵	8.25	严重入侵	—	—	—	—
L3	339.00	轻度入侵	3.52	严重入侵	—	—	—	—
L4	241.33	无入侵	3.02	严重入侵	—	—	—	—
L5	119.23	无入侵	0.82	无入侵	—	—	—	—
L6	289.00	轻度入侵	1.34	轻度入侵	—	—	—	—
L7	22 837.00	严重入侵	36.91	严重入侵	—	—	—	—

注:—指搜集样点无实验数据; /指 Q1 样品为海水,故无入侵程度数据

入侵造成的,应该是浅层地下水因埋深较浅,受蒸发作用导致地下水 $\delta^{18}O$ 同位素升高的结果.

表 4 天津市浅层地下水中海水混合比例及同位素值

实际样品	海水混合比例/%	同位素值/‰	备注
Q1	100	−1.6	现代海水
Q2	30.5	−5.7	咸水
Q3	—	−8.7	微咸水
Q4	39.0	−5.2	咸水
Q5	49.2	−4.6	咸水
Q6	—	−8.0	微咸水
Q7	—	−8.1	淡水
Q8	—	−8.0	微咸水
Q9	—	−8.3	微咸水
Q10	—	−6.9	淡水

注:—指搜集样点无实验数据

3 讨 论

3.1 天津海水入侵评价指标

通过对地下水水化学指标特征的分析及筛选,各入侵评价结果中钠吸附比的整体评价值均明显偏高,与其他指标的对应关系也较差,咸化系数的评价结果与氯离子和矿化度相比较,存在一定的相关性,但评价等级过低,所以钠吸附比和咸化系数不作为判定本地区海水入侵程度的指标. 氯离子和矿化度两个指标的相关性较好,整体上看,矿化度的评价等级略高于氯离子的评价等级,因此,两项指标可以综合分析,用于海水入侵的等级评价.

3.2 天津现代海水入侵区范围

通过氧同位素示踪分析,得出现代海水入侵区包括汉沽一汽大众华北产业园、大港垃圾处理场和

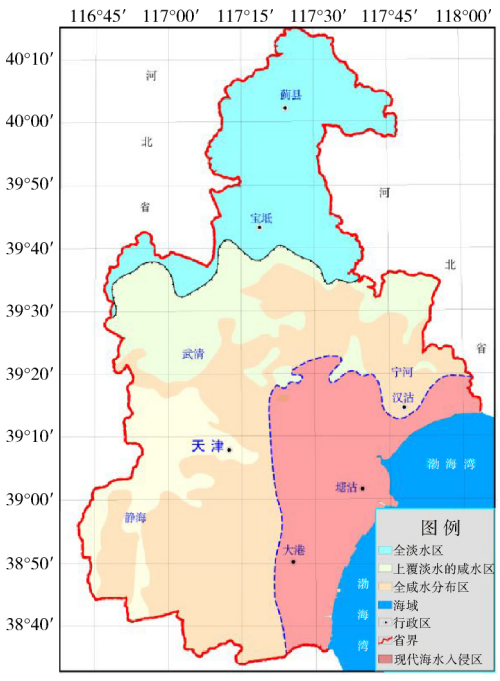


图 1 天津现代海水入侵区范围示意图

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

塘沽四维企业所在的沿海地区,天津现代海水入侵区范围示意如图 1. 上述地区海水混合比例均 > 30%,按照氧同位素的划分标准海水入侵程度等级属于严重海水入侵; 在平面展布上,浅层水海水入侵主要发生在滨海新区的中南部以及东丽、宁河与滨海新区交界的部分区域,以沿海地区为主; 其余地区无入侵.

3.3　天津现代海水入侵的判定方法

通过本次工作的归纳总结,确定适用于天津地区现代海水入侵的判定方法,首先要圈定咸水区,即采取氯浓度≥250 mg/L 作为咸水入侵的统一标准,矿化度指标作为辅助分析; 下一步结合同位素方法,在咸水入侵区内计算各区海水混合比例,判定是否发生入侵并评价入侵程度.

参 考 文 献

[1] 张琳怡. 天津滨海地区地下水咸化的水化学及锶同位素示踪研究[D]. 天津: 天津师范大学, 2012.

[2] 王凯燕,王文卓,李琼芳,等. 天津地区近 21 年地下水埋深变化特征及其影响因素[J]. 水资源保护, 2014, 30(3): 45 - 49.

[3] 段磊,王文科. 水同位素技术示踪地下水活动[J]. 地下水, 2006, 28(2): 33 - 36.

[4] 蔡明刚,黄奕普,陈敏,等. 厦门岛南岸地下水的氢氧同位素的示踪研究[J]. 海洋科学, 2003, 27(9): 1 - 6.

[5] 翁建伟,任雅娴,兰晶晶. 浅析岛屿和内陆应用稳定同位素分析地下水补给关系的效果[J]. 人民珠江, 2015, 36(3): 55 - 29.

[6] 国家海洋局海洋环境保护司. 海水入侵监测与评价技术规程(试行)[S/OL]. (2014-1-7)[2018-11-5]. https://wenku.baidu.com/view/ae5b0456bd64783e08122b7d.html.

[7] 纪其光,王碧泉. 地下水化学成分的数据处理及应用[J]. 南方国土资源, 2007(1): 31 - 33.

[8] 涂向阳. 海河流域滨海地区海水入侵防治对策研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.

[9] 曹基富,吴瑞钦,肖子平,等. 硇洲岛地下水氢氧同位素特征分析[J]. 人民珠江, 2014, 35(5): 46 - 49.

[10] 刘存富,王恒纯. 环境同位素与水文地质学基础[M]. 武汉: 武汉地质学院出版社, 1984.

[11] 杨吉龙,韩冬梅,苏小四,等. 环境同位素特征对滨海岩溶地区海水入侵过程的指示意义[J]. 地球科学进展, 2012, 27(12): 1344 - 1352.

Hydrochemical Characteristics and Oxygen Isotope Tracing Study of Shallow Groundwater Seawater – Intrusion in Tianjin

ZHAO Wei[1,2]　LIANG Hao[1,2]　GONG Shaojun[1,2]　QIAO Jiguo[1,2]　PENG Xin[1,2]　LI Wen[1,2]

(1. Tianjin Exploration Center of Marine Geology, Tianjin　300170; 2. Key Laboratory of Carrying Capacity Assessment for Resource and Environment, Ministry of Land and Resource, Beijing　100083)

Abstract: In this paper, the shallow groundwater in Tianjin had been sampled and investigated, and the hydrochemical factors related to seawater intrusion were studied and analyzed. The hydrochemical characteristics of the salty water in shallow groundwater in Tianjin area were summed up, and judged that different degrees of invasion of shallow groundwater occur. At the same time, Using ^{18}O isotope method to trace groundwater provenance, the oxygen isotope value increases gradually from land to sea. Finally, the mixing ratio of groundwater and seawater were estimated by isotope characteristics, which divided the area of modern seawater intrusion on the basis of the original saline water area, evaluated the intensity level of seawater intrusion, and sumed up the method of determining modern seawater intrusion which applied to Tianjin.

Keywords: groundwater in Tianjin; seawater intrusion; hydrochemical characteristics; isotope tracer

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net