

莱州湾东、南沿岸海(咸)水入侵的地下水水化学特征*

张祖陆 (山东师范大学地理系, 济南 250014)

彭利民 (山东省科技发展战略研究所, 济南 250014)

文 摘 莱州湾东、南沿岸地区是世界上具代表性的海水入侵区域之一, 该地区有海水、埋藏卤水(古海水)两种不同的入侵类型。为揭示该地区地下咸-淡水过渡带复杂的水化学变化过程和地下淡水被侵染的机理, 通过在典型地段咸-淡水过渡带的4条地下水观测剖面, 进行了长期水化学监测分析。研究表明, 现代海水、卤水在入侵过程中的地下水水化学特征有明显不同; 地下水与含水岩层间的离子交换与离子吸附作用对咸水的地下入侵过程产生重要影响。

关键词 海(咸)水入侵 莱州湾东、南沿岸地区 地下水水化学特征

The underground water hydrochemical characteristics on sea water intruded in eastern and southern coasts of Laizhou Bay. Zhang Zulu(Department of Geography, Shandong Normal University, Jinan 250014); Peng Limin(Shandong Research Institute for Development Strategy of Science and Technology Jinan 250014). *China Environmental Science*. 1998, 18(2): 121~ 125

Abstract — Eastern and southern coastal areas of Laizhou Bay are the representative sea water intruded regions in the world, two intrusion types with of peculiar sea water and underground brine. In order to reveal the complicated hydrochemical changing process and the mechanism of fresh underground water being polluted by salt water, we conducted long-term observation and hydrochemical analyse in four observing sections of typical salt-fresh water transitional zone. The study indicates that sea water and brine intrusion processes have different hydrochemical features; and that ion exchange and absorption actions between water and aquifer produce great influence to the intrusion.

Key words: sea water intrusion eastern and southern coastal areas of Laizhou Bay hydrochemical characteristics of underground water

海水入侵是特殊的地下水污染过程。莱州湾东、南沿岸地区(见图1)的现代海水、埋藏古卤水入侵很有代表性,特别是后者更有其特殊性^[1]。国内外有关海水入侵的研究中较注重于水化学成分变化过程和机理研究,而未重视入侵过程中透水岩层与地下水之间的离子吸附、离子交换作用的研究,在松散砂层中高矿化卤水入侵的此类作用的影响尤为突出。本文就该地区地下水水化学特征研究所得出的认识^[2],对海水入侵机理研究有很好的补充和推动作用。

1 莱州湾东、南沿岸滨海平原浅层地下水水化学类型

1.1 水化学类型及主要特征

1.1.1 水化学类型 根据400余个地下水水

化学监测分析数据,依照舒卡列夫分类法,划分出全区浅层地下水水化学类型(见表1)。

1.1.2 水化学类型的组合特征 统计数据表明,水化学类型组合可归纳为如下几个特征: (1)氯化物型水占很大比例,基本占据了矿化度为2.0g/L的等值线以北广大地区,Na⁺占绝对优势;全区基本无SO₄²⁻占优势的类型,只在东部滨海平原出现零星的HCO₃⁻ + Cl⁻ + SO₄²⁻和Cl⁻ + SO₄²⁻型的个别点,这与废水污染有关。充分显示了滨海平原浅层地下水水质变化主要受海水咸(卤)水混染的组合特征; (2)受自然环境制约,东岸与南岸滨海平原地下淡水的水

收稿日期: 1997-05-06

* 国家“八五”科技攻关项目(85-806-01-02)

化学本底类型不同。东岸沿海为狭窄的山前滨海平原,地下淡水以 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 或 $\text{HCO}_3^- + \text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+}$ 型水为主;南岸为宽阔的河流冲积平原,地下淡水类型以 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ 或 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 型水为主,这种差异显然与由海向陆的海风带来的 Cl^- 对平原地下水影响有关;(3)本区地下水中出现罕见的 $\text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+}$ 型水,但仅局限在局部古海侵地层中系残留古海水变化的产物。

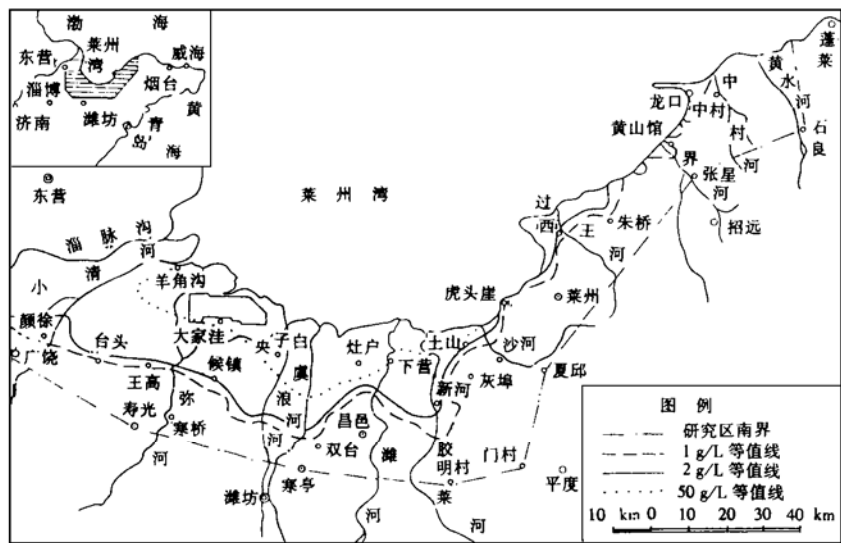


图1 研究区位置与地下水矿化度等值线

Fig.1 Position of the research area and isogram of underground water mineralization

表1 莱州湾东、南沿岸地区地下水水化学类型

Table 1 Hydrochemical types of shallow underground water in the eastern and southern coast area of Laizhou Bay

阳离子	阴离子					
	HCO_3^-	$\text{HCO}_3^- + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^- + \text{Cl}^-$	$\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$	Cl^-
Ca^{2+}	Ca^{2+} $- \text{HCO}_3^-$		Ca^{2+} $- \text{HCO}_3^- + \text{Cl}^-$	Ca^{2+} $- \text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-$	Ca^{2+} $- \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+} - \text{Cl}^-$
$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ $- \text{HCO}_3^-$	$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ $- \text{HCO}_3^- + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ $- \text{HCO}_3^- + \text{Cl}^-$	$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ $- \text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-$		
$\text{Ca}^{2+} + \text{Na}^+$		$\text{Ca}^{2+} + \text{Na}^+$ $- \text{HCO}_3^- + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+} + \text{Na}^+$ $- \text{HCO}_3^- + \text{Cl}^-$	$\text{Ca}^{2+} + \text{Na}^+$ $- \text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-$	$\text{Ca}^{2+} + \text{Na}^+$ $- \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$	
$\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$ $+ \text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$ $+ \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^-$		$\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ $- \text{HCO}_3^- + \text{Cl}^-$	$\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ $- \text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-$		
$\text{Na}^+ + \text{Mg}^{2+}$			$\text{Na}^+ + \text{Mg}^{2+}$ $- \text{HCO}_3^- + \text{Cl}^-$	$\text{Na}^+ + \text{Mg}^{2+}$ $- \text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-$		$\text{Na}^+ + \text{Mg}^{2+} - \text{Cl}^-$
Na^+			Na^+ $- \text{HCO}_3^- + \text{Cl}^-$	Na^+ $- \text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-$	Na^+ $- \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$	$\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$

1.2 地下水水化学类型的区域分布规律

全区地下水阴离子组合的 HCO_3^- 、 $\text{HCO}_3^- - \text{Cl}^-$ 、 $\text{Cl}^- - \text{HCO}_3^-$ 及 Cl^- 等4种水化学类

型,表现为从山前地带向冲积平原、滨海冲积海积平原至海积平原,随地貌类型变化而依次呈平行于海岸的带状分布特点。4种类型地下水,由

陆向海逐渐更替过渡的规律十分清楚。沿弥河、潍河等主要河流, $\text{HCO}_3^- - \text{Cl}^-$ 型水分布区明显呈舌状向下游突出, 说明河水对地下水的充分补给并对海(咸)水向上游内陆入侵起到的显著顶逆作用。

2 海(咸)水水化学特征分析

大致以莱州市虎头崖—沙河镇一线为界(图 1), 莱州湾东岸滨海平原地区以近岸的海水入侵为主, 此线以西的南岸平原地区则是晚更新世以来形成的地下埋藏古卤水的扩散入侵。卤水系第四纪地质历史时期入侵海水残留浓缩于地层中而形成^[5], 经历了漫长地质作用过程, 与周围土层处于不断地化学交换过程, 所以水化学组成与现代海水有些差异。莱州湾沿岸现代海水与南岸海水、地下埋藏卤水的水化学组成特征见表 2, 由表 2 可看出, 本区地下卤水与近岸海水、近岸浓缩海水具有相应一致的基本化学成分, 而且与近岸浓缩海水相比较, 主要元素的组成含量都较接近, 主要离子含量排列的顺序也一致, 即

$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Br}^-$, 而其中一些离子浓度比值与莱州湾现代近岸海水也相一致。

野外调查与地下水水质监测工作证实, 海、卤水化学组成的差异, 对入侵过程中的水化学变化特征产生的影响主要有: (1) 海水与卤水之间总矿化度值(M)相差很大, 所以海(咸)水在与地下淡水相混溶的过渡地带, 南岸平原地下水矿化度值要较东岸偏高, 且扩散过程中该值变化也比较复杂; (2) 地下卤水中 Cl^- 含量相对变化较大, 而现代近岸海水则较为稳定。二者相比较, 随矿化度值 M 升高, Cl^- 含量增长变化有显著差别。尽管本区各地下水 M- Cl^- 相关性均属极显著相关关系, 但是监测数据表明各地海水入侵过程中 M- Cl^- 之间相对数值相差很大。这可由东、南沿岸平原 4 个监测剖面的 M- Cl^- 线性相关回归方程的差别得到证实(表 3); (3) 近岸现代浓缩海水中 K^+ 与 SO_4^{2-} 含量大于地质历史时期形成的卤水, 其原因可能是地下卤水在地下长期赋存、流动过程中 K 已大量被岩层所吸附, SO_4^{2-} 长期与岩层中的 Ca^{2+} 不断结合形成石膏淀积造成。

表 2 莱州湾东、南沿岸地下卤水与海水化学特征对比 (mg/L)

Table 2 Contrast of chemical characteristic of underground brine and sea water in the eastern and southern coast of Laizhou Bay

项 目	正常海水	近岸海水	近岸浓缩海水	莱州盐田	羊口盐田
$\text{K}^+ (\times 10^3)$	3.87	3.20	18.60	14.90	11.00
$\text{Na}^+ (\times 10^2)$	10.76	8.77	53.92	53.35	48.21
$\text{Mg}^{2+} (\times 10^2)$	12.94	11.10	65.60	67.70	77.70
$\text{Ca}^{2+} (\times 10^2)$	4.13	3.70	13.40	11.00	13.4
$\text{Cl}^- (\times 10^2)$	19.353	15.80	97.15	99.57	91.12
$\text{SO}_4^{2-} (\times 10^2)$	27.12	22.40	122.6	75.90	107.90
$\text{HCO}_3^- (\times 10^2)$					
浓度(°Be′)	3.50	2.76	14.59	14.73	14.49
pH 值	8.25	> 8.0		6.5~ 7.6	

注: 各种含量均为地下卤水井平均值

表 3 4 条监测剖面地下水 M- Cl^- 线性回归方程

Table 3 M- Cl^- linear regression equations of four monitoring sections

监测剖面	线性回归方程
	$X(\text{Cl}^-, \text{mg/L}), Y(\text{M}, \text{g/L})$
东 龙口市黄河河剖面	$Y = 0.001754X + 0.2349$
岸 莱州市朱旺剖面	$Y = 0.001773X + 0.1175$
南 寿光市王高剖面	$Y = 0.002095X + 0.3971$
岸 昌邑市双台剖面	$Y = 0.001924X + 1.084$

注: 各剖面方程均依据 1993 年 6 月 20 日监测数据计算得出

3 海(咸)水入侵过程中地下水水化学变化的主要特征及机理分析

在海(咸)水入侵的过程中, 地下水主要表现在矿化度(M)、 Cl^- 浓度发生显著变化, 此外其它阳离子也随入侵而发生明显的迁移、变化。

3.1 咸-淡水过渡带地下水水化学变化的主要过程和特征

海(咸)水入侵过程中,咸水与淡水之间并不存在明显的突变交界面,事实是存在一个上窄下宽的盐类混溶变化的过渡带^[3]。在此过程中除水流梯度的变化外,还有盐类的浓度梯度的改变,这两种变化因素均影响着入侵过渡带水化学变化的基本特征。

3.1.1 本区天然淡水以重碳酸根(HCO_3^-)和碱土金属(Ca^{2+} 、 Mg^{2+})离子为主,咸水入侵后, Cl^- 浓度增大,随之碱金属(Na^+ 、 K^+)离子浓度也增加, HCO_3^- 与碱土金属离子百分含量相对降低。在过渡带咸-淡混合型水中通常没有一对阴阳离子的含量超过50%,显示了充分混合的特征。这是海(咸)水入侵过渡带中最普遍的一种地下水类型 $\text{Cl}^- - \text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+$ 型或 $\text{Cl}^- - \text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ 型水。

3.1.2 在咸淡水过渡带,随海水入侵发生的时间发展, Cl^- 浓度增长速度由缓逐渐变快,在多年海水入侵区地下水 Cl^- 增长幅度很大;随 Cl^- 浓度的不断增长,碱金属离子浓度变化较小,但当 Cl^- 毫克当量百分数大于85%、浓度相对稳定时, Na^+ 浓度却会迅速增长,最终形成以 Na^+ 与 Cl^- 为主的 $\text{Cl}^- - \text{Na}^+$ 型咸水。

3.1.3 监测资料显示,混合带地下水阳离子变化比较复杂。各观测剖面普遍出现由咸水区至咸-淡水过渡带 Na^+ 与 K^+ 不断减少,而 Ca^{2+} 浓度却不断增加(图2),浓度变化比较特殊,在入侵过渡带的咸-淡水交界面附近 Ca^{2+} 浓度迅速增高,达到峰值,再向淡水区,浓度又很快减少。

3.1.4 本研究区地下水中 SO_4^{2-} 含量较低,处于次要地位,在海(咸)水入侵过程中其含量变化很小。

3.2 海(咸)水入侵过程中的水化学机理分析

海(咸)水入侵过程中,随着各种离子浓度相对变化,地下水与含水层的水-岩间离子吸附与交换对地下水的水化学变化产生重要影响^[4]。

3.2.1 当咸水大量侵入淡水层的初期,由于含水层岩土颗粒对 Cl^- 、 Na^+ 的吸附作用很强,减缓了水中 Cl^- 浓度增长,但当达到岩土饱和吸附

量后,地下水 Cl^- 浓度又会迅速升高,所以出现 Cl^- 浓度增长先滞缓后加快,再达到新的平衡变化特点。同样,入侵过程中岩土颗粒对 K^+ 、 Na^+ 吸附作用更为强烈,造成过渡带中地下水随 Cl^- 浓度变化,水中 Na^+ 、 K^+ 浓度却又会不断降低(见图2)。

3.2.2 过渡带地下水中 Ca^{2+} 与 Na^+ 的反向变化,即 Ca^{2+} 浓度随 Na^+ 不断减少而逐渐增高,并在咸淡水的锋面附近达到最高值,富集的 Ca^{2+} 一是来自含水层岩土中离子的参与变化,二是水岩之间的阳离子交换。研究区自上游至下游即由山前平原至滨海平原、海岸带,随含水岩组的变化浅层含水层一方面方解石、白云石等溶解作用虽仍在继续,但不断减弱;另一方面,长石类及铁镁矿物的风化、分解作用不断增强,滨海地区岩土层的分离蚀变也非常明显,所以在山前地带淡水区的 Ca^{2+} 浓度不断增加,向下游滨海区,由于岩层中迁入的 Ca^{2+} 越来越少,浓度渐渐变小但进入咸-淡水过渡带由于 HCO_3^- 骤减, Ca^{2+} 很快达到超饱和状态,地下水中 Ca^{2+} 大量会聚,浓度迅速升高;同时在过渡带,咸水中富含的 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 随入侵过程将含水层原来所吸附的大量 Ca^{2+} 替换下来进入地下水中,使水中 Ca^{2+} 浓度大大增加。表4所列2组土样的测试证明了这种离子交换作用的存在。以上两方面的原因导致在淡-咸水过渡区的锋面一带, Ca^{2+} 含量达到最高。

表4 潍河下游咸水入侵过渡带两侧土层中阳离子含量(mg/100g)

Table 4 Statistics of cation content in the both sides of earth layer of salt-water intrusion transitional zone in Weihe River downstream

阳离子含量	淡水区一侧		入侵区一侧	
	亚粘土 D ₁	亚粘土 D ₂	亚粘土 X ₁	亚粘土 X ₂
Na ⁺	9.92	10.68	21.52	24.23
K ⁺	3.17	2.84	0.44	0.28
Ca ²⁺	71.45	66.88	4.87	9.05
Mg ²⁺	8.92	5.32	2.12	1.08

3.2.3 海(咸)水入侵区几乎无 SO_4^{2-} 型水存在,除 Cl^- 浓度过高, SO_4^{2-} 含量相对降低的原因之外, SO_4^{2-} 往往易与含水层介质中的 Ca^{2+} 结合,形成 CaSO_4 沉淀,这也是造成 SO_4^{2-} 减少的原因之一。在海(咸)水入侵区,特别是莱州湾南岸的咸水区常可以见到土层中出现的灰白色石膏或次生的钙质淀积层。

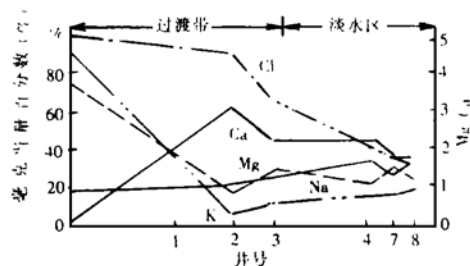


图2 龙口市北马河下游地下水水化学成分变化曲线

Fig.2 Hydrochemical composition variable curve of groundwater in Beima river downstream of Longkou city

4 结论

4.1 莱州湾东岸和南岸两个滨海平原区由于近岸现代海水与埋藏古卤水两种入侵水源水化学成分的差异,在入侵过程中地下水化学变化有明显不同。

4.2 海(咸)水向淡水入侵过程中,在地下含水层中发生的水、岩间的离子交换与离子吸附作用对水化学成分变化有很大影响,这对海(咸)水入侵机理研究具有重要意义。

4.3 莱州湾东岸和南岸滨海平原海(咸)水入侵

区地下水矿化度(M)- Cl^- 间的相关性有一定差别。实践证明,目前海水入侵监测中使用的 Cl^- 浓度(200~300mg/L)和矿化度(M)(2~3g/L)作为入侵发生的两种评判指标很难统一,难以适应海(咸)水入侵过程中地下水变化的复杂过程;两标准同时使用往往给监测研究工作带来混乱。而使用其中的某一单一指标又有明显的局限性。因此,非常有必要开展海水入侵多项综合评判指标体系的研究。

参考文献

- 1 尹泽生等. 莱州市滨海区域海水入侵研究. 北京: 海洋出版社, 1992. 43~59
- 2 周宏春. 工程勘察, 1987(3): 45~49
- 3 赵德三, 尹泽生, 张祖陆等. 山东沿海区域环境与灾害. 北京: 科学出版社, 1991. 237~240
- 4 Gupta A D, Poojitha D Y. Water Resour. Res., 1982, 18(3): 546~558
- 5 韩有松, 孟广兰, 王少青等. 中国北方沿海第四纪地下卤水. 北京: 科学出版社, 1996. 24~25

作者简介

张祖陆 男, 1949年6月生。自然地理学硕士。山东师范大学人口、资源与环境学院教授, 地理专业室主任。主持完成国家“八五”科技攻关项目“海水入侵防治试验研究”(获山东省科技进步一等奖、国家“八五”攻关重大成果奖); 以及主持、参加完成国家自然科学基金、山东省自然科学基金和山东省级、厅局级资助研究项目10余项, 获山东省科技进步二等奖2项, 中科院自然科学二等奖1项, 山东省教委优秀科技成果奖等12项。发表论文30余篇。

致谢 本系参加此项研究野外工作的还有赵健、郭笃发、赵明华、孟庆海等老师, 在此表示感谢。