

# 莱州湾南岸滨海平原地下卤水水化学特征<sup>\*</sup>

苏 乔, 于洪军, 徐兴永, 姚 菁, 姜兴钰

(国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

**摘 要:**综合运用数理统计分析方法对莱州湾南岸滨海平原地下卤水样品的水化学特征进行分析, 结果表明: 莱州湾南岸地下卤水水化学总体特征与海水一致,  $r_{Na}/r_{Cl}$ ,  $r_K/r_{Br}$  和  $r_{Mg}/r_{Ca}$  系数反映出当地地下卤水来源于沉积古海水, 并且海水浓缩程度很高, 而变质作用较弱; 主成分分析中, 第一主分量可以用来解释地下卤水形成时的海水浓缩程度, 第二主分量反映的是在第一主分量海水浓缩强度大体一致的情况下, 可逆反应  $CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2HCO_3^-$  的进行情况。

**关键词:**莱州湾南岸; 地下卤水; 水化学特征; 主成分分析

**中图分类号:** P736.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-6647(2011)02-0163-07

莱州湾南岸蕴藏着丰富的地下卤水, 它属于第四纪滨海相地下卤水。第四纪卤水来源于海水, 但并不是海水的简单浓缩, 其浓度要远远高于海水<sup>[1-5]</sup>。第四纪地下卤水存在的地质历史短, 变化程度低, 其水化学特征与现代盐湖卤水及第四纪以前的古地下卤水均存在差异。

20 世纪 80 年代初, 韩有松等对第四纪地下卤水的成因进行了探讨, 对莱州湾滨海平原第四纪古地理、古气候环境及地下卤水的水化学特征进行了研究<sup>[3]</sup>。此后, 又有多位学者对莱州湾南岸地下卤水的水化学组成、分布特征、地下水水化学模拟及卤水成因演化等方面做了大量的研究<sup>[6-11]</sup>。本研究主要是综合运用数理统计和主成分分析等方法分析莱州湾南岸滨海平原地下卤水的水化学特征。

## 1 区域概况

研究区位于潍坊市北部滨海地带, 西起小清河, 东至胶莱河, 分别隶属寿光、寒亭和昌邑等市区管辖。由鲁中山地北麓诸河流(如小清河、弥河、白浪河、潍河和胶莱河等)冲积而形成广阔的潍北平原, 是我国典型的粉砂淤泥质海岸。该滨海平原地貌类型层次变化清楚, 由南部山前洪积冲积平原向北过渡为冲积平原, 地势缓缓倾斜, 直至莱州湾沿岸过渡为狭窄带状冲积海积平原和海积平原。

本区第四纪厚度一般为 60~150 m, 由一套海陆交互相的含水砂层和粘土层组成, 并且自南向北逐渐增厚, 含水层的沉积物以粉砂和细砂为主, 粗砂和砾石分布比较局限<sup>[5]</sup>。区内的浅层地下卤水埋深范围为 0~80 m, 分 3~4 个含水层组赋存, 具有沿岸分布广、浓度高和储量大的特点。

## 2 地下卤水水化学类型及总体特征

2009-06 在莱州湾南岸滨海平原地区共采集地下卤水样品 114 个, 采样站位分布如图 1。利用有机玻璃

\* 收稿日期: 2010-06-12

**资助项目:**海洋公益性行业科研专项经费项目——环渤海区域海水入侵、土壤盐渍化预警与防控关键技术研究示范(201105020); 科技支撑项目——重要海湾海岸带典型受损生境修复关键技术与示范(2010BAC68B01); 国家海洋局第一海洋研究所基本科研业务费专项资金项目——基于综合物探方法的海水入侵动态监测研究(2010G09); 山东省科技攻关项目——莱州湾地区地质灾害预警预报系统研究(2009GG20005004)

**作者简介:**苏 乔(1983-), 男, 山东日照人, 研究实习员, 硕士, 主要从事海洋地质和第四纪环境方面研究。E-mail: suqiao@fio.org.cn

(陈 靖 编辑)

采水器,采集地下水水下 1 m 深度的卤水样品,用盐酸处理后装入 1 L 的聚乙烯瓶密封保存,然后送入实验室进行测试分析。样品主要测试项目包括  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{Br}^-$ 。

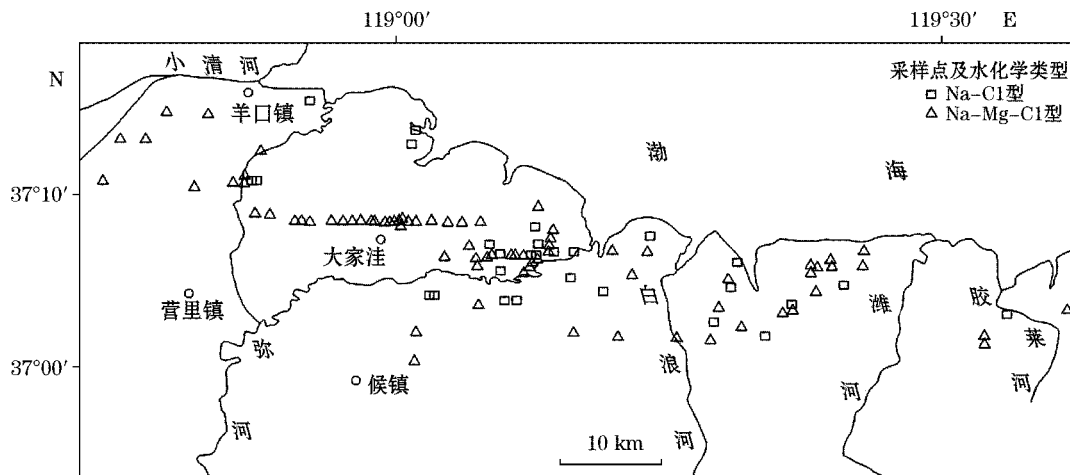


图 1 地下卤水样品采集点及水化学类型分布

Fig. 1 The distribution of underground brine types and their sampling locations

## 2.1 样品检验-离子平衡

天然地下水的化学成分是在漫长的地质历史中形成的,以各种元素的离子、分子、气体成分(溶解或未溶解)、微生物以及不同成分的胶体物质等形态存在。通常状态下,阴阳离子是地下水中的主要组成部分,因而在做水质分析时,对水中阴阳离子的平衡检查就成为检验样品可靠性的一种重要方法。阴阳离子平衡检查公式为:  $E(\%) = (\sum m_a - \sum m_b) / (\sum m_a + \sum m_b) \times 100$ , 式中  $E$  为相对误差;  $m_a$ 、 $m_b$  分别为阳离子和阴离子的毫克当量浓度(meq/L)。根据离子平衡检查公式计算,全部样品离子平衡相对误差在  $-1.94\% \sim 1.97\%$ 。其中,正平衡样品 56 个,平均相对误差为  $0.8\%$ ; 负平衡样品 58 个,平均相对误差为  $-0.96\%$ 。一般认为,离子平衡相对误差  $\pm 5\%$  则认为该数据是可靠的。本研究采用数据的离子平衡相对误差均在允许范围之内,数据是可信的。

## 2.2 水化学类型及总体特征

按照舒卡列夫分类法,全部 114 个样品中水化学类型划分为 Na-Cl 型及 Na-Mg-Cl 型(图 1),其中 Na-Cl 型为 33 个,Na-Mg-Cl 型为 81 个,两种类型的地下卤水空间分布没有明显规律。样品中  $\text{Cl}^-$  质量浓度最小值为  $34\ 651.60\ \text{mg/L}$ ,最大值为  $122\ 842.80\ \text{mg/L}$ ,样品全部为高质量浓度地下卤水,其质量浓度远远超过海水。

宏量组分是组成地下水浓度的主干部分,它决定了水的基本特征,是对比和分类的基础,它反映了水化学成分形成过程的趋向<sup>[12]</sup>。根据样品的水化学总体特征(表 1),可以得出地下卤水中宏量组分的数量关系:地下卤水中阴离子中  $\text{Cl}^-$  占绝对优势, $\text{SO}_4^{2-}$  次之, $\text{HCO}_3^-$  较少;地下卤水中阳离子中  $\text{Na}^+$  占绝对优势, $\text{Mg}^{2+}$  次之,其后为  $\text{Ca}^{2+}$ ,此特征与海水是一致的。其中  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的质量浓度平均值和标准偏差都较大,反映其在地下卤水中的绝对质量浓度较大,为地下卤水中的主要阴、阳离子,是决定地下卤水水化学特征的主要变量。

海水中化合物溶解度大小排列为  $\text{CaCO}_3 < \text{MgCO}_3 < \text{CaSO}_4 < \text{MgSO}_4 < \text{NaCl}$ ,海水是  $\text{CaCO}_3$  的饱和溶液,在海水蒸发浓缩过程中,首先析出文石和方解石沉淀,使得  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  同时降低,所以  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  在地下卤水中的质量浓度相对偏低。随着矿化度的升高,海水中有石膏析出, $\text{SO}_4^{2-}$  也开始形成沉淀,只有氯

盐的溶解度最大,Cl<sup>-</sup>仍处于溶解状态,其质量浓度在阴离子中最高。海水中 Na<sup>+</sup>质量浓度远大于 Mg<sup>2+</sup>,并且其溶解度也较大,所以 Na<sup>+</sup>在阳离子中占绝对优势。从离子空间变异上看,变异系数最大的是 K<sup>+</sup>,其次为 Br<sup>-</sup>,最小的为 Ca<sup>2+</sup>(表 1)。

表 1 地下卤水水化学总体特征

Table 1 The general hydrochemical characteristics of underground brine

化学元素	$\rho_{\min}$ /mg · L <sup>-1</sup>	$\rho_{\max}$ /mg · L <sup>-1</sup>	$\rho_{\text{平均值}}$ /mg · L <sup>-1</sup>	标准偏差	变异系数	$\rho_{\text{海水平均值}}^{[5]}$ /mg · L <sup>-1</sup>
Na <sup>+</sup>	17 820.00	67 920.00	41 528.42	10 687.84	25.74	10 760
K <sup>+</sup>	239.20	1 367.40	771.81	245.47	31.81	387
Ca <sup>2+</sup>	631.20	1 929.80	1 125.70	269.92	23.98	413
Mg <sup>2+</sup>	2 638.30	12 969.90	6 054.66	1 624.44	26.83	1 294
Cl <sup>-</sup>	3 4651.60	122 842.80	76 698.67	18 960.76	24.72	19 353
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	4 595.40	17 740.40	10 074.84	2 531.41	25.13	2 712
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	214.30	970.50	415.37	105.82	25.48	142
Br <sup>-</sup>	10.00	540.00	251.33	77.81	30.96	67

### 3 水化学分析

#### 3.1 相关性分析

相关性分析可以揭示地下水水化学参数的相似向异性及来源的一致性和差异性<sup>[13]</sup>。从地下卤水水化学参数相关关系矩阵(表 2)可以看出,Na<sup>+</sup>,K<sup>+</sup>,Mg<sup>2+</sup>,Cl<sup>-</sup>和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>彼此之间的相关系数均大于 0.7,Br<sup>-</sup>与上述 5 种离子之间的相关系数除 K<sup>+</sup>(0.468)稍小外,也均超过 0.5。特别注意的是,Na<sup>+</sup>与 Cl<sup>-</sup>表明了一种强相关关系(相关系数 0.99)。对这些离子来说,在海水浓缩过程中,其离子浓度随海水浓缩程度呈正比例变化。Ca<sup>2+</sup>与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>同其它离子的相关系数均较小,且多为负相关,主要是由于在海水的浓缩过程中,首先析出文石和方解石,使 Ca<sup>2+</sup>与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>同时降低;卤水形成后,Na<sup>+</sup>,K<sup>+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>与粘土中的 Ca<sup>2+</sup>发生离子交换,也会影响到它们之间的相关系数。

表 2 地下卤水水化学参数相关关系矩阵

Table 2 Correlation matrix showing hydrochemical parameters for the groundwater brine

	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	K <sup>+</sup>	Br <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Na <sup>+</sup>	1	0.101	0.787	0.990	0.766	0.807	0.568	-0.213
Ca <sup>2+</sup>		1	-0.003	0.126	0.042	-0.007	-0.196	-0.204
Mg <sup>2+</sup>			1	0.84	0.876	0.755	0.688	-0.012
Cl <sup>-</sup>				1	0.788	0.820	0.588	-0.187
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>					1	0.723	0.620	0.001
K <sup>+</sup>						1	0.468	-0.301
Br <sup>-</sup>							1	0.156
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>								1

#### 3.2 离子比例系数分析

在地下水化学成分中,许多化学组分之间存在某种相关关系(或共生关系),即一些化学元素含量间的比

值趋于固定。依据某些元素含量间的这种固定关系,便可能对地下水的成因和所处环境做出分析和判断,这种方法称为比例系数分析法<sup>[14]</sup>。

由表 1 可知,地下卤水与海水的化学组成基本特征相同,所含元素组分相近,主要元素排列顺序也相同,主要离子含量百分比存在较小差异。依据元素比例系数分析,海水中最有意义的是  $r_{Na}/r_{Cl}$  比值,因为其具有最大的稳定性,使用其离子比值可以判断地下水的成因和变质作用强度。当地下水  $r_{Na}/r_{Cl} \approx 0.87$  时,属于海水的派生水;当  $r_{Na}/r_{Cl} < 0.87$  时,海水发生了变质,系数值越小,变质作用越强烈<sup>[15]</sup>。由图 2 可以看出,除个别样品外,莱州湾南岸地下卤水的  $r_{Na}/r_{Cl}$  变化范围为 0.78~0.9,全部样品  $r_{Na}/r_{Cl}$  平均值为 0.833,低于 0.87,从另一个角度证明莱州湾南岸地下卤水来源于海水,并且变质作用不大。

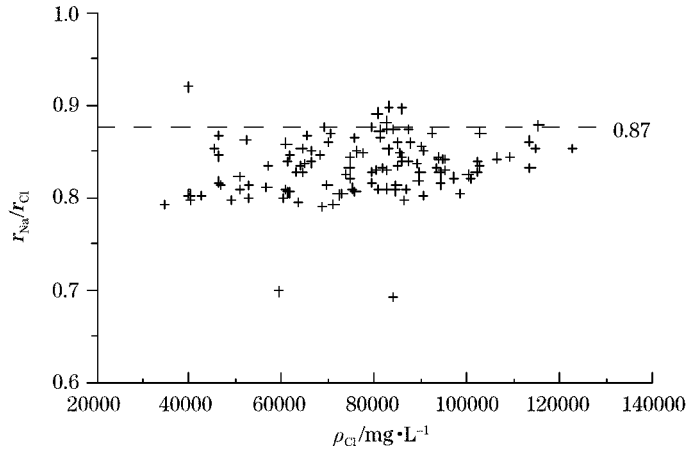


图 2 地下卤水  $r_{Na}/r_{Cl}$

Fig. 2 The  $r_{Na}/r_{Cl}$  ratio of the underground brine

在地下淡水中  $Mg^{2+}$  绝对含量通常都较  $Ca^{2+}$  要小,但在海水中  $Mg^{2+}$  含量要比  $Ca^{2+}$  大得多,海水  $r_{Mg}/r_{Ca}$  值约为 5.5,一般地下淡水不可能达到如此高值<sup>[14]</sup>。因此,可以根据  $r_{Mg}/r_{Ca}$  系数来判断海水入侵范围与程度。从莱州湾南岸地下卤水的  $r_{Mg}/r_{Ca}$  来看(图 3),其平均值达到 9.34,远远超过 5.5,同样证明地下卤水来源于海水,但又不是海水的简单浓缩。

海水  $r_K/r_{Br}$  值是 5.80,海水蒸发浓缩程度越高,则  $r_K/r_{Br}$  就越低,所以沉积卤水的  $r_K/r_{Br}$  不会大于 5.80,大于 5.80 的应是溶滤了钾盐的溶滤卤水<sup>[12]</sup>,高矿化水受淡化后  $r_K/r_{Br}$  基本无影响。从莱州湾南岸的地下卤水的  $r_K/r_{Br}$  比值来看,全部样品平均值为 3.59,并且比值基本小于 5.80(图 4),仅个别点数值较高,说明当地卤水为沉积卤水,并且浓缩程度很高。

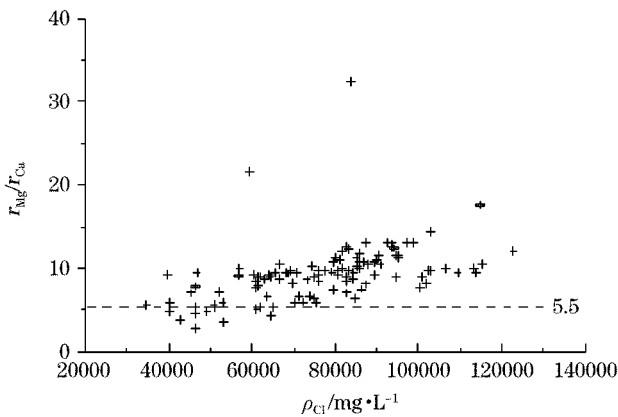


图 3 地下卤水的  $r_{Mg}/r_{Ca}$

Fig. 3 The  $r_{Mg}/r_{Ca}$  ratio of the underground brine

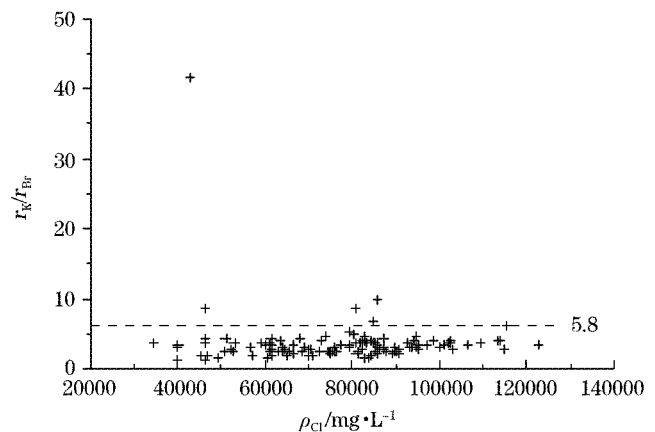


图 4 地下卤水  $r_K/r_{Br}$

Fig. 4 The  $r_K/r_{Br}$  ratio of the underground brine

## 4 主要离子主成分分析

主成分分析也称主分量分析,是指利用降维的方法,把多指标转化为少数几个不相关的综合指标的方法,即用较少的指标来代替和综合反映原来较多的信息,这些综合后的指标就是原来多指标的主要成分。本研究利用全部 114 个地下卤水样品水化学数据,选取  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{Br}^-$  浓度作为分析变量,利用 SPSS 软件对其进行主成分分析。

确定主成分个数主要综合考虑 3 方面的因素:1)取所有特征值大于某一确定值,一般取 1;2)是根据累计贡献率达到确定的百分比;3)根据 SPSS 软件生成的碎石图,结合特征根曲线的拐点及特征根植判断<sup>[15]</sup>。将处理好的数据在 SPSS 软件下进行运算,可以得到总方差解释(表 3)及碎石图(图 5),根据特征根值,前 2 个主成分根植均大于 1,方差贡献率大于 17%,累计贡献率达到 76.78%;碎石图特征根植拐点及曲线在第 2 个主成分之后,小因子相连的折线明显变缓,确定分析区域的主成分数为 2,即选取前 2 个因子为主成分。

表 3 总方差解释

Table 3 Variance analysis with its relevant contribution

成 份	初始特征值			提取平方和载入		
	特征根	方差贡献率/%	累积贡献率/%	特征根	方差贡献率/%	累积贡献率/%
1	4.744	59.303	59.303	4.744	59.303	59.303
2	1.398	17.476	76.780	1.398	17.476	76.780
3	0.854	10.669	87.449			
4	0.406	5.077	92.526			
5	0.291	3.637	96.162			
6	0.187	2.333	98.496			
7	0.116	1.455	99.951			
8	0.004	0.049	100.000			

注:表中空白代表未测

表 4 主成分矩阵

Table 4 Component Matrix

变 量	主成分	
	1	2
$\text{Na}^+$	0.936	-0.142
$\text{K}^+$	0.872	-0.164
$\text{Ca}^{2+}$	0.036	-0.692
$\text{Mg}^{2+}$	0.928	0.132
$\text{Cl}^-$	0.956	-0.128
$\text{SO}_4^{2-}$	0.896	0.103
$\text{HCO}_3^-$	-0.146	0.789
$\text{Br}^-$	0.712	0.454

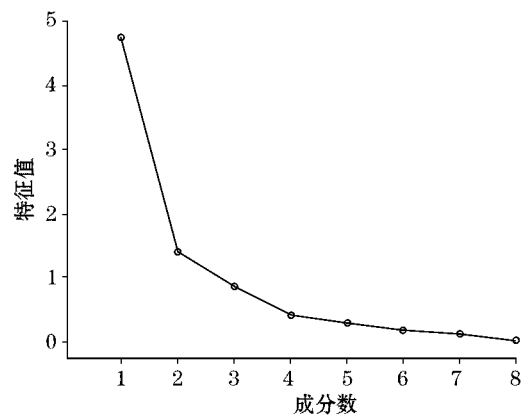


图 5 碎石图

Fig. 5 Plot for scree

从主成分矩阵(表 4)来看,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Br}^-$  在第一主成分的正相载荷很大, 权系数都超过了 0.7, 阳离子中  $\text{Na}^+$  最高,  $\text{Mg}^{2+}$  次之; 阴离子中  $\text{Cl}^-$  最高,  $\text{SO}_4^{2-}$  次之, 反映了地下卤水形成时的海水浓缩程度, 这些离子含量越高, 海水浓缩程度越大。与第二主分量密切相关的是  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{HCO}_3^-$ , 权系数绝对值均超过 0.65, 代表的是在第一主分量海水浓缩强度大体一致的情况下, 可逆反应  $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$  的进行情况, 该反应的进行程度和方向主要由地下水中溶解的  $\text{CO}_2$  的数量来决定, 从而导致在该主分量上  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{HCO}_3^-$  的权系数较其它离子大得多。 $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{HCO}_3^-$  在第二主分量上的权系数分别为 -0.692 和 0.789, 两者符号相反, 说明它们在地下水中的伴生关系上是相互“排斥”的, 也就是说, 一种离子含量升高, 必然在统计上伴随着另一种离子含量的降低。根据质量作用定律, 在上述可逆反应中, 当地下卤水中的  $\text{HCO}_3^-$  增加, 必然使地下卤水中的  $\text{Ca}^{2+}$  与之形成难溶于水的  $\text{CaCO}_3$ , 从而使地下卤水中的  $\text{Ca}^{2+}$  浓度减小。反之亦然<sup>[16]</sup>。

## 5 结 论

1) 莱州湾南岸地下卤水的水化学类型主要为 Na-Cl 型和 Na-Mg-Cl 型, 水化学总体特征与海水一致。 $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  彼此之间的相关性较好,  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{HCO}_3^-$  之间及与其它离子的相关性较差。

2) 地下水特征离子比例系数  $r_{\text{Na}}/r_{\text{Cl}}$ ,  $r_{\text{K}}/r_{\text{Br}}$  和  $r_{\text{Mg}}/r_{\text{Ca}}$ , 反映出莱州湾南岸地下卤水来源于沉积古海水, 并且海水浓缩程度很高, 而变质作用较弱。

3) 主成分分析中, 地下卤水形成时的海水浓缩程度可以用第一主分量来表示, 海水浓缩导致  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Br}^-$  质量浓度升高, 从而使该主分量的得分增加, 并且这些离子之间呈现明显的正相关, 说明其中任一离子都可以大致表示海水浓缩程度。第二主分量是在第一主分量海水浓缩强度大体一致的情况下, 可逆反应  $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$  的进行情况, 受水中溶解的  $\text{CO}_2$  所制约,  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{HCO}_3^-$  在地下水具有相互消长趋势。

## 参考文献(References):

- [1] WANG S H. A preliminary study of marine bed and its depositional conditions in late quarternary off the west coast of Laizhou bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1979, 10(1): 9-23. 王绍鸿. 莱州湾西岸晚第四纪海相地层及其沉积环境的初步研究[J]. *海洋与湖沼*, 1979, 10(1): 9-23.
- [2] HAN Y S, WU H F. The origin of underground brines in the coastal plain of Laizhou Bay[J]. *Geological Review*, 1982, 28(2): 126-131. 韩有松, 吴鸿发. 莱州湾滨海平原地下卤水成因初探[J]. *地质论评*, 1982, 28(2): 126-131.
- [3] HAN Y S, MENG G L, WANG S Q. The geological events and paleo-environment of the coastal plain of Laizhou bay in Bohai sea during late quaternary[J]. *Studia Marina Sinica*, 1994, 35: 87-98. 韩有松, 孟广兰, 王少青. 渤海莱州湾滨海平原晚第四纪地质事件与古环境[J]. *海洋科学集刊*, 1994, 35: 87-98.
- [4] WANG Z Y, HAN Y S. The geotechnical properties of the shallow sol layers of the southern bohai gulf and their relationship with the sedimentary facies in the area[J]. *Marine Sciences*, 1998(1): 22-24. 王珍岩, 韩有松. 第四纪滨海相地下卤水的研究[J]. *海洋科学*, 1998(1): 22-24.
- [5] WANG Z Y, MENG G L, WANG S Q. Geochemistry modeling of quaternary subsurface brines in south coast of the Laizhou Bay, the bohai sea-taking brines from core-aoli501 in changyi area as an example[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(1): 49-53. 王珍岩, 孟广兰, 王少青. 渤海莱州湾南岸地下卤水演化的地球化学模拟[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(1): 49-53.
- [6] SUN D P, LI B X, MA Y H, et al. An investigation on evaporating experiments for Qinghai-lake water, China[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 1995, 10(2): 10-19. 孙大鹏, 李秉孝, 马育华, 等. 青海湖湖水的蒸发实验研究[J]. *盐湖研究*, 1995, 10(2): 10-19.
- [7] HAN Y S, MENG G L, WANG S Q. Underground brine in coastal area of North China in quarternary[M]. Beijing: Science Press, 1996. 韩有松, 孟广兰, 王少青. 中国北方沿海第四纪地下卤水[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [8] HAN Y S, MENG G L, WANG S Q. A preliminary study on the distribution and genesis of underground brine in the littoral plain of Laizhou Bay in the Bohai Sea[J]. *Chinese Journal of Oceanology Limnology*, 1993 (1): 46-51.

- [9] BLATT H, MIDDLETON G, MURRAY R. Origin of sedimentary rocks[M]. Beijing: Science Press, 1978. BLATT H, MIDDLETON G, MURRAY R. 沉积岩成因[M]. 北京:科学出版社,1978.
- [10] HEYT B, STARINSKY A, KATZ A, et al. The role of seawater freezing in the formation of subsurface brines[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990(1):13-21.
- [11] MENG G L, WANG Z Y, WANG S Q, et al. Hydrochemical symbol of brines formed by seawater freezing- I.  $\delta D$  value of brines[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1999, 30(4):416-420. 孟广兰,王珍岩,王少青,等. 冰冻成因卤水的水化学标志-I. 卤水的  $\delta D$  值[J]. *海洋与湖沼*, 1999, 30(4):416-420.
- [12] Institute for Hydrographic and Engineering Geology under Geology and Mineral Department. Deep underground brine formation and its study methods[M]. Beijing: Geology Press, 1982. 地质矿产部水文地质工程地质研究所编. 深层卤水形成问题及其研究方法[M]. 北京:地质出版社,1982.
- [13] JIANG L, LI P C, GUO J Q. Hydrochemical characteristics and evolution laws of groundwater in typical oasis of arid areas on the west of Helan mountain[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2009, 31(3):285-290. 姜凌,李佩成,郭建青. 贺兰山西麓典型干旱区绿洲地下水水化学特征与演变规律[J]. *地球科学与环境学报*, 2009, 31(3):285-290.
- [14] SHEN Z L, ZHU W H, ZHONG Z S. Basic course for hydrographic geochemistry[M]. Beijing: Geology Press, 1993. 沈照理,朱宛华,钟佐燊. 水文地球化学基础[M]. 北京:地质出版社,1993.
- [15] LI Z Q, HOU M Y, BAI Y P. Principle composition analysis for application to hydroenvironmental quality evaluation[J]. *Haihe River Conservancy*, 2008, (3), 49-52. 李哲强,侯美英,白云鹏. 基于 SPSS 的主成分分析在水环境质量评价中的应用[J]. *海河水利*, 2008, (3):49-52.
- [16] GUO D F. Principal component analysis on the ions in the groundwater intrusion area of Laizhou Bay coast[J]. *Marine Sciences*, 2004, 28(9):6-9. 郭笃发. 莱州湾东南岸海水入侵区地下水中若干离子的主成分分析[J]. *海洋科学*, 2004, 28(9):6-9.

## Hydrochemical Characteristics of Underground Brine in Littoral Plain South of Laizhou Bay

SU Qiao, YU Hong-jun, XU Xing-yong, YAO Jing, JIANG Xing-yu  
(The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China)

**Abstract:** By means of mathematical statistics, hydrochemical characteristics of underground brine samples from the littoral plain south of the Laizhou Bay are analyzed. It is learnt from the analysis results that in general the characteristics of the brine underground of the littoral plain are consistent with those of sea water in the coastal sea. The  $r_{Na}/r_{Cl}$ ,  $r_{K}/r_{Br}$ ,  $r_{Mg}/r_{Ca}$  coefficients reflect the underground brine origination from the paleosedimentation with its strong concentration and weak metamorphism. As it is shown in the brine composition analysis, the first component in the composition can be used to explain the sea water concentration degree when the brine was initially formed. The second component reflects how the reversible reaction, i. e.  $CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2HCO_3^-$  went through if the sea water concentration shown by the first component was not much variable.

**Key words:** the coast south of Laizhou Bay; underground brine; hydrochemical characteristics; principal component analysis

**Received:** June 12, 2010