

文章编号: 0258-7106(2008)05-0631-07

# 山东潍坊沿海地下卤水矿地质特征及成矿规律\*

王松涛<sup>1</sup>, 高美霞<sup>1</sup>, 傅俊鹤<sup>2</sup>

(1 山东省第四地质矿产勘查院, 山东 潍坊 261021; 2 浙江省地质调查院, 浙江 杭州 311203)

**摘要** 文章对第四纪滨海相地下卤水资源的赋存条件、空间分布等卤水地质特征和成矿规律进行了系统的分析和研究。研究表明, 浅层地下卤水含水层为1层, 赋存在第四系全新统, 承压地下卤水含水层为4层, 赋存于第四系更新统中。地下卤水来源于海水, 系蒸发浓缩成卤, 是一种复杂的水盐体系; 其中含有  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Li}^+$ 、 $\text{Rb}^+$ 、 $\text{Br}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{O}^{2-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{BO}_2^-$ 、 $\text{I}^-$  等离子, 并组合形成多种可溶盐类; 主要有益组分为  $\text{NaCl}$ 、 $\text{Br}$ 、 $\text{MgCl}_2$ 、 $\text{MgSO}_4$ 、 $\text{CaSO}_4$ 、 $\text{KCl}$ 、 $\text{I}$ 、 $\text{LiCl}$ 、 $\text{Rb}_2\text{O}$ 、 $\text{B}_2\text{O}_3$  等, 达到工业指标的矿种有5种, 分别为  $\text{NaCl}$ 、 $\text{Br}$ 、 $\text{MgCl}_2$ 、 $\text{MgSO}_4$ 、 $\text{CaSO}_4$ ; 估算的卤水总储量为  $59.92 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

**关键词** 地球化学, 成矿规律, 地质特征, 地下卤水矿, 沿海, 潍坊

中图分类号: P641.4<sup>+</sup>64

文献标志码: A

## Geological characteristics and metallogenic regularity of underground brine ore in coastal areas of Weifang, Shandong Province

WANG SongTao<sup>1</sup>, GAO MeiXia<sup>1</sup> and FU JunHe<sup>2</sup>

(1 No. 4 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Weifang 261021, Shandong, China;

2 Zhejiang Geological Survey, Hangzhou 311203, Zhejiang, China)

### Abstract

This paper has systematically discussed geological characteristics and ore-forming processes of Quaternary littoral facies underground brine, including its burial conditions and aerial distribution. The results indicate that the water-bearing layer of shadow underground brine is No. 1 layer existing in Quaternary Holocene, whereas the water-bearing layers of pressurized underground brine are No. 1-4 layers in Quaternary Pleistocene. The underground brine is a complex water-salt system derived from seawater and subjected to intense evaporation and concentration in Quaternary sediments. It is rich in such components as  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Rb}^+$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{O}^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{BO}_2^-$  and  $\text{I}^-$ , forming many kinds of soluble salts. The beneficial components are  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Br}$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{I}$ ,  $\text{LiCl}$ ,  $\text{Rb}_2\text{O}$  and  $\text{B}_2\text{O}_3$ , among which  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Br}$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4$  have reached their industrial indexes. Total reserves are estimated to be  $59.92 \times 10^8 \text{ m}^3$ .

**Key words:** geochemistry, metallogenic regularity, geological characteristics, underground brine ore, coastal areas, Weifang

第四纪滨海相地下卤水矿床是一种新型盐类矿床, 在中国北方沿海主要分布于渤海沿岸及部分黄海岸段, 其中以山东莱州湾南岸的潍坊沿海地区分布较广, 浓度较高, 储量较大。地下卤水是发展盐化

\* 本文得到国家自然科学基金项目(2005120)和山东省潍坊市沿海地区地下卤水矿勘查项目的联合资助

第一作者简介: 王松涛, 男, 1971年生, 地质矿产工程师, 主要从事地质矿产勘查工作。E-mail: sdwfwst@163.com

收稿日期: 2007-12-17; 改回日期: 2008-03-06。李德先编辑。

工业的主要原料,具有极高的工业价值。20世纪70年代末,中国沿海经济大发展,原盐供不应求,这种状况促进了对莱州湾地区卤水矿床的勘查与研究。80年代以来,对该区相继进行了一系列地质工作,并取得了如下初步成果《山东省昌邑市廩里地下卤水勘查报告》、《山东省潍坊市寒亭区白浪河-虞河地段地下卤水初步勘查报告》、《山东省潍坊市寒亭区白浪河-丹河地段地下卤水初步勘查简报》等。上述工作对本区的深入研究起到了重要作用,但由于这些工作多为分段进行,缺乏总体评价,为此山东省第四地质矿产勘查院为查明潍坊北部沿海地区地下卤水资源的分布范围、分布规律、埋深、空间形态及现存资源储量等具体问题,在前人研究成果的基础上,采用了多种勘查手段,通过系统的地质工作,对潍坊北部沿海地区的地下卤水资源进行了全面的勘查工作。本文依据此次勘查成果整理而成,旨在揭示莱州湾地区地下卤水的地质特征及成矿规律,希望在沿海的第四纪滨海相地层中找到地下卤水远景分布区。

## 1 地下卤水矿地质特征

潍坊市地下卤水资源主要分布于北部滨海地带,分别隶属于寿光、寒亭、昌邑等3个市区管辖,东西长83 km,南北宽6~20 km,总面积为1 300 km<sup>2</sup>(图1)。

### 1.1 矿区地质特征

区内地势平坦广阔,地形自南向北由高到低,坡度为三千分之一,海拔标高2~7 m,属滨海堆积平原地貌<sup>①</sup>。根据地表地层出露及钻孔资料揭示,区内地层主要为第四系晚更新世-全新世冲积、海积、冲海积沉积层,总厚度达500 m左右。地下卤水矿主要赋存于第四系平原组和淮北组。

平原组为一套河漫滩相、河床相、海相及海陆交互相互沉积的综合堆积体,以棕黄色粉亚粘土为主夹各种不等粒砂层,总厚度200~500 m,为更新世沉积物,是地下卤水的主要赋存层位。

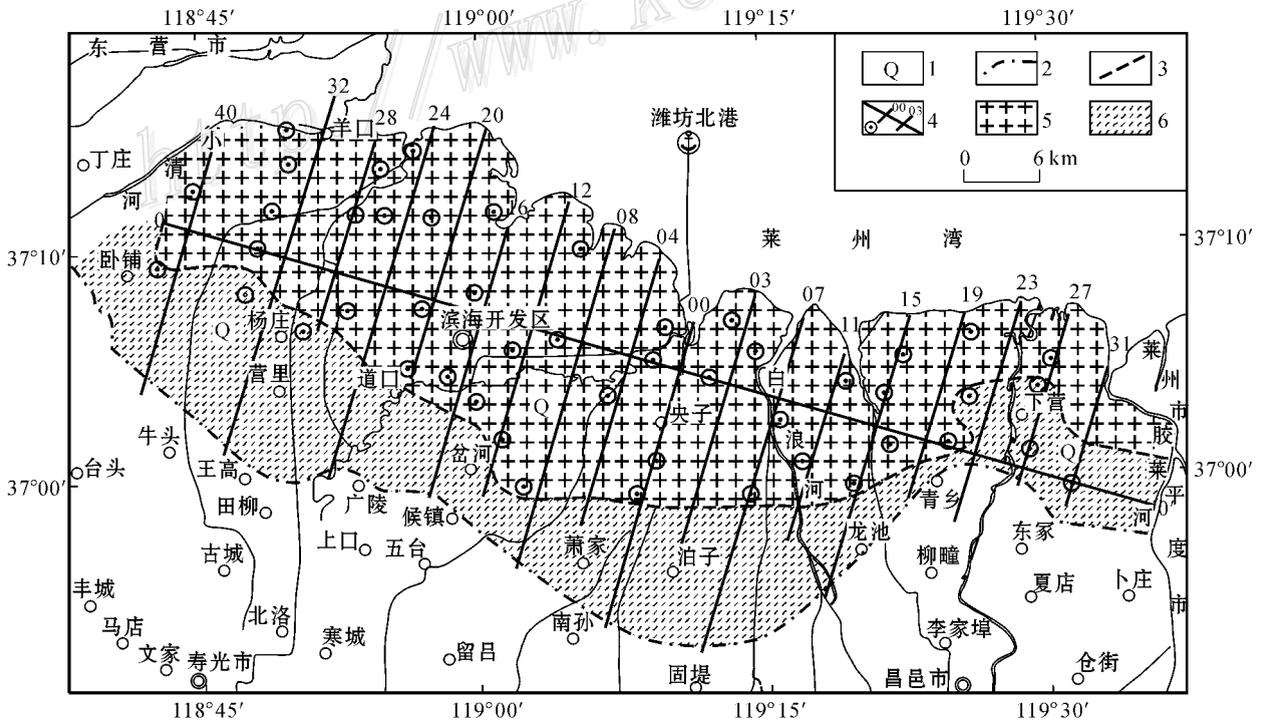


图1 山东省潍坊北部沿海地区地下卤水资源分布图

1—第四系;2—咸水区、淡水区分界线;3—卤水区、咸水区分界线;4—勘探线编号及钻孔位置;5—卤水区;6—咸水区

Fig. 1 Distribution of underground brine resources in coastal areas of Weifang, Shandong Province

1—Quaternary; 2—Boundary between salt water and fresh water area; 3—Boundary between brine and salt water area;

4—Serial number of exploration line and drilling hole; 5—Brine area; 6—Salt water area

① 吴衍华、王松涛等. 2006. 山东省潍坊市沿海地区地下卤水矿勘查地质报告. 山东省第四地质矿产勘查院.

潍北组在区内广泛出露，为近代海陆交互相沉积物，主要为灰黑色砂质粘土，灰黄色粘质砂土，局部夹河流相含砾混砾砂，含贝壳碎片，厚度 1~10 m，是潜卤水矿层赋存层位。

### 1.2 矿层地质特征

#### 1.2.1 地下卤水矿层的赋存条件

勘查结果表明，区内地下卤水层呈条带状，沿莱州湾南岸 EW 向展布，西起小清河南岸，东至胶莱河西岸，南部边界根据潍坊市地质环境监测站 20 世纪 80 年代建站以来的监测资料，结合本次钻孔控制情况分析，地下卤水在卧铺（北东 2 km）杨庄（北 1.5 km）道口-岔河（北东 1.0 km）-沿辛沙路（320 省道）-青乡-下营（北 1.5 km）-辛沙路（320 省道）胶莱河大桥一线以北的广大地区。

区内地下卤水矿主要赋存于第四系海相地层的松散沉积物中，以粉砂为主，局部夹细砂、淤泥质粉砂、粗砾砂、粉砂质粘土。

#### 1.2.2 地下卤水含水层的空间分布特征

对勘查施工的 63 个钻孔资料的总结分析表明，地下卤水矿体共分为 5 层，厚度在 17.80~58.70 m 之间，变化较大。昌邑市北部地区的平均厚度最大，为 37.84 m，寒亭区北部地区的平均厚度次之，为 35.20 m，寿光市北部（包括海化区）地区的平均厚度最小，为 32.73 m。

区内的卤水浓度为 0.05~0.165 kg/L，在水平方向和垂直方向上都具有一定的分带特征。

水平方向：卤水浓度最高的地段是寒亭区白浪

河往东至昌邑市龙池镇北部盐场一带，卤水浓度平均值为 0.104 kg/L。该带两侧卤水的浓度则逐渐降低，其中往东昌邑市卤水浓度平均值为 0.096 kg/L，往西寿光市（包括海化区）卤水浓度平均值为 0.097 kg/L。

垂直方向：高浓度卤水主要集中分布在 28.0~55.0 m 的埋深区间，卤水浓度在 0.100~0.165 kg/L，此区间往上、往下，浓度都逐渐降低。

#### 1.2.3 地下卤水含水层的特征

对该区卤水矿勘查资料的分析研究表明，矿区卤水矿层的底板埋深为 2.4~80 m，极少数埋深大于 80 m。按照卤水矿层的埋藏条件和水力性质特征，区内地下卤水含水层可分为浅层潜卤水层和中深层承压卤水层 2 种类型。

##### (1) 浅层潜卤水层

浅层潜卤水层分布于第四系全新统地层中，含水层主要由粉砂、细砂、淤泥质粉细砂、粉砂质粘土等组成，含有数量不等的贝螺类碎片，属于浅滩滨海相沉积。浅层潜卤水层在整个勘探区内只有 1 层（图 2）。本层底板埋深在 2.40~51.00 m 之间，潜卤水层的厚度变化较大，从 2.80~35.80 m 不等。卤水浓度 0.050~0.140 kg/L。

##### (2) 深层承压卤水层

区内深层承压卤水层分布在第四系更新统中，与上部的潜卤水层有一定厚度的隔水层，中深层承压卤水主要由 4 个较为稳定的卤水层构成。

第一承压卤水层：在北部地区广泛存在，所有

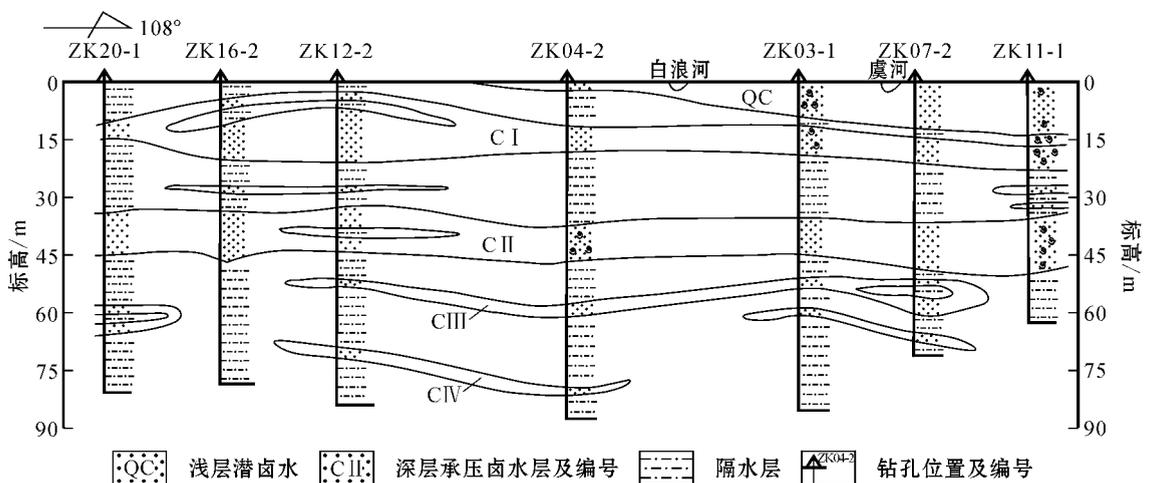


图 2 潍坊滨海第四纪地下卤水矿勘探线（横切）地质剖面图

Fig. 2 Geological section along the exploration line of underground brine in coast area of Weifang

的勘探线均揭露到该层。其上部是粉质粘土、粉砂质粘土或淤泥质粉质粘土组成的相对隔水层。卤水层主要由粉砂组成,其次是细砂,少有中粗砂,见有少量贝壳碎片。顶板埋深 7.00~33.80 m,底板埋深 15.40~53.40 m,含水层厚度 3.00~27.80 m,是卤水矿床的主要含卤水层。

第二承压卤水层:除 15、40 勘探线外,在北部地区绝大多数勘探线均揭露到该层。与第一承压卤水层之间的相对隔水层是由粉质粘土、粉砂质粘土构成。卤水层由粉砂、细砂组成,偶有中粗砂等,见有少量的贝壳碎片。顶板埋深 20.40~52.20 m,底板埋深 22.00~72.50 m,含水层厚度 1.20~26.60 m,变化较大,是卤水矿床的主要含卤水层。

第三承压卤水层:本层在北部只有部分地区揭露到,第 00、08、15、16、19、20、24、40 勘探线没有揭露到该层。与第二承压卤水层之间是由粉质粘土、粉砂质粘土组成的相对隔水层。卤水层主要由粉砂、细砂及少量中粗砂组成。含水层顶板埋深 28.20~73.20 m,底板埋深 36.40~73.20 m,含水层厚度 1.00~27.90 m 不等,为卤水矿床的主要含卤水层。

第四承压卤水层:该层只是在第 04、11、12、28 勘探线揭露到,由粉质粘土或粉砂质粘土组成的相对隔水层与第三承压卤水层分隔开。其含卤水层以粉砂为主,其次为细砂及少量中粗砂。含水层顶板埋深 44.60~73.80 m,底板埋深 46.20~88.00 m,含水层厚度 1.00~14.20 m,为卤水矿床的次要含卤水层。

## 2 有用组分

矿区内地下卤水主要含有  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、

表 1 地下卤水有益组分平均含量

Table 1 Average content of beneficial components in underground brine

卤水浓度 / $10^{-3}$ kg/L	有用组分浓度/ $10^{-3}$ kg/L				
	NaCl	MgCl	MgSO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub>	Br <sup>-</sup>
≥70	93.51	14.69	8.52	3.10	0.224
50~70	45.35	8.99	5.03	2.29	0.130

$\text{K}^+$ 、 $\text{Li}^+$ 、 $\text{Rb}^+$ 、 $\text{Br}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{O}_2^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{BO}_2^-$ 、 $\text{I}^-$  等离子,化合物为 NaCl、NaBr、 $\text{MgBr}_2$ 、 $\text{MgCl}_2$ 、 $\text{MgSO}_4$ 、 $\text{CaSO}_4$ 、KCl、LiCl、 $\text{B}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Rb}_2\text{O}$  等,达到工业指标的矿种有 5 种,分别为 NaCl、Br、 $\text{MgCl}_2$ 、 $\text{MgSO}_4$ 、 $\text{CaSO}_4$ 。有益组分平均含量如表 1 所示。

## 3 资源量

矿化度  $\geq 50 \times 10^{-3}$  kg/L 的地下水为地下卤水,目前开发利用的卤水主要为矿化度  $\geq 70 \times 10^{-3}$  kg/L 的地下卤水资源。对两种地下卤水资源进行的资源量估算表明(表 2):区内矿化度  $\geq 70 \times 10^{-3}$  kg/L 地下卤水资源量为  $43.50 \times 10^8 \text{ m}^3$  ( $50 \sim 70$ )  $\times 10^{-3}$  kg/L 地下卤水资源量为  $16.42 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

## 4 成矿规律

卤水是一种液体矿产资源,其形成主要受气象、水文条件、地质构造条件、地貌条件控制,生成于宽阔的海岸潮滩与海积平原,且必须有干旱、半干旱的气候条件及适宜的地理位置、纬度以及与海洋的距离等(孔庆友等 2006)。

表 2 两种不同浓度的地下卤水资源量估算结果表

Table 2 Reserves calculation of underground brine resources between two different brine concentration

估算面积/ $\text{km}^2$	矿化度 $\geq 70 \times 10^{-3}$ kg/L 资源量							
	地下卤水/ $10^8 \text{ m}^3$	食盐/万 t	溴/万 t	氯化镁/万 t	硫酸镁/万 t	硫酸钙/万 t	氯化钾/万 t	
潮间带	233.845	8.27	0.78	18.57	1216.04	707.06	257.59	109.74
陆地	993.483	35.23	3.29	79.12	5172.78	3002.13	1092.96	461.09
合计	1227.328	43.50	4.07	97.69	6388.82	3709.19	1350.55	570.83
估算面积/ $\text{km}^2$	矿化度 ( $50 \sim 70$ ) $\times 10^{-3}$ kg/L 资源量							
	地下卤水/ $10^8 \text{ m}^3$	食盐/万 t	溴/万 t	氯化镁/万 t	硫酸镁/万 t	硫酸钙/万 t	氯化钾/万 t	
潮间带	-	-	-	-	-	-	-	-
陆地	785.677	16.42	0.77	21.72	1431.14	811.22	385.53	151.78
合计	785.677	16.42	0.77	21.72	1431.14	811.22	385.53	151.78

“-”为无数据。

### 4.1 卤水浓度与化学组分

卤水的浓度与 NaCl、Br、MgCl<sub>2</sub>、B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、矿化度总体上呈正相关关系(图 3)。pH 值变化表现为：卤水平均浓度为(50~82)×10<sup>-3</sup> kg/L 范围内,随着卤水浓度的增加,pH 值平均值逐渐降低(7.45~7.18);当卤水平均浓度≥82×10<sup>-3</sup> kg/L 时,pH 值随卤水浓度增大变化甚微(表 3)。

### 4.2 空间分布规律

地下卤水层在水平方向上因受海水及内陆淡水的影响,形成了近岸和远岸低浓度带,中间高浓度带的分布格局。近岸低浓度带为现代潮汐作用的频繁地带,宽约 10~15 km,卤水浓度为 0.07~0.100 kg/L,中间高浓度带宽约 5~10 km,大致相当于海

拔 2.5 m 等高线的位置,此带卤水浓度高且稳定,为 0.100~0.165 kg/L;远岸低浓度带,宽约 10~15 km,该带距海岸较远,受海水影响很小,受陆源淡水和大气降水影响较大,卤水浓度一般在 0.05~0.095 kg/L 之间。往内陆方向逐步变化为浓度 < 0.05 kg/L 的咸水。

地下卤水层在垂向上,浅部因受大气降水及开采的影响,卤水浓度较低,深部受下部淡水的影响,卤水浓度逐渐降低,从而形成上、下低浓度带及中部高浓度带的分带格局。由浅部(2~28 m)→中部(28~55 m)→深部(55~75 m),地下卤水浓度呈现出由低→高→低的变化趋势,即由 0.05~0.09 kg/L→0.100~0.165 kg/L→0.090~0.060 kg/L 变化。

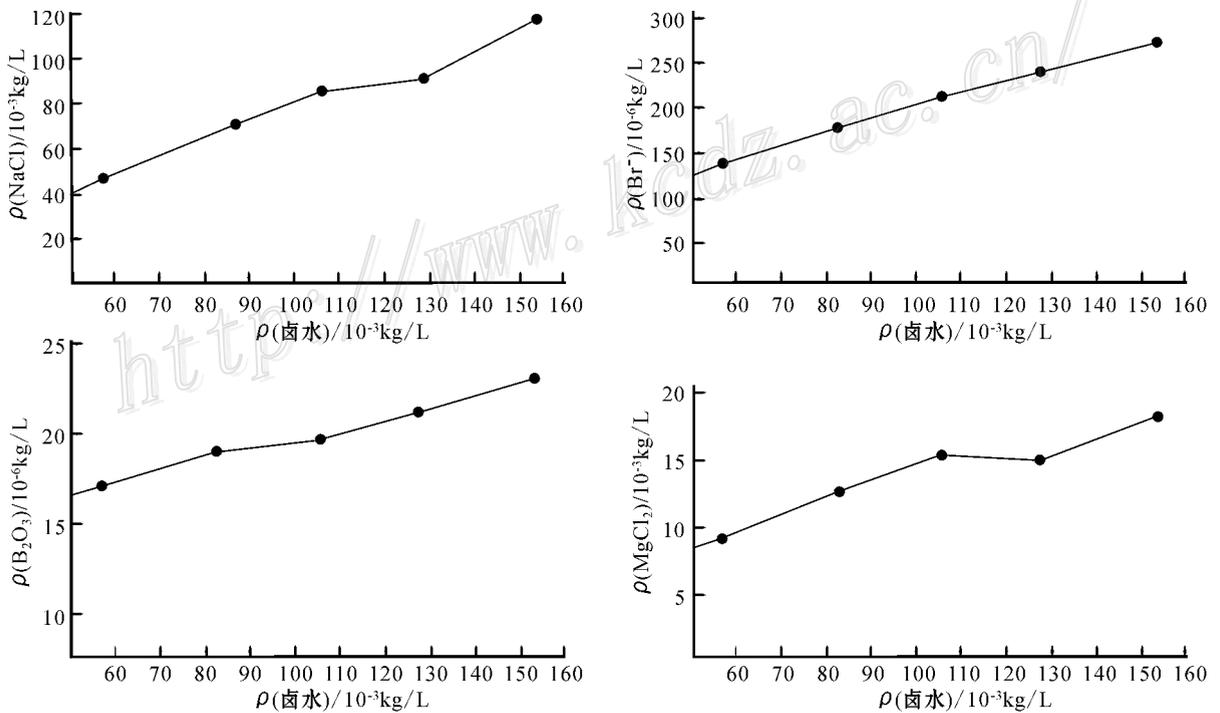


图 3 卤水浓度与化学组分含量相关关系图

Fig. 3 Relationship between brine concentration and its chemical components

表 3 地下卤水浓度与化学组分的关系

Table 3 Relationship between concentration and chemical composition of underground brine

卤水浓度/10 <sup>-3</sup> kg/L		样品数	NaCl/10 <sup>-3</sup> kg/L	Br/10 <sup>-3</sup> kg/L	矿化度/10 <sup>-3</sup> kg/L	pH 值
范围	平均值					
50~70	56	26	45.58	0.13038	61.27670	7.45
70~100	82	70	70.90	0.16972	92.36310	7.18
100~120	105	24	84.79	0.20410	118.51990	7.11
>120	137	27	100.01	0.24074	127.98018	7.01

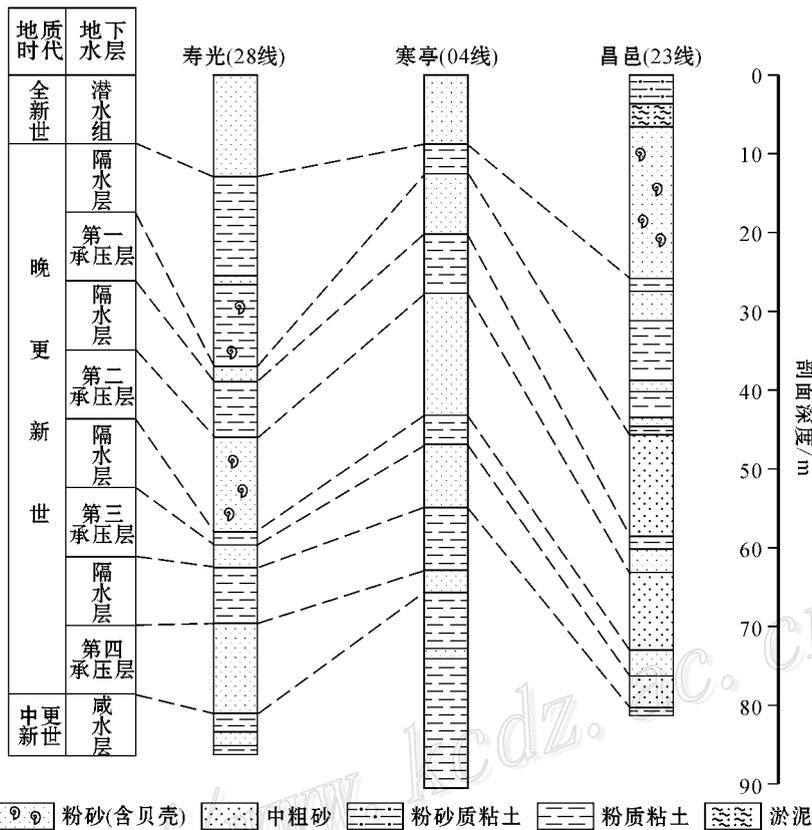


图4 潍坊北部沿海卤水层沉积岩系柱状剖面对比图

Fig. 4 Correlation of columnar sections in the north coast of Weifang

潍坊北部沿海地下卤水层由西部(寿光市)→中部(寒亭区)→东部(昌邑市),地下卤水含水层总厚度逐渐增大,潜水水层底板埋深迅速增大,承压卤水底板埋深由浅→深→浅,这种变化主要是由于沉积地层中含卤水层沉积厚度的变化造成的(图4)。

### 4.3 成因分析

关于潍坊北部沿海地下卤水成因主要有冰冻生卤和蒸发浓缩生卤两种假说。

冰冻生卤机制,即“陆架平原冰冻生卤假说”。假说认为:中国东部沿海地区在第四纪,特别是晚更新世以来的地质历史时期,古气候环境出现多次大的冰期与间冰期的交替。冰期时由于气候寒冷,海平面下降,现在的渤海、黄海水域海退成陆,年平均气温下降7~10℃,使得大部分成陆后的陆架平原区成为永久冻土区。在陆架平原上保留下来的残留海湾和咸水湖中,残留的海水由于结冰析盐浓缩形成卤水,海退时潮滩蒸发生成的浅层卤水也会由于冻土层的形成而结冰析盐进一步被浓缩,这些卤水可能在下一次海侵到来前被陆相沉积地层埋藏后得以

保存下来。从地质学的角度来看,冰冻生卤都有与之相应的地质条件,其埋深可达几百到几千米,而潍坊北部地区地下卤水的埋藏深度仅为0~90 m,显然不具备冰冻生卤的地质条件。

蒸发浓缩生卤假说认为,地下卤水主要来源于海水,在退潮期间,赋存于砂层中的海水经强烈的蒸发作用浓缩下渗,涨潮时新的海水又给予补充,如此周而复始,在砂层中贮存起丰富的卤水。

本次研究表明,在含地下卤水的砂层内,普遍发现了海相腹足类生物及有孔虫化石,它们属潮间带和滨岸浅水环境的种属;对该区地下卤水中的主要阴离子和阳离子的分析结果表明,离子含量顺序为 $Cl^- > Na^+ > SO_4^{2-} > Mg^{2+}$ ,  $Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$ ,  $Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^-$ ,与海水中离子含量排序相同(宁劲松等,2005);氯离子含量占阴离子含量的92%,钠离子含量占阳离子含量的77%,按舒卡列夫分类,为Cl-Na型水,与海水化学类型一致;宁劲松等(2005)对莱州湾南岸卤水样品中Na/Cl比值与Ca/Mg比值的测试发现,随着地下卤水浓缩倍数的

增加,Na/Cl 比值基本保持不变,而 Ca/Mg 比值迅速下降,这与海水蒸发实验曲线是一致的。这些证据与地球化学模拟方法得出的结论也是一致的(王珍岩等,2003),说明地下卤水主要来源于古海水的蒸发浓缩。

此外,晚更新世以来,潍坊北部地区气候日趋干旱,几经变化形成现在的半干旱气候,该区年平均降水量为 617 mm,而年蒸发量却高达 2 147 mm,是降雨量的 3.5 倍。这种气候条件和地质特点为蒸发浓缩生卤提供了充分依据。

韩有松等(2006)发现卤水的  $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-/\text{Br}^-$  等比值虽然与海水接近,但都低于海水的相应值,说明地下卤水绝非海水简单浓缩的产物。张永祥等人在对莱州湾南岸地下卤水的研究中发现,古海水在转化为卤水的过程中发生了方解石和石膏的沉淀及钠长石和钙长石的蚀变,使得卤水中各主要离子的浓度并不是以相同的浓缩倍数增长,在卤水与淡水的混合带,还存在着与  $\text{Na}^+$  与  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  离子之间的交换吸附的化学作用。

综上所述,潍坊北部地区地下卤水为海水蒸发浓缩形成,即第四纪滨海相地下卤水形成于第四纪海侵期的海退阶段-海岸潮滩淤积阶段。海岸潮滩及海水退缩后出露的滩面“浅盆”和萨布哈干化盐沼滩地是卤水生成的场所,不断供给的海水、干旱的气候环境是地下卤水形成的必要条件。地下卤水的生成过程可归纳为海水→潮滩→蒸发浓缩→下渗聚集→海退埋藏→继续浓缩→化学作用→地下卤水(王珍岩等,1998)。

## 5 结 论

(1) 山东省潍坊沿海地下卤水主要赋存于莱州湾南岸的第四纪海积冲积和海积层中。

(2) 矿区内地下卤水中达到工业指标的组分有 5 种,即 NaCl、Br、 $\text{MgCl}_2$ 、 $\text{MgSO}_4$ 、 $\text{CaSO}_4$ ;此外,还有  $\text{LiCl}$ 、 $\text{Rb}_2\text{O}$ 、 $\text{B}_2\text{O}_3$ 、I 等组分可综合开发利用。

(3) 浅部的潜卤水矿层主要赋存于粉砂及淤泥

质粘土中,富水性相对来说较弱,单井涌水量较小,埋深较浅(除少部分埋深大),厚度薄。承压卤水矿层分布广泛,并且含水层位较多,各层位的厚度也较厚,是主要的地下卤水含水层。

(4) 潍坊北部地区地下卤水来源于海水,系蒸发浓缩形成,是一种复杂的水盐体系。

## References

- Han Y S, Meng G L, Wang S Q, et al. 1996. Quaternary underground brine in the coastal areas of the Northern China [M]. Beijing: Science Press. 1-19 (in Chinese with English abstract).
- Kong Q Y, Zhang T Z, Yu X F, et al. 2006. Deposits in Shandong Province [M]. Jinan: Shandong Science & Technology Press. 522-535 (in Chinese with English abstract).
- Nin J S, Yu Z G and Jiang X Y. 2005. Chemical composition of underground brine in shore along Laizhou bay [J]. Ocean Science, 29 (11): 13-16 (in Chinese with English abstract).
- Wang Z Y and Han Y S. 1998. The geotechnical properties of the shallow soil layers of the southern bohai gulf and their relationship with the sedimentary facies in the area [J]. Marine Geology, (1): 22-24 (in Chinese with English abstract).
- Wang Z Y, Meng G L and Wang S Q. 2003. Geochemistry modeling of quaternary subsurface brines in south coast of the Laizhou bay, the Bohai sea-taking brines from core-Aoli 501 in changyi area as an example [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 23(1): 49-52 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 韩有松,孟广兰,王少青,等. 1996. 中国北方沿海第四纪地下卤水 [M]. 北京: 科学出版社. 1-193.
- 孔庆友,张天楨,于学峰,等. 2006. 山东矿床 [M]. 济南: 山东科学技术出版社. 522-535.
- 宁劲松,于志刚,江雪艳. 2005. 莱州湾沿岸地下卤水的化学组成 [J]. 海洋科学, 29(11): 13-16.
- 王珍岩,韩有松. 1998. 第四纪滨海相地下卤水的研究 [J]. 海洋地质, (1): 22-24.
- 王珍岩,孟广兰,王少青. 2003. 渤海莱州湾南岸第四纪地下卤水演化的地球化学模拟 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 23(1): 49-52.
- 张永祥,薛禹群,陈鸿汉. 1996. 莱州湾南岸晚更新世后地层中沉积海水的特征及其形成环境. 海洋学报, 18(6): 61-68.