

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*

张永祥 薛禹群

陈鸿汉

(南京大学地球科学系)

(长春地质学院水文地质与工程地质系)

摘要 本文阐述了莱州湾南岸晚更新世和全新世地层的地质特征、从山前冲洪积平原淡水到海积平原沉积海水的水化学特征,以及沉积海水的形成及其演化过程.研究表明,莱州湾南岸晚更新世和全新世地层具有3个赋存着沉积海水的海相沉积层,沉积海水与海水的化学成分相似,与冲洪积平原淡水化学成分不同.在古海水浓缩过程中,存在着方解石和石膏的沉淀以及钠长石和钙长石的蚀变.在沉积海水入侵淡水的混合带,存在着 Na^+ 与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 之间的离子交换.沉积海水的形成是晚更新世后期三次海侵期间的海水,经过蒸发浓缩、下渗富集和埋藏变质等作用的结果.

关键词 莱州湾 沉积海水 化学作用 形成环境

1 研究区地质特征

研究区位于山东省莱州湾南岸潍坊地区,面积为1 500km².区内地势南高北低,倾向海边,潍河和白浪河等河流流经本区,汇入渤海.本区属干旱和半干旱气候,多年平均降水量为551.5mm,多年平均蒸发量为1 637.6mm.

第四系沉积物主要为山前冲洪积物和滨海沉积物(见图1),局部地区有湖沼沉积物.山前冲洪积物主要由各河流形成的冲积扇群构成.由山前至冲洪积扇前缘,依次为砂砾石、砂、粉砂、砂质粘土和粘土.由各扇的轴部向两侧,由山前向冲洪积扇前缘,含水层由单层变为双层,单层厚度为2.5~32m,顶板埋深为5~40m,水位埋深为5~20m,矿化度小于1~2g/dm³.滨海沉积物主要为粉砂、细砂和粘土,呈多层结构,埋深80m以内的海积层具有3个赋存沉积海水的含卤层.第1含卤层埋深为2~27m,厚度为1~20m,水位埋深为1~2m,矿化度为50.0~150.0g/dm³.该层底部的有孔虫的泥炭层,¹⁴C测年为8.59±0.17ka BP,其下部陆相泥炭层¹⁴C测年为12.4±0.20ka BP,孢粉分析为阔叶树孢粉等,反映第1含卤层为全新

本文于1995-05-11收到,修改稿于1996-01-18收到.

* 本研究为地质矿产部“八五”研究项目及国家自然科学基金资助项目的成果.

世12.4~8.5ka BP 间冰后期沉积^[1~3]. 第Ⅱ含卤层埋深为15~32m, 厚度为2.8~35m, 水位埋深天然条件下为0.5~1.5m, 人工开采后为0~4.5m, 矿化度为50.0~200.0g/dm³. 含卤层中含有喜暖海相软体动物化石和暖温带阔叶林-草原植被孢粉组合, 海相粘土层¹⁴C 测年为24.4±1.1ka BP, 海侵层下伏的泥炭层¹⁴C 测年为32.0ka BP 以上. 因此, 第Ⅱ含卤层为更新世晚期39~24ka BP 间玉木冰期中亚间冰期的沉积. 第Ⅲ含卤层埋深为30~48m, 厚度为15~25m, 水位埋深为0.5~1.5m, 矿化度为50.0~101.0g/dm³. 含卤层中含有海相星轮虫化石和暖热潮湿气候下的孢粉组合, 古地磁测定为克拉克倒转极性事件之上, 年龄为100ka BP 以内. 因此, 第Ⅲ含卤层为更新世晚期100~70ka BP 间玉木-里斯间冰期的沉积.

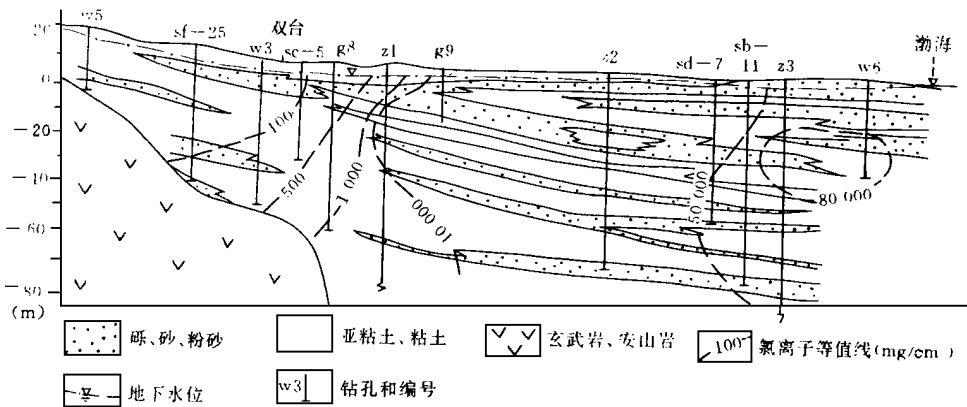


图1 研究区水文地质剖面

2 莱州湾南岸地下水的化学特征

2.1 地下淡水、咸水和沉积海水的化学成分

研究区内226个观测孔提供的监测结果表明, 南部冲洪积物中存在着淡水, 北部海积物中存在着咸水和卤水(沉积海水), 海岸带海积物中存在着沉积海水和现代海水的混合水(见表1)。

表1中的离子毫克当量百分数表明, Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 在海水中分别为76.04、19.19、90.21和9.30, 在卤水中分别为76.11、21.53、90.60和9.25, 咸水和卤水的值与海水相近; 在淡水中分别为26.18、28.25、11.30和14.78, 咸、卤水和海水与淡水相差甚远. 反映出咸水和卤水起源于古海水, 为沉积海水。

卤水中 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 的含量 (meq/dm^3) 高出现代海水5.02~5.9倍, K^+ 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 为3.0~4.6倍, 微量元素 F、I 相对浓集. 显然, 在古海水浓缩过程中, 各种离子不是按浓缩程度以相同倍数增长, K^+ 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 相对于 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 等增长倍数较低, 反映出古海水在浓缩形成沉积海水的过程中存在着某些化学作用的影响。

表1 莱州湾南岸淡水、沉积海水和现代海水的化学成分 (1992年4月)*

成分	淡 水		沉 积 海 水				现 代 海 水	
	(g/dm ³)	[meq(%)]**	咸 水	卤 水	(g/dm ³)	[meq(%)]	(g/dm ³)	[meq(%)]
K ⁺	0.000 45	0.22	0.256	1.32	1.350	1.11	0.300	1.28
Na ⁺	0.033 0	26.18	9.10	77.13	54.50	76.11	10.50	76.04
Ca ²⁺	0.048 1	43.75	0.246	2.34	0.781	1.25	0.431	3.58
Mg ²⁺	0.018 8	28.25	1.194	19.14	8.144	21.53	1.394	19.19
Cl ⁻	0.023 0	11.30	6.077	87.62	101.47	90.60	20.207	90.21
SO ₄ ²⁻	0.040 8	14.78	2.461	10.62	13.89	9.25	2.822	9.30
HCO ₃ ⁻	0.240 1	68.68	0.534	1.69	0.460	0.24	0.187	0.47
F ⁻	0.002 5	2.30	0.005 12	0.05	0.003	0.01	0.000 1	0.01
I ⁻	—	—	0.000 11	0.001	0.000 23	0.001	0.000 05	0.005
TDS	0.314		29.794		180.390		35.750	

* 淡水、咸水和卤水分别为观测孔 w3、z3-3和 w12中水样分析值，现代海水为莱州湾海水取样分析值。

** meq 为毫克当量，现已废弃。

2.2 地下水化学成分分布

地下水中 Cl⁻、SO₄²⁻、Na⁺和溶解固形物总量 (TDS) 等的浓度分布相似，各组分含量由南向北逐渐增加，在接近海岸带的高浓度卤水区，由上至下各含卤层中卤水浓度达到152.06、184.04和94.50g/dm³。咸水和淡水界线呈北东—南西方向展布，与海积层界线大致相同 (图2)。但在潍河和白浪河等河谷地带，由于淡水的冲刷，咸淡水界线呈舌形伸入咸水区，使河谷地带地下水浓度低于其两侧的程度。

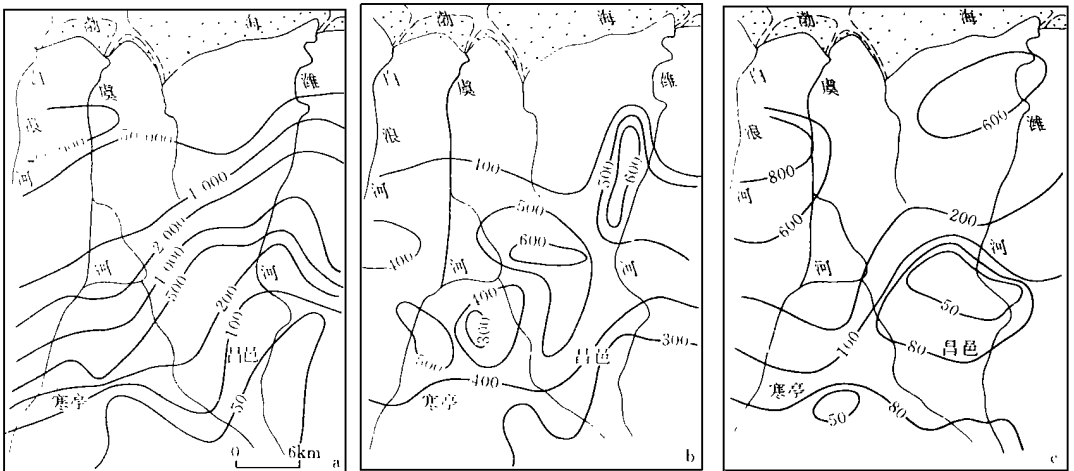


图2 莱州湾南岸地下水中组分等值线图 (1992年4月)

地下水中 HCO₃⁻、Ca²⁺和 Mg²⁺分布比较复杂。HCO₃⁻在淡水区和卤水区浓度均较低，一般为200~300mg/dm³；但在潍河冲积扇和白浪河冲积扇附近形成高浓度区，最高达1250mg/dm³。Ca²⁺和 Mg²⁺总体分布与 TDS 相近，但在潍河冲积扇和白浪河冲积扇附近 Ca²⁺和 Mg²⁺

浓度均相当低, 如昌邑地带的浓度分别仅为 8.02 和 $4.25\text{mg}/\text{dm}^3$.

3 影响沉积海水化学成分的作用

3.1 浓缩过程中碳酸盐和硫酸盐的沉淀

沉积海水中组分浓度和现代海水中相应组分浓度比值中 Cl^- 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 的比值 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 高, 这表现在地下水组分关系图上(图3). 在 Cl^- 的浓度大于 $1000\text{mol}/\text{dm}^3$ (相当于TDS为 $50000\text{mg}/\text{dm}^3$)的卤水范围内, HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 的点均位于海水线的下方. 这说明在海水浓缩过程中, HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 增加量相对减少了.

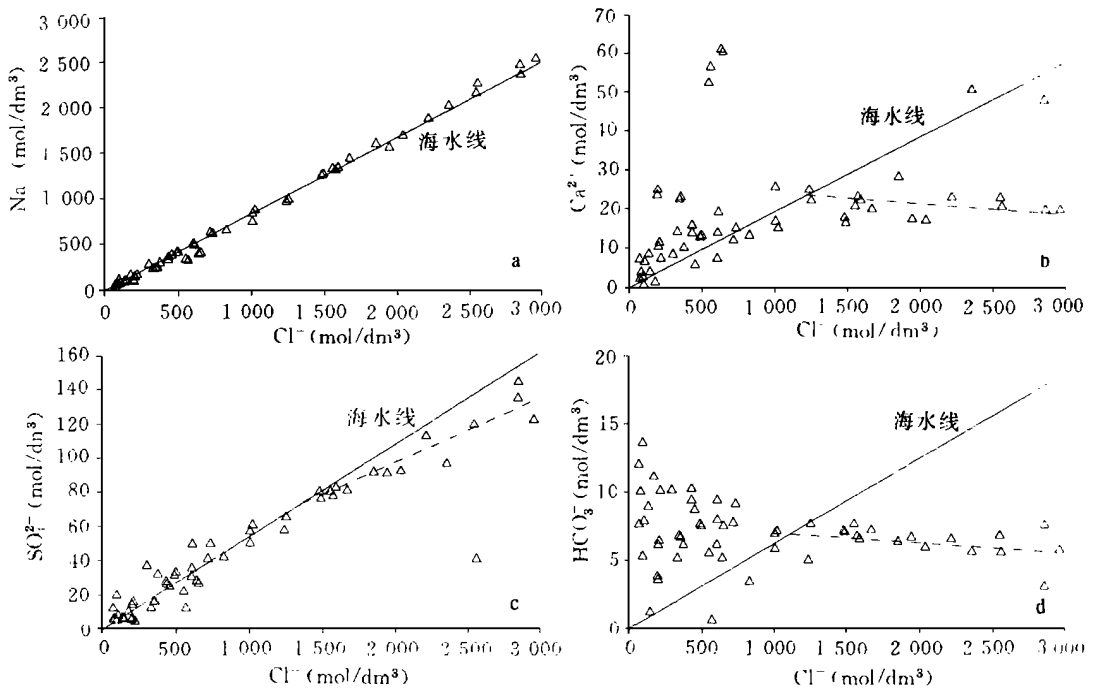
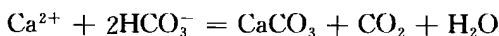
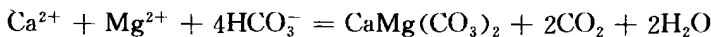
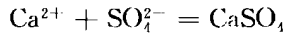


图3 地下水中化学组分关系散点图

研究表明, 当地下水达到一定的浓度时, 矿物相继沉淀, 如白云石、石膏和钠盐的临界浓度为 $70\sim 80$ 、 $130\sim 170$ 和 $250\sim 275\text{g}/\text{dm}^3$. 莱州湾南岸地区卤水的浓度普遍超过石膏的临界浓度, 最高达到 $184.20\text{g}/\text{dm}^3$, 所以可能出现方解石、白云石和石膏的沉淀.

为了确定方解石、白云石和石膏的沉淀程度, 计算了矿物饱和指数(SI)(表2). 结果表明, 卤水区的地下水中的方解石、白云石和石膏的饱和指数(SI)均大于1, 因此3种矿物都产生沉淀. 相应的化学反应为

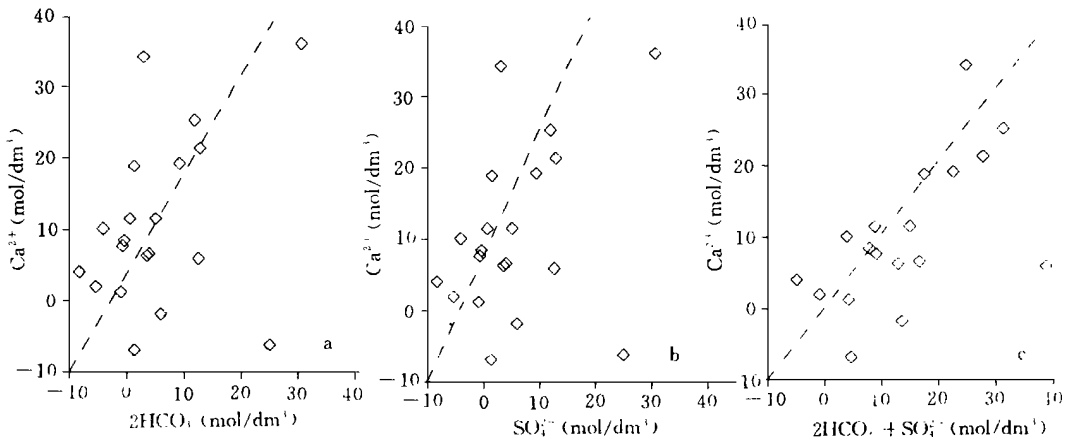




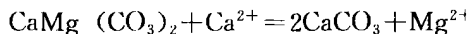
由于 Cl^- 在地下水化学作用中比较稳定,所以利用与地下水中 Cl^- 浓度相应的海水浓缩的各组分浓度与沉积海水中组分浓度的减量(ΔC),确定3种矿物沉淀对卤水的化学成分的影响程度.由上述反应,方解石单独沉淀时 $\Delta 2\text{HCO}_3^-$ 和 ΔCa^{2+} 的比值为1:1,石膏单独沉淀时 ΔSO_4^{2-} 和 ΔCa^{2+} 的比值为1:1,方解石和石膏同时存在沉淀时 $\Delta 2\text{HCO}_3^- + \Delta \text{SO}_4^{2-}$ 和 ΔCa^{2+} 的比值为1:1.由化学组分减量(ΔC)关系图(图4)可见, $\Delta 2\text{HCO}_3^-$ 和 ΔCa^{2+} 的比值, ΔSO_4^{2-} 和 ΔCa^{2+} 的比值均小于1:1,而 $\Delta 2\text{HCO}_3^- + \Delta \text{SO}_4^{2-}$ 和 ΔCa^{2+} 的比值为1:1,说明方解石和石膏同时沉淀,由此形成现在的沉积海水的主要化学组成.

表2 部分观测孔中地下水矿物饱和指数(SI)

孔号	SI_{CaCO_3}	$SI_{\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2}$	$SI_{\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}}$	孔号	SI_{CaCO_3}	$SI_{\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2}$	$SI_{\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}}$
g4	5.846	294.2	1.379	w7	0.372	0.092	0.007
g10	0.491	0.360	0.007	w8	0.015	0.352	1.504
g12	1.588	899.6	8.640	w12	0.718	9.466	1.507
g14	0.847	0.216	0.019	z4-1	0.168	0.076	0.113
g16	5.992	620.7	1.271	z5-1	1.129	1.525	1.085
g17	0.018	0.378	1.353	z5-2	21.31	613.3	1.732
w3	0.702	0.235	0.010	z7-1	1.431	12.21	1.281
w6	4.268	249.0	1.549	z7-2	8.724	493.9	1.272

图4 浓缩海水与沉积海水中组分浓度的减量(ΔC)图

上述研究显示白云石沉淀作用对水质 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 的影响较小, Mg^{2+} 的含量相对沉积海水的含量并未减少,这种现象可能由于地下深部的去白云岩化作用:



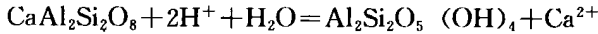
使白云岩中的 Mg^{2+} 析出,水化学成分上表现出方解石的沉淀影响,掩盖了白云石沉淀作用对水质的影响.

野外钻孔取样中也发现含卤层中存在着方解石和石膏结晶,从而证明海水浓缩过程中发生了方解石和石膏沉淀.

3.2 沉积海水地区硅酸岩的蚀变

沉积海水和现代海水中 Na^+ 的比值为 5.45, 高于 Cl^- 的比值 (5.02). 由地下水中化学组分关系散点图可看出, Na^+ 的点位于海水线以上, 说明在海水浓缩并变质为卤水过程中, Na^+ 还有其他的来源, 一种可能是来自地下水径流的积累, 另一种可能是地层中矿物的溶解. 由于卤水和上游地下水是在微咸水区和咸水区混合, 因此地下水径流的积累对卤水区影响较小. 这样, 地层中矿物的溶解就十分重要了.

由于南部山区分布着玄武岩和安山岩, 使组成含卤层的物质中富含来源于玄武岩和安山岩中的矿物成分, 主要为钙长石、钠长石、少量钾长石、辉石和黑云母. 为此, 进行硅酸岩矿物蚀变计算, 并作出相平衡图 (图5). 可见, 钙长石蚀变为高岭石, 钠长石蚀变为钠蒙脱石, 钾长石难以溶解, 矿物的不全等溶解反应方程为



$\text{NaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 6/7\text{H}^+ + 20/7\text{H}_2\text{O} = 3/7\text{Na}_{0.37}\text{Al}_{2.37}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10} (\text{OH})_2 + 6/7\text{Na}^+ + 10/7\text{Si} (\text{OH})_2$
蚀变结果使沉积海水中的 Na^+ 的含量增大.

另外, 沉积海水中 Mg^{2+} 的含量较多, 可能是辉石和黑云母蚀变出 Mg^{2+} 的结果.

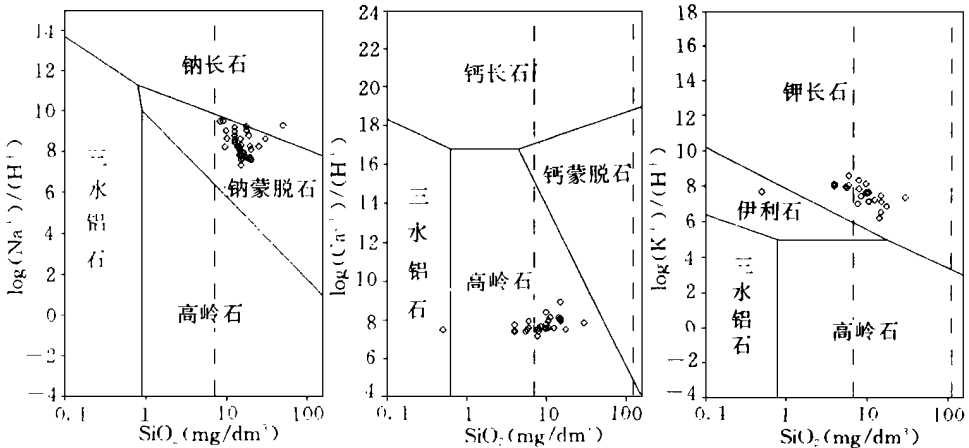
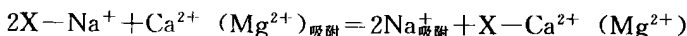


图5 硅酸盐岩矿物平衡相图

3.3 沉积海水和淡水的混合地带的离子交换作用

沉积海水和淡水的混合发生在海相沉积物和陆相沉积物交接地带, 混合带的地下水化学成分表现出许多特点. 由淡水区到海岸的离子含量变化曲线 (图6) 可看出, 在混合带前缘靠近淡水地带, 地下水由陆相地层流向海相地层, 地下水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 与海相沉积物中吸附的 Na^+ 发生离子交换, 使地下水中 Na^+ 的含量增高, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的含量降低; 在混合带中部靠近咸水地带, 由于过量开采地下水导致海咸水入侵, 海、咸水中的 Na^+ 与海相沉积物中吸附的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 发生离子交换, 使 Na^+ 的含量相对降低, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的含量相对增高. 海、咸水入侵和后退过程中, 岩土表面 (X) 发生的 Na^+ 与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 之间的离子交换方程为



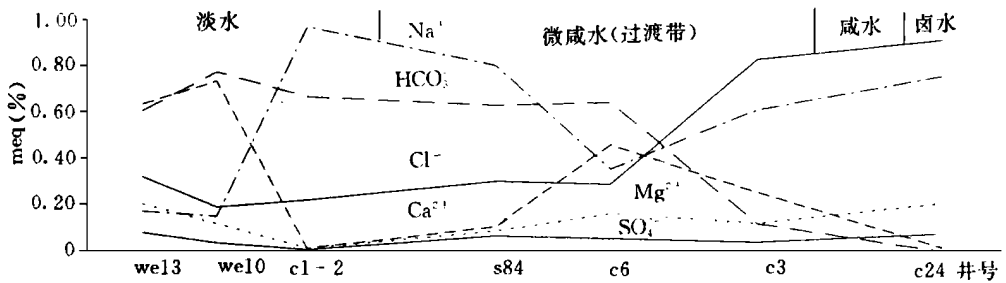


图6 淡水区到海岸地下水化学组分变化曲线

(图中 meq 为毫克当量, 现已停用)

采样进行的离子交换实验, 证明了岩土中离子交换作用的存在. 实验确定了不同岩土的离子交换容量^[4]和吸附等温线方程 (表3), 说明岩土具有较大的吸附能力.

表3 岩土离子交换容量和吸附等温线方程 ($\times 10^{-2} \text{mg/g 土}$)

	Na ⁺ 离子交换容量	Ca ²⁺ 离子交换容量	Na ⁺ 吸附等温线方程
亚砂土	23.62	4.56	$\Gamma = 0.021C_m^{0.74}$
亚粘土	20.70	7.31	$\Gamma = 0.73C_m^{0.32}$

4 莱州湾南岸沉积海水形成过程

莱州湾南岸沉积海水是由地质历史时期的海水经过蒸发浓缩、下渗富集和埋藏变质等过程所形成.

沉积海水埋藏在海相沉积物中, 含卤层中分别含有星轮虫、假转轮虫、卷转虫等化石, 并且有磨光破碎的贝壳等化石, 反映出此海积物为滨岸浅水和潮间带的沉积物. 因此在卤水的形成时期, 海水为沉积海水提供了物质来源.

古地理资料反映出3个含卤层的形成时期, 与晚更新世以来的3次间冰期相对应. 第Ⅲ含卤层、第Ⅱ含卤层和第Ⅰ含卤层形成于100~70、39~24.4和12.4~8.6ka BP的玉木-里斯间冰期、玉木间冰期和冰后期. 莱州湾现代属于旱-半干旱气候区, 蒸发量大. 古气候资料表明, 在间冰期的海侵期间的沉积物中有榆属为主的阔叶树木花粉和禾本科为主的草本花粉, 反映气候温热; 冰期的海退期间的地层以云杉等针叶林植被为主, 反映气候干冷. 这种气候由湿热至干冷变化, 使海水在退去过程中, 在潮间带进行的强烈的蒸发作用, 使之浓缩成为高浓度海水, 浓缩海水在密度差的作用下向地下深部运移. 因此, 气候特点为海水浓缩形成提供了条件.

3个含卤层是在3次海侵-海退旋回中形成. 间冰期的海侵期间, 形成海积层; 间冰期结束后的海退期间, 陆相沉积物将海积层覆盖. 而河流搬运力在海积层地带减弱, 沉积物为粉细砂和粘土. 随着海积层被覆盖, 含卤层被逐渐埋藏起来, 为沉积海水保存提供了条件.

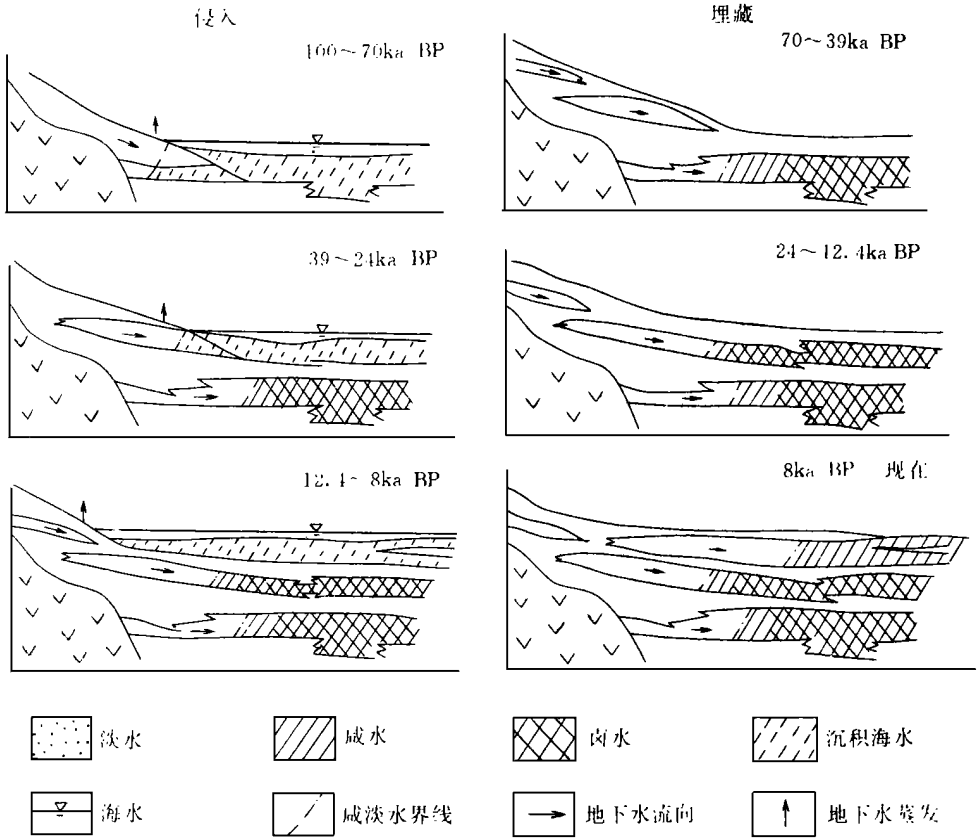


图7 晚更新世以来海侵-海退旋回及含卤层的形成

综上所述,莱州湾南岸3个含卤层的形成及其沉积海水的形成与晚更新世以来古地理和古气候变迁密切相关. 3个含卤层及其沉积海水的形成及演化过程如图7所示. 第Ⅲ含卤层、第Ⅱ含卤层形成于晚更新世的100~70和39~24.4ka BP, 范围较大, 由于上游淡水的冲淡作用, 卤水现代分布在海积层中部和北部; 第Ⅰ含卤层形成于全新世的12.4~8.6ka BP, 范围较小, 现代在潮间带仍然进行着海水浓缩作用.

参考文献

- 汪品先等. 我国东部第四纪海侵地层的初步研究. 地质学报, 1981, 55 (1):1~12
- 王 强. 对渤海西、南沿岸晚第四纪地层¹⁴C年代学的讨论. 海洋学报, 1980, 8 (1):72~82
- 郑守仪. 山东省打渔张灌区第四纪有孔虫及其沉积环境的初步探讨. 海洋科学集刊, 第13集, 北京: 科学出版社, 1978, 16~30
- Xue Yuqun *et al.* Sea water intrusion in the coastal area of Laizhou Bay, China. Ground Water, 1994, 31(4): 532~537; 31 (5):740~745