

运用地球化学分析研究潜江凹陷潜江组沉积环境

刘刚

中国地质科学院,北京 100037

摘要 运用同位素及粘土矿物的沉积地球化学特征在沉积环境方面的指示意义分析了潜江凹陷潜江组硫、碳、氧同位素及粘土矿物,结合层序地层学分析,对其演化规律与沉积环境的关系进行了探讨。认为硫、碳、氧同位素值及粘土矿物的高低变化与气候的变化和沉积环境的变化具有很好的相关性;潜江凹陷潜江组的沉积环境是一个封闭的较高盐度的陆相咸化湖泊沉积环境。

关键词 碳同位素,氧同位素,硫同位素,粘土矿物,沉积环境

The Application of Geochemical Analysis to the Study of Sedimentary Environment of Qianjiang Formation in Qianjiang Depression

LIU Gang

Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract Using the geochemical indicating significance of S, C, O isotopes and clay minerals in the sedimentary environment, the authors have studied geochemical characteristics of isotope composition and clay minerals of Qianjiang Formation in Qianjiang Depression. Based on the sequence stratigraphy analysis, this paper deals with the relationship between geochemistry and sedimentary environment. It is concluded that the variation of S, C, O isotopes and clay minerals is correlatable with the change of sedimentary environment, and that the sedimentary environment of Qianjiang Formation in Qianjiang Depression is an obstructed saline lake of inner land.

Key words sulfur, carbon, oxygen, isotope, clay minerals, sedimentary environment

盐湖盆地研究的关键是如何解释盐岩沉积在层序发育中的地位和作用,如何确定不整合面,了解盐岩沉积的湖平面变化特征,确定体系域的发育位置和分布,从而研究盆地发育与沉积充填历史。封闭盐湖的沉积记录在垂向上以显著的岩性变化为特征,这些变化取决于河水补给与蒸发、沉淀和渗透之间的平衡作用,并导致湖平面的相应变化和湖岸线的频繁迁移。封闭盐湖中原生碳酸盐岩和粘土矿物的形成与湖泊水体的化学性质密切相关,从湖泊的低水位到高水位水体化学性质在一定范围内依次变化。因而,湖相碳酸盐岩的同位素组成就能够提供碳酸盐岩形成时水介质条件的线索,并与封闭湖泊不同演化阶段的沉积特征密切相关(刘群等,1987;

邓宏文等,1993;谭红兵,1999)。

潜江凹陷潜江组作为我国新近纪—古近纪典型的盐湖盆地(图1),发育了巨厚的湖相盐韵律沉积,对于潜江凹陷累积厚度达1800 m的盐层来说,单纯采用浅水蒸发浓缩模式是不够的,而且这种模式也无法解释凹陷沉积中心暗色泥岩分布区纯盐层的成因。潜江凹陷储集砂体不发育,除凹陷北部为碎屑岩分布区外,其它大部分地区则被盐岩、膏泥岩所占据。盐湖盆地的层序地层解释至今缺乏一个比较适用的模式或研究方法,其中的关键是如何分析层序发育过程中盐岩沉积的特点和变化规律,解释盐岩沉积对湖平面变化的响应(戴世昭,1997)。

在盐湖盆地发育过程中,C、O、S等同位素含量

责任编辑:刘志强;收稿日期:2006-05-10;改回日期:2006-08-17。

第一作者简介:刘刚,男,1977年生,博士,从事造山带前陆含油气盆地与层序地层学的研究;通讯地址:100037,北京西城区百万庄大街26号;E-mail:lgst911@163.com。

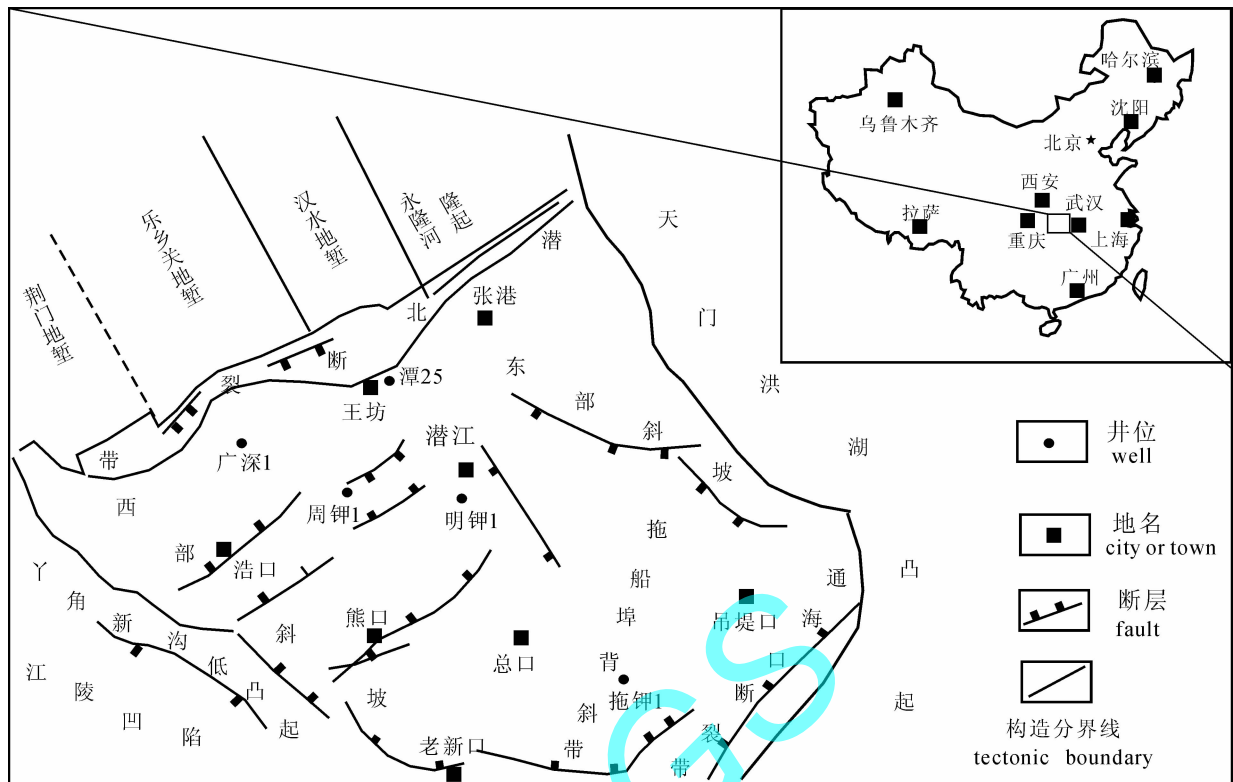


图1 潜江凹陷位置及构造图

Fig. 1 Location of the Qianjiang depression and structural map

及粘土矿物中的 Al_2O_3/MgO 的比值最能反映盐湖沉积时的某些环境参数 (Clayton, 1959; Sakai, 1968)。我们可以通过对潭 25 等井密集取样 (图 2), 进行同位素和粘土矿物分析, 确定盐岩的成因和沉积环境。

1 硫同位素的沉积地球化学特征分析

自然界中硫有四种稳定同位素, 其相对丰度为 ^{32}S : 95.02%; ^{33}S : 0.75%; ^{34}S : 4.21% 和 ^{36}S : 0.02%。一般研究的是 ^{34}S 与 ^{32}S 之比, 即 $R = ^{34}S/^{32}S$, 而 ^{33}S 和 ^{36}S 常用于地外物质的研究。世界其他一些盆地中现代石膏结晶作用中硫的同位素分馏作用也非常弱, 这些研究说明硫酸盐的硫同位素比值可以代表古湖水或海水的硫同位素比值, 因而可以从现代蒸发岩的硫酸盐同位素来判断古环境。现代海洋硫酸盐的 $\delta^{34}S$ 约为 20.0‰, 现代海相蒸发岩与海水中的硫酸盐 $\delta^{34}S$ 相似。海相蒸发岩及其所反映的古海洋硫酸盐的同位素组成只在较狭窄的范围内变化, 现代海洋硫酸盐及海相蒸发岩的 $\delta^{34}S$ 值约为 20‰。其中, 红海海水为 20.8‰, 其底部流动的热

卤水为 20.3‰, 而新近纪—古近纪海相蒸发岩与此并无明显差别, 最大的 $\delta^{34}S$ 大概不超过 25‰。因此, 一般认为海相蒸发岩的 $\delta^{34}S$ 代表了海水硫酸盐的 $\delta^{34}S$ 特征 (Sakai, 1968)。

样品采自潜江凹陷潜江组地层, 纵向上不同层序、不同体系域的上述各元素含量及比值变化有一定的规律。因 3、4、5 层序基本上都是潭 25 井的测试值, 而潭 25 井基本上是砂泥岩剖面, 所以硫同位素测试值反映水介质变化的规律性不太明显。

沉积岩中硫化物的 $\delta^{34}S$ 含量与其形成环境及系统的开放和封闭有关 (Sakai, 1986)。一般认为, 当 $\delta^{34}S$ 大于 5‰, 代表封闭的咸水条件, 表 1 中潜江组所测样品的 $\delta^{34}S$ 平均值为 31.68‰ ~ 39.81‰, 远超出了海相蒸发岩的 $\delta^{34}S$ 值, 这说明潜江组盐湖为一封闭的咸水沉积环境。

2 碳、氧同位素沉积地球化学特征分析

$\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 值之间明显的一致变化是封闭湖泊中所形成碳酸盐岩的重要特征, 而开放湖泊中碳

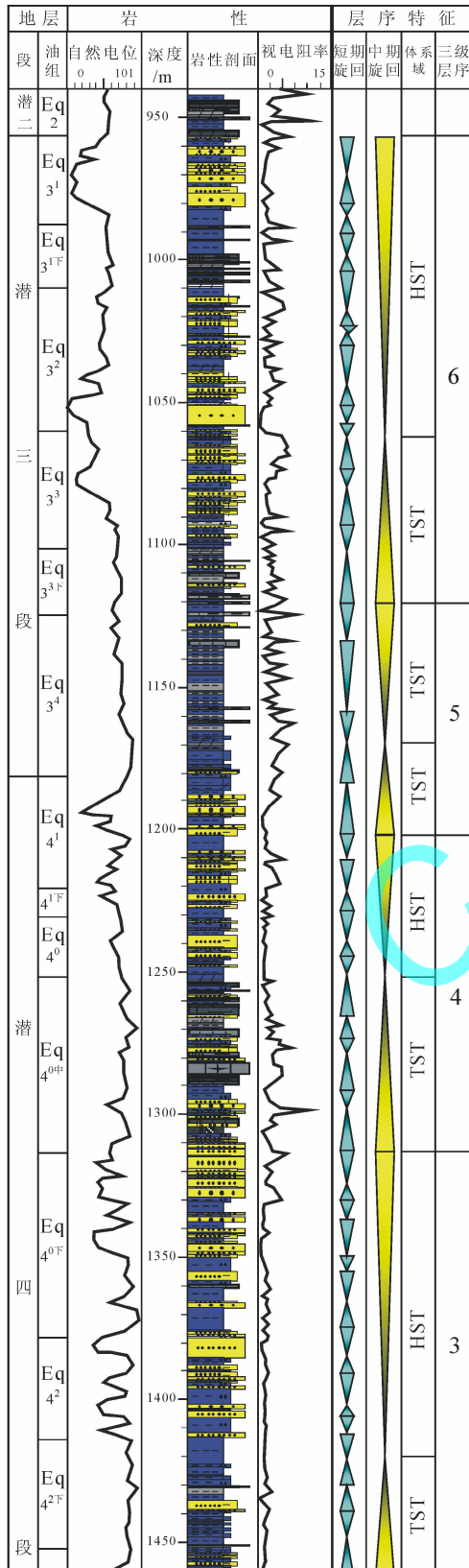


图 2 潭 25 井综合柱状图

Fig.2 Stratigraphic sequence of Tan-25 Well

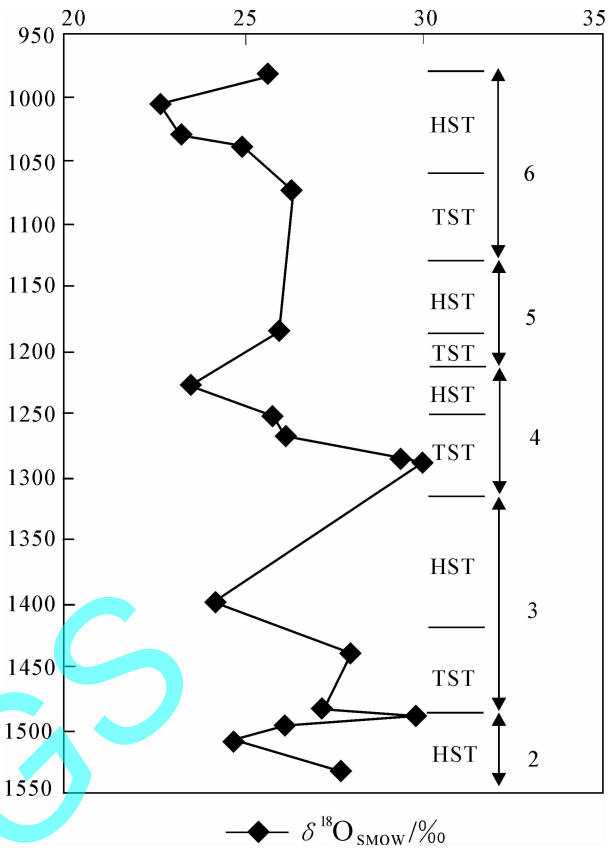


图 3 层序和 $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ (SMOW) 值变化图 (据潭 25 井测试资料)

Fig.3 Variation of the stratigraphic sequence and $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ (SMOW)

酸盐岩碳、氧同位素间变化相关性不大。低水位期蒸发作用导致的同位素分馏作用,使得富含重同位素碳酸盐岩的沉淀,粘土矿物以自生粘土矿物为主;同时由于此时生物活动受到限制,碳酸盐岩的沉淀中生物光合作用的分馏效应不明显,碳酸盐岩中重 $\delta^{13}\text{C}$ 较为富集。湖浸期湖泊水体被冲淡,水生生物繁盛, $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显变低,粘土矿物以碎屑粘土矿物为主 (Clayton, 1959; Keith, 1964; Shackleton, 1975; Hudson, 1977)。

潜江组是江汉盆地古盐湖发展的鼎盛时期,根据地层古生物化石的种类单调,缺乏底栖生物群,盐岩异常发育,局部出现杂卤石层和钾岩层,说明为高盐度水体。据 Degens (1966) 资料,形成于不同盐度中的碳酸盐岩稳定同位素含量不同,淡水碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-5\text{‰} \sim -15\text{‰}$ (-PDB), $\delta^{18}\text{O}$ 为 $10\text{‰} \sim 25\text{‰}$ (SMOW), 海相(咸水)碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 为

表1 潜江凹陷潜江组硫同位素表
Table 1 $\delta^{34}\text{S}\text{‰}$ values of the Qianjiang Formation

井号	层位	岩性	样品数	$\delta^{34}\text{S}\text{‰}$	同时代海相蒸发岩中的 $\delta^{34}\text{S}\text{‰}$
王4-2 ² 、王四新7-3	Eq1	钙芒硝泥岩	12	35.527	20 (据中科院地质所)
钟27 ² 、王4-2 ² 、王四新7-3等	Eq2	钙芒硝泥岩	19	39.81	
王云10-6、王四新7-3	Eq3	钙芒硝泥岩	9	37.64	
潭25	Eq4 ^上	钙芒硝泥岩	6	31.68	
潭25	Eq4 ^下	钙芒硝泥岩	3	32.67	

注:主要测试仪器名称及编号:MAT-251、8358;测试环境(温度):26°C;(湿度):62%。

表2 潜江凹陷潜江组碳、氧同位素变化特征
Table 2 $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ and $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ values of the Qianjiang Formation

井号	层位	岩性	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}$	Z值	沉积时的水介质特征	体系域	层序
			/‰(-PDB)	/‰(-PDB)	/‰(SMOW)				
王4-2 ²	Eq1 ¹	白云质泥岩	-6.49	-6.18	24.4892852	110.9308	相对淡化期	HST	8
王4-2 ²	Eq1 ²	白云质泥岩	-7.35	-4.21	26.3736	112.5123	相对淡化期	TST	
王4-2 ²	Eq2 ¹	含盐云质泥岩	-4.05	-1.37	29.4477218	118.3233	相对咸化期	HST	
王四新7-3	Eq2 ^{2上}	盐岩夹白云岩	-4.76	0.23	31.0970978	117.6661	相对咸化期	HST	7
王四新7-3	Eq2 ^{2下}	白云质泥岩	-7.00	-5.6	25.087184	110.1752	相对淡化期	TST	
王4-2 ²	Eq2 ³	含盐云质泥岩	-4.585	-1.89	28.9116746	115.873	相对咸化期	LST	
王四新7-3	Eq3 ¹	白云质泥岩	-2.35	-0.02	30.8393828	122.4772	相对咸化期	HST	6
王四新7-3	Eq3 ^{3下}	含盐白云岩	-4.78	-1.34	29.4786476	116.8432	相对咸化期	LST	
潭25	Eq4 ¹	灰质泥岩	-5.64	-4.72	25.9943408	113.3987	相对淡化期	TST	5
潭25	Eq4 ⁰	灰质泥岩	-4.17	-4.86	25.8500204	116.3396	相对淡化期	HST	4
潭25	Eq4 ^{0中}	含膏泥岩	-4.91	-1.4	29.416796	113.3189	相对咸化期	TST	
潭25	Eq4 ²	泥灰岩	-7.37	-6.42	24.2418788	109.0091	相对淡化期	HST	3
潭25	Eq4 ³	灰质泥岩	-4.13	2.27	28.004518	117.4125	相对咸化期	TST	
潭25	Eq4 ^下	灰质泥岩	-5.02	-1.02	29.8085228	116.5111	相对咸化期	HST	2
潭25	Eq4 ^下	灰质泥岩	-4.35	-5.9	24.777926	115.453	相对淡化期	TST	

注:主要测试仪器名称及编号:MAT-251、8358;测试环境(温度):23°C;(湿度):52%。

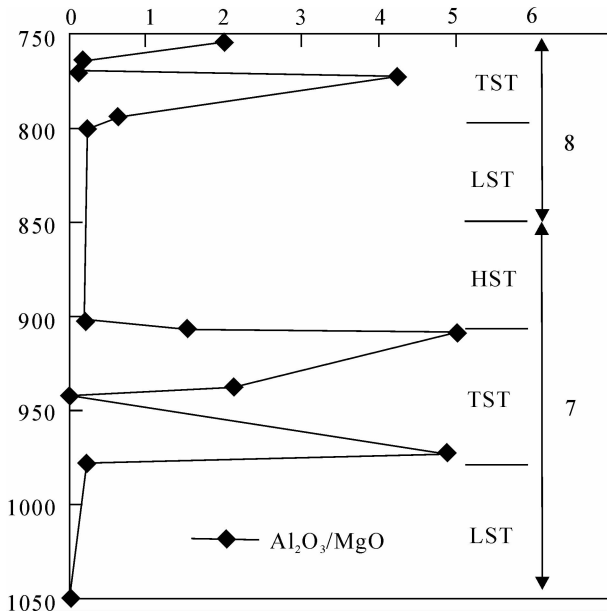
-5‰~5‰, $\delta^{18}\text{O}$ 为25‰~30‰以上。表2为潜江组的2~8层序及其体系域的碳氧同位素特征,不同层序的水进体系域(TST)(水体相对淡化期)和低位体系域(LST)高位体系域(HST)(相对咸化期)沉积在不同地区的碳氧同位素变化的分析结果(图3)。这说明了潜江凹陷潜江组湖盆的水体经历了高盐度浓缩期和相对淡化期的周期性变化,地层发育具有明显的旋回性。但在3、4层序发育期,碳氧同位素的值湖浸期比高位期还要高,反映出湖浸期沉积物的水介质盐度比高位期沉积物的水介质盐度要高,说明这一时期的盐岩成因可能不是由于干旱蒸发而形成的。

3 粘土矿物的沉积地球化学特征分析

一般说,盐湖早期未成盐阶段中,粘土矿物组合以伊利石-绿泥石-高岭石为特征,粘土矿物中 Al_2O_3 、 MgO 和 K_2O 相对百分含量具有冷温带大陆

粘土化学成分特征。而在盐湖成盐阶段中,粘土矿物组合以伊利石-绿泥石为特征,粘土中 Al_2O_3 、 MgO 和 K_2O 相对百分含量具有盐沼、干湖粘土化学成分特征。这基本反映了从盐湖早期未成盐阶段发展到晚期成盐阶段过程中,其气候环境从相对温冷、淋滤作用较强、酸性、弱碱性到相对干旱、淋滤作用不强、弱碱性、碱性。根据盐湖沉积物中主要粘土矿物及粘土矿物的主要金属阳离子及其形成条件,提出来用粘土中 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 值大小及其变化来反映沉积过程中古气候环境变化,已经取得初步结果,并具有一定的普遍意义(陈锦石等,1983;田景春等,1995)。

盐湖从早期未成盐阶段一进入晚期成盐阶段, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 值急剧减小;早期未成盐阶段中的值(一般大于5-8.5)明显大于晚期成盐阶段中的值。其值大的大致对应于淡化时期或相对淡化时期,并大致与碎屑物为主的碎屑层相对应;其值小的对应

图4 层序和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 比值变化图

(据王四新7-3井测试资料)

Fig. 4 Variation of the stratigraphic sequence and $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$

于咸化时期或相对咸化时期,并大致与盐类为主的沉积层相对应。而湖水相对淡化或咸化,与气候相对温湿或干旱有联系。因此,初步认为,可以利用粘土中 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 值及其变化作为盐湖沉积过程中气候环境变化的一种标志(郑喜玉等,1988;郑永飞等,2000)。

潜江凹陷潜江组低水位期蒸发作用导致的同位素分馏作用,使得富含重同位素碳酸盐岩的沉淀,粘土矿物以自生粘土矿物为主,同时由于此时生物活动受到限制。湖浸期湖泊水体被冲淡,水生生物繁盛,粘土矿物以碎屑粘土矿物为主。

在潜江凹陷潜江组盐湖沉积的不同阶段,在相对淡化或相对咸化的水介质呈周期性变化时,粘土矿物中 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 比值也呈现出有规律的变化(图4)。在高位体系域和低位体系域时期, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 比值相对较低,这一时期对应于盐湖的咸化期,此时粘土矿物长期处于高矿化度晶间卤水的特定环境中,使粘土表面发生某些化学作用;而在湖浸期,随着湖盆的进一步扩张,可容纳空间的进一步扩大,水体体积不断扩大,湖水逐渐淡化, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 比值也逐渐增大,古温度也较低,说明此期是较湿润的气

候。

4 结论

在层序界面处,因此时基准面下降到最低,可容纳空间相对最小,湖盆水体相对最为浓缩,所以地化指标表现为碳、氧同位素值很高,而 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 比值很低。而在层序的低位和高位体系域发育时期,基准面处于上升早期和下降晚期,可容纳空间相对较小,湖盆水体由浓缩逐渐变得淡化然后又由淡化逐渐变得浓缩,因而都有较厚层的盐岩发育,所以地化指标表现为碳、氧同位素值含量较高,而 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 比值较低,虽然在低位和高位体系域沉积时期,水体相对较为浓缩,但都出现过多个由淡化-咸化的小的旋回变化周期,说明气候是变化的,而每一次气候的微小变化都能反映在沉积物及其所含的微量元素及粘土矿物含量上;在湖浸体系域,随着湖盆的进一步扩张,可容纳空间的进一步扩大,水体体积不断扩大,湖水逐渐淡化,在此期间沉积了相对较厚层泥岩增多,盐岩厚度逐渐减薄,碳、氧同位素值含量不断变小, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 比值逐渐增大,说明此期气候可能变得较为湿润。然而,在凹陷中心,湖浸体系域发育时期也出现少量较厚层的盐岩,一方面说明在这一时期曾经出现过相对干旱的气候,使水体相对浓缩,另一方面也可能是由于火山构造等突发性活动事件,使得地下热卤水进入湖盆,导致湖水浓度短时间内变大很多,由于温度下降等原因,盐类大量析出,也可沉积较厚层盐岩。

因碳氧同位素值有随盐度的增高而增大的明显趋势,而 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 比值则随盐度增高而降低。总体上,层序3~4沉积时期湖水浓缩程度不大,为较温暖潮湿的气候背景,而从第5层序的高位体系域沉积时期开始,湖水浓缩程度逐渐变大,气候也从温暖潮湿逐渐转向半干热气候;在6层序的湖浸体系域沉积中期湖盆水体变得相对淡化,气候又出现短暂暖湿期;从7层序开始沉积时期,湖盆水体浓缩程度已经达到最高,气候也逐渐变得干旱。由此可以初步得出1~4层序的盐岩可能是深水成因的,而不是简单的蒸发成因的盐岩;而5~6层序的盐岩可能既有深水成因又有蒸发成因所形成的;而7层序的盐岩是蒸发成因形成的。总之,根据沉积剖面的硫、碳、氧同位素沉积地球化学特征分析及粘土矿物中 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 值的古气候环境意义分析,在不同层序、

不同体系域中的变化规律可知,总体上层序3~4沉积时为温暖潮湿的气候背景。5层序开始古气候背景有从温暖潮湿的气候向半干热气候,在6层序出现短暂暖湿气候之后到7层序气候又向半干热气候演变,即沉积环境水体逐渐变咸。

参考文献

- 陈锦石, 陈文正. 1983. 碳同位素地质学概论. 北京: 地质出版社, 25~40.
- 戴世昭. 1997. 江汉盐湖盆地石油地质. 石油工业出版社, 57~93.
- 邓宏文, 钱凯. 1993. 沉积地球化学与环境分析. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 34~35.
- 刘群, 等. 1987. 中国中、新生代陆源碎屑—化学岩型盐类沉积. 北京: 科学技术出版社, 240~244.
- 谭红兵, 于升松. 1999. 我国湖泊沉积环境演变研究中元素地球化学的应用现状及发展方向. 盐湖研究, (3): 58~65.
- 田景春, 曾允孚. 1995. 贵州二叠纪海相碳酸盐岩碳氧同位素地球化学演化规律. 成都理工学院学报, 1.
- 王永, 赵振宏, 林景星. 2004. 罗布泊 AK1 孔沉积物地球化学组成与古气候. 地球学报, 25(06): 653~658.
- 郑永飞, 陈江峰编著. 2000. 稳定同位素地球化学. 北京: 科学出版社, 218.
- 郑喜玉, 唐渊, 徐昶, 等. 1988. 西藏盐湖. 北京: 科学技术出版社, 72~73.
- 张英志, 丁孝忠, 韩坤英, 苏新, 柯学. 2006. 新疆库车坳陷晚白垩世沉积的地球化学特征及意义. 地球学报, 27(02): 129~134.

References

- Chen Jinshi, Chen wenzheng. 1983. C isotope Geology Conspectus. Beijing: Geology Publishing House, 25~40(in Chinese).
- Clayton R N, Degens ET. 1959. Use of carbon isotope analyses of carbonates for differentiating fresh-water and marine sediments. AAPG, 4: 889~897.
- Dai shizhao. 1997. Jiang Han Saline Basin Petroleum Geology. Petroleum Industry Publishing House, :57~93(in Chinese).
- Deng hongwen, Qian kai. 1993. Sedimentary Geochemistry and Environ-

ment Analysis. Langzhou: Ganshu Science and Technology Publishing House, 34~35(in Chinese).

- Hudson J D. 1977. Stable isotopes and limestone lithification. J. Geol. Soc., 133: 637.
- Keith M L, Weber J N. 1964. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils. Geoch. et Cosmoch. Acta, 28: 1786~1816.
- Liu qun, et al. 1987. China Mesozoic and Cenozoic Chemical Rock Saline Sediment. Beijing: Science and Technology Publishing House, 240~244(in Chinese).
- Tan hongbing, Yu bingsong, 1999. Present Situation and Future Development of Elemental Geochemistry in the Study of Lake Sediments' Evolution. Journal of Salt Lake Research, (3): 58~65(in Chinese with English abstract).
- Tian jingchun, Zeng yunfu. 1995. The Evolution Pattern of The Carbon And Oxygen Isotopes In The Permian Carbonate Rocks From Guizhou. Journal Of Chengdu University Of Technology, 1(in Chinese with English abstract).
- Sakai H. 1986. Isotopic properties of sulfur compounds in Hydro thermal processes. Geochem. J., 2(1): 68~78.
- Shackleton N J, Kennett J P. 1975. Paleotemperature history of the Cenozoic and the initiation of Antarctic glaciation; oxygen and carbon isotope analysis in DSDP sites 277, 279 and 281. Initial Reports of the DSDP29 Washington DC, USGovernment Printing Office, 743~755.
- Wang Yong, Zhao Zhenhong, Lin Jingxing. 2004. Pleoclimate and Geochemical Composition of AK1 Core Sediments in Lop Nur, Xinjiang. Acta Geoscientica Sinica, 25(6): 653~658(in Chinese with English abstract).
- Zhen yongfei, Chen jiangfeng. 2000. Steady Isotope Geochemistry. Beijing: Science Publishing House, 218(in Chinese).
- Zhen xiyu, Tang yuan, Xu xu, et al. 1988. Tibet Saline. Beijing: Science and Technology Publishing House, 72~73(in Chinese).
- Zhang Yingzhi, Ding Xiaozhong, Han Kunying, Su Xin, Ke Xue. 2006. Geochemical Characteristics and Significance of Late Cretaceous Deposits in the Kuqa Depression, Xinjiang. Acta Geoscientica Sinica, 27(2): 129~134(in Chinese with English abstract).