

文章编号: 1000-0550(2014)01-0101-09

沉积相变迁对内陆湖泊沉积易溶盐 作为古环境指标的影响^① ——以西宁盆地为例

刘艳蕊¹ 杨一博² 方小敏^{1,2} 宋春晖³ 刘晓明²

(1. 兰州大学西部环境与气候变化研究院 兰州 730000; 2. 中国科学院青藏高原研究所大陆碰撞与高原隆升重点实验室 北京 100101;
3. 兰州大学地质科学与矿产资源学院 兰州 730000)

摘要 获取合适的气候变化代用指标, 检验其在更长时间尺度内应用的有效性对于利用我国西部内陆湖盆沉积反映新生代以来大陆气候变化具有重要意义。易溶盐含量作为一种反映环境变化的代用指标, 在沉积相稳定的内陆湖泊沉积物研究中已获得广泛应用。对于存在沉积相变迁的古湖盆沉积物, 其适用性需要进行考虑。本文对西宁盆地谢家剖面的一套年代为始新世到中新世的内陆湖相泥岩/石膏沉积进行研究发现, 石膏层和泥岩层分别对应于 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 Sr^{2+} 的高值和低值变化。石膏层广泛分布的剖面下部 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 Sr^{2+} 含量较高, Na^+ 和 Cl^- 含量较低, 而石膏层逐渐消失的剖面上部 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 Sr^{2+} 整体含量降低, Na^+ 和 Cl^- 含量略有升高。沉积相分析表明红色泥岩层和石膏层分别对应于冲积扇远端和干盐湖化学沉积, 剖面下部石膏层和红色泥岩层交替到上部以红色泥岩层为主的岩相变化反映了区域范围上的干旱化进程。谢家剖面易溶盐含量强烈受控于上述沉积相变迁所决定的岩性变化, 并清晰揭示出发生在约 33 Ma 的巨大干旱化事件。因此对于存在沉积相变迁的古湖盆沉积物, 易溶盐含量分析不但要考虑内陆湖泊浓缩演化过程中溶解度控制的碳酸盐—硫酸盐—卤化物相继发生的沉淀序列, 还需考虑易溶盐在不同沉积相中的赋存迁移规律以及研究时段内的溶质补给类型是否存在差异。

关键词 西宁盆地 易溶盐 沉积相 古环境

第一作者简介 刘艳蕊 女 1982 年出生 硕士研究生 第四纪地质学 E-mail: liuyanrui2008@yeah.net

中图分类号 P534.63 **文献标识码** A

0 引言

获取新生代以来大陆气候环境变化记录对于揭示新生代以来气候变化的驱动机制及更短时间尺度上的气候环境变化机理具有重要意义。风成黄土沉积及其气候代用指标的成功应用(如粒度、磁化率等)为晚新生代以来我国大陆气候变化记录的建立提供了范例^[1,2]。而我国西部广泛分布的新生代沉积盆地为更长时间尺度大陆气候变化记录的建立提供了良好的条件。然而, 内陆湖盆沉积作为一个更为复杂的沉积体系, 气候变化代用指标的受控因素变得更加复杂。因此获取适合的气候变化代用指标, 检验其在更长时间尺度内有效性是准确获得新生代以来大陆气候环境变化的关键之一。

内陆湖泊沉积物的易溶盐含量可以反映古湖水的化学特征, 因此, 研究湖泊沉积中易溶盐含量变化

是重建湖泊古水文演化过程的重要途径之一^[3,4]。由于气候条件对于湖泊水化学特征的控制, 易溶盐含量变化亦可一定程度上指示古气候变迁^[4-8]。利用内陆湖泊沉积易溶盐含量反映古湖水化学特征及气候变化研究的逻辑前提是气候干旱背景下内陆湖泊浓缩演化过程中湖水中离子含量升高发生的碳酸盐—硫酸盐—卤化物随溶解度增大而相继发生的沉淀序列^[9]。前人研究的内陆湖泊易溶盐含量记录, 样品选取多来自于沉积稳定的湖泊碎屑/化学沉积样品^[10-13]。然而, 由于可能存在的沉积环境变迁, 在古湖盆沉积物中利用易溶盐含量反映古湖泊水文及古气候演化时, 尚需考虑上述干旱气候环境中溶解度控制的矿物沉淀序列的适用性。鉴于此, 本文选取位于青藏高原东北部, 已经有多项古气候代用指标研究的西宁盆地谢家剖面的一套内陆湖相碎屑/化学沉积, 年代跨度为始新世到中新世中期^[14]。通过易溶盐离子

^①国家重大科学研究计划(编号: 2013CB956400)、国家自然科学基金项目(批准号: 41321061, 40920114001, 40501079)联合资助
收稿日期: 2012-08-20; 收修稿日期: 2013-01-22

的含量分析 结合沉积相划分和其它古气候代用指标, 对上述易溶盐作为气候指标的适用性进行初步探讨。

1 研究区地质地理概况

西宁盆地位于青藏高原东北缘, 西宁市的南部, 位于祁连褶皱系之中部, 面积约4 600 km²。盆地位于青藏高原与黄土高原的过渡带, 北侧是达坂山, 南以拉脊山为屏障, 西临日月山, 东延入甘肃境内陇中盆地^[15]。陆相盆地沉积始于侏罗纪, 其沉积零星出露, 由含煤碎屑岩组成。白垩系为河流—滨湖相红色砂岩、砾岩。下第三系是内陆湖相含盐碎屑岩, 与上白垩平行不整合接触; 上第三系角度不整合于下第三系之上, 下部为河湖相碎屑岩, 上部为山麓洪积相砂砾岩^[15, 16]。盆地周围一些高山的海拔在3 000 m以上, 但盆地内大部分地区海拔在1 750~2 600 m。西宁盆地地处温带草原气候的西部边缘附近, 基本上为西风带所控制, 东南季风影响较弱, 冬季受蒙古高压的影响, 属半干旱高原大陆性气候。现代年平均温5℃~6℃, 年均降水量350~500 mm, 降水主要集中在夏季。

样品采集自西宁盆地的谢家剖面(36°31' N, 101°52' E, 海拔2 250 m, 图1)。谢家剖面新生代地层不整合于白垩纪地层之上, 剖面总厚819 m, 地层自下而上划分为祁家川组(深度: 20~69 m)、洪沟组

(深度: 69~224 m)、马哈拉沟组(深度: 224~504 m)、谢家组(深度: 504~667 m)、车头沟组(深度: 667~778 m)和咸水河组(深度: 778~819 m)。剖面下部(0~385 m)沉积物是规律性交替的石膏层和含石膏的泥岩, 石膏层中偶夹有含灰绿色的湖相泥岩。剖面上部(385~819 m)沉积物是来自洪泛平原和冲积扇远端的红色泥岩和粉砂岩, 并夹有河流相砂岩沉积。石膏层最后出现在剖面约500 m厚度处(图2)。谢家剖面的年代来自于Dai et al.^[14]的西宁盆地新生

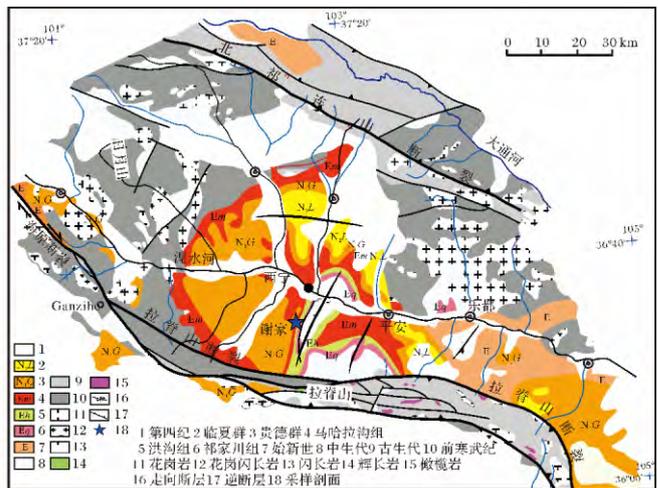


图1 西宁盆地地质构造图(引自文献[14])

Fig.1 Regional geological map of the Xining Basin with location of the Xiejia section (after reference [14])

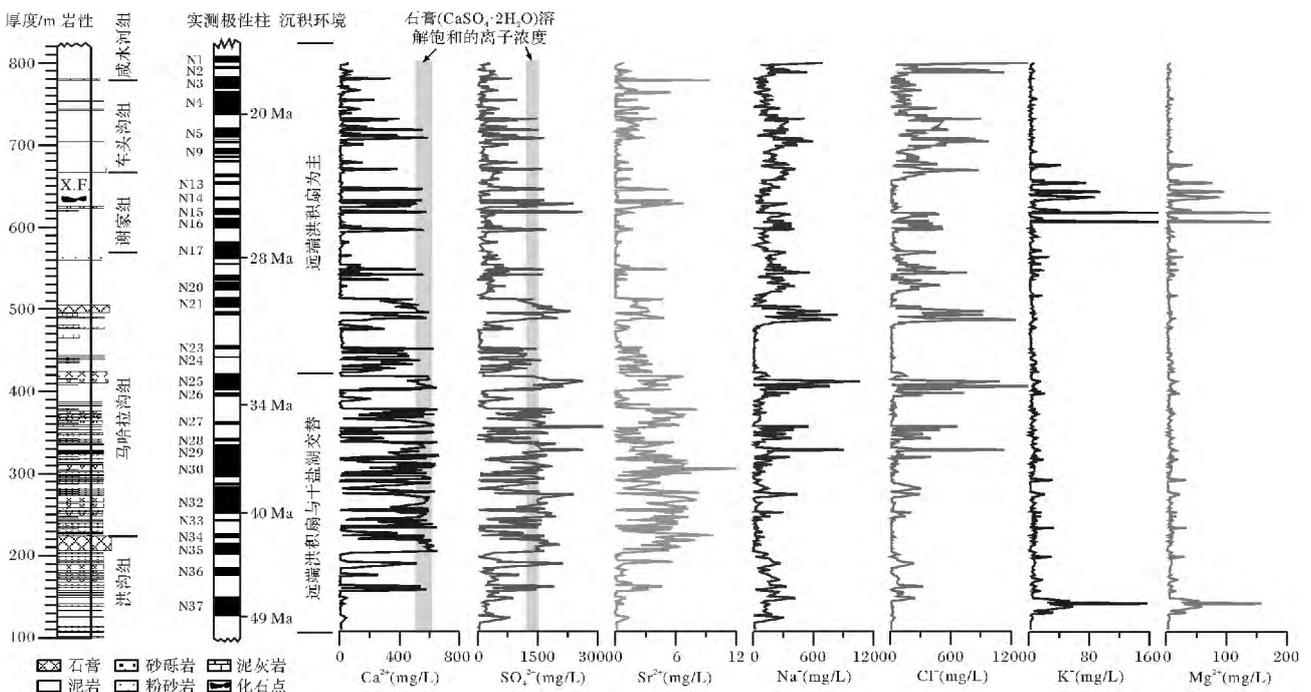


图2 谢家剖面易溶盐各离子含量随深度变化(古地磁结果引自文献[14])

Fig.2 Water soluble salts content against depth in Xiejia section (paleomagnetic results after reference [14])

地质层古地磁年代结果。本研究主要选取谢家剖面从洪沟组上部到咸水河组底部的一段(剖面深度为110~800 m),对应的年代跨度大约为49~17 Ma。

2 材料和方法

样品野外采集首先开挖0.5~2 m去风化壳,以1~2 m间隔取样,采集新鲜样品。全岩样品装入干净的纸质信封,置入烘箱(40℃)烘干,然后用玛瑙研钵将样品研磨至低于200目的粉末备用。取研磨好的样品,用万分之一天平称取0.5~0.6 g,装有10 mL超纯水的15 mL聚乙烯离心管中,漩涡混合器上震荡20 min后静置20 h,离心后,移取澄清液,定容备用。 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 均在中国科学院青藏高原研究所安装有卤素模式的ICP-OES(Leeman Labs, Prodigy-H)上进行。利用空白样和重复样进行质量控制。

本文对离子浓度含量的讨论基于前处理步骤中各离子溶解在10 mL超纯水的含量(单位:mg/L)进行。这主要是考虑部分样品中含大量石膏,特别是剖面下部样品,在上述前处理中不能完全溶解。根据石膏($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)在0℃~50℃纯水中的溶解度(0.223~0.265 g/100 g水),对10 mL超纯水中石膏溶解饱和时的理论浓度计算得出: Ca^{2+} 分布在518.6~616.3 mg/L, SO_4^{2-} 分布在1244.7~1479.1 mg/L(图2)。如图2所示大量样品达到了石膏的溶解饱和状态,存在石膏的不完全溶解。由于本文中样品称样量处于0.5~0.6 g之间,因此,依照传统做法乘以定容倍数后除以称样量所得含量,势必对 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 在趋势上产生偏倚。对于含其他离子(K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+})的矿物依溶解度数据不存在溶解饱和的状况。考虑到谢家剖面中石膏是化学沉积中的主要类型,对其他离子 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 、 Cl^- 含量的表示均统一为在10 mL超纯水的含量(mg/L),这样处理也利于下文中离子之间的对应分析。

为比较这两种浓度表示方法是否会对数据分析产生重大的认识偏差,以 Cl^- 为例,对现在采用的浓度含量(mg/L)和以对称样量校正的浓度(mg/kg)进行分析,其计算公式为 $Cl^-(mg/kg) = Cl^-(mg/L) \times 10 \text{ mL}/\text{称样量}(g) \times 1000$ 。结果(图3)表明,这两种浓度表示方法显著正相关,并且数据点紧密围绕在最佳拟合线附近。因此,这种偏倚是不足以产生重要数据解释偏差。显然偏差主要源于样品称取量的不一

致,本文虽未对每一个样品采用固定的称取量,但相对稳定在0.5~0.6 g之间的称取量不足以产生错误的判断。

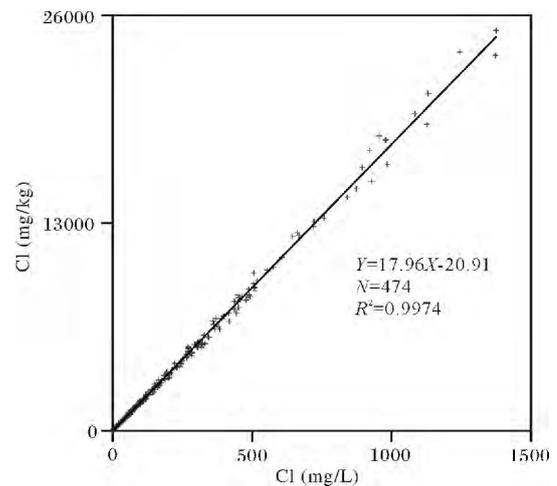


图3 两种 Cl^- 含量表示方法的比较
Fig. 3 Comparison of the two expressions of Cl^- content in this study

3 结果与讨论

3.1 易溶盐离子含量及蒸发岩矿物的溶解控制

谢家剖面主要离子含量随深度变化见表1和图2。主要离子含量随深度变迁大致可以划分为3种类型。第一种类型为 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 Sr^{2+} ,其趋势完全受控于石膏层为主的化学沉积和泥岩为主的碎屑沉积的交替,呈现出石膏层高值,泥岩层低值的分布型式。三种离子表现出一致的演化趋势,相互之间的变化显著性相关(见表2)。石膏是表生成因矿物中主要的含锶矿物之一, Ca^{2+} 和 Sr^{2+} 的一致性反映了石膏溶解对二者含量的主导性控制。含石膏样品在水溶过程中存在明显的不完全溶解,其上限并不能代表石膏在样品中的绝对含量变化,却真实地反映了下部剖面中的化学沉积/碎屑沉积的岩性交替。第二种类型为 Na^+ 和 Cl^- ,二者在趋势变化上呈现出了高度一致性(见表2),反映了石盐溶解对 Na^+ 和 Cl^- 的控制作用。二者随深度变化呈现出了与 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 不同的形态,其含量在剖面上部石膏层缺失的泥岩层含量反而比下部整体上要高。第三种类型为 K^+ 和 Mg^{2+} ,在剖面中整体含量都很低,在个别层位出现高值,在总的离子含量分布中占次要地位。

鉴于石膏作为谢家剖面主要化学沉积类型,有必要进一步探讨其对离子控制的作用。相对于石膏而言,碳酸钙矿物(方解石、文石和白云石)极低的溶解

度使得有理由假设谢家剖面中 Ca^{2+} 主要由石膏溶解供给。依据石膏 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 等个数比的当量关系, 可以获得对应于石膏溶解所释放出的 SO_4^{2-} 含量 (SO_4^{2-*})。图 4a 明显显示绝大多数样品 SO_4^{2-*} 明显小于实测 SO_4^{2-} 含量, 表明过剩 SO_4^{2-} (即其他非含钙硫酸盐溶解所提供的 SO_4^{2-}) 的普遍存在。

表 1 谢家剖面离子相关统计参数(单位: mg/L)
Table 1 Statistics characteristic of water soluble salts in Xiejia section (Unit: mg/L)

离子	最小值	最大值	平均值	标准偏差
Ca^{2+}	0.00	85.00	22.95	22.34
SO_4^{2-}	0.00	3137.40	645.50	661.90
Sr^{2+}	0.00	12.09	1.69	2.24
Na^+	0.00	1069.59	146.14	149.75
Cl^-	0.00	1374.19	131.42	219.82
K^+	0.00	172.68	7.53	16.32
Mg^{2+}	0.00	321.23	18.55	26.68

表 2 谢家剖面各离子含量相关系数矩阵
Table 2 Correlation coefficients of water soluble salts in Xiejia section

离子	Ca^{2+}	SO_4^{2-}	Sr^{2+}	Na^+	Cl^-	K^+	Mg^{2+}
Ca^{2+}	1.00						
SO_4^{2-}	0.80	1.00					
Sr^{2+}	0.70	0.69	1.00				
Na^+	-0.07	0.14	-0.19	1.00			
Cl^-	0.03	0.12	-0.11	0.89	1.00		
K^+	-0.05	-0.08	-0.05	-0.02	-0.08	1.00	
Mg^{2+}	0.32	0.40	0.32	0.10	0.11	0.45	1.00

基于过剩 SO_4^{2-} 与其他主要阳离子 Na^+ 、 K^+ 和 Mg^{2+} 的相关性分析及绝对含量上的对比(图 4-b, c, d), 很明显含钠硫酸盐主要提供了这部分过剩的 SO_4^{2-} , 暗示了石膏层中分布有芒硝或者钙芒硝这一类硫酸钠矿物的存在。因此, SO_4^{2-} 和 Na^+ 不仅仅分别由硫酸钙和氯化钠矿物溶解提供, 尚存在硫酸钠矿物溶解的贡献。而且这部分过剩 SO_4^{2-} 与实测 SO_4^{2-} 和 SO_4^{2-*} 的相关性表明(图 5), 这部分非石膏溶解的 SO_4^{2-} 与石膏含量并没直接的关系, 并且贡献了显著部分的实测 SO_4^{2-} 总量, 特别是当实测 SO_4^{2-} 含量升高时。

3.2 谢家剖面中的沉积相变迁

本区沉积相前人已经做了详细的研究^[14, 17, 18]。归纳起来本剖面沉积环境可以大致分为两段。第一段(420 ~ 800 m), 以红色泥岩主的序列。该套红色

泥岩块状为主, 缺乏水体相关层状沉积构造, 局部可见细小波纹构造及毫米级孔隙石膏晶体发育。部分层段出现 2 m 左右间隔的富含孔隙石膏晶体的泥岩与纯泥岩的旋回。上述石膏晶体发育的泥岩硬度大, 并呈现出一定的扰动特征, 如起伏的层面及类背斜构造。泥岩层中偶见黄色和褐色的斑点和条纹, 含具有交错层理特征的细砂和中砂夹层。

该段属于冲积扇远端沉积所表现在洪水期浅水沉积特征。泥岩中沉积结构的缺乏及反映氧化特征的红色指示了气下暴露沉积环境的极端状况。泥岩中的扰动特征代表了重复的干湿交替。含孔隙石膏泥岩中的石膏发育程度变化反映了波动的水位变迁, 并且暗示晶间卤水中溶解物质供给并没有高到足以产生大规模石膏层沉积的程度。在冲积扇远端的沉积环境中, 砂岩沉积可能反映大型的洪水事件沉积, 而稀疏的黄色和棕色泥岩斑点可能指示了气下环境的成土过程。

第二段为剖面下部(100 ~ 420 m)以红色泥岩和石膏层交替为特征(图 2)。泥岩层中含分米—米级厚度的粉砂质泥岩夹层并且含原位石膏结核, 除了一些稀少的波纹发育, 罕见其它沉积构造。石膏层含层状展布的从分米到米级大小不一的雪花状、块状、结核状、层状石膏, 部分层位可见有网状构造和错位的肠状石膏脉。石膏层发育规模巨大, 也见芒硝发育, 单个的层位或多个层位组合可在盆地内大范围对比。石膏层横向上可渐次变化为绿色泥岩, 绿色泥岩中见水平层理和毫米大小有机质斑点。

该段红色泥岩和石膏层交替反映了冲积扇远端与浅干盐湖沉积的交替。红色泥岩主要代表了冲积扇远端沉积。石膏层反映了干盐湖环境中的化学沉积, 指示了水体中硫酸盐含量的变化。这些硫酸盐来源于蒸发泵和毛细作用所驱动的地表径流和地下水的补给(图 6)。相对于泥岩层, 石膏层对应于高水位期形成的化学沉积。因为高水位可以提供足够的滞留时间和离子总量从而形成厚层的石膏沉积。石膏层中有机质斑点和具水平层理的绿色泥岩指示了此时相对较深的湖水深度。因此, 该段石膏和泥岩的交替反映了区域范围内水补给以及相关的湖水离子含量的旋回式波动。

上述沉积环境的分析可用图 6 的示意图表明: 当干盐湖补给充足, 湖面处于高水位期(图 6a), 湖面范围扩大, 湖水相对较深, 出现厚层的石膏沉淀, 水体处于相对还原环境, 于是在石膏层中偶见具水平层理的

富有机质的绿色泥岩。当干盐湖的水源和溶质补给不足(图 6b) ,湖面处于低水位期 ,湖面范围缩小 ,湖水变浅甚至消失 ,演化为气下环境为主导的滨湖泥坪沉积。气下环境的毛细蒸发作用会产生亚毫米级的孔隙石膏晶体发育和其它一些盐类离子的沉淀 ,更加

干旱的情况下这些盐类矿物沉淀甚至会缺失。同时 ,滨湖泥坪沉积上可发生初步的成土作用。大的洪水事件带来局部砂体的沉积 ,如谢家剖面上部分布的薄层的粉砂和砂质沉积(图 2) 。

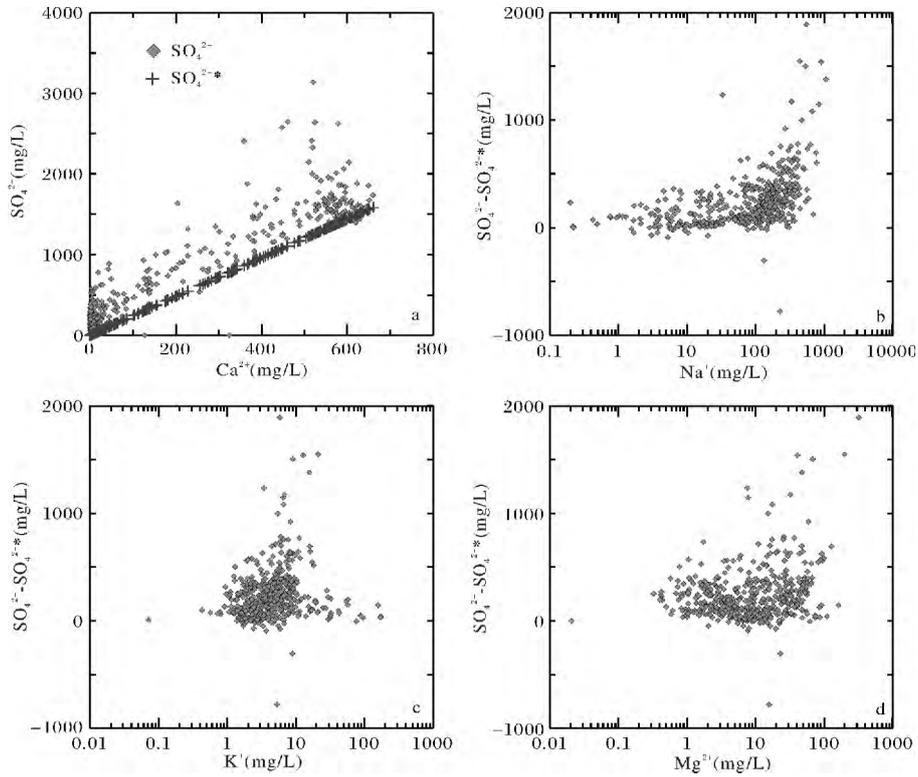


图 4 (a) 谢家剖面 Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 相关图(菱形方块表示实测 SO_4^{2-} 含量 ,十字表示若全部的 Ca^{2+} 全部来自于石膏溶解 ,与 Ca^{2+} 对应的等个数比的 SO_4^{2-} 含量(SO_4^{2-*}) ;(b-d) 并非由石膏溶解提供的 SO_4^{2-} 含量(实测 SO_4^{2-} 和 SO_4^{2-*} 的差值) 与 Na^+ 、 K^+ 和 Mg^{2+} 的相关图)

Fig. 4 (a) plot of Ca^{2+} versus SO_4^{2-} ; rhombus represents the SO_4^{2-} determined; cross represents (SO_4^{2-*}) , which is the SO_4^{2-} content the same mole fraction with Ca^{2+} based on the assumption that all Ca^{2+} are from gypsum dissolution. (b-d) plot of excess SO_4^{2-} versus Na^+ , K^+ , and Mg^{2+} , respectively; excess SO_4^{2-} is the difference between SO_4^{2-} determined and SO_4^{2-*} .

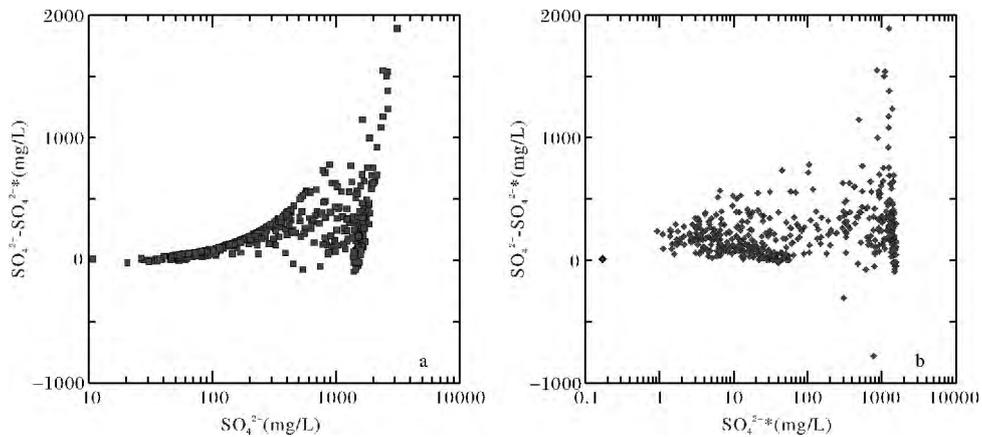


图 5 (a) 谢家剖面过剩 SO_4^{2-} (SO_4^{2-} 与 SO_4^{2-*} 之差) 与实测 SO_4^{2-} 相关图; (b) 过剩 SO_4^{2-} 与 SO_4^{2-*} 的相关图

Fig. 5 (a) plot of excess- SO_4^{2-} versus SO_4^{2-} determined; (b) plot of excess- SO_4^{2-} versus SO_4^{2-*} .

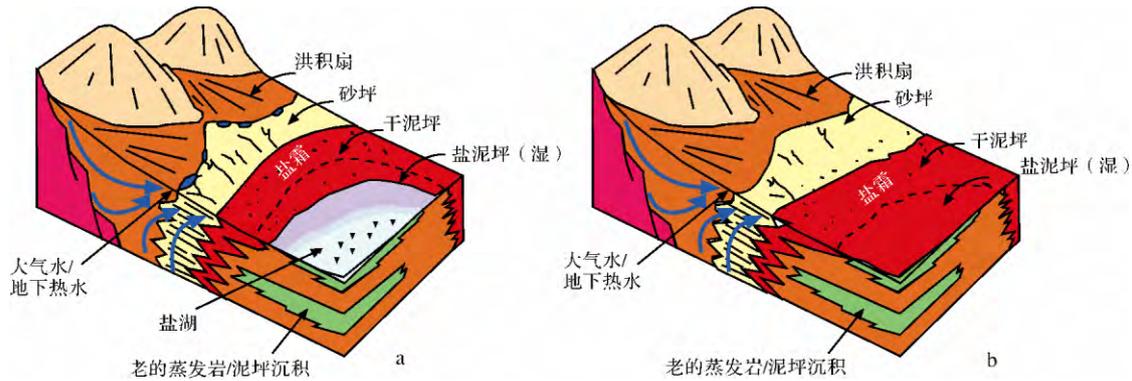


图 6 谢家剖面沉积相变迁示意图(改绘自文献[19])

(a) 干盐湖高水位期; (b) 干盐湖消失

Fig. 6 Schematic diagram showing the depositional evolution (redrawn from reference [19])

(a) high water table stage with dry salt lake; (b) stage with disappearance of dry salt lake.

3.3 古环境意义探讨

事实上,如果依据干旱背景控制下内陆湖泊浓缩演化过程中湖水中离子含量升高发生的碳酸盐—硫酸盐—卤化物随溶解度增大而相继发生的沉淀序列来解释这一套易溶盐数据,会错误地基于 420 m 前后石膏层的逐渐消失伴随着易溶盐 SO_4^{2-} 的趋势性的减少,以及之后石盐层的缺失(相对低的 Cl^- 含量),得出“湖水”淡化的推断;从而认为红色泥岩段属于淡化层,石膏层属于咸化层,得出与沉积环境分析相反的结论。这种推断混淆了湖水浓缩离子含量升高发生的碳酸盐—硫酸盐—卤化物随溶解度增大而相继发生的沉淀序列的适用范围。在始终为“水下”的湖泊沉积环境,湖水水体在持续地变浅咸化的过程中,随着水体离子含量提高相继发生上述碳酸盐—硫酸盐—卤化物沉积演化序列并最终导致湖泊干涸(倘若无持续补给)。然而,湖泊干涸后,“气下”主导的沉积环境使得易溶盐离子的进一步演化脱离了上述演化规律。干旱环境导致水和溶质补给缺乏,使得接下来的沉积(如泥坪为主的沉积)中易溶盐含量高低变化难以与之前的蒸发岩沉积进行对比。此时的碎屑岩(如红色泥岩为主)为主的“气下”沉积环境与湖泊在化学沉积后(石膏或者石盐层)发生大范围水补给所形成湖泊淡化碎屑层(如钙质碎屑层)具有质上的差别。二者均以碎屑沉积为主,但前者已经脱离了湖水作用变为“气下”环境,而后者却由于湖水变深变淡,重新回到“水下”的淡化阶段。

本研究中的易溶盐含量强烈受控于沉积相主导的岩性变迁。上部随石膏层逐渐消失而减少的 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 含量,同时整体增加的 Na^+ 和 Cl^- 含量首先

反映了冲积扇远端泥坪沉积所代表的碎屑沉积过程占据主导,以石膏沉积为代表的化学沉积减少甚至消失;其次反映了泥坪沉积中由于表面蒸发作用导致的上升的晶间卤水在沉积物表面沉淀,结成盐霜或者上述的毫米级孔隙石膏晶体。 Na^+ 和 Cl^- 具有很高的迁移能力,在多次干湿交替的所伴随的迁移和结晶中这两种离子更加富集于沉积物表面。同时强烈的氧化作用使得沉积物颜色红度值明显升高^[20, 21]。倘若是相对于剖面下部石膏层与泥岩交替段更为淡化的阶段出现,那么相对更深的湖水不应该沉积红度值更高(体现更强烈的氧化作用和更多的水体氧含量)的泥岩。

沉积相变迁所控制的易溶盐含量变化所反映的干旱化历程也被该剖面其他代用指标证实。距谢家剖面 3 km 的塔山剖面石膏—红色泥岩的粒度和孢粉分析表明^[21]红色泥岩层粒度较粗,其中孢粉含量较少,指示草原或疏林草原景观;石膏层中泥岩粒度较细,其中孢粉含量丰富,指示相对温暖湿润的灌丛—森林景观。而谢家剖面正构烷烃和孢粉分析的对比发现^[22],反映了在 420 m 处(约 33 Ma)的各项指标的巨大变化可能与全球气候变冷下的干旱化进程和青藏高原的早期隆升有关^[14, 17, 18, 20~23]。易溶盐含量清晰而明确地反映了这次干旱化,当然这也是合理地基于沉积环境约束下该项代用指标的应用。

谢家剖面化学沉积的主要类型是以石膏为代表的厚层硫酸盐矿物。距谢家剖面不远的水湾剖面石膏的硫和氧的同位素分析^[18]表明这两种同位素信号并未沿地层深度变化出现显著变化;进一步通过与新生代海洋中硫酸盐硫同位素对比,表明存在一个稳定

的非海相源区。在谢家剖面直至至干盐湖彻底干涸代之以泥坪沉积为主时,以石盐为代表的更高一级干旱环境的厚层氯化物并未出现。这可能与盐类离子的供给类型有关。因为石膏层中芒硝类矿物的出现预示了更高级干旱阶段的到来。尽管从本文的一套沉积物易溶盐数据难以对盐类离子的来源做出全面的揭示,然而结合盆地晚白垩和早古近纪地层分布非常广泛的石膏和芒硝类硫酸盐矿物^[15-24]和相对缺乏的石盐沉积,不难推断当时的盐类离子供给以硫酸盐为主。在硫酸盐为主的盐类离子供给下,直至湖泊干涸时是很难形成显著含量的氯化物沉积。因为显著含量的氯化物沉积类似于本剖面的厚层石膏沉积一样不仅需要适当的干旱气候条件还需要持续的水和物质供给。而在西宁盆地大量存在晚白垩和早古近纪芒硝类沉积和本文中揭示的芒硝类矿物的存在,证明了比石膏所表征的更高一级干旱环境的存在,因此氯化物矿物在本剖面中的缺失不能归咎于当时湖盆古环境没有演化到更干旱环境。相反,极端干旱下干盐湖由于缺少足够水分补给而消失,这也被近期关于西宁盆地石膏成因及其古环境指示意义的研究所证实^[16,18,21]。缺失的氯化物沉积恰恰佐证了可溶盐补给类型对湖水浓缩演化导致的矿物结晶的重要作用。而这种相对高含量的硫酸盐供给类型往往与源区岩石的蒸发岩(如石膏、硬石膏等硫酸盐矿物)和富硫化物的页岩沉积的风化输入有关^[25,26]。考虑到西宁盆地内前新生代地层主要为侏罗纪和白垩纪,其中侏罗系主要由含煤碎屑岩组成而白垩系为河流—滨湖相红色砂岩和砾岩,因此硫酸盐的供给可能与这两套地层中的含煤碎屑岩风化与蒸发岩淋滤有关,并可能存在上述晚白垩和早古近纪地层中钙芒硝矿物淋滤发生的再沉积作用。

前人常用的易溶盐含量反映湖泊古气候的研究中由于时间尺度较短,往往沉积环境并未发生大的转变,因此可以准确示踪古湖水的化学变化。如张洪等^[10]对东居延海1.7 m湖相地层易溶盐含量反映的该区近2 000年来的古气候变化。曹雯等^[11]对寺河南剖面近6 m湖泊沉积物易溶盐含量研究揭示的该区中全新世的气候变化。翟秋敏^[12]对安固里安固里淖钻孔岩芯的易溶盐含量分析推断了该湖泊全新世以来的水化学类型演变。年代更古老的湖相沉积,由于相对稳定的沉积相,也获得了合理的应用,如奚晓霞等^[8]通过临夏盆地东山古湖的氯离子解释该区早更新世以来的气候演化,以及方小敏等^[13]对柴达木

盆地中部鸭湖剖面湖相地层的盐类离子分析所反映的该区上新世以来的干旱化历程。

而对于研究地层内出现大的沉积环境变迁,易溶盐的解释变得相对复杂。如李荣全等^[27]对泥河湾古湖盆区4个地层剖面的沉积调查及易溶盐含量分析推断了泥河湾古湖水文演化。其研究显示湖滨相沉积中的易溶盐变化最为复杂,难以反映古湖水性质与演化,只能选用浅湖相沉积剖面的易溶盐分析结果反映古湖水性质。结合本文的研究,可以看出利用易溶盐离子反演古环境意义存在的复杂性,特别是对长时间尺度的可能存在沉积相变迁的内陆湖泊沉积要特别慎重。尽管溶质补给类型不会改变蒸发浓缩后蒸发岩结晶沉淀的规律,但是简单套用碳酸盐—硫酸盐—卤化物沉淀序列来解释环境变化可能得出相反的结论。

4 结论

(1) 西宁盆地谢家剖面100~800 m地层的易溶盐含量变化显示了强烈的岩性控制。红色泥岩为主的碎屑沉积和石膏层为主的化学沉积的交替变迁主导了主要离子含量(Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-})的变化。沉积环境分析表明,上述两种沉积分别代表了干旱环境背景下的冲积扇远端碎屑沉积和干盐湖化学沉积。谢家剖面地层的易溶盐含量变化清晰揭示出33 Ma左右的干旱化响应。

(2) 谢家剖面中石膏的广泛沉积和芒硝类矿物的存在,结合整个西宁盆地石膏及芒硝类矿物的广泛存在及石盐的相对缺失,指示了谢家剖面所代表时段内的溶质补给类型可能以硫酸盐为主,这也解释了为什么到湖水干涸为止存在石盐层的相对缺失。

(3) 利用内陆湖泊沉积易溶盐含量对古湖水水文特征演化的推断需密切结合沉积相的分析。对于年代跨度大,存在重大沉积相变迁的研究地层,要充分考虑易溶盐在各个沉积环境中的迁移赋存规律及其差别。同时也要注意研究时段内易溶盐离子的补给类型变化,不能简单套用碳酸盐—硫酸盐—卤化物的湖水浓缩沉淀规律。西宁盆地的易溶盐的研究结果对于具厚层化学沉积和碎屑红层交替的古老沉积的长时间尺度古环境推断具有启示意义。

致谢 感谢咎金波、吴福莉对本文的有益建议。感谢两位评审专家对于本文提出的细致而建设性的建议。

参考文献(References)

- 1 Liu T. Loess and Environment [M]. Beijing: China Ocean Press, 1985: 1-237
- 2 An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, *et al.* Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan plateau since late Miocene times[J]. *Nature*, 2001, 411: 62-66
- 3 Hakanson L, Jansson M. Principles of Lake Sedimentology [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1994: 1-174
- 4 Björck S Olsson, Ellis S. Late Holocene palaeoclimatic records from lake sediments on James Ross Island, Antarctica [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1996, 121(3-4): 195-220
- 5 Wasson R J, Smith G I, Agrawal D P. Late Quaternary sediments, minerals, and inferred geochemical history of Didwana lake, Thar Desert, India [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1984, 46: 345-372
- 6 Sinha R, Raymahashay B C. Evaporite mineralogy and geochemical evolution of the Sambhar Salt Lake, Thar Desert, Rajasthan, India [J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 166: 59-71
- 7 Last W M. Paleochemistry and paleohydrology of Ceylon Lake, a salt-dominated playa basin in the Northern great plains, Canada [J]. *Journal of Paleolimnology*, 1990, 4: 219-238
- 8 奚晓霞, 穆德芬, 方小敏, 等. 早更新世东山古湖氯离子含量变化与季风演化 [J]. *冰川冻土*, 1996, 8(2): 125-133 [Xi Xiaoxia, Mu Defen, Fang Xiaomin, *et al.* Variation of Cl⁻ Content in Paleo-Dongshanh Lake during Early Pleistocene and monsoonal evolution [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 8(2): 125-133]
- 9 瓦里亚什科. 钾盐矿床形成的地球化学规律 [M]. 北京: 中国工业出版社, 1965: 1-55 [Valiashko M G, *Geochemical Laws of the Formation of Potash Deposits* [M]. Beijing: China Industry Press, 1965: 1-55]
- 10 张洪, 靳鹤龄, 肖洪浪, 等. 东居延海易溶盐沉积与古气候环境变化 [J]. *中国沙漠*, 2004, 24(4): 409-415 [Zhang Hong, Jin Heling, Xiao Honglang, *et al.* Soluble salt sediments of East Juyan Lake and its indicating palaeoclimate environment changes [J]. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(4): 409-415]
- 11 曹雯, 夏正楷. 河南孟津寺河南中全新世湖泊沉积物的易溶盐测定及其古水文意义 [J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2008, 2: 65-69 [Cao Wen, Xia Zhengkai. Paleo-Hydrological signification in Mid-Holocene revealed by the analysis of soluble salts of Sihenan Profile in Mengjin, Henan province [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2008, 2: 65-69]
- 12 翟秋敏. 全新世安固里淖易溶盐沉积与环境 [J]. *古地理学报*, 2001, 3(1): 91-96 [Zhai Qiumin. Holocene soluble salt sediments of Angulinao Lake and its environment [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2001, 3(1): 91-96]
- 13 方小敏, 吴福莉, 韩文霞, 等. 上新世—第四纪亚洲内陆干旱化过程—柴达木中部鸭湖剖面孢粉和盐类化学指标证据 [J]. *第四纪研究*, 2008, 28(5): 874-882 [Fang Xiaomin, Wu Fuli, Han Wenxia, *et al.* Plio-Pleistocene drying process of Asian inland-sporopollen and salinity records from Yahu section in the central Qaidam Basin [J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(5): 874-882]
- 14 Dai S, Fang X, Dupont-Nivet G, *et al.* Magnetostratigraphy of Cenozoic sediments from the Xining Basin: Tectonic implications for the northeastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(B11)
- 15 青海地质矿产局地质志编写组. 青海省地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1991 [Qinghai Bureau of Geology and Mineral Resources. Geological Memoirs of Qinghai Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985]
- 16 常华进, 曹广超, 彭杨伟. 西宁盆地晚始新世石膏成因研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(11): 48-53 [Chang Huajin, Cao Guangchao, Peng Yangwei. Petrogenesis of late Eocene gypsum in Xining Basin [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(11): 48-53]
- 17 Dupont-Nivet G, Krijgsman W, Langereis C, *et al.* Tibetan plateau aridification linked to global cooling at the Eocene-Oligocene transition [J]. *Nature*, 2007, 445(7128): 635-638
- 18 Abels H A, Dupont-Nivet G, Xiao G, *et al.* Step-wise change of Asian interior climate preceding the Eocene-Oligocene Transition (EOT) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 299(3-4): 399-412
- 19 Warren J K. Evaporites through time: Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits [J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 98(3-4): 217-268
- 20 徐丽, 苗运法, 方小敏, 等. 青藏高原东北部西宁盆地中始新世—渐新世沉积物颜色与气候变化 [J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2009, 45(1): 12-19 [Xu Li, Miao Yunfa, Fang Xiaomin, *et al.* Middle Eocene-Oligocene climatic changes recorded by sedimentary colors in the Xining Basin, in northeastern Tibetan Plateau, NW China [J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2009, 45(1): 12-19]
- 21 肖国桥, 周新郢, 葛俊逸, 等. 西宁盆地晚始新世石膏—红色泥岩旋回的古环境指示 [J]. *第四纪研究*, 2010, 30(5): 919-924 [Xiao Guoqiao, Xu Xinying, Ge Junyi, *et al.* Sedimentary characteristics and paleoenvironmental significance of Late Eocene gypsum mudstone cycles in Xining Basin, Northeastern Tibetan Plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(5): 919-924]
- 22 龙利群, 方小敏, 苗运法, 等. 新生代全球变冷背景下北部青藏高原变冷和干旱化事件: 西宁盆地早第三纪沉积物中正构烷烃和孢粉的记录 [J]. *科学通报*, 2011, 56(15): 1221-1231 [Long Liqun, Fang Xiaomin, Miao Yunfa, *et al.* Northern Tibetan Plateau cooling and aridification linked to Cenozoic global cooling: evidence from n-alkane distributions of Paleogene sedimentary sequences in the Xining Basin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(15): 1569-1578]
- 23 Zachos J C, Pagani M, Sloan L, *et al.* Trend, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present [J]. *Science*, 2001, 292: 686-693
- 24 聂树人, 魏锦萍. 西宁盆地泥质型钙芒硝资源的开发利用 [J]. *青海地质*, 1997, 6(2): 28-37 [Nie Shuren, Wei Jinping. Exploitation of the argillaceous type glauberite resources in Xining Basin [J]. *Geology of Qinghai*, 1997, 6(2): 28-37]

- 25 Galy A and France-Lanord C. Weathering processes in the Ganges–Brahmaputra basin and the riverine alkalinity budget [J]. *Chemical Geology* ,1999 ,159: 31-60
- 26 Wu L L , Huh Y , Qin J H , *et al.* Chemical weathering in the Upper Huanghe(Yellow River) draining the eastern Qinghai Plateau [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* ,2005 ,69: 5279-5294
- 27 李容全 ,乔建国 ,邱维理 ,等. 泥河湾层内易溶盐沉积及其环境意义[J]. *中国科学(D 辑): 地球科学* ,2000 ,30(2) : 148-158 [Li Rongquan , Qiao Jianguo , Qiu Weili , *et al.* Soluble salt deposit in the Nihewan beds and its environmental significance [J]. *Science China (Seri. D) : Earth Sciences* ,2000 ,30(2) : 148-158]

Control of Sedimentary Facies Alternation on Water Soluble Salts in Inland Lake Sediments as a Paleoenvironmental Proxy:

A case study from Xining Basin

LIU Yan-rui¹ YANG Yi-bo² FANG Xiao-min^{1 2} SONG Chun-hui³ LIU Xiao-ming²

(1. Research School of Arid Environment & Climate Change , Lanzhou University , Lanzhou 730000;

2. Key Laboratory of Continental Collision and Plateau uplift , Institute of Tibetan Plateau Research , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100085;

3. School of Earth Sciences , Lanzhou University , Lanzhou 730000)

Abstract: It is significant for using China inland basins deposition to obtain the Cenozoic continental climate change records that we appropriately acquire paleoenvironmental proxies and examining their validity for a long-term scale. Water dissolved salts , as a paleoenvironmental proxy , has widely applied to the field of inland lake sediments with stable sedimentation. However , it is required to examine when this proxy has been used to the lake sediments with significant sedimentary facies alternation. In this study , we focus on a set of strata of inland lake sediments consisting of mudstones/gypsum alternations in Xiejia section , Xining Basin , age ranging from Eocene to Miocene. The investigation of water dissolved salts in Xiejia Section sediments shows the strong control of lithology alternations on variations of water dissolved salts concentrations. Specifically , the gypsum and mudstone layers correspond to the high/low concentrations of Ca^{2+} , SO_4^{2-} and Sr^{2+} , respectively. The lower part of this section sediments with widely spread gypsum layers has low concentrations of Na^+ and Cl^- and high concentrations of Ca^{2+} , SO_4^{2-} and Sr^{2+} ; The upper part of this section sediments lack of gypsum layers has slight high concentrations of Na^+ and Cl^- and low concentrations of Ca^{2+} , SO_4^{2-} and Sr^{2+} . Based on the sedimentary facies analysis , the gypsum and red mudstones layers are corresponding to shallow playa lake and distal alluvial fan , respectively. The evolution from distal alluvial fan and shallow playa lake alternations in the lower part of this section to distal alluvial fan in the upper part indicates a regional aridification process. The water dissolved salts in Xiejia section , strongly controlled by sedimentary facies alternations , clearly indicate a dry trend occurred at about 33 Ma. Hence , for the inland lake sediments with significant sedimentary facies alternations , not only the solubility limit control on the carbonate-sulfate-halide sequences in the inland lake water , but the differences of water dissolved salts occurrence and activity between different sedimentary environment , of solute types provided by the source area , should be taken into account.

Key words: Xining Basin; water dissolved salts; sedimentary facies; paleoenvironment