

·环境矿物学·

可可西里盐湖表层沉积物中粘土矿物的环境信息

高翔¹, 彭强¹, 蔡敏¹, 邸迎伟¹, 方勤方¹, 马鸿文¹, 鲁安怀²

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要:通过对可可西里盐湖表层沉积物中粘土矿物的研究,以期获得近年来湖区的某些环境信息。研究结果表明沉积物中的粘土矿物主要为伊利石和绿泥石,非粘土矿物主要为石英、方解石和长石以及少量白云石、文石、闪石和石膏等。样品中 $<2\ \mu\text{m}$ 的粘土矿物以伊利石和绿泥石为主,局部样品含少量有序伊/蒙混层。根据样品分布特点和粘土矿物的组合类型,将样品划分为3个区域:1区和3区的矿物组合为伊利石、绿泥石和有序伊/蒙混层,2区为伊利石和绿泥石,无伊/蒙混层矿物。其中1区和3区样品的结晶度(IC)范围为0.41~0.59,均值为0.51,2区样品的结晶度范围为0.25~0.40,均值为0.34,明显低于1区和3区,说明2区样品中的伊利石具有更高的结晶度。样品的伊利石化学指数(CI)均小于0.5,表明该伊利石为富Fe-Mg伊利石,主要是物理风化作用的结果。伊利石和绿泥石作为主要粘土矿物反映了近年来整个湖区的环境以干冷为主,局部区域(1区和3区)出现的少量有序I/S混层矿物则指示在短期内曾经历过短暂的干湿交替环境。此外,在酸性介质条件下,少量伊利石发生弱水解作用导致晶格中的 K^+ 淋失,并转化为伊/蒙混层矿物,同时也降低了伊利石的结晶度。

关键词:粘土矿物;表层沉积物;环境信息;可可西里盐湖

中图分类号:P579

文献标识码:A

文章编号:1000-6524(2012)05-0736-09

Environmental information of clay minerals in salt lake surface sediments of Hol Xil area

GAO Xiang¹, PENG Qiang¹, CAI Min¹, DI Ying-wei¹, FANG Qin-fang¹, MA Hong-wen¹
and LU An-huai²

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Clay minerals of surface sediments in the salt lakes of Hol Xil area were studied in this paper with the purpose of obtaining some recent environmental information of the lakes. The results show that clay minerals are illite and chlorite in surface sedimentary samples, whereas non-clay minerals mainly include quartz, calcite and feldspar together with small amounts of dolomite, aragonite, amphibole and gypsum. Clay minerals with particle sizes smaller than $2\ \mu\text{m}$ in samples are illite (65%~82%) and chlorite (13%~35%), and small amounts of ordered Illite/Smectite (I/S) mixed layer (4%~15%) also exists in local areas. According to the distribution of samples and the combination characteristics of clay minerals, the samples can be divided into 3 districts: mineral combinations of samples in No. 1 district and No. 3 district are illite, chlorite and ordered I/S mixed layer; however, samples in No. 2 district are composed of the combination of illite and chlorite, with no I/S mixed layer. Illite crystallinity in samples was obtained by measuring full width half maximum (FWHM) of $10\ \text{\AA}$ diffraction

收稿日期:2012-05-03;修订日期:2012-06-08

基金项目:中央高校基本科研业务费(2010ZY06);国家重点基础研究发展计划'973'资助项目(2011CB403004);中国地质大学(北京)矿物岩石材料国家专业实验室开放课题(07A007)

作者简介:高翔(1971-),女,博士,副教授,从事矿物学的科研和教学工作,E-mail: xgao@cugb.edu.cn

peak according to Kübler Index. At the same time, standard curve of illite crystallinity was obtained by international standard illite samples under the condition of D/Max-RC equipment, and the linear equation is $y = 1.9204x - 0.1547$ with related coefficient $R^2 = 0.9828$. On the basis of the linear equation for illite standard curve, the corrected illite crystallinity Kübler Index (IC) in samples was obtained, and the chemical index of illite in samples was also calculated. The crystallinity values for samples in No. 1 and No. 3 district are in the range of 0.41~0.59 with the average value of 0.51. However, illite in samples of No. 2 district has better crystallinity because its crystallinity values are in the range of 0.25~0.40 with the average value of 0.34, obviously smaller than the values of No. 1 and No. 3 district. In addition, chemical indexes are all smaller than 0.5, showing that illite belongs to Fe-Mg illite resulting from physical weathering. In conclusion, illite and chlorite, as major clay minerals in samples, suggest that the environmental conditions of the studied lake area are arid and cold, whereas small amounts of ordered I/S mixed layers in local districts, i. e., No. 1 and No. 3 districts, indicate that these districts have undergone the environment of alternate transient arid and humid in recent years. Furthermore, under acidic medium conditions, small amounts of illite experienced weak hydrolysis which led to the loss of potassium ions from illite crystal lattice, and then transformed to ordered I/S mixed layer, accompanied by the decrease of the crystallinity of illite.

Key words: clay minerals; surface sediments; environmental information; salt lakes of Hol Xil area

粘土矿物主要形成于地表条件下,是母岩经由物理风化或化学风化而产生的,在土壤或其他沉积物中分布极为广泛。近年来,粘土矿物所蕴含的丰富的气候环境信息使其在全球变化研究中受到世界各国学者的重视,并被应用于从冰川极地到热带雨林,从高原风化产物到湖泊、海洋沉积物,从寒武纪到第四纪的广泛时空范围的古气候重建研究中。实际上,粘土矿物在古气候重建方面的研究始于 20 世纪 60 年代。1966 年,Harlan 研究墨西哥湾的沉积物时发现,大量的高岭石和蒙脱石存在于间冰期,伊利石和绿泥石在冰期含量增加;Chamely 于 1967 年发现地中海西北部伊利石结晶度变化与浮游生物对气候的指示一致;1968 年,Parry & Revees 发现美国德克萨斯州湖在第四纪多雨季节沉积了大量的高岭石和蒙脱石,应用粘土矿物对古气候的重建与其他指标所获得的古气候环境信息相吻合(陈涛等, 2003;隆浩, 2007),粘土矿物已广泛应用于海洋和湖泊环境的气候重建(Chamely, 1989)。特别是近十几年来,粘土矿物与气候关系的研究取得了一定成果(Petschick *et al.*, 1996; Diekmann *et al.*, 1996; Ehrmann, 1998; Gingle *et al.*, 2001; Robert, 2004)因此,利用粘土矿物的成分、组合、含量和结晶度等进行古气候重建,是继地生态指标、地球化学指标之后,研究古气候的又一有效的矿物学手段。

粘土矿物颗粒细小($< 2 \mu\text{m}$),其形成和演变携

带着丰富的气候环境变化信息。如绿泥石形成于碱性环境,含量的增加代表逐渐变为干旱的气候条件(Gingle *et al.*, 2001; Winkler *et al.*, 2002)。伊利石形成于干冷环境,当气候变为湿热,碱金属离子(主要是 K^+)被带走时,伊利石分解为高岭石;在干湿交替环境下,晶格混层中的 K^+ 因淋失而向伊/蒙混层矿物转化,并最终形成蒙脱石。因此,气候干燥、淋滤作用弱利于伊利石的形成和保存。此外,伊利石结晶度是气候变化的灵敏指标,可反映气候环境的短期变化:高温和大量降雨可导致伊利石的强水解,使结晶度变差;而在低温干燥条件下,伊利石的结晶度则较高(Gingle *et al.*, 1998)。高岭石形成于温暖潮湿的环境,大量的高岭石反映湿热气候条件(Singer, 1984; Chamley, 1989; Cruz, 1999)。蒙脱石形成于干湿交替的气候环境,其存在反映寒冷气候特征(Chamley, 1989)。随着温度的升高,在 K^+ 、 Al^{3+} 的参与下,蒙脱石可向伊/蒙(I/S)混层矿物转化。伊/蒙混层矿物的形成代表气候逐渐转为潮湿的环境:在偏碱性介质条件下,可形成无序 I/S 混层($R=0$);在酸性介质影响下,形成有序 I/S 混层($R \geq 1$)。当酸性影响强时,有序 I/S 混层($R \geq 1$)向有序 IS1K($R=3$)转化;影响弱时,有序 I/S 混层($R \geq 1$)向无序 I/S 混层($R=0$)转化。蛭石于干湿交替气候下形成,纤维状坡缕石和海泡石形成于干旱、半干旱气候条件。而其他不规则混层矿物,如高/蒙混层是由蛭石和蒙脱石于温暖湿润气候条件下转变而

成绿/蒙混层代表气候转为潮湿环境(冯启等, 2007)。

此外,在土壤和沉积物中,粘土矿物的类型和组成能反映集水处占主要优势的水解作用的强度,且化学风化是气候条件(如温度、降水)、地形、构造稳定性(排水条件)以及母岩联合作用的结果(Weaver, 1989; Velde, 1995)。张乃娴等(2000)曾指出粘土矿物与温度和湿度的关系明显,湖泊沉积物中粘土矿物的类型和组合特征有可能成为湖泊环境温度的一个很好指标。近年来,我国也有一些学者通过对湖泊沉积物中粘土矿物组成特征的研究来重建古环境的演变历史(徐永昶, 1993; 朱大岗等, 2004)。

粘土矿物因颗粒细小,对其进行定性和半定量分析的最有效的手段为X射线衍射(XRD)。本文以可可西里自然保护区库赛湖附近的盐湖为例,通过XRD对湖泊表层沉积物中粘土矿物的成分、含量、组合类型、伊利石结晶度和化学指数等特征的研究,以期获得该湖区近年来的某些环境信息。

1 研究区背景

研究区位于藏北可可西里自然保护区,海拔

4 475 m,地理坐标 $N35^{\circ}24' \sim 35^{\circ}46'$, $E92^{\circ}54' \sim 93^{\circ}46'$,由若干封闭盐湖组成,其东北为昆仑山垭口,北部为昆仑山脉及黑海,其西北紧邻库赛湖。研究区是可可西里腹地海拔最低的封闭型半咸水湖,属于高寒草原半干旱气候,年平均温度 $0.0 \sim 2.0^{\circ}\text{C}$,年降水量 $100 \sim 150 \text{ mm}$,湖区附近为荒漠草原地带,其中库赛湖靠大气降水和地表河水库赛河补给水源,而本文所研究的周边盐湖的水补给则主要来源于大气降水。因自然环境和条件十分恶劣,研究区受人类活动的影响较小,湖区沉积物能够敏感反映不同时期气候的自然变迁状况。同时,有关研究区湖泊沉积物中粘土矿物的研究也为数不多,因此选择库赛湖附近的若干封闭盐湖作为本文的研究对象。样品采集时,采集表层 1 cm 以下的沉积物,取样厚度为 $2 \sim 3 \text{ cm}$,共采集表层沉积物样品 26 个,研究区域和采样位置见图 1。

2 材料和方法

采用X射线粉晶衍射仪(XRD)对表层沉积物样品进行矿物的定性和半定量分析,所用仪器为日本理学公司的D/Max-RC,实验条件为: $\text{CuK}\alpha$,石墨单

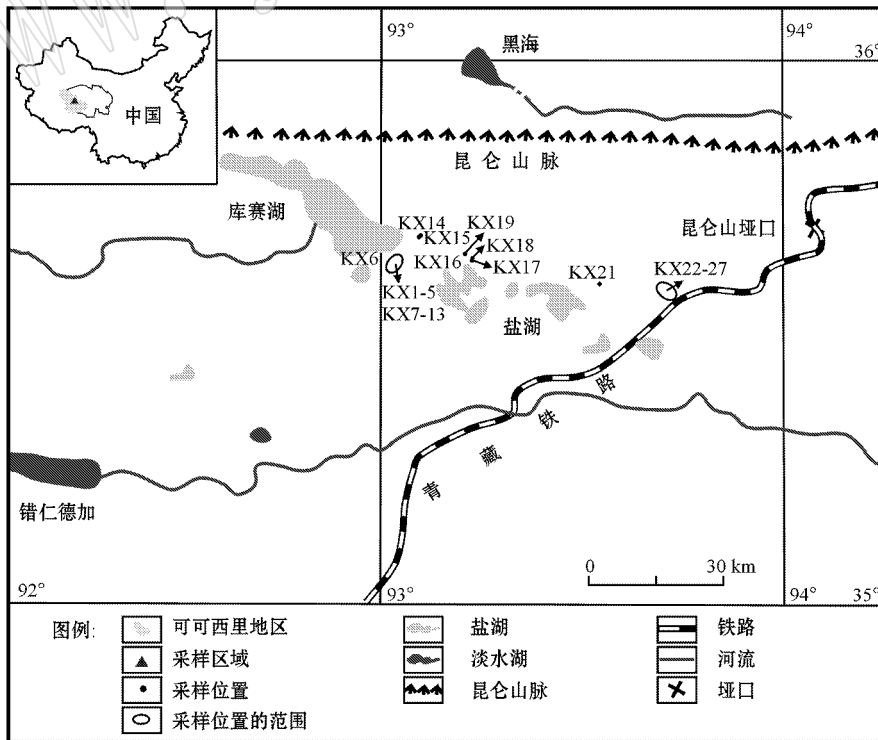


图 1 研究区和采样位置

Fig. 1 Location of the study area and sampling sites

色器 40 kV, 100 mA, DS=SS=1°, RS=0.3 mm, 步长 0.02°, 扫描速度 2°/min, 室温, 在中国地质大学(北京) X 光室测试分析。用玛瑙乳钵将沉积物全岩样品磨制 300 目左右, 将样品装在玻璃凹槽样品座中, 压制成平板状待测, 扫描范围 3°~70°, 以获得全岩样品的矿物定性和半定量估算结果。为了对样品中的粘土矿物进行精细分析, 每个样品称取 8 g 放置在 100 mL 烧杯中, 加入去离子水, 在搅拌器下充分搅拌 10 min, 静置 8 h 后, 将悬浮液取出, 于离心机中离心, 提取 < 2 μm 的粘土部分, 将其均匀铺置于毛玻璃片上, 分别制成自然片(N 片)、乙二醇饱和片(EG 片, 乙二醇蒸汽 16 h)和加热片(T 片, 450°C 下加热 2 h)待测。其中, 自然片(N)和乙二醇饱和片(EG)的测量范围为 2θ 2.5°~30°, 加热片(T)为 2θ 2.5°~15°。

粘土矿物的定性是通过 XRD 图谱上特征衍射峰的相对位置和强度确定的。半定量估算通常是以 EG 片上所测量的特定衍射峰的峰高(即强度)为基

础, 如伊利石含量的确定是根据 EG 片上 10 Å 峰强度。高岭石的出现是以 3.5 Å 处周围的双峰来推断: 即在 N 片或 EG 片上会出现绿泥石(004) 3.54 Å 衍射峰和高岭石(002) 3.57 Å 衍射峰的部分叠加。将所测量的 3.54~3.57 Å 处高岭石/绿泥石的峰强与 7 Å(EG) 峰的强度相结合, 可估算每种矿物的相对含量。I/S 混层矿物的(001)峰在 10~14 Å 之间表现为非对称, 而纯蒙脱石在 N 片的同一位置则表现为对称的(001)峰。对蒙脱石和无序的 I/S 混层矿物而言, 在 EG 片中(001)峰将飘移到 17 Å; 然而, 有序的 I/S 混层矿物却在 15 Å 左右。

3 盐湖表层沉积物的 XRD 研究

3.1 全岩样品的矿物定性和半定量

26 个表层沉积物样品的全岩 XRD 物相结果见表 1。表 1 表明, 粘土矿物为伊利石和绿泥石, 其中伊利石含量(质量分数, 下同)为 10%~30%, 绿泥石

表 1 表层沉积物全岩样品的 XRD 矿物定性和半定量结果

$w_B/\%$

Table 1 Qualitative and semi-quantitative estimations of minerals for bulk rock samples by XRD

样品号	粘土矿物		非粘土矿物							
	绿泥石	伊利石	石英	斜长石	钾长石	方解石	白云石	文石	闪石	石膏
KX1	10	15	45	15	5	8	-	-	-	-
KX2	15	30	20	13	2	15	3	-	2	-
KX3	10	15	45	6	2	15	2	-	-	5
KX4	10	15	50	10	5	8	-	-	-	-
KX5	5	10	40	20	10	10	3	-	-	-
KX6	15	25	20	8	2	10	3	15	-	2
KX7	10	15	35	12	3	0	3	-	-	-
KX8	10	15	30	20	5	15	3	-	2	-
KX9	10	5	35	20	5	12	3	-	-	-
KX10	10	10	40	15	10	10	3	-	-	-
KX11	10	15	25	15	5	15	3	10	2	-
KX12	15	15	30	15	5	15	5	-	3	-
KX13	10	13	35	20	5	10	2	-	3	2
KX14	10	20	20	30	5	10	-	-	-	-
KX15	15	20	30	10	5	15	3	-	2	-
KX16	10	15	40	5	5	10	3	10	2	-
KX17	15	20	40	10	-	15	-	-	-	5
KX18	15	25	30	10	-	20	-	-	-	5
KX19	20	25	33	15	-	12	-	-	-	-
KX21	15	20	30	13	2	10	5	-	3	-
KX22	20	25	20	15	5	10	3	-	2	-
KX23	15	20	30	7	3	15	3	2	-	5
KX24	10	15	30	18	7	15	5	-	-	-
KX25	10	10	35	17	3	20	3	-	2	-
KX26	10	15	30	17	3	20	3	-	2	-
KX27	10	20	35	13	2	15	3	-	2	-

为 5%~20% ,两者含量总和为 15%~45%。非粘土矿物为石英(20%~50%)、方解石(8%~20%)、斜长石(5%~30%)和钾长石(0~10%) ,另含少量白云石(0~5%)、文石(多数样品中无此矿物,个别样品达 15%)、闪石(0~3%)和石膏(0~5%)等。

3.2 <2 μm 粘土矿物的特征

3.2.1 粘土矿物的定性和半定量

为获得粘土矿物的精细信息,将<2 μm的粘土矿物从表层沉积物全岩样品中分离出来,并获得每个样品的 N 片、EG 片和 T 片的 XRD 图谱,据此分析得到粘土矿物种类和半定量的结果见表 2。由表可知,粘土矿物主要为伊利石(65%~82%)、绿泥石(13%~35%) ,二者的含量相对稳定。此外,少量有序 I/S 混层矿物的出现随采样位置表现出规律性,除 KX15、KX17、KX18、KX19 等 4 个样品中无伊/蒙混层矿物外,其余样品中均有,且伊/蒙混层的含量

为 4%~15% ,混层中蒙脱石所占的比例(S)均为 35% ,属于有序混层。

根据粘土矿物的分布和组合特征,并结合采样位置,将 23 个提纯粘土样品划分为 3 个区(表 2):1 区包括 12 个样品,2 区包括 4 个样品,3 区包括 7 个样品。少量有序 I/S 混层矿物出现在 1 区和 3 区,含量范围为 4%~15% ,S 为 35% ,2 区则无伊/蒙混层。

通过 XRD 分析可知,本次样品包含两种类型的粘土矿物组合(图 2)。图 2a 为伊利石+绿泥石+有序 I/S 混层的组合,1 区和 3 区属于此类组合;而图 2b 代表的是伊利石+绿泥石组合,无混层矿物,2 区即为此类型。

3.2.2 伊利石的结晶度(IC)和化学指数(CI)

全岩和提纯粘土的 XRD 分析均给出表层沉积物中的主要粘土矿物为伊利石和绿泥石。就伊利石而言,其结晶度是气候变化的灵敏指标,可反映气候环境的短期变化(Gingle *et al.* , 1998)。在结晶学中用结晶度来描述晶体结构结点上原子或离子的规则排列及其延续状态。结晶度好的晶体,其晶体内部结构完整,且该完整性在三维空间具有相当的延续,在衍射上的表现是衍射线清楚,衍射峰狭窄,因此,结晶度是反映晶体完整性和大小的参数。迄今为止,描述伊利石结晶度的指数很多,包括 Weaver 指数、Kübler 指数、Weber 指数、Millers 指数、Flehmig 指数和 Weber-Dunoyer de Segonzac-Economou 指数等,但随着对伊利石结晶度研究的深入,有的指数已不适用于结晶度的描述,有的则有一定的使用前提或使用范围(Wang and Zhou , 2000)。王河锦等(1998)曾对伊利石结晶度各指数间的关系进行了详细研究,将上述各指数分为条件性单一结晶度指数和非条件性单一结晶度指数,指出非条件性单一结晶度指数 Kübler 指数和 Weber-Dunoyer de Segonzac Economou 指数使用方便,特别是 Kübler 指数是用伊利石 10 Å 衍射峰的半高宽描述其结晶度,用以代表晶体的大小,使用时其晶体须是完整的。Kübler 指数测量的是伊利石 10 Å 衍射峰中部的半高宽,该指数建立在 Scherrer 方程基础上,指数越大,峰越宽,结晶度就越差。Kübler 指数简易方便且误差最小,因而被广泛应用。本文即采用 Kübler 指数描述样品中伊利石的结晶度。

因样品中的粘土矿物组合为伊利石、绿泥石和伊/蒙混层,为了尽量减少伊/蒙混层矿物(001)衍射峰对伊利石 10 Å 峰半高宽的影响,对样品 EG 片 10 Å

表 2 <2 μm 粘土矿物的定性和半定量分析及伊利石结晶度和化学指数计算结果

Table 2 Qualitative and semi-quantitative estimations for <2 μm clay minerals by XRD, and calculation results of illite crystallinity and chemical index

分区	样品号	$w_B/\%$			S/%	IC	CI
		Ill	Chl	I/S			
1 区	KX1	70	15	15	35	0.56	0.21
	KX2	68	22	10	35	0.48	0.33
	KX3	68	27	5	35	0.41	0.26
	KX4	70	20	10	35	0.44	0.32
	KX5	73	21	5	35	0.53	0.22
	KX7	71	21	6	35	0.53	0.26
	KX8	68	24	15	35	0.51	0.23
	KX9	70	24	7	35	0.58	0.24
	KX10	69	21	10	35	0.49	0.30
	KX11	66	22	12	35	0.47	0.29
	KX12	69	21	10	35	0.55	0.24
	KX13	68	24	13	35	0.56	0.28
	2 区	KX15	73	27	-	-	0.40
KX17		73	27	-	-	0.39	0.28
KX18		82	18	-	-	0.38	0.27
KX19		70	30	-	-	0.29	0.35
3 区	KX21	65	23	12	35	0.46	0.33
	KX22	70	26	4	35	0.42	0.31
	KX23	65	26	9	35	0.43	0.24
	KX24	70	20	10	35	0.53	0.24
	KX25	67	21	12	35	0.54	0.27
	KX26	67	21	12	35	0.58	0.26
	KX27	77	13	10	35	0.59	0.32

注: Ill—伊利石, Chl—绿泥石, I/S—伊/蒙混层, S/%—混层矿物中蒙脱石所占比例, IC—伊利石结晶度, CI—伊利石的化学指数; 样品 KX6、KX14 和 KX16 的量过少, 不足以用于提取粘土。

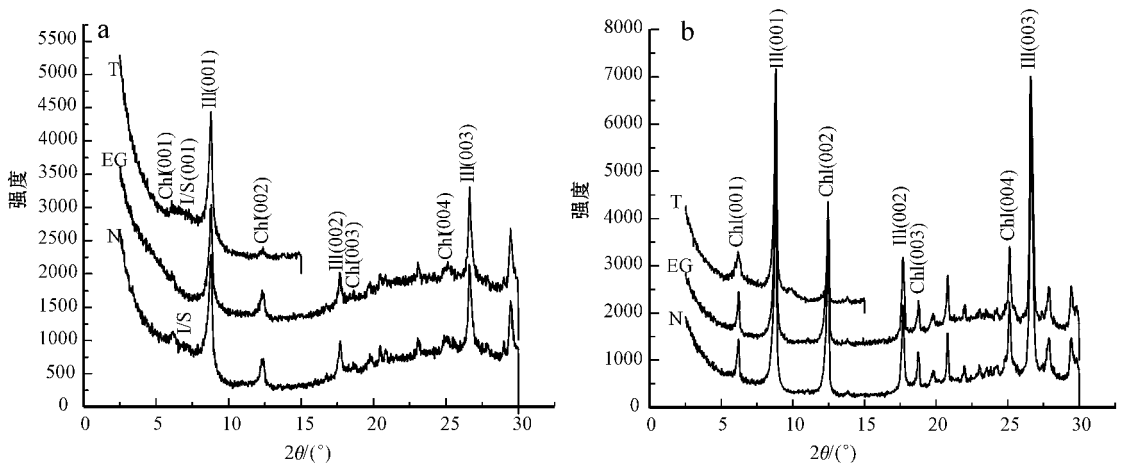


图 2 样品中两种粘土矿物组合类型的 XRD 图谱

Fig. 2 Two types of clay mineral combinations by XRD

a—伊利石 + 绿泥石 + I/S ; b—伊利石 + 绿泥石

a—Ill + Chl + I/S ; b—Ill + Chl

衍射峰中部的半高宽进行测量,以获得准确的结晶度值。这是因为在 EG 片中,伊利石 10 Å 峰和伊/蒙混层的(001)衍射峰已分离。为使本次样品中的伊利石结晶度值与伊利石国际标样的结晶度值能直接对比,本文采用日本理学公司的 D/Max-RC 型粉晶衍射仪,对 5 个伊利石国际标样(德国海森伯格大学的 Warr L. N. 教授提供)进行测定,用以校正本次实验的仪器,并以此为校正曲线,计算样品的伊利石结晶度和化学指数。其中 SW1、SW2、SW4、SW6 等 4 个标样为碎屑岩,沿英国西南 Cornwall 南部海岸线的华力西期极低级变质岩带采集,标样 SW8 为片状单矿物白云母,采自印度花岗岩带。5 个伊利石标样的制备遵照 IGCP-294 所推荐的测量伊利石结晶度的程序(Warr and Rice, 1994),测试条件见材料和方法部分,伊利石标样的 XRD 图谱见图 3。由图 3 知,标样 SW1 中的粘土矿物为伊利石、绿泥石、高岭石和少量伊/蒙混层;SW2 中的粘土矿物为伊利石和少量高岭石;SW4 和 SW6 中的粘土矿物均为伊利石和绿泥石;SW8 为纯 2M1 型白云母。在这组标样中,编号为 SW8 的纯 2M1 型白云母直接标定了衍射曲线中仪器贡献的部分,因此,以该组标样标定/校正的伊利石结晶度 Kübler 指数反映的是样品粒度大小的差别。

5 个标样中伊利石 10 Å 衍射峰的半高宽值(FWHM)即 Kübler 指数见表 3。以本次实验所获得的伊利石标样的结晶度为横坐标,以 Warr 和 Rice

(1994)所测的结晶度值为纵坐标,得到本次实验仪器的伊利石结晶度的线性方程为 $y = 1.9204x - 0.1547$,相关系数 $R^2 = 0.9828$ (图 4),可见该标准曲线的线性相关度非常高。

Ehrmann 等(2005)将伊利石结晶度分为 4 类: I 结晶好 ($< 0.4\Delta^{\circ}2\theta$), II 结晶较好 ($0.4 \sim 0.6\Delta^{\circ}2\theta$), III 结晶一般 ($0.6 \sim 0.8\Delta^{\circ}2\theta$), IV 结晶差 ($> 0.8\Delta^{\circ}2\theta$),即结晶度值高表明晶体结晶差,而低值则表示具有好的结晶度。应用伊利石结晶度标准曲线校正本次样品的伊利石结晶度 Kübler 指数,结果见表 2。由表知,校正后 1 区和 3 区伊利石结晶度值(IC, Illite Crystallinity)范围分别为 0.41~0.58 和 0.42~0.59,均值均为 0.51,属于 II 类结晶较好。而 2 区的结晶度值范围为 0.25~0.40,均值为 0.34,属于 I 类结晶好。从矿物组合类型看,2 区样品中无伊/蒙混层矿物,但其结晶度明显优于 1 区和 3 区。Gingle 等(1998)曾指出,在酸性介质条件下,高温和大量降雨可导致伊利石的水解,使结晶度变差,而在低温干燥条件下,伊利石的结晶度则较高。据此,可认为,与 2 区相比,1 区和 3 区具有较差结晶度的原因可能在于:具有相对高的温度和多的降水,从而导致该区样品中的少量伊利石在酸性介质中发生水解生成有序伊/蒙混层,同时降低了结晶度。

伊利石的化学指数(CI, Chemical Index)可通过 5 Å/10 Å 的峰面积之比计算:当 5 Å/10 Å 的峰面积比值 > 0.5 ,为富铝伊利石,是强水解作用的结果,若峰面

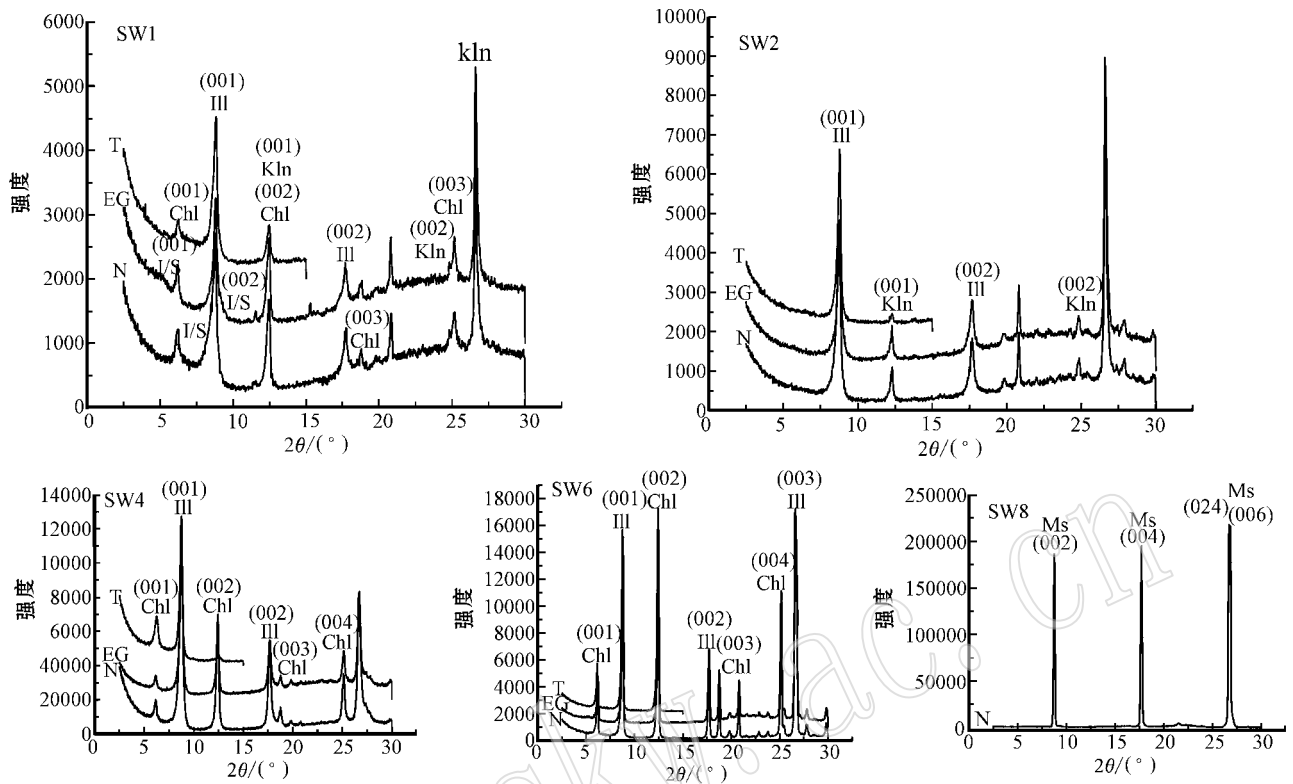


图 3 伊利石标样的 XRD 图

Fig. 3 XRD patterns of standard samples for illite

Chl—绿泥石; III—伊利石; I/S—伊/蒙混层; Ms—2M1 型白云母

Chl—chlorite; Ill—illite; I/S—Illite/Smectite (I/S) mixed layer; Ms—2M1 type muscovite

表 3 伊利石标样 10 Å 峰处的半高宽值 (FWHM)

Table 3 FWHM values of 10 Å peak for standard samples of illite

标样号	SW1	SW2	SW4	SW6	SW8
FWHM _{obs}	0.398	0.324	0.303	0.186	0.152
FWHM _{warr}	0.63	0.47	0.38	0.25	0.11

注: FWHM_{obs}为本文用 D/Max-RC 衍射仪测定的 10 Å 峰的半高宽值, FWHM_{warr}为 Warr 等 (1994) 测定的 10 Å 峰的半高宽值。

积比值 < 0.5 表明该伊利石为富 Fe-Mg 伊利石, 是物理风化的结果 (Esquevin, 1969)。库赛湖样品中伊利石的化学指数 CI 范围为 0.21~0.35 (见表 2) 均小于 0.5 表明为富 Fe-Mg 伊利石, 主要是物理风化作用的结果。

4 结论

采用 XRD 对库赛湖附近盐湖表层沉积物的矿物相分析可知, 沉积物中的粘土矿物主要为伊利石

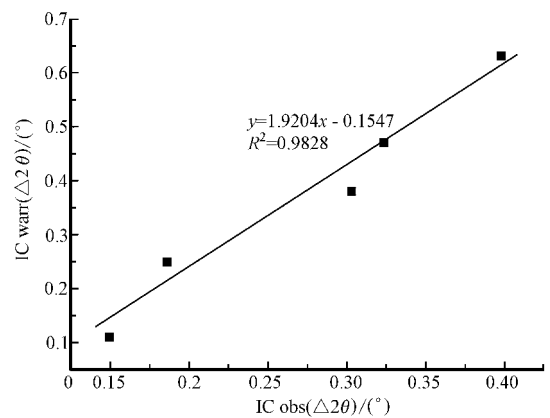


图 4 本仪器条件下伊利石结晶度的标准曲线

Fig. 4 Standard curve of illite crystallinity under the condition of D/Max-RC equipment

和绿泥石, 非粘土矿物主要为石英、方解石和长石以及少量白云石、文石、闪石和石膏等。样品中 < 2 μm 的粘土矿物以伊利石和绿泥石为主, 局部样品含少量有序伊/蒙混层。根据样品分布特点, 结合样品中

粘土矿物的组合类型,将样品划分为3个区域:1区和3区的矿物组合为伊利石、绿泥石和有序伊/蒙混层,2区为伊利石和绿泥石,无伊/蒙混层矿物。采用伊利石结晶度 Kübler 指数和伊利石国际标样,得到本仪器条件下伊利石结晶度的标准曲线,并在此基础上,计算得到样品中伊利石的结晶度值(IC)和化学指数(CI),其中1区和3区样品的结晶度值范围为0.41~0.59,均值为0.51,2区样品的结晶度值范围为0.25~0.40,均值为0.34,明显低于1区和3区,具有更高的结晶度。2区与1区和3区的另一区别在于,样品中无伊/蒙混层矿物。此外,伊利石化学指数CI均小于0.5,表明该伊利石为富Fe-Mg伊利石,主要是物理风化作用的结果。

通过上述对可可西里库赛湖附近盐湖表层沉积物中粘土矿物的分析,得到如下结论:

(1)盐湖表层沉积物中的粘土矿物以伊利石和绿泥石为主,伊利石化学指数CI均小于0.5,反映粘土矿物主要是物理风化作用的产物,湖区的气候环境以干冷为主;

(2)含有少量有序I/S混层矿物的局部区域(1区和3区),其结晶度相对较差,而无I/S混层矿物的区域(2区)则具有相对较高的结晶度。少量有序I/S混层矿物的存在表明,短期内该区域曾处于干湿交替的环境中,这是由于在酸性介质作用下,伊利石发生弱水解作用,致使晶格中的 K^+ 淋失,并逐步转化为有序I/S混层矿物,同时降低了结晶度。

References

- Chamely H. 1989. Clay Sedimentology[M]. Berlin:Spring-Verlag.
- Chen Tao, Wang Huan, Zhang Zuqing, *et al.* 2003. Clay minerals as indicators of paleoclimate[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 22(4):416~420(in Chinese with English abstract).
- Cruz M. 1999. Clay mineral assemblages in flysch from the Campode Gibraltar area(Spain)[J]. Clay Mineralogy, 34(2):345~364.
- Diekmann B, Petschick R and Gingle F X. 1996. Clay mineral fluctuation in late quarternary sediment of the southeastern South Atlantic: implications for past changes of deepwater advection[A]. Vefer G, Berger W H, Siedler G, *et al.* The South Atlantic: Present and Past Circulation[C]. Berlin:Springer, 621~644.
- Ehrmann W. 1998. Implications of late Holocene to early Miocene clay mineral assemblages in McMurdo Sound(Ross Sea, Antarctica) on paleoclimate and ice dynamics[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 139:213~231.
- Ehrmann W, Setti M and Marinoni L. 2005. Clay minerals in Cenozoic sediments off Cape Roberts(McMurdo Sound, Antarctica) reveal palaeoclimatic history[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 229:187~211.
- Esquevin J. 1969. Influence de la composition chimique des illites sur le crystallinité[J]. Bull. Cent. Rech. Pau S. N. P. A., 3:147~154.
- Feng Qi, Feng Qinlai, Yu Jishun, *et al.* 2007. Characteristics of clay minerals from the uppermost Permian in Dongpan Section, Guangxi Province and its significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 25(3):365~371(in Chinese with English abstract).
- Gingle F X, De Decker P D and Hillenbrand C D. 2001. Clay mineral distribution in surface sediments between Indonesia and NW Australia- source and transport by ocean currents[J]. Marine Geology, 179:135~146.
- Gingle F X, Muller P M and Schnieder R R. 1998. Orbital forcing of freshwater input in the Zaire Fan Area: clay mineral evidence from the last 200kyr[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 138(14):17~26.
- Long Hao, Wang Chenhua, Liu Yongping, *et al.* 2007. Application of clay minerals in paleoenvironment research[J]. Journal of Salt Lake Research, 15(2):21~25(in Chinese with English abstract).
- Petschick R, Kuhn G and Gingle F X. 1996. Clay mineral distribution in surface sediments of the South Atlantic: sources, transport and relation to oceanography[J]. Marine Geology, 30:203~229.
- Robert C. 2004. Late quarternary variability of precipitation in Southern California and climatic implication: clay minerals evidence from the Santa Barbara Basin, ODP site 893[J]. Quaternary Science Review, 23:1029~1040.
- Singer A. 1984. The paleoclimatic interpretation of clay minerals sediment a review[J]. Earth-Sci. Rev., 21:251~293.
- Velde B. 1995. Origin and Mineralogy of Clays. Clay and Environment[M]. Berlin:Spring-Verlag.
- Wang Hejin and Zhou Jian. 1998. On the indices of illite crystallinity[J]. Acta Petrologica Sinica, 14(3):395~405(in Chinese with English abstract).
- Wang H J and Zhou J. 2000. The relationships between the Kubler index, Weaver index and Weber index of illite crystallinity and their applications[J]. Schweiz. Miner. Petrog. Mitt., 80:187~198.
- Warr L N and Rice A H N. 1994. Interlaboratory standardization and calibration of clay mineral crystallinity and crystallite size data[J]. Journal of Metamorphic Geology, 12:141~152.
- Weaver C E. 1989. Clay, Muds and shals[A]. Developments in Sedi-

mentology[C]. Amsterdam :Elsevier.

- Winkler A , Wolf-Welling T C W and Stattegger K. 2002. Clay mineral sedimentation in high northern latitude deep- sea basins since the Middle Miocene(ODP Leg 151 , NAAG] J]. Int. J. Earth Sci. , 91(1): 133~148.
- Xu Yongchang. 1993. Clay Minerals Research of Salt Lakes in China [M]. Beijing : Science Press (in Chinese).
- Zhang Naixian , Wan Guojiang and Ma Yuguang. 2000. The clay minerals and its environmental record in the sediment core of Caohai , Weining[J]. Scientia Geologica Sinica , 35(2): 206~211(in Chinese with English abstract).
- Zhu Dagang , Meng Xiangang , Zhao Xitao , *et al.* 2004. Lake-level change of Nam Co , Tibet , since the late Pleistocene and environment information of clay minerals in lacustrine deposit[J]. Journal of Geomechanics , 10(4): 300~309 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈 涛,王 欢,张祖青,等. 2003. 粘土矿物对古气候作用浅析 [J]. 岩石矿物学杂志, 22(4): 417~420.
- 冯 启,冯庆来,于吉顺,等. 2007. 广西东攀剖面二叠系顶部粘土矿物特征及古气候意义[J]. 沉积学报, 25(3): 366~371.
- 隆 浩,王晨华,刘勇平,等. 2007. 粘土矿物在过去环境变化研究中的应用[J]. 盐湖研究, 15(2): 21~25.
- 王河锦,周 健. 1998. 关于伊利结晶度诸指数的评价[J]. 岩石学报, 14(3): 395~405.
- 徐永昶. 1993. 中国盐湖粘土矿物研究[M]. 北京 : 科学出版社.
- 张乃娴,万国江,马玉光. 2000. 威宁草海沉积物中的粘土矿物及其环境记录[J]. 地质科学, 35(2): 206~211.
- 朱大岗,孟宪刚,赵希涛,等. 2004. 西藏纳木错晚更新世以来湖面变化和湖相沉积中粘土矿物显示的环境信息[J]. 地质力学学报, 10(4): 300~309.

www.yskw.ac.cn