

# 浅谈利用黏土矿物重建古气候<sup>1)</sup>

陈 涛 王河锦 张祖青 王 欢

(北京大学地球与空间科学学院,北京,100871)

**摘 要** 利用黏土矿物重建古气候近年来得到了广泛的应用,其分析测试方法较多。其中,X射线衍射分析主要用来确定黏土矿物组合及其含量以及某些黏土矿物的结晶度;化学分析、电镜分析主要用于黏土矿物的来源、成因、演变过程的研究;放射性同位素的研究使气候指标和年代学建立起时间和空间上的联系,而氮氧同位素分析亦能对古气候重建提供重要佐证。本文旨在综述各种研究方法所能提供和揭示蕴藏于黏土矿物中的古气候信息,以期全面综合地利用黏土矿物为手段来重建古气候。

**关键词** 黏土矿物;古气候;X射线衍射分析;化学分析;电镜分析;同位素

**中图分类号** P 578; P 461

## 0 引 言

研究全球变化,特别是重建古气候冷、暖周期性变化,对于解释现代以及预测未来气候事件,有着非常重要的意义。除了黏土矿物学方法外,主要用于重建古气候的研究方法还有古生物学、古地磁学、孢粉、黄土-古土壤、洞穴石笋、树木年轮、沉积物、冰芯以及氮氧同位素等等。

最早将黏土矿物用于古气候建造是在 20 世纪 60 年代对第四纪沉积物的研究。譬如 Harlan(1966)报道墨西哥海湾 Sigsbee Deep 沉积物中,大量的蒙脱石、高岭石存在于间冰期,伊利石、绿泥石在冰期含量增加;Monaco(1967,1971)发现法国南部的 Roussillon 地区晚更新世到全新世沉积物中绿泥石和伊利石含量增加;Chamley(1967)报道地中海西北部伊利石结晶度变化和浮游生物对气候的指示一致;Parry 和 Reeves(1968)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<sup>[1]</sup>。这些研究,拉开了利用黏土矿物重建古气候这一新的研究领域的序幕。大量研究表明,黏土矿物对古气候分析结果与其他分析方法获得的古气候信息吻合,又由于黏土矿物分布的广泛性和取样的简易性(存在于地表和近地表),使黏土矿物成为古气候研究的有效手段之一。

近年来,随着对全球变化研究的重视,以黏土矿物为手段来恢复古气候的方法受到世界各国许多学者的关注和采纳,并将其运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,从寒武纪到第四纪如此广泛时空分布的气候重建研究。然而我国学者由于对黏土矿物研究起步较晚,利用黏土矿物重建古气候与目前国际研究现状相比还存在一定的差距。

1) 国家自然科学基金项目资助(40272022)

收稿日期:2003-11-26;修回日期:2004-02-18

由于黏土矿物颗粒极为细小( $d < 2 \mu\text{m}$ ),对周围环境的各种变化极为敏感,因此,利用黏土矿物重建古气候必定需要一套适合自身研究的分析、测试方法。笔者在参阅前人工作的基础上,总结了如何利用实验结果和数据去揭示蕴藏于黏土矿物中的古气候信息,以期能够使黏土矿物研究更好地用于古气候分析。

## 1 X 射线衍射分析

### 1.1 黏土矿物组合、含量对气候的指示作用

Singer<sup>[2,3]</sup>在研究了全球不同气候带各种沉积类型中的黏土矿物组合后指出,地表土壤、风化剖面 and 沉积物中的黏土矿物组合与气候条件及风化强度有密切的联系,在不同气候条件下,其组合类型不同,因而黏土矿物组合特征是解释古气候的主要指征。由于黏土矿物通常为粒径  $d < 2 \mu\text{m}$  的层状含水硅酸盐矿物,属于纳米级范围,因而只有用 X 射线衍射分析才能对黏土矿物成分作出快捷有效的鉴定<sup>[4]</sup>。

实验前需要从沉积岩中提取出  $d < 2 \mu\text{m}$  的黏土矿物,然后通过定向片(自然干燥片和乙二醇饱和片)对黏土矿物进行定性和定量分析。另外,需要特别指出的是自然界中黏土矿物以碎屑矿物和自生矿物 2 种形式存在,前者用于解释源区气候变化,后者则反映沉积区的气候变化。由于碎屑黏土矿物粒径往往大于自生黏土矿物粒径,因此这 2 种成因的黏土矿物可以应用物理离心分离方法分开。但是这种分离并不是绝对的,当无法物理分离时可以应用 Decoform 软件<sup>[5]</sup>对 XRD 衍射峰进行拟合与分解从而将其分开,并可计算出碎屑、自生黏土矿物的含量,此外也可通过后述的透射电镜分析进行成因鉴别。

黏土矿物的形成及演变携带着丰富的气候变化信息。一般认为,气候温暖潮湿有利于高岭石的形成。此后如果气候转变为干燥,高岭石形成的气候信息特征将很可能被保存下来<sup>[1,3,6-8]</sup>。例如,当地层中以高岭石为主、含伊利石和绿泥石时,反映出当时气候变冷的环境<sup>[9]</sup>,而碎屑高岭石多指示邻区的多雨热带气候环境<sup>[10,11]</sup>。

蒙脱石易形成于干湿交替的气候环境<sup>[12]</sup>,它的存在是寒冷气候特征的反映。Ehrmann 在研究南极洲古气候时发现,含量最高、结晶度最好的蒙脱石存在于南极洲上始新统<sup>[13]</sup>,指示寒冷的气候。Jimenez-Espinosa 等也指出与赤铁矿共生的蒙脱石指示半干旱气候<sup>[14]</sup>。

伊利石形成于温暖或寒冷少雨的气候条件下,当其晶格混层中  $\text{K}^+$  不断淋失,可向蒙脱石演化。如果气候变得湿热,化学风化彻底,碱金属(主要是  $\text{K}^+$ )被带走,伊利石将进一步分解形成高岭石。因此,气候干燥、淋滤作用弱对伊利石的形成和保存有利<sup>[15]</sup>。

绿泥石一般只能在化学风化作用受抑制的地区(如冰川或干旱的地表)幸存下来<sup>[16,17]</sup>。因此认为,绿泥石和伊利石含量增加一般代表逐渐变为干旱的气候条件<sup>[18-20]</sup>。

不规则混层矿物在季节性温暖气候环境的水源区形成<sup>[17,21]</sup>。例如,干旱气候条件下形成的蛭石和蒙脱石,在温暖湿润的气候时段转化成高-蒙混层矿物<sup>[22,23]</sup>;而蒙脱石-绿泥石、伊利石-蒙脱石混层矿物代表气候逐渐转为潮湿的环境<sup>[24]</sup>。

其他的黏土矿物,如蛭石在干湿交替气候下形成<sup>[25]</sup>,蛭石向有序伊利石-蒙脱石的转变代表潮湿和干燥的气候循环<sup>[26]</sup>。另外,纤维状的坡缕石、海泡石形成于干旱、半干旱的气候条件下<sup>[2,27,28]</sup>。

在纵向分布的地层中,单一黏土矿物很少出现,一般为几种黏土矿物的组合,并常含有混

层矿物。因此,应用 X 射线衍射方法获得黏土矿物的成分、组合和含量的综合信息,是黏土矿物重建古气候的最基础也是最重要的实验手段。然而,由于气候与黏土矿物之间的一些非气候因素的影响(如地形、地貌、时间),使其关系变得错综复杂,因此还需要结合其他实验手段综合考虑黏土矿物所反映的气候信息。

## 1.2 伊利石结晶度对气候的指示作用

Kübler<sup>[29]</sup>曾定义结晶度为结晶物质晶格内的“有序”程度。黏土矿物的这种有序性-无序性的变化是与其形成时的地质条件、气候环境条件直接相关的。因此,伊利石的结晶程度十分有助于解释其形成时的气候条件<sup>[3]</sup>。当母岩风化时,外界条件如气温、湿度等发生了改变,风化带的 pH 值也随之改变。如果有有机酸和降雨量都略有增加,便有利于伊利石晶层间  $K^+$  的淋溶,当  $K^+$  脱离越多,则结晶度也越差。所以结晶度的大小与降雨量有关,也说明了母岩受风化强烈的程度。因此,伊利石结晶度是气候变化的灵敏反映指标。

伊利石结晶度指数的表示方法较多,其中常用的有 Wearver 指数、Kübler 指数、Hw 指数以及  $N_s$  指数等<sup>[30]</sup>。王河锦等<sup>[31]</sup>详细讨论了伊利石结晶度诸指数的理论基础、使用前提和条件、特点及误差源,另外 Wang 等<sup>[32]</sup>从理论上解决了伊利石结晶度(IC) Kübler、Weaver 和 Weber 3 个重要指数间长达 30 多年未解决的定量关系,并提出公式将其他伊利石结晶度指数换算成统一的 Kübler 指数。Kübler 指数实际上是用衍射峰的半高宽代表晶体大小而表达伊利石的结晶度<sup>[33]</sup>。在伊利石结晶度测量中必不可少的步骤是固定制样程序、选定最优实验条件以及使用国际标样标定系数偏差,否则将引起伊利石结晶度值因条件的变化而不同或是无法与他人数据进行对比<sup>[34]</sup>。

刘东生等<sup>[35]</sup>在研究黄土时由伊利石结晶度的变化看出:古土壤形成与黄土堆积时的气候条件差异明显,古土壤形成于降水较多相对湿润的条件之下,而黄土则形成在气候比较干燥的时期。这和 Chamley 研究地中海海相沉积中伊利石结晶度变化趋势<sup>[1]</sup>一致,即伊利石结晶度高,反映了干燥寒冷的气候,结晶度差则反映了温暖潮湿的气候。

## 2 化学成分分析

由于黏土矿物各有其特征的化学组成,能在一定程度上反映其形成条件或环境,因此,对黏土矿物化学成分的分析能够提供古气候重建的佐证资料,例如,提供黏土矿物的成因资料,提供陆源物质沉积区来源资料等。进行黏土矿物化学成分分析的方法很多,主要有全岩分析<sup>[36]</sup>、X 射线荧光分析<sup>[37]</sup>、X 射线能谱分析<sup>[38]</sup>、X 射线衍射分析<sup>[4]</sup>等。其中全岩分析和 X 射线荧光分析可以达到对矿物化学成分的定量分析,X 射线能谱分析达到半定量程度,而 X 射线衍射分析只能对矿物化学成分作出定性解释。上述实验所需样品必须为提取的黏土矿物,而不能是原岩样品。

大多数学者在示踪环境条件时都是运用黏土矿物氧化物比率进行的。例如,用  $w(Fe_2O_3)/w(FeO)$  比值反映氧化还原环境的变迁:气温越高,氧化作用越强,该比值越大,反之,该比值越小; $w(SiO_2)/w(Al_2O_3)$  比值能反映某些矿物的含量关系、气候条件和风化条件,该比值越小,表明环境越暖湿,反之环境趋于干冷; $w(SiO_2)/(w(Al_2O_3) + w(Fe_2O_3))$  是衡量地层遭受风化作用强度的代用指标,其值越小,指示遭受风化程度越强,反之,风化程度越弱<sup>[39]</sup>。

刘东生<sup>[35]</sup>也认为黏粒化学分析的结果能很好的指示环境意义。从黏粒化学全分析的结果中,以  $w(\text{SiO}_2) - w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  的关系图代表样品形成时的湿度状况,用  $w(\text{SiO}_2) - w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$  的关系图代表化学风化的强度,以  $w(\text{SiO}_2) - w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$  的关系图代表淋滤作用的强度,从而清楚地显示出黄土与古土壤形成环境的不同。

徐昶<sup>[40]</sup>根据盐湖中主要黏土矿物及其化学组成,以及盐湖形成演化的一般趋势,利用不含碳酸盐的  $d < 2 \mu\text{m}$  黏土中的  $w(\text{Al}_2\text{O}_3) / w(\text{MgO})$  比值来反应沉积过程中某些环境变化。研究发现,该比值越大,越代表相对温湿、淋滤作用稍强、弱碱性的环境;而该比值越小,越代表相对干冷、淋滤作用较差的弱碱性-碱性环境。

黏土矿物中硼元素的含量对古气候也存在指示作用。大量资料研究表明:硼主要富集于沉积岩中,特别是黏土质岩石或黏土质沉积物中,而且硼还主要以吸附状态赋存于伊利石黏土矿物中<sup>[41]</sup>。从很多资料分析来看,硼含量大于  $100 \mu\text{g/g}$ ,多属海相环境,而含硼量低于  $40 \mu\text{g/g}$ ,则属陆相的可能性最大,含硼量在  $40 \sim 100 \mu\text{g/g}$ ,则海相或陆相都有可能。对于应用硼含量来判别古温度的问题,等(1976)曾指出:“干燥气候条件下形成的地层中硼含量可能高一些”。蒸发岩含硼量高也说明了与温度的关系<sup>[42]</sup>。

另外,伊利石的化学成分可由  $5 \text{ \AA}$ 、 $10 \text{ \AA}$  的 X 射线衍射峰的面积比来估算<sup>[43]</sup>。当比率  $< 0.5$  时,表示富 Fe、Mg 伊利石(黑云母、云母),代表以物理侵蚀为特征、未受风化的岩石;比率  $> 0.5$  时,表示富 Al 伊利石,它由水解作用形成。Gingele 等利用该方法用伊利石的化学特征来示踪沉积物流入扎伊尔河并估算淡水排除量的不规则变化<sup>[44]</sup>。

### 3 电镜分析

电镜分析(包括扫描电镜(SEM)<sup>[38]</sup>和透射电镜(TEM)<sup>[45]</sup>)可以根据黏土矿物的形态特征得到其成因证据、来源证据(如自生黏土还是碎屑来源的黏土),或是从黏土矿物的高分辨晶格像中发现其相互间的演变过程。因此,电镜分析同样是黏土矿物用以重建古气候的重要分析方法之一。

陈丽华等总结了扫描电镜下不同黏土矿物及其不同成因条件下所形成的形态特征,并从形貌上对各种黏土矿物进行初步的区别<sup>[46]</sup>。例如弯曲薄片状黏土矿物可能为伊利石或者蒙脱石,而薄六角板状、叶片状黏土矿物可能为绿泥石;风化和沉积作用下形成的黏土矿物结晶度不高、晶形不好,而热液作用下形成的黏土矿物结晶度高、晶形完好。

Chamley 指出墨西哥东部海湾黏土矿物的 TEM 照片揭示了其成因特征<sup>[1]</sup>。(1) 单纯呈长、密、重叠的束状坡缕石为自生成因,形成于本地浅水域的碱性蒸发环境;(2) 丰富的似羊毛状蒙脱石来自构造稳定期中的土壤碎屑矿物;(3) 大量存在的伊利石、高岭石表明源区的构造稳定。

Chahi 运用 TEM 揭示了 2 种含镁黏土矿物——富镁皂石和海泡石转变时,二者之间结构的继承和改变。TEM 可以观察到转变的步骤,从富镁皂石最初的重叠层到层间出现纤维,到最后海泡石完全代替富镁皂石<sup>[47]</sup>。这些结构转变说明,摩洛哥 Jbel Rhassoul 第三纪湖相沉积是在干燥期。湖水富硅,pH 值降低,不利于富镁皂石的存在,从而转变为海泡石。而随后长期的湿润气候将导致纯的富镁皂石的存在,而不形成海泡石。

Vicente 对伊比利亚海西期岩体古风化作用形成的黏土矿物组合进行研究时,主要应用

TEM 来揭示矿物之间的转换、新生黏土矿物的形态等。他拍摄的高分辨晶格像显示出云母转变成膨胀层矿物的过程<sup>[48]</sup>,从而提供了含膨胀层黏土矿物为自生成因的证据。

在分析研究中,SEM 制样简单,但仅可获得黏土矿物的形貌像,因此只可作为重建古气候的辅助资料。用于 TEM 分析的黏土矿物样品可以是原岩减薄样也可以是提纯黏土的铜网样,虽然制样复杂,但是如果能够得到高分辨透射电镜像将会对矿物成因和转变提供详实的证据。

## 4 稳定同位素分析

Singer (1979)<sup>[2]</sup>就提出,黏土矿物的同位素研究<sup>[49-51]</sup>是解释古气候最具前景的方法。他指出,一定剖面中的黏土矿物其  $w(D)/w(H)$ 、 $w(^{18}O)/w(^{16}O)$  在整个剖面中都是不变的,这些矿物的同位素比率一旦形成,即使与大气降水接触也不发生改变<sup>[2]</sup>。这就意味着对一个剖面中单个样品进行同位素分析便可揭示剖面的沉积特征。因此,新生成的或转变的黏土矿物包含了大气水,这些矿物的同位素成分将和大气水中的同位素成分达到均衡,在一定环境下,可作为古气候作用的指示剂。研究发现,形成于湿润时期的黏土矿物比干旱气候的黏土矿物亏损更多的重同位素<sup>[2]</sup>。

Elliott 等利用成壤高岭石的氧同位素比率估算美国 Piedmont 省残余土形成时的古气候条件。 $w(^{18}O)/w(^{16}O)$  比率显示绝大多数高岭石形成于较冷的气候阶段,该阶段大气水中的  $w(^{18}O)$  比现在的亏损。由此推断,成壤高岭石可能形成于北美更新世冰期之后不久或是在此期间<sup>[52]</sup>。

Stern 等研究了巴基斯坦北部 Potwar 平原喜马拉雅 Siwalik 阶磨砾层中古土壤地层系列中蒙脱石和高岭石的氧同位素比率。蒙脱石  $^{18}O$  值增长 3%~4% 与同时期 (8.5~6.5 Ma) 方解石  $^{18}O$  的增长值 (3.5%) 相似。成壤作用的高岭石的  $^{18}O$  值与蒙脱石的相近。这些氧同位素增长值表明其不是由于成岩作用而是气候的改变 (变干) 所致<sup>[53]</sup>。

智利南部中心地带表生高岭石的  $^{18}O$  和 D 值表明其风化形成时期的平均气温 (12 左右) 比现在高 (9.4 左右)<sup>[54]</sup>。

用于稳定同位素分析的黏土矿物必须是自生矿物,并且没有发生后期埋藏成岩转变,否则实验结果将不能反映沉积区的古气候特征,所以在开展同位素分析前的矿物成因鉴定至关重要。

## 5 放射性同位素分析

运用放射性同位素<sup>[50,51]</sup>测定剖面的地质年代,建立地层与黏土矿物组合、稳定同位素比值所重建的古气候变化规律相对应的年代关系,即将纵向发展的年龄与横向变化的气候建立起相互联系,以便说明气候演化的趋势,从而进行年代学和气候指标定量尺度的研究<sup>[1,55,56]</sup>。近年来对沉积岩中黏土矿物年龄测定除全岩和海绿石外,还扩展到沉积岩中常见的黏土矿物,如伊利石、高岭石、蒙脱石、绿泥石等,年龄测定有 Rb-Sr 法、 $K^{40}Ar$  法、 $^{39}Ar^{40}Ar$  法等。

从黏土矿物粒级分选所测年龄发现,从  $d < 0.2$ 、 $0.2 \sim 1$  到  $1 \sim 2 \mu m$  粒级,所测 K-Ar 年龄逐渐变老。其中,  $1 \sim 2 \mu m$  粒级黏土矿物所测年龄将比地层年龄老得多。另外,从碎屑黏土中所测得的 K-Ar 年龄比地层实际年龄偏老<sup>[1,57]</sup>。

可见,利用黏土矿物测定地层年龄时,首先应该富集提纯黏土矿物,避免碎屑矿物特别是

长石对样品测年的影响。另外,通过矿物学成因方面的研究选取自生黏土矿物才能得到所测地层的真实年龄(新形成的、改造和重结晶的黏土矿物都可以用来测定沉积岩年龄)。而尽量提取粒度小的黏土矿物也是准确测年的关键。

## 6 结束语

在利用黏土矿物重建古气候的研究中,X射线衍射分析主要用来确定黏土矿物组合及其含量以及某些黏土矿物的结晶度。化学分析、电镜分析主要是用于黏土矿物的来源、成因、演变过程的研究。放射性同位素的研究使气候指标和年代学建立起时间和空间上的联系。另外,氢氧同位素分析以及微量元素地球化学分析亦能对古气候重建提供重要佐证。目前,我国的古气候学家和黏土学家将黏土矿物用于对古气候重建的研究仍然较少,由于黏土矿物在组合、成分、结构等方面的变化反映了物源区气候冷、暖周期性变化,记录了沉积区域古气候演化的重要信息,因此,黏土矿物也是重建古气候的有效研究手段之一,相信随着黏土学科的不断发展,将黏土矿物用于重建古气候必将受到国内外越来越多学者的重视。

## 参 考 文 献

- 1 Chamley H. Clay Sedimentology. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1989
- 2 Singer A. The Paleoclimatic Interpretation of Clay Minerals in Soil and Weathering—A Review. *Earth Sci Rev*, 1979, 15: 303-326
- 3 Singer A. The Paleoclimatic Interpretation of Clay Minerals in Sediment—A Review. *Earth Sci Rev*, 1984, 21: 251-293
- 4 Moore D M, Robert C R. X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. New York: Oxford University, 1989
- 5 Wang Hejing, Lu Anhuai, Chen Tao. A New Method for Clay Mineral Analysis and Its Application in Geology. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76(4): 429-436
- 6 Singer A, Stoffers P. Clay-mineral Diagenesis in Two East African Lake Sediment. *Clay Miner*, 1980, 15: 291-307
- 7 蓝先洪. 黏土矿物作为古气候指标矿物的探讨. *地质科技情报*, 1990, 9(4): 31—35
- 8 汤艳杰, 贾建业, 谢先德. 黏土矿物的环境意义. *地学前缘*, 2002, 9(2): 337—344
- 9 Cruz M. Clay Mineral Assemblages in Flysch from the Campo de Gibraltar Area (Spain). *Clay Miner*, 1999, 34(2): 345-364
- 10 Murru M, Errera C, Da Pelo S, et al. The Palaeocene—Middle Eocene Deposits of Sardinia (Italy) and Their Palaeoclimatic Significance. *CR Geosci*, 2003, 335(2): 227-238
- 11 Temgoua E, Feifer H, Bitom D, et al. Trace Element Differentiation in Ferruginous Accumulation Soil Patterns under Tropical Rainforest of Southern Cameroon, the Role of Climatic Change. *Sci Total Environ*, 2003, 303(3): 203-214
- 12 Keller W D. Environmental Aspects of Clay Minerals. *J Sediment Petrol*, 1970, 40: 788-859
- 13 Ehrmann W. Implications of Late Eocene to Early Miocene Clay Mineral Assemblages in McMurdo Sound (Ross Sea, Antarctica) on Paleoclimate and Ice Dynamics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1998, 139(3-4): 213-231
- 14 Jimenez-Espinosa R, Jimenez-Millan J. Calcrite Development in Mediterranean Colluvial Carbonate Systems from SE Spain. *J Arid Environ*, 2003, 53(4): 479-489
- 15 Meunier A. Les Mécanismes de L'altération des Granites et le Role des Microsystemes. Etude des Arenas du Massif Granitique de Parthenay(Deux-Sevres). *Mém Soc Geol Fr*, 1980

- 16 Quigley R M, Martin R T. Chloritized Weathering Products of a New England Glacial Till. *Clays Clay Miner*, 1963, 10: 107-116
- 17 Ducloux J, Meunier A, Velde B. Smectite, Chlorite and a Regular Interlayered Chlorite-Vermiculite in Soils Developed on a Small Serpentinite Body, Massif Central, France. *Clay Miner*, 1976, 11: 121-135
- 18 Vanderaverot P. Miocene to Pleistocene Clay Mineral Sedimentation on the New Jersey Shelf. *Oceanol Acta*, 2000, 23 (1): 25-36
- 19 Gingele F X, De Deckker P, Hillenbrand C D. Late Quaternary Fluctuations of the Leeuwin Current and Palaeoclimates on the Adjacent Land Masses: Clay Mineral Evidence. *Aust J Earth Sci*, 2001, 48 (6): 867-874
- 20 Winkler A, Wolf-Welling T C W, Statterger K. Clay Mineral Sedimentation in High Northern Latitude Deep Sea Basins since the Middle Miocene (ODP Leg 151, NAAG). *Int J Earth Sci*, 2002, 91 (1): 133-148
- 21 Srodon J, Eberl D. Illite. In: Bailey S W, Ed. *Micas. Rev Miner Soc Am Short Course Notes*, 1984, 13: 495-544
- 22 Srivastava P, Parkash B, Pal D K. Clay Minerals in Soils as Evidence of Holocene Climatic Change, Central Indo Gangetic Plains, North-central India. *Quaternary Res*, 1998, 50 (3): 230-239
- 23 Grimley D A, Follmer L R, Hughes R E, et al. Modern, Sangamon and Yarmouth Soil Development in Loess of Unglaciated Southwestern Illinois. *Quaternary Sci Rev*, 2003, 22 (2-4): 225-244
- 24 Jain M, andon S K. Quaternary Alluvial Stratigraphy and Palaeoclimatic Reconstruction at the Thar Margin. *Curr Sci India*, 2003, 84 (8): 1 048-1 055
- 25 Jeong G Y, Bin Kim H. Mineralogy, Chemistry, and Formation of Oxidized Biotite in the Weathering Profile of Granitic Rocks. *Am Mineral*, 2003, 88 (2-3): 352-364
- 26 Taylor K G. Pedogenic Clay-mineral Transformation in the Weald Basin: Implications for Early Cretaceous hinterland Climate Reconstructions. *Cretaceous Res*, 1996, 17 (1): 103-108
- 27 Tateo F, Sabbadini R, Morandi N. Palygorskite and Sepiolite Occurrence in Pliocene Lake Deposits Along the River Nile: Evidence of an Arid Climate. *J Afr Earth Sci*, 2000, 31 (3-4): 633-645
- 28 Khadkikar A S, Chamyal L S, Ramesh R. The Character and Genesis of Calcrete in Late Quaternary Alluvial Deposits, Gujarat, Western India, and Its Bearing on the Interpretation of Ancient Climates. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, 162 (3-4): 239-261
- 29 Kübler B. La Crosta; Omote de Illite et les Zone Tout a Fait Superieures du Metamorphism. In: *Etages Tectoniques. Colloque de Neuchatel*, 1967. 105-122
- 30 杨献忠. 伊利石的结晶度及其地质意义综述. *沉积学报*, 1993, 11 (4): 92-97
- 31 王河锦, 周健. 关于伊利石结晶度诸指数的评价. *岩石学报*, 1998, 14 (3): 395-406
- 32 Wang H J, Zhou J. The Relationships between the Kübler Index, Weaver Index and Weber Index of Illite Crystallinity and Their Applications. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 2000, 80: 187-198
- 33 王河锦. 关于伊利石结晶度 Kübler 指数的误差计算. *地质论评*, 1998, 44 (3): 328-335
- 34 王河锦, 朱明新, 徐庆生, 等. 狭缝系统与伊利石结晶度 Kübler 指数的测定及相关问题讨论. *地质论评*, 2000, 46 (6): 588-593
- 35 刘东生. *黄土与环境*. 北京: 科学出版社, 1985. 219-237
- 36 伊丽莹. *矿物分析化学*. 北京: 科学出版社, 1994
- 37 , , H 著. 宋吉人, 周国清译. *岩石矿物的 X 射线荧光光谱分析*. 北京: 地质出版社, 1980
- 38 戈尔茨坦著. 张大同译. *扫描电子显微技术与 X 射线显微分析*. 北京: 科学出版社, 1988
- 39 张强, 朱诚, 宋友桂. 江苏金坛三星村地区 7 000 年来古环境演变初探. *山东师范大学学报(自然科学版)*, 2000, 15 (3): 279-284
- 40 徐昶. *中国盐湖粘土矿物研究*. 北京: 科学出版社, 1993. 169-175
- 41 龙天才. 关于应用硼判别沉积环境的有效性问题. 见: *中国地质学会第四纪冰川与第四纪地质专业委员会等编. 第四纪冰川与第四纪地质论文集(第 5 集)*. 北京: 地质出版社, 1988

- 42 阿·阿·奥佐尔著. 沉积和火山沉积硼矿. 秦国兴, 刘吉成译. 北京:地质出版社, 1987
- 43 Esquevin J. Influence de la Composition Chimique des Illites sui Cristallinite. Bull Cent Rech Pau SNPA, 1969, 3(1): 147-153
- 44 Gingele F X, Muller P M, Schneider R R. Orbital Forcing of Freshwater Input in the Zaire Fan Area: Clay Mineral Evidence From the Last 200 kyr. Palaeogeogr, Paleoclimatol, 1998, 138(1-4): 17-26
- 45 进藤大辅, 平贺贤二著. 刘安生译. 材料评价的高分辨电子显微方法. 北京:冶金工业出版社, 1998
- 46 陈丽华. 扫描电镜在地质上的应用. 北京:科学出版社, 1986
- 47 Chahi A, Fritz B, Duplay J. Textural Transition and Genetic Relationship between Precursor Stevensite and Sepiolite in Lacustrine Sediments (Jbel Rhassoul, Morocco). Clays Clay Miner, 1997, 45 (3): 378-389
- 48 Vicente M A, Elsass F, Molina E, et al. Palaeoweathering in Slates from the Iberian Hercynian Massif (Spain): Investigation by TEM of Clay Mineral Signatures. Clay Miner, 1997, 32 (3): 435-451
- 49 郑淑蕙, 郑斯成, 莫志超. 稳定同位素地球化学分析. 北京:北京大学出版社, 1986
- 50 赵杏媛, 张有瑜. 粘土矿物和粘土矿物分析. 北京:海洋出版社, 1990
- 51 魏菊英, 王关玉. 同位素地球化学. 北京:地质出版社, 1988
- 52 Elliott W C, Savin S M, Dong H L. A Paleoclimate Interpretation Derived from Pedogenic Clay Minerals from the Piedmont Province, Virginia. Chemical Geology, 1997, 142 (3-4): 201-211
- 53 Stern L A, Chamberlain C P, Reynolds R C. Oxygen Isotope Evidence of Climate Change from Pedogenic Clay Minerals in the Himalayan Molasse. Geochim Cosmochim Acta, 1997, 61(4): 731-744
- 54 Gilg H A, Hulmeyer S, Miller H. Supergene Origin of the Llastarria Kaolin Deposit, South Central Chile, and Paleoclimatic Implications. Clays Clay Miner, 1999, 47 (2): 201-211
- 55 Pandarinath K, Prasad S, Gupta S K. A 75 ka Record of Palaeoclimatic Changes Inferred from Crystallinity of Illite from Nal Sarovar, Western India. J Geol Soc India, 1999, 54(5): 515-522
- 56 Migon P, Lidmar-Bergstrom K. Deep Weathering through Time in Central and Northwestern Europe: Problems of Dating and Interpretation of Geological Record. Catena, 2002, 49 (1-2): 25-40
- 57 Jeans C V, Mitchell J G, Fisher M J. Age, Origin and Climatic Signal of English Mesozoic Clay Based on  $^{40}\text{Ar}$  Signatures. Clay Miner, 2001, 36: 515-539

## An Approach to Paleoclimate Reconstruction by Clay Minerals

CHEN Tao WANG Hejin ZHANG Zuqing WANG Huan

(School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871)

**Abstract** Clay minerals are widely applied in reconstructing paleoclimate, and many analysis methods are involved. Among them the X-ray diffraction analysis (XRD) is mainly used to confirm clay mineral assemblages and their crystallinity; chemical analysis and electronic microscope are used to study the source, the genesis and the evolution process of clay minerals; radioactive isotopes analysis can make up the relationship between the time and space which is based on the climate index and the chronology; Hydrogen and oxygen isotopes also provide important evidence for reconstructing paleoclimate. This paper summarizes what paleoclimate information is contained in clay minerals, and it is intent to use clay minerals synthetically as the means to reconstruct paleoclimate.

**Key words** Clay minerals; paleoclimate; XRD; chemical analysis; electron microscopy; isotopes