

天津蓟县长城系串岭沟组混层粘土矿物

陈涛^{1,2}, 王河锦²

1. 中国地质大学珠宝学院, 湖北武汉 430074

2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

摘要: 为了解天津蓟县长城系串岭沟组地层中混层粘土矿物的组成和结构特征, 利用 X 射线粉晶衍射(XRD)和高分辨透射电镜(HRTEM)对其进行深入研究. 通过对比该区粘土矿物的自然干燥片、Ca 离子饱和片、Ca 饱和的乙二醇膨胀片、加热到 375 °C 和 550 °C 的乙二醇膨胀片获取的 XRD 衍射峰, 确定该区混层粘土矿物为伊利石/蒙脱石(I/S)不规则混层矿物和绿泥石/蒙脱石(Chl/S)不规则混层矿物. 从高分辨透射电镜观察到 I/S 规则及不规则混层的晶格条纹像以及 Chl/S 不规则混层的晶格条纹像, 揭示了该区 I/S 混层和 Chl/S 混层的层间堆垛结构特征. 该研究为蓟县中元古界典型剖面提供了重要的混层粘土矿物的结构信息.

关键词: 蓟县; I/S 混层; Chl/S 混层; XRD 衍射峰; 晶格条纹像.

中图分类号: P57

文章编号: 1000—2383(2008)05—0716—07

收稿日期: 2008—03—05

Mix-layer Clay Minerals from Chuanlinggou Formation of Changcheng System in Jixian County, Tianjin City

CHEN Tao^{1,2}, WANG He-jin²

1. Gemmological Institute, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: In order to realize the character of composition and structure of mix-layer clay minerals from Chuanlinggou Formation of Changcheng System in Jixian County, Tianjin City, X-ray powder diffraction (XRD) and high-resolution transmission electron microscope (HRTEM) are used to study the minerals. By contrasting air-dried oriented aggregate sample, Ca cation saturation sample, Ca saturated glycerol salvation sample and heated 375 °C and 550 °C of glycerol salvation samples, it is confirmed that the mix-layer clay minerals from this area is illite/smectite (I/S) order and disorder mix-layer clay minerals and chlorite/smectite (Chl/S) disorder mix-layer clay minerals. The obtained lattice images from high-resolution transmission electron microscope of I/S order and disorder mix-layer minerals and Chl/S disorder mix-layer minerals show the structure character of layer stacking of I/S and Chl/S from this area. This study provides some important structure information of mix-layer clay minerals for the well-known Mesoproterozoic section of Jixian County.

Key words: Jixian County; I/S mix-layer clay mineral; Chl/S mix-layer clay mineral; XRD diffraction patterns; lattice finger images.

粘土矿物属于层状硅酸盐矿物, 常形成混层, 一般发生在具有相同类型八面体层的粘土矿物之间. 它们是由两种或两种以上的粘土矿物沿底面{001}形成连生而构成. 我们知道, 粘土矿物的 X 射线衍射峰具有很多特征, 主要表现在衍射峰的位置、强

度、峰形和宽度上(Wang and Zhou, 2000). 当粘土矿物的 XRD 衍射峰出现不对称和宽化现象时, 通常反映出该矿物组成中含有多于一种的不规则混层矿物(Lee and Peacor, 1983). 在混层矿物定向片处理前后(如乙二醇膨胀、加热等实验), X 射线衍射峰

的峰宽、对称性、峰的位置和强度的变化都将具有重要的鉴定意义。然而,从近年来国际上对层状硅酸盐及粘土矿物的研究中可以发现,高分辨透射电镜(HRTEM)是直接观察、有效识别、深入研究层状硅酸盐微结构的最有效手段(Buseck and Iijima, 1974; Lee and Peacor, 1983; Ahn and Buseck, 1990; Kogure and Murakami, 1996; Murakami *et al.*, 1999; Kogure and Banfield, 2000). Kogure (2002)曾指出平行层状硅酸盐单元层入射获得的高分辨电子显微像能够直观确定各独立结构层的堆垛特征。

因此,X射线粉末衍射(XRD)和高分辨透射电镜(HRTEM)是研究粘土矿物特别是混层粘土矿物的最佳手段。XRD从宏观上探测众多粘土颗粒的平均结构信息,而HRTEM从微观上研究某个粘土矿物颗粒的具体结构特征(Lee and Peacor, 1983)。这两种方法相辅相成,共同揭示混层粘土矿物的结构特征。

我国学者对混层粘土矿物展开了多种研究(蔡秀成等, 1992; 陆琦等, 1993a, b; 杨献忠和叶念军, 2003; 洪汉烈等, 2005; 师育新等, 2005; 张彦等, 2006), 然而利用高分辨透射电镜对混层粘土矿物的研究却十分薄弱。仅张立飞等(1992)及王启明和张立飞(1992)曾获得过陕北三叠系泥岩中伊利石/绿泥石混层的晶格条纹像,从而对其混层结构进行了研究。

本文所研究区域——蓟县位于燕辽沉降带中心部位,属于中朝地层区内的华北地层分区,在其北部发育有举世闻名的中新元古界地层剖面。我国的地质学家对该区的地层学、岩石学、古生物学都进行了较详尽的研究,该区的粘土矿物学尤其是伊利石矿物的研究也已经展开。Chen *et al.* (2005)对该区伊利石进行透射电镜研究时,从选区电子衍射的图谱中发现了具有 26° 非结晶学旋转角度的伊利石近双晶晶体。王欢等(2005)运用XRD方法研究发现该区伊利石为二维纳米级矿物,证明了该区伊利石经历了Ostwald成熟效应。Chen and Wang (2007a)利用高分辨电子显微像研究了该区伊利石的堆垛层结构,确定了 $[100]$ 和 $[110]$ 两组入射方向不是等同方向,并在国际上首次报道了 $1M$ 和 $2M_1$ 型伊利石多型的高分辨近原子结构像,对以数层结构单元层共生的伊利石多型微结构进行了较深入研究(Chen and Wang, 2007b)。但是该区混层粘土矿物的研究还很缺乏。笔者在对该区的粘土矿物进行系统研究

时,发现其以伊利石为主的粘土矿物组成中存在少量的伊利石/蒙脱石和绿泥石/蒙脱石混层粘土矿物。这两种混层矿物广泛分布于沉积岩中,然而目前对它们是如何混层甚至是如何共生均不太清楚(Ahn and Buseck, 1990; Murakami *et al.*, 1999)。本文将利用XRD和HRTEM为研究手段,揭示该区混层粘土矿物的混层特征。

1 样品与实验

样品采自天津蓟县东北部团山子一串岭沟一带(东经 $117^\circ28.865'$,北纬 $40^\circ10.881'$,海拔310 m)。由于样品中不含有机质,经粉碎后取适量样品放入去离子水中充分分散,然后根据Stokes'沉降法则,富集得到 $<2\ \mu\text{m}$ 的粘土矿物。

在XRD测试中,通过自然干燥定向片、离子饱和、膨胀和加热等实验确定粘土中的混层结构。首先将富集的粘土矿物进行离子饱和处理,放入 CaCl_2 饱和溶液中浸泡数小时后,用去离子水清洗,制成定向片,进行XRD测试。再将样品放入加有乙二醇的玻璃器皿内,将其放入鼓风干燥器中,保持温度 $60\ ^\circ\text{C}$ 左右,恒温12 h;再将经膨胀处理过的定向样品玻璃片,放入X射线衍射仪,采用相同实验条件再次测试该样品的衍射图谱。然后将这些膨胀片加热,分别一次性加热到 $375\ ^\circ\text{C}$ 和 $550\ ^\circ\text{C}$,再进行XRD测试。将前后5次获得的X射线衍射图进行对比,鉴定粘土矿物中的混层结构。

XRD实验使用国产BD-86型普通X射线衍射仪。实验时测试电压为30 kV,电流为30 mA。对于各种定向薄片,使用 0.02° 扫描步长和 $1^\circ/\text{min}$ 的扫描速度进行测量,测量范围 2θ 介于 $4^\circ\sim37^\circ$ 之间。实验室温为 $20\ ^\circ\text{C}$,相对湿度为 $20\%\sim30\%$ 。

由于粘土矿物结构单元层垂直 c^* 轴堆垛,因此为了研究粘土矿物的堆垛层结构需要获得沿 $[hk0]$ 入射方向形成的高分辨电子显微像。试样采用离子减薄方法制备。先沿垂直岩石叶理的方向切割成薄片,再将其机械抛磨成 $0.05\ \text{mm}$ 以下的薄片,然后再将试样贴在铜环上利用氩离子减薄。

高分辨透射电镜(HRTEM)实验在H-9000NAR(简称H-9000)高分辨电子显微镜下进行,其点分辨率为 $0.18\ \text{nm}(C_s=0.9\ \text{mm})$,工作电压为300 kV,采用胶片拍照,曝光时间为5 s。所获得的高分辨电子显微像是在谢尔策欠焦附近拍摄。

2 结果与讨论

2.1 XRD 分析

混层粘土矿物的衍射峰与其任意端员组分的衍射峰都不相同,并且与一般粘土矿物的衍射峰存在两个显著区别:(1)所谓的(001)各级衍射峰不具有相同的峰宽;(2)各级(001)衍射峰的位置没有规律(Moore,1989). Chen and Wang (2007b)曾报道过研究区域的物相成分主要为自生伊利石、绿泥石和石英,但从该区粘土矿物的定向片中可以看出,蓟县粘土矿物中还有一定量混层粘土矿物存在,但其物相不能仅仅通过自然干燥定向片鉴定出来(其矿物组成如图 1 中 JX-7-A 所示). 还需分别通过 Ca 离子饱和,乙二醇膨胀、加热(375 ℃和 550 ℃)实验(图 1)对该样品中的混层粘土矿物做进一步鉴定. 其中混层粘土矿物的衍射峰位置变化及其对混层粘土矿物成分的判定如表 1 所示.

首先从该样品的自然干燥片(JX-7-A)中可见粘土矿物的各级(001)衍射峰有明显的左右不对称和底部宽化现象,因此该样品中必定存在混层粘土矿物. 在做膨胀和加热实验前,先将富集的粘土矿物进行 Ca 饱和,以固定粘土矿物的层间域. 可以看见 Ca 饱和后的自然干燥片(JX-7-Ca)与原自然干燥片(JX-7-A)中衍射峰位置发生了移动. 下面将主要对比 Ca 饱和自然干燥片在膨胀和加热实验中衍射峰发生的形态和位置的变化来鉴定其中的混层粘土矿物成分.

根据 Méring (1949) 定律,混层粘土矿物的(001)*衍射峰与任一端员粘土矿物衍射峰都不一样,它位于两个端员粘土矿物衍射峰之间(但是端员衍射峰是不会出现的),其(001)*衍射峰的形状和对称性由端员粘土矿物衍射峰之间的距离和端员粘土矿物的成分比例共同决定.

图 1 中的彩色竖线分别表示伊利石、绿泥石、蒙

表 1 具有混层粘土矿物判断意义的 XRD 衍射峰及其对应矿物

Table 1 Identification XRD diffraction peaks of mixed-layer clay minerals and their counterpart minerals

	<i>d</i> (Å)	Mineral	<i>d</i> (Å)	Mineral	<i>d</i> (Å)	Mineral	<i>d</i> (Å)	Mineral
A	14.5	Chl(Å)	10.2	I(Å)	7.1	Chl(Å)	3.5	Chl(Å)
Ca	14.4	Chl(Å)	10.2	I+I(001)/S(001)	7.3	Chl(Å)	3.6	Chl(Å)
Ca-EG	15.1	Chl(001)/ S(001)+Chl	10.1	I+I(001)/S(001)	7.5	Chl(002)/ S(002)+Chl	3.5	Chl(004)/ S(005)+Chl
375	13.5	Chl(001)/ S(001)+Chl	10.1	I	7.5	Chl(002)/ S(002)+Chl	3.5	Chl(004)/ S(005)+Chl
550	12.1	Chl(001)/S(001)	10.1	I	—	—	—	—

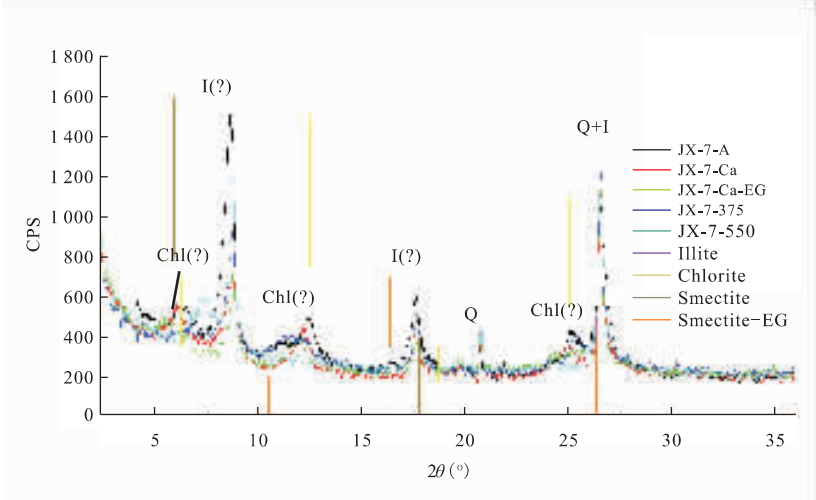


图 1 样品的各种 XRD 衍射图谱

Fig. 1 Different kinds of XRD pattern of the sample

Chl. chlorite, 绿泥石; S. smectite, 蒙脱石; I. illite, 伊利石; (?). 还不能确定粘土矿物组成; A. 自然干燥片; Ca. Ca 离子饱和片; Ca-EG. Ca 饱和的乙二醇膨胀片; 375. 加热到 375 ℃的乙二醇膨胀片; 550. 加热到 550 ℃的乙二醇膨胀片; Smectite-EG. 乙二醇膨胀蒙脱石

脱石(自然干燥和乙二醇膨胀片)的各级(001)衍射峰的位置。从Ca饱和自然干燥片(JX-7-Ca)和乙二醇膨胀片(JX-7-Ca-EG)的XRD衍射图谱可以发现伊利石(001)和(002)衍射峰有明显的衍射峰峰宽的变化。并且不对称的峰形偏向蒙脱石一侧,但峰的位置距伊利石的衍射峰偏离较少,加热到550℃后都变成了伊利石的衍射峰,因此样品中含有少量的伊利石/蒙脱石(I/S)不规则混层与相对含量较高的伊利石单矿物共生。

除掉石英和伊利石以及伊利石/蒙脱石混层衍射峰后还有3个位于 $5^{\circ}\sim 8^{\circ}2\theta$ 、 $10^{\circ}\sim 13^{\circ}2\theta$ 和 $24^{\circ}\sim 26^{\circ}2\theta$ 的衍射峰来自于其他粘土矿物。从乙二醇膨胀片(JX-7-Ca-EG)中可以看见,这3个峰相对原来的自然干燥片(JX-7-A)都发生了移动,说明混层中含有膨胀层矿物,膨胀后它们分别位于乙二醇膨胀蒙脱石和绿泥石衍射峰之间。虽然绿泥石/蛭石混层与绿泥石/蒙脱石混层自然干燥片的X射线衍射图谱很相似,但是它们的区别在于经过乙二醇或丙三醇处理后的膨胀程度不同,绿泥石/蛭石经乙二醇饱和后衍射峰位置保持不变(Moore, 1989; Walker, 1957)。而此处Ca离子浸泡后在室温和一定湿度下的自然干燥片中第一个衍射峰在 $14.5\text{ \AA}$ ($6.08^{\circ}2\theta$)处,经乙二醇处理后此衍射峰移动到 $15.1\text{ \AA}$ ($5.84^{\circ}2\theta$)处。因此可以初步判断该混层为绿泥石/蒙脱石(Chl/S)混层,其3个衍射峰分别为绿泥石和乙二醇膨胀蒙脱石的(001)/(001)、(002)/(002)和(004)/(005)衍射峰组成。在 $24^{\circ}\sim 26^{\circ}2\theta$ 处衍射峰变成了十分宽缓的小包,这是由于衍射仪测角很慢,到此角度时膨胀层中的乙二醇分子已经大量挥发出去,层间变得充填不均,从而衍射峰强度变小。

当加热到375℃时,层间部分坍塌,层间域减小,绿泥石/蒙脱石(Chl/S)的(001)/(001)衍射峰向高角度迁移。由于此温度下乙二醇分子没有全部失去,而且在层间重新调整了位置,因而 $24^{\circ}\sim 26^{\circ}2\theta$ 处Chl/S的(004)/(005)衍射峰反而变得明显。当加热到550℃时,层间全部坍塌。Chl/S的(001)/(001)衍射峰移动到 $7.28^{\circ}2\theta$ ($12.1\text{ \AA}$)处,其他两个衍射峰消失。从这个谱线可以确定它不是来自高岭石/蒙脱石(Kao/S)混层。从而进一步确定这几个衍射峰来自Chl/S混层。

另外,从乙二醇膨胀和加热片可以发现不存在绿泥石单相的衍射峰,因此绿泥石在该样品中含量极少。又由于Chl/S混层的各级衍射峰不是规则排

列,因此容易确定该Chl/S混层为不规则混层。所以样品中混层粘土矿物最终确定为I/S不规则混层和Chl/S不规则混层。

2.2 HRTEM 分析

确定了蓟县串岭沟组粘土矿物中确有混层粘土矿物后,利用HRTEM可以直接观察到I/S混层、Chl/S混层粘土矿物的堆垛形式和特征。

图2a展示了一颗具有伊利石(I)、蒙脱石(S)不规则混层的粘土矿物。从高分辨透射电镜获得的晶格条纹像可以清楚的测得每个单元层的厚度,从而判断出堆垛层的物相。在图2a中,可以看见该粘土颗粒的晶格条纹不等宽。在其右上部分可见以1.0 nm厚度堆垛的伊利石单元层,接着向下出现了几层1.3 nm厚度的蒙脱石层。在图2a中标出的蒙脱石层之间又存在两层1.0 nm的伊利石单元层。再往下是3层厚度为3.3 nm的由两层伊利石和一层蒙脱石组成的规则混层。接着又过渡到以1.0 nm堆垛的伊利石层。由于蒙脱石单元层厚度与其层间水的含量有密切关系,而蒙脱石层间水的含量又取决于所处环境的湿度和温度。当蒙脱石在高分辨透射电镜下由于电子辐照损伤的影响会使常态下成1.5 nm单元层厚度的蒙脱石失去不同数量的水分子而形成不同的单元层厚度(如1.4 nm或者1.3 nm)。当层间水全

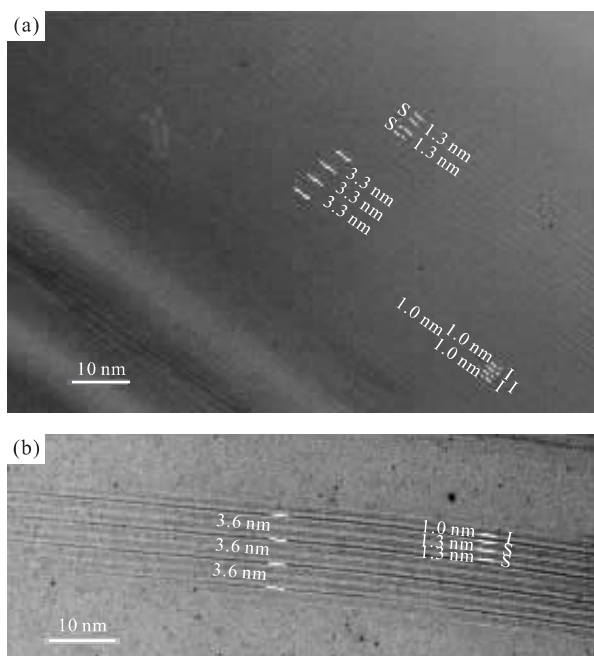


图2 I/S不规则(a)和不规则(b)混层粘土矿物的晶格像
Fig. 2 Lattice image of disorder I/S (a) and order I/S (b) mix-layer clay mineral



图 3 Chl/S 不规则混层粘土矿物的晶格像

Fig. 3 Lattice image of disorder Chl/S mix-layer clay miner

部失去,层间坍塌,最终形成具有 1.0 nm 单元层厚度的蒙脱石矿物。图 2a 中混层蒙脱石由于拍摄时高能电子辐照损伤而脱水,使层间域变小,形成具有 1.3 nm 厚度的蒙脱石层。

由 XRD 分析可知该样品中存在的 I/S 混层为不规则混层,图 2a 直接观察到了其不规则混层的特征。然而,XRD 获取的是样品中的平均结构信息(Chen and Wang, 2007a),这并不排除样品中偶尔存在规则堆垛的 I/S 混层颗粒。图 2b 为获得的一颗 I/S 规则混层粘土矿物颗粒的高分辨晶格像。该颗粒一共具有十几 nm 的厚度,由 3.6 nm 厚度的 I/S 混层堆垛形成。从对晶格像的进一步测量分析可见,该 I/S 混层是由一层 1.0 nm 的伊利石层和两层 1.3 nm 的蒙脱石层混层形成。

图 3 展示了绿泥石和蒙脱石相互混层形成的结构。绿泥石的单元层结构为 TOTB(T:四面体层,O:八面体层,B:水镁石层),因而其堆垛层的晶格像表现为粗细相间的条纹像,其中粗线条 1.4 nm 代表 TOT 层,细线条 1.0 nm 代表 B 层(Murakami *et al.*, 1999)。在所拍摄到的这颗 Chl/S 混层颗粒中,其上部为数十层以 1.4 nm 为单元层堆垛的绿泥石层,下部为十几层单元层厚度也为 1.4 nm 的蒙脱石

层。该蒙脱石层也由于电子辐照损伤失去了部分层间水,由原来的 1.5 nm 变为 1.4 nm 的单元层厚度。在透射电镜高能电子束的进一步辐射下,蒙脱石层间水逐渐脱掉,单元层厚度逐渐变小。从图 3 可以直接观察到,由于脱水作用蒙脱石层的晶格条纹像从 1.4 nm 逐渐变为 1.0 nm 的宽度。

3 结论

天津蓟县长城系串岭沟组地层中除主要含有的自生伊利石、绿泥石和石英外还含有少量的混层粘土矿物。通过对该区粘土矿物的自然干燥片、Ca 离子饱和片、Ca 饱和的乙二醇膨胀片、加热到 375 °C 的乙二醇膨胀片以及加热到 550 °C 的乙二醇膨胀片的 XRD 衍射峰的对比研究,确定该区混层粘土矿物为伊利石/蒙脱石(I/S)不规则混层矿物和绿泥石/蒙脱石(Chl/S)不规则混层矿物。

从高分辨透射电镜获取的 I/S 混层和 Chl/S 混层的晶格条纹像直接观察到了这些混层的结构特征。其中 I/S 混层粘土矿物除了具有伊利石、蒙脱石混合无规律堆垛的不规则混层颗粒外还发现了具有十几 nm 厚度的伊利石和蒙脱石规则堆垛的混层粘土颗粒。Chl/S 混层的晶格条纹像也清楚反映出了其不规则混层堆垛的结构特征。在所拍摄到的 Chl/S 混层颗粒中,绿泥石和蒙脱石分为上下两部分共同形成一个粘土颗粒,成为不规则混层粘土。

References

- Ahn, J. H., Buseck, P. R., 1990. Layer-stacking sequences and structural disorder in mixed-layer illite/smectite: Image simulations and HRTEM imaging. *American Mineralogist*, 75: 267—275.
- Buseck, P. R., Iijima, S., 1974. High resolution electron microscopy of silicates. *American Mineralogist*, 59 (1—2): 1—21.
- Cai, X. C., Liang, S. X., Chen, S. Y., et al., 1992. EPR study of dickite-kaolinite interstratified mineral. *Acta Mineralogica Sinica*, 12(2): 152—158 (in Chinese with English abstract).
- Chen, T., Chen, D. Z., Wang, H. J., 2005. Electron diffraction patterns of plesiotwinning of Fe-illite. *Acta Geologica Sinica*, 79 (3): 332—335.
- Chen, T., Wang, H. J., 2007a. Microstructure characteristics of illite from Chuanlinggou Formation of Changcheng

- System in Jixian City, Tianjin City. *Science in China (Ser. D)*, 50(10): 1452—1458.
- Chen, T., Wang, H. J., 2007b. Determination of layer stacking microstructures and intralayer transition of illite polytypes by high-resolution transmission electron microscopy (HRTEM). *American Mineralogist*, 92(5—6): 926—932.
- Hong, H. L., Tie, L. Y., Bian, Q. J., et al., 2005. Study on the Zhongxiang rectorite by SEM and EPMA. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 24(2): 124—128 (in Chinese with English abstract).
- Kogure, T., 2002. Investigation of micas using advanced TEM. In: Reviews in mineralogy (Vol. 46), Mineralogical Society of America, Washington, D. C., 281—312.
- Kogure, T., Murakami, T., 1996. Direct identification of biotite/vermiculite layers in hydrobiotite using high-resolution TEM. *Mineralogical Journal*, 18(4): 131—137.
- Kogure, T., Banfield, J. F., 2000. New insights into the mechanism for chloritization of biotite using polytype analysis. *American Mineralogist*, 85: 1202—1208.
- Lee, J. H., Peacor, D. R., 1983. Intralayer transitions in phyllosilicates of Martinsburg shale. *Nature*, 303: 608—609.
- Lu, Q., Lei, X. R., Liu, H. F., 1993a. Study of the stacking sequences of a kind of irregular mixed-layer illite-smectite (I/S) clay mineral—With a discussion of the existence of minerals with two-dimensional lattice and one-dimensional quasi-lattice. *Acta Geological Sinica*, 67(2): 123—130 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Q., Liu, H. F., Lei, X. R., 1993b. Simulating quantitative analysis method—Quantitative analysis of clay mineral mixtures of montmorillonite, illite/smectite interstratified clay minerals, illite, chlorite and some others. *Acta Mineralogica Sinica*, 13(1): 12—20 (in Chinese with English abstract).
- Méring, J., 1949. L'Interférence des Rayons X dans les systèmes à stratification désordonnée. *Acta Crystallography*, (2): 371—377.
- Moore, D. M., 1989. X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. Oxford University Press, New York, 332.
- Murakami, T., Sato, T., Inoue, A., 1999. HRTEM evidence for the process and mechanism of saponite-to-chlorite conversion through corrensite. *American Mineralogist*, 84: 1080—1087.
- Shi, Y. X., Dai, X. R., Song, Z. G., et al., 2005. Characteristics of clay mineral assemblages and their spatial distribution of Chinese loess in different climatic zones. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(4): 690—695 (in Chinese with English abstract).
- Walker, G. F., 1957. On the differentiation of vermiculites and smectites in clays. *Clay Mineralogy Bulletin*, 3: 239—246.
- Wang, H., Wang, H. J., Chen, T., et al., 2005. Study of two-dimensional nanometer illite in Jixian County, Tianjin City. *Geological Review*, 51(3): 319—324 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H., Zhou, J., 2000. Data smoothing and distortion of X-ray diffraction Peak (I: Theory). *Journal of Applied Crystallography*, 33: 1128—1135.
- Wang, Q. M., Zhang, L. F., 1992. Study on illite/chlorite by transmission electron microscope. *Chinese Science Bulletin*, 37(8): 727—730 (in Chinese).
- Yang, X. Z., Ye, N. J., 2003. Gibbs free energies of formation for mixed-layer illite-montmorillonite in the process of montmorillonite illitization. *Geology-Geochemistry*, 31(3): 20—25 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. F., Wang, Q. M., Ren, L. F., 1992. Transformation of clay minerals in the buried metamorphic process of Triassic mudstone from Ordos basin in northern Shaanxi. *Science in China (Ser. B)*, (7): 759—767 (in Chinese).
- Zhang, Y., Chen, W., Chen, K. L., et al., 2006. Study on the Ar-Ar Age spectrum of diagenetic I/S and the mechanism of ³⁹Ar recoil loss—Examples from the clay minerals of P-T boundary in Changxing, Zhejiang Province. *Geological Review*, 52(4): 556—561 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡秀成, 梁绍暹, 陈世悦, 等, 1992. 地开石—高岭石混层矿物的电子顺磁共振(EPR)研究. *矿物学报*, 12(2): 152—158.
- 洪汉烈, 铁丽云, 边秋娟, 等, 2005. 湖北钟祥累托石的电子显微研究. *电子显微学报*, 24(2): 124—128.
- 陆琦, 雷新荣, 刘惠芳, 1993a. 一种不规则伊/蒙混层粘土矿物堆垛序列的研究——兼论具二维晶格—一维准晶格的矿物的存在. *地质学报*, 67(2): 123—130.
- 陆琦, 刘惠芳, 雷新荣, 1993b. 蒙脱石+伊/蒙混层+伊利石等粘土矿物混合物相 X 射线定量分析方法—模拟定量法. *矿物学报*, 13(1): 12—20.
- 师育新, 戴雪荣, 宋之光, 等, 2005. 我国不同气候带黄土中粘土矿物组合特征分析. *沉积学报*, 23(4): 690—695.
- 王欢, 王河锦, 陈涛, 等, 2005. 天津蓟县二维纳米级伊利石

- 研究. 地质论评, 51: 319—324.
- 王启明, 张立飞, 1992. 伊利石/绿泥石混层的电镜研究. 科学通报, 37(8): 727—730.
- 杨献忠, 叶念军, 2003. 蒙脱石伊利石化过程中伊/蒙混层形成的 Gibbs 自由能. 地质地球化学, 31(3): 20—25.
- 张立飞, 王启明, 任磊夫, 1992. 陕北鄂尔多斯盆地三叠系泥岩中粘土矿物在埋藏变质过程中的转化. 中国科学(B 辑), (7): 759—767.
- 张彦, 陈文, 陈克龙, 等, 2006. 成岩混层(I/S) Ar-Ar 年龄谱型及³⁹Ar 核反冲丢失机理研究——以浙江长兴地区 P-T 界线粘土岩为例. 地质论评, 52(4): 556—561.

《地球科学——中国地质大学学报》

2008 年 第 33 卷 第 6 期 要目预告

青藏高原及邻区三阶段构造演化与成矿演化	李德威
浙闽地区华夏地块新元古代变沉积岩地球化学特征及其地质意义	靳 松等
内蒙古固阳地区埃达克质花岗岩的发现及其地质意义	曾俊杰等
广西昆仑关 A 型花岗岩地球化学特征及构造意义	谭 俊等
辽东硼矿的成矿机制及成矿模式	王翠芝等
地震灾害区域宏观脆弱性变化研究的理论和方法	苏桂武等
元谋断裂晚第四纪活动性定量分析	卢海峰等
近断层强地震动预测中的有限断层震源模型	王海云等
地震波传播的褶积微分算子法数值模拟	李信富等