

doi:10.3799/dqkx.2013.000

# 贵州花溪 P-T 界线附近粘土矿物结构及成因意义

高文鹏<sup>1</sup>, 洪汉烈<sup>1,2\*</sup>, 殷科<sup>1</sup>, 赖旭龙<sup>1,2</sup>, 王朝文<sup>1</sup>, 李荣彪<sup>1</sup>,  
杨博<sup>1</sup>, 韩文<sup>1</sup>, 刘欣<sup>1</sup>

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

**摘要:** 为了揭示贵州花溪区海相 P-T 界线附近粘土岩的成因及物质来源, 采用 X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)以及差示扫描量热法(DSC), 对粘土层中粘土矿物的精细结构进行了深入的研究。结果表明, 样品中的粘土矿物共有两种物质来源。样品 YN06 质地致密, 粘土颗粒具有一定的定向性, 主要粘土矿物成分为伊利石和少量绿泥石。粘土矿物颗粒具有不规则的轮廓及参差不齐的边缘; 样品脱羟基反应温度为 590 °C, 表明样品中的伊利石主要为 tv 结构, 来源于陆地机械风化作用。其余五件样品主要粘土矿物为伊蒙规则混层和伊利石以及少量蒙脱石、绿泥石, 脱羟基温度均大于 600 °C, 表明样品中的粘土矿物主要以 cv 结构为主, 含有少量的 tv 结构, 指示粘土岩主要来源于火山物质的蚀变并伴随部分陆源碎屑物质沉积形成。

**关键词:** 二叠—三叠系界线; 粘土矿物; 火山岩; 精细结构。

中图分类号: P571

文章编号: 1000—2383(2013)06—1253—10

收稿日期: 2012—12—10

## Fine Structure and Their Genetic Significance of Clay Minerals from the Permian-Triassic Boundary, Huaxi Area, Guizhou Province

GAO Wen-peng<sup>1</sup>, HONG Han-lie<sup>1,2\*</sup>, YIN Ke<sup>1</sup>, Lai Xu-long<sup>1,2</sup>, WANG Chao-wen<sup>1</sup>,  
LI Rong-biao<sup>1</sup>, Yang Bo<sup>1</sup>, HAN Wen<sup>1</sup>, LIU Xin<sup>1</sup>

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** The fine structure and provenance of clays across the Permian-Triassic boundary (PTB) in the Yanlou section were investigated by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and differential scanning calorimetry (DSC). The results suggest that the layers have two different provenances. The sample of YN06 exhibits a condensed texture with an oriented arrangement of detrital clay particles and consists mainly of illite and minor chlorite, with irregular outlines or ragged edges. The dehydroxylation temperature occurred at 590 °C, indicating that clay minerals are composed of trans-vacant (tv) octahedral sheets derived from weathering of detrital illite. Other samples are composed mainly of I-S, illite and minor smectite, chlorite, with dehydroxylation temperature all above 600 °C, suggesting that clay minerals consist of a mixture of tv and cv sheets and were derived from a mixture of terrigenous and volcanic sources.

**Key words:** Permian-Triassic Boundary (PTB); clay minerals; volcanic rocks; fine structure.

二叠—三叠纪之交的生物集群灭绝事件一直是国内外学者研究的热点(杨遵仪等, 1991), 超过 90% 的海洋生物种以及绝大部分陆生植物(Raup,

1979; Sepkoski, 1989; Visscher *et al.*, 1996; Ward *et al.*, 2000) 都可能在 0.5 Ma 范围内灭绝(Bowring *et al.*, 1998)。很多学者从不同方面对 P-T 界线事件

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 41072030, 40872038)。

作者简介: 高文鹏(1989—), 男, 主要从事粘土矿物学研究工作。E-mail: 379295315@qq.com

\* 通讯作者: 洪汉烈, E-mail: honghl8311@yahoo.com.cn

展开了深入的研究(Renne *et al.*, 1995; Wignall *et al.*, 1998; Hallam and Wignall, 1999; Becker *et al.*, 2001; Retallack, 2001; Kump *et al.*, 2005; Sheldon, 2006), 目前灭绝原因虽仍有争议, 但火山作用对 P-T 生物大灭绝中的重要影响已经被越来越多的学者所接受: 界线粘土层中大量的微球粒、六方双锥石英的发现表明 P-T 之交存在广泛的火山活动以及可能的地外事件参与(何锦文, 1985; 周瑶琪等, 1988; 张素新等, 2004, 2006, 2007); P-T 界线生物大灭绝事件层的锆石 U-Pb 年龄与大面积火山喷发时间具有一致性, 有学者认为火山事件导致了 P-T 之交的生物大灭绝(Kamo *et al.*, 2003). 全球 P-T 界线附近的碳同位素负偏移现象也使得学者们认为火山事件曾在此过程中有重要影响(Wignall, 2001; Xie *et al.*, 2007; Korte and Kozur, 2010). 可以看出, 二叠—三叠系界线附近广泛分布的粘土层是探究生物大灭绝事件的重要记录. 在中国的南方地区, 这些界线附近的粘土层分布广, 发育稳定, 有可能作为标志层进行大区域的分析对比. 粘土层中的六方双锥石英是火山活动的重要佐证(杨遵仪等, 1991; 张素新等, 2004, 2006, 2007); 界线粘土层中的锆石 U-Pb 年龄能为界线绝对年龄提供重要参考(Kamo *et al.*, 2003); 多种常量元素异常亦发现于其中(周瑶琪, 2005). 但是, 以往有关 P-T 界线附近粘土岩成因及来源的研究, 多通过粘土岩中粘土矿物种类及相对含量的变化(张素新等, 2004, 2006, 2007; 于开平等, 2005)、或者仅挑选粘土岩中的副矿物如六方双锥石英、锆石等进行推断(张素新等, 2004, 2006, 2007), 缺乏有关粘土矿物成因来源的直接证据. 粘土矿物精细结构能够提供直接的成因信息, 而差示扫描量热法(Differential Scanning Calorimetry, DSC)可以进行粘土矿物精细结构的鉴定(Hong *et al.*, 2008, 2011). 因此本文从粘土矿物精细结构与成因关系角度, 利用 DSC 并结合 XRD (X-Ray Diffraction)、SEM (Scanning Electron Microscopy) 等传统手段对贵州花溪区燕楼剖面 P-T 界线附近粘土岩展开研究, 揭示粘土物质来源及成因的直接证据, 为二叠—三叠纪之交生物大灭绝研究提供更多的资料.

## 1 研究区地质概况

研究区处于扬子板块西南缘, 研究剖面位于贵州省贵阳市花溪区燕楼村(图 1), 剖面起点 GPS 坐标为  $126^{\circ}60.15'E, 26^{\circ}32.26'N$ . 剖面自下而上为晚

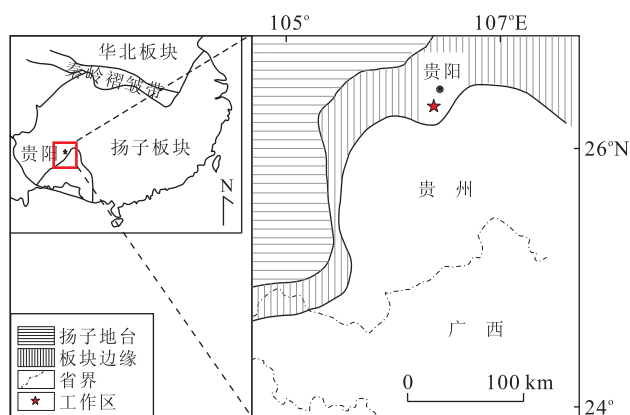


图 1 研究区地质构造简图

Fig. 1 Geological map of the study area

二叠系大隆组和早三叠系沙堡湾组, 为一天然连续的海相沉积剖面.

剖面全长 5.5 m, 共计 24 层, 含多层粘土岩. 下部岩性为大隆组灰色、灰绿色硅质泥岩夹薄层粘土岩、火山凝灰岩; 上部岩性为沙堡湾组灰黄、黄绿色钙质泥岩夹多层粘土岩、火山凝灰岩. 粘土层较薄, 厚度均在 1~10 cm. 本次研究在燕楼剖面下部二叠系大隆组到上部三叠系沙堡湾组共采集粘土岩样品 6 件(分别采自剖面第 2、6、7、15、21 及 23 层), 自下而上分别编号为 YN01-YN06(图 2).

## 2 实验方法

本次研究在燕楼剖面共采集粘土样品 6 件, 分别进行 X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)以及差示扫描量热法(DSC)的实验, 并将粘土样品淘洗后的碎屑物质在双目镜下进行挑选、鉴定.

### 2.1 X 射线衍射分析

燕楼剖面 6 件粘土样品的矿物组成及粘土矿物种类鉴定分别采用全岩片及粘土定向片法. 首先采用新鲜原样制备全岩片: 取新鲜原样置于  $60^{\circ}C$  烘箱中烘干, 将烘干样品置于玛瑙研钵中研磨并过 200 目筛, 最后将过筛后的样品粉末放在带有凹槽的玻璃片中采用背压法压实制成全岩片. 另外, 取过筛后的粘土粉末置于大烧杯中, 加水搅拌 30 min 后采用 Stokes 沉降法静置, 然后采用虹吸法取上层清液置于离心杯中离心, 将离心分离得到的粘土颗粒涂抹于玻璃片中制成粘土自然定向片. 把制成的自然定向片放于装有乙二醇饱和蒸汽的干燥皿中,  $70^{\circ}C$  恒温 3 h 后制成乙二醇饱和片(G). 粘土样品的 X 射线衍射测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产

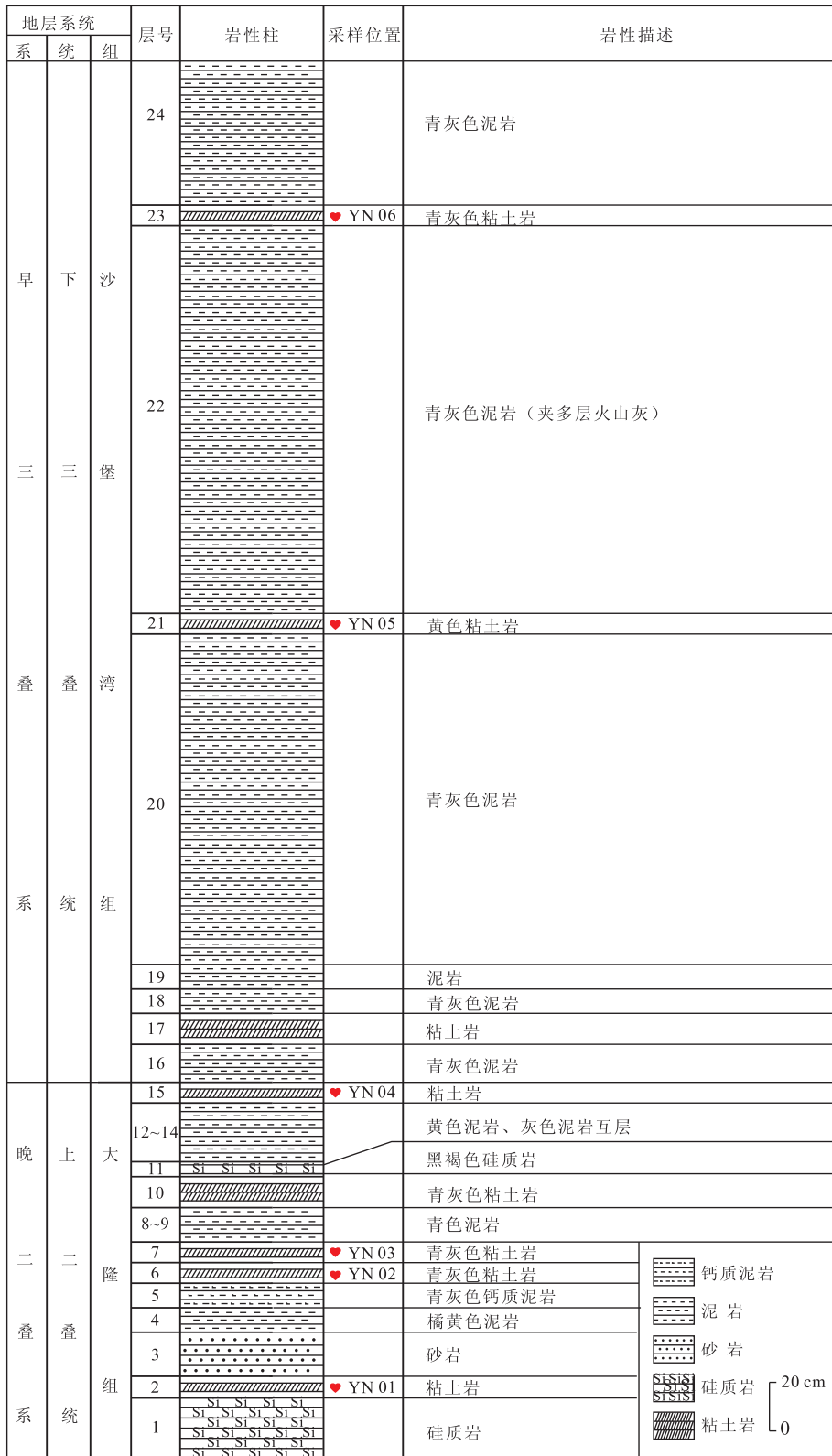


图 2 燕楼剖面地层及采样位置描述

Fig. 2 Stratigraphic sequence and sampling position at the Yanlou section, Guiyang, Guizhou Province

资源国家重点实验室的荷兰 X'Pert PRODY 2198 型 X 射线粉晶衍射仪上进行, 入射光源为 CuK $\alpha$  辐射, Ni 片滤波; 工作电压 40 kV, 电流 40 mA; 光阑系

统为 DS=SS=1°, RS=0.3 mm. 连续扫描, 扫描速度为 8°/min, 2 $\theta$  分辨率为 0.02°, 扫描范围 3°~63°. 样品矿物种类的鉴定主要依靠其特征的衍射峰

(Moore and Reynolds, 1989). 在全岩片和自然片中,  $10 \text{ \AA}$ 、 $5 \text{ \AA}$ 、 $4.5 \text{ \AA}$  和  $3.33 \text{ \AA}$  的衍射峰同时出现, 且乙二醇饱和处理后峰位保持不变, 说明样品中含有伊利石; 钙蒙脱石自然片中(001)衍射峰出现在  $15 \text{ \AA}$  左右, 乙二醇饱和处理后出现  $17 \text{ \AA}$  左右的峰; 绿泥石特征衍射峰为  $14.2 \text{ \AA}$ 、 $7.1 \text{ \AA}$  和  $3.52 \text{ \AA}$ ; 伊蒙混层矿物衍射峰常出现在  $10.0 \sim 15.5 \text{ \AA}$ , 并用乙二醇饱和处理后根据峰位变化情况做进一步确认. 非粘土矿物可以根据如下特征进行区分:  $4.25 \text{ \AA}$  和  $3.33 \text{ \AA}$  处衍射峰主要由石英产生; 斜长石特征衍射峰为  $3.18 \text{ \AA}$ . 粘土矿物相对含量(半定量)计算根据自然片上各粘土矿物特征峰的强度(Hong *et al.*, 2008, 2011), 伊蒙混层中伊利石晶层含量根据倒易矢量法来估算(陆琦等, 1991; 陆琦和雷新荣, 1993).

## 2.2 扫描电子显微镜及碎屑矿物形貌分析

选取若干块原岩小颗粒试样进行表面喷金导电处理, 进行扫描电子显微分析. 实验在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室 FEI QUANTA 450 型场发射扫描电子显微镜上进行. 加速电压为  $20 \text{ kV}$ , 工作距离  $12 \text{ mm}$ , 束斑大小  $6 \mu\text{m}$ . 同时, 采用扫描电子显微镜附带的 FEI FEG ESEM Quanta 450 型能谱仪对指定粘土矿物进行成分分析, 便于粘土矿物的进一步分析鉴定.

将六件粘土样品各取  $100 \text{ g}$  采用反复淘洗的方法进行粘土矿物与碎屑物质的分离. 将分离后的碎屑物质烘干后置于双目镜下进行观察, 挑选出形态完好的六方双锥石英、微球粒等碎屑物质, 然后利用 Leica 光学体式镜(摄像头系统: DFC 450; 镜筒系统: LAS 4.0)进行观察、拍照, 确定碎屑物质的形态及大小.

## 2.3 热分析

差示扫描量热法的测试在德国 NETZSCH STA-409 型热分析仪上进行. 取大约  $10 \text{ mg}$  样品至于刚玉坩埚中, 以  $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{分钟}$  的速率空气加热至  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ , 用来鉴定伊蒙混层和伊利石中两种空位八面体片(即 cv 和 tv)的脱羟基温度. 在二八面体 2:1 型层状硅酸盐矿物中, cv 结构是指层状硅酸盐中的羟基在空位八面体周围临位分布, 而 tv 结构是指羟基在空位八面体周围对位分布(Drits and Zviagina, 2009).

# 3 测试结果

## 3.1 粘土岩中矿物组成及粘土矿物相对含量

X 射线衍射结果表明, 样品中的主要矿物成分

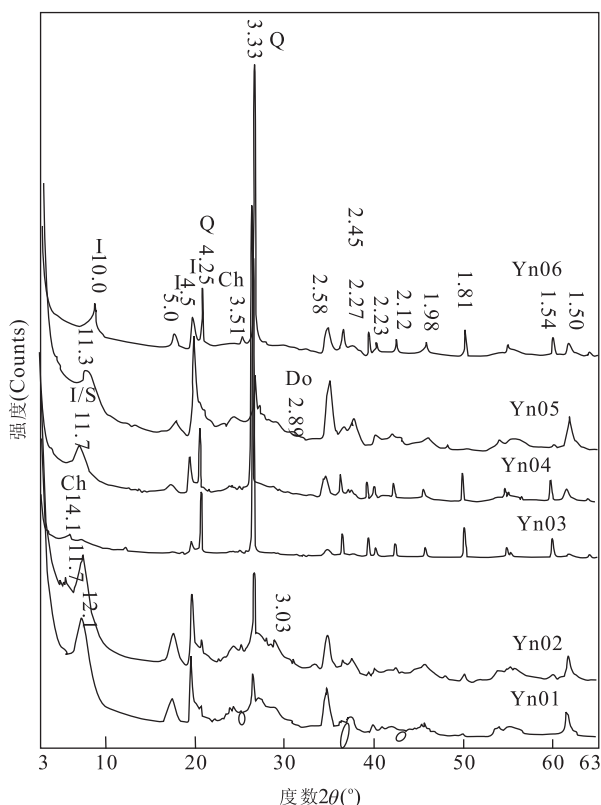


图 3 燕楼剖面样品全岩片的 X 射线粉晶衍射

Fig. 3 XRD patterns of the samples from Yanlou Section  
Q. 石英; Pl. 斜长石; I/S. 伊蒙混层; Ch. 绿泥石; I. 伊利石

为石英、斜长石等造岩矿物以及伊蒙混层、伊利石、蒙脱石、绿泥石等粘土矿物(图 3), 其中粘土矿物和石英为主要的矿物成分.

根据粘土定向片的测试结果, 样品中伊蒙混层和伊利石为主要的粘土矿物. 自然定向片中伊蒙混层的特征衍射峰出现在  $11 \sim 12 \text{ \AA}$  左右, 乙二醇饱和处理后分裂为两个峰, 一个出现在  $12 \sim 13 \text{ \AA}$ , 另一个出现在  $9.5 \text{ \AA}$  左右, 且并未出现  $17 \text{ \AA}$  左右的峰(图 4), 这表明样品中的伊蒙混层为 I-S-I 规则混层(陆琦等, 1991). 样品 YN01、YN02、YN03、YN04 主要粘土矿物组合为规则伊蒙混层和伊利石, 且伊蒙混层矿物相对含量都在 50% 以上, 其中 YN04 样品几乎只有伊蒙混层矿物; YN05 样品中伊利石相对含量增加到 45%; YN06 样品中伊蒙混层基本消失, 粘土矿物主要以伊利石为主, 绿泥石含量较低. 另外, 样品 YN02、YN03 中含有少量绿泥石, 样品 YN02 中有少量蒙脱石存在(见表 1).

## 3.2 形貌及能谱

将具有代表性的粘土样品进行扫描电镜测试. YN04 样品发育水平纹理. 扫描电镜下观察显示, 颗粒具有一定的定向性(图 5a). 粘土矿物主要呈集合

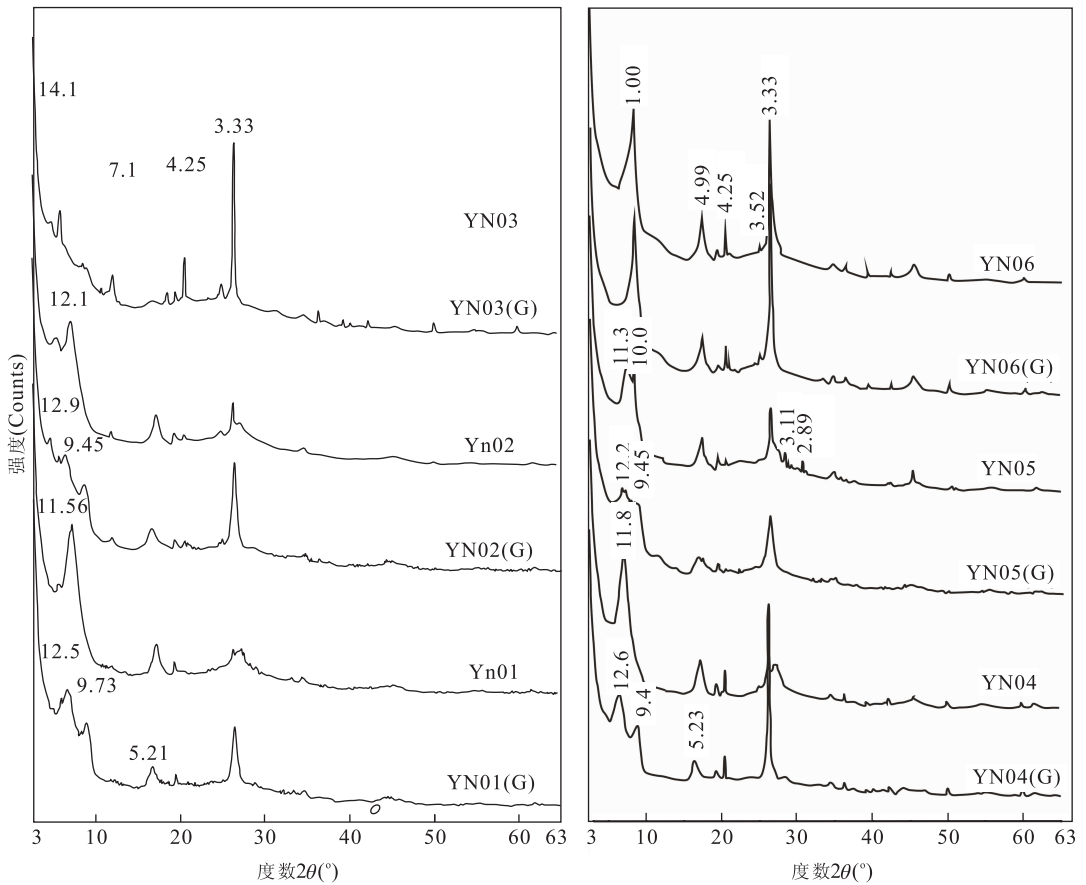


图 4 燕楼剖面自然定向片及乙二醇饱和片(G)X 射线粉晶衍射图

Fig. 4 XRD patterns of clay fractions in air-dried and ethylene glycol-solvated states of Yanlou section

Q. 石英;I/S. 伊蒙混层;Ch. 绿泥石;I. 伊利石;S. 蒙脱石

表 1 样品中粘土矿物相对含量(%)

Table 1 Clay mineral components of clay fractions of the samples (%)

| 样品编号 | 伊利石 | 伊蒙混层 | 蒙脱石 | 绿泥石 | I/S 中 S 晶层含量 |
|------|-----|------|-----|-----|--------------|
| YN06 | 90  |      |     | 10  |              |
| YN05 | 45  | 55   |     |     | 32           |
| YN04 |     | 100  |     |     | 42           |
| YN03 | 25  | 60   |     | 15  | 36           |
| YN02 | 20  | 60   | 15  | 5   | 41           |
| YN01 | 10  | 90   |     |     | 39           |

体分布,有些呈薄片状,发育不规则或港湾状边缘。(001)晶面弯曲,片状粘土颗粒大小在 0.4~4.0 μm 之间.能谱分析显示,薄片状粘土矿物以 O、Si、Al、K 元素为主,含少量 Mg、Fe 元素(图 5g),这与伊蒙混层化学成分基本一致.

YN06 样品质地较为致密.扫描电镜下观察粘土矿物均以集合体形式存在,边缘有些参差不齐,但以浑圆状为主,具有明显的碎屑成因特征(图 5b).同时粘土表面呈不平坦凹坑状,凸起部分由小粘土片组

成.能谱结果显示,粘土矿物同样以 O、Si、Al、K 元素为主,含少量 Mg、Fe 元素,但与 YN04 样品相比具有更高的 K 含量(图 5h),说明样品主要成分为伊利石,这也与 XRD 的测试结果一致(伊利石为主).

将双目镜下挑选出的碎屑物质(图 5f)喷金处理后也用扫描电镜进行了观察,在碎屑物质中发现了晶型完好的六方双锥石英以及透明微球粒,大小都在 50~300 μm 之间(图 5c, 5d, 5e).能谱结果显示六方双锥石英主要元素组成为 Si 和 O,原子比例近似 1 : 2;透明微球粒主要以 Si 和 O 为主,原子比例近似 1 : 2,说明微球粒主要以玻璃质为主(图 5i, 5j).

### 3.3 热分析结果

差示扫描量热法结果显示,由于粘土矿物脱羟基作用的影响,6 件样品的吸热反应均出现在 500~750 °C.其中样品 YN06 吸热峰较为紧凑,脱羟基温度为 590 °C.另外五件样品吸热峰较为宽缓,脱羟基温度均在 625 °C 左右(图 6).

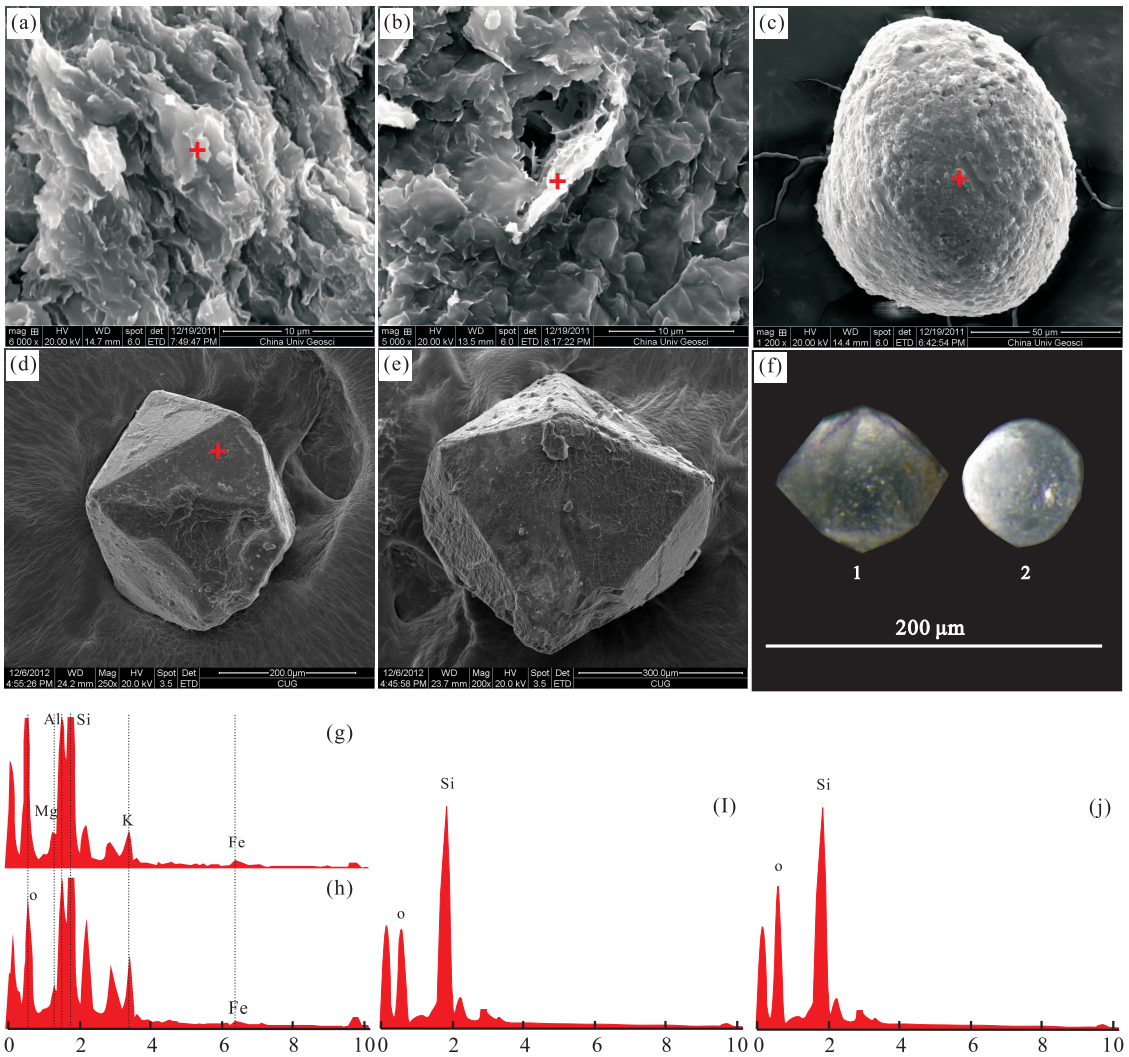


图 5 a. 扫描电镜下 YN04 中的伊蒙混层矿物; b. 扫描电镜下 YN06 中的伊利石; c. 扫描电镜下 YN05 中挑选出的微球粒; d、e. 扫描电镜下 YN05 中的六方双锥石英; f. 微球粒及六方双锥石英双目镜下形态; g. 伊蒙混层矿物的能谱分析结果; h. 伊利石能谱分析结果; i、j. 微球粒及六方双锥石英能谱分析结果

Fig. 5 a. SEM image of I-S clays in the sample YN04; b. SEM image of illite in the sample YN06; c. SEM images of the spherule in sample YN05; d, e. SEM images of hexagonal dipyrmaid quart in the sample YN05; f. Image of spherule and hexagonal dipyrmaid quart under the binocular; g. EDS analysis of I-S clays; h. EDS analysis of illite; i, j. EDS analysis of spherule and hexagonal dipyrmaid quart

## 4 讨论

XRD 结果显示, 燕楼剖面粘土样品中的粘土矿物主要为伊蒙混层、伊利石和绿泥石、蒙脱石。根据粘土矿物组合及样品脱羟基温度的不同可以把 6 件粘土样品分为 2 个类型: 一类是来自 YN06 的粘土矿物样品, 主要以伊利石和少量绿泥石为主要粘土矿物组成, 不含伊蒙混层矿物, 粘土矿物脱羟基温度为  $590^{\circ}\text{C}$ ; 另一类是 YN01、YN02、YN03、YN04 和 YN05 等 5 件样品, 粘土矿物以伊蒙混层和伊利石为主要粘土矿物并含少量绿泥石、蒙脱石, 粘土矿物

脱羟基温度均在  $600^{\circ}\text{C}$  以上。

粘土矿物精细结构能够提供其成因的直接信息, 2:1 型粘土矿物蒙脱石和伊利石一般分别含有 tv 和 cv 结构 (Tsipursky and Drits, 1984; Drits *et al.*, 1998)。tv 和 cv 结构具有不同的脱羟基温度, 利用这种脱羟基温度的不同可以进行粘土矿物 tv 和 cv 结构的鉴定 (Deconinck and Chamley, 1995; Drits *et al.*, 1998)。主要含 tv 结构的伊利石或蒙脱石等 2:1 型粘土矿物脱羟基温度小于  $600^{\circ}\text{C}$ , 被认为是大陆碎屑来源; 若以 cv 结构为主脱羟基温度大于  $650^{\circ}\text{C}$  则一般认为是火山来源 (Deconinck and

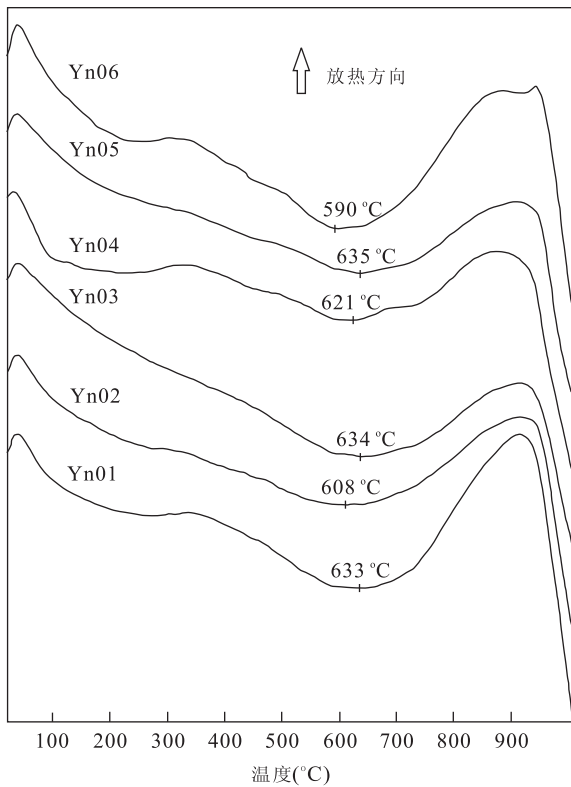


图 6 燕楼剖面样品脱羟基温度曲线

Fig. 6 DSC curves of the samples showing dehydroxylation temperatures of Yanlou section

Chamley, 1995; Drits *et al.*, 1998; Hong *et al.*, 2008, 2011). 有研究表明, cv 结构蒙脱石、cv 结构伊利石来源于火山灰或流纹岩成分的火山凝灰岩经过热液作用的转化 (McCarty and Reynolds, 1995; Cuadros and Altaner, 1998; Ylagan *et al.*, 2000). 对于同时含有 tv 和 cv 结构的粘土矿物, 其脱羟基温度取决于 tv 和 cv 结构的含量比 (Drits *et al.*, 1998). 脱羟基温度小于 600 °C, 说明粘土矿物主要含 tv 结构, 并指示其陆地机械风化来源; 如果脱羟基温度大于 650 °C, 则表示粘土矿物主要含 cv 结构, 暗示其火山来源 (Deconinck and Chamley, 1995; Drits *et al.*, 1998).

伊利石机械风化形成的伊蒙混层矿物主要含 tv 结构, 而由蒙脱石转化为伊利石所形成的伊蒙混层则以 cv 结构为主 (Drits *et al.*, 1998; McCarty and Reynolds, 1995, 2001). 因此, 伊蒙混层中以 cv 结构为主则显示其火山成因, 若以 tv 结构为主说明其来源于陆源伊利石的风化.

YN06 样品中的粘土矿物组合为 90% 伊利石和 10% 绿泥石, 脱羟基温度为 590 °C, 表明脱羟基温度主要来源于 tv 结构伊利石脱羟基作用的贡献, 说明

其为陆地机械风化来源, 与粘土矿物组合特征相一致. 样品质地较为松散, 通过扫描电镜观察, 样品中主要的粘土矿物伊利石呈残缺离散的片状, 边缘有些参差不齐, 但以浑圆状为主, 可能经过一定程度的风化溶蚀, 具有明显的碎屑成因特征, 说明粘土岩的陆地碎屑来源, 与前人研究海相剖面中的伊利石和绿泥石通常被认为是碎屑来源的结果对应 (Biscaye, 1965; Singer, 1984; Robert and Kennett, 1994). 同时, 对样品 YN06 碎屑物质淘洗后显示, 并未发现和火山作用相关的双方双锥石英、锆石及微球粒等物质, 也表明粘土层物质中没有火山来源的成分, 为陆源碎屑粘土矿物沉积所形成.

伊蒙混层矿物是燕楼剖面粘土岩样品中的主要粘土矿物, 除 YN06 样品外在其他 5 个样品中均有发现且含量较高. 海相剖面中的伊蒙混层通常有 3 种来源: 中酸性火山喷发、火山灰正常降落在碱性海水中与海水中的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  等离子反应, 最终形成伊蒙混层矿 (Pearson, 1990; 杨遵仪等, 1991; McCarty and Reynolds, 2001); 或是陆表伊利石在经过一系列化学风化作用后, 晶格中的  $\text{K}^+$  不断淋滤丢失而形成伊蒙混层, 并以陆源碎屑的形式进入到海水中 (Chamley, 1989). 另外, 蒙脱石在成岩过程中达到一定的温度、压力条件时会转化为伊蒙混层矿物 (Reynolds and Hower, 1970). 燕楼剖面样品中的伊蒙混层为规则的 I-S-I 混层, 可能是无序伊蒙混层有序转化的结果 (Pearson and Small, 1988). 规则伊蒙混层中蒙脱石晶层含量在 32%~42% 之间, 且并未出现一般正常海相剖面中蒙脱石晶层含量自上而下逐渐变小的趋势, 往往呈现出一种跳跃性的突变. 在只有 5.5 m 厚的燕楼剖面中, 粘土样品中的伊蒙混层的差异, 单以成岩作用是无法解释的, 只能从它们不同的物源、各自不同的成岩过程以及风化剥蚀程度和过程的不同等原因来解释 (Chamley, 1989). 差示扫描量热法的结果显示, YN01、YN02、YN03、YN04 和 YN05 这 5 件样品中粘土矿物脱羟基温度分别为 633 °C、608 °C、634 °C、621 °C 和 635 °C, 表明样品中粘土矿物同时含有 tv 和 cv 结构. 样品粘土矿物组合均为伊蒙混层、伊利石和少量绿泥石, 结合差示扫描量热法对粘土矿物精细结构的分析, 说明样品中的粘土矿物主要来源于陆源碎屑和火山来源的混合作用.

对样品中的碎屑物质进行挑选分析, 在样品中发现了六方双锥石英、微球粒 (见图 5c, 5d) 以及钾长石碎屑和火山残渣等碎屑物质. 其中 YN05 样品

中六方双锥石英、微球粒等碎屑物含量较高;样品 YN04、YN03、YN02、YN01 中双方双锥石英和微球粒含量较少;YN06 样品中未有发现。 $\beta$ -石英常成六方双锥状,结晶温度在 573 °C 到 870 °C 之间,常作为中酸性火山岩或浅成岩的斑晶产出。当温度迅速降低时, $\beta$ -石英即转变为  $\alpha$ -石英并仍具有  $\beta$ -石英六方双锥的外型,玻璃质微球粒亦被许多学者认为可能与火山作用相关(杨遵仪等,1991;周瑶琪,2005;张素新等,2004,2006,2007)。六方双锥石英和微球粒的出现,与粘土矿物精细结构研究的结果相一致,是粘土岩火山成因的重要佐证。证明 YN01、YN02、YN03、YN04 和 YN05 五件样品所在层位粘土矿物的成因与火山作用密切相关,均为火山喷发的火山灰沉积,并伴随陆源碎屑物的加入所形成。

燕楼剖面粘土岩的特征并非其独有。湖北黄石 P/T 剖面 41、42 等层位(杨遵仪等,1991)、湖北峡口 P/T 剖面 P267-b 层位(Hong *et al.*, 2008)粘土矿物组合特征与燕楼剖面 YN06 样品所在 23 层位相一致,均为伊利石加少量高岭石或绿泥石,被认为是陆地碎屑来源。黄石剖面 33 层位、峡口剖面 P259-b 层位粘土矿物组合特征与燕楼剖面 YN01、YN02、YN03、YN04 和 YN05 样品所在第 2、6、7、15 及 21 层具有很强的相似性,均为伊蒙混层加伊利石和少量绿泥石或高岭石、蒙脱石,被认为是火山灰沉降并伴随陆源碎屑物沉积形成。这些结论均与本文实验结果相吻合。

## 5 结论

实验结果显示,样品 YN01、YN02、YN03、YN04、YN05 粘土矿物主要以伊蒙混层和伊利石为主,含少量绿泥石。YN01、YN02、YN03、YN04 四件样品中六方双锥石英及微球粒含量稀少,YN05 样品中两者含量较高。样品中粘土矿物脱羟基温度分别为 633 °C、608 °C、634 °C、621 °C 和 635 °C,说明样品中粘土矿物分别含有 cv 和 tv 结构,指示其物质来源于火山喷发的火山灰沉积,并同时伴有陆源碎屑物质的加入。

样品 YN06 中不含伊蒙混层矿物,粘土矿物主要以伊利石为主,含少量绿泥石。未发现与火山活动有关的六方双锥石英及微球粒等碎屑物。粘土矿物颗粒均以集合体形式存在,少部分边缘参差不齐,但以浑圆状为主,可能经过风化溶蚀,具有明显的碎屑成因特征。样品中粘土矿物脱羟基温度为 590 °C,说

明样品中粘土矿物主要含 tv 结构,指示其来源于陆地碎屑物质风化。

## References

- Becker, L., Poreda, R. J., Hunt, A. G., et al., 2001. Impact Event at the Permian-Triassic Boundary: Evidence from Extraterrestrial Noble Gases in Fullerenes. *Science*, 291 (5508): 1530–1533. doi:10.1126/science.1057243
- Biscaye, P. E., 1965. Mineralogy and Sedimentation of Recent Deep-Sea Clay in the Atlantic Ocean and Adjacent Seas and Oceans. *Geological Society of America Bulletin*, 76 (7): 803–832. doi:10.1130/0016-7606(1965)76:2.CO;2
- Bowring, S. A., Erwin, D. H., Jin, Y. G., et al., 1998. U/Pb Zircon Geochronology and Tempo of the End-Permian Mass Extinction. *Science*, 280(5366): 1039–1045. doi:10.1126/science.280.5366.1039
- Chamley, H., 1989. *Clay Sedimentology*. Springer Verlag, Berlin, 623.
- Cuadros, J., Altaner, S. P., 1998. Characterization of Mixed-Layer Illite-Smectite from Bentonites Using Microscopic, Chemical, and X-Ray Methods; Constraints on the Smectite-to-Illite Transformation Mechanism. *American Mineralogist*, 83(7–8): 762–774.
- Deconinck, J. F., Chamley, H., 1995. Diversity of Smectite Origins in Late Cretaceous Sediments: Example of Chalks from Northern France. *Clay Minerals*, 30(4): 365–379. doi:10.1180/claymin.1995.030.4.09
- Drits, V. A., Lindgreen, H., Salyn, A. L., et al., 1998. Semi-quantitative Determination of Trans-Vacant and Cis-Vacant 2:1 Layers in Illites and Illite-Smectites by Thermal Analysis and X-Ray Diffraction. *American Mineralogist*, 83(11–12): 1188–1198.
- Drits, V. A., Zviagina, B. B., 2009. Trans-Vacant and Cis-Vacant 2:1 Layer Silicates; Structural Features, Identification, and Occurrence. *Clays and Clay Minerals*, 57 (4): 405–415. doi:10.1346/CCMN.2009.0570401
- Hallam, A., Wignall, P. B., 1999. Mass Extinctions and Sea-Level Changes. *Earth-Science Reviews*, 48(4): 217–250. doi:10.1016/S0012-8252(99)00055-0
- He, J. W., 1985. Discovery of Microspherules from the Permian-Triassic Mixed Fauna Bed No. 1 of Meishan in Changxing, Zhejiang and Its Significance. *Journal of Stratigraphy*, 9(4): 293–297 (in Chinese with English abstract).
- Hong, H. L., Zhang, N., Li, Z. H., et al., 2008. Clay Mineralogy across the PT Boundary of the XIAKOU Section, China: Evidence of Clay Provenance and Environment.



- Clays and Clay Minerals*, 56 (2): 131—143. doi: 10.1346/CCMN.2008.0560201
- Hong, H. L., Xie, S. C., Lai, X. L., 2011. Volcanism in Association with the Prelude to Mass Extinction and Environment Change across the Permian-Triassic Boundary (PTB), Southern China. *Clays and Clay Minerals*, 59 (5): 478—489. doi: 10.1346/CCMN.2011.0590505
- Kamo, S. L., Czamanske, G. K., Amelin, Y., et al., 2003. Rapid Eruption of Siberian Flood-Volcanic Rocks and Evidence for Coincidence with the Permian-Triassic Boundary and Mass Extinction at 251 Ma. *Earth and Planetary Science Letters*, 214 (1): 75—91. doi: 10.1016/S0012-821X(03)00347-9
- Korte, C., Kozur, H. W., 2010. Carbon-Isotope Stratigraphy across the Permian-Triassic Boundary: A review. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(4): 215—235. doi: 10.1016/j.jseaes.2010.01.005
- Kump, L. R., Pavlov, A., Arthur, M. A., 2005. Massive Release of Hydrogen Sulfide to the Surface Ocean and Atmosphere during Intervals of Oceanic Anoxia. *Geology*, 33(5): 397—400. doi: 10.1130/G21295.1
- Lu, Q., Lei, X. R., Liu, H. F., 1991. Genetic Types and Crystal Chemical Classification of Irregular Illite/Smectite Interstratified Clay Minerals. *Acta Mineralogica Sinica*, 11(2): 97—104 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Q., Lei, X. R., Liu, H. F., 1993. Study of the Stacking Sequences of a Kind of Irregular Mixed-Layer Illite-Smectite (I/S) Clay Mineral. *Acta Mineralogica Sinica*, 67 (2): 123—130 (in Chinese with English abstract).
- Mccarty, D. K., Reynolds, J. R. C., 1995. Rotationally Disordered Illite/Smectite in Paleozoic K-bentonites. *Clays and Clay Minerals*, 43(3): 271—284. doi: 10.1346/CCMN.1995.0430302
- Mccarty, D. K., Reynolds, J. R. C., 2001. Three-Dimensional Crystal Structures of Illite-Smectite Minerals in Paleozoic K-Bentonites from the Appalachian Basin. *Clays and Clay Minerals*, 49(1): 24—35. doi: 10.1346/CCMN.2001.0490102
- Moore, D. M., Reynolds, J. R. C., 1989. X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. Oxford University Press, New York, 378.
- Pearson, M. J., Small, J. S., 1988. Illite-Smectite Diagenesis and Palaeotemperatures in Northern North Sea Quaternary to Mesozoic Shale Sequences. *Clay Minerals*, 23 (2): 109—132. doi: 10.1180/claymin.1988.023.2.01
- Pearson, M. J., 1990. Clay Mineral Distribution and Provenance in Mesozoic and Tertiary Mudrocks of the Moray Firth and Northern North Sea. *Clay Minerals*, 25(4): 519—541. doi: 10.1180/claymin.1990.025.4.10
- Raup, D. M., 1979. Size of the Permo-Triassic Bottleneck and Its Evolutionary Implications. *Science*, 206 (4415): 217—218. doi: 10.1126/science.206.4415.217
- Renne, P. R., Black, M. T., Zichao, Z., et al., 1995. Synchrony and Causal Relations between Permian-Triassic Boundary Crises and Siberian Flood Volcanism. *Science*, 269 (5229): 1413—1416. doi: 10.1126/science.269.5229.1413
- Retallack, G. J., 2001. A 300-Million-Year Record of Atmospheric Carbon Dioxide from Fossil Plant Cuticles. *Nature*, 411(6835): 287—290. doi: 10.1038/35077041
- Reynolds, R. C., Hower, J., 1970. The Nature of Interlayering in Mixed-Layer Illite-Montmorillonites. *Clays and Clay Mineral*, 18: 25—36.
- Robert, C., Kennett, J. P., 1994. Antarctic Subtropical Humid Episode at the Paleocene-Eocene Boundary: Clay-Mineral Evidence. *Geology*, 22(3): 211—214. doi: 10.1130/0091-7613(1994)022<0211:ASHEAT>2.3.CO;2
- Sepkoski, J. J., 1989. Periodicity in Extinction and the Problem of Catastrophism in the History of Life. *Journal of the Geological Society*, 146 (1): 7—19. doi: 10.1144/gsjgs.146.1.0007
- Sheldon, N. D., 2006. Abrupt Chemical Weathering Increase across the Permian-Triassic Boundary. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 231(3): 315—321. doi: 10.1016/j.palaeo.2005.09.001
- Singer, A., 1984. The Paleoclimatic Interpretation of Clay Minerals in Sediments—A Review. *Earth-Science Reviews*, 21(4): 251—293. doi: 10.1016/0012-8252(84)90055-2
- Tsipursky, S. I., Drits, V. A., 1984. The Distribution of Octahedral Cations in the 2 : 1 Layers of Dioctahedral Smectites Studied by Oblique-Texture Electron Diffraction. *Clay Minerals*, 19 (2): 177—193. doi: 10.1180/claymin.1984.019.2.05
- Visscher, H., Brinkhuis, H., Dilcher, D. L., et al., 1996. The Terminal Paleozoic Fungal Event; Evidence of Terrestrial Ecosystem Destabilization and Collapse. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 93 (5): 2155—2158. doi: 10.1073/pnas.93.5.2155
- Ward, P. D., Montgomery, D. R., Smith, R., 2000. Altered River Morphology in South Africa Related to the Permian-Triassic Extinction. *Science*, 289 (5485): 1740—1743. doi: 10.1126/science.289.5485.1740
- Wignall, P. B., Morante, R., Newton, R., 1998. The Permo-

- Triassic Transition in Spitsbergen:  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  Chemos-tratigraphy, Fe and S Geochemistry, Facies, Fauna and Trace Fossils. *Geological Magazine*, 135(1): 47–62. doi:10.1017/S0016756897008121
- Wignall, P. B., 2001. Large Igneous Provinces and Mass Ex-tinctions. *Earth-Science Reviews*, 53(1–2): 1–33. doi: 10.1016/S0012–8252(00)00037–4
- Xie, S. L., Pancost, R. D., Huang, J., et al., 2007. Changes in the Global Carbon Cycle Occurred as Two Episodes during the Permian-Triassic Crisis. *Geology*, 35(12): 1083–1086. doi:10.1130/G24224A.1
- Yang, Z. Y., Wu, S. B., Yin, H. F., et al., 1991. Geological Events of Permo-Triassic Transitional Period in South China. Geological Press, Beijing, 190 (in Chinese).
- Ylagan, R. F., Altaner, S. P., Pozzuoli, A., 2000. Reaction Mechanisms of Smectite Illitization Associated with Hydrothermal Alteration from Ponza Island, Italy. *Clays and Clay Minerals*, 48(6): 610–631. doi:10.1346/CCMN.2000.0480603
- Yu, K. P., Han, G. M., Yang, F. L., et al., 2005. Study on Clay Minerals of P/T Boundary in Meishan Section, Changxin, Zhejiang Province. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23: 108–112 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. X., Yu, J. X., Yang, F. Q., et al., 2004. Study on Clayrocks of the Neritic, Littoral and Marine-Terrigenous Facies across the Permian-Triassic Boundary in Eastern Yunnan and Western Guizhou, South China. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(4): 81–86 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. X., Feng, Q. L., Gu, S. Z., et al., 2006. Clay Stone around Deep Water Permian-Triassic Boundary from Guizhou and Guangxi Region. *Geological Science and Technology Information*, 25(1): 9–13 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. X., Zhao, L. S., Tong, J. N., et al., 2007. Study on the Claystone near the Permian-Triassic Boundary from the Daxiakou Section, Xingshan, HuBei Province. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 27(3): 94–100 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y. Q., Chai, Z. F., Ma, J. G., et al., 1988. Study on Iron Ball in Claystone of P/T Boundary in Shansi Section, Guangyuan, Sichuan Province. *Chinese Science Bulletin*, 33(5): 397–398 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y. Q., 2005. The Study on the P/T Boundary Events. Oil University Press, Shandong, 256 (in Chinese).

### 附中中文参考文献

- 何锦文, 1985. 浙江长兴煤山二叠—三叠系混生层 1 中微粒粒的发现及其意义. *地层学杂志*, 9(4): 293–297.
- 陆琦, 雷新荣, 刘惠芳, 1991. 不规则伊/蒙混层粘土矿物成因类型及晶体化学分类. *矿物学报*, 11(2): 97–105.
- 陆琦, 雷新荣, 1993. 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(002): 123–130.
- 杨遵仪, 吴顺宝, 殷鸿福, 等, 1991. 华南二叠—三叠纪过渡期地质事件. 北京: 地质出版社, pp: 190.
- 于开平, 韩广民, 杨风丽, 等, 2005. 浙江长兴煤山剖面 P/T 界线附近粘土矿物研究. *沉积学报*, 23(1): 108–112.
- 张素新, 喻建新, 杨逢清, 等, 2004. 黔西滇东地区浅海, 滨海及海陆交互二叠系—三叠系界线附近粘土岩研究. *矿物岩石*, 24(4): 81–86.
- 张素新, 冯庆来, 顾松竹, 等, 2006. 黔桂地区深水相二叠系—三叠系界线附近黏土岩研究. *地质科技情报*, 25(1): 9–13.
- 张素新, 赵来时, 童金南, 等, 2007. 湖北兴山大峡口浅海相二叠系—三叠系界线附近粘土岩研究. *矿物岩石*, 27(3): 94–100.
- 周瑶琪, 柴之芳, 马建国, 等, 1988. 四川广元上寺 P/T 界线粘土中铁质小球的初步研究. *科学通报*, 33(5): 397–398.
- 周瑶琪, 2005. 二叠三叠系界线事件研究. 山东: 石油大学出版社, 256.