

文章编号: 1000-0550(2007) 03-0365-07

# 广西东攀剖面二叠系顶部粘土矿物特征及古气候意义

冯 启<sup>1</sup> 冯庆来<sup>2</sup> 于吉顺<sup>2</sup> 雷新荣<sup>3</sup>

(1 中国地质大学地球科学学院 武汉 430074; 2 中国地质大学岩石圈演化与矿产资源国家重点实验室 武汉 430074

3 中国地质大学(武汉)材化学院 武汉 430074)

**摘 要** 对广西东攀剖面二叠系顶部 20 个样品中的粘土矿物进行 X 射线衍射分析。伊利石结晶度值显示这些样品形成于中晚成岩带的地质环境; 伊利石、蒙脱石纵向分布规律和伊利石结晶度与伊利石含量的关系表明伊利石除陆源碎屑来源外, 可能有部分为蒙脱石伊利石化而成; 伊利石结晶度变化曲线和伊蒙混层类型的变化规律表明, 本区粘土矿物组合与含量的变化除受到后期成岩作用的影响外, 还明显地受沉积因素的控制; 伊利石结晶度、伊利石化学指数、高岭石和伊利石的含量、伊蒙混层类型显示东攀剖面以 Q 10 层界线上方 5m 为界, 古气候由干冷变为温暖; 水介质由偏碱性向酸性转变。

**关键词** 粘土矿物 古气候 伊利石结晶度 伊利石化学指数 二叠系顶部 广西

**第一作者简介** 冯启 女 1983 年出生 硕士研究生 粘土矿物和古气候研究

**中图分类号** P534.46 **文献标识码** A

沉积物中大量的粘土矿物是在表生风化作用中形成并与沉积物同时沉积的, 在沉积作用和埋藏作用的过程中可发生部分转变, 它的形成及转变与其所处的环境有着密切的关系<sup>[1-2]</sup>。几十年来研究者在极浅变质的地层中, 尤其是在晚古生代以来的地层中, 利用沉积物中的粘土矿物组合的变化规律探讨古气候取得较大的成功<sup>[3-6]</sup>。因此, 笔者尝试对广西东攀剖面 P-T 界线附近地层进行高分辨率的粘土矿物组合研究, 并试图探讨研究区二叠纪末的古气候特征。

## 1 地质背景及采样

广西东攀剖面位于广西省扶绥县柳桥镇东部约 5 km 的东攀村附近(图 1), 剖面包括晚二叠世大隆组的上部及三叠世罗楼组的下部地层, 是一个连续的深水相沉积剖面。大隆组上部划分为 12 层, 岩性主要为硅质岩、硅质泥岩、含泥硅质岩。罗楼组的下部划分出 4 层, 岩性主要为泥岩、钙质泥岩、泥灰岩。粘土岩呈夹层产出, 从第 1 层至第 13 层均有分布, 在 8、9、10 层以高频率出现<sup>[7]</sup>。

蒙有言<sup>[8]</sup>在 114 件粘土矿物分析数据的基础上, 得出了东攀剖面 Q 10 层界线处发生了显著的气候转变的结论。本文选取该界线上、下 20 个样品做 X 射线衍射分析。在选定样品时, 除考虑样品间隔外, 剔出了非气候占主导因素的火山成因的粘土岩。样品

所在层位见表 1。



图 1 东攀剖面位置图(据蒙有言, 2005)

Fig 1 The location of the Dongpan Section( after Meng 2005)

## 2 样品的处理与测试

将样品碾磨成粉状, 然后的处理及 XRD 测试在中国地质大学(武汉)岩石圈演化与矿产资源国家重点实验室进行。

每个样品用沉降法提取 < 2 μm 粘土颗粒制成定向片。首先用蒸馏水反复冲洗, 然后置于 2000 ml 的石英烧杯中, 加入 1500 ml 的蒸馏水充分混合, 在 25℃ 下置放 20 个小时后, 将溶液上部 < 2 μm 悬浮液吸入离心筒中, 在 2500 转/分下离心十分钟, 离心筒底部的沉淀物即为 < 2 μm 颗粒的样品。加入 2 ml

表 1 东攀剖面 P-T 界线附近粘土矿物 X 射线分析结果

Table 1 The composition of clay minerals in the Dongpan Section

样品编号	采样层位 /cm	含量 /%					伊蒙混层比	伊蒙混层类型	伊利石 结晶度	伊利石 化学指数
		伊利石	高岭石	绿泥石	蒙脱石	伊蒙混层				
Dp100307	79.50	30.00	0.00	0.00	0.00	70.00	0.66	有序 2	0.668	0.651
Dp100305	78.00	25.00	0.00	0.00	20.00	55.00	0.72	有序 2	0.568	0.525
Dp100303	77.00	35.00	0.00	0.00	0.00	65.00	0.65	有序 2	0.518	0.436
Dp100301	75.50	30.00	0.00	0.00	0.00	70.00	0.58	有序 1	0.618	0.385
Dp100112	72.00	20.00	30.00	0.00	35.00	15.00	0.50	有序 1	0.635	0.965
Dp100110	65.00	30.00	35.00	0.00	35.00	0.00	0.00	0.551	0.355	
Dp100109	58.00	30.00	30.00	0.00	40.00	0.00	0.00	0.602	0.538	
Dp100107	52.00	45.00	20.00	0.00	35.00	0.00	0.00	0.535	0.415	
Dp100105	46.00	65.00	0.00	0.00	0.00	35.00	0.60	无序 (少量有序 1)	0.434	0.290
Dp100103	43.00	0.451	0.344							
Dp100101	40.00	35.00	0.00	0.00	30.00	25.00	0.56	无序	0.535	0.544
Dp090607	31.00	40.00	0.00	0.00	25.00	35.00	0.49	无序	0.551	0.613
Dp090606	29.00	55.00	0.00	0.00	20.00	25.00	0.67	有序 1	0.551	0.458
Dp090605	27.00	60.00	0.00	0.00	15.00	25.00	0.59	无序 (少量有序 1)	0.551	0.357
Dp090604	25.00	70.00	0.00	0.00	10.00	20.00	0.64	无序	0.468	0.282
Dp090603	23.00	80.00	0.00	0.00	0.00	20.00	0.60	无序	0.468	0.279
Dp090602	21.00	65.00	0.00	0.00	0.00	35.00	0.64	无序 (少量有序 1)	0.485	0.332
Dp090600	19.00	50.00	5.00	0.00	15.00	30.00	0.55	无序	0.468	0.443
Dp090202	5.00	40.00	0.00	10.00	25.00	25.00	0.62	无序	0.551	0.517
Dp090201	3.00	40.00	0.00	0.00	10.00	50.00	0.69	无序 (少量有序 1)	0.568	0.563

(表中列有序 1 指 B 两层有序类型, 有序 2 指 BII 有序类型, 为三层有序。)

的蒸馏水, 乳化的泥状样涂于两个 20 cm × 30 cm 的平板玻璃板上制成定向片, 再分别经自然干燥和乙二醇处理。对样品进行乙二醇处理时, 用蒸汽法, 温度为 60°, 加热约 12 小时。X 射线衍射仪对每个样品, 输出两条用于鉴定的曲线 (图 2)。使用的仪器为 X'pertMPD Pro 型 X 射线衍射仪, Cu 靶, 仪器电压 40 kV, 管流 40 mA, 扫描速度为 25°/min, 扫描步宽为

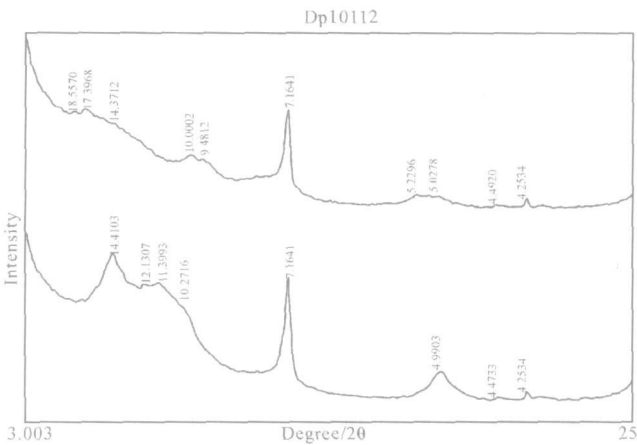


图 2 东攀剖面典型样品的 X 射线衍射谱

Fig 2 The X-ray diffraction profile of the typical sample of Dongpan Section

0.0167°, 扫描范围为 3~ 25° (2θ)。

粘土矿物的定性分析主要是对比自然干燥和乙二醇处理两种不同测试条件下得到的衍射曲线的特征。自然样和乙二醇样中 1.0 nm、0.5 nm 衍射峰的存在反映了伊利石 (I) 不同晶面对 X 射线的反射; 与自然曲线 1.5 nm 衍射峰相比, 乙二醇曲线上该峰向低角度移动, 出现在 1.7 nm 处, 说明样品中有蒙脱石 (M) 存在; 伊蒙混层 (IM) 在自然曲线上, 衍射峰位置在 1.0~ 1.5 nm 之间, 经过乙二醇饱和处理后, 若该混层矿物为无序混层 (随机混层, 两种晶层的排列无任何规律性), 则混层矿物的衍射效果变化为 1.7 nm 和 1.0 nm 的两个衍射峰; 若该矿物为有序混层 (如 B 两层有序和 BII 三层有序型), 则伊蒙混层的衍射峰分裂为接近于 1.0 nm 的峰和一个 1.1~ 1.2 nm 之间的峰。伊蒙混层矿物中伊利石晶层含量即混层比例 (α%) 的求法如下:  $1/d_{混层} = \alpha\% / 10\% + (1 - \alpha\%) / 15\%$ 。高岭石 0.7 nm 衍射峰和绿泥石 0.7 nm 的衍射峰重叠, 不易区分, 但可通过自然曲线和乙二醇曲线上 0.358 nm、0.354 nm 峰来辅助区别, 有 0.358 nm 峰的为高岭石, 反之, 则为绿泥石。

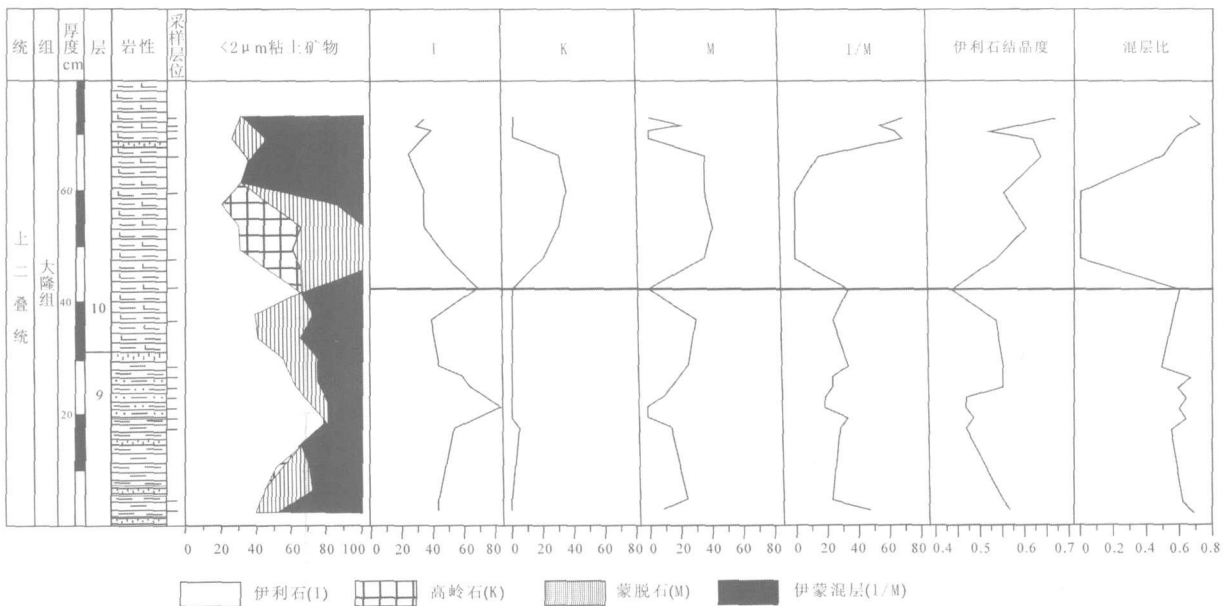


图 3 东攀剖面粘土矿物纵向变化曲线

Fig 3 Vertical changes of clay minerals in the Dongpan Section

由内标法按粘土矿物不同的百分含量配比得到的一组数据计算出各种粘土矿物的含量。

同时, 根据自然曲线和乙二醇曲线分别计算出伊利石结晶度和伊利石化学指数。伊利石结晶度为 (001) 反射 1 nm 半峰宽<sup>[9~11]</sup>。伊利石化学指数为 0.5 nm / 1 nm 峰面积比<sup>[10]</sup>。伊利石测试执行标准与 ICP-294 项目伊利石结晶度工作组推荐伊利石结晶度测试程序一致。大于 3 mg / cm<sup>2</sup> 的 < 2 μm 颗粒样品厚度消除了定向片厚度对测试结果的影响, 扫描速度相当于 < 1° / min 的 D/max 型 X 射线衍射仪的扫描速度, 完全满足精度要求<sup>[9]</sup>。

### 3 数据结果与分析

X 射线衍射分析表明, 9、10 层粘土矿物的基本特点是出现大量的伊蒙混层矿物和伊利石及适量的高岭石和蒙脱石。这与整个剖面粘土矿物的总体规律相一致<sup>[8]</sup>。通过对 9、10 层中粘土矿物组成及其变化特征的精细分析, 发现粘土矿物组成发生最大变化并不是在 9、10 层界线处, 而是在 9、10 层界线上 5 cm 处 (图 3 表 1)。伊利石含量经历一次下降后上升, 在 9、10 层界线上 5 cm 处达至又一个极大值, 后回落, 总体呈下降趋势; 高岭石在 9、10 层界线上 5 cm 以下的样品中, 仅一个含有, 且含量较少, 为 3%, 在 9、10 层界线上 5 cm 以上的岩层中, 含量增加, 平均含量近 30%, 但到 10 层顶部又消失; 绿泥石仅在

Dp090202 样品中出现; 蒙脱石在 9、10 层界线上 5 cm 处, 突减至 0%, 上下除各有两个样品未见蒙脱石外, 略呈增加的趋势; 伊蒙混层在 9、10 层界线上 5 cm 以下稳定发育, 平均含量为 30%, 往上经历一次减少后, 剧烈增加, 最高含量达 70%。

伊利石结晶度值少部分介于 0.434° ~ 0.485° (2θ) 之间 (占样品数的 30%), 大部分介于 0.535° ~ 0.668° (2θ) 之间。伊利石化学指数在 0.279 ~ 0.965 之间, 变化范围较宽 (表 1)。

伊蒙混层矿物中伊利石晶层所占的比例为 0.5 ~ 0.72 平均为 0.61 (表 1)。不管是整个剖面, 还是这 20 个样品的试验数据, 从变化曲线上看, 该比值与岩石埋深没有关系。伊蒙混层矿物下部以无序间层为主, 部分夹有少量有序, 上部变为 IS 有序, 顶部为 IS II 型。

### 4 讨论

#### 4.1 成岩作用影响

国际上以伊利石结晶度 Ktj b l e r 指数 (1967) 0.42 和 0.25 作为变质带的上、下限, 划分出成岩带、近变质带和浅变质带<sup>[11]</sup>。成岩带又进一步以 1.00 和 0.62 为界划分为早期成岩带、中期成岩带、晚期成岩带; 近变质带以 0.30 为界划分为低级近变质带、高级近变质带<sup>[12, 13]</sup>。伊利石的结晶度值因其客观、定量化的特点, 可以得到广泛的应用。在本次研究中, 所

有样品的伊利石结晶度都大于 0.42, 且大部分介于  $0.535^{\circ} \sim 0.668^{\circ} (2\theta)$  之间, 位于成岩演化中晚期范围内。本次测得的伊利石结晶度未经国际标样校对, 不能进行国际对比<sup>[14]</sup>, 但相同试验条件下测得的 20 个试验数据具有相对意义, 即本剖面 9-10 层岩层中伊利石确实来源于中晚成岩带的地质环境。

由于粘土矿物对温度和压力的改变而产生的不可逆性转化较为敏感, 或者是在埋藏期对孔隙水和早期变质较为敏感, 所以, 随着埋藏深度的增加, 温度升高, 压力增大, 为适应新的环境, 粘土矿物也发生相应的变化。浅部以高岭石和蒙脱石为主, 深部主要为伊利石和绿泥石。在埋藏和成岩过程中, 蒙脱石和伊蒙混层矿物都可能不可逆地转化为伊利石。在伊蒙混层矿物中, 伊利石晶层的含量随埋藏深度的加大而增多<sup>[15]</sup>。在东攀整个剖面中, 粘土矿物的纵向分布与地层岩石的埋藏深度没有相关性<sup>[8]</sup>。但是通过分析本次研究所选样品, 粘土矿物组合的变化情况却存在这样的规律, 伊利石和蒙脱石分别随埋深增大增加和减少(图 3)。

除第十、第二十个样品外, 伊利石含量与伊利石的结晶度值呈明显的反相关关系(图 4), 伊利石结晶度值越低层位, 伊利石含量越高。即成岩作用越晚期, 伊利石含量越高。这与粘土矿物的纵向分布与地层岩石埋藏深度的相关性推出的本区粘土矿物组合和含量受到了成岩作用影响的结论相一致。20 个样品的伊利石结晶度值均位于中晚成岩带伊利石结晶度值范围内, 中晚成岩阶段  $150 \sim 200^{\circ}\text{C}$  的温度条件, 可以满足蒙脱石向伊利石的转化<sup>[16]</sup>。虽然一些研究揭示, 时间在  $13 \sim 23 \text{ Ma}$  年龄的蒙脱石的伊利石化几乎不起作用<sup>[17]</sup>, 但 Howar(1981) 研究发现, 在相同条件下年轻岩石中的蒙脱石伊利石化程度比古老岩石中的轻得多, 其他许多学者的研究均证明了这一点, 这表明时间是除温度外控制蒙脱石伊利石化的又一重要因素, 转化的反应时间可弥补温度的不足<sup>[15, 18]</sup>。晚二叠世以来的漫长地质历史, 为蒙脱石伊利石化提供了更大的可能。因此, 在该剖面伊利石除陆源碎屑来源外, 可能还存在部分由蒙脱石伊利石化而成的伊利石。

#### 4.2 沉积因素

从伊利石结晶度变化曲线上看, 该值在底部较大, 往上减小, 到 9-10 层界线上方 5 cm 处达到最小值后又回升, 到顶部增至最大。在减小和回升的过程中, 还存在几处波动。可见, 该值虽在总体上随埋深

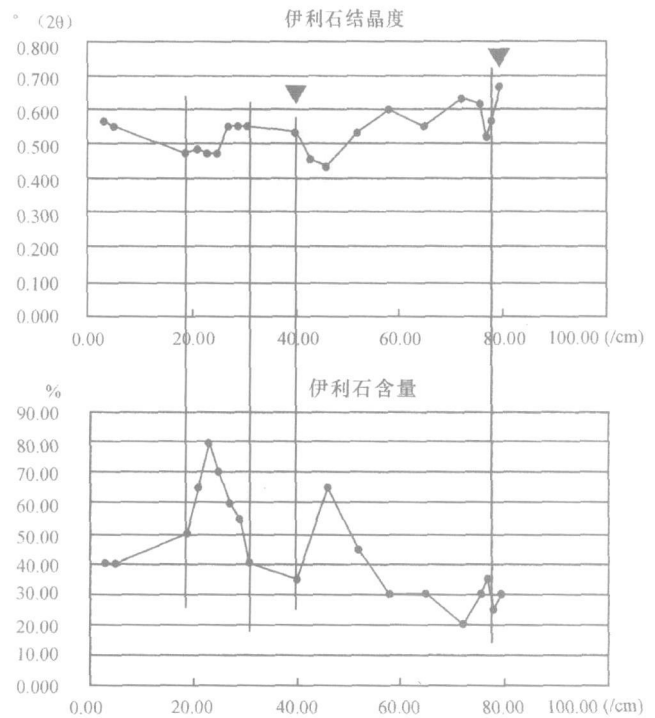


图 4 伊利石结晶度值与伊利石含量

Fig 4 Illite crystallinity and contents of illite

的增加而减小, 但其局部与岩石埋深却没有严格的对应关系。同时伊蒙混层矿物含量、伊蒙混层类型并不遵循随岩石埋深的增加而增加和由无序伊蒙混层有序伊蒙混层的变化规律, 且伊蒙混层无序和有序类型与伊利石结晶度反映的成岩作用强弱也没有成岩作用强, 即伊利石结晶度值高, 伊蒙混层有序; 成岩作用弱, 即伊利石结晶度值低, 伊蒙混层无序的对应关系。由此可以看出, 本区粘土矿物组合与含量的变化在受到后期成岩变化作用的影响的同时, 还部分取决于沉积因素, 即与沉积当时的物源、气候及地理条件有关。

#### 4.3 气候意义

粘土矿物不光有结晶化学类型的区别, 还有成因类型的区别, 不同成因的粘土矿物生成的时间相差很远<sup>[19]</sup>, 如果他们的成因类型不清楚, 而只注意某地层中有没有或有哪些种类的粘土矿物、粘土矿物的相对含量, 而没有搞清楚它们是怎样生成的, 由此而推断出的古地理环境、古气候类型在时间上的准确性就很低。要想通过粘土矿物的研究来恢复古气候环境, 建立起精确度较高的时间序列, 就必须正确区分他们的成因类型。目前认为海相地层中的伊利石、高岭石主要来自陆地, 以陆源来源为主的粘土矿物中蒙脱石含

量一般不超过 25%, 大都小于 20%<sup>[20]</sup>, 伊蒙混层可以由蒙脱石经成岩作用而形成, 也可以和蒙脱石一样, 来自火山成因<sup>[21]</sup>。

蒙脱石比较典型地富集于  $\leq 0.1\mu\text{m}$  的组分中, 而绿泥石的粒径稍大, 高岭石和伊利石的粒径明显加大<sup>[22]</sup>。粘土矿物的粒径差异可能使得高岭石、伊利石和绿泥石趋向于向岸沉积, 而蒙脱石趋向于在离岸距离较远的深水环境中沉积<sup>[23]</sup>。

基于以上两点, 粘土矿物含量除在纵向上单矿物自身变化, 相同成因的粘土矿物, 如在海相地层中一般认为同为陆源碎屑成因的伊利石和高岭石含量比值变化具有一定的气候指示意义外, 在横向上没有绝对的意义。在纵向分布的地层中, 单一粘土矿物很少出现, 一般为几种粘土矿物的组合, 并常有混层矿物, 所以, 用粘土矿物成分、组合和含量的综合信息来判断古气候往往具有不确定性和多解性。

因此, 本论文选用伊利石结晶度值作为主要指标, 以高岭石和伊利石含量为辅, 来反映东攀剖面 P-T 界线附近的古气候变化。Chamley(1975)对地中海沉积物进行大量的研究后提出伊利石的结晶度有助于区分冷干期与暖湿间冰期。但伊利石结晶度大小反映环境水解能力的强弱, 对气候干、湿做出的判断, 是基于化学风化成因而言的。因此, 物理风化作用对伊利石的形成不可忽视。所以在利用伊利石结晶度指数来重建古气候环境时, 不能简单的利用伊利石的结晶程度来分析古气候的潮湿期和干燥期, 依赖物理风化形成的伊利石结晶度的分析可能会导致完全错误的结论<sup>[24, 25]</sup>。

伊利石结晶度值为伊利石 1 nm 半峰宽, 低值代表结晶度高, 指示陆地物源区水解作用弱, 为干冷的气候条件<sup>[26]</sup>。本次研究测试样品中, 伊利石结晶度值变化范围为 0.468~0.635, 一半以上 (60%) 样品的测试结果集中在 0.518~0.568 之间, 所有样品的伊利石结晶度平均值为 0.539 (表 1)。伊利石化学指数为 0.5 nm/1 nm 峰面积比, 比值小于 0.5 代表富 Fe-Mg 伊利石, 为物理风化结果; 比值大于 0.5 为富 Al 伊利石, 代表强烈的水解作用<sup>[10]</sup>。本次测试的 20 个样品中, 伊利石化学指数在 0.279~0.965 之间, 变化范围较宽, 其中 11 个样品的测试结果小于 0.5 (表 1)。

由伊利石结晶度值、伊利石化学指数的气候意义, 我们知道, 伊利石结晶度值大, 其结晶度小, 代表暖湿的气候条件; 伊利石化学指数大, 代表强烈的水

解作用; 伊利石结晶度值小, 其结晶度大, 代表干冷的气候条件; 伊利石化学指数小, 小于 0.5 代表富 Fe-Mg 伊利石, 为物理风化结果。本次研究样品伊利石结晶度与伊利石化学指数随深度变化的曲线如图 5 所示, 从中我们可以发现, 除第四个和第十八个样品外, 伊利石结晶度值与伊利石化学指数有着相同的变化规律: 伊利石结晶度值减小, 伊利石化学指数也减小; 伊利石结晶度值增大, 伊利石化学指数也增大; 伊利石结晶度值达到极大值和极小值时, 伊利石化学指数相应地也达到极大值和极小值。这种良好的对应关系表明, 本区伊利石结晶度值和伊利石化学指数反映了相同的气候环境。因此, 伊利石结晶度值可以用于分析东攀剖面古气候特征, 下面作具体的分析。

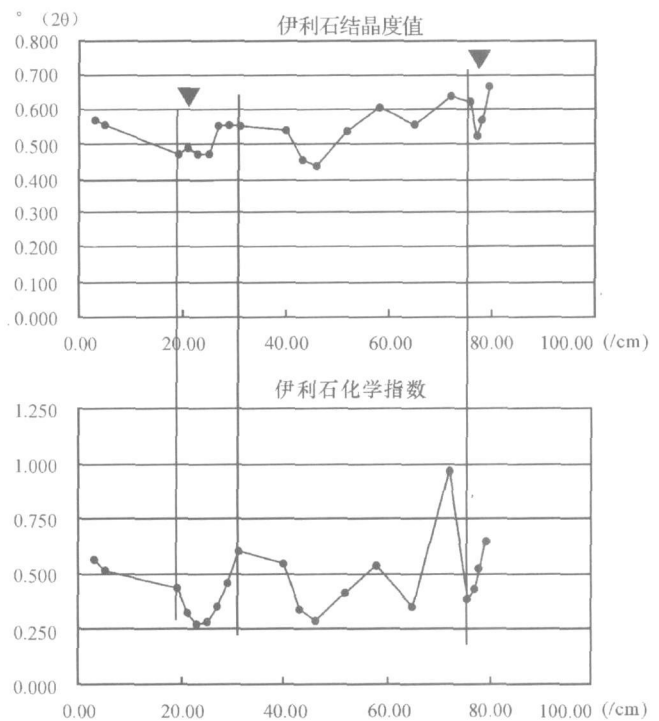


图 5 伊利石结晶度值与伊利石化学指数

Fig. 5 Illite crystallinity and illite chemical index

以 Q10 层界线上方 5 m 为界, 下部地层伊利石结晶度值呈现四步下降的规律, 指示陆地物源区水解作用逐渐减弱, 为相对干冷的气候条件; 而上部地层伊利石结晶度值则分三级增大, 表明陆地物源区水解作用逐渐增强, 为相对温暖的气候条件。这样的分析结果还与本次研究测试的伊利石、高岭石含量变化相一致。伊利石含量的逐渐减少和高岭石在 Q10 层界线上方 5 m 上部突增, 也代表了干冷向湿热气候条件的转化。

#### 4.4 水介质酸碱度

高岭石形成和保存于酸性介质中,而伊利石和蒙脱石形成于偏碱性的介质中<sup>[1,27]</sup>。高岭石在 Q 10 层界线上方 5 cm 以下的样品中,仅一个含有,且含量较少,为 5%,在 Q 10 层界线上方 5 cm 以上的岩层中,平均含量近 30%。而伊利石含量在纵向上逐渐减少,蒙脱石含量在 Q 10 层界线上方 5 cm 以上的岩层中虽有增多,但总体发育稳定。因此认为,以 Q 10 层界线上方 5 cm 为界,下部介质偏碱性,上部介质为酸性。这也可以从伊蒙混层类型得到证明,研究表明,在偏碱性的介质条件下,形成 S/I 无序间层矿物。在酸性介质的影响下,形成 IS 有序间层矿物。影响强,IS 向 ISII 转化;影响弱,IS 向 S/I 转化<sup>[28]</sup>。该研究层位,伊蒙混层在下部以无序类型为主,部分夹有 IS 有序间层矿物,上部伊蒙混层类型变为 IS 有序,顶部为 ISII 有序混层矿物。也表明了水介质由偏碱性向酸性的转变。

## 5 结论

通过分析东攀二叠系—三叠系界线剖面 Q 10 层界线上、下 20 个样品的粘土矿物 XRD 测试数据,得出如下结论:

(1) 东攀剖面 Q 10 层岩层中的伊利石除来源于中晚成岩带的地质环境外,可能有部分为蒙脱石伊利石化形成。

(2) 本区粘土矿物组合与含量的变化除受到后期成岩变化作用的影响外,还明显地与沉积因素有关,即与沉积当时的物源、气候及地理条件有关。

(3) Q 10 层界线上方 5 cm 处,古气候由干冷变为温暖。

(4) 以 Q 10 层界线上方 5 cm 处为界,水介质由偏碱性向酸性转变。

### 参考文献 (References)

- 1 汤艳杰,贾建业,谢先德. 粘土矿物的环境意义. 地学前缘, 2002, 9(2): 337-344 [ Tang Yanjie, Jia Jianye, Xie Xiande. Environment significance of clay minerals. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 337-344 ]
- 2 程捷,唐德翔,张绪教,等. 粘土矿物在黄河源区古气候研究中的应用. 现代地质, 2003, 17(1): 47-51 [ Cheng Jie, Tang Dexiang, Zhang Xujiao, et al. Research on the Holocene climate in the source area of the Yellow River by clay minerals. Geoscience, 2003, 17(1): 47-51 ]
- 3 何良彪. 海洋沉积岩芯中粘土矿物变化与古气候变迁的关系. 科学通报, 1982, 27(13): 809-812 [ He Liangbiao. The relationship be-

- ween the variance of paleoclimate and the changes of clays in the cores of oceanic sedimentary rocks. Chinese Science Bulletin, 1982, 27(13): 809-812 ]
- 4 蓝先洪. 海洋沉积物中粘土矿物组合特征的古环境意义. 海洋地质动态, 2001, 17(1): 5-7 [ Lan Xianhong. Paleoenvironment significance of clay minerals in marine sediments. Marine Geology Letters, 2001, 17(1): 5-7 ]
  - 5 Valleri B, Alessandra P, Pietro M, et al. Influence of climate on the iron oxide mineralogy of Terra Rossa. Clay and Clay Minerals, 1992, 40(1): 8-13
  - 6 Madhavaraju J, Ramasamy S, Alistair Ruffell, et al. Clay mineralogy of the Late Cretaceous and early Tertiary successions of the Cauvery Basin (southeastern India): implications for sediment source and palaeoclimates at the K/T boundary. Cretaceous Research, 2002, 23: 153-163
  - 7 蒙有言,冯庆来,何卫红,等. 桂西南柳桥地区深水相二叠系—三叠系界线剖面. 地质学杂志, 2005, 29(4): 323-332 [ Meng Youyan, Feng Qinglai, He Weihong, et al. A unique deep-water Permian-Triassic Boundary section from the Liuchiao region in southwestern Guangxi, south China. Journal of Stratigraphy, 2005, 29(4): 323-332 ]
  - 8 蒙有言,冯庆来,何卫红,等. 广西柳桥地区二叠系—三叠系界线附近粘土矿物及古气候特征. 地质科技情报, 2005, 24(4): 25-30 [ Meng Youyan, Feng Qinglai, He Weihong, et al. Clay minerals assemblages and paleoclimate in the Permian-Triassic boundary sediments of Liuchiao region in Guangxi. Geological Science and Technology Information, 2005, 24(4): 25-30 ]
  - 9 Kisch H J. Illite crystallinity: recommendations on sample preparation, X-ray diffraction settings, and interlaboratory samples. Journal of Metamorphic Geology, 1991, 9: 665-670
  - 10 刘志飞, Colin C, Trentesaux A, et al. 南海南部晚第四纪东亚季风演化的粘土矿物记录. 中国科学 (D 辑), 2004, 34(3): 272-279 [ Liu Zhifei, Colin C, Trentesaux A, et al. Quaternary clay mineralogy in the northern South China Sea (ODP site 1146). Science in China (Series D), 2004, 34(3): 272-279 ]
  - 11 Kisch H J. Calibration of the anchizone: a critical comparison of illite 'crystallinity' scales used for definition. Journal of Metamorphic Geology, 1990, 8: 31-46
  - 12 燕守勋. 广西右江盆地周—河口剖面极低级变质带的伊利石结晶度与粘土矿物光谱标志对比研究. 中国科学 (D 辑), 2003, 33(5): 459-469 [ Yan Shouxun. Study of the illite crystallinity and clay mineral spectrum of very low grade metamorphism zone in Youjiang Basin Lizhou-He Kou section, Guangxi province. Science in China (Series D), 2003, 33(5): 459-169 ]
  - 13 杨琦,刘伟新. 松潘—阿坝地区三叠系成岩演化实验研究. 石油实验地质, 2005, 27(5): 534-538 [ Yang Qi, Liu Weixin. Experimental study on diagenetic evolution for Triassic in the Songpan-Aba area. Petroleum Geology & Experiment, 2005, 27(5): 534-538 ]
  - 14 Warr L N, Rice A H N. Interlaboratory standardization and calibration of clay mineral crystallinity and crystallite size data. Journal of Metamorphic Geology, 1994, 12: 141-152

- 15 Richard M P. Considerations and applications of the illite/smectite geothermometer in hydrocarbon-bearing rocks of Miocene to Mississippian age. *Clay and Clay Minerals*, 1993, 41(2): 119-133
- 16 索书田, 毕先梅, 赵文霞, 等. 右江盆地三叠纪岩层低级变质作用及地球动力学意义. *地质科学*, 1998, 33(4): 395-405 [ Suo Shutian, Bi Xianmei, Zhao Wenxia, *et al.* Very low grade metamorphism and its geodynamical significance of Triassic strata within the Youjiang River Basin. *Scientia Geologica Sinica*, 1998, 33(4): 395-405 ]
- 17 Parker A, Sellwood B W. *Sediment Diagenesis*, 1981, 215-268
- 18 周张健. 蒙脱石伊利石化的控制因素、转化机制及其转化模型的研究综述. *地质科技情报*, 1994, 13(4): 41-46 [ Zhou Zhangjian. Summary of the studying for illitization of the smectite on its controlling factors, transformation mechanism and models. *Geological Science and Technology Information*, 1994, 13(4): 41-46 ]
- 19 武慧慧, 刘成武, 巨军昌. 他生、原生及次生粘土矿物的鉴别方法研究. *咸宁师专学报(自然科学版)*, 1997, 17(3): 74-76 [ Wu Xianhui, Liu Chengwu, Ju Junchang. Study on the differentiation methods of allogenetic, primary and secondary clay mineral. *Journal of Xianning Normal College*, 1997, 17(3): 74-76 ]
- 20 石学法, 陈丽容, 李坤业. 西菲律宾海西部海域粘土沉积物的成因矿物学研究. *海洋地质与第四纪地质*, 1995, 15(2): 61-72 [ Shi Xuefa, Chen Lirong, Li Kunye. Study on mineralogy of the clay sediment in the west of Philippine Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1995, 15(2): 61-72 ]
- 21 Rateev M A, Corbunavo Z N. The distribution of clay minerals in the Oceans. *Sedimentology*, 1969, 13(1): 21-43
- 22 刘光华. 粘土矿物特征与沉积环境关系的初步探讨. *沉积学报*, 1987, 5(1): 48-54 [ Liu Guanghua. Study of the relationship between characteristics of clay minerals and depositional environments. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1987, 5(1): 48-54 ]
- 23 陈志华, 石学法, 韩贻兵, 等. 北冰洋西部表层沉积物粘土矿物分布及环境指示意义. *海洋科学进展*, 2004, 22(4): 446-454 [ Chen Zhihua, Shi Xuefa, Han Yibin, *et al.* Clay mineral distributions in surface sediments from the western Arctic Ocean and their implications for sedimentary environments. *Advances in Marine Science*, 2004, 22(4): 446-454 ]
- 24 Robert C, Kennett J P. Antarctic continental weathering changes during Eocene-Oligocene cryosphere expansion. *Clay mineral and oxygen isotope evidence*. *Geology*, 1997, 25(7): 587-590
- 25 陈涛, 王欢, 张祖青, 等. 粘土矿物对古气候指示作用浅析. *岩石矿物学杂志*, 2003, 22(4): 416-420 [ Chen Tao, Wang Huan, Zhang Zuqing, *et al.* Clay minerals as indicators of paleoclimate. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2003, 22(4): 416-420 ]
- 26 Krumm S, Buggisch. Sample preparation effects on illite crystallinity measurements: grain size gradation and particle orientation. *Journal of Metamorphic Geology*, 1991, 9: 671-677
- 27 Keller W D. Environmental aspects of clay minerals. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1970, 40(3): 788-813
- 28 梁绍暹, 王水利, 姚改焕, 等. 华北石炭-二叠纪煤系中 I/S 间层矿物的研究. *煤田地质与勘探*, 1995, 23(6): 12-19 [ Liang Shaoyuan, Wang Shuilì, Yao Gaohuan, *et al.* Study on illite/smectite interstratified minerals of Carboniferous-Permian coal-bearing formation in northern China. *Coalfield Geology*, 1995, 23(6): 12-19 ]

## Characteristics of Clay Minerals from the Uppermost Permian in Dongpan Section, Guangxi Province and Its Significance

FENG Q<sup>1</sup>, FENG Qing-lai<sup>2</sup>, YU Ji-shun<sup>2</sup>, LEI Xin-rong<sup>3</sup>

(1 Faculty of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074;

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

3 Faculty of Material Science and Chemical Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

**Abstract** The integrated information of clay minerals from the Uppermost Permian sediments in the Dongpan Section, Guangxi province is measured by the analyses of the X-ray diffraction. Illite crystallinity shows that the illite in Bed 9 and Bed 10 is formed in the middle-late diagenetic stage. Vertical distribution of the illite/smectite and the relationship between the contents of illite and illite crystallinity indicate besides terrigenous clast genesis, part of it may derived from smectite. But the clay mineral assemblages and contents are not only related to the diagenesis, also controlled by the sedimentary factors such as source rock, climate and geography. Illite crystallinity, illite chemical index, the contents of illite and kaolinite, illite-smectite mixed-layers type show that Paleoclimate turn dry and cold into wet and warm and that water medium turn from alkaline to acidic upward 5cm from Beds 9 and 10 boundary.

**Key words** clay mineral, paleoclimate, illite crystallinity, illite chemical index, Uppermost Permian, Guangxi