

文章编号: 1000-0550(2012)01-0120-08

浙闽地区白垩纪早中期黏土矿物组成特征 及其古气候显示^①

刘玲^{1,2} 李祥辉¹ 王尹¹ 周勇³ 曹珂⁴

(1. 南京大学地球科学与工程学院内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室 南京 210093; 2. 有色金属华东地质勘查局 南京 210007;
3. 四川省地质矿产勘查开发局四〇二地质队 成都 611730; 4. 青岛海洋地质研究所 山东青岛 200092)

摘要 对浙江西南和福建西部地区 11 个剖面点陆相白垩系 11 个层位的碎屑黏土矿物组成进行了测试分析。结果显示,白垩系中下部大部分层位以伊利石为主,相对含量平均超过 80%;闽西坂头组、浙西寿昌组顶部—横山组下部、金华组中部、衢县组上部出现了较为丰富的蒙脱石,最高达 49%;高岭石一般较少,仅在浙西衢县组中部、寿昌组上部较高,最高达 38%。研究表明,中国东南地区在白垩纪早中期主要属于热带—亚热带干旱—半干旱气候,与全国乃至全球温室气候一致;在浙西阿普特初期和赛诺曼早期间断有湿热气候,可能与区域古植物较为繁盛及较大面积湖区有关;闽西凡兰吟期、浙西阿普特早期、阿尔布晚期、赛诺曼中期部分时期存在短期相对干冷气候,大致分别对应于白垩纪全球大洋缺氧事件结束后的一段时间,并可能与区域隆升有关。

关键词 黏土矿物 古气候 白垩纪 浙江 福建

第一作者简介 刘玲 女 1985 年出生 工程硕士 沉积学

通讯作者 李祥辉 E-mail: seanlee@nju.edu.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

白垩纪是显生宙最热、最为典型的温室气候时期^[1~3],是现今和未来温室气候研究的一面镜子。通过对这一时期气候特征及其变化过程、控制因素的研究,可以为研究人类活动对地球表层系统和全球气候产生影响的程度提供重要参考^[4]。然而,就目前国内外所取得的研究成果而言,所获得的白垩纪气候特征主要基于海相沉积,反映的基本是古海洋气候变化,陆地上的古气候研究相对匮乏^[5~7]。近来,人们已经认识到通过陆相环境下的气候记录来认识白垩纪全球气候变化的重要性^[8]。这是因为,陆相沉积记录具有多样性和保存的普遍性^[7],可为古气候的研究提供更多的途径和方向。

古气候研究有多种方法技术。相对于海相沉积而言,利用陆相沉积进行古气候研究较为有限,目前在定性分析方面主要利用特殊气候指示沉积(如石膏、岩盐、古土壤、红层、煤、古沙漠等)^[7]、孢粉、古植物组合等,在定量分析方面近来有些成功的研究例子,重点在利用植物气孔参数变化^[8]和成壤碳酸盐结核的碳同位素分析^[9~11]重建古大气二氧化碳浓度。虽然黏土矿物不是一种特殊沉积,但由于在海相

沉积中取得了良好效果,近来也被逐渐引入到陆相古气候分析^[12],并且有较多的成功研究实例^[6,13~17]。

中国浙江和福建中西部地区陆相白垩系分布较为广泛。鉴于它系一套火山与沉积互层或互为夹层,目前有一系列火山岩数据进而较为准确定年的优势,加之在古气候方面有一定的研究基础(如古土壤类型)^[18],因此,本文试图通过对碎屑黏土矿物相对含量和化学指数分析来研究讨论这一地区白垩纪早中期的气候类型及其变化特征,为白垩纪时期气候变化研究提供一方面的依据。

1 地层背景

浙江西部和福建中西部地区白垩系集中分布在上虞—政和—一大埔断裂以西(图 1),沉积盆地多属于山间小盆地,性质为断拗盆地、断陷盆地、火山构造盆地。岩层主要为一套内陆河湖相沉积岩或与火山岩喷发相互层,到上部形成了一套较厚的紫红色粗粒类磨拉石沉积,构筑了这一地区的丹霞地貌。浙江西部白垩系的岩石地层有衢县组、金华组、中戴组、方岩组、馆头组、横山组、寿昌组、黄尖组、劳村组,福建西

^①国家重大基础研究发展规划项目(973)“晚中生代温室气候—气候演变”之课题“晚中生代东西地区古气候重建”(2006CB701401)资助成果。
收稿日期: 2010-12-20; 收修改稿日期: 2011-02-21

部白垩系则有沙县组、均口组、白牙山组、吉山组、坂头组。由于这一地区陆相生物地层在年代地层方面控制的缺陷,过去已有的同位素年龄多为全岩 K—Ar、Ar—Ar、Rb—Sr 方法获得,使得上述岩石地层的时代归属争议较大,方案较多^[19~23]。本文中涉及地层的时代一方面依据前人的工作成果,另一方面则根据近期完成的火山岩夹层单颗粒锆石 U—Pb 同位素年龄(主体范围 113~132 Ma,李祥辉等未发表)进行调整,具体方案为:(1)浙西地区,劳村组—黄尖组属于欧特里夫期,寿昌组归于巴雷姆期,横山组—馆头组属于阿普特期,金华组—中戴组—方岩组—朝川组划为阿尔布期,衢县组划属赛诺曼期;(2)在福建西南,坂头组属于凡兰吟期—欧特里夫期,吉山组归于巴雷姆期,均口组属于阿尔布期和赛诺曼期,沙县组为土仑期(参见图 3)。

2 黏土矿物的气候指示

在排除成岩作用的前提下,碎屑黏土矿物组成被认为可以视作古气候指示^[12,13],并且国内外有诸多的成功研究实例^[13~17],尽管有一些因素如采样、样品制备流程、实验条件会对数据结果可能会造成影响^[5,25]。目前已经证实,这种方法与孢粉、碳氧同位素等所反映的古气候信息吻合^[26~27]。因此,黏土矿物的组合、含量、结晶度和化学指数已广泛应用于反映物源区甚至沉积盆地的气候变化研究^[28~31]。

一般地,高岭石是在潮湿气候、酸性介质中由长石、云母和辉石经强烈淋滤形成^[32],指示暖湿的气候。在这种条件下它可以保持稳定,即使温度高,压力增大,也不会向蒙脱石、伊利石转化;若 pH 值增大从酸性介质到碱性介质,高岭石的稳定性会减小。值得说明的是,作为碎屑搬运到盆地中沉积并与较多伊利石、绿泥石一起保存下来的高岭石,所反映的沉积盆地气候是变冷的^[33];而原地的碎屑高岭石自身才反映物源区湿热气候^[34,35]。

伊利石形成于温暖或寒冷少雨、弱碱性的气候条件下^[36],由长石、云母等铝硅酸盐矿物在风化脱 K⁺ 的情况形成。其晶格混层 K⁺ 继续淋失,则可能发生伊蒙混层并向蒙脱石变化。在气候湿热,化学风化较彻底的条件下,碱金属(主要是 K⁺)被带走,伊利石将进一步分解为高岭石^[30]。但总体而言气候干燥、淋滤作用弱对伊利石的形成和保存十分有利^[34],可作为干燥气候的指标。

蒙脱石易在富盐基特别是贫 K⁺ 而富含 Na⁺、

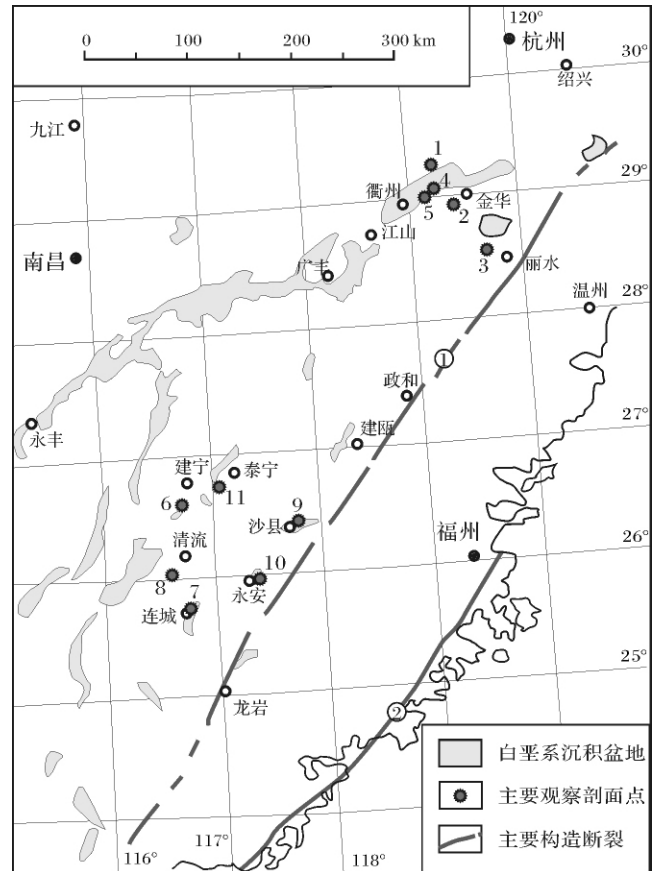


图1 中国东南地区陆相白垩系露头分布及地质调查主要剖面点观察和采样分布位置(底图依据舒良树等^[14])

1. 建德寿昌(劳村组、黄尖组、寿昌组、横山组 29°23'14.1", 119°10'46.2"); 2. 金华汤溪(中戴组 29°00'30.8", 119°19'47.3"); 3. 丽水老竹(寿昌组、馆头组 29°32'00.8", 119°44'58.7"); 4. 龙游十里铺(金华组 29°00'39.3", 119°12'27.2"); 5. 龙游小南海(衢县组 29°05'13.7", 119°14'148"); 6. 建宁均口(均口组 26°42'19.5", 116°48'21.0"); 7. 连城冠豸山(均口组 25°41'40.9", 116°45'25.9"); 8. 清流里田(沙县组 26°01'03.7", 116°42'04.0"); 9. 沙县陇东—罗布(均口组、沙县组 26°25'20.6", 117°46'50.1"); 10. 永安吉安(沙县组、坂头组 25°57'22.2", 117°19'55.4"); 11. 泰宁大龙(沙县组 26°37'57.0", 117°02'21.0")。①上虞—政和—大埔断裂; ②长乐—南澳断裂

Fig. 1 Localities of the observed sections within the continental Cretaceous in SE China (The Cretaceous outcrop is simplified on the geological map by Shu *et al*^[14])

Ca²⁺ 的碱性介质中形成。如风化强度增大, Na⁺ 和 Ca²⁺ 就从蒙脱石的混层位置上剥离, 因此蒙脱石的存在反映了寒冷的气候保存特征^[30]。

绿泥石形成于干燥气候条件下, 存在于碱性环境中, 其含量增加代表了逐渐变为干旱的气候条件^[37,38], 但绿泥石自身不能作为唯一直接指示气候的指标^[38], 需与其它黏土矿物配合才能判断。

伊利石结晶度和化学指数也可以反应气候条件^[12]。伊利石结晶度低值代表结晶度高,指示陆地物源区水解作用弱,为干燥寒冷的气候条件^[13,39];伊利石化学指数比值大于 >0.4 为富Al伊利石,代表强烈的水解作用;比值 <0.15 ,代表富Fe-Mg伊利石,为物理风化结果;在 $0.15 \sim 0.4$ 之间是过渡类型^[40]。

3 实验材料与方法

本次工作重点在11个剖面点(图1)的11个层位中采集了70件泥岩、粉砂质泥岩样品进行碎屑黏土矿物成分分析。样品经过镜下观察并考虑前人对中国白垩纪有关盆地的泥岩成岩作用检测结果^[37]显示大部分样品没有发生明显后期变化,部分样品甚至没有明显的压实;伊利石结晶度没有出现从下往上结晶度变小(值变大)趋势,说明受到埋藏变质作用影响甚微。

定向样品制备过程为:每件样品取 1 cm^3 左右进行粉碎,加入稀盐酸除钙,用去离子水反复清洗,采用沉降法提取 $<2\text{ }\mu\text{m}$ 黏土颗粒,制成两件(其中一件备用)定向薄片,并自然风干。将制备好的薄片用乙二醇在 60°C 的恒温烘箱里浸泡48 h,之后在 490°C 烘箱中加热2 h,制成定向薄片。黏土矿物定向样品的制备在南京大学表生地球化学研究所实验室完成。

实验测试采用的是日本理学Dmax III a仪器,使用Cu K α 辐射,滤波片Gra,扫描范围 $3^\circ \sim 36^\circ$,扫描步长 0.02 ,扫描速度 10 ,积分时间 0.3 ,管流 200 mA ,管压 37.5 kV 。实验样品的XRD测试分析在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成。

黏土矿物组分含量的解释在三种测试条件下完成,分别获得XRD波谱的对比与叠加。波峰参数半定量计算使用Jade5.0软件在乙二醇曲线上进行,计算方法采用中黏土矿物X射线半定量分析,重量峰标准是:经乙二醇处理,蒙脱石采用 $17\text{ \AA}$ (001)晶面,伊利石采用 $10\text{ \AA}$ (001)晶面,高岭石(001)和绿泥石(002)使用 $7\text{ \AA}$ 叠加峰;进一步根据 $3.53\text{ \AA}$ (绿泥石004)和 $3.56\text{ \AA}$ (高岭石002),采用参数分别为1、4、2(图2)。伊利石化学指数为 $5\text{ \AA}/10\text{ \AA}$ 的峰面积比,伊利石结晶度为 $10\text{ \AA}$ 半峰宽。

4 结果与讨论

4.1 浙江西南地区

如图3所示,浙江西南白垩纪早—中期黏土矿物的基本组成特点是:1)伊利石相对含量占绝对优势,

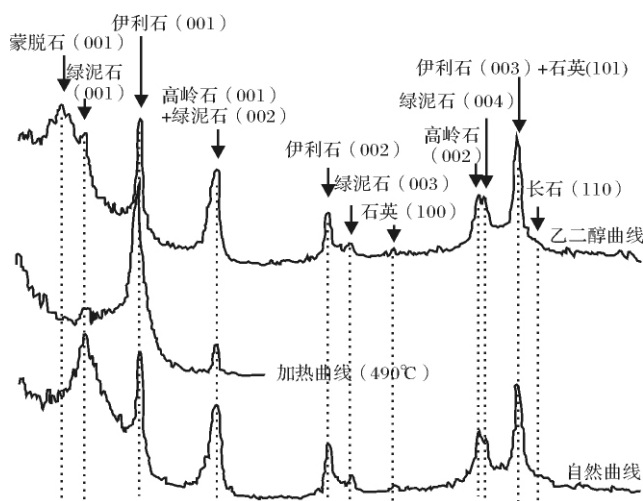


图2 典型样品的X射线衍射谱(样品lc-04)

Fig. 2 X-ray powder diffraction pattern of a typical clay mineral specimen (sample lc-04)

平均 86.5% ,其中,有两件样品(lz-02和zc-26)只含有伊利石,分别出现在馆头组第7层中部(距底部 150 m)和横山组下部;2)绿泥石含量平均 4.0% ;3)蒙脱石介于 $0.4\% \sim 49\%$ 不等,最大值出现在横山组底部(zc-28),在金华组的中部(gx-03)和寿昌组的上部(zc-22)蒙脱石也出现两个较高值,分别为 37% 和 48% ;4)高岭石介于 $0.2\% \sim 37.9\%$ 之间,平均含量为 4.1% ,最大值位于龙游剖面衢县组(cl-02)的中部;5)伊利石结晶度平均值为 0.56 ,最小值 0.29 ,位于金华组的中部(gx-03);6)化学指数介于 $0.09 \sim 0.73$ 之间,平均值 0.29 ,最大值位于金华组的中部(gx-03)。

根据上述黏土矿物组成特征、化学指数推测认为,浙西乃至到中部地区白垩纪早中期气候十分干燥,多属于中、低纬度地区的亚热带干旱—半干旱气候。这期间,气候有短期波动(图3),即具体表现为:1)在寿昌组上部高岭石含量达到 17% ,衢县组中部高岭石达 $30\% \sim 38\%$ 。无论这些高岭石是物源区原地的,还是沉积后暴露在洪泛环境下由伊利石转化而来,都说明研究区阿普特初期、赛诺曼早期部分时期处于相对湿热气候状态。这是因为研究区沉积盆地小,物源区离沉积盆地近,物源区和沉积盆地的气候特征基本相同。2)在寿昌组顶部—横山组下部蒙脱石相对含量高达 49% ,金华组中部和衢县组上部也都超过 10% ,高可达 37% ,表明这些时期(阿普特早期、阿尔布晚期、赛诺曼中期)不仅干燥,而且较冷。

然而,伊利石的结晶度相对较高平均 $0.5 \sim 0.6$,

化学指数较低平均 0.2~0.3,指示陆地物源区水解作用相对较强。这与黏土矿物相对含量变化特征所指示的气候似乎矛盾。一般认为,干冷条件下形成的伊利石矿物晶格破坏程度不高,而湿热条件下形成的伊利石晶格破坏程度大,化学指数较高,褪色程度高,结晶度降低^[42]。伊利石结晶度较高而化学指数较低一定程度上说明研究区出现过短暂的降水和较高的温度,使得气候以半干旱型为主。

4.2 闽西地区

闽西地区白垩纪黏土矿物的组成特征与浙西地区相似(图3),体现为:1)伊利石相对含量占绝对优势,平均 87%,部分样品相对含量甚至可超过 90%;2)绿泥石含量平均 5.0%,部分层位如均口组顶、底(sx-01)最高达 24%,沙县组中上部超过 10%;3)蒙脱石平均值 5.0%,但以坂头组居高,一般大于 10%,最大 36%(ya-03);4)高岭石相对含量较低,平均值 3%,最大值在沙县组中部(lt-04)为 8%;5)伊利石结晶度较高,介于 0.25~0.65,平均 0.53;6)伊利石化学指数较低,一般小于 0.26,平均 0.29,表明主要为富 Fe-Mg 伊利石。

上述黏土矿物相对含量特征显示,闽西地区的气候在早白垩世总体来说处于干旱气候状态,可能属于热带—亚热带干燥气候带。与浙西地区相似,存在气候波动:1)均口组大部 and 沙县组局部层位绿泥石相对含量较高,表明阿尔布期、土仑期、赛诺曼期部分时期尤为干燥,可能属于干旱气候时期;2)坂头组中下部蒙脱石较高且同期几乎不含绿泥石和较少的高岭石,说明凡兰吟期气候处于寒冷状态。

闽西伊利石结晶度和化学指数特征与浙西南相似,说明存在较为强烈的水解作用,暗示一定程有间断降雨过程,反映了总体上的半干旱气候特点。

4.3 气候变化成因与对比

如上,浙西、闽西地区白垩纪早中期总体而言以热带—亚热带干旱—半干旱气候为特征,这与全国存在大量同期陆相红层建造显示的结果一致,也符合全球白垩纪温室气候条件。然而,值得注意的是期间出现了干冷和温湿气候间断变化。

浙西阿普特初期(寿昌组上部)、赛诺曼早期(衢县组中部)时期的相对湿热气候状态间断印证了近期的古土壤研究和古生物方面的成果,表现为裸子植物花粉含量高^[43,44],产有较为丰富的介形虫和昆虫类化石;由于生物活动频繁,在古土壤层中出现大量的潜穴和根迹^[18]。浙西在古气候分带上比福建更

北,为什么会存在这两期湿热的间断看来从古气候分带上解释较为困难。我们认为,局部古地理区域古植物相对繁盛,加之有较大的湖水面(湖相分布),可能是造成这一湿热气候间断的主要原因。

对于闽西凡兰吟期、浙西阿普特早期、阿尔布晚期、赛诺曼中期的相对干冷气候间断,目前尚无其它方面的证据予以证实。问题在于:1)这几个时期大致对应于白垩纪全球几次大洋缺氧事件结束后的一段时间,其间是否存在必然联系有待进一步研究;2)浙西和闽西地理位置较近,二者的气候间断变冷时间上却不匹配。对于第1)个问题“其与缺氧事件是否存在必然联系”本文暂无法做出回答。对于第2)个方面问题,我们注意到中生代时期是西太平洋—亚洲地区板块构造演化的重要变换期^[45],浙闽地区处于隆升状态,晚侏罗世—早白垩世形成隆起,白垩纪中期出现地堑,因此,这几次间断变冷似乎与区域构造隆升事件有关。至于陈丕基^[46]推测在浙闽东部晚白垩世存在一个高达 3 500~4 000 m 的海岸山脉,与本次观察研究的结果在时间上明显错位,或许二者本身就没有必然的联系。

对比分析结果显示,东南地区与全国同期其它地区的古气候变化存在一定差异,表现为中国东北东南地区、华北中东部大部地区的主体处于干冷气候、局部属于干热气候^[6],四川盆地同期以干冷和干湿交替为特征^[41]。本文认为,导致这种差异的原因,一方面由于白垩纪的气候本身具有非均一性^[47],更为重要的是这三个地区的古纬度、古地貌存在不同,特别是东北南部和华北晚侏罗世—早白垩世期间的东部高原存在^[48]可能是根本原因。

5 小结

根据以上黏土矿物组成及变化的分析结果本文做如下总结:

(1) 浙江西南和福建西部地区的陆相白垩系中、下部沉积中伊利石是最常见、最典型的碎屑黏土矿物,平均超过 80%,总体显示热带—亚热带半干旱气候特征。

(2) 浙西南地区白垩纪中期的阿普特初期(寿昌组上部)、赛诺曼早期(衢县组中部)时期黏土矿物组合发生了较为明显的变化,即高岭石相对含量快速增加,超过 10%,最高到 38%,指示出现湿热间断气候,可能与局部古地理古植物相对繁盛、古湖泊面积相对较大有关。

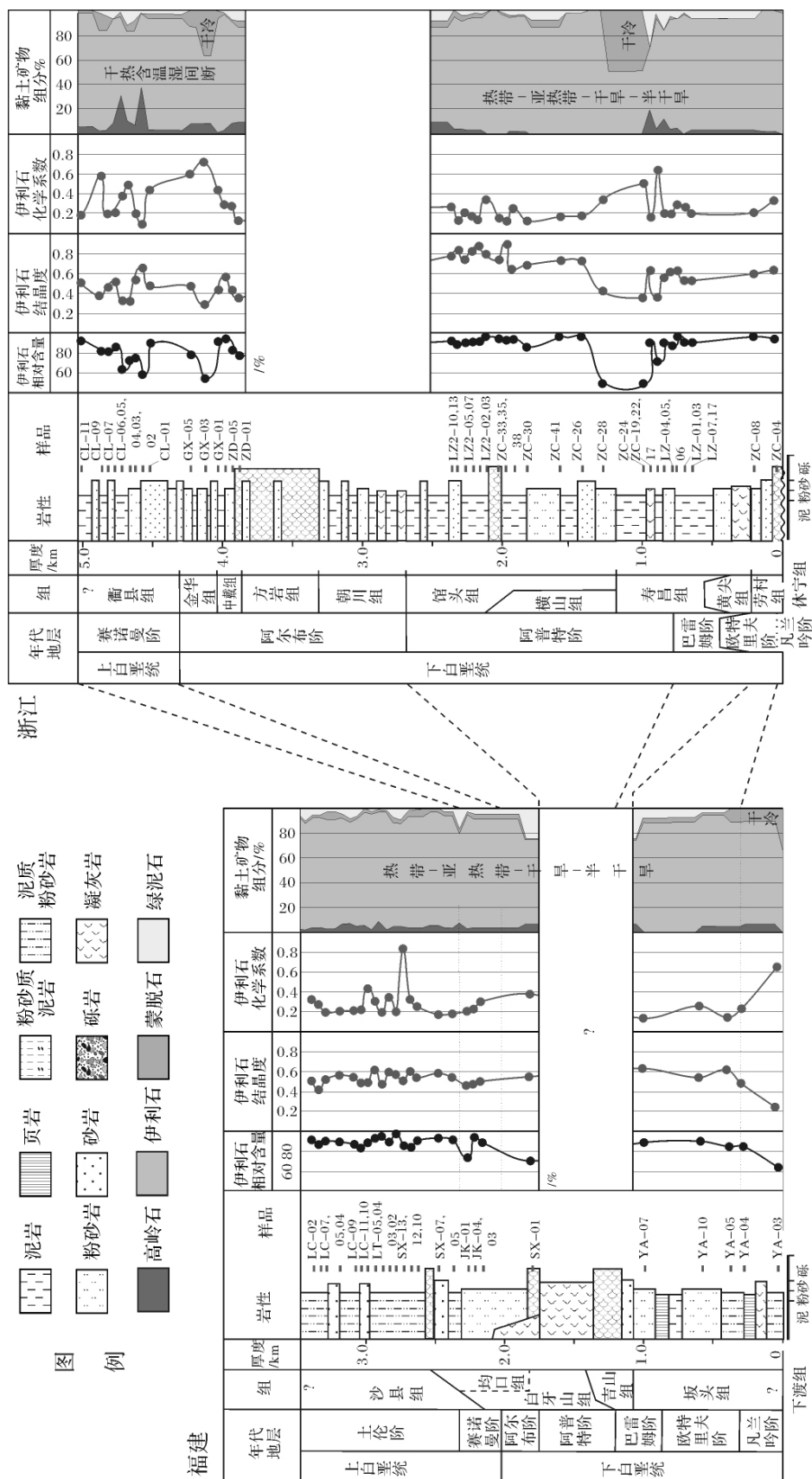


图3 浙闽地区白垩纪黏土矿物特征综合对比图

Fig. 3 Diagram showing the changes of the Cretaceous clay minerals in Zhejiang and Fujian

(3) 闽西凡兰吟期(坂头组)、浙西阿普特早期、阿尔布晚期、赛诺曼中期部分时期(寿昌组顶部—横山组下部、金华组中部、衢县组上部)在伊利石为主的背景下,蒙脱石含量较大幅度增加,最高可达49%,显示了相对干冷气候的间断,尽管大致对应于白垩纪几次全球性大洋缺氧事件结束后的一段时间,但更可能与区域隆升事件有关。

(4) 浙闽地区与华北、西南地区的同类沉积研究指示的古气候有一定差别,原因可能是古气候带位置不同,但晚侏罗世—早白垩世的东部高原可能是控制这些气候格局的主要地貌。

致谢 潘宇观老师在实验过程中给了大量帮助,蔡元峰教授、李响博士对黏土矿物数据结果含量转换给予了帮助和建议,王永栋研究员,研究生季燕南和罗来等参加了野外工作,在此一并感谢!

参考文献(References)

- 1 胡修棉. 白垩纪“温室”气候与海洋[J]. 中国地质, 2004, 31(4): 442-448 [Hu Xiumian. Greenhouse climate and ocean during the Cretaceous [J]. *Geology in China* 2004, 31(4): 442-448]
- 2 王成善. 白垩纪地球表层系统重大地质事件与温室气候变化研究[J]. 地球科学进展, 2006, 21(7): 838-842 [Wang Chengshan. Coupling of the earth surface system: Inferring from the Cretaceous major geological events[J]. *Advances in Earth*, 2006, 21(7): 838-842]
- 3 于革. 白垩纪温室气候机制的模拟研究评述[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(1): 20-25 [Yu Ge. Mechanisms and simulations of greenhouse climate in the Cretaceous: A review[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(1): 20-25]
- 4 Skelton P W, Spicer R A, Kelley S P, *et al.* The Cretaceous World [M]. London: Cambridge Express, 2003
- 5 洪汉烈, 于娜, 薛惠娟, 等. 临夏盆地晚更新世沉积物黏土矿物的特征及其古气候指示[J]. 现代地质, 2007, 21(2): 406-414 [Hong Hanlie, Yu Na, Xue Huijuan, *et al.* Clay mineralogy and its palaeoclimatic indicator of the Late Pleistocene in Linxia Basin [J]. *Geoscience*, 2007, 21(2): 406-414]
- 6 李祥辉, 徐宝亮, 陈云华, 等. 华北—东北南部地区中生代中晚期黏土矿物与古气候[J]. 地质学报, 2008, 82(5): 683-691 [Li Xianghui, Xu Baoliang, Chen Yunhua, *et al.* Clay minerals of the Middle-Late Mesozoic Mudrocks from North and Northeast China: Implications to Paleoclimate and Paleohighland [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(5): 683-691]
- 7 向芳, 宋见春, 罗来, 等. 白垩纪早期陆相特殊沉积的分布特征及气候意义[J]. 地质前缘, 2009, 16(5): 48-62 [Xiang Fang, Song Jianchun, Luo Lai, *et al.* Distribution characteristics and climate significance of continental special deposits in the Early Cretaceous [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(5): 48-62]
- 8 Bocherens H, Friis E M, Mariotti A, *et al.* Carbonisope abundances in Mesozoic and Cenozoic fossil plants: Palaeoecological implication[J]. *Lethaia*, 1994, 26: 347-358
- 9 Cerling T E. Carbon dioxide in the atmosphere: evidence from Cenozoic and Mesozoic paleosols [J]. *American Journal of Science*, 1991, 291: 377-400
- 10 Ekart D D, Cerling T E, Mont ez I P, *et al.* A 400 million year carbon isotope record of padogenic carbonate: implications for paleoatmospheric carbon dioxide [J]. *American Journal of Science*, 1999, 299: 805-827
- 11 Retallack G J. Greenhouse crises of the past 300 million years [J]. *Geological Society of Americac Bulletin*, 2009, 121: 1441-1455
- 12 鲁春霞. 黏土矿物在古环境研究中的指示作用[J]. 中国沙漠, 1997, 17(4): 456-459 [Lu Chunxia. Clay minerals as indicators of paleoenvironment [J]. *Journal of Desert Research*, 1997, 17(4): 456-459]
- 13 Chamley H. *Clay Sedimentology* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1989
- 14 蓝先洪. 黏土矿物作为古气候指标矿物的探讨[J]. 地质科技情报, 1990, 9(4): 31-35 [Lan Xianhong. Clay minerals as an index of paleoclimate[J]. *Geological Science and Technology Information*, 1990, 9(4): 31-35]
- 15 Karig D E, Ask M V S. Geological perspectives on consolidation of clay-rich marine sediments [J]. *Journal of Geophysical Research*. 2003, 109(4): 1-14
- 16 程捷, 唐德翔, 张绪教, 等. 黏土矿物在黄河源区古气候研究中的应用[J]. 现代地质, 2003, 17(3): 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 [J]. *Geosciences*, 2003, 17(3): 47-51]
- 17 Florias M, Segers S, Ranst E V. Palaeoenvironmental significance of the clay mineral composition of Olduvai basin deposits, northern Tanzania [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2007, 47: 39-48
- 18 李祥辉, 陈斯盾, 曹珂, 等. 浙闽地区白垩纪中期古土壤类型与古气候[J]. 地质前缘, 2009, 16(5): 63-70 [Li Xianghui, Chen Sidun, Cao Ke, *et al.* Paleosols of the mid-Cretaceous: A report from Zhejiang and Fujian, SE China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(5): 63-70]
- 19 李坤英, 沈加林, 王小平. 中国浙闽赣地区中生代陆相火山岩同位素年代学[J]. 地层学杂志, 1989, 13(1): 1-13 [Li Kunying, Shen Jialin, Wang Xiaoping. Isotopic geochronology of Mesozoic terrestrial volcanic rocks in the Zhejiang-Fujian-Jiangxi area [J]. *Journal of Stratigraphy*, 1989, 13(1): 1-13]
- 20 李兼海, 王国平, 郑铁藩, 等. 福建省地层多重划分-对比研究[J]. 福建地质, 1995, 14(4): 203-256 [Li Jianhai, Wang Guoping, Zheng Tiefan, *et al.* Study on the multiple classification and correlation of the strata in Fujian Province [J]. *Geology of Fujian*, 1995, 14(4): 203-256]
- 21 俞云文, 徐步台. 浙江中生代晚期火山—沉积岩系层序和时代[J]. 地层学杂志, 1999, 23(2): 136-145 [Yu Yunwen, Xu Butai. Stratigraphical sequence and geochronology of the upper Mesozoic volcano sedimentary rock series in Zhejiang [J]. *Journal of Stratigraphy*, 1999, 23(2): 136-145]

- 22 陈丕基. 中国陆相侏罗白垩系划分对比述评[J]. 地层学杂志, 2000, 24(2): 114-119 [Chen Piji. Comments on the classification and correlation of non-marine Jurassic and Cretaceous of China [J]. Journal of Stratigraphy, 2000, 24(2): 114-119]
- 23 左跃明, 巫建华, 周维勋. 闽浙赣粤中生代晚期火山岩岩石地层划分综述[J]. 华东地质学院学报, 2001, 24(3): 1-4 [Zuo Yueming, Wu Jianhua, Zhou Weixun. Summary for the Lithostratigraphic division of the West Zone of volcanic rock petrographic province in Late Mesozoic in Fujian, Zhejiang, Jiangxi, and Guangdong Province [J]. Journal of East China Geological Institute, 2001, 24(3): 1-4]
- 24 舒良树, 周新民, 邓平, 等. 中国东南部中-新生代盆地特征与构造演化[J]. 地质通报, 2004, 23(9-10): 876-884 [Shu Liangshu, Zhou Xinmin, Deng Ping, et al. Geological features and tectonic evolution of Meso-Cenozoic [J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(9-10): 876-884]
- 25 Moore D M, Reynolds R C. X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals [M]. New York, NY, United States, Oxford University Press, 1989: 1-332
- 26 Robert C, Kennett J P. Antarctic continental weathering changes during Eocene Oligocene cryosphere expansion: Clay mineral and oxygen isotope evidence [J]. Geology, 1997, 25(7): 587-590.
- 27 何良彪, 刘秦玉. 黄河与长江沉积物中黏土矿物的化学特征[J]. 科学通报, 1997, 42(7): 730-734 [He Liangbiao, Liu Qinyu. Chemical feature of the clay mineral in Yellow River and Yangtze River [J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(7): 730-734]
- 28 Diester-Haass L, Robert C, Chamley H. Paleoclimatic evolution in the Weddell Sea (Antarctica) during the middle Eocene-late Oligocene, from a coarse sediment fraction and clay mineral data [J]. Marine Geology, 1993, 114: 233-250
- 29 Stern L A, Chamberlain C P, Reynolds R C, et al. Oxygen isotope evidence of climate change from pedogenic clay minerals in the Himalayan molasse [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61(4): 731-744
- 30 陈涛, 王欢, 张祖青, 等. 黏土矿物对古气候指示作用浅析[J]. 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 [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2003, 22(4): 416-420].
- 31 Deconinck J F, Amedro F, Baudin F, et al. Late Cretaceous palaeoenvironments expressed by the clay mineralogy of Cenomanian-Campanian chalks from the east of the Paris Basin [J]. Cretaceous Research, 2005, 26(2): 171-179
- 32 汤艳杰, 贾建业, 谢先德. 黏土矿物的环境意义[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 337-344 [Tang Yanjie, Jia Jianye, Xie Xiande. Environment significance of clay minerals [J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 337-344]
- 33 Cruz M D, Duro F I. New data on the kaolinite-potassium acetate complex [J]. Clay Minerals, 1999, 34: 565-577
- 34 Murru M, Ferrera C, Da Pelo S, et al. The Palaeocene Middle Eocene deposits of Sardinia (Italy) and their palaeoclimatic significance [J]. Comptes Rendus-Academie des Sciences Geoscience, 2003, 335(2): 227-238
- 35 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 [J]. Science of Total Environment, 2003, 303(3): 203-214
- 36 Meunier A. Les mecanismes de l'altération des granites et le rôle des microsystemes. Etude des arenas du massif granitique de Parthenay (Deux-Sevres) [M]. Memoires de la Societe Geologique de France, 1980, 59(140): 79
- 37 Vanderaverroet P. Miocene to Pleistocene clay mineral sedimentation on the New Jersey shelf [J]. Oceanology. Acta, 2000, 23(1): 25-36
- 38 Parrish J T. Interpreting Pre-Quaternary Climate from the Geologic Record [J]. Columbia University Press, 1998: 121-124
- 39 Krumm S, Buggisch W. Sample preparation effects on illite crystallinity measurement; grain-size gradation and particle orientation [J]. Journal of Metamorphic Geology, 1991, 9(6): 671-677
- 40 Esquevia J. Influence de la composition chimique des illites sur cristallinité [J]. Bulletin Centre Resherch, Rau-SNPA, 1969, 3(1): 147-153
- 41 曹珂, 李祥辉, 王成善. 四川盆地白垩系黏土矿物特征及古气候探讨[J]. 地质学报, 2008, 82(1): 115-123 [Cao Ke, Li Xianghui, Wang Chengshan. The Cretaceous clay minerals and paleoclimate in Sichuan Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(1): 115-123]
- 42 褚玉娟. 江淮平原浅钻孔岩芯黏土矿物环境意义研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2008 [Zhu Yujian. Environment research of clay minerals from cores of shallow drilling in Huaihe Plain [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2008]
- 43 郑芬. 福建省古田小溪组早白垩世孢粉植物群[J]. 福建地质, 1993, 12: 210-217 [Zheng Fen. Early Cretaceous palynological flora in Xiaoxi Fm. of Gutian Basin, Fujian Province [J]. Geology of Fujian, 1993, 12: 210-217]
- 44 梁诗经, 文斐成, 陈润生, 等. 福建泰宁白垩纪红层植物及孢粉化石组合特征[J]. 福建地质, 2006, 25: 1-9 [Liang Shijing, Wen Feicheng, Chen Runsheng, et al. The assemblage and characters of floras and spore-pollen fossils in the Cretaceous red-bed basin of Taiping County, Fujian Province [J]. Geology of Fujian, 2006, 25: 1-9]
- 45 吴根耀. 白垩纪: 中国及邻区板块构造演化的一个重要变换期[J]. 中国地质, 2006, 33(1): 64-77 [Wu Genyao. Cretaceous: A key transition period of the plate tectonic evolution in China and its adjacent areas [J]. Geology in China, 2006, 33(1): 64-77]
- 46 陈丕基. 晚白垩世中国东南沿岸山系与中南地区的沙漠和盐湖化[J]. 地层学杂志, 1997, 21(3): 203-213 [Chen Peiji. Coastal Mountains of SE China, desertization and saliniferous lakes of Central China during the Upper Cretaceous [J]. Journal of Stratigraphy, 1997, 21(3): 203-213]
- 47 李祥辉, 胡修棉, 黄永健, 等. 白垩纪古海洋气候变化及主要问题[J]. 地球科学进展, 2004, 19: 1-10 [Li Xianghui, Hu Xiumian, Huang Yongjian, et al. Paleoclimatic evolution: A review of Cre-

- taceous Paleogeography [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19: 1-10]
- 48 张旗, 王元龙, 金惟俊, 等. 晚中生代的中国东部高原: 证据、问题和启示[J]. *地质通报*, 2008, 27(9): 1404-1430 [Zhang Qi, Wang Yuanlong, Jin Wweijun, *et al.* Eastern China Plateau during the Late Mesozoic: evidence, problems and implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(9): 1404-1430]

The Early-Mid Cretaceous Changes of Clay Mineral Composition from Zhejiang and Fujian Provinces, SE China: Indications to paleoclimate changes

LIU Ling^{1,2} LI Xiang-hui¹ WANG Yin¹ ZHOU Yong² CAO Ke³

(1. State Key Laboratory of Mineral Deposit Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093;

2. East China Mineral Exploration and Development Bureau, Nanjing 210007;

3. 402th Geological Survey, Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610213;

4. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao, Shandong 200092)

Abstract: Components of the clay mineral illite, smectite, kaolinite, and chlorite were measured and analyzed at eleven horizons from eleven observed sections to interpret the Early-Mid Cretaceous paleoclimate in western Zhejiang and Fujian provinces, SE China. The results show that in total the relative content of illite is over 80% in average in most of the Lower-Mid Cretaceous; abundant smectite is presented in the Bantou Formation of western Fujian and the upper Shouchang Formation, lower Hengshan Formation, middle Jinhua Formation, and upper Quxian Formation of west Zhejiang, in which the highest value is 49%; kaolinite is few, only high values (up to 38%) occurring in the middle Quxian Formation in western Zhejiang and upper Shouchang Formation. It is proposed that it was arid-semiarid climate of tropic-subtropic in the Early-Mid Cretaceous in SE China, corresponded to the whole greenhouse (continental) climate in the world; there could be an interruption of hot-humid climate in the early-Aptian and early Cenomanian in western Zhejiang that could be attributed to relatively developed vegetation and larger lacustrine area; and short durations of dry-cold climate could have happened in the Valanginian in western Fujian and in the early Aptian, late Albian, middle Cenomanian in western Zhejiang, which is corresponding to those of the Cretaceous oceanic anoxic events, and is supposed to be caused by regional tectonic uplifts in SE China.

Key words: clay mineral; paleoclimate; Cretaceous; Zhejiang; Fujian