

陕西镇安二叠系碳酸盐岩粘土矿物特征 及其对古气候的指示

曹婷丽,程成,李双应,庞长兴,魏星

合肥工业大学资源与环境工程学院,合肥,230009

内容提要:二叠纪是地质历史中的一个关键时期,恢复其古气候具有重要意义。陕西镇安地区二叠纪时为古特提斯洋东部的一个孤立台地,二叠纪地层连续发育,厚度巨大(超过3 km),是研究二叠纪古气候古环境的理想之地。粘土矿物作为重要的古气候指标,可以恢复地质历史中的古气候。本次研究对陕西镇安二叠系159件碳酸盐岩样品进行了粘土矿物的定性和半定量分析,结果显示研究区粘土矿物组合为伊利石(平均含量70.9%)、高岭石(平均含量7.9%)、蒙脱石(平均含量4.4%)、绿泥石(平均含量8.6%)和伊蒙混层(平均含量8.3%)。伊利石相对含量变化显示研究区二叠纪古气候的变化可分为8个段:即阿舍尔期(Asselian)至空谷期(Kungurian)中期的干冷期(P1);中二叠世中期经历了湿热(P2)—干冷(P3)—干冷暖湿交替(P4)的变化;卡匹敦期(Capitanian)中期至吴家坪期(Wuchiapingian)早期的气候变冷(P5);吴家坪期(Wuchiapingian)早期的短暂暖湿期(P6);吴家坪期(Wuchiapingian)早期至吴家坪期(Wuchiapingian)末期的气候逐渐变冷(P7);以及长兴期(Changhsingian)干冷暖湿交替显著的气候(P8)。同时,对比研究表明,研究区二叠纪古气候变化受晚古生代冰期事件(LPIA)、Kamura事件及G—LB(Guadalupian—Lopingian boundary)生物灭绝事件的影响。此外,研究区沃德期(Wordian)存在一个持续约2.4 Ma的短暂寒冷期,这与前人认为的空谷期(Kungurian)以来气候逐渐变暖不一致,其是否具有全球意义还有待进一步认识。

关键词:粘土矿物;古气候;二叠纪;古特提斯洋;陕西镇安

二叠纪是地质历史中的一个关键时期,全球的古地理、古气候、古环境以及古生物在二叠纪均发生了重大的变化,包括超大陆的汇聚与离散、冰室—暖室的转化、大火山岩省的爆发和生物大灭绝的发生等(Stampfli and Borel, 2002; Link, 2009; Sun Yadong et al., 2010; Shen Shuzhong and Shi Guangrong, 2013; 朱江等, 2013; Frank et al., 2015),这些都对地球系统的演化产生了深远的影响。二叠纪的沉积学研究程度较高,已经在气候模型(Parrish, 1993; Tabor et al., 2008)、冰期—间冰期演化(Link, 2009; Isbell et al., 2003, 2012; Retallack, 2013)等方面取得了较大进展,这为二叠纪古气候的深入研究奠定了基础。

粘土矿物存在于各种类型的沉积物(岩)中,其形成和转化与气候特别是温度和湿度有十分密切的关系(Singer, 1984)。一般地,温暖潮湿气候条件下,淋滤作用较强,碱金属、碱土金属元素容易流失,

先形成蒙脱石,进一步形成高岭石;寒冷干燥气候条件下,淋滤作用较弱,碱土金属不易淋滤流失,有利于形成伊利石、蒙脱石、绿泥石及混层类粘土矿物(孙庆峰等, 2011)。由于粘土矿物批量分析测试相对简单且其相对组成能较好反映古气候条件,越来越多的学者选择用粘土矿物进行古气候和古环境的恢复研究,并取得较大成功(Junttila et al., 2005; 洪汉烈等, 2010; Alphonse et al., 2011; Pal et al., 2012; 张强等, 2015; Decou et al., 2016; 程成等, 2016)。例如Alphonse等(2011)根据粘土矿物特征将西北特提斯洋边缘早白垩世凡兰吟期(Valanginian)划分为三个周期,并且认为除周期1受海平面变化影响外,周期2和周期3均主要受气候变化控制;程成等(2016)对安徽宿松坐山中二叠统栖霞组碳酸盐岩进行微相及粘土矿物分析,结果显示沉积相变化所反映的栖霞期4次相对海平面变化与粘土矿物分析所反映的3次明显的气候波动能

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41172097,40972082)的成果。

投稿日期:2016-07-15;改回日期:2017-02-24;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2017.02.009

作者简介:曹婷丽,女,1992年生。硕士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: 1278331603@qq.com。通讯作者:李双应,男,1956年生。博士,教授,主要从事沉积地质学和地层学研究。Email: lsysteven@126.com。

够较好的吻合,暗示气候对海平面和沉积记录有控制作用。此外,研究还表明粘土矿物所反映的古气候、古环境分析结果与孢粉、碳氧同位素等所反映的气候特征相似(蓝先洪, 1990; Dera et al., 2009; Heydari et al., 2013)。

陕西镇安地区二叠系剖面具有连续沉积且厚度巨大的特征,为二叠纪古气候的精细研究提供了可能;其特殊的古地理位置(古特提斯洋中的孤立台地)也使研究结果具备了重要的古地理和古环境意义。因此,利用碳酸盐岩的粘土矿物特征对研究区二叠纪古气候进行恢复并将其与华南、古特提斯及世界其他地区进行对比具有重要意义。

1 地质背景与地层划分

陕西镇安西口地区构造上属于南秦岭造山带(Meng Qingren, 2000),二叠纪时为古特提斯洋东部的一个孤立台地(殷鸿福等, 1995; 肖安成等, 2011)(图 1 和图 2)。

区内二叠系连续发育,厚度巨大,超过 3 km,主体由碳酸盐岩组成,其厚度占该剖面 90% 以上。许多学者对该剖面的古生物、地层和沉积环境进行过

详细研究(丁培榛等, 1987, 1989; 王训练等, 2006; 张海军等, 2006),并建立了详细的地层划分和对比方案。本次研究根据丁培榛等(1987, 1989)、王训练等(2006)的研究成果及国际地质年代表(IUGS, 2016),将陕西镇安西口地区二叠系自下而上划分为 3 统 9 阶,相对应的岩石地层划分为三里冲组和石门垭组,垭子组、五里坡组和水峡口组,及西口组、熨斗滩组和龙洞川组(表 1)。

2 研究方法

本次研究对陕西镇安西口二叠系剖面进行了剖面测量和系统采样。实测剖面总长度 7300 m,地层总厚度 3143 m。采集样品 272 件,本文对其中的 159 件碳酸盐岩样品进行了粘土矿物的定性分析及半定量计算。碳酸盐岩中粘土矿物的分析测试主要依据中国石油天然气总公司 1995 年发布的《沉积岩粘土矿物相对含量 X 射线衍射分析方法》,并参考 Alphonse 等(2011)及 Westermann 等(2013)的方法。其中,粘土矿物的提取步骤如下:第一步,将样品粉碎,并过 80 目的标准筛,从而获得样品的粉末;第二步,将获得的粉末放入烧杯中,加入 5% 稀盐酸

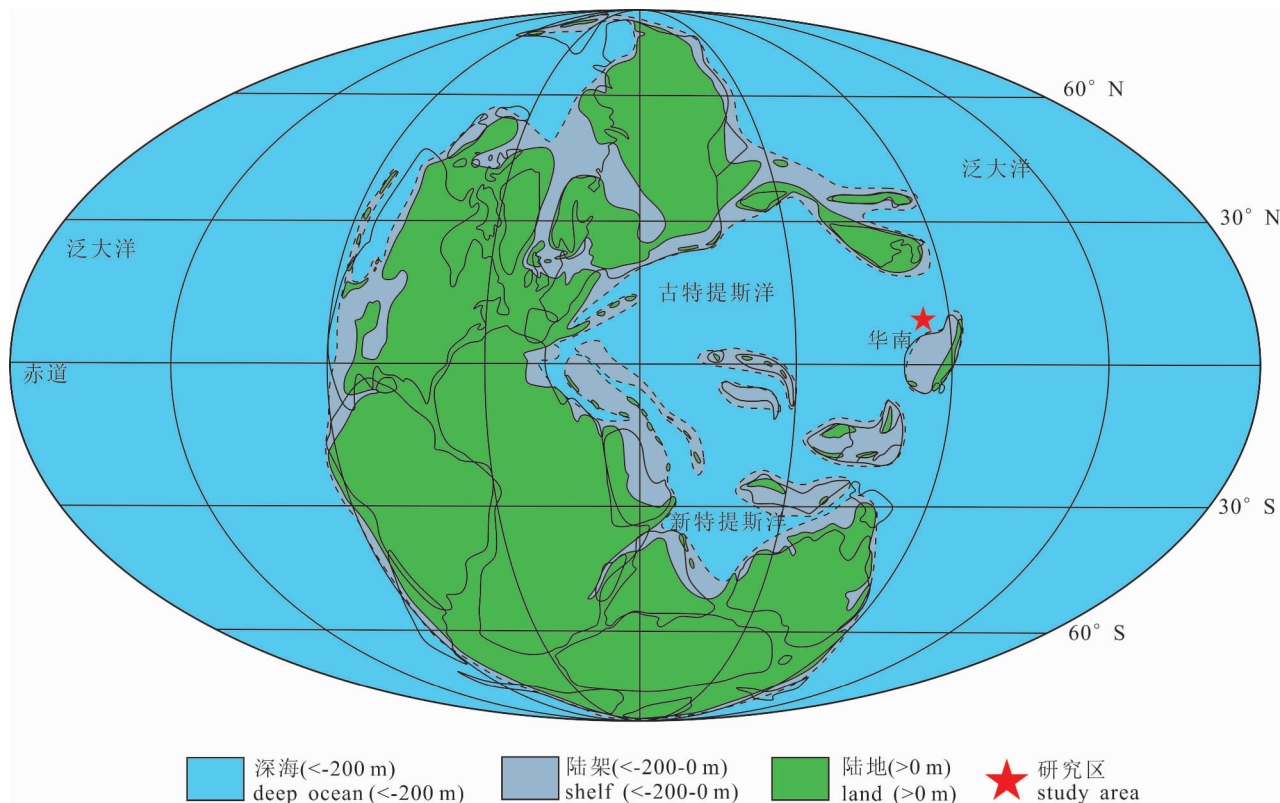


图 1 二叠纪古地理图(据 Isozaki et al., 2011)及研究区位置
Fig. 1 Permian paleogeography map(modified from Isozaki et al., 2011) and location of the study area

浮液离心,从而得到粘土矿物样品,实验采用的转速为 3500 转,离心时间为 10 min。

将分离得到的粘土矿物样品分别制备成三种定向片:①在粘土矿物样品加入适量的蒸馏水,得到乳化的泥状样用滴管吸出,滴到载玻片上,任其自然风干,制成自然定向片(N)并测试;②将测试后的自然片放入装有乙二醇(深度约 1 cm 左右)的干燥器中,在 50℃ 的条件下,加热 8h 或更长时间,制备成乙二醇定向片(EG)并测试;③最后将测试后的乙二醇片放入马弗炉中,以 550℃ 恒温加热 2 h,并自然冷却至室温并测试。

本次实验使用的仪器为丹东浩元 DX-2700 型衍射仪,仪器电压 40 kV,管流 30 mA,扫描步宽为 0.02°。自然定向片扫描范围为 4°~25°,乙二醇定向片扫描范围为 4°~30°,高温定向片扫描范围为 4°~15°。利用测试得到的每个样品的三种 X 衍射图谱来对样品的粘土矿物组成进行定性分析和半定量计算(图 3)。

定性分析是对比三个定向片的图谱特征得到的。其中,自然曲线上,1.0 nm 的衍射峰反映了伊利石(It)的存在;0.7 nm 的衍射峰表明样品中含有

高岭石(Kao)或/和绿泥石(C),而这两种矿物需通过 0.358 nm 和 0.353 nm 峰来区分,0.358 nm 峰为高岭石,0.353 nm 峰为绿泥石。由于伊利石、高岭石、绿泥石无膨胀性,乙二醇曲线中峰位不变,因此乙二醇曲线主要用来确定蒙脱石(S)及伊蒙混层(I/S)。蒙脱石在自然曲线中峰值为 1.50 nm 或 1.25 nm,乙二醇曲线上该峰移至 1.70 nm 处;伊蒙混层在自然曲线上 1.00 nm 到 1.54 nm 范围内有衍射峰,乙二醇曲线上该峰往 1.70 nm 处移动。定性分析表明研究区域的粘土矿物组合为蒙脱石、伊利石、高岭石、绿泥石和伊蒙混层,根据《沉积岩粘土矿物相对含量 X 射线衍射分析方法》,其相应的计算公式如下:

$$(Kao + C) = \frac{100 \times I_{0.7nm}(N)/1.5}{I_{1.0nm}(550^{\circ}C) + I_{0.7nm}(N)/1.5}$$
$$Kao = \frac{h_{0.358nm}(EG)}{h_{0.358nm}(EG) + h_{0.353nm}(EG)} \times (Kao + C)$$
$$C = (Kao + C) - Kao$$
$$S = \frac{I_{1.7nm}(EG)/4}{I_{1.0nm}(550^{\circ}C)} \times [100 - (Kao + C)]$$

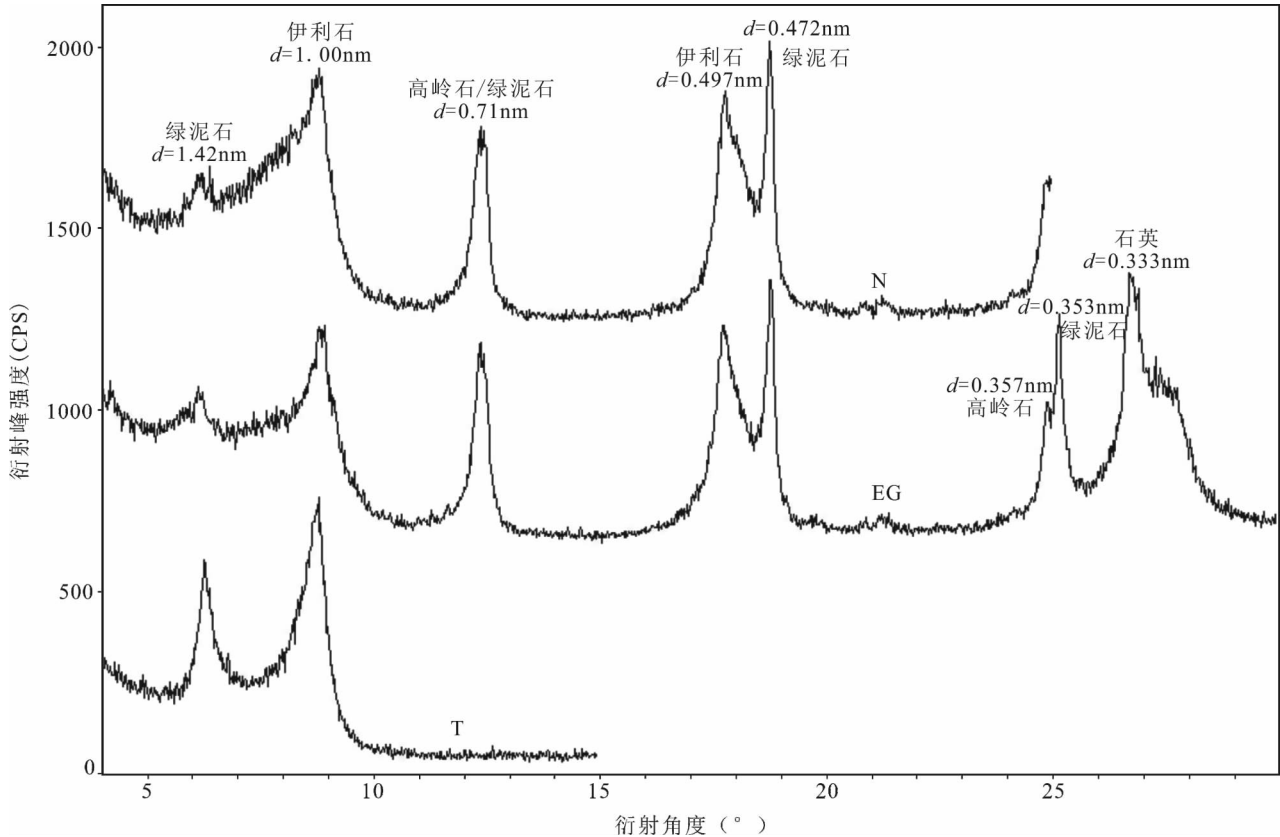


图 3 典型矿物(B71)的 X 射线衍射谱
Fig. 3 Typical diagram (B71) of X-ray powder diffraction patter

$$I_t = \frac{I_{1.0nm}(EG) \times [h_{0.7nm}(N)/h_{0.7nm}(EG)]}{I_{1.0nm}(550^{\circ}C)} \times [100 - (Kao + C)]$$
$$I/S = 100 - (S + I_t + Kao + C)$$

式中,*kao* 为高岭石(Kao)、*C* 为绿泥石(*C*),*S* 为蒙脱石(*S*),*I_t* 为伊利石(*I_t*),*I/S* 为伊蒙混层(*I/S*) 的相对含量;*I_{0.7nm}*(*N*) 为 *N* 图谱上 0.7 nm 衍射峰的强度;*I_{1.0nm}*(550℃) 为 550℃ 图谱上 1.0 nm 衍射峰的强度;*h_{0.358nm}*(*EG*) 为 *EG* 图谱上 0.358 nm 衍射峰的高度;*h_{0.353 nm}*(*EG*) 为 *EG* 在图谱上 0.353 nm 衍射峰的高度;*I_{1.7nm}*(*EG*) 为 *EG* 在图谱上蒙脱石 1.7 nm 衍射峰的强度;*I_{1.0nm}*(*EG*) 为 *EG* 在图谱上 1.0 nm 衍射峰的强度;*h_{0.7nm}*(*N*) 为 *N* 在图谱上 0.7 nm 衍射峰的高度;*h_{0.7nm}*(*EG*) 为 *EG* 在图谱上 0.7 nm 衍射峰的高度;如果测试结果中没有高岭石(Kao) 而只有绿泥石(*C*), 或者只有绿泥石(*C*) 而没有高岭石(Kao) 的时候,其百分含量按照下式计算:

$$Kao \text{ 或 } C = \frac{I_{0.7nm}(N)/1.5}{I_{1.0nm}(550^{\circ}C) + I_{0.7nm}(N)/1.5} \times 100$$

而当只有蒙脱石(*S*) 无伊蒙混层(*I/S*),或者只有伊蒙混层(*I/S*) 无蒙脱石(*S*) 时,其百分含量按照下式计算:

$$S \text{ 或 } I/S = 100 - (I_t + Kao + C)。$$

3 气候指标及可行性分析

粘土矿物主要是母岩物质风化形成的,常见的粘土矿物包括伊利石、高岭石、蒙脱石、绿泥石、伊利石/蒙脱石混层和绿泥石/蒙脱石混层等,不同的气候条件必然会出现不同的风化产物。因此,可以根据剖面上粘土矿物的种类和组合特征来推测当时的风化环境,从而恢复当时古气候。

伊利石是由长石、云母等铝硅酸盐矿物在干燥气候环境下、弱碱性介质条件下风化脱 K⁺ 形成(Weaver 和 Pollard,1973),因此气候干燥、低淋滤作用对伊利石的形成和保存有利(Chamley,1989),伊利石可作为干冷气候的标志(张乃嫻,2000)。绿泥石一般形成于弱碱性环境下,其水镁层中的二价铁容易被氧化,因此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)得以保存(Ducloux et al., 1976; Gingele et al., 2001)。伊利石和绿泥石组合指示干旱的古气候环境,其相对含量的增加代表气候逐渐变为干冷(Vanderaveroet, 2000; Winkler et al., 2002)。高岭石是酸性火山岩和变质岩在暖湿条件下风化而成的,指示沉积物母

岩在炎热气候条件下遭遇较强淋滤作用(Adatte et al., 2002),因此气候温暖潮湿有利于高岭石的形成。蒙脱石形成跟水解作用强弱有关(Chamley, 1989),当环境干湿交替时,伊利石层间 K⁺ 不断淋失,经由伊蒙混层矿物向蒙脱石转化(曹珂等, 2008;李祥辉等不,2008),但有研究显示,在寒冷条件下也可以形成蒙脱石(Keller, 1970; 刘志飞等, 2007)。

粘土矿物分为自生粘土矿物和碎屑粘土矿物,只有碎屑粘土矿物才能反映源区的风化情况,所以利用粘土矿物分析古气候时,需要进行粘土矿物成因的判别。而成岩作用过程中会导致粘土矿物的性质发生转变,从而影响其可靠性。因此,需要判断其是否发生变质作用。Kübler(1964)以伊利石结晶度 Kübler 指数 0.42Δθ°和 0.25Δθ°为界限,把变质程度分为三个区域:未变质(>0.42Δθ°)、近变质(0.25~0.42Δθ°)、浅变质(<0.25Δθ°),并认为只有当 Kübler 指数大于 0.25Δθ°,才可以认为粘土矿物基本保持原来的性质,可以指示古气候的变化。本文采用法国里尔大学沉积与地球动力学实验室建立的 Kübler 指数矫正的经验公式 $Y = (0.983X - 0.012)/0.58$ 进行矫正。计算结果表明,研究区粘土矿物矫正前的 Kübler 指数几乎均大于 0.25Δθ°,且大部分大于 0.42Δθ°,矫正后的 Kübler 指数均大于 0.42Δθ°,伊利石结晶度高,且没有出现从下往上结晶度变小的趋势(附录 1,图 4),说明研究区粘土矿物受到埋藏成岩和变质作用的影响较低,因此可以认为粘土矿物为碎屑来源,可以指示源区的风化条件。同时,从石炭纪至早三叠世研究区属于一个相对稳定的(孤立)碳酸盐岩台地环境,因此可以用粘土矿物来还原研究区古气候变化。

4 二叠纪古气候分析

4.1 研究区古气候特征

粘土矿物定性分析显示研究区粘土矿物组合为伊利石、蒙脱石、高岭石、绿泥石及伊蒙混层。半定量计算结果表明,伊利石含量最高,平均为 70.9%,蒙脱石、绿泥石、高岭石、伊蒙混层的相对含量均值分别为 4.4%、8.6%、7.9%、8.3%(附录 1)。结合研究区的实际情况,选择伊利石的相对含量作为恢复古气候的指标,同时参考其他矿物组成特征,本文将研究区二叠纪的古气候变化划分为以下 8 个阶段(图 4):

阶段一(P1):阿舍尔期(Asselian)至空谷期

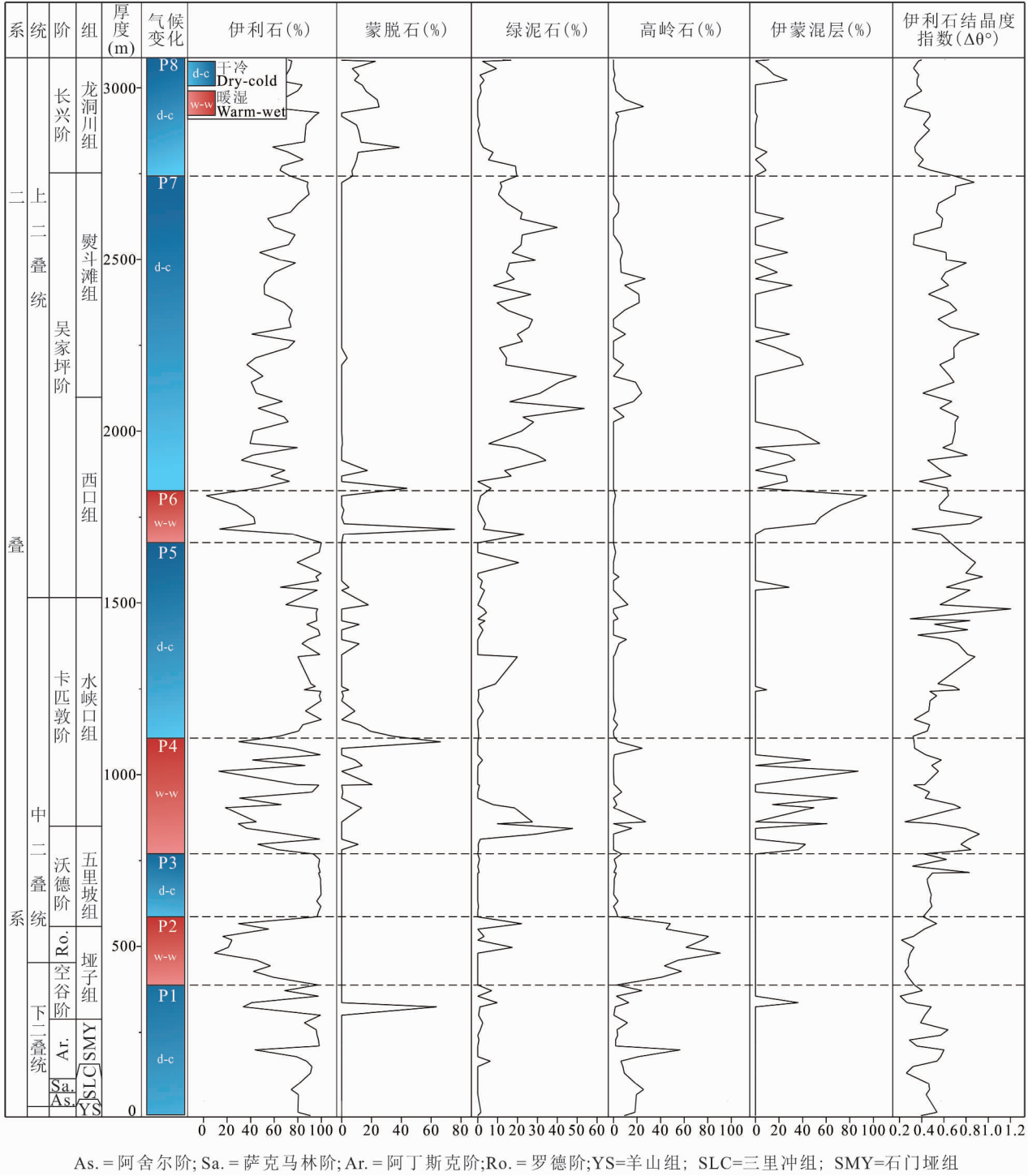


图4 镇安西口二叠纪粘土矿物纵向变化曲线及古气候变化趋势图
Fig. 4 Vertical changes of clay minerals and paleoclimate changes in Xikou region, Zhen'an country

(Kungurian)中期,对应羊山组到埡子组下部。粘土矿物以伊利石为主,其相对含量为 80.4% (33.7% ~ 99.3%),其次为高岭石,相对含量为 13.6% (0.3% ~ 56.5%),几乎不含蒙脱石,绿泥石及伊蒙混层。伊利石在干燥寒冷的条件下富集,由此可知,

该阶段气候虽有些许波动,但总体干燥寒冷。
阶段二(P2):空谷期(Kungurian)中期至沃德期(Wordian)早期,对应埡子组中部到五里坡组底部。粘土矿物以高岭石为主,相对含量为 62.0% (43.2% ~ 90.7%),伊利石含量较第一阶段明显降

低,为33.3%(9.3%~56.8%),且伊利石含量先由56.8%降到9.3%再增加到29.6%。这表明该阶段气候虽然经历了由温暖潮湿到寒冷干燥的转变,但变化幅度不大,同时,高岭石含量很高,表明该阶段总体湿热气候为主。

阶段三(P3):沃德期(Wordian)早期到沃德期(Wordian)晚期,对应五里坡组底部到五里坡组顶部。粘土矿物以伊利石为主,伊利石含量陡增,相对含量为97.8%(93.2%~99.8%),且含量几乎均大于95%,可见该时期气候忽然变冷,并且持续很冷,气候波动很小。

阶段四(P4):沃德期(Wordian)晚期到卡匹敦期(Capitanian)中期,对应五里坡组顶部到水峡口组下部。粘土矿物以伊利石为主,相对含量为58.9%(12.8%~99.2%),该阶段伊利石含量波动很大,暗示该时期暖湿干冷气候交替出现的特征。同时,该阶段的伊蒙混层含量较高,相对含量为21.4%,而伊蒙混层常常指示干湿交替的气候特征,这与伊利石含量变化所反映的气候特征一致。

阶段五(P5):卡匹敦期(Capitanian)中期至吴家坪期(Wuchiapingian)早期,对应水峡口组中部到西口组下部。粘土矿物以伊利石为主,相对含量为89.9%(64.3%~99.9%)。表明该阶段气候特征为寒冷干燥,且气候波动很小。

阶段六(P6):吴家坪期(Wuchiapingian)早期,对应西口组中部。伊利石相对含量为34.3%(2.4%~75.6%),伊利石含量由75.6%降低到2.4%,呈明显下降趋势,指示气候逐渐变为温暖潮湿。

阶段七(P7):吴家坪期(Wuchiapingian)早期至吴家坪期(Wuchiapingian)末期,对应西口组上部至熨斗滩组。粘土矿物以伊利石为主,相对含量为61.6%(32.1%~89.6%),伊利石含量呈缓慢上升趋势,同时该阶段绿泥石含量较高,相对含量20.9%。高含量的伊利石和绿泥石组合指示气候逐渐变的干冷,该阶段伊蒙混层有出现,说明气候总体干冷,但有干湿交替现象出现。

阶段八(P8):长兴期(Changhsingian),对应龙洞川组。粘土矿物以伊利石为主,相对含量为75.1%(49.3%~98.1%)。该阶段伊利石含量波动较为明显,且绿泥石及蒙脱石含量变化较大,绿泥石含量先降低再升高(19.7%~0%~16.7%),蒙脱石相对含量12.3%(0%~38.7%),呈明显的波动趋势。粘土矿物组合特征指示该阶段气候整体干

冷,但气候的干冷暖湿交替想象较显著。

4.2 二叠纪古气候对比

二叠纪是显生宙重要的最极端的气候转折期之一,从早二叠世的极端冰室,即晚古生代冰期(LPIA)的峰期,逐渐变暖至晚二叠世开始进入长期温室状态(Frank et al., 2015)。Mii等(2012)通过对澳大利亚悉尼盆地二叠系腕足类化石的氧同位素分析,指出晚石炭世至早二叠世气候寒冷,从空谷期(Kungurian)开始,气候由寒冷逐渐向温暖转变。Chen等(2013)通过对华南等低纬度地区的二叠纪牙形石磷酸盐氧同位素分析,也发现早二叠世阿瑟尔期(Asselian)、萨克马尔期(Sakmarian)和亚丁斯克期(Artinskian)时受晚古生代冰期(LPIA)影响,氧同位素值较高,气候较冷。从早—中空谷期(Kungurian)开始氧同位素开始下降,表明气候开始变暖,并持续至中二叠世卡匹敦期(Capitanian)晚期(图4),这与海平面的波动幅度从空谷阶开始显著下降吻合(Rygel et al., 2008)。同时,程成等(2016)对安徽宿松坐山中二叠统栖霞组碳酸盐岩进行微相及粘土矿物分析,发现栖霞期海平面整体上升、气候整体变暖湿,该趋势也与该时期全球气候和海平面变化一致(栖霞期的形成时代与空谷期(Kungurian)相当(Wang Yue et al., 2011))。上述研究与陕西镇安西口地区的古气候变化趋势具有较大的一致性,即研究区从石炭纪末到空谷期(Kungurian)中期,伊利石含量较高,虽有些许波动,但总体气候干冷,而空谷期(Kungurian)中期之后伊利石含量明显降低,以高岭石为主,表明气候变湿热。不同的地方在于,研究区从空谷期(Kungurian)中期到卡匹敦期(Capitanian)晚期气候并不是一直变暖,而是在沃德期(Wordian)出现一个寒冷期的间断,然后再次变暖(图5)。

研究区沃德期(Wordian)所对应的五里坡组总厚度为277m,代表3.7 Ma(~268.8~265.1Ma),而寒冷期(样品:B15~sx042)所对应的岩层厚度为183m。同时,由于五里坡组主要为颗粒—泥粒灰岩,岩性稳定,因此可以认为研究区沃德期(Wordian)的沉积物堆积速率恒定,从而推断该寒冷期持续了2.4Ma。然而,这一短暂的寒冷期是否只是一区域性事件,其是否具有更广泛的对比意义还有待进一步研究。

中—晚二叠世(Guadalupian—Lopingian)之交,研究区发生重大的气候变化。卡匹敦期(Capitanian)晚期伊利石相对含量明显变高,气候显

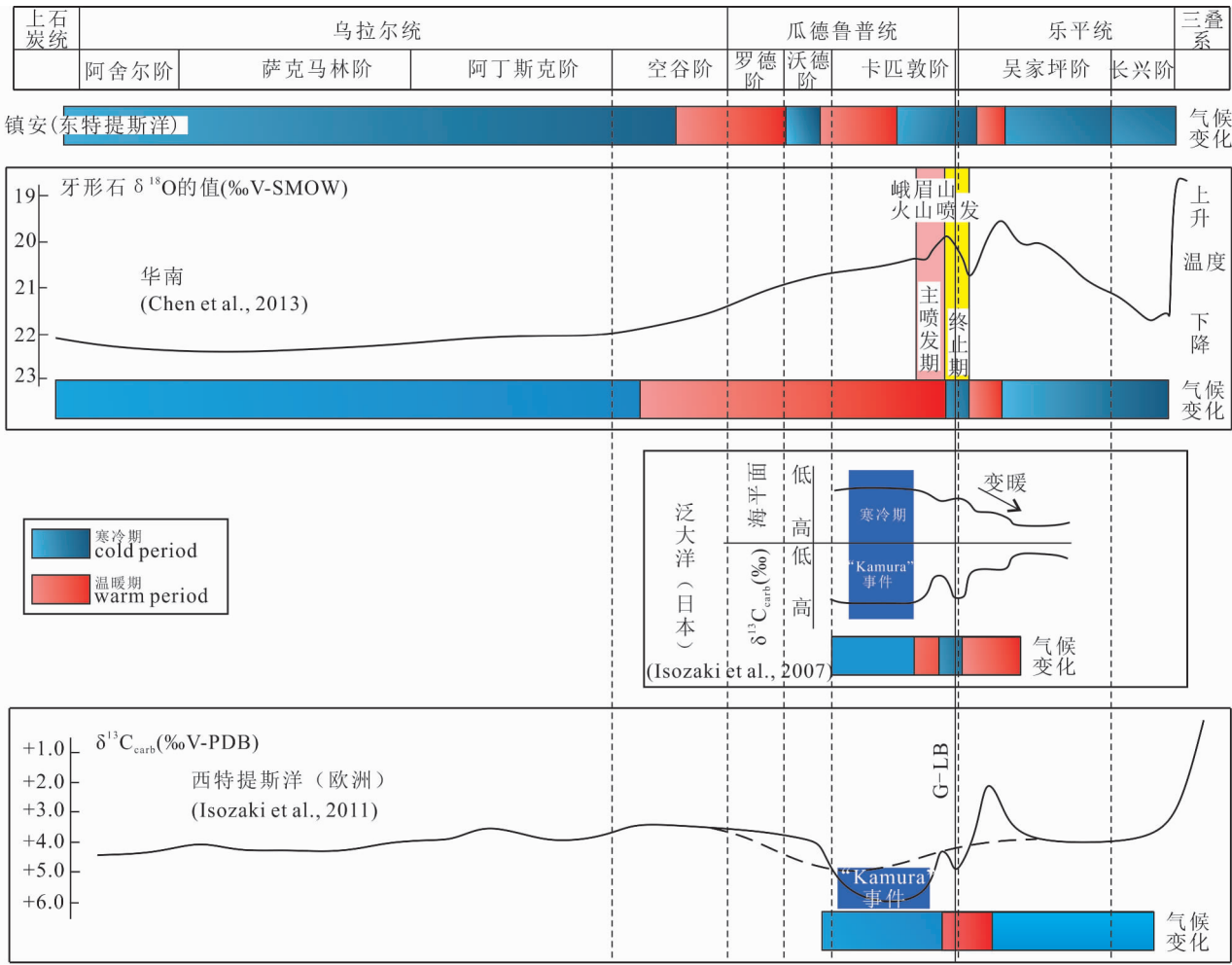


图5 研究区二叠纪古气候变化及其与华南(Chen et al., 2013)、西特提斯洋(Isozaki et al., 2011)及泛大洋(Isozaki et al., 2007)的对比。峨眉山火山喷发的时间据 Paul 等(2009)

Fig. 5 Paleoclimate changes of Permian in study area, and the comparison with South China (Chen et al., 2013), western Tethys (Isozaki et al., 2011) and Panthalassa (Isozaki et al., 2007). The eruption time of Emeishan based on Paul et al. (2009)

著干冷,至吴家坪期(Wuchiapingian)初期伊利石含量又忽然降低,经历了一个短暂的温暖期。随后伊利石含量逐渐降低,气候变得干冷(图5)。这与牙形石磷酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 值所指示的低纬度地区在卡匹敦期(Gapitanian)晚期至吴家坪期初期气候下降 $6\sim 8^{\circ}\text{C}$,然后在吴家坪期早期又显著变暖,随后逐渐变冷的变化趋势是一致的(图5)(Chen et al., 2011; 2013),只是研究区开始变冷的时间较早,暗示研究区受峨眉山火山作用影响不大。Chen等(2011; 2013)认为该期间的温度下降与火山作用产生的大面积玄武岩的化学风化消耗大气中的 CO_2 有关。同时,研究区卡匹敦期(Gapitanian)晚期的寒冷期与泛大洋及西特提斯洋中高产率事件引发的气候变冷事件("Kamura事件")(Isozaki et al., 2007; 2011)具

有良好的呼应,则暗示研究区卡匹敦期(Gapitanian)可能受该事件影响(图5)。晚二叠世吴家坪期初期出现短暂的暖湿期,可能与G—LB(Guadalupian—Lopingian boundary)生物灭绝导致生产率下降,大气 CO_2 升高有关,温度回升有关。之后,吴家坪期(Wuchiapingian)早期至长兴期(Changhsingian)的气候逐渐变冷则与该时期的全球气候整体变冷一致(Chen et al., 2013)。

综上,早二叠世受晚古生代冰期事件(LPIA)影响,研究区气候较为干冷,之后冰体开始融化,空谷期(Kungurian)中期开始气候变湿热,期间可能受到区域性冰川事件影响在沃德期(Wordian)出现一个寒冷期,然后至卡匹敦期(Gapitanian)中期气候较为暖湿。卡匹敦期(Gapitanian)晚期受"Kamura事件"

影响,气候变干冷。晚二叠世吴家坪期初期出现短暂的暖湿期,可能与 G—LB 的生物灭绝有关。之后,吴家坪期(Wuchiapingian)早期至长兴期(Changhsingian)的气候逐渐变冷则与该时期的全球气候变冷一致。

5 结论

(1)陕西镇安西口二叠系地层发育完整,剖面连续出露,厚约3143 m。对该剖面159件碳酸盐岩样品进行了系统地粘土矿物定性和半定量XRD分析,结果表明研究区碳酸盐岩中的粘土矿物组合为伊利石、蒙脱石、高岭石、绿泥石和伊蒙混层。其中,伊利石含量最高为70.9%(2.4%~99.9%),蒙脱石、高岭石、绿泥石、伊蒙混层的相对含量较低,均值分别为4.4%、7.9%、8.6%、8.3%。伊利石Kübler指数矫正前几乎均大于0.25 $\Delta\theta^\circ$,矫正后的Kübler指数均大于0.42 $\Delta\theta^\circ$,说明研究区域的粘土矿物变质程度较低,同时研究区二叠纪构造环境相对稳定,因此可以用粘土矿物来还原古气候变化。

(2)根据伊利石相对含量和粘土矿物组合特征变化,将研究区古气候变化分为八个期段:阿舍尔期(Asselian)至空谷期(Kungurian)中期的干冷期(P1);中二叠世中期经历了湿热(P2)——干冷(P3)——干冷暖湿交替(P4)的变化;卡匹敦期(Capitanian)中期至吴家坪期(Wuchiapingian)早期的气候变冷(P5);吴家坪期(Wuchiapingian)早期的短暂暖湿期(P6);吴家坪期(Wuchiapingian)早期至吴家坪期(Wuchiapingian)末期的气候逐渐变冷(P7);以及长兴期(Changhsingian)干冷暖湿交替的气候(P8)。

(3)对比研究显示,研究区二叠纪的气候变化受全球气候变化和生态事件影响。早二叠世受晚古生代冰期事件(LP1A)影响,研究区气候较为干冷,空谷期(Kungurian)中期开始气候变湿热,期间可能受到区域性冰川事件影响在沃德期(Wordian)出现一个寒冷期,随后至卡匹敦期(Gapitanian)中期气候较为暖湿。卡匹敦期(Gapitanian)晚期研究区受“Kamura事件”影响,气候变干冷。晚二叠世吴家坪期初期出现短暂的暖湿期,可能与G—LB的生物灭绝有关。之后,吴家坪期(Wuchiapingian)早期至长兴期(Changhsingian)的气候逐渐变冷则受当时的全球古气候控制。

(4)研究区沃德期存在一个短暂的寒冷期,这与前人认为的空谷期(Kungurian)中期到卡匹敦期

(Capitanian)晚期气候一直变暖不一致。由于研究区五里坡组(沃德期(Wordian))主要为颗粒—泥粒灰岩,岩性稳定,因此认为研究区沃德期(Wordian)的沉积物堆积速率恒定,从而推断该寒冷期持续了2.4 Ma。然而其是否只是一区域性事件,是否具有更广泛的对比意义还有待进一步研究。

致谢:感谢合肥工业大学周跃飞教授在X射线衍射分析实验中的帮助!

参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 曹珂,李祥辉,王成善. 2008. 四川盆地白垩系粘土矿物特征及古气候探讨. 地质学报, 82(1): 115~123.
- 程成,李双应,赵万为,彭亮. 2016. 安徽宿松坐山中二叠统栖霞组碳酸盐岩微相和黏土矿物特征及其对沉积相和古气候的指示. 地质学报, 90(6): 1208~1219.
- 丁培榛,金同安,孙秀芳. 1987. 陕西镇安西口二叠纪地质旅行指南. 西北地质科学, (1): 113~138.
- 丁培榛,金同安,孙秀芳. 1989. 东秦岭陕西镇安西口地区二叠纪地层及动物群. 西北地质科学, (1): 1~68.
- 洪汉烈,王朝文,徐耀明,张克信,殷科. 2010. 青藏高原新生代以来气候环境演化的粘土矿物学特征. 地球科学(中国地质大学学报), 35(5): 728~736.
- 蓝先洪. 1990. 粘土矿物作为古气候指标矿物的探讨. 地质科技情报, 9(4): 31~35.
- 李祥辉,徐宝亮,陈云华,曹珂,杨海楠. 2008. 华北—一东南部地区中生代中晚期粘土矿物与古气候. 地质学报, 82(5): 683~691.
- 刘志飞,赵玉龙,李建如,Christophe Colin. 2007. 南海西部越南岸外晚第四纪黏土矿物记录:物源分析与东亚季风演化. 中国科学(D辑:地球科学), 37(9): 1176~1184.
- 孙庆峰,Christophe Colin,陈发虎,张家武. 2011. 气候环境变化研究中影响粘土矿物形成及其丰度因素的讨论. 岩石矿物学杂志, 30(2): 291~300.
- 王训练,王雷,张海军,张世红,夏国英. 2006. 陕西镇安西口石炭系—二叠系界线剖面综合地层学研究. 地学前缘, 13(6): 291~302.
- 肖安成,魏国齐,沈中延,王亮,杨威,钱俊锋. 2011. 扬子地块与南秦岭造山带的盆地系统与构造耦合. 岩石学报, 27(3): 601~611.
- 殷鸿福,彭元桥. 1995. 秦岭显生宙古海洋演化. 地球科学, 20(6): 605~611.
- 张乃娴,万国江,马玉光. 2000. 威宁草海沉积物中的粘土矿物及其环境记录. 地质科学, 35(2): 206~211.
- 张海军,王训练,丁林,夏国英,王雷. 2006. 陕西镇安西口石炭—二叠系界线剖面:类生物多样性与高频海平面变化. 中国科学(D辑:地球科学), 36(3): 233~241.
- 张强,陈木宏,刘建国, Yu Zhaojie, 张兰兰,向荣. 2015. 白令海IODP U1340井粘土矿物组合特征及其古气候意义. 中国科学:地球科学, 45(4): 468~480.
- 朱江,张招崇. 2013. 大火成岩省与二叠纪两次生物灭绝关系研究进展. 地质论评, 59(1): 137~148.
- Adatte T, Keller G, Stinnesbeck W. 2002. Late Cretaceous to early Paleocene climate and sea-level fluctuations: the Tunisian record.

- Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 178 (3 ~ 4): 165 ~ 196.
- Cao Ke, Li Xianghui, Wang Chengshan. 2008&. The cretaceous clay minerals and paleoclimate in Sichuan Basin. *Acta Geologica Sinica*, 82(1): 115 ~ 123.
- Chamley H. 1989. *Clay Sedimentology*. Berlin: Springer-Verlag.
- Chen B, Joachimski M M, Sun Y D, Shen S Z, Lai X L. 2011. Carbon and conodont apatite oxygen isotope records of Guadalupian—Lopingian boundary sections: Climatic or sea-level signal? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 311 (3 ~ 4): 145 ~ 153.
- Chen B, Joachimski M M, Shen S Z, Lambert L L, Lai X L, Wang X D, Chen J, Yuan D X. 2013. Permian ice volume and palaeoclimate history: Oxygen isotope proxies revisited. *Gondwana Research*, 24: 77 ~ 89.
- Cheng Cheng, Li Shaungying, Zhao Wanwei, Peng Liang. 2016&. The characteristics of Microfacies and clay minerals of Chihhsia Formation carbonate rocks of Middle Permian in Susong, Anhui and its implication for sedimentary facies and paleoclimate. *Acta Geologica Sinica*, 90(6): 1208 ~ 1219.
- Decou A, Andrews S D, Alderton D H M, Morton A. 2016. Triassic to Early Jurassic climatic trends recorded in the Jameson Land Basin, East Greenland: clay mineralogy, petrography and heavy mineralogy. *Basin Research*, 1 ~ 16.
- Dera G, Pellenard P, Neige P, Deconinck J F, Puc  at E, Dommergues J L. 2009. Distribution of clay minerals in Early Jurassic Peritethyan seas: Palaeoclimatic significance inferred from multiproxy comparisons. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 271(2): 39 ~ 51.
- Ding Peizhen, Jin Tongan, Sun Xiufang. 1987&. An excursion guide to Permian geology of Xikou Area, Zhen' an County, Shaanxi. *Northwest Geoscience*, (1): 113 ~ 138.
- Ding Peizhen, Jin Tongan, Sun Xiufang. 1989&. The marine Permian strata and its faunal assemblages in Xikou Area of Zhen'an County, South Shaanxi, East Qinling Range. *Northwest Geoscience*, (1): 1 ~ 68.
- Duchamp S. 2011. Climate and sea-level variations along the northwestern Tethyan margin during the Valanginian C-isotope excursion: mineralogical evidence from the Vocontian Basin (SE France). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 302 (3): 243 ~ 254.
- Ducloux J. 1976. Smectite, Chlorite and a Regular Interlayered Chlorite—Vermiculite in Soils Developed on a Small Serpentinite Body Massif Central, France. *Clay Minerals*, 11(2): 121 ~ 135.
- Frank T D, Shultis A I, Fielding C R. 2015. Acme and demise of the late Palaeozoic ice age: A view from the southeastern margin of Gondwana. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 418: 176 ~ 192.
- Gingele F X, Deckker P D, Hillenbrand C D. 2001. Late Quaternary fluctuations of the Leeuwin Current and palaeoclimates on the adjacent land masses: clay mineral evidence. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(6): 867 ~ 874.
- Heydari E, Arzani N, Safaei M, Hassanzadeh J. 2013. Ocean's response to a changing climate: Clues from variations in carbonate mineralogy across the Permian—Triassic boundary of the Shareza Section, Iran. *Global and Planetary Change*, 105: 79 ~ 90.
- Hong Hanlie, Wang Chaowen, Xu Yaoming, Zhang Kexin, Yin Ke. 2010&. Paleoclimate evolution of the Qinghai—Tibet Plateau since the Cenozoic. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 35(5): 728 ~ 736.
- Isbell J L, Miller M F, Wolfe K L, Lenaker P A. 2003. Timing of late Paleozoic glaciation in Gondwana: Was glaciation responsible for the development of Northern Hemisphere cyclotherms? *Special Paper of the Geological Society of America*, 370: 5 ~ 24.
- Isbell J L, Henry L C, Gulbranson E L, Limarino C O, Fraiser M L, Koch Z J, Ciccio P L, Dineen A A. 2012. Glacial paradoxes during the late Paleozoic ice age: Evaluating the equilibrium line altitude as a control on glaciation. *Gondwana Research*, 22(1): 1 ~ 19.
- Isozaki Y, Kawahata H, Ota A. 2007. A unique carbon isotope record across the Guadalupian – Lopingian (Middle – Upper Permian) boundary in mid-oceanic paleo-atoll carbonates: The high-productivity “Kamura event” and its collapse in Panthalassa. *Global and Planetary Change*, 55(1): 21 ~ 38.
- Isozaki Y, Aljinovic D, Kawahata H. 2011. The Guadalupian (Permian) Kamura event in European Tethys. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 308 (1 ~ 2): 12 ~ 21.
- Juho Junttila, Mattiina Ruikka, Kari Strand. 2005. Clay-mineral assemblages in high-resolution Plio—Pleistocene interval at ODP Site 1165, Prydz Bay, Antarctica. *Global and Planetary Change*, 45: 151 ~ 163.
- Keller W D. 1970. Environmental Aspects of Clay Minerals. *Journal of Sedimentary Research*, 40(3): 788 ~ 813.
- Lan Xianhong. Clay minerals as an index of paleoclimate. 1990&. *Geological Science and Technology Information*, 9(4): 31 ~ 35.
- Li Xianghui, Xu Baoliang, Chen Yunhua, Cao Ke, Yang Hainan. 2008&. Clay Minerals of the Middle Late Mesozoic Mudrocks from North and Northeast China: Implications to Paleoclimate and Paleohighland. *Acta Geologica Sinica*, 82(5): 683 ~ 691.
- Link P K. 2009. *Icehouse (cold) climates*. Berlin: Springer-Verlag.
- Liu Zhifei, Zhao Yulong, Li Jianru, Christophe Colin. 2007#. Late Quaternary clay mineral records in Vietnam Coast, west of the South China Sea: Provenance analysis and East Asian Monsoon evolution. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 37(9): 1176 ~ 1184.
- Meng Q R, Zhang G W. 2000. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China. *Tectonophysics*, 323 (3 ~ 4): 183 ~ 196.
- Mii H S, Shi G R, Cheng C J, Chen Y Y. 2012. Permian Gondwanaland paleoenvironment inferred from carbon and oxygen isotope records of brachiopod fossils from Sydney Basin, southeast Australia. *Chemical Geology*, 291: 87 ~ 103.
- Pal D K, Bhattacharyya T, Sinha R, Srivastava P, Dasgupta A S, Chandran P, Ray S K, Nimje A. 2012. Clay minerals record from Late Quaternary drill cores of the Ganga Plains and their implications for provenance and climate change in the Himalayan foreland. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 356 ~ 357 (9): 27 ~ 37.
- Parrish J T. 1993. Climate of the Supercontinent Pangea. *Journal of Geology*, 101(2): 215 ~ 233.
- Retallack G J. 2013. Permian and Triassic greenhouse crises. *Gondwana Research*, 24: 90 ~ 103.
- Rygel M C, Fielding C R, Frank T D, Birgenheier L P. The magnitude of Late Paleozoic glacioeustatic fluctuations: a synthesis. *Journal of Sedimentary Research*, 2008, 78(8): 500 ~ 511.
- Shen S, Shi G R. 2013. Late Paleozoic deep Gondwana and its

- peripheries: Stratigraphy, biological events, paleoclimate and paleogeography. *Gondwana Res*, 24: 1 ~ 4.
- Singer A. 1984. The paleoclimatic interpretation of clay minerals in sediments——a review. *Earth Science Reviews*, 21: 251 ~ 293.
- Stampfli G M, Borel G D. 2002. A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons. *Earth and Planetary Science Letters*, 196(1 ~ 2): 17 ~ 33.
- Sun Qingfeng, Colin Christophe, Chen Fahu, Zhang Jiawu. 2011&. A discussion on the factors affecting formation and quantity of clay minerals in climatic and environmental researches. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 30(2): 291 ~ 300.
- Sun Y D, Lai X L, Wignall P B, Widdowson M, Ali J R, Jiang H W, Bond D P G, Vedrine S. 2010. Dating the onset and nature of the Middle Permian Emeishan large igneous province eruptions in SW China using conodont biostratigraphy and its bearing on mantle plume uplift models. *Lithos*, 119(119): 20 ~ 33.
- Tabor N J, Poulsen C J. 2008. Palaeoclimate across the Late Pennsylvanian—Early Permian tropical palaeolatitudes: A review of climate indicators, their distribution, and relation to palaeophysiographic climate factors. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 268(3 ~ 4): 293 ~ 310.
- Vanderaveroet P. 2000. Miocene to Pleistocene clay mineral sedimentation on the New Jersey shelf. *Acta Oceanologica Sinica*, 23(1): 25 ~ 26.
- Wang Xunlian, Wang Lei, Zhang Haijun, Zhang Shihong, Xia Guoying. 2006&. Integrated stratigraphy of the Carboniferous Permian boundary section at Xikou, Zhen'an County, Shaanxi Province. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 291 ~ 302.
- Wang Yue, Wang Jing, Chen Jun, Wang Weijie, Shen Shuzhong, Henderson C M. 2011. Progress, problem and prospects on the stratigraphy and correlation of the Kungurian stage, early Permian (Cisuralian) Series. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 85(2): 387 ~ 398.
- Weaver C E, Pollard D L. 1973. *The Chemistry of clay minerals* Amsterdam. New York; Elsevier Scientific Publish.
- Westermann S, Duchamp-Alphonse S, Fiet N, Fleitmann D, Matera V, Adatte T, Föllmi K B. 2013. Paleoenvironmental changes during the Valanginian: New insights from variations in phosphorus contents and bulk- and clay mineralogies in the western Tethys. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 392: 196 ~ 208.
- Winkler A, Wolf-Welling T, Stattegger K, Thiede J. 2002. Clay mineral sedimentation in high northern latitude deep-sea basins since the Middle Miocene (ODP Leg 151, NAAG). *International Journal of Earth Sciences*, 91(1): 133 ~ 148.
- Xiao Ancheng, Wei Guoqi, Shen Zhongyan, Wang Liang, Yang Wei, Qian Junfeng. 2011&. Basin—mountain system and tectonic coupling between Yangtze block and South Qinling orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3): 601 ~ 611.
- Yin Hongfu, Peng Yuanqiao. 1995&. Evolution of the Phanerozoic Paleo-ocean of Qinling. *Earth Science*, 20(6): 605 ~ 611.
- Zhang Naixian, Wan Guojiang, Ma Yuguang. 2000&. The clay mineral and its environmental record in the sediment core of Caohai, Weining. *Scientia Geologica Sinica*, 35(2): 206 ~ 211.
- Zhang Haijun, Wang Xunlian, Ding Lin, Xia Guoying, Wang Lei. 2006#. Biological diversity and high-frequency sea-level changes of Carboniferous—Permian boundary at Xikou, Zhen'an County, Shaanxi Province. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 36(3): 233 ~ 241.
- Zhang Qiang, Chen Muhong, Liu Jianguo, Yu Zhaojie, Zhang Lanlan, Xiang Rong. 2015#. Clay mineral assemblages at IODP Site U1340 in the Bering Sea and their paleoclimatic significance. *Science China Earth Science*, 45(4): 468 ~ 480.
- Zhu Jiang, Zhang Zhaochong. 2013&. The link between Large Igneous Provinces and the two Mass Extinctions in Permian: Review of Recent Progress. *Geological Review*, 59(1): 137 ~ 148.

Clay Mineral Characteristics of Permian Carbonate Rocks in Zhen'an Area, Shaanxi Province and Its Paleoclimate Significance

CAO Tingli, CHENG Cheng, LI Shuangying, PANG Changxing, WEI Xing

School of Resource and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009

Objectives: Permian is a key period in geological history and the specific studies of Permian climate are scarce, so it's of great significance to further the study of paleoclimate. During Permian, the study area located in Zhen'an area in Shaanxi Province today, where Permian stratum is continuously developed and huge-thickly accumulated (more than 3 km), was an isolated platform in Eastern Paleo-Tethys. It's therefore a favorable profile to carry out the study on paleoclimate and paleoenvironment of Permian.

Methods: 159 representative carbonate rock samples are picked out from the Permian section in Zhen'an area and then the qualitative and semiquantitative analysis of clay mineral are carried out.

Results: The analysis shows that clay mineral of the study area is comprised of Illite (70.9%), Kaolinite (7.9%), Montmorillonite (4.4%), Chlorite (8.6%) and Illite—smectite mixed layer (8.3%). Based on the change of illite's relative content, Permian palaeoclimate fluctuations in the study area can be divided into 8 phases: P1, from Asselian to middle Kungurian, was a dry—cold period; During the middle of Middle Permian,

the climate fluctuated from warm—wet period (P2) to dry—cold period (P3), and to the alternation of dry—colding and warm—weting (P4); P5, from middle Capitanian to early Wuchiapingian, was a cooling period; a short warm—wet period happened in early Wuchiapingian (P6); an increasingly cooling period from early Wuchiapingian to the end of Wuchiapingian (P7); and an alternation of dry—cold and warm—wet climate in Changhsingian (P8).

Conclusions: The contrastive study among the study area, South China, Western Europe (Western Palaeo-Tethys) and Japan (Panthalassa) shows that the change of Permian palaeoclimate in Zhen'an area is influenced by the Late Paleozoic Ice Age (LPIA), Kamura Event and G—LB biological extinction event. In addition, a short cold period (~2.4 Ma) during Wordian is identified by this study, which is different from previous views that the climate was gradually warming up from Kungurian onwards. Whether this phenomenon has global significance needs to be further studied.

Keywords: Clay mineral; Palaeoclimate; Permian; Paleo-Tethys; Zhen'an area in Shaanxi Province.

Acknowledgements: This study was financially supported by the Natural Science Foundation of China (No. 41172097, 40972082). We would like to express our thanks to professor Zhou Yuefei from Hefei University of Technology for X-ray diffraction analysis.

First author: CAO Tingli, female, born in 1992, master. Mineralogy, Petrology, Ore deposit. Email: 1278331603@qq.com

Corresponding Author: LI Shuangying, male, born in 1956, professor. Sedimentary geology and Stratigraphy. Email: lsysteven@126.com

Manuscript received on: 2016-07-15; Accepted on: 2017-02-24; Edited by: LIU Zhiqiang.

Doi: 10.16509/j.georeview.2017.02.009