

三叠纪卡尼期湿润幕事件研究进展^①

赵向东¹⁾²⁾ 薛乃华¹⁾²⁾ 王博¹⁾ 张海春¹⁾

1) 中国科学院南京地质古生物研究所和生物演化与环境卓越创新中心, 现代古生物学和地层学国家重点实验室 江苏南京 210008;
2) 中国科学技术大学 安徽合肥 230026

摘要: 卡尼期是继二叠纪—三叠纪之交全球气候显著变化后的又一重要气候转折期, 此时全球降雨量增高, 地球温度从 Julian 亚期晚期至 Tuvanian 亚期早期升高了约 6°C, 内陆风化、剥蚀作用加速, 大量陆源碎屑物质注入海洋导致碳酸盐生产遭遇危机, 特提斯域沉积作用发生转折。这一气候事件被称为“卡尼期湿润幕”(Carnian Pluvial Episode, CPE 事件)。本文详细介绍了 CPE 事件的研究历史、特提斯域沉积转折的关键性地质证据, 总结了 CPE 事件已有的同位素曲线特征, 并认为大火成岩省爆发可能是此次事件的主要原因。基于特提斯域的海相地层对该事件的研究已经有近 30 年的历史, 然而该事件对陆地生态系统的影响目前还知之甚少。我国三叠纪陆相地层分布广泛、发育完好、化石丰富, 是世界上研究陆相三叠系的重要地区之一, 对这些地层的研究有助于查明 CPE 事件在陆地生态系统的表征, 进一步揭示其真相。

关键词: 卡尼期, 晚三叠世, 气候转变, 碳同位素, CPE 事件

中图分类号: P534.51

文献标识码: A

文章编号: 0253-4959(2019)03-0306-09

卡尼期(Carnian)是晚三叠世的第一个期, 长达 10 mys(~237—~227 Ma), 可以进一步划分为 Julian 亚期和 Tuvanian 亚期。在 Julian 亚期早期, 古特提斯洋及新特提斯洋陆架地区广泛发育碳酸盐岩沉积; 而到了 Julian 亚期晚期, 岩性突然转变为硅质岩或黑色页岩。这一岩性突变非常显著(Hornung *et al.*, 2007a), 最早由 Schlager & Schllnberger 在 1974 年于奥地利北钙质阿尔卑斯地区发现, “Reingraben 转折点”的概念首次被提出。Simms & Ruffell 在 1989 年首次将其命名为“卡尼期湿润幕”(Carnian Humid Episode), 他们认为此次气候事件的开始与结束都可能与生物的灭绝和辐射存在明显的同步性(Simms & Ruffell, 1989, 1990)。后来大量学者对该时期古环境进行了深入研究, 并相继提出“卡尼期黑色页岩事件”(Hornung & Brandner, 2005)、“卡尼期碳酸盐生产力危机”(Hornung *et al.*, 2007a)、“卡尼期危机”(Hornung, 2007)等概念。2017 年 5 月在德国戴尔门斯特召开的关于此次地质事件的学术会议及之后的讨论中, 地质学家较多地认为该

地质事件的名称应该为 Carnian Pluvial Episode (下文简称 CPE; Dal Corso *et al.*, 2018)。关于 CPE 事件, 早期研究主要聚焦于古特提斯洋西北部被动大陆边缘地区和南阿尔卑斯地区。近十年来, 在整个特提斯域(欧洲、北美、华南、日本)都识别出这一气候事件(Kozur & Bachmann, 2010; Arche & Lopez-Gomez, 2014; Shi Zhi-qiang *et al.*, 2017), 并且着重对该事件的触发机制、海洋环境变化和全球性影响进行了深入研究(Nakada *et al.*, 2014; Mueller *et al.*, 2016; Sun Ya-dong *et al.*, 2016; Miller *et al.*, 2017)。至今, 越来越多的证据表明: 卡尼期的气候比三叠纪其他时期更加湿润, 而且是一次全球性事件(图 1)。根据 *Austrotrachyceras austriacum* 菊石带可以将 CPE 事件对应到 Julian 亚阶上部(Kozur & Bachmann, 2010), 目前的研究结果表明其持续时间为 0.8~1.2 mys, 相当于 2~3 个长偏心率周期。旋回地层学为这一事件的持续时间提供了高分辨率天文年代标尺(Preto & Hinnov, 2003; Ogg, 2015)。

① 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB26000000), 国家自然科学基金(41572010, 41622201, 41688103, 41730317)和 IGCP632 项目资助。

文稿接受日期: 2019-05-30; 修改稿收到日期: 2019-06-04。

第一作者简介: 硕士研究生, 主要研究方向为中生代陆相环境; e-mail: xdzha@nigpas.ac.cn

通信作者简介: 王博, 研究员, 主要研究方向为中生代陆地生态系统、昆虫演化; e-mail: bowang@nigpas.ac.cn



1. 奥地利, 意大利, 匈牙利, 西班牙; 2. 伊比利亚; 3. 以色列; 4. 德国, 英国; 5. 挪威; 6. 北美东部; 7. 阿根廷; 8. 印度; 9. 澳大利亚; 10. 中国; 11. 印度尼西亚; 12. 日本
1. Austria, Italy, Hungary, Spain; 2. Iberia; 3. Israel; 4. Germany, UK; 5. Norway; 6. eastern North America; 7. Argentina; 8. India; 9. Australia; 10. China; 11. Indonesia; 12. Japan

图 1 CPE 事件主要研究区域古地理分布图(改编自 Christopher, 2014; Ruffell, Simms & Wignall, 2015)

Fig. 1 Palaeogeographical distribution of the studied regions of the CPE (modified from Christopher, 2014; Ruffell, Simms & Wignall, 2015)

从古特提斯洋西北域掀起的 CPE 事件研究热潮, 逐渐席卷至古特提斯洋东域, 这与日益丰富的研究方法息息相关。二十余年来, 研究学者从沉积学、古生物学和同位素地层学等多个角度对 CPE 事件进行了大量且详细的研究。丰富的红色岩层中发育有蒸发岩、风积砂岩以及短暂的湖泊与河流沉积物, 证明至少在欧洲和北美等地, 三叠纪的大部分时期处于干旱或半干旱的气候(Crowley, 1994; Lucas & Orchard, 2013)。然而, 在早卡尼期中后期, 代表湿润气候的富含植物化石的黑色页岩和陆源硅质碎屑岩广泛沉积在古特提斯洋地区的碳酸盐台地之上(Hornung *et al.*, 2005, 2007a), 表明气候突然变得湿润, 降雨量急剧增加。此时浅水碳酸盐生产力降低, 碳酸盐沉积在远洋深水低能环境中减少或完全停止(Hornung *et al.*, 2007a; Preto *et al.*, 2010; Rostási *et al.*, 2011; Haas *et al.*, 2012; Lukeneder *et al.*, 2012; Nakada *et al.*, 2014; Dal Corso *et al.*, 2015)。同时期的生物圈也发生了相应变化, 海百合在 CPE 事件之后仅存个别属种, 菊石在 Julian-Tuvalian 界线附近灭绝率达 52%, 牙形刺也遭遇了一定的生存危机(Urlichs, 1974; Benton *et al.*, 1986; Simms & Ruffell, 1989; Rigo *et al.*, 2007); 孢粉分

析显示, Julian 亚期晚期的植物群落更适应于潮湿的生存环境, 如蕨类植物、针叶类植物和苏铁类植物高度繁盛(Roghi, 2004; Roghi *et al.*, 2010), 直到 Tuvalian 亚期早期, 这一现象才得以改变; 钙质微型浮游生物大规模爆发, 使特提斯域碳酸盐工厂生产机制发生变化(Hornung *et al.*, 2007a; Müller *et al.*, 2015); 在南阿尔卑斯地区发现的已知最早的琥珀生物群, 表明产生树脂的松柏科等植物在 CPE 事件期间非常繁盛(Roghi *et al.*, 2006; Dal Corso *et al.*, 2018)。此外, 恐龙类群在 CPE 事件期间发生了非常明显的辐射现象, 并在诺利期(Norian)开始占据生态系统的主导地位(Massimo *et al.*, 2018)。上述化石证据表明, CPE 事件的开始与结束可能与生物的灭绝和辐射存在明显的同步性。

1 CPE 事件的主要研究区域与进展

CPE 事件在欧美地区的研究程度较高, 大量证据表明, 淡水和硅质碎屑的注入导致古特提斯洋西域几乎所有的热带、亚热带碳酸盐工厂遭遇生产危机, 碳酸盐岩被硅质碎屑岩或黑色页岩取代。目前该事件的研究区域主要涉及古特提斯洋西北部被动大陆边缘地区和南阿尔卑斯地区, 此外, 在伊朗、喜马拉雅和印度尼西亚地区都可观察到此

类地质现象。时志强等(2009, 2010, 2017)、Sun Yandong *et al.*(2016)在中国华南地区开展了 CPE 事件研究。下文将详细介绍代表性区域的研究进展。

1.1 古特提斯洋西北部被动大陆边缘

Schlager & Schllnberger(1974)最早在奥地利北钙质阿尔卑斯地区发现了由碳酸盐岩突变为大量碎屑岩的地层层序,这一岩性突变现象引起了欧洲学者的关注。根据卡尼期—诺利期之交的菊石(至 Julian 亚期灭绝率达 52%)、苔藓虫(至诺利期灭绝率达 85%)和双壳类等生物丰度的统计结果, Simms & Ruffell (1989)将生物大灭绝与气候变化联系在一起,正式提出卡尼期降雨量增加,气候由干旱转变为湿润的假说。但这一气候事件到底是全球性事件还是区域性事件却无从考究。随后 20 年,来自欧美地区大量的地质证据如雨后春笋般被报道出来。目前古特提斯洋北部被动大陆边缘的代表性研究区域有奥地利、匈牙利和日耳曼盆地。

Pott *et al.*(2008)在奥地利首都维也纳西部伦茨(Lunz)地区发现了 CPE 事件的经典层序,并对该地区的化石植物群(主要是裸子植物)进行了研究,发现当时的植物发育有可以抵御干旱的气孔结构,但其围岩(煤)却指示湿润环境。Roghi *et al.*(2010)在伦茨附近的地层中识别出了“Reingrabener”转折点,孢粉统计结果表明当时水生植物占有优势,因此将该地层与伊拉克北部、伊朗、突尼斯和以色列等地的地层进行了对比。Dal Corso *et al.*(2015)与 Mueller *et al.*(2016)分别开展了 Lunz am See 地区海相地层孢粉学和同位素地球化学的研究,他们基于孢粉学证据认为在 Julian 1 与 Julian 2 界线附近气候变得湿润,并将 CPE 事件与兰格利亚(Wrangellia)大火成岩省的爆发联系在一起。

Rostási *et al.*(2011)认为卡尼期气候变化伴随着泛大陆的合并、分离,CPE 事件是由古特提斯洋的边缘隆起或者大火成岩省造成的(Furin *et al.*, 2006; Greene *et al.*, 2008)。他们对匈牙利 Transdanubian 山脉地区卡尼阶黏土矿物成分进行了检测,通过物源分析,发现在 Julian-Tuvalian 界线处的黏土岩中高岭石富集(10%~20%),而且高岭石与伊利石的比值也突然增大,这都被视作干旱气候向更具季节性的潮湿气候转变的证据。虽然 CPE 事件的大部分初始证据来自于奥地利和意大利等地,但北欧上三叠统非海相地层记录对于这一理论的发展同样重要。Shukla *et al.*(2010)对日耳曼盆地斯

图加特(Stuttgart)组地层进行了沉积相和砂体几何分析,并与现代恒河平原的观测结果进行比较,发现该组下部由灰色泥岩和砂岩组成,沉积于潮湿环境的浅水、微咸水环境;中部主要由细砂岩、粉砂岩和泥岩组成,为同样潮湿环境下的河流相沉积;上部为红色、灰色砂岩和泥岩,反映泥沙由反复发作的山洪携带并沉积于湖泊三角洲环境。斯图加特组岩相与法国巴黎盆地和英国南部卡尼阶砂岩相沉积非常相似,都表现出气候由干旱向潮湿转变的特征。Kozur & Bachmann(2010)分析了日耳曼盆地斯图加特组和周边地区的相关地层,认为至少在该区域,卡尼阶应该保留三分方案:Cordevolian 亚阶、Julian 亚阶和 Tuvalian 亚阶(Krystyn 于 1978 年将 Cordevolian 亚阶合并到 Julian 亚阶中)。目前普遍适用的卡尼阶划分为两分方案。

1.2 南阿尔卑斯地区

意大利北部的三叠纪地层是 CPE 事件最经典的地质证据之一。Furin *et al.*(2006)对亚平宁南部的拉格内哥罗(Lagonegro)盆地进行了深入研究,结果显示 Julian 亚阶和 Tuvalian 亚阶界线石灰岩存在沉积间断,他们将其解释为 CCD 界面上升造成深水相中缺少碳酸盐记录,并认为可能是由气候变化引起的。Roghi(2004)通过对 Cave del Predi 地区卡尼期地层的研究,确定了意大利北部 Julian 亚阶和 Tuvalian 亚阶界线的岩性转变,进而确定了该地区气候由干旱向潮湿转变的时间。但与此相悖的是, Dal Corso *et al.* (2012)根据意大利卡尼阶碳同位素分析,发现在 Julian 亚期中期(即 Julian1-Julian2 之交)存在碳同位素负偏移。他们认为这可能与兰格利亚大火成岩省以及太平洋火山爆发存在着一定的联系:火山喷发引起 CO₂ 和其他温室气体排入大气,进而导致海洋酸化和全球变暖。Massimo *et al.*(2018)综合分析了南阿尔卑斯山脉地区的恐龙骨骼和足迹化石证据,结果表明恐龙足迹恰好在 CPE 时期出现,恐龙骨骼丰度增加,因此他们认为恐龙在卡尼期中期发生了爆发性辐射事件,取代了当时的植食动物,从而能够在诺利期占据生态系统的主导地位。这一生物事件很有可能与 CPE 气候事件存在一定的关联。

1.3 中国

中国卡尼期海相地层主要分布于川西北、贵州、藏东、藏南及云南等地,目前研究程度较高的

是川西北和贵州两地。时志强等人对川西北绵竹汉旺、安县雒水、江油马鞍塘等剖面进行了研究,发现下卡尼阶灰岩段(主要岩性为含大量生物碎屑的鲕粒灰岩、海绵礁灰岩、微晶灰岩等)之上为马鞍塘组中部的黑灰色泥(页)岩(时志强等, 2009, 2010)。硅质海绵礁被黑色页岩代替的现象与古特提斯洋西北地区“Reingraben 转折点”的变化相似。王艳艳等(2012)发现川西北地区卡尼期化石中的碳同位素变化与古特提斯洋西北地区 Lunz-Polzberg 剖面 and 喜马拉雅 Spiti 盆地同期碳同位素变化存在一定的相似性,即整个古特提斯域在潮湿气候下受到了淡水输入的影响。她们认为,淡水的输入将原始的海相碳同位素特征值替换为明显变小、几乎为负的值(Immenhauser *et al.*, 1999),这是因为淡水输入可能改变浅海表面水体溶解的无机碳的碳同位素成分,因此导致 ^{12}C 相对富集。但此假说还有待进一步的验证。Zhang Yang *et al.*(2015)在对贵州两条剖面的旋回地层学研究中发现自然伽马能谱曲线记录了显著的天文周期,并据此建立了偏心率调谐的磁性地层格架,他们通过磁性地层对比发现扬子地台的终结与卡尼期湿润事件同期发生。Sun Ya-dong *et al.*(2016)对贵州贞丰地区的三叠纪剖面进行了高精度碳氧同位素分析,根据碳氧同位素负偏移的位置,推断 CPE 事件的开始时间为 Julian 亚期晚期。此外,该地区的有机碳同位素曲线与奥地利 Luntz 盆地、匈牙利 Transdanbian 山脉以及意大利的南阿尔卑斯地区的有机碳同位素曲线也存在一定的可比性。最近,Shi Zhi-qiang (2017)再次对四川盆地的三个剖面(安县雒水剖面、汉旺观音崖、青岩沟剖面)进行了详细的岩性和古生物学调查,并在前人的基础上开展了细致的地层古生物学研究,根据地层中大量的牙形刺 (*Quadralella polygnathiformis*) 和菊石 (*Discotropitidae* 和 *Juvavitidae*)以及岩性的转变,认为这一地区也受到了 CPE 事件的影响。

1.4 其他地区

CPE 事件的证据不仅局限于上述经典地区,同样来源于其他地区。卡尼期形成的煤层在南北极、南美、印度、加拿大和澳大利亚等地广泛分布于碎屑岩之上,这一岩性转变和煤中的植物化石都反映了由干旱向湿润转变的气候现象(Retallack *et al.*, 1996; McLoughlin *et al.*, 1997; Awatar *et al.*, 2014)。可能二叠纪大灭绝及随后长期干旱的气候抑制了

植物群落的生长,而卡尼期湿润气候为植物的繁盛和煤的形成提供了条件(Ruffell *et al.*, 2015)。来自阿根廷 Villa Union 盆地卡尼期 Ischigualasto 组地层的沉积学、黏土矿物和古土壤分析同样反映了由湿润向干旱转变的气候环境(Tabor *et al.*, 2006)。Nakada *et al.* (2014)对日本中部的卡尼期深海相地层中的燧石进行吸收精细结构谱分析(X-ray absorption fine structure),结果显示燧石中的含铁矿物由卡尼期早期的绿泥石、伊利石和赤铁矿组合变为卡尼期中期的蒙脱石、伊利石和赤铁矿组合,而卡尼期晚期的燧石组成又再次与卡尼期早期的燧石组成一致。这一结果表明深海相沉积环境同样受到了 CPE 事件的影响(Nakada *et al.*, 2014)。

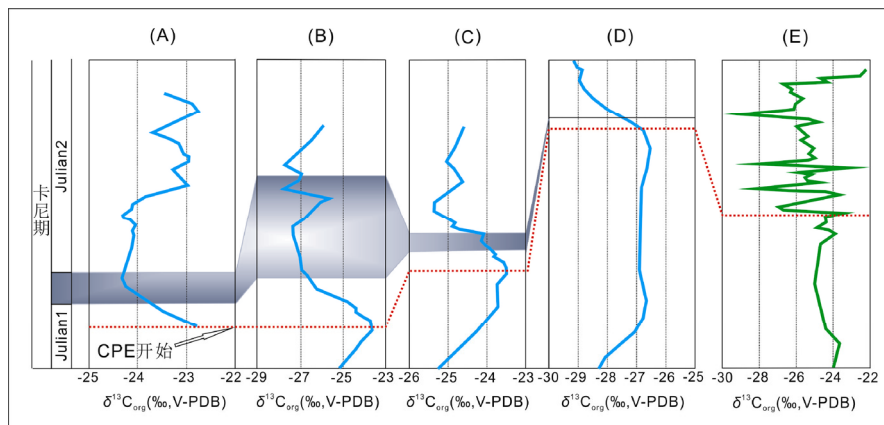
2 稳定同位素特征

大气—海洋—陆地系统的碳同位素循环体现了地质历史时期的生物地球化学过程。各个圈层中最大的碳同位素分馏($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$)过程是通过生物固碳作用发生的。在生物参与下, $^{12}\text{CO}_2$ 通过生物光合作用被大量分馏至生物体中,从而导致了有机质中较低的碳同位素比值($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值一般为-32‰至-22‰; Jochen, 2009)。碳循环与重大生命演化事件和环境事件密切相关,可以直接或间接反映古海洋和大气环境的变化特征,是了解早期环境演化的一个重要窗口 (Hoffman *et al.*, 1998; Rothman *et al.*, 2003; 王伟等, 2011),所以同一时期 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 的数值在一定程度上可以反映当时的碳循环情况。现代空气中 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-7‰,海洋中碳酸盐无机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 0。但在白垩纪以前与此相反,大气中的 CO_2 比海洋中的碳酸盐无机碳更富重碳(陆相值一般高于海相值; Arthur *et al.*, 1985)。目前已有多位学者运用碳同位素的分馏机制来分析 CPE 事件的前因后果(Hornung *et al.*, 2007b; Dal Corso *et al.*, 2012, 2015; Mueller *et al.*, 2016; Sun Ya-dong *et al.*, 2016; Miller *et al.*, 2017)。

在 Julian 1 晚期,无论是古特提斯洋西域还是华南地区的海相记录中, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值都出现了不同幅度的负偏移现象:意大利的南阿尔卑斯地区检测出 3.8‰的负偏移(Dal Corso *et al.*, 2012);奥地利 Lunz 地区和匈牙利 Baltonfüred 地区分别负偏移了 4.1‰和 1.8‰ (Dal Corso *et al.*, 2015);奥地利北钙质阿尔卑斯山地区(NCA)记录了约 4‰的负偏移

(Mueller *et al.*, 2016); 华南贞丰地区则保存了约 3‰ 的负偏移(Sun Ya-dong *et al.*, 2016; 图 2)。虽然由于成岩环境(如水深、温度等)不同, 不同区域沉积物记录的同位素振幅不同(Ruhl *et al.*, 2009), 但在古特提斯西域和华南都检测出明显的有机碳同位素负偏移现象, 因此该负偏移事件被认为是 CPE 事件的识别特征。然而, 迄今为止, 高精度的无机碳同位素研究中, 仅华南贞丰地区的无机碳同位素曲线(Julian 1 晚期约 4.5‰ 的负偏移)与有机碳同位素曲线展现了良好的耦合性, 此前的无机碳同位素结果并不能解释 CPE 事件(Hornung & Brandner, 2005; Keim *et al.*, 2006; Hornung *et al.*, 2007a; Preto *et al.*, 2009)。一般无机碳同位素负偏移没有被记录下来有以下原因: a) 无机碳分馏稳定, 不存在低碳比例增多的事件; b) 研究中无机碳

同位素检测的分辨率不够高, 导致碳同位素负偏移未被识别; c) 研究区域材料缺乏, 地层不连续; d) 成岩后作用和变质作用的改造。笔者认为在 Julian 1 晚期, 古特提斯洋西域的有机碳同位素曲线和无机碳同位素曲线不耦合的可能原因为 a 或 d; 此外 CPE 期间普遍缺少发育很好的碳酸盐岩地层, 要获取高质量的无机碳同位素记录还需要更多的基础性工作(例如寻找更好的剖面)。迄今为止, 关于 CPE 事件的碳同位素证据已经涉及古特提斯洋东、西域海相地层, 但陆相碳同位素证据仅有一例。Miller *et al.*(2017) 对英国南部 Wiscombe Park 钻孔的岩芯柱进行了有机碳同位素分析, 结果显示在 CPE 事件同期出现了振幅区间为 -30.1‰ 至 -25.1‰ 的 4 次负偏移, 这与海相有机碳同位素结果不同。但由于缺乏生物地层控制, 海陆对比问题没有得到很好的解决。



A. Dolomites 地区, 意大利; B. 北钙质阿尔卑斯地区, 奥地利; C. Transdanubian 地区, 匈牙利; D. 华南贞丰, 中国; E. Wiscombe Park, 英国
A. Dolomites, Italy; B. Northern Calcareous Alps, Austria; C. Transdanubian, Hungary; D. Zhenfeng, South China; E. Wiscombe Park boreholes, UK

图 2 CPE 事件有机碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$)曲线对比

Fig. 2 Correlation of the $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ curves in the studied regions of the CPE

Dal Corso *et al.*(2012)认为海相地层中明显的碳同位素负偏移是由于 CPE 事件开始时, 富含 ^{12}C 的 CO_2 注入大气—海洋—陆地的碳循环系统中, 而 $^{12}\text{CO}_2$ 可能来自于同期发生的兰格利亚大火成岩省(生物地层学研究结果显示, 兰格利亚大火成岩省年龄为拉丁期晚期至 Tuvlian 亚期早期)。 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 数据表明, 兰格利亚大火成岩省的火山作用很可能始于拉丁期晚期(Xu Guang-ping *et al.*, 2014); $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和 U-Pb 等放射性同位素测年结果为 233~227 Ma (Greene *et al.*, 2010)。此外, 全球气温的升高和海洋酸化导致了海洋系统的失衡, 甲烷气体释放至大气—海洋—陆地的碳循环系统也可能是此次负偏移事件的原因之一(Kemp *et al.*, 2005; Dal Cors *et al.*,

2012)。卡尼期的碳同位素负偏移事件和兰格利亚大火成岩省的模型, 与显生宙的几次大规模气候事件非常相似, 例如二叠纪末大灭绝与西伯利亚大火成岩省(Wignall, 2001)、早侏罗世托尔期大洋缺氧性事件与 Karoo 大火成岩省(Pálffy & Smith, 2000; Burgess *et al.*, 2015)以及白垩纪大洋缺氧性事件 1a(OAE 1a)与 Ontong Java 大火成岩省(Naafs & Pancost, 2016)。

目前有一些学者通过氧同位素计算古温度(Wenzel *et al.*, 2000)。孙亚东等(2016)根据测试获得的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PO}_4}$ 值两次负偏移, 认为 Julian 2 时期的海水温度大约从 27°C 上升到 31°C, 随后是短暂的冷却期; 在 Tuvlian 亚期海水温度又上升了 7°C, 大约从 26°C 上升到 33°C。北部钙质阿尔卑斯山脉和

南阿尔卑斯山脉的同期地层的氧同位素结果表明, Julian 亚期—Tuvalian 亚期晚期也发生了大约 6°C~8°C 的海水温度上升(Hornung *et al.*, 2007b; Trotter

et al., 2015)(图 3)。尽管在分析方法、取样分辨率和地域等方面存在差异, 但这些证据都表明卡尼期确实存在一个全球性变暖事件。

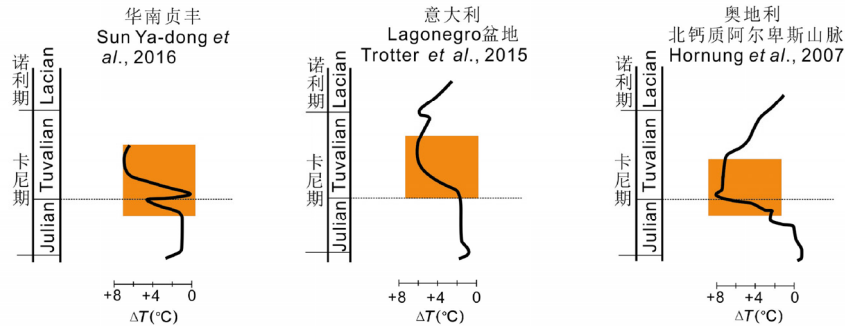


图 3 卡尼期华南、Lagonegro 盆地、北钙质阿尔卑斯地区古温度变化曲线(Sun Ya-dong *et al.*, 2016)

Fig. 3 Summary of intra-Carnian palaeotemperature variation in southern China, the Lagonegro Basin (Italy) and the northern Calcareous Alps, respectively (Sun Ya-dong *et al.*, 2016)

3 CPE 事件的触发机制

CPE 事件的触发机制目前有两种主流观点: 一些学者认为早期劳亚大陆和冈瓦纳大陆聚合形成泛大陆(Tabor & Poulsen, 2008), 泛大陆的聚合并隆起形成较高的地形对全球大气环流系统产生了强烈影响, 导致超级季风气候的形成, 在北半球反映为冬季盛行向南穿越古特提斯洋的干燥北风、夏季盛行向北的古特提斯洋北岸带来大量降雨的潮湿南风(Hornung *et al.*, 2007a; 金鑫等, 2015), 促使了古特提斯域湿度增加。而近期, 新的证据表明兰格利亚大火成岩省爆发可能是该事件的主要诱因: 火山喷发导致 CO₂ 和其他温室气体(如 SO₂)排入大气, 引起海洋酸化和全球变暖, 使风化作用和剥蚀作用速率增加, 造成碳酸盐台地的消亡以及硅质碎屑的大量沉积(Erba & Tremolada, 2004; Korte *et al.*, 2005; Furin *et al.*, 2006; Greene, *et al.*, 2008; Dal Corso *et al.*, 2012)。CPE 事件已有近 30 年的研究历史, 但其具体触发机制尚不清晰, 需要更多的地质证据和更丰富的研究手段来解决。

4 CPE 事件的陆相记录

陆相生物和环境的变化对于验证 CPE 事件的起因和机制至关重要, 但这方面的研究却鲜有开展。在英国西南部卡尼期的陆相序列中, Sidmouth Mudstone 组的红色蒸发岩、泥岩和粉砂岩等富盐沉积物取代了 Dunscombe Mudstone 组的湖相灰绿色泥岩和白云质灰岩(Gallois & Porter, 2006); 在

日耳曼盆地, 富盐沉积物被以河流相沉积为主的斯图加特组所取代(Shukla *et al.* 2010), 这些岩性变化表明了 CPE 期间降水普遍增加。英国西南部 Sidmouth Mudstone 组和 Dunscombe Mudstone 组的有机碳同位素曲线也初步表明了陆相环境中轻碳的注入(Miller *et al.*, 2017)。但由于目前证据过少, 陆相沉积(例如岩性、碳同位素等变化)是否在全球范围内记录了 CPE 事件, “中生代湖泊革命”(淡水生态系统的扩张、水生植物和昆虫大辐射; Cohen, 2003)是否是由 CPE 事件引发, 这些重要问题都有待考查和研究。

中生代的陆相沉积是中国地层发育的重要特色之一。我国三叠纪陆相地层分布广泛、发育完好、化石丰富并赋存煤和石油等矿产, 是世界上研究陆相三叠系的重要地区之一(白云来等, 2009; 童金南&殷鸿福, 2015)。中国晚三叠世陆相地层分布甚广, 大致以昆仑—秦岭—大别山系为界, 分为南方区和北方区。北方区中, 那些二叠系—三叠系连续沉积的盆地, 如鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地, 是解决陆相二叠系—三叠系界线, 建立陆相三叠系地层层序和恢复陆地生态系统的关键地区。鄂尔多斯盆地上三叠统被称为延长群(中国地质科学院地质研究所, 1980), 保存有比较丰富的植物、孢粉以及双壳类、介形类、叶肢介、昆虫和鲎虫等化石(王振&黄仁金, 1978; 解古巍等, 2015; Zheng Da-ran *et al.*, 2016)。对这套地层及所含化石的详细研究有望为我们了解陆相地层和陆地生物对 CPE 事件的响应提供新的证据。

5 结 论

“卡尼期湿润幕”作为三叠纪最显著的气候和沉积事件之一,主要表现为全球降雨量增大,CO₂含量增高,O₂含量降低,内陆风化、剥蚀作用加速,碳酸盐工厂遭遇生产危机,碳酸盐台地沉积被陆源碎屑物沉积所取代,有机碳同位素负偏移,海洋生物部分灭绝。海洋生态系统的重要地质事件波及了陆地生态系统,陆相沉积中发生了蒸发岩被碎屑岩和碳酸盐岩取代的转变,内陆出现了湿润化趋势,碳同位素负偏移多幕式出现。全球各地证据均表明 CPE 事件是一次全球性的环境-生物事件。关于 CPE 事件的成因机制,前人推断为泛大陆的隆起导致季风活动所致,最近颇多证据表明其可能与兰格利亚大火成岩省相关联,但是尚待进一步研究。CPE 事件在陆地生态系统中响应的研究尚处于起步阶段,我国三叠纪陆相地层分布广泛、发育完好、化石丰富并赋存煤和石油等矿产,是世界上研究陆相三叠系的重要地区之一。对于这些地层的研究,有助于查明该事件在陆地生态系统的表征,进一步揭示该事件的发生过程。中国学者通过诸如沉积学、生物地层学、同位素地层学、地质年代学和天文旋回地层学等综合手段的深入研究,有望在这一研究领域取得新的认识。

感谢德国埃尔朗根-纽伦堡大学孙亚东博士的指正和英国自然历史博物馆 Edmund Jarzembowski 教授对英语的修改。感谢中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB26000000),国家自然科学基金(41572010, 41622201, 41688103, 41730317)和 IGC P632 项目的资助。

参 考 文 献

白云来, 马 龙, 吴武军, 李玉虎. 2009. 鄂尔多斯盆地油页岩的主要地质特征及资源潜力. *中国地质*, **36**(5): 1123-1137.

金 鑫, 时志强, 王艳艳, 段 雄, 程 明. 2015. 晚三叠世中卡尼期极端气候事件: 研究进展及存在问题. *沉积学报*, **33**(1): 105-115.

时志强, 欧莉华, 罗凤姿, 李 云, 钱利军. 2009. 晚三叠世卡尼期黑色页岩事件在龙门山地区的沉积学和古生物学响应. *古地理学报*, **11**(4): 375-383.

时志强, 钱利军, 曾德勇, 欧莉华. 2010. 晚三叠世卡尼期碳酸盐生产危机在东特提斯地区的地质记录. *地质论评*, **56**(3): 321-328.

童金南, 殷鸿福. 2015. 三叠纪年代地层与中国建阶. *地球科学——中国地质大学学报*, **40**: 189-197.

王 伟, 周传明, 袁训来, 陈 哲, 关成国. 2011. 华南埃迪卡拉纪陡山沱海洋中无机碳同位素组成变化. *地层学杂志*, **35**(4): 349-360.

王艳艳, 张 彪, 时志强, 伊海生. 2012. 川西北地区晚三叠世卡尼期洪水事件沉积的碳、氧同位素记录. *古地理学报*, **14**(3): 375-382.

王 振, 黄仁金. 1978. 陕西三叠纪轮藻化石. *古生物学报*, **17**(3): 267-281.

解古巍, 叶美芳, 冯胜斌, 袁效奇, 贺 静. 2015. 陕西宜君晚三叠世延长组长 7 段萤虫化石的发现及意义. *古生物学报*, **54**(3): 381-386.

中国地质科学院地质研究所. 1980. 陕甘宁盆地中生代地层古生物. 北京: 地质出版社.

Arche A & López-Gómez J. 2014. The Carnian Pluvial Event in Western Europe: New data from Iberia and correlation with the Western Neotethys and Eastern North America-NW Africa regions. *Earth-Science Reviews*, **128**: 196-231.

Arthur M A, Dean W E & Claypool G E. 1985. Anomalous ¹³C enrichment in modern marine organic carbon. *Nature*, **315**: 216-218.

Awater R, Tewari R, Agnihotri D, Chatterjee S, Pillai S S K & Meena K L. 2014. Late Permian and Triassic palynomorphs from the Allan Hills, central Transantarctic Mountains, South Victoria Land. *Antarctica. Current Science*, **106**: 988-96.

Benton M J. 1986. More than one event in the late Triassic mass extinction. *Nature*, **321**: 857-861.

Burgess S D, Bowring S A, Fleming T H & Elliot D H. 2015. High-precision geochronology links the Ferrar large igneous province with early-Jurassic ocean anoxia and biotic crisis. *Earth Planetary Science Letters*, **415**: 90-99.

Christopher R S. 2014. Atlas of Permo-Triassic Paleogeographic Maps (Mollweide Projection), Maps 43-52, Volumes 3 & 4 of the Paleomap Atlas.

Cohen A S. 2003. Paleolimnology: The history and evolution of lake systems. London: Oxford University Press. 1-241.

Crowley T J. 1994. Pangean climates/Klein G D. Pangea, Paleoclimate, Tectonics, and Sedimentation During Accretion, Zenith and Breakup of a Supercontinent, pp. 25-39. Geological Society of America, Special Paper no. 288.

Dal Corso J, Benton M J, Bernardi M, Franz M, Gianolla P, Hohn S, Kustatscher E, Merico A, Roghi G, Ruffell A, Ogg J G, Preto N, Schmidt A R, Seyfullah L J, Simms M J, Shi Zhi-qiang & Zhang Yang. 2018. First workshop on the Carnian Pluvial Episode (Late Triassic): A report. *Albertiana*, **44**: 49-57.

Dal Corso J, Mietto P, Newton R J, Pancost R D, Preto N, Roghi G & Wignall P B. 2012. Discovery of a major negative $\delta^{13}\text{C}$ spike in the Carnian (Late Triassic) linked to the eruption of Wrangellia flood basalts. *Geology*, **40**: 79-82.

Dal Corso J, Gianolla P, Newton R J, Franceschi M, Roghi G, Caggiati M, Raucsik B, Budai T, Haas J & Preto N. 2015. Carbon isotope records reveal synchronicity between carbon cycle perturbation and the “Carnian Pluvial Event” in the Tethys realm (Late Triassic). *Global Planet Change*, **127**: 79-90.

Erba E & Tremolada F. 2004. Nannofossil carbonate fluxes during the Early Cretaceous: Phytoplankton response to nitrification episodes, atmospheric CO₂, and anoxia. *Paleoceanography*, **19**(1): 1-18.

Furin S, Preto N, Rigo M, Roghi G, Gianolla P, Crowley J L & Bowring S A. 2006. Highprecision U-Pb zircon age from the Triassic of Italy: Implications for the Triassic time scale and the Carnian origin of calcareous nannoplankton and dinosaurs. *Geology*, **34**: 1009-1012.

Gallois R W & Porter R J. 2006. The stratigraphy and sedimentology of the Dunscombe Mudstone Formation (late Triassic) of southwest England. *Geoscience in South-west England*, **11**: 174-182.

Greene A R, Scoates J S & Weis D. 2008. Wrangellia flood basalts in Alaska: A record of plume-lithosphere interaction in a Late Triassic accreted oceanic plateau. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **9**. doi:10.1029/2008GC002092.

Greene A R, Scoates J S, Weis D, Katvala E C, Israel S & Nixon G T. 2010. The architecture of oceanic plateaus revealed by the volcanic stratigraphy of the accreted Wrangellia oceanic plateau. *Geosphere*, **6**: 47-73.

Haas J, Budai T & Raucsik B. 2012. Climatic controls on sedimentary environments in the Triassic of the Transdanubian Range (Western Hungary). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*.

- 353-355: 31-44.
- Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P & Schrag D P. 1998. A Neoproterozoic snowball earth. *Science*, **281**: 1342-1346.
- Hornung T & Brandner R. 2005. Biostratigraphy of the Reingraben Turnover (Hallstatt Facies Belt): Local black shale events controlled by the regional tectonics, climatic change and plate tectonics. *Facies*, **51**: 460-479.
- Hornung T. 2007. Multistratigraphy of the Draxllehen quarry near Berchtesgaden (Tuvalian-Lacian2): Implication for halstatt limestone sedimentation and palaeoclimate in the aftermath of the "Carnian Crisis". *Austrian Journal of Earth Science*, **100**: 82-89.
- Hornung T, Krystyn L & Brandner R. 2007a. A Tethys-wide mid-Carnian (Upper Triassic) carbonate productivity crisis: Evidence for the Alpine Reingraben Event from Spiti (Indian Himalaya)? *Journal of Asian Earth Sciences*, **30**(2): 285-302.
- Hornung T, Brandner R, Krystyn L, Joachimskimo M M & Keim L. 2007b. Multistratigraphic constraints on the NW Tethyan "Carnian Crisis"/The Global Triassic//*Bull., N. M. Mus. Nat. Hist. Sci.*, **41**: 59-67.
- Immenhauser A, Schlager W, Burns S J, Scott R W, Geel T & Lehmann J. 1999. Late aptian to late albian sea-level fluctuations constrained by geochemical and biological evidence (nahr umr formation, oman). *Journal of Sedimentary Research*, **69**(2): 434-446.
- Ogg J G. 2015. The Mysterious Mid-Carnian "Wet Intermezzo" Global Event. *Journal of Earth Science*, **2**: 181-191.
- Jochen H. 2009. *Stable Isotope Geochemistry*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 48-53.
- Keim L, Spötl C & Brandner R. 2006. The aftermath of the Carnian carbonate platform demise: A basinal perspective (Dolomites, Southern Alps). *Sedimentology*, **53**: 361-386.
- Kemp D B, Coe A L, Cohen A S & Schwark L. 2005. Astronomical pacing of methane release in the Early Jurassic Period. *Nature*, **437**: 396-399.
- Korte C, Kozur H W & Veizer J. 2005. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of Triassic brachiopods and carbonate rocks as proxies for coeval seawater and palaeotemperature. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **226**: 287-306.
- Kozur H W & Bachmann G H. 2010. The Middle Carnian Wet Intermezzo of the Stuttgart formation (Schilfsandstein), Germanic Basin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **290**: 107-119.
- Krystyn L. 1978. Eine neue Zonengliederung im alpin mediterranen Unterkarn Zapfe H Beitrge zur Biostratigraphie der Tethys-Trias. *Schr. Erdwiss. Komm. sterr. Akada. Wiss.*, **4**: 37-75.
- Lucas S G & Orchard M J. 2013. Triassic. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, pp. 1-9. Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-409548-9.02872-4.
- Lukeneder S, Lukeneder A, Harzhauser M, Islamoğlu Y, Krystyn L & Lein R. 2012. A delayed carbonate factory breakdown during the Tethyan-wide Carnian Pluvial Episode along the Cimmerian terranes (Taurus, Turkey). *Facies*, **58**: 279-296.
- Massimo B, Piero G, Fabio M P, Paolo M & Michael J B. 2018. Dinosaur diversification linked with the Carnian Pluvial Episode. *Nature Communications*, **2018**(9): 1499.
- McLoughlin S, Lindstrom S & Drinnan, A N. 1997. Gondwanan floristic and sedimentological trends during the Permian-Triassic transition: New evidence from the Amery Group, northern Prince Charles Mountains, East Antarctica. *Antarctic Science*, **9**: 281-98.
- Miller C S, Peterse F, Da S A, Baranyi V, Reichart G J & Kürschner W M. 2017. Astronomical age constraints and extinction mechanisms of the late triassic carnian crisis. *Scientific Reports*, **7**(1): 1-7.
- Müller M N, Barcelos e Ramos J, Schulz K G, Riebesell U, Kazmierczak J, Gallo F, Mackinder L, Li Y, Nesterenko P N, Trull T W & Hallegraeff G M. 2015. Phytoplankton calcification as an effective mechanism to alleviate cellular calcium poisoning. *Biogeosciences*, **12**: 6493-6501.
- Mueller S, Krystyn L & Kürschner W M. 2016. Climate variability during the Carnian Pluvial Phase - a quantitative palynological study of the Carnian sedimentary succession at Lunz am See, Northern Calcareous Alps, Austria. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **441**: 198-211.
- Naafs B D A & Pancost R D. 2016. Sea-surface temperature evolution across aptian oceanic anoxic event 1a. *Geology*, **44**: 11.
- Nakada R, Ogawa K, Suzuki N, Takahashi S & Takahashi Y. 2014. Late Triassic compositional changes of aeolian dusts in the pelagic Panthalassa: Response to the continental climatic change. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **393**: 61-75.
- Pálffy J & Smith P L. 2000. Synchrony between Early Jurassic extinction, oceanic anoxic event, and the Karoo-Ferrar flood basalt volcanism. *Geology*, **28**: 747-750.
- Pott C, Krings M & Kerp H. 2008. The Carnian (Late Triassic) flora from Lunz in Lower Austria: Paleocological considerations. *Palaeoworld*, **17**: 172-182.
- Preto N & Hinnov L A. 2003. Unraveling the Origin of Carbonate Platform Cyclothems in the Upper Triassic Durrenstein Formation (Dolomites, Italy). *Journal of Sedimentary Research*, **73**(5): 774-789.
- Preto N, Spötl C & Guaiumi C. 2009. Evaluation of bulk carbonate $\delta^{13}\text{C}$ data from Triassic hemipelagites and the initial composition of carbonate mud. *Sedimentology*, **56**: 1329-1345.
- Preto N, Kustatscher E & Wignall P B. 2010. Triassic climates-state of the art and perspectives. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **290**: 1-10.
- Retallack G J, Veevers, J J & Morante R. 1996. Global coal gap between Permian-Triassic extinction and Middle Triassic recovery of peat-forming plants. *Geological Society of America Bulletin*, **108**: 195-207.
- Rigo M, Preto N, Roghi G, Tateo F & Mietto P. 2007. A rise in the Carbonate Compensation Depth of western Tethys in the Carnian (Late Triassic): Deep-water evidence for the Carnian Pluvial Event. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **246**: 188-205.
- Roghi G. 2004. Palynological investigations in the Carnian of the Cave del Predil area (Julian Alps, NE Italy). *Review of Palaeobotany and Palynology*, **132**: 1-35.
- Roghi G, Gianolla P, Minarelli L, Pilati C & Preto N. 2010. Palynological correlation of Carnian humid pulses throughout western Tethys. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **290**: 89-106.
- Roghi G, Ragazzi E & Gianolla P. 2006. Triassic amber of the southern Alps (Italy). *Palaio*, **21**: 143-154.
- Rostási Á, Raucsik B & Varga A. 2011. Palaeoenvironmental controls on the clay mineralogy of Carnian sections from the Transdanubian Range (Hungary). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **300**: 101-112.
- Rothman D H, Hayes J M & Summons R. 2003. Dynamics of the Neoproterozoic carbon cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **100**(14): 8124-8129.
- Ruffell A, Simms M J & Wignall P B. 2015. The Carnian Humid Episode of the late Triassic: A review. *Geological Magazine*, **153**: 271-284.
- Ruhl M, Kürschner W M & Krystyn L. 2009. Triassic-Jurassic organic carbon isotope stratigraphy of key sections in the western Tethys realm (Austria). *Earth and Planetary Science Letters*, **281**: 169-187.
- Schlager W & Schollnberger W. 1974. Das Prinzip stratigraphischer Wenden in der Schichtenfolge der Nordlichen Kalkalpen. *Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft Wien*, **66/67**: 165-93.
- Shukla U M, Bachmann G H & Singh I B. 2010. Facies architecture of the Stuttgart Formation (Schilfsandstein, Upper Triassic), central Germany, and its comparison with modern Ganga system, India. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **297**: 110-28.
- Simms M J & Ruffell A H. 1989. Synchronicity of climatic change in the late Triassic. *Geology*, **17**: 265-8.
- Simms M J & Ruffell A H. 1990. Climatic and biotic change in the Late Triassic. *Journal of the Geological Society*, **147**: 321-7.
- Shi Zhi-qiang, Nereo P, Jiang Hai-shui, Leopold K, Zhang Yang, James G O, Jin Xin, Yuan Jin-ling, Yang Xiao-kang & Du Yi-xing. 2017. Demise of Late Triassic sponge mounds along the northwestern margin of the Yangtze Block, South China: Related to the Carnian Pluvial Phase? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **474**: 247-263.

- Sun Ya-dong, Wignall P B, Joachimski M M, Bond D P G, Grasby S E, Lai Xu-long, Wang L N, Zhang Z T & Sun S. 2016. Climate warming, euxinia and carbon isotope perturbations during the Carnian (Triassic) Crisis in South China. *Earth and Planetary Science Letters*, **444**: 88-100.
- 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 palaeophysiological climate factors. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **268**: 293-310.
- Tabor N J, Montañez I P, Kelso K A, Currie B, Shipman T & Colombari C. 2006. A Late Triassic soil catena: Landscape and climate controls on paleosol morphology and chemistry across the Carnian-age Ischigualasto Villa Union basin, northwestern Argentina// Alonso-Zarza A M & Tanner L H. *Paleoenvironmental Record and Applications of Calcretes and Palustrine Carbonates*, 17-41. Geological Society of America, Special Paper no. 416.
- Trotter J A, Williams I S, Nicora A, Mazza M & Rigo M. 2015. Long-term cycles of Triassic climate change: A new $\delta^{18}\text{O}$ record from conodont apatite. *Earth and Planetary Science Letters*, **415**: 165-174.
- Ulrichs M. 1974. Zur stratigraphie und ammonitenfauna der Cassianer Schichten von Cassian (Dolomiten/Italien): Schriftenreihe der erd-wissenschaftlichen Kommission der österreichischen Akademie der Wissenschaften, **2**: 207-222.
- Wenzel B, Lécuyer C & Joachimski M M. 2000. Comparing oxygen isotope records of Silurian calcite and phosphate - ^{18}O comparisons of brachiopods and conodonts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **64**: 1859-1872.
- Wignall P B. 2001. Large igneous provinces and mass extinctions. *Earth-Science Reviews*, **53**: 1-33.
- Xu Guan-ping, Hannah J L, Stein H J, Mørk A, Vigran J O, Bingen B, Schutt D L & Lundschiern B A. 2014. Cause of Upper Triassic climate crisis revealed by Re-Os geochemistry of Boreal black shales. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **395**: 222-232.
- Zhang Yang, Li Ming-song, Ogg J, Montgomery P, Huang Chun-ju, Chen Zhong-qiang, Shi Zhi-qiang, Enos P & Lehmann D J. 2015. Cycle-calibrated magnetostratigraphy of Middle Carnian from South China: Implications for Late Triassic time scale and termination of the Yangtze Platform. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **436**: 135-166.
- Zheng Da-ran, Nel A, Wang Bo, Jarzembowski E A, Chang Su-chin, Zhang Hai-chun. 2016. The first Triassic 'Protodonatan' (Zygophlebiidae) from China: Stratigraphical implications. *Geological Magazine*, **154**(1): 169-174.

CARNIAN (LATE TRIASSIC) PLUVIAL EPISODE: CURRENT STATUS AND FUTURE CHALLENGES

ZHAO Xiang-dong¹⁾²⁾, XUE Nai-hua¹⁾²⁾, WANG Bo¹⁾ and ZHANG Hai-chun¹⁾

1) State Key Laboratory of Palaeobiology and Stratigraphy, Nanjing Institute of Geology and Palaeontology and Center for Excellence in Life and Palaeoenvironment, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008;

2) University of Science and Technology of China, Hefei 230026

Abstract An important interval of global climatic change after the P/T event is during the Carnian when global precipitation increased. Also, the global temperature increased by approximately 6°C from the late Julian to early Tuvanian. During this time, the acceleration of inland weathering and denudation produced a large amount of terrigenous clastic material injected into the oceans which led to a crisis in carbonate production and a changed Tethyan sedimentology. This climatic event is called the "Carnian Pluvial Episode" (CPE), and this article describes in detail the research history of the CPE, the key geological features of the depositional change in the Tethyan domain, and the characteristics of the current isotope curves of the CPE. It appears that the large igneous provinces are the main reason for this event. Although studies of the Tethyan marine stratigraphy concerning the CPE have been conducted for nearly 30 years, little is so far known about the impact of the event on terrestrial ecosystems. The widespread, well developed, and fossiliferous Triassic terrestrial strata in China occur in one of the most important regions in the world for studying the non-marine Triassic. It is important to determine the effect of this event on terrestrial ecosystems to gauge its full impact.

Key words Carnian, Late Triassic, climatic change, carbon isotope, CPE