

晚三叠世中卡尼期极端气候事件:研究进展及存在问题^①

金鑫¹ 时志强¹ 王艳艳² 段雄¹ 程明¹

(1.油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学) 成都 610059;

2.成都理工大学材料与化学化工学院 成都 610059)

摘要 作为三叠纪最显著的气候变化事件,全球性的卡尼期气候事件以幕次降雨量增多为特征,在西北特提斯洋地区表现较为明显,主要反映了从碳酸盐岩到黑色页岩的岩性变化,近年来这一地质事件在美国、中国、日本等地的卡尼阶地层中也有识别。其成因一直是学者研究的重点,有人认为是板块构造运动促使大气或大洋循环发生了变化,或是超级大陆聚合碰撞而触发大火成岩省喷发致使全球气候发生了紊乱,也有人认为是地球系统综合因素相互作用的结果。联系到中国西南部地区卡尼阶现状,认为超级季风、构造运动和卡尼期气候变化的关系值得深入研究,此外卡尼期气候事件过程中碳酸盐补偿深度上升问题、卡尼期黑色页岩事件反映的大洋生产力以及多幕卡尼期气候事件反映的气候波动事件等科学问题也是今后的研究中值得重视的。

关键词 卡尼期洪水事件 古气候 超级季风 构造运动 晚三叠世

第一作者简介 金鑫 男 1989年出生 硕士 沉积学 E-mail:jinxin2012cdut@163.com

通讯作者 时志强 男 教授 E-mail:szqcdut@163.com

中图分类号 P532 **文献标识码** A

0 引言

晚三叠世早卡尼期亚热带地区的碳酸盐台地广泛发育有碳酸盐岩沉积,但到了早卡尼期中后期,气候突然变得湿润,降雨量急剧增多,陆源硅质碎屑输入增强,碳酸盐岩沉积突然中断以及由碳酸盐岩向陆源硅质碎屑岩突然发生转变, Schlager 和 Schölnberger 在奥地利北钙质阿尔卑斯地区发现这一显著的岩性突变现象,并首次提出“Reingraben 转折点”的概念^[1]。这一重要的发现开启了研究卡尼期气候事件的先河,在欧美掀起了一股研究卡尼期气候事件的热潮,许多学者在研究卡尼期极端气候事件的过程中,相继提出一系列相关概念,如卡尼期洪积事件(Carnian Pluvial Event)^[2]、卡尼期黑色页岩事件(Carnian black shale event)^[3]、卡尼期碳酸盐生产力危机(Carnian Carbonate Productivity Crisis)^[4]、卡尼期危机(Carnian Crisis)^[5]或者卡尼期湿润事件(Carnian humid event)^[6]等。后续的研究发现在整个古特提斯洋陆架地区(德国日耳曼盆地、泛大陆北部浅海碳酸盐台地以及意大利)都能识别出这一气候事件并对该事件的触发机制和全球性影响进行了研究^[7-12]。近年来国内地质学者也开始注意到上三叠

统卡尼阶地层中的岩性突然发生变化的现象,有些学者认为是微板块的碰撞和俯冲,导致区域性的沉积环境改变,从而触发卡尼期事件^[13-14],时志强等(2009)在研究四川西北部地区卡尼期气候事件时,首次提出晚三叠世卡尼期幕次沉积的黑色书页状泥页岩与西北特提斯洋地区卡尼阶地层中的黑色页岩有等时对比性^[15],目前对该气候事件的研究已经成为地质学界兴趣的热点之一。

卡尼期气候事件曾被 Preto 等^[16]认为是三叠纪最夺目的气候变化事件,在这一地质事件发生的过程中,代表湿润气候的含植物茎杆的黑色页岩和受大量淡水输入影响带来的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。西北特提斯洋被动大陆边缘地区是目前研究卡尼期气候事件比较全面和深入的地区(图1),它以陆架边缘海地区碳酸盐岩沉积的中断和异常硅质碎屑物的输入为显著特征^[16],大量陆源碎屑物质的输入,导致碳酸盐生产力的降低^[4-5,17],碳酸盐台地消亡^[3,7],紧随其后的是黑色页岩、碎屑岩的沉积^[3-4]。这一事件过程中,台地相盐湖膏盐、泥灰岩的沉积被河流相砂岩的沉积打断,黏土岩中高岭石与伊利石的比值在上、下卡尼阶界线处地层中突然增大^[2,18],浅海沉积序列中 $\delta^{13}\text{C}$

^①国家自然科学基金“中国西南部地区晚三叠世卡尼期气候事件:成因、过程及研究意义(编号41272131)资助
收稿日期:2014-01-14;收修改稿日期:2014-04-21

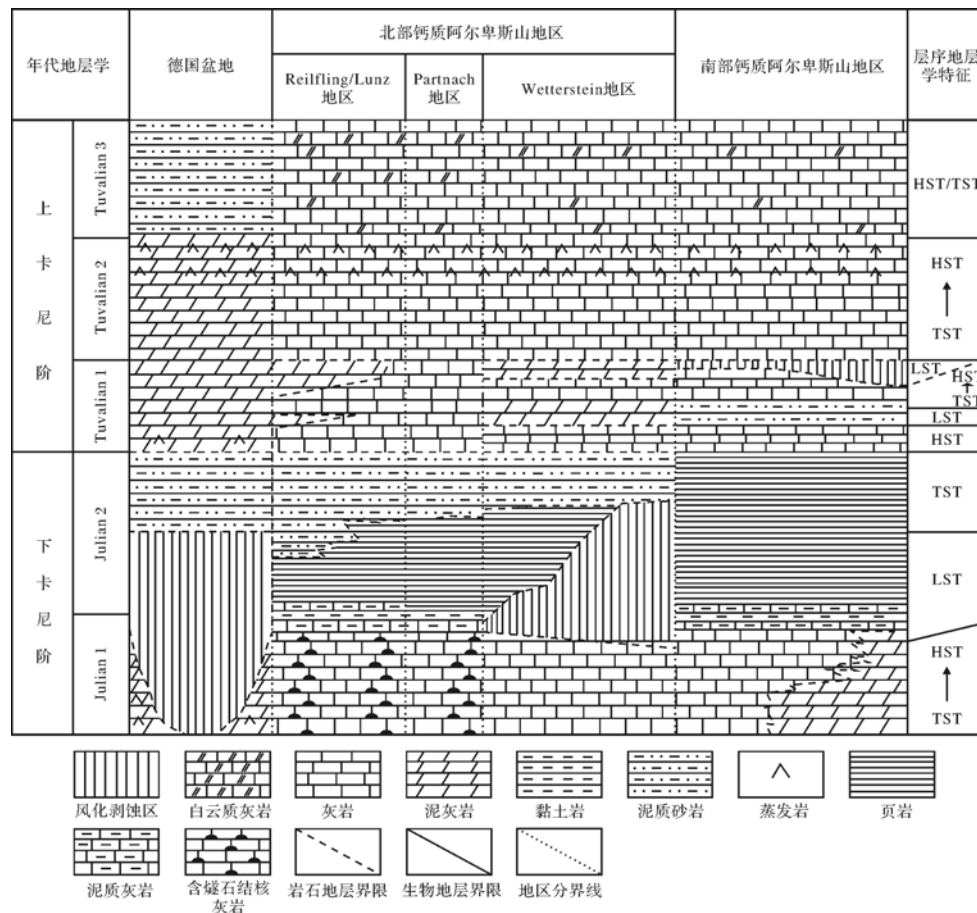


图1 西北特提斯洋地区卡尼阶地层对比图(据 Hornung 等^[5],有删改)

Fig.1 Correlation of the Carnian stratigraphy in Northwest Tethys region (modified from Hornung, et al.^[5])

极度损耗^[2,19],有机碳同位素强烈负偏^[17,20-21],牙形石中得出氧同位素发生偏移,推测出特提斯洋西北边缘海洋表面温度低于开阔海盆地区^[5,22-23],浅水碳酸盐台地边缘到盆地中心海水中可用溶氧量减少^[4]。在伊朗东北部,含凝灰质砂岩覆盖在泥粒灰岩之上^[24],在中国四川西北部地区,显示为硅质海绵礁的死亡,在贵州西南部地区,表现为碳酸盐工厂生产力降低,其上覆大量泥砂岩的沉积^[8-9],在日本 Kuma 地区,卡尼阶以黑色泥砂岩覆盖在台地相灰岩之上为特征^[25],在喜马拉雅 Spiti 盆地^[4]和印度尼西亚^[26]均发现岩性由碳酸盐岩向硅质碎屑岩转变的现象,近年来,几乎在全球都识别出了晚三叠世卡尼期极端气候事件。

Simms 和 Ruffell 认为卡尼期极端气候事件是由于降雨量增加所造成的^[2],它以幕次降雨量增多为特征,Kozur 和 Bachmann(2010)称之为中卡尼期雨季间奏曲幕(Wet Intermezzo)^[11],代表了非常明显的湿润期,在美国的西南部^[27]、美国的南部^[28]以及中国

的川西北地区^[15]也发现了湿润气候的证据,Preto 等认为该气候事件具有全球性的特点^[16],降雨带来大量淡水和硅质碎屑的注入,使几乎所有处于低纬度地区的特提斯碳酸盐工厂发生衰退^[4-5,17]。卡尼期气候事件也给全球生态系统带来巨大的影响,陆地动植物以及浅海海洋无脊椎动物群数量均发生不同程度的差异性变化^[5,29-30],如菊石在上、下卡尼阶界线附近灭绝率达 52%^[31],海百合在卡尼期气候事件之后仅存个别属种^[2],而在陆地上恐龙却首次出现^[32]、针叶类植物高度繁盛^[33]以及钙质微型浮游生物大规模爆发^[32,34-35]。卡尼期亦是全球环境变化的重要时期,晚三叠世大气中 CO₂ 含量达到中生代最高水平^[36],而 O₂ 含量处于最低水平^[37],该时期古环境复杂多变、海平面急剧变化、古构造活动频繁等多种因素综合造就了该时期极端的气候事件。

晚三叠世卡尼期极端气候事件作为 P-T 灭绝事件之后又一个具有代表性和深远意义的极端气候事件,引起了全球地质学者广泛的关注,欧美学者早在

上个世纪70年代就在北钙质阿尔卑斯地区识别出该事件,后续通过研究牙形石、菊石、双壳类、相关孢粉组合特征、同位素地球化学特征等对卡尼期气候事件的触发机制进行了更深入的研究,而作为同时期气候变化的产物,在东特提斯直到近年来才被我国地质学者提出,全球卡尼期事件对比、地层厘定以及持续时间在东特提斯地区都几乎处于空白,因而向我国广大地质工作者全面系统性介绍该极端气候事件具有重要的意义。

1 我国西南部地区卡尼期事件特征

在中国,海相卡尼阶地层较零星的分布于川西北、贵州、藏东、藏南及云南等地,研究区的岩性显示从碳酸盐岩到深灰色泥页岩、泥质粉砂岩的转变。我国的研究者已经注意到这一时期的岩性变化^[13,38-39]。

1.1 川西北地区

目前在中国研究卡尼期气候事件比较全面的地区主要集中在四川盆地西北部地区(绵竹汉旺、安县雒水、江油等地),卡尼阶地层在该地区广泛出露,岩性从下部深灰色鲕粒灰岩、含生屑灰岩、硅质海绵礁灰岩到中上部黑色书页状泥页岩、深灰色粉砂岩、细砂岩的岩性转变。在川西北地区又以汉旺青岩沟、汉旺观音崖、安县雒水等剖面为研究卡尼期气候事件的典型剖面,沉积特征都以硅质海绵礁的死亡为转折点,与西北特提斯洋地区“Reingraben转折点”的概念相似,在海绵礁之间的沉积物中可见礁黏结岩或障积岩与深灰色薄层状粉砂质页岩、黑色书页状泥页岩互层,在海绵礁的盖层广泛发育厚度约1~3 m的灰黑色粉砂质页岩,然后粒度向上逐步变粗为粉砂岩、细砂岩等薄层状陆棚碎屑岩沉积,灰黑色粉砂质页岩、泥质粉砂岩中见大量的植物茎秆和植物叶片,同时也发现有双壳类、腕足类、菊石类等化石,反映出潮湿气候背景下(洪水期)大量淡水输入海洋的影响(在季节性气候影响下,研究区在北半球夏季时期为洪水期,陆源物质及淡水输入增强;而在北半球相对干旱的冬季时期该地区古海洋恢复正常盐度,生长着正常海相后生动物)以及陆源硅质碎屑输入突然增强,这可能是造成东特提斯洋地区碳酸盐台地消失和川西北地区硅质海绵礁生长受到抑制的重要影响因素^[40]。王艳艳等^[41]发现川西北地区卡尼阶生物化石中的碳同位素值的变化与西北特提斯洋地区 Lunz-Polzberg 剖面 and 南特提斯洋地区 Guling 剖面中得出

的碳同位素的值具有一定的相似性^[4,20],即从碳酸盐岩沉积到陆源碎屑岩,碳同位素值有受淡水输入增多影响而变小、更趋于负值的趋势。

1.2 黔西南地区

在黔西南地区,卡尼期碳酸盐台地消亡的证据主要保存在关岭、贞丰等地区沉积物中,该地区卡尼阶地层由法郎组瓦窑段、赖石科段以及把南组组成^[42]。与西北特提斯洋地区的沉积序列相似,该地区在早卡尼期以台地相碳酸盐岩沉积为主,法郎组瓦窑段(或称瓦窑组、小凹组)岩性从含生屑泥质灰岩、砂质灰岩到深灰色页岩、黏土岩转变,富含有机质和微粒黄铁矿,含有大量菊石、海百合茎和双壳类化石^[42-44],上卡尼阶赖石科段为砂质泥岩、细粒砂岩等,把南组主要为黏土岩、石英砂岩^[42],其沉积序列与川西北地区极为相似,可能反映了相似的气候变化及碳酸盐生产终结和陆源物质大量输入的过程。从贞丰龙场赖石科组上部约30 m厚的黑色岩系中,发现了大量的创口海百合、双壳类及菊石,该地区黑色岩系的年代可归属到晚三叠世早卡尼期晚期^[39],这一证据意味着在黔西南地区也可能受到了卡尼期极端气候事件影响。

1.3 藏南地区

位于冈瓦纳大陆北缘古特提斯海沿岸的藏南地区,聂拉木土隆剖面 and 拉孜修康剖面卡尼阶研究较为深入。在聂拉木土隆剖面,札木热组归入晚三叠世卡尼期是肯定的^[45],该组中下部为灰色、棕灰色砂质页岩夹薄层泥质灰岩,上部岩性为豆状、瘤状及疙瘩状构造相当发育的生物碎屑灰岩,其上被沙隆组中的灰色页岩覆盖,沙隆组中的古生物组合显示其为早诺利期^[45]。在拉孜修康剖面,修康群沉积在穷果群顶部中三叠统富含鱼鳞蛤的黄绿色页岩之上,修康群下部属卡尼期,岩性为灰色薄至中层状灰岩与深灰色、暗绿色页岩不等厚互层,页岩中含黑色放射虫硅质岩(此岩性与意大利北部的一些卡尼阶剖面较为相似);修康群上部为灰白色、棕褐色、土黄色砾岩、砂砾岩、杂色砂岩夹黑色碳质页岩及疙瘩状薄层灰岩,其时代可能为诺利期^[45]。因缺乏牙形石依据,郝子文等^[45]将聂拉木土隆剖面、拉孜修康剖面卡尼期灰岩之上的页岩或砂砾岩的时代归属暂时划归诺利期,这两个剖面的岩性变化也反映了卡尼期晚期的碳酸盐生产危机,目前也不排除覆盖于卡尼阶灰岩之上的页岩等属上卡尼阶的可能。

2 卡尼期气候事件过程与持续时间

卡尼阶最初由学者通过菊石分区将其分为三个亚阶^[46]: Cordevolian、Julian 和 Tuvanian, 后研究发现 Cordevolian 亚阶地层中只有一个菊石分区, 且 Cordevolian 亚阶的时间界限非常短, 且与 Julian 亚阶的时间界限有重叠, 因此 Krystyn 将 Cordevolian 亚阶合并到 Julian 亚阶中^[47]。据前人的研究成果, 卡尼期地质事件经历以下发展过程: 拉丁期主要为干旱气候, 在南阿尔卑斯山台地相顶部沉积序列中, 大量帐篷构造发育, 记录了早期碳酸盐岩的快速沉积, 可能与蒸发机制有关^[48]。意大利北部地层中蒸发矿物开始出现, 薄的钙质黏土反复出现在早期沉积物的表面, 也反映了干旱的气候条件^[49-50]。在中国川西北地区, 拉丁期的白云岩化及膏岩化现象普遍, 广泛发育以白云岩为主的潮坪相沉积^[51]。在 Julian 亚阶早期 (即 Julian 1 阶段), 在西北特提斯洋边缘 Transdanubian 地区白云岩化作用明显^[52] 以及在南阿尔卑斯地区沉积序列中缺乏陆生植被和煤的沉积, 同时大量存在蒸发岩, 也预示着干旱气候特征^[53-54], 而中国川西地区出现鲕粒滩, 这无疑都显示了早卡尼期延续了拉丁期以来的干旱气候特征^[9,55]。

在 Julian 亚阶晚期 (即 Julian 2 阶段) 至 Tuvanian 亚阶早期, 欧洲和北美的大部分地区, 被湿润季风气候打断, 降雨量开始明显增加^[2,19], 前期的碳酸盐台地被后期的古喀斯特所覆盖, 洞穴和落水洞发育, 其中充填有陆源黏土沉积物和角砾岩^[56]。在西北特提斯洋边缘 Transdanubian 地区, 整个盆地处在潮湿的气候环境, 大量陆源碎屑物质的输入, 导致碳酸盐台地消亡^[52], 该地区沉积物中富集高岭石 (约 10% ~ 20%), 亦可被视作是干旱气候向更具季节性潮湿气候转变的证据^[18]。在德国盆地, 来自西北方向流动的信风, 带来大量降雨, 将大量陆源硅质碎屑岩运送到日耳曼盆地^[11]。海相沉积序列也开始发生变化, 碳酸盐补偿深度升高 (CCD), 碳酸盐生产力停滞, 也几乎都同时发生在这一时期^[5,7], 对西北特提斯洋边缘浅海地层序列进行孢粉学研究, 也证实了在 Julian 亚阶晚期和 Tuvanian 亚阶早期处于潮湿环境条件^[57], 与此同时, 海洋表面温度、盐度、pH 值等发生改变或栖息地的丧失, 导致海相无脊椎动物灭绝^[2,58], 同时期新种属植物开始出现^[59]。在 Tuvanian 亚阶中后期, 造山运动继续活动, 在季风循环调节下, 气候又开始变得干旱, 大部分地区气候长期稳定, 如

在南阿尔卑斯, 发育于晚卡尼期和诺利期白云岩化严重的灰岩, 就没有显示出任何气候的变化^[16,60], 部分地区气候动荡, 出现若干次潮湿气候阶段, 在沉积序列中记录几次碎屑岩脉冲, 如北钙质阿尔卑斯山 Lunz 地区^[61] 以及日本 Kuma 地区^[25]。卡尼期极端气候持续了近 1 Myr (0.8 Myr), 是最长的极端气候事件之一, 事件持续时间长, 影响范围广, 对全球古生态环境造成了深远的影响。

3 成因模式

目前卡尼期气候事件的触发机制还未解决, 有地质研究者对其成因提出了以下假设:

3.1 板块构造促使大气循环系统变化的模式

超级季风气候触发卡尼期气候事件的模式也被许多地质学者用于解释这一地质现象^[2-4,53-54], 晚石炭世强烈的构造运动使劳亚大陆和冈瓦纳大陆聚合形成泛大陆^[62], 泛大陆的聚合和中央山脉的隆起 (CPM) 可能对全球大气环流系统产生了强烈影响, 从而形成超级季风气候 (megamonsoon)^[58,62-63]。巨型季风受南、北半球热量和压力的驱动形成季节性交替气候^[63], 季节性风向带来潮湿的大气, 形成季节性强降雨^[64], 到了晚三叠世早期巨型季风达到峰值, 干旱气候扩展到高纬度地区, 而在泛大陆边缘低纬度地区 (包括古特提斯洋地区) 降雨量骤然增多^[28,63-64], 这一时期, 在局部构造运动 (基默里板块的造山运动和芬诺斯堪迪亚高原的隆升) 和巨型季风的共同作用之下, 陆地风化速率进一步增强, 季节性降雨频繁, 大量新鲜淡水和陆源硅质碎屑的输入, 导致碳酸盐台地消亡, 它的影响范围几乎涉及整个古特提斯洋, 跨地区的触发了 “Reingraben 转折” 事件^[4], 卡尼期气候事件可能记录了泛大陆超级季风达到了峰值^[27-28,53,63], 强烈的季风性气候使得降雨增多, 所以卡尼期沉积记录中广泛存在着湿润气候的特征^[4], 在卡尼期晚期, 受季风环流的影响, 在日耳曼盆地和古地中海地区的气候又变得干旱, 广泛沉积了一套含膏的灰岩^[11,16]。

3.2 大火成岩省喷发致使全球气候发生紊乱的模式

现在也有很多学者赞成是由 Wrangellia 大面积火成岩省或者由地中海东部的碱性火山喷发引起的^[5,16-17,21], 一些学者通过对北美西部 Wrangellia 大火成岩省喷发的物质进行锆石测年, 数据结果表明大火成岩省喷发的时间与卡尼期极端事件发生的时间非常接近^[21,32], 大规模的玄武岩岩浆喷发而释放出

大量的富 ^{12}C 的二氧化碳,使得大气中 CO_2 的含量剧增而引起气候变暖,这一时期全球表层温度升高约 $6^\circ\text{C}\sim 8^\circ\text{C}$ ^[65]。古山脉(或者古高原)隆升以及大气中 CO_2 浓度急剧升高,导致了陆地风化速度增强和陆源硅质碎屑输入,与此同时海底大规模火山活动形成了“Wrangellia”海底高原,海底火山喷发可能引发了海洋中产生大量不稳定的、极度富 ^{12}C 的甲烷水合物,从而引起甲烷气体的大量释放,进一步增加了当地的温室气体总量,这样引起了海洋中轻碳的剧增,从而使得 ^{13}C 同位素的过度负偏^[21,66],在洋流和海底构造活动的作用下,海底饱和含 CO_2 和 H_2S 的厌氧海水上涌,加剧了海洋生物的灭绝和厌氧事件的发生^[67]。

3.3 多种因素相互作用的模式

据时志强等(2010)^[9]的观点,早三叠世时期,在印支运动的影响效应下,高原或山脉开始隆升,古特提斯洋完全闭合,全球火山活动达到高潮,大气中 CO_2 浓度也急剧增加,这一时期古特提斯洋地区的季风气候开始由干旱转向以潮湿为主的季节性环流气候,潮湿的气候带来大量的降雨和大气中高浓度的 CO_2 共同作用,进一步加剧了陆地风化速率,随之大量的陆源硅质碎屑和黏土物质输入古特提斯洋边缘海地区,碳酸盐岩沉积中断,同时大量陆源矿物质输入海洋,也致使海洋中营养物质过剩,导致古特提斯洋表面钙质浮游微生物的大规模爆发,同时由于海底板块活动以及大规模火成岩省爆发,引发了海底大量富含 H_2S 和 CO_2 的海水随古洋流上升到浅海区域,加剧了古特提斯洋边缘海地区的缺氧环境,最终导致了特提斯洋地区黑色页岩的沉积,这一系列相互影响的因素造就了这一显著的地质事件。

4 问题讨论

2008年6月在柏林Bolzano举行了“三叠纪气候”学术会议,2010年《Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology》发表了该次学术会议的专辑,其成果是基于欧、美地区的研究,其中有很多研究是探讨卡尼期事件的。Preto等^[16]对该学术论文集的综述认为对卡尼期气候事件的争论主要表现在气候变化的原因上,对卡尼期气候事件的触发机制也未得以解决,其与米兰科维奇旋回的关系还未得以确定,未来的古气候研究结果可能会使晚三叠世复杂的气候背景浮出水面。结合西北特提斯洋地区的研究成果,对比位于古特提斯洋东部陆架范围的川西、黔西南、藏东等地的卡尼阶岩性剖面,我们认为下列涉及卡尼

期气候事件成因与过程的问题需要进一步深入研究:

4.1 超级季风(megamonsoon)如何影响了卡尼期气候事件?

很多学者认为卡尼期极端气候事件是受到了超级季风的影响^[4,17,53,68],这种超级季风(megamonsoon)气候与联合古陆(也称之为泛大陆)的聚合有关^[69-70],有学者认为早期劳亚大陆和冈瓦纳大陆聚合成泛大陆^[62],泛大陆的聚合和中央山脉的隆起(CPM)可能对全球大气环流系统产生强烈影响,加之受到泛大陆时期地球的北、南半球间的热量差异所驱动^[63,69],从而形成具有季节性环流的超级季风气候,在北半球反映为冬季向南穿越特提斯洋的干旱风和夏季向北的在特提斯洋北岸带来大量降雨的潮湿风向(图2),古特提斯洋沿岸在早卡尼期晚期潮湿的气候突然增强,降雨骤然增多^[28,63-64],大量淡水和陆源硅质碎屑的输入,导致碳酸盐工厂生产力降低,而到了晚卡尼期,气候突然又重新变得干旱,形成了广布在西北特提斯碳酸盐台地上的蒸发岩^[11,16],这一过程反映着超级季风气候可能受到南北半球的气压和热量差对比的影响而发生了显著变化,从而触发卡尼期气候事件。

根据泛大陆的聚合程度、形状或沉积岩中植物叶片特征等,很多学者认为超级季风在晚三叠世卡尼期达到顶峰^[27-28,53,63],由于强烈的季风大气循环,尽管晚三叠世普遍干旱,但是在西北特提斯洋的部分地区,却出现几次气候震荡,至少四次独立的潮湿气候阶段被记录在卡尼期时期^[6,71],在我国川西北地区及黔西南地区卡尼阶中都发育有受到风暴作用影响的沉积物^[39,72],可能是和超级季风有关的。很多学者都赞同用全球气候变化来解释卡尼期气候变化事件,但是这一时期在强烈季风气候框架内的气候变化还是不明了的^[16],Hornung和Brandner^[3]、Hornung等^[4]、时志强等^[9]也曾试图给予解释,但这些解释多是推测性的,卡尼期全球显著的气候变化的机制还没有得到完满的解决,其中内在的原因还有待深入研究。

4.2 构造运动与卡尼期气候事件的关系

很多学者将卡尼期气候事件与三叠纪时期全球板块活动联系起来,认为板块的碰撞与俯冲,导致高原或山脉隆升,火山活动增强,引发陆源硅质碎屑大量输入,导致早卡尼期末期古特提斯洋地区镶边碳酸盐台地消失^[3,4,17,73-74]。Corso等^[21]根据碳同位素负偏的证据认为卡尼期气候变化和北美西部Wrangellia

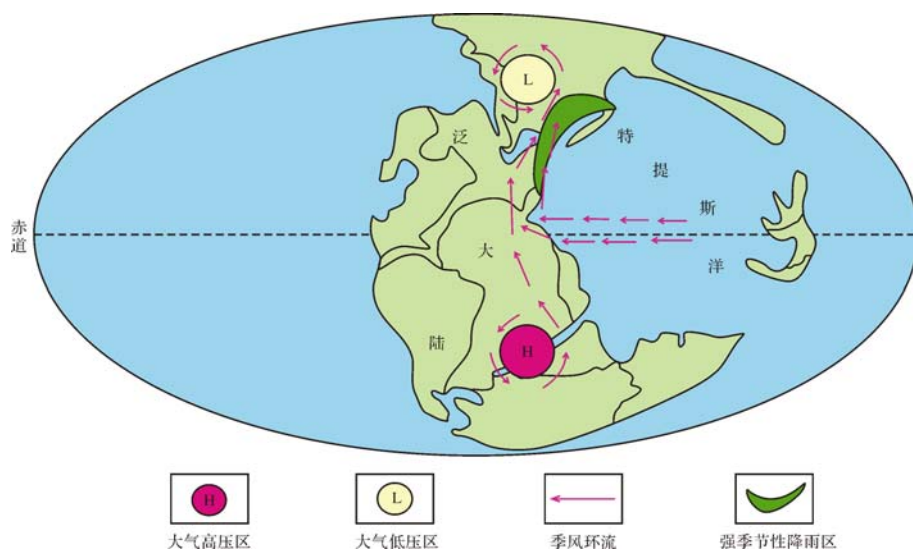


图 2 晚三叠世北半球夏季时泛大陆东部和特提斯季风环流示意图^[64](据 Parrish and Peterson)

Fig.2 Diagram illustrating monsoonal circulations in Late Triassic Eastern Pangaea in Northern summer^[64]
(modified from Parrish and Peterson)

火成岩省有关。我们认为构造因素在卡尼期极端气候事件中扮演着极为重要的角色,主要体现在以下两个方面:第一是直接影响,板块的汇聚,导致高原或者山脉的隆升,巨大的地形差异促使陆源物质供给增多,大量陆源物质由陆地向古特提斯洋浅海盆地的输入也随之增加,导致碳酸盐工厂生产力下降;第二是间接影响,高原或者山脉的隆升对全球气候有明显的影响(如新生代青藏高原的隆升),加之三叠纪超级季风盛行,晚三叠时期超级季风达到峰值^[27-28,53,63],季风性气候带来更多的大气降水^[9],此外伴随着古特提斯洋闭合过程,大规模火山爆发,使得大气中 CO_2 浓度急剧上升,全球温室效应明显,加之受到季节性湿润季风的影响,致使降雨量突然增多,也进一步使得陆地风化速率增加,导致台地相碳酸盐生产受到抑制。在晚三叠世卡尼期,分布于古特提斯洋和新特提斯洋之间的基默里板块群向北运动,与尚未完全拼合的欧亚大陆碰撞,造成古特提斯域构造活动剧烈,在东特提斯地区逐步形成金沙江缝合带^[75];在四川西北部地区,构造运动是由北向南扩展的^[13],在贵州西南部地区,大量富集在关岭动物群黑色岩系中的化石与三叠纪印支运动引起的缺氧事件和含硫化氢水位的上涌有密切的关系^[39],在西藏东部昌都地区,可见卡尼阶(洞卡组)中性火山岩覆盖在卡尼阶(公也弄组)碳酸盐岩之上^[76],在四川西部昌台地区,也发现卡尼阶(曲嘎寺组)碳酸盐岩沉积中断,取而代之的是上覆一套上三叠统勉戈组酸性火山岩^[77-79],

这些沉积现象都反映了碳酸岩生产受到抑制与构造活动有一定的关系。从全球范围来说,卡尼期构造运动最强烈的地区在亚洲(如我国的金沙江缝合带和华南造山带等),这与基默里微板块群与欧亚板块的汇聚有关,在这一过程里,我国西南部地区发育多条缝合带^[80]和大范围的卡尼期火山岩^[76,78],所以将我国卡尼期构造运动研究纳入全球卡尼期事件研究的范畴,很有可能获得对晚三叠世地球系统演化的更深刻认识。

4.3 卡尼期气候事件过程中碳酸盐补偿深度(CCD)上升问题

吴熙纯^[81]通过对川西地区硅质海绵礁的研究发现,川西地区卡尼阶地层中的海绵骨针多数可归属为硅质六射海绵纲,目前的研究多认为硅质六射海绵反映了水体较深的沉积环境^[38,82],但我们应该注意到:在意大利南部 Lagonegro 盆地卡尼阶地层中发现有含黏土质放射虫硅质岩,这预示着在晚三叠世卡尼期西北特提斯洋地区碳酸盐补偿深度(CCD)的短暂性升高^[7],而位于东特提斯洋的川西地区也发现有代表深水沉积环境的硅质六射海绵骨针,这意味着在整个古特提斯范围均存在 CCD 面升高的过程,这次事件是卡尼期事件在深水环境的反映,与生物危机、全球碳循环扰动及古海洋变化相关联。 CO_2 浓度、温度和海平面升降都将影响 CCD 面的变化,在 Lagonegro 盆地 CCD 面的深度可能主要受控于碳酸盐台地生长,在这一过程将消耗海相碳酸盐,造成海相碳酸盐向台

地的输出^[7],这一假设即使在西北特提斯地区也有争议(卡尼期气候事件发生时特提斯洋碳酸盐生产率是受到抑制的),更不能合理解释东特提斯卡尼期地质过程,因为目前的证据显示晚卡尼期碳酸盐生产在中国西南部地区是全面终止的;大气 CO₂ 浓度增加可能是 CCD 升高现象更为合理的解释,Rigo 等^[7] 也认为大气 CO₂ 浓度的增加可导致海洋酸化,使 CCD 面上升,与之相伴的是碳酸盐台地生长受阻、降雨量增加、深水硅质物质输入增多,这都类似于早白垩世早阿普第期事件^[83-84]。但是 Yves 等^[85] 认为晚三叠世大气 CO₂ 浓度是逐渐降低的,他们给出的曲线并未显示早卡尼期末期有一次大气 CO₂ 浓度增加的过程,Berner^[86] 绘制的显生宙大气 CO₂ 含量曲线(10Ma 尺度)也是这样的,是他们的 CO₂ 含量曲线的时间尺度不能显示细节,还是大气 CO₂ 浓度本身没有升高?或者是构造运动中产生的 CO₂ 气体被陆地风化作用和湿润时期植物生长迅速消耗了呢?这其中的内在缘由还需要深入研究。

4.4 卡尼期黑色页岩事件反映的大洋生产力

在西北特提斯洋地区,黑色页岩广泛覆盖在早卡尼期碳酸盐岩之上,在 Golonka^[87] 绘制的晚三叠世卡尼期板块构造位置与岩相古地理图上,该套黑色页岩广泛存在于古特提斯洋北部,一直从西北特提斯洋地区延伸到东特提斯洋,在奥地利钙质阿尔卑斯地区,Hornung 和 Brandner^[3] 由此提出了“卡尼期黑色页岩事件”(Carnian black shale event)的概念,实际上这是从另一个角度阐述卡尼期地质事件的。Hornung 和 Brandner^[3] 认为黑色页岩事件与西北特提斯深水环境物质循环的显著重组以及氧供应有关,或许是由于基默里陆块与欧亚大陆的碰撞所引发;在南钙质阿尔卑斯地区,可见到黑色页岩覆盖在碳酸盐岩之上的现象,被认为是由于海平面的急剧升高而导致碳酸盐岩沉积中断^[88];在冈瓦纳大陆北缘的喜马拉雅 Spiti 盆地也发现黑色页岩,其与奥地利 Reingraben 转换事件是等时的,反映了较深陆架环境的缺氧情况^[4]。在川西北地区 and 黔西南地区,下卡尼阶碳酸盐岩之上覆盖的是灰黑色粉砂质页岩或黑色页岩,与这一事件有很大的相似性,那么,特提斯洋地区与卡尼期气候事件有关的黑色页岩是等时沉积的吗?一般来讲,大洋缺氧事件发生期间海相碳酸盐和有机质碳稳定同位素均发生正偏,这在白垩纪和侏罗纪缺氧事件研究中被广泛证实^[89-90],而我们测试的化石激光微区碳同位素数据^[41]与 Keim 等^[88]和 Hornung 等^[4]的全岩碳

同位素数据都显示卡尼期黑色页岩的稳定碳同位素是负偏的(或者值偏低),这是否意味着大洋缺氧事件黑色页岩与淡水输入事件中沉积的黑色页岩的碳同位素分馏机制有所不同?卡尼期黑色页岩事件是否发生在深水缺氧环境?碳同位素低值是淡水的大量输入造成海水溶解氧含量升高造成的吗?这似乎不能合理解释页岩的颜色;该时期大洋生产力是高还是低?是否是陆地植物的大量沉积影响了黑色页岩的碳同位素值?详细的生物标志化合物、有机碳同位素测试等分析数据或许能解开这些谜团。

4.5 多幕卡尼期气候事件反映的气候波动

Roghi 等^[6]根据西北特提斯洋地区多个剖面里卡尼阶 4 个黑色页岩夹层的孢粉学研究认为,“卡尼期洪水事件”在欧洲记录了 4 个独立的反映潮湿气候扰动的硅质碎屑输入脉冲(pulse),有学者认为这与季节性季风气候有关^[71],这一特征和我国川西北、黔西南地区有很大的相似性;在绵竹汉旺剖面,处于马鞍塘组礁灰岩(下卡尼阶)与小塘子组薄层状粉、细砂岩之间的灰黑色粉砂质页岩(或灰质页岩)夹层中见大量植物叶片化石及菊石、腕足类海洋生物碎屑,反映了淡水输入及海洋生物死亡事件的影响,在该剖面厚度 1~3 m 的灰黑色泥质岩夹层有 3 套,另见一层厚度仅为 8 mm 的页岩夹层,也可能反映这一特征。

5 结论与展望

作为三叠纪最显著的气候和沉积变化事件之一,卡尼期气候事件已经引起了全球地质研究者的极大兴趣,有越来越多的高质量研究成果涉及这一领域。受基默里板块群与欧亚大陆碰撞拼合的影响,卡尼期构造活动强烈,构造运动对全球卡尼期气候事件的影响还不甚清晰。以古生物学、沉积学和地球化学研究方法综合研究卡尼期气候事件沉积,探讨这一幕式湿润气候变化在全球的影响,以系统论的观点研究这一地质事件发生的原因(如构造或气候驱动的机制)与过程(注意卡尼期事件的阶段性、及在这一过程里 CCD 面上升、黑色页岩沉积等),将使我们更深刻地认识晚三叠世卡尼期地球系统的复杂演化。

致谢 感谢 Nereo Preto 教授和 Piero Gianolla 教授提供意大利 CPE 研究团队详细的研究成果以及二者在川西北野外给予的建设性意见,感谢导师时志强教授在论文撰写期间大力的支持,感谢外审专家细致而富有启发性的评审意见。

参考文献 (References)

- Schlager W, Schönlberger W. Das Prinzip stratigraphischer Wenden in der Schichtenfolge der Noedlichen Kalkalpen [J]. Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft Wien, 1974, 66/67: 165-193.
- Simms M J, Ruffell A H. Synchronicity of climatic change and extinctions in the Late Triassic [J]. Geology, 1989, 17(3): 265-268.
- Hornung T, Brandner R. Biostratigraphy of the Reingraben Turnover (Hallstatt Facies Belt): local black shale events controlled by the regional tectonics, climatic change and plate tectonics [J]. Facies, 2005, 51(1/4): 460-479.
- Hornung T, Krystyn L, Brandner R. A Tethys-wide mid-Carnian (Upper Triassic) carbonate productivity crisis: Evidence for the Alpine Reingraben Event from Spiti (Indian Himalaya)? [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2007, 30(2): 285-302.
- Hornung T. Multistratigraphy of the Draxllehen quarry near Berchtesgaden (Tuvallian-Lacian 2): implication for hallstatt limestone sedimentation and palaeoclimate in the aftermath of the "Carnian Crisis" [J]. Austrian Journal of Earth Science, 2007, 100: 82-89.
- Roghi G, Gianolla P, Minarelli L, et al. Palynological correlation of Carnian humid pulses throughout western Tethys [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 290(1/4): 89-106.
- Rigo M, Preto N, Roghi G, et al. A rise in the carbonate compensation depth of western Tethys in the Carnian (Late Triassic): Deep-water evidence for the Carnian Pluvial Event [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, 246(2/4): 188-205.
- 时志强, 钱利军, 曾德勇, 等. 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 [J]. 地质论评, 2010, 56(3): 321-328. [Shi Zhiqiang, Qian Lijun, Zeng Deyong, et al. Geological records of late Triassic Carnian carbonate productivity crisis in Eastern Tethys Region (SW China) [J]. Geological Review, 2010, 56(3): 321-328.]
- 时志强, 钱利军, 熊兆军, 等. 中国西南部地区卡尼期危机及其形成原因探讨 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2010, 29(3): 227-232. [Shi Zhiqiang, Qian Lijun, Xiong Zhaojun, et al. Carnian crisis occurring in SW China and its origin [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry 2010, 29(3): 227-232.]
- Preto N, Hinnov L A. Unravelling the origin of shallow-water cyclothem in the Upper Triassic Dürrenstein Fm. (Dolomites, Italy) [J]. Journal of Sedimentary Research, 2003, 73(5): 774-789.
- Kozur H W, Bachmann G H. The Middle Carnian wet intermezzo of the stuttgart formation (schilfsandstein), Germanic basin [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 290(1/4): 107-119.
- Breda A, Preto N, Roghi G, et al. The Carnian pluvial event in the Tofane area (Cortina d'Ampezzo, Dolomites, Italy) [J]. GeoAlp, 2009, 6: 80-115.
- 刘树根, 杨荣军, 吴熙纯, 等. 四川盆地西部晚三叠世海相碳酸盐岩碎屑岩的转换过程 [J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(5): 556-565. [Liu Shugen, Yang Rongjun, Wu Xichun, et al. The Late Triassic transition from marine carbonate rock to clastics in the western Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(5): 556-565.]
- 李勇, 苏德辰, 董顺利, 等. 晚三叠世龙门山前陆盆地早期 (卡尼期) 碳酸盐缓坡和海绵礁的淹没过程与动力机制 [J]. 岩石学报, 2011, 27(11): 3460-3470. [Li Yong, Su Dechen, Dong Shunli, et al. Dynamic of drowning of the carbonate ramp and sponge build-up in the early stage (Cainian) of Longmen of Shan foreland basin, Late Triassic, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(11): 3460-3470.]
- 时志强, 欧莉华, 罗凤姿, 等. 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 [J]. 古地理学报, 2009, 11(4): 375-383. [Shi Zhiqiang, Ou Lihua, Luo Fengzi, et al. Black shale event during the Late Triassic Carnian Age: Implications from sedimentary and palaeontological records in Longmen Mountains region [J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(4): 375-383.]
- Preto N, Kustatscher E, Wignall P B. Triassic climates-State of the art and perspectives [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 290(1/2/3/4): 1-10.
- Hornung T, Spatzenecker A, Joachimski M M. Multistratigraphy of condensed ammonoid beds of the Rappoltstein (Berchtesgaden, Southern Germany): unravelling palaeo-environmental conditions on "Hallstatt deep swells" during the Reingraben Event (late Lower Carnian) [J]. Facies, 2007, 53(2): 267-292.
- Rostási Á, Raucsik B, Varga A. Palaeoenvironmental controls on the clay mineralogy of Carnian sections from the Transdanubian Range (Hungary) [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2011, 300(1/2/3/4): 101-112.
- Simms M J, Ruffell A H. Climatic and biotic change in the late Triassic [J]. Journal of the Geological Society of London, 1990, 147(2): 321-327.
- Korte C, Kozur H W, Veizer J. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of Triassic brachiopods and carbonate rocks as proxies for coeval seawater and palaeotemperature [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2005, 226(3/4): 287-306.
- Corso J D, Mietto P, Newton R J, et al. Discovery of a major negative ^{13}C spike in the Carnian (Late Triassic) linked to the eruption of Wrangellia flood basalts [J]. Geology, 2012, 40(1): 79-82.
- Rigo M, Joachimski M M. Palaeoecology of Late Triassic conodonts: Constraints from oxygen isotopes in biogenic apatite [J]. Acta Palaeontologica Polonica, 2010, 55(3): 471-478.
- Rigo M, Trotter J A, Preto N. Oxygen isotopic evidence for Late Triassic monsoonal upwelling in the northwestern Tethys [J]. Geology, 2012, 40(6): 515-518.
- Rüttner A W. Southern borderland of Triassic Laurasia in north-east Iran [J]. Geologische Rundschau, 1993, 82(1): 110-120.
- Daryan B S, Stanley G D J, Onoue T. Upper Triassic (Carnian) reef biota from the Sambosan Accretionary Complex, Kyushu, Japan [J]. Facies, 2012, 58(4): 671-684.
- Martini R, Zaninetti L, Villeneuve M, et al. Triassic pelagic deposits of Timor: Palaeogeographic and sea-level implications [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2000, 160(1/2): 123-151.
- Prochnow S J, Nordt L C, Atchley S C, et al. Multi-proxy paleosol ev-

- idence for Middle and Late Triassic climate trends in eastern Utah [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 232(1): 53-72.
- 28 Colombi C E, Parrish J T. Late Triassic Environmental evolution in Southwestern Pangea: plant taphonomy of the Ischigualasto Formation [J]. *Palaios*, 2008, 23(12): 778-795.
- 29 Mazza M, Furin S, Spötl C, et al. Generic turnovers of Carnian/Norian conodonts: Climatic control or competition? [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 290(1/2/3/4): 120-137.
- 30 Fowell S J, Cornet B, Olsen P E. Geologically rapid Late Triassic extinctions: Palynological evidence from the Newark Supergroup [J]. *Geological Society of America*, 1994, 288: 197-206.
- 31 Benton M J. More than one event in the late Triassic mass extinction [J]. *Nature*, 1984, 321(6073): 857-861.
- 32 Furin S, Preto N, Rigo M, et al. High-precision U-Pb zircon age from the Triassic of Italy: Implications for the Triassic time scale and the Carnian origin of calcareous nannoplankton and dinosaurs [J]. *Geology*, 2006, 34(1): 1009-1012.
- 33 Taylor E L, Taylor T N, Krings M. *Paleobotany: The Biology and Evolution of Fossil Plants* [M]. New York: Academic Press, 2009: 806-870.
- 34 Bellanca A, Di Stefano P, Neri R. Sedimentology and isotope geochemistry of Carnian deep-water marl/limestone deposits from the Sicani Mountains, Sicily: environmental implications and evidence from planktonic source of lime mud [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1995, 114(1): 111-129.
- 35 Preto N, Willems H, Guaiumi C, et al. Onset of significant pelagic carbonate accumulation after the Carnian Pluvial Event (CPE) in the western Tethys [J]. *Facies*, 2013, 59(4): 891-914.
- 36 Berner R A. The rise of plants and their effect on weathering and atmospheric CO₂ [J]. *Science*, 1997, 276(5312): 544-546.
- 37 Berner R A. Atmospheric oxygen over Phanerozoic time [J]. *Proceedings of the National Academy of the Sciences of the United States of America*, 1999, 96(20): 10955-10957.
- 38 吴熙纯. 川西北晚三叠世卡尼期硅质海绵礁—鲕滩组合的沉积相分析 [J]. *古地理学报*, 2009, 11(2): 125-142. [Wu Xichun. Sedimentary facies analysis of the Late Triassic Carnian siliceous sponge reef-oolite bank complex in northwestern Sichuan province [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2009, 11(2): 125-142.]
- 39 汪啸风, 陈孝红, 程龙, 等. 关岭及相关生物群沉积与生态环境的探讨 [J]. *古生物学报*, 2009, 48(3): 509-526. [Wang Xiaofeng, Chen Xiaohong, Cheng Long, et al. Sedimentary and palaeoecological environments of the Guanling and related biotas [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2009, 48(3): 509-526.]
- 40 时志强, 张华, 曾德勇, 等. 龙门山前缘上三叠统卡尼阶特征及其古环境、古气候意义 [J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2010, 37(4): 425-431. [Shi Zhiqiang, Zhang Hua, Zeng Deyong, et al. Characters of Carnian in the frontal area of Mt. Longmenshan: implications for palaeoenvironment and paleoclimate [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Social Sciences*, 2010, 37(4): 425-431.]
- 41 王艳艳, 张彪, 时志强, 等. 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 [J]. *古地理学报*, 2012, 14(3): 375-382. [Wang Yanyan, Zhang Biao, Shi Zhiqiang, et al. Oxygen and carbon isotopic records of the Late Triassic Carnian pluvial event deposits in northwestern Sichuan province [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(3): 375-382.]
- 42 贵州省地质矿产局. 贵州省岩石地层 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997. [Guizhou Geology and Mineral Bureau. *Rock Strata in Guizhou* [M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1997.]
- 43 汪啸风, 陈孝红, 陈立德, 等. 贵州关岭生物群研究的进展和存在问题 (代序) [J]. *地质通报*, 2003, 22(4): 221-227. [Wang Xiaofeng, Chen Xiaohong, Chen Lide, et al. Study of the Guanling biota in Guizhou: progress and problems [J]. *Geological Bulletin of China*, 2003, 22(4): 221-227.]
- 44 李荣西, 肖家飞, 魏家庸, 等. 黔南 Ladinian-Carnian 期海侵与碳酸盐岩台地演化 [J]. *地球学报*, 2005, 26(3): 249-253. [Li Rongxi, Xiao Jiafei, Wei Jiayong, et al. Ladinian-Carnian transgression and the evolution of Yangtze carbonate platform in southwestern Guizhou [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2005, 26(3): 249-253.]
- 45 郝子文, 饶荣标. 全国地层多重划分对比研究 (50): 西南区区域地层 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999: 82-113. [Hao Ziwen, Rao Rongbiao. *The Multiple Stratigraphic Division and Comparative Study of the National Rock Strata (50): Strata in Southwest Region* [M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1999: 82-113.]
- 46 Broglio Loriga C, Cirilli S, De Zanche, et al. A GSSP candidate for the Ladinian/Carnian boundary: the Prati di Stuores/Stuores Wiesen section (Dolomites, Italy) [C]. *Albertiana*, 1998, 21: 2-18.
- 47 Krystyn L. Eine neue Zonengliederung im alpin mediterranen Unterkarn [M] // Zapfe H. Beiträge zur Biostratigraphie der Tethys-Trias. *Schr. Erdwiss. Komm. Österr. Akad. Wiss.* 1978, 4: 37-75.
- 48 Assereto R L, Kendall C G S C. Nature, origin and classification of peritidal tepee structures and related breccias [J]. *Sedimentology*, 1977, 24(2): 153-210.
- 49 Goldhammer R K, Dunn P A, Hardie L A. High frequency glacioeustatic sea level oscillation with Milankovitch characteristics recorded in Middle Triassic platform carbonates in Northern Italy [J]. *American Journal of Science*, 1987, 287(9): 853-892.
- 50 Egenhoff S O, Peterhänsel A, Bechstädt T, et al. Facies architecture of an isolated carbonate platform: tracing the cycles of the Latemar (Middle Triassic, Northern Italy) [J]. *Sedimentology*, 1999, 46(5): 893-912.
- 51 赵玉峰. 川西地区中晚三叠世多重地层划分对比及沉积体系分析 [D]. 成都: 成都理工大学, 2009: 45-55. [Zhao Yufeng. *The multiple stratigraphic division and sedimentary system analysis in Middle-late Triassic in western Sichuan* [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009: 45-55.]
- 52 Haas J, Budai T, Raucsik B. Climatic controls on sedimentary environments in the Triassic of the Transdanubian Range (Western Hungary) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 353-355: 31-44.

- 53 Mutti M, Weissert H. Triassic monsoonal climate and its signature in Ladinian-Carnian carbonate platforms (Southern Alps, Italy) [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1995, 65(3): 357-367.
- 54 Stefani M, Brack P, Gianolla P, et al. Triassic carbonate platforms of the Dolomites: carbonate production, relative sea-level fluctuations and the shaping of the depositional architecture [C]. // *Thirty Second International Geological Congress*. Florence, Italy, 2004: 44.
- 55 颜佳新. 东特提斯地区二叠—三叠纪古气候特征及其古地理意义 [J]. *地球科学*, 1999, 24(1): 13-18. [Yan Jiaxin. Permian- Triassic paleoclimate of Eastern Tethys and its paleogeographic implication [J]. *Earth Science*, 1999, 24(1): 13-18.]
- 56 Carmignani L, Conti P, Massa G, et al. Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 "Foglio 249 - Massa Carrara" [M]. Servizio Geologico d'Italia, 2007: 200.
- 57 Roghi G. Palynological investigations in the Carnian of the Cave del Predil area (Julian Alps, NE Italy) [J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2004, 132(1): 1-35.
- 58 Dubiel R F, Parrish J T, Parrish J M, et al. The Pangaeon megamonsoon: evidence from the Upper Triassic Chinle Formation, Colorado Plateau [J]. *Palaio*, 1991, 6(4): 347-370.
- 59 Visscher H, van der Zwan C J. Palynology of the circum Mediterranean Triassic: phytogeographical and palaeoclimatological implications [J]. *Geologische Rundschau*, 1981, 70(2): 625-634.
- 60 Haas J, Demény A. Early dolomitisation of Late Triassic platform carbonates in the Transdanubian Range (Hungary) [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 151(3/4): 225-242.
- 61 Kristan T E, Hamedani A. Eine spezifische Mikrofaunen-Vergesellschaftung aus den Opponitzer Schichten des Oberkarn der niederösterreichischen Kalkvoralpen [J]. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie*, 1973, 143: 193-222.
- 62 Tabor N J, Poulsen C J. Palaeoclimate across the Late Pennsylvanian-Early Permian tropical palaeolatitudes: A review of climate indicators, their distribution, and relation to palaeophysiographic climate factors [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 268(3/4): 293-310.
- 63 Parrish J T. Climate of the supercontinent Pangea [J]. *Journal of Geology*, 1993, 101(2): 215-233.
- 64 Parrish J T, Peterson F. Wind directions predicted from global circulation models and wind directions determined from eolian sandstones of the western United States—a comparison [J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 56(1/2/3/4): 261-282.
- 65 Royer D L, Berner R A, Montañez I P, et al. CO₂ as a primary driver of Phanerozoic climate [J]. *GSA Today*, 2004, 14(3): 4-10.
- 66 Preto N, Spötl C, Guaiumi C. Evaluation of bulk carbonate $\delta^{13}\text{C}$ data from Triassic hemipelagites and the initial composition of carbonate mud [J]. *Sedimentology*, 2009, 56(5): 1329-1345.
- 67 Erba E, Tremolada F. Nannofossil carbonate fluxes during the Early Cretaceous: phytoplankton response to nitrification episodes, atmospheric CO₂, and anoxia [J]. *Paleoceanography*, 2004, 19(1): 1-18.
- 68 Balog A. Climate-controlled early dolomite, Late Triassic cyclic platform carbonates, Hungary [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1999, 69(1): 267-282.
- 69 Parrish J T, Ziegler A M, Scotese C R. Rainfall patterns and the distribution of coals and evaporites in the Mesozoic and Cenozoic [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1982, 40(1/2/3): 67-101.
- 70 汪品先. 全球季风的地质演变 [J]. *科学通报*, 2009, 54(5): 535-556. [Wang Pinxian. Global monsoon in a geological perspective [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(5): 535-556.]
- 71 Stefani M, Furin S, Gianolla P. The changing climate framework and depositional dynamics of Triassic carbonate platforms from the Dolomites [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 290(1/2/3/4): 43-57.
- 72 Yang Rongjun, Liu Shugen, Wu Xichun. Distribution and formation mechanism of lime mudstone in Upper Triassic in northwestern Sichuan, China [J]. *Carbonates and Evaporites*, 2010, 25(4): 275-281.
- 73 Rüber T, Zamparelli V. Facies and biota of Anisian to Carnian carbonate platforms in the Northern Calcareous Alps (Tyrol and Bavaria) [J]. *Facies*, 1997, 37(1): 115-136.
- 74 Keim L, Brandner R. Facies interfingering and synsedimentary tectonics on late Ladinian early Carnian carbonate platforms (Dolomites, Italy) [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2001, 90(4): 813-830.
- 75 李勇, 王成善, 伊海生. 西藏金沙江缝合带西段晚三叠世碰撞作用与沉积响应 [J]. *沉积学报*, 2003, 21(2): 191-197. [Li Yong, Wang Chengshan, Yi Haisheng. The Late Triassic collision and sedimentary responses at western segment of Jinshajiang suture, Tibet [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(2): 191-197.]
- 76 彭勇民, 汪名杰, 陈明. 昌都地区三叠纪事件沉积及其成因 [J]. *四川地质学报*, 1999, 19(4): 273-280. [Peng Yongmin, Wang Mingjie, Chen Ming. Triassic event sediments and their genesis in Changdu area [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 1999, 19(4): 273-280.]
- 77 游再平. 巴塘县拉纳山地层剖面的再认识 [J]. *四川地质学报*, 1987, (2): 29-38. [You Zaiping. Again know the stratigraphic section of Lana mountain in Batang [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 1987, (2): 29-38.]
- 78 黄仕华. 川西义敦地区中上三叠统内不整合的发现及意义 [J]. *中国地质*, 2001, 28(3): 12-15. [Huang Shihua. The discovery and significance of unconformable in the Upper Triassic in Yidui region of western Sichuan [J]. *Geology in China*, 2001, 28(3): 12-15.]
- 79 庞艳春, 付修根, 王新利, 等. 川西昌台地区上三叠统勉戈组的瓣鳃类 Pergamidia-Halobia 群落特征及古环境分析 [J]. *古生物学报*, 2008, 47(3): 341-351. [Pang Yanchun, Fu Xiugen, Wang Xinli, et al. Characteristics and paleoenvironment of the bivalve pergamidia-halobia community from Mlange Formation of Upper Triassic in Changtai of western Sichuan [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2008, 47(3): 341-351.]
- 80 崔可信, 等. 中国西南区域古地理及其演化图集 [M]. 北京: 地震出版社, 2004: 281. [Cui Kexin, et al. The Atlas of Paleogeographic Evolution in Southwest China [M]. Beijing: Earthquake Press, 2004:

- 281.]
- 81 吴熙纯. 川西北晚三叠世的灯海动物群[J]. 古生物学报, 1990, 29(3): 349-365. [Wu Xichun. Trilobites fauna in Late Triassic in Northwest Sichuan [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 1990, 29(3): 349-365.]
- 82 杨荣军, 刘树根, 吴熙纯, 等. 龙门山前缘上三叠统马鞍塘组沉积分布特征及其控制因素[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2008, 35(4): 455-462. [Yang Rongjun, Liu Shugen, Wu Xichun, et al. Distribution characteristics and controlling factors of Upper Triassic Ma'antang Formation in the front of Longmen Mountains, Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Social Sciences, 2008, 35(4): 455-462.]
- 83 Weissert H, Lini A, Föllmi K B, et al. Correlation of Early Cretaceous carbon isotope stratigraphy and platform drowning events: a possible link? [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1998, 137(3/4): 189-203.
- 84 Wortmann U G, Herrle J O, Weissert H. Altered carbon cycling and coupled changes in Early Cretaceous weathering patterns: evidence from integrated carbon isotope and sandstone records of the western Tethys [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 220(1/2): 69-82.
- 85 Godd  ris Y, Donnadi  u Y, de Vargas C, et al. Causal or casual link between the rise of nannoplankton calcification and a tectonically-driven massive decrease in Late Triassic atmospheric CO₂? [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 267(1/2): 247-255.
- 86 Berner R A. Geocarbsulf: A combined model for Phanerozoic atmospheric O₂ and CO₂ [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006, 70(23): 5653-5664.
- 87 Golonka J. Late Triassic and Early Jurassic palaeogeography of the world [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, 244(1/2/3/4): 297-307.
- 88 Keim L, Spotl C, Brandner R. The aftermath of the Carnian carbonate platform demise: a basinal perspective (Dolomites, Southern Alps) [J]. Sedimentology, 2006, 53(2): 361-386.
- 89 胡修棉, 王成善, 李祥辉. 大洋缺氧事件的碳稳定同位素响应[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(1): 1-6. [Hu Xiumian, Wang Chengshan, Li Xianghui. Stable carbon isotope response to oceanic anoxic events [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Social Sciences, 2001, 28(1): 1-6.]
- 90 Chen Lan, Yi Haisheng, Hu Ruizhong, et al. Organic geochemistry of the Early Jurassic oil shale from the Shuanghu area in Northern Tibet and the Early Toarcian oceanic anoxic event [J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(3): 392-397.

Mid-Carnian (Late Triassic) Extreme Climate Event: Advances and unsolved problems

JIN Xin¹ SHI ZhiQiang¹ WANG YanYan² DUAN Xiong¹ CHENG Ming¹

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059;

2. College of Materials and Chemistry & Chemical Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

Abstract: As one of the most pronounced climatic extremes in the geological history, the mid-Carnian (Late Triassic) extreme climate event, also named the Carnian Pluvial Event (CPE), has been widely recognized from the United States, China, Japan, and many places of Europe over past decades. The known evidence shows that the CPE is characterized by a dramatic increase in rainfalls and could last for nearly one million years. The CPE is represented by the sharp replacement of platform facies carbonates with the siliciclastic succession of mid-Carnian age worldwide. Several scenarios have been proposed to account for the CPE: (1) The plate tectonic activities such as collision and aggregation of the Pangea are believed to have prompted the atmosphere and ocean circulation changes; (2) the coeval large igneous province eruptions such as the Wrangellia Volcanic Province may have triggered a dramatic increase in CO₂ contents in atmosphere, which caused a warm, wet climatic condition; (3) Possible global climate disruption such as megamonsoon induced the elevated rainfalls; and integration of all of these factors accounted for the climatic extreme. The strata record from southwestern China suggests that the link among the megamonsoon, tectonic movement and climate changes during the Carnian Stage is worthy studying in detail. In addition, further studies on some critical issues concerning the rise of carbonate compensation depth (CCD), high oceanic productivity reflected by the Carnian black shale, and pulses of humid climate during the mid-Carnian are crucial for better understanding of this deep-time climatic extreme.

Key words: Carnian pluvial event; paleoclimate; megamonsoon; tectonic movement; Late Triassic