论文

南雄盆地白垩纪-古近纪(K-Pg)界线位置探讨 ——来自火山活动及古气候演化的证据

赵梦婷¹, 马明明^{2,3*}, 何梅¹, 邱煜丹¹, 刘秀铭^{2,3,4}

1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007;

2. 福建师范大学湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室, 福州 350007;

3. 福建师范大学湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007;

4. Department of Environment and Geography, Macquarie University, Sydney NSW 2109, Australia

* 通讯作者, E-mail: mamingming159@163.com

收稿日期: 2020-10-19; 收修改稿日期: 2021-01-09; 接受日期: 2021-02-02; 网络版发表日期: 2021-03-03

国家自然科学基金项目(批准号: 41602185和41772180)、国际地球科学计划项目(编号: IGCP 679)和福建师范大学创新团队项目(编号: IRTL1705)资助

摘要 陆相地层中K-Pg位置的确定对白垩纪末期陆地生态系统演化过程(尤其是非鸟类恐龙灭绝)的研究意义重大, 目前世界范围内的陆相K-Pg研究集中在中高纬度地区, 如北美及中国的东北地区. 位于低纬度地区的南雄盆地虽然也开展了大量的工作, 成为中国陆相白垩系-古近系地层划分对比的标准, 但是不同的研究者从不同的角度提出了4条可能的界线, 因此关于其具体的位置仍有待进一步确定. 本文对4条界线前后的样品进行了总汞(Hg)含量、环境磁学、地球化学等参数的测定, 并与全球记录进行了对比. 结果显示: (1) 总Hg含量在淡水组上段和上湖组坪岭段明显升高, 且表现出剧烈的峰谷波动, 结合已有的年代结果, 可以将Hg的异常高值归因为德干高原火山喷发, 界线1位于Hg异常区间的中部, 也是火山喷发的中期, 符合全球K-Pg界线与火山喷发的时间关系; (2) 重建的古气候演化曲线揭示出盆地红色沉积物记录了马斯特里赫特期末期的热事件(~66.2Ma, LMWE), 从4条界线与该事件的联系上看, 也只有界线1最接近南雄盆地真实的K-Pg界线.

关键词 南雄盆地, K-Pg界线, 总Hg含量, 马斯特里赫特期末期热事件

1 引言

白垩纪-古近纪界线(K-Pg)前后伴随着德干高原的喷发以及小行星的撞击, 全球生物发生了一次显著的大灭绝事件(Schulte等, 2010; Renne等, 2013), 最有名的便是非鸟类恐龙的灭绝, 这使得K-Pg附近的古气

候、古生物研究成为国际热点问题. 目前全球K-Pg界线层型剖面(GSSP)位于突尼斯El Kef剖面(Molina等, 2006), 为典型的海相沉积, 该剖面的确立无法解决陆相领域的很多问题, 如非鸟类恐龙的灭绝及哺乳动物的复苏, 因此有必要建立“陆相层型”(李伟同等, 2010). 从世界范围内来看, 陆相沉积中确定的K-Pg界线大多

中文引用格式: 赵梦婷, 马明明, 何梅, 邱煜丹, 刘秀铭. 2021. 南雄盆地白垩纪-古近纪(K-Pg)界线位置探讨——来自火山活动及古气候演化的证据. 中国科学: 地球科学, 51(5): 741–752, doi: [10.1360/SSTe-2020-0287](https://doi.org/10.1360/SSTe-2020-0287)

英文引用格式: Zhao M, Ma M, He M, Qiu Y, Liu X. 2021. Evaluation of the four potential Cretaceous-Paleogene (K-Pg) boundaries in the Nanxiong Basin based on evidences from volcanic activity and paleoclimatic evolution. Science China Earth Sciences, 64(4): 631–641, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9736-0>

位于北美地区, 中国境内分布着众多白垩纪-古近纪陆相沉积盆地(Li等, 2013), 研究程度比较高的有松辽盆地(Wu等, 2009; Wan等, 2013; Wang等, 2013; Wang, 2013)、嘉荫盆地(孙革, 2014)、南雄盆地(赵资奎等, 2009; 张显球等, 2013; 王尹等, 2015; Zhao等, 2002; Clyde等, 2010; Li等, 2010)等, 为陆相K-Pg界线及古气候演变研究提供了材料。研究者在中国不同地区提出了多条K-Pg标准剖面, 如松辽盆地(李莎等, 2013; Wan等, 2013)、嘉荫盆地(孙革, 2014)、南雄盆地(童永生等, 2002, 2013; 凌秋贤等, 2005; 张显球和李罡, 2015; 赵资奎等, 2017; Erben等, 1995; Clyde等, 2010)、江汉盆地(李伟同等, 2014)、豫西栾川-潭头盆地(江小均等, 2011)等, 遗憾的是各剖面中K-Pg界线的准确位置仍悬而未决(席党鹏等, 2019)。一是没有发现类似于北美地区的典型的孢粉组合变化(刘耕武等, 2009), 二是各盆地中利用不同指标建立的K-Pg界线位置大相径庭(如南雄盆地)。因此有必要继续开展中国陆相沉积的K-Pg界线研究。

位于中国东南地区的南雄盆地(图1)完整地保存着上白垩统-早古新统的红色、紫红色泥岩-砂岩, 出露良好, 盆地内的大塘剖面是中国非海相白垩系-古近系地层划分对比的标准, 也是中国白垩系-古近系地层、古生物、非鸟类恐龙绝灭、K-Pg界线研究最精细的热点地区(张显球, 1984; 张显球等, 2013; 赵资奎等, 2017; Erben等, 1995)。目前关于大塘剖面K-Pg位置有4种观点(图1d): 1)位于上湖组底部灰黄色底砾岩中(相当于赵资奎等(1991) CGY-CGD剖面的CGD162.5m处; 张显球等(2006)大塘剖面的43/42层之间), 其依据是非鸟类恐龙的灭绝、哺乳动物的出现、古地磁以及 $\delta^{13}\text{C}$ 的负漂移(童永生等, 2002, 2013; Clyde等, 2010); 2)位于上湖组坪岭段上部(相当于赵资奎等(1991) CGY-CGD剖面的CGD231m处; 张显球等(2006)大塘剖面的49/48层之间), 依据是大型哺乳类阶齿兽化石的出现和非海相腹足类化石组合(余汶等, 1990; 张显球和凌秋贤, 2004; 凌秋贤等, 2005); 3)位于上湖组坪岭段与下惠段界线处(相当于赵资奎等(1991) CGY-CGD剖面的CGD250m处; 张显球等(2006)大塘剖面的53/52层之间), 依据是介形虫化石组合特征(张显球, 1984, 1992)以及综合的古生物群面貌(张显球和李罡, 2015); 4)位于浈水组上段下部约21m厚的地层间隔(相当于赵资奎等(1991) CGY-CGD剖面的CGD57~78m; 张显球

等(2006)大塘剖面的30~32层), 依据是孢粉组合的变化(赵资奎等, 2017; Erben等, 1995; Stets等, 1996; Buck等, 2004)。

可见尽管大塘剖面被作为中国非海相白垩系-古近系地层划分对比的标准剖面, 但是其K-Pg界线位置仍有待进一步的确定。本文在前人工作的基础上, 通过总汞(Hg)含量、古气候演化及其与全球记录的对比等新的视角出发, 探讨沉积环境的变化, 对南雄盆地K-Pg界线位置进行约束, 从而判断已有的4条界线中, 哪一条最接近真实的K-Pg界线。

2 地质概况及实验方法

2.1 地质概况

南雄盆地(25°03'~25°16'N, 114°08'~114°40'E)现今年均降雨量~1555mm, 年均气温~19.6°C, 位于中国东南部, 大部分属于广东省北部(图1a), 向北东延伸到江西省信丰县境内(Li等, 2010)。位于诸广山和青嶂山两大花岗岩体之间, 是一个受北缘南雄大断裂控制的断陷盆地, 白垩纪晚期到古近纪, 南雄盆地主要受到拉伸作用(舒良树等, 2004)。盆地内沉积了完整的上白垩统-早古新统的红色、紫红色泥岩-砂岩。盆地周围除了花岗岩外, 还有部分寒武系-侏罗系地层。盆地内地层出露良好, 总体北东走向(图1b), 向西北倾斜, 倾角10°~20°(张显球等, 2013), 地层厚度最厚处可超过7km。按照地层沉积物的性质, 可以划分为2群9组, 即南雄群(长坝组, 江头组, 园圃组, 大风组, 主田组, 浈水组)及罗佛寨群(上湖组, 浓山组, 古城村组), 其中南雄群为上白垩统地层, 富含恐龙、恐龙蛋化石, 罗佛寨群为古新统地层, 富含哺乳动物化石(张显球等, 2013)。根据盆地内红层沉积物的地球化学成分与周围地层岩体成分的一致性以及盆地内砾石粗大、分选差、具棱角状等特征, 推测盆地内的沉积物为近源堆积(舒良树等, 2004), 且从白垩纪晚期到古近纪早期, 沉积物的物源一直比较稳定(Yan等, 2007)。

从20世纪20~30年代开始, 大量的研究工作在盆地内开展, 包括层序地层、古生物、古地磁及地球化学等(赵资奎等, 1991, 2017; 赵资奎和严正, 2000; 张显球等, 2000, 2006, 2013; 张显球和李罡, 2015; Zhao等, 2002; Yan等, 2007; Clyde等, 2010; Li等, 2010)。研究者在盆地内实测了多条标准剖面, 其中大塘剖面(图1c,

图 1 南雄盆地示意图

(a) 南雄盆地位置; (b) 南雄盆地地层(从大风组到古城村组, 修改自Li等, 2010); (c) 大塘剖面采样路线; (d) 大塘剖面白垩系-古近系地层实剖面(修改自张显球等, 2006), 1~4代表已有的4条界线

d)层序清楚, 化石丰富, 研究程度高. 许多科研单位和研究者对大塘剖面进行了实测和地层划分, 多数研究者认为大塘剖面是连续沉积、整合接触(赵资奎和严正, 2000; 张显球等, 2006, 2013; 童永生等, 2013), 这从我们重建的古气候记录及其与全球对比也得到证实(详见下文). 本文采用张显球的划分方案, 该剖面起于杨梅坑村, 止于逆龙坑村(图1c), 剖面总长度2300m, 地层厚度近700m(张显球等, 2006), 以粉砂质泥岩及泥质粉砂岩为主, 夹有砂岩、砾岩. 从上至下地层依次为上湖组(287.3m)、淡水组(294.9m)及主田组上部(104.6m). 各组的岩性特征及沉积物粗细情况如下(表1, 张显球等, 2006, 2013):

2.2 实验方法

将大塘剖面野外采集的样品带回实验室, 自然风干后测量其总Hg含量. 利用Hydra-C汞蒸气计(美国利曼实验室公司)和冷原子吸收光谱仪测定总Hg含量, 最低检测限为2ppb(1ppb=1ng/g). 测量原理是基于固体样品中Hg的直接热蒸发(800°C持续180秒), 因此不需要对样品进行化学预处理, 从而避免了样品制备过程中的潜在污染. 每5个样品重复测量一个样品, 以确保数据的稳定性和准确性. 总Hg含量的测试在中国科学院南京地理与湖泊研究所完成.

选取代表性样品进行总有机碳(Total Organic Car-

表 1 大塘剖面各组的岩性特征及沉积物粗细情况^{a)}

组段		厚度(m)	岩性特征	沉积物
上湖组	下惠段	199	暗紫、深褐色富含钙质结核的泥质粉砂岩和粉砂质泥岩, 夹薄层透镜状含砂砾岩、粗-中粒砂岩, 局部夹绿色薄层状泥岩或页岩	细碎屑岩
	坪岭段	88.3		
淡水组	上段	164.8	以粗碎屑岩发育, 灰紫色砂砾、含砾粗砂岩、中粗粒砂砾岩与红褐、棕红色砂岩、粉砂质泥岩互层	粗碎屑岩
	下段	130.1		
主田组	上部	104.6	厚层紫红、褐红色泥质粉砂岩, 间夹薄层状、条带状细砂岩, 砂岩局部含少量砾石	细碎屑岩

a) 改自张显球等 (2006, 2013)

bon, TOC)测试, 将800~1000mg研磨后的干土装入50mL的烧杯中, 每个烧杯内加入3~4滴1mol/L的HCL, 使盐酸与样品充分反应, 然后用去离子水冲洗样品至PH为中性, 将样品放入烘箱40℃烘干后再利用土壤碳氮元素分析仪(Elementar Vario EL III, 德国)测试样品的TOC.

在Hg测试的基础上选择大塘剖面4条界线前后的样品, 详细的测量磁化率(Magnetic Susceptibility, χ)、饱和等温剩磁(Saturation Isothermal Remanent Magnetisation, SIRM)、地球化学元素含量. 把自然风干后的样品放在研钵中轻微研磨, 称取粉末状样品装入磁测专用无磁性塑料盒中, 用Bartington MS2磁化率仪测试样品的 χ (测试频率为0.47Hz), 经质量归一后, 得到样品的 χ . 使用IM-10-30强磁仪对样品施加1T的磁场, 利用Molspin Minispin 旋转磁力仪测量得到SIRM.

使用带有金属陶瓷管的全解析Epsilon 3-XLE光谱仪通过X射线荧光(XRF)分析测定了主要元素的组成, 并将主要元素表示为氧化物. X射线管阳极在4~50kV加速电压下工作, 最大功率15W, 用600s积分时间测量Na~K元素, 每个样品测量3次, 得到平均值. 每10个样品使用标准物质, 重复性大于95%. XRF结果用于计算化学蚀变指数(CIA-mol), 计算公式为CIA=[Al₂O₃/(Al₂O₃+CaO*+Na₂O+K₂O)]×100% (Nesbitt和Young, 1982), 其中CaO*是样品硅酸盐部分中CaO的量, 本研究没有利用酸浸法去除非硅酸盐矿物, 所以采用了McLennan等(1993)提出的校正方法: 依据自然界硅酸盐矿物中Ca和Na的平均组成, 再根据沉积样品中CaO/Na₂O的摩尔比值来计算CIA. 若比值小于1, 直接用CaO的摩尔含量来计算CIA, 若比值大于1, 则用Na₂O的摩尔含量替代CaO的含量来计算CIA. χ 、SIRM、地球化学元素含量和TOC的测试在福建师范

大学湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室完成.

3 结果

整个大塘剖面总Hg含量在1.69~15.58ppb之间, 低于已发表的海相K-Pg剖面Hg含量(Sial等, 2013, 2016; Font等, 2016, 2018; Keller等, 2018), 这可能是由于海相地层和陆相地层的保存条件不一样: 海相地层有机质含量多, Hg吸附在有机质上更易保存; 而当时大塘剖面为干旱氧化环境, 不利于Hg的保存. 虽然大塘剖面Hg含量总体较低, 但结果显示剖面存在Hg异常区域(图2c, 2d). 其中主田组和淡水组下段Hg含量处于较低的水平, 到了淡水组上段和上湖组坪岭段, Hg含量明显开始升高, 且表现出剧烈的峰谷波动, 之后在上湖组下惠段又下降到与主田组及淡水组下段相当的低值. Hg含量波动曲线中有四次峰值比较显著: 第一次出现在淡水组上段, 与界线4重合, 处于Hg异常区初始位置; 第二次大致位于淡水组与上湖组交界处, 靠近界线1, 位于Hg异常区中部; 第三次位于上湖组坪岭段, 在界线1和界线2之间, 位于Hg异常区中后部; 第四次位于上湖组下惠段底部, 在界线2和界线3之间, 位于Hg异常区后部(图2a, 2c). 图2b显示大塘剖面的TOC值非常低, 绝大部分样品含量低于0.1%, 与前人研究结果一致(Yan等, 2007), 整体的变化趋势与Hg呈现出一定的反相关, 即主田组、淡水组下段和上湖组下惠段含量较高, 在淡水组上段和上湖组坪岭段含量较低.

从 χ 结果来看, χ 值整体较低, 但不同组段之间又有不同的变化趋势. 淡水组 χ 变化可以分为两个相似的阶段: 66.6~66.3Ma χ 先升后降, 66.3~66Ma χ 也表现出同样的变化, 上升幅度比第一次的更大; 上湖组的 χ 整体

图 2 大塘剖面TOC及总Hg含量

(a) 大塘剖面岩性地层; (b) TOC曲线; (c) 总Hg含量曲线, 紫色的虚线分别表示界线1、2、3, 紫色条表示界线4; (d) 经Clyde等 (2010) 的古地磁年代校正的Hg含量曲线; (e) Schoene等 (2019) 发表的德干高原火山喷发U-Pb年代, 灰色实线表示K-Pg界线; (f) Sprain等 (2019) 发表的德干高原火山喷发 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代(红色线条越粗代表喷发量越多)

上要高于淡水组, 65.96~65.85Ma由于农田的覆盖, 没有记录, 在~65.7Ma时 χ 显著降低, 前后 χ 的两个峰值可以与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 的两次负偏较好的对应。土壤钙结核的碳氧同位素数据来自Clyde等(2010)和王尹(2012)(图3b, 3c), 其中几个显著的变化是66.2Ma附近的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 正偏和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 的负偏; 65.7Ma附近 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 的两次显著负偏。

4 讨论

一般来说, 国际上对于K-Pg的界定依据有5个: (1) 浮游有孔虫大灭绝; (2) Danian物种的首次出现; (3) $\delta^{13}\text{C}$ 负漂移; (4) 铱(Ir)异常; (5) 红色粘土层(Keller等, 2018)。在没有生物依据的前提下, 后三个依据不能作为判定K-Pg的唯一标准(Keller, 2011)。从这些标准来看, 更多的是对海相地层的界定。而对于北美地区陆相地层来说, K-Pg大多是根据孢粉资料确定的(刘耕武等, 2009)。借鉴北美地区的研究经验, Erben等(1995)根据孢粉组合的变化, 将K-Pg置于淡水组上段的下部20余米厚地层中, 并通过沉积速率推测其持续了50kyr(界线4, 图3)。此后中国研究者多次在该界线附近采集样品

进行孢粉鉴定, 但是并没有发现可以用来说明界线问题的孢粉组合变化(刘耕武等, 2009)。此外, 南雄盆地当时的古气候为热带干旱半干旱, 而北美地区同期为湿润气候带, 古气候的差异导致植被类型及保存条件存在差异, 因此很有可能造成南雄盆地的孢粉资料无法与北美地区直接进行对比, 会造成运用孢粉资料确定K-Pg的困难(刘耕武等, 2009; 李伟同, 2014)。

最近, Clyde等(2010)通过古地磁、同位素及生物化石等, 发现在他们所划分的上湖组底界(灰黄色底砾岩)附近, $\delta^{13}\text{C}$ 发生显著负漂移, 且界线位于古地磁C29r的上面2/3处, 这与国际大多数的K-Pg位置吻合, 并结合非鸟类恐龙的灭绝及对比全球Danian期哺乳动物的兴起时间, 从而再次确认了其作为K-Pg的可行性(界线1, 图3)。然而, 赵奎奎等(2017)认为南雄盆地的古地磁结果存在争议, 需要进一步的研究, 仍更倾向于他们划分的孢粉界线(界线4)。由此可见, 最近发表的成果集中于对界线1和界线4的讨论, 虽然补充了一些证据, 但还是无法确定哪条界线更接近于真实的K-Pg, 所以, 对于K-Pg的界定仍然需做很多的工作。鉴于此, 对南雄盆地K-Pg的界定标准也应该有所侧重和创新,

图3 大塘剖面淡水组上段到上湖组坪岭段古气候演化

(a) χ 曲线; (b)、(c) $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 曲线(数据来自Clyde等, 2010; 王尹, 2012); (d) 太平洋Ocean Drilling Program 1209站点 $\delta^{18}\text{O}_{\text{benthic}}$ 曲线(Westerhold等, 2011); (e) 突尼斯Elles剖面 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线(Thibault等, 2015); 其中, 紫色的虚线分别表示界线1、2、3, 紫色条表示界线4, 灰色条表示LMWE、Dan-C2事件。年代采用Clyde等(2010)的古地磁结果

除了参考常规的鉴定标准外, 新标准新手段的应用也许可以为问题的解决提供新的思路。

Hg作为自然界唯一一种挥发性金属元素, 在地质时期常常伴随火山活动被大量排放到大气中(Pyle和Mather, 2003; Zambardi等, 2009), Hg在大气中的停留时间为0.5~2年, 保证其全球分布的同时也能快速沉降到陆地表面及水体中保存下来(Pyle和Mather, 2003; Witt等, 2008; Bagnato等, 2011), 被成功地用作重建古火山活动的标志物(Grasby等, 2015, 2019; Shen等, 2019a)。近年来, 越来越多的研究利用Hg将地质时期的生物大灭绝事件与火山活动联系起来(例如Shen等, 2019a, 2019b, 2019c), 也有研究发现K-Pg界线附近也出现显著Hg浓度异常, 并将其归因于德干高原火山的

喷发(Silva等, 2013; Sial等, 2013, 2014; Font等, 2016, 2018; Keller等, 2018, 2020)。尽管德干高原火山喷发的精确年代有待更多的工作来确定, 但是最新的年代结果显示Deccan Traps是在小于1个百万年的时间内完成喷发(66.3~65.5Ma, U-Pb年代, Schoene等, 2019; 66.413~65.422Ma, ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代, Sprain等, 2019, 图2)且整个喷发过程确实跨越了K-Pg界线, 为利用Hg研究K-Pg界线提供了可能。

在前人的研究中, Hg经常依附于某种物质保存下来, 比如有机质、硫化物等(Sial等, 2013; Font等, 2016; Grasby等, 2019; Shen等, 2019d, 2020)。而本研究剖面的TOC浓度基本都低于0.1%, 低于可以校正的TOC最低值(0.1%, Shen等, 2019a), 且TOC整体表现出与Hg含量反相关的趋势(图2), 表明南雄盆地的Hg并不是保存在TOC中。此外, 从沉积物粗细来看, Hg含量高的部位既包含粗碎屑沉积(淡水组上段)也有细碎屑沉积(上湖组坪岭段), 表明沉积物的“粒控效应”对Hg含量也没有影响。将样品中 Al_2O_3 、 SiO_2 、 CaO 、 MgO 、 Fe_2O_3 、 K_2O 这几种主要氧化物及Ti的值与总Hg含量作相关性分析, 从散点图结果来看, Hg与这些氧化物都不存在显著的相关关系(图4), 这说明本研究中Hg的来源最有可能是经大气直接沉降而不依附于某种特定物质, 可以反映火山活动排放到大气中Hg含量的变化。大塘剖面Hg异常区大约持续了0.8Ma(66.4~65.6Ma, 图2d), 元素异常时间长, 应该是由大型火山喷发造成的。目前南雄盆地内部测得代表火山活动的年代有两期, 一是以舒良树(2004)为代表测得的位于主田组中部的吊当排的玄武岩年龄(96 ± 1)Ma, 二是在浓山组中部发现的火山灰层, 其年代为~60Ma(童永生等, 2013), 这两个年代与Hg异常区间的年代不符; 而中国华南地区的大规模的火山活动集中在早白垩世, 并没有在白垩纪晚期发现大型的火成岩省(Li等, 2019)。这样看来, 大塘剖面的Hg异常是受到世界其他地区火山活动的影响, 而白垩纪晚期-古近纪早期规模和影响最大的火山活动是德干高原火山活动, 并且大塘剖面Hg异常区间与德干高原火山活动时间大致符合(图2d, 2e, 2f)。因此, 可以将南雄盆地Hg异常和德干高原火山活动联系起来。

Schoene等(2019)及Sprain等(2019)的年代学结果显示K-Pg大约位于德干高原火山喷发的中期(图2e, 2f), 南雄盆地4条K-Pg界线中只有界线1位于Hg异常区

图 4 总Hg含量与主要氧化物之间的关系

域的偏中间位置, 也就是德干高原火山喷发的中期(图 2c). 而其余3条界线的位置都有或多或少的偏差: 界线 2 靠近Hg异常区域的结束处, 界线3并不在Hg异常区间内, 界线4位于Hg异常区间开始处(图2c). 所以, 从总Hg含量来看, 界线1附近既出现了Hg含量异常高值, 在时间上又能与德干高原火山喷发的时间进行很好的对比, 符合全球K-Pg界线与德干高原火山喷发的关系.

成壤碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 主要取决于大气降水的氧同位素值、大气温度及蒸发作用等因素(Cerling等, 1989; Cerling和Quade, 1993; Quade等, 2007), 大量的地质记录揭示出白垩纪古土壤中成壤碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 可以用来反映其形成时期的大气古温度(比如Gao等, 2015), 南雄盆地 $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ (图3b)与全球同期深海记录(图3d)趋势一致, 证明了 $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 代表了古温度的变化. 此外, 南雄盆地大塘剖面 χ (图3a)与 $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ (图3b)以及同时期的深海记录(图3d)也可以形成很好的对比, 证实其记录了与全球一致的古气候演化, Ma等(2018)据此提出 χ 记录古气候的机制——加强版的“成壤说”, 即成壤过程中生

图 5 大塘剖面沉积物化学组成A-CN-K图

成的磁性矿物在热带干旱-半干旱气候背景下, 经历低温氧化作用, 彻底转变为最终产物——赤铁矿, 且赤铁矿的含量与成壤强度有关, 因此, χ 在研究区可以作为可靠的古气候代用指标. 一般来说, SIRM与磁性矿物

的浓度相关(Thompson和Oldfield, 1986), CIA值可以指示风化成壤作用的强弱(Nesbitt和Young, 1982, 1984). 为了探究CIA指标指示本研究区风化作用的可靠性, 绘制了A-CN-K($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}^*+\text{Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$)图(图5), 该图常常被用来估测大陆风化趋势(Nesbitt等, 1980). 根据元素活动性顺序可以把化学风化过程分为: 早期脱Ca和Na, 中期脱K, 晚期脱Si阶段(Nesbitt等, 1980). 从A-CN-K图中可以看出, 所有样品点在图中平行于A-CN边, 这表明沉积物处于化学风化早期脱Ca和Na的阶段, 且沉积物未发生钾的交代作用, 即在成岩过程中没有代入新的钾元素. 大部分样品的CIA值介于65~80之间, 表明沉积物为中等化学风化程度. 样品主要沿上地壳平均组成的风化趋势线分布, 表明大塘剖面沉积物的来源区比较广泛, 且经过了充分物质循环混合(Taylor和McLennan, 1985), 这与我们前期(Ma等, 2018)利用稀土元素的配比模式得到物源稳定且充分混合的结论一致, 因此CIA值在本研究区可以指示风化成壤作用的强弱. 图6中 χ 与SIRM、CIA呈现出显著的正相关关系, 进一步说明 χ 的变化受控于风化成壤过程中生成的赤铁矿含量, 为 χ 在研究区古气候指示的可靠性提供了更多的证据支持.

目前全球已有的大量古气候重建工作指示了在马斯特里赫特期末期发生了一次变暖事件(~66.2Ma, Late Maastrichtian warming event, LMWE)(Li和Keller, 1998; Abramovich等, 2003; Nordt等, 2003; Wilf等, 2003; Thibault和Gardin, 2010; Woelders等, 2017, 2018; Hull等, 2020), 并将其归因于德干高原火山喷发的 CO_2 导致的温室效应(Li和Keller, 1998; Nordt等, 2003; Wilf等, 2003; Thibault等, 2015; Woelders等, 2018), 该暖事

件之后到K-Pg界线全球古气候又发生显著的变冷. 图3显示了研究区4条界线前后的细致的古气候演化过程: 在66.2Ma期间, χ 为高值区、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 显著正偏、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 显著负偏, 指示了一次明显的气候变暖, 对应于全球LMWE事件; 之后到66Ma, χ 降低、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 负偏, 指示了快速的降温, 这一变化的细节可以很好的与多地的记录进行对比(如全球层型剖面——突尼斯Elles剖面 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线, Thibault等, 2015, 图3e). 对比南雄盆地4条K-Pg界线及LMWE事件的大致位置, 可以发现只有界线1的位置最符合全球记录; 界线4位于LMWE事件之前; 界线2附近 χ 表现为双峰, 对应着 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 的两次负漂移, 可能对应于K-Pg之后的热事件Dan-C2 event (Dan-C2, Quillévéré等, 2008; Coccioni等, 2010, 图3); 界线3位于Dan-C2事件之后. 因此, 从古气候记录的角度看, 也只有界线1最接近真实的K-Pg界线.

5 结论

本文在前人研究的基础上, 对大塘剖面总Hg含量、古气候演化进行了研究, 为确定南雄盆地K-Pg界线提供新的证据:

(1) 大塘剖面总Hg含量在淡水组上段和上湖组坪岭段明显升高, 且表现出剧烈的峰谷波动, 记录了德干高原火山活动. 结合最新的德干高原火山喷发年代结果, 4条界线中, 只有界线1所处的位置符合K-Pg界线与火山活动的关系.

(2) 南雄盆地记录了LMWE事件, 界线1位于LMWE事件之后, 且界线1与LMWE之间记录了短

图6 χ 与SIRM(a)、 χ 与CIA(b)的散点图

暂、快速的变冷事件, 与全球其他地区记录相符合。

总的来说, 界线1无论是在总Hg含量指示的古火山活动记录上, 还是在古气候演化记录上, 都最接近南雄盆地真实的K-Pg界线。

致谢 感谢两位审稿专家提出的建设性修改意见, 感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所张恩楼研究员与朱育新副研究员对总汞含量测试的支持和帮助。

参考文献

- 江小均, 柳永清, 姬书安, 张兴辽, 徐莉, 贾松海, 吕君昌, 袁崇喜, 李明. 2011. 豫西栾川-潭头盆地含脊椎动物化石地层序列和K/T界线初步研究. *中国科学: 地球科学*, 41: 738–744
- 李莎, 高琴琴, 张翼翼, 屈海英, 王曼艳, 万晓樵. 2013. 松辽盆地“松科1井(北孔)”晚白垩世晚期至古新世早期轮藻化石组合. *微体古生物学报*, 30: 1–16
- 李伟同, 刘耕武, Braman D R, 曹卫生, 陈钦保, Brinkman D. 2010. 湖北当阳陆相白垩系-古近系界线层型问题值得深入研究. *地层学杂志*, 34: 187–206
- 李伟同, 刘耕武, Braman D R, 李艺斌, 曹卫生, Brinkman D, 沈娇, 陈钦保. 2014. 中国新生界第一阶潜在的层型剖面. *中国科学: 地球科学*, 44: 634–641
- 刘耕武, Braman, D R, 李伟同, Brinkman D. 2009. 北美西部陆相白垩系-古近系界线孢粉学特征简介——兼评中国东部白垩系-古近系界线研究. *地层学杂志*, 33: 18–34
- 凌秋贤, 张显球, 林建南. 2005. 南雄盆地白垩纪-古近纪地层研究进展. *地层学杂志*, 29(增刊): 596–601
- 舒良树, 邓平, 王彬, 谭正中, 余心起, 孙岩. 2004. 南雄-诸广地区晚中生代盆地演化的岩石化学、运动学与年代学制约. *中国科学D辑: 地球科学*, 34: 1–13
- 孙革. 2014. 黑龙江嘉荫晚白垩世-古新世生物群、K-Pg界线及恐龙灭绝. 上海: 上海科技教育出版社. 188
- 童永生, 李曼英, 李茜. 2002. 广东南雄盆地白垩系-古近系界线. *地质通报*, 21: 668–674
- 童永生, 李茜, 王元青. 2013. 中国早古近纪陆相地层划分框架研究. *地层学杂志*, 37: 428–440
- 王尹. 2012. 南雄盆地晚白垩世-早古新世古气候变化. 硕士学位论文. 南京: 南京大学. 1–60
- 王尹, 李祥辉, 周勇, 刘玲. 2015. 南雄盆地晚白垩世-古新世陆源沉积组份变化的古气候指示. *沉积学报*, 33: 116–123
- 席党鹏, 万晓樵, 李国彪, 李罡. 2019. 中国白垩纪综合地层和时间框架. *中国科学: 地球科学*, 49: 257–288
- 余汶, 顾和林, 张显球. 1990. 广东南雄盆地晚白垩世-早第三纪非海相腹足类组合序列. *古生物学报*, 29: 160–182, 263–266
- 赵资奎, 叶捷, 李华梅, 赵振华, 严正. 1991. 广东省南雄盆地白垩系-第三系交界恐龙绝灭问题. *古脊椎动物学报*, 29: 1–12
- 赵资奎, 严正. 2000. 广东南雄盆地白垩系-第三系界线剖面恐龙蛋壳稳定同位素记录: 地层及古环境意义. *中国科学D辑: 地球科学*, 30: 135–141
- 赵资奎, 毛雪瑛, 柴之芳, 杨高创, 张福威, 严正. 2009. 广东省南雄盆地白垩纪-古近纪(K/T)过渡时期地球化学环境变化和恐龙灭绝: 恐龙蛋化石提供的证据. *科学通报*, 54: 201–209
- 赵资奎, 叶捷, 王强. 2017. 南雄盆地白垩纪-古近纪交界恐龙灭绝和哺乳动物复苏. *科学通报*, 17: 1869–1881
- 张显球. 1984. 南雄盆地坪岭剖面罗佛寨群的划分及其生物群. *地层学杂志*, 8: 239–254
- 张显球. 1992. 广东南雄盆地上湖组介形类动物群及白垩-第三系界线. *古生物学报*, 31: 678–702, 773–776
- 张显球, 黎三松, 李永丰. 2000. 南雄盆地西部地区地层研究新进展. *广东地质*, 15: 9–18
- 张显球, 凌秋贤. 2004. 南雄盆地白垩-古近系(E/K)界线研究现状. 第九届中国古脊椎动物学学术年会. 45–52
- 张显球, 林建南, 李罡, 凌秋贤. 2006. 南雄盆地大塘白垩系-古近系界线剖面研究. *地层学杂志*, 30: 327–340
- 张显球, 张喜满, 侯明才, 李罡, 黎汉明. 2013. 南雄盆地红层岩石地层划分. *地层学杂志*, 37: 57–67
- 张显球, 李罡. 2015. 南雄盆地上湖组坪岭段的时代探讨. *地层学杂志*, 39: 74–80
- Abramovich S, Keller G, Stüben D, Berner Z. 2003. Characterization of late Campanian and Maastrichtian planktonic foraminiferal depth habitats and vital activities based on stable isotopes. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 202: 1–29
- Bagnato E, Aiuppa A, Parello F, Allard P, Shinohara H, Liuzzo M, Giudice G. 2011. New clues on the contribution of Earth's volcanism to the global mercury cycle. *Bull Volcanol*, 73: 497–510
- Buck B J, Hanson A D, Hengst R A, Shu-Sheng H. 2004. “Tertiary dinosaurs” in the Nanxiong Basin, Southern China, are reworked from the Cretaceous. *J Geol*, 112: 111–118
- Cerling T E, Quade J, Wang Y, Bowman J R. 1989. Carbon isotopes in soils and palaeosols as ecology and palaeoecology indicators. *Nature*, 341: 138–139
- Cerling T E, Quade J. 1993. Stable carbon isotopes in soil carbonates. In: Swart P K, Lohmann K C, McKenzie J, Savin S, eds. *Climate Change in Continental Isotopic Records*. Washington DC: American Geophysical Union
- Clyde W C, Ting S, Snell K E, Bowen G J, Tong Y, Koch P L, Li Q, Wang Y. 2010. New paleomagnetic and stable-isotope results from the Nanxiong Basin, China: Implications for the K/T boundary and the timing of Paleocene mammalian turnover. *J Geol*, 118: 131–143
- Coccioni R, Frontalini F, Bancalà G, Fornaciari E, Jovane L, Sprovieri M. 2010. The Dan-C2 hyperthermal event at Gubbio (Italy): Global

- implications, environmental effects, and cause(s). *Earth Planet Sci Lett*, 297: 298–305
- Erben H K, Ashraf A R, Bohm H, Hambach U, Krumsiek K, Stets J, Thein J, Wurster P. 1995. Die Kreide/Tertiär-Grenze im Nanxiong-Becken (Kontinentalfazies, Südostchina). *Erdwissenschaftliche Forschung*, 32: 1–245
- Font E, Adatte T, Sial A N, Drude de Lacerda L, Keller G, Punekar J. 2016. Mercury anomaly, Deccan volcanism, and the end-Cretaceous mass extinction. *Geology*, 44: 171–174
- Font E, Adatte T, Andrade M, Keller G, Mbabi Bitchong A, Carvallo C, Ferreira J, Diogo Z, Mirão J. 2018. Deccan volcanism induced high-stress environment during the Cretaceous-Paleogene transition at Zumaia, Spain: Evidence from magnetic, mineralogical and biostratigraphic records. *Earth Planet Sci Lett*, 484: 53–66
- Gao Y, Ibarra D E, Wang C, Caves J K, Chamberlain C P, Graham S A, Wu H. 2015. Mid-latitude terrestrial climate of East Asia linked to global climate in the Late Cretaceous. *Geology*, 43: 287–290
- Grasby S E, Beauchamp B, Bond D P G, Wignall P, Talavera C, Galloway J M, Piepjohn K, Reinhardt L, Blomeier D. 2015. Progressive environmental deterioration in northwestern Pangea leading to the latest Permian extinction. *Geol Soc Am Bull*, 127: 1331–1347
- Grasby S E, Them I T R, Chen Z, Yin R, Ardakani O H. 2019. Mercury as a proxy for volcanic emissions in the geologic record. *Earth-Sci Rev*, 196: 102880
- Hull P M, Bornemann A, Penman D E, Henehan M J, Norris R D, Wilson P A, Blum P, Alegret L, Batenburg S J, Bown P R, Bralower T J, Cournede C, Deutsch A, Donner B, Friedrich O, Jehle S, Kim H, Kroon D, Lippert P C, Loroeh D, Moebius I, Moriya K, Peppe D J, Ravizza G E, Röhl U, Schueth J D, Sepúlveda J, Sexton P F, Sibert E C, Śliwińska K K, Summons R E, Thomas E, Westerhold T, Whiteside J H, Yamaguchi T, Zachos J C. 2020. On impact and volcanism across the Cretaceous-Paleogene boundary. *Science*, 367: 266–272
- Keller G. 2011. Defining the Cretaceous-Tertiary boundary: A practical guide and return to first principles. In: Keller G, Adatte T, eds. *The End-Cretaceous Mass Extinction and the Chicxulub Impact in Texas*. Tulsa: Society for Sedimentary Geology. 23–42
- Keller G, Mateo P, Punekar J, Khozyem H, Gertsch B, Spangenberg J, Bitchong A M, Adatte T. 2018. Environmental changes during the Cretaceous-Paleogene mass extinction and Paleocene-Eocene Thermal Maximum: Implications for the Anthropocene. *Gondwana Res*, 56: 69–89
- Keller G, Mateo P, Monkenbusch J, Thibault N, Punekar J, Spangenberg J E, Abramovich S, Ashkenazi-Polivoda S, Schoene B, Eddy M P, Samperton K M, Khadri S F R, Adatte T. 2020. Mercury linked to Deccan Traps volcanism, climate change and the end-Cretaceous mass extinction. *Glob Planet Chang*, 194: 103312
- Li G, Hirano H, Batten D J, Wan X, Willems H, Zhang X. 2010. Biostratigraphic significance of spinicaudatans from the Upper Cretaceous Nanxiong Group in Guangdong, South China. *Cretac Res*, 31: 387–395
- Li L, Keller G. 1998. Abrupt deep-sea warming at the end of the Cretaceous. *Geology*, 26: 995–998
- Li X, Xu W, Liu W, Zhou Y, Wang Y, Sun Y, Liu L. 2013. Climatic and environmental indications of carbon and oxygen isotopes from the Lower Cretaceous calcrete and lacustrine carbonates in South-east and Northwest China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 385: 171–189
- Li X, Zhang C, Li Y, Wang Y, Liu L. 2019. Refined chronostratigraphy of the late Mesozoic terrestrial strata in South China and its tectono-stratigraphic evolution. *Gondwana Res*, 66: 143–167
- Ma M, Liu X, Wang W. 2018. Palaeoclimate evolution across the Cretaceous-Paleogene boundary in the Nanxiong Basin (SE China) recorded by red strata and its correlation with marine records. *Clim Past*, 14: 287–302
- McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, Hanson G N. 1993. Processes controlling the composition of clastic sediments. *Spec Pap Geol Soc Am*, 284: 21–40
- Molina J M, Vera J A, Aguado R. 2006. Reworked microcodium calcarenites interbedded in pelagic sedimentary rocks (Paleocene, Subbetic, Southern Spain): Paleoenvironmental reconstruction. *Spec Pap Geol Soc Am*, 416: 189–202
- Nesbitt H W, Markovics G, Price R C. 1980. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering. *Geochim Cosmochim Acta*, 44: 1659–1666
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299: 715–717
- Nesbitt H W, Young G M. 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochim Cosmochim Acta*, 48: 1523–1534
- Nordt L, Atchley S, Dworkin S. 2003. Terrestrial evidence for two greenhouse events in the Latest Cretaceous. *GSA Today*, 13: 4–9
- Pyle D M, Mather T A. 2003. The importance of volcanic emissions for the global atmospheric mercury cycle. *Atmos Environ*, 37: 5115–5124
- Quade J, Rech J A, Latorre C, Betancourt J L, Gleeson E, Kalin M T K. 2007. Soils at the hyperarid margin: The isotopic composition of soil carbonate from the Atacama Desert, Northern Chile. *Geochim Cosmochim Acta*, 71: 3772–3795
- Quillévéré F, Norris R D, Kroon D, Wilson P A. 2008. Transient ocean

- warming and shifts in carbon reservoirs during the early Danian. *Earth Planet Sci Lett*, 265: 600–615
- Renne P R, Deino A L, Hilgen F J, Kuiper K F, Mark D F, Mitchell W S, Morgan L E, Mundil R, Smit J. 2013. Time scales of critical events around the Cretaceous-Paleogene boundary. *Science*, 339: 684–687
- Schoene B, Eddy M P, Samperton K M, Keller C B, Keller G, Adatte T, Khadri S F R. 2019. U-Pb constraints on pulsed eruption of the Deccan Traps across the end-Cretaceous mass extinction. *Science*, 363: 862–866
- Schulte P, Alegret L, Arenillas I, Arz J A, Barton P J, Bown P R, Bralower T J, Christeson G L, Claeys P, Cockell C S, Collins G S, Deutsch A, Goldin T J, Goto K, Grajales-Nishimura J M, Grieve R A F, Gulick S P S, Johnson K R, Kiessling W, Koeberl C, Kring D A, Macleod K G, Matsui T, Melosh J, Montanari A, Morgan J V, Neal C R, Norris R D, Pierazzo E, Ravizza G, Rebolledo-Vieyra M, Reimold W U, Robin E, Salge T, Speijer R P, Sweet A R, Urrutia-Fucugauchi J, Vajda V, Whalen M T, Willumsen P S. 2010. Response-Cretaceous Extinctions. *Science*, 328: 975–976
- Shen J, Algeo T J, Planavsky N J, Yu J, Feng Q, Song H, Song H, Rowe H, Zhou L, Chen J. 2019a. Mercury enrichments provide evidence of Early Triassic volcanism following the end-Permian mass extinction. *Earth-Sci Rev*, 195: 191–212
- Shen J, Chen J, Algeo T J, Yuan S, Feng Q, Yu J, Zhou L, O'Connell B, Planavsky N J. 2019b. Evidence for a prolonged Permian-Triassic extinction interval from global marine mercury records. *Nat Commun*, 10: 1563
- Shen J, Yu J, Chen J, Algeo T J, Xu G, Feng Q, Shi X, Planavsky N J, Shu W, Xie S. 2019c. Mercury evidence of intense volcanic effects on land during the Permian-Triassic transition. *Geology*, 47: 1117–1121
- Shen J, Algeo T J, Chen J, Planavsky N J, Feng Q, Yu J, Liu J. 2019d. Mercury in marine Ordovician/Silurian boundary sections of South China is sulfide-hosted and non-volcanic in origin. *Earth Planet Sci Lett*, 511: 130–140
- Shen J, Feng Q, Algeo T J, Liu J, Zhou C, Wei W, Liu J, Them Ii T R, Gill B C, Chen J. 2020. Sedimentary host phases of mercury (Hg) and implications for use of Hg as a volcanic proxy. *Earth Planet Sci Lett*, 543: 116333
- Sial A N, Lacerda L D, Ferreira V P, Frei R, Marquillas R A, Barbosa J A, Gaucher C, Windmüller C C, Pereira N S. 2013. Mercury as a proxy for volcanic activity during extreme environmental turnover: The Cretaceous-Paleogene transition. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 387: 153–164
- Sial A N, Chen J, Lacerda L D, Peralta S, Gaucher C, Frei R, Cirilli S, Ferreira V P, Marquillas R A, Barbosa J A, Pereira N S, Belmino I K C. 2014. High-resolution Hg chemostratigraphy: A contribution to the distinction of chemical fingerprints of the Deccan volcanism and Cretaceous-Paleogene Boundary impact event. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 414: 98–115
- Sial A N, Chen J, Lacerda L D, Frei R, Tewari V C, Pandit M K, Gaucher C, Ferreira V P, Cirilli S, Peralta S, Korte C, Barbosa J A, Pereira N S. 2016. Mercury enrichment and Hg isotopes in Cretaceous-Paleogene boundary successions: Links to volcanism and palaeoenvironmental impacts. *Cretac Res*, 66: 60–81
- Silva M V N, Sial A N, Barbosa J A, Ferreira V P, Neumann V H, De Lacerda L D. 2013. Carbon isotopes, rare-earth elements and mercury geochemistry across the K-T transition of the Paraíba Basin, northeastern Brazil. *Geol Soc London Spec Publ*, 382: 85–104
- Sprain C J, Renne P R, Vanderkluysen L, Pande K, Self S, Mittal T. 2019. The eruptive tempo of Deccan volcanism in relation to the Cretaceous-Paleogene boundary. *Science*, 363: 866–870
- Stets J, Ashraf A, Erben H K, Hahn G, Hambach U, Krumsiek K, Thein J, Wurster P. 1996. The Cretaceous-Tertiary boundary in the Nanxiong Basin (continental facies, southeast China). In: MacLeod N, Keller G, eds. *Cretaceous-Tertiary Mass Extinctions: Biotic and Environmental Changes*. New York: Norton. 349–371
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. New York: Oxford. 312
- Thibault N, Gardin S. 2010. The calcareous nannofossil response to the end-Cretaceous warm event in the Tropical Pacific. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 291: 239–252
- Thibault N, Galbrun B, Gardin S, Minoletti F, Le Callonnec L. 2015. The end-Cretaceous in the southwestern Tethys (Elles, Tunisia): Orbital calibration of paleoenvironmental events before the mass extinction. *Int J Earth Sci-Geol Rundsch*, 105: 771–795
- Thompson R, Oldfield F. 1986. *Environmental Magnetism*. London: Allen and Unwin. 227
- Wan X, Zhao J, Scott R W, Wang P, Feng Z, Huang Q, Xi D. 2013. Late Cretaceous stratigraphy, Songliao Basin, NE China: SK1 cores. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 385: 31–43
- Wang C, Feng Z, Zhang L, Huang Y, Cao K, Wang P, Zhao B. 2013. Cretaceous paleogeography and paleoclimate and the setting of SKI borehole sites in Songliao Basin, northeast China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 385: 17–30
- Wang C. 2013. Environmental/climate change in the Cretaceous greenhouse world: Records from Terrestrial scientific drilling of Songliao Basin and adjacent areas of China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 385: 1–5
- Westerhold T, Röhl U, Donner B, McCarren H K, Zachos J C. 2011. A complete high-resolution Paleocene benthic stable isotope record for

- the central Pacific (ODP Site 1209). *Paleoceanography*, 26: PA2216
- Wilf P, Johnson K R, Huber B T. 2003. Correlated terrestrial and marine evidence for global climate changes before mass extinction at the Cretaceous-Paleogene boundary. *Proc Natl Acad Sci USA*, 100: 599–604
- Witt M L I, Mather T A, Pyle D M, Aiuppa A, Bagnato E, Tsanev V I. 2008. Mercury and halogen emissions from Masaya and Telica volcanoes, Nicaragua. *J Geophys Res*, 113: B06203
- Woelders L, Vellekoop J, Kroon D, Smit J, Casadio S, Prámparo M B, Dinarès-Turell J, Peterse F, Sluijs A, Lenaerts J T M, Speijer R P. 2017. Latest Cretaceous climatic and environmental change in the South Atlantic region. *Paleoceanography*, 32: 466–483
- Woelders L, Vellekoop J, Weltje G J, de Nooijer L, Reichert G J, Peterse F, Claeys P, Speijer R P. 2018. Robust multi-proxy data integration, using late Cretaceous paleotemperature records as a case study. *Earth Planet Sci Lett*, 500: 215–224
- Wu H, Zhang S, Jiang G, Huang Q. 2009. The floating astronomical time scale for the terrestrial Late Cretaceous Qingshankou Formation from the Songliao Basin of Northeast China and its stratigraphic and paleoclimate implications. *Earth Planet Sci Lett*, 278: 308–323
- Yan Y, Xia B, Lin G, Cui X, Hu X, Yan P, Zhang F. 2007. Geochemistry of the sedimentary rocks from the Nanxiong Basin, South China and implications for provenance, paleoenvironment and paleoclimate at the K/T boundary. *Sediment Geol*, 197: 127–140
- Zambardi T, Sonke J E, Toutain J P, Sortino F, Shinohara H. 2009. Mercury emissions and stable isotopic compositions at Vulcano Island (Italy). *Earth Planet Sci Lett*, 277: 236–243
- Zhao Z, Mao X, Chai Z, Yang G, Kong P, Ebihara M, Zhao Z. 2002. A possible causal relationship between extinction of dinosaurs and K/T iridium enrichment in the Nanxiong Basin, South China: Evidence from dinosaur eggshells. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 178: 1–17

(责任编辑: 朱茂炎)