南雄盆地白垩纪-古近纪交界恐龙灭绝和哺乳动物复苏

赵资奎*, 叶捷, 王强*

中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 中国科学院脊椎动物演化与人类起源重点实验室, 北京 100044

* 联系人, E-mail: zhaozikui@ivpp.ac.cn; wangqiang@ivpp.ac.cn

2016-08-15 收稿, 2017-01-03 修回, 2017-01-04 接受, 2017-05-10 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2012CB821900)和国家自然科学基金(41202003, 41172018)资助

摘要 南雄盆地白垩纪-古近纪(K/Pg)界线剖面脊椎动物化石(恐龙蛋壳和龟类骨化石)的地球化学研究结果表明, 从白垩纪晚期到古近纪早期中国华南地区曾发生过3次以多个铍异常为标志的地球化学环境变化事件: 第一次地球化学环境变化事件发生在67 Ma前, 除了有很多蛋壳显示出病理组织结构特征外, 由它们为代表的恐龙种群多样性并没有发生明显变化。第二次地球化学环境变化事件规模较大, 正好发生在根据孢粉组合变化划分的K/Pg界线及其附近。恐龙在K/Pg交界开始灭绝, 然后持续至古新世早期。这一灭绝过程大约经历了250 ka。恐龙灭绝的原因是多次以铍异常、微量元素异常和氧同位素异常为标志的环境变化引起的, 短期和长期地球化学环境的不断恶化, 使恐龙无法正常繁殖后代而逐渐灭绝。第三次地球化学环境变化事件出现在早-中古新世, 表明当时的环境变化及其效应可能长时间推迟陆相生态环境的恢复和哺乳动物的完全复苏。南雄盆地获得的地球化学资料、恐龙渐变灭绝模式以及古新世哺乳类的复苏在年代上与印度德干火山喷发及持续时间比较一致。

关键词 南雄盆地, 白垩系-古近系(K/Pg)界线, 地球化学环境, 恐龙蛋, 恐龙灭绝, 哺乳类复苏

恐龙灭绝一直是白垩纪-古近纪(K/Pg)交界大灭绝事件讨论中最引人注目的一个问题。过去30多年来, 有关这次大灭绝的原因是由于地外撞击、还是巨大的溢流玄武岩火山活动(印度德干火山喷发)引起的一直争论不休。最近, Keller等人^[1]对印度安德拉邦戈达瓦里盆地的研究, 认为德干火山第二期(phase-2)喷发是K/Pg交界大灭绝的直接原因。

广东省南雄盆地是一个半地堑式山间盆地^[2], 这一不对称伸展断陷盆地内充填了一套比较连续的、含有晚白垩世恐龙蛋、恐龙化石和古新世哺乳动物化石的陆相沉积的“红色岩系”, 可为探讨恐龙类是怎样灭绝的、什么时候和什么原因灭绝以及哺乳动物演化等问题提供直接的证据。从南雄盆地CGY-CGD, CGT-CGF和CGN三个含有白垩系-古近系(K/Pg)界线剖面沉积系列的恐龙蛋壳化石的铍(Ir)和其他微量元

素丰度异常分布以及碳、氧稳定同位素组成分析结果, 证明在白垩纪-古近纪(K/Pg)过渡时期的地球化学环境和气候变化以及恐龙灭绝不是如《撞击理论》提出的, 只有几年或几百年的瞬间事件, 而是一个多次以铍异常、氧同位素异常为标志的全球性环境效应和以微量元素含量异常为标志的地区性环境变化等多种因素引起的持续相当长的过程, 在年代上似乎与印度德干火山喷发比较一致^[3~6]。

南雄盆地CGY-CGD白垩系-古近系界线剖面的地层层序保存完好, 含有丰富的恐龙蛋和古新世哺乳动物化石。为了更好地了解K/Pg过渡时期陆相地球化学环境变化持续的时间以及对恐龙类灭绝和古新世哺乳动物复苏的影响, 笔者综合了近20多年来对CGY-CGD白垩系-古近系界线剖面的研究成果, 并采用中子活化分析技术分析该剖面古新统上湖组

引用格式: 赵资奎, 叶捷, 王强. 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, 2017, 62: 1869–1881

Zhao Z K, Ye J, Wang Q. Dinosaur extinction and subsequent mammalian recovery during the Cretaceous-Paleogene (K/Pg) transition in the Nanxiong Basin (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 1869–1881, doi: 10.1360/N972016-00886

底部发现的龟类骨化石中的铱(Ir)含量,进一步论证南雄盆地白垩纪末期恐龙的灭绝及随之而来的哺乳类复苏在时间上与德干火山喷发所产生的环境效应的密切关系。

1 地质背景

南雄盆地“红色岩系”的时代和地层划分,只是在1960年以后,由于发现了晚白垩世恐龙蛋和古新世哺乳类化石^[7~11]才有较大进展,因而使得南雄盆地成为研究非海相白垩系-古近系(K/Pg)界线和恐龙灭绝问题的重要地区。

南雄盆地保存比较完整的白垩系-古近系界线剖面主要位于盆地中部。20世纪80年代,中-德联合考察队^[12~14]测制了位于大塘镇南面(CGY-CGD剖面)、湖口镇南面(CGL-CGW剖面)、南雄市区南面(CGN剖面)和风门坳村南面(CGT-CGF剖面)等4条白垩系-古近系界线剖面(图1(a))。近20多年来,由于大规模的农田开垦和城市建设,CGT-CGF剖面、CGN剖面 and CGL-CGW剖面的白垩系-古近系界线附近的地层露头遭到不同程度的破坏,只有大塘镇南面的CGY-CGD剖面因受到当地政府有关机构保护,地层出露良好,层序清楚,是目前应用生物地层学、古地磁学、沉积学和地球化学等研究最为详细的一条剖面。

CGY-CGD剖面(图1(b))位于坪岭村东侧。从杨

梅坑村北侧起,向北至逆龙坑村西止,地层厚度近760 m,其中CGY 0~144 m为园圃组上部(相当于Erben等人^[13]划分的Formation V),主要由紫红色粉砂质泥岩夹灰绿色灰质泥岩组成,其中含恐龙化石很少,只在CGY 63.69和72 m的灰质泥岩层面上发现恐龙足迹(图2)以及在顶部(CGY 118~144 m)发现有少量蛋壳碎片。这一沉积环境显示当时有恐龙活动过。

从CGY 144 m至CGD 161 m为坪岭组地层,实测地层厚度为305 m,相当于Erben等人^[13]划分的Formation VI。坪岭组由紫灰色砾岩、含砾砂岩与紫红色粉砂岩互层组成,含有很多成窝恐龙蛋和大量碎蛋壳,其中绝大多数是兽脚类恐龙,特别是窃蛋龙类的蛋。值得注意的是这些破碎蛋壳大都是成堆保存(图3),可能代表着原来在原地有蛋窝存在。这就清楚地表明,坪岭组中含有恐龙蛋壳化石的沉积层并未受过改造。

在南雄盆地中,可供利用的地层年代记录是在盆地西部(始兴县的铺背)地层中夹有被认为是晚白垩世形成的玄武岩,根据钾氩法(K/Ar)测定的年龄值为 67.04 ± 2.31 和 67.37 ± 1.49 Ma^[12]。含该年龄值的地层段可与CGY-CGD剖面园圃组顶部地层段对比。因此,可以肯定,包括园圃组顶部及其上覆坪岭组的地层年代应为晚白垩世马斯特里赫特期。然而,1987年

图1 南雄盆地剖面主要位置示意图(a)及坪岭-大塘剖面(b)

Figure 1 Map of the Nanxiong Basin showing the locations of the K/Pg boundary sections (a), and the location of the CGY-CGD Section (b)

图2 箭头处为保存在CGY 72 m(园圃组上部)绿色灰质泥岩层上面的鸭嘴龙足迹

Figure 2 Hadrosaurid dinosaur tracks (arrows) occur on the surface of purple silty mustone from the upper part of the Yuanpu Formation at CGY 72 m

Sloan^[15]观察了中-德联合考察队于1983年在CGD剖面坪岭组上部发现的一块下颌骨化石,认为“在南雄组上部80 m”(即坪岭组上部CGD 64 m)发现的这块下颌骨化石应属于蜥蜴类(Polyglyphanodontinae)的一个类型,可与北美Lance最晚期的North Horn组发现的*Polyglyphanodon*对比,但更为特化。后者恰好位于Puercan期Wagonroad动物群之下。鉴于坪岭组与上湖组之间为整合接触,因此认为坪岭组上部应为古新世早期(Puercan期)。

CGD 161 m以上沉积层为上湖组地层,相当于Erben等人^[13]划分的Formation VII。从岩性看,上湖组为一套紫褐色富含钙质结核的泥质粉砂岩和粉砂质泥岩夹薄层状含砾砂岩,与下伏坪岭组明显不同,

其中含有古新世哺乳类动物化石。

目前关于上湖组底界划分尚未统一,赵资奎等人^[12]认为,在CGD 161 m以上的粉砂岩与其下部的粉砂岩的颜色有明显差异,上部粉砂岩呈紫褐色,下部呈紫红色;上部粉砂岩中含有较大的钙质结核,且形状不规则,内部具空洞,下部粉砂岩中含小的钙质结核;值得注意的是在CGD 161 m以下的紫红色粉砂岩层中含有恐龙蛋化石,在区域上的分布相当稳定。直到现在,我们只在CGD 161 m以上地层中发现过属于古新世哺乳类化石,但从未发现过恐龙蛋或恐龙骨化石。考虑到含大结核粉砂岩的紫褐色与上湖组的整体色泽一致,将坪岭组和上湖组分界置于CGD 161 m处。童永生等人^[16,17]根据1973年在上湖组下部的泥砾岩层(CGD 162.5 m)中发现破碎的哺乳动物牙齿(野外编号: 73066b),遂将上湖组底界置于CGD 162.5 m。

上湖组下部地层含哺乳类化石非常稀少,除上述在底部的泥砾岩层(CGD 162.5 m)中发现破碎的哺乳动物牙齿外,1989年,中-德联合考察队成员又在其中(CGD 163 m)发现一残破下颌骨化石(图4)和一些破碎的龟类骨化石。这块下颌骨化石被认为是属于一种小型的原始踝节类(condylarths)^[18],但由于牙齿受到严重磨损,无法进行详细鉴定。此外, Wang和 Zhai^[19]记述了在上湖组发现的古亚洲裂齿兽(*Carnilestes palaeoasiaticus*),其中有一块标本产自上湖组下部。据推测该化石应出自CGD 169~172 m(原始记录为185~188 m)。然而,在上湖组中-上部地层中含哺乳类化石却很丰富,尤其是体型较大的

图3 出露在CGD剖面坪岭组中-上部地层中成堆的破碎蛋壳和受到风化的蛋窝。(a) 出露在CGD 82~87 m间隔中的*Macroolithus yaotunensis*蛋壳碎片及5个残破蛋化石(浅色椭圆示意); (b) 保存在CGD剖面以东约150 m(相当于CGD 10~12 m)粉砂岩中12个残破蛋化石(*Elongatoolithus* sp.)一窝

Figure 3 Eggshell fragments and destroyed clutch in situ, from the middle-upper part of the Pingling Formation in CGD section. (a) Eggshell fragments and five crushed eggs (light grey oval) of *Macroolithus yaotunensis* occurred in the interval of CGD 82~87 m; (b) an incomplete clutch containing cross-section of 12 eggs, identified as *Elongatoolithus* sp., occurred in the middle part of the Pingling Formation, in the east of CGD section, corresponding to CGD 10~12 m

图4 上湖组底部(CGD163 m)发现的残破下颌骨化石-原始踝节类(condylarths)

Figure 4 A broken mandible bone belonging to a small primitive condylarths from the lower part of the Shanghu Formation (CGD 163 m)

阶齿兽科(Bemalambidae)化石在CGD 231 m以上层位大量发现。

2 白垩纪-古近纪(K/Pg)界线地层位置

在讨论恐龙灭绝是由于火山活动引起的长时期生态变化结果、还是由于地外撞击引起的瞬间事件,就必须精确地划分白垩系-古近系(K/Pg)界线的地层位置。但是从南雄盆地获得的生物地层学,岩石地层学,地球化学和地球物理学等的研究资料来看,不同的学者对这一地层层序的白垩纪-古近纪(K/Pg)界线精确定位很不一致。目前有关K/Pg界线划分仍存在着下列4种意见:

(1) 童永生等人^[16,17]主要根据在上湖组下部的泥砾岩层(CGD 162.5 m)中发现破碎的哺乳动物牙齿及其下伏坪岭组发现恐龙蛋壳,并利用Clyde等人^[20]的大塘剖面的古地磁及稳定同位素研究结果,遂将上湖组下部的泥砾岩层底界(CGD 162.5 m)作为白垩系-古近系分界线;

(2) 余汶等人^[21]和凌秋贤等人^[22]根据在南雄盆地发现的非海相腹足类化石组合和哺乳类阶齿兽最早出现的层位,将白垩系-古近系界线置于上湖组中部,即大约相当于CGD 231 m;

(3) 张显球等人^[23,24]则根据介形虫化石组合特征,将白垩系-古近系界线上移至相当于CGD 250 m;

(4) Erben等人^[13]提出,确定陆相白垩纪-古近纪(K/Pg)界线最可靠的标准是根据孢粉组合变化来划定。他们发现,在坪岭组上部CGD 57~78 m间隔中的孢粉组合发生了明显变化。在CGD 57 m以下各层中

主要含有以*Cyathidites*, *Cicatricosisporites*, *Gaboniasporis vigourouseii*, *Chomotrilletes almegrensis*, *Schiazeisporites cretaci*等为代表的晚白垩世类型孢粉,在CGD 60 m除含有晚白垩世类型孢粉外,首次出现第三纪孢粉类型。在CGD 78 m以上各层中则含有以*Pinuspollenites ruginosa*, *Abiespollenites*, *Piceapollenites*, *Triatriopollenites bituitus*, *Paranyssapollenites striatus*, *Juglanspollenites verus*等为代表的第三纪类型。因此,将白垩纪-古近纪(K/Pg)界线置于CGD 57~78 m间隔中,其延续时限约为50 ka,说明南雄盆地坪岭组上部,即在CGD 57~78 m以上含有恐龙蛋和恐龙化石的地层应为古新世早期,与Sloan^[15]的研究结果一致。

20世纪60年代以来,国际上白垩系-古近系交界的高分辨率地层学研究主要的一项突破是,在所有的海洋盆地中发现浮游有孔虫类化石的更替发生在马斯特里赫特阶-丹尼阶交界^[25],而丹尼阶原来被认为是白垩系最后的一个阶。因此,将马斯特里赫特阶-丹尼阶交界层序作为所有白垩系-古近系界线剖面的标准。Keller等人^[1]提出,只有浮游有孔虫大灭绝才是界定白垩系-古近系界线的唯一标准,其他的如铀异常、黏土层、 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏移等是次要的标准,因为它们不是独一无二的。

北美洲地区的陆相白垩系-古近系界线是根据孢粉组合变化划分的,与地球化学的研究结果,铀含量异常一致^[26-29];更为重要的直接(第一级序)证据是Saito等人^[30]对日本北海道海相页岩的研究结果。他们发现,在白垩系-古近系交界浮游有孔虫类的灭绝与孢子/花粉比值以及松树花粉丰度的增加同时发生。因此,在陆相层序中,根据孢粉组合变化划分白垩系-古近系(K/Pg)界线,可与国际公认的海相白垩系-古近系界线进行对比^[28,31]。为此,我们认为南雄大塘剖面中的K/Pg界线更接近Erben等人^[13]的研究结果。

国际上已建立起来的磁性地层剖面, K/Pg交界都位于C_{29r}地磁带中。然而,有关南雄盆地白垩系-古近系沉积层序相应的磁性地层中的C_{30n}, C_{29r}和C_{29n}的划分^[12,20,32,33]仍很不一致(图5)。因此,还需要进一步研究。

3 白垩纪-古近纪过渡期间的地球化学环境变化事件

我们从上湖组底部2个层位采集的龟类化石(编

图5 南雄盆地大塘剖面磁性地层的不同划分

Figure 5 The CGD stratigraphic section from the Nanxiong Basin, showing the magnetostratigraphic divisions of various of data

号CGD 126和127)随机选择4个样品,在中国科学院高能物理研究所核分析技术开放实验室采用放射化学中子活化分析法(RNAA)测定其中的铈含量.分析结果,包括已发表的恐龙蛋壳的铈丰度异常资料^[5]和未发表的补充资料以及这些样品的地层位置见表1和图6.

可以看出,从白垩纪最晚期到古新世早-中期,南雄盆地曾发生过3次以多个铈异常为标志的地球化学环境变化事件(图6):

较早的一个地球化学环境变化事件发生在67 Ma前,有3个层位(CGY 201, 202和206)显示铈丰度异常,其中CGY 201的恐龙蛋壳样品中Ir=50.8 ppt, CGY 202中Ir=45.5 ppt, CGY 206中Ir=50.8 ppt.

第二个地球化学环境变化事件正好发生在K/Pg交界及其附近,最高铈丰度出现在CGD 111,为118 ppt,在其下2~5 m(CGD 109),铈含量为117.6 ppt,在其上31~32 m(CGD 119),铈含量为51 ppt.从恐龙蛋壳稳定同位素($\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$)的地层记录^[4]可以看出,在K/Pg界线附近, $\delta^{18}\text{O}$ 出现多次向正值偏移,与上述在这一地层间隔内发现的铈含量异常变化基本一致,说明在K/Pg过渡的大约150 ka期间内曾出现过至少3

次年平均气温在27℃以上的相当严重的干燥气候;与此同时, $\delta^{13}\text{C}$ 值相对亏损的变化趋势反映当时出现过大气 CO_2 浓度的持续升高.此外,在K/Pg界线层及其上、下附近这一地层间隔内(即在CGD 40~80 m之间),恐龙蛋壳所含微量元素,如Cr, Ni, Co, Zn, Pb, Cu, Mn, V等均不同程度地达到最大峰值^[5].

第三个地球化学环境变化事件出现在早-中古新世,即本文研究的上湖组底部2个层位(CGD 126和127)发现的龟类化石铈含量异常,其中CGD 126样品的铈含量为245 ppt, CGD 127样品的铈含量为114 ppt.

所有这些证据进一步证明,南雄盆地K/Pg过渡时期地球化学环境变化不是瞬间发生的,而是从晚白垩世马斯特里赫特中期持续到早-中古新世.

4 白垩纪-古近纪(K/Pg)交界恐龙灭绝

从1962年以来,在南雄盆地晚白垩世地层中,除发现了一些恐龙和其他爬行类化石如龟类和蜥蜴类外,还先后发现了大量恐龙蛋化石.据不完全统计,已发现的有36个近于完整或部分整窝蛋,计437枚比较完整的蛋及大量破碎蛋壳.这些蛋化石标本分别存放在中国科学院古脊椎动物与古人类研究所标本馆、上海自然博物馆、广东省韶关市博物馆、南雄市博物馆和始兴县博物馆中.另外,20世纪80年代由中-德古生物考察队以及最近3年来我们在CGY-CGD剖面逐层采集到大量的蛋壳化石,除少量属于鳄类和龟类的外,其余的都是恐龙蛋.根据赵资奎等人^[34]提出的恐龙蛋分类系统,可以把这些恐龙蛋化石分为6个蛋属、11个蛋种,分别归属于Elongatoolithidae, Prismaticoolithidae, Ovaloolithidae和Megaloolithidae等4个蛋科.虽然目前还没有充分的证据来肯定某个蛋种是由某种恐龙产的.但是根据已有的资料,在较高的分类阶元上探讨它们的归属是合理的.长形蛋科(Elongatoolithidae)和棱柱形蛋科(Prismaticoolithidae)的成员应属于兽脚类恐龙.在蒙古国南戈壁^[35,36]和北美蒙大拿州西部^[37,38]发现含有胚胎骨骼的蛋化石,根据蛋壳的组织结构特征的相似性和蛋在蛋窝中的排列方式,可把这两个蛋科分别归属于窃蛋龙科(Oviraptoridae)^[39]和伤齿龙科(Troodontidae)^[40].

从上述11个蛋种的地层记录可以看出(图6),在6700万年前发生有3个铈丰度异常这一地层间隔中发现的恐龙蛋化石,除了有很多蛋壳显示出病理组织结果特征外,由它们为代表的恐龙种群多样性并没

表 1 南雄盆地CGY-CGD剖面脊椎动物化石样品铱含量^{a)}

Table 1 Ir values in the samples of fossil vertebrates from the CGY-CGD Section

样品编号	取样地层间隔(m)	样品(a, b, c)数量	Ir丰度(ppt)
CGD 127	165~167	2c	114±6.8; 109±9.3
CGD 126	163	2c	245±3.2; 245±5.3
CGD 125	161	2a	24.9±3.6; 25.8±3
CGD 124	158~161	a	28.8±3.7
CGD 121	122~132	2a	<8.5; <4.6
CGD 119	109~110	2a	51.0±8.8; 35.6±1.6
CGD 118	100~104	a	14.1
CGD 116	82~87	a	<12.5
CGD 115	78~81	a	18.5
CGD 114	70~76	a	<9.0
CGD 112	64~65	a	12.9
CGD 111	60~63	4a	61.9±13.3; 118.0±2.3; 81.5±2.4; 48.6±2.1
CGD 110	55~60	3a	9.38; 13.3; 17.2
CGD 109	52~55	2a	49.5±5.0; 117.6±2.1
		b	84.5±6.5
CGD 108	45~52	a	17.5
CGD107	34~42	a	11.7
CGD 103	10~12	3a	11.8; 11.6; 17.3
CGD 102	3~6	a	7.86
CGY 210	182~186	a	<16
CGY 209	177~182	a	<14.9
CGY 208	171~177	a	<12.0
CGY 207	168~171	a	18.1
CGY 206	168	a	50.8±0.5
CGY 205	162~168	a	<22.6
CGY 203	150	a	33.9
CGY 202	144~150	2a	45.5±5.0; 36.2±1.1
CGY 201	141~144	2a	45.6±7.2; 50.8±9.5

a) 样品: a, *Macroolithus yaotunensis* 蛋壳; b, 破碎骨化石(恐龙类?); c, 龟类骨化石. 1 ppt=1×10⁻¹² g/g, 下同

有发生明显变化.

恐龙灭绝主要发生在K/Pg交界, 但是只有6个稀有的蛋种在K/Pg交界灭绝, 其余的属于长形蛋科的5个蛋种则越过K/Pg交界继续生存到古新世早期, 最后有 *Macroolithus yaotunensis*, *Elongatoolithus andrewsi*和*E. elongatus* 3个蛋种一直到坪岭组 and 上湖组分界才绝迹. 根据坪岭组的沉积速率为40 cm/ka^[13] 计算, 这一绝灭过程大约经历了250 ka.

5 讨论和结论

5.1 德干火山活动与恐龙灭绝

当前, K/Pg交界大灭绝事件被认为是地外撞击或

巨大的溢流玄武岩火山活动(德干火山喷发)引起的. 墨西哥尤卡坦半岛Chicxulub陨石坑的发现^[41~43]使很多学者相信, 一颗小行星或彗星的撞击是恐龙和其他许多生物类群灭绝的直接原因.

然而, 在南雄盆地K/Pg过渡期间除发现多个层位显示铱含量异常外, 没有发现小行星撞击的其他直接证据^[13]. 既没有发现冲击石英颗粒也没有找到微波陨石. 因此, 墨西哥尤卡坦半岛Chicxulub小行星或彗星的撞击可能没有对中国东南部南雄盆地的古环境和恐龙动物群的灭绝起决定性的或直接的突然影响.

印度德干火山岩分布区是过去245 Ma以来最大的火山喷发事件形成的, 喷出的岩浆覆盖面积

图6 CGY-CGD剖面铈丰度异常, 恐龙蛋群和哺乳动物群的地层分布

Figure 6 The CGY-CGD stratigraphic section from the Nanxiong Basin, showing the lithological log, the stratigraphic position of Ir values in the fossil vertebrates, stratigraphic occurrence of dinosaur footprints and different oospecies (solid bars), and mammalian fauna

512000 km², 体积约1.2×10⁶ km³, 熔岩流堆积的厚度3500 m^[1,44]. 近30年来, 许多学者(如McLean^[45], Courtillot等人^[46,47], Duncan和Pyle^[48], Venkatesan等人^[49], Raju等人^[50], Pande等人^[51])认为德干高原火山喷发事件及其带来的影响是全球性的, 是K/Pg交界大灭绝的主要原因。

Sant等人^[52]报道在印度西部Anjar地区K/Pg过渡时期(65 Ma)德干暗色岩间夹层中发现的3个铈含量异常与方石英(由火山作用形成的多形体矿物)最大峰值有明显同时性, 证明这些铈含量异常是来源于德干火山喷发。现已查明, 形成德干暗色岩的热点火山(现在位于印度洋的留尼旺岛)仍在释放出铈^[53]。

然而, 由于缺乏德干火山熔岩流与富含微体化石的海相夹层的有关资料, 要把德干火山活动与K/Pg交界大灭绝事件直接联系起来仍存在一定困难。

近几年来, 很多综合性研究结果改变了这一认识, 从而把德干火山活动与K/Pg交界大灭绝事件直接联系起来: (1) 根据放射性年代测定的研究结果, 揭示出3500 m厚的德干火山岩主要由3次大规模火山喷发事件形成^[44,54]。第一次(phase-1)发生在67.4 Ma前, 喷出的岩浆约占6%, 喷发强度相对较小; 第二次(phase-2)被认为是最激烈的大规模喷发事件, 发生在K/Pg交界之下, 喷出的岩浆约占全部德干火山岩的80%。第三次(phase-3)发生在丹尼早期, 即在K/Pg交界之后约270 ka开始喷发, 喷出岩浆约占14%。(2) 从印度西部安德拉邦戈达瓦里(K-G)盆地获得的资料表明, 夹在海相沉积层中的德干火山两次喷发(phase-2和phase-3)的熔岩是世界上最大和最长熔岩流。大灭绝发生在德干火山第二次喷发(phase-2)^[1]。

南雄盆地获得的地球化学资料和恐龙渐变灭绝模式在年代上与印度德干火山喷发及持续时间比较一致。多次的火山喷发可以解释在南雄盆地K/Pg交界发现的铈和其他微量元素以及氧同位素分布模式。然而, 仍有一些问题, 如研究那些具有铈和其他微量元素含量异常层位沉积岩的岩性特征, 进一步论证这些元素是否来源于火山喷发将具有重要意义。

这里需要特别指出的是Erben等人^[13]的研究表明, 在K/Pg交界及其上下附近, 即在CGD 40~80 m的地层间隔中恐龙蛋壳的微量元素浓度有明显异常, 但是在其沉积岩层中从未发现相应的异常变化。在河流相红色地层环境, 包括湖相沉积及成壤的钙质结核, 由于成岩作用有可能把地球化学异常信息破

坏掉了。在白垩纪-古近纪过渡期间有多个铈和其他微量元素的异常分布在蛋壳和其他脊椎动物化石中, 能够保存下来是由于这些化石中的生物微晶方解石或磷灰石有非常薄的有机质薄膜保护。因此, 采用地球化学分析方法, 研究那些发现在有详细的地质框架内脊椎动物的牙齿、骨或蛋壳等的痕量及微量元素、同位素组成及其分布特征, 可为探讨陆相古气候和古环境的变化提供最可靠依据。

此外, 在南雄盆地磁性地层研究中出现的地磁极性时划分和对比的多解性, 表明在陆相地层中, 地磁极性时的划分与对比要充分考虑到其堆积过程的复杂性, 应进行必要的综合分析。

5.2 K/Pg交界恐龙灭绝机制

根据孢粉组合的变化划定的K/Pg界线层及其上下附近(即在CGD 40~110 m地层间隔范围内)3个层位的恐龙蛋壳样品CGD 109, 111和119显示有铈和其他微量元素含量异常、氧同位素组成异常以及具有病态结构特征的蛋壳大量出现有明显同时性。在这一地层间隔内发现的各类蛋壳的平均厚度及其显微结构都显示出明显的异常变化, 例如属于*Macroolithus yaotunensis*蛋壳中, 有异常结构的蛋壳约占74%^[5]。这就表明, 恐龙蛋壳中铈和其他微量元素的富集以及氧同位素组成异常与病态结构蛋壳的形成可能存在着一定关系。

根据Zhao等人^[55]的研究, 在CGY-CGD剖面坪岭组发现的恐龙蛋壳氨基酸组成有明显异常。这些蛋壳样品的组织结构形态不完全是正常的, 特别是CGD 45 m和CGD 106~110 m两个蛋壳样品是采自有大量病态结构蛋壳以及微量元素和氧同位素异常的层位中。可以认为, 这些蛋壳样品的氨基酸组成有明显异常很可能反映出这些蛋壳有机基质蛋白质结构发生了变化。结果在石化过程更容易发生降解作用, 形成了不同的氨基酸组成。

鉴于恐龙蛋壳组织结构模式和鸟类的相似, 蛋壳有机基质的氨基酸组成模式也基本相似^[55~59], 说明恐龙蛋壳的形成机制和在现生鸟类中观察到的应该很相似。因此, 产生病态结构恐龙蛋壳的生理机制可以根据发生在现生鸟类蛋壳的病理结构特征来解释。Gonzalez和Hiroldo^[60]发现生活在西班牙的猛禽, 白肩雕(*Aquila (heliacal) adalberti*)在1972~1984年所产的蛋壳不仅含有少量的重金属如Hg, Pb, Cd, Zn,

Cu及其他有机农药分解产物,而且蛋壳的平均厚度比1906年以前这类猛禽所产的蛋壳厚度减少12.6%,同时构成这些蛋壳的方解石晶体排列不很规则。Grandjean^[61]也发现欧洲猛禽,红隼(*Falco tinnunculus*)蛋壳厚度的变化与含有高浓度的Pb存在着一定关系。

根据在《生物矿物学》研究中发展起来的“有机基质概念”,证明在蛋壳钙化过程中,有机基质对诱导蛋壳碳酸钙晶体的形成和控制晶体的生长起着重要作用。虽然,目前在分子水平上对钙质蛋壳形成的生物机制的了解还不完全清楚,但是有证据显示,蛋壳基质蛋白质的生物合成可以受许多内外因素的影响。病态结构蛋壳的形成与其基质蛋白质图形发生变化有一定关系。例如鸟蛋壳的可溶性基质大分子可以由于环境中的一些微量元素或有毒元素如Pb, Cd, Hg, Be等的作用而发生变化,从而导致异常结构蛋壳的形成^[62,63]。因此,有理由认为, K/Pg过渡期间恐龙蛋壳含有异常量的铍和其他微量元素是通过食物进入到恐龙体内,然后又沉积到它们所产的这些蛋壳中的^[5,64]。这一过程会使恐龙本身的正常生理功能受到影响,从而改变了恐龙蛋壳有机基质原来的蛋白质图形,导致形成病态结构的蛋壳,如蛋壳厚度异常(参见文献[5]中图6)和蛋壳显微结构的病理变化(参见文献[65]中图12.15和文献[5]中图7)。

众所周知,鸟蛋中所含微量元素过多或不足会引起胚胎发育发生异常,从而降低蛋的孵化率^[66]。Ar等人^[67]的研究指出,如果鸟蛋壳比正常的薄或厚都会降低鸟蛋的孵化率。因此,可以合理地假定,在南雄盆地白垩纪-古近纪过渡期间由于多次以铍异常、氧同位素异常为标志的全球性环境效应以及以微量元素含量异常为标志的环境毒化等多种因素引起的环境恶化。通过食物链环的运转,使微量元素过多的聚集到恐龙体内,从而破坏了恐龙体内生理活动过程中微量元素的平衡,结果影响了恐龙的生殖过程,形成了病态结构蛋壳。它们易碎,不能保护胚胎正常发育;另一方面,由于微量元素过多地集聚在蛋内的营养物质(蛋黄和蛋白)中,也会大大地降低恐龙蛋的孵化率,使恐龙无法正常繁殖后代而逐渐灭绝。

在南雄盆地发现的36个近于完整或部分整窝蛋中,有5窝蛋是在园圃组中部地层(晚白垩世坎潘期)中发现的,其余的31窝蛋都发现于上覆地层——坪岭组中。从20世纪80年代以来,我们在南雄盆地不断地开展高密度的地层调查发现,在园圃组地层中很少

发现有完整的恐龙蛋窝。从这一侧面也反映出在白垩纪-古近纪过渡期间恐龙蛋孵化率降低了。

5.3 恐龙灭绝之后哺乳类动物的复苏

白垩纪-古近纪(K/Pg)交界恐龙灭绝之后陆相生态环境和哺乳动物的复苏是另一个未解之谜。在南雄盆地含恐龙和恐龙蛋化石层位(坪岭组)中从未发现过哺乳类化石,表明在该地层时段南雄地区生态域仍为恐龙和其他爬行类占领。新生代哺乳动物化石最早出现在上湖组底部泥砾岩层(CGD 162.5 m),为一小型原始踝节类。根据Li和Ting^[68]的统计,在上湖组发现的哺乳动物化石计有6目8科11属15种。但是,他们绝大多数都是在上湖组中-上部地层中发现的,尤其是体型较大的阶齿兽科(*Bemalambidae*)化石在CGD 231 m以上层位大量发现。王元青等人^[69]认为,上湖组发现的以钝脚目(*Pantodonta*)、列齿目(*Tillodontia*)和中兽目(*Mesonychia*)等为代表的新生代哺乳动物群是时代最早、形态最原始的类型。这就表明,在K/Pg交界之后约250 ka后,新生代哺乳动物才开始逐渐替代恐龙动物群占据的生态域。根据我们的长期调查,以阶齿兽类为代表的古新世哺乳动物群多样性的增加是在上湖组中部(CGD 231 m以上地层)才发展起来。

如上所述,从白垩纪最晚期(67 Ma前)到古新世早-中期,南雄盆地曾发生过3次以多个铍异常为标志的地球化学环境变化事件,可分别对应于晚白垩世至早古新世早期印度德干火山3个时期猛烈喷发中释放出的铍峰值。上湖组底部2个层位(CGD 163 m和CGD 165~167 m)发现的铍含量异常事件与德干火山第三期(phase-3)喷发在年代上比较一致。Keller等人^[1]提出从印度安德拉邦戈达瓦里盆地深部矿井获得的研究资料表明,德干火山第三期(phase-3)喷发很可能是长时间推迟海洋生态环境复苏的原因。因此,可以合理地假定,德干火山第三期(phase-3)喷发形成的高压环境及其效应可能是长时间推迟中国东南部地区陆相生态环境和哺乳动物的完全复苏。

上述的研究资料表明,南雄盆地具有全世界K/Pg过渡时期陆相地球化学环境变化、恐龙灭绝和哺乳动物复苏的最完整记录。在其他大陆,有关这一时期的恐龙和哺乳动物化石记录大都是断断续续,不很完整。中国陆相白垩系-古近系地层沉积特点是小盆地式的,其中有几个盆地,如湖南省茶陵盆地和陕

西省山阳盆地等与南雄盆地相似, 含有晚白垩世恐龙蛋化石和古新世哺乳类化石的沉积序列. 因此, 采用多学科综合研究这些盆地的K/Pg界线剖面和其中的恐龙蛋及相关脊椎动物化石的铍和其他微量元素

含量, 碳、氧同位素组成以及蛋壳结构特征等, 有可能为建立白垩纪-古近纪过渡时期陆相地球化学环境变化模式, 探讨恐龙灭绝和哺乳动物复苏等问题提供可靠依据.

致谢 中国科学院高能物理研究所柴之芳院士和毛雪瑛教授提供本文研究的脊椎动物骨化石和恐龙蛋壳化石的铍含量数据; 北京自然博物馆李建军教授鉴定恐龙足迹化石; 两位评审专家审阅本文并提出宝贵的修改意见, 作者在此表示衷心感谢.

参考文献

- Keller G B, Bhowmick P K, Upadhyay H E, et al. Deccan volcanism linked to the Cretaceous-Tertiary boundary mass extinction: New evidence from ONGC Wells in the Krishna-Godavari Basin. *J Geol Soc India*, 2011, 78: 399–428
- Shu L S, Deng P, Wang B, et al. Lithology, kinematics and geochronology related to late Mesozoic basin-mountain evolution in the Nanxiong-Zhuguang area, South China. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2004, 47: 673–688
- Zhao Z K, Mao X Y, Chai Z F, et al. Iridium anomalies in dinosaur eggshells at the Cretaceous-Paleogene (K/T) boundary in the Nanxiong Basin, South China (in Chinese). *Sci China Ser D-Earth Sci*, 1998, 28: 425–430 [赵资奎, 毛雪瑛, 柴之芳, 等. 广东南雄盆地白垩系-第三系(K/T)交界恐龙蛋壳的铱丰度异常. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1998, 28: 425–430]
- Zhao Z K, Yan Z. Stable isotopic studies of dinosaur eggshells from the Nanxiong Basin, South China. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2000, 43: 84–92 [赵资奎, 严正. 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*, 2000, 30: 135–141]
- Zhao Z K, Mao X Y, Chai Z F, et al. A possible causal relationship between extinction of dinosaurs and K/T iridium enrichment in the Nanxiong Basin, South China: Evidence from dinosaur eggshells. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecon*, 2002, 178: 1–17
- Zhao Z K, Mao X Y, Chai Z F, et al. Geochemical environmental changes and dinosaur extinction during the Cretaceous-Paleogene (K/T) transition in the Nanxiong Basin, South China: Evidence from dinosaur eggshells. *Chin Sci Bull*, 2009, 54: 806–815 [赵资奎, 毛雪瑛, 柴之芳, 等. 广东南雄盆地白垩纪-古近纪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*, 2009, 54: 201–209]
- Zhang Y P, Tong Y S. Subdivision of “redbeds” of Nanxiong Basin, Guangdong (in Chinese). *Vert PalAsia*, 1963, 7: 249–260 [张玉萍, 童永生. 广东南雄盆地红层的划分. *古脊椎动物与古人类*, 1963, 7: 249–260]
- Young C C. Fossil eggs from Nanshiung, Kwantung and Kanchow, Kiangsi (in Chinese). *Vert PalAsia*, 1965, 9: 141–189 [杨钟健. 广东南雄、始兴、江西赣州的蛋化石. *古脊椎动物与古人类*, 1965, 9: 141–189]
- Zheng J J, Tang Y J, Qiu Z X, et al. Notes on the Upper Cretaceous-Lower Tertiary of the Nanxiong Basin, N. Guangdong (in Chinese). *Vert PalAsia*, 1973, 11: 18–28 [郑家坚, 汤英俊, 邱占祥, 等. 广东南雄晚白垩纪-早第三纪地层剖面的观察. *古脊椎动物与古人类*, 1973, 11: 18–28]
- Tong Y S, Zhang Y P, Wang B Y, et al. The Lower Tertiary of the Nanxiong and Chijiang basins (in Chinese). *Vert PalAsia*, 1976, 14: 16–25 [童永生, 张玉萍, 王伴月, 等. 南雄盆地和池江盆地早第三纪地层. *古脊椎动物与古人类*, 1976, 14: 16–25]
- Zhou M Z, Zhang Y P, Wang B Y, et al. Mammalian Fauna from the Paleocene of Nanxiong Basin, Guangdong. *Palaeontol Sin, New Ser C* 20 (in Chinese). Beijing: Science Press, 1977. 1–128 [周明镇, 张玉萍, 王伴月, 等. 广东南雄古新世哺乳动物群. *中国古生物志, 新丙种第 20 号*. 北京: 科学出版社, 1977. 1–128]
- Zhao Z K, Ye J, Li H M, et al. Extinction of the dinosaurs across the Cretaceous-Tertiary boundary in Nanxiong Basin, Guangdong Province (in Chinese). *Vert PalAsia*, 1991, 29: 1–20 [赵资奎, 叶捷, 李华梅, 等. 广东南雄盆地白垩系-第三系交界恐龙灭绝问题. *古脊椎动物学报*, 1991, 29: 1–20]
- Erben H K, Ashraf A R, Bohm H, et al. Die Kreide/Tertiär-Grenze im Nanxiong-Becken: Kontinentalfazies, Südostchina). Mainz: Franz Steiner Verlag, *Erdwiss Forsch*, 1995, 32: 1–245
- Stets J, Ashraf A R, Erben H K, et al. The Cretaceous-Tertiary boundary in the Nanxiong Basin (Continental facies, Southeast China). In: MacLeod N, Keller G, eds. *The Cretaceous-Tertiary Mass Extinction: Biotic and Environmental Effect*. New York: Norton W. W, 1996. 349–371
- Sloan R E. Paleocene and latest Cretaceous mammal ages, biozones, magnetozones, rates of sedimentation, and evolution. *Geol Soc Am Spec Pap*, 1987, 209: 165–200

- 16 Tong Y S, Li M Y, Li Q. The Cretaceous-Paleogene boundary in the Nanxiong Basin, Guangdong Province (in Chinese). *Geol Bull China*, 2002, 21: 668–674 [童永生, 李曼英, 李茜. 广东南雄盆地白垩系-古近系界线. 地质通报, 2002, 21: 668–674]
- 17 Tong Y S, Li Q, Wang Y Q. An introduction to recent advance in the study of the continental early Paleogene stages in China (in Chinese). *J Stratigr*, 2013, 37: 428–440 [童永生, 李茜, 王元青. 中国古近纪陆相地层划分框架研究. 地层学杂志, 2013, 37: 428–440]
- 18 Ye J. Discussion on the problems of K/T boundary in the Nanxiong Basin (in Chinese). *Vert PalAsia*, 2000, 38: 1–9 [叶捷. 关于南雄盆地 K/T 界线问题的讨论—与 D. A. 拉塞尔, D. E. 拉塞尔, A. R. 斯威特商榷. 古脊椎动物学报, 2000, 38: 1–9]
- 19 Wang X M, Zhai R J. *Carnilestes*, a new primitive Lipotyphlan (Insectivor: Mammalia) from the Early and Middle Paleocene, Nanxiong Basin, China. *J Vertebr Paleontol*, 1995, 15: 131–145
- 20 Clyde W C, Ting S Y, Snell K E, et al. 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*, 2010, 118: 131–143
- 21 Yu W, Gu H L, Zhang X Q. Assemblage sequence of Late Cretaceous and Early Tertiary non-marine gastropods from Nanxiong Basin, Guangdong (in Chinese). *Acta Palaeontol Sin*, 1990, 29: 160–182 [余汶, 顾和林, 张显球. 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, 1990, 29: 160–175]
- 22 Ling Q X, Zhang X Q, Lin J N. New advance in the study of the Cretaceous and Paleogene strata of the Nanxiong Basin (in Chinese). *J Stratigr*, 2005, 29: 596–601 [凌秋贤, 张显球, 林建南. 南雄盆地白垩纪-古近纪地层研究进展. 地层学杂志, 2005, 29: 596–601]
- 23 Zhang X Q, Lin J N, Li G, et al. Non-marine Cretaceous-Paleogene boundary section at Datang of Nanxiong, northern Guangdong (in Chinese). *J Stratigr*, 2006, 30: 327–340 [张显球, 林建南, 李罡, 等. 南雄盆地大塘白垩系-古近系界线剖面研究. 地层学杂志, 2006, 30: 327–340]
- 24 Zhang X Q, Zhang X M, Hou M C, et al. Lithostratigraphic subdivision of red beds in Nanxiong Basin, Guangdong, China (in Chinese). *J Stratigr*, 2013, 37: 441–451 [张显球, 张喜满, 侯明才, 等. 南雄盆地红层岩石地层划分. 地层学杂志, 2013, 37: 441–451]
- 25 Smit J, Romein A J T. A sequence of events across the Cretaceous-Tertiary boundary. *Earth Planet Sci Lett*, 1985, 74: 155–170
- 26 Orth C J, Gilmore J S, Knight J D, et al. An iridium abundance anomaly at the palynological Cretaceous-Tertiary boundary in northern New Mexico. *Science*, 1981, 214: 1341–1343
- 27 Wolfe J A, Upchurch G R. Vegetation, climatic and floral changes at the Cretaceous-Tertiary boundary. *Nature*, 1986, 324: 148–152
- 28 Smit J, van der Kaars W A, Rigby J K Jr. Stratigraphic aspects of the Cretaceous-Tertiary boundary in the Bug Creek area of eastern Montana, USA. *Mem Soc Geol Fr*, 1987, 150: 53–73
- 29 Lerbekmo J F, Sweet A R, St Louis R M. The relationship between the iridium anomaly and palynological floral events at three Cretaceous-Tertiary boundary localities in western Canada. *Geol Soc Amer Bull*, 1987, 99: 325–330
- 30 Saito T, Yamanoi T, Kaiho K. End-Cretaceous devastation of terrestrial flora in the boreal Far East. *Nature*, 1986, 323: 253–255
- 31 Hallam A, Wignall P B. Mass Extinctions and Their Aftermath. New York: Oxford University Press, 1997. 1–320
- 32 Liu Q S, Hansen H J, Rasmussen K L, et al. Magnetostratigraphy of the Cretaceous-Tertiary boundary of Datang Section at Nanxiong Basin, Guangdong Province. In: Special Issue on Geophysical Exploration, 1. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992. 121–125
- 33 Hansen H J, Rasmussen K L, Liu Q S, et al. Correlation of marine and terrestrial Upper Cretaceous sediments by their magnetic susceptibility. *Bull Geol Soc, Denmark*, 1993, 40: 175–184
- 34 Zhao Z K, Wang Q, Zhang S K. Dinosaur Eggs. *Palaeovertebrata Sinica*, Vol II, Fascicle 7. Beijing: Science Press, 2015. 1–168 [赵资奎, 王强, 张蜀康. 恐龙蛋类. 中国古脊椎动物志, 第 2 卷, 第 7 册. 北京: 科学出版社, 2015. 1–168]
- 35 Norell M A, Clark J M, Demberelyin D, et al. A theropod dinosaur embryo and the affinities of the Flaming Cliffs dinosaur eggs. *Science*, 1994, 266: 779–782
- 36 Norell M A, Clark J M, Chiappe L M, et al. A nesting dinosaur. *Nature*, 1995, 378: 774–776
- 37 Horner J R, Weishampel D B. A comparative embryological study of two ornithischian dinosaurs: Correction. *Nature*, 1996, 383: 103
- 38 Varricchio D J, Horner J R, Jackson F D. Embryos and eggs for the Cretaceous theropod dinosaur *Troodon formosus*. *J Vertebr Paleontol*, 2002, 22: 564–576
- 39 Zhao Z K. Nesting behavior of dinosaurs as interpreted from the Chinese Cretaceous dinosaur eggs. *Paleont Soc Korea, Spec Publ*, 2000, 4: 115–126
- 40 Zhao Z K. The nesting behavior of troodontid dinosaurs (in Chinese). *Vert PalAsia*, 2003, 41: 157–168 [赵资奎. 伤齿龙(Troodontids)筑巢产卵的行为. 古脊椎动物学报, 2003, 41: 157–168]
- 41 Hildebrand A R, Penfield G T, Kring D A, et al. Chicxulub crater: A possible Cretaceous-Tertiary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico. *Geology*, 1991, 19: 867–871
- 42 Hildebrand A R, Pilkington M, Connors M, et al. Size and structure of the Chicxulub crater revealed by horizontal gradients and cenotes. *Nature*, 1995, 376: 415–417
- 43 Kamo S L, Krogh T E. Chicxulub crater source for shocked zircon crystals from the Cretaceous-Tertiary boundary layer, Saskatchewan:

- Evidence from new U-Pb data. *Geology*, 1995, 23: 281–284
- 44 Chenet A L, Quidelleur X, Fluteau F, et al. $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ dating of the main Deccan large igneous province: Further evidence of KTB age and short duration. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 263: 1–15
 - 45 McLean D. Deccan Traps mantle degassing in the terminal Cretaceous marine extinctions. *Cretac Res*, 1985, 6: 235–259
 - 46 Courtillot V, Besse J, Vandamme D, et al. Deccan flood basalts at the Cretaceous/Tertiary boundary? *Earth Planet Sci Lett*, 1986, 80: 361–374
 - 47 Courtillot V, Feraud G, Maluski H, et al. The Deccan flood basalts and the Cretaceous-Tertiary boundary. *Nature*, 1988, 333: 843–846
 - 48 Duncan R A, Pyle D G. Rapid eruption of the Deccan flood basalts at the Cretaceous/Tertiary boundary. *Nature*, 1988, 333: 841–843
 - 49 Venkatesan T R, Pande K, Gopalan K. Did Deccan volcanism pre-date the Cretaceous-Tertiary transition? *Earth Planet Sci Lett*, 1993, 119: 181–189
 - 50 Raju D S N, Jaiprakash B C, Kumar A, et al. Age of Deccan volcanism across KTB in Krishna-Godavari Basin: New evidences. *J Geol Soc India*, 1995, 45: 229–233
 - 51 Pande K, Pattanaya S K, Subbarao K V, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of a lava flow from the Bhimashankar Formation, Giravali Ghat, Deccan Traps. *Proc Indian Acad Sci*, 2004, 113: 755–758
 - 52 Sant D A, Mathew G, Khadkikar A S, et al. Co-existent cristobalite and iridium at 65 Ma, Anjar Intertrappeans, Kachchh, western India. *Cretac Res*, 2003, 24: 105–110
 - 53 Toutain J, Meyer G. Iridium-bearing sublimates at the hot-spot volcano (Piton de la Fournaise, Indian Ocean). *Geophys Res Lett*, 1989, 16: 1391–1394
 - 54 Chenet A L, Fluteau F, Courtillot V, et al. Determination of rapid Deccan eruptions across the Cretaceous-Tertiary boundary using paleomagnetic secular variation: Results from a 1200-m-thick section in the Mahabaleshwar escarpment. *J Geophys Res*, 2008, 113: B04101, doi: 10.1029/2006JB004635
 - 55 Zhao Z K, Wang J K, Chen S X, et al. Amino acid composition of dinosaur eggshells nearby the K/T boundary in Nanxiong Basin, Guangdong Province, China. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecon*, 1993, 104: 213–218
 - 56 Kolesnikov C M, Sochava A V. A paleobiochemical study of Cretaceous dinosaur eggshells from the Gobi. *Paleontol J*, 1972, 2: 235–245
 - 57 Krampitz G, Erben H K, Kriesten K. Über Aminosäurezusammensetzung und Struktur von Eischalen. *Biom mineralisation*, 1972, 4: 87–99
 - 58 Wykoff R W G. The Biochemistry of Animal Fossils. Bristol: Sciencetechnica, 1972. 135–144
 - 59 Zhao Z K, Yuan Q, Wang J K, et al. On the amino acid composition and microstructure of fossil ostrich eggshells from Sinanthropus site (in Chinese). *Vert PalAsia*, 1981, 19: 327–336 [赵资奎, 袁全, 王将克, 等. 中国猿人化石产地鸵鸟蛋壳化石的显微结构和氨基酸组成. *古脊椎动物与古人类*, 1981, 19: 327–336]
 - 60 Gonzalez L M, Hiroldo F. Organochlorine and heavy metal contamination in the eggs of the Spanish Imperial eagle (*Aquila (heliacal) adalberti*) and accompanying changes in eggshell morphology and chemistry. *Environ Pollut*, 1988, 51: 241–258
 - 61 Grandjean P. Possible effect of lead on eggshell thickness in kestrels. *Bull Environ Contam Toxicol*, 1976, 16: 101–106
 - 62 Mueller W J, Leach R M Jr. Effects of chemicals on eggshell formation. *Annu Rev Pharmacol*, 1974, 14: 289–303
 - 63 Krampitz G, Witt W. Biochemical aspects of biomineralization. In: Boschke F L, ed. *Topics in Current Chemistry*. Berlin: Springer-Verlag, 1979. 57–144
 - 64 Yang G C, Mao X Y, Wang J C, et al. A study on the relationship between iridium concentration in hen eggshell and iridium-enriched feed by NAA. *J Radioanal Nucl Chem Artic*, 2001, 247: 567–570
 - 65 Zhao Z K. The dinosaur eggs in China: On the structure and evolution of eggshells. In: Carpenter K, Hirsch K F, Horner J R, eds. *Dinosaur Eggs and Babies*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 184–203
 - 66 Romanoff A L, Romanoff A J. *The Avian Eggs*. New York: John Wiley and Sons, 1949
 - 67 Ar A, Rahn H, Paganelli C V. The avian egg: Mass and strength. *Condor*, 1979, 81: 331–337
 - 68 Li C K, Ting S Y. The Paleogene mammals of China. *Bull Carnegie Mus Nat Hist*, 1983, 21: 1–93
 - 69 Wang Y Q, Meng J, Ni X J, et al. Paleogene mammal radiation in China (in Chinese). In: Rong J Y, Fang Z J, Zhou Z H, et al., eds. *Originations, Radiations and Biodiversity Changs-Evidences from the Chinese Fossil Record*. Beijing: Science Press, 2006. 735–755, 948–950 [王元青, 孟津, 倪喜军, 等. 中国古近纪哺乳动物的辐射. 见: 戎嘉余, 方宗杰, 周忠和, 等. *生物起源、辐射与多样性演变——华夏化石记录的启示*. 北京: 科学出版社, 2006. 735–755, 948–950]

Summary for “南雄盆地白垩纪-古近纪交界恐龙灭绝和哺乳动物复苏”

Dinosaur extinction and subsequent mammalian recovery during the Cretaceous-Paleogene (K/Pg) transition in the Nanxiong Basin

ZHAO ZiKui*, YE Jie & WANG Qiang*

Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Key Laboratory of Vertebrate Evolution and Human Origins of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044, China

* Corresponding authors, E-mail: zhaozikui@ivpp.ac.cn; wangqiang@ivpp.ac.cn

Geochemical analysis of the vertebrate fossils (dinosaur eggshell fragments and chelonian bones) from the K/Pg boundary section exposed in the Nanxiong Basin, Guangdong Province, South China shows that at least three geochemical environmental events, marked by Ir anomalies, took place during the latest Cretaceous (Maastrichtian) and early Paleocene. The first geochemical environmental event occurred at about 67 Ma. In this event dinosaur diversity was hardly reduced, although it appears to have led to an increased incidence of eggshell pathology.

The second event was larger, and occurred at or near the pollen-defined K/Pg boundary interval. Enrichment of other trace elements, such as Cr, Ni, Co, Zn, Pb, Cu, Mn and V, within the eggshells occurs mostly at and near the interval, and eggshells in this stratigraphic zone also show positive oxygen-18 excursions and anomalies in thickness and microstructure. Abundant Ir and other trace elements in the dinosaur eggshells reflect changes in their original mineral composition that took place before fossilization began. The anomalously abundant elements were taken into the dinosaurs' bodies in food, and then passed into their eggs. This process would have affected the normal physiological functioning of the dinosaurian body, as well as causing the observed eggshell pathologies.

The extinction of the dinosaurs in the Nanxiong Basin did not occur instantaneously, but was spread out within 250 ka with major extinction beginning at the boundary interval. The cause may have been environmental poisoning and adverse climatic changes, as indicated by geochemical analyses of the dinosaur eggshells. Through the food chain, trace elements were taken into the dinosaurian body in excessive amounts, causing imbalances in trace element levels. This affected the dinosaurs' reproduction, leading to the formation of pathologic eggshells. The eggshells became so brittle that they failed to protect the developing embryos, contributing to the extinction of the dinosaurs.

The third geochemical environmental event occurred in the early-middle Paleocene, the time interval represented by the bottom layer of the Shanghu Formation. This event may have significantly delayed the full recovery of non-marine ecosystems and mammals after the dinosaur extinction.

The stepwise extinction and the Paleocene mammalian recovery observed in the Nanxiong Basin nearly coincide with the duration of the Deccan volcanism seen in India. Recent advances in Deccan volcanic studies indicate that the volcanic eruptions occurred in a series of rapid pulses, grouped into three main phases. The initial set of eruptions, phase 1, occurred at ~67.4 Ma. This phase accounts for only about 6% of the total volume of the Deccan Traps, probably because the eruptions were less intense in this phase than in the later ones. Phase 2 included the largest eruptions, took place prior to the K/Pg boundary, and accounts for ~80% of the total volume of the Deccan Traps. Phase 3 began in the early Danian, or about 270 ka after the K/Pg boundary, and accounts for ~14% of the total volume of the Deccan traps. Therefore, it seems likely that the K/Pg events that occurred in the Nanxiong Basin can be explained in terms of the effects of the Deccan volcanism on an already stressed biosphere.

Nanxiong Basin, Cretaceous-Paleogene boundary, geochemical environment, dinosaur egg, dinosaur extinction, mammalian recovery

doi: 10.1360/N972016-00886