

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

赵资奎, 毛雪瑛, 柴之芳, 杨高创, 张福成, 严正

中国科学院古脊椎动物与古人类研究所脊椎动物进化系统学重点实验室, 北京 100044;

中国科学院高能物理研究所核分析技术开放实验室, 北京 100080;

中国地震局地质研究所, 北京 100029

E-mail: zk.zhao@gmail.com

2008-02-20 收稿, 2008-10-30 接受

国家自然科学基金(批准号: 40472018)和中国科学院重大项目(批准号: 21039751)资助

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. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(5): 806—815, doi: 10.1007/s11434-008-0565-1

摘要 南雄盆地3个含有K/T界线剖面的恐龙蛋壳中铱和其他微量元素含量及稳定同位素组成的分布模式表明, 从白垩纪最晚期到古近纪早期中国华南地区曾发生过两次大的环境变化事件. 第一次地球化学环境变化事件发生在K/T交界前2 Ma, 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多样化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K/T交界及其附近. 恐龙在K/T交界开始灭绝, 然后持续至古新世早期. 这一绝灭过程大约经历了250 ka, 比北美蒙大拿地区和印度西部的恐龙灭绝要晚一些. 恐龙灭绝的原因是多次以铱异常、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, 短期和长期间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.

关键词
广东南雄
白垩系-古近系(K/T)界线
Ir异常
微量元素
稳定同位素
恐龙蛋壳
恐龙灭绝

白垩纪末期发生的恐龙灭绝事件是人们最感兴趣的一个问题. 根据在白垩系-古近系(K/T)界线层发现的Ir含量异常, Alvarez等人^[1~3]提出, 这次灭绝事件是由一颗直径为10 km的小行星撞击地球引起的. 但是由于缺少合适的地层剖面 and 恐龙化石材料稀少, 很难提供令人满意的解释. 实际上, 在很长的一段时期内, 有关恐龙最后灭绝事件的证据和争论几乎都来自北美西部内陆地区^[4~9].

广东省南雄盆地的“红层”是一套比较连续的、含有晚白垩世恐龙蛋化石和古新世哺乳动物化石的陆相沉积岩序列, 可为探讨恐龙是怎样灭绝的、什么时候和什么原因灭绝的等问题提供直接的证据. 从CGY-CGD和CGT-CGF两个剖面(图1)已获得的资料^[10~16], 证明K/T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, 而是一个持续相当长的过程.

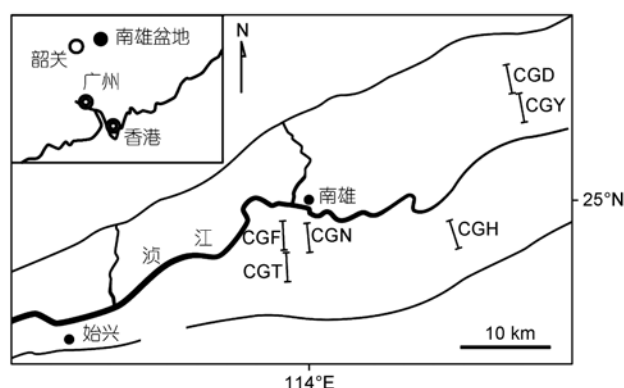


图1 南雄盆地K/T界线剖面地理位置图

为了更好地了解恐龙灭绝的原因及其年代，我们又分析南雄盆地第 3 个 K/T 界线剖面(CGN 剖面)一系列恐龙蛋壳的铱和其他微量元素含量，碳、氧稳定同位素组成及蛋壳组织结构特征。

本文将根据上述 3 个含有 K/T 界线剖面(即 CGY-CGD, CGT-CGF 和 CGN 剖面)获得的各种地球化学信号(即铱、其他微量元素及碳、氧稳定同位素)和恐龙蛋壳组织结构特征及其地层记录等资料，建立起 K/T 过渡时期地球化学环境变化模式及其对恐龙灭绝所起的作用。

1 CGN 剖面恐龙蛋壳的微量元素及同位素组成

CGN 剖面位于南雄市城区南面(图 1)。从岩性上看，这一剖面与 CGY-CGD 剖面和 CGT-CGF 剖面的基本相似，但缺失坪岭组最上部及其上覆地层——上湖组。

根据我们的观察，坪岭组含有很多完整、成窝恐龙蛋和大量碎蛋壳。1972~1994 年，由上海自然博物馆，韶关市博物馆和南雄市博物馆等单位在这一剖面不同层位采集到了比较完整的恐龙蛋大约有 10 窝。它们都完好地保存在原来的位置上，未见有被搬运迹象。蛋壳碎片大都是成堆发现，可能代表着原来在原地或附近有蛋窝存在。这就充分表明，这些含有蛋壳化石的沉积层并未受过再造。由于所含孢粉化石非常稀少，难以确定 K/T 界线的地层位置。但从其他相关的证据来看，这条界线应位于坪岭组上部^[15]，或在 220~240 m 之间。

本文研究的材料是 1984 年中国和德国地质古生物学考察队^[10,15]从这一剖面的 15 个层位中采集到的各类恐龙蛋壳化石，从中选择属于 *Macroolithus yao-*

tunensis 共 15 个蛋壳样品，采用放射化学中子活化法和仪器中子活化法分别测定这些蛋壳样品的铱和其他微量元素含量。同时，我们又选择另外 15 个蛋壳样品，在中国地震局地质研究所实验室分析碳、氧稳定同位素组成。上述的这些蛋壳样品是在显微形态学基础上挑选出来的，它们的组织结构是典型原生方解石，几乎没有明显重结晶现象。

由于铱不是维持生命活动所必需的元素。在正常情况下，蛋壳和骨组织中是不可能含有这种元素的。根据 Zhao 等人^[12]和 Yang 等人^[17]的研究，北京动物园饲养的非洲鸵鸟(*Struthio camelus*)、安徽省南部的野生扬子鳄(*Alligator sinensis*)以及家鸡(*Gallus gallus*)等所产的蛋壳，铱含量均接近或小于检测限度 < 6 至 < 10 ppt (1 ppt=10⁻¹² g/g, 下同)^[12,17]。

蛋壳样品的铱含量和碳、氧稳定同位素组成分析结果见表 1。可以看出，在所有被分析的蛋壳样品中，只有 4 个层位的蛋壳样品 CGN 901, CGN 903, CGN 909 和 CGN 912 显示有铱异常。在经过 Ca 归一化后，这 4 个样品仍然存在着很明显的铱含量异常。其中在 215.5 m 的蛋壳样品(CGN 912)铱丰度最高，达 236.8 ppt。其他 3 个是：在 202~203 m 间隔的蛋壳样品(CGN 909)铱丰度为 42.7 ppt；在 85.5 m 的蛋壳样品(CGN 903)铱丰度为 53.3 ppt；在 44 m 的蛋壳样品(CGN 901)铱丰度为 179.7 ppt。图 2(c)所示的是 CGN 剖面的蛋壳样品铱和其他微量元素丰度变化曲线。这些元素(As, Br, K, La, Na, Au, U, Yb, Fe, Co, Sc 和 Sr)的分布，除 Au, U 和 Fe 的最大峰值出现在 44 m 的蛋壳样品 CGN 901 外，其余的大都在 223.5~225 m 间隔的蛋壳样品 CGN 913 中显示出最大的丰度变化。

表 1 坪岭组 CGN 剖面恐龙蛋壳(*Macroolithus yaotunensis*)样品的铱含量及碳、氧稳定同位素组成

样品编号	取样间隔/m	Ir 丰度/ppt	Ca 含量(%)	Ca 归一化后的 Ir 丰度/ppt	$\delta^{13}\text{C}$ (‰, PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰, PDB)
CGN 915	235.0~235.5	29.7	39.5	28.0	-10.93	+5.50
CGN 914	231.5~232.0	29.4	39.6	27.6	-10.27	-3.29
CGN 913	223.5~225.0	<16.3	9.25		-10.18	-3.85
CGN 912	215.5	268	42.1	236.8	-10.85	+0.36
CGN 911	213.5	<18.5	41.4		-10.09	-1.63
CGN 910	208.0	8.91	41.4	8.1	-9.62	+1.45
CGN 909	202~203	48.4	42.2	42.7	-9.90	-2.19
CGN 908	198.0~199.5	23.0	42.8	20.0	-12.01	-6.75
CGN 907	186.0	25.1	40.5	23.1	-11.13	-2.31
CGN 906	176.5	26.5	40.0	24.6	-10.55	-3.26
CGN 905	110~112	29.3	42.5	25.6	-10.77	-2.20
CGN 904	104.5~106.0	<11.6	41.9		-10.46	-3.36
CGN 903	85.5	60.6	42.3	53.3	-9.54	-4.54
CGN 902	76.5	<20.9	41.8		-9.09	+1.11
CGN 901	44.0	185	38.3	179.7	-9.23	-0.97

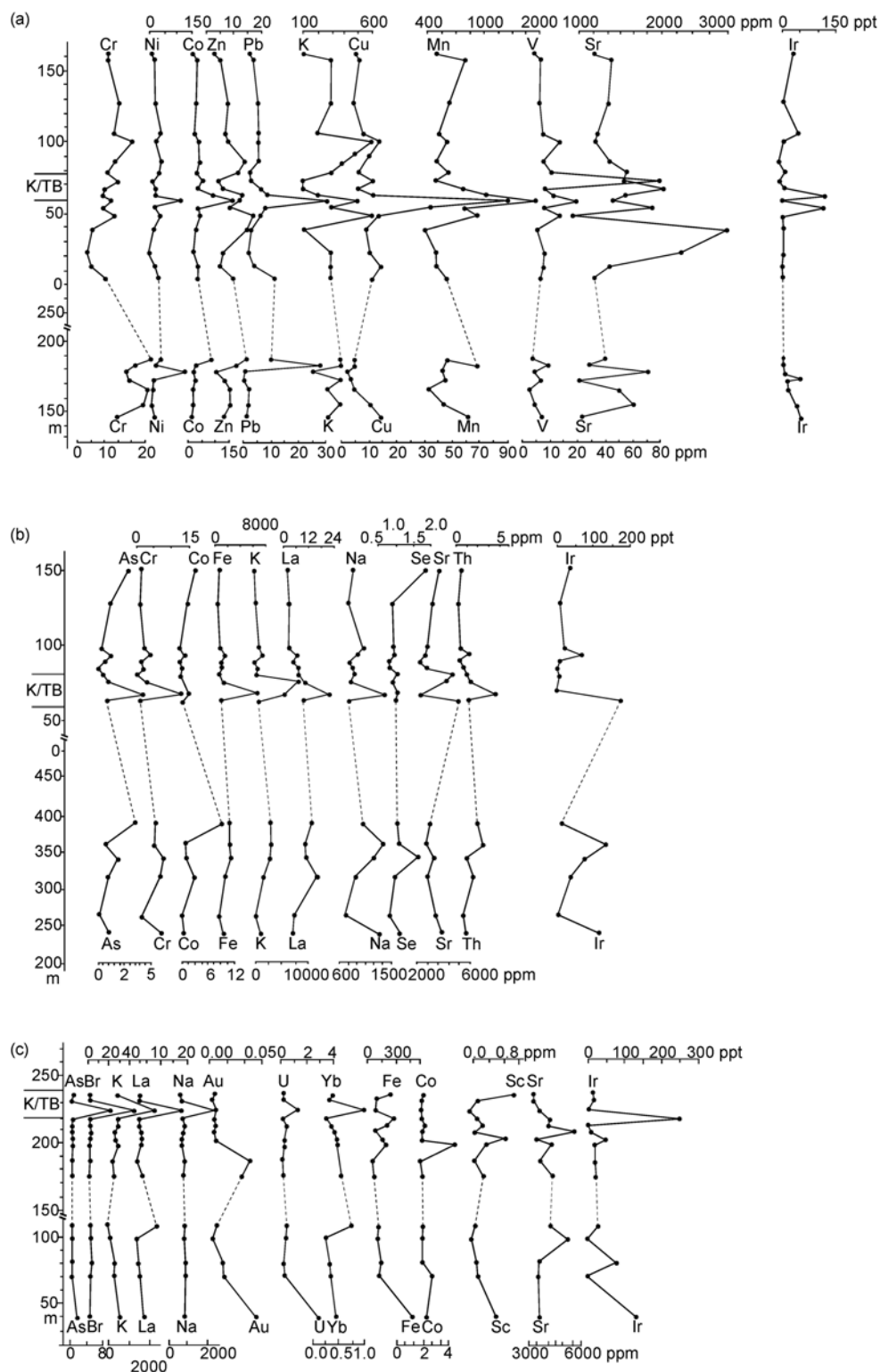


图2 南雄盆地坪岭组3个含有K/T界线剖面 *Macroolithus yaotunensis* 蛋壳铱和其他微量元素丰度变化
(a) CGY-CGD剖面; (b) CGT-CGF剖面; (c) CGN剖面

Macroolithus yaotunensis 蛋壳样品的碳、氧稳定同位素组成(表 1)是, $\delta^{13}\text{C}$ 在 $-12.01\text{‰} \sim -9.09\text{‰}$ (PDB) 之间, $\delta^{18}\text{O}$ 在 $-6.75\text{‰} \sim 5.50\text{‰}$ (PDB) 之间. 可以看出, $\delta^{13}\text{C}$ 的变化幅度较小, 在 3‰ 左右; 相反地 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化幅度却很大, 为 12‰ , 而且除 76.5 m 的样品 (CGN 902) 的 $\delta^{18}\text{O} = 1.11\text{‰}$ 外, 在 208~235.5 m 的地层间隔内氧同位素出现了较大波动, 发生了 3 次向正值偏移. 在 208 m 的蛋壳样品 CGN 910, 215.5 m 的蛋壳样品 CGN 912 及 235~235.5 m 的蛋壳样品 CGN 915, 其 $\delta^{18}\text{O}$ 分别为 1.45‰ , 0.36‰ 和 5.50‰ , 与 CGY-CGD 和 CGT-CGF 两个剖面氧同位素记录^[13] 的变化趋势有明显相似性.

2 CGN 剖面恐龙蛋壳的病理结构特征

从 CGN 剖面发现的恐龙蛋化石主要有 *Macroolithus yaotunensis*, *Macroolithus rugustus*, *Elongatoolithus andrewsi*, *Elongatoolithus elongatus*, *Elongatoolithus oosp.*, *Apheloolithus shuinanensis*, *Nanshiungoolithus chuetienensis* 和 *Shixingoolithus erbeni* 等 8 个蛋种.

在正常情况下, 每一个蛋种(oosp)具有特定的组织结构形态和正常变异范围的蛋壳厚度. 根据 Zhao 等人^[14] 的研究, 在 CGH 剖面园圃组发现的各类恐龙蛋壳, *Macroolithus yaotunensis* 的厚度变异范围在 1.70~2.52 mm, *Macroolithus rugustus* 在 1.66~2.38 mm, *Elongatoolithus andrewsi* 在 1.36~1.58 mm, 而 *Elongatoolithus elongatus* 在 0.9~1.26 mm. 可以看出, 每一个蛋种的蛋壳厚度有一定变异范围, 而且在这一剖面中由下到上每一个蛋种的蛋壳平均厚度几乎没有变化(参见文献^[14] 中的图 6A).

我们测量了在 CGN 剖面坪岭组逐层采集到的这 4 个蛋种的蛋壳碎片共 1758 块, 其中 *Macroolithus yaotunensis* 的厚度变异范围在 0.9~2.36 mm, *Macroolithus rugustus* 在 0.92~1.96 mm, *Elongatoolithus andrewsi* 在 0.6~1.52 mm, *Elongatoolithus elongatus* 在 0.6~1.16 mm, 表明它们的厚度变异范围比其下覆园圃组 CGH 剖面发现的要大得多. 图 3 是表示坪岭组 CGN 剖面各层位中这 4 个蛋种的蛋壳平均厚度变化曲线. 可以看出, 它们的平均厚度变异范围比较大, 与 CGY-CGD 剖面和 CGF-CGT 剖面发现的这 4 个蛋种的蛋壳厚度具有相似的变异现象(参见文献 Zhao 等人^[14] 中的图 6B 和 6C).

图 4(a) 显示的是属于 *Macroolithus yaotunensis* 正

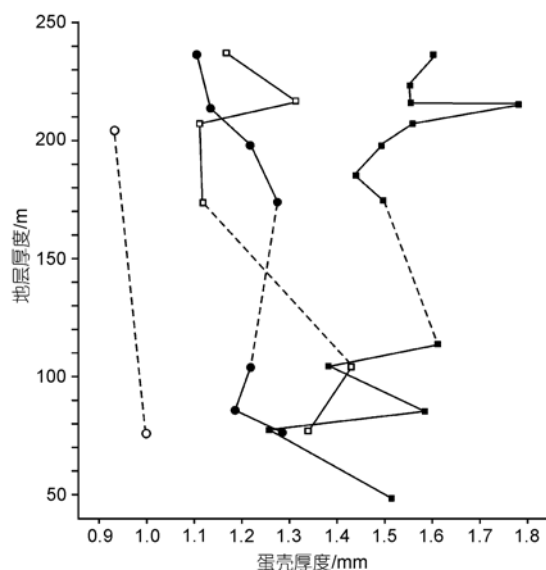


图 3 南雄盆地坪岭组 CGN 剖面 4 个蛋种的蛋壳厚度变异

○ *Elongatoolithus elongatus*; ● *Elongatoolithus andrewsi*; □ *Macroolithus rugustus*; ■ *Macroolithus yaotunensis*

常组织结构的蛋壳经切面, 其中由锥体组成的锥体层和波浪形的柱状层清晰可见.

在光学显微镜或扫描电子显微镜下观察, 很多蛋壳显示出各种各样的病理组织结构特征, 如双层锥体或多层锥体及柱状层中有不规则排列的方解石晶体或不规则形腔隙等(图 4(b)~(d)). 根据随机取样统计, 从这一剖面发现的 *Macroolithus yaotunensis* 蛋壳, 在 44~106 m 范围内, 具有病理组织结构的蛋壳样品出现率的置信区间为 17%~53%; 在 110~199 m, 具有相似的异常结构蛋壳样品出现率的置信区间为 12%~46%; 在 202~235 m, 有异常结构蛋壳样品出现率上升至 50%~85%(表 2). 这就再次证明, 恐龙蛋壳中铀和其他微量元素的富集与病态结构蛋壳的形成有密切关系^[10,11,14,18]. 这些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(有关其形成机制可参阅文献 Zhao^[18], 赵资奎等人^[10,14] 和 Yang 等人^[17]).

3 讨论和结论

3.1 CGN 剖面 K/T 界线地层位置

图 2 表示 CGY-CGD, CGT-CGF 和 CGN 等 3 个 K/T 界线剖面恐龙蛋壳的铀和其他微量元素丰度异常的分布. 已获得的研究结果^[10,15] 表明, CGY-CGD 剖面 K/T 沉积层序非常完整, 露头清楚, 是目前应用古生

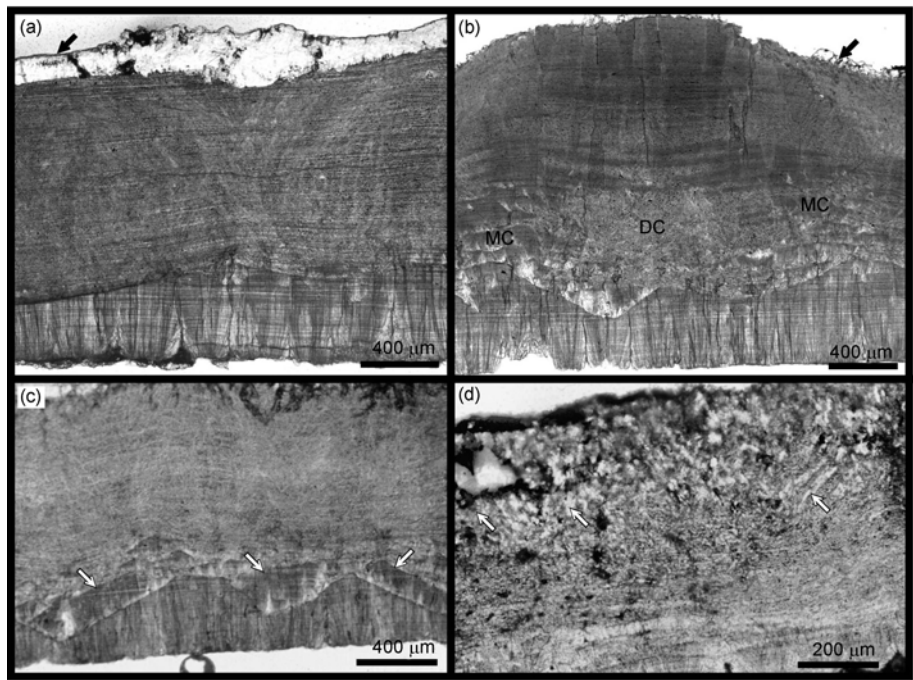


图 4 CGN 剖面 *Macroolithus yaotunensis* 正常和病态蛋壳径切面

(a) *Macroolithus yaotunensis* 正常蛋壳径切面(CGN 908); 由下往上为锥体层、柱状层; 箭头指处系次生方解石层. (b) *Macroolithus yaotunensis* 病态蛋壳径切面(CGN 912); 箭头指处示柱状层下部呈多层锥体(MC)和晶体无序排列(DC); 箭头指处系次生方解石层; (c) *Macroolithus yaotunensis* 病态蛋壳径切面(CGN 903); 箭头指处示锥体层和柱状层之间局部地夹有一层或两层以上的锥体; (d) *Elongatoolithus andrewsi* 病态蛋壳径切面(CGN 913); 箭头指处系柱状层上部具不规则形腔隙

表 2 坪岭组 CGN 剖面 *Macroolithus yaotunensis* 病态蛋壳出现率

取样间隔/m	蛋壳样品数	病态蛋壳样品数	病态蛋壳出现率 (%)
CGN 235~	—	—	—
CGN 202~235	30	21	50~85
CGN 110~199	30	8	12~46
CGN 44~106	30	10	17~53

物地层学、古地磁地层学、沉积学和地球化学等研究最为详细、并被普遍接受的一条非正式K/T界线层型剖面。根据孢粉组合的变化^[15,16]，K/T界线被置于坪岭组上部CGD 57~78 m间隔中，其延续时限约为 50 ka。

非常有意思的是，在CGY-CGD剖面(图 2(a))发现 6 个层位的蛋壳样品有铍含量异常^[14]，其中两个最大的异常(118 和 117.6 ppt)正好出现在根据孢粉组合变化划分的K/T界线层底部的蛋壳样品(CGD 111)和界线层下 2~5 m 的蛋壳样品(CGD 109)中。值得注意的是夹在这两个铍异常层(CGD 111 和CGD 109)之间 CGD 57 m发现的蛋壳样品CGD 110 所含微量元素，如Ni, Co, Pb, Cu和Mn等均不同程度地达到最大峰值。

这些研究结果证明,根据孢粉组合变化确定的K/T界线有明显的地球化学异常, 与国际公认的K/T界线标准一致. 因此, 这个剖面可以作为解释和比较其他 K/T界线剖面的有关资料时的标准.

从图 2 可以看出, CGN剖面(图 2(c))223.5~225 m 的蛋壳样品CGN 913 的微量元素丰度异常及其下层 215.5 m的蛋壳样品CGN 912 的铍丰度异常(236.8 ppt)应分别相当于CGY-CGD剖面孢粉K/T界线层底部的CGD 110 和CGD 109, 以及CGT-CGF剖面(图 2(b))的CGF 402和CGF 401. 此外, 从表 1 可以看出, 在CGN剖面 208~235.5 m的地层间隔中氧同位素出现了 3 次向正值偏移, 与CGY-CGD 和 CGT-CGF两个剖面氧同位素记录^[13]的变化趋势有明显相似性. 根据上述所有的地球化学资料, CGN剖面K/T界线应位于 220~240 m.

1984 年, 中-德古生物学考察队在这一剖面逐层采集到的蛋壳化石最高只发现于 215.5~235.5 m (表 1). 1972 年, 上海自然博物馆在这一剖面采集到的两窝恐龙蛋化石, 其中一窝属于*Elongatoolithus* oosp.蛋化石应位于 235.5 m以上地层中. 20 世纪 80 至 90 年

代,南雄市南部扩建新的城区,新增建设用地包括 CGN剖面 250~280 m这段地层.在约 0.6 km² 范围内曾发现属于 *Macroolithus yaotunensis* 恐龙蛋几十枚、包括有 4 个近乎完整的整窝蛋及大量属于长形蛋科 (*Elongatoolithidae*) 的碎蛋壳.此外,还发现了一件属于窃蛋龙类的不完整头骨,下颌及头后骨骼^[19].这就表明,由长形蛋类为代表的恐龙种群的确幸存到古新世早期,与 CGY-CGD 和 CGT-CGF 两个剖面的记录^[14] 相似.

3.2 K/T 过渡期间的地球化学环境

蛋壳是在输卵管中形成的,其形成过程很快.大多数鸟类的蛋壳大约在 19~21 h 就可形成^[20,21].一般地说,蛋壳的化学组成与动物在产卵期间食物的性质密切相关,因而也是该动物生活环境特征的反映.根据实验观察,如果用不同性质来源的水喂饲鸵鸟和母鸡,在 10 d 后水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 就可完全记录在其所产的蛋壳中^[22,23].在母鸡饲料中添加一定量的铱化

合物 $(\text{NH}_4)_2\text{IrCl}_6$, 结果发现,只有极少量的铱被吸收.在 4~6 d 后铱就能完全沉积到所产的蛋壳中,其沉积率约 0.08%^[17].哺乳动物在口服稀土元素后吸收量在 1‰ 以下^[24].因此,可以合理计算出,南雄盆地 K/T 过渡期间的地质环境中铱的含量应达到 $10^{-7} \sim 10^{-9}$ g/g 量级.这与已知的全球各 K/T 界线层的铱异常值相一致.

图 2 和 5 是表示南雄盆地 3 个 K/T 界线剖面恐龙蛋壳的铱和其他微量元素丰度的异常分布.可以看出,从白垩纪最晚期到古新世早期,那里曾发生过两次以多个铱异常为标志的环境变化事件.较早的一个地球化学环境变化事件发生在 67 Ma 前,即位于 K/T 界线层之下古地磁正向带 31°N (图 5).在 CGY-CGD 剖面的这一间隔发现有 3 个铱丰度异常^[14],在 CGT-CGF 剖面相当这一间隔发现有 4 个铱丰度异常^[14],在 CGN 剖面发现有 2 个铱丰度异常.

第二个地球化学环境变化事件正好发生在 K/T

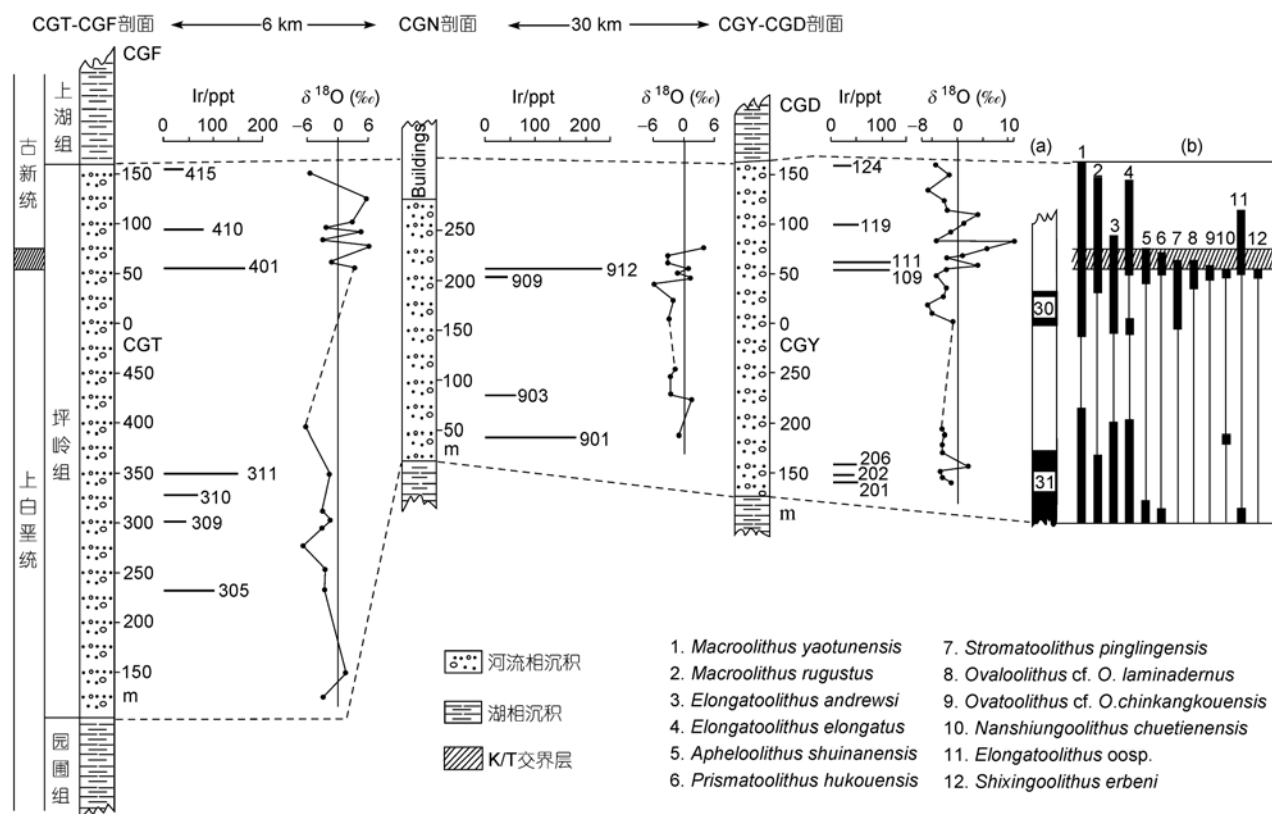


图 5 南雄盆地坪岭组 3 个含有 K/T 界线剖面 *Macroolithus yaotunensis* 蛋壳 Ir 丰度异常、 $\delta^{18}\text{O}$ 及恐龙蛋群的地层分布

CGY-CGD 和 CGT-CGF 两个剖面恐龙蛋壳 Ir 丰度异常的资料来自 Zhao 等人^[14], $\delta^{18}\text{O}$ 资料来自赵资奎和严正^[13].

(a) 磁性地层柱(参阅赵资奎等人^[10]); (b) 不同恐龙蛋种地层分布

交界及其附近,从上述3个剖面蛋壳的铀丰度分布可以看出,CGY-CGD剖面最高的铀丰度出现在界线层底部CGD 111,为118 ppt,在界线层下2~5 m(CGD 109),铀含量为117.6 ppt;CGT-CGF剖面的铀峰值最高出现在界线层下2~3 m(CGF 401),为168 ppt;CGN剖面的铀峰值最高出现在界线层下6 m(CGN 912),为236.8 ppt.

此外,从CGY-CGD和CGT-CGF两个剖面 $\delta^{18}\text{O}$ 的地层记录可以看出,在界线层及其上、下约50 m间隔内也出现了多次向正值偏移(图5),说明当时的气候曾发生过强烈波动.所有这些证据进一步证明,南雄盆地K/T过渡期间地球化学环境变化不是瞬间发生的,而是持续了相当长的时间.

值得注意的是在每一个剖面的K/T界线层及其附近,铀和其他微量元素含量异常都不是在同一层位中发现的(图2),说明两者形成的年代不同,来源也不同.微量元素的富集可能是由当地一未知来源^[10]或附近的火山活动引起的.

3.3 K/T 交界恐龙的灭绝

南雄盆地晚白垩世地层发现的恐龙蛋化石计有8个蛋属,12个蛋种,分属于Elongatoolithidae, Prisma-toolithidae, Ovaloolithidae 和 Megaloolithidae等4个蛋科.虽然目前还没有充分的证据来肯定某种蛋是由某种恐龙产的,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.一般认为,长形蛋科(Elongatoolithidae)和棱柱形蛋科(Prisma-toolithidae)的成员应属于兽脚类恐龙.在蒙古国^[25,26]和北美蒙大拿西部^[27,28]发现的含有胚胎骨骼的蛋化石,根据蛋壳组织结构特征的相似性和蛋在蛋窝中排列方式,可把这两个蛋科分别归属于窃蛋龙科Oviraptoridae^[29]和伤齿龙科Troodontidae^[30].

从上述3个K/T界线剖面发现的12个蛋种的地层记录可以看出(参见图5右侧),在67 Ma年前的古地磁极性带31N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多样化并没有发生明显变化.

恐龙灭绝主要发生在K/T交界,但是只有7个稀有的蛋种在那里灭绝了,其余的属于长形蛋科的5个蛋种则越过K/T交界继续生存到古新世早期.最后,只有一个蛋种*Macroolithus yaotunensis*一直分布到坪岭组 and 上湖组分界才消失.根据坪岭组的沉积速率为40 cm/ka^[15]计算,这一绝灭过程大约经历了250 ka.

根据目前的资料,在北美蒙大拿地区,恐龙是否是在K/T界线全部灭绝^[8,9],或者早在界线下3 m就已灭绝^[5],或者继续生存到界线之上1.3 m(约4万年)才灭绝^[6,7],至今仍无定论.最近, Mohabey^[31]根据在印度西部进行的多学科综合研究^[32~34],对该地区的恐龙蛋化石进一步地研究,认为那里的恐龙是在K/T交界前0.3 Ma灭绝的.在年代上与印度德干火山喷发最激烈的时间比较一致.因此,似乎可以认为,白垩纪晚期恐龙的灭绝并不是突然在全世界同时发生,而是在不同地区的不同时间内灭绝的.

3.4 恐龙灭绝的原因

当前,K/T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^[35~37]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灭绝的直接原因.

然而,在南雄盆地K/T过渡时期中除发现多个铀含量异常外,从没有发现小行星撞击的其他直接证据^[15].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起决定性的或直接的突然影响.

印度德干火山活动是过去245 Ma以来最大的火山喷发事件.根据 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代测定和Re-Os同位素研究结果,德干火山活动发生在距今67~64 Ma之间^[38~45],而最激烈的大规模喷发事件则发生在65.2~65.4 Ma之间^[46].根据Cox^[47]的估计,在整个德干火山活动期间,断断续续大约喷发100~500次,中间由相对较短的静止期隔开.

最近,Sant等人^[48]报告,在印度西部Anjar地区K/T过渡时期(65 Ma)德干暗色岩间夹层中发现的3个铀含量异常与方石英(由火山作用形成的多形体矿物)最大峰值有明显同时性,证明这些铀含量异常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汪岛)仍在释放铀^[49].

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似乎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/T交界发现的微量元素和同位素分布模式.然而,上面提到,K/T交界恐龙蛋壳的铀和其他微量元素异常含量不是同一来源.这些微量元素的富集可能是由当地一未知来源或附近的火山活动引起的.因此,我国

华南地区 K/T 交界恐龙灭绝的原因是由于多次以铱异常、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的环境毒化等多种因素引起的。短期和长期间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。

有关恐龙蛋壳的地球化学研究结果表明, 环境

对蛋壳的微量元素和同位素组成以及病态蛋壳的形成起着重要的作用。因此采用地球化学和蛋壳组织学相结合的研究方法, 研究那些发现在有详细的地层框架内蛋壳的微量元素和碳、氧稳定同位素组成及其分布特征, 有可能为探讨陆相白垩纪古气候和古环境的变化以及恐龙多样化事件提供可靠依据。

致谢 写作过程中得到美国普林斯顿大学的 Gerta Keller、堪萨斯大学的苗德岁、法国 Montpellier 大学的 Monique Vianey-Liaud 和荷兰 Silesia 大学的 A. J. von Loon 等的许多帮助, 审稿人提出建设性的评审意见, 作者特此致谢。

参考文献

- 1 Alvarez L W, Alvarez W, Asaro F, et al. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science*, 1980, 208: 1095—1108 [[DOI](#)]
- 2 Alvarez W, Alvarez L W, Asaro F, et al. The end of the Cretaceous sharp boundary or gradual transition? *Science*, 1984, 223: 1183—1186 [[DOI](#)]
- 3 Alvarez W, Kauffman E G, Surelyk F, et al. Impact theory of mass extinctions and the invertebrate fossil record. *Science*, 1984, 223: 1135—1141 [[DOI](#)]
- 4 Archibald J D. *Dinosaur Extinction and the End of an Era: What the Fossils Say*. New York: Columbia University Press, 1996. 1—237
- 5 Archibald J D, Clemens W A. Late Cretaceous extinctions. *Am Scientist*, 1982, 70: 377—385
- 6 Sloan R E, Rigby J K Jr, van Valen L M, et al. Gradual dinosaur extinction and simultaneous ungulate radiation in the Hell Creek Formation. *Science*, 1986, 232: 629—633 [[DOI](#)]
- 7 Rigby J K Jr, Newman K R, Smit J, et al. Dinosaurs from the Paleocene part of the Hell Creek Formation, McCone County, Montana. *Palaios*, 1987, 2: 296—302
- 8 Smit J, Alexander W, van Der Kaars, et al. Stratigraphic aspects of the Cretaceous-Tertiary boundary in the Bug Creek area of eastern Montana, USA. *Mem Soc Geol France*, N S. 1987, 150: 53—73
- 9 Sheehan P M, Fastovsky D E, Hoffman R G, et al. Sudden extinction of the dinosaurs: Latest Cretaceous, Upper Great Plains, USA. *Science*, 1991, 254: 835—839 [[DOI](#)]
- 10 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
- 11 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. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1993, 104: 213—218
- 12 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(5): 425—430
- 13 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(2): 135—141
- 14 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. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2002, 178: 1—17 [[DOI](#)]
- 15 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. 1—245
- 16 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
- 17 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*, 2001, 247: 567—570 [[DOI](#)]
- 18 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
- 19 吕君昌. 中国南方窃蛋龙类化石. 北京: 地质出版社, 2005. 1—200
- 20 Taylor T G. How an eggshell is made. In: *Vertebrate Structures and Functions*. San Francisco: Freeman, 1974. 371—377

- 21 Thibault C, Beaumont A, Levasseur M C. La reproduction des vertebres. Paris: Masson, 1998. 1—307
- 22 Folinsbee R E, Fritz P, Krouze H R, et al. Carbon-13 and oxygen-18 in dinosaur, crocodile, and bird eggshells indicate environmental conditions. *Science*, 1970, 168: 1353—1356 [\[DOI\]](#)
- 23 von Schirnding Y, Merwe N J, van Der Vogel J C. Influence of diet and age on carbon isotope ratios in ostrich eggshells. *Archaeometry*, 1982, 24: 3—20 [\[DOI\]](#)
- 24 郭伯生, 竺伟民, 熊炳昆, 等. 农业中的稀土. 北京: 中国农业科技出版社, 1988. 1—220
- 25 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 [\[DOI\]](#)
- 26 Norell M A, Clark J M, Chiappe L M, et al. A nesting dinosaur. *Nature*, 1995, 378: 774—776 [\[DOI\]](#)
- 27 Horner J R, Weishampel D B. A comparative embryological study of two ornithischian dinosaurs: Correction. *Nature*, 1996, 383: 103
- 28 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 [\[DOI\]](#)
- 29 Zhao Z K. Nesting behavior of dinosaurs as interpreted from the Chinese Cretaceous dinosaur eggs. *Paleont Soc Korea, Spec Publ*, 2000, 4: 115—126
- 30 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
- 31 Mohabey D M. Understanding community structure, nesting and extinction of Upper Cretaceous (Maestrichtian) Indian Dinosaurs: Evidences from eggs and nests. *Gond Geol Magz*, 2000, 15: 1—23
- 32 Hansen H J, Toft P, Mohabey D M, et al. Lameta age: Dating the main pulse of Deccan Trap volcanism. *Gond Geol Magz*, 1996, 2: 365—374
- 33 Hansen H J, Mohabey D M, Toft P. New data on Indian K-T boundaries. In: *International Seminar on Recent Advances in the Study of Cretaceous Sections*. India: (ONGC) Chennai, 1998. 25—26
- 34 Hansen H J, Toft P, Mohabey D M. No K-T boundary at Anjar, Gujarat, India. In: *Seminar on Deccan Trap Basalts and K-T Boundary*. PRL, Ahmedabad, 1999. 9—10
- 35 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 [\[DOI\]](#)
- 36 Hildebrand A R, Pilkington M, Connors M, et al. Size and structure of the Chixulub crater revealed by horizontal gradients and cenotes. *Nature*, 1995, 376: 415—417 [\[DOI\]](#)
- 37 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 [\[DOI\]](#)
- 38 Courtillot V. Deccan volcanism at the Cretaceous-Tertiary boundary: Past climatic crisis as a key to future? *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1990, 89: 291—299 [\[DOI\]](#)
- 39 Duncan R A, Pyle D G. Rapid eruption of the Deccan flood basalts at the Cretaceous/Tertiary boundary. *Nature*, 1988, 333: 841—843 [\[DOI\]](#)
- 40 Venkatesan T R, Pande K, Gopalan K. Did Deccan volcanism pre-date the Cretaceous/Tertiary transition? *Earth Planet Sci Lett*, 1993, 119: 181—189 [\[DOI\]](#)
- 41 Baksi A K. Geochronological studies on whole-rock basalts, Deccan Traps, India: Evaluation of the timing of volcanism relative to the K-T boundary. *Earth Planet Sci Lett*, 1994, 121: 43—56 [\[DOI\]](#)
- 42 Bhattacharji S, Chatterjee N, Wampler J M, et al. Indian intraplate and continental margin rifting, lithospheric extension, and mantle upwelling in Deccan flood basalt volcanism near the K/T boundary: Evidence from mafic dike swarms. *J Geol*, 1996, 104: 379—398
- 43 Sheth H C, Duncan R A, Chandrasekharam D, et al. Deccan Trap dioritic gabbros from the western Satpura-Tapi region. *Curr Sci*, 1997, 72: 755—757
- 44 Allegre C J, Birck J L, Capmas F, et al. Age of the Deccan Traps using ^{187}Re - ^{187}Os systematics. *Earth Planet Sci Lett*, 1999, 170: 197—204 [\[DOI\]](#)
- 45 Mahoney J J, Sheth H C, Chandrasekharam D, et al. Geochemistry of flood basalts of the Toranmal section, northern Deccan traps, India: Implications for region Deccan stratigraphy. *J Petrol*, 2000, 41: 1099—1120 [\[DOI\]](#)
- 46 Hoffmann C, Feraud G, Courtillot V. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of mineral separates and whole rocks from the Western Ghats lava pile: Further constraints on duration and age of Deccan Traps. *Earth Planet Sci Lett*, 2000, 180: 13—27 [\[DOI\]](#)
- 47 Cox K G. Gradual volcanic catastrophes? *Nature*, 1988, 333: 802 [\[DOI\]](#)
- 48 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 [\[DOI\]](#)
- 49 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 [\[DOI\]](#)