

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

赵资奎

(中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044)

严 正

(中国地震局地质研究所, 北京 100029)

摘要 研究了南雄盆地两个白垩系-第三系(K/T)剖面恐龙蛋壳的碳、氧稳定同位素组成. 结果显示, 在 K/T 交界过渡的大约 150 ka 期间内, $d^{18}\text{O}$ 出现了多次向正值偏移, 说明当时曾出现过至少 3 次年平均气温在 27°C 以上的相当严重的干燥气候. 蛋壳 $d^{13}\text{C}$ 值在 $-8.37\text{‰} \sim -11.60\text{‰}$ 之间, 再加上因新陈代谢作用富集了 16‰ 表明由这些蛋壳所代表的恐龙可能以 $d^{13}\text{C}$ 为 $-24.3\text{‰} \sim -27.60\text{‰}$ 的 C_3 型植物作为主要食物来源. 然而, 在 K/T 交界过渡期间蛋壳 $d^{13}\text{C}$ 相对亏损(约 1.3‰)可能间接说明当时曾有过较长时间大气 CO_2 浓度的持续升高.

关键词 K/T 交界 恐龙蛋壳 同位素组成 古环境

最近, 赵资奎等人^[1]报道, 用放射化学中子活化分析方法(RNAA)测定广东省南雄盆地 K/T 界线剖面(CGY-CGD 剖面)一系列恐龙蛋壳样品的铍含量, 发现在根据孢粉组合变化划分的 K/T 交界层^[2]及其上、下附近 3 个层位的蛋壳样品有铍含量异常, 提出南雄盆地 K/T 过渡期间发生的以铍为标志的环境事件至少持续了 150 ka.

南雄盆地坪岭组含有很多完整、成窝恐龙蛋和大量碎蛋壳^[1,3,4], 表明该盆地在 K/T 过渡期间是恐龙繁殖和筑巢产卵的地点. 因此, 系统研究坪岭组 K/T 界线剖面恐龙蛋壳的碳、氧稳定同位素组成, 探讨它们所反映的古环境信息, 将有助于解释我国华南地区 K/T 交界恐龙绝灭时的生存状态. 迄今有关南雄盆地恐龙蛋壳碳、氧同位素组成的研究^[2,5,6], 由于提供的资料不很完全, 还不能显示出清晰画面. 现有的资料表明^[1,2,5], 南雄盆地坪岭组 CGY-CGD 剖面 K/T 沉积相对连续, 露头清楚, 是目前应用生物地层学、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的 K/T 界线层型剖面. 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. 本文报道了坪岭组 CGY-CGD 和 CGT-CGF 两个界线剖面的一系列恐龙蛋壳化石的碳、氧稳定同位素分析结果. 这项研究是 1983~1986 及 1989 年中-德合作项目“陆相白垩系-第三系交界全球事件”的一个部分.

1 材料和方法

CGY-CGD 剖面位于南雄县城东北方向的大塘镇南面, CGT-CGF 剖面位于县城西南的风

门坳村南部, 两者相距约 40 km. 我们从这两个界线剖面采集的各类恐龙蛋壳化石中选择 *Macroolithus yaotunensis* 作为研究材料, 其中在 CGY-CGD 剖面选取 36 个蛋壳样品, 在 CGT-CGF 剖面选取 20 个蛋壳样品. 这类蛋壳化石在南雄盆地中分布广泛, 保存极佳. 从显微结构上看, 其壳单元完好保存了原生方解石生长的细微结构(参见文献[7]中图 4 和文献[8]中图 12.6 及图 12.15).

首先, 在显微形态学的基础上挑选分析的蛋壳样品. 然后, 将这些样品的内、外表面层刮掉, 用超声波清洗, 烘干后研成粉末. 在真空中用 103%磷酸(H_3PO_4)在 75℃和样品反应生成 CO_2 , 经纯化、分离后, 采用 MAT 251 型质谱仪进行碳、氧稳定同位素比值的测定. d 值统一采用 PDB 标度, 实验精度优于 $\pm 0.1\%$.

2 结果和讨论

蛋壳的碳、氧稳定同位素分析结果见表 1 和 2. 总的看来, 这两个剖面的蛋壳碳、氧同位素组成以及在地层中的变化趋势有很明显的相似性. $d^{13}\text{C}$ 的变动范围在 CGY-CGD 剖面为 $-8.74 \sim -11.60\%$ 在 CGT-CGF 剖面为 $-8.37 \sim -11.09\%$ 两者的变化幅度较小, 都在 3%左右. $d^{18}\text{O}$ 的变动范围, 前者为 $+11.43 \sim -7.97\%$ 后者为 $+6.90 \sim -6.68\%$ 其变化幅度都很大, 分别为 19%和 13%

在讨论这些同位素资料之前, 先要说明的是原来的组成是否受过成岩作用的严重影响. 如上所述, 本文研究的蛋壳样品是在显微形态学的基础上挑选出来的, 它们的结构和颗粒形态是典型原生方解石, 几乎没有明显的重结晶现象.

根据杨卫东等人^[6]的报道, 采自南雄盆地坪岭组中上部几个夹层的碳酸岩盐样品, 其同位素组成是: $d^{13}\text{C}$ 值的范围为 -8.14% ~ -10.31% 平均 -9.18% $d^{18}\text{O}$ 为 -7.36% ~ -10.94% (PDB 标准), 平均 -8.91% 与本文的结果有明显不同. 这种情况不可能是成岩作用的结果. 由于两者都经历了相同的地质历史, 如果成岩作用强烈, 其碳、氧同位素组成会趋向一致.

另一方面, 从单个蛋窝中取出的蛋壳样品(见表 1、2), 其 $d^{18}\text{O}$ 值非常一致, 误差在 $\pm 0.5\%$ 以内. 这一结果不仅说明这些蛋窝分别由单一个体产生, 而且也说明这些蛋壳的同位素值的变化受成岩作用的影响很小. 根据上述的证据可以认为, 本文研究的 *Macroolithus yaotunensis* 蛋壳碳、氧同位素组成基本上反映了 K/T 过渡期间恐龙生存的环境条件.

2.1 蛋壳氧同位素的地层记录

由表 1 及图 1 可以看出, 从下部 CGY 剖面的 141 m 至 K/T 界线底部(CGD 剖面的 60 m 处)的各层蛋壳样品, 除 162~168 m 的样品(CGY206) $d^{18}\text{O} = +2.12\%$ 外, 其余的变化于 -1.33% ~ -6.14% 之间, 平均 -3.22% 然而, 在界线层之上, 氧同位素出现了剧烈的波动, 发生了 3 次向正值偏移. 55~60 m 的蛋壳样品(CGD110), 其 $d^{18}\text{O}$ 值为 $+4.70\%$ 65~81 m 的 3 个蛋壳样品(CGD113, CGD114, CGD115), 其 $d^{18}\text{O}$ 值分别为 $+0.27\%$ $+6.37\%$ $+11.43\%$ 在 CGD 100~110 m 的两个蛋壳样品, $d^{18}\text{O}$ 值各为 $+0.87\%$ 和 $+4.10\%$ 随后这种趋势又发生改变, 从 110 m 至坪岭组和上湖组分界的 161 m, 各层的蛋壳样品 $d^{18}\text{O}$ 值在 -0.18% ~ -7.97% 之间, 平均 -3.93% 与界线层以下各层样品 $d^{18}\text{O}$ 的平均值非常相似.

CGT-CGF 剖面蛋壳氧同位素记录(见表 2 及图 2), 与上述 CGY-CGD 剖面的非常相似. 在界线层之下的 CGT 各层位中, 除 135~154 m 的蛋壳样品($d^{18}\text{O} = +2.10\%$)外, 其他的变化于

表 1 CGY-CGD 剖面 *Macroolithus yaotunensis* 蛋壳的碳、氧稳定同位素

样品编号	取样间隔/m	$d^{13}\text{C}/\text{‰}$, PDB	$d^{18}\text{O}/\text{‰}$ PDB
CGD124	158 ~ 161	-9.95	-4.80
CGD123	146 ~ 152	-10.19	-0.18
CGD122	134 ~ 142	-10.29	-7.97
CGD121	122 ~ 133	-10.57	-3.77
CGD120 ^{a)}	110 ~ 116	-11.58±0.32	-2.97±0.21
CGD119	104 ~ 110	-11.60	+4.10
CGD118	97 ~ 104	-11.19	+0.87
CGD117	88 ~ 97	-10.22	-1.76
CGD116	82 ~ 87	-10.07	-4.61
CGD115	76 ~ 81	-10.03	+11.43
CGD114	68 ~ 76	-9.24	+6.37
CGD113	65 ~ 68	-10.17	+0.27
CGD112 ^{a)}	63 ~ 65	-10.36±0.31	-3.07±0.31
CGD111	60 ~ 63	-10.10	-2.83
CGD110	55 ~ 60	-10.58	+4.70
CGD109 ^{a)}	52 ~ 55	-10.46±0.34	-2.06±0.14
CGD108	45 ~ 52	-10.12	-4.85
CGD107	34 ~ 42	-9.53	-2.15
CGD105	24 ~ 34	-9.72	-3.06
CGD104	21 ~ 24	-10.65	-6.14
CGD103	10 ~ 12	-11.37	-5.37
CGD102	3 ~ 6	-9.80	-1.33
CGY210	182 ~ 186	-8.74	-3.09
CGY209	177 ~ 182	-9.88	-2.52
CGY208	171 ~ 177	-9.15	-3.18
CGY207 ^{a)}	168 ~ 171	-8.86±0.05	-3.11±0.11
CGY206	162 ~ 168	-9.44	+2.12
CGY204	150 ~ 154	-8.89	-3.48
CGY202	144 ~ 150	-8.76	-3.11
CGY201 ^{a)}	141 ~ 144	-9.04±0.03	-1.76±0.51

a) 分别从单个蛋窝中取出 2 ~ 3 个蛋壳样品的 $d^{13}\text{C}$ 和 $d^{18}\text{O}$ 的平均值

表 2 CGT-CGF 剖面 *Macroolithus yaotunensis* 蛋壳的碳、氧稳定同位素

样品编号	取样间隔/m	$d^{13}\text{C}/\text{‰}$, PDB	$d^{18}\text{O}/\text{‰}$, PDB
CGF415	150 ~ 153	-10.75	-5.16
CGF414	126 ~ 129	-10.97	+6.05
CGF413 ^{a)}	99 ~ 100	-10.93±0.45	+3.47±0.10
CGF410	87 ~ 91	-11.09	-2.08
CGF407	84 ~ 87	-10.34	+5.76
CGF404	81 ~ 84	-10.42	-3.50
CGF403	71 ~ 81	-10.85	+6.90
CGF402	66 ~ 68	-10.35	-0.87
CGF401	63 ~ 66	-11.08	+3.88
CGT312	372 ~ 390	-9.83	-6.18
CGT311	349 ~ 350	-10.16	-1.89
CGT310	332 ~ 333	-9.33	-3.20
CGT309	330 ~ 310	-8.83	-1.02
CGT308	288 ~ 291	-10.14	-2.96
CGT307	273 ~ 276	-8.37	-6.68
CGT306	250 ~ 258	-9.34	-2.38
CGT305	226 ~ 234	-8.75	-2.66
CGT304	135 ~ 154	-9.82	+2.10
CGT303	111 ~ 135	-9.04	-2.55

a) 从单个蛋窝中取 2 个蛋壳样品的 $d^{13}\text{C}$ 和 $d^{18}\text{O}$ 平均值

-1.02 ‰~ -6.18 ‰之间, 平均-3.28 ‰ 在界线层之上, 即在 CGF 剖面 63 ~ 129 m 的范围内, $d^{18}\text{O}$ 也出现了多次向正值偏移的剧烈波动.

据赵资奎等人^[1]报道, 在 CGY-CGD 剖面的 K/T 界线层及其附近的 3 个层位(即在 52 ~ 110 m 之间)的恐龙蛋壳样品有钡含量异常, 与上述在这一地层间隔内发生的氧同位素的异常变化基本一致. 这就进一步证明南雄盆地在 K/T 交替时期的气候环境曾发生过强烈的变化.

Folinsbee 等人^[9]曾用实验首次证明, 产卵动物饮用水的 $d^{18}\text{O}$ 与其所产的碳酸盐蛋壳的 $d^{18}\text{O}$ 存在着一定线性关系. 随后, Erben 等人^[10]进一步分析了世界许多地区的现生鸟类及爬行类蛋壳及其产地水的氧同位素组成, 并在此基础上论证了这些蛋壳 $d^{18}\text{O}$ 与其产地年平均气温的线性关系. 最近, Sarkar 等人^[11]在研究印度 Kheda 地区恐龙蛋壳的碳、氧同位素组成时, 对蛋壳 $d^{18}\text{O}$ 与年平均气温之间的线性关系进一步作了修正(见图 3). 如果把本文分析的 CGY-CGD 和 CGT-CGF 两个剖面的蛋壳 $d^{18}\text{O}$ 值投影到了图 3 中, 就可看出, 除 K/T 界线层之上的几个样品外, 绝大多数样品的标绘点大体上位于 22℃ ~ 27.6℃ 之间. 这一结果与杨卫东等人^[6]根据南雄盆地坪岭组中上部夹层中的碳酸岩盐样品 $d^{18}\text{O}$ 值推算出的古温度平均变化范围(26.66℃ ~ 33.95℃)基本接近或略低.

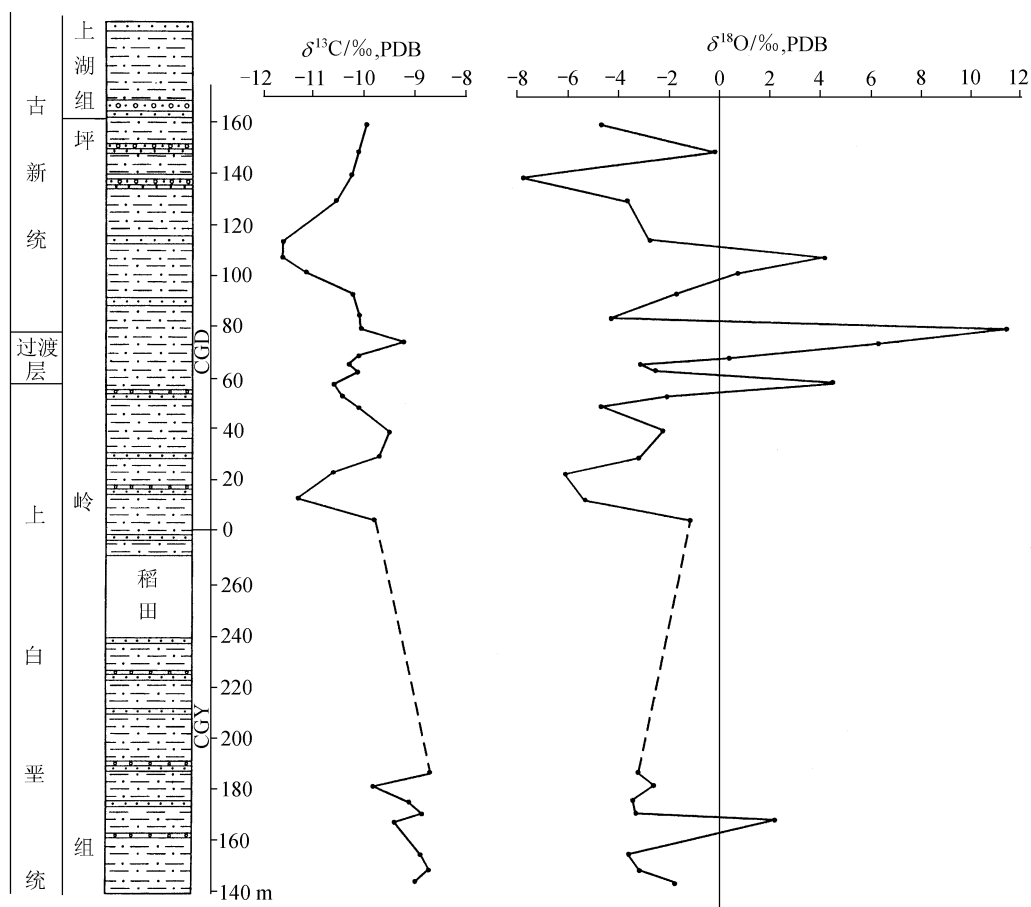


图 1 南雄盆地坪岭组 CGY-CGD 剖面恐龙蛋壳的碳、氧稳定同位素分布图

然而,值得注意的是, CGY-CGD 和 CGT-CGF 这两个剖面的 K/T 界线层之上的那些样品, $d^{18}\text{O}$ 突然增高, 超出了图 3 中所给出的线性范围. 这就意味着在 K/T 过渡期间可能发生异常大的温度变化. 但是, 碳酸盐蛋壳的 $d^{18}\text{O}$ 值不仅受水温或气温的控制, 也受其他因素如蒸发过程中的同位素动力分馏作用的影响. 在气温较高且干燥的地区, 水受温暖和干燥气候的影响而蒸发, 因而在水蒸气中将富集 ^{16}O , 在水源中剩下的母液将富集 ^{18}O . 生活在该地区的动物饮用这些水后, 所产生的蛋壳将富集更多的 ^{18}O . 根据 Erben 等人^[10]的报道, 现代非洲鸵鸟生活在非常干燥的低纬度地区, 自然饮用了过度蒸发的水. 其蛋壳的 $d^{18}\text{O}$ 为 +7.1‰, 估计当地年平均气温在 30℃ 以上. 分布在尼罗河流域的鳄类, 其蛋壳 $d^{18}\text{O}$ 为 +2.8‰, 表明它们生活的自然环境干燥, 年平均气温在 25℃ 以上. 因此, 似乎有理由认为, 上述的 K/T 界线层之上蛋壳 $d^{18}\text{O}$ 的异常富集, 除温度因素外, 可能与恐龙饮用了过度蒸发的水有关. 这就进一步表明我国华南地区在 K/T 交界过渡期间至少曾出现过 3 次年平均气温在 27℃ 以上的相当严重的干燥气候.

南雄盆地“红层”的沉积速率大约为 40 cm/ka^[2], 则上述 K/T 交界过渡期间出现的多个 $d^{18}\text{O}$ 值的突然增高的地层间隔(在 CGD 剖面为 55 ~ 110 m, 在 CGF 剖面为 63 ~ 129 m)所代表的时间大约为 150 ka.

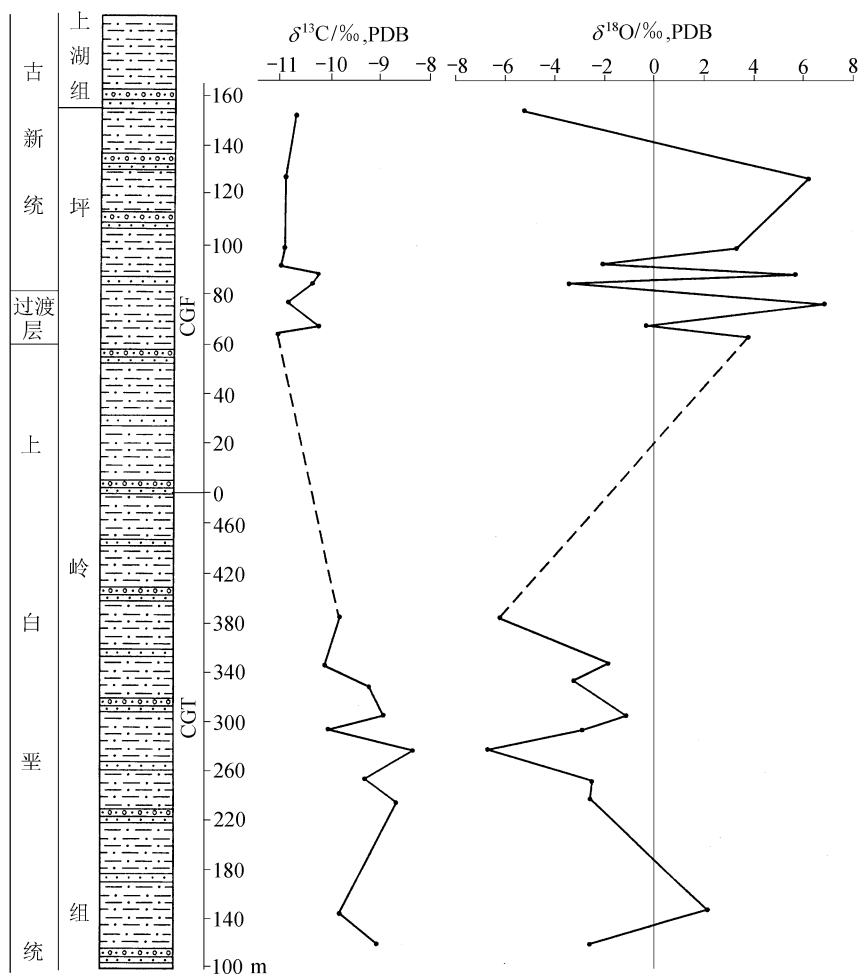


图 2 南雄盆地坪岭组 CGT-CGF 剖面恐龙蛋壳的碳、氧稳定同位素分布图

2.2 蛋壳碳同位素的地层记录

在根据碳同位素组成作出最后结论之前, 首先需要说明卵壳中碳的来源问题. 现有的资料表明^[10,11], 碳酸盐蛋壳的 $\delta^{13}\text{C}$ 主要与该产卵动物吸收食物中的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 有关. 因此, 这就涉及到这些动物的食物来源的问题. 大量的研究资料表明, 植物在其光合作用同化 CO_2 的过程中, 不同类型的植物对 CO_2 中的 ^{13}C 和 ^{12}C 具有不同的辨别能力. 目前根据 $\delta^{13}\text{C}$ 值区别植物光合作途径的研究, 基本上可把大多数现生植物分为 C_3 植物($\delta^{13}\text{C}$ 在 $-20\text{‰} \sim -35\text{‰}$ 之间, 平均 -26‰), C_4 植物($\delta^{13}\text{C}$ 在 $-7\text{‰} \sim -15\text{‰}$ 之间, 平均 -12‰)和 CAM 植物($\delta^{13}\text{C}$ 值范围在 $-10\text{‰} \sim -22\text{‰}$ 之间, 平均 -16‰) 3 个类型^[12,13]. 由于动物对碳同位素没有辨别能力, 因此对于那些可作为食物的 C_3 和 C_4 植物不同 $\delta^{13}\text{C}$ 值会反映在动物的碳同位素组成中. 近来的一些研究^[11,14,15]证明, 碳酸盐蛋壳的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比其母体动物食用的食物中的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 富集约 16‰ . 因此, 根据蛋壳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 大体上可推导出该产卵动物食物中的 $\delta^{13}\text{C}$, 从而可进一步推断该产卵动物的食物以何种类型的植物为主.

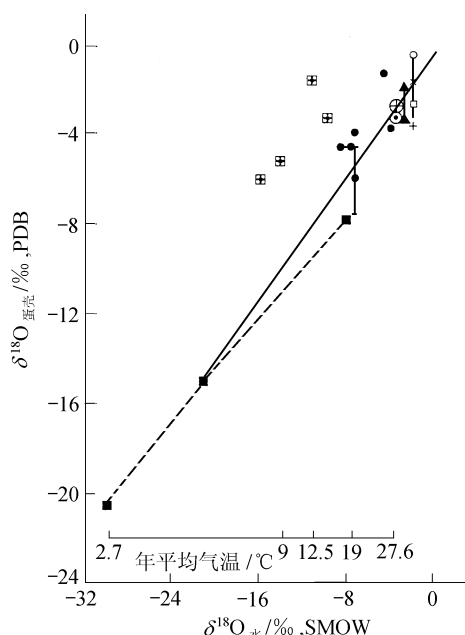


图 3 现生鸟类和爬行类蛋壳与其生活区水的氧同位素组成与年平均气温的关系

○示 Emu; ×示 Peacock; +示 Crocodile; □示 Home Lizard; ▲示 Chicken; ⊕, ⊙示来自 Delat 的 Crocodile; ●示 Erben 等人 1979 年资料; □示 Deviant 实验资料;

■示 Folinsbee 等人 1970 年资料

的 $d^{13}\text{C}$ 值发生了变化。

根据碳同位素比与光合作用对环境条件的适应性研究, 植物的 $d^{13}\text{C}$ 值可反映大气 CO_2 浓度及 d_a 变化^[16~18]。例如 C_3 植物生长于富含 CO_2 的环境中, 其 $d^{13}\text{C}$ 明显高于 -27‰ ^[19]。最近 Penuelas 等人^[20]对近 300 年来生长在西班牙 Catalonia 地区 12 种 C_3 植物的 $d^{13}\text{C}$ 分析, 发现从 18 世纪 50 年代至 20 世纪 80 年代, 这些植物的 $d^{13}\text{C}$ 值由平均 -25.8‰ 下降到 -26.4‰ , 而在这期间大气中 $d^{13}\text{C}$ 值 d_a 也由 -6.4‰ 下降至 -7.9‰ , 表明这些植物 $d^{13}\text{C}$ 的变化与大气中 CO_2 浓度升高的因果关系。林植芳等人^[21]对广东省鼎湖山自然保护区马尾松年轮 $d^{13}\text{C}$ 的分析也证明, 空气 CO_2 浓度的增加改变了 $d^{13}\text{C}$ 值的年际变化。

虽然我们不能直接证明蛋壳 $d^{13}\text{C}$ 值和大气 CO_2 浓度变化的因果关系, 但从以上的分析有理由认为, 上述 CGY-CGD 和 CGT-CGF 两个剖面恐龙蛋壳 $d^{13}\text{C}$ 值相对亏损的变化趋势可能间接反映了 K/T 交界过渡期间出现过大气 CO_2 浓度的持续升高。这一分析结果与 McLean^[22~24]提出的 K/T 交界过渡期间由于印度德干特拉普斯火山大规模喷发引起全球大气 CO_2 浓度增加而产生的温室效应相一致。

致谢 写作过程中曾得到中国科学院华南植物研究所林植芳教授的许多帮助, 作者特此致谢。

由表 1 和 2 可以看出, CGY-CGD 剖面蛋壳 $d^{13}\text{C}$ 值在 -8.74‰ ~ -11.60‰ 之间, 变化幅度较小, 在 3‰ 左右。CGT-CGF 剖面的蛋壳 $d^{13}\text{C}$ 值在 -8.37‰ ~ -11.09‰ 之间, 与前者非常相似。这种均一性反映了这些恐龙以相似的植物类群作为食物来源。如上所述, 考虑到因新陈代谢的作用富集 16‰ , 那么, 上述这两个剖面蛋壳 $d^{13}\text{C}$ 的变化范围可能说明, 由其代表的恐龙以 $d^{13}\text{C}$ 为 -24.3‰ ~ -27.6‰ 的 C_3 型植物作为主要食物来源。

值得指出的是, 上述这两个剖面蛋壳 $d^{13}\text{C}$ 从下到上都显示出由相对富集向相对亏损的变化趋势。在 CGY-CGD 剖面中, 从 CGY 的 141 m 往上至 CGD 的 6 m 的一系列蛋壳样品, 其 $d^{13}\text{C}$ 值变化于 -8.74‰ ~ -9.88‰ 之间, 平均 -9.17‰ 。从 CGD 的 10 m 往上越过 K/T 界线层直至坪岭组 and 上湖组分界线的 CGD 的 161 m, $d^{13}\text{C}$ 值变化于 -9.24‰ ~ -11.60‰ 之间, 平均 -10.38‰ , 相对亏损 1.2‰ 。CGT-CGF 剖面蛋壳 $d^{13}\text{C}$ 值由下到上也显示出相似的变化趋势, 在 CGT 各层的蛋壳 $d^{13}\text{C}$ 平均为 -9.36‰ , 而在其上的 CGF 各层的蛋壳 $d^{13}\text{C}$ 平均为 -10.75‰ , 相对亏损 1.4‰ 。这种变化趋势可能反映了这些恐龙原来主要食用的 C_3 植物中

参 考 文 献

- 1 赵资奎, 毛雪瑛, 柴之芳, 等. 广东南雄盆地白垩系-第三系(K/T)交界恐龙蛋壳的铍丰度异常. 中国科学, D 辑, 1998, 28(5): 425 ~ 430
- 2 Erben H K, Ashraf A R, Bohm H, et al. Die Kreide/Tertiar in Nanxiong-Becken (Kontinentalfazies, Sudostchina). Erdwiss Forsch Akad Wiss Lit mainz Bd, 1995, 32: 1 ~ 245
- 3 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(2): 141 ~ 189
- 4 赵资奎. 广东南雄恐龙蛋化石的显微结构(I)——兼论恐龙蛋化石的分类问题. 古脊椎动物与古人类, 1975, 13(2): 105 ~ 117
- 5 赵资奎, 叶 捷, 李华梅, 等. 广东南雄盆地白垩系-第三系交界恐龙绝灭问题. 古脊椎动物学报, 1991, 29(1): 1 ~ 20
- 6 杨卫东, 陈南生, 倪师军, 等. 白垩纪红层碳酸盐岩和恐龙蛋壳碳氧同位素组成及环境意义. 科学通报, 1993, 38(23): 2161 ~ 2163
- 7 Zhao Z K. Structure, formation, and evolutionary trends of dinosaur eggshell. In: Kobayashi I, Mutvei H, Sahni A, eds. Structure, Formation and Evolution of Fossil Hard Tissues. Tokyo: Tokai Univ Press, 1993. 195 ~ 212
- 8 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
- 9 Folinsbee R E, Fritz P, Krouse H R, et al. Carbon-13 and oxygen-18 in dinosaur, crocodile and bird eggshells indicate environmental conditions. Science, 1970, 168: 1353 ~ 1355
- 10 Erben H K, Hoefs J, Wedpohl K H. Paleobiological and isotopic studies of eggshells from a declining dinosaur species. Paleobiology, 1979, 5(4): 380 ~ 414
- 11 Sarkar A, Bhattacharya S K, Mohabey D M. Stable-isotope analyses of dinosaur eggshells: Paleoenvironmental implications. Geology, 1991, 19: 1 068 ~ 1 071
- 12 林植芳. 稳定性碳同位素在植物生理生态研究中的应用. 植物生理学通讯, 1990, 3: 1 ~ 6
- 13 Percy R W, Ehleringer J. Comparative ecophysiology of C₃ and C₄ plants. Plant Cell and Environment, 1984, 7: 1 ~ 13
- 14 von Schirnding Y, Van der Verwe N J, Vogel J C. Influence of diet and age on carbon isotope ratios in ostrich eggshell. Archaeometry, 1982, 24: 3 ~ 20
- 15 Schaffner F C, Swart P K. Influence of diet and environmental water on the carbon and oxygen isotopic signatures of seabird eggshell carbonate. Bulletin of Marine Science, 1991, 48: 23 ~ 38
- 16 Keeling C D, Mook W G, Tans P P. Recent trends in the ¹³C/¹²C ratio of atmospheric carbon dioxide. Nature, 1979, 277: 121 ~ 122
- 17 Francey R J, Farquhar G D. An explanation of ¹³C/¹²C variations in tree rings. Nature 1982, 297: 28 ~ 31
- 18 Stuiver M, Braziunas T F. Tree cellulose ¹³C/¹²C isotope ratios and climatic change. Nature, 1987, 328: 58 ~ 60
- 19 Osmond C B, Winter K, Ziegler H. Functional significance of different pathways of CO₂ fixation in photosynthesis. In: Lango O L, et al. eds. Encyclopedia Plant Physiology. New Series. Berlin, Heideberg, New York: Springer-Verlag, 1982. 12B: 480 ~ 547
- 20 Penuelas J, Azcon-Bieto J. Changes in leaf ¹³C of herbarium plant species during the last 3 centuries of CO₂ increase. Plant, Cell and Environment, 1992, 15: 485 ~ 489
- 21 林植芳, 梁 春, 彭长连, 等. 鼎湖山地区人类活动对马尾松年轮 ¹³C/¹²C 的影响. 生态学报, 1997, 17(2): 124 ~ 132
- 22 McLean D M. Deccan Traps mantle degassing in the terminal Cretaceous marine extinctions. Cretaceous Research, 1985, 6: 235 ~ 259
- 23 McLean D M. Impact winter in the global K/T extinctions: no definitive evidences. In: Levine J S, ed. Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications. Cambridge: The MIT Press, 1991. 493 ~ 508
- 24 McLean D M. K-T transition greenhouse and embryogenesis dysfunction in the dinosaurian extinctions. Journal of Geological Education, 1995, 43: 517 ~ 528