

# 四川开江恐龙骨骼化石矿物组分分离 和微量元素组合的研究

张玉光 李 奎 蔡开基

(成都理工学院古脊椎动物研究室)

**[内容提要]** 文章详述了恐龙骨骼化石矿物组分的化学分离方法,同时对开江恐龙骨骼化石样品进行了分离和中子活化分析,通过对测试结果进行生物地球化学的对比研究,发现恐龙骨骼化石中某些微量元素异常明显,并推断其中的砷(As)、铬(Cr)、铷(Rb)的高异常含量和锌(Zn)的低异常含量极有可能是导致开江恐龙动物群集群死亡的原因之一。

**关键词** 矿物组分 化学分离 微量元素组合 恐龙骨骼化石 四川开江

近年来,国内外一些学者借助各种手段对恐龙化石的化学成分进行尝试性研究,试图以此来恢复恐龙时代的古环境或藉以探讨恐龙绝灭之谜,有关这方面的报道也陆续问世。在此基础上,笔者将从开江恐龙骨骼化石微量元素组合研究入手,采用准确度、灵敏度均高的中子活化分析,在分析样品的制备上选择了独特的且有别于传统制样的方法,对骨骼化石样品经化学方法处理,以期将原生矿物与次生矿物分离测试,为探求恐龙生命规律找到新的线索。

开江恐龙动物群位于开江县城东北约10km,化石点有马鞍坪和老山沟两处。该动物群个体数量丰富,种类除大量蜥脚类外,还有虚骨龙和肉食龙与之共存(有成年个体和未成年个体),并有同期伴生动物。化石保存在中侏罗统下沙溪庙组(J<sub>2</sub>xs)的紫红色粉砂质泥岩(马鞍坪化石点)和黄灰绿色粉砂岩(老山沟化石点)中。

## 1 开江恐龙骨骼化石的矿物组分和组构

### 1.1 开江恐龙骨骼化石的矿物组分

对现代脊椎动物及古代脊椎动物的骨骼、骨骼化石矿物组分的研究,前人已作过大量工作(表1),业已证明现代脊椎动物骨骼内有大量造骨有机基质和无机物质。无机物质主要包括磷酸盐、碳酸盐等矿物和微量元素两部分。古代脊椎动物骨骼中的有机质分解殆尽,仅保留有无机物质,并以磷酸盐占多数和微量元素共同组成<sup>[1]</sup>。几乎所有脊椎动物的骨组织都由相同化学成分和基本结构单元组成,所不同的是微观形态结构上有变化。恐龙骨骼矿物成分是由胶原纤维组成的骨基板、嵌在骨基板中的骨细胞与胶原纤维紧密结合的无机成分磷灰石共同构成。在石化过程中,恐龙骨骼中的有机成分,包括骨细胞和血管等,都趋于降解,其间隙被次生矿物充填<sup>[2]</sup>。开江恐龙骨骼化石由碳氟磷灰石和结晶方解石构成,方解石属次生

① 本文1998年1月9日收稿。

② 地质行业科学技术发展基金资助项目(项目编号:959614)成果之一。

交代作用充填于骨组织腔隙和有机基质部位。关于碳氟磷灰石的成因是在埋藏成岩过程中,骨骼生前的碳磷灰石、羟磷灰石等随埋藏升温而引起其中 $\text{CO}_2$ 丢失,导致磷灰石折光率、晶体参数、形态、结晶度发生系统变化,向碳氟磷灰石完整系列演化。在晶格结构上,则缘于碳氟磷灰石六方晶格中 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{F}^-$ 排列紧密, $\text{F}^-$ 距Ca三角形近而牢固结合,而羟磷灰石却因 $\text{OH}^-$  (0.14~0.16nm)比 $\text{H}^-$  (0.133nm)大, $\text{OH}^-$ 离Ca三角形远,故而形成稳定的碳氟磷灰石<sup>[3]</sup>(图1)。因此,开江恐龙骨骼化石中矿物组分包括原生磷灰石和次生方解石,以及内含的微量元素。

表1 脊椎动物硬组织的无机物组成  
Table 1 Inorganic compositions of the hard parts of the ancient and modern vertebrates from Kaijiang, Sichuan

| 生物门类 | 组织名称或部位                | 无机物 |
|------|------------------------|-----|
| 脊椎动物 | 耳石、卵壳                  | 碳酸钙 |
| 脊椎动物 | 龄釉质、象牙质、水泥质、爪角、盾鳞、软骨硬骨 | 磷酸钙 |

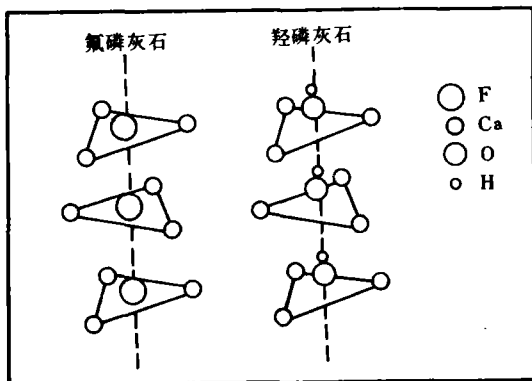


图1 氟、羟磷灰石原子结构简图  
(据刘魁梧,1989,略有修改)

Fig. 1 Sketches to show the atomic configuration of fluorapatite and hydroxylapatite in the dinosaur skeletons from Kaijiang, Sichuan (modified from Liu Kuiwu, 1989)

## 1.2 开江恐龙骨骼化石的组构

对开江恐龙肢骨化石磨制的光片和薄片观察后,发现其骨骼组织结构异常清楚,除最外层骨膜在形成化石时脱落破损外,其内部组构完全可与现代脊椎动物的骨骼组构相对比,并同样是由外侧稍薄的骨密质层和内侧较厚的骨松质层及中空的髓腔组成(图2)。

骨密质层:由圆形和卵圆形被方解石充填的哈佛氏管与磷灰石质的圆柱状骨板组成。圆柱状骨板呈层状环绕哈佛氏管排列,哈佛氏管同绕其同心纤维状分布的圆柱状骨板组成哈佛氏系统<sup>[4]</sup>,在骨密质层外侧成层环绕的柱状骨板系间可见弧形的休止线(图3),骨密质层的厚度往往因个体种属、年龄不同而出现差异。

骨松质层、髓腔:在镜下见到骨松质层形态极不规则,是由形状各异、孔径较大的髓隙和围绕在周围、似海绵状连接的骨小梁相互交错而成<sup>[4]</sup>,髓隙已被次生方解石及细小砂粒、粘土充填。髓腔是中空的,同样为次生方解石充填(图4)。

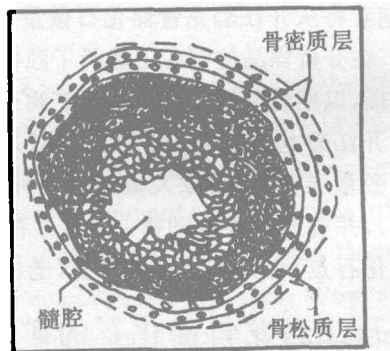


图2 恐龙骨骼横截面结构示意图

Fig. 2 Sketch to show the cross section of the dinosaur skeletons from Kaijiang, Sichuan

## 2 开江恐龙骨骼化石矿物组分的分离、分析测试

### 2.1 开江恐龙骨骼化石矿物组分的分离

迄今为止,国内外有关脊椎动物骨骼化石微量元素的分析测试报道,均未提及到对原生生物成因矿物和次生交代矿物的分离,全是直接在化石上取样、测试,进而从微量元素的组合特征研究其对生命活动的影响作用,无法证明微量元素是恐龙生前还是死后进入体内,此

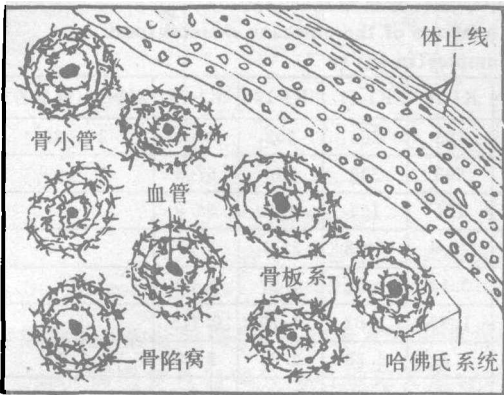


图3 开江恐龙胫骨骨密质层示意图

Fig.3 Sketch to show the architectures of the compact bone in tibia of dinosaurs from Kaijiang, Sichuan

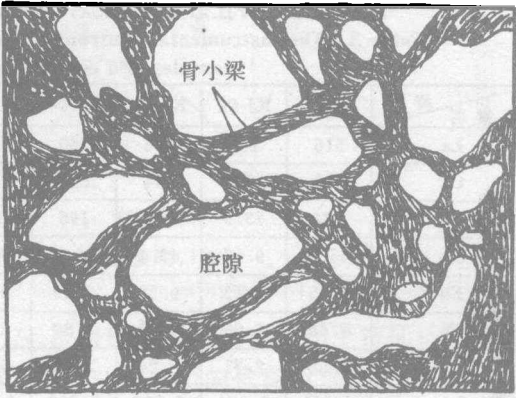


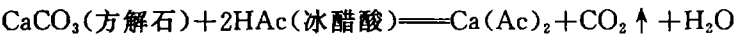
图4 开江恐龙股骨骨松质层示意图

Fig.4 Sketch to show the architectures of the cancellus bone in femur of dinosaurs from Kaijiang, Sichuan

举缺乏一定的科学性是显而易见的。因此,笔者在大量实验观察的基础上,探索性地寻找一种较为科学的分离手段,并且此法对原生生物成因矿物结构及内部化学成分无丝毫破坏和影响,具体方法及过程如下:

1. 在化石选定部位取新鲜样品,样体大小一般为3mm×3mm×3mm,然后用蒸馏水浸泡、冲洗,去掉表面杂物。

2. 将清洗样稍干燥后掷于盛放12.5%(体积比)冰醋酸的烧杯中<sup>[5]</sup>,浸泡时间在6~8h(当样品块体大时,时间应延长),将骨骼化石内次生方解石彻底溶解。反应方程式为:



3. 将浸泡处理样用镊子小心从烧杯中取出,再用蒸馏水浸泡冲洗,除掉残留物液,并低温烘干。

利用此法处理的恐龙骨骼化石样品在镜下观察组织结构清晰完好,且无次生方解石滞留。所以,这种对骨骼化石分离的方法是行之有效的。

2.2 开江恐龙骨骼化石分析测试

笔者依据上述方法对开江恐龙动物群中恐龙个体取样、处理(表2),同时粉碎、研磨(用玛瑙乳钵)、过筛(200目)、装样,最后进行仪器中子活化分析(INAA),分析结果见表3。

表2 开江恐龙骨骼化石及围岩取样表

Table 2 Sampling sites of the dinosaur skeletal fossils and country rocks in Kaijiang, Sichuan

| 产 地 | 样 号   | 取 样 部 位 | 层 位                      | 备 注        |
|-----|-------|---------|--------------------------|------------|
| 开江  | KJ-01 | 右肱骨远端   | 下沙溪庙组(J <sub>2</sub> xs) | 蜥脚类        |
| 开江  | KJ-02 | 左肱骨远端   | 下沙溪庙组(J <sub>2</sub> xs) | 蜥脚类        |
| 开江  | KJ-03 | 左尺骨近端   | 下沙溪庙组(J <sub>2</sub> xs) | 蜥脚类        |
| 开江  | KJ-04 | 左胫骨近端   | 下沙溪庙组(J <sub>2</sub> xs) | 蜥脚类        |
| 开江  | KJ-08 | 围 岩     | 下沙溪庙组(J <sub>2</sub> xs) | 长石石英砂岩     |
| 开江  | KJ-09 | 右肱骨远端   | 下沙溪庙组(J <sub>2</sub> xs) | KJ-01 经分离样 |
| 开江  | KJ-10 | 左肱骨远端   | 下沙溪庙组(J <sub>2</sub> xs) | KJ-02 经分离样 |
| 开江  | KJ-11 | 左尺骨近端   | 下沙溪庙组(J <sub>2</sub> xs) | KJ-03 经分离样 |
| 开江  | KJ-12 | 左胫骨近端   | 下沙溪庙组(J <sub>2</sub> xs) | KJ-04 经分离样 |

表3 开江恐龙骨骼化石、围岩样品中子活化分析结果( $w_B/10^{-6}$ )  
Table 3 The instrumental neutron activation analyses of the dinosaur skeletal fossil samples and country rock samples(in  $w_B/10^{-6}$ )

| 元素名        | 样号 | KJ-01 | KJ-02 | KJ-03 | KJ-04 | KJ-09 | KJ-10 | KJ-11 | KJ-12 | KJ-08 | 沉积岩(碎屑岩) |
|------------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| La         |    | 516   | 150   | 386   | 360   | 297   | 193   | 265   | 303   | 30.9  | 10~20    |
| Ce         |    | 819   | 207   | 644   | 526   | 390   | 293   | 370   | 336   | 67.8  | —        |
| Nd         |    | 294   | 73.5  | 276   | 195   | 160   | 131   | 185   | 157   | 36.8  | —        |
| Sm         |    | 45.0  | 9.47  | 43.4  | 36.9  | 34.1  | 22.5  | 34.8  | 28.7  | 5.97  | —        |
| Eu         |    | 10.5  | 2.53  | 9.38  | 5.00  | 5.99  | 3.13  | 7.01  | 4.31  | 1.09  | —        |
| Tb         |    | 4.66  | 1.05  | 4.09  | 2.30  | 3.08  | 1.33  | 3.02  | 1.70  | 0.715 | —        |
| Yb         |    | 6.58  | 2.71  | 8.24  | 2.65  | 5.73  | 3.32  | 5.38  | 2.74  | 2.28  | 4.0      |
| Lu         |    | 0.766 | 0.384 | 0.793 | 0.380 | 0.680 | 0.270 | 0.540 | 0.340 | 0.340 | —        |
| As         |    | 157   | 54.9  | 115   | 84.7  | 114   | 69.2  | 79.2  | 78.4  | 19.2  | 1.0      |
| Ba         |    | 509   | 469   | 420   | —     | 535   | —     | 289   | 43    | 621   | 100~200  |
| $w(Ca)/\%$ |    | 34.74 | 32.87 | 34.51 | 37.54 | 41.14 | 29.90 | 33.05 | 39.09 | 10.77 | 2.68     |
| Co         |    | 2.6   | 5.2   | 0.9   | 3.2   | 7.6   | 6.7   | 2.9   | 3.9   | 9.7   | 0.3      |
| Cr         |    | 23    | 17.6  | 16.5  | 14.8  | 30.8  | 15.0  | 17.5  | 11.9  | 77.2  | 3500     |
| Cs         |    | 1.5   | 1.2   | 0.6   | 1.0   | 2.0   | 2.3   | 0.8   | —     | 4.3   | 0.1~0.9  |
| $w(Fe)/\%$ |    | 0.526 | 0.605 | 0.272 | 0.167 | 1.00  | 0.837 | 0.360 | 0.177 | 1.28  | 2.8      |
| Hf         |    | —     | 0.6   | —     | —     | 1.5   | 1.0   | 0.37  | —     | 4.4   | 3.9      |
| $w(K)/\%$  |    | 0.241 | 0.57  | 0.103 | —     | 0.134 | 0.651 | 0.174 | 0.090 | 1.457 | 1.32     |
| $w(Na)/\%$ |    | 0.160 | 0.079 | 0.101 | 0.151 | 0.342 | 0.160 | 0.160 | 0.118 | 1.386 | 0.92     |
| Rb         |    | —     | 13.4  | —     | —     | 27    | 28    | 18.9  | —     | 72    | 60       |
| Sc         |    | 2.0   | 3.1   | 1.7   | 0.76  | 4.0   | 4.1   | 2.03  | 0.83  | 7.7   | 1        |
| Th         |    | 0.7   | 1.6   | —     | —     | 3.2   | 2.9   | 0.91  | —     | 7.6   | 1.7      |
| U          |    | 135   | 256   | 184   | 532   | 107   | 303   | 156   | 439   | 15.9  | 0.45     |
| Zn         |    | 44    | 86    | 47    | 60    | 90    | 103   | 74    | 32    | 126   | 16       |
| Zr         |    | —     | —     | —     | —     | 267   | —     | —     | —     | —     | 220      |

3 开江恐龙骨骼化石微量元素组合特征

生物体内化学元素按对生物体所产生的生物功能和生物反应分为生命营养元素(包括11种生命结构元素和17种必须微量生命元素)与生命毒性元素(非必须微量生命元素)<sup>[6]</sup>(表4)。11种生命结构元素在骨骼中仅Ca和P是骨骼的主要成分,其余则多存在生物活细胞中。必须生命微量元素在协调生物体正常代谢、调节、控制机体平衡起着积极作用。生命毒性元素在生物体中基本不需要,往往对生物体产生不同程度的危害。上述诸多元素中,特别是金属元素,其离子浓度的高低对生物体的影响作用是截然不同的(图5)。

表4 生命元素分类表  
Table 4 Classification of life elements

| 生 命 营 养 元 素               |                                                     | 生 命 毒 性 元 素                                          |
|---------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 生命结构元素                    | 生命必须微量元素                                            |                                                      |
| H、C、O、N、P、S、K、Ca、Na、Mg、Cl | Fe、Cu、Zn、Cr、Co、V、Mn、Mo、Se、Ni、<br>Sn、F、Sc、Ti、B、Al、Ge | Cd、Hg、Pb、U、Th、Tl、Li、Rb、Cs、Be、<br>Sr、Ba、As、Au、Ag、REE等 |

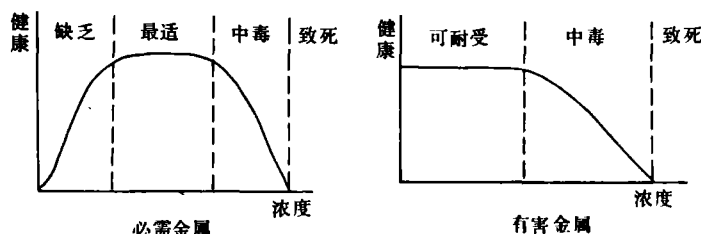


图5 生命金属元素浓度与健康关系(据沈敦瑜,1993)

Fig. 5 The correlation of the health and concentration of life metallic elements(after Shen Dunyu,1993).

观察表3的分析结果,可初步发现恐龙骨骼化石、围岩微量元素组合有如下特征:

未分离恐龙骨骼和分离后恐龙骨骼:对比同一样品分离前后的数据组合,可见钡(Ba)、铀(U)、砷(As)元素经化学分离的样品含量普遍降低,而钴(Co)、铯(Cs)、铪(Hf)、铷(Rb)、钍(Th)、锌(Zn)元素在分离样品中的含量则增高。

围岩:参考一般沉积岩(碎屑岩)中微量元素组分分析测试结果,砷(As)、钙(Ca)、钴(Co)、铀(U)、钡(Ba)、锌(Zn)元素在围岩中含量较高,而铬(Cr)、锆(Zr)则远低于一般沉积岩中的平均含量。

将开江恐龙骨骼化石微量元素的组合与现代脊椎动物、围岩相对比研究,笔者认为以下几种元素的异常值得深入探讨。

钡(Ba)含量的高异常:钡是一种对生命有害的微量元素,少量钡盐可引起骨髓机能亢进,大量则会引起抑制,同时也可使骨骼中的钙磷出现代谢紊乱<sup>[7]</sup>。从分析结果看,经处理的四个骨骼化石样中Ba含量明显低于其对应的未处理样。未处理样Ba含量范围 $w(\text{Ba})$ 为 $420 \times 10^{-6} \sim 509 \times 10^{-6}$ ,说明钡高异常很可能是次生方解石交代的带人物,同时钡易与钙发生类质同像替代,对比围岩中钡含量为 $621 \times 10^{-6}$ ,更有力说明后期成岩作用过程中,生物体(恐龙)埋藏于一个高钡的环境中,足以使骨骼化石中钡呈现高异常值。因此,尽管骨骼化石中钡含量高出现代陆生动物,如牛、马、熊猫4~5倍,但没有充足理由证实恐龙生前因体内过高钡含量而中毒。

铀(U)含量的高异常:铀是具剧毒和强烈放射性的元素,对生物体危害极大<sup>[7]</sup>。据分析知,现代牛、大熊猫、犀牛、马含量 $w(\text{U})$ 为 $(0 \sim 2.1) \times 10^{-6}$ ,而开江恐龙骨骼化石中 $w(\text{U})$ 含量高达 $107 \times 10^{-6} \sim 532 \times 10^{-6}$ ,超出现代陆生动物平均含量 $0.013 \times 10^{-6}$ 约4~5个数量级,并且在分离样品与未分离样品中的铀含量无明显差别,普遍显高异常。同时对比开江围岩样品及自贡等地的恐龙骨骼化石、植物化石样品,发现恐龙骨骼化石内铀含量均显高异常,而围岩、植物化石(硅化木)中铀含量则偏低,植物化石中 $w(\text{U})$ 小于 $4 \times 10^{-6}$ 。因此,若当时环境严重遭铀污染,则在植物内明显显现出来,分析表明这种可能性不大,因而由铀导致食物中毒也难以成立。现代地球化学研究证明<sup>[8]</sup>,铀的性质活泼、易迁移,且易在有机物中富集,具强烈的亲骨性。鉴于此,笔者认为恐龙骨骼化石中铀超高异常应属恐龙死亡后骨骼中有机基质对围岩中的铀长期吸附积累所致,从而也造成骨骼中有机基质因分解被方解石充填后,次生方解石中也有较高铀异常。

铬(Cr)含量的高异常:铬是促进各类代谢不可少的元素。通过对现代陆生动物研究,其生命的 $w(\text{Cr})$ 平均有效含量为 $0.07 \times 10^{-6}$ ,而测试现代牛、犀牛、大熊猫、马的 $w(\text{Cr})$ 值范围是 $(0 \sim 2.2) \times 10^{-6}$ ,含量因个体、部位略有差异。而开江恐龙骨骼化石中 $w(\text{Cr})$ 含量却在

$11.9 \times 10^{-6} \sim 30.8 \times 10^{-6}$ , 超过正常平均值, 意味着对生命将造成危害, 而过量的铬又具强烈毒性,  $\text{Cr}^{6+}$  的毒性是  $\text{Cr}^{3+}$  毒性 1000 倍, 而  $\text{Cr}^{3+}$  又造成体内血液中的蛋白沉淀。对比恐龙骨骼化石样品和经分离处理样, 原生物磷灰石中铬的含量也为高异常, 同未处理样含量差距不明显, 而围岩中  $w(\text{Cr})$  含量为  $77.2 \times 10^{-6}$ , 间接参照自贡硅化木化石  $w(\text{Cr})$  含量仅为  $5.5 \times 10^{-6}$ , 远不及围岩中高。因此, 恐龙骨骼化石中高铬含量通过食物摄入的可能性较小。现代研究认为, 铬对环境的污染多发生于水源污染, 由这种污染渠道进入恐龙体内, 从而造成骨骼内铬的高异常, 这正与水成沉积的围岩有较高铬含量相吻合。

**铷(Rb)含量的高异常:** 铷是一种极活泼的生命毒性元素, 对调节生物体的血液循环方面起着一定作用。在现代动物, 如牛、熊猫、犀牛、马骨骼中  $w(\text{Rb})$  含量为  $(0 \sim 3) \times 10^{-6}$ , 而恐龙骨骼化石中含量为  $13.4 \times 10^{-6} \sim 28 \times 10^{-6}$ , 特别是经处理分离样品中铷的含量更是显著, 说明原生物磷灰石中铷含量高, 可能是恐龙生前铷高含量的证据。对比同一层位自贡硅化木中  $w(\text{Rb})$  含量达到  $12 \times 10^{-6}$ , 围岩中  $w(\text{Rb})$  含量高达  $72 \times 10^{-6}$ , 因此通过食物、饮水这种途径造成恐龙体内聚铷的可能性极大, 而过量的铷在体内又常常取代体内钾, 导致生物体缺钾病变, 使细胞功能紊乱, 同时也可引发癌变。无独有偶, 在开江恐龙骨骼化石中  $w(\text{K})$  的含量为  $0.09 \times 10^{-6} \sim 0.65 \times 10^{-6}$ , 还不及陆生动物正常限值  $0.74 \times 10^{-6}$ , 从这一点看, 是否也可说明恐龙生前体内因含铷过高, 又导致低钾而致病, 值得深思。

**砷(As)含量的超高异常:** 砷作为一种毒性较强的有害生命元素。在开江恐龙骨骼化石中含量超高异常, 多数  $w(\text{As})$  含量在  $100 \times 10^{-6}$  左右, 而现代牛、大熊猫、马骨骼中  $w(\text{As})$  含量范围是  $0.86 \times 10^{-6} \sim 12.4 \times 10^{-6}$ , 恐龙骨骼化石中含量高出现代陆生动物平均含量  $0.2 \times 10^{-6}$  约 2~3 个数量级。观察对比恐龙骨骼化石样与对应的分离处理样砷的变化, 可见经分离样中砷含量较之未分离样略低, 不仅说明生物成因磷灰石中砷含量高, 同时经次生交代充填的方解石中砷也有较高的迹象。结合元素砷(As)的化学性质, 砷易于有机蛋白质中的巯基反应, 甚至于取代生物体中的磷酸盐, 因此, 次生方解石中砷高含量的解释应是: 恐龙死亡后骨骼中大量有机质吸收砷, 之后有机质分解, 而次生方解石则充填占据其位置, 形成了高砷方解石。若把骨骼化石中砷含量的超高异常归咎于死后吸附, 那么围岩中的砷异常源又何在? 围岩中砷含量虽高于一般沉积岩, 但无法想象在骨骼中是何以如此富集。同时, 借鉴自贡恐龙骨骼化石与围岩、植物化石砷含量情况, 也与开江有同样规律, 骨骼化石砷含量远高于围岩, 而植物化石中  $w(\text{As})$  含量为  $4632 \times 10^{-6}$ , 如此之高砷含量的植物使恐龙因食用而中毒又何尝不可能。因此, 笔者认为砷含量的超高异常可能是危及开江恐龙生命的元素之一。

**锌(Zn)含量的低异常:** 锌是生命中众多组织的组成成分, 特别是保证骨骼正常生长发育等不可少的重要元素。现代研究证明, 陆生动物体内  $w(\text{Zn})$  含量  $160 \times 10^{-6}$  才能达到正常新陈代谢的需求。而对开江恐龙骨骼化石分析后发现, 未处理样品  $w(\text{Zn})$  含量为  $44 \times 10^{-6} \sim 86 \times 10^{-6}$ , 经分离后略有增加,  $w(\text{Zn})$  含量达  $74 \times 10^{-6} \sim 103 \times 10^{-6}$ , 表明生物成因磷灰石中 Zn 含量高于次生交代方解石。尽管如此, 恐龙生前体内含锌量也还不及现代陆生动物体内的含量, 表现出明显的锌含量低异常, 而缺锌则会引起代谢紊乱、毒血病以及生长发育停止, 同时, 锌的极重要作用是对砷有极强的解毒作用, 加之开江恐龙骨骼化石中砷的超高异常, 而体内锌含量远不能满足这种生理需求, 长期缺锌的体内环境对恐龙生存有不利影响是不言而喻的。

**稀土元素(REE)的高异常:** 稀土元素是毒性较强, 又具致癌性的微量元素。现代陆生动

物体体内 $w(\text{REE})$ 平均含量在 $1 \times 10^{-6}$ 左右,而现代牛、大熊猫、马骨骼经测试 $w(\Sigma \text{REE}) < 7 \times 10^{-6}$ ,但开江恐龙骨骼化石中稀土元素含量 $w(\Sigma \text{REE})$ 为 $500 \times 10^{-6} \sim 1700 \times 10^{-6}$ ,含量异常惊人。最显著的异常是其中的轻稀土元素(LREE)较为富集,Ce为高峰元素,这一现象在别的地区,如自贡、广元等地也存在。而经分离处理后的恐龙骨骼样稀土元素含量显著降低,表明高异常的稀土元素并非恐龙生前摄入,死后的吸附是一个不可忽视的来源。再分析围岩中稀土元素含量 $w(\Sigma \text{REE}) = 145.99 \times 10^{-6}$ ,数量不仅低于一般沉积岩含量的 $184.63 \times 10^{-6}$ ,同时更低于地壳的平均含量 $200 \times 10^{-6}$ ±,因此更有力地说明恐龙生前环境介质中稀土元素的低含量不致使恐龙中毒。同时借助自贡同层位的植物化石的稀土含量 $w(\Sigma \text{REE}) = 36.02 \times 10^{-6}$ ,跟现代植物稀土含量 $10 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ 相比,虽属其列,但偏低。所以,恐龙骨骼化石内稀土元素的高异常应是死后生物体内有机质的长期缓慢吸收的结果。稀土元素,特别是轻稀土元素正具备这一特性。研究证明,稀土元素具亲骨性,磷灰石以强烈富集稀土元素中的轻稀土元素为特征,岩石中磷灰石含量的多少,是影响REE含量,特别是影响LREE含量的主要因素,这与上述的分析结论正好不谋而合。

## 4 结论

通过上述对开江恐龙骨骼化石分离方法和样品微量元素组合特征的阐述、分析,笔者认为用此种分离方法来研究恐龙骨骼化石元素组合,这对深入探讨恐龙方面的问题迈进关键一步。并进一步分析开江恐龙动物群微量元素组合特征,该恐龙动物群集群死亡原因应是:①钡、铀、稀土元素的高异常极可能是恐龙死后埋藏成岩得以富集,与该恐龙动物群死亡无必然因果关系。②砷、铬、铷的高异常,锌含量的低异常应是恐龙生前食物链、环境介质的影响而造成的,并直接危害到恐龙的生命,以致死亡。

成都理工学院博物馆为本文提供了宝贵的材料,成都理工学院应用核技术研究所童纯菡教授及葛良全、杨凤根、熊寿萍等对样品进行中子活化分析,笔者在此表示衷心的感谢。

## 参 考 文 献

- 1 王将克、陈水挟等. 氨基酸生物地球化学. 北京:科学出版社,1991,P27~31,P33~35
- 2 Chinsamy A and Dodson P. Inside a dinosaur bone. Am. Sci., 1995, 83: 174-180
- 3 刘魁梧. 成岩作用中磷灰石矿物的演变. 地质学报, 1989, Vol. 63, No. 4, P319-320
- 4 夏文杰、李秀华. 恐龙埋藏环境及岩相古地理特征. 成都:四川科学技术出版社, 1988, P83~84
- 5 A. E. 里克森著(史庆礼等译). 动物化石的修理与保存. 北京:中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 1979, P199~200
- 6 冯子道、安智珠. 生命元素. 成都:四川教育出版社, 1989, P55~109
- 7 吴香尧. 生物地球化学概论. 成都:成都科技大学出版社, 1993, P50~82
- 8 张景华、周瑶琪等. 自贡恐龙骨骼中U的超高异常的发现及其意义. 科学通报, 1993, Vol. 38, No. 16, P1500~1501

## **The chemical separation of mineral compositions and trace element assemblages from the dinosaur skeletal fossils in Kaijiang, Sichuan**

Zhang Yuguang   Li Kui   Cai Kaiji

*Laboratory of Vertebrate Palaeontology, Chengdu University of Technology*

### **ABSTRACT**

One chemical separation method used in mineral composition separation of the dinosaur skeletal fossils is introduced in detail in this paper, and the chemical separation and instrumental neutron activation analysis (INAA) of the dinosaur skeletal fossils from Kaijiang, Sichuan have been made. The biogeochemical study of the analytical results shows that the highly anomalous Ba, U and rare earth elements may well result from burial diagenesis of the dead dinosaurs; it should not be responsible for mass extinction of dinosaurs. The high anomalies of As, Cr and Rb elements and low anomalies of Zn element in the fossils should be caused by the food chains and surrounding media, and thus may lead to the mass mortality of the dinosaur faunas in the study area.

**Key words:** mineral composition, chemical separation, trace element assemblage, dinosaur skeletal fossil, Kaijiang in Sichuan