

致谢 对北京市生物医药研究所崔承彬教授在抗癌药物筛选实验中给予的帮助深表谢意。本工作为国家自然科学基金资助项目(批准号:39570464)。

参 考 文 献

- Langcake P, Pryce R J. The production of resveratrol by *Vitis vinifera* and other members of the Vitaceae as a response to infection or injury. *Physiol Plant Pathol*, 1976, 9 (1): 77~86
- Langcake P, Pryce R J. A new class of phytoalexins from grapevines. *Specialia*, 1977, 15 (2): 151~152
- Hain R, Reif H J, Krause E, et al. Disease resistance results from foreign phytoalexin expression in a novel plant. *Nature*, 1993, 361: 153~156
- Jang M, Cai L, Udeani G O, et al. Cancer chemopreventive activity of resveratrol, a natural product derived from grapes. *Science*, 1997, 275: 218~220
- Goldberg D M, Hahn S E, Parkes J G. Beyond alcohol: beverage consumption and cardiovascular mortality. *Clin Chim Acta*, 1995, 237: 155~187
- Siemann E H, Creasy L L. Concentration of the phytoalexin resveratrol in wine. *Am J Enol Vitic*, 1992, 43: 49~52
- Goldberg D M, Yan J, Ng E, et al. A global survey of *trans*-resveratrol concentrations in commercial wines. *Am J Enol Vitic*, 1995, 46(2): 159~165
- 张智清, 姚立红, 侯云德. 含 PrPL 启动子的原核高效表达载体的组建及其应用. *病毒学报*, 1990, 6(2): 111~116
- 李太元, 田颖川, 秦晓峰, 等. 高效抗虫转基因烟草的研究. *中国科学, B 辑*, 1994, 24 (3): 276~282
- Chang S, Puryear J, Cairney J. A simple and efficient method for isolating RNA from pine trees. *Plant Molecular Biology Reporter*, 1993, 11(2): 113~116
- Sambrook J, Fritsch E F, Maniatis T. *Molecular Cloning, a Laboratory Manual*, 2nd ed. New York: Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1989
- 贾盘兴, 蔡金科, 马德钦. *微生物遗传学实验技术*. 北京: 科学出版社, 1992. 104~109
- Subikova V. Resveratrol accumulation in grapevine infected with grapevine vein necrosis disease. *Biologia Plantarum (PRAHA)*, 1991, 33: 287~290
- Romero-Perez A I, Lamuela-Raventos R M, Waterhouse A L, et al. Levels of *cis*- and *trans*-resveratrol and their glucosides in white and rose *Vitis vinifera* vine from Spain. *J Agric Food Chem*, 1996, 44: 2124~2126
- Melchior F, Kindl H. Coordinate- and elicitor-dependent expression of stilbene synthase and phenylalanine ammonia-lyase genes in *Vitis* cv. Optima. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 1991, 288: 552~557

(2000-08-15 收稿, 2000-12-04 收修改稿)

辽西四合屯脊椎动物生存时代: 锆石 U-Pb 年龄证据

王松山^① 王元青^② 胡华光^① 李惠民^③

①中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; ②中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044; ③中国地质科学院天津地质矿产研究所, 天津 300170. E-mail: sshanwang@163.net

摘要 辽西北票市四合屯及其周边地区赋存长毛恐龙及早期鸟类化石的地层时代, 存在晚侏罗世、早白垩世和晚侏罗~早白垩世多种观点. 近年发表的同位素年龄数据也存在较大分歧. 四合屯含脊椎动物化石层位的凝灰岩中锆石 U-Pb 法定年结果为(125.2±0.9) Ma, 锆石强的抗热扰动性及高的 U-Pb 体系封闭温度, 决定了这一年龄值更客观地反映出四合屯脊椎动物生存时代为早白垩世.

关键词 四合屯 脊椎动物 凝灰岩 锆石 U-Pb 定年

近年来, 在辽宁西部北票市四合屯及其周边地区义县组下部湖相沉积夹层中, 发现了丰富的早期鸟类和长羽毛及毛状皮肤衍生物的小型兽脚类恐龙化石^[1~6], 这些发现为研究鸟类起源和早期演化提供了重要线索和依据. 随之而来令人关注的热点之一是: 赋存这些化石的义县组的地层时代和地质年龄. 由于陆相地层对比的困难性, 有关义县组的地层时代, 长期以来存在晚侏罗世^[7,8]和早白垩世^[9~11]的争论. 后来又有学者建议将这套地层暂按侏罗系-白垩系“过渡层”处理. 随着四合屯及周边地区脊椎动物及其他门类化石的不断发现, 又引出了新一轮义县组地层时代的争论. 同样存在晚侏罗世^[1,12,13]、早白

垩世^[14,15]和晚侏罗世-早白垩世^[2,3,16]3种观点. 在辽西义县组年代学研究方面, 也同样存在分歧. 有(137±7)(K-Ar 等时线)和(142.5±4) Ma(Rb-Sr 等时线)的报道^[17]; 也有 115.0~144.0(K-Ar 等时线)、125.4~129.2(Ar-Ar 坪年龄)、119.0~130.0(Rb-Sr 等时线)和 112.0~136.0 Ma(U-Pb 等时线)的报道^[18]; 还有(120.2±0.3)~(123.0±0.3)Ma 的激光 Ar-Ar 测定结果^[19]. 需指出的是, 上述定年标本并非采自四合屯及其周边地区, 标本层位与四合屯脊椎动物化石层位的对比, 尚需做深入研究. Swisher 等人^[20]和罗清华等人^[21,22]分别报道了四合屯-尖山沟地区凝灰岩中透长石和白云母的激光 Ar-Ar 定年结果. 前者给出透长石年龄是

(124.60 ± 0.25)和(124.61 ± 0.2) Ma; 后者给出黑云母的年龄为(145.3 ± 4.4)(平均值)和(147.1 ± 1.8) Ma(反等时线). 无论采用何种地质年表, 上述结果表明, 标本层位分属早白垩世和晚侏罗世, 分歧依然存在. 锆石的 U-Pb 高封闭温度及其地球化学特性, 决定了这种矿物抗地质干扰能力要优于 K-Ar 和 Rb-Sr 体系. 为此, 笔者对凝灰岩中自生锆石进行了 U-Pb 定年, 进而对四合屯含脊椎动物化石层位的归属进行了讨论.

1 地质背景

四合屯含脊椎动物的湖相沉积, 呈北北东向分布在长约 12~14 km, 宽约 4~5 km 的范围内, 化石主要产自四合屯、尖山沟、张家沟、黄半吉沟、团山沟等 10 余个地点^[14]. 图 1 给出了四合屯及周边地区义县组综合地层剖面, 共划为 3 段 9 层, 第 1 段(1 层)

为冲积相粗碎屑岩, 第 2 段(2~4 层)主要由中基性火山熔岩组成, 第 3 段(5~9 层)则由滨-浅湖、半深湖-深湖相砂岩和页岩组成^[4], 综合剖面总厚度 100~120 m^[5]. 第 6 层为四合屯下部化石层, 是含鸟类和带羽毛及毛状皮肤衍生物的小型兽脚类恐龙等脊椎动物化石的层位, 第 8 层为黄半吉沟上部化石层, 主要产鱼类、被子植物、昆虫、叶肢介等化石. YL31 凝灰岩产自四合屯人工发掘剖面, 其层位属文献^[4]中第 18 层的第 6 小层, 相当综合剖面第 6 层. 该凝灰岩呈黄~黄褐色, 层状产出, 具不明显的流动层理, 厚 15~25 cm 不等. 镜下显示, 该岩石呈凝灰结构, 晶屑主要由钾(透)长石、石英、斜长石和黑云母组成, 晶屑粒径多为 0.15~0.25 mm, 少数可达 0.5 mm, 均匀分布. 火山灰已脱玻, 形成黏土矿物雏晶. 副矿物有锆石、磷灰石、褐帘石等.

2 锆石特征及实验结果

从 8 kg 凝灰岩(YL31)中选出约 20 mg 锆石, 在显微镜下观察, 锆石明显分为两类(图 2). A 类锆石: 无色或浅黄色、透明、细长柱状或等轴状, 自形晶. 这类锆石晶面保存完好, 没有熔蚀和磨损的痕迹, 从其

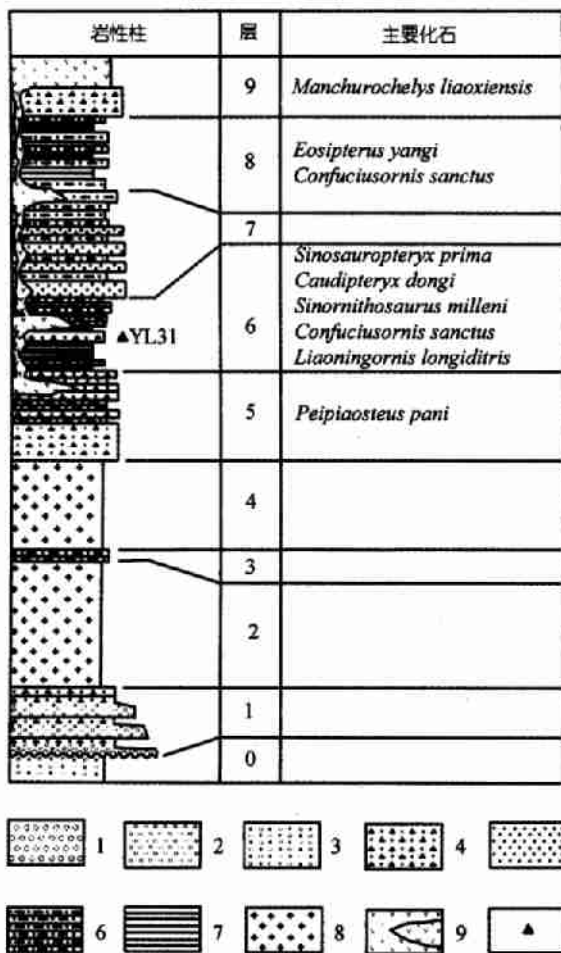


图 1 四合屯及周边地区义县组综合地层剖面(根据文献^[4,12])
0层: 上侏罗统土城子组; 1~9层: 义县组. 1. 粗砾岩, 2. 中细砾岩, 3. 砂砾岩, 4. 凝灰质砂岩及凝灰岩, 5. 中粒砂岩, 6. 粉砂岩-粉砂质泥岩, 7. 灰黑色页岩, 8. 中基性火山熔岩, 9. 中基性火山侵入岩, 10. 采样层位

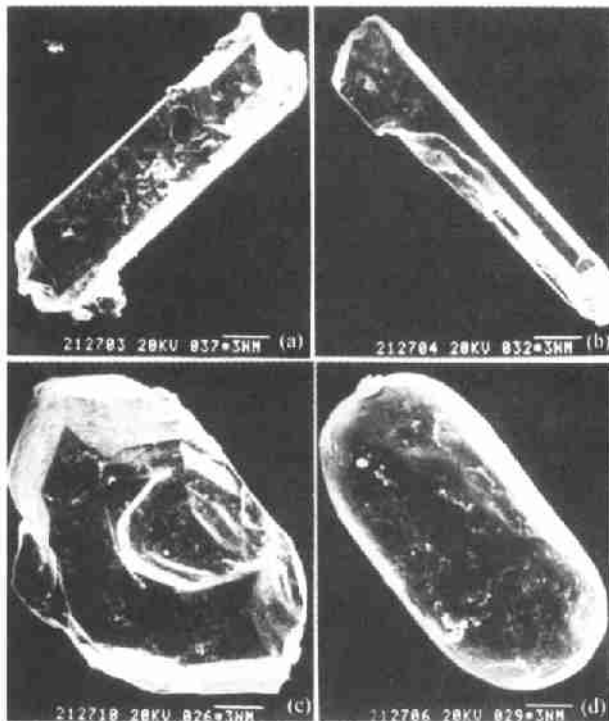


图 2 YL31 凝灰岩中锆石的显微照片
(a), (b) 长柱状自生锆石; (c) 等轴状自生锆石; (d) 捕获锆石

特征看它是凝灰岩形成过程中的结晶锆石,即自生锆石。B类锆石:全呈紫色、半透明、半自形晶、柱状晶体,晶面有熔蚀痕迹。其特征表明,此类锆石属捕获锆石,即火山岩浆上升过程中,从下部老地层中捕获的锆石。在锆石总颗粒中,自生锆石占绝大部分。

分别对A、B两类锆石进行U-Pb定年,重点是A类锆石,对B类锆石只做一组测定,用以验证是否属捕获锆石。锆石的化学分析流程详见文献[23],采用²⁰⁵Pb-²³⁵U混合稀释剂,同位素测定是在MAT-261质谱计上进行。实验结果如表1和图3所示,其中衰变常数²³⁵U取 $9.8485 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$,²³⁸U取 $1.55125 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$,铀同位素比值为137.88。

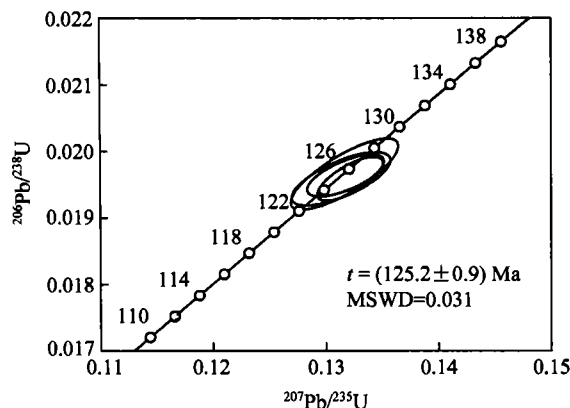


图3 凝灰岩(YL31)中锆石 U-Pb 谐合图

3 讨论

4组A类锆石(分析号1~4)和1组B类锆石(分析号5)的表面年龄截然不同,表明A、B两类锆石确属不同成因和来源。A类自生锆石4个数据点在实验误差范围内全部落在谐合曲线上。通常认为对于年轻锆石而言,²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄较之其他两组年龄要精确可靠。因而这4组锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄的权重平均值(125.2 ± 0.9) Ma,应解释为自生锆石的结晶年龄,也就是凝灰岩(YL31)的形成年龄。它表明,在综合剖面第6层发现的原始中华龙鸟、邹氏尾羽龙、董氏尾羽龙、意外北票龙、千禧中国鸟龙等带毛恐龙,圣贤孔子鸟、杜氏孔子鸟、长趾辽宁鸟、步氏始反鸟等早期鸟类,以及五尖张和兽、金氏热河兽等大量脊椎动物^[5],生活在距今125 Ma前。

对于老的锆石而言,通常认为²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb表面年龄更接近真实年龄。表1分析号5给出的2425 Ma年龄表明,B类紫红色捕获锆石来源于深部古元古代的变质岩石。

Swisher等人^[20]测定的2个凝灰岩采自四合屯和尖山沟剖面,相当图1第6层,与本文凝灰岩(YL31)层位相同。他给出的透长石Ar-Ar年龄与本文报道的锆石U-Pb年龄在误差范围内相吻合。罗清华等人^[21,22]测定的凝灰岩采自四合屯之东的恒道子,样品层位相当图1的第9层。笔者从YL31凝灰岩中选

表1 YL31凝灰岩中锆石U-Pb分析结果

分析号	锆石特征 ^{a)}	重量/ μg	U/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	Pb/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	同位素比值 ^{b)}					表面年龄/Ma		
					²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb
1	A-1	25	563	14	1522 {424}	0.3813	0.01966 (44)	0.1317 (39)	0.04860 (88)	125.5	125.7	128.6
2	A-2	25	705	17	1263 {464}	0.3450	0.1964 (26)	0.1318 (28)	0.04870 (78)	125.4	125.8	133.5
3	A-2	25	766	19	1464 {513}	0.3485	0.01959 (23)	0.1322 (24)	0.04892 (62)	125.1	126.0	144.1
4	A-1	25	518	13	1045 {358}	0.3671	0.01959 (33)	0.1314 (36)	0.04864 (96)	125.1	125.3	130.5
5	B	10	349	157	14357 {2520}	0.05275	0.4317 (21)	9.352 (48)	0.1571 (2)	2 314	2 373	2 425

a) A-1: 无色透明长柱状自形晶; A-2: 浅黄色透明等轴状自形晶; B: 紫红色半透明半自形。b) ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb已做实验空白(Pb = 0.030 ng; U = 0.002 ng)和稀释剂校正, {}内为未做任何校正的测定值; 其他比值中的铅同位素均为放射成因; 括号内数值为2 σ 误差, 例如: 0.01966(44)表示 $0.01966 \pm 0.00044(2\sigma)$

出少许黑云母, 经常规 Ar-Ar 阶段加热定年发现, 15 个阶段的表面年龄摆动范围较大, 为 112~184 Ma, 累积气体年龄为 152.7 Ma, 与锆石年龄很不协调. 随机对 5 片黑云母进行电子探针分析, 给出的该黑云母 K₂O 含量为 0.01%~0.24%, 远低于正常值. X 射线衍射分析表明, 此黑云母基本蚀变为蛭石. 由于黑云母在风化蚀变过程中 K 的大量流失, 造成 K-Ar 体系开放, 此 Ar-Ar 年龄已无地质意义. 不知文献[21,22]所测的黑云母是否也受到某种程度风化蚀变的影响.

国际上关于侏罗-白垩纪的界线年龄, 一直存在争议. 主要有 135^[24]和 144 Ma^[25,26]的方案, 我国年代学工作者倾向(135 ± 5) Ma^[27]. Odin^[24]提出的 135 Ma 的方案, 也参考了我国学者发表的浙江建德群年龄数据. 无论采用现今何种方案, 四合屯脊椎动物生存时代都属早白垩世, 而不会更早.

致谢 作者衷心感谢李佩贤研究员、汪筱林和郭敬辉博士、马志邦和常征路高级工程师给予的协助和有意义的讨论. 本工作为国家自然科学基金资助项目(批准号: 49873023).

参 考 文 献

- Hou L H, Zhou Z H, Martin C D, et al. A beaked bird from the Jurassic of China. *Nature*, 1995, 377: 616~618
- Chen P J, Dong Z M, Zhen S N. An exceptionally well-preserved theropod dinosaur from the Yixian Formation of China. *Nature*, 1998, 391: 147~152
- Ji Q, Currie P J, Norell M A, et al. Two feathered dinosaurs from northeastern China. *Nature*, 1998, 393: 753~761
- 汪筱林, 王元青, 王原, 等. 辽西四合屯及周边地区义县组下部地层层序与脊椎动物化石层位. *古脊椎动物学报*, 1998, 36(2): 81~101
- Wang X L, Wang Y Q, Zhou Z H, et al. Vertebrate faunas and biostratigraphy of the Jehol Group in western Liaoning, China. *Vertebrate Palaeoasiatica*, 2000, 38(Suppl): 41~56
- 侯连海, 陈丕基. 最小的早期鸟类——娇小辽西鸟. *科学通报*, 1999, 44(3): 311~314
- 顾知微. 中国的侏罗系和白垩系. 北京: 科学出版社, 1962. 1~84
- 李子舜, 王思思, 于霄珊, 等. 中国上侏罗统的划分及其与白垩系的界线. *地质学报*, 1982, 56(4): 347~363
- 郝怡纯, 苏德英, 李友桂, 等. 论中国非海相白垩系的划分及侏罗-白垩系的分界. *地质学报*, 1982, 56(3): 187~199
- 李佩贤, 苏德英, 李友桂, 等. 狼鳍鱼(Lycoptera)岩层的时代归属. *地质学报*, 1994, 68(1): 87~100
- Sha J, Fursich F T. Biostratigraphy of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous bivalves *Buchia* and *Aucellina* of eastern Heilongjiang, northeast China. *Geol Mag*, 1993, 130(4): 533~542
- 任东, 郭子光, 卢立伍, 等. 辽宁西部上侏罗统义县组研究新进展. *地质论评*, 1997, 43(5): 449~459
- Sun G, Dilcher D L, Zheng S L, et al. In search of the first flower: A Jurassic angiosperm, *Archaeofructus*, from northeast China. *Science*, 1998, 282: 1693~1695
- 汪筱林, 王元青, 金帆, 等. 辽西北票四合屯脊椎动物化石组合及其地质背景. *Palaeoworld*, 1999, (11): 310~327
- Xu X, Tang Z L, Wang X L. A therizinosaurid dinosaur with integumentary structures from China. *Nature*, 1999, 399: 350~354
- Hu Y M, Wang Y Q, Li C K. A new symmetrodont mammal from China and its implications for mammalian evolution. *Nature*, 1997, 390: 137~142
- 王东方, 刁乃昌. 辽西侏罗-白垩系火山岩系统的同位素年龄测定——兼测侏罗系与白垩系的底界年龄. 见: 地质矿产部编. 国际交流地质学术论文集 1. 北京: 地质出版社, 1984. 1~12
- 陈义贤, 陈文奇. 辽西及邻区中生代火山岩——年代学、地球化学和构造背景. 北京: 地震出版社, 1997, 106~163
- Smith P E, Evensen N M, York D, et al. Dates and rates in ancient lakes: ⁴⁰Ar-³⁹Ar evidence for an early Cretaceous age for the Jehol Group, northeast China. *Can J Earth Sci*, 1995, 32: 1426~1431
- Swisher C C, Wang Y Q, Wang X L, et al. Cretaceous age of the feathered dinosaurs of Liaoning, China. *Nature*, 1999, 400: 58~61
- 罗清华, 陈丕基, 邹东羽, 等. 中华鸟龙与孔子鸟类的时代——辽西义县组火山凝灰岩激光 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄测定. *地球化学*, 1999, 28(4): 405~409
- Lo C H, Chen P J, Tsou T Y, et al. ⁴⁰Ar/³⁹Ar laser single-grain and K-Ar dating of the Yixian Formation, NE China. *Palaeoworld*, 1999, (11): 328~340
- 陆松年, 李惠民. 蓟县长城系大红峪火山岩的单颗粒锆石 U-Pb 法准确定年. *中国地质科学院院报*, 1991, 22: 137~146
- Odin G S, Galbrum B, Renard M. Physico-chemical tool in Jurassic stratigraphy. *Phanerozoic Time Scale*, Bull Liai Inform IUGS Subcomm Geochron, 1992, 10: 39~50
- Harland W B, Cox A V, Llewellyn P G, et al. *A Geological Time Scale*. London: Cambridge University Press, 1982. 4~5, 52~53, 91~94
- Gradstein F M, Agterberg F P, Ogg J G, et al. A Triassic, Jurassic and Cretaceous time scale. In: Berggren W A, Kent D V, Aubry M P, et al, eds. *Geochronology Time Scale and Global Stratigraphic Correlation*. SEPM Spec Publ, 1999, 54: 95~126
- 地质矿产部中国同位素地质年表工作组. 中国同位素地质年表. 北京: 地质出版社, 1987. 92~105

(2000-07-12 收稿, 2000-10-30 收修改稿)