

# 辽西建昌玲珑塔地区侏罗纪地层的离子探针锆石 U-Pb 定年: 对最古老带羽毛恐龙的年代制约

王亮亮<sup>①②③</sup>, 胡东宇<sup>④</sup>, 张立君<sup>④</sup>, 郑少林<sup>④</sup>, 贺怀宇<sup>①\*</sup>, 邓成龙<sup>⑤</sup>, 汪筱林<sup>⑥</sup>, 周忠和<sup>⑥</sup>, 朱日祥<sup>⑤</sup>

① 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院地球深部研究重点实验室, 北京 100029;

② 中国地质大学地球科学学院, 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074;

③ 霍林河露天煤业股份有限公司地质勘探公司, 霍林郭勒 029200;

④ 沈阳师范大学古生物研究所, 沈阳 110034;

⑤ 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;

⑥ 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044

\* 联系人, E-mail: Huaiyuhe@mail.iggcas.ac.cn

2012-09-04 收稿, 2012-10-10 接受, 2013-03-21 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2012CB821900)、国家自然科学基金(40925012, 41172026)和辽宁省自然科学基金(201102199)资助

**摘要** 辽西建昌玲珑塔地区髫髻山组火山-沉积岩地层中富含燕辽生物群(又称道虎沟生物群)的重要化石, 并记录了若干重要的生物演化事件, 特别是对研究鸟类的起源以及最早鸟类和恐龙祖先的分化均具有关键的意义, 因而其地层时代问题备受关注. 本文对建昌玲珑塔大西山含化石沉积层中的 3 个凝灰岩样品进行了详细的 SIMS 锆石 U-Pb 定年, 获得了  $160.7 \pm 1.7$ ,  $159.5 \pm 2.3$  和  $158.9 \pm 1.7$  Ma 的年龄结果. 根据近年广泛使用的地质年表 GTS2004 和新近修订的地质年表 GTS2012, 由侏罗兽和近鸟龙等构成的燕辽生物群生存于晚侏罗世早期, 从而为最早哺乳动物和最早带羽毛恐龙的出现年代提供了确凿的同位素年代学证据.

## 关键词

建昌玲珑塔  
晚侏罗世  
U-Pb 年代学  
带羽毛恐龙

内蒙古、河北、辽宁三省交界地区发育一系列晚中生代火山-沉积盆地, 这些盆地中沉积了巨厚的中、晚侏罗世到早白垩世的火山-沉积地层, 并产出了举世闻名的燕辽生物群<sup>[1-5]</sup>(又称道虎沟生物群)和热河生物群<sup>[6-8]</sup>. 自热河生物群之后, 产于髫髻山组(蓝旗组)中的道虎沟生物群因其记录了若干重要的生物演化事件而备受关注. 辽西建昌玲珑塔地区(图 1)出露的髫髻山组(蓝旗组)火山-沉积岩地层中富含叶肢介、介形类、双壳类、鱼、昆虫、脊椎动物和植物等近 10 个门类的化石. 近年来在该沉积层中发现了迄今最早的原始真兽类哺乳动物——中华侏罗兽<sup>[9]</sup>, 并根据初步的年代结果, 将有袋类和胎盘类哺乳动物的分化历史向前推进了大约 3500 万年. 同时在该

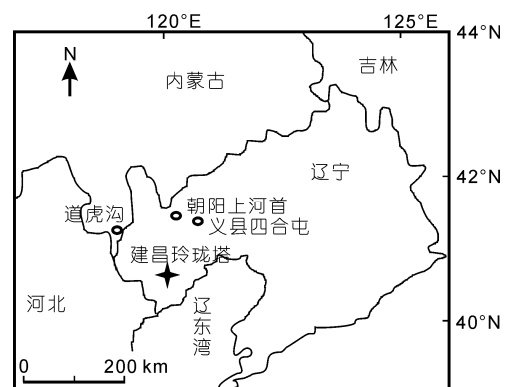


图 1 辽西建昌玲珑塔地区、道虎沟生物群化石点道虎沟、热河生物群化石点朝阳上河首和义县四合屯的地理位置示意图

**引用格式:** 王亮亮, 胡东宇, 张立君, 等. 辽西建昌玲珑塔地区侏罗纪地层的离子探针锆石 U-Pb 定年: 对最古老带羽毛恐龙的年代制约. 科学通报, 2013, 58: 1346-1353  
Wang L L, Hu D Y, Zhang L J, et al. SIMS U-Pb zircon age of Jurassic sediments in Linglongta, Jianchang, western Liaoning: Constraint on the age of oldest feathered dinosaurs (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2013, 58: 1346-1353, doi: 10.1360/972012-535

地区同层位还发现了迄今最早的带羽毛恐龙——郝氏近鸟龙<sup>[10]</sup>、郑氏晓廷龙<sup>[11]</sup>、原始类群向进步类群演化的过渡类型——模块达尔文翼龙<sup>[12]</sup>等, 这些发现对研究鸟类的起源以及最早鸟类和恐龙祖先的分化均具有关键的意义. 玲珑塔地区产出的这些化石均属于道虎沟生物群, 因此, 该地区髫髻山组(蓝旗组)及其含化石层的年龄对揭示道虎沟生物群记录的一系列生物演化事件至关重要.

由于精确同位素年代学数据的缺乏以及地层的复杂性等客观因素的制约, 玲珑塔地区含道虎沟生物群化石层位的时代归属问题存在较大争议. 部分学者将其归属于早白垩世热河群最底部的沉积<sup>[13]</sup>, 部分学者将其归属于晚侏罗世的髫髻山组<sup>[11]</sup>, 部分学者将其归属于中侏罗世的髫髻山组<sup>[14-19]</sup>, 还有一些学者认为其属于晚侏罗世的蓝旗组<sup>[20]</sup>, 因此, 精确限定该地区含化石层的沉积时代对于解决以上争议并进一步探讨鸟类起源与演化具有重要意义. 在周边地区产该生物群的髫髻山组已做了大量的测年工作, 例如, He 等人<sup>[21]</sup>测得宁城地区髫髻山组安山岩钾长石的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄为  $159.8 \pm 0.8 \text{ Ma}$ ; Liu 等人<sup>[15]</sup>测得宁城地区髫髻山组火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $152 \sim 168 \text{ Ma}$ ; Chang 等人<sup>[22]</sup>测得北票地区蓝旗组(髫髻山组)底部火山灰的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄为  $160.7 \pm 0.4 \text{ Ma}$  和  $158.7 \pm 0.6 \text{ Ma}$ ; 陈文等人<sup>[23]</sup>测得宁城地区上覆髫髻山组火山岩的年龄为  $164 \sim 165 \text{ Ma}$ ; 马强等人<sup>[24]</sup>测得金羊盆地蓝旗组火山岩的上部安山质角砾岩的锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄为  $159.4 \pm 3.4 \text{ Ma}$ . 由于该区在中生代期间的多次火山喷发, 使得该地区地层缺少连续出露, 为相关地层和生物群直接对比带来了困难. 从以上提供的数据来看, 不同测年的结果也确实存在较大差异. 本文报道了辽西建昌玲珑塔剖面凝灰岩层的 SIMS 锆石 U-Pb 年龄, 并探讨了该年龄结果对最早哺乳动物和带羽毛恐龙生存年代的制约.

### 1 区域地质背景

建昌盆地处于冀北-辽西地区的过渡带, 是该区众多中生代地层发育较全的火山-沉积盆地之一. 盆地内侏罗、白垩纪地层发育较为连续, 出露良好, 具有典型的区域代表性. 中生代期间, 主要是侏罗-白垩纪期间, 该区发生了剧烈而频繁的火山活动和构造运动. 前人研究表明该区侏罗纪髫髻山组和土城

子组均发生了强烈褶皱变形, 轴向 NNE-NE, 早白垩世热河群以角度不整合覆盖其上<sup>[25]</sup>(图 2).

建昌地区道虎沟生物群化石主要分布在玲珑塔以南的火山-沉积岩地层中. 我们在玲珑塔镇大西山剖面的含化石沉积岩中系统采集了 9 层火山灰(图 2). 由北向南, 样品采集起于玲珑塔镇北山口村, 终于黑山科徐长子东, 依次出露多层安山岩, 河流-湖泊相沉积岩和间夹的火山碎屑岩, 多层安山岩. 野外未见南北的安山岩与中间含化石沉积岩之间的直接接触关系. 沉积岩地层产状较一致, 倾向 NNW. 岩石薄片鉴定显示样品蚀变较普遍, 无法挑选新鲜长石. 本文选择了其中 3 层比较新鲜的火山灰样品进行锆石分选, 并在详细的锆石成因研究基础上进行 SIMS 锆石 U-Pb 定年. 样品 JC11-1a ( $40^{\circ}52'3.2''\text{N}$ ,  $119^{\circ}58'54.9''\text{E}$ )所在的沉积层产出多门类化石, 岩性为灰色页岩, 夹有薄层黄褐色凝灰岩, 野外可见多件鱼化石残片, 位置比较靠近北部安山岩的顶部. 样品 JC11-6 ( $40^{\circ}51'54.8''\text{N}$ ,

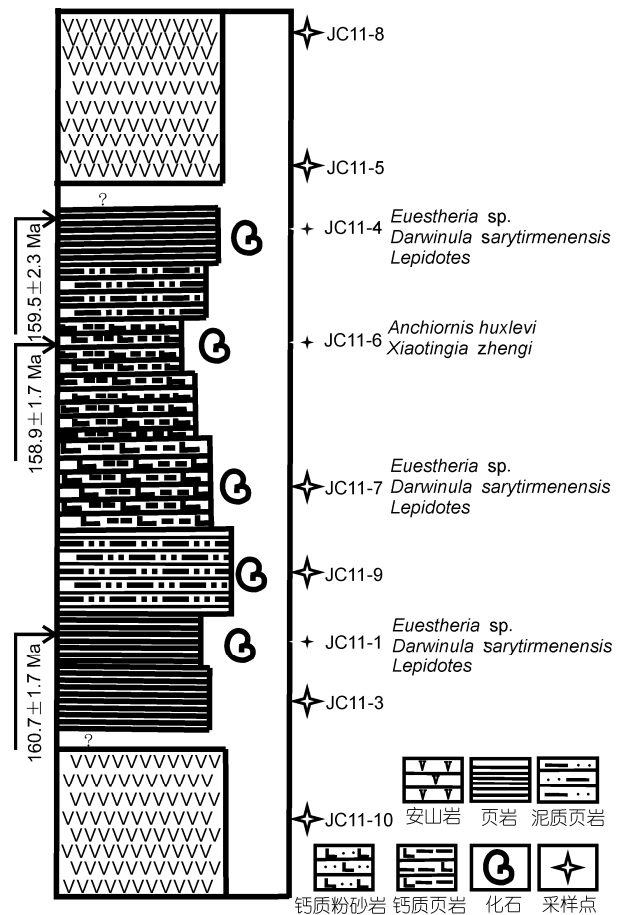


图 2 辽西建昌玲珑塔地区大西山剖面地层柱状图

实心星号表示本文研究的 3 个样品

119°59'52.8"E)采自中间沉积层的中部段的一个化石采集坑,该段沉积层主要岩性为灰白色钙质页岩,夹有黄褐色凝灰岩团块,此处采集坑产近鸟龙化石.样品 JC11-4 (40°51'55.1"N, 119°58'28.4"E)所在沉积层产出恐龙、鱼类和昆虫(蜻蜓)化石,岩性为灰白色页岩,夹有黄褐色凝灰岩团块,位置低于含介形虫的含灰白色钙质粉砂岩层(图 2),紧靠南部安山岩的上部层位,即为剖面的最低含化石层.

## 2 分析方法与实验结果

采用常规的重选和磁选技术,从 3 件待测样品(JC11-1a, JC11-4 和 JC11-6)中分选出无裂隙且晶形较好的锆石.将锆石样品颗粒和锆石标样 Plésovice<sup>[26]</sup>和 Qinghu<sup>[27]</sup>粘贴在环氧树脂靶上,然后抛光使其暴露一半晶面.对锆石进行透射光和反射光显微照相以及阴极发光图像分析,以检查锆石的内部结构,帮助选择适宜的测试点位.样品靶在真空中镀金以备分析.

锆石 U, Th, Pb 的测定在中国科学院地质与地球物理研究所 CAMECA IMS-1280 二次离子质谱仪(SIMS)上进行,详细分析方法见 Li 等人<sup>[27,28]</sup>.锆石标样与锆石样品以 1:3 比例交替测定. U-Th-Pb 同位素比值用标准锆石 Plésovice<sup>[26]</sup> (337 Ma)校正获得, U 含量采用标准锆石 91500<sup>[29]</sup> (81 ppm)(1 ppm=1 μg/g,下同)校正获得,以长期监测标准样品获得的标准偏差(1SD = 1.5%<sup>[30]</sup>)和单点测试内部精度共同传递得到样品单点误差,以标准样品 Qinghu<sup>[27]</sup>(159.5 Ma)作为未知样监测数据的精确度.普通 Pb 校正采用实测<sup>204</sup>Pb 值.由于测得的普通 Pb 含量非常低,假定普通 Pb 主要来源于制样过程中带入的表面 Pb 污染,以现代地壳的平均 Pb 同位素组成<sup>[31]</sup>作为普通 Pb 组成进行校正.同位素比值及年龄误差均为 1σ. 数据结果处理采用 Isoplot/Ex rev. 2.49 软件<sup>[32]</sup>.

本次所测样品中的锆石颗粒(图 3)多为半自形-自形结构,无色透明-半透明.长度变化范围较大为 20~200 μm,长宽比为 1:1~5.5:1.形状有长柱状、圆形和次圆形.在 CL 图像中,大部分锆石具明显的振荡环带,表明其为典型岩浆成因的锆石;有些颗粒发育有振荡环带的同时还发育扇形分带,也说明其为岩浆成因的锆石;部分圆形不透明的颗粒上无环带发育或有发育不明显的环带;还有少量锆石发育有较强的阴极发光亮边,可能是后期变质作用改造

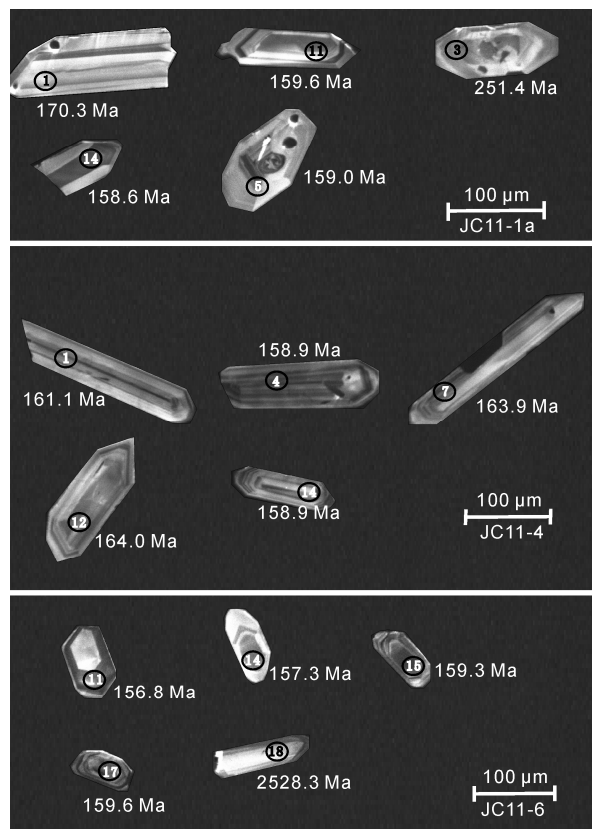


图 3 玲珑塔地区髻髻山组凝灰岩样品中代表性锆石的阴极发光(CL)图像

椭圆代表 SIMS 定年分析点号的位置及相应的 U-Pb 年龄

所致<sup>[33]</sup>.本次定年分析尽量选择岩浆成因特征明显的锆石区域,以期较好地限定岩浆喷发时限.

对 JC11-1a 样品中的 17 个锆石颗粒进行了 17 个分析点的 U-Pb 同位素年龄分析(表 1 和图 4(a)).所分析的锆石 U 含量介于 49~365 ppm, Th 含量介于 50~621 ppm, Th/U 比值在 0.67~1.70 之间变化.所有分析点均分布在谐和线附近,指示锆石自形成后没有发生明显的 Pb 丢失.谐和年龄为 160.7±1.4 Ma,这与这些点的加权平均年龄 160.7±1.7 Ma (MSWD = 1.3)在误差范围内一致.这个加权平均年龄可以代表凝灰岩样品 JC11-1a 的结晶年龄.

样品 JC11-4 的锆石粒度大小非常不均一,长度变化范围较大为 30~300 μm,长宽比介于 1:1~5.5:1.大部分锆石晶形为较好的柱状自形晶,发育有明显的振荡环带;也有部分圆形和次圆形的颗粒.呈圆形和次圆形的颗粒从 CL 图像上也显示岩浆震荡环带并具有继承核的特征;部分圆形和次圆形锆石的 CL 图

表 1 玲珑塔髻髻山组凝灰岩 SIMS 锆石 U-Pb 同位素分析结果

样品@点位	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	$f_{206}(\%^{a})$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$	$\pm\sigma$ %	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$	$\pm\sigma$ %	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$	$\pm\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$	$\pm\sigma$
JC11-1a@2	118	80	0.674	0.40	0.1615	7.30	0.0256	1.59	152.0	10.3	162.8	2.6
JC11-1a@4	109	86	0.783	0.00	0.1692	7.10	0.0247	1.67	158.7	10.5	157.1	2.6
JC11-1a@5	145	118	0.816	0.69	0.1670	7.70	0.0250	1.82	156.8	11.3	158.9	2.9
JC11-1a@6	142	94	0.660	0.40	0.1570	7.00	0.0245	1.54	148.1	9.7	156.3	2.4
JC11-1a@7	119	150	1.265	0.69	0.1508	10.60	0.0255	1.68	142.6	14.2	162.2	2.7
JC11-1a@8	111	73	0.652	0.47	0.1578	8.20	0.0251	1.65	148.8	11.4	159.7	2.6
JC11-1a@9	273	236	0.865	0.90	0.1840	6.60	0.0255	1.60	171.5	10.5	162.0	2.6
JC11-1a@10	49	50	1.010	0.00	0.1841	8.00	0.0251	3.17	171.6	12.7	160.0	5.0
JC11-1a@11	102	91	0.887	0.69	0.1532	10.70	0.0249	1.50	144.7	14.5	158.6	2.4
JC11-1a@12	229	282	1.235	1.01	0.1587	7.50	0.0263	1.55	149.6	10.4	167.1	2.6
JC11-1a@13	162	166	1.025	0.00	0.1867	6.90	0.0256	2.54	173.8	11.1	162.9	4.1
JC11-1a@14	165	226	1.368	0.60	0.1509	7.30	0.0247	2.11	142.7	9.8	157.6	3.3
JC11-1a@15	92	99	1.078	0.00	0.1836	7.60	0.0261	3.32	171.1	12.1	166.3	5.5
JC11-1a@16	68	82	1.212	0.00	0.1959	6.60	0.0263	2.88	181.7	11.1	167.3	4.8
JC11-1a@17	105	127	1.204	0.47	0.1571	8.30	0.0249	1.78	148.1	11.5	158.6	2.8
JC11-1a@18	365	621	1.703	0.14	0.1809	4.70	0.0257	1.51	168.8	7.3	163.7	2.4
JC11-1a@19	160	183	1.143	0.57	0.1679	6.60	0.0249	1.90	157.6	9.7	158.4	3.0
JC11-4@1	194	67	0.348	0.23	0.1709	4.91	0.0253	1.67	160.2	7.3	161.0	2.7
JC11-4@2	118	34	0.286	0.00	0.1712	6.35	0.0252	2.22	160.4	9.5	160.7	3.5
JC11-4@3	216	106	0.488	0.00	0.1623	3.91	0.0248	1.59	152.7	5.6	158.0	2.5
JC11-4@4	416	138	0.332	0.00	0.1702	3.00	0.0250	1.66	159.6	4.4	158.9	2.6
JC11-4@5	92	54	0.587	0.00	0.1656	5.94	0.0241	2.13	155.6	8.6	153.3	3.2
JC11-4@6	117	74	0.631	0.00	0.1533	6.59	0.0240	1.52	144.8	8.9	153.0	2.3
JC11-4@8	81	28	0.344	0.00	0.1771	8.24	0.0255	1.59	165.6	12.7	162.1	2.5
JC11-4@9	201	87	0.431	0.00	0.1783	3.89	0.0255	1.65	166.6	6.0	162.6	2.6
JC11-4@10	197	94	0.479	0.00	0.1830	4.38	0.0253	2.39	170.6	6.9	161.2	3.8
JC11-4@11	171	104	0.605	0.00	0.1840	4.07	0.0260	1.63	171.5	6.4	165.4	2.7
JC11-4@12	139	84	0.606	0.00	0.1866	4.41	0.0259	1.52	173.7	7.1	164.7	2.5
JC11-4@13	596	384	0.644	0.00	0.1753	2.58	0.0254	1.53	164.0	3.9	162.0	2.4
JC11-4@15	145	91	0.628	0.44	0.1761	6.87	0.0265	3.25	164.7	10.5	168.6	5.4
JC11-4@16	212	144	0.678	0.40	0.1547	5.35	0.0248	1.61	146.0	7.3	158.0	2.5
JC11-4@17	127	73	0.570	0.00	0.1810	4.55	0.0238	1.56	168.9	7.1	151.6	2.3
JC11-4@18	144	73	0.505	0.46	0.1642	7.05	0.0253	3.19	154.3	10.2	161.3	5.1
JC11-4@19	475	183	0.385	0.18	0.1708	3.17	0.0252	1.50	160.1	4.7	160.3	2.4
JC11-6@1	185	107	0.581	0.93	0.1696	6.80	0.0251	1.50	159.0	10.0	159.6	2.4
JC11-6@2	208	104	0.499	0.31	0.1732	5.20	0.0249	1.88	162.1	7.8	158.7	3.0
JC11-6@3	310	197	0.634	0.05	1.2242	3.00	0.1344	2.48	811.7	17.1	813.2	19.0
JC11-6@4	931	604	0.649	0.16	0.1651	2.80	0.0252	2.05	155.2	4.0	160.2	3.2
JC11-6@5	342	195	0.569	0.78	0.1529	5.50	0.0254	2.49	144.4	7.4	161.8	4.0
JC11-6@6	838	415	0.495	0.05	0.1665	2.70	0.0249	1.92	156.4	3.9	158.5	3.0
JC11-6@7	354	213	0.600	0.00	0.1681	3.40	0.0243	1.60	157.8	4.9	154.5	2.4
JC11-6@8	403	680	1.688	0.55	0.1565	4.90	0.0250	1.56	147.6	6.7	159.1	2.4
JC11-6@9	74	53	0.722	1.99	0.1397	16.50	0.0229	1.67	132.8	20.7	146.0	2.4
JC11-6@10	1386	948	0.684	0.09	0.1671	2.20	0.0252	1.60	156.9	3.2	160.7	2.5
JC11-6@11	493	237	1.225	1.56	0.1461	10.60	0.0246	2.69	138.4	13.8	156.8	4.2
JC11-6@12	258	146	0.567	19.60	0.1822	30.70	0.0232	1.70	169.9	49.2	148.1	2.5
JC11-6@13	112	99	0.884	1.74	4.2672	2.90	0.2843	1.51	1687.1	23.8	1612.8	21.5
JC11-6@14	216	252	1.166	2.24	0.1744	9.20	0.0247	2.39	163.2	14.0	157.3	3.7
JC11-6@15	529	294	0.557	0.38	0.1616	3.80	0.0250	1.51	152.1	5.4	159.3	2.4
JC11-6@16	204	113	0.553	41.00	0.3591	139.50	0.0258	17.65	311.6	318.7	164.2	28.7
JC11-6@17	396	222	0.560	0.11	0.1686	4.10	0.0251	2.58	158.2	6.0	159.6	4.1
JC11-6@18	104	160	1.538	0.06	11.0465	1.80	0.4802	1.50	2527.1	17.1	2528.3	31.5

(续表 1)

样品@ 点位	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	$f_{206}\%$ <sup>a)</sup>	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$	$\pm\sigma$ %	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$	$\pm\sigma$ %	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$	$\pm\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$	$\pm\sigma$
Qinghu@1	1498	791	0.528	0.06	0.1734	2.42	0.0252	1.51	162.4	3.6	160.4	2.4
Qinghu@2	1812	837	0.462	0.09	0.1637	2.32	0.0244	1.51	154.0	3.3	155.3	2.3
Qinghu@3	675	353	0.524	0.00	0.1740	2.49	0.0246	1.51	162.9	3.8	156.7	2.3
Qinghu@4	1715	1058	0.616	0.00	0.1705	2.75	0.0245	1.70	159.9	4.1	156.2	2.6
Qinghu@5	865	426	0.492	0.10	0.1758	3.45	0.0257	2.49	164.5	5.2	163.5	4.0
Qinghu@6	1768	825	0.467	0.09	0.1677	2.14	0.0246	1.50	157.5	3.1	157.0	2.3
Qinghu@7	775	339	0.437	0.00	0.1712	3.18	0.0248	1.63	160.5	4.7	157.9	2.5
Qinghu@8	1007	629	0.624	0.00	0.1619	2.52	0.0241	1.63	152.3	3.6	153.3	2.5

a)  $f_{206}\%$ 代表普通 Pb 占总 Pb 的比例. 带删除线的数据未参加年龄计算

像显示出其表面有磨蚀现象, 说明它们经历过一定距离的搬运. 对 17 颗锆石进行了 17 个分析点的 U-Pb 同位素年龄分析(表 1 和图 4(b)), 所分析的锆石 U 含量介于 81~596 ppm, Th 含量介于 34~384 ppm, Th/U 比值在 0.29~1.68 之间.

JC11-4 的 17 个分析点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  比值在误差分析范围内基本一致, 从谐和图上可以看出锆石基本上没有 Pb 丢失现象. 17 个分析点得到了 U-Pb 谐和年龄为  $159.5\pm 1.8$  Ma (图 4(b)), 其锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $159.5\pm 2.3$  Ma (MSWD=2.5). 两者在误差范围内一致, 因此, 该加权平均年龄代表了凝灰岩样品 JC11-4 的结晶年龄.

样品 JC11-6 的锆石粒度普遍偏小, 长度变化范围不大, 为 40~150  $\mu\text{m}$ , 长宽比介于 1:1~3:1, 大部分锆石晶形较好, 为短柱状自形晶, 也有部分圆形和次圆形的颗粒. 虽然颗粒较小, 但是在 CL 图像上可以看见发育有明显的振荡环带. 呈圆形和次圆形的颗粒从 CL 图像上也显示岩浆震荡环带及继承核的特征, 部分圆形和次圆形锆石的 CL 图像显示其表面有磨蚀现象, 指示其经历过一定距离的搬运. 对 18 颗锆石进行了 18 个分析点的 U-Pb 同位素年龄分析(表 1 和图 4(c), (d)). 所分析的锆石 U 含量变化范围较大, 介于 74~1386 ppm, Th 含量介于 53~948 ppm, Th/U 比值在 0.50~1.69 之间变化.

样品 JC11-6 的 18 个分析点中, 有 3 个分析点得到了明显偏老的年龄(JC11-6@3, JC11-6@13 和 JC11-6@18), 分别为  $813.2\pm 19.0$ ,  $1612.8\pm 21.5$  和  $2527.1\pm 17.1$  Ma, 应该是捕获的不同时代的锆石. 其余 15 个分析点在误差分析范围内基本一致, 其中 5 个分析点含有较高的普通铅含量, 其余 10 个分析点得到了

U-Pb 谐和年龄为  $158.7\pm 1.8$  Ma (图 4(d)), 与其锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄  $158.9\pm 1.7$  Ma (MSWD=0.5) 在误差范围内一致, 所以该加权平均年龄代表了凝灰岩的结晶年龄.

### 3 讨论与结论

辽西玲珑塔地区位于华北克拉通北部, 燕山中生代板内造山带东段, 区内盛产燕辽生物群(或道虎沟生物群)化石, 是研究鸟类起源以及鸟类和恐龙祖先分化的重要地区<sup>[2,3]</sup>. 在中生代时期, 燕山构造带发生了大量的火山活动和构造运动, 给该区的地层对比工作带来了很大困难. 详细的同位素年代学工作可以为陆相地层的对比提供有力的支持. 本文对玲珑塔地区髫髻山组地层中含中华侏罗兽和近鸟龙等重要脊椎动物化石层的 3 件凝灰岩样品(即 JC11-1a, JC11-4 和 JC11-6) 进行了高精度的 SIMS 锆石 U-Pb 定年, 获得了在误差范围内近乎一致的晚侏罗世年龄, 其加权平均年龄分别为  $160.7\pm 1.7$ ,  $159.5\pm 2.3$  和  $158.9\pm 1.7$  Ma. 3 个样品的采样点均在含化石层或在含化石层的最近层(图 2), 可以较好地控制含化石层的年龄, 也可以代表化石层的时代. 根据近年广泛使用的地质年表 GTS2004<sup>[34]</sup> 和新近修订的地质年表 GTS2012<sup>[35]</sup>, 中、晚侏罗世界线的年龄为  $161.2\pm 4.0$  Ma<sup>[34]</sup> 或  $163.5\pm 1.1$  Ma<sup>[35]</sup>, 3 个年龄数据属于晚侏罗世早期. 另外, 这 3 个年龄数据在误差范围内一致, 表明玲珑塔地区的髫髻山组沉积层持续时间很短, 燕辽生物群的时代也可定在 159~161 Ma, 即属于晚侏罗世早期. 这个地层时代归属与古生物学家对燕辽生物群昆虫化石研究得出的中侏罗世最晚期至晚侏罗世早期的结论基本一致<sup>[36,37]</sup>.

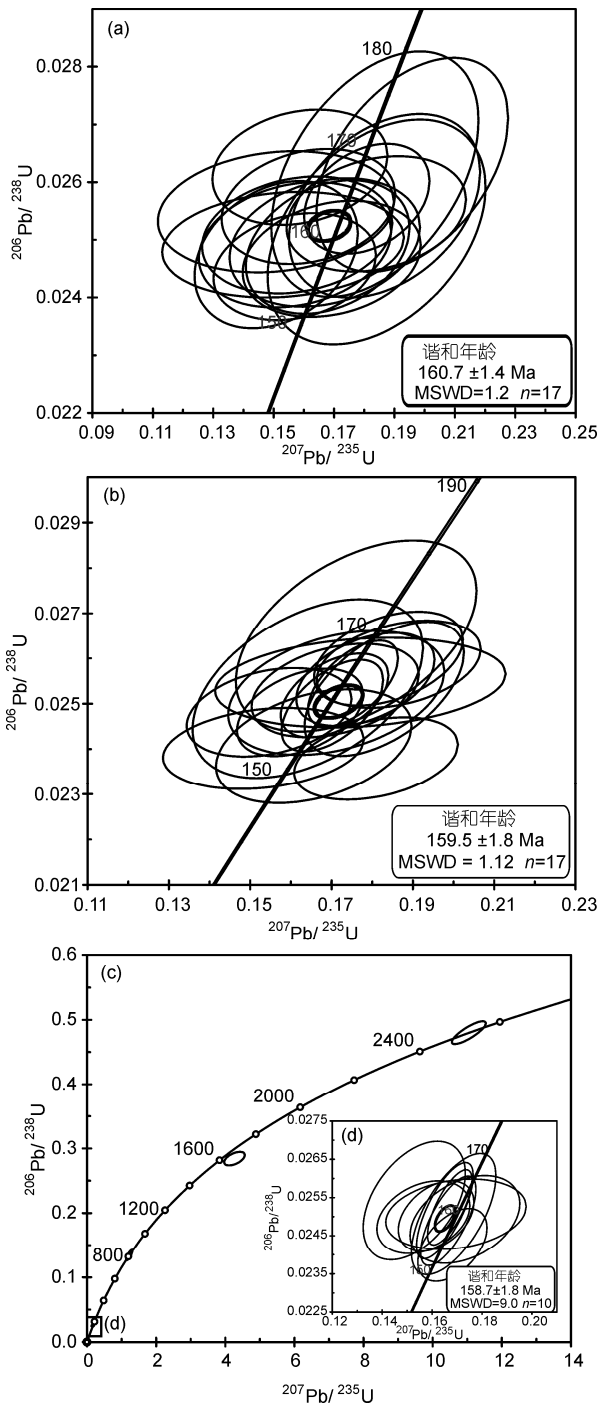


图4 玲珑塔地区髫髻山组凝灰岩锆石 SIMS U-Pb 谐和年龄图

(a) 样品 JC11-1a 锆石分析结果; (b) 样品 JC11-4 锆石分析结果; (c) 样品 JC11-6 锆石分析结果, 其中放大图(d)为 JC11-6 的 10 颗锆石分析结果

致谢

感谢中国地质大学吴元保教授、中国科学院地质与地球物理研究所李献华研究员、李秋立博士和刘宇工程师的讨论和帮助。

值得指出的是,最近 Liu 等人<sup>[19]</sup>采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年也对玲珑塔地区大西山含化石层中的 3 层凝灰岩进行了同位素年代学研究,分别得到  $160.5 \pm 0.99$ ,  $161.0 \pm 1.44$  和  $158.5 \pm 1.6$  Ma 三个年龄数据,与本文的 SIMS 锆石 U-Pb 年龄数据基本一致,但认为建昌玲珑塔大西山火山-沉积岩地层中的化石属于中侏罗世的髫髻山组。

本文以及 Liu 等人<sup>[19]</sup>对玲珑塔地区髫髻山组含化石层及其附近层位获得的同位素年龄结果与前人在邻区的髫髻山组获得的同位素年龄基本一致,例如,北票蓝旗安山角砾熔岩的锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄  $159.4 \pm 3.4$  Ma<sup>[24]</sup>、北票地区蓝旗组(髫髻山组)底部火山灰的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄  $160.7 \pm 0.4$ ,  $158.7 \pm 0.6$  Ma<sup>[22]</sup>; 与辽西凌源蓝旗组安山质火山角砾岩和凝灰岩锆石 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄  $158.0 \pm 1.0$  Ma<sup>[38]</sup>在误差范围内也基本一致; 与内蒙古宁城地区含道虎沟化石层之上和之下的火山岩透长石 Ar-Ar 年龄和 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 152~168 Ma<sup>[15,23]</sup>在误差范围内也基本吻合,因此,我们认为玲珑塔地区髫髻山组(蓝旗组)沉积地层与冀北地区和内蒙宁城地区的同组地层属于同期形成。

由于近年来在建昌玲珑塔地区发现了一批具有重要演化意义的脊椎动物化石,包括被认为最早的真兽类哺乳动物——中华侏罗兽<sup>[9]</sup>,最早的带毛恐龙——郝氏近鸟龙<sup>[10]</sup>、郑氏晓廷龙<sup>[11]</sup>、长尾的翼龙<sup>[12,39]</sup>等,因此准确的年代标定对研究最早鸟类和恐龙祖先的分化,以及有袋类和胎盘类哺乳动物的分化历史均具有关键的意义。此外,在内蒙宁城道虎沟地区相同地层也发现了大量重要的脊椎动物和昆虫等化石,如最早飞行的哺乳动物<sup>[40]</sup>、最早游泳的哺乳动物<sup>[41]</sup>、最早具有展示功能尾羽的带毛恐龙<sup>[42]</sup>、具有毛状物的翼龙<sup>[43]</sup>、最早传粉的昆虫<sup>[44]</sup>以及最古老的可能具有吸血功能的“巨型”跳蚤化石<sup>[45]</sup>等等,因此,建昌玲珑塔地区髫髻山组燕辽生物群的准确年代标定对研究近鸟和恐龙的分化、鸟类的起源、翼龙的演化以及真兽类起源与其他哺乳动物的分化提供了重要的年代证据。对于燕辽生物群各区域类群间,以及燕辽生物群与同时代其他生物群之间的对比提供了确切的时间依据。

参考文献

- 1 汪筱林, 王元青, 张福成, 等. 辽宁凌源及内蒙古宁城地区下白垩统义县组脊椎动物生物地层. 古脊椎动物学报, 2000, 38: 81-99
- 2 汪筱林, 周忠和, 张福成, 等. 热河生物群发现带“毛”的翼龙化石. 科学通报, 2002, 47: 54-58
- 3 Zhang J F. The most primitive earwigs (Insecta: Dermaptera: Archidermaptera) from Upper Jurassic of Nei Monggol Autonomous Region, northern China. Acta Micropalaeont Sin, 2002, 19: 348-362
- 4 Gao K Q, Shubin N H. Earliest known crown-group salamanders. Nature, 2003, 422: 424-428
- 5 王原. 内蒙古中生代有尾两栖类一新种: 道虎沟辽西蜥. 科学通报, 2004, 49: 814-815
- 6 Chang M M, Chen P J, Wang Y Q, et al. The Jehol Biota: The Emergence of Feathered Dinosaurs, Beaked Birds and Flowering Plants. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2003. 1-208
- 7 Zhou Z H, Clarke J, Zhang F C, et al. Gastroiths in Yanornis: An indication of the earliest radical diet-switching and gizzard plasticity in the lineage leading to living birds? Naturwissenschaften, 2004, 91: 571-574
- 8 周忠和. 热河生物群脊椎动物的辐射及其环境背景. 科学通报, 2004, 49: 718-720
- 9 Luo Z X, Yuan C X, Meng Q J, et al. A Jurassic eutherian mammal and divergence of marsupials and placentals. Nature, 2011, 476: 442-445
- 10 Hu D Y, Hou L H, Zhang L J, et al. A pre-*Archaeopteryx* troodontid theropod from China with long feathers on the metatarsus. Nature, 2009, 461: 640-643
- 11 Xu X, You H L, Du K, et al. An Archaeopteryx-like theropod from China and the origin of Avialae. Nature, 2011, 475: 465-470
- 12 Lü J C, Unwin D M, Jin X S, et al. Evidence for modular evolution in a long-tailed pterosaur with a pterodactyloid skull. Proc Roy Soc B, 2010, 277: 383-389
- 13 汪筱林, 周忠和, 贺怀宇, 等. 内蒙古宁城道虎沟化石层的地层关系与时代讨论. 科学通报, 2005, 50: 2127-2135
- 14 任东, 高克勤, 郭子光, 等. 内蒙古宁城道虎沟地区侏罗纪地层划分及时代探讨. 地质通报, 2002, 21: 584-588
- 15 柳永清, 刘燕学, 姬书安, 等. 内蒙古宁城和辽西凌源热水汤地区道虎沟生物群与相关地层 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及有关问题的讨论. 科学通报, 2006, 51: 2273-2282
- 16 Ji Q, Yuan C X. New advances in the study of Middle Jurassic mammals in China. Acta Geosci Sin, 2008, 29: 377-384
- 17 段治, 郑少林, 胡东宇, 等. 辽宁建昌玲珑塔地区中侏罗世地层与化石初步报道. 世界地质, 2009, 28: 143-147
- 18 Jiang X J, Liu Y Q, Peng N, et al. Middle Jurassic pterosaur and feathered dinosaur bearing-strata at Linglongta, Jianchang county, Western Liaoning. Acta Geosci Sin, 2010, 31(Suppl 1): 33-35
- 19 Liu Y Q, Kuang H W, Jiang X J, et al. Timing of the earliest known feathered dinosaurs and transitional pterosaurs older than the Jehol Biota. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2012, 323-325: 1-12
- 20 Zhou Z H, Jin F, Wang Y. Vertebrate assemblages from the Middle-Late Jurassic Yanliao Biota in Northeast China. Earth Sci Front, 2010, 17: 252-254
- 21 He H Y, Wang X L, Zhou Z H, et al.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of ignimbrite in Inner Mongolia, northeastern China indicates a post-Middle Jurassic age for the overlying Daohugou Bed. Geophys Res Lett, 2004, 31: L20609
- 22 Chang S C, Zhang H C, Renne P R, et al. High-precision  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age constraints on the basal Lanqi Formation and its implications for the origin of angiosperm plants. Earth Planet Sci Lett, 2009, 279: 212-221
- 23 陈文, 季强, 刘敦一, 等. 内蒙古宁城地区道虎沟化石层同位素年代学. 地质通报, 2004, 23: 1165-1169
- 24 Ma Q, Zheng J P. *In-situ* U-Pb dating and Hf isotopic analyses of zircon in the volcanic rock of the Lanqi Formation in the Beipiao area, western Liaoning Province. Acta Petrol Sin, 2009, 25: 3287-3297
- 25 宋鸿林, 张长厚, 王根厚, 等. 中华人民共和国区域地质调查报告青龙县幅(1:250000). 北京: 中国地质大学(北京)地质调查研究院, 2004
- 26 Sláma J, Košler J, Condon D J, et al. Plešovice zircon—A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. Chem Geol, 2008, 249: 1-35
- 27 Li X H, Liu Y, Li Q L, et al. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multicollector SIMS without external standardization. Geochem Geophys Geosyst, 2009, 10: Q04010
- 28 Li Q L, Li X H, Liu Y, et al. Precise U-Pb and Th-Pb age determination of kimberlitic perovskites by secondary ion mass spectrometry. Chem Geol, 2010, 269: 396-405
- 29 Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, et al. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace-element and REE analyses. Geostand News, 1995, 19: 1-23
- 30 Li Q L, Li X H, Liu Y, et al. Precise U-Pb and Pb-Pb dating of Phanerozoic baddeleyite by SIMS with oxygen flooding technique. J Anal At Spectrom, 2010, 25: 1107-1113

- 31 Stacey J S, Kramers J D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth Planet Sci Lett*, 1975, 26: 207–221
- 32 Ludwig K R. Users manual for Isoplot/Ex rev. 2.49. Berkeley Geochronol Cent Spec Publ, 2001, (1a): 1–56
- 33 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. *科学通报*, 2004, 49: 1589–1604
- 34 Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G. *A. Geologic Time Scale 2004*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 1–589
- 35 Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M, et al. *The Geologic Time Scale 2012*. Amsterdam: Elsevier, 2012
- 36 Zhang J F. New species of *Palaeobolbomyia* Kovalev and *Ussatchovia* Kovalev (Diptera, Brachycera, Rhagionidae) from the Callovian-Oxfordian (Jurassic) Daohugou Biota of China: Biostratigraphic and paleoecologic implications. *Geobios*, 2010, 43: 663–669
- 37 Zhang J F. Records of Bizarre Jurassic Brachycerans in the Daohugou Biota, China (Diptera, Brachycera, Archisargidae and Rhagionemestriidae). *Palaeontology*, 2010, 53: 307–317
- 38 赵越, 张拴宏, 徐刚, 等. 燕山板内变形带侏罗纪主要构造事件. *地质通报*, 2004, 23: 854–863
- 39 Wang X L, Kellner A W A, Jiang S X, et al. An unusual long-tailed pterosaur with elongated neck from western Liaoning of China. *An Acad Bras Cienc*, 2009, 81: 793–812
- 40 Meng J, Hu Y M, Wang Y Q, et al. A Mesozoic gliding mammal from northeastern China. *Nature*, 2006, 444: 889–893
- 41 Ji Q, Luo Z X, Yuan C X, et al. A swimming mammaliaform from the Middle Jurassic and ecomorphological diversification of early mammals. *Science*, 2006, 311: 1123–1127
- 42 Zhang F C, Zhou Z H, Xu X, et al. A bizzard Jurassic maniraptoran from China with elongate ribbon-like feathers. *Nature*, 2008, 455: 1105–1108
- 43 汪筱林, 周忠和, 张福成, 等. 热河生物群发现带“毛”的翼龙化石. *科学通报*, 2002, 47: 54–58
- 44 Ren D, Labandeira C C, Santiago-Blay J A, et al. A probable pollination mode before angiosperms: Eurasian, longproboscis scorpionflies. *Science*, 2009, 326: 840–847
- 45 Huang D Y, Engel M S, Cai C Y, et al. Diverse transitional giant fleas from the Mesozoic era of China. *Nature*, 2012, 483: 201–204

## SIMS U-Pb zircon age of Jurassic sediments in Linglongta, Jianchang, western Liaoning: Constraint on the age of oldest feathered dinosaurs

WANG LiangLiang<sup>1,2,3</sup>, HU DongYu<sup>4</sup>, ZHANG LiJun<sup>4</sup>, ZHENG ShaoLin<sup>4</sup>, HE HuaiYu<sup>1</sup>, DENG ChengLong<sup>5</sup>, WANG XiaoLin<sup>6</sup>, ZHOU ZhongHe<sup>6</sup> & ZHU RiXiang<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of the Earth's Deep Interior, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

<sup>3</sup>Huolinhe Opencut Coal Industry Corporation Limited of Inner Mongolia, Huolinguole, 029200, China;

<sup>4</sup>Paleontological Institute, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China;

<sup>5</sup>State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

<sup>6</sup>Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044, China

Mesozoic fossil locality in Linglongta village, Jianchang County, western Liaoning, has drawn extensive attention among paleontologists as producing hundreds of beautifully preserved feathered dinosaurs and mammals. The SIMS U-Pb zircon analyses of zircons derived from three tuff layers in Daxishan section in Linglongta yield (160.7±1.7), (159.5±2.3) and (158.9±1.7) Ma, indicating that they were formed at early Late Jurassic. Such a result is generally consistent with biostratigraphic evidence, providing a maximum known age for the first appearance of feathered dinosaurs.

**Jianchang Linglongta, Late Jurassic, U-Pb dating, feathered dinosaurs**

doi: 10.1360/972012-535