

# 再论辽西四合屯脊椎动物生存时代: Ar-Ar 年龄证据\*

王松山<sup>1</sup> 胡华光<sup>1</sup> 李佩贤<sup>2</sup> 王元青<sup>3</sup>

WANG SongShan<sup>1</sup>, HU HuaGuang<sup>1</sup>, LI PeiXian<sup>2</sup> and WANG YuanQing<sup>3</sup>

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

3. 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044

1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

3. Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044, China

2001-04-28 收稿, 2001-07-02 改回。

**Wang SS, Hu HG, Li PX and Wang YQ. 2001. Further discussion on the geologic age of Sihetun vertebrate assemblage in western Liaoning, China: evidence from Ar-Ar dating. Acta Petrologica Sinica, 17(4):663-668**

**Abstract** The geologic age of the feathered dinosaurs and early birds in Sihetun and its neighboring area in Beipiao, western Liaoning is appointed to different epoches of the Mesozoic Era, such as the Late Jurassic, the Early Cretaceous or the Late Jurassic - Early Cretaceous. Even the dating data are also very different. Recent report of the U-Pb age of  $125.2 \pm 0.9$  Ma of zircon separated from tuff in the bed 6 of the composite stratigraphic column of Yixian Formation in Sihetun and its neighboring area, indicated that the Sihetun vertebrate belonged to the Early Cretaceous. This paper provides new evidence from Ar-Ar dating. YL29 basalt-andesite was collected from the low part of the bed 2 of the composite stratigraphic column, and the sample yields a K-Ar age of  $129.0 \pm 0.9$  Ma. The Ar-Ar step-heating experiment performed on the YL29 basalt-andesite yields a remarkably simple pattern. Apparent ages from step 6~13, comprising over 90 percent of the release of  $^{39}\text{Ar}$ , are virtually concordant, and give a plateau age of  $128.2 \pm 0.8$  Ma. The Ar-Ar total gas age (all 15 steps) on the sample is  $128.4 \pm 1.4$  Ma. When all steps data are plotted on a correlation or isochron diagram, an age of  $128.4 \pm 0.2$  Ma is obtained. YL30 diabase was collected from the subvolcanic rock, which intruded into beds 5~9. The Ar-Ar step-heating experiment on this sample yields a virtually concordant set of ages over 93 percent of the release of  $^{39}\text{Ar}$  (step 7~12) with a plateau age of  $122.3 \pm 0.5$  Ma. The Ar-Ar total gas age (all 12 steps) on the diabase is  $122.1 \pm 1.2$  Ma. The age obtained from the isochron plot using all steps data points is  $121.8 \pm 1.3$  Ma, indistinguishable from the plateau age. About the Jurassic-Cretaceous boundary age, there are continuous disputations internationally and both 135 Ma and 144 Ma are proposed for the boundary. The Chinese geochronologists prefer the forme one. According to above Ar-Ar age data of YL29 basalt-andesite and YL30 diabase, the Sihetun vertebrate assemblage should be the Early Cretaceous in age.

**Key words** Sihetun, Vertebrate, Basalt-andesite, Subvolcanic rock, Ar-Ar dating, Early Cretaceous

**摘要** 辽西北票市四合屯及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、早白垩世和晚侏罗世-早白垩世多种观点。同样,同位素年龄数据亦存在很大差异。作者曾报道四合屯含脊椎动物化石层位的地层综合剖面第6层所夹 YL31 凝灰岩中锆石的 U-Pb 年龄为  $125.2 \pm 0.9$  Ma, 并指出四合屯脊椎动物生存时代属早白垩世。本文报道两组 Ar-Ar 定年数据,作为这一观点的又一新的证据。YL29 玄武安山岩的层位属综合地层剖面第2层下部,它的 K-Ar 年龄是  $129.0 \pm 2.6$  Ma。此样品的 Ar-Ar 阶段加热实验给出一条平坦的年龄谱线,其坪年龄是  $128.2 \pm 0.8$  Ma, 对应的  $^{39}\text{Ar}$  析出量达 90% 以上; 15 个阶段的总气体年龄为  $128.4 \pm 1.4$  Ma; 相关性很好的 Ar-Ar 等时线给出的年龄是  $128.4 \pm 0.2$  Ma。YL30 辉绿岩侵入

\* 国家自然科学基金(编号:49873023)资助项目。

第一作者简介: 王松山,男,1939年9月生,研究员,同位素地球化学专业, E-mail: sshanwang@163.net

到综合地层剖面 5-9 层,其 Ar-Ar 年龄谱也呈平坦状,坪年龄是  $122.3 \pm 0.5$  Ma, 对应的  $^{39}\text{Ar}$  析出量高达 93% 以上;12 个阶段的总气体年龄为  $122.1 \pm 1.2$  Ma; 相关性很好的 Ar-Ar 等时线给出的年龄是  $121.8 \pm 1.3$  Ma。国际上关于晚侏罗世~早白垩世世界线年龄一直存有争议,其观点主要有 135Ma 和 144Ma 两种方案,中国年代学工作者倾向性  $135 \pm 5$  Ma。无论采用哪种方案,四合屯脊椎动物生存时代均属早白垩世。

**关键词** 四合屯;脊椎动物;玄武安山岩;潜火山岩;Ar-Ar 定年;早白垩世  
**中图分类号** P597.3

### 1 引言

由于陆相地层对比的困难,长期以来有关辽西义县组的地层时代,存在着晚侏罗世、早白垩世和晚侏罗世~早白垩世的不同观点的争论。近几年随着四合屯及周边地区丰富的早期鸟类(Hou LH *et al.*, 1999)、长羽毛或毛状皮肤衍生物恐龙(Chen PJ *et al.*, 1998; Ji Q *et al.*, 1999)等重要化石的发现,又引出新一轮义县组地层时代的争论,其观点仍可分为晚侏罗世(Hou LH *et al.*, 1995; 任东等, 1997)、早

白垩世(汪筱林等,1999; Xu X *et al.*, 1999) 和晚侏罗世~早白垩世(Chen PJ *et al.*, 1998; Ji Q *et al.*, 1998; Hu YM *et al.*, 1997)。同样,年代学研究也存在着分歧,仅四合屯及周边地区赋存脊椎动物化石层位的定年结果就有 124.6 Ma (Swisher *et al.*, 1999)和 145~147 Ma(罗清华等 1999; Lo CH *et al.*, 1999)之分,分别支持早白垩世和晚侏罗世的观点。作者曾对四合屯含脊椎动物化石层位的凝灰岩中锆石进行 U-Pb 定年,其结果为  $125.2 \pm 0.9$  Ma (王松山等, 2001),并指出化石层位应属早白垩世。李佩贤等(2001)根据新的年龄资料也指出,四合屯一带孔子鸟化石层的时代

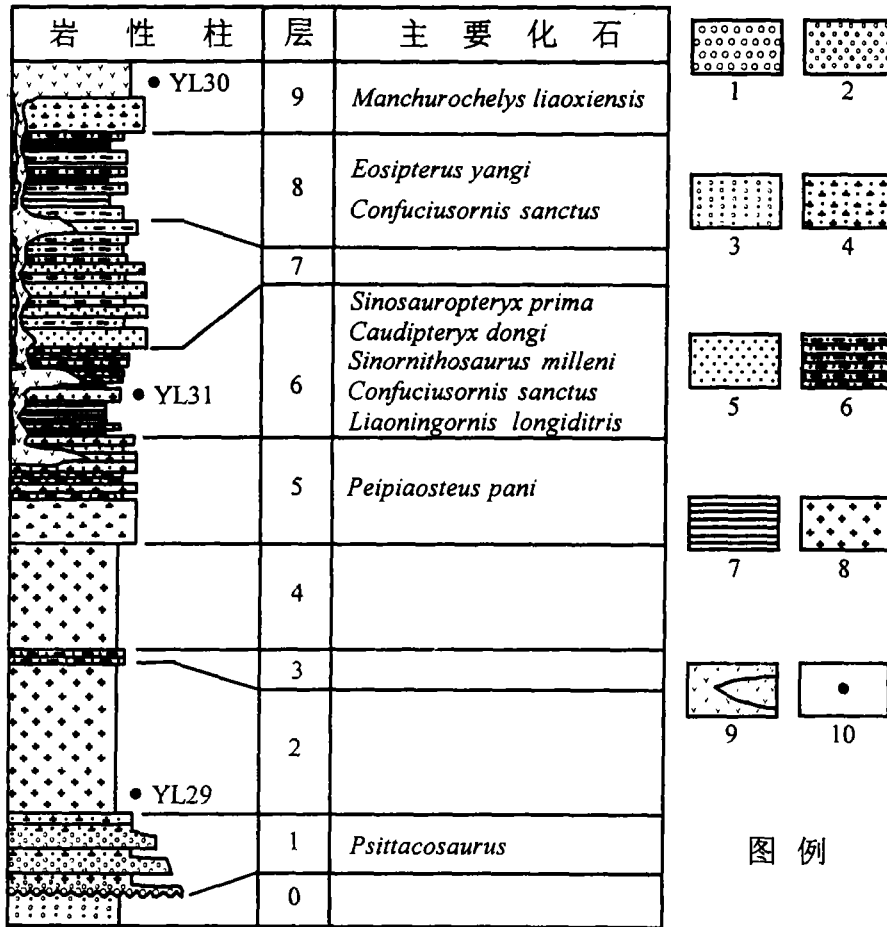


图1 四合屯及周边地区义县组综合地质剖面(根据 Wang XL *et al.*, 2000)

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.砂粒岩;4.凝灰质砂岩;5.中粒砂岩;6.粉砂岩-粉砂质泥岩;7.灰黑色页岩;8.中基性火山岩;9.中基性潜火山岩;10.样品层位

Fig. 1 The composite columnar section of the Yixian Formation in Sihetun and neighboring area, western Liaoning, China (after Wang XL *et al.*, 2000)

表 1  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  快中子活化定年结果  
Table 1  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  Ar dating results

Temp. C	(40/39) <sub>m</sub>	(36/39) <sub>m</sub>	(37/39) <sub>m</sub>	(38/39) <sub>m</sub>	(39) <sub>K,mol</sub>	(39) <sub>K,%</sub>	F	$\sigma F$	t, a	$\sigma t, a$
YL29 玄武安山岩										
							W=0.29645g		J=0.01158	
420	2.000E+01	4.356E-02	1.220E-01	2.416E-01	2.156E-14	9.398E-02	7.110E+00	2.000E-01	1.427E+08	3.862E+06
520	2.593E+01	7.253E-02	3.137E+00	1.758E-01	1.939E-14	8.450E-02	4.729E+00	2.593E-01	9.619E+07	5.133E+06
600	3.312E+01	9.740E-02	1.493E+00	1.061E-01	9.854E-14	4.295E-01	4.426E+00	3.312E-01	9.018E+07	6.573E+06
660	2.089E+01	5.078E-02	1.181E+00	7.156E-02	1.848E-13	8.056E-01	5.952E+00	2.089E-01	1.202E+08	4.084E+06
720	1.141E+01	1.781E-02	6.021E-01	2.563E-02	6.829E-13	2.977E+00	6.162E+00	1.141E-01	1.243E+08	2.228E+06
800	6.987E+00	2.357E-03	4.846E-01	1.232E-02	3.893E-12	1.697E+01	6.300E+00	6.987E-02	1.270E+08	1.365E+06
860	6.640E+00	8.160E-04	4.498E-01	1.244E-02	5.336E-12	2.326E+01	6.406E+00	6.640E-02	1.291E+08	1.296E+06
920	6.480E+00	4.762E-04	6.986E-01	1.267E-02	4.481E-12	1.953E+01	6.366E+00	6.480E-02	1.283E+08	1.266E+06
980	6.851E+00	1.702E-03	1.354E+00	1.404E-02	3.008E-12	1.311E+01	6.429E+00	6.851E-02	1.295E+08	1.337E+06
1040	7.174E+00	3.261E-03	1.887E+00	1.543E-02	1.177E-12	5.130E+00	6.336E+00	7.174E-02	1.277E+08	1.401E+06
1100	7.444E+00	4.036E-03	2.573E+00	1.682E-02	9.505E-13	4.143E+00	6.433E+00	7.444E-02	1.296E+08	1.452E+06
1180	7.103E+00	3.373E-03	2.469E+00	1.607E-02	1.074E-12	4.682E+00	6.280E+00	7.103E-02	1.266E+08	1.388E+06
1250	8.669E+00	8.484E-03	2.498E+00	1.599E-02	9.195E-13	4.008E+00	6.338E+00	8.669E-02	1.278E+08	1.692E+06
1450	1.041E+01	1.392E-02	4.670E+00	2.005E-02	9.236E-13	4.026E+00	6.649E+00	1.041E-01	1.338E+08	2.023E+06
1550	1.765E+01	3.676E-02	8.395E+00	3.431E-02	1.732E-13	7.550E-01	7.452E+00	1.765E-01	1.493E+08	3.397E+06
YL30 辉绿岩										
							W=0.29430g		J=0.008857	
420	1.620E+02	5.157E-01	1.554E-01	3.306E-01	2.583E-14	3.393E-01	9.612E+00	1.620E+00	1.474E+08	2.370E+07
500	1.721E+02	5.600E-01	3.031E+01	3.357E-01	2.927E-14	3.845E-01	9.228E+00	1.721E+00	1.417E+08	2.252E+07
580	3.622E+01	1.058E-01	1.527E+01	1.425E-01	3.913E-14	5.140E-01	6.193E+00	3.622E-01	9.633E+07	5.482E+06
650	4.229E+01	1.215E-01	2.360E+01	2.453E-01	1.798E-14	2.362E-01	8.372E+00	4.229E-01	1.290E+08	6.285E+06
720	1.993E+01	4.626E-02	1.100E+01	1.061E-01	6.229E-14	8.183E-01	7.160E+00	1.993E-01	1.109E+08	2.997E+06
790	1.157E+01	1.214E-02	3.406E+00	3.657E-02	2.982E-13	3.917E+00	8.242E+00	1.157E-01	1.271E+08	1.728E+06
860	8.703E+00	2.703E-03	8.737E-01	1.577E-02	9.474E-13	1.244E+01	7.947E+00	8.703E-02	1.227E+08	1.304E+06
930	8.867E+00	3.148E-03	1.102E+00	1.758E-02	8.132E-13	1.066E+01	7.999E+00	8.867E-02	1.235E+08	1.328E+06
1000	9.029E+00	3.689E-03	1.373E+00	1.990E-02	4.394E-13	5.772E+00	8.025E+00	9.029E-02	1.239E+08	1.352E+06
1070	8.500E+00	2.083E-03	7.577E-01	1.458E-02	1.538E-12	2.018E+01	7.918E+00	8.500E-02	1.223E+08	1.274E+06
1200	8.294E+00	1.641E-03	7.698E-01	1.465E-02	2.184E-12	2.869E+00	7.844E+00	8.294E-02	1.212E+08	1.244E+06
1450	8.916E+00	4.336E-03	2.303E+00	1.836E-02	1.219E-12	1.602E+01	7.797E+00	8.916E-02	1.205E+08	1.337E+06

注：( )：Ar 同位素，m：测量值，F：(40)r/(39)<sub>K</sub>，r：放射成因，K：靶元素钾。

属早白垩世。最近作者采用 Ar-Ar 阶段加热技术对四合屯及周边地区的火山岩和潜火山岩的地质年龄进行研究,以进一步确定四合屯脊椎动物的生存时代。

## 2 地质背景

辽西北票市四合屯及周边地区义县组角度不整合在下伏的侏罗纪土城子组杂色砂岩、含砾砂岩之上,本工作区义县组未见顶,总厚度 100~120m,由 3 段 9 层组成(图 1)。第 1 段(1 层)为冲积扇沉积,含鸚鵡嘴龙、上圆热河龙和强壮爬兽等化石;第 2 段(2~4 层)主要由中基性火山岩组成,其间夹有粉砂岩和粉砂质泥岩薄层;第 3 段(5~9 层)为湖相沉积,主要由砂岩、凝灰质砂岩、页岩等组成,并夹有薄层状凝灰岩。闻名中外的圣贤孔子鸟、杜氏孔子鸟、长趾辽宁鸟、步氏始反鸟等早期鸟类,中华龙鸟、邹氏羽尾龙、董氏羽尾龙、千禧中国鸟龙等带毛恐龙,以及五尖张和兽、金氏热河兽、三燕丽蟾、秀丽郝氏翼龙等大量脊椎动物化石就埋藏在第 3 段第 6 层(Wang XL *et al.*, 2000)。中华狼鳍鱼、杨氏翼手龙等见于第 8 层。第 9 层有辽西满洲龟化石。

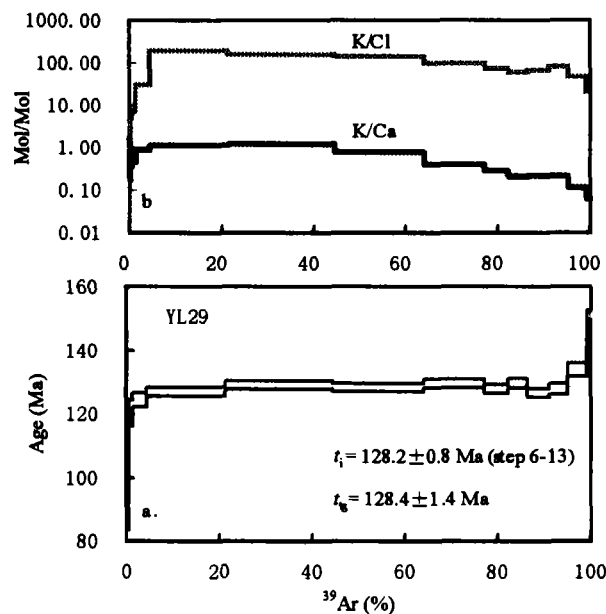


图 2 YL29 玄武安山岩<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年龄谱(a)及 K/Ca、K/Cl 变化

Fig. 2 Age spectrum (a) and K/Ca, K/Cl ratios (b) of YL29 basalt-andesite

YL29 玄武安山岩采自四合屯北东 5km 的黄半吉沟,其层位属图 1 第 2 层下部。岩石暗灰色,致密块状,标本新鲜。镜下显示,岩石具斑状结构,斑晶主要由斜长石和辉石组成,基质则由细长柱状斜长石和细粒状辉石组成。流动构造明显,部分气孔被玉髓和碳酸盐充填。在四合屯及周边地区出

露一套基性潜火山岩(辉绿岩),它侵位在 5~9 层之中,并出露在整个剖面最上部。YL30 辉绿岩即为这种潜火山岩,采自四合屯中国科学院古脊椎动物与古人类研究所人工发掘剖面附近。岩石呈灰黑色,致密块状,非常新鲜。主要矿物是辉石和斜长石,副矿物为磷灰石和磁铁矿。

## 3 实验技术

将标本破碎 60~80 目,为去掉样品中的碳酸盐,采用稀盐酸浸泡数小时,直至 CO<sub>2</sub> 气泡消失为止,之后用清水及蒸馏水冲洗样品,最后再 95℃ 烘干。处理好的两个样品与年龄标准样 ZBH-25 黑云母(K-Ar 年龄 132.7 Ma, 王松山, 1983)和 GA1550 黑云母(K-Ar 年龄 97.9 Ma, McDougall *et al.*, 1974)一起,分两批在北京 49-2 反应堆进行中子照射,照射时的具体要求及对 K、Ca、Cl 干扰同位素的校正,详见文献(王松山等, 1992)。采用英国 VSS 公司生产的 RGA-10 质谱计对 Ar 同位素进行静态分析,其数值已做了本底扣除、时间零点和质量歧视校正。取<sup>40</sup>K 的衰变常数 = 5.54310<sup>-10</sup>/a, <sup>40</sup>K/K = 1.167 × 10<sup>-4</sup>(原子比)。实验结果如表 1 及图 2~5 所示。

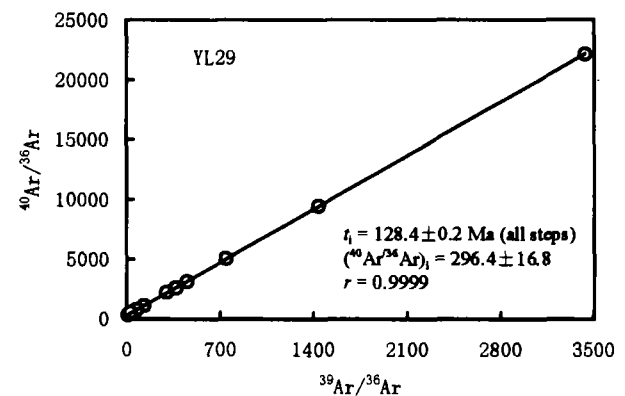


图 3 YL29 玄武安山岩 Ar-Ar 等时线

Fig. 3 <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar vs <sup>39</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar isochron plot of YL29 basalt-andesite

## 4 YL29 玄武安山岩年龄

将 YL29 玄武安山岩从 420℃ 加热至熔融,共分 15 个阶段进行,所得年龄谱见图 2。由 6~13 阶段视年龄组成的坪年龄  $t_p = 128.2 \pm 0.8$  Ma (1 $\sigma$ ),它对应的<sup>39</sup>Ar 析出量高达 90.8%。15 个阶段给出的总气体年龄  $t_g = 128.4 \pm 1.4$  Ma (1 $\sigma$ )。这两个年龄值的吻合表明,YL29 玄武安山岩形成以后未受到后期的热扰动,其放射成因<sup>40</sup>Ar 没有受到热扩散丢失。从理论上讲,总气体年龄与 K-Ar 年龄应是一致的。经中国地震局地质所李大明研究员测定,YL29 的 K = 1.79%,

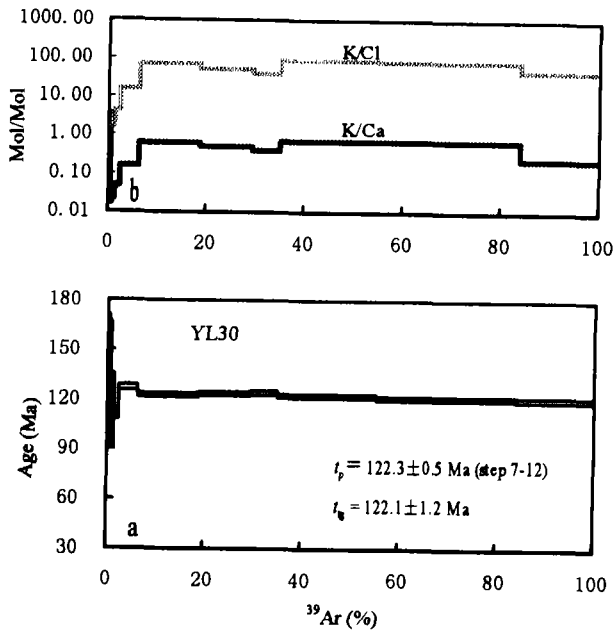


图 4 YL30 辉绿岩 Ar-Ar 年龄谱(a)及 K/Ca、K/Cl 变化(b)

Fig. 4 Ar-Ar age spectrum (a) and K/Ca, K/Cl ratios of YL30 diabase (b)

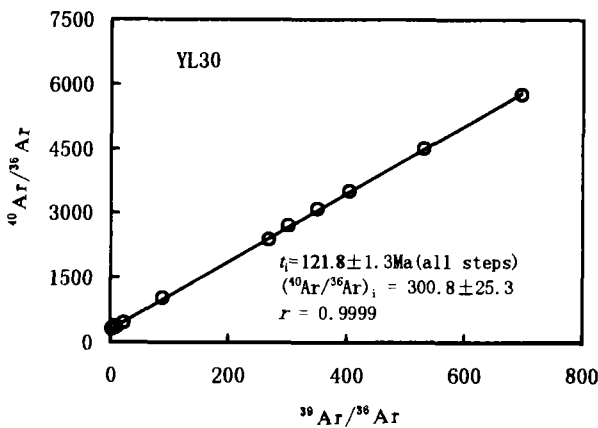


图 5 YL30 辉绿岩 Ar-Ar 等时线

Fig. 5  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  vs  $^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  isochron plot of YL30 diabase

$^{40}\text{Ar}^* = 4.150 \times 10^{-10} \text{ mol/g}$ ,  $^{40}\text{Ar}^*/\text{总}^{40}\text{Ar} = 92.19\%$ , K-Ar 年龄 =  $129.0 \pm 2.6 \text{ Ma}$  ( $1\sigma$ )。图 3 给出的是 YL29 Ar-Ar 等时线, X、Y 轴的 Ar 同位素已做了 K、Ca、Cl 干扰同位素校正, 对全部 15 个阶段数据作图, 其相关系数近于 1, 等时年龄  $t_i = 128.4 \pm 0.2 \text{ Ma}$  ( $1\sigma$ ), 它与坪年龄  $t_p$  完全一致。 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  的初始值为  $296.4 \pm 16.8$ , 与 Nier 值相吻合, 表明此样品

不含过剩 Ar。可以认为, 坪年龄  $t_p$  和等时年龄  $t_i$  具有明确地质意义, 即 YL29 玄武安山岩从冷却至今, 经历了 128.2 Ma。图 2b 显示, 低中温区间 K/Ca 比值略高于中高温的比值。这说明加热实验前半部分析出的馏分主要来自相对富 K 的组分, 即长石; 而后半部则主要来自富 Ca 的组分, 即辉石。由于全岩是由多种矿物组成, 往往造成全岩的 K/Ca 和 K/Cl 比值变化要比单矿物复杂一些。

### 5 YL30 辉绿岩定年结果

从 420 C 到熔融, 共分 12 个加热阶段, 图 4 显示 7~12 阶段视年龄构成一平坦谱线, 它给出的坪年龄  $t_p = 122.3 \pm 0.5 \text{ Ma}$  ( $1\sigma$ ), 所对应的  $^{39}\text{Ar}$  析出率高达 93.8%。由全部 12 个阶段计算出总气体年龄  $t_{ig} = 122.1 \pm 1.2 \text{ Ma}$  ( $1\sigma$ )。图 5 显示 YL30 辉绿岩全部数据弥合成一条相关性极好的等时线, 其等时年龄  $t_i = 121.8 \pm 1.3 \text{ Ma}$  ( $1\sigma$ )。( $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ )<sub>i</sub> =  $300.8 \pm 25.3$ , 与 Nier 值很相近, 表明此辉绿岩不含过剩 Ar。 $t_p$ 、 $t_{ig}$  和  $t_i$  的一致性, 说明 YL30 辉绿岩没受过热扰动的影响,  $^{40}\text{Ar}^*$  未发生热扩散丢失, 坪年龄和等时年龄有明确地质意义: 该岩石的侵位发生在 122 Ma 前, 也就是说, 四合屯脊椎动物生存时代不应晚于此值。

### 6 讨论

四合屯及周边地区义县组地层中, 脊椎动物化石见于综合剖面的第 1、6、8、9 层, 尤以第 6 层为众。上述两块标本的 Ar-Ar 定年结果表明, 第 2~9 层的年龄范围是 128~122 Ma。这一结果支持笔者已报道的第 6 层凝灰岩中锆石 U-Pb 年龄 ( $125.2 \pm 0.9 \text{ Ma}$ ) 和 Swisher *et al.* (1999) 报道的第 6 层凝灰岩中透长石激光 Ar-Ar 年龄 ( $124.6 \pm 0.3 \text{ Ma}$ )。

至于近年发现上圆热河龙 (徐星等, 2000) 和强壮爬兽 (Li JL *et al.*, 2001) 的综合剖面第 1 层的年龄, 根据整个剖面厚度及 YL29 和 YL30 两块标本年龄, 可以推算不会大于 130Ma。YL30 辉绿岩年龄表明, 综合剖面第 9 层的年龄不应小于 122Ma。从而, 可以认为四合屯及周边地区义县组的年龄范围是 130~122Ma。

关于侏罗纪~白垩纪界线年龄, 国际上长期存在争论, 主要有 135Ma (Odin *et al.*, 1992) 和 144Ma (Harland *et al.*, 1982) 两种意见。我国地质年代学者倾向  $135 \pm 5 \text{ Ma}$  (地质矿产部中国同位素地质年表工作组, 1987)。王鸿祯等 (1990) 建议中国地层的这一界线年龄取 135 (140) Ma。无论采用哪种方案, 本文发表的 YL29 玄武安山岩和 YL30 辉绿岩的 Ar-Ar 年龄数据表明, 四合屯脊椎动物生存时代应属早白垩世。

**致谢** 作者衷心感谢马志邦和常征路高级工程师给予的帮助和有意义的讨论。

## References

- Chen PJ, Dong ZM and Zhen SN. 1998. An exceptionally well-preserved dinosaur from the Yixian Formation of China. *Nature*, 391:147-152
- Harland WB, Cox AV, Liewelly PG, Pickton CA, Smith AG and Walters R. 1982. *A Geological Time Scale*. London: Cambridge University Press, 4-5, 52-53, 91-94
- Hou LH and Zhou ZH. 1998. Paleornithology: a general review. *Chinese Science Bulletin*, 44 (23): 2113-2116
- Hou LH, Zhou ZH, Martin CD and Feduccia AA. 1995. A beaked bird from the Jurassic of China. *Nature*, 377: 616-618
- Hu YM, Wang YQ, Luo ZX and Li CK. 1997. A new symmetrodont mammal from China and its implications for mammalian evolution. *Nature*, 390:137-142
- Ji Q, Currie PJ, Norell MA and Ji SA. 1998. Two feathered dinosaurs from northeastern China. *Nature*, 393:753-761
- Ji Q, Luo ZX and Ji SA. 1999. A Chinese triconodont mammals and mosaic evolution of the mammalian skeleton. *Nature*, 398: 326-330
- Li PX, Chen ZW and Pang QQ. 2001. The horizon and age of the Confuciusornis in Peipiao, western Liaoning. *Acta Geologica Sinica*, 75 (1): 1-13 (in Chinese with English abstract)
- Li JL, Wang Y, Wang YQ and Li CK. 2001. A new family of primitive mammal from the Mesozoic of western Liaoning, China. *Chinese Science Bulletin*, 46 (9): 782-786 (in Chinese)
- Lo CH, Chen PJ, Tsou TY, Sun SS and Lee CY. 1999. Age of Sinosauropteryx and Confuciusornis -  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  laser single-grain and K-Ar dating of the Yixian Formation, NE China. *Geochimica*, 28 (4): 405-409 (in Chinese with English abstract)
- Lo CH, Chen PJ, Tsou TY, Sun SS and Lee CY. 1999.  $^{40}\text{Ar}$ / $^{39}\text{Ar}$  laser single-grain and K-Ar dating of the Yixian Formation, NE China. *Palaeoworld*, (11): 328-340 (in English with Chinese abstract)
- McDougall I and Roksandic Z. 1974. Total fusion  $^{40}\text{Ar}$ / $^{39}\text{Ar}$  ages using HIFAR reactor. *Journal of the Geological Society of Australia*, 21, 81-89
- Odin GS, Galbrum B and Renard M. 1992. Physic-chemical tool in Jurassic stratigraphy. *Bulletin of Liaison and Information of IUGS Subcommission on Geochronology*, 10: 39-50
- Ren D, Guo ZG, Lu LW, Ji SA, Tan F, Jing, YG, Fang XS and Ji Q. 1997. A further contribution to the knowledge of the Upper Jurassic Yixian Formation in western Liaoning. *Geological Review*, 43(5): 449-459 (in Chinese with English abstract)
- Swisher CC, Wang YQ, Wang XL, Xu X, and Wang Y. 1999. Cretaceous age of the feathered dinosaurs of Liaoning, China. *Nature*, 400:58-61
- Wang HZ and Li GC. 1990. *Correlation Table of Stratigraphical Subdivision*. Beijing: Geological Publishing House. 1 (in Chinese)
- Wang SS. 1983. Age determinations of  $^{40}\text{Ar}$ - $^{40}\text{K}$ ,  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  and radiogenic  $^{40}\text{Ar}$  released characteristics on K-Ar geostandards of China. *Scientia Geologica Sinica*, (4): 315-323 (in Chinese with English abstract)
- Wang SS, Hu SL, Sang HQ, Qiu J, Cordani UG and Kawashita K. 1992. BSP-1 hornblende, a 2 Ga age standard as flux monitor of  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating. *Acta Petrologica Sinica*, 8 (2): 103-127 (in Chinese with English abstract)
- Wang SS, Wang YQ, Hu HG and Li HM. 2001. The existing time of Sihetun vertebrate in western Liaoning, China; Evidence from U-Pb age of zircon. *Chinese Science Bulletin*, 46 (9): 779-782 (in Chinese with English abstract)
- Wang XL, Wang YQ, Ji F, Xu X, Wang Y, Zhang JY, Zhang FC, Tong ZL, Li C and Gu G. 1999. The Sihetun fossil vertebrate assemblage and its geological setting of western Liaoning, China. *Palaeoworld*, (11): 310-327 (in Chinese with English abstract)
- Wang XL, Wang YQ, Zhou ZH, Jin F, Zhang JY and Zhang FC. 2000. Vertebrate faunas and biostratigraphy of the Jehol Group in western Liaoning, China. *Vertebrata Palasiatica*, 38 (supplement): 41-56
- Wang Y and Gao KQ. 1999. Earliest Asian discoglossid frog from western Liaoning. *Chinese Science Bulletin*, 44 (7): 676-682
- Wang Y. 2000. A new salamander (Amphibia: Caudata) from the Early Cretaceous Jehol Biota. *Vertebrata Palasiatica*, 38 (2): 100-103 (in Chinese with English abstract)
- Work Group on the Geological Time Scale MGMR. 1987. *A Geological Time Scale of China*. Beijing: Geological Publishing House, 92-95 (in Chinese with English abstract)
- Xu X, Tang ZL and Wang XL. 1999. A therizinosaurid dinosaur with integumentary structures from China, *Nature*, 399:350-354
- Xu X, Wang XL and You HL. 2000. A primitive ornithomimid from the Early Cretaceous Yixian Formation of Liaoning. *Vertebrata Palasiatica*, 38 (4): 318-325 (in Chinese with English abstract)

## 附中文参考文献

- 地质矿产部中国同位素地质年表工作组. 1987. 中国同位素地质年表. 北京:地质出版社, 92-105
- 李锦玲,王原,王元青,李传夔. 2000. 辽宁西部中生代原始哺乳类动物一新科. *科学通报*, 45 (23):2545-2549
- 李佩贤,程政武,庞其清. 2001. 辽西北票孔子鸟 Confuciusornis 的层位及年代. *地质学报*, 75 (1):1-13
- 罗清华,陈丕基,邹东羽,孙贤金,李奇山. 1999. 中华龙鸟与孔子鸟的时代-辽西义县组火山凝灰岩激光 $^{40}\text{Ar}$ / $^{39}\text{Ar}$ 年龄测定. *地球化学*, 28(4):405-409
- 任东,郭子光,芦立伍,姬书安,唐烽,靳锐高,方晓思,季强. 1997. 辽宁西部上侏罗统义县组研究新进展. *地质论评*, (43)5:449-459
- 王鸿祯,李光岑. 1990. 国际地层时代对比表. 北京:地质出版社, 1
- 王松山. 1983. 我国 K-Ar 法标准样 $^{40}\text{K}$ - $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄测定及放射成因 $^{40}\text{Ar}$ 的析出特征. *地质科学*, (4):315-323
- 王松山,胡世玲,桑海清,裘冀, Cordani UG, Kawashita K. 1992. 氩-氩定年法国际标准物质 BSP-1 角闪石的研制. *岩石学报*, 8 (2): 103-127
- 王松山,王元青,胡华光,李惠民. 2001. 辽西四合屯脊椎动物生存时代:锆石 U-Pb 年龄证据. *科学通报*, 46 (4):330-333
- 汪筱林,王元青,金帆,徐星,王原,张江水,张福成,唐治路,李淳,顾罡. 1999. 辽西北票四合屯脊椎动物化石组合及其地质背景. *Palaeoworld*, (11):310-327
- 王原. 2000. 早白垩世热河生物群一新的有尾两栖类. *古脊椎动物学报*, 38(2):100-103
- 徐星,汪筱林,尤鲁海. 2000. 辽宁早白垩世一原始鸟脚类恐龙. *古脊椎动物学报*, 38(4):318-325