

# 北京延庆高于庄组凝灰岩的锆石 U-Pb 定年研究及其对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束<sup>\*</sup>

李怀坤<sup>1</sup> 朱士兴<sup>1</sup> 相振群<sup>1</sup> 苏文博<sup>2</sup> 陆松年<sup>1</sup> 周红英<sup>1</sup> 耿建珍<sup>1</sup> 李生<sup>1</sup> 杨锋杰<sup>3</sup>  
 LI HuaiKun<sup>1</sup>, ZHU ShiXing<sup>1</sup>, XIANG ZhenQun<sup>1</sup>, SU WenBo<sup>2</sup>, LU SongNian<sup>1</sup>, ZHOU HongYing<sup>1</sup>, GENG JianZhen<sup>1</sup>, LI Sheng<sup>1</sup> and YANG FengJie<sup>3</sup>

1. 天津地质矿产研究所, 天津 300170

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

3. 山东科技大学地质科学与工程学院, 青岛 266510

1. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China

2. School of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3. College of Geological Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China

2010-03-22 收稿, 2010-05-26 改回.

Li HK, Zhu SX, Xiang ZQ, Su WB, Lu SN, Zhou HY, Geng JZ, Li S and Yang FJ. 2010. Zircon U-Pb dating on tuff bed from Gaoyuzhuang Formation in Yanqing, Beijing: Further constraints on the new subdivision of the Mesoproterozoic stratigraphic in the northern North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2131–2140

**Abstract** A tuff bed in the upper horizon of Gaoyuzhuang Formation has been newly discovered in Yanqing County, Beijing. Two almost identical precise zircon U-Pb ages,  $1559 \pm 12\text{Ma}$  (SHRIMP) and  $1560 \pm 5\text{Ma}$  (LA-MC-ICPMS), have been obtained for the tuff bed, which indicates that the Gaoyuzhuang Formation in the northern North China Craton was formed in the early stage of Mesoproterozoic Calymmian Period (1600 ~ 1400Ma). Combining with the available zircon U-Pb age data (1622 ~ 1625Ma) for the volcanics from the upper part of Dahongyu Formation, the lower boundary age of Gaoyuzhuang Formation could be accurately positioned at 1600Ma. Moreover, with the newly determined SHRIMP U-Pb age (~1440Ma) of the K-bentonite in Tieling Formation, the authors therefore propose again that the basal boundary of Gaoyuzhuang Formation should be taken as the lower boundary of Mesoproterozoic Jixian System. The voluminous carbonate succession from Gaoyuzhuang Formation to Tieling Formation with time span of 1600Ma to 1400Ma comprises the Jixian System, almost identically comparable with the international Mesoproterozoic Calymmian System. The new achievement in dating on the tuff of the Gaoyuzhuang Formation provides strong age constraints on the Meso- to Neoproterozoic stratigraphic subdivision and other relevant important scientific issues in the northern North China Craton.

**Key words** North China Craton; Gaoyuzhuang Formation; SHRIMP & LA-MC-ICPMS U-Pb dating; Calymmian Period

**摘要** 作者最近在北京延庆高于庄组张家峪亚组上部发现了凝灰岩,并测得了该凝灰岩中锆石  $1559 \pm 12\text{Ma}$  的 SHRIMP U-Pb 年龄和  $1560 \pm 5\text{Ma}$  的 LA-MC-ICPMS U-Pb 年龄。这一新的高精度定年结果表明,华北北部高于庄组形成于中元古代初期的盖层纪(Calymmian Period, 1600 ~ 1400Ma)早期。结合早先大红峪组火山岩的锆石 U-Pb 年龄(1622 ~ 1625Ma),现在可以确切地将高于庄组的底界年龄限定在 1600Ma 左右。结合最近在铁岭组斑脱岩获得的锆石 U-Pb 年龄(~1440 Ma),本文再次建议,应将华北中元古界蓟县系的底界下拉到高于庄组底界,自该组底部(1600Ma)到铁岭组顶部(1400Ma)的巨厚碳酸盐岩序列都属于新定义的蓟县系,并对应于国际中元古界的盖层系,高于庄组与大红峪组之间的界线则可作为蓟县系与长城系的分界标志。高于庄组凝灰岩锆石的精确定年,为华北北部中元古界年代地层划分等研究,提供了直接的年代学约束。

**关键词** 华北克拉通; 高于庄组; SHRIMP 和 LA-MC-ICPMS U-Pb 定年; 盖层纪

中图法分类号 P534.3; P597.3

\* 本文受中国地质调查局国土资源大调查项目(1212010611802)、国家自然科学基金项目(40772076)和中石化海相前瞻性研究项目(YPH08086)联合资助。

第一作者简介: 李怀坤,男,1963年生,研究员,从事前寒武纪地质学和同位素地质年代学研究, E-mail: tjhuaikun@cgs.gov.cn

华北北部的高于庄组来源于高振西等(1934)定义的“高于庄灰岩”(Kao *et al.*, 1934),1959年第一次全国地层会议后改称高于庄组(全国地层委员会,1962)。该组是一套以碳酸盐岩为主的沉积,在标准剖面——天津蓟县下营乡高于庄村一带,其总厚度为1596m,可分四个亚组(陈晋镛等,1980)或四段(河北省地质矿产局,1989;陈晋镛等,1996)。该组在华北北部有着广泛的分布,并被认为是中元古时期第一次大规模海侵的产物(陈晋镛等,1980;河北省地质矿产局,1989)。钟富道(1977)根据对河北兴隆高板河铅锌矿层的Pb-Pb定年,将高于庄组的形成年龄确定为1434Ma左右,并认为其顶界年龄不应小于1400Ma。基于这一研究,高于庄组一直被置于长城系顶部,并对应于国际中元古代中期(陈晋镛等,1996;全国地层委员会,2001;Lu *et al.*, 2008)。

关于高于庄组的时代归属问题主要因为对其与上覆和下伏地层接触关系的不同认识,历来有不同意见,可概括为下列三种方案。第一种意见是认为高于庄组与上覆杨庄组之间为平行不整合接触关系,而与下伏大红峪组之间则为整合过渡关系,因而主张将高于庄组与下伏的常州沟组、串岭沟组、团山子组和大红峪组一起归入长城系的顶部(Kao *et al.*, 1934;全国地层委员会,1962,2001)。并根据钟富道(1977)对河北兴隆高板河铅锌矿层的Pb-Pb定年资料,将长城系和高于庄组的顶界年龄确定为1400Ma(Sun and Lu, 1985;陈晋镛等,1996;全国地层委员会,2001;Lu *et al.*, 2008)。第二种方案与第一种意见相反,认为高于庄组与下伏的大红峪组之间存在明显的平行不整合接触界面,而与上覆的杨庄组之间却为连续沉积,因而主张将高于庄组与上覆的杨庄组、雾迷山组、洪水庄组和铁岭组一起划归蓟县系,为蓟县系的早期地层(申庆荣和廖大从,1958),并按照地层对比关系,以及后来大红峪组的年龄资料,推测其下界年龄大致为1600Ma。第三种意见则是将高于庄组与下伏的大红峪组另建新系(或新群),称南口系(或群),位于长城系和蓟县系之间(钟富道,1977;陈晋镛等,1980)。本文作者根据多年来对上述各组界线性质的研究结果,确认高于庄组与下伏大红峪组之间存在明显的沉积间断,与上覆杨庄组主要为连续沉积关系,因而一直持将高于庄组向上划归蓟县系的第二种意见(Zhu and Chen, 1992;Lu *et al.*, 1996)。

最近本文作者在北京延庆高于庄组第三亚组发现了凝灰岩并分选出了岩浆锆石,对其进行了高精度的SHRIMP和LA-MC-ICPMS U-Pb定年研究,分别获得了 $1559 \pm 12$ Ma和 $1560 \pm 5$ Ma的年龄。这是继早先在华北北部下马岭组(高林志等,2007;2008;Su *et al.*, 2008)及最近铁岭组取得测年突破(苏文博等,2010)之后的又一新进展,为高于庄组以及华北北部中新元古界年代地层系统的重新厘定提供了重要的年代约束。

## 1 地质背景和测年样品的岩石学特征

研究区位于北京延庆北部,属于华北克拉通北缘中-新

元古代燕山裂陷槽中段(图1)。自古元古代末期(约1800Ma)的吕梁运动导致华北克拉通结晶基底形成以后,标志哥伦比亚超大陆裂解作用在华北克拉通上的具体响应的燕山裂陷槽于中元古代初期开始发育,形成了巨厚的中-新元古界。本文研究区位于延庆红旗甸附近地区,自下而上发育中-新元古界常州沟组、串岭沟组、团山子组、大红峪组、高于庄组、雾迷山组、洪水庄组、铁岭组、下马岭组、长龙山组和景儿峪组(高于庄组和雾迷山组之间的杨庄组在研究区不发育)。中元古界最下部的常州沟组角度不整合于新太古代红旗营子群之上,之上被中、下寒武统毛庄-徐庄组不整合覆盖或二者呈断层接触关系。区内广泛发育中生界下侏罗统门头沟组、中侏罗统髫髻山组和上侏罗统后城组,它们以角度不整合覆盖于中-新元古界之上,或呈断层接触关系。该地区中-新元古界主要为河流相碎屑岩和滨海-浅海相碎屑岩、粘土岩、碳酸盐岩沉积,含有丰富的叠层石和微体、微古植物化石。

本文研究的测年样品为采自北京市延庆县红旗甸乡下马鹿沟村附近的高于庄组第三亚组——张家峪亚组的上部层位的凝灰岩,距离第三亚组和第四亚组的界线约75m(地层厚度),采样点地理坐标:  $N40^{\circ}44.282'$ ,  $E116^{\circ}12.883'$ 。高于庄组自下而上由四个亚组构成:官地亚组、桑树鞍山组、张家峪亚组和环秀寺亚组。官地亚组主要岩石组成为浅灰、深灰中厚层燧石条带白云岩夹薄层含藻白云岩,底部有含砂白云岩;桑树鞍山组主要由灰白色中厚层白云岩及薄层钙质、泥质白云岩组成,局部有含锰页岩;张家峪亚组由深灰色中厚层白云岩和薄层板状白云岩组成;环秀寺亚组由灰白、浅灰色中厚-厚层白云岩夹薄层及巨厚层白云岩和燧石条带白云岩组成。

在张家峪亚组的上部灰色中厚层状灰质白云岩中夹有一层1.4m厚的凝灰岩(图2),野外露头呈墨绿色,通过显微镜下薄片鉴定为白云石化硅化流纹质玻屑凝灰岩(图3),岩石主要由火山玻屑(65%~70%)、火山尘(30%~35%)和少量晶屑组成。玻屑呈棒状、鸡骨状、弧面棱角状,成层分布;晶屑主要为石英,少量白云母、黑云母,呈棱角状,粒径0.02~0.08mm,零星可见;细小火山尘物质充填玻屑、晶屑空隙间。见玻屑、晶屑被白云石和硅质(玉髓、微粒石英)顺层不均匀交代。从该凝灰岩中选出的测年矿物锆石为短柱状自型晶体,短轴/长轴为1/2左右,锆石长轴一般为100~150 $\mu$ m,阴极荧光图像显示锆石内部发育密集的震荡生长环带,具有典型的岩浆锆石特征(图4)。

## 2 实验方法和测年结果

野外采集新鲜的凝灰岩样品约30kg,首先用水将样品表面清洗并晾干、粉碎至80目,然后经过用水粗淘、强磁分选、电磁分选和用酒精细淘之后,在实体显微镜下手工挑选出锆石。锆石分选工作在河北省廊坊区域地质调查所实验室完

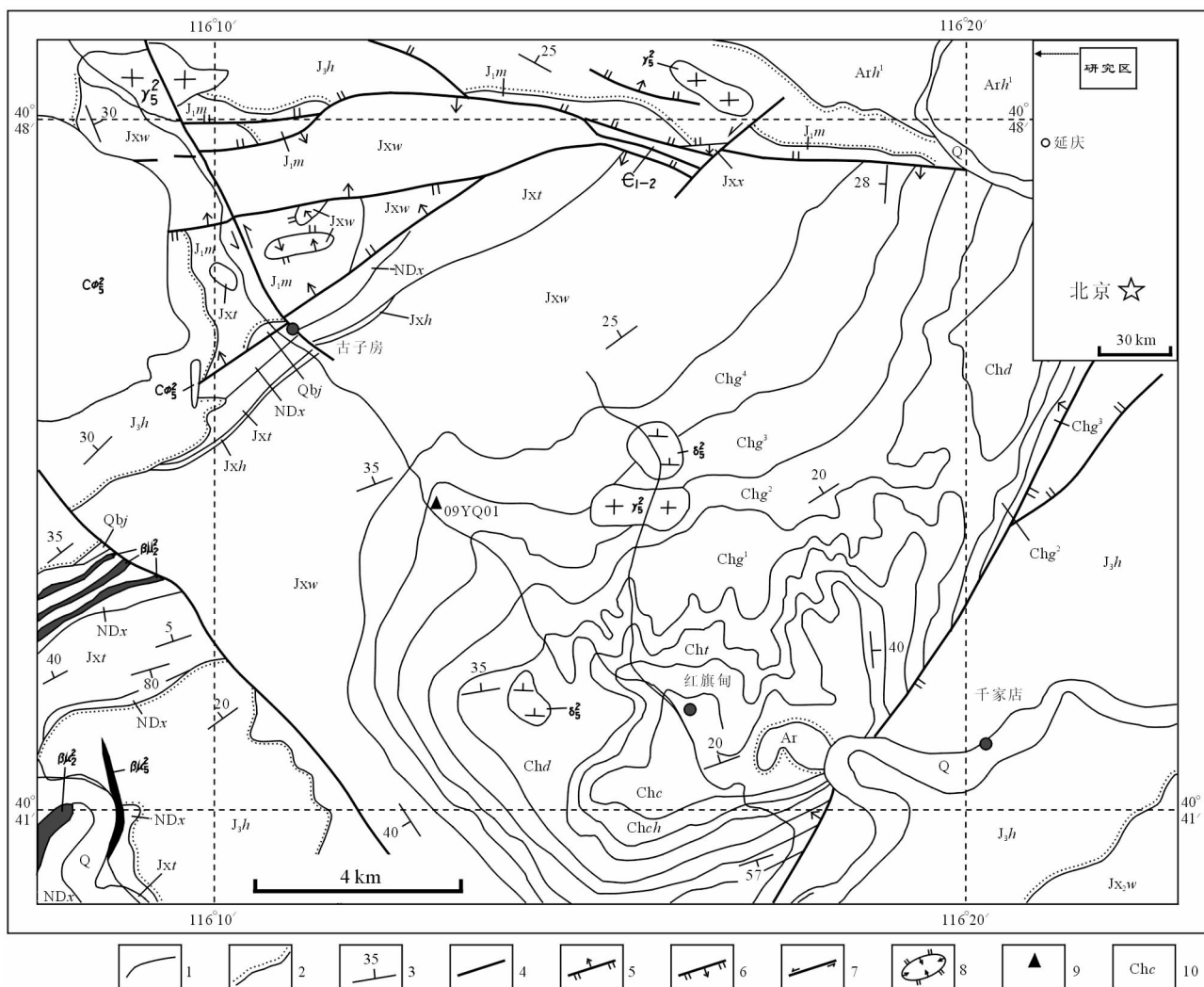


图1 研究区地质略图(据1:20万丰宁幅地质图①修改)

1-地层界线;2-角度不整合界线;3-地质体产状;4-断层;5-逆断层;6-正断层;7-平移断层;8-飞来峰;9-采样点;10-地层、岩体、岩脉代号:Ar-太古界片麻岩,Arh<sup>1</sup>-太古界红旗营子群一段,Chc-长城系常州沟组,Chch-长城系串岭沟组,Chr-长城系团山子组,Chd-长城系大红峪组,Jxg<sup>1</sup>-蓟县系高于庄组第一亚组,Jxg<sup>2</sup>-蓟县系高于庄组第二亚组,Jxg<sup>3</sup>-蓟县系高于庄组第三亚组,Jxg<sup>4</sup>-蓟县系高于庄组第四亚组,Jxw-蓟县系雾迷山组,Jxh-蓟县系洪庄组,Jxt-蓟县系铁岭组,NDx-待建系下马岭组,Qbj-青白口系景儿峪组,ε<sub>1,2</sub>-寒武系毛庄组-徐庄组,J<sub>1m</sub>-下侏罗统门头沟组,J<sub>3h</sub>-上侏罗统后城组,Q-第四系,βu<sub>2</sub>-中元古代辉绿岩,βu<sub>3</sub>-燕山期辉绿岩,δ<sub>3</sub>-燕山期闪长岩,γ<sub>3</sub>-燕山期花岗岩,CΦ<sub>3</sub>-燕山期钠长斑岩

Fig. 1 Geological sketch map of the studied area

成。锆石测年分别采用高灵敏度高分辨率离子探针质谱法(SHRIMP)和激光烧蚀多接收器等离子体质谱法(LA-MC-ICPMS)两种方法。

锆石 U-Pb 测年工作首先需要制作锆石环氧树脂靶。在实体显微镜下挑选裂隙相对少、表面尽量洁净、透明度相对较高的锆石约 100 粒制作环氧树脂样品靶,经过打磨和抛光后,拍摄锆石反射光和透射光、阴极荧光(CL)图像。SHRIMP 测年锆石样品靶在北京离子探针中心制备,LA-MC-ICPMS 测年样品靶在天津地质矿产研究所同位素实验室制

备,锆石阴极荧光图像照相在北京离子探针中心完成。

SHRIMP 法年龄测定:在北京离子探针中心利用高灵敏度高分辨率离子探针质谱仪(SHRIMP II)进行锆石微区原位 U-Pb 同位素测定,详细分析流程及原理参见 Compston *et al.* (1984,1992)、Williams (1998) 和宋彪等(2002)的文献。测试过程中采用标准锆石 TEMORA 1(Black *et al.*, 2003)(参考年龄为 417 Ma)进行同位素分馏校正,使用标准锆石 M257(参考年龄为 561.3 ± 0.3 Ma,U 含量为 840 × 10<sup>-6</sup>,Th/U 为 0.27)标定所测锆石的 U、Th 和 Pb 的含量(Nasdala *et al.*,

① 河北省地质局. 1972. 中华人民共和国 1:20 万丰宁幅(K-50-XXVII)地质图及说明书

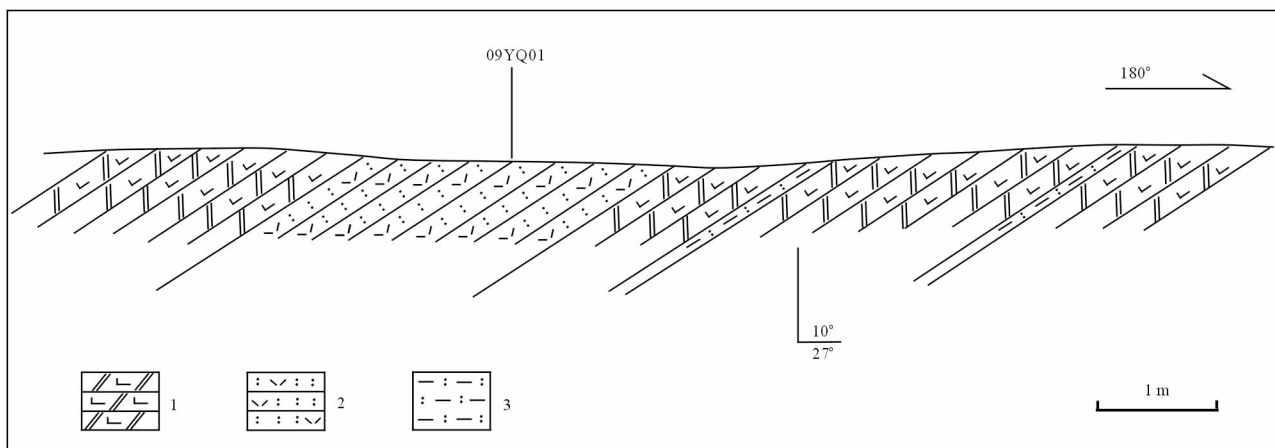


图2 高于庄组上部凝灰岩采样位置剖面图

1-灰质白云岩;2-流纹质玻屑凝灰岩;3-凝灰质泥页岩

Fig. 2 Tuff sample-collecting cross-section of the upper part of Gaoyuzhuang Formation

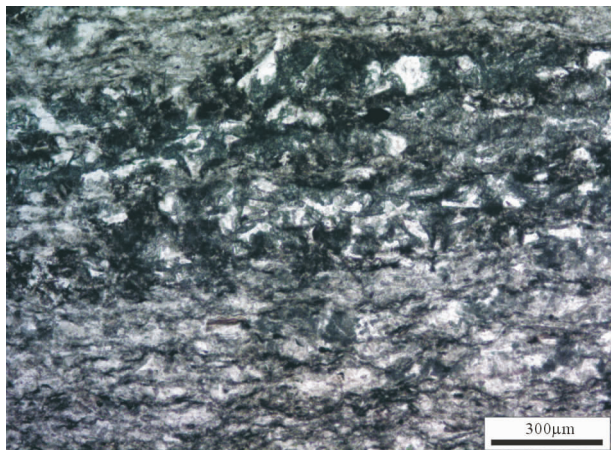


图3 高于庄组流纹质玻屑凝灰岩显微照片(单偏光)

Fig. 3 Photomicrograph of the rhyolitic vitric tuff in Gaoyuzhuang Formation (plane polarized light)

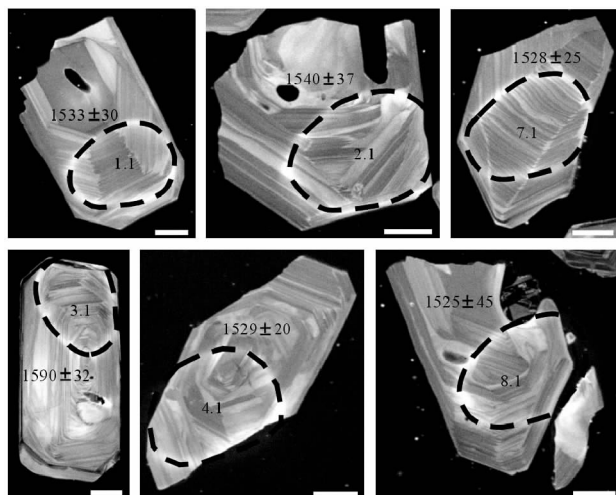


图4 凝灰岩中锆石阴极发光图像(比例尺的线段长度为20 $\mu\text{m}$ )

Fig. 4 Cathodoluminescence images of zircons from the tuff (scale bar is 20 $\mu\text{m}$  long)

2008)。应用 SQUID 和 Isoplot 程序进行数据处理(Ludwig, 2001, 2003),采用锆石样品中实际测得的 $^{204}\text{Pb}$ 进行普通 Pb 校正。

LA-MC-ICPMS 年龄测定:对同一个样品在天津地质矿产研究所同位素实验室利用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)进行了微区原位 U-Pb 同位素测定(李怀坤等,2009a)。天津地质矿产研究所同位素实验室的激光烧蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)系统的多接收器电感耦合等离子体质谱仪为 Thermo Fisher 公司制造的 Neptune,其离子光学通路采用能量聚焦和质量聚焦的双聚焦设计,并采用动态变焦(ZOOM)使质量色散达到 17%;仪器配有 9 个法拉第杯接收器和 4 个离子计数器接收器,除了中心杯和离子计数器外,其余 8 个法拉第杯配置在中心杯的两侧,并以马达驱动进行精确的位置调节,4 个离

子计数器捆绑在 L4 法拉第杯上。与等离子体质谱仪配套的进样设备激光器为美国 ESI 公司生产的 UP193-FX ArF 准分子激光器,激光波长 193nm,脉冲宽度 5ns,束斑直径为 1、2、10、20、25、35、50、75、76、100 和 150 $\mu\text{m}$  可调,脉冲频率 1 ~ 200Hz 连续可调。根据锆石阴极荧光照片、显微镜下反射光和透射光照片选择锆石的合适(感兴趣)的测年晶域,利用 193nm 激光器对锆石进行剥蚀,通常采用的激光剥蚀的斑束直径为 35 $\mu\text{m}$  或 50 $\mu\text{m}$ ,激光能量密度为 10 ~ 11J  $\cdot$  cm $^{-2}$ ,频率为 8 ~ 10Hz,激光剥蚀物质以 He 为载气送入 Neptune 的电感耦合等离子体,锆石中的 U、Pb 在 8000 $^{\circ}\text{C}$  以上的高温等离子体中发生离子化,利用动态变焦扩大色散可以同时接收质量数相差很大的 U-Pb 同位素从而进行锆石微区



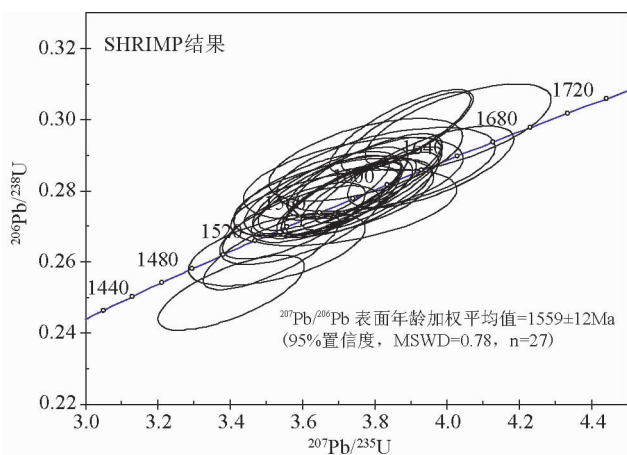


图5 凝灰岩中锆石 SHRIMP U-Pb 同位素谐和图

Fig. 5 SHRIMP U-Pb concordia diagram of the zircon from the tuff

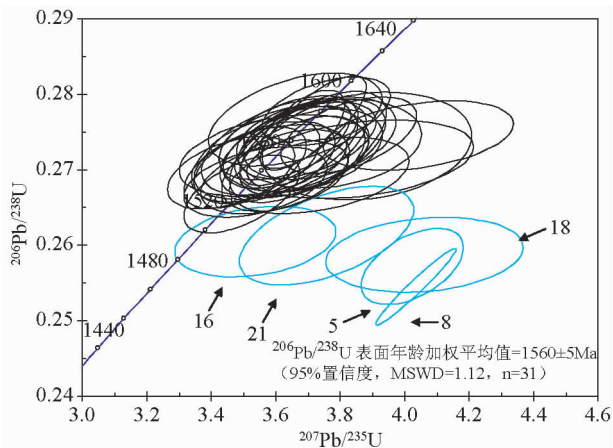


图6 凝灰岩中锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 同位素谐和图

Fig. 6 LA-MC-ICPMS U-Pb concordia diagram of the zircon from the tuff

U-Pb 同位素原位同时测定。采用 TEMORA 和 GJ-1 作为外部锆石年龄标准进行 U、Pb 同位素分馏校正 (Black *et al.*, 2003; Jackson *et al.*, 2004)。采用中国地质大学刘勇胜博士研发的 ICPMSDataCal 程序 (Liu *et al.*, 2009) 和 Ludwig KR 的 Isoplot 程序 (Ludwig, 2003) 进行数据处理, 采用  $^{208}\text{Pb}$  校正法对普通铅进行校正 (Andersen, 2002)。利用 NIST612 玻璃标样作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量。LA-MC-ICPMS 年龄测定实验条件和关键参数: 接收器设置—L4,  $^{206}\text{Pb}$ ; L3,  $^{207}\text{Pb}$ ; L2,  $^{208}\text{Pb}$ ; C, 219.26; H2,  $^{232}\text{Th}$ ; H4,  $^{238}\text{U}$ 。冷却气体  $16\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ , 辅助气体  $0.75\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ , Ar 载气  $0.968\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ , He 载气  $0.86\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。RF 功率 1251W, 积分时间 0.131s, 样品信号采集时间 60s (其中 20s 为空白的测定)。

利用离子探针测定了 27 个锆石 U-Pb 同位素数据点, 从

测定结果 (表 1) 可以看出, 该样品锆石的 U-Pb 同位素体系保持得很好, 获得了基本谐和的 U-Pb 同位素数据, 数据点基本都落在谐和线上 (图 5), 全部 27 个测点的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表面年龄加权平均值为  $1559 \pm 12\text{Ma}$  (95% 置信度,  $\text{MSWD} = 0.78, n = 27$ )。锆石中 Th、U 含量分别为  $54 \times 10^{-6} \sim 246 \times 10^{-6}$  和  $74 \times 10^{-6} \sim 197 \times 10^{-6}$ , Th/U 为 0.51 ~ 1.29。

利用激光烧蚀多接收器等离子体质谱法测定了 36 个锆石 U-Pb 同位素数据点 (表 2), 除了 5 个数据点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄偏小, 谐和度相对较差, 其他 31 个数据点为基本一致的谐和年龄数据点 (图 6), 它们的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄加权平均值为  $1560 \pm 5\text{Ma}$  (95% 置信度,  $\text{MSWD} = 1.12, n = 31$ ), 该年龄值与 SHRIMP 测定结果在误差范围内完全一致。根据研究可知, 高于庄组第三段上部凝灰岩准确的形成年龄应为 1560 Ma。

### 3 讨论

#### 3.1 高于庄组形成时限的直接确认

20 世纪 70 年代, 根据对河北兴隆高板河一带高于庄组所产沉积型铅锌矿层的测年研究, 获得了介于 1384 ~ 1485Ma 间的 Pb-Pb 年龄 (钟富道, 1977)。人们将该组的形成年限确定为 1434Ma 左右, 推测其顶界应不小于 1400Ma, 遂被划归“长城纪”晚期, 大体对应于后来的中元古代盖层纪 (Calymnian Period, 1600 ~ 1400Ma) (Gradstein *et al.*, 2004), 并沿用至今 (陈晋铨等, 1980, 1996; Chen *et al.*, 1981; 全国地层委员会, 2001; Lu *et al.*, 2008)。

陆松年和李惠民 (1991) 在大红峪组中上部的富钾粗面玄武岩夹层里获得了  $1625 \pm 6\text{Ma}$  的锆石 U-Pb 年龄后, 人们对其上覆地层——高于庄组的形成时限有了一些新的看法, 认为该组的实际年龄应大于 1434Ma, 但一直没有获得更直接的证据。虽然 2002 年张巧大等利用碳酸盐岩定年方法, 在北京十三陵附近的高于庄组获得了  $1608 \pm 74\text{Ma}$  的数据 (张巧大等, 2002), 但是因为该方法本身的局限性 (张巧大等同时还在雾迷山组获得了  $1373 \pm 92\text{Ma}$ 、在杨庄组获得了  $1488 \pm 55\text{Ma}$  的年龄数据), 这一数据并没有得到广泛认可。

本文高精度的锆石 U-Pb 测年结果表明, 高于庄组第三亚组含有年龄为  $1559 \pm 12\text{Ma}$  (SHRIMP) 和  $1560 \pm 5\text{Ma}$  (LA-MC-ICPMS) 的凝灰岩, 这对高于庄组的地层时限提供了很好的制约。由于下伏大红峪组中上部火山岩夹层的锆石 U-Pb 年龄为 1622 ~ 1625Ma (陆松年和李惠民, 1991; Lu *et al.*, 2008), 可进一步将高于庄组的底界 (即大红峪组与高于庄组的界线) 年龄限定在 1600Ma 左右, 因此整个高于庄组的形成时限大致应在 1600 ~ 1550Ma 之间。

此外, 本文测年样品采自其张家峪组的上部, 而其下正是高于庄组的主要化石层和生油层, 因此本文高精度的锆石 U-Pb 测年结果对这些主要化石层和生油层提供了精确的时代限定。

表1 凝灰岩中锆石 SHRIMP U-Pb 同位素分析结果

Table 1 SHRIMP U-Pb isotopic data of zircons from the tuff

点号	$^{206}\text{Pb}_e$ (%)		U ( $\times 10^{-6}$ )	Th ( $\times 10^{-6}$ )	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	表面年龄 (Ma)		同位素原子比率				误差相关			
	$^{206}\text{Pb}^*$ ( $\times 10^{-6}$ )	$^{206}\text{Pb}_e$				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	谐和度 (%)	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$			$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$		
			测值	相对误差(±%)	测值	相对误差(±%)	测值	相对误差(±%)	测值	相对误差(±%)	测值		相对误差(±%)		
1.1	0.43	35.4	146	112	0.79	1592 ± 25	1533 ± 30	104	0.0952	1.6	3.677	2.4	0.2800	1.8	0.748
2.1	0.36	25.7	107	78	0.75	1584 ± 23	1540 ± 37	103	0.0956	2.0	3.672	2.6	0.2785	1.7	0.639
3.1	0.08	20.2	93	59	0.65	1446 ± 22	1590 ± 32	91	0.0982	1.7	3.403	2.4	0.2514	1.7	0.704
4.1	0.12	38.9	153	123	0.84	1674 ± 23	1529 ± 20	109	0.0951	1.1	3.887	1.9	0.2965	1.5	0.819
5.1	0.00	23.6	93	54	0.61	1674 ± 24	1523 ± 25	110	0.0947	1.3	3.874	2.1	0.2966	1.6	0.782
6.1	0.66	26.7	104	82	0.82	1680 ± 25	1590 ± 37	106	0.0982	2.0	4.03	2.6	0.2978	1.7	0.640
7.1	0.25	31.0	129	85	0.68	1588 ± 22	1528 ± 25	104	0.0950	1.3	3.659	2.0	0.2794	1.5	0.763
8.1	0.73	24.7	99	65	0.68	1635 ± 24	1525 ± 45	107	0.0948	2.4	3.77	2.9	0.2887	1.6	0.566
9.1	0.77	19.8	82	68	0.85	1581 ± 23	1551 ± 49	102	0.0962	2.6	3.69	3.1	0.2779	1.7	0.537
10.1	0.20	23.6	98	59	0.62	1590 ± 23	1589 ± 24	100	0.0982	1.3	3.787	2.1	0.2798	1.6	0.776
11.1	0.07	18.8	77	49	0.66	1613 ± 24	1555 ± 28	104	0.0964	1.5	3.779	2.2	0.2844	1.7	0.750
12.1	0.21	23.6	98	69	0.72	1583 ± 22	1570 ± 24	101	0.0971	1.3	3.728	2.0	0.2784	1.6	0.783
13.1	0.66	28.4	125	89	0.74	1508 ± 21	1569 ± 44	96	0.0971	2.3	3.529	2.8	0.2636	1.6	0.562
14.1	0.25	22.9	98	64	0.67	1549 ± 22	1538 ± 30	101	0.0955	1.6	3.577	2.3	0.2716	1.6	0.716
15.1	0.00	18.0	80	66	0.85	1505 ± 22	1565 ± 27	96	0.0969	1.4	3.513	2.2	0.2630	1.7	0.759
16.1	1.08	21.6	88	59	0.70	1608 ± 24	1542 ± 54	104	0.0957	2.9	3.74	3.3	0.2834	1.7	0.499
17.1	0.20	20.9	85	55	0.66	1610 ± 23	1557 ± 31	103	0.0965	1.6	3.772	2.3	0.2836	1.6	0.708
18.1	0.00	47.1	197	246	1.29	1580 ± 21	1563 ± 20	101	0.0968	1.1	3.707	1.8	0.2778	1.5	0.815
19.1	0.32	18.1	78	59	0.79	1543 ± 23	1555 ± 35	99	0.0964	1.9	3.592	2.5	0.2704	1.7	0.661
20.1	0.55	18.4	74	54	0.74	1621 ± 24	1571 ± 51	103	0.0972	2.7	3.83	3.2	0.2859	1.7	0.525
21.1	0.06	29.6	122	82	0.70	1600 ± 22	1589 ± 20	101	0.0981	1.1	3.810	1.9	0.2817	1.6	0.825
22.1	0.21	19.0	79	74	0.97	1588 ± 24	1520 ± 36	104	0.0946	1.9	3.642	2.6	0.2792	1.7	0.665
23.1	1.57	30.7	128	97	0.78	1568 ± 22	1583 ± 57	99	0.0978	3.0	3.71	3.4	0.2753	1.6	0.461
24.1	0.41	27.2	113	78	0.71	1581 ± 22	1586 ± 29	100	0.0980	1.6	3.754	2.2	0.2780	1.6	0.709
25.1	0.10	29.0	121	81	0.69	1580 ± 22	1562 ± 22	101	0.0967	1.2	3.704	1.9	0.2777	1.6	0.803
26.1	0.45	32.1	135	100	0.77	1573 ± 22	1551 ± 31	101	0.0962	1.6	3.663	2.3	0.2763	1.6	0.695
27.1	0.35	23.4	95	77	0.85	1625 ± 23		100	0.1001	1.7	3.955	2.4	0.2867	1.6	0.686

注:误差为  $1\sigma$ ;  $\text{Pb}_e$  和  $\text{Pb}^*$  分别指示普通铅和放射成因铅;所有同位素比率已对测得的  $^{204}\text{Pb}$  进行了校正;表面年龄谐和度的计算公式为:  $t_{206/238}/t_{207/206} \times 100$

表 2 凝灰岩中锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 同位素分析结果

Table 2 LA-MC-ICPMS U-Pb isotopic data of zircons from the tuff

点号	Pb ( $\times 10^{-6}$ )	U ( $\times 10^{-6}$ )	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	表面年龄 (Ma)				同位素原子比率						误差 相关
				$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		
				测值	相对误差 ( $\pm\%$ )	测值	相对误差 ( $\pm\%$ )	测值	相对误差 ( $\pm\%$ )	测值	相对误差 ( $\pm\%$ )	测值	相对误差 ( $\pm\%$ )	
1	35	119	0.51	1571 $\pm$ 12	1602 $\pm$ 36	1644 $\pm$ 37	98	0.2746	0.75	3.8265	2.24	0.1011	1.97	0.504
2	28	95	0.52	1579 $\pm$ 15	1579 $\pm$ 29	1579 $\pm$ 24	100	0.2762	0.92	3.7165	1.81	0.0976	1.25	0.766
3	29	97	0.60	1587 $\pm$ 11	1587 $\pm$ 34	1588 $\pm$ 36	100	0.2777	0.67	3.7559	2.17	0.0981	1.95	0.462
4	22	76	0.51	1565 $\pm$ 13	1567 $\pm$ 30	1568 $\pm$ 28	100	0.2735	0.83	3.6603	1.91	0.0971	1.50	0.656
5	23	79	0.88	1482 $\pm$ 12	1643 $\pm$ 26	1856 $\pm$ 25	90	0.2572	0.80	4.0240	1.61	0.1135	1.40	0.497
6	28	95	0.51	1575 $\pm$ 12	1571 $\pm$ 23	1566 $\pm$ 22	100	0.2753	0.77	3.6807	1.47	0.0970	1.16	0.625
7	14	47	0.51	1561 $\pm$ 13	1576 $\pm$ 40	1596 $\pm$ 43	99	0.2725	0.82	3.7014	2.53	0.0985	2.33	0.391
8	22	78	0.58	1468 $\pm$ 12	1645 $\pm$ 21	1879 $\pm$ 9	89	0.2545	0.81	4.0345	1.26	0.1150	0.50	0.972
9	14	50	0.38	1565 $\pm$ 14	1589 $\pm$ 50	1621 $\pm$ 57	98	0.2734	0.88	3.7646	3.12	0.0999	3.06	0.211
10	14	47	0.51	1569 $\pm$ 13	1583 $\pm$ 41	1602 $\pm$ 45	99	0.2742	0.81	3.7366	2.59	0.0988	2.40	0.376
11	14	47	0.54	1569 $\pm$ 13	1562 $\pm$ 38	1553 $\pm$ 40	100	0.2742	0.83	3.6398	2.42	0.0963	2.12	0.513
12	16	53	0.62	1563 $\pm$ 13	1563 $\pm$ 36	1564 $\pm$ 38	100	0.2730	0.81	3.6451	2.33	0.0969	2.03	0.524
13	11	37	0.78	1555 $\pm$ 12	1610 $\pm$ 60	1683 $\pm$ 65	97	0.2714	0.78	3.8624	3.72	0.1032	3.55	0.315
14	9	33	0.37	1557 $\pm$ 13	1552 $\pm$ 52	1545 $\pm$ 59	100	0.2719	0.81	3.5931	3.34	0.0959	3.14	0.364
15	15	48	0.50	1563 $\pm$ 17	1614 $\pm$ 55	1681 $\pm$ 62	97	0.2731	1.07	3.8824	3.42	0.1031	3.38	0.195
16	19	65	0.79	1499 $\pm$ 11	1539 $\pm$ 44	1595 $\pm$ 52	97	0.2605	0.73	3.5366	2.89	0.0985	2.78	0.272
17	15	52	0.63	1552 $\pm$ 13	1546 $\pm$ 39	1536 $\pm$ 42	100	0.2709	0.82	3.5647	2.51	0.0954	2.22	0.491
18	16	54	0.66	1490 $\pm$ 12	1651 $\pm$ 51	1862 $\pm$ 55	90	0.2587	0.78	4.0612	3.08	0.1138	3.03	0.190
19	15	51	0.59	1562 $\pm$ 13	1566 $\pm$ 41	1572 $\pm$ 47	100	0.2728	0.85	3.6571	2.61	0.0972	2.54	0.243
20	15	50	0.63	1567 $\pm$ 12	1575 $\pm$ 37	1585 $\pm$ 40	100	0.2739	0.76	3.6969	2.35	0.0979	2.10	0.481
21	19	64	0.59	1503 $\pm$ 15	1588 $\pm$ 47	1702 $\pm$ 47	95	0.2613	1.02	3.7575	2.93	0.1043	2.55	0.521
22	15	52	0.52	1546 $\pm$ 11	1522 $\pm$ 36	1490 $\pm$ 40	102	0.2696	0.72	3.4613	2.33	0.0931	2.10	0.466
23	15	47	0.52	1571 $\pm$ 11	1647 $\pm$ 49	1746 $\pm$ 52	95	0.2745	0.68	4.0427	2.98	0.1068	2.82	0.342
24	17	60	0.52	1549 $\pm$ 13	1532 $\pm$ 34	1509 $\pm$ 36	101	0.2702	0.82	3.5045	2.22	0.0941	1.89	0.553
25	14	47	0.62	1547 $\pm$ 13	1560 $\pm$ 35	1578 $\pm$ 38	99	0.2699	0.82	3.6303	2.23	0.0976	2.01	0.441
26	15	52	0.56	1554 $\pm$ 13	1540 $\pm$ 35	1520 $\pm$ 39	101	0.2713	0.85	3.5380	2.29	0.0946	2.06	0.443
27	14	47	0.55	1539 $\pm$ 11	1539 $\pm$ 39	1540 $\pm$ 45	100	0.2684	0.71	3.5366	2.56	0.0956	2.36	0.413
28	18	63	0.60	1531 $\pm$ 12	1530 $\pm$ 32	1528 $\pm$ 34	100	0.2668	0.79	3.4939	2.09	0.0950	1.77	0.563
29	15	53	0.56	1553 $\pm$ 12	1550 $\pm$ 42	1545 $\pm$ 47	100	0.2710	0.75	3.5824	2.69	0.0959	2.47	0.416
30	15	53	0.63	1543 $\pm$ 11	1553 $\pm$ 40	1566 $\pm$ 45	99	0.2690	0.74	3.5960	2.60	0.0969	2.38	0.425
31	9	30	0.48	1544 $\pm$ 12	1583 $\pm$ 48	1635 $\pm$ 53	98	0.2693	0.77	3.7340	3.05	0.1006	2.85	0.377
32	16	54	0.63	1557 $\pm$ 12	1571 $\pm$ 34	1591 $\pm$ 37	99	0.2718	0.79	3.6818	2.17	0.0983	1.96	0.438
33	15	51	0.58	1563 $\pm$ 17	1575 $\pm$ 42	1592 $\pm$ 41	99	0.2730	1.10	3.6998	2.69	0.0983	2.19	0.613
34	13	45	0.52	1563 $\pm$ 15	1559 $\pm$ 45	1553 $\pm$ 48	100	0.2730	0.95	3.6244	2.89	0.0963	2.55	0.495
35	14	49	0.52	1562 $\pm$ 15	1572 $\pm$ 45	1585 $\pm$ 47	99	0.2728	0.99	3.6834	2.84	0.0979	2.48	0.520
36	13	43	0.53	1581 $\pm$ 14	1567 $\pm$ 47	1547 $\pm$ 51	101	0.2766	0.91	3.6607	3.01	0.0960	2.72	0.452

备注:误差为  $1\sigma$ ; Pb 为锆石中全铅含量; 同位素比率已采用  $^{208}\text{Pb}$  校正法进行了普通铅校正; 表面年龄谱和度的计算公式为:  $t = \frac{206\text{Pb}/^{238}\text{U}}{\lambda} / \frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}} \times 100$

表3 华北克拉通北部中元古界年代地层厘定方案

Table 3 Revised stratigraphic subdivision of the Mesoproterozoic in the northern North China Craton

国际地层表 (Plumb, 1991)		中国地层表 (全国地层委员会, 2001)		本文建议方案	参考年龄	
中 元 古 界	狭带系	铁岭组	1000Ma	待 建 系	? 下马岭组	
	延展系	蓟县系 洪水庄组	1200Ma			1320Ma (李怀坤等, 2009b) (岩床)
		雾迷山组	1200Ma			1368Ma (高林志等, 2007)
盖层系	杨庄组	1400Ma	1380Ma (Su <i>et al.</i> , 2008)			
古 元 古 界	盖层系	高于庄组	1400Ma	1366Ma (高林志等, 2008)		
		大红峪组	1400Ma	1440Ma (苏文博等, 2010待刊)		
	固结系	团山子组	1600Ma	1345-1353Ma (Zhang <i>et al.</i> , 2009) (岩床)		
		串岭沟组	1600Ma	1560Ma (本文)		
常州沟组	1800Ma	1625Ma (陆松年和李惠民, 1991)	1600Ma			
				1622Ma (Lu <i>et al.</i> , 2008)		
				1683Ma (李怀坤等, 1995)		

表3 据李怀坤等, 2009b, 有改动

### 3.2 华北北缘燕辽裂陷槽中元古界地层系统的进一步厘定

由于近年来在下马岭组第三段黑色页岩中发现钾质斑脱岩, 并获得了 1380Ma 左右的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 (高林志等, 2007, 2008; Su *et al.*, 2008), 以及新近有关侵入到下马岭组的基性岩床的锆石和斜锆石 U-Pb 测年进展 (李怀坤等, 2009b; Zhang *et al.*, 2009), 原先根据海绿石 K-Ar 年龄归属于新元古代拉伸纪 (Tonian Period, 850 ~ 1000Ma) (Gradstein *et al.*, 2004) 的下马岭组, 其真正的形成时限已被重新厘定为 1400 ~ 1320Ma 之间, 归属于中元古代中期的延展纪 (Ectasian Period, 1200 ~ 1400Ma) (Gradstein *et al.*, 2004) 早期。基于此并结合早先在大红峪组火山岩获得的锆石 U-Pb 年龄 1622 ~ 1625Ma (陆松年和李惠民, 1991; Lu *et al.*, 2008), 笔者等 (Su *et al.*, 2008; 李怀坤等, 2009b) 将下伏于下马岭组的铁岭组-高于庄组推定到中元古代早期盖层纪 (Calymmian Period, 1400 ~ 1600Ma) (Gradstein *et al.*, 2004), 并建议将高于庄组一同划归“蓟县系” (参见表 3)。显然这一厘定在逻辑上是正确合理的, 但毕竟当时因为铁岭组及高于庄组都缺乏更为直接的高精度定年, 其顶底的具体时限还存在着一定的不确定性。

最近苏文博等 (2010) 在铁岭组发现斑脱岩并获得了大

约 1440Ma 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄, 这使厘定后的华北“盖层系”的上限得到了确切的年代约束, 同时也在客观上要力求能尽快给予“盖层系”底部的高于庄组更准确、更直接的限定。

本文研究获得了高于庄组第三亚组凝灰岩的精确年龄 1560Ma, 而下伏的大红峪组火山岩具有 1622 ~ 1625Ma 锆石 U-Pb 年龄 (陆松年和李惠民, 1991; Lu *et al.*, 2008), 因此高于庄组应形成于 1600 ~ 1550Ma 之间。由此可将整个华北北部的高于庄组归属于中元古代盖层纪 (Calymmian Period, 1600 ~ 1400Ma) (Gradstein *et al.*, 2004) 最早期。这一进展的意义在于: 华北北部中-新元古界的主体——自高于庄组到铁岭组总厚度接近 6000m 的碳酸盐岩沉积序列最底部的地层单元——高于庄组 (参见表 3), 从此有了直接的、确凿的高精度岩浆锆石 U-Pb 年龄约束。同时这也为笔者等新近将这一序列厘定为新的蓟县系的方案 (李怀坤等, 2009b; 苏文博等, 2010), 提供了扎实的年代学依据。因此本文欲借此再次建议: 将华北克拉通北部蓟县系与长城系界线下拉至高于庄组与大红峪组之间 (表 3), 新的蓟县系包括高于庄组、杨庄组、雾迷山组、洪水庄组及铁岭组, 对应于国际中元古界盖层系, 高于庄组的底界可近似地作为具有良好操作性的华北北部盖层系底界的宏观物理标志。



应该指出,乔秀夫等(2007)曾根据下马岭组年代学研究进展提出了一个华北中-新元古界年代地层柱“科学预测”,建议重新划分华北中-新元古界:长城系 1800~1600Ma(包括常州沟组、串岭沟组、团山子组和大红峪组)、蓟县系 1600~1400Ma(包括高于庄组、杨庄组、雾迷山组、洪水庄组和铁岭组)、新建西山系 1400~1200Ma(只包含下马岭组一个组)、之上为待建系 1200~1000Ma、最顶部为青白口系 1000~800Ma(包括龙山组和景儿峪组)。该建议中有关长城系和蓟县系的处理是合理的,得到了本文作者近两年来新获得的铁岭组和高于庄组凝灰岩锆石 U-Pb 年龄的支持。

### 3.3 华北克拉通中-新元古界年代地层研究的展望

华北晚前寒武纪地层学的系统研究已有半个多世纪的历史。20世纪70年代末到80年代初,曾经迎来一个研究的高潮(中国地质科学院天津地质矿产研究所,1980),其标志性成果之一,就是确认了华北的“震旦系”实际上要老于华南的震旦系。但究竟如何更准确地标定、划分、归属华北“前震旦系”这些地层单位,一直是我国前寒武纪地层学家研究的重点和热点之一。除少数火山岩夹层外(陆松年和李惠民,1991;李怀坤等,1995;Lu *et al.*, 2008),不太精确的全岩、海绿石、方铅矿、碳酸盐等测年对象和方法,一直是学者们努力的方向,并沿用长达三十余年(钟富道,1977;陈晋镛等,1980,1996;Chen *et al.*, 1981;全国地层委员会,2001;Lu *et al.*, 2008)。

和稍早前有关铁岭组的类似研究(苏文博等,2010)一样,本文有关高于庄组岩浆型锆石 U-Pb 测年研究表明,在华北中-新元古界巨厚碳酸盐岩沉积序列里开展此类高精度定年研究,是完全可行的,关键是确认凝灰岩等火山喷发沉积物。和砂砾岩等碎屑沉积比较,碳酸盐岩沉积一般代表着远离陆源物质干扰的清水环境,此类火山沉积物比较容易保存下来。燕山地区、胶辽-徐淮以及豫西-陕南等地区是华北中-新元古界的主要沉积区,都发育有相当多的碳酸盐岩。相信只要不断努力,一定能够在其中获得更多可靠的年龄数据,全面厘定华北中-新元古界地层划分和对比,并可依托华北地层记录的天然优势,在国际前寒武纪年代地层学研究中为中国赢得更多话语权。

## 4 结论

(1)通过对北京延庆高于庄组第三亚组所发现凝灰岩锆石的 U-Pb 测年研究,获得了  $1559 \pm 12$ Ma(SHRIMP)和  $1560 \pm 5$ Ma(LA-MC-ICPMS)的高精度定年结果。这一进展直接并精确地限定了华北克拉通北部高于庄组的形成年龄,高于庄组应归属于中元古代盖层纪早期。

(2)根据上述进展并结合早先获得的下伏大红峪组火山岩夹层的锆石 U-Pb 年龄,可以将高于庄组与大红峪组界线年龄进一步限定为 1600Ma 左右。该界线可以作为华北北部

盖层系底界的物理标志。

(3)根据上述进展并结合此前铁岭组的类似新资料,再次建议将我国习用的“蓟县系”底界下拉到高于庄组底界,新的蓟县系将完全对应于国际中元古界盖层系。

**致谢** 刘敦一教授、宋彪研究员、张玉海高工、苗来成博士、陶华和周慧女士等对锆石 SHRIMP 测年工作给予了大力支持,河北省廊坊区域地质调查所实验室在单矿物分选、薄片磨制工作中给予了大力支持,许雅雯女士帮助鉴定了岩石薄片,黄学光研究员参加了早期的野外和岩矿鉴定工作,郝爽、张永清参与了 LA-MC-ICPMS 测年工作,秦松、刘采参与了 SHRIMP 测年工作,审稿专家高林志先生提出了宝贵的修改意见,作者在此一并致以诚挚的谢意。

## References

- Anderson T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chem. Geol.*, 192: 59–79
- Black LP, Kamo SL, Allen CM, Aleinikoff JN, Davis DW, Kosch RJ and Foudoulis C. 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. *Chem. Geol.*, 200: 155–170
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Hebei Province. 1989. Regional Geology of Hebei Province, Beijing Municipality and Tianjin Municipality. Beijing: Geological Publishing House, 1–741 (in Chinese)
- Chen JB, Zhang HM, Zhu SX, Zhao Z and Wang ZG. 1980. Research on Sinian Suberathem of Jixian, Tianjin. In: Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, CAGS (ed.). Research on Precambrian Geology. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 6–114 (in Chinese)
- Chen JB, Zhang HM, Xing YS and Ma GG. 1981. On the Upper Precambrian (Sinian Suberathem) in China. *Precambrian Res.*, 15: 207–228
- Chen JB, Zhang PY, Gao ZJ and Sun SF. 1996. Stratigraphic Dictionary of China (Meso-Proterozoic). Beijing: Geological Publishing House, 1–89 (in Chinese)
- China Commission on Stratigraphy. 1962. Precambrian Stratigraphy in China. Beijing: Science Press, 1–80 (in Chinese)
- China Commission on Stratigraphy. 2001. Guide to Stratigraphy in China and the Introduction to the Guide. Revised Edition. Beijing: Geological Publishing House, 1–59 (in Chinese)
- Compston W, Williams IS and Meyer C. 1984. U-Pb geochronology of zircons from lunar breccia 73217 using a sensitive high mass-resolution ion microprobe. *Journal of Geophysical Research*, 89: B525–B534
- Compston W, Williams IS, Krischvink JL, Zhang Z and Ma G. 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale. *J. Geol. Soc. Lond.*, 149: 171–184
- Gao LZ, Zhang CH, Shi XY, Zhou HR and Wang ZQ. 2007. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the tuff bed in the Xiamaling Formation of the Qingbaikouan System in North China. *Geological Bulletin of China*, 26(3): 249–255 (in Chinese with English abstract)
- Gao LZ, Zhang CH, Shi XY, Song B, Wang ZQ and Liu YM. 2008. Mesoproterozoic age for Xiamaling Formation in North China Plate indicated by zircon SHRIMP dating. *Chinese Science Bulletin*, 53(17): 2665–2671
- Gradstein FM, Ogg JG and Smith AG. 2004. A new geologic time scale, with special reference to Precambrian and Neogene. *Episodes*, 27: 83–100
- Jackson SE, Pearson NJ, Griffin WL and Belousova EA. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chemical*

- Geology, 211: 47–69
- Kao CS, Hsiung YH and Kao P. 1934. Preliminary notes on Sinian stratigraphy of North China. *Bull. Geol. Soc. China*, 13: 243–276
- Li HK, Li HM and Lu SN. 1995. Grain zircon U-Pb ages for volcanic rocks from Tuanshanzi Formation of Changcheng System and their geological implications. *Geochimica*, 24(1): 43–48 (in Chinese with English abstract)
- Li HK, Geng JZ, Hao S, Zhang YQ and Li HM. 2009a. Zircon U-Pb dating technique using LA-MC-ICPMS. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 28 (Supp.): 77 (in Chinese)
- Li HK, Lu SN, Li HM, Sun LX, Xiang ZQ, Geng JZ and Zhou HY. 2009b. Zircon and beddeleyite U-Pb precision dating of basic rock sills intruding Xiamaling Formation, North China. *Geological Bulletin of China*, 28(10): 1396–1404 (in Chinese with English abstract)
- Liu YS, Gao S, Hu ZC, Gao CG, Zong KQ and Wang DB. 2009. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571
- Lu SN and Li HM. 1991. A precise U-Pb single zircon age determination for the volcanics of the Dahongyu Formation, Changcheng System in Jixian. *Chinese Academy of Geological Science Bulletin*, 22: 137–146 (in Chinese with English abstract)
- Lu SN, Yang CL and Zhu SX. 1996. Precambrian Continental Crust Profile from Eastern Hebei to Jixian, Tianjin. Beijing: Geological Publishing House, 1–42
- Lu SN, Zhao GC, Wang HC and Hao GJ. 2008. Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China Craton. *Precambrian Res.*, 160(1–2): 77–93
- Ludwig KR. 2001. SQUID ver; 1.02. A User's Manual; Berkeley Geochronology Center Special Publication. No. 2: 1–19
- Ludwig KR. 2003. User's manual for Isoplot/Ex, version 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel; Berkeley Geochronology Center Special Publication. No. 4: 1–70
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, Martinson JM, Corfu F, Dörr W, Kamo SL, Kennedy AK, Kronz A, Reiners PW, Frei D, Kosler J, Wan YS, Götze J, Häger T, Kröner A and Valley JW. 2008. Zircon M257: A homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon. *Geostandards and Geoanalytical Res.*, 32: 247–265
- Plumb KA. 1991. New Precambrian timescale. *Episodes*, 14(2): 139–140
- Qiao XF, Gao LZ and Zhang CH. 2007. New idea of the Meso-and Neoproterozoic chronostratigraphic chart and tectonic environment in Sino-Korean Plate. *Geological Bulletin of China*, 26(5): 503–509 (in Chinese with English abstract)
- Sheng CY and Liao TC. 1958. The Sinian strata and their sedimentary mineral deposits along the Yanshan Ranges. *Acta Geologica Sinica*, 38(2): 263–278 (in Chinese)
- Song B, Zhang YH, Wan YS and Jian P. 2002. The making method of zircon sample target for SHRIMP, age measurement and the discussion of some questions. *Geological Review*, 48(Supp.): 26–30 (in Chinese with English abstract)
- Su WB, Zhang SH, Huff WD, Li HK, Ettensohn FR, Chen XY, Yang HM, Han YG, Song B and Santosh M. 2008. SHRIMP U-Pb ages of K-bentonite beds in the Xiamaling Formation: Implications for revised subdivision of the Meso- to Neoproterozoic history of the North China Craton. *Gondwana Res.* 14: 543–553
- Su WB, Li HK, Huff WD, Ettensohn FR, Zhang SH, Zhou HY and Wan YS. 2010. SHRIMP U-Pb dating for a K-bentonite bed in the Tieling Formation, North China. *Chinese Science Bulletin* (in press)
- Sun DZ and Lu SN. 1985. A subdivision of the Precambrian of China. *Precambrian Res.*, 28(2): 137–162
- Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, CAGS. 1980. Research on Precambrian Geology-Sinian Suberathem in China. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1–407 (in Chinese)
- Williams IS. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben MA, Shanks III WC, Ridley WI (eds.). *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Process. Reviews in Economic Geology*, 7: 1–35
- Zhang QD, Song TR, He ZJ and Ding XZ. 2002. Pb-Pb Age determination of Meso- to Neoproterozoic carbonates in the Ming Tombs district, Beijing. *Geological Review*, 48(4): 416–423 (in Chinese with English abstract)
- Zhang SH, Zhao Y, Yang ZY, He ZF and Wu H. 2009. The 1.35 Ga diabase sills from the northern North China Craton: Implications for breakup of the Columbia (Nuna) supercontinent. *EPSL*, 288: 588–600
- Zhong FD. 1977. On Sinian geological timescale based on isotopic ages of the Sinian strata in the Yanshan region. *Science in China (Series D)*, 2: 151–161 (in Chinese)
- Zhu SX and Chen HN. 1992. Characteristics of Paleoproterozoic stromatolites in China. *Precambrian Res.*, 57(1–2): 135–163

## 附中文参考文献

- 陈晋镛, 张惠民, 朱士兴, 赵震, 王振刚. 1980. 蓟县震旦界的研究. 见: 中国地质科学院天津地质矿产研究所编. 前寒武地质研究中国震旦亚界. 天津: 天津科学技术出版社, 56–114
- 陈晋镛, 张鹏远, 高振家, 孙淑芬. 1996. 中国地层典——中元古界. 北京: 地质出版社, 1–89
- 高林志, 张传恒, 史晓颖, 周洪瑞, 王自强. 2007. 华北青白口系下马岭组凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年. *地质通报*, 26(3): 249–255
- 高林志, 张传恒, 史晓颖, 宋彪, 王自强, 刘耀明. 2008. 华北古陆下马岭组归属中元古界的锆石 SHRIMP 年龄新证据. *科学通报*, 53(21): 2617–2623
- 河北省地质矿产局. 1989. 河北省北京市天津市区域地质志. 北京: 地质出版社, 1–741
- 李怀坤, 李惠民, 陆松年. 1995. 长城系团山子组火山岩颗粒锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地球化学*, 24(10): 43–47
- 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 张永清, 李惠民. 2009a. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究. *矿物岩石地球化学通报*, 28 卷(增刊): 77
- 李怀坤, 陆松年, 李惠民, 孙立新, 相振群, 耿建珍, 周红英. 2009b. 侵入下马岭组的基性岩床的锆石和斜锆石 U-Pb 精确定年——对华北中元古界地层划分方案的制约. *地质通报*, 28(10): 1396–1404
- 陆松年, 李惠民. 1991. 蓟县长城系大红峪组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*, 22: 137–145
- 乔秀夫, 高林志, 张传恒. 2007. 中朝板块中、新元古界年代地层柱与构造环境新思考. *地质通报*, 26(5): 503–509
- 全国地层委员会. 1962. 中国的前寒武系. 北京: 科学出版社, 1–80
- 全国地层委员会. 2001. 中国地层指南及中国地层指南说明书. 修订版. 北京: 地质出版社, 1–59
- 申庆荣, 廖大从. 1958. 燕山山脉震旦纪地层及其震旦纪沉积矿产. *地质学报*, 38(2): 263–278
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. *地质论评*, 48(增刊): 26–30
- 苏文博, 李怀坤, Huff WD, Ettensohn FR, 张世红, 周红英, 万渝生. 2010. 铁岭组钾质斑脱岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究及其地质意义. *科学通报* (出版中)
- 张巧大, 宋天锐, 和政军, 丁孝忠. 2002. 北京十三陵地区中-新元古界碳酸盐岩 Pb-Pb 年龄研究. *地质论评*, 48(4): 416–423
- 中国地质科学院天津地质矿产研究所. 1980. 前寒武地质研究中国震旦亚界. 天津: 天津科学技术出版社, 1–407
- 钟富道. 1977. 从燕山地区震旦地层同位素年龄论中国震旦地质年表. *中国科学(D辑)*, 2: 151–161