



华北克拉通南缘白术沟组归属中元古界“待建系” ——来自凝灰岩LA-MC-ICPMS锆石U-Pb年龄 的约束

祝禧艳^{1,2*}, 王世炎³, 苏文博⁴, 赵太平^{2,5}, 庞岚尹^{2,5,6}, 翟明国^{1,2,6}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院地球科学研究所, 北京 100029;

3. 河南省地质调查院, 郑州 450001;

4. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

5. 中国科学院广州地球化学研究所, 中国科学院矿物学与成矿学重点实验室, 广州 510640;

6. 中国科学院大学, 北京 100049

* 通讯作者, E-mail: zhuxiyan@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期: 2020-03-11; 收修改稿日期: 2020-06-19; 接受日期: 2020-07-30; 网络版发表日期: 2020-09-11

国家自然科学基金重点项目(批准号: 41630211)、国家自然科学基金面上项目(批准号: 41872198、41772028)和国家自然科学基金重大项目(编号: 41890834)资助

摘要 蓟县剖面及燕辽地区下马岭组(ca. 1.4~1.35Ga)曾被认为是华北克拉通中元古界“待建系”的唯一沉积记录, 十余年内未发现其他可对比层位, 限制了对华北克拉通延展纪(1.4~1.2Ga)沉积体系特征的进一步认识. 本次研究在华北克拉通南缘柴川地区白术沟组上段碳硅质板岩-千枚岩中识别出凝灰岩夹层, 获得其岩浆锆石的LA-MC-ICPMS U-Pb年龄分别为(1330±10)Ma(MSWD=0.43, N=38)和(1332±10)Ma(MSWD=0.90, N=24). 二者在误差范围内一致, 精确限定白术沟组主体应沉积于1.33Ga前后, 表明该组也属于华北中元古界“待建系”. 分别位于华北克拉通北部和南缘的“待建系”下马岭组及白术沟组, 凝灰岩夹层的年龄(~1.38及~1.33Ga)相差~50Myr, 但其整体岩性组成特点及上、下地层叠覆关系等高度相似, 表明它们的沉积背景和演化过程具有可对比性. 白术沟组沉积时代的准确限定, 为理清华北克拉通南缘中元古界和新元古界相关沉积序列提供了关键资料, 是构建华北克拉通中-新元古界年代学格架, 进而深入剖析华北克拉通及全球延展纪阶段地质演化的重要依据.

关键词 凝灰岩, 白术沟组, 锆石U-Pb年龄, 待建系, 华北克拉通

1 引言

近年来一系列新的高精度年代学研究成果使得中

国在中-新元古界年代地层学格架的厘定方面已取得了不少重要进展. 研究者在华北燕辽裂陷槽原青白口系下马岭组黑色岩系中发现钾质斑脱岩夹层(苏文博

中文引用格式: 祝禧艳, 王世炎, 苏文博, 赵太平, 庞岚尹, 翟明国. 2020. 华北克拉通南缘白术沟组归属中元古界“待建系”——来自凝灰岩LA-MC-ICPMS锆石U-Pb年龄的约束. 中国科学: 地球科学, 50(11): 1569–1581, doi: 10.1360/SSTe-2020-0061

英文引用格式: Zhu X, Wang S, Su W, Zhao T, Pang L, Zhai M. 2020. Zircon U-Pb geochronology of tuffite beds in the Baishugou Formation: Constraints on the revision of Ectasian System at the southern margin of the North China Craton. Science China Earth Sciences, 63(11): 1817–1830, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9657-0>

等, 2006), 并陆续测得其中的岩浆型锆石SHRIMP U-Pb年龄为~1.38Ga(高林志等, 2007, 2008a; Su等, 2008, 2010; Zhang S C等, 2015), 在侵入下马岭组的基性岩床中也获得了~1.32Ga的锆石和斜锆石U-Pb年龄(Zhang等, 2009, 2012; 李怀坤等, 2009a; 张拴宏等, 2013; Wang等, 2014), 从而将下马岭组的地质时代由早先的新元古代早期厘定为中元古代中期的延展纪(Ectasian Period, 1400~1200 Ma). 基于此, 全国地层委员会于2010年8月正式推出了新的中国中-新元古代年代地层划分方案, 建议在蓟县系与青白口系之间的1400~1000Ma阶段, 增加一个新的、系(纪)一级的单位. 由于其命名等相关工作仍需时日, 因此暂称之为“待建系(纪)”(李怀坤等, 2009a; 陆松年等, 2010).

华北南缘中-新元古代沉积地层非常发育, 如何与北缘燕辽地区进行对比, 一直是地质学界关注的重点. 虽然最近依靠火山岩或凝灰质沉积夹层的确认及高精度年代学测试, 陆续获得不少标定华北南部长城系顶界、蓟县系底界及新元古代地层年表的年代学“锚点”(阎国翰等, 2010; 苏文博等, 2012; 李承东等, 2017; 张恒等, 2019; 胡国辉等, 2019), 也使得熊耳群成为填补华北克拉通从结晶基底固结到蓟县剖面长城群稳定沉积开始发育之前空缺的地层记录(赵太平等, 2004, 2019; He等, 2010; Cui等, 2011, 2013; Wang等, 2019). 然而, 由于缺少可靠的同位素测年对象, 在中元古界中上部一些关键层位至今没有获得新的突破. 华北南部地区是否发育可与蓟县剖面对比的“待建系”, 尚无定论.

本次研究在华北南缘白术沟组中首次确认有火山凝灰质沉积夹层, 并获得~1330Ma的LA-MC-ICPMS锆石U-Pb年龄. 这一新进展将该组明确归属“待建系”, 为厘定华北南缘中-新元古界相关沉积序列提供了关键的年代学资料, 将推动华北克拉通中-新元古代地层格架的建立, 并有助于深入剖析华北及全球延展纪阶段的地质演化.

2 地质背景和白术沟组剖面概况

吕梁(滹沱)运动后, 华北克拉通主要沿南、北两大裂隙槽发育了巨厚的裂谷系沉积(图1a; Zhai等, 2015). 在华北北部的辽宁-燕山地区, 以蓟县剖面的长城群、蓟县群、青白口群最为典型; 而在华北南部地

区, 则主要由熊耳群火山岩系及其上正常的沉积岩系组成, 后者在豫陕交界处的熊耳山-小秦岭地层小区包括高山河群、官道口群、栾川群等(图1b), 嵩山地区发育有五佛山群等, 而在豫西、晋南地区则包括汝阳群和洛峪群等(河南省地质矿产局, 1989; 蒋干清等, 1994; 河南省地质矿产厅, 1997; 王跃峰, 2000; 高林志等, 2002; 赵太平等, 2004, 2015; 苏文博等, 2012; 胡国辉等, 2013; 苏文博, 2014, 2016).

研究表明, 熊耳群火山岩的喷发时限大致为1.78~1.75Ga(赵太平等, 2001, 2004; Peng等, 2008; Wang等, 2010; He等, 2010; Cui等, 2011, 2013). 多数学者认为其形成于非造山环境, 是华北克拉通中元古代早期大火山岩省的重要组成部分(Zhao等, 2002; Peng等, 2007, 2008; Peng, 2015; Zhai等, 2015).

熊耳群之上为一套稳定的滨海-浅海相沉积序列, 以陆缘碎屑岩-碳酸盐岩为主, 洛南-卢氏-栾川一带的高山河群、官道口群及栾川群等厚度最大, 沉积最连续. 高山河群与下伏熊耳群呈不整合接触, 虽然其沉积时代尚未精确限定, 但根据岩性组合及其上下地层关系等, 一般认为其与华北北部长城群大体相当(武铁山, 1982; 李钦仲等, 1985; 苏文博, 2016; 祝禧艳等, 2019). 高山河群之上官道口群为一套碳酸盐岩沉积建造, 由下至上包括龙家园组、巡检司组、杜关组及冯家湾组. 该群与高山河群为平行不整合或微角度不整合接触. 最近有学者在龙家园组底部发现一套凝灰岩, 限定该组底界约为1600Ma(张恒等, 2019), 进一步明确其在年代地层学上接近燕辽地区蓟县群高于庄组底界(李怀坤等, 2010; Li H K等, 2013; 田辉等, 2015). 栾川群与下伏官道口群为平行不整合接触关系, 主体为碎屑岩、碳酸盐岩和碱性火山岩组成的滨海-浅海相沉积. 考虑到岩性特征、叠覆关系、区域分布等地层特征, 大多数学者赞同将其归属为青白口系(蒋干清等, 1994; Peng, 2015; 苏文博, 2016).

在官道口群之上、栾川群之下, 存在一套主体为浅海陆源碎屑岩的沉积建造, 岩性大体可分为下段碳质绢云千枚岩、绢云石英片岩与长石石英砂岩互层, 中段变长石石英砂岩、含碳绢云石英千枚岩, 上段碳硅质板岩等(河南省地质矿产厅, 1997). 该层位最早由河南地质三队于1978年创建于栾川县三川乡白术沟村, 命名为白术沟组, 大致相当于秦岭区测队1965年创建的三道撞组的一部分, 划归新元古界栾川群底部. 石

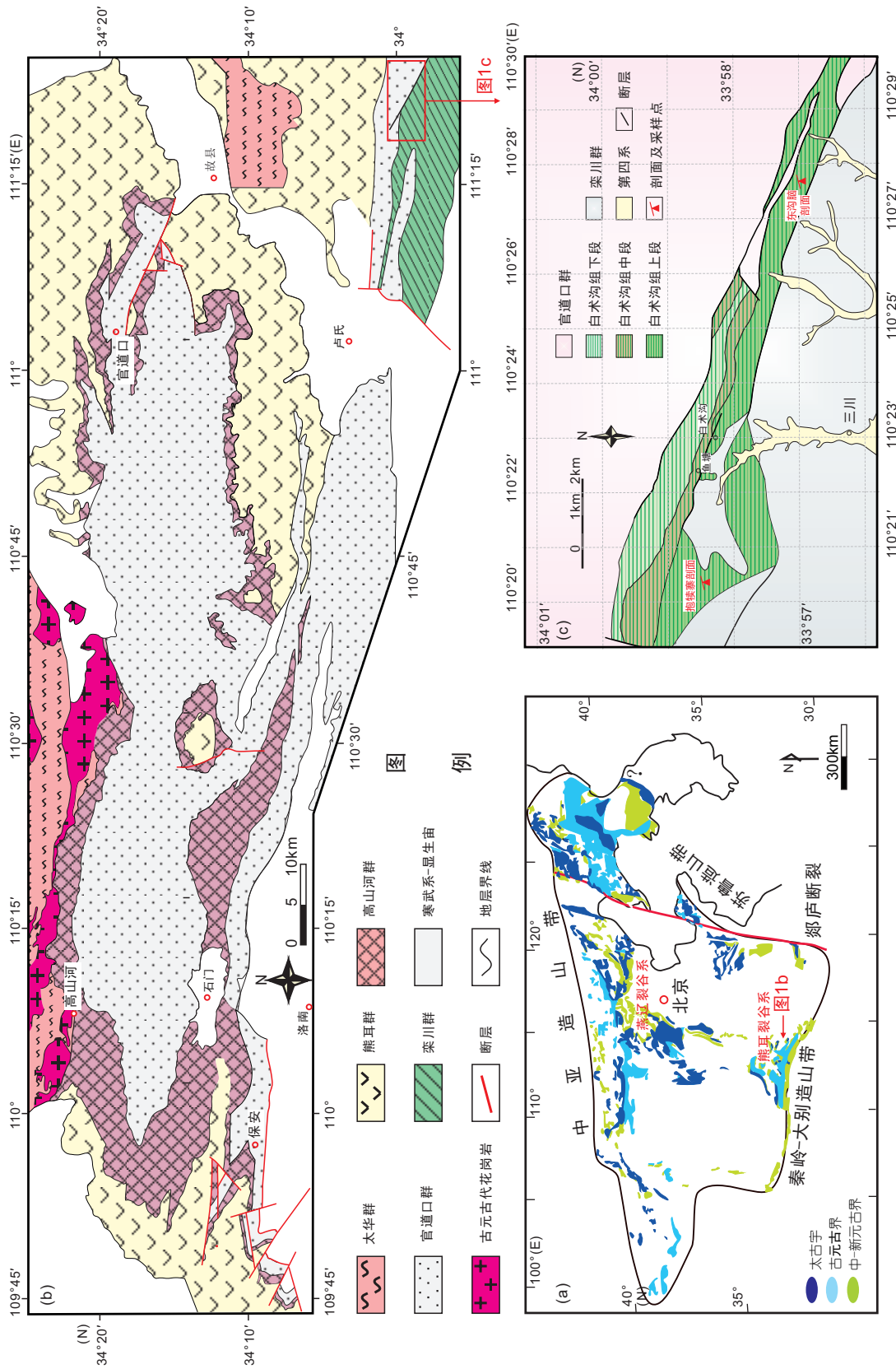


图 1 华北克拉通前寒武纪地质简图(a)、华北南缘中-元古界分布简图(b)和栾川地区白术沟组分布图(c)

(a) 据Peng等(2007); (b) 据祝禧艳等(2019); (c) 据河南省地质矿产局(1989)

铨曾(1995)认为豫陕交界处的白术沟组与官道口群及栾川群均呈断层接触, 且为高磷、富铀的灰黑色碳质千枚岩系, 与邻近的寒武系早期辛集组十分类似, 属早寒武世, 应从栾川群中剔除. 直至上世纪末, 河南区调队在栾川县南部区域进行1:25万填图工作时发现三川组底部存在含砾砂岩, 认为其与白术沟组间有较大的沉积间断. 囿于缺少可靠的同位素年龄制约, 又因其覆于官道口群冯家湾组之上, 故暂将白术沟组置于中元古界官道口群的顶部(表1). 值得注意的是, 无论岩性组合特征, 还是上下叠置关系, 华北南缘白术沟组都与燕辽地区的下马岭组尤其相似, 推测其在中-新元古代地层柱中的相对位置归属“待建系”可能更为合适.

根据目前研究, 白术沟组仅在栾川县鱼库沟、冷水、大坪、张前沟、黄背岭以及卢氏杜关向斜局部有零星出露(图1c), 空间分布范围局限且互不连续, 厚度变化大, 岩性组合较为复杂. 已有资料及笔者野外观察表明, 在栾川县西北部, 白术沟组底界以薄层碳质千枚岩与下伏冯家湾组燧石条带白云岩呈不整合接触并发育古风化壳, 局部可见绿泥-绢云石英片岩, 向上逐渐过渡为灰绿色-灰黑色含碳绢云千枚岩, 顶界以薄-中层绢云碳质板岩-千枚岩与上覆三川组石英砂岩呈平行不整合或断层接触(图2; 河南省地质矿产局, 1989). 在该组上部黑色碳质千枚岩-板岩中, 许多地点仍保存着较好的水平纹理, 并夹有火山凝灰岩薄层. 与该组中

下部相比, 显示出典型的水体深度加大、水动力扰动微弱、相对滞留还原的沉积背景.

凝灰岩样品1904BS02采自栾川县东沟脑村, 该剖面主要为富含P、V、Mo等重金属元素的黑色碳质板岩及千枚岩. 凝灰岩夹层呈灰白-浅蓝绿色薄层状, 新鲜面具很强的黏舌感, 层厚约5cm, 层面产状为175°∠30°(图3a和3b). 分析表明, 该凝灰岩具钾质斑脱岩特征, 主要由伊利石、蒙脱石等黏土矿物组成(图3d), 含不等量微晶状石英、长石和黑云母(图3e), 应属中酸性长英质岩浆成因. 另一凝灰岩样品1904BS08采自栾川抱犊寨景区内, 野外呈现灰白色薄层状泥质灰岩. 因构造影响, 原始层位略有褶曲和破碎(图3c), 但根据野外追索, 其整体上仍属于与东沟脑剖面大体一致的白术沟组中上部的“石煤层”附近层位(图1c). 该样品表面略呈土状, 结构疏松, 钙质含量高, 淋滤风化后呈褐黄色(图3f), 新鲜面同样具强的黏舌感.

3 测试方法

野外采集新鲜的凝灰岩样品(5~10kg/件), 用纯净水清洗岩石表面并晾干. 单矿物锆石分选使用常规方法和流程, 详见参考文献祝禧艳等(2019). 锆石阴极发光图像利用JMS-IT100高真空扫描电子显微镜, 在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成. 锆石微区原位U-Th-Pb同位素测定利用

表 1 白术沟组划分地层沿革表

秦岭区队(1965)		1:5万栾川县南部区调 (河南地质三队, 1978)		1:50万河南省地质图 (河南区调队, 1981)		1:5万朱阳镇等4幅区调 (河南省区调队, 1995)		河南省岩石地层 (河南省区调队, 1997)		1:25万内乡幅 (河南省地质调查院基础中心GIS所, 2001)		本文					
1:20万栾川幅	1:20万洛南幅	青白口系	白术沟组	新元古界	白术沟组	中元古界	官道口群	白术沟组	新元古界	栾川群	白术沟组	中元古界	官道口群	白术沟组	待建系	白术沟组	
震旦系	香子坪组	上震旦统	冯家湾组	冯家湾组	杜关组	杜关组	杜关组	冯家湾组	中元古界	官道口群	冯家湾组	中元古界	官道口群	冯家湾组	中元古界	白术沟组	
			杜关组														杜关组
	白术沟组	下震旦统	巡检司组	巡检司组	巡检司组	巡检司组	巡检司组	巡检司组	中元古界	官道口群	巡检司组	中元古界	官道口群	巡检司组	中元古界	官道口群	冯家湾组
			龙家园组														
		高山河组	龙家园组	中元古界	官道口群	中元古界	官道口群	高山河组	中元古界	官道口群	高山河组	中元古界	官道口群	高山河组	长城系	高山河群	

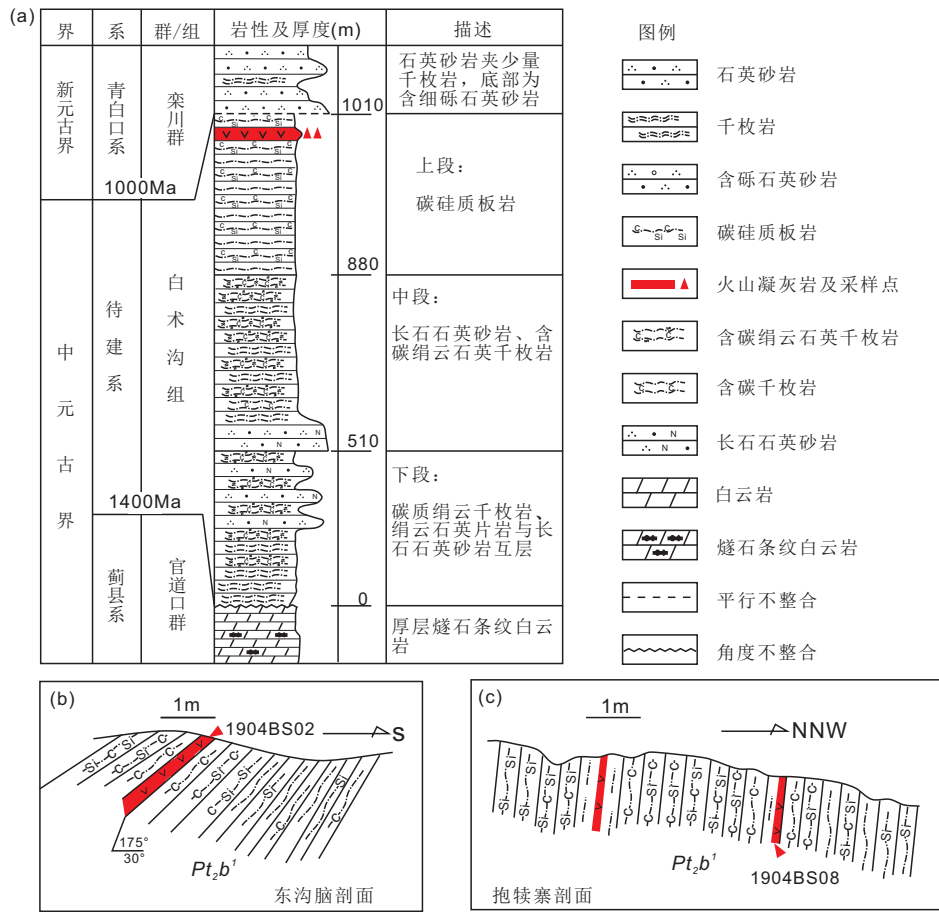


图2 (网络版彩图)白木沟组地层柱状图(a)、东沟脑剖面(b)和抱犊寨剖面(c)采样示意图
(a) 据河南省地质矿产局(1989)、河南省地质矿产厅(1997)

激光烧蚀多接受器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS), 在中国地质调查局天津地质调查中心同位素实验室完成. 分析数据分别采用GJ-1作为外部锆石年龄标准进行U、Pb同位素分馏校正, ²⁰⁸Pb校正法对普通铅进行校正, NIST612玻璃标样作为外标计算锆石样品的Pb、U、Th含量. 数据处理采用ICPSDataCal程序(Liu等, 2010)和Isoplot程序(Ludwig, 2003). 仪器配置和实验流程详见李怀坤等(2009b).

4 测试结果

两个凝灰岩样品中锆石大部分呈长柱状, 最大者长轴约100μm, 长宽比为2:1~3:1; 部分锆石颗粒为短柱-纺锤状, 长轴50~100μm, 长宽比小于2:1. 所有锆石颗粒均为无色或淡黄色的半透明-透明晶体, 自形程

度高, 显示其未经过明显的搬运磨蚀. 阴极发光图像显示其内部振荡环带发育, 为典型的岩浆锆石特征(图4).

样品1904BS02中选择40颗锆石进行定年分析, 其中两个数据点(sam.26和sam.27, 图5a)的年龄明显偏大并且不谐和, 可能发生了放射性铅丢失, 计算时已予以剔除. 其余锆石颗粒Th/U值分布于0.32~0.96(sam.16的Th/U=0.06, 网络版附表S1, <http://earthcn.scichina.com>), U-Pb同位素组成均落于²⁰⁷Pb/²³⁵U-²⁰⁶Pb/²³⁸U图解中的不一致线上, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb表面年龄值变化范围为1260~1391Ma, 不一致线与谐和线的上交点年龄为(1329±12)Ma(MSWD=0.53, N=38), 38颗锆石的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb加权平均年龄为(1330±10)Ma(MSWD=0.43)(图5c). 二者在误差范围内完全一致, 以后者(1330±10)Ma代表该凝灰岩中锆石的结晶年龄.

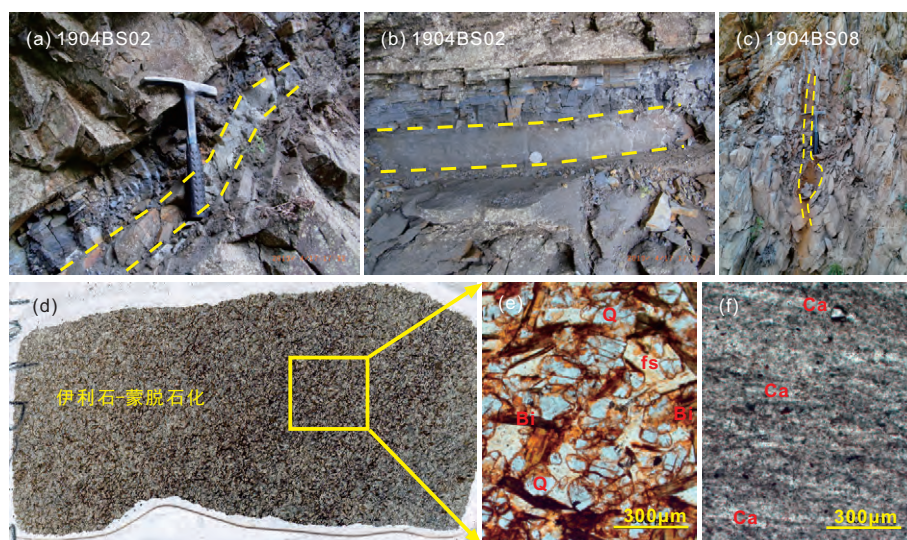


图3 白术沟组层凝灰岩夹层的野外产状及镜下显微照片

(a)~(b) 东沟脑剖面层凝灰岩夹层, 厚约5cm; (c) 抱犊寨剖面层凝灰岩夹层; (d)~(e) 东沟脑剖面层凝灰岩显示较典型的斑脱岩特征; (f) 抱犊寨剖面层凝灰岩显示钙质蚀变. Q, 石英; fs, 长石; Bi, 黑云母; Ca, 黏土矿物

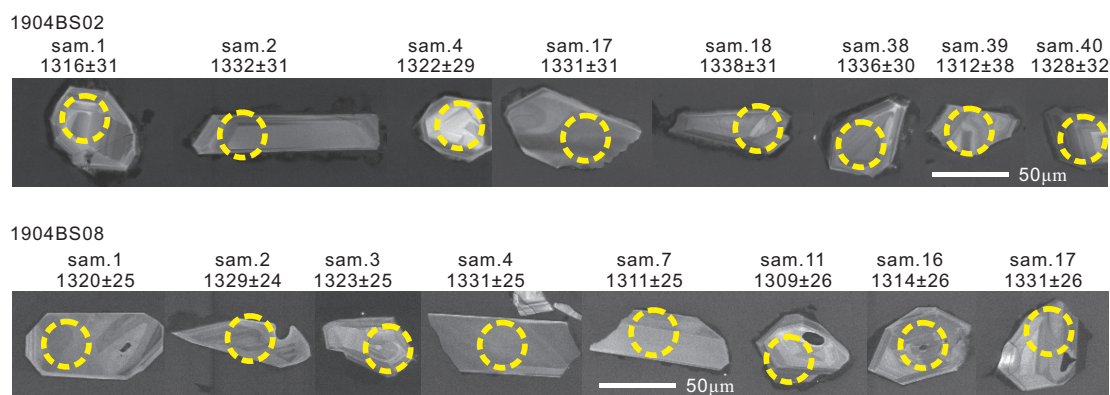


图4 白术沟组层凝灰岩样品中锆石的阴极发光(CL)图像

束斑直径35μm; 图中年龄数据单位为Ma

在样品1904BS08中, 对32粒锆石开展了测年分析. 其中2粒锆石显示古元古代年龄并极度不谐和(sam.22和sam.25), 另外6粒锆石虽然测年值属中元古代, 但明显偏大或偏小(sam.8、sam.10、sam.15、sam.23、sam.26、sam.28). 参考阴极发光图像等分析, 这8粒锆石可能受到了后期热事件的强烈改造, 导致放射性成因铅丢失, 已在统计计算时予以剔除. 其余24个测试点Th/U值分布范围为0.44~1.30, 构成的不一致线的上交点年龄为(1325±15)Ma(MSWD=0.93)(图5b), $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄值变化范围为1290~1387Ma, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为(1332±10)Ma(MSWD=0.90)(图5d). 二

者误差范围内一致, 以后者(1332±10)Ma代表锆石的结晶年龄.

5 讨论

5.1 白术沟组沉积时代的标定

由于白术沟组地层厚度小, 分布不连续, 一直未能获取有效年代学数据. 早期区调工作者大致根据其 与官道口群、栾川群的叠覆关系将其划为中元古代晚期或新元古代早期(关保德等, 1988; 河南省地质矿产局, 1989; 河南省地质矿产厅, 1997), 甚至更年轻的寒武纪

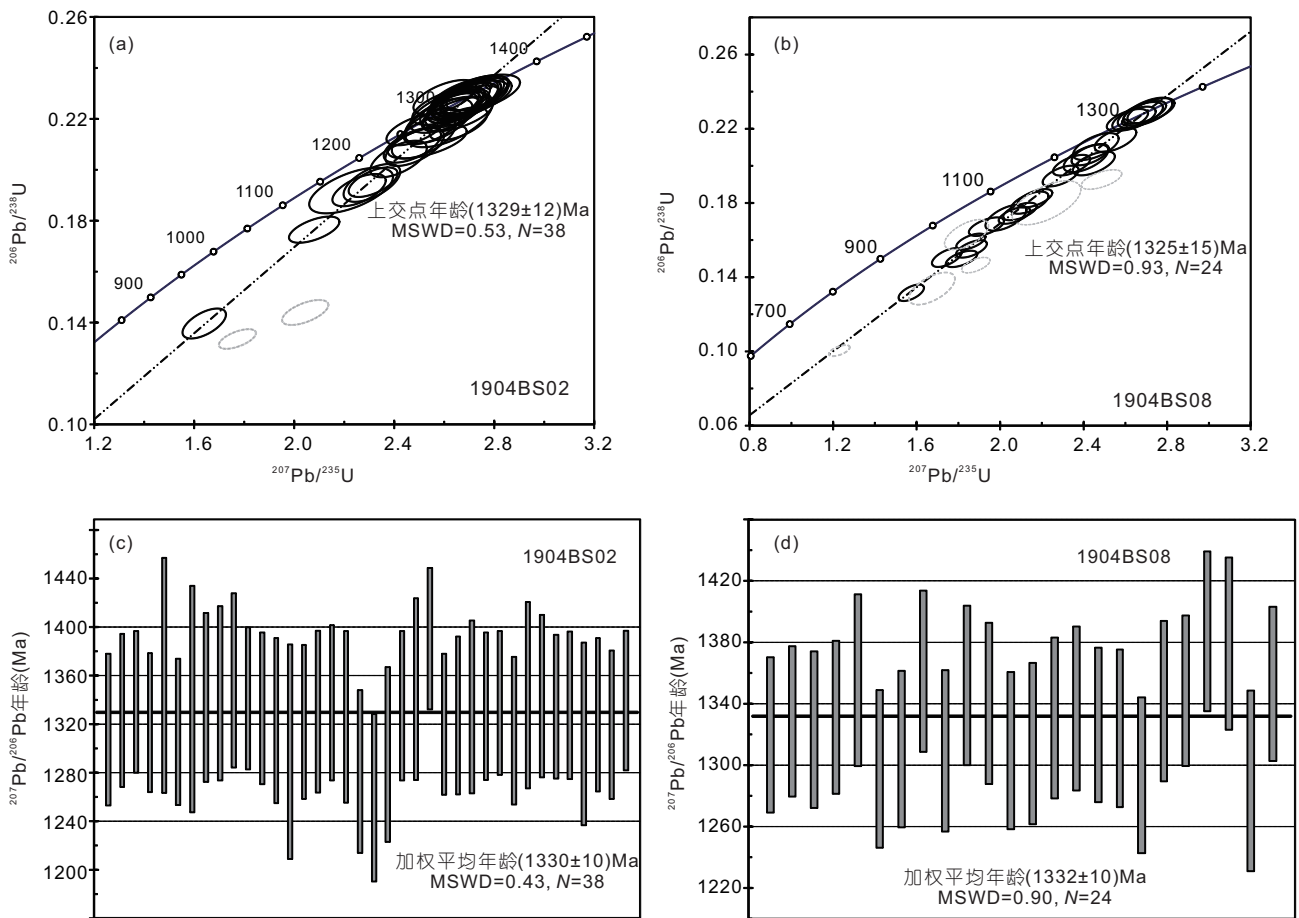


图5 白术沟组层凝灰岩样品中岩浆锆石的U-Pb年龄谐和图

早期(石铨曾, 1995)。最近, 有研究者在白术沟组建组地点——白术沟组剖面中段“石英岩”中发现若干1.2~1.0Ga碎屑锆石(Liu等, 2019; Zuo等, 2019), 西北约1km鱼塘村“白术沟组石英岩”中也获得类似相对年轻的碎屑锆石年龄(贾超, 2018; 李振生等, 2020), 因此认为白术沟组的沉积下限为新元古代早期。然而, 根据最新的区调成果(2019年评审验收的三川幅1:5万区域地质调查报告, 出版中), 建组剖面白术沟组中部“夹”的这套石英质砂岩, 实为上覆栾川群三川组下部被断层切割形成的断块, 非原始层位, 鱼塘村“石英岩”也应划归三川组而非白术沟组, 故已有的碎屑锆石测年数据不再适用于限定白术沟组的沉积时限。

在栾川地区祖师庙、东沟脑、抱犊寨等剖面上, 白术沟组各段上、下层位清楚且相对更为连续。本次研究在不同剖面的白术沟组上段碳质千枚岩中识别出层凝灰岩, 分别获得其LA-MC-ICPMS锆石U-Pb年龄

为(1330±10)和(1332±10)Ma, 二者在误差内一致, 精确厘定了其中火山活动的喷发时间, 进而标定白术沟组的形成时代为~1330Ma, 应归属“待建系”, 是目前已知华北南缘唯一具有确切同位素年龄依据的中元古代延展纪火山-沉积记录。

5.2 华北克拉通南缘与燕辽地区的中-新元古界层序对比

已有研究表明, 华北克拉通太古宙到古元古代结晶基底之上不同地区盖层沉积开始发育的时间存在区域性差异。华北克拉通古元古代活动带的演化结束之后, 南、北分别发育了在地表并未完全连接的熊耳裂陷槽和燕辽裂陷槽(Zhai等, 2015)。熊耳群火山岩的喷发活动始于1.80Ga, 至1.78~1.76Ga达到顶峰(赵太平等, 2004; He等, 2010; Cui等, 2011; Wang等, 2019), 早于燕辽地区长城群常州沟组底界年龄~17亿年(如万渝

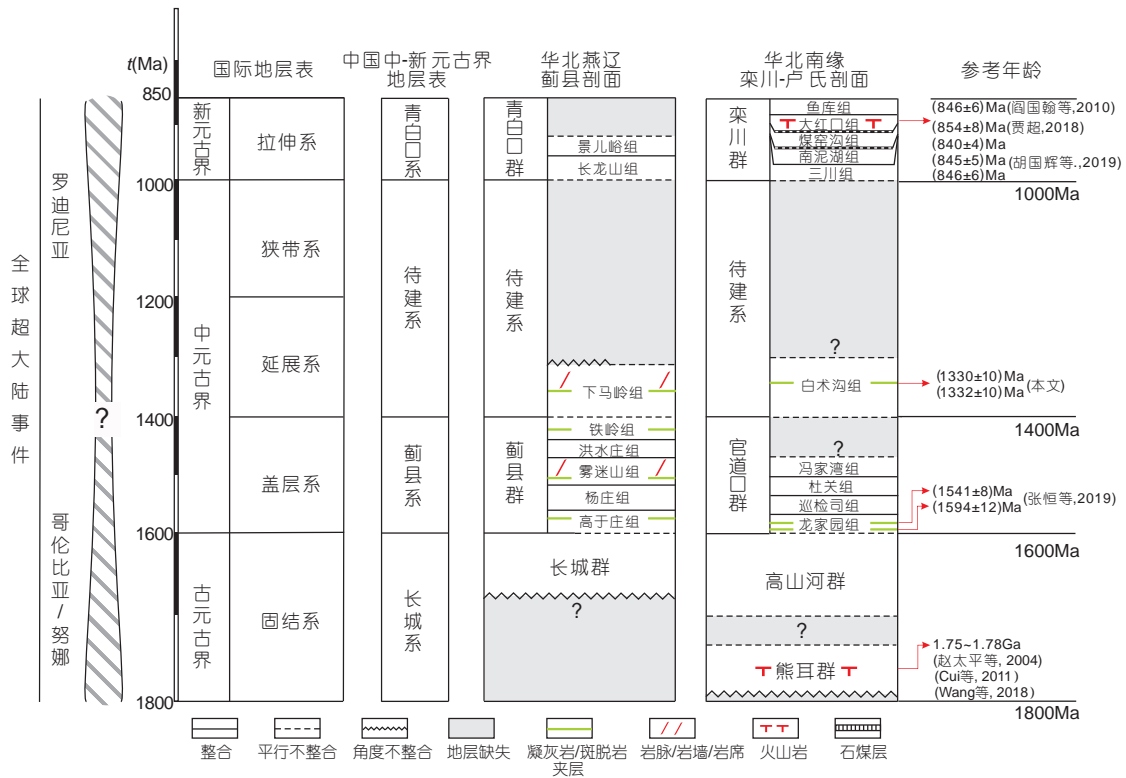


图6 (网络版彩图)华北南缘与蓟县剖面中-新元古界对比图

生等, 2003; 彭澎等, 2011; Zhang Y B等, 2015)甚至16.5亿年(李怀坤等, 2011; 和政军等, 2011a, 2011b; Li H K等, 2013), 属于华北南缘中元古界的最下部沉积序列。熊耳群之上的高山河群以滨-浅海环境下的砂砾岩沉积为主, 底部最年轻的碎屑锆石年龄为1760~1770Ma(祝禧艳等, 2019; 谭聪等, 2019), 但通过与汝阳-鲁山等地区相当层位的对比, 将其最早沉积时限约束在1710~1700Ma(Hu等, 2014), 年代地层划分置于长城系中上部(图6)。

燕辽地区的蓟县群, 自下而上划分为高于庄组、杨庄组、雾迷山组、洪水庄组及铁岭组, 以白云岩夹页岩为主, 中上部富含叠层石, 是一套持续海进的滨-浅海碳酸盐沉积。近年来在铁岭组灰岩中均发现多层钾质斑脱岩, 锆石U-Pb年龄值~1440Ma(Su等, 2010; 李怀坤等, 2014; 郭文琳等, 2019)。结合该组上覆下马岭组所获斑脱岩锆石U-Pb年龄值~1380Ma(高林志等, 2007, 2008; Su等, 2008, 2010; Zhang S C等, 2015), 表明铁岭组与下马岭组之间并无太长时间的沉积间断, 并可下、上两组界线视为蓟县系-“待建系”年代学

分界(1400Ma)的物理性标志。

华北南缘官道口群不整合于高山河群之上, 同样以碳酸盐岩地层为主体, 由下至上发育厚层含燧石条带-团块白云岩、中厚层含砾白云岩和泥质白云岩、白云质板岩, 叠层石增多(河南省地质矿产厅, 1997), 整体表现为水体深度逐渐加大的沉积背景, 基本可与蓟县群高于庄组至雾迷山组沉积体系对比(图6)。最近, 张恒等(2019)精确标定官道口群底部龙家园组起始沉积时代接近1600Ma, 属华北南缘蓟县系最低层位的沉积记录。由于其顶部冯家湾组尚未发现凝灰质夹层, 目前仍无准确年龄限定。本次研究将白术沟组精确标定为~1330Ma, 为区域内发育最晚的中元古界, 也是“待建系”最下部的层位, 并由此大致限定其底界为1400Ma左右, 与蓟县系-“待建系”分界年龄基本吻合。需要说明的是, 根据区域上岩性组成及岩相变化对比, 笔者推测华北南缘蓟县系官道口群与“待建系”白术沟组之间的沉积间断, 可能要比燕辽地区铁岭组与下马岭组之间不整合的间隔更为持久。

白术沟组之上为新元古代栾川群, 自下而上通常

划分为三川组、南泥湖组、煤窑沟组、大红口组和鱼库组(河南省地质矿产局, 1989), 主要由砂岩、大理岩、片岩、千枚岩和碱性火山岩组成。其中, 栾川群底部以含海绿石石英砂岩为标志层的三川组下部可与燕辽地区发育的长龙山组进行对比, 三川组上部“鸭蛋青色”白云岩与景儿峪组相当(苏文博, 2016)。近年来, 陆续获得的大红口组火山岩的锆石年龄集中在850~860Ma(阎国翰等, 2010; 贾超, 2018; 胡国辉等, 2019), 三川组石英砂岩中最年轻的碎屑锆石年龄为~1.0Ga(贾超, 2018; Liu等, 2019; Zuo等, 2019; 李振生等, 2020), 均支持栾川群归属青白口系的结论(图6; Peng, 2015; 苏文博, 2016)。基于这一认识, 并参照燕辽地区测年研究, 推测白术沟组与上覆三川组即栾川群之间的沉积间断, 至少也在300Myrs左右。这与燕辽地区下马岭组和上覆长龙山组-景儿峪组之间的不整合关系(Li H K等, 2013; 苏文博, 2016)也是十分类似的。

华北南、北两处“待建系”白术沟组及下马岭组主体均为一套含硅质成分黑色页岩/板岩系, 垂向上夹持在碳酸盐岩(下伏蓟县系)和砂砾岩沉积(上覆青白口系)之间, 其间被显著的不整合面分隔, 相同的沉积序列均反映了相对浅水的氧化环境突变至相对封闭的海相停滞还原环境, 又变迁回浅海氧化环境(苏文博, 2016)。因此, 虽然两个组内凝灰岩夹层的峰值年龄(~1.33及~1.38Ga)相差~50Myrs, 但整体岩性及上、下地层叠覆关系等高度相似, 表明二者很可能经历了基本一致的沉积背景和演化过程。

5.3 “待建系”沉积序列对华北克拉通中-新元古代构造演化的启示

在全球地质演化模型中, 中元古代晚期-新元古代早期正是哥伦比亚/努娜(Columbia/Nuna)超大陆裂解到罗迪尼亚(Rodinia)超大陆形成与演化的关键构造转折时期(图6; Condie, 2001; Rino等, 2008; Ernst等, 2008; Evans, 2013; Li Z X等, 2013)。有一种观点认为, 哥伦比亚超大陆各个块体在后期并未完全分裂, 只是在重新聚合成罗迪尼亚超大陆之前发生局部裂解(Bradley, 2011; Evans和Mitchell, 2011; Berman和Bethune, 2013)。对于华北克拉通来说, Zhai等(2015)强调, 华北自元古代末至新元古代经历了多期伸展作用, 出现相应的大火山岩省、非造山岩浆组合、铁镁质岩席群和岩墙

群, 几乎没有块体拼合的构造事件的记录。在华北北部、东缘、南缘发现大量峰值为1.4~1.0Ga的碎屑锆石(如Luo等, 2006; Li等, 2007; Hu等, 2012; Yang等, 2012; 胡波等, 2013; Liu等, 2017)和捕获锆石(Yang等, 2004), 均被解释为来自与中元古代超大陆裂解相关的岩浆活动。

华北克拉通响应于超大陆演化过程的中-新元古代地层出露广泛, 厚度巨大且保留了相对完整的层序特征, 但在空间分布上有所差别, 辽东、徐淮及豫西栾川一带普遍发育晚中元古代沉积, 早-中元古代沉积则主要见于燕辽地区、中部和南部地区(Lu等, 2008; 苏文博, 2016; 赵太平等, 2019; Zuo等, 2019; Liu等, 2019)。目前已知的“待建系”白术沟组和下马岭组, 是华北克拉通延展纪构造热事件的浅层沉积响应, 均以黑色页岩/板岩为主体, 形成于相对缺氧及沉积源区供给缺乏的水体环境, 反映了中元古代中期盆地迅速沉降, 水体加深的沉积背景。

大部分学者倾向于将下马岭组归为与长城系、蓟县系一致的持续裂谷沉积, 形成于地球中年期的伸展背景(翟明国等, 2014; Zhai等, 2015), 与同期大火山岩省密切相关(Zhang等, 2009, 2012, 2017)。也有学者尤其关注其夹层钾质斑脱岩具有同碰撞岛弧火山岩的地球化学特征, 同时其上下地层叠覆关系又与前陆盆地远程效应的演化序列(Ettensohn, 1994, 2004)有较好的对应关系, 因此倾向于下马岭组可能是华北北缘与相邻未知陆块碰撞过程中前陆盆地沉积序列的一部分, 并基于当时的年代学资料, 将其视为响应于罗迪尼亚超大陆的汇聚过程(苏文博等, 2006; Su等, 2008)。

在华北南缘栾川等地区, 白术沟组底部与下伏蓟县系冯家湾组之间存在明显的古风化壳, 显示构造抬升与剥蚀作用的存在; 同样地, 在华北北缘燕辽地区, 铁岭组顶部普遍发育风化壳与铁矿层, 指示与下马岭组之间存在不整合关系, 代表一次区域地壳抬升, 曾被命名为“芹峪上升”(乔秀夫, 1976)。在白术沟组顶部, 虽有构造错断或第四系覆盖严重, 但仍在三川镇常家村剖面观察到与上覆三川组石英砂岩之间发育一套底砾岩, 明确显示沉积间断的存在; 而在燕辽地区下马岭组与上覆新元古界长龙山组之间的不整合则十分明显, 并且沉积相不连续地由厌氧深水相变为滨岸浅水相沉积(杜汝霖和李培菊, 1980; 苏文博等, 2006; 曲永强等, 2010), 指示下马岭组沉积后曾发生过长时间的

抬升和剥蚀, 一些研究者认为这一不整合可能反映了华北与周边陆块碰撞相关的造山事件(苏文博等, 2006; Meng等, 2011), Zhang等(2012, 2017)则解释为1.33~1.30Ga基性大火山岩省的前岩浆期穹窿状地壳抬升, 造成地层缺失或沉积环境的明显改变。

如前所述, 白术沟组与下马岭组及其上、下地层组合具有高度可对比性, 并且二者沉积前后也发育几乎无差别的不整合面和沉积间断, 表明华北南、北缘在延展纪可能经历了相似的盆地和构造演化过程。但是, 由于华北克拉通整体上缺失待建系1350~1000Ma的沉积记录(高林志等, 2008b, 2011; Li H K等, 2013; 苏文博, 2014, 2016; Li等, 2019; Zuo等, 2019), 上述“待建系”层组的沉积背景及顶部这种长达250Myrs沉积间断所代表的地质事件性质和意义究竟如何, 目前仍不明确。

朝鲜半岛在地质上与华北联系密切, 是传统上被称为中朝克拉通或中朝地块(Sino-Korean Craton)的最东段。古元古代造山事件之后, 朝鲜平南盆地翁津地区发育了与燕辽、熊耳裂陷槽同期的古裂谷带(朴贤旭等, 2016; 杨正赫等, 2016及其中的文献), 以中元古代黄海群(Hwanghae Group)为典型沉积序列。这套陆相-滨浅海相沉积组合的岩性主体为碎屑岩、火山-沉积岩交互层、酸性火山岩和少量大理岩, 中下部及上部层位的酸性火山岩的时代分别为~1235Ma和~1200Ma(朴贤旭等, 2016), 最年轻碎屑锆石年龄为~1250Ma(杨正赫等, 2016), 共同限制其形成时代为中元古代延展纪晚期。黄海群沉积期间伴随大量的火山喷发和花岗岩侵入, 并且其整体时限明显年轻, 很可能属于下马岭组和白术沟组之上的“待建系”层位, 可以补充华北南缘和北部延展纪顶部缺失部分的沉积记录。对其开展以成分组成、物质源区和形成背景为基础的系统研究, 有可能为正确认识“待建系”长达250Myrs沉积缺失的真实性质和地质内涵, 从而为华北克拉通中-新元古代地史转折期的构造演化和动力学背景等研究, 提供更确切的答案。

6 结论

(1) 华北克拉通南缘栾川地区东沟脑及抱犊寨中-新元古代地层剖面中白术沟组上段碳硅质板岩/千枚岩中分别识别出的凝灰岩夹层, 其LA-MC-ICPMS锆

石U-Pb年龄分别为(1330±10)和(1332±10)Ma。二者在误差内一致, 精确限定了白术沟组的沉积时代, 应归属中元古界“待建系”。

(2) 与下马岭组相比, 白术沟组沉积主体同样为黑色页岩/板岩系, 上、下地层叠覆关系高度相似, 表明华北克拉通南、北缘在延展纪很可能经历了类似或一致的沉积过程和演化历史。

(3) 朝鲜平南盆地的黄海群主体沉积时限(~1200Ma)年轻于白术沟组和下马岭组, 可能形成于中-新元古代盆地和基底构造演化过程的相对晚期阶段。三者沉积层序和其间岩浆记录的综合厘定, 应可以更有效地约束华北克拉通延展纪构造背景, 并为探讨全球哥伦比亚-罗迪尼亚超大陆构造体制转换等提供更完整的科学依据。

致谢 本次研究的野外考察和采样工作得到西北大学张成立教授的支持和研究生雷天的帮助, 锆石U-Pb年代学测试工作得到中国地质调查局天津地质调查中心同位素实验室涂家润、肖志斌、张健等工程师的帮助。两位匿名评审专家及执行主编对本文提出建设性修改意见, 使得文章质量进一步提升。在此一并表示衷心感谢!

参考文献

- 杜汝霖, 李培菊. 1980. 燕山西段震旦界/中国震旦界. 天津: 天津科学技术出版社. 56-114
- 高林志, 尹崇玉, 王自强. 2002. 华北地台南缘新元古代地层的新认识. 地质通报, 21: 130-135
- 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: 249-255
- 高林志, 张传恒, 史晓颖, 宋彪, 王自强, 刘耀明. 2008a. 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: 2617-2623
- 高林志, 张传恒, 尹崇玉, 史晓颖, 王自强, 刘耀明, 刘鹏举, 唐烽, 宋彪. 2008b. 华北古陆中-新元古代年代地层框架SHRIMP锆石年龄新依据. 地球学报, 29: 366-376
- 高林志, 丁孝忠, 庞维华, 张传恒. 2011. 中国中-新元古代地层年表的修正——锆石U-Pb年龄对年代地层的制约. 地层学杂志, 35: 1-7
- 关保德, 耿午辰, 戎治权, 杜慧英. 1988. 河南东秦岭北坡中-上元古界. 郑州: 河南科学技术出版社. 41-49
- 郭文琳, 苏文博, 张健, 李惠民, 周红英, 李怀坤, Ettensohn F R, Huff W D. 2019. 天津蓟县铁岭组新剖面钾质斑脱岩锆石U-Pb测年及Hf同位素研究. 岩石学报, 35: 2433-2454
- 河南省地质矿产局. 1989. 河南省区域地质志. 北京: 地质出版社.

- 94-114
河南省地质矿产厅. 1997. 河南省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社. 51-68
- 和政军, 牛宝贵, 张新元, 赵磊, 刘仁燕. 2011a. 北京密云元古宙常州沟组之下环斑花岗岩古风化壳岩石的发现及其碎屑锆石年龄. 地质通报, 30: 798-802
- 和政军, 张新元, 牛宝贵, 刘仁燕, 赵磊. 2011b. 北京密云元古宙环斑花岗岩古风化壳及其与长城系常州沟组的关系. 地学前缘, 18: 123-130
- 胡波, 翟明国, 彭澎, 刘富, 第五春荣, 王浩铮, 张海东. 2013. 华北克拉通元古代末-新元古代地质事件——来自北京西山地区寒武系和侏罗系碎屑锆石LA-ICP-MS U-Pb年代学的证据. 岩石学报, 29: 2508-2536
- 胡国辉, 赵太平, 周艳艳, 王世炎. 2013. 华北克拉通南缘中-新元古代沉积地层对比研究及其地质意义. 岩石学报, 29: 2491-2507
- 胡国辉, 张拴宏, 张琪琪, 王世炎. 2019. 华北克拉通南缘栾川群大红口组形成时代及其对新元古代构造演化的制约. 岩石学报, 35: 2503-2517
- 贾超. 2018. 豫西地区新元古代地层的形成时限、物源及构造背景分析. 硕士学位论文. 合肥: 合肥工业大学. 1-83
- 蒋干清, 周洪瑞, 王自强. 1994. 豫西栾川地区栾川群的层序、沉积环境及其构造古地理意义. 现代地质, 8: 430-440
- 李承东, 赵利刚, 常青松, 许雅雯, 王世炎, 许腾. 2017. 豫西洛峪口组凝灰岩锆石LA-MC-ICPMS U-Pb年龄及地层归属讨论. 中国地质, 44: 511-525
- 李怀坤, 陆松年, 李惠民, 孙立新, 相振群, 耿建珍, 周红英. 2009a. 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: 1396-1404
- 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 张永清, 李惠民. 2009b. 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. 矿物学报, 29: 600-601
- 李怀坤, 朱士兴, 相振群, 苏文博, 陆松年, 周红英, 耿建珍, 李生, 杨锋杰. 2010. 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. 岩石学报, 26: 2131-2140
- 李怀坤, 苏文博, 周红英, 耿建珍, 相振群, 崔玉荣, 刘文灿, 陆松年. 2011. 华北克拉通北部长城系底界年龄小于1670Ma: 来自北京密云花岗斑岩岩脉锆石LA-MC-ICPMS U-Pb年龄的约束. 地学前缘, 18: 108-120
- 李怀坤, 苏文博, 周红英, 相振群, 田辉, 杨立公, Huff W D, Ettensohn F R. 2014. 中-新元古界标准剖面蓟县系首获高精度年龄制约——蓟县剖面雾迷山组和铁岭组斑岩锆石SHRIMP U-Pb同位素定年研究. 岩石学报, 30: 2999-3012
- 李钦仲, 杨应章, 贾金昌. 1985. 华北地台南缘(陕西部分)晚前寒武纪地层研究. 西安: 西安交通大学出版社. 1-174
- 李振生, 贾超, 赵卓娅, 霍金晶, 李全忠, 张交东. 2020. 华北克拉通南缘栾川群的形成时代、物源及其对区域构造演化的意义: 锆石U-Pb年代学和Hf同位素制约. 地质学报, 94: 1046-1066
- 陆松年, 李怀坤, 相振群. 2010. 中国中元古代同位素地质年代学研究进展述评. 中国地质, 37: 1002-1013
- 彭澎, 刘富, 翟明国, 郭敬辉. 2011. 密云岩墙群的时代及其对长城系底界年龄的制约. 科学通报, 56: 2975-2980
- 朴贤旭, 翟明国, 杨正赫, 金正男, 郑哲珠, 吴福元, 金胜贤, 韩龙渊, 朴雄, 金明哲, 侯泉林. 2016. 朝鲜半岛平南盆地中元古代岩浆事件. 岩石学报, 32: 3033-3044
- 乔秀夫. 1976. 青白口群地层学研究. 地质科学, 3: 246-265
- 曲永强, 孟庆任, 马收先, 李林, 武国利. 2010. 华北地块北缘中元古界几个重要不整合面的地质特征及构造意义. 地学前缘, 17: 112-127
- 石铨曾. 1995. 豫西白木沟组的构造位态及时代问题. 河南地质, 13: 113-119
- 苏文博. 2014. 2012年全球前寒武纪新年表与中国中元古代年代地层学研究. 地学前缘, 21: 119-138
- 苏文博. 2016. 华北及扬子克拉通中元古代年代地层格架厘定及相关问题探讨. 地学前缘, 23: 156-185
- 苏文博, 李志明, 史晓颖, 周洪瑞, 黄思骥, 刘晓茗, 陈晓雨, 张继恩, 杨红梅, 贾柳静, Huff W D, Ettensohn F R. 2006. 华南五峰组-龙马溪组与华北下马岭组的钾质斑脱岩及黑色岩系——两个地史转折期板块构造运动的沉积响应. 地学前缘, 13: 82-95
- 苏文博, 李怀坤, 徐莉, 贾松海, 耿建珍, 周红英, 王志宏, 蒲含勇. 2012. 华北克拉通南缘洛峪群-汝阳群属于中元古界长城系——河南汝州洛峪口组层凝灰岩锆石LA-MC-ICPMS U-Pb年龄的直接约束. 地质调查与研究, 35: 96-108
- 谭聪, 卢远征, 宋昊南, 吕奇奇, 邓胜微, 王华建, 苏玲. 2019. 华北克拉通西南缘高山河组凝灰岩锆石U-Pb年龄及其地质意义. 地质学报, 93: 113-1124
- 田辉, 张健, 李怀坤, 苏文博, 周红英, 杨立公, 相振群, 耿建珍, 刘欢, 朱士兴, 许振清. 2015. 蓟县中元古代高于庄组凝灰岩锆石LA-MC-ICPMS U-Pb定年及其地质意义. 地球学报, 36: 647-658
- 万渝生, 张巧大, 宋天锐. 2003. 北京十三陵长城系常州沟组碎屑锆石SHRIMP年龄: 华北克拉通盖层物源区及最大沉积年龄的限定. 科学通报, 48: 1970-1975
- 王跃峰. 2000. 栾川群大红口组火山岩研究初探. 河南地质, 18: 181-189
- 武铁山. 1982. 豫西(型)震旦系地层的对比统一划分和时代问题. 中国区域地质, 1: 73-81
- 阎国翰, 马芳, 蔡剑辉, 任康绪, 刘楚雄, 柳晓艳, 牟保磊, 杨斌, 李凤棠, 黄宝玲. 2010. 华北克拉通南缘栾川群大洪口组碱性粗面岩锆石SHRIMP U-Pb年龄及其意义. 2010年全国岩石学与地球动力学研讨会论文集. 289-290
- 杨正赫, 彭澎, 郑哲寿, 朴雄, 文正根, 金哲贤, 苟贤哲. 2016. 朝鲜平南盆地古元古界-下古生界沉积岩碎屑锆石年龄谱对比及意义.

- 岩石学报, 32: 3155–3179
- 翟明国, 胡波, 彭澎, 赵太平. 2014. 华北中-新元古代的岩浆作用与多期裂谷事件. 地学前缘, 21: 100–119
- 张恒, 高林志, 周洪瑞, 宋彪, 丁孝忠, 张传恒, 刘昊岗, 龚成强. 2019. 华北克拉通南缘官道口群和洛峪群的年代学研究新进展——来自凝灰岩SHRIMP锆石U-Pb年龄的新证据. 岩石学报, 35: 2470–2486
- 张拴宏, 赵越, 叶浩, 胡健民, 吴飞. 2013. 燕辽地区长城系串岭沟组及团山子组沉积时代的新制约. 岩石学报, 29: 2481–2490
- 赵太平, 周美夫, 金成伟, 关鸿, 李惠民. 2001. 华北陆块南缘熊耳群形成时代讨论. 地质科学, 36: 326–334
- 赵太平, 翟明国, 夏斌, 李惠民, 张毅星, 万渝生. 2004. 熊耳群火山岩锆石SHRIMP年代学研究: 对华北克拉通盖层发育初始时间的制约. 科学通报, 49: 2342–2349
- 赵太平, 邓小芹, 胡国辉, 周艳艳, 彭澎, 翟明国. 2015. 华北克拉通古/中元古代界线和相关地质问题讨论. 岩石学报, 31: 1495–1508
- 赵太平, 庞岚尹, 仇一凡, 祝禧艳, 王世炎, 耿元生. 2019. 古/中元古代界线: 1.78 Ga. 岩石学报, 35: 2281–2298
- 祝禧艳, 仇一凡, 庞岚尹, 翟明国. 2019. 华北南缘中元古界高山河群碎屑沉积岩物质源区多元性及其对区域地层对比和构造演化的指示. 岩石学报, 35: 2487–2502
- Berman R G, Bethune K M. 2013. Paleoproterozoic tectonic assembly of the western Canadian shield: New findings and implications for the reconstruction of Laurentia/Nuna. *Precambrian Res*, 232: 1–3
- Bradley D C. 2011. Secular trends in the geologic record and the supercontinent cycle. *Earth-Sci Rev*, 108: 16–33
- Condie K. 2001. Continental growth during formation of Rodinia at 1.35–0.9 Ga. *Gondwana Res*, 4: 5–16
- Cui M L, Zhang B L, Zhang L C. 2011. U-Pb dating of baddeleyite and zircon from the Shizhaigou diorite in the southern margin of North China Craton: Constrains on the timing and tectonic setting of the Paleoproterozoic Xiong'er group. *Gondwana Res*, 20: 184–193
- Cui M L, Zhang L C, Zhang B L, Zhu M T. 2013. Geochemistry of 1.78 Ga A-type granites along the southern margin of the North China Craton: Implications for Xiong'er magmatism during the break-up of the supercontinent Columbia. *Int Geol Rev*, 55: 496–509
- Ernst R E, Wingate M T D, Buchan K L, Li Z X. 2008. Global record of 1600–700 Ma Large Igneous Provinces (LIPs): Implications for the reconstruction of the proposed Nuna (Columbia) and Rodinia supercontinents. *Precambrian Res*, 160: 159–178
- Ettensohn F R. 1994. Tectonic control on the formation and cyclicity of major Appalachian unconformities and associated stratigraphic sequences. In: Dennison J M, Ettensohn F R, eds. *Tectonic and Eustatic Controls on Sedimentary Cycles*. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology
- Ettensohn F R. 2004. Modeling the nature and development of major Paleozoic clastic wedges in the Appalachian basin, USA. *J Geodyn*, 37: 657–681
- Evans D A D. 2013. Reconstructing pre-Pangean supercontinents. *Geol Soc Am Bull*, 125: 1735–1751
- Evans D A D, Mitchell R N. 2011. Assembly and breakup of the core of Paleoproterozoic-Mesoproterozoic supercontinent Nuna. *Geology*, 39: 443–446
- He Y H, Zhao G C, Sun M, Han Y G. 2010. Petrogenesis and tectonic setting of volcanic rocks in the Xiaoshan and Waifangshan areas along the southern margin of the North China Craton: Constraints from bulk-rock geochemistry and Sr-Nd isotopic composition. *Lithos*, 114: 186–199
- Hu B, Zhai M G, Li T S, Li Z, Peng P, Guo J H, Kusky T M. 2012. Mesoproterozoic magmatic events in the eastern North China Craton and their tectonic implications: Geochronological evidence from detrital zircons in the Shandong Peninsula and North Korea. *Gondwana Res*, 22: 828–842
- Hu G H, Zhao T P, Zhou Y Y. 2014. Depositional age, provenance and tectonic setting of the Proterozoic Ruyang Group, southern margin of the North China Craton. *Precambrian Res*, 246: 296–318
- Li H K, Lu S N, Su W B, Xiang Z Q, Zhou H Y, Zhang Y Q. 2013. Recent advances in the study of the Mesoproterozoic geochronology in the North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 72: 216–227
- Li Q L, Chen F, Guo J H, Li X H, Yang Y H, Siebel W. 2007. Zircon ages and Nd-Hf isotopic composition of the Zhaertai Group (Inner Mongolia): Evidence for early Proterozoic evolution of the northern North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 30: 573–590
- Li Z H, Xi S L, Hu J M, Dong X P, Zhang G S. 2019. New insights about the Mesoproterozoic sedimentary framework of North China Craton. *Geol J*, 54: 409–425
- Li Z X, Evans D A D, Halverson G P. 2013. Neoproterozoic glaciations in a revised global palaeogeography from the breakup of Rodinia to the assembly of Gondwanaland. *Sediment Geol*, 294: 219–232
- Liu X F, Zuo P F, Wang Q F, Bagas L, He Y L, Zheng D S. 2019. Initial accretion of the North Qinling Terrane to the North China Craton before the Grenville orogeny: Constraints from detrital zircons. *Int Geol Rev*, 61: 109–128
- Liu F L, Zhang J, Liu C H. 2017. Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Preface. *Precambrian Res*, 303: 1–9
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, Gao C G, Gao S, Xu J, Chen H H. 2010. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chin Sci Bull*, 55: 1535–1546
- Lu S N, Zhao G C, Wang H C, Hao G J. 2008. Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China Craton: A review. *Precambrian Res*, 160: 77–93
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot/Ex, Version 3.00. A

- Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication
- Luo Y, Sun M, Zhao G C, Li S Z, Xia X P. 2006. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Yushulazi Formation in the Liaodong Peninsula, Northeast China. *Int Geol Rev*, 48: 828–840
- Meng Q R, Wei H H, Qu Y Q, Ma S X. 2011. Stratigraphic and sedimentary records of the rift to drift evolution of the northern North China craton at the Paleo- to Mesoproterozoic transition. *Gondwana Res*, 20: 205–218
- Peng P. 2015. Late Paleoproterozoic-Neoproterozoic (1800–514 Ma) mafic dyke swarms and rifts in North China. In: Zhai M G, ed. *Precambrian Geology of China*. Berlin, Heidelberg: Springer. 171–204
- Peng P, Zhai M G, Guo J H, Kusky T, Zhao T P. 2007. Nature of mantle source contributions and crystal differentiation in the petrogenesis of the 1.78 Ga mafic dykes in the central North China craton. *Gondwana Res*, 12: 29–46
- Peng P, Zhai M G, Ernst R E, Guo J H, Liu F, Hu B. 2008. A 1.78 Ga large igneous province in the North China craton: The Xiong'er Volcanic Province and the North China dyke swarm. *Lithos*, 101: 260–280
- Rino S, Kon Y, Sato W, Maruyama S, Santosh M, Zhao D. 2008. The Grenvillian and Pan-African orogens: World's largest orogenies through geologic time, and their implications on the origin of superplume. *Gondwana Res*, 14: 51–72
- Su W B, Zhang S H, Huff W D, Li H K, Etensohn F R, Chen X Y, Yang H M, Han Y G, Song B, 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 W B, Li H K, Huff W D, Etensohn F R, Zhang S H, Zhou H Y, Wan Y S. 2010. SHRIMP U-Pb dating for a K-bentonite bed in the Tieling Formation, North China. *Chin Sci Bull*, 55: 3312–3323
- Wang C M, He X Y, Carranza E J M, Cui C M. 2019. Paleoproterozoic volcanic rocks in the southern margin of the North China Craton, central China: Implications for the Columbia supercontinent. *Geosci Front*, 10: 1543–1560
- Wang Q H, Yang H, Yang D B, Xu W L. 2014. Mid-Mesoproterozoic (~1.32 Ga) diabase swarms from the western Liaoning region in the northern margin of the North China Craton: Baddeleyite Pb-Pb geochronology, geochemistry and implications for the final breakup of the Columbia supercontinent. *Precambrian Res*, 254: 114–128
- Wang X L, Jiang S Y, Dai B Z. 2010. Melting of enriched Archean subcontinental lithospheric mantle: Evidence from the ca. 1760 Ma volcanic rocks of the Xiong'er Group, southern margin of the North China Craton. *Precambrian Res*, 182: 204–216
- Yang D B, Xu W L, Xu Y G, Wang Q H, Pei F P, Wang F. 2012. U-Pb ages and Hf isotope data from detrital zircons in the Neoproterozoic sandstones of northern Jiangsu and southern Liaoning Provinces, China: Implications for the Late Precambrian evolution of the southeastern North China Craton. *Precambrian Res*, 216–219: 162–176
- Yang J H, Wu F Y, Zhang Y B, Zhang Q, Wilde S A. 2004. Identification of Mesoproterozoic zircons in a Triassic dolerite from the Liaodong Peninsula, Northeast China. *Chin Sci Bull*, 49: 1958–1962
- Zhai M G, Hu B, Zhao T P, Peng P, Meng Q R. 2015. Late Paleoproterozoic-Neoproterozoic multi-rifting events in the North China Craton and their geological significance: A study advance and review. *Tectonophysics*, 662: 153–166
- Zhang S C, Wang X M, Hammarlund E U, Wang H J, Costa M M, Bjerrum C J, Connelly J N, Zhang B M, Bian L Z, Canfield D E. 2015. Orbital forcing of climate 1.4 billion years ago. *Proc Natl Acad Sci USA*, 112: E1406–E1413
- Zhang S H, Zhao Y, Yang Z Y, He Z F, Wu H. 2009. The 1.35 Ga diabase sills from the northern North China Craton: Implications for breakup of the Columbia (Nuna) supercontinent. *Earth Planet Sci Lett*, 288: 588–600
- Zhang S H, Zhao Y, Santosh M. 2012. Mid-Mesoproterozoic bimodal magmatic rocks in the northern North China Craton: Implications for magmatism related to breakup of the Columbia supercontinent. *Precambrian Res*, 222–223: 339–367
- Zhang S H, Zhao Y, Li X H, Ernst R E, Yang Z Y. 2017. The 1.33–1.30 Ga Yanliao large igneous province in the North China Craton: Implications for reconstruction of the Nuna (Columbia) supercontinent, and specifically with the North Australian Craton. *Earth Planet Sci Lett*, 465: 112–125
- Zhang Y B, Li Q L, Lan Z W, Wu F Y, Li X H, Yang J H, Zhai M G. 2015. Diagenetic xenotime dating to constrain the initial depositional time of the Yan-Liao Rift. *Precambrian Res*, 271: 20–32
- Zhao T P, Zhou M F, Zhai M, Xia B. 2002. Paleoproterozoic rift-related volcanism of the Xiong'er Group, North China Craton: Implications for the breakup of Columbia. *Int Geol Rev*, 44: 336–351
- Zuo P F, Li Y, Zhang G C, Si R J, Wang S Y, Liu S C, Zheng D S, Sun J T. 2019. Reviews of the Mesoproterozoic to Neoproterozoic sedimentary sequences and new constraints on the tectono-sedimentary evolution of the southern margin of the North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 179: 416–429

(责任编辑: 朱茂炎)



论文

附录

附表 S1 白木沟组层凝灰岩 LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄测试结果

样品号	含量($\times 10^{-6}$)			同位素比值						年龄(Ma)									
	Pb	Th	U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ
sam.1	35	84	146	0.2235	0.0026	2.620	0.048	0.0850	0.0014	0.0578	0.0014	0.5740	0.0028	1301	15	1306	24	1316	31
sam.2	34	81	139	0.2249	0.0027	2.658	0.050	0.0857	0.0014	0.0582	0.0014	0.5834	0.0036	1308	16	1317	25	1332	31
sam.3	54	132	264	0.1948	0.0030	2.311	0.046	0.0860	0.0013	0.0486	0.0012	0.4979	0.0046	1148	18	1216	24	1338	29
sam.4	82	318	332	0.2171	0.0029	2.553	0.047	0.0853	0.0013	0.0505	0.0012	0.9588	0.0072	1267	17	1287	24	1322	29
sam.5	25	45	111	0.2111	0.0027	2.532	0.065	0.0870	0.0022	0.0670	0.0020	0.4094	0.0069	1235	16	1281	33	1360	48
sam.6	53	123	220	0.2261	0.0027	2.647	0.047	0.0849	0.0013	0.0590	0.0015	0.5576	0.0110	1314	16	1314	23	1314	30
sam.7	15	29	62	0.2295	0.0032	2.726	0.073	0.0861	0.0021	0.0724	0.0022	0.4651	0.0035	1332	18	1335	36	1341	47
sam.8	27	65	111	0.2264	0.0027	2.690	0.054	0.0862	0.0015	0.0630	0.0020	0.5830	0.0109	1315	16	1326	27	1342	35
sam.9	18	34	74	0.2284	0.0027	2.718	0.055	0.0863	0.0016	0.0663	0.0018	0.4674	0.0021	1326	16	1333	27	1346	36
sam.10	18	42	77	0.2219	0.0028	2.655	0.057	0.0868	0.0016	0.0636	0.0016	0.5456	0.0050	1292	16	1316	28	1356	36
sam.11	47	140	202	0.2090	0.0030	2.482	0.048	0.0861	0.0013	0.0576	0.0014	0.6906	0.0085	1223	18	1267	24	1341	29
sam.12	34	87	141	0.2238	0.0029	2.647	0.050	0.0858	0.0014	0.0582	0.0012	0.6203	0.0122	1302	17	1314	25	1333	31
sam.13	39	63	198	0.1920	0.0026	2.259	0.044	0.0853	0.0015	0.0558	0.0013	0.3169	0.0040	1132	15	1200	23	1323	34
sam.14	34	114	227	0.1396	0.0024	1.640	0.036	0.0852	0.0013	0.0409	0.0009	0.5032	0.0066	843	15	986	21	1320	31
sam.15	22	72	102	0.1918	0.0037	2.228	0.069	0.0842	0.0019	0.0548	0.0019	0.7091	0.0089	1131	22	1190	37	1298	44
sam.16	33	10	160	0.2192	0.0036	2.578	0.056	0.0853	0.0014	0.0245	0.0006	0.0628	0.0014	1278	21	1294	28	1322	32
sam.17	20	37	87	0.2282	0.0030	2.696	0.054	0.0857	0.0015	0.0520	0.0011	0.4208	0.0021	1325	17	1327	26	1331	33
sam.18	35	100	139	0.2266	0.0030	2.686	0.054	0.0860	0.0014	0.0558	0.0011	0.7176	0.0099	1317	18	1325	27	1338	32
sam.19	27	119	146	0.1765	0.0021	2.080	0.041	0.0855	0.0016	0.0290	0.0006	0.8146	0.0104	1048	12	1142	23	1326	35
sam.20	35	88	155	0.2157	0.0025	2.484	0.047	0.0835	0.0014	0.0523	0.0010	0.5644	0.0023	1259	15	1267	24	1281	34
sam.21	29	61	119	0.2285	0.0028	2.602	0.051	0.0826	0.0015	0.0564	0.0012	0.5135	0.0015	1327	16	1301	26	1260	34
sam.22	23	41	97	0.2247	0.0029	2.606	0.055	0.0841	0.0016	0.0587	0.0014	0.4212	0.0046	1307	17	1302	27	1295	36
sam.23	35	77	158	0.2127	0.0034	2.518	0.052	0.0859	0.0014	0.0470	0.0012	0.4896	0.0090	1243	20	1277	26	1335	31
sam.24	22	39	94	0.2197	0.0044	2.620	0.071	0.0865	0.0017	0.0666	0.0018	0.4177	0.0046	1280	26	1306	36	1349	37

样品号	含量($\times 10^{-6}$)			同位素比值						年龄(Ma)									
	Pb	Th	U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ
sam.25	47	112	201	0.2181	0.0026	2.657	0.047	0.0884	0.0013	0.0577	0.0013	0.5587	0.0033	1272	15	1317	23	1391	29
sam.26	36	236	229	0.1440	0.0020	2.044	0.038	0.1030	0.0016	0.0209	0.0006	1.0321	0.0113	867	12	1130	21	1678	28
sam.27	51	492	337	0.1335	0.0016	1.773	0.030	0.0963	0.0014	0.0199	0.0004	1.4593	0.0137	808	10	1036	18	1553	28
sam.28	52	177	243	0.1951	0.0024	2.316	0.040	0.0861	0.0013	0.0500	0.0011	0.7297	0.0088	1149	14	1217	21	1340	29
sam.29	53	161	212	0.2251	0.0027	2.644	0.046	0.0852	0.0013	0.0560	0.0011	0.7594	0.0087	1309	16	1313	23	1320	29
sam.30	45	125	182	0.2277	0.0033	2.685	0.054	0.0855	0.0014	0.0589	0.0013	0.6900	0.0055	1322	19	1324	26	1327	32
sam.31	18	36	75	0.2302	0.0028	2.724	0.054	0.0858	0.0016	0.0598	0.0014	0.4813	0.0066	1335	16	1335	26	1334	36
sam.32	39	104	165	0.2219	0.0028	2.627	0.047	0.0859	0.0013	0.0551	0.0014	0.6329	0.0064	1292	16	1308	24	1335	30
sam.33	42	89	172	0.2284	0.0029	2.707	0.049	0.0860	0.0013	0.0618	0.0014	0.5198	0.0024	1326	17	1330	24	1338	30
sam.34	40	100	162	0.2274	0.0029	2.664	0.049	0.0850	0.0013	0.0604	0.0013	0.6168	0.0131	1321	17	1318	24	1315	30
sam.35	17	33	71	0.2284	0.0031	2.717	0.063	0.0863	0.0017	0.0670	0.0015	0.4682	0.0039	1326	18	1333	31	1344	38
sam.36	32	104	125	0.2300	0.0027	2.735	0.052	0.0862	0.0015	0.0580	0.0012	0.8331	0.0099	1335	16	1338	25	1343	33
sam.37	44	120	200	0.2042	0.0029	2.417	0.046	0.0858	0.0013	0.0541	0.0011	0.6019	0.0048	1198	17	1248	24	1335	30
sam.38	33	73	136	0.2293	0.0030	2.716	0.051	0.0859	0.0013	0.0641	0.0014	0.5350	0.0061	1331	17	1333	25	1336	30
sam.39	25	42	108	0.2227	0.0034	2.606	0.058	0.0849	0.0016	0.0680	0.0015	0.3888	0.0054	1296	20	1302	29	1312	38
sam.40	39	57	180	0.2096	0.0028	2.473	0.047	0.0855	0.0014	0.0707	0.0018	0.3166	0.0075	1227	16	1264	24	1328	32
1904HS08																			
sam.1	50	110	210	0.2275	0.0028	2.672	0.044	0.0852	0.0011	0.0530	0.0013	0.5267	0.0032	1321	17	1321	22	1320	25
sam.2	68	145	328	0.2060	0.0023	2.431	0.037	0.0856	0.0011	0.0356	0.0007	0.4424	0.0126	1208	14	1252	19	1329	24
sam.3	37	117	152	0.2288	0.0025	2.693	0.042	0.0853	0.0011	0.0458	0.0009	0.7676	0.0041	1328	15	1326	21	1323	25
sam.4	50	219	219	0.2040	0.0030	2.411	0.044	0.0857	0.0011	0.0410	0.0008	0.9970	0.0083	1197	18	1246	23	1331	25
sam.5	46	408	323	0.1316	0.0018	1.574	0.025	0.0868	0.0013	0.0156	0.0003	1.2613	0.0235	797	11	960	15	1356	28
sam.6	45	125	192	0.2247	0.0024	2.610	0.040	0.0842	0.0011	0.0452	0.0009	0.6520	0.0125	1307	14	1303	20	1298	26
sam.7	37	98	182	0.2003	0.0023	2.342	0.037	0.0848	0.0011	0.0373	0.0008	0.5353	0.0064	1177	13	1225	19	1311	25
sam.8	52	233	295	0.1630	0.0033	1.841	0.043	0.0819	0.0011	0.0349	0.0009	0.7882	0.0112	973	20	1060	25	1243	26
sam.9	66	225	421	0.1552	0.0019	1.863	0.030	0.0870	0.0012	0.0212	0.0005	0.5335	0.0034	930	11	1068	17	1361	26
sam.10	70	226	342	0.1927	0.0022	2.487	0.040	0.0936	0.0013	0.0386	0.0010	0.6612	0.0052	1136	13	1268	20	1500	26
sam.11	32	102	148	0.2104	0.0030	2.459	0.045	0.0847	0.0011	0.0335	0.0010	0.6892	0.0039	1231	17	1260	23	1309	26
sam.12	30	131	164	0.1754	0.0019	2.095	0.033	0.0866	0.0012	0.0292	0.0009	0.7990	0.0096	1042	11	1147	18	1352	26
sam.13	32	125	169	0.1825	0.0020	2.167	0.034	0.0861	0.0012	0.0275	0.0009	0.7411	0.0080	1081	12	1170	18	1340	26
sam.14	39	211	244	0.1592	0.0018	1.860	0.029	0.0847	0.0011	0.0161	0.0006	0.8654	0.0027	952	11	1067	16	1310	26

samm.15	23	72	121	0.1801	0.0048	2.223	0.067	0.0895	0.0013	0.0365	0.0016	0.5964	0.0051	1067	29	1188	36	1415	29
samm.16	44	106	189	0.2255	0.0026	2.641	0.043	0.0849	0.0012	0.0440	0.0021	0.5633	0.0167	1311	15	1312	21	1314	26
samm.17	39	146	157	0.2292	0.0031	2.707	0.048	0.0857	0.0012	0.0393	0.0013	0.9291	0.0093	1330	18	1330	24	1331	26
samm.18	32	66	139	0.2298	0.0028	2.723	0.046	0.0859	0.0012	0.0420	0.0012	0.4777	0.0086	1333	16	1335	23	1337	27
samm.19	51	246	278	0.1721	0.0029	2.028	0.040	0.0855	0.0011	0.0301	0.0008	0.8852	0.0054	1023	17	1125	22	1326	25
samm.20	40	118	198	0.1945	0.0023	2.290	0.035	0.0854	0.0011	0.0385	0.0009	0.5974	0.0054	1146	13	1209	19	1324	26
samm.21	49	394	303	0.1506	0.0021	1.745	0.029	0.0841	0.0011	0.0192	0.0006	1.3002	0.0060	904	12	1025	17	1294	25
samm.22	62	256	264	0.2058	0.0021	3.587	0.058	0.1264	0.0018	0.0418	0.0013	0.9728	0.0181	1206	13	1547	25	2049	25
samm.23	62	356	389	0.1465	0.0017	1.885	0.028	0.0934	0.0012	0.0256	0.0006	0.9145	0.0086	881	10	1076	16	1495	25
samm.24	33	141	169	0.1802	0.0024	2.141	0.037	0.0862	0.0012	0.0331	0.0007	0.8320	0.0070	1068	14	1162	20	1342	26
samm.25	60	252	244	0.2066	0.0026	3.770	0.061	0.1323	0.0023	0.0492	0.0010	1.0301	0.0126	1211	15	1586	26	2129	30
samm.26	52	461	361	0.1338	0.0036	1.674	0.045	0.0908	0.0013	0.0159	0.0007	1.2772	0.0082	809	22	999	27	1442	26
samm.27	49	136	217	0.2141	0.0027	2.553	0.041	0.0865	0.0011	0.0451	0.0008	0.6265	0.0108	1251	16	1287	21	1349	25
samm.28	40	270	364	0.1002	0.0012	1.231	0.021	0.0891	0.0012	0.0226	0.0004	0.7409	0.0065	616	8	815	14	1406	26
samm.29	37	149	170	0.2013	0.0026	2.449	0.041	0.0882	0.0012	0.0363	0.0007	0.8809	0.0050	1182	15	1257	21	1387	26
samm.30	28	144	177	0.1499	0.0018	1.815	0.031	0.0879	0.0013	0.0259	0.0005	0.8131	0.0138	900	11	1051	18	1379	28
samm.31	25	140	140	0.1672	0.0020	1.934	0.034	0.0839	0.0013	0.0286	0.0005	0.9990	0.0068	997	12	1093	19	1290	29
samm.32	46	205	249	0.1732	0.0019	2.070	0.032	0.0867	0.0011	0.0316	0.0006	0.8236	0.0088	1030	11	1139	18	1353	25