

doi:10.3799/dqkx.2016.121

扬子北部三峡地区南沱组冰碛岩的物源特征： 锆石年龄和地球化学证据

胡 蓉¹, 李双庆^{1*}, 王 伟², 陈福坤¹

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

摘要:扬子陆块新元古代地层发育完整并广泛分布,三峡地区南沱组冰碛岩是扬子北部南华纪的冰成杂砾岩,不整合地覆盖在新元古代黄陵花岗岩之上。南沱组冰碛岩成分复杂,分选性差,缺乏可对比的标志,其沉积时代和物源组成研究较少且存在争议。对南沱组冰碛岩开展锆石U-Pb定年工作,得到最年轻的锆石年龄为 706 ± 7 Ma,印证了南沱组沉积时代应不早于700 Ma的说法,并可与Marinoan冰期对应。所获得锆石U-Pb年龄谱峰值主要分为 ~ 3.0 Ga, $2.5 \sim 2.3$ Ga, $2.05 \sim 1.95$ Ga和 $900 \sim 700$ Ma,反映了扬子陆块4次地壳再造事件,其中古元古代和太古代年龄与崆岭杂岩相似, $900 \sim 800$ Ma和 $800 \sim 700$ Ma的锆石年龄与附近黄陵花岗岩和扬子北缘岩体一致。冰碛砂岩的微量元素和同位素组成分异明显,可能是扬子北缘岩体、黄陵花岗岩和崆岭杂岩不同程度混合的结果。南沱组冰碛岩中包裹的花岗质砾石表现出不同的微量元素特征,具有偏低的稀土含量和亏损的重稀土组成,结合其锆石U-Pb年龄和Sr-Nd同位素特征,这些花岗质砾石主体可能来自于附近黄陵花岗岩和崆岭岩基。南沱组冰碛岩的物质组成特征反映了新元古时期,扬子地区强烈的裂谷岩浆作用所导致的北高南低的地势环境。

关键词:扬子陆块;南沱组;冰碛岩;锆石年龄;Sr-Nd同位素;地球化学。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2016)10-1630-25

收稿日期: 2016-05-13

Source Characteristics of Tillite the Nantuo Formation in Three Gorges, Northern Yangtze Block: Evidences from Zircon Ages and Geochemical Composition

Hu Rong¹, Li Shuangqing^{1*}, Wang Wei², Chen Fukun¹

1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

2. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074

Abstract: Neoproterozoic sedimentary sequences from the Yangtze block are completely developed and widely distributed. The Nantuo tillites in the Three Gorge area are glacial diamictites from the northern Yangtze block in the Nanhua period, which unconformably overlie the Neoproterozoic Huangling granites. The compositions of the Nantuo tillites are complicated, and the sedimentary time and components of source are rarely studied and remain in dispute. Zircon U-Pb dating results of the Nantuo tillite in this study yield youngest zircon age of 706 ± 7 Ma. Combining with previous results about zircon U-Pb ages of the tuff from basal Doushantuo Formation and top of Datangpo Formation, the sedimentary ages of the Nantuo Formation are limited to 654–635 Ma, which can be equal to that of Marinoan. The peaks of zircon U-Pb age-spectrum are ~ 3.0 Ga, $2.5 \sim 2.3$ Ga, $2.05 \sim 1.95$ Ga and $900 \sim 700$ Ma respectively, which indicate four crustal-reworking events in the Yangtze block. The ages of Paleoproterozoic and Archean are similar to that of the Kongling complex, meanwhile, $900 \sim 800$ Ma and $800 \sim 700$ Ma are the same as that of the Huangling granites nearby and the rocks from northern margin of the Yangtze block. The trace elements and isotope compositions of moraine sandstones show obvious differentiation, maybe due to the different degrees of mixture by materials from the northern margin of the Yangtze block, the Huangling granite and the Kongling Complex. Granitic conglomerates

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos.40973042,41090372);中央高校基本科研业务费专项资金。

作者简介:胡蓉(1985—),女,硕士,主要研究沉积地球化学。E-mail: rong1104@mail.ustc.edu.cn

*通信作者:李双庆, E-mail: lsq@ustc.edu.cn

引用格式:胡蓉,李双庆,王伟,等.2016.扬子北部三峡地区南沱组冰碛岩的物源特征:锆石年龄和地球化学证据.地球科学,41(10):1630–1654.

erates in the Nantuo tillites have different features of trace elements, low REE contents and depleted HREE. Associated with zircon U-Pb age and signature of Sr-Nd isotopes, these granitic conglomerates probably mainly came from the Huangling batholith and the Kongling Complex. The provenance characteristics of the Nantuo tillites reflect intensive rift related magma activities in the Yangtze block during the Neoproterozoic time, which causes the terrain featuring “lower in the south and higher in the north”.

Key words: Yangtze block; Nantuo Group; tillite; zircon age; Sr-Nd isotope; geochemistry.

0 引言

新元古代是全球岩浆活动和气候变化最为剧烈的时期之一,涉及超大陆的形成与裂解、广泛的裂谷岩浆活动、低纬度冰期发育、生命大爆发等重大科学问题(Anbar and Knoll, 2002; Wang and Li, 2003; 郑永飞, 2003; Chen et al., 2004).在新元古时期出现的几次全球性冰期事件,一直是人们关注的焦点,目前普遍认为存在 4 次较明显的冰期,依次为:Kai-gas 冰期(Zheng et al., 2007)、Sturtian 冰期(Xiao et al., 2004; Xu et al., 2005)、Marinoan 冰期(Condon et al., 2005; Halverson et al., 2005; Zhang et al., 2005) 和 Gaskiers 冰期(Xiao et al., 2004; Halverson et al., 2005),其中处于 635~650 Ma 的 Marinoan 冰期分布最为广泛(Hoffman, 2009).值得注意的是,在我国的扬子地区也广泛发育了新元古代冰期地层,并且前人已经开展大量相关工作(Zhou et al., 2004; Zheng et al., 2007),其中以三峡地区的南沱组为典型代表,可以与全球同时期的其他冰期地层进行对比.但是由于冰期沉积地层岩性贫乏,地层和古生物化石缺失,不同学者采用的定年方法和测试对象存在差异,所以关于南沱组的沉积时代目前尚存在较大争议(Wang et al., 1981; Knoll and Xiao, 1999; Evans et al., 2000; Barfod et al., 2002; Zhang et al., 2002; Wang and Li, 2003; Zhou et al., 2004; Chu et al., 2005; Condon et al., 2005; Yin et al., 2005; Zhang et al., 2005; Zhang et al., 2008b),因此有必要对南沱组冰期地层的沉积时代进行更具体的限定.

在冰期,冰川的运移和堆碛作用会形成特定的地形和堆积物,这些堆积物在成岩作用下形成冰碛岩,它主要由冰川迁移沿途吸收的陆源碎屑物质构成,其组分可能包括花岗岩、片岩、片麻岩及砂岩等各种碎屑物质,基本可以代表碎屑源区物质的平均组成.由于冰川搬运能力强,且寒冷环境下不易受到风化和变质作用影响,因此冰碛岩通常继承了母岩的化学、矿物和岩石成分,可以有效地反映源区组成

和古地理特征.具体来说,冰碛岩中碎屑锆石的 U-Pb 年龄可以限定沉积的最大时代,其年龄图谱可以和已知的源区对比进而推测可能的物源组成(Zhu et al., 2011; Li et al., 2012; Wang et al., 2012).同时,碎屑物质中的稀土元素和 Zr、Th 等微量元素具有较强的抗风化和抗迁移能力,在搬运、沉积和成岩过程中基本不受影响,而继承自源区的放射性同位素特征更可以直接反演物源组成并示踪(Taylor and McLennan, 1985; Prudencio et al., 1989; Crichiton and Condie, 1993; 高福红等, 2014).

本文所研究的三峡地区九龙湾剖面是扬子陆块南沱组典型剖面,地层出露完整,层序清晰,是研究新元古冰期活动的理想区域.研究人员针对南沱组冰碛岩开展了锆石 U-Pb 年代学工作,并结合微量元素以及 Sr-Nd 放射性同位素分析结果,尝试对南沱组的形成时代进行制约,反演其物质源区的组成特征,并为进一步理解该时期的全球气候变化和构造演化提供依据.

1 地质背景

扬子陆块与华夏陆块通过四堡造山运动在新元古代拼合形成华南板块(李献华等, 2012),其中扬子陆块不仅出露有太古代岩石,而且主要在边缘区域发育着古元古代到中元古代岩浆活动和沉积事件,另外整个陆块也广泛分布着新元古代沉积序列,且地层连续,岩石基本没有变质,保存了丰富的生物化石(Zhao and Cawood, 2012; Wang et al., 2013b; Zheng et al., 2013; Zhou et al., 2014).经过多年的研究积累,前人在扬子陆块发现了越来越多的太古代和古元古代年龄记录(Qiu et al., 2000; Liu et al., 2008; Zhang et al., 2008a),因此对扬子陆块基底主要形成时代的认识由原来的古元古代(Chen and Jahn, 1998)发展到古太古代(Qiu et al., 2000; Zhang et al., 2006a, 2006c; Liu et al., 2008; 焦文放等, 2009; Gao et al., 2011).扬子陆块目前已知的基底岩石是峡东地区的崆岭杂岩(Qiu et al.,

2000)、西北缘的后河杂岩(Wu *et al.*, 2012)和西南缘的大红山群(Greentree and Li, 2008),其中最古老的基底是崆岭杂岩,主要为一套中高级变质杂岩系,包括 TTG 质片麻岩、混合岩、变沉积岩以及少量斜长角闪岩和镁铁质麻粒岩,前人已得到的年龄约为 3.3~2.9 Ga(Gao *et al.*, 1999, 2011; Qiu *et al.*, 2000; Jiao *et al.*, 2009).另外,在对扬子陆块年代学研究中发现大量 2.0~1.9 Ga 时期的锆石(凌文黎和高山, 2000; Qiu *et al.*, 2000; 吴元保, 2002; Zhang *et al.*, 2006b; Zheng *et al.*, 2006b),它们对应的 Th/U 比值范围非常广泛(Zhang *et al.*, 2006b),暗示这一时期可能既有岩浆活动又有变质活动发生.同时 Hf 同位素分析结果基本为负值,表明应该以古老地壳的再造作用为主,可能与 Columbia 超大陆的聚合有关(Wu *et al.*, 2008).扬子陆块古元古代再造事件结束于约 1.85 Ga,即圈椅端花岗岩侵入崆岭群的时间(袁海华等, 1991; 熊庆等, 2008).扬子北缘以及陆块内部在 830~750 Ma 发生了大量与伸展相关的岩浆和沉积作用,发育了很多新元古代中期的火山—沉积盆地以及岩浆岩(李永飞等, 2007; 李献华等, 2012),可能与 Rodinia 超大陆裂解有关(Wang and Li, 2003).扬子北缘区内已知的古老基底为陕西汉中碑坝地区的后河杂岩和火地坪群以及西乡地区的西乡群,它们于晋宁期被大规模侵

位,主要的侵入岩体有碑坝地区的碑坝基性侵入岩、猫儿寨钾长花岗岩、天平河和杨家沟花岗闪长岩和铁船山霓石花岗岩以及西乡地区的望江山基性岩体和流南杂岩,随后被震旦系地层所覆盖(凌文黎, 1996; Ling *et al.*, 2002; 胡建等, 2007).扬子陆块内部在新元古代中期广泛发育花岗岩以及酸性火山岩等,其中典型的黄陵岩基根据不同的岩性划分为 4 个岩套:黄陵庙、三斗坪、大老岭和晓峰,其源岩为古老地壳,与崆岭杂岩有关(Zhang *et al.*, 2008a, 2009).不整合地覆盖在黄陵花岗岩之上的是全套完整的新元古代地层,从下到上依次为:莲沱组砂岩、南沱组冰碛岩、陡山沱组白云岩与黑色页岩和灯影组灰岩.其中莲沱组是扬子地区最古老的未变质的沉积地层,分布不稳定,厚度变化也比较大,为一套含凝灰质成分较多的粗碎屑岩.位于莲沱组和南沱组之间的古城组与大塘坡组在三峡地区缺失,可能是受澄江运动影响,扬子地台整体上升,导致沉积间断,莲沱组与南沱组呈假整合接触,这 4 个组统称为南华系,与国际上的 Cryogenian 系对应.南华纪晚期,全球进入冰期,被冰川覆盖,接受冰水沉积.覆盖在南沱组之上的是震旦系地层,对应于国际上的 Ediacaran 系,包括下伏的陡山沱组白云岩和黑色页岩以及上覆的灯影组灰岩.震旦纪初期,气候变暖,冰川融化,扬子地台自东向西发生大规模海侵并转

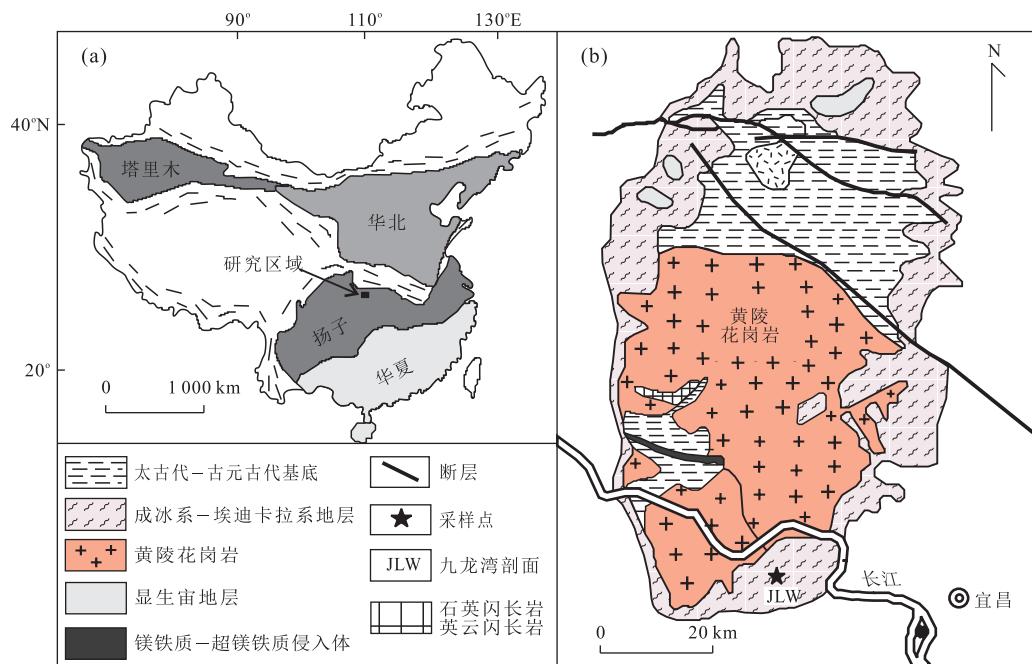


图 1 研究区地质

Fig.1 Geology of research area

a.中国扬子、华夏、华北和塔里木板块的分布位置;b.三峡地区和黄陵背斜的地质简图.据 McFadden *et al.*(2009)和 Xiao *et al.*(2012)修改

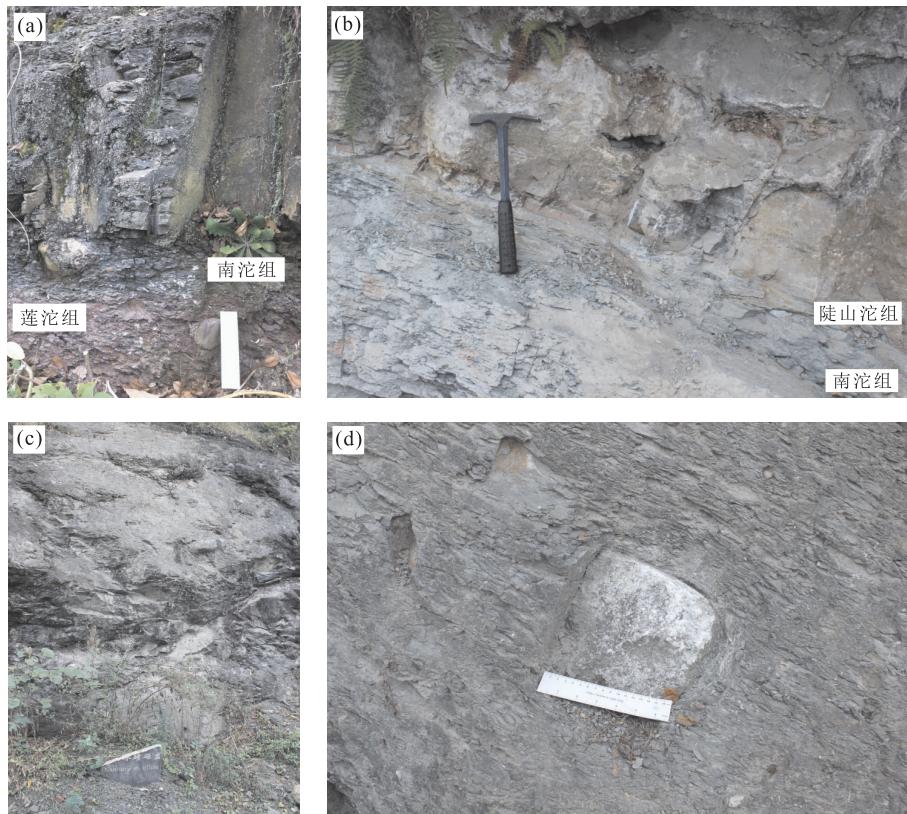


图 2 三峡地区九龙湾南沱组典型剖面特征

Fig.2 Outcrop pictures of the Nantuo Formation in the Jiulongwan section

a.南沱组与莲沱组的界线;b.南沱组与陡山沱组的界线;c.南沱组;d.南沱组冰砾岩中的砾石

变为被动大陆边缘,从东南到西北方向,依次发育盆地相沉积,斜坡相沉积和台地相沉积。

南沱组冰砾岩广布于扬子地层分区和江南地层分区的范围(邢裕盛等,1996),尤其在黄陵背斜地区分布广泛,但是沉积厚度不一,自南向北呈减薄趋势,发育状况大体沿背斜西翼的黄家河至背斜东翼的牛坪北西方向连线划分为两区:北线以南沉积厚度60~110 m,北线以北减至10 m以下直至消失(沙庆安等,1963).其厚度变化极大,从几十米到几百米不等,最厚位于庙河一带,达110 m.本文研究区域位于湖北宜昌三峡地区九龙湾剖面($30^{\circ}48'12.82''N, 111^{\circ}03'19.65'E$),黄陵背斜的东南翼(图1).南沱组主要为灰绿色夹紫红色巨块状冰砾泥砾岩,由于冰川承载力强,可以搬运较重的固态物质,所以冰砾岩通常自成一大巨块且并无层理,其中所含的砾石也因为没有相对大的移动,杂乱无章地分布在冰砾岩中.砾石大小不一,分选性差,成分复杂,常见有白云岩、硅质岩、花岗岩和变质岩等,直径为1~70 cm不等,形状多为次棱状,时有扁圆形和球形,常见磨光面,擦痕和“丁”字压坑等,可能是由于在冰川搬运过程中碎屑之间或

与冰床相互摩擦碰撞的结果(张长俊,1990),胶结物主要为泥质,常见泥包砾结构(赵自强等,1980;张启锐,1995).冰砾岩中除了形态多样的砾石外,主要含有砂质和泥质的细碎屑物质,各地组分和含量差异比较大,与下伏基岩和附近岩石有关(沙庆安等,1963).南沱组顶部可见层理明显的砂质粘土岩,含零星砾石,厚度约为60~70 m(图2).

2 样品描述和分析方法

三峡地区广泛发育新元古代标准地层,是研究南沱组冰砾岩的理想地区.本文沿九龙湾剖面的南沱组连续选取了表面新鲜未受风化的冰砾岩样品,其中对6个样品进行锆石U-Pb定年,10个样品进行微量元素分析测试,12个样品进行Sr-Nd同位素分析测试(表1).大部分南沱组冰砾岩样品为砂岩、粉砂岩和含砾砂岩,例如样品NT0601为一套灰绿色含砾砂岩,其中含砾10%~15%,砾径为0.5~2.0 mm,呈次棱角状(图3a);样品NT0603为一套浅灰色扁圆状含砾粉砂岩,砾石含量低,砾径小

表 1 扬子北部三峡地区九龙湾剖面南沱组冰碛岩样品描述

Table 1 Sample description of tillite of the Nantuo formation in the Jiulongwan section, northern Yangze block

样品号	样品描述	样品位置
NT0601	灰绿色块状冰碛含砾砂岩,含砾 10%~15%,砾径为 0.5~2.0 mm,次棱角状,砾石有泥质岩、花岗岩、石英等	
NT0602	粗粒黑云母二长花岗岩,冰碛岩中挑选出来的砾石,含有斜长石、钾长石、石英和少量黑云母等矿物	
NT0603	浅灰色扁圆状冰碛含砾粉砂岩,砾石含量低,砾径小,主要有石英、泥岩等	
NT0604	深灰色块状冰碛含砾砂岩,砾石含量低,主要有石英、泥岩等,有的石英砾径长达 3 mm	30°46'58.7"N 111°02'01.0"E
NT0605	灰绿色块状冰碛砂岩	
NT0607	灰色块状冰碛石英中砂岩,含有石英和绢云母等	
NT0608	深灰色扁圆状冰碛细砂岩,含有石英等	
NT0609	深灰色块状冰碛含砾粉砂岩	
NT0610	粗粒黑云母二长花岗岩,冰碛岩中挑选出来的砾石,主要矿物为石英、斜长石、钾长石和黑云母等	30°48'31.1"N 111°03'26.2"E
NT0611	深灰色块状冰碛细砂岩,含有石英等	
NT0612	花岗质岩石,冰碛岩中挑选出来的砾石,钾长石斑晶比较大,直径长大约 3 cm	
NT0613	凝灰质火山岩,含杂砾泥质岩,砾石成分复杂多样,大小不一,大至几十厘米,小至小于 1 cm	30°48'31.2"N 111°03'26.0"E
NT0614	灰绿色块状冰碛含砾砂岩,含砾 15%~20%,砾径为 0.5~3.0 mm,次棱角状,砾石有泥质岩、石英等	
NT0615	紫红色块状冰碛泥质砂岩	
NT0616	灰白色凝灰质火山岩	

(图 3c);样品 NT0604 为一套深灰色含砾砂岩,砾石含量低(图 3d);样品 NT0605 为灰绿色砂岩(图 3e);样品 NT0607 为灰色石英中砂岩,含有石英和绢云母(图 3f);样品 NT0608 为深灰色扁圆状冰碛细砂岩,含有石英等成分(图 3g);样品 NT0609 为深灰色含砾粉砂岩(图 3h);样品 NT0611 为深灰色细砂岩,含有石英等成分(图 3j);样品 NT0614 为灰绿色含砾砂岩,其中含砾 15%~20%,砾径为 0.5~3.0 mm,呈次棱角状(图 3l)。其次,通过野外观察可以发现,南沱组冰碛岩中含有很多大小不一、杂乱无序的砾石,有的粒径可长达约 1 m,并且在九龙湾剖面的南沱组冰碛岩砾石中,花岗岩组分含量最高,所以本文挑选 3 件花岗质砾石作为样品开展工作以确定其来源和属性:NT0602 为粗粒黑云母二长花岗岩,其中主要含有的矿物为斜长石、钾长石、石英和少量黑云母(图 3b);NT0610 为粗粒黑云母二长花岗岩,其所含矿物主要为石英,斜长石、钾长石和黑云母等(图 3i);NT0612 花岗质岩石,可能受到后期变质作用影响,其中钾长石斑晶比较大,直径长达约 3 cm(图 3k)。另外还有 2 个凝灰质火山岩样品,分别是 NT0613 和 NT0616(图 3n)。

由于南沱组冰碛岩样品成分复杂,表现出明显

差异的特征,其中所含的砾石粒度分选极差,粒径也较大,并以花岗岩为主,我们针对这部分砾石,去除了周边杂基后单独挑选出来开展锆石 U-Pb 定年、微量元素测试以及 Sr-Nd 同位素分析工作。另外大部分冰碛岩主要以砂岩为主,其中含砾砂岩的粒度也比较小,成分相对均一,因此我们对其进行锆石 U-Pb 定年、全岩微量元素以及 Sr-Nd 同位素分析工作。同时我们对同期的凝灰质火山岩开展了锆石 U-Pb 定年分析工作,以期对南沱组冰碛岩起到对比限定作用。

2.1 锆石 U-Pb 定年

将已经挑选好的样品,机械破碎至矿物的自然粒度后,按常规矿物分选流程分选出锆石。锆石单矿物分选工作是由河北省廊坊市科大岩石矿物分选技术服务有限公司完成。首先在双目镜下挑选晶形发育完好、无明显裂痕和可见矿物包裹体的不同形态和类型的锆石作为研究对象。然后将精选出的锆石颗粒制作成环氧树脂靶样,待冷却固结后打磨、抛光至露出锆石晶体核部。锆石 U-Pb 同位素分析测试工作是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用 LA-ICP-MS 方法测定。剥蚀激光束直径为 32 μm ,采用 He 作为剥蚀物质的载



图 3 三峡地区九龙湾剖面南沱组冰砾岩样品

Fig.3 Sample of tillite of the Nantuo formation in the Jiulongwan section

气,锆石 U-Pb 同位素组成分析采用 91500 国际标准锆石作为外标进行元素分馏校正,分析方法及仪器参数可参考 Yuan *et al.* (2004). 测定的 U-Pb 同位素比值采用 Gilliter Ver 4.0 程序计算得到,普通 Pb 采用 Andersen (2002) 的 Excel 程序 (ComPb-Corr #3_18) 进行校正,U-Pb 年龄结果采用 Isoplot 程序进行计算 (Ludwig, 2003).

2.2 全岩微量元素分析

全岩微量元素分析是在中国科学技术大学中科院壳幔物质与环境重点实验室完成,采用封闭压力酸溶法进行样品溶解,首先将待测岩石粉末样品置于烘

箱中 105 °C 加热约 4 h, 取出样品待冷却至室温后准确称取 50 mg, 置于已洗净烘干的 Teflon 溶样弹中, 加入 2 滴左右高纯水润湿样品, 同时另取溶样弹, 同样加入 2 滴高纯水作为空白, 之后向溶样弹中依次加入 1.50 mL 纯化 HNO₃、1.50 mL 纯化 HF 和 1 滴约 0.01 mL 的纯化 HClO₄, 随后放置于电热板上在 140 °C 下蒸至湿盐状以除去硅基体; 再次加入 1.50 mL 纯化 HNO₃ 和 1.50 mL 纯化 HF, 加盖并密封于钢套, 置于烘箱中, 190 °C 下加热 48 h; 待样品冷却后取出溶样弹, 并除去表面浮尘后打开溶样弹密封盖, 置于 140 °C 电热板上加热; 蒸干后加入 3.00 mL

纯化 HNO_3 继续蒸至发黄近糊状;然后在溶样弹中加入 4.00 mL 50% 的纯化 HNO_3 ,再次加盖并密封于钢套,置于烘箱中 150 °C 下加热 12 h,以确保样品完全溶解提取。待样品冷却后取出溶样弹,并用高纯水清洗外围,按序排好以备稀释。在已洗净且自然风干的 PET 试剂瓶中准确加入 1.0 000 g Rh 内标(浓度为 800×10^{-9}),接着将已提取好的样品溶液分别转移至相应编号的 PET 瓶中,并用高纯水冲洗溶样弹的盖子内部和内壁约 3 次以保证样品溶液完全转移。将含有样品溶液和 Rh 内标的 PET 瓶定容至 80.00 mL,密封并等待上机测试。微量元素组成的分析是在美国 Perkin Elmer 公司生产的第三代动态反应池(dynamic reaction pool,简称 DRC)Elan DRC II 型双聚焦电感耦合等离子体质谱仪(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry,简称为 ICP-MS)上进行,以多元素混合标准溶液曲线进行元素含量校准,分析过程中采用平行测试空白样、重复样、国际岩石标样 AGV-2(安山岩)、BCR-2(玄武岩)来进行流程和数据质量监控,对于大多数元素分析精度高于 5%,个别元素如 Cr、Co、Ta、Nb 等精度约为 10%,具体的分析测试流程可参考侯振辉和王晨香(2007)。

2.3 全岩 Sr-Nd 同位素分析

Sr-Nd 同位素的化学分离及测试在中国科学技术大学中科院壳幔物质与环境重点实验室完成。更详细的分析方法和流程可参考 Chen *et al.*(2000, 2002)。首先称取约 100 mg 样品粉末,再沿着闷罐壁滴入纯化的 8~10 滴 HClO_4 酸,缓慢摇动至粉末样品无结块,然后加入纯化的 3 mL HF 酸,加盖拧紧在 120 °C 电热板上加热一周左右,在此期间需要经常缓慢摇动闷罐使之充分溶解。待样品溶解后,等待化学分离。Sr 和 REE 的分离和纯化是在装有 5 mL 体积 AG50W-X12 交换树脂(200~400 目)的石英交换柱进行的,Sm 和 Nd 的分离和纯化是在石英交换柱中用 1.7 mL Teflon 粉末为交换介质完成的。

同位素比值测试是在德国 Finnigan 公司生产的 MAT-262 固体热电离质谱(thermal ionization mass spectrometer,简称 TIMS)上完成的。Sr 同位素比值测定采用 TaHf_5 发射剂和双 Ta—金属带的形式进行测定,Nd 同位素比值测定采用双 Re—金属带的形式。测定 Sr-Nd 同位素时所有样品分别采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.119\ 4$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.721\ 9$ 校正 Nd 和 Sr 同位素质量分馏效应。在同位素测试过程中分别采用国际标样 NBS987 和 La Jolla 对 Sr 和 Nd 同位素分析过程进行监测,分别得到其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

的实际测定值为 $0.710\ 249 \pm 0.000\ 012$ ($2\delta, n = 38$) 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511\ 869 \pm 0.000\ 006$ ($2\delta, n = 25$), Sr-Nd 的全流程实验本底分别小于 100 pg 和 50 pg。本文样品的初始同位素比值回算到 635 Ma。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

笔者从冰碛岩样品 NT0601 中一共挑选了 25 颗碎屑锆石进行 U-Pb 定年,其中 24 个年龄数据表现谐和并构成较大的年龄分布范围,从 ~3.1 Ga 到 800 Ma,其中 4 组锆石年龄群落比较明显,加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 852 ± 37 Ma ($n = 7$, MSWD = 22), $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2\ 017 \pm 21$ Ma ($n = 7$, MSWD = 1.06)、 $2\ 452 \pm 56$ Ma ($n = 6$, MSWD = 6.4) 和 $3\ 046 \pm 60$ Ma ($n = 3$, MSWD = 1.6)(图 4a),在锆石年龄概率分布图上可以看出年龄的分布以 900~800 Ma 为主,其余的数据包含晚元古代和中太古代的年龄(图 4b),获得的最大年龄为 $3\ 066 \pm 18$ Ma,最小年龄为 810 ± 8 Ma,锆石的 Th/U 比值为 0.38~5.68(表 2),暗示着它们具有岩浆成因的特征。

在冰碛岩样品 NT0609 中一共选取了 32 颗碎屑锆石进行 U-Pb 定年,其中 32 个年龄数据都表现谐和并构成较大的年龄分布范围,从 ~2.5 Ga 到 750 Ma(图 4c),其中最主要的锆石年龄峰为 900~750 Ma,加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 821 ± 16 Ma ($n = 27$, MSWD = 31),剩下的数据主要为晚元古代的年龄(图 4d),获得的最大年龄为 $2\ 539 \pm 20$ Ma,最小年龄为 757 ± 5 Ma,锆石的 Th/U 比值为 0.16~1.85(表 2),指示其岩浆成因的特征。

从灰绿色砂岩样品 NT0614 中选取 35 颗碎屑锆石,数据点基本都分布在谐和线上,年龄分布范围比较广,从 2.5 Ga 到 700 Ma,其中最显著的峰值加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 800.6 ± 9.4 Ma ($n = 24$, MSWD = 9.9)(图 4e),在锆石年龄概率分布图上可以看出年龄的分布以 900~750 Ma 为主,剩下的数据为晚元古代的年龄(图 4f),获得的最大年龄为 $2\ 483 \pm 20$ Ma,最小年龄为 743 ± 9 Ma,锆石的 Th/U 比值为 0.44~1.35(表 2),应为岩浆成因。

花岗岩砾石样品 NT0612 中 43 颗碎屑锆石的 U-Pb 定年结果显示可能有后期热事件对 U-Pb 同位素体系重置,自 2.70 Ga 左右后发生 Pb 丢失事件。大部分数据点分布在不一致线上,谐和线和不一致线的下交点年龄为 279 ± 65 Ma,上交点年龄为

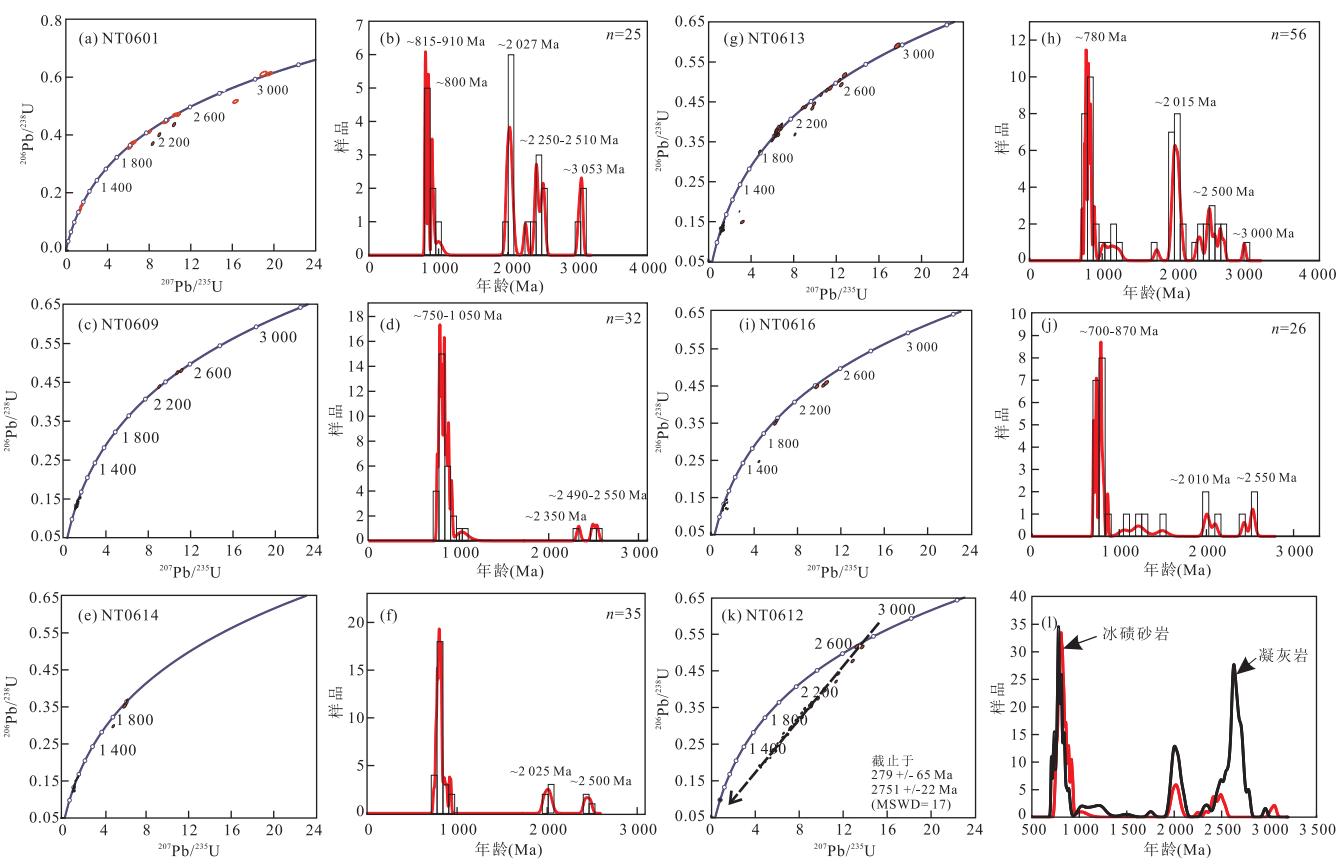


图 4 三峡地区九龙湾剖面南沱组冰碛岩锆石 U-Pb 年龄谐和图和直方分布图

Fig.4 Zircon U-Pb concordia and histogram of zircon ages for tillite of the Nantuo formation in the Jiulongwan section

$2\ 751 \pm 22$ Ma(图 4k),其中多数年龄集中在上交点的谐和线附近,加权平均 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2\ 654 \pm 16$ Ma($n=43$, MSWD=8.4),其上交点年龄代表了其原岩的成岩年龄,下交点年龄可能与扬子和华北在三叠纪时期的碰撞事件有关(Zhang *et al.*, 2006a; Zheng *et al.*, 2003)。

凝灰质火山岩样品 NT0613 所测试的 56 颗碎屑锆石中,53 颗年龄谐和并给出了较大的年龄范围 3.0 Ga 到 700.0 Ma,其中两组锆石年龄群落比较明显,加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 795 ± 18 Ma($n=20$, MSWD=29)和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2\ 046 \pm 21$ Ma($n=10$, MSWD=1.5)(图 4g),在锆石年龄概率分布图上可以看出年龄的分布以 900~700 Ma 和 1.9~2.1 Ga 为主,其余的数据包含中元古代到中太古代的年龄(图 4h),获得的最大年龄为 $2\ 960 \pm 20$ Ma,最小年龄为 724 ± 7 Ma,锆石的 Th/U 比值为 0.01~1.95(表 2),说明它们的成因相对比较复杂。

凝灰质火山岩样品 NT0616 中 26 颗碎屑锆石的数据点大多数都分布在谐和线上,年龄分布范围从 2.5 Ga 到 700 Ma,其中最主要的年龄群落加权平

均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 763 ± 21 Ma($n=15$, MSWD=32)(图 4i),在锆石年龄概率分布图上可以看出年龄的分布以 850~700 Ma 为主,剩下的数据为中元古代和晚元古代的年龄(图 4j),获得的最大年龄为 $2\ 540 \pm 26$ Ma,最小年龄为 706 ± 7 Ma,锆石的 Th/U 比值为 0.44~2.41(表 2),暗示着它们具有岩浆成因的特征。

3.2 全岩微量元素和 Sr-Nd 同位素组成

从稀土分配模式和微量元素蛛网图中可以看出(图 5),南沱组冰碛砂岩与冰碛岩中的花岗岩砾石区别明显,虽然配分模式比较相似,富集 Rb、Ba、Th、U 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta 等高场强元素,轻稀土相对富集,轻重稀土元素分异程度较大,冰碛砂岩和花岗质砾石的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比分别为 $3.7 \sim 29.8$ 和 $16.2 \sim 29.4$,Ce 都具有弱负异常($\text{Ce}/\text{Ce}^* = 0.75 \sim 1.02$),Sr 和 Eu($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.17 \sim 0.57$)也都具有明显的负异常(表 3)。但是花岗质砾石的 ΣREE 为 $61.6 \times 10^{-6} \sim 194.9 \times 10^{-6}$,明显低于冰碛砂岩的 ΣREE ($78.3 \times 10^{-6} \sim 260.5 \times 10^{-6}$),并且花岗质砾石的重稀土相对于轻稀土来说,比冰碛

表 2 扬子北部三峡地区九龙湾剖面南沱组冰碛岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

Table 2 U-Pb isotope data of zircons from tillite of the Nantuo formation in the Jilongwan section, northern Yangtze block, obtained by the LA-ICPMS technique

测点	含量(10^{-6})		同位素值				同位素年龄(Ma)									
	Pb*	Th	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
NT0601																
NT0601-01	285.4	388.8	430.2	0.90	0.155 82	0.001 69	9.666 48	0.071 66	0.449 82	0.002 85	2.411	18	2.404	7	2.395	13
NT0601-02	29.9	55.6	53.0	1.05	0.127 44	0.002 11	6.609 86	0.095 56	0.376 08	0.003 23	2.063	29	2.061	13	2.058	15
NT0601-03	124.9	111.0	203.9	0.54	0.153 99	0.001 91	9.442 61	0.090 22	0.444 61	0.003 16	2.391	21	2.382	9	2.371	14
NT0601-04	30.3	89.4	51.2	1.75	0.124 49	0.002 86	6.136 11	0.131 64	0.357 39	0.004 02	2.022	40	1.995	19	1.970	19
NT0601-05	19.7	28.1	35.7	0.79	0.123 55	0.002 31	6.323 66	0.106 86	0.371 11	0.003 50	2.008	33	2.022	15	2.035	16
NT0601-06	89.2	103.7	159.8	0.65	0.141 88	0.001 97	8.030 17	0.091 39	0.410 40	0.003 14	2.250	24	2.234	10	2.217	14
NT0601-07	122.3	54.2	141.7	0.38	0.231 97	0.002 58	19.582 00	0.156 27	0.612 10	0.004 21	3.066	18	3.071	8	3.078	17
NT0601-08	61.8	65.5	92.0	0.71	0.166 63	0.002 19	10.803 23	0.114 38	0.470 11	0.003 59	2.524	22	2.506	10	2.484	16
NT0601-09	16.7	59.2	92.1	0.64	0.070 35	0.002 21	1.323 22	0.039 29	0.136 39	0.001 45	9.39	63	856	17	824	8
NT0601-10	15.7	71.1	80.0	0.89	0.068 44	0.001 98	1.349 99	0.036 86	0.143 03	0.001 42	882	59	868	16	862	8
NT0601-11	262.3	551.9	471.3	1.17	0.121 77	0.001 35	6.057 11	0.046 63	0.360 69	0.002 26	1.982	20	1.984	7	1.985	11
NT0601-12	73.8	36.0	85.8	0.42	0.225 03	0.002 99	18.989 47	0.209 50	0.611 90	0.005 20	3.017	21	3.041	11	3.078	21
NT0601-13	21.8	132.2	107.3	1.23	0.067 14	0.001 97	1.240 12	0.034 25	0.133 94	0.001 33	842	60	819	16	810	8
NT0601-14	43.1	86.4	75.7	1.14	0.124 34	0.002 05	6.386 34	0.092 20	0.372 44	0.003 17	2.019	29	2.030	13	2.041	15
NT0601-15	18.1	81.4	83.0	0.98	0.067 76	0.001 90	1.413 71	0.037 25	0.151 28	0.001 47	861	57	895	16	908	8
NT0601-16	37.4	58.2	53.9	1.08	0.157 01	0.002 41	9.686 40	0.128 02	0.447 35	0.003 87	2.424	26	2.405	12	2.384	17
NT0601-17	14.6	46.9	76.3	0.61	0.072 60	0.002 03	1.424 26	0.037 42	0.142 26	0.001 40	1.003	55	899	16	857	8
NT0601-18	217.8	256.8	275.5	0.93	0.229 22	0.002 83	16.306 09	0.156 79	0.515 85	0.003 94	3.047	20	2.895	9	2.682	17
NT0601-19	88.6	99.8	132.4	0.75	0.164 37	0.002 01	10.693 80	0.100 60	0.471 77	0.003 36	2.501	20	2.497	9	2.491	15
NT0601-20	83.7	221.5	133.4	1.66	0.124 81	0.001 76	6.417 19	0.074 50	0.372 83	0.002 80	2.026	25	2.035	10	2.043	13
NT0601-21	22.8	49.0	38.8	1.26	0.125 86	0.002 49	6.442 74	0.116 25	0.371 20	0.003 69	2.041	35	2.038	16	2.035	17
NT0601-22	14.0	54.9	62.0	0.89	0.070 14	0.003 50	1.436 34	0.072 32	0.154 71	0.002 47	932	99	929	29	927	14
NT0601-23	98.4	403.7	71.0	5.68	0.161 53	0.002 40	10.440 87	0.132 51	0.468 73	0.003 98	2.472	25	2.475	12	2.478	17
NT0601-24	10.7	49.5	55.6	0.9	0.067 68	0.002 75	1.262 88	0.049 38	0.135 32	0.001 75	859	82	829	22	818	10
NT0609																
NT0609-01	8.06	52.6	39.6	1.33	0.064 43	0.002 25	1.184 79	0.039 56	0.133 61	0.001 53	756	72	794	18	808	9
NT0609-02	5.82	31.7	31.5	1.01	0.063 97	0.003 03	1.122 32	0.051 40	0.127 48	0.001 86	741	97	764	25	774	11
NT0609-03	73.42	18.4	118.3	0.16	0.168 07	0.001 98	11.121 90	0.102 39	0.480 80	0.003 50	2.539	20	2.533	9	2.531	15
NT0609-04	24.18	86.6	138.3	0.63	0.066 16	0.001 35	1.185 95	0.022 01	0.130 24	0.001 04	811	42	794	10	789	6
NT0609-05	34.92	188.6	196.6	0.96	0.064 85	0.001 23	1.112 60	0.019 02	0.124 64	0.000 95	770	39	759	9	757	5
NT0609-06	19.92	73.6	110.2	0.67	0.065 97	0.001 43	1.225 63	0.024 39	0.134 96	0.001 12	806	45	812	11	816	6
NT0609-07	4.75	25.1	26.5	0.95	0.064 26	0.003 23	1.113 69	0.054 15	0.125 90	0.001 92	750	103	760	26	765	11
NT0609-08	18.75	132.9	94.1	1.41	0.065 03	0.001 53	1.149 87	0.025 20	0.128 43	0.001 12	775	49	777	12	779	6
NT0609-09	24.03	145.3	123.9	1.17	0.073 22	0.002 03	1.312 54	0.034 16	0.130 21	0.001 30	1.020	55	851	15	789	7

续表 2

测点	含量(10^{-6})		Th/U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		同位素比值		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		同位素年龄(Ma)		
	Pb*	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
NT0609															
NT0609-10	34.32	121.3	196.4	0.62	0.065 16	0.001 15	1.196 61	0.018 71	0.133 37	0.000 99	780	37	799	9	807
NT0609-11	71.09	228.4	378.4	0.60	0.072 25	0.001 12	1.418 30	0.018 83	0.142 55	0.001 02	933	31	897	8	859
NT0609-12	21.25	67.7	103.6	0.65	0.074 83	0.002 77	1.573 74	0.055 72	0.152 69	0.001 96	1 064	73	960	22	916
NT0609-13	25.14	97.1	134.3	0.72	0.071 07	0.001 87	1.340 27	0.033 08	0.136 93	0.001 32	959	53	863	14	827
NT0609-14	42.83	168.1	242.2	0.69	0.064 01	0.001 21	1.179 45	0.020 14	0.133 77	0.001 03	742	40	791	9	809
NT0609-15	51.00	174.5	284.6	0.61	0.065 96	0.001 12	1.257 18	0.018 83	0.138 35	0.001 02	805	35	827	8	835
NT0609-16	29.28	118.3	156.7	0.75	0.065 53	0.001 36	1.259 98	0.023 92	0.139 55	0.001 13	792	43	828	11	842
NT0609-17	13.16	40.7	65.0	0.63	0.071 79	0.002 14	1.516 11	0.042 82	0.153 26	0.001 63	980	60	937	17	919
NT0609-18	15.59	63.7	89.1	0.71	0.069 26	0.001 69	1.243 04	0.028 24	0.130 24	0.001 18	906	50	820	13	789
NT0609-19	8.60	74.4	40.1	1.85	0.068 60	0.002 56	1.223 06	0.043 76	0.129 37	0.001 58	887	75	811	20	784
NT0609-20	72.87	48.1	127.9	0.38	0.148 99	0.001 78	9.027 48	0.084 03	0.439 57	0.003 16	2 334	20	2 349	9	2 349
NT0609-21	29.21	93.8	156.2	0.60	0.066 24	0.001 41	1.341 42	0.026 26	0.146 87	0.001 22	814	44	864	11	883
NT0609-22	23.13	137.7	121.9	1.13	0.065 19	0.001 45	1.181 41	0.024 17	0.131 41	0.001 11	781	46	792	11	796
NT0609-23	9.40	59.2	45.1	1.31	0.071 05	0.003 44	1.341 90	0.062 80	0.136 94	0.002 12	959	96	864	27	827
NT0609-24	17.87	80.8	90.6	0.89	0.064 36	0.001 68	1.282 73	0.031 44	0.144 48	0.001 35	754	54	838	14	870
NT0609-25	9.77	37.2	50.0	0.74	0.065 37	0.002 31	1.328 68	0.044 98	0.147 33	0.001 72	786	73	858	20	886
NT0609-26	15.24	67.2	79.5	0.85	0.066 48	0.001 92	1.305 86	0.035 73	0.142 34	0.001 44	822	59	848	16	858
NT0609-27	22.49	84.1	116.6	0.72	0.065 89	0.001 54	1.341 67	0.029 03	0.147 53	0.001 29	803	48	864	13	887
NT0609-28	19.32	64.2	109.8	0.58	0.066 69	0.001 64	1.278 45	0.029 34	0.138 87	0.001 26	828	51	836	13	838
NT0609-29	33.73	144.9	183.1	0.79	0.063 60	0.001 21	1.222 08	0.020 94	0.139 18	0.001 08	728	40	811	10	840
NT0609-30	129.75	116.0	197.8	0.59	0.163 39	0.001 84	10.726 10	0.089 91	0.475 39	0.003 31	2 491	19	2 500	8	2 507
NT0612															
NT0612-01	233.2	211.7	496.4	0.43	0.176 73	0.001 84	8.473 35	0.057 11	0.347 79	0.002 13	2 622	17	2 283	6	1 924
NT0612-02	139.1	185.5	175.2	1.06	0.193 28	0.002 09	13.739 84	0.102 46	0.515 65	0.003 35	2 770	18	2 732	7	2 681
NT0612-03	221.8	176.8	411.1	0.43	0.185 53	0.001 96	10.210 88	0.071 65	0.399 20	0.002 50	2 703	17	2 454	6	2 165
NT0612-04	191.3	823.6	576.7	1.43	0.180 14	0.001 94	5.799 21	0.041 99	0.233 51	0.001 46	2 654	18	1 946	6	1 353
NT0612-05	154.8	287.6	193.2	1.49	0.195 38	0.002 19	12.855 02	0.103 31	0.477 23	0.003 22	2 788	18	2 659	8	2 515
NT0612-06	238.0	231.4	439.5	0.53	0.189 40	0.002 08	10.348 22	0.078 58	0.396 27	0.002 58	2 737	18	2 466	7	2 152
NT0612-07	134.8	104.4	218.2	0.48	0.189 30	0.002 16	11.555 46	0.095 39	0.442 74	0.003 01	2 736	19	2 569	8	2 363
NT0612-08	223.9	248.8	538.7	0.46	0.179 71	0.001 95	7.545 21	0.055 51	0.304 50	0.001 94	2 650	18	2 178	7	1 714
NT0612-09	194.8	400.4	516.6	0.78	0.170 03	0.002 00	6.563 37	0.056 48	0.279 95	0.001 88	2 558	20	2 054	8	1 591
NT0612-10	204.4	363.8	369.8	0.98	0.181 43	0.001 97	9.101 44	0.067 61	0.363 81	0.002 34	2 666	18	2 348	7	2 000
NT0612-11	234.5	200.8	505.0	0.40	0.180 66	0.001 91	8.547 43	0.060 46	0.343 10	0.002 16	2 659	17	2 291	6	1 902
NT0612-12	211.2	177.3	583.6	0.30	0.178 85	0.001 93	6.437 81	0.047 26	0.261 04	0.001 66	2 642	18	2 037	6	1 495
NT0612-13	239.6	326.9	549.0	0.60	0.178 45	0.001 93	7.938 64	0.058 76	0.322 60	0.002 07	2 639	18	2 224	7	1 802

续表 2

测点	含量(10^{-6})		Th/U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		同位素比值		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		同位素年龄(Ma)			
	Pb*	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
NT0612																
NT0612-14	221.6	131.7	385.3	0.34	0.195 41	0.002 04	11.347 32	0.078 23	0.421 10	0.002 65	2.788	17	2.552	6	2.266	12
NT0612-15	253.1	383.2	759.4	0.50	0.172 21	0.001 79	5.605 00	0.037 90	0.236 02	0.001 45	2.579	17	1.917	6	1.366	8
NT0612-16	158.7	204.8	294.9	0.69	0.188 32	0.002 06	9.720 86	0.073 88	0.374 30	0.002 45	2.728	18	2.409	7	2.050	11
NT0612-17	228.3	387.2	812.8	0.48	0.176 79	0.001 99	4.924 09	0.039 03	0.201 96	0.001 31	2.623	19	1.806	7	1.186	7
NT0612-18	232.5	412.8	887.7	0.46	0.164 24	0.001 84	4.354 03	0.034 18	0.192 22	0.001 24	2.500	19	1.704	6	1.133	7
NT0612-19	223.1	378.6	580.3	0.65	0.183 39	0.001 92	6.978 34	0.048 12	0.275 91	0.001 73	2.684	17	2.109	6	1.571	9
NT0612-20	220.2	178.1	560.8	0.32	0.175 76	0.001 86	7.138 73	0.051 02	0.294 51	0.001 86	2.613	18	2.129	6	1.664	9
NT0612-21	223.9	441.5	554.8	0.80	0.177 22	0.001 85	7.085 18	0.049 13	0.289 88	0.001 82	2.627	17	2.122	6	1.641	9
NT0612-22	216.5	234.9	481.8	0.49	0.177 51	0.001 90	8.215 57	0.060 47	0.335 57	0.002 16	2.630	18	2.255	7	1.865	10
NT0612-23	245.8	520.2	898.5	0.58	0.172 91	0.001 86	4.466 98	0.032 86	0.187 31	0.001 19	2.586	18	1.725	6	1.107	6
NT0612-24	231.6	293.8	570.0	0.52	0.179 99	0.001 86	7.323 78	0.049 66	0.295 03	0.001 84	2.653	17	2.152	6	1.667	9
NT0612-25	203.2	1192.6	590.0	2.02	0.177 86	0.001 94	5.516 24	0.041 86	0.224 87	0.001 45	2.633	18	1.903	7	1.308	8
NT0612-26	193.7	321.9	434.5	0.74	0.186 00	0.002 01	8.269 99	0.052 16	0.322 38	0.002 10	2.707	18	2.261	7	1.801	10
NT0612-27	118.3	61.7	167.2	0.37	0.185 72	0.002 11	13.228 84	0.111 49	0.516 43	0.003 61	2.705	19	2.696	8	2.684	15
NT0612-28	203.6	1789.3	753.5	2.37	0.175 67	0.001 90	4.526 03	0.033 83	0.186 80	0.001 20	2.612	18	1.736	6	1.104	7
NT0612-29	196.7	1013.0	600.7	1.69	0.185 10	0.001 98	5.899 73	0.043 02	0.231 09	0.001 48	2.699	18	1.961	6	1.340	8
NT0612-30	241.3	362.0	762.7	0.47	0.168 54	0.001 78	5.397 23	0.038 66	0.232 18	0.001 47	2.543	18	1.884	6	1.346	8
NT0612-31	192.8	133.8	554.6	0.24	0.174 58	0.002 01	6.484 52	0.054 61	0.269 31	0.001 83	2.602	19	2.044	7	1.537	9
NT0612-32	203.2	1111.9	606.0	1.83	0.180 85	0.002 00	6.143 46	0.048 13	0.246 29	0.001 62	2.661	18	1.996	7	1.419	8
NT0612-33	225.2	630.5	525.8	1.20	0.181 93	0.001 91	7.876 50	0.055 88	0.313 89	0.002 01	2.671	17	2.217	6	1.760	10
NT0612-34	208.7	336.9	435.6	0.77	0.185 21	0.001 92	8.894 20	0.062 11	0.348 18	0.002 22	2.700	17	2.327	6	1.926	11
NT0612-35	186.7	1593.3	584.0	2.73	0.175 63	0.001 96	5.103 35	0.040 56	0.210 67	0.001 39	2.612	18	1.837	7	1.232	7
NT0612-36	229.8	369.5	571.5	0.65	0.176 53	0.001 86	7.255 84	0.052 38	0.298 01	0.001 92	2.621	17	2.143	6	1.681	10
NT0612-37	201.6	463.1	657.4	0.70	0.182 91	0.001 97	5.372 00	0.039 97	0.212 94	0.001 38	2.679	18	1.880	6	1.245	7
NT0612-38	208.5	219.1	482.2	0.45	0.176 35	0.001 81	7.680 42	0.052 66	0.315 77	0.002 00	2.619	17	2.194	6	1.769	10
NT0612-39	201.6	202.8	428.4	0.47	0.187 40	0.001 93	9.100 41	0.062 92	0.352 10	0.002 25	2.719	17	2.348	6	1.945	11
NT0612-40	231.3	295.3	667.9	0.44	0.173 22	0.001 80	6.022 47	0.042 20	0.252 08	0.001 60	2.589	17	1.979	6	1.449	8
NT0612-41	222.1	615.9	623.1	0.99	0.177 25	0.001 86	6.345 19	0.045 59	0.259 56	0.001 67	2.627	17	2.025	6	1.488	9
NT0612-42	192.2	322.9	360.5	0.90	0.181 34	0.001 94	8.927 76	0.066 93	0.356 97	0.002 35	2.665	18	2.331	7	1.968	11
NT0612-43	217.6	249.8	442.0	0.57	0.186 14	0.002 08	9.139 50	0.075 13	0.356 02	0.002 45	2.708	18	2.352	8	1.963	12
NT0613																
NT0613-01	206.3	72.5	99.3	0.73	0.129 38	0.001 77	6.831 11	0.074 99	0.382 88	0.002 81	2.090	24	2.090	10	2.090	13
NT0613-02	413.9	89.2	156.4	0.57	0.168 07	0.001 97	11.115 99	0.094 23	0.479 61	0.003 25	2.539	20	2.533	8	2.526	14
NT0613-03	205.9	97.5	100.3	0.97	0.129 74	0.001 80	6.575 23	0.073 53	0.367 52	0.002 71	2.095	24	2.056	10	2.018	13
NT0613-04	27.1	29.2	29.7	0.98	0.154 16	0.006 23	3.172 86	0.120 39	0.149 25	0.002 64	2.393	67	1.451	29	897	15

续表 2

测点	含量(10^{-6})		同位素比值						同位素年龄(Ma)					
	Pb*	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
NT0613														
NT0613-05	63.4	78.3	86.8	0.90	0.06935	0.00188	1.31338	0.03338	0.13733	0.00130	909	55	852	15
NT0613-06	61.5	102.2	87.3	1.17	0.06693	0.00191	1.18820	0.03179	0.12874	0.00124	836	58	795	15
NT0613-07	109.3	56.0	51.0	1.10	0.12627	0.00232	6.56364	0.10818	0.37696	0.00351	2047	32	2055	15
NT0613-08	44.0	92.4	62.3	1.48	0.06773	0.00269	1.16620	0.04441	0.12486	0.00156	860	80	785	21
NT0613-09	372.7	79.4	157.8	0.50	0.16269	0.00211	9.74969	0.09946	0.43458	0.00321	2484	22	2411	9
NT0613-10	946.4	239.8	471.0	0.51	0.15954	0.00183	8.11470	0.06580	0.36884	0.00241	2451	19	2244	7
NT0613-11	171.6	137.9	77.7	1.77	0.12639	0.00189	6.37170	0.08012	0.36559	0.00286	2048	26	2028	11
NT0613-12	127.9	210.0	181.8	1.15	0.07191	0.00145	1.27819	0.02321	0.12891	0.00101	983	41	836	10
NT0613-13	27.8	52.6	34.3	1.53	0.06777	0.00301	1.31356	0.05626	0.14055	0.00194	862	90	852	25
NT0613-14	36.1	41.7	50.8	0.82	0.06891	0.00227	1.27646	0.03999	0.13434	0.00146	896	67	835	18
NT0613-15	98.9	155.7	129.8	1.20	0.06665	0.00155	1.27494	0.02725	0.13873	0.00117	827	48	835	12
NT0613-16	258.6	134.3	124.1	1.08	0.12577	0.00173	6.41522	0.07149	0.36990	0.00272	2040	24	2034	10
NT0613-17	468.7	2.4	254.7	0.01	0.12628	0.00151	6.40764	0.05656	0.36796	0.00244	2047	21	2033	8
NT0613-18	363.8	50.0	134.6	0.37	0.18320	0.00220	12.46589	0.11211	0.49344	0.00350	2682	20	2640	8
NT0613-19	60.0	85.2	82.9	1.03	0.07714	0.00204	1.42313	0.03508	0.13378	0.00128	1125	52	899	15
NT0613-20	65.7	92.2	94.4	0.98	0.07867	0.00210	1.39135	0.03456	0.12826	0.00124	1164	52	885	15
NT0613-21	700.7	64.6	793.9	0.08	0.11970	0.00135	2.89963	0.02275	0.17566	0.00110	1952	20	1382	6
NT0613-22	78.3	150.5	106.9	1.41	0.08164	0.00185	1.44804	0.03005	0.12863	0.00112	1237	44	909	12
NT0613-23	275.3	152.4	106.2	1.43	0.14721	0.00201	8.83750	0.09864	0.43535	0.00334	2314	23	2321	10
NT0613-24	329.6	296.7	152.2	1.95	0.12237	0.00186	5.97816	0.07671	0.35426	0.00279	1991	27	1973	11
NT0613-25	353.6	118.8	165.2	0.72	0.12640	0.00164	6.85287	0.06989	0.39315	0.00279	2049	23	2093	9
NT0613-26	238.2	82.6	96.2	0.86	0.15077	0.00201	9.10953	0.09775	0.43816	0.00331	2355	23	2349	10
NT0613-27	228.7	36.6	80.6	0.45	0.17878	0.00235	12.75815	0.13582	0.51749	0.00406	2642	22	2662	10
NT0613-28	237.2	50.3	126.4	0.40	0.12335	0.00175	6.09408	0.07110	0.35827	0.00269	2005	25	1989	10
NT0613-29	535.7	113.0	260.2	0.43	0.12606	0.00162	6.77406	0.06812	0.38970	0.00275	2044	23	2082	9
NT0613-30	33.4	51.8	43.7	1.18	0.06997	0.00241	1.34846	0.04425	0.13976	0.00159	927	69	867	19
NT0613-31	571.1	99.5	236.3	0.42	0.16144	0.00205	9.91446	0.09916	0.44535	0.00328	2471	21	2427	9
NT0613-32	56.0	59.3	76.0	0.78	0.07455	0.00196	1.44206	0.03534	0.14028	0.00134	1056	52	907	15
NT0613-33	118.7	53.0	56.3	0.94	0.12218	0.00245	6.440290	0.11774	0.38003	0.00382	1988	35	2033	16
NT0613-34	202.5	64.1	100.1	0.64	0.12201	0.00193	6.32323	0.08620	0.37582	0.00309	1986	28	2022	12
NT0613-35	239.9	53.4	88.9	0.60	0.17106	0.00222	11.43554	0.11862	0.48478	0.00370	2568	21	2559	10
NT0613-36	195.5	32.4	97.1	0.33	0.12264	0.00193	6.54927	0.08879	0.38726	0.00319	1995	28	2053	12
NT0613-37	66.6	81.6	95.0	0.86	0.06681	0.00197	1.22415	0.03412	0.13287	0.00133	832	60	812	16
NT0613-38	716.9	136.6	280.2	0.49	0.16361	0.00183	10.57624	0.08418	0.46876	0.00310	2493	19	2487	7
NT0613-39	66.5	84.4	106.8	0.79	0.06834	0.00190	1.11987	0.02921	0.11883	0.00114	879	57	763	14

续表 2

测点	含量(10^{-6})			同位素比值			同位素年龄(Ma)							
	Pb*	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
NT0613														
NT0613-40	142.2	46.3	83.1	0.56	0.107 22	0.001 87	4.812 95	0.074 27	0.325 50	0.002 77	1.753	32	1.787	13
NT0613-41	316.2	67.4	162.1	0.42	0.122 01	0.001 51	6.252 00	0.059 41	0.371 57	0.002 55	1.986	22	2.012	8
NT0613-42	152.7	64.8	75.2	0.86	0.12267	0.001 77	6.243 23	0.075 60	0.369 05	0.002 84	1.996	25	2.011	11
NT0613-43	142.7	178.2	215.1	0.83	0.066 53	0.001 16	1.161 04	0.017 65	0.126 54	0.000 91	823	36	782	8
NT0613-44	34.8	79.1	45.4	1.74	0.060 64	0.002 33	1.117 47	0.041 29	0.133 63	0.001 58	627	81	762	20
NT0613-45	31.1	34.8	39.6	0.88	0.070 85	0.002 51	1.441 72	0.048 82	0.147 57	0.001 75	953	71	906	20
NT0613-46	352.7	210.7	168.8	1.25	0.123 34	0.001 50	6.209 50	0.057 45	0.365 08	0.002 48	2.005	21	2.006	8
NT0613-47	162.2	226.2	244.2	0.93	0.072 92	0.001 18	1.252 86	0.017 34	0.124 60	0.000 88	1.012	32	825	8
NT0613-48	62.8	122.2	82.6	1.48	0.066 27	0.001 84	1.230 20	0.032 15	0.134 61	0.001 29	815	57	814	15
NT0613-49	855.2	160.9	304.2	0.53	0.176 69	0.001 86	12.291 00	0.087 05	0.504 42	0.003 20	2.622	17	2.627	7
NT0613-50	296.7	59.0	85.6	0.69	0.217 21	0.002 71	17.702 00	0.177 24	0.590 98	0.004 69	2.960	20	2.974	10
NT0614														
NT0614-01	32.7	202.5	160.0	1.27	0.067 19	0.001 43	1.232 20	0.023 86	0.132 99	0.001 06	844	44	815	11
NT0614-02	28.8	155.7	152.3	1.02	0.066 83	0.001 64	1.186 48	0.026 89	0.128 74	0.001 12	833	50	794	12
NT0614-03	26.4	50.8	50.3	1.01	0.122 38	0.002 12	5.905 85	0.090 26	0.349 94	0.003 05	1.991	30	1.962	13
NT0614-04	19.1	95.9	105.1	0.91	0.067 73	0.001 98	1.177 57	0.032 39	0.126 09	0.001 25	860	59	790	15
NT0614-05	13.0	84.8	70.2	1.21	0.071 70	0.002 75	1.207 81	0.044 33	0.122 15	0.001 52	978	76	804	20
NT0614-06	7.2	44.7	33.1	1.35	0.064 23	0.003 19	1.211 72	0.058 29	0.136 81	0.002 04	749	102	806	27
NT0614-07	31.1	134.2	166.4	0.81	0.065 42	0.001 43	1.206 16	0.024 05	0.133 69	0.001 08	788	45	803	11
NT0614-08	13.9	48.3	73.1	0.66	0.067 13	0.002 09	1.310 04	0.038 69	0.141 51	0.001 47	842	64	850	17
NT0614-09	106.3	175.9	216.4	0.81	0.120 51	0.001 55	5.676 88	0.057 16	0.341 60	0.002 36	1964	23	1928	9
NT0614-10	17.6	84.2	96.0	0.88	0.067 46	0.002 03	1.177 87	0.033 48	0.126 61	0.001 28	852	61	790	16
NT0614-11	109.3	430.1	620.4	0.69	0.068 15	0.000 92	1.211 22	0.012 90	0.128 89	0.000 83	873	28	806	6
NT0614-12	30.8	135.3	167.9	0.81	0.064 71	0.001 41	1.171 15	0.023 22	0.131 24	0.001 05	765	45	787	11
NT0614-13	47.9	205.7	259.2	0.79	0.067 59	0.001 17	1.229 62	0.018 53	0.131 92	0.000 94	856	36	814	8
NT0614-14	26.8	132.4	135.2	0.98	0.067 55	0.001 59	1.273 44	0.027 59	0.136 71	0.001 17	855	48	834	12
NT0614-15	120.0	151.4	166.1	0.91	0.162 64	0.001 92	10.724 68	0.094 68	0.478 16	0.003 30	2.483	20	2.500	8
NT0614-16	110.8	111.9	169.2	0.66	0.159 44	0.001 91	10.041 44	0.090 55	0.456 67	0.003 17	2.450	20	2.439	8
NT0614-17	16.1	79.2	82.2	0.96	0.066 10	0.001 88	1.231 16	0.032 99	0.135 06	0.001 30	810	58	815	15
NT0614-18	6.2	25.9	34.9	0.74	0.070 12	0.003 30	1.271 47	0.057 82	0.131 49	0.001 93	932	94	833	26
NT0614-19	44.0	79.3	78.8	1.01	0.124 04	0.002 07	6.296 71	0.092 26	0.368 12	0.003 16	2.015	29	2.018	13
NT0614-20	10.2	31.6	52.8	0.60	0.069 85	0.002 51	1.388 07	0.047 76	0.144 11	0.001 71	924	72	884	20
NT0614-21	44.8	160.7	249.0	0.65	0.068 17	0.001 21	1.251 47	0.019 41	0.133 11	0.000 97	874	36	824	9
NT0614-22	55.8	217.8	296.9	0.73	0.067 41	0.001 14	1.262 56	0.018 49	0.135 82	0.000 96	850	35	829	8
NT0614-23	13.2	63.7	73.4	0.87	0.061 76	0.002 27	1.071 55	0.037 70	0.125 81	0.001 44	666	77	740	18

续表 2

测点	含量(10^{-6})		Th/U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		同位素比值		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		同位素年龄(Ma)			
	Pb*	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
NT0614																
NT0614-24	12.8	57.6	59.9	0.96	0.069 42	0.002 22	1.409 64	0.042 86	0.147 25	0.001 59	911	65	893	18	886	9
NT0614-25	28.7	48.0	52.4	0.92	0.125 55	0.002 33	6.422 98	0.107 33	0.370 95	0.003 49	2 037	32	2 035	15	2 034	16
NT0614-26	27.3	140.1	142.9	0.98	0.066 16	0.001 52	1.197 96	0.025 38	0.131 29	0.001 10	812	47	800	12	795	6
NT0614-27	12.4	52.6	68.5	0.77	0.064 56	0.002 08	1.158 52	0.035 45	0.130 12	0.001 36	760	66	781	17	789	8
NT0614-28	23.1	76.2	126.5	0.60	0.067 98	0.001 59	1.276 96	0.027 57	0.136 21	0.001 16	868	48	836	12	823	7
NT0614-29	44.2	160.5	203.1	0.79	0.068 72	0.001 28	1.472 40	0.024 35	0.155 37	0.001 17	890	38	919	10	931	7
NT0614-30	25.7	46.5	47.7	0.97	0.124 62	0.002 49	6.173 68	0.113 02	0.359 24	0.003 58	2 023	35	2 001	16	1 979	17
NT0614-31	12.2	42.8	71.2	0.60	0.064 55	0.002 13	1.145 48	0.035 92	0.128 68	0.001 37	760	68	775	17	780	8
NT0614-32	141.6	99.6	225.5	0.44	0.156 41	0.001 81	9.951 19	0.085 03	0.461 34	0.003 12	2 417	20	2 430	8	2 446	14
NT0614-33	54.1	272.2	233.5	1.17	0.071 14	0.001 23	1.498 06	0.022 74	0.152 69	0.001 12	962	35	930	9	916	6
NT0614-34	15.6	59.8	83.3	0.72	0.068 47	0.002 19	1.272 83	0.038 70	0.134 79	0.001 44	883	65	834	17	815	8
NT0614-35	12.3	52.1	62.3	0.84	0.068 93	0.002 56	1.309 05	0.046 45	0.137 71	0.001 66	897	75	850	20	832	9
NT0616																
NT0616-01	7.5	50.3	36.5	1.38	0.068 81	0.003 01	1.220 41	0.051 43	0.128 60	0.001 76	893	88	810	24	780	10
NT0616-02	58.8	632.7	262.7	2.41	0.069 49	0.001 35	1.110 49	0.019 21	0.115 88	0.000 87	913	39	758	9	707	5
NT0616-03	14.4	71.6	75.8	0.95	0.066 40	0.001 78	1.193 17	0.029 86	0.130 30	0.001 20	819	55	797	14	790	7
NT0616-04	103.0	259.5	266.4	0.97	0.130 15	0.002 10	4.437 10	0.061 02	0.247 21	0.001 98	2 100	28	1 719	11	1 424	10
NT0616-05	81.2	60.1	131.6	0.46	0.157 88	0.002 33	9.771 36	0.121 46	0.448 78	0.003 72	2 433	25	2 414	11	2 390	17
NT0616-06	16.1	132.4	75.7	1.75	0.082 79	0.003 04	1.388 07	0.048 46	0.121 58	0.001 53	1 264	70	884	21	740	9
NT0616-07	27.5	80.6	156.0	0.52	0.067 54	0.001 60	1.248 54	0.027 25	0.134 05	0.001 15	854	48	823	12	811	7
NT0616-08	34.7	185.6	195.4	0.95	0.066 43	0.001 30	1.114 85	0.019 56	0.121 69	0.000 92	820	40	761	9	740	5
NT0616-09	46.2	58.0	92.3	0.63	0.123 46	0.002 06	6.070 21	0.088 60	0.356 55	0.003 03	2 007	29	1 986	13	1 966	14
NT0616-10	19.6	83.4	103.7	0.80	0.071 08	0.002 12	1.293 98	0.036 38	0.132 02	0.001 35	960	60	843	16	799	8
NT0616-11	27.9	157.7	142.1	1.11	0.068 98	0.001 61	1.221 16	0.026 23	0.128 38	0.001 09	888	47	810	12	779	6
NT0616-12	33.5	147.5	176.7	0.84	0.067 91	0.001 48	1.225 83	0.024 29	0.130 89	0.001 06	866	44	812	11	793	6
NT0616-13	19.1	108.3	99.4	1.09	0.066 40	0.001 71	1.159 86	0.027 75	0.126 68	0.001 13	819	53	782	13	769	6
NT0616-14	15.2	56.7	78.7	0.72	0.080 37	0.002 19	1.512 69	0.038 50	0.136 49	0.001 35	1 206	53	936	16	825	8
NT0616-15	44.2	81.1	83.8	0.97	0.123 26	0.002 26	5.942 08	0.097 38	0.349 59	0.003 19	2 004	32	1 967	14	1 933	15
NT0616-16	8.6	50.0	45.2	1.10	0.093 34	0.003 07	1.536 74	0.047 62	0.119 39	0.001 42	1 495	61	945	19	727	8
NT0616-17	13.6	122.1	66.8	1.83	0.069 25	0.002 34	1.104 77	0.035 53	0.115 70	0.001 27	906	68	756	17	706	7
NT0616-18	14.3	95.1	68.5	1.39	0.067 78	0.002 05	1.213 15	0.034 69	0.129 81	0.001 31	862	62	807	16	787	7
NT0616-19	13.1	62.9	76.8	0.82	0.066 53	0.002 22	1.109 69	0.035 22	0.120 96	0.001 31	823	68	758	17	736	8
NT0616-20	97.0	67.3	154.1	0.44	0.166 71	0.002 26	10.408 49	0.114 89	0.452 79	0.003 52	2 525	23	2 472	10	2 408	16
NT0616-21	25.9	78.0	132.3	0.59	0.074 45	0.002 08	1.478 83	0.038 70	0.144 04	0.001 43	1 054	56	922	16	868	8
NT0616-22	80.6	120.2	113.4	1.06	0.168 25	0.002 59	10.641 22	0.141 05	0.458 67	0.004 03	2 540	26	2 492	12	2 434	18

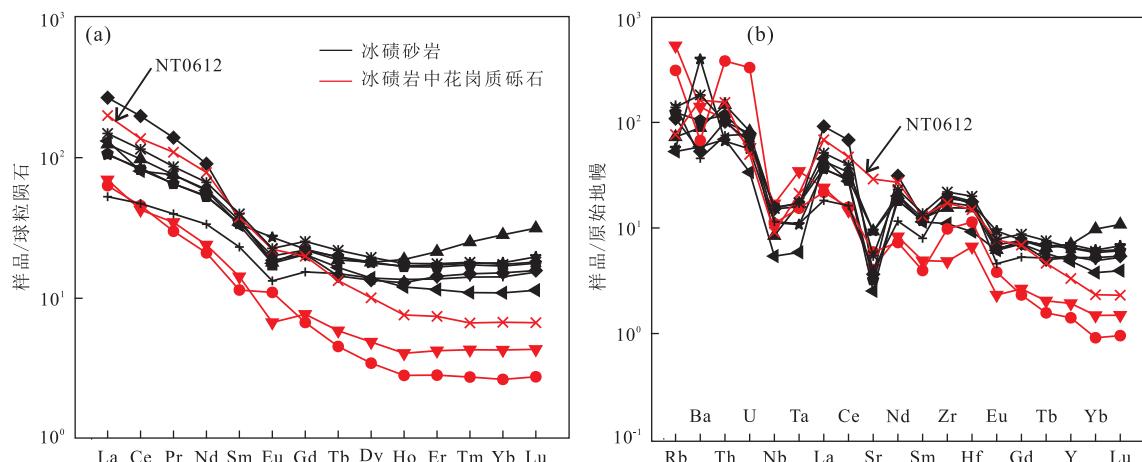


图 5 三峡地区九龙湾剖面南沱组冰碛岩

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element patterns of the Nantuo tillite in Jiulongwan section

a.稀土元素球粒陨石标准化图解;b.微量元素原始地幔标准化蛛网图;其中黑色线条为南沱组冰碛砂岩,红色线条为南沱组被包裹的花岗质砾石,球粒陨石数据来自于 Boynton(1984),原始地幔数据来自于 Sun and McDonough(1989)

表 3 扬子北部三峡地区南沱组冰碛岩全岩微量元素组成

Table 3 Trace-element concentrations (10^{-6}) for tillite of the Nantuo formation in the Jiulongwan section, northern Yangtze block

样品编号	NT0601	NT0602	NT0603	NT0604	NT0608	NT0609	NT0610	NT0611	NT0612	NT0615
Li	13.4	16.5	12.6	9.63	24.5	24.9	12.2	9.69	12.2	23.0
Be	0.36	4.22	0.96	0.34	0.55	1.37	3.71	0.94	1.54	1.99
Sc	8.74	1.10	5.79	5.12	4.31	12.1	0.95	8.92	3.03	12.2
V	14.3	3.41	9.51	17.4	24.8	73.0	12.4	41.1	27.5	70.3
Cr	4.99	5.50	8.92	42.4	9.26	48.3	6.14	17.3	8.34	58.5
Co	3.56	1.30	1.66	3.80	7.26	14.1	2.30	6.94	5.01	11.5
Ni	6.85	5.19	7.81	10.9	30.4	31.2	4.10	11.4	9.34	24.1
Cu	12.3	1.72	17.0	6.48	33.4	24.9	6.19	21.7	5.82	17.2
Ga	18.3	22.4	14.7	6.92	13.6	19	21.0	16.3	19.1	17.1
Rb	46.2	339	69.0	33.7	36.1	78.8	198	93.6	48.8	88.2
Sr	196	88.3	76.6	53.3	196	67.7	125	84.9	615	115
Y	31.7	8.73	23.9	22.1	31.6	29.3	6.41	24.6	15.1	29.6
Zr	174	54.1	214	123	226	196	110	230	193	246
Nb	6.01	12.1	10.8	3.86	8.03	11.2	7.87	8.20	6.52	10.9
Cs	6.15	6.64	2.17	1.32	3.32	4.21	4.89	5.12	1.36	3.77
Ba	622	984	372	410	2772	729	471	320	1141	1280
La	29.5	16.5	63.2	31.1	24.7	25.2	15.0	12.5	47.2	35.3
Ce	59.8	26.0	121	49.2	51.7	50.2	27.9	28.9	83.5	70.2
Pr	7.16	3.30	13.2	7.17	6.19	6.20	2.85	3.79	10.4	8.20
Nd	27.8	11.2	42.3	27.2	25.0	24.6	9.83	15.7	36.6	31.2
Sm	5.48	2.18	5.50	5.07	5.15	5.25	1.75	3.54	5.76	6.09
Eu	1.04	0.39	1.08	1.03	1.57	1.16	0.64	0.77	1.29	1.31
Gd	4.53	1.58	4.22	4.21	4.59	4.53	1.38	3.16	4.10	5.21
Tb	0.70	0.22	0.54	0.62	0.73	0.74	0.17	0.56	0.50	0.82
Dy	4.58	1.24	3.41	3.54	4.51	4.59	0.88	3.53	2.56	4.97
Ho	1.07	0.23	0.73	0.68	0.96	0.95	0.16	0.77	0.43	1.00
Er	3.55	0.70	2.37	1.91	2.86	2.76	0.47	2.27	1.23	2.91
Tm	0.64	0.11	0.38	0.28	0.45	0.44	0.07	0.36	0.17	0.46
Yb	4.80	0.73	2.58	1.86	3.04	2.88	0.45	2.41	1.15	2.96
Lu	0.80	0.11	0.40	0.29	0.50	0.45	0.07	0.39	0.17	0.46
Hf	4.75	2.05	5.45	2.84	5.21	4.97	3.52	5.53	4.62	6.18
Ta	0.70	1.41	0.65	0.24	0.44	0.70	0.63	0.45	0.87	0.71
Pb	28.0	26.7	16.2	8.17	5.37	6.09	46.0	20.6	24.5	6.57
Th	12.5	9.05	8.67	5.89	5.66	9.97	32.6	6.38	13.2	8.63
U	1.73	1.23	1.65	0.71	1.18	1.51	6.98	1.63	1.05	1.38
Σ REE	150.7	64.4	260.5	133.9	131.5	129.5	61.6	78.3	194.9	170.6
$(La/Yb)_N$	4.4	16.2	17.6	12.0	5.8	6.3	23.9	3.7	29.4	8.6
Eu/Eu^*	0.32	0.17	0.37	0.53	0.57	0.36	0.32	0.31	0.38	0.39
Ce/Ce^*	0.95	0.78	0.95	0.75	0.97	0.93	0.93	1.02	0.86	0.94

注:N 为球粒陨石标准化后的值; $Eu/Eu^* = Eu/(Sm * Gd)^{0.5}$; $Ce/Ce^* = Ce/(2La + Nd)$ (Boynton, 1984).

表 4 扬子北部三峡地区九龙湾剖面南沱组冰砾岩全岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 4 Sr and Nd isotopic composition of whole-rock samples of tillite of the Nantuo formation in the Jiulongwan section, northern Yangtze block

样品 编号	Rb (10^{-6})	Sr (10^{-6})	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$2\sigma_m$ (10^{-6})	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(t)}$	Sm (10^{-6})	Nd (10^{-6})	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$2\sigma_m$ (10^{-6})	T_{DM}^* (Ma)	$T_{\text{DM}2}^+$ (Ma)	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
NT0601	46.2	196.0	0.683	0.718 511	10	0.712 327	5.48	27.8	0.119 2	0.512 098	6	1.69	1.52	-4.2
NT0602	339.0	88.3	11.270	0.861 078	12	0.758 957	2.18	11.2	0.117 7	0.511 872	7	2.02	1.82	-8.5
NT0603	69.0	76.6	2.611	0.725 601	11	0.701 953	5.50	42.3	0.078 6	0.511 982	5	1.32	1.45	-3.2
NT0604	33.7	53.3	1.832	0.722 552	11	0.705 958	5.07	27.2	0.112 7	0.512 063	7	1.64	1.53	-4.4
NT0605	23.9	351.0	0.197	0.713 709	9	0.711 924	2.83	16.1	0.106 2	0.511 634	8	2.14	2.07	-12.3
NT0607	10.6	192.0	0.160	0.713 271	11	0.711 823	4.61	25.1	0.111 0	0.511 998	5	1.71	1.61	-5.5
NT0608	36.1	196.0	0.533	0.713 923	11	0.709 093	5.15	25.0	0.124 5	0.512 133	6	1.73	1.51	-4.0
NT0609	78.8	67.7	3.376	0.731 690	11	0.701 115	5.25	24.6	0.129 0	0.512 154	7	1.79	1.50	-4.0
NT0610	198.0	125.0	4.623	0.797 533	13	0.755 657	1.75	9.83	0.107 6	0.511 103	7	2.92	2.79	-22.7
NT0611	93.6	84.9	3.195	0.725 033	13	0.696 092	3.54	15.7	0.136 3	0.512 581	5	1.12	0.97	3.8
NT0612	48.8	615.0	0.230	0.718 761	11	0.716 679	5.76	36.6	0.095 1	0.510 683	5	3.15	3.28	-29.9
NT0615	88.2	115.0	2.222	0.723 575	12	0.703 445	6.09	31.2	0.118 0	0.512 081	7	1.70	1.54	-4.5

注:Rb、Sr、Sm 和 Nd 的含量是在 ICP-MS 上测量的; t 为同位素比值初始值; $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 的测量参据 Bouvier *et al.* (2008); * 单阶段模式年龄的计算据 DePaolo (1981); 十二阶段模式年龄据 Liew and Hofmann (1988); Sr 和 Nd 同位素组成的初始值据 Condon *et al.* (2005) 回算到 635 Ma。

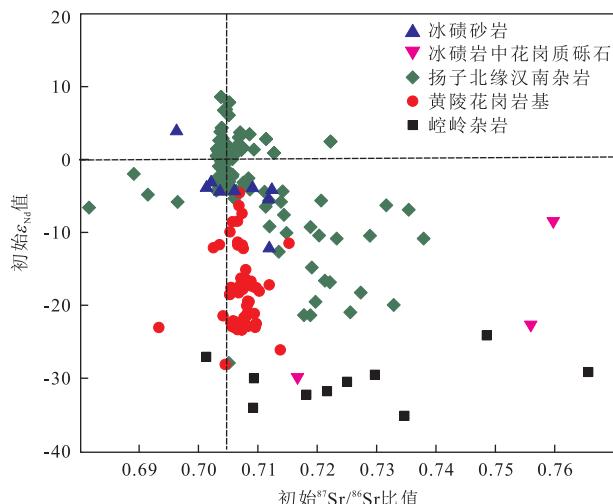


图 6 三峡地区九龙湾剖面南沱组冰砾岩的 Sr-Nd 同位素
Fig.6 The Sr-Nd isotope compositions of tillite of the Nantuo formation in the Jiulongwan section

崆岭杂岩,包括花岗质片麻岩和 TTG 岩套(Gao *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2013);黄陵花岗岩基,包括黄陵庙、三斗坪、大老岭和晓峰岩套(Zhang *et al.*, 2008a, 2009; Zhao *et al.*, 2013);扬子北缘,岩性包括奥长花岗岩、英云闪长岩、花岗闪长岩、混合岩、斜长角闪岩、变流纹岩和火山岩(凌文黎, 1996; 凌文黎等, 1997; Ling *et al.*, 2003; Zhao and Zhou, 2008; 李永飞等, 2007)

砂岩更亏损,其中样品 NT0612 具有 Sr/Yb 比值明显高的特点。南沱组冰砾岩的微量元素组成总体表现出混合的特征,可能分别自扬子北缘岩体、黄陵花岗岩和崆岭杂岩不同程度的贡献(凌文黎等, 1997; Gao *et al.*, 1999; Ling *et al.*, 2002; Ling *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2006b; 李永飞等, 2007; Zhang *et al.*,

2008a, 2009; Zhao and Zhou, 2008; Wang *et al.*, 2013a)。

南沱组冰砾岩 12 个样品的 Sr-Nd 同位素数据列于表 4,本文样品的 Rr、Sr 含量均很高,平均含量分别为 88.4×10^{-6} 和 188.7×10^{-6} 。由于南沱组冰砾岩成分复杂多样,所以对应计算到 635 Ma(Condon *et al.*, 2005) 时的 Sr-Nd 同位素组成有着显著的差异,并且变化范围都非常大,冰砾砂岩与花岗质砾石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值分别为 $0.696\ 092 \sim 0.712\ 327$ 和 $0.716\ 679 \sim 0.758\ 957$, 初始 ϵ_{Nd} 值分别为 $-12.3 \sim 3.8$ 和 $-29.9 \sim 8.5$, 单阶段模式年龄分别为 $1.12 \sim 2.14$ Ga 和 $2.02 \sim 3.15$ Ga, 两阶段模式年龄分别为 $0.97 \sim 2.07$ Ga 和 $1.82 \sim 3.28$ Ga, 从图 6 中可以看出,南沱组冰砾岩的 Sr-Nd 同位素组成反映出扬子北缘岩体、黄陵花岗岩与崆岭杂岩混合的特征,而花岗质砾石与黄陵花岗岩和崆岭杂岩更为接近。

4 讨论

4.1 南沱组的沉积时代

前人对扬子地区南沱组的沉积时代进行了大量研究工作(Wang *et al.*, 1981; Knoll and Xiao, 1999; Evans *et al.*, 2000; Barfod *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2003; Wang and Li, 2003; Zhou *et al.*, 2004; Chu *et al.*, 2005; Condon *et al.*, 2005; Yin *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2008b),但目前依然没有达到共识,争议主要

集中在该期冰碛作用与 Sturtian 冰期还是 Marinoan 冰期相对应。而对南沱组沉积岩时代的限定,可以通过直接对其组成物质进行同位素定年工作获得,或者对其上覆和下伏的岩层开展定年工作从而间接制约其时代。

前人对扬子地区南沱组冰碛岩的直接定年工作相对比较少,主要是由于沉积岩中碎屑物质比较多,成分复杂,定年结果存在一定的偏差。Yang *et al.* (1997)对扬子地区南沱组中部的含锰沉积物用 Sm-Nd 等时线定年方法测定,得到结果为 696 ± 52 Ma; Liu *et al.* (2008)报道了两颗年轻的南沱组碎屑锆石年龄,分别为 600 ± 6 Ma 和 606 ± 6 Ma,但文中对这两颗锆石的特征属性并未进行详细探讨,所以南沱组的初始沉积年龄是否晚于 600 Ma 还需要进一步的确认。本文在南沱组的凝灰质火山岩中得到最年轻的锆石年龄为 706 ± 7 Ma,它的 Th/U 值为 1.83,应为岩浆成因,虽然没有进一步缩小南沱组形成年龄的范围,但是却为其沉积时代下限的制约提供了更多证据。

更多的研究工作主要是通过对南沱组上覆和下伏地层的定年数据来间接限定其沉积时代。例如: Chu *et al.* (2005)对江西上饶地区,接近于南华系与震旦系界线处的火山灰进行锆石 U-Pb 定年,得到了 635.3 ± 5.4 Ma 的年龄; Condon *et al.* (2005)通过对上覆陡山沱组底部上 2.3 m 的火山灰夹层锆石进行 U-Pb 定年,获得 635.2 ± 0.6 Ma 的年龄; Yin *et al.* (2005)中三峡地区九曲脑剖面的陡山沱组底界上 2.0 m 凝灰岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 628.3 ± 5.8 Ma; Zhang *et al.* (2005)用锆石 SHRIMP U-Pb 定年方法,获得三峡地区陡山沱组底界上 2.5 m 的火山灰的年龄为 621 ± 7 Ma,可以看出这些年龄在误差范围基本一致。南沱组底部的沉积年龄是通过下伏地层定年来限定的,由于大塘坡组和古城组在峡东地区缺失,南沱组不整合地覆盖在莲沱组之上,所以不同地区的南沱组下伏地层的沉积年龄差别比较大。比如,马国干等(1984)测得峡东地区下伏莲沱组砂岩中上部凝灰岩锆石年龄为 748 ± 12 Ma; 郑永飞(2003)用 Pb/U 等时线重新计算了其中的岩浆锆石,得到了 766 ± 18 Ma 的年龄; Zhou *et al.* (2004)和 Zhang *et al.* (2008b)分别对湖南地区南沱组下部的大塘坡组底部和顶部进行锆石 U-Pb 定年得到了 663 ± 4 Ma 和 654.5 ± 3.8 Ma 的年龄。因此,通过以上对前人研究成果的总结以及本文的锆石定年结果,笔者认为扬子三峡地区南沱组

沉积年龄应该为 $654 \sim 635$ Ma,并且可与 Marinoan 冰期($650 \sim 635$ Ma)相对应。

4.2 南沱组冰碛岩源区特征

黄陵花岗岩的时代一般认为集中在 $900 \sim 800$ Ma(马国干等,1984;胡世玲等,1985;李志昌和王桂华,2002;马大栓等,2002;Zhang *et al.*,2009),三斗坪岩套定年结果为 $850 \sim 800$ Ma(冯定犹等,1991;凌文黎等,2006;李益龙等,2007;Zhang *et al.*,2009),大老岭岩套的定年结果为 800 Ma 左右(李志昌和王桂华,2002;凌文黎等,2006;Zhang *et al.*,2009),晓峰岩套定年结果也为 800 Ma 左右(Zhang *et al.*,2008a)。而前人报道的黄陵花岗岩年龄中小于 800 Ma 的结果一般是通过 Rb-Sr 等时线和黑云母 K-Ar 稀释法所获得的(冯定犹等,1991;李志昌和王桂华,2002;马大栓等,2002),另外凌文黎等(2006)通过锆石 U-Pb 定年法得到黄陵地区的晓峰浅成岩岩套形成于 744 ± 22 Ma,但是该样品表现出明显的 Pb 丢失,所以这一偏小的年龄可能需要更多的证据支持。因此,笔者认为黄陵花岗岩的形成时代应该大于 800 Ma,约在 $820 \sim 800$ Ma 侵入崆岭杂岩(马国干等,1984;马大栓等,2002;Zhang *et al.*,2008a,2009),并将其分隔成南、北两区。

锆石作为高稳定性的难熔矿物,具有较强的抗风化能力,因此锆石 U-Pb 定年能够有效的确认古老地壳残片时代,并记录变质事件或者岩浆活动,从而为认识古老的构造背景和演化历史提供依据(Liu *et al.*,2008;Zhang *et al.*,2006a,2006c)。本文南沱组冰碛岩样品中的碎屑锆石主要有 4 组年龄: ~ 3.00 Ga, $2.50 \sim 2.30$ Ga, $2.05 \sim 1.95$ Ga 和 $900 \sim 700$ Ma,与 Liu *et al.*(2008)中测得南沱组锆石年龄类似。本文南沱组冰碛砂岩和凝灰质火山岩的年龄群落反映了几次主要的地壳再造事件,冰碛砂岩样品 NT0601 中发现了 3 颗年龄在 3.0 Ga 左右的碎屑锆石,加权平均年龄为 3046 ± 60 Ma ($n = 3$, MSWD=1.6),在凝灰质火山岩样品 NT0613 中发现了一颗年龄为 2960 ± 20 Ma 的碎屑锆石,4 颗锆石的 Th/U 比值为 $0.38 \sim 0.93$,应该为岩浆成因,这组太古代的年龄可能与崆岭杂岩基底岩石的花岗质岩浆活动有关(Qiu *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2006a; Zheng *et al.*, 2006a)。不仅如此,本文南沱组冰碛砂岩样品 NT0601 和 NT0614 以及凝灰岩样品 NT0613 和 NT0616 中也广泛分布着 $2.05 \sim 1.95$ Ga 的碎屑锆石,在崆岭杂岩中也被证实存在着相似的古元古代年龄,例如凌文黎和高山(2000)用单矿物

Sm-Nd 等时线法对崆岭副片麻岩和角闪岩定年得到 1.95~1.93 Ga 的年龄; Qiu *et al.* (2000) 中的奥长花岗岩片麻岩及其他变沉积岩中也保存有该时期的年龄组成; Zhang *et al.* (2006a, 2006b) 在对扬子北部的崆岭基底和表壳岩石的研究中发现了大量的古元古代锆石, 年龄在 2.0~1.9 Ga, 因此他们认为崆岭杂岩在古元古代中期经历了一次构造热事件, 并且在扬子北部地区主要表现为变质活动, 而在扬子南部地区则表现为岩浆活动, 说明了南沱组沉积岩中的~3.0 Ga 和 2.05~1.95 Ga 的锆石有较大可能来自崆岭杂岩。另外, 我们对南沱组冰碛砂岩和凝灰岩样品中 800~700 Ma 和 900~800 Ma 的碎屑锆石的年龄分别加权平均得到约 780~740 Ma 和 840~820 Ma 的结果, 由于华南在 820 Ma 和 720 Ma 发生了广泛的裂谷岩浆活动, 其中扬子陆块内部主要集中于 820 Ma, 而扬子北缘则在 750 Ma 左右最为强烈 (郑永飞, 2003; 郑永飞等, 2003; Zheng *et al.*, 2003; 郑永飞和张少兵, 2007; 李献华等, 2012)。因此, 南沱组沉积岩中 900~800 Ma 的新元古代碎屑锆石很可能是来自于附近的黄陵花岗岩, 而 800~700 Ma 的锆石可能来自于扬子北缘。另外, 花岗岩砾石样品 NT0612 发生了 Pb 丢失, 不一致线上交点年龄为 2 751±22 Ma, 暗示其母岩可能是太古代古老花岗岩基。

这一推论也可以从南沱组冰碛岩的微量元素和 Sr-Nd 同位素的研究中得到印证。在微量元素组成方面, 南沱组冰碛砂岩与扬子北缘岩体、黄陵花岗岩和崆岭杂岩组成相似, 但冰碛岩的微量元素组成变化范围较大, 应该是各物源不同比例混合的结果, 所以难以精细区分众多冰碛岩样品中各物源的具体贡献; 而被包裹的花岗岩砾石样品的微量元素配分特征与黄陵花岗岩以及崆岭古老岩基都比较接近, 呈现出轻稀土和大离子亲石元素相对富集, Nb、Ta 亏损以及 Eu 的轻微负异常的特征, 尤其是 NT0612 样品具有较高的 Sr 含量和较低的 Yb 含量, 以及高的 Sr/Yb 比值, 与崆岭杂岩 TTG 组成相似 (图 5, 表 3) (凌文黎等, 1997; Gao *et al.*, 1999; Ling *et al.*, 2002; Ling *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2006b, 2008a, 2009; 李永飞等, 2007; Zhao and Zhou, 2008)。全岩同位素组成方面, 从图 6 中可以看出, 南沱组冰碛砂岩的 Sr-Nd 同位素表现出扬子北缘岩体、黄陵花岗岩和崆岭杂岩 3 个源区混合的特点, 而被包裹的花岗岩砾石呈富集特征, 与黄陵花岗岩甚至崆岭杂岩接近, 尽管南沱组花岗岩砾石里有沉积岩的干扰, 但

是结合杂乱无分选的野外产状 (图 2), 以及年龄和微量元素组成, 我们认为其主体可能是来自于附近的黄陵花岗岩和崆岭杂岩, 而南沱组冰碛砂岩的物质则是来自扬子北缘岩体、黄陵花岗岩和崆岭杂岩不同比例的混合。

4.3 构造意义

经过多年的研究积累, 学者们在扬子陆块发现了越来越多的太古宙年龄信息, 例如: 崆岭杂岩的混合岩和片麻岩中存在一些 3.4~3.1 Ga 的继承锆石核, 基底岩石中~2.9 Ga 的锆石颗粒和~3.2 Ga 的锆石继承核都具有负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和老达 3.55 Ga 的两阶段模式年龄 (Qiu *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2006a); 柳小明等 (2005) 和 Zhang *et al.* (2006c) 分别在三峡地区的南华纪沉积地层南沱组与莲沱组中发现了 3.51~3.32 Ga 和 3.8 Ga 的碎屑锆石, 其中 3.8 Ga 碎屑锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -0.8, Hf 模式年龄为 4.00~3.96 Ga, 说明扬子陆块的地壳生长可追溯到冥古宙晚期; Zhang *et al.* (2006c) 根据 Hf 模式年龄得出扬子陆块在 3.6~3.2 Ga 期间发生了广泛的地壳生长; 焦文放等 (2009) 确定了崆岭杂岩的一个黑云母斜长片麻岩结晶年龄为 3.2 Ga 左右, Gao *et al.* (2011) 发现了一颗年龄为 3.3 Ga 左右的来自奥长花岗质片麻岩的锆石, 这些年龄结果说明扬子陆壳的生长可以追溯到早太古代。

本文南沱组冰碛岩的 4 组锆石 U-Pb 年龄反映了 4 次扬子陆块地壳再造和增生事件, 其中约 3.0 Ga 的事件可能与崆岭 2.95~2.90 Ga 的 TTG 质岩浆活动有关 (Qiu *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2006a; Zheng *et al.*, 2006a), Liu *et al.* (2008) 报道的南沱组~2.95 Ga 锆石的 Hf 同位素组成与 Zhang *et al.* (2006a) 中崆岭 TTG 质混合岩和片麻岩相似也证实这一点。古元古代时期, 扬子陆块发生了强烈的变质—岩浆活动 (凌文黎和高山, 2000; Qiu *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2006a; Zheng *et al.*, 2006a; 郑永飞和张少兵, 2007), 南沱组中 2.05~1.95 Ga 和 2.50~2.30 Ga 的锆石年龄反映了这期变质—岩浆事件, 这些锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 大多数为负值 (Zhang *et al.*, 2006c; Liu *et al.*, 2008), 仅有少量的正值, 说明扬子陆块古元古代主要表现为古老地壳的再造 (Zhang *et al.*, 2006b, 2006c), 同时也有少量新生地壳记录, 可能与 Columbia 超大陆聚合有关 (Zhao *et al.*, 2003, 2004)。另外, 南沱组冰碛岩中的锆石年龄主要集中于 900~700 Ma (图 4l), 与华南广泛分布的新元古代中期岩浆活动相符合 (Li

et al., 2003a; Zheng *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2003b; Wu *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2006c; Zheng *et al.*, 2006b; Zhou *et al.*, 2002a, 2002b, 2006), 其中 820 Ma 和 750 Ma 的两期双峰式岩浆活动, 可能与 Rodinia 超大陆的裂解有关(Li *et al.*, 2003b; Zheng *et al.*, 2004; Wu *et al.*, 2006). 这一时期地球构造运动的加强, 引起大规模风化剥蚀和沉积作用, 使大气中 CO₂ 消耗量增加, 进而促使雪球地球事件的发生(Hoffman *et al.*, 1998; 郑永飞, 2003), 冰期时沉积形成的南沱组冰碛岩中 900~700 Ma 锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值既有负值也有正值, 相应的 Hf 模式年龄跨度也较大, 从新元古代到太古代(Liu *et al.*, 2008), 说明该时期既有古老地壳的再造, 也有新生地壳的增长. Sr-Nd 同位素和微量元素组成上显示出 800~700 Ma 时期, 南沱组沉积岩中有来自扬子北缘地体的贡献, 可能是由于大规模的裂谷岩浆活动伴随发育了大量火山沉积盆地, 形成了当时北高南低的环境(沙庆安等, 1963), 从而导致扬子北缘的物质被剥蚀搬运至沉积盆地.

5 结论

南沱组冰碛岩锆石 U-Pb 定年结果显示最年轻年龄约为 700 Ma, 结合前人工作认为南沱组冰碛岩的沉积时代为 654~635 Ma, 可与国际上的 Marinoan 冰期对应.

针对南沱组冰碛砂岩和大粒径被裹挟的花岗质砾石分别开展分析工作, 结果显示宽泛的锆石年龄分布和分异明显的地球化学组成. 冰碛砂岩碎屑锆石年龄谱, 以及微量元素和 Sr-Nd 同位素特征, 反映其组成是扬子北缘岩体、黄陵花岗岩和崆岭杂岩不同比例的混合; 另外锆石年龄和地球化学特征指示, 南沱组冰碛岩中被包裹的花岗质砾石主体可能来自黄陵花岗岩和崆岭岩基.

南沱组冰碛岩主要的锆石年龄群组分为 ~3.0 Ga、2.5~2.3 Ga、2.05~1.95 Ga 和 900~700 Ma, 反映了扬子陆块 4 次地壳再造事件, 同时比例最高的 900~700 Ma 时期锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值既有正值又有负值, 暗示不仅有古老地壳的再造也有新生地壳的形成, 可能与 Rodinia 超大陆的裂解有关, 而强烈的裂谷火山作用可能导致了当时研究区北高南低的地势状态.

致谢: 感谢肖平在分析测试上提供的帮助. 陈福坤和胡蓉设计了整体研究思路, 胡蓉完成部分实验

工作(全岩微量元素和 Sr-Nd 同位素分析)和文稿撰写, 李双庆处理实验数据并完成文稿修改, 王伟参与野外工作和部分实验测试(锆石 U-Pb).

References

- Anbar, A.D., Knoll, A.H., 2002. Proterozoic Ocean Chemistry and Evolution: A Bioinorganic Bridge? *Science*, 297 (5584): 1137–1142. doi: 10.1126/science.1069651
- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses that Do Not Report ²⁰⁴Pb. *Chemical Geology*, 192(1–2): 59–79. doi: 10.1016/S0009-2541(02)00195-X
- Barfod, G. H., Albarede, F., Knoll, A. H., et al., 2002. New Lu-Hf and Pb-Pb Age Constraints on the Earliest Animal Fossils. *Earth and Planetary Science Letters*, 201 (1): 203–212. doi: 10.1016/S0012-821X(02)00687-8
- Bouvier, A., Vervoort, J.D., Patchett, P.J., 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd Isotopic Composition of CHUR: Constraints from Unequilibrated Chondrites and Implications for the Bulk Composition of Terrestrial Planets. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1–2): 48–57. doi: 10.1016/j.epsl.2008.06.010
- Boynton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. *Rare Earth Element Geochemistry*, 19: 63–114.
- Chen, D.F., Dong, W.Q., Zhu, B.Q., et al., 2004. Pb-Pb Ages of Neoproterozoic Doushantuo Phosphorites in South China: Constraints on Early Metazoan Evolution and Glaciation Events. *Precambrian Research*, 132(1–2), 123–132. doi: 10.1016/j.precamres.2004.02.005
- Chen, F.K., Hegner, E., Todt, W., 2000. Zircon Ages and Nd Isotopic and Chemical Compositions of Orthogneisses from the Black Forest, Germany: Evidence for a Cambrian Magmatic Arc. *International Journal of Earth Sciences*, 88: 791–802.
- Chen, F.K., Siebel, W., Satir, M., et al., 2002. Geochronology of the Karadere Basement (NW Turkey) and Implications for the Geological Evolution of the Istanbul Zone. *International Journal of Earth Sciences*, 91(3): 469–481. doi: 10.1007/s00531-001-0239-6
- Chen, J.F., Jahn, B.M., 1998. Crustal Evolution of Southeastern China: Nd and Sr Isotopic Evidence. *Tectonophysics*, 284(1–2): 101–133. doi: 10.1016/S0040-1951(97)00186-8
- Chen, K., Gao, S., Wu, Y.B., et al., 2013. 2.6–2.7 Ga Crustal Growth in Yangtze Craton, South China. *Precambrian Research*, 224: 472–490. doi: 10.1016/j.precamres.2012.10.017
- Chu, X.L., Todt, W., Zhang, Q.R., et al., 2005. U-Pb Zircon

- Age for the Nanhua-Sinian Boundary. *Chinese Science Bulletin*, 50(7):716—718.
- Condon, D., Zhu, M. Y., Bowring, S., et al., 2005. U-Pb Ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China. *Science*, 308 (5718): 95 — 98. doi: 10.1126/science.110776
- Crichton, J.G., Condie, K.C., 1993. Trace Elements As Source Indicators in Cratonic Sediments: A Case Study from the Early Proterozoic Libby Creek Group, Southeastern Wyoming. *The Journal of Geology*, 101(3):319—332.
- Depaolo, D. J., 1981. A Neodymium and Strontium Isotopic Study of the Mesozoic Calc-Alkaline Granitic Batholiths of the Sierra Nevada and Peninsular Ranges, California. *Journal of Geophysical Research*, 86(B11):470—488.
- Evans, D. A., Li, Z., Kirschvink, J. L., et al., 2000. A High-Quality Mid-Neoproterozoic Paleomagnetic Pole from South China, with Implications for Ice Ages and the Breakup Configuration of Rodinia. *Precambrian Research*, 100(1—3):313—334. doi: 10.1016/S0301—9268(99)00079—0
- Feng, D.Y., Li, Z.C., Zhang, Z.C., 1991. Intrusive Ages and Isotopic Characteristics of Massives in the South of Huangling Granitoids. *Hubei Geology*, 5(2):1—12 (in Chinese with English abstract).
- Gao, F.H., Yang, Y., Wang, F., et al., 2014. Determination of the Early Paleozoic Strata in Eastern Heilongjiang Province: Evidence from Field Geology and Detrital Zircon U-Pb Geochronology. *Earth Science*, 39(5):499—508 (in Chinese with English abstract).
- Gao, S., Ling, W.L., Qiu, Y.M., et al., 1999. Contrasting Geochemical and Sm-Nd Isotopic Compositions of Archean Metasediments from the Kongling High-Grade Terrain of the Yangtze Craton: Evidence for Cratonic Evolution and Redistribution of REE during Crustal Anatexis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(13—14):2071—2088. doi: 10.1016/S0016—7037(99)00153—2
- Gao, S., Yang, J., Zhou, L., et al., 2011. Age and Growth of the Archean Kongling Terrain, South China, with Emphasis on 3.3 Ga Granitoid Gneisses. *American Journal of Science*, 311(12):153—182. doi: 10.2475/02.2011.03
- Greentree, M.R., Li, Z.X., 2008. The Oldest Known Rocks in South-Western China: SHRIMP U-Pb Magmatic Crystallisation Age and Detrital Provenance Analysis of the Paleoproterozoic Dahongshan Group. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33(5):289—302. doi: 10.1016/j.jseas.2008.01.001
- Halverson, G. P., Hoffman, P. F., Schrag, D. P., et al., 2005. Toward a Neoproterozoic Composite Carbon-Isotope Record. *Geological Society of America Bulletin*, 117(9):1181—1207. doi: 10.1130/B25630.1
- Hu, J., Qiu, J.S., Wang, R.C., et al., 2007. Earliest Response of the Neoproterozoic Rodinia Break-up in the North-eastern Yangtze Craton: Constraints from Zircon U-Pb Geochronology and Nd Isotopes of the Gneissic Alkaline Granites in Donghai Area. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6):1321—1333 (in Chinese with English abstract).
- Hu, S.L., Wang, S.S., Sang, H.Q., et al., 1985. An Application of the Fast-Neutron Activation Dating Technique to Approach the Age of Early Emplacement of Jiuling Granodiorite Intrusion of Jiangxi Province. *Acta Petrologica Sinica*, 1(3):29—34 (in Chinese with English abstract).
- Hoffman, P.F., Kaufman, A.J., Halverson, G.P., et al., 1998. A Neoproterozoic Snowball Earth. *Science*, 281(5381):1342—1346. doi: 10.1126/science.281.5381.1342
- Hoffman, P.F., 2009. Pan-Glacial—A Third State in the Climate System. *Geology Today*, 25(3):100—107. doi: 10.1111/j.1365—2451.2009.00716.x
- Hou, Z.H., Wang, C.X., 2007. Determination of 35 Trace Elements in Geological Samples by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Journal of University of Science and Technology of China*, 37: 940—944 (in Chinese with English abstract).
- Jiao, W. F., Wu, Y. B., Yang, S. H., et al., 2009. The Oldest Basement Rock in the Yangtze Craton Revealed by Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Composition. *Science in China (Ser. D)*, (7):972—978. doi: 10.1007/s11430—009—0135—7
- Knoll, A., Xiao, S. H., 1999. On the Age of the Doushantuo Formation. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 16: 225—236.
- Li, S.Q., Chen, F., Siebel, W., et al., 2012. Late Mesozoic Tectonic Evolution of the Songliao Basin, NE China: Evidence from Detrital Zircon Ages and Sr-Nd Isotopes. *Gondwana Research*, 22 (S3—4): 943—955. doi: 10.1016/j.gr.2012.04.002
- Li, X. H., Li, Z. X., Ge, W. C., et al., 2003a. Neoproterozoic Granitoids in South China: Crustal Melting above a Mantle Plume at ca. 825 Ma? *Precambrian Research*, 122(S1—4): 45—83. doi: 10.1016/S0301—9268(02)00207—3
- Li, X. H., Li, W. X., He, B., 2012. Building of the South China Block and Its Relavance to Assembly and Breakup of Rodinia Supercontinent: Observations, Interpretations and Test. *Bull Mineral Petrol. Geochem.*, 31(6):543—559 (in Chinese with English abstract).

- Li, Y.F., Lai, S.C., Qin, J.F., et al., 2007. Neoproterozoic Rifting of North Margin of Yangtze Block: Evidences from Geochemistry and Sr-Nd-Pb Isotopes of Bikou Volcanic Rocks. *Science in China (Ser. D)*, 37 (Suppl. 1): 295–306 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y.L., Zhou, H.W., Li, X.H., et al., 2007. ^{40}Ar - ^{39}Ar Plateau Ages of Biotite and Amphibole from Tonalite of Huangling Granitoids and Their Cooling Curve. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (5): 1067–1074 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z.C., Wang, G.H., Zhang, Z.C., 2002. Isotopic Age Spectrum of the Huangling Granitic Batholith, Western Hubei. *Geology and Mineral Resources of South China*, 3: 19–28 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z.X., Li, X., Kinny, P., et al., 2003b. Geochronology of Neoproterozoic Syn-Rift Magmatism in the Yangtze Craton, South China and Correlations with Other Continents; Evidence for a Mantle Superplume that Broke Up Rodinia. *Precambrian Research*, 122 (1–4): 85–109. doi:10.1016/S0301-9268(02)00208-5
- Liew, T. C., Hofmann, A. W., 1988. Precambrian Crustal Components, Plutonic Associations, Plate Environment of the Hercynian Fold Belt of Central Europe: Indications from a Nd and Sr Isotopic Study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98 (2): 129–138. doi:10.1007/BF00402106
- Ling, W. L., 1996. Isotopic Geochronology and Crustal Growth of Proterozoic Basement along the Northern Margin of Yangtze Craton: I. Houhe Group and Xixiang Group. *Earth Science*, 5 (in Chinese with English abstract).
- Ling, W. L., Gao, S., Zhang, B. R., Zhou, L., Zhang, H. F., 1997. Early Precambrian Continental Crust Evolution at the Northern Margin of Yangtze Craton; Constraint from the Elemental and Isotopic Geochemical Study of Houhe Complex. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 17 (4): 26–32 (in Chinese with English abstract).
- Ling, W. L., Gao, S., Zhang, B. R., et al., 2000. Later Paleoproterozoic Tectonothermal Event and Evolution of Yangtze Craton. *Chinese Science Bulletin*, 45: 2343–2348 (in Chinese with English abstract).
- Ling, W. L., Gao, S., Ouyang, J. P., et al., 2002. Time and Tectonic Setting of the Xixiang Group: Constraints from Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry. *Science in China (Ser. D)*, 45 (9): 818–831. doi:10.1007/BF02879516
- Ling, W. L., Gao, S., Zhang, B. R., et al., 2003. Neoproterozoic Tectonic Evolution of the Northwestern Yangtze Craton, South China: Implications for Amalgamation and Break-up of the Rodinia Supercontinent. *Precambrian Research*, 122 (1): 111–140. doi:10.1016/S0301-9268(02)00222-X
- Ling, W. L., Gao, S., Cheng, J. P., et al., 2006. Neoproterozoic Magmatic Events within the Yangtze Continental Interior and along Its Northern Margin and Their Tectonic Implication: Constraint from the ELA-ICPMS U-Pb Geochronology of Zircons from the Huangling and Hannan Complexes. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (2): 387–396 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. M., Gao, S., Ling, W. L., et al., 2005. Evidence of 3.5 Ga Detrital Zircons in Yangtze Craton and Their Geological Significance. *Progress in Natural Science*, 15: 1334–1337 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. M., Gao, S., Diwu, C. R., et al., 2008. Precambrian Crustal Growth of Yangtze Craton as Revealed by Detrital Zircon Studies. *American Journal of Science*, 308 (4): 421–468. doi:10.2475/04.2008.02
- Ludwig, K. R., 2003. User's manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Geochronology Center Special Publication, Berkeley, 74.
- Ma, D. Q., Du, S. H., Xiao, Z. F., 2002. The Origin of Huangling Granite Batholith. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21 (2): 151–161 (in Chinese with English abstract).
- Ma, G. G., Li, H. Q., Zhang, Z. C., 1984. An Investigation of the Age Limits of the Sinian System in South China. *Bulletin of Yichang Institute of Geology and Mineral Resources*, 8: 1–29 (in Chinese with English abstract).
- McFadden, K. A., Xiao, S. H., Zhou, C. M., et al., 2009. Quantitative Evaluation of the Biostratigraphic Distribution of Acanthomorphic Acritharchs in the Ediacaran Doushantuo Formation in the Yangtze Gorges Area, South China. *Precambrian Research*, 173 (1–4): 170–190. doi:10.1016/j.precamres.2009.03.009
- Prudencio, M. J., Figueiredo, M. O., Cabral, J. M. P., 1989. Rare Earth Distribution and Its Correlation with Clay Mineralogy in the Clay-Sized Fraction of Cretaceous and Pliocene Sediments (Central Portugal). *Clay Minerals*, 24 (1): 67–74. doi:10.1180/claymin.1989.024.1.06
- Qiu, Y. M., Gao, S., McNaughton, N. J., et al., 2000. First Evidence of > 3.2 Ga Continental Crust in the Yangtze Craton of South China and Its Implications for Archean Crustal Evolution and Phanerozoic Tectonics. *Geology*, 28 (1): 11–14. doi:10.1130/0091-7613(2000)028<0011:FEOGCC>2.0.CO;2
- Sha, Q. A., Liu, H. Y., Zhang, S. S., et al., 1963. Tillites of Na-

- ntuo Formation in East Yangtze Area. *Scientia Geologica Sinica*, 3: 139—148 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S.S., McDonough, W., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, Special Publications, London*, 42: 313—345.
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Black-Well Scientific Publications, Oxford.
- Wang, J., Li, X.H., Duan, T.Z., et al., 2003. Zircon SHRIMP U-Pb Dating for the Cangshuipu Volcanic Rocks and Its Implications for the Lower Boundary Age of the Nanhua Strata in South China. *Chinese Science Bulletin*, 48 (16): 1663—1669. doi: 10.1360/03wd0168
- Wang, J., Li, Z.X., 2003. History of Neoproterozoic Rift Basins in South China: Implications for Rodinia Break-up. *Precambrian Research*, 122 (1—4): 141—158. doi: 10.1016/S0301-9268(02)00209-7
- Wang, M.X., Wang, C.Y., Sun, Y.L., 2013a. Mantle Source, Magma Differentiation and Sulfide Saturation of the ~637 Ma Zhouan Mafic-Ultramafic Intrusion in the Northern Margin of the Yangtze Block, Central China. *Precambrian Research*, 228: 206—222. doi: 10.1016/j.precamres.2013.01.015
- Wang, W., Chen, F.K., Hu, R., et al., 2012. Provenance and Tectonic Setting of Neoproterozoic Sedimentary Sequences in the South China Block: Evidence from Detrital Zircon Ages and Hf-Nd Isotopes. *International Journal of Earth Sciences*, 101(7): 1723—1744. doi: 10.1007/s00531-011-0746-z
- Wang, W., Zhou, M.F., Yan, D.P., et al., 2013b. Detrital Zircon Record of Neoproterozoic Active-Margin Sedimentation in the Eastern Jiangnan Orogen, South China. *Precambrian Research*, 235: 1—19. doi: 10.1016/j.precamres.2013.05.013
- Wang, Y., Lu, S., Gao, Z., et al., 1981. Sinian Tillites of China. *Earth's Pre-Pleistocene Glacial Record*, 386: 401.
- Wu, R.X., Zheng, Y.F., Wu, Y.B., et al., 2006. Reworking of Juvenile Crust: Element and Isotope Evidence from Neoproterozoic Granodiorite in South China. *Precambrian Research*, 146(S3—4): 179—212. doi: 10.1016/j.precamres.2006.01.012
- Wu, Y.B., Chen, D.G., Xia, Q.K., et al., 2002. SIMS U-Pb Dating of Zircons in Granulite of Huangtuling from Northern Dabieshan. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 378—382 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y.B., Gao, S., Zhang, H.F., et al., 2012. Geochemistry and Zircon U-Pb Geochronology of Paleoproterozoic Arc Related Granitoid in the Northwestern Yangtze Block and Its Geological Implications. *Precambrian Research*, 200: 26—37. doi: 10.1016/j.precamres.2011.12.015
- Wu, Y.B., Zheng, Y.F., Gao, S., et al., 2008. Zircon U-Pb Age and Trace Element Evidence for Paleoproterozoic Granulite-Facies Metamorphism and Archean Crustal Rocks in the Dabie Orogen. *Lithos*, 101(3): 308—322. doi: 10.1016/j.lithos.2007.07.008
- Xiao, S.H., Bao, H.M., Wang, H.F., et al., 2004. The Neoproterozoic Quruqtagh Group in Eastern Chinese Tianshan: Evidence for a Post-Marinoan Glaciation. *Precambrian Research*, 130 (1): 1—26. doi: 10.1016/j.precamres.2003.10.013
- Xiao, S.H., McFadden, K.A., Peek, S., et al., 2012. Integrated Chemostratigraphy of the Doushantuo Formation at the Northern Xiaofenghe Section (Yangtze Gorges, South China) and Its Implication for Ediacaran Stratigraphic Correlation and Ocean Redox Models. *Precambrian Research*, 192—95 (1), 125—141. doi: 10.1016/j.precamres.2011.10.021
- Xing, Y.S., Gao, Z.J., Wang, Z.Q., 1996. Stratigraphical Lexicon of China: Neoproterozoic. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Xiong, Q., Zheng, J.P., Yu, C.M., et al., 2008. Zircon U-Pb Age and Hf Isotope of Quanyishang A-Type Granite in Yichang: Signification for the Yangtze Continental Cratonization in Paleoproterozoic. *Science in China Press*, 53: 2782—2792 (in Chinese with English abstract).
- Xu, B., Jian, P., Zheng, H.F., et al., 2005. U-Pb Zircon Geochronology and Geochemistry of Neoproterozoic Volcanic Rocks in the Tarim Block of Northwest China: Implications for the Breakup of Rodinia Supercontinent and Neoproterozoic Glaciations. *Precambrian Research*, 136(2): 107—123. doi: 10.1016/j.precamres.2004.09.007
- Yang, J.D., Wang, Z.Z., Xue, Y.S., et al., 1997. Origin and Age of Mn Deposits of the Nantuo Formation in the Sinian System. *Chinese Science Bulletin*, 42(24): 2072—2075. doi: 10.1007/BF02882949
- Yin, C.Y., Tang, F., Liu, Y.Q., et al., 2005. U-Pb Zircon Age from the Base of the Ediacaran Doushantuo Formation in the Yangtze Gorges, South China: Constraint on the Age of Marinoan Glaciation. *Episodes*, 28(1): 48—49.
- Yuan, H.H., Zhang, Z.L., Liu, W., et al., 1991. Direct Dating Method of Zircon Grains by $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$. *Mineral. Petrology*, 11(2): 72—79 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H.L., Gao, S., Liu, X.M., et al., 2004. Accurate U-Pb

- Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28:353—370.
- Zhang, C.J., 1990. Sedimentary Facies and Origin of Purplish Red Diamictites of Nantuo Formation (Lower Sinian) in Yunnan. *Journal of Chengdu College of Geology*, 17(4):53—61 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q.R., 1995. The Oringin of the Sinian Nantuo Formation in Yichang County, Hubei Province. *Scientia Geologica Sinica*, 30(2):147—152 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q.R., Chu, X.L., Zhang, T.G., et al., 2002. From Global Glaciation to Snowball Earth: Recent Researches on the Neoproterozoic Glaciation Events. *Geological Journal of China Universities*, 8(4):473—481.
- Zhang, S.B., Zheng, Y.F., Wu, Y.B., et al., 2006a. Zircon Isotope Evidence for ≥ 3.5 Ga Continental Crust in the Yangtze Craton of China. *Precambrian Research*, 146(1—2):16—34. doi:10.1016/j.precamres.2006.01.002
- Zhang, S.B., Zheng, Y.F., Wu, Y.B., et al., 2006b. Zircon U-Pb Age and Hf-O Isotope Evidence for Paleoproterozoic Metamorphic Event in South China. *Precambrian Research*, 151(3—4):265—288. doi:10.1016/j.precamres.2006.08.009
- Zhang, S.B., Zheng, Y.F., Wu, Y.B., et al., 2006c. Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Evidence for 3.8 Ga Crustal Remnant and Episodic Reworking of Archean Crust in South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 252(1—2):56—71. doi:10.1016/j.epsl.2006.09.027
- Zhang, S.B., Zheng, Y.F., Zhao, Z.F., et al., 2008a. Neoproterozoic Anatexis of Archean Lithosphere: Geochemical Evidence from Felsic to Mafic Intrusions at Xiaofeng in the Yangtze Gorge, South China. *Precambrian Research*, 163(3): 210—238. doi:10.1016/j.precamres.2007.12.003
- Zhang, S.B., Zheng, Y.F., Zhao, Z.F., et al., 2009. Origin of TTG-Like Rocks from Anatexis of Ancient Lower Crust: Geochemical Evidence from Neoproterozoic Granitoids in South China. *Lithos*, 113(3):347—368. doi:10.1016/j.lithos.2009.04.024
- Zhang, S.H., Jiang, G.Q., Zhang, J.M., et al., 2005. U-Pb Sensitive High-Resolution Ion Microprobe Ages from the Doushantuo Formation in South China: Constraints on Late Neoproterozoic Glaciations. *Geology*, 33:473—476.
- Zhang, S.H., Jiang, G.Q., Han, Y.G., 2008b. The Age of the Nantuo Formation and Nantuo Glaciation in South China. *Terra Nova*, 20(4):289—294. doi:10.1111/j.1365—3121.2008.00819.x
- Zhao, G.C., Sun, M., Wilde, S.A., et al., 2003. Assembly, Accretion and Breakup of the Paleo-Mesoproterozoic Columbia Supercontinent: Records in the North China Craton. *Gondwana Research*, 6:417—434.
- Zhao, G.C., Sun, M., Wilde, S.A., et al., 2004. A Paleo-Meso-proterozoic Supercontinent: Assembly, Growth and Breakup. *Earth-Science Reviews*, 67:91—123.
- Zhao, G.C., Cawood, P.A., 2012. Precambrian Geology of China. *Precambrian Research*, 222—223, 13—54.
- Zhao, J. H., Zhou, M. F., 2008. Neoproterozoic Adakitic Plutons in the Northern Margin of the Yangtze Block, China: Partial Melting of a Thickened Lower Crust and Implications for Secular Crustal Evolution. *Lithos*, 104: 231—248.
- Zhao, J. H., Zhou, M. F., Zheng, J. P., 2013. Neoproterozoic High-K Granites Produced by Melting of Newly Formed Mafic Crust in the Huangling Region, South China. *Precambrian Research*, 233:93—107.
- Zhao, Z.Q., Xing, Y.S., Ma, G.G., Yu, W., Wang, Z.Q., 1980. Subdivision and Correlation of the Upper Precambrian in China. Tianjin Science and Technology Publishing House, Tianjin, 29—53 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, J., Griffin, W., O'Reilly, S. Y., Zhang, M., Pearson, N., Pan, Y., 2006a. Widespread Archean Basement Beneath the Yangtze Craton. *Geology*, 34:417—420.
- Zheng, Y. F., 2003. Neoproterozoic Magmatic Activity and Global Change. *Chinese Science Bulletin*, 48 (16): 1639—1656 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y.F., Fu, B., Gong, B., Li, L., 2003. Stable Isotope Geochemistry of Ultrahigh Pressure Metamorphic Rocks from the Dabie-Sulu Orogen in China: Implications for Geodynamics and Fluid Regime. *Earth-Science Reviews*, 62:105—161.
- Zheng, Y.F., Wu, Y.B., Chen, F.K., et al., 2004. Zircon U-Pb and Oxygen Isotope Evidence for a Large-Scale ^{18}O Depletion Event in Igneous Rocks during the Neoproterozoic. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 4145—4165.
- Zheng, Y.F., Zhao, Z.F., Wu, Y.B., et al., 2006b. Zircon U-Pb Age, Hf and O Isotope Constraints on Protolith Origin of Ultrahigh-Pressure Eclogite and Gneiss in the Dabie Orogen. *Chemical Geology*, 231:135—158.
- Zheng, Y. F., Zhang, S. B. 2007. Formation and Evolution of Precambrian Continental Crust in South China. *Chinese Science Bulletin*, 52(1):1—12 (in Chinese with English abstract).

- Zheng, Y.F., Zhang, S.B., Zhao, Z.F., et al., 2007. Contrasting Zircon Hf and O Isotopes in the Two Episodes of Neoproterozoic Granitoids in South China: Implications for Growth and Reworking of Continental Crust. *Lithos*, 96: 127—150.
- Zheng, Y.F., Xiao, W.J., Zhao, G., 2013. Introduction to Tectonics of China. *Gondwana Research*, 23: 1189—1206.
- Zhou, C., Tucker, R., Xiao, S., et al., 2004. New Constraints on the Ages of Neoproterozoic Glaciations in South China. *Geology*, 32: 437—440.
- Zhou, M.F., Kennedy, A.K., Sun, M., et al., 2002a. Neoproterozoic Arc-Related Mafic Intrusions along the Northern Margin of South China: Implications for the Accretion of Rodinia. *J. Geol.*, 110: 611—618.
- Zhou, M.F., Yan, D.P., Kennedy, A.K., et al., 2002b. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronological and Geochemical Evidence for Neoproterozoic Arc-Magmatism along the Western Margin of the Yangtze Block, South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 196: 51—67.
- Zhou, M., Ma, Y., Yan, D., et al., 2006b. The Yanbian Terrane (Southern Sichuan Province, SW China): A Neoproterozoic Arc Assemblage in the Western Margin of the Yangtze Block. *Precambrian Research*, 144: 19—38.
- Zhou, M.F., Zhao, X.F., Chen, W.T., et al., 2014. Proterozoic Fe-Cu Metallogeny and Supercontinental Cycles of the Southwestern Yangtze Block, Southern China and Northern Vietnam. *Earth-Science Reviews*, 139: 59—82.
- Zhu, X.Y., Chen, F., Li, S.Q., et al., 2011. Crustal Evolution of the North Qinling Terrain of the Qinling Orogen, China: Evidence from Detrital Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopic Composition. *Gondwana Research*, 20: 194—204.
- 焦文放,吴元保,彭敏,等,2009.扬子板块最古老岩石的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成.中国科学(D辑), (7): 972—978.
- 凌文黎,1996.扬子克拉通北缘元古宙基底同位素年代学和地壳增生历史: I.后河群和西乡群.地球科学, 21 (5): 491—494.
- 凌文黎,高山,张本仁,等,1997.扬子克拉通北缘早前寒武纪地壳演化—后河杂岩元素和同位素地球化学限制.矿物岩石, 17(4): 26—32.
- 凌文黎,高山,张本仁,等,2000.扬子陆核古元古代晚期构造热事件与扬子克拉通演化.科学通报, 45(4): 2343—2348.
- 凌文黎,高山,程建萍,等,2006.扬子陆核与陆缘新元古代岩浆事件对比及其构造意义——来自黄陵和汉南侵入杂岩 ELA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素年代学的约束.岩石学报, 22(2): 387—396.
- 李献华,李武显,何斌,2012.华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆聚合—裂解—观察,解释与检验.矿物岩石地球化学通报, 31(6): 543—559.
- 柳小明,高山,凌文黎,等,2005.扬子克拉通 35 亿年碎屑锆石的发现及其地质意义.自然科学进展, 15(11): 1334—1337.
- 李永飞,赖绍聪,秦江峰,等,2007.碧口火山岩系地球化学特征及 Sr-Nd-Pb 同位素组成—晋宁期扬子北缘裂解的证据.中国科学(D辑), 37(增刊1): 295—306.
- 李益龙,周汉文,李献华,等,2007.黄陵花岗岩基英云闪长岩的黑云母和角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄及其冷却曲线.岩石学报, 23(5): 1067—1074.
- 李志昌,王桂华,张自超,2002.鄂西黄陵花岗岩基同位素年龄谱.华南地质与矿产, 3: 19—28.
- 马大栓,杜绍华,肖志发,2002.黄陵花岗岩基的成因.岩石矿物学杂志, 21(2): 151—161.
- 马国干,李华芹,张自超,1984.华南地区震旦纪时限范围的研究.宜昌地质矿产研究所所刊, 8: 1—29.
- 沙庆安,刘鸿允,张树森,等,1963.长江峡东区的南沱组冰砾岩.地质科学, 4(3): 139—148.
- 吴元保,2002.北大别黄土岭麻粒岩锆石 U-Pb 离子探针定年.岩石学报, 18(3): 378—382.
- 熊庆,郑建平,余淳梅,等,2008.宜昌圈椅嘴 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素与扬子大陆古元古代克拉通化作用.科学通报, 53(2): 2782—2792.
- 邢裕盛,高振家,王自强,等,1996.中国地层典:新元古界.北京:地质出版社.
- 袁海华,张志兰,刘炜,等,1991.直接测定颗粒锆石²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄的方法.矿物岩石, 11(2): 72—79.
- 张长俊,1990.云南南沱组杂砾岩的成因及沉积相.成都地质学院学报, 17(4): 53—61.

张启锐,1995.湖北省宜昌县震旦系南沱组成因的新认识.地质科学,30(2):147—152.

郑永飞,2003.新元古代岩浆活动与全球变化.科学通报,48(16):1705—1720.

郑永飞,陈福坤,龚冰,等,2003.大别—苏鲁造山带超高压变质岩原岩性质,锆石氧同位素和 U-Pb 年龄证据.科学

通报,48(2):110—119.

郑永飞,张少兵,2007.华南前寒武纪大陆地壳的形成和演化.科学通报,52(1):1—10.

赵自强,邢裕盛,马国干,等,1980.湖北峡东震旦系.中国震旦亚界.天津:天津科学技术出版社,29—53.

* * * * *

《地球科学》

2016 年 11 月 第 41 卷 第 11 期 要目预告

东昆仑沟里地区晚奥陶世花岗闪长岩地球化学特征及其对原特提斯洋演化的制约	陈加杰等
福山凹陷西部地区原油地化特征与油源分析	卢政环等
湖南嘉禾大窝岭剖面吴家坪阶—长兴阶界线牙形石生物地层及一次碳同位素负偏	叶茜等
沙垒田凸起前古近系基岩分布及源—汇过程	刘强虎等
东准噶尔晚石炭世双峰式火山岩年代学、地球化学及其构造意义	罗婷等
南极洲普里兹湾岩石圈各向异性—海底地震仪观测	牛雄伟等
早古近纪时期陆相断陷型湖泊物质分异作用及其对“PETM”事件的响应:以渤海湾盆地济阳坳陷孔店组为例	谭先锋等
一种基于三角网的地质体三维模型切割方法	万波等