

doi: 10.12029/gc20170409

曾勇, 郭维民, 姚春彦, 陈丹丹, 刘君安. 2017. 巴西卡拉加斯地区基底杂岩的地质特征与时代约束[J]. 中国地质, 44(4): 766–780.

Zeng Yong, Guo Weimin, Yao Chunyan, Chen Dandan, Liu Jun'an. 2017. Geological features and age constraint of basement complex in Carajás province of Brazil[J]. Geology in China, 44(4): 766–780(in Chinese with English abstract).

# 巴西卡拉加斯地区基底杂岩的地质特征与时代约束

曾勇<sup>1,2</sup> 郭维民<sup>2</sup> 姚春彦<sup>2</sup> 陈丹丹<sup>2</sup> 刘君安<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 2. 南京地质调查中心, 江苏 南京 210016)

**摘要:**巴西卡拉加斯(Carajás)地区出露世界上重要且古老的太古宙变质基底,是世界上矿床类型最为丰富、资源聚集程度最高的成矿区之一,它的基底兴谷(Xingú)杂岩是南美克拉通古老的太古宙花岗岩-绿岩地体。在调查该地区基底杂岩地质特征的基础上,对侵入其中的变质深成岩体进行了年代学研究,提出了基底杂岩的组成、结构与构造的认识,认为兴谷杂岩是以麻粒岩相-角闪岩相片麻岩和混合岩为主体的古老变质岩,将其中的紫苏花岗岩和英云闪长质-奥长花岗质片麻岩从中剥离出来,进一步分解出不同时期的变质侵入体;本次在其中的片麻状花岗岩中获得了(2899±45) Ma、(2742±9.5) Ma和(2831±19) Ma的锆石 LA-ICP-MS 年龄,进一步确认兴谷杂岩的时代为中太古代,时代约束在 3.05~2.85 Ga,其中包含 3.05~2.96 Ga 和 2.96~2.85 Ga 的两个构造时段的表壳岩和 TTG 片麻岩套。

**关键词:**变质岩;巴西;卡拉加斯;兴谷杂岩;年龄

**中图分类号:**P588.3;P597<sup>+</sup>.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2017)04-0766-15

## Geological features and age constraint of basement complex in Carajás province of Brazil

ZENG Yong<sup>1,2</sup>, GUO Weimin<sup>2</sup>, YAO Chunyan<sup>2</sup>, CHEN Dandan<sup>2</sup>, LIU Jun'an<sup>2</sup>

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. Nanjing Center of China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

**Abstract:** The world's most important and older Archeozoic metamorphic basement is exposed in Carajas province of Brazil, it is known as one of the metallogenic provinces that have most abundant ore deposit types and highest extent of resource aggregation. Its basement of Xingu complex is the Southern American Craton's older Archaean greenstone-gtanite body. Based on the investigation of geological features of the basement complex, the authors studied the chronology of metamorphic pluton that intruded into the metamorphic basement and put forward the understanding concerning composition, structure and tectonics of the basement complex. It is thought to be the ancient metamorphic basement with granulite-amphibolite facies gneisses and complex as the main body. The authors peeled off the charnockite and tonalite-trondhjemitic granitic gneiss and further decomposed the metamorphic intrusions in different periods. The LA-ICP-MS ages of zircons in (2899±45) Ma, (2742±9.5) Ma and (2831±19) Ma

收稿日期:2016-08-10;改回日期:2017-04-22

基金项目:中国地质调查局地质矿产调查评价项目(1212011220909)和中央地质勘查基金境外风险勘查项目(201130D6200119)联合资助。

作者简介:曾勇,男,1965年生,教授级高级工程师,博士生,矿产普查与勘探专业,从事拉美地区区域地质构造与成矿研究工作;

E-mail: larryzeng@163.com。

were acquired in gneissic granite, and this further confirms the fact that the age of Xingu complex is Mesoarchean within 3.05–2.85 Ga, and the Xingu complex also includes two tectonic periods of supracrustal rock and gneiss suite with age of 3.05–2.96 Ga and 2.96–2.85 Ga.

**Key words:** metamorphic rocks; Brazil; Carajas; Xingu complex; age

**About the first author:** ZENG Yong, male, born in 1965, senior researcher, doctor candidate, mainly engages in the study of regional geological structure and mineralization in Latin America; E-mail: larryzeng@163.com.

**Fund support:** Supported jointly by China Geological Survey Program (No. 1212011220909) and Central Geological Exploration Fund Project (No. 201130D6200119).

## 1 引言

卡拉加斯地区位于巴西太古宙亚马逊克拉通盆地的东南部边缘,其东邻托坎廷斯(Tocantins)—巴西利亚(Brasilia)早古生代褶皱带,南接Parecis新生代盆地,西部及北部被广泛分布的中新元古代沉积地层围绕。地理位置在 $5^{\circ}30' \sim 7^{\circ}00' \text{ S}$ 、 $49^{\circ}00' \sim 51^{\circ}00' \text{ W}$ 的范围内,面积约 $10000 \text{ km}^2$ 。这一地区是世界上矿床类型最为丰富、资源聚集程度最高的成矿区之一,也是世界上重要且古老的太古宙变质基底,是世界上著名的古老的变质岩区(Santos et al., 2000; Tassinari et al., 2004),其基底杂岩(兴谷杂岩)的组成、结构、特征与时代及对区域构造演化和成矿的控制等引起众多专家学者的关注,并形成了许多研究成果(Pinheiro et al., 1997; Cordani et al., 2000; Tallarico et al., 2004; Grainger et al., 2008; Silva et al., 2008; Groves et al., 2010)。但是,基底杂岩高级变质岩系地层系统的调查与研究在这一地区仍然是个薄弱的环节,对麻粒岩—片麻岩区地质构造与组成的认识仍不全面,为基底地层系统的重建及早期地壳增生过程和构造演化历史研究带来很大的困难。

在前人研究的基础上,进一步调查了兴谷杂岩的区域地质,利用构造—岩石的方法(杨振升等, 2003; 耿元生等, 2006)将基底杂岩进一步划分为镁铁—超镁铁质岩、紫苏花岗岩、片麻岩和变质深成岩体以及变质表壳岩五个主要部分,并对侵入其中的变质深成岩体进行了年代学研究,以期客观地认识基底杂岩的特征与形成时代。

## 2 卡拉加斯地区地质背景

卡拉加斯地区前寒武纪地层出露广泛,以太古宙地层分布最广,其次为古元古代地层,边缘则为

时代较新的中新元古代和古生代地层(图1)。它由两个太古宙构造单元组成(Cordani et al., 2000),北部Itacaiúnas成矿带(ISB)和南部Rio Maria似花岗岩—绿岩地体(RMGGT)。

中太古代兴谷杂岩是卡拉加斯地区的结晶基底,由麻粒岩相—角闪岩相的片麻岩、混合花岗岩—火山沉积岩组成,表壳岩为角闪岩相的变质沉积岩,包括超镁铁质变辉长岩、辉石岩、闪长岩和透闪石片岩,变质(枕状)玄武岩及钙质石英岩,以及富镁铁角闪岩、富硫和富锰的变沉积岩、大理岩和石墨片岩组成的火山—沉积岩系,构造变形强烈,一般认为其属中太古代,年龄为 $3 \sim 2.8 \text{ Ga}$ (Grainger et al., 2008; Zappettini et al., 2005; Machado et al., 1991)。兴谷杂岩主体分布在卡拉加斯南部的Rio Maria花岗岩—绿岩地体(RMGGT)中,也称为Rio Maria花岗岩—绿岩杂岩体(Grainger et al., 2008; Zappettini et al., 2005)。

新太古代Itacaiúnas超群属于卡拉加斯地区的褶皱基底,自下而上划分为萨洛博(Igarapé Salobo)群、波露卡(Igarapé Pojuca)群、帕拉(Grão Pará)群和巴伊亚(Igarapé Bahia)群,它们是卡拉加斯地区最主要、也是世界上保存最好的新太古代火山—沉积岩序列,许多学者研究(Cordani et al., 2000; Grainger et al., 2008; Zappettini et al., 2005; Machado et al., 1991)认为火山活动的时间发生在 $2.75 \text{ Ga}$ 。新太古代清水(Águas Claras)群/弗勒斯柯河(Rio Fresco)组是浅海相—河流相沉积的砂岩和粉砂岩,不整合覆盖于之前的地层及岩石之上。

卡拉加斯地区的盖层是中元古界乌阿托马(Uatumá)群(表1),东部地区被新元古代—早古生代( $500 \sim 600 \text{ Ma}$ )的阿拉瓜依亚(Araguaia)超群沉积不整合覆盖(Grainger et al., 2008; Zappettini et al., 2005)。

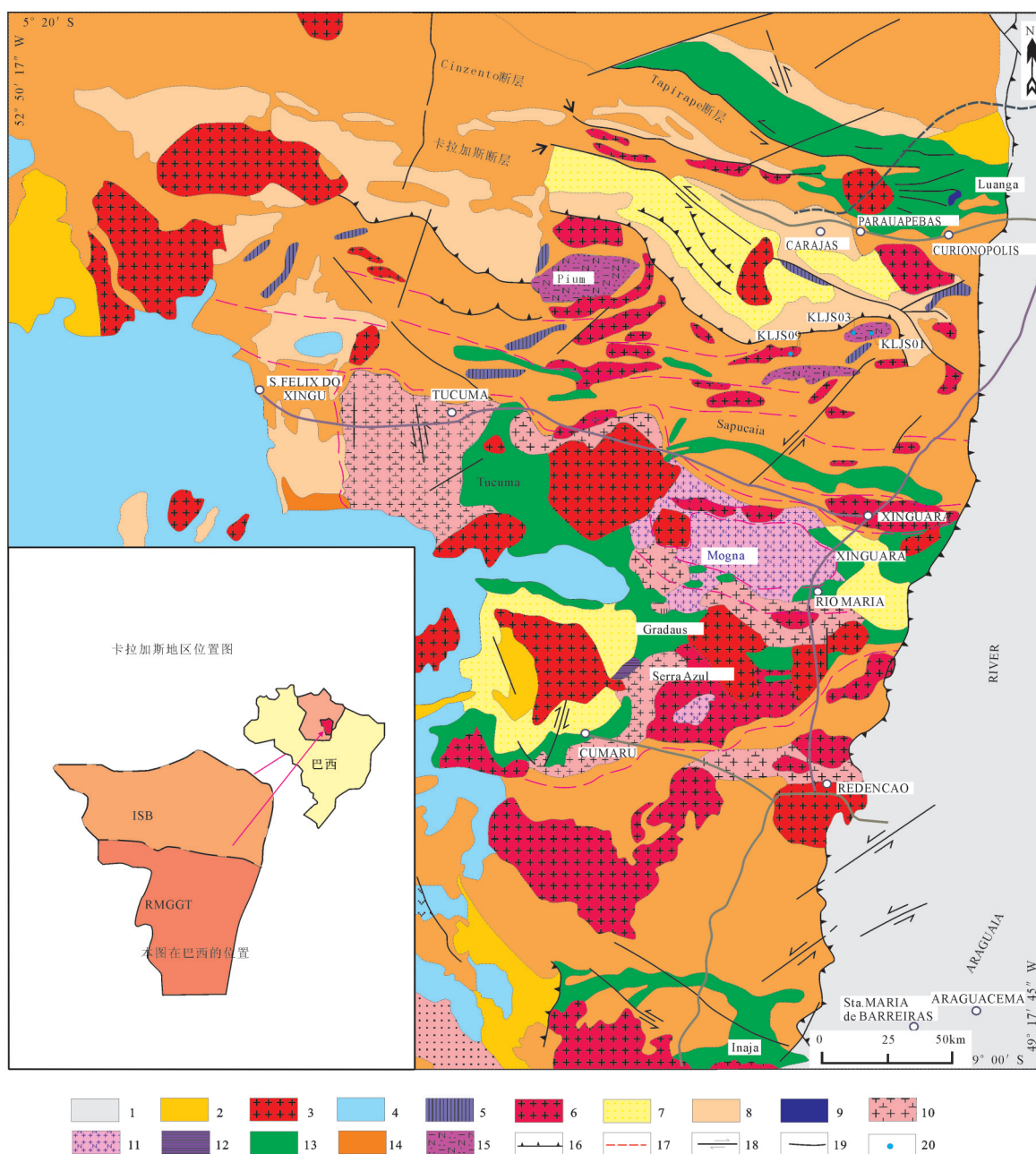


图1 巴西卡拉加斯地区地质图(据 Villas et al., 2001 修改)

1—新元古代—早古生代 Araguaia 褶皱带 (500~600 Ma); 2—Gorotire (Paredão) 组; 3—非造山花岗岩 (1.8~1.9 Ga); 4—Uatumã 超群 (1.8~2.0 Ga); 5—元古宙铁镁质/超铁镁质岩体; 6—新太古代花岗岩 (2.5~2.76 Ga); 7—Rio Fresco/Águas Claras 群 (2.68 Ga); 8—Itacaiunas 超群 (2.76 Ga); 9—新太古代铁镁质/超铁镁质岩体; Luanga (2.76 Ga); 10—中太古代花岗闪长岩: Rio Maria (2.87 Ga); 11—中太古代奥长花岗岩: Mogno (2.87 Ga); 12—中太古代层状铁镁质/超铁镁质杂岩: Serra Azul (2.97 Ga); 13—绿岩岩石: Andorinhas 超群 (2.9 Ga); 14—Xingú 杂岩 (2.9 Ga); 15—Pium 麻粒岩杂岩 (3.0 Ga); 16—逆冲断层; 17—剪切断层; 18—走滑断层; 19—一般断层; 20—样品位置

Fig.1 Geological map of Carajás mineral province in Brazil (modified after Villas et al., 2001)

1—Neoproterozoic-Early Paleozoic Araguaia Fold Belt (500~600 Ma); 2—Gorotire (Paredão) Formation; 3—Anorogenic granites (1.8~1.9 Ga); 4—Uatumã Supergroup (1.8~2.0 Ga); 5—Proterozoic mafic-ultramafic complexes; 6—Neoproterozoic granites (2.5~2.76 Ga); 7—Rio Fresco/Águas Claras Group (2.68 Ga); 8—Itacaiunas Supergroup (2.76 Ga); 9—Neoproterozoic mafic/ultramafic complexes: Luanga (2.76 Ga); 10—Mesoarchean granodiorite: Rio Maria (2.87 Ga); 11—Mesoarchean Trondhjemite: Mogno (2.87 Ga); 12—Layered Mesoarchean mafic/ultramafic complexes: Serra Azul (2.97 Ga); 13—Greenstone belt sequences: Andorinhas Supergroup (2.9 Ga); 14—Xingú complex (2.9 Ga); 15—Pium complex (3.0 Ga); 16—Thrust fault; 17—Shear fault; 18—Strike-slip fault; 19—Fault; 20—Sampling position



表1 卡拉加斯地区变质地层与岩石组成  
Table 1 Simplified stratigraphic table of Carajás mineral province

时代	地层单位	主要岩石组成
中元古代	乌阿托马 Uatumá 群	流纹岩、流纹质英安岩、安山岩、玄武岩、火山碎屑岩、砂岩、砾岩
	清水(Águas Claras)群/弗勒斯柯(Rio Fresco)组	粉砂岩、页岩、燧石岩、碳酸盐岩条带
新太古代	巴伊亚(Igarapé Bahia)群	低绿片岩相变质火山岩及沉积岩
	帕拉(Grão Pará)群	低绿片岩相玄武岩、玄武质安山岩和少量基性到中 中性火山碎屑岩,中部 50 m 厚的含白云石铁英 岩、条带状硅铁建造
	Itacaiúnas 超群	绿片岩相碎屑沉积岩
	波露卡(Igarapé Pojuca)群	片岩、片麻岩、石英岩、变火山岩、层间条带状 硅铁建造、含锰质岩
中太古代	萨洛博(Igarapé Salobo) 群	杂砂岩和浊积岩, 基性-超基性火山岩
	兴谷杂岩(原定义): 麻粒岩相-角 闪岩相的混合岩、片麻岩、角闪 岩和绿岩岩石,混 有铁镁及超铁镁质 岩石和绿片岩相的 硬砂岩、长石砂岩、 粉砂岩等	杂砂岩和浊积岩 杂砂岩和浊积岩, 大量基性-超基性火山岩
	表壳岩	Serra Azul 杂岩 层状镁铁-超镁铁质岩石
	Gradaús 群	Andorinh as 超群 浊积岩以及钙碱性火山岩
	São Félix 群	Lagoa Seca 群 基性火山岩以及超基性火山岩
	Tucumã 群	Babaçu 群
	兴谷杂岩(现含义)	主体是以麻粒岩相-角闪岩相片麻岩和混合岩为主体的变质岩, 少量富镁 铁角闪岩、富硫和富锰的变沉积岩、大理岩和石墨片岩
Pium 麻粒岩杂岩	紫苏花岗岩和紫苏花岗岩闪长岩	

注:根据(Bizzi et al., 2003)和 CPRM 完成的 Xinguaia 幅(1:250 000)、Araguaia 幅(1:1 000 000)地质图综合。

这一地区最重要的构造形迹是位于 Sapucaia 地区(图1)分割北部 Itacaiúnas 成矿带(ISB)和南部 Rio Maria 似花岗岩-绿岩地体(RMGGT)之间的巨型东西向剪切带,将卡拉加斯地区分为铁铜金成矿区和金成矿区。南北两侧为卡拉加斯向斜和走向 E-W 到 NWW-SEE 的 Carajás 断层系、Cinzento 断层系、Inaja 断层系(图1)。

区域结晶基底岩石在中太古代末期(2859±2)Ma (Moreto et al., 2011)经历了混合岩化作用,自老而新形成由麻粒岩相、角闪岩相岩石单元;新太古代的褶皱基底火山岩-沉积岩石(Itacaiúnas 超群)发生了低绿片岩相区域变质作用,局部走滑断层附近处遭受强烈剪切作用,形成角闪岩相动力变质岩石。

### 3 兴谷杂岩地质特征

#### 3.1 兴谷杂岩的名称及含义

对兴谷杂岩的最早定义,是席尔瓦等(Silva et al., 1974)命名的“兴谷岩群”,原义仅表示 Araguaia 地区的结晶基底岩石,认为兴谷岩群的岩石组成以麻粒岩相-角闪岩相片麻岩和由花岗闪长岩和英云闪长岩组成的片麻岩为主(Silva et al., 1974),并将这一地区火山沉积序列(即 Itacaiúnas 超群)下伏的片麻岩、变质花岗岩或花岗质岩石组合都划分在此岩群范围内。

后来其概念在亚马逊南部的整个克拉通被广泛推广和采用,并一度扩展到任何属于火山沉积序列(Itacaiúnas 超群或被认为是相当于 Itacaiúnas 超群)以前的地层或岩石都统称为“兴谷岩群”。尽管有学者认为这个术语已经成为对亚马逊克拉通基底岩石加深研究和深化认识的最大障碍(Bizzi et al., 2003),但它仍然被广泛使用。

#### 3.2 对兴谷杂岩认识及释义

随着卡拉加斯的地质调查的深入,兴谷岩群也逐渐解体出新的地层和岩石单位,比如 Arco Verde Mata-Surrão Cumaru、Rio Maria、Xinguaia Mogno、Parazônia、Pium、Guarantã等(Bizzi et al., 2003),有学者在卡拉加斯北部地区兴谷岩群中识别出了 TTG 片麻岩套(Macambira et al., 2001),逐渐认识并改称兴谷岩群为兴谷杂岩(Barros et al., 2001)。

巴西地调局研究(Bizzi et al., 2003)并重新定义为:兴谷杂岩是混合岩化的花岗岩-绿岩岩石组合,这个名称的应用应当仅限于卡拉加斯地区的太古宙结晶基底岩石,其东自卡拉加斯-兴谷地区,西止于尹利利(Iriri)河流域,即中巴西地盾区的 Bacajá 地区和卡拉加斯周边。兴谷杂岩的时代包括年龄 3.05~2.85 Ga 的岩石(Machado et al., 1991)。巴西地调局在 2000 年完成的 1:250 000 Xinguaia 幅和 2004 年完成的 1:1 000 000 Araguaia 幅地质图中对

其进行了解,独立分出了以Pium为代表的麻粒岩杂岩,将表壳岩归为Andorinhas超群和Tucumã群、São Félix群和Gradaús群。

本次研究认为兴谷杂岩的主体是以麻粒岩相-角闪岩相片麻岩和混合岩为主的中太古代变质岩,含有少量富镁铁角闪岩、富硫和富锰的变沉积岩、大理岩和石墨片岩。实际上它包含了Pium麻粒岩杂岩、Andorinhas绿岩岩石和Serra Azul层状超铁镁质-铁镁质杂岩等复杂的岩石类型。参照国内对高级变质的麻粒岩-片麻岩区地质调查与研究成果(沈其韩,2002;冯艳芳等,2010),将其中的紫苏花岗岩、花岗质深成岩从片麻岩中剥离出来,并进一步分解出不同时期的表壳岩和变质深成侵入体。

### 3.3 兴谷杂岩的地质特征

表壳岩系包括早期的Andorinhas超群中的绿岩岩石(年龄在3.05~2.96 Ga)和晚期的Tucumã群、São Félix群和Gradaús群。早期的Andorinhas超群由Babaçu群和Lagoa Seca群组成,Babaçu群主要由基性火山岩以及超基性火山岩组成(科马提岩、纯橄岩、辉石岩、拉斑玄武岩),底部为变辉长岩、玄武岩以及英安岩,已经获得的Sm-Nd等时线年龄为(3046±74)Ma(Souza et al., 2001);Lagoa Seca群由浊积岩以及钙碱性火山岩组成,锆石U-Pb的年龄(Pimentel et al., 1994)显示为(2979±5)Ma。晚期的Tucumã, São Félix 和 Gradaús群出现较多变质沉积岩(杂砂岩和浊积岩)的岩石,含有来自早期表壳岩的含铁沉积岩碎屑,年龄为(2868±8)Ma(Avelar et al., 1999)。基性超基性火山岩普遍存在于Tucumã群和Gradaús群中。

相伴其左右的是二期片麻岩套,它是由英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩的组分派生而来(TTG片麻岩套),主要是灰色斜长石-角闪石-黑云母片麻岩,其突出特征是具有韧性剪切形成的条带,并局部过渡到非变形的深成岩体。早期与Andorinhas超群相伴的是英云闪长岩型TTG片麻岩套,由较Andorinhas超群年龄略小的英云闪长岩和奥长花岗岩组成(2924±2)Ma(Leite, 2001)、(2957±21)Ma(Macambira et al., 2001),其中识别出如Rio Maria, Mogno, Guarantã, Mata-Surrão等变质深成岩体,它的年龄为3.05~2.96 Ga,被认为是由于石榴子石-斜长角闪岩的部分熔融或者由于俯冲环

境的榴辉岩重熔的产物(Althoff et al., 2000),代表该区域演化变迁中的原始岛弧物质。晚期与Tucumã, São Félix 和 Gradaús群相伴的花岗闪长岩型TTG片麻岩套,主要为花岗闪长岩以及二长花岗岩,代表性的如Xinguara、Água Fria、Xingú和Parazônia等变质深成岩体,这些TTG片麻岩套显示钙碱性花岗岩的特点(如Xinguara花岗岩),它们构成这一时期第二阶段的岩浆弧,指示已经存在地壳与洋壳的部分熔融并发生了较强的混染作用,年龄为2.87~2.8 Ga,其中Água Fria奥长花岗岩(2864±21)Ma(Leite, 2001),Parazônia闪长岩的年龄为2858 Ma(Pimentel et al., 1994)。

以混合岩为主的变质岩,在众多文献中均有描述(Grainger et al., 2008; Bizzi et al., 2003; Macambira et al., 2001; Barros et al., 2001),宜进一步限定仅为其中发育大量长英质脉体的条带状、片麻状的岩石,而其中夹有富镁铁角闪岩、富硫和富锰的变沉积岩、大理岩和石墨片岩的组合,可能存在孔兹岩系(沈其韩,2002)。

已经识别出的Pium和Serra Azul两个杂岩。Pium麻粒岩杂岩由紫苏花岗岩和紫苏花岗闪长岩组成,该类岩石在兴谷杂岩中还有大量分布并不时会被发现;Serra Azul杂岩以层状的科马提岩和拉斑玄武岩为代表,它与Babaçu群或Tucumã群的基性-超基性火山岩类似,其中的侵入体应单独划分。

中巴西地盾区Bacajá地区和卡拉加斯地区,兴谷杂岩在花岗岩穹隆-滑脱伸展带-走滑剪切区分布。花岗岩穹隆(Rio Maria地区)是一系列穹状隆起与穹间褶皱组合而成的花岗岩-绿岩穹隆构造,包括Xingura, Tucumã, Cumaru次级穹隆,构成面积约5000 km<sup>2</sup>的残存构造(图1)。主穹隆的中心以兴谷杂岩(片麻岩和混合岩)为主,次级穹隆的核部发育TTG片麻岩套和解体出来的变质深成岩。穹间出露Andorinhas超群等表壳岩系,绿岩岩石围绕次级穹隆的核部环带状分布,其中发育环状的伸展断层系或滑脱构造,外部(如Sapucaia地区)在前期剪切带的基础上进一步形成滑脱伸展带。穹隆的南北侧是多组近东西向巨型走滑剪切带,Carajás断层系和Cinzento断层系和Inaja断层系分割兴谷杂岩形成不同的构造区域,其中花岗质片麻岩大面积分布,东西两端上覆有后期沉积盖层,被构造改造。

综合认为兴谷杂岩是一套花岗岩-绿岩岩石组合,是以麻粒岩相-角闪岩相片麻岩和混合岩为主的变质岩,含少量富镁铁角闪岩、富硫和富锰的变沉积岩、大理岩和石墨片岩,它代表南美克拉通中太古代新生地壳形成和陆壳生长过程中多幕TTG侵入事件的产物。其中所含的镁铁-超镁铁质岩、紫苏花岗岩、片麻岩、变质深成岩体以及变质壳岩都应该单独划分,逐步解体(翟明国等, 2001)。

## 4 侵入体及其地质年龄

### 4.1 岩体及其基本特征

卡拉加斯地区经历了多期不同组分的花岗质岩浆的侵入作用(Grainger et al., 2008; Zappettini et al., 2005)。

中太古代的侵入岩包括一些非混合的片麻岩套和超铁镁质-铁镁质杂岩体以及其中识别出的变质深成岩体。早期的片麻岩套为英云闪长质片麻岩-奥长花岗质片麻岩,如 Mogno, Rio Maria, Guarantã, Mata-Surrão 等变质深成岩体,其中 Mogno 奥长花岗岩年龄为(2968±3) Ma、Rio Maria 花岗闪长岩年龄为(2872±5) Ma(Moreto et al., 2011);晚期的片麻岩套为花岗闪长质片麻岩以及二长花岗质片麻岩,如 Xinguara, Água Fria, Xingú, Parazônia 等变质深成岩体。

Pium 麻粒岩杂岩为由长英质岩石(紫苏花岗岩和紫苏花岗闪长岩)组成的浅色麻粒岩,已经获得(3002±14) Ma 的 U-Pb 锆石结晶年龄(Pidgeon et al., 2000)。Serra Azul 杂岩为层状-条带状的超铁镁质-铁镁质岩石组合,下部为科马提岩和拉斑玄武岩,上部为含有长英质火山岩的沉积岩,具有杂岩体的性质,超铁镁质侵入体的年龄为(2970±7) Ma (Pimentel et al., 1994),被 Mogno 奥长花岗岩和 Rio Maria 花岗闪长岩侵入(Moreto et al., 2011)。

新太古代侵入体包括片麻状的闪长岩、花岗岩和碱性花岗岩,仍有超铁镁质-铁镁质杂岩体。片麻状花岗岩也有两期(Moreto et al., 2011):一是 2.76~2.74 Ga 的碱性-过铝质片麻状花岗岩,如 Estrela 岩体;二是 2.57 Ga 的过碱性-准铝质片麻状花岗岩,以老 Salobo 和 Itacaiúnas 花岗岩为代表,与铜金矿的形成有关(Torresi et al., 2012)。超铁镁质-铁镁质岩体主要分布在北部 Itacaiúnas 成矿带(ISB)

和南部 Rio Maria 似花岗岩-绿岩地体(RMGGT)间的过渡区域,构造侵位于兴谷杂岩和 Andorinhas 绿岩岩石中,如 Vermelho 岩体和 Luanga 岩体,主要由(橄榄)辉长岩、苏长岩组成,伴有紫苏花岗岩、云英闪长岩、花岗闪长岩等,形成时代为 2.763 Ga (Moreto et al., 2011),富镍、镁。

古元古代沿 ISB 和 RMGGT 间的过渡区域(Sapucaia 地区)发育大量超铁镁-铁镁质杂岩岩体和碱性岩,其构造属性目前并不明了。这一时期还有数个碱性花岗岩侵入体,如 Carajás 花岗岩体和 Cigano 花岗岩体,它们属碱性的非造山花岗岩,与亚马逊克拉通区域广泛分布的元古宙 A 型花岗岩相当(Machado et al., 1991),常见云英岩化,形成了广泛的铜、铁和锡矿化。

新元古代一早古生代卡拉加斯地区不仅形成了强烈的褶皱,而且产生了大量的同褶皱花岗岩和伟晶岩,常呈复式岩体或岩体群产出,单体呈线型延伸,并与区域褶皱构造线一致,是大规模穹窿-滑脱构造的形成时期同期的产物。岩体内有时可见碳酸盐及其他岩石包体,花岗岩的年龄为 600~550 Ma(Grainger et al., 2008),如 Formiga 花岗岩,代表了该区域最年轻的花岗岩岩浆作用,接触带常具矽卡岩化,与金矿关系密切(董永观等, 2015)。

### 4.2 岩体锆石测定样品采集及测定方法

笔者等在巴西考察期间,对卡拉加斯地区东南部 Sossego 铜金矿床和东北部 Salobo 铜金矿外围的兴谷杂岩进行了调查研究(曾勇等, 2015),采集了兴谷杂岩中的紫苏花岗岩和片麻状黑云母花岗闪长岩样品 3 件(图 2)。其中 KLJS01 岩性为细粒紫苏花岗岩,位于 Parauapebas 镇通往 Sossego 铜金矿的公路上,坐标 49° 51'53.79"W、6° 24'22.21"S; KLJS03 岩性为中-细粒紫苏花岗岩,坐标 49° 55' 38.88"W、6° 24'24.72"S,它与 KLJS01 的紫苏花岗岩宏观特征相近,与 Pium 麻粒岩杂岩的浅色麻粒岩可对比;KLJS09 岩性为中粗粒片麻状黑云母花岗闪长岩,位于 Sossego 铜金矿通往 Alvo 118 铜金矿的公路上,坐标 50° 9'1.41"W、6° 28'12.58"S。

锆石样品破碎和挑选由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。用水将样品表面清洗并晾干粉碎至 80 目,然后经过水粗淘、强磁分选、电磁分选之后,在双目实体显微镜下手工挑选锆石。选





图2 巴西卡拉加斯地区花岗质侵入体宏观及微观照片

KLJS01—紫苏花岗岩, 粒状变晶结构, 主要由钾长石和石英组成, 次为斜长石, 少量斜方辉石; KLJS03—紫苏花岗岩, 中-细粒状变晶结构, 主要由钾长石、斜长石和石英组成, 少量斜方辉石; KLJS09—片麻状黑云母花岗岩闪长岩, 主要由钾长石、石英、斜长石和黑云母组成。

Pl—斜长石; Bi—黑云母; Kf—钾长石; Qz—石英; Opx—斜方辉石

Fig.2 Macroscopic and microscopic photos of metagranitic intrusion samples in Carajas province of Brazil

KLJS01—Charnockite, granoblastic texture, mainly composed of k-feldspar and quartz, plagioclase, and small amounts of orthopyroxene; KLJS03—Charnockite medium-fine granoblastic structure, mainly composed of potassium feldspar and plagioclase quartz, and a small amount of orthopyroxene; KLJS09—Gneissic biotite granodiorite, mainly composed of K-feldspar, quartz, plagioclase and biotite. Pl—Plagioclase; Bi: Biotite; Kf—K-Feldspar; Qz—Quartz; Opx—Orthopyroxene



择其中200粒锆石颗粒用于制作环氧树脂样品靶,经过打磨和抛光后,拍摄锆石反射光和透射光、阴极荧光(CL)图像(图3)。锆石微区原位U-Th-Pb同位素测定在天津地质矿产研究所同位素实验室完成,利用Thermo Fisher公司制造的Neptune激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICP MS)进行,仪器配置和试验流程参见文献(李怀坤等,2009)。与等离子体质谱仪配套的进样设备激光器为美国ESI公司生产的UP193-FX ArF准分子激光

器,激光波长193 nm,脉冲宽度5 ns。根据锆石阴极荧光照片、显微镜下反射光和透射光照片选择锆石的合适部位(图3),利用193 nm激光器对锆石进行剥蚀,采用的激光剥蚀的斑束直径为35  $\mu\text{m}$ ,激光能量密度为10~11  $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,频率为8~10 Hz,激光剥蚀物质以He为载气送入Neptune的电感耦合等离子体中。

实验获得的分析数据处理采用GJ-1作为外部锆石年龄标准进行U、Pb同位素分馏校正,采用中

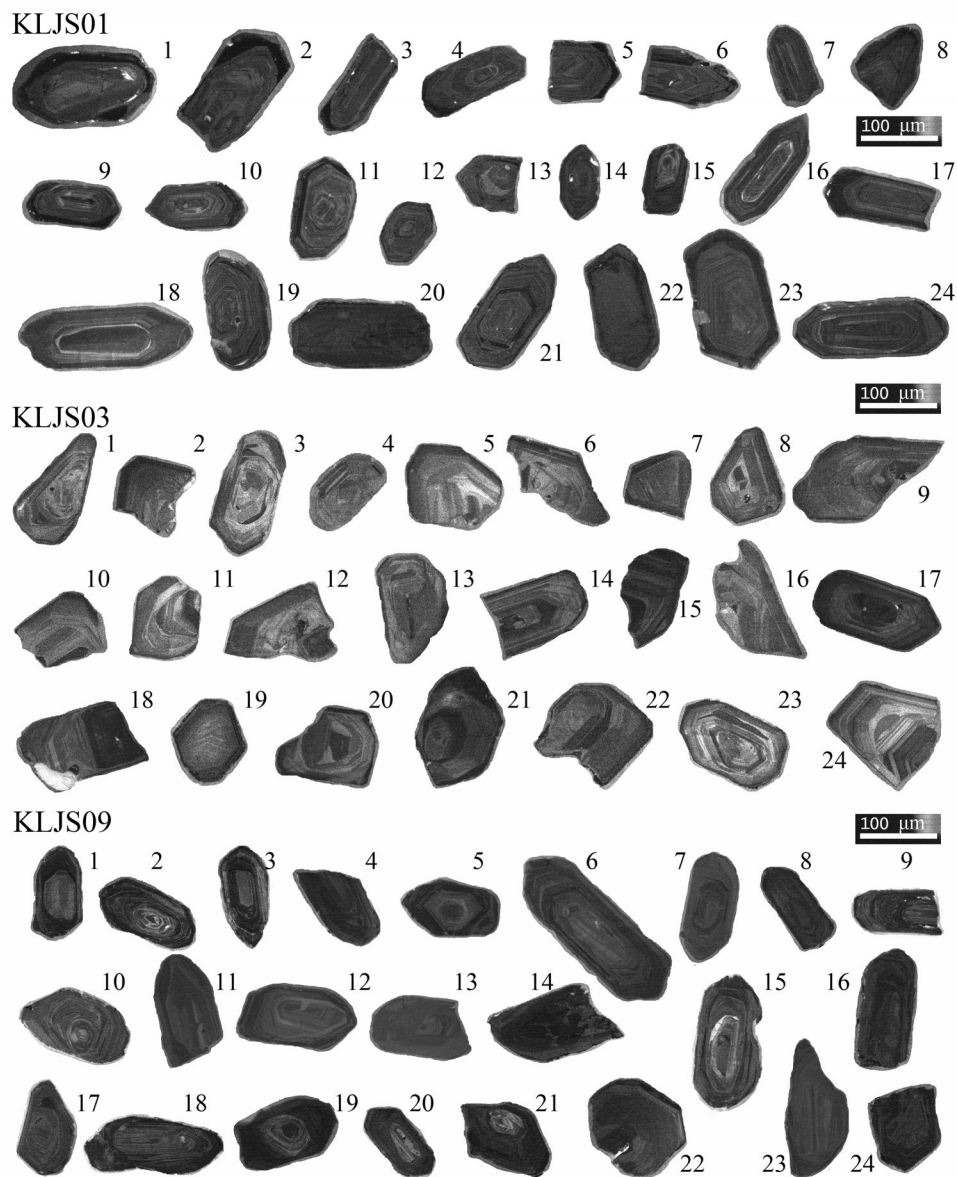


图3 巴西卡拉加斯地区花岗质侵入体测年样品锆石阴极发光图像照片

Fig.3 Zircon cathodoluminescence image photo of metagranitic intrusion samples in Carajas province of Brazil



国地质大学刘勇胜博士研发的ICP MS DataCal程序和Ludwig的Isoplot程序进行数据处理,利用NIST612玻璃标样作为外标计算锆石样品的Pb、U、Th含量。

### 4.3 岩体锆石U-Pb定年结果

对3个样品所选取的72颗锆石进行了72个测点测试,所得数据见表2。锆石颗粒阴极发光图像(图3)显示:锆石呈自形柱状,晶棱锋锐、清晰,大小60~200  $\mu\text{m}$ 不等,长宽比为1.5:1~3:1,震荡环带发育,U/Th比值较高、且 $>1$ (U/Th=2.6),显示为岩浆结晶锆石。部分锆石边部有窄的增生边,表明可能遭受过后期热事件的改造(高林志等,2010;陈海东等,2014)。

KLJS01紫苏花岗岩样品共测定了24个锆石U-Th-Pb同位素数据点(表2、图4A),除了3个测点具有较大的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄值(点6:3205 Ma,点15:3467 Ma,点22:3223 Ma),可能为继承或捕获锆石。谐和图显示在谐和线下方呈较好的不一致线,上交点年龄为(2899 $\pm$ 45) Ma,代表着岩石的形成时代。它的野外产状与Pium麻粒岩杂岩一致,为该时期卡拉加斯地区广泛分布的麻粒岩杂岩的部分。

样品KLJS03紫苏花岗岩的锆石U-Th-Pb同位素测定测年结果见表2和图4B。本样品共测定了24个U-Th-Pb同位素数据点,24个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄值相差不大,仅有一个(点19)较小,其余23个年龄值集中在2724~2763 Ma,加权平均年龄为(2738.26 $\pm$ 11) Ma。全部数据点具有非常一致的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄,谐和图显示在谐和线下方呈较好的不一致线,表明该岩石受到后期构造热事件的影响,发生了Pb丢失,不一致线上交点年龄为(2742 $\pm$ 9.5) Ma,代表着锆石冷却结晶的时代,即岩石的形成年龄。该样品与新太古代时期的碱性-过铝质片麻状花岗岩具有相同的特点,为与Estrela岩体同期的花岗岩变质形成。

样品KLJS09片麻状黑云母花岗闪长岩共测定了24个锆石U-Th-Pb同位素数据点(表2、图4C)。其中点14的年龄值非常小,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为(772 $\pm$ 5) Ma, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄为(1958 $\pm$ 18) Ma,表明后期有不同程度的Pb丢失;点20的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄为(3017 $\pm$ 16) Ma,可能为捕获或继承锆石。该样品的锆石年龄谱主要集中在2419~2830 Ma,谐和图显示在谐和线下方呈较好的不一致线,不一致

线上交点年龄为(2831 $\pm$ 19) Ma,代表着岩石的形成时代,它与这一地区中太古代TTG片麻岩套一致,是中太古代时期第二阶段的岩浆弧的一部分。

## 5 基底时代的约束与源区

### 5.1 基底时代的约束

兴谷杂岩主要是以麻粒岩相-角闪岩相片麻岩和混合岩为主的变质岩,变质程度达到高角闪岩相至麻粒岩相,其中识别出了(2968 $\pm$ 3) Ma的Mogna奥长花岗岩和(2872 $\pm$ 5) Ma的Rio Maria花岗闪长岩(Moreto et al., 2011)。代表原始岛弧的TTG片麻岩套年龄限定在3.05~2.96 Ga,第二阶段的岩浆弧的年龄为2.87~2.85 Ga,兴谷杂岩的时代约束在3.05~2.85 Ga。

从本文的测试结果分析,卡拉加斯地区兴谷杂岩中的紫苏花岗岩和花岗质片麻岩形成时代为2899~2742 Ma,基本反映了卡拉加斯地区中新太古代的主要岩浆-热事件。这与早期不同方法(全岩Rb-Sr和锆石U-Pb蒸发法)获得的年龄基本一致(Pimentel et al., 1994; Avelar et al., 1999; Moreto et al., 2011),表明这一年龄准确可靠。

兴谷杂岩时限范围,正是南美克拉通前寒武纪岩浆-热事件集中发生时期,也是卡拉加斯地区早期陆壳形成的一个重要阶段。兴谷杂岩所代表的南美克拉通基底与中国大陆华北克拉通的(微)陆块的基底有许多共同点:基底形成于中-晚太古代,各自都包含大于3.05 Ga以前的陆壳形成记录(翟明国, 2012; 万渝生等, 2015);基底呈花岗岩穹窿构造形态产出,或改造成以花岗岩穹窿-滑脱伸展带或走滑剪切的水平和近水平构造(李三忠等,2015);岩石主要为麻粒岩、片麻岩岩系和花岗岩绿岩岩石构成,含有代表板块俯冲过程原始岛弧成分的TTG片麻岩套;基底的高级变质岩-片麻岩区变质程度可达高角闪岩相-麻粒岩相,而花岗岩-绿岩岩石的变质程度较低;都经历了二阶段的克拉通化过程,最终在古元古代末(1.82~1.95 Ga)固结形成多层结构的克拉通基底(翟明国, 2012; 张传林等,2012);这些共同的特点指示着它们都是哥伦比亚(Columbia)超大陆形成过程中的原始陆块,并且经历了后期的克拉通破坏过程(赵越等, 2010)。

但是两个克拉通基底仍然存在一些差异:兴谷

表2 巴西卡拉加斯地区样品锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素年龄分析结果  
Table 2 Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotope analytical results of Crajas province of Brazil

样品分析	含量/10 <sup>-6</sup>		同位素比值										表面年龄/Ma						
	Th	U	U/Th	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1 σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1 σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1 σ	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	1 σ	<sup>232</sup> Th/ <sup>238</sup> U	1 σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1 σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1 σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1 σ
KLJS01-1	222	986	4.43	0.1899	0.0014	5.7752	0.0796	0.2206	0.0025	0.1605	0.0008	0.1772	0.0013	1121	8	1943	27	2985	19
KLJS01-2	539	1628	3.02	0.2595	0.0021	7.7202	0.1101	0.2158	0.0025	0.1589	0.0001	0.4162	0.0029	1487	12	2199	31	2950	19
KLJS01-3	473	1636	3.46	0.1937	0.0014	6.3027	0.0859	0.2359	0.0027	0.1131	0.0004	0.8267	0.0054	1142	8	2019	28	3093	18
KLJS01-4	892	2598	2.91	0.2493	0.0022	7.7009	0.1124	0.2240	0.0026	0.1409	0.0007	0.6425	0.0025	1435	13	2197	32	3010	19
KLJS01-5	431	2384	5.53	0.1380	0.0011	4.1379	0.0574	0.2175	0.0025	0.1094	0.0013	0.3688	0.0068	833	6	1662	23	2962	19
KLJS01-6	378	1445	3.83	0.1676	0.0012	5.8535	0.0809	0.2532	0.0029	0.1857	0.0007	0.4886	0.0033	999	7	1954	27	3205	18
KLJS01-7	379	794	2.10	0.3899	0.0031	11.4818	0.1595	0.2136	0.0025	0.2411	0.0050	0.3169	0.0065	2122	17	2563	36	2933	19
KLJS01-8	394	751	1.90	0.4439	0.0049	12.6423	0.2008	0.2066	0.0024	0.1359	0.0006	0.5148	0.0020	2368	26	2653	42	2879	19
KLJS01-9	267	502	1.88	0.4436	0.0053	13.4346	0.2217	0.2197	0.0025	0.1294	0.0014	0.5521	0.0035	2367	29	2711	45	2978	19
KLJS01-10	348	1122	3.23	0.2510	0.0037	7.3486	0.1421	0.2123	0.0025	0.1236	0.0022	0.4276	0.0080	1444	21	2155	42	2923	19
KLJS01-11	334	1693	5.06	0.1572	0.0011	4.6104	0.0619	0.2127	0.0025	0.1100	0.0002	0.3360	0.0008	941	6	1751	24	2926	19
KLJS01-12	372	847	2.28	0.3475	0.0029	10.1569	0.1442	0.2120	0.0024	0.1133	0.0005	0.7521	0.0073	1923	16	2449	35	2921	19
KLJS01-13	280	1360	4.85	0.1399	0.0024	4.8194	0.0916	0.2498	0.0030	0.1609	0.0026	0.3881	0.0056	844	15	1788	34	3184	19
KLJS01-14	332	640	1.93	0.4021	0.0028	12.2361	0.1666	0.2207	0.0026	0.1619	0.0014	0.6623	0.0026	2179	15	2623	36	2986	19
KLJS01-15	901	2289	2.54	0.2363	0.0022	9.7541	0.1508	0.2993	0.0035	0.4023	0.0070	0.3624	0.0037	1368	13	2412	37	3467	18
KLJS01-16	300	536	1.79	0.4909	0.0051	13.7931	0.2168	0.2038	0.0024	0.1174	0.0004	0.4628	0.0010	2575	27	2736	43	2857	19
KLJS01-17	303	1796	5.92	0.1417	0.0016	4.1374	0.0662	0.2118	0.0024	0.0930	0.0003	0.2479	0.0024	854	10	1662	27	2919	19
KLJS01-18	255	451	1.77	0.4898	0.0036	13.5140	0.1842	0.2001	0.0023	0.1117	0.0002	0.5862	0.0005	2570	19	2716	37	2827	19
KLJS01-19	371	871	2.35	0.3956	0.0028	12.1366	0.1647	0.2225	0.0026	0.1296	0.0002	0.6628	0.0002	2149	15	2615	35	2999	19
KLJS01-20	811	1774	2.19	0.3470	0.0051	11.9352	0.2213	0.2495	0.0029	1.8831	0.0144	0.0497	0.0002	1920	28	2599	48	3181	18
KLJS01-21	469	1144	2.44	0.3006	0.0051	9.3876	0.1769	0.2265	0.0027	0.1208	0.0004	0.8568	0.0060	1694	29	2377	45	3028	19
KLJS01-22	678	2809	4.14	0.1521	0.0015	5.3683	0.0818	0.2560	0.0030	0.3059	0.0016	0.2841	0.0012	913	9	1880	29	3223	18
KLJS01-23	435	1111	2.56	0.3140	0.0035	8.9723	0.1412	0.2072	0.0024	0.1325	0.0003	0.5424	0.0043	1760	20	2335	37	2884	19
KLJS01-24	326	1235	3.79	0.2157	0.0015	6.7677	0.0916	0.2276	0.0026	0.1586	0.0005	0.2495	0.0013	1259	9	2082	28	3035	18
KLJS03-1	75	125	1.66	0.5068	0.0033	13.2855	0.0978	0.1901	0.0013	0.1074	0.0003	0.8334	0.0008	2643	17	2700	20	2743	11
KLJS03-2	131	229	1.74	0.4937	0.0032	12.8543	0.0946	0.1888	0.0012	0.1073	0.0001	0.6901	0.0015	2587	17	2669	20	2732	11
KLJS03-3	95	168	1.77	0.4804	0.0032	12.574	0.0932	0.1898	0.0012	0.1055	0.0002	0.771	0.001	2529	17	2648	20	2741	11
KLJS03-4	87	144	1.66	0.501	0.0033	13.1494	0.0968	0.1904	0.0013	0.1064	0.0002	0.9315	0.0026	2618	17	2690	20	2745	11
KLJS03-5	82	141	1.71	0.5009	0.0032	13.1091	0.096	0.1898	0.0012	0.1106	0.0003	0.7261	0.0007	2617	17	2688	20	2741	11
KLJS03-6	103	178	1.72	0.5038	0.0032	13.0549	0.0954	0.188	0.0012	0.1058	0.0002	0.679	0.0004	2630	17	2684	20	2724	11
KLJS03-7	138	236	1.7	0.5044	0.0033	13.1354	0.0955	0.1889	0.0012	0.1071	0.0001	0.7174	0.0019	2633	17	2689	20	2732	11
KLJS03-8	201	334	1.66	0.5001	0.0032	13.0007	0.0941	0.1886	0.0012	0.1047	0.0001	0.9717	0.0038	2614	17	2680	19	2730	11
KLJS03-9	99	169	1.71	0.5044	0.0033	13.1981	0.0967	0.1898	0.0012	0.1053	0.0004	0.7149	0.0006	2633	17	2694	20	2740	11
KLJS03-10	85	145	1.71	0.5102	0.0032	13.4241	0.0983	0.1908	0.0013	0.1069	0.0005	0.642	0.0005	2607	17	2710	20	2749	11
KLJS03-11	146	273	1.86	0.4527	0.0028	11.7416	0.0842	0.1881	0.0012	0.1028	0.0002	0.785	0.0008	2407	15	2584	19	2726	11
KLJS03-12	148	264	1.78	0.4824	0.0031	12.6267	0.0917	0.1898	0.0012	0.1044	0.0002	0.7014	0.0004	2538	16	2652	19	2741	11
KLJS03-13	104	190	1.83	0.4635	0.0035	12.1427	0.0991	0.19	0.0012	0.0934	0.0003	0.8407	0.0055	2455	19	2615	21	2742	11
KLJS03-14	146	272	1.86	0.4589	0.003	12.002	0.0872	0.1897	0.0012	0.1033	0.0001	0.727	0.0004	2435	16	2605	19	2740	11
KLJS03-15	231	419	1.82	0.471	0.003	12.313	0.0893	0.1896	0.0012	0.1033	0.0002	0.7736	0.0006	2488	16	2629	19	2739	11



续表2

样品分析 点号	含量/ $10^{-6}$		同位素比值										表面年龄/Ma						
	Th	U	U/Th	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$1\sigma$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$
KLJS03-16	168	328	1.95	0.4299	0.0029	11.2507	0.0837	0.1898	0.0012	0.0983	0.0001	0.8099	0.0007	2305	16	2544	19	2740	11
KLJS03-17	171	303	1.77	0.4858	0.0032	12.727	0.0923	0.19	0.0012	0.1022	0.0001	0.7202	0.002	2552	17	2660	19	2742	11
KLJS03-18	111	191	1.72	0.5017	0.0032	13.3071	0.1056	0.1924	0.0013	0.1164	0.0013	0.6231	0.0004	2621	17	2702	21	2763	11
KLJS03-19	434	1013	2.34	0.4186	0.0037	9.6056	0.099	0.1664	0.0011	0.095	0.0005	0.0628	0.0003	2254	20	2398	25	2522	11
KLJS03-20	131	228	1.75	0.4853	0.0032	12.687	0.0923	0.1896	0.0012	0.1118	0.0002	0.7403	0.001	2550	17	2657	19	2739	11
KLJS03-21	295	530	1.79	0.4626	0.0031	12.0451	0.0896	0.1888	0.0012	0.1144	0.0001	0.8082	0.0008	2451	16	2608	19	2732	11
KLJS03-22	268	449	1.67	0.4871	0.0031	12.6576	0.0906	0.1885	0.0012	0.1356	0.0009	0.8096	0.0059	2558	16	2655	19	2729	11
KLJS03-23	195	342	1.76	0.4646	0.0031	12.0795	0.0898	0.1886	0.0012	0.1339	0.0003	0.7735	0.0038	2460	16	2611	19	2730	11
KLJS03-24	101	173	1.7	0.4997	0.0032	13.0771	0.0952	0.1898	0.0012	0.1441	0.0003	0.5783	0.0014	2612	17	2685	20	2740	11
KLJS09-1	222	743	3.35	0.2591	0.0035	6.0916	0.1081	0.1705	0.0017	0.0862	0.0002	0.4753	0.0094	1485	20	1989	35	2563	17
KLJS09-2	395	1051	2.66	0.3265	0.002	8.3133	0.0839	0.1847	0.0018	0.0891	0.0002	0.5258	0.0039	1821	11	2266	23	2695	16
KLJS09-3	299	1344	4.5	0.2048	0.0024	4.5115	0.0745	0.1598	0.0016	0.0574	0.0003	0.3268	0.0039	1201	14	1733	29	2453	17
KLJS09-4	749	1971	2.63	0.3511	0.003	9.2766	0.1093	0.1916	0.0019	0.3427	0.0054	0.0592	0.0011	1940	17	2366	28	2756	16
KLJS09-5	293	1240	4.23	0.2001	0.0013	4.32	0.0441	0.1566	0.0015	0.0453	0.0002	0.9086	0.0084	1176	8	1697	17	2419	17
KLJS09-6	502	2046	4.07	0.2228	0.0015	5.0336	0.0526	0.1639	0.0016	0.0429	0.0001	0.5576	0.005	1297	9	1825	19	2496	17
KLJS09-7	527	1010	1.92	0.4724	0.0031	12.8188	0.1308	0.1968	0.0019	0.0701	0.0003	0.515	0.0056	2494	17	2666	27	2800	16
KLJS09-8	315	459	1.46	0.5544	0.0042	15.3214	0.1658	0.2004	0.002	0.1058	0.0003	1.198	0.0013	2843	21	2835	31	2830	16
KLJS09-9	324	1435	4.43	0.2157	0.0014	4.8837	0.0499	0.1642	0.0016	0.124	0.0005	0.076	0.0003	1259	8	1799	18	2499	17
KLJS09-10	232	489	2.1	0.4264	0.0043	11.317	0.1459	0.1925	0.0019	0.1025	0.0004	0.3891	0.0017	2290	23	2550	33	2763	16
KLJS09-11	251	406	1.62	0.5082	0.0039	13.7761	0.1512	0.1966	0.0019	0.1078	0.0003	0.9679	0.0026	2649	20	2734	30	2798	16
KLJS09-12	151	240	1.59	0.5183	0.0051	13.9412	0.1797	0.1951	0.0019	0.1058	0.0003	1.0001	0.0059	2692	26	2746	35	2786	16
KLJS09-13	327	1444	4.41	0.2153	0.0013	4.7089	0.0469	0.1586	0.0016	0.1366	0.0004	0.0887	0.0002	1257	8	1769	18	2441	17
KLJS09-14	620	4519	7.29	0.1273	0.0008	2.1083	0.0216	0.1201	0.0012	0.0605	0.0003	0.2605	0.0029	772	5	1152	12	1958	18
KLJS09-15	205	458	2.23	0.403	0.0043	11.0999	0.1525	0.1997	0.002	0.097	0.0004	0.3383	0.0029	2183	23	2532	35	2824	16
KLJS09-16	207	575	2.79	0.3257	0.0024	7.9828	0.0889	0.1778	0.0018	0.1661	0.0007	0.1848	0.003	1817	13	2229	25	2632	16
KLJS09-17	722	1377	1.91	0.4718	0.0029	12.9716	0.1294	0.1994	0.002	0.1364	0.0004	0.2856	0.0014	2492	16	2678	27	2821	16
KLJS09-18	329	954	2.9	0.2684	0.0022	6.5467	0.0746	0.1769	0.0018	0.0831	0.0004	0.984	0.0082	1533	13	2052	23	2624	16
KLJS09-19	387	1255	3.25	0.2962	0.002	7.24	0.0758	0.1773	0.0017	0.1109	0.0002	0.0628	0.0004	1673	11	2141	22	2627	16
KLJS09-20	1203	2374	1.97	0.4374	0.0029	13.5674	0.1388	0.225	0.0022	0.4261	0.0037	0.1139	0.0015	2339	16	2720	28	3017	16
KLJS09-21	344	1026	2.98	0.3021	0.0021	7.5993	0.0799	0.1824	0.0018	0.1118	0.0005	0.2658	0.0012	1702	12	2185	23	2675	16
KLJS09-22	141	207	1.47	0.542	0.0041	14.9825	0.1625	0.2005	0.002	0.1171	0.0002	1.1611	0.004	2792	21	2814	31	2830	16
KLJS09-23	310	623	2.01	0.4408	0.0057	11.8443	0.1827	0.1949	0.0019	0.1249	0.0009	0.3837	0.021	2354	30	2592	40	2784	16
KLJS09-24	371	962	2.59	0.3412	0.0027	8.7157	0.0983	0.1852	0.0018	0.1495	0.0006	0.2688	0.0031	1893	15	2309	26	2700	16

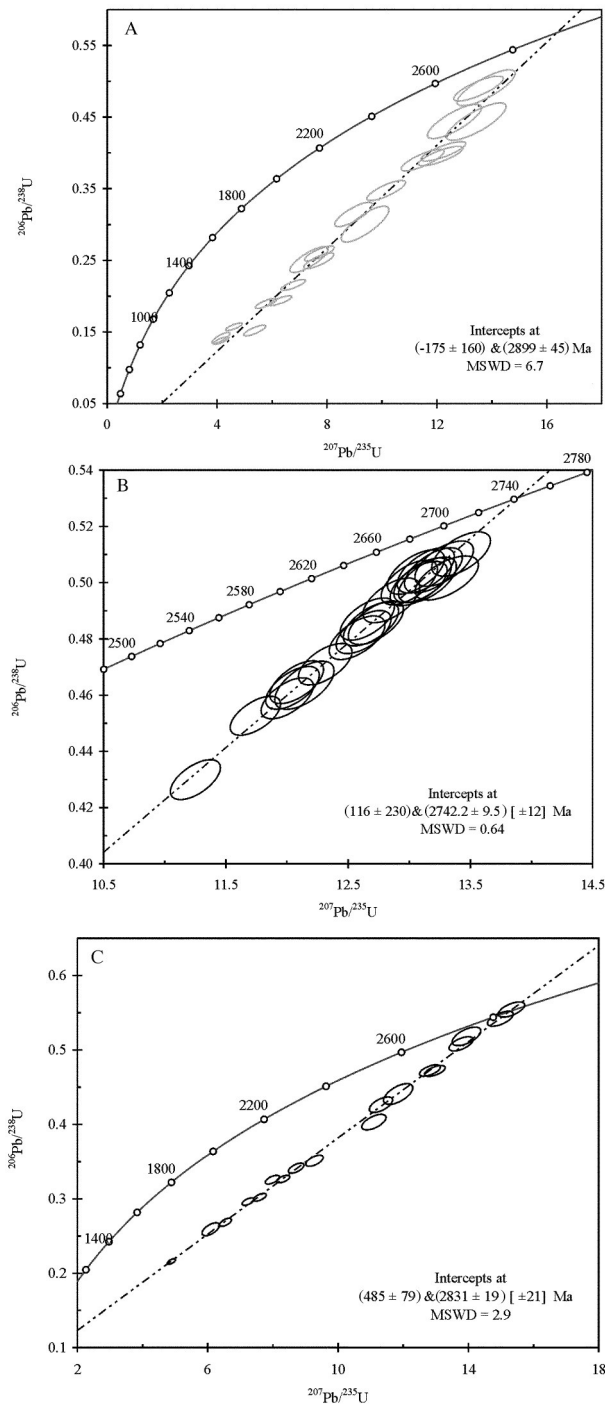


图4 巴西卡拉加斯地区花岗质侵入体锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄谱和图  
 A—KLJS01 紫苏花岗岩; B—KLJS03 紫苏花岗岩;  
 C—KLJS09 片麻状黑云母花岗岩闪长岩  
 Fig.4 Zircon LA-ICP-MS U-Pb age concordia diagram of metagranitic intrusion in Carajas province of Brazil  
 KLJS01—Charnockite(A); KLJS03—Charnockite(B);  
 KLJS09—Gneissic biotite granodiorite(C)

杂岩形成时代(3.05~2.85 Ga)较华北克拉通的太华杂岩、曹庄杂岩、阜平杂岩等总体较老;兴谷杂岩中代表陆壳形成和生长的TTG片麻岩套的年龄为3.0 Ga、2.86 Ga,而华北克拉通的TTG片麻岩套的年龄高峰期在2.7 Ga、2.5 Ga;卡拉加斯地区典型的火山沉积岩序列时间发生在2.75 Ga,华北克拉通在2.5~2.6 Ga间发生大规模的火山活动,初步克拉通化和大规模BIF形成时间相差1~2.5 Ga。这种时间上的差异正是南美克拉通、华北克拉通共同参与全球板块构造活动相互影响的结果。

### 5.2 碎屑物质的源区

作为世界上最早最著名的太古宙岩石出露区,卡拉加斯地区早前太古代岩石的年代学研究已经有很多详细的描述,不同时代的前寒武纪碎屑岩中发现大量大于3.05 Ga的锆石(Santos et al., 2000; Tassinari et al., 2004; Cordani et al., 2000)。从Pium麻粒岩杂岩获得的锆石SHRIMP U-Pb年龄为(3002±14) Ma(Pidgeon et al., 2000)的结果表明,卡拉加斯地区还有更古老的基底存在。

由于早于3002 Ma的岩石还从未在地表发现,一般认为这一地区的碎屑物质物源的主体应来自3.05~2.85 Ga的岩石(Macambira et al., 2001)。有关碎屑锆石的研究证实这一地区变质沉积岩的形成过程中存在着比3.05 Ga更古老的岩石侵蚀作用,如Macambira和Lancelo在Rio Maria和卡拉加斯获得3.19 Ga的碎屑锆石年龄(Macambira et al., 2001);Machado和Macambira分别在Musa花岗岩和Jamon花岗岩中的继承锆石中获得了3.20 Ga和3.13 Ga的年龄(Machado et al., 1991; Macambira et al., 2001);目前报道(Bizzi et al., 2003; Teixeira et al., 2002)的最古老继承锆石的时代分别是(3679±8) Ma和(3594±2) Ma(始太古代)。

本次在KLJS01-03样品得到了继承或捕获锆石年龄3205~3223 Ma、最老3467 Ma的结果,进一步确认这一地区有比3.05 Ga更加古老的基底存在,并可能存在大于3205 Ma的古太古代基底和碎屑物质源区。

## 6 结 论

综合前人研究成果及本次调查情况和年代学资料,得出以下主要结论:



(1)兴谷杂岩是以麻粒岩相-片麻岩和混合岩为主体的古老变质岩,含有大量未完全解体的变质深成岩体,还有必要在现有工作基础上将其进一步分解出镁铁-超镁铁质岩、紫苏花岗岩、片麻岩、变质深成岩体以及变质表壳岩等岩石单元。

(2)兴谷杂岩形成于3.05~2.85 Ga期间,可进一步分出3.05~2.96 Ga和为2.96~2.85 Ga的两个构造时段的表壳岩和TTG片麻岩套,在Rio Maria地区,它已经解体成为一个以高级变质岩-片麻岩区为主的岩石构造单元。

(3)卡拉加斯地区应该存在比3.05 Ga更古老的变质岩石单元,可能是大于3.205 Ga的古太古代基底,如果存在的话它应该不是兴谷杂岩,而是另一个更古老的构造岩石单元。

**致谢:**感谢中国地质大学李建威教授、中国地质科学院地质研究所卢民杰研究员在研究过程中给予的精心指导;感谢审稿专家及责任编辑对本文提出的修改意见;野外工作得到湖南有色地质矿产局巴西湘色矿业公司陈小龙高级工程师和Jorge Luiz Oliveira da Silva工程师的真诚协作与大力支持;南京地质调查中心邢光福博士、高天山博士、邱永泉研究员对成文提出了指导意见,在此一并致以诚挚的谢意。

## References:

- Avelar V G, Lafon J M, Correia J F C, Macambira M J B. 1999. O magmatismo arqueano da região de Tucumã, Província Mineral de Carajás: Novos dados geocronológicos[J]. *Revista Brasileira de Geociências*, 29(4): 453-460.
- Althoff F, Barbey P and Boullier A M. 2000. 2.8-3.0 Ga plutonism and deformation in the SE Amazonian raton: the Archaean granitoids of Marajoara(Carajás Mineral Province, Brazil) [J]. *Precambrian Research*, 04(3/4): 187-206.
- Barros C E M, Macambira M J B e Barbey P. 2001. Idade de zircão do Complexo Granítico Estrela: Relações entre magmatismo, deformação e metamorfismo na Província Metalogenética Carajás. In: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 7, Belém[CD]. 17-20.
- Bizzi L A, Schobbenhaus C, Vidotti R M, e Gonçalves J H. (eds). 2003. *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*[M]. Brasília: CPRM, 26-35: 177-186.
- Chen Haidong, Li Jiao, Jing Yaozu, et al. 2014. Zircon U-Pb dating of the hypersthene-plagioclase granulite in Liangcheng area of central Inner Mongolia and its geological significance[J]. *Geology in China*, 41(4): 1136-1142(in Chinese with English abstract).
- Cordani U G, Mila E J, Filho A T. 2000. Tectonic Evolution of South America[C]//Rio de Janeiro: Publication of the 31th International Geological Congress, 1-856.
- Dong Yongguan, Zeng Yong, Yao Chunyan, Gao Weihua, Guo Weimin. 2015. Geological tectonic evolution and mineralization of metallic minerals in the South America platform[J]. *East China Geology*, 2: 116-122 (in Chinese with English abstract).
- Feng Yanfang, Deng Jinfu, Wang Shijin, Xiao Qinghui, Lu Songnian, Liu Cui, Cui Xianye, Gong Fanying, Zhen Shimin, Jia Delong, Qi Fanyu. 2010. The recognition of the magnesian andesitic series (MA) in the Precambrian granitic rocks in western Shandong Province and the continental crustal growth[J]. *Geology in China*, 37(4): 1119-1129(in Chinese with English abstract).
- Gao Linzhi, Ding Xiaozhong, Cao Qian, et al. 2010. New Geological time scale of Late Precambrian in China and geochronology[J]. *Geology in China*, 37(4): 1014-1020 (in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng, Wang Xinshe, Shen Qihan, Wu Chunming. 2006. Redefinition of the Alxa Group-complex(Precambrian metamorphic basement) in the Alxa area, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 33(1): 138-145(in Chinese with English abstract).
- Grainger C J, Groves D I, Tallarico F H B, Fletcher I R. 2008. Metallogenesis of the Carajás Mineral Province, Southern Amazon Craton, Brazil: Varying styles of Archean through Paleoproterozoic to Neoproterozoic base and precious-metal mineralization [J]. *Ore Geology Reviews*, 33: 451-489.
- Groves D I, Bierlein F P, Meinert L D, Hitzman M W. 2010. Iron Oxide Copper-Gold (IOCG) Deposits through Earth History: Implications for Origin, Lithospheric Setting, and Distinction from Other Epigenetic Iron Oxide Deposits [J]. *Economic Geology*, 105: 641-654.
- Leite A A S. 2001. Geoquímica, petrogênese e evolução estrutural dos granitóides arqueanos da região de Xinguara, SE do Cráton Amazônico[D]. Centro de Geociências. Belém, Universidade Federal do Pará. PhD thesis, 1-330.
- Li Huaikun, Geng Jianzhen, Hao Shuang, Zhang Yongqing, Li Huiming. 2009. The isotope age study of U-Pb in zircon through LA-MC-ICP MS[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(Supp.): 600-601 (in Chinese).
- Li Sanzhong, Li Xiyao, Dai Liming, Liu Kin, Zhang Zhen, Zhao Shujuan, Guo Lingli, Zhao Guochun, Zhang Guowei. 2015. Precambrian geodynamics ( VI ): Formation of North China Craton[J]. *Earth Science Frontiers*. 6: 77-96 (in Chinese with English abstract).
- Macambira M J B, Barros C E, Silva D C C, Santos M C C. 2001.

- Novos dados geológicos e geocronológicos para a região norte da Província Carajás: Evidências para o estabelecimento do limite Arqueano–Paleoproterozóico no sudeste do Cráton Amazonas. In: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 7, Belém[CD], 68–71.
- Machado N, Lindenmayer Z, Krogh T E, Lindenmayer D. 1991. U–Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil [J]. Precambrian Research, 49: 329–354.
- Moreto C P N, Lena V S and Monteiro R P. 2011. Mesoarchean (3.0 and 2.86 Ga) host rocks of the iron oxide–Cu–Au Bacaba deposit, Carajás Mineral Province: U–Pb geochronology and metallogenetic implications [J]. Mineralium Deposita, 46: 789–811.
- Pidgeon R, Macambira M J B, Lafon J M. 2000. Th–U–Pb isotopic systems and internal structures from an enderbite from the Pium Complex, Carajás Province, Brazil: evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of the enderbite [J]. Chem. Geology, 166: 159–171.
- Pimentel M M, Machado N e Lobato L M. 1994. Geocronologia U/Pb de rochas graníticas e gnáissicas da região de Lagoa Real, Bahia, e implicações para a idade da mineralização de Urânio[C]//SBG. Congresso Brasileiro de Geologia, 38, Balneário Camboriú, Boletim dos Resumos Expandidos, (2): 389–390.
- Pinheiro R V L and Holdsworth R E. 1997. Reactivation of Archean strike–slip fault systems, Amazon region, Brazil [J]. Journal of the Geological Society, 154: 99–103.
- Santos J O S, Hartmann L A. 2000. A new understanding of the provinces of the Amazon craton based on integration of field mapping and U–Pb and Sm–Nd geochronology [J]. Gondwana Research, 3(4): 453–488.
- Shen Qihan. 2002. Some important aspects in the study of Archean stratigraphy[J]. Geology in China, 29(29): 113–116(in Chinese with English abstract).
- Silva G G, Lima M I C, Andrade A R F, Issler R S, Guimarães G. 1974. Geologia das folhas SB.22 Araguaia e Parte de SC.22 Tocantins. In: Levantamento de Recursos Naturais. Vol. 4, Programa de Integração Nacional [R]. Rio de Janeiro: DNPM. Projeto RADAM, 91–143.
- Silva R C F, Lobato L M, Rosiere C A, Hagemann S, Baars F J. 2008. A hydrothermal origin for the Jaspilite–hosted, giant Serra Norte iron ore deposits in the Carajás Mineral Province, Para State, Brazil[J]. Reviews in Economic Geology, 15: 255–290.
- Souza Z S, Potrel A, Lafon J M, Althoff F J, Pimentel M M, Dall’Agnol R, Oliveira C G. 2001. Nd, Pb and Sr isotopes in the Identidade Belt, an Archean greenstone belt of the Rio Maria region (Carajás Province, Brazil): implications for the Archean geodynamic evolution of the Amazonian Craton [J]. Precambrian Research, 109: 293–315.
- Tallarico F H B, McNaughton N J, Groves D I, Fletcher I R, Figueiredo B R. 2004. Geological and SHRIMP II U–Pb constraints on the age and origin of the Breves Cu–Au–(W–Bi–Sn) deposit, Carajás, Brazil [J]. Mineralium Deposita, 39: 68–86.
- Tassinari C C G e Macambira M J B. 2004. Evolução tectônica do Cráton Amazônico. Geologia do Continente Sul Americano[M]. São Paulo: BECA, 471–486.
- Teixeira N P, Bettencourt J S, Moura C A V, Dall’Agnol R, Macambira E M B. 2002. Archean crustal sources for Paleoproterozoic tin–mineralized granites in the Carajás Province, SSE Para, Brazil: Pb–Pb geochronology and Nd isotope geochemistry [J]. Precambrian Research, 257–275.
- Torresi I, Xavier R P and Bortholoto D F A. 2012. Hydrothermal alteration, fluid inclusions and stable isotope systematics of the Alvo 118 iron oxide–copper–gold deposit, Carajás Mineral Province (Brazil): Implications for ore genesis [J]. Mineralium Deposita, 47: 299–323.
- Villas R N and Santos M D. 2001. Gold deposits of the Carajás mineral province: deposit types and metallogenesis[J]. Mineralium Deposita, 36: 300–331.
- Wan Yusheng, Dong Chunyan, Xie Hangqiang, Liu Shoujie, Ma Mingzhu, Xie Shiwen, Ren Peng, Sun Huiyi, Liu Dunyi. 2015. Some Progress in the Study of Archean Basement of the North China Craton[J]. Acta Geoscientica Sinica, 6: 686–701(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhensheng, Xu Zhongyuan, Liu Zhenghong, Peng Xiangdon. 2003. Consideration and practice of the construction of litho stratigraphic systems in high–grade metamorphic terrains: A case study in the Daqingshan–Wulashan area[J]. Geology in China, 30 (4): 343–351(in Chinese with English abstract).
- Zeng Yong, Guo Weimin, Xiang Hongli, Yao Chunyan, Dong Yongguan. 2015. Massive Fe–Cu–Au Polymetallic Metallogenesis in Carajás Mineral Province of Brazil[J]. Mineral Deposits, 34(4): 828–841(in Chinese with English abstract).
- Zappettini E O, Kilibarda C R, Schobbenhaus C, et al. 2005. Metallogenic map of South America at the scale of 1: 5000000[M]. Buenos Aires: The Commission for the Geological Map of the World, 1–274.
- Zhai Mingguo. 2012. Evolution of the North China Craton and Early Plate Tectonics [J]. Acta Geologica Sinica, 86(09): 1335–1349 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo and Liu Wenjun. 2001. The formation of granulite and its contribution to evolution of the continental crust[J]. Acta Petrologica Sinica, 17(1): 28–39(in Chinese with English abstract).
- Zhang chuanlin, Li Huaikun and Wang Hongyan. 2012. A review on Precambrian tectonic evolution of Tarim block[J]. Geological Review, 58(5): 923–936(in Chinese with English abstract).



Zhao Yue, Chen Bin, Zhang Shuanhong, et al. Pre-Yanshanian geological events in the northern margin of the North China Craton and its adjacent areas[J]. *Geology in China*, 2010, 37(4): 900-915 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 陈海东, 黎娇, 景耀祖, 鲁宁, 张国忠. 2014. 内蒙古中部凉城地区紫苏斜长麻粒岩锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *中国地质*, 41(4): 1136-1142.
- 董永观, 曾勇, 姚春彦, 高卫华, 郭维民. 2015. 南美地台地质构造演化与主要金属矿产成矿作用[J]. *华东地质*, 2: 116-122.
- 冯艳芳, 邓晋福, 王世进, 肖庆辉, 陆松年, 刘翠, 崔显岳, 公凡影, 甄世民, 贾德龙, 齐钊宇. 2010. 鲁西地区早前寒武纪花岗岩类中镁安山质岩石系列(MA)的识别及大陆地壳生长[J]. *中国地质*, 37(4): 1119-1129.
- 高林志, 丁孝忠, 曹茜, 张传恒. 2010. 中国晚前寒武纪年表和年代地层序列[J]. *中国地质*, 37(4): 1014-1020.
- 耿元生, 王新社, 沈其韩, 吴春明. 2006. 内蒙古阿拉善地区前寒武纪变质基底阿拉善群的再厘定[J]. *中国地质*, 33(1): 138-145.
- 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 张永清, 李惠民. 2009. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICP MS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究[J]. *矿物学报*, 29(S1): 600-601.
- 李三忠, 李玺瑶, 戴黎明, 刘鑫, 张臻, 赵淑娟, 郭玲莉, 赵国春, 张国伟. 2015. 前寒武纪地球动力学(VI): 华北克拉通形成[J]. *地学前缘*, 6: 77-96.
- 沈其韩. 2002. 太古宙地层研究中应注意的几个问题[J]. *中国地质*, 29(29): 113-116.
- 万渝生, 董春艳, 颀颀强, 刘守偈, 马铭株, 谢士稳, 任鹏, 孙会一, 刘敦一. 2015. 华北克拉通太古宙研究若干进展[J]. *地球学报*, 6: 686-701.
- 杨振升, 徐仲元, 刘正宏, 彭向东. 2003. 高级变质区岩石地层系统建立的思考与实践——以内蒙古大青山—乌拉山地区为例[J]. *中国地质*, 30(4): 343-351.
- 曾勇, 郭维民, 项红莉, 姚春彦, 董永观. 2015. 巴西卡拉加斯地区大规模铁-铜-金多金属成矿作用[J]. *矿床地质*, 34(4): 828-841.
- 翟明国. 2012. 华北克拉通的形成以及早期板块构造[J]. *地质学报*, 86(09): 1335-1349.
- 翟明国, 刘文军. 2001. 麻粒岩的形成及其对大陆地壳演化的贡献[J]. *岩石学报*, 17(1): 28-39.
- 张传林, 李怀坤, 王洪燕. 2012. 塔里木地块前寒武纪地质研究进展评述[J]. *地质论评*, 58(5): 923-936.
- 赵越, 陈斌, 张拴宏, 刘建民, 胡健民, 刘健, 裴军令. 2010. 华北克拉通北缘及邻区前燕山期主要地质事件[J]. *中国地质*, 37(4): 900-915.