

文章编号:1672-6561(2015)05-0017-14

## 扬子地块西缘康滇地区古一中元古代 地层和岩浆活动研究进展

范宏鹏<sup>1</sup>,朱维光<sup>1</sup>,陈才杰<sup>2</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室,贵州 贵阳 550081;

2. 四川省冶金地质勘查局 601 大队,四川 攀枝花 617027)

**摘要:**康滇地区位于扬子地块西缘,其古一中元古代地层主要由一系列变质沉积岩和变质火山岩组成。康滇地区独特的构造演化历史和成矿作用,使其成为研究扬子地块前寒武纪构造演化的热点地区。随着各种定年技术的发展,该地区近年来有大量精确的年代学研究成果被报道。总结和评述了有关扬子地块西缘康滇地区古一中元古代地层层序、岩浆活动和成矿作用以及构造演化的最新研究成果。虽然目前在该区没有找到有太古宇—古元古界底部地层出露,但大量碎屑锆石年代学数据指示康滇地区很可能广泛分布着太古宙—古元古代基底地层;康滇地区乃至整个扬子地块分布的古一中元古代岩浆活动,指示扬子地块在 1.5~2.0 Ga 可能经历了碰撞造山到伸展的构造演化过程,而这一过程恰好与 Columbia 超大陆旋回一致。因此,扬子地块很可能就是古一中元古代 Columbia 超大陆的组成部分。

**关键词:**地层层序;岩浆活动;古一中元古代;成矿作用;构造演化;Columbia 超大陆;扬子地块  
中图分类号:P535;P588.1 文献标志码:A

### Review on Paleo-Mesoproterozoic Strata and Magmation in the Kangdian Area of the Western Margin of the Yangtze Block

FAN Hong-peng<sup>1</sup>, ZHU Wei-guang<sup>1</sup>, CHEN Cai-jie<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, Guizhou, China; 2. No. 601 Geological Team, Sichuan Bureau of Metallurgical Geology and Mineral Exploration, Panzhihua 617027, Sichuan, China)

**Abstract:** Kangdian area, which is located in the western margin of the Yangtze Block, is important for studying the Precambrian tectonic evolution of the Yangtze Block due to its unique history of tectonic evolution and mineralization. The Paleo-Mesoproterozoic strata in this area are meta-volcanic and meta-sedimentary rocks. With the development of various dating techniques, a large number of accurate geochronological results have been reported from this area in recent years. Paleo-Mesoproterozoic stratigraphic sequence, magmation, mineralization and tectonic evolution in the Kangdian area of the western margin of the Yangtze Block were reviewed. Archean-Early Paleoproterozoic rocks are not outcropped in the Kangdian area, but a lot of detrital zircon geochronology data show that the distribution of Archean-Early Paleoproterozoic basement strata is probably widespread in this area; Paleo-Mesoproterozoic magmation in the Kangdian area

收稿日期:2015-04-03

基金项目:国家自然科学基金项目(41403044,41273049);中国地质调查局地质大调查项目(1212011220718)

作者简介:范宏鹏(1987-),男,安徽安庆人,助理研究员,理学博士,E-mail:fanhongpeng@vip.gyig.ac.cn。

通讯作者:朱维光(1968-),男,广东梅州人,研究员,博士研究生导师,理学博士,E-mail:zhuweiguang@vip.gyig.ac.cn。

and even the whole Yangtze Block shows that the tectonic evolution history from collisional orogenesis to extension happens during 1.5-2.0 Ga in the Yangtze Block, which is consistent with the cycle of Columbia supercontinent. Therefore, Yangtze Block may be a component of the Paleo-Mesoproterozoic Columbia supercontinent.

**Key words:** stratigraphic sequence; magmatism; Paleo-Mesoproterozoic; mineralization; tectonic evolution; Columbia supercontinent; Yangtze Block

## 0 引言

扬子地块及其东南侧的华夏地块组成了现今的华南板块,这两个地块被晚中元古代—早新元古代的四堡造山带分割<sup>[1]</sup>。扬子地块和华夏地块的汇聚时限还存在争议,其可能是 900~1 000 Ma<sup>[2-5]</sup> 或者 820~870 Ma<sup>[6-9]</sup>。

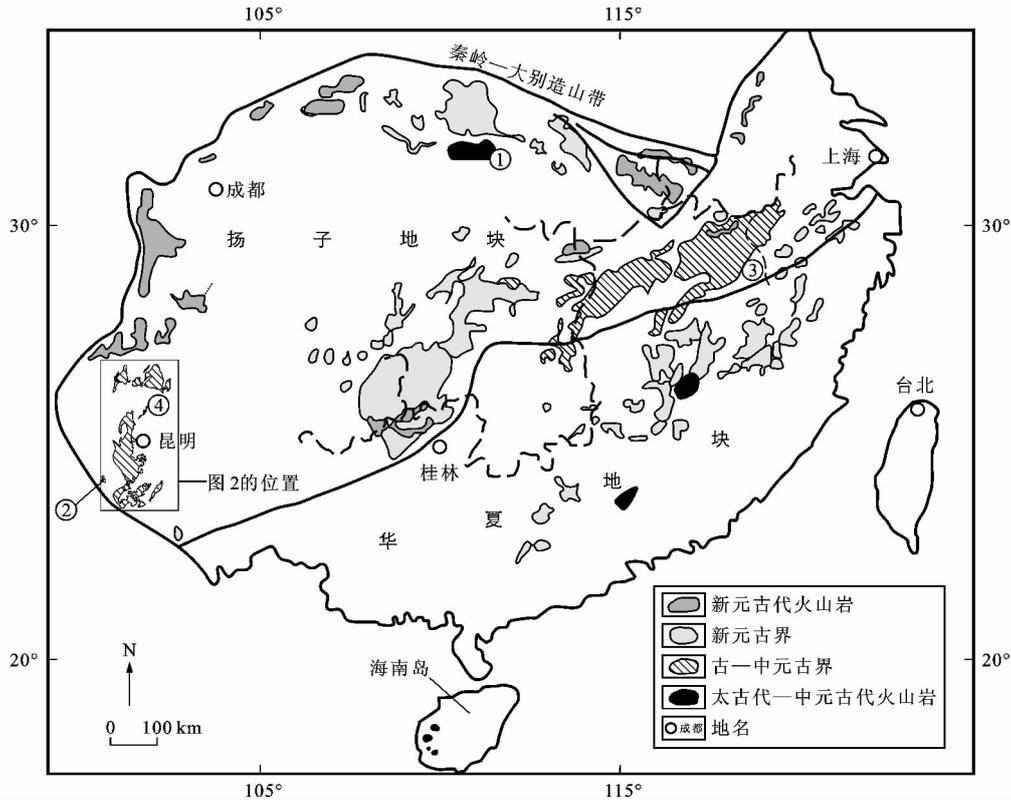
康滇地区位于扬子地块西缘。该区古—中元古代地层吸引了大批学者的注意,因为这些地层中赋存大量铁铜矿床,其中著名的有北部四川拉拉、中部云南迤纳厂和鹅头厂以及南部云南大红山铁铜矿床,这些铁铜、铁和铜矿床构成了著名的“康滇成矿省”<sup>[10]</sup>。康滇地区产出的大红山式(拉拉式)铁铜矿床和东川式铜矿床都是中国重要的成矿类型<sup>[10]</sup>。近年来,学者们对康滇地区这些矿床进行了广泛研究,取得了一系列重要成果<sup>[11-20]</sup>。然而,由于缺乏精确的定年数据,这些矿床的成因争议仍然很大<sup>[10,15-16,20-21]</sup>。近年来,还有一些钛铁氧化物矿床被发现,其成矿时代为中元古代,这些钛铁氧化物矿床被认为是钛铁氧化物在岩浆演化晚期分离结晶并堆积成矿的<sup>[22-23]</sup>;钛铁矿型(碱性钛铁质辉长岩—闪长岩)铁铜矿床以白锡腊铁铜矿和新塘铁铜矿床为代表,形成了独立钛铁矿—金红石矿体和铁铜矿体中共伴生钛铁矿—金红石矿体,形成时代为(1 047±15)~(1 067±20)Ma<sup>[19,24]</sup>。

正是由于康滇地区构造演化历史复杂,岩浆活动广泛,矿产丰富,历来都是地质工作的热点研究地区,特别是近年来借助快速发展的定年手段,精确的年代学研究成果大量涌现。随着近年来对扬子地块西缘大红山群、河口群、会理群和昆阳群中变质火山岩及基性侵入体的年代学研究,越来越多的研究资料显示该区存在古元古代晚期—中元古代岩浆活动的信息<sup>[13-15,20,22,25-40]</sup>。这些火山岩和侵入岩研究可提供该区古—中元古代岩石圈演化过程的关键信息。本文着重从扬子地块西缘康滇地区古—中元古代地层层序、岩浆活动及构造演化等方面总结和评述最新研究成果。

## 1 康滇地区古—中元古代地层

塔里木—华北克拉通广泛分布太古宙—古元古代基底,而与它们相邻的扬子地块现今在地表却很少出露太古宙岩石,导致地质学家至今对扬子地块是否具有广泛的太古宙基底存在疑问。然而根据现有的年龄资料,扬子地块北部的确出露有太古宙岩石,如 2.9~3.3 Ga 的崆岭杂岩<sup>[41-44]</sup>和约 2.4 Ga 的后河杂岩<sup>[45]</sup>(图 1)。崆岭杂岩主要由英云闪长岩—奥长花岗岩—花岗闪长岩(Tonalite-trondhjemite-granodiorite, TTG)、混合岩化片麻岩、变质沉积岩、斜长角闪岩以及少量麻粒岩组成<sup>[41]</sup>。其中,TTG 年龄为 2.9~2.95 Ga<sup>[42]</sup>。然而,在崆岭杂岩中还出现了 3.2 Ga 残留锆石年龄和约 3.5 Ga 的 Hf 两阶段模式年龄<sup>[44,46]</sup>。Zheng 等根据古生代煌斑岩中锆石的 U-Pb 年龄和 Hf 同位素资料,也认为扬子地块可能广泛存在太古宙基底<sup>[47]</sup>。Greentree 等通过对大红山群的研究,提出扬子地块西缘可能存在 2.0 Ga 的古元古代基底<sup>[13]</sup>;在古—新元古代沉积岩中也发现大量太古宙—古元古代碎屑锆石<sup>[14,20,33,36,48]</sup>。在云南东川地区有新太古代似层状方解石钠长石岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为(2 520±14)Ma<sup>[24]</sup>的报道。在越南 Song Da 地区也发育太古代地层<sup>[49]</sup>,Cavinh 和 Song Hongkong 杂岩的 Nd 模式年龄为 3.1~3.4 Ga,锆石 U-Pb 年龄为 2.5~2.8 Ga<sup>[50]</sup>。以上研究成果均表明扬子地块可能存在广泛分布的太古宙—古元古代基底岩石。

扬子地块西缘康滇地区出露的最古老基底岩石是晚古—中元古代由变质沉积岩夹酸性和基性变质火山岩组成的变质火山岩和变质沉积岩系列<sup>[4,13-14,25,51]</sup>。这些岩石分别被命名为大红山群<sup>[13]</sup>、河口群<sup>[15,29,52]</sup>、东川群<sup>[14]</sup>,一些区域的地层也被称为汤丹群、会理群<sup>[53]</sup>和昆阳群<sup>[53]</sup>等,它们沿绿汁江断裂及一系列相关的 NNE 向断裂分布(图 2)。康滇地区出露的前寒武纪地层形成时代一直没有得到准确的限定<sup>[52]</sup>,近年来,学者们才从一些地层中获得了较精确的锆石 U-Pb 年龄(图 2、表 1)。



①崆岭杂岩体;②大红山群;③田里片岩;④昆阳—东川群系列

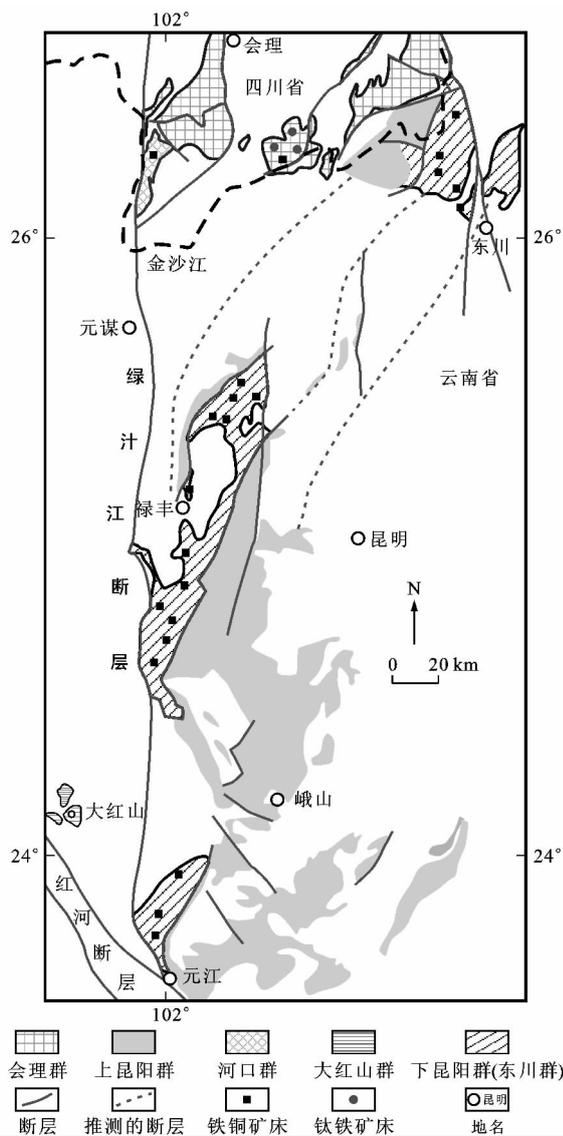
图 1 华南板块构造及前寒武纪地层和火山岩分布

Fig. 1 Simplified Tectonic Map of South China Plate with the Distribution of Precambrian Strata and Volcanic Rocks

大红山群分布在红河断裂以北,零星出露于云南省新平县的大红山—腰街—漠沙、元江县的撮科等地,由低角闪岩相的变质沉积岩组成,主要包括云母片岩、角闪岩、碳酸盐岩和石英岩,自下而上被分为老厂河组、曼岗河组、红山组、肥味河组和坡头组<sup>[54]</sup>。大红山群经历了中低级区域变质作用,地层变形比较强烈,褶皱构造及片理化发育,原始层面和早期沉积相特征多因遭受多期变质和变形而未有保存。然而,Greentree 等在其上部地层坡头组石英岩中发现了交错层理,并在曼岗河组中找到复碎屑变质砾岩,并以此沉积相特征判断大红山群沉积阶段曾处于大陆浅海或潟湖环境<sup>[13]</sup>。Hu 等用 TIMS 测得曼岗河组变钠质熔岩的锆石 U-Pb 年龄为 1 654~1 679 Ma,曼岗河组和红山组变质沉积岩及变质碱性玄武岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 (1 657 ± 82) Ma<sup>[55]</sup>。大红山群中变质火山岩的锆石还分别给出了 (1 675 ± 8) Ma 的 SHRIMP U-Pb 年龄<sup>[13]</sup>和 (1 681 ± 13)、(1 711 ± 4) Ma 的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄<sup>[15,34]</sup>。一条侵入其中的辉绿岩脉的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄 ((1 659 ± 16) Ma)<sup>[15]</sup>表明这些火山岩的形成稍早于辉绿岩脉。

河口群分布在研究区西北部黎溪、河口及姜驿一带,由一系列变质碎屑岩和变质碳酸盐岩组成,自下而上依次为大营山组、落函组和长冲组,该群被认为与大红山群在形成时代上相当<sup>[14,25,31,52,56]</sup>。侵入于河口群中辉长岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 (1 710 ± 8) Ma<sup>[31]</sup>、锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 (1 657 ± 21) Ma<sup>[57]</sup>,表明河口群的形成时代要早于上述年龄,这也得到何德峰从河口群获得的 (1 695 ± 20) Ma 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄<sup>[29]</sup>的印证(图 3)。

昆阳群主要在研究区南部出露,分为上昆阳群和下昆阳群<sup>[14-15,53]</sup>。位于底部的下昆阳群一般被称为东川群<sup>[14-15,53]</sup>,然而也有学者认为下昆阳群包括东川群和汤丹群两部分,其中汤丹群属早元古代地层,而东川群属于中元古代地层,二者之间发育东川运动<sup>[24]</sup>。东川群包括因民组、落雪组、鹅头厂组/黑山组和绿汁江组/青龙山组,而上昆阳群包括大营盘组、黑山头组、大龙口组和美党组。从东川群中获得最古老的碎屑锆石年龄约为 1.78 Ga,而从该组凝灰岩中获得的锆石年龄为 (1 742 ± 13) Ma<sup>[14]</sup>。孙志明等从下昆阳群鹅头厂组凝灰岩样品中得到的锆石



图件引自文献[15]

图2 康滇地区出露的晚古—中元古界地层以及中元古代岩体群

Fig. 2 Geological Map of Late Paleoproterozoic Strata and Mesoproterozoic Intrusions in the Kangdian Area

SHRIMP U-Pb 年龄为(1 503±17)Ma<sup>[30]</sup>。方维萱报道了小溜口岩组锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为(2 520±14)Ma<sup>[24]</sup>, 但只给出了年龄, 没有详细的采样位置、岩性及锆石特征等信息, 而且该年龄明显老于其他已报道的东川群年龄数据, 因此, 不排除所获得的年龄是继承锆石的形成时代。综上所述, 东川群很可能形成于 1.5 Ga 至约 1.7 Ga 之间, 其下部在形成时间上与大红山群和河口群可能相当(图 3)。

上昆阳群大营盘组的 1 个碳质页岩样品经测试得出了(1 258±70) Ma 的全岩 Pb-Pb 等时线年龄<sup>[58]</sup>。另外, 上昆阳群黑山头组上部的凝灰岩锆石亦得出了(995±15)、(1032±9) Ma 的 SHRIMP

表 1 康滇地区古—中元古代地层和岩浆岩年龄

Tab. 1 Ages from Paleo-Mesoproterozoic Strata and Magmatic Rocks in the Kangdian Area

序号	地层	岩性	定年技术	年龄/Ma	文献来源
1	大红山群	凝灰质片岩	锆石 SHRIMP U-Pb	1 675±8	[13]
2	大红山群	长英质火山岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	1 681±13	[15]
3	大红山群	变质中酸性岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	1 711±4	[34]
4	大红山群	变质基性岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	1 686±4	[34]
5	大红山群	辉绿岩脉	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	1 659±16	[15]
6	大红山群	变钠质熔岩	锆石 TIMS U-Pb	1 654~1 679	[55]
7	大红山群	地层	全岩 Sm-Nd 等时线	1 657±82	[55]
8	河口群	角斑岩	锆石 SHRIMP U-Pb	1 695±20	[29]
9	河口群	辉长岩体	锆石 SHRIMP U-Pb	1 710±8	[31]
10	河口群	辉长岩体	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	1 657±21	[57]
11	河口群	变质凝灰岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	1 705±6	[57]
12	河口群	变质凝灰岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	1 708±7	[57]
13	河口群	变质凝灰岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	1 697±13	[57]
14	会理群	变质英安岩	锆石 TIMS U-Pb	958±16	[59]
15	下昆阳群	凝灰岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	1 742±13	[14]
16	下昆阳群	凝灰质火山岩	锆石 SHRIMP U-Pb	1 503±17	[30]
17	下昆阳群	花岗岩岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	1 730±15	[37]
18	下昆阳群	辉绿岩脉	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	1 767±15	[39]
19	下昆阳群	岩浆角砾岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	1 739±13	[38]
20	下昆阳群	辉绿岩脉	锆石 SHRIMP U-Pb	1 676±15	[32]
21	下昆阳群	辉绿岩脉	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	1 690±32	[14]
22	下昆阳群	白云岩	全岩 Pb-Pb 等时线	1 716±56	[58]
23	下昆阳群	碳质板岩	全岩 Pb-Pb 等时线	1 607±128	[58]
24	上昆阳群	凝灰岩	锆石 SHRIMP U-Pb	1 142±16	[25]
25	上昆阳群	凝灰岩	锆石 SHRIMP U-Pb	995±15	[25]
26	上昆阳群	凝灰岩	锆石 SHRIMP U-Pb	1 032±9	[28]
27	上昆阳群	碳质板岩	全岩 Pb-Pb 等时线	1 258±70	[58]
28	会理群	变质流纹岩	锆石 SHRIMP U-Pb	1 028±9	[26]
29	会理群	辉长岩体	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	1 694±16	[35]
30	会理群	辉长岩体	锆石 SIMS U-Pb	1 494±6	[22]
31	会理群	辉长岩体	斜锆石 SIMS U-Pb	1 486±3	[22]
32	会理群	辉长岩体	斜锆石 SIMS U-Pb	1 490±4	[22]
33	会理群	辉长-闪长岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	1 513±13	[27]

U-Pb 年龄<sup>[25,28]</sup>。同时, 从上昆阳群顶部获得的最年轻碎屑锆石 U-Pb 年龄为 960 Ma<sup>[25,48]</sup>。因此, 上昆阳群是在中—新元古代早期沉积的地层(图 3)。

会理群是一套巨厚(大于 10 km)的浅变质岩系, 包含一系列变质碎屑岩和变质碳酸盐岩夹变质火山岩<sup>[52]</sup>。其底部与康定杂岩接触关系不清; 顶部

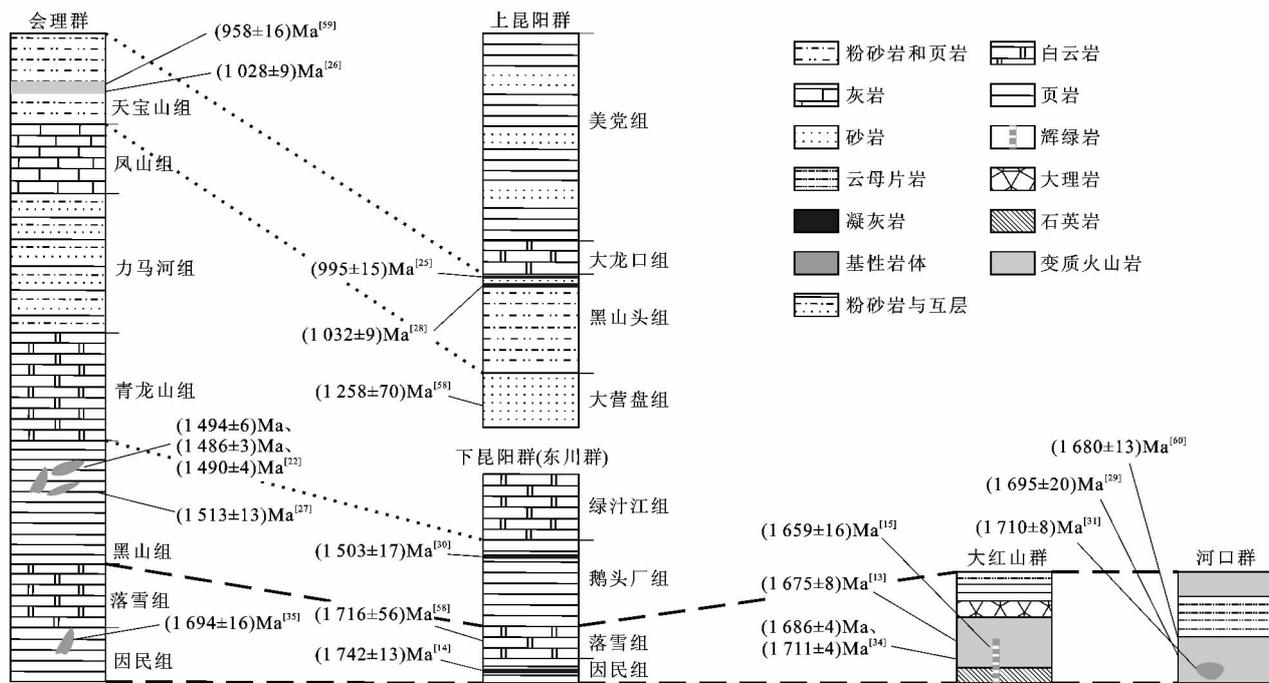


图 3 扬子地块西缘元古宙地层对比

Fig. 3 Stratigraphic Correlation for Proterozoic Strata in the Western Margin of the Yangtze Block

被陡山沱组或灯影组不整合覆盖。从底部往上,会理群包括因民组、落雪组、黑山组、青龙山组、力马河组、凤山组和天宝山组。黑山组火山岩主要分布于会东东部的小街、新田等地,分为上、下两部分,下部玄武质火山岩段为玄武质晶屑凝灰岩,上部为流纹质火山岩<sup>[53]</sup>。天宝山组分布于四川会理和德昌一带,为一套变质的沉积岩夹火山岩建造。会理群火山岩以中—酸性为主,主要岩性为变质斑状英安岩和变质流纹岩,侵入到会理群底部的辉长岩体年龄为(1 694±16)Ma<sup>[35]</sup>,而黑山组中基性岩体群年龄约为 1.5 Ga<sup>[22,27]</sup>。天宝山组变质火山岩样品的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为(958±16)Ma<sup>[59]</sup>和(1 028±9)Ma<sup>[26]</sup>。由此可见,会理群在形成时间与昆阳群相当(图 3)。

## 2 康滇地区古—中元古代岩浆活动及成矿作用

### 2.1 变质火山岩

云南西南部大红山群中含有变质火山岩。这些变质火山岩主要分布于大红山铁铜矿区及附近,主要为一套细碧岩—角斑岩建造的钠质火山岩系,其锆石 TIMS U-Pb 年龄为 1 654~1 679 Ma,Sm-Nd 等时线年龄为(1 657±82)Ma,锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为(1 675±8)Ma<sup>[13]</sup>、锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为(1 681±13)Ma<sup>[15]</sup>。此外,杨红等获得老厂河组变质

中酸性岩和变质基性岩中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为(1 711±4)、(1 686±4)Ma<sup>[34]</sup>。与大红山群层位相当的河口群变质沉积岩中也夹杂一些变质火山岩,主要分布于四川省会理县河口地区一带。河口群下部变质火山岩为(石英)角斑岩,上部变质火山岩为细碧岩<sup>[29,53]</sup>;该地层产出拉拉铜矿床,矿区角斑岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为(1 695±20)Ma<sup>[29]</sup>,变质凝灰岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为(1 679±13)Ma<sup>[57]</sup>。此外,大营山组上部和中部也分布一些变质凝灰岩,锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为(1 705±6)Ma和(1 708±7)Ma<sup>[57]</sup>。

云南北部和中东部昆阳群含有一套浅变质沉积—火山岩系。其中,因民组火山岩由火山角砾岩、中—基性条带状钠质凝灰岩、沉凝灰岩以及细碧—角斑岩等组成。它们在多个旋回中呈互层产出,凝灰岩样品的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为(1 742±13)Ma<sup>[14]</sup>。鹅头厂组的板岩中夹杂凝灰质火山岩,凝灰质火山岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为(1 503±17)Ma<sup>[30]</sup>。上昆阳群黑山头组火山岩为细碧岩及变质基性熔岩,呈层状产出,火山岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为(995±15)Ma<sup>[25]</sup>和(1 032±9)Ma<sup>[28]</sup>。美党组火山岩仅有少量凝灰质板岩、凝灰岩,呈夹层状产出。

四川南部会理群变质碎屑岩及碳酸盐岩中夹有火山岩。其中,黑山组火山岩主要分布于四川省会

东县东部的小街、新田等地,分为上、下两部分,下部玄武质火山岩段为玄武质晶屑凝灰岩,上部为流纹质火山岩<sup>[53]</sup>。天宝山组火山岩分布于四川省会理县和德昌县一带,以中—酸性火山岩为主,主要岩性为变质斑状英安岩和变质流纹岩,变质斑状英安岩的锆石 TIMS U-Pb 年龄为 954~961 Ma<sup>[59]</sup>,变质流纹岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为(1 028±9)Ma<sup>[26]</sup>。

## 2.2 岩脉(体)

大红山群、河口群、会理群和昆阳群等变质火山-沉积岩地层均出露基性岩脉或岩体。其中,大红山群有较多的基性侵入岩,主要分布于大红山铜矿区,以变辉绿岩、辉绿-辉长岩等为主,呈脉状产出,辉绿岩脉的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为(1 659±16)Ma<sup>[15]</sup>。河口群地层也有较多的辉长岩和辉绿岩脉广泛分布于拉拉铁铜矿区、河口地区一带<sup>[29,60]</sup>。在四川省会理县河口地区出露有辉长-辉绿岩体呈岩株状(或岩床)侵入于河口群地层中,该岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为(1 710±8)Ma<sup>[31]</sup>。拉拉铁铜矿区中辉长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(1 657±21)Ma<sup>[57]</sup>。

昆阳群也有较多中—基性岩浆岩侵入。在云南省武定县海孜地区有花岗斑岩和辉绿岩脉侵入到下昆阳群因民组中,花岗斑岩和辉绿岩脉的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为(1 730±15)Ma<sup>[37]</sup>和(1 767±15)Ma<sup>[40]</sup>。Zhao 等也获得因民地区辉绿岩脉的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为(1 690±32)Ma<sup>[14]</sup>。此外,在云南东川地区拖布卡一带,地表出露大量以基性为主的中—基性侵入岩脉或岩体,在数量上有数十个,面积均小于 0.2 km<sup>2</sup>。这些小岩体通常呈岩脉、岩墙、岩床状或岩株状产出,大致呈 SN 向展布,以辉长岩、辉长辉绿岩为主,还有少量闪长岩。据野外观察,拖布卡金矿区的辉绿岩脉或岩体主要侵位于昆阳群黑山组中,与四川省会理县通安地区辉绿岩和辉长岩脉侵位于相同层位。因此,拖布卡金矿区的辉绿岩脉或岩体的形成时代很可能与通安地区基性岩脉(体)的形成时代相当。

会理群也有较多的基性岩脉或岩体侵入。在四川省会理县通安地区有大量基性侵入岩体出露,多呈岩墙或小岩体。其中,侵入到会理群底部的辉长岩体年龄为(1 694±16)Ma<sup>[35]</sup>。然而,其他大部分岩体都侵入到会理群黑山组板岩以及白云岩地层中,其中竹箐岩体群位于该区东北部,这些岩体均呈 NW 向展布,岩体出露长度大于 4 km,宽通常为 115~465 m,厚 91~371 m。通过锆石 SIMS U-Pb

同位素分析,锆石 U-Pb 年龄为(1 494±6)Ma,斜锆石 U-Pb 年龄为(1 486±3)Ma 和(1 490±4)Ma。这些锆石和斜锆石 U-Pb 年龄在误差范围内一致,表明竹箐岩体群形成于约 1.5 Ga<sup>[22]</sup>。此外,在通安地区还有辉长-闪长岩出露,其中岩浆锆石年龄为(1 513±13)Ma<sup>[27]</sup>。

根据前人近年来对康滇地区古—中元古代基底地层中基性岩脉(体)的研究,初步证实存在 1.5 Ga 至约 1.7 Ga 的基性岩浆活动。但系统的高精度年代学研究工作仍然非常薄弱,尤其是它们都缺乏高精度的元素-同位素地球化学数据的制约,其岩石成因还没有定论。

## 2.3 成矿作用

康滇地区拥有超过 50 个铁铜矿床(图 2)。赋存在下昆阳群的铁铜矿床有 2 种类型:①赋存在白云岩中的细脉浸染状铜硫化物矿床,即东川式铜矿,如东川、汤丹矿床;②赋存在变质火山岩或变质陆源碎屑岩中含大量铁氧化物和/或铜硫化物的铁(铜)矿床,如迤纳厂、鹅头厂矿床,其中赋存在变质火山岩中的铁(铜)矿床也被称为稀矿山式矿床<sup>[10]</sup>。大红山群和河口群中产出的铁铜矿床均赋存在变质火山岩中,也被称为大红山式铁铜矿床<sup>[54]</sup>,如大红山、拉拉铁铜矿床。这些矿床的矿石矿物主要是铁氧化物(磁铁矿和赤铁矿)和/或铜的硫化物(黄铜矿和斑铜矿),部分矿床中还伴生有 Au、Ag、Co、Mo、Ni 和稀土元素等副产品。这些矿床一般都有相同的矿化特征,即早期的铁氧化物矿化,其后是铜硫化物矿化,虽然两者在各个矿床中的比例不尽相同<sup>[15,21]</sup>。康滇地区古元古代铁铜矿床具有很多 IOCG 矿床的特点<sup>[61]</sup>。例如,这些矿床一般赋存在特定的层位(大红山群、河口群和下昆阳群)中,而且显示层控的特征,成矿作用总伴随着区域构造角砾岩,并通常发生在区域构造带上,因此,Zhao 等将这些矿床划归 IOCG 矿床<sup>[15,24]</sup>。这些矿床似乎与岩浆活动关系不大,但是在大红山、拉拉等铁铜矿床中,铁氧化物的矿化分布与辉长岩体以及玄武岩的关系密切<sup>[15]</sup>。

由于缺少年代学数据,加上康滇地区构造复杂,古—中元古代地层层序一直存在很大争议,导致这些矿床成因仍然众说纷纭,如有“顺层交代说”、“沉积-变质说”、“火山沉积-变质说”、“火山块状硫化物矿床”和“喷流沉积矿床”等<sup>[10-17,20-21,62]</sup>。通过前人的研究,很多 Pb-Pb、Rb-Sr 和<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 同位素都给出了新元古代的年龄<sup>[10,63-67]</sup>。拉拉铁铜矿床中辉铜矿的 Re-Os 同位素年龄稍老,为 928~1 005 Ma<sup>[67]</sup>

和 $(1\ 086\pm 8)\text{Ma}$ <sup>[16]</sup>。然而,近年来报道的迤纳厂、拉拉、大红山铁铜矿床的 Re-Os 同位素年龄都明显更老,属于古—中元古代<sup>[15-16,20,62]</sup>。Zhao 等获得迤纳厂矿床的辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄约为 $1.66\text{Ga}$ <sup>[62]</sup>,叶现韬等也测得矿石中黄铜矿样品的 Re-Os 同位素等时线年龄为 $(1\ 690\pm 99)\text{Ma}$ <sup>[20]</sup>,这个成矿年龄与大红山铁铜矿床的含矿变质火山岩和基性岩墙的年龄 $(1\ 659\sim 1\ 711\text{Ma})$ <sup>[13,15,34]</sup>以及迤纳厂铁铜矿床出露的岩浆角砾岩的锆石年龄 $((1\ 739\pm 13)\text{Ma})$ <sup>[38]</sup>一致,证实成矿作用与岩浆活动之间存在联系。

在四川省会理县通安地区的会理群黑山组中有大量辉长岩侵位,其中有部分岩体的底部赋存钛铁钒氧化物矿床,探明的铁矿石 $(331)+(332)+(333)$ 资源量已超过 $1.0\times 10^8\text{t}$ 。通过锆石 SIMS U-Pb 同位素分析,竹箐钛铁钒氧化物矿床形成于约 $1.5\text{Ga}$ <sup>[22]</sup>。这些钛铁钒氧化物矿床被认为是形成于软流圈的富集地幔发生较低程度部分熔融形成富钛铁的原始岩浆,经过强烈的分异演化而大量结晶磁铁矿和钛铁矿,并堆积在岩浆房下部成矿的,也就是说通安地区基性岩体的钛铁钒氧化物是从演化程度很高的母岩浆中形成的,是岩浆演化晚期分离结晶的产物<sup>[22-23]</sup>。在云南省东川县白锡腊铁铜矿床和新塘铁铜矿床中,独立钛铁矿-金红石矿体和铁铜矿体中共伴生的钛铁矿-金红石矿体形成时代为 $((1\ 047\pm 15)\sim (1\ 067\pm 20)\text{Ma})$ <sup>[19,24]</sup>,揭示与深源碱性钛铁质辉长岩类有关的钛铁钒氧化物成矿作用有可能持续演化到中元古代末期。

### 3 扬子地块西缘古—中元古代构造演化及其与 Columbia 超大陆的联系

扬子地块在重建 Rodinia 超大陆的过程中发挥了重要作用<sup>[68-69]</sup>,但地质学家对其是不是古—中元古代 Columbia 超大陆的组成部分仍然知之甚少<sup>[70-71]</sup>。

崆岭杂岩体中已经被报道有最古老 $3.3\text{Ga}$ 的岩浆和变质岩石<sup>[44,72]</sup>。基于古生代钾镁煌斑岩中锆石捕虏体的 U-Pb 年代学和 Hf 同位素数据,Zheng 等指出太古代岩石在扬子地块未出露的基底中广泛分布<sup>[47]</sup>。Zhao 等通过分析从扬子地块西南缘古—新元古代沉积岩中获得的碎屑锆石<sup>[14,36]</sup>,得出与文献<sup>[47]</sup>一致的结论。在扬子地块,除了崆岭基底岩石外,还有其他 3 个主要的、已被报道的古—中元古代岩石单元,主要包括一些火山和变质火山

岩。其中, $1.66\sim 1.75\text{Ga}$ 的大红山—河口群是由变质火山碎屑岩、变质玄武岩、变质碎屑岩和大理岩组成<sup>[13-14,29]</sup>;田里片岩是一个碎屑沉积层序,可能是在 $1\ 042\sim 1\ 530\text{Ma}$ 的扬子地块南部大陆架上沉积形成的<sup>[1]</sup>;会理—昆阳—东川群由变质沉积岩和变质火山岩组成,其形成时代很可能是 $1.0\sim 1.8\text{Ga}$ <sup>[13-14,25]</sup>。这些太古宙—古元古代的年龄证据都说明扬子地块可能经历过其后的古—中元古代(即 Columbia 超大陆时期)的构造演化。

在扬子地块北部有 $1.97\sim 2.03\text{Ga}$ 的花岗岩、 $1.85\text{Ga}$ 的 A 型花岗岩及基性岩墙出露,这些岩石都恰好形成在 Columbia 超大陆的聚合期间内<sup>[73-74]</sup>,因此,它们很可能与 Columbia 超大陆的演化有成因联系<sup>[35,75-80]</sup>。此外,很多研究认为,扬子地块存在 $1.8\sim 2.0\text{Ga}$ 构造热事件的年代学记录,这些年代学记录揭示出扬子地块存在 $1.9\sim 2.0\text{Ga}$ 的碰撞造山作用,并且可能与 Columbia 超大陆的聚合有关<sup>[20,31-32,37-40,81-83]</sup>。

Peng 等认为扬子地块北部 $1.85\text{Ga}$ 的 A 型花岗岩是碰撞后伸展环境下的产物,指示在约 $1.85\text{Ga}$ 的扬子地块发生了由碰撞挤压向伸展作用的构造转换<sup>[79]</sup>,这也得到扬子地块西缘形成于裂谷拉张环境下的 $1.73\text{Ga}$ 海孜花岗斑岩的印证<sup>[37]</sup>。Zhao 等通过对东川群碎屑锆石开展 U-Pb 年代学和 Hf 同位素研究,认为古元古代晚期康滇地区已处于板内裂谷的构造环境下<sup>[15]</sup>。王冬兵等认为扬子地块西缘会理地区 $(1\ 694\pm 16)\text{Ma}$ 的辉长岩可能是 Columbia 超大陆裂解期地壳在伸展构造环境下,幔源岩浆沿张性断裂侵入的产物;还认为与扬子地块西缘古元古代晚期基性侵入岩形成有关的幔源岩浆事件记录了扬子地块古元古代晚期的一次伸展过程,可能是 Columbia 超大陆裂解作用在扬子地块的响应<sup>[82]</sup>。此外,Zhao 等将康滇地区产出的古元古代铁铜矿床与全球其他克拉通产出的同类型矿床进行对比,认为该区的铁铜矿床也可能是超大陆旋回的产物,并指示 Columbia 超大陆初始裂解<sup>[62]</sup>。

Fan 等认为扬子地块西缘康滇地区约 $1.5\text{Ga}$ 的岩浆活动很可能与全球大部分前寒武纪克拉通内部广泛分布的 $1.2\sim 1.6\text{Ga}$ 中元古代造山后和非造山岩浆活动有成因联系<sup>[22]</sup>。这些 $1.2\sim 1.6\text{Ga}$ 的岩浆活动都被认为与导致 Columbia 超大陆裂解的地幔柱活动有关<sup>[70-71,74,79,84-87]</sup>,而四川省会理县竹箐地区的岩浆活动也很可能形成该时期内的地幔柱作用。那么,类似那些岩浆活动的产物,竹箐岩体群的

形成很可能是导致 Columbia 超大陆裂解的、地幔柱活动产生的全球分布岩浆事件中的一员。因此, 扬子地块 1.5~2.0 Ga 的岩浆活动特征是可以与 Columbia 超大陆的聚合至裂解旋回相对应的, 也就是说扬子地块很可能是古—中元古代 Columbia 超大陆的组成部分。

扬子地块在 Columbia 超大陆的位置还很难确定, 因为针对 Columbia 超大陆其他比较确定的克拉通 (Laurentia, Baltica, Ukrainian Shield, Amazonian Shield, Australia, Siberia, 华北, Kalaharia 等) 的拼合方案差别都还较大<sup>[70-71, 85-86]</sup>。例如, 其中一种将 Greenland 东南部与 Baltica 西部拼接在一起<sup>[71, 84-85, 88]</sup>, 而另一种则认为 Greenland 东部与 Baltica 北部在 Columbia 超大陆中相邻<sup>[74, 86, 89-95]</sup>。虽然古

地磁数据更倾向支持后一种假设, 且证实 Laurentia 和 Baltica 从 1 800 Ma 开始, 至少到 1 270 Ma 都聚合在一起<sup>[86, 92, 94-95]</sup>。针对扬子地块参与的重建方案更是初步的设想, 如 Zhao 等将其定于 Columbia 超大陆的北部靠近西伯利亚、北美和塔里木<sup>[84]</sup>, 而 Wang 等根据从扬子地块西缘古—新元古代沉积岩中获得的碎屑锆石数据, 将扬子地块定于 Columbia 超大陆的最西部, 位于澳大利亚或者中国华北附近<sup>[36]</sup> (图 4)。Zhou 等认为康滇地区 1.66 Ga 的铁铜矿床可以对比 Columbia 超大陆其他克拉通中相似的矿床, 扬子地块可能与澳大利亚以及印度相邻<sup>[96]</sup>。因此, 要确定扬子地块在 Columbia 超大陆的准确位置还要更多地质和古地磁资料的收集和更多学者的参与。



图件引自文献<sup>[36]</sup>和<sup>[84]</sup>

图 4 扬子地块在 Columbia 超大陆可能的位置

Fig. 4 Possible Position of the Yangtze Block in the Columbia Supercontinent

## 4 结 语

(1) 虽然太古宙—古元古界岩石在扬子地块西缘康滇地区现今没有广泛出露, 但大量碎屑锆石年代学数据指示康滇地区很可能广泛分布着太古宙—古元古界基底。康滇地区出露的最古老基底地层由古—中元古代变质沉积岩和变质火山岩组成, 它们出露于云南南部大红山群、四川南部河口群、云南北

部下昆阳群以及四川南部会理群的底部层位。

(2) 康滇地区广泛分布古—中元古代岩浆活动, 前人已报道了一些高精度年代学数据, 但总体研究工作仍然非常薄弱, 尤其是它们都缺乏高精度的元素—同位素地球化学数据的制约, 其岩石成因还一直没有定论。

(3) 康滇地区产出的大红山式 (拉拉式) 铁铜矿床和东川式铜矿床都是中国重要的成矿类型。近年

来,康滇地区铁铜矿床得到了地质学家的广泛研究,并取得了一系列重要成果。然而,关于这些矿床的成因争议仍然很大,其成矿作用与岩浆活动之间的联系尚待进一步明确。

(4) 康滇地区乃至整个扬子地块分布的古—中元古代岩浆活动指示,扬子地块在 1.5~2.0 Ga 可能经历了碰撞造山到伸展的构造演化过程,而这一过程恰好与 Columbia 超大陆旋回一致。因此,扬子地块很可能是古—中元古代 Columbia 超大陆的组成部分。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] LI Z X, WARTHON J A, OCCHIPINTI S, et al. Early History of the Eastern Sibao Orogen (South China) During the Assembly of Rodinia; New  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Dating and SHRIMP U-Pb Detrital Zircon Provenance Constraints[J]. *Precambrian Research*, 2007, 159(1/2):74-94.
- [2] JOHN B M, ZHOU X H, LI J L. Formation and Tectonic Evolution of South Eastern China and Taiwan: Isotopic and Geochemical Constraints[J]. *Tectonophysics*, 1990, 183(1/2/3/4):145-160.
- [3] LI Z X. Tectonic History of the Major East Asian Lithospheric Blocks Since the Mid-Proterozoic: A Synthesis [C]//FLOWER M F J, CHUNG S L, LO C H, et al. *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. Washington DC: American Geophysical Union, 1998: 221-243.
- [4] LI X H, LI Z X, ZHOU H W, et al. U-Pb Zircon Geochronology, Geochemistry and Nd Isotopic Study of Neoproterozoic Bimodal Volcanic Rocks in the Kangdian Rift of South China: Implications for the Initial Rifting of Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 2002, 113(1):135-154.
- [5] LI X H, LI W X, LI Z X, et al. Amalgamation Between the Yangtze and Cathaysia Blocks in South China: Constraints from SHRIMP U-Pb Zircon Ages, Geochemistry and Nd-Hf Isotopes of the Shuangxiwu Volcanic Rocks[J]. *Precambrian Research*, 2009, 174(1/2):117-128.
- [6] 郝杰, 李曰俊, 胡文虎. 晋宁运动和震旦系有关问题[J]. *中国区域地质*, 1992(2):131-140.  
HAO Jie, LI Yue-jun, HU Wen-hu. Problems Related to the Jinning Movement and the Sinian System[J]. *Regional Geology of China*, 1992(2):131-140.
- [7] ZHAO G C, CAWOOD P A. Tectonothermal Evolution of the Mayuan Assemblage in the Cathaysia Block: Implications for Neoproterozoic Collision-related Assembly of the South China Craton[J]. *American Journal of Science*, 1999, 299(4):309-339.
- [8] ZHOU M F, YAN D P, KENNEDY A K, et al. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronological and Geochemical Evidence for Neoproterozoic Arc-magmatism Along the Western Margin of the Yangtze Block, South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 196(1/2):51-67.
- [9] WANG X L, ZHOU J C, QIU J S, et al. LA-ICP-MS U-Pb Zircon Geochronology of the Neoproterozoic Igneous Rocks from Northern Guangxi, South China: Implications for Tectonic Evolution[J]. *Precambrian Research*, 2006, 145(1/2):111-130.
- [10] 孙克祥, 沈远仁, 刘国庆, 等. 滇中元古宙铁铜矿床[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991.  
SUN Ke-xiang, SHEN Yuan-ren, LIU Guo-qing, et al. *Proterozoic Iron-copper Deposits in Central Yunnan Province*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991.
- [11] 杨耀民, 涂光炽, 胡瑞忠. 迤纳厂稀土铁铜矿床稀土元素地球化学[J]. *矿物学报*, 2004, 24(3):301-308.  
YANG Yao-min, TU Guang-chi, HU Rui-zhong. REE Geochemistry of Yinachang Fe-Cu-REE Deposit in Yunnan Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2004, 24(3):301-308.
- [12] 杨耀民, 涂光炽, 胡瑞忠, 等. 武定迤纳厂 Fe-Cu-REE 矿床 Sm-Nd 同位素年代学及其地质意义[J]. *科学通报*, 2005, 50(12):1253-1258.  
YANG Yao-min, TU Guang-chi, HU Rui-zhong, et al. Sm-Nd Isotopic Geochronology of the Yinachang Fe-Cu-REE Deposit at Wuding, Yunnan Province and Its Genetic Significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(12):1253-1258.
- [13] GREENTREE M R, LI Z X. The Oldest Known Rocks in South-western China: SHRIMP U-Pb Magmatic Crystallization Age and Detrital Provenance Analysis of the Paleoproterozoic Dahongshan Group[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 33(5/6):289-302.
- [14] ZHAO X F, ZHOU M F, LI J W, et al. Late Paleoproterozoic to Early Mesoproterozoic Dongchuan Group in Yunnan, SW China: Implications for Tectonic Evolution of the Yangtze Block[J]. *Precambrian Research*, 2010, 182(1/2):57-69.
- [15] ZHAO X F, ZHOU M F. Fe-Cu Deposits in the Kangdian Region, SW China: A Proterozoic IOCG (Iron-oxide-copper-gold) Metallogenic Province[J]. *Minerali-*

- um Deposita, 2011, 46(7): 731-747.
- [16] CHEN W T, ZHOU M F. Paragenesis, Stable Isotopes, and Molybdenite Re-Os Isotope Age of the Lala Iron-copper Deposit, Southwest China[J]. Economic Geology, 2012, 107(3): 459-480.
- [17] ZHAO X F, ZHOU M F, HITZMAN M W, et al. Late Paleoproterozoic to Early Mesoproterozoic Tangdan Sedimentary Rock-hosted Strata-bound Copper Deposit, Yunnan Province, Southwest China [J]. Economic Geology, 2012, 107(2): 357-375.
- [18] 方维萱. 论铁氧化物铜金型(IOCG)矿床地球化学岩相学填图新技术研发[J]. 地球科学进展, 2012, 27(10): 1178-1184.  
FANG Wei-xuan. R & D on New Mapping Technology of Geochemical Lithofaces in Prediction and Exploration for Iron-oxide Copper Gold Deposits (IOCG) [J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(10): 1178-1184.
- [19] ZHAO X F, ZHOU M F, LI J W, et al. Late Paleoproterozoic Sedimentary Rock-hosted Stratiform Copper Deposits in South China; Their Possible Link to the Supercontinent Cycle [J]. Mineralium Deposita, 2013, 48(1): 129-136.
- [20] 叶现韬, 朱维光, 钟宏, 等. 云南武定迤纳厂 Fe-Cu-REE 矿床的锆石 U-Pb 和黄铜矿 Re-Os 年代学, 稀土元素地球化学及其地质意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(4): 1167-1186.  
YE Xian-tao, ZHU Wei-guang, ZHONG Hong, et al. Zircon U-Pb and Chalcopyrite Re-Os Geochronology, REE Geochemistry of the Yinachang Fe-Cu-REE Deposit in Yunnan Province and Its Geological Significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(4): 1167-1186.
- [21] 侯林, 丁俊, 王长明, 等. 云南武定迤纳厂铁-铜-金-稀土矿床成矿流体与成矿作用 [J]. 岩石学报, 2013, 29(4): 1187-1202.  
HOU Lin, DING Jun, WANG Chang-ming, et al. Ore-forming Fluid and Metallogenesis of the Yinachang Fe-Cu-Au-REE Deposit, Wuding, Yunnan Province, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(4): 1187-1202.
- [22] FAN H P, ZHU W G, LI Z X, et al. Ca. 1.5 Ga Mafic Magmatism in South China During the Break-up of the Supercontinent Nuna/Columbia; The Zhuqing Fe-Ti-V Oxide Ore-bearing Mafic Intrusions in Western Yangtze Block [J]. Lithos, 2013, 168/169: 85-98.
- [23] FAN H P, ZHU W G, ZHONG H, et al. Platinum-group Element Geochemistry of the Zhuqing Fe-Ti-V Oxide Ore-bearing Mafic Intrusions in Western Yangtze Block, SW China; Control of Platinum-group Elements by Magnetite [J]. Mineralogy and Petrology, 2014, 108(3): 419-438.
- [24] 方维萱. 论扬子地块西缘元古宙铁氧化物铜金型矿床与大地构造演化 [J]. 大地构造与成矿学, 2014, 38(4): 733-757.  
FANG Wei-xuan. Geotectonic Evolution and the Proterozoic Iron Oxide Copper-gold Deposits on the Western Margin of the Yangtze Massif [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2014, 38(4): 733-757.
- [25] GREENTREE M R, LI Z X, LI X H, et al. Late Mesoproterozoic to Earliest Neoproterozoic Basin Record of the Sibao Orogenesis in Western South China and Relationship to the Assembly of Rodinia [J]. Precambrian Research, 2006, 151(1/2): 79-100.
- [26] 耿元生, 杨崇辉, 杜利林, 等. 天宝山组形成时代和形成环境: 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和地球化学证据 [J]. 地质论评, 2007, 53(4): 556-563.  
GENG Yuan-sheng, YANG Chong-hui, DU Li-lin, et al. Chronology and Tectonic Environment of the Tianbaoshan Formation: New Evidence from Zircon SHRIMP U-Pb Age and Geochemistry [J]. Geological Review, 2007, 53(4): 556-563.
- [27] 耿元生, 柳永清, 高林志, 等. 扬子克拉通西南缘中元古代通安组的形成时代: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄 [J]. 地质学报, 2012, 86(9): 1479-1490.  
GENG Yuan-sheng, LIU Yong-qing, GAO Lin-zhi, et al. Geochronology of the Mesoproterozoic Tong'an Formation in Southwestern Margin of Yangtze Craton: New Evidence from Zircon LA-ICP-MS U-Pb Ages [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(9): 1479-1490.
- [28] ZHANG C H, GAO L Z, WU Z J, et al. SHRIMP U-Pb Zircon Age of Tuff from the Kunyang Group in Central Yunnan; Evidence for Grenvillian Orogeny in South China [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(11): 1517-1525.
- [29] 何德峰. 四川省拉拉铜矿床岩石学及地球化学研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.  
HE De-feng. Petrological and Geochemical Characteristics of the Lala Copper Deposit in Sichuan Province [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [30] 孙志明, 尹福光, 关俊雷, 等. 云南东川地区昆阳群黑山组凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地层学意义 [J]. 地质通报, 2009, 28(7): 896-900.  
SUN Zhi-ming, YIN Fu-guang, GUAN Jun-lei, et al. SHRIMP U-Pb Dating and Its Stratigraphic Significance of Tuff Zircons from Heishan Formation of Kunyang Group, Dongchuan Area, Yunnan Province, China [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(7):

- 896-900.
- [31] 关俊雷,郑来林,刘建辉,等.四川省会理县河口地区辉绿岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J].地质学报,2011,85(4):482-490.  
GUAN Jun-lei, ZHENG Lai-lin, LIU Jian-hui, et al. Zircons SHRIMP U-Pb Dating of Diabase from Hekou, Sichuan Province, China and Its Geological Significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(4): 482-490.
- [32] 朱华平,范文玉,周邦国,等.论东川地区前震旦系地层层序:来自锆石 SHRIMP 及 LA-ICP-MS 测年的证据[J].高校地质学报,2011,17(3):452-461.  
ZHU Hua-ping, FAN Wen-yu, ZHOU Bang-guo, et al. Assessing Precambrian Stratigraphic Sequence of Dongchuan Area: Evidence from Zircon SHRIMP and LA-ICP-MS Dating[J]. Geological Journal of China Universities, 2011, 17(3): 452-461.
- [33] 朱华平,周邦国,王生伟,等.扬子地台西缘康滇克拉通中碎屑锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J].矿物岩石,2011,31(1):70-74.  
ZHU Hua-ping, ZHOU Bang-guo, WANG Sheng-wei, et al. Detrital Zircon U-Pb Dating by LA-ICP-MS and Its Geological Significance in Western Margin of Yangtze Terrane[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2011, 31(1): 70-74.
- [34] 杨红,刘福来,杜利林,等.扬子地块西南缘大红山群老厂河组变质火山岩的锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J].岩石学报,2012,28(9):2994-3014.  
YANG Hong, LIU Fu-lai, DU Li-lin, et al. Zircon U-Pb Dating for Metavolcanites in the Laochanghe Formation of the Dahongshan Group in Southwestern Yangtze Block, and Its Geological Significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(9): 2994-3014.
- [35] 王冬兵,尹福光,孙志明,等.扬子陆块西缘古元古代基性侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素及其地质意义[J].地质通报,2013,32(4):617-630.  
WANG Dong-bing, YIN Fu-guang, SUN Zhi-ming, et al. Zircon U-Pb Age and Hf Isotope of Paleoproterozoic Mafic Intrusion on the Western Margin of the Yangtze Block and Their Implications[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(4): 617-630.
- [36] WANG L J, GRIFFIN W L, YU J H, et al. U-Pb and Lu-Hf Isotopes in Detrital Zircon from Neoproterozoic Sedimentary Rocks in the Northern Yangtze Block: Implications for Precambrian Crustal Evolution[J]. Gondwana Research, 2013, 23(4): 1261-1272.
- [37] 王子正,郭阳,杨斌,等.扬子克拉通西缘 1.73 Ga 非造山型花岗岩斑岩的发现及其地质意义[J].地质学报,2013,87(7):931-942.  
WANG Zi-zheng, GUO Yang, YANG Bin, et al. Discovery of the 1.73 Ga Haizi Anorogenic Type Granite in the Western Margin of Yangtze Craton, and Its Geological Significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(7): 931-942.
- [38] 侯林,丁俊,邓军,等.云南武定迤纳厂铁铜矿岩角砾岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其意义[J].地质通报,2013,32(4):580-588.  
HOU Lin, DING Jun, DENG Jun, et al. Zircon LA-ICP-MS Dating of the Magmatic Breccia from the Yinachang Iron-copper Deposit in Wuding County of Yunnan Province and Its Geological Significance[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(4): 580-588.
- [39] 郭阳,王生伟,孙晓明,等.云南省武定县迤纳厂铁铜矿区古元古代辉绿岩锆石的 U-Pb 年龄及其地质意义[J].大地构造与成矿学,2014,38(1):208-215.  
GUO Yang, WANG Sheng-wei, SUN Xiao-ming, et al. Zircon U-Pb Age of the Paleoproterozoic Diabase from the Yinachang Iron-copper Deposit, Yunnan Province, and Its Geological Implication[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2014, 38(1): 208-215.
- [40] 郭阳,王生伟,孙晓明,等.扬子地台西南缘古元古代末的裂解事件:来自武定地区辉绿岩锆石 U-Pb 年龄和地球化学证据[J].地质学报,2014,88(9):1651-1665.  
GUO Yang, WANG Sheng-wei, SUN Xiao-ming, et al. The Paleoproterozoic Breakup Event in the Southwest Yangtze Block: Evidence from U-Pb Zircon Age and Geochemistry[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(9): 1651-1665.
- [41] GAO S, LING W L, QIU Y M, et al. 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[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(13/14): 2071-2088.
- [42] QIU Y M, GAO S, MCNAUGHTON N J, et al. 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[J]. Geology, 2000, 28(1): 11-14.
- [43] 高山, QIU Yu-min, 凌文黎. 崆岭高级变质地体单颗粒锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究: 扬子克拉通 >3.2 Ga 陆壳物质的发现[J]. 中国科学: D 辑, 地球科学, 2001, 31(1): 27-35.  
GAO Shan, QIU Yu-min, LING Wen-li, et al. Single

- Zircon U-Pb Dating of the Kongling High-grade Metamorphic Terrain: Evidence for  $>3.2$  Ga Old Continental Crust in the Yangtze Craton[J]. *Science in China; Series D, Earth Sciences*, 2001, 31(1): 27-35.
- [44] ZHANG S B, ZHENG Y F, WU Y B, et al. Zircon Isotope Evidence for  $\geq 3.5$  Ga Continental Crust in the Yangtze Craton of China[J]. *Precambrian Research*, 2006, 146(1/2): 16-34.
- [45] 凌文黎, 高山, 张本仁, 等. 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[J]. *矿物岩石*, 1997, 17(4): 26-32.  
LING Wen-li, GAO Shan, ZHANG Ben-ren, et al. Early Precambrian Continental Crust Evolution at the Northern Margin of Yangtze Craton: Constrain from the Elemental and Isotopic Geochemical Study of Houhe Complex[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1997, 17(4): 26-32.
- [46] 焦文放, 吴元保, 彭敏, 等. 扬子板块最古老岩石的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J]. *中国科学: D 辑, 地球科学*, 2009, 39(7): 972-978.  
JIAO Wen-fang, WU Yuan-bao, PENG Min, et al. The Oldest Basement Rock in the Yangtze Craton Revealed by Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Composition[J]. *Science in China; Series D, Earth Sciences*, 2009, 39(7): 972-978.
- [47] ZHENG J P, GRIFFIN W L, O'RRILLY S Y, et al. Widespread Archean Basement Beneath the Yangtze Craton[J]. *Geology*, 2006, 34(6): 417-420.
- [48] SUN W H, ZHOU M F, GAO J F, et al. Detrital Zircon U-Pb Geochronological and Lu-Hf Isotopic Constraints on the Precambrian Magmatic and Crustal Evolution of the Western Yangtze Block, SW China[J]. *Precambrian Research*, 2009, 172(1/2): 99-126.
- [49] 岳军培, 孙晓猛, HIEU Pham-trung, 等. 越南 Song Da 带前新生代构造属性及构造背景分析[J]. *大地构造与成矿学*, 2013, 37(4): 561-570.  
YUE Jun-pei, SUN Xiao-meng, HIEU Pham-trung, et al. Pre-Cenozoic Tectonic Attribute and Setting of the Song Da Zone, Vietnam[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2013, 37(4): 561-570.
- [50] LAN C Y, CHUNG S L, LO C H, et al. First Evidence for Archean Continental Crust in Northern Vietnam and Its Implications for Crustal and Tectonic Evolution in Southeast Asia[J]. *Geology*, 2001, 29(3): 219-222.
- [51] LI X H, LI Z X, SINCLAIR J A, et al. Revisiting the "Yanbian Terrane": Implications for Neoproterozoic Tectonic Evolution of the Western Yangtze Block, South China[J]. *Precambrian Research*, 2006, 151(1/2): 14-30.
- [52] 吴懋德, 段锦荪, 宋学良, 等. 云南昆阳群地质[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1990.  
WU Mao-de, DUAN Jin-sun, SONG Xue-liang, et al. *Geology of Kunyang Group in Yunnan Province*[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1990.
- [53] 尹福光, 孙志明, 张璋. 会理—东川地区中元古代地层: 构造格架[J]. *地质论评*, 2011, 57(6): 770-778.  
YIN Fu-guang, SUN Zhi-ming, ZHANG Zhang. Mesoproterozoic Stratigraphic Structure Framework in Huili-Dongchuan Area[J]. *Geological Review*, 2011, 57(6): 770-778.
- [54] 钱锦和, 沈远仁. 云南大红山古火山岩铁铜矿[M]. 北京: 地质出版社, 1990.  
QIAN Jin-he, SHEN Yuan-ren. *The Dahongshan Volcanogenic Fe-Cu Deposit in Yunnan Province*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990.
- [55] HU A Q, ZHU B Q, MAO C X, et al. Geochronology of the Dahongshan Group[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1991, 10(3): 195-203.
- [56] 尹福光, 孙志明, 万方, 等. 扬子陆块西缘构造演化及其资源效应[M]. 北京: 地质出版社, 2007.  
YIN Fu-guang, SUN Zhi-ming, WAN Fang, et al. *Tectonic Evolution and Resource Effect of the Western Margin of the Yangtze Block*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.
- [57] CHEN W T, ZHOU M F, ZHAO X F. Late Paleoproterozoic Sedimentary and Mafic Rocks in the Hekou Area, SW China: Implication for the Reconstruction of the Yangtze Block in Columbia[J]. *Precambrian Research*, 2013, 231: 61-77.
- [58] 常向阳, 朱炳泉, 孙大中, 等. 东川铜矿床同位素地球化学研究: I. 地层年代与铅同位素化探应用[J]. *地球化学*, 1997, 26(2): 32-38.  
CHANG Xiang-yang, ZHU Bing-quan, SUN Da-zhong, et al. Isotope Geochemistry Study of Dongchuan Copper Deposit in Middle Yunnan Province, SW China: I. Stratigraphic Chronology and Application of Geochemical Exploration by Lead Isotopes[J]. *Geochimica*, 1997, 26(2): 32-38.
- [59] 牟传龙, 林仕良, 余谦. 四川会理天宝山组 U-Pb 年龄[J]. *地层学杂志*, 2003, 27(3): 216-219.  
MOU Chuan-long, LIN Shi-liang, YU Qian. The U-Pb Ages of the Volcanic Rock of the Tianbaoshan Formation, Huili, Sichuan Province[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2003, 27(3): 216-219.
- [60] 周家云, 郑荣才, 朱志敏, 等. 四川会理拉拉铜矿辉长岩群地球化学与 Sm-Nd 同位素定年[J]. *矿物岩石地*

- 球化学通报,2009,28(2):111-122.  
ZHOU Jia-yun, ZHENG Rong-cai, ZHU Zhi-min, et al. Geochemistry and Sm-Nd Dating of the Gabbro in the Lala Copper Ore District, Sichuan Province, China [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2009, 28(2): 111-122.
- [61] GROVES D I, BIERLEIN F P, MEINERT L D, et al. 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, 2010, 105(3): 641-654.
- [62] ZHAO X F, ZHOU M F, LI J W, et al. Late Paleoproterozoic Sedimentary Rock-hosted Stratiform Copper Deposits in South China; Their Possible Link to the Supercontinent Cycle [J]. Mineralium Deposita, 2013, 48(1): 129-136.
- [63] 陈好寿, 冉崇英. 康滇地轴铜矿床同位素地球化学 [M]. 北京: 地质出版社, 1992.  
CHEN Hao-shou, RAN Chong-ying. Isotope Geochemistry of the Copper Deposit in the Kangdian Axis [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992.
- [64] 陈好寿. 同位素地球化学研究 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1994.  
CHEN Hao-shou. Study on Isotopic Geochemistry [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1994.
- [65] 叶霖, 刘玉平, 李朝阳, 等. 云南武定迤纳厂铜矿含矿石英脉  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄及其意义 [J]. 科学通报, 2004, 24(4): 411-414.  
YE Lin, LIU Yu-ping, LI Chao-yang, et al. Ar-Ar Isotopic Age of Yinachang Copper Deposit, Wuding, Yunnan Province, China and Its Implications [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 24(4): 411-414.
- [66] 孙燕, 舒晓兰, 肖渊甫. 四川省拉拉铜矿床同位素地球化学特征及成矿意义 [J]. 地球化学, 2006, 35(5): 553-559.  
SUN Yan, SHU Xiao-lan, XIAO Yuan-fu. Isotopic-Geochemistry of the Lala Copper Deposit, Sichuan Province, China and Its Metallogenetic Significance [J]. Geochimica, 2006, 35(5): 553-559.
- [67] 李泽琴, 王奖臻, 刘家军, 等. 拉拉铁氧化物-铜-金-钼-稀土矿床 Re-Os 同位素年龄及其地质意义 [J]. 地质找矿论丛, 2003, 18(1): 39-42.  
LI Ze-qin, WANG Jiang-zhen, LIU Jia-jun, et al. Re-Os Dating of Molybdenite from Lala Fe-oxide-Cu-Au-Mo-REE Deposit, Southwest China: Implications for Ore Genesis [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2003, 18(1): 39-42.
- [68] LI Z X, ZHANG L H, POWELL C M. South China in Rodinia: Part of the Missing Link Between Australia-East Antarctica and Laurentia [J]. Geology, 1995, 23(5): 407-410.
- [69] LI Z X, BOGDANOVA S V, COLLINS A S, et al. Assembly, Configuration, and Break-up History of Rodinia: A Synthesis [J]. Precambrian Research, 2008, 160(1/2): 179-210.
- [70] ROGERS J J W, SANTOSH M. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic Supercontinent [J]. Gondwana Research, 2002, 5(1): 5-22.
- [71] ZHAO G C, SUN M, WILDE S A, et al. A Paleo-Mesoproterozoic Supercontinent: Assembly, Growth and Breakup [J]. Earth-science Reviews, 2004, 67(1/2): 91-123.
- [72] GAO S, YANG J, ZHOU L, et al. Age and Growth of the Archean Kongling Terrain, South China, with Emphasis on 3.3 Ga Granitoid Gneisses [J]. American Journal of Science, 2011, 311(2): 153-182.
- [73] HOFFMAN P F. Tectonic Genealogy of North America [M] // VAN DER PLUIJM B A, MARSHAK S. Earth Structure: An Introduction to Structural Geology and Tectonics. New York: McGraw-Hill, 1997: 459-464.
- [74] HOFFMAN P F. Speculations on Laurentia's First Giga-year (2.0 to 1.0 Ga) [J]. Geology, 1989, 17(2): 135-138.
- [75] ZHANG S B, ZHENG Y F, WU Y B, et al. Zircon U-Pb Age and Hf-O Isotope Evidence for Paleoproterozoic Metamorphic Event in South China [J]. Precambrian Research, 2006, 151(3/4): 265-288.
- [76] SUN M, CHEN N S, ZHAO G C, et al. U-Pb Zircon and Sm-Nd Isotopic Study of the Huangtuling Granulite, Dabie-Sulu Belt, China: Implication for the Paleoproterozoic Tectonic History of the Yangtze Craton [J]. American Journal of Science, 2008, 308(4): 469-483.
- [77] WU Y B, ZHENG Y F, GAO S, et al. Zircon U-Pb Age and Trace Element Evidence for Paleoproterozoic Granulite-facies Metamorphism and Archean Crustal Rocks in the Dabie Orogen [J]. Lithos, 2008, 101(3/4): 308-322.
- [78] 熊庆, 郑建平, 余淳梅, 等. 宜昌圈椅垭 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 [J]. 科学通报, 2008, 53(22): 2782-2792.  
XIONG Qing, ZHENG Jian-ping, YU Chun-mei, et al. Zircon U-Pb Age and Hf Isotope of Quanyishang A-type Granite in Yichang: Signification for the Yangtze Continental Cratonization in Paleoproterozoic [J]. Chinese

- Science Bulletin, 2008, 53(22): 2782-2792.
- [79] PENG M, WU Y B, WANG J, et al. Paleoproterozoic Mafic Dyke from Kongling Terrain in the Yangtze Craton and Its Implication[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(6): 1098-1104.
- [80] PENG M, WU Y B, GAO S, et al. Geochemistry, Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Compositions of Paleoproterozoic Aluminous A-type Granites from the Kongling Terrain, Yangtze Block: Constraints on Petrogenesis and Geologic Implications[J]. Gondwana Research, 2012, 22(1): 140-151.
- [81] 周家云, 毛景文, 刘飞燕, 等. 扬子地台西缘河口群纳长岩锆石 SHRIMP 年龄及岩石地球化学特征[J]. 矿物岩石, 2011, 31(3): 66-73.  
ZHOU Jia-yun, MAO Jing-wen, LIU Fei-yan, et al. SHRIMP U-Pb Zircon Chronology and Geochemistry of Albitite from the Hekou Group in the Western Yangtze Block[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2011, 31(3): 66-73.
- [82] 王冬兵, 孙志明, 尹福光, 等. 扬子地块西缘河口群的时代: 来自火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄的证据[J]. 地层学杂志, 2012, 36(3): 630-635.  
WANG Dong-bing, SUN Zhi-ming, YIN Fu-guang, et al. Geochronology of the Hekou Group on the Western Margin of the Yangtze Block: Evidence from Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating of Volcanic Rocks[J]. Journal of Stratigraphy, 2012, 36(3): 630-635.
- [83] 王生伟, 廖震文, 孙晓明, 等. 云南东川铜矿区古元古代辉绿岩地球化学: Columbia 超级大陆裂解在扬子陆块西南缘的响应[J]. 地质学报, 2013, 87(12): 1834-1852.  
WANG Sheng-wei, LIAO Zhen-wen, SUN Xiao-ming, et al. Geochemistry of Paleoproterozoic Diabase in the Dongchuan Copper Deposit, Yunnan, SW China: Response to Breakup of the Columbia Supercontinent in the Southwestern Margin of Yangtze Block[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(12): 1834-1852.
- [84] ZHAO G C, CAWOOD P A, WILDE S A, et al. Review of Global 2.1-1.8 Ga Orogens: Implications for a Pre-Rodinia Supercontinent[J]. Earth-science Reviews, 2002, 59(1/2/3/4): 125-162.
- [85] HOU G T, SANTOSH M, QIAN X L, et al. Configuration of the Late Paleoproterozoic Supercontinent Columbia: Insights from Radiating Mafic Dyke Swarms[J]. Gondwana Research, 2008, 14(3): 395-409.
- [86] EVANS D A D, MITCHELL R N. Assembly and Breakup of the Core of Paleoproterozoic-Mesoproterozoic Supercontinent Nuna[J]. Geology, 2011, 39(5): 443-446.
- [87] SILVEIRA E M, SODERLUND U, OLIVEIRA E P, et al. First Precise U-Pb Baddeleyite Ages of 1 500 Ma Mafic Dykes from the São Francisco Craton, Brazil, and Tectonic Implications[J]. Lithos, 2012, 174: 144-156.
- [88] JOHANSSON A. Baltica, Amazonia and the SAMBA Connection: 1 000 Million Years of Neighbourhood During the Proterozoic[J]. Precambrian Research, 2009, 175(1/2/3/4): 221-234.
- [89] BUCHAN K L, MERTANEN S, PARK R G, et al. Comparing The Drift of Laurentia and Baltica in the Proterozoic: The Importance of Key Palaeomagnetic Poles[J]. Tectonophysics, 2000, 319(3): 167-198.
- [90] KALSBECK F. Geochemical Comparison Between Archean and Proterozoic Orthogneisses from the Nagssugtoqidian Orogen, West Greenland[J]. Precambrian Research, 2001, 105(2/3/4): 165-182.
- [91] PESONEN L J, ELMING S A, MERTANEN S, et al. Paleomagnetic Configuration of Continents During the Proterozoic[J]. Tectonophysics, 2003, 375(1/2/3/4): 289-324.
- [92] SALMINEN J, PESONEN L J. Paleomagnetic and Rock Magnetic Study of the Mesoproterozoic Sill, Valaam Island, Russian Karelia[J]. Precambrian Research, 2007, 159(3/4): 212-230.
- [93] BISPO-SANTOS F, D'AGRELLA-FILHO M S, PACCA I I G, et al. Columbia Revisited: Paleomagnetic Results from the 1 790 Ma Colíder Volcanics (SW Amazonian Craton, Brazil)[J]. Precambrian Research, 2008, 164(1/2): 40-49.
- [94] LUBNINA N V, MERTANEN S, SODERLUND U, et al. A New Pole for the East European Craton at 1 452 Ma: Paleomagnetic and Geochronological Constraints from Mafic Rocks in the Lake Ladoga Region (Russian Karelia)[J]. Precambrian Research, 2010, 183(3): 442-462.
- [95] PISAREVSKY S A, BYLUND G. Paleomagnetism of 1 780-1 770 Ma Mafic and Composite Intrusions of Smaland (Sweden): Implications for the Mesoproterozoic Supercontinent[J]. American Journal of Science, 2010, 310(9): 1168-1186.
- [96] ZHOU M F, ZHAO X F, CHEN W T, et al. Proterozoic Fe-Cu Metallogeny and Supercontinental Cycles of the Southwestern Yangtze Block, Southern China and Northern Vietnam[J]. Earth-science Reviews, 2014, 139: 59-82.