

印度达尔瓦尔克拉通绿岩带 BIF 型铁矿 地质特征及成因分析

成功¹, 孙卫宾¹, 李尚林², 罗彦军², 李丹¹

(1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 湖南 长沙 410083;

2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

摘要:印度铁矿储量约占全球的7%, 矿石类型以前寒武纪 BIF 铁矿为主, 其中产于绿岩带以及绿片岩相岩石中的 BIF 型铁矿是印度最重要的铁矿类型。南印度地盾达尔瓦尔克拉通发育众多绿岩带, 绿岩带中发育大规模 BIF 铁矿, BIF 铁矿属于不同的地层序列, 有不同的岩石组合关系。笔者对吉德勒杜尔加绿岩带和库斯赫塔吉绿岩带 BIF 地球化学分析表明, 根据 Al_2O_3 含量, BIF 分为页岩 BIF($\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 2\%$) 和石英岩 BIF($\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 2\%$), BIF 呈石英氧化物相, 碳酸盐相和硫化物相。BIF 主量和微量元素表明 BIF 为陆源碎屑沉积和火山碎屑沉积共同作用形成; 稀土元素表明 BIF 铁矿呈 Ce 负异常和 Eu 正异常。达尔瓦尔克拉通测年数据表明, 经过 2.7~2.65 Ga 和 2.58~2.54 Ga 两期主要的火山作用, 2.7~2.6 Ga 和 2.58~2.52 Ga 2 个阶段的大陆增生作用, 形成了达尔瓦尔克拉通和绿岩带。BIF 成矿来源上, AMOR 的高温热液提供大量的 Fe 和 SiO_2 , 海洋中生物光合作用提供了 O_2 , 在化学沉积和碎屑沉积共同作用下, 形成了 BIF 铁矿。

关键词: 达尔瓦尔克拉通; 绿岩带; BIF; 地球化学; 成因

中图分类号: P617

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2016)04-0136-10

Geological Characters and Genesis Analysis of Greenstone-type BIF Iron Deposits in Dharwar Craton, India

CHENG Gong¹, SUN Weibin¹, LI Shanglin², LUO Yanjun², LI Dan¹

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Xi'an Center of China Geology Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: India takes up about 7% of iron ore reserves in the world, which is dominated by Precambrian BIF iron. In which, the BIF iron ores occurred within greenstone belt or green schist serve as the most important type of iron deposits in India. The greenstone belts were well developed in Dharwar Craton and South India Shield, where a lots of BIF iron deposits were developed in different strata sequences and rock association. The geochemical characters of BIF deposits in Chitradurga and Kushtagi greenstone belts have been analyzed and discussed in this paper. The results show that these BIFs can be classified into shale and quartz BIFs by using the limit of 2%

收稿日期: 2015-09-12; 修回日期: 2016-06-01

基金项目: 澳洲-印度克拉通重要矿床地质背景与成矿规律研究(1212011120325), 南亚地区基础地质图件编制与成矿地质背景研究(1212011120333)

作者简介: 成功(1972-), 男, 讲师, 硕士生导师, 在职博士, 主要从事遥感及地质找矿等研究。E-mail: 417375394@qq.com

Al₂O₃ content. And these BIFs show three lithofacies, such as quartzoxide, carbonate or sulfides phases. The major and trace elements geochemistry show that these BIFs were formed by the joint action of terrigenous clastic and volcanic clastic sedimentary. The rare earth elements geochemistry shows that these BIFs have negative Ce anomalies and positive Eu anomalies. The dating data of Dharwarcraton suggest that two major volcanisms occurred in 2.7~2.65 Ga and 2.58~2.54 Ga, and two stages continental accretions happened in 2.7~2.6 Ga and 2.58~2.52 Ga, which caused the formation of Dharwarcraton and related greenstone belts. As for the ore-forming materials source of these BIFs deposits, the Fe and SiO₂ were came from the high-temperature hydrothermal of AMOR, the O₂ was sourced from marine biological photosynthesis, and these BIF deposits were formed by the combined action of chemical and clastic sediments under this environment.

Keywords: Dharwar; greenstone belt; BIF; geochemistry; genesis

绿岩带是指由前寒武纪变质火山-沉积岩系组成的表壳岩,通常由早期的火山岩和晚期的沉积岩或火山碎屑沉积岩组成。绿岩带主要产出在古陆核之间或其边缘,少数为古陆核的不成部分。绿岩带通常为长条状或不规则状,在同构造期片麻岩类或花岗岩类岩石内分布。条带铁建造(Banded Iron Formation,简称 BIF),大多形成于前寒武纪,为变质沉积岩。条带铁建造中铁含量达到工业品位就成为 BIF 铁矿床。

印度是重要的铁矿生产国,铁矿总量占世界铁矿总量的 7%,铁矿年产量位居第四位,仅次于中国,巴西和澳大利亚。产于绿岩带以及绿片岩相岩石中的铁矿是印度最重要的铁矿类型,位于达尔瓦尔克拉通和巴斯塔尔克拉通。其中达尔瓦尔克拉通经过太古代 2 个阶段形成发育众多绿岩带,在形成过程中和形成后,长期的火山作用和沉积作用形成了丰富的金属矿产资源,其中,BIF 铁矿尤其富集。

新太古宙(2.8~2.5 Ga)时期,全球范围内的主要克拉通普遍经历了大规模的陆壳生长过程,是绿岩带形成最为集中的阶段,现今超过 80%的陆壳形成于这一阶段(翟明国,2010)。世界上最早的 BIF 形成于 38 亿年,在 27 亿年达到峰值,大规模 BIF 在 18 亿年左右趋于结束(KLEIN C,2005)。克拉通 BIF 形成时代与早前寒武纪岩浆活动的时间基本一致(张连昌等,2012),GROSS 将条带铁建造分为 2 类:阿尔戈马型(Algoma)和苏比利尔湖(Superior)型(GROSS G A,1980)。中国条带状铁建造铁矿床以绿岩带阿尔戈马型为主,苏比利尔湖型条带状铁建造铁矿床在中国分布不多,多形成于古元古代,发

育于克拉通盆地内(沈保丰等,2005;张连昌等,2012)。印度达尔瓦尔克拉通绿岩带地质年代跨度大,记录了丰富的克拉通演化信息。BIF 铁矿床多发育在绿岩带,且具有不同的岩相和岩石组合,矿床类型、成矿来源及成矿环境存在争议。研究达尔瓦尔克拉通绿岩带和 BIF 发育规律,对研究克拉通演化、地质年代学、前寒武纪时期构造环境和绿岩带型 BIF 矿床成矿机制具有重要作用。

1 地质背景

达尔瓦尔克拉通(Dharwar)面积不到 50 万 km²,南部是新元古代麻粒岩带,北部是德干岩群,东北是卡里姆纳加尔麻粒岩带(2.6 Ga),东部是元古宙东高止山活动带(图 1)。达尔瓦尔克拉通是太古代地域典型的“三部曲”结构:早太古宙—中太古宙的半岛片麻岩基底,2 期火山-沉积绿岩带——萨尔古尔群和达尔瓦尔超群绿岩带,新太古宙钙碱性到 K 质深成岩体(CHARDON D,2011)。根据花岗岩和片麻岩不同年龄和特征,绿岩分布,地壳厚度,变质矿物组合和基底融化程度等,达尔瓦尔克拉通分为东克拉通(EDC)和西克拉通(WDC),沿吉德勒杜尔加(Chitradurga)绿岩带东部边界的剪切带被认为是 2 个地块间的分界线(JAYANANDA,2006)。达尔瓦尔克拉通为太古宙大陆壳,岩相从北部向南部依次为绿岩相、角闪岩相、麻粒岩相渐变。近来,结合 U-Pb 锆石年龄和 Nd 同位素数据,达尔瓦尔克拉通被分为西、中、东达尔瓦尔省。西达尔瓦尔省是主要的老地壳(3.4~3.2 Ga),中达尔瓦尔

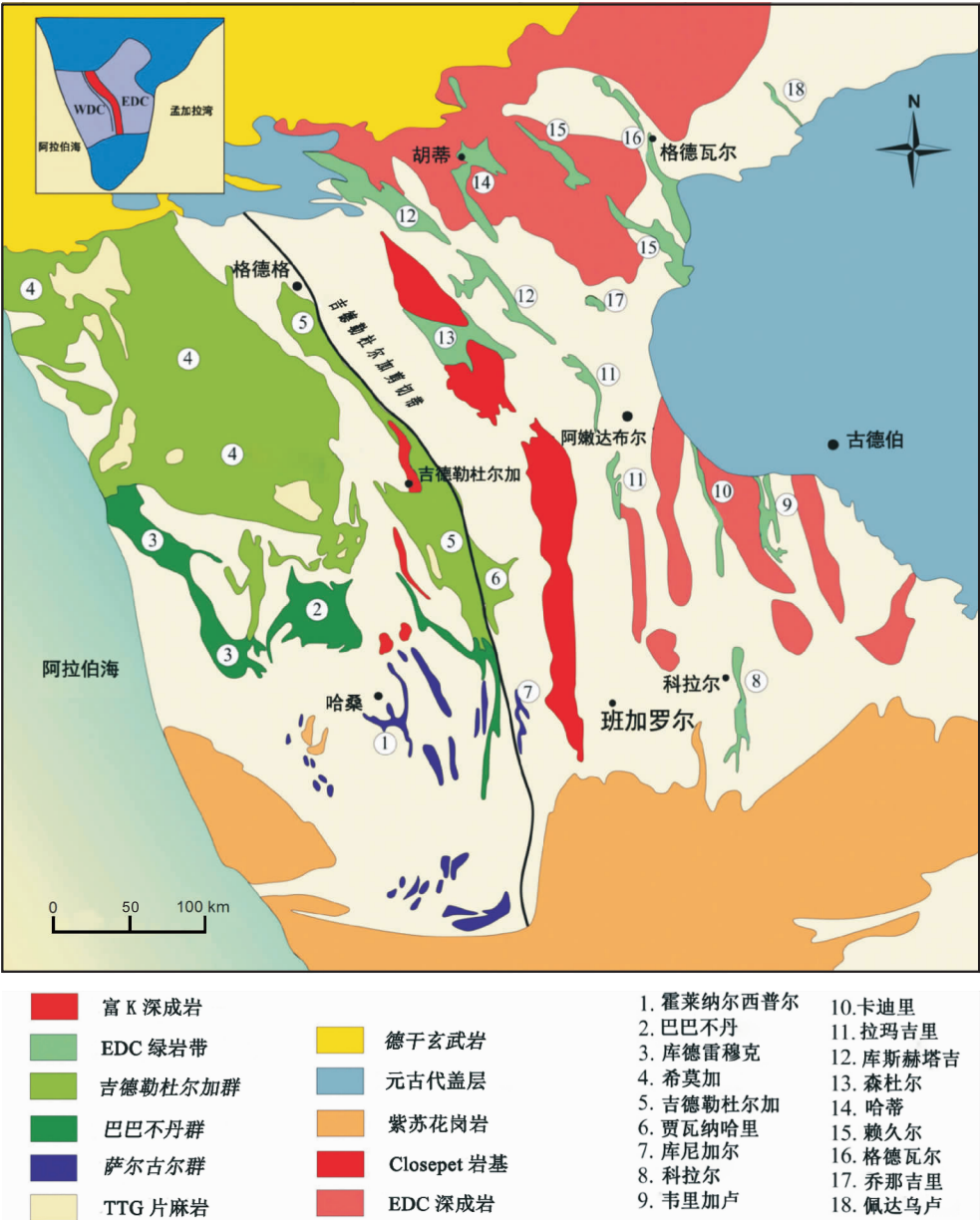


图1 达尔瓦尔克拉通及绿岩带地质简图(据 JAYANANDA M,2013,改绘)

Fig. 1 Geological sketch map of the Dharwarcraton and greenbelts(After JAYANANDA M, 2013 modified)

省为老地壳(3.4~3.2 Ga)和新地壳(2.56~2.52 Ga)混合,东达尔瓦尔省主要是新地壳(2.7~2.52 Ga)(DEY S,2013)。

西达尔瓦尔克拉通(WDC,以下简称 WDC)由 TTG 半岛片麻岩,较早的萨尔古尔群和较晚的达尔瓦尔超群绿岩带以及新钙碱性到钾质深成岩组成(JAYANANDA,2006)。半岛片麻岩在 3.6~3.2 Ga 经过几个阶段的增生作用形成。萨尔古尔群绿岩带主要为科马提岩-玄武岩火山岩,还有一些长英

质火山岩,夹有石英岩-泥质岩-碳酸盐岩-BIF 沉积岩。达尔瓦尔超群分为下巴巴不丹群和上吉德勒杜尔加群,不整合覆盖半岛片麻岩和萨尔古尔群岩石。巴巴不丹群包括单成分砾岩,千枚岩,长英质火山岩和 BIF。吉德勒杜尔加群包括多成分砾岩,铁镁质火山岩,杂砂岩和顶层包括碳酸盐岩、长英质火山岩和 BIF 的泥质岩。萨尔古尔群绿岩带科马提岩的 Sm-Nd 同位素年龄为 $(3\ 352\pm110)\text{ Ga}$ (JAYANANDA,2006),长英质火山岩锆石 SHIMP U-

Pb 年龄为 $(3\,298 \pm 7)$ Ma (PEUCAT J J, 1995)。达尔瓦尔超群年代为 $3.0 \sim 2.5$ Ga (CHARDON D, 2011), 花岗质深成岩年代为 2.61 Ga (JAYANANDA, 2006)。东达尔瓦尔克拉通 (EDC, 以下简称 EDC) 包括 TTG 片麻岩和混合岩、细长的绿岩带、钙碱性到钾质深成岩体。TTG 片麻岩为 $2.7 \sim 2.5$ Ga, 含有少量 $3.0 \sim 3.4$ Ga 陆壳痕迹。绿岩带年代为 $2.7 \sim 2.5$ Ga (SARMA D S, 2011), 深成岩体为 $2.56 \sim 2.50$ Ga (CHARDON D, 2011), 岩体中最突出的是 Closepet 岩基。EDC 大多数绿岩带边界与新太古宙同构造深成岩为侵入接触关系, 只有科拉尔绿岩带不是这种关系, 科拉尔绿岩带西缘不整合覆盖在基底上, 基底年代为 3.1 Ga (CHARDON D, 2002)。EDC 绿岩岩系主要是火山岩和 BIF, 火山岩包括科马提岩, 高 Mg 玄武岩, 安山岩, 埃达克岩和流纹岩。

达尔瓦尔克拉通出露众多新太古宙绿岩带 (图 1), 这些绿岩带包括科马提岩玄武岩中性到长英质火山岩。WDC 主要有吉德勒杜尔加绿岩带、巴巴不丹 (Bababudan)、希莫加 (Shimoga) 绿岩带, EDC 主要有库斯赫塔吉 (Kushtagi)、森杜尔 (Sandur)、拉玛吉里 (Ramagiri)、科拉尔 (Kolar) 等绿岩带。

WDC 的吉德勒杜尔加绿岩带长 450 km, 是印度最长的太古宙绿岩带。南端是北北东走向, 北部是北北西走向。绿岩带从北部格德格延伸到南部的迈索尔塞林伽巴丹, 在吉德勒杜尔加附近, 宽度达到最大的 50 km, 在南部最窄处只有 2 km, 面积大约 $6\,000$ km²。片麻岩上层是达尔瓦尔超群, 包括下巴不丹群和上吉德勒杜尔加群, 2 个群分隔明显, 以底部多成分碎屑砾岩为界。萨尔古尔群主要沿片岩带东部和西部边界出露。巴巴不丹群, 出露在片岩带西部边界, 包括石英-卵石单成分碎屑底砾岩, 顶部石英岩和铁镁质岩套。吉德勒杜尔加群覆盖大部分绿岩带, 有些不整合覆盖巴巴不丹群, 另外一些直接覆盖片麻岩。吉德勒杜尔加群分为 3 组: Vanivilas 组, 包括砾岩、绿泥石片岩、石英岩、石灰岩、白云岩、锰-铁条带; Ingaldhal 组, 包括酸性、中性、基性火山岩和火成碎屑岩; 希里尤尔组, 包括杂砂岩-泥质岩套、BIF、变玄武岩和多源碎屑岩。侵入吉德勒杜尔加绿岩带中部的花岗岩年龄接近 $2\,620$ Ma, 北部格德格区

域花岗岩为 $2\,550$ Ma (JAYANANDA M, 2013)。

EDC 中, 科拉尔绿岩带长 40 km, 北-南向斜。主要的岩石是拉斑玄武岩和较小的科马提岩。玄武岩的枕状结构表明是水下环境喷发。玄武质单元包括辉长岩层和间歇辉岩条带。绿岩带东部一组岩石被称为查姆平片岩带 (champion gneiss), 包括长英质火山岩、火山块岩、变质杂砂岩、带片麻岩卵石的复矿碎屑砾岩、花岗岩和火山质碎屑。绿岩带西部包括 TTG 基底片麻岩和石英二长岩的花岗状岩石侵入绿岩, 绿岩带东缘和南缘与混杂片麻岩和同构造的深成岩接触变形。根据已有测年数据, 科拉尔绿岩带铁镁质火山作用年龄可能为 2.7 Ga (PEUCAT J J, 2013)。绿岩带基底年龄为 3.3 Ga, 在 2.7 Ga 绿岩盆地侵位, 2.55 Ga 再造, 形成长英质深成岩作用和火山作用 (JAYANANDA M, 2000)。森杜尔绿岩带长 10 km, 宽 35 km, 是克拉通晚太古宙高温变质区域, 该区域与晚太古宙低温区域被一个韧性剪切带分隔。火山岩系包括铁镁质和超铁镁质、块状和枕状玄武岩、中型-长英质岩, 例如, 安山岩、流纹岩和埃达克岩。沉积岩包括砂质岩、浊积岩、页岩、叠层碳酸盐岩、BIF、条带锰建造 (BMF) 和石英。长英质火山岩锆石 U-Pb SHRIMP 年龄为 2.7 Ga, 高 Mg 玄武岩和科马提岩 Sm/Nd 同位素年龄为 2.7 Ga (MANIKYAMBA C, 2006)。

格德瓦尔 (Gadwal) 绿岩带为北北西-南南东向, 长 85 km, 宽 $1 \sim 15$ km。绿岩系包括基底变质玄武岩、角闪岩、上层的英安岩、流纹英安岩、流纹岩和火山角砾岩。对变质玄武岩主量和微量元素研究表明, 变质玄武岩中的玻安岩为耐熔地幔湿地幔熔融形成 (MANIKYAMBA C, 2007)。²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 测定年龄为 $2\,585$ Ma, 该年龄可能对应石英质岩浆流结晶 (JAYANANDA M, 2013)。哈蒂绿岩带位于 EDC, 主要是少量沉积成分的双峰火山岩。绿岩带与周围片麻岩接触, 通常受花岗岩状深成岩剪切和侵入。绿岩带火山岩主要是枕状变质玄武岩, 在玄武岩内有细粒流纹岩和凝灰岩。绿岩带已有的同位素测年数据显示绿岩带铁镁质火山作用发生在 $2.7 \sim 2.65$ Ga, 长石质火山岩流、周围深成岩侵位和砾岩形成大概在 $2.58 \sim 2.54$ Ga, 花岗岩侵入体接近 2.2 Ga (JAYANANDA M, 2013)。拉玛吉里绿

岩带从南部的拉玛吉里延伸到北部的 Hungund, 长 180 km。绿岩带西部主要为玄武岩, 包括玄武岩、安山岩、英安岩和带有少量 BIF 的流纹岩。在拉玛吉里有超铁镁质片岩出露, 在 Hungund 区域则是枕状玄武岩。已有测年数据显示绿岩带年龄为 2.7 Ga (NUTMAN A P, 1996)。

2.8~2.5 Ga, 全球范围内主要克拉通普遍经历大规模陆壳生长过程, 超基性-基性岩浆流、TTG 和钙碱性花岗岩套侵位克拉通。达尔瓦尔克拉通绿岩带经过长期沉积变质作用形成丰富的 BIF 铁矿等矿产资源, 尤其在 WDC 的吉德勒杜尔加、巴巴不丹、希莫加绿岩带和 EDC 的库斯赫塔吉、森杜尔等绿岩带, 有大量的 BIF 铁矿, 在 WDC 的吉德勒杜尔加、EDC 的拉玛吉里、科拉尔等绿岩带有大量条带锰建造和金矿。研究这些绿岩带可以解释达尔瓦尔克拉通增生机制及成矿作用。

2 BIF 铁矿地质特征

达尔瓦尔克拉通 BIF 矿床众多, 主要分为赤铁矿和磁铁矿。主要的赤铁矿有贝拉里 (Bellary) 地区的多里玛兰 (Donimalai) 和 Aarpee 矿床, 吉德勒杜尔加地区的锡瓦甘加 (Sivaganga) 和希里尤尔 (Hiriyur) 矿床, 希莫加地区的恰恩纳吉里矿床, 以及杜姆古尔 (Tumku) 地区、北卡纳拉 (North Kanara) 地区, 阿嫩达布尔 (Anantapur) 地区等, 主要的磁铁矿有吉格默格卢尔 (Chikmagalur) 的巴巴不丹矿床、库德雷穆克 (Kudramukh) 矿床和北卡纳拉的 Kodalgadde 矿床。其中多里玛兰矿床探明储量为 1.55 亿 t, 平均品位 Tfe 为 64.5%。库德雷穆克矿床探明铁矿储量为 7 亿 t, 矿石平均品位 Tfe 为 38.6%。在达尔瓦尔克拉通 BIF 矿床中, 赤铁矿矿床品位较高, 均在 58% 以上, 磁铁矿矿床品位较低, 一般为 30%~40%。

Naqvi 提出绿岩带有 5 个地层序列 (NAQVI S M, 1988), 在达尔瓦尔克拉通, BIF 分布在 2.6~3.5 Ga 时期内的 5 个连续的沉积单元中, 分别为 BIF1、BIF2、BIF3、BIF4、BIF5。第一个 BIF 单元分布在较老的绿岩带中; 第二个 BIF 分布在 Javanahalli 群; 第三个单元 BIF 最为集中, BIF 层厚度也最大, 形成

于 3.0~2.8 Ga, 主要分布在巴巴不丹、库德雷穆克、萨恩杜尔、库斯赫塔吉等绿岩带, BIF 主要呈石英质和氧化物-硫化物-碳酸盐混合相, 沉积环境为稳定陆棚; 第四个单元 BIF 有氧化物、碳酸盐和硫化物相, 主要分布在吉德勒杜尔加绿岩带; 第五个单元 BIF 层很薄, 主要是石英和页岩氧化物相。

2.1 库斯赫塔吉绿岩带 BIF

东达尔瓦尔克拉通库斯赫塔吉绿岩带长 115 km, 宽 15 km, 面积 1 500 km², 北西-南东走向。绿岩带西北部 BIF, 曾经被 Kaladgi 岩石覆盖, 现在出露, 这些 BIF 是达尔瓦尔克拉通变质最晚的 BIF。泥质条带在纯化学沉积条带之间, 没有经受同沉积和沉积后蚀变和风化作用。绿岩带包括枕状玄武岩、铁镁质片岩、长英质火山岩、碳酸盐岩、变质沉积亚氯酸片岩/千枚岩和 BIF, 偶有花岗质侵入体。

绿岩带 BIF 主要含赤铁矿和石英, 这些 BIF 可分为两种类型, 石英 BIF (CBIF) 和页岩 BIF (SBIF)。两种类型都不含假象赤铁矿和磁铁矿。石英 BIF 含少量碎屑成分, 主要为他形赤铁矿和隐晶质到微晶石英和少量碎屑白云母的蚀变带。不同地层富铁层厚度和赤铁矿富集度差异明显。在一些地方地层从富二氧化硅到富铁突变, 一些地方则为渐变。在富石英条带, 赤铁矿呈浸染状颗粒或者细条带。相比石英 BIF, 页岩 BIF 含大量碎屑岩。页岩 BIF 与石英 BIF 间层, 页岩 BIF 除赤铁矿和石英之外, 还含高岭石和白云母。这些高岭土不是原地风化形成, 而是铁和二氧化硅沉积之前的细粒黏土质沉积。

Khan 对 dui Hiremagi-Ramthal 和 Aihole-Sulebhavi 铁矿床的 BIF 进行采样、分析, 得到了库斯赫塔吉绿岩带 BIF 的微量元素和稀土元素等地球化学特征 (NAQVI S M, 2006)。根据 Al₂O₃ 含量将绿岩带 BIF 分为石英 BIF 和页岩 BIF, Al₂O₃ 含量 <2% 为石英 BIF, 含量 >2% 则为页岩 BIF。

2.1.1 微量元素

Al、Zr、Hf、Y、Rb、Sr、Ta、U、Th, 由长英质岩石风化后进入海水, 铁镁矿物元素 Cr、Ni、Co、V、Sc 来源于铁镁质岩石, 可能是铁镁质岩石风化也可能是盆内火山作用。库斯赫塔吉绿岩带 BIF 铁矿中 Zr、Hf、Y、Rb、Sr 富集, 表明 BIF 序列沉积过程中盆地中存在陆源物质 (BAU, 1993)。类似地 Ni、Cr、Co、

V、Sc 富集可能表明铁镁质-超铁镁质物质进入盆地。BIF 样品显示 Al_2O_3 与 Zr 呈正相关(相关系数为 0.9),表明连续或间歇的细粒陆源碎屑进入盆地。石英 BIF 中 Hf、Zr 分别低于 0.35×10^{-6} 和 16×10^{-6} (KHAN, 1996),页岩 BIF 可达到 8.18×10^{-6} 和 276.88×10^{-6} (KHAN, 1996)。 Al_2O_3 与 V、Sc 同样呈正相关(相关系数分别为 0.8 和 0.9),页岩 BIF 比石英 BIF 更为富集 V 和 Sc。库斯赫塔吉绿岩带 BIF 样品中 Sc/La 大多小于 1,表明不同 BIF 岩层中陆源碎屑物质和火山碎屑物质类型和数量不同,2 种类型碎屑以不同比例与化学沉积一同作用。如果不是常量型的数据,最好都配参考文献,或者原始数据并注明出处。

2.1.2 稀土元素

根据北美页岩标准化 REE 型式,石英 BIF 中 $\text{LREE}/\text{HREE} < 1$, $\text{Nd}/\text{Yb} < 1$ (Khan, 1996),强 Eu 正异常。页岩 BIF 标准化型式总体与石英 BIF 相同,只是 REE 总量更高,表现不完全的 Ce 负异常。库斯赫塔吉绿岩带 BIF 样品大多数表现 Eu 正异常,可能表明含 Fe、 SiO_2 的溶液来源于还原环境,富 Eu 热液流体进入海洋使得 BIF 中 Eu 呈正异常。REE 总量与 Zr 含量呈正相关(相关系数为 0.87) (KHAN, 1996),高 Zr 含量提升了 REE 总量,REE 富集则表明 BIF 含陆源成分。

2.2 吉德勒杜尔加绿岩带 BIF

吉德勒杜尔加绿岩带以变沉积岩为主,其主要是单成分和多成分碎屑砾岩,杂砂岩和叠层碳酸盐岩。杂砂岩、多成分碎屑岩砾岩和长石砂岩在不同岩层显示递变层理。火山岩显示枕状结构,刺玻结构。绿岩带一个重要的特征是叠层岩白云岩和石英经含锰碳酸盐页岩过渡到 BIF。叠层岩层、水流层理和波痕的石英岩、石英砾岩,片麻岩自上而下分布。

吉德勒杜尔加绿岩带 BIF 主要集中在希里尤尔、Sibaganga、Bhimasamudra、Medikeripura、Kadlegudam 等地,包括石英氧化物相 BIF,石英碳酸盐相 BIF 和硫化物相 BIF,这 3 种 BIF 都伴有页岩 BIF。BIF 有 3 种岩石组合关系:①砂质岩-叠层岩-碳酸盐岩-泥质岩。②火山岩-火山碎屑岩。③杂砂岩-泥质岩火山岩套。第一种组合关系中,石英和页岩质的碳酸盐和氧化物相 BIF 发育在一套

基底序列中,这一序列包括石英岩、正负角闪岩、叠层石碳酸盐岩、碳质燧石、含锰碳酸盐岩和千枚岩。这套岩石位于绿岩带西缘,属于吉德勒杜尔加群 Vanivilas 组的一部分。第二种岩石组合主要在绿岩带中部发育,碳酸盐和硫化物相 BIF 与火山岩和火山碎屑岩伴生。这些碳酸盐岩和硫化物相 BIF 为石英和页岩质。在硫化物相 BIF 上部 and 下部,是火山灰、角砾集块岩、火山碎屑火山弹和枕状熔岩。第三种 BIF 组合包括氧化物相 BIF,杂砂岩和泥质岩,该组合中 BIF 层薄,普遍呈北-南向,其中页岩和石英质 BIF 都有发现。RAO(1995)对吉德勒杜尔加绿岩带不同地区不同类型 BIF 进行采样并分析了它们的地球化学数据图 2。

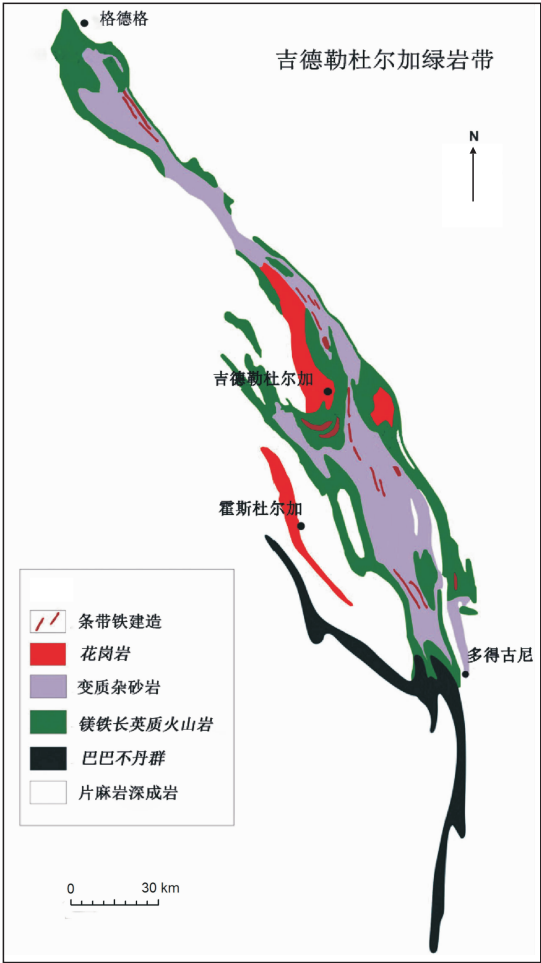


图 2 吉德勒杜尔加绿岩带地质简图
(据 JAYANANDA M, 2013, 改绘)

Fig. 2 Geological sketch map of the Chitradrga green belt
(After JAYANANDA M, 2013 modified)

2.2.1 主量元素

吉德勒杜尔加绿岩带中 BIF 的 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 SiO_2 是 BIF 中 3 种主要的成分,以 Al_2O_3 含量 2% 为界,BIF 可分为含量高的页岩 BIF 和含量低的石英 BIF。 Fe 、 SiO_2 含量总的呈反比, $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 摩尔比依赖铁和二氧化硅交替层的厚度。 SiO_2 、 Fe_2O_3 呈不同程度负相关,其中石英 BIF 主要由 SiO_2 和 Fe_2O_3 组成,二者呈相关最为明显,而盐酸盐相 BIF 因 CaO 含量不同相关程度也不同,硫化物相相关程度较石英 BIF 稍弱。页岩 BIF 富 Al_2O_3 、 TiO_2 ,表明碎屑源包括陆源和火山碎屑。大多数石英氧化物相 BIF 低 Al_2O_3 (0.01%~0.1%) 和 TiO_2 (0.01%~0.2%),表明主要为化学沉积(RAO,1995)。

2.2.2 微量元素

Zr 、 Hf 、 Y 、 Sr 来源于长石风化,而 Cr 、 Ni 、 Co 、 V 、 Sc 为铁镁质源。吉德勒杜尔加绿岩带 BIF 中 Zr 、 Hf 、 Y 、 Rb 、 Sr 的富集和 Na_2O 、 K_2O 的亏损,可能表明一段时间 BIF 序列沉积中陆源物质沉积。 Zr 、 Hf 在页岩 BIF 正相关(比值 0.9),而在其他 BIF 中丰度低且随机分布。 $\text{Zr}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Hf}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 正相关(摩尔比分别为 0.9 和 0.79)。3 种类型 BIF 都含 Ni 、 Cr 、 Co ,其中页岩 BIF 相对富 Cr 、 Ni ,硫化物相 BIF 相对富 Co ,也较富 Ni 、 Cr ,3 种元素之间呈明显正相关,而大部分氧化物相 BIF 亏损 Ni 、 Cr (RAO,1995)。

2.2.3 稀土元素

石英 BIF 和页岩 BIF 在 REE 组分上表现不同的丰度, La 富集、 Ce 亏损程度。氧化相、碳酸盐相、硫化物相太古宙平均沉积岩标准化 REE 型式基本相同,而硫化物相 REE 总量较高,尤其是高 Al_2O_3 的硫化物相 BIF。石英 BIF 亏损 REE,页岩 BIF 富集。石英 BIF 表现 La 富集,页岩 BIF 则亏损 La 。页岩 BIF 硫化物相不表现 Ce 亏损,而氧化物和碳酸盐相 BIF 因 Ce^{3+} 氧化为 Ce^{4+} 表现负 Ce 异常,硫化物相 BIF 不表现 Ce 负异常。大部分 BIF 表现 Eu 正异常(RAO,1995)。

3 成因分析

3.1 克拉通大陆增长和绿岩带火山作用

达尔瓦尔克拉通新太古宙大陆增生构造环境还

存在争议,但岩石测年数据越来越多,达尔瓦尔克拉通大陆地壳生长的阶段性也逐渐清晰。根据这些测年数据,JAYANANDA 将达尔瓦尔克拉通在新太古宙的大陆增长分为 2.7~2.65 Ga 和 2.58~2.52 Ga 2 个阶段(JAYANANDA M, 2013)。第一阶段为西达尔瓦尔克拉通东缘铁镁质岩浆岩和长石质深成岩增生;第二阶段为 TTG 和钙碱性深成岩和长石质火山岩侵位。

第一阶段 2.7~2.65 Ga 增生作用发生在吉德勒杜尔加绿岩带东部和科拉尔绿岩带及其东部,主要是长英质深成岩作用和绿岩火山作用,与之有关的铁镁质岩浆活动没有表现出受已有大陆影响的特征。这一阶段增生作用可能发生在以 >3.0 Ga, WDC 为边界的海洋环境,并通过融化下地壳,钾质深成岩侵位和局部变形影响 WDC 东缘,在 WDC 内部没有发现 2.6 Ga 之后的岩浆增生作用,从 WDC 到科拉尔绿岩带,花岗-绿岩区从 WDC 侵位到科拉尔绿岩带,这一过渡区即为中达尔瓦尔省。2.56~2.51 Ga 期间的超热造山运动对整个东达尔瓦尔克拉通都有着结构、岩浆作用、变质作用的影响,这次造山运动与第二阶段 2.58~2.52 Ga 的增生作用关联,这一阶段增生事件包括 TTG/钙碱性深成岩化作用,长石质火山活动贯穿整个 EDC (CHARDON D, 2011)。这是太古宙时期最晚的造山运动和岩浆质增生,对 >3.0 Ga 的 WDC、 $>3.0\sim 2.7$ Ga 的中达尔瓦尔省和 2.7~2.65 Ga 的东达尔瓦尔省都有影响。如此广泛的影响区域,还有同期火成或壳源的深成岩和长石火山岩,表明可能为活动边缘环境或者混合弧/地幔柱环境(MOYEN J F, 2003)。在中达尔瓦尔和 EDC 下部的西倾俯冲板块导致 EDC 下部巨地幔柱上升,进而引发第二次增生。上升到地幔柱引起地壳再造、局部变质和 2.52~2.50 Ga 的太古宙地壳克拉通化。

达尔瓦尔克拉通新太古宙绿岩带 U-Pb 和 Nd 数据和同位素/年龄数据表明有 2 次主要的绿岩带火山活动,分别在新太古宙 2.7~2.65 Ga 和 2.61~2.54 Ga。在岩浆活动期间有较多的火山作用与沉积作用发生,形成新太古宙绿岩带和条带铁建造,同时有大量的壳融花岗岩和 TTG 片麻岩形成。

在达尔瓦尔克拉通内,2.7 Ga 的火山作用主要

是铁镁质岩浆流, 2.61~2.54 Ga 主要是中性和长英质岩浆。吉德勒杜尔加、科拉尔、拉玛吉利、萨恩杜尔、哈蒂等绿岩带的同位素测年数据表明铁镁质火山作用接近 2.7 Ga。科拉尔、卡迪里 (CHAR-DON D, 2002)、拉玛吉利 (BALAKRISHNAN S, 1999) 和森杜尔绿岩带 (NUTMAN A P, 1996) 附近的片麻岩和深成岩锆石数据表明这次火山作用与 TTG 侵位绿岩带处于同一时期。2.61~2.54 Ga 的第二次长英质火山作用与西达尔瓦尔克拉通希莫加-达尔瓦尔盆地 2.61 Ga 的流纹岩、东达尔瓦尔克拉通哈蒂、科拉尔、卡迪里、格德瓦尔绿岩带 2.58~2.54 Ga 的流纹岩一致。在东达尔瓦尔克拉通 2.61 Ga 长英质火山作用与下地壳融化来源的钾质花岗岩 (吉德勒杜尔加和 Arsikere - Banavara 花岗岩) 侵位相关。2.58~2.54 Ga 长英质火山作用与 EDC 广泛的钙碱性岩浆作用和地壳再造同时期 (CHAR-DON D, 2011)。

3.2 BIF 铁矿成因分析

达尔瓦尔克拉通大规模铁矿成矿需要大量的 FeO 、 SiO_2 和 O 供给。Fe 有 3 个可能的来源: ① 近陆来源, 溶解在水中由河流进入海洋。② 碎屑在海洋深部沉积, Fe 在还原环境中析出。③ 火山喷流。O 可能来自光合作用、或者化学自养、水电离作用。在克拉通一些绿岩带, BIF 伴生在杂砂岩、石英岩层中, 在某些地方, 这些石英岩层还包含微化石。在一些绿岩带, BIF 与富 Mn 条带表现出均夷作用。Mn 条带与杂砂岩伴生, 可能表明太古宙时期有机物活动和光合作用比较旺盛。

库斯赫塔吉和吉德勒杜尔加绿岩带 BIF 地球化学特征表明, 绿岩带 BIF 中 REE、Fe、 SiO_2 来自 AMOR 的热液溶液。SEYFRIED 和 JANECKY (1985) 提出热液流体中 Fe 浓度取决于 350~425 °C 范围的热液温度, Fe 在流体温度 425 °C 时的浓度大约是它在流体为 350 °C 时浓度的 100 倍。热液溶剂和高出口温度使热液中 Fe 具有高浓度, 为绿岩带铁矿成矿提供大量 Fe。 SiO_2 可能因为更高的逸出温度和太古宙热液增加的碱性, 大量 SiO_2 溶解在热液中进入海水。海水温度和碱性相对较低, SiO_2 随之沉积下来。除了热液溶液, 陆源碎屑也是 BIF 物质来源。库斯赫塔吉绿岩带页岩 BIF 的 REE 型式

与太古宙页岩相似, 表明化学沉积和陆源物质的共同作用, 吉德勒杜尔加绿岩带中, 纯化学沉积 Ce 亏损, BIF 中 Ce 富集, 表明 Ce 在化学沉积中氧化, 又从碎屑成分中得到积累。REE 总量与 Al_2O_3 等关系也表明 BIF 中 REE 成分因碎屑而增加, 表明 BIF 的碎屑来源。氧化亚铁到氧化铁的过程需要大量 O_2 , DRAGANIC (1991) 否定了通过光解作用和水电解作用产生 O_2 的推论, 克拉通一些绿岩带含大量锰条带, MnO_2 与杂砂岩和含蓝藻菌的石英条带伴生, Rao 从绿岩带的微化石和 $\delta^{13}\text{C}$ 的值 (-1.65% PDB) 推论, O_2 最可能的来源是光合作用 (MOYEN J F, 2003)。

吉德勒杜尔加绿岩带 3 种不同类型的 BIF 岩石组合代表了 3 种不同的沉积环境。第一种为浅陆棚环境, 热液和化学物质分异、上涌, 富 Fe、 SiO_2 热液海水进入陆棚并在陆棚与 O 反应, 形成铁氧化物并沉积。砂质岩-叠层石可能是海侵-海退循环和海水因热液溶液而富集 FeO 的产物。第二种岩石组合中, 硫化物相 BIF 在火山口附近还原环境中沉积, 碳酸盐岩相 BIF 在还原环境和氧化环境都有形成。海水中溶解的 CO_2 和热液溶液中 FeO 反应形成 Fe 碳酸盐。另一个碳酸盐相 BIF 形成途径可能为有机质与铁氧化物和铁氢氧化物反应, 这种成岩作用在有机物多的盆地边缘更为普遍。砂质岩-叠层岩碳酸盐岩相 BIF 组合和硫化物相火山岩火山碎屑岩组合可能是同一个盆地中不同化学和物理性质的 2 个不同部位沉积。但是, 杂砂岩氧化物相 BIF 可能是更晚的事件。BIF 上、下层的杂砂岩代表了汇聚条件下对流方向改变和洋底移动。

4 结论

通过对达尔瓦尔克拉通中绿岩带及 BIF 的地质特征的综合分析, 可得到以下结论。

(1) 达尔瓦尔克拉通在新太古宙有 2 次绿岩火山作用, 分别发生在 2.7~2.67 Ga 和 2.58~54 Ga。达尔瓦尔克拉通有 2 阶段的增生作用。第一阶段发生在 2.7~2.6 Ga, 沿西达尔瓦尔克拉通东缘, 以铁镁质岩浆作用和长英质深成岩作用为主, 后形成东达尔瓦尔克拉通。第二阶段发生在 2.58~

2.52 Ga,中和东达尔瓦尔省内 TTG、钙碱深成岩和长英火山岩侵入。

(2)绿岩带中 Fe、SiO₂ 来自 AMOR 的热液溶液,高温下热液中含高浓度的 Fe 使得 BIF 能够大量沉积。BIF 中 REE 来自热液和陆源碎屑的共同作用,氧化亚铁氧化为氧化铁需要的大量 O₂ 可能来源于生物光合作用。海平面变化导致海侵-海退循环,海侵时大部分 BIF 沉积作用发生,海退时陆源碎屑覆盖沉积,页岩 BIF 沉积作用发生。

(3)吉德勒杜尔加绿岩带 BIF 成矿物质既有幔源碎屑又有壳源碎屑,属火山-沉积成因。苏比利尔型 BIF 多数与沉积建造有关,它们沉积在海进序列的相对稳定的浅海环境中,沉积环境为大陆架被动大陆边缘。绿岩带 BIF 中单成分和多成分碎屑砾岩,杂砂岩和叠层碳酸盐岩建造在太古宙阿尔戈马型铁建造中少见。根据上述特征,暂可将这些绿岩带 BIF 铁矿归结为苏比利尔型和阿尔戈马型之间的过渡类型。这些绿岩带 BIF 具有沉积和火山建造双重特点,结合达尔瓦尔克拉通演化,可能为岛弧和陆缘之间的沉积产物,之后又遭受较强的变质作用改造。

参考文献(References):

翟明国. 华北克拉通的形成演化与成矿作用[J]. 矿床地质, 2010 (1): 24-36.

ZHAI Mingguo. Tectonic evolution and metallogenesis of North China Craton[J]. Mineral Deposits, 2010 (1): 24-36.

张连昌,翟明国,万渝生,等. 华北克拉通前寒武纪 BIF 铁矿研究: 进展与问题[J]. 岩石学报, 2012, 28 (11): 3431-3445.

ZHANG LC, ZHAI MG, WAN YS, et al. Study of the Precambrian BIF-iron deposits in the North China Craton: Progresses and questions[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28 (11): 3431-3445.

沈保丰,翟安民,杨春亮,等. 中国前寒武纪铁矿床时空分布和演化特征[J]. 地质调查与研究, 2005, 28 (4): 196-206.

SHEN Baofeng, ZHAI Anmin, YANG Chunliang, et

al. Temporal Spatial Distribution and Evolutional Characters of Precambrian Iron Deposits in China[J]. Geological Survey and Research, 2005, 28(4): 196-206.

CHARDON D, JAYANANDA M, PEUCAT J J. Lateral constrictional flow of hot orogenic crust: insights from the Neoproterozoic of south India, geological and geophysical implications for orogenic plateaux[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2011, 12(2): 1-24.

JAYANANDA, M., CHARDON, D., PEUCAT, J.-J., CAPDEVILA, R. 2.61 Ga potassic granites and crustal reworking in the western Dharwar craton, southern India: tectonic, geochronologic and geochemical constraints[J]. Precambrian Research, 2006, 150 (1-2): 1-26.

DEY S. Evolution of Archaean crust in the Dharwar craton: The Nd isotope record[J]. Precambrian Research, 2013, 227(4): 227-246.

PEUCAT J J, JAYANANDA M, CHARDON D, et al. The lower crust of the Dharwar Craton, Southern India: patchwork of Archean granulitic domains[J]. Precambrian Research, 2013, 227(4): 4-28.

CHADWICK B, VASUDEV VN, HEGDE GV. The Dharwar craton, southern India, interpreted as the result of Late Archaean oblique convergence[J]. Precambrian Research, 2000, 99(1): 91-111.

PEUCAT J J, BOUHALLIER H, FANNING CM, et al. Age of the Holenarsipur greenstone belt, relationships with the surrounding gneisses (Karnataka, South India) [J]. The Journal of Geology, 1995, 103(6): 701-710.

SARMA DS, FLETCHER IR, RASMUSSEN B, et al. Archaean gold mineralization synchronous with late cratonization of the Western Dharwar Craton, India: 2.52 Ga U-Pb ages of hydrothermal monazite and xenotime in gold deposits[J]. Mineral Deposits, 2011, 46(3): 273-288.

CHARDON D, PEUCAT JJ, JAYANANDA M, et al. Archaean granite-greenstone tectonics at Kolar (south India): Interplay of diapirism and bulk inhomogeneous contraction during juvenile magmatic accretion[J]. Tectonics, 2002, 21(3): 7-17-17.

JAYANANDA M, PEUCAT JJ, CHARDON D, et al. Neoproterozoic greenstone volcanism, Dharwar craton,

- southern India: constraints from SIMS zircon geochronology and Nd isotopes[J]. *Precambrian Research*, 2013, 227: 55-76.
- JAYANANDA M, MOYEN JF, MARTIN H, et al. Late Archaean (2550-2520 Ma) juvenile magmatism in the Eastern Dharwarcraton, southern India: constraints from geochronology, Nd-Sr isotopes and whole rock geochemistry[J]. *Precambrian Research*, 2000, 99(3): 225-254.
- MANIKYAMBA C, KERRICH R. Geochemistry of black shales from the Neoarchaeal Sandur Superterrane, India: first cycle volcanogenic sedimentary rocks in an intraoceanic arc-trench complex[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(18): 4663-4679.
- MANIKYAMBA C, KHANNA TC. Crustal growth processes as illustrated by the Neoarchaeal intraoceanic magmatism from Gadwal greenstone belt, Eastern Dharwar Craton, India[J]. *Gondwana Research*, 2007, 11(4): 476-491.
- NUTMAN AP, CHADWICK B, KRISHNA RAO B, et al. SHRIMP U/Pb zircon ages of acid volcanic rocks in the Chitradurga and Sandur groups, and granites adjacent to the Sandur schist belt, Karnataka[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 1996, 47(2): 153-164.
- NAQVI SM, SAWKAR RH, RAO DVS, et al. Geology, geochemistry and tectonic setting of Archaean greenschists from Karnataka nucleus, India[J]. *Precambrian Research*, 1988, 39(3): 193-216.
- NAQVI SM, KHAN R MK, Manikyamba C, et al. Geochemistry of the NeoArchaean high-Mg basalts, boninites and adakites from the Kushtagi-Hungund greenstone belt of the Eastern Dharwar Craton (EDC); implications for the tectonic setting[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 27(1): 25-44.
- KHAN RMK, NAQVI SM. Geology, geochemistry and genesis of BIF of Kushtagi schist belt, Archaean Dharwar Craton, India[J]. *Mineralium Deposita*. 1996, 1(1-2): 123-133.
- BAN M, MOLLER P. Rare earth element systematics of the chemically precipitated component in Early Precambrian iron formations and the evolution of the terrestrial atmosphere-hydrosphere-lithosphere system[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(10): 2239-2249.
- RAO TG, NAQVI SM. Geochemistry, depositional environment and tectonic setting of the BIFs of the Late Archaean Chitradurga Schist Belt, India[J]. *Chemical Geology*, 1995, 121(1): 217-243.
- MOYEN JF, MARTIN H, JAYANANDA M, et al. Late Archaean granites: a typology based on the Dharwar Craton (India)[J]. *Precambrian Research*, 2003, 127(1): 103-123.
- BALAKRISHNAN S, RAJAMANI V, HANSON G N. U-Pb Ages for Zircon and Titanite from the Ramagiri Area, Southern India: Evidence for Accretionary Origin of the Eastern Dharwar Craton during the Late Archaean[J]. *The Journal of geology*, 1999, 107(1): 69-86.
- SEYFRIED WE, JANECKY DR. Heavy metal and sulfur transport during subcritical and supercritical hydrothermal alteration of basalt: Influence of fluid pressure and basalt composition and crystallinity[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, 49(12): 2545-2560.
- DRAGANIC IG, BJERGBAKKE E, DRAGANIC ZD, et al. Decomposition of ocean waters by potassium-40 radiation 3800 Ma ago as a source of oxygen and oxidizing species[J]. *Precambrian Research*, 1991, 52(3): 337-345.
- KLEIN C. Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origins[J]. *American Mineralogist*, 2005, 90(10): 1473-1499.
- GROSS G A. A classification of iron formations based on depositional environments[J]. *The Canadian Mineralogist*, 1980, 18(2): 215-222.