

文章编号 10258-7106 (2007) 04-0397-20

新元古代岩浆 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床地质特征、 形成时代及其地球动力学背景*

吕林素^{1,2}, 毛景文^{1,3}, 刘 璐¹, 陈 刚⁴, 张作衡³, 谢桂青³, 王瑞廷⁵

(1 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 中国地质博物馆, 北京 100034; 3 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 4 青海省地质矿产局黄金公司, 青海 西宁 800012; 5 西北有色地质勘查局, 陕西 西安 710054)

摘 要 岩浆硫化物矿床已成为矿床学研究的热点之一。罗迪尼亚(Rodinia)超大陆的汇聚与裂解受到国际地质学界的广泛关注,通过对中国新元古代岩浆 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床的研究,将有助于推动 Rodinia 研究的深入。最新的 SHRIMP 锆石 U-Pb 法和硫化物矿石 Re-Os 法定年结果表明,宝坛、煎茶岭、冷水箐和金川 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床均形成于新元古代早期(1 000~800 Ma),且从南到北、从东到西,成矿时代依次变新,即从宝坛(982±21) Ma→煎茶岭(878±27) Ma→冷水箐(约 800 Ma)→金川(833±35) Ma,而矿床规模从宝坛中型 Ni-Cu-Co-(PGE)矿床→煎茶岭大型 Ni-Co 矿床→冷水箐中型 Ni-Cu-(PGE)矿床→金川超大型 Ni-Cu-Co-(PGE)矿床,这些矿床均处于克拉通边缘,即扬子克拉通南缘、北缘和西缘以及华北克拉通西南缘。中国新元古代岩浆 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床按其所处的大地构造位置可划分为桂北、勉略宁、盐芦和龙首山等 4 个成矿带,且它们的形成均与 Rodinia 超大陆的拼合与裂解密切相关。

关键词 地质学 铜镍(铂族)硫化物矿床 新元古代 地球动力学背景 罗迪尼亚超大陆

中图分类号: 文献标识码: A

Geological characteristics, geochronology and tectonic settings of Neoproterozoic magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits in China

LÜ LinSu^{1,2}, MAO JingWen^{1,3}, LIU Jun¹, CHEN Gang⁴, ZHANG ZuoHeng³, XIE GuiQing³
and WANG RuiTing⁵

(1 School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 Geological Museum of China, Beijing 100034, China; 3 Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 4 Gold Company of Qinghai Bureau of Geology and Mineral Resources, Xining 800012, Qinghai, China; 5 Northwest China Bureau of Geological Exploration for Nonferrous Metals, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract

98% Pt, 86% Ni and 7.5% Cu of China come from magmatic sulfide deposits. Therefore, the study of these deposits becomes one of the most active research subjects. The convergence and divergence of Rodinia supercontinent have aroused extensive attention among geoscientists all over the world, and the investigation of Neoproterozoic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits in China will be surely helpful to the deepgoing study of Rodinia supercontinent. The available zircon U-Pb dating and Re-Os dating data of sulfide ore deposits show that the metallogenic events of Baotan, Lengshuiqing, Jianchaling and Jinchuan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits all occurred at the early stage of Neoproterozoic (1 000~800 Ma). From south to north, the metallogenetic epoch of the four deposits became younger and the metallogenetic dimensions became larger, that is, from (982±21) Ma of Baotan to (878±27) Ma of Jianchaling to

* 本文由中国地质大调查项目(编号 1212010634001)和(编号 1212010561502-2)资助

第一作者简介 吕林素,女,1965 年生,博士,副研究员,主要从事矿物学岩石学矿床学研究。E-mail: lulinsu@126.com

收稿日期 2007-03-06; 改回日期 2007-06-05。张绮玲编辑。

(833±35) Ma of Jinchuan to (800±) Ma of Lengshuiqing, the ore-forming process is from middle to large to superlarge in scale. The four deposits are all the break-up products of Neoproterozoic Rodinia Supercontinent and they are distributed on the margin of the craton, i. e., on the southwestern margin of the North China Craton and on the western, northern and southern margin of the Yangtze Craton. These sulfide deposits may be divided into four metallogenic belts, namely. Longshoushan belt, Yanlu belt, Mianlue-ning belt and Guibei belt, with the corresponding geodynamic settings being the rift environment cracked by the North China Plate, the island arc environment on the margin of the Yangtze Plate, the extensional environment after collision and post-orogeny of the Yangtze Plate and the North China Plate, and the arc-rear extensional environment on the margin of the Yangtze Plate.

Key words: geology, Cu-Ni-(PGE) sulfide deposits, Neoproterozoic, geodynamic settings, Rodinia Supercontinent

中国有 98% 以上的铂、86% 的镍和 7.5% 的铜来自岩浆硫化物矿床,含钴铜镍(铂)硫化物矿床占全国保有储量的 43.3% (耿文辉等,2001),该类矿床已成为矿床学研究的热点之一。罗迪尼亚(Rodinia)超大陆的汇聚与裂解受到国际地学界的广泛关注,通过对中国新元古代的 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床的研究将有助于推动 Rodinia 研究的深入。Rodinia 是 McMenamin 等科学家率先于 1990 年提出的新元古代超大陆假说,是由约 1 100 Ma 的格林威尔(Grenville)造山运动将全球分散的古老克拉通相互拼贴而成的以劳伦大陆(Laurentia)为中心的 global 性超级大陆(Pisarevsky,2004),形成于中元古代末期(1 300~1 000 Ma),在新元古代早期(1 000~900 Ma)发生伸展(陆松年,2001),新元古代中期(830~820 Ma)发生解体(Li Z X et al.,2003b)。随着对 Rodinia 研究的深入,推动了许多矿床前沿课题的进展,特别是超级地幔柱以及巨量岩浆活动与超大陆裂解的关系,导致全球构造控制的大型成矿作用等(张世红等,2002),且地史时期的成矿作用具有明显的旋回性,并与超大陆的裂陷、离散、汇聚和拼合作用等构造旋回相耦合(毛德宝等,2001)。因此,Rodinia 的聚散将约束新元古代矿产的形成与分布规律。

迄今为止,中国仅发现 4 个区域的岩浆型铜镍(铂)硫化物矿床形成于新元古代,且均分布于克拉通边缘,主要出露于甘肃的金川、陕西的略阳、四川的盐边、广西的宝坛,其中以金川、煎茶岭、冷水箐和宝坛矿床最为典型,它们形成的动力学背景可能与罗迪尼亚(Rodinia)超大陆的汇聚与裂解有关。对于这 4 个矿床的成岩成矿时代、镁铁质-超镁铁质岩浆演化历程以及地球动力学背景的认识长期以来存在较大争议(毛景文等,1990;汤中立等,1992;葛文春等,2001b;沈渭洲等,2003;朱维光等,2004;李献华等,2004;闰海卿等,2005)。近年来,高精度的 SHRIMP 锆石 U-Pb 法和硫化矿石 Re-Os 法用于上述岩体和矿床的年代学研究(毛景文等,2001;王瑞廷等,2003;杜利林等,2005;杨刚等,2005;杨胜洪等,2007),为重新厘定新元古代 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床的成矿时代提供了依据。本文基于以往的研究成果,综合论述了新元古代岩浆 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床的时空分布规律、形成时代和地球化学特征,并探讨了其形成的地球动力学背景。

1 区域成矿地质背景

超大陆的汇聚和裂解是地球演化最基本的规律(徐备,

2001)。中国大陆古板块是一个经历了复杂的汇聚-裂解-汇聚历史的复合大陆,其中最具有划时代意义的汇聚与裂解旋回就是 1 000~850 Ma 以晋宁运动为代表的中元古代末的汇聚与新元古代的裂解(郭进京等,1999),并形成了金川、煎茶岭、冷水箐和宝坛 4 个有代表性的岩浆 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床,它们依次分布于华北克拉通的西南缘以及扬子克拉通的北缘、西缘和南缘。

1.1 中国古大陆与 Rodinia 的关系

新元古代前,中国古大陆至少存在华北、扬子和塔里木 3 个规模较大的克拉通陆块(陆松年等,2004b),但是关于它们在 Rodinia 中的位置存在明显分歧。一种观点认为新元古代早期各主要克拉通陆块在晋宁期曾发生过复杂拼贴(郭进京等,1999),汇聚成统一的中国古大陆(王鸿祯,1997;王鸿祯等,2002),此后才发生裂解(张文治,2002)。另一种观点则认为新元古代除扬子与华夏汇聚成华南古陆外,华北、华南和塔里木并未相聚(Li Z X et al.,1996),即华北与扬子、塔里木隔洋相望(陆松年,2004b;郑永飞,2004)。然而,古中国地块无论拼合与否,在新元古代均位于 Rodinia 中北部澳大利亚、劳伦提亚(Laurentia)和西伯利亚克拉通地块之间,且都处于新元古代晚期 Rodinia 破裂的中心部位,这正是中国大陆克拉通地块的早期地质背景(郭进京等,1999)。

1.2 扬子克拉通的构造演化与区域成矿

扬子克拉通包括滇中、川西南、桂北、赣北、皖南及浙西北的大片地区,是固结于晋宁期(1 000 Ma 左右)的古大陆。由于古大陆的裂解与后来各陆块的重新拼合,使扬子克拉通周边表现出极其复杂的构造演化格局。其地质历史大致可分为古太古代—古元古代、中元古代、新元古代早期、新元古代晚期—古生代和中-新生代 5 个主要构造阶段,其中以新元古代早期构造阶段所形成的矿床最为重要。

古太古代—古元古代(3 500~1 800 Ma)为扬子克拉通陆核形成阶段。湖北宜昌三峡的崆岭杂岩是目前在扬子克拉通出露的最老的岩石,也是扬子克拉通唯一的太古宙陆核。通过锆石 U-Pb 和 Hf-O 同位素研究,表明它存在 3 800 Ma 的古老地壳组分,其初始生长可能在 4 000 Ma,在 3 300~3 200 Ma 和 3 000~2 900 Ma 有 2 期重要的岩浆活动,指示扬子陆核形成于中太古代,并于 2 000~1 900 Ma 发生再造(张少兵等,2007)。北缘的秦岭地区,构成勉-略-宁三角区的鱼洞子地体是太古代—早元古代克拉通裂解形成的古地块碎片,其同

位素年龄为 2 600 Ma (王相等, 1996) 西缘的南、北 2 段具有完全不同的 Nd 模式年龄与铅同位素组成特征, 表明其基底不具统一的演化历史 (陈岳龙等, 2001)。

中元古代 (1 800~1 000 Ma) 为扬子地壳主体形成阶段。扬子克拉通以中元古代中低级变质火山-沉积岩系广泛发育为特色 (吴根耀, 2000), 构成江南造山带的基底。即 1 800 Ma 的吕梁运动使统一的中国岩石圈板块的南缘发生裂解, 形成一些大小不等的微型陆块并向南漂移, 组成以川中微型陆块为主体向北西突出的牛轭形陆块带, 相应地发生了中元古代的东川沟弧体系成矿作用 (花友仁, 1994)。

新元古代早期 (1 000~750 Ma) 为扬子克拉通汇聚与裂解阶段。扬子克拉通处于强烈的热构造活动状态中, 早期汇聚事件群包括接近 1 000 Ma 的蛇绿岩残留、约 900 Ma 的同造山花岗岩的发育、晚于 900 Ma 的变质作用和 820 Ma 的后造山花岗岩的形成, 晚期裂解事件群则有晚于 820 Ma 的初始裂谷盆地的发育及南华系底部双峰式火山岩的喷发、750 Ma 左右盆地的再次拉张, 导致大规模基性岩墙群的形成以及 A 型花岗岩的发育 (陆松年等, 2003)。华南的晋宁运动可与格林威尔运动对比 (郝杰等, 2004), 是北-中秦岭地块俯冲-碰撞造山作用和新元古代 Rodinia 聚合与裂解的主要地质事件 (高坪仙等, 1999), 相应地发生了新元古代早期的晋宁大陆裂谷成矿作用 (花友仁, 1994), 因而在扬子克拉通的周边形成了桂北、勉略宁和盐芦 3 个岩浆型铜镍 (铂) 硫化物成矿带。

1.3 华北克拉通的构造演化与区域成矿

华北克拉通西南缘包括龙首山地区、祁连山区及其相间的河西走廊, 是吕梁造山运动期间 (1 800 Ma 左右) 聚合而成的古大陆的一部分 (陆松年等, 2004b)。该区构造由鄂尔多斯地块、阿拉善地块和阿拉善南缘加里东褶皱带 3 个构造单元组成, 且走廊北缘 (榆树沟山-高台南) 及野牛山-冷龙岭深断裂为两大板块的缝合线, 西北部被阿尔金断裂所截 (张新虎等, 2005)。该区的主要构造表现为早古生代 (加里东) NWW 走向线性造山带与前寒武纪地块镶嵌, 其前身为古特提斯洋 (任纪舜等, 1997)。华北克拉通西南缘具有复杂的大地构造演化历史, 其地质历史大致可分为始太古代—古元古代、中-新元古代、古生代、中-新生代 4 个主要构造阶段, 其中以中-新元古代构造阶段所形成的矿床最为重要。

始太古代—古元古代 (3 800~1 800 Ma) 为克拉通基底形成演化阶段。18 亿年地质事件大陆发生裂解, 可能形成了龙首山 (LSS) 裂谷带 (翟明国等, 2001), 并在克拉通西南边缘存在一条中新元古代的古裂谷带, 且裂谷北界推测在潮水盆地南缘及合黎山一带 (张新虎等, 2005)。新元古代中晚期发育了温都尔庙蛇绿岩带, 代表华北克拉通对 Rodinia 超大陆裂解有响应 (杨刚等, 2005)。而 Pisarevsky (2004) 提出了 Rodinia 汇聚和裂解的新模式, 该超大陆底部首先形成地幔超热流柱, 大约在 830 Ma 发生深熔岩浆作用, 而超大陆内的大陆

裂谷作用则开始于 820 Ma。华北克拉通西南缘裂谷开始之初, 可能处于大陆岩石圈伸展和减薄的减压熔融环境, 因而有地幔柱成因的铁镁质岩石, 并形成了世界著名的龙首山岩浆型铜镍 (铂) 硫化物成矿带。

2 矿床空间分布及典型矿床地质特征

新元古代岩浆 Ni-Cu- (PGE) 硫化物矿床分布于甘肃的金川、陕西的略阳、四川的盐边、广西的宝坛, 它们所处的大地构造背景分别为华北克拉通西南缘、扬子克拉通北缘、西缘和东南缘。上述地区分布的矿床主要为金川、煎茶岭、冷水箐和宝坛等矿床, 矿床规模从金川超大型 Ni-Cu- (PGE) 矿床依次减小→煎茶岭大型 Ni-Co 矿床→冷水箐中型 Ni-Cu- (PGE) 矿床→宝坛中型 Ni-Cu-Co- (PGE) 矿床, 各矿床基本特征见表 1。

本文在毛景文等 (2001)、葛文春等 (2001b)、汤中立等 (2002)、王瑞廷等 (2003)、沈渭洲等 (2003)、李献华等 (2004) 和杨刚等 (2005) 研究基础上, 依据大地构造位置、成岩成矿环境及其形成时代, 将新元古代岩浆 Ni-Cu- (PGE) 硫化物矿床划分为桂北 (I_1)、勉略宁 (I_2)、盐芦 (I_3) 和龙首山 (I_4) 等 4 个成矿带 (图 1)。

2.1 龙首山成矿带

龙首山成矿带, 李文渊 (1996) 称之为中-朝克拉通边缘铜、镍 (铂) 成矿区中龙首山地区与中元古代早期超镁铁质岩侵入体有关的含 PGE 硫化 Cu-Ni 矿床成矿系列 (简称“龙首山成矿系列”) 而汤中立 (2004) 则称之为华北陆块西南缘中元古代龙首山与伸展构造有关的岩浆型 Ni-Cu-Co-Pt 矿床成矿系列 (金川式)。该成矿带包括金川超大型 Ni-Cu-Co- (PGE) 硫化物矿床和内蒙古杜青山野笈里小型硫化铜镍矿床^①, 并以前者最为著名。

金川 Ni-Cu-Co- (PGE) 硫化物矿床位于甘肃省金昌市南 22 km 处。1958 年在龙首山东段北麓的“白家嘴子”发现了含矿岩体, 1964 年边勘探边建成投产, 1973 年完成了地质勘探 (汤中立等, 1996)。累计探明储量镍约 565 万 t, 铜 356 万 t, 钴 14 万 t, 铂 127 t, 钯 65 t, 为世界级的超大型 Ni-Cu-PGE 矿床。该矿床位于华北克拉通西南缘阿拉善地块西南缘的龙首山断褶带中段, 该区北以北缘断裂带为界与潮水坳陷相接, 南以南缘断裂带为界与河西走廊过渡带相连 (图 2a) (汤中立等, 1996)。区内出露的大小超镁铁质岩体共有 130 余个, 断续分布, 呈 NWW 向带状展布, 东西长 120 km (王瑞廷等, 2005)。

金川矿床赋存于龙首山断褶带北侧 NW 向断裂带内, 位于前震旦系龙首山群白家嘴子组和韩母山群下部地层中。含矿岩体沿 NW 向断裂侵位, 直接围岩为斜长片麻岩、白云质大理岩、斜长角闪岩以及混合花岗岩等。含矿岩体平

① 赵德太, 徐景成. 1960. 内蒙巴盟阿拉善右旗杜青山野笈里区小型硫化铜镍矿床普查地质报告. 内部资料.

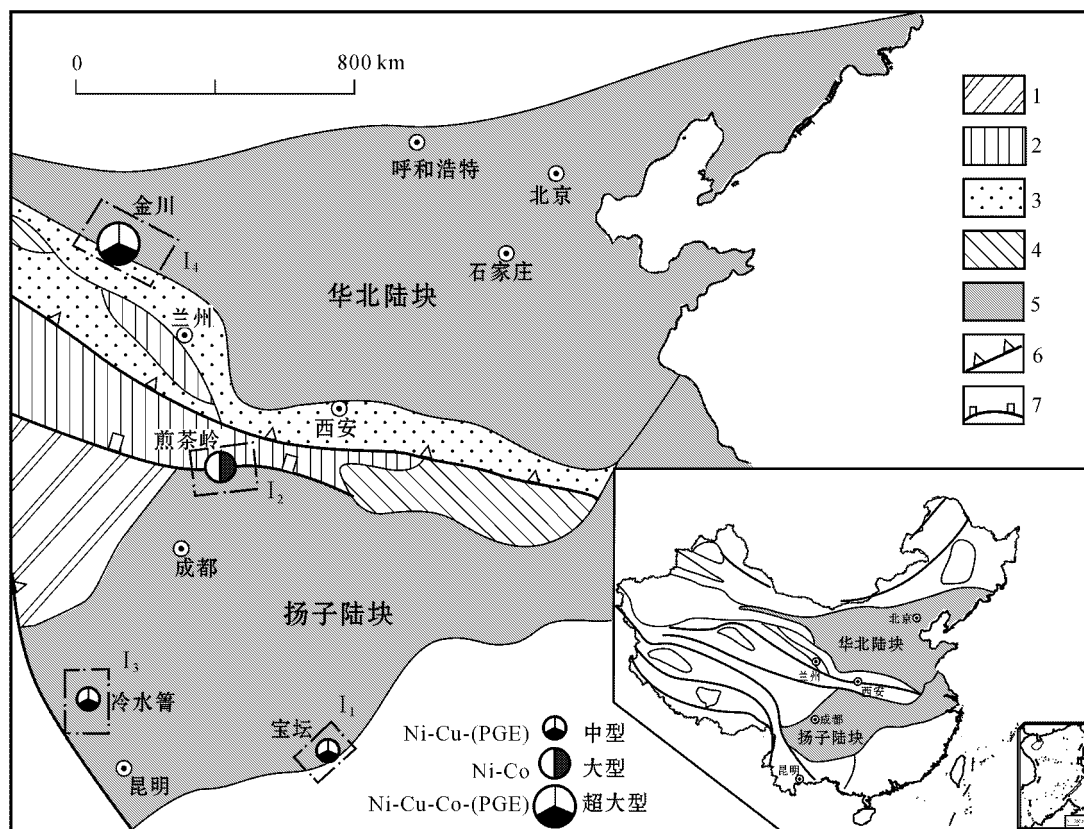


图 1 新元古代岩浆 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床分布图(地质背景据周鼎武等,2002)

1—三叠纪(印支)造山带 2—晚古生代(华力西)造山带 3—早古生代(加里东)造山带 4—微古陆块 5—前寒武纪陆块;
6—古俯冲消减带 7—中生代缝合线

Fig. 1 Map showing the distribution of Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits in Neoproterozoic strata (geological setting after Zhou et al., 2002)

1—Indosinian orogenic belt; 2—Variscan orogenic belt; 3—Caledonian orogenic belt; 4—Micro-palaeoblock; 5—Precambrian block;
6—Palaeo-subduction zone; 7—Mesozoic suture zone

面上呈透镜状,局部有膨缩现象,长约 6.5 km,宽 0.02~0.53 km,最大延深大于 1.1 km,出露面积约 1.34 km²,剖面上呈不规则的陡倾岩墙状,走向 NW50°,倾向 SW,倾角 50°~80°(汤中立等,1995; 汤中立等,1996; 李文渊,1996)。金川岩体是由纯橄榄岩、二辉辉橄岩、二辉橄榄岩、斜长二辉橄榄岩和辉石岩组成的多岩相复式岩体。依据岩性组合可分为 5 个岩相带,即纯橄榄岩相带、二辉橄榄岩相带、二辉辉橄岩相带、橄榄辉石岩相带、辉石岩相带,以及边缘片岩岩相带。中粗粒二辉橄榄岩和纯橄榄岩为主要含矿岩相(王瑞廷等,2005; 汤中立等,2006)。

金川含矿岩体被 3 条 NEE 向压扭性断层(F₈、F₁₆、F₂₃)错断,由西向东依次为Ⅲ、Ⅰ、Ⅱ和Ⅳ等 4 个矿区(图 2b)。Ⅰ矿区岩体出露地表长 1 500 m,西宽东窄,宽 20~320 m,延深大于 700 m,走向 NW50°~60°,倾向 SW,倾角较陡,为 70°~80°。底部形态波状起伏,海绵状富矿体发育于岩体近底部。Ⅱ矿区岩体长大于 3 000 m,西窄东宽,最宽达 530 m 左右,走向 NW50°,西部岩体由上、下 2 个分枝组成(图 2c),下分枝规

模大,延深数百米至大于 1 000 m,为海绵陨铁状、块状富矿及星点状贫矿。东部岩体呈漏斗状、透镜状,矿体规模显著变小,在岩体下侧部,以星点状贫矿为主,次为海绵陨铁状富矿和块状特富矿。Ⅲ矿区岩体受 F₈ 断层影响,相对于Ⅰ矿区岩体向南西推移 900 m 以上,全部隐伏于第四系之下,埋深约 40~50 m,东宽西窄,向西逐渐尖灭,走向 NW,倾向 SW,倾角多为 60°~70°,东部延深达 600 m 以上,西部延深仅 200 m 左右,呈楔形向下尖灭,主要由星点状贫矿石构成,矿化率较高。Ⅳ矿区岩体长约 1 300 m,隐伏于第四系之下,埋深约 60~140 m,延深 400~600 m 尖灭(汤中立等,1995; 李文渊,1996)。矿体按成因可分为就地熔离矿体(以星点状矿石为主)、深熔贯入矿体(以海绵状矿石为主)、晚期贯入矿体(以块状矿石为主)、接触交代矿体(以浸染状矿石为主)以及热液叠加矿体(以海绵状矿石为主)。矿石主要为浸染状、海绵陨铁状、块状、角砾状和脉状构造。矿石矿物主要为磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、方黄铜矿、马基诺矿、墨铜矿、黄铁矿和紫硫镍铁矿以及砷铂矿等。镍、钴、铜、铂和钯平均品位分别为

表 1 新元古代岩浆 Ni-Cu- (PGE)硫化物矿床基本特征

Table 1 Basic Characteristics of typical Neoproterozoic magmatic Ni-Cu- (PGE) sulfide deposits

	龙首山成矿带	勉略宁成矿带	盐芦成矿带	桂北成矿带
矿田名称	金川	煎茶岭	冷水箐	宝坛
地理位置	E 102°09'36" N 38°28'08" 甘肃省金昌市	E 106°21'25" N 33°15'20" 陕西省略阳县	E 101°33'00" N 26°48'00" 四川省盐边县	E 108°43'00" N 25°03'00" 广西罗城县
矿床	白家嘴子	煎茶岭	冷水箐	大坡岭
岩体时代/Ma	833±35	878±27	800±	982±21
岩体出露面积/km ²	1.34	6.8	<4	<1
含矿岩石	二辉橄榄岩、纯橄橄榄岩 ($m/f=3.03\sim4.75$, 铁质超基性岩)	纯橄橄榄岩、方辉橄榄岩 ($m/f=8.45\sim11.96$, 镁质超基性岩)	角闪二辉橄榄岩、角闪辉石岩和单辉橄榄岩 ($m/f=3.75\sim4.20$, 铁质超基性岩)	辉石岩、橄辉岩 ($m/f=3.48\sim4.74$, 铁质超基性岩)
含矿岩石蚀变	蛇纹石化、碳酸盐化、滑石化、绿泥石化	黄铁矿化、蛇纹岩化、滑镁岩化	蛇纹岩化、滑石化、透闪石化	透闪石化、绿泥石化
矿体形态	透镜状、平板状、似脉状、似囊状、层状、柱状	透镜状、似层状	条带状、似层状、透镜状	层状、似层状、透镜状
矿石构造	网状、星点状、海绵状、块状、浸染状及斑杂状	浸染状、斑点状、似条带状	浸染状(海绵陨铁状、星散状、稀疏浸染状、蠕虫斑点状)和致密块状	斑杂状、浸染状、块状、脉状
矿石矿物	磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、方黄铜矿、马基诺矿、砷铂矿和铋碲铋矿等	镍黄铁矿、紫硫镍铁矿、针镍矿和辉镍矿等	磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿和方黄铜矿	磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿、辉砷镍矿和辉钴矿等
矿床规模	超大型(Ni-Cu-Co-PGE)	大型(Ni-Co)	中型(Ni-Cu-PGE)	小型(Ni-Cu-PGE)
储量($\times10^3$ t)	Ni 5650@1.06%	Ni 220@0.683%	Ni 27.2@0.92%	Cu 4.8@0.3%
@品位%	Cu 3560@0.73% Co 140@0.03% Pt 127 t@0.05~0.64 g/t Pd 35 t@0.01~0.35 g/t	Co 7.9@0.026% Cu 2@0.029%	Cu 9.9@0.31% Pt 2@0.01~0.06 g/t Pd 2@0.06~0.20 g/t	Ni 13.2@0.55% Co 1.42@0.02% Pt+Pd :@0.5~1.2 g/t
资料来源	李文渊,1996; 王瑞廷等,2005; 汤中立等,2006	李文渊,1996; 王瑞廷等,2003 2005	李文渊,1996; 张成江等,1999; 杜利林等,2005	李文渊,1996; 毛景文等,2001; 黄杰等,2004

(w_B ,下同)Ni 1.06%、Cu 0.73%、Co 0.03%、Pt 0.05~0.64 g/t 和 Pd 0.01~0.35 g/t。矿床属于岩浆深部熔离-复式贯入型成因(汤中立等,1996)。

2.2 勉略宁成矿带

勉略宁成矿带,相当于李文渊(1996)所称的扬子克拉通边缘铜、镍(铂)成矿区中勉略地块北东缘与镁质超基性岩有关的硫化 Ni 矿床成矿系列(简称“勉略地块北东缘成矿系列”)或汤中立(2004)所称的扬子陆块北缘勉略宁活动带 Ni-Cu 矿床成矿系列(煎茶岭式)。该成矿带包括煎茶岭大型含钴镍硫化物矿床、陕西西乡望江山(余家山、柳沟和乔家山)小型铜镍钴硫化物矿床以及陕西洋县城山-毕机沟铜镍矿化点(李行等,1995),其中以煎茶岭最为著名。

煎茶岭含钴硫化镍矿床位于陕西省略阳县南东 20 km 处。1970 年在何家岩镇发现了含矿岩体。1984 年完成了地质勘查,目前尚未开发利用。累计探明储量镍约 22 万 t,钴 0.79 万 t,为大型 Ni-Co 矿床。该矿床位于扬子克拉通北缘松潘-甘孜造山带摩天岭褶皱系东部,勉(县)-略(阳)-阳(平

关)元古代隆起区北缘。该区北以 NW 向略阳-褒河深断裂为界与秦岭造山带相接,南以 NE 向汉江深断裂为界与扬子地块相连,其北部鱼洞子地体和南部碧口地体拼接而成的一个独特的楔状三角形构造复合地体,即勉-略-阳三角区(图 3)(王相等,1996)。区内出露的大小超镁铁质岩体共有 112 个,构成南、北、中 3 条岩带(涂怀奎,2001),南岩带内有 66 个,断续分布,呈 NE 向带状展布,其中以煎茶岭岩体最为著名(王瑞廷等,2005)。

该矿床赋存于略阳-褒河深断裂带南侧的含镍超镁铁质岩体西段(刘生辉等,1996),含矿岩体沿 NNE 向与 NWW 向断裂交汇部位侵入于何家岩背斜东部倾伏端。岩体平面上呈中部膨大,向北西、南西分枝,向东收缩的不规则形态,东西长 5 km,南北宽 0.3~1.2 km,控制最大深度大于 1.1 km,出露面积约 5 km²。剖面上呈向南陡倾的岩墙状(王相等,1996)。含矿岩体的直接围岩为新太古界鱼洞子群(Ar_{3Yd})混合岩、片麻岩,中-新元古界碧口群(Pt_{2-3bk})火山岩以及上震旦统灯影组(Z_2dy)白云岩和板岩。岩体与围岩呈构造侵位关系

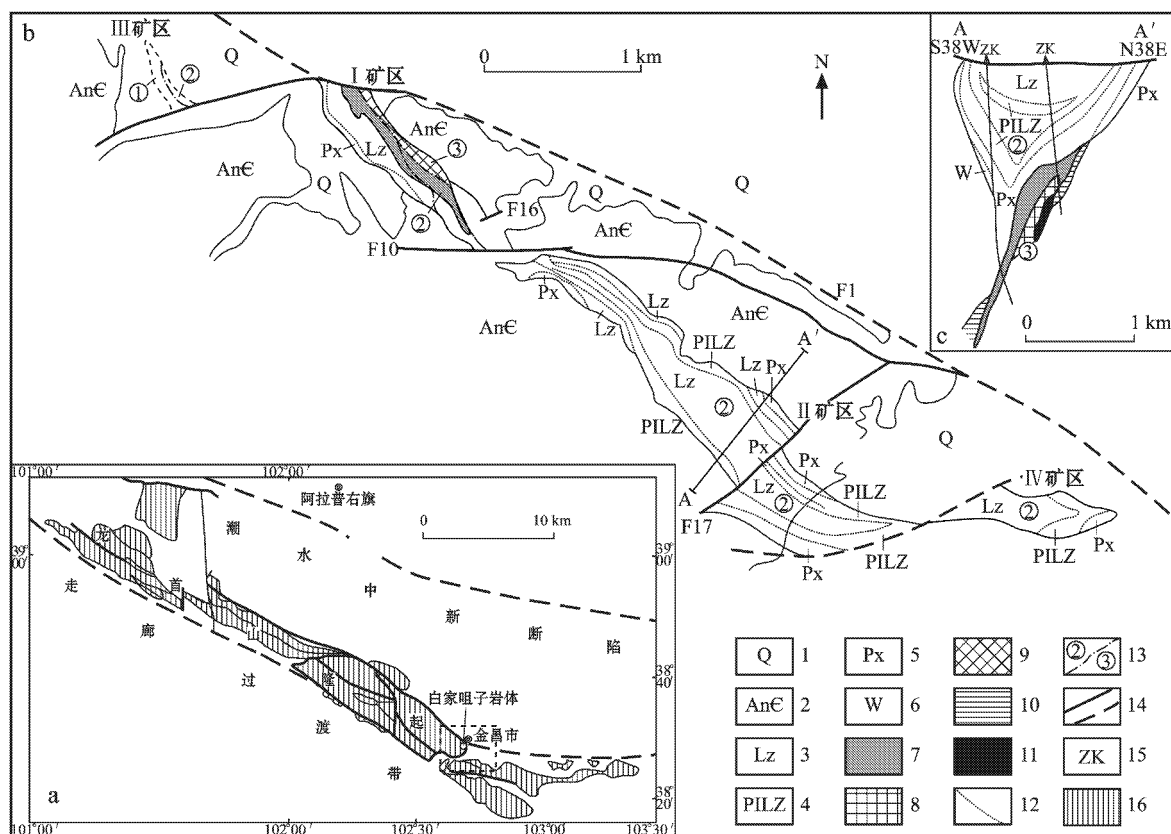


图 2 金川镁铁质-超镁铁质杂岩体地质图(a)^①及含矿岩体地质图(b)及剖面图(c)(据闫海卿等,2005)

1—第四系 2—前寒武系 3—二辉橄榄岩 4—斜长二辉橄榄岩 5—橄榄二辉岩 6—二辉岩 7—星点状矿体 8—网状矿体 9—氧化矿体；
10—交代矿体 11—块状矿体 12—岩相界线 13—侵入期次及界线 14—实测及推测断层 15—钻孔 16—隆起带

Fig. 2 Map and diagram showing geology of the Jinchuan mafic-ultramafic complexes (a) (modified after No. 6 Geological Party, Gansu Bureau of Geology and Mineral Resources, 1985, unpublished data), geological plan (b) and cross sections (c) respectively (modified after Yan et al., 2005)

1—Quaternary; 2—Precambrian; 3—Lherzolite; 4—Plagioclase lherzolite; 5—Olivine websterite; 6—Websterite; 7—Disseminated ore body; 8—Network ore body; 9—Oxidized ore body; 10—Metasomatic ore body; 11—Massive sulfide ore body; 12—Petrofacies boundary; 13—Intrusion stage and its serial number; 14—Measured and inferred faults; 15—Drill hole; 16—Mole track

(汤中立等,2006)。该含矿主岩体主要由透闪岩、滑石菱镁岩、蛇纹岩及石英菱镁岩等蚀变岩石组成,原岩恢复为纯橄榄岩,并以透闪岩和滑石菱镁岩为主要含矿岩相(王瑞廷等,2005)。

该矿床可分为南、北、中 3 个矿化带,各矿体皆位于岩体南部印支期花岗斑岩外接触带弧形断裂蚀变带中,且其成群成带环绕外接触带分布(王相等,1996),目前探明的矿体 98% 以上的矿石储量集中分布于中带主岩体中段 1 100 m 范围内(刘生辉等,1996)。矿体走向 280~260°,南倾,倾角 68~75°,呈似层状、透镜状平行岩体走向斜列展布。单个矿体沿走向和倾向均有明显的分枝复合和膨胀收缩现象。矿体产状与花岗斑岩北接触带完全一致。矿体规模变化较大,主要

矿体均具有浅部矿体薄、矿石品位低、深部矿体厚、矿石品位高的变化规律(王瑞廷等,2005)。已知工业矿体 26 个,其中较大者 7 个,长 380~800 m,延深 350 m,厚度大于 12 m。矿石类型有透闪岩型、滑镁岩型、蛇纹岩型和菱镁岩型,并以前两者为主(刘生辉等,1996)。矿石主要为浸染状、斑点状、斑杂状、似条带状和致密块状构造。根据主要金属矿物组合,镍矿石可分为磁黄铁矿-镍黄铁矿型和黄铁矿-针镍矿-辉镍矿型,并以前者为主。镍、钴、铜平均品位分别为 Ni 0.683%、Co 0.026%、Cu 0.029%。Ni 品位大于 1% 的富镍矿占总储量的 30%,并常位于贫镍矿体中、下部和深部,且形态和产状均与贫镍矿体一致(王瑞廷等,2005)。矿床属于岩浆熔离-热液改造型成因(刘生辉等,1996;王瑞廷等,2002,2005)。

① 甘肃省地质局地质六队. 1985. 甘肃省龙首山区镍矿资源预测及方法研究报告. 内部资料.

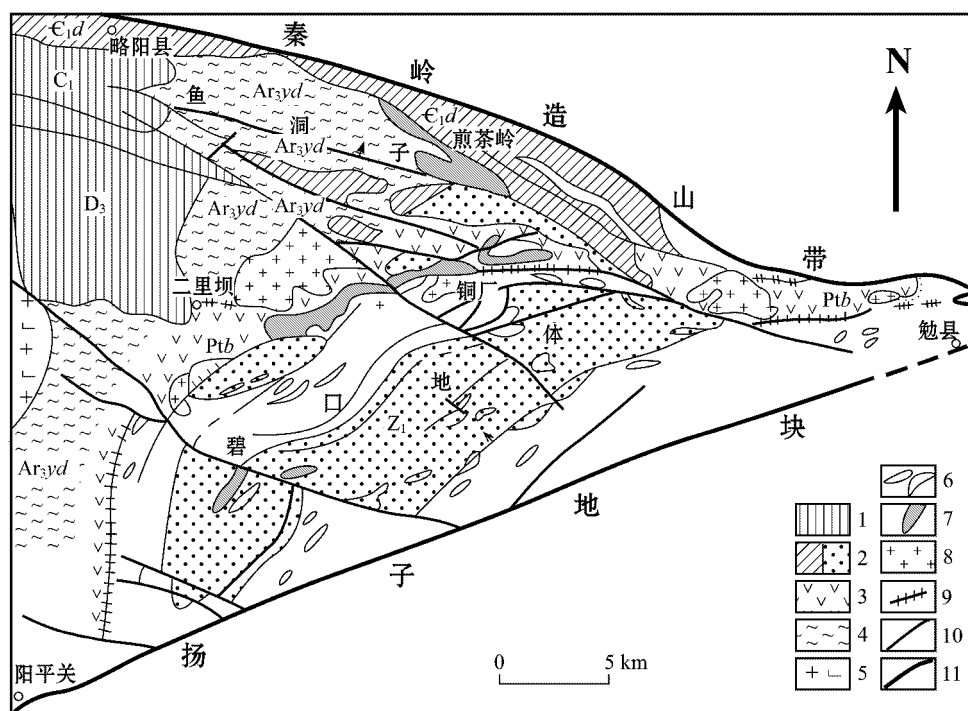


图 3 煎茶岭镁铁质-超镁铁质杂岩体地质图(王相等, 1996)

1—泥盆系-石炭系(D_3-C_1) 2—震旦系-寒武系(Z_1-E_1d) 3—碧口群($Ptbt$) 4—鱼洞子群(Ar_{3yd}) 5—中酸性侵入岩 6—基性侵入岩脉;
7—超基性侵入岩脉 8—滑镁铁岩、石英菱镁岩及滑石片岩 9—地体拼接带 10—断裂 11—深大断裂

Fig. 3 Geology of the Jianchaling mafic-ultramafic complexes for intrusions(modified after Wang et al., 1996)

1—Devonian-Carboniferous (D_3-C_1); 2—Sinian-Cambrian (Z_1-E_1d) 3—Bikou Group ($Ptbt$) 4—Yudongzi Group (Ar_{3yd}); 5—Intermediate-acidic intrusion; 6—Basic intrusive vein; 7—Ultrabasic intrusive vein; 8—Talc-magnesite rock, quartz magnesite and talc schist; 9—Pieced terrane belt; 10—Fault; 11—Deep fault

2.3 盐芦成矿带

盐芦成矿带,相当于李文渊(1996)所称的扬子克拉通边缘铜、镍(铂)成矿区中康滇地轴成矿系列中盐边地区与晋宁期镁铁质-超镁铁质侵入体有关的硫化 Cu-Ni 矿床成矿亚系列(简称“盐边成矿亚系列”)或汤中立(2004)所称的扬子陆块西缘中元古代青河-程海断裂带 Ni-Cu 矿床成矿系列(冷水箐式)。该成矿带包括四川盐边冷水箐中型铜镍(铂)硫化物矿床、芦山白铜尖子小型铜镍(铂)硫化物矿床,宝兴天堂和黄铜尖子以及天全昂州河铜镍矿化点(王登红等,2007),其中以冷水箐最为著名。

冷水箐铜、镍(铂)硫化物矿床位于四川省盐边县城南约 30 km 处的高家村。冷水箐岩体于 1975 年发现并命名为蛇绿岩体,之后在盐边建成年产镍矿石 3 万 t 的矿山(张云湘等,1996)。累计探明储量镍约 2.72 万 t,铜 0.99 万 t,钴 0.14 万 t(王登红等,2007),为中型 Ni-Cu-(PGE)矿床。该矿床位于扬子克拉通西缘(习惯上称为“康滇地轴”,西与松潘-甘孜褶皱带相接)的川滇南北向构造带中段的高家村岩体中。区内出露有 16 个大小不等岩体,单个岩体多呈不对称的岩盆状或岩盘状,构成以高家村杂岩体为中心的冷水箐卫星复式岩体群,受 NS 向青河-程海断裂次级构造控制(李文渊,

1996),平面上呈不规则状,南北长约 9.0 km,东西宽约 7.5 km,出露面积超过 60 km²,实际面积可能大于 150 km²(李行等,1995)(图 4),岩体东侧为断层接触,西侧与围岩呈整合侵入接触。冷水箐岩体不属于蛇绿岩套范畴,而是一个典型的同心环状侵入体,岩体分带清楚,由内向外依次为橄榄岩→橄榄辉长岩→辉长岩→闪长岩,组成岩盆状堆晶岩序列,且在该岩体中心部位及东侧的围岩中有镁铁质层状杂岩体(即高家村岩体)侵入(李行等,1995;沈渭洲等,2003)。该岩体群中只有 I、II 号岩体发现有铜镍硫化物工业矿体,III、IV 号岩体有小规模矿化(张成江等,1999)。

该矿床赋存于 I、II 号岩体较晚期的超镁铁质岩盆中,岩体侵位于中元古界盐边群上部岩系中段,盐边群接触变质作用发育,其直接围岩为碳质绢云母板岩、碳质板岩、变质砂岩、变粒岩和斜长角闪岩等。I 号岩体为单一式超镁铁质岩体,主要由角闪橄榄岩组成,局部可见二辉橄榄岩(沈渭洲等,2003)而 II 号岩体为复式岩体,岩浆分异演化特征明显,岩体上部酸性程度高,向下渐变为基性,即顶部为中-酸性岩(花岗岩、花岗闪长岩和闪长岩相)、上部为辉石岩相(主要由角闪辉石岩组成)、下部为橄榄岩相(主要由二辉橄榄岩和单辉橄榄岩组成),且中-酸性岩与超镁铁质岩之间为突变关系,而橄榄

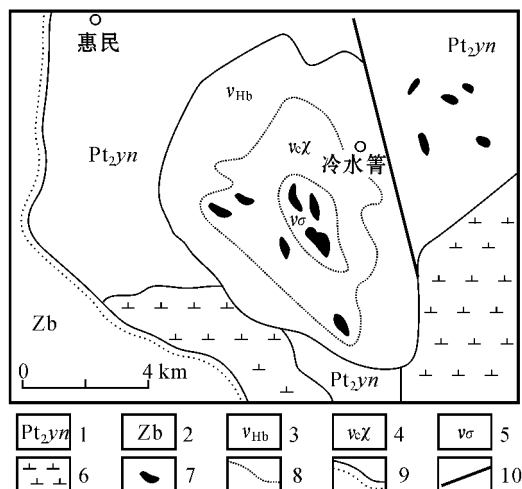


图 4 冷水箐杂岩体地质略图(据沈渭洲等,2003 修改)

- 1—盐边群 2—震旦系上统 3—角闪辉长岩带 4—苏长辉长岩带;
5—橄榄辉长岩带 6—石英闪长岩体 7—镁铁质-超镁铁质岩;
8—岩相界线 9—不整合接触界线 10—断层

Fig. 4 Geological sketch map of the Lengshuiqing complexes intrusions(modified after Shen et al., 2003)

- 1—Yanbian Group; 2—Upper Sinian; 3—Hornblende gabbro belt;
4—Norite gabbro belt; 5—Olivine gabbro belt; 6—Quartz diorite rock
body; 7—Mafic-ultramafic rock; 8—Petrofacies boundary;
9—Unconformity; 10—Fault

岩相和辉石岩相各类岩石之间为渐变过渡关系(张成江等, 1999)。当岩体相伴产出时,中-酸性岩体侵入在前,镁铁质-超镁铁质岩体在后,后期还有煌斑岩脉贯入,均系同源岩浆不同演化阶段的产物,且冷水箐岩体镁铁质-超镁铁质岩的原始岩浆为拉斑玄武质岩浆(李文渊,1996;张成江等,1999;沈渭洲等,2003)。含矿岩体呈条带状、似层状和透镜状零星分布于岩体下部的镁铁质-超镁铁质岩体中,出露面积小于 4 km^2 (沈渭洲等,2003)。含矿岩相为角闪二辉橄榄岩、角闪辉石岩和单辉橄榄岩,其中以以前者的含矿性最佳(李文渊,1996)。该矿床的矿体厚度变化与镁铁质-超镁铁质岩体的厚度成正比。以 1、2 号工业矿体为例,主要由浸染状(海绵陨铁状、星散状、稀疏浸染状、蠕虫-斑点状)和致密块状矿石组成,其中以以前者为主,后者呈脉状体沿含浸染状矿石的二辉橄榄岩裂隙贯入,厚度为 $0.37 \sim 0.42 \text{ m}$ 。矿石矿物为磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿和方黄铜矿等。镍、铜、铂和钯的平均品位分别为 $\text{Ni } 0.92\%$ 、 $\text{Cu } 0.31\%$ 、 $\text{Pt } 0.01 \sim 0.06 \text{ g/t}$ 和 $\text{Pd } 0.06 \sim 0.20 \text{ g/t}$,其中 Ni 最高可达 3.6% 。成矿作用包括岩浆深部熔离-贯入、晚期矿浆贯入和岩浆期后热液 3 个矿化阶段,其中以以前者为主,而最后阶段并未形成工业矿体。矿床属岩浆熔离-贯入型成因(李文渊,1996)。

2.4 桂北成矿带

桂北成矿带,李文渊(1996)称之为扬子克拉通边缘铜、镍

(铂)成矿区中桂北地区早元古代科马提岩型硫化 Cu-Ni 矿床成矿系列(简称“桂北成矿系列”)而汤中立(2004)则称之为扬子陆块东南缘与中元古代四堡期溢流玄武岩有关的 Ni-Cu 矿床成矿系列(大坡岭式)。该成矿带由桂北宝坛地区的 16 个中、小型铜镍硫化物矿床组成(毛景文等,2001)以及广西龙胜铜镍矿化点(葛文春等,2001a),其中以大坡岭最为著名。

宝坛铜镍硫化物矿床位于广西壮族自治区罗城县北西。上世纪 70 年代在宝坛乡发现了含矿岩体,有大坡岭、小坡岭、清明山、红岗山、陶家、地苏、满洞、池洞和文得等矿床,目前尚未开发利用,累计探明金属储量镍 5 万余吨,铜 3 万余吨,钴约 0.2 万吨^①,为中型 Ni-Cu -(PGE)矿床。该矿床位于扬子克拉通南缘的江南中、新元古代造山带西段的桂北台隆(黄杰等,2004),而江南造山带是华夏与扬子板块间的碰撞拼贴带(王孝磊等,2006)。区内发育一套层状-似层状镁铁质-超镁铁质岩石,断续分布,广泛产出,呈带状展布,并受 3 条 NNE 向断裂和四堡群地层的走向所控制。宝坛地区的 200 多个镁铁质-超镁铁质岩体受 NNE 向四堡深断裂约束,可划分为田蓬岩群、清明山-五地岩群和文得-池洞岩群(黄杰等,2004),局部镁铁质-超镁铁质岩层的底部出现铜镍矿化。其中大坡岭、小坡岭、清明山、田蓬和陶家 5 个矿区均位于宝坛地区南部的田蓬-大坡岭-清明山 EW 向复式背斜内,并具有良好的连续性和可比性(图 5a)(毛景文等,2001)。

大坡岭矿床赋存于一轴向 EW 的复式褶皱构造中,均赋存于古元古界四堡群中部文通组下段一层厚约十几米到几十米的镁铁质-超镁铁质岩层底部(图 5b),距岩层底部 $0.5 \sim 4 \text{ m}$,且该岩层与四堡群地层呈 NE 到近 EW 走向的同步紧密线状褶皱,均被具宽缓褶皱的丹洲群不整合覆盖。该岩层具有较明显的分异现象,自上而下依次为玄武质科马提岩(闪长岩和辉长辉绿岩)到辉石质科马提岩(橄辉岩或辉石岩),空间上由南而北,从以基性岩为主到以超基性岩为主,其中细粒辉石岩为主要含矿岩相(李文渊,1996;毛景文等,2001;黄杰等,2004)。含矿岩层平面上呈透镜状、带状,剖面上呈透镜状、层状-似层状,其直接围岩为文通组下段变质凝灰岩和变质粉砂岩,岩层与矿层的产状几乎一致。自西向东有 44 号、45 号、46 号和 47 号 4 个含矿岩体,岩体内断续分布有 10 个矿体。8、10 号矿体赋存于 44 号岩体中,1、2、3、4 和 6 号矿体赋存于 45 号岩体中,5、7 号矿体赋存于 46 号岩体中,9 号矿体赋存于 47 号岩体中,其中 6 号矿体规模较大,其探明储量占该矿床总储量的 82% ^①。矿体长 $900 \sim 1200 \text{ m}$,一般厚 $2 \sim 50 \text{ m}$ (黄杰等,2004)。矿石以浸染状构造为主,还有豆斑状、斑杂状、块状和脉状构造。矿石的主要金属矿物为磁黄铁矿和镍黄铁矿,还有黄铜矿、黄铁矿、辉钴矿、辉砷镍矿和紫硫镍矿等。镍、铜和铂钯的平均品位分别为 $\text{Ni } 0.4\% \sim 5\%$ 、 $\text{Cu } 0.3\% \sim 3\%$ 、 $\text{Co } 0.02\% \sim 0.2\%$ 、 $\text{Pt} + \text{Pd } 0.5 \sim 1.2 \text{ g/t}$ (黄杰等,2004)。矿床属岩浆熔离型和贯入型成因,但后者不具工业价

① 广西壮族自治区地质矿产局第七地质队. 1981. 广西罗城县大坡岭铜镍矿床详细普查地质报告. 内部资料.

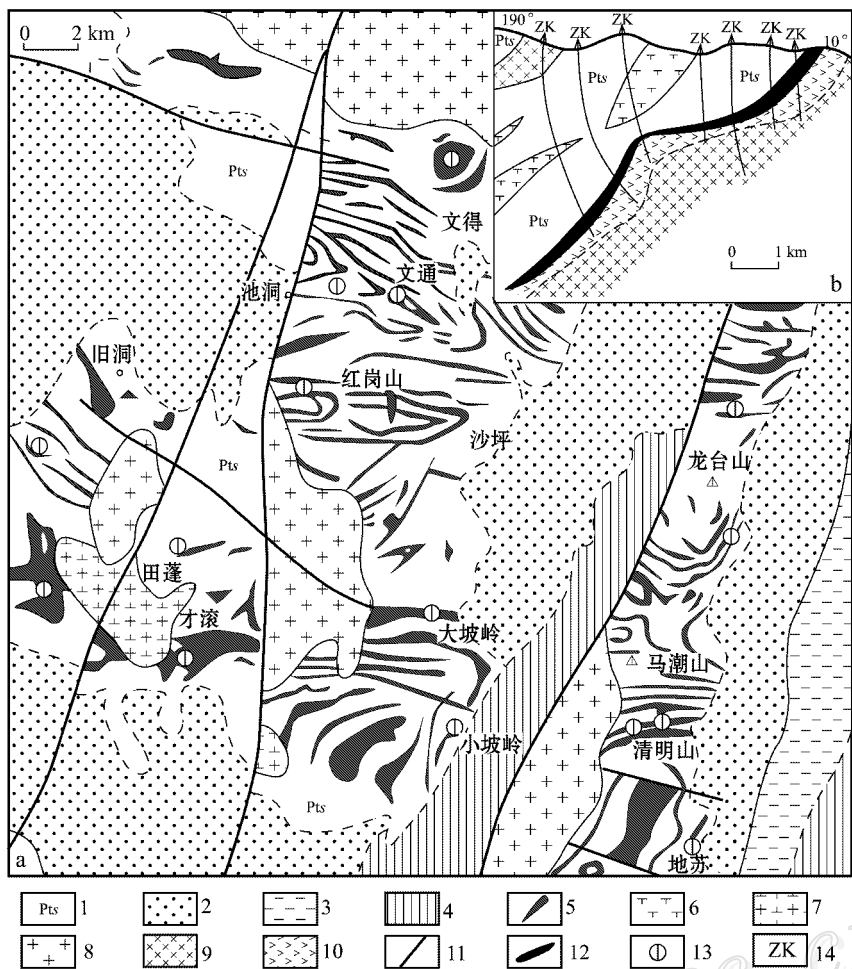


图 5 宝坛镁铁质-超镁铁质杂岩体地质图(a)及剖面图(b)(据广西壮族自治区地质矿产局第七地质队,1981^①)

1—四堡群 2—丹洲群 3—震旦系 4—泥盆系 5—镁铁质-超镁铁质岩 6—石英闪长岩 7—花岗闪长岩 8—黑云母花岗岩；
9—辉石岩 10—辉长辉绿岩 11—断裂 12—矿体 13—铜镍硫化物矿床(矿点) 14—钻孔

Fig. 5 Geology of the Baotan mafic-ultramafic complexes (a) and Cross sections (b) for intrusions(modified after No.7 Geological Party, Guangxi Bureau of Geology and Mineral Resources,1981 unpublished data)

1—Sibao Group ;2—Danzhou Group ;3—Sinian ;4—Devonian ;5—Mafic-ultramafic rocks ;6—Quartz diorite ;7—Granodiorite ;8—Biotite granite ;9—Pyroxenolite ;10—Gabbro-diorite ;11—Fault ;12—Ore body ;13—Copper-nickel sulfide deposit (ore spot) ;14—Drill hole

值(毛景文等,2001)。

3 成岩成矿时代厘定

新元古代岩浆 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床及其含矿的镁铁质-超镁铁质岩的形成时代一直备受关注,长期以来是一个悬而未决的问题。20 世纪 90 年代中期以前,不同研究者利用 Rb-Sr 法、K-Ar 法、Sm-Nd 法和锆石常规 U-Pb 法获得了大量同位素年龄数据(表 2),由于测试方法和测试精度所限,因而不能很好地限定矿床的成矿时代。近年来,采用 SHRIMP 锆

石 U-Pb 法和 Re-Os 法,对 4 个与 Rodinia 汇聚与裂解有关的岩浆 Ni-Cu-(PGE)硫化物典型矿床的成矿时代进行厘定,发现主要成矿期均为新元古代早期(1 000~800 Ma),从南到北,从东到西,成矿时代,从宝坛(982±21)Ma(Re-Os 法,毛景文等,2001)→煎茶岭(878±27)Ma(Re-Os 法,王瑞廷等,2003)→冷水箐(800±)Ma(SHRIMP 锆石 U-Pb 法,杜利林等,2005)→金川(833±35)Ma(Re-Os 法,杨刚等,2005)依次变新。

3.1 (833±35)Ma 成矿事件

龙首山成矿带内以金川岩浆型 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床

① 广西壮族自治区地质矿产局第七地质队. 1981. 广西罗城县大坡岭铜镍矿床详细普查地质报告. 内部资料.

表 2 新元古代岩浆 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床及有关岩体的同位素年龄

Table 2 Chronological data of Neoproterozoic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits and related mafic-ultramafic rocks					
矿床名称	测试方法	测定对象	年龄值/Ma	资料来源	
金川	K-Ar 法	斜长二辉橄榄岩(黑云母)	1 509~1 526	汤中立等,1995	
		斜长二辉橄榄岩(黑云母)	713~820		
		二辉橄榄岩(黑云母)	403.69±6.63		
	颗粒锆石 U-Pb 法	二辉橄榄岩(锆石)	308	汤中立等,1995	
	Rb-Sr 法	全岩	712	张宗清等,2004	
		辉石岩、二辉橄榄岩、含硫化物纯橄岩	819		
	Sm-Nd 法	斜长二辉橄榄岩、二辉橄榄岩和橄榄岩(辉石和橄榄石)	1 508±31	汤中立等,1992	
		辉石岩、二辉橄榄岩、含硫化物纯橄岩	970±310	张宗清等,2004	
	SHRIMP 锆石 U-Pb 法	含硫化物橄长岩(锆石)	827±8	李献华等,2004	
		含斜长石二辉橄榄岩(斜锆石)	812±26	Li et al.,2005	
斜长二辉橄榄岩(锆石)		平均 837	闫海卿等,2005		
Re-Os 法	硫化镍富矿石	911±20	Du et al.,1996		
	硫化镍富矿石	877±34	Keays et al.,2004		
	硫化镍富矿石	879±19	408±140	Yang et al.,2004	
	硫化镍富矿石	852±25	杨刚等,2005		
	块状硫化物矿石	833±35	杨胜洪等,2007		
	浸染状硫化物矿石	840±79	杨胜洪等,2007		
	海绵陨铁状硫化物矿石	1 126±96	杨胜洪等,2007		
	海绵陨铁状硫化物矿石	1 220±57	闫海卿等,2005		
	海绵陨铁状矿石和块状富矿石(全岩)	1 220±57	张宗清等,2004		
宝坛	Sm-Nd 法	全岩	2 219±111	毛景文等,1990	
		全岩	1 782±82	韩发等,1994	
	颗粒锆石 U-Pb 法	锆石	(1 734±20)~(1 863±7)	韩发等,1994	
	SHRIMP 锆石 U-Pb 法	锆石	828±7	Li et al.,1999	
Re-Os 法	硫化镍富矿石	982±21	毛景文等,2001		
煎茶岭	K-Ar 法	蚀变超基性岩	590	①	
		蛇纹岩(全岩)	389~396	405	黄婉康等,1996
		石英菱镁岩(铬水云母)	144.7	庞春勇等,1993	
	Sm-Nd 法	纤胶蛇纹岩(全岩)	927±29	王瑞廷等,2003	
Re-Os 法	硫化镍富矿石	878±27	王瑞廷等,2003		
冷水箐	K-Ar 法	角闪橄榄岩(全岩)	1 253	②	
		角闪辉长岩(角闪石)	1 112	②	
		闪长岩(角闪石)	709	②	
		角闪石化辉长岩(全岩)	1 031	袁海华,1981	
	颗粒锆石 U-Pb 法	角闪辉长岩(锆石)	936±7	沈渭洲等,2003	
角闪辉长岩(锆石)		840±5	朱维光等,2004		
SHRIMP 锆石 U-Pb 法	玄武质岩石(锆石)	782±53	杜利林等,2005		

最具代表性。金川矿床早期采用 K-Ar、Rb-Sr 和颗粒锆石 U-Pb 法研究岩体及矿床的形成时代,所获得的年龄数据不仅误差大,而且彼此相差甚远(表 2),因此可信度不高。金川岩体的二辉橄榄岩、辉橄岩、含辉橄橄榄岩的全岩及橄榄石、辉石单矿物的 Sm-Nd 等时线年龄均为 (1 508±31) Ma(汤中立等,1992 李文渊等,2004),若用国际通用的 ISOPLLOT 程序重新计算,则为 (1 510±140) Ma,表明该 Sm-Nd“等时线”有可能是“误差线”或“混合线”(李献华等,2004) 而张宗清等(2004)

所获得的 Sm-Nd 全岩等时线年龄为 (970±310) Ma,但线性不好,且这 2 个数数据误差都太大,因而其地质意义值得商榷。近年来,Du 等(1996)率先用全岩金属硫化物 Re-Os 法获得金川矿床的形成年龄为 (911±20) Ma。2004~2007 年相继发表了一批该矿床的 Re-Os 同位素年龄,即全岩海绵陨铁矿石和块状富矿石共同构成的 Re-Os 等时线年龄 (1 043±28) Ma(张宗清等,2004),但该 Re-Os 等时线上有 6 个点的 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 初始值与 1/¹⁸⁷Os 呈正相关关系,表明该等时线的初始值不均

① 西北有色地质勘查局 711 总队. 1995. 陕西省略阳县煎茶岭镍矿床地质详查报告. 内部资料.
② 全国同位素地质年龄数据汇编编写组. 1975. 全国同位素地质年龄数据汇编. 内部资料.

可能反映混合关系(杨刚等,2005)。Keays 等(2004)给出 3 个 Re-Os 等时线年龄($1\ 408 \pm 140$) Ma(海绵陨铁状矿石)、(877 ± 34) Ma 和 (879 ± 19) Ma(块状矿石),但前者误差太大,后两者比较一致,有一定意义。2 个块状矿石的 Re-Os 等时线年龄为(852 ± 25) Ma(杨刚等,2004)和(833 ± 35) Ma($n=5$, ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$)_{初始值} = 0.279 ± 0.018 , MSWD = 1.7)(杨刚等,2005)。杨胜洪等(2007)最新获得的浸染状矿石和块状矿石 Re-Os 表观等时线年龄分别为($1\ 126 \pm 96$) Ma 和 (840 ± 79) Ma。杜安道(2006 年个人交流)在对金川矿床不同类型矿石进行 Re-Os 等时线年龄测试中发现,块状矿石的年龄始终比海绵陨铁状矿石的年轻,表 2 中的 Re-Os 等时线年龄也证明了这一点,且从硫化物矿石中挑纯单矿物,颗粒越细,样品量略大,效果更好,这可解释 Keays 等(2004)所获得 3 个不同的年龄数据和杨胜洪等(2007)所给出的 2 个不同的表观年龄数据。推测约 8 亿年前金川矿床形成时地壳混染导致浸染状矿石和海绵陨铁状矿石的 Os 同位素组成不均一,从而给出偏老的表观年龄,而块状矿石由于形成时 Os 同位素快速均一化而得出成矿年龄(杨胜洪等,2007)。另外,金川岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为(827 ± 8) Ma(含硫化物橄长岩,李献华等,2004)、(812 ± 26) Ma(侵入体边缘含斜长石二辉橄长岩, Li et al., 2005)和(837 ± 1) Ma(斜长二辉橄长岩, 闫海卿等,2005)。杨刚等(2005)给出的块状矿石 Re-Os 等时线年龄(833 ± 35) Ma,与同类矿石同种方法所得到的年龄(852 ± 25) Ma、(877 ± 34) Ma、(879 ± 19) Ma 和 (840 ± 79) Ma 以及岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄(827 ± 8) Ma、(812 ± 26) Ma 和约 837 Ma 在误差范围内一致,表明这个年龄值比较可信。因此,金川矿床很可能形成于新元古代而不是中元古代,即该成矿带内的 Ni-Cu-Co- (PGE) 硫化物矿床应属于新元古代早期晋宁运动的产物。

3.2 (982 ± 21) Ma 成矿事件

桂北成矿带内以宝坛 Ni-Cu- (PGE) 硫化物矿床最具代表性。宝坛地区的镁铁质-超镁铁质岩全岩 Sm-Nd 等时线年龄分别为($2\ 219 \pm 111$) Ma(毛景文等,1990)和($1\ 782 \pm 82$) Ma(韩发等,1994),这 2 个数据误差偏大。锆石常规 U-Pb 年龄($1\ 734 \pm 20$) ~ ($1\ 863 \pm 7$) Ma(韩发等,1994),这些年龄数据均偏老。然而, Li 等(1999)对宝坛以北三防过铝 A 型花岗岩体西南外接触带即侵入四堡群中的 4 个镁铁质-超镁铁质岩墙,采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 法精确定年为(828 ± 7) Ma,与 SHRIMP 锆石 U-Pb 法和常规锆石 U-Pb 法分别测定的三防花岗岩体的年龄(826 ± 13) Ma 和 (827 ± 15) Ma 吻合。但三防花岗岩体既穿插四堡群又切割丹洲群,说明其形成时代应明显晚于四堡群中的镁铁质-超镁铁质岩。加之宝坛地区的镁铁质-超镁铁质岩多数顺层产出,并与四堡群同步褶皱,且普遍以不整合形式被覆盖于丹洲群之下,另外在丹洲群底部

还有相同的镁铁质-超镁铁质岩的砾石存在(葛文春等,2001b)。因此, (828 ± 7) Ma 这个年龄值并不能代表区内含矿岩层的形成时代。毛景文等(2001)发表了铜镍硫化物矿石 Re-Os 同位素等时线年龄(982 ± 21) (2σ) Ma($n=8$, ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$)_{初始值} = 0.102 ± 0.010 , MSWD = 1.5), 比较准确地确定了该期镁铁质-超镁铁质岩活动及其矿化的时限,表明区内铜镍矿床形成于新元代早期,即该成矿带内的 Ni-Cu- (PGE) 硫化物矿床应属于新元古代早期四堡运动的产物。

3.3 (878 ± 27) Ma 成矿事件

勉略宁成矿带内以煎茶岭 Ni-Co 硫化物矿床最具代表性。煎茶岭超基性岩体的蚀变超基性岩、蛇纹岩全岩、石英菱镁岩中的铬水云母的 K-Ar 年龄分别为 590 Ma^①、396 ~ 389 Ma 或 405 Ma(转引自王瑞廷等,2002)和 144.7 Ma(黄婉康等,1996)。由于 K-Ar 体系中云母类和长石类矿物保存 Ar 能力较弱,且封闭温度较低,易受扰动等因素, K-Ar 法主要适用于年轻的地质热历史简单的地质体测年,加之岩体的两组全岩 K-Ar 年龄相差较大,因而不能代表岩体的形成年龄,可能反映超基性岩发生最晚期蛇纹石化的变质年龄(王瑞廷等,2005; 闫海卿等,2005)。全岩(纤胶蛇纹岩) Sm-Nd 等时线年龄为(927 ± 49) Ma(庞春勇等,1993),可能代表煎茶岭超基性岩体的成岩年龄(王瑞廷等,2005)。王瑞廷等(2003)采用 Re-Os 等时线法测得铜镍硫化物矿石的年龄为(878 ± 27) (1σ) Ma($n=5$, ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$)_{初始值} = 0.131 (0.019 , MSWD = 3.5), 与 Sm-Nd 等时线年龄基本接近,加之矿石形成要晚于岩体,因而可以认为该年龄比较准确地界定了区内该期超镁铁质岩活动及其矿化的时限。该成矿年龄代表了矿床的主成矿期,并与陕西略阳铜厂铜矿床辉钼矿 Re-Os 模式年龄 889 Ma(丁振举等,1998)相当,指示新元古代勉-略-宁三角区为重要的成矿期,仍表明区内铜镍矿床形成于新元古代早期,即该成矿带内的 Ni-Cu- (PGE) 硫化物矿床应属于扬子克拉通西北缘新元古代早期晋宁期构造岩浆成矿作用的产物(王瑞廷等,2003)。

3.4 800 Ma 左右成矿事件

盐芦成矿带内以冷水箐岩型 Ni-Cu- (PGE) 硫化物矿床最具代表性。冷水箐岩体曾有角闪橄长岩全岩 K-Ar 年龄为 1 253 Ma^②,该年龄却大于该岩体中角闪辉长岩年龄(角闪石 K-Ar 年龄 1 112 Ma^②),而角闪橄长岩侵入于角闪辉长岩中,其年龄不应该大于辉长岩的年龄。而四川省地质矿产局(1991)仍将该岩体的年龄厘定为 1 112 ~ 1 300 Ma,认为是中元古代末期岩浆活动的产物。该岩体 K-Ar 年龄为 1 031 Ma(袁海华,1981)及其闪长岩中角闪石 K-Ar 年龄为 709 Ma^②,但因岩体经受了一定程度的蚀变,其单矿物的 K-Ar 年龄很难代表岩体形成时代。上述年龄数据的误差大,且彼此相差甚远。近年来,采用单颗粒锆石 U-Pb 法测得该岩体中角闪

① 西北有色地质勘查局 711 总队. 1995. 陕西省略阳县煎茶岭镍矿床地质详查报告. 内部资料.

② 全国同位素地质年龄数据汇编编写组. 1975. 全国同位素地质年龄数据汇编. 内部资料.

辉长岩的形成年龄分别为 $(936 \pm 7) \text{ Ma}$ (沈渭洲等, 2003) 和 $(840 \pm 5) \text{ Ma}$ (朱维光等, 2004), 但两者相差较大, 达 100 Ma 之久, 可能与其中所含的残留的继承性锆石有关, 其年龄可能代表混合年龄 (杜利林等, 2005)。采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 法测定盐边群底部荒田组玄武岩 (原划为蛇绿岩) 的岩浆结晶年龄为 $(782 \pm 53) \text{ Ma}$ (杜利林等, 2005), 但误差偏大, 且样品并非直接采自冷水箐岩体, 并不能代表该岩体的真实年龄, 不过这些年龄均表明冷水箐岩体是新元古代早期岩浆活动产物。此处暂且将冷水箐岩体的年龄限定为 800 Ma 左右。若有条件, 可采用 Re-Os 法直接测定硫化物矿石的年龄, 以便更加准确地厘定该成矿带内 Ni-Cu-(PGE) 硫化物矿床的成矿时代。

4 地球动力学背景

中国新元古代 4 个岩浆 Ni-Cu-(PGE) 硫化物矿床成矿带即龙首山、桂北、勉略宁和盐边成矿带, 它们所对应的地球动力学背景分别为华北板块裂解成裂谷环境、扬子板块边缘弧后拉张环境、扬子与华北板块碰撞造山后伸展环境和扬子板块裂解成裂谷环境。

4.1 华北板块裂解成裂谷环境

在龙首山地区, 与镁铁质-超镁铁质侵入岩有关的金川超大型铜-镍矿床的块状硫化物矿石 $(833 \pm 35) \text{ Ma}$ 年龄可能反映出地质历史演化期间的一幕重要地质事件。新元古代早期 (1000 Ma 左右), 在由格林威尔造山运动 (在龙首山为晋宁运动) 形成的 Rodinia 超大陆中, 华北地块位于西伯利亚与劳伦提亚之间的缺口中。 $(833 \pm 35) \text{ Ma}$ 时镁铁质-超镁铁质岩的侵入是地幔柱到达的信号, 地幔柱导致岩石圈大范围 (约 1000 km) 的隆起、侵蚀和去顶作用, 并导致华北克拉通边缘裂谷化 (周金城等, 2003)。此时正值全球 Rodinia 超大陆分裂时期, 北祁连也正好处于大陆裂谷阶段 (杨刚等, 2005)。还有金川矿床所在的龙首山地区缺失青白口群, 说明该地区在 800 Ma 前长期处于隆起状态, 这与含矿岩体和块状矿脉在拉张的构造背景下贯入是一致的, 并与地幔柱隆升的构造环境类似 (汤中立, 1996)。阿拉善地块南缘自北而南分布有北大山岩带、龙首山岩带和北海子岩带, 位于北大山岩带中的野苾里含长辉石橄榄岩侵入体的 Sm-Nd 等时线年龄 $(773.1 \pm 10.8) \text{ Ma}$ (陶仙聰等, 1994), 为 Rodinia 超大陆裂解的响应 (李文渊等, 2004)。因此, 可以认为龙首山 $(833 \pm 35) \text{ Ma}$ 岩墙是 Rodinia 超大陆裂解的地幔柱活动在华北的响应。金川铜-镍矿床的母岩浆是上地幔在高温 ($1400 \sim 1700^\circ\text{C}$) 条件下局部熔融形成的高 Mg 苦橄质拉斑玄武岩浆 (王瑞廷等, 2004), 而这种类型的母岩浆与地幔柱的活动密切相关 (Chai et al., 1992)。已有一些研究指出新元古代地幔柱 (或超级地幔柱) 是 Rodinia 超大陆裂解的主要动力学机制, 其中最早和最主要的一次地幔柱活动很可能发生在约 830 Ma (Pisarevsky, 2004)。世界级岩浆型 Ni-Cu 硫化物矿床如俄罗斯的 Noril'sk-Talnakh 和美国的 Duluth 矿床主要与地幔柱成因的溢流玄

武岩有关。同理, 金川岩体很可能与 Rodinia 裂解时期的约 830 Ma 地幔柱活动有关。也就是说, 这一地幔柱事件导致了华北克拉通内地幔隆升, 地壳发生拉张、减薄和裂解, 使陆缘呈被动离散趋势, 形成离散型陆缘, 沿陆缘裂谷-裂陷槽所形成的超壳断裂, 引发岩石圈地幔物质上涌和热幔环流, 使幔源岩浆深部熔离成矿 (裴荣富等, 2005), 进而形成了与镁铁质-超镁铁质岩浆有关的金川铜-镍硫化物矿床。

4.2 扬子板块边缘弧后拉张环境

在宝坛地区, 与超镁铁质侵入岩有关的铜镍硫化物矿 $(982 \pm 21) \text{ Ma}$ 年龄可能反映出地质历史演化期间的一幕重要事件。该年龄与桂北田蓬花岗岩体全岩 Rb-Sr 等时线年龄 $(952 \pm 86) \text{ Ma}$ (董宝林等, 1987)、浙江章村-楼塔双溪坞群细碧岩的全岩 Sm-Nd 等时线年龄 $(1154 \pm 122) \text{ Ma}$ 和 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 等时线年龄 $(994 \pm 20) \text{ Ma}$ (徐步台等, 1996)、皖南蛇绿岩 Sm-Nd 年龄 $(1034 \pm 24) \sim (935 \pm 10) \text{ Ma}$ (Chen et al., 1991) 及赣东北蛇绿岩离子探针锆石 U-Pb 年龄 $(968 \pm 23) \text{ Ma}$ (李献华等, 1994) 在误差范围内基本一致, 可能是扬子与华夏板块碰撞造山前的构造-岩浆-热事件记录。扬子块体南缘新元古代晋宁运动的时限为 $1000 \sim 800 \text{ Ma}$ (李献华, 1999), 由格林威尔造山运动 (在桂北为四堡运动) 形成 Rodinia, 且华南位于该超大陆的中央 (Li et al., 2003)。华南的武陵运动使华夏与扬子地块发生碰撞拼合形成统一的“华南古陆” (高坪仙等, 1999)。沿扬子克拉通东南部存在大约 970 Ma 的埃达克岩 (adakite), 显示当时俯冲作用仍在进行 (Pisarevsky, 2004), 且湖南益阳安山质集块岩 $[(933.2 \pm 2.1) \text{ Ma}]$ 以及浙江绍兴的 Taohong 和 Xiqu 英云闪长岩-花岗闪长岩 (SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 $(913 \pm 15) \text{ Ma}$ 和 $(905 \pm 14) \text{ Ma}$ (Ye et al., 2007)) 的形成与华夏-扬子板块间的碰撞造山有关, 并形成绵延 1500 km 的江南造山带 (王孝磊等, 2003), 还是沿扬子板块东南缘新元古代早期四堡岩浆弧的全岩地球化学证据 (Ye et al., 2006a)。加之, 桂北四堡群中的科马提质玄武岩的地球化学特征表明它是汇聚板块边缘、俯冲带岩浆作用的产物, 而不具有地幔柱来源的岩浆的特性 (周金城等, 2003)。桂北新元古代强过铝质 A 型花岗岩形成于华夏-扬子板块碰撞高峰期后, 并非新元古代双峰式岩浆作用的产物, 因而不能用地幔柱模型来解释 (王孝磊等, 2006)。然而, 广西北部元宝山镁铁质-超镁铁质岩石的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 $(828 \pm 7) \text{ Ma}$ (Li et al., 1999) 和 $(841 \pm 22) \text{ Ma}$ (周继彬等, 2007), 与桂北的 Hejiawan 层状辉绿岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 $(811.5 \pm 4.8) \text{ Ma}$ (Wang et al., 2006b), 三防过铝质 S 型花岗岩体的颗粒锆 U-Pb 年龄 $(825 \pm 6) \text{ Ma}$ (李献华, 1999) 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 $(804.3 \pm 5.2) \text{ Ma}$ (王孝磊等, 2006a), 以及元宝山和本洞过铝质 S 型花岗岩体的颗粒锆石 U-Pb 年龄依次为 $(824 \pm 4) \text{ Ma}$ (李献华, 1999) 和 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 $(820 \pm 7) \text{ Ma}$ (李献华, 1999) 以及桂北的本洞、寨滚、峒马和田朋花岗岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 $(822.7 \pm 3.8) \text{ Ma}$ 、 $(835.8 \pm 2.5) \text{ Ma}$ 、 $(824 \pm 13) \text{ Ma}$ 和 $(794.2 \pm 8.1) \text{ Ma}$ (王孝磊等,

2006a) 以及江西九岭、安徽许村 S 型花岗岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 (818 ± 10) Ma、(829 ± 11) Ma (李献华等, 2001) 在误差范围内一致, 表明桂北元宝山约 825 Ma 超镁铁质岩的形成可能与导致 Rodinia 超大陆裂解的地幔柱有关, 并限定了丹洲群的沉积下限年龄约为 820 Ma, 而广西龙胜镁铁质-超镁铁质岩石呈 NNE 向岩脉状侵入丹洲群地层中, 且其颗粒锆石 U-Pb 年龄为 (761 ± 8) Ma (葛文春等, 2001a), 与南苏鲁超高压变质地体南部正片麻岩类和榴辉岩的原岩代表的花岗岩浆 (780~680 Ma) 和基性岩浆 (765~730 Ma) 活动 (许志琴等, 2006) 时间基本一致, 限定了丹洲群地层的沉积上限年龄约为 760 Ma。因此, 分布于江南造山带上的桂北、湘东北、江西和安徽的新元古代强过铝质花岗岩体以及南苏鲁地区的花岗岩浆和基性岩浆, 特别是广西龙胜地区 820~760 Ma 形成的丹洲群火山岩、镁铁质-超镁铁质岩石及铜镍硫化物矿床可能与 Rodinia 超大陆 ~825 Ma 裂解之后的另一次裂解事件有关 (葛文春等, 2000; 2001a; 2001b)。因此, (982 ± 21) Ma 大于汇聚造山年龄 (933.2 ± 2.1) Ma, 可能形成于前造山期, 其形成环境很可能类似于弧后拉张等活动性边缘环境, 是 Rodinia 在汇聚过程中局部伸展作用在华南的反映。即扬子板块南缘大洋板块的俯冲, 可能引起较深处岩石圈地幔物质的局部上涌, 在汇聚板块边缘导致镁铁质-超镁铁质岩浆活动, 使幔源岩浆熔离成矿, 从而形成了与镁铁质-超镁铁质岩浆有关的宝坛铜-镍硫化物矿床。

4.3 扬子与华北板块碰撞造山后伸展环境

在略阳地区, 与超镁铁质岩有关的煎茶岭硫化镍矿床 (878 ± 27) Ma 的年龄反映了勉-略-宁三角区地质演化期间一次重要的构造岩浆事件。该年龄与北秦岭的商南岩体 (I-S 型) 的颗粒锆石蒸发 Pb-Pb 年龄 (889 ± 22) Ma (裴先治等, 1995)、蔡凹花岗岩体 (I 型) 和汉南天平河花岗岩体的 ELA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 (889 ± 10) Ma (张成立等, 2004) 或 (863 ± 10) Ma (凌文黎等, 2006) 在误差范围内一致, 且蔡凹岩体具有后碰撞拉张阶段花岗岩特征, 表明这些岩体可能同为造山晚期裂开环境的构造-岩浆-热事件记录。该年龄小于北秦岭地区新元古代早期强烈汇聚主碰撞造山阶段 ($980 \sim 900$ Ma) 所形成的牛角山 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 (955 ± 13) Ma (王涛等, 2005)、德河 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 (943 ± 18) Ma (陆松年等, 2003) 及涝峪、寨根和石槽沟等强变形线状同造山期过铝质 S 型花岗岩 (陆松年等, 2004a), 在同一地点侵入于岩体中的弱变形花岗岩脉的锆石 SHRIMP 年龄为 (929 ± 25) Ma, 表明该片麻状花岗岩体记录的同碰撞变形主要发生于 955~929 Ma (王涛等, 2005)。西乡群下部白勉峡组和上部孙家河组的颗粒锆石 U-Pb 谐和年龄 (946 ± 18) Ma 和 (904 ± 18) Ma (凌文黎等, 2002) 以及西乡群岛孤英安岩和流纹岩的 TIMS 锆石 U-Pb 年龄 (950 ± 4) ~ (895 ± 3) Ma (Ling et al., 2003), 但大于晚造山阶段的松树沟超基性岩的辉石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄 (842 ± 4) Ma (陈丹玲等, 2002) 以及松树沟黑云母花岗岩的侵位年龄 (848 ± 71) Ma 和 (839 ± 19) Ma (陆松年等,

2004a)。秦岭造山带于 1 250~840 Ma 期间发生了一系列热-构造事件, 即中元古代晚期武关裂谷的形成, 导致 ($1\,243 \pm 46$) Ma 陆内裂谷火山岩喷发, 中元古代末期松树沟洋盆的打开, 形成超基性岩 ($1\,084 \pm 73$) Ma 和具 MORB 特征的玄武岩 ($1\,030 \pm 46$) Ma (陆松年等, 2004a)。而陕西西乡的毕机沟镁铁质-超镁铁质层状岩体的 Sm-Nd 等时线年龄为 (924 ± 115) Ma、Rb-Sr 等时线年龄为 (725 ± 191) Ma (凌文黎等, 1997) 以及 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 820 Ma (Zhou et al., 2002b), 洋县的望江山镁铁质层状岩体的 Sm-Nd 等时线年龄为 (785 ± 88) Ma (凌文黎等, 2001) 和 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 780 Ma (Zhou et al., 2002b), 秦岭地区山阳磨沟峡闪长岩岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 (743 ± 12) Ma (牛宝贵等, 2006), 指示了北秦岭在新元古代早期已进入由强烈挤压主碰撞转向后碰撞伸展演化阶段, 随后秦岭进入了更为广泛的伸展裂解阶段 (张成立等, 2004)。因此, (878 ± 27) Ma 可能代表区内新元古代造山晚期, 构造应力由挤压向伸展转变阶段。另外, S→I→A 型花岗岩演化 ($959 \sim 725$ Ma), 揭示出该造山带可能经历了同碰撞-晚碰撞到碰撞后伸展的碰撞造山旋回——“威尔逊构造旋回”, 表明新元古代早期造山带两侧陆块可能发生了汇聚与裂解 (王涛等, 2002), 并沟通壳幔的岩浆上侵活动及其与围岩的相互作用, 产生了类似于科马提质的高镁母岩浆, 从而促使了煎茶岭镍-钴矿床的形成和就位 (王瑞廷等, 2003; 2005)。

4.4 扬子板块裂解成裂谷环境

扬子块体西缘新元古代岩浆活动非常强烈, 在盐边地区位于扬子克拉通西缘中段的与镁铁质-超镁铁质侵入岩有关的铜-镍硫化物矿床, 其岩体形成的年龄 (约 800 Ma) 可能反映出地质历史演化期间一幕重要地质事件。该年龄与盐边地区的同德辉长岩和闪长岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 (820 ± 13) Ma 和 (813 ± 14) Ma (Sinclair, 2001)、康滇地区的冷碛辉长岩和苏雄组玄武岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 (808 ± 12) Ma (李献华等, 2002b) 和 (803 ± 12) Ma 基本一致, 还与滇东南老君山猛洞群的石英角闪斜长片麻岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 [(829 ± 10) Ma 和 (761 ± 12) Ma (刘玉平等, 2006)], 云南峨山 (I 型) 和川西丹巴贡才等花岗岩体、康定和米易杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 (819 ± 8) Ma 和 (824 ± 14) Ma、(795 ± 13) ~ (797 ± 10) Ma 和 (796 ± 9) Ma (Zhou et al., 2002a), 泸定—石棉地区黄草山花岗岩体、康定地区下索子花岗岩体、石棉地区田湾闪长岩体和松潘—甘孜造山带中丹巴东谷混合花岗岩体的颗粒锆石 U-Pb 年龄 [(786 ± 36) Ma、(805 ± 15) Ma (沈渭洲等, 2000)、(823 ± 12) Ma (郭建强等, 1998) 和 (798 ± 24) Ma (徐士进等, 1996)] 在误差范围内基本相同, 可能是与扬子板块裂解事件有关的构造-岩浆-热事件记录。但该年龄却晚于四川石棉扁路岗角闪二长花岗岩体和泸定桥头基性杂岩体辉长岩中颗粒锆石 U-Pb 年龄 (853 ± 42) Ma (沈渭洲等, 2002) 和川西南盐边关刀山岩体 (典型的 I 型花岗岩) 的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 (857 ± 13) Ma (李献华等, 2002a), 丹巴格宗花岗岩体的颗粒锆石 U-Pb 年龄 ($876 \pm$

40) Ma (郭建强等, 1998) 和 (864 ± 26) Ma (徐士进等, 1996) 和 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 (864 ± 8) Ma (Zhou et al., 2002a)。另外, 攀西麻粒岩中颗粒锆石 U-Pb 年龄为 $858 \sim 778$ Ma, 可能受地幔柱活动影响, 麻粒岩在快速冷却-抬升过程中发生了角闪岩相退变质作用 (刘文中等, 2005)。加之, (803 ± 12) Ma 形成的苏雄组玄武岩是一套弱碱性双峰式火山岩, 形成于典型的板内裂谷环境 (李献华等, 2001), 川西康滇裂谷中康定-泸定-石棉地区广泛分布的基性岩墙群 (SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 $780 \sim 760$ Ma) (林广春等, 2006), 且攀枝花地区的橄榄辉石岩体和角闪辉石岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 (746 ± 10) Ma 和 (738 ± 23) Ma (Zhao et al., 2006), 这些大规模岩浆活动很可能是 Rodinia 超大陆下 $860 \sim 750$ Ma 超级地幔柱最早的岩浆活动记录 (李献华等, 2005)。因此, 推测盐边成矿带可能是扬子板块裂解成裂谷环境的岩浆-热事件的记录。

5 结 论

通过对新元古代岩浆 Cu-Ni-(PGE) 硫化物矿床的综合分析研究, 得出以下结论:

(1) 中国新元古代的岩浆型 Ni-Cu-(PGE) 硫化物矿床主要出露于甘肃的金川、陕西的略阳、四川的盐边、广西的宝坛, 其中以金川、煎茶岭、冷水箐和宝坛矿床最为典型。这些矿床受控于镁铁质-超镁铁质岩体, 直接产于岩体的底部、边部及上部。成矿作用以深部熔离富集-浅部贯入为主, 矿化类型有通道型和熔离型, 成矿岩体小、含矿率高, 部分具有小岩体成大矿的特点。

(2) 中国新元古代的岩浆型 Ni-Cu-(PGE) 硫化物矿床均分布于克拉通边缘, 即扬子克拉通南缘、北缘和西缘以及华北克拉通西南缘, 按其所处的大地构造位置可划分为 4 个成矿带, 即桂北成矿带、勉略宁成矿带、盐芦成矿带和龙首山成矿带。

(3) 中国新元古代的岩浆型 Ni-Cu-(PGE) 硫化物矿床的主要成矿期均为新元古代早期 ($1\ 000 \sim 800$ Ma), 从南到北, 从东到西, 成矿时代依次变新, 即从宝坛 (982 ± 21) Ma $\rightarrow$ 煎茶岭 (878 ± 27) Ma $\rightarrow$ 冷水箐 $(800 \pm)$ Ma $\rightarrow$ 金川 (833 ± 35) Ma, 而矿床规模从宝坛中型 Ni-Cu-Co-(PGE) 矿床 $\rightarrow$ 煎茶岭大型 Ni-Co 矿床 $\rightarrow$ 冷水箐中型 Ni-Cu-(PGE) 矿床 $\rightarrow$ 金川超大型 Ni-Cu-(PGE) 矿床。

(4) 中国新元古代的 4 个岩浆型 Ni-Cu-(PGE) 硫化物矿床均与罗迪尼亚 (Rodinia) 超大陆的汇聚与裂解有关。桂北、勉略宁成矿带分别发生于 Rodinia 汇聚时期弧后盆地和造山后伸展环境, 而盐边、龙首山成矿带则与 Rodinia 裂解时期的地幔柱活动有关。所对应的地球动力学背景分别为扬子板块边缘弧后拉张环境、扬子与华北板块碰撞造山后伸展环境、扬子板块裂解成裂谷环境和华北板块裂解成裂谷环境。

致 谢 杨富全和毛德宝两位研究员仔细审阅了全文, 提出了宝贵的修改意见, 谨致最真诚的感谢!

References

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Sichuan province. 1991. Regional Geology of Sichuan province [M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese).
- Chai G and Naldrett A J. 1992. The Jinchuan ultramafic intrusion: Crystallization of a high-Mg basaltic magma [J]. J. Petrol., 33: 277~304.
- Chen D L, Liu L, Zhou D W, Luo J H and Sang H Q. 2002. Genesis and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of clinopyroxene megacrysts in ultramafic terrain from Songshugou, east Qinling Mountain and its geological implication [J]. Acta Petrological Sinica, 18(3): 355~362 (in Chinese with English abstract).
- Chen J, Foland K A, Xing F, et al. 1991. Magmatism along the south-east margin of the Yangtze block: Precambrian collision of the Yangtze and Cathaysia blocks of China [J]. Geology, 19: 815~818.
- Chen Y L, Luo Z H and Liu C. 2001. New recognition of Kangding-Mianning metamorphic complexes from Sichuan, western Yangtze craton: evidence from Nd isotopic composition [J]. Earth Science Journal of China University of Geosciences, 26(3): 279~285 (in Chinese with English abstract).
- Ding Z J, Yao S Z, Zhou Z G and Wu G. 1998. Metallogenic chronology and its geologic significance of Tongchang copper ore deposit, Shaanxi Province [J]. Journal of Xi'an Engineering University, 20(3): 24~27 (in Chinese with English abstract).
- Dong B L and Tan J. 1987. The new data about isotope age of granite in Jiuwandashan area, North Guangxi and discuss about age [J]. Guangxi Regional Geology, (1): 20~22 (in Chinese).
- Du A D, Sun Y L, Zou X Q, et al. 1996. Study on Rhenium-Osmium isotope system by inductively coupled plasma mass spectrometry and its application to copper-nickel sulfide and molybdenite to copper-nickel sulfide and molybdenite dating [J]. Rock and Mineral Analysis, 15(4): 263~266.
- Du L L, Geng Y S, Yang C H, Wang X S, Ren L D, Zhou X W, Shi Y R and Yang Z S. 2005. Geochemistry and SHRIMP U-Pb zircon chronology of basalts from the Yanbian group in the western Yangtze block [J]. Acta Geological Sinica, 79(6): 805~813 (in Chinese with English abstract).
- Gao P X and Liu X M. 1999. Discussion on geological records of convergence and disintegration in China continent during Mesoproterozoic and Neoproterozoic [J]. Geological Survey and Research, 22(1): 47~54 (in Chinese with English abstract).
- Ge W C, Li X H, Li Z X, Zhou H W, Wang J and Lee C Y. 2000. "Longsheng Ophiolite" in North Guangxi revisited [J]. Acta Petrologica Sinica, 16(1): 111~118 (in Chinese with English abstract).
- Ge W C, Li X H, Li Z X and Zhou H W. 2001a. Mafic in intrusions in Longsheng area: age and its geological implications [J]. Chinese Journal of Geology, 36(1): 112~118 (in Chinese with English abstract).
- Ge W C, Li X H, Liang X R, Wang R C, Li Z X and Zhou H W. 2001b. Geochemistry and geological implications of mafic-Ultramafic rocks with the age of ~ 825 Ma in Yuanbaoshan-Baotan area of northern Guangxi [J]. Geochemica, 30(2): 123~130 (in Chinese with English abstract).
- Gen W H, Jia G X, Zhang Y L, Tang H S, Chen Y R and Liang Y B. 2001. General appraisal of nickel-cobalt resources western area in China [J]. China Mining Magazine, 10(2): 27~30 (in Chinese).

- Guo J J, Zhang G W, Lu S N and Zhao F Q. 1999. Neoproterozoic continental block collage of China and Rodinia supercontinent [J]. *Geological Journal of China Universities*, 5 (2) : 148 ~ 156 (in Chinese with English abstract).
- Guo J Q, You Z P, Yang J, Shen W Z, Xu S J and Wang R C. 1998. Study on the U-Pb dating of zircon in Tianwan and Pianlugang bodies from Shimian area, west Sichuan [J]. *J. Mineral Petrol.*, 18 (1) : 91 ~ 94 (in Chinese with English abstract).
- Han F, Shen J Z, Nie F J, Ding X S, Li S C, Yang K T and Yang C. 1994. The geochronal studies of Sibao Group in the southern margin of Jiangnan massif [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, (1~2) : 43 ~ 50 (in Chinese with English abstract).
- Hao J and Zhai M G. 2004. Jinning movement and Sinian system in China: their relationship with Rodinia supercontinent [J]. *Chinese Journal of Geology*, 39 (1) : 139 ~ 152 (in Chinese with English abstract).
- Hua Y R. 1994. Geotectonic evolution and regional metallogenic rules of Yangtze plate [J]. *Geological Science and Technology of Jiangxi*, 21 (1~2) : 15 ~ 25 (in Chinese).
- Huang J, Mo J P, Tang H S and Liu Y X. 2004. Metallogenic geologic conditions and prospecting of Cu-Ni sulfide deposits in North Guangxi [J]. *Guangxi Geology*, (11) : 70 ~ 71 (in Chinese).
- Huang W K, Gan X P, Shan Z X, Chen L X and Liu Y. 1996. A study of petrology and metallogenetic epoch of gold in Jianchaling deposit, Shaanxi province [J]. *Geochimica*, 25 (2) : 150 ~ 156 (in Chinese with English abstract).
- Jiao J G, Yan H Q, Qian Z Z, Liu R P and Li J J. 2006. Geochemical characteristics of typical mafic-ultramafic rocks in Longshou mountains [J]. *J. Mineral Petrol.*, 26 (1) : 49 ~ 56 (in Chinese with English abstract).
- Keays R R, Ihlenfeld C, McInnes B I A, et al. 2004. Re-Os isotope dating of the Jinchuan Ni-Cu-PGE, sulfide deposit, China [A]. In: Shellnutt J G, Zhou M F, Pang K N, ed. Recent advance in magmatic ore systems in mafic-ultramafic rocks [C]. Hong Kong SAR China: Proceedings of the IGCP479 Hong Kong Workshop, Abstract Volume : 41 ~ 42.
- Li W Y. 1996. Metallogenic series and geochemistry of nickel-copper sulfide deposits in China [M]. Xi'an: Xi'an Cartographic Pub. House. 1 ~ 134 (in Chinese).
- Li W Y, Tang Z L, Guo Z P and Wang W. 2004. Petrogenetic epoch and geochemical characteristics of mafic-ultramafic rocks on the southern margin of Alxa massif in northern China [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23 (2) : 117 ~ 126 (in Chinese with English abstract).
- Li X, Bai W J, Chen F L, Zou X H, Zheng X H, Yang Z T, Lu Y, Yang X and Hu X F. 1995. On the mafic layered complex of pre-Cambrian and its Pt-bearing property from northern and western edge of Yangtze massif [M]. Xi'an: Publishing House of Westnorth University. 18 ~ 95 (in Chinese with English abstract).
- Li X H, Li Z X, Ge W C, et al. 2003b. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma [J]. *Precambrian Research*, 122 : 45 ~ 83.
- Li X H, Zhou G Q and Zhao J X. 1994. SHRIMP on microprobe zircon U-Pb age of the NE Jiangxi ophiolite and its tectonic implications [J]. *Geochimica*, 23 (2) : 125 ~ 131 (in Chinese with English abstract).
- Li X H. 1999. U-Pb zircon ages of granites from northern Guangxi and their tectonic significance [J]. *Geochimica*, 28 (1) : 1 ~ 9 (in Chinese with English abstract).
- Li X H, Li Z X, Ge W C, Zhou H W, Li W X and Liu Y. 2001. U-Pb zircon ages of the Neoproterozoic granitoids in south China and their tectonic implications [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20 (4) : 271 ~ 273 (in Chinese).
- Li X H, Li Z X, Zhou H W, Liu Y, Liang X R and Li W X. 2002a. SHRIMP U-Pb zircon age, geochemistry and Nd isotope of the Guandaoshan pluton in SW Sichuan: Petrogenesis and tectonic significance [J]. *Science in China (Series D)*, 32 (Supp.) : 60 ~ 68 (in Chinese).
- Li X H, Zhou H W, Li Z X, Liu Y and Liang X R. 2002b. U-Pb zircon geochronological, geochemical and Nd isotopic study of Neoproterozoic basaltic magmatism in Western Sichuan: petrogenesis and geodynamic implications [J]. *Earth Science Frontiers*, 9 (4) : 329 ~ 338 (in Chinese with English abstract).
- Li X H, Su L, Song B and Liu D Y. 2004. SHRIMP U-Pb zircon age of the Jinchuan ultramafic intrusion and its geological significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49 (4) : 420 ~ 422 (in Chinese).
- Li X H, Qi C S, Liu Y, Liang X R, Tu X L, Xie L W and Yang Y H. 2005a. The Genesis of Neoproterozoic bimodal volcanic rock in the west margin of Yangtze block: New restraint from Hf isotope and Fe/Mn [J]. *Chinese Science Bulletin*, 50 (19) : 2155 ~ 2160 (in Chinese).
- Li X H, Su L, Chung S L, Li Z X, Liu Y, Song B and Liu D Y. 2005b. Formation of the Jinchuan ultramafic intrusion and the world's third largest Ni-Cu sulfide deposit: Associated with the ~ 825 Ma south China mantle plume [J]. *Geochem. Geophys. Geosys.*, 6, Q11004, doi: 10.1029/2005GC001006.
- Li Z X, Zhang L H and Powell C M. 1995. South China in Rodinia: part of the missing link between Australia-East Antarctica and Laurentia [J]. *Geology*, 23 : 407 ~ 410.
- Li Z X and Metcalfe P. 1996. Breakup of Rodinia and Gondwanaland and assembly of Asia [J]. *Australia J. Earth Science*, 43 (6) : 593 ~ 2604.
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. 1999. The breakup of Rodinia: Did it start with a mantle plume beneath South China [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 173 : 171 ~ 181.
- Li Z X, Cho M and Li X H. 2003a. Precambrian tectonics of East Asia and relevance to supercontinent evolution [J]. *Precambrian Research*, 122 : 1 ~ 6.
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. 2003b. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia [J]. *Precambrian Research*, 122 : 85 ~ 109.
- Lin G C, Li X H and Li W X. 2006. SHRIMP U-Pb age and geochemistry of elements and Nd-Hf isotope from Neoproterozoic basic dike swarm in West Sichuan: lithogenesis and tectonic significances [J]. *Science in China (Series D)*, 36 (7) : 630 ~ 645 (in Chinese).
- Ling W L, Zhang B R, Zhou L and Zhao Z B. 1997. Continental delamination signals beneath the northern margin of the Yangtze craton during Neoproterozoic: indication of isotopic geochemistry from Bijigou mafic-ultramafic intrusive rock [J]. *J. Mineral Petrol.*, 17 (1) : 40 ~ 49 (in Chinese with English abstract).
- Ling W L, Wang X H and Cheng J P. 2001. Geochemical features and its tectonic implication of the Jinningian Wangjiangshan gabbros in the north margin of Yangtze Block [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20 (4) : 218 ~ 221 (in Chinese with English abstract).

- Ling W L, Gao S, Ouyang J P, Zhang B R and Li H M. 2002. Time and tectonic setting of the Xixiang Group: Constraints from zircon U-Pb geochronology and geochemistry [J]. *Science in China (Series D)*, 32(2): 101~112 (in Chinese).
- Ling W L, Gao S, Zhang B R, Li H M, Liu Y and Cheng J P. 2003. Neoproterozoic tectonic evolution of the northwestern Yangtze craton, South China: implications for amalgamation and break-up of the Rodinia Supercontinent [J]. *Precambrian Res.*, 122: 111~140.
- Ling W L, Gao S, Cheng J P, Jiang L S, Yuan H L and Hu Z C. 2006. Neoproterozoic magmatic events within the Yangtze continental interior and along its northern margin and their tectonic implication: constraint from the ELA-ICPMS U-Pb geochronology of zircons from the Huangling and Hannan complexes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 387~396 (in Chinese with English abstract).
- Liu S H, Sun C A, Wang J S, Li H X and Wang M. 1996. The discovery history of mineral deposits of China-Volume of Shaan'xi province [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 49~50 (in Chinese).
- Liu W Z, Xu S J, Wang R C, Zhao L Z, Li H M, Wu J Q and Fang Z. 2005. Zircon U-Pb geochronology of granulites in Panzhihua-Xichang Area: New Evidence for the Neoproterozoic Geological Evolution in the western margin of Yangtze Block [J]. *Geology Review*, 51(4): 470~476 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y P, Ye L, Li C Y, Song B, Li T S, Guo L G and Pi D H. 2006. Discovery of the Neoproterozoic magmatics in southeastern Yunnan: evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating and litho-geochemistry [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 916~926 (in Chinese with English abstract).
- Lu S N. 2001. From Rodinia to Gonwanaland supercontinents-Thinking about problems of researching Neoproterozoic supercontinents [J]. *Earth Science Frontiers*, 8(4): 441~448 (in Chinese with English abstract).
- Lu S N, Li H K and Chen Z H. 2003. Characteristics, sequence and ages of Neoproterozoic thermo-tectonic events between Tarim and Yangzi blocks-A hypothesis of Yangzi-Tarim connection [J]. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 321~326 (in Chinese with English abstract).
- Lu S N, Chen Z H, Li H K, Hao G J, Zhou H Y and Xiang Z Q. 2004a. Late Mesoproterozoic-early Neoproterozoic evolution of the Qinling orogen [J]. *Geological Bulletin of China*, 23(2): 107~112 (in Chinese).
- Lu S N, Li H K, Chen Z H, Yu H F, Jin W and Guo K Y. 2004b. Relationship between neoproterozoic cratons of China and the Rodinia [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(2): 515~522 (in Chinese with English abstract).
- Mao D B and Zhong C T. 2001. Metallogeny in relation to supercontinent [J]. *Progress in Precambrian Research*, 24(6): 83~97 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Zhang Z Q and Dong B L. 1990. A new Sm-Nd isotopic chronology of Sibao Group in southern margin of Yangtze massif [J]. *Geological Review*, 36(3): 264~268 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W and Du A D. 2001. The 982Ma Re-Os age of copper-nickel sulfide ores in the Baotan area, Guangxi and its geological significance [J]. *Science in China (Series D)*, 45(10): 911~920 (in Chinese).
- McMenamin M A S and McMenamin D L S. 1990. The emergence of animals: the Cambrian breakthrough [M]. New York: Columbia University Press. 1~12.
- Niu B G, He Z J, Ren J S, Wang J and Deng P. 2006. SHRIMP U-Pb ages of zircons from the intrusions in the western Douling-Xiaomaoling uplift and their geological significances [J]. *Geological Review*, 52(6): 826~835 (in Chinese with English abstract).
- No.6 Unit of Gansu Bureau of Geology and Mineral Resources. 1984. Geology of Baijiazui sulfide nickel deposit [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 11~17 (in Chinese).
- Pang C Y and Chen M Y. 1993. Isotopic geochronological data and their geological significance in Jianchaling region, Shaanxi province [J]. *Mineral Resources and Geology*, 7(5): 354~360 (in Chinese with English abstract).
- Pei R F, Li J W and Mei Y X. 2005. Metallogeny of continental margin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(1): 24~34 (in Chinese with English abstract).
- Pei X Z, Li G G, Wang Q Q and Zhang W J. 1995. Geological characteristics and its genetic type of the Shangnan granite pluton in the north Qinling [J]. *Northwestern Geology*, 16(4): 1~7 (in Chinese).
- Pisarevsky S. 2004. Annual report of IGCP Project No. 440 in 2003-Rodinia assembly and breakup [J]. *Global Geology*, 23(2): 118~122.
- Ren J S, Chen T Y, Niu B G, Liu Z G and Liu F G. 1990. Tectonic evolution of the continental lithosphere and metallogeny in Eastern China and adjacent areas [M]. Beijing: Science Press. 10~101 (in Chinese).
- Ren J S, Wang Z X, Chen B W, Jiang C F, Niu B G, Li J Y, Xie G L, He Z J and Liu Z G. 1997. A new generation tectonic map of China [J]. *Regional Geology of China*, 16(3): 225~248 (in Chinese with English abstract).
- Shen W Z, Li H M, Xu S J and Wang R C. 2000. U-Pb chronological study of zircons from the Huangcaoshan and Xiasuozi granites in the western margin of Yangtze plate [J]. *Geological Journal of China Universities*, 6(3): 1412~1416 (in Chinese with English abstract).
- Shen W Z, Gao J F, Xu S J and Zhou G Q. 2002. Geochemical characteristics and genesis of the Qiaotou basic complex, Luding County, western Yangtze block [J]. *Geological Journal of China Universities*, 8(4): 380~389 (in Chinese with English abstract).
- Shen W Z, Gao J F, Xu S J, Tan G Q, Yang Z S and Yang Q W. 2003. Format on age and geochemical characteristics of the Lengshuiqing body, Yanbian, Sichuan province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 27~37 (in Chinese with English abstract).
- Sinclair. 2001. A re-examination of the "Yanbian Ophiolite Suite": evidence for western extension of the Mesoproterozoic Sibao Orogen in South China [J]. *Geol. Soc., Aust.*, 65: 99~100.
- Tang Z L, Yang J D, Xu S J, Tao X C and Li W Y. 1992. Sm-Nd dating of ore-bearing ultramafic rock in Jingchuan [J]. *Chinese Science Bulletin*, 37(10): 918~920 (in Chinese).
- Tang Z L and Li W Y. 1995. Nickel-copper sulfide (platinum bearing) mineral deposit and geological contrast [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 14~209 (in Chinese).
- Tang Z L. 1996. The main mineralization mechanism of magma sulfide deposits in China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 70(3): 237~243 (in Chinese with English abstract).
- Tang Z L and Zhang Q Q. 1996. The discovery history of mineral deposits of China-Volume of Gansu province [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 28~34 (in Chinese with English abstract).
- Tang Z L. 2002. Magmatic ore deposits in small rockbody in China [J]. *Engineering Science*, 4(6): 9~12 (in Chinese with English abstract).

- Tang Z L. 2004. The accumulation and evolution of metallogenic series of the mafic-ultramafic magmatic deposits in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 11 (1): 113 ~ 119 (in Chinese with English abstract).
- Tang Z L, Yan H Q, Jiao J G and Li X H. 2006. New classification of magmatic sulfide deposits in China and ore-forming processes of small intrusive bodies [J]. *Mineral Deposits*, 25 (1): 1 ~ 9 (in Chinese with English abstract).
- Tao X C, Yang J D and Xu S J. 1994. Sm-Nd Isotopic dating of Gabbro in Yejili, Neimenggu (Inner Mongolia) [J]. *Chinese Science Bulletin*, 39 (16): 1378 ~ 1381.
- Tu H K. 2001. Distribution characteristic of ultrabasic rock and discussion comprehensive utilization in Qinling [J]. *Geology Chemical Minerals*, 23 (3): 151 ~ 157 (in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Luo Y N, Qu W J, Li Y Q, Fu D M, Li Y G, Li C J, Chen Z Y and Fu X F. 2007. Geology, geochemistry and prospecting of PGE deposits in S W China [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 28. 241 ~ 242 (in Chinese with English abstract).
- Wang H Z and Zhang S H. 2002. Tectonic pattern of the World Precambrian Basement and Problems of Palecontinent Reconstruction [J]. *Earth Science*, 27 (5): 467 ~ 481 (in Chinese with English abstract).
- Wang H Z. 1997. Thinking about Earth's rhythm and continental dynamics [J]. *Earth Science Frontiers*, 4 (3 ~ 4): 1 ~ 12 (in Chinese with English abstract).
- Wang R T, He Y, Liu M W, Qi L and Wang D S. 2002. Geological characteristics of ores from the Jianchaling nickel sulfide deposit [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 23 (6): 535 ~ 540 (in Chinese with English abstract).
- Wang R T, He Y, Wang D S and Liu M W. 2003. Re-Os isotope age and its application to the Jianchaling nickel-copper sulfide deposit, Lueyang, Shaanxi province [J]. *Geological Review*, 49 (2): 205 ~ 211 (in Chinese with English abstract).
- Wang R T, Mao J W, He Y, Wang D S and Tang Z L. 2004. Geochemical characteristics of platinum group elements in Jinchuan super-large sulfide copper-nickel deposit, Jinchang city, Gansu province, China [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 28 (3): 279 ~ 286 (in Chinese with English abstract).
- Wang R T, Mao J W, He Y, Tang Z L, Wang D S and Ren X H. 2005. Geochemical characteristics of Platinum group elements of the sulfide nickel ores and related rocks in Jianchaling, Lueyang County, Shannxi province, China and their implication for genesis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (1): 219 ~ 226 (in Chinese with English abstract).
- Wang T, Zhang G W, Pei X Z., Zhang C L and Li W P. 2002. Possibility of the existence of a Neoproterozoic NW trending orogenic belt in the North Qinling and convergence and breakup of blocks on its two sides [J]. *Geological Bulletin of China*, 21 (8 ~ 9): 516 ~ 522 (in Chinese with English abstract).
- Wang T, Zhang Z Q, Wang X X, Wang Y B and Zhang C L. 2005. Neoproterozoic collisional deformation in the core of the Qinling Orogen and its age: constrained by zircon SHRIMP dating of strongly deformed syn-collisional granites and weakly deformed granitic veins [J]. *Acta Geological Sinica*, 79 (2): 220 ~ 231 (in Chinese with English abstract).
- Wang X, Tang R Y and Li S. 1996. Qinling Orogenic Belt and metallic mineralization [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 273 ~ 300 (in Chinese).
- Wang X L, Zhou J C, Qiu J S and Gao J F. 2003. Geochemistry of the Meso-Neoproterozoic volcanic-intrusive rocks from Hunan province and its petrogenic significances [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19 (1): 49 ~ 60 (in Chinese with English abstract).
- Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, Zhang W L, Liu X M and Zhang G L. 2006a. Petrogenesis of the Neoproterozoic strongly peraluminous granitoids from Northern Guangxi: Constraints from zircon geochronology and Hf isotopes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (2): 326 ~ 342 (in Chinese with English abstract).
- Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, Zhang W L, Liu X M and Zhang G L. 2006b. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from Northern Guangxi, South China: Implications for tectonic evolution [J]. *Precambrian Research*, 145: 111 ~ 130.
- Wingate M T D, Campbell I H, Compston W and Gibson G M. 1998. Ion micro-probe U-Pb ages for Neoproterozoic basaltic magmatism in south-central Australia and implications for the Breakup of Rodinia [J]. *Precamb. Res.*, 87: 135 ~ 159 (in Chinese with English abstract).
- Wu G Y. 2000. Grenville orogens in south China and their collapse: Implications for evolution of the supercontinent Rodinia [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 24 (2): 112 ~ 123 (in Chinese with English abstract).
- Xu B. 2001. Recent study of the Rodinia supercontinent evolution and its main goal [J]. *Geological Science and Technology Information*, 20 (1): 15 ~ 19 (in Chinese with English abstract).
- Xu B T and Qiu Y S. 1996. Sm-Nd and ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of Shuangiwu group and their geological significance [J]. *Geology of Zhejiang*, 12 (1): 46 ~ 53 (in Chinese with English abstract).
- Xu S J, Wang R C, Shen W Z, Zhong H, Lu J J, Hou L W, Fu X F, Huang M H, Yang J D, Wang Y X and Tao X C. 1996. U-Pb, Rb-Sr isotopic chronology of Jinning granites in the Songpan-Ganze Orogenic Belt and its tectonic significances [J]. *Science in China (Series D)*, 26 (1): 52 ~ 58 (in Chinese).
- Xu Z Q, Liu F L, Qi X X, Zhang Z M, Yang J S, Zeng L S and Liang F H. 2006. Record for Rodinia supercontinent breakup event in the south Sulu ultra-high pressure metamorphic terrance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (7): 1745 ~ 1760 (in Chinese with English abstract).
- Yan H Q, Su S G, Jiao J G and Tang H. 2005. Metallogenetic epoch of Jinchuan Cu-Ni (PGE) magmatic sulfide deposit [J]. *Earth Science Frontiers*, 12 (2): 309 ~ 315 (in Chinese with English abstract).
- Yang G, Du A D, Lu J R, Qu W J and Chen J F. 2005. Re-Os (ICP-MS) dating of massive sulfide ores from Ni-Cu-Pt deposits in Jinchuan [J]. *China Science (Series D)*, 35 (3): 241 ~ 245 (in Chinese).
- Yang G, Du A D, Qu W J, et al. 2004. Pt-Os and Re-Os dating of ores from the Jinchuan Ni-Cu-PGE deposit, a world class Ni deposit [A]. In: Shellnutt J G, Zhou M F, Pang K N, ed. Recent Advance in Magmatic Ore Systems In mafic-Ultramafic Rocks [C]. Hong Kong SAR China: Proceedings of the IGCP479 HONG KONG Workshop, Abstract Volume, 40.
- Yang S H, Chen J F, Qu W J, Yang G and Du A D. 2007. Re-Os "ages" of Jinchuan copper-nickel sulfide deposit and their significance [J]. *Geochimica*, 36 (1): 27 ~ 36 (in Chinese with English abstract).
- Ye M F, Li X H, Li W X, Liu Y and Li Z. 2007. SHRIMP zircon U-Pb geochronological and whole-rock geochemical evidence for an early

- Neoproterozoic Sibaoan magmatic arc along the southeastern margin of the Yangtze Block [J]. *Gondwana Research*, 12 : 144~156.
- Yuan H H. 1981. Preliminary study on isotopic K-Ar dating of part mafic-ultramafic from Panzhihua of Xichang area [J]. *Journal of Chengdu Geological College*, (2) : 39~58 (in Chinese).
- Zhai M G, Guo J H and Zhao T P. 2001. Study advances of Neoproterozoic Paleoproterozoic tectonic evolution in the North China craton [J]. *Progress in Precambrian Research*, 24(1) : 17~27 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C J, Li X L, Wang Y L, Xiu S Z and Huang Y J. 1999. Geochemical characteristics of platinum group elements in Lengshuiqing Cu-Ni deposit [J]. *Geology-Geochemistry*, 27(1) : 73~78 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C L, Liu L, Zhang G W, Wang T, Chen D L, Yuan H L, Liu X M and Yan Y X. 2004. Determination of Neoproterozoic post-collisional granites in the north Qinling Mountains and its tectonic significance [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3) : 33~42 (in Chinese with English abstract).
- Zhang S B and Zheng Y F. 2007. Growth and reworking of the Yangtze continental nucleus: evidence from zircon U-Pb ages and Hf isotopes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2) : 393~402 (in Chinese with English abstract).
- Zhang S H and Wang H Z. 2002. A perspective of paleocontinental reconstruction [J]. *Geological Review*, 48(2) : 198~213 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W Z. 2002. Relative positions of south and north China blocks in Neoproterozoic and its tectonic significance [J]. *Progress in Precambrian Research*, 25(2) : 120~128.
- Zhang X H, Liu J H, Xu J L, Niu H B and Zhao Y Q. 2005. Second study on plate tectonics in Gansu province [J]. *Acta Geologica Gansu*, 14(2) : 1~10 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y X, Wang S Q, et al. 1996. The discovery history of mineral deposits of China-Volume of Shichuan province [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 108p (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z Q, Du A D, Tang S H, Lu J R, Wang J H and Yang G. 2004. Age of the Jinchuan copper nickel deposit and isotopic geochemical feature of its source [J]. *Acta Geological Sinica*, 78(3) : 359~365 (in Chinese with English abstract).
- Zhao J H and Zhou M F. 2006. Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzhihua district, SW China: Implications for interaction between subducted slab and mantle wedge [J]. *Goldschmidt Conference Abstracts*, doi: 10.1016/j.gca. 2006.06.1333 A740.
- Zheng Y F. 2004. The location of South China in the configuration of Neoproterozoic supercontinents [J]. *China Science Bulletin*, 49(8) : 715~717 (in Chinese).
- Zhou D W, Liu L, Zhang C L, Wang J L and Ren J F. 2002. The comparative research on convergence and extension events of ancient North China block and Yangtze block in the Middle-Neoproterozoic [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 32(2) : 109~113 (in Chinese with English abstract).
- Zhou J B, Li X H, Ge W C and Liu Y. 2007. Geochronology, mantle source and geological implications of Neoproterozoic ultramafic rocks from Yuanbaoshan area of northern Guangxi [J]. *Geological Science and Technology Information*, 26(1) : 11~18 (in Chinese with English abstract).
- Zhou J C, Wang X L, Qiu J S and Gao J F. 2003. Lithogeochemistry of Meso- and Neoproterozoic mafic-ultramafic rocks from northern Guangxi [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1) : 9~18 (in Chinese with English abstract).
- Zhou M F, Yang Z X, Song X Y, Keays R R and Leshner C M. 2002a. Magmatic Ni-Cu-(PGE) sulphide deposits in China [A]. In: Cabri L J, ed. *The geology, geochemistry, mineralogy, mineral beneficiation of the Platinum-group elements* [C]. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. Special Volume, 54 : 619~636.
- Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, Li Y Q and Ding J. 2002b. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 196 : 51~67.
- Zhu W G, Deng H L, Liu B G, Li C Y, Tang Y, Luo Y N, Li Z D and Pi D H. 2004. The age of the Gaojiacun mafic-ultramafic intrusive complex in the Yanbian area, Sichuan province: Geochronological constraints by U-Pb dating of single zircon grains and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of hornblende [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(10) : 1077~1085 (in Chinese).

附中文参考文献

- 彼萨列夫斯基 S. 2004. IGCP440“罗迪尼亚超大陆汇聚与裂解”项目—2003 年度上作进展 [J]. *世界地质*, 23(2) : 118~122.
- 陈丹玲, 刘良, 周鼎武, 罗金海, 桑海清. 2002. 东秦岭松树沟超镁铁质岩中辉石巨晶的成因和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 18(3) : 355~362.
- 陈岳龙, 罗照华, 刘翠. 2001. 对扬子克拉通西缘四川康定-冕宁变质基底的新认识—来自 Nd 同位素的证据 [J]. *地球科学*, 26(3) : 279~285.
- 丁振举, 姚书振, 周宗桂, 伍刚. 1998. 陕西略阳铜厂铜矿成矿时代及地质意义 [J]. *西安工程学院学报*, 20(3) : 24~27.
- 董宝林, 覃杰. 1987. 桂北九万大山地区花岗岩类新的同位素年龄数据及时代的讨论 [J]. *广西区域地质*, (1) : 20~22.
- 杜利林, 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 任留东, 周喜文, 石玉若, 杨铸生. 2005. 扬子地台北缘盐边群玄武质岩石地球化学特征及 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 [J]. *地质学报*, 79(6) : 805~813.
- 甘肃省地质矿产局第六地质队. 1984. 白家咀硫化铜镍矿床地质 [M]. 北京: 地质出版社. 11~17.
- 高坪仙, 刘新秒. 1999. 试论中国古大陆中-新元古代汇聚与裂解的地质记录 [J]. *前寒武纪研究进展*, 22(1) : 47~54.
- 葛文春, 李献华, 李正祥, 周汉文, 王剑, 李寄. 2000. 桂北“龙胜蛇绿岩”质疑 [J]. *岩石学报*, 16(1) : 111~118.
- 葛文春, 李献华, 李正祥, 周汉文. 2001a. 龙胜地区镁铁质侵入体年龄及其地质意义 [J]. *地质科学*, 36(1) : 112~118.
- 葛文春, 李献华, 梁细荣, 王汝成, 李正祥, 周汉文. 2001b. 桂北元宝山宝坛地区约 825Ma 镁铁-超镁铁岩的地球化学及其地质意义 [J]. *地球化学*, 30(2) : 123~130.
- 耿文辉, 贾国相, 张永林, 唐红松, 陈远荣, 梁有彬. 2001. 我国西部地区镍钴资源综合评价 [J]. *中国矿业*, 10(2) : 27~30.
- 郭进京, 张国伟, 陆松年, 赵凤清. 1999. 中国新元古代大陆拼合与 Rodinia 超大陆 [J]. *高校地质学报*, 5(2) : 148~156.
- 郭建强, 游再平, 杨军, 沈渭洲, 徐士进, 王汝成. 1998. 川西石棉地区田湾与扁路岗岩体的锆石 U-Pb 定年 [J]. *矿物岩石*, 18(1) : 91~94.
- 韩发, 沈建忠, 聂凤军, 丁孝石, 李世朝, 杨开泰, 杨淳. 1994. 江南古陆南缘四堡群同位素地质年代学研究 [J]. *地球学报*, (1~2) : 43~50.
- 郝杰, 翟明国. 2004. 罗迪尼亚超大陆与晋宁运动和震旦系 [J]. *地质科学*, 39(1) : 139~152.

- 花友仁. 1994. 扬子板块的大地构造演化与区域成矿规律[J]. 江西地质科技, 21(1~2): 15~25.
- 黄杰, 莫江平, 唐红松, 刘月星. 2004. 桂北地区铜镍硫化矿成矿地质条件分析及找矿方向[J]. 南方国土资源, (11): 70~71.
- 黄婉康, 甘先平, 单祖翔, 陈嘉湘, 刘雁. 1996. 陕西煎茶岭矿区的岩石及成矿时代研究[J]. 地球化学, 25(2): 150~156.
- 焦建刚, 闫海卿, 钱壮志, 刘瑞平, 李晶晶. 2006. 龙首山岩带典型镁铁-超镁铁质岩体岩石地球化学特征[J]. 矿物岩石, 26(1): 49~56.
- 李文渊. 1996. 中国铜镍硫化物矿床成矿系列与地球化学[M]. 西安: 西安地图出版社. 11~134.
- 李文渊, 汤中立, 郭周平, 王伟. 2004. 阿拉善地块南缘镁铁超镁铁岩形成时代及地球化学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 23(2): 117~126.
- 李行, 白文吉, 陈方伦, 邹湘华, 郑新华, 杨钟堂, 陆瑶, 杨星, 胡旭峰. 1995. 扬子地块北缘和西缘前寒武纪镁铁层状杂岩及含铂性[M]. 西安: 西北大学出版社. 18~95.
- 李献华, 周国庆, 赵建新. 1994. 赣东北蛇绿岩的离子探针锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地球化学, 23(2): 125~131.
- 李献华. 1999. 广西北部新元古代花岗岩锆石 U-Pb 年代学及其构造意义[J]. 地球化学, 28(1): 1~9.
- 李献华, 周汉文, 李正祥, 刘颖, 梁细荣. 2002b. 川西南新元古代玄武岩岩浆岩的锆石 U-Pb 年代学、元素和 Nd 同位素研究: 岩石成因与地球动力学意义[J]. 地学前缘, 9(4): 329~338.
- 李献华, 苏犁, 宋彪, 刘敦一. 2004. 金川超镁铁侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 科学通报, 49(4): 420~422.
- 李献华, 祁昌实, 刘颖, 梁细荣, 涂湘林, 谢烈文, 杨岳衡. 2005a. 扬子块体西缘新元古代双峰式火山岩成因: Hf 同位素和 Fe/Mn 新制约[J]. 科学通报, 50(19): 2155~2160.
- 李献华, 李正祥, 葛文春, 周汉文, 李武显, 刘颖. 2001. 华南新元古代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 20(4): 271~273.
- 李献华, 李正祥, 周汉文, 刘颖, 梁细荣, 李武显. 2002a. 川西南关刀山岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、元素和 Nd 同位素地球化学-岩石成因与构造意义[J]. 中国科学(D 辑), 32(增刊): 60~68.
- 林广春, 李献华, 李武显. 2006. 川西南新元古代基性岩墙群的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、元素和 Nd-Hf 同位素地球化学: 岩石成因与构造意义[J]. 中国科学(D 辑), 36(7): 630~645.
- 凌文黎, 张本仁, 周炼, 赵祖斌. 1997. 扬子克拉通北缘新元古代大陆岩石圈脱层作用信息: 毕机沟镁铁质-超镁铁质侵入体同位素地球化学指示[J]. 矿物岩石, 17(1): 40~49.
- 凌文黎, 王歆华, 程建萍. 2001. 扬子北缘晋宁期江山基性岩体的地球化学特征及其构造背景[J]. 矿物岩石地球化学通报, 20(4): 218~221.
- 凌文黎, 高山, 欧阳建平, 张本仁, 李惠民. 2002. 西乡群的时代与构造背景: 同位素年代学及地球化学制约[J]. 中国科学(D 辑), 32(2): 101~112.
- 凌文黎, 高山, 程建萍, 江麟生, 袁洪林, 胡兆初. 2006. 扬子陆核与陆缘新元古代岩浆事件对比及其构造意义-来自黄陵和汉南侵入杂岩 ELA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素年代学的约束[J]. 岩石学报, 22(2): 387~396.
- 刘生辉, 孙长安, 王金生, 李和详, 王梅. 1996. 中国矿床发现史(陕西卷)[M]. 北京: 地质出版社. 49~50.
- 刘文中, 徐士进, 王汝成, 赵连泽, 李惠民, 吴俊奇, 方中. 2005. 攀西麻粒岩锆石 U-Pb 年代学: 新元古代扬子陆块西缘地质演化新证据[J]. 地质论评, 51(4): 470~476.
- 刘玉平, 叶霖, 李朝阳, 宋彪, 李铁胜, 郭利果, 皮道会. 2006. 滇东南发现新元古代岩浆岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学证据[J]. 岩石学报, 22(4): 916~926.
- 陆松年. 2001. 从罗迪尼亚到冈瓦纳超大陆: 对新元古代超大陆研究几个问题的思考[J]. 地学前缘, 8(4): 441~448.
- 陆松年, 李怀坤, 陈志宏. 2003. 塔里木与扬子新元古代热构造事件特征、序列和时代: 扬子与塔里木连接(YZ-TAR)假设[J]. 地学前缘, 10(4): 321~326.
- 陆松年, 陈志宏, 李怀坤, 郝国杰, 周红英, 相振群. 2004a. 秦岭造山带中-新元古代(早期)地质演化[J]. 地质通报, 23(2): 107~112.
- 陆松年, 李怀坤, 陈志宏, 于海峰, 金巍, 郭坤一. 2004b. 新元古时期中国古大陆与罗迪尼亚大陆的关系[J]. 地学前缘, 11(2): 515~522.
- 毛德宝, 钟长汀. 2001. 超大陆旋回和成矿作用[J]. 前寒武纪研究进展, 24(6): 83~97.
- 毛景文, 张宗清, 董宝林. 1990. 江南古陆南缘四堡群钨钼同位素年龄研究[J]. 地质论评, 36(3): 264~268.
- 毛景文, 杜安道. 2001. 广西宝坛地区铜镍硫化物矿石 982Ma Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 中国科学(D 辑), 31(12): 992~998.
- 牛宝贵, 和政军, 任纪舜, 王军, 邓平. 2006. 秦岭地区陡岭-小茅岭隆起带西段几个岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年及其地质意义[J]. 地质论评, 52(6): 826~835.
- 庞春勇, 陈民扬. 1993. 煎茶岭地区同位素地质年龄数据及其地质意义[J]. 矿产与地质, 7(5): 354~360.
- 裴荣富, 李进文, 梅燕雄. 2005. 大陆边缘成矿[J]. 大地构造与成矿学, 29(1): 24~34.
- 裴先治, 李国光, 王全庆, 张维吉. 1995. 北秦岭商南花岗岩体地质特征及其成因类型[J]. 西北地质, 16(4): 1~7.
- 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 刘志刚, 刘凤仁. 1990. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社. 10~101.
- 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 姜春发, 牛宝贵, 李锦轶, 谢广连, 和政军, 刘志刚. 1997. 新一代中国大地构造图[J]. 中国区域地质, 16(3): 225~248.
- 沈渭洲, 李惠民, 徐士进, 王汝成. 2000. 扬子板块西缘黄草山和下索子花岗岩体锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 高校地质学报, 6(3): 1412~1416.
- 沈渭洲, 高剑峰, 徐士进, 周国庆. 2002. 扬子板块西缘泸定桥头基性杂岩体的地球化学特征和成因[J]. 高校地质学报, 8(4): 380~389.
- 沈渭洲, 高剑峰, 徐士进, 谭国全, 杨铸生, 杨七文. 2003. 四川盐边冷水箐岩体的形成时代和地球化学特征[J]. 岩石学报, 19(1): 27~37.
- 四川省地质矿产局. 1991. 四川省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 汤中立, 杨杰东, 徐士进, 陶仙聪, 李文渊. 1992. 金川含矿超镁铁岩的 Sm-Nd 法定年[J]. 科学通报, 37(10): 918~920.
- 汤中立, 李文渊. 1995. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质特征对比[M]. 北京: 地质出版社. 14~209.
- 汤中立. 1996. 中国岩浆硫化物矿床的主要成矿机制[J]. 地质学报, 70(3): 237~243.
- 汤中立, 张庆预. 1996. 中国矿床发现史(甘肃卷)[M]. 北京: 地质出版社. 28~34.
- 汤中立. 2002. 中国的小岩体岩浆矿床[J]. 中国工程科学, 4(6): 9~12.
- 汤中立. 2004. 中国镁铁-超镁铁岩浆矿床成矿系列的聚集与演化

- [J]. 地学前缘, 11(1): 113~119.
- 汤中立, 阎海卿, 焦建刚, 李小虎. 2006. 中国岩浆硫化物矿床新分类与小岩体成矿作用[J]. 矿床地质, 25(1): 1~9.
- 陶仙聪, 杨杰东, 徐士进. 1994. 内蒙古野及里辉长岩的 Sm-Nd 定年[J]. 科学通报, 39(15): 1413~1415.
- 涂怀奎. 2001. 秦岭地区超基性岩分布特征和综合利用的讨论[J]. 化工矿产地质, 23(3): 151~157.
- 王登红, 骆耀南, 屈文俊, 李云泉, 傅德明, 李佑国, 李纯杰, 陈振宇, 付小方. 2007. 中国西南铂族元素矿床地质、地球化学与找矿[M]. 北京: 地质出版社. 28, 241~242.
- 王鸿祯, 张世红. 2002. 全球前寒武纪基底构造格局与古大陆再造问题[J]. 地球科学, 27(5): 467~481.
- 王鸿祯. 1997. 地球的节律与大陆动力学的思考[J]. 地学前缘, 4(3~4): 1~12.
- 王瑞廷, 赫英, 刘明武, 漆亮, 王东生. 2002. 煎茶岭硫化镍矿床矿石地球化学特征[J]. 地球学报, 23(6): 535~540.
- 王瑞廷, 赫英, 王东生, 刘民武. 2003. 略阳煎茶岭铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质论评, 49(2): 205~211.
- 王瑞廷, 毛景文, 赫英, 王东生, 汤中立. 2004. 金川超大型铜镍硫化物矿床的铂族元素地球化学特征[J]. 大地构造与成矿学, 28(3): 279~286.
- 王瑞廷, 毛景文, 赫英, 汤中立, 王东生, 任小华. 2005. 煎茶岭硫化镍矿床的铂族元素地球化学特征及其意义[J]. 岩石学报, 21(1): 219~226.
- 王涛, 张国伟, 裴先治, 张成立, 李伍平. 2002. 北秦岭新元古代北北西向碰撞造山带存在的可能性及两侧陆块的汇聚与裂解[J]. 地质通报, 21(8~9): 516~522.
- 王涛, 张宗清, 王晓霞, 王彦斌, 张成立. 2005. 秦岭造山带核部新元古代碰撞变形及其时代—强变形同碰撞花岗岩与弱变形脉体锆石 SHRIMP 年龄限定[J]. 地质学报, 79(2): 220~231.
- 王相, 唐荣扬, 李实. 1996. 秦岭造山带与金属成矿[M]. 北京: 冶金工业出版社. 273~300.
- 王孝磊, 周金城, 邱检生, 高剑峰. 2003. 湖南中-新元古代火山-侵入岩地球化学及成因意义[J]. 岩石学报, 19(1): 49~60.
- 王孝磊, 周金城, 邱检生, 张文兰, 柳小明, 张桂林. 2006a. 桂北新元古代强过铝花岗岩的成因: 锆石年代学和 Hf 同位素制约[J]. 岩石学报, 22(2): 326~342.
- 吴根耀. 2000. 华南的格林威尔造山带及其坍塌: 在罗迪尼亚超大陆演化中的意义[J]. 大地构造与成矿学, 24(2): 112~123.
- 徐备. 2001. Rodinia 超大陆构造演化研究的新进展和主要目标[J]. 地质科技情报, 20(1): 15~19.
- 徐步台, 邱郁双. 1996. 章村-楼塔一带双溪坞群 Sm-Nd 和 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及地质年代意义[J]. 浙江地质, 12(1): 46~53.
- 徐士进, 王汝成, 沈渭洲, 钟宏, 陆建军, 侯立玮, 付小方, 黄明华, 杨杰东, 王银喜, 陶仙聪. 1996. 松潘—甘孜造山带中晋宁期花岗岩的 U-Pb 和 Rb-Sr 同位素定年及其大地构造意义[J]. 中国科学(D 辑), 26(1): 52~58.
- 许志琴, 刘福来, 戚学祥, 张泽明, 杨经绥, 曾令森, 梁凤华. 2006. 南苏鲁超高压变质地体中罗迪尼亚超大陆裂解事件的记录[J]. 岩石学报, 22(7): 1745~1760.
- 闫海卿, 苏尚国, 焦建刚, 汤华. 2005. 金川 Cu, Ni(PGE) 岩浆硫化物矿床成矿时代研究[J]. 地学前缘, 12(2): 309~315.
- 杨刚, 杜安道, 卢记仁, 屈文俊, 陈江峰. 2005. 金川镍-铜-铂矿床块状硫化物矿石的 Re-Os (ICP-MS) 定年[J]. 中国科学(D 辑), 35(3): 241~245.
- 杨胜洪, 陈江峰, 屈文俊, 杨刚, 杜安道. 2007. 金川铜镍硫化物矿床的 Re-Os '年龄' 及其意义[J]. 地球化学, 36(1): 27~36.
- 袁海华. 1981. 攀枝花-西昌地区部分基性-超基性岩同位素 K-Ar 年龄的初步研究[J]. 成都地质学院学报, (2): 39~58.
- 翟明国, 郭敬辉, 赵太平. 2001. 新太古-古元古代华北陆块构造演化的研究进展[J]. 前寒武纪研究进展, 24(1): 17~27.
- 张成江, 李晓林, 汪云亮, 修淑芝, 黄永健. 1999. 冷水铜镍硫化物矿床的铂族元素地球化学特征[J]. 地质地球化学, 27(1): 73~78.
- 张成立, 刘良, 张国伟, 王涛, 陈丹玲, 袁洪林, 柳小明, 晏云翔. 2004. 北秦岭新元古代后碰撞花岗岩的确定及其构造意义[J]. 地学前缘, 11(3): 33~42.
- 张少兵, 郑永飞. 2007. 扬子陆核的生长和再造: 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素研究[J]. 岩石学报, 23(2): 393~402.
- 张世红, 王鸿祯. 2002. 古大陆再造的回顾与展望[J]. 地质论评, 48(2): 198~213.
- 张文治. 2002. 新元古时期中国华南和华北陆块的相对位置及构造意义[J]. 前寒武纪研究进展, 25(2): 120~128.
- 张新虎, 刘建宏, 徐家乐, 牛洪斌, 赵延庆. 2005. 再论甘肃省的板块构造[J]. 甘肃地质学报, 14(2): 1~10.
- 张云湘, 王绍琼, 等. 1996. 中国矿床发现史(四川卷)[M]. 北京: 地质出版社. 108 页.
- 张宗清, 杜安道, 唐索寒, 卢纪仁, 王进辉, 杨刚. 2004. 金川铜镍矿床年龄和源区同位素地球化学特征[J]. 地质学报, 78(3): 359~365.
- 郑永飞. 2004. 新元古代超大陆构型中华南的位置[J]. 科学通报, 49(8): 715~717.
- 周鼎武, 刘良, 张成立, 王居里, 任军峰. 2002. 华北和扬子古陆块中新元古代聚合、伸展事件的比较研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 32(2): 109~113.
- 周继彬, 李献华, 葛文春, 刘颖. 2007. 桂北元宝山地区超镁铁岩的年代、源区及其地质意义[J]. 地质科技情报, 26(1): 11~18.
- 周金城, 王孝磊, 邱检生, 高剑锋. 2003. 桂北中-新元古代镁铁质-超镁铁质岩的岩石地球化学[J]. 岩石学报, 19(1): 9~18.
- 朱维光, 邓海林, 刘秉光, 李朝阳, 覃喻, 骆耀南, 李志德, 皮道会. 2004. 四川盐边高家村镁铁-超镁铁质杂岩的形成时代: 单颗粒锆石 U-Pb 和角闪石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学制约[J]. 科学通报, 49(10): 985~992.