

康滇地区元古宙构造运动 I：昆阳陆内裂谷、地幔柱及其成矿作用

王生伟¹⁾, 蒋小芳¹⁾, 杨波¹⁾, 孙晓明^{2,3)}, 廖震文¹⁾, 周清¹⁾, 郭阳¹⁾, 王子正¹⁾, 杨斌¹⁾

1) 中国地质调查局成都地质调查中心, 成都, 610081;

2) 中山大学海洋学院, 广州, 510275; 3) 中山大学地球科学与地质工程学院, 广州, 510275

内容提要: 康滇地区是我国南方元古宙基底出露最为广泛的地区, 元古宙岩浆活动频繁、成矿作用明显, 是研究扬子陆块早期演化的重要窗口, 也是近年研究的热点, 元古宙地质演化过程争议较大。本文系统总结了发生在古元古代晚期—中元古代早期的重要构造—岩浆—成矿事件, 即昆阳裂谷。昆阳裂谷前的基底为分布在东川和滇中地区少量的古元古代早期的汤丹群, 其构造变形较东川群更强烈, 可能与 > 1800 Ma 的东川运动有关。昆阳裂谷期的岩浆岩系统主体为出露在东川—会理—滇中地区基性侵入岩, 其次为少量的超基性岩、变质基性火山岩和中酸性侵入岩体, 具有双峰式岩浆岩组合的特征。岩浆岩的年龄为 1800 Ma ~ 1450 Ma, 集中分布在 1750 Ma ~ 1650 Ma, 反映了昆阳裂谷持续了约 400 Ma, 高峰期持续将近 100 Ma。昆阳裂谷期基性岩浆岩的地球化学显示为典型陆内裂谷玄武岩的地球化学性质, 其中滇中武定地区辉绿岩和会理拉拉地区的变质基性火山岩还具有典型洋岛玄武岩的特征, 如富碱、高 TiO₂、P₂O₅、低 CaO/TiO₂、Al₂O₃/TiO₂ 比值, Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素不亏损, 以及有较高的 [n(⁸⁷Sr)/n(⁸⁶Sr)]_i 初始比值以及较高的 ε_{Nd}(t) 值。根据区内岩浆岩组合及地球化学特征, 我们提出在古元古代晚期至中元古代早期, 康滇地区发生了一次由地幔柱活动引起的陆内裂谷拉张事件, 即昆阳地幔柱。昆阳陆内裂谷在 1450 Ma 前后在会理—东川一线发展成为了局限小洋盆, 并在中元古代晚期关闭。昆阳裂谷的沉积岩系统主体为东川群、河口群和大红山群, 并可能延伸到了康滇北部的里伍岩群, 上述地层中火山岩、凝灰岩锆石的 U-Pb 年龄集中在 1800 Ma ~ 1500 Ma, 不同岩群岩性组合差异可能与所处构造部位有关, 并导致沉积相的差异。昆阳裂谷也是一次重要的成矿事件, 其形成的矿床可分为两个系列, 以因民组、落雪组等沉积岩中为主的层状铜矿床 (Sediment-hosted Stratiform Copper, SSC 系列), 主要有汤丹铜矿、落雪铜矿、狮子山铜矿、铜厂铜矿等, 原生沉积型铜矿的成矿时代为约 1750 Ma; 其次为与昆阳裂谷期岩浆热液活动紧密相关的铁氧化物铜金矿床 (Iron—Oxide—Copper—Gold, IOCG 系列), 主要有拉拉铁铜矿床、大红山铁铜矿床、稀矿山铁铜矿床、迤纳厂铁铜矿床等, 研究程度较高的迤纳厂、稀矿山以及鹅头厂等铁铜矿床的时代集中在 1700 Ma ~ 1450 Ma。昆阳期剧烈的岩浆活动、大规模的铁、铜成矿作用以及成矿物质来源、动力学机制可能均与昆阳地幔柱活动紧密相关。

关键词: 昆阳裂谷; 昆阳地幔柱; 东川群; 河口群; 大红山群; 东川式铜矿; IOCG 矿床; 康滇地轴

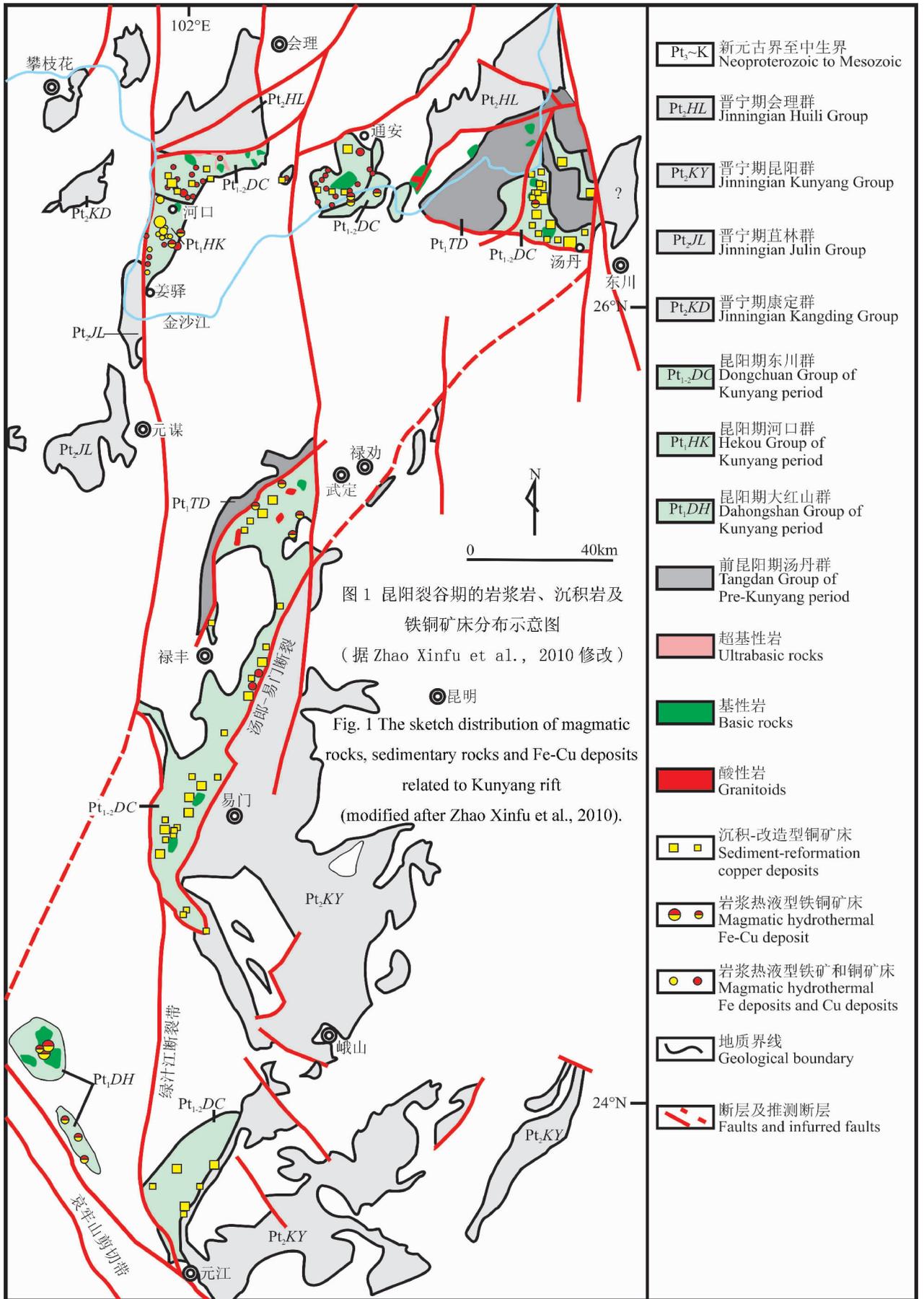
康滇地区纵贯四川、云南两省, 南北长约 500 km, 东西宽约 200 km, 大地构造上属扬子陆块的西南缘, 与南西方向的印支地块和西侧的青藏地块接壤 (图 1)。区内广泛出露元古宙基底地层, 元古宙构造—岩浆活动频繁, 矿产资源极其丰富, 是研究扬子陆块早期演化的重要的窗口, 一直以来, 受到地质学家、地球物理学家的广泛关注。老一辈地质学家, 如黄汲清 (1954) 称之为“康滇地轴”; 张文佑 (1958, 1984) 称其为“康滇台背斜”及“裂谷构造”; 李四光

(1962) 称之为“川滇经向构造带”; 陈国达 (1965) 称呼其为“川滇地洼系”; 丛柏林 (1973) 从岩石学角度提出康滇地区为大陆裂谷; 而骆耀南 (1985) 则认为该带属海西期的古裂谷带, 并称为“攀西裂谷带”。对于元古宙最重要的构造事件, 潘杏南等 (1985) 称其为绿岩型裂谷, 时代 > 2.0 Ga; 华仁民 (1990) 称之为昆阳坳拉谷, 即未发育成洋盆就中途消亡的陆内裂谷, 时代为 2.0 ~ 1.9 Ga; 龚琳和何毅特 (1996) 则将其命名为昆阳裂谷, 时间为中元古代至新元古

注: 本文为国家自然科学基金青年基金资助项目 (编号: 41202067) 和国土资源大调查项目 (编号: 1212010911064; 1212010813066; 12120113053000) 的成果。

收稿日期: 2015-10-16; 改回日期: 2016-07-26; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2016.06.001

作者简介: 王生伟, 男, 1978 年生。博士, 主要从事矿床地球化学及岩石地球化学研究。Email: osmium@126.com。



代。上世纪,由于缺乏可靠的同位素地质年代学数据,对康滇地区早期的构造—岩浆事件的时代、性质、成矿作用等争议较大,进入 21 世纪后,随着高可靠度的锆石 U-Pb、Re-Os 等测年技术在本区的运用,获得了一大批较为可靠的地层、岩浆岩及铁铜矿床的同位素年龄和地球化学数据(表 1),这些最新研究成果与前辈对本区早期地质演化的认识差异很大(李春昱等,1963;陈智梁等,1987;周名奎等,1988;吴懋德等,1990)。本文根据近年康滇地区最新的研究成果,对区内古元古代晚期至中元古代早期这一元古宙最重要的构造—岩浆—成矿事件,即昆阳裂谷进行了详细的梳理和总结,主要包括裂谷前的基底、构造运动,昆阳裂谷的时间、性质、岩浆岩系统、沉积岩系统、成矿系统等,并首次提出昆阳地幔柱,尝试从地幔柱的角度对昆阳裂谷构造—岩浆—成矿事件的动力学机制进行探讨。

1 昆阳裂谷前的基底及构造运动

1.1 昆阳裂谷前的基底

一直以来,由于康定群变质程度最高,且早期获得了一些非常老的年龄数据,如泸定—渔通剖面混合片麻岩残留体锆石的 U-Pb 年龄为 2451 Ma 和 2062 Ma(马杏垣等,1980);冕宁沙坝角闪紫苏混合片麻岩 Rb-Sr 全岩等时线年龄为 2400 Ma(袁海华等,1986);攀枝花市同德角闪紫苏混合片麻岩铅全岩等时线年龄为 2950 Ma(袁海华等,1986)。因此,康定群长期被认为是康滇地区最古老的基底地层,以此为基础,不少学者对元古宙构造演化进行了探索,然而,近年不同学者对康定群的研究发现,康定群是由一些中元古代沉积岩和新元古代岩浆杂岩组成(Zhou Meifu et al., 2002; 杜利林等,2007;耿元生等,2008),只是变质程度较高而已。其实,在东川地区东川群之下还存在下伏四组地层,自下而上分别为酒海沟组、望厂组、菜园湾组和平顶山组,以往的大多数资料中,上述四组地层被认为滇中地区昆阳群(黄草岭组、黑山头组、大龙口组和美党组)四组地层往北的延伸,也被认为是紧邻的麻塘断裂北部会理群(淌塘组、力马河组、凤山营组和天宝山组)在南侧对应的地层,自 2008 年以来,本项目团队通过 1/5 万地质填图及综合研究后认为东川地区下伏四组地层与狭义的昆阳群和会理群差别非常显著,主要体现在以下几个方面:

(1) 对东川黄草岭和牛厂坪一带熔结凝灰岩高精度的 SHRIMP U-Pb 测年结果均显示,其沉积时代

约 2.3 Ga(朱华平等,2011;周邦国等,2012),与昆阳群富良棚段凝灰岩和会理群天宝山组英安岩时代相差近 1.0 Ga(张传恒等,2007;耿元生等,2007;尹福光等,2011)。

(2) 从岩浆岩的角度,东川地区约 1.7 Ga 的辉绿岩非常发育,这已被 Zhao Xinfu(2010)和朱华平等(2011)报道证实,上述辉绿岩切穿东川地区下伏四组地层,并侵入至因民组和落雪组中,从岩浆岩的角度证明下伏四组地层较 1.7 Ga 辉绿岩要老。

(3) 本项目组在东川 1/5 万地质填图中,在诸多地方识别出了东川群与下伏地层平顶山组的不整合接触关系,这些接触界面中发育底砾岩、粘土层和铁锰质层,这也表明下伏四组地层与上述地层的不整合接触是毋庸置疑的。

(4) 在滇中地区的昆阳群的大龙口组和四川南部的会理群凤山营组中,普遍均有菱铁矿层,即凤山式铁矿和鲁奎山式铁矿,但在东川地区的下伏四组地层中,没有菱铁矿被发现。

(5) 从现有的研究结果来看,约 1.7 Ga 年左右发生规模较大的陆内裂谷拉张作用,而东川群、河口群和大红山群是这次陆内裂谷拉张的沉积产物,不是裂谷拉张之前已存在的基底陆块,因此约 1.7 Ga 的裂谷拉张,既然是陆内性质,那么其裂解拉张前必然存在更老的陆块,从这个角度上讲,把东川群之下的四组地层列为约 1.7 Ga 陆内裂谷拉张前就已存在的基底也是合理的。

(6) 会理群顶部和昆阳群的黑山头组与大龙口组之间均有凝灰岩和火山岩分布,如天宝山组顶部的流纹英安岩非常发育,厚度较大,在滇中富良棚村和铜厂乡的黑母云村一带均有流纹岩和安山岩、安山玄武岩出露,而在东川地区下伏四组地层中,仅有少量凝灰岩夹持于望厂组,并不发育火山岩。

(7) 本项目组在菜园—踩马水—麻糖断裂带东段,即麻糖断裂带内识别出约 1.0 Ga 的后碰撞花岗岩(王生伟等,2013c),且菜园园橄榄岩具有蛇绿岩底部方辉橄岩的地球化学特征,表明该断裂带是一条中元古代晚期的缝合带(王生伟等,2103b),两侧的地层分属不同的块体(尹福光等,2011)。

从以上 7 点看来,东川地区下伏四组地层并不是会理群和昆阳群的延伸,没有可比性,仅仅是岩性组合相似而已,基于以上证据,我们建议将东川(或整个康滇地区)地区,与东川群成明显不整合接触关系的下伏地层重新建立汤丹群,以区别于会理群和昆阳群的各四组地层(王生伟等,2011;周邦国

表1 昆阳裂谷期的岩浆岩、地层和矿床年龄数据表

Table 1 Ages of magmatic rocks, strata and deposits related to Kunyang rift

编号	采样点	测试对象	测试方法	结果	作者、年代
1	大红山群	曼岗河组变凝灰岩锆石	SHRIMP U-Pb	1675 ± 8 Ma	Greentree et al., 2008
2	大红山群	曼岗河组变凝灰岩锆石	LA-ICP-MS	1681 ± 13 Ma	Zhao Xinfu et al., 2011
3	大红山群	红山组辉绿岩锆石	LA-ICP-MS	1659 ± 16 Ma	Zhao Xinfu et al., 2011
4	大红山群	红山组和曼岗河组	Sm-Nd 等时线	1657 ± 82 Ma	Hu Aiqin et al., 1991
5	大红山群	辉绿岩锆石	U-Pb	1665.55 Ma	Hu Aiqin et al., 1991
6	大红山群	老厂河组变中酸性岩锆石	LA-ICP-MS	1711 ± 4 Ma	杨红等, 2012
7	大红山群	变质辉绿岩锆石	LA-ICP-MS	1686 ± 4 Ma	杨红等, 2012
8	大红山群	底巴都组混合岩	Rb-Sr 全岩	1706 Ma	李复汉等, 1988
9	东川地区	辉绿岩锆石	SHRIMP U-Pb	1676 ± 13 Ma	朱华平等, 2011
10	东川地区	辉绿岩锆石	LA-ICP-MS	1690 ± 13 Ma	Zhao Xinfu et al., 2010
11	东川地区	辉绿岩锆石	LA-ICP-MS	1686 ± 16 Ma	本项目组未刊数据
12	东川地区	辉绿岩锆石	LA-ICP-MS	1693 ± 17 Ma	本项目组未刊数据
13	东川地区	原生黄铜矿	Re-Os 等时线	1765 ± 57 Ma (n = 3)	王生伟等, 2012
14	东川地区	原生黄铜矿	Re-Os 等时线	1788 ± 110 Ma (n = 5)	本项目组未刊数据
15	东川地区	层状矿体硫化物	Re-Os 年龄	1397 ~ 1432 Ma	Huang Xiaowen et al., 2013
16	东川地区	原生沉积铜矿石	Pb-Pb 等时线	1893 ± 270 Ma	龚琳等, 1996
17	东川地区	落雪组白云岩	Pb-Pb 模式年龄	1764 Ma	陈好寿等, 1992
18	东川地区	小溜口铁矿矿床硫化物	Pb-Pb 年龄	1798 Ma	吴建民等, 1998 (及其中的文献)
19	东川地区	稀矿山铁矿矿床黄铜矿	Pb-Pb 年龄	1603.61 Ma	吴建民等, 1998 (及其中的文献)
20	东川地区	蓑衣坡矿区因民组硅质岩	Pb-Pb 年龄	1562.56 Ma	吴建民等, 1998 (及其中的文献)
21	东川地区	面山、龙山铜矿硫化物	Pb-Pb 年龄	1703.24 Ma	吴建民等, 1998 (及其中的文献)
22	东川地区	汤丹铜矿硫化物	Pb-Pb 年龄	1633.49 Ma	吴建民等, 1998 (及其中的文献)
23	东川地区	落雪组白云岩	Pb-Pb 年龄	1718.74 Ma	吴建民等, 1998 (及其中的文献)
24	东川地区	落雪组白云岩	Pb-Pb 等时线	1716 ± 56 Ma	常向阳等, 1997
25	东川地区	黑山组板岩	Pb-Pb 等时线	1607 ± 128 Ma	常向阳等, 1997
26	东川地区	黑山组凝灰岩锆石	SHRIMP U-Pb	1503 ± 17 Ma	孙志明等, 2009
27	东川铜矿	原生沉积铜矿石	Pb-Pb 等时线	1893 ± 270 Ma	龚琳等, 1996
28	东川地区	落雪组白云岩	Pb-Pb 模式年龄	1764 Ma	陈好寿等, 1992
29	东川—滇中	因民组	古地磁	≈ 1800 ~ 1 750 Ma	范效仁等, 1999
30	东川—滇中	落雪组	古地磁	≈ 1 680, 1 650, 1 650 Ma	范效仁等, 1999
31	东川—滇中	黑山组	古地磁	≈ 1 550 Ma	范效仁等, 1999
32	滇中地区	因民组凝灰岩锆石	La-ICP-MS	1742 ± 13 Ma	Zhao Xinfu et al., 2010
33	滇中地区	狮子山铜矿硫化物	Pb-Pb 年龄	1638.83 Ma	吴建民等, 1998
34	会东菜园子	花岗岩锆石	LA-ICP-MS	1701 ± 26 Ma	本项目未刊数据
35	会东菜园子	含磁铁矿辉绿岩锆石	LA-ICP-MS	1700 ± 25 Ma	本项目未刊数据
36	会理南部	河口辉绿岩锆石	SHRIMP U-Pb	1710 ± 8 Ma	关俊雷等, 2011
37	会理南部	菜园园方辉橄辉岩斜锆石	LA-ICP-MS	1454 ± 32 Ma	本项目组未刊数据
38	会理南部	皎平度辉绿岩锆石	LA-ICP-MS	1694 ± 16 Ma	王东兵等, 2013
39	会理南部	通安地区辉长—闪长岩	LA-ICP-MS	1513 ± 13 Ma	耿元生等, 2012
40	会理南部	河口群石英英岩斑岩锆石	SHRIMP U-Pb	1722 ± 25 Ma	王东兵等, 2012
41	会理南部	河口群变质玄武岩锆石	SHRIMP U-Pb	1680 ± 13 Ma	周家云等, 2011
42	会理南部	河口群凝灰质片岩	LA-ICP-MS	1669 ± 6 Ma	Zhu Zhimin et al., 2013a
43	会理南部	河口群辉长岩	LA-ICP-MS	1657 ± 21 Ma	Chen et al., 2013
44	会理南部	河口群变凝灰岩	LA-ICP-MS	1705 ± 6 Ma	Chen et al., 2013
45	会理南部	河口群变凝灰岩	LA-ICP-MS	1708 ± 7 Ma	Chen et al., 2013
46	会理南部	河口群变凝灰岩	LA-ICP-MS	1679 ± 13 Ma	Chen et al., 2013
47	会理南部	河口群细碧角斑岩锆石	U-Pb 模式年龄	1712 Ma	李复汉等, 1988
48	武定地区	迤纳厂矿石	Sm-Nd 等时线	1617 ± 100 Ma	杨耀民等, 2005
49	武定地区	迤纳厂黄铜矿	Re-Os 等时线	1685 ± 37 Ma	叶现韬, 等 2013
50	武定地区	迤纳厂黄铜矿	Re-Os 等时线	1648 ± 14 Ma	Hou Lin et al., 2015
51	武定地区	迤纳厂层状矿石中的辉钼矿	Re-Os 模式年龄	1654 ± 7 Ma	Zhao Xinfu et al., 2013
52	武定地区	迤纳厂脉状矿石中的辉钼矿	Re-Os 等时线年龄	1487 ± 110 Ma	Zhao Xinfu et al., 2013
53	武定地区	鹅头厂铁矿黄铁矿	Rb-Sr 等时线年龄	1453 ± 28 Ma	Zhao Xinfu et al., 2013

编号	采样点	测试对象	测试方法	结果	作者、年代
54	武定地区	岩浆角砾岩锆石	LA-ICP-MS	1739 ± 13 Ma	侯林等, 2013
55	武定地区	花岗岩锆石	LA-ICP-MS	1730 ± 15 Ma	王子正等, 2013
56	武定地区	流纹岩锆石?	LA-ICP-MS	1724 ± 10 Ma	待刊数据
57	武定地区	辉绿岩锆石	LA-ICP-MS	1728 ± 4 Ma	郭阳等, 2014a
58	武定地区	辉绿岩锆石	LA-ICP-MS	1767 ± 15 Ma	郭阳等, 2014b
59	武定地区	辉绿岩锆石	LA-ICP-MS	1746 ± 24 Ma	本项目未刊数据
60	武定地区	花岗岩锆石	LA-ICP-MS	1734 ± 18 Ma	本项目未刊数据
61	里伍岩群	斜长角闪岩	Sm-Nd 等时线	1674 ± 112 Ma	傅昭仁等, 1997
62	里伍岩群	斜长角闪岩	Sm-Nd 等时线	1677 ± 62.5 Ma	傅昭仁等, 1997

等, 2012)。

汤丹群目前主要分布在东川地区, 其沉积相类似于复理石建造, 沉积环境相对较为稳定, 物源可能是新太古代的古陆核。近年本单位在武定地区实施的 1/5 万矿产地质调查过程中, 也在东川群因民组下面识别有类似于东川地区汤丹群类似的建造组合, 因此, 我们推测汤丹群在约 1.7 Ga 前应该是广泛存在的, 至少有东川群、河口群和大红山群的地区应均有汤丹群的存在, 但目前大多数出露在东川地区和武定—禄丰地区, 另外在麻塘断裂以北, 淌塘组之下存在一套青灰色、浅灰色的灰岩, 传统上大家均倾向于上述灰岩与麻塘断裂南侧的东川群青龙山组白云岩为同一组地层, 但近年来, 我们在麻塘断裂以北菜园子地区辉绿岩、石英斑岩的研究结果来看, 上述岩浆岩的侵位时代为 1.7 Ga 左右, 由此推测, 麻塘断裂以北的所谓“青龙山组”可能并不对应南侧的青龙山组(含藻白云岩), 可能类似于汤丹群的菜园湾组。

1.2 昆阳裂谷前的构造运动——东川运动

“东川运动”是花友仁(1959)首先提出的, 原来的意思是指东川地区因民组与下伏地层的不整合接触, 可以理解为东川群沉积之前, 下伏地层受到的构造挤压产生的褶皱变形作用。从“东川运动”概念提出以后, 关于东川运动存在与否、东川运动的时间等问题长期存在争议。邓家藩等(1963)认为其含义不代表因民组—青龙山组与下伏地层之间的一次运动性质和位置, 以易门运动取代东川运动。王可南等(1963)、谢振西等(1965)在详细划分东川地区地层层序后, 根据因民组—青龙山组与下伏地层的褶皱形态、沉积环境和沉积建造等特点, 认为东川运动存在。龚琳(1973)和张伟察(1973)认为东川因民组与下伏地层为上下叠置关系, 而不是不整合关系。1970 年四川省地质局 1:20 万会理幅区测报认为, 花友仁(1959)所提东川运动表现出来的不

整合关系和底砾岩是断层推覆造成的, 进而否定东川运动的存在。孙师舜(1975)认为东川因民组底部角砾岩与因民组是假整合接触关系, 而非因民组本身的组成部分, 建议独立建组。陈和生等(1978)在东川汤家箐和红门楼沟等地发现了因民组的底砾岩, 且因民组与下伏地层呈清晰的不整合接触关系, 认为东川运动存在。1980 年, 匡立人报道了云南省元江红龙厂的因民组底部存在砾岩层, 与下伏地层呈微角度不整合接触关系, 肯定东川运动存在(转引自李复汉等, 1988)。潘杏南等(1985)和李复汉等(1988)分别又对东川地区因民组底部砾岩进行了详细调查, 认为东川运动存在, 但认为是元古宙冒

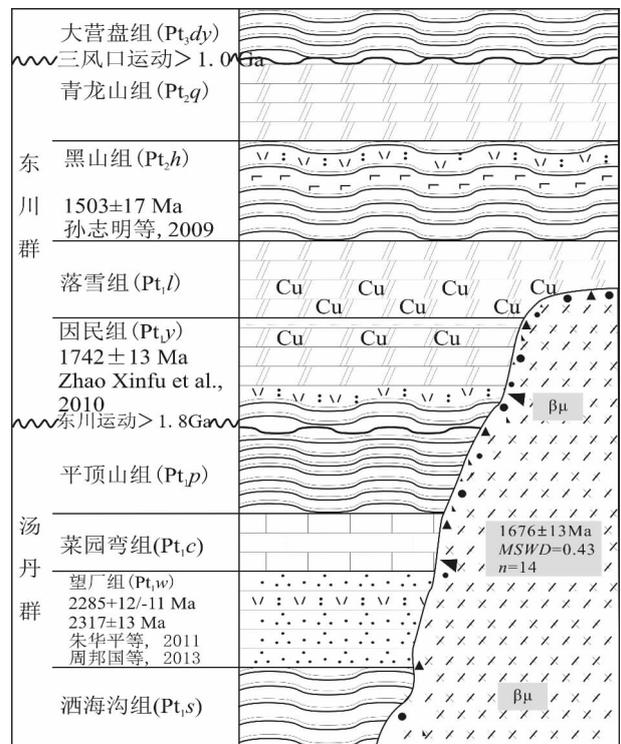


图 2 东川地区元古宙界—中元古界地层层柱状图

Fig. 2 Paleo- Mesoproterozoic stratigraphic column in Dongchuan area

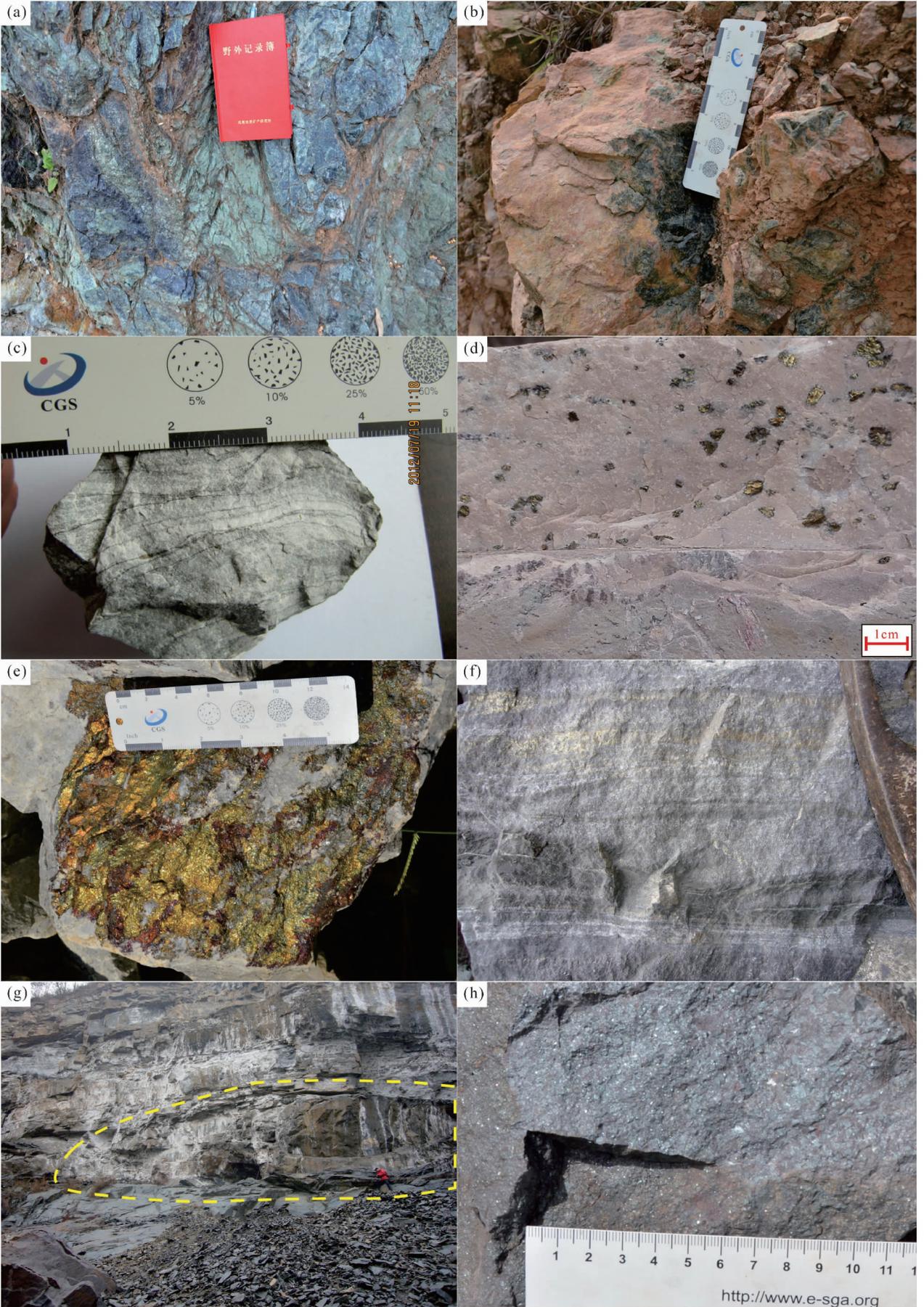


图 3 东川—滇中地区典型地质现象照片

Fig. 3 The typical geological phenomena in Dongchuan—central Yuannan province

(a) 会理菜园园蚀变质辉橄橄榄岩;(b) 武定地区双峰式岩浆岩(暗色的基性岩被肉红色石英斑岩俘虏);(c) 雪组原生沉积型马尾丝状铜矿石;(d) 落雪组原生沉积的豆状、粒状黄铜矿;(e) 落雪组块状富铜矿石;(f) 迤纳厂铁铜矿床中的条带状矿石;(g) 迤纳厂铁铜矿床透镜状矿体;(h) 稀矿山铁铜矿床中岩浆热液形成的自形一半自形赤铁矿集合体

(a) meta-harzburgite at Caiziyuan in Huili county; (b) the bimodal magmatic rocks in Wuding area(earlier dark basic rock captured by late fleshy red quartz porphyry); (c) primary sedimentary horsetail low-grade Cu ore in the Luoxue Formation; (d) primary sedimentary pisolitic—granular chalcocopyrite in the Luoxue Formation; (e) massive Cu-enriched ore in the Luoxue Formation; (f) banded ore at Yilachang Fe—Cu deposit; (g) the lenticular orebody at Yinchang Fe—Cu deposit; (h) the aggregation composed of magmatic hydrothermal euhedral—subhedral hematite at Xikuangshan Fe—Cu deposit

地槽后地壳的一次拉张运动。

近年来,本项目组通过对东川地区地层、构造详细的地质调查和高精度测年,结果表明东川地区因民组下伏地层的沉积时代为古元古代,远远老于四川会理群和滇中昆阳群。根据野外地质调查和同位素测年结果,东川地区元古宇基底可以分为三个构造层(图 2),底部为古元古界汤丹群,中部为古一中元古界东川群,上部为中元古界大营盘组。汤丹群地层的褶皱形态较东川群更复杂,反映了在沉积东川群之前,汤丹群已经历过构造挤压变形及抬升过程,即东川运动。东川运动发生在古元古代中—晚期,其时代可能早于 1.8 Ga(王生伟等,2011),大致对应华北地台的吕梁运动和中条运动(武铁山等,1982;乔秀夫等,1984),而不是广西的四堡运动。东川运动可能是在全球性 Columbia 超级大陆形成过程中,汤丹群(地块)与扬子古陆核(或其他古陆核)之间的碰撞和造山运动。

2 昆阳裂谷的岩浆岩系统

2.1 岩石类型及时空分布

构造—岩浆事件时限最常用、最可靠的方法是根据构造运动形成的岩浆岩侵位和喷发时代,近年来,利用现代测试技术获得了大量可靠的数据(表 1)。从表 1 可以看出 1800 Ma ~ 1400 Ma 是康滇地区漫长地质演化历史上岩浆活动的重要高峰期,即昆阳裂谷期,而 1650 Ma ~ 1750 Ma 又是最为集中的时间段,仅有少量 1500 Ma 岩浆岩,因此,昆阳裂谷拉张应集中在 1650 Ma ~ 1750 Ma,1600 Ma ~ 1500 Ma 可能代表裂谷拉张的尾声,而 1500 Ma ~ 1400 Ma 可能还存在较长时间的岩浆期后热液活动,以迤纳厂铁铜矿床辉钼矿 Re-Os 年龄、鹅头厂铁铜矿床黄铁矿的 Rb-Sr 年龄和汤丹铜矿层状硫化物的 Re-Os 年龄为标志(Zhao Xinfu et al.,2013;Huang Xiaowen et al.,2013)。总体上昆阳裂谷期岩浆活动及岩浆期后热液活动的时间跨度较大,约 400 Ma,与华北

克拉通在古一中元古代裂解事件相比较而言,昆阳裂谷则相对要短暂,根据已发表的数据,前者持续时间长达近 500 Ma(李怀坤等,2006,2009;翟明国等,2000;赵太平等,2004a,2004b;彭澎等,2004;胡国辉等,2010;Zhao Guochun et al.,2000,2002;Zhao Taiping et al.,2002,2009;Lu Songnian et al.,2002;Zhang Shuanhong et al.,2012)。

昆阳裂谷期的岩浆岩类型相对较丰富,主要为超基性岩、基性岩和酸性岩,中性岩类分布面积及数量均较少。超基性岩主要分布在会理关河乡菜园村的尘河两岸,大多数均已强烈变形变质,以片理化、蛇纹石化和滑石化为主(图 3a),在该区形成一定规模的红土型镍矿,本项目对其中的一个方辉橄橄榄岩体中的大量斜锆石进行了 U-Pb 定年,结果为 1454 ± 32 Ma(本项目组未刊数据),与邻近的辉绿岩—闪长岩锆石的 U-Pb 年龄接近(耿元生等,2012)。

昆阳裂谷期的基性岩浆岩最为发育,分布面积较广,数量也较其它同期岩石类型多。岩石类型以辉绿岩、辉长岩及辉绿辉长岩等侵入岩为主体。基性侵入岩主要分布在东川铜矿区、会东县—会理县南部的新田—菜园子(表 2,图 4a)—皎平度—通安—关河—河口—黎溪等地,呈东西向带状展布,由于河流的深切作用出露地表,从表 1 可见,上述基性侵入岩锆石的 U-Pb 年龄多数集中在 1750 Ma ~ 1650 Ma 之间;其次分布在滇中地区的武定—禄丰县以及新平大红山铁铜矿区,武定地区的辉绿岩时代相对会理—会东—东川地区的基性岩,时代相对较老,多数岩体锆石的 U-Pb 年龄集中在 1750 Ma 左右(郭阳等,2014a,2014b),大红山地区基性侵入岩锆石的 U-Pb 年龄也集中在 1750 Ma ~ 1650 Ma 区间(表 1);滇中狮子山铜矿、峨腊厂铜矿区也出露较多的辉绿辉长岩,目前缺乏年代学数据,推测可能也是古元古代晚期的岩浆岩;此外,在九龙县的里伍岩群

表 2 昆阳裂谷期基性岩与典型地幔柱玄武岩岩石化学对比表

Table 2 The comparison of petrogeochemistry between the basic magmatic rocks related to Kunyang rift and the typical basalts related to mantle plume

地名\化学成分	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Na ₂ O + K ₂ O	CaO/TiO ₂	Al ₂ O ₃ /TiO ₂	资料来源
冰岛 Rosemary 玄武岩	47.35	1.99	15.42	12.66	0.18	7.53	10.73	2.4	0.44	0.18	2.84	5.39	7.75	转引自李红阳等,2002
喀麦隆西南 Pagalu 玄武岩	45.28	3.58	12.96		0.17	8.68	9.99	2.82	1.5	0.8	4.32	2.79	3.62	Lee et al.,1994
喀麦隆西南 Pagalu 碧玄武岩	42.94	2.99	12.03		0.2	11.18	10.63	2.76	0.95	1.05	3.71	3.56	4.02	Lee et al.,1994
红海过渡玄武岩	44.62	3.15	15.4	6.6	0.18	6.78	7.37	2.69	1.28	0.46	3.97	2.34	4.89	Stein et al.,1992
红海碧玄武岩	44.6	3.27	14.2	13.4	0.16	7.79	10.25	3.72	1.16	1.38	4.88	3.13	4.34	Stein et al.,1992
红海碱性玄武岩	44.8	3.05	14.7	13.6	0.18	7.18	9.59	4.29	1.61	1.23	5.9	3.14	4.82	Stein et al.,1992
克尔格伦东南玄武岩	43.88	3.84	13.58	13.85	0.19	7.48	9.55	3.18	3.31	1.42	6.49	2.49	3.54	Weis et al.,1993
克尔格伦东南夏威夷岩	50.94	3.04	15.4	7.34	0.18	3.7	7.12	4.16	2.68	0.94	6.84	2.34	5.07	Weis et al.,1993
克尔格伦碱性玄武岩	48.3	2.92	14.62	4.26	0.17	6.84	9.65	2.93	1.24	0.37	4.17	3.30	5.01	Weis et al.,1993
夏威夷群岛玄武岩	50.29	3.03	12.92	1.48	0.14	8.07	10.84	2.26	0.46	0.36	2.72	3.58	4.26	Hauri,1996
夏威夷 Loihi 碱性玄武岩	44.59	2.1	9.71		0.16	18.14	9.79	2.03	0.66	0.26	2.69	4.66	4.62	Hauri,1996
峨眉山高 Ti 玄武岩	49.96	4.31	13.08	2.07	0.19	4.90	6.89	3.43	0.82	0.41	4.25	1.60	3.04	肖龙等,2003a
德干玄武岩	50.18	2.2	13.7	3.72	0.21	6.58	11.44	1.7	0.73		2.43	5.20	6.23	转引自李红阳等,2002
澜沧江缝合带 OIB	45.55	3.60	20.08	5.38	0.15	3.95	0.81	2.42	2.59	0.80	5.01	0.22	5.58	侯增谦等,1996b,1996 c
澜沧江缝合带 EMORB	46.12	2.17	12.58	7.29	0.17	11.11	8.88	2.59	0.15	0.23	2.74	4.09	5.79	侯增谦等,1996b,1996 c
澜沧江缝合带 NMORB	48.86	1.14	16.00	6.10	0.19	6.45	10.31	2.09	0.49	0.11	2.58	9.08	14.10	侯增谦等,1996b,1996 c
武定辉绿岩	46.06	3.59	12.84	7.58	0.04	5.69	5.96	4.26	2.37	0.37	6.63	1.66	3.58	郭阳等,2014b
河口群变质玄武岩	50.29	2.85	12.29	3.97	1.26	3.35	5.92	4.94	3.82	0.46	8.76	2.08	4.31	周家云等,2011
东川辉绿岩	47.46	1.45	14.34	6.79	0.15	7.91	9.66	2.45	0.94	0.13	3.39	6.67	9.90	王生伟等,2013a

注:上述岩石组份含量(单位:%)及比值为根据文献中结果计算后所得的平均值。

表2 昆阳裂谷期基性岩与典型地幔柱玄武岩岩石化学对比表

Tab. 2 The comparison of petrogeochemistry between the basic magmatic rocks related to Kunyang rift and the typical basalts related to mantle plume

地名\化学成分	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Na ₂ O + K ₂ O	CaO/TiO ₂	Al ₂ O ₃ /TiO ₂	资料来源
冰岛 Rosemary 玄武岩	47.35	1.99	15.42	12.66	0.18	7.53	10.73	2.4	0.44	0.18	2.84	5.39	7.75	转引自李红阳等,2002
喀麦隆西南 Pagalu 玄武岩	45.28	3.58	12.96		0.17	8.68	9.99	2.82	1.5	0.8	4.32	2.79	3.62	Lee et al.,1994
喀麦隆西南 Pagalu 碧玄岩	42.94	2.99	12.03		0.2	11.18	10.63	2.76	0.95	1.05	3.71	3.56	4.02	Lee et al.,1994
红海过渡玄武岩	44.62	3.15	15.4	6.6	0.18	6.78	7.37	2.65	1.28	0.46	3.97	2.34	4.89	Stevn et al.,1992
红海碧玄岩	44.6	3.27	14.2	13.4	0.16	7.79	10.25	3.72	1.16	1.38	4.88	3.13	4.34	Stevn et al.,1992
红海碱性玄武岩	44.8	3.05	14.7	13.6	0.18	7.18	9.59	4.25	1.61	1.23	5.9	3.14	4.82	Stevn et al.,1992
克尔格伦东南玄武岩	43.88	3.84	13.58	13.85	0.19	7.48	9.55	3.18	3.31	1.42	6.49	2.49	3.54	Wais et al.,1993
克尔格伦东南夏威夷岩	50.94	3.04	15.4	7.34	0.18	3.7	7.12	4.16	2.68	0.94	6.84	2.34	5.07	Wais et al.,1993
克尔格伦碱性玄武岩	48.3	2.92	14.62	4.26	0.17	6.84	9.65	2.93	1.24	0.37	4.17	3.30	5.01	Wais et al.,1993
夏威夷群岛玄武岩	50.29	3.03	12.92	1.48	0.16	8.07	10.84	2.26	0.46	0.36	2.72	3.58	4.26	Hauri,1996
夏威夷 Loihi 碱性玄武岩	44.59	2.1	9.71		0.16	18.14	9.79	2.03	0.66	0.26	2.69	4.66	4.62	Hauri,1996
峨眉山高 Ti 玄武岩	49.96	4.31	13.08	2.07	0.19	4.90	6.89	3.43	0.82	0.41	4.25	1.60	3.04	肖龙等,2003a
德干玄武岩	50.18	2.2	13.7	3.72	0.21	6.58	11.44	1.7	0.73		2.43	5.20	6.23	转引自李红阳等,2002
澜沧江缝合带 OIB	45.55	3.60	20.08	5.38	0.15	3.95	0.81	2.42	2.59	0.80	5.01	0.22	5.58	侯增谦等,1996b,1996c
澜沧江缝合带 EMORB	46.12	2.17	12.58	7.29	0.17	11.11	8.88	2.59	0.15	0.23	2.74	4.09	5.79	侯增谦等,1996b,1996c
澜沧江缝合带 NMORB	48.86	1.14	16.00	6.10	0.19	6.45	10.31	2.09	0.49	0.11	2.58	9.08	14.10	侯增谦等,1996b,1996c
武定辉绿岩	46.06	3.59	12.84	7.58	0.04	5.69	5.96	4.26	2.37	0.37	6.63	1.66	3.58	郭阳等,2014b
河口群变质玄武岩	50.29	2.85	12.29	3.97	1.26	3.35	5.92	4.94	3.82	0.46	8.76	2.08	4.31	周家云等,2011
东川辉绿岩	47.46	1.45	14.34	6.79	0.15	7.91	9.66	2.45	0.94	0.13	3.39	6.67	9.90	王生伟等,2013a

注:上述岩石组份含量(单位:%)及比值为根据文献中结果计算后所得的平均值

中,也有古元古代晚期基性岩浆活动的报道(傅昭仁等,1997)。基性火山岩出露较少,主要分布在河口群落幽组 and 东川群黑山组中,其中以河口群落中的变质玄武岩强烈蚀变,钠长石化明显,研究程度也较高,锆石 U-Pb 年龄为 1680 ± 13 Ma 和 1669 ± 6 Ma(周家云等,2011; Zhu Zhimin et al., 2013a)。

昆阳裂谷期的中酸性岩数量较少,目前报道的的基性—中性岩仅分布在通安地区,锆石的 U-Pb 年龄 1513 ± 18 Ma 和 1531 ± 18 Ma(耿元生等,2012);酸性岩以侵入岩为主,目前报道的主要有武定地区,该区的酸性岩相对新鲜,锆石的 U-Pb 年龄为 1730 ± 15 Ma(王子正等,2013),其次分布在会东菜园园地区,总体上蚀变较强,锆石的 U-Pb 年龄为 1700 ± 25 Ma(表2;图4b),昆阳裂谷期的酸性岩体颜色普遍偏红,岩石类型以石英斑岩为主,上述地区的基性—酸性岩浆岩空间上紧邻,酸性岩体往往侵入至早期的基性岩体中,形成典型的双峰式岩浆岩组合(图3b)。少量的酸性火山岩、潜火山岩主要分布在河口群和大红山群中,凝灰岩在大红山群、河口群、东川群均有分布,东川群中的火山岩和凝灰岩变质程度较低,河口群和大红山群中的凝灰岩与其他岩石类型一样,均已大多变质程度较高,上述地层中的火山岩和凝灰岩的年龄对制约其沉积时代具有重要的意义。

2.2 地球化学特征及构造背景

近年来不少学者对昆阳裂谷阶段主要岩浆岩进行了较为详细的同位素地质年代学、地球化学研究(Zhao Xinfu et al.,2010; Zhu Zhimin et al., 2013a; Chen et al., 2013; 周家云等,2011; 王生伟等,2013a; 王子正等,2013; 郭阳等,2014b),主要对象为东川地区辉绿岩、武定地区辉绿岩和酸性岩、拉拉铜矿床周边基性侵入岩,主要特征简述如下:

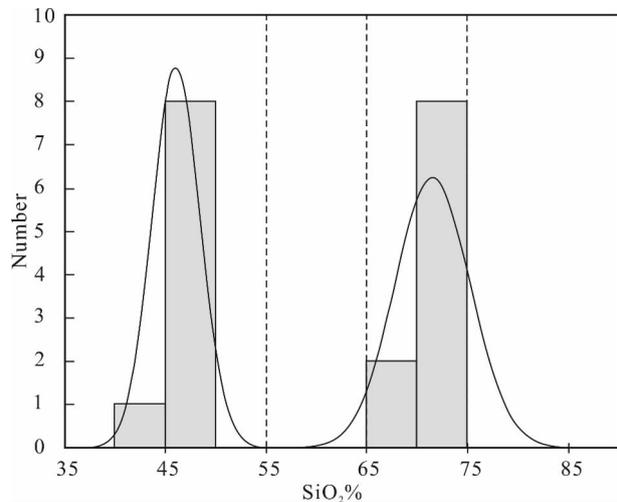


图 4 武定地区古元古代双峰式岩浆岩(原始数据来源于王子正等,2013;郭阳等,2014)

Fig. 4 The Paleoproterozoic bimodal magmatic rocks in Wuding area (primary data from Wang Zizheng et al., 2013; Guo Yang et al., 2014b).

东川地区古元古代晚期辉绿岩的主量元素中 MgO 含量较高,为 6.16% ~ 9.65%, $Mg^{\#}$ 平均为 72.2;富 Na_2O , Na_2O/K_2O 为 1.3 ~ 9.8;低 SiO_2 , 45.61% ~ 49.34%;低 TiO_2 , 0.74% ~ 2.74% (表 2); FeO/MgO 小于 1,表明本区辉绿岩初始岩浆相对较原始。 $(La/Yb)_N$ 为 1.66 ~ 4.37, δEu 为 1.04 ~ 1.22, 稀土元素球粒陨石的配分呈平缓右倾模式,出现 Eu 的弱正异常。富集 Rb、Ba 等大离子半径元素, MORB 配分为向右陡倾模式,出现突出的 Rb、Ba 峰, Zr、Hf 弱负异常,多数样品没有明显的 Nb、Ta 异常。 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 为 -0.2 ~ 3.8, 多数样品的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 为正值,初始 $[n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)]_i$ 值为 0.7055 ~ 0.7084, 总体上东川地区辉绿岩表现为陆内裂谷玄武岩的地球化学特征 (Zhao Xinfu et al., 2010; 王生伟等, 2013a), 拉拉铁铜矿区及周边的辉绿辉长岩地球化学与东川基本相似,时代也相近 (关俊雷等, 2011; Chen et al., 2013), 形成机制及构造背景应是一致的。

武定地区辉绿岩锆石的 U-Pb 年龄为 1767 ± 15 Ma (郭阳等, 2014b), 时代较东川—会东—会理地区基性侵入岩较老, 可能是昆阳裂谷初始拉张的产物, 岩石化学表现为低 SiO_2 、MgO 以及高 TiO_2 (3.24% ~ 4.02%, 平均值为 3.59%)、碱 ($K_2O + Na_2O$) 和 P_2O_5 含量 (0.32% ~ 0.45%, 平均值为 0.37%) (见表 2), 具有偏碱性的拉斑质玄武岩的岩石化学特

征, 微量元素的配分模式中, 大离子半径元素如 K、Rb、Ba 等富集, 高场强元素如 Ta、Nb 和 Zr、Hf 没有明显的亏损。河口群中的变质基性火山岩的岩石化学特征与武定地区偏碱性的辉绿岩基本类似, 富碱、高 Ti、高 P_2O_5 (表 2), 微量元素原始地幔配分模式中高场强元素不亏损, 稀土元素的球粒陨石配分呈向右陡倾的配分模式, 具有高的 $(La/Yb)_N$ 值 (周家云等, 2011; Zhu Zhimin et al., 2013a)。

武定地区酸性岩体具有高硅 (SiO_2 含量为 69.77% ~ 73.83%)、高碱 (ALK 值为 5.46 ~ 6.65)、低钾 (K_2O/Na_2O 为 0.02 ~ 0.14) 等特征, 里特曼指数 1.04 ~ 1.65, A/CNK 值为 1.11 ~ 1.25, 平均值为 1.18 (> 1.1), $10000Ga/Al$ 为 3.96 ~ 7.34 (均值为 5.18 > 2.6), 较高的含铁指数 [$FeO/(FeO + MgO) = 0.95 \sim 0.99$], 总体显示了低钾钙碱性强过铝质 (SP) 铁质 A 型花岗岩的特点。岩石富集 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素; 强烈亏损 K、Sr、Ba 等大离子亲石元素, 稀土元素总量 $\Sigma REE = 390.70 \times 10^{-6} \sim 674.91 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 为 1.74 ~ 3.29 (均值 2.18), 轻稀土分馏作用明显, 相对富集, 表现出强烈的负 Eu 异常。La-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年方法获得海孜花岗斑岩的形成年龄为 1730 ± 15 Ma (MSWD = 4.0)。地球化学特征表明, 区内古元古代晚期酸性岩体形成于板内伸展构造环境的 A 型花岗岩 (王子正等, 2013), 与本区稍早侵入的辉绿岩形成典型的双峰式岩浆岩组合 (图 4)。

会理菜园橄橄榄岩的岩石化学表现为高 MgO, 低 SiO_2 、CaO、 Al_2O_3 ; 铂族元素地球化学中 Pd/Ir 值较低, 原始地幔标准化配分模式大多向右平缓倾斜; Re-Os 同位素体系封闭性相对较好, γOs 值较小。总体上, 无论是岩石化学、铂族元素地球化学, 还是 Re-Os 同位素, 均表现为蛇绿岩底部残留方辉橄橄榄岩的特征 (王生伟等, 2013b), 菜园橄橄榄岩的地球化学、斜锆石的 U-Pb 年龄以及岩性组合表明, 以菜园—踩马水—麻塘断裂界限, 南侧的古元古代晚期—中元古代早期的昆阳陆内裂谷最终可能发展成为了近东西向展布的局限小洋盆, 并在中元古代末期关闭 (尹福光等, 2011; 王生伟等, 2013c)。

根据对康滇地区古元古代晚期岩浆岩的地球化学研究, 绝大多数学者均提出上述基性—酸性岩浆岩形成于陆内裂谷环境, 因此不难判断, 康滇地区古元古代晚期至中元古代早期的构造性质属陆内裂谷, 可能是全球性的 Columbia 超级大陆的裂解事件在本区的响应 (王生伟等, 2013a; 郭阳等 2014b;

Zhao Xinfu et al., 2010; Chen and Zhou, 2013a; Zhu Zhimin et al., 2013a)。昆阳陆内裂谷最终的命运并不像本区的晚二叠世的攀西陆内裂谷,后者到目前为止,没有证据表明其最终发展成为了局限的小洋盆。总之,昆阳裂谷既不是 > 2.0 Ga 的绿岩型裂谷,也是不纯粹的坳拉谷,而极有可能是类似于现代的东非大裂谷—红海不再继续发展就消亡的面貌,原因可能是能量已经耗尽,其次也可能与晋宁运动的到来有关。

2.3 昆阳裂谷的动力学机制——昆阳地幔柱

研究表明,大规模的构造—岩浆事件动力学机制多数与地幔柱活动有关(Morgan, 1971, 1983; White and McKenzie, 1989; Hill, 1991, 1992, 1993; Maruyama, 1994; Coffin and Eldholm, 1994; Storey, 1995; 侯增谦等, 1996a; Courtillot et al., 1999; Condie, 2001; 徐义刚等, 2002),我国西南康滇地区晚二叠世峨眉山玄武岩被公认为地幔柱的产物,且研究程度也最高(Chung et al., 1995; Xu Yigang et al., 2001; Zhang Zhaochong et al., 2002; Xiao Long et al., 2004; Zhou Meifu et al., 2008; 卢记仁, 1996; 宋谢炎等, 1998; 徐义刚等, 2001, 2002, 2003; 何斌等, 2003; 肖龙等, 2003a, 2003b, 2003c),峨眉地幔柱上涌在我国西南地区除了形成了大规模的溢流玄武岩,还造就了世界上最大规模的钒钛磁铁矿和较小规模的铜镍铂族元素矿床。与地幔柱有关的玄武岩往往具有独特的地球化学特征,如高 TiO_2 、 MgO 、 P_2O_5 、低 CaO/TiO_2 及 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$; 富集大离子半径元素、高场强元素不亏损或弱亏损以及较高的 $[n(^{87}\text{Sr})/(^{86}\text{Sr})]_i$ 初始比值和 $\delta_{\text{Nd}}(t)$ 值等,也就是典型洋岛型玄武岩的地球化学特征;其次,苦橄岩也地幔柱活动的最重要标志(莫宣学等, 1993, 1998; 张招崇等, 2003, 2004, 2005, 2006; 姜常义等, 2007; 李杰等, 2008; 郝艳丽等, 2011; 汤庆艳等, 2015);此外,双峰式岩浆岩组合(Li Zhengxiang et al., 1999)以及大火成岩省、大型放射状岩墙群也是地幔柱的重要证据。

元古宙地质演化的遗迹,绝大多数由于埋深较大,无法直接观察。由于喜马拉雅期的印度和亚洲大陆强烈的碰撞造山作用,致使川滇地区地壳的抬升,河流的深切、剥蚀作用,才使得深埋的昆阳裂谷期地层、岩浆岩和矿床断续、零星出露地表(图1)。从东川至河口一线,昆阳裂谷期基性岩浆岩分布长约 150 km,曾长期被认为是与峨眉山玄武岩同期的侵入岩体;从大红山地区至拉拉地区长约 300 km 的

范围内,也广泛出露同期基性岩群,如果川西里伍岩群斜长角闪岩 Sm-Nd 年龄 (1674 ± 112 Ma 和 1677.0 ± 67.5 Ma) 是可靠的话,南北展布则超过 600 km。相对于基性侵入岩而言,昆阳裂谷期的火山岩,厚度要小,范围也窄得多,目前仅有河口群和大红山群中,且大多均已强烈变质、变形,比华北同期的熊耳群火山岩类型、出露范围和厚度也要逊色得多(Zhao Taiping et al., 2002; 赵太平等, 2004b)。

本文收集了目前研究程度较高的典型地幔柱成因玄武岩以及本项目组已发表了昆阳裂谷期辉绿岩的主要岩石化学数据。岩石化学对比可见(表2),武定地区辉绿岩 TiO_2 与典型地幔柱有关的玄武岩,如峨眉山高 Ti 玄武岩、澜沧江缝合带的 OIB、夏威夷群岛玄武岩、南印度洋克尔格伦玄武岩、红海地区玄武岩以及喀麦隆地区玄武岩的 TiO_2 含量均较正常的玄武岩高,超过 3%,而河口群变质玄武岩的 TiO_2 含量略低,均值也达到 2.85%;武定地区辉绿岩及河口群变质玄武岩的 P_2O_5 含量均值分别为 0.37% 和 0.46%,在与上述玄武岩的对比中,处于中等,与克尔格伦碱性玄武岩、夏威夷群岛玄武岩、红海过渡性玄武岩及峨眉山高 Ti 玄武岩 P_2O_5 含量相当,但低于喀麦隆西南 Pagalu 碧玄岩、红海碧玄岩、红海碱性玄武岩和克尔格伦东南玄武岩,上述地区玄武岩的 P_2O_5 含量超过 1%。武定地区辉绿岩和河口群变质玄武岩的碱含量 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 均值分别为 6.63% 和 8.76%,几乎超过所有典型地幔柱成因的玄武岩。由于 TiO_2 含量较高,导致本区辉绿岩和变质玄武岩的 CaO/TiO_2 及 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值与上述地幔柱成因玄武岩相比,绝大多数均较低。

河口群和武定地区基性岩浆岩的微量元素及稀土元素配分模式中(周家云等, 2011; 郭阳等, 2014b),没有明显的高场强元素,如 Nb、Ta、Zr、Hf 等的亏损,稀土元素配分呈向右陡倾模式,轻稀土元素明显富集,重稀土元素亏损,配分模式与典型的洋岛型玄武岩和峨眉山高 Ti 玄武岩类似,后二者被认为是地幔柱活动的主要岩石化学证据。

昆阳裂谷期岩浆岩的 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素报道较少,目前仅有王生伟等(2013a)对东川地区辉绿岩进行过较为详细的同位研究,其中, $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i$ 初始比值相对均较高,7 件样品值为 0.7055 ~ 0.7084,与克尔格伦地幔柱成因的碱性火山岩的同位素组成接近(Weis et al., 1993; Storey et al., 1988),但高于大多数地幔柱成因的洋岛型玄武岩的 $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i$ 比值; $\delta_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-0.2 \sim$

3.8, 其中6件样品的 $\delta_{Nd}(t)$ 值为正值, 均与本区峨眉山高 Ti 玄武岩相似(肖龙等, 2003a), 也与本区新元古代岩浆岩的同位素组成相似(李献华等, 2002a, 2002b, 2002c; 沈渭洲等, 2003; 杜利林等, 2009), 上述新元古代岩浆岩的 Nd 同位素特征($\delta_{Nd}t$ 值多为正值)被认为是地幔柱活动的重要证据(李献华等, 2001; 2002a, 2002b, 2002c; 朱维光等, 2004; Li Xianhua et al., 2002, 2003; Li Z X et al., 2003)。此外, 本项目组对东川地区辉绿岩进行了较为详细的 Re-Os 同位素体系研究(未发表数据), Re 含量为 $17 \times 10^{-9} \sim 853 \times 10^{-9}$, 均值为 307×10^{-9} , 与夏威夷玄武岩的 Re 含量相当(Hauri et al., 1996), $n(^{187}\text{Os})/n(^{188}\text{Os})$ 为 0.6 ~ 34.4, 远远高于夏威夷玄武岩, 且东川辉绿岩 γOs 非常高, 364 ~ 29306, 通常情况, 高 γOs 反映壳源物质的大量加入, 然而东川辉绿岩的微量元素、同位地球化学显示其又未有受到明显的壳源物质混染(王生伟等, 2013a)。Re 为中等不相容元素, 以类质同相的形式存在, 东川辉绿岩高 γOs , $n(^{187}\text{Os})/n(^{188}\text{Os})$ 可能反应了其初始岩浆含较多的大离子半径元素, 符合地幔柱玄武岩的特征。

此外, 作者在与本单位曾长期在康滇地区工作一些老一辈地质工作者交流中, 他们曾经在会理菜子园地区, 也就是前文提到的菜子园橄榄岩出露地区采集到的一些橄榄岩样品薄片, 发现一些鬣刺结构, 总所周知, 鬣刺结构是科马提岩的特有标志, 如果属实的话, 昆阳裂谷期可能存在类似于苦橄岩类的偏超基性喷出岩。

总之, 无论是岩性组合、岩石化学、微量元素地球化学还是同位素地球化学, 昆阳裂谷期基性岩浆岩尤其是武定地区的辉绿岩及河口群中的变质玄武岩均显示出明显的地幔柱玄武岩的特征, 因此, 我们提出, 古元古代晚期至中元古代早期, 扬子陆块西缘大规模的构造岩浆事件的动力学机制, 可能源于地幔柱, 即昆阳地幔柱。其实, 古元古代—中元古代全球地幔柱活动的报道并不鲜见, 如华北地区(Zhao Taiping et al., 2002; 彭澎等, 2004)、加拿大 Flin flon 绿岩带中 $> 1.9 \text{ Ga}$ 的 OIB 型玄武岩(Stern et al., 1995)以及澳大利亚南部地区(Barley et al., 1992; Kerrich, 1992), 而 Rogers and Santosh (2002) 认为古—中元古代的 Columbia 超级大陆的裂解的动力学机制可能与地幔柱活动有关。昆阳地幔柱与本区晚二叠世的峨眉地幔柱的地理位置、构造部位可能大致是吻合的, 但二者的表现形式也差别较大, 后者规模明显较前者大得多, 喷溢速度快、持续时间很

短。

3 昆阳裂谷的沉积岩系统

根据近年的研究结果, 昆阳裂谷期的沉积岩系统包括东川群、河口群及大红山群上述基底地层在康滇地区大致沿东川—会理—武定—易门—元江呈带状断续出露, 前人分别称其为东川—会理裂陷槽、易门—元江裂陷槽(龚琳等, 1996)。各群的简要特征如下:

东川群(Pt_{1-2}DC): 东川群主要分布在东川地区小江断裂西侧、四川会理县的南部、滇中的武定—禄丰—易门—峨山—元江, 在滇中地区呈狭长的带状断续出露。

东川群的总体特征是下部因民组的底部发育大量极其复杂的角砾岩, 胶结物也十分丰富, 其沉积相为裂谷初期快速拉张环境, 并伴随强烈的岩浆活动, 类似于优地槽以及东非大裂谷初始拉张中的沉积产物。向上逐渐过渡为相对稳定的浅海和半深海、深海相的浊流沉积, 沉积了巨厚的白云岩和页岩, 可能与裂谷的持续拉张下陷有关, 沉积环境逐渐趋于稳定, 即相当于冒地槽的复理石建造。东川群在东川地区各个地层组均较厚, 而到了会理—武定—易门—元江地区, 逐渐减薄, 各个地层组的岩性如下:

因民组(Pt_1y): 下部主要为条带状(砂质)白云岩; 中部为紫红色铁质板岩及泥砂质结晶白云岩夹板岩、赤铁矿层, 具干裂纹、波痕、斜层理及色调粒级韵律, 含黄铜矿、斑铜矿, 上部为紫红、灰紫色砂质结晶白云岩夹板岩, 具色调粒级韵律及斜层理、波痕构造; 顶部主要为粉砂质、钙质板岩、变质粉砂岩等, 其间见大量辉绿辉长岩侵入和紫红色角砾岩产出。因民组与下伏平顶山组的接触关系, 主要为断层接触, 在汤丹—拖布卡地区为假整合接触, 局部为角度不整合接触。因民组中上部赋存铜矿, 是东川汤丹、因民等铜矿床的含矿层之一, 中部是铁铜矿的赋存层位, 在东川稀矿山、武定迤纳厂、禄丰鹅头厂等地形成矿床。

落雪组(Pt_1l):

落雪组与因民组常相伴出露, 分布范围内一致。为灰白色、肉红色厚层—块状结晶白云岩, 含藻白云岩夹硅质团块、条带白云岩和细条纹条带状粉砂质白云岩。下部及底部为东川式铜矿的主要赋存层位。落雪组是著名的东川式铜矿的主要产出层位。与下伏因民组呈整合接触。

黑山组(Pt_2h):

以深灰色至灰黑色板岩为主,常见由粉砂质、硅质、钙质组成的条带,或由深浅色交替形成的条纹条带,底部板岩含碳质和硅质,顶部碳质、泥质成分较高,局部为绢云板岩和绢云炭质、粉砂质、泥质板岩,并在中部夹中层状变砾石英砂岩。与下伏落雪组为整合接触关系。

青龙山组(Pt_2q):

岩性主要为青灰、浅灰至深灰色中厚层至块状结晶白云岩,普遍含有硅质细条纹,中上部含少量硅质团块,夹少量绢云板岩、泥质灰岩及结晶灰岩。与下伏黑山组条带状板岩为整合接触,与上覆大营盘组铁泥质板岩为平行不整合接触。

东川群的时代,可利用其中的凝灰岩中锆石的 U-Pb 定年进行制约,如易门地区因民组中凝灰岩锆石的加权平均年龄为 1742 ± 13 Ma,等时线年龄为 1740 ± 15 Ma (Zhao Xinfu et al., 2010),表明因民组的沉积时代为古元古代晚期;黑山组中夹少量凝灰岩和玄武岩,孙志明等(2009)对东川地区的黑山组中凝灰岩锆石进行了 SHRIMP U-Pb 测年,获得了 1503 ± 17 Ma 的加权平均年龄,表明该组沉积时代为中元古代早期。其次,东川群中的原生沉积型铜矿的年龄也可以对落雪组的时代进行制约,我们对东川铜矿中原生黄铜矿进行了 Re-Os 同位素测年,结果为 1765 ± 57 Ma (王生伟等, 2012) 和 1788 ± 110 Ma (见表 1), 龚琳等(1996)获得落雪铜矿石的 Pb-Pb 年龄为 1893 ± 270 Ma, 陈好寿等(1992)对落雪组 Pb-Pb 年龄为 1764 Ma, 范效仁等(1999)还通过古地磁法获得因民组(≈ 1800 Ma ~ 1750 Ma)、落雪组(≈ 1680 Ma, 1650 Ma)及黑山组(≈ 1550 Ma)的古地磁年龄;此外,还可以根据其中的侵入岩年龄对地层沉积时代进行间接制约,例如东川地区侵入至因民组及落雪组辉绿岩锆石的 U-Pb 年龄均大于 1650 Ma (Zhao Xinfu et al., 2010; 朱华平等, 2011); 通安地区侵入至东川群中的辉绿岩—闪长岩锆石的 U-Pb 年龄为 1513 ± 13 Ma、 1531 ± 18 Ma (耿元生等, 2012); 武定地区侵入至因民组中辉绿岩锆石的 U-Pb 年龄为 1767 ± 15 Ma (郭阳等, 2014b)。总之,根据上述学者的研究结果,表明东川群下限可能在 1800 Ma ~ 1760 Ma 之间,上限小于 1503 Ma,跨度较大,约 300 Ma,与昆阳裂谷期岩浆活动持续的时间也较吻合

河口群(Pt_1HK):

该群主要分布在会理南部的河口,向南延伸至云南姜驿,河口群可以细分为 6 个组,其主要岩性、

含矿特征及分布区域简述如下:

白云山组(Pt_1b):

上部变砂岩、变凝灰质砂岩、粉砂岩;中部白云石英片岩夹石榴二云片岩;下部炭质板岩、绢云千枚岩,夹石榴黑云片岩及白云石大理岩。

小铜厂组(Pt_1xt):

钾长角斑岩、局部夹角闪黑云钠长片岩,白云石英片岩、石榴白云片岩等。

大团箐组(Pt_1d):

上部白云石英片岩夹绿泥绢云片岩;中部石榴角闪黑云片岩、钙质白云片岩、炭质板岩,下部钙质云母石英片岩夹大理岩、变质岩

落函组(Pt_1l):

由三个次级火山喷发旋回组成,每个旋回自下而上的岩性组合为:钠长角斑质熔岩—角斑质火山碎屑岩、潜火山岩及局部沉积碎屑岩,赋存了拉拉地区大中型铁铜矿床。

新桥组(Pt_1xq):

上部为石榴黑云片岩、石榴角闪黑云片岩;下部为白云石英片岩夹白云石大理岩和炭质板岩透镜体;中部为钙质白云石英片岩。

天生坝组(Pt_1t):

上部为钠长角斑质熔岩;中部为炭质板岩夹石榴角闪黑云片岩;下部为钠长角斑质熔岩,赋存官地、李家坟等铁矿床。

近年来,不少学者对河口群中变质基性火山岩、石英角斑岩、凝灰岩和侵入岩开展了锆石的 U-Pb 年代学研究(关俊雷等, 2011; 周家云等, 2011; Chen et al., 2013; Zhu Zhimin et al., 2013a),这些研究成果对制约河口的沉积时代具有重要意义。如石英角斑岩的时代为 1722 ± 25 Ma (王东兵等, 2012),变质基性火山岩的年龄为 1680 ± 13 Ma (周家云等, 2011),凝灰岩的年龄为 1669 ± 6 Ma (Zhu Zhimin et al., 2013a) 和 1705 ± 6 Ma、 1708 ± 7 Ma 及 1679 ± 13 Ma (Chen et al., 2013),这些研究结果在误差范围内基本上是一致的,表明河口群的时代可以限制在古元古代晚期,与早期获得河口群中细碧角斑岩锆石的 U-Pb 模式年龄(1712 Ma)较为相似(李复汉等, 1988)。

大红山群(Pt_1DH):位于云南中南部,加持于绿汁江断裂和红河断裂之间的三角地带,由一套深变质岩系构成,分布于大红山、腰街、漠沙、希拉河、撮科等地(后四者没有同位素年龄制约,目前暂划入大红山群),以大红山矿区出露最全,其它地区仅部

分出露,区域上具有稳定的含矿层。大红山岩群沉积建造可分为三部分:下部碎屑岩建造(混合岩);中部海相火山岩建造(变质火山岩);上部碳酸岩及复理石建造。主要铜铁矿无一例外均赋存于中部火山岩建造中。大红山群从老到新分为底巴都岩组、老厂河岩组、曼岗河岩组、红山岩组、肥味河岩组、坡头岩组 6 个组、20 个岩性段,总厚大于 2900 m,各组岩性简要特征如下:

底巴都岩组(Pt_1d):

以一套动力变质作用形成的糜棱岩为主体,部分为破碎岩夹少量构造片岩。是原岩发生塑性变形和重结晶作用形成的岩石。

老厂河岩组(Pt_1l):

下部为一套石英岩、变质含砾砂岩夹片岩;上部为石英岩、大理岩、白云质大理岩夹片岩。岩层变形明显表现于所夹片岩中,其间出现大量叠加舌状褶皱和锥状鞘褶皱,且这些褶皱多次折断。在大红山地区出现石榴石等新生变质矿物。该岩组是铜、铀、金含矿层位。

曼岗河岩组(Pt_1m):

该岩组以一套火山喷发沉积物为主体。地区差异性比较明显,大红山地区为一套变基性到偏中酸的火山凝灰岩、火山熔岩为主体的火山喷发岩系夹黑云片岩、绢云片岩,中上部夹大理岩;腰街和希拉河地区以中基性火山凝灰岩、沉凝灰岩夹沉积岩为主,熔岩少见。岔河—撮科地区以基—中性熔岩为主体夹火山凝灰岩及少量片岩。该岩组下部是铜、铁、金、银、钴、镓、钡含矿层,上部是铁含矿层。

红山岩组(Pt_1h):

见于大红山矿区的大量钻孔中,以熔岩为主,底部为火山角砾岩、集块岩,具明显的火山结构构造。是大红山铁矿主要赋矿层位

肥味河岩组(Pt_1f):

该岩组主要是含砂质、泥质的白云质大理岩夹含黄铁矿炭质板岩、千枚岩、硅质岩。其特点是变质程度相对较低,但变形强烈,各式叠加褶皱、鞘褶皱、梳状褶皱等发育,软夹层的拉断、膨胀现象普遍,局部尚出现布丁构造。

坡头岩组(Pt_1p):

为一套白云石大理岩、片岩、炭质石英岩及炭质板岩。

近年来,不少学者先后获得大红山地区曼岗河组、红山组及老厂河组中变凝灰岩、变中酸性岩中锆石的 U-Pb 年龄、地层的 Sm-Nd 年龄、辉绿岩锆石的

U-Pb 年龄,全部集中在 1750 Ma ~ 1650 Ma 之间(Hu Aiqin et al., 1991; Greentree et al., 2008; Zhao Xinfu et al., 2011; 杨红等, 2012),与早期获得的底巴都组的全岩 Rb-Sr 年龄(1706 Ma)较为一致(李复汉等, 1988),上述研究结果表明,尽管大红山群变质程度较东川群、河口高,但三者沉积时代是一致的,均为昆阳裂谷期沉积产物。

根据岩性差异性,东川群划分为 4 个地层组,而大红山群划分为 6 个地层组,而河口群也由 6 个岩性组构成。大红山群及河口群岩性组合较东川群复杂得多,二者中均有较多的火山岩夹层,相对而言,东川群沉积环境要稳定得多,且火山岩几乎不发育,由于三者沉积时代基本一致,它们岩性组合差异可能与当时所处的裂谷位置有关,河口群与大红山群可能处于或更靠近岩浆喷溢中心,其沉积环境类似于槽台学说的优地槽,而东川群可能相对远离喷溢中心,到了落雪期至青龙山期,沉寂环境趋于稳定。

4 昆阳裂谷的成矿系统

强烈的构造、岩浆事件往往伴随着大规模的成矿作用,古元古代晚期至中元古代早期的昆阳陆内裂谷拉张事件也是一次重要的成矿事件,现有的研究结果越来越显示,昆阳期地层中的一系列铜矿、铁矿以及铁铜矿床的成矿作用,可能均与昆阳裂谷紧密相关(表 3)。按照成矿系列、成矿作用、成因类型,上述矿床大致可以划分为两个系列, I 为因民组、落雪组等沉积地层中的层状铜矿床(Sediment-hosted Stratiform Copper, SSC); II 为与昆阳期岩浆热液有关的铁氧化物铜金矿床(Iron—Oxide—Copper—Gold, IOCG),前者最有代表性的当属东川铜矿,开采历史悠久,规模也较大,据龚琳等(1996)报道,仅东川地区的铜矿床(点)就多达 148 个,两个大型,分别为汤丹铜矿、落雪铜矿;中型 4 个(石将军—萝卜地、面山、大英稠、新塘);小型矿床 36 个。已探明铜金属总储量 3.914 Mt,其中 C 级以上铜储量 2.278 Mt, D 级 0.947 Mt, 预测 E + F 级储量 2.04 Mt, 总共高达 5.954 Mt, 以上数据中包含少量的南华纪滥泥坪式铜矿资源量,除去新元古代的铜矿之外(也有学者认为滥泥坪式铜矿物质来源于下伏含铜的东川群地层,如龚琳等, 1996; 吴健民等, 1998),整个昆阳裂谷期在东川地区形成铜矿的铜资源量可能超过 5.0 Mt,同时还伴生大量的 Ag、Au、Co、Ge、Ga 和 Mo 等金属元素。除了东川地区,在滇中、会理以及大红山地区的古元古代晚期—中元古

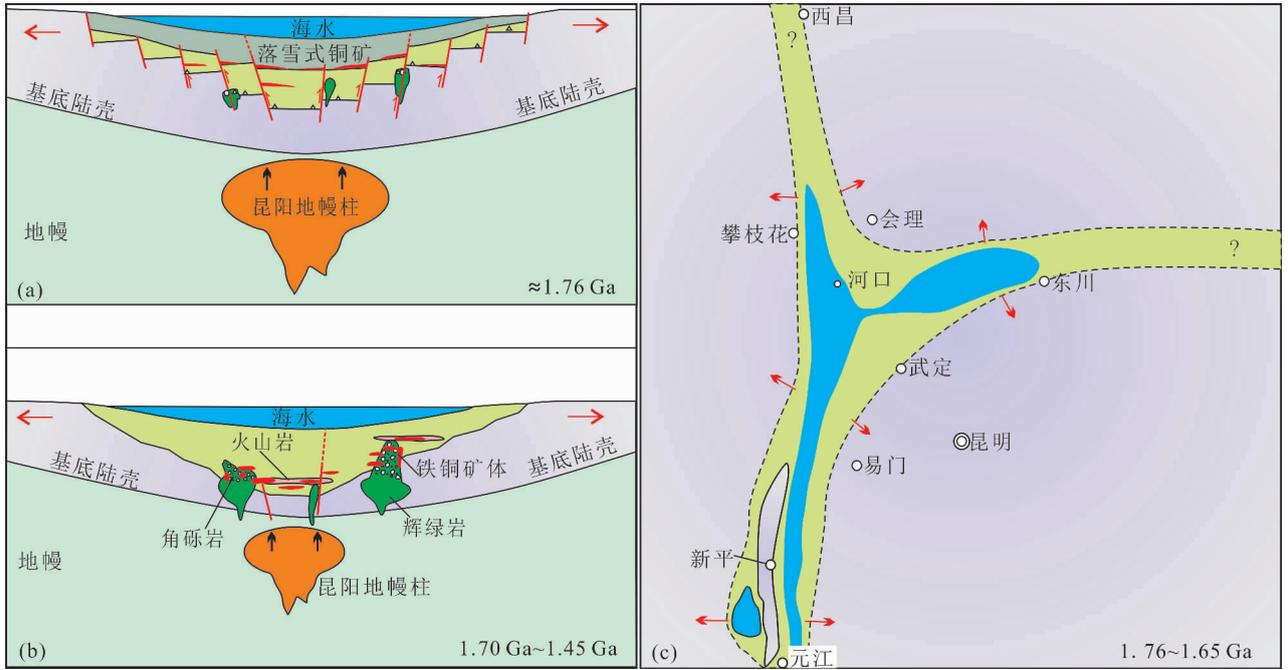


图 5 昆阳裂谷、地幔柱及铜矿和铁铜矿床成矿模式图

Fig. 5 The Konyang rift, mantle plume and metallogenic models of Cu and Fe—Cu deposits

代早期地层中也发育大规模东川式铜矿,如狮子山、铜厂、鹅腊厂等均达中型规模,加上拉拉、大红山、稀矿山等铁氧化物铜金矿床,昆阳裂谷期形成的 Cu、Fe 总资源量是相当可观的(图 1)。

昆阳裂谷期的铜矿、铁铜矿床一直受到广泛关注,以东川铜矿为例,先后有沉积成因(龚琳等, 1981; Wang Kenan, 1984)、岩浆热液交代(邱华宁等, 2002)、“红层汲取-藻控成岩成矿”(冉崇英, 1983)、沉积-活化改造(华仁民, 1990)等不同观点,近年来,更是掀起了区内铁铜矿床研究的新高潮。目前研究程度最高的当属滇中地区的迤纳厂铁铜矿床、拉拉铁铜矿床以及东川铜矿,各种方法获得的成矿时代大多数集中在 1.8 ~ 1.4 Ga 之间,从时代上看,与昆阳裂谷时间高度一致,属昆阳陆内裂谷的产物无疑。落雪式铜矿主要分布在东川、武定、易门及元江等地,原生铜矿物以星点状、马尾丝状、豆状硫化物为主(图 3c、d),后期形成块状富矿石(图 3e),对东川地区落雪式铜矿中层状矿体硫化物进行的 Re-Os 同位素研究也表明(王生伟等, 2012; Huang Xiaowen et al., 2013),原生沉积型黄铜矿的年龄为 1765 ± 57 Ma,同前人报道的硫化物和地层的 Pb-Pb 年龄较相似(吴建民等, 1998)(表 1),可能与昆阳陆内裂谷早期拉张形成的一系列类似于地堑式的断陷盆地相关(图 5a),沉积或成矿环境可

能与现代东非大裂谷中一系列串珠状的湖泊类似。需要指出的是,对于落雪式铜矿,尽管矿体总体顺层展布,原生沉积型矿石的品位是非常低的,具有较高经济意义的是高品位的块状富矿石,往往成团块状、网脉状、条纹状等,常常与热液白云石、方解石、石英等脉石矿物共生,是后期形成的,团块状黄铜矿的 Re-Os 同位素年龄为 879 ± 70 Ma(本项目未刊数据),邱华宁等(1997, 1998, 2000, 2001, 2002)以及叶霖等(2004)对东川地区脉石矿物开展了详细的 Ar-Ar 同位素研究,期年龄集中在 800 Ma ~ 700 Ma 之间,从上述学者的研究工作结合矿体形态、矿石矿物的结构、构造,把昆阳裂谷期赋存于因民组、落雪组等地层中层状铜矿床,即“落雪式”铜矿的成因类型归入沉积+改造型是合理的(图 5b)。

昆阳裂谷期的铁铜矿床以会理拉拉、新平大红山、东川稀矿山、武定迤纳厂最具代表性,大多数铁铜矿床与昆阳期的辉绿岩、角砾岩及变质基性火山岩等在空间位置上较紧密。近年来,一些学者先后发表了关于迤纳厂、拉拉等铁铜矿床的一些成矿年龄,如迤纳厂铁铜矿床矿石的 Sm-Nd 年龄为 1617 ± 100 Ma(杨耀民等, 2005),黄铜矿的 Re-Os 年龄为 1685 ± 37 Ma(叶现韬等, 2013)和 1648 ± 14 Ma(Hou Lin et al., 2015),矿石中辉钼矿的模式年龄为 1654 ± 7 Ma,脉状矿石辉钼矿的 Re-Os 年龄为 1487

表 3 昆阳期的主要铜矿及铁铜矿床

Table 3 The main Cu and Fe—Cu deposits of Kunyang period

序号	名称	赋矿地层	规模	矿种	系列	成因类型
1	会理县大箐沟铜矿	东川群	中型	铜	SSC	沉积 + 改造型
2	会理县黎溪中厂铜矿	东川群	矿点	铜	SSC	沉积 + 改造型
3	会理县黑箐铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积 + 改造型
4	会理县铜厂沟铜矿	东川群	矿点	铜	SSC	沉积 + 改造型
5	会理县红铜山铜矿	东川群	矿点	铜	SSC	沉积 + 改造型
6	会理县黎发村铜矿	河口群	矿点	铜	IOCG	岩浆热(气)液型
7	会理县石龙铁铜矿	河口群	小型	铁铜	IOCG	岩浆热(气)液型
8	会理县板山头铜矿	河口群	矿点	铜	IOCG	岩浆热(气)液型
9	会理县大劈槽铜矿	河口群	矿点	铜	IOCG	岩浆热(气)液型
10	会理县赵家梁子铜矿	河口群	矿点	铜	IOCG	岩浆热(气)液型
11	会理县落函铜矿	河口群	大型	铁铜	IOCG	岩浆热(气)液型
12	会理县菖蒲箐铜矿	河口群	小型	铜	IOCG	岩浆热(气)液型
13	会理县黎洪铜矿	河口群	矿点	铜	IOCG	岩浆热(气)液型
14	会理县老羊汗滩沟铜矿	河口群	中型	铜	IOCG	岩浆热(气)液型
15	会理县红泥坡铜矿	河口群	小型	铁铜	IOCG	岩浆热(气)液型
16	会理县寨子箐铜矿	河口群	矿点	铜	IOCG	岩浆热(气)液型
17	会理县落函矿区小露天铁铜矿	河口群	小型	铁铜	IOCG	岩浆热(气)液型
18	会理县白鸡乡李家山—金竹林	河口群	小型	磁铁矿	IOCG	岩浆热(气)液型
19	会理县黎洪乡龙树铁矿	河口群	小型	磁铁矿	IOCG	岩浆热(气)液型
20	会理县新铺子铁矿	河口群	小型	赤铁矿	IOCG	岩浆热(气)液型
21	会理县玉新铁矿	河口群	小型	磁铁矿	IOCG	岩浆热(气)液型
22	会理县小黑菁铁矿	河口群	小型	磁铁矿	IOCG	岩浆热(气)液型
23	会理县官地铁矿	河口群	小型	磁铁矿	IOCG	岩浆热(气)液型
24	会理县香炉山—腰棚子铁矿	河口群	小型	赤铁矿	IOCG	岩浆热(气)液型
25	东川市拖布卡铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积 + 改造型
26	东川市牛厂坪铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积 + 改造型
27	东川市四棵树铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积 + 改造型
28	东川市玉宝箐铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积 + 改造型
29	东川市因民稠峡沟铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积 + 改造型
30	东川市因民铜矿	东川群	中型	铜	SSC	沉积 + 改造型
31	东川市落雪三江口	东川群	小型	铜	SSC	沉积 + 改造型
32	东川市落雪穿天坡铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积 + 改造型
33	东川市稀矿山铁铜矿	东川群	小型	铁铜	IOCG	岩浆热(气)液型
34	东川市落雪铜矿	东川群	中型	铜	SSC	沉积 + 改造型
35	东川市新塘铜矿	东川群	中型	铜	SSC	沉积 + 改造型
36	东川市落雪萝卜地	东川群	小型	铜	SSC	沉积 + 改造型
37	东川市落雪老背冲铜矿	东川群	中型	铜	SSC	沉积 + 改造型
38	东川市石将军铜矿	东川群	中型	铜	SSC	沉积 + 改造型
39	东川九龙铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积 + 改造型
40	东川市黄草岭铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积 + 改造型
41	东川市白锡腊铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积 + 改造型
42	东川市汤丹铜矿	东川群	大型	铜	SSC	沉积 + 改造型
43	东川水库山铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积 + 改造型
44	东川火麻箐铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积 + 改造型
45	东川人占石铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积 + 改造型
46	易门县里土铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积 + 改造型
47	易门县小马山铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积 + 改造型
48	易门铜厂铜矿	东川群	中型	铜	SSC	沉积 + 改造型
49	易门县易门矿区铜矿	东川群	中型	铜	SSC	沉积 + 改造型
50	易门县三家厂狮山铜矿	东川群	中型	铜	SSC	沉积 + 改造型
51	易门县七步郎铜矿	东川群	中型	铜	SSC	沉积 + 改造型
52	易门县象鼻山铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积 + 改造型
53	易门县三家厂铜矿凤山矿段	东川群	中型	铜	SSC	沉积 + 改造型

序号	名称	赋矿地层	规模	矿种	系列	成因类型
54	易门县起乍铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积+改造型
55	易门县梭佐铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积+改造型
56	易门县绿房铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积+改造型
57	易门县都厂铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积+改造型
58	易门县峨腊厂铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积+改造型
59	元江县红龙厂铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积+改造型
60	元江县龙厂铜矿	东川群	矿点	铜	SSC	沉积+改造型
61	元江县希拉河铜矿	东川群	矿点	铜	SSC	沉积+改造型
62	元江县鸡冠山铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积+改造型
63	元江县白龙厂铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积+改造型
64	元江县甘庄铜矿	东川群	矿点	铜	SSC	沉积+改造型
65	禄劝县蔡园子铁矿	东川群	小型	铁铜	IOCG	岩浆热(气)液型
66	禄劝县笔架山铁矿	东川群	中型	磁铁矿	IOCG	岩浆热(气)液型
67	禄丰县大美厂铜矿	东川群	中型	铜	SSC	沉积+改造型
68	禄丰县小新厂铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积+改造型
69	禄丰县中村老洞管铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积+改造型
70	禄丰县罗茨温泉铁矿	东川群	小型	铁铜	IOCG	岩浆热(气)液型
71	禄丰县碧城鹅头厂铁矿	东川群	小型	铁铜	IOCG	岩浆热(汽)液型
72	武定县迤纳厂铁铜矿	东川群	小型	铁铜	IOCG	岩浆热(汽)液型
73	武定金钟罩一过路街铜矿	东川群	矿点	铜	SSC	沉积+改造型
74	武定旧村铜矿	东川群	矿点	铜	SSC	沉积+改造型
75	武定汤郎矿区铜矿	东川群	矿点	铜	SSC	沉积+改造型
76	武定县打厂岭岗铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积+改造型
77	武定县观天厂铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积+改造型
78	武定县海孜铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积+改造型
79	武定县老五少铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积+改造型
80	武定县梁花管铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积+改造型
81	武定县邵家坡铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积+改造型
82	武定县朱家坝铜矿	东川群	小型	铜	SSC	沉积+改造型
83	新平县大红山铜铁矿	大红山群	大型	铜铁	IOCG	岩浆热(汽)液型
84	新平县曼蚌铜矿	大红山群	小型	铜	IOCG	岩浆热(汽)液型
86	新平县耙耙寨铜矿	大红山群	小型	铜	IOCG	岩浆热(汽)液型

± 110 Ma (Zhao Xinfu et al., 2013), 表明迤纳厂铁铜矿床确为昆阳裂谷期形成。大红山和稀矿山铁铜矿床目前没有成矿时代报道, Zhu Zhimin 等 (2013b) 和 Chen and Zhou (2012) 报道了拉拉铁铜矿床黄铜矿和辉钼矿的 Re-Os 同位素年龄, 分别为 1290 ± 38 Ma 和 1086 ± 8 Ma, 二者相差较大, 朱志敏最近也获得了较好的辉钼矿 Re-Os 年龄, 约 835 Ma (未发表数据), 由此看来, 拉拉铁铜矿床可能经历多期成矿作用, 最早期的成矿作用应与昆阳裂谷有关。

由于早期没有成矿时代的制约, 因此一直以来均认为区内铁铜矿床属沉积—变质—改造、海相火山岩型铁铜矿床 (如吴健民等, 1998), 事实上, 从昆阳裂谷期岩浆岩的地球化学特征、昆阳期沉积岩组合判断, 古元古代晚期—中元古代早期, 区内构造背景属陆内裂谷环境, 河口群、大红山群中的岩浆岩也与海相火山岩差别巨大, 双峰式岩浆岩也是陆内裂

谷的重要特征 (图 4), 只是昆阳裂谷期岩浆岩活动持续时间较长, 岩浆侵入及喷溢、沉积作用及热液作用缓慢交替进行, 而不像晚二叠世峨眉山 (大陆溢流) 玄武岩在较短时间内就快速地完成了巨量玄武岩的喷溢, 这也可能是两者成矿作用差异的重要原因; 其次, 与其说区内铁铜矿床与火山岩有关, 倒不如说与基性—酸性侵入岩、岩浆角砾岩和潜火山岩关系更密切, 事实上, 很多铁铜矿体并非产于火山岩中, 也并非层状, 尽管从微观上观察, 条带发育 (图 3f), 但大多数矿体在宏观上则是呈透镜体状 (图 3g)、囊状顺层或不规则状产出, 在东川稀矿山铁铜矿床, 可以见到大量自形赤铁矿 (图 3h), 与沉积成因的赤铁矿差异明显, 为典型热液成因。会理—东川、滇中地区东川群、河口群及大红山群中普遍发育强烈的纳长石化、绿泥石化, 包括“因民角砾岩”在内的诸多角砾岩可能与古元古代晚期的基性岩浆热事件有关, 东川群、河口群、大红山群以滇中

地区迤纳厂组中的纳长岩(石)可能是基性岩浆后期强烈的钠长石化等热液蚀变形成的,并与迤纳厂和拉拉等铁铜矿床的成矿作用有着直接的关系,从这个角度上讲,上述铁铜矿床从成因类型划分,应归入(酸性—基性)岩浆热(气)液型矿床(表 3,图 5b)。

总之,从现有的研究程度来看,无论是本区的沉积岩中的层状铜矿床(SSC 系列)还是与基性岩浆岩有关的铁铜矿床(IOCG 系列),最初的成矿时代可能均发生在 1.8 ~ 1.4 Ga,与昆阳期岩浆活动—沉积作用大致同期,应与昆阳陆内裂谷拉张事件密切相关(图 5c)。前人研究表明,大规模的成矿事件往往和地幔柱事件紧密相关(Barley and Groves, 1992; Kerrich, 1992; Sawkins, 1976; Mitchell and Garson, 1981; 王登红, 1996; 侯增谦等, 1998; 李红阳等, 1996a, 1996b, 1998)。康滇地区昆阳期地层中的铁铜矿床—原生层状铜矿床成矿时代上与昆阳期岩浆岩活动高度一致,因此我们认为古—中元古代的昆阳陆内裂谷、岩浆活动及成矿作用动力学机制、物质来源可能均与昆阳地幔柱活动紧密相关。

5 结论

本文系统总结了发生在康滇地区古元古代晚期至中元古代早期的岩浆—构造—沉积—成矿事件,即昆阳裂谷,并简要阐述了昆阳裂谷前的基底、构造运动,主要有以下认识:

(1)昆阳裂谷前的基底地层并非高变质的康定群,而是分布在东川及武定地区东川群之下的汤丹群,其沉积时代应为古元古代早—中期,并约 1.8 Ga 前发生过较为明显的构造挤压变形过程,即东川运动,时间上和性质可能与华北的吕梁运动或中条运动相当。

(2)昆阳期的岩浆岩由超基性岩、基性岩及少量的中酸性岩构成,以基性侵入岩为主,主要分布在东川—河口—武定—大红山一线,时代约 1800 Ma ~ 1450 Ma,集中分布在 1750 Ma ~ 1650 Ma,表明昆阳裂谷持续了近 400 Ma,高峰期为 1750 Ma ~ 1650 Ma,在局部地区出现双峰式岩浆岩组合。

(3)昆阳期的基性岩浆岩具有典型的陆内裂谷玄武岩的地球化学特征,其中武定地区辉绿岩及河口群中变质基性火山岩富 TiO_2 、 P_2O_5 、富碱、低 CaO/TiO_2 及 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值,且具有较高的 $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i$ 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值;微量、稀土元素配分模式没有高场强元素不亏损,与典型地幔柱玄武岩的地球化

学特征吻合,我们提出古元古代晚期—中元古代早期的昆阳裂谷是一次由地幔柱上涌引起的陆内裂谷拉张事件,即昆阳地幔柱。昆阳裂谷于 1450 Ma 前后在会理—东川一带发展成为局限小洋盆,并在中元古代末期关闭。

(4)昆阳裂谷的沉积岩系统主体为东川群、河口群和大红山群,可能延伸到了康滇北部的里伍岩群,其中的火山岩、凝灰岩锆石的 U-Pb 年龄以及地层的 Pb-Pb 年龄、古地磁等年龄数据集中在 1800 Ma ~ 1500 Ma,大致反映了昆阳期的沉积时限,与岩浆岩活动基本一致。

(5)昆阳裂谷也是一次重要的成矿事件,其形成的矿床可分为两个系列, I: 以因民组、落雪组等沉积岩中为主的层状铜矿(Sediment-hosted Stratiform Copper, 即 SSC 系列),主要有汤丹铜矿、落雪铜矿、狮子山铜矿、铜厂铜矿等,原生沉积型铜矿的成矿时代与赋矿地层基本同期,约为 1750 Ma; II: 与昆阳裂谷期岩浆热液活动紧密相关的铁氧化物铜金矿床(Iron—Oxide—Copper—Gold, 即 IOCG 系列),主要有拉拉、大红山、稀矿山、迤纳厂等铁铜矿床,研究程度较高的迤纳厂铁铜矿床的时代集中在 1700 Ma ~ 1450 Ma。

(6)昆阳期陆内裂谷拉张、沉积作用、岩浆活动以及强烈的成矿作用、成矿物质来源、动力学机制等可能均与昆阳地幔柱活动紧密相关。

致谢: 本文是在和项目团队成员一起填图、研究、讨论和系统总结的成果,其中还包括周邦国、罗茂金、马东、朱华平、侯林、沈占武、任光明等;在与香港大学周美夫教授、中国地质科学院地质研究所的耿元生研究员、四川省地质调查院阚泽忠教授级高级工程师、成都地质调查中心孙志明研究员、澳大利亚地质调查局 Roger G. Skirrow 教授、云南地质调查院的李锡康高级工程师,以及赵新福博士、陈伟博士、朱志敏博士、李超博士等请教、交流中受益匪浅,部分矿床(点)参考了四川省和云南省资源潜力评价报告资料,审稿专家提出了宝贵的修改意见,谨致谢忱!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

常向阳, 朱炳泉, 孙大中, 邱华宁, 邹日. 1997. 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. 地球化学, 26(2): 32 ~ 38.

- 陈国达, 郭令智, 张伯声, 朱夏, 马杏垣, 谢家荣. 1965. 中国大地构造问题. 北京: 科学出版社, 1~183.
- 陈好寿, 冉崇英. 1992. 康滇地轴铜矿床同位素地球化学. 北京: 地质出版社, 1~100.
- 陈和生. 1978. 对“东川运动”及东川地层的划分意见. 西南冶金地质, 3.
- 陈智良, 陈世瑜. 1987. 扬子地块西缘地质构造演化. 重庆: 重庆出版社, 1~172.
- 丛柏林, 赵太升, 张雯华, 张兆忠, 杨美娥. 1973. 西昌地区岩浆活动特征及其与构造地质的关系. 地质科学, 3: 69~106.
- 邓家藩. 1963. 云南前震旦昆阳群的初步研究. 中国地质学会云南省分会 1963 年首届学术年会论文集, 中国地质学会云南省分会编印.
- 杜利林, 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 周喜文, 任留东, 王彦斌, 杨铸生. 2007. 扬子地台西缘康定群的再认识: 来自地球化学和年代学证据. 地质学报, 81(11): 1562~1577.
- 杜利林, 杨崇辉, 耿元生, 王新社, 任留东, 周喜文. 2009. 扬子地台西南缘高家村岩体成因: 岩石学、地球化学和年代学证据. 岩石学报, 25(8): 1897~1908.
- 范效仁, 吴延之, 刘继顺, 李杏林. 1999. 滇中—川西昆阳群层序的古地磁学依据. 桂林工学院学报, 19(1): 19~27.
- 傅昭仁, 宋鸿林, 颜丹平. 1997. 扬子地台西缘江浪变质核杂岩结构及对成矿的控制. 地质学报, 71(2): 113~122.
- 耿元生, 柳永清, 高林志, 彭楠, 江小均. 2012. 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. 地质学报, 86(9): 1479~1490.
- 耿元生, 杨崇辉, 杜利林, 王新社, 任留东, 周喜文. 2007. 天宝山组形成的时代和形成环境——锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和地球化学证据. 地质论评, 53(4): 556~563.
- 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 杜利林, 任留东, 周喜文. 2008. 扬子地台西缘变质基底演化. 北京: 地质出版社, 1~215.
- 龚琳, 何毅特. 1996. 云南东川元古宙裂谷型铜矿. 北京: 冶金工业出版社, 1~252.
- 龚琳, 王承尧. 1981. 论“东川式铜矿”的成因. 地质科学, 7(3): 203~211.
- 龚琳. 1973. 东川铜矿的地质特征、矿床成因及找矿方向. 云南冶金地质前寒武纪铜铁矿床会议资料汇编.
- 关俊雷, 郑来林, 刘建辉, 孙志明, 程万华. 2011. 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. 地质学报, 85(4): 482~490.
- 郭阳, 王生伟, 孙晓明, 廖震文, 王子正, 周邦国, 杨斌. 2014a. 云南省武定县迤纳厂铁铜矿区元古代辉绿岩锆石的 U-Pb 年龄及其地质意义. 大地构造与成矿学, 38(1): 208~215.
- 郭阳, 王生伟, 孙晓明, 王子正, 杨斌, 廖震文, 周邦国, 蒋小芳, 侯林, 杨波. 2014b. 扬子地台西南缘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. 地质学报, 88(9): 1651~1655.
- 郝艳丽, 黄启帅, 张晓冉, 史任灯. 2011. 云南大理苦橄岩的 Re-Os 同位素特征: 对峨眉山大火成岩省成因的制约. 岩石学报, 27(10): 2937~2946.
- 何斌, 徐义刚, 肖龙, 王康明, 沙绍礼. 2003. 峨眉山大火成岩省的形成机制和空间展布: 来自沉积地层学的新证据. 地质学报, 77(2): 194~202.
- 侯林, 丁俊, 邓军, 廖震文, 彭惠娟. 2013. 云南武定迤纳厂铁铜矿岩浆角砾岩 La-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其意义. 地质通报, 32(4): 580~588.
- 侯增谦, 李红阳. 1998. 试论幔柱构造与成矿系统——以三江特提斯成矿域为例. 矿床地质, 17(2): 97~113.
- 侯增谦, 卢记仁, 李红阳, 王登红, 吕庆田. 1996a. 中国西南特提斯构造演化——幔柱构造控制. 地球学报, 17(4): 439~453.
- 侯增谦, 莫宣学, 朱勤文, 沈上越. 1996c. “三江”古特提斯地幔热柱——洋脊玄武岩证据. 地球学报, 17(4): 362~375.
- 侯增谦, 莫宣学, 朱勤文. 1996b. “三江”古特提斯地幔热柱——洋岛玄武岩证据. 地球学报, 17(4): 343~361.
- 胡国辉, 胡俊良, 陈伟, 赵太平. 2010. 华北克拉通南缘中条山—嵩山地区 1.78Ga 基性岩墙群的地球化学特征及构造环境. 岩石学报, 25(6): 1563~1576.
- 花友仁. 1959. 对东川铜矿地层划分和区域构造的探讨. 地质论评, 19(4): 155~162.
- 华仁民. 1990. 论昆阳拗拉谷. 地质学报, 4: 289~301.
- 黄汲清. 1954. 中国主要地质构造单位. 北京: 地质出版社, 1~197.
- 姜常义, 钱壮志, 姜寒冰, 唐冬梅, 张蓬勃, 朱士飞. 2007. 云南宾川—永胜—丽江地区低钛玄武岩和苦橄岩的岩石成因与源区性质. 岩石学报, 23(4): 777~792.
- 李春昱. 1963. “康滇地轴”地质构造发展历史初步研究. 地质学报, 43(3): 214~229.
- 李复汉, 覃嘉铭, 申玉连, 玉福星, 周国富, 潘杏南, 李兴振. 1988. 康滇地区的前震旦系. 重庆: 重庆出版社, 1~396.
- 李红阳, 侯增谦. 1998. 初论幔柱构造成矿体系. 矿床地质, 17(3): 247~255.
- 李红阳, 牛树银, 王立峰, 高永丰. 2002. 幔柱构造. 北京: 地震出版社, 1~224.
- 李红阳, 闫升好, 王金锁, 张建珍, 王国富. 1996a. 初论地幔热柱与成矿——以冀西北金银多金属成矿区为例. 矿床地质, 15(3): 249~256.
- 李红阳, 闫升好, 王金锁. 1996b. 试论冀西北金银多金属矿产富集区地幔热柱及其成矿制约. 地球学报, 17(4): 401~412.
- 李怀坤, 李惠民, 陆松年. 1995. 长城系团山子组火山岩颗粒锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地球化学, 24(1): 43~48.
- 李怀坤, 陆松年, 李惠民, 孙立新, 相振群, 耿建珍, 周红英. 2009. 侵入下马岭组的基性岩床的锆石和斜锆石 U-Pb 精确定年——对华北中元古界地层划分方案的制约. 地质通报, 28(10): 1396~1404.
- 李杰, 徐继峰, 何斌, 徐义刚, 董彦辉. 2008. 青藏高原东南缘木里地区二叠纪苦橄岩的 Os—Sr—Nd 同位素地球化学研究. 岩石学报, 24(2): 337~347.
- 李四光. 1962. 地质力学概论. 北京: 科学出版社, 1~228.
- 李献华, 李正祥, 周汉文, 刘颖, 梁细荣, 李武显. 2002a. 川西关刀山岩体的 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. 中国科学(D 辑), 32(增刊): 60~68.
- 李献华, 李正祥, 周汉文, 刘颖, 梁细荣. 2002b. 川西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. 地学前缘(中国地质大学, 北京), 9(4): 329~338.
- 李献华, 周汉文, 李正祥, 刘颖, Kinny P. 2001. 扬子地块西缘新元古代双峰式火山岩的锆石 U-Pb 年龄和岩石化学特征. 地球化学, 30(4): 315~322.
- 李献华, 周汉文, 李正祥, 刘颖. 2002c. 川西新元古代双峰式火山岩成因的微量元素和 Sm-Nd 同位素制约及其大地构造意义. 地质科学, 37(3): 264~276.
- 卢记仁. 1996. 峨眉地幔柱的动力学特征. 地球学报, 17(4): 424~438.
- 骆耀南. 1985. 中国攀枝花—西昌古裂谷带, 中国攀西裂谷论文集(1), 北京: 地质出版社, 241~257.

- 马杏垣, 谭应佳, 吴正文, 蔡学林. 1980. 中国大陆壳的早期构造演化. 国际交流地质学论文集(1), 地质出版社: 27~34.
- 莫宣学, 路凤香, 沈上越. 1993. 三江特提斯火山岩作用与成矿. 中华人民共和国地质矿产部地质专报(第20号), 北京: 地质出版社, 267.
- 莫宣学, 沈上越, 朱勤文, 须同瑞, 魏启荣, 谭劲, 张双全, 程惠兰. 1998. 三江中南段火山岩—蛇绿岩与成矿. 北京: 地质出版社, 1~128.
- 潘杏南, 赵济湘, 张选阳, 郑海翔, 杨暹和, 周国富, 陶大理. 1985. 康滇构造与裂谷作用. 重庆: 重庆出版社, 1~298.
- 彭澎, 翟明国, 张华锋, 倪志耀. 2004. 华北克拉通 1.8Ga 镁铁质岩墙群的地球化学特征及其地质意义: 以晋蒙交界地区为例. 岩石学报, 20(3): 439~456.
- 乔秀夫, 王雪英. 1984. 吕梁运动新厘定. 地质论评, 30(2): 177~178.
- 邱华宁, Wijbrans J R, 李献华, 朱炳全, 朱崇林, 曾保成. 2001. “东川式”层状铜矿⁴⁰Ar-³⁹Ar 成矿年龄测定. 矿物岩石地球化学通报, 20(4): 358~359.
- 邱华宁, Wijbrans J R, 李献华, 朱炳全, 朱崇林, 曾保成. 2002. 东川式层状铜矿⁴⁰Ar-³⁹Ar 成矿年龄研究: 华南地区晋宁期—澄江期成矿作用的新证据. 矿床地质, 21(2): 129~136.
- 邱华宁, 孙大中, 朱炳权, 常向阳. 1998. 东川汤丹铜矿床石英真空击碎及其粉末阶段加热⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄谱的含义. 地球化学, 27(4): 335~343.
- 邱华宁, 孙大中, 朱炳全, 常向阳. 1997. 东川式矿床同位素地球化学研究: II. Pb-Pb、⁴⁰Ar-³⁹Ar 法成矿年龄测定. 地球化学, 26(2): 39~45.
- 邱华宁, 朱炳全, 孙大中. 2000. 东川铜矿硅质角砾⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年探讨. 地球化学, 29(1): 21~27.
- 冉崇英. 1983. 东川式层状铜矿的成矿模式. 中国科学(B)辑, 3: 249~255.
- 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. 岩石学报, 19(1): 27~37.
- 宋谢炎, 王玉兰, 曹志民, 金景福, 李巨福, 温春齐. 1998. 峨眉山玄武岩、峨眉山裂运动与幔热柱. 地质地球化学, 1: 47~52.
- 孙师舜. 1975. 关于“落因角砾岩”成因问题初步探讨. 西南冶金地质.
- 孙志明, 尹福光, 关俊雷, 刘建辉, 李军敏, 耿全如, 王立全. 2009. 云南东川地区昆阳群黑山组凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地层学意义. 地质通报, 28(7): 896~900.
- 汤庆艳, 张铭杰, 李立武, 贺怀宇, 曹春辉. 2015. 峨眉山幔柱岩浆岩的起源及演化: 苦橄岩和玄武岩流体组成和 C—He—Ar 同位素的制约. 吉林大学学报(地球科学版), 45(增刊1): 1~3.
- 王登红. 1996. 地幔柱与热点的成矿作用. 地球学报, 17(4): 393~400.
- 王东兵, 孙志明, 尹福光, 王立全, 王保弟, 张万平. 2012. 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. 地层学杂志, 36(3): 630~635.
- 王东兵, 尹福光, 孙志明, 王立全, 王保弟, 廖世勇, 唐渊, 任光明. 2013. 扬子陆块西缘元古代基性侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素及其地质意义. 地质通报, 32(4): 617~630.
- 王可南. 1963. 云南前震旦纪昆阳群的初步研究. 中国地质学会云南省分会 1963 年首届学术年会论文选集, 中国地质学会云南省分会编印.
- 王生伟, 孙晓明, 蒋小芳, 屈文俊, 廖震文, 李超. 2012. 东川铜矿原生黄铜矿的 Re - Os 年龄及其成矿背景. 矿床地质, 31(增刊): 609~610.
- 王生伟, 蒋小芳, 廖震文, 于远山, 张海, 周邦国, 王子正, 李永灿, 杨波, 郭阳, 侯林, 陆生林. 2011. 扬子地台西缘基底成矿作用及找矿方向研究成果报告. 成都, 成都地质矿产研究所, 1~259.
- 王生伟, 廖震文, 孙晓明, 蒋小芳, 周邦国, 郭阳, 罗茂金, 朱华平, 马东. 2013a. 云南东川铜矿区元古代辉绿岩地球化学——Columbia 超级大陆裂解在扬子陆块西缘的响应. 地质学报, 87(12): 1834~1852.
- 王生伟, 廖震文, 孙晓明, 周邦国, 郭阳, 蒋小芳, 朱华平, 孙志明, 罗茂金, 马东, 沈占武, 张海. 2013c. 会东菜园子花岗岩的年龄、地球化学—扬子地台西缘格林威尔造山运动的机制探讨. 地质学报, 87(1): 55~70.
- 王生伟, 孙晓明, 廖震文, 屈文俊, 杨波, 蒋小芳, 李超, 李永灿. 2013b. 会理菜园子镍矿床方辉橄岩岩铂族元素、Re-Os 同位素及其地质意义. 矿床地质, 32(3): 515~532.
- 王子正, 郭阳, 杨斌, 王生伟, 孙晓明, 侯林, 周邦国, 廖震文. 2013. 扬子克拉通西缘 1.73Ga 海攻 A 型花岗岩岩体的发现及其构造意义. 地质学报, 87(7): 931~942.
- 吴建民, 刘肇昌, 黎功举, 黄永平, 李凡友, 钟康惠. 1998. 扬子地块西缘铜矿床地质. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~270.
- 吴懋德, 段锦荪, 宋学良. 1990. 云南昆阳群地质. 昆明: 云南科技出版社, 1~256.
- 武铁山, 徐朝雷. 1982. 吕梁运动讨论. 地质论评, 28(3): 240~244.
- 肖龙, 徐义刚, 何斌. 2003a. 峨眉地幔柱—岩石圈的相互作用: 来自低钛和高钛玄武岩的 Sr—Nd 和 O 同位素证据. 高校地质学报, 9(2): 207~217.
- 肖龙, 徐义刚, 梅厚均, 何斌. 2003b. 云南金平晚二叠纪玄武岩特征及其与峨眉地幔柱关系——地球化学证据. 岩石学报, 19(1): 38~48.
- 肖龙, 徐义刚, 梅厚均, 于荣坪. 2003c. 云南保山卧牛寺玄武岩成因: 地幔柱活动的产物?. 岩石矿物学杂志, 22(1): 20~28.
- 谢振西. 1965. 云南东川前震旦系层序及几个地质问题. 地质部西南地质科学研究所专题研究报告.
- 徐义刚, 梅厚均, 许继峰, 黄小龙, 王岳军, 钟孙霖. 2003. 峨眉山大火成岩省中两类分异趋势及其成因. 科学通报, 48: 383~387.
- 徐义刚, 钟孙霖. 2001. 峨眉山大火成岩省: 地幔柱活动的证据及其熔融条件. 地球化学, 30(1): 1~9.
- 徐义刚. 2002. 地幔柱构造、大火成岩省及其地质效应. 地学前缘, 9(4): 341~353.
- 杨红, 刘福来, 杜利林, 刘平华, 王舫. 2012. 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. 岩石学报, 28(9): 2994~3014.
- 杨耀民, 涂光炽, 胡瑞忠, 石学法. 2005. 武定迳纳厂 Fe—Cu—REE 矿床 Sm-Nd 同位素年代学及其地质意义. 科学通报, 50(12): 1253~1258.
- 叶霖, 刘玉平, 李朝阳, 刘家军. 2004. 东川桃园式铜矿 Ar-Ar 同位素年龄及意义. 矿物岩石, 24(2): 57~60.
- 叶现韬, 朱维光, 钟宏, 何德锋, 任涛, 柏中杰, 范宏鹏, 胡文俊. 2013. 云南无定迳纳厂 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. 岩石学报, 29(4): 1167~1186.
- 尹福光, 孙志明, 张璋. 2011. 会理—东川地区中元古代地层—构造格架. 地质论评, 57(6): 770~778.
- 袁海华, 张树发, 张平. 1986. 康滇地轴结晶基底的年代归属. 成都地质学院学报, 13(4): 64~70.

- 翟明国, 卞爱国. 2000. 华北克拉通新太古代末超大陆拼合及古元古代末—中元古代裂解. 中国科学(D辑), 30(增刊): 129~137.
- 张传恒, 高林志, 武振杰, 史晓颖, 闫全人, 李大建. 2007. 滇中昆阳群凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄: 华南格林威尔造山的证据. 科学通报, 52(7): 818~824.
- 张伟察. 1973. 关于“东川运动”的问题. 云南冶金地质前寒武纪铜铁矿床会议资料汇编. 张文佑. 1958. 中国大地构造纲要. 北京: 科学出版社, 1~320.
- 张文佑. 1984. 断块构造导论. 北京: 石油工业出版社, 1~385.
- 张招崇, John J M, 王福生, 赵莉, 艾羽, 杨铁铮. 2006. 峨眉山大火成岩省西部苦橄岩及其共生玄武岩的地球化学: 地幔柱头部熔融的证据. 岩石学报, 22(6): 1538~1552.
- 张招崇, 郝艳丽, 王福生. 2003. 大火成岩省中苦橄岩的研究意义. 地质前缘(中国地质大学, 北京), 10(3): 105~114.
- 张招崇, 王福生, 郝艳丽, John J M. 2004. 峨眉山大火成岩省中苦橄岩与其共生岩石的地球化学特征及其对源区的约束. 地质学报, 78(2): 171~180.
- 张招崇, 王福生, 屈文俊, 郝艳丽, John J M. 2005. 峨眉山大火成岩省中高 Os 苦橄岩的发现及地质意义. 地质学报, 79(4): 515~521.
- 赵太平, 陈福坤, 翟明国, 夏斌. 2004a. 河北大庙斜长岩杂岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 岩石学报, 20(3): 685~690.
- 赵太平, 翟明国, 夏斌, 李惠民, 张毅星, 万渝生. 2004b. 熊耳群火山岩锆石 SHRIMP 年代学研究: 对华北克拉通盖层发育初始时间的制约. 科学通报, 49(22): 2342~2349.
- 周邦国, 王生伟, 孙晓明, 廖震文, 郭阳, 蒋小芳, 朱华平, 罗茂金, 刘才泽, 马东, 沈战武, 张海. 2012. 云南东川望厂组熔结凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其意义. 地质论评, 58(2): 359~368.
- 周家云, 毛景文, 刘飞燕, 谭洪旗, 沈冰, 朱志敏, 陈家彪, 罗丽萍, 周雄, 王越. 2011. 扬子地台西缘河口群钠长岩锆石 SHRIMP 年龄及岩石地球化学特征. 矿物岩石, 31(3): 66~73.
- 周名魁, 刘俨然. 1988. 西昌—滇中地区地质构造特征及地史演化. 重庆: 重庆出版社, 1~198.
- 朱华平, 范文玉, 周邦国, 王生伟, 罗茂金, 廖震文, 郭阳. 2011. 论东川地区前震旦系地层序: 来自锆石 SHRIMP 及 La-ICP-MS 测年的证据. 高校地质学报, 17(3): 1~12.
- 朱维光, 邓海琳, 刘秉光, 李朝阳, 覃喆, 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⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代学制约. 科学通报, 49(10): 985~992.
- Barley M E and Groves D I. 1992. Supercontinent cycles and distribution of metal deposits through time. *Geology*, 20: 291~294.
- Chang Xiangyang, Zhu Bingquan, Sun Dazhong, Qiu Huaning, Zou Ri. 1997&. Isotope geochemistry study of Dongchuan copper deposits in middle Yunnan province, SW China: I. stratigraphic chronology and application of geochemical exploration by Lead isotopes. *Geochimica*, 26(2): 32~38.
- Chen Guoda, Guo Lingzhi, Zhang Bosheng, Zhuxia, Ma Xingyuan, Xie Jiarong. 1965&. Tectonic problems in China. Beijing, Geology Publishing House, 1~183.
- Chen Haoshou, Ran Chongying. 1992&. Isotopic geochemistry of copper deposits in Kangdian earth's axis. Beijing, Geology Publishing House, 1~100.
- Chen W T, Zhou Meifu, Zhao Xinfu. 2013. Late paleoproterozoic sedimentary and mafic rocks in the Hekou area, SW China: Implication for the reconstruction of the Yangtze block in Columbia. *Precambrian Research*, 231: 61~77.
- Chen W T, Zhou Meifu. 2012. Paragenesis, stable Isotopes, and molybdenite Re-Os isotope age of the Lala iron—copper deposit, Southwest China. *Economic Geology*, 107: 459~480.
- Chen Zhiliang, Chen Shiyu. 1987&. On The tectonic evolution of the west margin of the Yangtze block. Chongqing, Chongqing Publishing House, 1~172.
- Chung S L, Jahn B M. 1995. Plume—lithospher interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian—Triassic boundary. *Geology*, 23: 889~892.
- Coffin M F and Eldholm O. 1994. Large igneous provinces: crustal structure, dimensions and external consequences. *Rev. Geophys.*, 32: 1~36.
- Condie K C. 2001. Mantle plume and their record in earth history. Cambridge University Press, 1~306.
- Cong Bolin, Zhang Taisheng, Zhang Wenhua, Zhang Zhaozong, Yang Meie. 1973&. Characteristics of magmatic activity in the Sichuan area and its bearing on the tectonic geological development. *Scientia Geologica Sinica*, 3: 69~106.
- Courtillot V, Jaupart C, Manighetti I, Tapponnier P, Besse J. 1999. On causal links between flood basalts and continental breakup. *Earth and planetary Science Letters*, 166: 177~195.
- Du Lilin, Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Wang Xinshe, Zhou Xiwen, Ren Liudong, Wang Yanbin, Yang Zhusheng. 2007&. New understanding on Kangding Group on the western margin of Yangtze block: Evidence from geochemistry and chronology. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1562~1577.
- Du Lilin, Yang Chonghui, Geng Yuansheng, Wang Xinshe, Ren Liudong, Zhou Xiwen. 2009&. Petrogenesis of the Gaojiacun mafic—ultramafic pluton at the southwestern margin of Yangtze block: Evidence from petrology, geochemistry and geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1897~1908.
- Fan Xiaoren, Wu Yanzhi, Liu Jishun, Li Xinglin. 1999&. The paleomagnetic evidence of the Kunyang group in central Yunnan—western Sichuan. *Journal of Guilin Institute Technology*, 19(1): 19~27.
- Fu Zhaoren, Song Honglin, Yan Danping. 1997&. The structure of the Jianglang metamorphic core complex in the western margin of the Yangtze platform and its control on metallization. *Acta Geologica Sinica*, 71(2): 113~122.
- Geng Yuansheng, Liu Yongqing, Gao Linzhi, Peng Nan, Jiang Xiaojun. 2012&. Geochronology of the Mesoproterozoic Toangan formation in Southwestern margin of Yangtze craton: New evidence from Zircon LA-ICP-MS U-Pb ages. *Acta Geologica Sinica*, 86(9): 1479~1490.
- Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Du Lilin, Wang Xinshe, Ren Liudong, Zhou Xiwen. 2007&. Chronology and tectonic environment of the Tianbaoshan formation: New evidence from zircon SHRIMP U-Pb age and geochemistry. *Geological Review*, 53(4): 556~563.
- Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Wang Xinshe, Du Lilin, Ren Liudong, Zhou Xiwen. 2008&. The metamorphic basement evolution in the southwestern Yangtze platform. Beijing, Geology Publishing House, 1~215.
- Gong Lin, He Yite. 1996&. The Proterozoic rift type copper in Yunnan province. Beijing, Press of Metallurgy Industry, 1~252.
- Gong Lin, Wang Chengyao. 1981&. On the origin of "Dongchuan type" copper deposit. *Scientia Geologica Sinica*, 7(3): 203~211.
- Greentree M R, Li Zhengxiang. 2008. The oldest known rocks in south-

- western China: SHRIMP U-Pb magmatic crystallisation age and detrital provenance analysis of the Paleoproterozoic Dahongshan Group. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33(5~6): 289~302.
- Guan Junlei, Zhen Lailin, Liu Jianhui, Sun Zhiming, Cheng Wanhua. 2011&. Zircon SHRIMP U-Pb dating of diabase from Hekou, SiChuan province, China and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 85(4): 482~490.
- Guo Yang, Wang Shengwei, Sun Xiaoming, Liao Zhenwen, Wang Zizheng, Zhou Bangguo, Yang Bin. 2014a&. Zircon U-Pb age of the Paleoproterozoic diabase from the Yinachang iron—copper deposit, Yunnan province, and its geological implication. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(1): 208~215.
- Guo Yang, Wang Shengwei, Sun Xiaoming, Wang Zizheng, Yang Bin, Liao Zhenwen, Zhou Bangguo, Jiang Xiaofang, Hou Lin, Yang Bo. 2014b&. The Paleoproterozoic breakup event in the southwest Yangtze block; evidence from U-Pb zircon age and geochemistry of diabase in Wuding, Yunnan province, SW China. *Acta Geologica Sinica*, 88(9): 1651~1655.
- Hao Yanli, Huang Qishuai, Zhang Xiaoran, Shi Rendeng. 2011&. Re-Os isotopes of Dali picrite (Yunan); new constraints on the formation of Emeishan large igneous province. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10): 2937~2946.
- Hauri E H. 1996. Major-element variability in the Hawaiian mantle plume. *Nature*, 382(1): 415~419.
- He Bin, Xu Yigang, Xiao Long, Wang Kangming, Sha Shaoli. 2003&. Generation and spatial distribution of the Emeishan large igneous province: new evidence from stratigraphic records. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 194~202.
- Hill R I. 1991. Starting plumes and continental break-up. *Earth and Planetary Science Letters*, 104: 298~416.
- Hill R I. 1992. Mantle plume and continental tectonics. *Science*, 256: 186~193.
- Hill R I. 1993. Mantle plume and continental tectonics. *Lithos*, 30(3/4): 193~206.
- Hou Lin, Ding Jun, Deng Jun, Liao Zhenwen, Peng Huijuan. 2013&. 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. *Geological Bulletin of China*, 32(4): 580~588.
- Hou Lin, Ding Jun, Deng Jun, Peng Huijuan. 2015. Geology, geochronology, and geochemistry of the Yinachang Fe—Cu—Au—REE deposit of the Kangdian region of SW China: Evidence for a Paleo-Mesoproterozoic tectonic—magmatic and associated IOCG systems in the western Yangtze block. *Journal of Asian Earth Sciences*, 103: 129~149.
- Hou Zengqian, Li Hongyang. 1998&. A tentative discussion on the mantle plume tectonics and metallogenic system as exemplified by the Sanjiang Tethyan metallogenic domain. *Mineral Deposits*, 17(2): 97~113.
- Hou Zengqian, Lu Jiren, Li Hongyang, Wang Denghong, Lv Qingtian. 1996a&. Tectonic evolution of the Tethys in southwestern China: is controlled by plume tectonics. *Acta Geoscientia Sinica*, 17(4): 439~453.
- Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Zhu Qinwen, Shen Shangyue. 1996b&. Mantle plume in the Sanjiang paleo-Tethyan region, China; evidence from ocean— island basalts. *Acta Geoscientia Sinica*, 17(4): 343~361.
- Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Zhu qinwen, Shen Shangyue. 1996c&. Mantle plume in the Sanjiang Paleo-Tethyan lithosphere: evidence from mid-ocean ridge basalts. *Acta Geoscientia Sinica*, 17(4): 362~375.
- Hu Aiqin, Zhu Bingquan, Mao Cunxiao, Zhu Naijuan, Huang Rongsheng. 1991. Geochronology of the Dahongshan group. *Chinese Journal of Geochemistry*, 10(3): 195~203.
- Hu Guohui, Hu Junliang, Chen Wei, Zhao Taiping. 2010&. Geochemistry and tectonic setting of the 1.78 Ga mafic dyke swarms in the Mt. Zhongtiao and Mt. Song areas, the southern margin of the north China craton. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1563~1576.
- Hua Renmin. 1990&. On the Kunyang aulacogen *Acta Geologica Sinica*, 4: 289~301.
- Hua Youren. 1959&. Discussion on stratigraphic division and regional tectonics at Dongchuan copper deposit. *Geological Review*, 19(4): 155~162.
- Huang Chiching. 1954&. The main geological and tectonic units in China. Beijing, Geology Publishing House, 1~197.
- Huang Xiaowen, Zhao Xinfu, Qi Liang, Zhou Meifu. 2013a. Re Os and S isotopic constraints on the origins of two mineralization events at the Tangdan sedimentary rock hosted stratiform Cu deposit, SW China. *Chemical Geology*, 347: 9~19.
- Jiang Changyi, Qian Zhuangzhi, Jiang Hanbing, Tang Dongmei, Zhang Pengbo, Zhu Shifei. 2007&. Petrogenesis and source characteristics of low-Ti basalts and picrites at Binchuan—Yongsheng—Lijiang region, Yunnan province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(4): 777~792.
- Kerrick R. 1992. Continents ring the changes. *Nature*, 358: 16~17.
- Lee Chunyu. 1963&. A preliminary study of the tectonic development of the "Kangdian Axis". *Acta Geologica Sinica*, 43(3): 214~229.
- Lee D C, Halliday A N, Fitton J G, Poli G. 1994. Isotopic variations with distance and time in the volcanic islands of the Cameroon line; evidence for a mantle plume origin. *Earth and Planetary Science Letters*, 123: 119~138.
- Li Fuhuan, Qin Jiaming, Shen Yulian, Wang Fuxing, Zhou Guofu, Pan Xingnan, Li Xingzhen. 1988&. The Presinian in the Kangdian area. Chongqing, Chongqing Publishing House, 1~396.
- Li Hongyang, Hou Zengqian. 1998&. A preliminary discussion on the ore-forming system of plume tectonics. *Mineral Deposits*, 17(3): 247~255.
- Li Hongyang, Niu Shuyin, Wang Lifeng, Gao Yongfeng. 2002&. Mantle plume branch structure. Beijing, Seismological Press, 1~224.
- Li Hongyang, Yan Shenghao, Wang Jinsuo, Niu Shuyin, Zhang Jianzhen, Yang Qirong. 1996b&. Mantle plume and metallization-controlling in northwest hebei Au—Ag—polymetallic enriched region. *Acta Geoscientia Sinica*, 17(4): 401~412.
- Li Hongyang, Yan Shenghao, Wang Jinsuo, Zhang Jianzhen, Wang Guofu. 1996a&. A preliminary discussion on mantle plume and metallogenesis of Au—Ag—multimetal mineralization area in northwest Hebei. *Mineral Deposits*, 15(3): 249~256.
- Li Huaikun, Li Huimin, Lu Songnian. 1995&. Grain zircon U-Pb ages for volcanic rocks from Tuanshanzi formation of Changcheng system and their geological implication. *Geochimica*, 24(1): 43~48.
- Li Huaikun, Lu Songnian, Li Huimin, Sun Lixin, Xiang Zhenqun, Geng Jianzhen, Zhou Hongying. 2009&. Zircon and beddeleyite U-Pb precision dating of basic rock sills intruding Xiamaling formation, north China. *Geological Bulletin of China*, 28(10): 1396~1404.
- Li Jie, Xu Jifeng, He Bin, Xu Yigang, Dong Yanhui. 2004&. Sr—Nd—Os isotope geochemistry of Permian picrites from Muli area,

- southeast Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 337 ~ 347.
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Zhou Hanwen, Liu Ying, Liang Xirong. 2002b&. U-Pb zircon geochronological, geochemical and Nd isotopic study of Neoproterozoic basaltic magmatism in western Sichuan: Petrogenesis and Geodynamic implications. *Earth Science Frontiers (China University of Geoscience, Beijing)*, 9(4): 329 ~ 338.
- Li Xianhua, Zhou Hanwen, Li Zhengxiang, Liu Ying, Kinny P. 2001&. Zircon U-Pb age and petrochemical characteristics of the Neoproterozoic bimodal volcanics from western Yangtze block. *Geochimica*, 30(4): 315 ~ 322.
- Li Xianhua, Zhou Hanwen, Li Zhengxiang, Liu Ying. 2002c&. Petrogenesis of Neoproterozoic bimodal volcanics in western Sichuan and its tectonic implications: Geochemical and Sm-Nd isotopic constraints. *Chinese Journal of Geology*, 37(3): 264 ~ 276.
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Zhou Hanwen, Liu Ying, Kenny P D. 2002. 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. *Precambrian Research*, 113: 135 ~ 154.
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Zhou Hanwen, Liu Ying, Liang Xirong, Li Wuxian. 2003. SHRIMP U-Pb zircon age, geochemistry and Nd isotope of the Guandaoshan pluton in SW Sichuan: Petrogenesis and tectonic significance. *Science in China(Series D)*: 73 ~ 83.
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, Wang J, Zhang S, Zhou H. 2003. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. *Precambrian Research*, 122: 85 ~ 109.
- Li Z X, Li X H, Kinney P D, Wang J. 1999. The breakup of Rodinia: did it start with a mantle plume beneath South China?. *Earth and Planetary Science Letters*, 173: 171 ~ 181.
- Lu Jiren. 1996&. Dynamical characteristics of the Emei mantle plume, *Acta Geoscientia Sinica*, 17(4): 424 ~ 438.
- Lu Songnian, Yang Chunliang, Li Huaikun, Li Huimin. 2002. A group of rifting events in the terminal Paleoproterozoic in the North China Craton. *Gondwana Research*, 5: 123 ~ 131.
- Maruyama. 1994. Plume tectonic. *Jour. Geol Soc Japan*. 100: 24 ~ 49.
- Mitchell A H G and Garson M S. 1981. Mineral deposits and global tectonic settings. Academic Press, 1 ~ 108.
- Morgan W J. 1971. Convection plumes in the lower mantle. *Nature*, 230: 42 ~ 43.
- Morgan W J. 1983. Hotpost tracks and the early rifting of the Atlantic. *Tectonophysics*, 94: 123 ~ 139.
- Pang Xingnan, Zhao Jixiang, Zhuang Xuanyang, Zhen Haixiang, Yang Xianhe, Zhou Guofu, Tao Dali. 1985&. Tectonics and rifting in kangdian region. Chongqing, Chongqing Publishing House, 1 ~ 298.
- Peng Peng, Zhai Mingguo, Zhang Huafeng, Zhao Taiping Ni Zhiyao. 2004&. Geochemistry and geological significance of the 1.8 Ga mafic dyke swarms in the North China Craton: an example from the juncture of Shanxi, Hebei and Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 439 ~ 456.
- Qiao Xiufu, Wang Xueying. 1984&. New stipulation concerning the Luliang orogeny. *Geological Review*, 30(2): 177 ~ 178.
- Qiu Huaning, Sun Dazhong, Zhu Bingquan, Chang Xiangyang. 1997&. Isotope geochemistry study of Dongchuan copper deposits in middle Yunan province, SW China: II. dating the ages of mineralization by Pb-Pb and $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ methods. *Geochimica*, 26(2): 39 ~ 45.
- Qiu Huaning, Sun Dazhong, Zhu Bingquan, Chang Xiangyang. 1998&. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating for a quartz sample from the Tangdan copper deposit, Dongchuan, Yunnan, by crushing in vacuum and by incremental heating on its powder. *Geochimica*, 27(4): 335 ~ 343.
- Qiu Huaning, Wijbrans J R, Li Xianhua, Zhu Bingquan, Zhu Chonglin, Zeng Baocheng. 2001&. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating for the mineralization ages of the Dongchuan-type layered copper deposits, Yunnan. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(4): 358 ~ 359.
- Qiu Huaning, Wijbrans J R, Li Xianhua, Zhu Bingquan, Zhu Chonglin, Zeng Baocheng. 2002&. New $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ evidence for ore-forming process during Jinning—Chengjiang period in Dongchuan type copper deposits, Yunnan. *Mineral Deposits*, 21(2): 129 ~ 136.
- Qiu Huaning, Zhu Bingquan, Sun Dazhong. 2000&. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating techniques for a hydrothermal siliceous breccia sample from the Luoxue mine, Dongchuan copper deposits, Yunnan, by crushing in cacuum then by stepped heating on its powders. *Geochimica*, 29(1): 21 ~ 27.
- Rogers J J W, Santosh M. 2002. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic Supercontinent. *Gondwana Research*, 2002, 5(1): 5 ~ 22.
- Sawkins F J. 1976. Metal deposits related to introcontinental hotpot and rifting enviroments. *Journal of Geology*, 84(6): 653 ~ 671.
- Shen Weizhou, Gao Jianfeng, Xu Shijin, Tang Guoquan, Yang Zhusheng, Yang Qiwen. 2003&. Fromat on age and geochemical characteristics of the Lengshuiqing body, Yanbian, Sichuan province. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 27 ~ 37.
- Song Xieyan, Wang Yulan, Cao Zhimin, Jin Jingfu, Li Jufu, Wen Chunqi. 1998&. Emeishan basalts, Emei tafrogeny and mantle plume. *Geology—Geochemistry*, 1: 47 ~ 52.
- Stein M and Hofmann A W. 1992. Fossil plume head beneath the Arabian lithosphere?. *Earth and planetary Science Letters*, 114(1): 193 ~ 210.
- Stern R A, Syme E C, Lueas S B. 1995. Geochemistry of 1.9 Ga MORB- and OIB-like basalts from the Amisk collage, Flin Flon belt, Canada: Evidence for an intr-oceanic origin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(15): 3131 ~ 3154.
- Storey B C. 1995. The role of mantle plumes in continental breakup: case histories form Gonwana. *Nature*, 377: 301 ~ 308.
- Storey M, Saunders A, Tarney J, Leat P, Thirlwall M F. 1988. Geochemical evidence for plume—mantle interactions beneath Kerguelen and Heardislands, Indian Ocean. *Nature*, 336: 371 ~ 374.
- Sun Zhiming, Yin Fuguang, Guan Junlei, Liu Jianhui, Li Junmin, Geng Quanru, Wang Liqun. 2009&. SHRIMP U-Pb dating and its stratigraphic significance of tuff zircons from Heishan formation of Kunyang group, Dongchuan area, Yunnan province, China. *Geological Bulletin of China*, 28(7): 896 ~ 900.
- Wang Denghong. 1996&. Mineralization related to mantle plume and hotspot. *Acta Geoscientia Sinica*, 17(4): 393 ~ 400.
- Wang Dongbing, Sun Zhiming, Yin Fuguang, Wang Liqun, Wang Baodi, Zhang Wanping. 2012&. 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. *Journal of Stratigraphy*, 36(3): 630 ~ 635.
- Wang Dongbing, Yin Fuguang, Sun Zhiming, Wang Liqun, Wang Baodi, Liao Shiyong, Tang Yuan, Ren Guangming. 2013&. Zircon

- U-Pb age and Hf isotope of Paleoproterozoic mafic intrusion on the western margin of the Yangtze block and their implication. *Geological Bulletin of China*, 32(4): 617~630.
- Wang Kenan. 1984. Geochemical characteristics of sedimentation and metamorphism of the Dongchuan copper deposit, Yunnan province, China. *Precambrian Research*, 25: 135~136.
- Wang Shengwei, Jiang Xiaofang, Liao Zhenwen, Yu Yuanshan, Zhang Hai, Zhou Bangguo, Wang Zizheng, Li Yongcan, Yang Bo, Guo Yang, Hou Lin, Lu Shenglin. 2011. Research report on metallogenesis and prospecting direction of basement in the southwest of Yangtze platform. Chengdu, Chengdu Institute of Mineral Resources. 1~259.
- Wang Shengwei, Liao Zhenwen, Sun Xiaoming, Jiang Xiaofang, Zhou Bangguo, Guo Yang, Luo Maojin, Zhu Huaping, Ma Dong. 2013a. Geochemistry of Paleoproterozoic diabbases in the Dongchuan copper deposit, Yunnan, SW China: Response to breakup of the Columbia supercontinent in the Southwestern Margin of Yangtze block. *Acta Geologica Sinica*, 87(12): 1834~1852.
- Wang Shengwei, Liao Zhenwen, Sun Xiaoming, Zhou Bangguo, Guo Yang, Jiang Xiaofang, Zhu Huaping, Sun Zhiming, Luo Maojin, Ma Dong, Shen Zhanwu, Zhang Hai. 2013c. Age and Geochemistry of the Caiyuanzi granite in Sichuan, SW China: Mechanism of the Grenvillian orogenic movement in the western Margin of Yangtze block. *Acta Geologica Sinica*, 87(1): 55~70.
- Wang Shengwei, Sun Xiaoming, Jiang Xiaofang, Qu Wenjun, Liao Zhenwen, Li Chao. 2012. Re-Os isotopic age and mineralization setting of protosomatic chalcopyrites from Dongchuan copper deposit. *Mineral Deposits*, 31(Supp.): 609~610.
- Wang Shengwei, Sun Xiaoming, Liao Zhenwen, Qu Wenjun, Yang Bo, Jiang Xiaofang, Li Chao, Li Yongcan. 2013b. Platinum group elements and Re-Os isotope geochemistry of harzburgites from Caiziyan nickel deposit in Huili county of Sichuan province and its geological significance. *Mineral Deposits*, 32(3): 515~532.
- Wang Zizheng, Guo Yang, Yang Bin, Wang Shengwei, Sun Xiaoming, Hou Lin, Zhou Bangguo, Liao Zhenwen. 2013. Discovery of the 1.73 Ga Haizi anorogenic type granite in the western margin of Yangtze craton, and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 87(7): 931~942.
- Weis D, Frey F A, Leyrit H, Gautier I. 1993. Kerguelen archipelago revisited: Implication and isotopic study of the southeast province lavas. *Earth and Planetary Science Letters*, 118: 101~119.
- White R S and Mckenzie D P. 1989. Magmatism at rift zones: the generation of volcanic continental margins and flood basalts. *Jour. Geophy. Res.*, 94(B6): 7685~7729.
- Wu Jianmin, Liu Zhaochang, Li Gongju, Huang Yongping, Li Fanyou, Zhong Kanghui. 1998. Copper deposits geology in the southwest of Yangtze block. Wuhan, China University of Geosciences Press, 1~270.
- Wu Maode, Duan Jinsun, Song Xueliang. 1990. Kunyang group geology in Yunnan province. Kunming, Yunnan Science and Technology Publishing Press, 1~256.
- Wu Tieshan, Xu Chaolei. 1982. On the Luliang movement. *Geological Review*, 28(3): 240~244.
- Xiao Long, Xu Yigang, Mei Houjun, He Bin. 2003b. Late Permian flood basalts at Jinping area and its relation to Emei mantle plume: Geochemical evidence. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 38~48.
- Xiao Long, Xu Yigang, He Bin. 2003a. Emei mantle plume—subcontinental lithosphere interaction: Sr—Nd and O isotopic evidences from low-Ti and High-Ti basalts. *Geological Journal of China Universities*, 9(2): 207~217.
- Xiao Long, Xu Yigang, Mei Houjun, Yu Rongping. 2003c. Petrogenesis of the basalts of Woniusi formation at Baoshan area, Yunnan: is it of mantle plume origin?. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(1): 20~28.
- Xiao Long, Xu Y G, Mei H J, Zheng Y F, He B, Franco Pirajno. 2004. Distinct mantle sources of low-Ti and high-Ti basalts from the western Emeishan large igneous province, SW China: implications for plume—lithosphere interaction. *Earth and Planetary Science Letters*, 228: 525~546.
- Xu Yigang, Chung Sunlin. 2001. The Emeishan large igneous Province: Evidence for mantle plume and melting conditions. *Geochimica*, 30(1): 1~9.
- Xu Yigang, Chung Sunlin, Jahn B M, Wu Genyao. 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian—Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China: Lithos, 58: 145~168.
- Xu Yigang. 2002. Mantle plumes, large igneous provinces and their geologic consequences. *Earth Science Frontiers(China University of Geosciences, Beijing)*, 9(4): 341~353.
- Yang Hong, Liu Fulai, Du Lilin, Liu Pinghua, Wang Fang. 2012. Zircon U-Pb dating for metavolcanites in the Laochanghe formation of the Dahongshan group in southwestern Yangtze block, and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2994~3014.
- Ye Lin, Liu Yeping, Li Chaoyang, Liu Jiajun. 2004. The Ar-Ar age in Dongchuan Taoyuan type copper deposit, Yunnan province and its significance. *J Mineral Petrol*, 24(2): 57~60.
- Ye Xiantao, Zhu Weiguang, Zhong Hong, He Defeng, Ren Tao, Bai Zhongjie, Fan Hongpeng, Hu Wenjun. 2013. Zircon U-Pb and chalcopyrite Re-Os geochronology, REE geochemistry of the Yinachang Fe—Cu—REE deposit in Yunnan province and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 50(12): 1253~1258.
- Yin Fuguang, Sun Zhiming, Zhang Zhang. 2011. Mesoproterozoic stratigraphic—structure framework in Huili—Dongchuan area. *Geological Review*, 57(6): 770~778.
- Yuan Haihua, Zhang Shufa, Zhang Ping. 1986. Geochronological belonging of the crystalline basement of the Kang-Dian geoxis. *Journal of Chengdu College of Geology*, 13(4): 64~70.
- Zhai Mingguo, Bian Aiguo, Zhao Taiping. 2000. The amalgamation of the supercontinent of the North China craton at the end of Neo-Archaean and its breakup during late Palaeoproterozoic and Mesoproterozoic. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 43(Supp.): 219~232.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Santosh M. 2012. Mid-Mesoproterozoic bimodal magmatic rocks in the northern North China Craton: Implications for magmatism related to breakup of the Columbia supercontinent. *Precambrian Research*, 222~223: 339~367.
- Zhang Zhaochong, Hao Yanli, Wang Fusheng. 2003. Picrites in large igneous provinces and their implications. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 10(3): 105~114.
- Zhang Zhaochong, John J M, Wang Fusheng, Zhao Li, Ai Yu, Yang Tiezheng. 2006. Geochemistry of picritic and associated basalt flows of the western Emeishan flood basalt province, China: Evidence for a plume-head origin. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1538~1552.

- Zhang Zhaochong, Wang Fusheng, Hao Yanli, John J M. 2004&. Geochemistry of the picrites and associated basalts from the Emeishan large igneous basalt province and constraints on their source region. *Acta Geologica Sinica*, 78(2): 171~180.
- Zhang Zhaochong, Wang Fusheng, Qu Wenjun, Hao Yanli, John J M. 2005&. Discovery of high-Os picrites in the large Emeishan igneous province and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 79(4): 515~521.
- Zhang Zhaochong, Wang Fusheng. 2002. Geochemistry of two types of basalts in the Emeishan basaltic province: evidence for mantle plume—lithosphere interaction. *Acta Geologica Sinica*, 76(2): 229~238.
- Zhao Guochun, Cawood P A, Wilde S A, Sun Min, Lu Liangzhao. 2000. Metamorphism of basement rocks in the Central Zone of the North China Craton: implications for Paleoproterozoic tectonic evolution. *Precambrian Research*, 103: 55~88.
- Zhao Guochun, Cawood P A, Wilde S A, Sun Min. 2002. Review of global 2.1~1.8 Ga orogens: Implications for a pre-Rodinia supercontinent. *Earth-Science Reviews*, 59: 125~162.
- Zhao Taiping, Chen Fukun, Zhai Mingguo, Xia Bin. 2004a&. Single zircon U-Pb ages and their geological significance of the Damiao anorthosite complex, Hebei province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 685~690.
- Zhao Taiping, Chen Wei, Zhou Meifu. 2009. Geochemical and Nd-Hf isotopic constraints on the origin of the ~1.74-Ga Damiao anorthosite complex, North China Craton. *Lithos*, 113: 673~690.
- Zhao Taiping, Zhou Meifu, Zhai Mingguo, Xia Bin. 2002. Paleoproterozoic rift-related volcanism of the Xiong'er Group, North China Craton: Implication for the breakup of Columbia. *International Geology Review*, 44: 336~351.
- Zhao Xinfu, Zhou Meifu, Li Jianwei, Selby D, Li Xianghui, Qi Liang. 2013. Sulfide Re-Os and Rb-Sr isotope dating of the Kangdian IOCG metallogenic province, southwest China: Implications for regional metallogenesis. *Economic Geology*, 108: 1489~1498.
- Zhao Xinfu, Zhou Meifu, Li Jianwei, Sun Min, Gao Jianfeng, Sun Weihua, Yang Jinhui. 2010. Late Paleoproterozoic to early Mesoproterozoic Dongchuan Group in Yunnan, SW China: Implications for tectonic evolution of the Yangtze Block. *Precambrian Research*, 182: 57~69.
- Zhao Xinfu, Zhou Meifu. 2011. Fe—Cu deposits in the Kangdian region, SW China: a proterozoic IOCG (iron—oxide—copper—gold) metallogenic province. *Miner Deposita*, 46: 731~747.
- Zhou Bangguo, Wang Shengwei, Sun Xiaoming, Liao Zhenwen, Guoyang, Jiang Xiaofang, Zhu Huaping, Luo Maojin, Liu Caize, Ma Dong, Shen Zhanwu, Zhang Hai. 2012&. SHRIMP U-Pb age and its significance of zircons in welded tuff of Wangchang formation in Dongchuan area, Yunnan province, SW China. *Geological Review*, 58(2): 359~368.
- Zhou Jiayun, Mao Jingwen, Liu Feiyan, Tan Hongqi, Shen Bing, Zhu Zhimin, Chen Jiabiao, Luo Liping, Zhou Xiong, Wang Yue. 2011&. SHRIMP U-Pb zircon chronology and geochemistry of albitite from the Hekou group in the western Yangtze block. *J Mineral Petrol*, 31(3): 66~73.
- Zhou Meifu, Nicolas T A, John M, Christina Y W, Allen K K. 2008. Two magma series and associated ore deposit types in the Permian Emeishan Large igneous province, SW China. *Lithos*, 103: 352~368.
- Zhou Meifu, Yan Danping, Kennedy A K, Li Yunqian, Ding Jun. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze block, south China. *Earth and Planetay Science Letters*, 196: 51~57.
- Zhou Mingkui, Liu Yanran. 1988&. The geological tectonic characteristics and evolution in Xichang—mid-Yunnan region. Chongqing Publishing House, 1~198.
- Zhu Huaping, Fan Wenyu, Zhou Bangguo, Wang Shengwei, Luo Maojin, Liao Zhenwen, Guo Yang. 2011&. Assessing Precambrian stratigraphic sequence of Dongchuan area; Evidence from zircon SHRIMP and LA-ICP-MS dating. *Geological Journal of China Universities*, 17(3): 1~12.
- Zhu Weiguang, Deng Hailin, Liu Bingguang, Li Chaoyang, Qin Yu, Luo Yaonan, Li Zhide, Pi Daohui. 2004&. The age of the Gaojiacun mafic—ultramafic intrusive complex in the Yanbian ara, Sichuan province: Geochronological constraints by U-Pb dating of single zircon grains and ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of hornblende. *Chinese Science Bulletin*, 49(10): 1077~1085.
- Zhu Zhimin, Hou Kejun, Zhu Kongyang, Tan Hongqi. 2013a. Geochronology and geochemistry of the Hekou group in Sichuan province, SW China. *Geochemical Journal*, 47: 51~64.
- Zhu Zhimin, Sun Yali. 2013b. Direct Re-Os Dating of chalcopyrite from the Lala IOCG deposit in the Kangdian copper belt, China. *Economic Geology*, 108: 871~882.

The Proterozoic Tectonic Movement In Kangdian Area I : Kunyang Intracontinental Rift, Mantle Plume and Its Metallogenesis

WANG Shengwei¹⁾, JIANG Xiaofang¹⁾, YANG Bo¹⁾, SUN Xiaoming^{2, 3)}, LIAO Zhenwen¹⁾,
ZHOU Qing¹⁾, GUO Yang¹⁾, WANG Zizheng¹⁾, YANG Bin¹⁾

1) Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu, 610081;

2) School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou, 510275;

3) School of Earth Sciences and Geological Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou, 510275

Objectives: Kangdian area is famous for Cu—Fe deposits hosted in Proterozoic basements, Magmatic rocks and complicated geological evolution. Much research has been carried out from last century, however, confused isotopic dating data arouse bitter controversy on tectonic setting, magmatism, and metallogenesis etc. The most

important tectonic—magmatic—mineralization events, i. e. Kunyang rift in Paleo-Mesoproterozoic is summarized systematically in this paper.

Results: The basement Pre-Kunyang rift is the few Tangdan group strata in Dongchuan and central Yunnan province, which have more obvious deformation than Dongchuan group, being caused by the Dongchuan movement before 1.8 Ga. The magmatic system of Kunyang period include mainly plenty of basic intrusive rocks distributing along Dongchuan—Huili—central Yunnan, and secondly few ultrabasic rocks, meta-basic volcanic rocks and intermediate—acid rocks, which has the typical characteristics of bimodal magmatic rock combination. The U-Pb ages for zircons of these magmatic rocks are from 1800 Ma to 1450 Ma, clustering together in 1650 ~ 1750 Ma, which reflect that Kunyang rift lasted for 0.4 billion, and peaked for 0.1 billion. The basic magmatic rocks geochemistry of Kunyang period have the geochemical characteristics of intracontinental basalts, and the diorites in Wuding area in central Yunnan and meta-basic volcanic rocks possess the characteristic of ocean island basalt (OIB), such as high alkaline, TiO_2 , P_2O_5 contents, low CaO/TiO_2 , $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ratios, no high-field-strength-elements (HFSEs) depletion, relatively high $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i$ initial ratio and $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ value. According to the lithological association and geochemistry of the magmatic rocks, we propose that it was an intracontinental rift extensional event which was caused by mantle plume activities, i. e. Kunyang mantle plume. The Kunyang intracontinental rift grew into limited small ocean basin at about 1450 Ma in Huili—Dongchuan area, and closed in late Mesoproterozoic. The sedimentary system of Kunyang rift were composed mainly of Dongchuan group, Hekou group and Dahongshan Group, probably extending to Liwu group in northern Kangdian area. The different lithological association of each group might be related to the tectonic location which resulted in the difference of sedimentary facies. It was an important metallogenesis event for Kunyang rift, and the related deposits could be divided into two series, sediment-hosted copper (SSC) series consisted of Tangdan, Luoxue, Shizishan and Tongchang copper deposits, etc., which were hosted in sedimentary rocks, such as Yinmin, Luoxue formations, with about 1750 Ma mineralogenetic epoch for primary sedimentary chalcopyrites; Secondly, iron—oxide—copper—gold (IOCG) series consisted of Lala, Dahongshan, Xikuangshan, and Yinachang deposits, etc., which were closely related to the magmatic hydrothermal activities of Kunyang rift, and the metallogenesis ages, such as Yinachang, Xikuangshan, and Etouchang Fe—Cu deposits with highly researched degree concentrated in 1700 ~ 1450 Ma.

Conclusions: We propose that the intensively magmatic activities, large scale metallogenesis and metallogenic material sources of Fe—Cu, and dynamic mechanics for Kunyang rift may be caused by the late Paleoproterozoic to early Mesoproterozoic Kunyang mantle plume.

Keywords: Kunyang rift; Mantle plume; Dongchuan group; Hekou group; Dahongshan group; Dongchuan type copper deposit; IOCG deposit; Kangdian earth's axis

Acknowledgements: The study was supported by Natural Science Foundation of China (No. 41202067) and State Land Resource Survey (No. 1212010911064; 1212010813066; 12120113053000).

First author: WANG Shengwei, male, born in 1978, doctor, Chengdu Center, China Geological Survey, mainly engaged in litho-geochemistry and geochemistry of mineral deposits. Email: osmium@126.com

Manuscript received on: 2015-10-16; Accepted on: 2016-07-26; Edited by: ZHANG Yuxu.

Doi: 10.16509/j.georeview.2016.06.001