

文章编号: 1009-3850(2016)01-0014-09

贵州东部南华纪大塘坡早期古地理环境控锰作用探讨

和景阳^{1,2}, 肖加飞¹

(1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 贵州东部及邻区的南华纪沉积锰矿是我国重要的锰矿资源之一, 具有较大的找矿潜力, 但其成矿作用至今仍存在争议。本文在前人研究基础上, 从古地理、古环境两方向分别介绍了贵州东部及邻区大塘坡早期古地理环境及其控矿作用的研究现状, 总结了古地理环境在锰矿成矿过程中的控矿作用, 认为古地理环境控制着锰矿的成矿物质来源、迁移富集、沉淀成矿成岩等过程。分析认为现阶段南华纪大塘坡早期古地理、古环境及其控矿作用研究的系统性、综合性仍显不足。在系统研究古地理、古环境的基础上, 将古地理环境各因素置于统一的成矿环境体系中, 综合考虑南华纪大塘坡早期古地理、古海洋环境、古生物、海平面变化、海底同生断裂及火山活动等因素的耦合作用, 来探讨锰矿的古地理环境综合控矿作用, 不失为一种可行的研究思路。

关键词: 古地理环境; 控矿作用; 海相沉积锰矿; 大塘坡早期; 贵州东部

中图分类号: P611

文献标识码: A

南华纪海相沉积锰矿是我国最重要的锰矿资源之一^[1,2], 主要分布在贵州东部、湖南中西部、重庆东南部以及湖北的长阳古城等地区。在贵州东部及邻区, 锰矿主要赋存在南华系大塘坡组第一段的黑色炭质页岩中, 又称为“大塘坡式”锰矿。目前已发现杨立掌、大屋、大塘坡、道坨、西溪堡、民乐等大中型锰矿床(图1B), 其中道坨锰矿为2010年新发现的一个全隐伏超大型碳酸锰矿床^[3,4], 显示出较大的找矿潜力。但由于其成矿作用较为复杂, 先后形成了多种成因认识, 如生物成因^[5,6]、热水沉积^[7]、重力流沉积^[8]、多源、生物-浊流沉积^[9]、盖帽碳酸盐岩沉积^[10]、海底火山喷发-沉积^[11]、冷泉碳酸盐岩沉积^[12,13]等。然而, 无论如何, 海相沉积矿床中矿质的沉淀和富集“很大程度上都决定于盆地的构造背景、盆地演化、古地理环境以及元素地球化学性质等”^[14], 南华纪沉积锰矿的古地理环境控

矿作用也得到较多学者的关注^[5-6,14-20]。本文从古地理环境角度出发, 总结南华纪沉积锰矿古地理环境及其控矿作用的研究现状, 分析存在问题及争论焦点, 为锰矿的矿床成因研究提供新的思路。

1 区域地质背景

贵州东部及邻区跨越上扬子地块和江南造山带(图1A), 其新元古代地层属于扬子区的湘桂次级盆地沉积^[21]。在构造演化上, 该区是一个以中、新元古界浅变质岩系为基底的复杂褶皱带, 伴随着扬子古陆、华夏古陆的汇聚碰撞形成华南板块, 以及华南板块内部的裂解和汇聚, 该区经历了多期构造运动^[14,22]。新元古代早期, 武陵运动使扬子板块与华夏板块汇聚碰撞, 形成了区内的第一个构造不整合界面^[22]。随着 Rodinia 超大陆的裂解, 使华南新元古代裂谷系在约 820Ma 开始开启, 并在华南新

收稿日期: 2015-01-04; 改回日期: 2015-11-02

作者简介: 和景阳(1989-) 男, 硕士研究生, 研究方向为沉积地球化学。E-mail: hejingyang1989@163.com

通讯作者: 肖加飞(1961-) 男, 研究员, 主要从事沉积学和地球化学研究。E-mail: xiaojiafei5@163.com

资助项目: 矿床地球化学国家重点实验室“十二五”项目(SKLODG-ZY125-08)

元古代裂谷的湘桂次级盆地内沉积了以青白口系板溪群/下江群/丹洲群为代表的裂谷系楔状地层,代表了渐变拉张、快速充填的裂谷发育阶段^[21-23]。雪峰运动后,研究区部分抬升为陆,大致以沿河、石阡、都匀连线为界,西部为强烈切割的山区,东部为湘黔桂海,海水由东南侵入^[24],研究区进入稳定拉

张的被动大陆边缘阶段。江绍缝合带的左行走滑,使得该区发育一系列北东向同生转换拉张断裂及地堑-地垒构造^[14-25]。长安冰期结束后,海平面逐渐上升,在大塘坡间冰期,沿北东向断裂控制的沉积盆地内沉积了一套黑色炭质页岩建造^[26]。

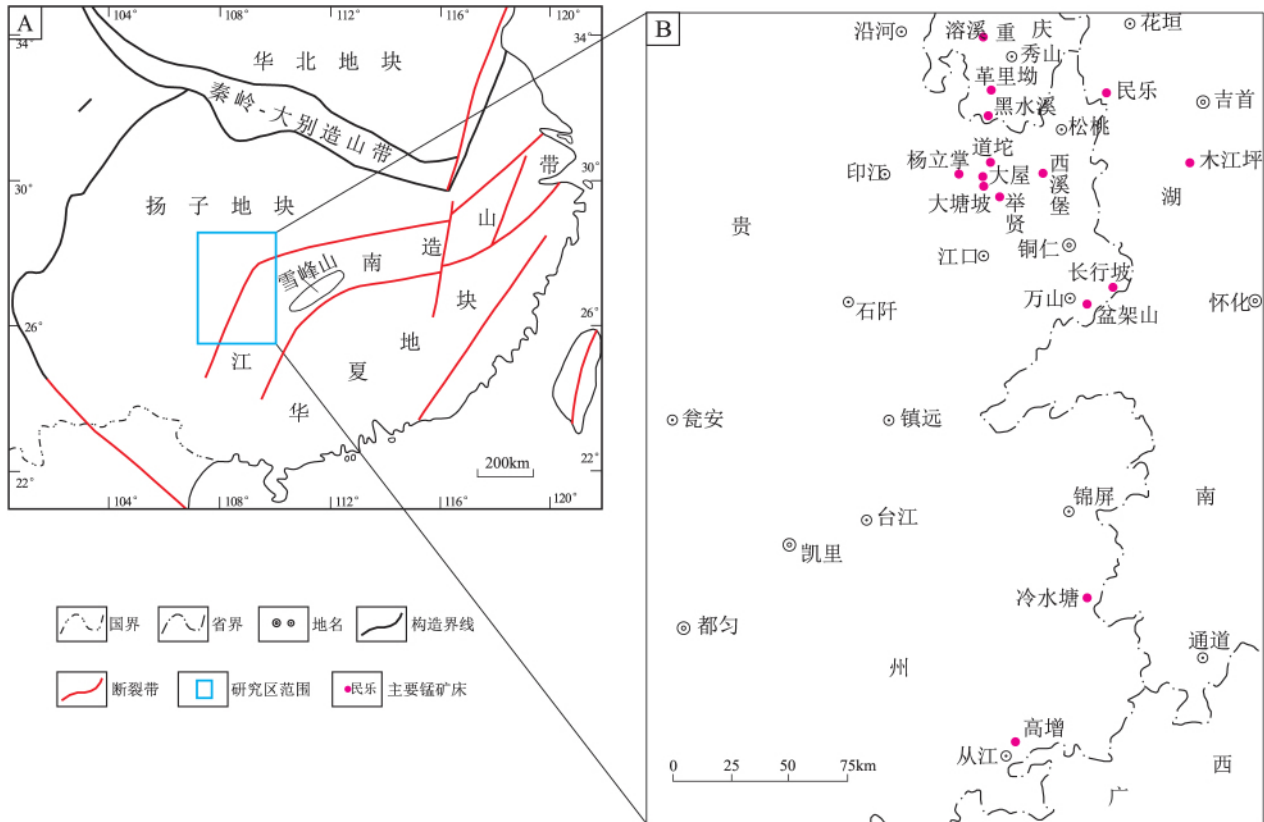


图1 贵州东部及邻区构造位置^[27] (A) 及主要南华纪锰矿分布图^[19, 28-29, 31] (B)

Fig. 1 Tectonic setting of eastern Guizhou and its adjacent areas (A) (modified from Shu Liangshu, 2012) and distribution of the Nanhuan manganese deposits (B) (after Qin Ying et al., 2005; Yang Ruidong et al., 2010; Fu Shengyun et al., 2011; Zhu Xiangkun et al., 2013)

2 大塘坡组第一段地质特征

南华系大塘坡组通常据岩性划分为两段,其中第一段为黑色炭质页岩岩系,对应于大塘坡早期沉积,因其有锰矿层产出又被称为“含锰岩系”,属含锰黑色页岩系^[1]。岩性主要为黑色炭质页岩、含锰炭质页岩及凝灰岩夹层,局部夹有白云岩透镜体,含有藻类、菌类和凝源类化石,富含有机碳和黄铁矿^[15]。多位学者从底部的凝灰岩中获得的锆石 U-Pb 年龄介于 660~670Ma 之间^[30-32],初步限定了南华系大塘坡组的下限年龄。此外,在含锰岩系底部常夹有 1~3 层菱锰矿矿体,呈层状、似层状和透镜状,厚度变化较大,一般为 0.5~12m;品位为 10%~

30%,平均为 21%。矿层的厚度、品位与含锰岩系的厚度存在着较强的正相关性,表现出显著的地层控矿性^[33]。

3 古地理环境控矿作用研究现状

对于研究区内南华纪大塘坡早期的古地理环境及其控矿作用研究,许多学者做了大量的工作。总的来看,主要有两个研究方向:第一个是通过沉积相研究,分析岩相组合及横向变化规律,恢复大塘坡早期的沉积环境和古地理格局;另一个是根据地球化学特征,利用岩石地球化学方法分析大塘坡早期的海洋古环境条件,包括古气候、古温度、古盐度、氧化还原条件以及生物有机质作用、海底热水

活动等。现将两方面的研究现状分别介绍如下。

3.1 古地理

关于研究区大塘坡早期的古地理研究,比较具有代表性的是上世纪八十年代王砚耕等^[15]、刘巽锋等^[5-6]的工作。前者将大塘坡早期的海相沉积环境划分为滨岸相和斜坡相,斜坡相又划分为脊内坡上局限盆地、构造脊、脊外斜坡相和深水盆地相(图2A),认为受北东向构造脊围限的脊内局限盆地是主要的聚锰环境;后者将大塘坡早期的滨-浅海相带

划分为腐泥-藻席坪相、近岸局限浅海相、近岸开阔浅海相和陆棚浅海相(图2B),认为主要聚锰环境是受若干古岛障壁作用形成的近岸局限浅海环境,其中以藻类生长的潮坪环境为最宜,其次为藻类繁殖的滨岸海湾或淡化潟湖环境。虽然两者的岩相古地理研究明显结果不同,但均认为贵州东北部松桃县境内及邻区的沉积环境较为局限,是有利的聚锰环境。刘宝珺等^[14]也对研究区内南华纪大塘坡期的岩相古地理格局进行了研究。

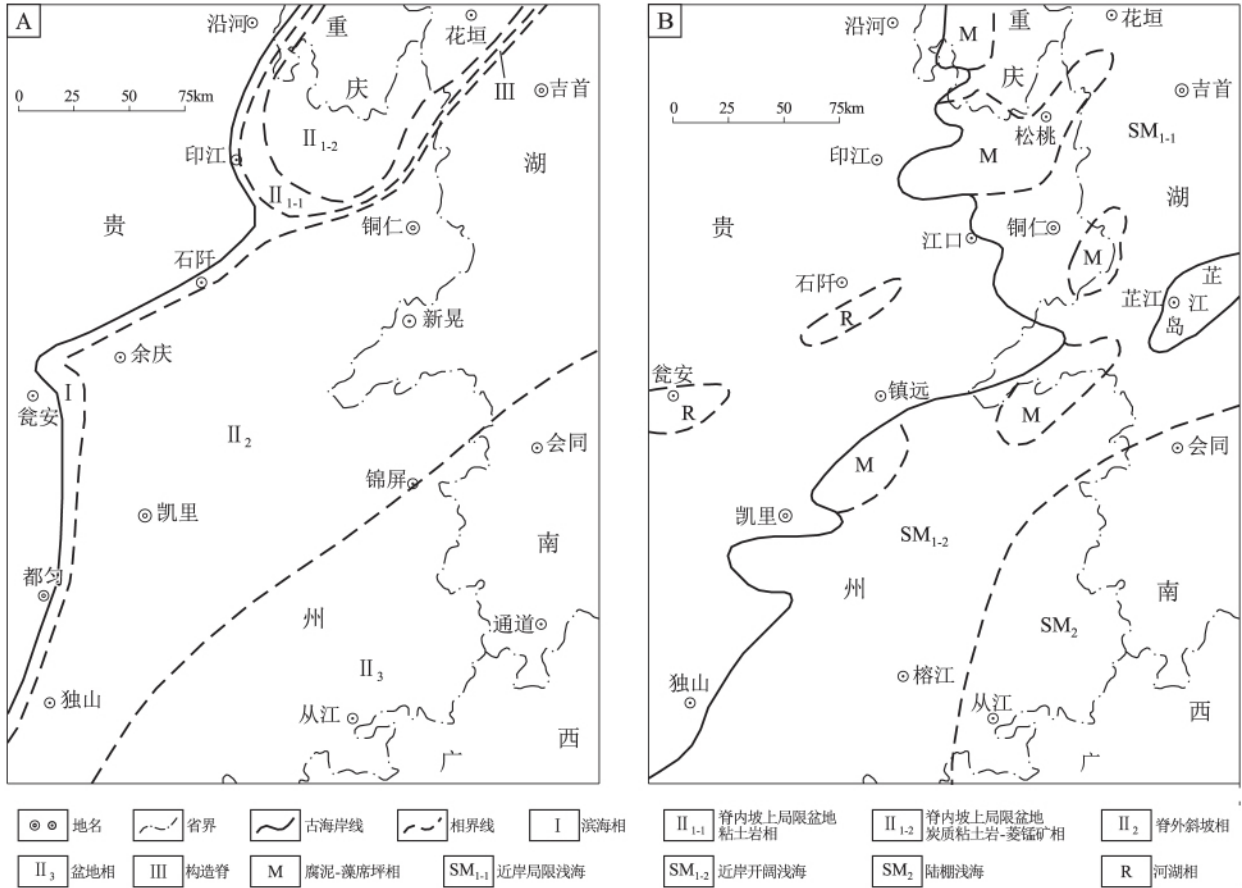


图2 贵州东部及邻区南华纪大塘坡早期的古地理格局(图A据王砚耕等^[15],1985,有改动;图B据刘巽锋等^[5-6],1983,1989,有改动)

Fig.2 Palaeogeographic framework of eastern Guizhou and its adjacent areas during the early Datangpoan (A: modified from Wang Yangeng et al., 1985; B: Liu Xuanfeng et al., 1983, 1989)

随后,该区域特别是黔湘渝“锰三角”所在的贵州东北及邻区的古地理环境研究受到更多学者的关注。何惠中和刘金山^[34]在研究湖南民乐锰矿时,指出成矿期的古地理环境是一个靠近古陆边缘的海湾潟湖,属于有障壁岛的海滨浊水沉积。夏文杰和雷建喜^[35]则认为大塘坡组锰矿形成于受一系列北东向障壁岛围限的潮坪-潟湖环境,并指出锰的富集成矿成岩与沉积环境的封闭性及藻类的生命活动密切相关。

进入二十世纪九十年代后,何明华^[17-18]认为菱锰矿为海相自生碳酸盐岩,横向上与白云岩属过渡关系,因此,根据海相碳酸盐岩沉积模式建立起贵州东北及邻区大塘坡早期的古地理格局(图3A)。自北西向东南依次为潮间潟湖、滩后潮坪、台缘浅滩、台缘斜坡、局限浅海陆棚及潮下陆棚隆起带、开阔陆棚、局限深水陆棚环境,呈北东向有序分布。在这些沉积环境中,局限浅海陆棚的沉积基面位于碳酸盐溶解界面之上,潜在容纳空间大,受潮下陆

棚隆起带阻滞,底层水水质稳定,有利于碳酸锰的稳定沉淀和聚集,是寻找大中型锰矿床的最佳相带;而较浅的潟湖台地、台缘浅滩、台缘斜坡环境和较深的局限深水陆棚,则不利于成矿,前者水体动荡,不利于锰的聚集,后者深度较大,不利于碳酸锰的沉淀。覃英等^[19]、向文勤等^[20]也提出了类似的观点。而黄道光等^[36]、牟军等^[37]则认为大塘坡早期整体为一半局限浅海陆架盆地环境,并进一步划分出3种沉积微相环境,即盆地中心微相、盆地外围

微相和水下隆起带微相(图3B),锰矿几乎全部分布在陆架盆地的中心及其附近。

此外,在成锰盆地构造演化方面,多数学者均认为南华纪成锰盆地的形成与新元古代 Rodinia 超大陆的裂解作用密切相关,区域上矿床多分布在由北东、北东东向同生断裂控制的地堑或半地堑盆地中^[14 21 25 38](图4A)。研究区内锰矿的分布受北东-北东东向的古构造控制,表现出较明显的等距性和方向性^[19-20](图4B)。

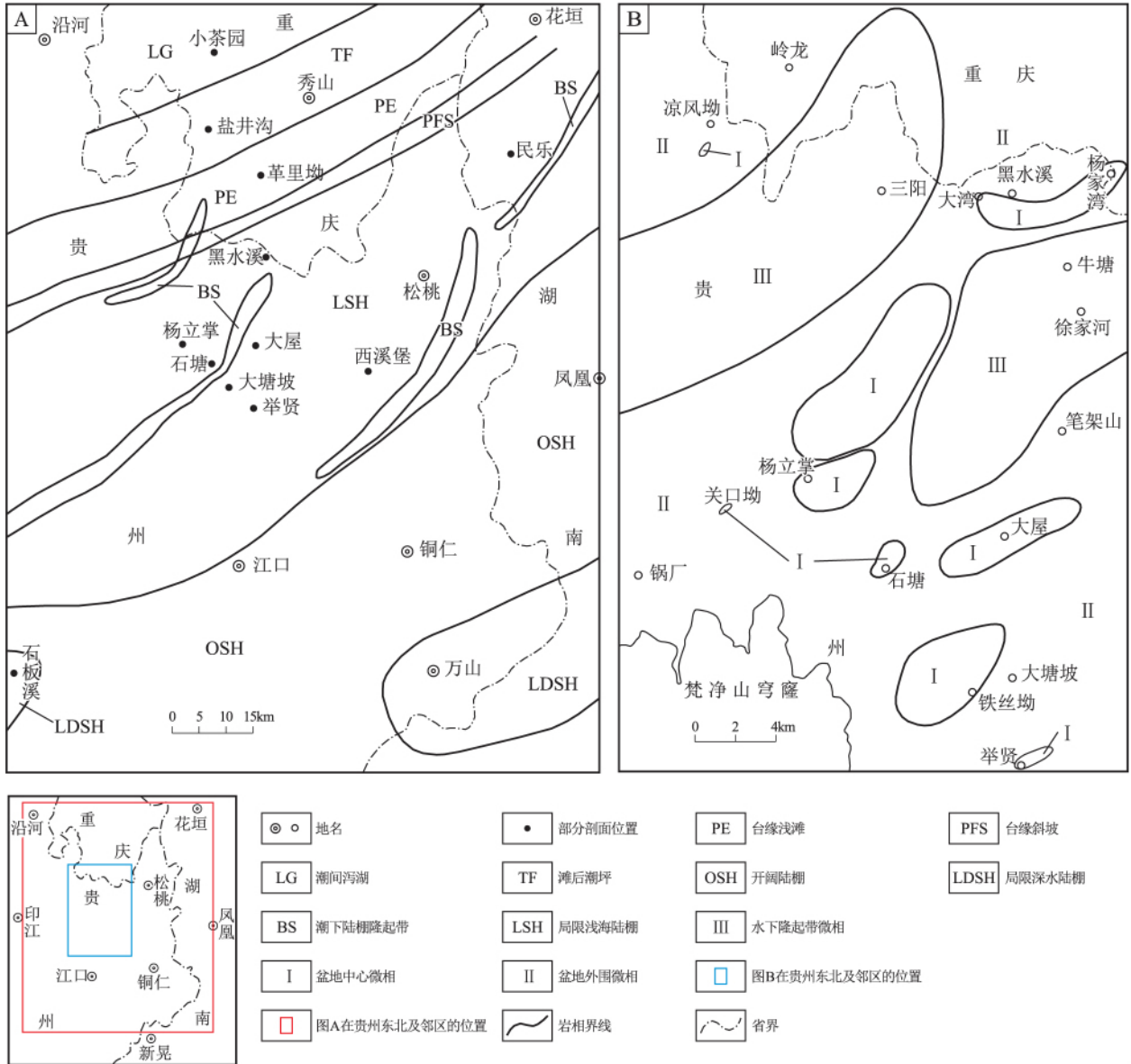


图3 贵州东北及邻区南华纪大塘坡早期古地理格局(A)及松桃-印江地区大塘坡早期沉积微相环境划分(B)(古地理格局据何明华^[17-18],1993,2001,有改动;沉积微相环境划分据牟军等^[37],2014)

Fig. 3 Palaeogeographic framework of northeastern Guizhou and its adjacent areas during the early Datangpoan (A) and division of the sedimentary microfacies in the Songtao-Yinjiang region during the early Datangpoan (A: modified from He Minghua, 1993, 2001; B: after Mou Jun et al., 2014)

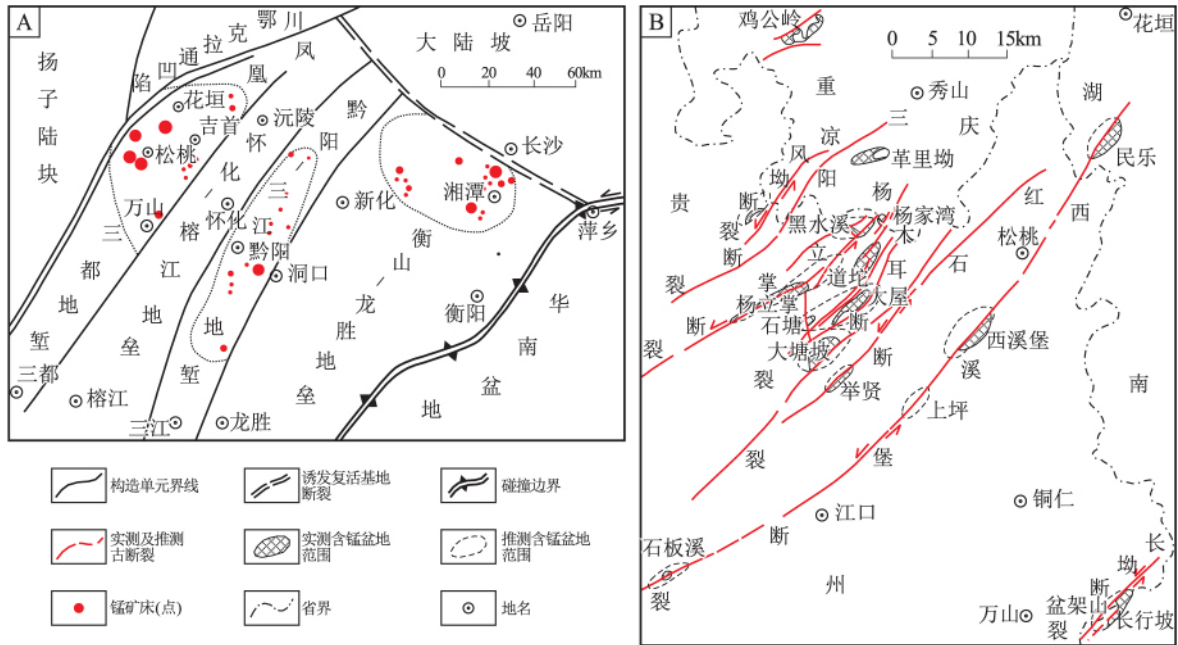


图4 贵州东部及邻区南华纪沉积锰矿构造背景(A)及早南华世古断裂与成锰盆地分布图(B)(构造背景图据侯宗林等^[25], 1996,有改动;分布图据覃英等^[19] 2005;向文勤等^[20] 2013;朱祥坤等^[4] 2013)

Fig. 4 Tectonic setting of the Nanhuan sedimentary manganese deposits (A) and distribution of early Nanhuan faults and manganese-forming basins (B) in eastern Guizhou and its adjacent areas (A: modified from Hou Zonglin et al., 1996; B: after Qin Ying et al., 2005; Xiang Wenqin et al., 2013; Zhu Xiangkun et al., 2013)

3.2 古环境

南华系大塘坡组是华南新元古代长安冰期和南沱冰期之间的地层单位,代表温暖气候下的间冰期沉积^[31]。南华纪地层的古地磁资料^[15, 24, 34, 39]和岩石的CIA指数^[40-42]表明,大塘坡期研究区处于较低纬度,岩石化学风化程度相对较高,古气候条件为热带—亚热带湿润气候^[34],这也与含锰岩系中富含有机碳和藻菌类化石的特征相吻合^[5-6, 15, 34-35, 43-44]。

关于海水的古温度、古盐度也有一定的研究^[6, 15-16, 34, 44-47],其中对于古温度关注较多,总体上前后存在两种认识。二十世纪八十年代,持生物成因观点的学者认为成矿环境为生物较发育的潮坪—潟湖环境,温度接近或稍高于常温^[6, 34, 44],主要取决于气候条件。进入九十年代后,随着热水成因观点的兴起,较多的研究资料发现古海水温度和成矿温度均较高,受热水活动的影响较大。根据碳、氧稳定同位素换算出的古海水温度在50~60℃左右^[7, 47],而据原生石英包裹体、沥青反射率以及生物标志物获得的成矿环境温度在200℃左右^[7, 45-46],表明成矿环境中存在明显的水热活动。

pH、Eh是影响锰质沉淀的重要因素。多数学者认为,菱锰矿的形成需要一个碱性的还原环境^[5-6, 16, 35, 43],菱锰矿以碳酸盐形式直接沉淀,即菱

锰矿属自生碳酸盐岩^[5-6, 8, 10, 12-13, 34-35, 43]。近几年来,一些学者提出了一种新的认识,认为成矿阶段水体较为氧化,锰以氧化物或氢氧化物的形式沉淀,然后在水岩界面之下的缺氧环境中经细菌的硫酸盐还原作用转化为菱锰矿,即菱锰矿石在早期成岩过程中转化而来^[4, 48-51]。

生物有机质和海底热水活动在与黑色页岩相关的沉积矿床中具有重要作用^[52-54],对于南华纪沉积锰矿亦是如此,分别形成生物成因和热水沉积成因理论。生物成因理论强调生物有机质在成矿中的作用,认为南华纪的大气圈具有富CO₂、贫O₂的特征,海水中含较多CO₂而偏酸性,锰进入藻席坪环境后便可溶性的Mn(HCO₃)₂存在。藻类一方面通过吸附作用使锰质一定程度的富集^[6],另一方面通过光合作用以及成岩过程中的有机质降解,改变沉积环境,促进菱锰矿的沉淀^[5-6, 16, 35, 43]。同时,一些学者也认为细菌等微生物在促使锰的氧化沉淀方面具有重要作用^[15]。热水沉积成因则较注重海底热水活动对成矿物质来源的贡献作用,认为海底热水携带了大量的锰质进入到较局限的水体中,经藻菌类等微生物的生物和生物化学作用,促使锰的沉淀成矿^[7]。而且,锰质的热水来源也得到大量的矿床地质、地球化学资料的验证^[28, 45-47, 55-57]。而海底

火山活动也可能提供了部分成矿物质^[11]。此外,周琦等^[12-13]认为在成锰盆地中心存在古天然气渗流系统,并繁殖以甲烷为生的微生物,使渗流出的甲烷发生厌氧氧化,产生的 HCO_3^- 与渗漏溢出的富锰气液中的 Mn^{2+} 结合形成菱锰矿,与海水中的 Mg^{2+} 结合形成白云岩,即含锰岩系中的菱锰矿和白云岩均为冷泉碳酸盐岩^[13]。

4 控矿作用认识

古地理环境在南华纪沉积锰矿的成矿过程中具有重要的控制作用,主要表现在锰的成矿物质来源、迁移富集、沉淀成矿成岩等方面。

(1) 大塘坡早期的古地理格局控制着锰质的迁移富集,具有一定局限性、水动力条件较弱的沉积环境是有利的聚锰环境,而较开阔的沉积环境,由于水动力较强,不利于锰质的迁移富集。贵州东北部及邻区由于受构造脊^[15]或障壁古岛^[5-6]的围限,沉积环境较为局限,为研究区内最重要的成锰区域(图1B)。而贵州东南部的沉积环境较为开阔,聚锰条件差,仅有少量的锰矿床产出(图1B)。同时,在主要的成锰区域中,还由于沉积微相的差异而表现出不同的控矿特征,锰矿多分布在特定的沉积微相中^[17-19, 36-37]。总而言之,沉积环境的局限性是形成锰矿的古地理前提条件。

(2) 由海底同生断裂及海底火山喷发导致的热水活动,可能提供了大量的成矿物质^[7, 11]。而锰矿床本身的地质、地球化学特征以及成锰盆地的构造特征也从侧面说明了锰矿的形成与海底的热水活动密切相关^[14, 24-25, 28, 46-47, 56-57]。

(3) 生物有机质在促进锰质的沉淀成矿方面具有重要的作用。可能表现为3个方面:通过藻类的吸附作用使锰质一定程度地富集^[6];通过藻类的光合作用以及成岩过程中的有机质降解,改变沉积环境,促使锰质沉淀成岩^[16, 43];部分细菌可以使锰质发生氧化沉淀^[15]。

(4) 海洋古环境中的各种物化条件,特别是氧化还原条件,是影响锰质沉淀及沉淀形式的重要因素^[6, 49-50]。

5 存在问题与建议

虽然我们得出了一些关于南华纪沉积锰矿古地理环境控矿作用的认识,但这对于锰矿的成因研究仍略显不足,现阶段锰矿的古地理环境控矿作用研究仍存在下列一些问题。

(1) 研究区在南华纪大塘坡早期的沉积环境和岩相古地理格局仍存在争论。首先表现为岩相古地理的划分,虽然古地理界线大致相似,但具体的沉积相类型差别较大。古地理重建并未综合考虑古生物、构造、盆地演化等因素,使古地理研究结果具有一定的片面性。其次是关于贵州东北部主要聚锰环境的局限条件,存在障壁古岛围限与构造脊围限两种观点。此外,对于主要聚锰环境的沉积微相划分,分歧颇大,实际上含锰岩系及上下地层均以陆源碎屑沉积物占绝对优势,而建立在海相碳酸盐岩模式之上的古地理格局是否合适,还需要更多探讨。

(2) 在古环境的研究中,也存在许多问题与争论。首先,对研究区内大塘坡早期的古海洋环境目前还没有较为系统性的研究,现阶段的古环境研究较为分散,未综合考虑构造背景演化、海平面变化、生物演化等各因素。其次,现阶段的古环境研究程度有待进一步的深入。第一,对于古盐度、古温度的研究,主要是基于菱锰矿和白云岩的碳氧同位素或微量元素比值来判断,但这是建立在菱锰矿为自生碳酸盐的基础之上,而目前关于菱锰矿的具体成因还末定论。含锰岩系中有机质经历了成岩埋深后的成熟演化,而根据生物标志物、沥青反射率得到的温度是否代表沉积时的环境温度,仍值得商榷;第二,古氧化还原条件研究缺乏系统性,未采用微量元素比值、氧化还原敏感元素富集系数、稀土元素异常、稳定同位素特征等多种方法综合判断,也没有进一步研究成锰盆地中水体的氧化还原程度和分层性;第三,热水沉积的判别还需排除陆源碎屑物质的影响以及更多的地球化学证据。此外,还有一些古环境问题尚未得到解决。如菱锰矿与上下围岩的形成环境是否一致,是否存在“环境的变化导致锰质的沉淀成矿”这一情况^[58-59]。大塘坡组形成于海侵阶段^[14],海平面的上升是否破坏了局限环境中水体原有的氧化还原分层特征^[60],是否而造成藻类生物的大量死亡埋藏^[61],而这又与菱锰矿中碳同位素的强烈负偏移^[12]是否存在内在联系。有机质的沉降与降解及厌氧细菌的活动对沉积环境有何影响,能否改变环境的物化条件,含锰岩系中黄铁矿具有别于上下地层异常高的 $\delta^{34}\text{S}$ 正值^[50, 62],这与沉积环境及锰矿成因有何关系。值得注意的是,含锰岩系富含有机碳和草莓状黄铁矿^[4, 50],而有机碳在某些情况下可与其他微量元素指示沉积环境^[63-64],草莓状黄铁矿的粒径分布特征

可以指示黄铁矿的形成过程,分析古海洋底层水、水岩界面之下沉积物中孔隙水的氧化还原程度^[65-67],但关于这些方面的研究还未见报道。最后,关于某些古环境条件的争论,也造成在锰矿的成矿物质来源、沉淀成矿形式等方面存在不同的认识。

(3) 在以往的古地理环境控矿作用研究中,往往过于强调个别古地理环境因素的作用,而未将各因素置于一个统一的成矿环境体系中来研究锰的沉积成矿过程,这是造成多种成因观点并存的重要原因。事实上,锰的成矿很可能与各古地理因素及其在时间和空间上的耦合作用密切相关。

针对以上存在的问题,笔者提出以下3个方面的建议:

(1) 沉积相研究及岩相古地理格局重建。应首先注意到南华系大塘坡组第一段及上下地层均以陆源碎屑沉积物为主,仅局部夹有少量的白云岩、菱锰矿、凝灰岩等“内源”沉积物,因此大塘坡早期的古地理格局恢复及古环境分析都应建立在陆源碎屑沉积模式之上。根据含锰岩系的沉积特征,识别出不同的沉积类型,采用现代层序地层学的研究方法,并结合成锰盆地构造演化特征、古生物分布等因素综合绘制研究区的岩相古地理图。

(2) 古环境研究中应首先重点解决沉积环境中水体的氧化还原条件及锰的沉淀形式,利用多种地球化学方法,包括微量元素比值、氧化还原敏感元素富集系数、稀土元素异常特征、草莓状黄铁矿粒径分布特征等^[65-66, 68-71],综合研究分析含锰岩系形成时的氧化还原条件以及在纵向上的变化特征。同时,根据菱锰矿的地球化学特征,与其它已知沉积物,如研究区内同时期的自生白云岩、南非古元古代 Kalahari 锰碳酸岩^[4, 72]、现代深海含锰沉积物^[58]、现代海底铁锰结核^[73]等采用地球化学对比的方法,并结合含锰岩系形成的氧化还原条件综合判断菱锰矿的形成环境和沉淀形式。但在对比时,须注意采用提纯或换算的方法尽可能排除菱锰矿中陆源碎屑物的影响。其次,对于海底热水活动研究可通过主量元素相关性分析、相关微量元素的图解等方法判断。但须注意微量元素图解是否适用于陆源碎屑沉积物,是否需要排除陆源碎屑的影响。

(3) 控矿作用研究应将各古地理环境因素置于一个统一的成矿环境体系中来综合研究锰的沉积成矿过程。在掌握含锰岩系及菱锰矿的地质、地球化学特征基础上,综合考虑南华纪大塘坡早期的古

地理、古海洋环境、古生物、海平面变化、海底同生断裂活动及海底火山活动等因素,分析各因素在时空上的耦合作用以及对锰矿的控制作用,进而提出古地理环境的综合控矿模式。

6 结论

(1) 古地理环境在南华纪沉积锰矿的成矿过程中,主要控制着锰的成矿物质来源、迁移富集、沉淀成矿成岩等方面。

(2) 现阶段南华纪沉积锰矿的古地理、古环境及控矿作用的研究在系统性、综合性方面尚存不足。

(3) 在系统研究古地理、古环境的基础上,将各古地理环境因素置于一个统一的成矿环境体系中,综合考虑南华纪大塘坡早期古地理、古海洋环境、古生物、海平面变化、海底同生断裂活动及火山活动等因素的耦合作用,来探讨古地理环境的综合控矿作用不失为一种可行的研究思路。

参考文献:

- [1] 侯宗林,薛友智,黄金水,等. 扬子地台周边锰矿[M]. 北京:冶金工业出版社,1997.
- [2] FAN D L, YANG P J. Introduction to and classification of manganese deposits of China [J]. *Ore Geology Reviews*, 1999, 15: 1-13.
- [3] 覃英,安正泽,王佳武,李代平. 贵州松桃锰矿整装勘查区道坨隐伏超大型锰矿床的发现及地质特征[J]. *矿产勘查*, 2013, 4(4): 345-355.
- [4] 朱祥坤,彭乾云,张仁彪,等. 贵州省松桃县道坨超大型锰矿床地质地球化学特征[J]. *地质学报*, 2013, 87(9): 1335-1348.
- [5] 刘翼锋,胡肇荣,曾励训,等. 贵州震旦纪锰矿沉积相特征及其成因探讨[J]. *沉积学报*, 1983, 1(4): 106-118.
- [6] 刘翼峰,王庆生,高兴基,等. 贵州锰矿地质[M]. 贵阳:贵州人民出版社,1989.
- [7] 王砚耕. 一个浅海裂谷盆地的古老热水沉积锰矿——以武陵山震旦纪锰矿为例[J]. *岩相古地理*, 1990, 1(1): 38-45.
- [8] 赵东旭. 震旦纪大塘坡期锰矿的内碎屑结构和重力流沉积[J]. *地质科学*, 1990, 2: 149-157.
- [9] 刘金山. 湖南早震旦世沉积建造、浊流沉积及锰矿成因[J]. *大地构造与成矿学*, 1994, 18(2): 174-182.
- [10] 杨瑞东,欧阳自远,朱立军,等. 早震旦世大塘坡期锰矿成因新认识[J]. *矿物学报*, 2002, 22(4): 329-334.
- [11] 杨绍祥,劳可通. 湘西北锰矿床成矿模式研究——以湖南花垣民乐锰矿床为例[J]. *沉积与特提斯地质*, 2006, 26(2): 72-80.
- [12] 周琦,杜远生,颜佳新,等. 贵州松桃大塘坡地区南华纪早期冷泉碳酸盐岩地质地球化学特征[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2007, 32(6): 845-852.
- [13] 周琦,杜远生,覃英. 古天然气渗漏沉积型锰矿床成矿系统与成矿模式——以黔湘渝毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿为例

- [J]. 矿床地质, 2013, 32(3): 457-466.
- [14] 刘宝珺, 许效松, 徐强, 等. 中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [15] 王砚耕, 王来兴, 朱顺才, 等. 贵州东部大塘坡组地层沉积环境和成锰作用[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1985.
- [16] TANG S Y, LIU T B. Origin of the early Sinian Minle manganese deposit, Hunan Province, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 1999, 15: 71-78.
- [17] 何明华. 松桃及邻区早震旦世大塘坡早期岩相古地理及成锰条件[J]. 贵州地质, 1993, 10(1): 62-67.
- [18] 何明华. 黔东北及邻区早震旦世成锰期岩相古地理及菱锰矿矿床[J]. 沉积与特提斯地质, 2001, 21(3): 39-47.
- [19] 覃英, 周琦, 张遂. 黔东北地区南华纪锰矿基本特征[J]. 贵州地质, 2005, 22(4): 246-251.
- [20] 向文勤, 肖永开. 铜仁-松桃地区南华系大塘坡式锰矿地质特征及成矿规律探讨[J]. 西南科技大学学报, 2013, 28(4): 31-38.
- [21] 王剑, 刘宝珺, 潘桂棠. 华南新元古代裂谷盆地演化——Rodinia 超大陆解体的前奏[J]. 矿物岩石, 2001, 21(3): 135-145.
- [22] 戴传国, 陈建树, 卢定彪, 等. 黔东及邻区武陵运动及其地质意义[J]. 地质力学学报, 2010, 16(1): 78-84.
- [23] 王剑, 曾昭光, 陈文西, 等. 华南新元古代裂谷系沉积超覆作用及其开启年龄新证据[J]. 沉积与特提斯地质, 2006, 26(4): 1-7.
- [24] 王立亭. 贵州古地理的演变[J]. 贵州地质, 1994, 11(2): 133-140.
- [25] 侯宗林, 薛友智等主编. 中国南方锰矿地质[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1996.
- [26] 贵州省地质矿产局. 贵州省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- [27] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 2012, 31(7): 1035-1053.
- [28] 杨瑞东, 高军波, 程玛莉, 等. 贵州从江高增新元古代大塘坡组锰矿沉积地球化学特征[J]. 地质学报, 2010, 84(12): 1781-1790.
- [29] 付胜云, 郑正福, 彭志刚. 吉首—凤凰锰矿带成矿模式探讨[J]. 中国锰业, 2011, 29(2): 25-29.
- [30] ZHOU C, TUCKER R, XIAO S, et al. New constraints on the ages of Neoproterozoic glaciation in south China [J]. *Geology*, 2004, 32(5): 437-440.
- [31] 尹崇玉, 王砚耕, 唐烽, 等. 贵州松桃南华系大塘坡组凝灰岩锆石 SHRIMP II U-Pb 年龄[J]. 地质学报, 2006, 80(2): 273-278.
- [32] 高林志, 陆济璞, 丁孝忠, 等. 桂北地区新元古代地层凝灰岩锆 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 中国地质, 2013, 40(5): 1443-1452.
- [33] 谢小峰, 覃英, 温官国, 等. 浅论贵州铜仁松桃锰矿区大塘坡组地层与锰矿成矿的关系[J]. 贵州地质, 2014, 31(1): 32-37.
- [34] 何惠中, 刘金山. 花垣民乐锰矿床古构造古地理岩相分析[J]. 湖南地质, 1986, 5(2): 1-11.
- [35] 夏文杰, 雷建喜. 贵州松桃地区早震旦世大塘坡期沉积环境及锰矿成因[J]. 成都地质学院学报, 1989, 16(1): 67-77.
- [36] 黄道光, 牟军, 王安华. 贵州印江-松桃地区含锰岩系及南华系早期沉积环境演化[J]. 贵州地质, 2010, 21(1): 13-21.
- [37] 牟军, 王安华, 黄道光. 贵州松桃—印江地区“含锰岩系”沉积微相特征与远景预测[J]. 贵州地质, 2014, 31(2): 99-104.
- [38] 许效松, 黄慧琼, 刘宝珺, 等. 上扬子地块早震旦世大塘坡期锰矿成因和沉积学[J]. 沉积学报, 1991, 9(1): 63-71.
- [39] 黄建中, 唐晓珊, 郭乐群, 等. 湖南前寒武纪地层古地磁特征及地质意义[J]. 中国区域地质, 1996(3): 204-212.
- [40] 王自强, 尹崇玉, 高林志, 等. 黔南—桂北地区南华系化学地层特征[J]. 地球学报, 2009, 30(4): 465-474.
- [41] 赵小明, 刘圣德, 张权绪, 等. 鄂西长阳南华系地球化学特征的气候指示意义及地层对比[J]. 地质学报, 2011, 85(4): 576-585.
- [42] 譙文浪, 汪建国, 陈武. 贵州丹寨地区南华系地层地球化学特征及其对古气候、古环境的意义[J]. 地质科学, 2013, 48(2): 847-859.
- [43] 郑光夏, 刘巽峰. 贵州震旦纪沉积菱锰矿床的藻类成矿作用及其成岩序列[J]. 贵州地质, 1987, 4(3): 339-348.
- [44] 唐世瑜. 湖南花垣民乐震旦系锰矿床同位素地质研究[J]. 沉积学报, 1990, 8(4): 77-84.
- [45] 陈多福, 陈先沛. 贵州省松桃热水沉积锰矿的地质地球化学特征[J]. 沉积学报, 1992, 10(4): 35-43.
- [46] 解启来, 陈多福, 陈先沛. 贵州松桃锰矿沉积有机质特征研究[J]. 沉积学报, 1999, 17(2): 280-284.
- [47] 何志威, 杨瑞东, 高军波, 等. 贵州省松桃杨家湾锰矿含锰岩系地质地球化学特征[J]. 现代地质, 2013, 27(3): 593-602.
- [48] 张飞飞, 彭乾云, 朱祥坤, 等. 湖北古城锰矿 Fe 同位素特征及其古环境意义[J]. 地质学报, 2013, 87(9): 1411-1418.
- [49] 张飞飞, 闫斌, 郭跃玲, 等. 湖北古城锰矿的沉淀形式及其古环境意义[J]. 地质学报, 2013, 87(2): 245-258.
- [50] 张飞飞, 朱祥坤, 高兆富, 等. 黔东北西溪堡锰矿的沉淀形式与含锰层位中黄铁矿异常高 $\delta^{34}\text{S}$ 值的成因[J]. 地质论评, 2013, 59(2): 274-286.
- [51] 安正泽, 张仁彪, 陈甲才, 等. 贵州省松桃县道坨超大型锰矿床的发现及其成因探讨[J]. 矿床地质, 2014, 33(4): 870-884.
- [52] 范德廉, 刘铁兵, 叶杰. 黑色岩系成岩成矿过程中的生物地球化学作用[J]. 岩石学报, 1991, 2: 65-74.
- [53] 陈多福, 陈先沛, 陈光谦, 等. 热水沉积作用与成矿效应[J]. 地质地球化学, 1997, 4(4): 7-12.
- [54] 施春华, 曹剑, 胡凯, 边立曾, 韩善楚, 姚素平. 黑色岩系矿床成因及其海水、热水与生物有机成矿作用[J]. 地学前缘, 2013, 20(1): 19-31.
- [55] 谭满堂, 鲁志雄, 张嫣. 鄂西地区南华系大塘坡期锰矿成因浅析——以长阳古城锰矿为例[J]. 资源环境与工程, 2009, 23(2): 108-113.
- [56] 何志威, 杨瑞东, 高军波, 等. 贵州松桃西溪堡锰矿沉积地球化学特征[J]. 地球化学, 2013, 42(6): 576-588.
- [57] 陈祎, 张均, 刘安璐, 等. 贵州松桃千公坪锰矿地质地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014, 33(2): 185-192.
- [58] HUCKRIEDE H, MEISCHNER D. Origin and environment of manganese-rich sediments within black-shale basins [J].

- Geochimica et Cosmochimica Acta ,1996 60(8) : 1399 – 1413.
- [59] DU Q D ,YI H SH ,HUI B ,et al. Recognition ,genesis and evolution of manganese ore deposits in southeastern China [J]. Ore Geology Reviews 2013 55: 99 – 109.
- [60] ZHOU C M ,JIANG S Y. Palaeoceanographic redox environments for the lower Cambrian Hetang Formation in South China: Evidence from pyrite framboids ,redox sensitive trace elements , and sponge biota occurrence [J]. Palaeogeography , Palaeoclimatology ,Palaeoecology 2009 271: 279 – 286.
- [61] HALLAM A ,WIGNALL P B. Mass extinctions and sea-level changes [J]. Earth-Science Reviews ,1999 48: 217 – 250.
- [62] 李仁伟 张淑坤 雪加锦,等. 震旦纪地层黄铁矿硫同位素组成时空变化特征及扬子地块与晚元古代超大陆关系的论证 [J]. 地质科学 ,1996 31(3) : 209 – 217.
- [63] ALGEO T J ,LYONS T W. Mo – total organic carbon covariation in modern anoxic marine environments: Implications for analysis of paleoredox and paleohydrographic conditions [J]. Paleoceanography 2006 21: 1016 – 1038.
- [64] PIPER D Z ,CALVERT S E. A marine biogeochemical perspective on black shale deposition [J]. Earth-Science Reviews 2009 95: 63 – 96.
- [65] WILKIN R T ,BARNES H L ,BRANTLEY S L. The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: An indicator of redox conditions [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta ,1996 60(20) : 3897 – 3912.
- [66] WILKIN R T ,ARTHUR M A ,DEAN W E. History of water-column anoxia in the Black Sea indicated pyrite framboid size distributions [J]. Earth and Planetary Science Letters ,1997 , 148: 517 – 525.
- [67] WIGNALL P B ,BOND D P G ,KUWAHARA K ,et al. An 80 million year oceanic redox history from Permian to Jurassic pelagic sediments of the Mino-Tamba terrane ,SW Japan ,and the origin of four mass extinctions [J]. Global and Planetary Change ,2010 , 71: 109 – 123.
- [68] JONES B ,MARNING D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of paleoredox conditions in ancient mudstones [J]. Chemical Geology ,1994 ,111 (1 – 4) : 111 – 129.
- [69] ALGEO T J ,MAYNARD B J. Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems [J]. Chemical Geology 2004 206: 289 – 318.
- [70] ALGEO T J ,TRIBOVILLARD N. Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum – uranium covariation [J]. Chemical Geology 2009 268: 211 – 225.
- [71] PATTAN J N ,PEARCE N J G ,MISLANKAR P G. Constraints in using Cerium-anomaly of bulk sediments as an indicator of paleo bottom water redox environment: A case study from the Central Indian Ocean Basin [J]. Chemical Geology ,2005 ,221: 260 – 278.
- [72] CHETTY D ,GUTZMER J. REE redistribution during hydrothermal alteration of ores of the Kalahari Manganese Deposit [J]. Ore Geology Reviews 2012 47: 126 – 135.
- [73] BAU M ,SCHMIDT K ,KOSCHINSKY A ,et al. Discriminating between different genetic types of marine ferro-manganese crusts and nodules based on rare earth elements and yttrium [J]. Chemical Geology 2014 381: 1 – 9.

The controls of the palaeogeographic environments on manganese deposits in eastern Guizhou during the early Datangpoan (Nanhuan)

HE Jing-yang^{1, 2} , XIAO Jia-fei¹

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry , Institute of Geochemistry , Chinese Academy of Sciences , Guiyang 550002 , Guizhou , China; 2. School of Earth Sciences and Resources , China University of Geosciences , Beijing , 100083 , China)

Abstract: The Nanhuan sedimentary manganese deposits in eastern Guizhou and its adjacent areas are most important manganese resources of great exploration potential in China. Referenced to the previous results of research , the present paper gives a detailed overview of current states of research concerning the palaeogeographic environments and their controls on the manganese deposits in eastern Guizhou and its adjacent areas during the early Datangpoan (Nanhuan) . The controls of the palaeogeographic environments on the manganese deposits are manifested in origin , migration and enrichment , precipitation , mineralization and diagenesis of the ore-forming matter , with the emphasis on palaeogeography , palaeo-oceanography , palaeontology , sea-level changes , submarine contemporaneous faults and volcanic activities in the study areas during the early Datangpoan.

Key words: palaeogeographic environment; ore control; marine sedimentary manganese deposit; early Datangpoan; eastern Guizhou