

[文章编号] 1671-9727(2004)01-0015-07

分散元素超常富集的资源与环境效应： 研究现状与发展趋势

顾雪祥^{1,2} 王 乾² 付绍洪² 唐菊兴²

(1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002; 2. 成都理工大学地球科学学院)

[摘要] 传统观点认为, Cd, Ga, In, Tl, Ge, Se, Te, Re 等分散元素不能形成独立矿床, 它们只能以伴生元素的方式存在于其他元素的矿床内。近年来, 中国西南地区多例分散元素独立矿床的相继发现, 打破了这一传统的思维方式和科学理念。在对国内外分散元素矿床研究现状和存在问题分析的基础上, 提出扬子地块西部大陆边缘构造演化及其所控制的壳幔置换、流体活动、元素分馏等动力学过程, 控制了区域内分散金属成矿作用的基本样式和矿床时空分布的基本格局。未来对分散元素超常富集机理及资源与环境效应研究, 应着重于三方面, 即: 分散元素矿集区的成矿大陆动力学背景、分散元素成矿作用的共性和差异性及其他矿化元素共生-分异的化学动力学机制、表生循环过程中分散元素的地球化学行为及其对生态和环境的制约。

[关键词] 研究现状; 发展趋势; 资源环境效应; 大陆动力学; 超常富集; 分散元素

[分类号] P618.7 **[文献标识码]** A

镉(Cd)、镓(Ga)、铟(In)、铊(Tl)、锗(Ge)、硒(Se)、碲(Te)、铼(Re)等是地壳中含量低且高度分散的元素。这种低含量(地壳平均含量一般为 $10^{-6} \sim 10^{-9}$ 级)和高度分散性, 一方面决定了“它们形成矿物的概率很低”^[1], 主要以类质同象或机械混入等方式分散于其他造岩或造矿矿物中; 另一方面决定了它们必须经过某种相当特殊的地球化学机制并且在某些特殊的地质条件下, 才能由分散趋向聚集, 形成具有经济价值的矿床。因而, 长期以来, 人们通常认为“分散元素不形成独立矿床, 它们只能以伴生元素的方式存在于其他元素的矿床内”^[2]。迄今为止, 世界上除了少数几个镓、锗、硒、碲的独立矿床(如, 美国犹他州阿佩克斯 Ga-Ge 矿床、玻利维亚帕卡哈卡 Se 矿床、纳米比亚楚梅布 Ge 矿床、中国四川大水沟 Te 矿床)外, 绝大多数分散元素均作为其他金属矿石加工和金属精炼时的副产品回收利用。例如, Cd, Tl, In, Ge

是精炼锌的副产品; Re, Se, Te 是精炼铜(钼)的副产品; Ga 是加工铝土矿和锌冶炼时的副产品。

近年来, 在中国西南地区相继发现了多例分散元素的独立矿床, 包括云南临沧煤系地层中的超大型锗矿床^{[3]~[13]}、南华砷铊矿床^{[14]~[17]}、会泽铅锌锗矿床、都龙镉锡锌矿床^{[18], [19]}、贵州牛角塘锌镉矿床^{[19]~[28]}、滥木厂汞铊矿床^{[29], [30]}、四川大水沟碲矿床^{[31]~[36]}、沐川铊铋矿床、拉尔玛硒金矿床^{[37]~[44]}、湖北渔塘坝硒矿床^{[45]~[48]}等。这是矿床学上的重大突破, 表明分散元素在一定的条件下也能聚集形成独立矿床, 在特定的地质-地球化学条件下甚至可出现数千倍乃至数万倍的超常富集而形成大型-超大型矿床。同时, 分散元素在这一地区的超常富集现象, 也为中国矿床学家提供了得天独厚的研究条件和具原始创新意义的研究机遇。

[收稿日期] 2003-05-15

[基金项目] 中国科学院百人计划资助项目

[作者简介] 顾雪祥(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 矿床学和地球化学专业。(E-mail: gxx@edut.edu.cn)

1 国家资源战略与环境安全保障需求

开展分散元素超常富集的资源与环境效应研究,是国家资源战略与环境安全保障的迫切需求。众所周知,分散金属被广泛应用于电子、信息、航天和军事工业以及其他各种工业部门,是高新技术领域必不可少的重要原材料。目前,作为重要战略物资的分散金属正日益走俏于国际市场;特别是海湾战争后,许多发达国家都争相加快以分散金属为原料的尖端高技术的发展。据统计^[49],国际上 Tl 的价格在 1988~1998 年的十年间上涨了约 6 倍多(每磅由 80 美元上涨至 580 美元),Ge 的价格仅在 1994~1998 年的四年间上涨了约 45% (每千克由 1375 美元上涨至 2000 美元),其他分散金属的价格也呈不同程度的增长趋势。可以预测,随着世界科学技术和工业发展水平的提高,人类对分散金属的需求量将大幅度增长,分散金属的价位将长期高居不下,供求矛盾将日益突出。因此,加强对分散元素超常富集机理和成矿关键理论问题的研究,对于开拓和寻找更多的分散金属矿产资源基地,增加分散金属的战略储备,以满足国家需求,无疑具有十分重要的现实意义。

在中国,无论是分散元素的独立矿床抑或是作为其他矿种伴生组分出现的分散金属,其被认识、重视和开发利用的程度均远远低于其他矿产资源。这一方面由于人们受传统思维方式的束缚,认为高度分散的地球化学性质决定了它们不可能成矿;另一方面,由于技术、经济以及环境等原因,通常作为伴生组分出现的分散金属没有被当作一种资源得到充分利用,而是作为“废石”或“尾渣”被抛弃,造成了资源的极大浪费和严重的环境污染。例如,中国许多铅锌矿床中通常富含 Cd, Ga, Ge, In 等多种分散元素,这些元素的含量尽管有的已达到或超过伴生甚至独立矿床的工业品位要求,但却很少或几乎没有得到利用。目前,许多铅锌矿山随着资源量的日益减少以及开采难度的加大,生产成本越来越高。为延长矿山寿命,降低生产成本,增创效益,对其中所伴生的分散金属加以研究和开发利用,无疑是最好的解决办法。

当分散元素矿物暴露地表后或在富含分散元素的矿床开采过程中,分散元素的表生地球化学循环直接影响着一个地区的生态环境和人体健

康。由于分散元素大多为“毒性”元素,但个别分散元素(如 Se)又是动植物和人体所必需的微量元素,因此摄入过量或不足均会引起生物体内元素平衡的失调,导致肌体的功能学障碍和形态学改变,从而引发某些地方性疾病。例如,一方面中国东北某些地区因缺 Se 而出现克山病和大骨节病,另一方面在湖北恩施和陕西紫阳等地因 Se 过量而出现硒中毒(俗称“脱甲风”);在贵州滥木厂汞铊矿床开采过程中,曾出现 Tl 中毒而使当地部分居民严重脱发、双目失明,甚至死亡。因此,科学评价分散元素超常富集的环境效应,并提出合理化的防治对策,其意义不言而喻。

2 国内外研究现状与存在问题分析

鉴于上述历史和现实的原因,长期以来,对分散元素矿床的研究没有给予足够的重视,国际上有关分散元素矿床研究的报道鲜见(几近空白)。因此,有关分散元素矿床的研究程度总体上仍很低,正如涂光炽先生所指出的那样,“分散元素形成独立矿床,是有待开拓深化的新领域,需要做深入细致的工作”^[1]。

在中国,由于得天独厚的资源条件,开展对分散元素超常富集机理的研究已有近十年的历史。尤其是“九五”期间由涂光炽院士主持的国家自然科学基金重点项目“分散元素成矿机制研究”的实施和取得的初步成果,为相关研究积累了较为丰富的基础资料和许多有益的认识。这些前期研究最重要的贡献,一方面确认了地壳中分散元素的超常富集不仅是可能的,而且在地域分布上可能是有规律的、成带的,从而打破了人们传统的思维方式和科学理念;另一方面,中国分散元素矿床已显示的和正初露端倪的巨大经济价值,激发了人们从技术、经济、产业以及环境等角度重新审视这一特殊矿产资源利用价值和开发前景的浓厚兴趣。

对中国已发现的数例独立分散元素矿床的研究表明,它们通常具有下列共同特征^{[3]~[48]}:(1)地域分布上,主要集中在西南地区,特别是扬子地块的西南缘和西北缘;(2)矿床大多产于古生代及其以后的沉积岩系地层中,尤其是寒武系、晚古生代和中生代的地层中,赋矿岩系通常为富含有机质和硅质的碳酸盐岩(Cd, Ga, Ge, In, Te)、硅质岩(Se, Ge)、泥质灰岩-泥岩(Tl)、黑色页岩-粉砂岩

(Se, Re, Ge)以及煤层(Ge)。大水沟碲矿床则产于不纯的白云质大理岩和钙质基性火山岩中;(3)矿体多为层状、似层状、透镜状,与地层产状基本一致(大水沟碲矿床例外,为切层的脉状),矿化多受与地层产状一致的层间断裂或破碎带控制;(4)矿石中的分散元素除以类质同象(如闪锌矿中的Cd, Ga, Ge, In等)和吸附方式(煤层中的Ge)赋存外,还出现大量的分散元素独立矿物(如Tl, Se, Te, Cd的独立矿物);(5)成矿温度除大水沟碲矿床为中高温(285~350℃)外,其余均为中低温(一般<250℃)。成矿与沉积-低温热液改造和海底喷流热水沉积作用关系密切,部分矿床(如四川沐川铍钼矿床)可能与低温、低压条件下的地表或地表浅部的风化作用和沉积作用过程有关;(6)成矿时代多为燕山期-喜马拉雅期。

然而,有关分散元素矿床,摆在我们面前亟待回答的问题远比人们已知的要多。首先,中国迄今所发现的分散元素超常富集现象为何集中出现于扬子地块的西缘?其地壳规模(crust-scale)的控制因素以及大陆动力学背景是什么?分散元素独立成矿是否代表了某些重大地质事件的特定响应?成矿时代较新是否与青藏高原隆升和喜马拉雅构造-热事件有着内在的联系?

其次,分散元素的超常富集通常伴随有其他金属元素的矿化富集,即使是在独立的分散元素矿床中,也往往有一种或多种其他元素达到工业矿床规模的富集,如大水沟独立碲矿床中的金-银-铋,拉尔玛独立硒矿床中的金,南华独立铊矿床中的砷,濠木厂独立铊矿床中的汞,都龙独立镉矿床中的锡-锌,沐川独立铍矿床中的钼-金-银-铜等。因此,这些元素共生富集的地球化学机理是什么?为什么地球化学性质差异较大的不同分散元素可以和同一种其他元素共同富集?为什么同一种分散元素在某些矿床里与这种元素共同富集,而在另一些矿床里却与另一种元素共同富集?分散元素及其伴生金属是否经历了不同的活化-迁移-成矿历程?

再次,同种分散元素在不同的地质环境中往往表现出复杂的成矿特征。例如,镉在铅锌矿床中通常出现不同程度的富集,闪锌矿中镉的含量随矿床成因类型的不同而有很大的差异。密西西比河谷型(MVT)矿床中的闪锌矿含镉量最高(106个矿床平均含镉4.85%),而火山喷流型(VOL-

CEX)和沉积喷流型(SEDEX)矿床中的闪锌矿含镉量最低(87个VOLCEX矿床和19个SEDEX矿床平均含镉分别为2.36%和2.85%),矽卡岩型矿床则介于两者之间(54个矿床平均含镉3.54%)^[50]。显然,这种差异是成矿过程中多种因素综合影响的产物。那么,诸如源区化学成分的原始不均一性、Cd/Zn比值、流体的性质、溶液中配位体的数量与种类(Cl^- , HS^- , S^{2-})等对Cd的富集程度起了什么样的控制作用?为什么镉在有的矿床中主要赋存于黑色闪锌矿中(如都龙矿床^[19]),而在另一些矿床中则主要赋存于浅色闪锌矿中(如牛角塘矿床^[19])中?

此外,分散元素的超常富集为什么往往与有机质(煤层、黑色页系、富含有机质的碳酸盐岩和碎屑岩)关系密切?有机质仅仅是起吸附作用抑或同时为分散金属的活化、迁移提供了不可替代的络合剂?通常以纳米-微米级颗粒出现的有机物质在分散元素的迁移、沉淀、富集过程中有着什么样的特殊贡献?一些以吸附和类质同象形式赋存的分散元素矿石经表生氧化后为什么会出现纳米-微米级的独立分散元素矿物(如牛角塘矿床中的硫镉矿、菱镉矿)?等等。

最后,以往的研究仅限于Cd, Ge, Se, Te, Tl, In等部分分散元素的部分矿床;而对Ga和Re的超常富集与成矿问题则尚未涉及。过去仅注重孤立地研究单个分散元素的成矿问题,而忽略了各个分散元素之间共性与差异性的研究。显然,倘若要系统、完整地揭示分散元素超常富集的机理,并进而构筑分散元素成矿的理论体系,尚需要做许多进一步的深入研究。

3 成矿大陆动力学:揭示分散元素超常富集机理的科学基础

从成矿大陆动力学角度研究元素的超常富集和大型-超大型矿床/矿集区的形成机制,是现代成矿学研究最具生命力的前沿领域。地球表层大型、超大型矿床和矿集区的出现往往具有独一无二的特性,其形成通常具有特定的大陆动力学背景^{[51]、[52]}。地球上已知的世界规模级矿集区和大型、超大型矿床,均分布于壳幔置换和层圈交换作用剧烈的地区,如环太平洋成矿域和阿尔卑斯-喜马拉雅成矿域。近年来对五大洲形成于不同地质环境的矿床研究表明,地壳中金属组分大规模

富集与“幔根”的构造不连续性(mantle-rooted structural discontinuities)有关,尤其是这种深部构造不连续性与板块边界、裂谷构造、造山带或板内深部其他构造线等交切部位^{[53],[54]}。在造山运动期间,这些部位为深部岩浆、热和金属的上升提供了有利的通道,使地球物质处于开放系统,层圈(软流圈、岩石圈、大气圈及生物圈等)交换作用、流体活动和地球化学分馏等十分活跃,因而是形成大型—超大型矿床和矿集区所必须的物质-能量-介质-动力的最佳耦合场所。

现有的研究资料表明,分散元素超常富集之所以集中出现于扬子地块的西缘,很可能与这一地区特殊的大地构造位置和特定的地质构造演化历史密切相关。地处欧亚板块、印度板块和太平洋板块复合部位的扬子地块西缘显生宙以来的演化,本质上是由裂谷型被动大陆边缘(古生代)向地体增生型活动大陆边缘(中生代)发展的历史,也是由岩石圈伸展裂陷作用(古生代)向岩石圈收缩、地体增生、碰撞造山作用(中生代)演化的历史^[55]。古生代的始特提斯和古特提斯阶段,伴随洋盆扩张和岩石圈伸展裂陷作用,在扬子地块西缘川陕湘黔一带的下寒武统和鄂西地区的二叠系黑色岩系地层中出现了与热水沉积事件有关的 Se(Re)的超常富集,形成了四川拉尔玛、陕西紫阳、岚皋以及湖北渔塘坝等独立/共生硒矿床;在西南右江盆地的广西大厂一带出现了与泥盆纪热水沉积锡石-块状硫化物矿化有关的 In 和 Cd 等分散元素的超常富集。随着中生代早期古特提斯洋的消亡闭合以及大陆边缘岩石圈由伸展裂陷转向收缩汇聚,中生代晚期至新生代时期的扬子地块西缘进入了全面的陆内造山、碰撞挤压、走滑叠缩的演化历史,这一时期发生的分散元素超常富集主要有:早期热水沉积基础上受燕山期岩浆热液叠加改造形成的锡石-硫化物矿床中的 In-Cd(云南个旧、都龙、白牛厂,湖南芙蓉);川甘陕和滇黔桂地区 Au-As-Hg-Sb 矿床中的 Tl(Cd);侏罗系陆相红色岩系地层中的 Re(四川马边、沐川等地);四川大水沟与火山作用有关的热液充填脉型 Te 矿床;云南金顶铅锌矿床中的 Cd, Tl, Ge;滇西临沧第三系含煤建造中的 Ge。

因此,我们的初步分析认为,以上述两种大陆边缘和两种基本构造作用为主要内容的扬子地块西部大陆边缘构造演化及其所控制的壳幔置换、

流体活动、元素分馏等动力学过程,控制了区域内分散金属成矿作用的基本样式和矿床时空分布的基本格局。换言之,成矿大陆动力学研究是揭示该区分散元素超常富集机理的重要科学基础。

4 发展趋势:急需研究的若干科学问题

进一步开展分散元素超常富集机理及资源与环境效应研究,其基本的科学思路是:以扬子地块西缘为重点解剖地区,综合运用包括大陆动力学和环境地质学在内的多学科的理论与方法,将区域分散元素成矿作用纳入大陆边缘岩石圈伸展裂陷-地体增生-碰撞造山的背景框架下,查明分散元素超常富集的物质基础、大陆动力学背景和地壳规模控制因素,阐明不同分散元素矿床的流体演化、元素迁移和富集成矿的地质-地球化学过程与区域地质构造发展历史、壳幔置换作用、地球圈层演化以及元素地球化学分馏的关系,建立分散元素成矿的理论框架,探讨分散元素表生地球化学循环的生态和环境效应,并在此基础上形成一套分散金属开发利用过程中包括技术、经济、产业以及环保等方面的理论和方法。当前急需研究的主要科学问题包括以下三方面。

4.1 分散元素矿集区的成矿大陆动力学背景

在大陆边缘岩石圈伸展裂陷-地体增生-碰撞造山的背景框架下,考察扬子地块西缘分散元素超常富集的物质基础、大陆动力学背景和地壳规模控制因素,这不仅有助于从本质上把握成矿的地质-地球化学过程与区域地质构造发展历史、壳幔置换作用、地球圈层演化以及元素地球化学分馏的关系,而且也符合当今国际地质科学正从传统的定性静态描述转向以揭示过程为目标的定量动力学研究的发展趋势。重点应研究在时间和空间尺度上分散元素超常富集与扬子地块西缘若干重大地质事件(包括早寒武世的缺氧事件,古生代岩石圈拉张背景下广泛出现的热热水沉积事件,中生代岩石圈收缩汇聚-陆内造山过程中的岩浆作用、流体活动、构造-热事件、成煤作用等)的关系,查明分散元素在不同储库(大陆岩石圈、对流地幔)之间分异的动力学过程及其与大陆地壳生长的关系,揭示大陆边缘构造演化对分散金属成矿作用基本样式和矿床时空分布格局的控制意义。

4.2 分散元素成矿作用的共性和差异性以及其他矿化元素共生-分异的化学动力学机制

从以往对单个分散元素研究的框架中跳出来,既注重各分散元素成矿作用共性与差异性研究,又强调分散元素与其他矿化元素共生-分异的动力学机制研究,这必将有助于系统、完整地认识分散元素超常富集的机制,构筑分散元素成矿的理论体系。揭示分散元素成矿作用的共性与差异性,关键在于研究各分散元素之间在成矿地质条件、矿床地质特征、含矿流体地球化学性状、有机质的贡献和影响、矿质迁移活化方式和卸载富集机理等方面的共性与差异性。同时,应重点研究下列各类矿床中分散元素与其他矿化元素共生-分异的地质-地球化学机理和化学动力学过程:(1)铅锌矿床中 Ge, Ga, Cd, In, Tl 等分散元素的共生与分异(四川天宝山、大梁子,云南会泽、富乐、金顶,贵州牛角塘、杉树林、长坪子等);(2)锡多金属矿床中 In (Cd) 的超常富集(广西大厂,云南个旧、都龙、白牛厂,湖南芙蓉);(3)黑色岩系地层中 Se 的超常富集及与 PEG, Au, Ag, V, Ni, Mo, Co, Mn, Sn, P 等元素的共生和分异(湖北渔塘坝,湖南天门山,陕西紫阳、岚皋,湘黔、川甘地区等);(4)红色岩系地层中 Re 的超常富集以及与 Mo, Au, Ag, Cu 等元素共生-分异机理(四川马边、沐川等地);(5)Tl 与 As, Hg, Au 等元素的共生富集机理(云南南华,贵州滥木厂,川甘陕和滇黔桂地区的微细浸染型金矿床)。

4.3 表生循环过程中分散元素的地球化学行为及其对生态和环境的制约

开展对分散元素超常富集的环境效应研究,尤其是对表生地球化学循环过程中毒害元素的价态变化与生态环境和人体健康的关系研究,既是以往研究的薄弱点,也是未来研究的重要方向之一。若这方面取得成果,可望能从本质上揭示分散元素的表生地球化学行为与某些地方性疾病之间的内在联系,并为生态环境的监测与治理奠定理论基础。应重点研究表生条件下 Se, Ga, Cd, In, Te, Tl 等“毒性”分散元素的价态变化、迁移方式以及在岩(矿)石、土壤、水体、植物(包括农作物)、动物体内的循环分异规律,查明重要污染物质的生态毒理学机制及与人体健康的关系,并在此基础上探索分散元素富集区的天然污染和矿山开采的人为污染过程中的环境监测和治理的地球化学

方法。

总之,分散元素超常富集这一在中国独具特色的重大科学问题的解决,可望使中国在国际地球科学研究领域占有重要的一席之地,从而为成矿大陆动力学理论创新做出中国地球科学家应有的贡献;同时,这一科学问题的解决,必将促进中国分散金属资源的找矿突破,并将为与分散金属资源利用有关的环境问题评价提供科学依据。

[参 考 文 献]

- [1] 涂光炽. 分散元素可以形成独立矿床——一个有待开拓深化的新矿产领域[A]. 中国矿物岩石地球化学研究新进展[C]. 兰州:兰州大学出版社,1994. 234.
- [2] 中国大百科全书(地质卷)[M]. 北京:中国大百科全书出版社,1993. 197.
- [3] 胡瑞忠,毕献武,叶造军,等. 临沧锆矿床成因初探[J]. 矿物学报,1996,16(2): 97-102.
- [4] 胡瑞忠,毕献武,苏文超,等. 对煤中锆矿化若干问题的思考[J]. 矿物学报,1997,17(4): 364-368.
- [5] 胡瑞忠,苏文超,戚华文,等. 锆的地球化学、赋存状态和成矿作用[J]. 矿物岩石地球化学通报,2000,19(4): 215-217.
- [6] 张淑苓,尹金双,王淑英. 云南帮卖盆地煤中锆存在形式的研究[J]. 沉积学报,1988,6(3): 29-40.
- [7] 庄汉平,刘金钟,傅家谟,等. 临沧超大型锆矿床锆赋存状态研究[J]. 中国科学(D辑),1998,28(增刊): 37-42.
- [8] 卢家烂,庄汉平,傅家谟,等. 临沧超大型锆矿床的沉积环境、成岩过程和热液作用与锆的富集[J]. 地球化学,2000,29(1): 36-42.
- [9] 庄汉平,刘金钟,傅家谟,等. 临沧超大型锆矿床有机质与锆矿化的地球化学特征[J]. 地球化学,1997, 26(4): 44-52.
- [10] Zhuang Hanping, Lu Jiacan. Germanium occurrence in Lincang superlarge deposit in Yunnan, China [J]. Science in China, 1998, 41 (suppl.): 21-27.
- [11] Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Su Wenchao, et al. Gerich hydrothermal solution and abnormal enrichment of germanium in coal [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44 (2): 257-258.
- [12] Su Wenchao, Hu Ruizhong. Geochemistry of siliceous rocks and germanium mineralization of Lincang superlarge germanium deposit in Yunnan Province [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44 (2): 156-157.

- [13] Zhuang Hanping, Lu Jiacan, Fu Jiamo, *et al.* Lincang superlarge germanium deposit in Yunnan Province, China: Sedimentation, diagenesis, hydrothermal process and mineralization [J]. *Journal of China University of Geosciences*, 1998, 9 (2): 129-136.
- [14] 张忠, 张兴茂, 张宝贵. 南华砷铊矿床碱金属碱土金属和稀土元素地球化学[J]. *矿物学报*, 1999, 19 (1): 112-119.
- [15] 张忠, 张兴茂, 张宝贵. 南华砷铊矿床元素地球化学和成矿模式[J]. *地球化学*, 1998, 27(3): 269-275.
- [16] Zhang Zhong, Zhang Baogui, Tang Chunjing, *et al.* The main geochemical biological and reworking metallogenic models of the Lanmuchang independence Tl deposit [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2000, 19 (1): 45-51.
- [17] Zhang Zhong, Chen Guoli, Zhang Baogui, *et al.* The Lanmuchang Tl deposit and its environmental geochemistry [J]. *Science in China*, 2000, 43 (1): 51-62.
- [18] 刘玉平, 李朝阳, 谷团, 等. 都龙锡锌多金属矿床成矿物质来源的同位素示踪[J]. *地质地球化学*, 2000, 8 (4): 75-82.
- [19] 高振敏, 李朝阳. 分散元素矿床地球化学[A]. *资源环境与可持续发展*[C]. 北京: 科学出版社, 1999. 241-248.
- [20] 叶霖, 刘铁庚. 贵州牛角塘富镉锌矿中镉的赋存状态和矿床成因初步研究[A]. *资源环境与可持续发展*[C]. 北京: 科学出版社, 1999. 113-115.
- [21] 叶霖, 刘铁庚, 邵树勋. 富镉锌矿成矿流体地球化学研究: 以贵州都匀牛角塘富镉锌矿为例[J]. *地球化学*, 2000, 29 (6): 597-603.
- [22] 叶霖, 刘铁庚. 都匀地区镉(Cd)矿产资源及其远景初探[J]. *贵州地质*, 1997, 14 (2): 160-163.
- [23] 谷团, 李朝阳. 分散元素镉的资源概况及其研究意义——来自牛角塘铅锌矿的线索[J]. *地质地球化学*, 1998, 26 (4): 38-41.
- [24] 刘铁庚, 叶霖. 都匀牛角塘大型独立镉矿床的地质地球化学特征[J]. *矿物学报*, 2000, 20 (3): 279-285.
- [25] Ye Lin, Liu Tiegeng. Sphalerite chemistry of Niujiatong Cd-rich zinc deposit, Guizhou, southwest China [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1999, 18 (1): 62-68.
- [26] Liu Tiegeng, Ye Lin, Chen Guoyong. Geochemical characteristics of independent cadmium deposit, Niujiatong, Duyun, Guizhou [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44 (suppl. 2): 61-63.
- [27] Ye Lin, Liu Tiegeng. Simulating experiment on soaking and leaching of Cd in the Niujiatong Cd-rich zinc deposit, Guizhou, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44 (suppl. 2): 190-193.
- [28] Ye Lin, Liu Tiegeng. Existing state of Cd in Niujiatong Cd-rich zinc deposit, Guizhou, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44 (suppl. 2): 182-183.
- [29] 张宝贵, 张忠. 滥木厂独立铊矿床主要地球化学特征[A]. *资源环境与可持续发展*[C]. 北京: 科学出版社, 1999. 122-124.
- [30] 张宝贵, 王三学, 胡静, 等. 贵州滥木厂铊矿床和烂泥沟(含铊)金矿床稀土铊多金属初步研究[A]. *中国科学院矿床地球化学开放研究实验室年报*[C]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2001. 74-77.
- [31] 陈毓川, 毛景文. 四川大水沟碲(金)矿床地质和地球化学[M]. 北京: 原子能出版社, 1996. 1-127.
- [32] 骆耀南, 曹志敏, 温春齐, 等. 大水沟独立碲矿床[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1996. 1-160.
- [33] 刘埃平, 骆耀南. 四川石棉碲矿床地球化学特征研究[J]. *地球化学*, 1996, 25(4): 365-371.
- [34] 曹志敏, 温春齐, 李保华, 等. 首例独立碲矿床成因探讨[J]. *中国科学(B辑)*, 1995, 25(6): 647-654.
- [35] 李保华, 曹志敏, 金景福, 等. 大水沟碲矿床成矿物理化学条件研究[J]. *地质科学*, 1999, 33 (4): 463-472.
- [36] 张佩华, 赵振华, 赵文霞, 等. 四川大水沟楚碲铋矿的两类显微文象结构[J]. *高校地质学报*, 2000, 19 (4): 223-225.
- [37] 刘家军, 郑明华, 刘建明, 等. 西秦岭寒武系金矿床中硒的富集规律及其找矿前景[J]. *地质学报*, 1997, 71(3): 266-273.
- [38] 刘家军, 刘建明, 卢文全, 等. 邛崃金矿床中的硒辉铋矿[J]. *矿物学报*, 1998, 18(4): 445-449.
- [39] 刘家军, 郑明华. 首次发现铋的硒-硫化物系列[J]. *科学通报*, 1992, 37(9): 864.
- [40] 温汉捷, 裘愉卓. 拉尔玛碲-金矿床中元素的有机/无机结合态及硒的赋存状态研究[J]. *中国科学(D辑)*, 1999, 29 (5): 426-432.
- [41] 温汉捷, 裘愉卓, 姚林波, 等. 中国若干下寒武统高硒地层的有机地球化学特征及生物标志物研究[J]. *地球化学*, 2000, 29 (1): 28-35.
- [42] 温汉捷, 裘愉卓, 胡耀国. 拉尔玛碲-金矿床中硒矿物形成的地质地球化学环境[J]. *矿物学报*, 1999, 19 (4): 418-425.
- [43] Wen Hanjie, Qiu Yuzhou. Geological setting of some

- selenium-bearing formations in China [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(suppl. 2): 184-185.
- [44] Wen Hanjie, Qiu Yuzhou. Organic and inorganic occurrence of selenium in Laerma Se-Au deposit, China [J]. Science in China, 1999, 42(6): 662-669.
- [45] 姚林波,高振敏. 恩施双河渔塘坝硒矿床成因探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2000, 19(4): 350-352.
- [46] 宋成祖. 鄂西南渔塘坝沉积型硒矿化区概况[J]. 矿床地质, 1989, 8(3): 81-89.
- [47] 姚林波,高振敏,龙洪波. 分散元素硒的地球化学循环及其富集作用[J]. 地质地球化学, 1999, 27(3): 62-67.
- [48] Gao Zhenmin, Li Chaoyang, Yao Linbo. Independent ore deposits of dispersed elements [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44 (suppl. 2): 208-210.
- [49] USGS. Metal prices in the United States through 1998 [M]. 1998. 1-179.
- [50] Schwartz M O. Cadmium in zinc deposits: Economic geology of a polluting element [J]. International Geology Review, 2000, 42: 445-469.
- [51] 李晓波. 成矿作用与地球动力学[A]. 当代地质科学前沿[C]. 武汉:中国地质大学出版社, 1993. 49-54.
- [52] 顾雪祥,唐菊兴,王成善,等. 喜马拉雅碰撞造山作用与(超)大型矿集区的形成:科学问题与思考[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(4): 344-349.
- [53] Kutina J. Regional mantle-rooted Discontinuities extending transversely to the margins of cratons and adjacent mobile belts: Metallogenic implications [J]. Global Tectonics and Metallogeny, 1995, 5 (1/2): 7-18.
- [54] Kutina J. The role of mantle-rooted structural discontinuities in concentration of metals with an example from the Bohemian Massif set in the context of Central and Western Europe [J]. Global Tectonics and Metallogeny, 1996, 5(3-4): 79-92.
- [55] 吴健民,刘肇昌,黎功举,等. 扬子地块西缘铜矿床地质[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1998. 1-271.

Resources and environmental effects of abnormal enrichment of dispersed elements: research situation and tendency

GU Xue-xiang^{1,2}, WANG Qian², FU Shao-hong², TANG Ju-xing²

(1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, China;

2. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, China)

Abstract: Dispersed elements, including Cd, Ga, In, Tl, Ge, Se, Te and Re, are traditionally considered to be impossible to form independent ore deposits. However, the discovery of a number of independent ore deposits of dispersed elements in western China in the recent years has broken this traditional cognition. Based on the analysis of current research situation and existing problems in the study of dispersed element deposits, the authors of this paper propose that the tectonic evolution and associated crust-mantle replacement, fluid activity, and geochemical fractionation processes of the western margin of the Yangtze block have controlled the principal styles of mineralization and distribution framework of dispersed element deposits. Future research on the mechanism of abnormal enrichment of dispersed elements and its resources and environmental effects should be focused on three main aspects, i. e., the metallogenic geodynamics of enrichment districts of dispersed elements, the generality and discrepancy in mineralization of dispersed elements and chemical dynamics of their intergrowth and/or separation with other mineralizing elements, and the geochemical behaviors of dispersed elements during supergene circulation and their constraints on ecological and environmental systems.

Key words: research situation; developing tendency; resources and environmental effects; continental geodynamics; abnormal enrichment; dispersed element