

勘查地球物理 勘查地球化学文集

第 9 集

成矿区带区域地球化学
与地球化学找矿方法研究

张本仁 主编

地 质 出 版 社

勘查地球物理 勘查地球化学文集

第 9 集

成矿区带区域地球化学
与地球化学找矿方法研究

张本仁 主编

地 质 出 版 社

勘查地球物理勘查地球化学文集

第9集

成矿区带区域地球化学与地球化学找矿方法研究

张本仁 主编

责任编辑：吴传璽

地质出版社出版发行

(北京和平里)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店总店科技发行所经销

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：20.5 插页：2页 字数：482000

1989年10月北京第一版·1989年10月北京第一次印刷

印数：1—1290册 国内定价：8.95元

ISBN 7-116-00477-7/P·402

前 言

本文集是地质矿产部“六五”期间重点科技攻关项目(83064项)中“成矿区带区域地球化学与地球化学找矿方法研究”课题下属五个成矿区带研究专题的主要成果及其经验总结。这五个专题是:“陕西省柞水—山阳成矿带地球化学及地球化学找矿方法研究”、“八达岭构造岩浆带区域岩石地球化学测量方法及应用效果”,“青海省赛什塘—日龙沟铜矿带地球化学找盲矿研究”、“湖南省龙山地区地球化学及地球化学找矿方法研究”和“福建省安溪县大坪—西坪火山岩地区地球化学及地球化学找矿方法研究”。

五个专题研究是在课题总体设计的指导下,统一要求,统一布署,分别完成的。成矿区带地球化学研究的总体构想是:成矿区带研究必须以区域地壳(最好是岩石圈)为系统,以各类地质体的地球化学资料为基础,以历史地球化学的理论与观点为指导,通过地球化学专题研究与区域地球化学测量相结合的途径,探讨元素通过各类地质—地球化学作用发生分配、演化的趋势,查明区域地球化学场的结构、分布与地质意义,开展矿带构造环境和成矿规律的地球化学分析,进而实现控矿地质因素、环境、条件向地球化学因素、环境、条件的转化,以及由控矿地球化学因素、环境、条件向找矿标志的转化,结合异常特征,建立地球化学异常评价的指标与准则,开展成矿远景区的预测。课题的主要目的是设想通过几个地质构造特征不同和成矿类型各异的成矿区带的研究,继续探索应用地球化学原理、方法解决基础地质和成矿问题,以及改善地球化学找矿方法和扩大其应用范围的途径与经验。

文集反映了各专题取得的以下重要成果:

一、通过地球化学理论与方法的应用:研究地层的时代、元素本底含量、沉积地球化学相环境及含矿性;论证沉积层控矿床的海底热卤水同生沉积成因,沉积成矿环境及后期变质作用改造的成矿过程;探讨花岗岩类的物质来源、构造环境、成因类型,岩浆分异结晶过程中成矿元素的浓集趋势,岩体含矿性评价及花岗岩与同时代中、酸性火山岩的成因联系;探索区域断裂构造的控矿和找矿意义,区域蚀变带的形成与成矿的关系,以及预测火山机构的地球化学标志等;并已取得新的进展。

二、在方法技术方面包括:岩石地球化学测量按采样单元和采样单位进行取样的方法研究,区域地球化学场的分解及同生和后生场的划分,区域地球化学图的多种成图方法(克立格法、泛克立格法、距离平方倒数移动平均法、普通移动平均法、趋势面分析法、成晕能法)的研究与比较,新的地球化学找矿标志的探讨,以及几种地球化学测量方法(岩石、水系沉积物和土壤测量)地质与找矿效果的比较等。

三、按照上述两个转化的构想*,针对各成矿区带的地质构造特征与成矿类型,分别总结了找矿标志,探索了异常评价的新途径,开展了测区成矿远景预测,提供了在预测远景区内布置钻探验证预期盲矿的经验。

* 详见张本仁(1988),本文集。

目 录

1. 成矿带地球化学研究的理论构想和方法张本仁 (1)
2. 陕西省柞水—山阳成矿带地球化学及地球化学找矿方法研究
..... 李泽九 陈德兴 谷晓明 蒋敬业 郭五寅 胡以铿 李方林 (21)
3. 八达岭构造岩浆带区域岩石地球化学测量方法及应用效果
.....曾太文 赵玉祥 周亚男 阮起合 毕晓芳 (103)
4. 青海省赛什塘—日龙沟铜矿带地球化学找盲矿研究.....
吴悦斌 王自玮 战卫国 赖孝珍 刘文华 梁维明 欧阳建平 郭世珍 (159)
5. 湖南省龙山地区地球化学及地球化学找矿方法研究
.....姜翠萍 刘士奇 (228)
6. 福建省安溪县大坪—西坪火山岩地区地球化学及地球化学找矿方法研究
.....陈伟志 陈国荣 李宗耀 黄令盛 (237)

成矿带地球化学研究的理论 构想和方法

张 本 仁

(中国地质大学)

成矿带多数与区域构造活动带有关,是区域地质构造发展复杂历史的集中体现,又是区域矿产群聚的场所,因此,成矿带的研究历来受到地质学家与找矿工作者的注视。这种研究不仅对于深化区域地质构造认识,而且对于解决新的矿产基地均具有重大意义。

在当前的成矿带研究方面,或者是以地质学的方法为主、辅以一些地球化学证据,或者是开展很少配合地球化学研究的成矿带规模的地球化学测量。然而具有既探讨区域地质和成矿规律,又解决区域找矿问题双重目标的综合地球化学研究,尚属少见。这种状况不仅限制了地球化学研究在揭示区域地质构造发展历史和阐明区域成矿规律方面的潜在作用的发挥,又使矿带地球化学找矿工作仍然摆脱不了原有的就异常评异常的局面。当然这种评述丝毫不忽视成矿带研究已经取得丰硕成果和较大经济效益之意,而只是针对如何发挥地球化学学科优势、扩大现有地球化学资料的应用,能使地球化学在更多方面做出贡献和取得效益而言的。

现行国内区域与成矿带地球化学找矿工作中存在的一个普遍问题是,所取得的地球化学成果图与测区地质图之间,还缺乏能由此及彼和由彼及此的较深入细微和顺利的相互沟通,类似没有很好贴合起来的皮肉,结果使异常解释评价只能依赖于异常本身的特征,加上简单的地质前题。数学统计评价法的应用也未能根本改变这种局面。这说明在区域地球化学场与基本地质构造环境之间架设相互理解桥梁的必要性,而现代地球化学就能很好地起到这种桥梁和译员作用。

现在,对区域和成矿带缺乏综合性地球化学研究的原因虽然是多方面的,但缺少适应于现代科学水平的区域和成矿带地球化学研究的理论体系与方法,不能说不是一个重要障碍。1978年以来我们进行了三轮有关区域和成矿带地球化学的探索性研究。通过实践与学习,我们对于开展现代区域和成矿带地球化学研究的基础理论与方法形成了一些想法^①。本文仅侧重于讨论有关成矿带地球化学研究的理论格架和方法。

一、成矿带地球化学研究的理论格架

成矿带地球化学研究本身,就是应用现代地球化学理论与方法于有关成矿带各研究领域的探讨。因此,它必然要涉及从事此项研究的人员对现代地球化学基础理论与方法的熟

① 张本仁,现代区域地球化学理论格架的探索,《矿物岩石地球化学通讯》,1987, No. 3.

悉程度或素养。然而，通过实践我们体会到，对现代地球化学基本观点的深入理解与正确应用，则具有更关键的作用。因为这些地球化学基本观点具有重要方法论的作用，只有在它们的指导下，地球化学的具体理论与方法才能更有效地发挥作用。

(一) 地球化学的基本观点

总结现代地球化学的思想与发展状况，我们初步认为以下观点是重要的：

1. 地球化学系统的观点

随着地球化学研究的深入，愈益发现元素的一般化学行为与地球化学行为的差异，以及同种元素在不同地质-地球化学作用中行为的不同。再加上现代系统科学思想的影响，更多的人认识到元素的迁移运动均处于特定的地球化学系统之中，并受地球化学系统特征的制约。因此，现代地球化学的研究已从单纯的化学元素扩宽为整个地球化学系统，其研究内容已从研究元素的分布、分配及迁移，扩宽到研究地球中各种地球化学系统的成分、作用与演化。这说明在当前开展任何类型与层次的地球化学研究，必须持有地球化学系统的观点，将元素及其组合的迁移运动摆在特定的地球化学系统中去考查，并且在开展区域地球化学系统研究时，必须联系整个地球系统来认识；而在开展成矿带一级的地球化学研究时，则必须联系区域地球化学系统——区域地壳或岩石圈的特征来分析。

2. 地球物质运动的化学形式与地球物质运动的其它形式相互转化和相互制约的观点

地球化学本质上是主要研究地球物质化学运动形式的科学，因此，它与构造地质学（主要研究地球物质的机械和力学运动形式）和地球物理学（主要研究地球物质的物理运动形式）同为地球科学的基础科学（相应于地球系统的力学、物理学及化学）。它们的分工是为了深化地球物质运动各个侧面的认识，它们的联合才能全面深刻揭示地球的地质发展历史。在地球科学和地质科学的各个领域，要求开展地质构造学、地球物理学和地球化学的综合研究，已经成为当前的明显潮流。因此要发挥地球化学在综合研究中的作用，运用地球物质化学运动观点来分析地质运动问题是绝对必要的。

物质运动的各种形式，不仅是统一运动的组成部分，相互有着不可分割的联系，而且还是能够相互转化与彼此制约的。地球的构造运动、地球物理运动和地球化学运动之间，也具有相同的关系。这就是将各类地质问题转化为地球化学课题，或者对地质问题给予地球化学限制和论证，从而为发挥地球化学学科优势提供依据。例如，对于区域成矿规律问题，就可转化为成矿与伴生元素的来源，运输及浓集机制，成矿环境和条件等问题来加以研究；对于区域古构造研究，目前普遍重视了地球化学的证据与限制（Geochemical Constraint）。

同样，根据物质运动形式相互转化的观点，就有可能将地质现象、作用、环境和条件同地球化学现象、作用、环境和条件进行相互转化，使地质学语言与地球化学语言可以相互沟通。例如，从地球化学观点看，岩浆形成这一地质过程实质就是元素在熔体相与残留固相间的再分配过程，断裂带就是减压环境，碳酸盐岩层就是碱性地球化学障或天然溶液酸碱度的缓冲剂，等等。反之，地质体中元素的组合与含量特征，就能反映岩石和矿化的类型，指示地质体的成因及地质作用的物理-化学环境与发展演化过程，而放射性元素的丰度与分布，甚至直接就是地球能源、热场分布与构造运动的决定或影响因素，等等。

因此，遵循这一观点，提高对地质和地球化学课题、作用、现象、环境和条件等的认识和相互转化能力，就可充分发掘地质资料中的地球化学信息以及地球化学资料中的地质

信息,使地球化学的学科优势得到充分发挥,从而提高地球化学研究的地质和找矿效果。

3. 地球化学作用不断上升演化的观点

地球形成以来,随着其内部能源的变化(主要表现为放射性元素因衰变减少而造成的能源减少),水圈、大气圈和生物圈的形成、发展与演化以及大陆地壳产生、发展和幔-壳物质交换的发展等,内生与外生地质和地球化学作用的环境、物源特征及物理化学条件,均随地质历史的演进而发展。因此,从地球发展历史角度来看,虽然,各个大的地质时代均存在由岩浆作用到风化剥蚀和沉积作用,经深埋成岩作用后,而又发展变质作用,最终再次深熔而出现岩浆活动的地球化学循环,但历史地球化学研究证明,这种循环并非周而复始的简单重复,而是不可逆地不断向着更高层次发展和演化。外生和内生的成岩和成矿作用类型、地球化学特征与规模等,均随地质历史而发生着规律的演化^{[20][29]}。地球的各种地球化学系统(壳、幔和核;水圈、气圈、生物圈和岩石圈;各地质构造单元的地壳和岩石圈等),也由于各种地质-地球化学作用不断进行着物质和能量交换,从而发生着成分与状态的规律变化。

通过世界重要构造单元中各地质时代玄武岩类、花岗岩类和页岩类化学成分的对比,发现这三类岩石随地质时代均显示出一致的化学演化趋势,即随着时间的推移,三类岩石中Mg、Ni、Cr、Co等浓度呈规律性降低,而K、Rb、REE(稀土元素)、Sr、Ba等浓度及Fe/Mg、Fe₂O₃/FeO、Co/Ni比值均逐渐增大。这种共同的演化规律完全类似于岩浆系列的分异演化趋势,反映出地壳由基性向偏酸性方向的演变。由于地壳的物质来源于地幔,因此,地壳的这种地球化学演化亦反映深部地幔物质的分异与演化(Ronov, A. B. et al, 1984)^[27]。

由于地质-地球化学作用特征的变化及其在时间和空间中发展的不平衡性,就造成了地壳在化学上的不均一性,形成各种地球化学省、区、带。

现代地球化学中已经形成了历史地球化学的学科分支,它已在有关地球物质总体分异演化以及地球化学作用历史发展的原因、动力和规律等方面的研究上,建立了自己的理论体系^{[1][21]}。因此,在开展区域和成矿带地球化学研究时,应用历史地球化学的观点和理论作为指导思想,是极其重要的。

4. 元素分配的观点

地球形成以后,虽然,同外部宇宙空间有一定的物质和能量交换,例如陨尘、陨石与宇宙线加入地球,以及可能有些地球上的轻的气态原子(H和He等)自地球引力圈中逃出,但其总的规模甚小,不足以明显影响地球物质的总量。因此,地球基本上为一近似封闭体系,在其中除少数放射性母体元素的原子数量在减少和子体稳定同位素原子在增多外,其余所有元素的原子数几乎是不变的。因此,在地球形成以来的历史中,地球物质的化学运动(地球化学迁移),如果不涉及其机制(转变过程与输运过程,前者包括物理-化学状态和相转变-化学反应;后者包括质量迁移、能量输运和动量传递),则可主要归结为元素(包括稳定同位素)在地球不同规模的系统(大者如核、幔和壳,中者如不同构造单元、各类地质体,小者如不同矿物相和相内的不同结构位置等)间的重分配和再循环,并辅以少数放射性元素或同位素的衰变过程。

对于研究区域和成矿带来说,元素分配的观点尤为重要,因为,这里所涉及的构造运动、各类地质作用与过程,均可以元素分配的观点来看待。例如,大洋中脊玄武岩浆的溢出到洋壳俯冲消减本身就是幔-壳物质的再循环或重分配;而通过部分熔融形成岩浆、岩浆结晶分异、岩浆离熔和超临界水流体相自岩浆的分出等过程,以及风化、沉积和各类变

质作用，在本质上无一不是元素在不同相和系统间的分配过程。

自然界各相和各系统间，元素均衡分配的情况是罕见的，而不均匀分配则是普遍的，其结果必然为元素在一种相和系统中的浓集，伴随着它们在另一种相和系统中的贫化。因此，元素的富集和贫化实质就是分配过程的两极表现，控制和影响元素分配的因素和条件本身就控制和影响着元素的集中和分散。特定的时间和空间内，在不同相和系统间具有相同分配行为的元素，就构成特别相和系统中的特征元素组合。所以，特定地质体中元素组合的形成原因、机制和条件本身也取决于控制元素分配的因素、机制和条件。

各类地质作用中均贯穿着元素的分配过程，元素集中、分散与共生组合的阐明，亦依赖于元素分配规律的解决。因此，在开展区域与成矿带研究时，必须善于运用元素分配的观点来观察和分析地质与成矿现象，善于运用有关元素分配的理论与方法来解决地质与成矿问题。

5. 地质体中元素和元素组合的含量（量的方面）与赋存形式（质的方面）是地球物质化学运动过程遗迹或纪录的观点

地球化学作用同其他地质作用一样，除现代正在地表发生的作用外，均需采用反序研究的方法，即由作用过程遗留的痕迹来追溯和认识作用本身发展的进程与特征。上面已论及，地球历史时期内的地球化学作用均伴随着元素的分配过程，并在各类地球化学系统（主要为地质体）形成元素的一定浓度与组合，结合为一定物相状态。因此，各类地质体中元素的含量，组合与赋存形式，即为地球化学作用过程的重要纪录，人们必须善于运用这种纪录来研究地球化学作用本身的特征与历史。这里要强调指出的是，在当前国内的勘查地球化学研究中多只注意了元素的含量与组合，而对它们的赋存形式则重视不够，这不可避免地会由此失去一些重要的地球化学信息。

（二）成矿问题的地球化学分析

从上述地球化学基本观点来看，地壳中的成矿问题最本质地就是元素从普遍分散状态（地壳丰度水平）浓集到在某些地质系统中可被工业利用的浓度水平，而元素的浓集则又受到元素不均一分配的控制。因而，从地球化学解决成矿问题，就需涉及物源系统和成矿系统中元素初始浓度与赋存形式的作用，元素浓集的机制与控制因素，以及元素浓集环境与空间位置等问题。

1. 物源系统与岩浆系统元素初始浓度与赋存形式的意义

实际研究与理论分析已经证明，矿源层与岩浆等系统中成矿元素的初始浓度仅为成矿的有利因素和必要条件，而非成矿的决定因素和充分条件。

从理论方面看，不管这些系统中成矿元素的初始浓度能有多么高，总是距离成矿所需浓度甚远，成矿的关键还在于能否发生浓集。对矿源系统来说，就必须成矿元素能够活动转移，并向成矿系统中作适度浓集；而对成矿系统来说，成矿元素的进一步浓集则是绝对必要的。当然，在元素能够发生活动转移和浓集的情况下，物源和成矿系统中成矿元素初始浓度高些，可使它们浓集水平更高，而有利于成矿。元素在这些系统中能否活动转移和发生浓集，取决于多种因素，但元素的赋存形式总是最主要因素之一。

从实际情况分析，碱性岩浆中铍的平均浓度（9ppm）高于花岗岩浆中铍的浓度（3—5ppm），然而铍的成矿却总是与花岗岩有关。这也有力地说明，系统中元素的初始浓度不是成矿的决定因素。至于为什么初始浓度较高的系统不能成矿，而浓度较低的系统能够成

矿,这在很大程度上同铍在两个系统中的赋存形式有关。铍为两性元素,它在碱性岩浆中显示酸性,即主要呈 $[\text{BeO}_4]^{6-}$ 形式存在,它与 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 络离子在晶体化学上相似,且在碱性岩浆中又富含高价阳离子(Ti^{4+} 、 Nr^{4+} 、 Nb^{5+} 、 Ta^{5+} 和三价REE等),可以平衡 $[\text{BeO}_4]^{6-}$ 代替 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 后多余的负电荷,故使大量铍分散到硅酸盐造岩矿物中去,而不利残余富集成矿。但在酸性的花岗岩浆中,铍显示碱性,即主要呈 Be^{2+} 形式存在,这阻止了铍向造岩硅酸盐矿物的大量分配,而随岩浆结晶逐步在残余岩浆浓集,最后实现成矿。

根据上述分析,进行矿带研究时,既需注意区域与成矿带中成矿元素的背景含量,尤需重视各种体系中成矿元素的赋存形式及浓集趋势。

2. 元素浓集成矿的机制与控制因素

根据自然现象的观察以及工业与实验工作经验,物相的突然转变,诸如侵入岩的冷凝边的形成和实验体系的淬火,均不能造成物相成分的改变,即不会导致元素的集中或分散。然而,岩浆的分异结晶和盐湖水的蒸发等过程总是伴随着各相的成分变化,表现为元素在一种相中的逐渐浓集和在另一种相中的逐渐贫化。这些事实说明元素的浓集只能通过它们在不同相间的均一分配。

前面已述及,各种地质作用过程中均包含着元素在不同相间的分配过程。例如,部分熔融过程中元素的分配发生于形成的熔体相与残余固相之间,结晶分异过程中发生于结晶固相与残余熔体相之间,岩浆离熔过程中发生于两种不混溶的液相之间,岩浆热液形成过程中发生于超临界水流体相与岩浆熔体之间,冷水和热水溶液作用过程中发生于沉淀固相与液相之间;风化与沉积作用过程中发生于结晶固相、细分散相、生物机体与液相之间;而热液交代-萃取过程和变质作用过程中则均发生于各种固相与水溶液之间。这些过程均能导致元素在特定系统中的浓集,因此均可作为元素浓集成矿的机制。

能斯特(Nernst)分配定律在地球化学中的应用,微量元素在岩浆部分熔融与结晶分异过程中分配演化模型的研制,以及胶体吸附、离子交换能力与生物有机质吸收过程等的研究,已经证明,各种地质作用过程,就其作为元素浓集与分散的机制看,其效能的高低相差是很大的^{[12][22]}。通过沉积作用能形成很纯的由 CaCO_3 组成的石灰岩和 SiO_2 含量极高的硅质岩,而通过玄武岩浆彻底的分异结晶也只能使岩石中的 SiO_2 含量大致由40% (纯橄岩)变化到75% (超酸性岩)。通过海水同海相沉积粘土、碳酸盐以及海生植物中元素浓度的比较,发现粘土、碳酸盐和海洋生物均是微量元素的强烈富集剂。例如,远洋粘土中Cu、Pb和Zn的富集系数分别为830000, 1500000和500000;远洋碳酸盐岩中Zn的富集系数为250000, Sr为303;海生植物(灰分)中元素的富集系数:Ag 830, Cu 3700, Zn 15000, Au 7200, Pb 267000。然而,按照岩浆部分熔融和分异结晶定量模型,可以看出不相容元素在这些过程中可能的最大浓集程度只有几倍至十多倍。但是,在玄武岩浆的离熔过程中,亲硫元素Ni、Cu等则能非常强烈地向富硫化物的熔体相中富集。经实验测定,Ni和Cu在富硫化物熔体与硅酸盐熔体间的分配系数,在1255℃条件下分别为274和245 (Rajamani and Naldrett, 1978)^[26]。因此,一般说来沉积作用是多数微量元素强烈富集的机制。现有的实验资料还可说明,上面指出的所有其它地质过程,在有利的条件下,也能使元素富集几倍至十几倍。例如,经实验测定,Cu、Mo、Zn在NaCl水溶液与花岗质岩浆之间的分配系数,分别平均为 9.1 ± 2.5 , 2.5 ± 1.6 和9.5;并且还证明,Cu与Zn的分配系数取决于溶液中NaCl的浓度,分配系数与后者呈正比关系(Holland, 1972; Candela and

Holland, 1984) [19][15]。

当然,在物质运输过程中,由于元素性质与扩散速率的差异及流体动力学等原因,也可在流体相的不同部分产生浓度梯度,发生局部的浓集与贫化现象。

控制地质系统中元素浓集的因素是复杂多样的。其中有物理学的因素——温度、压力和动力学因素等。温度和压力决定着化合物的稳定性和系统的相平衡,影响着元素在不同相间的分配系数。同时,温度和压力梯度还是流体相运移和物质运输的驱动力,有利于成矿物质局部汇集。但是动力学因素与元素浓集关系的研究目前尚很薄弱,其实际应用的可能性还受很大限制。

化学因素主要包括地球化学系统的成分特征与物相(矿物)组成,尤其是特殊浓集剂(胶体物质、生物有机质)、络合物配位剂(Cl^- 、 F^- 、 CO_2 、 HS^- 等)和控矿元素等。沉积系统中胶体物质和生物有机质的加入,强烈地促使元素向沉积物中集中。含有适当络合物配位剂的系统中,由于重金属元素易溶络合物的形成,而增强溶液自岩层或岩浆对这些元素的萃取率,即增大这些元素在溶液与固相,或者溶液与熔体间的分配系数(如上述Cu和Zn分配系数与系统中NaCl浓度的正比关系)。控矿元素(Na、K、Mg、Ca、Al、S、O等)的作用主要表现为,它们决定主要物相(矿物)的出现与类型,以及微量成矿元素在系统中的赋存形式与结构位置,从而影响元素的分配行为。例如,Cr在玄武岩浆的橄榄石结晶阶段,具不相容元素性质($K_D^{Cr} \approx 0.032$),随岩浆的结晶而在熔体中发生浓集,导致铬尖晶石的析出。但当岩浆进入辉石大量结晶阶段,Cr则转变为相容元素,因其在辉石与岩浆间的分配系数均远高于1,它在岩浆中将不断贫化。所以,有利于Cr的浓集和铬尖晶石大量形成的因素,是岩浆中相对富 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 而贫 Ca^{2+} 、 Al^{3+} ,并且 O^{2-} 的活度足以使岛状硅氧四面体成为系统中硅酸的主要形式。因为这些因素可以延长橄榄石的结晶和推迟辉石结晶,从而使Cr得到充分浓集。在玄武岩浆分异结晶过程中,Ni始终为相容元素(总分配系数 $\gg 1$),故随岩浆结晶而迅速在残余岩浆中贫化,无成矿可能性。但当岩浆中S浓度超过硫化物在岩浆中的溶解度时,就发生岩浆离熔作用,Ni就可成200多倍地向富硫化物熔体中浓集,以致成矿,因此,硫则为Ni成矿的首要控制因素。

在熔体状态下,Na和K与氧的化学键很弱,故相对富Na和K的岩浆具有相对高的自由 O^{2-} 离子活度,即碱性。在这种系统中两性元素(Be、Fe等)主要呈酸根(氧的络离子)形式存在,因而具有与酸性系统中的不同行为。例如,Be则因之具有相容元素性质而不能浓集成矿;Fe则相反,它在相对富Na、K的岩浆中具有一定不相容元素特征,能够发生残余富集,直至成矿。故岩浆中碱金属的相对比例,对许多元素来说,均为控矿因素。费斯(Fiess,1978)研究指出,长英质岩浆系统中 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO})$ 比例的增大,有利于 Cu^{2+} 在残余岩浆中的保留与聚集[17]。

上述分析表明,在成矿带研究中必须善于应用现代地球化学有关元素分配的理论,结合区域各种地质体的实际资料,探讨各类地质作用在浓集成矿元素方面的效能及控制因素。

3. 元素成矿所需的浓集程度

元素不仅在地壳中有着差别悬殊的丰度,而且它们与当前工业可用矿石的品位要求也相差很大。如以矿石最低可用品位与地壳丰度的比值来反映元素成矿所需的浓集程度,则可看出主要金属元素成矿所需的浓集倍数为:Si 1.5, Al ~3, Fe ~6, Mn 110, Cr 400, Ni 70, Cu 50, Zn 600, Pb 600, Mo 130, As 4000, Au 6000, Sb 25000,

Bi 25000。这些数据表明，不同元素成矿所需的富集程度差别也是很大的。少数元素(主要是Al、Fe、Si等高丰度元素和P等)只需富集几倍即可成矿，因此它们往往只需通过一次地质作用的浓集就可成矿。但大多数元素则需富集几十倍、几百倍、几千倍、甚至几百万倍才能成矿。因此，这些元素则需经过多种地质-地球化学过程的逐步浓集才能成矿。由此可见，元素成矿所需的浓集程度也是分析矿床成因、预测成矿远景必须考虑的因素之一。

在一个足够大的区域中，元素的成矿无非就是元素在区域岩石圈中通过各种地质-地球化学作用发生再循环、重分配，并浓集于局部地段。这里包括壳内的再循环与重分配及壳-幔间的物质交换。壳内的再循环表现为：(1) 沉积区成矿对剥蚀区地球化学特征的继承和发展，例如秦岭褶皱系内近年来不断发现新的金矿远景区，就说明这个沉积区继承了南、北两侧古陆剥蚀区古老岩层富集金的特征；(2) 后继地质-地球化学过程对先行地质-地球化学过程的继承和发展，历史地球化学研究证明，许多元素都是通过早先的沉积过程发生初步富集，尔后再经其他各种内生地质作用进一步浓集成矿，这已为一条重要规律(Tugarinov, A. I., 1972) [30]。壳-幔物质交换主要体现为幔源的岩浆活动及其有关矿化。因此，注意搜集有关区域岩石圈和各类地质体的元素丰度资料，以历史的观点探讨区域内各类地质-地球化学作用及其继承发展关系和元素浓集的效率，同时考虑元素成矿所需的浓集程度，即可判断和预测成矿带的优势矿种及成矿的机制、条件和远景。

4. 元素成矿的环境与空间位置

成矿带的形成是地球物理场、应力场及地球化学场发展不平衡性所引起的物质剧烈运动的结果。但是就其空间展布说来，大的构造运动带则是主导控制因素。同样，在矿带内各种级次构造也是控制矿田与矿床分布的主要因素。然而成矿必定需要其他有利地质-地球化学条件的配合，因此矿床、矿体并不出现于所有相同构造之中，甚至在同一构造中也只有局部地段形成工业矿体和矿床。这就为单纯依赖地质标志进行找矿带来困难，更何况还存在着矿床与构造被覆盖的难题。

探讨控制成矿带的规模较大的构造，尤其是构造的性质与环境，是十分重要的。这种研究不仅对阐明区域构造发展历史具有意义，而且也是解决矿带成因及指示找矿所不可缺少的。

从全球构造格局看，不同的构造环境以及同一构造环境的不同部位，地质作用都有着不同的物质来源与物理-化学条件，形成不同的岩石组合和矿床系列，甚至同类岩石与矿石组合的地球化学特征也有所差别。研究中、新生代各类板块构造环境中火山岩、侵入岩(尤其花岗岩类)，其次为变质岩与沉积岩的地球化学特征，已总结出依据岩石地球化学特征判别其产出构造环境的标志、准则与图解。利用这些标志与方法，就可对矿带的古构造性质(张性—裂谷；压性—俯冲、碰撞)和环境(板内、陆缘、岛弧、洋脊等)进行判别^{[13][23][24][25]}。此外，地质体铅同位素组成也对指示构造环境具有重要意义^[16]。

研究成矿的地球化学(物理-化学)环境与条件，对于阐明成矿机制和模型，提供找矿依据和标志，均具有重大意义。然而成矿的地球化学环境与条件总是高于地质环境与条件之中，因此必须善于从地质环境与条件中提取更具有实质意义的地球化学环境和条件等因素。

在构造-岩浆活动带中，不仅可以通过火山岩与侵入岩的地球化学特征研究，判别成

矿带的构造环境，而且还可通过岩石组成矿物的流体包裹体和热力学研究，确定成岩与成矿的温度，压力，pH和Eh等条件。岩浆与围岩的相互作用关系的观察，以及岩浆岩、围岩与矿石化学特征的综合分析，可为成矿控制因素提供重要信息。例如，矽卡岩之产出于侵入体与碳酸盐岩的接触带，就决定于两侧分别为富Ca和Mg以及Si和Al的环境，而白钨矿之倾向富集于碳酸盐岩、矽卡岩和花岗岩的钠长石化带中，亦是同富钙（或 Ca^{2+} 活度高）环境有关。通过同类岩石地球化学特征的研究，可以建立起判别含矿岩体与不含矿岩体的地球化学标志，从而使岩浆侵入体从一般地质学意义上的找矿前提，转化为地球化学意义上的找矿前提。此外，矿带地球化学测量还可反映区域构造与矿化的展布，指示隐伏构造与盲矿体，阐明构造的控矿意义，有利于探讨成矿物质来源。

变质岩区域内存在的大型剪切带，可以被视为膨胀减压带，它起着使分散的变质热液汇聚的作用；剪切作用使矿物粒度减小，从而增强溶液与岩石间的化学反应速度；这种反应改变着变质溶液的原有成分，使之更加富集成矿物质；最后由于二级膨胀剪切带的减压作用，溶液又向其中运移，并在那里发生沉淀。这就是博伊尔（Boyle, 1969）以地球化学观点剖析构造剪切带（将构造因素转化为地球化学因素），从而提出前寒武纪绿岩带中金成矿的“花岗岩化—变质—膨胀”模型的典型思路^[11]。

两组断裂构造交汇处有利于成矿，从地球化学角度来看，这不仅是空间有利的问题，而且很可能那里有不同性质溶液的混合，造成物理化学条件的突变，而导致成矿物质的大量沉淀，因此那里更应视为有利成矿的地球化学障。地壳浅部裂隙，闭合的条件应相对还原，热液在那里更多的析出硫化物；张开的条件应相对氧化，热液在那里应更多的析出石英等脉石矿物，并较少析出硫化物。因此，对于细脉浸染型矿床来说，控矿裂隙愈闭合（愈细）、裂隙密度愈大，则矿石品位愈高。

近年研究沉积岩区层状硫化物矿床证明，它们具有海底热卤水喷溢成因，它们虽受地层的一定层位控制，但只在局部地段成矿，其空间位置受当时海下断裂通道和（或）海底洼地的控制。目前仅根据地表地质观察是较难发现这些通道和洼地的。然而，从地球化学观点出发，就可将找通道和洼地的问题转化为找不同于正常海水的热卤水遗迹和更封闭、高盐度、更还原的沉积环境的问题，从而有利于发挥地球化学的示踪与相分析的作用。在陕西南部柞水—山阳成矿带的研究中，就遵循这一思路，以粘土岩硼含量做为指示古水体盐度指标，以 FeO/Fe_2O_3 比值和有机质含量做为指示古沉积环境氧化-还原性质的指标，并依据粘土岩中的钡含量及矿层重晶石的Sr和Pb含量（通过实验测定分配系数）估计成矿溶液中的Ba、Sr、Pb浓度，证明了当时海下热卤水的存在及成矿地段沉积环境的高盐度和封闭还原环境，并以此为基础设计了利用环境指标（Ba, B）的地球化学找矿方法（见李泽九等1988，本文集）。

（三）研究途径

成矿带处于区域地质构造重要部位，又是成矿最集中的地带，因此其研究目标应该是双重的，即既有解决区域基础地质与成矿问题的任务，又需开展地球化学找矿方法研究，总结成矿预测的地球化学准则与指标，在矿带内开展找矿，在区域中提供评价筛选异常的经验。据此看来，开展综合性成矿带研究应该采取地球化学专题研究与区域地球化学测量（1:5万比例尺）相结合的技术路线，以利于从点面结合上深入研究。

近年来区域性的基岩地球化学测量（取样密度 ≤ 4 个样/ km^2 ）已在我国许多地区开

展。实践证明，这种方法在反映测区矿化分布与找矿效果上至少可同其他同比例尺地球化学测量方法（土壤和水系沉积物测量）相比，甚至有所超出；而在反映测区地质构造及解决基础地质和成矿问题方面，岩石测量方法无疑地较之其他方法有明显的优越性。考虑到在已开展1:20万水系沉积物测量的地区，再进行1:5万水系沉积物测量已无必要，因之我们认为，在条件许可与合适的情况下，应优先采用岩石化学测量方法。

在我们组织的几个成矿带地球化学研究中，岩石地球化学测量的采用，有的是配合1:5万区域地质调查进行的（见陈伟志等，1988，本文集）；有的考虑到便于1:5万地球化学测量与区域地质调查能较好地同步进行，还研制了按采样单元和采样单位进行采样的岩石测量方法，并取得较好的地质与找矿效果（见曾太文等，1988，本文集）。在柞水—山阳成矿带研究中，曾分别应用专题研究样品数据和岩石测量样品数据解决某些基础地质问题，结果取得了近似的结果，表明地球化学测量数据尚具有很大的潜力可以挖掘。

地球化学专题研究与岩石地球化学测量的结合，还有利于地质学与地球化学相互渗透，有利于实现下述两个转化：首先将成矿的地质环境与条件转化为地球化学环境与条件，并赋予预测区特征元素组合以地质意义；然后再将成矿有利的地球化学环境与条件，连同已具地质意义的异常元素组合和特征，转化为地球化学异常解释评价的标志与准则，建立地球化学预测的指标与模型。这样就可突破目前地质和地球化学图件两张皮，以及仅就异常评价异常的局面。当然，异常评价的数学模型化是必要的发展趋势，不过更重要地是必须首先使这种数学模型具有反映实际地质-地球化学模型的基础。

综合上述三方面的认识基础和理论分析，我们认为开展成矿带地球化学研究，必须以区域地壳（最好以岩石圈）为系统，以各类地质体的地球化学资料为基础，以历史地球化学理论与观点为指导，通过地球化学专题研究与区域地球化学测量相结合的途径，探讨元素通过各类地质-地球化学作用发生分配、演化的趋势，查明区域地球化学场的分布、性质与地质意义，开展矿带构造环境和成矿规律的地球化学分析，进而实现成矿地质环境、条件向地球化学环境、条件的转化，以及成矿地球化学环境、条件向找矿标志与准则的转化，并连同异常特征，建立异常评价的指标与模型，开展测区成矿远景预测。

上述成矿带研究的理论骨架仅是初步的和基本适应当前地球化学水平的。今后随着化学动力学、流体动力学、非平衡过程热力学及耗散结构理论等在地球化学中的应用、发展和成熟，还需探索更加完善的理论体系。

二、成矿带地球化学研究的方法

成矿带存在的问题是多方面的，地球化学研究方法因之也是多种多样的。在本节中我们只着重讨论有关区域与成矿带岩石地球化学测量成果整理与应用方面的几个带普遍意义的研究方法。当然这种讨论只是一般原则性的，而具体论述读者可参看本文集的有关论文。

（一）元素及元素组合地质意义的确定

查明元素与元素组合的地质意义，是应用地球化学解决基础地质、成矿与找矿问题的重要基础之一。解决这一问题可以采用直接对比法和因子分析法。

直接对比法就是将区域与成矿带地球化学图中元素或元素组合的高含量区和异常的分

布直接同地质体与矿化体的分布相对照, 以及将元素和元素组合与相应地质体和矿化体的岩石、矿物的化学成分相对照, 从而确定引起元素与元素组合高含量区和异常的地质原因及其地质指示意义。

1973年我们在陕西略阳煎茶岭超基性岩镍矿区工作, 发现多种元素的复杂异常, 不区别各类异常的成因, 就很难排除干扰, 筛选出真正的指示镍矿体的异常。为此我们就采用了直接对比法, 使这一问题得到了解决^①。例如, 我们选择岩浆期镍矿体(由磁黄铁矿-镍黄铁矿型矿石组成)与热液期镍矿化(黄铁矿-针镍矿-辉镍矿)单独出现的地段, 对照该处异常特征, 发现前者出现的是Ni、Co、Cu组合异常, 且Ni/Co比值 >20 , 这同岩浆型矿石的成分和Ni/Co比值完全一致; 而在后者矿化的范围内, 出现了Ni、Co、Cu、As组合异常, 且Ni/Co比值 <20 , 这同热液型矿化体中含有少量辉镍矿和Ni/Co比值相一致。经地球化学研究还证明, 热液期镍矿化是沿切割岩浆型镍矿体的裂隙发生的, 并以岩浆型矿石为物源, 这种异常已达地表。因此, 这种热液期矿化引起的Ni、Co、Cu、As (Ni/Co <20)组合异常, 具有指示岩浆型镍矿体(深埋地表下200m, 岩浆期同生异常紧包矿体未达地表)的意义。矿区内广泛分布于海西期超基性岩体两侧的大面积As异常, 同样随燕山期花岗斑岩侵入而发生的大范围黄铁矿化有关, 这种黄铁矿含砷平均为820ppm, 因此As异常仅反映晚期的黄铁矿化, 而无指示镍矿的意义。矿区内V异常出现地段基本同炭质板岩、变辉长岩脉和晚期磁铁矿化-铬云母化分布吻合。分析证明炭质板岩明显富V, 变辉长岩中绿泥石含V达255ppm, 透闪石中达94ppm; 磁铁矿含V达420ppm, 铬云母含V最高, 达2000ppm。因此V异常仅有指示特殊岩石与晚期矿化、蚀变的意义。

因子分析是当前研究地球化学系统中元素组合的最佳方法, 它不仅能从元素内在的联系上划分元素组合, 而且还能为元素组合的地质意义提供信息。但在应用因子分析时, 要想取得较好效果, 就须注意以下几点: (1) 要目的明确, 针对需要解决问题的性质, 采用不同层次的因子分析; (2) 为了提高因子分析提供地质-地球化学信息的作用, 必须在变量中包括具有指示意义的标型元素; (3) 要注意因子元素组合同地质体中岩石和矿物元素组合的对照。

要划分某类岩石, 例如沉积岩或沉积物的元素组合, 并了解影响它们的地质因素时, 就必须仅选用这种沉积岩的样品(尽量避免矿化、蚀变和风化影响), 并在变量中加入Zr、La等以反映矿物碎屑因素, 加入Sr以指示碳酸盐因素, 加入Al、K、Na、Mg、B等以指示粘土矿物因素, 加入Fe、Mn、V等以反映氧化物因素等, 例如, 斯本塞等(Spencer et al., 1968)在应用因子分析研究帕里亚海湾(the Gulf of Paria)沉积物的地球化学时, 就注意了这些原则, 取得了较好的效果。他们的因子分析表明, 前五个因子的累积方差贡献就达90%, 并对这五个因子组合赋予以下地质涵意: (1) F_1 的组合为Ti、Al、K、Cs、Cr、Ni、Cu、Li、Rb, 加上负载荷的Zr。正载荷的元素组合反映粘土沉积因素, Zr反映碎屑矿物, 尤其石英, 两者的负相关关系说明粘土沉积与矿物(石英为主)碎屑沉积的反消长关系, 或者碎屑沉积的稀释因素。(2) F_2 为Ca、Sr和 CO_2 组合, 反映碳酸盐因素。

(3) F_3 为Fe、Mn、V和Co组合, 反映Fe、Mn氧化物因素。(4) F_4 为Na和B, 受伊利石-海绿

① 张本仁等, 1985年, “陕西略阳煎茶岭超基性岩镍矿床的地球化学特征及地球化学找矿的某些问题”研究报告。

石因素的影响,因伊利石对硼有强的吸附能力,而海绿石则以钠为主要组分之一。(5)
 F_5 为Mg、Ba和Be组合,受蒙脱石因素影响。

在北秦岭地区,我们为了探讨含矿与不含矿斑岩体的判别方法,分别对含矿斑岩体与不含矿斑岩体的样品进行因子分析,变量中既包括反映岩浆岩和蚀变的标型元素(Ti、V、Sr、Ba),又包含成矿元素Pb、Zn、Ag等。分析结果表明,含矿岩体中Pb、Zn、Ag、Co构成最重要的因子组合(F_1 因子方差贡献为20.61%)。根据这组元素同造岩矿物长石和黑云母的特征元素(分别为Sr及Ti和V)无相关性,认为这组元素反映矿化因素。 F_2 为Cu、Mo、F,加负载荷Sr的组合,根据斑岩体中普遍存在辉钼矿和黄铜矿矿化,并伴随斜长石的钾长石化(Sr随Ca带出),可以认为这个因子组合反映矿化与蚀变因素,矿化和蚀变愈强,Mo、Cu带入愈多,而Sr的淋失也愈强。然而无矿斑岩体因子分析的结果表明,成矿微量元素与反映造岩矿物的特征元素均处于共同的因子组合之中,这说明不含矿斑岩体的元素因子组合明显不同于含矿斑岩体^[2]。

对于区域或成矿带规模的,以各类地质体资料为基础而进行的因子分析,一般只能反映到地质作用或各类地质体和矿化层次的因素。在这种情况下编制因子组合的因子得分图,并与测区地质图进行对比,就能有效地查明各因子元素组合的地质意义(见曾太文等,1988,本文集)。

(二) 地质体中元素本底含量与叠加含量的确定

地质体形成后经常要受到后来各种地质作用的影响,使该地质体形成时元素的初始含量受到改变,即有所增益或亏损。区别地质体的初始本底含量与叠加作用造成的元素含量的增益或亏损部分,对于判别诸如侵人体或矿源层元素含量的性质(同生与后生),估计地质体元素属正常场或异常场,以及确定元素地球化学异常下限等,均具有重大意义。

以往通常采用多重母体分解的方法来解决这一问题。近年来於崇文以维斯特里乌斯(Vistelius, 1960)提出的“地球化学过程的基本定律”为依据,提出了解决这一问题的新途径。该定律说明:“地壳中化学元素浓度的概率分布可以分为两类。第一类是地球化学过程中某一特定阶段的分布,这一类分布是正态的;第二类是地球化学过程中若干阶段混合产物的分布,这一类是偏离正态,并且是明显正偏的”^{[3][32]}。於崇文结合南岭地区地层地球化学研究的实际情况,具体将该定律表述为“由单一地球化学过程所形成的单一地质体中,化学元素的含量服从正态分布”,并相应地提出一套应用柯尔莫洛夫-斯米尔诺夫正态检验剔除离群样品,计算地质体元素初始本底含量(A)的方法。而以全部样品(不经剔除)数据求得的平均含量,即为地质体经两种或两种以上地球化学过程综合作用形成的元素平均含量(M)。因此 M/A 比值就成为度量地质体遭受叠加作用强度的良好参数。利用这种方法与参数,他们成功地研究了地层的元素丰度和地质体含矿性评价问题^{[4][5]}。

在我们近年研究秦岭地区层控矿床含矿地层的地球化学特征时,发现成矿元素(Pb、Zn、Cu、Ag等)的 A 值无论在近矿或远矿地段都较低,并沿地层走向变化不大,说明正常海相沉积作用并未引起这些元素的富集,且使元素分布得较为均匀。然而就元素的 M 值来说,近矿地段含矿地层明显高于远矿地段,且近矿地段含矿地层中的 M/A 比值很高($\gg 1$),远矿地段相应层位的 M/A 比值则接近为1。这种情况有力地说明,矿段中成矿元素的富集是由其他地质-地球化学过程作用的结果(非正常海相沉积作用),并且含矿地层仅具有时控、层控意义,而无提供成矿物源的作用。由于矿床具有明显同生沉积特征,正常海水沉

积与海底热卤水沉积两种过程是同时在同一地段中发生的(双层结构沉积模型)。因此我们认为,两种同时发生的地球化学过程,只要在空间上重叠,并且强度不均匀,其所造成的元素分布亦是正态的、正偏的(见李泽九等,1988,本文集)。

前寒武纪变质地层的地球化学研究证明,虽然区域变质岩属多次地质作用产物,经历了沉积-成岩和变质作用,但片岩类、斜长角闪岩类和混合花岗岩中的元素(主要是过渡型铁族元素)仍服从正态分布型式^①。据此,我们初步认为成岩作用和区域变质作用都为均匀叠加于沉积产物之上的过程,它们是几个正态分布母体的均匀叠加,结果元素的分布仍为正态型式。如果进一步的研究能完全肯定这一规律,那末我们就有可能将区域变质岩石中元素的 A 值视为变质岩石元素的本底含量,而以 M/A 比值作为衡量变质岩遭受其它作用(退变质,混合岩化,矿化等)影响强度的参数。

最近曾太文等(1988,见本文集)利用测区岩石地球化学测量资料进行因子分析,通过各因子元素组合地质意义的认真研究,将因子分为反映同生作用和后生(叠加)作用的两类,并根据 $Z = \Delta Z_T + \Delta Z_K$ (Z 为变量标准化数值矩阵, ΔZ_T 和 ΔZ_K 分别为同生分量和后生分量),以及 ΔZ_T 和 ΔZ_K 均等于 $\sum_{j=i,k,l} A_j \cdot F_j$ (A_j 分别为同生和后生诸因子载荷, F_j 分别为同生和后生诸因子得分)的公式,将每种元素在每个网格结点上的含量值分解为同生和后生两个分量,并以此为基础,编制了元素的同生地球化学场和后生地球化学场图,取得了既能反映区域地质构造特征,又能指示矿化分布和强度的更好效果。

(三) 地球化学场的研究方法

区域与成矿带的地球化学场具有随机性与结构性(即空间相关)的双重属性。只有应用法国马特龙(Matheron, 1962)提出的“地质统计学”理论(随机场理论)及其所运用的具体方法(克里格法),才能更有效地研究各种地质作用(包括成矿作用)的空间展布,揭示其空间结构^[6]。於崇文(1980)首次将这种随机场理论与方法应用于区域地球化学场的研究,并取得很好的效果与经验,对于随机场理论与克里格法也做了详细介绍^{[4][5]}。

在我们这轮成矿带地球化学研究中,通过八达岭矿带和柞水—山阳矿带专题所进行的,运用多种方法(移动平均法、距离平方倒数加权移动平均法、趋势面分析法、普通克里格估值法和泛克里格估值法)编制区域地球化学图的对比,从实践上再次证明克里格法与泛克里格法的明显优越性。其具体表现为:(1)可以较好地反映特定地质体和矿化的展布与形态,而不发生偏移现象;(2)可以利用“地质统计学”的变异函数,分析某特定地质过程对元素分布的影响是否存在异向性,例如在柞水—山阳成矿带中通过Mo和Cu的变异函数计算,发现变异函数值在南北向稍大于东西向,说明它们的含量沿地层走向或区域主构造线变化较小,而在垂直构造线方向则变化较为明显;(3)可以利用变异函数计算得出的变程,估计测区矿化范围和规模大小,例如在柞水—山阳矿带中,Zn在I级结构中的变程为9km,在II级结构中的为0.9km,分别反映了本区层控矿床和岩浆热液矿床Zn矿化范围;(4)通过计算得出的元素变程,判断岩石地球化学测量的取样密度是否合理,例如在八达岭矿带中计算得出的元素各个方向的变程均大于1km,而采样密度为1.61个样/km²,每个样点控制0.62km²,说明这种取样密度不会漏掉有意义的矿化与地质体(见李泽九等,1988;曾太文等,1988;本文集)。

● 中国地质大学(武汉)地球化学系,郭孝明硕士学位论文,1988。(武汉)