



中国地质调查成果

CGS 2014-022

CIXING DIZHIXUE YU CHANGLUN

ZAI JINSHU CHENGKUANGXUE ZHONG DE YINGYONG

磁性地质学与“场论” 在金属成矿学中的应用

◎李 行 赵东宏 赵振明 等著

地 质 出 版 社



中国地质调查“秦岭关键地区区域地质调查(编号:12120113047600)”
和“秦岭成矿带矿产资源潜力调查(编号:12120113047800)”项目资助

磁性地质学与“场论” 在金属成矿学中的应用

李 行 赵东宏 赵振明 彭素霞 著
李宗会 王 虎 罗根根

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 摘 要

本书是作者多年来对某些金属矿床成矿与物理场效应间的关系以及相关地质事件的动力学基础问题的一些思考所撰写的文稿编汇而成的。涉及内容分两大部分。第一部分（上篇）强调应把具有某些离子态性质的岩浆熔体和气液矿质流体在其运移过程中所激发的电磁场效应与熔体或矿质流体内的元素（离子）的相互关系联系起来，探究其矿床形成的重要机制。内容包括岩浆型铬铁矿、青海德尔尼铜钴矿床、南非布什维尔德杂岩层状铬铁矿，以及相关小岩体成矿问题或模型解释等。第二部分（下篇）是地球动力学与磁性地质学，主要内容包括：地磁场与宇宙场的耦合关系，重要地球事件与天文周期的时间尺度；秦祁昆造山系重要地质事件与地磁极性关系；地磁极性倒转和地磁视极移等。中心论点是：强调从日地（太阳系与地球）、银地（银河系与地球）之间的磁运动学关系，寻求对地球事件的动力学基础做出较合理的解释。

本书可供地质学、矿床学领域的同行们商榷和参考。

图书在版编目（CIP）数据

磁性地质学与“场论”在金属成矿学中的应用 / 李
行等著. —北京：地质出版社，2015.4
ISBN 978-7-116-09216-7

I. ①磁… II. ①李… III. ①磁性—地质学—应用—
金属矿床—矿床成因论②场论—应用—金属矿床—矿床成
因论 IV. ①P618.201

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 068263 号

责任编辑：赵俊磊 吴宁魁

责任校对：王 瑛

出版发行：地质出版社

社址邮编：北京市海淀区学院路 31 号，100083

电 话：(010) 66554642（邮购部）；(010) 66554627（编辑室）

网 址：<http://www.gph.com.cn>

传 真：(010) 66554686

印 刷：西安地质矿产研究所印刷厂

开 本：787 mm × 1092 mm¹/16

印 张：10.5

字 数：240 千字

印 数：1—800 册

版 次：2015 年 4 月北京第 1 版

印 次：2015 年 4 月北京第 1 次印刷

定 价：36.00 元

书 号：ISBN 978-7-116-09216-7

（如对本书有建议或意见，敬请致电本社；如本书有印装问题，本社负责调换）

第一作者简介：李行，男，汉族，1935年生，云南省凤庆县人，研究员。1956年重庆大学地质系毕业。工作后一直从事基性、超基性岩及相关矿产专业研究。其中20世纪80年代前，主要以铬铁矿成矿学为主要研究领域，80年代后转向与基性、超基性岩有关的铂族元素矿产研究，1995年退休。作为第一作者出版专著《扬子地块北缘和西缘前寒武纪镁铁层状杂岩含铂性》（1995年，西北大学出版社），作为第二作者出版专著《中国含铂基性超基性岩与铂（族）矿床》（1993年，西安交通大学出版社）、《中国超镁铁质岩》（1995年，地质出版社），并发表过多篇地质专业论文。

第一作者 李行研究员 题词

詞心序
身納百川如足杆莽里山
風霜雨露數千年月缺月
圓已華風燭殘年還本遺
願開珊歲月撰餘篇仰長
空天地本一體有始銀盃
旋轉時萬物皆緣解證中

第一作者

前言

作为地球科学系统的主流分支学科的地质学，一直是自然科学领域争论最激烈的学科之一。从18世纪开始，在近300年的发展历史中，地质学曾出现过三次最激烈的争论。第一次为维尔纳（A. G. Werner, 1749~1817）的“水成论”与赫顿（J. Hutton, 1726~1797）的“火成论”之争；第二次是发生在19世纪的莱伊尔（Lyell, 1797~1875）的“渐变论”与居维叶的“突变论”之争；第三次为20世纪的“固定论”与“活动论”之争。

从现今观点看，无论是“水成”与“火成”，“渐变”和“突变”或是“固定”与“活动”论，应当说只不过是地球系统演化过程中两个方面的对立统一表现。诸如“火成”与“水成”论间互为转换性，“渐变”与“突变”的量变到质变间的辩证关系，“固定”和“活动”论间的静态和动态间的相对性，等等。其实，作为对“未知世界”探索的地质学，无论何时创立的理论都只有相对性，而无绝对真理的意义。而且，与人类社会历史发展一样，地质学也同样遵循着肯定—否定的辩证认识规律。特别是随着科学技术的进步和发展，某些重大科学技术问题的突破，总是会不断提示人们去重新认识自然界，创建新的理论体系。当然，这一肯定—否定的辩证认识规律，并非是全盘否定先前建立和对当时科学发展起过积极作用的一些理论体系。诸如“水成”（沉积）和“火成”岩仍是现今地质学的两大基础学科之一。“渐变”和“突变”论也被广泛融入地学研究的领域内，如生物繁殖与灭绝、气候和环境、地磁极性迁移和地震学研究等。而“固定”和“活动”论目前还在并存发展争论之中，如对大洋和大陆岩石圈动力学机制的解释等。其实，20世纪60年代以赫斯（Hess）为代表发展起来的海底扩张或板块构造理论，近年来，在大陆岩石圈应用上已引起不少地质学家的质疑。某些方面暗示出海底扩张理论并非是全面解释地球系统演化唯一正确的理论。

另一方面，对历史上曾出现过的不同观点的学术理论体系的评述，不当以现今观点去否定一切，而应当站在当时的科学技术发展水平和思维体系上去评价它对该学科领域的推进作用和贡献。只要是对当时科学和社会进步有推进作用的，那它就是进步和肯定的，至于其后被某种新理论取代，这是自然科学和人类认识的一种自然发展规律，是肯定中的否定，是发展中的否定。典型的如我国20世纪50~70年代大地构造学界的争鸣，在“百花齐放”、“百家争鸣”的学术氛围中相互促进、推陈出新、不断发展，这不仅使

地质科学理论水平得到极大提升，也让我国地质找矿工作取得了丰硕成果，为中华民族地质事业作出了举世瞩目的贡献，历史是不会忘记地学先辈们的创新精神的。

事实上，20 世纪特别是后半叶，是人类科学与进步的重要变革时代。空间的探月工程、卫星观测技术、大功率大口径的天文射电望远镜，地面上的地球物理、古地磁学、气象生物工程，以及三维性的地学观测技术，都无形地聚焦于人类赖以生存的这个地球星体上，许多理论和假说不时展露于世，如大陆漂移和再造，地磁场起源及磁场倒转，生物灭绝和气候环境资源，大陆岩石圈的动力学，等等。而且各专业学科正以各自特有的方式追逐发展自身领域的一些前缘性理论体系，可以说它代表着近代科学发展的一种新趋向。

如果说人类历史上发展和建立起来的自然科学体系，大多是立足于地球这个实体基础上的话，那么以后逐渐被分化出来的专业性学科门类，只不过是为其更深刻揭示某一领域的内在规律而人为地被分割出来，不管这种分割再如何细微或详尽，最终都应当汇集到对星际空间一员的地球这个行星体的剖析和认识上来。

在这方面值得特别关注的是，20 世纪兴起和迅速发展起来的古地磁学研究，已深刻影响到整个地球科学系统的理论思维和发展趋势。如古地磁极性状态与重要地球事件发生的时间关系，古地磁视极移与古大陆再造，古地磁极性变更与天文周期的时间尺度等。或许可以认为，在地球发展演化过程中发生的一切重要地球事件，都应当是地球在随太阳系绕银河系轨道远程上所发生的。这便提示人们只有从古地磁记载的这一过程去寻求原因和解释。或者更直观地说，地球是磁性星体，太阳系和银河系也有磁场，也是个星际级磁性系统，本身三者间就是一种磁运动学系统，人们只有在这个结点上剖析出各种地球事件发生的磁运动学背景，才能以此来建立地球事件发生的动力学基础。

再一方面，日地、银地间的磁运动学关系，还会不时影响到地球内部物态的调整和运动方式，诸如地幔柱的形成，热对流，岩浆和成矿事件的发生皆是这种调整过程的明显标志。实验岩石学资料证实，高温岩浆熔体是带有离子态的，气液矿质热流体也是一种带离子化性质的。当它们运动或移动时，会类似于运动电荷那样，会在周围空间激发电场和磁场。应当说正是这种电磁场效应与元素（离子）间的相互作用关系，可能才是某些金属矿床成矿的重要机制。

当然，无论是从磁运动学关系提示的地球事件的起因，还是从电磁学原理解释的某些金属矿床成因机制，目前还无版本作镜鉴。故此，所提问题和解释只能说是一种粗浅尝试。

目 录

上篇 岩浆型金属矿床成因问题的“场论”解释

1 岩浆型铬铁矿床成因问题的“场论”解释	(3)
1.1 几个重要含铬岩体及矿床实例	(6)
1.1.1 玉石沟岩体	(6)
1.1.2 松树沟岩体	(9)
1.1.3 大道尔吉岩体	(14)
1.1.4 萨尔托海岩体	(17)
1.1.5 西藏罗布萨岩体	(21)
1.1.6 宁夏小松山岩体	(26)
1.2 岩浆运动或流动形式与物理场 (电磁场) 效应	(27)
1.2.1 层流 (或平流)	(29)
1.2.2 涡流形式	(30)
1.2.3 弧流运动形式	(32)
1.3 岩浆不同运动形式的电磁场效应对元素的选择性	(32)
1.4 成矿过程分析	(39)
2 含铬岩体产出部位的构造应力场与物理场间的某些相关性	(44)
2.1 控岩构造特征与岩相、岩石类型组合的产出配置关系	(44)
2.2 应力场与物理场相关性	(49)
3 布什维尔德岩体层状铬铁矿成因的“场论”解释	(52)
3.1 岩体地质概况	(52)
3.2 临界带的铬铁岩层	(52)
3.3 临界带铬铁岩层的成分变化特征	(56)
4 从“场论”观点对青海德尔尼铜钴矿床的成因解释	(64)
4.1 矿床产出构造环境与格局	(64)
4.2 矿床特征及成因纷议	(74)
4.3 矿床成因的“场论”解释	(76)
4.3.1 基本原理	(77)
4.3.2 成矿过程剖析	(79)
4.4 成矿事件与模型分析	(84)

5 有关小岩体成矿问题的“场论”剖析	(88)
5.1 中酸性小岩体的成矿作用	(90)
5.1.1 介质间的场源关系	(90)
5.1.2 温差汤姆逊效应	(95)
5.1.3 岩体形态曲率效应	(95)
5.1.4 物源条件	(96)
5.2 基性、超基性小岩体的成矿作用	(97)
5.2.1 Cu、Ni 组分的汇集机制	(98)
5.2.2 外来硫加入机制	(101)
6 韧性剪切带的物理场效应与金的成矿作用	(103)
6.1 韧性剪切构造带的物理场效应	(103)
6.2 成矿过程及模型	(107)
6.3 结 论	(108)
7 结 语	(109)
参考文献及资料	(110)

下 篇 地球动力学与磁性地质学浅议

8 引 言	(115)
9 地球动力学与磁性地质学研究的基本思路和立论依据	(117)
9.1 地球的“质”	(117)
9.2 地磁场的起源	(119)
9.3 地磁场与外源场的耦合关系	(119)
10 重要地球事件与天文周期	(124)
11 秦祁昆造山系重要地质事件与地磁极性关系	(129)
11.1 重要构造—岩浆事件	(129)
11.2 地磁极性与重要成矿事件	(136)
12 天文周期与地磁极性	(140)
12.1 天文周期的时间尺度	(140)
12.2 地磁极性倒转	(143)
12.3 地磁极性与地质事件的对应关系	(145)
12.4 古地磁极的视极移	(148)
13 结 语	(152)
参考文献及资料	(153)
后 记	(157)

上 篇

岩浆型金属矿床成因
问题的“场论”解释

1 岩浆型铬铁矿床成因问题的“场论”解释

新中国成立初期，基于国民经济建设对铬铁矿资源的急切需求，国家曾大力投入过对该矿种的勘查找矿工作，特别是20世纪60~70年代，多部委曾联合在新疆、内蒙古两地组织过地域性的铬矿找矿会战工作。在此同时，各省（区）地勘和科研单位也将此矿种列为省级地勘重要对象。毫不夸张地说，这在国内外地勘史上也是少见的。也正是这一工作布局，不仅在较短时期内基本查明了中国大陆境内基性、超基性岩体的产出分布，发现了一批重要的铬铁矿床或矿产地，而且，也使我国铬铁矿床学理论研究工作得到极大提升。除累积大量的实际研究资料和数据外，一些像“毛、条、体、带”（王述平，1962，1977）、“流动分异”高庆华（1965）、“熔离”（王恒升，1965；王恒升等，1983）等的新铬铁矿床成因观点，也不失为当时世界研究的先进水平。截至目前，尽管我国铬铁矿资源还未获得根本性突破，但先驱的实践和创新精神仍是值得记忆和弘扬的。

迄今，在中国大陆境内已发现近万个基性、超基性岩体，总面积超过5000 km²，有的是呈独立岩体，有的为基性、超基性杂岩体。其中，面积在10~100 km²以上的岩体仅100余个，约占岩体总数的1%，余者皆为小型岩体，最大岩体为西藏境内的日喀则和丁青两岩体，面积可达500~1000 km²。

到目前为止，我国尚未发现像南非布什维尔德那样前寒武纪的镁铁层状岩体和巨型铬铁矿床，探明的一些铬铁矿床无一例外地产出在古生代以来造山带蛇绿岩或阿尔卑斯型基性、超基性岩体内。其间规模达百万吨级的有新疆萨尔托海，西藏罗布萨、东巧，内蒙古赫根山，甘肃达道尔吉岩体和铬铁矿床；数十万吨级的有陕西松树沟、青海玉石沟、新疆鲸鱼、宁夏小松山岩体和铬铁矿床。时代上，可分为早古生代，晚古生代和中生代三个重要成岩成矿时段。早古生代以玉石沟、松树沟中型矿床为代表；晚古生代有新疆萨尔托海、内蒙古赫根山大中型矿床；中生代以西藏罗布萨和东巧两大型矿床最典型。按规模似乎有随时代变新而增大之势。发现的铬铁矿床以囊状、豆荚状矿床（体）为特征，似层状或条带浸染状矿床（体）较少。

尽管铬铁矿为典型岩浆矿床无多大争议，但与镁铁—超镁铁岩之间的共生成因关系确存在一系列不同看法和认识，总体说有个从早期岩浆矿床到晚期残余岩浆至熔离成因矿床的认识变化过程。其间，最早由Vogt（1894）提出的早期岩浆分异矿床的主要论据是：认为液态岩浆含有难熔的金属物质，在岩浆冷却过程中首先结晶金属矿物——铬尖晶石，由于重力效应铬尖晶石沉淀堆积在岩浆底部，形成层状矿床。这种观点也一度影响到我国早期的铬铁矿勘查工作。诸如“探边摸底”勘查思路的实施，不过时间不长，随着大量找矿实践和岩石矿物学研究，许多矿床学家注意到，许多矿床（包括层状岩体和陡倾斜岩体）不是生于岩体的底部或下部，而是生在岩体的上部、中部或边部。岩石矿物晶出结构关系表明，铬尖晶石晶出大都晚于橄榄石和辉石，且所见岩石中的副矿物铬尖晶石和

矿石中的造矿铬尖晶石成分存在显著差别，这些都无法用晶体重力沉淀来解释。就此，以 Sampson (1929) 为代表相应提出了晚期岩浆残余矿床成因假说。他不仅发现造矿铬尖晶石的晶出晚于硅酸盐矿物橄榄石，且认为矿物的晶出次序不仅取决于熔体温度，也受熔体物质各种组成成分比例及元素的性质、挥发组分的含量影响，所以铬尖晶石的晶出可以晚于硅酸盐矿物等。也就在此前后，苏联学者 Обручев (1929) 研究硫化物矿床时曾提出了“熔离”（分熔）成因观点，也被 Шдлун (1933) 应用于铬铁矿的成因解释中，即铬铁矿熔离成因观点。认为含矿的岩浆在挥发组分或其他作用影响下，可分成两个不相混熔的液相，即铬铁矿岩浆和硅酸盐熔浆，两者不混熔。铬的络合物曾呈液相点滴在内聚力（表面张力）作用下，从岩浆中分离出来，如果冷却较快时，矿液点滴不能更多汇集，则形成浸染状矿石。如果冷却缓慢，矿液点滴进一步汇集可能成块状矿石。事实上，这种铬铁矿岩浆和硅酸盐熔浆不熔现象，已被其后 20 世纪 50 年代发展起来的实验岩石学资料所证实。如 Keith (1954) 的 $\text{MgO} - \text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ 系统；Muan 和 Somiya (1960) 的 $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ 和 $\text{FeO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Cr}_2\text{O}_3$ 系统；Classr 和 Osborn (1958) 的 $\text{CaO} - \text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ 和 $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ 系统等。因此，岩浆和矿浆的不混熔性或熔离机制已广泛应用于岩浆矿床的成因问题解释中。

值得指出的是，我国著名学者王恒升等 (1983)，依据查瓦里斯基提出的“辉长岩 - 橄榄岩岩浆还处在液体状态时，能够在侵入体的内部分异成各种成分的岩相带”以及索科洛夫研究证实的“南克拉卡岩盘原生带状构造的垂直分异不是由于重力结晶分异，而是岩浆完全在液相状态时重力分异的结果”的认识，进一步提出“由液态重力分异产生的‘局部’岩浆，每个‘局部’岩浆在结晶过程中又可形成残余含矿熔浆，再加上残余熔浆的熔离作用，便可形成富矿的矿浆。前者可以各种浸染状矿石组成的矿体（床）为代表；后者则由稠密浸染 - 块状矿石组成的矿体（床）为特征”。故此，他们建议铬铁矿床成因分类为：

(1) 残余岩浆矿床

1) 无应力作用影响的（残余岩浆 a 型）。

2) 在应力作用下的（残余岩浆 b 型）。

(2) 分熔（熔离）矿浆矿床

1) 就地型（a 型）。

2) 移动型（b 型）。

按其解释，残余岩浆 a 型矿床是指岩浆侵入岩浆房后形成矿液的。矿浆形成过程未受应力影响而运移，原地固结的，岩体和矿体中没有流线、流面和条带构造等定向构造。若有定向构造则说明成矿阶段岩浆或矿浆有运动发生，或者岩浆和矿浆结晶作用和运动同时，则为在应力作用下的残余岩浆 b 型矿床。而属分熔（熔离）类的 a 型矿床，指的是含矿熔体内矿浆与纯橄岩浆没有发生脱离现象，矿体均产于较大的纯橄岩分离体内，造矿铬尖晶石成分与纯橄岩分离体的副矿物铬尖晶石成分相近。如果矿浆团脱离岩浆团，便形成“脱壳”使矿体直接产于另一岩相内，则为移动型分熔岩浆矿床（b 型）。

除上述外，在铬铁矿成因问题研究中还出现过热液成因或热液变质成因（Fisher, 1929）、气成成因（Кормиский, 1966）、应力分异成因（Diller, 1919）等多种观点。尤其是 Diller 的应力分异成因观点所强调的矿质在含矿熔浆中的分异是在定向压力作用下以

结晶作用方式进行的,定向压力和结晶作用同时发生的看法,在20世纪我国铬铁矿勘查研究中也有类似的应用和发展。诸如高庆华(1965)提出的“岩浆侵入过程中边流动边分异成矿”的观点,王述平(1962,1977)对松树沟铬铁矿床产出分布规律“毛、条、体、带”的认识等。与应力分异成因观点不同处在于这种定向压力并非只控制矿物的结晶分异作用,而是液态岩浆在动力条件下的一种流动分异和分熔。并总结得出,矿床(体)多集中产出在岩体转弯、膨大、由宽变窄或由窄变宽,以及边界外突或基底洼槽等部位上。这些部位恰是岩浆流速发生变化,容易产生紊流、涡流的地方。

其实,岩浆流动分异成矿观点,在当时我国铬铁矿勘查和研究工作中,已作为一种较为有效的经验被广泛地推广和应用,并取得了一些相应成果。而且还发现受一定动力作用条件下的岩浆流动构造,在不同岩体中均有其特定的部位,除流线、流面构造发育外,还是各种异离体(纯橄岩、辉石岩、辉长岩等)、后期脉岩和围岩捕虏体相伴产出的重要地带,甚至在岩石结构上可出现从细粒—伟晶结构的岩石组合。这一特征,不仅在阿尔卑斯类型岩体中发育,而且在层状杂岩体中也广泛存在并与层状铬铁矿床产出层位相一致。如南非布什维尔德杂岩体产出的层状铬铁矿和梅林斯基型Cu、Ni、Pt矿的临界带中,所见的辉石岩、苏长岩、斜长岩、橄榄岩和纯橄岩的杂岩组合;津巴布韦大岩墙产层状铬铁矿过渡带的斜辉辉橄岩、纯橄岩和辉石岩组合;美国斯蒂尔沃特层状杂岩体J—M层中的斜辉辉橄岩、橄橄岩、辉石岩、辉长岩和纯橄岩组合。这充分展示出铬铁矿的成矿作用主要与岩浆熔体内构造活动性密切相关,而与重力分异和结晶分异作用无多大相关性。

另一方面,正像巴甫洛夫和丘普林娜(1969)对肯皮尔赛岩体的含铬性提出的那样,“计算表明,岩体中大约蕴藏着150亿~200亿t Cr_2O_3 ,这个数量要比矿床中所含数量大许许多多倍,但是为使岩体各个地方中蕴藏的 Cr_2O_3 集中起来,则需要处理数十万立方千米的橄榄岩及纯橄岩,而要使整个岩体中所有的 Cr_2O_3 集中起来也是绝不可能的”。王恒升等(1983)也类似估算过一个长5 km、宽、深各1 km,含 Cr_2O_3 为0.4%的纯橄岩体,假如分异程度极高,全部成矿,可产生1亿t的铬铁矿石。但实际上所见一个岩体无论分异程度如何,其绝大部分 Cr_2O_3 仍然是以副矿物铬尖晶石形式产出,而能富集成矿的仅为一小部分,甚至与铬铁矿成矿相关的纯橄岩相分异情况亦是如此。照此看来,作为铬铁矿成因矿床学的研究最重要也是最关键的是在于探索这一小部分 Cr_2O_3 如何富集成矿的作用过程,以及控制其规模大小的关键因素。

实际资料揭示,我国一些重要铬铁矿床在岩体中有两种不同的产出部位。一是位于岩浆活动相对主流地带,以铬尖晶石和辉石矿物定向排列形成的流线、流面构造和纯橄岩异离体,以及脉岩发育为明显标志。矿床(体)多以似层状、层带状、脉状、条带浸染状矿石为主。二是位于岩体拐弯膨大、边界外凸或基底凹槽部位上,这些部位的流线、流面构造常呈紊流或涡流状,表明岩浆在这些部位曾发生过流向的改变或受到过扰动,所见矿体(床)多以囊状、豆荚状矿群产出为特征。值得注意的是,两种不同类型矿床(体)在造矿铬尖晶石成分上是完全不同的。普遍规律是,产于层流(平流)地带的似层状、脉状、浸染状矿石的造矿铬尖晶石成分多是富铁型铬铁矿,而产于涡流地段囊状、豆荚状矿体的造矿铬尖晶石却是富铝型铝铁矿。而且,与矿体相关围岩中的副矿物铬尖晶石,不仅两类矿体的围岩各不相同,而且还同所在地段的造矿铬尖晶石,呈现反消长

性的互补关系,如前者(层流地带的似层状矿体)造矿铬尖晶石为富铁类型的铬铁矿,副矿物铬尖晶石都是富镁铝、贫铁铬的。后者(涡流地段囊状、豆荚状矿体),造矿铬尖晶石为富铝型铬铁矿,副矿物铬尖晶石相对富铁、铬而贫铝。甚至,这种现象反映在近矿纯橄岩成分上,两类矿床也同样存在者较明显的差别,特别是橄榄石的镁、铁成分含量的变化。

看来,岩体产出和空间构造形态,不但制约着侵入其内的超基性岩浆的活动和运动方式,而且不同的运动方式(如层流、涡流)还对元素的集散和岩浆流动分异作用产生明显的抑制和选择性作用。一般情况是,层流或平流运动对铁、铬组分的迁移富集有突出的效应,而涡流形式则与镁、铝组分的选择性富集有较密切的关系。很显然,这种岩浆不同运动形式对相关元素的选择性,无论从现有的结晶分异、液态重力分异或熔离成因观点对它都是难以作出合理解释的。即便是“流动分异”观点,虽然已注意到岩浆活动对矿浆形成的重要性,但仍未能揭示这种对元素富集选择性的内在原因。

其实,现代原子理论和实验岩石学证明,高温岩浆熔体中的各种元素或组分是以离子态存在并具“群聚态组”的特性。用X射线对硅氧化物熔体的衍射显示,熔体中的离子群的罗列并不是完全杂乱无章而是具有一定规律的(王恒升等,1983)。此外,由近代光谱技术、电子衍射技术对橄榄石、辉石岩、铬尖晶石中离子占位测定,以及对人工玻璃、火山玻璃有序性的研究,矿物晶体结构中四面体和八面体配位位置上的阳离子的取代和有序化,按伯恩斯(1967)的晶体场理论,也是一种静电场中金属阳离子与配位体之间相互作用的行为。这些都肯定了高温岩浆具有离子态的特性。另一方面,高温的基性、超基性岩浆熔体,按离子类型和性状,大体可分为两种“群聚态组”。即富硅的造岩和富铬的造矿“群聚态组”,前者主要构成岛状和链状硅酸盐的 $[\text{SiO}_2]^{4-}$ 、 $[\text{Si}_2\text{O}_6]^{4-}$ 络阴离子团和可被它吸附的 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 单阳离子组成;后者主要由构成尖晶石类矿物的 $[\text{CrO}_4]^{5-}$ 、 $[\text{AlO}_4]^{5-}$ 和 $[\text{FeO}_4]^{5-}$ 络阴离子团和被它们吸附的 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 单阳离子组成。 Cr^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 除构成络阴离子外,还可以单阳离子出现。这样,当这些具带电离子或“群聚态组”处在一种定向运动状态时,按电磁学原理,必有电磁效应的发生,可能正是这种场的效应与不同带电离子间的相互作用关系,致使岩浆熔体内不同类型和性质的离子或离子团朝各自有利的场中迁移汇集,最终导致不同成分类型含矿熔体的形成和成矿。

1.1 几个重要含铬岩体及矿床实例

1.1.1 玉石沟岩体

玉石沟岩体位于北祁连山加里东造山带托莱山北坡的东西玉石沟间,为纯橄岩-斜辉辉橄岩型岩体,东西长8.2 km,南北最宽达3.8 km,面积约28 km²,分别由南、中、北三个岩体构成。侵入地层为元古宇—寒武系的一套绢云绿泥片岩、千枚岩、变基性火山岩和大理岩组合。据获得的变基性火山岩(521.48 ± 23.79) Ma 同位素年龄,时代为早寒武世,可代表北祁连洋盆发育扩张或蛇绿岩形成的主要时限。

所分南、中、北三个岩体的岩石组合（图 1.1）中的南岩体基本由纯橄岩类岩石构成，是已知主要铬铁矿床的赋存岩石；中岩体由斜辉橄橄岩类岩石构成，纯橄岩较少，只见于岩体的南北两侧；北岩体主体由橄橄岩类构成。产状上，南岩体北倾，北岩体南倾，中岩体南北相向倾斜，总体呈一个向斜盆状构造。其内的岩体内部流动构造基本与岩体产状相一致，并在中岩体内可见多个由流动构造构成的岩注状构造，轴线也与岩体走向近一致。

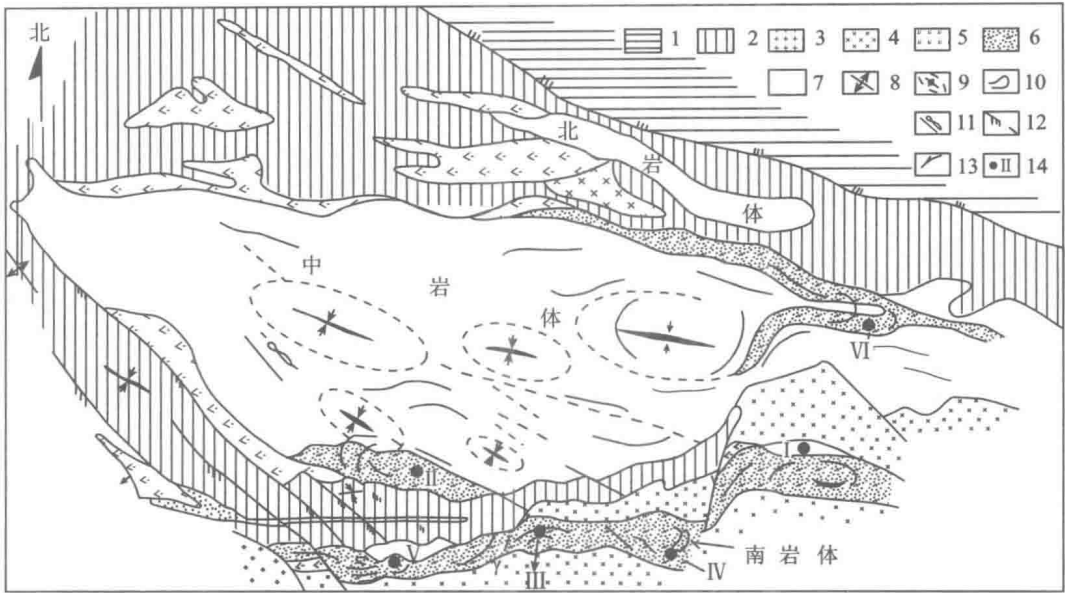


图 1.1 玉石沟超基性岩体地质构造示意图

1—石炭—二叠系；2—前寒武—寒武纪（？）板岩、基性火山岩、大理岩、硅质条带灰岩等；3—花岗岩；4—辉长岩；5—蛇纹岩；6—纯橄岩；7—斜辉辉橄岩—斜辉橄橄岩；8—褶皱轴；9—由流动构造构成的岩注位置；10—流动构造方向及变化；11—捕虏体；12—压扭性断裂；13—张扭性断裂；14—矿带位置及编号

发现的工业铬铁矿床（体），主要产出在南岩体和中岩体西南部的纯橄岩相中，共有 6 个矿体群（带）。其中除 II、VI 矿群为中岩体南部最宽处产出的矿体群外，I、III、IV、V 矿群均产于南岩体中。

从图 1.1 所见，在矿体群所在地段，由副矿物铬尖晶石和少数辉石矿物定向排列构成的流线、流面构造，均出现一种弧流、涡流运动形式，表明在岩浆侵入流动过程中曾在这些地段发生过流向的改变或受到过扰动。较典型的如南岩体西部 V 号矿体群所在地带，从岩浆原生流动构造、铬铁矿体、脉岩、大理岩包体的展布来看，明显呈现出一个南东收敛、南西撒开的似帚状构造（图 1.2）。而出现在该帚状构造系统中的东西两个涡流区，恰与两个主要矿体群产出相一致。特别是靠东边规模较大的涡流区是深部矿体群埋深所在部位。在岩石特征上，从涡流区外部到内部（或远矿到近矿）橄橄岩结晶粒度逐渐变大，尘点状磁铁矿和副矿物尖晶石含量逐渐增多，并出现较多微晶绿泥石类蚀变矿物，说明 Cr_2O_3 、 Al_2O_3 、 TFeO 组分有向涡流区富集的特征。

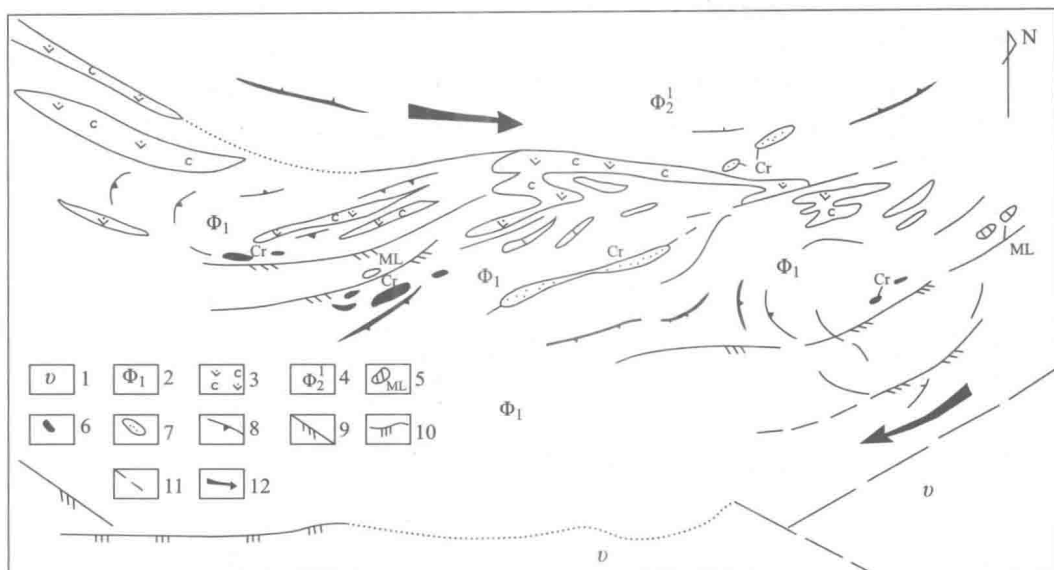


图 1.2 玉石沟超基性岩体 V 号矿带构造特征示意图

- 1—辉长石；2—蛇纹石化纯橄岩；3—滑石菱镁岩化蛇纹岩；4—蛇纹石化斜辉辉橄岩；
5—大理岩（包体）；6—地表矿体；7—地下平硐所见矿体；8—流动构造；9—压扭性断裂；
10—压性断裂；11—推测断裂；12—应力作用方式

而位于南岩体东段的 I 号矿体群，原生和次生构造也成一个近“S”型旋扭性构造形式、较大的 I_1 和 I_{40} 两个矿体，则分别赋存在“S”型构造的两个转弯地带。

除涡流形式中矿体群外，该岩体中还见有产于弧流和层流运动形式的矿体（群）。前者如 III 号矿体群，后者为 II 号矿体群中的部分矿体。III 号矿体群产于南岩体中段向北转弯部位，此处的原生流动构造和次生构造也是一个向北突出的弧形，与岩体突出部位相对应。矿体群既产出在弧形转变部位，产状也与流线弧形构造相一致，为弧形构造的重要组成部分。II 号矿体群的 II_2 号矿体，为中岩体南部比较典型的一个浸染条带状矿体。此处流动构造近于直线形层带状，紧靠岩体基底断裂或岩浆活动带的近旁，为岩浆活动的一种层流或平流运动形式。

矿床特征上，产于涡流形式中的矿体多为透镜体状、囊状和豆荚状，以稠密浸染和块状矿石为主。铬尖晶石粒度较粗，偶见豆状、瘤状矿石，与围岩界线清楚或呈迅速过渡关系，部分矿体有绿泥石或滑石菱镁矿化薄壳；产于弧流形式中的矿体，多为长条状并随流动构造转弯而弯曲，由中等—稠密浸染状矿石组成，与围岩呈迅速—逐渐过渡关系；而产于层流形式的矿体，一般呈似层状、似脉长条状，与流动构造产状一致。矿石以细—中粒的稀疏—中等浸染状矿石为主，具条带状构造，与围岩为渐变过渡关系。

图 1.3 是三种不同流动构造形式中产出的矿体造矿铬尖晶石和近矿纯橄岩及其中的副矿物铬尖晶石的一些组分变化对比图示。十分明显，三种不同流动构造形式中的造矿、副矿物铬尖晶石和近矿纯橄岩成分是完全不同的。具体说造矿铬尖晶石的 Al_2O_3 和 MgO 有从层流到涡流平缓增高， Cr_2O_3 、 FeO 和 Fe_2O_3 则有平缓降低之势。与此完全不同，副矿

物铬尖晶石却从层流到涡流 Al_2O_3 、 MgO 呈明显下降，而 Cr_2O_3 和 FeO 却显著增高，且变化幅度十分突出， Fe_2O_3 组分也和造矿铬尖晶石有一种反向消长关系。而与之相关的纯橄岩化学成分，从层流到涡流也呈现一种增减的互补性递变关系（图 1.4、图 1.5），只是 Cr_2O_3 、 Al_2O_3 组分与造矿铬尖晶石， MgO 、 TFeO 组分与副矿物铬尖晶石表现为各自不同的反消长关系。

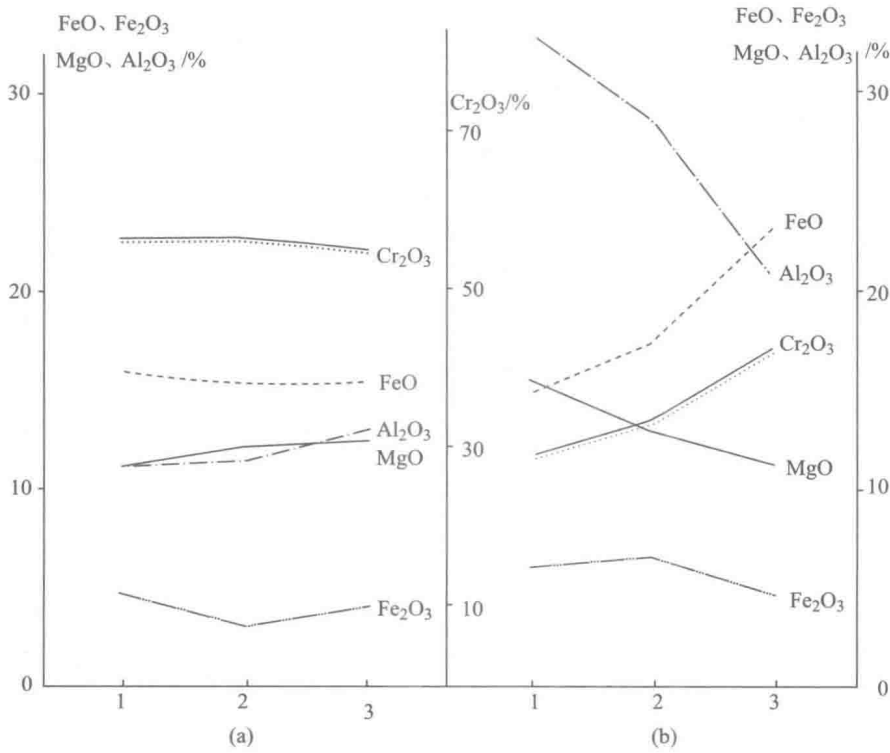


图 1.3 玉石沟岩体造矿和副矿物铬尖晶石化学成分对比图
 (a) 造矿铬尖晶石；(b) 副矿物铬尖晶石；横坐标 1、2、3 分别代表层流、弧流、涡流区
 （平流以 Il_2 矿体为代表；弧流以 Il_6 矿体为代表；涡流以 V 矿带矿体为代表）

由以上造矿、副矿物铬尖晶石和近矿纯橄岩成分上相互间的消长关系，较清楚地表明：岩浆不同运动或流动方式对元素的迁移有明显的选择性。

1.1.2 松树沟岩体

该岩体出露于秦岭造山带的商丹缝合带内，被多数研究者认为是分割华北、扬子板块北秦岭洋盆发育的重要标志。岩体侵入在商县—丹凤大断裂北侧的古元古界秦岭群深变质岩系内（图 1.6）。据蛇绿岩套丹凤群变质基性火山岩 534 ~ 488 Ma 同位素年龄数据，时代为早寒武世—早奥陶世（张国伟等，1995，2001；闫全人等，2009）。

松树沟岩体地表为一长透镜状，由镁铁和钙镁（铁）两类岩石组成。二者在岩体中略呈对称分布，中间为含透辉石条带状的纯橄岩岩相带；两侧为透辉橄榄岩—透辉石岩相带；再外或边部为纯橄岩—斜辉辉橄岩杂岩带。铬铁矿床多集中产出在边部杂岩相带内，