

大气降水氢、氧同位素地球化学研究专著

两阶段水-岩同位素交换理论 及其勘查应用

张超刚 陈振胜 刘敬秀 于桂香 等著



地质出版社

热液成矿、氧同位素地球化学研究专著

两阶段水-岩同位素 交换理论及其勘查应用

张理刚 陈振胜 刘敬秀 于桂香 王可法

(地质矿产部宜昌地质矿产研究所)

王炳成 徐金方 郑文深

(山东省地质科学研究所)

李东一 李 宏 侯大勇

(黑龙江地质矿产局第一、二、三地质调查所)

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

(京)新登字 085 号

ISBN 7-116-01744-5



9 787116 017443 >

内 容 简 介

本书作者在对我国东部近 20 个不同类型有关矿床(点)及化探异常区进行系统的水-岩同位素交换体系氢、氧同位素地球化学和找矿评价综合研究(共获得了 1600 余个新数据),及水-岩同位素交换理论研究的基础上,结合大量矿床(点)研究资料,首次提出了大气降水缓冲开放体系两阶段水-岩同位素交换模式和成矿流体运输过程氢同位素动力分馏理论;初次建立了地表高 ^{18}O 中心、低 ^{18}O 中心和高-低-高 ^{18}O 三层圈等 3 种氧同位素找矿勘查模式;介绍了氧同位素找矿方法、步骤和成功例子等;对铜厂铜矿、焦家式台上金矿等超大型、大型矿床水-岩同位素交换体系提出了见解;首先计算了水-岩同位素交换体系最小有效水量等等。总之,本书是国内外第一本系统研究两阶段大气降水-岩石氢、氧同位素交换理论并将其应用于找矿勘查及矿床评价方面的专著。

本书可供从事同位素地球化学、矿床学、地球化学和找矿勘探等有关专业的科研人员和高等学校有关专业师生学习与参考。

图书在版编目(CIP)数据

两阶段水-岩同位素交换理论及其勘查应用:大气降水热液成矿氢、
氧同位素地球化学研究专著/张理刚等著

北京:地质出版社,1995.10

ISBN 7-116-01744-5

I. 两… II. 张… III. 同位素-地质勘探 IV. P629

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 10433 号

地质出版社出版发行

(100013 北京和平里七区十楼)

责任编辑:孙旭荣 江晓庆

*

地质印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092 $^{1/16}$ 印张:15.125 字数:34.80 万

1995 年 10 月北京第一版·1995 年 10 月北京第一次印刷

印数:1—400 册 定价:21.00 元

ISBN 7-116-01744-5

P·1398



谨将此书献给

第三十届国际地质大会

张理刚

1995.4.25.于宜昌

目 录

前 言	(1)
第一章 绪论	(4)
一、概述	(4)
二、研究对象及方法	(10)
三、同位素分析测试方法	(12)
四、英文摘要	(13)
第二章 现代及古大气降水氢、氧同位素组成	(14)
一、大气降水中氢、氧同位素组成的关系	(14)
二、中国现代大气降水氢、氧同位素组成与变化规律	(18)
三、成矿流体和古大气降水同位素组成与变化规律	(19)
四、英文摘要	(22)
第三章 水-岩同位素交换理论基础及大气降水成矿模式	(23)
一、同位素平衡和动力分馏	(23)
二、水-岩同位素交换体系的开放和封闭问题	(28)
三、大气降水-岩石同位素交换体系氢、氧同位素演化模式	(34)
四、英文摘要	(41)
第四章 蚀变岩型焦家式金矿水-岩体系同位素演化	(43)
一、区域地质背景	(44)
二、焦家式大型台上金矿床水-岩体系	(49)
三、焦家式小型十里铺金银矿水-岩体系	(64)
四、结论	(68)
五、英文摘要	(68)
第五章 斑岩-次火山岩破碎带细脉浸染型金多金属矿床水-岩体系同位素演化	(70)
一、黑龙江团结沟金矿	(70)
二、江西冷水坑银铅锌矿床	(79)
三、江西银山铅锌银矿床	(89)
四、结论	(100)
五、英文摘要	(101)
第六章 石英脉型金银矿床水-岩体系同位素演化	(103)
一、胶东金青顶金矿	(103)
二、胶东邓格庄金矿	(113)
三、内蒙古白乃庙金矿	(117)
四、云南两河金矿	(125)
五、内蒙古额仁陶勒盖银矿	(127)
六、结论	(136)

七、英文摘要·····	(137)
第七章 斑岩型铜(钼)矿床水-岩体系同位素演化 ·····	(139)
一、黑龙江多宝山铜矿田铜山铜矿水-岩体系同位素演化·····	(139)
二、黑龙江多宝山铜矿田Ⅳ号隐伏矿体水-岩体系同位素演化·····	(150)
三、黑龙江塔和县廿一站铜矿水-岩体系同位素演化·····	(154)
四、江西德兴铜厂铜矿水-岩体系同位素演化·····	(160)
五、斑岩型铜钼矿床水-岩体系演化模式及评价·····	(170)
六、英文摘要·····	(173)
第八章 四平山陆相火山喷气-沉积含金硅质岩型矿床水-岩体系同位素演化 ·····	(174)
一、矿区及矿床地质概述·····	(174)
二、成矿流体氢、氧同位素组成·····	(178)
三、蚀变火山岩体系氧同位素组成·····	(181)
四、水-岩体系氧同位素演化·····	(184)
五、矿化评价及预测·····	(186)
六、英文摘要·····	(188)
第九章 水-岩体系氧同位素找矿勘查实例 ·····	(190)
一、氧同位素找矿勘查模式·····	(190)
二、大兴安岭呼中西吉诺山-风水山金多金属异常区·····	(191)
三、黑龙江塔河县马林西铜(钼)异常区·····	(197)
四、黑龙江尚志黑龙宫铜多金属矿点·····	(200)
五、湖南济阳麻子坪-柞冲铜异常点·····	(204)
六、胶东焦家式金矿氧同位素找矿勘查·····	(207)
七、英文摘要·····	(212)
第十章 水-岩同位素交换体系氢同位素动力分馏 ·····	(214)
一、成矿流体氢、氧同位素组成变化·····	(215)
二、蚀变岩石氢、氧同位素组成变化·····	(216)
三、水-岩体系氢同位素动力分馏·····	(217)
四、英文摘要·····	(220)
结 论 ·····	(221)
参考文献 ·····	(224)

Contents

Preface	(1)
Chapter 1 Introduction	(4)
1. Introduction	(4)
2. Study objects and methods	(10)
3. Isotope analytical methods	(12)
4. English abstract	(13)
Chapter 2 H and O Isotopic Compositions for Contemporary and Palaeo	
-Meteoric Waters	(14)
1. Relations between H and O isotopic compositions of meteoric water	(14)
2. H and O isotopic compositions and variation laws of contemporary meteoric water in China	(18)
3. Isotopic compositions and variations of ore-forming fluid and palaeo-meteoric water	(19)
4. English abstract	(22)
Chapter 3 Theoretical Basis for Water-Rock Interaction and Meteoric	
hydrothermal Mineralization Model	(23)
1. Isotope equilibrium and kinetic fractionation	(23)
2. Open and closed system water-rock interaction	(28)
3. H and O isotope evolutionary model for meteoric water-rock interaction system	(34)
4. English abstract	(41)
Chapter 4 Water-Rock System Isotope Evolution for Jiaojia Type	
(Altered Rock Type) Gold Deposit	(43)
1. Regional geological settings	(44)
2. Water-rock system of the super-huge Jiaojia type Taishang gold deposit	(49)
3. Water-rock system for the small Jiaojia type Shilipu Au-Ag deposit	(64)
4. Conclusions	(68)
5. English abstract	(68)
Chapter 5 Water-Rock System Isotopic Evolution for Porphyry- Subvolcanic	
Stringer-Disseminated Gold-Polymetallic Deposit in Fracture Belt	(70)
1. The Tuanjiegou gold deposit in Heilongjiang Province	(70)
2. The Lengshuikeng Au-Pb-Zn deposit in Jiangxi Province	(79)
3. The Yingshan Pb-Zn-Ag deposit in Jiangxi Province	(89)
4. Conclusions	(100)
5. English abstract	(101)

Chapter 6 Water-Rock System Isotopic Evolutions for Quartz-Vein Type

Au-Ag Deposit	(103)
1. The Jinqingding gold deposit in eastern Shandong Province	(103)
2. The Denggezhuang gold deposit in eastern Shandong Province	(113)
3. The Boin Sum gold deposit in Inner Mongolia	(117)
4. The Lianghe gold deposit in Yunnan Province	(125)
5. The Eren Tolgoi silver deposit in Inner Mongolia	(127)
6. Conclusions	(136)
7. English abstract	(137)

Chapter 7 Water-Rock System Isotope Evolution of Porphyry type Cu (Mo)

Deposit	(139)
1. Water-rock system isotope evolution for Tongshan Cu deposit in Duobaoshan Cu mining field, Heilongjiang Province	(139)
2. Water-rock system isotope evolution for the No. IV concealed ore body in Duobaoshan Cu mining field, Heilongjiang Province	(150)
3. Water-rock system isotope evolution for the 21-Station Cu deposit in Tahe County, Heilongjiang Province	(154)
4. Water-rock system isotope evolution for Tongchang Cu deposit in Dexin County, Jiangxi Province	(160)
5. Water-rock system evolutionary model and prospecting criteria for porphyry type Cu-Mo deposit	(170)
6. English abstract	(173)

Chapter 8 Water-Rock System Isotope Evolution of Sipingshan Continental

Volcanic Exhalative-Sedimentary Au-Bearing Silicalite Type De- posit in Heilongjiang Province	(174)
1. Geological setting of mining area and ore deposit	(174)
2. H and O isotopic compositions of ore-forming fluid	(178)
3. O isotopic compositions of altered rocks	(181)
4. O isotope evolution in water-rock system	(184)
5. Criteria for mineralization prospecting	(186)
6. English abstract	(188)

Chapter 9 Water-Rock System O Isotope Prospecting Cases

1. O isotope prospecting models	(190)
2. The Xijinuoshan-Fengshuishan Au-polymetallic anomalous area in Huzhong, Hingganling	(191)
3. The Malinxi Cu-(Mo) anomalous area in Tahe County, Heilongjiang Province	(197)
4. The Heilonggong Cu-polymetallic ore spot in Shanzhi	(200)
5. The Maziping-Changchong Cu anomalous spot in Liuyang, Hunan	

Province	(204)
6. O isotope prospecting for Jiaojia type Au deposit, eastern	
Shandong Province	(207)
7. English abstract	(212)
Chapter 10 H Isotope Kinetic Fractionation in Water-Rock	
Interaction System	(214)
1. H and O isotope compositions and variations of ore-forming fluids	(215)
2. H and O isotope compositions and variations of altered rocks	(216)
3. H isotope kinetic fractionation in water-rock interaction system	(217)
4. English abstract	(220)
Conclusions	(221)
References	(224)

前 言

《两阶段水-岩同位素交换理论及其应用》是作者根据主要在“八五”期间先后完成的 6 个研究项目有关成果归纳整理而成的一本专著。这些项目名称、参加人员及完成时间如下。

1. 地质行业基金项目 张理刚、陈振胜、刘敬秀、王可法、于桂香, 1990—1993, 大气降水-岩石交换体系氢、氧同位素演化模式及找矿。

2. 地质矿产部定向基金项目 张理刚、刘敬秀、陈振胜、于桂香、李东一、李宏、侯大勇, 1992—1994, 黑龙江呼中凤水山和虎林四平山等地铜金多金属矿床氧同位素勘查与找矿预测研究。

3. 地质矿产部同位素地质开放研究实验室项目 张理刚、陈振胜、刘敬秀、于桂香, 1992—1993, 大兴安岭地区超大型额仁式火山岩银矿勘查同位素地球化学研究。

4. 中国地质科学院项目 张理刚、刘敬秀、于桂香、陈振胜, 1992—1994, 赣东北地区铜多金属矿床同位素地质与找矿。

5. 与山东省地质矿产局合作研究项目 张理刚、王炳成、徐金方、陈振胜、刘敬秀、郑文深, 1989—1992, 胶东金矿稳定同位素地球化学与找矿。

上述 5 个项目立项的共同目标是: (1) 通过对不同地区已知典型矿床三维空间氢、氧同位素的研究, 建立典型矿床氧同位素找矿勘查模式; (2) 开展水-岩同位素交换作用氢、氧同位素演化的理论和实际研究, 建立水-岩同位素交换大气降水成矿模式; (3) 对矿点及化探异常区进行地表氧同位素找矿及矿体定位预测研究。

6. 国家自然科学基金项目 张理刚、陈振胜、刘敬秀、于桂香、庄龙池、黄惠兰等, 1995—1996, 成矿流体输运过程氢同位素动力分馏。在本书编写过程中获悉该项目已批准, 便随之分析了一批氢同位素样品, 结合已有资料, 单独撰写了第十章。

5 年来, 作者对中国东部华南、华北和东北地区不同纬度的与中生代岩浆岩 (包括火山岩) 有空间关系的 14 个不同类型铜金多金属矿床进行了系统的成矿流体, 水-岩同位素交换体系氢、氧同位素地球化学研究; 同时, 为了检验基础理论及应用基础研究结论的可靠性和实用性, 又先后对 10 余个矿点、化探异常区进行了系统的氧同位素找矿评价以及矿体定位预测工作。

具体而言, 作者的研究对象包括中国东部不同构造单元从南到北 20 多个矿床 (点) 及异常区。它们是:

1. 武夷地块 (B4-1 铅铜同位素省) (张理刚, 1993a, 下同) 中冷水坑次火山岩断裂破碎带中的浸染状铅锌银矿床;

2. 南扬子省 (B2-3 铅同位素省) 花岗闪长斑岩中铜厂斑岩型铜矿、银山次火山岩及变质围岩断裂破碎带中的脉状、浸染状银铅锌 (铜) 矿床;

3. 三江断块 (B3-2 铅同位素省) 中两河脉状金矿床;

4. 胶东地块 (A3-2 铅同位素省) 中焦家式台上、苍上、红布、十里铺金 (银) 矿床和金青顶式 (包括金青顶、邓格庄、福录地等) 脉状金矿床;

5. 兴安地块 (C1 铅同位素省) 中白乃庙火山岩中脉状金矿床、额仁陶勒盖火山岩中脉状银矿床、甘一站斑岩铜矿、多宝山及铜山斑岩铜矿、虎林四平山含金硅质岩矿床等, 以及呼中地区西吉诺山、马林西、风水山等化探异常区;

6. 佳木斯地块 (C2 铅同位素省) 中黑龙宫铜矿点等。

在以上矿区 (点) 及异常区, 作者均进行了实地野外地质调查, 并采集了相应标本 (累计达 2000 余块)。在此基础上, 进行了室内鉴定、同位素及化学测试分析, 并进行了大量的计算。经过 4 年多的紧张而辛勤的劳动, 获得了如下主要成果。

1. 获得了研究区内矿床 (点) 及异常区全岩、矿物氧同位素数据 1500 余个, 全岩、矿物及矿物包裹体同位素数据 100 余个, 此外, 还测定了 10 个矿物包裹体³⁶Ar 百分含量及少量硫、铅同位素数据。

2. 在研究了许多矿床中三维体系热液蚀变岩石及成矿流体氢、氧同位素演化规律的基础上, 首次提出了早期深部淋滤水-岩体系演化大气降水热液储库形成阶段以及上部沸腾流体-岩石体系矿化沉积阶段的缓冲开放体系两阶段水-岩同位素交换模式。

3. 首次采用反演和正演法定量计算了缓冲开放体系两阶段水-岩同位素交换有效 W/R (即水/岩, 下同) 比值变化, 对某些矿床的水-岩体系计算了最小有效水量。

4. 通过对水-岩同位素交换体系大量蚀变岩石的氧同位素进行测试, 结合样品的地质背景, 首次提出了 3 种氧同位素找矿勘查模式, 即: (1) 地表高¹⁸O 中心找矿勘查模式, 属于这类模式的矿床多为岩浆岩及火山岩断裂带内蚀变浸染状矿床, 如台上、银山、冷水坑、团结沟等矿床, 该类矿床成矿储库热液多在低 W/R 比值体系中形成; (2) 地表低¹⁸O 中心找矿勘查模式, 属于这类模式的矿床多为火山喷发热液活动中心及部分断裂带中形成的脉状矿床, 如额仁陶勒盖、两河、白乃庙矿床, 该类矿床成矿储库热液多在高 W/R 比值体系中形成; (3) 地表高-低-高¹⁸O 中心找矿勘查模式, 属于这类模式的矿床多为与花岗斑岩类或浅成侵入体有关的细脉浸染型、斑岩型矿床, 如铜厂、甘一站、铜山等矿床, 该类矿床成矿储库热液有多个中心, 且在不同 W/R 比值体系中形成。

5. 首次提出上部成矿水-岩体系中存在沸腾去气 (H) 作用, 导致上部及浅部蚀变岩石 δD 值不同程度升高或重化的新认识, 从而否定了前人利用蚀变矿物 δD 值获得的 δD_{H_2O} 值的可靠性。

6. 根据氢、氧同位素研究, 结合地质和地球化学资料, 首次发现并确认黑龙江四平山金矿床系国内外文献中未见报导的新的金矿类型, 并提出该矿床系陆相火山喷气-沉积含金硅质岩层状矿床的新见解。

7. 首次对大型、超大型矿床水-岩体系条件进行了系统研究, 发现了早期淋滤水-岩体系深度大、范围广 (如台上、冷水坑等), 以及上部沸腾水-岩体系有效高 W/R 比值多中心水-岩相互作用 (如铜厂等) 等特殊水-岩体系条件。

8. 应用水-岩同位素交换理论, 发现在胶东地区焦家式金矿及金青顶式金矿成矿早期, 深部大气降水淋滤水-岩同位素交换作用主要发生在中基性岩浆岩中, 进而推断金来自中基性岩; 对银山铜铅锌矿床而言, 深部大气降水淋滤水-岩作用发生在元古宙浅变质岩中, 金属物质来自浅变质岩, 等等。总之, 定量确定了一批矿床水-岩体系演化条件及成矿物质来源。

9. 对储库热液在低 W/R 比值体系中形成的有关上部矿化蚀变岩石的¹⁸O 分配模式, 如

胶东、赣东北地区，建立了区域性找矿评价准则。

10. 对不同大气降水/岩石比值体系热液矿床，测定了石英包裹体大气 ^{36}Ar 百分含量，为热液来源、演化研究提供了新的手段和途径。

11. 通过对若干化探异常区进行地表岩石氧同位素找矿预测研究，对下列5个异常区提出了找矿远景区以及下步工程位置。(1) 在黑龙江呼中西吉诺山铜多金属异常区，圈出了2条封闭的低 ^{18}O 等值线，等值线中心的槽子中已发现较好的铜、金矿化；(2) 在黑龙江尚志黑龙宫铜异常区，圈出一条封闭的低 ^{18}O 等值线和一个高 ^{18}O 范围，后者可能有工业铜矿化；(3) 黑龙江马林西铜钼异常区具有高-低-高 ^{18}O 中心找矿勘查模式的氧同位素分布特征，地表已挖出浸染状铜矿体；(4) 在黑龙江呼中凤水山地区铜钼多金属异常区已发现4个低 ^{18}O 区段，其中2个可能为低 ^{18}O 热液成矿活动中心；(5) 在湖南浏阳麻子坪-枞冲铜异常区，圈出一个北东向低 ^{18}O 带，深部有可能发现隐伏浸染状铜矿体。前3个氧同位素定位预测矿体正待深部验证。

自上述两阶段水-岩同位素交换理论及氧同位素找矿勘查模式先后提出以来，得到各方面的关注和好评，并得到有关部门重视：1992年第29届国际地质大会邀请张理刚在会上宣读了这些成果；1992年10月在全国矿床同位素地质大会上宣读后获得与会代表广泛兴趣和重视；1994年日本东京大学岛崎教授邀请张理刚赴日本作学术交流等。总之，对缓冲开放体系两阶段大气降水-岩石同位素交换理论及氧同位素找矿勘查模式的深入研究，有着深刻的理论意义和广泛的潜在社会经济意义。可以肯定地说，它在找矿勘查中的价值将会很快被人们所接受。事实上，作者已经利用氧同位素找矿勘查模式进行了找矿及定位预测，而且部分已被实践所证实，取得了明显的经济和社会效益。专家们指出，5个科研报告不论是在研究的深度和广度方面，还是在取得的成果和效益方面，均处于国际先进或国内领先水平。

作者据评审意见，进一步修改和压缩了科研报告，甚至补充了必要的测试工作，然后撰写成本书。当然，本书最终推出的资料中，还有许多不足之处，尤其是矿物的氢同位素资料嫌少一些，矿物对氧同位素数据也有些不足，因而尚无法深入研究水-岩同位素交换过程中与同位素动力学有关的问题。

为达到应用氧（氢）同位素找矿勘查模式找矿的最终目标，作者侧重在平面上和垂向上对不同矿床（点）进行二维和多维的系统采样和同位素分析测试工作。野外和室内大量工作由课题组成员共同协作完成。张理刚提出全书整体构思和学术思想。本书共分10章，其中第二章及冷水坑银路岭银铅锌矿、白乃庙金矿、团结沟金矿及额仁陶勒盖银矿等4个矿区由陈振胜执笔编写了初稿，其余章节由张理刚执笔，最后由张理刚修改定稿。有关英文翻译由陈振胜完成。于桂香清绘了全部图件。有关项目在执行过程中得到宜昌地质矿产研究所领导、科技处，地质矿产部同位素地质开放研究实验室（南方中心）的关心和支持；野外工作得到黑龙江省地质矿产局领导、科技处、一所、二所、三所，山东省地质矿产局科技处以及团结沟、白乃庙、额仁、铜厂、银山、台上、金青顶等矿区有关地勘单位和矿山的大力协助，特此表示衷心的感谢。还要特别感谢张炳喜和宋叔和院士，以及张本仁、胡受奚、杨敏之、于津生、徐步台、丁悌平、沈渭洲、卢武长、储雪蕾等教授，他们对有关科研报告进行了仔细评审，并提出了宝贵修改意见。

第一章 绪 论

一、概 述

几个世纪以来,地质学家尤其是矿床地质学家们,一直对热水流体及其携带物质的来源抱有极大的兴趣。这不仅仅是为了回答学术上争论的问题,而且在经济上也有重大意义。原因是地壳表层中大量的金属(金、银、铅、锌、铜、钨、锡、铋、钼、汞、锑等等)和非金属(萤石、明矾石、水晶、蛇纹石、石棉和高岭石等等)矿床,过去和现在,而且将来均会被人们开采和利用。过去,矿床地质研究者对热液矿床成因的认识,是通过非常谨慎仔细的观察及研究有关化学分析和岩矿鉴定资料而获得的。但由于新的事实或地质现象随着研究工作的深入和矿石的开采而不断地被揭露出来,以及研究者逻辑思维能力和分析角度的不同等原因,致使人们对同一矿床的成因,往往得出不同的结论。例如,某一区域变质岩中赋存的脉状、透镜状矿体中的金属矿物组合及元素在变质岩中多少均能找到它们,于是人们至少可能提出3种“认识”:岩浆热液论者认为,是深部岩浆分异出的岩浆期后成矿热液充填而成,若见不到岩浆岩出露,就推测深部有隐伏岩体;侧分泌论者则认为,是地下水淋滤围岩物质而充填于成矿裂隙的产物;变质论者则主张,是区域变质作用过程中变质分泌产物。这种同一地质现象的不同解释意见,是“观察矿床学”的必然结果。但是,60年代之前,几乎所有矿床地质学家的主流思想是,除了砂矿和残积矿床以外,几乎所有金属乃至非金属矿床,都是在岩浆作用过程中形成的,例如矿石矿物是从岩浆中直接结晶出的或是从岩浆分异出的热液流体中沉积而成的(Bateman, 1950)。在成矿作用过程中,人们设想温度和压力是逐渐降低的。由此,主要是根据温度-深度关系(例如深成低温热液后成热液等),或者与岩浆侵入体的相对距离(例如深成低温热液)而建立的矿床分类曾广泛地被接受。在这些模式中,所有岩浆均被想象产生于地幔中,并且它们基本上没有与地壳发生物质交换。因此,这些模式暗示除了形成于地球表面的某些砂矿、风化矿床外,其它矿床均直接由地幔物质演化而来。然而,今天的所有地质学家均已认识到不仅岩浆过程是某些重要矿床的形成条件,而且海底生物活动,大气降水、海水与地壳表层或海底岩石尤其是火山岩之间的相互作用最终也能形成大量矿床,在成岩和变质作用过程中也能形成矿床。矿床中矿物的沉积机理也不仅仅是温度和压力的降低,还包括流体的混合以及凝聚、沸腾,流体与岩石的化学交换,以及其它的物理化学条件等等。

在过去20年中,岩浆岩石学领域一个很重要的进展和成就是认识到绝大部分花岗岩类岩浆是原先存在于地壳表面环境中的岩石(包括沉积岩、火山岩等)部分熔融和反复重熔形成的,而不是地幔物质的分异或部分熔融或同熔产物。花岗岩浆的同位素化学、岩石化学与含矿性差异受岩石圈非均一性及演化动力学过程所制约(张理刚, 1995a)。

上述岩石学方面的概念在最近20年间的巨大变化,在很大程度上取决于矿床及岩石稳定同位素地球化学和其它现代地球化学方法的改进及其研究成果。

近30年来,尤其是最近20年间,热液矿床成因方面的研究有了很大的进展,这主要应归功于20世纪40—50年代处于萌芽状态、60年代正式诞生的稳定同位素地球化学这门物理学、化学和地质学之间的边缘学科。它在定量地研究地质学中的一系列问题,尤其是研究成矿物质来源、成矿成岩物理化学条件等等方面,掀起了成矿学理论研究领域的轩然大波。

除了应用稳定同位素理论研究成果论证海水热液成矿作用 (Craig, 1966; Shanks 等, 1977; Robinson 等, 1973; Ohmoto 等, 1974、1986; Rye 等, 1974; Spooner 等, 1977; Shapman 等, 1977; Ripley 等, 1977; 张理刚, 1985e、1989等), 变质水热液成矿作用 (Boyle, 1970; Rye 等, 1974), 原生水 (建造水) 热液成矿作用 (Kamilli 等, 1977; Pinckney 等, 1972; Hall 等, 1963; White, 1974; Ohmoto 等, 1986; Clayton 等, 1966) 和 (再平衡) 岩浆水热液成矿作用 (Rye, 1966; 张理刚等, 1982; 张理刚, 1985b) 以外, 最受研究者重视的主要是大气降水热液成矿作用, 因为它是地壳表层中最主要的热液成矿作用类型 (图 I-1) (张理刚, 1985c)。

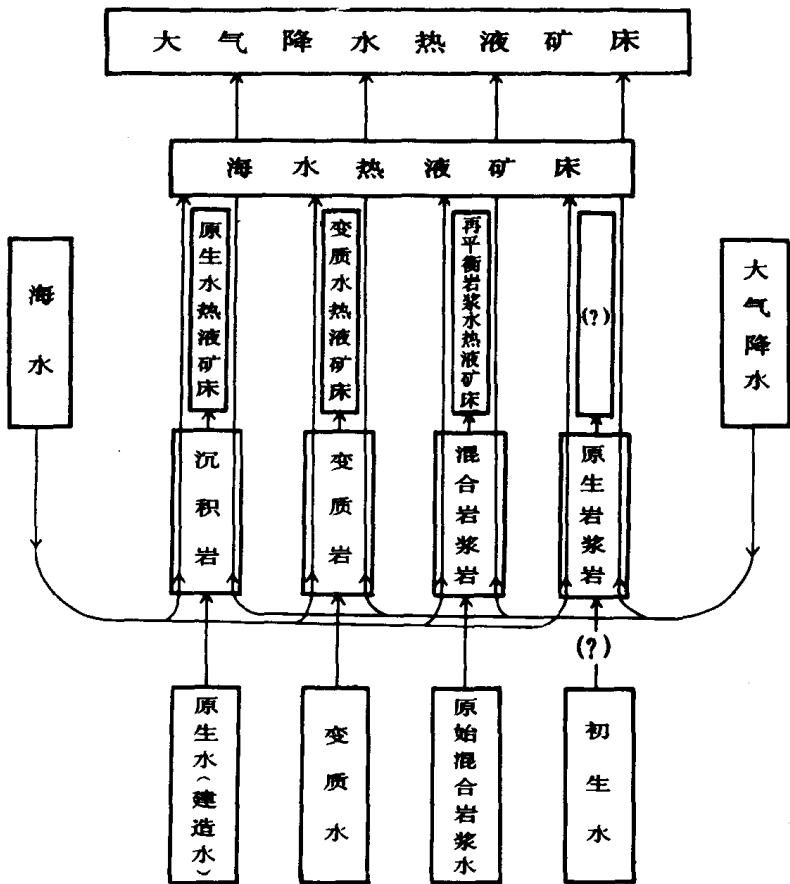


图 I-1 金属活化热液成矿作用的几种端员类型 (据张理刚, 1985c)

Fig. I-1 The varied end types of metal-activation hydrothermal mineralization (from Zhang Ligang, 1985c)

在过去30年间对大陆壳表层岩石中大气降水-岩石同位素交换体系化学的,尤其是氢、氧同位素演化方面的研究,已取得了长足的发展。早在1956年, Craig 等人就已对现代地热流体的稳定同位素组成进行过研究,并指出其中95%以上的水与地表水有关。1966年,他又

对轰动地质界的曾认为是岩浆热液“活标本”的 Salton 湖含矿热卤水进行了氢、氧同位素组成测定,并明确指出,它来源于沿大断裂渗入地下深处循环的当地大气降水。铅、锶和硫同位素资料亦证明是这种地下循环水从中、新生代沉积物中淋滤出大量金属物质,最终形成含矿热卤水的。它的温度随深度增加,1000m 深处水温为300℃,2300m 深处可达360℃。该含矿热卤水总矿化度达25.9%,属于高盐度的 Na-Ca/Cl 型卤水。该含矿热卤水中富含重金属,在卤水出口处的水垢中,含量最高的成分为非晶质二氧化硅,可鉴别出的金属矿物有斑铜矿、蓝辉铜矿、黄铜矿、黝铜矿、黄铁矿、毒砂、自然银、辰砂等,共含数十种金属元素。上述论点的提出,主要是考虑任何地点的地热流体中所测出的 D/H 比值相等于当地地下雨水(年平均大气降水)的值,而地热水中 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比值却比当地地下雨水的值有明显增加。(主要是原始地下雨水受热后与深部围岩发生相互作用而引起的。)这种 ^{18}O “漂移”效应最早由 Taylor (1968、1971、1973、1974、1983) 提出,他还证实热液蚀变体系中存在 ^{18}O 亏损的岩石。国内最早由张理刚等(1981) 提出。70年代至80年代,对大气降水热液成矿(含矿)体系的氢、氧同位素研究取得的巨大成果,主要反映在以下几个方面。

(1) 提出在地壳表层环境热液矿床中,大部分矿床是大气降水在地下循环过程中摄取金属并在这一条件下将它们沉淀下来而形成的,即使对那些岩浆水热液矿床而言,在它们的成矿晚期甚至成矿期间,大气降水也参与了成矿活动,或者是成矿富集和沉积成矿的主要作用因素。成矿流体的 δD 值是地理位置的函数(张理刚,1985a、b,1989; Taylor, 1974; Ohmoto 等, 1986; White, 1974)。

(2) 发现与大气降水热液体系有关的蚀变体系岩石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,大量地出现低 $\delta^{18}\text{O}$ 值中心,或者说,地表低 ^{18}O 值中心即是成矿流体活动中心,也是成矿中心(Taylor, 1971、1973、1974、1980; Taylor 等, 1971、1978、1979、1980; Criss 等, 1983、1984、1985、1986、1991; Hattori 等, 1982; Forester 等, 1976、1977、1980; Fleck 等, 1985; Sheppard 等, 1974、1986; Larson 等, 1986; Perfit 等, 1979; Magaritz 等, 1976; Hagstrum 等, 1986; Churchill, 1980; O'neil 等, 1973、1974; Hall 等, 1974; Solomon 等, 1986; Jackson 等, 1980; Clayton 等, 1968; 张理刚, 1985a、b、c; 1989; 陈振胜等, 1989a)。这一成果不仅有重要的理论意义,而且开拓了地球化学找矿研究新领域。

(3) 编制出了现代、中生代和新生代(图 I-2、3、4、5) 大气降水氢、氧同位素等值线变化趋势图(Sheppard 等, 1969; Taylor, 1974; 张理刚, 1985b、c)。根据 $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ 大气降水线方程,可以用 $\delta^{18}\text{O} = -7.5\text{‰}$ 代替 $\delta\text{D} = -50\text{‰}$, 用 $\delta^{18}\text{O} = -10\text{‰}$ 代替 $\delta\text{D} = -70\text{‰}$ 等等,作出 $\delta^{18}\text{O}$ 值等值线。图 I-2 中氢、氧同位素组成的变化表明,现代地表水氢、氧同位素组成随离海岸线距离的增大、纬度的升高、地形高度的增大, $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值降低,而沙漠地区则因反复蒸发而向相反方向变化。从图 I-3 中看出,中生代地表水氢(氧)同位素组成(主要根据矿物包裹体水测定值)等值线形态与图 I-2 中的基本相似,但系统偏低 20‰ 左右,这主要是因海岸线效应而产生的,即中生代海岸线比现代的要向东移,亦即南海、东海、黄海以及日本海在白垩纪时期为陆地;其次可能是地形比目前地形要高。

图 I-5 中 δD 值等值线是根据北美第三纪大气降水热液蚀变矿物以及第三纪表生粘土和风化高岭石矿物 δD 值计算的 $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值。第三纪 δD 值比图 I-4 中目前地表水 δD 值高出 10‰—15‰,表明第三纪气候比较温暖且温度较高,或者地形比目前的低(据 Taylor, 1974)。

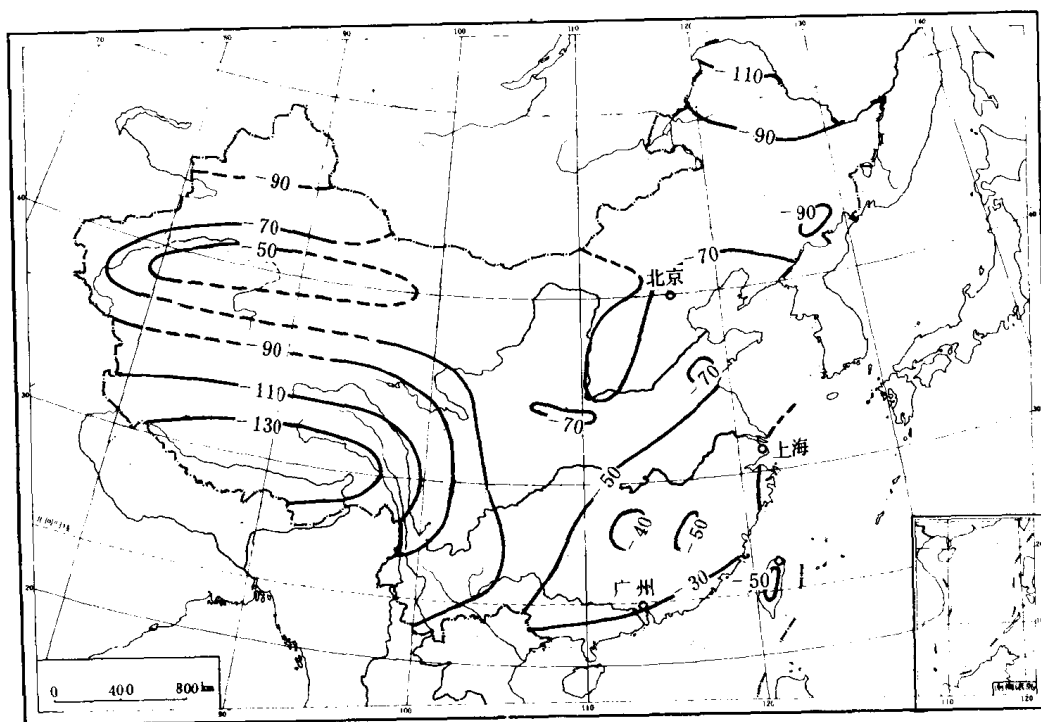


图 1-2 中国现代地表水 (年平均大气降水) 氢同位素组成 (‰) 等值线图
(参考张理刚1985c、1989资料补充修改)

Fig. 1-2 H isotope compositions (‰) and the changes of the contemporary surface water (year's mean value) in China (modified Zhang Ligang, 1985c, 1989)

(4) 到80年代末, 北美洲已发现和报导过50余个大气降水热液蚀变低 ^{18}O 值中心, 在我国已发现和报导过的有10余个。其中美国爱达荷州 Casto 环状带低 ^{18}O 值面积达 4500km^2 , 82个全岩样品 $\delta^{18}\text{O}$ 值平均为 $0.4 \pm 3.3\text{‰}$, 最低值为 -8.8‰ (Criss 等, 1984)。许多低 ^{18}O 值带的面积达 500km^2 以上, 如爱达荷州 Sawtooth 环状带 (Criss 等, 1983)、加利福尼亚南加利福尼亚岩基达 2000km^2 (Taylor 等, 1978), 爱达荷州 Rocky Bar 浅成岩体达 800km^2 (Criss 等, 1983), Painted 岩湖浅成侵入体 (Fleck 等, 1985) 和 Whisting Pig 浅成岩体也分别达 500km^2 , 安大略 Mill 城地区火山中心达 500km^2 (Taylor, 1971), 苏格兰 Skye、Mull 等环状脉岩侵入体也达 $500-600\text{km}^2$ (Forester 等, 1976、1977)。这些低 ^{18}O 中心中的蚀变岩石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值绝大部分低于 0‰ 。此外, 还有更多的低 ^{18}O 值带面积在 $n \times \text{km}^2$ 到 $n \times 10\text{km}^2$ 之间 (Taylor, 1971、1973、1974、1986; 李培忠和桂训唐等, 1991)。

(5) 在大气降水热液成矿体系中, 既存在共生矿物相之间的同位素平衡, 也存在同位素非平衡体系。为此, 最近10年间广泛开展了对天然体系的、理论的和实验的大气降水-岩石同位素交换体系氧 (氢) 同位素平衡和动力分馏机制和开放、封闭体系的氢、氧同位素分馏研究 (Taylor 等, 1974、1977、1986; Criss 等, 1986, 1987; Cole 等, 1983、1987、1992; Ohmoto, 1974、1986; Gregory 等, 1989; Zhang 等, 1989、1994; 张理刚等, 1990a、b, 1991), 获得了一系列矿物-流体体系的尤其是岩石-水流体系的平衡分馏系数以及某些矿物

的同位素交换速率、交换活化能、扩散速率、扩散活化能等动力学基本参数。

(6) 大气降水-岩石同位素交换体系中伴随的化学和同位素交换反应有可能显著扰动岩石 K-Ar 和 Rb-Sr 地质年代体系母体与子体元素。为此,有人进行了有益的探索(Taylor 等, 1978; Criss 等, 1982、1986; Silver 等, 1979), 指出 ^{18}O 亏损蚀变岩石的 K-Ar 年龄降低, 而 Rb-Sr 等时线年龄及其初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值几乎没有改变。

从上述回顾中看出, 对大气降水-岩石相互作用及热液成矿体系的研究已取得了惊人的

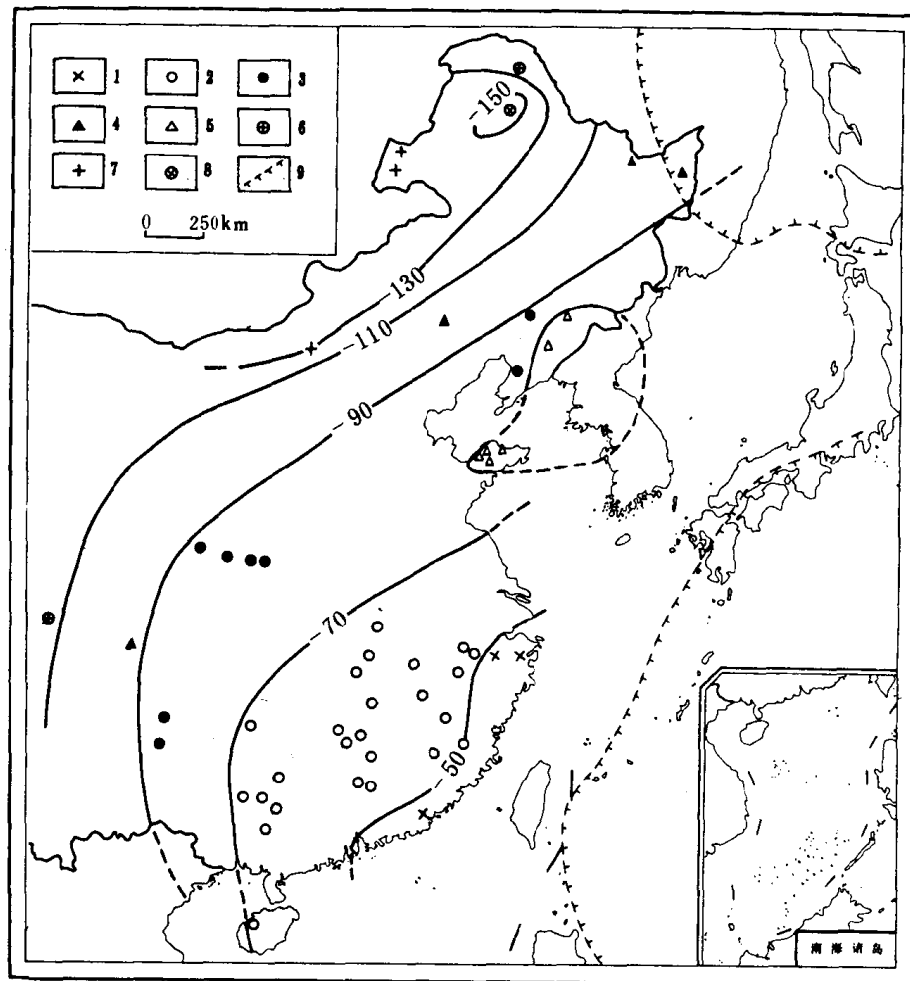


图 I-3 中国东部中生代 (J_3-K_2) 地表水氢同位素组成 (‰) 等值线图

(参考张理刚1985c、1989资料补充修改)

1—大于 -50‰ ; 2— -50‰ — -70‰ ; 3— -70‰ — -90‰ ; 4— -90‰ — -110‰ ; 5— -110‰ — -130‰ ; 6— -130‰ — -150‰ ; 7— -150‰ — -170‰ ; 8—中生代海岸线位置

Fig. I-3 H isotopic contours of Mesozoic waters in eastern China (modified Zhang Ligang, 1985c, 1989; mainly based on δD values of mineral inclusions)