

高等院校地学研究生教学用书

沉积地球化学

Sedimentary Geochemistry

● 田景春 张翔 编著

地质出版社

高等院校地学研究生教学用书

沉积地球化学

田景春 张 翔 编著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

沉积地球化学是沉积学和地球化学相互渗透、相互融合而产生的一门边缘性学科。本书在众多研究成果基础上,系统介绍了沉积地球化学的研究内容、研究方法和研究意义,并利用常量元素、微量元素、稀土元素、稳定同位素以及有机地球化学参数阐述、分析沉积岩(物)的形成过程、形成条件及其成因机制。

本书可作为高等院校地质类专业研究生教学用书,亦可供相关专业的研究人员阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

沉积地球化学 / 田景春, 张翔编著. —北京: 地质出版社, 2016. 1

ISBN 978-7-116-09646-2

I. ①沉… II. ①田… ②张… III. ①沉积地球化学
IV. ①P591

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 025624 号

Chenji Diqu Huaxue

责任编辑: 李凯明 徐 洋

责任校对: 王洪强

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话: (010) 66554528 (邮购部); (010) 66554579 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真: (010) 66554582

印 刷: 北京全景印刷有限公司

开 本: 787 mm × 1092 mm $\frac{1}{16}$

印 张: 13.25

字 数: 327 千字

印 数: 1—1500 册

版 次: 2016 年 1 月北京第 1 版

印 次: 2016 年 1 月北京第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

书 号: ISBN 978-7-116-09646-2

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装质量问题, 本社负责调换)

前 言

众所周知,化学应用到地球科学中就产生了地球化学。地球化学这一学科的发展经历了一段漫长的历史过程。自从 1838 年德国化学家舍恩拜因首次提出“地球化学”一词以来,化学元素周期律的发现以及原子结构理论的重大突破,各国学者撰写的有关地球化学著作以及逐步开展的地质调查和地质填图、矿产资源的寻找与开发利用,分析化学中的重量分析、容量分析等技术方法的逐渐完善以及地球化学分析技术的飞速发展,都为地球化学学科的形成和发展奠定了重要的基础。

伴随着相关化学理论在地球科学不同领域中的应用,地球化学逐渐形成了一系列的分支学科,如同位素地球化学、同位素地质年代学、矿床地球化学、有机地球化学、元素地球化学、环境地球化学、宇宙地球化学、海洋地球化学、实验地球化学、第四纪地球化学、构造地球化学及沉积地球化学等。

沉积地球化学是沉积学和地球化学相互渗透、相互结合而产生的一门新兴边缘学科,是以沉积物和沉积岩为研究对象,研究其在沉积-成岩过程中元素及稳定同位素的迁移、聚集和分布规律的一门学科。

沉积地球化学经历了实际应用、学科建立、学科完善三个发展阶段:

(1) 实际应用阶段

自地球化学学科建立至 20 世纪 90 年代,地球化学的理论方法不断应用到沉积学研究中,解决沉积岩的形成环境、形成条件及形成过程等相关问题,为恢复沉积岩形成历史提供更为准确的科学依据。

(2) 学科建立阶段

伴随着地球化学理论及方法在沉积学中的不断应用,沉积学及地球化学领域内的相关学者认为,建立“沉积地球化学”学科分支是十分必要的。为此,20 世纪 90 年代,我国学者邓宏文教授率先出版《沉积地球化学与环境分析》专著,首次明确提出“沉积地球化学”概念。同期,成都理工大学沉积地质研究院(原成都地质学院沉积地质研究所)一直为沉积学专业(含古地理学)研究生开设沉积地球化学课程,并印发内部教材。这些均为沉积地球化学学科的建立做出了贡献。

(3) 学科完善阶段

从 20 世纪 90 年代末期至今,伴随着沉积地球化学学科的建立,以及相关测试分析技术的不断发展,大量的、更为准确的各种相关精细分析沉积岩的物质组分特征的测试、分析数据的获得,使得利用相关地球化学数据更好地认识有关沉积岩的特征、成因成为可能,也使得“沉积地球化学”学科理论体系与知识结构更加完善。

沉积地球化学以沉积物和沉积岩为研究对象,根据研究内容或研究对象的不同,可进一步划分为不同的分支学科。研究内容涉及沉积岩形成的全过程,从母岩的风化、搬运到沉积、成岩;研究方法主要包括野外研究和室内研究两大方面。

本书在众多研究成果基础上,系统介绍了沉积地球化学的研究内容、研究方法和研究意义,以及如何利用沉积岩中的常量元素、微量元素、稀土元素、稳定同位素、有机地球化学参数来阐明沉积物及沉积岩的特征,分析沉积岩及沉积物的形成过程、形成条件及其成因机制。

本书由田景春、张翔编著。全书共分六章,其中前言、第一章、第二章、第五章和第六章由田景春执笔;第三章、第四章由张翔、田景春共同执笔。研究生梁庆韶、邢浩婷、邱琼、李成、张鑫、刘鑫承担了本书相关图件的清绘及参考文献的整理工作。全书由田景春统一修改和定稿。

本书编著过程中参考和引用了众多学者发表的学术论文、出版的专著及相关教材中的研究理论与研究成果,并通过网络参考、引用了众多专家的相关成果资料。在此,表示衷心的感谢和诚挚的敬意。文后所列参考文献可能挂一漏万,敬请原谅。成都理工大学研究生院为本书的出版提供了资助,在此深表谢意。书中如有不妥之处,敬请广大同仁和读者指正。

编著者

2015年5月

目 录

CONTENTS

前 言

第一章 沉积地球化学研究历史、内容及方法 1

第一节 地球化学发展过程	1
一、地球化学概念	1
二、地球化学发展简史	1
三、地球化学学科特点	3
第二节 沉积地球化学发展过程	3
一、沉积地球化学概念	3
二、沉积圈中的地球化学作用	3
三、沉积地球化学的发展	5
第三节 元素地球化学分类	5
一、戈尔德施密特分类	6
二、扎瓦里茨基分类	7
三、戚长谋教授分类	8
四、其他分类	9
第四节 沉积地球化学学科分支	9
一、根据研究元素含量多少及性质不同划分	9
二、根据研究对象不同划分	12
第五节 沉积地球化学研究内容	16
第六节 沉积地球化学研究方法	18
一、研究方法特点	18
二、研究程序	18
三、研究方法	18
第七节 沉积地球化学发展趋势	19

第二章 常量元素沉积地球化学 21

第一节 概念及研究内容	21
一、常量元素概念	21
二、常量元素沉积地球化学概念	21
三、常量元素沉积地球化学研究内容	22
第二节 沉积岩中常量元素含量及分布特征	22
一、地壳中元素平均含量	22
二、沉积岩中元素平均含量	26
三、不同类型沉积岩中元素含量	29
四、不同类型砂岩中元素含量	31
五、沉积岩中元素的分布特征	32
第三节 沉积岩中常量元素分布的控制因素	34
一、母岩成分和风化作用类型及强度	34
二、元素的迁移形式与沉积分异	39

三、沉积-埋藏环境的影响	39
四、成岩作用中元素的再分配	41
第四节 常量元素地球化学标志在沉积环境分析中的应用	41
一、测定古盐度	41
二、判别氧化-还原条件	44
三、确定成岩介质酸碱度	46
四、确定离岸距离	46
五、判别砂岩形成的构造背景	47
六、判别硅质岩成因	49
七、应用于砂岩分类	50
八、判别碎屑岩粒度	51
九、应用于层序地层学	54
第五节 结论	55
第三章 微量元素沉积地球化学	56
第一节 概述	56
一、微量元素概念	56
二、微量元素沉积地球化学概念	56
三、微量元素沉积地球化学发展过程	57
第二节 微量元素分类及其在地质体中的存在形式	57
一、微量元素分类	57
二、微量元素存在状态	59
第三节 微量元素地球化学数据处理与应用	60
第四节 沉积学研究中常用的微量元素及分析方法	62
一、常用的微量元素	62
二、分析方法	62
第五节 微量元素在沉积学研究中的应用	63
一、分析沉积环境	63
二、分析古气候	64
三、分析构造环境	69
四、分析成岩作用	71
五、分析硅质岩物质来源及成因	72
六、辨识物源	75
七、研究古水深	77
八、分析氧化-还原环境	77
九、计算古水温	78
十、研究白云岩成因	78
十一、应用于层序地层学	80
十二、应用于油源对比	83
第四章 稀土元素沉积地球化学	84
第一节 概述	84
一、稀土元素概念	84
二、稀土元素的发现	84
三、稀土元素在地球化学应用中的优点	85
第二节 稀土元素分类及其性质	85
一、稀土元素分类	85
二、稀土元素性质	86

第三节 稀土元素含量、分布特征及采用标准	88
一、稀土元素含量特征	88
二、稀土元素在地壳中的分布特征	90
三、稀土元素研究中采用的标准	90
四、稀土元素含量及分布的控制因素	91
第四节 稀土元素地球化学数据处理与应用	92
一、稀土总量和轻重稀土比值	93
二、某些特殊元素比值	93
三、曾田彰正-科里尔图解	93
四、稀土配分三角图解	93
五、稀土元素参数图解	93
第五节 不同环境中的稀土元素含量	94
第六节 稀土元素在沉积学研究中的应用	95
一、判别岩石成因	95
二、判别构造背景	96
三、判别物源	97
四、判别氧化-还原条件	101
五、判别酸碱性	101
六、分析古气候	101
七、判别白云岩成因	102
八、分析古水深	104
九、分析沉积速率	104
十、分析成岩作用	105
十一、应用于层序地层学	105

第五章 稳定同位素沉积地球化学

108

第一节 概述	108
一、同位素定义	108
二、同位素分类	109
三、同位素成分变化原因	110
四、同位素的研究意义	113
第二节 沉积学中常用的稳定同位素标准及表示方法	113
一、稳定同位素标准	113
二、稳定同位素表示方法	116
第三节 不同环境中稳定同位素的组成	116
一、不同稳定同位素在自然界中的分布	116
二、不同环境中稳定同位素的组成	122
第四节 稳定同位素在沉积学研究中的应用	131
一、测定环境古温度	131
二、分析古气候	133
三、测定古盐度	135
四、分析海平面变化	135
五、判别氧化-还原条件	142
六、应用于白云岩研究	142
七、应用于硅质岩成因研究	143
八、应用于磷质岩研究	145
九、应用于黏土岩研究	145
第五节 稳定同位素地层学	146

一、概念	146
二、稳定同位素地层学简史	147
三、氧同位素地层学	147
四、碳同位素地层学	148
五、硫同位素地层学	151
第六节 锶同位素特征及研究意义	153
一、锶同位素地球化学特征	153
二、锶元素地球化学行为	153
三、锶同位素组成	153
四、锶同位素在沉积环境分析中的应用	155
五、锶同位素地层学	158

第六章 有机沉积地球化学 160

第一节 概述	160
一、有机沉积地球化学定义及研究范畴	160
二、有机质概念及其组分	160
三、沉积有机质的一般特征	162
第二节 沉积环境及其对有机质沉积的影响	166
一、环境的物理参数及其对有机质沉积的影响	166
二、环境的化学参数及其对有机质沉积的影响	168
三、环境的生物参数及其对有机质沉积的影响	170
四、各类环境参数之间的相互关系	170
第三节 不同沉积环境中有机质的沉积特征	170
一、海洋环境中有机质的沉积特征	170
二、过渡环境中有机质的沉积特征	172
三、湖泊环境中有机质的沉积特征	173
四、沼泽环境中有机质的沉积特征	173
五、小结	174
第四节 有机沉积地球化学常规分析项目及意义	175
第五节 有机地球化学参数在沉积学研究中的应用	175
一、有机碳含量	176
二、氯仿沥青“A”及族组分分析	177
三、岩石热解参数	179
四、干酪根特征	181
五、生物标志化合物	185
六、孢粉颜色指数	188
七、牙形石颜色指数	190
八、有机地球化学参数应用时须注意的问题	191
第六节 有机相及有机沉积相	192
一、有机相概念	192
二、有机相分类	192
三、有机沉积相概念	193
四、有机沉积相类型划分	193
五、研究有机相及有机沉积相的意义	195

参考文献 196

第一章 沉积地球化学研究历史、内容及方法

第一节 地球化学发展过程

一、地球化学概念

地球化学是研究地球的化学组成、化学作用和化学演化的科学，它是地质学与化学相结合而产生并发展起来的边缘学科。自 20 世纪 70 年代中期以来，地球化学和地质学、地球物理学已成为研究固体地球科学的三大支柱学科（图 1-1）。它的研究范围也从地球扩展到月球和太阳系的其他天体。地球化学的理论和方法，对矿产资源的寻找、评价和开发以及农业发展、环境科学等具有重要意义。地球科学基础理论的一些重大研究成果，如界限事件、洋底扩张、岩石圈演化等，均与地球化学的研究过程、研究方法、研究成果密切相关。地球化学已经成长为研究地球形成、演化的关键学科之一。

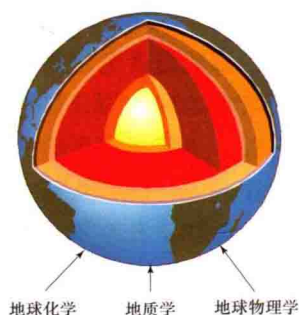


图 1-1 固体地球科学的三大支柱学科

二、地球化学发展简史

“地球化学”一词系 1838 年德国化学家舍恩拜因提出。伴随着相关学科的发展和测试分析技术的不断进步、发展、完善，地球化学的发展过程大致可以划分为 3 个阶段：

1. 萌芽阶段

19 世纪，一些工业先进国家逐步开展系统的地质调查和地质填图、矿产资源的寻找、开发及利用促进了地球化学的萌芽。19 世纪中叶以后，分析化学中的重量分析、容量分析逐渐完善，1869 年化学元素周期律的发现（图 1-2）以及原子结构理论的重大突破（如放射性的发现）（图 1-3），为地球化学学科的形成奠定了基础。

2. 形成阶段

1908 年，美国学者克拉克撰写《地球化学资料》一书，到 1924 年已出版第五版。在这部著作中，克拉克广泛地汇集和计算了地壳及其各部分的化学组成，明确提出地球化学应研究地球的化学作用和化学演化，为地球化学的发展指出了方向。



图 1-2 门捷列夫 (化学元素周期律的发现者)

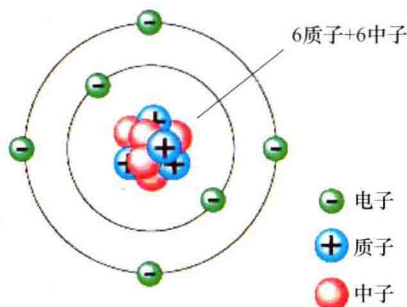


图 1-3 碳原子结构示意图

挪威学者戈尔德施密特在《元素的地球化学分布规则》(1923~1938)中指出:化学元素在地球上的分布不仅与其原子的物理化学性质有关,而且还与它在晶格中的行为特性有关。这使地球化学从主要研究地壳的化学组成转向探讨化学元素在地球中分布的控制规律。

苏联学者维尔纳茨基和费尔斯曼共同创立了苏联地球化学学派。1922年,费尔斯曼撰写的《俄罗斯地球化学》一书,系统论述了各地区的地球化学,是第一部区域地球化学基础著作。1924年,维尔纳茨基撰写的《地球化学概论》一书,首次为地球化学提出了研究原子的任务,最先注意到生物对于地壳、生物圈中化学元素迁移、富集和分散的巨大作用,并于1927年组织和创立了世界上第一个地球化学研究机构——生物地球化学实验室。20世纪30年代,费尔斯曼撰写《地球化学》(4卷),多方面分析了地壳中各种原子运移的规律。与此同时,放射性衰变规律的认识、同位素的发现、质谱仪的发明与改进,促进了同位素地球化学,特别是同位素地质年代学的发展。1907年,美国化学家博尔特伍德发表第一批化学铀-铅法年龄数据。19世纪30~40年代,铀-钍-铅法、钾-氩法、铷-锶法、普通铅法、 ^{14}C 法等测年方法逐步发展并完善,使得同位素地质年代学初具规模。

3. 发展阶段

20世纪50年代以后,地球化学除了继续把矿产资源作为重要研究对象以外,还开辟了环境保护、地震预报、海洋开发、农业开发、生命起源、地球深部和球外空间等研究领域。地球化学分析手段飞速发展,广泛应用超微量、高灵敏度的分析测试技术与仪器,与电子计算机联合使用,不仅可以获得大量高精度的分析数据,而且可以直接揭示样品中难以观测的元素及其同位素组成的细微变化和超微结构。一些新的年代测定法,如铀系法、裂变径迹法、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法、钐-钕法、热释光法等相继成熟,使同位素地质年代学研究方法更加完善。

这个时期,中国在元素地球化学、同位素地质年代学方面取得了一批重要成果,如:1961年李璞等发表了中国第一批同位素年龄数据;1962年黎彤等发表了中国各种岩浆岩平均化学成分资料;1963年中国科学院完成了中国锂、铍、铋、钽等稀土元素地球化学总结,提出了这些矿种的重要矿床类型和分布规律。

三、地球化学学科特点

地球化学是一门属于地学和化学相互融合的边缘学科，主要研究化学元素和其同位素在地球（广义可包括部分天体）演化历史中的分布、分配、迁移等规律。地球化学的学科特点主要表现在如下几方面：

- 1) 地球化学研究的主要物质系统是地球的地质作用体系，因此它是地球科学的一部分。
- 2) 地球化学着重研究地球系统物质运动中物质的化学运动规律。
- 3) 地球化学以化学类学科为理论基础。
- 4) 地球化学与相关学科相互交叉，派生出众多分支学科（图 1-4）。
- 5) 地球化学是一门应用性很强的学科，可广泛应用于矿产资源勘查、农业综合开发、环境保护、医学和社会可持续发展等领域。
- 6) 地球化学是年轻的、发展中的科学。

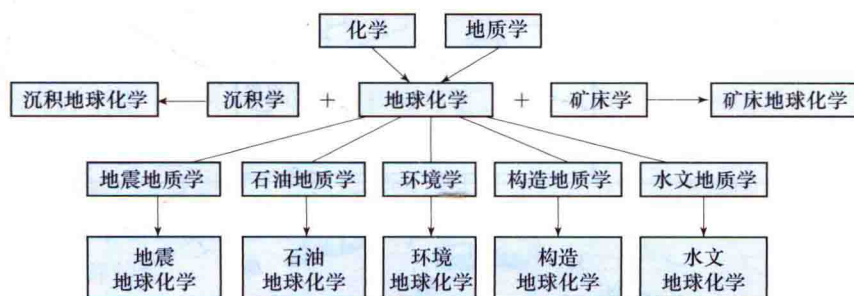


图 1-4 地球化学的分支学科

第二节 沉积地球化学发展过程

一、沉积地球化学概念

伴随着地球化学在地质学中的不断应用，地球化学逐渐形成了一系列的分支学科，如同位素地球化学、同位素地质年代学、矿床地球化学、有机地球化学、元素地球化学、环境地球化学、宇宙天体化学、海洋地球化学、实验地球化学、第四纪地球化学、构造地球化学及沉积地球化学等。

沉积地球化学是沉积学和地球化学相互渗透、相互结合而产生的一门新兴边缘学科，是以沉积物和沉积岩为研究对象，研究其在形成过程中（母岩风化→搬运→沉积→成岩全过程）所含元素及稳定同位素的迁移、聚集和分布规律的一门学科（图 1-5）。

二、沉积圈中的地球化学作用

由于岩石圈、水圈、大气圈和生物圈的相互作用，在地表形成了松散的沉积物（土圈）和成层的沉积岩（岩石圈），它们组成厚度不一且较为连续的圈层，覆盖在地球的表

层，被称之为沉积圈（图 1-6）。

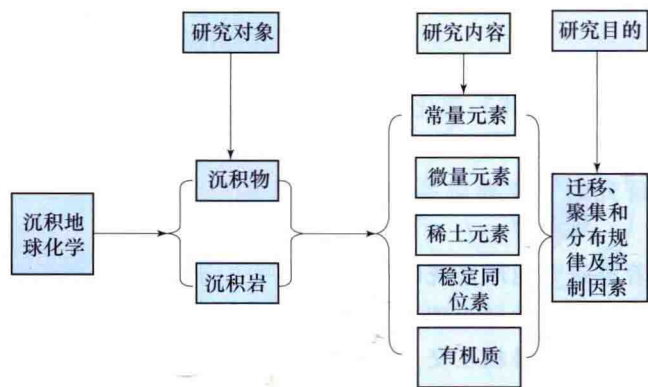


图 1-5 沉积地球化学研究的对象、内容及目的

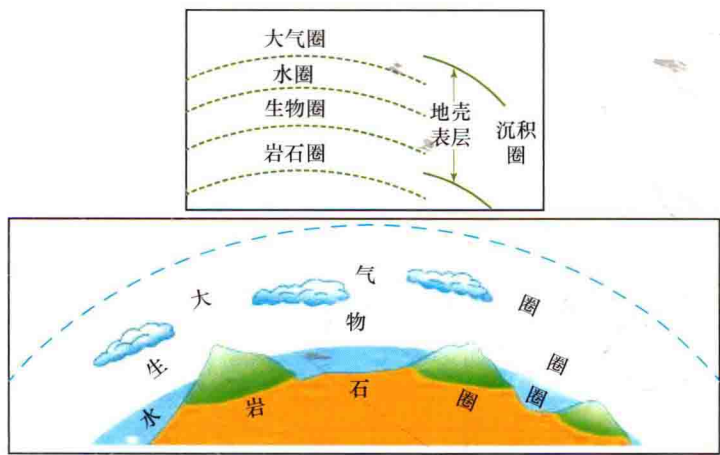


图 1-6 沉积圈示意图

沉积圈的总体积为 $3 \times 10^8 \sim 4.17 \times 10^8 \text{ km}^3$ ，总质量为 $1.7 \times 10^{18} \sim 2.4 \times 10^{18} \text{ t}$ ，约占地壳总质量的 10% 或地球总质量的 0.04%。整个沉积圈的平均厚度为 2.2 km，在不同地质单元中质量分配相当不均匀，大陆区沉积圈的平均厚度大于大陆边缘，大陆边缘沉积圈的平均厚度又大于大洋区，相应厚度比例为 5 : 2.5 : 0.4。

不同的沉积类型，其化学成分变化极大，其中主要氧化物，如 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 $\text{CaO}-\text{MgO} (+\text{CO}_2)$ 等，含量变化范围可由 1% 以下到 99% 以上，这种特点反映了沉积地球化学作用具有明显的分异趋势。沉积岩中的 Fe_2O_3 、 CO_2 、 H_2O 及有机质等含量较高，且 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3) > w(\text{FeO})$ 、 $w(\text{K}_2\text{O}) > w(\text{Na}_2\text{O})$ ，是由沉积圈化学作用的特点（如水的积极参与、氧化作用强、生物作用和黏土矿物的影响等）所决定的。

沉积圈中地球化学作用的特点主要表现如下：

- 1) 气态、液态和固态三种物质稳定共存。
- 2) 引起反应的能量来源多种多样（如地能、宇宙能、生物能等）。
- 3) 普遍存在游离态氧和水。
- 4) 各种反应在低温、低压或常温、常压条件下进行。

5) 生物作用的影响特别重要。

为了强调这些特点,沉积地球化学也被部分学者称之为“外生地球化学”或“表生地球化学”。

三、沉积地球化学的发展

如上所述,沉积地球化学作为一门沉积学和地球化学相互渗透、相互结合而产生的一门新兴边缘学科,其发展经历了实际应用、学科建立和学科完善三个阶段。

(1) 实际应用阶段

自地球化学学科建立以来至 20 世纪 90 年代,主要表现为地球化学的理论和研究方法不断应用于沉积学中,通过沉积岩(物)中相关元素含量、比值等解决沉积岩(物)形成环境、形成条件及形成过程中的相关问题,为恢复沉积岩(物)形成历史提供更为准确的科学依据。

(2) 学科建立阶段

伴随着地球化学理论及方法在沉积学中的不断应用,沉积学及地球化学领域内的相关学者都认为建立“沉积地球化学”分支学科十分必要。20 世纪 90 年代,我国著名学者邓宏文教授撰写的专著《沉积地球化学与环境分析》率先出版,首次明确提出“沉积地球化学”概念;同期,成都理工大学沉积地质研究院(原成都地质学院沉积地质研究所)为沉积学(含古地理学)专业研究生开设沉积地球化学课程,并使用内部印发教材。这些均为“沉积地球化学”学科的建立做出了贡献。

(3) 学科完善阶段

自 20 世纪 90 年代末期至今,伴随“沉积地球化学”学科的建立、相关测试分析技术的发展、各种相关精细分析沉积岩的物质组分特征测试结果的获得,使得利用相关地球化学数据更好地认识有关沉积岩(物)的特征、成因成为可能,也使得“沉积地球化学”学科理论体系、知识结构更加完善。

第三节 元素地球化学分类

由于沉积地球化学所研究的对象为沉积岩(物)中的相关元素的含量、赋存状态、分布特征及其所反映的沉积岩形成时的环境条件。因此,首先要对元素进行地球化学分类,这是开展沉积地球化学研究的基础。

化学元素(chemical element)就是具有相同的核电荷数(即核内质子数)的一类原子的总称。到 2012 年为止,共有 118 种元素被发现,其中 94 种存在于地球中。在元素周期表(图 1-7)的基础上,结合元素的自然组合及各种地球化学特征,对化学元素进行分类是地球化学研究的基础。元素地球化学分类反映了化学元素在自然界的分布规律,及其相互间的共生组合特征与其原子结构的密切关系。所以,为了深入理解沉积地球化学的学科内涵及学科分支,首先要了解有关元素地球化学的分类方法。

元素的地球化学分类方法较多,被广泛采用的是戈尔德施密特分类及扎瓦里茨基分类。

周期\族	I A	II A	主族元素										过渡元素										0族元素	0族元素
1	1 H 1.008																						2 He 4.003	
2	3 Li 6.941	4 Be 9.012																					10 Ne 20.18	
3	11 Na 22.99	12 Mg 24.31																					18 Ar 39.95	
4	19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.88	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.93	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.39	31 Ga 69.72	32 Ge 72.61	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.90	36 Kr 83.80						
5	37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.94	43 Tc 98.91	44 Ru 101.1	45 Rh 102.9	46 Pd 106.4	47 Ag 107.9	48 Cd 112.4	49 In 114.8	50 Sn 118.7	51 Sb 121.8	52 Te 127.6	53 I 126.9	54 Xe 131.3						
6	55 Cs 132.9	56 Ba 137.3	57-71 La-Lu 镧系	72 Hf 178.5	73 Ta 180.9	74 W 183.8	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.1	79 Au 197.0	80 Hg 200.6	81 Tl 204.4	82 Pb 207.2	83 Bi 209.0	84 Po [209]	85 At [210]	86 Rn [222]						
7	87 Fr [223]	88 Ra [226]	89-103 Ac-Lr 锕系	104 Rf [261]	105 Db [262]	106 Sg [263]	107 Bh [264]	108 Hs [265]	109 Mt [266]	110 Ds [269]	111 Rg [272]	112 Cn [277]												

原子序数: 92 U

元素符号, 红色指放射性元素

元素名称: 铀

注*的是人造元素

外围电子层排布, 括号指可能的电子层排布

相对原子质量: 238.0

过渡元素

金属元素

非金属元素

注: 相对原子质量源自1995年国际原子量表, 并全部取4位有效数字; 相对原子质量加括号的为放射性元素的半衰期最长的同位素的质量数。

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
镧系	镧 138.9	铈 140.9	镨 140.9	钕 144.2	钷 [144.9]	钐 150.4	铕 152.0	钆 157.3	铽 158.9	镱 162.5	铒 167.3	铥 168.9	镱 173.0	镱 175.0	
锕系	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
锕系	锕 227.0	钍 232.0	镤 231.0	铀 238.0	镎 237.0	钚 [244]	镅 [243]	锔 [247]	锫 [247]	锿 [251]	镄 [257]	钔 [257]	钷 [258]	锫 [259]	镱 [260]

图 1-7 元素周期表

一、戈尔德施密特分类

戈尔德施密特分类是以地球起源和内部构造的假说为基础, 根据化学元素的性质与其在各地球圈层内的分配之间的关系, 将元素分为 4 个地球化学组 (图 1-8)。

H																	
He	Li	Be	B	C	N	O	F										
Ne	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl										
Ar	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br
Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I
Xe	Cs	Ba	TR	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At
Rn	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U											
亲铁元素						亲石元素		亲铜元素				亲气元素					

图 1-8 戈尔德施密特元素地球化学分类

(1) 亲石元素

离子最外层具有 2 个或 8 个电子, 呈惰性气体型稳定结构, 与 O、F、Cl 亲和力强, 多组成氧化物或含氧盐, 特别是硅酸盐, 形成大部分造岩矿物, 并主要集中在岩石圈。

(2) 亲铜元素

离子最外层具有 18 个电子的铜型结构, 与 S、Se、Te 亲和力强, 多形成硫化物和复杂硫化物。

(3) 亲铁元素

离子最外层具有 8~18 个电子的过渡型结构，与 O 及 S 的亲合力均较弱，主要集中在地球深部的铁镍核中。

(4) 亲气元素

为惰性气体，呈原子或分子状态集中在地球的大气圈中。

此外，戈尔德施密特还划分出亲生物元素，这些元素多富集在生物圈中。

二、扎瓦里茨基分类

扎瓦里茨基分类能够从原子结构这一最本质的原因去理解元素在自然界的分布与组合规律。根据元素地球化学行为的相似性将元素划分为 12 族（图 1-9）。

	H															
He	Li	Be	B C N O F													
Ne	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl									
Ar	K	Ca	Sc	Ti V Cr Mn Fe Co Ni						Cu Zn Ga Ge				As Se Br		
Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag Cd In Sn		Sb Te I			
Xe	Cs	Ba	TR	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au Hg Tl Pb		Bi Po At			
Rn	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U										

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----

图 1-9 扎瓦里茨基元素地球化学分类

1—氢族；2—惰性气体族；3—造岩元素族；4—挥发分元素族；5—铁族；6—稀土、稀有元素族；7—放射性元素族；8—钨钼族；9—铂族；10—金属矿床成矿元素族；11—半金属元素族；12—重卤素元素族

(1) 氢族

即 H 元素。

(2) 惰性气体族

包括 He、Ne、Ar、Kr、Xe、Rn 6 个元素。

(3) 造岩元素族

包括元素 Li、Be、Na、Mg、Al、Si、K、Ca、Rb、Sr、Cs 和 Ba。

(4) 挥发分元素族

包括元素 B、C、N、O、F、P、S、Cl。

(5) 铁族

包括元素 Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni。

(6) 稀土、稀有元素族

包括元素 Sc、Y、Zr、Nb、REE、Hf、Ta。

(7) 放射性元素族

包括元素 Fr、Ra、Ac、Pa、U。

(8) 钨钼族

包括元素 Mo、Tc、W、Re。

(9) 铂族

包括元素 Ru、Rh、Pd、Os、Ir、Pt。

(10) 金属矿床成矿元素族

包括 Cu、Zn、Ge、Ag、Cd、In、Sn、Au、Hg、Pb 等元素。

(11) 半金属元素族

包括元素 As、Sb、Bi、Se、Te、Po。

(12) 重卤素元素族

包括元素 Br、I、At。

三、戚长谋教授分类

戚长谋教授提出，以元素的亲和性为依据对元素进行地球化学分类，即：亲石元素、亲氧元素、亲硫元素、阴离子及两性元素、氢及惰性气体元素（图 1-10）。

H																	He	
Li	Be	B	C	N												O	F	Ne
Na	Mg	Al	Si	P												S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	TR	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U													

亲石元素

亲氧元素

亲硫元素

阴离子及两性元素

氢及惰性气体元素

图 1-10 元素亲和性地球化学分类

（据戚长谋，1991）

(1) 亲石元素

具有与硅酸根或碳酸根结合倾向的元素。因其为造岩矿物的主要成分，故仍采用“亲石”这一术语。本类元素包括周期表左侧的碱金属和碱土金属两个化学族。s 电子构型， $X=0.7\sim 1.5$ 。本类元素与硅酸根和碳酸根结合的倾向具有选择性。碱金属和碱土金属可分别与不同结构的硅酸根结合形成各类硅酸盐，而与碳酸根结合的元素则为碱土金属 Mg、Ca、Sr、Ba 等。

(2) 亲氧元素

具有与氧结合倾向的元素，包括呈氧化物（如 TiO_2 ）或酸根（如 SiO_4^{4-} 、 CO_3^{2-} ）两种状态。这一定义严格地与戈氏“亲石”的概念相区别。分类表中包括碱土金属右侧的第三、第四、第五副化学族和 Cr、W、U、Mn、Fe 及 Sn 等元素。p 及 d 电子构型， $X=1.3\sim 2.2$ 。

本类元素形成氧化物或进入酸根的倾向取决于离子场强。分类表上方的 B、C、N、Si 和 P 具有强亲氧性，故与氧形成稳定的酸根；其次为 Nb、Ta 和 W，也具有进入酸根的倾向；Ti、V、Cr、Mn、Fe 等因其离子场强较低，故常形成简单的氧化物。