

915646

环境地球化学

陈静生 邓宝山
陶澍 程承旗
编著

海洋出版社



环境地球化学

陈静生 邓宝山
陶澍 程承旗 编著

海洋出版社

1990年·北京

6.01
3347

内 容 简 介

本书是陈静生教授根据自己长期以来从事环境地球化学教学和研究工作的经验、心得，综合国内外近期来在环境地球化学方面的研究成果编著而成的。全书共12章，系统地阐述了环境地球化学的基本原理，元素及化学污染物在环境中的迁移转化规律，以及地球化学环境与地方病等。该书是一本内容丰富，具有总结性和理论性的专著，与国内外已出版的同类著作相比，内容更为系统、全面和深入。适应于从事地球化学、环境科学和环境保护工作的科技人员、及有关的大专院校师生参考。

责任编辑 朱志军
责任校对 刘兴昌

环境地球化学

陈静生 邓宝山 编著
陶 澍 程承旗

*

海洋出版社出版（北京市复兴门外大街1号）
新华书店北京发行所发行 昌平建华印刷厂印刷
开本：787×1092 1/16 印张：22.25 字数：500千字
1990年4月第一版 1990年4月第一次印刷
印数：1—1200

*

ISBN 7-5027-0623-2/X·12 定价：12.00元

序

各学科的结合处经常是新学科的生长点。地质科学的发展也不例外。较早期，地质学与生物学结合产生了古生物学、地史学、地层学等；地质学与力学结合产生了地质力学、大地构造学等；地质学与化学结合产生了矿物学、岩石学、地球化学等。本世纪70年代以来，地质学与环境科学结合产生了环境地质学与环境地球化学等。当时我在一篇关于讨论环境科学的文章中曾谈及环境地质学与环境地球化学将在环境科学体系中占有重要的地位。但当时，我国环境科学研究工作刚刚开始，资料有限，理论欠成熟，尚不可能对环境地球化学这一分支研究领域作出具体深入的阐述。时至今日，仅短短十几年时间，在党和国家的高度重视下，我国环境科学的发展十分令人欣慰，各分支学科从无到有，发展壮大。大多数分支研究领域已各自形成一套初步完整的思想理论体系和工作方法，逐渐走向成熟。环境地球化学也不例外。陈静生同志撰写的《环境地球化学》一书是我国这个新研究领域内的第一本专著，标志着我国环境地球化学的发展已走向一个系统化、理论化的新阶段。

环境地球化学作为地质学在环境科学中的一个新生长点，其所以具有旺盛的生命力，是和地球化学本身发展的特点分不开的。地球化学成为一个独立完整的学科体系，是近代物理学、化学的许多最新研究成果与地质学不断结合的产物。化学中先进的物质结构理论与物质成分分析测试手段的发展和应用，及对元素原子核内微观结构、同位素组成与化学反应能量特征的认识，极大地促进了地球化学从最初的经验统计阶段向晶体化学和元素原子历史研究阶段的发展，使之逐步完善，成为今天较为成熟和系统的地球化学理论。地球化学的这种积极吸收其他学科最新成果，不断完善自身的显著特点，决定了这一学科所具有的生命力和直接为社会服务的应用性。二次世界大战后，现代原子能工业和国防尖端工业的兴起，大量需求稀有及放射性元素等新资源，元素地球化学和同位素地球化学的发展，直接为满足这些要求作出了贡献。在大范围的区域找矿工作中，勘探地球化学的工作方法成为十分有效的找矿手段。随着航天技术的突飞猛进，天体地球化学、实验地球化学应运而生，直接为宇宙开发服务。70年代以来，人类面临日益严峻的环境污染和生态系统平衡破坏的威胁。为应付这一挑战，与其他学科一道，地球化学又开始了新的耕耘，开拓出了一块直接为人类生产、生活和健康服务的崭新领域——环境地球化学。

实践证明，环境地球化学在揭示各种化学物质在生态系统物质循环过程中的迁移转化规律，评价环境质量，查明环境对污染物的净化和容纳能力，阐明人类自身生存和自然环境的依存关系的实质等方面，都有着独到的、重要的意义，是环境科学领域中一支强有力的分支学科。

环境地球化学不仅与地质学和环境科学有关，也与自然地理学密切相关。在本世纪50年代，在地球化学与自然地理学之间产生了一门新的边缘学科——景观地球化学。这门学科研究原子在景观中的迁移历史，研究组成景观的各要素之间的地球化学联系。陈静生同志自50年代以来长期在北京大学地理系从事景观地球化学与风化壳和土壤地球化学的教学与研究工作；70年代以来从事环境地球化学的教学与研究工作；多次撰文讨论与此有关的问题；并曾有机会在国外就这一问题进行较长时间的考查和研究。本书是他长期从事这方面教

学、研究工作的心得和经验总结。

本书系统地阐述了环境地球化学的基本原理，并把许多与环境环境保护有关的问题系统化，是一本很好的带有总结性和理论性的专著。本书反映了国际上当前环境地球化学研究的进展。与近期国际上出版的同类著作相比，内容更为系统、全面和深入，尤其是对元素及化学污染物在环境中迁移转化规律的阐述，具有自己的特色，很值得从事或关心地球化学与环境科学工作的同志们一读。

特此为序，谨衷心祝愿环境地球化学这一年青而又充满生机的学科，在为国民经济发展和人民健康服务的事业中作出更大的贡献。

刘东生

1986年11月

前 言

环境地球化学是一门新兴的边缘学科。近年来国外出版了数本环境地球化学著作，一些大学开设了环境地球化学课程。但各学者对这门新学科内容的理解则各有侧重。如A.A. Беус所著《Геохимия Окружающей Среды》(1976)主要阐述组成人类环境的四个地球化学系统(大气系统、水系统、土壤-生物系统和表层岩石圈系统)中化学元素分布与迁移的原理。John A.C. Fortescue等所著《Environmental Geochemistry》(1980)阐述的主要是Б.Б.Полынов、А.И.Перельман和М.А.Глазовская等在景观地球化学方面研究的成果。美国堪萨斯大学地质系开设的环境地球化学课程，主要介绍地球物理和地球化学的原理与方法在环境污染问题研究中的应用。美国在一些与环境地球化学有关的专刊和丛书中，主要刊登地球化学环境与人体健康方面的研究成果。

自70年代初以来，我国的地质学家、地球化学家，如刘东生、涂光帜、洪业汤、李长生等，也曾对这门新兴学科的内容、任务和发展提出了自己的看法。作者自50年代以来，在北京大学从事景观地球化学的教学和研究工作；自1975年以来讲授环境地球化学课程，热心于这门新学科的发展，曾多次撰文探讨关于这门学科的某些理论与方法问题。1981—1982年，作者在美国堪萨斯大学环境工程教研室与地球化学教研室进修和工作期间，曾在Ernest E. Angino教授帮助下，比较广泛地查阅了与此有关的各方面的文献。总结国内外近期研究进展，融会吸收各国学者的见解，拟定了本书的写作大纲和系统。

我写作本书的目的是企图为这门有广阔前景的学科的发展尽菲薄之力。本书以阐述有关问题的基本原理为主，着重吸收和反映当前国际上研究的进展，并注意吸收和反映国内学者在有关问题上的研究成果。

我衷心地感谢在本书写作过程中从各方面给我以帮助的美国堪萨斯大学地球化学教授E. E. Angino、环境工程教授R. E. McKinneg、中国科学院地质研究所研究员及我校兼职教授刘东生、环境化学研究所研究员汤鸿霄、贵阳地球化学研究所副研究员洪业汤和邓宝山、国家海洋局环保司前司长朱文学及我系我教研室的领导、同事和同学们。

由于作者水平有限，书中定有许多不完善和错误之处，敬希指正。

陈静生

1986年11月于北京大学

目 录

绪 论	(1)
一、什么是地球化学	(1)
二、什么是环境科学	(1)
三、什么是环境地球化学	(1)
第1章 元素的起源、丰度及其在地球与地壳中的分布	(6)
一、恒星演变与元素的核合成	(6)
二、元素的宇宙丰度	(8)
三、元素在地球和地壳中的分布	(14)
四、元素在地壳中的存在形态	(17)
第2章 岩石圈表生自然体的地球化学	(21)
一、原生矿物的化学风化过程	(21)
二、粘土矿物的结构、性质、分类和形成	(28)
三、风化壳发展过程中的元素迁移特征	(36)
四、成土过程中元素迁移特征	(39)
五、大陆沉积物中化合物的水成淀积作用	(47)
六、我国土壤和第四纪沉积物中化学淀积物的形成和地理分布规律	(51)
第3章 水圈地球化学	(59)
一、水分子的组成、结构和特性	(60)
二、影响水圈溶质成分的因素	(65)
三、天然水中主要离子的来源、反应、含量和存在形态	(71)
四、天然水中的主要气体成分	(85)
五、各类陆地水体离子组成特征	(90)
第4章 大气圈地球化学	(98)
一、大气圈的结构	(98)
二、大气圈的化学组成	(100)
三、低层大气圈化学成分的变化与地球化学循环	(104)
四、高层大气化学	(110)
第5章 生物圈地球化学	(114)
一、生物圈的结构	(114)
二、生命起源与主要生命过程的化学	(117)
三、生物圈元素组成特征	(123)
四、生命元素的分类	(131)
五、元素在生物体内的功能和分布	(133)
第6章 影响元素在环境中迁移的主要地球化学参数与外部条件	(137)
一、若干基本概念	(137)

二、影响元素在环境中迁移的主要地球化学参数	(139)
三、环境的酸碱条件与元素迁移	(147)
四、环境的氧化-还原条件与元素迁移	(153)
五、区域自然地理条件与元素迁移	(160)
第7章 元素在环境中迁移的主要物理化学作用	(169)
一、沉淀-溶解作用与元素迁移	(169)
二、水解作用与元素迁移	(175)
三、络合、螯合作用与元素迁移	(181)
四、吸附作用与元素迁移	(188)
第8章 若干重金属在环境中的迁移转化作用和影响	(196)
一、概述	(196)
二、汞在环境中的迁移转化作用和影响	(201)
三、镉在环境中的迁移转化作用和影响	(216)
四、砷在环境中的迁移转化作用和影响	(223)
五、铅在环境中的迁移转化作用和影响	(229)
六、铬在环境中的迁移转化作用和影响	(235)
第9章 有机物在环境中的降解作用与影响	(246)
一、有机物的化学氧化作用	(246)
二、有机物的生物化学氧化作用	(249)
三、代表性耗氧有机物的生化降解过程	(259)
四、耗氧有机物的降解与水体溶解氧平衡	(265)
五、耗氧有机物的降解与水体富营养化作用	(270)
第10章 化学农药在环境中的迁移转化作用和影响	(275)
一、概述	(275)
二、农药在土壤中的迁移、降解和残留	(276)
三、农药在植物体内的代谢和残留	(289)
四、农药对动物的危害及其在动物体内的代谢与浓集	(294)
五、农药在人体内的积累和对健康的危害	(297)
第11章 酚、氟在环境中的迁移转化作用和影响	(303)
一、酚类化合物	(303)
二、氟化物	(317)
第12章 地球化学环境与地方病	(325)
一、概述	(325)
二、地球化学环境与地方性甲状腺肿	(328)
三、地球化学环境与地方性氟病	(331)
四、地球化学环境与克山病	(336)
五、地球化学环境与大骨节病	(344)

绪 论

一、什么是地球化学

自从瑞士科学家Schönbein(1838)第一次提出“地球化学”一词到现在已经有150年历史了。在整个19世纪,地球化学处于积累资料的经验科学阶段。至本世纪,由于欧、美及苏联许多科学家的努力,使地球化学逐渐发展成为现代理论科学。地球化学是研究地壳和地球的化学成分以及元素在其中分布、分配、集中、分散、共生组合及其迁移规律和演化历史的科学^[1]。

第二次世界大战以后,现代工业蓬勃发展,尤其是宇宙飞行器上天,开拓了宇宙化学的新领域。地球化学与其他学科相结合,形成了许多新的研究方向。其中,已经比较成熟和正在迅速发展的分支学科有:岩石圈地球化学、海洋地球化学、成矿作用地球化学、元素地球化学、同位素地球化学、生物地球化学、有机地球化学、区域地球化学、宇宙化学及应用地球化学等。本书所讨论的环境地球化学是,70年代以来形成的地球化学的一个新的分支学科。

二、什么是环境科学

环境科学作为一门新兴的正在发展中的科学,人们对它的对象、任务和研究范围等尚无统一的认识。这是不足为怪的。因为任何人对环境及环境科学理解,不能不受到他们先前的生活经验、专业知识范围、兴趣及对环境质量和生活质量要求等各种因素的影响。但是无疑地,环境科学的内容十分广泛,综合性很强,是一个多科性的科学领域。作者趋向于接受P.W. Purdom等(1980)所下的比较朴素的定义,即:“环境科学是应用多种学科的知识 and 理论来研究环境与管理环境的科学(图1)”^[2]。研究环境科学的目的是:(1)保护人类,使之免于各种环境因素的负影响;(2)保护环境(局部的和全球的),使之免于人类活动的负影响;(3)为保护人类健康和提高生活水平而不断地改善环境质量。

三、什么是环境地球化学

环境地球化学作为一门新兴的边缘学科,其内容范围远比环境科学单纯和狭窄。但其涉及面仍然较广,综合性同样很强,人们对它研究的对象、任务和内容同样地缺乏一致的认识。

A.A. Beyc等(1976)认为,环境地球化学主要研究组成人类环境的4个地球化学系统(大气系统、水系统、土壤与生物系统、表层岩石圈系统)中化学元素分布与迁移的原理^[3]。John A.C. Fortescue等(1980)所著《环境地球化学》一书中阐述的主要是

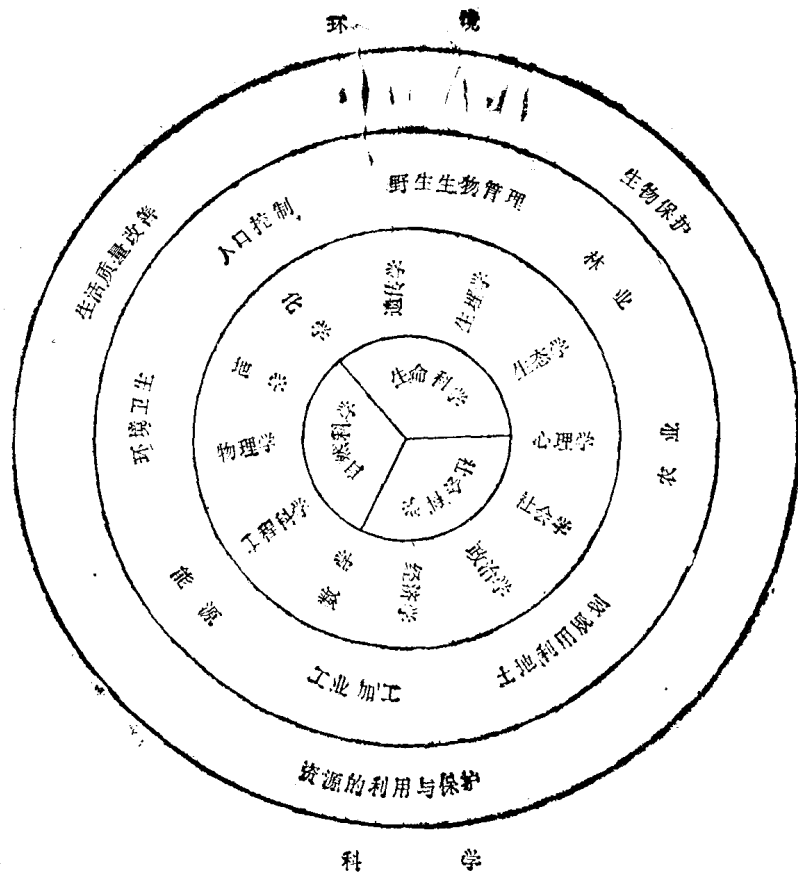


图 1 环境科学与相邻学科的关系

是Б.Б.Полынов、А.И.Перельман和М.А.Глазовская等在景观地球化学方面研究的成果^[4]。美国堪萨斯大学地质系开设的“环境地球化学”课程，主要介绍地球物理和地球化学的原理与方法在环境污染问题研究中的应用^[5]。在美国有一些与环境地球化学有关的专刊和丛书中，主要刊登地球化学环境与人体健康关系方面的研究成果。

涂光帜（1973）在“关于环境科学”一文中指出：“地球化学是研究各种元素在地球中运动、分散、富集规律的学科。……所谓环境污染，从地球化学的角度去看，无非是一些人为的金属元素、非金属元素、各种无机和有机化合物叠加在自然界这些物质运动的基础之上而已。因此，一些研究地球化学的指导思想、工作方法也可以用于研究环境问题。这就必然导致环境科学与地球化学的密切结合，从而导致了环境地球化学这一门新的分支学科的产生。”^[6]

刘东生和李长生（1977）指出：“环境地质学（也称环境地球化学）的主要内容是研究生命演化的地球化学，即研究无机环境的化学组成变化与生命演化，以及与人类健康的内在联系。当前，它着重研究化学污染物质在环境中的热力学、地球化学和生物化学过程，探索环境质量的内部结构和运动规律，建立近代环境污染演化趋势及其对人类健康影响的环境学理论”。^[7]

自1975年以来，作者在北京大学地理系讲授“环境地球化学”课程^[8]，曾撰文探讨关于环境地球化学的某些理论与方法问题^[8]，并为中国大百科全书环境科学卷撰写“环境地球

1) 陈静生，环境地球化学（上），北京大学讲义，1975。

化学”条目^[9]。1981—1982年作者在美国堪萨斯大学地质系地球化学教研室和土木工程系环境工程教研室学习和工作期间，曾在Ernest E. Angino教授帮助下，比较广泛地查阅近20年来与环境地球化学有关的各方面的文献。总结国内外近期研究进展，融会吸收各国学者的见解，提出环境地球化学的定义，即：环境地球化学是研究环境中化学物质（天然的和人为释放的）的迁移转化规律及其与环境质量和人类健康关系的学科。

据作者的认识，环境地球化学主要包括下列三方面的内容：

（1）研究人类环境的地球化学性质：从地球化学角度看，人类赖以生存的地球表面环境可以区分为5个地球化学系统：表层岩石圈系统、大气系统、水系统、土壤-生物系统、技术系统。这些系统是在地质历史过程中逐步演化和依次产生的。它们的化学性质不断地发生变化，尤其是到了近代，其变化的速度与强度大大加剧。人类用自己强大的技术力量大规模地改变了自然界的面貌。许多地壳深部的化学物质被发掘出来了，越来越多的自然界本来不存在的化合物，被从实验室和从生产中合成出来。它们中的一部分不可避免地被散布到环境中。在原来环境物质循环的基础上，叠加了这些新的物质，对人类环境质量产生了严重影响。环境地球化学的重要任务之一在于及时地研究现代环境化学变化的过程和趋势。在原来地球化学的基础上，更加深入地研究组成人类环境的各个系统（岩石圈表层系统、大气系统、水系统、土壤-生物系统等）的地球化学性质。

（2）研究污染物质在环境中的迁移转化规律：人为散发的污染物质在环境中不是固定不变的，而是不断地发生着空间位置的移动和存在形态的转化，这种迁移转化的结果，可以向着有利的方向发展，如污染物质被稀释、扩散、分解，甚至消失；也可以向着不利的方向发展，如在某些条件下积累起来，转为持久的次生污染源。

污染物质在环境中可以通过各种化学作用（如溶解-沉淀、水解、络合与螯合、氧化还原、吸附、化学分解、光化学分解和生物化学分解等作用）不断地改变其存在形态。污染物的存在形态不同，其毒性往往不同。如在水介质中，六价铬的毒性大于三价铬；铜的铬离子的毒性小于简单铜离子，且铬离子愈稳定其毒性愈小。污染物的存在形态不同，生物对它的吸收作用也不同。如底栖无脊椎动物对水体底泥中铜的吸收作用，与底泥中铜的总含量没有相关性，而与某些地球化学相中铜的含量（可交换态铜和易还原态铜）有良好的相关性，说明这两种地球化学相的铜易为生物所吸收。所以，在环境污染研究中，只研究污染物的总量是不够的，而必须对其形态进行研究。

在具体环境中，污染物的存在形态决定于环境的地球化学条件，如环境的酸碱条件、氧化还原条件、环境中胶体的种类和数量、环境中有机质的数量和性质等。地球化学的研究表明，在地球表面上的每一特定地区均有其特有的地球化学条件和性质，所以应用地球化学的原理和方法，能够较好地阐明污染物质在环境中的迁移转化规律。进行这方面问题的研究有助于评价环境质量，预测环境质量变化的趋势；有助于了解自然界对污染物质的同化能力和承纳量，从而合理地利用自然净化能力；有助于制定环境标准和制定改造已被污染的环境的措施。

（3）研究环境元素与生命元素之间的关系，及环境中与生命有关的化学物质对生物体和人体健康的影响：这曾是地球化学的另一个分支学科——生物地球化学的内容。更确切地说，环境地球化学是在生物地球化学的基础上发展起来的。

关于环境元素和生命元素的关系，早在本世纪40年代，对生物地球化学的研究即指出：

(1) 有机体中所含的化学元素与生物圈中所存在的化学元素成正比；(2) 组成有机体的主要元素都是生物圈中容易形成气体和水溶性化合物的元素。60年代，英国地球化学家埃利克·汉密尔顿等测定，并在对数坐标中比较了岩石和人体血液中60多种元素的丰度后发现，除了原生质中的主要成分(碳、氢、氧、氮)和岩石中的主要组分(硅)外，人体组织中元素的丰度和地壳中的丰度两者有惊人的相关性。这一情况向人们揭示了一个真理，即人类并不是超自然的特殊物质，而是地壳物质演化的产物。人体的组成是人类在漫长的岁月中通过新陈代谢，与环境进行物质交换，并通过遗传、变异等过程建立了动态平衡的结果。显然，近代人类释放到环境中的各种各样的化学物质，必将以不同的程度输送给生物和人体。当机体组织不能忍受这些物质时，就可能产生严重的后果。由于汞污染引起的“水俣病”和由于镉污染引起的“骨痛病”就是这方面突出的例子。

环境地球化学在这方面的任务，不仅研究现代环境化学组成的变化与生物体、人体化学组成和人类健康的联系，而且在更广阔的地质背景上研究宇宙元素、地壳元素、海洋元素和生命元素之间的关系，研究生命过程的地球化学演化等问题。

环境地球化学与相邻学科的关系：环境地球化学在研究污染物质的迁移转化规律方面，与环境化学有一定的重叠性，在研究地球化学过程与生命过程之间的联系方面，与环境生物无机化学有一定的重叠性。环境化学和环境生物无机化学几乎是与环境地球化学同时诞生的环境科学的另外两个边缘分支学科。环境地球化学与它们的区别在于，那两门学科从微观方面，即从物质结构和反应机制方面来揭示污染物质在环境中的运动、变化过程，从生命体内的结构和生理功能的关系方面而揭示生命与环境之间的内在本质联系。而地球化学则侧重于从宏观方面，在一定程度上，从宏观与微观两方面相结合，来揭示污染物质在全环境中的转移、循环和分布，来揭示生命过程与地球化学过程之间的联系，并将此两方面的问题放在作为行星的地球物质演化的总背景上进行考察。

环境地球化学研究方法：研究环境地球化学通常采用两类方法：现场调查研究法与实验室模拟实验研究法。应用这两种方法均在于获得可靠的实际地球化学资料。

在现场调查研究中，科学地确定取样地点最为重要。取样点必须有代表性和有足够的数量。为查明化学物质在环境中的迁移转化特点，通常采用共轭布点法。所谓共轭布点法，指同时对各种有关联的环境要素作对比取样分析。如在研究风化壳的化学成分时，同时采集流经这种风化壳的河水的样品进行分析；在研究土壤的化学成分时，同时采集生长在这种土壤上的植物样品进行分析，这样就能获得关于环境各要素间存在着密切的地球化学联系的资料，就可以了解所研究的化学物质在全环境中的迁移状况。

现场调查研究法，只能说明所研究的物质在环境中迁移作用的结果，而不能说明这种结果发生的原因和机制。为了说明化学物质在环境中迁移作用的机制，必须在实验室内配以简单的或复杂的模拟实验，即在人工设计的环境中进行某一过程的观测研究。设计时所采用的环境参数既要服从实验目的，也要尽可能地接近环境现场的实际情况。

现代分析测试技术的应用是研究环境地球化学的基础。在环境地球化学研究中，已采用的现代分析测试技术有：中子活化分析法、火花源质谱法、化学电离质谱法、用电感耦合等离子体源的原子发射光谱法、无火焰原子吸收光谱法、X射线荧光光谱法、电子探针法、化学分析电子能谱法、阳极溶出伏安法、差示脉冲极谱法和气相色谱法等。进行环境地球化学研究要求分析测试方法的灵敏度要高，准确度要好，基体反应要小，要能进行多元素分析。

应用数学方程, 可以定量地更完善地刻划元素在环境中的迁移运动规律, 有助于对这方面的问题进行预测预报。

参 考 文 献

- [1] John A.C., 1980, *Environmental Geochemistry*, Springer-Verlag.
- [2] P. Walton Purdom, Stanley H. Anderson, 1980, *Environmental Science*, Charles E. Merrill Publishing Co. A Bell & Howell Company.
- [3] Беус, А.А.Л.И. Грабовская, Н.В.Тихонова, 1978, Геохимия Окружающей Среды.
- [4] John A.C. Fortescue, 1980, *Environmental Geochemistry*, Springer-Verlag.
- [5] The University of Kansas, 1979/1980, Undergraduate Catalog, p.74.
- [6] 涂光帜, 1973, 七十年代自然科学领域中的一个新生长点——环境科学, 环境地质与健康, 科学出版社。
- [7] 刘东生, 李昌生, 1977, 环境地质学与人体健康, 环境科学情报资料, 第一期。
- [8] 陈静生, 1980, 关于环境地球化学, 环境科学研究与进展, 科学出版社。
- [9] 陈静生, 1983, 环境地球化学, 中国大百科全书环境科学卷, 中国大百科全书出版社。
- [10] Iain Thornton, 1983, *Applied Environmental Geochemistry*, Imperial College, London U.K.
- [11] David H. Specidel, Allen F. Agnew, 1982, *The Natural Geochemistry of Our Environment*, Westview Press.
- [12] Fairbridge, R.W.1972, *The Encyclopedia of Geochemistry and Environmental Science*, Van Nostrand Reinhold.

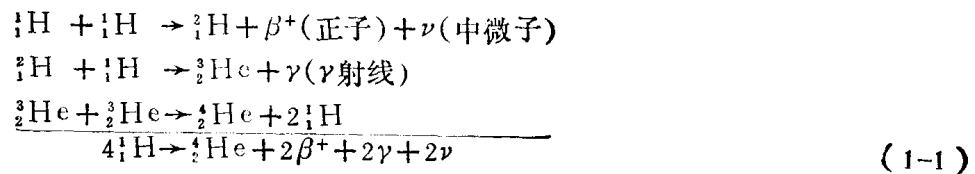
第 1 章 元素的起源、丰度及其在地球与地壳中的分布

构成人类环境和人类自身的基本物质是元素。在地壳和地球大气圈中已经发现了90种元素——指周期表中 ^{92}U 以前除 ^{43}Tc 和 ^{61}Pm 以外的所有元素。另外，有15种元素已被人工合成出来或在其他宇宙物质中被发现。人们难免要问，构成宇宙和人类环境的元素是怎样生成的。人们还发现，构成环境的元素有些丰度值很高，而另一些却很低，如地壳中丰度最大的元素氧（47%）比丰度最小的元素氦（ $7 \times 10^{-16}\%$ ）大 10^{17} 倍。这是由什么原因引起的呢？本章就关于元素起源和丰度的某些近代知识，以及地球和地壳中元素的丰度特征与存在形式作出介绍。

一、恒星演变与元素的核合成

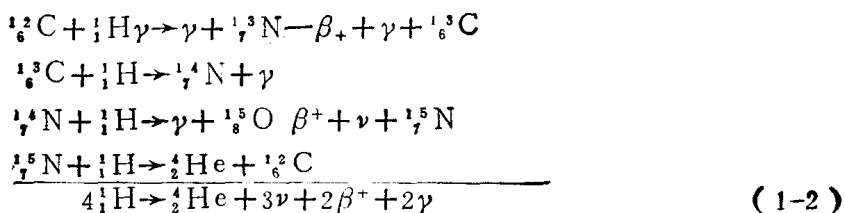
元素的起源与宇宙起源有关。关于宇宙起源，现代一般认为，原来存在于宇宙空间的原始物质发生凝聚，形成了原始星云。原始星云中的气体和尘埃进一步凝聚，产生了几十亿颗恒星。目前这一个过程仍在持续着。

据研究^[1]，氢是宇宙中最丰富的元素，并且认为，最原始的宇宙几乎全部是由氢元素构成的。目前，大多数天体物理学家均接受这样的理论，即宇宙中比氢和氦重的元素，都是在恒星演化过程中在恒星内部由氢和氦通过热核反应合成的。现代天体物理理论认为，恒星的演化和元素的合成过程开始时是这样的：在宇宙的某些区域，氢、氦和其他原子或分子由于随机过程使密度增大，产生重力引力，从而开始缓慢的凝聚过程。当引力势能转变为动能时，原子运动的速度增大。随着物质密度增高，上述区域内温度升高。当温度达得 10^7-10^8 K时，激活障碍被克服，从而开始了核热反应。首先进行的反应是由氢原子聚变为氦原子的反应，叫做氢燃烧：



上述反应为质子对质子的反应（称p-p反应）。反应的顺序：先是两个质子反应生成重氢，重氢再和质子反应生成不稳定氦（ ${}_2^3\text{He}$ ），接着两个不稳定氦之间发生反应生成稳定氦（ ${}_2^4\text{He}$ ）并放出两个质子。故其总结果是4个质子聚变为1个氦原子，同时放出两个中微子、两个正子和发出两次 γ 射线。

假如星体特别大，且其凝聚气体中含有少量 ^{12}C 时，则发生催化核反应，称为碳-氮循环（或 β 循环）。这也是氢燃烧的一种反应：



在这一反应系列中，不稳定的核素如 ${}^{13}\text{N}$ 和 ${}^{15}\text{O}$ 迅速地被分解，而稳定性核素（如 ${}^{12}\text{C}$ 、 ${}^{14}\text{N}$ 和 ${}^{15}\text{N}$ ）在很长时间内可供质子轰击。另外应注意，在这里 ${}^{12}\text{C}$ 虽然是碳-氮循环第一步反应的反应物，但在最后一步反应中又被产生出来，因此， ${}^{12}\text{C}$ 在循环中是作为催化剂而存在的。

在恒星演化中，氢燃烧阶段称之为主序星阶段。在这一阶段，氢燃烧释放出来的能量使原子运动的速度进一步加快。在此条件下，重力场的解体过程将为不断增大的光压所抵消。因此这一阶段通常可以稳定地存在几十亿年。当有较大量和较密集的氢原子产生出来时，它们倾向于向星体内部集中，形成一个显著地不同于外层氢燃烧区域的内壳（图1.1）（J. W. Moore, 1976）^[1]。当内壳温度达 10^8K 和密度达 10^5克/厘米^3 时，氢燃烧的激活障碍被克服，从而开始了氢聚变为碳和氧的过程，称为氢燃烧。

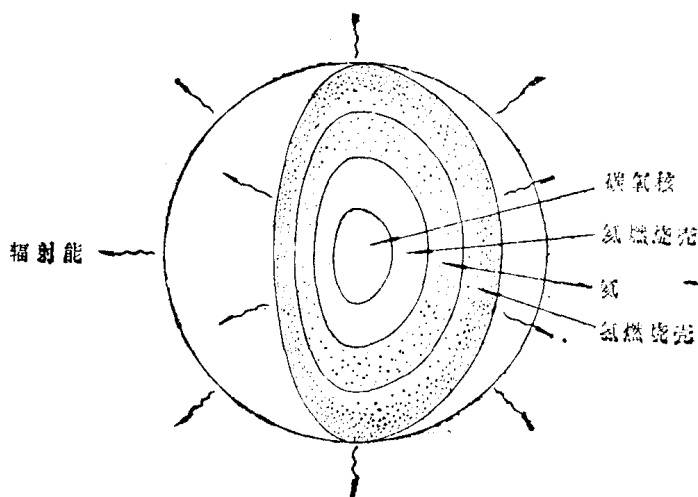


图 1.1 红巨星阶段的恒星的结构
(同时具有氢燃烧壳与氦燃烧壳)

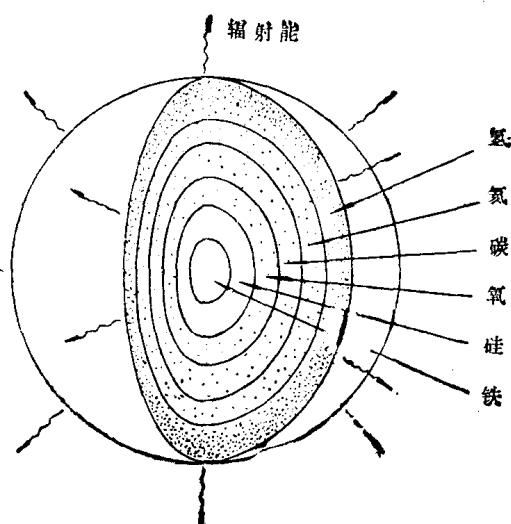
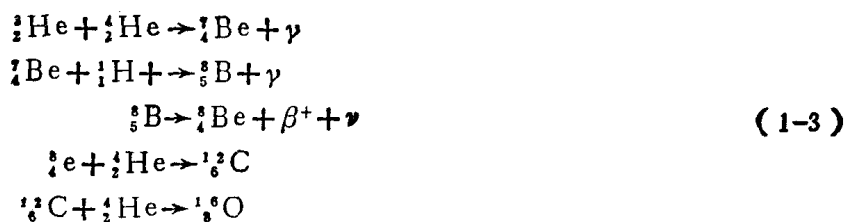


图 1.2 超新星爆炸前恒星的结构



恒星演化的这一阶段称为红巨星阶段。只有大的恒星能较长时间地停留在这一阶段（几亿年）。如果恒星的质量大到超过太阳质量的3.5倍以上时，足够的势能将使星体内壳的温度再度升高，碳和氧的密度（浓度）也将增高，从而开始较重核之间的反应，生成Na、Si、S、P等。



当温度达到 $\approx 3 \times 10^9 \text{K}$ 时，实际上将有足够的动能去克服所有核反应的激活障碍，可以合成从 Fe、Ni 直到 Pu 以前的所有元素。恒星的这一演化阶段称为超新星阶段 (图 1.2) (J. W. Moore, 1976) [11]。

在超新星阶段，质子、中子和各种核子之间达到一种平衡，同时释放出大量能量。所有核均逐渐地转变为稳定核，使星体内部的重力引力大大增强。这样就有机会从星体外层突然吸入大量 H、He 和其他轻元素，一起进行核燃烧反应，从而引起超新星的爆炸，这样就结束了恒星的一生。恒星的演化图式如图 1.3 (R. A. Horne, 1978) [2]。我国古代天文学家在 1054 年曾观察到过超新星的爆炸。在爆炸时由核反应所产生的各种物质和能量被逸散到宇宙空间去。逸散到宇宙空间的物质 (气体、尘埃和新形成的各种元素) 可重新凝聚再形成新的恒星。可能由于这类过程的反复进行，从而使宇宙元素的组成混合成均匀状态。

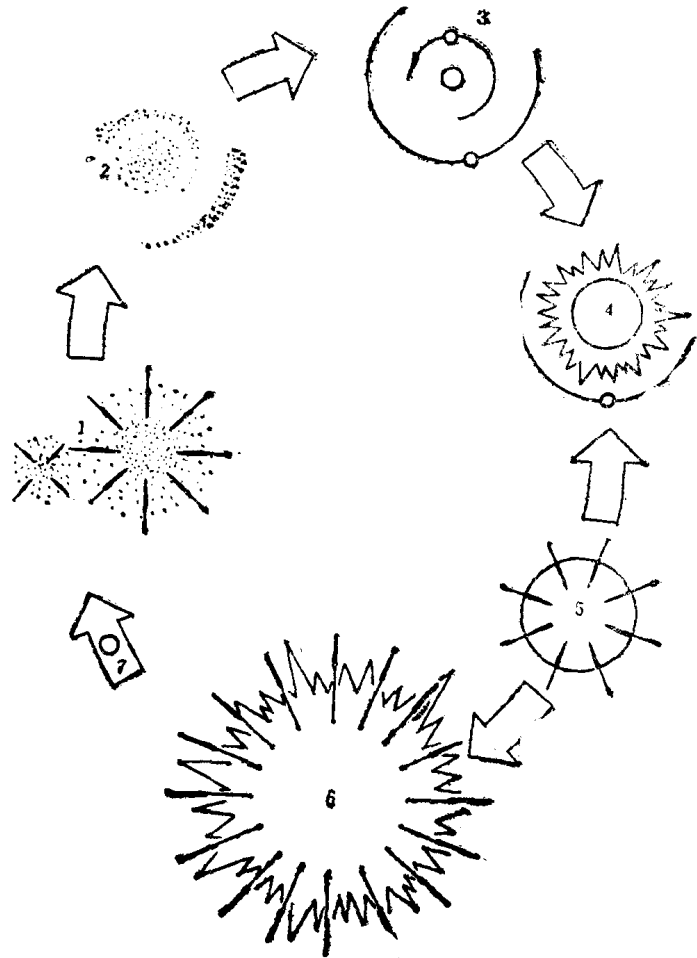


图 1.3 恒星的一生

1—星际气体与尘埃 2—星的形成 3—主序星阶段

4—红巨星阶段 5—脉冲星阶段 6—超新星爆炸

二、元素的宇宙丰度

表 1.1 中所列举的元素的宇宙丰度 (A. H. Brownlow, 1979) [13]，重元素是根据对陨石的化学分析确定的，轻元素是根据太阳、恒星及星云的光谱测定的。由于恒星表面的温度极高，各种元素的原子均处于激发态，不断地辐射出各自的特有光谱。谱线的数目和波长反映元素的种类，在温度、压力和其他条件相同的情况下，谱线的亮度反映元素的相对丰度。

元素宇宙丰度的最显著的特征是氢和氦具有极大的丰度值。这两种元素的原子几乎占了太阳大气中全部原子数目的98%。从元素的原子序与丰度的关系图(图1.4)(A.H.Brownlow, 1979)^[3]上可以十分清楚地看出:(1)元素的宇宙丰度随原子序的增大而按指数关系迅速降低。(2)原子序为偶数的元素,其丰度大于原子序为奇数的元素。这一规则早在本世纪初即为G.Oddo和W.D.Harkins所发现,故被称为奥多-哈根斯法则。(3)从原子序与元素丰度的正常关系看, Li、Be、B的丰度相对偏低,而Fe、Ni、Pb的丰度相对偏高。

表 1.1 元素的原子丰度(相对于10⁶个硅原子)^[3]

原子序	元素	宇宙	球陨石	地球	地壳
1	H	3.18×10 ¹⁰	—	8,400	1.4×10 ⁶
2	He	2.21×10 ⁹	0.11	3.5×10 ⁻⁸	—
3	Li	49.5	~50	—	290
4	Be	0.81	0.669	—	31
5	B	350	6.2	—	93
6	C	1.18×10 ⁷	2,000	7,000	1,700
7	N	3.74×10 ⁶	90	20	140
8	O	2.15×10 ⁷	3.7×10 ⁶	3.5×10 ⁶	2.9×10 ⁶
9	F	2,450	~700	300	3,300
10	Ne	3.44×10 ⁶	0.0015	12×10 ⁻⁸	—
11	Na	6.0×10 ⁴	4.6×10 ⁴	4.6×10 ⁴	1.0×10 ⁵
12	Mg	1.061×10 ⁶	9.4×10 ⁵	8.9×10 ⁵	9.6×10 ⁴
13	Al	8.5×10 ⁴	6×10 ⁴	9.4×10 ⁴	3.0×10 ⁵
14	Si	1.00×10 ⁶	1.00×10 ⁶	1.00×10 ⁶	1.00×10 ⁶
15	P	9,600	5,300	1×10 ⁴	3,400
16	S	5.0×10 ⁵	1.1×10 ⁵	1×10 ⁵	810
17	Cl	5,700	700	3,200	370
18	Ar	1.172×10 ⁵	0.4	5.9×10 ⁻³	—
19	K	4,200	3,500	4,000	5.3×10 ⁴
20	Ca	7.21×10 ⁴	4.9×10 ⁴	3.3×10 ⁴	1×10 ⁵
21	Sc	35	29	—	49
22	Ti	2,775	~2,600	2,000	1.2×10 ⁴
23	V	262	200	—	260
24	Cr	1.27×10 ⁴	6,600	8,000	190
25	Mn	9,300	7,400	4,000	1,700
26	Fe	8.3×10 ⁵	6.9×10 ⁵	1.35×10 ⁶	1×10 ⁵
27	Co	2,210	1,300	3,500	42
28	Ni	4.80×10 ⁴	4×10 ⁴	1×10 ⁵	130
29	Cu	540	250	—	87
30	Zn	1,244	130	—	110
31	Ga	48	12	—	22
32	Ge	115	20	—	2.1
33	As	6.6	4.6	—	2.4