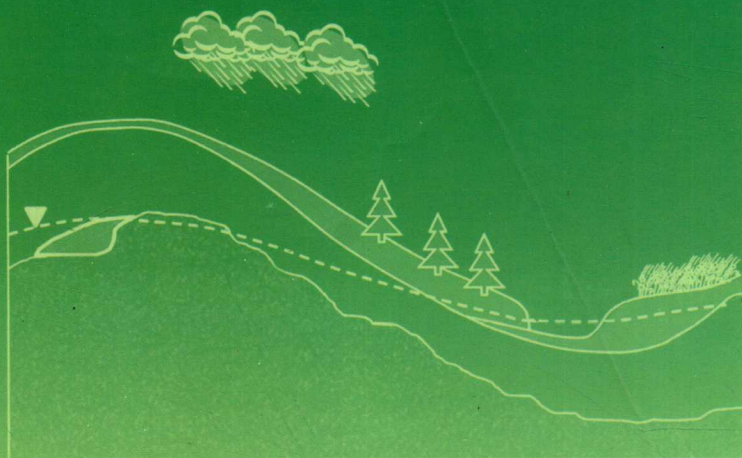


中国地质大学（北京）国家级特色专业地质学系列教材



ENVIRONMENTAL GEOCHEMISTRY

环境地球化学

陈岳龙 杨忠芳 主编



地质出版社



中国地质大学（北京）国家级特色专业地质学系列教材

环境地球化学

主 编 陈岳龙 杨忠芳

副主编 冯海燕 夏学齐

袁国礼 侯青叶

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本教材结合近年来国内外环境地球化学的最新研究进展及相关教材、资料,围绕人类周围环境中与生命和健康及污染有关的化学物质组成、相互作用、演化的地球化学原理,从宇宙起源、元素形成过程、地球形成与演化、生命起源为起点,进而对表生、大气、大陆水体、大洋水体、土壤等环境中化学物质的存在形式、迁移转化,污染物评价与治理等分别进行深入系统地展开讨论;在生态地球化学一章中介绍了该领域较系统的研究方法与成果;在全球变化一章中概要介绍了过去全球变化环境地球化学信息提取方法及原理与中国的资源环境现状。

本书可作为普通高等院校地球化学及相关专业本科生教学用书,也可供其他从事环境地质学、农业地质学、环境科学、生态学、化学地理学等相关专业的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

环境地球化学 / 陈岳龙等主编. —北京:地质出版社, 2017. 10

ISBN 978 - 7 - 116 - 10615 - 4

I. ①环… II. ①陈… III. ①环境地球化学 - 高等学校 - 教材 IV. ①X142

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 258306 号

Huanjing Diqiu Huaxue

责任编辑:徐 洋

责任校对:关风云

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话:(010)66554646 (邮购部); (010)66554579 (编辑部)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

传 真:(010)66554579

印 刷:固安华明印业有限公司

开 本:787mm × 1092mm 1/16

印 张:15.25

字 数:371 千字

印 数:1—3000 册

版 次:2017 年 10 月北京第 1 版

印 次:2017 年 10 月河北第 1 次印刷

定 价:32.00 元

书 号:ISBN 978 - 7 - 116 - 10615 - 4

(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)

前 言

在全体作者的努力下，中国地质大学（北京）国家级特色专业地质学系列教材之一——《环境地球化学》终于即将出版。作为本教材的主编，五年的重担终于可以暂时放下了。要说的话似乎很多，梳理出重要的几点：

一、从国家到教育部及各高校，近年来越来越重视教学与教材，我们真切地感觉到教育兴国战略对于培养高素质专业人才的重要性。这几年来，我们努力探索，结合当前国际主流环境地球化学方面的教材，深感我国环境地球化学教材与国际接轨的紧迫性。环境与环境地球化学目前已深入人心，也与民众的生产、生活具有极为紧密的联系。从雾霾、土地重金属污染、大气温度显著增高，到富硒土壤的开发利用、矿山的复垦等无一不与普通民众的生产、生活息息相关。因此，从基本原理上阐明物质在地表环境中的迁移、转化、分散、富集等规律，是我们改善环境、修复被损害环境的基础，所以我们要义不容辞地编写好这本教材。

二、环境地球化学是一门理论与实践紧密结合的学科，我们在编写本教材的同时，也编写了《环境地球化学实验》，以便学生在掌握基本理论、基本方法的同时，提高对环境与环境地球化学问题的感性认识及学习兴趣，具有基本的操作技能。

三、由于作者水平有限，在本教材完稿之际，仍深感有诸多的遗憾：学科在快速发展，而我们的知识更新没有跟上，难免遗漏一些重要的环境地球化学研究进展；部分数据资料来自互联网，在教材中没有一一注明，一些内容也没有深入证实。无论如何，在此诚恳地向提供了这些数据资料的互联网作者们表示衷心感谢，同时欢迎使用本教材的师生们对其中的错误批评指正。

四、希望本教材起到抛砖引玉的作用，今后有更多更好的环境地球化学教材涌现，以丰富环境地球化学的知识体系，普及环境地球化学知识，造福人类。

本教材是集体创作的成果，绪论、第一章、第八章由陈岳龙编写，第二章由冯海艳编写，第三章、第四章由夏学齐编写，第五章由袁国礼编写，第六章由冯海艳、侯青叶编写，第七章由杨忠芳编写。全书由陈岳龙统稿、定稿。初稿完成

后，本教材得到广州大学常向阳教授的指导，他与他的同事在百忙中对部分章节内容进行了精心的审阅，并提出宝贵的修改意见。

本教材在立项及编写过程中得到中国地质大学（北京）教务处、地球科学与资源学院及地球化学教研室的各级领导的关心、支持与鼓励。在此，致以衷心的感谢！

编者

2016 年 12 月

目 录

前 言

绪 论	(1)
第一节 环境地球化学与其他学科的关系	(2)
第二节 环境地球化学的发展简史	(4)
小 结	(6)
复习与思考题	(6)
第一章 地球环境概论	(7)
第一节 宇宙诞生及恒星的形成与演化	(7)
一、宇宙的诞生	(7)
二、恒星的形成与元素合成	(8)
第二节 地球的形成与演化	(14)
一、行星的原始组成	(15)
二、地球的年龄	(15)
三、地壳	(17)
第三节 地球环境	(24)
一、大气与天气系统	(24)
二、水与水圈	(30)
三、土壤与植被	(31)
第四节 生命起源及演化	(33)
小 结	(43)
复习与思考题	(44)
第二章 表生环境及表生地球化学	(45)
第一节 表生带环境特点	(45)
一、表生带环境的主要特征	(45)
二、表生带环境的地带性特征	(46)
三、表生带环境的非地带性特征	(48)
四、地球关键带及其性质和作用	(48)
第二节 表生作用的动力学过程	(51)
一、风化作用地球化学过程	(51)
二、沉积作用地球化学过程	(59)
第三节 表生带环境中元素的存在形式和迁移转化	(64)
一、元素的存在形式	(64)
二、元素的迁移转化	(65)

第四节 重金属元素的表生地球化学特征	(67)
一、汞的表生地球化学特征	(68)
二、砷的表生地球化学特征	(69)
三、铅的表生地球化学特征	(70)
四、镉的表生地球化学特征	(71)
小 结	(72)
复习与思考题	(72)
第三章 大气环境地球化学	(73)
第一节 大气圈的结构与成分	(73)
一、大气圈层结构	(73)
二、大气成分	(75)
第二节 大气污染源及污染物	(78)
一、大气污染源	(78)
二、大气污染物	(79)
第三节 大气污染物的迁移与转化	(89)
一、大气污染物的迁移	(89)
二、大气污染物的转化	(92)
第四节 大气污染的危害、评价与防治	(106)
一、大气污染的危害	(106)
二、大气环境质量评价	(109)
三、大气污染的控制与防治	(112)
小 结	(115)
复习与思考题	(115)
第四章 大陆水体环境地球化学	(116)
第一节 天然水的基本特征	(116)
一、地表水的分布与水循环	(116)
二、天然水的性质与组成	(117)
三、天然水的性质和平衡过程	(124)
第二节 水体污染物和污染源	(126)
一、水体污染物	(126)
二、水体污染源	(130)
第三节 水体污染物迁移转化	(132)
一、污染物的自净和降解	(132)
二、水体中重金属元素的迁移转化	(134)
三、水体富营养化作用	(138)
第四节 水体环境质量评价与污染防治	(139)
一、水体环境质量评价	(139)
二、水体污染的预防和治理	(143)
小 结	(146)

复习与思考题	(146)
第五章 大洋水体环境地球化学	(147)
第一节 大洋水体的元素组成	(147)
一、常量元素	(147)
二、营养元素	(148)
三、微量元素	(148)
四、溶解气体	(148)
五、有机物质	(149)
第二节 大洋水体循环	(149)
一、风环流	(149)
二、热盐环流	(151)
第三节 大洋水体与全球气候	(152)
一、环流对温度的直接影响	(152)
二、海水对 CO ₂ 等温室气体的固定	(152)
第四节 大洋水体中元素的循环	(154)
一、大洋水体中主量离子的地球化学循环	(154)
二、大洋水体中微量元素的地球化学循环	(162)
第五节 河口及近海水体环境污染与治理	(165)
一、近海污染物种类及类型	(165)
二、海洋污染物的迁移转化和危害	(170)
三、海洋污染的检测	(170)
四、典型海洋污染与治理	(171)
小 结	(174)
复习与思考题	(174)
第六章 土壤环境地球化学	(175)
第一节 土壤的形成及成土过程	(175)
一、土壤形成过程中的大、小循环学说	(175)
二、土壤的形成因素	(176)
三、成土过程	(179)
四、土壤剖面	(182)
第二节 土壤物质组成与结构	(183)
一、土壤的基本物质组成	(183)
二、土壤的机械组成	(186)
三、土壤结构	(187)
第三节 土壤的物理和化学性质	(188)
一、表征土壤物理性质的指标	(188)
二、土壤胶体特性及其吸附性	(188)
三、土壤的酸碱性	(190)
四、土壤的氧化还原反应	(192)

第四节 土壤中物质的迁移与转化	(192)
一、土壤矿物质的迁移与转化	(192)
二、土壤有机质的转化	(193)
第五节 土壤系统分类概述	(195)
一、分类原则	(196)
二、分类系统	(197)
第六节 土壤污染与防治	(198)
一、土壤污染的基本概念	(198)
二、土壤污染的特点	(202)
三、土壤污染物及污染来源	(202)
四、土壤污染防治	(205)
小 结	(207)
复习与思考题	(207)
第七章 生态地球化学	(208)
第一节 生态地球化学产生的背景	(208)
第二节 生态地球化学的概念和研究内容	(209)
一、生态地球化学定义	(209)
二、生态地球化学的研究内容	(210)
三、生态地球化学与其他学科的关系	(210)
第三节 中国生态地球化学研究进展	(211)
一、农田生态系统	(211)
二、城市生态系统	(212)
三、河流生态系统	(212)
四、湖泊生态系统	(213)
五、重点问题探索	(214)
第四节 生态地球化学学科发展趋势	(215)
小 结	(216)
复习与思考题	(216)
第八章 全球变化	(217)
第一节 地球环境的历史变化	(217)
一、地球环境历史变化记录	(217)
二、地球环境变化的影响因素	(222)
第二节 当前全球性环境问题	(224)
一、ENSO	(224)
二、青藏高原隆升的全球气候环境效应	(225)
三、人口与资源环境问题	(226)
小 结	(228)
复习与思考题	(229)
参考文献及参考资料	(230)

绪 论

人类及其生活的地球表层，是整个地球系统不可分割的组成部分，也是地球自身在漫长历史中不断发展与演化的产物。所谓环境，就是某一事物（称之为主体）的周围事物（称之为客体），如对于人类来说，大气、水体、表层土壤、沉积物、岩石和其他生物体等均为其环境。这些周围事物既包括自然的，也包括人造的，对于人类及灵长类动物还应包括社会的，并且客体与主体之间相互影响。本书中的环境涉及与人类有关的周围环境，但不包括社会环境。

人类在长期的生产与生活实践中，早就认识到人与环境之间的关系。在春秋战国时期完成的《黄帝内经》中，黄帝就上古之人长寿的原因问岐伯，岐伯的回答是：“上古之人，其知道者，法于阴阳，和于术数……”岐伯的回答表明，上古时代那些懂得养生之道的人，能依据天地阴阳的自然变化之理而去适应，调和养生而达到协调……

西方尊称为“医学之父”的古希腊医师希波克拉底斯（Hippocrates，公元前460—公元前377年）认为，一个医生进入某个城市，首先要注意这个城市的方向、土壤、气候、风向、水源、水、饮食习惯、生活方式等这些与人的健康和疾病有密切关系的自然环境。

始于18世纪中叶欧洲英格兰中部地区的工业革命，其加速发展的主要因素是蒸汽机、煤炭、钢铁，使人们从繁重的人力与手工劳动中解放出来。随之而来的问题是，矿产资源的大量开采，大量的人口向城市迁移，贫富分化，住房拥挤，气候变暖，人们生活的环境被破坏并遭受污染。如大量燃煤导致的颗粒物污染，使城市居民的支气管疾病在特定季节爆发；酸雨导致建筑物及金属材料的加速腐蚀等；汽车工业的发展，导致石油大量的开采，汽车燃烧石油产品后排出的尾气与阳光的相互作用在城市大气中产生光化学烟雾，刺激居民的皮肤与眼睛，而长期、大量的刺激可导致严重疾病。

科学家对不同地区的居民进行大量研究发现，某些类型疾病的高发只出现在特定的地区。如干旱、沿海地区，山区的居民分别因环境中的碘过高或不足，其甲状腺肿的发病率而明显偏高；某些地区的土壤环境中硒不足，导致当地人群的地方性心肌病、动物白肌病高发，而在土壤硒含量过高地区，出现畜类的盲目蹒跚及结缔组织坏死的中毒性地方病等等。同时，在一些地区尽管生产、管理及种植方式均相同，不同质地的土壤、水、光热条件下所产作物的质量、口感及营养价值却存在明显的差别，如河南省由熊耳群变质岩发育而成的土壤，其中生长的洛阳牡丹，因为土壤中富含铁、锰等微量元素适量，使得花体、色泽、形态、气味等均优于其他地区所产的牡丹；胶东半岛种植苹果因生长于花岗岩风化的沙质土壤中，口感好、富含微量营养元素。

随着物质生活水平不断提高，人们对其周围的生活与工作环境越来越重视，环境地球化学这门新兴的学科便应运而生。我们知道地球化学研究地球的化学组成、化学作用及化学演化（涂光炽，1984），因此，环境地球化学是研究人类周围环境中与人类生命和健康

有密切关系的化学物质组成、作用及演化的一门学科。它基本不涉及地球深部过程，而主要研究表生条件下，对人类生命与健康有密切影响的化学组分在环境中的组成及其在各介质之间的迁移转化规律，进而研究这些组分及转化过程对人类生命与健康的影响。因此，环境地球化学的基本任务可概括为：

1) 地球表层水体、大气、土壤、岩石、食用动植物等各种介质中元素及有关化合物的组成，为确定环境背景值、基准值、基线值及区域农业优质产品养殖、种植的合理布局提供依据；

2) 研究对人体健康有毒有害的元素及有关化合物在表生各环境介质中的来源、存在形式、迁移转化规律、危害程度、变化趋势、控制措施；

3) 研究人体必需的有益元素及有关化合物在某些区域环境各介质中的丰缺状况，为改善与提高区域人群的健康水平提供科学依据；

4) 研究某些区域人造工程对环境各介质中有关元素及化合物存在形式、迁移转化规律的影响与变化趋势；

5) 研究过去全球变化过程中某些元素、同位素、化合物的组成与变化规律，为未来全球环境变化趋势预测提供依据。

由环境地球化学的定义与基本任务，该学科的基本特征可以总结如下：

1) 环境地球化学是地球化学与环境科学的交叉学科，侧重研究人类生存的地球表层系统中与生命、健康有密切关系的元素及化合物；

2) 不仅涉及自然过程，还对人类的生产、生活过程对元素及化合物在环境各介质中的存在与迁移形式的影响进行研究；

3) 不仅研究现在的环境介质，还对过去全球变化过程中有关介质记录下来的元素、同位素、化合物特征进行研究，也将这些物质在未来全球变化中的演化趋势作为重要的内容。

第一节 环境地球化学与其他学科的关系

环境地球化学与环境地质学一起构成环境科学与工程基础学科中的环境地学分支(图0-1)。环境地球化学和环境化学有着较密切的关系，但是各自的任务不同，环境化学侧重于研究有害化学物质在环境介质中的存在、化学特性、行为和效应及其控制的化学原理和方法，主要包括以研究环境污染物检测方法与原理为主的环境分析化学和以化学污染物的起源与污染机制为主的环境污染化学。环境地球化学和环境科学与工程中的其他基础学科的差别显而易见，如环境生态学、环境生物学主要研究生物与受人干预的环境相互之间的关系、相互作用的规律及其机理；环境毒理学是从医学与生物学的角度，利用毒理学方法研究环境中有害因素对人体健康的影响等。

所谓污染，就是指由于人类的生产、生活活动导致其环境中有毒有害物质的量高于自然背景值，并对处于该环境中的人群健康产生损害效应的现象。因此，环境地球化学的研究结果是环境化学研究的基础；同时，环境地球化学不仅研究污染物质，还研究自然环境中对人类健康和农作物生长的有益、有害物质；不仅研究现状，还从全球尺度研究过去与未来的变化。

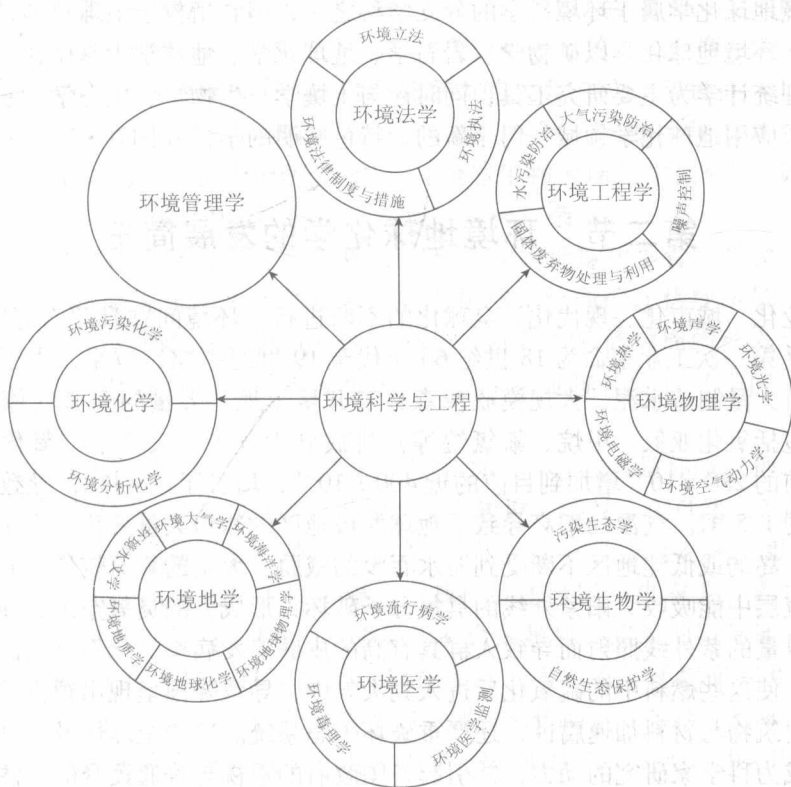


图0-1 环境科学与工程分支学科

环境地球化学与环境地质学有着密切的关系，其区别在于环境地球化学研究自然与人类活动引起的物质组分的分布与变化规律，而环境地质学主要研究相关的宏观地质问题，如区域地质环境，包括地质灾害的分布、自然资源开发中引起的环境地质问题（如地面沉降、海水倒灌、盐碱化、荒漠化、人工滑坡、山崩等）；工程建设引起的地质环境问题（如水库、城市、道路、海港工程、机场、电站建设对地质环境的破坏，引起的环境恶化等）。

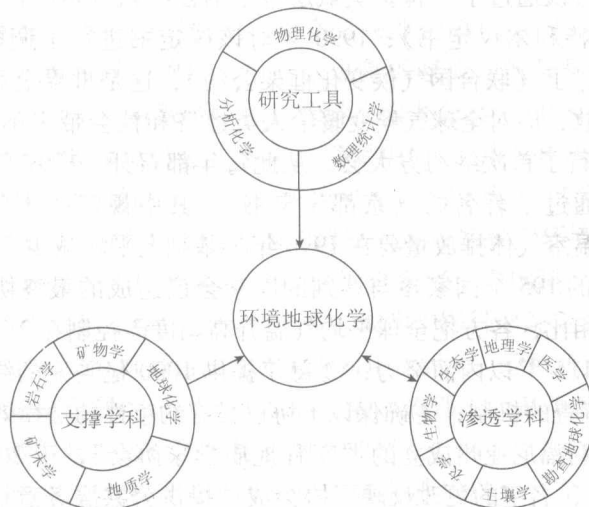


图0-2 环境地球化学与其他学科的关系

尽管环境地球化学属于环境科学的分支学科之一，但它植根于地球科学，尤其是地球化学。因此，环境地球化学以矿物学、岩石学、地球化学、地质学为基础，物理化学、分析化学、数理统计学为主要研究工具，同时还与土壤学、生物学、生态学、农学、医学相互渗透，形成应用地球化学领域一门全新的、特色鲜明的学科（图0-2）。

第二节 环境地球化学的发展简史

随着工业化、城市化、现代化、全球化的不断进行，环境问题日益引起人们的关注。自工业革命（第一次工业革命为18世纪60年代至19世纪中期）以来，由于人类过度使用化石燃料、大量制造水泥、大规模砍伐森林与开垦土地，大量的温室气体（以二氧化碳为主，还包括氧化亚氮、甲烷、氟氯烷等）排放到大气中，大气中二氧化碳体积分数从工业革命前的 280×10^{-6} 增加到目前的近 400×10^{-6} ，增长了约43%，导致全球平均气温增高了大约 1.5°C 。气温的增高导致了地球两极地区的冰川大量融化，海平面上升，许多沿海城市、岛屿或低洼地区不断受到海水吞没的威胁。大量的氟氯烷进入到大气中，将一些区域平流层中能吸收太阳紫外线的臭氧分子破坏，形成大的臭氧空洞，使这些空洞下的人们遭受过量的紫外线照射而导致人群具有高的皮肤癌发病率。化石燃料的燃烧，尤其是煤的燃烧，使这些燃料中的硫氧化后进入到大气中，导致降雨呈现出很强的酸性。这种酸雨不仅使建筑物与材料加速腐蚀，还严重破坏生态系统。这些全球性及区域性环境问题与解决方案成为科学家研究的动力，并引起各国政府的重视与普通民众的关注。

1898年，瑞典科学家阿伦尼乌斯（Arrhenius）就警告说，二氧化碳排放过量可导致全球变暖。然而，直到20世纪70年代，通过科学家的深入研究，这个问题才引起关注。1972年联合国在瑞典斯德哥尔摩通过了《联合国人类环境会议宣言》，该宣言概括出7个共同观点，其中第6个观点是：在解决世界各地的行动时，必须更审慎地考虑它们对环境产生的后果。为现代人和子孙后代保护和改善人类环境，已成为人类一个紧迫的目标。这个目标将同争取和平和全世界的经济与社会发展两个基本目标共同和协调实现。1985年，联合国在奥地利召开会议通过了《保护臭氧层维也纳公约》；1987年在加拿大通过《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》；1990年对该议定书进行了调整和修正。1992年，在巴西里约热内卢通过了《联合国气候变化框架公约》，这是世界上第一个为全面控制二氧化碳等温室气体排放，应对全球气候变暖给人类经济和社会带来不利影响的国际公约。1995年在德国柏林举行了首次缔约方大会，从此每年都召开。1997年的第3次缔约方大会在日本京都召开，通过了著名的《京都议定书》，其中规定：从2008~2012年期间，主要工业发达国家的温室气体排放量要在1990年的基础上平均减少5.2%。2015年12月12日，由联合国主导的195个国家参与谈判的巴黎会议达成的最终协议的4点主要成果是：①与前工业时代相比，各方把全球平均气温升高幅度需控制在 2°C 以内作为目标，并为把升温幅度控制在 1.5°C 以内而努力；②每年提供1000亿美元的绿色基金；③确立每5年对减排成果进行审查的机制；④确保以上协议具有约束性的法律效力。

1957年在美国加利福尼亚州成立的“工程地质学家协会”，于2005年更名为“环境与工程地质学家协会”，名字的更改反映了协会成员提供公共服务意识的重要变化。1963年11月在纽约由美国地球化学协会发起，首次召开了“地质学与微量元素及营养关系”

的讨论会。美国地质协会最早成立的工程地质分会,在 20 世纪 60~70 年代随着联邦政府有关环境法案的通过,及对环境、核电站选址与建设等问题的关注,变更为环境与工程地质分会,1971 年召开了两个有关工程地质环境方面的大会;1995 年创办《环境与工程地球科学》杂志。创立于 1917 年的美国石油地质学家协会,于 1995 年创办《环境地球科学》杂志。美国地球物理协会于 1996 年创办《全球生物地球化学循环》。英国的伦敦地质协会于 2001 年创办《地球化学:勘查、环境、分析》杂志。

苏联地球化学家维诺格拉多夫于 1938 年提出“生物地球化学省”学说,常量及微量元素在成土母质与土壤-天然水-植物-动物有机体系统内的迁移规律是该学说的基础(维尔纳茨基,1940);柯瓦尔斯基(1960)指出,凡是有机体对周围环境中微量和宏量元素过剩或不足具一定反应的地区、分布区,即为生物地球化学省(中国地理学会自然地理专业委员会,1965)。

由 32 个成员组成的欧洲地质调查协会,其中的两个目的就是环境管理,废弃物管理与处置,土地利用规划;可持续的城市发展与安全建设。同时,在自然灾害的研究中也注重研究环境中元素的过剩与不足问题。20 世纪 40 年代从欧洲发展起来的勘查地球化学,最初是一种找矿技术,但其成果不仅可服务于找矿,还可以解决农业、畜牧业、环境污染、地方病等问题(谢学锦等,2009)。隶属于联合国教科文组织的国际地质科学联合会于 1964 年成立国际工程地质与环境协会,旨在促进工程地质与环境研究和技术的发展,改进工程地质教学和培训方法,以及迅速搜集、评价和传播世界各地工程地质活动中成功和失败的经验。国际地质科学联合会每年均设立国际地质对比计划(IGCP),1988 年设立了 IGCP259 项目,其目的是基于最适合的采样介质为地质和环境上的应用而编制一系列国际系统地表地球化学图(王学求,1991);该项目的延续项目是 1993 年批准的极低密度全球地球化学基线值填图,即 IGCP360(谢学锦,2003)。俄罗斯稀有元素矿物学、地球化学和结晶化学研究所为配合 IGCP259,于 20 世纪 90 年代初率先开展了“多目标地球化学填图”,通过在景观条件不同、总面积 $46 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的 6 个试验区开展的试点工作,取得了集地质、农业、环境、找矿、土地利用、资源利用的系列地球化学图件(杨忠芳等,2002)。

1972 年,官厅水库上万尾鱼突然死亡,在周恩来总理的亲自过问下,迅速成立了以万里为组长的官厅水系水源保护领导小组,这也是国家成立的最早的环保部门。1973 年正式成为国家机构,称为“国务院环境保护领导小组办公室”。1982 年更名为“环境保护局”,隶属于建设部。1988 年更名为“国家环境保护局”,成为国务院直属机构。1998 年国家环境保护局升格为正部级的国家环境保护总局,2008 年更名为“环境保护部”。从 20 世纪 70 年代初开始,国内有关科研机构的研究人员开始研究环境问题。1975 年,中国科学院地球化学研究所成立了环境地质地球化学研究室;中国科学院成立环境化学研究所,1986 年与中国科学院生态研究中心合并,成为中国科学院生态环境研究中心。与此同时,中国科学院原地理研究所开始研究环境中的化学问题,地质研究所的部分学者开始对地球历史上的全球变化进行研究。国土资源部(前地质部)及其下属的研究院(所)依托水文地质、工程地质成果长期进行环境地质问题的研究。同时,中国地质调查部门从 1978 年开始部署全国 1:20 万区域化探全面扫面工作,截止到 1997 年,全国完成近 $600 \times 10^4 \text{ km}^2$ 基岩出露区 39 种元素的地球化学图,从 20 世纪 80 年代开始,这些地球化学图件就开始

应用到环境、农业、地方病病因及防治中（谢学锦等，2009）。1999年，中国地质调查局部署了国土资源大调查，首先在成都平原、江汉盆地、珠江三角洲试点部署了覆盖区多目标地球化学调查项目，分析54种元素和指标，发现了这3个区域的部分土壤中存在由于人类活动造成的重金属污染现象，调查结果对区域农业种植、养殖结构调整具有重要的指导意义。此后，相继在全国近 $150 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的覆盖区开展了1:25万的多目标地球化学调查，取得了诸多重要的成果（奚小环，2007）。

目前，环境保护部、中国科学院、农业部、国土资源部均有从事环境科学、环境工程研究的相关机构，教育部所属的综合性大学均有与这些学科有关的教学与研究院系。

小 结

本章简要回顾了环境及环境与健康的历史起源，科学地定义了环境地球化学，概括了该学科的基本任务，说明了环境地球化学与其他学科之间的关系，简单回顾了环境地球化学的发展历史及国际社会对环境问题的关注与重视程度，概要介绍了环境地球化学在中国的发展历史与成果及主要研究机构。

复习与思考题

1. 什么是环境？
2. 什么是环境地球化学？
3. 环境地球化学的研究任务是什么？
4. 环境地球化学与其他学科之间是什么关系？
5. 简述《京都议定书》的相关内容。
6. 查阅资料，简述《巴黎协议》的相关内容。
7. 什么是“多目标地球化学调查”？
8. 什么是污染？

第一章 地球环境概论

本章首先介绍理论物理有关宇宙起源计算的最新结果；地球在太阳系中的独特性，包括生命、水、大气、岩石；从比较行星学的角度阐明地球的起源及演化，侧重介绍近 10 多年来元素、同位素地球化学研究的新进展，如地球历史的记录、壳-幔分异的特征；从火山作用的排气组成论述地球原始大气特征，包括稀有气体元素及同位素特征进行的推断，含氧大气的形成与演化；简要阐述水圈的特征与演化；从生命起源的地质证据论述生物圈的起源与演化，包括澄江动物群、瓮安动物群、脊椎动物的最早出现，生物多样性等。

第一节 宇宙诞生及恒星的形成与演化

一、宇宙的诞生

理论物理研究表明：自然界的基本单元不是电子、光子、中微子和夸克之类的粒子，而是很小很小的弦的闭合圈（称为闭合弦或闭弦）。闭弦的不同振动和运动就产生出各种不同的基本粒子。尽管弦论中的弦尺度非常小，但操控它们性质的基本原理预测，存在着几种尺度较大的薄膜状物体，后者简称为“膜”。直观地说，我们所处的宇宙空间也许就是九维空间中的三维膜。

目前众多证据表明宇宙是由大爆炸产生。该理论认为，宇宙是在极短的时间与极小的空间尺度上产生的，始于 13.7 Ga（1 Ga = 10 亿年）前， 10^{-31} m 的空间尺度上、 10^{-43} s 时间内，宇宙从量子背景出现。宇宙的发展史可表示为一个右端开放的封闭曲面体（图 1-1），左端中心为爆炸奇点，向右延伸到现在这个开口部。如果是这样，宇宙不是单一的，在我们所处的宇宙之外可能还有很多很多的宇宙。理论物理计算指出，可以存在多达 10^{500} 个宇宙。宇宙中存在暗物质；宇宙与宇宙之间存在黑洞，它们之间存在相互作用。最终这些宇宙将灭亡，所有物质再次压缩到 10^{-31} m 的极小空间，并通过新的大爆炸产生新的宇宙。

大爆炸前 10^{-35} s 时，温度为 10^{27} K，分解为强核力、弱核力、电磁力和引力；至大爆炸前 10^{-11} s 时，宇宙急剧膨胀了 10^{50} 倍；大爆炸前 10^{-5} s，温度降低至 10×10^{12} K，形成中子和质子；大爆炸前 0.01 s，温度降至 1×10^{12} K，以光子、电子、中微子为主，质子、中子仅占十亿分之一，体积迅速膨胀，温度和密度不断下降；大爆炸后 0.01 s，温度下降到 1×10^{11} K，中子/质子的值从 1.0 下降到 0.61，物质与辐射的量以 $1:10^8$ 固定下来；大爆炸 1 s 后，温度下降到 1×10^{10} K，中微子向外逃逸，正、负电子湮没反应出现，核力尚不足以束缚中子和质子；大爆炸 13.8 s 后，温度下降到 3×10^9 K，氢、氦、锂等稳定原子核（化学元素）形成，且相对丰度确定，H/He 值为 12.5。这是元素的宇宙核合成阶段，

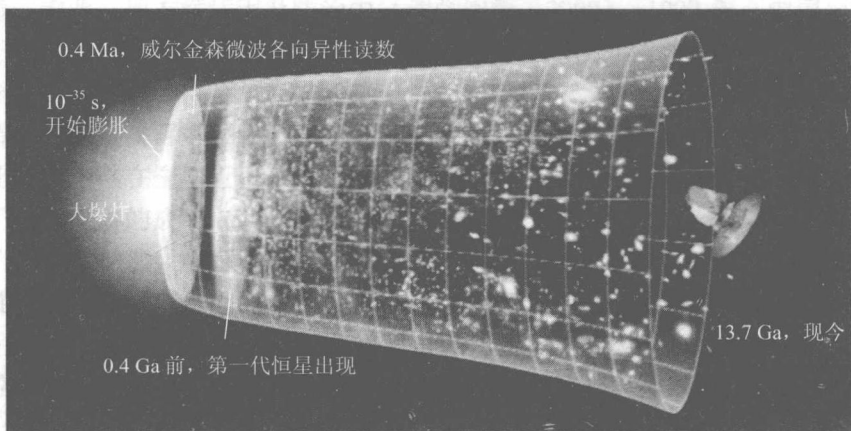


图 1-1 美国国家航空航天局威尔金森微波各向异性探测卫星最新数据构筑的宇宙发展示意图

(据 Cho, 2006)

此图说明大爆炸后约 0.4 Ga 恒星开始出现及新诞生的宇宙如何以快于光速的速度膨胀的极限理论

其反应机理为：



Li 以及比 Li 重的元素是在其后的过程中形成的。这些较重的元素在整个过程中稳定产生，但不同星系之间，甚至是单个星系内部，此类过程的效率不同。Li、Be、B 是星际空间由物质与宇宙射线相互作用连续产生的（星系核合成），其形成过程是：



二、恒星的形成与元素合成

宇宙中存在着许多原星系，它们最初都是一团巨大的气体，主要成分是氢。其后，原星系内的气体团聚成许多中心，在万有引力作用下，气体分别向这些中心收缩，出现了许多原星体，越收缩密度越大；密度越大则收缩越快，使原星体内原子的平均运动速率越来越大，温度也越来越高。当温度升高到 1×10^7 K 以上时，原星体会发生核聚变反应，出现 4 个氢原子聚变为 1 个氦原子的过程。较大的原星体的核反应特别强，能聚变成较重的元素。这些聚变过程会伴生大量辐射能，使原星体转变为发光的恒星体。恒星体内部存在复杂的核反应，在氢的消耗过程中，较重元素的丰度渐渐增高，并形成一些更重的元素。特别巨大的星体，内部核反应特别强，能使星体爆裂，形成超新星，它具有强大的爆炸压强，使其中已形成的不同原子量的元素裂成碎片，散布到星际空间中，形成宇宙尘和气体云，随后冷却成暗云。这样，超新星的每一次爆炸，都进一步使星系内增加更多的较重元