

微量元素与健康

陈清 卢国琨 主编

北 京 大 学 出 版 社

微量元素与健康

陈 清 卢国琨 主编

胡汉升 安笑兰 审校

北 京 大 学 出 版 社

内 容 简 介

科学的进步及测试技术的发展,使人们对微量元素参与生命过程的研究成为可能。实践中人们越来越认识到微量元素在维持人类健康中的重要作用。

本书阐述了微量元素的生物学效应;微量元素与营养物质的相互作用;微量元素与免疫、肿瘤等的关系。详细介绍了生物体内几种常见的微量元素如铁、碘、锌、硒、砷、汞、镉、稀土等在人体内的分布、代谢、生物学效应及缺乏症和中毒的防治等。

本书适用于从事医学教学与研究、医疗、卫生保健、环境保护等多方面的专业技术人员学习、参考。

微 量 元 素 与 健 康

陈 清 等 主 编

北京大学出版社出版

(北京大学校内)

北京妙峰山印刷厂 印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

787×1092毫米 16开本 18.3 印张 434 千字

1989年12月第一版 1989年12月第一次印刷

ISBN 7-301-00948-8/R·003

印数: 2000册 定价: 10元

编 者

(按章节顺序排列)

李长生	中国科学院生态环境研究中心
吴炳辅	北京医科大学公共卫生学院
卢国理	北京医科大学公共卫生学院
程 时	北京医科大学基础医学院
江伟珣	北京医科大学公共卫生学院
薛 彬	北京医科大学公共卫生学院
安笑兰	北京医科大学公共卫生学院
陈 清	北京医科大学公共卫生学院
钟永安	中国农业科学院畜牧研究所
李彩双	天津医学院内分泌研究所
翟旭元	中华人民共和国农业部饲料质量监测中心
戴尧天	北京医科大学公共卫生学院
于志恒	河北医学院卫生系
陈孝曙	中国预防医学科学院营养与食品卫生研究所
荫士安	中国预防医学科学院营养与食品卫生研究所
薛安娜	中国预防医学科学院营养与食品卫生研究所
朴建华	中国预防医学科学院营养与食品卫生研究所
陈君石	中国预防医学科学院营养与食品卫生研究所
肖传方	北京医科大学公共卫生学院
宋增仁	哈尔滨医科大学公共卫生学院
岳 麟	中国预防医学科学院环境卫生监测研究所
童世庐	中国健康教育研究所
王振刚	北京医科大学公共卫生学院
章净霞	北京医科大学基础医学院
王耐芬	北京医科大学公共卫生学院

序

微量元素与健康的关系,十分密切。随着现代医学科学、分子生物学和检测技术的迅猛发展,微量元素的生物学效应,微量元素与生命起源、遗传、出生缺陷、生长发育、地方病、职业病、公害病等的关系,已越来越引起科学界的关注。研究愈益深入,“微量元素与健康”有逐渐发展形成一门新学科的趋势。

北京医科大学公共卫生学院及有关单位从事微量元素与健康的研究工作者,为了适应新形势,满足临床医学、预防医学、卫生防疫、环境保护、生态学、生物地球化学等广大实际工作者的迫切需要,汇集了近年来国内外微量元素研究的新成就和论述,结合本书作者们长期从事微量元素研究工作的丰富经验,编成此书。书中比较全面系统地介绍了微量元素的生物学效应、生物化学基础、生物地球化学以及微量元素与出生缺陷、免疫、肿瘤、微量元素药物、动物微量元素缺乏症与中毒、微量元素相互作用等科学知识;对碘、锌、硒、铁、镉、砷、汞、稀土元素,除介绍国外进展,许多内容都是作者自己的研究成果。如何研究微量元素与健康的关系,方法学是很重要的。本书介绍了流行病学、实验研究和生物监测研究方法,特别对生物监测的质量保证和质量控制均有较详细的叙述。本书内容丰富,文字深入浅出,是一本有益的参考书,故乐于向广大读者推荐。

胡汉升

1989.10月

编者的话

微量元素在临床医学和预防医学领域内的重要作用及其取得的社会效益,日益引起人们的兴趣和关注。北京医科大学公共卫生学院于1985年开设了“微量元素与健康”选修课,1986年以后举办了几次微量元素进修班和讲座。在此基础上,我们邀请了校内外从事微量元素研究工作的教师及研究人员共同编写了此书,希望为教学、科研及实际工作单位提供一本参考书。

本书分三篇,第一篇,介绍微量元素与健康的有关基础理论,如微量元素研究概况,微量元素的生物地球化学,微量元素的生物化学,微量元素的代谢及生物学效应,微量元素的相互作用,微量元素与免疫、出生缺陷、肿瘤,金属络合物药物,动物微量元素缺乏症与中毒症。第二篇,介绍几种与缺乏症或中毒症有关的,且我国自己研究成果较多的元素,如铁、碘、锌、硒、砷、汞、镉、稀土元素。第三篇,介绍微量元素与健康的研究方法,如流行病学研究方法、实验研究方法及生物监测研究方法。

本书在编写过程中,得到预防医学科学院杨光圻教授的热情支持及鼓励,承王绍汉、王振刚老师对部分内容作了重要审校,阮永道、王夔、苏静怡、徐厚恩、周宗灿老师对有关内容提供了宝贵的意见,王耐芬老师对促成此书的出版给予了大力的协助,此外,李文娣、颜春红同志帮助作了大量工作,在此一并表示感谢。

限于水平,本书一定有很多不足之处,恳请读者提出宝贵批评和修改意见。

陈 清 卢国理

1989年10月

目 录

第一篇 总 论

1. 微量元素概念和研究简史.....	(1)
2. 微量元素的生物地球化学.....	(5)
3. 微量元素生物学作用的化学基础.....	(20)
4. 微量元素的代谢.....	(33)
5. 微量元素的生物学效应.....	(53)
6. 微量元素与营养物质的相互作用.....	(72)
7. 微量元素与免疫.....	(80)
8. 微量元素与出生缺陷.....	(88)
9. 微量元素与肿瘤.....	(100)
10. 金属络合物药物.....	(114)
11. 动物微量元素缺乏症与中毒.....	(124)

第二篇 各 论

1. 铁.....	(132)
2. 碘.....	(142)
3. 锌.....	(159)
4. 硒.....	(166)
5. 砷.....	(182)
6. 汞.....	(193)
7. 镉.....	(211)
8. 稀土.....	(222)

第三篇 研究方法

1. 流行病学研究方法.....	(233)
2. 实验研究方法.....	(238)
3. 生物监测研究方法.....	(243)
附录 I 人体生物材料微量元素参照值.....	(273)
附录 II 我国微量(金属)元素的卫生标准.....	(284)
附录 III 食品中一些必需微量元素含量.....	(286)

第一篇 总论

1. 微量元素概念和研究简史

1.1 概 念

地球及地球上的万物都是由化学元素组成，人类也不例外。人类是地球表面物质的化学与生物进化的结果，在其自身的生命过程中，又不断与地球生物圈进行着以化学元素为基础的物质交换，因此，人体的元素组成，在质和量两方面基本上与地球表层（包括生物圈）的元素组成相似。

人体几乎含有周期表中自然界存在的所有元素。它们的含量差别极大。按其含量可分为常量和微量元素两大类。元素在体内的标准含量，一般是以其总含量占体重的百分比计算。

1. 常量元素 亦称宏量元素或组成元素。它们的标准含量均占人体总重量的万分之一（ 1×10^{-4} ）以上，是组成人体的主要的和生命必需的元素。人体对它们的需要量按克计，这类元素包括（按含量顺序）：氧（O）、碳（C）、氢（H）、氮（N）、钙（Ca）、硫（S）、磷（P）、钠（Na）、钾（K）、氯（Cl）和镁（Mg）十一种元素。它们构成人体总量的99.95%。其中，氧、碳、氢、氮、硫、磷占人体总重量的94%，氢、氧结合而成的水占65%，因此又称基本结构元素。钠、钾、钙、镁、氯则又称宏量矿物元素，它们在体内的作用主要是：维持细胞内外液渗透压的平衡；调节体液的pH值；形成骨骼等硬组织，支撑身体，维持有力的运动形式；维持神经、肌肉细胞膜的生物兴奋性，传递信息，使肌肉收缩；并有使血液

凝固和酶活化作用。

人体的宏量元素均为原子序数较小的轻元素。多数为非金属元素，只有钠、钾、钙、镁为轻金属。

2. 微量元素或痕量元素 微量元素一词起源于十九世纪中叶。当时用光谱分析法测定动植物体内元素成分时，发现有些元素只能被定性地确定有痕量存在，故得名。但本词含有不确切的意思。现在对这些元素均已测得其相当准确的含量，但因原称简练，使用悠久，故本世纪下半叶，“微量元素”成为各种语言通用的术语。文献中尚可见其同义词：稀有元素、少量元素、欠缺元素和分散元素（苏联文献中常用）。

体内检出的微量元素约达70种，几乎包括周期表中自然界存在的除常量元素以外的大部分元素。它们在体内的唯一共同点是存在的浓度很低，其标准量均不足人体总重量的万分之一（ $\leq 1 \times 10^{-4}$ ），且均在低浓度下具有生物学作用。

微量元素在体内的分布有很大的不均匀性。不同元素之间含量差别可达2—3个甚至10个数量级。同一元素在不同组织、器官中的含量也有很大差别。

按元素的理化性质而言，体内微量元素大多数为金属元素——即在体内具有生理意义的条件下，能失去一个或更多电子而形成阳离子参加反应的元素。其中多是密度 $\geq 4\text{g/cm}^3$ （亦有按 $\geq 5\text{g/cm}^3$ 划分）的重金属。还有少数为放射性元素（如：钷、铀、镭等）。

按生物学作用而言，微量元素可分为两

1
大类：一类是已被确认为维持机体正常生命活动不可缺少的必需微量元素。人体对它们的每日需要量以mg或 μg 计算，如铁、铜、锌，对不足1mg或以 μg 计者，又称必需超微量元素。如碘、硒、锰、钴、钼等。大部分微量元素属于第二类。它们的含量顺序已清楚，但对其在体内的存在形式尚缺乏研究；也还有些元素的含量尚未查明。此类元素的生理作用尚不清楚。有些如铅(Pb)、汞(Hg)、镉(Cd)、铍(Be)、铊(Tl)等已证明毒性很大，有些可疑为必需元素。

1.2 简 史

人类对微量元素的认识，经历了漫长的历程——从长达数千年生活实践经验的积累的缓慢阶段，到近百年来以高科技实验研究的迅速发展阶段。

据古代文字记载，公元前四世纪，我国《庄子》一书中已有对瘰病（即甲状腺肿）的记载，晋代名医葛洪用海藻治瘰；公元七世纪隋代巢元方更提出瘰与水土有关。公元224—263年魏晋时，嵇康著的“养生论”中有“齿居晋而黄。”这很可能是世界上最早的有关水土、地理环境与疾病有关的记载，也是关于微量元素碘与氟的最早的经验记录。

远在两千年前，我国的《计倪子》(公元四世纪)、《神农本草经》(公元一世纪)、《石药尔雅》(公元818年)就有应用含金属的矿物来治病或作为滋补剂的记载。唐代宫廷宫女以砒为内服药以保持青春容颜。明代李时珍(1518—1591)的《本草纲目》总结了古代药物的精华，其中详细记述了217种含金属的矿物药的性质、用途、以及它们对疾病、健康的作用。这些历史表明：我国古代对微量元素的认识曾远在各各国之前。限于社会历史等原因，我国古代这一领域的光辉成就未能

得到持续的充实和发展，以至于在其后相当长的时期内，发展是迟缓的。

西方国家微量元素研究的发展与我国有所不同。一百多年以前，在欧洲，微量元素的研究起始于动物生理方面，如发现某些鸟类羽毛中含有羽红素(含铜卟啉)；蜗牛血中有铜蓝蛋白；软体动物有含锌血色素等。1832年，Frodisch报告了萎黄病患者血中含铁量比健康人明显低下，从而将微量元素的研究与人体疾病联系起来。1857年，伯纳德(Bernard)及1885年Mac Minn关于铁细胞、铁及氧化过程的研究成果，为其后研究金属酶在细胞结构及功能中的重要作用开辟了道路。同期(1850)，法国著名植物学家查庭(Chatin)对土、水、食品含碘量进行了系统分析，科学地证实了甲状腺肿与环境缺碘密切相关，从而首次对碘与人类疾病和环境的关系有了定性和定量的阐明。

二十世纪的研究，大致可分为三个阶段：第一阶段，发展比较缓慢，主要是研究铁与碘的作用。1919年，肯德尔(Kendall)从人体甲状腺中分离出含碘65%的晶状化合物，这就是甲状腺素。其后，在地方性甲状腺肿病区，补充定量碘剂的做法成为人类有效地控制人畜地方性甲状腺肿的良好开端。

德国威尔斯泰特(Willstatter)在研究植物叶绿素的过程中，发现植物缺镁就不能合成叶绿素，因而不能进行正常呼吸。二十年后，这位科学家又发现并证实了人类血红蛋白中的铁是重要的载氧工具，这些都显示了生命与某些微量元素的密切关系。

与此同时，测试技术有了新的进展。采用先进的测试方法，能测出低浓度的微量元素20—30种，为人体及环境微量元素的分布性研究创造了必要的条件。

进入三十年代后，世界各地发生了一系列原因不明的人与家畜的地区性疾病。1931年，人们发现斑釉齿与饮水中含氟量过

高有关。1933年以后,又陆续发现牛羊患碱土病(慢性硒中毒)、盲目瞎(急性硒中毒)、仔猪营养性软骨障碍(锰缺乏病)、牛腹泻(钼中毒)等疾病。开始时,研究重点在寻找病因、采取措施,控制发病。不久,注意到人畜中尚有边缘性微量元素缺乏状态的存在,虽然它的症状或体征少而且不明显,但影响的范围更大。

迪克(Dick)在澳大利亚南部观察羊群铜中毒时,发现只有在适量硫酸盐存在的条件下,钼才能抑制铜蓄留。由此,研究微量元素之间、微量元素与其他营养素之间的相互作用以及它们在营养学上的重要意义便提到日程上来。于是研究微量元素的深度与广度有了进一步的进展。

第二阶段,人们对微量元素在营养方面的重要性的研究取得了突破性的进展。为了研究并证实某种微量元素是否为“必需”,需要在该元素不存在的状态下,观察生物的生长发育是否受到妨碍。因此,必须有纯化饲料、无污染的环境以及精密的分析技术。在此之前,由于实验条件所限,实验动物经常很快死亡。此后,美国由哈特(Hart)领导的威斯康星(Wisconsin)组研制了新的纯化膳食技术,成功地先后证实铁、铜、锰的“必需性”,从而为其后陆续证实钼、硒的“必需性”铺平了道路。这些成果是经过20多年的研究方才取得的。从此微量元素实验研究进入一个新的时期。

同期,利用放射性同位素,对研究重金属的代谢发挥了巨大的威力。特别是研究微量元素的吸收、排泄的时效变化以及在体内的吸收、转移等生理过程,有了很大进展。

第三阶段,是微量元素研究迅速发展并取得巨大成果的阶段。这个阶段的发展,有以下几个特点:

自五十年代开始至七十年代,集中反映出的环境问题是世界性三大问题之一(人口、能源、环境)。日本环境污染所引起的

水俣病、痛痛病等金属中毒事件震惊一时。此后,研究者开始了对环境中有毒金属的食物链转移、在体内的代谢转运、脏器分布、体内平衡、重金属蓄积和毒性以及螯合剂促排效果等的研究,以及致畸、致癌、致突变等方面的研究,从而丰富了环境医学的研究内容。

随着分子生物学的发展,微量元素分子水平的研究推出一系列的新的研究课题。如锌是多种金属酶的活性中心问题,金属硫蛋白的生物学作用问题,核酸中微量元素的生物学功能问题,以及微量元素与生物遗传信息和传递中心的作用等一系列待深入研究的问题。

测试技术的迅速发展和应用,如原子吸收分光法、中子活化及微区探针等的应用,明显提高了测试的灵敏度和精确度,可以直接测定体液、组织、细胞以及亚细胞内的元素浓度及分布,为深入研究元素的生物学作用提供了重要条件。七十年代,史密斯(Smith)及施瓦茨(Schwarz)研制了“全塑隔离装置”,对保证无污染的饲养环境条件作出重大技术改进。此后,有关砷、氟、硅、锡、砷等微量元素“必需性”的报告相继出现。同时,由于临床采用了全肠胃外营养技术,一些长期使用此疗法的病人,产生多种微量元素缺乏症。这又为认识微量元素的缺乏症及需要量的研究提供了机会。

人们愈来愈认识到微量元素在维持人类健康中的基础性的作用。有些元素不仅可以抗感染,而且与许多慢性、退行性甚至恶性病变有关联。大量流行病学调查指出,对必需微量元素的边缘性缺乏,可能使人群对疾病的敏感性增高,而城市现代化造成的重金属的环境污染(来自空气、水、食物中的重金属元素),可能对人群健康有长期潜在的危害。故有学者指出对“适宜营养状态”的概念应给以新的定义及标准。

对微量元素研究的深入开展,吸引了许

多学科的关注和兴趣,并促进了不少边缘学科的形成与发展,如无机生物化学、生物地球化学、结构化学等。医学领域内也逐渐出现了“微量元素与健康”、“医学元素学”等新的名词,显示了这些新的研究领域迅速发展的趋势。多学科综合性的研究,特别是医学与化学及地学的接近,使这一领域得以将宏观研究与微观研究相结合,理论研究与社会实践相结合,展示出一幅非常活跃并富有成果的前景。我国科学家在克山病病因学研究方面的巨大成功,就是一个最有说服力

的例证。今后这些有关学科的相互渗透及发展,无疑将会促进整个生命科学的进展。

主 要 文 献

- [1] Walter Mertz, Trace Elements in Human and Animal Nutrition 5th Ed, Vol. 1, Academic Press INC, USA (1986) .
- [2] 朱梅年,微量元素与健康,贵州人民出版社 (1979) .

2. 微量元素的生物地球化学

2.1 地球演化与元素分布

生命是在地球表面产生并发展起来的。有关生命体化学组成和地壳化学组成的数据已大量出现, 这些研究结果雄辩地表明, 如果仅从化学元素组成角度来看, 生命物质并不是什么奇特的东西, 它只不过是地壳物质的复制或“翻版”。由于地壳物质是地球及太阳系演化的某种必然结果, 所以生命和宇宙演化的和谐关系首先在这一层次上被体现出来。

我们目前所感知的宇宙, 据信是一百五十亿年前一次宇宙大爆炸的产物。在炽热而稠密的早期宇宙中, 由于中子大爆炸, 产生了质子和电子, 由此产生了最早的元素——氢原子。当这一早期宇宙气体云由于引力作用发生塌缩时, 星体开始形成。每个星体物质的中心部分处于高热状态, 使氢原子发生热核反应而生成氦原子。在经过主序星发展阶段后, 星体核心的高热使氢发生聚变产生碳和氧; 在红巨星发展阶段, 碳-氧核心进一步发生热核反应, 产生镁、硅、硫等元素; 这些元素进一步通过热核反应形成铁镍核心。此后, 星体演化成为中子星。在这类星体中, 星体核心区连续不断地塌缩, 中子不断添加到核心中的铁原子中, 形成较重的元素; 这种反应经历一系列步骤, 产生原子序数越来越高的元素。在这一宇宙演化的过程中, 各种元素具有不同稳定性; 稳定性强的元素有较大机率在宇宙中存留下来, 因而具有较高宇宙含量, 或称之为宇宙丰度。元素的宇宙丰度基本随其原子序数增加而降低, 并且原子序数为偶数的元素丰度高于奇数元素。(图I-2-1)。氢、氦是产生其它元素的“原料”, 在宇宙中具有最大丰度; 氧

碳等元素作为氢热核反应的最终产物, 也具有较大丰度; 但对锂、硼、铍来说, 尽管它们原子序数较小, 但由于作为氢热核反应的中间产物, 因而本身都变成了“微量元素”。实际上, 我们目前感兴趣的微量元素, 其丰度在宇宙形成时就被确定了。这时的元素丰度由原子核的稳定性所决定, 而与元素的化学性质无关。

太阳系现处于主序星演化阶段, 图I-2-1中元素的宇宙丰度反映了太阳系的组成特征。通过对太阳最外部光线光谱的分析, 已鉴定出三分之二以上的天然存在元素, 其中以氢、氦最为丰富。太阳系的各行星则代表着太阳由星际物质凝聚后的剩余物质。人们认为, 行星的生长发生于太阳星云之中, 太阳星云是曾一度环绕太阳的一团炽热气体和尘埃。当气体星云冷却时, 固体物质从星云中凝聚出来; 这种分离往往按照一定的化学顺序发生。金属铁-镍应首先凝聚, 形成富含金属铁的地核物质; 而后, 富含硅酸镁的物质凝聚出来, 形成地幔; 在地球形成过程中, 轻元素向上移动, 形成地壳。(图I-2-2) 地壳在大陆下面平均厚度为35km, 在大洋下面平均厚度为10km, 其组成相当于花岗岩和玄武岩各半, 其主要组分是钾、钠、钙、镁的铝硅酸盐。地壳物质从地幔中分离出来, 主要是通过岩浆演化作用, 因此元素的化学性质, 尤其是元素在熔融-结晶过程中所表现的热力学特征, 对地壳元素丰度显示了明显控制作用。氧和硅成为地壳中的主要元素。按重量计, 它们分别占地壳总量的47%和28%。

上面, 简述了地球上元素的起源和几种主要元素在地球不同层次的分布。这些元素的活动构成了地壳地球化学演化的主体, 在

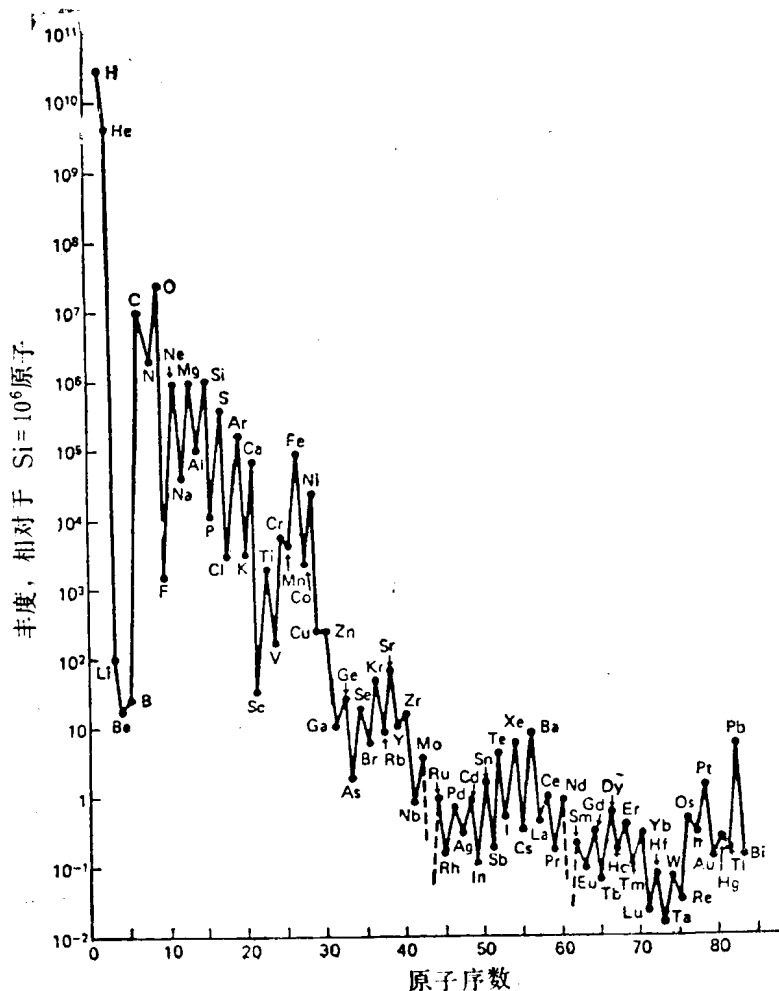


图 I-2-1 元素的宇宙丰度图

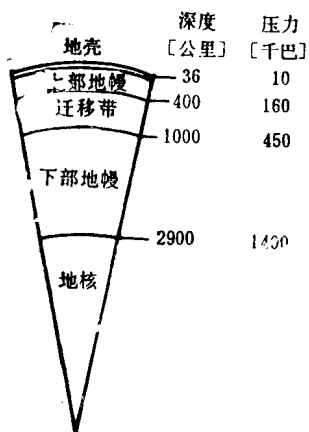


图 I-2-2 地球的构造

这一地球化学演化的舞台上，微量元素往往是跟着常量元素“跑龙套”的小角色。

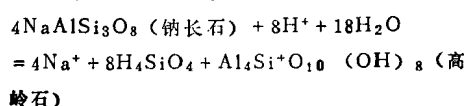
地壳包括岩石圈、水圈、大气圈和生物圈。根据元素的化学亲合性及其地球化学分布，可将元素分为五个种族：

- ①亲铁元素：该组元素与氧的亲合性小，有向铁—镍形成的地核中集中的倾向；
- ②亲铜元素：该组元素与硫具有很强亲合性，常以硫化物形式存在于地壳中；
- ③亲石元素：该组元素与氧的亲合力强，多参加铝硅酸盐建造，存在于地壳表层的硅酸盐岩层中；
- ④亲气元素：该组元素具有惰性，不参加岩石圈建造，游离于大气圈中；
- ⑤亲生物元素：该组元素是生物有机体的主要建造者，集中出现于生物圈中。

表 1 元素的地球化学分类

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

在地壳表面, 阳光、雨水、风、水流、生物活动等种种环境营力使岩石圈遭受风化和淋溶, 其后果是使地壳表面的元素重新分布。比如, 当代海洋和土壤的化学组成就是这种作用长期积累的结果。构成大陆表层的硅酸盐矿物在水和氧的作用下, 硅酸盐晶格遭受破坏, 释放出 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子; 与此同时, 硅酸盐的残余部分, 吸收大气中的 H^+ 和 H_2O , 生成在地表条件下较为稳定的次生矿物, 如高岭石、伊利石、蒙脱石等粘土矿物。钠长石的风化反应即可视为一个典型的此类反应:



这一类风化反应在地壳表面演化历史上扮演着十分重要的角色, 因为它一方面破坏

表 2 海水的化学成分及每个元素的主要化合物

(据П.戈德别尔格, 1963年)

元 素	浓度 (mg/L)	海水中元素存在的化合物形式
H	1080000	H_2O
He	0.000005	He
Li	0.2	Li^+
Be	0.000006	$Be(OH)^+$, $Be(OH)_2$
B	4.6	$B(OH)_3$, $B(OH)_2O^-$
C	28.0	HCO_3^- , $H_2CO_3 \cdot CO_3^{2-}$ 和有机化合物
N	0.5	NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , N_2 和有机化合物
O	857000.0	H_2O , O_2 , SO_4^{2-} 和其它阴离子
F	1.3	F^-
Ne	0.0001	Ne (气体)
Na	10.500	Na^+
Mg	1.350	Mg^{2+} , $MgSO_4$
Al	0.01	
Si	3.0	$Si(OH)_4$, $Si(OH)_3O^-$
P	0.07	HPO_4^{2-} , $H_2PO_4^-$, PO_4^{3-} , H_3PO_4
S	885.0	SO_4^{2-}
Cl	19000.0	Cl^-
Ar	0.6	Ar (气体)
K	380.0	K^+
Ca	400.0	Ca^{2+} , $CaSO_4$
Sc	0.00004	
Ti	0.001	
V	0.002	$VO_2(OH)_3^{2-}$
Cr	0.00005	
Mn	0.002	Mn^{2+} , $MnSO_4$

续表

元 素	浓 度	海水中元素存在的化合物形式
Fe	0.01	Fe(OH) ₃ (固体的)
Co	0.0005	Co ²⁺ , CoSO ₄
Ni	0.0002	Ni ²⁺ , NiSO ₄
Cu	0.003	Cu ²⁺ , CuSO ₄
Zn	0.01	Zn ²⁺ , ZnSO ₄
Ga	0.00007	
As	0.003	HA ₃ O ₄ ²⁻ , H ₂ AsO ₄ ⁻ , H ₃ AsO ₄ , H ₃ AsO ₃
Se	0.004	SeO ₄ ²⁻
Br	65.0	Br ⁻
Kr	0.0003	Kr (气体)
Rb	0.12	Rb ⁺
Sr	8.0	Sr ²⁺ , SrSO ₄
Y	0.0003	
Nb	0.00001	
Mo	0.01	MoO ₄ ²⁻
Ag	0.0003	AgCl ₂ ⁻ , AlCl ₃ ²⁻
Cd	0.00011	Cd ²⁺ , CdSO ₄
Iu	0.02	
Sn	0.0005	
I	0.06	IO ₃ ⁻ , I
Xe	0.0001	
Cs	0.0005	Cs ⁺
Ba	0.03	Ba ²⁺ , BaSO ₄
La	0.0003	
Ce	0.0004	
W	0.0001	WO ₄ ²⁻
Au	0.000004	AuCl ₄
Hg	0.00003	HgCl ₄ ²⁻ , HgCl ₃ ⁻
Tl	0.00001	Tl
Pb	0.0002	
Rn	0.6×10^{-15}	Rn (气体)
Ra	1×10^{-10}	
Th	0.0007	
U	0.003	UO ₂ (CO ₃) ₃ ⁴⁻

表 3 元素在岩石圈、土壤和地表植物中丰度的比较

(据维诺格拉多夫, 1962年和И. И. 马留加, 1963年)

元 素	岩 石 圈	土 壤	植物 (灰中)
Li	3.2×10^{-3}	3×10^{-3}	1.1×10^{-3}
Be	3.8×10^{-4}	6×10^{-4}	2×10^{-4}
B	1.2×10^{-3}	1×10^{-3}	4×10^{-2}
F	6.6×10^{-2}	2×10^{-2}	1×10^{-3}
Na	2.50	0.63	2.0
Mg	1.87	0.63	7.0
Al	8.05	7.13	1.40
Si	29.5	33.0	15.0

续表

元 素	岩 石 圈	土 壤	植物 (灰中)
P	9.3×10^{-2}	8×10^{-2}	7.0
S	4.7×10^{-2}	8.5×10^{-2}	5.0
Cl	1.7×10^{-2}	1×10^{-2}	1×10^{-2}
K	2.50	1.36	3.0
Ca	2.96	1.37	3.0
Ti	0.45	0.46	0.1
V	9×10^{-3}	1×10^{-2}	6.1×10^{-3}
Cr	8.3×10^{-3}	2×10^{-2}	2.5×10^{-2}
Mn	1×10^{-1}	8.5×10^{-2}	7.5×10^{-1}
Fe	4.65	3.8	1.0
Co	1.8×10^{-3}	1×10^{-3}	1.5×10^{-3}
Ni	5.8×10^{-3}	4×10^{-3}	5×10^{-3}
Cu	4.7×10^{-3}	2×10^{-3}	2×10^{-2}
Zn	8.5×10^{-3}	5×10^{-3}	9×10^{-2}
As	1.7×10^{-4}	5×10^{-4}	3×10^{-3}
Se	5×10^{-8}	1×10^{-3}	—
Br	2.1×10^{-4}	5×10^{-4}	1.5×10^{-2}
Rb	1.5×10^{-2}	6×10^{-3}	1×10^{-2}
Sr	3.4×10^{-2}	3×10^{-2}	3×10^{-2}
Zr	1.7×10^{-2}	3×10^{-2}	—
Mo	1.1×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-3}
Ag	7×10^{-3}	(1×10^{-5})	1×10^{-4}
Cd	1.3×10^{-5}	5×10^{-5}	1×10^{-8}
Su	2.5×10^{-4}	1×10^{-3}	5×10^{-4}
I	4×10^{-5}	5×10^{-3}	5×10^{-3}
Cs	3.7×10^{-4}	5×10^{-4}	$n \times 10^{-4}$
Ba	6.5×10^{-2}	5×10^{-2}	$n \times 10^{-2}$
Au	4.3×10^{-7}	—	1×10^{-4}
Hg	8.3×10^{-6}	1×10^{-8}	1×10^{-7}
Pb	1.6×10^{-3}	1×10^{-3}	1×10^{-3}
Ra	8.3×10^{-11}	8×10^{-11}	2×10^{-11}
Th	1.3×10^{-3}	6×10^{-4}	—
U	2.5×10^{-4}	1×10^{-4}	5×10^{-5}

表 4 大气圈的平均化学成分(干燥空气)

(据帕内特, 1937年, 有米尔多夫更详细的说明, 1961年)

气 体	组成 (体积百分数)	组成 (重量百分数)	总量 $n \times 10^{20}$ 克
N ₂	78.0900	75.5100	38.648
O ₂	20.9500	23.1500	11.841
Ar	0.9300	1.2800	0.655
CO ₂	0.0300	0.04600	0.0233
Ne	0.0018	0.00125	0.000636
He	0.00052	0.000072	0.000037
CH ₄	0.00022	0.00012	0.000062
Kr	0.0001	0.00029	0.000146

续表

气 体	组成(体积百分数)	组成(重量百分数)	总量 $n \times 10^{20}$ 克
N ₂ O	0.0001	0.00015	0.000077
H ₂	0.00005	0.000003	0.000002
Xe	0.000008	0.000036	0.000018
O ₃ *	0.000001	0.000036	0.000031

*含量是变化的,并随提高的增加而增加。

表 5 地球生命物质的平均成分

(据维诺格拉多夫,1954年)

元 素	在有机体中的平均含量 (重量%)	元 素	在有机体中的平均含量 (重量%)
O	70.0	Mg	4×10^{-2}
C	18.0	P	7×10^{-2}
H	10.5	S	5×10^{-2}
Na	5×10^{-1}	Ca	5×10^{-2}
K	3×10^{-1}	N	3×10^{-1}
Si	2×10^{-1}	Cl	2×10^{-2}
Fe	1×10^{-2}	Ge	10^{-4}
Al	5×10^{-3}	Ni	5×10^{-5}
Ba	3×10^{-3}	Pb	5×10^{-5}
Sr	2×10^{-3}	(Sn)	(5×10^{-5})
Mn	1×10^{-3}	As	3×10^{-5}
B	1×10^{-3}	Co	2×10^{-5}
Ti	8×10^{-4}	Li	1×10^{-5}
F	5×10^{-4}	Mo	1×10^{-5}
Zn	5×10^{-4}	Y	1×10^{-5}
Rb	5×10^{-4}	Cs	1×10^{-5}
Cu	2×10^{-4}	Se	$< 10^{-6}$
V	$n \times 10^{-4}$	U	$< 10^{-3}$
Cr	$n \times 10^{-4}$	Hg	$n \times 10^{-7}$
Br	1.5×10^{-4}	Ra	$n \times 10^{-12}$

在有机体中定性地发现的有惰性气体, Be, Sc, Ga, Y, Zr, Ag, Cd, Zn, Sb, Te, Hf, Ta, W, Re, Au, Tl, Bi, Th和钍族元素(生命物质的主体是海洋和陆地的植物)。

岩石,生成粘土,为土壤生成创造了条件;另一方面,此作用将大量可溶盐类携入海洋,改变了海洋的化学组成,从而为地球上生命的出现和发展准备了条件。

海洋中的化学元素除一部分来自火山喷发和岩石释出外,其相当大部分盐类来自大陆岩石圈的风化作用。当代海水的化学成分列于表2。元素在岩石圈、土壤和地表植物中丰度见表3。

表4和表5分别列出大气和地球生命物质的平均化学组成。

随着人类分析技术的不断提高,元素丰度的数值将会不断趋向精确和完善,我们有理由期待在这一领域出现新的发现。

2.2 元素在自然环境中的迁移

在地壳形成的初期阶段,除少数气态元素外,大多数元素(包括微量元素)都被禁锢在岩石矿物的结晶格架之中。这些由岩浆