

高等学校试用教材

海洋地球化学

赵其渊 等编



地质出版社

37845



200357149



00287715

高等学校试用教材

海洋地球化学

青岛海洋大学 赵其渊 等编



52/44/12

地质出版社

※ ※ ※

本书由张本仁主审，经地质矿产部地球化学专业课程教学指导委员会于1987年11月召开的第二次全体会议审稿，同意作为高等学校试用教材出版。

※ ※ ※

高等学校试用教材

海洋地球化学

青岛海洋大学 赵其渊 等编

责任编辑：杨洪钧

地质出版社出版

（北京和平里）

地质出版社印刷厂印刷

（北京海淀区学院路29号）

新华书店总店科技发行所发行

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：17.875 插页：2页 字数：421000

1989年5月北京第一版·1989年5月北京第一次印刷

印数：1—1505册 定价：3.95元

ISBN 7-116-00370-3/P·317

前 言

海洋地球化学是地球化学的一门新兴的分支学科，近年来它随着科学技术进步和海洋调查与科学研究的广泛开展，积累了许多重要成果，得到了很大发展。为适应学科发展和教学需要，受地矿部地球化学教材编审委员会（现地球化学专业课程教学指导委员会前身）委托而编写了本教材。

由于在本分支学科尚无现成的范本可供借鉴，编写工作存在一定困难。在编写中，从大纲拟定到具体内容编写都得到了主审人中国地质大学张本仁教授的热情鼓励和帮助。其间，地球化学专业课程教学指导委员会和主审人先后对本教材的编写大纲和编写初稿进行了审查，编者根据审查意见进行了修改。

本教材由赵其渊组织编写，其中第七章第一节和第八章的一部分由程广芬编写，其余由赵其渊编写，王琦为本教材准备了附录二的海底地形简介，全文由赵其渊统稿和校订。图件绘制由黄际遂完成，文献、资料的一切缩放和复印工作由杜宝贞完成。

在编写中得到了本校杨作升、曹钦臣、李家丰、且仲禹、孙秉一、张正斌、钱佐国、崔清晨及兄弟单位赵一阳、何起祥、王绍伟、戴问天等的热情帮助和资料、文献支援，谨一并表示感谢。

由于编者的水平和实践都有限，又是本分支学科的初编教材，因此不论在取材和论述上都会存在不当和错误之处，敬希得到大家的批评、指正，以促进本分支学科的迅速发展。

编者

1988年3月于青岛

目 录

绪 论	1
第一节 海洋地球化学的定义和任务	1
第二节 海洋地球化学的研究对象及其特殊规律性	2
第三节 海洋地球化学发展远景及其对整个地球化学学科发展的意义	3
第一章 海洋的化学组成及物理化学特征	5
第一节 海洋的化学组成	5
一、海水中的常量和微量元素	5
二、海洋中的溶解气体和有机质	14
第二节 海洋中化学元素的分布及分类	17
一、海洋中化学元素的分布	17
二、海洋中化学元素的分类	24
第三节 海洋的物理化学特征	29
一、水溶液及溶解度	29
二、海洋的二氧化碳-碳酸根体系	34
三、海洋环境的pH和Eh	39
四、大洋水体的温度和压力	46
五、海洋的化学平衡问题	49
第二章 海洋的水动力状况	51
第一节 世界大洋的表层环流体系	51
第二节 海洋的深水流和海底流	54
第三节 海洋地球化学环境的水动力分区	56
第四节 世界大洋的垂直混合速率	58
第三章 海洋环境中的有机质	62
第一节 有机质的来源	62
第二节 海洋环境中的有机化合物和复杂有机质	64
一、有机化合物	64
二、复杂有机质	73
三、有机物质来源的鉴别标志	73
第三节 有机反应	75
一、有机反应的类型	75
二、有机反应的某些特点	76
三、有机质是最重要的还原剂	76
第四节 有机质的成岩作用和海洋环境中油气的生成	77
一、有机质的成岩作用	77
二、海洋环境中油气的生成	77

第五节	氨基酸测年与测温	79
第四章	同位素在海洋地球化学研究中的意义和应用	81
第一节	放射性同位素向海底的发送及其在沉积物中的分布	81
第二节	铀系测年法	82
一、	铀钍的系列衰变	82
二、	铀系不平衡测年法	87
第三节	^{14}C 及其他沉降同位素测年法	99
一、	^{14}C 测年	99
二、	其他沉降同位素测年	102
第四节	稳定同位素在海洋地球化学研究中的应用	103
一、	同位素的分馏(分离)及同位素地质温度计	103
二、	氧、氢同位素	106
三、	碳同位素	109
四、	硫同位素	111
五、	铋、铅同位素	112
六、	铯同位素	114
第五章	海洋沉积作用地球化学特征	118
第一节	向海洋的物质输入通量	118
第二节	物质向海洋的搬运和沉积	119
一、	陆源物质向海洋的搬运	119
(一)	牛顿流体的侵蚀、搬运和沉积作用	120
(二)	非牛顿流体浊流的侵蚀、搬运和沉积作用	122
(三)	其他搬运、沉积营力	124
二、	内源物质的搬运和沉积	124
第三节	风化侵蚀和搬运沉积过程中的地球化学分异作用	124
第四节	沉积环境与判别标志	126
一、	生物学标志	126
二、	粒度标志	126
三、	地球化学标志	127
第六章	陆源物质沉积作用地球化学	130
第一节	近岸浅海区陆源物质沉积作用地球化学	130
一、	河口地球化学	131
二、	萨布哈(Sabkha)沉积作用地球化学	136
三、	近岸浅海区沉积作用地球化学	140
第二节	深海沉积作用地球化学	147
一、	陆源物质在整个海底的分布及其水动力学机制	148
二、	粘土矿物在大洋沉积物中的分布	150
三、	深海沉积物中的化学元素分布	153
第七章	生源物质沉积作用地球化学	166
第一节	构成生源沉积的主要生物群及其分布趋向	166
一、	主要浮游生物及其在大洋生态系统中的生态位	166

二、主要浮游生物分布趋向	168
第二节 生源碳酸盐沉积作用地球化学	170
一、生源碳酸盐沉积物的海底分布	170
二、碳酸盐的溶解度	170
三、碳酸盐的饱和面、溶跃面和补偿深度	172
四、碳酸盐海底分布与溶解速度的调查方法	173
五、制约碳酸盐溶解速度的因素	176
六、碳酸盐溶跃面以下过渡带宽度和形态的数学表达式	177
七、碳酸盐补偿深度与地壳运动	180
八、世界大洋CaCO ₃ 溶解速度模型值与实测值的比较	182
第三节 生源SiO ₂ 沉积作用地球化学	183
一、生源SiO ₂ 沉积物的海底分布	183
二、SiO ₂ 介壳在海底的溶解	183
三、间隙水对蛋白石溶解作用的数学表达式	186
四、对世界大洋生源SiO ₂ 降落和溶解速度的估算	187
第四节 磷酸盐沉积作用地球化学	188
第五节 海洋生物地球化学简述	192
第八章 自生物物质沉积作用地球化学	198
第一节 海底铁锰结核的自生沉积作用	198
一、铁锰结核在海底的分布和产状	198
二、铁锰结核的矿物组成	201
三、铁锰结核地球化学特征	203
第二节 自生矿物的环境指示意义	210
第九章 海底火山、热液活动及成矿作用地球化学	212
第一节 地壳与岩石圈	212
第二节 地幔分异演化与海底火山作用	214
一、上地幔中的相转变	215
二、上地幔的化学演化	216
三、上地幔的不可逆性分异和火山作用	221
第三节 大洋基底的海水循环与热液活动	223
一、大洋基底海水循环与热液活动的地球物理证据	223
二、蚀变玄武岩和变质玄武岩	226
第四节 海底热液成矿作用与海底热泉	228
一、海底热液成矿作用	228
二、海底热泉	231
第五节 来自海底的元素通量估计	235
一、来自基底上部岩石的元素通量——低温、高水、岩比值反应	235
二、来自深部基底岩石的元素通量——低温、低水、岩比值反应	237
三、来自大洋中脊翼部的元素通量——中等温度、中等水、岩比值反应	237
四、来自大洋中脊轴部的元素通量——高温、低水、岩比值反应	238
五、来自海底的元素总通量及其与河流通量的比较	239

第十章 沉积物间隙水地球化学	240
第一节 沉积物间隙水化学组分的浓度-深度剖面.....	240
第二节 沉积物间隙水化学组分浓度-深度剖面的类型	243
一、具有保守性Ca和Mg的浓度-深度剖面	243
二、具有非保守性Ca和Mg的浓度-深度剖面	244
第三节 间隙水在成岩作用中的地球化学意义	246
一、碳酸盐成岩作用	246
二、二氧化硅成岩作用	247
三、其它自生矿物成岩作用	248
四、有机质成岩作用	248
五、在蒸发岩带的沉积物间隙水	251
六、海底热液活动对沉积物间隙水的影响	252
第十一章 历史海洋地球化学	253
第一节 地球发展历史简述	253
第二节 海洋化学组成的波动性及其控制因素	254
第三节 海洋历史演化的地球化学标志.....	256
一、地球化学示踪剂	256
二、示踪剂综合应用实例	257
第四节 人类活动对海洋体系未来的影响	261
附录一 常数及数值	269
附录二 海底地形及说明	271
主要参考文献	276

绪 论

第一节 海洋地球化学的定义和任务

海洋地球化学 (GEOCHEMISTRY OF OCEAN) 是地球化学的新兴的分支学科, 是地质学、海洋地质学、海洋学和海洋化学相结合而形成的边缘科学, 它集中研究海洋环境下的各种地球化学作用过程和在这些过程中化学元素的行为规律和自然历史。

与海洋地球化学关系密切而名称不同和性质上也有所区别的邻近学科有化学海洋学 (CHEMICAL OCEANOGRAPHY)、海洋化学 (MARINE CHEMISTRY) 和海水化学 (CHEMISTRY OF SEA WATER) 等等。显然, 海洋地球化学更突出海洋科学和地质科学的结合, 更着眼于研究海洋体系的地球化学问题和全球性地球化学问题的内在联系, 从而规定了其担负有不同于这些相邻学科的任务, 并成为整体地球化学的重要组成部分。Виноградов, А. П. 于1967年编写的《海洋地球化学导论》(Введение в геохимию океана) 可看作是苏联在本分支学科的早期代表性著作。

海洋地球化学是在整个海洋科学飞速发展和取得一系列重大成果的基础上产生的。自第二次世界大战以后, 特别是近二三十年以来, 随着科学技术的突飞猛进, 许多国家先后用先进的科学考察船、先进的仪器设备和潜水器等手段开展了空前规模的海洋调查和科学研究。这些调查, 除独国进行的以外, 更重要和更富有成效的是有多国参加的世界大洋的国际合作调查。其中与地质学科关系密切的如1970—1980年进行的, 作为“国际海洋调查十年规划”(IDOE) 组成部分的“海洋断面地球化学研究计划”(GEOSECS)、正式开始于1968年的“深海钻探计划”(DSDP)、1973—1975年法美两国在大西洋中央裂谷以潜水器进行的联合海底调查(FAMOUS) 以及1977年以后美国在东太平洋海隆和加拉帕戈斯海岭(太平洋海隆的一个分支) 进行的多次深潜调查等等。通过这些调查, 在各方面, 包括海洋物理、海洋化学、海洋生物、海洋地质等方面都取得了丰富的实际资料和许多在科学上突破性的科研成果。包括我国在内的许多发展中国家也竞相对各自的滩涂、近海以至远洋开展了积极的调查研究。海洋占地球表面的71%, 向海洋进军、大力开展海洋调查和科学研究, 不仅关系到各国对海洋及海洋矿产资源的开发利用, 而且是解决一切全球性地学问题不可缺少的重要环节, 是许多新兴学科的生长点和前哨阵地。例如近年来, 在地学领域许多新理论的提出: 板块学说、地震和地热理论、古地磁、古温度、层控矿床和地幔热点等等莫不与海洋调查有关, 或从海洋调查中获得了支持和验证。由于这些调查早已超越了二次大战前那种着重为渔业、航海和军事服务的狭隘目的, 而是着眼于全球性地学问题的解决和服务于全球性海洋和海洋资源的开发、利用和保护……, 因而对人类未来, 对科学发展, 都具有无可估量的理论意义和实际价值。在上述活动中, 地球化学家的积极参与, 乃为海洋地球化学的资料积累和海洋地球化学这一分支学科的形成和发展起了很大的推动作用。

第二节 海洋地球化学的研究对象及其特殊规律性

海洋地球化学是研究在海洋体系这一特殊条件下各种地球化学作用过程和在这些过程中化学元素活动、迁移、集中、分散规律性的科学。海洋体系以其具有多系统和复杂、多样的一系列独特属性规定了海洋地球化学研究对象的特殊性质和所具有的特殊规律性。作为水圈主体的海洋，首先以其一大、二深、三沟通而完全不同于大陆江河湖泊。唯其大，而有大洋的热盐环流体系、大洋所特有的潮汐运动、大洋极宽的运动谱区和千姿百态的运动形式；唯其深，才使海洋环流系统得到充分发展，形成具有各种特性的水团结构和使各种海洋生物得以繁衍繁茂；而各大洋沟通一体则使得在能量上和物质上都可到充分的交流，使一切地球化学作用具有全球性特征。海洋又以其为多电解质盐溶液不同于大陆淡水溶液，并含有多种溶解气体和无机、有机胶体和悬浮物质而具有多种特性并对海洋生物、海洋化学、海洋的热状况以及海水运动发挥着重要影响。海洋又是一个与各地质圈不断进行着物质和能量交换、传递的开放体系。海面是海洋与外界沟通的主要窗口，通过它，海洋接受太阳辐射能，进行海洋一大气间的物质和能量交换，并直接影响着海洋的水动力循环、生物循环和化学循环过程。河口和海岸带是海洋与大陆联系的桥梁，大陆物质由此进入海洋，而海岸带和大陆架则是海洋能量的主要耗散带。海底是海洋和洋壳进行物质和能量交换、传递的又一重要界面，它对于海洋物化性质和物质平衡具有同样重要意义。

所有上述，决定了海洋地球化学作用具有至少以下诸特点或特殊规律性：

1. 海洋地球化学过程，除与化学的和晶体化学的规律有关外，还同时受海洋水动力循环、生物循环和生物化学循环的共同制约。透光带生物对营养分的摄取，造成表层水营养元素的贫化；生物碎屑在深水的分解、重溶，造成海洋深层水营养元素浓度的提高。而海洋水动力循环则不断把富含营养分的深水带往表层以满足生物的需要。这里，制约元素活动、迁移的主要是生物作用和水动力条件，而不是单纯化学作用。另外，海洋对绝大多数元素，特别对微量和痕迹元素来说，是远离饱和点的，它们自海水的移出不可能依靠化学沉淀作用，而是依靠上述生物作用和颗粒物质对它们的“清扫”作用。对“清扫”一词可理解为比一般吸附作用具有更广泛的涵意，即它泛指无机和有机胶体-悬浮体在其凝聚和向海底沉降过程中，通过对元素的从单纯的静电吸附到络合、螯合、离子交换等作用，像清道夫一样，能将元素从海水中“清扫”出来并一道进入沉积物的作用过程。在海底沉积物分析中常分出：酸可溶相、有机相、水可溶相和交换相，它们分别反映了这些元素自海水移出的不同结合形式。其中酸可溶相代表与Fe、Mn、Al等氢氧化物相结合的组分，有机相代表与有机质形成螯合物的组分，水可溶相代表可用水浸取的组分，而可交换相代表被无机和有机离子交换剂（如粘土矿物、有机质等）所交换出的组分。

基于上述，造成了大洋水体中元素含量、分布和循环的特殊形式，并对海洋环境下元素的地球化学分类提出了特殊的要求。

2. 海洋为多系统的复杂体系。海洋各系统之间、系统内部各环节之间以及海洋体系与环境之间相互依从、相互制约，形成一个彼此协调而稳定的整体。任一环节受扰动都会牵连及整个海洋体系。另一方面，在一定限度内，海洋体系又有着自发消除外来影响以恢复原有平衡的自动调节机能，而如果外来影响继续作用下去，或超过一定限度，则海洋将会

在新的条件下，以“寻求”建立新的平衡。W. S. Broecker形象地将海洋比喻为一巨大的化学加工厂。如通常的化工厂那样，其运转规程包括有进料（大陆、大气和海底向海洋的输入通量）、搅拌（水动力循环）、催化（无机和有机催化剂）、反应（地球化学作用过程）和产品输出（海洋向海底、大气等方向的输出通量）。在上述过程中，任一环节发生变化，都会导致其他环节和整个过程发生相应改变。因此，如同化工工程师一样，研究整个海洋体系的物质输入、输出通量，研究各个环节的物质交换、反应速率以及它们的制约因素等就成为海洋地球化学家的中心任务之一。

3. 包含有多系统的海洋体系，除了复杂的一面外，同时也有其简单一面。海洋体系的稳定态 (steady state) 特征即这方面的集中体现，它是海洋体系历史发展的结果，并为海洋地球化学研究提供了基点，并且是研究海洋历史演变的基本参考系。另外，海洋体系的简单一面也表现在它的一些性质从整体讲具有不均匀性和时变性，而就局部讲则具有均匀性和稳定性。例如海洋温度、压力等，从整体讲具有垂直分层性和水平分带性，从局部讲又具有均匀性和稳定性。如对大洋表层暖水的温度和压力都可视作常数，从而可着重去研究地球化学作用与其他因素（如 Eh 、 pH 、 c ...）的关系；对于大洋深层冷水则可当作温度为常量，压力为变量的体系来对待；对于大洋底水则又可当作压力为常量和与地质历史发展有关的，即在长时间尺度意义上的温度变化为变量的体系来研究。不同地质历史时期海洋底层水温度的不同，必然会在各该时期形成之生物介壳的氧同位素组成上反映出来。本世纪40年代，H. C. Urey首倡的氧同位素测温法即针对上述情况而提出来的。如今，氧同位素测温法已成为研究在古海洋温度和古气候的重要手段之一，也是海洋地球化学的重要研究课题之一。

4. 海洋体系之简单一面还表现在海底的年青性和对于海洋地球化学作用产物的良好现场保存性。在海洋体系中不仅进行着各种“活”的地球化学作用（如海底热液活动、海底热泉……）可供人们直接观察、研究（利用深潜器、海底电视等），而且由于有大洋水水层的保护，各种地球化学作用产物能在海底得到很好保存，而这将大大有利于进行现场研究和取得定量的突破性研究成果。为取得不受扰动、扭曲的原状样品，一般采用有箱式取样器、Kasten取样管、沉积物收集器等等。对于所采到样品，强调现场分析，或将样品就地冷冻，以防样品发生变化。

海洋地球化学研究所取得的一切成果，皆有助于“将今比古”，为研究更古老的其他地球化学问题提供借鉴。

第三节 海洋地球化学发展远景及其对整个地球化学学科发展的意义

海洋占地球表面的71%，对此广大区域的地质问题的了解是建立全球地质科学观点的关键之一。但过去，限于科学技术条件，巨厚的大洋水层成了人们观察、了解该广阔地区地质情况的不可逾越的障碍。因此，人们长期以来，对于海洋，特别是海底地质情况所知甚少，或所知甚为局限。直至1872—1876年才有“H. M. S. 挑战者”号对世界大洋的首次环球科学考查，航程达 12.6×10^4 km。在调查中进行了全球性海底取样12,000个，由J. Murray负责，分析、整理并编成第一幅世界大洋沉积物分布图，出版《深海沉积》专著。

根据这次调查，前后出版研究成果50巨册，包括了海洋科学各个领域。它是对海洋地质认识上的一次飞跃。

正式开始于1968年的“深海钻探计划”(DSDP)，截止1979年，已在世界大洋打钻近500孔，平均孔深300m，最深的钻进为1737.3m，获取岩芯总长近50km。出版初步报告50卷，总字数达5000余万字。经此调查，查明海底年龄不老于2亿年(侏罗纪)，海底扩张速率1—13cm/a；查明了大西洋开裂史和地中海发展史；发现了多处海底热液活动、海底热泉、海底重金属泥和地幔热点等；并在大西洋和太平洋海底发现了黑色页岩层和燧石层等等。所有上述，对人们了解2亿年来的地质历史和海洋地球化学史无疑具有巨大意义。因此，从战略上讲，在经济和技术条件许可下，开展海洋调查和科学研究无疑是解决地学问题的重要突破口。

可以预料，在已有成就的基础上，今后的海洋调查和科学研究将会带来更令人振奋的新成果、新成就，其根据是：

1. 解决全球地学问题的关键地区在大陆边缘带，它是海陆的过渡带。这里不仅沉积了巨厚的沉积物，埋藏有大量的油气资源，而且经历了复杂的构造运动和岩浆活动，是海陆相互渗透、转化的枢纽地带。DSDP在头十年中的钻探主要在远洋，今后为了查明油气生成规律和海陆演变过程，已将钻探重点由远洋转移向大陆边缘，并且要用新改装的“格洛玛探险者”号(“Glomar Explorer”)取代过去的“格洛玛挑战者”号，以期穿透更深的沉积层和大洋结晶基底。因此，有理由相信随着DSDP第二阶段工作的进展，将会有更多的成果出来和更多的地学问题得到查清。

2. 随着科学技术的发展，许多新的调查方法、手段在投入使用。除海底电视、海底照像和潜水器等外，为研究痕量元素沉积速率、海底氧化-还原反应、水柱中所发生的吸附、解吸作用以及直接测定海底的物质通量，采用了沉积物收集器(Sedimentary traps)、海底通量室(benthic flux chambers)和悬浮体过滤新技术等新的设备和新的手段。在船身定位上，以船位指示仪、计算机和四个推进器相配合，进行动力定位，不仅能使船体始终准确地保持在井口上方的位置上，而且它的重返井口装置更可准确地找到原来的井口继续工作。

总之，随着深海钻探工作在大陆边缘带的大力开展和海上调查、研究的进一步深入，通过海洋地球化学与陆壳地球化学的相互渗透、相互补充和相互促进，必将大大推动整个地球化学学科的发展。最后应强调的是，对大陆边缘带的深入调查和研究必将是打开海陆演变等全球性地学问题奥秘的一把钥匙。

第一章 海洋的化学组成 及物理化学特征

海洋是一个浩瀚广阔的场所，在其中进行着各种物理的、化学的和生物学的复杂过程。它既是物质运动的“中转站”，又是各种物质的“加工厂”和“储集库”，即不仅将陆源等外来物质最终转移向海底，而且溶解有多种组分，是人类的资源宝库^①。

本章讨论海洋的化学组成（包括溶解气体和有机质）、大洋水体中元素的分布、元素的分类以及海洋的物理化学特征。对于海洋的化学平衡问题放在最后加以讨论。

海洋为稳定态体系，环境对它的物质的和能量的输入为其对环境的相应输出所抵偿。对于额外输入，海洋能够通过自身内部的物质运动，自动地加以调节和消除该外来影响，叫做海洋的自净能力。但这不是无限的，超越一定限度，将会导致海洋环境的污染和带来严重后果。对此，不仅已为全世界海洋和环境科学工作者所关注，也日益为广泛人士所理解、重视，成为当代人类面临的严重挑战之一。

第一节 海洋的化学组成

一、海水中的常量和微量元素

海洋溶解有各种组分，而且是明显的均一化体系。在其组成中，水约占96.5%，溶解盐类占3.5%左右。此外含有颗粒物质、溶解气体和有机化合物。海水占整个水圈的98%以上。

海水是一种盐溶液，与雨水和河水相比，以富含溶解盐类为特征。

① 海洋总体积约为 $1.37 \times 10^9 \text{ km}^3$ 或 $1.37 \times 10^{21} \text{ L}$ ，根据各元素含量可以估出海洋中各元素的蕴藏量。今引《Earth Science》(Bernstein et al., 1979)中的估量数值如下：

元素	每平方公里含量(t/km ³)	元素	每平方公里含量(t/km ³)
Av	0.004	Mn	2.05
Hg	0.03	Pb	3.05
W	0.1	Cu	3.05
Ag	0.3	Sn	3.05
Ni	0.5	Al	10.25
Co	0.5	Fe	10.25
Ti	1.02	C	28776
		S	924320
		Mg	1335250

表 1-1 化学元素在大洋水中的存在形式、浓度和分布类型

原子序数	元素名称	在含氧水中可能存在的形式	浓度范围和平均值 (在35‰盐度下)		分布类型	居留时间③ $\tau(a)$
			重量摩尔单位①	重量分数单位②		
1	H	H ₂ O形式	54mol/kg	108‰		
2	He		1.8nmol/kg	7.2ppt		
3	Li	Li ⁺	25 μ mol/kg	0.175ppm	保守型	5.7 × 10 ⁵
4	Be	Be(OH) ⁻ , Be(OH) ₂ ⁰	4—30 μ mol/kg 20 μ mol/kg	0.036—0.70ppt 0.018ppt	营养及 清扫型	
5	B	H ₃ BO ₃	0.416mmol/kg	4.5ppm	保守型	9.6 × 10 ⁶
6	C 无机 有机	HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ²⁻	2.0—2.5mmol/kg	24—30ppm	营养型	~10 ⁵
			2.3mmol/kg	27.6ppm		
	4 μ mol/kg	48ppb				
7	N	NO ₃ ⁻ 溶解N ₂	<0.1—45 μ mol/kg 30 μ mol/kg 0.58mmol/kg	<0.0014—0.63ppm 0.42ppm 8.12ppm	营养型	
8	O	溶解O ₂ H ₂ O形式O	0—300 μ mol/kg 54mol/kg	0—4.8ppm 864‰	营养型 之镜象	~10 ⁶
9	F	F ⁻ , MgF ⁺	86 μ mol/kg	1.29ppm	保守型	5.0 × 10 ⁵
10	Ne		7.5nmol/kg	0.15ppb		
11	Na	Na ⁺	0.486mol/kg	10764ppm	保守型	8.3 × 10 ⁷
12	Mg	Mg ²⁺	53.2mmol/kg	1293ppm	保守型	1.3 × 10 ⁷
13	Al	Al(OH) ₄ ⁻ , Al(OH) ₃ ⁰	(5—40 nmol/kg) (20nmol/kg)	(0.135—1.08ppb)④ (0.54ppb)	中 深 最小值	6.2 × 10 ²
14	Si	H ₄ SiO ₄	<1—180 μ mol/kg 100 μ mol/kg	<0.028—5.06ppm 2.81ppm	营养型	2.0 × 10 ⁴
15	P	HPO ₄ ²⁻ , NaHPO ₄ ⁻ , MgHPO ₄ ⁰	<1—3.5 μ mol/kg 2.3 μ mol/kg	<31—108.5ppb 71.3ppb	营养型	6.9 × 10 ⁴
16	S	SO ₄ ²⁻ , NaSO ₄ ⁻ , MgSO ₄	28.2mmol/kg	904ppm	保守型	2 × 10 ⁷ ⑤
17	Cl	Cl ⁻	0.546mol/kg	19356ppm	保守型	~10 ⁸
18	Ar		15 μ mol/kg	0.6ppm		
19	K	K ⁺	10.2mmol/kg	399ppm	保守型	1.2 × 10 ⁷
20	Ca	Ca ²⁺	10.3mmol/kg	413ppm	表水微 贫 化	1.1 × 10 ⁶
21	Sc	Sc(OH) ₃ ⁰	8—20 μ mol/kg 15 μ mol/kg	0.36—0.9ppt 0.68ppt	表水贫化	

续表

原子序数	元素名称	在含氧水中可能存在的形式	浓度范围和平均值 (在35%盐度下)		分布类型	居留时间 ^③ τ (a)
			重量摩尔单位 ^①	重量分数单位 ^②		
22	Ti	$\text{Ti}(\text{OH})_4^0$	(<20nmol/kg)	(<0.96ppb)	?	3.7×10^3
23	V	HVO_4^{2-} , H_2VO_4^- , NaHVO_4^-	20—35nmol/kg 30nmol/kg	1.02--1.79ppb 1.53ppb	表水微 贫化	4.5×10^4
24	Cr	CrO_4^{2-} , NaCrO_4^-	2—5nmol/kg 4nmol/kg	0.1—0.26ppb 0.21ppb	营养型	8.2×10^3
25	Mn	Mn^{2+} , MnCl^-	0.2—3nmol/kg 0.5nmol/kg	11—165ppt 27.5ppt	深水贫化	1.3×10^3
26	Fe	$\text{Fe}(\text{OH})_3^0$	0.1—2.5nmol/kg 1nmol/kg	5.58--140ppt 55.8ppt	表、深水 贫化	5.4×10^1
27	Co	Co^{2+} , CoCO_3^0 , CoCl^+	(0.01—0.1nmol/kg) (0.02nmol/kg)	(0.59—5.9ppt) (1.18ppt)	表、深水 贫化	3.4×10^2
28	Ni	Ni^{2+} , NiCO_3^0 , NiCl^-	2—12nmol/kg 8nmol/kg	0.12--0.7ppb 0.47ppb	营养型	8.2×10^3
29	Cu	CuCO_3^0 , CuOH^+ , Cu^{2+}	0.5—6nmol/kg 4nmol/kg	0.03--0.38ppb 0.25ppb	营养及清 扫型	9.7×10^5
30	Zn	Zn^{2+} , ZnOH^+ , ZnCO_3^0 , ZnCl^+	0.05—9nmol/kg 6nmol/kg	0.003—0.59ppb 0.39ppb	营养型	5.1×10^2
31	Ga	$\text{Ga}(\text{OH})_3^-$	(0.3nmol/kg)	(21ppt)	?	9.0×10^3
32	Ge	H_4GeO_4 , H_3GeO_4^-	≤ 7 —115pmol/kg 70pmol/kg	≤ 0.51 —8.35ppt 5.01ppt	营养型	
33	As	HAsO_4^{2-}	15—25nmol/kg 23nmol/kg	1.13--1.88ppb 1.73ppb	营养型	3.9×10^4
34	Se	SeO_4^{2-} , SeO_3^{2-} , HSeO_3^-	0.5—2.3nmol/kg 1.7nmol/kg	0.04—0.18ppb 0.13ppb	营养型	2.6×10^4
35	Br	Br^-	0.84mmol/kg	67.12ppm	保守型	1.3×10^8
36	Kr		3.4nmol/kg	0.285ppb		
37	Rb	Rb^+	1.4 μ mol/kg	0.12ppm	保守型	3.0×10^6
38	Sr	Sr^{2+}	90 μ mol/kg	7.88ppm	表水微 贫化	5.1×10^6
39	Y	YCO_3^+ , YOH^{2+} , Y^{3+}	(0.15nmol/kg)	(13.3ppt)	?	7.4×10^2

续表

原子序数	元素名称	在含氧水中可能存在的形式	浓度范围和平均值 (在35‰盐度下)		分布类型	居留时间 ^③ τ (a)
			重量摩尔单位 ^①	重量分数单位 ^②		
40	Zr	$Zr(OH)_4^0, Zr(OH)_5^-$	(0.3nmol/kg)	(27.4ppt)	?	
41	Nb	$Nb(OH)_6^-, Nb(OH)_5^0$	(≤50pmol/kg)	(≤4.65ppt)	?	
42	Mo	MoO_4^{2-}	0.11μmol/kg	10.56ppb	保守型	8.2×10^5
43	(Tc)	TcO_4^-	无稳定同位素			
44	Ru	?	?	?	?	
45	Rh	?	?	?	?	
46	Pb	?	?	?	?	
47	Ag	$AlCl_2^-$	(0.5—35 pmol/kg) 25pmol/kg	(0.05—3.78ppt) (2.70ppt)	营养型	3.5×10^2
48	Cd	$CdCl_2^-$	0.001—1.1nmol/kg 0.7nmol/kg	0.11—123.6ppt 78.68ppt	营养型	
49	In	$In(OH)_3^0$	(1pmol/kg)	0.11ppt	?	
50	Sn	$SnO(OH)_3^-$	(1—12pmol/kg) (~4pmol/kg)	0.12—1.42ppt (0.47ppt)	表水高含量	
51	Sb	$Sb(OH)_6^-$	(1.2nmol/kg)	(0.15ppb)	?	5.7×10^5
52	Te	$TeO_3^{2-}, HTeO_3^-$?	?	?	
53	I	IO_3^-	0.2—0.5μmol/kg 0.4μmol/kg	25.4—63.5ppb 50.8ppb	营养型	3.4×10^5
54	Xe		0.5nmol/kg	65.5ppt		
55	Cs	Cs^-	2.2nmol/kg	0.29ppb	保守型	3.3×10^5
56	Ba	Ba^{2+}	32—150nmol/kg 100nmol/kg	4.39—20.9ppb 13.7ppb	营养型	8.8×10^3
57	La	$La^{3+}, LaCO_3^+, LaCl_2^+$	13—37pmol/kg 30pmol/kg	1.81—5.14ppt 4.17ppt	表水贫化	3.2×10^3
58	Ce	$CeCO_3^+, Ce^{3+}, CeCl_2^+$	16—26mol/kg 20pmol/kg	2.24—3.64ppt 2.8ppt	表水贫化	1.4×10^3
59	Pr	$PrCO_3^+, Pr^{3+}, PrSO_4^+$	(4pmol/kg)	(0.56ppt)	表水贫化	3.1×10^3
60	Nd	$NdCO_3^+, Nd^{3+}, NdSO_4^+$	12—25pmol/kg 20pmol/kg	1.73—3.6ppt 2.88ppt	表水贫化	2.8×10^3

续表

原 子 序 数	元 素 名 称	在含氧水中可能存 在的形式	浓度范围和平均值 (在35‰盐度下)		分布类型	居留时间③ τ (a)
			重量摩尔单位①	重量分数单位②		
62	Sm	SmCO_3^+ , Sm^{3+} , SmSO_4^+	2.7—4.8 $\mu\text{mol/kg}$ 4 $\mu\text{mol/kg}$	0.41—0.72ppt 0.6ppt	表水贫化	2.9×10^3
63	Eu	EuCO_3^+ , Eu^{3+} , EuOH^{2+}	0.6—1.0 $\mu\text{mol/kg}$ 0.9 $\mu\text{mol/kg}$	0.09—0.15ppt 0.14ppt	表水贫化	5.3×10^3
64	Gd	GdCO_3^+ , Gd^{3+}	3.4—7.2 $\mu\text{mol/kg}$ 6 $\mu\text{mol/kg}$	0.53—1.13ppt 0.94ppt	表水贫化	4.6×10^3
65	Tb	TbCO_3^+ , Tb^{3+} , TbOH^{2+}	(0.9 $\mu\text{mol/kg}$)	(0.14ppt)	表水贫化	5.6×10^3
66	Dy	DyCO_3^+ , Dy^{3+} , DyOH^{2+}	(4.8—6.1 $\mu\text{mol/kg}$) (6 $\mu\text{mol/kg}$)	(0.78—0.99ppt) (0.98ppt)	表水贫化	7.8×10^2
67	Ho	HoCO_3^+ , Ho^{3+} , HoOH^{2+}	(1.9 $\mu\text{mol/kg}$)	(0.15ppt)	表水贫化	1.3×10^4
68	Er	ErCO_3^+ , ErOH^{2+} , Er^{3+}	4.1—5.8 $\mu\text{mol/kg}$ 5 $\mu\text{mol/kg}$	0.68—0.97ppt 0.84ppt	表水贫化	8.1×10^3
69	Tm	TmCO_3^+ , TmOH^{2+} , Tm^{3+}	(0.8 $\mu\text{mol/kg}$)	(0.14ppt)	表水贫化	5.3×10^3
70	Yb	YbCO_3^+ , YbOH^{2+}	3.5—5.4 $\mu\text{mol/kg}$ 5 $\mu\text{mol/kg}$	0.61—0.93ppt 0.87ppt	表水贫化	8.5×10^3
71	Lu	LuCO_3^+ , LuOH^{2+}	(0.9 $\mu\text{mol/kg}$)	(0.16ppt)	表水贫化	6.2×10^3
72	Hf	$\text{Hf}(\text{OH})_4^0$, $\text{Hf}(\text{OH})_5^-$	(<40 $\mu\text{mol/kg}$)	(<7.12ppt)	?	
73	Ta	$\text{Ta}(\text{OH})_5^0$	(<14 $\mu\text{mol/kg}$)	(2.53ppt)	?	
74	W	WO_4^{2-}	0.5 $\mu\text{mol/kg}$	91.95ppt	?	
75	Re	ReO_4^-	(14—30 $\mu\text{mol/kg}$) (20 $\mu\text{mol/kg}$)	(2.6—5.58ppt) (3.72ppt)	?	
76	Os	?	?	?	?	
77	Ir	?	?	?	?	
78	Pt	?	?	?	?	
79	Au	AuCl_2^-	(25 $\mu\text{mol/kg}$)	(4.93ppt)	?	9.7×10^4
80	Hg	HgCl_2^-	(2—10 $\mu\text{mol/kg}$) (5 $\mu\text{mol/kg}$)	(0.4—2.01ppt) (1.01ppt)	?	5.6×10^2