

魏东岩 著

蒸发岩生物成因论

ZHENG FAYAN SHENG WU CHENG YIN LUN

地质出版社

蒸发岩生物成因论

魏东岩 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书通过对现代盐湖生物和生物食物链的研究,并通过对现代盐湖生物与古代蒸发岩生物分子化石、细菌(藻)化石、卤虫化石和卤蝇化石等的对比研究,以大量的事实和证据说明了蒸发岩的生物成因,并提出“蒸发岩微生物(藻)类建造”和“蒸发岩两虫化石和两虫结构”的新概念,对盐类矿床及相关矿床成矿理论的研究,对蒸发岩矿床及其相关矿床的普查找矿,将具有推动作用。

本书可供从事矿床地质、沉积学、古生物、古生态研究的科研、管理人员及相关院校师生阅读参考,也可供卤虫和卤蝇养殖业人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

蒸发岩生物成因论/魏东岩著. —北京:地质出版社,
2008.7

ISBN 978-7-116-05697-8

I. 蒸… II. 魏… III. 蒸发岩-生物-成因矿物学
IV. P588.24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 083825 号

责任编辑:孙亚芸

责任校对:王素荣

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) 82324508(邮购部);(010) 82324569(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京印刷学院实习工厂

开 本:787 mm × 1092 mm^{1/16}

印 张:9 彩版:2 面 黑白图版:10 面

字 数:219 千字

印 数:1—600 册

版 次:2008 年 7 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价:30.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-05697-8

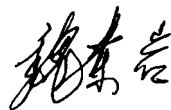
(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

自序

退休安居陋室，放松了许多，也静心了许多，终于有了坐下来读书的时间，观天地生物人文气象，读古今经世典故文章，可谓悠哉也。累了，便看墙上的一幅古人对联，上联是“事能知足心常泰”，下联是“人到无求品自高”。自我安慰，平衡心态，倒也心顺。但在赋闲之时，心里总惦记着一件事，那就是欠的“债”尚未还，倍感内疚。说起欠“债”还得从我国著名地质学家、中国科学院院士袁见齐先生谈起。袁先生是我早年读研究生时的导师。20世纪90年代初，我去拜访先生，并把在先生指导下发表于《科学通报》上的《芒硝矿层中卤水虾粪粒化石的发现及其地质意义》一文，请先生教正，还想听听先生关于我下一步工作的意见。先生看过文章后，异常高兴。他知道我正在做有关蒸发岩的另一项课题，于是，他让我积累资料写一本关于蒸发岩生物成因的书。先生寄予我希望的一席话，给我指明了研究的方向。但我深知，写这样一本书实在不易，因为这是地质科学的前沿性课题，同时也是一门跨学科的综合性课题。倘若不树立创新意识的意识，不从实践中来，不寻求事物的差异性和本来面貌，不深钻细研，不搞原创性研究，是很难完成的。当时因科研工作任务繁重，抽不出更多时间来专门做这方面工作，只是边工作边拓宽思路，有意识积累些资料而已。

1991年先生乘鹤仙逝，我无比悲痛。近三十余年先生解惑释疑，探幽发微，为学做人，历历在目。从先生身上不仅学知识，更重要的是学精神，学做人。忆往昔岁月，我不论是在野外地质队工作，还是在大学任教，也不论是在科研院所工作，都与先生保持有密切联系，也无时不在受到先生的教诲和熏陶。应当说，我走上探索地球之路是与先生分不开的，我的每一项成果都是在先生激励教导下取得的。因此，先生的指示，我始终放在心中，不敢有丝毫懈怠。我作为在新中国成长起来的一个普通地质工作者，为能从事祖国的地质事业而感到自豪。回想飞逝的地质生涯，足登千山万壑，汗洒江河湖海，眼观镜下世界，心系菌藻虫物的经历，我应该而且必须鼓起勇气，克服困难去完成导师交给的任务。就这样，历经十余载，在毛主席《实践论》和《矛盾论》的指引下，苦苦探索孜孜以求，数易其稿，终于完成本书。书名取《蒸发岩生物成因论》是为纪念先生的。现以本书献给长眠于九泉之下的我可尊敬的导师，也献给一切关心地质科学发展的人们！

这里，要提及的是，数十年来，与我一道出野外、做课题的我的众多的同事们，书中也凝聚了他们的汗水和艰辛。在此，向他们表示深深的谢意！还要提及的是，书的写成是与我的家人——妻子栗生莲和子女们：BS. 魏赫，Dr. Michael Holzrichter，Dr. 魏博，Dr. 蒋巧媛的大力帮助和多方关心分不开的，特向他们致谢！



2008.2.

前言

蒸发岩矿床在国民经济建设中占有重要位置。蒸发岩矿产是现代化学工业的基本原料，可以说，没有蒸发岩便没有化学工业。蒸发岩矿物中最为家喻户晓、人人皆知的莫过于石盐（岩盐）。人类利用石盐少说有 5000 多年的历史。石盐在人类繁衍生殖和人类文明的发扬光大中起着不可替代的作用。因此，文化学者称其为盐文化。盐文化是中华文明中重要的组成部分。

众所周知，黄河是中华民族的摇篮。中国远古的尧都平阳、舜都蒲坂、禹都安邑均围绕运城盐湖而立国建邦，究其原因不外乎盐湖所产之石盐。因为石盐与水、谷物和空气一样，乃人类生存之必需。科学实验表明，人类的血液、眼泪乃至身体的各个组织都含有盐分。一个人倘若石盐的日摄入量经常低于 2 g，便会因营养缺乏而导致死亡，反之，若一个人日摄入量经常高于 8 g，则会患上高血压、心血管病和肾病等多种疾病。

蒸发岩是由溶于水中之盐类物质蒸发形成而得名，世界上许多民族对盐形成的认识有着共同性，都认为盐与太阳有关。例如，俄罗斯族语言中太阳为 *солнце*，而盐为 *соль*，具有相同的词根。又如，中国殷商甲骨文中“卤”字写成“𩇛”，李约瑟（Joseph Needham, 1975）在其所著《中国科学技术史》第五卷（地学）中，对卤字的解释，认为“那是一个蒸发咸水的盐池鸟瞰图”。甲骨文中“𩇛”（卤）字原创的依据可能就是山西运城盐湖。在该盐湖北岸卧云岗上现存有唐代建造的池神庙，庙中供奉风、雨、日三神。这表明，很早以前，劳动人民通过生产实践就认识到盐的形成与风、雨、太阳之间的密切关系。在风、雨、日三者中，古人更重视风的作用。当地一年四季盛吹南风。宋代科学家沈括称之盐南风。素有亲民爱民美称的虞舜的《南风歌》，至今仍脍炙人口：

南风之熏兮，
可以解吾民之愠兮；
南风之时兮，
可以阜吾民之财兮。

现代矿床学是 19 世纪下半叶，伴随现代工业革命，脱离矿物学而独立出来的一门学科。几乎与此同时，意大利化学家乌齐利奥（J. Usiglio）等利用水盐体系的相平衡来进行盐类矿物的蒸发实验。这是运用现代科技方法研究盐类成因的最早尝试。之后，包括俄国的 H. C. 库尔纳科夫在内的一批地球化学家，对天然自析盐盆地进行了直接而系统的观察，同时，又利用物理-化学方法制定了复杂平衡体系的状态图，确定了大型海盆地蒸发时盐类的结晶顺序，发现了海水中盐类结晶的所谓“阳光”途径。无疑，这些化学家和地球化学家，对盐类矿物的结晶实验作出了贡献。但他们强调的是水盐体系中的温度、溶解度、溶液的组成和二氧化碳分压等因素，忽略了含盐水体中的生物以及生物对水盐体系相平衡的影响作用。

现代盐湖（包括海湾和潟湖等水体）中生物的研究已有很久的历史。早在 1755 年于

英国的 Lymington 湖发现并研究卤虫（卤水虾 brine shrimp），1830 年 Say 对美国 Mono 湖碱水卤蝇（*Ephydra*）进行了描述和分类，1917 年 C. T. Vorhies 在美国大盐湖观察到原生动物——小变形虫和纤毛虫属，1937 年 Smith 和 Zobel 首先提出美国大盐湖存在着细菌群落。20 世纪 70 年代，由于世界盐业生产的需要和盐藻体生物药用和食用的研究，盐湖生物学、生态学和生物地球化学得到了迅猛发展。我国学者对中国最具代表性的各类型盐湖中嗜盐生物进行了研究，取得了丰硕的成果。王大珍等（1994）从西藏、青海、内蒙古、新疆等地盐（碱）湖分离出大量不同类型的嗜盐、嗜碱细菌，并进行了形态、生理生化、分子生物学、应用技术方面的研究；郑绵平等（1985）对西藏高寒盐湖嗜寒性嗜盐藻的研究；任慕莲等（1992）对新疆艾比湖卤虫、藻类及其他浮游生物的系统研究；作者 20 世纪 60 年代末对山西运城盐湖嗜盐生物，尤其是卤虫进行了系统观察，80 年代、90 年代对新疆、内蒙古等盐碱湖卤虫、卤蝇和原生动物进行了研究。

盐湖生物研究表明，盐湖卤水的矿化度、化学组成和自然地理环境，对生物群落的生存和繁衍有重要的控制作用（袁见齐等，1990），而水盐体系中的生物对卤水类型、矿化度、化学组成和水介质条件也有重要的制约作用（魏东岩，1998）。盐湖生物是维护盐湖生命的主力军，没有盐湖生物，盐湖将变为死水一潭，其生命便会完结。因此，传统理论认为盐类矿物形成于水盐体系是不正确和不全面的，盐类矿物应该形成于生物-水盐体系中，而在生物-水盐体系中，生物形成一个简单的食物链即嗜盐菌藻类—原生动物—卤虫和卤蝇（魏东岩等，2000）。盐湖生物研究是蒸发岩生物成因论立论的依据之一。

蒸发岩矿床生物成矿研究的关键是在蒸发岩中找到足以证明参与生物成矿作用的可靠证据即生物化石。只有在此基础上，才能进一步研究生物成矿的机理。

有关蒸发岩中生物化石和生物成矿报道的文献尚不多见。20 世纪 60 年代初苏联学者在上卡姆二叠系钾石盐中发现了嗜盐菌藻化石；蔡克勤等（1984）报道了大柴旦盐湖硼矿层中的羟钠镁矾晶体上点节状菌类遗迹；刘群等（1987）在镇源钾石盐中发现了类似菌类的物质；郑绵平等（1989）提出“生物成硼作用”，并初步探讨了可能的机理；R. L. Folk（1993）研究了大盐湖文石鲕和胶结物等在扫描电镜下的细菌和超微细菌化石；蔡克勤（1998）对近代天然碱矿床生物成矿作用进行了研究；魏东岩（1991，1992）发现并研究了蒸发岩中卤水虾粪粒化石；魏东岩等（1992，1998）对芒硝矿床生物成矿作用进行了研究，在 2000 年第三十一届国际地质大会上发表了《论盐类矿床之生物化学成因》一文。

近年来作者在研究蒸发岩中卤虫粪粒化石、嗜盐菌（藻）化石和分子化石的基础上，发现了卤虫化石和卤蝇化石以及卤蝇粪粒化石。这些化石在地质文献中未曾报道过，尚属首次发现。这些化石的发现将蒸发岩生物成因的研究又推上了一个新的台阶。卤虫化石包括卤虫卵化石、无节幼体化石、成虫化石、次成虫化石和幼虫蜕皮化石以及卤虫附肢和触角等部分的化石等；卤蝇化石包括卤蝇幼虫化石、幼虫蜕皮化石、卤蝇蛹化石、卤蝇蛹壳化石等。因为在蒸发岩中卤虫化石与卤蝇化石常常是大量且相伴产出并相互砌集构成矿物，故作者将两者统称为两虫化石（Two-Arthropod-Fossils, TAF）。两虫化石，这个新概念的提出，具有重要的地质意义。

蒸发岩中几乎满含着两虫化石，因此，实际上，蒸发岩是两虫化石的砌集体。两虫化石以不同大小、不同形式聚合成各种的样式。这种各种样式的综合体，作者就称其为蒸发

岩的两虫结构 (Two-Arthropod-Textures, TAT)。蒸发岩两虫结构从根本上揭示了蒸发岩环境不同成盐条件下生存的两虫的成盐本质。

蒸发岩中分子化石、菌藻类化石、两虫化石等研究表明,在古代蒸发岩中已找到与现代盐湖生物食物链相应的生物化石。这就是说,古代蒸发岩形成的生物-水盐体系与现代是相似或相同的。嗜盐生物尤其是两虫和嗜盐菌(藻)类在成盐体系中形成巨大的生物营力,嗜盐菌(藻)类化石和两虫化石等都是盐类矿物构成的重要材料。它们在生物成盐作用中起着主导的和不可替代的作用。从微观上看,盐类是菌(藻)类建造,其内数量众多、形态各异的嗜盐(碱)菌(藻)类化石构成极为特征的生物超微结构;从宏观上看,蒸发岩是两虫蒸发岩(Two-Arthropod-Evaporites, TAE),具两虫结构是其重要的特征。蒸发岩成因从化学沉积作用到生物沉积作用的认识上的转变,是对典型的纯化学沉积矿床成因认识上的一次飞跃。这种观点将促进盐类矿床乃至相关矿床成矿理论的发展。

蒸发岩两虫结构是蒸发岩的指相标志。根据两虫结构可以恢复一些已经变质了的和经多种地质作用改造了的原岩矿的蒸发岩形成环境。这无疑对一些矿床的蒸发岩环境的研究和对矿产的寻找起到指导作用。

蒸发岩两虫化石和两虫结构新概念的提出对研究作为节肢动物的卤虫和卤蝇的起源、演变、进化和对研究古地理、古环境、古气候、古生态的演绎变化具有重要价值。

目 次

自 序

前 言

第一章 蒸发岩形成的生物-水盐体系	(1)
第一节 水盐体系相平衡概述	(1)
第二节 传统的现代盐湖水盐体系	(3)
第三节 现代盐湖生物-水盐体系	(7)
第二章 现代盐湖生物群落	(10)
第一节 藻类	(10)
第二节 细菌	(11)
第三节 原生动物	(12)
第四节 其他浮游生物	(13)
第五节 昆虫	(13)
第六节 鸟类	(13)
第三章 卤水虾（卤虫）生物学及卤水虾产业	(14)
第一节 卤水虾生物学	(14)
第二节 卤水虾的生命周期	(15)
第三节 卤水虾的生存条件及染色体	(17)
第四节 卤水虾的食性和粪粒	(17)
第五节 卤水虾产业状况	(18)
第四章 卤水蝇（卤蝇）生物学	(21)
第一节 卤水蝇的分类体系	(21)
第二节 卤水蝇的构造	(22)
第三节 卤水蝇的生命史	(22)
第四节 卤水蝇生长的影响因素	(24)
第五节 物种间的竞争	(26)
第六节 卤水蝇的实用价值	(26)
第五章 蒸发岩中的两虫化石及两虫结构	(27)
第一节 盐类矿物奇特晶形与卤虫和卤蝇化石	(27)
第二节 卤虫化石和卤蝇化石的鉴别	(28)
第三节 盐类矿物——两虫化石之砌集体	(31)
第四节 蒸发岩两虫结构类型	(34)

第五节	两虫蒸发岩	(36)
第六节	结束语	(37)
第六章	蒸发岩中两虫粪粒化石	(38)
第一节	两虫粪粒化石的地质产状	(38)
第二节	卤虫粪粒化石的物理性质	(39)
第三节	卤虫粪粒化石物质组成与结构	(40)
第四节	卤蝇幼虫粪粒化石	(42)
第五节	小结	(44)
第七章	巴里坤盐湖第四纪生物地层学及两虫化石	(45)
第一节	巴里坤盐湖概述	(45)
第二节	巴里坤湖水化学特征	(46)
第三节	巴里坤盐湖生物概况	(47)
第四节	巴里坤盐湖生物地层学	(48)
第五节	巴里坤盐湖硫酸钠矿层	(52)
第六节	巴里坤盐湖第四纪芒硝矿层中两虫化石	(53)
第七节	巴里坤盐湖第四纪硫酸钠矿层中两虫粪粒化石	(55)
第八节	结束语	(56)
第八章	内蒙古碱湖第四纪碱矿及两虫化石	(57)
第一节	内蒙古碱湖概述	(57)
第二节	内蒙古碱湖第四纪碱矿床	(59)
第三节	内蒙古碱湖第四纪碱矿中两虫化石及粪粒化石	(65)
第四节	碱矿的成矿条件	(66)
第九章	鄂尔多斯盆地奥陶纪含盐系地质特征及两虫化石	(68)
第一节	鄂尔多斯盆地地质概况	(68)
第二节	鄂尔多斯盆地奥陶纪含盐系	(72)
第三节	奥陶纪含盐系中的两虫化石	(75)
第四节	奥陶纪盐岩中的两虫粪粒化石	(78)
第五节	含盐系两虫化石及粪粒化石发现的地质意义	(80)
第十章	鄂尔多斯盆地奥陶纪含盐系生物分子化石	(82)
第一节	含盐系样品的采集和研究方法	(82)
第二节	含盐系有机质含量及分布	(83)
第三节	含盐系生物标记化合物特征	(85)
第四节	结论	(90)
第十一章	扫描电镜下盐类矿物的细菌(藻)建造	(91)
第一节	极端嗜盐(碱)细菌——古生菌的重要组成部分	(91)
第二节	第四纪产某些盐类矿物扫描电镜下细菌(藻)建造	(93)
第三节	中新生产某些盐类矿物扫描电镜下细菌(藻)建造	(95)

第四节	古生代产石盐之扫描电镜下细菌（藻）建造	(99)
第五节	扫描电镜下盐类矿物细菌（藻）建造的几个具体问题	(101)
第六节	盐类矿物细菌（藻）建造中的细菌化石是否为极端嗜盐（碱） 古生菌化石	(104)
第十二章	蒸发岩生物成因概述	(106)
第一节	生物-水盐体系中的生物食物链	(106)
第二节	蒸发岩中生物化石	(107)
第三节	生物在成盐中之作用	(109)
第四节	结束语	(111)
主要参考文献		(113)
后记		(116)
英文摘要		(117)
图版说明		(124)
图版		

Contents

Preface

Introduction

Chapter 1 The Biological-water-salt System for Evaporite Formation	(1)
1. Introduction to water-salt system balance	(1)
2. Conventional modern salt lake water-salt system	(3)
3. Modern saltlake biological-water-salt system	(7)
Chapter 2 Modern Salt Lake Organic Communities	(10)
1. Algae	(10)
2. Bacteria	(11)
3. Protozoa	(12)
4. Plankton	(13)
5. Insects	(13)
6. Birds	(13)
Chapter 3 Brine Shrimp (Artemiidae) Biology and Its Industry	(14)
1. Brine Shrimp biology	(14)
2. Brine Shrimp life cycle	(15)
3. Brine Shrimp living condition and its karyotype	(17)
4. Brine Shrimp's diet and faecal pellets	(17)
5. Brine Shrimp industry status	(18)
Chapter 4 The Brine Fly (Ephydriidae) Biology	(21)
1. Classification of Ephydriidae	(21)
2. Structure of Ephydriidae	(22)
3. Life cycle of Ephydriidae	(22)
4. Influence factors of Ephydriidae growth	(24)
5. Interspecific competition	(26)
6. Commercial value of Ephydriidae	(26)
Chapter 5 Two-Arthropod-Fossils (TAF) and Two-Arthropod-Textures (TAT) in Evaporites	(27)

1. Relationship between peculiar crystal forms of salt minerals and Artemiida & Ephyridae fossils	(27)
2. Artemiida & Ephyridae fossils	(28)
3. Som saline minerals and Two-Arthropod-Fossils	(31)
4. Two-Arthropod-Textures of evaporites	(34)
5. Two-Arthropod-Evaporites	(36)
6. Conclusions	(37)
Chapter 6 Two-Arthropod Faecal Pellets Fossils in Evaporites	(38)
1. Geologic setting of Two-Arthropod faecal pellet fossils	(38)
2. Physical characteristics of Artemiidae faecal pellet fossils	(39)
3. Constitutions and textures of Artemiidae faecal pellet fossils	(40)
4. Faecal pellets fossils of Ephyridae larva	(42)
5. Conclusions	(44)
Chapter 7 Quaternary Biostratigraphy of Barkol Saltlake and Two-Arthropod-Fossils (TAF)	(45)
1. Introduction to Barkol saltlake	(45)
2. Hydrochemical characteristics of Barkol saltlake	(46)
3. Introduction to organism in Barkol saltlake	(46)
4. The biostratigraphy of Barkol saltlake	(48)
5. Quaternary sodium sulfate beds of Barkol saltlake	(52)
6. Two-Arthropod-Fossils (TAF) in Quaternary mirabilite beds of Barkol saltlake	(53)
7. Two-Arthropod faecal pellet fossils in Quaternary mirabilite beds of Barkol saltlake	(55)
8. Conclusions	(56)
Chapter 8 Quaternary Alkali Ore Beds and Two-Arthropod-Fossils in Inner Mongolian Alkaline Lakes	(57)
1. Introduction to Inner Mongolian alkali lakes	(57)
2. Quaternary alkali ore deposits in Inner Mongolian	(59)
3. Two-Arthropod-Fossils and Two-Arthropod faecal pellet fossils in Inner Mongolian quaternary alkali ore beds	(65)
4. Mineral-formation condition of alkali ore beds	(66)

Chapter 9 Geological Characteristics and Two-Arthropod-Fossils of Ordovician	
Salt-bearing Series in Erdos Basin	(68)
1. Introduction to geology of Erdos basin	(68)
2. The Ordovician salt-bearing series in Erdos basin	(72)
3. Two-Arthropod-Fossils in Ordovician halilytes	(75)
4. Two-Arthropod faecal pellet fossils in Ordovician halilytes	(78)
5. Geological significance of discovery of Two-Arthropod fossils and faecal pellet fossils	(80)
Chapter 10 The Biotic Molecular Fossils of Ordovician Salt-bearing Series	
in Erdos Basin	(82)
1. The collection and investigation method for salt-bearing samples	(82)
2. Contents and distributions of organisms in salt-bearing series	(83)
3. The biomarker characteristics of the salt-bearing series	(85)
4. Conclusions	(90)
Chapter 11 SEM Imaging of Bacteria and Archae in Bacteria (Algae)	
Formation of Salt Minerals	(91)
1. Halophilic (Alkaliphilic) bacteria—— one of archae	(91)
2. Bacteria (Algae) Formation of Quaternary salt minerals under SEM	(93)
3. Bacteria (Algae) Formation of meso-cenozoic salt minerals under SEM	(95)
4. Bacteria (Algae) Formation of palaeozoic salt minerals under SEM	(99)
5. Discussion of some problems on Bacteria (Algae) Formation of salt minerals under SEM	(101)
6. Halophilic (Alkaliphilic) bacteria or archae	(104)
Chapter 12 Introduction to Biological Formation of Evaporites	(106)
1. A food chain in biological-water-salt system	(106)
2. Biological food chain fossils in evaporites	(107)
3. Role of organism in Evaporite Formation	(109)
4. Conclusions	(111)
References	(113)
Postscript	(116)
Abstract	(117)
Plates and Illustrations	(124)

第一章 蒸发岩形成的生物-水盐体系

众所周知，蒸发岩是由溶于水中之盐类物质经蒸发、沉淀而形成的。这里谈及的“水”是指海水，也可以是湖水，还可能是多种来源的混合水。蒸发岩论成因不外乎是海相和陆相两种。海水沉积的蒸发岩往往是在被沙洲与海洋基本上隔开的浅水潟湖和海湾以及潮上盐湖中形成的，被称为海相蒸发岩。湖水沉积的蒸发岩形成于常说的内陆盐湖，被称为陆相蒸发岩。

不论是海相还是陆相蒸发岩，传统的观点是认为其形成于水盐体系之中。然而，传统的水盐体系存在着缺点，一是不认为水体中存在有生物，二是认为即使水体中有生物也不影响水盐体系的相平衡。研究表明，水体之中不仅有生物，而且水体之中生物的作用是巨大的，它不仅起到聚集成矿物质的作用（以钾的聚集为例，А. П. Виноградов (1932) 认为，生物含有水圈中全部钾的 0. n%），而且也直接影响水盐体系相平衡的条件和介质条件。因此，传统的水盐体系的提法是不准确和不正确的，应当更正为生物-水盐体系。蒸发岩正是形成于生物-水盐体系之中的。

第一节 水盐体系相平衡概述

早在 1849 年，意大利化学家乌齐利奥（J. Usiglio）就利用地中海海水样品在 40℃ 条件下进行了蒸发实验。实验表明，蒸发时盐类从溶液中沉淀的顺序恰好与其溶解度相反。他确定的盐类析出顺序是：

- 1) 氧化铁和碳酸钙；
- 2) 石膏；
- 3) 石膏 + 石盐；
- 4) 石膏 + 石盐 + 泻利盐；
- 5) 石膏 + 石盐 + 泻利盐 + 软钾镁矾；
- 6) 石膏 + 石盐 + 泻利盐 + 光卤石；
- 7) 石膏 + 石盐 + 泻利盐 + 光卤石 + 水氯镁石。

这种析盐顺序，直到今天仍不失其科学价值。

1877 年，德国学者奥克谢尼乌斯（Okcehuyc）提出了沙洲说，用以解释厚层盐矿床的形成。沙洲说认为，盐矿床的形成，首先在海湾出口处形成沙洲，把海湾和大海隔离。这个被沙洲隔开的海湾很少有淡水流入，于是逐渐蒸发形成盐类，但远海的水还是周期性地通过海峡流入海湾中，源源不断地补给海湾。这样一来，盐类越积越多，便形成厚层盐。但是，沙洲说是不完善的。沙洲说提及的海湾完全与海隔绝这种特殊条件在自然界是极少见的。沙洲说也忽视了盐类沉积的大地构造上的特点和地质条件，因而，不能解释厚大盐层的广泛分布。

19 世纪末，范特荷夫（J. H. Vant-Hoff）及其继承者通过对德国斯塔斯富特盐矿的研

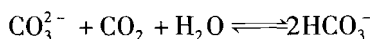
究,取得了 Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} 离子水盐体系的基本资料,完成了 25°C 和 83°C Na^+ , K^+ , $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$, $\text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$ 五元体系的溶解度相图。研究表明,盐类从溶液中沉淀的顺序,不仅与它们的溶解度有关,而且与溶液中盐类相对含量、成分、结晶温度和时间等有关。在理想的情况下,盐类从海水溶液中沉淀的次序是:①钙镁碳酸盐;②石膏;③石盐和石膏;④石盐和硬石膏;⑤石盐和杂卤石;⑥白钠镁矾和泻利盐;⑦硫酸钾和硫酸镁;⑧钾盐镁矾;⑨光卤石;⑩水氯镁石。

1938 年,苏联的库尔纳科夫 (H. C. Курнаков) 研究了在自然条件下海水蒸发的结果,盐类的沉积顺序在 25°C 为:①石膏;②石盐;③泻利盐;④六水泻盐;⑤光卤石;⑥水氯镁石。把这种结果绘制成相图称为阳光图。阳光图即介稳平衡相图,是不完全符合稳定平衡的溶解度相图。之后,М. Г. 瓦里亚什科 (М. Г. Валяшко) (1965) 用人工合成卤水进行了 25°C 等温蒸发实验,补充和校正了阳光图,认为阳光图只是 K^+ , Na^+ , $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$, $\text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$ 体系介稳相图的一部分。

德国学者博歇特 (H. Borchert) 认为海水蒸发沉积过程中,盆地各部分的温度是不同的,在盐类沉积过程中卤水又是流动的。他进行了动态多温试验,来解释成分复杂的盐类矿床的形成机理。

我国自 20 世纪 50 年代起,随着制盐工业的迅猛发展和盐类普查勘探工作的普遍展开,一些工业部门、科研单位和高等院校先后开展了对水盐体系相平衡的研究。60 年代,金作美等通过 10 个合成卤水的等温蒸发实验,作出了 25°C K^+ , Na^+ , $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$, $\text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$ 体系完整的介稳平衡相图。70 年代,北京地质学院韩蔚田等 (1982a, 1982b) 在研究我国东部红层盆地老第三系含盐层时,做了大量卤水蒸发实验,完成了 25°C K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , $\text{Ca}^{2+}/\text{Cl}^-$, $\text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$ 水盐体系稳定图,分析了该种卤水 25°C 和 90°C 蒸发时盐类的结晶规律。

迄今为止,探讨水盐体系盐类沉积最常用的是 K^+ , Na^+ , $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$, $\text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$ 五元体系,其温度范围是 $0 \sim 100^\circ\text{C}$,即是说五元体系在不同温度下 (0°C , 5°C , 20°C , 25°C , 35°C , 40°C , 55°C , 60°C , 65°C , 70°C , 83°C , 90°C , 100°C) 都有相图可查。此外,碳酸盐的三元体系即 $\text{Na}_2\text{CO}_3-\text{NaHCO}_3-\text{H}_2\text{O}$ 体系,对分析碱矿物的析出规律是实用的。在 $\text{Na}_2\text{CO}_3-\text{NaHCO}_3-\text{H}_2\text{O}$ 三元体系中,由于溶液中碳酸根离子 CO_3^{2-} 和重碳酸根离子 HCO_3^- 的含量与二氧化碳 CO_2 的分压有关,故存在以下平衡关系:



从反应式可知,体系中碱矿物的形成与温度和 CO_2 分压有关。

综上所述,卤水水盐体系相平衡的研究,为探讨天然盐类沉淀和转变规律提供了理论和实验的基础。但必须指出的是,水盐体系相平衡的研究,全然没有考虑卤水中之生物以及生物对相平衡条件即盐度、温度和 CO_2 分压之影响。卤水中生物,尤其是嗜盐生物是卤水的主要组成部分。至于海洋中生物的研究,广见于一些专著中。值得提及的是,薛廷耀编译的《海洋细菌学》(科学出版社,1962)是一部重要文献。不论盐湖还是海洋都生活着大量生物,因此,谈卤水的水盐体系,不谈生物是不全面的,不谈生物对水盐体系的影响也是不符合客观规律的。所谓水盐体系,实质上是生物-水盐体系。在盐类沉积作用中,只谈物理-化学作用,不谈生物作用,是不全面、不真实的。

下文将以现代盐湖为例,论述传统的水盐体系并探讨生物-水盐体系。

第二节 传统的现代盐湖盐体系

传统的盐湖盐体系研究的内容有：卤水的物理性质和化学性质以及水盐体系相平衡等。卤水物理性质有卤水之颜色、混浊度、密度、卤水分层现象等，卤水的化学性质主要研究卤水的成分和日晒盐田的卤水化学。应当指出，上述研究内容都不能回避生物和生物作用以及其对卤水物化性质的影响。

一、卤水的物理性质

1. 盐湖水的颜色

盐湖水的颜色多种多样，计有蓝绿色、微红色、粉红色、红色等。同一盐湖不同季节其颜色亦不同。古人对盐湖湖水的颜色早有记述。两千多年前，北魏郦道元在其所著《水经注》中写到：“今池水（山西运城盐湖）东西七十里，南北十七里，紫色澄亭，浑而不流”。宋代沈括在其所著《梦溪笔谈》中曰：“解州盐池……卤色正赤，在坂泉之下，俚俗谓之‘蚩尤血’……”。这里，“紫色”、“正赤”、“蚩尤血”都指的是山西运城盐湖卤水的颜色。

不论是盐湖，还是晒盐池，我们都可以看到，随着盐度的逐渐升高，卤水的颜色逐渐地加深，由绿而褐而红。关于卤水颜色的成因，过去人们认为与卤水的离子成分有关，但直到现在，人们才有一个较清楚的认识即颜色与不同盐度中所生活的菌藻类的多寡和不同生物种属有关。郦道元说的“紫色”、沈括说的“赤色”和“血红色”都表明当时运城盐湖卤水中已生长有众多的红色嗜盐细菌、嗜盐藻类和红色的卤水虾等生物。

2. 混浊度

盐湖卤水的混浊度随地点和时间而改变。混浊度是由藻类和悬浮的盐类矿物以及非盐类的矿物碎屑所决定的。以硫酸钠盐湖为例，当春天芒硝溶解和新孵化出的卤水虾和卤水蝇幼虫消耗藻类时，卤水的混浊度即急速下降。生活于盐湖之中的卤水虾和卤水蝇幼虫是天然的“清洁工”，它使卤水的混浊度越来越小。

3. 密度

盐湖卤水的密度是随着季节、年度和长期的湖水位升降变化而产生的反向效应。

4. 分层现象

一般盐湖中卤水被分成两个明显的层次：上部较透明、无气味，下部密度较大。例如，美国大盐湖南湾中，以水深 6.08 ~ 6.99 m 为界，分为上、下两层，上层湖水无气味且透明，下层则密度剧增且污染较重。1979 年在水深 3 m 处测得密度为 1.089 ~ 1.110 g/cm³，7.6 m 处测得密度为 1.166 ~ 1.170 g/cm³。

5. 卤水温度

卤水温度波动可导致离子饱和程度的变化，它将使卤水中盐类产生选择性的析出和溶解。卤水温度是可变化的，随昼夜和季节的变化而变化。

(1) 平均卤水温度

当卤水蒸发时，在卤水表面形成的一些晶体，一旦沉入池底，由于条件发生变化，其将会分解或溶解，而分解速率与卤水的温差和浓度变化等因素有关。实验表明，池中卤水的实际温度是气温的 0.6 ~ 0.8 倍，且在同一池中卤水的上下浓度亦各不相同，许多盐结

晶并不与其所处的卤水相平衡。因此，在预测沉积池底的盐类结晶类型时，卤水的平均温度通常是最好的判断。

(2) 卤水的昼夜温度变化周期

卤水昼夜温度变化是明显的，是有规律的。卤水昼夜温度变化直接影响到析盐情况。例如，美国大盐湖，当白日气温 35°C 时，在天然盐田条件下，有利钾盐镁矾 ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{KCl} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) 生成，而在夜晚，当温度降至 15°C 时，则有利于软钾镁矾 ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 的形成。因 SO_4^{2-} 离子对温度等敏感，故含 SO_4^{2-} 盐类能在较低温度下析出，结果在单池中同一卤水内可得到两种盐的混合物。又如，在新疆巴里坤盐湖，夏日早晨可见夜里结晶的长柱状芒硝晶体，而近中午时太阳提供的足够活化能可使数小时前才结晶的芒硝又全部溶解。

(3) 季节性温度变化

盐湖中季节性温度变化可影响盐类的沉积。比如，大盐湖于 6 ~ 8 月沉积的盐类在冬季低温和下雨时，转化成其他盐类，这些盐类有可能发生全面的化学变化。例如，钾盐镁矾可以转化为硬块状的氯化钾和泻利盐，而若与含硫酸盐的卤水接触，则能转变为软钾镁矾。与此相反，芒硝却在冬天析出，夏天重新溶解。

6. 蒸发速率

蒸发作用发生于卤水表面，盐的结晶作用也在那里进行。蒸发速率越高，卤水过饱和与成盐可能性越大。当卤水表面盐类结晶密度较大时，将沉于池底（或湖底）。

影响蒸发速率的因素有太阳的烤晒、风的吹扬，这是传统的认识。近些年来，通过对卤水嗜盐生物的研究，结果发现，红色的嗜盐菌藻类及红色的卤水虾等生物可使整个卤水染为红色，其吸收阳光，不仅使卤水温度增高，也增大了蒸发速率。

7. 卤水深度与盐类结晶粒度

盐田的深度与盐类结晶的粒度有密切的关系。例如，在盐田的结晶池中，在深度 $< 7.6\text{ cm}$ 和深度 $> 30.5\text{ cm}$ 情况下，其结晶出石盐的粒度要小于深度介于 7.6 cm 与 30.5 cm 之间结晶的石盐粒度。

二、卤水的化学性质

盐湖卤水的化学性质主要研究卤水中阳阴离子、微量离子、放射性化学成分等。

现代盐湖按照卤水的成分（湖表卤水、晶间卤水、淤泥卤水）可分为氯化物型、硫酸盐型、碳酸盐型、硝酸盐型（郑喜玉，1993）四大类。不同类型的盐湖卤水析出的盐类是不同的。

应当指出，上述谈及的盐湖卤水类型不是一成不变的，而是随着制约的条件变化而变化。例如，新疆盐湖水化学类型的演化就是一个证明。基岩山区 $\text{HCO}_3\text{-Cl-Ca} \cdot \text{Na}$ 型水，随着元素的不断溶滤迁入和吸附、交换、氧化、沉淀、析出、扩散等化学、热动力、水动力等因素的作用，过渡为 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca} \cdot \text{Mg}$ 和 $\text{SO}_4\text{-Cl-Na} \cdot \text{Mg}$ 型水，进而过渡为 $\text{SO}_4\text{-Na} \cdot \text{Mg}$ ，乃至 Cl-Na 型水（张明刚，1993）。卤水的浓度和密度由小变大，pH 值亦由弱酸性变为弱碱性。

三、日晒盐田的卤水化学

人工盐田实践表明，盐田中的化学反应受到风、雨和温度变化等自然条件的影响。影