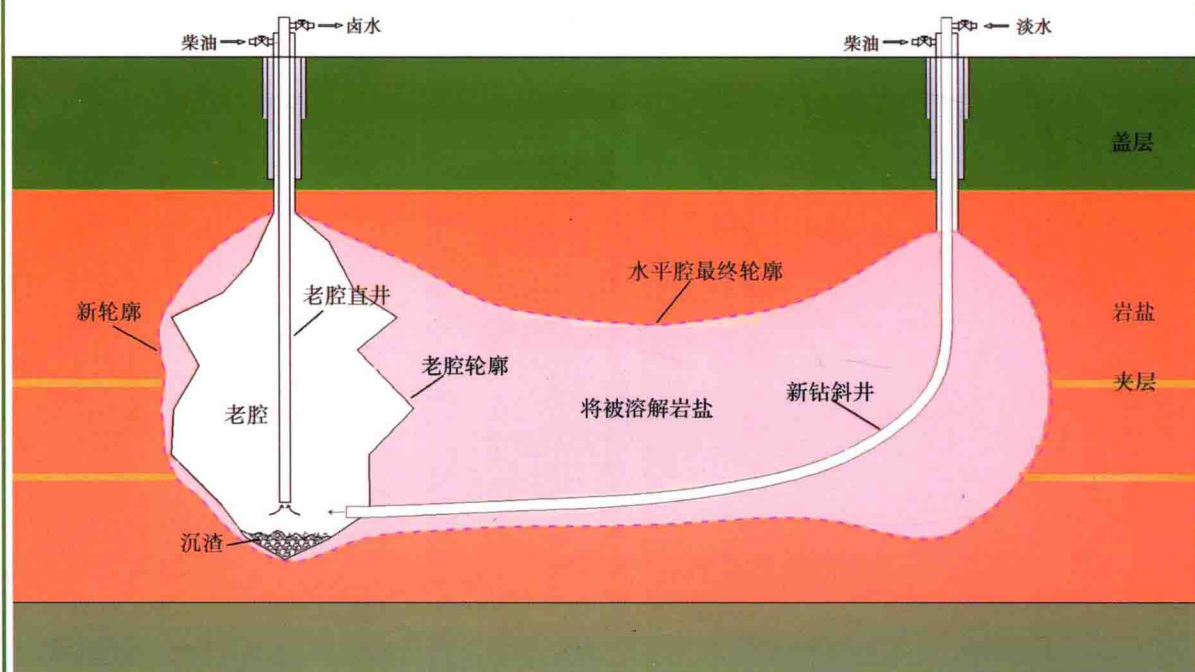


国家自然科学基金项目 (51074198; 51574048; 41672292)

层状盐岩

采卤造腔工艺模拟及仿真技术



姜德义 陈 结 杨春和 任 松 刘 伟 / 著



科学出版社

层状盐岩采卤造腔工艺模拟 及仿真技术

姜德义 陈 结 杨春和 任 松 刘 伟 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以层状盐岩采卤造腔工艺模拟及仿真技术为研究方向,主要内容有:我国盐矿物地质特征;盐岩溶解特性;造腔的理论基础及相似理论;单井水溶造腔流场相似实验研究;单井水溶造腔浓度场相似实验研究;双井水溶造腔流场和浓度场相似实验研究;大尺寸型盐材料的压制;大尺寸型盐单井水溶造腔技术;大尺寸型盐小井间距双井水溶造腔技术;大尺寸型盐水平井水溶造腔技术;天然盐岩水溶造腔腔体扩展规律;水溶造腔数值仿真。

本书可作为盐矿水溶开采及水溶性岩层造腔工艺技术方面的管理、设计、施工人员和科研人员的参考书,也可以作为高校相关专业研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

层状盐岩采卤造腔工艺模拟及仿真技术 / 姜德义等著. —北京: 科学出版社, 2017.8

ISBN 978-7-03-053824-6

I. ①层… II. ①姜… III. ①地下储气库-工程模拟②地下储气库-地下工程-计算机仿真 IV. ①TE972

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 141236 号

责任编辑: 张 展 陈 杰 / 责任校对: 彭 映

责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年8月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017年8月第一次印刷 印张: 11 1/2

字数: 275千字

定价: 89.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

由于盐岩矿床具有良好的蠕变、低渗透性(渗透率低于 10^{-20} m^2)及损伤自愈合特性,因此被公认为是能源(石油、天然气)储存和核废料地质处置的理想场所。英国石油公司(BP)2015年统计报告显示,2014年中国石油消耗量为52030万t,同比增长3.3%,占世界总消耗量的12.4%;2014年中国天然气消耗量为1855亿 m^3 ,同比增长8.6%,占世界总消耗量的5.4%。我国油气产量不足,必须大量依赖进口,然而对油气进口依赖程度越高,我国油气市场受国际环境的影响越大。因此,建立健全的战略油气储备是应对国际油价变动、政治经济不利形势、油气消费波动等问题的有力武器,尤其是对于我国这种对外油气依存度极高的国家,建立健全的油气战略储备体系更是刻不容缓。欧美发达国家均建立了较完备的国家战略油气储备体系,如美国石油战略储备超过180天,德国超过160天,日本超过150天。据国家统计局公布的数据显示,中国石油储备一期工程包括舟山、镇海、大连和黄岛等四个石油储备基地,总储备库容为1640万 m^3 ,储备原油1243万t,但这四个储备基地的石油储备量只相当于大约9天的消耗量,远低于国际能源机构(International Energy Agency, IEA)建议的90天的进口量。国外机构估计,中国若想储备相当于90天进口量的原油,将需要5.4亿~6亿桶原油的战略石油储备。

我国的地下盐岩资源丰富,分布范围广,埋深从数十米到4000m不等,具有建设地下储库的地质条件基础,在华东地区如苏北、苏南、山东等地均有大型盐岩矿层,为我国的西气东输工程提供建造储气库的地质条件。而在人口较为稀少的西北、西南地区,如新疆和云南部分地区也发现有大型盐岩层,这些盐岩层可为核废料地下处置库的建造提供候选场址。在建的江苏金坛储气库是我国乃至亚洲第一座盐穴储气库,目前已有15口井投入使用,对华东地区的供气调峰正发挥关键作用。同时,在湖北应城和潜江、江苏淮安、河南平顶山等地也正在开展盐穴储备库的规划和先导工作。

但我国盐层地质条件与国外又有所不同,根据我国盐岩矿床分布及地质资料分析可知,盐岩矿床有矿体厚度薄(60~100m)、泥质夹层多的特点,与国外普遍利用深部盐丘作油气储库和核废料的处置场所有很大的不同,夹层的存在势必对储气库的围岩稳定性及渗透特性产生显著的影响,使溶腔的建造过程和运行的稳定性方面有很大的不同,同时建造的难度和复杂程度也将有所增大。目前,国外的研究主要集中于盐丘中储气库的形状控制、腔体稳定及渗透特性的研究,很少考虑到多夹层对盐岩采卤造腔的影响,无论在理论上还是应用方法上均很难直接应用于我国能源储存的工程实践,同时我国层状盐岩储气库的建设中许多关键性的问题尚未得到解决,严重影响我国储气库的开发建设。因此,针对我国层状盐岩采卤造腔的工艺模拟和仿真技术的研究势在必行,开展层状盐岩采卤造腔的理论与模拟研究,对完成我国下一步能源储备战略计划具有十分重要的

意义。

本书是在国家重大基础研究“973 计划”、国家自然科学基金项目（51074198；51304256；51574048；41672292；51604044）、中国博士后科学基金（2015M582520，2015T80857）等联合资助下完成的，在此对以上资助单位表示诚挚的谢意！

本书凝聚了重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室盐岩组易亮博士、张军伟博士、邱华富博士等，以及研究生唐康、李晓军、李晓康、康燕飞、张治鑫等的辛勤劳动。

衷心感谢鲜学福院士对项目研究的关怀和指导，在研究中得到了中国科学院武汉岩土力学研究所李银平研究员、马洪岭、施锡林，以及中国石油江苏油田分公司唐海军、徐卫华高级工程师等的指导和帮助，感谢其他为本项目完成以及著作出版提供支持的专家和朋友！

由于作者水平有限，不妥之处在所难免，敬请各位读者批评指正！

目 录

第 1 章 我国盐矿物理地质特征	1
1.1 盐岩的物理性质	1
1.2 中国盐矿分布规律	2
1.3 盐岩矿床成因及沉积类型	3
1.4 我国典型盐矿特征分析	4
1.4.1 江苏金坛盐矿	4
1.4.2 江苏赵集盐矿	5
1.4.3 湖北云应盐矿	7
1.4.4 湖北潜江盐矿	8
1.4.5 河南叶舞盐矿	9
第 2 章 盐岩溶解特性实验研究	12
2.1 盐岩溶解特性研究进展	12
2.2 盐岩溶解特性的基本影响因素概述	13
2.2.1 盐岩溶解特性的内部因素	13
2.2.2 盐岩溶解特性的外部因素	13
2.3 无应力状态下的溶解特性	14
2.3.1 盐岩试件的取样和加工	14
2.3.2 实验方案	15
2.3.3 实验结果分析	16
2.4 三轴应力条件下的盐岩溶解特性	19
2.4.1 盐岩试件的准备	19
2.4.2 实验设备	20
2.4.3 盐岩试样溶解面应力分布规律	21
2.4.4 实验方法	22
2.4.5 实验结果分析	23
2.5 卸荷条件下流量对盐岩溶解的影响	24
2.5.1 实验方法	24
2.5.2 实验结果	25
2.5.3 盐岩有效溶解面积模型	29
第 3 章 盐岩水溶造腔理论基础及相似理论	32
3.1 盐岩水溶造腔技术研究进展	32
3.1.1 单井油垫法水溶造腔技术	32
3.1.2 双井水溶造腔及其他造腔技术	33

3.2 盐岩水溶造腔理论基础	34
3.2.1 盐岩的溶解	34
3.2.2 溶蚀边界层	34
3.2.3 对流扩散	35
3.2.4 盐岩溶蚀模型	36
3.3 盐岩水溶造腔相似理论基础	38
3.3.1 相似理论的相关概念	38
3.3.2 相似三大定理	39
第4章 单井水溶造腔流场相似实验研究	41
4.1 流场相似理论分析	41
4.2 流场相似模型实验平台的搭建	42
4.3 流场相似模型实验的设计	43
4.4 实验结果分析	46
4.4.1 注水速度对流场的影响	46
4.4.2 套管间距对流场的影响	47
4.4.3 夹层对流场的影响	49
4.4.4 盐岩储气库建造期流场分布规律	51
第5章 单井水溶造腔浓度场相似实验研究	53
5.1 浓度场相似理论分析	53
5.2 相似实验平台的搭建	54
5.3 浓度场相似模型实验	55
5.4 实验结果分析	55
5.4.1 注水流量对盐岩造腔浓度场的影响研究	55
5.4.2 套管间距对盐岩造腔浓度场的影响研究	57
5.4.3 循环方式对盐岩造腔浓度场的影响研究	58
5.4.4 夹层对盐岩造腔浓度场的影响研究	58
5.5 浓度场分布规律分析	62
5.5.1 腔体浓度分布	62
5.5.2 腔体竖直方向上浓度梯度分析	63
第6章 双井水溶造腔流场和浓度场相似实验研究	67
6.1 相似理论分析	67
6.2 实验平台的搭建	68
6.3 水平溶腔流场分布规律及演化特征	69
6.3.1 羽流区流场特征及积分模型	70
6.3.2 边界层流场特征	71
6.3.3 射流区流动特征	73
6.3.4 底部区特征	74
6.3.5 实验结论	75
6.4 溶腔浓度特征	75

6.5	多因素条件下流场变化特征	76
6.5.1	不同造腔阶段溶腔流场运移特征	76
6.5.2	不同井组溶腔流场变化特征	80
第7章	大尺寸型盐材料的压制	83
7.1	型盐材料的性质实验研究	83
7.1.1	型盐材料的相似模型研究	83
7.1.2	型盐材料的压制方法	84
7.1.3	型盐的力学实验研究	86
7.1.4	型盐溶解特性实验研究	90
7.2	大尺寸型盐的制备	92
7.2.1	无夹层大尺寸型盐的制备	92
7.2.2	含夹层大尺寸型盐的制备	94
第8章	大尺寸型盐单井水溶造腔技术	96
8.1	单井油垫法水溶造腔的技术特点	96
8.1.1	单井油垫法工艺流程	96
8.1.2	油垫井的管串组合	96
8.1.3	单井油垫法水溶造腔的基本过程	97
8.2	单井无夹层型盐水溶造腔模型实验	98
8.2.1	实验的平台	98
8.2.2	实验参数	99
8.2.3	实验结果分析	100
8.3	单井含夹层型盐水溶造腔模型实验	103
8.3.1	实验参数	103
8.3.2	实验结果分析	104
第9章	大尺寸型盐小井间距双井水溶造腔技术	107
9.1	型盐试件的制备	107
9.2	实验的平台	107
9.3	实验参数	108
9.4	实验结果分析	111
9.4.1	排卤口卤水浓度变化规律	111
9.4.2	腔体体积分析	112
9.4.3	腔体形状	114
9.5	单井及小井间距双井水溶造腔模型实验的对比	117
第10章	大尺寸型盐水平井水溶造腔技术	120
10.1	实验条件及方法	120
10.1.1	盐岩试件	120
10.1.2	实验装置	120
10.1.3	实验步骤	121
10.1.4	相似比的建立	121

10.1.5 实验参数	122
10.2 实验结果分析	123
10.2.1 排卤口卤水浓度的变化规律	123
10.2.2 溶腔体积扩展分析	124
10.2.3 溶腔轮廓扩展分析	125
第 11 章 天然盐岩水溶造腔腔体扩展规律	128
11.1 实验条件及方法	128
11.1.1 盐岩试件	128
11.1.2 实验装置	129
11.1.3 实验步骤	129
11.1.4 相似比的建立	130
11.1.5 实验参数	131
11.2 注水流量对腔体扩展的影响研究	132
11.2.1 排卤口卤水浓度的变化规律	132
11.2.2 溶腔体积扩展分析	133
11.2.3 溶腔轮廓扩展分析	134
11.2.4 腔体立体形状分析	138
11.3 井间距对腔体扩展的影响研究	139
11.3.1 排卤口卤水浓度的变化规律	139
11.3.2 溶腔体积扩展分析	140
11.3.3 溶腔轮廓扩展分析	141
11.3.4 溶腔立体形状分析	144
11.4 提管方式对腔体扩展的影响研究	144
11.4.1 排卤口卤水浓度的变化规律	144
11.4.2 腔体扩展分析	146
11.4.3 溶腔立体形状分析	150
11.4.4 单双井水溶造腔腔体扩展的对比	150
第 12 章 水溶造腔数值仿真	153
12.1 单井油垫法水溶造腔数值仿真软件	153
12.2 软件的基本原理	153
12.2.1 数学模型方程组	153
12.2.2 夹层力学模型及垮塌判据	154
12.3 软件操作简介	155
12.4 数值仿真结果分析	156
12.4.1 不同提管方式下的水溶造腔规律	156
12.4.2 不同注水流量下的水溶造腔规律	161
12.4.3 夹层对腔体形状的影响	163
参考文献	170

第 1 章 我国盐矿物理地质特征

1.1 盐岩的物理性质

盐岩主要矿物为“盐岩”，化学式为 NaCl ，理论含量： Na^+ 为 39.34%、 Cl^- 为 60.66%，常含有卤水、气泡、泥质和有机质等包裹体(杨春和等，2009；沈洵等，2015)。表面呈玻璃光泽，风化表面或潮解后呈油性光泽，贝壳状断口，性脆，盐岩硬度为 2~2.6，密度为 $2.1\sim 2.2\text{g}/\text{cm}^3$ ，熔点为 800.8°C ，沸点为 1465°C 。

盐岩单晶体为等轴晶系，常呈立方体，在立方体晶面上常有阶梯状凹陷(图 1.1)，集合体一般为粒状、致密块状，有时呈柱状、纤维状、毛发状、盐华状等；无色透明或白色，含泥质时呈灰色，含氢氧化铁时呈黄色，含氧化铁时呈红色，含有机质呈黑褐色(李银平等，2012)。

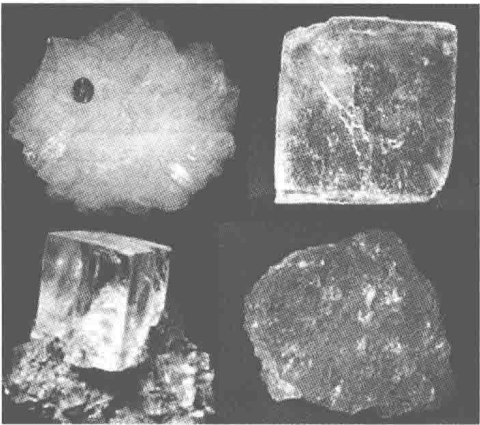


图 1.1 盐岩晶体

盐溶于极性溶液，不溶于非极性溶液。盐在水和其他溶剂中的溶解度见表 1.1。

表 1.1 盐的溶解度(王春荣，2012)

溶剂	温度/ $^\circ\text{C}$	溶解度	溶剂	温度/ $^\circ\text{C}$	溶解度	溶剂	温度/ $^\circ\text{C}$	溶解度
甲醇	25	1.4	水	0	35.7	水	50	37
乙醇	25	0.065		10	35.8		60	37.3
甲酸	25	5.21		20	36		70	37.8
乙二醇	25	7.15		25	36.12		80	38.4
液氨	-40	2.15		30	36.3		90	39
单乙醇氨	25	1.86		40	36.6		100	39.8

1.2 中国盐矿分布规律

我国盐矿资源基本分为在东部海盐、西部湖盐、中部井矿盐(周桓, 2008; 聂百洲, 2012)。全国的盐矿分布如图 1.2 所示。

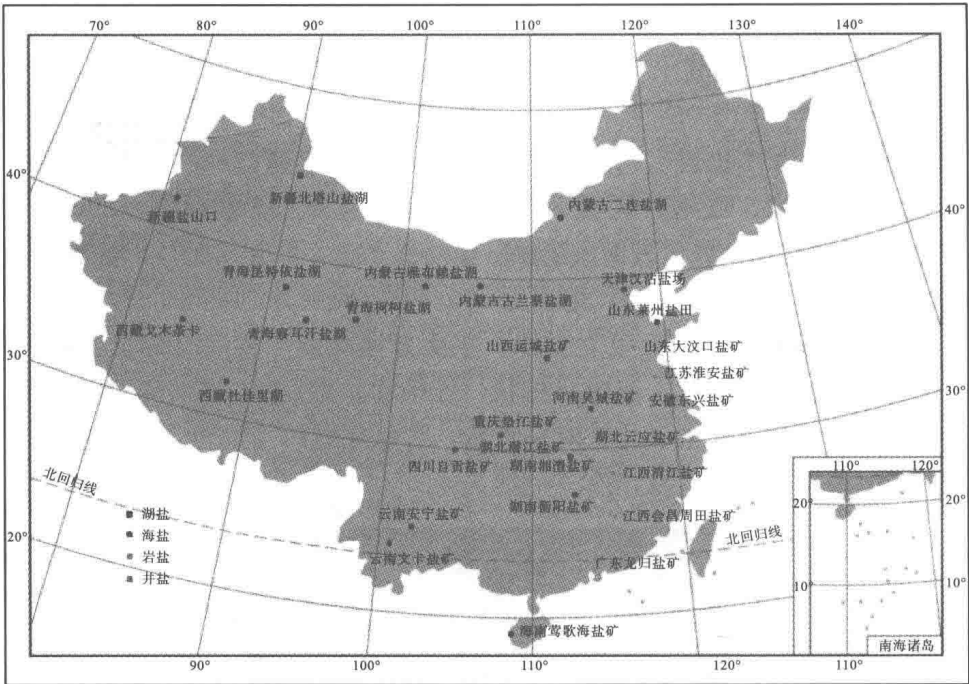


图 1.2 我国主要盐矿分布示意图(陈结, 2012a; 朱训, 1999)

按照省份划分,我国井矿盐分布范围(黄孟云等, 2014; 刘凤梅等, 2006)如下。

江西省:我国井矿盐产区之一。盐岩矿床有产于古近系的清江盐矿和产于上白垩统的会昌县周田盐矿等。

江苏省:井矿盐产于古近系的盐矿矿床有金坛市直溪桥盐矿、淮阴区高堰盐矿、丰县盐矿,产于白垩系的盐岩矿床有淮安盐矿。

河南省:我国井矿盐产区之一,有产于古近系的桐柏县吴城盐碱矿、叶县盐矿、并在濮城,在文留一带发现古近系特大型盐岩矿床——濮阳盐矿。

湖北省:我国井矿盐主要产区之一。盐矿资源极为丰富。在云梦县、应城市、天门市和潜江市分布有古近系的特大型盐岩矿床和地下卤水矿床,如云应盐矿。盐岩矿床还有产于白垩系的枣阳市王城盐矿,产于三叠系的利川市建南盐矿等。

湖南省:我国井矿盐产区之一,有产于古近系的衡阳盐矿和澧县盐矿。

四川省及重庆市:我国井矿盐主要产区之一。井盐生产历史悠久,其主要产盐地——自贡市素有“盐都”之称。四川省蕴藏着极其丰富的盐矿资源。

云南省:我国井矿盐产区之一。滇中、滇西、滇南均有赋存于古近系的盐岩矿床,如宁洱哈尼族彝族自治县磨黑盐矿、禄丰县元永井盐矿、江城哈尼族彝族自治县勐野井

钾盐岩—盐岩矿床等。

1.3 盐岩矿床成因及沉积类型

1. 盐岩矿床成因

盐岩矿床成因主要分为陆相成因和海相成因，包括沙洲说(1855~1970年)，沙漠盆地(1894~1924年)、分离盆地(1915~1955年)、回流说(1947~1965年)、深水蒸发岩沉积(1855~1969年)、盐沼和“萨布哈”说(1955~1971年)、干化深盆地(1972年)等。

(1)沙洲说：处于半封闭的潟湖、海湾盆地与大洋之间有沙洲(或生物礁、构造)隔开，中间仅有狭窄通道使海水得以经常流入。这种潟湖、海湾盆地，可以是一个，也可以有若干个次一级的小盆地。在干旱气候条件下，当潟湖中的水分被蒸发浓缩，其含盐量不断增高，当其达到饱和时，盐类矿物开始按溶解度的大小顺序依次沉积，形成各类盐类矿床。其示意图见图1.3。

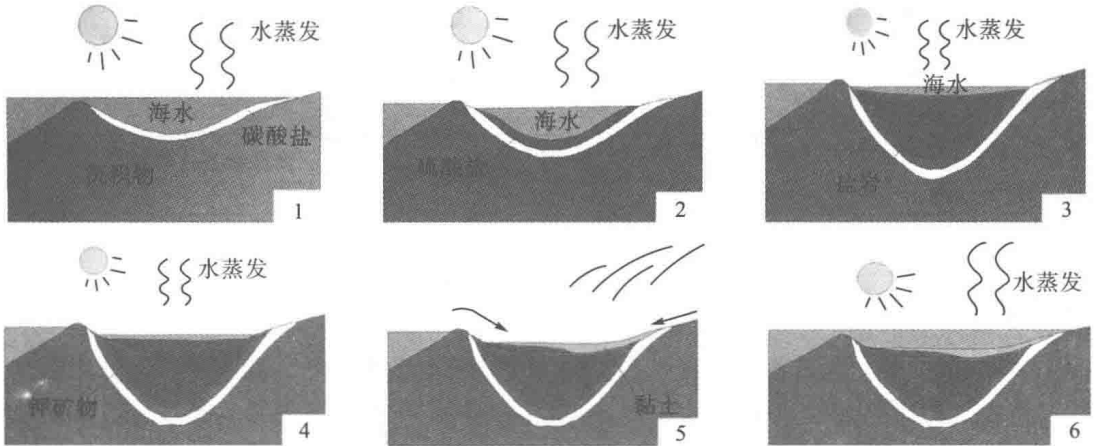


图 1.3 盐类矿物沉积示意图(翟裕生等, 2011)

(2)沙漠盆地：巨大的盐类矿床只有在成为闭流盆地的大陆才能形成。在这些地区，含有分散状盐类的岩石，因风化和淋滤作用，其盐类物质被地下水和地表水流带入闭流盆地，在炎热的沙漠性干旱气候条件下蒸发浓缩，沉积为巨厚的盐类矿床。

(3)盐沼和“萨布哈”说：根据对阿拉伯海至波斯湾之间一些海滩上盐的沉积的研究结果，认为：在离海岸有相当距离、地形相对较高海滩上，海水涨潮时可以浸入，落潮时留下一些，经长期蒸发、沉积成盐。我国柴达木盆地达布逊湖现代光卤石的沉积，一些学者认为就是“萨布哈”理论的例证。

(4)干化深盆地：巨大的盐类矿床可在巨型深盆地中沉积，由于盆地与大洋水有时隔绝，处于封闭状态，通过干涸作用，盐类矿物依次沉积：碳酸盐及硫酸盐沿着盆地边缘的大陆架和大陆斜坡逐步沉积下来；卤水因相对密度大而流入底部低于海平面数千米的深海盆地，形成巨厚的盐岩和钾盐。

2. 盐岩矿床沉积类型

盐类矿床沉积类型可划分为两个含盐建造，6 个矿床类型，10 个矿石组合分类，见表 1.2。

表 1.2 我国盐类矿床沉积类型表

含盐建造	矿床类型	矿石组分分类	矿床实例
海相含盐建造	海湾凹陷盆地	盐岩岩类	四川长宁盐矿
	浅海—潮坪潟湖盐类	盐岩岩类、杂卤石—盐岩岩类	石盐矿床—威西盐矿；杂卤石—盐岩矿床；川中盐矿
	滨海潟湖盐盆	含泥灰质盐岩岩类	新疆库车拗陷含盐带
陆相含盐建造	山前凹陷盐盆	钙芒硝，钾芒硝—盐岩岩类	湖北云应盐矿；潜江盐矿
		钙芒硝盐类	四川眉山市大洪山矿区
	山间断陷盐盆	钙芒硝（无水芒硝）—盐岩岩类	湖南衡阳盐矿；广东龙归盐矿
		盐岩—天然碱岩类	河南桐柏吴城盐岩—天然碱矿
		自然硫—盐岩岩类	山东泰安县大坟口盐矿
	干盐湖再沉积盐凹	泥砾质盐岩及泥砾质钙芒硝—盐岩岩类	云南磨黑盐矿；元永井盐矿
		泥砾质盐岩—钾盐岩类	云南江城县；勐野井盐岩—钾盐矿床

1.4 我国典型盐矿特征分析

1.4.1 江苏金坛盐矿

1. 自然地理现状

金坛盐矿位于西气东输管线附近，长江三角洲苏南地区金坛、丹徒、丹阳、句容四县市的结合部，交通以公路为主，地势平坦。该区高压线路及变电所设施建设良好，采输卤设有专线，西南有丰富的石灰石和建材材料，已采卤 14 年，采盐井 40 多口。

2. 构造与地层

金坛盐盆位于扬子江地带的东北部，是一个走向北东、倾向北西的新生代盆地，为苏南隆起区中的次一级构造单元，而茅兴矿段赋存在金坛盐盆西侧的直溪桥凹陷的西南部。

根据钻井、地震剖面资料解释，凹陷内含盐层系地质构造相对简单，呈北东向“一拱两洼”的构造格局，见西庄、直溪桥、鲍塘和观西—大树下四条断裂以及直溪桥断裂北段所派生的三条小断裂。区内断层一般，主体部位未见断层。

据茅资 1 井地层岩性结构(表 1.3)显示，该区揭露地层有第四系东台组、古近系三垛组、戴南组、阜宁组四段。该区为同一聚盐期内沉积的一套浅湖、潟湖相蒸发成盐建造。

表 1.3 茅资 1 井地层岩性结构(韩琳琳等, 2010; 常小娜, 2014)

地层				井深/m		视厚度/m	岩性综述	
界	系	组	段					
新生界	第四系	东台组		17.0	17.0	灰黄色砂质黏土层、泥岩、浅灰色砂砾岩		
	古近系	三垛组	二段	371.5	354.5	上部：浅灰色含砾不等粒砂岩、不等粒砂岩夹棕色泥岩； 中部：浅灰色粉砂岩、泥质粉砂岩与棕色泥岩、砂质泥岩不等厚互层； 下部：棕色泥岩、砂质泥岩		
			一段	566.5	195.0	上部：灰黑色玄武岩、杂色凝灰岩夹灰色变质泥岩； 中部：灰绿色泥岩夹灰质泥岩； 下部：灰黑色泥岩、深灰色、灰色灰质泥岩；底部夹二层泥质粉砂岩		
		戴南组	二段	757.0	190.5	浅灰色泥质粉砂岩与深灰色泥岩、灰色泥岩、砂质泥岩、灰色、深灰色灰质泥岩互层		
			一段	832.5	75.5	灰色灰质泥岩、砂质泥岩、泥岩、白云质泥岩		
		阜宁组	阜四段	盐顶	860.0	27.5	灰色含膏泥岩、灰色白云质泥岩、灰色泥岩、暗棕色泥岩	
				盐层	1055.0	195.0	灰色泥质盐岩、含硝盐岩、含硝泥质盐岩、含无水芒硝盐岩夹灰绿色泥岩、含硝泥岩、灰色岩质泥岩、泥岩、暗棕色泥岩薄层	
				盐底	1110.0	55.0	灰色泥岩夹暗棕色泥岩	

3. 基本地质特征

金坛盐岩资源丰富, 含盐地层面积约为 60.5km², 盐岩储量达 162.42×10⁸ t, NaCl 储量 125.38×10⁸t。该盐矿含盐系赋存在 E₁f⁴ 地层中, 属古近纪始新世中、晚期沉积, 上部含盐系地层由上而下可分为三层。

盐上含膏泥岩层: 灰色泥岩夹绿灰色泥岩, 含钙芒硝和硬石膏。上部所见的硬石膏、钙芒硝系裂隙充填物, 而下部以星点状散布为主, 厚 6~20m 不等。

盐岩层: 以含泥盐岩和灰色盐岩为主, 夹含钙芒硝泥岩、白云质泥岩、含白云质泥岩等岩石, 含盐率为 84%~95%, 矿石品位高达 85%。厚 153.50~198.99m, 顶板埋深在 888.6~1236.4m。

盐下含膏泥岩层: 一套含钙芒硝、硬石膏的泥岩及泥灰岩, 厚 11.30~16.70m。夹层岩性主要为含膏泥岩、白云质泥岩、含硝泥岩、盐质泥岩、泥岩等, 一般厚 1.5~2.5m。

金坛盐矿的直接顶板为阜宁组四段顶部—戴南组下段的地层, 埋深在 800~1140m, 顶板厚 96~150m。岩性为含钙芒硝泥岩、云灰质泥岩及膏泥岩等, 岩性坚硬。

1.4.2 江苏赵集盐矿

1. 自然地理现状

赵集盐矿位于淮安市淮阴区赵集镇境内, 在距市区 30km 处, 三面为湖水环绕, 水

陆交通便利，全区地形平坦，区内人工河渠众多，与张福河和洪泽湖相通。该区气候宜人，电力通信等设施配套齐全，劳动力丰富，有利于矿产资源的规模开发。目前盐矿开采状况良好，有 14 家盐岩、无水芒硝企业在此开发，盐类资源的开发利用已经成为当地的支柱产业，形成的盐腔稳定，卤水消化能力较强。

2. 构造与地层

赵集盐矿位于苏北盆地洪泽凹陷的东北部——赵集次凹。在盐岩形成期，赵集次凹处于四面环山的“高山深盆”环境(舒福明，2004)。洪泽凹陷夹持于鲁苏隆起和建湖隆起之间，南与建湖和张八岭隆起相接，受控于北缘邓码断裂；东与淮安凸起相邻，受控于杨庄—倪湖庄断裂，并由该断裂相接于淮安中断陷；西南相望于管镇次凹隔湖；西北与鲁苏隆起超覆过渡。

地震勘探和钻井资料表明：赵集次凹由北向南倾伏，为一典型的南断北超箕状断陷盆地，构造形态大致呈北东突出的扇形，倾向南东，据基底起伏、沉积和断裂特征，该次凹分为 3 个次凹，由南东向北西依次为断阶带、深凹带和斜坡带。位于断阶带内侧的深凹带，是赵集次凹的沉积中心，沉积了厚约 4500m 的古近系地层，是盐沉积的良好场所。斜坡带的岩性岩相则发生急剧变化，主要为石膏碎屑岩相沉积。

赵集次凹内部构造较简单，断层不发育，凹陷边部见南北和北东向的边界断层，斜坡带内发育的一条次一级断层与走向斜交(吴颖等，2012)。

地表为第四纪地层所覆盖，区域地质资料表明，该盆地从白垩系开始接受沉积，古近系和新近系为盆地盐类的主要沉积发育期，是一套陆相碎屑岩型蒸发岩沉积岩系。

3. 基本地质特征

截至 2011 年底，在研究区约 25km² 范围内探明盐岩资源储量 1350×10⁸t(不包括洪泽湖底)，远景资源量可达 2.8×10¹¹t、探明淮阴区赵集镇庆丰段西矿段为一大型盐岩芒硝矿床，在 3.113km² 共获得盐岩矿石量 11.77×10⁸t，NaCl 储量 8.6×10⁸t。

含盐系赋存于古近系阜宁组四段(E₁^f)，根据含盐系特征，E₁^f 可进一步划分为五个岩性亚段：盐下膏盐亚段、下盐亚段、中部淡化段、上盐亚段和盐上膏盐亚段(郑开富等，2012)(表 1.4)。

表 1.4 洪泽凹陷赵集次凹 E₁^f 含盐系特征表

组	段	亚段	厚度/m	岩性简述
阜宁组 (E ₁ ^f)	四段 (E ₁ ^f)	盐上膏盐亚段	3.56~10.50	以灰、灰黑色硬石膏岩、泥质硬石膏岩为主
		上盐亚段	60.00~150.00	以灰白色石盐岩为主，夹硬石膏岩及钙芒硝岩
		中部淡化段	71.50~115.00	岩性以钙质泥岩、泥岩为主
		下盐亚段	12.80~104.72	为石盐岩、硬石膏岩及钙芒硝岩等，其上部以无水芒硝岩、石盐岩、钙芒硝岩为主夹泥岩
		盐下膏盐亚段	>322.00	为硬石膏岩与泥岩互层，灰色泥岩、白云质泥岩夹碳酸盐岩

下盐亚段和上盐亚段为主要的盐类矿层富集矿段。上盐亚段顶板埋深 1350~2010m, 盐矿体的直接顶板为阜宁组四段顶部岩层, 厚度 4.0~50m。底板埋深 1450~2176m, 为阜宁组四段上盐亚段与下盐亚段之间的淡化层, 厚度 45~82m。矿层顶底板岩性致密, 裂隙不发达, 隔水性好, 是良好的封盖层。含盐层沉积构造稳定, 岩性变化小, 厚 118.60~142.94m, 盐岩厚度达 103.60~130.33m, 是盐岩矿体的主要勘探开发层段。夹石为 0.2~1.8m 的灰色钙芒硝质泥岩、石膏质泥岩和泥岩。下盐亚段以棕黄—灰黄色无水芒硝岩、灰色盐岩和深灰色含膏泥岩为主, 是勘探、开发无水芒硝矿层的主要目的层, 具有埋深增大、厚度变薄、品位降低的变化趋势(漆智先等, 2003a)。

上盐亚段的含盐率为 87.4%~91.18%, 岩性为灰色盐岩夹薄层棕灰色砂质泥岩和钙芒硝岩, 底部边缘见少量无水芒硝岩, 主要为由盐岩、钙芒硝、无水芒硝等。另见少量杂质黏土矿物、方解石和白云石。品位平均 74.2%, 伴生 Na_2SO_4 含量一般小于 5%。上盐亚段是勘探、开发石盐矿层的主要目的层, 顶板埋藏深度为 1400~2100m。

1.4.3 湖北云应盐矿

1. 自然地理现状

云应盐矿位于湖北云梦县和应城市境内, 江汉平原北部。汉—丹铁路经由矿区内的隔蒲站向西 240km 至襄阳市, 与焦—柳铁路相接, 向东 80km 到达武汉市, 距西气东输二线经过的湖北武穴约 220km, 交通便利。

该区盐矿资源开发始于 20 世纪 50 年代, 截至 2004 年, 已有 8 家制盐企业、1 家盐化企业, 目前制盐企业、盐化企业各自建有采卤矿区(2004 年, 主要是盐盆边部矿区的开发, 中心部位尚未勘探), 为大型的盐及盐化工基地。

2. 构造与地层

云应盐盆位于江汉盆地中的云应凹陷南部, 是一个 NWW-SEE 向的似纺锤状对称盆地。

物探及实钻资料均表明, 矿区地质构造条件简单, 被 NEE 向的应城—郎君桥断裂划分为南北两区, 控制着盐类的沉积, 另在盆地边缘发育有五条继承性基底断裂。总的来说, 区内构造简单, 褶皱、断裂和裂隙均不发育, 仅局部地段见一些小断层发育。

盆地内沉积了巨厚的古近系云应群碎屑岩—含盐岩—碳酸盐岩, 盆地基底为白垩系, 为第四系地层所覆盖。经地质勘探钻孔揭露云应盐矿地层由上至下分别为: 第四系、古近系云应群文峰塔组、古近系云应群膏盐组。

3. 基本地质特征

云应盆地是我国著名的产膏盐盆地, 盐岩层分布面积约为 260km^2 , 边缘盐层埋藏浅, 厚度薄。受断裂构造影响, 盆中的可采盐层面积仅 125km^2 , 已探明(含已被矿山占用)的面积约 40km^2 , 被建筑物及重要公路、铁路、河流覆盖面积约 45km^2 , 尚未探明其资源量面积约 40km^2 。预计地质储量 $3.6 \times 10^{11}\text{t}$, 其中孝感矿区盐矿总储量达 $2.8 \times 10^{10}\text{t}$ 。

在该区探明并开发的有应城、省化工一号井田、省化工一号采区、长江填井田与隔蒲井田等 5 个盐岩矿床。

云应盐矿赋存于古近系云应膏盐组三段，由上至下为：①上硬石膏段：岩性为硬石膏泥岩、泥质粉砂岩、泥质硬石膏岩夹泥质粉砂岩，厚 28~129m；②上钙芒硝段：岩性为泥质钙芒硝岩，钙芒硝质泥岩、硬石膏泥岩夹粉砂质泥岩、泥质粉砂岩等，由北向南加厚，厚度 7~81m；③盐岩段：由不等厚的盐岩、泥质钙芒硝、泥质硬石膏岩和泥岩、粉砂质泥岩互层组成，该段盐岩密集成群。

盐岩段为盐岩发育的主要目的层，该层段由含盐的盐群和非盐的间隔夹层交替互层产出。相邻盐群间的岩层即为非盐间隔层。盐群主要由硬盐岩、石膏、钙芒硝互层构成。

钻井揭开的膏盐组盐岩段盐层共划分出 89 个盐群，每个盐群有 1~27 层盐，各盐群厚度为 0.38~14.67m，一般为 2~7m；各盐群的盐岩层累计厚度为 0.3~8.79m，一般为 1~5.5m，含矿率 33%~91%，一般为 41%~75%；各盐群间距一般为 2~3m，最大 32.42m，最小 0.49m。盐岩矿体呈薄层状、似层状和透镜状产出。

矿体平均埋深 300~850m，主体矿埋深一般在 150~400m。矿床的直接顶板为相对隔水层，水文地质条件较简单(王必金，2006)。矿石矿物主要为盐岩，其次为硬石膏、钙芒硝和黏土矿物。主要有两种矿石类型：①钙芒硝—盐岩矿石，分布较普遍，NaCl 含量 30%~90%；②硬石膏—盐岩矿石。

1.4.4 湖北潜江盐矿

1. 自然地理现状

潜江市位于江汉平原腹地，是古云梦泽的一部分，位于长江中游，长湖、泄洪道、田关河横穿东西，长江的最大支流——汉江以及它的分洪道——东荆河纵贯南北。境内地势平坦，土壤肥沃，雨量充沛，气候温和。318 国道、汉宜高速公路横穿东西，襄—岳公路纵贯南北，交通便利。该区盐矿的开采主要是采用油盐兼探综合采矿方法与技术。另外，该区有丰富的石油、天然气等能源资源，著名的江汉油田分公司总部就在潜江市。

2. 构造与地层

位于潜江凹陷王场背斜翼部与黄场鼻状斜坡带之间的黄场盐矿，盐构造发育状况继承了王场背斜，倾角约 15°，倾向 SWW，西面为王场背斜和黄场鼻状斜坡带的交接处，地层平缓。王场背斜东北边的王场向斜、西南边的蚌湖向斜和周巩向斜，是江汉盆地潜江组的三个成盐中心，王场背斜位于三个向斜间的洼中隆起，是潜江组含盐系最发育的地区。在潜四段盐体的底辟作用下，潜二段盐体在沉积时，王场背斜基本上表现为水下隆起，而位于王场背斜翼部的黄场盐矿就表现为轴薄翼厚。

潜江凹陷潜江组盐体沉积主要受构造演化、水体盐度、物源供给以及气候条件等共同影响，发育了一套含盐韵律与砂泥岩交互沉积地层，为一套盐岩与盐间非砂岩的陆相盐湖沉积物(漆智先等，2003b)。