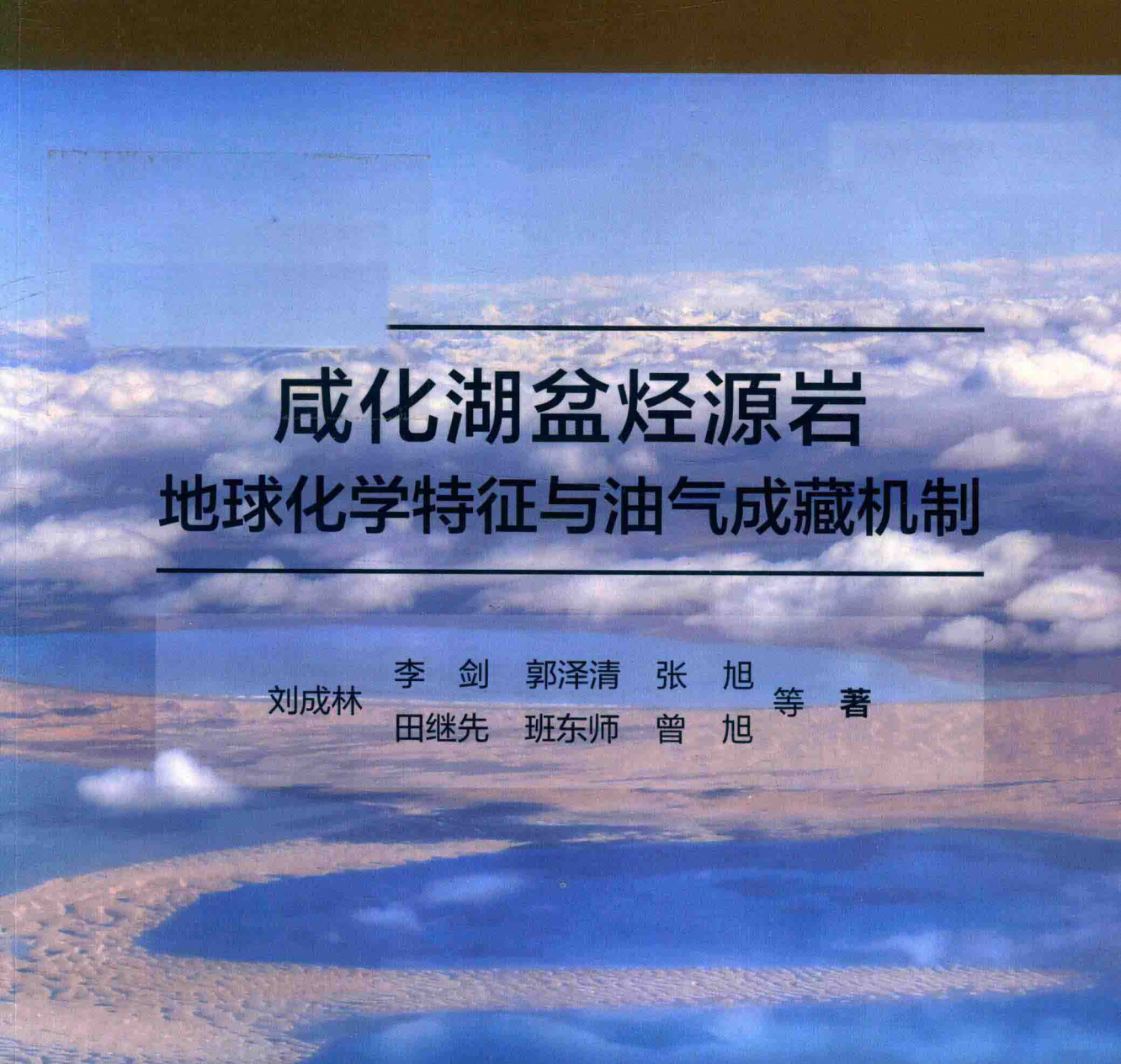




咸化湖盆烃源岩 地球化学特征与油气成藏机制

刘成林 李 剑 郭泽清 张 旭 等 著
田继先 班东师 曾 旭



科学出版社

国家自然科学基金项目 (41272159, 41572099)

中国石油天然气股份有限公司重大科技专项 (2011E-03)

资助

咸化湖盆烃源岩地球化学特征 与油气成藏机制

刘成林 李 剑 郭泽清 张 旭 等 著
田继先 班东师 曾 旭



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统总结了国内外典型咸化湖盆基本特征及油气地质条件,以柴达木盆地西部地区咸化湖盆为研究对象,分析了其古近系-新近系烃源岩有机地球化学特征、烃源岩生烃机理、细粒沉积岩储层特征、地层压力特征、油气成藏模式、天然气地球化学特征及来源,反映陆相咸化湖盆油气成藏地质研究的最新进展,是开展油气地质研究的重要参考。

本书理论与实践相结合,既可供从事油气勘探开发的科研人员阅读,也可供石油院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

咸化湖盆烃源岩地球化学特征与油气成藏机制 / 刘成林等著. —北京: 科学出版社, 2018. 11

ISBN 978-7-03-059159-3

I. ①咸… II. ①刘… III. ①湖盆-烃源岩-地球化学-特征-研究②湖盆-烃源岩-油气藏形成-研究 IV. ①P59②P618. 130. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 242766 号

责任编辑: 焦 健 姜德君 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 北京图阅盛世

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>

北京九州迅驰传媒文化有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 11 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 11 月第一次印刷 印张: 17

字数: 380 000

定价: 148.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

主要编写人员

刘成林	李 剑	郭泽清	张 旭	田继先	班东师
曾 旭	刘 军	徐思渊	张 林	李浩涵	平英奇
洪唯宇	李 培	彭 博	郑是竞	张 瑄	曹 军
梁德秀	刘文平	张 英	李志生	李潍莲	李宗星
杨元元	孙明亮	孔 骅	袁嘉音	王 利	耿志强
朱 杰	童 超	顿 超	王志强	徐 韵	张 禹
黎 彬	杨 赛	张 迈	龚宏伟	柳永军	张 蔚
任浩林	杨晟颢	杨熙雅	冯德浩	张 鸿	张智辉
吴林强	汪紫菱	曾庆猛	徐 最	张 谦	温银宇
张利红	李 明	李 冰	周 刚	王少清	刘 鹏
王盛亮	代 昆	郑 策	徐丽丽	赵 伟	周 利

序 一

咸化湖盆与淡水湖盆、海相盆地相比,在有机质富集、烃源岩形成与演化、储层特征及演化、油气运聚成藏机制等方面具有鲜明特色。而古近纪-新近纪的柴达木盆地属于典型的咸化湖盆。刘成林教授主持的国家自然科学基金项目“氯化盐浓度对气源岩生成天然气组成的影响”(41272159)深入探讨了咸化湖盆油气成藏规律,《咸化湖盆烃源岩地球化学特征与油气成藏机制》一书是该团队长期致力于咸化湖盆研究成果的结晶。主要认识包括:

(1) 建立了柴西咸化湖盆的有机质富集模式。盐度较高的烃源岩具有有机质类型好、有机质转化率高、成熟度较低的特点,并且烃源岩氯离子含量与有机质丰度呈“三段型关系”,中等盐度对应较高的有机质丰度,盐度过高或过低对应有机质丰度较低。生烃模拟实验表明盐类物质的加入降低反应活化能,明显加快烃源岩生烃过程,使烃源岩提前进入生油窗,提高了产烃率。

(2) 茫崖拗陷古近系-新近系细粒沉积岩发育厚度大,有机碳含量高,处于低成熟-成熟阶段,微裂缝、粒间孔、粒内孔等发育,是致密油气勘探有利区。

(3) 柴西北区古近系-新近系地层压力与盐度在平面分布上趋势相吻合,并且呈现出明显的浅部异常低压、中部常压和深部异常高压的特征。欠压实作用、有机质生烃作用和构造挤压作用是引起研究区地层超压的主要原因,而欠压实作用对地层超压的贡献率大于60%。

(4) 柴西地区主力生烃层系为 E_3^1 、 E_3^2 、 N_1 及 N_2^1 ,柴西地区天然气以烃类气体为主,大部分地区烃类含量大于90%。其中柴西北部主要为腐殖型气和混合气,柴西南部主要为腐泥型气,部分混合气和少量腐殖型气。

该书在编写过程中得到了中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“柴达木盆地建设千万吨油气田综合配套技术研究”(2011E-03)的资助,对推动咸化湖盆油气勘探开发研究具有重要理论和实践意义。希望该书的出版有助于促进石油地质专家在咸化湖盆油气勘探的认识,对我国咸化湖盆油气资源研究领域的人才培养起到积极促进作用。

中国科学院院士 戴金星

2018年3月28日

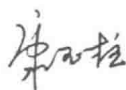
序 二

柴达木盆地作为我国重要的油气生产基地之一，过去几十年发现的油气主要集中在柴西古近系-新近系、柴北缘侏罗系以及三湖拗陷第四系，油气资源丰富。其中，柴西在古近纪-新近纪发育咸化湖盆，其烃源岩独具特点：有机质丰度较低、成熟度较低、有机质转化率高，目前已经发现昆北、狮子沟、南翼山、开特米里克、油泉子、小梁山等油气田。该书综合运用石油地质学、天然气地质学、有机地球化学、油气储层地质学、非常规油气地质学等多学科理论，基于大量的实测钻井、录井、测井与岩心测试数据，详细研究了柴西咸化湖盆油气成藏规律，对咸化湖盆油气勘探开发及区块优选具有极其重要的指导意义。

《咸化湖盆烃源岩地球化学特征与油气成藏机制》一书是国家自然科学基金项目“氯化盐浓度对气源岩生成天然气组成的影响”（41272159）的主要研究成果，是系统研究柴达木盆地西部咸化湖盆油气成藏规律的学术成果结晶。该书的主要认识有：①建立了柴西咸化湖盆“三段型关系”的有机质富集模式。②明确了盐类物质会降低反应活化能，明显加快烃源岩生烃过程，提高产烃率。③指出柴西深部异常高压的主要成因包括欠压实作用、有机质生烃作用和构造挤压作用。④认为柴西茫崖拗陷具有较好的致密油气成藏条件。⑤鉴定柴西地区天然气以烃类气体为主，柴西北区主要为腐殖型气和混合气，而柴西南区主要为腐泥型气。

该书由刘成林教授带领的长期致力于咸化湖盆油气成藏机制研究的团队撰著，得到了中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“柴达木盆地建设千万吨油气田综合配套技术研究”（2011E-03）的资助，是有关咸化湖盆石油地质领域的重要学术专著。相信该书的出版不仅对推动咸化湖盆油气成藏理论和勘探开发具有重要意义，而且对咸化湖盆超压地层的油气开发具有重要的指导价值。

中国工程院院士



2018年3月30日

前 言

世界上的含盐盆地大多数都是含油气盆地 (North, 1985; Tissot, 1984; 金强等, 2008; 陈中红等, 2009), 在全球 115 个含油气盆地中有 58% 的盆地含有蒸发岩, 而这些含盐盆地的油气储量占了目前探明石油储量的 89%、天然气储量的 80% (高红灿等, 2015)。在世界上已发现的 334 个大油气田中, 有盐岩直接参与成藏的油气田达到 33% (马中振等, 2013), 因此咸化湖盆油气形成机理一直以来备受国内外学者关注。与淡水湖盆、海相盆地相比, 咸化湖盆在有机质富集、烃源岩形成与演化、储层特征及演化、油气成藏机制等方面具有鲜明特色, 而古近纪-新近纪的柴达木盆地属于典型的咸化湖盆。

柴达木盆地作为我国重要的油气生产基地之一, 过去几十年发现的油气主要集中在西部古近系-新近系、北缘侏罗系以及东部第四系, 油气资源丰富。其中, 柴达木盆地西部 (以下简称柴西) 在古近纪-新近纪发育咸化湖相, 其烃源岩、储层、盖层等油气地质条件与油气富集过程独具特色。本书综合运用石油地质学、有机地球化学、沉积岩石学、储层地质学、非常规油气地质学等多学科理论, 以国内外咸化湖盆油气研究理论为基础, 结合大量的钻井、录井、测井资料和烃源岩、储层及油气样品测试分析, 研究咸化湖盆烃源岩地球化学特征与油气富集机制, 探索咸化湖盆油气成藏机制。主要研究认识包括:

(1) 咸化湖盆是地质历史时期蒸发量大于注入量, 发生碳酸盐、硫酸盐或氯化盐及砂泥岩沉积, 以湖相为主的沉积盆地。咸化湖盆形成条件包括封闭和稳定沉降的构造条件、干旱和半干旱的气候条件、足够的盐类物质来源等。

(2) 咸化湖盆平面上岩性与岩相带常呈环带状或半环状分布, 烃源岩中有机质含量较高、干酪根以腐泥型为主、有机质向烃转化率高。膏盐岩是封堵能力强的盖层。多旋回、多韵律膏盐层发育盐下、盐上与盐间油气成藏模式, 空间上形成多套含油气组合。

(3) 咸化湖盆特殊的沉积环境及水体咸化程度形成有机质丰度与盐度的三段型关系模式: 低盐度阶段 (盐度低于 15‰) 较有利于有机质富集和保存, 有机质丰度较高; 中等盐度阶段 (盐度 15‰ ~ 40‰) 有利于有机质富集和保存, 有机质丰度高; 高盐度阶段 (盐度高于 40‰) 有机质主要受富集条件的限制, 有机质丰度较低。

(4) 受咸化湖相环境影响, 柴西烃源岩总体上表现为总有机碳含量和生烃潜量较低、而氯仿沥青“A”和有机质转化率较高; 有机质类型以混合型为主, 有机质偏腐泥型; 烃源岩大多处于生油窗演化阶段; 优质烃源岩普遍发育于咸水、高咸水环境。

(5) 氯化盐对生烃具有促进作用, 低温阶段随着氯化钠盐度增加, 有机质生烃量增加, 气态烃与液态烃产率升高, 高温阶段氯化盐加快液态烃裂解, 液态烃产率降幅提高, 气态烃产率升高。结合干酪根分子模拟计算, 认为氯离子的电子诱导效应降低了化学键的离解能, 使干酪根分子中的 C—C 键、C—H 键及 C—O 键离解能降低。

(6) 柴西北区从古近系至新近系地层盐度增大, 碳酸盐含量逐渐增高, 粉砂岩类明显减少, 发育混合细粒岩类逐渐增多。细粒沉积岩中粒间孔、粒内孔及微裂缝发育, 孔隙结构复杂, 非均质性强。有机碳含量、热成熟度、矿物含量和盐度是控制柴西北区细粒沉积岩孔隙发育的主要因素。

(7) 柴西北区地层压力呈现出明显的浅部异常低压、中部常压和深部异常高压特征。地层超压的主要形成机制包括欠压实作用、有机质生烃作用和构造挤压作用。柴西北区自渐新世以来的盐湖环境与超压的形成演化有一定关系, 随盐湖中心东移, 异常高压初始层位自西向东逐渐变新。

(8) 盐类成分及浓度在烃源岩、储层、盖层和圈闭形成演化以及油气运聚与保存过程中始终发挥作用, 使柴西古近系-新近系油气成藏机理与分布规律具有独特性, 主要体现在咸化湖盆范围控制烃源岩规模、构造运动影响圈闭的形成和流体压力影响油气空间分布。

(9) 柴西天然气以烃类气体为主的有机成因气, 包括腐泥型气、腐殖型气和混合气。柴西南区主要为腐泥型气, 部分混合气和少量腐殖型气; 柴西北区主要为腐殖型气和混合气, 少量腐泥型气。天然气呈现干燥系数大、碳同位素偏重的咸化湖盆天然气特征。

本书是国家自然科学基金项目“氯化盐浓度对气源岩生成天然气组成的影响”(41272159)的主要研究成果, 并且得到了中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“柴达木盆地建设千万吨油气田综合配套技术研究”(2011E-03)和国家自然科学基金项目“碳沥青与钒矿物伴生机理研究”(41572099)的资助和支持。本书由刘成林、李剑负责统稿, 全书分为7章, 具体分工如下: 前言, 由刘成林完成; 第1章, 由刘成林、张旭、郑是竞、洪唯宇、李培、李浩涵、刘军、张瑄、平英奇、李宗星、李潍莲、杨元元、孙明亮、朱杰、汪紫菱、曾庆猛、郑策、童超、徐思渊、班东师、彭博、顿超、梁德秀、袁嘉音、王利、王志强、张禹、黎彬、孔骅、冯德浩完成; 第2章, 由李剑、刘成林、徐思渊、曹军、刘军、张旭、李浩涵、徐最、刘文平、张瑄、徐韵、张谦、温银宇、张利红、李明完成; 第3章, 由刘成林、李剑、李浩涵、郑是竞、李冰、周刚、王少清、刘鹏、王盛亮完成; 第4章, 由刘成林、班东师、郑是竞、李浩涵、张瑄、李志生、杨赛、张迈、龚宏伟、柳永军、张蔚、任浩林、杨晟颢、杨熙雅完成; 第5章, 由刘成林、张旭、平英奇、郭泽清、耿志强、代昆、张瑄、张智辉、刘军、张旭、徐丽丽、赵伟、周利完成; 第6章, 由郭泽清、田继先、曾旭、刘军、平英奇、张旭、李浩涵完成; 第7章, 由刘成林、刘军、张林、李浩涵、郑是竞、吴林强、张鸿完成。

本书在编写过程中得到了中国石油勘探开发研究院廊坊分院、中国石油青海油田勘探开发研究院的数据和技术支持, 也得到了中国石油大学(北京)、中国科学院广州地球化学研究所等单位的样品测试分析支持。在项目执行过程中, 中国石油大学(北京)、中国地质科学院地质力学研究所、中国石油勘探开发研究院廊坊分院的领导与同事给予了一如既往的支持。戴金星院士、康玉柱院士等专家在项目实施与书稿编写过程中给予了精心指

导与严格把关。在此对帮助书稿编写的领导、专家、老师和同学表示真诚的感谢!

戴金星院士、康玉柱院士在百忙之中对书稿进行审阅,提出很多宝贵的意见和建议,并为本书作序,在此对两位院士的辛勤劳动表示衷心感谢。

希望本书的出版对咸化湖盆油气成藏理论和勘探开发有所帮助,由于作者水平有限,书中难免存在不足,敬请读者批评指正。

作 者

2018年7月12日

目 录

序一

序二

前言

第1章 咸化湖盆地质特征	1
1.1 咸化湖盆基本特征与形成条件	1
1.1.1 咸化湖盆基本特征	1
1.1.2 咸化湖盆形成条件	2
1.2 国内外典型咸化湖盆油气地质特征	4
1.2.1 近海咸化湖盆	4
1.2.2 内陆咸化湖盆	11
1.2.3 咸化湖盆油气地质特征	27
1.3 小结	37
第2章 柴达木盆地西部咸化湖盆演化与有机质富集模式	38
2.1 盆地概况	38
2.1.1 地层特征	39
2.1.2 构造单元划分	42
2.2 咸化湖盆演化	44
2.2.1 构造演化特征	44
2.2.2 沉积演化特征	47
2.3 有机质富集模式	59
2.3.1 有机质生产力	59
2.3.2 有机质保存条件	64
2.3.3 有机质富集模式	66
2.4 小结	70
第3章 柴达木盆地西部咸化湖盆烃源岩地球化学特征	71
3.1 有机质丰度	71
3.1.1 总有机碳	71
3.1.2 氯仿沥青“A”	72
3.1.3 生烃潜量	74
3.1.4 柴西咸化湖盆烃源岩有机质丰度评价标准	75
3.2 有机质类型	77
3.2.1 可溶有机质族组分	77
3.2.2 岩石热解参数	78

3.2.3 有机质显微组分特征	79
3.3 有机质成熟度	81
3.3.1 热解峰温	81
3.3.2 镜质组反射率	82
3.4 烃源岩综合评价	83
3.4.1 路乐河组	83
3.4.2 下干柴沟组下段	84
3.4.3 下干柴沟组上段	84
3.4.4 上干柴沟组	86
3.4.5 下油砂山组	86
3.4.6 下油砂山组	87
3.5 小结	88
第4章 咸化湖盆有机质生烃机理	89
4.1 生烃模拟实验	89
4.1.1 生烃模拟实验方法概述	89
4.1.2 开放体系生烃模拟实验	91
4.1.3 密闭体系生烃模拟实验	97
4.1.4 生烃模拟实验方法对比	117
4.2 咸化湖相烃源岩生烃机理	121
4.2.1 计算机分子模拟	121
4.2.2 咸化湖相烃源岩生烃机理分析	133
4.3 咸化湖相烃源岩生烃图版	136
4.4 小结	141
第5章 柴达木盆地西部北区古近系-新近系细粒沉积岩和地层压力特征	142
5.1 细粒沉积岩储集特征	142
5.1.1 岩石类型	142
5.1.2 岩石孔隙结构特征	145
5.1.3 岩石物性特征	165
5.1.4 岩石孔隙发育影响因素	171
5.2 地层压力特征	179
5.2.1 地层压力预测与误差分析	179
5.2.2 地层压力分布特征	182
5.2.3 地层压力影响因素分析	185
5.3 小结	192
第6章 柴达木盆地典型构造天然气藏剖析与成藏模式研究	193
6.1 南翼山构造油气藏剖析	193
6.1.1 地质概况	193
6.1.2 油气地质条件	195

6.1.3 油气藏特征	201
6.2 咸化湖盆天然气成藏模式	204
6.2.1 油气成藏期次	204
6.2.2 油气成藏过程	210
6.2.3 油泉子—南翼山—大风山构造带油气成藏模式	212
6.3 咸化湖盆油气成藏主控因素	213
6.3.1 咸化湖盆多沉积中心	213
6.3.2 古构造及构造运动	214
6.3.3 地层压力	215
6.4 小结	216
第7章 柴达木盆地西部咸化湖盆天然气地球化学与分布特征	217
7.1 天然气地球化学特征与成因类型	217
7.1.1 天然气组分特征	217
7.1.2 天然气碳同位素特征	223
7.1.3 天然气成因类型与分布	228
7.2 气源分析	232
7.2.1 庚烷值	232
7.2.2 天然气成熟度	233
7.2.3 天然气轻烃指纹	234
7.2.4 天然气与烃源岩、原油碳同位素	236
7.2.5 天然气与原油及烃源岩轻烃参数	237
7.3 不同类型天然气分布特征	239
7.4 小结	239
参考文献	240

第1章 咸化湖盆地质特征

本章厘定了咸化湖盆的定义、基本特征及其形成条件,并总结了国内外典型咸化湖盆的油气地质特征。咸化湖盆是指地质历史时期蒸发量大于注入量,发生碳酸盐、硫酸盐或氯化盐及砂泥岩沉积,以湖相为主的沉积盆地。咸化湖盆形成条件包括封闭和稳定沉降的构造条件、干旱和半干旱的气候条件、足够的盐类物质来源等。咸化湖盆平面上岩性与岩相带常呈环带状或半环状分布,烃源岩中有机质含量较高、干酪根以腐泥型为主、有机质向烃转化率高。膏盐岩是封堵能力强的盖层。多旋回、多韵律膏盐层发育盐下、盐上与盐间油气成藏模式,空间上形成多套含油气组合。

1.1 咸化湖盆基本特征与形成条件

1.1.1 咸化湖盆基本特征

1. 咸化湖盆定义及类型

咸化湖盆是指地质历史时期蒸发量大于注入量,发生碳酸盐、硫酸盐或氯化盐及砂泥岩沉积,以湖相为主的沉积盆地。孙镇城等(1997)依据水体盐度将湖泊划分为淡水湖(盐度 $<0.5‰$)、半咸水湖(盐度为 $0.5‰\sim 35‰$)、咸水湖(盐度为 $35‰\sim 50‰$)、盐水湖(盐度 $>50‰$)。咸化湖包括半咸水湖、咸水湖、盐水湖。盐湖是在特定的气候条件(年蒸发量 $>$ 补给量)、构造条件及物源条件等多因素综合控制下形成的极端湖泊类型(张永生等,2005)。郑绵平(2001)提出将狭义盐湖的含盐度下限定为 $35‰$,广义盐湖的下限定为 $3‰$ 。一般而言,狭义的盐湖包含了咸水湖和盐水湖,而广义的盐湖指的就是相对淡水湖的咸化湖。除特殊说明外,本书所称的盐湖均是广义的盐湖。

世界范围内湖盆主要分为海成型(潟湖、沙嘴湖等)和大陆型(如内陆盆地的一些远离海岸的湖盆),中国现代盐湖均属于大陆型湖泊。与淡水湖一样,大陆型盐湖按湖盆成因进一步划分为构造湖、侵蚀盆地湖、火山湖和河迹湖四种类型:①构造湖——大都发育在近期地壳活动比较剧烈的地区,多分布在断陷盆地、深断裂带谷地和构造运动褶皱隆起的背斜构造带间的向斜洼地中,除了断陷成因湖盆外,还存在拗陷型咸化湖;②侵蚀盆地湖——大多发育在较为稳定的大陆地壳部分,它们的形成主要是外营力作用的结果,可分为冰蚀湖盆、流水侵蚀湖盆、风蚀湖盆;③火山湖——分为火山口湖、熔岩湖、火山壅塞湖(张彭熹等,1999);④河迹湖——与河流有关的湖泊,分为河源湖、连河湖、河口湖、牛轭湖、河漫滩湖等。除此之外,张彭熹(2000)针对盐湖还提出了三种划分方案:一是按卤水赋存状态划分,可分为卤水湖、干盐湖、沙下湖;二是按主要盐类沉积物分

类,分为石盐湖、芒硝湖、碱湖、硼酸盐盐湖、钾镁盐盐湖;三是按卤水化学成分分类,分为碳酸盐型、硫酸盐型、氯化物型。柳大纲等(1996)依据化学组成将盐湖分为碳酸盐湖、硫酸盐湖、硫酸盐向氯化物过渡型、氯化物湖;工业应用分类包括一般盐湖、钾湖、硼湖、锂湖。

2. 咸化湖盆分布特征

1) 现代盐湖分布特征

现代盐湖集中分布于赤道两侧纬度 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$,南、北半球的干旱带中,分为两个盐湖带和两个盐湖区,即北半球盐湖带、南半球盐湖带、赤道非洲盐湖区以及南极洲盐湖区。北半球盐湖带分为亚非欧大陆盐湖区和北美大陆盐湖区,南半球盐湖带包括非洲南部、澳大利亚和南美洲西部,赤道非洲盐湖区主要分布在乌干达、肯尼亚和坦桑尼亚境内,分为西部裂谷盐湖和东部裂谷盐湖,南极洲盐湖区分布于南极北部 $71^{\circ}\text{S}\sim 73^{\circ}\text{S}$,涉及南维多利亚地、邦格丘陵以及维斯德福尔特丘陵等(唐祥华,1998a;Warren,2010;张彭熹,2000)。国外咸化湖盆以北半球的欧亚板块最多,北美次之,主要分布在阿尔卑斯褶皱山系及其山前拗陷区,其次为不同时代基底的有新生代地层覆盖的地台区和活动地台区,以海相蒸发沉积为主的盐湖盆地居多(唐祥华,1998b;白建斌,2010)。盐湖分布受地形和地势变化的影响,碳酸盐型盐湖和硫酸盐型盐湖较多,而氯化物型盐湖较少,在中国和智利等国还发育硝酸盐型盐湖(白建斌,2010)。

中国的盐湖主要发育在沿 $28^{\circ}\text{N}\sim 52^{\circ}\text{N}$ 延伸的干旱和半干旱地区,从西部边疆的西藏、新疆经青海、甘肃、宁夏、陕西、山西直至东北的内蒙古、黑龙江等省区都广泛发育着数以千计的盐湖,是世界上盐湖众多的国家之一(黄麒和韩凤清,2007)。以近东西走向的喜马拉雅山脉、昆仑山—阿尔金山—祁连山—六盘山、北北东向的贺兰山和太行山—大兴安岭为界,划分为四个盐湖区:青藏高原盐湖区、西北部盐湖区、东北部盐湖区和东部分散盐湖区,著名的盐湖主要有运城盐湖、罗布泊盐湖、察尔汗盐湖和扎布耶盐湖等(郑绵平,2001)。

2) 中国新生代咸化湖盆演化与分布特征

中国新生代陆相咸化湖盆较为发育,其咸化过程始于早古新世,经过发生—发展—衰退—再发展的全过程,直至全新世。古新世干燥气候分布范围比较大;进入始新世干旱气候进一步扩大,咸化湖盆向北转移,北部的咸化湖盆增多;渐新世全球气候变冷,长江以北黄河以南,以及长江以南地区咸化湖盆减少,面积缩减,而西北地区的咸化湖盆则分布广泛;中新世,北半球气候普遍转暖,西北地区的咸化湖盆继续发育,同时江汉、景谷盆地也成为主要的咸化湖盆;上新世,古气候已经接近现代气候分布格局,形成了咸化湖泊分布在西北半壁、淡水湖泊分布在东南半壁的格局。而其中主要的含油气陆相咸化湖盆有渤海湾盆地、江汉盆地、南襄盆地、汾渭盆地、河套盆地、柴达木盆地、酒泉盆地、吐哈盆地、塔里木盆地、准噶尔盆地等(孙镇城,1997)。

1.1.2 咸化湖盆形成条件

咸化湖盆形成条件包括封闭和稳定沉降的构造条件、干旱和半干旱的气候条件、足够

的盐类物质来源等,这些条件影响其形成、演化和消亡过程(陈克造,1992;金强和查明,2000;屈红军,2003;郑绵平,2006;黄麒和韩凤清,2007;白建斌,2010)。

1. 构造作用

陆相咸化湖盆绝大多数属于构造成因,尤其是与断层密切相关的断陷(孙镇诚等,1997)。我国新生代大型咸化湖盆如江汉、南襄、柴达木、塔里木、吐哈、准噶尔等均与盆地边界断裂活动或断块陷落有关(李江海等,2014)。其中,柴达木盆地更是自始至终均受着构造运动控制。构造运动不仅造成湖泊所需要的盆地,而且其产生的断裂还是输送盐类物质的主要渠道之一,特别是深大断裂(黄麒和韩凤清,2007)。构造运动和断裂活动控制着盆地古地理面貌,决定着盆地蓄水空间的形成与消亡(张林晔,2008)。

陈克造等(1981)研究发现青藏高原的盐湖分布严格受区域构造线控制而平行于山脉走向,很多盐湖为构造断陷湖。由于重重高山阻隔印度洋气流向北侵入,盐湖浓缩程度自南向北逐渐增高。青藏高原的隆起,特别是第四纪以来的强烈抬升,对我国主要盐湖的形成和分布起着决定性的作用(陈克造,1992)。郑喜玉(1993)将新疆盐湖盆地按成因分为不同类型,其中构造作用形成的断陷盆地或山间盆地一般规模比较大,往往分布于大盆地边缘及其附近,具有明显的方向性,属于大盆地中的次盆地,对早期形成的大盆地具有一定的继承性。袁见齐等(1983)提出“高山深盆”是现代和古代成盐相当普遍的地貌特征,而柴达木盆地新生代盐湖就是典型的“高山深盆”的深水成盐模式(施辉等,2013)。这种成盐模式有利于大型咸化湖盆的形成,其湖水在浓缩或矿化度增大的同时,面积并不缩小也不变浅,所以湖泊深水区的比深值较高,有利于形成稳定的湖水分层(包括温度、化学分层),并且深大断裂带也可以提供地壳深层的地下卤水,这也从另一方面提供了盐湖的盐类物质来源。

2. 古气候条件

古气候条件是各种沉积作用、沉积物和沉积矿产资源形成的重要因素。对盐湖沉积而言,气候条件更是起了主导性作用。湖盆咸化的过程主要是在半封闭或封闭的条件下湖泊蒸发量大于补给量逐渐发生的。综合中国现代盐湖来看,我国盐湖区的地貌特征为高、中、低山地与高原、盆地兼而有之,地貌总轮廓为西南高而东北低,中国的众多盐湖就赋存在这些高原和盆地之中。中国盐湖区深居内陆,地形起伏,山脉高耸。特别是沿该区东界、南界的山脉走向与气流方向近于直交,严重地影响着气流的运行,阻碍了太平洋和印度洋海洋水气的深入。在中国盐湖区的范围内,冬半年常在高纬度大陆寒冷空气控制下,空气含水量很低,虽然不时有西风气流中的波动经过,但形成的降水很少,西南部的西藏高原海拔高,面积大,它对中纬度西风气流有巨大的阻碍和扰动作用。在下半年,这一带又由于有重重大山阻碍,湿润海洋热带空气难至。因此,中国盐湖区基本气候特征是太阳辐射强、降水量低、蒸发量大,南部为高干旱草原荒漠气候,北部为半干旱、干旱草原荒漠气候(张彭熹,1999)。

陆相咸化湖盆沉积作用主要包括蒸发岩沉积作用和碎屑岩沉积作用,在干湿交替的古气候影响下,咸化湖盆大多形成了蒸发岩与碎屑岩共生的沉积序列特征。所以古气候是影

响湖盆咸化过程及其相应沉积序列的主要因素之一。另外,古气候不仅控制了咸化湖盆的咸化过程,而且还控制了湖盆沉积物有机质丰度,位于不同气候环境的湖盆,蒸发量和降水量的差异导致湖盆水介质和矿化度的变化,产生不同性质的沉积物。气候的变化控制着降水量、蒸发水量,从而控制着湖盆面的变化,进而影响优质烃源岩的发育(张林晔,2008)。不同矿化度水介质湖盆中的沉积物胶结物类型和含量有明显差别,对沉积后的碎屑岩变化产生重要影响,故不同水介质湖盆碎屑岩储层有不同成岩作用及物性特征(薛叔浩,2002)。咸化湖盆具有干湿交替的古气候、封闭型高盐度水体、水介质呈弱碱性-碱性、水体环境呈强还原环境,这些都是陆相盐湖沉积中油气得以形成及保存的环境特征(江继纲等,2004)。

3. 物质(盐类)来源

物质来源决定了湖泊演化各个时期的沉积物,决定了湖泊的类型和存在时间的长短,是湖泊演化过程中起决定性的因素之一。在构造运动、冰川和河流堵塞等作用形成一个盆地之后,接着充足的水源带入各种物质,包括各种微量元素和碎屑物。湖泊能演化到盐湖阶段,不但要有水源不断供给,而且湖泊的寿命要长。湖泊中盐类组成的储量与湖泊的寿命是成正比的,同一水源的湖泊寿命越长,则供给水带入湖中的盐类物质和稀有元素的储量就越大(黄麒和韩凤清,2007)。吴靖等(2014)把不同地区盐类物质的来源总结为:陆源区母岩风化导致的“古盐”释放、通过深大断裂上涌的深部卤水、火山或岩浆活动带来的盐类物质、来自海水入侵或残留海水、天然水热溶液(温、热、沸泉水)循环,并且有蒸发成盐、兑卤成盐和生物成盐三种成盐机制。柴达木盆地成盐的物质来源,归纳起来有五种:岩石风化淋滤、火山热水、古湖水、深部水及古近系-新近系含盐系溶滤水。深部水沿断裂上升,以泉水或越流补给为盐湖提供新的物质来源,特征是矿化度较高,水质类型为氯化钙型,一般含较高的Br、I,与周边风化补给来源的低矿化度硫酸盐型水显著不同(刘淑琴,1992)。

1.2 国内外典型咸化湖盆油气地质特征

1.2.1 近海咸化湖盆

1. 墨西哥湾盆地

1) 地质概况

墨西哥湾盆地位于北美洲大陆东南沿海水域,面积约为 $28 \times 10^4 \text{ km}^2$ (Goldthwaite, 1991)。墨西哥湾盆地划分为多个次盆:密西西比次盆、北路易斯安那次盆、东得克萨斯次盆、里约格兰德拗槽、南佛罗里达亚盆地、坦帕拗槽、阿巴拉契考拉拗陷、佐治亚东南拗槽等。盆地内沉积厚度可达20 km,三叠纪到全新世的地层均有分布(图1.1)(蒋玉波等,2012)。

系	统	阶	群/组
第四系 — 新近系	中新统		
	渐新统		卡塔胡拉组 弗里奥组 阿纳瓦克组
古近系	始新统		维克斯堡组
			杰克逊组
			克莱本组
			威尔科特斯组
	古新统		米德韦组
白垩系	上统	麦特里希特阶	纳巴罗组
		坎佩尼阶	泰勒组
		桑托阶	奥斯汀组/东京组
		科尼亚克阶	尤托组
		土伦阶	伊格弗德组
	下统	森诺曼阶	伍德拜恩组/塔斯卡卢萨组
		阿尔比阶	沃希托组
			弗雷德里克斯堡组
			赫伦花组
		阿普第阶	皮尔斯组
		豪特里维阶	斯莱戈组
		巴列姆阶	
		凡兰吟阶	
		贝利亚斯阶	
侏罗系	上统	提通阶	卡顿 瓦利组
		启莫里支阶	罗西耶组
		牛津阶	吉尔默组
	中统		斯马克夫组
			芦安盐岩

图 1.1 墨西哥湾盆地地层柱状图（据顾春光，2008，有修改）

墨西哥湾盆地基底为经历了变质作用的上古生界碎屑岩（韩彧等，2015），构造演化具有典型大陆裂谷演化的特征，从早三叠世开始先后经历了裂谷期和裂谷后期两个演化阶段（孙萍和王文娟，2010）。晚白垩世至新生代的拉腊米运动是一重要的地质事件。在拉腊米运动之前，盆地持续稳定的沉降，从中侏罗世到早白垩世盆地沉积以盐岩、碎屑岩和碳酸盐岩为主，形成了中生代以碳酸盐岩为主、碎屑岩为辅的油气系统。拉腊米运动之后，该运动导致盆地周边隆起，大量陆源物质向盆地搬运和沉积，导致富含有机质的沉积物大量堆积，这一方面为油气形成提供了新的物质基础，另一方面其重力作用导致盆地内中侏罗统盐岩的大规模塑性变形，形成有利于油气存储的构造。

前人研究（Schuster，1995；贾承造等，2003；梁杰等，2010）表明墨西哥湾地区的盐、盐运动和盐底辟的形成过程大致可以划分为4个阶段。