

## 海相膏盐岩层系烃源岩形成演化特征初探

赵恒<sup>1,2,5</sup>, 刘文汇<sup>3</sup>, 李艳杰<sup>1</sup>, 刘全有<sup>4</sup>, 周冰<sup>4</sup>, 罗厚勇<sup>3</sup>,  
王杰<sup>4</sup>, 卢龙飞<sup>4</sup>, 孟庆强<sup>4</sup>, 吴小奇<sup>4</sup>

1 江苏地质矿产设计研究院/中国煤炭地质总局煤系矿产资源重点实验室/中国煤炭地质总局页岩气重点实验室;

2 甘肃省油气资源研究重点实验室/中国科学院油气资源研究重点实验室; 3 西北大学;

4 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院; 5 中国科学院大学

**摘要** 勘探实践和地质地球化学分析显示,膏盐岩作为一种化学沉积岩虽然本身不具备生烃能力,但其岩系组合中不同程度富含的生烃物质,使得膏盐岩层系可作为海相盆地非常重要的烃源岩,因此,我国的高演化、低有机质丰度的海相膏盐岩层系也可以作为良好的烃源岩。分析表明:海相膏盐岩层系烃源岩具有多元化的生烃物质、异常活跃的有机-无机相互作用和膏盐岩层系特殊的物理化学条件,这些因素共同影响着其生烃物质来源、有机质热演化进程、产物的组分及产率、稳定同位素组成等特征,因此研究膏盐岩层系烃源岩的形成演化特征,对于我国海相膏盐岩层系源-藏匹配、生烃机理、烃源岩评价等问题具有重要的勘探实践和理论研究意义。此外,由于海相膏盐岩层系在成因和矿物组成方面的特殊性,传统的烃源岩评价指标如 TOC、氯仿沥青“A”、 $S_1+S_2$  等难以适用于海相膏盐岩层系烃源岩,而采用总生烃碳的概念评价烃源岩演化及生烃潜力应该更为客观可靠。

**关键词** 海相; 膏盐岩层系; 烃源岩; 总生烃碳; 有机酸盐

**中图分类号**: TE122.1

**文献标识码**: A

### 0 前言

膏盐岩是一种主要由石膏、硬石膏和变水石膏组成,并含一定量的盐类矿物、黏土矿物、有机质、铁的氧化物等物质的蒸发岩<sup>[1-2]</sup>,在海相层系中广泛发育。本文所指的膏盐岩层系在空间上与膏盐岩共生,在形成时间上包括膏盐岩沉积期、盐前沉积期和盐后沉积期,以及膏盐岩层系形成以后的后生改造期。膏盐岩层系主体上是指均受膏盐岩地球化学环境影响的沉积岩系,包括海相膏盐岩、海相碳酸盐岩及少量碎屑岩。这一岩系除控制海相优质盖层发育外,对烃源岩及碳酸盐岩储层的发育和改造都起到特殊作用。

长期以来,膏盐岩层系作为理想的盖层为人们所关注,随着勘探和研究的不断深入,人们逐步发现膏盐岩层系在油气的运移、聚集、储存等过程中都发

挥着重要作用<sup>[1-5]</sup>。但是膏盐岩层系作为烃源岩却较少受到关注,这是因为传统观点认为高盐度环境下有机质产量很低,难以形成优质烃源岩<sup>[6]</sup>。就陆相层系而言,自 20 世纪 80 年代陆相生油理论诞生以来,便认为大型淡水湖泊最有利于优质烃源岩的形成<sup>[7-8]</sup>;就海相层系而言,我国的海相膏盐岩层系具有热演化程度高、有机质丰度相对低的特点,它作为有效烃源岩受到很大质疑<sup>[9-13]</sup>。但是近年来,我国海相油气勘探在鄂尔多斯盆地东部、塔里木盆地中部、四川盆地西部等地区的膏盐岩层系中都取得了突破,从而引发了人们对高演化、低有机质丰度的海相膏盐岩层系作为油气来源这一问题的关注。

有研究认为<sup>[8,14-16]</sup>,咸水环境下沉积的膏盐岩层系可以作为优质烃源岩,陆相生油理论所认为的主力烃源岩均不同程度与海侵作用所形成的咸化湖盆有关,而非之前认为的淡水环境。国内外也有很多膏

收稿日期: 2018-03-27; 改回日期: 2019-01-03; 网络发表日期: 2019-05-29

本文受国家自然科学基金重点项目“海相含膏盐岩层系烃源岩发育特征与生烃潜力评价”(编号: U1663201)、国家自然科学基金青年基金项目“页岩解吸气碳同位素分馏特征及其指示意义研究”(编号: 41503033)、国家重点基础研究发展计划(973)项目“早古生代海相层系烃源特征与成藏过程示踪”(编号: 2012CB214801)、中国煤炭地质总局科技项目“青海柴达木盆地煤系气资源量评价与勘探开发前景研究”(编号: ZMKJ-2018-11)和甘肃省重点实验室专项(编号: 1309RTSA041)共同资助

**第一作者**: 赵恒,博士,主要从事油气地质和同位素地球化学研究。通信地址: 221006 江苏省徐州市纺织路 1 号; E-mail: zhao-heng12@mails.ucas.ac.cn

**通信作者**: 刘文汇,博士,教授,主要从事天然气地质及油气地球化学研究。通信地址: 710069 陕西省西安市碑林区太白路 229 号; E-mail: whliu@nww.edu.cn

盐岩层系作为重要烃源岩的实例<sup>[15,17-20]</sup>。从生烃机理上讲,首先,在膏盐岩层系沉积时的高盐度环境中,能够生存的物种与正常环境相比虽然偏少,但这些生物群仍拥有巨大的产物通量,能够为膏盐岩层系烃源岩提供充足的优质生烃母质<sup>[1,21-24]</sup>;其次,就目前膏盐岩层系中低 TOC 而言,其原始层系中优质的生烃物质在地质历史中可能经历了生烃转化,大部分有机碳以烃类方式排出了烃源岩,才导致目前残留的 TOC 较低<sup>[25]</sup>;最后,就膏盐岩层系评价而言,传统的烃源岩 TOC 测定方法忽视了有机酸盐这一重要的特征烃源<sup>[26]</sup>,低估了膏盐岩层系的总生烃碳丰度。

关于膏盐岩层系作为烃源岩的可行性,已另文系统分析<sup>[1]</sup>,此处不再赘述。本文主要针对海相膏盐岩层系烃源岩及其生烃特征开展分析,进而对其评价方法进行探讨。我国的四川盆地、塔里木盆地和鄂尔多斯盆地广泛发育海相膏盐岩层系,发育层位从寒武系、奥陶系、石炭系至中、下三叠统均有分布。上述海相膏盐岩层系均为目前海相油气研究和勘探的热点地区,普遍具有高演化、低有机质丰度的特点,本文的研究有望为这些膏盐岩层系烃源岩评价及源-藏匹配问题提供理论支撑。

## 1 膏盐岩层系烃源岩的形成特征

膏盐岩作为一种化学沉积岩,其本身的 TOC 较

低而不具备生烃潜力,但其岩系组合中不同程度富含的有机质,是烃类的真正来源。膏盐岩层系烃源岩按沉积期可分为膏盐岩层系沉积前、后所形成的烃源和膏盐岩层系沉积期所形成的烃源,其中在膏盐岩层系沉积前、后所形成的烃源与常规烃源相同,前人已有相当系统的研究<sup>[1,27-28]</sup>,在此不再赘述。膏盐岩沉积期所形成的烃源是在高盐度水体环境下形成的,具有特殊的生物组合特征及特殊的再生烃源——有机酸盐,由此构成了多元化的生烃物质。

目前的研究显示,世界范围内膏盐岩层系的有机质丰度有较大差异,但除少量纹层状膏盐岩外,其他的膏盐岩 TOC 含量总体较低,大多小于 1%。如美国得克萨斯州—新墨西哥州西部全新统至更新统蒸发岩的 TOC 平均值约为 0.6%,欧洲二叠盆地南缘(波兰)上二叠统蒸发岩的 TOC 为 0.09%~0.70%,我国四川盆地三叠系雷口坡组四段的灰白色石膏层的 TOC 含量小于 0.2%,鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组盐岩中 TOC 含量也低于 0.35%(表 1)<sup>[17,29-31]</sup>。大部分膏盐岩层系烃源岩有机质类型较好,以 I 型和 II<sub>1</sub>型为主<sup>[16]</sup>。膏盐岩层系具有优质的生烃生物组合,以浮游生物和细菌为主的生烃母质具有很高的生烃转化率,可能是最大的油气直接贡献者<sup>[27-28]</sup>。此外,我国的海相膏盐岩层系多具有年代老、埋藏深、热演化程度较高的特点。

表 1 国内外膏盐岩层系有机质丰度特征

地区	层位	岩性	TOC/%	沉积环境/相	参考文献
美国得克萨斯—新墨西哥州西部	全新统—更新统	硬石膏	0.6	盐坪萨布哈	[18]
欧洲二叠盆地南缘(波兰)	上二叠统	黑色硬石膏	0.09~0.70	海退体系域	[29]
鄂尔多斯盆地	奥陶系马家沟组	石膏、膏质白云岩	0.04~0.35	海退体系域局限蒸发台地	[32]
四川盆地	三叠系雷口坡组四段	石膏层	<0.2	高位体系域蒸发台地	[33]
柴达木盆地	古近系干柴沟组	膏盐岩层	>1	深水	[8]
波兰 Kowala 盆地	上泥盆统	白云岩、石灰岩	0.7~4.9	深水、台地	[34]
江汉盆地	古近系潜江组	含膏岩层	2~7	浅水盐湖	[30, 35]
江汉盆地	古近系新沟咀组	含膏砂岩	1.5~8.0	咸化滨浅湖砂坝	[30, 36]
埃及苏伊士裂谷红海湾北部	中新统—上新统	纹层状膏盐岩	~30	高盐浅水环境	[31]

## 2 膏盐岩层系烃源岩的演化特征

膏盐岩层系中生烃物质与硫酸盐、氯化盐、碳酸盐、黏土等矿物质广泛共存,这种有机质与盐类矿物的紧密接触关系使得有机-无机相互作用异常

活跃,这不仅影响着有机质热演化进程,而且也影响了气态烃的组分特征。膏盐类物质与有机物之间的相互作用决定着生烃有机质的热演化进程和烃类产率,也是影响评价膏盐岩层系生烃潜力的重要因素。

## 2.1 膏盐岩对有机质演化的催化作用

膏盐岩层系富含盐类矿物、黏土矿物、金属离子和水,这些物质对有机质生烃有重要的影响。黏土矿物、金属离子和水能够降低反应活化能,对于有机质生烃有促进作用<sup>[37-38]</sup>。关于盐类矿物对有机质热演化的影响,前人做了大量研究,总体可归纳为:膏盐岩在有机质的中、低成熟阶段抑制生烃,而在高成熟阶段则促进生烃,且总体表现为促进烃源岩生烃<sup>[39]</sup>。这种催化作用推迟了膏盐岩层系烃源岩生成气态烃的高峰期,且峰值产量明显增大,因而有利于高成熟度地层(如我国下古生界海相层系)中油气的成藏与保存<sup>[40-42]</sup>。

## 2.2 膏盐岩层系对生烃特征的控制作用

### 2.2.1 TSR 对生烃的影响

TSR(硫酸盐热化学还原反应)是烃类与硫酸盐之间的热化学还原作用。由于海相膏盐岩层系中碳酸盐岩储层与硫酸盐岩密切接触,甚至有的硫酸盐岩本身就可作为储层,因此 TSR 普遍存在。由于 TSR 催化并驱动加速了原油的裂解,因此使得原油裂解的温度降低,促使天然气大量提前形成<sup>[43]</sup>。同时 TSR 选择性地消耗掉大量烃类,这不仅使天然气干燥系数增大,硫化氢含量普遍较高,而且导致气藏充满度降低,压力系数减小<sup>[44-45]</sup>。此外,TSR 造成的同位素分馏,导致气态烃产物碳同位素变重,进而使得利用同位素对此类气藏(如鄂尔多斯盆地东部下古生界盐下气藏)进行气源对比更加困难,无法区分同位素组成是母质类型造成的继承效应,还是 TSR 造成的分馏效应<sup>[46]</sup>。

### 2.2.2 膏盐岩层系对有机质生烃演化及生烃潜力的影响

传统生烃有机质在演化过程中生成的有机酸会发生脱羧作用形成液态烃,因此传统的生烃模式在低演化阶段液态烃产率较高;而膏盐岩层系海相烃源岩在生烃过程中有机酸与碳酸盐等碱性矿物反应生成有机酸盐,由于有机酸盐热稳定性高于有机酸,在低演化阶段液态烃产率偏低,而在高演化阶段大量生成高温裂解气。海相烃源中有机酸盐的存在改变了有机酸的正常生烃途径、生烃过程及生烃数量,这可能是造成海相烃源生烃模式与传统生烃模式不同的主要原因<sup>[27,47]</sup>。

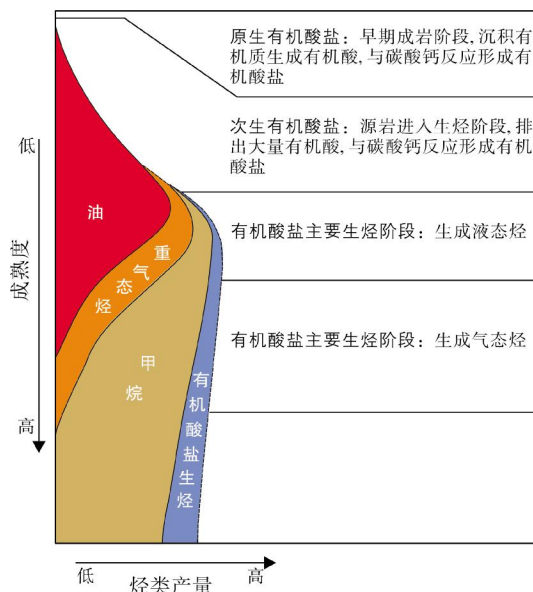


图1 有机酸盐的生烃模式及其与传统生烃模式的差异对比示意图

图1中红色、橙色、黄色区域分别代表传统生烃模式中油、重气态烃、甲烷随演化程度增加的产率变化,蓝色区域代表有机酸盐随演化程度增加的生烃量变化。如图所示,在低演化阶段为原生有机酸盐和次生有机酸盐的形成阶段,在达到一定演化程度后,有机酸盐才开始形成液态烃和气态烃。有机酸盐的存在推迟了烃源岩的生烃高峰期,有利于低丰度、高演化海相膏盐岩层系的生烃与保存。图1中有机酸盐与传统烃源岩之间的生烃量对比仅作为定性示意,具体比例与沉积初期传统有机质与有机酸盐的比例有关。传统烃源岩生成的油、重气态烃和甲烷之间的产量比也仅作为定性示意,具体比例与烃源的母质类型有关。

膏盐岩层系特殊的物理化学条件对有机质的生烃特征也有较大的影响。膏盐岩层系形成的高盐度环境使得生成的烃类碳、氢同位素偏重<sup>[40]</sup>。此外,郝芳等<sup>[48-49]</sup>研究认为膏盐岩层系中普遍存在的超压能够延迟有机质的热演化进程,抑制烃类的裂解。同时由于膏盐岩层的热导率很高,是一般岩性的2~3倍,可使下部岩层中的热量快速散失,这同样减缓了有机质的热演化进程<sup>[4]</sup>,这也是造成膏盐岩层系烃源岩液态烃产率低,而晚期大量生气的重要因素。

## 2.3 膏盐岩层系烃源岩评价方法

几十年来,国内外学者相继建立了一系列烃源

岩评价参数与标准,如 TOC、氯仿沥青“A”、 $S_1+S_2$ 、O/C 和 H/C 原子比等,并成功应用于泥质烃源岩的评价<sup>[50-51]</sup>。但是,由于包括碳酸盐岩在内的海相膏盐岩层系在成源和矿物组成方面具有特殊性,上述烃源岩评价方法在应用时遇到了许多问题和争议,尤其是我国海相膏盐岩层系具有高演化、低有机质丰度的特点,其烃源岩评价一直是我国石油地质、地球化学界争议很大且悬而未决的问题<sup>[52-53]</sup>。虽然海相碳酸盐岩烃源岩研究已经具备一定的基础<sup>[9-10,24,27,52-55]</sup>,但是海相膏盐岩层系烃源岩作为一个整体,目前其研究程度还比较低。为此,根据膏盐岩层系在形成环境及生烃物质方面的特性,本文尝试着从有机质特征、有机碳含量和生烃特征等方面,对膏盐岩层系烃源岩进行评价。

### 2.3.1 膏盐岩层系烃源岩的有机碳含量评价方法

烃源岩中有机质的数量、类型和热演化途径是烃源岩评价的关键。国内外许多学者提出了碳酸盐岩烃源岩的 TOC 下限值(表2),虽然该标准一降再降,但仍没解决我国海相油气勘探面临的源-藏不匹配问题。笔者认为传统 TOC 评价存在的本质问题是没有认识到我国海相膏盐岩层系高演化、低丰度烃源岩成源、成烃的特点。首先,原始膏盐岩层系中优质的生烃物质在地质历史中可能已经进行了生烃转化<sup>[52]</sup>,为古油气藏提供了烃源,才导致目前残留的 TOC 较低,因此要解决我国海相油气勘探中源-藏不匹配的问题,不是人为降低烃源岩的 TOC 下限,而是要动态评价烃源岩演化过程中有机碳的变化;其次,传统有机碳分析在消除无机碳的同时,损失了一定数量的有机酸盐,而有机酸盐在高温条件下具有很强的生烃能力,可能是膏盐岩层系高演化阶段的主要再生烃源,因此损失的这部分有机酸盐对低丰度烃源岩的有机质下限值可以造成重大影响。针对上述问题,本文建议采用包括有机酸盐在内的总生烃碳的概念对膏盐岩层系烃源岩的生烃潜力进行评价。所谓总生烃碳是指在地质演化过程中能够提供形成烃类的总有机质含量,其范围包括传统意义上的 TOC 以及特殊的生烃物质——有机酸盐。

需要说明的是,总生烃碳评价并不是在传统 TOC 评价的基础上简单地加入有机酸盐的贡献量,而是要建立一套适用于膏盐岩层系烃源岩评价的新测试方法和评价标准。首先,目前的研究表明碳酸盐

表 2 碳酸盐岩烃源岩 TOC 下限值

学 者	TOC 下限值/ %	学 者	TOC 下限值/ %
HUNT <sup>[56]</sup>	0.29	刘宝泉等 <sup>[11]</sup>	0.05
PALACAS <sup>[57]</sup>	0.30	陈丕济 <sup>[12]</sup>	0.1
TISSOT 等 <sup>[58]</sup>	0.30	郝石生等 <sup>[10]</sup>	0.2
傅家谟等 <sup>[13]</sup>	0.1~0.2	梁狄刚等 <sup>[9]</sup>	0.50
夏新宇等 <sup>[54]</sup>	0.4~0.5	彭平安等 <sup>[52]</sup>	0.1

岩中有机酸盐含量与传统 TOC 值并不成正比<sup>[60]</sup>,因此无法根据传统 TOC 值计算出有机酸盐的含量;其次,之前许多学者提出海相碳酸盐岩烃源岩的 TOC 下限值时,在生烃模拟、动力学计算等过程中已经包含了有机酸盐的贡献量,只是在 TOC 测试时没有将其包含进来,使其成为了“无名英雄”,因此利用总生烃碳来评价烃源岩的 TOC 下限,也不能在传统 TOC 下限标准上再加入有机酸盐的贡献量。

常规的 TOC 测定标准为首先用盐酸除去烃源岩粉末中的无机碳,然后用蒸馏水淋洗至中性后,再测定固相物质的 TOC,而淋洗液则被丢弃,这样大量的酸溶有机质也伴随着淋洗液流失<sup>[61]</sup>。酸溶有机质的流失对于富有机质泥质烃源岩的 TOC 值影响较小,但是对于低有机质丰度的膏盐岩层系烃源岩则影响很大。为此,刘鹏等<sup>[26]</sup>发明了利用蒙脱石增稠元素分析来测试碳酸盐岩烃源岩中包括有机酸盐在内的生烃有机碳测定新方法,该方法测定的生烃有机碳含量比传统方法测试的 TOC 含量有了大幅的提高<sup>[25]</sup>。

总生烃碳评价方法目前还处于起步阶段,亟待加强生烃模拟、生烃动力学、烃源岩生烃碳下限标准等方面的研究,尤其是有机酸盐在不同沉积相带、不同演化程度的膏盐岩层系中,它的含量和赋存状态仍需要进一步研究。此外,研究膏盐岩层系中不同类型有机质在演化过程中生烃、残留的比例,对于动态评价高演化、低丰度烃源岩的有机质含量也有重要意义。

### 2.3.2 膏盐岩层系烃源岩的生烃物质及产烃效率

膏盐岩层系烃源岩是在高盐度水体环境下形成的,因此具有特殊的生物组合特征及生烃物质。通过对现代膏盐岩典型沉积环境——现代盐湖的研究发现,绿藻和蓝藻是低盐度水体中的主要生物群,而嗜盐菌是高盐度环境生物群的主导<sup>[1,21,24]</sup>。在膏盐岩形成环境中能够生存的物种数量与正常环境相比偏少,主要以浮游藻和细菌类为主,包括蓝藻、盐生杜

氏藻、光养噬硫细菌、嗜盐古细菌、卤虫藻和真细菌等,但这些生物群拥有巨大的产物通量<sup>[22,62]</sup>。在我国西藏扎布耶盐湖北湖,就发育大量红色嗜盐藻——杜氏藻<sup>[23]</sup>。此外,膏盐岩层系中广泛发育的有机酸盐是具有生烃能力的一类特殊的化学物质,具有很高的生烃转换率,是重要的生烃母质,尤其是对高演化、低有机质丰度的海相膏盐岩层系而言,有机酸盐可作为一种重要的再生烃源<sup>[27,47]</sup>。

生烃模拟实验显示,以浮游藻为主的烃源岩具有很高的生烃转化率,其单位 TOC 的产烃量可到底

栖藻的 2 倍<sup>[27]</sup>(图2)。而膏盐岩层系是以浮游生物和细菌为主的优质生烃生物组合,因此,推断它具有很高的生烃转化率,可能是最大的油气直接贡献者。此外,膏盐岩层系所含的碳酸盐、硫酸盐、氯化盐对有机质生烃有强烈的催化作用,能够明显提高烃源岩形成气态烃和液态烃的产率<sup>[63]</sup>(图3)。而且膏盐岩层系的形成环境和沉积模式使得膏盐岩层系中的有机质与碳酸盐、硫酸盐和氯化盐广泛接触,因此可大大提升烃类产率。同时由于膏盐岩层系排烃所需的有机碳含量很低<sup>[52]</sup>,因此也推断它应该具有良好的排烃效率。

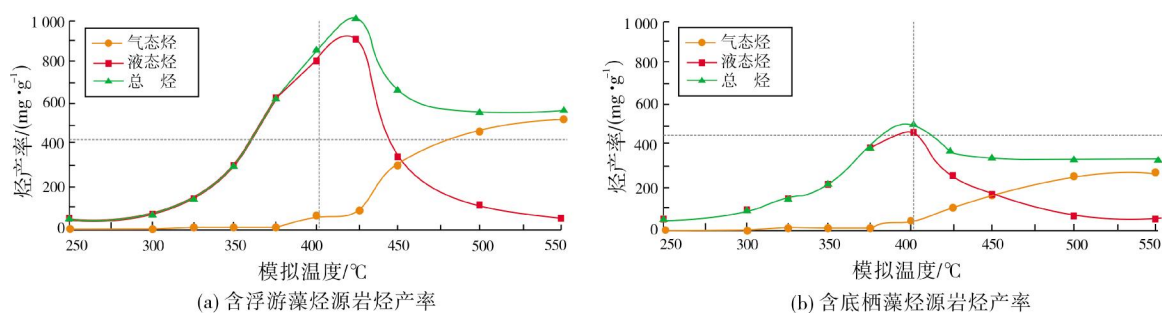


图2 海相层系不同生物组合有机质烃类产率(据文献[27])

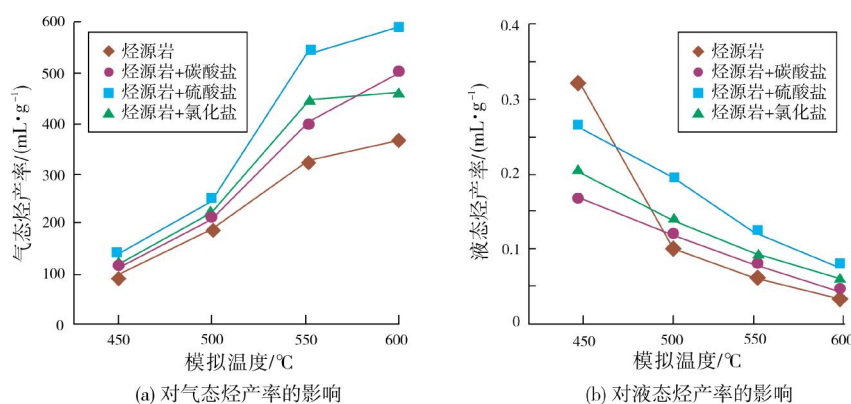


图3 膏盐岩层系中盐类物质的催化作用对烃类产率的影响(据文献[63])

### 3 结论

(1) 勘探实践和地质地球化学分析显示,由于富含优质的生烃物质,膏盐岩层系可作为海相盆地非常重要的烃源岩,我国的高演化、低丰度海相膏盐岩层系同样可作为良好的烃源岩。

(2) 膏盐层系烃源岩的生烃过程十分复杂:其一,膏盐岩层系烃源岩具有多元化的生烃物质——生烃生物组合与有机酸盐,二者具有不同的生烃途径、演化进程和烃类产物组分,二者共同作用导致

生烃过程复杂;其二,膏盐岩层系中的生烃物质与硫酸盐、氯化盐、碳酸盐、黏土等物质的紧密接触,使得有机-无机相互作用(催化作用、TSR等)异常活跃,控制着有机质演化进程、生烃路径、烃产率及组分;其三,膏盐岩层系引起的高盐度、地层超压等特殊的物理化学条件也控制着其生烃特征。

(3) 传统的评价方法难以适用于海相膏盐岩层系烃源岩,采用总生烃碳法对烃源岩演化及生烃潜力进行动态评价更为客观可靠。总生烃碳评价方法目前处于探索阶段,评价指标参数等仍需进一步研究完善。

## 参考文献

- [1] 刘文汇,赵恒,刘全有,等.膏盐岩层系在海相油气成藏中的潜在作用[J].石油学报,2016,37(12): 1451-1462.
- [2] 赵政璋,李永铁,叶和飞,等.青藏高原中生界沉积相及油气储盖层特征[M].北京:科学出版社,2001: 241-256.
- [3] 金之钧,周雁,云金表,等.我国海相地层膏盐岩盖层分布与近期油气勘探方向[J].石油与天然气地质,2010,31(6): 715-724.
- [4] 赵振宇,周瑶琪,马晓鸣,等.含油气盆地中膏盐岩层对油气成藏的重要影响[J].石油与天然气地质,2007,28(2): 299-308.
- [5] BUSSON G. Relationship between different types of evaporitic deposits and the occurrence of organic-rich layers (potential source rocks)[J]. Carbonates and evaporites, 1991, 6(2): 177-192.
- [6] UNGERER P, BURRUS J, DOLIGEZ B, et al. Basin evaluation by integrated two-dimensional modeling of heat transfer, fluid flow, hydrocarbon generation, and migration[J]. AAPG bulletin, 1990, 74(3): 309-335.
- [7] 石宝珩.陆相生油理论的由来和发展(I)[J].石油勘探与开发,1981,8(3): 14-17.
- [8] 金强,朱光有,王娟.咸化湖盆优质烃源岩的形成与分布[J].中国石油大学学报(自然科学版),2008,32(4): 19-23.
- [9] 陈建平,梁狄刚,张永昌,等.泥岩/页岩:中国元古宙—古生代海相沉积盆地主要烃源岩[J].地质学报,2013,87(7): 905-921.
- [10] 郝石生,贾振远.碳酸盐岩油气形成和分布[M].北京:石油工业出版社,1989.
- [11] 刘宝泉,梁狄刚,方杰,等.华北地区中上元古界、下古生界碳酸盐岩有机质成熟度与找油远景[J].地球化学,1985(2): 150-162.
- [12] 陈丕济.碳酸盐岩生油地化中几个问题的评述[J].石油实验地质,1985,7(1): 3-12.
- [13] 傅家谟,史继扬.石油演化理论与实践(II):石油演化的实践模型和石油演化的实践意义[J].地球化学,1977(2): 87-104.
- [14] LI Maowen, PANG Xiongqi. Contentious petroleum geochemical issues in China's sedimentary basins[J]. Petroleum science, 2004, 1(3): 4-22.
- [15] 朱光有,金强.东营凹陷两套优质烃源岩层地质地球化学特征研究[J].沉积学报,2003,21(3): 506-512.
- [16] 金强,查明.柴达木盆地西部第三系蒸发岩与生油岩共生沉积作用研究[J].地质科学,2000,35(4): 465-473.
- [17] EDGELL H S. Proterozoic salt basins of the Persian Gulf area and their role in hydrocarbon generation[J]. Precambrian research, 1991, 54(1): 1-14.
- [18] HUSSAIN M, WARREN J K. Source rock potential of shallow-water evaporites: an investigation in Holocene-Pleistocene salt flat sabkha(playa), west Texas-New Mexico[J]. Carbonates and evaporites, 1991, 6(2): 217-224.
- [19] TÄNAVUU-MILKEVICIENE K, SARG J F. Evolution of an organic-rich lake basin-stratigraphy, climate and tectonics: Piceance Creek basin, Eocene Green River Formation[J]. Sedimentology, 2012, 59(6): 1735-1768.
- [20] 李洪波,张敏,张春明,等.柴达木盆地西南部第三系烃源岩地球化学特征[J].天然气地球科学,2008,19(4): 519-523.
- [21] GÖCKE K, HERNÁNDEZ C, GIESENHAGEN H, et al. Seasonal variations of bacterial abundance and biomass and their relation to phytoplankton in the hypertrophic tropical lagoon Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia[J]. Journal of plankton research, 2004, 26(12): 1429-1439.
- [22] BARBE A, GRIMALT J O, PUEYO J J, et al. Characterization of model evaporitic environments through the study of lipid components[J]. Organic geochemistry, 1990, 16(4/6): 815-828.
- [23] 郑绵平,刘文高,向军.西藏扎布耶盐湖嗜盐菌、藻的发现和地质生态学意义[J].地质学报,1985(2): 162-171,188.
- [24] SAMMY N. Biological systems in north-western Australian solar salt fields[C]//Sixth symposium on salt. 1983(1): 207-215.
- [25] 刘文汇,腾格尔,王晓峰,等.中国海相碳酸盐岩层系有机质生烃理论新解[J].石油勘探与开发,2017,44(1): 155-164.
- [26] 刘鹏,王晓峰,房媛,等.碳酸盐岩有机质丰度测试新方法[J].沉积学报,2016,34(1): 200-206.
- [27] 刘文汇,王杰,腾格尔,等.中国海相层系多元生烃及其示踪技术[J].石油学报,2012,33(增刊1): 115-125.
- [28] 刘文汇,王杰,腾格尔,等.中国南方海相层系天然气烃源新认识及其示踪体系[J].石油与天然气地质,2010,31(6): 819-825.
- [29] KLUSKA B, ROSPONDEK M J, MARYNOWSKI L, et al. The Werra cyclothene (Upper Permian, Fore-Sudetic Monocline, Poland): insights into fluctuations of the sedimentary environment from organic geochemical studies[J]. Applied geochemistry, 2013, 29(1): 73-91.
- [30] GRICE K, SCHOUTEN S, PETERS K E, et al. Molecular isotopic characterisation of hydrocarbon biomarkers in Palaeocene-Eocene evaporitic, lacustrine source rocks from the Jiangnan Basin, China[J]. Organic geochemistry, 1998, 29(5/7): 1745-1764.
- [31] RICHARDSON M, ARTHUR M A, QUINN J S, et al. Depositional setting and hydrocarbon source potential of the Miocene Gulf of Suez syn-rift evaporites[J]. AAPG bulletin, 1988, 72(8): 1020-1021.
- [32] 贾蓉芬,刘德汉.鄂尔多斯盆地地下古生界海相碳酸盐岩有机质分布特征及其对气田形成的意义[J].海相油气地质,2000,5(1/2): 29-34.
- [33] 张劲超,赵晨露,杜浩坤,等.川西雷口坡组滩体沉积相研究[J].长江大学学报(自然科学版),2013,10(10): 4-6.
- [34] JOACHIMSKI M M, OSTERTAG-HENNING C, PANCOST R D, et al. Water column anoxia, enhanced productivity and concomitant changes in  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{34}\text{S}$  across the Frasnian-Famennian boundary(Kowala-Holy Cross Mountains/Poland)[J]. Chemical geology, 2001, 175(1): 109-131.
- [35] 张永生,杨玉卿,漆智先,等.江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组含盐岩系沉积特征与沉积环境[J].古地理学报,2003,5(1): 29-35.
- [36] 万赞来,胡明毅,胡忠贵,等.盐湖盆地浅水三角洲沉积模式:以江汉盆地潜江凹陷新沟咀组为例[J].沉积与特提斯地质,2011,31(2): 55-60.
- [37] BROOKS B T. Evidence of catalytic action in petroleum formation[J]. Industrial & engineering chemistry, 1952, 44(11): 2570-2577.
- [38] 李忠.试论油气形成过程中黏土矿物的催化作用[J].石油实验地质,1992,14(1): 59-63.
- [39] 胡素云,石书缘,王铜山,等.膏盐环境对碳酸盐岩层系成烃、成储和成藏的影响[J].中国石油勘探,2016,21(2): 20-27.
- [40] 彭平安,盛国英,傅家谟,等.盐湖沉积环境未成熟油的成因与碳酸盐沉积阶段沉积的有机质有关[J].科学通报,2000,45(增刊1): 2689-2694.
- [41] ROHRBACK B G, PETERS K E, KAPLAN I R. Geochemistry

- of artificially heated humic and sapropelic sediments: II: oil and gas generation[J]. AAPG bulletin, 1984, 68(8): 961-970.
- [42] 妥进才, 邵宏舜, 黄杏珍. 盐湖相生油岩中某些地球化学参数与沉积环境的关系[J]. 沉积学报, 1994, 12 (3): 114-119.
- [43] 张水昌, 帅燕华, 朱光有. TSR 促进原油裂解成气: 模拟实验证据[J]. 中国科学: D 辑 地球科学, 2008, 38(3): 307-311.
- [44] LIU Wenhui, Tenger, ZHANG Zhongning, et al. An isotope study of the accumulation mechanisms of high-sulfur gas from the Sichuan Basin, southwestern China[J]. Science China (Earth sciences), 2016, 59(11): 2142-2154.
- [45] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 四川盆地高含  $H_2S$  天然气的分布与 TSR 成因证据[J]. 地质学报, 2006, 80(8): 1208-1218.
- [46] 刘全有, 金之钧, 高波, 等. 川东北地区酸性气体中  $CO_2$  成因与 TSR 作用影响[J]. 地质学报, 2009, 83(8): 1195-1202.
- [47] 刘全有, 金之钧, 刘文汇, 等. 鄂尔多斯盆地海相层系中有机酸盐存在以及对低丰度高演化烃源岩生烃潜力评价的影响[J]. 中国科学: D 辑 地球科学, 2013, 43(12): 1975-1983.
- [48] HAO Fang, ZOU Huayao, GONG Zaisheng, et al. Hierarchies of overpressure retardation of organic matter maturation: case studies from petroleum basins in China[J]. AAPG bulletin, 2007, 91(10): 1467-1498.
- [49] HAO Fang, LI Sitian, SUN Yongchuan, et al. Characteristics and origin of the gas and condensate in the Yinggehai Basin, offshore South China Sea: evidence for effects of overpressure on petroleum generation and migration[J]. Organic geochemistry, 1996, 24 (3): 363-375.
- [50] TISSOT B, DURAND B, ESPITALIE J, et al. Influence of nature and diagenesis of organic matter in formation of petroleum[J]. AAPG bulletin, 1974, 58 (3): 499-506.
- [51] 梁狄刚, 陈建平, 张宝民, 等. 塔里木盆地库车坳陷陆相油气的生成[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [52] 彭平安, 刘大永, 秦艳, 等. 海相碳酸盐岩烃源岩评价的有机碳下限问题[J]. 地球化学, 2008, 37 (4): 415-422.
- [53] 殷鸿福, 谢树成, 颜佳新, 等. 海相碳酸盐烃源岩评价的地球生物学方法[J]. 中国科学: D 辑 地球科学, 2011, 41 (7): 895-909.
- [54] 夏新宇, 戴金星. 碳酸盐岩生烃指标及生烃量评价的新认识[J]. 石油学报, 2000, 21(4): 36-41.
- [55] JARVIE D M. Components and processes affecting producibility and commerciality of shale resource systems[J]. Geologica acta, 2014, 12 (4): 307-325.
- [56] HUNT J M. The origin of petroleum in carbonate rocks[J]. Developments in sedimentology, 1967, 9(Part B): 225-251.
- [57] PALACAS J G. Petroleum geochemistry and source rock potential of carbonate rocks[C]. AAPG studies in geology, 1984, 18: 120-128.
- [58] TISSOT B P, WELTE D H. Petroleum formation and occurrence[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 1984.
- [59] 梁狄刚, 张水昌, 张宝民, 等. 从塔里木盆地看中国海相生油问题[J]. 地学前缘, 2000, 7 (4): 534-547.
- [60] 孙敏卓, 孟仟祥, 郑建京, 等. 塔里木盆地海相碳酸盐岩中有机酸盐的分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44 (1): 216-222.
- [61] 石油地质勘探专业标准化委员会. 沉积岩粘土矿物相对含量 X 射线衍射分析方法: SY/T 5163-1995[S]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- [62] WARREN J K. Evaporites through time: tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits [J]. Earth-science reviews, 2010, 98 (3): 217-268.
- [63] 王娟, 金强, 马国政, 等. 高成熟阶段膏岩等盐类物质在烃源岩热解生烃过程中的催化作用[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(1): 26-31.

编辑:黄革萍

## A preliminary study on hydrocarbon generation and evaluation of marine gypsum/salt-bearing source rocks

ZHAO Heng, LIU Wenhui, LI Yanjie, LIU Quanyou, ZHOU Bing, LUO Houyong, WANG Jie, LU Longfei, MENG Qingqiang, WU Xiaoqi

**Abstract:** Gypsum/salt-bearing strata series have been proved to be a very important hydrocarbon source in marine basins according to oil-gas exploration and geological-geochemical analysis, and the marine gypsum/salt beds with high maturity and low TOC in China can also act as a good source rock. The marine gypsum/salt strata have several hydrocarbon-generation substances, extremely active organic-inorganic interactions, and special physical-chemical conditions. These factors act synergistically in affecting the source of hydrocarbon, thermal evolution process of organic matter, component, stable isotopic composition and yield of the product. Therefore, the study of hydrocarbon generation of gypsum/salt-bearing source bed has important practical and theoretical significance to China's source-reservoir matching in marine gypsum/salt strata, hydrocarbon-generation mechanism and the evaluation of hydrocarbon source rock. Moreover, because of the particularity in hydrocarbon source and the mineral composition of the marine gypsum/salt strata, traditional evaluation indexes of hydrocarbon source rocks such as TOC, Chloroform asphalt "A",  $S_1+S_2$ , et al, are hardly suitable for marine source rock. So the dynamic evaluation of source rock evolution and hydrocarbon potential should be more objective and reliable by using total hydrocarbon-generation carbon method.

**Key words:** marine; gypsum/salt-bearing strata series; evaluation of source rock; total hydrocarbon-generation carbon; organic acid salt

**ZHAO Heng,** First author: PhD, engaged in oil and gas geology and isotope geochemistry. Add: No. 1 Fangzhi Rd., Xuzhou, Jiangsu 221006, China

**LIU Wenhui,** Corresponding author: PhD, Professor, engaged in oil and gas geology and natural gas geochemistry. Add: No. 229 Taibai Rd., Xi'an, Shaanxi 710069, China