

# 石油双机耦合成因假说与意义

罗群<sup>1</sup>, 贾春<sup>2</sup>, 欧光习<sup>3</sup>, 梁光河<sup>4</sup>, 刘银河<sup>5</sup>, 曾普胜<sup>6</sup>, 陈佳宇<sup>1</sup>, 崔倩<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(北京), 北京 102249; 2. 四川省地质矿产勘查开发局一〇九地质队, 成都 610100;

3. 核工业北京地质研究院, 北京 100020; 4. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100020;

5. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 6. 中国地质科学院, 北京 100032)

**摘要:**明确油气的成因及其分布具有重要的理论与现实意义。针对目前石油成因研究中的关键科学问题,以全球构造学、石油地质学的一般原理为指导,对各种石油成因假说进行梳理、融合和集成创新,形成了石油的双机(有机-无机)耦合成因假说框架。其主要观点是,石油(或天然气)是一种多成因的可再生资源,储量巨大。石油的形成与分布是盆地与地幔隆起、深部流体与浅部流体、有机生烃机制与无机生烃机制、深大断裂与封盖条件 4 对成烃成藏要素相互耦合的结果。双机耦合程度越好,油气越丰富。盆地及其基底以下区域是耦合程度最好的领域,其次是盆地周边区域封盖条件较好的深大断裂发育区;深大断裂与封盖条件的匹配是控制油气聚集的重要因素;长期、多期或近期活跃的深大断裂发育区封盖条件好的大型圈闭,是最可能取得重大勘探突破的区域。

**关键词:**石油;有机成因;无机成因;双机耦合成因;假说;勘探观念

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

## Hypothesis of organic-inorganic coupling causes for petroleum generation and its significance

LUO Qun<sup>1</sup>, JIA Chun<sup>2</sup>, OU Guangxi<sup>3</sup>, LIANG Guanghe<sup>4</sup>,

LIU Yinhe<sup>5</sup>, ZENG Pusheng<sup>6</sup>, CHEN Jiayu<sup>1</sup>, CUI Qian<sup>1</sup>

(1. China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2. 109 Geological Team, Sichuan Geology and Mineral Exploration and Development Bureau, Chengdu, Sichuan 610100, China;

3. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100020, China;

4. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100020, China;

5. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China;

6. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100032, China)

**Abstract:** It has important theoretical and practical significance to clarify the causes and distribution of oil and gas. This paper focused on the key scientific issues in the current petroleum genesis research, guided by the general principles of global tectonics and petroleum geology. Various petroleum genesis hypotheses have been sorted out, merged, integrated and innovated, thus a hypothesis framework of organic-inorganic coupling causes for petroleum was introduced. The main factors are that oil (including natural gas) is a renewable resource with multiple origins and has huge reserves. The formation and distribution of petroleum is the result of the coupling of four pairs of hydrocarbon-forming factors, including basin and mantle uplift, deep and shallow fluids, organic and inorganic hydrocarbon generation mechanisms, deep faults and sealing conditions. The higher degree of organic-inorganic cause coupling indicates the richer the oil and gas. The basin and the area below its basement are the locations with the best degree of coupling, followed by the deep and large fault development areas with good sealing conditions in the surrounding areas of the basin. The matching of deep and large faults with sealing conditions is an important factor constraining hydrocarbon accumulation. Large-scale traps with good sealing conditions in long-term, multi-period or recent active deep and large fault development areas are the most favorable targets for major exploration successes.

**Key words:** petroleum; organic cause; inorganic cause; organic-inorganic coupling causes; hypothesis; exploration concept

收稿日期: 2020-05-25; 修订日期: 2021-03-15。

作者简介: 罗群(1963—), 男, 博士, 教授, 从事非常规油气成藏与地质评价研究。E-mail: luqun2002@263.net。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672118), 国家科技重大专项(2017ZX05035-002)和中国石油大学(北京)—中国石油战略合作科技专项(ZLZX2020-01-06)联合资助。

最早探讨石油成因的学者是我国宋代的沈括,他在《梦溪笔谈》中指出:“盖石油至多,生于地中无穷,……与泉水相杂”<sup>[1]</sup>。1763年,前苏联学者罗蒙诺索夫提出蒸馏说,认为石油是煤在地热作用下干馏产生的,从此开创了石油有机成因说。但自从1876年俄罗斯化学家门捷列夫提出石油的无机成因说——碳化说以来<sup>[2]</sup>,石油的成因已经争论近150年,争论的核心是油气的物质起源和生成过程。

有关石油成因学说超过了40种,主要有碳化铁生烃说、宇宙说、二元成因说、多元成因说等(表1)<sup>[2-21]</sup>。依据原始物质与形成过程,石油成因说主要可归纳为有机成因说和无机成因说两大类。有机成因说认为石油是由生物遗体形成的干酪根在地下高温高压和催化剂作用下演变而成的;无机成因说认为石油是由与生物无关的物质在适宜的地质条件下演变而成的。有机成因说比较系统、成熟、完善,目前为绝大多数人所接受,已经上升到理论;

表 1 石油成因主要学说简况<sup>[2-21]</sup>

Table 1 Summary of main causes for petroleum

学派	主要人物	学说	核心观点	时间
无机成因说	门捷列夫 <sup>[2]</sup>	碳化铁生烃说	石油是地下深处的重金属碳化物与下渗水相互作用生成的	1876
	索可洛夫 <sup>[3]</sup>	宇宙说	随着地球不断冷却,地球诞生时被吸收的碳氢化合物逐渐冷凝埋藏在地壳中形成石油	1889
	沃里沃夫斯基 <sup>[3]</sup>	费—托合成说	地幔脱气生成的CO <sub>2</sub> 、CO、H <sub>2</sub> 沿玄武岩的破裂带上升到超基性的蛇纹岩带,发生著名的费—托合成反应,形成烃类	1930
	库得梁采夫 <sup>[4-5]</sup>	岩浆成因说	石油是基性岩浆在冷却过程中C、H元素在高温高压条件下合成的碳氢化合物	1949
	ROBINSON <sup>[6]</sup>	费—托合成说	地球上原始石油可能是在20亿年前通过费—托合成反应而形成	1963
	耶兰斯基 <sup>[6]</sup>	蛇纹石化成油理论	蛇纹石化作用多发生在地壳深部的拗陷,蛇纹石化生成的油气沿裂隙升入沉积岩中形成油藏	1966
	GOLD <sup>[7]</sup>	地幔脱气说	在地球深部存在大量甲烷,这些气体可通过断裂、火山活动得到释放,在断裂附近形成无机成因的油气藏	1982
	杜乐天 <sup>[8-9]</sup>	烃碱幔汁说	烃碱幔汁流体是HACONS流体,油气是由“幔汁”从地球深部带来的。幔汁中的C-H系统才是油气的主要来源	1988
	李扬鉴 <sup>[9]</sup>	大陆层控构造理论	严重缺氧的干酪根演变成含氢量非常丰富的烃,氢来自地球深部,干酪根生烃的主要能量也来自地球深部	1996
	罗群 <sup>[10]</sup>	深大断裂说	断裂输导地幔脱气带各类成因的无机烃向上运移,并聚集在沿深大断裂带分布的各类圈闭中形成无机烃藏	1998
	刘先志 <sup>[11]</sup>	地下放电发光说	石油、天然气是地下无机物因地下放电发光合成形成的	2006
	徐晓宁 <sup>[12]</sup>	二氧化碳基源学说	高温高压下,CO <sub>2</sub> 能够很容易地与H <sub>2</sub> 反应,生成CH <sub>4</sub>	2012
	张景廉 <sup>[5,13]</sup>	油气深部起源说	在传统干酪根晚期降解生烃学说划定的油气“经济死亡线”以下(地球深部),油气仍有很高的热力学稳定性	2013
	周宁超 <sup>[14]</sup>	成因模式说	提出了3种无机成因油气成因模式:“缺花岗岩”型盆地油气模式、板块俯冲带油气模式和洋中脊热液油气模式	2014
	虞震东 <sup>[15]</sup>	地下核燃烧学	地下核燃烧导致碳元素和地下水自动发生化学反应,生成大量的碳氢氧化物	2016
崔永强 <sup>[9]</sup>	幔源油气理论	以烃类为主的挥发分和以钾钠为主的碱金属两大类组分构成了地幔烃碱流体;烃类组分进入圈闭形成油气藏	2017	
有机成因说	罗蒙诺索夫 <sup>[1,3,16]</sup>	蒸馏说	石油是煤在地热作用下干馏产生的	1763
	美国学者 <sup>[4]</sup>	海相生油说	石油都形成于海相地层中,由动物、植物死亡后的遗体经过高温高压作用形成的	19世纪
	潘钟祥等 <sup>[4,17]</sup>	陆相生油说	石油可以在淡水沉积物中生成,陆相生油是多期的,而且可能形成油田	1941
二元—多元成因说	罗志立 <sup>[18]</sup>	地裂运动控烃说	地裂盆地可以富集由有机物质演化而成的油气,也可以接纳无机成因的深层油气资源	1991
	何志高 <sup>[19]</sup>	二元碳酸盐决定论	湿封闭体系微生物和碳酸盐主导生油,没有碳酸盐古物源沉积物的任何沉积盆地都不可能石油	2000
	陈发亮 <sup>[20]</sup>	二元—元素循环说	石油和天然气只是元素循环过程中的一种中间产物,其生成是多方面的而没有一个统一的模式	2001
	滕吉文 <sup>[21]</sup>	双机混合成因说	承认在以有机物成油为主体的前提下,无机物亦可生成部分石油	2017
	郭占谦 <sup>[7]</sup>	多元成因说	石油、天然气的生成具有一次性与可再生的两种属性;有机生烃、无机生烃与混合生烃3种机制	2008

表2 石油无机成因论与有机成因论的主要证据与缺陷

Table 2 Main evidences and defects of inorganic and organic cause theories for petroleum

无机成因论		有机成因论	
证据	缺陷	证据	缺陷
(1) 不含生物的地层或盆地外地层中也能找到石油。 (2) 油气和热液矿床共处于统一的共生序列中。 (3) 现代火山活动有大量烃类物质喷出。 (4) 实验室用无机物模拟出了石油(费—托合成烃实验)。 (5) 许多天体中存在碳氢化合物	(1) 不能直接指导油气勘探。 (2) 多以化学反应结果为依据,缺少实际地质材料。 (3) 在中国还没有发现一个商业无机成因油气藏。 (4) 学说繁多,大多相互割裂,甚至矛盾,不统一。 (5) 不能解释石油中含大量生物标志化合物	(1) 99%油气藏都存在于沉积盆地之中。 (2) 99%油气藏都是通过有机成因论指导找到的。 (3) 石油中含有生物标记化合物,有旋光性。 (4) 干酪根热模拟实验获得烃类物质	(1) 不能解释巨量石油的来源,与生物数量不匹配。 (2) 不能解释严重缺氢的干酪根演变成氢含量非常丰富的烃,氢从何来? (3) 有些陨石中的石油也发现含有生物标记化合物,有旋光性。 (4) 干酪根生烃热解模拟实验的热解产物在组成上与天然原油、天然气的组成差异很大。 (5) 不能解释镜质体反射率 $R_o$ 值为 3.0%、温度超过 300 °C 时,仍有液态烃的存在

无机成因说比较分散,总体还不成熟,仍处于假说阶段。两种石油成因说的主要证据与缺陷见表2。

由此可见,石油与天然气既有有机成因的、无机成因的,也有混合(二元或多元)成因的,仍存在以下科学问题:

(1) 无机成因的油气能否单独形成商业油藏,不清楚。既然无机成因的油气这么多,为什么中国还没有找到一个独立的具有商业价值的无机油气藏?

(2) 有机与无机油气藏共同的成藏背景、形成机制是什么,他们之间有什么相互联系? 有机无机油气藏分布序列是什么? 是否存在一个共同反映有机、无机油气藏形成分布特征的规律? 如果有,这个规律是什么? 如何利用这一规律去有效指导油气勘探?

(3) 如果有有机说与无机说并没有突出的矛盾,都有合理、科学的内容,能否将有机论与无机论进行有机的整合与融合,形成一个统一的能够解释和回答目前各自难以回答的问题,能够相互说服对方,能够有效指导油气勘探的大理论或假说。尽管目前已经提出二元(双机)、多元混合学说,但他们多仅仅是将有机说与无机说进行简单、机械地组合或拼合,没有揭示其内在联系,没有实现两者的真正融合。

## 1 石油双机耦合成因假说

### 1.1 “石油双机耦合成因假说”形成的思路

针对目前有机说与无机说存在的缺陷和科学问题,站在全球视野高度,充分吸取有机说与无机说中合理、有益的部分,遵循全球构造学、石油地质学的一般原理,以地质时空观为指导,以客观事实

为依据,以地球的客观运动规律为导向,结合自己的科研实践,对有机说、无机说进行梳理、整合、融合和创新,以揭示油气成藏机制和总结油气成藏与分布规律,建立合理的、对油气勘探有指导作用的、统筹有机与无机成因油气为一体的石油成因假说或理论框架,开展油气成因、油气藏形成机制、分布规律的研究与总结,形成了石油的有机—无机(双机)耦合成因假说框架。

### 1.2 “石油双机耦合成因假说”基本原理与中国大陆双机耦合成烃成藏模式

#### 1.2.1 “石油双机耦合成因假说”基本原理

石油的双机耦合成因假说的基本原理主要来源于干酪根热解生烃、烃碱幔汁生烃、费—托合成生烃、深大断裂控烃、幔源油气等学说的整合和融合。

地球深部(包括地幔、下地壳、中地壳)有大量的各种富含 C、H、烃、碱金属的流体<sup>[8-9,22-23]</sup>。地球的运动引起地幔的不均衡活动而发生局部隆起,导致深大断裂的产生和活动,促进地幔隆起对应的上地壳发生沉陷,形成受深大断裂控制的沉积盆地<sup>[24-26]</sup>。断入地幔脱气带的深大断裂长期、多期活动,输导烃碱幔汁(包括 H<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、碱金属等)、岩浆作用产生的富 C、H、烃及其流体,以及深部其他领域的富 C、H、烃及各种流体,在压力差等动力作用下,向深大断裂汇聚并沿深大断裂向上运移,其中 H<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub> 在适宜的地质条件下(温度、压力、Fe、Ni 等催化剂)进行费—托合成反应,生成烃类物质,它们随原有的烃类物质一起向上运移,一部分在盆地基底之下的深大断裂周边具有封盖条件的圈闭中聚集,形成无机成因油气藏,一部分继续沿深大断裂向上运移进入盆地,在盆地中适宜的圈闭中单独聚集,形成无机

成因油气藏,或与盆地中已经形成的有机成因的油气藏混合,形成混合成因油气藏<sup>[27-35]</sup>。同时,随深大断裂源源不断进入盆地烃源岩的  $H_2$ ,作为干酪根热解生烃的重要氢源补充,为干酪根热解生成大量的烃提供了物质保障。深大断裂在输导深部流体的同时,也将深部的能量(如热量等)传导到盆地内的烃源层,为干酪根热解生烃提供了能量;深部流体进入盆地储层,带来的物质(如  $CO_2$ )与能量(地热)也有利于改造油气的储集空间<sup>[36-42]</sup>。位于盆地外的深大断裂,除了没有盆地内的控烃过程外,其控制油气的作用原理与盆地内的深大断裂类似。以上过程中,深大断裂起到了控制盆地形成、输导流体(包括烃类流体)运移、提供费—托合成烃的场所、传递能量的作用。油气的成烃成藏结果与分布特征,取决于有机作用与无机作用(双机)的耦合程度,包括盆地与地幔隆起耦合(称盆幔耦合)、深浅流体耦合(即深部无机流体与盆地有机流体的耦合,称流体耦合)、成烃机制耦合(即有机成烃机制与无机成烃机制的耦合,称机制耦合)和断层与盖层耦合(即深大断裂与封盖条件的耦合,称断盖耦合)。耦合包括两者的时空耦合,耦合得越好,油气越富集。

### 1.2.2 中国大陆双机耦合成烃成藏模式

基于石油双机耦合成因假说基本原理,结合中国大陆构造地质特征,建立了中国大陆的双机耦合成烃成藏模式:东部地区由于太平洋板块向中国大陆俯冲导致地幔上拱,产生深大断裂并控制东部裂谷盆地形成,深大断裂向下沟通地幔脱气带,向上伸入裂谷盆地,成为东部裂谷盆地及其基底和周边

无机成因烃藏或混合成因烃藏的烃源断裂,同时也给盆地内烃源岩的干酪根热解生烃增能加氢;中、西部地区由于受印度板块的挤压,在板块俯冲带及板块之间形成逆冲或压扭走滑性质的深大断裂,它们沟通地幔脱气带与地壳(包括盆地内和盆地外)沿断裂展布的各类圈闭,在盆地内或盆地外形成各类无机成因烃藏或混合成因烃藏,同时也给盆地中烃源岩的干酪根热解生烃增能加氢(图 1)。

### 1.3 “石油的双机耦合成因假说”主要观点

#### 1.3.1 油气的形成与富集、分布受控于统一地球构造运动背景

油气是碳、氢化合物的烃类物质,地壳、地幔、地核都有分布<sup>[4,16,43]</sup>,盆地内、盆地外都有分布<sup>[13,44]</sup>,有无机成因的,也有有机成因的和多元成因的<sup>[43-44]</sup>,它们的形成、富集与分布,受控于地球圈层结构及其演化、地球动力学背景、深大断裂活动,它们赋存于核幔边界、地幔脱气带、软流圈、地壳低速高导层、地壳沉积盆地之中或盆地之外。地球运动导致地幔隆起,地幔脱气、幔汁形成、岩浆分异、深大断裂活动、盆地沉降与生物繁殖、死亡和埋藏,因而控制着不同成因类型油气的形成、富集与分布。

#### 1.3.2 油气成因类型、成烃机制、成藏过程、富集规模与分布特征取决于双机耦合程度

双机耦合指有机事件与过程(与生物作用有关的地质事件与过程)和无机事件与过程(与生物作用无关的地质事件与过程)在时空相互匹配、相互结合及其相互作用的过程与结果,主要包括盆幔耦合、流体耦合、机制耦合、断盖耦合 4 个方面。

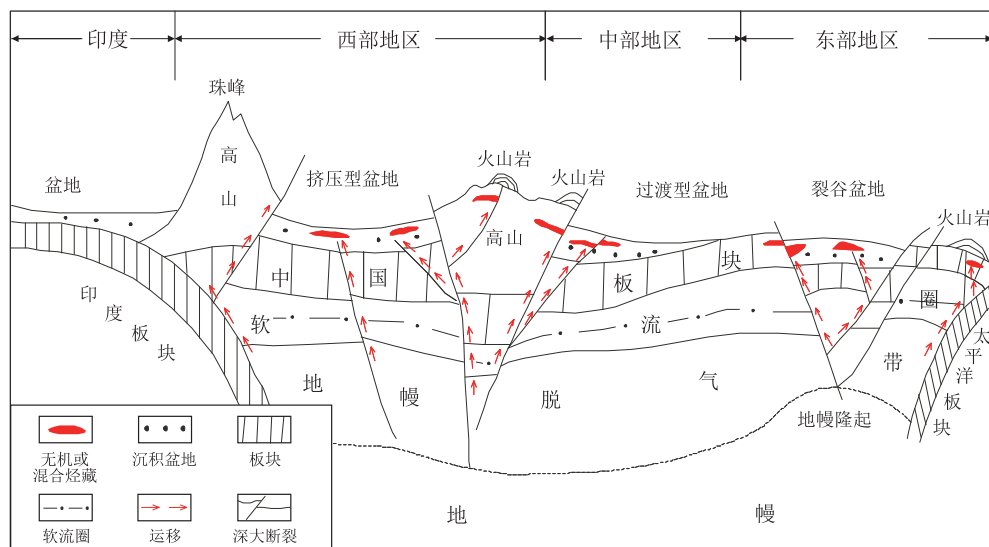


图 1 中国大陆的油气双机耦合成烃成藏模式

(1) 盆幔耦合:大型含油气盆地往往对应着地幔隆起,且隆起幅度与油气丰度呈正相关<sup>[45-48]</sup>,因此,地幔隆起与盆地的时空耦合关系决定着盆地及其基底油气的赋存和分布。没有地幔隆起的盆地及基底不会含有丰富的油气资源,地幔隆起幅度越大、对应的盆地形成演化越有利于油气的形成与富集。

(2) 流体耦合:即深、浅部流体耦合,深部流体指地幔及中、下地壳中的无机流体,包括幔汁、岩浆分异流体等,浅部流体主要指盆地内部的有机流体,包括与有机烃有关的流体<sup>[49-50]</sup>。理论计算与模拟实验表明,盆地中烃源岩干酪根热解生烃,如果没有深部氢的补充,即没有深部流体的加氢增能作用,只靠盆地中有限的干酪根热解生烃作用,是很难有大规模的烃类生成的。因此,在盆地中要生成巨量烃类物质,必须要有丰富的富氢深部流体进入烃源层,必须实现深部流体与浅部流体在时空上的有利匹配和融合。

(3) 机制耦合:即有机生烃机制(干酪根热解)与无机生烃机制(包括费-托合成、地幔脱气、幔汁作用、岩浆分异等)的时空匹配。最好的形式是盆内、盆外(尤其盆地基底)均赋存丰富的油气,这就需要盆内的有机生烃机制与盆外的无机生烃机制同时发挥最大的作用,即有机生烃机制的生烃效应与无机生烃机制的生烃效应在时空上进行最有利的匹配。两者匹配得越好,油气越丰富。

(4) 断盖耦合:即深大断裂对流体的输导与区域盖层、直接盖层对油气封闭性的时空匹配关系。深大断裂是输导深部富C、H、烃类流体向浅层和盆地运移的通道,也是传递成烃成藏能量的媒介,其对油气成烃成藏有至关重要的控制作用。而盖层、尤其是区域盖层对油气成藏的重要性却往往被忽视。为什么目前发现的绝大多数油气藏都分布于盆地中,这是因为盆地中往往发育多套泥质、盐岩、石膏岩等封闭性好的区域盖层,宏观上封盖、阻止了油气的大规模的散失,如四川盆地的五峰组—龙马溪组泥页岩,松辽盆地的青山口组泥页岩,鄂尔多斯盆地的延长组泥页岩等。断盖耦合,就是深大断裂将深部大量生烃的原始物质(富C、H流体)及烃类及时输导上来,既补充盆地中烃源岩干酪根热解生烃中的氢,以生成大量的烃,又可以将深部无机烃也输导到中浅层和盆地中的圈闭聚集成藏。在圈闭的上方要有盖层尤其是区域盖层,盖层的封闭性越好,越有利于大油气藏的形成。

以上4对成藏要素的时空匹配得越好,生烃成藏的机会就越多,形成的油气藏的规模也就越大。图2反映了有机—无机(双机)耦合成烃成藏机理与分布模式。

1.3.3 深大断裂控制的盆地区域是双机耦合最好的区域,油气最为丰富,且纵向上油气分布规律明显,需要分步勘探

深大断裂控制的盆地区域,是地幔隆起的对

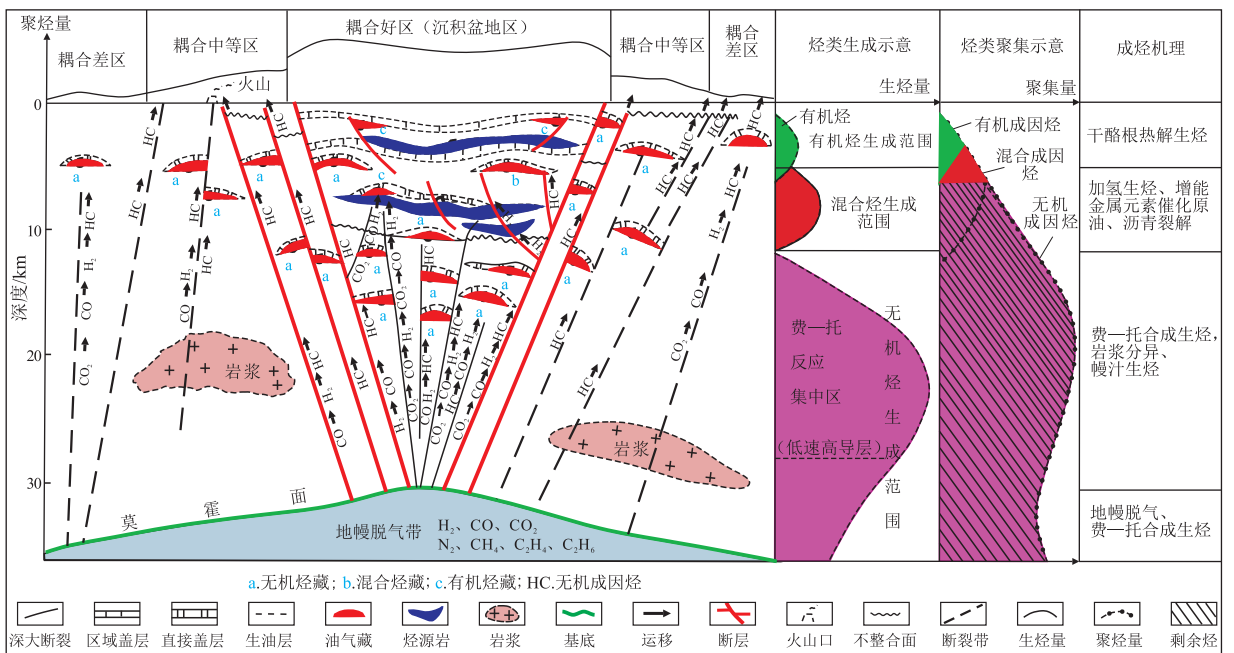


图2 油气的有机—无机(双机)耦合成烃成藏机理与烃类分布模式  
Fig.2 Hydrocarbon generation and accumulation mechanism with the coupling of organic and inorganic causes, and hydrocarbon distribution pattern

应(耦合)区域,深大断裂最为发育。深大断裂是物质交换与能量交换的媒介,这里深部流体最为活跃,无论是深部的幔汁活动、费—托反应、岩浆分异,还是盆地内的干酪根热解生烃与加氢增能生烃,都表现得最为突出。纵向上,从盆地到基底再到基底深部,烃类聚集量明显增大(图2):①盆地中、浅层(埋深浅于5 km,即第一深度空间<sup>[48]</sup>)。主要为有机烃生成区域,干酪根热解生烃为主要成烃机理,主要聚集有机成因烃和少部分混合成因烃,目前已经发现和采出大部分,是目前主要勘探的领域;②盆地深层(5 km至盆地基底(约10 km),即第二深度空间<sup>[48]</sup>)为混合烃形成区域。大量深部流体随深大断裂进入,干酪根加氢增能热解生烃、金属元素催化干酪根热解、催化原油和沥青裂解成气为主要成烃机制,并伴随有深部无机烃随深大断裂的大量涌入,与有机成因烃混合成藏或单独成藏,这个区域生烃量和聚烃量明显比盆地中浅层多,其中已经有少量被发现和采出,绝大部分仍残留在地下,是下步勘探取得突破最现实的领域;③基底以下是无机烃生成区域,其中盆地基底到壳幔分界(约33 km)是幔汁生烃、费—托合成生烃、岩浆分异成烃的有利区域,地幔上部(埋深约在10~33 km)是地幔脱气带,地幔脱气是该区域的主要成烃机制。无机烃生成区域蕴藏着巨量的无机成因烃,目前人类还没有揭示,是将来油气勘探的主要领域(图2)。需要说明的是,图2中烃类生成示意图和烃类聚集示意图的横坐标“生烃量”、“聚烃量”是一个相对的概念,限于目前人们的认识和科技的发展,还无法对地表下面不同圈层的“生烃量”、“聚烃量”进行定量的估计,尤其是越往深层,越不好估计。因此,横坐标上没有刻度和数据,只是表示一个相对大小。

### 1.3.4 深大断裂发育的盆地外边缘区域与深大断裂发育的非盆地区域,双机耦合程度中等

深大断裂发育的盆地外边缘区域与深大断裂发育的非盆地区域,往往处于地幔隆起的边部或地幔隆起斜坡,尽管有深大断裂发育,深部流体活跃,但由于缺少烃源层,也不发育封闭程度好的区域性分布的沉积盖层。因此,这些地区缺少盆地与地幔隆起、深部流体与浅部流体、断裂与盖层的有效耦合,油气富集程度明显低于盆地内区域,其油气富集类型为无机成因油气,油气富集程度主要取决于深大断裂附近盖层尤其是区域盖层的发育程度。不排除在封盖条件好的深大断裂发育区找到大型甚至特大型无机油气藏的可能。

### 1.3.5 深大断裂不发育的地区,双机耦合程度差,油气不富集

深大断裂不发育的地区,如板块内部构造稳定区、缺少4对成藏要素(盆地与地幔隆起、深部与浅部流体、有机与无机生烃机制、深大断裂与封盖条件)的有利配合,即缺少双机的有利耦合,因此难以有大规模的油气聚集。

### 1.3.6 深大断裂与封盖层的有利匹配是形成大规模油气藏的充分必要条件

沟通地幔与地壳的深大断裂是物质交换、能量交换的特殊地带,起着输导成烃流体和烃类物质向浅部和盆地运移、提供费—托合成生烃场所、传递生烃与聚烃能量、控制断裂附近圈闭的形成等关键作用,没有深大断裂,不可能有规模效应的成烃与成藏效应;但是,如果没有良好的封盖条件,深大断裂成烃成藏的油气会散失,不可能有大规模的油气富集。目前在许多盆地周边非沉积岩中发现大量的油气显示和古油藏,检测其中包裹体,发现大量的油气包裹体<sup>[18]</sup>,这正是因为缺少盖层,油气大量散失的证据。因此,要形成大规模油气聚集,必须要有深大断裂与区域盖层(以及直接盖层)的时空有利匹配,反过来,凡是大规模的油气藏,都有深大断裂与区域盖层(以及直接盖层)的时空有利匹配。

### 1.3.7 基于石油的双机耦合成因假说的勘探思路

石油的双机耦合成因假说以探讨油气成因为主要目的,以寻找大油气藏为主要目标,其勘探思路是“顺藤摸瓜”,“藤”即是深大断裂,“瓜”即是大规模油气藏,就是以深大断裂为线索,尤其是长期、多期活动,甚至现今还在活动的深大断裂为线索,寻找其影响区域内封盖条件相对好的大圈闭,进行钻探。值得注意的是,流体与烃类物质沿深大断裂运移,还有一个优势运移通道的问题,只有位于断面优势运移通道及其附近的圈闭才能聚集油气成藏。

## 1.4 “石油的双机耦合成因假说”提出的意义

### 1.4.1 理论意义

以地球构造格架和动力学为研究背景,以有机—无机成烃事件及其耦合关系为主要依据,结合自己的研究成果,对前人有关石油成因理论成果进行梳理、整合、融合和集成创新,形成石油的双机耦合成因假说框架。双机耦合成因假说能合理解释目前有机说与无机说难以解释的问题,将众多的有机说和无机说有机地统一于一个理论框架下,明确了石油的形成演化过程,揭示和建立石油的成烃、

成藏、分布与富集机理和模式,提出了具体寻找大油气藏的勘探原则和思路,初步形成了一个有机的理论体系框架,有利于终止有机与无机学派的长期争论,是对石油成因与成藏理论的重要补充、推进和完善,具有重要的理论意义。石油的双机耦合成因假说还将在实践—认识—再实践—再认识中不断修正、补充、完善和发展。

#### 1.4.2 现实意义

石油的双机耦合成因论的提出,对我国油气勘探具有重大的现实意义。2018年我国的石油对外依存度已经超过70%,天然气对外依存度已经超过45%,油气已经成为制约我国国民经济、社会发展和国家安全的卡脖子瓶颈。如果按照目前流行的石油成因理论进行勘探开发,我国的油气的对外依存度必然进一步攀升,而依据“石油的双机耦合成因论”进行勘探开发,我国的油气对外依存度可能大幅度降低,甚至不远的将来可能会实现能源独立。

依据“石油的双机耦合成因论”,有如下认识和启示:

(1) 油气是可再生资源,是取之不尽,用之不竭的。

依据目前流行的油气成因理论,油气是非常有限的,主要局限于盆地之中,是不可再生的资源,越采越少,终将枯竭。而依据“石油的双机耦合成因论”,地球中的油气总量巨大,是可再生资源,是取之不尽,用之不竭的,它们主要赋存在盆地深层、基底和盆地外的深大断裂发育的广阔地区。

(2) 油气勘探要变被动为主动,必须转变观念。

我国目前的油气勘探开发仍以流行的石油有机成因理论为依据和指导,使得勘探领域受到很大的局限。“石油双机耦合成因论”表明,油气分布不受“源控论”约束,更没有所谓的“下限”“底线”。因此,油气勘探应该到更广大的领域,如含油气盆地的深层,含油气盆地的基底及盆地的基底以下,到含油气盆地外,到非沉积岩(尤其是火山岩)区寻找大油气藏。如中国东部伸展盆地带及新近纪至第四纪北西西向构造、岩浆活动带是无机成因油气分布的有利地区<sup>[14]</sup>。

(3) 油气勘探要取得大突破,必须抓住主要矛盾,找到控制大油气藏形成与分布的主要因素。

“深大断裂与封盖层的有利匹配是形成大规模油气藏的充要条件”是“石油双机耦合成因假说”的重要观点,容易取得油气勘探大突破的地方应该具备这些条件:①长期或多期或近期活跃的深

大断裂分布区域;②上覆地层存在区域性盖层(除了区域性泥质岩或泥页岩或盐岩或石膏岩或泥灰岩等外,相对大面积分布的致密火山岩如各种熔岩也行);③存在大型圈闭,在我国满足这些条件的地区有很多,除了目前勘探的各大沉积盆地外,纵向上许多沉积盆地基底及以下领域、平面上盆地之外的许多火山岩发育区都具备这3个条件。

(4) 独特的大地构造条件决定了我国具有非常丰富的油气资源

我国独特的大地构造背景及其演化历史,决定了我国比其他国家具有更为丰富的油气资源和更广阔的勘探领域。

大地构造背景上,我国位于东部太平洋、南部印度、北部西伯利亚三大板块长期作用下,地层破碎、深大断裂极为发育,成为我国不同于其他国家的独特地质风格。一部分深大断裂控制含油气盆地,成为油气资源最为丰富的区域,其他深大断裂分布在盆地之外,沿这些深大断裂展布的地区,也应该是(无机)油气资源比较丰富的地区(图3)。

据郭占谦研究,中国板块由28个古板块与小板块拼接而成,由136条断开岩石圈或地壳的深大断裂分割,他们遍布整个中国大陆,成为地球深部物质(包括烃类)向地壳、地表运移的上涌通道<sup>[43]</sup>,沿着这些深大断裂(包括目前已经发现的含油气盆地),一定分布着丰富的油气资源。

另外,对已经枯竭或正在枯竭的油田(如玉门油田),要充满信心,依据“石油的双机耦合成因假说”,若干年后,油田将重新聚集更多的油气,焕发青春。

## 2 双机耦合成烃成藏实例

### 2.1 松辽盆地昌德气田芳深5、芳深1气藏基本情况

位于中国东北部的松辽盆地侏罗纪—早白垩世为典型的裂谷盆地,其形成与太平洋板块向西北俯冲导致中国东部地幔上拱有关<sup>[8,16,43]</sup>。盆地古中央隆起带的昌德气藏为一大型气藏,由多个气藏组成(图4),其西侧芳深1、2井气藏已经证实为无机成因 $\text{CH}_4$ 气田,东侧芳深5井气藏已经证实为有机成因 $\text{CH}_4$ 气藏<sup>[16]</sup>。芳深1、2井气藏反映了深部无机成因 $\text{CH}_4$ 气沿深大断裂进入盆地单独成藏,形成独立的无机成因气藏的过程;芳深5井气藏反映了东侧有机成因气沿深大断裂进入芳深5井圈闭成藏的过程。两者是双机耦合成烃成藏的典型例子。

### 2.2 运聚成藏分析

芳深1气藏和芳深5气藏所在的古中央凸起

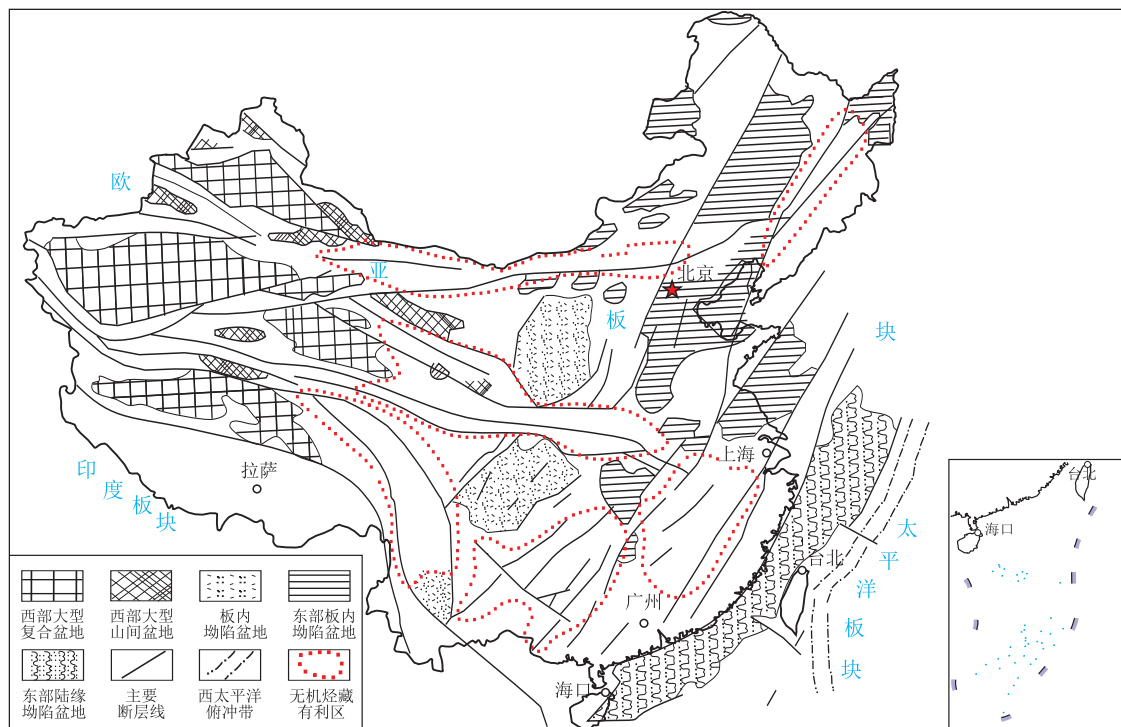


图 3 中国大陆、近海油气盆地与深大断裂、无机烃藏预测示意

据参考文献[51]修改。

Fig.3 Prediction of oil and gas basins and deep faults and inorganic hydrocarbon reservoirs in mainland and offshore of China

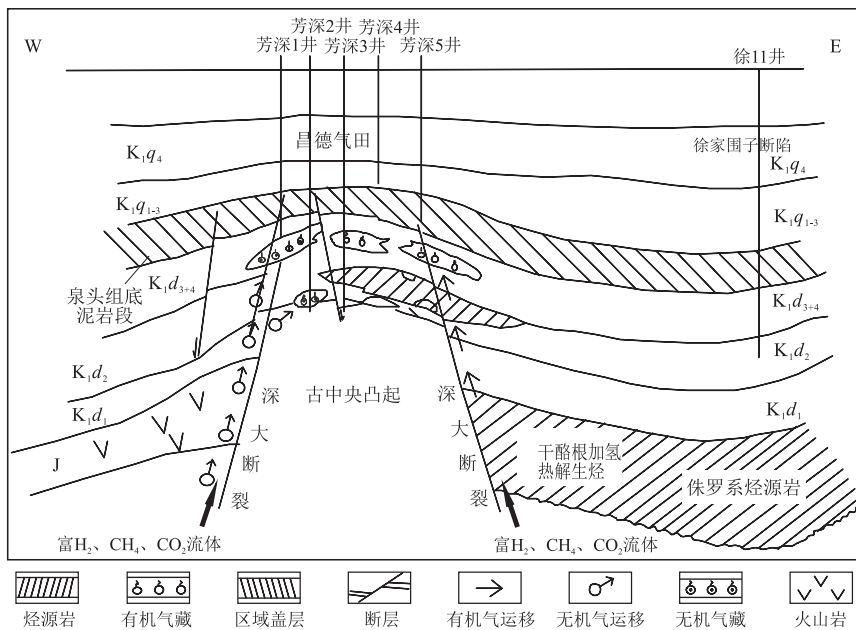


图 4 松辽盆地昌德气田芳深 1 井无机成因气藏与芳深 5 井有机成因气藏成藏模式

Fig.4 Gas accumulation pattern with inorganic cause

in well Fangshen 1 and organic cause in well Fangshen 5, Changde Gas Field, Songliao Basin

受东、西两条深大断裂控制，昌德气田实际上是受这两条深大断裂控制的潜山披覆气藏。其东侧为徐家围子断陷，由于古隆起东侧深大断裂同沉积活动，在徐家围子西侧形成了侏罗系煤系烃源岩，东侧深大断裂带来的深部富氢流体进入侏罗系煤系

烃源岩，烃源岩中的干酪根加氢热解，生成有机成因的天然气并排出，沿东侧深大断裂向上运移，在登三、四段披覆构造—岩性圈闭中聚集，形成昌德气田东部的芳深 5 井有机成因的气藏(图 4)。

由于古凸起西侧断裂活动的差异性及其控制



作用不同,造成了昌德气田西侧的芳深1井气藏为无机成因的天然气藏。地质研究与断裂发育史表明,由于古中央凸起西侧深大断裂强烈活动,古中央凸起以西侏罗纪时期火山活动发育,不发育侏罗系烃源岩,因此古中央凸起以西没有有意义的有机成因的油气产生,而沟通地幔的古中央凸起西侧深大断裂,一方面作为火山喷发的通道,同时也是地幔无机成因烃气向上运移的有利通道,这些地幔无机成因甲烷气向上运移至深大断裂控制的潜山披覆构造中,从而形成芳深1井无机成因气藏(图4)。

### 3 讨论

“石油的双机耦合成因假说”能否回答目前有机说和无机说难以回答的问题,是检验这个假说是否更合理、更先进的重要标志。无机说难以回答的主要问题有:(1)不能直接指导油气勘探。(2)既然无机成因的烃那么多,为什么在中国还没有发现一个商业无机成因油气藏。针对第一个问题,“石油的双机耦合成因假说”提出了“顺藤摸瓜”的勘探思路和“活跃(长期、多期或近期活动)深大断裂区封盖条件好的圈闭是最有利的勘探目标”的勘探原则,可直接指导油气勘探。针对第二个问题,“石油的双机耦合成因假说”认为,一是目前的勘探局限于盆地之中,失去了许多寻到无机油气藏的机会;二是目前找到的油气中,可能存在一部分是无机成因的,因为他们最终聚集于盆地中,其相关指标已经被有机成因的背景同化了,被误认为是有机成因的油气。苏联的多位地质学家均主张石油的无机成因来源<sup>[52]</sup>。另外,松辽盆地昌德气藏已经被证实为以无机成因为主的气藏<sup>[14,16]</sup>。

对表2中有机说存在的缺陷,假说也都能很好地给予解释,例如深部油气数量巨大,是可再生资源,因此,油田的巨大储产量的来源、与生物数量不匹配的问题就很好解释了。深部富氢流体的加入,解决了干酪根生烃缺氢的问题;深部富铁等流体的加入,解决了干酪根生烃缺催化剂的问题;油气藏可能来源于深部无机成因的烃,当然与干酪根生烃热解模拟实验的热解产物的组成有大的差异;高温高 $R_0$ 值的地层中仍有液态烃存在,这种液态烃可能来自于深部无机成因烃,因温度和压力条件的聚变而变成液态。

由于假说都能很好地解释表2中有机说与无机说的证据和缺陷,也解决了油气成因存在的科学问题,表明与目前其他油气成因论相比,石油双机耦合成因假说具有明显的先进性。

### 4 结论

(1)石油的双机耦合成因假说是在前人石油成因理论成果基础上集成创新的结果,具有重大的理论意义与现实价值。

(2)中国独特的大地构造背景和地质演化历史,导致深大断裂特别发育,遍布全国,致使双机耦合现象普遍存在,因此,中国的油气资源非常丰富。

(3)中国油气勘探重大突破取决于勘探观念的重大改变,“双机耦合成烃成藏”将改变目前被动的油气勘探局面。

(4)盆地深层、盆外封盖条件较好的深大断裂发育区是下步现实的取得油气勘探重大突破的领域。

#### 参考文献:

- [1] 李祖刚.石油成因研究中的辩证法[J].华东石油学院学报(社会科学版),1987(1):40-42.  
LI Zugang. Dialectics in the study of petroleum genesis[J]. Journal of East China Petroleum Institute (Social Science Edition), 1987(1):40-42.
- [2] 邵丽英.门捷列夫的石油无机成因学说及其现代影响[J].西安石油大学学报(社会科学版),2015,24(6):12-17.  
SHAO Liying. Medeleev's petroleum inorganic cause theory and its modern influence[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Social Science Edition), 2015,24(6):12-17.
- [3] 密洛诺夫 С И,李祖刚.石油成因研究中的辩证法[J].科学通报,1952(9):618-624.  
MILONOV С И, LI Zugang. dialectics in the study of petroleum genesis[J]. Chinese Science Bulletin, 1952(9):618-624.
- [4] 王大锐.“石油无机成因”说立足未稳[J].石油知识,2014(4):4-5.  
WANG Darui. “Petroleum inorganic cause” said the foothold is not stable[J]. Petroleum Knowledge, 2014(4):4-5.
- [5] 张景廉,李相博,刘化清.“石油无机成因说”的理论与实践[J].西安石油大学学报(自然科学版),2013,28(1):1-11.  
ZHANG Jinglian, LI Xiangbo, LIU Huaqing. Theory and practice of petroleum inorganic origin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2013,28(1):1-11.
- [6] SZATMARI P,陈德卿.板块构造中的费—特合成法石油生成假说[J].地质科学译丛,1990,7(3):51-58.  
SZATMARI P, CHEN Deqing. Petroleum formation by Fischer-Tropsch synthesis in plate tectonics[J]. Journal of Geoscience Translations, 1990,7(3):51-58.
- [7] 郭占谦.论石油与天然气的多元成因[J].新疆石油地质,2008,29(6):768-774.  
GUO Zhanqian. On multifactor origin of crude oil and natural gas[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008,29(6):768-774.
- [8] 杜乐天.新地球科学原理导论[M].兰州:兰州大学出版社,2017:259-285.

- DU Letian. Introduction to novel geoscience principles [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2017: 259-285.
- [9] 崔永强, 陈丹江. 幔源油气理论, 打开石油开发新天地[J]. 中国石油和化工, 2017(5): 41-45.  
CUI Yongqiang, CHEN Danjiang. Mantle-derived oil and gas theory opens up a new world of oil development [J]. China Petroleum and Chemical Industry, 2017(5): 41-45.
- [10] 罗群, 白新华. 断裂控烃理论与实践: 断裂活动与油气聚集研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1998: 86-89.  
LUO Qun, BAI Xinhua. The theory and practice of fault controlling hydrocarbon-fault activity and hydrocarbon accumulation [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1998: 86-89.
- [11] 刘先志. 石油、天然气、金刚石地下放电光成因说[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(1): 121-123.  
LIU Xianzhi. Hypotheses of origins of oil, natural gas and diamond by underground discharge/radiation [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(1): 121-123.
- [12] 徐晓宁. 关于石油、天然气和煤炭的成因机理的探讨[J]. 油气藏评价与开发, 2012, 2(2): 76-79.  
XU Xiaoning. Discussion about the formation mechanism of petroleum, natural gas and coal [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2012, 2(2): 76-79.
- [13] 张景廉, 朱炳泉, 陈义贤, 等. 辽河断陷石油无机成因的地球化学证据[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(3): 192-194.  
ZHANG Jinglian, ZHU Bingquan, CHEN Yixian, et al. Geochemical evidences of inorganic origin for oils in Liaohe Faulted Depression [J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(3): 192-194.
- [14] 周宁超, 南云. 无机成因油气的成因模式和鉴别特征研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2014, 11(26): 51-56.  
ZHOU Ningchao, NAN Yun. On the genetic mode and identification characteristics of inorganic oil and gas [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2014, 11(26): 51-56.
- [15] 虞震东. 煤的无机成因学说: 兼论石油天然气和油页岩的成因[J]. 前沿科学, 2016, 10(3): 33-60.  
YU Zhendong. Inorganic theory of coal origin also review the origins of petroleum, natural gas and oil shale [J]. Frontier Science, 2016, 10(3): 33-60.
- [16] КАПРАМАНОВ Ю Р, ЕГИКЯН А Г. 论石油成因[J]. 新疆石油地质, 2002, 23(3): 265-269.  
КАПРАМАНОВ Ю Р, ЕГИКЯН А Г. On petroleum origin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2002, 23(3): 265-269.
- [17] 王晓玲, 房乃珍, 陈娟, 等. 大庆油田无机成因油气藏的生成及勘探前景[J]. 西安石油大学学报(社会科学版), 2017, 26(4): 22-28.  
WANG Xiaoling, FANG Naizhen, CHEN Juan, et al. The generation of inorganic origin reservoir and its exploration prospects in Daqing oilfield [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Social Science Edition), 2017, 26(4): 22-28.
- [18] 罗志立. 地裂运动与中国油气分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991: 22-58.  
LUO Zhili. Taphrogeny and distribution of oil and gas reservoir in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991: 22-58.
- [19] 何志高. 关于石油成因理论发展历史若干问题的思考与评论[J]. 海相油气地质, 2000, 5(3/4): 118-122.  
HE Zhigao. Thinking and commenting on several issues in the history of petroleum genesis theory [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2000, 5(3/4): 118-122.
- [20] 陈发亮, 邓国振, 禹金营. 对石油与天然气成因的思考[J]. 断块油气田, 2001, 8(3): 8-10.  
CHEN Faliang, DENG Guozhen, YU Jinying. A consideration to the origin of petroleum and natural gas [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2001, 8(3): 8-10.
- [21] 滕吉文, 刘有山, 乔勇虎. 石油双机(有机+无机)混合成因的研究与探索[J]. 地球物理学报, 2017, 60(5): 1874-1892.  
TENG Jiwen, LIU Youshan, QIAO Yonghu. Study and exploration of the mixed-origin theories of organic and inorganic oil and gas [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(5): 1874-1892.
- [22] HAZEN R M, SCHIFFRIES C M. Why deep carbon? [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2013, 75(1): 1-6.
- [23] JIN Zhijun, ZHANG Liuping, YANG Lei, et al. A preliminary study of mantle-derived fluids and their effects on oil/gas generation in sedimentary basins [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2004, 41(1/3): 45-55.
- [24] LIU Quanyou, DAI Jinxing, JIN Zhijun, et al. Abnormal carbon and hydrogen isotopes of alkane gases from the Qingshen gas field, Songliao Basin, China, suggesting abiogenic alkanes? [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2016, 115: 285-297.
- [25] LIU Quanyou, ZHU Dongya, JIN Zhijun, et al. Effects of deep CO<sub>2</sub> on petroleum and thermal alteration: the case of the Huangqiao oil and gas field [J]. Chemical Geology, 2017, 469: 214-229.
- [26] ZHU Dongya, LIU Quanyou, JIN Zhijun, et al. Effects of deep fluids on hydrocarbon generation and accumulation in Chinese petroliferous basins [J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(1): 301-319.
- [27] DUAN Zhenhao, MØLLER N, WEARE J H. Molecular dynamics simulation of PVT properties of geological fluids and a general equation of state of nonpolar and weakly polar gases up to 2000 k and 20,000 bar [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56(10): 3839-3845.
- [28] DEMAISON G J, MOORE G T. Environment and oil source bed genesis [J]. Organic Geochemistry, 1979, 2: 9-31.
- [29] DUAN Zhenhao, MØLLER N, WEARE J H. A general equation of state for supercritical fluid mixtures and molecular dynamics simulation of mixture PVTX properties [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(7): 1209-1216.
- [30] JACQUEMYN C, EL DESOUKY H, HUNT D, et al. Dolomitization of the Latemar platform: fluid flow and dolomite evolution [J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 55: 43-67.
- [31] PAN Changchun, YU Linping, LIU Jinzhong, et al. Chemical and carbon isotopic fractionations of gaseous hydrocarbons during abiogenic oxidation [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 246(1/2): 70-89.
- [32] PUEYO J J, SÁEZ A, GIRALT S, et al. Carbonate and organic matter sedimentation and isotopic signatures in lake Chungarú,

- Chilean Altiplano, during the last 12.3 kyr [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 307(1/4): 339-355.
- [33] 戴金星, 石昕, 卫延召. 无机成因油气论和无机成因的气田(藏)概略[J]. *石油学报*, 2001, 22(6): 5-10.
- DAI Jinxing, SHI Xin, WEI Yanzhao. Summary of the abiogenic origin theory and the abiogenic gas pools (Fields) [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2001, 22(6): 5-10.
- [34] 吴聿元, 陈贞龙. 延川南深部煤层气勘探开发面临的挑战和对策[J]. *油气藏评价与开发*, 2020, 10(4): 1-11.
- WU Yuyuan, CHEN Zhenlong. Challenges and countermeasures for exploration and development of deep CBM of South Yan-chuan [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2020, 10(4): 1-11.
- [35] 何治亮, 李双建, 刘全有, 等. 盆地深部地质作用与深层资源: 科学问题与攻关方向[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(5): 767-779.
- HE Zhiliang, LI Shuangjian, LIU Quanyou, et al. Deep geological processes and deep resources in basins: scientific issues and research directions [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(5): 767-779.
- [36] STUART F M, BURNARD P G, TAYLOR R P, et al. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids: He Ar isotopes in fluid inclusions from Dae Hwa W Mo mineralisation, South Korea [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(22): 4663-4673.
- [37] SIBSON R H. Crustal stress, faulting and fluid flow [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1994, 78(1): 69-84.
- [38] SUGISAKI R, MIMURA K. Mantle hydrocarbons: abiotic or biotic [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(11): 2527-2542.
- [39] SURDAM R C, CROSSEY L J, EGLINTON G, et al. Organic-inorganic reactions during progressive burial: key to porosity and permeability enhancement and preservation [and discussion] [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1985, 315(1531): 135-156.
- [40] SEEWALD J S. Organic-inorganic interactions in petroleum-producing sedimentary basins [J]. *Nature*, 2003, 426(6964): 327-333.
- [41] 乔世海, 李玉宏, 郭望, 等. 陕西铜川地区延长组长7油页岩无机地球化学特征及古环境恢复[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(1): 121-126.
- QIAO Shihai, LI Yuhong, GUO Wang, et al. Inorganic geochemical characteristics and paleoenvironment of Chang 7 oil shale in Yan-chang Formation, Tongchuan area, Shaanxi Province [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(1): 121-126.
- [42] 邱楠生, 何丽娟, 常健, 等. 沉积盆地热历史重建研究进展与挑战[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(5): 790-802.
- QIU Nansheng, HE Lijuan, CHANG Jian, et al. Research progress and challenges of thermal history reconstruction in sedimentary basins [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(5): 790-802.
- [43] 郭占谦, 王先彬. 松辽盆地非生物成因气的探讨[J]. *中国科学(B辑)*, 1994, 24(3): 303-309.
- GUO Zhanqian, WANG Xianbin. Study on inorganic origin gas in Songliao Basin [J]. *Science in China (Series B)*, 1994, 24(3): 303-309.
- [44] ROACH J W, 王曼. 石油的生物成因说[J]. *国外油气勘探*, 1989, 1(3): 41-51.
- ROACH J W, WANG Man. The biological cause of oil [J]. *Equipment for Geophysical Prospecting*, 1989, 1(3): 41-51.
- [45] 乔桂林, 赵永强, 沙旭光, 等. 塔里木盆地塔中隆起南坡油气勘探领域[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(5): 630-637.
- QIAO Guilin, ZHAO Yongqiang, SHA Xuguang, et al. Oil and gas exploration domains on the southern slope of Central Tarim Uplift, Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(5): 630-637.
- [46] 康玉柱. 中国南方隆起区油气资源潜力及勘查方向[J]. *断块油气田*, 2020, 27(4): 409-411.
- KANG Yuzhu. Potential and exploration direction of oil and gas resources in the uplift regions of southern China [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2020, 27(4): 409-411.
- [47] 蒋其垠. 从石油成因学说的争论谈起[J]. *自然杂志*, 1983, 6(7): 512-515.
- JIANG Qikai. Talking from the controversy about the theory of oil genesis [J]. *Nature Magazine*, 1983, 6(7): 512-515.
- [48] 刘远. 西方承认: 俄罗斯成因研究领先30年[J]. *国外测井技术*, 2007, 22(6): 77.
- LIU Yuan. Western recognition: Russia's oil genesis research is 30 years ahead [J]. *World Well Logging Technology*, 2007, 22(6): 77.
- [49] 于浩雨, 于明德, 李洲, 等. 洛伊凹陷西南部边界大断裂发育特征及其对油气成藏的控制作用[J]. *油气地质与采收率*, 2020, 27(5): 13-24.
- YU Haoyu, YU Mingde, LI Zhou, et al. Development characteristics of large fault in southwest boundary of Luoyi Sag and its controlling effect on hydrocarbon accumulation [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(5): 13-24.
- [50] 王金铎, 曾治平, 宫亚军, 等. 深部超压储层发育机制及控制因素: 以准噶尔盆地永进油田为例[J]. *油气地质与采收率*, 2020, 27(3): 13-19.
- WANG Jinduo, ZENG Zhiping, GONG Yajun, et al. Development mechanism and controlling factors of deep overpressured reservoir: a case study of Yongjin Oilfield in Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(3): 13-19.
- [51] 李德生. 中国含油气盆地构造学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 248-254.
- LI Desheng. Tectonics of petroliferous basins in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, China, 2002: 248-254.
- [52] 黄瑞华. 石油无机成因说的新进展[J]. *石油实验地质*, 1981, 3(1): 66-69.
- HUANG Ruihua. New development of the origin theory of petroleum inorganic [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 1981, 3(1): 66-69.