

川东北地区海相深层多源生烃动态转化机制 ——以普光气田为例*

腾格尔 刘文汇 秦建中 郑伦举 付小东 申宝剑 卢龙飞 王杰

TENGER, LIU WenHui, QIN JianZhong, ZHENG LunJu, FU XiaoDong, SHEN BaoJian, LU LongFei and WANG Jie

中国石化油气成藏重点实验室,石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所,无锡 214151

Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Wuxi 214151, China

2011-07-21 收稿, 2011-11-30 改回.

Tenger, Liu WH, Qin JZ, Zhen LJ, Fu XD, Shen BJ, Lu LF and Wang J. 2012. Dynamic transformation mechanism for hydrocarbon generation from multiple sources in deep-buried marine carbonates in the northeastern Sichuan Basin: A case study from the Puguang gas field. *Acta Petrologica Sinica*, 28(3):895–904

Abstract Petroleum formation mechanism in deep-buried and extremely deep-buried marine carbonates is one of hot and difficult topics in petroleum geology. In this paper, we have made a discussion based on a case study from the Puguang gas field of the northeastern Sichuan Basin, by comprehensively analyzing the oil and gas source and the processes of hydrocarbon generation and accumulation. The methods include assessment of hydrocarbon sources and their geochemical correlation with oil, reservoir bitumen and gas, study on formation, evolution and preservation of hydrocarbon pools, analysis of gas composition, fluid inclusion and simulation of hydrocarbon generation from multiple sources. The results showed that the deep-buried marine source sequences and main hydrocarbon-producing intervals may have experienced high temperatures, high pressures and multi-stage sedimentological and tectonic movements. As a result, various kinds of hydrocarbon sources were formed, including different types of kerogens, accumulated and dispersed soluble organic matters, and insoluble organic matters of organic acid salts. It is common for the continuous and/or overlapping dynamic transformation of various kinds of hydrocarbon sources and multiple origins of hydrocarbons to have contributed to petroleum pools. Based on these results, we propose that the main mechanism for hydrocarbon formation and evolution in deep-buried strata is the dynamic transformation for hydrocarbon generation from multiple sources. The gas generation can be extended to high to extremely high evolution stages. This is favorable for the gas re-filling and accumulation in deep and extremely deep-buried reservoirs.

Key words Hydrocarbon generation from multiple sources; Dynamic transformation; Marine sequences; Deep-buried reservoir; Natural gas; Puguang gas field; Northeastern Sichuan Basin

摘要 海相碳酸盐岩层系深层-超深层油气形成机制是石油地质学研究的热点和难点。以川东北普光气田为例,通过烃源(岩)评价及其与原油、储层沥青和天然气之间的地球化学对比,油气藏形成演化与保存过程分析,结合不同类型天然气组分、流体包裹体以及多种烃源生烃模拟等实验数据,对油气来源和成烃成藏过程进行了系统分析。结果表明,在多期沉积构造活动背景下,海相深层烃源岩系和主力产层均经历过高温高压环境与高热演化,形成了不同类型的干酪根、以分散和富集状态赋存的 可溶有机质,以及以有机酸盐形式存在的不溶有机质等多种形式的烃源,并普遍存在不同类型烃源、不同成因油气的连续或叠置动态相态转化,及其对油气成藏贡献的接替过程,呈现出“来源的多样性、转化的接替性、过程的多期性和成因的复合性”之油气形成演化特点,提出“多源生烃动态转化”是深层油气形成演化的主要机制,将烃源生气过程延续到更高的演化阶段,有利于深层-超深层条件下油气藏的再充注和聚集保存。

关键词 多源生烃;动态转化;海相层系;深层;天然气;普光气田;川东北

中图法分类号 P618.13

* 本文受石油化工联合基金项目(40839910)及国家重大专项(2008ZX05005-01-02)联合资助。

第一作者简介:腾格尔,男,1967年生,博士,高级工程师,主要从事油气地质和地球化学研究,E-mail: tenger_syky@sinopec.com

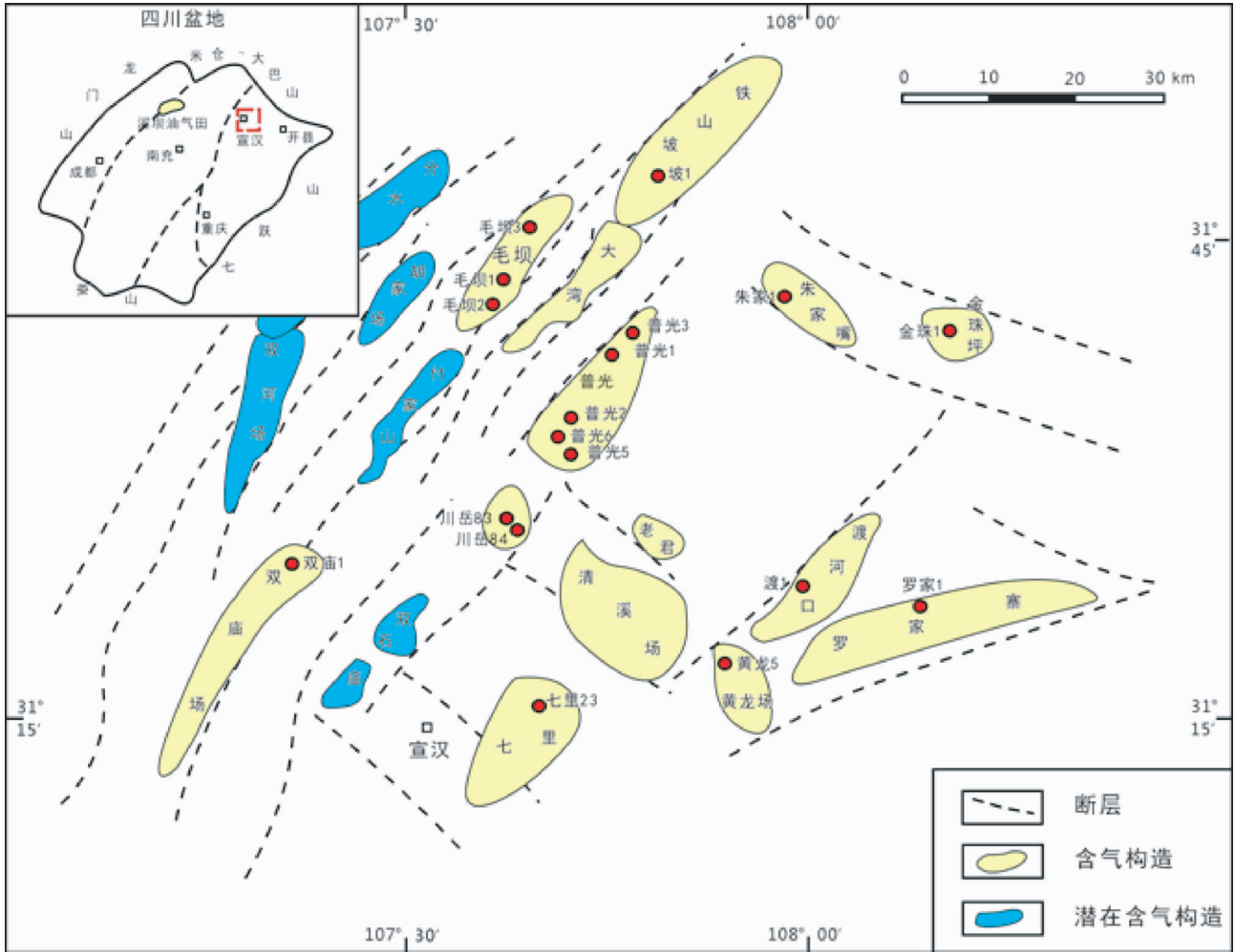


图1 川东北地区气田或含气构造分布

Fig.1 A map showing distribution of gas pools and gas-bearing structures in northeastern Sichuan Basin

1 引言

近年来,继在6000米左右的深部海相地层发现塔河油田和普光气田后,在四川盆地东北部地区又发现了一个迄今为止国内油气藏埋藏最深(6240~6950m)、储量超千亿吨的元坝气田(郭彤楼等,2011),进一步展示了我国海相碳酸盐岩层系深层-超深层(以下简称海相深层)巨大的油气勘探潜力以及川东北地区海相深层油气形成与成藏基础理论研究意义。其中,油气来源始终是一项亟待解决的关键科学问题。干酪根晚期成烃理论(Tissot and Welte,1978)是常规油气生成演化规律的核心,以此衍生的油气潜力评价的地球化学方法成为近代油气勘探的主要指导思想和准则,也取得了重要成效(傅家谟和贾蓉芳,1984; Cheng *et al.*, 1996; 梁狄刚等,2000; 彭平安等,2008)。实践证明,世界上大部分油气资源与干酪根晚期热降解成烃作用密切相关,热降解是主要成烃模式。基于此,长期以来我国海相油气勘探中,烃源岩

评价、油气源对比及资源量计算等主要集中“在岩”上,均以干酪根为主的单一生烃理论基础上。然而,上述海相深层油气田在中期沉积构造活动、高温高压环境和高热演化条件下经历了复杂的多元生排烃、不同相态转化与中期成藏改造过程,致使①发育多套烃源岩仍不能确定其有效性;②找到了大油气田还不清楚其主要来源;③资源潜力有较大不确定性和认识上的分歧等,不仅制约着海相油气资源潜力预测和勘探部署等,而且对传统观念提出了严重挑战,暗示着干酪根成烃绝非唯一油气生成与成藏机制,特别是天然气,传统认识中忽略了高热演化条件下源内外、不同赋存状态的可溶有机质、以有机酸盐形式存在的不溶有机质高温裂解以及有机与无机相互作用对天然气形成与成藏的贡献,这可能是早期对我国海相油气勘探久攻不下或者即使找到油气藏对其形成和分布难以合理解释的根源之一。因此,解剖普光气田探索海相深层天然气形成机制,旨在深化海相碳酸盐岩层系油气地质理论的认识,并对我国海相深层油气勘探起到较好的指导作用。

表 1 普光气田储层沥青-原油-源岩碳同位素组成对比

Table 1 Comparison of isotopic composition of reservoir bitumen, oil and source rocks of Puguang gas field

样品号	岩性	深度(m)	位置	层位	TOC (%)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} (\text{‰})$					
						饱和烃	沥青“A”/ 原油	芳烃	非烃	沥青质	干酪根
川岳 84	原油		川岳 84	T_{1f}		-29.8	-29.6	-27.6	-27.6	-28.3	
PG5-3-2	针孔状白云岩	4893.3	PG5 井	T_{1f}		-28.7	-28.8	-26.5	-28.0	-28.3	
PG5-4-1	溶孔砂屑白云岩	5061.0				-29.3	-28.6	-28.2	-28.3	-28.0	
平均值						-29.0	-28.7	-27.3	-28.1	-28.2	
PG5-7-1	溶孔白云岩	5169.8	PG5 井	P_2ch		-29.8	-29.2	-29.0	-28.6	-28.7	
PG5-8-5	海绵骨架礁灰岩	5292.4				-30.0	-29.3	-26.9	-27.7	-29.1	
PG5-268	浅灰色灰岩	5468 ~ 5471				-29.4	-28.6	-26.9	-29.6	-29.4	
平均值						-29.7	-29.0	-27.6	-28.6	-29.0	
PG5-70	深灰色泥岩	2973 ~ 2978	PG5 井	T_{3x}	1.0	-28.0	-24.3	-24.0	-23.7	-24.3	-23.3
PG5-89-1	深灰色泥岩	3180 ~ 3184			3.8	-29.1	-24.4	-24.3	-24.3	-24.6	-24.6
PG5-89-2	煤屑	3180 ~ 3184				-28.8	-24.5	-24.0	-24.9	-25.0	-24.6
平均值						-28.6	-24.4	-24.1	-24.3	-24.6	-24.1
PG5-280-2	深灰色泥灰岩	5638 ~ 5644				1.0	-28.6	-28.6	-26.6	-29.7	-28.6
PG5-284-2	黑色泥岩	5668 ~ 5671	PG5 井	P_2l	2.0	-29.3	-28.7	-26.5	-28.5	-29.0	-27.7
PG5-285-1	碳质泥岩	5676 ~ 5679			1.4	-29.3	-28.7	-27.0	-28.1	-29.0	-27.7
平均值						-29.1	-28.6	-26.7	-28.7	-28.9	-27.9
TJ-07-115	黑色页岩	露头	通江诺水河 南江桥亭	S_1l	2.4	-26.8	-27.9	-27.9	-27.5	-28.4	-30.6
Qj-7	黑色泥岩	浅井			1.4	-28.3	-27.9	-27.2	-28.1	-27.7	-30.0
平均值					-27.6	-27.9	-27.6	-27.8	-28.0	-30.3	
Yb-06-02	黑色页岩	露头	南江杨坝		2.1	-27.3	-30.1	-26.8	-28.3	-32.1	-32.8
Nj-06-06	黑色页岩	露头	南江沙滩	\in_1n	2.6	-26.7	-28.1	-27.0	-25.8	-28.6	-30.8
Ck-06-17	黑色页岩	露头	城口明月		1.8	-28.0	-28.1	-26.4	-27.9	-29.3	-31.6
平均值					-27.4	-28.8	-26.7	-27.3	-30.0	-31.7	

2 地质背景

四川盆地东北部地区从早古生代以来就经历了海西、印支-燕山和喜山等多期沉积构造运动,现处于川东断褶带,北侧为米仓山隆起及大巴山推覆带,西邻川中平缓构造带,东南侧为盆地东部平行及弧形断褶带。北东-北东东向断褶带是该区主体构造,包括黄金口构造带、宣汉构造带等,该区出露的海相地层自下而上为震旦系、寒武系、奥陶系、志留系、石炭系、二叠系和中下三叠统。如图 1 所示,普光气田位于宣汉地区黄金口构造双石庙-普光构造带,属北东向高陡背斜带,为一构造-岩性复合型大型气藏,天然气主要富集于上二叠统长兴组-下三叠统飞仙关组(P_2ch-T_{1f})礁滩相孔隙型储集层,属常压低温气藏,埋藏深度普遍达 5000m 以下(Ma *et al.*, 2007; 郭彤楼等, 2011)。

根据普光气田 12 口探井 28 个天然气样品分析数据统计,天然气组分以甲烷(CH_4)为主,含量为 74.46% ~ 82.12%,平均 76.32%,其次为非烃气,含量平均达 23.24%,

包括 6.89% ~ 17.1% (平均 13.81%) 的硫化氢(H_2S)和 7.89% ~ 11.54% (平均 8.9%) 的二氧化碳(CO_2)和少量氮气(N_2),是典型高含硫的酸性气田,其 CH_4 的碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$)为 -27.8‰ ~ -31.1‰,平均为 -30.6‰,乙烷(C_2H_6)的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 -27.7‰ ~ -30.8‰,平均为 -29.4‰,具有高温裂解的油型气特点。与普光气田邻近的清溪场、河坝场气藏等都是不含或微含 H_2S 的天然气藏,主要为 T_{1f} 裂缝型储集层,为低温高压的构造气藏,埋藏深度也达 5000m 以下。其中,清溪气藏位于宣汉构造带的清溪场北西向构造带,与双石庙-普光构造带邻近;河坝气藏位于川中平缓构造带的通南巴次级构造带南段,河坝 1 井在 T_{1f} 组试获工业气流,从而发现了河坝场不含 H_2S 的优质天然气藏。

3 油气来源的多样性

在四川盆地,至少发育四套海相烃源岩层,即下寒武统牛蹄塘组(\in_1n)、上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组(O_3w-S_1l)、下二叠统和上二叠统,是现今大中型油气田的物质基

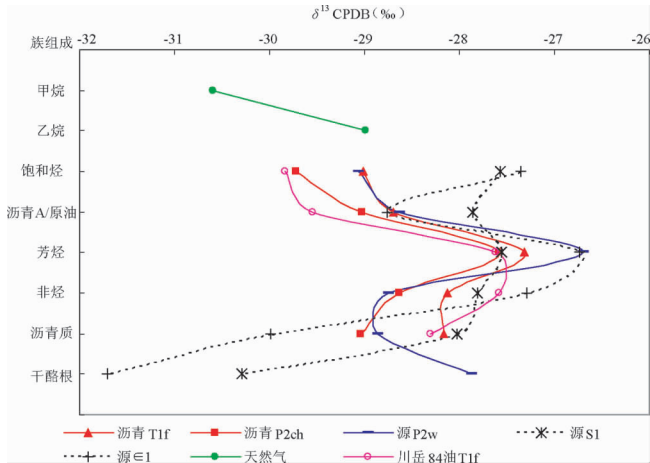


图2 普光气田天然气-储层沥青-原油-源岩碳同位素类型曲线对比图

Fig. 2 Comparison of carbon isotopic composition of gas, reservoir bitumen, oil and potential source rocks of Puguang gas field

础 (Huang *et al.*, 1996; 梁狄刚等, 2008; 腾格尔等, 2010)。这些烃源岩层由于成烃生物、沉积环境的不同, 使其在品质和分布上存在显著差异。其中, 下古生界 ϵ_{1n} 、 O_3w - S_1l 两套烃源岩主要以腐泥型干酪根为主的泥质烃源岩, 厚度数十米至百余米, 前者主要沿中上扬子台地边缘展布, 后者主要环绕川中古隆起分布, 其生烃中心在川东-鄂西渝东 (Huang *et al.*, 1996; 腾格尔等, 2006, 2007; 梁狄刚等, 2008; Tenger *et al.*, 2011)。近年来, 随着普光 5、毛坝 3 和元坝 2 等探井的不断揭露, 对于二叠纪烃源岩的研究取得了新进展。在晚二叠世, 四川盆地中、南部陆相和海陆过渡相沉积环境中形成了一套以腐殖型干酪根 (II-III 型) 为主的龙潭组 (P_2l) 煤系烃源岩 (Huang *et al.*, 1996; 梁狄刚等, 2008), 而在川东北地区台内局限盆地、深水陆棚等半封闭型缺氧环境中形成了以腐泥型 (I-II 型) 干酪根为主、富有机质的吴家坪组 (P_2w , 与 P_2l 同时异相) 和大隆组 (P_2d) 泥质、泥灰质或硅质烃源岩 (腾格尔等, 2008, 2010)。川岳 84 井钻井和广元长江沟剖面资料也证实了大隆组烃源岩的存在 (王一刚等, 2006; 腾格尔等, 2008)。可见, 在川东北地区, 上二叠统富有机质层段是邻近普光、元坝油气田的最主要烃源岩层。

表 1、图 2 表示了普光气田 (普光 5 井) 的 P_2ch - T_1f 储层沥青和天然气、川岳 84 井同层位原油与可能烃源岩 (ϵ_{1n} 、 S_1l 、 P_2w) 干酪根、抽提物等固-液-气族组分碳同位素组成 ($\delta^{13}C$) 之间的关系。其中, 两个储层沥青之间及其与原油之间无论在不同族组分的碳同位素值, 还是碳同位素类型曲线上都具有较好的可比性。从天然气乙烷、储层沥青和原油族组分的 $\delta^{13}C$ 分布特征可以预测 (图 2), 其原始母质-干酪根的 $\delta^{13}C$ 约在 -27‰ ~ -30‰ 的范围内, 与 P_2w 烃源岩干酪根 $\delta^{13}C$ 更具可比性, 而下古生界两套烃源岩干酪根 $\delta^{13}C$ 明显偏

轻。据普光 5 井 P_2w 富有机质层段 (三个岩芯样品) 的干酪根提取分析 (表 1), 其 $\delta^{13}C$ 为 -27.9‰ ~ -28.2‰ , 处于上述普光油气母质来源的 $\delta^{13}C$ 范围内, 并且储层沥青、原油同位素类型曲线与 P_2w 源岩样品亦呈相似性分布 (图 2), 支持它们之间的亲缘关系。根据普光 5 井 P_2w 富有机质层段和储层沥青的分子地球化学研究 (图 3), P_2ch - T_1f 储层沥青与 P_2w / P_2l 烃源岩具有良好的可比性, 同样表明了二者之间的相关性。而下寒武统、上三叠统烃源岩分离出的干酪根, 其同位素成分分别为 -31.7‰ 、 -24.1‰ (表 1), 不符合于上述普光气田油气源的 $\delta^{13}C$ 范围值, 且碳同位素类型曲线差异性也明显 (图 2), 尤其是储层沥青与上三叠统相同族组分同位素组成之间差值达 -4‰ 以上 (表 1), 显然不是生烃过程中碳同位素分馏结果。通常认为, 干酪根碳同位素是比较稳定的, 主要与沉积有机质的化学组成或母质类型有关 (傅家谟和秦匡宗, 1995), 而且与由其生成的原油或沥青碳同位素组成基本一致, 相差一般不超过 2‰ ~ 3‰ (Golyshev *et al.*, 1991)。值得提出的是, 近年笔者有关不同类型烃源 (干酪根、原油和固体沥青) 生烃演化过程中不同相态产物化学、同位素组成的演化特征的模拟实验研究也取得了类似的结论, 表明在不同演化阶段, 烃源生成的固、液态产物 $\delta^{13}C$ 分馏小, 其值与来源物质基本相似或代表了原始同位素特征, 继承性强, 可示踪烃源和油源对比 (腾格尔等, 2010^①)。

如图 2、图 3 所示, 天然气、储层沥青与下志留统烃源岩比较, 在同位素类型曲线分布和生物标记物组成上都存在差异, 如 Ts/Tm 。在此基础上, 结合该区海相层系上二叠统烃源岩生烃转化和 P_2ch - T_1f 储层中油气成藏过程的有效反演 (图 4), 可以推测, 普光气田的天然气和储层沥青主要是上二叠统烃源岩生成的原油高温裂解产物。这一认识得到了来自其他方面研究成果的支持 (Ma *et al.*, 2007; 秦建中等, 2008a, b; 刘文汇等, 2010)。

上述烃源 (岩) 层中, 除了不同类型的干酪根之外, 从源岩、输导体系到圈闭、储层, 以分散和富集状态赋存的可溶有机质 (赵文智等, 2005; Ma *et al.*, 2007; 秦建中等, 2008a, b; 刘文汇等, 2010)、以有机酸盐形式存在的不溶有机质 (刘文汇, 2009), 在高温条件下也可能裂解生成天然气, 更鲜明地表现出成烃物质和烃源类型的多样性。普光气田热史和埋藏史恢复分析表明 (Ma *et al.*, 2007; 秦建中等, 2008a, b), 在川东北地区多期构造活动背景下, 古生界海相烃源岩及源内外聚集 (古油藏) 或分散分布的原油经历了多期次深埋、抬升过程, 其中上二叠统烃源岩和 P_2ch - T_1f 储层埋藏最深可达 9000m。根据普光 2、普光 5 井 P_2ch - T_1f 储层储层流体包裹体分析, 其均一温度高达 $180 \sim 215^\circ\text{C}$, 远高于原油裂解生气温度, 现今 P_2ch - T_1f 储层沥青反射率普遍达到 2% 以上, 有机质热演化程度处于过成熟阶段。按照传统认识, 在地质条件下 $180 \sim 215^\circ\text{C}$ 正处于原油大量生气阶段 (Tissot and Welte,

① 腾格尔等. 2010. 南海相层系油气源对比指标体系研究及应用

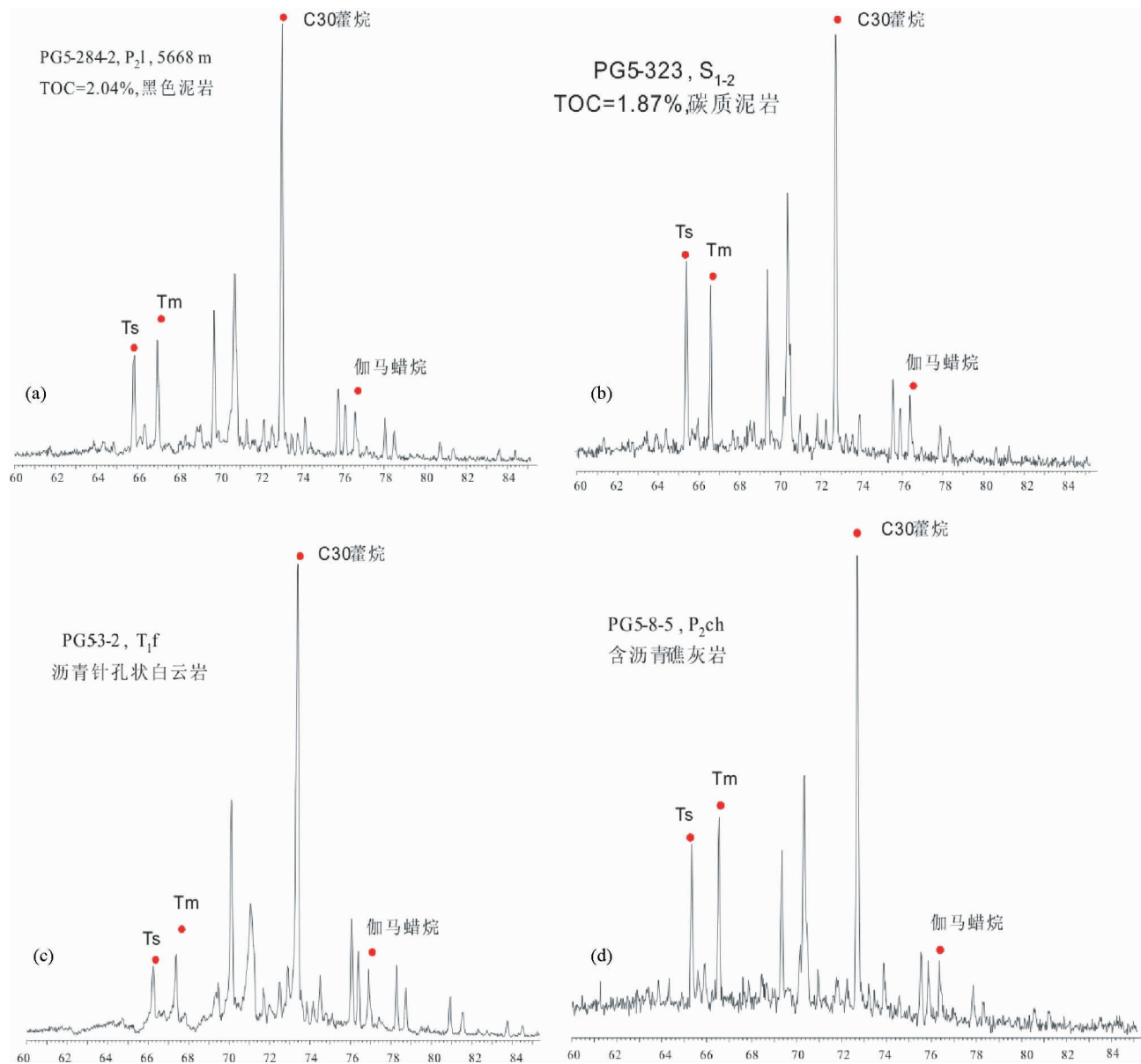


图3 普光气田 T₁f、P₂ch 储层沥青及可能源岩抽提物藿烷分布图 (m/z191, GC-MS)

Fig.3 Hopane distributon of reservoir bitumen and source rocks (T₁f, P₂ch) of Puguang gas field (m/z = 191, GC-MS)

1978), 而且在川东北地区由于硫酸盐热化学还原作用(王—刚等, 2002; Cai *et al.*, 2003, 2004, 2010; Zhu *et al.*, 2005; Hao *et al.*, 2008; 刘文汇等, 2010; 张水昌等, 2011), 对原油裂解具有促进作用, 裂解气形成温度可能大幅降低。在此地质背景下, 普光气田 P₂ch-T₁f 储层中早期聚集的油藏作为再生烃源完全转化成裂解气并形成现今大量储层沥青是可能的, 并且天然气地球化学特征已表现出裂解气的属性, 如天然气组分上, 普光气田的天然气不仅属于高温裂解的干气, 而且其与主要来自干酪根热解的天然气呈差异性分布(图 5)。川西坳陷侏罗系-上三叠统(J-T₃) 天然气主要来自上三叠统以腐殖型干酪根为主的煤系烃源岩干酪根热解气(秦胜飞等, 2007)。图 5 中, 塔里木盆地塔河油田等塔北地区海相

天然气与川西陆相天然气呈相似分布特征, 大量研究认为前者也主要来自干酪根热解(赵孟军等, 2001; 张敏等, 2009)。

沉积有机质及干酪根生成的有机酸在碱性的海相碳酸盐环境下与矿物反应形成有机酸盐, 这些有机酸盐广泛存在于海相碳酸盐岩层系中(Carothers and Kharaka, 1978; Pittman and Lewan, 1994)。近年来实验研究表明有机酸盐在高温条件下具有裂解成气的特性, 具有良好的生烃能力, 可能成为除干酪根、可溶有机质之外的另一类重要烃源物质(刘文汇, 2009; 雷天柱等, 2009), 有机酸盐的存在使古生界海相层系生烃过程更具多元化特征。

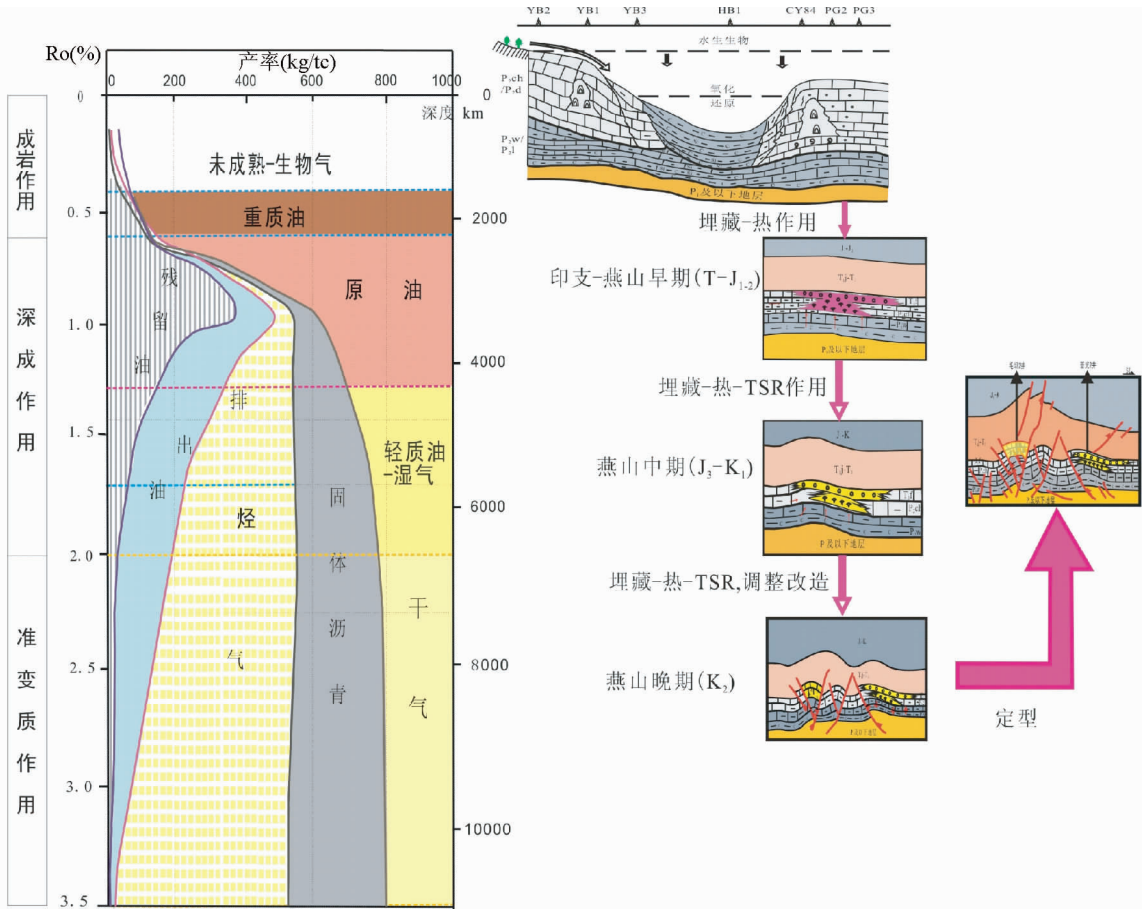


图4 川东北区上二叠统海相优质烃源岩成烃成藏演化的地质模型

Fig.4 Geological model showing hydrocarbon generation from Upper Permian marine source rocks, and hydrocarbon accumulation and alteration in the northeastern Sichuan basin

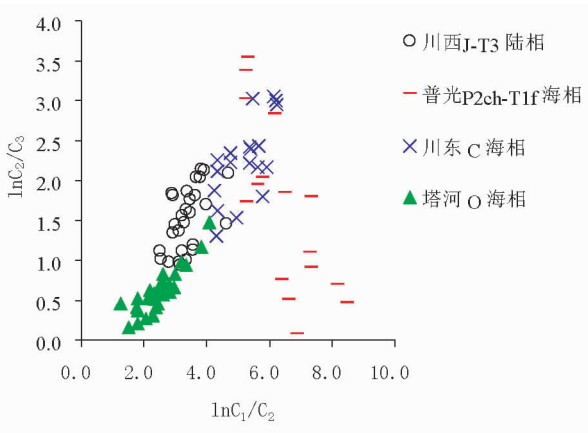


图5 四川、塔里木部分层位海相(P₂ch-T₁f, C, O)、陆相(J-T₃)天然气烃类组对比分析

Fig.5 Comparison of nature gases from marine (P₂ch-T₁f, C, O) and terrestrial (J-T₃) in Sichuan and Tarim

4 生烃转化的接替性和生烃成藏过程的多期性

在多期、差异构造活动背景下,不同地区海相深层烃源岩(岩)可能经历一次或多期次生排烃过程,造成部分地区原油聚集成藏保存至今(如塔河油田),部分地区继续深埋裂解成气(如普光气田),部分地区经过抬升发生次生变化(如麻江古油藏),从而导致空间上生烃中心的变迁、储层流体相态的转化和有效圈闭的位移,时间上生烃转化的接替性和生烃成藏过程的多期性,反映出海相深层油气形成与成藏过程的动态演化特征。以普光气田为例,如图4所示,主要表现为两个方面:一是沉积有机质的热演化是一个连续递进的过程,烃源岩演化初期干酪根是生烃主体,由不溶有机质向油气转化,随热演化程度的增强,不同形式赋存的液态烃成为主要轻烃来源,由重烃向轻烃,液态烃向气态烃转化,至过成熟均趋于甲烷化和石墨化,形成现今 P₂ch-T₁f 储层中以甲烷为主的干气藏和大量的固体沥青,尤其是腐泥型干酪根以生油为主,连续性演化特征更为明显(图4左);二是,同一套烃源层

可发生多期次的生烃、排烃和充注过程,尤其二次生排烃是海相层系多期构造活动中广泛存在的一种生烃和充注过程。与其类似,同一层位油藏和源内外分散可溶有机质也可经历多期次裂解、聚散和调整过程,如在印支-燕山早期($T-J_{1-2}$),来自上二叠统烃源岩的原油在 P_2ch-T_1f 储层中聚集成藏,随着持续埋藏,储层温度提高,加之硫酸盐热化学还原作用(TSR),在燕山中期(J_3-K_1), P_2ch-T_1f 油藏作为一个主要的“生气中心”经过高温裂解向气藏转化,大量储层沥青的存在就是最好的例证。此时,上二叠统烃源岩已进入高过成熟阶段,来自干酪根的生烃潜力有限,而滞留于源岩和运移途径中的分散可溶有机质作为另一主要气源裂解生气并向气藏充注;经燕山晚期(K_2)以来的构造活动,气藏发生调整改造,最终形成现今气藏(图4右)。可见,深层成气过程中必然要经历生气母质的转换和生气时机与贡献的接替,前人将烃源(岩)这种连续性演化特征概括为有机质“接力成气”机理(赵文智等,2005)。普光气田的成藏史研究也表明,现今天然气属于主要来自上二叠统烃源岩的早期聚集成藏的原油裂解气,至少经历了三期生气成藏过程(Ma *et al.*, 2007; 秦建中等,2008a, b; 刘文汇等,2010)。然而,对于清溪、河坝气藏来说,如前所述,两个气藏并不存在早期原油聚集成藏并裂解形成现今气藏的圈闭和储层条件,没有发现类似于普光气田的大量储层沥青,现今天然气储集空间也属于晚期构造活动的产物(李凤等,2011),结合二者烃源岩评价及其油气源对比分析(腾格尔等,2008,2010; 刘文汇等,2010),可以预测它们主要来自上二叠统烃源岩,干酪根与由其生成的源岩内外分散可溶有机质经高温裂解形成了大量天然气,并在晚期构造运动下聚集成藏于现今裂缝型储层中。这一认识进一步证实了分散可溶有机质是叠合盆地重要的一类气源灶(赵文智等,2005; 刘文汇等,2007)。

5 油气成因的复合性

近10年来,我国各大含油气盆地深层油气勘探形势喜人,除了海相深层以外,东部陆相深层也取得重大突破(秦伟军等,2007; 张尔华等,2010)。这些深层油气成藏虽然在某种程度上有着与中浅层油气成藏相近的规律,原始母质来源最终均归因于干酪根,都要经历传统的运聚保过程。然而,在深层油气勘探研究中,发现了成因上一些传统理论无法解释的新现象,例如在高温高压($T \geq 150^\circ\text{C}$, $P \geq 50\text{MPa}$)条件下仍存在液态烃(塔深1井,云露和翟晓先,2008),突破了传统“生烃死亡线”,还发生了油气的有效成藏,那么油气来自何处?是浅生深储,还是深生深储?如果浅生深储,原油在深埋过程中在巨厚的上覆地层压力和不断提升的温度条件下如何保存下来?如果是深生深储,除了上述烃类保存问题外,烃类来源也是一个谜,在这深层高温高压极端环境中油气是如何生成?按照传统的油气成因理论,烃类的形成是沉积物中有机质去氧加氢的过程,达到这个高温阶段,有机质

中氢被消耗尽,生烃潜力明显降低(Tissot and Welte, 1978)。可见,在多期沉积构造活动背景下,海相深层油气形成具有多种生烃来源,经历了复杂的物理化学环境和多种赋存状态,成因上显示出由多项因素综合控制、热降解与高温裂解、有机与无机相互作用的复合性,主要体现在两个方面:

一是生烃转化过程中影响因素的复杂性。在地质条件下油气的生成演化、排烃运移、聚集成藏都是在相对封闭或半封闭条件下进行的(Price and Wenger, 1992),其中生烃过程的实质是一项不同类型有机质或不同相态生烃物质之间的化学反应,其与反应物性质(如干酪根类型)和数量(如有机碳含量)有关外,还应与整个体系的物理化学环境如温度、上覆静岩压力、体系流体压力以及流体介质性质、赋存状态和储集空间大小等一系列反应边界条件有关。众所周知,在经典的干酪根晚期成烃理论中主要强调了温度和时间对有机质热解生排烃过程的影响。然而,在海相深层条件下,油气的生成和赋存必然要经历高温高压环境。前人有关压力对不同生烃反应的影响研究表明,超压对不同生烃反应的影响存在明显差异,超压环境对于干酪根生烃和原油裂解具有抑制作用(Hao *et al.*, 2004)。由于高温高压环境中流体动力学机制和油气水近临界-临界特性,深层油气运聚方向不一定是构造高点,而可能更有利于形成大范围连片的储集体系及连续的大油气区(层)——连续型油气藏(邹才能等,2009)。特别是,近年中国石化油气成藏重点实验室自行研制出一种地层孔隙热压模拟实验仪,建立了温压动态控制生排烃模拟实验技术(郑伦举等,2009),动态、综合考虑影响烃源岩生排烃过程的多种因素,从而能够相对真实地再现地质条件下有机质热解生烃演化过程。基于此技术,针对四川盆地海相深层油气形成机制,选区不同层位(ϵ_1n, S_1l, P_2w)、不同类型烃源(干酪根、原油和固体沥青)的大量生排烃模拟实验研究,认识到生烃空间和高温高压液态水跟温度、压力和时间一样自始至终影响着有机质的生烃演化和运聚过程。显然,这些新的认识,使更多的学者意识到海相深层油气形成的主控因素并不限于经典油气生成理论中强调的温度-时间因素(Tissot and Welte, 1978),而受温度、压力、流体和空间等多项因素的综合控制。

二是生气机理的多样性,如深层天然气藏可能经历干酪根降解、原油裂解,还可能存在有机-无机相互作用下的复合成因,特别是外源氢的加入和TSR等都具有重要影响。研究表明,普光气田的天然气主要来自原油裂解,也有干酪根裂解生气与TSR生成的天然气,尤其是通过TSR形成了大量 H_2S (12.31%~17.11%)。不同的生烃反应机理是多种生烃转化过程的根源,主要包括:①干酪根经过水解与重排反应等一系列化学反应生成以含杂原子羧酸、醛、酮、酯等沥青和胶质为主的过渡态大分子“中间产物”;②随着地层温度压力的进一步升高,这些“中间产物”再经过一系列的烷基化反应、脱水反应及缩聚反应等生成油、水和 CO_2 等无机物;③可溶有机质一方面通过自由基重排反应、TSR反应等断键生成

短链烃,另一方面由于缩聚反应生成残炭等再生不溶有机质。实际上,沉积有机质在经历了早期的生物化学改造进入热演化阶段之后,随着多旋回沉积构造活动和不同的温压环境变化,就自始至终包含着不溶与可溶的有机质,不同性质的物理化学反应过程及其相互之间的转化过程,包括承压状态下的异构化反应、减压条件下的裂解-芳构化反应等(图4)。也就是说,干酪根在生成小分子油气的时候也生成更难热裂解(聚合程度更高)的干酪根,同时前期已经生成的可溶有机质也会发生热裂解生成分子量更小、结构更稳定的可溶有机质与聚合成分子量相对较大的不溶有机质(残炭)。因此,大量储层沥青和高含硫天然气的并存是深层条件下古油藏裂解生成气藏的重要证据,也印证了深层油气藏的复合成因机制。众所周知,高成熟以前的烃源岩和煤系烃源岩主要由干酪根热解或裂解生成天然气,即使在深层高温条件下,煤型气主要来自腐殖型-Ⅲ型干酪根裂解气,其缺乏生成大量原油并裂解生气的潜力(Tissot and Welte,1978),如川西陆相(J-T₃)天然气(秦胜飞等,2007)。然而,在海相碳酸盐岩层系深层环境中,海相烃源岩富含倾油型的腐泥型(I-II型)干酪根,特别是I型干酪根在低熟-成熟阶段形成大量石油,在合适的地质条件下通过高温裂解生气并聚集成藏,从成因机理上明确了干酪根高温裂解并非唯一天然气生成机制,而存在天然气来源的多种途径,关注可溶有机质的高温裂解和有机与无机相互作用对深层-超深层油气藏形成的贡献。

6 结论

(1)普光气田的天然气属于主要来自上二叠统烃源岩的早期聚集成藏的原油(沥青)裂解气。而河坝气田和清溪气藏天然气主要来自上二叠统烃源岩的干酪根与由其生成的源岩内外分散可溶有机质的高温裂解气。

(2)在多期沉积构造活动背景下,海相层系深层-超深层环境中形成了不同类型的干酪根、以分散和富集状态赋存的可溶有机质和以有机酸盐形式存在的不溶有机质等多种形式烃源,并普遍存在连续、叠置动态生烃转化及其对油气成藏贡献的接替过程,呈现出“来源的多样性、转化的接替性、过程的多期性和成因的复合性”之油气形成演化特点,将其凝练为“多源生烃动态转化”的深层油气形成机制,强调了高热演化条件下不同赋存状态的可溶有机质和不溶有机质裂解生气对现今天然气藏的重要贡献。

(3)深层-超深层油气的形成和分布较中浅层更加复杂,所涉及参数并不“主要是有机质的性质和温度对时间的关系”,还受深层流体压力、相态和空间因素的影响。目前,我们对深层多元生烃转化过程及其示踪技术仍处于探索阶段,对再生烃源的生排烃过程、运聚机理和天然气富集规律等尚不清楚,跳出传统的烃源岩及其干酪根研究向多元生烃转化和动态示踪转变是海相烃源(岩)研究的一项重要任务,也是

深层-超深层油气勘探所需的必然发展趋势。

致谢 感谢中国石化南方勘探分公司在基础地质资料收集和样品采集中提供的帮助,感谢审稿专家和蔡春芳研究员提出的宝贵意见。

References

- Cai CF, Worden RH, Bottrell SH, Wang LS and Yang CC. 2003. Thermochemical sulphate reduction and the generation of hydrogen sulphide and thiols (mercaptans) in Triassic carbonate reservoirs from the Sichuan Basin, China. *Chemical Geology*, 202: 39–57
- Cai CF, Xie ZY, Worden RH, Hu GY, Wang LS and He H. 2004. Methane-dominated thermochemical sulphate reduction in the Triassic Feixianguan Formation East Sichuan Basin, China: Towards prediction of fatal H₂S concentrations. *Marine and Petroleum Geology*, 21: 1265–1279
- Cai CF, Li KK, Zhu YM, Xiang L, Jiang L, Tenger, Cai XY and Cai LL. 2010. TSR origin of sulfur in the Permian and Triassic reservoir bitumen in East Sichuan Basin, China. *Organic Geochemistry*, 41: 871–878
- Carothers WW and Kharaka YK. 1978. Aliphatic acid Anions in oil-field waters-implications for origin of natural gas. *AAPG Bulletin*, 62: 2441–2453
- Cheng KM and Wang ZY. 1996. An evaluation method of hydrocarbon generating potential of highly mature and over-mature marine carbonate. *Science in China (Series D)*, 40(1): 81–90
- Fu JM and Jia RF. 1984. Evolution and organic matter type in carbonate rocks and petroleum evaluation. *Geochimica*, 13(1): 1–9 (in Chinese with English abstract)
- Fu JM and Qin KZ. 1995. *Kerogen Geochemistry*. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 449–467 (in Chinese)
- Golyshev SI, Verkhovskaya NA, Burkova VN and Matis EY. 1991. Stable carbon isotopes in source-bed organic matter of west and east Siberia. *Org. Geochem.*, 14: 277–291
- Guo TL. 2011. Reservoir characteristics and its controlling factors of the Changxing Formation reservoir in the Yuanba gas field, Sichuan basin, China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(8): 2381–2391 (in Chinese with English abstract)
- Hao F, Zou HY, Gong ZS, Yang SG and Zeng ZP. 2004. Hierarchies of overpressure retardation of organic matter maturation. *Science in China (Series D)*, 34: 443–451
- Hao F, Guo TL and Zhu YM. 2008. Evidence for multiple stages of oil cracking and thermochemical sulfate reduction in the Puguang gas field, Sichuan Basin, China. *AAPG Bulletin*, 92(5): 611–637
- Huang JZ, Chen SJ, Song JR, Wang LS, Gou XM and Wang TD. 1996. Hydrocarbon source systems and formation of gas fields in Sichuan Basin. *Science in China (Series D)*, 40(1): 32–42
- Lei TZ, Xia YQ, Zheng JJ, Wang YX and Meng QX. 2009. Ketones: An important product during hydrocarbon formation of organic acid salt. *Journal of Mineralogy Petrology*, 29(2): 84–87 (in Chinese with English abstract)
- Li F, Zhang Q, Huang RC, Zhao YQ, Tian J and Zhu X. 2011. Relation between geochemical characteristics of natural gas and hydrocarbon accumulation in Yuanba and Tongnanba areas. *Journal of Oil and Gas Technology*, 33(6): 36–40 (in Chinese with English abstract)
- Liang DG, Zhang SC, Zhang BM and Wang FY. 2000. Understanding on marine oil generation in China based on Tarim Basin. *Earth Science Frontiers*, 7(4): 534–547 (in Chinese with English abstract)
- Liang DG, Guo TL, Chen JP, Bian LZ and Zhao Z. 2008. Distribution of four suits of regional marine source rocks. *Marine Petroleum Geology*, 13(2): 1–16 (in Chinese with English abstract)
- Liu WH, Zhang JY, Fan M, Gao B, Zhang DW and Zheng LJ. 2007.

- Gas generation character of dispersed soluble organic matter. *Petroleum Geology and Experiment*, 29(1): 1-6 (in Chinese with English abstract)
- Liu WH. 2009. Research progress on manifold hydrocarbon source and its trace system in marine strata. *Natural Gas Geoscience*, (1): 1-7 (in Chinese with English abstract)
- Liu WH, Tenger, Gao B, Zhang ZN, Zhang JY, Zhang DW and Fan M. 2010. H₂S formation and enrichment mechanism in medium to large scale natural gas fields (reservoirs) in Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 37(5): 513-522 (in Chinese with English abstract)
- Ma YS, Guo XS, Tong LG, Rui H and Cai XY. 2007. The Puguang gas field; New giant discovery in the mature Sichuan Basin, southwest China. *AAPG Bulletin*, 91(5): 627-643
- Peng PA, Liu DY, Qin Y, Yu CL, Zhang SW, Sui FG and Li JY. 2008. Low limits of organic carbon content in carbonate as oil and gas source rocks. *Geochimica*, 37(4): 415-422 (in Chinese with English abstract)
- Pittman ED and Leman MD. 1994. *Organic Acids in Geological Processes*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 70-114
- Price IC and Wenger LM. 1992. The influence of pressure on petroleum generation and maturation as suggested by aqueous pyrolysis. *Org. Geochem.*, 19: 141-159
- Qin JZ, Fu XD and Tenger. 2008a. Evaluation of the excellent Triassic to Silurian marine hydrocarbon source rocks in Xuanhan-Daxian area of Northeast Sichuan Basin. *Petroleum Geology and Experiment*, 30(4): 367-374 (in Chinese with English abstract)
- Qin JZ, Meng QQ and Fu XD. 2008b. Three hydrocarbon generation and accumulation processes of marine carbonate rocks in northeastern Sichuan Basin, China. *Petroleum Exploration and Development*, 35(5): 548-556 (in Chinese with English abstract)
- Qin SF, Dai JX and Wang LS. 2007. Different origins of natural gas in secondary gas pool in western Sichuan foreland basin. *Geochimica*, 36(4): 368-374 (in Chinese with English abstract)
- Qin WJ. 2007. Eastern China deep oil-gas exploration technology and its application effect. *Petroleum & Petrochemical Today*, 15(7): 7-9 (in Chinese with English abstract)
- Tenger, Gao CL, Hu K, Pan WL, Zhang CJ, Fang CM and Cao QG. 2006. High-quality source rocks in the lower combination in southeast Upper Yangtze area and their hydrocarbon generating potential. *Petroleum Geology and Experiment*, 28(4): 359-364 (in Chinese with English abstract)
- Tenger, Gao CL, Hu K, Fang CM, Lv JX, Zhai CB and Zhang CJ. 2007. High quality source rocks of lower combination in the northern Upper Yangtze area and their hydrocarbon potential. *Natural Gas Geoscience*, 18(2): 254-259 (in Chinese with English abstract)
- Tenger, Qin JZ, Fu XD, Li W, Rao D and Zhang MZ. 2008. Basic conditions of marine hydrocarbon accumulation in northwest Sichuan Basin; High quality source rocks. *Petroleum Geology and Experiment*, 30(5): 478-483 (in Chinese with English abstract)
- Tenger, Qin JZ, Fu XD, Yang YF and Xie XM. 2010. Hydrocarbon source rocks evaluation of the Upper Permian Wujaping Formation in northeast Sichuan area. *Journal of Palaeogeography*, 12(3): 1-12 (in Chinese with English abstract)
- Tenger, Hu K, Meng QQ, Huang J, Fu XD, Xie XM, Yang YF and Gao CL. 2011. Formation mechanism of high quality marine source rocks; Coupled control mechanism of geological environment and organism evolution. *Journal of Earth Science*, 22(3): 326-339
- Tissot BP and Welte DH. 1978. *Petroleum Formation and Occurrence; A New Approach to Oil and Gas Exploration*. New York, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 3-66
- Wang YG, Dou LR, Wen YC, Zhang J and Liu HY. 2002. Origin of H₂S in Triassic Feixianguan Formation gas pools, Northeastern Sichuan Basin, China. *Geochimica*, 31(3): 1-12 (in Chinese with English abstract)
- Wang YG, Wen YC, Hong HT, Xia ML and Song SJ. 2006. Dalong Formation Found in Kaijiang-Liangping oceanic trough in The Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 26(9): 32-36 (in Chinese with English abstract)
- Yun L and Zhai XX. 2008. Discussion on characteristics of the Cambrian reservoirs and hydrocarbon accumulation in Well Tashen-1, Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 29(6): 726-732 (in Chinese with English abstract)
- Zhang EH, Jiang CJ, Zhang YG, Li ZA, Fen XY and Wu J. 2010. Study on the formation and evolution of deep structure of Xujiaweizi fault depression. *Acta Petrologica Sinica*, 26(1): 149-157 (in Chinese with English abstract)
- Zhang M, Huang GH, Wang X and Zhang J. 2009. Geochemical characteristics, formation condition and source evaluation of oil cracked gas; Case study of Tarim Basin. *Journal of Oil and Gas Technology*, 31(6): 38-43 (in Chinese with English abstract)
- Zhang SC, Zhu GY and He K. 2011. The effects of thermochemical sulfate reduction on occurrence of oil-cracking gas and reformation of deep carbonate reservoir and the interaction mechanisms. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3): 809-826 (in Chinese with English abstract)
- Zhao MJ, Zhang SC and Liao ZQ. 2001. The cracking gas from crude oil and its significance in gas exploration. *Petroleum Exploration and Development*, 28(4): 47-49 (in Chinese with English abstract)
- Zhao WZ, Wang ZY, Zhang SC, Wang HJ, Zhao CY and Hu GY. 2005. Successive generation of natural gas from organic materials and its significance in future exploration. *Petroleum Exploration and Development*, 32(2): 1-7 (in Chinese with English abstract)
- Zheng LJ, Qin JZ and He S. 2009. Preliminary study of formation porosity thermocompression simulation experiment of hydrocarbon generation and expulsion. *Petroleum Geology and Experiment*, 31(3): 296-306 (in Chinese with English abstract)
- Zhu GY, Zhang SC, Liang YB, Dai JX and Li J. 2005. Isotopic evidence of TSR origin for natural gas bearing high H₂S contents within the Feixianguan Formation of the northeastern Sichuan Basin, southwestern China. *Science in China (Series D)*, 48(11): 1960-1971
- Zou CN, Tao SZ, Yuan XJ, Zhu RK and Dong DZ. 2009. Global importance of "continuous" petroleum reservoirs; Accumulation, distribution and evaluation. *Petroleum Exploration and Development*, 36(6): 669-682 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 傅家谟, 贾蓉芳. 1984. 碳酸盐岩分散有机质的基本形式、演化特征与碳酸岩地层油气评价. *地球化学*, 13(1): 1-9
- 傅家谟, 秦匡宗. 1995. *干酪根地球化学*. 广州: 广东科技出版社, 449-467
- 郭彤楼. 2011. 元坝气田长兴组储层特征与形成主控因素研究. *岩石学报*, 27(8): 2381-2391
- 雷天柱, 夏燕青, 郑建京, 王有孝, 孟仟祥. 2009. 酮-有机酸盐生烃过程中的重要产物. *矿物岩石*, 29(2): 84-87
- 李凤, 张卿, 黄仁春, 赵永庆, 田江, 朱祥. 2011. 元坝-通南巴地区天然气地球化学特征与成藏关系研究. *石油天然气学报*, 33(6): 36-40
- 梁狄刚, 张水昌, 张宝民, 王飞宇. 2000. 从塔里木盆地看中国海相生油问题. *地学前缘*, 7(4): 534-547
- 梁狄刚, 郭彤楼, 陈建平, 边立曾, 赵喆. 2008. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(一) 南方四套区域性海相烃源岩的分布. *海相油气地质*, 13(2): 1-16
- 刘文汇, 张建勇, 范明, 高波, 张殿伟, 郑伦举. 2007. 叠合盆地天然气的重要来源——分散可溶有机质. *石油实验地质*, 29(1): 1-6
- 刘文汇. 2009. 海相层系多种烃源及其示踪体系研究进展. *天然气*

- 地球科学, 20(1): 1-7
- 刘文汇, 腾格尔, 高波, 张中宁, 张建勇, 张殿伟, 范明. 2010. 四川盆地大中型天然气田(藏)中 H_2S 形成及富集机制. 石油勘探与开发, 37(5): 513-522
- 彭平安, 刘大永, 秦艳, 于赤灵, 张善文, 隋凤贵, 李钜源. 2008. 海相碳酸盐岩烃源岩评价的有机碳下限问题. 地球化学, 37(4): 415-422
- 秦建中, 付小东, 腾格尔. 2008a. 川东北宣汉-达县地区三叠-志留系海相优质烃源层评价. 石油实验地质, 30(4): 367-374
- 秦建中, 孟庆强, 付小东. 2008b. 川东北地区海相碳酸盐岩三期成烃成藏过程. 石油勘探与开发, 35(5): 548-556
- 秦胜飞, 戴金星, 王兰生. 2007. 川西前陆盆地次生气藏天然气来源追踪. 地球化学, 36(4): 368-374
- 秦伟军. 2007. 中国东部深层油气勘探技术与应用效果. 当代石油石化, 15(7): 7-9
- 腾格尔, 高长林, 胡凯, 潘文蕾, 张长江, 方成名, 曹清古. 2006. 上扬子东南缘下组合优质烃源岩发育及生烃潜力. 石油实验地质, 28(4): 359-365
- 腾格尔, 高长林, 胡凯, 方成名, 吕俊祥, 翟常博, 张长江. 2007. 上扬子北缘下组合优质烃源岩分布及生烃潜力评价. 天然气地球科学, 18(2): 254-259
- 腾格尔, 秦建中, 付小东, 李武, 饶丹, 张美珍. 2008. 川西北地区海相油气成藏物质基础——优质烃源岩. 石油实验地质, 30(5): 478-483
- 腾格尔, 秦建中, 付小东, 仰云峰, 谢小敏. 2010. 川东北地区上二叠统吴家坪组烃源岩评价. 古地学报, 12(3): 1-12
- 王一刚, 窦立荣, 文应初, 张静, 刘划一. 2002. 四川盆地东北部三叠系飞仙关组高含硫气藏 H_2S 成因研究. 地球化学, 31(3): 1-12
- 王一刚, 文应初, 洪海涛, 夏茂龙, 宋蜀筠. 2006. 四川盆地开江-梁平海槽内发现大隆组. 天然气工业, 26(9): 32-36
- 云露, 翟晓先. 2008. 塔里木盆地塔深1井寒武系储层与成藏特征探讨. 石油与天然气地质, 29(6): 726-732
- 张尔华, 姜传金, 张元高, 李自安, 冯肖宇, 吴杰. 2010. 徐家围子断陷深层结构形成与演化的探讨. 岩石学报, 26(1): 149-157
- 张敏, 黄光辉, 王祥, 张俊. 2009. 原油裂解气的地球化学特征、形成条件与资源评价——以塔里木盆地台盆区为例. 石油天然气学报, 31(6): 38-43
- 张水昌, 朱光有, 何坤. 2011. 硫酸盐热化学还原作用对原油裂解成气和碳酸盐岩储层改造的影响及作用机制. 岩石学报, 27(3): 809-826
- 赵孟军, 张水昌, 廖志勤. 2001. 原油裂解气在天然气勘探中的意义. 石油勘探与开发, 28(4): 47-49
- 赵文智, 王兆云, 张水昌, 王红军, 赵长毅, 胡国义. 2005. 有机质“接力成气”模式的提出及其在勘探中的意义. 石油勘探与开发, 32(2): 1-7
- 郑伦举, 秦建中, 何生. 2009. 地层孔隙热压生排烃模拟实验初步研究. 石油实验地质, 31(3): 296-306
- 邹才能, 陶士振, 袁选俊, 朱如凯, 董大忠. 2009. “连续型”油气藏及其在全球的重要性: 成藏、分布与评价. 石油勘探与开发, 36(6): 669-682