

文章编号: 0253-9985(2005)04-0450-05

塔北地区甲烷碳同位素特征与烃类运移方式

朱怀平, 程同锦, 李 武, 王国建

(中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏无锡 214151)

摘要: 不同的烃类运移方式产生了不同的甲烷碳同位素分馏效应。其中, 以扩散型方式运移的烃类甲烷碳同位素具有随运移距离的增加而显示趋重的变化特征, 例如塔北地区不同井中甲烷碳同位素由深层三叠系的 -46.98% ~ -55.98% 至浅层第四系为 -31.47% ~ -37.51% 。北海富提斯油田近地表沉积物甲烷碳同位素在油气田上方分布着较轻的甲烷碳同位素($\delta^{13}\text{C}_1$ 值为 -40%), 向外围, 随着距离的增加甲烷碳同位素($\delta^{13}\text{C}_1$ 值为 -30%)也呈明显趋重的变化分布。渗漏型方式运移的烃类甲烷碳同位素则不随运移距离而变化, 如塔北地区阿克库木构造奥陶系烃源岩天然气甲烷碳同位素值 -34.85% ~ -34.98% , 地表化探甲烷碳同位素值稳定在 -34.62% ~ -36.56% , 与地下奥陶系天然气甲烷碳同位素值近似或等同, 显示出地表甲烷碳同位素与地下甲烷碳同位素之间具有同源的关系。不同烃类的运移方式, 甲烷碳同位素明显不同的规律性变化, 主要是由于扩散型运移, 甲烷中轻碳同位素分子因溶解而分馏, 从而形成酸解烃甲烷碳同位素沿着地层剖面向上的趋重分馏, 渗漏型运移由于天然气运移规模大、速度快, 甲烷在水中的微量溶解难以改变大规模运移中的甲烷碳同位素特征。

关键词: 甲烷碳同位素; 运移方式; 扩散型; 渗漏型; 塔北地区

中图分类号: TE112.3 **文献标识码:** A

Features of methane carbon isotope and patterns of hydrocarbon migration in Tabei area

Zhu Huaping, Cheng Tongjin, Li Wu, Wang Guojian

(Wuxi Institute of Petroleum Geology, Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu)

Abstract Various patterns of hydrocarbon migration would result in different fractionation effects of methane carbon isotopes. When hydrocarbons migrate through diffusion, methane carbon isotopes tend to get heavier along with increasing migration distance. For example, methane carbon isotopes in different wells in Tabei area change from -46.98% ~ -55.98% in the deep Triassic to -31.47% ~ -37.51% in the shallow Quaternary. In Forties oilfield in North Sea, the methane carbon isotopes are lighter in the near surface sediments over the oilfield (the value of $\delta^{13}\text{C}_1$ being -40%), and they also tend to get heavier along with the increasing migration distance to the periphery (the value of $\delta^{13}\text{C}_1$ being -30%). When hydrocarbons migrate through filtration, methane carbon isotopes do not change along with migration distances. For example, the methane carbon isotopes of natural gas in the Ordovician source rocks in Akekumu structure, Tabei area, is in the range of -34.85% ~ -34.98% . The methane carbon isotopes measured through surface geochemical exploration is in the range of -34.62% ~ -36.56% , which is near or equal to that in the subsurface Ordovician, indicating that the surface and subsurface methane carbon isotopes have a cogenetic relationship. The reason that causes apparent and regular variation of methane carbon isotopes in various hydrocarbon migration patterns is that the methane molecules with light carbon isotopes would be dissolved during diffusion migration. As a result, the carbon isotopes detected with acidolitic hydrocarbon method would be fractionated, or become heavier upward along the

基金项目: 中国石化股份公司科技项目 (P02091)

第一作者简介: 朱怀平, 男, 42岁, 工程师, 石油地质与油气地球化学

收稿日期: 2005-06-26

stratigraphic section. While during filtration migration, negligible dissolution of methane in water would not change the methane carbon isotope features in extensive migration, due to the large scale and rapid migration of natural gas.

Key words methane carbon isotope migration pattern; diffusion type; filtration type

烃类在运移中碳、氢同位素组成是否会发生分馏是一个曾经颇有争议的问题。例如, Syngayevskiy^[1]根据稳定同位素的分馏作用, 实验模拟了天然气运移中碳同位素的分馏效应, 认为气态烃穿过岩石会发生同位素分馏。但 Coleman 与 Reitsma^[2]证实在烃类运移过程中甲烷的碳、氢同位素并不发生变化。陈锦石^[3]、魏菊英等^[4]认为天然气运移过程中同位素的分馏主要取决于气体组分的性质和运移方式。陈荣书^[5]认为, 由于¹²CH₄和¹³CH₄具有不同的扩散运移速度, 在油气运移过程中, 扩散与渗滤会有不同的分馏作用。阮天键等^[6]则认为扩散运移不会导致烃同位素明显的改变。近年来, 陈安定^[7]、张同伟^[8]、李剑等^[9]通过实验模拟认为, 天然气在运移中会造成明显的甲烷碳同位素分馏。

烃类的运移方式目前认为有多种^[10~12], 主要是渗透、扩散和水动力等。渗透方式又分为渗透(通过孔隙)和渗漏(通过裂隙)。限于文章篇幅, 本文仅探讨渗透运移中的渗漏型运移与扩散型运移方式的甲烷碳同位素分馏变化特征。

1 渗漏型运移方式

塔里木盆地北部雅克拉油气田为多层系油气田。沙参 2 井(O)、沙 4 井(J)、沙 5 井(K₁)、沙 7 井(Є, J K)等主要产层的全油碳同位素相近。 $\delta^{13}C_{全油}$ 为-32‰~-31‰, 姥植烷比约为 1.0, 钕镍比大于 1.0, 表明母质来源与环境相同; 正构烷烃碳数分布形态一致, 甾烷、萜烷分布相似, 说明雅克拉油气田为同一烃源提供的高成熟海相原油。根据油、气烃源研究, 雅克拉油气田烃源岩为奥陶系烃源岩^[13]。

通过表 1 可以看出, 雅克拉构造不仅同一口井中不同时代的多个油气层具有近似的甲烷、乙烷及丙烷碳同位素值, 而且分布于该构造上的不同井相同时代与不同时代油气层, 也均具有极为近似的天然气甲烷、乙烷及丙烷碳同位素值^[14], 表明雅克拉构造甲烷碳同位素具有稳定的分布, 即使在雅克拉油气田边缘水气同层的沙 6 井也具有和产油气井

表 1 塔里木盆地北部雅克拉地区天然气甲烷同位素分布特征^[14]

Table 1 Distribution characteristics of gas $\delta^{13}C_1$ in Yakela area, northern Tarim basin				
产层时代	井号	$\delta^{13}C_1 / \text{‰}$	$\delta^{13}C_2 / \text{‰}$	$\delta^{13}C_3 / \text{‰}$
E	沙 3 井	-40.51		
	沙 7 井	-39.43	-32.65	-30.16
K	沙 5 井	-40.13	-32.71	-30.68
	沙 7 井	-39.42	-31.47	-29.19
J	沙 4 井	-39.30	-33.29	
	沙 5 井	-40.50	-32.71	-30.68
O	沙参 2 井	-40.91	-32.22	-30.95
	沙 5 井	-41.56	-37.61	
	沙 15 井	-40.91		
Є	沙 7 井	-41.89	-31.71	-29.81
	沙 6 井	-40.62	-29.60	
Z	沙 4 井	-39.58	-31.96	-30.88

注: 表中空格为无资料

相同的甲烷碳同位素, 说明油气水混相区域复杂动荡的运移条件并没有改变沙 6 井甲烷碳同位素的特征。这些共性表明, 一是雅克拉构造不同井、不同储层中的烃类具有同源性, 二是中生界储层与古生界油气藏或烃源岩具有良好的连通性^[15, 16]。

汤良杰等^[17]在塔里木盆地东北部断裂构造特征及控油作用研究中证实, 雅克拉和阿克库勒地区中生界的油气, 其烃源岩为寒武-奥陶系, 都是通过轮台-沙雅断裂带和阿克库木-阿克库勒断裂带运移上来的。刘锦才等^[18]认为油气二次运移是在浮力的作用下, 沿裂隙系统和渗透带作垂向和侧向运移。显然, 雅克拉构造侏罗系、白垩系及第三系油气藏的形成均是断裂和裂缝串通不整合面, 连通烃源与圈闭, 构成高渗透性运移网络, 油气借此网络以渗漏方式大规模运移进入不同时代储集层聚集的结果(图 1)。不整合面上、下油气藏样品的正构烷、甾烷、萜烷运移参数相似的事实, 也证实了不整合面是油气运移的高渗透性运移通道^[11]。

位于塔里木盆地北部的桑塔木油气藏, 也是一个多产层油气藏, 油气层分别位于石炭系底部、上部及三叠系中部(图 2), 3 层油气层中天然气甲烷及乙烷碳同位素值非常近似(表 2)。反映不同油气层中的烃类具有同源性。据该区石油地质资料研究^[8], 桑塔木油气田三叠系油气为他源运移

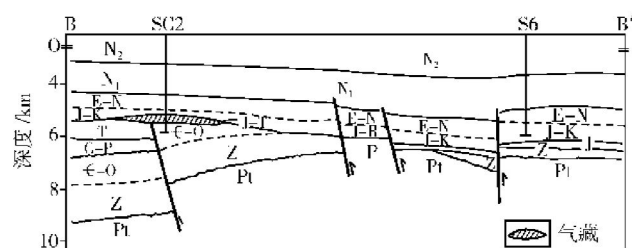
图 1 塔北地区雅克拉油气藏剖面图^[6]

Fig. 1 Profile of Yakela oil and gas reservoirs in Tabei area

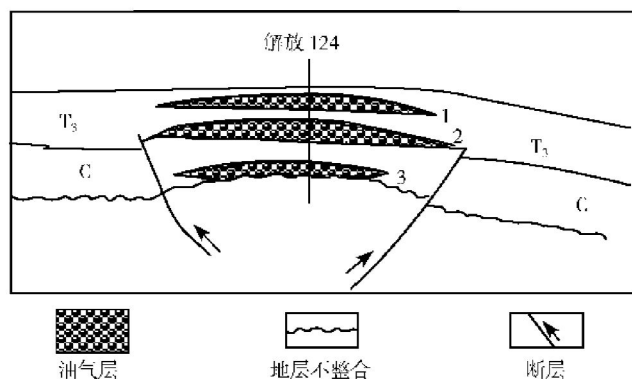
图 2 桑塔木油气藏构造示意图^[8]

Fig. 2 Schematic structural map of Shangtanu oil and gas reservoir

而来。不同油气层碳同位素近似的组合特征表明, 烃类在垂向运移过程中未发生碳同位素的明显分馏。桑塔木油气藏烃类碳同位素的组合特征与断裂发育条件表明, 油气藏中的烃类是通过断裂、裂隙等高渗透性运移通道以渗漏方式运移聚集成藏的。

表 2 解放 124 井油三层溶气碳同位素组成^[8]Table 2 Composition of $\delta^{13}\text{C}_1$ of gas dissolved in three oil layers in Jiefang 124 well

产层	井深 /m	时代	$\delta^{13}\text{C}_1 / \text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}_2 / \text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}_3 / \text{‰}$
1	4 420	T ₂	- 36.5	- 35.3	- 32.2
2	4 946	C	- 35.2	- 34.9	- 29.8
3	5 081	C	- 35.6	- 35.5	- 29.9

塔北地区各油气田不同油气储层中天然气甲烷碳同位素值相近似的特征表明, 油气在二次运移聚集成藏过程中没有发生碳同位素的分馏。这一现象与国内研究人员所进行的天然气通过高渗透性运移通道时, 天然气甲烷碳同位素不发生分馏的模拟结果相符^[9], 与 Reitsma 等^[19]的观察, 自然条件下天然气沿断裂垂向运移上千米, 甲烷的碳、氢同位素不会发生分馏的结论具有一致性。

2 扩散型运移

由于天然气聚集成藏, 与周围介质存在有浓

度差, 势必导致发生天然气扩散运移。随着烃类向上部地层的扩散运移, 质量较 $^{13}\text{C}_1$ 低的 $^{12}\text{C}_1$ 同位素, 因运移速度较快, 在穿越不同物性的岩石柱时, 较先到达水层与水分子结合成水合分子或填充于水分子的间隙中^[20], 而使运移中的天然气发生溶解分馏。由于在垂向扩散运移方向上, 伴随烃类浓度、地层温度的降低, 以及大气降水、地表淡水的补充, 导致了地层水矿化度的降低等一系列有利于甲烷溶解作用因素的增加, 促进了甲烷碳同位素的分馏作用, 使参与扩散运移的烃类随着运移距离的增加甲烷轻碳同位素被逐渐分馏, 甲烷重碳同位素相对于下部地层有所增加, 在向上部地层运移中, 甲烷重碳同位素分子被吸附于细粒沉积物表面或进入矿物晶格中保存, 留下烃类扩散运移的碳同位素痕迹。

塔北地区不同井中酸解烃甲烷碳同位素有着较为一致的分馏变化特征 (表 3)。表现为甲烷碳同位素从油气井剖面的下部向剖面上部呈明显趋重分馏的变化特征^[21]。这种变化与有机质在成熟演化中, 甲烷碳同位素随埋藏深度增加表现有上轻 ($\delta^{12}\text{C}_1$) 下重 ($\delta^{13}\text{C}_1$) 的变化完全不同; 与国内研究人员通过天然气及其组分所进行的扩散运移模拟, 甲烷碳同位素分馏趋轻的结果也不相同^[9]。很多研究者认为在地表甲烷碳同位素的变重, 与烃类气体运移到地表后被细菌氧化而产生甲烷碳同位素的分馏有关。细菌优先氧化含 ^{12}C 的甲烷,

表 3 塔北地区部分油气井酸解烃甲烷碳同位素分布特征 ($\delta^{13}\text{C}_1 / \text{‰}$)^[21]Table 3 Distribution characteristics of $\delta^{13}\text{C}_1$ detected with acidolytic hydrocarbon method in some wells in northern Tarim basin ($\delta^{13}\text{C}_1 / \text{‰}$)

地 层	甲烷碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}_1 / \text{‰}$)				
代 号	沙 4 井	沙 22 井	沙 18 井	沙 15 井	沙 5 井
Q	- 3.485	- 3.751	/	- 31.47	- 35.00
N ₂ k	- 37.36	- 39.98	/	- 32.37	
N ₁ k		- 41.04	- 39.99	- 32.10	- 43.15
N ₁ j	- 38.14	/	- 40.12	- 36.47	- 40.32
N ₁ s		- 42.02	/	- 36.60	
E-K ₂	- 35.37	/	- 41.95	- 4.013(气)	
K ₁ hp		- 41.54	- 41.45	- 35.80	- 41.90(气)
J	- 41.34	/	/	- 40.50(气)	
T ₃ h		/	- 52.81	/	
T ₂ a	- 46.98	- 55.85	/	/	
T ₁ k		/	/	/	
C		- 41.10(气)	/	- 44.43	
O		/	- 40.91(气)	/	

注: 表中空格为无资料

会使剩余的甲烷¹³C 值变高^[22]。而塔北雅克拉油气田酸解烃甲烷碳同位素的试验研究证明, 该地区地表烃气是下伏油气藏运移上来的, 且未受细菌氧化^{*}。显然, 塔北地区酸解烃甲烷碳同位素在剖面上的分馏变化特征, 与天然气在扩散运移中的分馏效应^[23]有关。

Aleksyev^[24]的气体实验曾得出这样的结论, 甲烷在溶于水时, 主要溶解含轻碳原子的分子。

经“八·五”科技攻关研究, 我国松辽盆地东南部十屋断陷后五家户气田浅部气层, 是来源于下部富含轻碳同位素的水溶烃甲烷的脱溶成藏 (表 4)^{**}。后五家户气田浅部气层溶解气甲烷碳同位素特征表现出富轻碳同位素的现象, 反映了天然气穿越地层剖面运移时, 甲烷发生明显的碳同位素分馏。这从另一侧面反映甲烷中轻碳同位素具有优先溶于水的特点。

表 4 后五家户气田深浅部天然气甲烷碳同位素对比表^{**}

Table 4 Comparison of gas $\delta^{13}\text{C}_1$ in the deep and shallow layers in Houwujiahu gas field (Xiao Haiyan, 1995)

层 位	气 藏	井 号	埋深 /m	产 状	$\delta^{13}\text{C}_1$ /‰	层 系
K_1q^3	杨大城子	SN 38	355~360	气层	-38.16	上部层系
K_1q^3	杨大城子	SN 38	355~360	气层	-38.16	上部层系
	农安	后浅 1	452~458	气层	-34.20	
K_1q^1	农安	SN 24	1 175	气层	-38.66	下部层系
	农安		1 260~1 267	含气水层	-36.16	
	农安	SN 29	1 305~1 311	水层	-36.54	
	农安	SN 30-1	1 494~1 498	气层	-26.53	
	农安		1 526~1 528	气层	-26.32	
	农安	SN 33	1 490	气层	-25.29	
K_1d	小五家子	SN 42	1 531~1 536	气层	-25.56	

3 实例

塔北阿克库勒地区阿克库木构造沙 14 井奥陶系天然气甲烷碳同位素值为-34.85‰, 沙 9 井奥陶系天然气甲烷碳同位素值为-34.98‰^[13]。该构造地表区域化探异常酸解烃甲烷碳同位素值为-36.56‰~-34.62‰, 与地下奥陶系天然气甲烷碳同位素值近似或等同 (表 5), 显示出地表甲烷碳同位素与地下甲烷碳同位素之间具有同源的关系^[25], 这一现象与人工模拟实验和自然界中观察到的高渗漏运移条件下甲烷碳同位素不发生分馏的结果相一致^[9]。说明阿克库木构造地表异常酸解烃甲烷碳同位素是由地下油气藏中的烃类通过渗漏方式运移到达近地表的 (图 3)。

表 5 阿克库木构造地表酸解烃甲烷碳同位素分析表^[25]

Table 5 Analysis of $\delta^{13}\text{C}_1$ on the surface of Akekumu structure with acidolytic hydrocarbon method

样品号	$\delta^{13}\text{C}_1$ /‰	样品号	$\delta^{13}\text{C}_1$ /‰
A-1-1	-36.740	A-2-1	-37.599
A-1-42(异常点)	-34.759	A-2-18(异常点)	-3.534 9
A-1-55(异常边缘点)	-34.623	A-2-55(异常点)	-36.557

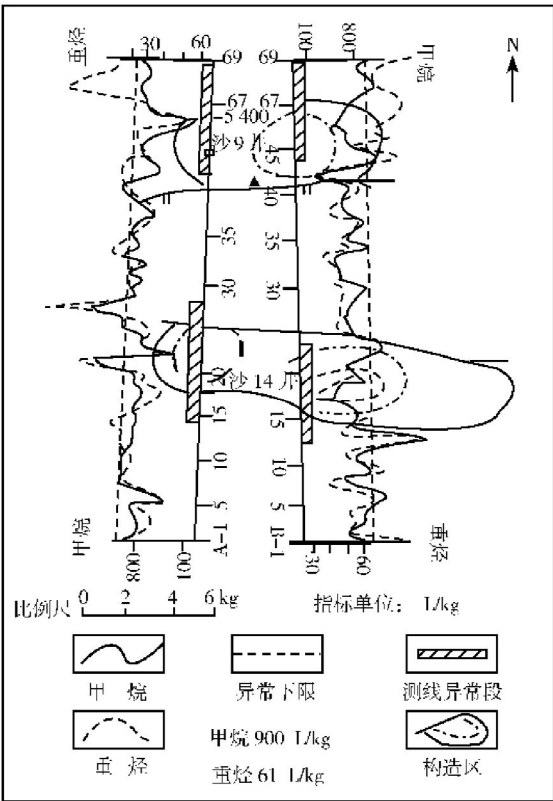


图 3 阿克库木构造地表烃气地球化学平面剖面图^[25]

Fig. 3 Plane-profile map showing geochemical characteristics of surface hydrocarbons in Akekumu structure

* 陈炜. 甲烷、 ΔC 稳定碳同位素新技术在油气化探中应用研究的探讨. 1989

** 赵庆吉, 何兴华, 肖海燕, 等. 松辽盆地东南部浅层天然气成藏规律及勘探评价研究. 1995

图 4 为北海富提斯油田地表沉积物甲烷碳同位素分布图,从图中可以看出在油气田上方分布着较轻的甲烷碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}_1$ 值为 -40‰)^[22],围绕富提斯油田向外围,随着距离的增加甲烷碳同位素值呈明显趋重的变化分布。这一现象与陈安定^[7]天然气管状模型试验的结果,井中酸解烃甲烷碳同位素自下而上呈现的趋重扩散运移特征较为吻合,表明富提斯油田地表甲烷碳同位素的趋重变化分布特征,是地下油气藏中的烃类通过扩散方式运移所致,它们构成了环油气田地表烃类的区域背景^[22]。

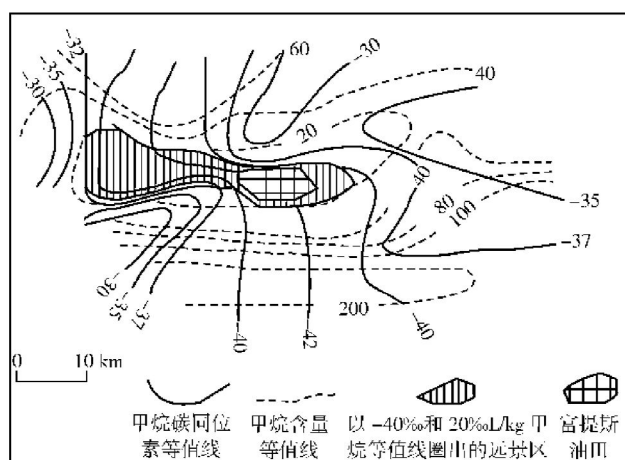


图 4 富提斯油田地表甲烷碳同位素分布特征^[22]

Fig. 4 Distribution characteristics of $\delta^{13}\text{C}_1$ on the surface of Forties oilfield

通过上述实例分析,可以看出塔里木盆地北部油气区因烃类运移方式不同,而产生了甲烷碳同位素明显不同的规律性变化。其中,油气藏剖面酸解烃甲烷碳同位素由下向上变重的特征,反映了烃类在运移通道不畅的情况下以扩散型方式向近地表运移,而这种扩散方式运移的结果导致了甲烷碳同位素发生了较为明显的分馏。这些经过分馏的较重的甲烷烃往往分布于背景中,这与化探理论中扩散形成地化背景场的认识是一致的。油气田内同一油层或不同油层中天然气甲烷碳同位素相等或相近的特征,与高渗漏条件下人工模拟甲烷碳同位素不发生分馏的结果一致,表明以渗漏型方式向近地表运移形成的酸解烃甲烷碳同位素不发生分馏。它保持了油气藏中烃类的碳同素特征,该烃类异常具有指证油气藏的作用。

参 考 文 献

- 1 Syngayevskiy Y D. Fractionation of carbon isotopes during migration of hydrocarbons in the gas phase through rocks in Petroleum geochemistry, genesis and migration, AGI reprint series [J]. International Geology Review, 1980, 1: 968-1981
- 2 王大锐. 油气稳定同位素地球化学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2000: 219
- 3 陈锦石, 陈文正. 碳同位素地质学概论 [M]. 北京: 地质出版社, 1983: 128-129
- 4 魏菊英, 王关玉. 同位素地球化学 [M]. 北京: 地质出版社, 1988: 152
- 5 陈荣书. 天然气地质学 (第二版) [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989: 93, 28-29
- 6 阮天键, 费琪. 石油天然气地球化学勘探 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992: 126, 36
- 7 陈安定. 陕甘宁盆地中部气田奥陶系天然气的成因和运移 [J]. 石油学报, 1994, 15(2): 1-10
- 8 张同伟, 陈践发, 王先彬, 等. 天然气运移的气体同位素地球化学示踪 [J]. 沉积学报, 1995, 13(2): 70-76
- 9 李剑, 刘朝露, 李志生, 等. 天然气组分及其同位素分馏作用模拟实验研究 [J]. 天然气地球科学, 2003, 14(6): 463-467
- 10 张义纲, 陈彦华, 陆嘉炎. 油气运移及其聚集成藏模式 [M]. 南京: 河海大学出版社, 1997
- 11 程同锦, 王者顺, 吴学明, 等. 烃类运移的近地表显示与地球化学勘探 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 96-101
- 12 戴金星, 戚厚发, 郝石生. 天然气地质学概论 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1989: 75, 93-95

(下转第 460 页)

- 生代断裂系统 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(1): 78~85
- Xiao Ancheng Yang Shufeng Li Yuejun et al The Cenozoic fracture systems in Bachu-Keping area of Tarim basin [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(1): 78~85
- 20 余晓宇, 施泽进, 刘高波. 巴楚-麦盖提地区油气成藏的输导系统 [J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 346~349
- She Xiaoyu Shi Zejin Liu Gaobo Pathway system of oil and gas migration in Bachu-Maigaiti area [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(4): 346~349
- 21 杨威, 王清华, 赵仁德, 等. 和田河气田奥陶系碳酸盐岩裂缝 [J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(3): 252~255
- Yang Wei Wang Qinghua Zhao Rendeng et al Fractures of Ordovician carbonate rocks in Hetianhe gasfield [J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(3): 252~255
- (编辑 李树森)
-
- (上接第 454 页)
- Dai Jinxing Qi Houfa Hao Shisheng Natural gas geology [M]. Beijing Petroleum Industry Press, 1989, 75, 93~95
- 13 康玉柱. 塔里木盆地古生代海相油气田 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992, 160~165, 142
- Kang Yuzhu Paleozoic marine facies oil & gas field [M]. Wuhan China University of Geosciences Press, 1992, 160~165, 142
- 14 陈正辅, 罗宏. 油气资源 [A]. 见: 康玉柱. 中国塔里木盆地石油地质特征及资源评价 [C]. 北京: 地质出版社, 1996, 179
- Chen Zhengfu Luo Hong Oil and gas resources [A]. In Kang Yuzhu The characteristics of petroleum geology and resource assessment in Tarim Basin, China [C]. Beijing Geological Publishing House, 1996, 179
- 15 杨克明, 龚明, 段铁军, 等. 塔里木盆地断裂的输导和封闭性 [J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(2): 123~127
- Yang Keming Gong Ming Duan Tiejun et al Carrying and sealing properties of faults in Tarim basin [J]. Oil & Gas Geology, 1996, 17(2): 123~127
- 16 黄海军, 许晓宏. 天然气同位素特征及作用 [J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(21): 136~137
- Huang Haijun Xu Xiaohong The characteristics and function of natural gas isotope [J]. Oil & Gas Geology, 1997, 18(21): 136~137
- 17 汤良杰, 黄太柱, 王士敏. 塔里木盆地东北部断裂构造特征及控油作用 [A]. 见: 贾润胥. 中国塔里木盆地北部油气地质研究 (第二辑): 构造与油气 [C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991, 46~47
- Tang Liangjie Huang Taizhu Wang Shimin The characteristics of fault structure and its dominating petroleum function in northeastern Tarim basin [A]. In Jia Yunxu Study on oil & gas geology in northern Tarim basin, China (Vol 2): structure and oil & gas [C]. Wuhan China University of Geosciences Press, 1991, 46~47
- 18 刘锦才, 陈志高. 塔里木盆地凝析油气及其运移模式 [J]. 石油与天然气地质, 1992, 13(1): 67
- Liu Jincan Chen Zhigao Condensate oil and gas and their migration model in Tarim basin [J]. Oil & Gas Geology, 1992, 13(1): 67
- 19 Eilertsen R H, Kaltenback A J, Lindberg F A. Source and migration of light hydrocarbons indicated by carbon isotopic ratios [J]. AAPG Bull, 1981, (66): 1536~1541
- 20 付晓泰, 王振平. 气体在水中的溶解机理及溶解度方程 [J]. 中国科学 (B) 辑, 1996, 126(2): 124~130
- Fu Xiaotai Wang Zhenping Gas dissolution mechanism and its solubility equation in water [J]. China Sciences (B), 1996, 126(2): 124~130
- 21 刘崇禧, 赵克斌, 余刘应. 中国油气化探 40 年 [M]. 北京: 地质出版社, 2001, 5, 17
- Liu Congxi Zhao Kebin Yu Liuying Forty years of geochemical prospecting for oil & gas in China [M]. Beijing Geological Publishing House, 2001, 5, 17
- 22 吴传壁, 邱郁文, 陈玉明, 等. 油气化探发展脉络与思考 [M]. 北京: 地质出版社, 1996, 103~104, 121~124
- Wu Chuanbi Qiu Yuwen Chen Yuming et al The developmental route and consideration of geochemical prospecting for oil and gas [M]. Beijing Geological Publishing House, 1996, 103~104
- 23 程军, 刘崇禧, 赵克斌, 等. 油气垂向微运移的证据及特点 [J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(3): 236~240
- Cheng Jun Liu Congxi Zhao Kebin et al Evidence and Characteristics of oil & gas vertical microseepage [J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(3): 236~240
- 24 Aleksyev F A. Isotope composition of carbon in gaseous hydrocarbon and conditions for accumulation of natural gas [J]. Intern Geol Rev, 1973, 15, 300
- 25 吴学明, 王福. 浅层酸解烃气地球化学方法在塔东北地区的应用效果 [A]. 见: 贾润胥. 中国塔里木盆地北部油气地质研究 (第三辑): 物化探与钻井 [C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991, 101~109
- Wu Xueming Wang Fu The application effect of surface adsorbed hydrocarbon method in northeastern Tarim Basin, China [A]. In Jia Runxu Study on oil & gas geology in northern tarim basin, China (No 3): Geophysical and geochemical exploration and drilling [C]. Wuhan China University of Geosciences Press, 1991, 101~109
- (编辑 李树森)