

中国西部盆地 油藏地球化学

段毅等著



科学出版社

www.sciencep.com

中国西部盆地油藏地球化学

段 毅 等著

国家重点基础研究发展计划项目 (2005CB422105)

国家自然科学基金项目 (40872092)

联合资助

中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (KZCX3-SW-128 和 KZCX2-111)

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是对中国西部盆地典型油藏（低成熟油藏、低渗透油藏和海相碳酸盐岩油藏）地球化学系统研究的成果总结。作者重点分析了柴达木盆地、鄂尔多斯盆地及塔里木盆地等地区不同类型油藏原油的地球化学特征、成因、油藏连通性、原油含氮化合物特征与石油充注、储层流体包裹体特征与成藏期次、原油地球化学非均质性与石油运移等特征，论述了典型油藏的石油充注、聚集历史与成藏机制和成藏动力学过程。

本书可供地球化学和石油地质学等学科的科技工作者及大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国西部盆地油藏地球化学/段毅等著. —北京: 科学出版社, 2010
ISBN 978-7-03-027109-9

I. ①中… II. ①段… III. ①含油气盆地-构造油气藏-地球化学-研究-中国 IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 054407 号

责任编辑: 韦 沁 胡晓春 / 责任校对: 朱光光

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 4 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2010 年 4 月第一次印刷 印张: 15

印数: 1—1 500 字数: 342 000

定价: 58.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

油藏地球化学是 20 世纪 80 年代后期新兴的地球化学的分支学科。经过多年的研究和发展,目前油藏地球化学已成为理论性和实践性都很强的一门应用学科,构成自 20 世纪末以来地球化学领域的一个新的学科生长点。

多年来,在中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX3-SW-128 和 KZCX2-111)、国家重点基础研究发展计划项目(2005CB422105)、国家自然科学基金项目(40872092)和中国石油长庆油田公司等资助下,我们和合作者对中国西部典型盆地油藏地球化学进行了研究,获得了一批重要的研究成果,本专著即是这些研究成果的总结。书中针对典型油藏(低成熟油藏、低渗透油藏和海相碳酸盐岩油藏),进行了地球化学研究,其结果为油藏地球化学研究提供了研究方法、基础理论和典型实例。主要特色成果可概括为以下几个方面:

① 系统地研究了典型油藏原油地球化学特征,查明了原油有机母质、形成环境和成熟度;根据原油地球化学特征的差异,进行了原油成因族群的划分;阐明了原油中生物标志化合物的成因,建立了判识典型油藏原油成因的生物标志化合物示踪体系。

② 针对典型油藏原油成因特征,遴选有效的地球化学参数,进行油源对比,确定了原油的油源;建立了不同类型油藏油源对比的地球化学参数。

③ 通过盐湖相低成熟油藏原油中非烃化合物地球化学研究,建立了判识低成熟原油成因的非烃化合物示踪指标。首次从这类原油中检出了脂肪酸甘油一酯化合物,结合其他丰富的非烃化合物的存在,提出生物油脂类是这类原油的重要成油母质。研究认为,盐湖相强还原和咸水环境,有利于生物油脂类的保存,生物油脂类与可溶有机质和干酪根一起在低成熟阶段形成低成熟原油。

④ 研究了油藏储层内流体与岩石相互作用。通过典型油藏原油含氮化合物分析,研究了中性含氮化合物与岩石相互作用引起的运移分馏效应,查明了原油的充注点和运移方向,确定了烃源灶;结合石油运移通道和动力,阐明了石油的运聚规律。

⑤ 研究了油藏流体非均质性。对典型油藏原油总体化学组成的非均质性和分子构成的非均质性进行了研究;在国内首次研究了原油伴生气中氮同位素组成分布的非均质性,提出这种分布起因于油气运移过程中伴生气的扩散作用和水、油溶解作用的氮同位素分馏。因此,氮同位素组成和分布可能是一种指示油气运移的新指标。由此阐明了原油的充注点和运移方向,确定了烃源灶。

⑥ 研究了油藏流体的连通性。通过典型油藏原油色谱指纹参数的研究,阐明了研究地区油藏流体的连通性;研究发现,油藏的连通性特征与油藏形成的古环境和古地理位置分布关系密切。

⑦ 通过典型油藏储层含油气包裹体与矿物基质之间相互叠置和结合关系分析,确定了与不同期次含油气包裹体所伴生的流体包裹体的均一化温度,研究了油气运移期

次；结合研究区地层埋藏史和古地温资料，分析了包裹体形成的深度范围及其所对应的时间范围，确定了石油运移成藏的时间。

⑧ 在油藏地球化学研究的基础上，通过研究油藏成藏的其他条件，阐明了典型油藏的石油成藏机制与成藏动力学过程。

本书共分三篇九章。第一章由段毅和张辉执笔，第二章和第三章由段毅执笔，第四章由段毅、王传远和吴保祥执笔，第五章和第六章由段毅和王传远执笔，第七章由段毅和吴保祥执笔，第八章由段毅和郑朝阳执笔，第九章由段毅、郑朝阳和吴保祥执笔。

在本书编写过程中得到中国科学院资源环境科学与技术局、中国科学院兰州地质研究所、中国石油长庆油田公司和中国石化石油勘探开发研究院西部分院等有关单位的支持和帮助；研究也得到了中国科学院知识创新工程重要方向性项目（KZCX2-111）负责人孟自芳、国家重点基础研究发展计划项目（2005CB422105）负责人郝芳的资助和支持，在此表示衷心的感谢。

段 毅

2010年1月于兰州

目 录

前言

第一篇 柴达木盆地低成熟油藏地球化学

第一章 柴达木盆地原油地球化学特征与成因	3
一、原油的一般性质.....	4
二、原油碳同位素地球化学.....	6
三、原油烷烃地球化学.....	14
四、原油芳烃地球化学.....	23
五、原油非烃地球化学.....	29
六、原油油源与成因.....	35
第二章 柴达木盆地尕斯库勒油田原油含氮化合物特征与石油运移	39
一、原油含氮化合物分馏效应与分析方法.....	39
二、原油含氮化合物组成与石油充注和运移方向.....	41
第三章 柴达木盆地尕斯库勒油田石油成藏及动力学机制	49
一、原油地球化学.....	49
二、石油成藏动力学机制.....	57

第二篇 鄂尔多斯盆地低渗透油藏地球化学

第四章 鄂尔多斯盆地原油地球化学特征与成因及油藏连通性	67
一、延安组原油地球化学.....	68
二、延长组长 ₁ —长 ₆ 油层组原油地球化学.....	76
三、延长组长 ₈ 油层组原油地球化学.....	83
四、延长组长 ₉ 油层组原油地球化学.....	92
五、原油色谱指纹特征与油藏连通性.....	105
第五章 鄂尔多斯盆地原油含氮化合物特征与石油运移	112
一、延安组原油含氮化合物组成与石油充注和运移.....	112
二、延长组长 ₁ —长 ₆ 油层组原油含氮化合物组成与石油充注和运移.....	120
三、延长组长 ₈ 油层组原油含氮化合物组成与石油充注和运移.....	127
四、延长组长 ₉ 油层组原油含氮化合物组成与石油充注和运移.....	134
第六章 鄂尔多斯盆地储层流体包裹体特征与石油运移期次	139
一、流体包裹体研究概况和一般特征.....	139
二、延安组储层包裹体特征.....	140
三、延长组储层包裹体特征.....	143

第七章 鄂尔多斯盆地石油成藏及动力学机制	151
一、马岭油田油藏成藏条件与机制.....	151
二、延长组长, 油层组油气运聚规律	156
三、西峰油田石油成藏动力学.....	161

第三篇 塔里木盆地海相碳酸盐岩油藏地球化学

第八章 塔里木盆地塔河油田原油地球化学特征与成因	169
一、原油一般性质.....	169
二、原油烷烃地球化学.....	175
三、原油芳烃地球化学.....	186
四、原油的油源与成因.....	195
第九章 塔里木盆地塔河油田原油地球化学非均质性与石油运移	205
一、物性分布的非均质性与石油运移.....	205
二、烷烃分布的非均质性与石油运移.....	208
三、芳烃分布的非均质性与石油运移.....	214
四、稀有气体分布的非均质性与石油运移.....	216
参考文献	220

第一篇

柴达木盆地低成熟油藏地球化学

第一章 柴达木盆地原油地球化学特征与成因

柴达木盆地位于青藏高原北部（图 1.1），面积约 25 万 km²，是一个中、新生代大型内陆地块型山间盆地，沉积岩面积约 9.6 万 km²，其中分布有两套沉积环境不同的生油层系，从而形成了成因截然不同的两类原油。侏罗系生油层系分布于柴达木盆地北部地区（简称柴北地区），形成于淡水湖沼环境。烃源岩主要由侏罗系泥岩、碳质泥岩和煤层组成，泥岩和碳质泥岩有机碳含量一般大于 1%；有机质类型主要为Ⅲ型，其次为Ⅱ型；有机质成熟度从低成熟至过成熟。古近系、新近系生油层系分布于柴达木盆地西部地区（简称柴西地区），形成于咸水—超咸水湖泊环境。烃源岩主要为渐新统下干柴沟组和中新统上干柴沟组的泥岩、泥灰岩和钙质泥岩，它们的有机碳含水量平均为 0.4%；有机质类型为Ⅱ型；成熟度变化较大，主要为低成熟。古近系、新近系原油的储层主要为孔隙型碎屑岩和裂缝型储层，石油运移距离较短，一部分油藏还为自生自储型。对于来自上述两种成油环境的两类原油的地球化学特征及其成因一直是国内外学者关注的问题。

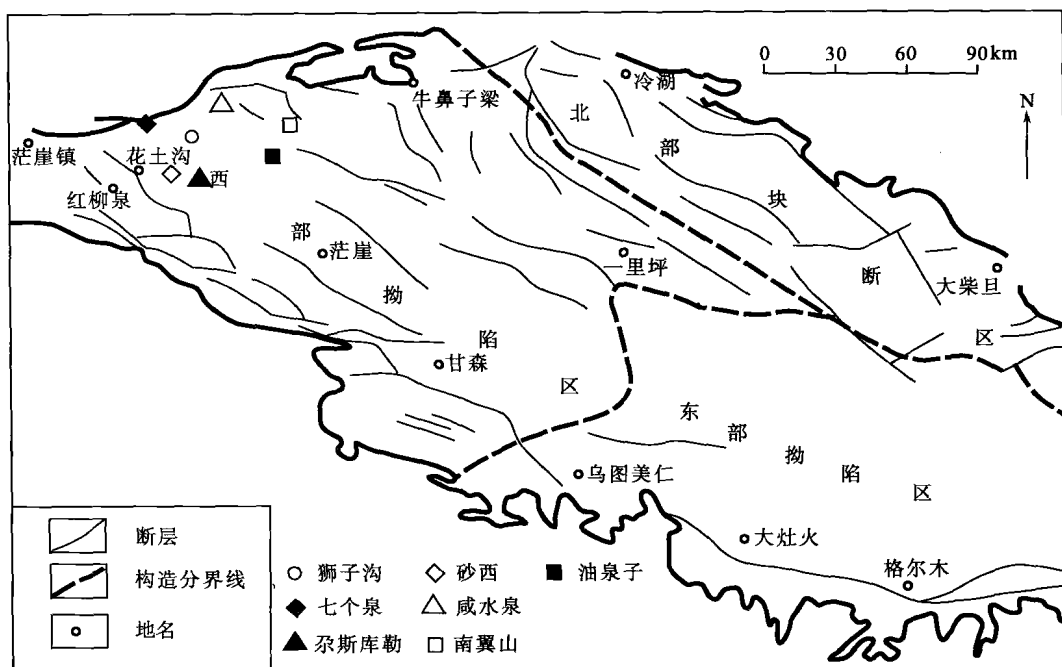


图 1.1 柴达木盆地构造单元

本章对采集柴达木盆地北部和西部地区的 13 个油田的原油和烃源岩进行了系统的地球化学分析，详细地研究了原油的物理性质、族组成、碳同位素地球化学和烷烃、芳

烃、非烃地球化学,探讨了原油的成因,并且结合碳同位素组成,进行了类型划分,同时,进行了油源对比。这些为柴达木盆地原油的成因认识提供了证据,为盐湖相低成熟原油成因提供了理论依据。

一、原油的一般性质

原油的物理性质和族组成反映了原油的成因类型。柴达木盆地存在着成因明显不同的两种类型原油:柴达木盆地西部盐湖相低成熟原油和柴达木盆地北部淡水湖泊相成熟原油,它们在物理性质和族组成方面差别显著。

(一) 原油的物理性质

原油的密度一般为 $0.7500\sim 0.9800\text{g/cm}^3$,柴达木盆地原油密度总体来说偏低,为 $0.8040\sim 0.8642\text{g/cm}^3$ (表 1.1)。柴达木盆地西部地区低成熟原油密度较高,为 $0.8180\sim 0.8642\text{g/cm}^3$ 。对我国不同盆地和地区 89 个低成熟原油密度的研究发现,绝大多数低成熟原油的密度分布于 $0.8500\sim 0.9400\text{g/cm}^3$ (王铁冠等,1995)。与此相比,柴达木盆地西部地区低成熟原油密度低于我国绝大多数低成熟原油的密度,但是要高于柴达木盆地北部地区成熟原油的密度,后者为 $0.8040\sim 0.8146\text{g/cm}^3$ 。原油的密度直接与原油中非烃+沥青质相对含量有关,如图 1.2 所示,原油的密度随非烃+沥青质的相对含量增加而变大。柴达木盆地北部地区原油为成熟原油,饱和烃相对含量较高、非烃+沥青质的相对含量较低,密度较低、柴达木盆地西部地区原油为低成熟原油,饱和烃相对含量较低、非烃+沥青质的相对含量较高,密度较高。

表 1.1 柴达木盆地原油物理性质和族组成

油田	产层	密度 /(g/cm^3)	黏度 /($\text{MPa}\cdot\text{s}$)	凝点 / $^{\circ}\text{C}$	含蜡量 /%	含硫量 /%	饱和烃 /%	芳烃 /%	非烃 /%	沥青质 /%	非烃+ 沥青质 /%	饱和烃/ 芳烃	非烃/ 沥青质
狮子沟	E_3^1	0.8540	8.94	29.3	—	—	38.7	2.1	39.1	20.1	59.2	18.4	1.9
花土沟	N_2	0.8469	7.90	17.0	17.41	—	36.7	6.8	53.4	3.2	56.6	5.4	16.7
尕斯库勒	E_3^1	0.8349	15.10	34.4	15.09	0.19	43.3	5.2	45.3	6.2	51.5	8.3	7.3
砂西	E_3^1	0.8642	25.20	36.0	12.20	0.48	13.2	7.0	66.2	13.6	79.8	1.9	4.9
南翼山	N_2	0.8180	0.53	—	—	—	45.2	6.9	46.9	1.0	47.9	6.6	46.9
油泉子	N_2	0.8530	8.58	—	17.50	0.08	36.3	7.4	52.1	4.2	56.3	4.9	12.4
冷湖三	J_2	0.8105	6.62	-2.0	17.20	0.04	54.9	8.9	34.7	1.5	36.2	6.2	23.1
冷湖四	N_1	0.8146	5.03	-6.0	10.80	0.05	51.1	8.8	37.2	2.9	40.1	5.8	12.8
冷湖五	N_1	0.8050	1.46	-9.0	8.38	—	80.0	4.4	14.8	0.8	15.6	18.2	18.5
南八仙	N_1	0.8040	1.84	—	—	—	92.2	2.4	5.1	0.4	5.5	38.4	12.8

柴达木盆地原油黏度分布具有一定规律性。柴达木盆地西部地区低成熟原油黏度较高,除南翼山 N_2 产层中原油黏度较小外,其他原油黏度分布范围为 $7.90\sim 25.20\text{MPa}\cdot\text{s}$,

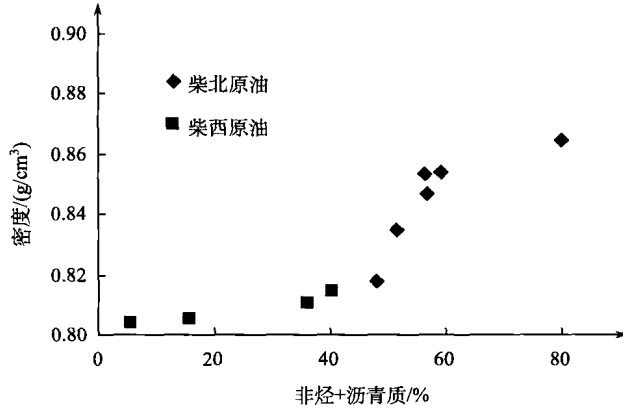


图 1.2 柴达木盆地原油密度与非烃+沥青质相对含量相关图

明显地高于柴达木盆地北部地区成熟原油的黏度 (1.46~6.62MPa·s)。

柴达木盆地西部低成熟原油的含蜡量和含硫量分别为 12.20%~17.50% 和 0.08%~0.48%。一个显著的特点是，柴达木盆地西部原油也是盐湖相成因，但是其硫含量明显地低于我国盐湖相成因原油产地的江汉盆地 (2.93%) 和泌阳凹陷 (0.65%~1.20%)，这说明柴达木盆地西部原油的形成过程中，硫的作用相对较小。

(二) 原油族组成

原油族组成反映了原油烃类组成和成因类型。柴达木盆地西部低成熟原油族组成以非烃为主，占 39.1%~66.2%，其次为饱和烃，占 13.2%~45.2%，芳烃和沥青质相对含量较低 (表 1.1 和图 1.3)，反映了低演化的特点，这与低成熟油的形成与生物脂类的早期转化成烃有关 (黄第藩等, 1987)。相比之下，柴达木盆地北部地区成熟原油则饱和烃相对含量最高，为 51.1%~92.2%，非烃相对含量次之，为 5.1%~37.2%，芳烃和非烃+沥青质相对含量较低，反映了成熟原油烃含量高、重杂原子含量低。

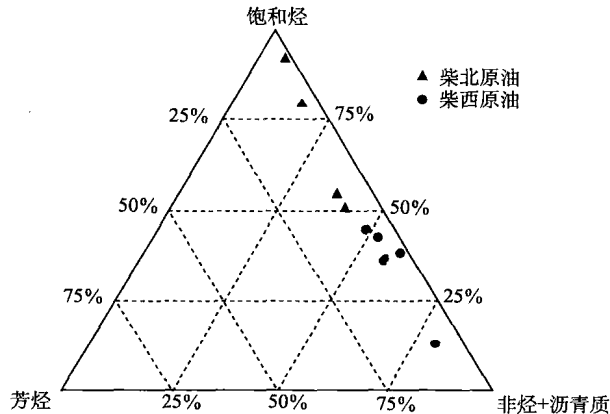


图 1.3 柴达木盆地原油族组成三角图

二、原油碳同位素地球化学

柴达木盆地已发现油田 18 个，主要为未成熟—低成熟原油。这些原油的形成环境、母源性质和成熟度都有较大差异，碳同位素技术是重要的研究手段。

(一) 原油碳同位素组成和分布特征

柴达木盆地西部原油产层均为古近系、新近系，北部产层除古近系、新近系外，还有侏罗系。对采集的 40 个油样进行了碳同位素分析，结果表明：① 西部原油的碳同位素组成分布范围窄小，为 $-27.5\text{‰} \sim -25.4\text{‰}$ ，平均为 -26.6‰ ，主要分布在 $-27\text{‰} \sim -26\text{‰}$ （表 1.2 和图 1.4），并且随着埋深的加大，碳同位素组成总体上有变轻的趋势（图 1.5）。根据同位素组成，可以将西部原油分为 3 类，即碳同位素组成最重的样品只有一个，为 -25.4‰ ；碳同位素组成较轻，且 $\leq -27.0\text{‰}$ 的样品有 7 个；其他样品的碳同位素组成较接近，并介于上述两类原油之间，为 $-26.8\text{‰} \sim -26.3\text{‰}$ 。② 北部原油碳同位素组成比西部轻得多。冷湖三号构造原油碳同位素最轻，为 -31.6‰ ，冷湖五号构造原油碳同位素最重，为 -26.7‰ ，冷湖四号构造和南八仙地区原油碳同位素组成介于上述两者之间，分别为 -28.3‰ 和 -28.1‰ （表 1.2）。

表 1.2 柴达木盆地原油碳同位素组成

序号	样品号	层位	油田	井号	深度/m	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$
1	14	N_2^2	咸水泉	深 2	662~800	-26.4
2	20	N_2^2	油泉子	104	—	-26.8
3	17	N_2^2	南翼山	浅 4-2	903~1481	-26.5
4	18	E_3^2	南翼山	南 5	3475~3488	-26.7
5	15	E_3^2	南翼山	南 12	底界 3075	-26.7
6	5	E_3^1	红柳泉	红地 107	2792~2887	-26.8
7	4	N_1	七个泉	七 6-28	598~672	-26.3
8	3	E_3^1	七个泉	七坪 1	1813~1873	-27.3
9	1	N_1	狮子沟（浅）	中 10 斜 2	991~1278	-25.4
10	11	E_3^1	狮子沟（深）	新 28	4068~4153	-26.3
11	10	N_2^2	花土沟	浅 N1-3	416~563	-26.7
12	7	N_2^2	花土沟	新 N5-3-2	967~1028	-26.7
13	30	N_1	花土沟	S1-3	1031~1073	-26.6
14	26	N_2^2	油砂山	242	208~276	-26.4
15	24	N_1	油砂山	211	813~966	-27.1
16	32	N_1	跃进二号东高点	175	1121（中深）	-26.6
17	34	E_3^2	跃进二号西高点	跃西 5	1371~1388	-26.5
18	29	E_3^1	砂西	平 1	4007~4275	-27.0
19	43	E_3^1	尕斯库勒	3-4	3410~3481	-26.9
20	41	E_3^1	尕斯库勒	5-36	3501~3572	-26.8
21	42	E_3^1	尕斯库勒	3-34	3573~3627	-27.1

续表

序号	样品号	层位	油田	井号	深度/m	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$
22	37	E ₃ ¹	尕斯库勒	8-6	3321~3388	-26.9
23	36	E ₃ ¹	尕斯库勒	9-36	3319~3393	-27.0
24	40	E ₃ ¹	尕斯库勒	9-38	3461~3560	-26.6
25	38	E ₃ ¹	尕斯库勒	16-26	3228~3430	-27.0
26	39	E ₃ ¹	尕斯库勒	16-27	3359~3443	-27.5
27	44	N ₂ ¹	尕斯库勒	742	1436~1562	-26.2
28	45	N ₂ ¹	尕斯库勒	213	1627~1697	-26.3
29	46	N ₂ ¹	尕斯库勒	414	1709~1804	-26.1
30	47	N ₂ ¹	尕斯库勒	525	2151~2245	-27.1
31	48	N ₂ ¹	尕斯库勒	662	1378~1398	-26.2
32	49	N ₂ ¹	尕斯库勒	493	1671~1762	-26.3
33	50	N ₂ ¹	尕斯库勒	X662	1823~1844	-26.7
34	51	N ₂ ¹	尕斯库勒	475	1870~1978	-26.4
35	52	N ₁ -N ₂ ¹	尕斯库勒	392	1525~1747	-26.0
36	53	N ₁ -N ₂ ¹	尕斯库勒	380	1655~1784	-26.1
37	56	J ₂	冷湖三号	中 14	467~789	-31.6
38	54	N ₁	冷湖四号	深 85	600~800	-28.3
39	55	N ₁	冷湖五号	970	466~763	-26.7
40	58	N ₁	南八仙	仙中 3	1809~1812	-28.1

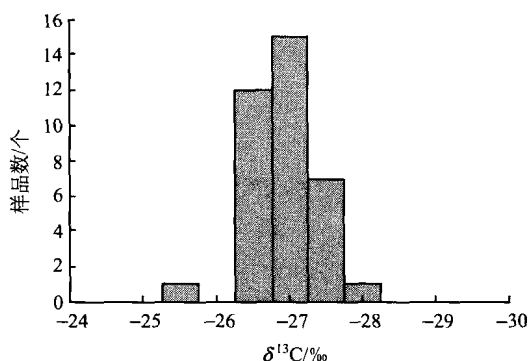


图 1.4 柴达木盆地西部原油碳同位素组成分布

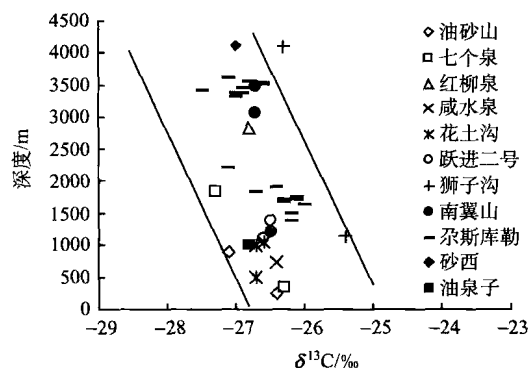


图 1.5 柴达木盆地西部原油碳同位素组成值与深度相关图

(二) 原油碳同位素组成的主控因素

柴达木盆地西部原油碳同位素组成特征与我国淡水湖相原油截然不同, 表现为富集重碳同位素, 与国外海相和我国江汉、中原盐湖相原油相似 (黄第藩等, 1989; Chung *et al.*, 1992), 反映了高盐成油环境的特征, 这与其古近系、新近系烃源岩的形成环境是一致的。进一步认识这种成因原油碳同位素变化的主控因素, 对于原油的成因分类研

究很重要。一般说来,原油的碳同位素组成受许多因素控制,其中原油的母质类型、成熟度、形成环境和运移地质色层效应为主要因素 (Stahl, 1980; Peters *et al.*, 1981; Sofer, 1984; Sandstrom and Philp, 1984; Schoell, 1984; Bonilla and Engel, 1986)。原油的成熟度对碳同位素组成的影响表现为随着原油的成熟度升高其碳同位素变重,这种变化小于 2‰。盆地西部地区原油主要为未成熟—低成熟原油,成熟度对它们的碳同位素影响甚微。当原油经过长距离运移时,地质色层效应会引起碳同位素分馏。经过石油地质和原油地球化学研究表明,盆地西部地区油藏中的原油一般经历了短距离运移 (黄杏珍等, 1993),因此,原油运移引起的碳同位素变化一般是很小的。以往的研究表明,母质类型明显影响原油的碳同位素组成,水生生物成因的原油具有轻的碳同位素组成,而陆生植物成因的原油具有重的碳同位素组成 (段毅等, 1996)。但是对于柴达木盆地西部地区来说,干燥炎热气候和盐湖沉积环境对原油碳同位素组成的影响,与母质类型具有相同或更为重要的作用。西部古近系、新近系油源岩是在干燥炎热气候条件下水体不断咸化的盐湖盆地中形成的,其 I 型和 III 型母质碳同位素界线值,在半咸水—咸水环境中相差 0.5‰,在咸水—半咸水环境中相差 1.8‰。盐度引起母质碳同位素的变化也为 1.8‰ (图 1.6),因此湿度和盐度都是影响源岩和原油母质生物碳同位素分馏的重要因素。由于水的胁迫作用可以诱导植物叶子气孔关闭和导通系数降低,从而使光合植物富集¹³C (Saurer and Sigenthaler, 1995),因此在土壤含水量低、降水量小和空气干燥条件下生长的光合植物,都具有重的碳同位素组成。水体盐度和土壤盐分都对光合植物的碳同位素分馏产生重要影响 (Farquhar *et al.*, 1989; Chung *et al.*, 1992)。盐度 (或盐分) 的增加能降低溶解 CO₂ 的可利用性,从而使光合植物的碳同位素变重。高盐度环境还限制了生物种类的发展,使生物的多样性降低,那些耐盐而碳同位素分馏程度低的种类占优势,使该环境中生物总的碳同位素组成变得更重。例如,柴达木盆地西部干燥气候下盐湖中生长的现代芦苇植物碳同位素值为 -23.8‰,与甘南潮湿气候下淡水沼泽中生长的现代芦苇植物碳同位素组成 (-28.2‰) 相比,重 4.4‰。对柴达木盆地格尔木河流和达布逊盐湖底部淤泥中有机质类型和碳同位素分析表明,虽然它们有机质类型均为 II 型,但是它们的碳同位素组成却分别为 -25.0‰和 -19.5‰,这主要是前者为淡水沉积有机质,后者为盐水沉积有机质。因此,气候和盐度的明显变化,均会引起生物碳固定过程中碳同位素分馏的变化,从而影响沉积有机质及其液态产物原油的

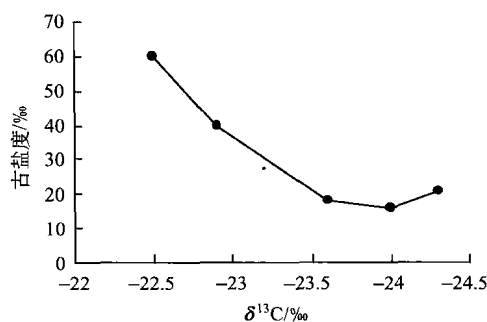


图 1.6 柴达木盆地西部古近系、新近系烃源岩干酪根碳同位素组成与古盐度相关图

碳同位素组成。古近纪、新近纪期间柴达木盆地气候干燥程度是逐渐增加的,以致从渐新世、中新世到上新世,柴达木盆地西部古湖泊水体盐度从半咸水变为咸水—盐湖,其中沉积有机质干酪根^δ¹³C值也依次增高,即从 -24.3‰变为 -22.5‰ (图 1.6)。同时,柴达木盆地西部原油随着储层深度变浅,碳同位素组成总体上呈变重的趋势 (图 1.5),这与一般自然演化剖面原油碳同位素变轻不一致,而与研究区自然剖面盐度变化相吻合。如前所述,盆地

西部原油只经历了短距离运移, 并且以垂向兼侧向运移为主; 一部分原油为自生自储。因此, 大部分原油的埋深与其源岩的空间分布趋势是一致的。例如, 尕斯库勒油田深层原油主要来自 E_3^1 , 而浅层原油主要来自 N_1-N_2 , 从而浅层原油与深层原油相比, 其呈现出富集重碳同位素的趋势。上述资料表明, 柴达木盆地西部未成熟—低成熟原油碳同位素组成主要受成油环境的控制, 因此, 柴达木盆地西部地区原油的碳同位素成因研究, 应主要考虑成油环境。

北部成油环境与西部的完全不同, 北部侏罗系油源岩是在温暖潮湿气候条件下, 形成于淡水沼泽和淡水湖泊环境, 其原油碳同位素组成比西部的轻。在有机质演化程度不太高的情况下, 形成于这种环境下的原油碳同位素组成和变化主要取决于母源性质, 即随着陆源有机质成因组分的增多, 原油的碳同位素组成变重。

(三) 原油单体正构烷烃碳同位素研究

原油中单体烃在线同位素分析 (GC-C-MS) 是利用色谱仪将包括生物标志化合物在内的有机化合物分离, 经燃烧炉燃烧转化为 CO_2 后, 直接送气体入同位素质谱仪进行单体烃碳同位素测定的一项新技术 (Hayes *et al.*, 1987; Duan *et al.*, 1997a, b)。该技术在石油地球化学研究领域具有广泛的应用前景, 它不仅可以提供石油形成的沉积环境、母质类型和有机质热演化程度的重要信息, 而且还可以进行油-油和油-岩对比研究 (Bjorøy *et al.*, 1991; 张文正等, 1992; 赵孟军等, 1994; 段毅等, 1997c; 杨家静、胡伯良, 1997)。

可是, 由于原油烃类是不同生物脂类的混合, 而在这些应用研究中可以出现多解性。在这种情况下, 不同成因类型的原油, 特别是典型成因类型的原油单体烃碳同位素研究资料的大量积累, 为该技术在石油地球化学中的应用研究提供可靠性。柴达木盆地存在着侏罗系湖沼相生油层和古近系、新近系盐湖相生油层, 从而形成了成因截然不同的两种成因类型的原油。但是, 以往对柴达木盆地原油的成因主要是通过生物标志化合物分布和全油碳同位素组成来研究, 而对于单体烃碳同位素研究报道甚少。我们利用正构烷烃单体系的碳同位素组成和分布特征, 对柴达木盆地北部和西部原油的成因进行了探讨。

样品均分别来自狮子沟油田 (Qai-1)、尕斯库勒油田 (Qai-39 和 Qai-44)、冷湖四号构造 (Qai-54)、冷湖五号构造 (Qai-55) 和冷湖三号构造 (Qai-56), 这些原油的地质地球化学参数见表 1.3。

表 1.3 原油样品地质地球化学参数

样号	Qai-1	Qai-39	Qai-44	Qai-54	Qai-55	Qai-56
产层	N_1	E_3^1	N_2^1	N_1	N_1	J_2
深度/m	1134	3401	1499	615	700	628
Pr/Ph	0.49	0.55	0.41	3.23	3.08	3.86
伽马蜡烷/ $C_{30-\alpha\beta}$ 藿烷	0.66	0.59	—	0.04	0.08	0.03
C_{29} 甾烷/%	35.4	38.1	35.5	50.6	40.7	45.1
C_{29} 甾烷 20S/(20S+20R)	0.41	0.30	0.25	0.48	0.46	0.54

原油饱和烃馏分在英国 VG 公司生产的同位素比值检测气相色谱-质谱仪 (irm-GC-MS) 上进行了碳同位素测定。质谱仪为 PRISM III 型, 色谱仪为 HP 5890 Series II 型, 色谱柱为 DB-5 毛细管柱 (60m×0.25mm i. d.), 起始温度为 80℃, 以 3℃/min 的速率升至 315℃, 然后恒温 30min。饱和烃馏分也用气相色谱-质谱联用仪进行了分析, 将所获得的总离子流图与 m/z 44 离子流图比较, 确定 m/z 44 离子流图上的单体异构和环烷烃化合物。 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对 PDB 标准, 并且在测定化合物具有良好的色谱分离和适合的强度下, 其测试误差小于 $\pm 0.5\%$ 。

从表 1.4 和图 1.7 可以看出, 柴达木盆地西部地区原油单体正构烷烃碳同位素组成普遍较重。Qai-1 号原油的单体正构烷烃碳同位素组成最重, $\delta^{13}\text{C}$ 值分布在 -28.0% ~ -23.7% , 平均为 -25.9% 。Qai-39 和 Qai-44 号原油单体正构烷烃碳同位素组成相对较轻, 它们的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为 -28.5% ~ -26.3% 和 -28.1% ~ -25.8% , 它们的平均值较接近, 分别为 -27.5% 和 -27.0% 。在这些原油中, 单体正构烷烃碳同位素组成均呈波浪式分布。

表 1.4 柴达木盆地原油单体正构烷烃碳同位素组成 ($\%$, PDB)

T 正构烷烃	Qai-1	Qai-39	Qai-44	Qai-54	Qai-55	Qai-56
C ₁₂	—	—	-27.3	—	—	—
C ₁₃	—	—	—	—	—	-30.5
C ₁₄	—	-28.5	-27.9	-26.8	-25.5	-31.3
C ₁₅	-27.2	-27.5	-26.4	-29.6	-27.6	—
C ₁₆	-27.5	-28.1	-27.8	-29.6	-27.0	-31.6
C ₁₇	-28.0	-28.2	-28.1	-29.4	-27.9	-32.1
C ₁₈	-25.7	-27.8	-27.6	-29.8	-27.8	-33.0
C ₁₉	-25.5	-27.2	-25.8	-28.0	-27.8	-31.0
C ₂₀	-24.5	-26.0	-26.1	-27.9	-27.2	-31.5
C ₂₁	-26.5	-27.2	-27.0	-28.2	-27.3	-31.4
C ₂₂	-25.8	-27.4	-26.9	-29.1	-27.0	-31.8
C ₂₃	-27.0	-27.2	-27.4	-29.8	-27.2	-32.6
C ₂₄	-26.9	-26.9	-27.3	-29.0	—	-32.2
C ₂₅	-24.7	-26.8	-26.2	-29.6	-27.9	-31.6
C ₂₆	-24.5	-27.6	-26.0	-29.5	-27.2	-31.9
C ₂₇	-26.2	-28.2	-26.4	-29.6	-25.7	-33.4
C ₂₈	-26.3	-26.5	—	—	—	—
C ₂₉	-27.0	-28.2	-27.3	—	—	-32.1
C ₃₀	-26.5	-27.2	—	—	—	-31.0
C ₃₁	-24.3	-27.1	—	—	—	—
C ₃₂	-24.5	-27.7	—	—	—	—
C ₃₃	-23.7	-26.3	—	—	—	—
平均值	-25.9	-27.5	-27.0	-29.0	-27.2	-31.8

柴达木盆地北部地区原油单体正构烷烃碳同位素组成相对较轻 (Qai-55 号原油除外)。Qai-55 号原油单体正构烷烃碳同位素组成最重, $\delta^{13}\text{C}$ 值分布在 -27.9% ~