

文章编号: 1001-6112(2000)04-0319-06

# 塔里木盆地巴楚隆起烃源岩特征 及其油气源研究

高志农

(武汉大学 化学与环境科学学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:**作者系统评价了塔里木盆地巴楚隆起 5 套烃源岩系的有机地球化学特征, 从剖面和平面上研究了各层碳酸盐烃源岩和泥质烃源岩的有机相分布特征, 进而探讨了巴楚隆起的油气来源。研究表明, 该区的主要烃源岩为其深部的高成熟寒武-奥陶系海相碳酸盐烃源岩, 其次为海陆混源的石炭系烃源岩; 其油气主要来自该区深部的烃源岩, 生油贡献明显呈东部大于西部、北部大于南部的特点, 同时亦有从西南凹陷侧向运移而来的石炭系原油。

**关键词:**烃源岩; 油气源; 有机相; 油气勘探; 巴楚隆起

**中图分类号:** TE122.1

**文献标识码:** A

巴楚隆起是塔里木盆地中央隆起带西北部的一个二级构造单元。研究区以巴楚隆起为主体, 并包括相邻的麦盖提斜坡的一部分(图 1)。该地区尚处于早期油气勘探阶段, 烃源岩与油气源研究程度较低。前期研究揭示共发育寒武-下奥陶统、中上奥陶统、下石炭统、上石炭统、下二叠统 5 套烃源岩系。但本区的主要烃源岩是石炭系还是寒武-奥陶系, 油气源主要是本地的还是侧向运移供给的等问题都未定论。这直接关系到本区的油气勘探部署与远景评价。

烃源岩的评价及油气源研究是一个复杂的系统工程, 除了系统研究本身的有机地球化学特征外, 还要与构造学、沉积学研究结合起来; 不仅需要采用多项有机地化分析方法研究油气的化学结构组成及烃源岩的成烃特征与能力, 而且也必须利用地质研究方法确定其剖面变化、平面展布及其与邻区的相互关系。只有如此, 有机地化研究才能为油气勘探提供可靠的地质信息。

## 1 有机质数量

分析结果(表 1)表明, 本区下二叠统和上石炭统泥质岩为中等烃源岩, 下石炭统泥质岩为好的烃

源岩。而碳酸盐岩的有机碳值(TOC)可采用物质反应平衡原理所求得的恢复系数<sup>[1]</sup>作热演化恢复, 对表面样品同时还进行风化校正(风化系数 3.0)。结果显示, 寒武-下奥陶统、中上奥陶统为好的烃源岩, 下石炭统为较好烃源岩, 而上石炭统则为较差烃源岩。需要指出的是, 寒武系、奥陶系岩样虽然氯仿沥青“A”含量一般不到  $100 \times 10^{-6}$  (油苗除外), 但其

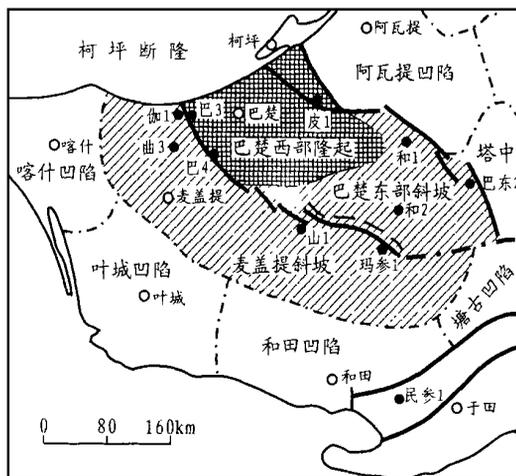


图 1 研究区地理位置及现今构造图  
Fig. 1 Geographic location and present tectonic map of the study area

收稿日期: 2000-03-03; 修订日期: 2000-07-10.

基金项目: 国家“九五”科技攻关项目(96-111-03-04-04).

作者简介: 高志农(1961-), 男(汉族), 湖北广水人, 博士、副教授, 主要从事有机地球化学方面的研究工作.

表 1 巴楚地区有机质丰度及烃源岩厚度

Table 1 Abundance of organic matter and thickness of hydrocarbon source rocks in Bachu district

层位	岩性	TOC / %	恢复 TOC / %	沥青“ A ” / 10 <sup>-6</sup>	HC / 10 <sup>-6</sup>	S <sub>1</sub> + S <sub>2</sub> / (mg/g)	源岩厚度 / m
下二叠统	泥质岩	0.72(24)		293(9)	75(7)	2.38(2)	0 ~ 50
上石炭统	碳酸盐岩	0.24(9)	0.28	104(13)	55(11)	0.33(22)	4 ~ 160
	泥质岩	0.64(19)		488(12)	105(10)	0.29(2)	0 ~ 220
下石炭统	碳酸盐岩	0.44(16)	0.57	209(9)	96(7)	0.35(19)	0 ~ 250
	泥质岩	1.26(17)		437(11)	107(9)		0 ~ 120
中上奥陶统	碳酸盐岩	0.26(15)	0.70	78(10)	68(7)	0.19(11)	0 ~ 160
寒武 - 下奥陶统	碳酸盐岩	0.37(22)	1.13	88(16)	51(12)	2.5(29)	200 ~ 380

注:( )内为样品数

沥青“ C ”含量一般都较沥青“ A ”高许多,少数样品甚至高一个数量级。寒武系、奥陶系见有丰富的缝合线有机质和沥青,其碳酸盐岩中存在大量的有机包裹体,表明原始有机质含量丰富,原始生烃性能好。

巴楚隆起各烃源岩层厚度不等,平面分布不均匀。总体上看,从二叠系至寒武系烃源岩厚度有依次增大的趋势(中上奥陶统除外)。寒武系、奥陶系几乎全为碳酸盐烃源岩,呈东部厚西部薄、北部厚南部薄的特点;下石炭统以碳酸盐烃源岩为主,东南部较厚,西北部较薄直到被完全剥蚀;上石炭统碳酸盐烃源岩略多,而泥质烃源岩主要集中于东南部及和 2 井、和深 3 井周围;下二叠统主要为泥质烃源岩,虽然在整个区域都有分布,但厚度薄。

因此,本区有机质的数量总体上是相当可观的,尤其是寒武 - 下奥陶统的有机质数量很大,其次为下石炭统,而上石炭统、下二叠统的有机质数量有限。中上奥陶统由于仅局限于东北部,厚度又不很大,其有机质数量有限。

### 2 有机质类型

干酪根镜检结果表明,本区寒武系、奥陶系有机质为絮状无定形结构,常混杂有外缘不规则块状,所有样品几乎无棱角状、棒状结构,充分显示了水生生物特征,为 Ⅱ型或 A<sub>1</sub>型。石炭系有机质主要表现为生物结构、不定形或叠片状,以 A<sub>1</sub>型为主,少量

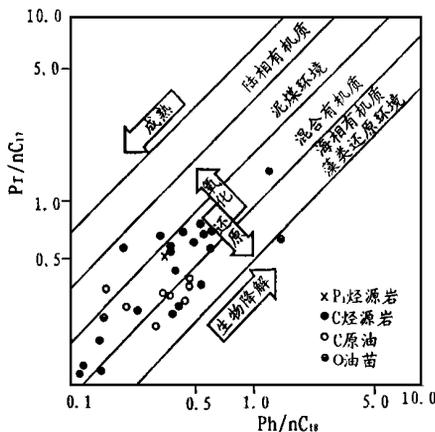


图 2 巴楚隆起烃源岩、原油 Pr/nC<sub>17</sub>与 Ph/nC<sub>18</sub>关系图

Fig. 2 Relationship of Pr/nC<sub>17</sub> to Ph/nC<sub>18</sub> for hydrocarbon source rocks and crude oil in the Bachu Uplift

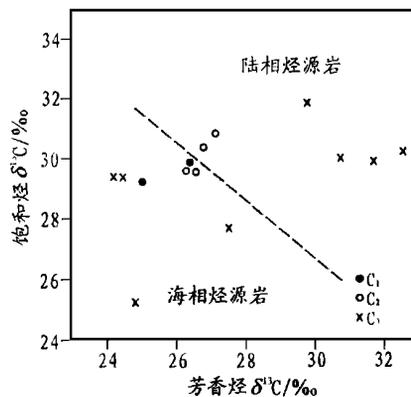


图 3 烃源岩饱和烃-芳香烃碳同位素关系图

Fig. 3 <sup>13</sup>C (‰) relationship between saturated and aromatic hydrocarbons

型,亦有一些棱角状,呈 B 型。下二叠统的棱角状增多,主要为 B 型有机质,部分为 型。干酪根的碳同位素组成特征、元素分析及热解分析结果亦显示出烃源岩烃源岩由浅至深类型变好的总体趋势。本区石炭系碳酸盐烃源岩有其独特的类型特征,较一般碳酸盐岩类型要差。巴楚隆起 5 套烃源岩系的沥青“ A ” TOC、总烃(HC)/TOC 比值总体较低,而饱和烃/芳烃、烃/非烃比值较高。下二叠统胶质、沥青质含量相对较高,类型较差,而石炭系比值变化较大。姥鲛烷(Pr)/nC<sub>17</sub>与植烷(Ph)/nC<sub>18</sub>关系图(图 2)及烃类的碳同位素分布(图 3)较好地揭示了石炭系烃源岩的有机质原始物源与形成环境。石炭系烃源岩的饱和烃多为双峰分布,甾烷/藿烷大都在 1 左右,C<sub>27</sub>、C<sub>29</sub>甾烷含量相对较高,主要来源于高等植物的五环三萜及来自细菌、藻类的三环二萜烷(C<sub>20</sub>-C<sub>30</sub>)都十分丰富,充分显示了其原始物源的二元性及有机质类型的多样性。寒武系、奥陶系的生物标志物则完全呈海相水生生物来源的特征。

### 3 有机质演化程度

正确认识烃源岩的成熟度及成烃演化特征,对巴楚隆起的烃源岩评价十分重要。由于碳酸盐烃源岩的特殊性,众多常规的演化指标失去了作用,因而必须采用一些非常规的有效研究手段和方法<sup>[2,3]</sup>。

矿物包裹体在油气评价和预测中的应用是 90 年代应用石油地质学研究的一大特色,对研究碳酸盐岩较为有效。本区 20 余块样品的测试结果(表 2)与有关研究结论<sup>[4]</sup>相比较及换算显示,下二叠统烃源岩总体处于未成熟-低熟阶段,石炭系基本处于成熟期,奥陶系处于主生油期,而寒武系有机质则具有较高的成熟度,但尚未过成熟。

生油岩评价仪测试获得的最大裂解温度( $T_{max}$ 值)和产烃率指数( $P_1$ )等可用来判断烃源岩的演化阶段<sup>[5]</sup>。本区的分析结果(表 3)与包裹体的研究结论基本一致,只是  $T_{max}$ 值因受含可溶有机物及有机质类型较好烃源岩的影响而使得其推测的  $R_o$  值降

表 2 巴楚地区矿物包裹体测试结果

Table 2 Measured results of mineral inclusion in Bachu district

层位	主要矿物名称	气相颜色	液相颜色	大小 / $\mu\text{m}$	气液比 / %	均一温度 /	对应 $R_o$ / %
下二叠统	亮晶方解石	无色或浅褐色	无色或浅褐色	5	<5	70~97	0.50
上石炭统	生物灰岩中 亮晶方解石	无色或浅褐色	无色或浅褐色	5~10	5~10	108~109	0.70
下石炭统	亮晶方解石	灰黑色为主	浅褐色为主	5~15	10~15	114~128	0.90
中上奥陶统	亮晶方解石	黑色	浅褐色	5~15	10~15	131~159	1.20
下奥陶统	石英次生加大边	黑色	浅褐色	10~15	10~15	144~170	1.35
寒武系	亮晶方解石	黑色	浅褐色	10~15	10~20	151~184	1.70

表 3 巴楚地区各烃源岩层平均  $T_{max}$  值及产烃率简表

Table 3 Mean  $T_{max}$  values and hydrocarbon-producing indices of various source rocks in Bachu district

层位	$T_{max}$ 平均值/ /	产率指数( $P_1$ )平均值	$R_o$ 推算值/ %
下二叠统	428(6)	0.27(6)	0.48
上石炭统	431(13)	0.33(12)	0.55
下石炭统	435(29)	0.50(27)	0.75
中上奥陶统	441(14)	0.67(13)	0.95
下奥陶统	449(2)	0.78(2)	1.05
寒武系	451(5)	0.88(5)	1.25

注:( )内为样品数

低了一些。

经镜质体反射率测定及沥青反射率换算,本区的下二叠统烃源岩  $R_o$  值为 0.4% ~ 0.7%,上石炭统  $R_o$  值为 0.6% ~ 0.81%,下石炭统  $R_o$  值为 0.71% ~ 1.1%,奥陶系  $R_o$  值为 1.19% ~ 1.3%,寒武系  $R_o$  值为 1.3% ~ 1.7%,与上述研究结论吻合。此外,饱和烃及芳烃的气相色谱分析结果均进一步证实了这些结果。

### 4 各烃源岩层系有机相特征

利用有机相特征进行烃源岩评价是石油勘探工作中综合预测油气源岩、源区的有效工具。其划分是建立在油气生成和演化各相识别标志综合一体的基础之上的,已出现了许多对有机相类型进行评价和划分的方法。根据现行常用的 5 种有机相类型的基本特征(表 4),巴楚隆起烃源岩的现实有机相在剖面(图 4)及平面上的总体分布与变化充分揭示了本区各烃源岩层的生烃能力,为油气勘探的靶区选择提供了重要的科学依据。

(1)下二叠统:沉积环境主要为浅海台地相、台地边缘生屑滩相,Pr/Ph 为 0.5 ~ 1(此比值大,成油母质及地球化学环境有利于生油),铁还原系数不高,为弱还原 - 弱氧化地球化学环境,有机质丰度一般,以  $B$  型为主,综合表明为 B - C 型有机相。本层基本为泥质烃源岩,厚度薄,平面上由北向南从 0m 增至 50 余米, $R_o$  值同时由 0.4% 增至 0.7%,而有机碳值由北向南由 0.8% 降至 0.2% 左右。因此,该层在整个巴楚地区无多大生油贡献。

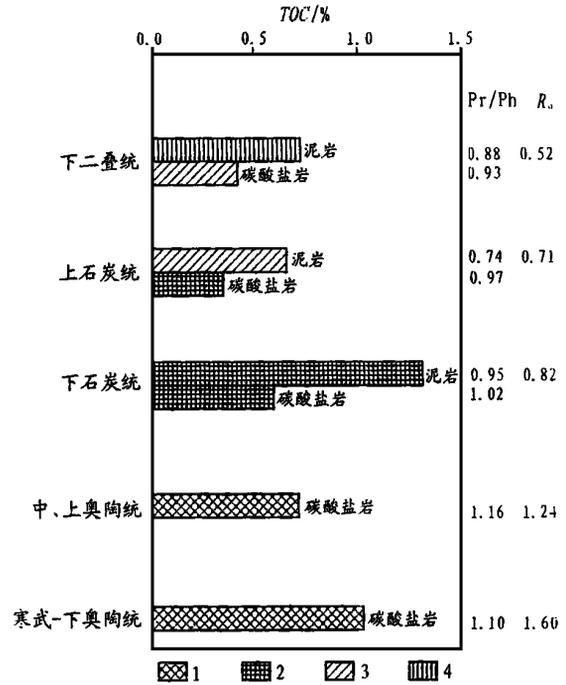


图 4 巴楚地区烃源岩剖面有机相概况图

- 1. 型有机质为主; 2.  $a$ 型为主,部分  $b$ 型;
- 3.  $b$ 型有机质为主; 4. 型 -  $b$ 型有机质

Fig. 4 General sketch of organic facies in the source rock section of Bachu district

(2)上石炭统:主要为局限海台地相和滨海沼泽相,Pr/Ph 接近 1,为弱还原 - 弱氧化地球化学环境,有机质丰度不高,以  $B$  型为主,为 B - C 型有机相。碳酸盐烃源岩在隆起中间地带厚度较大,TOC 较高,类型亦较好些。由于该层段有机相类型不佳,成熟度不太高,其生油贡献不会太大。

表 4 有机相沉积、地球化学特征简表

Table 4 Dedimentary and geochemical characteristics of organic facies

有机相	产物	沉积环境	地球化学相	有机质生源	恢复有机碳/ %	有机质类型
A	油	缺氧(咸水)深湖为主,少量海相	强还原	浮游生物	> 1.5	A
B	油	缺氧海相或深湖	还原 - 强还原	浮游生物为主,少量高等植物	1.0 ~ 1.5	A,
B - C	油、气	可变三角洲,较深湖,海相	弱氧化 - 还原	浮游生物,高等植物	0.5 ~ 1.0	B, A
C	气	中等含氧陆架、斜坡,滨浅湖	弱氧化 - 弱还原	高等植物	0.5 ~ 1.0	B,
D	干气	冲积平原,滨湖等	强氧化	高等植物	< 0.5	,

(3) 下石炭统:主要为开阔海台地相,另有部分潮间砂坪相与浅滩相,铁还原系数较高,Pr/Ph 为 1 左右,整体上为弱还原-还原环境,以 A 型有机质为主,有机质丰度相对较高,低等水生生物来源占主导地位,并混有陆相生物来源,呈 B 型有机相特征。碳酸盐和泥质烃源岩的厚度、TOC 均自西向东增大, $R_o$  值最大达 0.9%~1.1%。由于该层烃源岩已进入大量生油阶段,再加厚度较大,有机质数量较高,因而其生油贡献亦较大。

(4) 中上奥陶统:为浅缓坡相、滩丘复合体及潮坪相,Pr/Ph > 1,为强还原环境,水生生物来源,有机质主要为 型,恢复 TOC 为 0.7%,为 B 型有机相。但隆起西南部及邻近的麦盖提斜坡无该层段沉积,只是在东北部有一定分布,最厚达 160m。鉴于其有机质丰度、类型及成熟度均处于较佳范围,因而该层碳酸盐烃源岩对局部油气供给有一定贡献。

(5) 寒武-下奥陶统:主要为潮坪相、潮下浅海相及半封闭泻湖相,Pr/Ph > 1,为强还原环境,水生生物来源,有机质类型好(主要为 型),TOC 经恢复大于 1%,显示出 A 型有机相特征。整个区域都有较厚的分布,平面上明显呈东厚西薄、北厚南薄的特点。由于其烃源岩厚,有机质数量大,成熟度高又尚未过成熟,因而其生油贡献最大,是本区最主要的烃源岩。

由此可见,巴楚隆起最好的烃源岩在下部,主力烃源岩为寒武-下奥陶统,下石炭统次之,其它烃源岩系对生油贡献较小。从平面上看,本区烃源岩的生油贡献明显呈东部大于西部、北部大于南部的特点。石炭系能提供油源已被曲 1、巴参 1 等井的油源研究所证实,而和 4 井揭示在寒武系发育着高成熟的优质烃源岩,山 1 井在奥陶系顶部见有油气显示,展示了本区深层油气勘探的广阔前景。

## 5 油气源研究

巴楚地区的油气经研究认为主要来自海相烃源岩<sup>[6]</sup>。但其油气主要来自何处、何层尚有许多争论。准确弄清本区的油气来源是油气勘探突破的一个关键性问题。

原油的化学结构组成特征及其原始物源的追踪可较好地应用于本区的油源研究。曲 1、巴 4 等井石炭系地层中的原油含有较多的  $C_{27}$ 、 $C_{28}$  甾烷,同时亦有一定的  $C_{29}$  甾烷,甾烷/藿烷 > 1,能检测到较丰

富的 -、-胡萝卜烷, $m/e125$  系列化合物与石炭系烃源岩有较好的一致性;而曲 3 井原油不含胡萝卜烷,麦 3 井只含微量。鉴于石炭系、二叠系烃源岩富含胡萝卜烷,而寒武-奥陶系基本不含,因而这一特征较好地反映了这些原油的各自来源。曲 3 井、麦 3 井原油中植烷系列化合物的丰度较高,Pr/Ph 1,二萜烷含量相对较高,并有一定含量的孕甾烷,具有寒武-奥陶系原油的指纹特征。少数井(如和 2 井)的原油  $C_{29}$  甾烷含量较高,显示出一定的海陆混源特征。

不同油源的原油,其成熟度不尽相同。巴楚地区数口井石炭系地层中的原油甾烷与藿烷的成熟度关系(图 5)表明,其成熟度都较高,而且大都处于高成熟阶段,这与本区石炭系烃源岩的成熟度相差较大,与西部凹陷石炭系烃源岩也有一定差异。曲 3、曲 5、麦 4、麦 6、巴探 2 等多口井石炭系地层中原油的轻烃( $C_2 - C_7$ )组成特征与塔北来自寒武-奥陶系的原油相近,为高成熟的腐泥型产物。有些钻井(如麦 3 井)中不同深度的原油分属不同的演化阶段,其多项成熟度参数相差较大(尤其是  $T_m/T_s$  值),表明来自不同的层位或地区。

本区原油之间及其与邻区原油之间的结构组成特征,很好地揭示了它们的相互关系。从环烷烃组分的相对分布来看,麦 3 井原油与塔中 1 井奥陶系原油相似,而与曲 1 井原油有一定的差异。曲 1 井原油系烃源岩有较好的可比性。西南凹陷柯 6 等井原油  $^{13}C = -31.4\%$ ,高于曲 3、麦 3 等井,与石炭

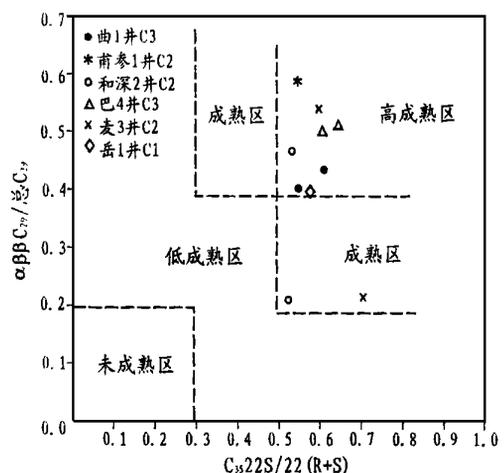


图 5 巴楚地区石炭系原油成熟度参数图

Fig. 5 Maturity parameters of the Carboniferous crude oil

的一环烷烃含量极高,而巴楚地区原油均无此特征,反映出油源系统的不同。原油的芳烃组分(包括杂原子芳香化合物)分布显示,曲 1 井和巴参 1 井原油完全相同,为同一油源,而与建化采石场的奥陶系原油不同,与塔北英买 9 井、提 1 井原油也不相似。有人利用芳香化合物(包括咪唑类化合物)特征发现,巴楚隆起邻区群 4 井、群 5 井的原油都是经过了较长距离的运移,为高成熟原油,并非石炭系自生自储的,而是来自寒武-奥陶系<sup>[7,8]</sup>。研究发现,同一构造带上的曲 3 等钻井原油亦具有类似特征。

需要指出的是,巴参 1、曲 1 等井原油虽是石炭系烃源岩供给的,组成上与本区石炭系烃源岩具有相似性,但其成熟度却明显偏高,与西南凹陷石炭系烃源岩及原油较为相近。鉴于西南凹陷油气向巴楚隆起-麦盖提斜坡侧向运移具有极佳的地质便利条件,因而其原油应该是接受了西南凹陷油源的供给。此外,天然气的碳同位素及其化学组成分析结果揭示本区同时存在着高成熟腐泥型成因气及石炭系混源成因气。

综上所述,巴楚隆起的油气来源较复杂,主要供给源是本区深部的高成熟寒武系、奥陶系海相碳酸盐烃源岩,其次为呈一定海陆混源特征的石炭系烃源岩。来源于石炭系的油气,既有本区原地形成的,

亦有西南凹陷侧向供给的成熟度较高一些的油气。由于资料有限,阿瓦提凹陷等邻区是否有油源供给,尚未获得直接证据。

致谢:研究中得到了中国地质大学(武汉)石油系费琪教授、徐思煌、蔡忠贤副教授等以及西北石油地质局有关人员的大力支持与帮助,在此一并致以衷心感谢!

#### 参考文献:

- [1] 金强. 生油岩原始有机碳恢复方法的探讨[J]. 石油大学学报, 1989, 13(5): 1-9.
- [2] 傅家谟, 贾蓉芬, 刘德汉, 等. 碳酸盐岩有机地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989. 77-90.
- [3] 高志农, 陈远荫. 碳酸盐岩中天然沥青演化特征的再认识[J]. 石油实验地质, 1998, 20(4): 405-410.
- [4] 刘鑫, 杨传忠. 碳酸盐岩矿物流体包裹体的主要研究方法及其应用[J]. 石油实验地质, 1991, 13(4): 339-406.
- [5] 邬立言, 顾信章, 盛志纬, 等. 生油岩热解快速定量评价[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [6] 刘德光, 王绪龙. 塔里木盆地西南坳陷油气源研究[J]. 沉积学报, 1997, 15(2): 35-39.
- [7] 刘洛夫, 王伟华, 徐新德, 等. 塔里木盆地群 5 井芳烃地球化学研究[J]. 沉积学报, 1996, 14(2): 47-55.
- [8] 刘洛夫, 徐新德, 毛东风, 等. 咪唑类化合物在油气运移研究中的应用初探[J]. 科学通报, 1997, 42(4): 420-423.

## SOURCE ROCK CHARACTERISTICS AND OIL/ GAS SOURCES OF THE BACHU UPLIFT IN THE TARIM BASIN

GAO Zhi-nong

(College of Chemistry and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

**Abstract:** The author systematically evaluates the organic geochemical characteristics of five sets of hydrocarbon source rock series in the Bachu Uplift of the Tarim Basin, studies the distributive features of organic facies for the carbonate and argillaceous source rocks of various strata in plane and section, and discusses the oil/ gas sources of the Bachu Uplift. The results show that the major hydrocarbon source rocks of the study area are the Cambrian-Ordovician high-mature marine carbonate source rocks in the deep part, while the Carboniferous marine and terrigenous mixed source rocks take second place. The oil and gas mainly comes from deep source rocks of the study area. It is clear that the oil-generating contribution of the east is greater than that of the west, and the contribution of the north is greater than that of the south. Meanwhile, there is the Carboniferous crude oil migrated laterally from the Southwest Depression.

**Key words:** hydrocarbon source rocks; oil/ gas sources; organic facies; hydrocarbon exploration; the Bachu Uplift