

doi: 10.12029/gc20170105

欧阳慧子, 杨文光, 解龙, 陶刚, 李超, 何碧, 李超. 2017. 羌塘盆地拉雄错地区上二叠统热觉茶卡组烃源岩地球化学特征及油气潜力分析[J]. 中国地质, 44(1): 61-74.

Ouyang Huizi, Yang Wenguang, Xie Long, Tao Gang, Li Chao, He Bi, Li Chao. 2017. Geochemical characteristics and oil-gas potential analysis of source rock of Upper Permian Rejuechaka Formation in Laxiongcuo area, Qiangtang Basin[J]. Geology in China, 44(1): 61-74(in Chinese with English abstract).

羌塘盆地拉雄错地区上二叠统热觉茶卡组烃源岩 地球化学特征及油气潜力分析

欧阳慧子 杨文光 解龙 陶刚 李超 何碧 李超

(成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059)

摘要:羌塘盆地上二叠统热觉茶卡组烃源岩主要为一套深灰色—灰黑色薄层—极薄层泥岩,通过有机地球化学特征分析,结果表明:该套烃源岩的有机碳含量为0.31%~0.72%,并以差—中等烃源岩居多,有机质类型主要为II₂型,有机质母质形成于具有一定盐度的还原环境,主要来源于海相浮游类和菌藻类等低等水生生物,并伴有一定量高等植物的输入,有机质热演化程度已达到高成熟阶段。羌塘盆地上二叠统热觉茶卡组烃源岩的发现进一步证实了古生界烃源岩具有良好的生烃潜力,为羌塘盆地油气资源评价提供了基础地质资料。

关键词:羌塘盆地;拉雄错;上二叠统;烃源岩;地球化学

中图分类号:TE112.1⁺13 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2017)01-0061-14

Geochemical characteristics and oil-gas potential analysis of source rock of Upper Permian Rejuechaka Formation in Laxiongcuo area, Qiangtang Basin

OUYANG Huizi, YANG Wenguang, XIE Long, TAO Gang, LI Chao, HE Bi, LI Chao

(Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: The source rock of Upper Permian Rejuechaka Formation in Laxiongcuo area of Qiangtang Basin is characterized by dark gray-ash black and thin-very thin layers. An analysis of organic matter shows that total organic carbon content varies between 0.31% and 0.72% in the source rock, mainly reaching a poor-medium standard. The organic matter mainly belongs to II₂ type. Parent material of the organic matter was derived from a reducing environment with considerable salinity, and mainly came from plankton, algae, pilze with the mixture of a small amount of higher plants. The thermal evolution degree reaches high maturity stage. The discovery of the source rock further suggests that Paleozoic source rock has good hydrocarbon generating potential. The result obtained by the authors provides basic geological information for the assessment of oil and gas resources in Qiangtang Basin.

Key words: Qiangtang Basin; Laxiongcuo; Upper Permian; source rock; geochemistry

About the first author: OUYANG Huizi, female, born in 1993, master candidate, majors in paleontology and stratigraphy; E-mail:

收稿日期:2016-03-26;改回日期:2016-11-18

基金项目:中国地质调查局项目(GZH201400301, 12120113033004, 121201010000150014)资助。

作者简介:欧阳慧子,女,1993年生,硕士生,古生物学与地层学专业;E-mail:554830221@qq.com。

通讯作者:杨文光,男,1980年生,讲师,主要从事古生物学与地层学和区域地质调查研究;E-mail:312895457@qq.com。

554830221@qq.com.

About the corresponding author: YANG Wenguang, male, born in 1980, lecturer, mainly engages in the study of paleontology, stratigraphy and regional geological survey; E-mail: 312895457@qq.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. GZH201400301, 12120113033004, 121201010000150014).

1 引言

羌塘盆地位于西藏北部,与中东油气富集区(如波斯湾盆地)同属特提斯构造域(王岫岩等,1999;谭富文等,2002;王成善等,2004)。目前为止,在盆地内发现了200余处油气显示(王剑等,2009a),规模较大的有比隆错—昂达尔错古油藏带(王成善等,2004;伍新和等,2005)和北羌塘中生代海相油页岩带(王剑等,2009a;汪正江等,2007;付修根等,2007;付修根等,2009;王剑等,2009b;王剑等,2010;曾胜强等,2013),显示了该盆地具有良好的油气勘探前景。然而95%以上的油气显示都集中在中生界烃源岩层(王剑等,2009a),尤其是上三叠统肖茶卡组、中侏罗统布曲组和夏里组以及上侏罗统索瓦组被认为是盆地内最主要的4套烃源岩层(赵政璋等,2000;罗建宁等,2003;许怀先等,2004;王剑等,2004;伍新和等,2008;王剑等,2009a;丁文龙等,2011;Ding et al., 2013)。对于古生代地层而言,油气显示较少,目前仅有零星的几处报道(陈文彬等,

2013;宋春彦等,2014;陈文彬等,2015a;曹俊峰等,2015),究其原因,可能是因为目前的油气勘探重心主要集中在中生代地层(赵政璋等,2000;王成善等,2001;王剑等,2009a),加之古生代地层大多埋藏较深,出露较少(伍新和等,2005;付修根等,2015),从而在客观上制约了对古生代地层的研究。2014年,笔者有幸参加了“羌塘盆地鲤鱼山—长梁山地区天然气水合物1:10万专项地质调查”项目的野外地质考察,在拉雄错北西发现了一套上二叠统热觉茶卡组深灰色—灰黑色薄层—极薄层泥质岩,并对其剖面测制和采样。本文拟通过有机地球化学方法,对这套烃源岩进行研究,以期对该区的油气资源评价提供基础地质资料。

2 地质背景

羌塘盆地夹持于可可西里—金沙江缝合带和班公湖—怒江缝合带之间,是一个具有前寒武纪结晶基底的复合型残留盆地(王剑等,2009a)。由北向南,羌塘盆地可分为羌塘北缘褶皱冲断带、北羌塘

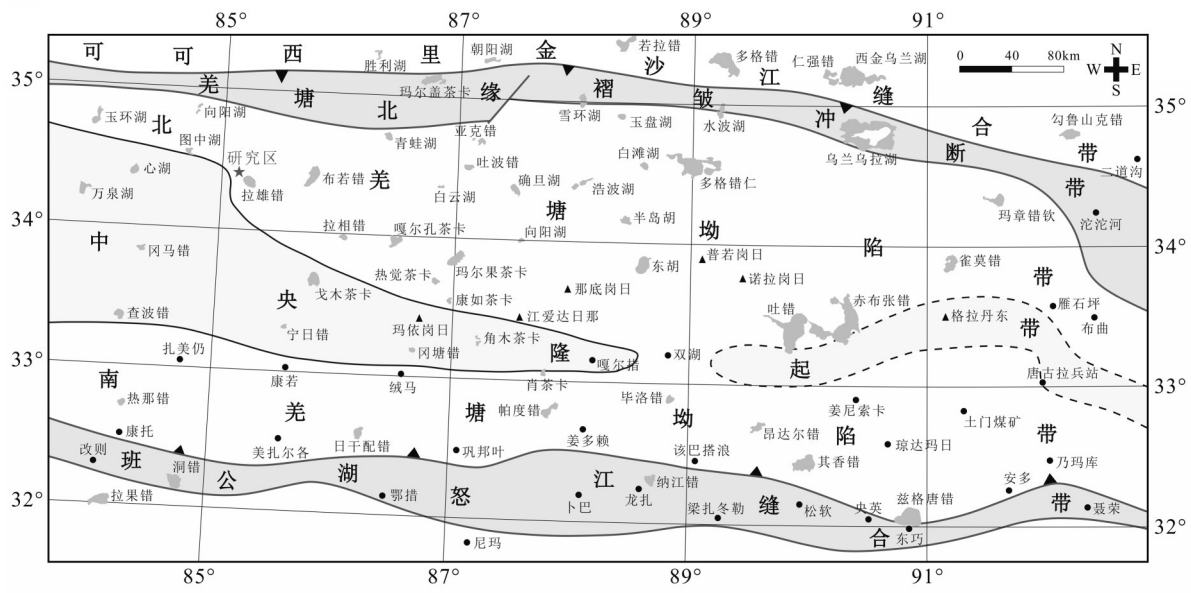


图1 羌塘盆地构造单元划分图(据王剑等,2009a)及研究区位置
 Fig.1 Division of tectonic units in Qiangtang Basin (after Wang et al., 2009a) and the location of the study area

坳陷带、中央隆起带和南羌塘坳陷带(王剑等, 2009a)(图1)。二叠纪末—三叠纪初,受古特提斯洋逐步闭合的影响,羌塘盆地发生大规模海退(王成善等, 2001;王剑等, 2009a),羌北盆地整体上呈现出东高西低的格局(易积正等, 1996;王成善等, 2001),并在盆地西部地区形成了一套以海陆过渡相沉积为主的含煤碎屑岩(方立敏等, 2002),即热觉茶卡组。

热觉茶卡组最初由文世宣(1979)在双湖办事处以北约10 km热觉茶卡南岸创名,为一套含煤碎屑岩,岩性为灰—深灰色中厚层粗砂岩、粉砂岩、页岩、泥岩夹薄煤层,含有瓣类、腕足类、三叶虫以及植物化石,未见底,整合于上覆下三叠统康鲁组紫红色碎屑岩之下(夏代祥和刘世坤, 1997;陈寿铭等, 2009)根据瓣类组合特征,将其时代划归为晚二叠世长兴阶。该组在盆地内出露较少,主要分布在北羌塘西部的热觉茶卡、拉雄错附近和北羌塘东部。

3 样品及实验

样品采自北羌塘盆地拉雄错北西约11 km的露头剖面,剖面长969 m,厚499.1 m,未见顶底。从地层柱状图上(图2)可以看出,剖面下部岩性主要为泥岩夹粉砂岩,中部为粉砂岩夹泥岩,上部为泥岩,偶夹细砂岩,整体上呈现出海陆交互沉积特征。本次研究共采集了19个样品,岩性为深灰色—灰黑色薄层—极薄层泥岩,层位为上二叠统热觉茶卡组(P_{3r})。样品主要用于烃源岩基础地球化学分析和生物标志物分析。

样品的有机碳、镜质体反射率、热解、干酪根镜检、干酪根有机元素和干酪根碳同位素分析在中国石油华北油田分公司勘探开发研究院生油实验室完成。其执行标准分别为GB/T 19145-2003《沉积岩中总有机碳测定》、SY/T 5124-1995《沉积岩中镜质组反射率测定方法》、GB/T 18602-2001《岩石热解分析方法》、SY/T 5125-1996《透射光—荧光干酪根显微组分鉴定及类型划分方法》、GB/T 19143-2003《岩石有机质中碳、氢、氧元素分析方法》和SY/T 5238-2008《有机物和碳酸盐岩碳、氧同位素分析方法》;所使用的仪器分别为Leco碳硫测定仪、MPM80显微光度仪、油气显示评价仪、Axioskop 2 plus生物显微镜、EA 1112 CHNS-O元素分析仪和

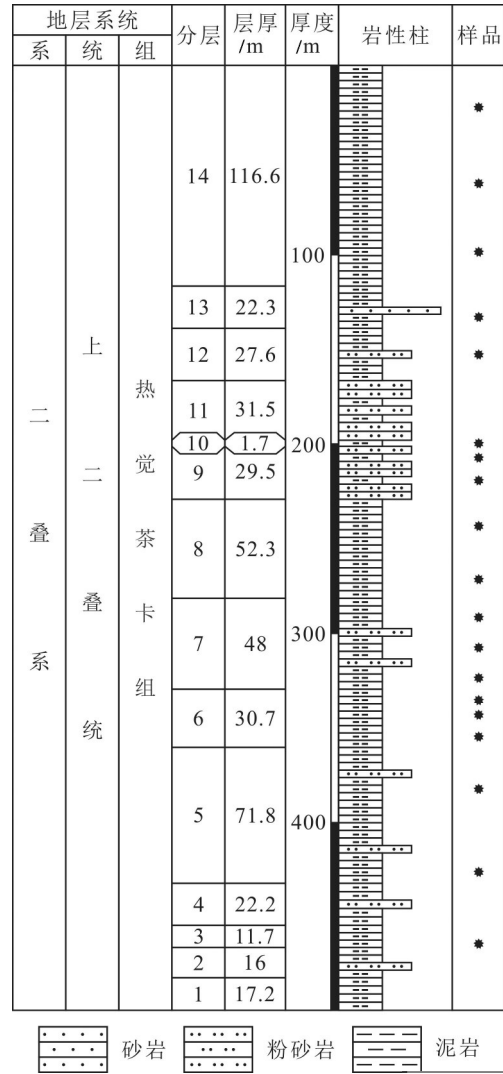


图2 羌塘盆地热觉茶卡组地层柱状图
Fig.2 Stratigraphic column of Rejuechaka Formation, Qiangtang Basin

Finngan MAT-252 同位素质谱仪;检测环境温度和湿度分别为22~25°C和45%~50%。

生物标志物色谱-质谱分析在长江大学地球化学实验室完成。样品经索氏抽提和族组分分离后,直接进行色谱-质谱分析,使用的仪器型号为惠普公司生产的6890 GC/5973 MSD。色谱柱为HP-5MS弹性石英毛细柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm)。以脉冲不分流方式进样,脉冲压力为15 Psi,进样器温度为300°C,以He为载气,流速为恒定的1.0 mL/min,扫描范围为50~550 amu。升温程序:50°C恒温2 min,然后从50°C到100°C和100°C到310°C分别

以20°C/min和3°C/min的升温速率进行升温,并恒温18 min。电离方式为EI,电离能量为70 eV,离子源温度为230°C;检测方式为全扫描(SCAN)和多离子检测(SIN)。检测过程中,正构烷烃和甾萜类使用的标样分别为C₂₄D₅₀和5 α -雄甾烷。

4 烃源岩地球化学特征

4.1 有机质丰度

羌塘盆地烃源岩样品大多取自地表,由于遭受了长期的风化作用和经历了较高的热演化作用,因此针对井下未受风化和未成熟-成熟阶段的样品提出的常规烃源岩评价标准显然不适合本区(王剑等,2009a)。鉴于这种情况,本文采用王剑等(2009a)制定的青藏高原泥质烃源岩有机质丰度评价标准,即以残余有机碳含量为主要评价指标,氯仿沥青“A”质量分数和生烃潜力(S₁+S₂)等作为辅助

指标。其中,泥质烃源岩残余有机碳含量小于0.4%、0.4%~0.6%、0.6%~1.0%和大于1.0%分别对应非烃源岩、差烃源岩、中等烃源岩和好烃源岩(王剑等,2009a)。纵观表1的分析结果,热觉茶卡组19个泥岩样品的TOC质量分数为0.31%~0.72%,其中非烃源岩占比21.1%,差烃源岩占比52.6%,中等烃源岩占比26.3%(图3)。样品的氯仿沥青“A”质量分数为0.0039%~0.0112%,平均值0.0069%,除3个样品达到下限值0.01%外,其余样品均低于下限值;生烃潜力(S₁+S₂)含量为0.08~0.60 mg/g,平均值0.22 mg/g,全部小于下限值1 mg/g。因此,利用这两个指标判别有机质丰度已失去原有的意义。

4.2 有机质类型

热觉察卡组烃源岩的干酪根显微组成以腐泥组为主,含量57%~78%,均值64%;其次为惰质组,含量22%~43%,均值35%;几乎不含壳质组。在显

表1 羌塘盆地热觉茶卡组烃源岩基础地球化学参数

Table 1 Basic geochemical parameters of source rocks from Rejuechaka Formation, Qiangtang Basin

样品编号	岩性	TOC/%	氯仿沥青 “A”/%	S ₁ +S ₂ (mg·g ⁻¹)	TI	有机质 类型	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	H/C	O/C	腐泥组 颜色	T _{max} /°C	R _o /%
PM01-03SY ₁	泥岩	0.62	0.0039	0.14	56	II ₁	-23.7	1.14	0.06	棕褐	399	1.36
PM01-05SY ₂	泥岩	0.34	0.0095	0.13	45	II ₁		1.24	0.06	棕褐	378	
PM01-05SY ₃	泥岩	0.70	0.0076	0.25	42	II ₁	-23.7	1.09	0.09	棕褐	382	
PM01-06SY ₁	泥岩	0.66	0.0068	0.15	36	II ₂		1.25	0.08	棕褐	327	
PM01-06SY ₂	泥岩	0.41	0.0112	0.19	34	II ₂	-23.6	1.22	0.09	棕褐	362	1.39
PM01-06SY ₃	泥岩	0.31	0.0106	0.15	30	II ₂		1.12	0.09	棕褐	388	
PM01-07SY ₁	泥岩	0.46	0.0054	0.17	32	II ₂		1.09	0.06	棕褐	387	
PM01-07SY ₂	泥岩	0.72	0.0049	0.13	36	II ₂		1.03	0.07	棕褐	371	
PM01-07SY ₃	泥岩	0.57	0.0062	0.18	34	II ₂	-23.3	1.12	0.09	棕褐	323	
PM01-08SY ₂	泥岩	0.34	0.0047	0.18	20	II ₂		1.23	0.08	棕褐	375	
PM01-08SY ₃	泥岩	0.36	0.0084	0.08	26	II ₂	-23.7	1.12	0.21	棕褐	522	1.32
PM01-09SY ₁	泥岩	0.66	0.0047	0.17	30	II ₂		1.23	0.24	棕褐	324	
PM01-09SY ₂	泥岩	0.41	0.0069	0.13	16	II ₂		1.22	0.24	棕褐	371	
PM01-10SY ₁	泥岩	0.46	0.0040	0.14	20	II ₂		1.13	0.2	棕褐	367	
PM01-12SY ₂	泥岩	0.60	0.0090	0.59	14	II ₂	-23.3	1.09	0.24	棕褐	378	1.32
PM01-13SY ₁	泥岩	0.52	0.0109	0.38	18	II ₂		1.14	0.16	棕褐	452	
PM01-14SY ₂	泥岩	0.53	0.0070	0.60	20	II ₂		1.24	0.18	棕褐	426	
PM01-14SY ₃	泥岩	0.47	0.0047	0.26	16	II ₂	-23.5	1.16	0.17	棕褐	414	1.46
PM01-14SY ₄	泥岩	0.46	0.0039	0.08	24	II ₂	-23.6	1.14	0.12	棕褐	511	

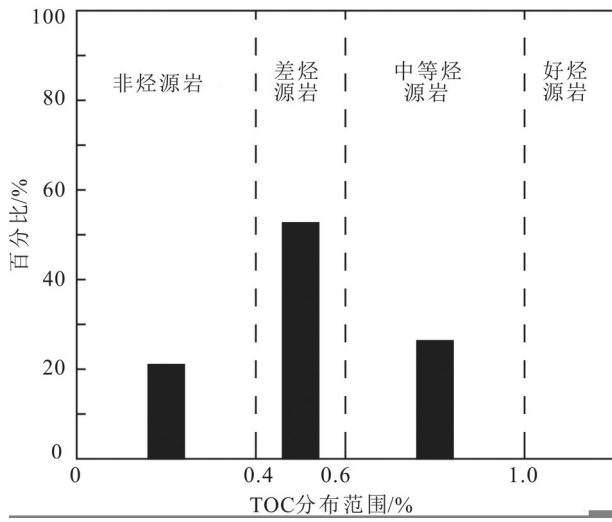


图3 羌塘盆地热觉茶卡组烃源岩TOC直方图
Fig.3 TOC histogram of source rocks from Rejuechaka Formation, Qiangtang Basin

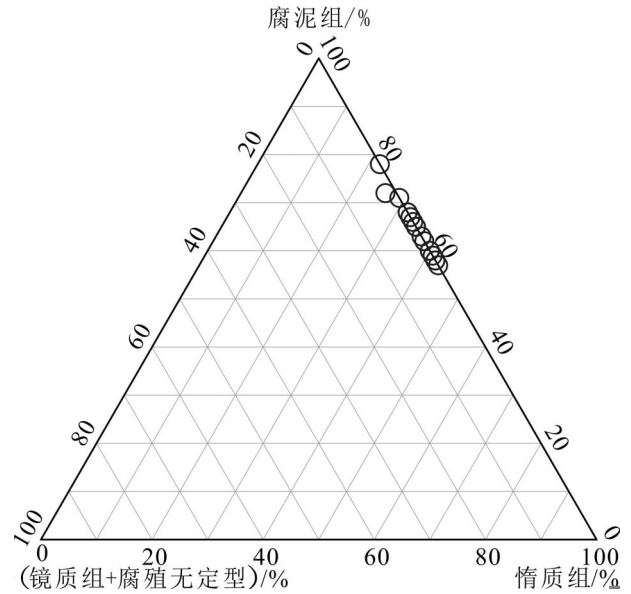


图4 羌塘盆地热觉茶卡组烃源岩干酪根显微组分三角图
Fig. 4 Triangular plot of maceral composition of kerogen for source rocks from Rejuechaka Formation, Qiangtang Basin

微组分三角图上(图4),样品的干酪根靠近腐泥组,表明其生烃母质以低等藻类和浮游类生物为主。干酪根类型指数 TI 是确定有机质类型的常用方法,其计算公式为: $TI=[腐泥组\times 100+壳质组\times 50-镜质组\times 75-惰质组\times 100]/100$ 。根据 TI 计算结果,样品的干酪根类型指数 TI 为14~56,均值29,有机质类型绝大多数为 II_2 型,仅3件样品为 II_1 型。

样品的干酪根元素分析结果显示, H/C 原子比为1.03~1.25, O/C 原子比为0.06~0.24,在范氏图(图5)上,除1个样品落入I型区外,其余样品均落入II型区。干酪根元素分析与干酪根镜检结果基本一致,表明热觉察卡组烃源岩有机质类型总体较好。研究表明,风化作用和有机质热演化会影响干酪根元素比值,在风化作用过程中, O/C 原子比会显著增大,而 H/C 原子比变化不大(孟元林等,1999),在热演化过程中,随着成熟度的增加, O/C 原子比先明显减小,然后 H/C 原子比接着减小(陈文彬等,2015b)。从图5上可以看出,样品的 H/C 原子比比较集中,全部位于II型干酪根范围内(1.0~1.5),而 O/C 原子比相对分散,大部分小于II型干酪根下限值(0.1),表明热演化作用可能是引起干酪根元素比值发生变化的主导因素,而非风化作用。

一般认为,羌塘盆地烃源岩的干酪根碳同位素小于 -28‰ 为I型有机质, -28‰ ~ -26‰ 为 II_1 型有机

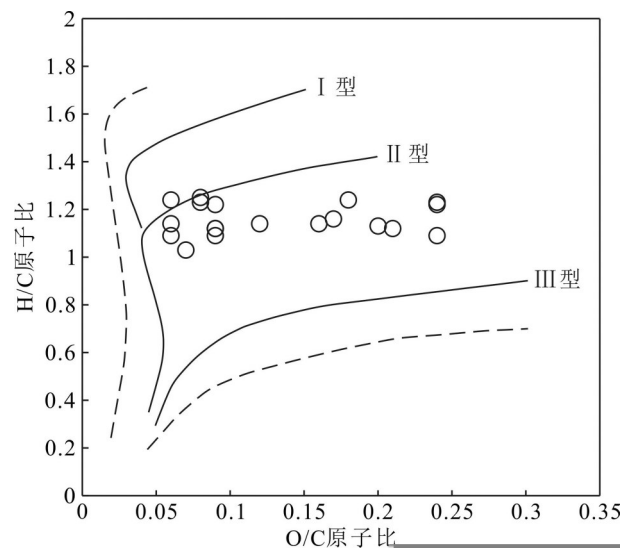


图5 羌塘盆地热觉茶卡组烃源岩干酪根元素范氏图
Fig. 5 Van Krevelen diagrams of kerogen elements of source rocks from Rejuechaka Formation, Qiangtang Basin

质, -26‰ ~ -24‰ 为 II_2 型,大于 -24‰ 的为III型有机质(赵政璋等,2000;丁文龙等,2011)。热觉察卡组烃源岩的干酪根碳同位素介于 -23.7‰ ~ -23.3‰ ,显示其为III型有机质。这与前面的干酪根镜检和干酪根元素分析结果不一致,但与陈文彬等(2013)遇到的情况类似。研究表明,风化作用和有机质热演

化均能导致干酪根碳同位素变重,在热演化过程中,III型干酪根碳同位素增重幅度一般不超过1‰,II型一般不超过2‰(苏艾国,1999),I型最大可达3.8‰(熊永强等,2004);对地面样品而言,III型干酪根碳同位素风化增重幅度约为1‰,II型可达2.5‰,I型大于2.5‰(苏艾国,1999)。在综合考虑有机质热演化和风化作用的情况下,笔者推测热觉察卡组烃源岩的干酪根碳同位素理论值应该小于-24‰,即烃源岩的有机质类型应该好于III型。

4.3 有机质成熟度

镜质体反射率 R_o 是反应烃源岩有机质成熟度最有效的指标,最高热解峰温 T_{max} 和干酪根腐泥组颜色可以作为参考指标(侯读杰和冯子辉,2011)。分析结果显示,样品的镜质体反射率 R_o 为1.32%~1.46%,根据判别标准(王剑等,2009a),热觉察卡组烃源岩已经达到高成熟阶段。 T_{max} 值介于323~522°C,且绝大多

数小于430°C,总体上呈现出未成熟特征,其判别结果与 R_o 不符,但考虑到 S_2 值小于0.2 mg/g的样品的 T_{max} 值可能测不准确(赵政璋等,2000),而本文样品的 S_2 值绝大多数小于0.2 mg/g,因此,利用 T_{max} 值判别有机质成熟度可能已失去实际意义。热觉察卡组烃源岩的干酪根腐泥组颜色为棕褐色(图6),表明烃源岩已经达到了高成熟阶段。综合这3项指标,笔者认为研究区烃源岩有机质演化程度较高,已达到高成熟阶段。

5 生物标志物特征

5.1 生物降解度

如前所述,羌塘盆地的烃源岩样品大多取自地表,因此,在对样品进行生物标志物研究时,首先得判别各生物标志物参数是否有效。在常见生物标志物中,正构烷烃最易遭受降解,然后依次是类异

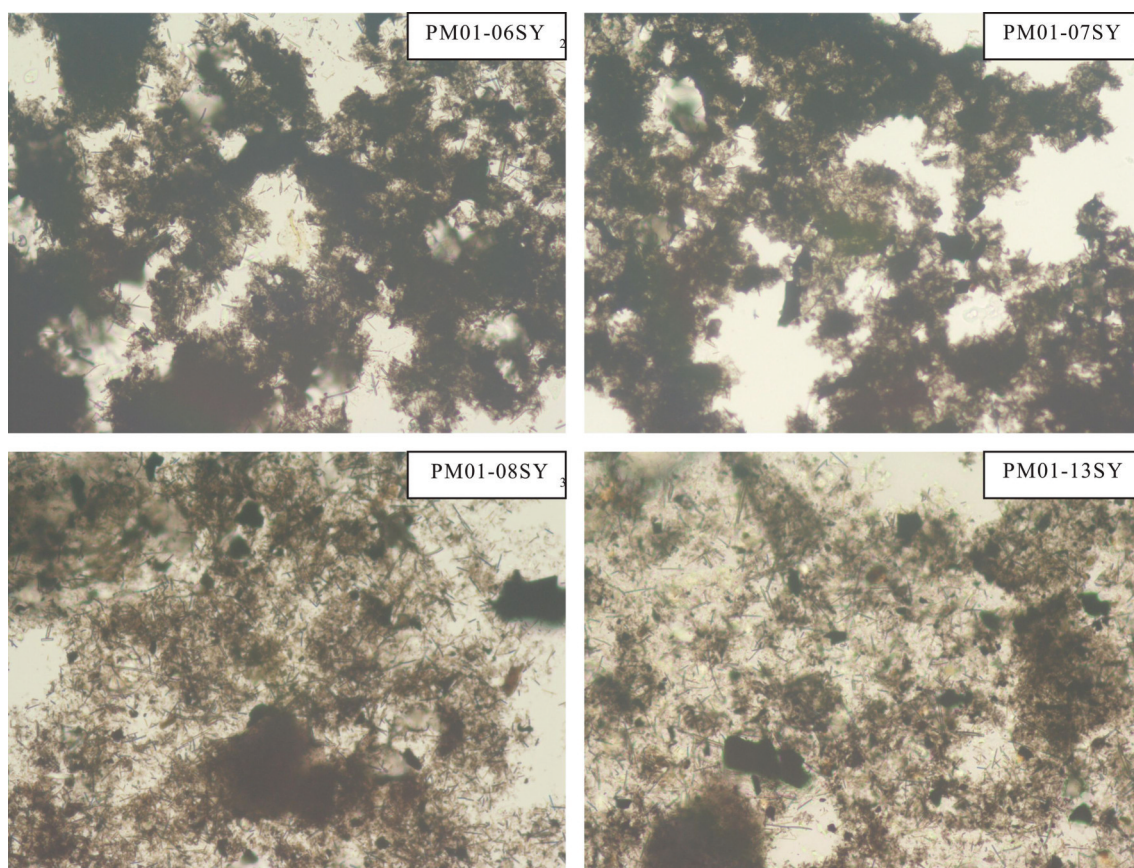


图6 羌塘盆地热觉察卡组烃源岩干酪根镜检照片

Fig.6 Photos of microscopic examination of kerogen for source rocks from Rejuechaka Formation, Qiangtang Basin

戊二烯烃、甾烷和藿烷。窦启龙等(2005)的研究显示,微生物对生物标志物进行降解的先后顺序是,正构烷烃>类异戊二烯烃>藿烷,并且低碳数正构烷烃($\sum nC_{21}^-$)比高碳数正构烷烃($\sum nC_{22}^+$)更易遭受降解。陈文彬等(2013)对羌塘盆地烃源岩的生物标志物进行研究时发现,尽管正构烷烃的色谱曲线呈现出UCM峰,但正构烷烃的碳数范围是连续的,并且均检测出较为丰富的姥鲛烷和植烷,表明样品没有遭受严重的降解。本文样品的正构烷烃色谱曲线呈现出UCM峰(图7),但碳数范围为连续的(nC_{12} - nC_{39}), $\sum nC_{21}^-/\sum nC_{22}^+$ 值大于1,姥鲛烷和植烷也具有较高的丰度,表明样品没有遭受明显的生物降解作用,因此,样品的生物标志物参数是有效的。

5.2 正构烷烃

正构烷烃的峰型分布特征和轻重碳数比($\sum nC_{21}^-/\sum nC_{22}^+$ 或 $(nC_{21}+nC_{22})/(nC_{28}+nC_{29})$)能反映有机质的母质来源。其中,前锋型(主峰碳为 nC_{15} - nC_{19})的母质来源于藻类和浮游类等低等水生生物;后峰型(nC_{25} - nC_{33})的母质来源于陆源高等植物;双峰型的母质来源既有低等生物,又有高等植物

(Moldowan et al., 1991);轻重碳数比大于1,表明有机质的母质主要来源于藻类和浮游类等低等水生生物,轻重碳数比小于1,表明有机质的母质主要来源于高等植物。研究样品的正构烷烃的碳数范围为 nC_{12} - nC_{39} ,主峰碳为 nC_{18} 和 nC_{19} ,表现为前峰型(图7)。 $\sum nC_{21}^-/\sum nC_{22}^+$ 值为1.02~2.92; $(nC_{21}+nC_{22})/(nC_{28}+nC_{29})$ 值为1.34~3.74(表2)。这些特征表明,热觉茶卡组烃源岩的母质主要来源于藻类和浮游类等低等水生生物。表征有机质成熟度的OEP值介于0.86~1.08,均值为0.93,接近平衡值1,显示了成熟的有机质特征。

5.3 类异戊二烯烃

沉积物中姥鲛烷(Pr)和植烷(Ph)主要来源于叶绿素的植醇侧链,植醇在还原条件下可形成植烷,在氧化条件下则形成姥鲛烷(侯读杰和冯子辉,2011),因此,姥鲛烷和植烷的分布特征可以指示沉积环境。Peters et al.(2005)指出,对生油窗内的样品而言,高Pr/Ph值(>3.0)并不完全反映沉积环境,而是代表氧化条件下陆源有机质的输入,低值(<0.6)则反映了缺氧的、通常是超盐度的沉积环境,Pr/Ph值在0.8~2.5

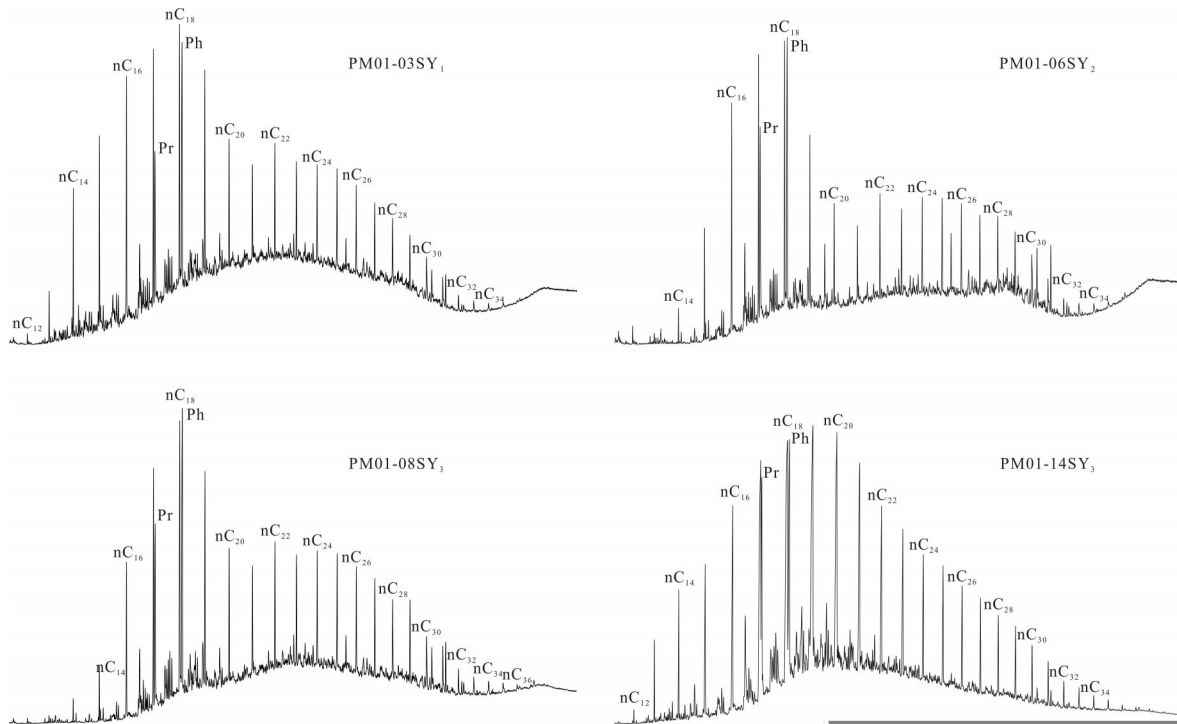


图7 羌塘盆地热觉茶卡组烃源岩饱和烃和烃气相色谱图

Fig. 7 Gas chromatograms of the saturated hydrocarbons of source rocks from Rejuechaka Formation, Qiangtang Basin

表2 羌塘盆地热觉茶卡组烃源岩饱和烃参数

Table 2 Parameters of the saturated hydrocarbons of source rocks from Rejuechaka Formation, Qiangtang Basin

样品	正构烷烃				类异戊二烯烃			
	主峰碳	碳数范围	OEP	$\Sigma nC_{21}/\Sigma nC_{22}^+$	$(nC_{21}+nC_{22})/(nC_{28}+nC_{29})$	Pr/Ph	Pr/nC ₁₇	Ph/nC ₁₈
PM01-03SY ₁	nC ₁₈	nC ₁₂ -nC ₃₅	0.89	1.49	1.50	0.66	0.95	1.35
PM01-06SY ₂	nC ₁₈	nC ₁₃ -nC ₃₈	0.86	1.54	1.34	0.73	1.07	1.45
PM01-08SY ₃	nC ₁₈	nC ₁₃ -nC ₃₇	0.88	1.02	1.38	0.60	0.99	1.32
PM01-14SY ₃	nC ₁₀	nC ₁₇ -nC ₃₀	1.08	2.92	3.74	0.71	0.55	0.70

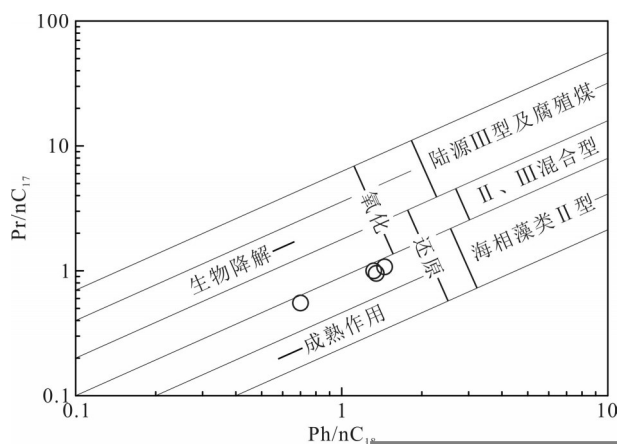


图8 羌塘盆地热觉茶卡组烃源岩 Pr/nC₁₇-Ph/nC₁₈图解
Fig. 8 Diagram of Pr/nC₁₇ versus Ph/nC₁₈ of source rocks from Rejuechaka Formation, Qiangtang Basin

的样品,一般不作为古环境的判别标志。样品的 Pr/Ph 值为 0.60~0.73, 均值 0.68, 呈明显的植烷优势, 表明这些样品的成烃母质形成于缺氧的还原环境。Pr/nC₁₇ 值和 Ph/nC₁₈ 值通常用于研究烃源岩的母质类型、形成环境和成熟度 (Shanmugam et al., 1985)。在 Pr/nC₁₇-Ph/nC₁₈ 图解上 (图 8), 所有样品落入海相藻类 II 型区域, 反映了烃源岩的成烃母质以海相藻类为主, 并形成于还原环境。

5.4 萜烷

样品中检测到的萜烷化合物包括三环萜烷、藿烷和伽马蜡烷 (图 9)。三环萜烷一般来源于菌藻类, 具有较高的抗生物降解能力和热稳定性 (杨文光等, 2011), 并且在咸化沉积环境中的丰度比淡水环境高 (Ourisson et al., 1982; 孟仟祥等, 2004)。前人的研究表明 (张水昌和卢松年, 1993), 陆相地层中的三环萜烷/五环萜烷值一般小于 0.25; 海相地层中其值为 0.1~1。本文样品的三环萜烷丰度略高, 碳数范围为

C₁₉~C₂₉ (缺 C₂₇), 以 C₂₃ 为主峰碳, 三环萜烷/五环萜烷值为 0.56~1.21, 表明烃源岩的成烃母质来源于海相菌藻类, 并形成于具有一定的盐度的环境。

藿烷的形成与细菌等微生物有关, 尤其是升藿烷 (C₃₁~C₃₅) 被认为来自细菌藿四醇 (侯读杰和冯子辉, 2011), 高含量的 C₃₅ 升藿烷还可能和沉积环境中强烈的细菌活动相关 (Peters et al., 2005)。研究样品的藿烷碳数为 C₂₇~C₃₅, 以 C₂₉Ts 和 C₃₀αβ藿烷丰度最高, 升藿烷含量较低, 表明细菌对成烃母质具有一定的贡献。藿烷中表征成熟度的参数有 C₃₁αβ22S/22(S+R) 和 Ts/(Ts+Tm)。样品的 C₃₁αβ22S/22(S+R) 值为 0.57~0.61, 接近平衡值 0.57~0.62, 表明烃源岩已达到或超过主要的生油阶段 (Peters et al., 2005)。Ts/(Ts+Tm) 适用于成熟-高成熟阶段, 一般随成熟度增加而逐渐变大 (王春江等, 2000; Peters et al., 2005), 在生油阶段晚期 (Ro≈1.4%) 该值达到 0.5 (任拥军等, 2000)。样品的 Ts/(Ts+Tm) 值为 0.47~0.51, 反映了烃源岩已经达到高成熟阶段。

伽马蜡烷主要来源于四膜虫中的四膜虫醇, 广泛分布于原生动、光合作用细菌和其他生物体中, 形成于还原环境 (张立平等, 1999)。伽马蜡烷作为沉积环境的标志物, 与水体盐度密切相关, 水体盐度越高, 其含量越高 (Peters et al., 2005)。近来的研究显示, 伽马蜡烷还与水体的分层有关, 高含量的伽马蜡烷常常位于水体分层段 (张立平等, 1999)。样品中均检测出一定量的伽马蜡烷, 但含量较低, 伽马蜡烷/C₃₀αβ藿烷值为 0.12~0.17, 与羌塘盆地低盐度成因海相烃源岩的伽马蜡烷/C₃₀αβ藿烷值 (0.11~0.31) (陈文彬等, 2007; 杜佰伟等, 2016) 一致, 表明烃源岩的成烃母质形成于低盐度的还原环境。

5.5 甾烷

本次所分析的样品中检测出了丰富的规则甾

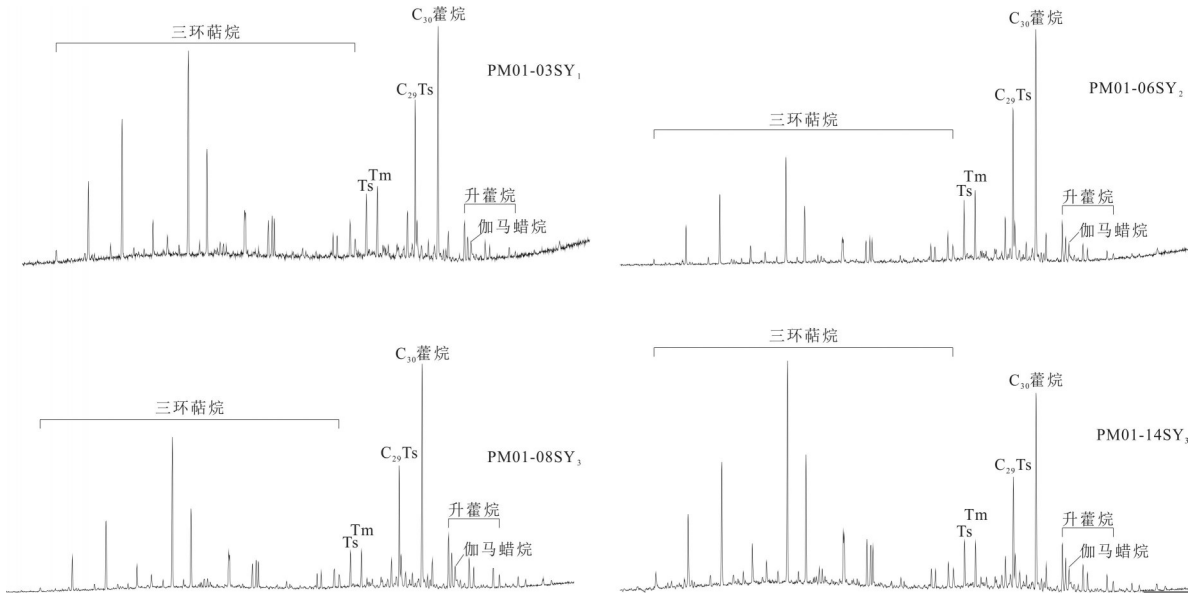


图9 羌塘盆地热觉茶卡组烃源岩萜烷(m/z191)质量色谱图

Fig.9 Mass chromatogram of terpanes (m/z191) of source rocks from Rejuechaka Formation, Qiangtang Basin

烷、重排甾烷、孕甾烷和升孕甾烷以及少量的4-甲基甾烷(图10),通常认为,C₂₇和C₂₈甾烷来源于低等水生生物,而C₂₉甾烷既可以来源于高等植物,也可以来源于藻类(Huang et al., 1979; Philp et al., 1991; Duan et al., 2001)。研究区烃源岩样品中,C₂₇、C₂₈和

C₂₉规则甾烷含量分别为0.37~0.43、0.26~0.28和0.31~0.35(表3),C₂₇/C₂₉为1.05~1.39,总体上以C₂₇规则甾烷占优势(图10),在甾烷三角图上(图11),样品落入混合源区域,并靠近以浮游植物为主要来源的源区,指示烃源岩的有机质母质是以低等水生

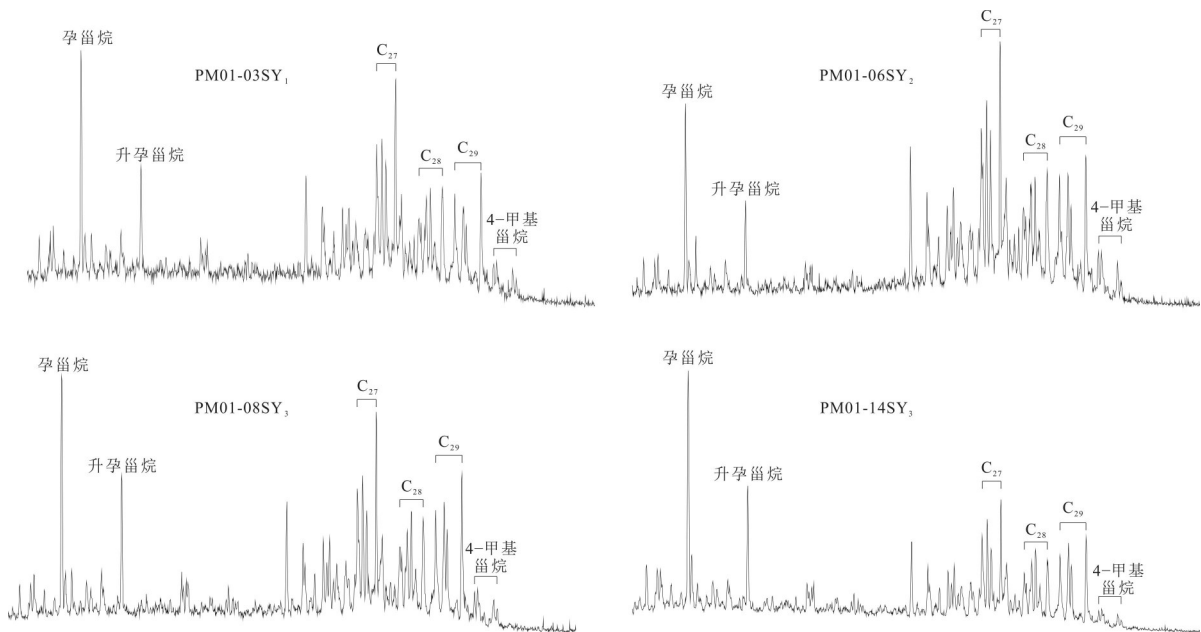


图10 羌塘盆地热觉茶卡组烃源岩甾烷(m/z217)质量色谱图

Fig.10 Mass chromatogram of steranes (m/z217) of source rocks from Rejuechaka Formation, Qiangtang Basin

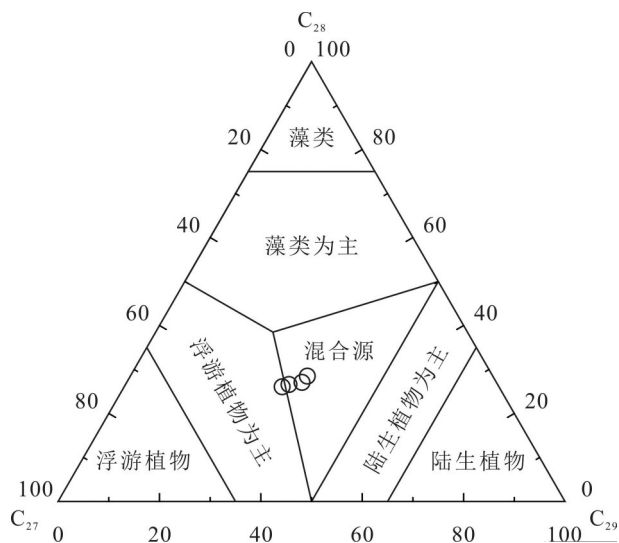


图 11 羌塘盆地热觉茶卡组烃源岩甾烷三角图
Fig.11 Steranes triangle of source rocks from Rejuechaka Formation, Qiangtang Basin

物为主,并伴有一定量高等植物的输入。4-甲基甾烷一般来自甲藻类(Robinson et al., 1984),但也存在于细菌中(Philp et al., 1991),热觉茶卡组烃源岩中4-甲基甾烷的存在,反应了菌藻类对成烃母质的贡献。

甾烷中的 $C_{29}\alpha\alpha\alpha 20S/20(S+R)$ 和 $C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta)$ 比值常用于研究有机质热演化程度,从未成熟到成熟阶段,其比值随成熟度的增大而增大,直到达到平衡值 0.52~0.55 和 0.67~0.71 (Peters et al., 2005)。热觉茶卡组烃源岩的 $C_{29}\alpha\alpha\alpha 20S/20(S+R)$ 和 $C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta)$ 比值分别为 0.46~0.57 和 0.41~0.46(表 3),总体上低于平衡值,似乎与研究区样品的实际成熟度 ($R_o>1.3\%$) 相矛盾。但考虑到甾烷异构化达到平衡并不表明异构化终止,在高一过成熟

阶段,某些矿物作用使 20S 构型比 20R 构型、 $\beta\beta$ 构型比 $\alpha\alpha$ 构型裂解更快,从而导致异构化比值逐渐变小(廖永胜, 2005)。因此,样品的甾烷异构化低值实际上反应了烃源岩的高成熟度特征。

6 油气潜力分析

羌塘盆地中生界地层沉积厚度大,最厚可达 13000 m(王剑等, 2004),加之油气显示较多(赵政璋等, 2000; 王剑等, 2009a),长期以来,羌塘盆地被认为是最有希望取得勘探突破的中生代大型含油气盆地(谭富文等, 2002; 罗建宁等, 2003)。然而,白垩纪和新近纪以来的隆升剥蚀作用导致了羌塘盆地中生代地层的广泛出露(陈文彬等, 2015a, b; 付修根等, 2007); 相反,古生代地层大多埋藏较好(伍新和等, 2005),因而古生界油气藏的保存条件可能好于中生界油气藏。但正是由于古生界地层出露少,从而在客观上制约了对其生烃潜力缺乏有效的认识(付修根等, 2015)。

近来,在羌塘盆地陆续发现了古生界烃源岩和古油藏,例如,在中央隆起带附近的孔孔茶卡地区发现了中等—好的石炭系擦蒙组烃源岩(陈文彬等, 2013); 在中央隆起带上角木茶卡地区也发现了中等—好的二叠系展金组烃源岩(陈文彬等, 2015a; 宋春彦等, 2014; 曹俊峰等, 2015)和二叠系古油藏(宋春彦等, 2014),通过生物标志物参数对比发现,二叠系古油藏的烃类并非来源于石炭系擦蒙组、二叠系龙格组、展金组和热觉察卡组烃源岩,暗示盆地内还可能还存在其他层位的古生界烃源岩。本文在北美羌塘盆地拉雄错附近发现的上二叠统热觉茶卡组烃源岩厚约 400 m,有机质丰度较高,以差—中等烃源岩居多,有机质以 II_2 型为主,有机质母质主

表 3 羌塘盆地热觉茶卡组烃源岩萜烷和甾烷参数

Table 3 Parameters of the terpanes and steranes of source rocks from Rejuechaka Formation, Qiangtang Basin

样品	三环萜烷 /五环萜烷	$Ts/(Ts+Tm)$	$C_{31}\alpha\beta 22S$ /($22S+22R$)	伽玛蜡烷/ $C_{30}\alpha\beta$ 藿烷	C_{27}	C_{28}	C_{29}	$C_{29}\alpha\alpha\alpha$ 20S/20(S+R)	$C_{29}\alpha\beta\beta$ /($\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta$)

要来源于低等水生生物,并混有一定量高等植物,热演化程度已达高成熟阶段。这些事实表明羌塘盆地古生界烃源岩具备良好的生烃能力,它对羌塘盆地油气的贡献可能与中生界烃源岩并重(伍新和等,2005),因此,在以后的勘探过程中,值得重视。

7 结 论

(1) 羌塘盆地上二叠统热觉茶卡组烃源岩的TOC含量为0.31%~0.72%,属非—中等烃源岩,并以差—中等烃源岩居多,有机质类型主要为II₂型,有机质热演化已达到高成熟阶段,具备较好的生气潜力。

(2) 生物标志物特征反映了羌塘盆地上二叠统热觉茶卡组烃源岩形成于具有一定盐度的还原环境,有机质母质主要来源于浮游类和菌藻类等低等水生生物,并伴有一定量高等植物的输入,有机质热演化已达到高成熟阶段。

(3) 羌塘盆地上二叠统热觉茶卡组烃源岩的发现进一步证实了古生界烃源岩具有良好的生烃潜力,在以后的油气勘探过程中应给予重视。

致谢:成都理工大学沉积地质研究院朱利东教授和史建南副教授在野外和成文过程中给予指导,研究生唐国龙和西藏地勘局区调队白马·顿都在样品处理方面给与帮助,编辑部老师和审稿专家给予建设性意见和建议,在此致以诚挚的谢意!

References

Cao Junfeng, Song Chunyan, Fu Xiugen, Chen Ming, Zheng Bo, Sun Wei. 2015. Basic characteristics of Permian Zhanjin source rock in Well Qiangzi-5 in Qiangtang Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 20(2): 15-20 (in Chinese with English abstract).

Chen Shouming, Cheng Liren, Wu Shuizhong, Zhu Yongshan. 2009. Late Permian fusulinds from the Raggyorcaka Formation, northern Qiangtang, Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1725-1729 (in Chinese with English abstract).

Chen Wenbin, Liao Zhongli, Zhang Yujie, Peng Zhimin. 2007. Geochemical characteristics and significance of hydrocarbon source rocks in the Jurassic BiQu Formation in the north Qiangtang basin[J]. *Geology in China*, 34(5): 927-934 (in Chinese with English abstract).

Chen Wenbin, Fu Xiugen, Tan Fuwen, Feng Xinglei. 2013. The discovery of the Carboniferous source rock in Qiangtang Basin of Tibet and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(7): 1105-1112 (in Chinese with English abstract).

Chen Wenbin, Fu Xiugen, Zhan Wangzhong, Feng Xinglei, Song Chunyan, Zeng Shengqiang. 2015a. Characteristics and significance of the source rocks from the Lower Permian Zhanjin Formation in the Jiaomuchaka area, Qiangtang Basin, northern Xizang[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 35(1): 43-49 (in Chinese with English abstract).

Chen Wenbin, Fu Xiugen, Tan Fuwen, Feng Xinglei, Zeng Shengqiang. 2015b. Geochemical characteristics of Upper Triassic source rocks from typical sections in Qiangtang Basin, northern Tibet[J]. *Geology in China*, 42(4): 1151-1160 (in Chinese with English abstract).

Ding Wenlong, Li Chao, Su Aiguo, He Zhonghua. 2011. Study on the comprehensive geochemical cross section of Mesozoic marine source rocks and prediction of favorable hydrocarbon generation area in Qiangtang basin, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3): 878-896 (in Chinese with English abstract).

Ding W L, Wan H, Zhang Y Q, Han G Z. 2013. Characteristics of the Middle Jurassic marine source rocks and prediction of favorable source rock kitchens in the Qiangtang Basin of Tibet[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 63-72.

Dou Qilong, Chen Jianfa, Xue Yanfen, Wang Jie, Duan Wenbiao, Guo Jianjun. 2005. A comparative study of the geochemical characters of crude oil after microbe degradation in laboratory[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(3): 542-547 (in Chinese with English abstract).

Du Baiwei, Peng Qinghua, He Jianglin. 2016. Characteristics of biomarker compounds in the mudstone of Upper Jurassic Suowa Formation from QZ3 Well in Qiangtang Basin, northern Tibet[J]. *Geology in China*, 43(1): 298-305 (in Chinese with English abstract).

Duan Y, Ma L. 2001. Lipid geochemistry in a sediment core from Ruergai Marsh deposit (Eastern Qinghai- Tibet plateau, China) [J]. *Organic Geochemistry*, 32(12): 1429-1442.

Fang Limin, Lu Bing, Liu Chiyang, Liu Zhong. 2002. Evolution of the central Dome in the Qiangtang basin and its importance in Oil-gas Exploration[J]. *Geological Review*, 48(3): 279-283 (in Chinese with English abstract).

Fu Xiugen, Wang Jian, Wang Zhengjiang, Chen Wenxi. 2007a. Marine Oil Shale Depositional Environment of Qiangtang Basin in Northern Tibet[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 28(5): 529-533 (in Chinese with English abstract).

Fu Xiugen, Liao Zhongli, Liu Jianqing, Chen Wenbin, Chen Wenxi. 2007b. Sedimentary environment of the Middle Jurassic Bi Qu Formation and its controls on petroleum geology in the Zaring area, southern Qiangtang basin[J]. *Geology in China*, 34(4): 599-605 (in Chinese with English abstract).

- Fu Xiugen, Wang Jian, Wang Zhengjiang, He Jianglin. 2009. Characteristics of kerogens and their carbon isotope implications for the Shengli River oil shale in Qiangtang basin, northern Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(5): 643–650 (in Chinese with English abstract).
- Fu Xiugen, Wang Jian, Tan Fuwen, Chen Ming, Li Zhongxiong, Chen Wenbin, Feng Xinglei. 2015. Recent progress in oil and gas geological exploration in the Qiangtang Basin, northern Xizang[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 35(1): 16–24.
- Hou Dujie, Feng Zihui. 2011. *Petroleum Geochemistry*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 168–243 (in Chinese with English abstract).
- Huang W Y, Meinschein W G. 1979. Sterols as ecological indicators[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43(5): 739–745.
- Liao Yongsheng. 2005. Some issues about evaluation on high-over matured gas source rocks[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 32(4): 147–152 (in Chinese with English abstract).
- Luo Jianning, Xie Yuan, Wang Xiaolong, Zhu Zhongfa, Tong Zhenyan, Ye Hefei, Li Yongtie. 2003. The preliminary study of petroleum geology of the Qiangtang Basin in northern Xizang[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 23(1): 1–15 (in Chinese with English abstract).
- Meng Qianxiang, Fang Xuan, Xu Yongchang, Shen Ping. 2004. Biomarkers and geochemical significance of Carboniferous source rocks and coals from Qaidam Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(4): 729–736 (in Chinese with English abstract).
- Meng Yuanlin, Xiao Lihua, Yang Junsheng, Wang Jianguo, Sun Yuanlin. 1999. Influences of weathering on organic matter of outcrop and correcting methods in Xining Basin[J]. *Geochimica*, 28(1): 42–50 (in Chinese with English abstract).
- Moldowan J M, Fago F J, Carlson R M K, Young D C, Duvne G A, Clardy J, Schoell M, Pillinger C T and Watt D S. 1991. Rearranged hopanes in sediments and petroleum[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(11): 3333–3353.
- Ourisson G, Albrecht P, Rohmer M. 1982. Predictive microbial biochemistry—from molecular fossils to procaryotic membranes[J]. *Trends in Biochemical Sciences*, 7(7): 236–239.
- Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. 2005. *The biomarker guide: biomarkers and isotopes in the environment and human history*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1–708.
- Philp R P, Fan P, Lewis C A, Zhu H, Wang H. 1991. Geochemical characteristics of oils from the Chaidamu, Shanganning and Jiangnan Basins, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 5(1/4): 351–358.
- Ren Yongjun, Ji Youliang, Li Ruixue. 2000. Geochemical characteristics and significance of steranes and terpanes in the Carboniferous potential source rocks of the South Qilian Basin[J]. *Experimental Petroleum Geology*, 22(4): 341–345 (in Chinese with English abstract).
- Robinson N, Eglinton G, Brassel S C, Cranwell, P A. 1984. Dinoflagellate origin for sedimentary 4 α methylsteroids and 5 α (H) sterols[J]. *Nature*, 308: 439–441.
- Shanmugam G. 1985. Significance of coniferous rain forests and related organic matter in generating commercial quantities of oil, Gippsland Basin, Australia[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 69(8): 1241–1254.
- Song Chunyan, Cao Junfeng, Wang Jian, Tan Fuwen, Fu Xiugen, He Jianglin, Zeng Shengqiang, He Li. 2014. The discovery and basic characteristics of ancient reservoir in Permian of Jiaomuchaka Area, Qiangtang Basin[J]. *Xinjiang Geology*, 32(1): 87–91 (in Chinese with English abstract).
- Su Aiguo. 1999. Discussion on variation of carbon isotope of Kerogen during thermal maturation and weathering[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 18(2): 11–16 (in Chinese with English abstract).
- Tan Fuwen, Wang Jian, Wang Xiaolong, Du Baiwei. 2002. The Qiangtang Basin in Xizang as the target area for the oil and gas resources in China[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 22(1): 16–21 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhengjiang, Wang Jian, Chen Wenxi, Fu Xiugen. 2007. Discovery of the Late Jurassic Shenglihe marine oil shale in the Northern Qiangtang basin, Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(6): 764–768 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chengshan, Yi Haisheng, Li Yong, Deng Bin, Liu Dengzhong, Wang Guozhi, Shi He, Li Youguo, Ma Runze, Lin Jinhui. 2001. *The Geological Evolution and Prospective Assessment for Oil and Gas in the Qiangtang Basin, Tibet*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 54–232 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chengshan, Yi Haisheng, Liu Chiyang, Li Yalin, Zou Yanrong, Wu Xinhe, Deng Bin and Yang Xingke. 2004. Discovery of paleo-oil-reservoir in Qiangtang basin in Tibet and its geological significance[J]. *Oil & Gas Geology*, 25(2): 139–143 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chunjiang, Fu Jiamo, Sheng Guoying, Xiao Qianhua, Li Jinyou, Zhang Yali, Pu Mingzhi. 2000. Geochemical properties and applications of the compounds of 18 α (H)–neohopanes and 17 α (H)–diahopanes[J]. *Chinese Science Bulletin*, 45(13): 1366–1372 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jian, Tan Fuwen, Li Yalin, Li Yongtie, Chen Ming, Wang Chengshan, Guo Zujun, Wang Xiaolong, Du Baiwei, Zhu Zhongfa. 2004. The Potential of the Oil and Gas Resources in Major

- Sedimentary Basins on the QinghaiXizang (Tibet) Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 26–31 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jian, Ding Jun, Wang Chengshan, Tan Fuwen. 2009a. Evaluation and Investigation of the Oil and Gas in the Qinghai–Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 208–270 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jian, Fu Xiugen, Li Zhongxiong, Wu Tao, He Jianglin. 2009b. Discovery of the Shenglihe—Changsheshan oil shale belt in the Qiangtang basin, northern Tibet, China and its significance[J]. Geological Bulletin of China, 28(6): 691–695 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jian, Fu Xiugen, Li Zhongxiong, Xiong Song. 2010. Formation and significance of the oil shales from the North Qiangtang Basin[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 30(3): 11–17 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiuyan, Yun Jinbiao, Luo Duqing, Teng Yuhong, Lin Tiefeng. 1999. Discussion on geodynamic evolution and oil gas prospect of Qiangtang basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 20(3): 38–42 (in Chinese with English abstract).
- Wen Shixuan. 1979. New materials of Biostratigraphy in the northern Qiangtang plateau[J]. Acta Stratigraphica Sinica, 3(2): 150–156 (in Chinese with English abstract).
- Wu Xinhe, Wang Chengshan, Yi Haisheng, Zou Yanrong, Li Yalin. 2005. Fossil–reservoir of hydrocarbon rock in Qiangtang Basin of Tibet and exploration perspective of oil and gas[J]. Acta Petrolei Sinica, 26(1): 13–17 (in Chinese with English abstract).
- Wu Xinhe, Zhang Li, Wang Chengshan, Yi Haisheng. 2008. Characteristics of the Mesozoic Marine Source Rocks in the Qiangtang Basin, Tibet[J]. Oil & Gas Geology, 29(3): 348–354 (in Chinese with English abstract).
- Xia Daixiang, Liu Shikun. 1997. Lithostratigraphy of Xizang Autonomous Region[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 38–39 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Yongqiang, Zhang Haizu, Geng Ansong. 2004. Variation of carbon isotopic composition of kerogen during thermal evolution[J]. Petroleum Geology and Experiment, 26(5): 484–487 (in Chinese with English abstract).
- Xu Huaixian, Qin Jianzhong. 2004. Thermal evolution history of the Mesozoic marine source rock in the Qiangtang Basin, Tibet[J]. Petroleum Exploration and Development, 31(2): 59–63 (in Chinese with English abstract).
- Yang Wenguang, Zhu Lidong, Mi Wentian, Wang Chengshan, Li Yalin, Huang Hui, Wu Jinlong, Yang Lin, Zhou Xiaolin. 2011. Study on biomarker characteristics of hydrocarbon source rocks from Cenozoic Yaxicuo Group in the Yanghu basin of Tibet, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (science & Technology edition), 38(6): 633–640 (in Chinese with English abstract).
- Yi Jizheng, Deng Guanghui, Zhang Xiufu. 1996. Geological Conditions for the Petroleum Generation in the Qiangtang Basin, Northern Tibet[J]. Earth Science, 21(2): 141–146 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Shengqiang, Wang Jian, Fu Xiugen, Feng Xinglei, Sun Wei. 2013. Hydrocarbon generation potential and sedimentary environment for the source rocks along the Changshe Mountain oil shale section in North Qiangtang Basin[J]. Geology in China, 40(6): 1861–1871 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Liping, Huang Difan, Liao Zhiqing. 1999. Gammacerane–Geochemical Indicator of Water Column Stratification[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 17(1): 136–140 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuichang, Lu Songnian. 1993. Molecular fossils derived marine palaeobacteria[J]. Earth Sciences, 18(4): 381–392 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhengzhang, Li Yongtie, Ye Hefei, Zhang Yuwen. 2000. Oil and Gas Generation of Mesozoic Marine Source Rock in the Qiangtang–Xizang Plateau, China[J]. Beijing: Science Press, 74–466 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹峻峰, 宋春彦, 付修根, 陈明, 郑博, 孙伟. 2015. 羌塘盆地羌5井二叠系展金组烃源岩基本特征[J]. 海相油气地质, 20(2): 15–20.
- 陈寿铭, 程立人, 吴水忠, 朱永山. 2009. 西藏羌塘北部上二叠统热觉茶卡组䗴类动物群的特征[J]. 地质通报, 28(12): 1725–1729.
- 陈文彬, 廖忠礼, 张予杰, 彭志敏. 2007. 北羌塘盆地侏罗系布曲组烃源岩地球化学特征及意义[J]. 中国地质, 34(5): 927–934.
- 陈文彬, 付修根, 谭富文, 冯兴雷. 2013. 藏北羌塘盆地石炭系烃源岩的发现及其油气地质意义[J]. 地质通报, 32(7): 1105–1112.
- 陈文彬, 付修根, 占王忠, 冯兴雷, 宋春彦, 曾胜强. 2015a. 藏北羌塘盆地角木茶卡地区下二叠统展金组烃源岩特征及意义[J]. 沉积与特提斯地质, 35(1): 43–49.
- 陈文彬, 付修根, 谭富文, 冯兴雷, 曾胜强. 2015b. 藏北羌塘盆地上三叠统典型剖面烃源岩地球化学特征研究[J]. 中国地质, 42(4): 1151–1160.
- 丁文龙, 李超, 苏爱国, 何忠华. 2011. 西藏羌塘盆地中生界海相烃源岩综合地球化学剖面研究及有利生烃区预测[J]. 岩石学报, 27(3): 878–896.
- 窦启龙, 陈践发, 薛燕芬, 王杰, 段文标, 郭建军. 2005. 实验室条件下微生物降解原油的地球化学特征研究[J]. 沉积学报, 23(3): 542–547.
- 杜佰伟, 彭清华, 何江林. 2016. 羌塘盆地羌3井索瓦组泥岩生物标志化合物特征及其地质意义[J]. 中国地质, 43(1): 298–305.

- 方立敏, 鲁兵, 刘池阳, 刘忠. 2002. 羌塘盆地中部隆起的演化及其在油气勘探中的意义[J]. 地质论评, 48(3): 279-283.
- 付修根, 王剑, 汪正江, 陈文西. 2007a. 藏北羌塘盆地海相油页岩沉积环境[J]. 新疆石油地质, 28(5): 529-533.
- 付修根, 廖忠礼, 刘建清, 陈文彬, 陈文西. 2007b. 南羌塘盆地扎仁地区中侏罗统布曲组沉积环境特征及其对油气地质条件的控制作用[J]. 中国地质, 34(4): 599-605.
- 付修根, 王剑, 汪正江, 何江林. 2009. 藏北羌塘盆地胜利河油页岩干酪根特征及碳同位素指示意义[J]. 地球学报, 30(5): 643-650.
- 付修根, 王剑, 谭富文, 陈明, 李忠雄, 陈文彬, 冯兴雷. 2015. 藏北羌塘盆地油气地质勘探新进展[J]. 沉积与特提斯地质, 35(1): 16-24.
- 侯读杰, 冯子辉. 2011. 油气地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 168-243.
- 廖永胜. 2005. 高一过成熟气源岩评价的若干问题[J]. 石油勘探与开发, 32(4): 147-152.
- 罗建宁, 谢渊, 王小龙, 朱忠发, 童箴言, 叶和飞, 李永铁. 2003. 羌塘盆地石油地质条件与初步评价[J]. 沉积与特提斯地质, 23(1): 1-15.
- 孟仟祥, 房熲, 徐永昌, 沈平. 2004. 柴达木盆地石炭系烃源岩和煤岩生物标志物特征及其地球化学意义[J]. 沉积学报, 22(4): 729-736.
- 孟元林, 肖丽华, 杨俊生, 王建国, 孙元林. 1999. 风化作用对西宁盆地野外露头有机质性质的影响及校正[J]. 地球化学, 28(1): 42-50.
- 任拥军, 纪友亮, 李瑞雪. 2000. 南祁连盆地石炭系可能烃源岩的甾萜烷地球化学特征及意义[J]. 石油实验地质, 22(4): 341-345.
- 宋春彦, 曹竣峰, 王剑, 谭富文, 付修根, 何江林, 曾胜强, 何利. 2014. 羌塘盆地角木茶卡地区二叠系古油藏的发现及基本特征[J]. 新疆地质, 32(1): 87-91.
- 苏艾国. 1999. 干酪根碳同位素在成熟和风化过程中变化规律初探[J]. 矿物岩石地球化学通报, 18(2): 11-16.
- 谭富文, 王剑, 王小龙, 杜佰伟. 2002. 西藏羌塘盆地——中国油气资源战略选区的首选目标[J]. 沉积与特提斯地质, 22(1): 16-21.
- 汪正江, 王剑, 陈文西, 付修根. 2007. 青藏高原北羌塘盆地胜利河上侏罗统海相油页岩的发现[J]. 地质通报, 26(6): 764-768.
- 王成善, 伊海生, 李勇, 邓斌, 刘登忠, 王国芝, 石和, 李佑国, 马润则, 林金辉. 2001. 西藏羌塘盆地地质演化与油气远景评价[M]. 北京: 地质出版社, 54-232.
- 王成善, 伊海生, 刘池洋, 李亚林, 邹艳荣, 伍新和, 邓斌, 杨兴科. 2004. 西藏羌塘盆地古油藏发现及其意义[J]. 石油与天然气地质, 25(2): 139-143.
- 王春江, 傅家谟, 盛国英, 肖乾华, 李金有, 张亚丽, 朴明植. 2000. 18 α (H)-新藿烷及17 α (H)-重排藿烷类化合物的地球化学属性与应用[J]. 科学通报, 45(13): 1366-1372.
- 王剑, 谭富文, 李亚林, 李永铁, 陈明, 王成善, 郭祖军, 王小龙, 杜佰伟, 朱忠发. 2004. 青藏高原重点沉积盆地油气资源潜力分析[M]. 北京: 地质出版社, 26-31.
- 王剑, 丁俊, 王成善, 谭富文. 2009a. 青藏高原油气资源战略选区调查与评价[M]. 北京: 地质出版社, 208-270.
- 王剑, 付修根, 李忠雄, 吴滔, 何江林. 2009b. 藏北羌塘盆地胜利河—长蛇山油页岩带的发现及其意义[J]. 地质通报, 28(6): 691-695.
- 王剑, 付修根, 李忠雄, 熊松. 2010. 北羌塘盆地油页岩形成环境及其油气地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 30(3): 11-17.
- 王岫岩, 云金表, 罗笃清, 滕玉洪, 林铁锋. 1999. 西藏羌塘盆地动力学演化与油气前景探讨[J]. 石油学报, 20(3): 38-42.
- 文世宣. 1979. 西藏北部地层新资料[J]. 地层学杂志, 3(2): 150-156.
- 伍新和, 王成善, 伊海生, 邹艳荣, 李亚林. 2005. 西藏羌塘盆地烃源岩古油藏带及其油气勘探远景[J]. 石油学报, 26(1): 13-17.
- 伍新和, 张丽, 王成善, 伊海生. 2008. 西藏羌塘盆地中生界海相烃源岩特征[J]. 石油与天然气地质, 29(3): 348-354.
- 夏代祥, 刘世坤. 1997. 西藏自治区岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 38-39.
- 熊永强, 张海祖, 耿安松. 2004. 热演化过程中干酪根碳同位素组成的变化[J]. 石油实验地质, 26(5): 484-487.
- 许怀先, 秦建中. 2004. 羌塘盆地中生界海相烃源层热演化史[J]. 石油勘探与开发, 31(2): 59-63.
- 杨文光, 朱利东, 密文天, 王成善, 李亚林, 黄辉, 武景龙, 杨林, 周小琳. 2011. 西藏羊湖盆地雅西措群烃源岩生物标志物特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 38(6): 633-640.
- 易积正, 邓光辉, 张修富. 1996. 藏北羌塘盆地成油气地质条件探讨[J]. 地球科学, 21(2): 141-146.
- 曾胜强, 王剑, 付修根, 冯兴雷, 孙伟. 2013. 北羌塘盆地长蛇山油页岩剖面烃源岩生烃潜力及沉积环境[J]. 中国地质, 40(6): 1861-1871.
- 张立平, 黄第藩, 廖志勤. 1999. 伽马蜡烷——水体分层的地球化学标志[J]. 沉积学报, 17(1): 136-140.
- 张水昌, 卢松年. 1993. 海洋古细菌分子化石[J]. 地球科学, 18(4): 381-392.
- 赵政璋, 李永铁, 叶和飞, 张昱文. 2000. 青藏高原海相烃源层的油气生成[M]. 北京: 科学出版社, 74-466.