

# 吐鲁番坳陷二叠系烃源岩地球化学 与沉积环境的关系

苗建宇 周立发 邓 昆 韩中原 布占奇

(西北大学大陆动力学教育部重点实验室, 西北大学地质系, 陕西 西安 710069)

**摘要:**二叠系烃源岩是中国西部吐鲁番坳陷重要的潜在生烃层系。以地表剖面暗色泥岩的分析资料为主, 结合部分井下烃源岩样品分析数据, 详细探讨了泥岩的微量元素地球化学特征, 利用不同岩类烃源岩有机碳含量、有机质类型及饱和烃气相色谱等特征对烃源岩的沉积环境进行了分析。研究认为, 吐鲁番坳陷二叠系烃源岩层系沉积时水体的环境为弱还原相—还原相沉积环境。烃源岩有机质中陆源生物占优势, 低等水生生物也有大量的分布。油气为还原环境沉积有机质的转化产物, 坳陷具有良好的成烃潜力。还原程度强、具一定深度水体的沉积相带是原始有机质沉积的良好场所, 沉积有机质能及时沉积、保存下来, 因此, 烃源岩大多有机质丰度高; 反之, 则明显变差。

**关键词:**二叠系; 烃源岩; 沉积环境; 吐鲁番坳陷

**中图分类号:** P618.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2004)04-0424-07

吐鲁番坳陷是吐鲁番—哈密盆地的一级构造单元, 位于盆地的西部, 北依博格达山, 东以了墩隆起与哈密坳陷相隔, 南邻觉罗塔格山, 西端为喀拉乌成山所封闭。该坳陷主要包括台北、托克逊及台南等生烃凹陷, 面积约  $2.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 二叠系—第四系沉积厚度超过 8 000 m(图 1)<sup>[1]</sup>。

油气勘探证实, 吐鲁番坳陷具有较好的含油气远景, 已在中—上三叠统及中—下侏罗统等多套含油气层系获得工业性油气流。二叠系富含有机质的烃源岩应是坳陷油气生成的重要层系<sup>[2]</sup>。

## 1 烃源岩岩性沉积分布

地表露头及井下钻遇地层并参照国际地层新分类方案分析表明<sup>[3-4]</sup>, 吐鲁番坳陷烃源岩主要发育于伊尔希土组(相当于乌拉尔统亚丁斯克阶—空谷阶)、塔尔郎组(相当于瓜德普统罗德阶—卡匹敦阶)及梧桐沟组(相当于乐平统吴家坪—长兴阶), 程度不同地分布于各凹陷内。

### (1) 伊尔希土组

烃源岩以灰黑色泥岩、粉砂质泥岩为主。台北凹陷主要为灰黑色、深灰色页岩、少量深灰色硅质页岩夹粉砂岩、硅质碳酸盐岩及鲕粒碳酸盐岩薄层, 仅在恰勒坎—七角井一带断

续出露, 页岩、碳酸盐岩具水平纹层, 粉砂岩具沙纹交错层理。台南凹陷部分井中钻遇这套地层, 其中艾参 1 井烃源岩厚 241 m, 向东至塔 3 井烃源岩厚度变薄到 193 m, 到南侧的鲁南 1 井烃源岩厚度减小到 85 m, 特别是凹陷北缘的玉东 1 井烃源岩厚度明显变薄, 仅为 37 m。显示本组烃源岩沉积的突出特点是分布范围较小, 厚度变化较大。

### (2) 塔尔郎组

烃源岩主要为灰黑色泥岩及泥灰岩。其中艾维尔沟为黑色泥(页)岩, 厚约 320 m, 桃东沟发育程度相对较好, 以灰黑色粉砂质泥岩、泥(页)岩为主, 厚度约 221 m。照壁山主要为绿灰色—深灰色泥岩、粉砂质泥岩夹薄层状细砂岩、砾岩及少量泥质碳酸盐岩或生物碎屑碳酸盐岩, 推测凹陷深部有一定厚度及分布范围。托克逊凹陷伊 3 井烃源岩沉积厚度为 157 m, 向西至托参 1 井厚度变薄, 仅为 19 m, 向东到盐 1 井烃源岩沉积厚度明显减薄到 58 m, 表明凹陷内塔尔郎组烃源岩沉积厚度变化较大。台南凹陷井下证实了这套烃源岩的存在, 其中艾参 1 井较完整地揭示其厚度达 392 m。本组烃源岩主要具两种沉积特征: ①滨—浅湖相普遍含钙质, 缺乏内部构造, 粉砂岩沙纹交错层理发育, 层面具流水或浪成波痕; ②半深湖—深湖相主要为灰黑色、深灰色页岩及少量深灰色硅

收稿日期: 2004-03-23; 改回日期: 2004-06-26

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司“九五”勘探科技工程项目(970207-33)资助。

作者简介: 苗建宇, 男, 1952 年生, 博士, 副教授, 从事石油地质学专业; E-mail: miaojy@pub.xaonli.com。

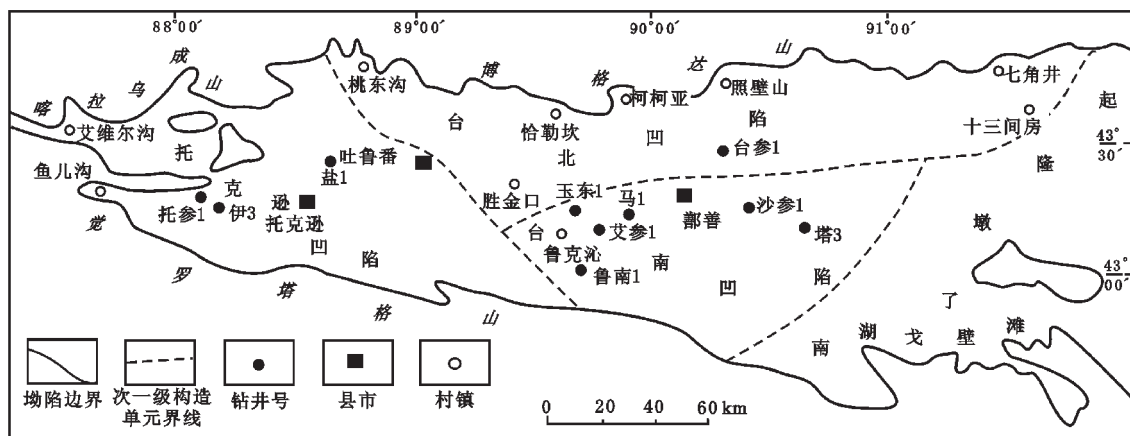


图 1 吐鲁番坳陷构造井位图

Fig.1 Tectonic units and well locatites in the Turpan depression

表 1 吐鲁番坳陷二叠系部分烃源岩微量元素统计

Table 1 Statistics of trace element of part of Permian petroleum

剖面地点	层位	样号	岩性	微量元素 / 10 <sup>-6</sup>																
				Mn	Cr	Co	Cu	Zn	Pb	Ga	Rb	Zr	Nb	Th	Sr	Ba	Sr/ Ba	V	Ni	V/(V+ Ni)
桃东沟	P <sub>2</sub> <sup>f</sup>	TDS-6	碳酸盐岩	159091	10	9	15	29	18	5	44	61	4	<2	1240	418	2.97	87	33	0.73
桃东沟	P <sub>2</sub> <sup>f</sup>	TDS-7	碳酸盐岩	500000	3	8	15	35	14	5	50	42	4	5	173	122	1.42	43	35	0.55
桃东沟	P <sub>2</sub> <sup>f</sup>	TDS-8	碳酸盐岩	204546	<3	8	11	30	16	3	48	39	4	3	363	145	2.50	45	34	0.57
桃东沟	P <sub>2</sub> <sup>f</sup>	TDS-14	碳酸盐岩	212121	<3	9	10	15	21	<2	4	15	2	<2	845	178	4.75	22	39	0.36
桃东沟	P <sub>2</sub> <sup>f</sup>	TDS-3	泥岩	22727	49	15	18	96	18	17	253	125	8	4	89	308	0.29	94	52	0.64
桃东沟	P <sub>2</sub> <sup>f</sup>	TDS-4	泥岩	68182	21	11	20	51	20	6	65	73	5	8	861	286	3.01	93	34	0.73
桃东沟	P <sub>2</sub> <sup>f</sup>	TDS-10	泥岩	15152	38	17	21	38	16	8	43	58	4	7	91	119	0.76	244	18	0.93
桃东沟	P <sub>2</sub> <sup>f</sup>	TDS-16	泥岩	30303	41	14	10	72	16	9	61	134	6	7	119	146	0.82	110	32	0.77
艾参 1	P <sub>3</sub> <sup>w</sup>	IC1-33	泥岩	13200	541										1655	147700	0.01	1066	3600	0.23
艾参 1	P <sub>3</sub> <sup>w</sup>	IC1-34	泥岩	12300	405										2022	49150	0.04	1204	1306	0.48
艾参 1	P <sub>3</sub> <sup>w</sup>	IC1-35	泥岩	11450	301										1498	79500	0.02	1270	899	0.59
艾参 1	P <sub>3</sub> <sup>w</sup>	IC1-37	泥岩	20200	478										3796	54450	0.07	1543	4571	0.25
艾参 1	P <sub>2</sub> <sup>f</sup>	IC1-46	泥岩	8050	195										3322	97550	0.03	1007	2360	0.30
艾参 1	P <sub>2</sub> <sup>f</sup>	IC1-50	泥岩	5600	241										2869	148100	0.02	863	644	0.57
艾参 1	P <sub>2</sub> <sup>f</sup>	IC1-52	泥岩	10450	210										2971	129800	0.02	715	340	0.68
艾参 1	P <sub>2</sub> <sup>f</sup>	IC1-55	泥岩	9000	363										3307	75350	0.04	941	2663	0.26
艾参 1	P <sub>2</sub> <sup>f</sup>	IC1-57	泥岩	13500	198										2552	150600	0.02	331	86	0.79
艾参 1	P <sub>2</sub> <sup>f</sup>	IC1-58	泥岩	9150	166										2453	131100	0.02	713	474	0.60
艾参 1	P <sub>2</sub> <sup>f</sup>	IC1-59	泥岩	8150	254										1962	106700	0.02	1014	4278	0.19
		克拉克值 <sup>[4]</sup>	碳酸盐岩	1100	11	0.1	4	20	9	4	3	19	0.3	1.7	610	10	61	20	20	0.50
		克拉克值 <sup>[5]</sup>	页岩	850	90	19	45	95	20	19	140	160	11	12	300	580	0.52	130	68	0.66

注:桃东沟剖面样品由西北大学大陆动力学教育部重点实验室进行 XRF 分析,艾参 1 剖面样品由中国科学院北京高能物理研究所进行 XRF 分析。

质页岩夹粉砂岩、硅质碳酸盐岩及鲕粒碳酸盐岩薄层,页岩、碳酸盐岩具水平纹层,粉砂岩具沙纹交错层,含分散状黄铁矿、自生钠沸石和丰富的有机碳,粘土矿物主要为蒙脱石、伊—蒙混层和伊利石。

(3) 梧桐沟组

主要为一套灰绿色及深灰色泥岩、砂质泥岩、泥质碳酸盐岩及深灰色泥岩夹绿灰色砂岩及少量泥质碳酸盐岩或生物碎屑碳酸盐岩沉积,区域上由西向东粒度变粗,厚度减薄。

桃东沟为深灰—灰黑色页岩夹绿灰色粉砂岩及细砂岩薄层,黄铁矿含量较高,水平纹层发育。照壁山—七角井等地为绿灰色及深灰色泥岩、粉砂质泥岩夹薄层状细砂岩及少量泥质碳酸盐岩或生物碎屑碳酸盐岩,粉砂质泥岩具水平层理,粉砂岩层面见有浪成波痕,沙纹层理发育。台南凹陷艾参1井、玉东1井及沙参1井都已钻遇这套沉积,但厚度都不到100 m。总体表现出本组沉积环境已有明显变化,即拗陷逐渐趋于消亡。

## 2 烃源岩地球化学

针对吐鲁番拗陷二叠系烃源岩的沉积分布特点,重点选择了盆地西北缘桃东沟地表剖面进行了样品采集和地质剖面研究。所有样品元素地球化学分析在西北大学大陆动力学教育部重点实验室和中国科学院北京高能物理研究所用X荧光光谱法(XRF)完成(表1),样品有机地球化学分析测试在中国石油勘探开发研究院等单位进行(表2)。

### 2.1 亲铁元素(Co、Ni)

亲铁元素丰度值在桃东沟地表烃源岩剖面中含量不一(表1),其中碳酸盐类烃源岩中Co、Ni元素丰度值明显高于同类岩石的克拉克值<sup>[5]</sup>,泥岩类烃源岩具有较低的Co、Ni元素丰度值。井下剖面中艾参1井所在的台南凹陷泥岩类烃源岩中Ni元素丰度值含量明显要高于同类岩石的克拉克值。

### 2.2 亲铜元素(Cu、Zn、Pb、Ga)

研究区桃东沟地表剖面烃源岩亲铜元素总的特点是Cu、Zn、Pb、Ga元素丰度值与同类岩石的克拉克值相比含量高低不等。碳酸盐类烃源岩的Cu、Zn、Pb、Ga元素丰度值相

比较高,泥岩类烃源岩的Cu、Zn、Pb、Ga元素丰度值相比较低,只是相差程度有所不同。

### 2.3 亲石元素(V、Cr、Mn、Rb、Nb、Zr、Th、Sr、Ba)

二叠系烃源岩样品中Mn元素丰度值普遍较高,大部分烃源岩中Mn元素丰度值明显高于同类岩石的克拉克值。碳酸盐类烃源岩的Rb、Zr、Nb、Th元素丰度值高于同类岩石的克拉克值,泥岩类烃源岩Nb、Th元素丰度值多数低于同类岩石的克拉克值。桃东沟地表烃源岩剖面泥岩类烃源岩中V、Cr元素丰度值高低不一,碳酸盐类烃源岩Cr元素丰度值较低,V元素丰度值较高;泥岩类烃源岩中V元素丰度值较低。井下剖面中艾参1井所在的台南凹陷泥岩类烃源岩中V、Cr元素丰度值含量明显要高于同类岩石的克拉克值。不同剖面烃源岩样品中Sr、Ba元素含量变化较大,碳酸盐类烃源岩中元素的Sr/Ba值明显高于泥岩类烃源岩的Sr/Ba值。针对微量元素在不同剖面的含量变化,可看出其变化相当复杂,但局部又有一定的规律。统计表明,各元素在不同剖面含量变化不一,这种含量的变化与不同剖面的物源供应及环境地球化学有关<sup>[6-7]</sup>。

### 2.4 有机碳含量

沉积物中有机碳的含量在一定程度上是原始有机质丰度、沉积水体的深度、沉积物的沉积速率及介质的物理化学条件等沉积环境因素的综合反映<sup>[8-11]</sup>。测试结果统计显示(表2),吐鲁番拗陷碳酸盐岩的有机碳含量最大值为0.56%,最小值仅为0.08%,平均值约为0.36%;泥质碳酸盐岩的有机碳含量分别为3.24%和1.13%,平均为2.19%;泥岩的有机碳含量最高值7.64%,最低值0.40%,平均值为2.12%。其次,具不同

表2 吐鲁番拗陷部分烃源岩有机地球化学参数统计  
Table 2 Statistics of organic geochemical parameters of part of petroleum source rocks in the Turpan depression

序号	拗陷	层位	剖面地点	岩性	有机碳/%		样品数	主峰碳	轻/重烃		Pr/Ph	样品数	
					变化范围	平均值			变化范围	平均值			变化范围
1	台北	P <sub>3w</sub>	桃东沟	泥岩	2.40~4.14	3.27	2	C <sub>17</sub> -C <sub>21</sub>	1.74~2.07	1.91	1.31~1.87	1.59	2
	台北	P <sub>2f</sub>	桃东沟	碳酸盐岩	0.08~0.56	0.36	3	C <sub>23</sub> -C <sub>25</sub>	0.43~0.65	0.52	1.35~1.61	1.49	3
	台北	P <sub>2f</sub>	桃东沟	泥质碳酸盐岩	1.13~3.24	2.19	2	C <sub>17</sub> -C <sub>17</sub>	1.33~1.38	1.34	2.01~2.35	2.18	2
	台北	P <sub>2f</sub>	桃东沟	泥岩	1.24~6.77	4.05	9	C <sub>17</sub> -C <sub>21</sub>	0.73~1.68	1.29	0.74~1.84	1.13	5
	台北	P <sub>2f</sub>	照壁山	泥岩	0.79~1.24	1.02	2	C <sub>18</sub>	0.96	0.96	0.45	0.45	1
	台北	P <sub>1y</sub>	恰勒坎	泥岩	1.15~2.99	2.07	2	C <sub>18</sub>	1.49	1.49	0.57	0.57	1
	台北	P <sub>1y</sub>	照壁山	泥岩	1.34	1.34	1	C <sub>18</sub>	1.13	1.13	0.52	0.52	1
	台北	P <sub>1y</sub>	二塘沟	泥岩	0.60~4.23	1.70	4	C <sub>18</sub>	1.17	1.17	0.81	0.81	1
2	台南	P <sub>3w</sub>	艾参1	泥岩	0.56~0.86	0.45	8						
	台南	P <sub>2f</sub>	艾参1	泥岩	0.40~4.61	1.71	30	C <sub>16</sub> -C <sub>23</sub>	0.18~3.32	1.70	0.27~1.12	0.51	22
	台南	P <sub>2f</sub>	鲁南1	泥岩	1.23~2.87	2.29	5						
	台南	P <sub>1y</sub>	艾参1	泥岩	0.79~1.30	0.95	4	C <sub>16</sub> -C <sub>19</sub>	0.32~0.67	0.50	0.27~0.3	0.29	2
	台南	P <sub>1y</sub>	鲁南1	泥岩	0.45~0.75	0.60	2	C <sub>16</sub> -C <sub>19</sub>	0.18~0.80	0.31	0.81~1.27	0.98	6
3	托克逊	P <sub>2f</sub>	伊3	泥岩	1.33~3.94	2.63	8						
4	托克逊	P <sub>2f</sub>	托参1	泥岩	0.68~2.47	1.59	7						
	托克逊	P <sub>2f</sub>	艾维尔	碳酸盐岩	0.23	0.23	1			3.38	3.38	1	
	托克逊	P <sub>2f</sub>	艾维尔	泥岩	0.66~7.64	3.22	19	C <sub>16</sub> ~C <sub>19</sub>			0.15~2.75	1.51	9

注:序号1样品由中国石油勘探开发研究院中心实验室分析;序号2由吐哈油田勘探开发研究院实验室分析;序号3由华北油田勘探开发研究院实验室分析;序号4由原新星公司华北石油局第三石油普查队实验室分析。

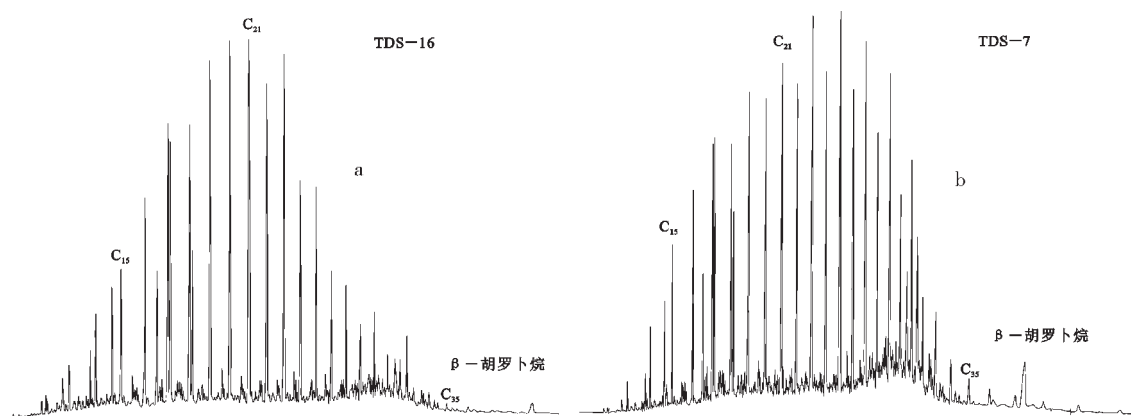


图 2 吐鲁番坳陷二叠系烃源岩饱和烃气相色谱图

Fig.2 Saturated hydrocarbon gas chromatogram of Permian petroleum source rocks in the Turpan depression

颜色的泥岩中有机碳含量有所差别,大部分灰黑色泥、页岩中有机碳含量大于 2%;多数黑灰色泥、页岩中有机碳含量为 1%~2%;灰色—绿灰色泥岩中有机碳含量大多小于 1%。

## 2.5 饱和烃分布

### (1) 正构烷烃组成

吐鲁番坳陷伊尔希土组泥岩类烃源岩岩石抽提物正构烷烃分布较为集中,主峰碳数以  $C_{18}$  单峰型为主,轻重烃比值在 1.13~1.61 之间,平均 1.24,说明当时沉积水体较深。塔尔郎组到梧桐沟组烃源岩泥岩类烃源岩岩石抽提物的正构烷烃主峰碳分布在  $C_{17}$ — $C_{21}$  内,几乎全为单峰型(图 2—a),轻重烃比值除个别样品外,多数都大于 1,平均为 1.27,表明当时水体较深,还原条件较好。夹在大套泥岩中的薄层碳酸盐岩类烃源岩岩石抽提物的正构烷烃主峰碳数有所增高,分布在  $C_{17}$ — $C_{25}$  内,以单峰型为主,轻重烃比值明显偏小,在 0.43~0.65 之间,反映出当时水体明显要浅的多,氧气进入的程度较高,对沉积有机质的生物降解作用较强(图 2—b)。

台南凹陷井下泥岩类烃源岩岩石抽提物中正构烷烃分布主要以单峰型为主,主峰碳大多在  $C_{19}$ — $C_{23}$  范围内,少数样品呈后峰稍占优势的双峰型。轻重烃比值在 0.7%~2.0%之间,多数都大于 1,平均值约为 1.30,反映出沉积物的水体较碳酸盐岩类烃源岩沉积时稍深,有机质物混有一定数量的陆源有机质也说明离岸较近,氧化程度较高。

### (2) 无环类异戊间二烯烷烃

伊尔希土组烃源岩检出的 Pr/Ph 值相对较小,平均约 0.70,反映了烃源岩沉积时还原环境程度较强的沉积特征。从塔尔郎组泥岩烃源岩中检出的 Pr/Ph 值来看,基本具备两个特点:其一是无论泥岩类烃源岩,还是碳酸盐类烃源岩,两者的 Pr/Ph 值差别不大;二是烃源岩的 Pr/Ph 值介于 0.8~2.8 之间的占到 82%以上,<0.8 的为 15%,>2.8 的仅占 3%。大体反映了坳陷在塔尔郎组烃源岩沉积时,大多处于还原环境条件之下。

具体到坳陷内部,各凹陷沉积环境稍有不同。台南凹陷

烃源岩的 Pr/Ph 平均值 0.74,同时在烃源岩中还普遍检出  $\beta$ -胡萝卜素等,共同表现出较强还原环境的沉积特点。台北凹陷烃源岩的 Pr/Ph 值,平均为 1.36,同时在烃源岩中检出了含量相对较高的  $\beta$ -胡萝卜素等类异戊间二烯类化合物。

由此可见,台北凹陷塔尔郎组烃源岩沉积时,也具备一定程度还原环境的沉积条件。梧桐沟组烃源岩的 Pr/Ph 平均值为 1.59,说明沉积环境逐渐向弱氧化环境变化。相比之下,托克逊凹陷烃源岩的 Pr/Ph 值较高,平均为 1.70,个别样品达到 3.38,推测当时的沉积环境的还原程度要逊于台北凹陷和台南凹陷。

## 2.6 有机质类型

通过镜下对干酪根显微组构成仔细观察,发现烃源岩中壳质组多数含量较高,惰质组含量普遍低,腐泥组和镜质组含量互有消长,腐泥组以团块状为主,其次为孢粉及黄色壳屑。在蓝光激发荧光下,腐泥组多呈暗黄色荧光,具有可溶烃渗出。桃东沟中二叠统塔尔郎组烃源岩中壳质组含量在 20%~54%之间,腐泥组含量大部分为 27%~64%,镜质组为 12%~32%,镜鉴结果主要为 II 型干酪根。托克逊凹陷和台南凹陷井下二叠系伊尔希土组烃源岩中壳质组含量在 20%~50%之间,腐泥组含量大部分为 5%~25%,镜质组含量大多为 40%~75%,镜鉴结果主要为 III 型干酪根。此外,台北凹陷上二叠统梧桐沟组有机质类型发育也较差,具腐殖型(III)干酪根的特征。

## 3 烃源岩地球化学与沉积环境的关系

### 3.1 地球化学与有机质数量

湖相沉积中聚集的有机质主要来源于水生生物,其中浮游生物特别是浮游植物中藻类的大量繁殖是沉积有机质的主要来源。从古生物化石鉴定提供的信息来看,生物出现的种类和繁衍程度与沉积水体的含盐度关系较大。

首先,生物与环境进行物质交换,从外界环境吸收物质;

其次,在不同生物体中,微量元素的浓度是不一样的,生物体中元素的含量随营养介质、环境条件、生物体的发育阶段等不同而变化<sup>[12]</sup>。在富含有机质的岩石中较富集的有V、Ni、Co、Cu、Zr和Mn等元素,说明有机质可促进V、Zr、Mn等络合物及胶体溶液的稳定性,保护进行较长距离的迁移、沉积。进一步分析发现,烃源岩中V、Ni、Co、Cu、Zn、Ga和Cr等元素含量较高,特别是泥岩类烃源岩明显高于泥质碳酸盐岩类和碳酸盐岩类烃源岩,显示与岩石中富含有机质有关。

坳陷内二叠系烃源岩的Sr/Ba平均值仅为0.56,属内陆湖盆淡水沉积环境。但不同凹陷Sr/Ba比值有所差别,如桃东沟地剖面碳酸盐岩类烃源岩的Sr/Ba比值,平均为2.91,泥岩类烃源岩的Sr/Ba平均值为1.12,两类烃源岩的Sr/Ba平均值为2.02;艾参1井Sr/Ba平均值为0.037,伊3井Sr/Ba平均值为0.046,显示分隔作用较为明显,各凹陷的Sr/Ba值并不完全一致。

纵向上看,不同组段烃源岩的Sr/Ba比值不同。伊尔希土组烃源岩Sr/Ba比值为0.50,塔尔郎组烃源岩的Sr/Ba比值逐渐升高,到梧桐沟组烃源岩的Sr/Ba比值又趋于降低到0.026,代表了湖泊—沼泽相的淡水沉积环境。此外,不同岩性烃源岩的Sr/Ba比值也有差别,如桃东沟剖面中碳酸盐岩类烃源岩的Sr/Ba比值明显高于泥岩类烃源岩的Sr/Ba比值(表1)。

二叠系沉积时各凹陷沉积水体的Sr/Ba比值不同,元素含量有所差别,使得沉积过程中元素迁移和富集规律不同,对不同凹陷水体的水介质条件(盐度)起着一定的控制作用。在淡水、微咸水和正常咸水环境,水生生物都可大量发育;超咸水环境不利于生物发育,只剩下少数喜盐生物;盐度更高,只发育某些绿藻植物。盐度周期性变化的环境,可造成不同生物群落的周期性繁殖和死亡,提供丰富的有机质沉积。显然,较高盐度环境会影响到生物的生长与发育,实际上也就控制了沉积物原始有机质的产率<sup>[13-14]</sup>,间接说明岩石中微量元素特征与有机质含量有着密切的关系。

### 3.2 地球化学与有机质类型

据坳陷部分地表剖面和井下烃源岩样品干酪根有机元素O/C、H/C原子比统计,反映的样品点大部分落在Ⅲ型干酪根界线两侧,只有部分样品点落在Ⅱ型干酪根区内,说明坳陷二叠系烃源岩有机质类型总体偏差。台北凹陷桃东沟剖面表现的塔尔郎组烃源岩有机质类型明显好于其他地区,除少部分样品点外,大部分落在Ⅱ型区范围内。台南凹陷井下塔尔郎组及艾维尔沟地表剖面塔尔郎组烃源岩干酪根样品点显示有机质类型较差,应该说落在Ⅲ型区界线附近的样品主要是由这两部分干酪根样品所组成的。

如前所述,各凹陷烃源岩有机质类型较好层段沉积时的水体深度和氧化还原条件多处于强还原—弱氧化环境范围内。有利的有机质类型主要沉积在湖泊水体具pH值较高, Eh值较低的碱性还原条件下,只是不同坳陷、不同地区乃至

不同时期演化程度有所差别而已。

### 3.3 地球化学与油源对比

部分测试数据显示,二叠系烃源岩 $\gamma$ 蜡烷/C<sub>30</sub>藿烷的比值在0.006 4~0.323 6范围内,C<sub>30</sub>重排藿烷/C<sub>30</sub>藿烷的比值则在0.064 0~0.124 7之间。规则甾烷中C<sub>27</sub>规则甾烷较低,C<sub>28</sub>、C<sub>29</sub>规则甾烷较高。规则甾烷中C<sub>29</sub>约为40%~75%,C<sub>28</sub>为10%~40%,C<sub>27</sub>含量范围在5%~30%之间,类型比较单一,表现出有机质中陆源生物占优势,低等水生生物也有大量的分布,具混合生源的特征<sup>[15]</sup>。

台南凹陷艾参1井原油分析结果中饱和烃38.44%,芳烃25.94%,非烃25.31%,沥青质13.44%,原油碳同位素( $\delta^{13}C$ )为-29.9‰。桃东沟剖面油苗的族组成为饱和烃30.9%,芳烃24.44%,非烃19.81%,沥青质24.85%,碳同位素( $\delta^{13}C$ )为-28.6‰。尽管两者分布的地点相差很远,但两者的可溶性物质组成具有一定程度的相似性。台南凹陷明确为二叠系烃源岩生成的原油,主峰碳多以nC<sub>27</sub>、nC<sub>29</sub>等高碳组分为主,表现出原油降解、轻质组分大量散失的特点,这些都与后期环境改造有关;而托参1井原油主峰碳为nC<sub>21</sub>,反映出轻质组分含量较高,nC<sub>21</sub>/nC<sub>22+</sub>为3.44,属还原环境沉积有机质的成烃特征。

原油中C<sub>30</sub>藿烷和C<sub>29</sub>降藿烷均相对含量较高,生物标志化合物组合中相对富含 $\gamma$ -蜡烷、 $\beta$ -胡萝卜烷及三环萜类,与二叠系源岩的生物标记化合物组成极为类似,油-岩对比性较好。如C<sub>29</sub>aaaS/(S+R),两者基本接近。甾烷相对含量中,桃东沟油苗C<sub>27</sub>规则甾烷含量较高,而玉1井以C<sub>29</sub>规则甾烷相对富集为特点,这反映出两个凹陷当时的有机质来源不尽相同。

### 3.4 地球化学与沉积环境

众多研究表明<sup>[16-20]</sup>,在富含有机质的岩石中常富集的有V、Ni、Co、Cu、Zn和Cr等元素。其中微量元素V/(V+Ni)可作为沉积水体环境氧化还原条件的反映。高V/(V+Ni)值(0.84~0.89)反映水体分层,底层水体中出现H<sub>2</sub>S的厌氧环境;中等比值(0.54~0.82)为水体分层不强的厌氧环境;低值时(0.46~0.60)为水体分层弱的贫氧环境。此外, $\beta$ -胡萝卜烷也常存在于低硫缺氧的湖泊沉积环境中<sup>[15]</sup>。

从分析的微量元素结果(表1)得出,盆地西北缘桃东沟剖面微量元素V/(V+Ni)中,碳酸盐岩类烃源岩微量元素V/(V+Ni)平均值为0.55,泥岩类烃源岩V/(V+Ni)平均值为0.77。两类烃源岩的V/(V+Ni)平均值都表明,二叠系沉积时沉积水体环境属水体分层弱—不强的厌氧环境,显示出不同岩类烃源岩沉积环境的差异。托克逊凹陷泥岩类烃源岩微量元素V/(V+Ni)为0.55,台南凹陷泥岩类烃源岩微量元素V/(V+Ni)为0.46,显示出不同凹陷沉积环境的差异。即总体为还原环境,只是不同凹陷、不同岩类烃源岩沉积时的氧化还原条件有所差异而已<sup>[21]</sup>。

结合岩相沉积特征对比,发现碳酸盐岩类烃源岩主要发育

在水中陆源碎屑物供应相对较差的时期。从盆地纵向剖面发育特点来看,大多层段较薄,沉积持续时间较短,多呈薄层状夹层分布在厚度较大的碎屑岩沉积剖面中,表明其沉积物补偿速度较慢。烃源岩地球化学反映的还原环境条件相对较差,沉积有机质暴露时间相对要长,因此,保存条件相对要差<sup>[22]</sup>。

沉积于半深湖—深湖相的泥岩类烃源岩颜色较深,多为深灰—黑色;沉积于浅湖—水下三角洲相的泥岩类烃源岩颜色较浅,大多为灰色—深灰色;沉积于河流相—水上三角洲相的泥岩类烃源岩颜色明显变浅,大多为灰色—灰绿色。所以,对碎屑成因的泥岩类烃源岩来说,沉积水动力条件弱,烃源岩地球化学反映的还原环境程度相对较强,有机质能被及时埋藏。因此,烃源岩大多具有有机质丰度高的形成特点<sup>[23-24]</sup>。

## 5 结 论

(1) 吐鲁番坳陷二叠系烃源岩层系主要集中在塔尔郎组 and 梧桐沟组,平面上主要分布于托克逊、台南和台北凹陷北部;伊尔希土组仅在艾参 1 井等少数井中钻遇,地表露头也只在台北凹陷西北缘剖面有所揭示。

(2) 烃源岩中微量元素特征与有机质数量有着密切的关系;部分微量元素含量不同,烃源岩沉积的水介质条件不同,生物的种类、生长与发育程度不同,沉积物原始有机质的类型、产率也就不同。

(3) 油源对比分析显示,烃源岩有机质类型表现出陆源生物占优势,低等水生生物也有大量的分布,具混合生源的特征。油气为还原环境沉积有机质的转化产物,坳陷具有良好的成烃潜力,只是不同凹陷的有机质来源不尽相同。

(4) 微量元素在不同剖面含量变化不一,两类烃源岩的 V/(V+Ni) 平均值都表明,二叠系沉积时沉积水体环境属水体分层弱—不强的厌氧环境,沉积环境总体为还原环境,但不同岩类烃源岩沉积时的氧化—还原条件有所差异。

(5) 地球化学与沉积环境分析证实,凡是有机质沉积时沉积水体的还原程度强,沉积环境为半深湖—深湖相时,有机质能被及时埋藏的泥岩类烃源岩大多具有有机质丰度高的特征;碳酸盐岩类烃源岩处于氧化程度较高的的沉积条件下,大部分具有有机质丰度偏低的形成特点。

冯乔博士提供了部分测试分析数据,在此深表感谢。

## 参考文献(References):

[1] 新疆油气区石油地质志编写组编.中国石油地质志(卷 15)[M].北京:石油工业出版社,1993.15~25.  
Compilation Group for Records of Petroleum Geology in Xinjiang. The China Records of Petroleum Geology (No.15) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993.15~25(in Chinese).

[2] 苗建宇.吐鲁番坳陷二叠系—三叠系烃源岩研究[J].西北大学学报(自然科学版),1996,26(3):267~270.  
Miao Jianyu. Research on Permian—Triassic hydrocarbon source rock in Tulpan depression[J]. Journal of Northwest University(Natu-

ral Science Edition), 1996, 26(3): 267~270 (in Chinese with English abstract).

[3] 金玉珩,王向东,尚庆华,等.国际二叠纪年代地层划分新方案[J].地质论评,1998,44(5):478~488.  
Jin Yugan, Wang Xiangdong, Shang Qinghua, et al. A new Permian chronostratigraphic scheme [J]. Geological Review, 1998, 44(5): 478~488 (in Chinese with English abstract).

[4] 金玉珩,尚庆华,曹长群.二叠纪地层研究述评[J].地层学杂志,2000,24(2):99~108.  
Jin Yugan, Shang Qinghua, Cao Changqun. A review of Permian stratigraphy [J]. Journal of Stratigraphy, 2000, 24(2): 99~108 (in Chinese with English abstract).

[5] 黎彤,倪守斌.地球和地壳的化学元素丰度[M].北京:地质出版社,1990.44~51.  
Li Tong, Ni Shoubin. Chemical Element Abundance in Earth and Earth's Crust [M]. Beijing: Geological Publishing House. 1990.44~51 (in Chinese).

[6] 刘英俊,曹励明.元素地球化学导论[M].北京:地质出版社,1987.9~25.  
Liu Yingjun, Cao Liming. Introduction to Element geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.9~25 (in Chinese).

[7] James G Crichton, Kent C Condie. Trace elements as source indicators in cratonic sediments: A case study from the early Proterozoic Libby Creek Group, Southeastern Wyoming [J]. Journal of Geology, 1993, 101: 319~332.

[8] 程克明,王铁冠,钟宁宇,等.烃源岩地球化学[M].北京:科学出版社,1995.17~40.  
Cheng Keming, Wang Tieguan, Zhong Ningning, et al. Geochemistry of Hydrocarbon Source rocks [M]. Beijing: Science Press, 1995.17~40 (in Chinese).

[9] 杨明慧,夏文臣,张兵山,等.非海相盆地准层序级别的有机相变化及其地质意义[J].沉积学报,2000,18(2):297~301.  
Yang Minghui, Xia Wenchen, Zhang Bingshan, et al. Parasequence-scale organic facies variations and its significance in non-marine basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(2): 297~301 (in Chinese with English abstract).

[10] Parris J T. Paleogeography of Corg-rich rocks and the preservation versus production controversy [J]. AAPG Studies Geology, 1995, 40: 1~20.

[11] 刘传联,徐金鲤,汪品先.藻类勃发—湖相油源岩形成的一种重要机制[J].地质论评,2001,47(2):207~210.  
Liu Chuanlian, Xu Jinli, Wang Pinxian. Algal blooms: the primary mechanism in the formation of lacustrine petroleum source rocks [J]. Geological Review, 2001, 47(2): 207~210 (in Chinese with English abstract).

[12] 戎秋涛,翁焕新.环境地球化学[M].北京:地质出版社,1990.154~186.  
Rong Qiutao, Weng Huanxin. Environment Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990.154~186 (in Chinese).

[13] 赵振华.微量元素地球化学原理[M].北京:科学出版社,1997.183~204.  
Zhao Zhenhua. Principle of Trace Element Geochemistry [M]. Bei-

- jing: Science Press, 1997. 183~204(in Chinese).
- [14] Carroll A R, Bohacs K M. Lake-type controls on petroleum source rock potential in nonmarine basins [J]. AAPG Bull, 2001, 85(6): 1033~1053.
- [15] K.E. 彼得斯, J.M. 莫尔多万. 生物标记化合物指南. 姜乃煌, 等译 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1995, 79~149.
- Peters K E, Moldowan J M. The biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments [M]. in: Jiang Naihuang, et al. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995. 79~149 (in Chinese).
- [16] 邓宏文, 钱凯. 沉积地球化学与环境分析 [M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993. 95~104.
- Deng Hongwen, Qian Kai. Sedimentary geochemistry and environment analysis [M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1993. 95~104 (in Chinese).
- [17] Hatch J R, Leventhal J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U.S.A [J]. Chemical Geology, 1992, 99: 65~82.
- [18] 万晓樵, 刘文灿, 李虎, 等. 白垩系黑色页岩与海水含氧量变化——以西藏南部为例 [J]. 中国地质, 2003, 30(1): 36~47.
- Wan Xiaojiao, Liu Wencan, Li Hu, et al. Crataceous black shale and dissolved oxygen content — A case study in southern Tibet [J]. Geology in China, 2003, 30(1): 36~47 (in Chinese with English abstract).
- [19] 赵一阳, 鄯明才, 李安春, 等. 中国近海沿岸泥的地球化学特征及其指示意义 [J]. 中国地质, 2002, 29(2): 181~185.
- Zhao Yiyang, Yan Mingcai, Li Anchun, et al. Geochemistry of muds along the coast of China and their significance [J]. Geology in China, 2002, 29(2): 181~185 (in Chinese with English abstract).
- [20] Wingnall P B, Hallam A. Anoxia as a cause of the Permian / Triassic mass extinction: facies evidence from northern Italy and the western United States [J]. Paleogeography, Paleoclimate, Paleocology, 1992, 93: 21~46.
- [21] Henger D, Sethi P A. Geochemical and sedimentological investigation of high-resolution environmental changes within the late Pennsylvanian (Missourian) endora core black shale of the mid-continent region, U.S.A. Shale and Mudstone [M]. I. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1998. 271~293.
- [22] 夏新宇, 曾凡刚, 洪峰. 中国陆表海碳酸盐岩有机质的生烃潜力 [J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(4): 287~292.
- Xia Xinyu, Zeng Fangang, Hong Feng. Hydrocarbon-generating potential of organic matter in epicontinental sea carbonate rocks in China [J]. Oil and Gas Geology, 2001, 22(4): 287~292 (in Chinese with English abstract).
- [23] 刘春莲, 杨建林, Hans J R, et al. 影响湖相沉积岩中有机碳分布的主要因素 [J]. 沉积学报, 2001, 19(1): 113~115.
- Liu Chunlian, Yang Jianlin, Hans J. R, et al. Factors influencing organic distribution in lacustrine sediments [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(1): 113~115 (in Chinese with English abstract).
- [24] Katz B J. Factors controlling the development of lacustrine petroleum source rocks - an update [J]. AAPG Studies Geology, 1995, 40: 61~79.

## Relationship between the depositional environment and geochemistry of Permian hydrocarbon source rocks in the Turpan depression

MIAO Jian-yu, ZHOU Li-fa, DENG Kong, HAN Zhong-yuan, BU Zhan-qi

(Key Laboratory of Continental Dynamics of the Ministry of Education, Northwest University,

Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

**Abstract:** Permian hydrocarbon source rocks are an important potential hydrocarbon-generating sequence in the Turpan depression, northwestern China. Mainly based on the analytic data of dark mudstone on the outcrop sections, combined with the geochemical data from core samples of hydrocarbon source rocks, the trace geochemistry of mudstone is discussed in detail and the sedimentary environment of the source rocks is analysed by using the organic carbon content, organic matter types and saturated hydrocarbon chromatogram parameters of the source rocks. The studies demonstrate that the depositional environment was the weak reducing-reducing one. The terrigenous organisms predominate in the organic matter of the source rocks, and lower aquatic organisms are also present in large quantity. The hydrocarbon is the product of conversion of organic matter deposited in the reducing environment. The depression has a high genetic potential. The sedimentary zones with a strong reducing power and fairly deep water bodies are favorable sites for deposition of primary organic matter, where deposited organic matter can be buried and preserved in time. Therefore most hydrocarbon source rocks contain abundant organic matter and vice versa.

**Key words:** Permian; source rock; depositional environment; Turpan depression