

# 准噶尔盆地东南缘芦草沟组油页岩元素地球化学特征及沉积环境指示意义

彭雪峰, 汪立今, 姜丽萍

新疆大学 地质与勘查工程学院, 乌鲁木齐 830047

**摘要:** 本文通过 XRF 和 ICP-MS 测试方法对油页岩样品进行测试, 根据常量元素和微量元素特征、组分含量及某些元素的比值, 探讨了研究区油页岩样品的地球化学特征, 进一步阐述了其沉积环境的指示意义。结果表明, P 和 B 元素强烈富集, 相当硼及古盐度值都表明属于半咸水沉积环境, B/Ga、Sr/Ba 值也说明受到海水影响或间歇性受海水影响, 沉积环境以半咸水湖泊为主;  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ 、 $V/(V+Ni)$ 、 $V/Ni$ 、 $Cu/Zn$ 、 $Ni/Co$  和 U/Th 值及 Ni 的含量说明沉积环境为咸化的弱还原—还原环境; Mn/Fe 和 Mn/Ti 值也较小, 反映近岸的沉积环境; Sr/Cu 表明主力油页岩形成时期处于温湿—干热气候。总体上反映出, 研究区油页岩的沉积介质环境的显著特征是半咸水状态的弱还原—还原环境。

**关键词:** 准噶尔盆地东南缘; 油页岩; 元素地球化学; 沉积环境

中图分类号: P595 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2012)02-0121-07

## Geochemical Characteristics of the Lucaogou Formation Oil Shale in the Southeastern Margin of the Junggar Basin and Its Environmental Implications

PENG Xue-feng, WANG Li-jin, JIANG Li-ping

Geology and Perambulation Engineer Institute of Xinjiang University, Xinjiang, Urumchi 830047, China

**Abstract:** On the basis of XRF and ICP-MS analyses for the Lucaogou Formation oil shale samples, this paper investigated geochemical characteristics, including, features of major and trace elements, elements contents and several element-ratios, of the oil shale samples and discussed their implications on rebuilding sedimentary environment history. The results showed that P and B are significantly enriched, together with the value of paleosalinity, indicate a brackish water sedimentary environment; the ratios of B/Ga and Sr/Ba show that the sedimentary environment was affected or intermittently affected by sea water; the ratios of  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ ,  $V/(V+Ni)$ ,  $V/Ni$ ,  $Cu/Zn$ ,  $Ni/Co$  and Ni illustrate that sedimentary environment is a salinized weak reducing to reducing environment; the ratios of Mn/Fe and Mn/Ti are small reflecting a near shore sedimentary environment; Sr/Cu value shows that the climate of the main formation period was warm/humid-dry/hot. In summary, the sedimentary environment of oil shale forming can be characterized as brackish water weak reducing-reducing sedimentary environment.

**Key words:** southeastern margin of the Junggar Basin; oil shale; element geochemical; sedimentary environments

沉积岩成岩过程中其所含元素的迁移、聚集与分布规律可用来判断、恢复沉积古环境<sup>[1]</sup>。页岩沉积的主要机理是絮凝作用<sup>[2]</sup>。絮凝作用与水介质的化学、生物化学作用密切相关, 因此某些用来判别砂、砾岩沉积环境的物性标志对泥质岩来说成因意义不明显, 无机地球化学标志却在泥质岩成因类型分析中有重要作用<sup>[3]</sup>。元素的迁移富集规律主要取决于元素本身的物理化学性质但又受地质环境的影

响。沉积盆地具有基本的地球化学环境, 对元素的分布起控制作用, 且表现出元素分布的规律性<sup>[4]</sup>。因此可通过研究元素含量及其比值来识别沉积环境。许多学者<sup>[5~9]</sup>通过分析沉积物的元素地球化学特征来研究沉积环境, 取得了良好效果。

## 1 地质背景

准噶尔盆地东南缘构造上处于东、西天山过渡

收稿日期: 2011-05-27 收到, 06-20 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40862004); 新疆重点学科矿产普查及勘探建设项目资助; 新疆高校科学研究重点项目(XJEDV2007I09)联合资助

第一作者简介: 彭雪峰(1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 环境矿物学及地质学. E-mail: pxf0056@163.com.

通讯作者简介: 汪立今, 男, 教授. E-mail: lw668w@sina.com.

带内,位于北天山晚古生代造山带中部,北隔准噶尔盆地与西伯利亚板块相望,南与吐-哈盆地和觉罗塔格石炭系火山岩带相邻,西界在乌鲁木齐市一带,东界位于巴里坤县西侧<sup>[10]</sup>。受多期变形构造的改造作用影响,该区构造较为复杂,地层褶皱极为强烈,形成等斜或不等斜褶皱<sup>[11]</sup>。大型逆冲断层作用导致二叠系油页岩伴随博格达山系的形成而出露地表,成为规模巨大的二叠纪油页岩分布带,东西长约

125 km,南北宽约 9~15 km<sup>[12]</sup>(图 1)。芦苇沟组发育在下二叠统上茆茆槽子群中,岩性多达 42 种,主要为黑色至褐灰色页岩、油页岩、粉砂岩夹白云岩、灰岩和少量砂岩、火山凝灰岩,含鱼化石、两栖类及叶肢介、双壳类等<sup>[13~15]</sup>。油页岩发育为本组典型特征。该区油页岩发育于塔里木板块与准噶尔板块缝合后的内陆湖泊环境<sup>[16]</sup>。

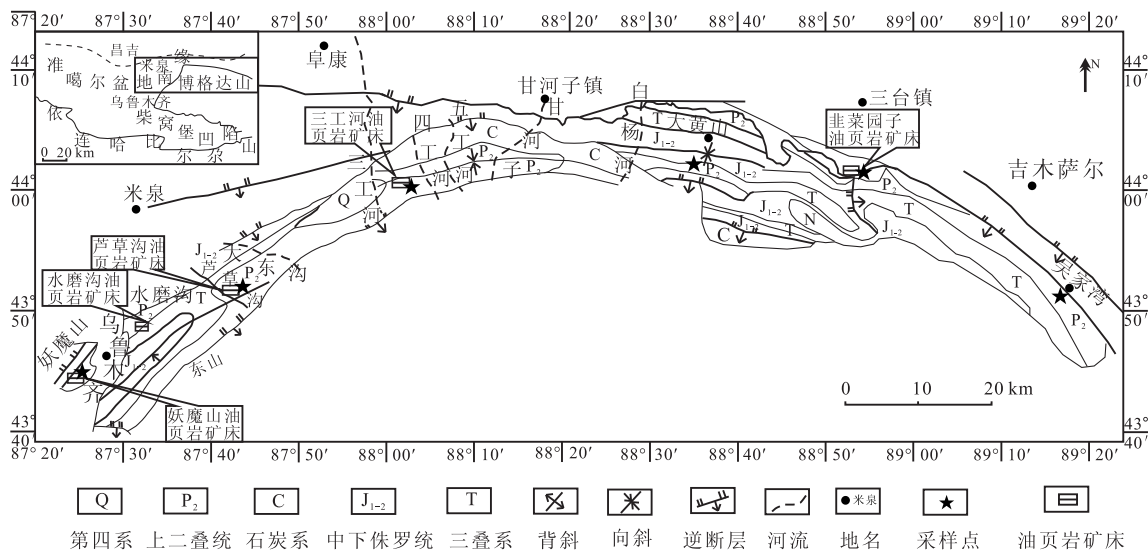


Fig. 1 Geological sketch map of the southeastern margin of the Junggar Basin and sample locations (modified from ref. [17])

## 2 样品采集及测试

本文对准噶尔盆地东南缘油页岩矿带中几个典型矿区钻孔和露头进行了仔细观察。分别在 6 个矿区的芦苇沟组采集了具有代表性的油页岩样品,采样位置见图 1。在每个矿区中筛选一个典型样品,进行预处理,再对样品进行常量元素和微量元素分

析。样品测试在新疆维吾尔自治区矿产实验研究所岩矿检测室完成。常量元素分析使用美国 ARL 公司制造的 X 荧光光谱仪(规格型号为 XRF-8680)测试,其 RD<2%;微量元素测试使用 X 系列电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS),检测依据 ZBF-3.67-2005,误差小于 5%;重复样分析结果吻合,样品分析具有较高精度。测试结果见表 1、表 2。

表 1 准噶尔盆地东南缘油页岩常量元素含量

Table 1 Major elements Contents in the oil shale samples collected at the southeastern margin of the Junggar Basin  $w_b$  (%)

样号	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	FeO	LOI
J-1	8.94	46.27	1.62	2.15	0.64	5.67	0.41	1.62	0.11	0.35	0.95	32.55
J-2	6.45	42.19	2.41	1.24	0.38	6.01	1.42	0.72	0.15	0.51	2.59	39.07
J-3	5.78	46.01	1.79	1.46	0.35	3.12	0.45	0.71	0.19	0.69	1.73	37.55
J-4	11.27	53.74	4.39	1.62	0.61	3.29	1.32	1.48	0.07	0.82	1.75	19.93
J-5	9.36	58.47	3.19	2.71	0.49	4.71	0.59	0.91	0.12	0.59	0.98	18.75
J-6	8.18	52.69	6.31	2.45	0.71	2.18	4.29	1.18	0.08	0.38	3.11	20.18
Ave.	8.33	49.9	3.29	1.97	0.53	4.16	1.41	1.1	0.12	0.56	1.85	28.01
页岩	15.4	58.1	3.11	3.24	0.65	4.02	2.44	1.3	0.119	0.17	2.45	—
地壳	15.80	49.50	6.40	1.88	0.70	6.60	4.40	3.20	0.14	0.20	—	—
黑色页岩	12.27	56.35	0.27	5.02	0.65	7.08	1.56	0.66	0.19	0.31	—	4.90
炭质页岩	15.00	58.03	0.26	3.60	0.64	3.67	1.64	3.52	0.09	0.16	—	4.30

注:页岩数据引自文献[12],地壳数据引自文献[18],黑色页岩和炭质页岩数据引自文献[19];分析者:新疆维吾尔自治区矿产实验研究所岩矿检测室

表 2 准噶尔盆地东南缘油页岩微量元素含量

Table 2 Trace elements contents of the oil shale samples in the southeastern margin of the Junggar Basin  $w_p(\%)/10^{-6}$

样号	Cr	Co	Cu	Pb	Zn	Ga	Cd	V	Ni	Sr	Ba	B	Th	U
J-1	54	14.6	37	22	103	22	0.1	115	36	137	247	95	5.03	2.24
J-2	54	21.8	62	18	97	22	0.2	130	41	121	126	50	1.29	2.07
J-3	59	22.6	58	21	117	22	0.2	137	42	429	302	163	7.19	3.84
J-4	51	20.2	52	18	108	19	0.2	120	37	156	239	78.4	4.28	3.03
J-5	74	17.4	46	18	101	21	0.2	129	38	159	203	98	2.98	3.17
J-6	52	20.6	53	18	112	20	0.2	127	35	171	238	183	4.02	2.89
Ave.	57.33	19.53	51.33	19.17	106.33	21	0.18	126.33	38.17	195.5	225.83	112.9	4.13	2.87
页岩	100	19	—	20	80	—	—	130	68	300	580	10	12	3.7
地壳	119	25	24	12.6	73	16	75	128	51	325	390	18	5.6	1.42

注:页岩数据引自文献[19],地壳数据引自文献[18];分析者:新疆维吾尔自治区矿产实验研究所岩矿检测室

### 3 测试结果分析与讨论

#### 3.1 元素地球化学特征

3.1.1 常量元素地球化学特征 研究区油页岩的常量元素与页岩中该类元素含量相比(图 2),与普通页岩相似。其中,Ca、Fe 和 Mn 元素与页岩中含量相当,其余几种元素的含量低于普通页岩中的含量。Al、K 和 Mg 元素相当于页岩含量的二分之一,Al 元素在砂里的含量是从陆相往远海增高,可以说明离海较远。Ti 和 Na 元素也低于页岩的含量。只有 P 元素显著富集,均值是普通页岩中的 3.3 倍,富磷的原因很可能是由于当时盆地周围火山喷发后的火山灰所致,这与前人鉴定的该区油页岩中凝灰质成分的结果也相一致。从而可以推知,P 元素为藻类的生长提供了良好的客观环境,大量藻类的生长又消耗了水中大量的氧气,很容易引起水体形成缺氧的还原环境,有利于有机质的保存。

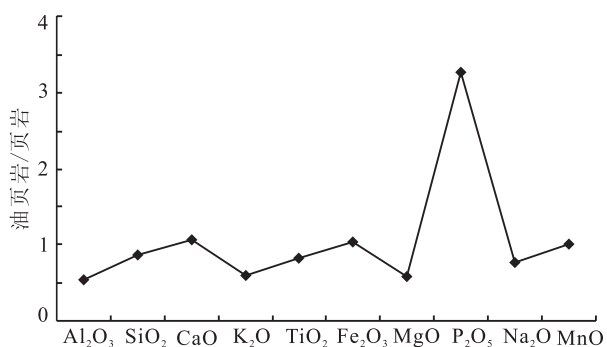


图 2 研究区油页岩常量元素与页岩常量元素含量之比

Fig. 2 The ratios of the major elements contents in oil shale and shale of the study area

将油页岩的常量元素与地壳、碳质页岩和黑色页岩的化学成分对比发现(图 3),油页岩中 Ca 的含量是碳质页岩和黑色页岩的 12 倍多,这可能与油页岩中含大量白云岩有关。P 的含量是地壳丰度值的 2.8 倍,黑色页岩的 1.8 倍多,是碳质页岩的 3.5

倍,与前述结论一致。除了 P 元素,Si、K 和 Mn 元素与地壳丰度值相当,其余元素均低于地壳化学成分。与黑色页岩相比,Na 和 P 元素稍高于油页岩,其余元素(除 Ca)都低于黑色页岩。油页岩中 Fe 和 Mn 元素稍高于炭质页岩,其它化学成分(除 Ca 和 P)也均低于炭质页岩。油页岩的烧失量相对其它地区的油页岩为中等(28.01%),但都高于碳质页岩和黑色页岩,是碳质页岩的 6.5 倍,是黑色页岩的 5.7 倍左右。

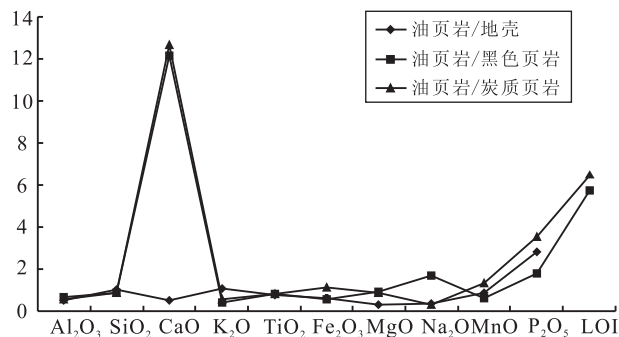


图 3 准噶尔盆地东南缘油页岩与炭质页岩和黑色页岩常量元素比值

Fig. 3 The ratios of major elements of oil shale, carbonaceous shale and black shale in the southeastern margin of the Junggar Basin

3.1.2 微量元素地球化学特征 由表 2 可知,与页岩中各种微量元素的平均含量(克拉克值)相比(图 4),油页岩中强烈富集 B 元素,是页岩中 B 元素克拉克值的 11 倍,是地壳丰度值的 6 倍多,Pb、Zn 和 U 元素含量高于页岩中的克拉克值,其余元素含量均低于页岩的克拉克值,Zn 元素含量高于地壳丰度值,Co、Pb、V 元素含量与地壳丰度值相当,其余元素低于地壳元素丰度值。

3.1.3 元素分类 对元素进行分类可以对元素的共生组合进行分析,地质中有效的方法为聚类分析

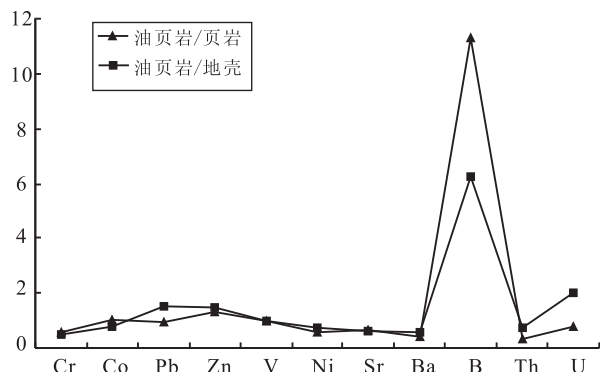


图4 准噶尔盆地东南缘油页岩微量元素含量与页岩和地壳元素丰度值的比值

Fig. 4 Trace elements contents of oil shale in the southeastern margin of the Junggar Basin compared with those of shale and crustal abundances

法。微量元素对环境的指示较敏锐,本文用 SPSS 软件对研究区的微量元素进行了 R 型聚类分析。由于指标变量的量纲不同或数量级相差很大,在分析时先用 Z-Scores 方法进行数据标准化。通过几种方法对微量元素进行聚类分析,结果表明,Ward Method 方法的聚类效果较好,并且采用欧几里德距离平方和 (Squared Euclidean distance) 对数据进行聚类得到图 5。

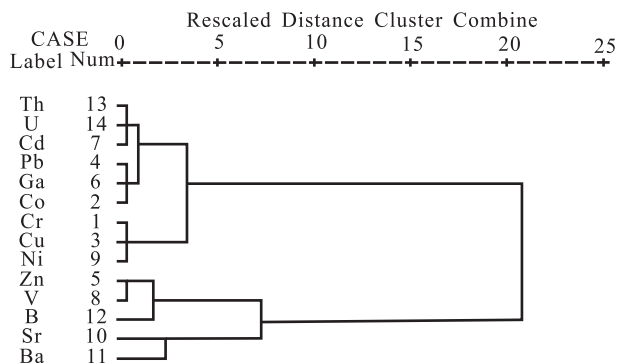


图5 准噶尔盆地东南缘油页岩微量元素聚类谱系图

Fig. 5 Clustering dendrogram of trace elements of the oil shale in the southeastern margin of the Junggar Basin

聚类分析的结果表明,所测微量元素可分为两组,Th、U、Cd、Pb、Ga、Co、Cr、Cu 和 Ni 为 I 组,属于陆源风化产物随河流进入湖盆沉积的外源元素; Zn、V、B、Ba 和 Sr 为 II 组,为反映当时湖泊沉积环境的内源元素,属湖盆内化学作用的产物。即 I 组元素为和沉积环境和母源性质的密切相关的元素,II 组元素为与沉积水体的化学性质密切相关的元素。

### 3.2 常量元素沉积环境指示意义

3.2.1 铁、锰、钛元素 铁沉积具有明显的规律性,用来反映环境的地球化学条件。一般认为,

$Fe^{2+}/Fe^{3+} \gg 1$  为还原环境,  $Fe^{2+}/Fe^{3+} > 1$  为弱还原环境,  $Fe^{2+}/Fe^{3+} = 1$  为中性环境,  $Fe^{2+}/Fe^{3+} < 1$  为弱氧化环境,  $Fe^{2+}/Fe^{3+} \ll 1$  为氧化环境<sup>[4]</sup>。分析结果见表 3,由于  $Fe^{2+}$  被氧化成  $Fe^{3+}$  的影响,要准确的判定油页岩的沉积环境有一定的难度,但还是得出油页岩的沉积相以弱氧化—弱还原相为主。铁在搬运过程中极易受氧化而沉淀,钛化合物的稳定性相对也较弱,锰稳定性较好,可发生长距离的迁移。因而 Mn 和 Ti 的含量变化可以用来反映沉积物在盆地中搬运的相对距离和水深, Mn/Fe、Mn/Ti 值可作为离岸距离的标志,其值常随距陆地距离的增加而增大<sup>[20]</sup>。研究区油页岩 Mn/Fe 值非常低, Mn/Ti 值也较小,反映近岸的沉积环境。

表3 准噶尔盆地东南缘油页岩  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ 、Mn/Fe、Mn/Ti 值

Table 3  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ , Mn/Fe, Mn/Ti values of oil shale in the southeastern margin of the Junggar Basin

样号	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	$Fe^{2+}/Fe^{3+}$	Mn/Fe	Mn/Ti
J-1	0.95	5.67	0.11	0.64	0.16755	0.0194	0.1719
J-2	2.59	6.01	0.15	0.38	0.43095	0.0250	0.3947
J-3	1.73	3.12	0.19	0.35	0.55449	0.0609	0.5429
J-4	1.75	3.29	0.07	0.61	0.53191	0.0213	0.1148
J-5	0.98	4.71	0.12	0.49	0.20807	0.0255	0.2449
J-6	3.11	2.18	0.08	0.71	1.42661	0.0367	0.1127

3.2.2 磷元素 磷(P)是对古气候变化反应较为灵敏的元素之一。P 元素含量相对高表示干旱炎热条件下的高盐度环境<sup>[21]</sup>。研究区油页岩的磷含量相对比较高,这与前面所得的结果相一致。

### 3.3 微量元素沉积环境指示意义

常量元素在岩石中的含量较高,但对环境变化的敏感性较弱,微量元素能更好的指示沉积环境。

3.3.1 硼、镓元素 水体中的粘土沉积物对硼具有一定的吸附能力,自然界水体中 B 的含量是盐度的线性函数,沉积物中 B 含量可作为其形成时水介质的古盐度标志<sup>[22]</sup>。许多学者都提出了区分海相、陆相和海陆过渡相的 B 含量指标。Degens 等<sup>[22]</sup>提出区分海相和淡水沉积的硼含量指标:海相粘土(或泥岩)硼含量大于  $100$  或  $120 \times 10^{-6}$ ,淡水沉积硼含量一般小于  $80 \times 10^{-6}$ ,而海陆过渡相则在  $80 \sim 120 \times 10^{-6}$  之间。研究区有三个样品在半咸水范畴内,一个属于淡水沉积环境,两个在海相沉积环境中,可能是因为当时该区局部受海水影响而造成了各个区域的水体盐度变化。

还有一些学者将 B 含量转化为“相当硼含量”,认为“相当硼含量”在  $(300 \sim 400) \times 10^{-6}$  为正常海水

环境,  $(200\sim 300)\times 10^{-6}$  为半咸水环境, 小于  $200\times 10^{-6}$  则为淡水沉积<sup>[23]</sup>。其求解可分为两步: 首先计算校正硼含量 (校正硼 = 实测硼含量  $\times 8.5 / K_2O\%$ ), 然后根据  $K_2O$  及校正硼数值再计算相当硼的散射曲线查得相当硼的数值<sup>[24]</sup>。为方便计算, 用公式: 相当硼 =  $11.8 \times \text{校正硼} / 1.70 \times (11.8 - K_2O\%)$ <sup>[25]</sup>。

研究区相当硼的值较高 (表 4), 最高值接近  $700\times 10^{-6}$ 。结合研究区发现的鱼类化石、页岩的微纹层和砂岩中的浪成构造等, 判断准噶尔盆地东南缘芦草沟组油页岩应为湖相产出, 又根据 50% 样品 (图 6) 所代表的岩石属于半咸水环境沉积, 这种定性判识结果说明油页岩沉积环境以半咸水湖泊为主, 但受到海水的影响或间歇性受海水影响。

表 4 准噶尔盆地东南缘油页岩古盐度表  
Table 4 Paleosalinity table for oil shale in the southeastern margin of the Junggar Basin

样号	实测硼含量 ( $10^{-6}$ )	氧化钾 (%)	校正硼 ( $10^{-6}$ )	相当硼 ( $10^{-6}$ )	古盐度 (%)
J-1	95	2.15	375.58	251.57	17.54
J-2	50	1.24	342.74	251.23	17.50
J-3	163	1.46	948.97	681.09	59.50
J-4	78.4	1.62	411.36	290.67	21.36
J-5	98	2.71	307.38	193.94	11.91
J-6	183	2.45	634.90	412.05	33.21

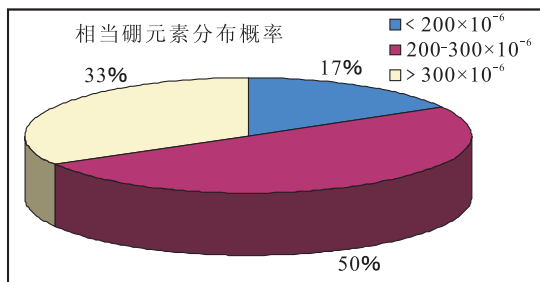


图 6 准噶尔盆地东南缘油页岩硼元素分布概率图  
Fig. 6 Distribution of Boron in the southeastern margin of the Junggar Basin

根据亚当斯的水体盐度的公式:  $y = 0.0977x - 7.043$  (式中:  $y$  为水体的盐度,  $x$  为相当硼)<sup>[12]</sup>, 计算出研究区油页岩的古盐度值如表 4。按照孙镇城等<sup>[26]</sup>的标准, 准噶尔盆地东南缘油页岩属于半咸水沉积环境。

一般淡水沉积物比海相沉积物中镓含量较高,  $B/Ga < 1.5$  为淡水相,  $5 < B/Ga < 6$  为近岸海相,  $B/Ga > 7$  为海相<sup>[4]</sup>。研究区  $B/Ga$  值 (表 5) 有两个大于 7, 其余都在 1.5 至 5 之间, 表明沉积环境既不

是淡水沉积, 也不是海相沉积, 结合上述分析, 应属于高盐度的湖相沉积, 只是受海水影响。

表 5 准噶尔盆地东南缘油页岩各元素比值  
Table 5 The elemental ratios of oil shale in the southeastern margin of the Junggar Basin

$\frac{B}{Ga}$	$\frac{Sr}{Ba}$	$\frac{Sr}{Cu}$	$\frac{Cu}{Zn}$	$\frac{V}{Ni}$	$\frac{V}{(V+Ni)}$	$\frac{Ni}{Co}$	$\frac{U}{Th}$
4.32	0.55	3.70	0.36	3.19	0.76	2.47	0.45
2.27	0.96	1.95	0.64	3.17	0.76	1.88	1.60
7.41	1.42	7.40	0.50	3.26	0.77	1.86	0.53
4.13	0.65	3.00	0.48	3.24	0.76	1.83	0.71
4.67	0.78	3.46	0.46	3.39	0.77	2.18	1.06
9.15	0.72	3.23	0.47	3.63	0.78	1.70	0.72

3.3.2 锶、钡、铜、锌元素 锶与钡的化学性质较相似, 并且  $Sr/Ba$  值对古盐度的变化非常敏感, 还可以用作古盐度标志<sup>[1]</sup>, 值越大反映古盐度越高。淡水沉积物的锶钡比值通常小于 1, 海相沉积物则大于 1<sup>[27]</sup>。研究区  $Sr/Ba$  值大部分小于 1, 只有一个值大于 1, 说明当时沉积环境主要是陆相沉积, 但受到海水的影响, 与前面的结果十分吻合。

$Cu/Zn$  值也可作为判断沉积环境的氧化还原条件的标志,  $Cu/Zn$  值高表示还原条件, 低值代表氧化条件<sup>[4]</sup>。从表 5 中可以明显的看出  $Cu/Zn$  值较高, 说明沉积环境为弱还原—还原环境。

古气候的变化也会影响沉积盆地中有机质的形成和分布。通常  $Sr/Cu$  值为 1.3~5.0 指示温湿气候, 大于 5.0 则指示干热气候<sup>[28]</sup>。研究区  $Sr/Cu$  值最小为 1.95, 最高可达 7.4, 其余在 3~4 之间, 表明主力油页岩形成时期处于温湿—干热气候。先是湿润气候为大量植物生长提供了适宜环境, 随着气候转为干燥, 导致水体盐度增加, 产生水体分层, 形成还原环境, 有机质得以保存, 有利于油页岩的形成。

3.3.3 镍、钒、钴元素 镍、钒为两种铁族元素, 化学性质较活泼<sup>[29]</sup>。一些国外学者<sup>[30,31]</sup>提出  $V/(V+Ni)$  可作为古缺氧环境判识标志,  $V/(V+Ni)$  值在 0.84~0.89 之间为水体分层的厌氧环境, 0.54~0.82 之间为水体分层不强的厌氧环境, 0.46~0.60 之间为水体分层弱的贫氧环境<sup>[32]</sup>。 $V/Ni$  常用来作为海陆相的区分标志, 也可作为水体氧化还原作用的指示剂, 随着还原程度的增强而增大。高的  $V/Ni$  值可能同时是高盐度和强还原程度的反应<sup>[33]</sup>。根据国内外资料, 认为海水中  $Ni$  的含量大于  $40\times 10^{-6}$ , 而淡水中一般不高于  $30\times 10^{-6}$ 。从表 5 可以看出, 所有样品的  $V/(V+Ni)$  值处于 0.76~0.78 之间, 显示了还原性较强的沉积环境。 $V/Ni$  值均



大于1,显示出咸化的还原环境。Ni的含量有4个在30~40,另外两个大于40,表明研究区不应为海相沉积,而是受海水影响的陆相咸化环境。

同样,Ni/Co值也可以作为恢复水体氧化条件的地球化学指标<sup>[30]</sup>。Ni/Co高值反映还原条件,研究区Ni/Co值在1.70~2.47之间,为还原环境。

3.3.4 钍、铀元素 铀元素在自然界水体中因易与还原剂作用生成铀黑或其他物质吸附而沉淀;钍的络合物在弱碱性溶液中易水解,变成氧化物或氢氧化物沉淀<sup>[34]</sup>。Jones等<sup>[30]</sup>提出 $U/Th < 0.75$ 指示氧化环境,在0.75~1.25之间为贫氧环境, $U/Th > 1.25$ 为厌氧环境。研究区油页岩的 $U/Th$ 值较小,最低值为0.45,最高值为1.60,按Jones等的标准,其指示的意义与其他参数存在一定差别,只有1个值大于1.25。其余都小于0.75。

## 4 结 论

研究区油页岩的沉积介质环境显著特征是半咸水状态的弱还原—还原环境。

(1) P元素显著富集,表示干旱炎热条件下的高盐度环境。磷为藻类的大量生长提供了良好的客观环境,大量藻类的生长又消耗了水中大量的氧气,很容易引起水体形成缺氧的还原环境,有利于有机质的保存。

(2) 研究区强烈富集B元素,相当硼的值较高,水体盐度较高,加之古盐度值都表明准噶尔盆地东南缘油页岩的沉积环境属于半咸水沉积环境。

(3) B/Ga、Sr/Ba值表明受到海水的影响或间歇性受海水影响,沉积环境以半咸水湖泊为主。

(4) Sr/Cu表明主力油页岩形成时期处于温湿—干热气候。先是湿润气候为大量植物生长提供了适宜环境,随着气候转为干燥,导致水体盐度增加,产生水体分层,形成还原环境,有机质得以保存,有利于油页岩的形成。

(5)  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ 、 $V/(V+Ni)$ 、 $V/Ni$ 、 $Cu/Zn$ 和Ni/Co值及Ni的含量说明沉积环境为咸化的弱还原—还原环境。 $Mn/Fe$ 和 $Mn/Ti$ 值也较小,反映近岸的沉积环境。

## 参考文献 (References):

[1] 李敏, 颀永平. 不同沉积地球化学特征对沉积环境的指示意义[J]. 内蒙古石油化工, 2010, 16: 41—43.  
Li Min, Xie Yongping. Sedimentary geochemistry characteristics and its sedimentary environment significance[J]. Inner Mongolia Petrochemical, 2010, 16: 41—43. (in Chinese with

English abstract)

- [2] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 252.  
Jiang Zaixing. Sedimentology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 252. (in Chinese)
- [3] 中国科学院地球化学研究所. 高等地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 378.  
Institute of Geochemistry. Chinese Academy of Sciences[M]. Beijing: Science Press, 2000: 378. (in Chinese)
- [4] 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: 4—28, 97.  
Deng Hongwen, Qian Kai. Depositional geochemical and environment analysis[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1993: 4—28, 97. (in Chinese)
- [5] 冯兴雷, 付修根, 谭富文, 陈文彬. 北羌塘盆地沃若山剖面上三叠统土门格拉组沉积岩地球化学特征与构造背景分析[J]. 现代地质, 2010, 24(5): 910—918.  
Feng Xinglei, Fu Xiugen, Tan Fuwen, Chen Wenbin. Geochemical characteristics and tectonic Significance of upper Triassic Tumengela formation in Woruo mountains, north Qiangtang basin[J]. Geoscience, 2010, 24(5): 910—918. (in Chinese with English abstract)
- [6] 夏凯生, 何多兴, 谢世友, 袁道先. 长江三峡地区一级阶地堆积物地球化学特征——以江津油溪剖面为例[J]. 山地学报, 2010, 28(5): 519—525.  
Xia Kaisheng, He Duoxing, Xie Shiyu, Yuan Daoxian. Geochemical characteristics of the peleoenvironment of sediment of the first terrace of the Three Gorge of the Changjiang—A case study for the Youxing profile of Jiangjin[J]. Journal of Mountain Science, 2010, 28(5): 519—525. (in Chinese with English abstract)
- [7] 韩宗珠, 衣伟虹, 李安龙, 李德平. 巢北地区黄龙组岩石学、元素地球化学特征及意义[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(9): 123—127.  
Han Zongzhu, Yi Weihong, Li Anlong, Li Deping. Petrology, element geochemistry characteristics and significance of Huanglong formation, Chaobei Area[J]. Periodical of Ocean University of China, 2010, 40(9): 123—127. (in Chinese with English abstract)
- [8] 汪凯明, 罗顺社. 燕山地区中元古界高于庄组和杨庄组地球化学特征及环境意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009, 28(4): 356—364.  
Wang Kaiming, Luo Shunshu. Geochemical characteristics and environmental significance of Gaoyuzhuang and Yangzhuang formations in Yanshan region[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2009, 28(4): 356—364. (in Chinese with English abstract)
- [9] 邱海鸥, 孙文, 汤志勇, 张克信, 宋虎跃. 西藏吉隆盆地沃马剖面元素地球化学特征及环境指示意义[J]. 地球科学, 2010, 35(5): 789—802.  
Qiu Haiou, Sun Wen, Tang Zhiyong, Zhang Kexin, Song Huyue. Geochemical characteristics of the Oma Section in the Tibetan Gyirong Basin and its implications on environment change[J]. Earth Science Journal of China University of Geo-

- sciences, 2010, 35(5): 789–802. (in Chinese with English abstract)
- [10] 汪新伟, 汪新文, 马永生. 新疆博格达山晚中生代以来的差异剥露史[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1507–1517.  
Wang Xinwei, Wang Xinwen, Ma Yongsheng. Differential exhumation history of Bogeda mountain, Xinjiang, northwestern China since the Late Mesozoic[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(11): 1507–1517. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王东营. 博格达山北麓二叠系芦草沟组油页岩地质特征与沉积成矿作用研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2008.  
Wang Dongying. Study on the oil shale geology and deposition for mineralization of Permian lucaogou formation in the northern bogda mountain[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2008. (in Chinese)
- [12] 李倩倩. 博格达山北麓二叠系芦草沟组油页岩地球化学特征研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2009.  
Li Qianqian. Study on the oil shale geochemistry of Permian lucaogou formation in the northern bogda mountain[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009. (in Chinese)
- [13] 李松, 汤达祯, 陶树. 博格达山北麓阜康区油页岩岩体特征[J]. 洁净煤技术, 2010, 16(1): 43–46.  
Li Song, Tang Dazhen, Tao Shu. The orebody characteristics of the western Fukang oil shale in the northern piedmont of Bogeda mountain[J]. Clean coal technology, 2010, 16(1): 43–46. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王东营, 汤达祯, 苟明福, 王烽, 陶树, 高冠峰. 准噶尔南缘阜康地区芦草沟组油页岩地质特征[J]. 中国石油勘探, 2007, 6: 18–22.  
Wang Dongying, Tang Dazhen, Gou Mingfu, Wang Feng, Tao Shu, Gao Guanfeng. Oil shale geology of Lucaogou formation in Fukang area on southern margin of Junggar Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2007, 6: 18–22. (in Chinese with English abstract)
- [15] 白云来. 准噶尔盆地东南缘油页岩的开发前景[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(4): 462–465.  
Bai Yunlai. Prospects for development of oil shale deposits in southeastern margin of Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(4): 462–465. (in Chinese with English abstract)
- [16] 卢进才, 李玉宏, 魏仙样, 姜亭. 西北地区油页岩形成条件及找矿方向[J]. 西北地质, 2006, 39(4): 57–63.  
Lu Jincai, Li Yuhong, Wei Xianyang, Jiang Ting. Formation and exploration target of oil shale in northwestern China [J]. Northwestern Geology, 2006, 39(4): 57–63. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李成博, 郭巍, 宋玉勤, 杜江峰. 新疆博格达山北麓油页岩成因类型及有利区预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(6): 949–953.  
Li Chengbo, Guo Wei, Song Yuqin, Du Jiangfeng. The genetic type of the oil shale at the northern foot of Bogeda mountain, Xinjiang and prediction for favorable Areas [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36(6): 949–953. (in Chinese with English abstract)
- [18] 韩吟文, 马振东. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 46–47.  
Han Yinwen, Ma Zhendong. Geochemistry [M]. Beijing: Geology Publishing House, 2003: 46–47. (in Chinese)
- [19] 迟清华, 鄢明才. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 1–45.  
Chi Qinghua, Yan Mingcai. Applied geochemistry element abundance data handbook [M]. Beijing: Geology Publishing House, 2007: 1–45. (in Chinese)
- [20] 郭彦如. 银额盆地查干断陷闭流湖盆层序的控制因素与形成机理[J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 295–299.  
Guo Yanru. Controls and formation mechanism of the sequences in the Chagan fault-Depressed stagnant lacustrine depression, Yin'e basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(2): 295–299. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王东营, 许浩, 李婧婧, 陶树, 周传祯, 高冠峰. 博格达山北麓大黄山地区芦草沟组油页岩地球化学特征与沉积环境分析[J]. 内蒙古石油化工, 2008, 2: 62–65.  
Wang Dongyin, Xu Hao, Li Jinqing, Tao Shu, Zhou Chuanwei, Gao Guanfeng. Analysis on the oil shale geochemical characteristics and sedimentary environments of Lucaogou Formation in Dahuangshan area [J]. Inner Mongolia Petrochemical, 2008, 2: 62–65. (in Chinese with English abstract)
- [22] Degens E T, Williams E G, Keith M L. Environmental studies of carboniferous sediments part I: Geochemical criteria for different marine from freshwater shales [J]. AAPG, 1957, 41: 2427–2455.
- [23] 同济大学海洋地质系. 海、陆相地层辨认标志[M]. 北京: 科学出版社, 1976: 32–57.  
Department of Marine Geology, Tongji University. Marine. Continental facies identify signs of formation [M]. Beijing: Science Press, 1976: 32–57. (in Chinese)
- [24] Walker C T. Evaluation of boron as a paleosalinity indicator and its application to offshore prospects [J]. AAPG Bull, 1968, 52: 751–766.
- [25] 张厚福, 方朝亮, 高先志. 石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 86–95.  
Zhang Houfu, Fang Chaoliang, Gao Xianzhi. Petroleum geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999: 86–95. (in Chinese)
- [26] 孙镇城, 彭立才. 中国新生代咸化湖泊沉积环境与油气生成[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 125–128.  
Sun Zhencheng, Peng Licai. The Cenozoic Brackish lake sedimentary environment and oil generation in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 125–128. (in Chinese)
- [27] 南京大学地质系. 地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 357–358.  
Department of Geology, Nanjing University. Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1984: 357–358. (in Chinese)

- [M]. Lanzhou: Lanzhou University press, 1994: 1—130. (in Chinese)
- [4] 甘肃地质局. 1:20 万努尔盖公社幅地质调查报告[R]. 1976. Gansu Geological Bureau. Reports on regional geological surveys of 1:200000 Nurgai scale maps [R]. 1976. (in Chinese)
- [5] 内蒙古地质矿产局. 内蒙古区域地质志[A]. 中华人民共和国地质矿产部专报——区域地质[M](第 25 号). 北京: 地质出版社, 1991: 1—663. Inner Mongolia Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional geology of Inner Mongolia [A]. The People's Republic of China Ministry of Geology and Mineral Resources Special Report-regional geology (No. 25) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 1—663. (in Chinese)
- [6] 赖新荣. 内蒙古阿拉善右旗铁矿及其地质环境研究[D]. 上海: 中国科学院上海冶金研究所, 2000. Lai Xinrong. Geological significance of Kaxiutata iron deposit in right banner of Alxa in Inner Mongolia [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, 2000. (in Chinese with English abstract)
- [7] 黎彤. 化学元素的地球丰度[J]. 地球化学, 1976(3): 167—174. Li Tong. Chemical element abundances in the earth and its major shells[J]. *Geochemica*, 1976(3): 167—174. (in Chinese with English abstract)
- [8] 冶金工业部地质研究所. 中国斑岩铜矿[M]. 北京: 科学出版社, 1984. Institute of Geology, Ministry of Metallurgical Industry. Porphyry copper deposit in China [M]. Beijing: Science Press, 1984. (in Chinese)
- [9] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes[J]. *Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond.*, 1989, 42: 313—345.
- [10] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25: 956—983.
- [11] Rittmann A. Note to contribution by V. Gottini on the "Serial character of the volcanic rocks of Pantelleria" [J]. *Bull. Volcanol.*, 1970, 33: 979—981.
- [12] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geol. Soc. Am. Bull.* 1989, 101: 635—643.
- [13] Mzniar P D, Piccoli P M. 花岗岩类的构造环境判别[J]. *国外地质*, 1992, 1: 12—23. Mzniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Foreign Geology*, 1992, 1: 12—23. (in Chinese)

## (上接第 127 页)

- [28] 陈会军, 刘招君, 柳蓉, 郭巍, 肖国平, 吴彦斌, 付占荣, 史冀忠, 胡晓峰, 孟庆涛. 银额盆地下白垩统巴音戈壁组油页岩特征及古环境[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2009, 39(4): 669—675. Chen Huijun, Liu Zhaojun, Liu Rong, Guo Wei, Xiao Guoping, Wu Yanbin, Fu Zhanrong, Shi Jizhong, Hu Xiaofeng, Meng Qingtao. Characteristic of oil shale and Paleoenvironment of the Bayingebi Formation in the Lower Cretaceous in Yin'e Basin[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2009, 39(4): 669—675. (in Chinese with English abstract)
- [29] 曾英, 倪师军, 张成江. 钒的生物效应及其环境地球化学行为[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(6): 472—476. Zeng Ying, Ni Shijun, Zhang Chengjiang. Biological effect and environmental geochemical behavior of vanadium[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19(6): 472—476. (in Chinese with English abstract)
- [30] Jones B, Manning D A C. Comparison of geological indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 1994, 111: 111—129.
- [31] 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, USA. [J]. *Chemical Geology*, 1992, 99(1): 65—82.
- [32] Finkelman R B. Trace element in coal[J]. *Biological Trace Element Research*, 1999, 67(3): 197—204.
- [33] 王争鸣. 缺氧沉积环境的地球化学标志[J]. *甘肃地质学报*, 2003, 12(2): 55—58. Wang Zhengming. Geochemical indicators for diagnosing anoxic sedimentary environment [J]. *Acta Geologica Gansu*, 2003, 12(2): 55—58. (in Chinese with English abstract)
- [34] 刘英俊, 曹励明. 元素地球化学导论[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 57—97. Liu Yingjun, Cao Liming. Introduction to geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 57—97. (in Chinese)