

# 准噶尔盆地阜康凹陷芦草沟组 高有机碳页岩发育的古环境

石 军<sup>1,2</sup>, 邹艳荣<sup>1</sup>, 余 江<sup>3</sup>, 刘家靖<sup>3</sup>

(1.中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640;

2.中国科学院大学, 北京 100049;

3.兰州大学地质科学与矿产资源学院, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**准噶尔盆地是我国重要的大型含油气盆地,阜康凹陷位于准噶尔盆地东南缘,博格达山北麓,属于准噶尔盆地东部的次级凹陷。选取准噶尔盆地阜康凹陷四工河附近二叠系芦草沟组作为目标层位,探讨其有机质富集情况及古环境特征。总有机碳(TOC)分析表明,剖面上整体有机质含量介于3.67%~16.0%之间,平均值为8.50%,总体有机质含量高。微量元素在地质历史变迁过程中,物理化学条件在一定的平衡之后稳定存在,其相对含量大小的背后蕴含着古沉积环境信息。研究区的古环境,包括古盐度、古气候、古氧化还原条件、古水深、古生产力特征,经主微量元素含量及比值分析,结果显示为贫氧一次富氧、半干旱—温湿气候、水动力弱的淡水—半咸水陆相深湖湖盆沉积环境。高有机碳页岩主要是初始生产力较高造成的,古环境对有机质的富集具有积极的作用。

**关键词:**阜康凹陷;芦草沟组;古环境;淡水—半咸水沉积

**中图分类号:**TE121.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1926(2018)08-1138-13

**引用格式:**Shi Jun, Zou Yanrong, Yu Jiang, *et al.* Paleoenvironment of organic-rich shale from the Lucaogou Formation in the Fukang Sag, Junggar Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(8): 1138-1150. [石军, 邹艳荣, 余江, 等. 准噶尔盆地阜康凹陷芦草沟组高有机碳页岩发育的古环境[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(8): 1138-1150.]

## 0 引言

页岩是一种沉积岩,具有薄页状或薄片层状的页理,主要是由黏土沉积物在一定的压力和温度条件下形成的岩石,成分复杂,混杂有石英、长石的碎屑以及其他化学物质。准噶尔盆地阜康凹陷的芦草沟组(P<sub>2</sub>l)岩性主要为黑色至褐灰色的页岩、油页岩、粉砂质白云岩、白云质灰岩和少量砂岩,含有鱼、两栖类、叶肢介及双壳类等化石,地层厚度为50~1 000m<sup>[1]</sup>。由于其在页岩油气资源开发研究中的价值,无论是从构造特征、沉积环境、层序地层学方面,还是从烃源岩评价、孔隙特征及吸附特点等方面

前人<sup>[2-4]</sup>都进行过较详细的研究。

据前人<sup>[5,6]</sup>研究,芦草沟组为晚二叠世温暖气候条件下的湖相沉积。芦草沟组是准噶尔盆地重要的生烃层位,目前针对准噶尔盆地芦草沟组的研究,主要分为2个方面:一是沉积环境;二是烃源岩特征。通过对岩心、测井和钻井等资料的分析研究,多认为芦草沟组为湖相沉积,油页岩主要发育在半深湖—深湖相环境中<sup>[7,8]</sup>。博格达山北麓芦草沟组发育于裂谷型陆相湖盆,沉积介质环境显著特征是深湖—半深湖的还原和弱还原环境、咸水—半咸水状态、火山活动造就富营养条件<sup>[1,9]</sup>,吉木萨尔凹陷呈现“多种物源,混合沉积”,广泛发育典型的咸化湖

收稿日期:2018-02-12;修回日期:2018-06-28.

基金项目:中国科学院大学生创新实践训练计划(编号:201716500061);国家自然科学基金创新研究群体项目(编号:41621062)联合资助。

作者简介:石军(1995-),男,新疆鄯善人,硕士研究生,主要从事油气地球化学研究.E-mail:shijun@gig.ac.cn.

通信作者:邹艳荣(1959-),男,黑龙江双鸭山人,研究员,博士,博士生导师,主要从事油气地球化学研究.E-mail:zouyr@gig.ac.cn.

相混合沉积<sup>[10]</sup>,同样的层位在相近的不同地区呈现出差异。然而,阜康凹陷芦草沟组的元素地球化学特征鲜有研究,目前已发表资料不多,本文着重应用元素地球化学特征进行分析,以期还原研究区的古环境,进一步了解研究区油页岩发育成因机制。

### 1 研究区概况

准噶尔盆地是我国重要的大型含油气盆地<sup>[11,12]</sup>。中国陆上和海域油气盆地在全球四大构造域中均有分布,准噶尔盆地是陆上盆地中除松辽盆地以外唯一归属欧亚构造域的沉积盆地<sup>[13]</sup>。准

噶尔盆地经历过多期构造演化,前寒武纪结晶基底与海西褶皱基底的双层基底结构,成盆后接受二叠纪至今的盖层沉积<sup>[14]</sup>。阜康凹陷位于准噶尔盆地东南缘,博格达山北麓,属于准噶尔盆地东部的次级凹陷,为准东地区地层发育最全、烃源岩最多、构造变动最小的一个凹陷。目前,针对阜康凹陷的研究多以其侏罗系为主<sup>[15,16]</sup>。

采样点位于准噶尔盆地东南缘阜康凹陷中部,位于四工河附近(图1)。选取油页岩集中的26m厚层段作为油页岩的采样目标层位(图2)。

准噶尔盆地二叠系主要为半深湖相—深湖相沉

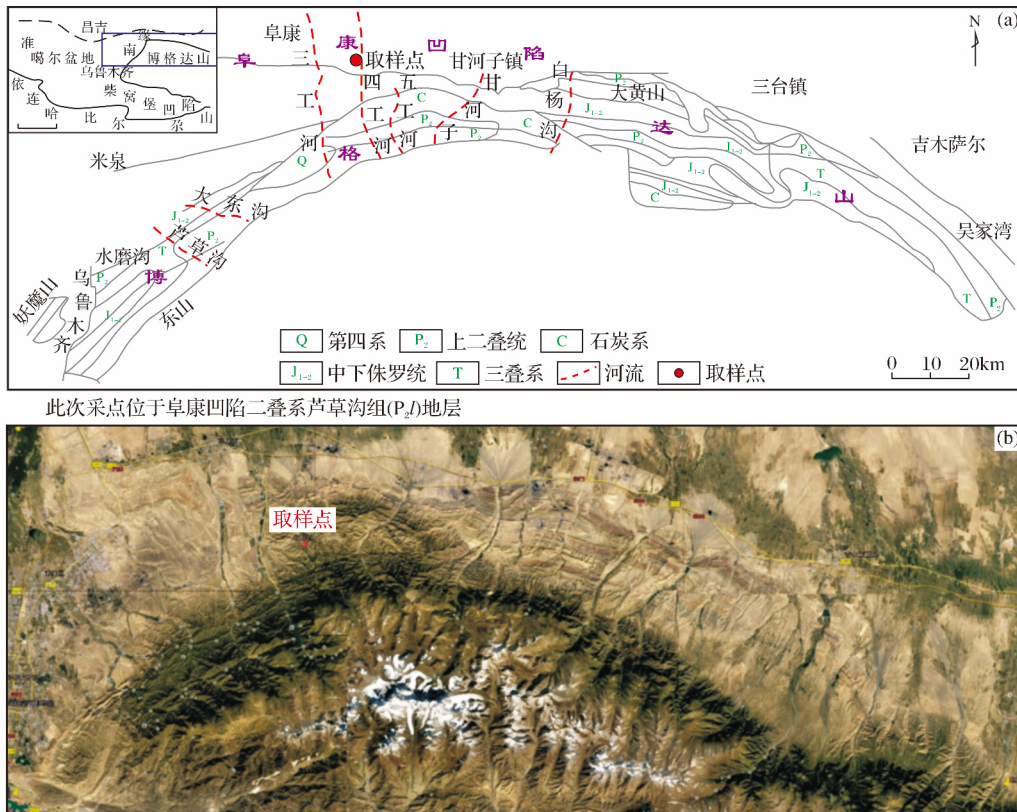


图1 研究区区域地质简图(a)<sup>[7]</sup>及其遥感影像(b)

Fig.1 Sketch geological map showing location of the study area(a)<sup>[7]</sup> and the remote image(b)

积<sup>[17]</sup>,二叠系芦草沟组(P<sub>2</sub>l)岩性单一,以暗色泥岩、油页岩为主,夹薄层砂岩和白云岩,地层总厚度大约为600m。王越等<sup>[18]</sup>在研究准噶尔盆地南缘芦草沟组时,根据岩性特征将其自下而上分为一段、二段及三段:一段发育灰色砾岩、含砾粗砂岩夹深灰色泥岩,二段以灰色砾岩、灰岩和泥页岩为主,三段主要发育泥页岩夹薄层灰岩。

彭雪峰等<sup>[7]</sup>在研究准噶尔盆地东南缘二叠系时,综合研究钻井、测井、露头、岩心等资料并在前人研究的基础上,将二叠系芦草沟组分为一个完整的

三级层序,并在该层序内部划分出4个体系域,即低位体系域(LST)、水进体系域(TST)、高位体系域(HST)和水退体系域(RST),从而划分为一段、二段、三段及四段,建立了准噶尔盆地东南缘二叠系芦草沟组以四级层序为单元的等时层序地层对比格架。本研究中,阜康凹陷剖面自下而上划分为3个亚段,即I段、II段、III段。阜康凹陷剖面对应于王越等<sup>[18]</sup>划分的芦草沟组三段页岩富集层段[图2(a)]和彭雪峰等<sup>[7]</sup>划分的芦草沟组三段、四段。阜康剖面的第I段以页岩、白云质灰岩为主,并

有泥页岩、灰岩、砂岩；底部与砂岩层相连，往上出现白云质灰岩、灰岩、页岩、泥页岩，厚度共 11m；第Ⅱ段以页岩为主，并有泥页岩和夹砂岩岩层，底部为 2m 砂岩岩层，往上为泥页岩、页岩、泥页岩岩层，厚

度约为 9m；第Ⅲ段为含泥页岩、页岩、砂岩，底部为 1m 砂岩薄层，往上为泥页岩与页岩互层段，共 6m 厚。整个剖面共 26m，以页岩为主，含泥页岩、砂岩、泥灰岩及白云质砂岩[图 2(b)]。

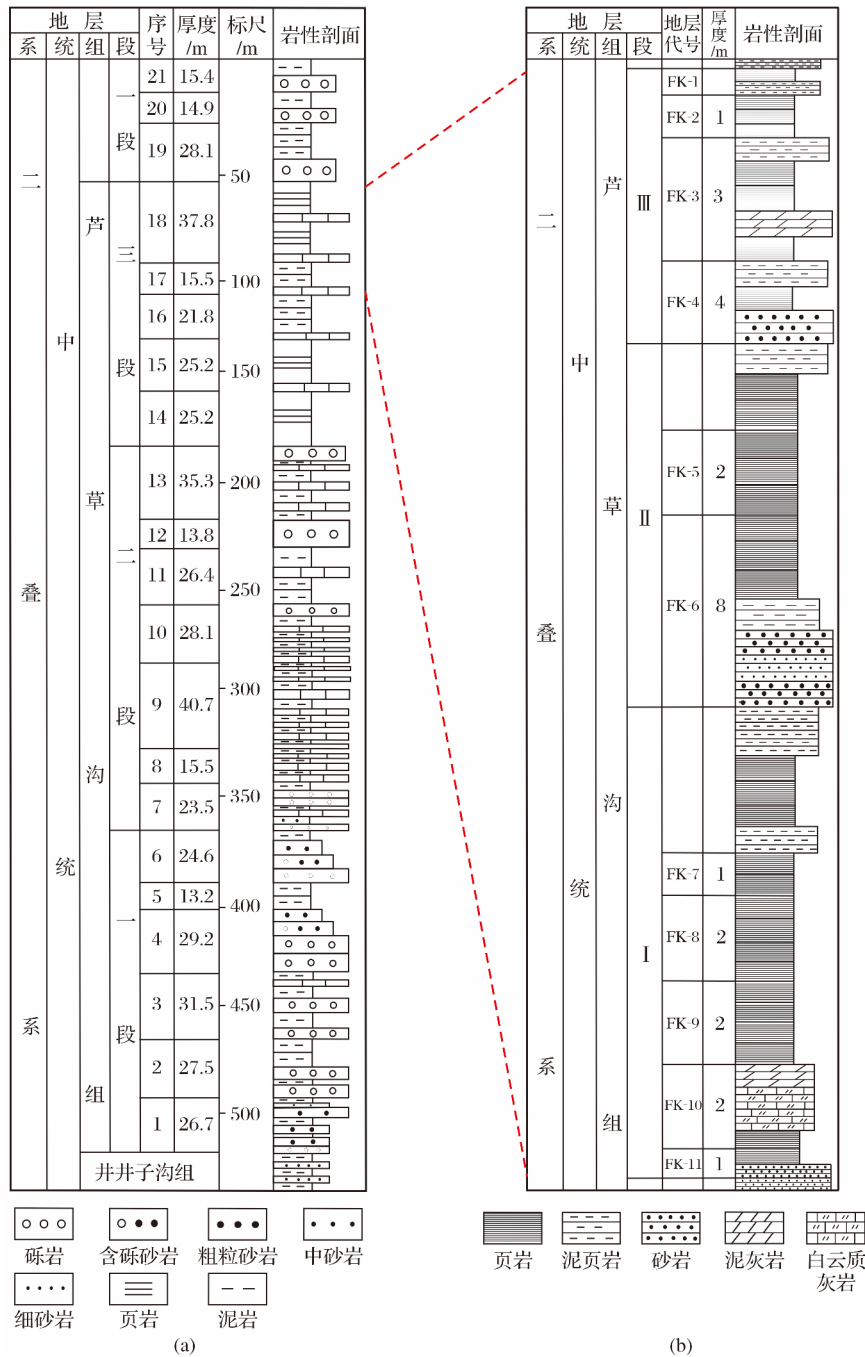


图 2 研究地层及对比<sup>[18]</sup>

Fig.2 The stratigraphy column and the sampled sites<sup>[18]</sup>

## 2 样品与分析方法

### 2.1 样品

样品采集于准噶尔盆地阜康凹陷中部四工河附

近,顶点坐标为 44°00'15.76N,88°08'41.56E;最低点坐标为 44°00'14.69N,88°08'41.56E。以该剖面的 26m 泥页岩层为目标层位,采集 11 个样品,自上而下编号为 FK-1 至 FK-11,目标层位岩性为灰黑

色、黑色页岩。

样品粉碎前,用小刀除净表面污染物,将岩石样品粉碎至 80 目(0.180mm)。主微量元素含量测定样品粉碎筛选至 200 目(0.075 0mm)以下。分析测试步骤如下:①总有机碳分析:取 80mg 左右干燥的粉末样品,使用 15% HCl 溶液在室温下浸泡 12h 以上,在 80℃ 下水浴锅中浸泡 1h 以上,器壁用去离子水清洗 6 次,将 CaCl<sub>2</sub> 等沉淀过滤干净,在 100℃ 温度下干燥 12h,采用 CS-400 型有机碳分析仪测定有机碳含量。②主量元素测定方法:试样加入包含硝酸锂在内的助熔剂,充分混合后,高温熔融。熔融物倒入铂金模子形成扁平玻璃片后,用 X-射线荧光光谱法分析。同时称取另一份试样放入马弗炉中,于 1 000℃ 下加热 1h。冷却后称重。样品加热前后的重量差即是烧失量。主量元素分析仪器为 PANalytical PW2424X 荧光光谱仪,相对偏差(RD) < 5%,相对误差(RE) < 2%。③微量元素测定方法:烧失后的样品用高氯酸、硝酸、氢氟酸消解;蒸至近干后的样品用稀盐酸溶解定容,应用等离子体发射光谱与等离子体质谱进行分析。元素之间的光谱干扰得到矫正后,即是最后分析结果。微量元素分析仪器为电感耦合等离子体发射质谱(Agilent 7 700x),以及电感耦合等离子体发射光谱(Agilent VISTA),相对偏差(RD) <

10%,相对误差(RE) < 10%。

## 2.2 数据处理

处理沉积岩元素数据时,需注意元素来源,沉积物中的微量元素一般由碎屑成分和自生成分组成,仅自生成分对于反映原始沉积环境具有重要研究意义<sup>[19]</sup>。由于环境因素的影响,往往处于较浅埋藏深度的沉积岩容易发生元素的含量变化,尤其含量少的微量元素受到的影响更大。因此,仅根据微量元素高于或低于平均地壳(或页岩)值而认定微量元素富集或亏损则会产生偏差<sup>[20]</sup>。一般要将所测的元素值做 Al 标准化处理,因为 Al 元素来自于陆源且始终稳定存在,抗风化能力强。

元素比值分析法对于分析过程中出现的许多复杂的干扰因素可起到有效的排除作用<sup>[21,22]</sup>。须特别说明的是,在本文研究样品 FK-10 中发现明显的白云化作用,在涉及到有范围值和平均值计算时,将其值排除。

## 2.3 总有机碳含量(TOC)

有机碳是指岩石中除去碳酸盐、石墨等无机碳以外的碳。有机碳含量为单位质量岩石中有机碳质量的百分数<sup>[23]</sup>。有机碳的含量直接决定了烃源岩的最大生烃潜力,本文对 11 块烃源岩总有机碳含量进行了测定,总有机碳值介于 3.67%~16.0% 之间(图 3)。

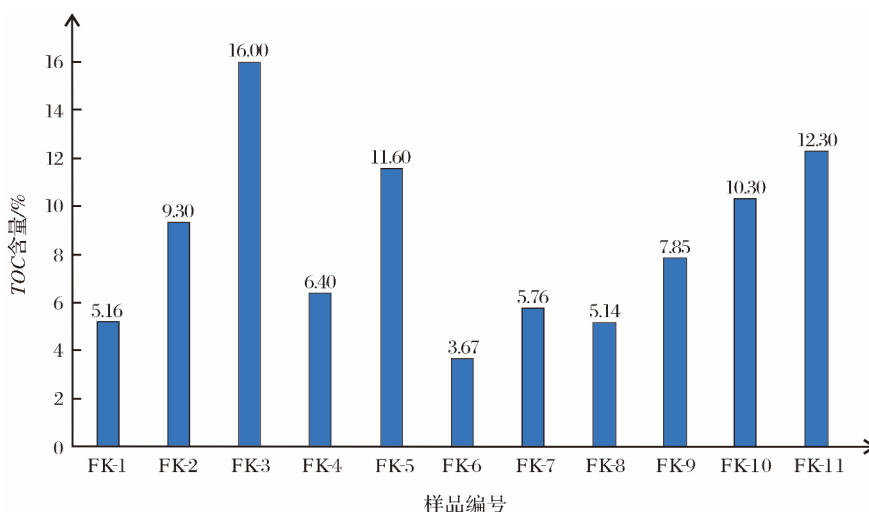


图 3 烃源岩有机碳含量(TOC)

Fig.3 Total organic carbon content in source rocks

有机碳含量 > 2% 被视为非常好的烃源岩,图 3 中样品 TOC 值分布在 3.67%~16.0% 之间,平均值为 8.50%,可见研究区烃源岩样品属于高有机碳页岩。

## 3 结果与讨论

### 3.1 实验结果

由于微量元素在地质历史变迁过程中,其含量

因物理化学条件变化在一定的平衡之后稳定存在,其相对含量大小的背后蕴含着古沉积环境信息。沉积学家一直在广泛使用一些元素含量及比值如 Fe、Mn、Sr、Ba、Ga、Rb、Co、Ni、V 及 Sr/Ba、Fe/Mn、V/

Ni 等判别海相与陆相、氧化与还原、水盆深度、盐度及离岸距离等沉积条件<sup>[22]</sup>。阜康凹陷的主量元素分析及计算结果列于表 1,微量元素分析结果及计算结果分别列于表 2 和表 3 中。

表 1 阜康凹陷芦草沟组地层页岩主量元素组成分析及计算结果  
Table 1 Analytics and calculated results of major elemental components of shale in Lucaogou Formation, Fukang Sag, Juggar Basin

样品 编号	元素组成/%																
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BaO	CaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	SrO	TiO <sub>2</sub>	LOI 1000	总计	CIA
FK-1	13.18	0.05	0.76	0.01	1.87	2.40	0.57	0.01	1.14	.27	65.06	0.26	0.02	0.61	14.06	100.27	75.40
FK-2	11.18	0.03	3.90	<0.01	4.45	2.07	0.77	0.10	0.94	0.73	58.29	0.36	0.03	0.47	16.87	100.19	61.80
FK-3	7.04	0.03	3.34	<0.01	2.09	1.40	0.37	0.10	0.72	0.60	51.17	0.22	0.02	0.31	32.51	99.92	56.32
FK-4	10.06	0.04	1.76	<0.01	3.56	1.96	0.50	0.06	0.99	0.22	67.91	0.33	0.02	0.44	12.54	100.39	68.11
FK-5	10.82	0.04	2.18	<0.01	5.52	2.02	0.54	0.09	0.91	0.34	54.65	0.29	0.02	0.49	21.31	99.22	67.92
FK-6	14.48	0.05	1.00	<0.01	2.82	2.47	0.94	0.02	1.32	0.34	62.19	0.29	0.03	0.59	12.78	99.32	75.14
FK-7	9.76	0.04	2.37	<0.01	3.32	1.83	0.57	0.03	1.06	0.57	67.33	0.31	0.03	0.42	12.70	100.34	64.98
FK-8	10.97	0.03	1.30	<0.01	2.56	1.92	0.54	0.04	1.07	0.22	67.53	0.22	0.01	0.45	12.57	99.43	71.89
FK-9	10.17	0.04	2.46	<0.01	2.97	1.89	0.57	0.06	1.04	0.45	62.03	0.22	0.03	0.46	17.82	100.21	65.36
FK-10	2.02	0.02	24.9	<0.01	3.65	0.37	15.50	0.13	0.33	0.15	12.02	0.08	0.04	0.10	41.36	100.67	7.31
FK-11	9.56	0.04	2.45	<0.01	3.92	1.82	0.61	0.20	1.06	0.42	59.89	0.35	0.02	0.43	19.52	100.29	64.20

注: CIA=100×Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)

表 2 准噶尔盆地阜康凹陷二叠系芦草沟组微量元素分析结果  
Table 2 Analytical results of trace elements of shale in Lucaogou Formation, Fukang Sag, Juggar Basin

样品编号	Al	Ba	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	Ga	K	Li	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	P	Sr	Th	U	V	Zn
FK-1	6.88	410	0.55	2.7	46	55.0	1.26	17.05	1.93	25.4	0.32	38	16.85	0.81	18.4	1190	197.5	8.87	4.4	144	32
FK-2	5.75	280	2.75	11.2	38	61.7	3.03	13.80	1.64	27.9	0.41	751	10.90	0.63	32.9	3220	250	6.21	7.0	135	81
FK-3	3.80	300	2.40	9.7	31	54.7	1.52	8.97	1.14	23.3	0.22	783	4.69	0.53	32.5	2700	224	4.06	4.1	78	58
FK-4	5.26	290	1.25	7.0	27	37.8	2.34	11.65	1.54	29.2	0.28	418	7.42	0.69	26.1	1010	154.0	4.29	3.7	84	52
FK-5	5.57	330	1.55	10.7	38	56.9	3.81	11.95	1.60	21.5	0.30	663	7.60	0.63	42.6	1490	177.5	5.37	3.6	125	59
FK-6	7.59	430	0.76	8.6	38	48.3	1.90	18.80	2.01	25.1	0.54	185	3.59	0.93	38.0	1560	289	8.41	2.8	114	84
FK-7	5.13	330	1.70	7.0	28	46.6	2.21	11.65	1.45	26.1	0.31	221	6.90	0.74	31.7	2540	222	4.92	4.8	101	52
FK-8	5.81	320	0.95	13.3	35	59.1	1.73	14.40	1.56	30.2	0.31	327	2.96	0.76	46.5	970	187.0	6.36	3.3	120	56
FK-9	5.25	340	1.75	15.0	32	87.3	1.98	12.30	1.50	26.1	0.32	425	6.81	0.72	53.8	2000	237	4.71	4.4	114	72
FK-10	1.04	120	16.10	2.3	13	9.0	2.37	2.30	0.29	14.1	8.96	921	0.26	0.23	4.9	670	369	0.89	0.6	134	16
FK-11	4.94	330	1.73	11.2	30	43.8	2.76	11.30	1.45	26.0	0.33	1410	7.88	0.74	59.4	1860	176.5	3.77	3.3	117	64

注: Al、Ca、Fe、K、Mg、Na 单位为%; Ba、Co、Cr、Cu、Ga、Li、Mn、Mo、Ni、P、Sr、Th、U、V、Zn 单位为×10<sup>-6</sup>

## 3.2 讨论

### 3.2.1 古盐度

古盐度代表着过去地质历史时期水体含盐程度,含盐度的高低可以很好地反映水体当时的古环境特点,为矿产勘查和气候变化研究提供重要的依据。古盐度判别方法较多,如古生物学、岩石学方法、同位素法等<sup>[24-27]</sup>。本文采用微量元素含量及比值分析法反映古盐度。

不同的元素在不同地质体中的含量受到不同的物理化学性质的影响而发生复杂的改变,而这种改变为反映古环境提供了规律性的有效解释(表 4)。Li、Sr、Ni、Ga 的含量对水体盐度的变化敏感性较强。Li 含量大于 150μg/g、Sr 含量介于 800~1 000μg/g 之间、Ni 含量大于 40μg/g、Ga 含量小于 8μg/g,指示咸水(海相)沉积环境;而 Li 含量小于 90μg/g、Sr 含量介于 100~500μg/g 之间、Ni 含量介于 20~

25 $\mu\text{g/g}$  之间、Ga 含量大于 17 $\mu\text{g/g}$ , 指示淡水(陆相)沉积环境<sup>[27,28]</sup>。阜康凹陷样品的 Li 含量值介于 21.5~30.2 $\mu\text{g/g}$  之间, 平均值为 26.05 $\mu\text{g/g}$ ; Sr 值介于 154~197.5 $\mu\text{g/g}$  之间, 平均值为 211.45 $\mu\text{g/g}$ ; Ni 含量介于 18.4~59.4 $\mu\text{g/g}$  之间, 平均值为 38.14 $\mu\text{g/g}$ ; Ga 含量介于 11.3~18.8 $\mu\text{g/g}$  之间, 平均值为 13.187 $\mu\text{g/g}$ , 这一结果显示, 这些样品沉积时的水体为淡水—半咸水沉积环境。

Sr/Ba 目前是表示水体盐度使用最为广泛的重要指标<sup>[29-32]</sup>。Sr 的迁移能力要高于 Ba, 随着水体盐度的不断增加, Ba 先以 BaSO<sub>4</sub> 沉淀的形式堆积下来, 之后 SrSO<sub>4</sub> 沉淀, 在盐度达到一定的高值时会析出<sup>[30]</sup>。Sr/Ba 值可用作区分淡水和咸水沉积的标

志, 刘招君等<sup>[25]</sup>认为, Sr/Ba > 1.0 指示是海相咸水沉积; Sr/Ba < 0.6 是陆相淡水沉积; Sr/Ba 介于 0.6~1.0 之间被看作是过渡相的半咸水沉积。我们的计算结果显示, Sr/Ba 值范围在 0.48~0.89 之间, 平均值为 0.635, 故而认为是半咸水湖相沉积环境。此外, Rb/K 值介于 0.003 886~0.004 4627 之间, 平均值为 0.004 181 4, 符合半咸水页岩 Rb/K 值大于 0.004 的判别标准。

阜康凹陷 6 项古盐度指标示于图 4。Li 与 Sr 对于淡水环境的敏感性明显优于其他元素<sup>[28]</sup>, 从图 4 可以看出 Li 值、Sr 值指示淡水水体, Ga、Ni、Rb/K、Sr/Ba 等值显示淡水—半咸水水体。综合判断研究区湖盆为淡水—半咸水沉积环境。

表 3 准噶尔盆地阜康凹陷二叠系芦草沟组微量元素计算结果

Table 3 Calculated results of trace elements of shale in Lucaogou Formation, Fukang Sag, Juggar Basin

样品编号	U/Th	V/Cr	Ni/Co	V/(V+Ni)	$\delta\text{U}$	Sr/Ba	Sr/Cu	Rb/K	C	Fe/Mn	Mn/Ti
FK-1	0.50	3.13	6.81	0.89	1.20	0.48	3.59	0.004 279 8	0.35	331.58	0.01
FK-2	1.13	3.55	2.94	0.80	1.54	0.89	4.05	0.004 115 9	0.57	40.35	0.27
FK-3	1.01	2.52	3.35	0.70	1.50	0.75	4.10	0.003 886 0	0.37	19.41	0.40
FK-4	0.86	3.11	3.73	0.76	1.44	0.53	4.07	0.004 019 5	0.63	55.98	0.16
FK-5	0.67	3.29	3.98	0.74	1.34	0.54	3.12	0.004 075 0	0.94	57.47	0.22
FK-6	0.33	3.00	4.42	0.75	1.00	0.67	5.98	0.004 462 7	0.45	102.70	0.05
FK-7	0.98	3.61	4.53	0.76	1.49	0.67	4.76	0.004 165 5	0.53	100.00	0.09
FK-8	0.52	3.43	3.50	0.72	1.22	0.58	3.16	0.004 288 5	0.49	52.91	0.12
FK-9	0.93	3.56	3.59	0.68	1.47	0.70	2.71	0.004 253 3	0.47	46.59	0.16
FK-10	0.67	10.31	2.13	0.96	1.34	3.08	41.00	0.004 103 4	0.10	25.73	1.56
FK-11	0.88	3.90	5.30	0.66	1.45	0.53	4.03	0.004 082 8	0.68	19.57	0.54

注:  $C = \sum(\text{Fe} + \text{Mn} + \text{Cr} + \text{Ni} + \text{V} + \text{Co}) / \sum(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Sr} + \text{Ba} + \text{K} + \text{Na})$ ;  $\delta\text{U} = \text{U} / [0.5 \times (\text{Th}/3 + \text{U})]$

表 4 沉积环境中古盐度判别指标<sup>[25,27,28]</sup>

Table 4 Indexes of paleosalinity in sedimentary environment<sup>[25,27,28]</sup>

沉积环境	Li/( $\mu\text{g/g}$ )	Sr/( $\mu\text{g/g}$ )	Ni/( $\mu\text{g/g}$ )	Ga/( $\mu\text{g/g}$ )	Rb/K	Sr/Ba
咸水(海相)	>150	800~1 000	>40	<8	>0.006	>1.0
半咸水(过渡相)	90~150	500~800	25~40	8~17	0.004~0.006	0.6~1.0
淡水(陆相)	<90	100~500	20~25	>17	<0.004	<0.6

### 3.2.2 古气候条件

气候条件控制着沉积环境的温度、Eh、pH 及古盐度, 尤其是在构造相对稳定的情况下<sup>[33]</sup>, 是解释沉积环境必不可少的指标之一。用于说明古气候条件的常用指标有古气候指数(C)、Sr、Cu 及 Sr/Cu、Fe/Cu、Mg/Ca、Fe/Mn、SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等值。其中, 以 Sr/Cu 值反映古气候条件的应用尤为广泛。古气候指数是指喜湿性元素含量与喜干性元素含量的相对大小:

$$C = \sum(\text{Fe} + \text{Mn} + \text{Cr} + \text{Ni} + \text{V} + \text{Co}) / \sum(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Sr} + \text{Ba} + \text{K} + \text{Na}) \quad (1)$$

Sr/Cu 值对气候变化的影响较为敏感, Sr/Cu 低值表示温暖湿润气候, 高值则表示炎热干燥气候。通常认为,  $0.6 < C < 1$ , Sr/Cu 值介于 1.3~5.0 之间, 指示温暖湿润气候;  $C < 0.2$ , Sr/Cu 值大于 5.0 则反映干旱炎热气候;  $0.2 < C < 0.6$ , 表示半潮湿—半干旱气候<sup>[33,34]</sup>。阜康凹陷样品的古气候指数 C 值介于 0.35~0.94 之间, 平均值为 0.55, Sr/Cu 值介于

2.71~4.76 之间,平均值为 3.96,显示出半潮湿—半干旱气候条件。

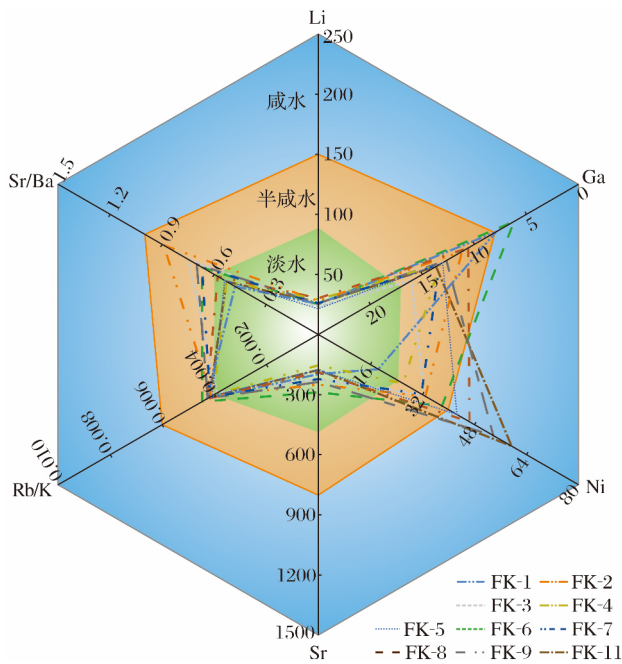


图 4 阜康凹陷古盐度分析雷达图

Fig.4 Radar chart of paleosalinity in Fukang Sag

沉积物的形成过程中,气候可以影响母岩风化作用强弱、沉积物的搬运和组成等,化学蚀变指数(CIA)常被用来反映古气候条件化学蚀变指数<sup>[35,36]</sup>。CIA 值越大,化学蚀变越强烈,强的化学蚀变通常指示温湿的气候条件,其计算公式为:

$$CIA = 100 \times \frac{Al_2O_3}{(Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)} \quad (2)$$

CIA 值的大小判别标准为:50<CIA<65,为弱化学蚀变;65<CIA<85,为中等化学蚀变;85<CIA<100,为强化学蚀变。阜康凹陷样品的 CIA 值介于 56.32~75.14 之间,平均值为 64.20,可看作为弱化学蚀变,所以研究区处于较为干旱的地区。

根据实验结果及各指示气候指标(表 5)绘制古气候分析图(图 5),样品点落在半干旱—潮湿气候区,结合 Sr/Cu 值综合说明研究区的古气候表现为半干旱—温湿气候,物理风化作用较强,化学风化作用较弱。

表 5 古气候条件判别指标<sup>[33-36]</sup>

Table 5 Indexs of paleosalinity in sedimentary environment<sup>[33-36]</sup>

气候条件	C	Sr/Cu	CIA
温暖潮湿气候	0.6~1	1.3~5.0	85~100
半干旱气候	0.2~0.6	>5.0	65~85
干旱气候	<0.2		50~65

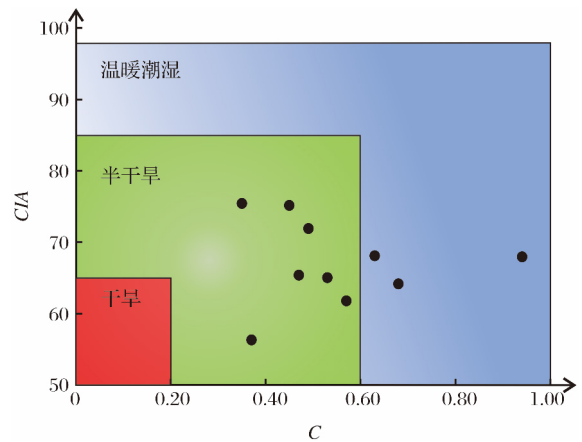


图 5 研究区古气候分析

Fig.5 Diagram showing paleoclimate in the study area

### 3.2.3 古氧化还原条件

氧化还原条件对于有机质的保存、沉积物的形成、生物的形成与演化有着十分重要的影响。金属元素 U、Th、V、Cr、Ni、Co 的地球化学行为在不同的氧化还原条件下分异明显,因此 U/Th、V/Cr、Ni/Co、V/(V+Ni)及 δU 等微量元素指标被广泛用于古氧化还原条件的判识<sup>[37-40]</sup>。在微量元素的搬运沉积过程中,铀元素活动性较钍强,易被氧化淋滤,而钍吸附在细粒沉积物中。δU 法在应用时,普遍认为是在正常水体环境中 δU<1,缺氧环境中 δU>1,δU 的计算公式为 δU=U/[0.5×(Th/3+U)]。实验结果表明:U/Th 含量介于 0.33~1.13 之间,平均值为 0.78;V/Cr 值介于 2.52~3.90 之间,平均值为 3.31;Ni/Co 值介于 2.94~6.81 之间,平均值为 4.21;V/(V+Ni)值介于 0.66~0.96 之间,平均值为 0.748。参考表 6 中标准,研究区整体呈贫氧—富氧环境。

V/(V+Ni)值不仅仅可以反映古氧化还原条件,还常用于判断沉积物沉积时底层水体分层强弱。V/(V+Ni)值高于 0.84,分层强;在 0.6~0.84 之间,分层中等;在 0.4~0.6 之间,分层弱<sup>[31,37,40]</sup>。结合图 6,V、Ni、V/(V+Ni)等值在泥页岩中易受到有机质丰度及成岩演化阶段的影响<sup>[41]</sup>,Co 值稳定,导致 V/(V+Ni)与 Ni/Co 出现低值,U/Th 个别值可能与露头样品易受到氧化还原反应的影响显示低值,并不作为主要指标考虑。综合来看,研究区为沉积物沉积时底层水体分层程度中等的贫氧—富氧环境。

### 3.2.4 古水深

古水深的大小对于反映沉积体水动力具有重要意义。水体变浅,水动力相对增加,还原性减弱,利

于氧化作用的发生;相反,水体变深,则有利于有机质的保存。古盐度与氧化还原条件的变化都可以表现出水体深度的变化,古盐度值的增大指示着古水深的增加<sup>[42]</sup>。对于湖泊古水深的定性分析,照搬海相水体深度指标显然不具说服力。一般而言,Fe、Ti化合物易在滨岸富集,Mn化合物稳定性较Fe的化合物强,可以经长距离搬运,并在远离滨岸的湖盆中富集<sup>[33]</sup>,Fe/Mn值、Mn/Ti值常作为湖泊古水深的指标<sup>[27,33,43]</sup>。水体中元素富集状况与其深度及离岸距离相关<sup>[44]</sup>,随着深度和离岸距离的增加,Fe/Mn值会逐渐减小,Mn/Ti值则相反。Fe/Mn < 100, Mn/Ti值介于0.1~0.3之间时被认为是深湖;

Fe/Mn值介于100~150之间,Mn/Ti值等于0.1视为半深湖;Fe/Mn > 150, Mn/Ti值小于0.1揭示沉积环境为滨浅湖水体。研究区数据显示Fe/Mn值介于19.41~102.70之间,平均值为53.81, Mn/Ti值介于0.01~0.39之间,平均值为0.20;Fe/Mn值存在个别极值,这是由于样品FK-1的Mn含量极低。Mn/Ti值变化较大,这是由于Mn值受到较大的影响,这可能与露头样品容易受到外部环境的影响有关。Fe、Mn、Ti对于古水深的应用条件十分广泛,相比于彭雪峰等<sup>[9]</sup>在博格达山北麓地区的元素值较低,这可能与样品类型有关。综合分析研究区的水体深度较大,为一深湖相,水动力弱。结合TOC

表6 氧化还原环境的元素判别指标<sup>[37,39,45,46]</sup>

Table 6 Element discrimination parameters in redox condition<sup>[37,39,42,43]</sup>

古氧相/(mL/L)	V/(V+Ni)	V/Cr	U/Th	Ni/Co	$\delta U$
缺氧、极贫氧环境(<0.2)	>0.50	>4.25	>1.25	>7.0	>1
贫氧、次富氧环境(0.2~2.0)	0.45~0.50	2.0~4.25	1.25~0.75	5.0~7.0	<1
富氧环境(>2.0)	<0.45	<2.0	<0.75	<5.0	

数据,表明水体深度大对于沉积体有机质的累积。

### 3.2.5 古生产力

对于沉积体古生产力的研究一直都是地球科学学者关注的重点之一。海相盆地一般可用有机碳同位素、生物化石的稳定碳同位素,微体古生物指标(有孔虫、放射虫等),以及生物标志化合物等作为古生产力研究的重要方法。海洋环境复杂,含盐度高,并且面积辽阔,而现今对于湖泊古生产力的研究多沿用海相地层的研究指标,大量研究表明,其效果良好,但这并不能完全有效说明湖泊的真实古生产力。湖泊可以看作是一个缩小的海洋模型,一般替代性的指标有有机碳法、微量元素、生物硅、色素、碳同位素以及生物标志化合物<sup>[47]</sup>。本文主要以微量元素含量及其比值作为研究方法,为了最大程度地消除陆源成分因素,对所用到的微量元素采用Al标准化处理。U、Mo、Mn、Cu、Ni、Zn、P可表征当时湖盆古生产力的大小。P元素在生物新陈代谢过程中扮演着十分重要的角色,它是一种必须营养元素,是核酸、磷酸和骨骼的结构成分,在生物死后遗体中所含的磷元素随生物体沉积,演化成为有机质成分含量高的烃源岩中的一部分<sup>[48,49]</sup>。经过计算得出U/Al、Mo/Al、Ni/Al、Zn/Al、Mn/Al、Cu/Al、P/Al等值大小及平均值分别为0.4~1.2,0.7;0.47~2.45,1.36;2.7~10.2,7.1;4.65~15.26,11.0;5.52~206.05,

103.08;7.19~16.63,10.2;173~711,353(图7),总体上古生产力相对较高。同时可见在整个研究剖面上变化较大,总体平均值较高,由图7可见古生产力指标与TOC大小在垂向剖面上的变化,相关性好。

### 3.2.6 TOC值变化的主要控制因素

地质体中控制有机碳含量的因素可分为古生产力和保存条件2种模式<sup>[20,50,51]</sup>，“古生产力”模式强调初级生产力高而成就较多的有机碳含量<sup>[52]</sup>，“保存条件”模式强调的是沉积环境闭塞,还原性强而利于有机质在漫长的地质历史时期能够得到很好的保存<sup>[51,53]</sup>。由图6和图7可见,TOC值的变化较大,总体较高。图7显示,与古生产力有关的U、Mo、Mn、Cu、Ni、Zn元素Al标准化值与各样品点TOC值变化趋势大致相同,相关性良好,呈现出较强的初级生产力。图6中展现了古氧化还原指标V/(V+Ni)、V/Cr、U/Th、Ni/Co、 $\delta U$ 在整体上与TOC值在剖面上的变化,相关性整体较好。

综合来看,准噶尔盆地阜康凹陷烃源岩有机质发育主要受到生产力的控制,沉积环境对于有机质的保存显示出一定积极的影响。

## 4 结论

准噶尔盆地阜康凹陷二叠系芦草沟组的有机质含量较高,介于3.67%~16.0%之间,平均值为8.50%,



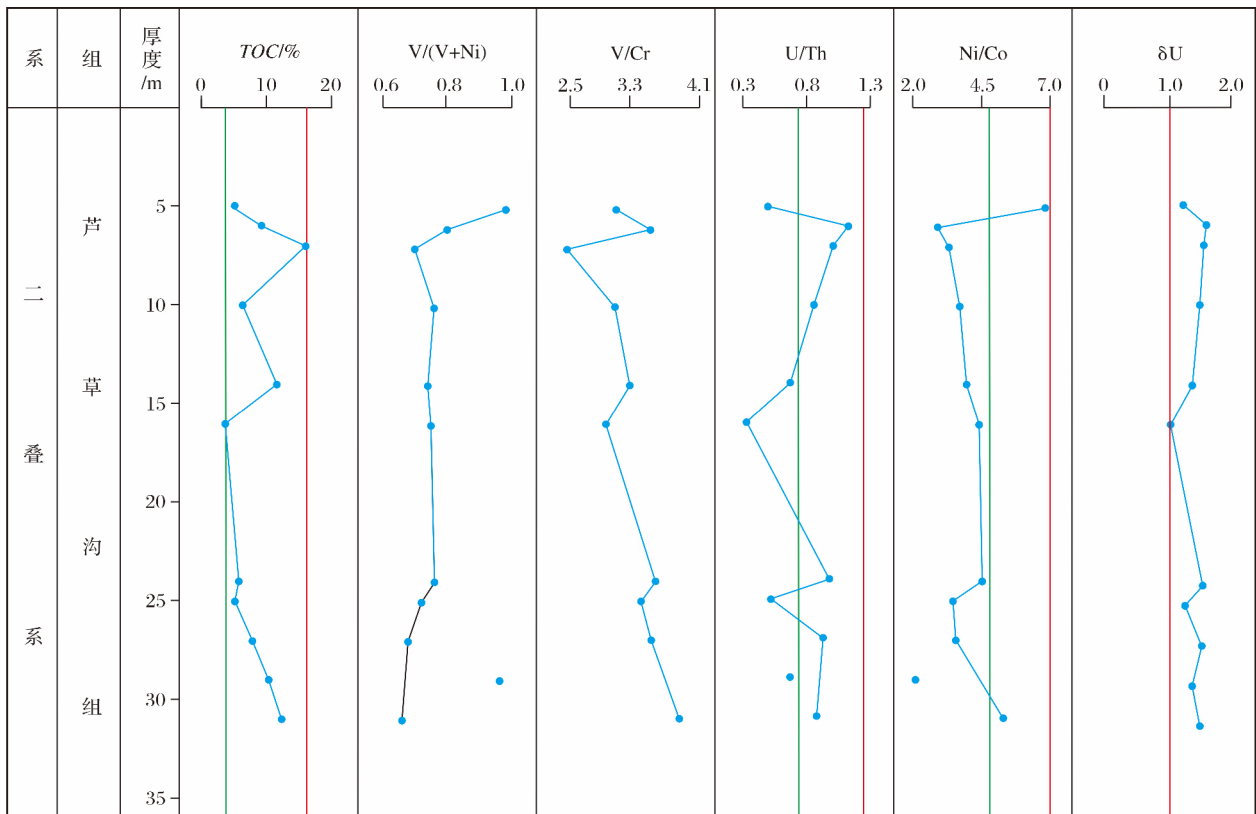


图 6 古氧化还原指标与 TOC 值在垂向剖面上的变化

Fig.6 The value of paleoredox indexes and TOC in vertical profile

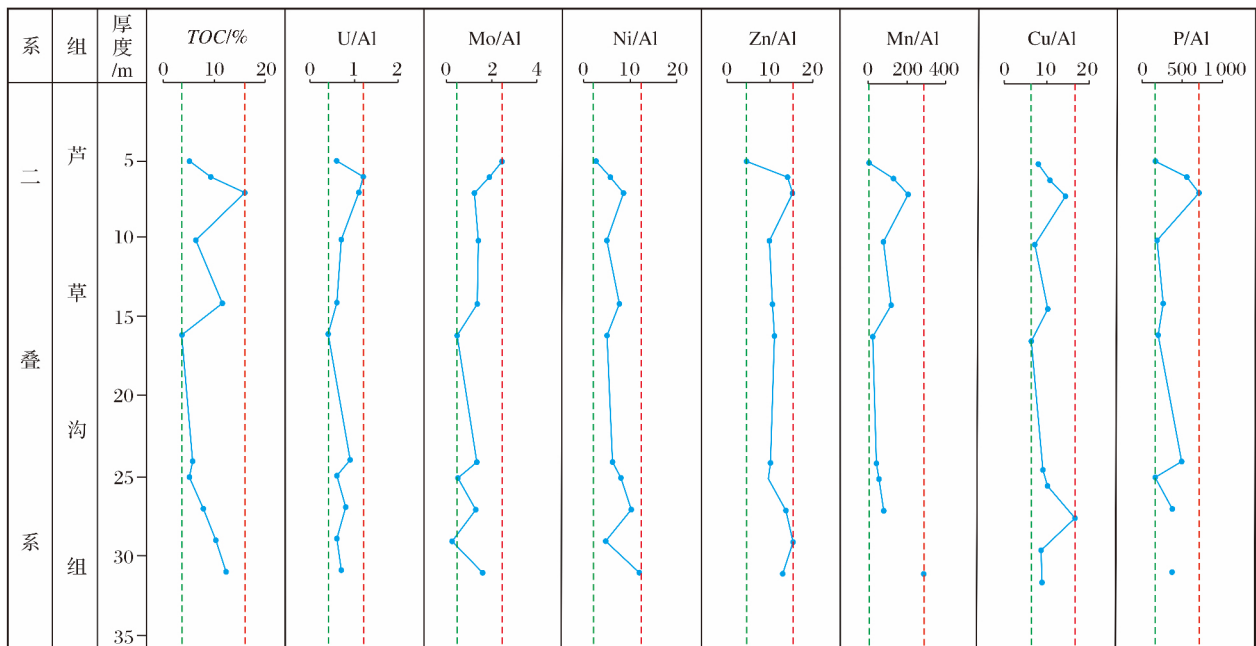


图 7 古生产力 Al 标准化值与 TOC 在垂向剖面上的变化

Fig.7 Aluminum normalization value of paleoproductivity and TOC in vertical profile

为高有机碳页岩。阜康凹陷二叠系芦草沟组是处在贫氧—一次富氧,半干旱—温湿,水体深度较大,水动力弱的淡水—半咸水陆相深湖湖盆沉积环境。古生

产力和古氧化还原指标随剖面 TOC 的协同关系结果显示,相对保存条件来说,古生产力指标对有机质含量显示出主要控制作用。

致谢:感谢两位审稿专家的切实建议及兰州大学地质科学与矿产资源学院闫建萍副教授、张成君教授、李艳芳博士在本文完成过程中给予宝贵的建议与指导,在此一并深表感谢。

#### 参考文献(References)

- [1] Li Jingjing. Study on the Oil Shale Geochemistry of Permian Lucaogou Formation in the Northern Bogda Mountain[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009: 12-13.  
李婧婧. 博格达山北麓二叠系芦草沟组油页岩地区化学特征[D]. 北京: 中国地质大学, 2009: 12-13.
- [2] Wang Dan. Detailed Sequence Stratigraphy Study of Upper Permian at Southern Bogda Mountains in Xinjiang[D]. Xi'an: Northwest University, 2006: 10-67.  
王丹. 新疆博格达山南缘上二叠统精细层序地层学研究[D]. 西安: 西北大学, 2006: 10-67.
- [3] Fang Shihu, Jia Chengzao, Guo Zhaojie, *et al.* New view on the Permian evolution of the Junggar Basin and its implications for tectonic evolution[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(3): 108-121.  
方世虎, 贾承造, 郭召杰, 等. 准噶尔盆地二叠纪盆地属性的再认识及其构造意义[J]. *地质前缘*, 2006, 13(3): 108-121.
- [4] Si Chunsong, Chen Nenggui, Yu Chaofeng, *et al.* Sedimentary characteristics of tight oil reservoir in Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(5): 528-533.  
斯春松, 陈能贵, 余朝丰, 等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层沉积特征[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(5): 528-533.
- [5] Wu Shaozu, Qu Xun, Li Qiang. Paleoclimatic conditions of Loucaogou and Huangshanjie Formations in the Junggar Basin[J]. *Xinjiang Geology*, 2002, 20(3): 183-186.  
吴绍祖, 屈迅, 李强. 准噶尔盆地芦草沟组与黄山街组的古气候条件[J]. *新疆地质*, 2002, 20(3): 183-186.
- [6] Wartes M A, Greene T J, Carroll A R. Permian lacustrine paleogeography of the Junggar and Turpan-Hami Basins, northwest China[J]. *American Association of Petroleum Geologists Annual Convention, Extended Abstracts*, 1998, 2: 682.
- [7] Peng Xuefeng, Wang Lijin, Jiang Liping. Analysis of sedimentary environment of the Permian Lucaogou Formation in southeastern margin of the Junggar Basin[J]. *Journal of Xinjiang University: Natural Science Edition*, 2011, 28(4): 395-400.  
彭雪峰, 汪立今, 姜丽萍. 准噶尔盆地东南缘芦草沟组沉积环境分析[J]. *新疆大学学报: 自然科学版*, 2011, 28(4): 395-400.
- [8] Wang Zhenghe, Ding Bangchun, Yan Jianfei, *et al.* Depositional characteristics and petroleum exploration significance of Lucaogou Formation in south Junggar Basin[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2016, 31(2): 25-32.  
王正和, 丁邦春, 闫剑飞, 等. 淮南芦草沟组沉积特征及油气勘探前景[J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2016, 31(2): 25-32.
- [9] Peng Xuefeng, Wang Lijin, Jiang Liping. Geochemical characteristics of the Lucaogou Formation oil shale in the southeastern margin of the Junggar Basin and its environmental implications[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2012, 31(2): 121-127.  
彭雪峰, 汪立今, 姜丽萍. 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[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2012, 31(2): 121-127.
- [10] Ma Ke, Hou Jiagen, Liu Yuming, *et al.* The sedimentary model of saline lacustrine mixed sedimentation in Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(2): 636-648.  
马克, 侯加根, 刘钰铭, 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组咸化湖混合沉积模式[J]. *石油学报*, 2017, 38(2): 636-648.
- [11] Chen Fajing, Wang Xinwen, Wang Xinwei. Prototype and tectonic evolution of the Junggar Basin, northwestern China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3): 77-89.  
陈发景, 汪新文, 汪新伟. 准噶尔盆地的原型和构造演化[J]. *地质前缘*, 2005, 12(3): 77-89.
- [12] Chen Xin, Lu Huaifu, Shu Liangshu, *et al.* Study on tectonic evolution of Junggar Basin[J]. *Geological Journal of China University*, 2002, 8(3): 257-267.  
陈新, 卢华复, 舒良树, 等. 准噶尔盆地构造演化分析新进展[J]. *高校地质学报*, 2002, 8(3): 257-267.
- [13] Xu Xiaosong, Wang Zhengjiang. Thought clew to search after strategic prospecting precincts of oil and gas resources in marine facies basins in China[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2003, 8(1-2): 1-10.  
许效松, 汪正江. 对中国海相盆地油气资源战略选区的思路[J]. *海相油气地质*, 2003, 8(1-2): 1-10.
- [14] Cai Zhongxian, Chen Fajing, Jia Zhenyuan. Types and tectonic evolution of Junger Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(4): 431-440.  
蔡忠贤, 陈发景, 贾振远. 准噶尔盆地的类型和构造演化[J]. *地质前缘*, 2000, 7(4): 431-440.
- [15] Fu Huan, Wang Zhenqi, Wang Zesheng, *et al.* Geochemical characteristics of Middle-Lower Jurassic coal measures in the Fukang Sag[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2011, 25(6): 32-35.  
付欢, 王振奇, 王泽胜, 等. 阜康凹陷中下侏罗统煤系烃源岩地球化学特征[J]. *石油地质与工程*, 2011, 25(6): 32-35.
- [16] Chen Dandan, Ji Hongjie, Tao Huifei, *et al.* Sedimentary characteristics and evolution model of the Middle-Early Jurassic on the south of the Fukang Sag in the eastern Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(11): 2093-2106.  
陈丹丹, 吉鸿杰, 陶辉飞, 等. 准东地区阜康凹陷南部中下侏罗统沉积特征与沉积演化模式[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26

- (11):2093-2106.
- [17] Wang Bingkai, Feng Qiao, Tian Fangzheng, *et al.* The characteristics and significance of biomarker compounds in the Permian Lucaogou Formation hydrocarbon source rock on the southern margin of the Junggar Basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(2/3):304-313.  
王炳凯, 冯乔, 田方正, 等. 新疆准噶尔盆地南缘二叠系芦草沟组烃源岩生物标志化合物特征及意义[J]. *地质通报*, 2017, 36(2/3):304-313.
- [18] Wang Yue, Chen Shiyue, Zhang Guanlong, *et al.* Classifications of mixed sedimentite and sedimentary facies characteristics of mixed sedimentary facies belt in saline lacustrine basin; Taking examples as the Lucaogou Formation in the south of Junggar Basin and the Taerlang Formation in the northwest of Tuha Basin[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2017, 38(9):1021-1035.  
王越, 陈世悦, 张关龙, 等. 咸化湖盆混积岩分类与混积相带沉积相特征——以准噶尔盆地南缘芦草沟组与吐哈盆地西北缘塔尔朗组为例[J]. *石油学报*, 2017, 38(9):1021-1035.
- [19] Pi D H, Liu C Q, Shields-Zhou G A, *et al.* Trace and rare earth element geochemistry of black shale and kerogen in the Early Cambrian Niutitang Formation in Guizhou Province, South China; Constraints for redox environment and origin of metal enrichments[J]. *Precambrian Research*, 2013, 225:218-229.
- [20] Li Yanfang, Shao Deyong, Zhang Tongwei, *et al.* A relationship between elemental geochemical characteristics and organic matter enrichment in marine shale of Wufeng Formation-Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2015, 36(12):1470-1483.  
李艳芳, 邵德勇, 张同伟, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组海相页岩元素地球化学特征与有机质富集的关系[J]. *石油学报*, 2015, 36(12):1470-1483.
- [21] Wang Guoping, Liu Jingshuang, Zhai Zhengli. Ratio of elements and their implications with in typical sedimentation profile in them arsh-salinization indicators and climatic change between the arid and the humid[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(3):335-339.  
王国平, 刘景双, 翟正丽. 沼泽沉积剖面特征元素比值及其环境意义——盐碱化指标及气候干湿变化[J]. *地理科学*, 2005, 25(3):335-339.
- [22] Xiong Xiaohui, Xiao Jiafei. Geochemical indicators of sedimentary environments—a summary[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(3):405-414.  
熊小辉, 肖加飞. 沉积环境的地球化学示踪[J]. *地球与环境*, 2011, 39(3):405-414.
- [23] Gao Yuan. Study on the Organic Geochemistry and Depositional Paleoenvironment of Oil Shale in Southeast of the Junggar Basin[D]. Lanzhou: Lanzhou Center for Oil and Gas Resources, Institute of Geology and Geophysics, CAS, 2013:16.  
高苑. 准噶尔盆地东南缘油页岩有机地球化学特征及其古环境研究[D]. 兰州: 中科院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心, 2013:16.
- [24] Wang Peng, Yan Xiaoyong, Tan Kaijun. Application of sedimentary geochemistry to the Late Carboniferous sedimentary environment analysis in eastern Junggar Basin[J]. *Journal of Yanan University: Natural Science Edition*, 2013, 32(2):70-73.  
王鹏, 严小镭, 谭开俊. 沉积地球化学在准东石炭系沉积环境分析中的应用[J]. *延安大学学报: 自然科学版*, 2013, 32(2):70-73.
- [25] Liu Zhaojun, Meng Qingtao, Liu Rong, *et al.* Geochemical characteristics of oil shale of the Eocene Jijuntun Formation and its geological significance, Fushun Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(10):2340-2350.  
刘招君, 孟庆涛, 柳蓉, 等. 抚顺盆地始新统计军屯组油页岩地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2009, 25(10):2340-2350.
- [26] Li Jinlong, Chen Dongjing. Summary of quantified research method on paleosalinity[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2003, 10(5):1-3.  
李进龙, 陈东敬. 古盐度定量研究方法综述[J]. *油气地质与采收率*, 2003, 10(5):1-3.
- [27] Tian Jingchun, Zhang Xiang. *Sedimentary Geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016:66-77.  
田景春, 张翔. *沉积地球化学*[M]. 北京: 地质出版社, 2016:66-77.
- [28] Wang Feng, Liu Xuanchun, Deng Xiuqin, *et al.* Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Zhifang Formation in the Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentary*, 2017, 35(6):1265-1273.  
王峰, 刘玄春, 邓秀芹, 等. 鄂尔多斯盆地纸坊组微量元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J]. *沉积学报*, 2017, 35(6):1265-1273.
- [29] Wen Huaguo, Zheng Rongcai, Tang Fei, *et al.* Reconstruction and analysis of paleosalinity and paleoenvironment of the Chang 6 member in the Gengwan region, Ordos Basin[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2008, 28(1):114-120.  
文华国, 郑荣才, 唐飞, 等. 鄂尔多斯盆地耿湾地区长6段古盐度恢复与古环境分析[J]. *矿物岩石*, 2008, 28(1):114-120.
- [30] Wang Minfang, Jiao Yangquan, Wang Zhenghai, *et al.* Recovery paleosalinity in sedimentary Environment: An example of mudstone in Shuixigou Group, southwestern margin of Turpan-Hami Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2005, 26(6):419-422.  
王敏芳, 焦养泉, 王正海, 等. 沉积环境中古盐度的恢复——以吐哈盆地西南缘水西沟群泥岩为例[J]. *新疆石油地质*, 2005, 26(6):419-422.
- [31] Xu Jing, Pu Renhai, Yang Lin, *et al.* The palaeosalinity analysis of carboniferous mudstone, Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(3):509-517.

- 许璟,蒲仁海,杨林,等.塔里木盆地石炭系泥岩沉积时的古盐度分析[J].沉积学报,2010,28(3):509-517.
- [32] Qian Lijun, Chen Hongde, Lin Liangbiao, *et al.* Geochemical characteristics and environmental implications of Middle Jurassic Shaximiao Formation, western margin of the Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(6): 1061-1071.
- 钱利军,陈洪德,林良彪,等.四川盆地西缘地区中侏罗统沙溪庙组地球化学特征及其环境意义[J].沉积学报,2012,30(6): 1061-1071.
- [33] Li Hao, Lu Jianlin, Li Ruilei, *et al.* Generation paleoenvironment and its controlling factors of Lower Cretaceous lacustrine hydrocarbon source rocks in Changling Depression, southern the Songliao Basin[J]. Earth Science, 2017, 42(10): 1774-1786.
- 李浩,陆建林,李瑞磊,等.长岭断陷下白垩统湖相烃源岩形成古环境及主控因素[J].地球科学,2017,42(10):1774-1786.
- [34] Lermann A. Lakes: Chemistry, Geology, Physics[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1978:79-83.
- [35] McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, *et al.* Geochemical approaches to sedimentation, Provenance and tectonics[J]. Geological Society of America Special Paper, 1993, 284:21-40.
- [36] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 1982, 299:715-717.
- [37] 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, Wabunsee County, Kansas, U.S.A [J]. Chemical Geology, 1992, 9(1/3): 65-82.
- [38] Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, *et al.* Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update[J]. Chemical Geology, 2006, 232(1/2): 12-32.
- [39] Jones B, Manning D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of paleoredox conditions in ancient mudstones[J]. Chemical Geology, 1994, 111(1-4): 111-129.
- [40] Xiong Guoqing, Wang Jian, Hu Renfa. Trace element characteristics and sedimentary environment of the sinian system of the Fanjingshan area in Guizhou Province[J]. Acta Geoscientifica Sinica, 2008, 29(1): 51-60.
- 熊国庆,王剑,胡仁发.贵州梵净山地区震旦系微量元素特征及沉积环境[J].地球学报,2008,29(1):51-60.
- [41] Qiao Jinqi, Liu Luofu, Shang Xiaoqing, *et al.* The relationship between V, Ni or V/Ni ratio and each of organic matter abundance and diagenetic evolution stages in shales: Taking the shales in Fukang Sag of Junggar Basin for example[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35(4): 756-768.
- 乔锦琪,刘洛夫,尚晓庆,等.泥页岩中微量元素 V、Ni、V/Ni 与有机质丰度及成岩演化关系研究——以准噶尔盆地阜康凹陷为例[J].矿物岩石地球化学通报,2016,35(4):756-768.
- [42] Ming Chengdong, Hou Dujie, Zhao Xingmin, *et al.* The geochemistry records of paleoenvironment and sea-level relative movement of middle Permian Zhesi Formation in eastern Inner Mongolia[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(8): 1484-1494.
- 明承栋,侯读杰,赵省民,等.内蒙古东部索伦地区中二叠世哲斯组古环境与海平面相对升降的地球化学记录[J].地质学报,2015,89(8):1484-1494.
- [43] Wang Lei. The Recovery of the Paleoproductivity in the Period of Chang7 in the Ordos Basin and Its Control Factors[D]. Xi'an: Northwest University, 2015:2-5.
- 王磊.鄂尔多斯盆地延长组长7期湖盆古生产力恢复及其控制因素[D].西安:西北大学,2015:2-5.
- [44] Wang Chunlian, Liu Chenglin, Hu Haibing, *et al.* Sedimentary characteristics and its environmental significance of salt-bearing strata of the member 4 of Paleocene Shashi Formation in southern margin of Jiangling Depression, Jiangnan Basin[J]. Journal of Paleogeography, 2012, 14(2): 165-175.
- 王春连,刘成林,胡海兵,等.江汉盆地江陵凹陷南缘古新统沙市组四段含盐岩系沉积特征及其沉积环境意义[J].古地理学报,2012,14(2):165-175.
- [45] Tenger, Liu Wenhui, Xu Yongchang. The discussion on anoxic environments and its geochemical identifying indices[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(2): 365-370.
- 腾格尔,刘文汇,徐永昌,等.缺氧环境及地球化学判识标志的探讨——以鄂尔多斯盆地为例[J].沉积学报,2004,22(2): 365-370.
- [46] Li Guangzhi, Hu Bin, Deng Tianlong, *et al.* Petroleum geological significance of microelements V and Ni[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(1): 13-17.
- 李广之,胡斌,邓天龙,等.微量元素 V 和 Ni 的油气地质意义[J].天然气地球科学,2008,19(1):13-17.
- [47] Zhao Bangsheng, Li Rongxi, Wang Xiangzeng, *et al.* Sedimentary environment and Preservation conditions of organic matter analysis of Shanxi Formation mud shale in Yanchang exploration area, Ordos Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(6): 103-111.
- 赵帮胜,李荣西,王香增,等.鄂尔多斯盆地延长探区山西组泥页岩沉积地球化学特征及有机质保存条件分析[J].地质科技情报,2016,35(6):103-111.
- [48] Algeo T J, Ingall E. Sedimentary corg: pratio, paleocean ventilation and phanerozoic atmospheric PO<sub>2</sub> [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, 256(3/4): 130-155.
- [49] Algeo T J, Kuwahara K, Sano H, *et al.* Spatial variation in sediment fluxes, redox conditions, and productivity in the Permian-Triassic Panthalassic Ocean[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2011, 308(1/2): 65-83.

- [50] Passey Q R, Bohacs K M, Esch W L, *et al.* From Oil-Prone Source Rock to Gas-Producing Shale Reservoir: Geologic and Petrophysical Characterization of Unconventional Shale-Gas Reservoirs[R]. SPE, 131350, 2010.
- [51] Pedersen T F, Calver S E. Anoxia vs. productivity: What controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rocks? [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(4): 454-466.
- [52] Demaison G J, Moore G T. Anoxic environment sand oil source bed genesis[J]. AAPG Bulletin, 1980, 64(8): 1179-1209.
- [53] Zhang Shuichang, Zhang Baomin, Bian Lizeng, *et al.* Development constraints of marine source rocks in China[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 39-48.
- 张水昌, 张宝民, 边立曾, 等. 中国海相烃源岩发育控制因素[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 39-48.

## Paleoenvironment of organic-rich shale from the Lucaogou Formation in the Fukang Sag, Junggar Basin, China

Shi Jun<sup>1,2</sup>, Zou Yan-rong<sup>1</sup>, Yu Jiang<sup>3</sup>, Liu Jia-jing<sup>3</sup>

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The Junggar Basin is a large oil-gas-bearing basin in China, the Fukang Sag is located in the edge of the southeast of the Junggar Basin and on the north of the Bogda Mountain, which is the secondary sag in the east of the basin. We choose the Lucaogou Formation as the object that is near the Sigonghe River in the Fukang Sag to reveal the level of enrichment of the organic matter and sedimentary environment characteristics in study area. The content of organic matter in vertical profile ranged from 3.67% to 16.0% with an average of 8.5%, showing that the shale is rich in organic matter. Trace element plays a key role in unlocking paleoenvironments because of its stability. We explore the paleoenvironment through investigating paleosalinity, paleoclimate, paleoredox, paleoproductivity, paleo-water-depth, and paleoproductivity. Results suggest that the shale was deposited in the anoxic-suboxic, semi-arid and warm-humid, weak hydrodynamic, and fresh and semi-saline continental deep lake. High TOC in the shale is mainly caused by the primary productivity, and the paleoenvironment has a positive influence on the accumulation of organic carbon.

**Key words:** Shale; Fukang Sag; Lucaogou Formation; Paleoenvironment; Fresh and Semi-saline sedimentary