

新疆博格达山北麓白杨河剖面页岩地球化学 特征及其地质意义

赵仕华

(山东省国土资源厅 煤炭与非常规天然气资源勘查重点实验室, 山东 泰安 271018; 山东泰山矿产资源检测研究院,
山东 泰安 271018; 中国地质大学 构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 通过博格达山北麓白杨河剖面芦草沟组页岩的地球化学特征的综合研究, 讨论了芦草沟组页岩的元素富集特征和沉积环境以及源区物源特征和构造背景。结果表明: ① 研究区页岩 P 元素极为富集, 这受控于页岩中凝灰质火山灰夹层的广泛发育; ② 对比于世界页岩微量元素分布, 白杨河页岩相对富集 Li、B、Pr、Tb、Dy、Ho、Er、Tm 和 Lu 元素, 其他元素相对亏损; ③ 白杨河剖面页岩地化参数揭示芦草沟组自下而上气候由温湿向干热转变, 进而引起水体由淡水向咸水的转变和还原程度的进一步加强; ④ 物源区遭受低级-中等风化程度, 物源类型主要为长英质火成岩, 其次为铁镁质火成岩; ⑤ 物源区大地构造背景以大陆岛弧-活动大陆边缘构造背景为主。

关键词: 博格达山; 芦草沟组; 页岩; 化学蚀变指数

中图分类号: P588.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)02-0255-10

Geochemical characteristics of the Baiyanghe shale in the northern Bogda Mountain of Xinjiang and its geological significance

ZHAO Shi-hua

(Key Laboratory of Unconventional Natural Gas and Coal Resource, Shandong Bureau of Land and Resources, Tai'an 271018, China; Shandong Taishan Institute of Mineral Resource Test and Research, Tai'an 271018, China; Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on the comprehensive research on geochemical characteristics of shale of Lucaogou Formation along the Baiyanghe profile in the northern Bogda Mountain in Xinjiang, the authors investigated the elements distribution and depositional environment of shales of Lucaogou Formation, source characteristics and tectonic setting of the source area. Some conclusions have been reached: ① Baiyanghe shale is evidently enriched in phosphorus, which is ascribed to the development of the volcanic ash, as indicated by the tuffaceous composition of the interbedded mudstone and carbonate layers. ② In comparison with the average concentrations of worldwide shales, the Baiyanghe shale is enriched mainly in Li, B, Pr, Tb, Dy, Ho, Er, Tm and Lu, and depleted in other elements relative to their average values. ③ Geochemical characteristics reveal that there occurred climate change from warm humidity to dry heat from the bottom to top of Lucaogou Formation, which caused the change from freshwater to saltwater and strengthened gradually the reducing environment from the bottom to top of Lucaogou Formation. ④ The source area was under the low-moderate chemical weathering condition. The provenance of shales was mainly felsic igneous rock, followed by femic igneous rock. ⑤ The tectonic setting of the source area was a continental island arc-active continental margin.

Key words: Bogda Mountain; Lucaogou Formation; shale; CIA (chemical index of alteration)

收稿日期: 2014-05-19; 接受日期: 2016-01-21

作者简介: 赵仕华(1980-), 男, 山东临沂人, 在读博士研究生, 主要从事煤田地质、岩矿鉴定分析、非常规天然气检测与评价等领域的研究, E-mail: 273993351@qq.com

细粒沉积物的常、微量元素可作为判断氧化还原条件(Jones and Manning, 1994)、物源特征(刘宝珺, 1980; Taylor and McLennan, 1985; McLennan and Taylor, 1991; Cullers and Podkovyrov, 2000)、源区风化剥蚀程度(Nesbitt and Young, 1982; Cox and Low, 1995; Selvaraj and Chen, 2006)和源区构造背景(Bhatia *et al.*, 1981, 1986; Bhatia, 1983; Rose and Korsch *et al.*, 1986)的重要指标。元素 Sc、Cr 和 Co 等(富集于基性岩中)、元素 Th、La 和 REEs (富集于酸性岩中)、REE 分布模式和 Eu 异常通常作为判断物源来源和源区构造背景的重要依据(Cullers and Podkovyrov, 2000; Cullers, 2002)。本文主要通过博格达山北麓白杨河剖面二叠系芦草沟组黑色页岩地球化学特征的研究, 探讨研究区芦草沟组沉积期的沉积环境和判别源区物源特征、风化剥蚀程度和区域构造背景。

1 地质概况

博格达山位于准噶尔盆地南缘, 天山中段, 为一向北突出、东西向延展的弧形山脉(图 1)。其向西经红雁池、妖魔山并入依连哈比尔尕山, 向东与巴里坤山、卡尔里克山相连。

博格达地区晚石炭世-中二叠世的构造演化, 可

以划分为晚石炭世早期裂谷扩张期(柳树沟组)、晚石炭世中晚期拗陷-萎缩期(祁家沟组-奥尔吐组)、早二叠世的再次扩张期(石人子沟组-塔什库拉组)和中二叠世的盆地拗陷-扩展期(魏红兴, 2007; 白滨, 2008; 李丕龙等, 2010)。其中博格达地区在中二叠世早期(乌拉泊组-井井子沟组)为残余陆表海环境, 在中二叠世晚期(芦草沟组-红雁池组)结束残余陆表海环境而进入湖相盆地演化阶段(魏红兴, 2007; 白滨, 2008; 彭学峰等, 2012), 但此时湖盆可能受间歇性海水影响(彭学峰等, 2012)。芦草沟组地层中出现的吐鲁番鳕鱼化石也进一步表明其为湖相环境(魏红兴, 2007)。芦草沟组沉积期博格达地区具裂谷-拗陷盆地特征(白滨, 2008)或后造山伸展下的盆地特征(王金荣等, 2010), 但都揭示芦草沟组为伸展背景下的湖相沉积。

芦草沟组沉积期博格达地区的物质来源, 普遍认为来自北部的克拉美丽山地区(图 1)(张传恒等, 2005; 李玮等, 2007)。上述源区在晚石炭世-早二叠世为板块俯冲碰撞造山和残余洋盆消亡期(李丕龙等, 2010)。

博格达山主体由石炭系组成, 二叠系主要分布在山的南北两麓(舒良树等, 2005)。其中二叠系芦草沟组(P₂l)和红雁池组(P₂h)是区内主要烃源岩层位, 受后期构造改造而呈带状出露于地表(图 1),

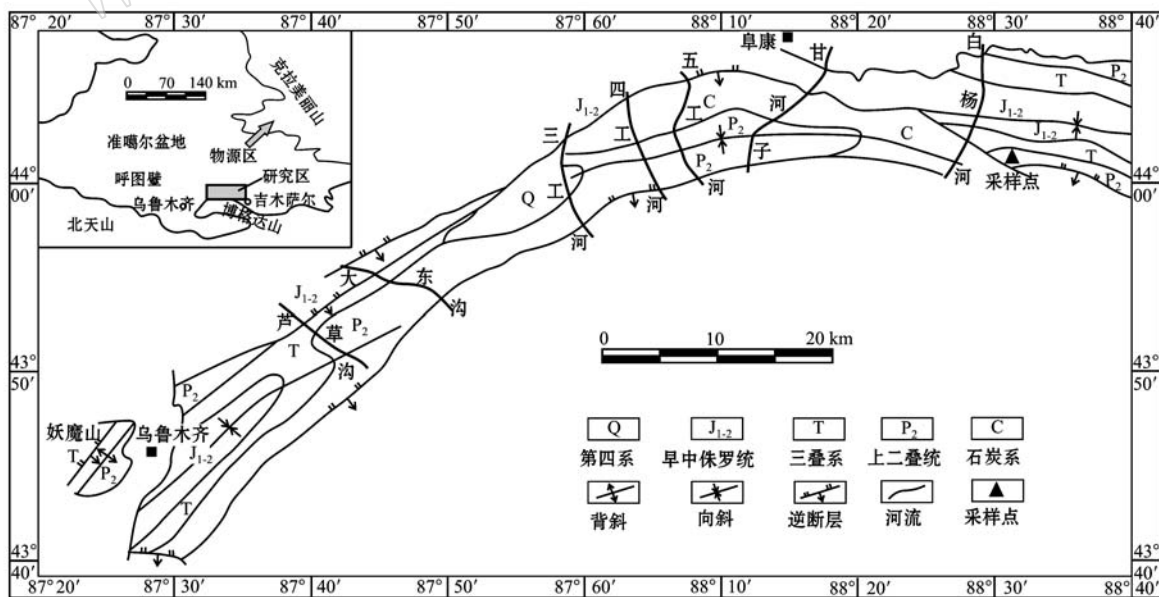


图 1 博格达山北麓地质简图及采样位置(据李成博等, 2006)

Fig. 1 Generalized geological map of the northern foot of the Bogda Mountain, showing sampling sites (after Li Chengbo *et al.*, 2006)

成为规模巨大的二叠纪页岩分布带(李婧婧, 2009)。白杨河剖面位于博格达山山麓东缘(图1)。芦草沟组为此研究层段,其上与中二叠统红雁池组整合接触,下与中二叠统井井子沟组整合接触。芦草沟组岩性复杂,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,可见鱼化石、两栖类及叶肢介、双壳类等。

2 样品及方法

样品采自博格达山北麓白杨河剖面,采样层位为中二叠统芦草沟组,采样平面位置见图1,采样柱状见图2。采样时,掘去表面风化页岩至新鲜面,样品用锡纸包裹送实验室分析。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。页岩样品粉碎至200目进行地球化学分析。常量元素分析

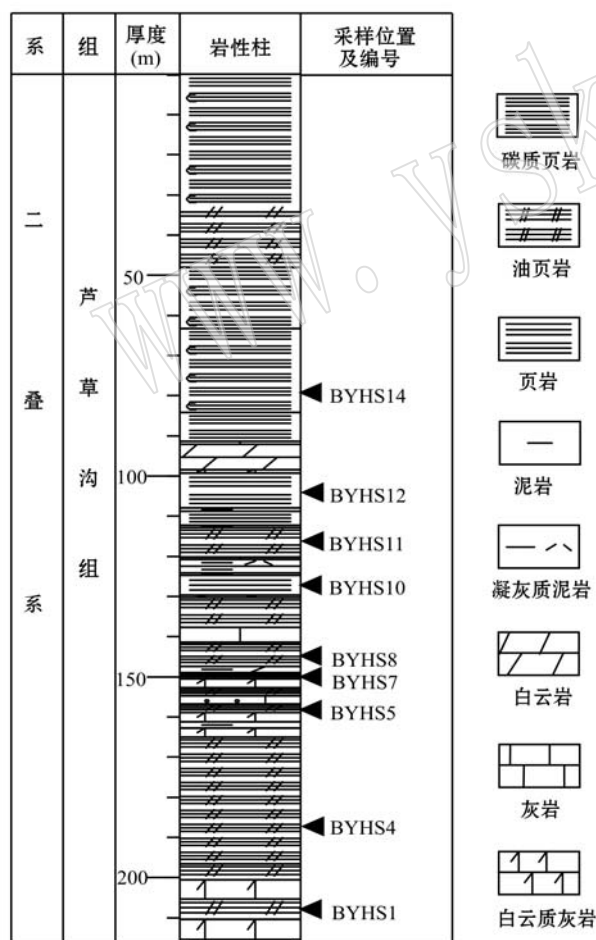


图2 白杨河剖面采样柱状图及采样位置

Fig. 2 Stratigraphic column and locations of sampling sites along the Baiyanghe profile

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。

3 常、微量元素丰度特征

表 1 为白杨河页岩、北美页岩(Gromet *et al.*, 1984)、世界页岩和沉积岩中的常、微量元素丰度(Ketris and Yudovich, 2009)。对比世界页岩微量元素丰度,白杨河页岩的 Li、B、Pr、Tb、Dy、Ho、Er、Tm 和 Lu 元素较富集,富集系数为 1.0~1.7,其他元素低于世界页岩对应元素丰度(图3)。对比世界沉积岩微量元素丰度,白杨河页岩的 Li、B、Cu、Zn、Ga、Zr、Nb、Tb、Dy、Er、Yb、Hf 和 Pb 元素较富集,富集系数为 1.0~1.6,其他元素低于世界沉积岩对应元素丰度(图3)。其中,代表陆源风化产物随河流进入湖盆的外源元素 Li、Cr、Cu、Ni、Pb 和 V 的平均富集系数为 0.58(页岩)和 1.05(沉积岩),代表化学沉积的内源元素 Sr 和 Ba 的平均富集系数为 0.75(页岩)和 0.83(沉积岩),揭示页岩元素组成中既有化学沉积的贡献,又有陆源碎屑矿物的补充。

对比北美页岩常量元素丰度(Gromet *et al.*, 1984),白杨河页岩的 P 元素明显富集,约为世界页岩的 4.1 倍,此与先前相关文献报道相一致(李婧婧, 2009; Tao *et al.*, 2013)。Na 元素相对富集,约为北美页岩的 1.6 倍。其他元素均低于北美页岩对应元素丰度。P 元素的富集可能归因于页岩中凝灰质火山灰夹层的存在(李婧婧, 2009; Tao *et al.*, 2013)。火山灰(富 P)为藻类的生长提供了良好的客观环境,大量藻类的生长消耗了水中的氧,引起水体形成缺氧的还原环境,有利于有机质的保存。

4 讨论

4.1 湖盆的气候、水体咸度及氧化还原特征

邓宏文等(1993)指出 Sr/Cu 比值可用作温湿、干热气候条件的判别指标。Sr/Cu 比值介于 1.3~5.0 指示温湿气候条件, Sr/Cu 比值大于 5.0 指示干热气候条件。研究区样品的 Sr/Cu 比值介于 1.7~

表 1 白杨河页岩常量($w_B/\%$)、微量($w_B/10^{-6}$)元素丰度Table 1 The concentrations of major($w_B/\%$) and trace($w_B/10^{-6}$) elements of the Baiyanghe shales

	BYHS1	BYHS4	BYHS5	BYHS7	BYHS8	BYHS10	BYHS11	BYHS12	BYHS14	均值	页岩 ^b	页岩 ^a	沉积岩 ^a
SiO ₂	55	52	58	52	48	58	51	58	58	54	64.8		
Al ₂ O ₃	11	9.8	11.6	10.3	7.4	11.2	11	13.2	11.2	10.7	16.9		
Fe ₂ O ₃	4.2	3.7	3.2	3.6	2.1	4.9	4.6	4.6	4.2	3.9	5.66		
TiO ₂	0.48	0.45	0.51	0.47	0.33	0.53	0.52	0.61	0.50	0.49	0.70		
P ₂ O ₅	0.27	0.14	0.26	0.19	0.11	0.12	3.3	0.16	0.25	0.53	0.13		
CaO	1.5	2.5	0.39	1.7	5.5	1.2	6.8	0.96	1.1	2.4	3.63		
K ₂ O	1.8	1.5	3.3	2.5	1.5	2.3	2	2.5	2.3	2.2	3.97		
MgO	0.74	3.8	0.4	0.63	4.1	4.5	1.8	1.8	0.98	2.1	2.86		
MnO	0.06	0.08	0.02	0.09	0.05	0.08	0.09	0.06	0.06	0.06	0.06		
Na ₂ O	3.8	2.9	0.93	1.5	1.2	1.2	2	1.7	1.4	1.8	1.14		
FeO	1.1	2.3	1.6	1.0	1.0	2.8	2.2	2.0	2.2	1.8			
Li	30	60	25	32	46	60	46	63	44	45		37	33
Be	2.0	1.7	1.3	1.4	1.0	1.6	1.7	2.1	1.4	1.6		2.6	1.9
B	31	98	60	57	71	181	185	217	124	114		65	72
V	88	66	59	68	42	113	98	102	76	79		180	91
Cr	53	42	36	45	33	42	44	52	42	43		93	58
Ni	32	31	44	41	24	35	33	42	30	35		67	37
Cu	35	39	51	42	28	39	35	55	39	40		140	31
Zn	79	68	58	57	38	91	59	60	71	65		160	43
Ga	15	14	15	12	10	16	13	17	14	14		17	12
Rb	61	56	87	68	55	78	67	87	68	70		76	94
Sr	132	145	87	119	332	165	579	187	204	217		230	270
Y	27	17	24	17	18	19	26	21	19	21		23	29
Zr	134	152	129	130	123	152	200	179	148	150		200	170
Nb	10.7	9.2	9.7	8.6	6.7	9.5	8.5	10.9	8.2	9.1		15	7.6
Cd	0.17	0.13	0.09	0.18	0.12	0.14	0.14	0.15	0.33	0.16		6.2	0.8
Ba	406	274	345	334	290	312	373	346	453	348		630	410
La	25	18	19	17	18	19	21	23	20	20		26	32
Ce	47	33	41	32	33	36	36	42	37	37		55	52
Pr	6.5	4.4	5.5	4.2	4.4	4.9	5.2	5.8	5.1	5.1		4.4	6.8
Nd	24	17	22	17	17	19	20	22	20	20		29	24
Sm	5.2	3.5	5.0	3.5	3.6	4.0	4.2	4.5	4.0	4.1		4.5	5.5
Eu	0.79	0.64	0.94	0.68	0.68	0.79	0.88	0.92	0.83	0.79		1.00	0.94
Gd	4.7	3.0	4.3	3.0	3.2	3.4	3.9	3.9	3.5	3.7		4.3	4
Tb	0.87	0.53	0.79	0.55	0.56	0.59	0.73	0.68	0.61	0.66		0.66	0.69
Dy	5.1	3.2	4.6	3.2	3.3	3.5	4.3	4.0	3.7	3.9		2.9	3.6
Ho	1.01	0.65	0.93	0.62	0.66	0.71	0.95	0.77	0.72	0.78		0.50	0.92
Er	3.0	1.9	2.7	1.9	1.9	2.1	2.9	2.4	2.1	2.3		1.8	1.7
Tm	0.46	0.30	0.41	0.29	0.30	0.34	0.46	0.37	0.31	0.36		0.35	0.78
Yb	3.1	2.1	2.9	2.0	2.0	2.3	3.2	2.5	2.3	2.5		2.8	2
Lu	0.49	0.35	0.46	0.33	0.30	0.38	0.51	0.41	0.36	0.40		0.35	0.44
Hf	4.2	4.0	3.2	3.4	3.2	4.2	4.5	5.2	3.6	3.9		4.5	3.9
Ta	0.65	0.46	0.47	0.34	0.27	0.55	0.13	0.60	0.39	0.43		0.8	1
Pb	17.2	11.5	14.9	13.5	11.3	12.3	11.5	16.8	12.6	13.5		25	12
Th	5.5	4.6	5.4	4.5	4.0	5.1	3.4	5.3	4.6	4.7		7.8	7.7
U	3.5	2.5	2.9	2.3	2.8	2.0	3.8	2.4	2.9	2.8		9.9	3.4

注: 数据来源页岩^a(Ketris *et al.*, 2009), 沉积岩^a(Ketris *et al.*, 2009), 页岩^b(Gromet *et al.*, 1984)。

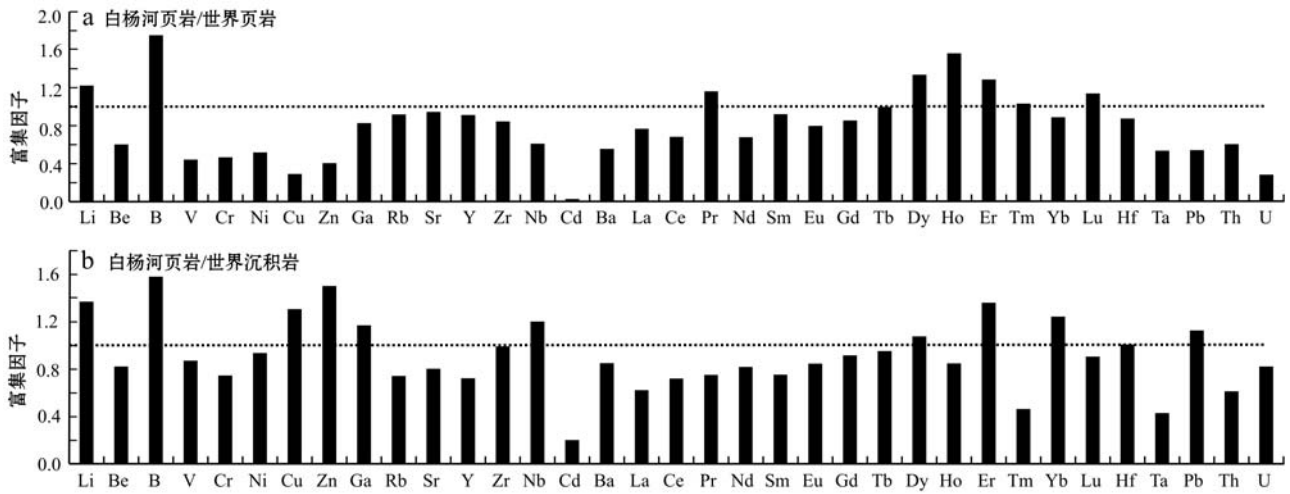


图 3 白杨河页岩微量元素富集因数

Fig. 3 The concentration factors of trace elements of the Baiyanghe shale

表 2 白杨河页岩的地球化学参数

Table 2 The geochemical indices of the Baiyanghe shales

样品	相当 B	B/Ga	Sr/Cu	Mn/Ti	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Al/(Al+ Fe+Mn)	Si/(Si+ Al+Fe)	ICV	CIA	Th/U	Al ₂ O ₃ / TiO ₂	Cr/Zr	Th/Cr	La/Th
BYHS1	118	2.0	3.8	0.16	5.0	0.60	0.73	1.4	52	1.6	23	0.40	0.104	4.5
BYHS4	453	7.2	3.7	0.23	5.3	0.54	0.72	2.4	48	1.8	22	0.28	0.107	3.9
BYHS5	127	4.1	1.7	0.05	5.0	0.64	0.74	0.8	69	1.9	23	0.28	0.151	3.6
BYHS7	158	4.6	2.8	0.25	5.1	0.62	0.74	1.2	57	2.0	22	0.35	0.099	3.8
BYHS8	331	7.3	11.6	0.20	6.5	0.63	0.79	2.4	57	1.4	22	0.27	0.122	4.4
BYHS10	546	11.5	4.2	0.19	5.2	0.51	0.71	1.9	64	2.5	21	0.28	0.122	3.8
BYHS11	644	13.8	16.4	0.23	4.7	0.54	0.69	1.6	55	0.9	21	0.12	0.077	6.1
BYHS12	602	12.4	3.4	0.12	4.4	0.59	0.70	1.2	66	2.2	22	0.29	0.103	4.3
BYHS14	373	8.8	5.2	0.14	5.2	0.56	0.72	1.1	64	1.6	22	0.28	0.109	4.3
均值	373	8.0	5.9	0.17	5.1	0.58	0.73	1.5	59	1.8	22	0.28	0.110	4.3

16.4(均值为 5.9), 自下至上呈增大趋势(图 4), 揭示下部页岩沉积期以温湿气候为主, 上部以温湿-干热气候为主。

相当 B 和 B/Ga 参数可用以指示水体的盐度 (Degens *et al.*, 1957; 李婧婧, 2009)。相当 B < 200 × 10⁻⁶ 指示淡水沉积, 200 × 10⁻⁶ ~ 300 × 10⁻⁶ 指示半咸水, > 300 × 10⁻⁶ 指示咸水沉积(李婧婧, 2009)。B/Ga 小于 2.5 指示淡水环境, 介于 2.5 ~ 4.0 指示过渡环境, 大于 4.0 指示咸水环境(Chen *et al.*, 1997)。研究区样品的相当 B 含量介于 118 × 10⁻⁶ ~ 644 × 10⁻⁶ 之间, B/Ga 比值介于 2 ~ 14 之间(表 2)。水体咸度垂向变化揭示自下而上水体盐度呈增加趋势, 下部以淡水为主, 向上逐渐以咸水为主(图 4)。

Jones 等(1994)指出 V/(V + Ni) 比值可用作氧化还原条件的判识指标。V/(V + Ni) 比值大于 0.54

指示厌氧环境, 介于 0.46 ~ 0.54 指示贫氧环境, 小于 0.46 指示富氧环境。研究区样品 V/(V + Ni) 比值介于 0.57 ~ 0.76 之间, 表明页岩沉积期为还原环境。此外, δCe 的负异常也揭示还原环境的存在(图 4)。氧化还原参数的垂向变化揭示剖面自下而上还原性主体增强。

白杨河剖面自下而上水体咸度和氧化还原条件的变化可能受控于气候条件。剖面自下而上随干热气候的逐渐增强, 水体蒸发量逐渐增加, 导致水体盐度增加, 产生水体分层, 易于形成还原环境。

4.2 源区物源特征

地化参数 SiO₂/Al₂O₃ 比值 (Taylor and McLennan, 1985)、Al/(Al + Fe + Mn) 比值 (刘宝珺, 1980) 和 Si/(Si + Al + Fe) 比值 (贵州省地质矿产局, 1987) 常用以判断物源的来源类型。陆壳中 SiO₂/Al₂O₃ 为 3.6,

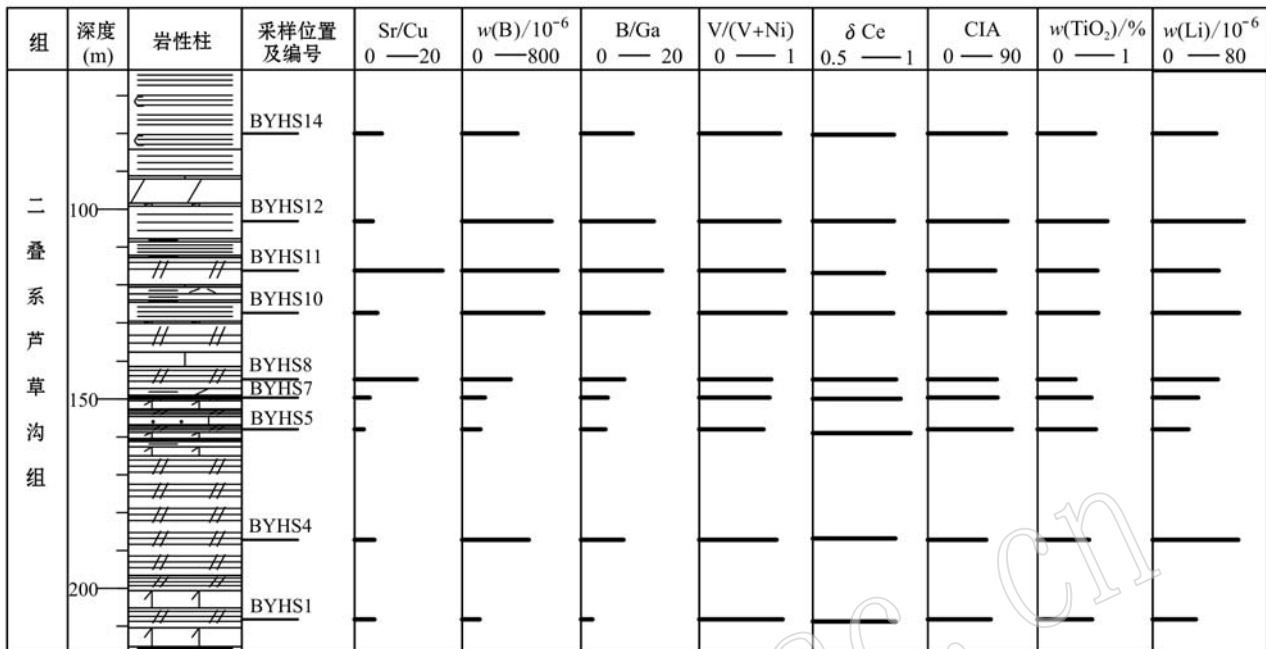


图 4 白杨河页岩地化参数垂向特征(岩性符号同图 2)

Fig. 4 Vertical characteristics of geochemical parameters for the Baiyanghe shale (lithologic symbols as for Fig. 2)

沉积岩中 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值接近 3.6 指示物源以陆源沉积为主, 此值超过较多则是受生物或热水作用影响较大; $\text{Al}/(\text{Al} + \text{Fe} + \text{Mn}) > 0.5$ 指示沉积物源主要为陆源碎屑, $\text{Al}/(\text{Al} + \text{Fe} + \text{Mn}) < 0.35$ 指示沉积物来源有热水加入; $\text{Si}/(\text{Si} + \text{Al} + \text{Fe}) < 0.9$ 指示物源主要为陆源碎屑, 比值介于 0.9~1.0 指示物源主要为生物作用。研究区页岩的上述地化参数揭示沉积物物源类型主要为陆源碎屑来源(表 2)。

Nesbitt 等(1982)提出了化学蚀变指数(CIA)用以判别物源区的风化程度, 但考虑到老地层中细屑岩的再循环沉积会改变其原始成分, 需用另一个化学指数即成分变异指数(ICV)判断物源区物质是否经历再循环沉积。成分变异指数定义为 $\text{ICV} = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}^* + \text{MgO} + \text{TiO}_2) / \text{Al}_2\text{O}_3$ (Cox *et al.*, 1995), 主要成分为摩尔分数, CaO 为硅酸盐中的 CaO。当 ICV 值大于 1 时, 表明其含粘土矿物较少, 属构造活动时期的初始沉积; 当 ICV 小于 1 时, 表明其含较多粘土矿物, 可能经历了再沉积作用或强烈风化条件下的初始沉积(Cullers and Podkovyrov, 2000; Cullers, 2002)。本研究中计算的 ICV 值绝大多数大于 1, 表明样品几乎未受到再沉积作用的影响, 因而 CIA 可真实反映源区风化剥蚀程度。化学蚀变指数 $\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* +$

$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) \times 100]$ 。对于 CaO^* 的计算和校正, McLennan 等(1993)提出: $\text{CaO}^* = \text{CaO} - (10/3 \times \text{P}_2\text{O}_5)$, 比较校正后 CaO 摩尔数与 Na_2O 摩尔数大小, 取小者作为 CaO^* 的摩尔数。Selvaraj 等(2006)指出 CIA 介于 50~60 之间反应初级风化程度, 60~80 反应中等风化程度, 80~100 反应强烈风化程度。研究区样品的 CIA 介于 48~69(均值为 59), 揭示物源区遭受了初级-中等风化程度。

地化参数 Th/U 值 (McLennan and Taylor, 1991)、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值 (Girty *et al.*, 1996)、Cr/Zr 值 (Wronkiewicz and Condie, 1989) 和 Zr - TiO_2 物源判识图 (Hayashi *et al.*, 1997) 常用以判断源区物源类型。地壳粘土岩中 Th/U 比值为 3.4, 上地壳 Th/U 值为 3.8, 其值偏低表明有来自深部铁镁物源的存在; $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 < 14$ 指示物源为铁镁质火山岩, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值介于 18~26 指示物源为长英质火山岩; Cr/Zr 值能够反映物源区铁镁质与长英质组分的相对比例, 因 Cr 赋存于铬铁矿石中, 代表铁镁质组分, 而 Zr 赋存于锆石中, 代表长英质组分。研究区页岩的 Th/U 值介于 0.88~2.53, 揭示有来自深部铁镁物源的存在。Tarney(1976)提出的 $\text{SiO}_2 - \text{TiO}_2$ 图解揭示物源主要来自于火山岩源区(图 5a)。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值和 Zr - TiO_2 图解揭示物源主要为长

英质火成岩(图 5b)。Cr/Zr 值介于 0.11~0.39 之间,平均值为 0.27,揭示物源区长英质组分占绝对优势(73%),铁镁质组分比例相对较小(27%)。此外,Cullers 等(2000)指出酸性来源细粒沉积物 Th/Cr 值介于 0.067~4.0,基性来源细粒沉积物 Th/Cr 值介于 0.002~0.045。研究区样品的 Th/Cr 值介于 0.08~0.15 之间,揭示物源主要为酸性来源细粒沉积物。

4.3 源区构造背景

尽管沉积岩的化学成分受物源类型、风化条件、搬运方式及成岩作用等多种因素的制约,但沉积岩中的性质稳定化学元素(例如稀土元素,大离子元素 Rb、Zr、Y 和 Yb 等)的地球化学特征研究可以推断

源区的大地构造背景,这方面国内外学者总结了一系列沉积岩大地构造背景的判别图解(Bhatia, 1983; Bhatia *et al.*, 1981, 1986; Roser and Korsch, 1986)。

Roser 等(1986)提出了 $\text{SiO}_2 - (\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O})$ 构造背景判别图解,用以判别沉积物源区的大地构造背景。研究区样品的 $\text{SiO}_2 - (\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O})$ 构造背景判别图解揭示中二叠世芦草沟组沉积期,源区构造背景为大陆岛弧-活动大陆边缘背景(图 5c)。

Bhatia 等(1981)指出大陆岛弧构造背景下,沉积岩 La/Th 值为 4.5, Hf 介于 $4 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$ 之间。研究区样品的 La/Th 值介于 3.56~6.11(均值为 4.39), Hf 值介于 $3.2 \times 10^{-6} \sim 5.2 \times 10^{-6}$ (均值为

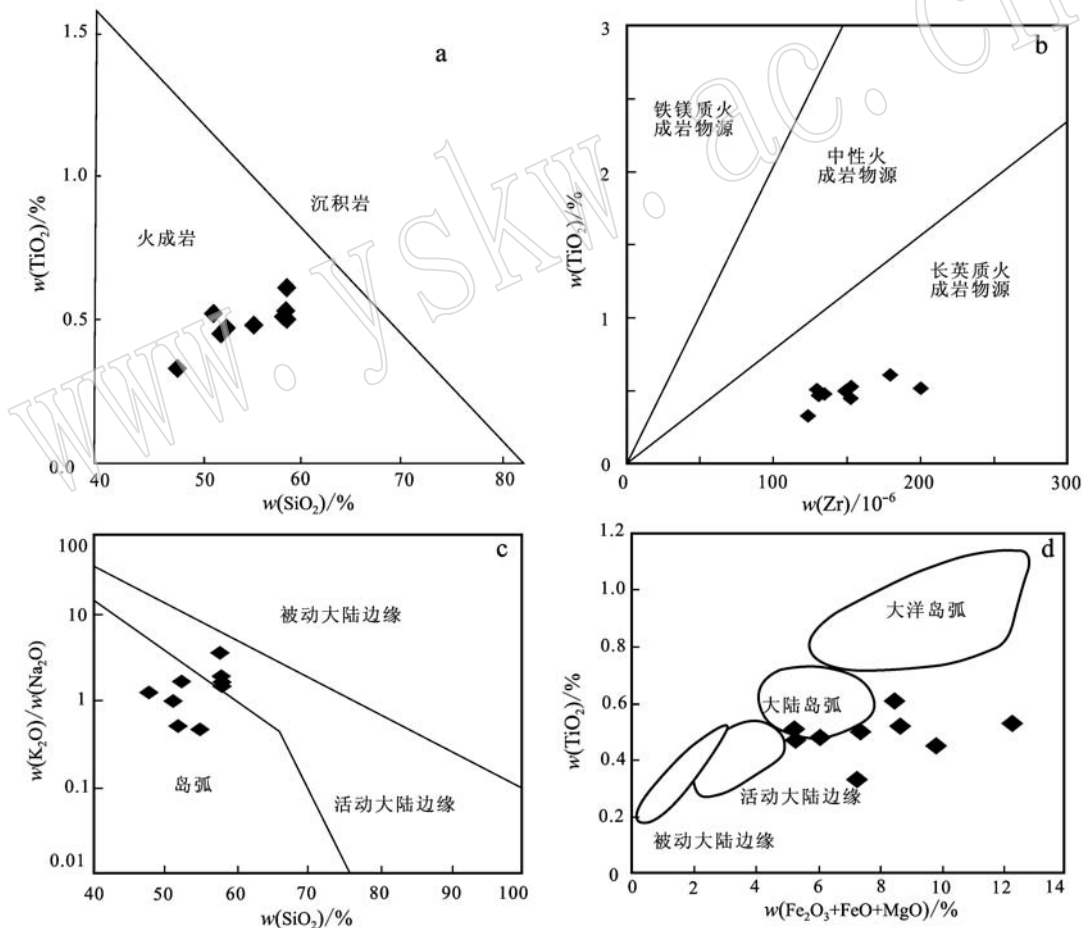


图 5 物源和构造背景判别图解

Fig. 5 The discrimination diagrams of provenance and tectonic setting

a— $\text{SiO}_2 - \text{TiO}_2$ 物源判别图(Tarney, 1976); b—Zr - TiO_2 物源判别图(Hayashi *et al.*, 1997); c— $\text{SiO}_2 - (\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O})$ 构造判别图解

(Roser and Korsch, 1986); d— $\text{TiO}_2 - (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO})$ 构造判别图解(Bhatia, 1983)

a— $\text{SiO}_2 - \text{TiO}_2$ source discrimination diagram (Tarney, 1976); b—Zr - TiO_2 source discrimination diagram (Hayashi *et al.*, 1997);

c— $\text{SiO}_2 - (\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O})$ tectonic discrimination diagram(Roser and Korsch, 1986); d— $\text{TiO}_2 - (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO})$ tectonic discrimination diagram (Bhatia, 1983)

为 4.0×10^{-6}), 也指示了大陆岛弧构造背景。Bhatia(1983)提出了 $TiO_2 - (Fe_2O_3 + FeO + MgO)$ 图解, 研究区样品点落入大陆岛弧区(图 5d), 表明源区构造背景主体为大陆岛弧构造背景。Bhatia(1985)总结了不同构造环境下砂岩、泥岩的稀土元素特征判

别标志(表 3), 研究区样品的稀土元素值 La 、 Ce 、 ΣREE 、 La/Yb 、 $LREE/HREE$ 和 $(La/Yb)_N$ 与大陆岛弧背景相似, 物源来自切割岩浆弧, 而 δEu 值与活动大陆边缘相似, 物源来自于基底隆起, 揭示源区构造背景为大陆岛弧-活动大陆边缘背景。

表 3 页岩样品均值和不同构造背景沉积盆地砂岩的 REE 特征比较

Table 3 The comparison of rare earth element of graywackes between various tectonic settings and the Baiyanghe shales

构造背景	源区类型	La	Ce	ΣREE	La/Yb	LREE/HREE	$(La/Yb)_N$	δEu
大洋岛弧	未切割的岩浆弧	8 ± 1.7	19 ± 3.7	58 ± 10	4.2 ± 1.3	3.8 ± 0.9	2.8 ± 0.9	1.04 ± 0.11
大陆岛弧	切割的岩浆弧	27 ± 4.5	59 ± 8.8	146 ± 20	11 ± 3.6	7.7 ± 1.7	7.5 ± 2.5	0.79 ± 0.13
活动大陆边缘	基底隆起	37	78	186	12.5	9.1	8.5	0.6
被动大陆边缘	克拉通内构造高地	39	85	210	15.9	8.5	10.8	0.56
	样品均值	20 ± 2.5	37 ± 5.1	102 ± 14	8.1 ± 1.0	6.0 ± 0.5	5.4 ± 0.6	0.63 ± 0.06

4.4 源区构造背景与盆地构造背景

芦草沟组页岩的地球化学特征揭示源区主要为大陆岛弧-活动大陆边缘背景, 与前人对准噶尔北部造山带构造背景研究成果相一致(李丕龙等, 2010)。在晚石炭世-早二叠世, 准噶尔盆地北缘处于板块俯冲碰撞造山和残余洋盆消亡阶段, 为明显的活动大陆边缘-岛弧环境。造山作用之后往往有一个应力相对松弛的后造山伸展期, 此时岩石圈的热作用有利于张性盆地的形成(李丕龙等, 2010)。故中二叠世时期, 博格达山地区在拉张背景下形成了一套区域广泛分布的芦草沟组烃源岩。另外, 博格达山地区的火山岩地球化学证据也表明芦草沟组形成于后造山伸展阶段(王金荣等, 2010)。

5 结论

(1) 对比世界页岩微量元素丰度, 白杨河页岩相对富集 Li、B、Pr、Tb、Dy、Ho、Er、Tm 和 Lu 元素, 其他元素相对亏损; 对比世界沉积岩中微量元素丰度, 白杨河页岩相对富集 Li、B、Cu、Zn、Ga、Zr、Nb、Tb、Dy、Er、Yb、Hf 和 Pb 元素, 其他元素相对亏损。常量元素 P 十分富集, 此归因于页岩中凝灰质火山灰夹层的广泛发育。

(2) 白杨河剖面自下而上, 地化参数揭示气候由温湿转变为干热, 进而导致水体分层, 咸度由淡水转变为半咸水-咸水, 水体还原程度进一步增强。

(3) 研究区源区遭受低级-中等风化程度, 源区物源主要为长英质火成岩陆源碎屑, 其次为铁镁质火成岩陆源碎屑。

(4) 页岩地化参数及构造背景判别图解揭示源区构造背景以大陆岛弧-活动大陆边缘构造背景为主。

致谢 感谢新疆地矿局第九地质大队在野外工作和收集资料方面给予的帮助。

References

- Bai Bin. 2008. Tectono-sedimentary evolution and its controls on basin petroleum geological condition of south margin of Junggar[D]. Xi'an: Northwest University(in Chinese with English abstract).
- Bhatia M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. *Journal of Geology*, 91: 611~627.
- Bhatia M R. 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: provenance and tectonic control[J]. *Sedimentary Geology*, 45: 97~113.
- Bhatia M R and Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic discrimination of sedimentary basins[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92: 181~193.
- Bhatia M R and Taylor S R. 1981. Trace element geochemistry and sedimentary provinces: a study from the Tasman Geosyncline, Australia [J]. *Chemical Geology*, 33: 115~126.
- Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province. 1987. Regional Geology of Guizhou Province[M]. Beijing: Geology Press, 25~58(in Chinese with English abstract).
- Chen Z, Chen Z and Zhang W. 1997. Quaternary stratigraphy and trace element indices of the Yangtze Delta, Eastern China, with special reference to marine transgressions[J]. *Quaternary Research*, 47(2):

- 181~191.
- Cox R and Low D R. 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 2 919~2 940.
- Cullers R L. 2002. The source and origin of terrigenous sedimentary rocks in the Mesoproterozoic Uj group, southeastern Russia[J]. *Precambrian Research*, 117: 157~183.
- Cullers R L and Podkovyrov V M. 2000. Geochemistry of the Mesoproterozoic Lakhanda shales in southeastern Yakutia, Russia: Implication for mineralogical and provenance control and recycling[J]. *Precambrian Research*, 104: 77~93.
- Degens E T, Williams E G and Keith M L. 1957. Environmental studies of carboniferous sediments part I: Geochemical criteria for different marine from freshwater shales[J]. *AAPG*, 41: 2 427~2 455.
- Deng Hongwen and Qian Kai. 1993. Depositional Geochemical and Environment Analysis[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 4~28, 97(in Chinese with English abstract).
- Girty G H, Ridge D L, Knaack C, *et al.* 1996. Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite, Sierra Nevada, CA[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 66: 107~118.
- Gromet L P, Dymek R F, Haskin L A, *et al.* 1984. The North American shale composite: its compilation, major and trace element characteristics[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48: 2 469~2 482.
- Hayashi K, Fujisawa H, Holland H D, *et al.* 1997. Geochemistry of 1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61: 4 115~4 137.
- Jones B and Manning D A C. 1994. Comparison of geological indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 111: 111~129.
- Ketris M P and Yudovich Y E. 2009. Estimations of Clarkes for carbonaceous biolithes: world average for trace element contents in black shales and coals[J]. *International Journal of Coal Geology*, 78: 135~148.
- Li Chengbo, Guo Wei, Song Yuqin, *et al.* 2006. The genetic type of the oil shale at the northern foot of Bogda mountain in Xinjiang and prediction for favorable areas[J]. *Journal of Jilin Unive rsity (Earth Science Edition)*, 36(6): 949~953(in Chinese with English abstract).
- Li Jingjing. 2009. Study on oil shale geochemistry of Permian lucaogou formation in the northern bogda mountain[D]. Beijing: Chinese University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Li Peilong, Feng Jianhui, Lu Yongchao, *et al.* 2010. The Sediment, Tectonic and Reservoir Formation in the Zhungar Basin[M]. Beijing: Geology Press, 1~340(in Chinese with English abstract).
- Li Wei, Hu Jianmin, Li Dunpeng, *et al.* 2007. Analysis of the Late Paleozoic and Mesozoic Paleocurrents and its constructional significance of the Northern Bogdashan, Xinjiang[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 25(2): 283~292(in Chinese with English abstract).
- Liu Baojun. 1980. Sedimentary Petrology[M]. Beijing: Geology Press, 1~497(in Chinese with English abstract).
- McLennan S M and Taylor S R. 1991. Sedimentary rocks and crustal evolution: tectonic setting and secular trends[J]. *J. Geol.*, 91(1): 1~22.
- McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, *et al.* 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics[A]. Johnson M J and Basu A. Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments[D]. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 284: 21~40.
- Nesbitt H W and Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 299: 715~717.
- Peng Xuefeng, Wang Lijin, Jiang Liping, *et al.* 2012. Geochemical characteristics of the Lucaogou formation oil shale in the southeastern margin of the Junggar basin and its environmental implication[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 31(2): 121~127(in Chinese with English abstract).
- Roser B P and Korsch R J. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone - mudston suite using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ration [J]. *Geology*, 94(5): 635~650.
- Selvaraj K and Chen C T A. 2006. Moderate Chemical Weathering of Subtropical Taiwan: Constraints from Solid-Phase Geochemistry of Sediments and Sedimentary Rocks[J]. *The Journal of Geology*, 114 (1): 101~116.
- Shu Liangshu, Zhu Wenbin, Wang Bo, *et al.* 2005. The post-collision intracontinental rifting and olistostrome on the southern slope of Bogda mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 25~36(in Chinese with English abstract).
- Tarney J. 1976. Geochemistry of Archaean high grade gneisses with implications as to the origin and evolution of the Precambrian crust[A]. Windley B F. *The Early History of the Earth*[C]. Wiley, New York, 405~418.
- Tao Shu, Tang Dazhen, Xu Hao, *et al.* 2013. Organic geochemistry and elements distribution in Dahuangshan oil shale, southern Junggar Basin: Origin of organic matter and depositional environment[J]. In-

- ternational Journal of Coal Geology, 115: 41~51.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. London, Blackwell, 312.
- Wang Jinrong, Li Taide, Tian Liping, *et al.* 2010. Late Paleozoic tectono-magmatic evolution in Bogda orogenic belt, Xinjiang: Evidence from geochemistry of volcanic rocks[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(4): 1 103~1 115(in Chinese with English abstract).
- Wei Hongxing. 2008. The structural characteristics and evolution of orogenic belt in southern Bogda[D]. Xi'an: Northwest University (in Chinese with English abstract).
- Wronkiewicz D J and Condie K C. 1989. Geochemistry and provenance of sediments from the Pongola Supergroup, South Africa: Evidence for a 3.0 Ga continental craton[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 53: 1 537~1 549.
- Zhang Chuanheng, Liu Dianbo, Zhang Chuanlin, *et al.* 2005. Stratigraphic constraints on the initial up lift age of Bogda Shan, Xinjiang, northwest China[J]. Earth Science Frontiers, 12(1): 294~302(in Chinese with English abstract).
- 白 滨. 2008. 准噶尔南缘构造沉积演化及其控制下的基本油气特征[D]. 西安: 西北大学.
- 邓宏文, 钱 凯. 1993. 沉积地球化学与环境分析[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 4~28, 97.
- 贵州省地质矿产局. 1987. 贵州省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 25~58.
- 李成博, 郭 巍, 宋玉勤, 等. 2006. 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, 36(6): 949~953.
- 李婧婧. 2009. 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.
- 李丕龙, 冯建辉, 陆永潮, 等. 2010. 准噶尔盆地构造沉积与成藏[M]. 北京: 地质出版社, 1~340.
- 李 玮, 胡建民, 黎敦朋, 等. 2007. 新疆博格达山北缘晚古生代-中生代古水流样式转折及其构造意义[J]. 沉积学报, 25(2): 283~292.
- 刘宝珺. 1980. 沉积岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1~497.
- 彭学峰, 汪立今, 姜丽萍, 等. 2012. 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, 31(2): 121~127.
- 舒良树, 朱文斌, 王 博, 等. 2005. 新疆博格达南缘后碰撞期陆内裂谷和地下水滑塌构造[J]. 岩石学报, 21(1): 25~36.
- 王金荣, 李泰德, 田黎萍, 等. 2010. 新疆博格达造山带晚古生代构造-岩浆演化过程: 火山岩组合及地球化学证据[J]. 岩石学报, 26(4): 1 103~1 115.
- 魏红兴. 2007. 博格达山南缘构造特征及其形成演化[D]. 西安: 西北大学.
- 张传恒, 刘典波, 张传林, 等. 2005. 新疆博格达山初始隆升时间的地层学标定[J]. 地学前缘, 12(1): 294~302.

附中文参考文献