

中哈边境伊犁地区中二叠统沉积环境的地球化学判别

冯杨伟, 姜亭, 宋博, 牛亚卓

中国地质调查局西安地质调查中心, 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室,
中国地质调查局造山带地质研究中心, 西安, 710054

内容提要: 细粒沉积物中的暗色泥岩是利用地球化学指标进行沉积环境分析的最有利载体之一。中哈边境伊犁地区中二叠世泥岩较为发育, 厘定泥岩形成时的沉积环境对其是否可以成为烃源岩和其生成油气潜力十分关键。本次研究主要从暗色泥岩主量元素、微量元素分析、稀土元素分析结果为基础, 选用对沉积环境反映比较敏感的元素, 分析研究区地层中微量元素含量及其比值与沉积介质环境之间的对应关系, 进而探讨伊犁地区中二叠世沉积期的湖盆气候条件、盐度、氧化还原条件等沉积环境特征。研究结果表明: $[m(\text{Sr})/m(\text{Ba})]$ 、 $[m(\text{B})/m(\text{Ga})]$ 和硼质量分数 $w(\text{B})$ 共同反映出伊犁地区中二叠世为较咸水—咸水的沉积环境, 且从早期的晓山萨依期向晚期的铁木里克期湖盆古盐度逐渐升高; δU 、 Th/U 和 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 揭示出伊犁地区中二叠统为缺氧环境下的产物, 沉积环境为水体分层不强的厌氧环境—水体分层及底层水体中出现 H_2S 的厌氧环境的过渡; 依据中二叠世泥岩北美页岩标准化分布推测当时沉积应为化学风化作用较弱的较干燥气候, 同时水体可能较安静。综上分析认为: 伊犁地区中二叠世处于干燥缺氧的咸水环境, 且从早到晚沉积环境水体的还原性逐渐增强, 盐度逐渐增高。

关键词: 伊犁地区; 铁木里克组; 古盐度; 氧化—还原条件; 地球化学判别

中哈边境伊犁地区处于丝绸之路经济带建设的重要位置, 也是近年来中国北方石炭—二叠系油气基础地质调查的热点地区之一。前人工作表明, 伊犁地区中二叠统发育多套泥岩, 是潜在的烃源岩层位。这些泥岩形成时的沉积环境对其是否可以成为烃源岩和其生成油气潜力起到了控制作用。前人针对伊犁地区二叠纪沉积环境开展过一些工作, 他们主要通过沉积充填特征 (Hao Jipeng et al., 2003) 或者借助地震剖面与钻井数据 (Zhong Hongli, 2012) 来恢复二叠纪的岩相古地理, 或者在对整个北疆开展大区域沉积环境分析的时候探讨了伊犁盆地二叠纪沉积环境 (Miao Jianyu, 2001)。伊犁地区中二叠世沉积环境恢复工作很薄弱, 尤其是运用泥岩地球化学特征来开展相关工作。细粒沉积物中的暗色泥岩是利用地球化学指标进行沉积环境分析的最有利载体之一, 通过对沉积岩中微量元素含量及分布, 尤其是一些相关元素比值的研究, 可以推断当时的沉积环境, 反演沉积时期的地质条件 (Wang Yiyong et al., 1979; Song Mingshui, 2005)。“源”是油气基础地质调查的首要目标, 因此泥岩的沉积

环境分析迫在眉睫, 同时细粒沉积物中的泥岩是利用地球化学指标进行沉积环境分析的最有利载体之一。

沉积岩中的微量元素常与其形成环境有密切关系 (Liu Baojun et al., 1985), 运用沉积物元素含量的波动性提取环境演变信息是研究环境演变的常用手段之一。在不同的表生自然环境下, 不同元素的分解、迁移、富集等特征不同, 因此元素含量在沉积物中的波动在一定程度上反映沉积时的环境条件 (Yu Suhua et al., 1999)。在沉积过程中, 沉积物与水介质之间有着复杂的地球化学平衡, 如沉积物对某些元素的吸附及沉积物与水介质之间的元素交换等。这种吸附和交换作用除与元素本身性质有关外, 还受到沉积介质物理化学条件的影响, 而不同沉积环境的水介质有不同的物理化学条件, 元素的分散与聚集的规律也不相同, 这就为利用沉积物微量元素及其含量进行古环境分析提供了理论依据 (Bailey et al., 1996; Zhang Yigang, 2005)。是十分可靠的参数。

本文以中哈边境伊犁地区的露头剖面中二叠统

注: 本文为中国地质调查局地质调查项目 (编号: DD20160172、DD20160200) 和国家自然科学基金项目 (批准号: 41502081) 共同资助的成果。

收稿日期: 2016-10-08; 改回日期: 2017-02-20; 责任编辑: 郝梓国, 黄敏。

作者简介: 冯杨伟, 男, 1987 年生, 博士, 助理研究员。主要从事沉积学与盆地分析方面的研究工作。Email: 2005130009@163.com。

泥岩样品主量元素、微量元素和稀土元素的测试结果为基础,结合区域地质背景,选用对沉积环境反映比较敏感的元素,分析研究区地层中微量元素含量及其比值与沉积介质环境之间的对应关系,进而探讨伊犁地区中二叠世沉积期的湖盆气候条件、盐度、氧化还原条件等沉积环境特征,以便为该区油气地质评价提供沉积环境方面的支持。

1 区域地质背景

伊犁地区位于中天山构造带内,属于中亚成矿域的一部分(Tu Guangzhi, 1999; Ren Jishun et al., 2016)。伊犁地区是发育在中天山微板块上的独立单元(Wang Bo et al., 2007; Han Baofu et

al., 2011),属于山间叠合盆地(Dai Shifeng et al., 2015)。南邻哈里克套—那拉提中、南天山板块间的早、中古生代碰撞造山带,北以科古琴—博罗霍洛早、中古生代陆内造山带为界。东端在南北天山交汇处收敛,西与楚河—萨雷苏盆地为邻,构成菱形中新世山间盆地。盆内发育 4 个一级构造单元:伊宁凹陷、尼勒克凹陷、巩乃斯凹陷和阿吾拉勒凸起(Li Yuwen et al., 2011; Li Baoqing et al., 2014)。伊犁地区内断裂的展布大多与区域构造线方向一致,北部以北西西向为主,中部以近东西向为主,南部以南西西向为主,还有一些北西向和北东向的断裂。伊宁地区晚古生界分布十分广泛,盆地周缘和内部均有露头分布(图 1)。

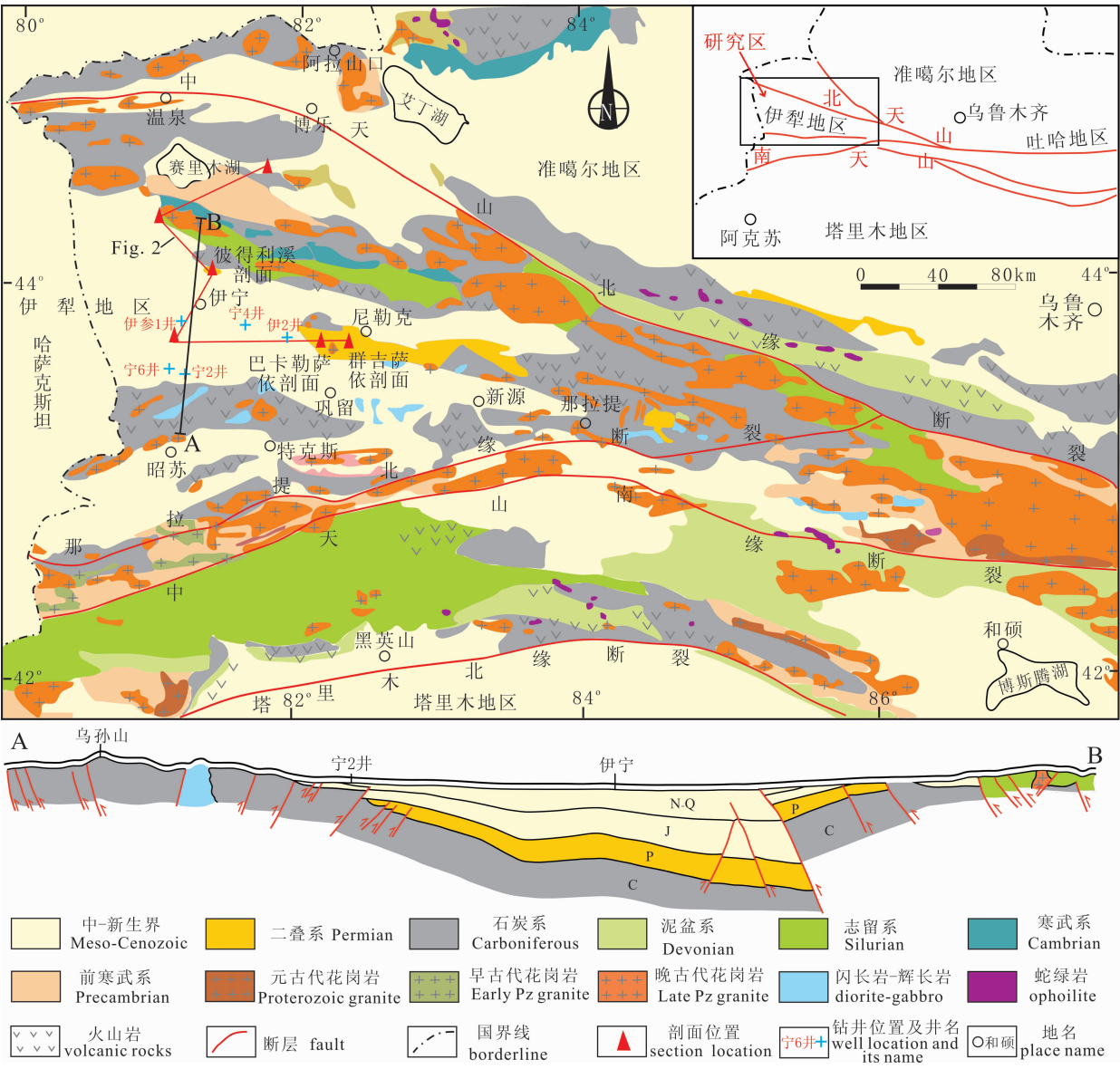


图 1 伊犁地区地质构造简图与露头分布情况

Fig. 1 Sketch map of geological structure and outcrops distribution in Yili area

伊犁地区构造演化主要经历了前泥盆纪的结晶基底形成阶段、石炭纪后碰撞板内海相裂谷演化阶段、二叠纪板内陆相湖盆演化阶段和中新生代陆内拗陷盆地演化阶段(Xia Linqi et al., 2002, 2008)。其中二叠纪以来主要经历了 4 个构造沉降—抬升剥蚀阶段(Chen Zhengle et al., 2008; Zhu Jianjun et al., 2014), 中二叠世—三叠纪初期沉降率最大, 二叠纪末期短暂抬升, 隆升幅度小; 早三叠世—晚白垩世早期盆地较快速沉降, 早白垩世晚期伊宁地区发生大规模的隆升剥蚀, 剥蚀量较大; 晚白垩世早期—古近纪末期沉降速率减小, 古近纪末期 24Ma 左右受喜马拉雅运动影响短暂快速隆升; 新近纪早期—更新生代晚期缓慢沉降, 现今盆地处于剥蚀状态。

2 伊犁地区沉积充填与中二叠统概况

2.1 伊犁地区沉积充填特征

伊犁地区是西天山褶皱带内的改造型盆地, 沉积建造主要包括四大层系: 前南华纪基底岩系、石炭纪海相岩系、二叠纪陆相岩系和中新生代陆内拗陷盆地岩系—山间磨拉石堆积(Feng Yangwei, 2015a; Bai jianke et al., 2015)(图 2)。伊犁地区基底为前南华系浅变质岩, 以长城系特克斯群、蓟县系克苏群、青白口系库什台群等为代表。石炭纪发育海相沉积层系, 石炭纪火山—沉积岩系由下到上可以划分为两个火山—沉积序列: 序列 I: 大哈拉军山组碎屑岩、火山岩、火山碎屑岩及阿克沙克组碎屑岩、碳酸盐岩; 序列 II: 伊什基里克组双峰式火山岩、火山碎屑岩及东图津河组碎屑岩、碳酸盐岩。序列 I 和序列 II 对应于盆地演化的两个旋回, 第一个旋回为早石炭世盆地初始伸展—裂陷阶段; 第二旋回为晚石炭世盆地经历稳定沉降期后再一次伸展—裂陷阶段。二叠纪发育陆内湖相沉积岩系, 早二叠世发育乌郎组陆相火山岩及凝灰岩沉积, 中二叠世主要发育晓山萨依组、哈米斯特组和铁木里克组河流—湖泊相陆源碎屑沉积(Feng Yangwei et al., 2015b), 晚二叠世巴斯尔干组为一套粗碎屑砂砾岩沉积。中—新生界主要为陆相沉积, 主要为河流—湖相碎屑岩, 靠近盆地边部发育山间磨拉石堆积等。

2.2 伊犁地区中二叠统

伊犁地区中二叠统从下往上依次为: 晓山萨依组、哈米斯特组和铁木里克组, 晓山萨依组跟下伏早二叠世乌郎组为平行不整合接触, 晓山萨依组、哈米斯特组和铁木里克组之间均为整合接触, 铁木里克组与上覆晚二叠世巴斯尔干组为不整合接触(图 2,

图 3)。

中二叠世早期晓山萨依组主要岩性为黄褐、灰绿、灰色杂砂岩、粉砂岩、泥岩、页岩、泥灰岩组成的正常碎屑岩沉积, 产植物、昆虫、叶肢介、双壳类化石。群吉萨依实测剖面本组分为三段: 下段岩性底部是一套厚层灰紫、灰褐色中厚层状复成分砾岩, 在龙口剖面相同层位为巨厚层砾岩, 为冲洪积扇; 下部为紫红色、灰红色含砾砂岩、长石岩屑砂岩、粉砂岩、红色粉砂质泥岩、泥岩, 砂砾岩层为透镜状, 底部可见槽模, 粉砂岩层发育交错层理, 泥岩中有干裂等暴露标志, 为河流相沉积。中段为紫灰色巨厚层—块状粗砾复成分砾岩、粗粒长石岩屑砂岩、细粒长石岩屑砂岩, 砂岩层发育交错层理和不对称波痕, 夹薄层湖相灰岩和安山质玻屑晶屑凝灰岩, 代表了主体为滨湖相沉积环境, 间或水体加深发育浅湖相沉积环境; 上段为灰黄、灰色中薄层细粒岩屑砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩、灰色泥岩、砾岩, 含双壳类、叶肢介、昆虫、植物、孢粉及遗迹化石。发育交错层理、板状层理, 砂岩层表面发育不对称波痕, 偶见对称波痕和放射状波痕, 此时湖水加深, 主体为浅湖相沉积环境(图 2, 图 3)。

中二叠世早期哈米斯特组平行不整合于晓山萨依组之上, 岩性主要为砾岩、凝灰岩、层火山角砾岩、集块岩、玄武岩夹砂岩、泥灰岩等。分为二个段: 下段主要岩性为紫红、灰紫色厚层—块状含巨砾钙质复成分砾岩、长石岩屑砂岩, 夹粉砂质泥岩、安山质含角砾岩屑凝灰岩, 含双壳类、植物、淡水鱼化石; 上段主体为暗灰、灰紫、灰绿色杏仁状玄武岩、粗玄岩、钠长粗面岩、流纹质角砾熔结凝灰岩, 夹灰色含砾白云质岩屑砂岩、凝灰质砂岩、粉砂岩。下与晓山萨依组整合接触, 上与铁木里克组呈整合接触(图 2, 图 3)。

中二叠世晚期铁木里克组与下伏哈米斯特组呈整合接触, 岩性主要为灰—灰黑色砂岩、泥灰岩、灰岩、页岩灰、灰紫色厚层细砾岩、长石岩屑砂岩、灰黑色中薄层钙质粉砂质泥岩、钙质页岩, 上部局部夹煤线, 下部夹流纹岩、火山碎屑岩。从下往上可分为四段: A 段, 中厚层状砾岩、砂岩和砂砾岩等, 局部地区为深灰色钙质泥岩、灰岩, 可见植物碎片; B 段, 深灰色钙质页岩、黑色泥岩、粉砂质泥岩等, 局部地区上部夹薄层煤线/炭质泥岩; C 段, 黑色深灰色泥岩、钙质泥岩夹薄—中厚层状灰岩和粉、细砂岩, 是暗色泥岩主要发育层段; D 段, 灰色—灰白色薄—中厚层状粉、细砂岩、粉砂质泥岩夹厚层透镜状含砾砂岩,

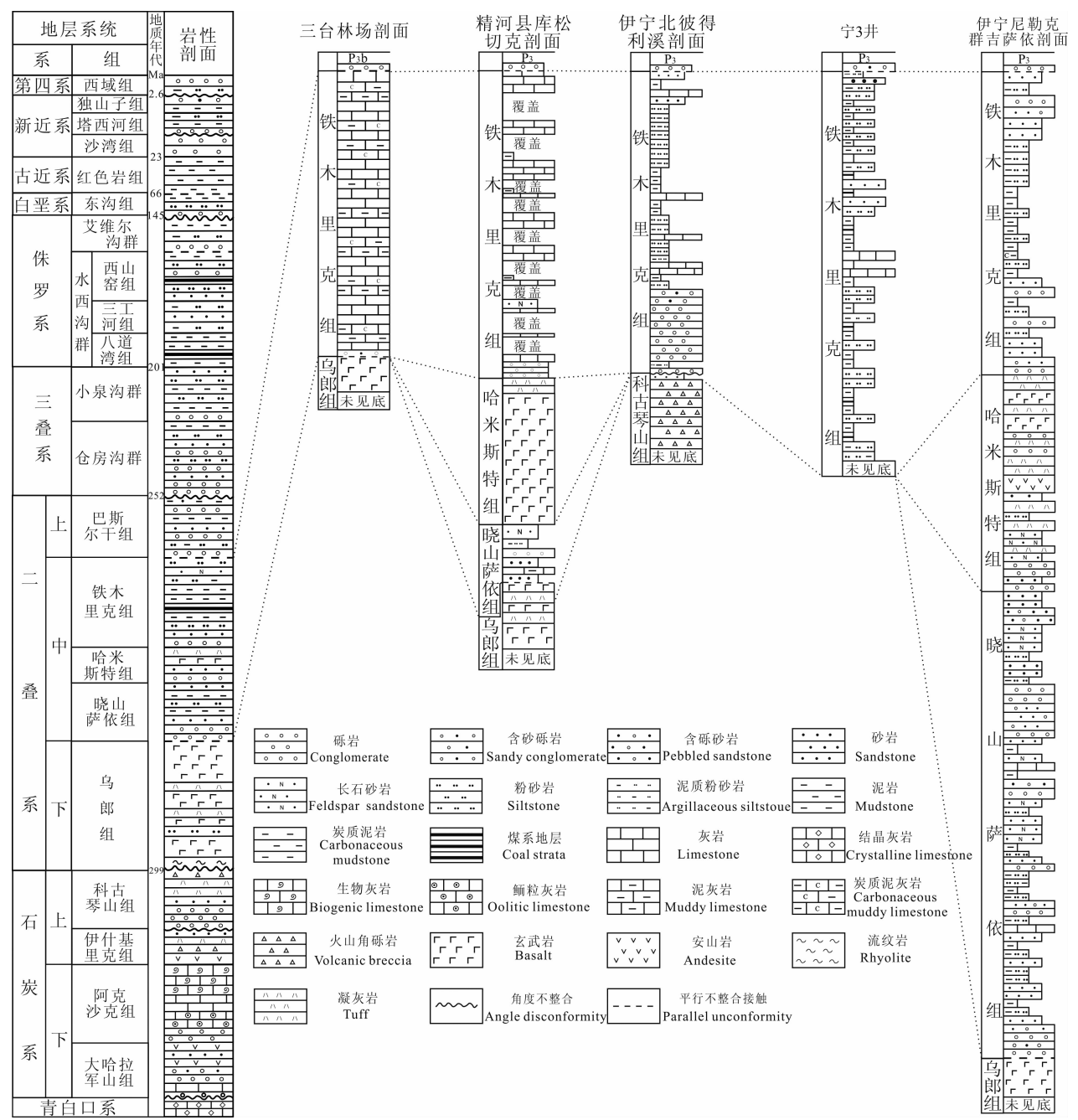


图 2 伊犁地区地层综合柱状和中二叠统地层对比图

Fig. 2 Compositd column of stratum and stratigraphic correlation of Middle Permian in Yili area

可见植物碎片(图 2,图 3)。

3 样品采集与测试分析

本次用于分析的样品来自于新疆北部伊犁地区尼勒克县群吉萨依剖面中二叠世晓山萨依组(16QJSY)、哈米斯特组和铁木里克组(16TMQSY),尼勒克县西南巴卡勒萨依剖面中二叠世铁木里克组(16BKLSY)和伊宁北彼得利溪剖面中二叠世铁木里克组(16BDL)。对地层细粒沉积

物(主要是泥岩)从下向上连续采样,共计 20 件,主要岩性包括灰色泥岩、黑色泥岩、碳质泥页岩等。均为新鲜露头样品,采集时有效避开了方解石脉等其他脉体,单个样品的采集量均不小于 500g。对这些样品分别进行了主量元素、微量元素和稀土元素测试分析,样品前处理及主量元素、微量元素、稀土元素在测试中国地质调查局西安地质调查中心实验测试中心完成,样品分析结果见表 1,表 2。

主量元素测试采用 Xios4.0kwX—荧光光谱仪



图 3 伊犁地区群吉萨依实测剖面中二叠统岩性特征

Fig. 3 The lithology characteristics of Middle Permian at Qunjisayi section in Yili area

(a)—晓山萨依组底部砾岩;(b)—晓山萨依组中下部灰色泥岩;(c)—晓山萨依组中部灰岩;(d)—晓山萨依组上部砂岩中不对称波痕;(e)—铁木里克组底部砾岩;(f)—铁木里克组中下部炭质泥岩和膏盐层;(g)—铁木里克组中部厚层黑色泥岩;(h)—铁木里克组中上部黄绿色砂岩

(a)—Conglomerate at the bottom of Xiaoshansayi formation;(b)—gray mudstone at lower-middle of Xiaoshansayi formation;(c)—limestone at middle of Xiaoshansayi formation;(d)—asymmetric ripple mark in sandstone at upper of Xiaoshansayi formation;(e)—conglomerate at the bottom of Tiemulike formation;(f)—carbonaceous mudstone and gypsum salt layer at lower-middle of Tiemulike formation;(g)—black argillite at middle of Tiemulike formation;(h)—yellow-green sandstone at middle-upper of Tiemulike formation

表 1 伊犁地区群吉萨依剖面中二叠统主量分析结果

Table 1 Major element content of Middle Permian at Qunjisayi section in Yili area													
采样剖面	样品编号	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	FeO (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	MnO (%)	灼失※ (%)
群吉 萨依	14QJSY-CH1	60.38	13.67	1.17	3.27	5.85	2.03	3.27	1.93	0.52	0.10	0.070	7.75
	14QJSY-CH2	63.79	13.00	2.88	1.69	3.04	4.21	2.05	3.89	0.51	0.12	0.080	4.72
	14QJSY-CH3	53.83	12.05	3.47	1.20	9.93	2.54	3.39	1.31	0.49	0.12	0.070	11.56
	14QJSY-CH7	59.40	13.73	2.95	0.80	6.72	2.01	3.60	2.33	0.52	0.11	0.050	7.76
	14QJSY-CH8	60.62	14.74	3.56	0.94	2.76	2.51	4.47	1.29	0.64	0.16	0.040	8.25
	14QJSY-CH9	56.31	13.35	3.48	1.89	7.50	2.46	2.78	4.13	0.68	0.10	0.12	7.18
	14QJSY-CH10	46.62	10.88	2.64	1.12	15.16	2.00	3.16	1.04	0.46	0.14	0.12	16.62
	14QJSY-CH11	50.42	11.46	3.12	1.04	12.71	2.14	3.10	0.99	0.48	0.14	0.080	14.33
	14QJSY-CH12	40.55	9.10	2.37	0.90	21.25	1.66	2.60	0.86	0.38	0.13	0.10	20.09
	14QJSY-CH13	50.50	11.77	2.84	1.62	11.94	2.25	3.18	1.02	0.47	0.14	0.070	14.17
	14QJSY-CH14	57.78	12.81	1.30	1.49	10.14	1.28	2.78	2.65	0.47	0.10	0.070	9.13
	14TMQSY-CH1	58.04	14.42	2.14	1.23	6.50	1.30	2.96	1.13	0.68	0.14	0.035	11.44
	14TMQSY-CH4	47.98	10.62	1.97	1.54	13.96	1.48	1.88	1.32	0.47	0.19	0.14	18.37
	14TMQSY-CH7	25.54	5.19	0.87	1.10	32.64	1.24	0.68	1.07	0.24	0.22	0.050	31.10
巴卡 勒萨依	14BKLSY-CH1	48.49	10.07	1.67	0.71	17.74	1.14	2.57	1.91	0.40	0.10	0.10	15.10
	14BKLSY-CH2	68.86	15.10	0.83	1.19	1.02	0.54	8.16	2.07	0.37	0.050	0.020	1.77
	14BKLSY-CH3	22.76	3.51	0.42	0.52	55.56	0.94	0.67	0.53	0.12	0.12	0.12	14.61
彼得 利溪	14BDL-CH1	15.61	2.92	1.34	1.41	41.21	0.93	0.52	0.56	0.14	0.22	0.30	34.84
	14BDL-CH2	11.64	2.28	1.33	1.26	44.20	0.86	0.27	0.43	0.12	0.23	0.38	36.98
	14BDL-CH3	37.20	8.40	2.56	1.44	23.39	2.25	1.41	1.56	0.42	0.18	0.090	21.09

表 2 伊犁地区群吉萨依剖面中二叠统稀土元素分析结果

Table 2 REE element content of Middle Permian at Qunjisayi section in Yili area															
样品编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
	(× 10 ⁻⁶)	(× 10 ⁻⁶)	(× 10 ⁻⁶)	(× 10 ⁻⁶)	(× 10 ⁻⁶)	(× 10 ⁻⁶)	(× 10 ⁻⁶)	(× 10 ⁻⁶)	(× 10 ⁻⁶)	(× 10 ⁻⁶)	(× 10 ⁻⁶)	(× 10 ⁻⁶)	(× 10 ⁻⁶)	(× 10 ⁻⁶)	(× 10 ⁻⁶)
14QJSY-CH1	16.6	36.4	4.75	19.2	3.99	0.93	3.79	0.62	3.81	0.81	2.38	0.37	2.44	0.37	19.9
14QJSY-CH2	15.8	35.8	4.73	19.4	4.25	1.12	4.19	0.68	4.16	0.87	2.54	0.39	2.53	0.38	22.3
14QJSY-CH3	18.8	40.6	5.14	20.6	4.64	1	4.22	0.67	4.06	0.85	2.45	0.38	2.48	0.38	21
14QJSY-CH7	16.1	35.6	4.64	18.5	3.99	0.96	3.85	0.64	3.94	0.82	2.41	0.37	2.38	0.37	20.1
14QJSY-CH8	17.6	38.6	5.08	19.4	4.33	0.9	4.28	0.67	4.15	0.9	2.64	0.41	2.67	0.4	22.5
14QJSY-CH9	19.5	40.5	5.17	19.6	4.32	1.2	3.95	0.62	3.65	0.75	2.15	0.33	2.18	0.34	18.9
14QJSY-CH10	22.6	46.2	5.96	23.6	4.96	0.98	4.8	0.74	4.58	0.94	2.6	0.4	2.52	0.38	22.8
14QJSY-CH11	19.9	42.1	5.59	22.5	4.78	0.94	4.36	0.7	4.26	0.88	2.56	0.4	2.56	0.38	21.9
14QJSY-CH12	21.5	43.8	5.36	20.4	4.15	0.85	3.99	0.62	3.52	0.71	2	0.32	1.99	0.31	19.4
14QJSY-CH13	20.4	43.8	5.54	22.2	4.72	0.95	4.36	0.71	4.2	0.87	2.48	0.38	2.43	0.37	21.4
14QJSY-CH14	20.2	41.2	5.19	19.8	4.02	1.08	3.68	0.59	3.5	0.72	2.06	0.32	2.07	0.32	17.9
14BKLSY-CH1	18.8	37.7	4.76	18.1	3.74	0.88	3.48	0.55	3.23	0.67	1.96	0.3	1.86	0.29	17
14BKLSY-CH2	43.2	86	10	37	6.75	1.22	5.68	0.85	4.54	0.88	2.41	0.36	2.28	0.33	20.9
14BKLSY-CH3	7.45	14.6	1.66	6.16	1.19	0.45	1.08	0.18	1	0.19	0.52	0.075	0.47	0.069	5.59
14BDL-CH1	13.3	26.4	3.04	11	2.22	0.5	2.08	0.31	1.68	0.32	0.81	0.12	0.74	0.11	9.6
14BDL-CH2	12.5	24.5	2.82	9.88	1.91	0.45	2	0.28	1.5	0.29	0.74	0.11	0.7	0.11	8.91
14BDL-CH3	16.4	32.5	3.91	14.2	3.01	0.77	2.86	0.43	2.61	0.53	1.43	0.22	1.44	0.22	13.5
14TMQSY-CH1	34.1	69.2	8.56	30.7	7	1.12	6.72	1.02	5.76	1.14	3.24	0.46	3.04	0.46	30.6
14TMQSY-CH4	23.6	46.3	5.39	20.8	4.9	0.86	4.64	0.65	3.66	0.72	2	0.3	1.95	0.29	18.8
14TMQSY-CH7	11.7	22.9	2.56	9.55	2.14	0.45	2.35	0.34	1.87	0.38	0.99	0.15	0.95	0.15	9.91

(SX-45),测试温度为 22℃,湿度为 56℃。测试过程如下:将试样加入包含硝酸锂在内的助熔剂,充分混合后,高温熔融;之后,将熔融物倒入铂金模子形成扁平玻璃片;再用 X 射线荧光光谱仪分析,测试精度优于 5%。微量元素测试采用电感耦合等离子体

发射光谱与等离子体质谱仪。测试过程如下:首先,将试样用高氯酸、硝酸、氢氟酸消解;之后,将蒸至近干的样品用稀盐酸溶解定容;再用等离子体发射光谱与等离子体质谱进行分析。将元素之间的光谱干扰校正后即是最后分析结果。稀土元素测试采用电

感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)。测试过程如下:将试样加入到偏硼酸锂/四硼酸锂熔剂中,混合均匀,在 1025℃ 以上的熔炉中熔化;熔液冷却后,用硝酸、盐酸和氢氟酸定容;再用等离子体质谱仪分析,测试精度优于 5%。

4 结果

4.1 沉积环境古盐度

古盐度分析最有代表性的是暗色泥岩的 $[m(\text{Sr})/m(\text{Ba})]$ 、 $[m(\text{B})/m(\text{Ga})]$ 和硼质量分数($w(\text{B})$)。 $[m(\text{Sr})/m(\text{Ba})]$ 比值可作为古盐度判别的灵敏标志,是依据溶液中锶的迁移能力及其硫酸盐化合物的溶度积远大于钡的地球化学性质(Zheng Rngcai et al., 1999)。 $[m(\text{Sr})/m(\text{Ba})]$ 随着远离海岸而逐渐增大,可以定性地反映古盐度,进行沉积环境古盐度的恢复。一般来说,沉积物中 $[m(\text{Sr})/m(\text{Ba})]$ 在 1.0~0.6 为半咸水相,小于 0.6 为微咸水相,而盐湖(海相)沉积物中 $[m(\text{Sr})/m(\text{Ba})]$ 值大于 1(Zheng Rngcai et al., 1999; Wang Yiyong et al., 1979)。 $[m(\text{B})/m(\text{Ga})]$ 和 $[m(\text{Sr})/m(\text{Ba})]$ 的变化相似(Chen Zhongyuan et al., 1997)。研究表明,一般沉积物 $[m(\text{B})/m(\text{Ga})]$ 值大致以 3.3 为界,大于 3.3 则水体逐渐咸化,小于 3.3 则水体逐渐淡化,且受区域环境背景值影响(Department of marine geology, Tongji University, 1980)。硼质量分数是判断沉积物沉积介质含盐度比较有效的指标之一(Ming Chengdong et al., 2015),硼在海陆

相中的差别十分显著,自然界水体中硼的浓度是盐度的线性函数,粘土中硼元素的含量可以指示其形成时水介质的古盐度值(Couch, 1971; Walker, 1968),这是 B 含量可以作为古沉积环境指标的依据(Department of marine geology, Tongji University, 1980)。一般情况是淡水沉积中 B 含量最低,咸水沉积中约为 100mg/kg(Department of geology, Nanjing University, 1979)。本次研究采用实测剖面暗色泥岩的 $[m(\text{Sr})/m(\text{Ba})]$ 和 $[m(\text{B})/m(\text{Ga})]$ 与一些已知盐度环境的 $[m(\text{Sr})/m(\text{Ba})]$ 和 $[m(\text{B})/m(\text{Ga})]$ 进行对比,定性分析中二叠世铁木里克组和晓山萨依组的沉积环境盐度,结果如表 3 所示。

伊犁地区中二叠世早期晓山萨依组($w(\text{B})$)为 $14.3 \times 10^{-6} \sim 75.2 \times 10^{-6}$,平均值为 41.9×10^{-6} ;中二叠世晚期铁木里克组($w(\text{B})$)为 43.9134×10^{-6} ,平均值为 88.9×10^{-6} 。中二叠世早期晓山萨依沉积期尼勒克县群吉萨依地区 $[m(\text{Sr})/m(\text{Ba})]$ 均值为 1.09, $[m(\text{B})/m(\text{Ga})]$ 均值为 7.76,为较咸水环境;晚期铁木里克组 $[m(\text{Sr})/m(\text{Ba})]$ 在伊宁北部—尼勒克一线平均值在 6.64~9.17, $[m(\text{B})/m(\text{Ga})]$ 在伊宁北部—尼勒克一线平均值为 2.91—6.83,综合分析这一地区为较咸的咸水环境;巴卡勒萨依剖面 $[m(\text{B})/m(\text{Ga})]$ 平均值为 1.08, $[m(\text{B})/m(\text{Ga})]$ 平均值为 2.81,表现出较咸水特征,可能该地区在铁木里克组沉积时期有陆源淡水河流的供给,降低了盐度(图 4)。

表 3 伊犁地区盐度分析和我国部分已知环境盐度统计
Table 3 Salinity analysis of Yili area and Partially known environmental salinity statistics in our country

元素比值样品环境		$[m(\text{Sr})/m(\text{Ba})]$			$[m(\text{B})/m(\text{Ga})]$			资料来源
		Min	Max	Avg	Min	Max	Avg	
苏北盆地始新世较咸水湖相		1.0	2.0				4.9	Qian Kai et al., 1982 Deng Hongwen et al., 1993 Liu Pinglue, 1985
东营凹陷沙四段较咸水湖相		0.7	7.9	1.3	4.0	7.0	6.1	
东营凹陷沙三段淡水湖相		0.2	1.2	0.6	0.6	3.0	1.4	
松辽盆地白垩系淡水湖相				0.5	3.0	4.0		Qu Xingwu et al., 1979
海南岛文昌县海湾相—近岸海相		1.5	1.6					
山东历城海湾相、海相		1.3	1.45					Miao Jianyu, 2001
伊犁地区	泥岩	0.56	14.15	6.94				
铁木里克组	灰岩	9.85	14.1	11.97				本次测试
伊犁地区铁木里克组(泥岩)	巴卡勒萨依	0.11	2.01	1.08	1.06	3.70	2.81	
	群吉萨依	1.39	14.02	6.64	6.43	7.36	6.83	
	彼得利溪	2.81	13.71	9.17	1.32	5.54	2.91	
伊犁地区晓山萨依组	群吉萨依	0.36	2.15	1.09	1.06	3.76	2.76	

4.2 沉积环境的氧化—还原条件

4.2.1 &U 法及 Th/U 比值法

Th 和 U 在还原状态下地球化学性质相似,在

氧化状态下差别很大(Liu Yingjun et al., 1987)。在表生环境下,Th 只有 +4 价一种价态且不易溶解,而 U 则不一样。在氧化的水体中 U 一般为 +6

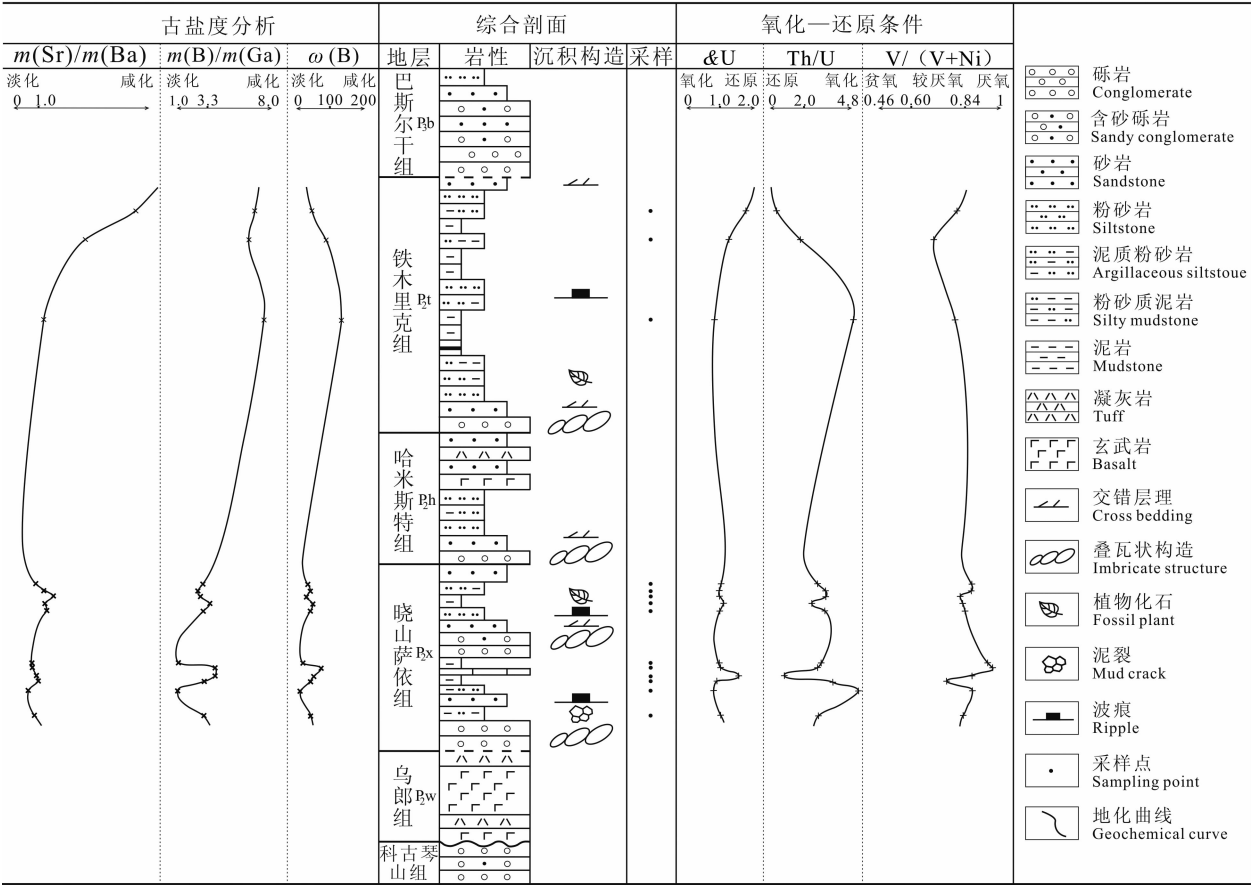


图 4 伊犁地区群吉萨依剖面中二叠统地球化学特征

Fig. 4 Geochemical charanterietine of Middle Permian at Qunjisayi section in Yili area

价,它以铀酰基的形式与碳酸根离子结合形成 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ 并在现代海水中稳定存在。在类似于 Fe^{3+} 至 Fe^{2+} 转变的还原条件下, U^{6+} 被还原为 U^{4+} , 并多以沥青铀矿 (UO_2 、 U_3O_8) 或表面活性很大的羟基络合物的形式沉淀和富集在沉积物中 (McManus et al., 2005)。U 在强还原状态下为 +4 价,不溶解于水,导致它在沉积物中富集;基于这两种元素的地球化学性质差异,常利用 $\text{\&U}$ 法和 Th/U 比值法判断沉积环境的氧化还原状态 (Kimura et al., 2001)。 $\text{\&U}$ 法关系式如下: $\text{\&U} = \text{U} / [0.5 \times (\text{Th}/3 + \text{U})]$, $\text{\&U} > 1$, 表明缺氧还原环境; $\text{\&U} < 1$, 则说明为正常的水体环境 (Tonger et al., 2004)。Th/U 值在 0~2 之间指示缺氧还原环境,在强氧化环境下这个比值可达 8 (Kimura et al., 2001)。

伊犁地区中二叠世早期晓山萨依组地层 $\text{\&U}$ 为 0.81~1.53,平均值为 1.03;Th/U 值为 0.92~4.40,平均值为 3.05。中二叠世晚期铁木里克组暗色泥岩的 $\text{\&U}$ 为 0.84~1.76,平均值为 1.19~

1.56;Th/U 值在 0.41~4.12,平均值为 0.91~2.48,平均为 1.83(表 4)。

表 4 伊犁地区中二叠统微量元素对沉积环境的氧化—还原条件反映

地层		$\text{\&U}$			Th/U			V/(V+Ni)		
		Min	Max	Avg	Min	Max	Avg	Min	Max	Avg
铁木里克组	群吉萨依	0.84	1.76	1.28	0.41	4.12	2.11	0.71	0.79	0.76
	巴卡勒萨依	0.85	1.68	1.19	0.57	4.04	2.48	0.78	0.87	0.81
	彼得利溪	1.27	1.74	1.56	0.45	1.74	0.91	0.79	0.87	0.84
晓山萨依组	群吉萨依	0.81	1.53	1.03	0.92	4.40	3.05	0.76	0.94	0.86

4.2.2 V/(V+Ni)比值法

前人研究认为,V、Ni 同属铁族元素,其离子价态易随氧化度变化,V、Ni 主要被胶体质点或粘土等吸附沉淀,氧化水体中 V(+5 价)以钒酸氢根 HVO_4^{2-} 和 H_2VO_4^- 的形式稳定存在。在弱还原的条件下, V^{5+} 被还原为 V^{4+} 并形成钒酰基 VO^{2+} 、羟基基团 $\text{VO}(\text{OH})^{3-}$ 以及不溶的氢氧化物 VO

(OH)₂。这一转变在有腐殖酸和富里酸存在的情况下更容易发生,通过形成有机金属配位体或被基团表面吸附进入沉积物(Emerson and Husted, 1991)。在强还原(如硫化的)环境中,V 可以转变为+3 价并被周围的卟啉捕获,或以氧化物 V₂O₃ 或氢氧化物 V(OH)₃ 形式沉淀。在成岩作用阶段,V³⁺ 容易取代自生的或重结晶的粘土矿物中八面体位置上的 Al³⁺ (Breit, 1991),不过 V 不会以固溶体的形式进入铁的硫化物。因此元素 V/(V+Ni) 比值可反映沉积水体的氧化还原环境(邓宏文等, 1993;Rimmer S M, 2004)。元素 V/(V+Ni) 比值可反映沉积水体的氧化还原环境,高比值(>0.84)反映水体分层及底层水体中出现 H₂S 的厌氧环境;中等比值(0.6~0.84)为水体分层不强的厌氧环境;低比值时(0.46~0.60)为水体分层弱的贫氧环境(Miao Jianyu, 2001)。

伊犁地区中二叠世早期晓山萨依组暗色泥岩元素 V/(V+Ni) 比值范围在 0.76~0.94,平均为 0.86,指示沉积环境为水体分层及底层水体中出现 H₂S 的厌氧环境。V/(V+Ni) 比值纵向上的变化,反映出伊犁地区中二叠世早期存在多期沉积环境氧化—还原变化次级旋回(图 4)。晚期铁木里克组暗色泥岩元素 V/(V+Ni) 比值范围在 0.71~0.87,平均为 0.80,指示沉积环境为水体分层不强的厌氧环境—水体分层及底层水体中出现 H₂S 的厌氧环境。

4.3 古气候条件

对新疆北部伊犁地区尼勒克县群吉萨依中二叠统细粒沉积岩的稀土元素做了北美页岩(Haskin, et al, 1984)标准化后的分布模式(图 5),并计算了 LREE/HREE、 δEu 和 δCe 参数,经分析后发现:经北美页岩标准化后发现泥岩中稀土元素比北美页岩的含量低,且个别样品中的含量低得多。

5 沉积环境讨论

古盐度分析表明伊犁地区中二叠世早期晓山萨依组和晚期铁木里克组沉积环境为较咸水—咸水的沉积环境,从早期的晓山萨依期向晚期的铁木里克期湖盆古盐度逐渐升高。反映出中二叠世早期到中期伊犁地区湖盆有逐渐咸化的趋势,期间存在多个水体逐渐变咸的次级旋回。

本次野外实测剖面在伊犁地区尼勒克县西南群吉萨依剖面铁木里克组发现厚约 25cm 的膏盐层(图 3h)。同时,伊参 1 井铁木里克组古水盐度平均

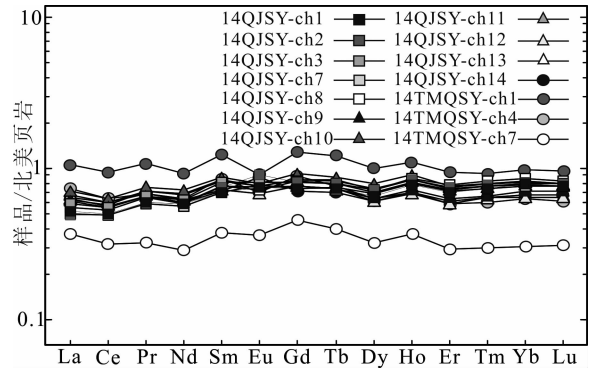


图 5 伊犁地区尼勒克县群吉萨依剖面中二叠统泥岩的北美页岩均一化稀土分布模式图

Fig. 5 North American shale-normalized REE patterns for the Middle Permian mudstones at Qunjisayi section of Nileke country in Yili area

为 35.7‰,最低 12.6‰,最高达到 66‰ (Miao Jianyu, 2001)。反映本地区铁木里克组沉积期为一个相对闭塞的环境,曾有短暂的时期处于炎热的环境。

伊犁地区尼勒克县群吉萨依中二叠统细粒沉积物 δU 和 Th/U 曲线纵向上的变化表明:伊犁地区中二叠世早期沉积环境整体为半缺氧—缺氧环境,同时存在多期沉积环境氧化—还原变化次级旋回;中二叠世晚期铁木里克组沉积时期整体处于缺氧环境,且沉积环境具有从早期偏氧化的环境逐渐变为晚期偏还原的环境的变化趋势。同时,还原性及缺氧程度在平面上的展布具有北边明显高于中部地区的特征(图 4)。

伊犁地区尼勒克县群吉萨依中二叠统细粒沉积物元素 V/(V+Ni) 比值反映出:中二叠统为缺氧环境下的产物,整体沉积环境处在缺氧、还原的背景之下,存在多期沉积环境氧化—还原变化次级旋回,跟沉积环境古盐度的变化具有良好的对应关系(图 4)。

伊犁地区尼勒克县群吉萨依中二叠统细粒沉积岩的稀土元素北美页岩标准化后的分布模式揭示出:当时沉积可能为化学风化作用较弱的气候,同时水体可能较安静,制约了稀土元素在铁木里克组泥质沉积物中的迁移富集。

6 结论

(1) $[m(\text{Sr})/m(\text{Ba})]$ 、 $[m(\text{B})/m(\text{Ga})]$ 和硼质量分数($w(\text{B})$)共同反映出伊犁地区中二叠世为较咸水—咸水的沉积环境,且从早期的晓山萨依期向晚

期的铁木里克期湖盆古盐度逐渐升高; δU 、 Th/U 和 $V/(V+Ni)$ 揭示出伊犁地区中二叠统为缺氧环境下的产物,沉积环境为水体分层不强的厌氧环境—水体分层及底层水体中出现 H_2S 的厌氧环境的过渡;依据中二叠世泥岩北美页岩标准化分布推测当时沉积应为化学风化作用较弱的较干燥气候,同时水体可能较安静。

(2)伊犁地区中二叠世整体沉积环境为缺氧、还原、咸化,从早期到晚期沉积环境水体总体上还原性逐渐增强,盐度逐渐增高。存在多期沉积环境氧化—还原变化次级旋回,跟沉积环境古盐度的变化具有良好的对应关系。

致谢:感谢西安地质矿产研究所实验测试中心为本次研究开展了主量元素、微量元素和稀土元素的测试分析工作;感谢编辑部老师和外审专家师的宝贵意见与建议;感谢中国地质调查局银额项目团队对本次研究工作的全方位大力支持。

References

Bai Jianke, Li Zhipei, Xu Xueyi, Sun Jiming, Niu Yazhuo. 2015. Carboniferous Volcanic-Sedimentary Succession and Basin Properties in Ili Area, Western Tianshan, Xinjiang. *Geological review*. 61(1): 195~206 (in Chinese with English abstract).

Bailey S W, Hornbeck J W, Driscoll C T, Gaudette H E. 1996. Calcium inputs and transport in a base-poor forest ecosystem as interpreted by sr isotopes. *Water Resources Research*, 32 (3), 707719.

Breit G N, Wanty R B. 1991. Vanadium accumulation in carbonaceous rocks: a review of geochemical controls during deposition and diagenesis. *Chem. Geol.*, 91: 83~97.

Chen Zhengle, Li Li, Liu Jian, Gong Hongliang, Jiang Rongbao, Li Shengxiang, Zheng Enjiu, Han Xiaozhong, Li Xigen, Wang Cheng, Wang Guorong, Wang Guo, Lu Kegai. 2008. Preliminary study on the uplifting-exhumation process of the western Tianshan range, northwestern China. *Acta petrologica*, 24(04): 625~636 (in Chinese with English abstract).

Chen Zhongyuan, Zheng Lou. 1997. Quaternary stratigraphy and trace-element indices of the Yangtze Delta, Eastern China, with special reference to marine transgressions. *Quaternary Research*, 47: 181~191.

Dai Shifeng, Yang Jianye, Ward Colin R, Hower James C., Liu Huidong, Garrison Trent M., French David, O'Keefe Jennifer M. K. 2015. Geochemical and mineralogical evidence for a coal-hosted uranium deposit in the Yili Basin, Xinjiang, northwestern China. *Ore Geology Reviews*, 70: 1~30.

Deng Hongwen, Qian Kai. 1993. *Sedimentary geochemistry and environmental analysis*. Lanzhou: Gansu science and Technology Press, 1~154(in Chinese).

Department of geology, Nanjing University. 1979. *Geochemistry*.

Beijing: Science Press, 1~514(in Chinese).

Department of marine geology, Tongji University. 1980. Identification mark between marine facies with continental facies. Beijing: Science Press, 1~225(in Chinese).

Emerson S R, Huested S S. 1991. Ocean anoxia and the concentrations of molybdenum and vanadium in seawater. *Mar. Chem.*, 34(3-4): 177~196.

Feng Yangwei. 2015a. Tecton-thermal history analysis and upper Paleozoic shale gas accumulation conditions in Yining basin. Xi'an: Northwest University, 1~181 (in Chinese with English abstract).

Feng Yangwei, Lu Jincai, Jiang Ting, Niu Yazhuo, Chen Gaochao, Xu Wei. 2015b. Upper Paleozoic Shale Gas Accumulation Conditions of the Tiemulike Formation in Yining Basin. *Acta Geologica Sinica(English edition)*, 89(z1): 147~150.

Han Baofu, He Guoqi, Wang Xuechao, Guo Zhaojie. 2011. Late Carboniferous collision between the Tarim and Kazakhstan - Yili terranes in the western segment of the South Tian Shan Orogen, Central Asia, and implications for the Northern Xinjiang, western China. *Earth-Science Reviews*, 107: 74~93.

Hao Jipeng, Yang Zhiyong, Shi Jianhong, Chen Guojun. 2003. The hydrocarbon potential of the Carboniferous-Permian strata in the Ili Basin, Xinjiang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 23(1): 75~83.

Kimura H, Watanabe Y. 2001. Ocean anoxia at the Precambrian—Cambrian boundary. *Geology*, 29: 995~998.

Li Baoqing, Zhuang Xinguo, Li Jing, Zhao Shihua. 2014. Geological controls on coal quality of the Yili Basin, Xinjiang, Northwest China. *International Journal of Coal Geology*, 131: 186~199.

Li Yuwen, Yu Chaofeng, Xiong Shaoyun, Chen Nenggui, Qu Jianhua. 2011. Petroleum Geology Characteristics and Exploration Potential of Carboniferous Rocks in Ili Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 16(3): 30~37 (in Chinese with English abstract).

Liu Baojun, Zeng Yunfu. 1985. *The foundation and working method of lithofacies palaeogeography*. Beijing: Geological Publishing House, 23~28 (in Chinese).

Liu Hongsheng, Wang Bo, Shu Liangshu, Jahn B, Lizuka Y. 2014. Detrital zircon ages of Proterozoic meta-sedimentary rocks and Paleozoic sedimentary cover of the northern Yili Block: Implications for the tectonics of microcontinents in the Central Asian Orogenic belt. *Precambrian Research*, 252: 209~222.

Liu Pinglue, Zhou Houqing, Kang Guiyun. 1986. Distribution of elements and its relation with sedimentary environment in Songliao basin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 5(2): 14~18, 21.

Liu Yinjun, Cao Liming. 1987. *Introduction to elemental geochemistry*. Beijing: Geological Publishing House, 1~281 (in Chinese).

McManus J, Berelson W M, Klinkhammer G P, Hammond D E, Holm C. 2005. Authigenic uranium: relationship to oxygen

- penetration depth and organic carbon rain. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 69: 95~108.
- Miao Jianyu. 2001. The depositional environment of Permian system hydrocarbon source rocks and its potential hydrocarbon generating characteristics in major basins in North Xinjiang. Xi'an: Northwest University, 1~127 (in Chinese with English abstract).
- Ming Chengdong, Hou Dujie, Zhao Xingmin, Song Jian, Deng Jian, Wu Saisai, Li Jinghui. 2015. The Geochemistry Records of Paleoenvironment and Sea-Level Relative Movement of Middle Permian Zhesi Formation in Eastern Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 89(8): 1484~1494 (in Chinese with English abstract).
- Qian Kai, Wang Sumin, Liu Shufan, Shi Huaxing. 1982. Evaluation of salinity of lake water in Tertiary of the Dongying depression. *Acta Petroli Sinica*, 3(4): 95~102.
- Qu Xingwu, Wang Jincheng. 1979. Preliminary study on the sedimentary environment by the ratio of Strontium to Barium. *Coal Geology & Exploration*, (1): 15~21 (in Chinese with English abstract).
- Ren Jishun, Zhao Lei, Xu Qinqin, Zhu Junbin. 2016. Global tectonic position and geodynamic system of China. *Acta Geologica Sinica*, 90(9): 2100~2108 (in Chinese with English abstract).
- Rimmer S M. 2004. Geochemical paleoredox indicators in Devonian—Mississippian black shales, Central Appalachian Basin(USA). *Chem. Geol.*, 206: 373~391.
- Song Mingshui. 2005. Sedimentary environment geochemistry in the Shasi section of Southern ramp, Dongying depression. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 25(1): 67~73 (in Chinese with English abstract).
- Tonger, Liu Wenhui, Xu Yongchang, Chen Jianfa. 2004. The discussion on anoxic environments and its geochemical identifying Indices. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(2): 365~372 (in Chinese with English abstract).
- Tu Guangzhi. 1999. On the central Asia metallogenic Province. *Chinese Journal of Geology*, 34(4): 397~404 (in Chinese with English abstract).
- Wang Bo, Chen Yan, Zhan Sheng, Shu Liangshu, Faure M, Cluzel D, Charvet J, Laurent-Charvet S. 2007. Primary Carboniferous and Permian paleomagnetic results from the Yili Block (NW China) and their implications on the geodynamic evolution of Chinese Tianshan Belt. *Earth and Planetary Science Letters*, 263: 288~308.
- Wang Yiyou, Guo Wenying, Zhang Guodong. 1979. Application of some geochemical indicators in determining of sedimentary environment of the funing group(paleogene), Jinhu depression, Kiangsu province. *Journal of Tongji University*, (2): 51~60 (in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongping, Wang Lishe. 2002. Some thoughts on the characteristics of Paleozoic ocean-continent transition from Tian shan mountains. *Northwestern geology*, 35(4): 9~20 (in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongping. 2008. Petrogenesis of Carboniferous-early Permian rift-related volcanic rocks in the Tianshan and its neighboring Areas, Northwestern China. *Northwestern geology*, 41(4): 1~68 (in Chinese with English abstract).
- Yu Suhua, Zheng Honghan. 1999. REE of Sediments of the Changliushui Section at Zhongwei County of Ningxia Province and the Environmental Significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(1), 149~155.
- Zhang Yigang. 2005. Prospection of petroleum geochemistry. *Petroleum Geology and Experiment*, 27(5): 484~489 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Rongcai, Liu Meiqing. 1999. Study on palaeosalinity of Chang 6 oil reservoir set in Ordos basin. *Oil & Gas Geology*, 20(1): 20~25 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jianjun, Lin Shuiqing, Zhang Hongjun, Zhang Gaoyuan, Ying Wenxi, Gu Chao, Wang Qi. 2014. Tectonic Subsidence of Yining Depression and Its Main Controlling Factors. *Natural Gas Geoscience*, 25(8): 1181~1187.

参 考 文 献

- 白建科, 李智佩, 徐学义, 孙吉明, 牛亚卓. 2015. 新疆西天山伊犁地区石炭纪火山—沉积序列及盆地性质. *地质论评*, 61(1): 195~206.
- 陈正乐, 李丽, 刘健, 宫红良, 蒋荣宝, 李胜祥, 郑恩玖, 韩效忠, 李细根, 王成, 王国荣, 王果, 鲁克改. 2008. 西天山隆升—剥露过程初步研究. *岩石学报*, 24(04): 625~636.
- 邓宏文, 钱凯. 沉积地球化学与环境分析. 1993. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1~154.
- 冯杨伟. 伊宁盆地构造—热演化与上古生界页岩气成藏条件研究. 2015. 西安: 西北大学, 1~181.
- 郝继鹏, 杨志勇, 史建宏, 陈国军. 2003. 伊犁盆地石炭系—二叠系含油气系统评价. *沉积与特提斯地质*, 23(1): 75~83.
- 李玉文, 余朝丰, 熊绍云, 陈能贵, 瞿建华. 2011. 伊犁盆地石炭系石油地质特征与勘探潜力. *海相油气地质*, 16(03): 30~37.
- 刘宝珺, 曾允孚. 1985. 岩相古地理基础和工作方法. 北京: 地质出版社, 23~28.
- 刘平略, 周厚清, 康桂云. 1986. 松辽盆地元素分布及其与沉积环境的关系. *大庆石油地质与开发*, 5(2): 14~18, 21.
- 刘英俊, 曹励明. 1987. 元素地球化学导论. 北京: 地质出版社, 1~281.
- 苗建宇. 2001. 新疆北部主要盆地二叠系烃源岩沉积环境与生烃特征. 西安: 西北大学, 1~127.
- 明承栋, 侯读杰, 赵省民, 宋健通, 邓坚, 吴赛赛, 李经辉. 2015. 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. *地质学报*, 89(8): 1484~1494.
- 南京大学地质学系. 1979. 地球化学. 北京: 科学出版社, 1~514.
- 钱凯, 王素民, 刘淑范, 时华星. 1982. 东营凹陷早第三纪湖水盐度的计算. *石油学报*, 3(4), 95~102.
- 曲星武, 王金城. 1979. 用铈钡比研究沉积环境的初步探讨. *煤田*

地质与勘探, (1): 15~21.

任纪舜, 赵磊, 徐芹芹, 朱俊宾. 2016. 中国的全球构造位置和地球动力系统. 地质学报, 90(9): 2100~2108.

宋明水. 2005. 东营凹陷南斜坡沙四段沉积环境的地球化学特征. 矿物岩石, 25(1): 67~73.

腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 陈践发. 2004. 缺氧环境及地球化学认识标志的探讨. 沉积学报, 22(2): 365~372.

同济大学海洋地质系. 1980. 海陆相地层辨认标志. 北京: 科学出版社, 1~225.

涂光炽. 1999. 初议中亚成矿域. 地质科学, 34(4): 397~404.

王益友, 郭文莹, 张国栋. 1979. 几种地球化学标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用. 同济大学学报, (2): 51~60.

夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平, 王利社. 2002. 天山古生代洋陆转化特点的几点思考. 西北地质, 35 (4): 9~20.

夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平. 2008. 天山及邻区石炭纪一早二叠世裂谷火山岩岩石成因. 西北地质, 41(4): 1~68.

余素华, 郑洪汉. 1999. 宁夏中卫长流水剖面沉积物中稀土元素及其环境意义. 沉积学报, 17(1), 149~155.

张义纲. 2005. 油气地球化学的若干展望. 石油实验地质, 27 (5): 484~489.

郑荣才, 柳梅青. 1999. 鄂尔多斯盆地长 6 油层组古盐度研究. 石油与天然气地质, 20(1): 20~25.

祝建军, 林水清, 张红军, 张高源, 应文玺, 顾超, 王琪. 2014. 伊宁凹陷构造沉降史与主控因素分析. 天然气地球科学, 25(8): 1181~1187.

Geochemical Discrimination of Middle Permian Sedimentary Environment of the Yili Area, the Border between China and Kazakhstan

FENG Yangwei,JIANG Ting,SONG Bo,NIU Yazhuo

Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey; Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MLR; Geological Research Center of Orogenic Belt, China Geological Survey,Xi'an, 710054

Abstract

The dark mudstones in fine-grained sediments are one of the most favorable carriers for the depositional environment analysis using geochemical indicators. The Middle Permian mudstones are well developed in the Yili area of China-Kazakhstan border. Determining the sedimentary environment during mudstone formation is critical to whether it can be the source rock of hydrocarbon and its potential to generate oil and gas. Based on the analysis of the major elements, trace elements and rare earth elements of dark mudstone, the elements which are sensitive to the depositional environment were selected in this study. The relationship between the content with its ratios of trace elements and sedimentary medium environment was analyzed. The sedimentary environment characteristics, such as climatic conditions, salinity, redox conditions of the lake basin during Middle Permian in Yili area were discussed. Our results indicate that the values of Sr/Ba, B/Ga and $w(B)$ reflect a brackish-saltwater sedimentary environment in the Yili area during Middle Permian, with the paleosalinity of the lake gradually increasing from the early Xiaoshansayi period to the late Tiemulike period. The data of $\delta^{13}C_{org}$, Th/U and V/(V+Ni) reveal that the Middle Permian of the Yili area developed under an anaerobic environment, in which water was weakly stratified with H_2S gradually occurring at its bottom. Based on the standardized distribution of Middle Permian mudstone by North America shale, it can be speculated that the paleoclimatic environment was dry climate with weak chemical weathering and calm water. Comprehensive analysis above suggests that the Yili area was in a dry, hypoxia saltwater environment during Middle Permian, with the reducibility and salinity of water in sedimentary environment gradually increasing from Early Permian to Late Permian.

Key words: Yili Area; Tiemulike Formation; paleosalinity; oxidation/reduction condition; geochemical discrimination