

阿尔泰山缘吉木乃地区下二叠统 沉积环境的地球化学判别

冯杨伟^{1,2,3,4}

(1. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室,江西 南昌 330013;2. 东华理工大学地球科学学院,江西 南昌 330013;
3. 中国地质调查局造山带地质研究中心,陕西 西安 710054;4. 山东科技大学山东省沉积成矿作用与沉积矿产
重点实验室,山东 青岛 266590)

摘 要:选用对沉积环境反映比较敏感的元素,对吉木乃地区珠万喀腊剖面早二叠世卡拉岗组 14 件泥岩样品开展主量元素、微量元素、稀土元素分析,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,进而探讨吉木乃地区早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。研究表明,古盐度指标 $\omega(\text{B})$ 、 $[m(\text{Sr})/m(\text{Ba})]$ 和 $[m(\text{B})/m(\text{Ga})]$ 平均值分别为 51.32×10^{-6} 、0.29% 和 2.42%,共同反映出吉木乃地区早二叠世为淡水环境,期间存在多个水体咸淡变化的次级旋回;氧化-还原条件指标 $V/(V+\text{Ni})$ 、 Th/U 和 δU 平均分别为 0.82%、3.62% 和 0.92%,揭示出吉木乃地区下二叠统为缺氧环境下的沉积;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,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。

关键词:吉木乃地区;卡拉岗组;古盐度;氧化-还原条件;下二叠统

中图分类号:P618.13

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2019)04-0098-10

Geochemical Discrimination of Early Permian Sedimentary Environment in Jimunai Area, Southern Altai

FENG Yangwei^{1,2,3,4}

(1. State Key Laboratory for Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 3. Centre for Orogenic Belt Geology, CGS, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. Shandong Provincial Key Laboratory of Depositional Mineralization & Sedimentary Mineral, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China)

Abstract: The elements that are sensitive to the depositional environment have been selected for analyzing the major elements, trace elements and rare earth elements of 14 dark mudstone samples from early Permian Kalagang Formation at Zhuwankala section in Jimunai area. And then, the relationship between the contents and ratios of the strata's trace elements and the related sedimentary environment in the studying area has been analyzed. Finally, the sedimentary environ-

收稿日期:2019-01-03;修回日期:2019-03-12

基金项目:东华理工大学博士科研启动基金项目“煤系石墨矿床成矿富集机理研究”,山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室开放基金(DMSM2019008),国家自然科学基金青年基金项目(41502081)共同资助

作者简介:冯杨伟(1987-),男,博士,讲师,硕士研究生导师,从事沉积盆地分析和油气勘探方面的教学科研工作。E-mail: 2005130009@163.com, fyangwei@ecit.cn

ment characteristics of Jimunai area in Early Permian, such as lake-basin climatic conditions, salinity, redox conditions, have been discussed. The results show that the Paleo-salinity indexes such as $w(B)$, $[m(Sr)/m(Ba)]$ and $[m(B)/m(Ga)]$ are 51.32×10^{-6} , 0.29% and 2.42%, respectively, indicating a freshwater sedimentary environment in Jimunai area during Early Permian, with multiple secondary cycles of brackish water. The $V/(V+Ni)$, Th/U and δU values are 0.82%, 3.62% and 0.92%, respectively, which suggest that the Jimunai area developed under an anaerobic environment during Early Permian. After standardizing by North America shale, it's found that the REE contents in mudstone is lower than North America shale, and it's speculated that the paleoclimatic environment was dry climate sedimentary condition with weak chemical weathering and calm water.

Keywords: Jimunai area; Kalagang Formation; palaeosalinity, oxidation/reduction condition; Early Permian

阿尔泰山南缘吉木乃地区是近年来中国北方油气调查的热点地区之一。前人野外地质调查工作表明,吉木乃地区发育下二叠统暗色泥岩,分布广且厚度较大,是潜在的烃源岩层位(LI et al., 2015)。目前,该地区哈萨克斯坦国一侧的斋桑坳陷已经发现了斋桑油气田(包含二叠系、侏罗系和三叠系油气藏),处于同一盆地、相同构造位置的中国境内的吉木乃坳陷至今没有油气发现。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,为了推动中国在吉木乃地区的油气勘查工作,开展吉木乃地区下二叠统的分析与研究工作十分重要且必要,为国家“一带一路”能源战略提供一定可借鉴的地质资料。

前人针对吉木乃地区早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(薛钧月等,2009),通过对沉积岩中一些相关元素的含量及其比值的分析工作,可以推断当时的沉积环境(冯杨伟等,2017)。沉积岩中的微量元素常与其形成环境有密切关系(LIU 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 et al., 1999)。笔者以中哈边境伊犁地区的露头剖面中二叠统泥岩样品主量元素、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,为判定吉木乃地区早二叠世暗色泥岩是否具有生烃潜力提供一定地质依据。

1 区域地质背景

吉木乃地区位于阿尔泰山南缘,地壳主体是在古生代期间拼贴和碰撞形成的(何登发等,2016),其上叠加了二叠纪以来的吉木乃内陆山间盆地。大地构造位置处于北西走向的额尔齐斯-斋桑缝合带上,南邻中哈萨克-巴尔喀什湖板块和准噶尔板块,北依西伯利亚板块南缘,查尔斯克-斋桑断裂带呈北西—南东走向穿过研究区。

吉木乃盆地近东西向展布,西宽东窄,呈向西开口的喇叭状,坳陷面积约为 $1 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。基底为前二叠系变质岩与火山岩,盖层为二叠系、三叠系、侏罗系、古近系和新近系碎屑岩。根据钻井、地震剖面和区域研究,吉木乃地区划分为3个构造层:前石炭系、二叠系一中生界和新生界。前石炭系构造层作为本区基底,主要为一些变质的结晶岩系和火山岩组成(李宜强等,2012)。二叠系一中生界构造层包括二叠系、三叠系和侏罗系3个亚构造层,下部亚构造层界面倾角与上古生界构造层基本一致,向上倾角变缓。新生代构造层由古近系、新近系和第四系组成,产状近乎水平(图1)。

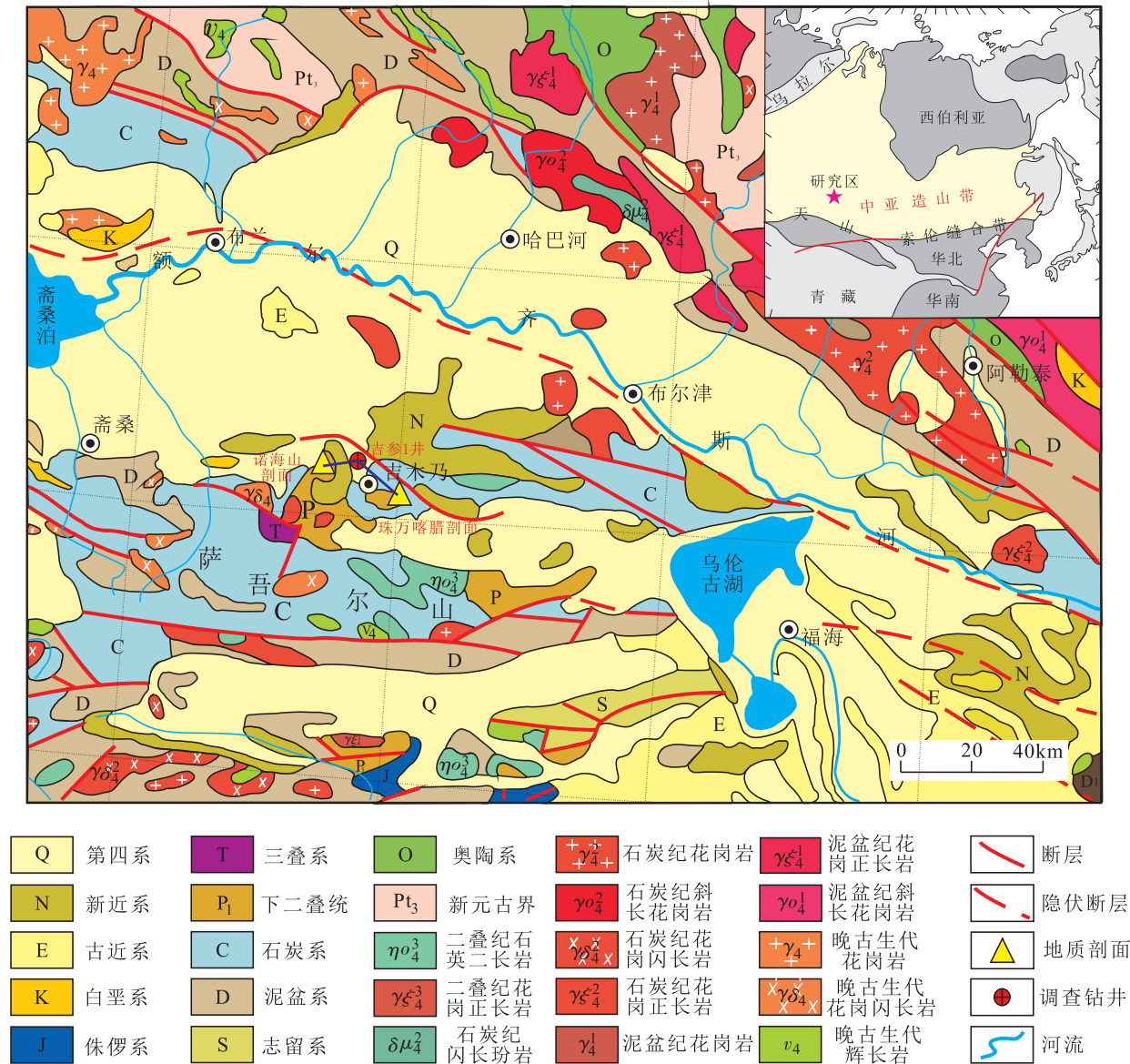


图 1 吉木乃区域地质与二叠系露头分布情况图(据李宝强等,2014 修改)

Fig.1 Sketch map of Geological structure and Permian Outcrops distribution in Jimunai area
(Modified after LI et al. , 2014)

吉木乃地区属哈萨克斯坦-准噶尔板块的一部分(涂光炽,1999),其演化跟古亚洲洋西准噶尔多陆块洋盆演化有密切关系(李锦轶等,2006),演化过程受到地幔柱的影响(夏冬等,2018)。西准噶尔多陆块洋盆的发展过程经历了早古生代与晚古生代两大构造旋回作用的多次开合,而每次开合各自都形成了一套沟弧盆体系,这些沟弧盆体系在造山运动中经历典型的软碰撞过程,彼此互相拼合或叠置在一起,构成了复杂的构造格局(XIAO et al. , 2012;曹小红等,2018;裴国栋等,2018)。其构造演化划分为

3 大阶段:①前石炭纪“多陆块洋”开合阶段。②二叠纪陆内盆地后碰撞演化阶段,石炭纪末—早二叠世初期古亚洲洋闭合,天山及邻区早二叠世地层与下伏地层之间呈广泛的区域性不整合接触。中二叠世板块冷却沉降,湖盆水体加深,湖泊范围扩大;晚二叠世受到构造运动的影响,湖盆被粗碎屑快速充填。③三叠纪以来陆内盆地坳陷-隆升剥蚀演化阶段,各造山带普遍发生多次强烈的构造隆升-剥蚀夷平过程,新近纪以来的强烈构造导致布尔津-斋桑地区盆山相间的构造格局基本定形。

2 吉木乃地区下二叠统概况

古亚洲洋在石炭纪末—早二叠世初期闭合,受古亚洲洋闭合后构造的控制,吉木乃地区二叠纪为前陆盆地湖泊相沉积。依据野外地质露头剖面、钻井资料以及地震剖面,结合研究区 1:20 万地区地质调查,早二叠世湖盆初始发育阶段,发育卡拉岗组(P_1k)含煤线的碎屑建造(图 2)。

卡拉岗组(P_1k)主要为含煤的陆源碎屑建造,局部地区相变为火山碎屑-基性熔岩建造,主要分布于铁布克山和萨吾尔山东段北坡。下二叠统卡拉岗组底部以灰绿色粗砂岩夹含砾砂岩与下伏上石炭统

哈尔加乌组角度不整合接触(图 3),由哈尔加乌往西北至吉木乃县,该不整合解除关系愈发变的明显。卡拉岗组分为上下 2 个亚组:第一亚组为正常碎屑岩夹碳质泥岩和可采煤层,向西相变为火山碎屑岩;第二亚组为不含煤的陆源碎屑岩(图 4)。含丰富的植物化石,含植物化石,匙叶、芦木及少量鳞木化石等。厚度大约为 1 000 m。该组分布于铁布克山和萨吾尔山东段北坡,由哈尔加乌往西北至吉木乃县,卡拉岗组与哈尔加乌组之间变为明显的不整合接触。在闹海珠万喀拉,下亚组岩性为含煤碎屑岩,上亚组为火山碎屑岩,厚为 513~762 m。向西变为辉石安山粉岩、安山质火山角砾岩、玄武岩等。

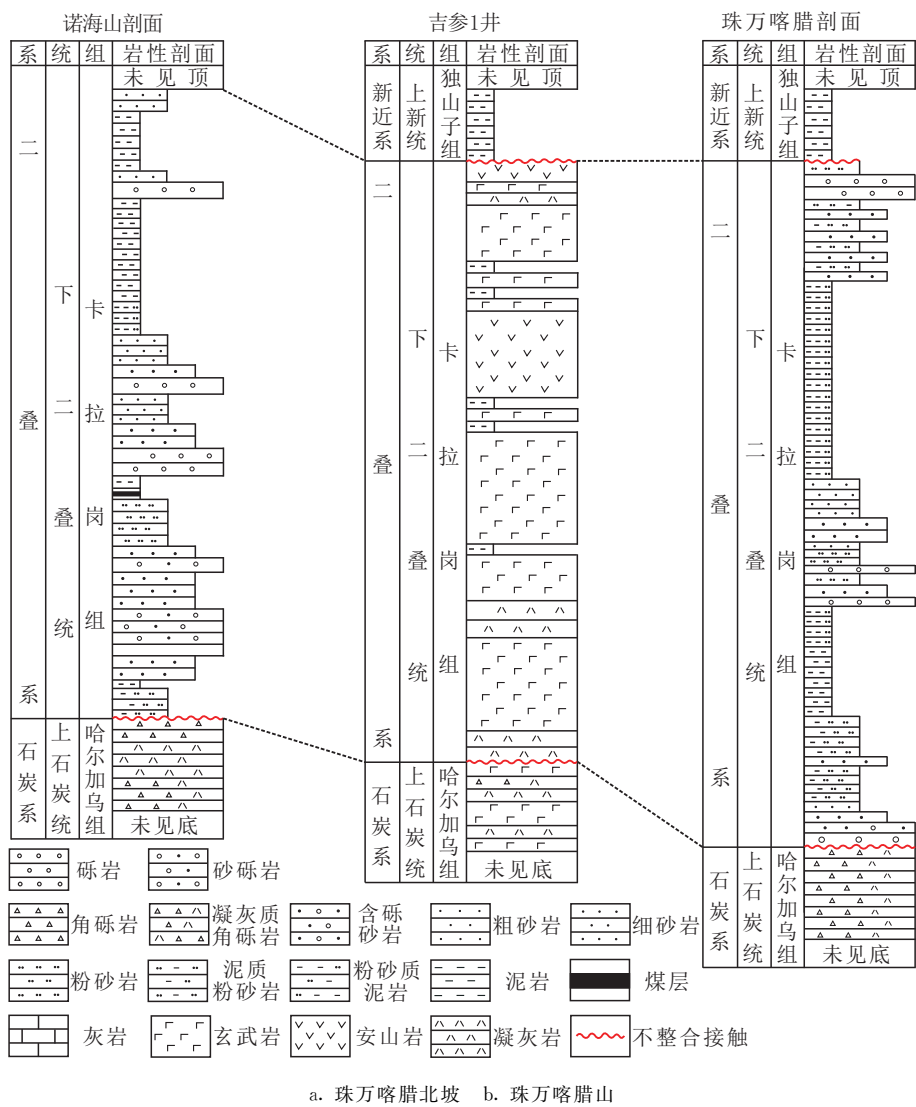
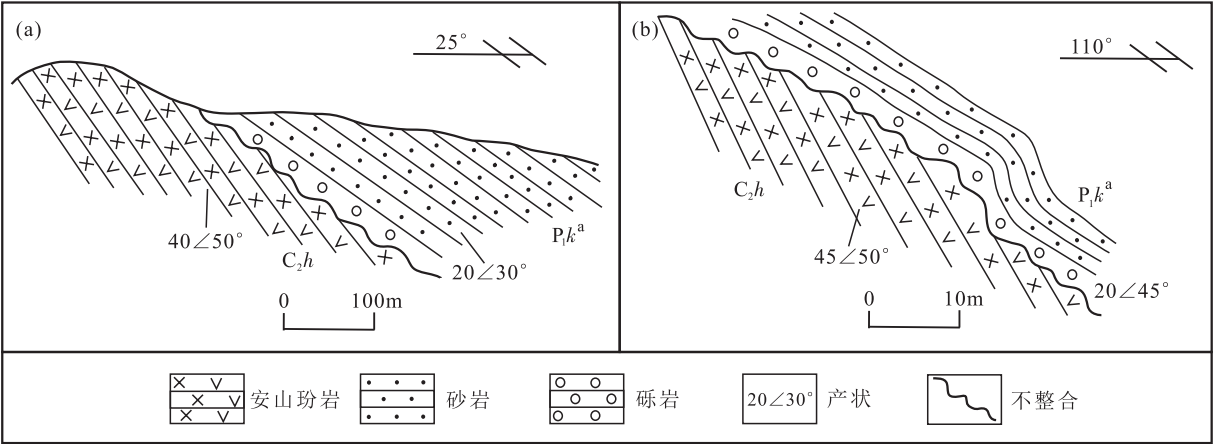


图 2 吉木乃地区二叠系对比图(剖面位置见图 1)

Fig. 2 Composed column of stratigraphic correlation of Permian in Jimunai area



a. 珠万喀腊水坡;b. 珠万喀腊山

图 3 吉木乃地区下二叠统卡拉岗组和下伏上石炭统角度不整合接触关系图

Fig. 3 Angular contact relationship between the lower Permian Kalagang formation and the upper Carboniferous in the Jimunai area

3 样品采集与测试分析

本次用于分析的样品来自于阿尔泰南缘吉木乃地区珠万喀腊剖面早二叠世卡拉岗组,从下向上连续采集细粒沉积物样品共计 14 件,主要岩性为黑色

泥岩、灰色泥岩等。
采集新鲜露头样品,有效避开方解石脉等其他脉体,单个样品的采集量均不小于 500 g。样品前处理、主量元素、微量元素、稀土元素测试在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。

表 1 吉木乃地区珠万喀腊剖面下二叠统主量元素分析结果表(%)

Tab. 1 Major element content of Early Permian at Zhuwankala section in Jimunai area(%)

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 [*]
ZWKL-CH1	57.77	16.90	4.31	4.60	1.52	2.52	1.83	0.55	0.84	0.35	0.08	8.65
ZWKL-CH2	57.32	16.91	3.17	4.39	2.33	2.59	2.17	0.68	0.82	0.19	0.11	9.24
ZWKL-CH3	61.07	17.14	2.77	3.05	1.37	2.04	2.21	1.28	0.80	0.19	0.07	7.92
ZWKL-CH4	56.55	16.83	3.39	7.20	1.42	3.10	2.04	0.43	0.81	0.20	0.11	7.83
ZWKL-CH5	56.43	18.01	3.34	6.35	1.04	3.14	2.27	0.50	0.87	0.21	0.09	7.64
ZWKL-CH6	55.99	17.22	3.50	7.80	0.94	3.47	1.94	0.42	0.84	0.22	0.11	7.47
ZWKL-CH7	56.81	18.17	3.12	6.21	1.02	3.03	2.29	0.59	0.86	0.16	0.09	7.53
ZWKL-CH8	61.50	17.13	2.73	4.00	1.07	2.33	2.03	0.96	0.84	0.16	0.08	7.09
ZWKL-CH9	59.23	16.88	3.28	5.29	0.97	2.80	2.17	0.63	0.78	0.15	0.08	7.63
ZWKL-CH10	60.94	17.34	2.93	3.87	1.02	2.34	2.02	1.17	0.86	0.16	0.08	7.21
ZWKL-CH11	60.45	17.01	1.99	4.71	1.63	2.45	1.95	1.25	0.82	0.16	0.10	7.40
ZWKL-CH12	59.62	17.01	3.11	4.79	1.06	2.43	2.17	0.24	0.80	0.24	0.09	8.36
ZWKL-CH13	59.19	17.26	3.68	4.02	1.19	2.43	2.18	0.27	0.82	0.24	0.09	8.55
ZWKL-CH14	57.62	18.55	2.69	4.33	1.28	2.39	2.38	0.28	0.88	0.19	0.08	9.23



a.卡拉岗组底部细砾岩



b.卡拉岗组下部滨湖相含植物茎干化石粗砂岩



c.卡拉岗组下部黑色厚层泥岩夹透镜状细砂岩



d.卡拉岗组中部灰白色透镜状细砾岩



e.卡拉岗组中部灰白色细砾岩可见斜层理



f.卡拉岗组中上部暗色泥岩



g.卡拉岗组中上部灰褐色中砂岩



h.卡拉岗组上部灰色透镜状细砾岩

图 4 吉木乃地区珠万喀腊剖面下二叠统岩性特征图

Fig. 4 The lithology characteristics of Early Permian at Zhuwankala section in Jimunai area

表 2 吉木乃地区珠万喀腊剖面下二叠统稀土元素分析结果表(10⁻⁶)
Tab. 2 Traorrlmrnt onntrnt of Early Permian at Zhuwankala section in Jimunai area(10⁻⁶)

样品编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
ZWKL-CH1	16.4	35.2	5.08	21.8	5.66	1.56	5.23	0.80	4.40	0.83	2.22	0.34	2.31	0.39	22.1
ZWKL-CH2	26.4	55.2	7.02	27.2	6.10	1.15	5.32	0.86	4.87	0.96	2.74	0.43	2.85	0.46	26.4
ZWKL-CH3	16.3	29.9	4.29	16.5	3.76	1.02	3.48	0.56	3.32	0.66	1.98	0.32	2.25	0.37	18.2
ZWKL-CH4	19.1	39.5	5.10	20.0	4.47	1.15	4.09	0.68	4.16	0.83	2.32	0.36	2.50	0.41	24.0
ZWKL-CH5	15.7	31.8	4.24	16.5	3.83	1.04	3.54	0.58	3.47	0.71	2.03	0.32	2.23	0.37	18.9
ZWKL-CH6	18.0	37.6	5.22	20.9	4.88	1.16	4.40	0.68	3.82	0.74	2.08	0.33	2.28	0.38	20.8
ZWKL-CH7	15.2	30.2	4.00	15.1	3.21	0.84	2.95	0.49	3.05	0.62	1.86	0.30	2.12	0.36	18.0
ZWKL-CH8	13.8	25.5	3.58	12.9	2.88	0.79	2.90	0.48	2.98	0.63	1.87	0.30	2.11	0.35	16.3
ZWKL-CH9	25.2	51.2	6.58	25.8	5.13	1.09	4.49	0.71	4.26	0.83	2.40	0.38	2.55	0.41	24.1
ZWKL-CH10	16.4	29.8	4.02	15.0	3.07	0.88	2.88	0.48	3.02	0.63	1.90	0.30	2.08	0.34	17.0
ZWKL-CH11	12.5	22.4	3.23	12.1	2.76	0.80	2.86	0.46	2.85	0.60	1.76	0.28	1.92	0.31	15.5
ZWKL-CH12	18.9	35.2	5.17	20.7	4.50	1.10	4.12	0.66	3.99	0.78	2.27	0.36	2.46	0.39	20.4
ZWKL-CH13	22.8	43.8	5.69	21.5	4.88	1.17	4.44	0.73	4.31	0.85	2.45	0.40	2.67	0.42	23.6
ZWKL-CH14	20.6	37.6	5.34	19.8	4.03	0.94	3.86	0.62	3.72	0.78	2.30	0.36	2.45	0.40	20.7

4 结果与沉积环境讨论

4.1 沉积环境古盐度

本次依据早二叠世卡拉岗组暗色泥岩的[*m*(Sr)/*m*(Ba)]、[*m*(B)/*m*(Ga)]和硼质量分数(*w*(B))来定性分析的沉积环境盐度(图 5)。郑荣才等(1999)认为[*m*(Sr)/*m*(Ba)]值是判别古盐度的灵敏标志之一,依据[*m*(Sr)/*m*(Ba)]值和距离海岸远近成反比可定性地反映沉积环境的古盐度特征,王益友等(1979)认为半咸水和咸水(海相)环境[*m*(Sr)/*m*(Ba)]分别为 1.0~0.6 和>1;研究表明[*m*(B)/*m*(Ga)]与[*m*(Sr)/*m*(Ba)]具有类似的变化规律(CHEN et al. , 1997;EMERSON et al. , 1991),[*m*(B)/*m*(Ga)]>3.3 水体咸化加强,[*m*(B)/*m*(Ga)]<3.3 水体逐渐淡化;沉积物中硼质量分数(*w*(B))与其盐度值线性相关,是指示其形成时水介质古盐度的有效指标之一,咸水环境中硼质量分数(*w*(B))约为 100 mg/kg,淡水环境中 *w*(B)值很低。

吉木乃地区珠万喀拉剖面卡拉岗组泥岩硼质量分数 *w*(B)为 41.60×10⁻⁶~62.90×10⁻⁶,平均值为 51.32×10⁻⁶(图 5),代表了早二叠世时期为淡水沉积环境。[*m*(Sr)/*m*(Ba)]为 0.21%~14%,平均值为 0.29%,代表了早二叠世时期为淡

水沉积环境,有短暂的咸水环境。[*m*(B)/*m*(Ga)]为 1.87%~14%,平均值为 2.42%(图 5),代表了早二叠世时期为淡水沉积环境。参照中国已知部分环境盐度结果,认为吉木乃地区早二叠世时期为淡水沉积环境,期间存在多个水体咸淡变化的次级旋回。

4.2 沉积环境的氧化-还原条件

元素 V/(V+Ni)值指示沉积环境的氧化还原条件,V、Ni 同属铁族元素,V 在氧化环境中易迁移而在还原环境中易沉淀,Ni 在氧化及还原环境中均较稳定。氧化环境下 V 元素呈 V⁵⁺以钒酸氢根 HVO₄²⁻和 H₂VO⁻⁴的形式稳定存在;弱还原条件下 V⁵⁺被还原为 V⁴⁺,形成钒酰基 VO²⁺、羟基 VO(OH)³⁻以及不溶的氢氧化物 VO(OH)₂;强还原环境下 V 被还原为 V³⁺,被周围的卟啉捕获或以氧化物 V₂O₃、氢氧化物 V(OH)₃形式沉淀(邓宏文等,1993;RIMMER, 2004;KIMUTA et al. , 2001)。元素 V/(V+Ni)值>0.84 指示水体分层且底层出现 H₂S 的厌氧环境;比值在 0.6~0.84 区间指示水体分层不强的厌氧环境;比值在 0.46~0.60 区间指示水体分层弱的贫氧环境(苗建宇, 2001)。布尔津南珠万喀拉剖面卡拉岗组泥岩 V/(V+Ni)值在 0.77%~14%,平均为 0.82%,代表了较强的厌氧环境,且水体出现分层同时可能有 H₂S,沉积环境存在多期变化次级旋回(图 5)。

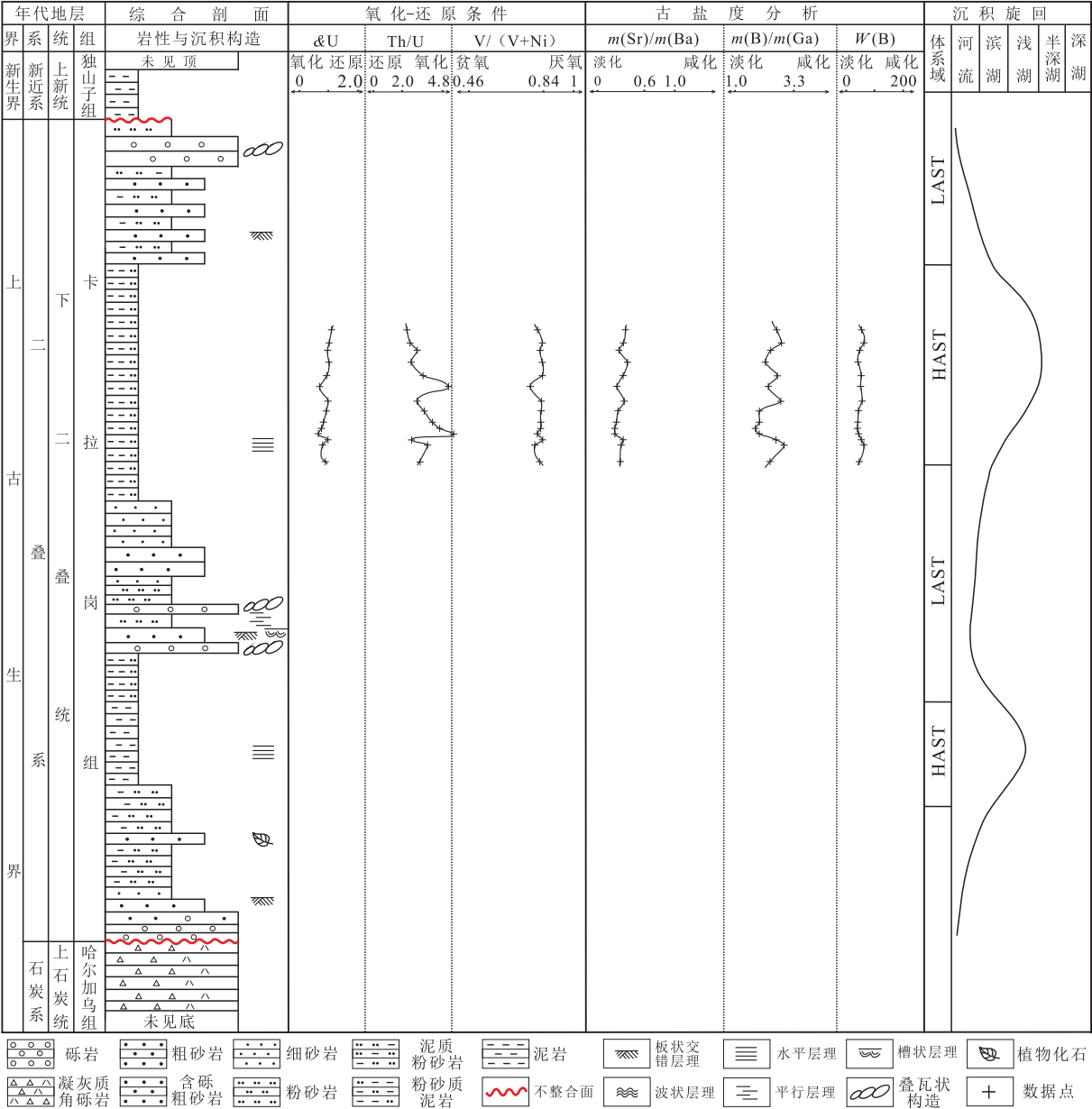


图 5 吉木乃地区珠万喀腊剖面下二叠统地球化学剖面图

Fig. 5 Geochemical charanterietine of Early Permian at Zhuwankala section in Jimunai area

基于 Th 和 U 两种元素地球化学性质在还原环境下相似而在氧化环境下具有显著差异(LIU et al. , 1985)的特性,细粒沉积物中 Th/U 值和 &U 值常常被用来分析沉积环境的氧化还原状态。氧化环境中 U 元素呈 U^{6+} 可迁移状态,以铀酰基的形式与碳酸根离子结合形成 $UO_2(CO_3)_3^{4-}$;还原条件下 U^{6+} 被还原为 U^{4+} ,以沥青铀矿或羟基络合物的形式在沉积物中富集(MCMANUS et al. , 2005)。Th 元素只有一种不易溶解的 Th^{4+} 价态。Th/U 值

在 0~2 指示还原环境,>2 指示氧化环境(KIMURA et al. , 2001)。&U= $U/[0.5 \times (Th/3 + U)]$, &U>1 指示还原环境;&U<1 指示氧化环境(腾格尔等,2004)。

布尔津南珠万喀拉剖面卡拉岗组泥岩 Th/U 为 2.36%~14%,平均值为 3.62,代表了缺氧还原环境;&U 为 0.69%~14%,平均值为 0.92%,代表了轻微缺氧环境,存在多期沉积环境氧化-还原变化次级旋回(图 5)。

4.3 古气候条件

对阿尔泰南缘吉木乃地区珠万喀腊剖面下二叠统暗色泥岩的稀土元素做了北美页岩标准化后的分布模式(图 6),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,推测当时沉积应为化学风化作用较弱的气候,同时水体可能较安静,制约了稀土元素在卡拉岗组泥质沉积物中的迁移富集。

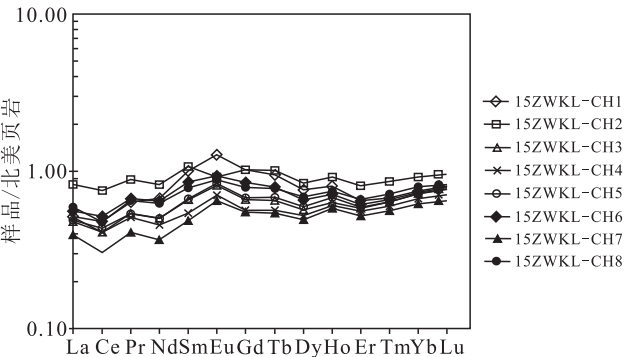


图 6 吉木乃地区珠万喀腊剖面下二叠统泥岩的北美页岩均一化稀土分布模式图

Fig. 6 North American shale-normalized REE patterns for the Early Permian mudstones at Zhuwankala section in Jimunai area

5 结论

(1)暗色泥岩的 $[m(\text{Sr})/m(\text{Ba})]$ 、 $[m(\text{B})/m(\text{Ga})]$ 和硼质量分数($w(\text{B})$)共同反映出吉木乃地区早二叠世时期为淡水沉积环境,期间存在多个水体咸淡变化的次级旋回。

(2)表征氧化-还原条件的 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 值、 Th/U 值和 δU 值反映出早二叠世阿尔泰南缘吉木乃地区为一个水体分层不强的厌氧还原环境;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。

(3)样品/北美页岩标准化后的分布模式显示当时沉积应为化学风化作用较弱的气候,同时水体可能较安静,制约了稀土元素在卡拉岗组泥质沉积物中的迁移富集。

致谢:感谢西安地质调查中心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;感谢参与野外地质调查的各位专家,感谢审稿专家的宝贵意见与建议。

参考文献(References):

曹小红,韩琼,赵同阳,等. 阿尔泰造山带北部喀拉加拉克岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. 西北地质, 2018, 51(3): 67-79.

CAO Xiaohong, HAN Qiong, ZHAO Tongyang, et al. LA-ICP MS Zircon U-Pb Dating and Geochemical Characteristics of Kalajiareke Rock Mass in Northern Altay Orogenic Belt and Its Geological Significance[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(3): 67-79.

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.

DENG Hongwen, QIAN Kai. Sedimentary geochemistry and environmental analysis[M]. Lanzhou: Gansu science and Technology Press, 1993.

冯杨伟,姜亭,宋博,等. 中哈边境伊犁地区中二叠统沉积环境的地球化学判别[J]. 地质学报, 2017, 91(4): 942-953.

FENG Yangwei, JIANG Ting, SONG Bo, et al. Geochemical Discrimination of Middle Permian Sedimentary Environment of the Yili Area, the border between China and Kazakhstan[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(4): 942-953.

何登发,童晓光,杨福忠,等. 中亚含油气区构造演化与油气聚集[M]. 北京:科学出版社, 2016.

HE Dengfa, TONG Xiaoguang, YANG Fuzhong, et al. Tectonic Evolution and Oil and Gas Accumulation in Oil and Gas-bearing Areas of Central Asia[M]. Beijing: Science Press, 2016.

李宝强,孟广路,王心泉,等. 中国新疆及中亚邻区地质矿产图[M]. 北京:地质出版社, 2014.

LI Baoqiang, MENG Guanglu, WANG Xinquan, et al. Geological and mineral programs of Xinjiang and its neighboring areas in central Asia, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.

李锦轶,何国琦,徐新,等. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨[J]. 地质学报, 2006, 80(1): 148-168.

LI Jinyi, HE Guoqi, XU Xin, et al. Crustal Tectonic Framework of Northern Xinjiang and Adjacent Regions and Its Formation[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(1): 148-168.

- 李宜强, 刘同敬, 王伯军, 等. 哈萨克斯坦斋桑油气项目技术经济评价[R]. 中国石油大学(北京), 2012.
- LI Yiqiang, LIU Tongjing, WANG Bojun, et al. Technical and Economic Evaluation of Zaysan Oil and Gas Project in Kazakhstan[R]. China University of Petroleum (Beijing), 2012.
- 苗建宇. 新疆北部主要盆地二叠系烃源岩沉积环境与生烃特征[D]. 西安: 西北大学, 2001.
- MIAO Jianyu. The depositional environment of Permian system hydrocarbon source rocks and its potential hydrocarbon generating characteristics in major basins in North Xinjiang [D]. Xi'an: Northwest University, 2001.
- 裴国栋, 弓小平, 马华东, 等. 阿尔泰山带喀纳斯群变质岩地球化学特征及形成环境[J]. 中国地质, 2018, 45(1): 141-154.
- PEI Guodong, GONG Xiaoping, MA Huadong, et al. Geochemical characteristics and formation environments of metamorphic rocks in the Kanas Group of Altay tectonic belt[J]. Geology in China, 2018, 45(1): 141-154.
- 腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 等. 缺氧环境及地球化学判别标志的探讨[J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 365-372.
- TONGER, LIU Wenhui, XU Yongchang, et al. The discussion on anoxic environments and its geochemical identifying Indices [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(2): 365-372.
- 涂光炽. 初议中亚成矿域[J]. 地质科学, 1999, 34(4): 397-404.
- TU Guangzhi. On the central Asia metallogenic Province[J]. Chinese Journal of Geology, 1999, 34(4): 397-404.
- 王益友, 郭文莹, 张国栋. 几种地球化学标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用[J]. 同济大学学报, 1979, (2): 51-60.
- WANG Yiyu, GUO Wenyong, ZHANG Guodong. Application of some geochemical indicators in determining of sedimentary environment of the Funing group (paleogene), Jinhua depression, Jiangsu province[J]. Journal of Tongji University, 1979, (2): 51-60.
- 夏冬, 彭玉旋, 罗照华, 等. 新疆石炭一二叠纪双亚慢柱特征及其对矿产资源的约束[J]. 西北地质, 2018, 51(4): 10-23.
- XIA Dong, PENG Yuxuan, LUO Zhaohua, et al. Characteristic of Carboniferous-Permian Double Sub-mantle Plumes in Xinjiang and Their Constraints on Mineral Resources[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(4): 10-23.
- 薛钧月, 李巨初, 王红军. 康滇地轴南段江川盆地澄江砂岩微量元素地球化学特征及其地质意义[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2019, 32(1): 45-51.
- XUE Junyue, LI Juchu, WANG Hongjun. Geochemical Characteristics of Trace Element Sand Geological Significance of Chengjiang Sandstone in Jiangchuan Basin, Kangdian Axi [J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science), 2019, 32(1): 45-51.
- 郑荣才, 柳梅青. 鄂尔多斯盆地长6油层组古盐度研究[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(1): 20-25.
- ZHENG Rongcai, LIU Meiqing. Study on palaeosalinity of Chang 6 oil reservoir set in Ordos basin [J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(1): 20-25.
- CHEN Zhongyuan, ZHENG Lou. Quaternary stratigraphy and trace-element indices of the Yangtze Delta, Eastern China, with special reference to marine transgressions [J]. Quaternary Research, 1997, 47: 181-191.
- EMERSON S R, HUESTED S S. Ocean anoxia and the concentrations of molybdenum and vanadium in seawater [M]. Mar. Chem., 1991, 34(3-4): 177-196.
- KIMUTA H, WATANABE Y. Ocean anoxia at the Precambrian-Cambrian boundary [J]. Geology, 2001, 29: 995-998.
- LI Di, HE Dengfa, MA Delong, et al. Carboniferous-Permian Tectonic Framework and Its Later Modifications to The Area From Eastern Kazakhstan to Southern Altai: Insights From The Zaysan-Jimunai Basin Evolution [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 113: 16-35.
- LIU Baojun, ZENG Yunfu. The foundation and working method of lithofacies palaeogeography [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985.
- MCMANUS J, BERELSON W M, KLINKHAMMER G P, et al. Authigenic uranium: relationship to oxygen penetration depth and organic carbon rain [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 2005, 69: 95-108.
- RIMMER S M. Geochemical paleoredox indicators in Devonian-Mississippian black shales, Central Appalachian Basin (USA) [J]. Chem. Geol., 2004, 206: 373-391.
- XIAO Wenjiao, LI S, SANTOSH M, et al. Orogenic belts in Central Asia: Correlations and connections [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 49(3): 1-6.
- YU Suhua, ZHENG Honghan. REE of Sediments of the Changliushui Section at Zhongwei County of Ningxia Province and the Environmental Significance [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(1): 149-155.