

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.11.005

准噶尔盆地东缘中—晚侏罗世细碎屑岩地球化学特征:物源与古沉积环境恢复

程先钰¹, 张天福¹, 程银行¹, 刘行¹, 胡鹏¹, 吴志伟², 武志宇³CHENG Xianyu¹, ZHANG Tianfu¹, CHENG Yinhang¹, LIU Xing¹, HU Peng¹, WU Zhiwei², WU Zhiyu³

1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;

2. 成都理工大学, 四川 成都 610059;

3. 长庆实业集团, 陕西 西安 710016

1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

2. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;

3. Changqing Industry and Commerce Group, Xi'an 710016, Shaanxi, China

摘要:准噶尔盆地东缘喀木斯特地区中侏罗统头屯河组底部砂体是砂岩型铀矿重要的赋矿层位。采用 ICP-MS 对准噶尔盆地东缘喀木斯特地区中—晚侏罗世西山窑组、头屯河组、齐古组、喀拉扎组不同层位的 33 件细碎屑岩样品进行微量、稀土元素测试,探讨西山窑组、头屯河组、齐古组、喀拉扎组氧化—还原条件、源区构造背景及古气候演化对铀成矿的影响。研究发现,样品的相对 B 含量、Sr/Ba、V/(V+Ni)、U/Th、Ni/Co 等组合指示,西山窑组、头屯河组、齐古组、喀拉扎组沉积时的古水体介质均为富氧的淡水环境; Fe^{2+}/Fe^{3+} 指示西山窑组成煤、成岩形成原生还原层,头屯河组上段与齐古组红层为强氧化环境。西山窑组—喀拉扎组, Sr/Cu、FeO/MnO、 Al_2O_3/MgO 等比值总体反映古气候经历了温暖潮湿—干湿交替—半干旱、干旱的转变过程;西山窑组顶部与头屯河组底部为干湿转换的关键时期; CIA、ICV 指数反映头屯河组上段、齐古组、喀拉扎组具有构造环境相对稳定的物源区,西山窑组和头屯河早期,准噶尔盆地周缘构造活动性增强。沉积岩构造环境判别图解显示,喀木斯特地区西山窑组、头屯河组、齐古组、喀拉扎组沉积物源主要来自上地壳长英质火成岩源区,同时具有一定量的大陆拉斑玄武岩的混合,其以大陆岛弧构造背景为主,部分物源显示大陆边缘构造背景。综上所述,西山窑组—头屯河组古气候和富氧古水体转变对喀木斯特地区砂岩型铀大规模成矿作用有着重要的指示意义。

关键词:准噶尔盆地;古环境;中—晚侏罗世;地质调查工程;砂岩型铀矿;地球化学特征

中图分类号:P534.52;P588.21 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)11-1950-17

Cheng X Y, Zhang T F, Cheng Y H, Liu X, Hu P, Wu Z W, Wu Z Y. Element geochemical characteristics of the Middle—Late Jurassic microclastic rock in the Eastern Junggar Basin: implications for tracing sediment sources and paleoenvironment restoration. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(11): 1950–1966

Abstract: The sand body at the bottom of the Middle Jurassic Toutunhe Formation from the Kamusite area in the eastern margin of the Junggar Basin is an important sandstone-type uranium ore bearing horizon. In this paper, thirty-three microclastic rock samples collected from the Middle-Late Jurassic Xishanyao, Toutunhe, Qigu and Kalazha Formations in the eastern margin of Junggar Basin were analyzed for REEs and trace elements by means of ICP-MS. The oxidation-reduction conditions of Xishanyao, Toutunhe, Qigu and Kalazha Formations and tectonic setting of their provenances and paleoclimate change are discussed to understand their implication for uranium mineralization. It is found that the relative B contents, Sr/Ba, B/Ga, U/Th, V/(V+Ni), V/Cr, Ni/Co ratios and other

收稿日期:2020-08-16;修订日期:2021-08-30

资助项目:中国地质调查局项目《京津冀协同发展区暨雄安新区资源环境承载能力监测评价》(编号:DD20221727)、《天山—华北陆块铀钍等矿产资源调查项目》(编号:DD20190813)

作者简介:程先钰(1991-),男,硕士,工程师,从事地质矿产调查与研究工作。E-mail:chengxianyu_601@163.com

geochemical indices suggest that the the Xishanyao, Toutunhe, Qigu and Kalazha Formations were deposited in the fresh oxygenated water. The $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ratios indicate that the Xishanyao Formation characterized by the appearance of coal seam represent reduced environment, while the red bed in the upper Toutunhe Formation and Qigu Formation indicate a strong oxidation environment. From Xishanyao to Kalazar period, the Sr/Cu , FeO/MnO , $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ ratios indicate that the paleoclimate and paleoenvironment experienced variations from warm-humid to alternated dry-wet, semi-arid and arid. The top of the Xishanyao Formation and the bottom of the Toutunhe Formation are the key periods of dry-wet transformation. The *CIA* and *ICV* indexes show that the upper Toutunhe Formation, Qigu Formation and Kalazha Formation have relatively stable provenance. During the Xishanyao and early Toutunhe period, the tectonic activity around the Junggar Basin increased. The discrimination diagram of sedimentary tectonic environment shows that the provenances of the Xishanyao, Toutunhe, Qigu and Kalazar Formations in this study area were dominantly composed by felsic igneous rocks in the upper crust, with certain amount of continental tholeiite. The tectonic background was continental island arc, with part of the provenance hinted the tectonic background of continental margin. In summary, the paleoclimate and oxygenated paleowater transformation from Xishanyao period to Toutunhe period was crucial for large-scale sandstone-type uranium mineralization in this area.

Key words: Junggar Basin; paleoenvironment; Middle-Late Jurassic; geological survey engineering; sandstone-type uranium; geological characteristics

准噶尔盆地是晚石炭世—新近纪发育在中国西北部的大型陆内叠合盆地,是中国第二大内陆盆地^[1-3]。盆地内中生代沉积地层记录完整,其中中侏罗统西山窑组、头屯河组分别是重要的含煤、含铀岩系,上侏罗统齐古组、喀拉扎组为氧化红层。砂岩型铀矿作为新型能源矿产,近年受到广大地质学者的关注,随着铀矿勘查程度的深入,发现准噶尔盆地的煤田、油气钻井中常伴随铀异常,且砂岩型铀矿成矿过程中,地表水系起着连接造山带铀源和沉积盆地的纽带作用^[4]。古气候决定了赋矿岩系沉积时的氧化、还原性质,对沉积期后地层中铀的淋滤、迁移及沉淀具有重要影响^[5],因此研究喀木斯特地区中—上侏罗统古气候和古沉积环境对揭示铀成矿过程具有重要意义。水体及沉积物中的微量、稀土元素不仅与本身的化学性质有关,而且还受到沉积介质物理化学条件及古气候条件的影响^[6-7],因此沉积物中的稀土、微量元素既可以反映古环境、古气候的变迁,还可以指示古沉积环境的氧化还原状态^[8-14]。

本次选取准噶尔盆地东缘喀木斯特地区煤田钻孔 ZKU05,对中—晚侏罗世西山窑组、头屯河组、齐古组、喀拉扎组不同层位的泥岩等细碎屑岩进行取样分析。通过分析细碎屑岩稀土、微量元素在垂向上的变化,恢复古水体、重建古气候的变迁过程,探讨区域构造运动与古沉积环境的关系,对研究古水体条件、古气候条件在准东地区铀成矿过程中的作用具有指示意义。

1 区域地质背景

准噶尔盆地位于阿尔泰山以南,天山以北,整体呈北窄南宽的不规则三角形,位于哈萨克斯坦板块、塔里木板块和西伯利亚板块的交汇部位,受控于古亚洲洋和周边造山带的演化^[15-17]。盆地整体向西倾斜,南部地势稍低于北部,东西长约 700 km。南北宽约 320 km,面积约 $13 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。研究区位于准噶尔盆地东缘喀木斯特地区(图 1),区内岩浆活动较发育,主要出露于研究区东南部。晚古生代地层多分布于研究区边缘,中—新生代地层主要分布于研究区中部,第四系大面积出露,主要为湖积、风成堆积物等(图 1)。

准东喀木斯特地区 ZKU05 钻井中—上侏罗统岩性组合及沉积相特征见图 2。西山窑组以灰白色砂岩、泥岩、泥质粉砂岩互层为主,是主要的含煤地层。西山窑组为湖泊三角洲相沉积,顶部煤层及炭质泥岩为三角洲平原沉积,沉积水体较稳定,大量植被繁殖,聚煤作用强烈,下部为厚层灰色细砂岩,为三角洲前缘沉积。头屯河组主体以一套红、绿色交替的河流相碎屑沉积为主,上段为灰色—灰绿色与紫红色、褐红色砂泥岩互层组成,以中细砂岩为主,底部的辫状河道砂体为研究区砂岩型铀矿的主要赋矿层位,以黄褐色中细砂岩为主,局部含炭屑(图 2)。齐古组主要为棕红色、紫红色细碎屑岩组成的稳定氧化红层,整体以泛滥平原相沉积为主。喀拉扎组为河流相沉积,岩性以灰色碎屑岩为主,局部见膏盐层。喀拉扎组与下伏齐古组呈角度不

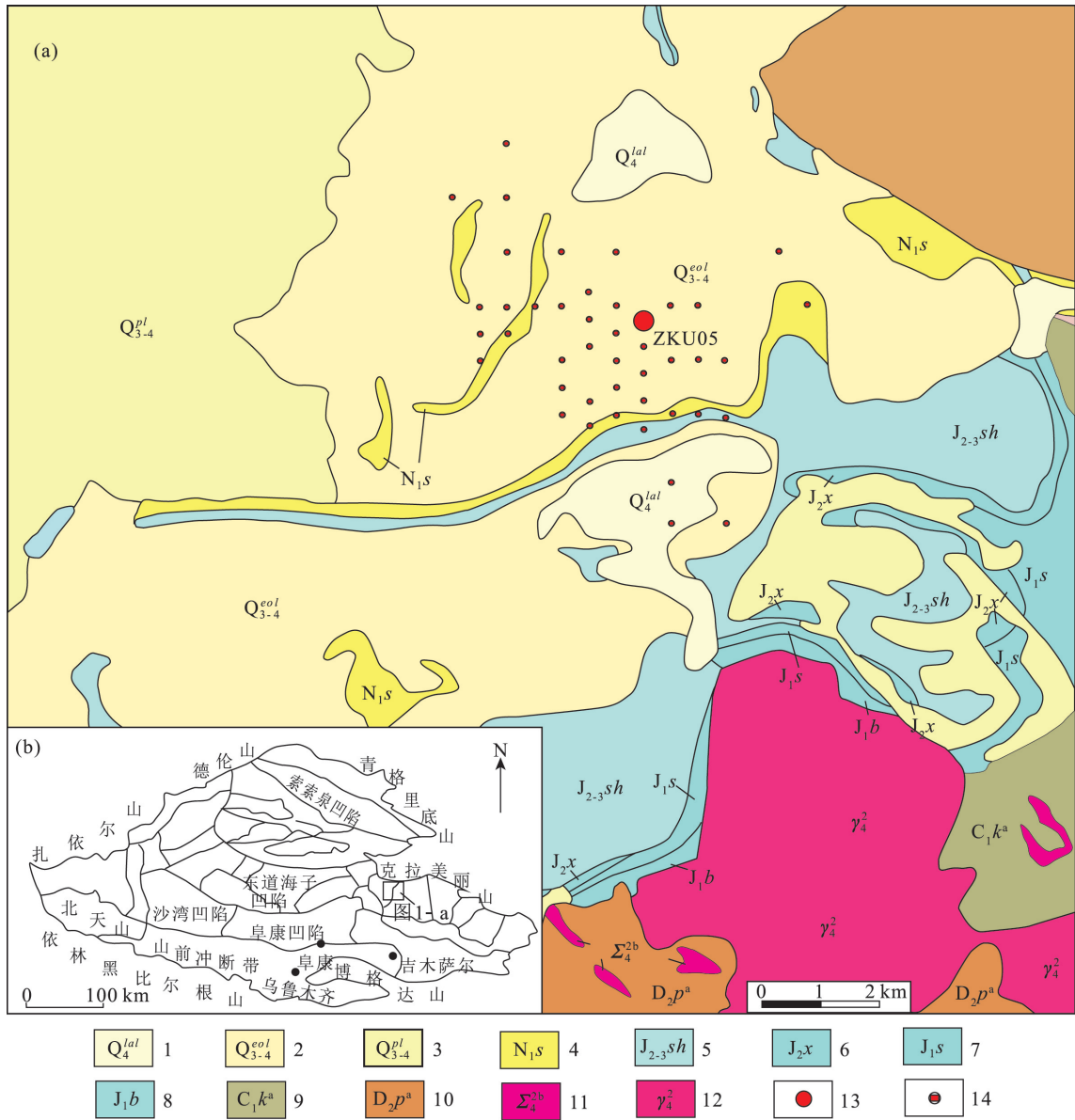


图 1 研究区地质简图(a)及构造位置(b,据参考文献[17]修改)

Fig. 1 Geological map(a) and tectonic division(b) of the study area

1—第四系湖积物;2—古近系—第四系风成堆积砂;3—古近系—第四系湖积物;4—新近系索泉组;5—中—上侏罗统石树沟群;6—中侏罗统西山窑组;7—下侏罗统三工河组;8—下侏罗统八道湾组;9—下石炭统卡姆斯特下亚组;10—中泥盆统平顶山组下亚组;11—蚀变超基性岩;12—斑状黑云花岗岩;13—已验证工业铀矿孔;14—潜在工业孔

整合接触,上侏罗统与上覆古近系也为角度不整合接触^[18]。

2 样品采集及测试方法

样品采自准噶尔盆地东缘喀木斯特地区 ZKU05 井(图 1),自西山窑组至喀拉扎组顶部系统采集 33 件样品,其中西山窑组 5 件,头屯河组 13

件,齐古组 7 件,喀拉扎组 8 件,采样位置见图 3。样品分析测试由中国地质调查局天津地质调查中心实验室完成。首先将样品研磨成 200 目全岩粉末,主量元素采用 X 衍射荧光光谱(XRF)分析,检测方法依据为《硅酸盐岩石化学分析方法第 14 部分:氧化亚铁量测定》(GB/T14506.14—2010)、《硅酸盐岩石化学分析方法第 28 部分:16 个主要成分

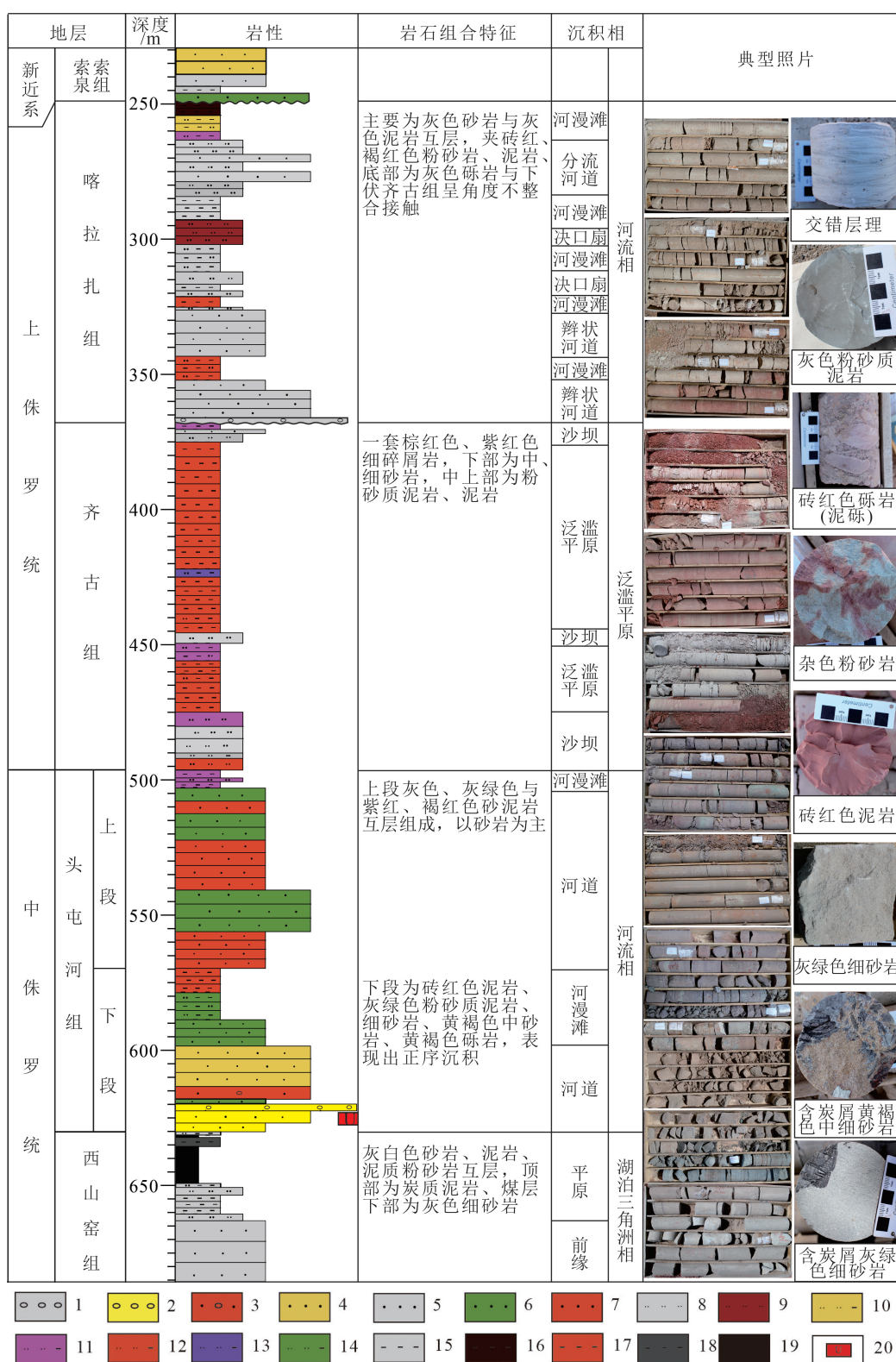


Fig. 2 The column of ZKU05 drilling lithology in Kamuste area, eastern margin of the Junggar Basin
1—灰色砾岩;2—黄色砾岩;3—砖红色含砾砂岩;4—土黄色砂岩;5—灰色砂岩;6—灰绿色砂岩;7—砖红色砂岩;8—灰色粉砂岩;
9—褐红色粉砂岩;10—土黄色泥粉砂岩;11—紫红色泥质粉砂岩;12—砖红色泥质粉砂岩;13—紫色泥质粉砂岩;
14—灰绿色泥质粉砂岩;15—灰色泥岩;16—深棕色泥岩;17—砖红色泥岩;18—深灰色泥岩;19—煤;20—铀矿化

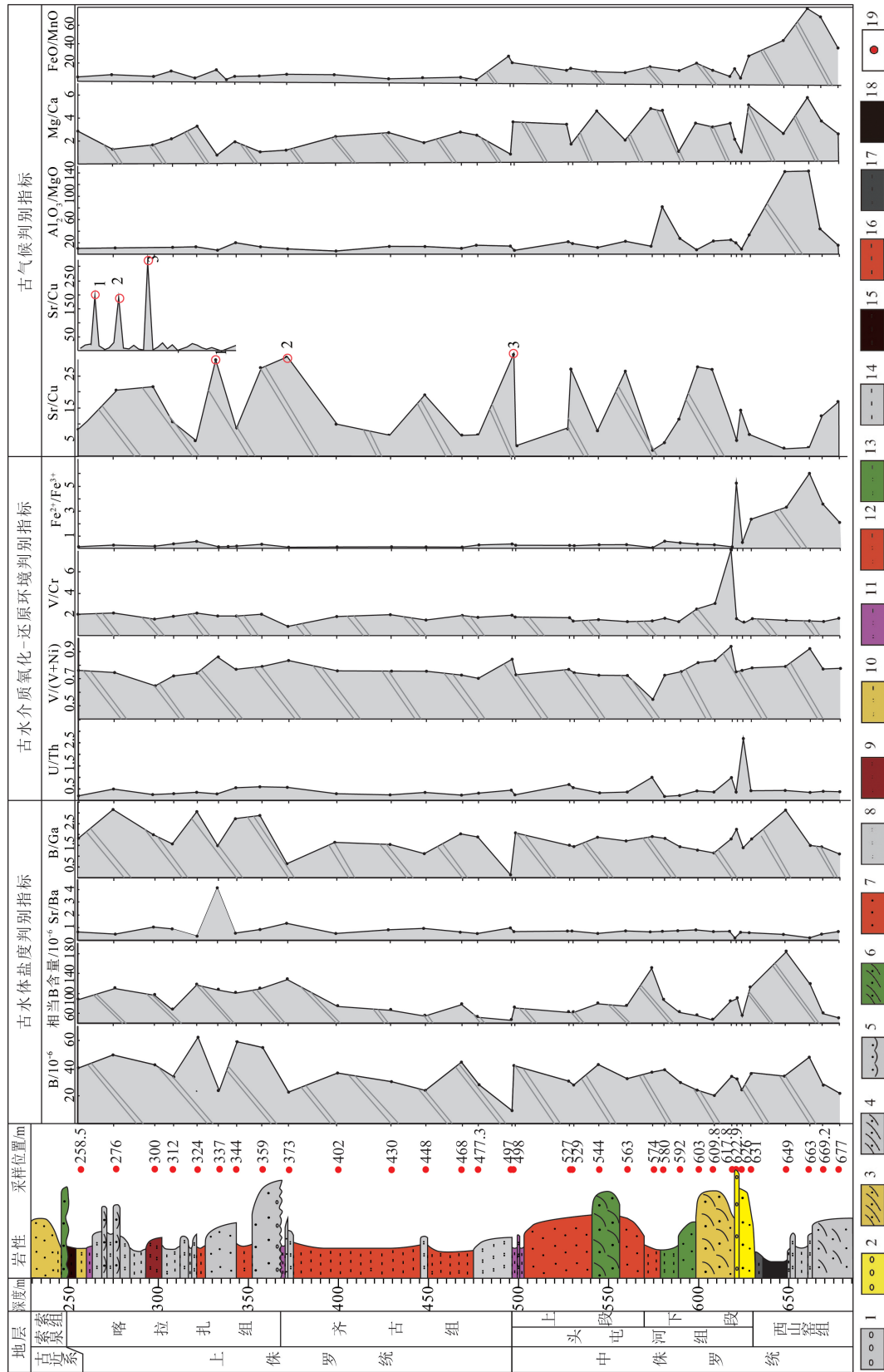


图3 准噶尔盆地东缘西山窑组、头屯河组、齐古组、喀拉扎组细碎屑岩样品采样位置和微量元素比值判别图
Fig. 3 Sampling location and geochemical indicators of trace elements ratios of microclastic rocks from the Xishanyao, Toutunhe, Qigu and Kalazha Formations in the eastern margin of Junggar Basin
1—灰色砾岩; 2—黄色砾岩; 3—含斜层理土黄色砂岩; 4—含斜层理灰色砂岩; 5—含波状层理灰色砂岩; 6—含斜层理灰色砂岩; 7—砖红色砂岩; 8—灰色粉砂岩; 9—褐色粉砂岩; 10—土黄色泥质粉砂岩; 11—紫红色泥质粉砂岩; 12—砖红色泥质粉砂岩; 13—灰色泥岩; 14—深棕色泥岩; 15—深棕色泥岩; 16—砖红色泥岩; 17—深棕色泥岩; 18—煤; 19—采样位置

量测定》(GB/T14506.28—2010),实验温度 20~25℃,相对湿度 30%。主量元素使用 X-射线荧光光谱仪(XRF-1500)法测试,FeO 采用氢氟酸、硫酸溶样、重铬酸钾滴定容量法,分析精度优于 2%。微量、稀土元素采用美国 X series II 型号 ICP-MS 等离子体质谱仪进行测定,分析精度优于 5%。

3 测试结果

3.1 古盐度判别

B 含量:B 常用来指示古盐度。一般海相环境下的 B 含量在 $80 \times 10^{-6} \sim 125 \times 10^{-6}$ 之间,而淡水环境的 B 含量小于 60×10^{-6} [19-20]。研究区西山窑组细碎屑岩的 B 含量介于 $21.90 \times 10^{-6} \sim 47.40 \times 10^{-6}$ 之间,平均为 33.60×10^{-6} ($n=6$) (图 3;表 1);头屯河组细碎屑岩 B 含量介于 $21.20 \times 10^{-6} \sim 41.10 \times 10^{-6}$ 之间,平均为 31.72×10^{-6} ($n=13$);齐古组细碎屑岩 B 含量介于 $10.30 \times 10^{-6} \sim 43.80 \times 10^{-6}$ 之间,平均为 27.94×10^{-6} ($n=7$);喀拉扎组细碎屑岩 B 含量介于 $24.20 \times 10^{-6} \sim 63.10 \times 10^{-6}$ 之间,平均为 45.81×10^{-6} ($n=8$)。以上 B 含量数据反映,西山窑组、头屯河组、齐古组、喀拉扎组古沉积水体环境均为淡水环境。

相当 B 含量:相当 B 含量需要在校正 B 含量的基础上计算得出,校正 B 含量 = $8.5 \times [B \text{ 测定值} (10^{-6}) / K_2O\%]$;相当 B = $11.8 \times \text{校正 B} / 1.7 \times (11.8 - K_2O\%)$ [19-20];相当 B 含量大于 400×10^{-6} 时,古海水为超盐度环境, $300 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$ 时为正常海水环境, $200 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$ 时为半咸水环境,小于 200×10^{-6} 时则是低盐度环境的沉积产物。研究区西山窑组细碎屑岩相当 B 含量介于 $52.32 \times 10^{-6} \sim 183.48 \times 10^{-6}$ 之间,平均为 105.69×10^{-6} ($n=6$);头屯河组细碎屑岩相当 B 含量介于 $48.69 \times 10^{-6} \sim 152.11 \times 10^{-6}$ 之间,平均为 76.28×10^{-6} ($n=13$);齐古组细碎屑岩相当 B 含量介于 $49.24 \times 10^{-6} \sim 128.85 \times 10^{-6}$ 之间,平均为 73.76×10^{-6} ($n=7$);喀拉扎组细碎屑岩相当 B 含量介于 $69.11 \times 10^{-6} \sim 112.44 \times 10^{-6}$ 之间,平均为 100.88×10^{-6} ($n=8$)。研究区样品相当 B 含量均小于 200×10^{-6} (图 3;表 1),再次证明西山窑组、头屯河组、齐古组、喀拉扎组沉积水体为淡水。

Sr/Ba 值:一般来说, Sr/Ba 值小于 1 为淡水介质,大于 1 为咸水介质 [21]。研究区除样品 05-300、05-337、05-373 的 Sr/Ba 值分别为 1.01、6.11、1.32 外,其余 30 件细碎屑岩样品的 Sr/Ba 值均小于 1

(介于 0.12~0.95 之间,平均 0.57) (表 1),反映古水体介质整体为淡水环境。从 Sr/Ba 值曲线(图 3)可以看出,喀拉扎组古水体盐度突然增高,然后迅速回落,其原因可能为水体蒸发量剧增,水体迅速减少。另外,在喀拉扎组局部发现膏盐层,推测晚侏罗世喀拉扎组出现气温明显升高,局地干旱的现象。由于喀拉扎组为陆内河流相沉积,排除咸水注入盆地的可能。

3.2 古沉积水体介质的氧化还原性

氧化还原敏感微量元素 U、Th、Co、V、Ni、Cr、Cu、Fe 含量及比值能够判别古沉积水体介质的氧化还原性 [22-23]。其中 U、V、Cr、Co 元素在沉积环境中表现为还原条件下不溶,氧化条件下易溶,成岩过程中不易发生迁移,保留了原始沉积记录 [24]。U/Th、V/Cr、Ni/Co 和 V/(V+Ni) 比值被认为是判断氧化-还原环境最可靠的参数(图 3;表 1)。

研究区西山窑组 U/Th 值介于 0.29~0.37 之间,平均 0.32 ($n=5$);头屯河组 U/Th 值介于 0.18~3.05 之间,平均 0.66 ($n=13$);齐古组 U/Th 值介于 0.19~0.56 之间,平均 0.34 ($n=7$);喀拉扎组 U/Th 值介于 0.24~0.58 之间,平均 0.37 ($n=8$) (表 1)。结合图 3 认为,西山窑组、齐古组、喀拉扎组的 U/Th 值较集中,指示沉积水体均为富氧水体。头屯河组底部样品 05-626 的 U/Th 值突增,表明该层位古水体含氧程度发生突变。头屯河组辫状河道砂体为该区铀矿的主要赋矿层位,推测含铀富氧水对头屯河组底部细碎屑岩的 U/Th 值影响较大。

V/(V+Ni) 值判别沉积物沉积时底层水体分层强弱效果较好 [26-27],高于 0.84 指示分层强,0.6~0.84 之间指示分层中等,0.4~0.6 之间指示分层弱。研究区西山窑组、头屯河组、齐古组、喀拉扎组的 V/(V+N) 值均介于 0.55~0.94 之间,集中于 0.65~0.86 之间 ($n=30$) (表 1),表明研究区中—晚侏罗世沉积时底层水体主要为中等分层。

V/Cr、Ni/Co 值可判别古水体氧化还原环境 [28]。研究区样品的 V/Cr 值、Ni/Co 值 (1.43~3.66) 反映,西山窑组、头屯河组、齐古组和喀拉扎组沉积时均为富氧环境,而 05-617.8 的 V/Cr 值 (11.05) 和 05-574 的 Ni/Co 值 (11.60) 略高 (表 1)。由于头屯河组下部为辫状河道沉积,水动力较强,内部卷入西山窑组炭屑,推测 V/Cr、Ni/Co 异常值为受还原性较强的炭屑所致。

表1 准噶尔盆地东缘西山窑组、头屯河组、齐古组、喀拉扎组细碎屑岩微量元素分析结果

Table 1 Trace elements contents of microclastic rocks from the Xishanyao, Qigou and Kalazha Formations in the eastern margin of Junggar Basin

层位	样品 顺序	样号	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Co	Cd	Li	Rb	Cs	Sr	Ba	V	Sc	B	Ga	U	Th	校正 B含量	相当 B含量	Sr/Ba	B/Ga	U/Th	V/ (V+Ni)	V/Cr	Ni/Cr	Sr/ Cu
喀拉扎组	1	05-258.5	37.20	21.10	74.10	46.10	29.40	12.80	0.03	52.90	85.40	9.17	310.00	473.00	94.70	13.60	40.10	21.80	2.73	11.50	113.62	89.62	0.66	1.84	0.24	0.76	2.05	2.30	8.33
	2	05-276	10.60	12.30	27.10	19.10	14.90	4.63	0.05	15.90	76.40	2.90	215.00	439.00	41.30	7.79	50.20	16.10	2.27	5.10	142.71	112.44	0.49	3.12	0.45	0.73	2.16	3.22	20.28
	3	05-300	22.80	13.90	57.00	44.60	38.90	11.90	0.07	44.50	80.40	6.31	502.00	498.00	71.30	11.80	42.20	20.70	2.54	9.78	125.42	97.38	1.01	2.04	0.26	0.65	1.60	3.27	22.02
	4	05-312	31.30	21.70	77.70	40.50	30.00	10.70	0.16	38.90	114.00	9.16	347.00	411.00	76.80	13.70	33.80	20.90	3.39	11.50	83.03	69.11	0.84	1.62	0.29	0.72	1.90	2.80	11.09
	5	05-324	31.60	14.80	72.20	44.70	28.40	10.10	0.13	32.70	146.00	11.70	179.00	405.00	83.80	14.30	63.10	21.00	2.10	8.27	105.17	108.95	0.44	3.00	0.25	0.75	1.87	2.81	5.66
	6	05-337	8.60	20.60	65.00	21.40	7.56	3.18	0.10	14.40	37.20	2.41	1600.00	262.00	45.60	5.44	24.20	16.90	5.06	14.40	180.44	117.49	0.11	1.43	0.35	0.86	2.13	2.38	186.05
	7	05-344	25.80	23.00	65.10	42.10	23.60	11.80	0.10	28.10	132.00	9.46	229.00	440.00	79.80	11.70	57.70	21.20	5.89	11.00	100.09	100.69	0.52	2.72	0.54	0.77	1.90	2.00	8.88
	8	05-359	12.30	11.20	49.70	33.10	20.40	8.35	0.09	29.10	94.90	4.42	344.00	455.00	72.40	11.90	55.20	19.10	3.56	6.15	132.54	111.38	0.76	2.89	0.58	0.78	2.19	2.44	27.97
齐古组	9	05-373	8.04	15.40	77.60	48.40	8.34	2.69	0.04	15.80	35.00	2.64	1580.00	1200.00	43.00	5.18	23.80	37.40	8.63	15.50	200.30	128.85	1.32	0.64	0.56	0.84	0.89	3.10	196.52
	10	05-402	28.60	18.90	75.80	52.40	31.40	13.80	0.07	44.80	96.50	8.22	287.00	445.00	91.80	13.80	36.40	22.00	2.20	10.70	93.76	76.56	0.64	1.65	0.21	0.75	1.75	2.28	10.03
	11	05-430	39.50	22.20	83.50	46.40	31.80	15.20	0.12	38.20	94.20	9.28	257.00	342.00	96.50	13.20	30.40	20.20	2.18	11.40	84.17	66.92	0.75	1.50	0.19	0.75	2.08	2.09	6.51
	12	05-448	18.40	19.00	58.10	35.60	22.10	9.64	0.04	33.00	73.10	5.25	358.00	457.00	56.80	10.10	23.40	20.80	4.85	10.90	77.39	58.20	0.78	1.13	0.44	0.72	1.60	2.29	19.46
	13	05-468	42.10	20.40	83.10	55.60	44.40	19.30	0.14	55.70	116.00	10.70	251.00	453.00	107.00	14.80	43.80	23.00	3.26	10.90	86.78	80.21	0.55	1.90	0.30	0.71	1.92	2.30	5.96
	14	05-477.3	37.30	16.00	73.10	52.90	31.70	13.80	0.08	44.60	104.00	9.86	104.00	231.00	91.90	13.20	27.50	15.90	3.22	10.50	67.75	56.32	0.45	1.73	0.31	0.74	1.74	2.30	2.79
	15	05-497	6.46	18.60	26.80	14.40	4.90	2.36	0.04	8.78	28.60	1.84	2090.00	2200.00	27.00	4.69	10.30	55.60	5.66	16.00	75.47	49.24	0.95	0.19	0.35	0.85	1.88	2.08	323.53
	16	05-498	37.00	17.40	76.10	66.00	34.60	14.30	0.03	41.30	146.00	8.95	206.00	368.00	97.20	14.90	41.10	20.00	2.05	9.21	73.70	72.46	0.56	2.06	0.22	0.74	1.47	2.42	5.57
头屯河组	17	05-527	23.80	15.40	75.30	61.20	28.80	13.40	0.01	44.00	102.00	7.24	265.00	371.00	95.50	13.90	30.90	20.50	7.34	11.70	77.02	63.72	0.71	1.51	0.63	0.77	1.56	2.15	11.13
	18	05-529	13.10	11.90	49.70	59.10	23.20	13.20	0.03	31.00	69.20	2.63	349.00	475.00	66.70	11.10	27.80	19.20	2.88	5.66	81.48	63.55	0.73	1.45	0.51	0.74	1.13	1.76	26.64
	19	05-544	23.30	14.90	69.50	50.40	30.50	13.50	0.01	55.00	116.00	8.64	219.00	487.00	83.30	12.50	40.90	22.00	3.07	8.55	95.51	81.24	0.45	1.86	0.36	0.73	1.65	2.26	9.40
	20	05-563	12.90	13.00	43.00	32.80	20.70	12.00	0.09	29.40	70.20	2.80	300.00	482.00	56.90	10.20	32.60	19.20	1.94	5.67	96.89	75.23	0.62	1.70	0.34	0.73	1.73	1.73	23.26
	21	05-574	48.70	10.90	65.20	185.00	196.00	16.90	0.03	47.30	41.20	4.40	76.30	156.00	236.00	19.20	35.90	18.60	4.48	4.38	229.44	152.11	0.49	1.93	1.02	0.55	1.28	11.60	1.57
	22	05-580	40.80	21.40	98.40	65.80	40.90	16.40	0.03	36.20	106.00	10.60	191.00	363.00	106.00	13.80	38.50	21.70	2.10	11.70	104.55	83.70	0.53	1.77	0.18	0.72	1.61	2.49	4.68
	23	05-592	23.50	15.90	58.80	60.40	25.30	11.10	0.03	28.00	76.80	4.72	270.00	465.00	77.00	11.70	28.70	20.60	2.25	9.43	81.86	64.42	0.58	1.39	0.24	0.75	1.27	2.28	11.49
	24	05-603	12.00	12.20	50.80	67.20	31.50	12.90	0.01	21.40	72.10	2.69	282.00	445.00	154.00	10.90	23.60	19.10	2.36	5.94	69.65	54.20	0.63	1.24	0.40	0.83	2.29	2.44	23.50
头屯河组下段	25	05-609.8	11.40	9.42	41.00	32.80	20.80	12.10	0.06	21.60	69.80	2.48	262.00	494.00	98.50	10.20	21.20	19.00	1.64	4.77	62.57	48.69	0.53	1.12	0.34	0.83	3.00	1.72	22.98
	26	05-617.8	22.20	18.50	57.20	39.20	27.40	19.20	0.14	26.30	78.10	13.90	227.00	408.00	433.00	12.20	34.20	19.80	5.52	5.74	110.53	83.67	0.56	1.73	0.96	0.94	11.05	1.43	10.23
	27	05-622.9	15.30	12.40	47.90	52.40	26.70	14.60	0.15	24.70	62.80	2.09	56.70	305.00	86.90	8.44	32.60	15.60	1.74	5.77	126.53	91.39	0.19	2.09	0.30	0.76	1.66	1.83	3.71
	28	05-626	16.40	11.10	48.70	70.70	25.60	15.50	0.36	17.70	74.90	2.17	241.00	426.00	84.50	10.40	24.40	17.80	16.70	5.47	74.34	57.27	0.57	1.37	3.05	0.77	1.20	1.65	14.70
	29	05-631	31.80	16.20	52.90	56.40	25.70	7.02	0.07	38.30	58.70	5.02	150.00	281.00	95.00	10.30	36.20	19.80	5.17	14.10	156.99	110.74	0.53	1.83	0.37	0.79	1.68	3.66	4.72
	30	05-649	23.70	19.90	25.60	54.40	21.80	13.80	0.09	2.72	40.20	2.06	46.20	107.00	80.60	2.33	34.80	10.60	3.42	9.28	284.42	183.48	0.43	3.28	0.37	0.79	1.48	1.58	1.95
	31	05-663	41.40	20.10	170.00	103.00	12.00	6.44	0.16	4.98	83.00	4.64	109.00	896.00	142.00	9.94	47.40	31.30	3.49	12.10	158.62	118.90	0.12	1.51	0.29	0.92	1.38	1.86	2.63
	32	05-669.2	11.50	13.40	54.60	52.20	21.30	9.23	0.05	15.70	74.70	2.42	143.00	419.00	72.50	9.28	27.70	18.60	1.70	5.84	80.63	63.03	0.34	1.49	0.29	0.77	1.39	2.31	12.43
西山窑组	33	05-677	13.80	11.30	45.30	44.60	23.20	12.80	0.05	24.50	66.10	2.33	233.00	429.00	78.10	11.30	21.90	18.80	1.45	4.97	68.44	52.32	0.54	1.16	0.29	0.77	1.75	1.81	16.88

注:微量元素含量为 10^{-6} ;校正B含量 $=8.5 \times [B \text{测定值}(10^{-6})/K_2O\%]$;相当B $=11.8 \times \text{校正B}/1.70 \times [11.8 - K_2O(\%)]$

Fe^{2+} 、 Fe^{3+} :Fe 离子的价态变化,表明其对氧化还原反应灵敏。一般认为, $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+} > 1$ 为还原环境, $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+} > 1$ 为弱还原环境, $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+} = 1$ 为中性环境, $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+} < 1$ 为弱氧化环境, $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+} < 1$ 为氧化环境。然而, $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 指标受到煤、石油等还原物质的影响,使 Fe^{3+} 还原成 Fe^{2+} 。研究区喀拉扎组 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 值介于 0.05~0.58 之间,平均 0.18 ($n=8$); 齐古组 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 值介于 0.03~0.33 之间,平均 0.13 ($n=7$); 头屯河组除铀矿层位样品 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+} = 5.30$,其余介于 0.04~0.56 之间,平均 0.35 ($n=12$); 西山窑组 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 值介于 1.92~7.93 之间,平均 3.88 ($n=5$) (表 2; 图 3)。表明喀拉扎组、齐古组和头屯河组上段表现出原生的强氧化沉积,其中齐古组和头屯河组上段为红层沉积,而西山窑组沉积后的聚煤作用形成了区域性原生还原层,头屯河组底部赋铀层位同样具有原生还原性质。

以上分析表明,元素 B、Sr/Ba 及 U/Th、V/(V+Ni)、V/Cr、Ni/Co 组合指示,西山窑组、头屯河组、齐古组和喀拉扎组沉积时的古水体条件均为富氧的淡水环境,喀拉扎组古水体盐度相对偏高; $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 值指示西山窑组沉积后成煤阶段形成了区域性的原生还原层,头屯河组底部赋铀层同样为还原层,头屯河组上段、齐古组和喀拉扎组为强氧化环境背景。

3.3 古气候重建

3.3.1 古气候的地球化学判别

Sr/Cu、 FeO/MnO 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 值等对判别古气候具有较好的指示意义(图 3; 表 2)。Sr 含量和 Sr/Cu 值对气候具有灵敏的指示,Sr 含量高指示干旱气候,Sr 含量低指示潮湿的气候。Sr/Cu 值介于 1.3~5.0 之间指示温湿气候,大于 5.0 指示干旱气候^[29]。 FeO/MnO 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 、 Mg/Ca 值也具有指示意义;沉积物中 FeO/MnO 的高值对应温湿气候,低值为干热气候; Mg/Ca 的高值反映干旱炎热气候^[30]。

研究区西山窑组底部的 Sr/Cu>5.0,顶部煤层部分的 Sr/Cu<5.0,说明西山窑组是由于干旱气候转变为潮湿气候条件下逐渐成煤的;头屯河组和齐古组的 Sr/Cu 值波动较大(图 3),表现出干旱为主的干—湿交替的气候环境;喀拉扎组的 Sr/Cu 值较大,说明喀拉扎组沉积时为稳定的干旱气候;样品中 05-337、05-373、05-497 的 Sr、Cu 含量极高,且

Sr/Cu 值非常高,表现出极度干旱的气候,野外定名为白色粉砂岩、白色粉砂质泥岩、白色粉砂质泥岩,推测这 3 个层位为膏盐层。 FeO/MnO 值虽然变化不强烈(图 3),但在垂向上的变化与 Sr/Cu 具有较好的一致性,表现为西山窑组的 FeO/MnO 值高于头屯河组的 FeO/MnO 值,齐古组和喀拉扎组的 FeO/MnO 值最小,进一步说明了西山窑组到喀拉扎组的沉积经历了潮湿到逐渐干旱的气候变化特征。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 指示了同样的结果。

3.3.2 物源区的古风化作用及对古气候的指示

风化蚀变指数(CIA)可以定量地表示物源区的风化程度^[31], $\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100$,其中 CaO^* 为校正后的摩尔量($\text{CaO} \leq \text{Na}_2\text{O}$ 时,采用 CaO 的值; $\text{CaO} > \text{Na}_2\text{O}$ 时, $\text{CaO} = \text{Na}_2\text{O}$)。普遍认为,CIA 值在 50 左右的碎屑沉积岩,其物源区岩石遭受化学风化;CIA 值为 50~100 时,表明源区岩石遭受一定强度的风化;CIA 在 50~65 之间反映寒冷干燥气候下的弱风化;65~85 之间反映温暖、湿润气候下的中等风化;85~100 之间反映炎热、潮湿的强风化作用^[32]。ICV(index chemical variation)指数可以确定沉积物的成分成熟度^[33],值越高,成分成熟度越低。

研究区西山窑组细碎屑岩的 CIA 指数介于 59.13~92.87 ($n=5$) 之间,平均 75.63,ICV 指数介于 0.17~1.06 ($n=5$) 之间,平均 0.60;头屯河组下段细碎屑岩的 CIA 指数介于 50.74~91.33 ($n=8$) 之间,平均 62.55,ICV 指数介于 0.53~1.54 ($n=8$) 之间,平均 1.10,上段细碎屑岩的 CIA 指数介于 49.29~56.80 之间 ($n=5$),平均 53.31,ICV 指数介于 1.23~1.32 之间 ($n=5$),平均 1.27;齐古组细碎屑岩的 CIA 指数介于 54.59~60.66 之间 ($n=7$),平均 56.58,ICV 指数介于 1.08~1.29 之间 ($n=7$),平均 1.22;喀拉扎组细碎屑岩的 CIA 指数介于 48.77~59.81 之间 ($n=8$),平均 53.87,ICV 指数介于 1.12~1.40 之间 ($n=8$),平均 1.30(表 2)。

结合数据分析和图 4-a、b 可以看出,西山窑组—喀拉扎组细碎屑岩的 CIA 及 ICV 指数从下到上具有明显的变化规律,且 CIA 与 ICV 具有较好的对应性。西山窑组煤层顶底板的化学风化程度较高,成分成熟度较高,说明当时处于湿润环境,且碎屑经过了长距离搬运,遭受一定的风化改造;齐古组和喀拉扎组细碎屑岩的 CIA、ICV 指数均较集中,说明

表 2 准噶尔盆地东缘西山窑组、头屯河组、齐古组、喀拉扎组细碎屑岩主量元素分析结果
Table 2 Major elements contents of microclastic rocks from the Xishanyao, Toutunhe, Qigu and Kalazha Formations in the eastern margin of Junggar Basin

样品 层位 顺序	送样号	岩性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	总计	Fe ²⁺ / Fe ³⁺	Mg/ Ca	Al ₂ O ₃ / MgO	FeO/ MnO	Cl/Al	ICV	F ₁	F ₂	
喀拉扎组	1	05-258.5	土黄色泥岩	60.72	0.78	15.52	5.39	0.47	0.10	3.04	1.49	2.18	3.00	0.16	7.10	99.95	0.10	2.86	10.42	4.95	59.81	1.40	0.53	0.09
	2	05-276	土灰色中细砂岩	76.67	0.42	10.86	1.80	0.43	0.06	0.81	1.02	2.48	2.99	0.09	2.33	99.95	0.27	1.11	10.65	7.68	48.78	1.19	-0.57	-0.30
	3	05-300	灰白色细砂岩	64.60	0.66	14.72	4.24	0.34	0.06	2.11	1.74	3.04	2.86	0.29	5.31	99.97	0.09	1.70	8.46	5.67	52.90	1.37	-0.43	0.48
	4	05-312	灰白色泥岩	61.86	0.77	15.34	4.97	1.02	0.10	2.24	1.37	2.34	3.46	0.16	6.27	99.90	0.23	2.29	11.20	10.63	57.25	1.30	0.68	0.56
	5	05-324	砖红色泥岩	63.31	0.68	15.45	6.29	0.30	0.08	1.79	0.71	2.21	5.10	0.13	3.90	99.95	0.05	3.53	21.76	3.61	54.68	1.29	-0.65	-0.23
	6	05-337	白色粉砂岩	67.98	0.26	12.64	1.72	0.81	0.07	1.16	2.20	2.74	1.14	0.08	9.10	99.90	0.52	0.74	5.75	10.95	55.21	1.12	0.67	2.37
	7	05-344	砖红色粉砂岩	64.69	0.68	14.75	4.69	0.23	0.10	1.87	1.25	2.27	4.90	0.16	4.39	99.98	0.05	2.09	11.80	2.30	53.57	1.35	0.03	-0.42
	8	05-359	灰白色中细砂岩	69.10	0.59	13.46	3.54	0.30	0.06	1.17	1.71	3.13	3.54	0.14	3.24	99.98	0.09	0.96	7.87	5.00	48.77	1.34	-1.22	-0.28
齐古组	9	05-373	白色粉砂质泥岩	67.11	0.26	13.20	1.93	0.57	0.11	1.57	2.07	2.72	1.01	0.04	9.34	99.93	0.33	1.06	6.38	5.18	56.78	1.13	1.65	3.16
	10	05-402	砖红色泥岩	62.89	0.80	15.62	5.49	0.50	0.09	2.12	1.23	2.71	3.30	0.16	5.04	99.95	0.10	2.41	12.70	5.32	55.55	1.29	0.35	0.66
	11	05-430	砖红色泥岩	60.05	0.73	16.35	7.33	0.48	0.07	2.39	1.27	2.21	3.07	0.15	5.86	99.96	0.07	2.63	12.87	6.67	60.66	1.28	0.59	1.15
	12	05-448	灰白色粉砂岩	65.78	0.56	15.44	4.27	0.19	0.09	1.87	1.50	3.04	2.57	0.13	4.55	99.99	0.05	1.75	10.29	2.21	54.69	1.21	-0.16	1.11
	13	05-468	砖红色泥岩	60.62	0.86	16.84	7.07	0.26	0.10	2.00	1.02	2.33	4.29	0.27	4.31	99.97	0.04	2.75	16.51	2.60	57.75	1.25	0.95	1.12
	14	05-477.3	砖红色泥岩	63.12	0.79	15.53	6.08	0.17	0.04	2.02	1.10	2.57	3.45	0.20	4.91	99.98	0.03	2.57	14.12	3.95	56.00	1.29	-1.09	-0.02
	15	05-497	白色粉砂质泥岩	71.23	0.26	11.72	0.98	0.24	0.10	1.11	1.84	2.58	1.16	0.07	8.70	99.99	0.27	0.84	6.37	2.40	54.59	1.08	1.78	2.15

续表 2

样品 顺序	层位	送样号	岩性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	总计	Fe ²⁺ / Fe ³⁺	Mg/ Ca	Al ₂ O ₃ / MgO	FeO/ MnO	ClA	ICV	F ₁	F ₂
16	头屯 河组 上段	05-498	紫色泥岩	64.06	0.80	14.95	4.52	2.11	0.08	2.04	0.80	2.23	4.74	0.19	3.24	99.76	0.52	3.57	18.69	25.73	54.50	1.30	0.01	-0.31
17		05-527	紫红色泥岩	64.63	0.81	15.01	3.92	1.49	0.08	2.26	0.92	2.37	3.41	0.17	4.79	99.86	0.42	3.44	16.32	18.86	56.62	1.24	0.42	0.26
18		05-529	紫灰色细砂岩	68.86	0.57	13.39	3.40	1.04	0.09	1.57	1.30	3.23	2.90	0.17	3.37	99.89	0.34	1.69	10.30	11.56	49.29	1.32	-0.39	0.69
19		05-544	紫红色泥岩	66.73	0.62	14.15	4.62	1.14	0.08	2.02	0.63	2.07	3.64	0.15	4.03	99.88	0.27	4.49	22.46	13.57	56.80	1.23	0.13	0.38
20		05-563	紫灰色细砂岩	70.06	0.48	13.02	3.20	0.98	0.11	1.50	1.08	3.12	2.86	0.15	3.34	99.90	0.34	1.94	12.06	8.91	49.34	1.28	-0.17	0.97
21	头屯 河组 下段	05-574	红褐色泥岩	44.86	1.15	20.75	20.47	0.68	0.05	0.88	0.25	0.16	1.33	0.06	9.28	99.92	0.04	4.93	83.00	13.08	91.33	0.91	2.59	0.71
22		05-580	灰绿色泥岩	60.56	0.88	16.96	5.18	2.61	0.07	1.98	0.60	1.77	3.13	0.14	5.83	99.71	0.56	4.62	28.27	39.55	64.78	0.99	0.90	1.01
23		05-592	灰绿色细砂岩	63.79	0.78	15.48	3.25	1.41	0.16	1.64	2.05	2.50	2.98	0.20	5.61	99.85	0.48	1.12	7.55	8.81	57.46	1.18	0.52	0.28
24		05-603	灰绿色中细砂岩	68.96	0.67	13.84	3.04	1.03	0.06	1.59	0.63	2.98	2.88	0.16	4.07	99.91	0.38	3.53	21.97	18.73	51.70	1.16	-0.50	0.53
25		05-609.8	紫红色中细砂岩	72.56	0.49	12.73	2.86	0.78	0.08	1.19	0.51	3.06	2.88	0.15	2.64	99.93	0.30	3.27	24.96	9.29	49.11	1.14	-0.76	0.83
26		05-617.8	褐铁矿化泥岩	64.50	0.48	12.33	10.63	0.82	0.23	1.45	0.62	2.38	2.63	0.14	3.72	99.93	0.09	3.27	19.89	3.57	53.57	1.54	-1.56	1.63
27		05-622.9	灰绿色含砾细砂岩	69.84	0.59	13.58	0.90	4.29	0.35	0.82	0.58	0.20	2.19	0.16	6.04	99.54	5.30	1.98	23.41	12.26	81.74	0.53	4.89	-1.25
28		05-626	灰色轴矿化细砂岩	67.92	0.64	13.08	3.09	1.32	0.71	1.32	1.82	2.94	2.79	0.18	4.04	99.85	0.47	1.02	7.19	1.86	50.74	1.33	0.86	1.11
29	西山 窑组	05-631	灰色粉砂质泥岩	66.61	0.69	16.25	1.54	3.28	0.13	1.76	0.48	1.43	1.96	0.18	5.33	99.64	2.37	5.13	33.85	25.23	75.06	0.72	2.42	1.20
30		05-649	灰色细砂岩	71.84	0.87	18.52	0.12	0.38	0.01	0.24	0.12	0.04	1.04	0.03	6.76	99.96	3.52	2.80	154.33	42.22	92.87	0.17	5.94	-4.37
31		05-663	灰色粉砂质泥岩	66.89	1.14	20.00	0.15	1.07	0.01	0.54	0.13	0.08	2.54	0.04	7.27	99.87	7.93	5.82	153.85	76.43	85.83	0.30	6.43	-4.22
32		05-669.2	浅灰色细砂岩	73.37	0.57	14.20	0.52	1.71	0.03	0.85	0.31	2.09	2.92	0.12	3.13	99.82	3.65	3.84	45.81	68.40	65.24	0.73	1.17	-0.36
33		05-677	灰绿色细砂岩	71.21	0.55	13.47	1.32	2.28	0.06	1.42	0.76	2.94	2.72	0.16	2.87	99.76	1.92	2.62	17.72	35.63	59.13	1.06	0.87	0.69

注: 主量元素含量单位为%; $ClA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO * + Na_2O + K_2O)$; $ICV = (Fe_2O_3 + MgO + TiO_2) / Al_2O_3$; 判别函数 $F = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + C$, 其中, $x_1 \sim x_n$ 为 n 个判别变量, $a_1 \sim a_n$ 为相应系数, C 为常数(据参考文献[25])

表 3 准噶尔盆地东缘西山窑组、头屯河组、齐古组、喀拉扎组细碎屑岩稀土元素分析结果
Table 3 Rare earth elements contents of microclastic rocks from the Xishanyao, Touthunhe, Qigu and Kalazha Formations in the eastern margin of Junggar Basin

层位	送样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	球粒陨石标准化 ^[35]			北美页岩标准化 ^[36]		
																					La _N /Yb _N	δEu	δCe	La _N /Yb _N	δEu	δCe
喀拉扎组	05-258.5	27.6	68.9	7.68	30.2	6.25	1.3	5.64	0.98	5.66	1.11	3.29	0.51	3.18	0.5	29.6	162.80	141.93	20.87	6.80	6.23	0.67	1.16	0.82	1.03	1.12
	05-276	18.4	38.9	4.77	18.5	3.59	0.9	3.28	0.54	3.05	0.6	1.7	0.25	1.62	0.26	15.5	96.36	85.06	11.30	7.53	8.15	0.80	1.02	1.07	1.23	0.98
	05-300	36	63.5	10.1	42.5	8.45	1.78	7.68	1.25	7.01	1.38	3.99	0.6	3.79	0.59	35.4	188.62	162.33	26.29	6.17	6.81	0.68	0.82	0.90	1.04	0.79
	05-312	35.3	67.5	8.84	35.3	7.04	1.3	6.32	1.08	6.29	1.23	3.58	0.55	3.58	0.55	32.8	178.46	155.28	23.18	6.70	7.07	0.60	0.94	0.93	0.91	0.91
	05-324	28.6	42.9	6.67	26.1	5.37	1.07	4.58	0.82	4.79	1	2.97	0.46	3.01	0.47	26.7	128.81	110.71	18.10	6.12	6.82	0.66	0.76	0.90	1.01	0.74
齐古组	05-337	28.8	80.4	8.12	31.6	6.78	0.48	6.26	1.14	7.02	1.37	4.06	0.64	4.01	0.62	36.6	181.30	156.18	25.12	6.22	5.15	0.23	1.29	0.68	0.35	1.25
	05-344	30.3	54.6	7.78	30.7	6.01	1.13	5.28	0.88	5.06	0.99	2.88	0.46	2.83	0.44	26.7	149.34	130.52	18.82	6.94	7.68	0.61	0.87	1.01	0.94	0.84
	05-359	20.9	49.2	5.67	22.1	4.4	0.97	4.03	0.67	3.85	0.76	2.23	0.34	2.2	0.34	19.9	117.66	103.24	14.42	7.16	6.81	0.70	1.11	0.90	1.08	1.07
	05-373	32.1	72	8.53	31.9	6.37	0.64	5.95	1.05	6.4	1.26	3.77	0.59	3.83	0.6	32.6	174.99	151.54	23.45	6.46	6.01	0.32	1.07	0.79	0.49	1.03
	05-402	32.1	63	7.98	30.8	6.03	1.22	5.3	0.87	4.96	0.97	2.86	0.44	2.85	0.44	25.8	159.82	141.13	18.69	7.55	8.08	0.66	0.97	1.06	1.01	0.93
头屯河组	05-430	31.8	59.1	6.92	26.8	5.32	1.01	4.81	0.82	4.79	0.96	2.79	0.44	2.8	0.44	25.6	148.80	130.95	17.85	7.34	8.15	0.61	0.98	1.07	0.94	0.95
	05-448	25.1	55	6.64	25.1	4.96	0.99	4.19	0.71	3.96	0.75	2.25	0.35	2.23	0.36	19.7	132.59	117.79	14.80	7.96	8.07	0.66	1.04	1.06	1.02	1.01
	05-468	34.4	64.6	8.54	34.1	6.58	1.39	5.95	1.01	5.76	1.11	3.28	0.5	3.23	0.5	30.2	170.95	149.61	21.34	7.01	7.64	0.68	0.92	1.00	1.04	0.89
	05-477.3	27.3	50.8	6.21	24.5	4.74	1.02	4.2	0.78	4.5	0.92	2.7	0.42	2.64	0.42	24.3	131.15	114.57	16.58	6.91	7.42	0.70	0.96	0.98	1.07	0.93
	05-497	26.1	51.6	6.22	21.9	4.17	1.08	3.82	0.58	3.34	0.66	2.06	0.34	2.24	0.35	17.2	124.46	111.07	13.39	8.29	8.36	0.83	0.99	1.10	1.27	0.96
上段	05-498	28.9	48.3	7.29	28.4	5.53	1.17	4.92	0.82	4.75	0.94	2.79	0.43	2.73	0.43	24.7	137.40	119.59	17.81	6.71	7.59	0.69	0.82	1.00	1.05	0.79
	05-527	28.5	52.1	7.08	27.1	5.25	1.11	4.75	0.81	4.77	0.95	2.79	0.44	2.84	0.46	25.5	138.95	121.14	17.81	6.80	7.20	0.68	0.90	0.95	1.04	0.87
	05-529	24.1	48.6	6.15	24.1	4.72	1.11	4.23	0.7	3.99	0.76	2.21	0.34	2.14	0.34	20.1	123.49	108.78	14.71	7.39	8.08	0.76	0.98	1.06	1.17	0.95
	05-544	28.2	54.7	6.84	27.1	5.18	1.13	4.61	0.78	4.4	0.87	2.6	0.4	2.52	0.39	23.2	139.72	123.15	16.57	7.43	8.03	0.71	0.97	1.06	1.09	0.93
	05-563	22.6	47.2	5.74	22.5	4.44	1	3.94	0.66	3.7	0.72	2.09	0.32	2.03	0.32	19	117.26	103.48	13.78	7.51	7.99	0.73	1.02	1.05	1.12	0.98

续表 3

层位	送样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	球粒陨石标准化 ^[35]			北美页岩标准化 ^[36]			
																				La _N /Yb _N	δEu	δCe	La _N /Yb _N	δEu	δCe	
头屯河组下段	05-574	12.4	16.9	2.69	10	2.16	0.62	2.36	0.52	3.7	0.82	2.71	0.44	3.03	0.5	18.1	58.85	44.77	14.08	3.18	2.94	0.84	0.72	0.39	1.29	0.69
	05-580	30.8	59.1	8.14	31.6	6.34	1.26	5.61	1	5.66	1.11	3.21	0.49	3.2	0.49	28.9	158.01	137.24	20.77	6.61	6.90	0.65	0.92	0.91	0.99	0.89
	05-592	32.2	67.9	8.92	35.2	6.83	1.45	6.03	1	5.38	1	2.88	0.43	2.77	0.44	27.1	172.43	152.50	19.93	7.65	8.34	0.69	0.98	1.10	1.06	0.95
	05-603	23.6	46.3	6.14	23.9	4.56	1.15	4.12	0.67	3.69	0.72	2.13	0.32	2.17	0.33	18.9	119.80	105.65	14.15	7.47	7.80	0.81	0.94	1.03	1.25	0.91
	05-609.8	26	55	6.68	26.5	5.14	1.22	4.6	0.73	4.04	0.76	2.22	0.34	2.14	0.33	20.6	135.70	120.54	15.16	7.95	8.71	0.77	1.02	1.15	1.18	0.99
西山窑组	05-617.8	29	63.7	7.21	28.6	5.61	1.28	5.05	0.85	4.8	0.94	2.72	0.42	2.67	0.42	25.1	153.27	135.40	17.87	7.58	7.79	0.74	1.08	1.02	1.13	1.05
	05-622.9	23.7	52.1	6.06	23.7	4.62	1.02	4.3	0.7	4.03	0.8	2.3	0.35	2.26	0.36	20.7	126.30	111.20	15.10	7.36	7.52	0.70	1.07	0.99	1.07	1.03
	05-626	22.8	49.1	5.95	23.5	4.75	1.1	4.27	0.73	4.11	0.78	2.23	0.33	2.09	0.32	21	122.06	107.20	14.86	7.21	7.83	0.75	1.03	1.03	1.15	1.00
	05-631	36.5	67	8.21	30.2	5.76	1.14	5.06	0.8	4.52	0.87	2.6	0.4	2.64	0.42	23.5	166.12	148.81	17.31	8.60	9.92	0.65	0.95	1.30	0.99	0.92
	05-649	21.6	51.4	4.56	15.6	2.48	0.36	2.14	0.29	1.44	0.26	0.78	0.12	0.73	0.11	6.32	101.87	96.00	5.87	16.35	21.22	0.48	1.27	2.79	0.73	1.23
西山窑组	05-663	76.9	156	18.3	66.9	12.4	2.65	10.1	1.57	7.79	1.29	3.42	0.47	2.9	0.42	29.9	361.11	333.15	27.96	11.92	19.02	0.72	1.02	2.50	1.11	0.99
	05-669.2	25.8	52.7	6.47	25.6	4.94	1.17	4.49	0.74	4.3	0.87	2.53	0.38	2.45	0.37	22.8	132.81	116.68	16.13	7.23	7.55	0.76	1.00	0.99	1.17	0.97
	05-677	25.2	53.8	6.41	25.7	5.02	1.18	4.44	0.72	4.15	0.77	2.3	0.34	2.2	0.33	21	132.56	117.31	15.25	7.69	8.22	0.76	1.04	1.08	1.17	1.00

注: 稀土元素含量单位为 10^{-6} ; δ Eu = $\text{Eu}_N / (\text{Sm}_N \times \text{Gd}_N)^{1/2}$; δ Ce = $\text{Ce}_N / (\text{La}_N \times \text{Pr}_N)^{1/2}$

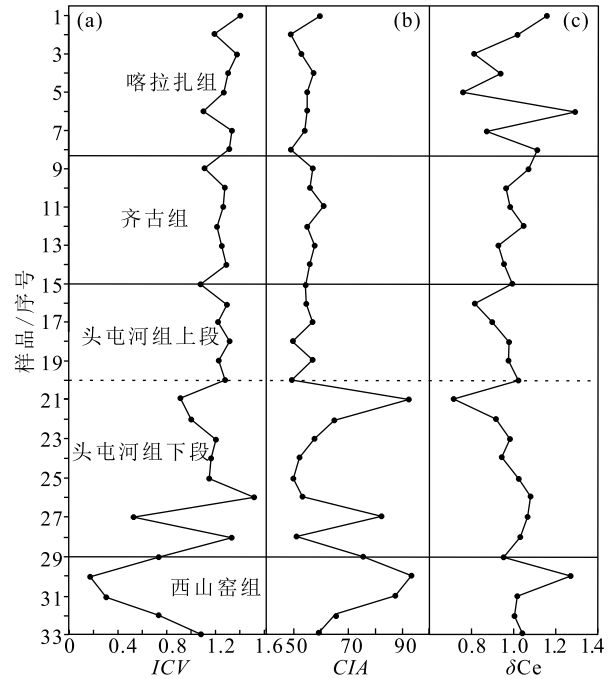


图 4 准噶尔盆地东缘西山窑组、头屯河组、齐古组、喀拉扎组 ICV 、 CIA 指数值及 δCe 值垂向变化趋势

Fig. 4 Variable trend map of ICV , CIA and δCe for the Xishanyao, Toutunhe, Qigu and Kalazha Formations in the eastern margin of Junggar Basin

物源区构造稳定;头屯河组下段底部和上段顶部存在 2 次明显突变,指示物源区存在 2 次构造活动或古气候变迁。西山窑组过渡到头屯河组, CIA 减小后突然增大,然后迅速回落; ICV 增大后突然减小,然后迅速回升,反映头屯河组下段底部物源区化学风化作用突然增强,一定程度上指示了头屯河组底部的源区古气候由干旱向潮湿气候突变;头屯河组细碎屑岩的 CIA 逐渐升高、 ICV 逐渐减小,齐古组底部的 CIA 突然减小、 ICV 突然增大,反映头屯河组—齐古组存在古气候环境突变,推测其由盆地周缘造山带构造活动性突然加强引起。

3.3.3 古生物的组合对古气候的约束

古生物组合特征可以反映沉积古气候的变化。西山窑组大量出现拟苏铁杉、南美杉、桫欏科孢、紫萁等,反映中侏罗世早期为热带潮湿气候;中侏罗统头屯河组和上侏罗统齐古组出现了较多的耐旱型裸子植物 *classopollis* 属^[34],介形虫化石 *Darwinula impudica*, *D. sarytirmenensis*,反映头屯河组—齐古组气候发生了明显的变化,即气候由半干旱转化为干旱

气候;喀拉扎组出现大量的掌鳞杉科 *classopollis* 属耐旱型裸子植物,说明喀拉扎组处于炎热干旱气候。

综上所述,中侏罗世西山窑组—晚侏罗世喀拉扎组古气候经历了温暖潮湿—干湿交替—半干旱—干旱的转变过程。

3.4 沉积物源的地球化学示踪

3.4.1 稀土元素地球化学特征

研究区细碎屑岩样品的稀土元素分析结果见表 3,球粒陨石和北美页岩标准化后的稀土元素配分模式见图 5。西山窑组稀土元素总量(ΣREE)介于 $132.56 \times 10^{-6} \sim 361.11 \times 10^{-6}$ 之间,集中于 $132.56 \times 10^{-6} \sim 166.12 \times 10^{-6}$ 之间;头屯河组 ΣREE 介于 $58.85 \times 10^{-6} \sim 172.43 \times 10^{-6}$ 之间,集中于 $117.26 \times 10^{-6} \sim 172.43 \times 10^{-6}$ 之间;齐古组 ΣREE 介于 $124.46 \times 10^{-6} \sim 174.99 \times 10^{-6}$ 之间;喀拉扎组 ΣREE 介于 $96.36 \times 10^{-6} \sim 188.62 \times 10^{-6}$;表明从西山窑组到喀拉扎组细碎屑岩的稀土元素相对富集。各个层位轻稀土元素总量(ΣLREE)值分别在 $96.00 \times 10^{-6} \sim 333.15 \times 10^{-6}$ 、 $42.77 \times 10^{-6} \sim 152.50 \times 10^{-6}$ 、 $111.07 \times 10^{-6} \sim 151.54 \times 10^{-6}$ 、 $85.06 \times 10^{-6} \sim 162.23 \times 10^{-6}$ 之间,重稀土元素总量(ΣHREE)分别在 $5.87 \times 10^{-6} \sim 27.96 \times 10^{-6}$ 、 $13.78 \times 10^{-6} \sim 20.77 \times 10^{-6}$ 、 $13.39 \times 10^{-6} \sim 23.45 \times 10^{-6}$ 、 $11.30 \times 10^{-6} \sim 26.29 \times 10^{-6}$ 之间,西山窑组到喀拉扎组 LREE/HREE 值分别在 7.23~16.35(平均 10.36)、3.18~8.00(平均 6.99)、6.46~8.29(平均 7.36)、6.12~7.53(平均 6.70)之间, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ (球粒陨石)分别集中在 7.55~21.22(平均 13.19)、2.94~8.71(平均 7.44)、6.06~8.36(平均 7.68)、5.15~8.15(平均 6.84)之间(表 3),均显示轻、重稀土元素分馏明显, LREE 相对富集, HREE 相对亏损的特征(图 5)。

从球粒陨石标准化稀土元素配分曲线可以看出,西山窑组到喀拉扎组的配分曲线均显示右倾分布模式,轻稀土元素段略陡,重稀土元素段较平缓,负 Eu 异常明显($\delta \text{Eu} = 0.23 \sim 0.84$, 平均 0.67)(图 5)。

北美页岩(NASC)标准化稀土元素配分曲线显示,轻、重稀土元素整体分馏近乎相等, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值集中于 0.39~2.79;西山窑组 δCe 值介于 0.92~1.23 之间($n=5$),平均为 1.02(表 3);头屯河组 δCe 值介于 0.69~1.05 之间($n=13$),平均为 0.93(表 3);齐古组 δCe 值介于 0.93~1.03 之间($n=7$),平均

为 0.96(表 3);喀拉扎组 δCe 值介于 0.74~1.25 之间($n=8$),平均为 0.96(表 3)。西山窑组 δCe 无异常或弱正异常,头屯河组到喀拉扎组 δCe 整体趋向于负异常(图 5),反映西山窑组煤层段古沉积环境为还原环境,头屯河组到喀拉扎组总体为氧化环境,局部有小幅氧化—还原变化交替(图 4-c)。

3.4.2 物源区构造背景

稀土、微量元素特征可以反映岩石地球化学特征及源区构造环境^[35, 37-38]。运用 $\text{La}-\text{Th}-\text{Sc}$ 、 $\text{Th}-\text{Sc}-\text{Hf}/10$ 、 $\text{Th}-\text{Co}-\text{Zr}/10$ 等图解进行源区构造环境判别^[39-41];利用 $\text{La}/\text{Yb}-\Sigma \text{REE}$ 图解反映某些岩石大类的成因特征;结合砂—泥岩 F_1-F_2 判别图解,可进一步分析源区的性质。

在 $\text{La}-\text{Th}-\text{Sc}$ 图解和 $\text{Th}-\text{Co}-\text{Zr}/10$ 图解中,大部分数据点落在大陆岛弧范围,少部分落在大陆边缘范围(图 6-a、c),说明物源区构造性质以大陆岛弧为主,大陆边缘次之的环境中。泥—砂岩构造背景函数 F_1-F_2 判别图解显示,西山窑组—喀拉扎组的物源主要来自长英质火成岩源区,少部分来自中性火成岩源区和铁镁质的中性火成岩源区(图 6-b)。为反映源岩属性特征,本次采用 $\Sigma \text{REE}-\text{La}/\text{Yb}$ 源岩属性判别图解进行分析(图 6-d)。在该图解中,大部分样品点落入沉积岩区,少部分落入沉积岩与大陆拉斑玄武岩重叠区,并且有 1 个样品落在花岗岩区。综上所述,西山窑组—喀拉扎组的沉积物源主要来自长英质火成岩源区,少部分来自大陆拉斑玄武岩和花岗岩源区,且源区性质以大陆岛弧构造背景为主,少部分为大陆边缘背景。

研究区碎屑物源的构造判别图解显示,物源主要来源于大陆岛弧构造背景下的长英质火成岩区。早侏罗世,准噶尔盆地东北缘克拉美丽山持续隆升,中—晚侏罗世,克拉美丽山隆升速度变缓,形成了西山窑组的湖泊三角洲和头屯河组—喀拉扎组的河流沉积相^[42-43]。通过对板状交错层理和楔状交错层理产状的判断,确定准东地区侏罗纪古水流方向主要为由北向南^[44-49],推测研究区碎屑物源主要来自克拉美丽山长英质火成岩。这一结论还需今后更加深入的研究。

5 结 论

(1) B、Sr/Ba、U/Th、V/V+Ni、Ni/Co、V/Cr 组合指示,西山窑组、头屯河组、齐古组、喀拉扎组沉

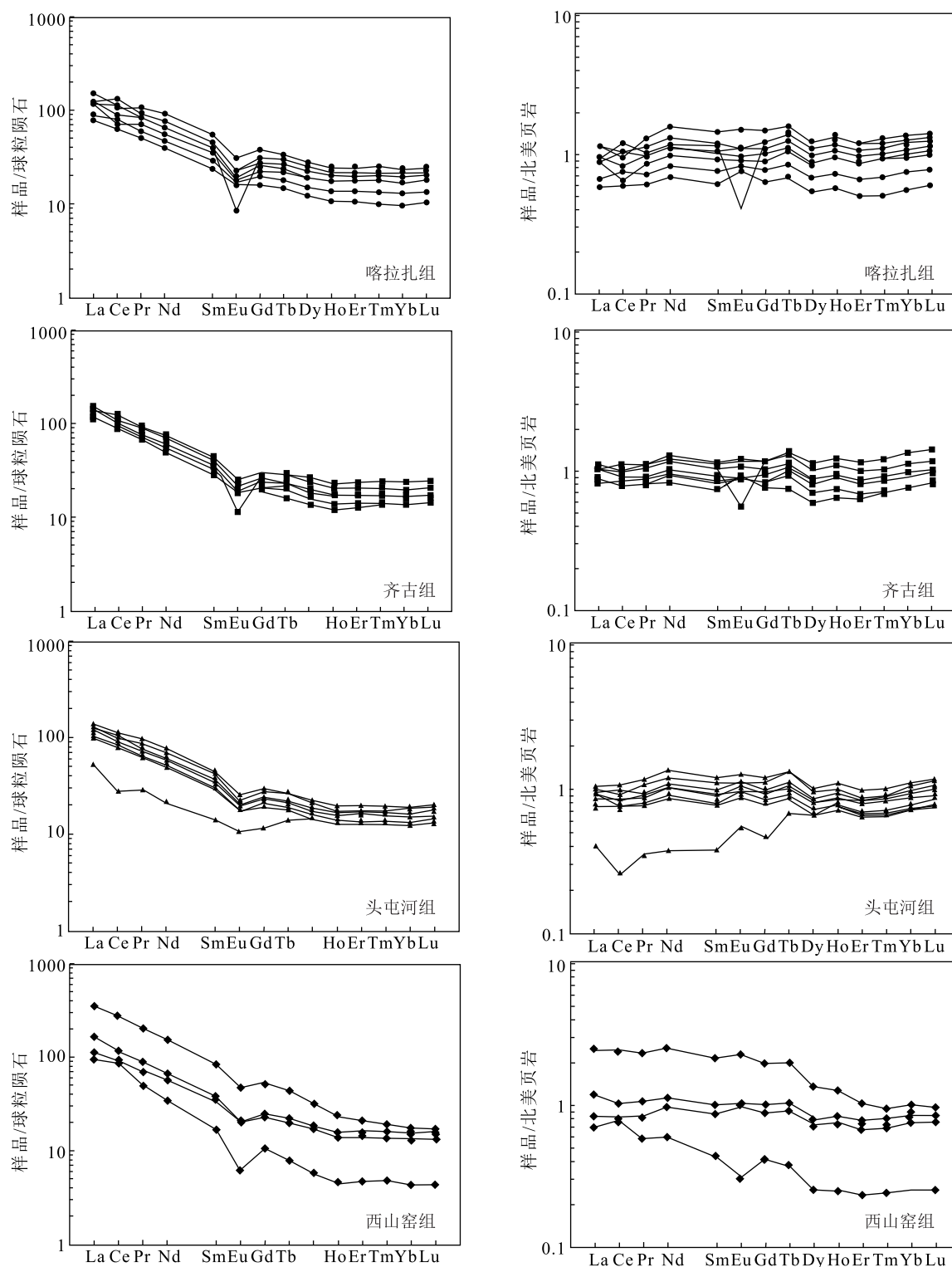


图 5 准噶尔盆地东缘西山窑组、头屯河组、齐古组、喀拉扎组细碎屑岩稀土元素球粒陨石-北美页岩标准化配分模式图(球粒陨石标准值据参考文献[35];北美页岩标准值据参考文献[36])

Fig. 5 Chondrite and NASC normalized REE patterns of the Xishanyao, Toutunhe, Qigu and Kalazha Formations in the eastern margin of Junggar Basin

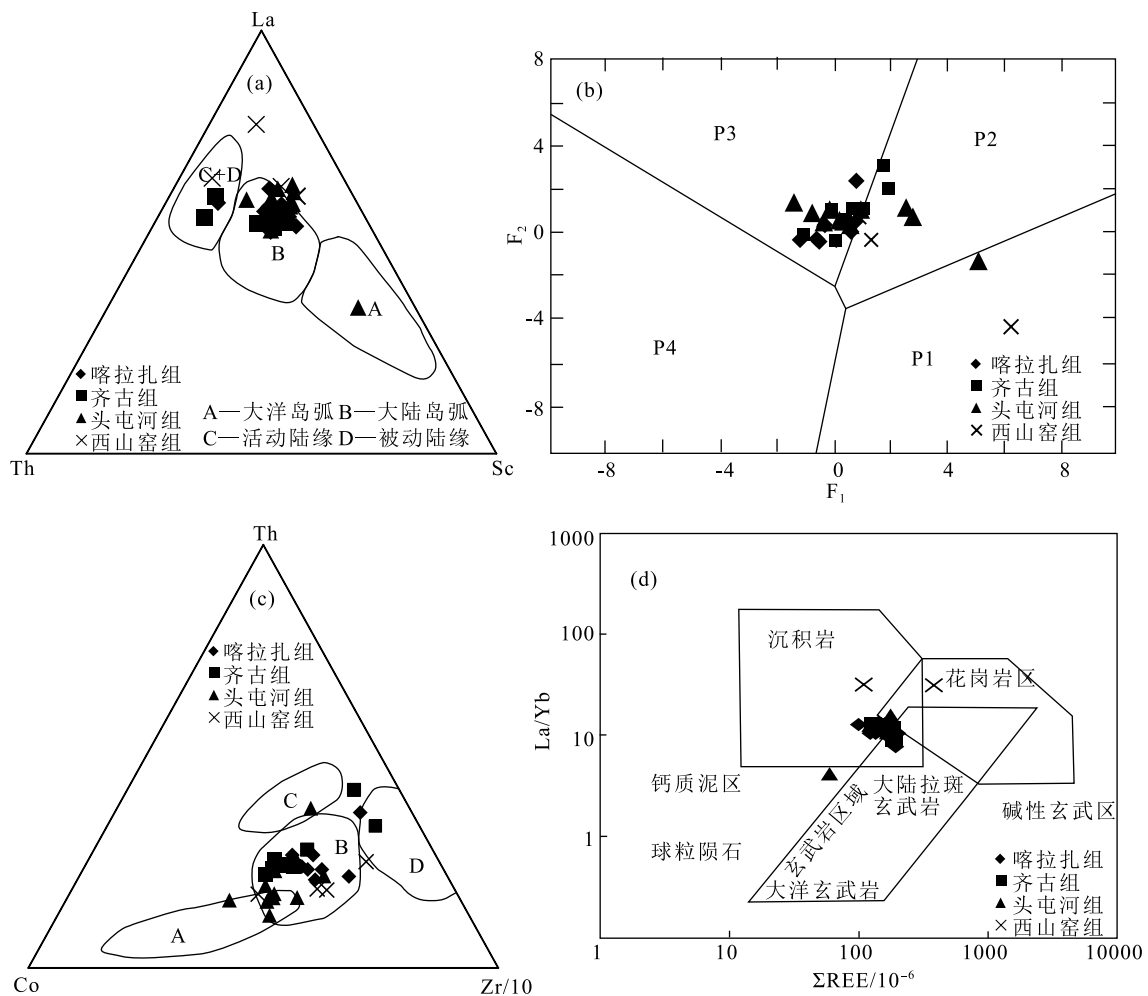


图 6 准噶尔盆地东缘西山窑组、头屯河组、齐古组、喀拉扎组源岩构造背景判别图解

Fig. 6 Tectonic setting discrimination diagrams of the Xishanyao, Toutunhe, Qigu and Kalazha Formations in the eastern margin of Junggar Basin

a—La-Th-Sc 判别图解;b—源区性质函数 F_1 - F_2 判别图解;c—Th-Co-Zr/10 判别图解;d—La/Yb- Σ REE 判别图解。

P1—镁铁质的和少量中性火成岩源区;P2—主要中性火成岩源区(主要为安山岩);P3—长英质火成岩源区(大陆边缘弧);

P4—古老的沉积体系或克拉通/再旋回造山带

积时的古水体介质为富氧的淡水环境,喀拉扎组古水体盐度略高; Fe^{2+}/Fe^{3+} 指示西山窑组与头屯河组底部形成了原生还原层,头屯河组上段与齐古组形成氧化红层; Sr/Cu 、 FeO/MnO 、 Al_2O_3/MgO 等比值与古生物的组合共同指示古气候经历了温暖潮湿—干湿交替—半干旱—干旱的转变过程。

(2) CI 、 ICV 指数反映齐古组和喀拉扎组的物源区构造较稳定,中侏罗世头屯河期,发生 2 次明显突变,推测准噶尔盆地周缘构造活动增强,古气候发生变迁。

(3) 通过 La-Th-Sc、Th-Co-Zr/10、 F_1 - F_2 及

La/Yb- Σ REE 判别图解,总结出西山窑组到喀拉扎组主要沉积物源来自长英质火成岩源区,同时有少量的大陆拉斑玄武岩和花岗岩混合,其构造背景以大陆岛弧为主,部分为大陆边缘构造背景。

参考文献

- [1] 张朝军,何登发,吴晓智,等.准噶尔多旋回叠合盆地的形成于演化[J].石油地质,2006,1: 47-58.
- [2] 高志勇,韩国猛,朱如凯,等.准噶尔盆地南缘古近纪—新近纪前陆盆地沉积格局与演变[J].古地理学报,2009,11(5): 491-502.
- [3] 杨烨,许强,何中波.准噶尔盆地顶山地区古近系乌伦古组物源分析[J].矿床地质,2014,33(Supp): 645-646.

- [4] 焦养泉, 吴立群, 彭云彪, 等. 中国北方古亚洲构造域中沉积型铀矿形成发育的沉积—构造背景综合分析[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 189–205.
- [5] Nameroff T J, Calvert S E, Murray J W. Glacial—interglacial variability in the eastern tropical North Pacific oxygen minimum zone recorded by redox—sensitive trace metals [J]. *Paleoceanography*, 2004, 19: 1010–1029.
- [6] Tribouillard N, Averbush O, Devleeschouwer X, et al. Deep—water anoxia over the Frasnian—Famennian boundary (La Serce, France): a tectonically—induced oceanic anoxic event[J]. *Terra Nova*, 2004, 16: 288–295.
- [7] Werne J P, Lyons T W, Hollander D J, et al. Reduced sulfur in euxinic sediments of the Cariaco Basin: sulfur isotope constrains on organic sulfur formation[J]. *Chem. Geol.*, 2003, 195: 159–179.
- [8] Lyons T W, Werne J P, Hollander D J, et al. Contrasting sulfur geochemistry and Fe/Al and Mo/Al ratios across the last oxic—to—anoxic transition in the Cariaco Basin, Venezuela [J]. *Chem. Geol.*, 2003, 195: 131–157.
- [9] Riboulleau A, Baudin F, Deconinck J F, et al. Depositional conditions and organic matter preservation pathways in an epicontinental environment: the Upper Jurassic Kashpir Oil Shales (Volga Basin, Russia) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2003, 197: 171–197.
- [10] Sageman B B, Murphy A E, Werne J P, et al. Fate of shales: the relative roles of production, decomposition, and dilution in the accumulation of organic—rich strata, Middle Upper Devonian, Appalachian Basin[J]. *Chem. Geol.*, 2003, 195: 229–273.
- [11] Rimmer S M, Thompson J A, Goodnight S A, et al. Multiple controls on the preservation of organic matter in Devonian—Mississippian marine black shales: geochemical and petrographic evidence [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 215: 125–154.
- [12] Algeo T J, Maynard J B. Trace—element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas—type cyclothems [J]. *Chem. Geol.*, 2004, 206: 289–318.
- [13] 张天福, 孙立新, 张云, 等. 鄂尔多斯盆地北缘侏罗纪延安组、直罗组泥岩微量、稀土元素地球化学特征及其古沉积环境意义[J]. 地质学报, 2016, 90(12): 3454–3472.
- [14] 冯晓曦, 滕雪明, 何友字, 等. 初步探讨鄂尔多斯盆地东胜组矿田成矿作用研究若干问题[J]. 地质调查与研究, 2019, 42(2): 96–108.
- [15] 林晓慧, 詹兆文, 邹艳荣, 等. 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意义[J]. 地球化学, 2019, 48(1): 67–78.
- [16] 李锦轶, 肖序常. 对新疆塔地壳结构与构造演化几个问题的简要评述[J]. 地质科学, 1999, 34(4): 405–419.
- [17] 张天福, 张云, 苗培森, 等. 鄂尔多斯盆地西缘中晚侏罗世地层化学蚀变指数(CIA)研究及其意义[J]. 地质调查与研究, 2006, 41(4): 258–262.
- [18] 何登发, 周路, 唐勇. 准噶尔盆地中侏罗统西山窑组与头屯河组间不整合面特征及其油气勘探意义[J]. 古地理论, 2007, 9(4): 387–396.
- [19] 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.
- [20] 梁云海, 李文铅, 李卫东. 新疆准噶尔造山带多旋回开合构造特征[J]. 地质通报, 2004, 23(3): 279–285.
- [21] Walker C T, Price N B. Departure curves for computing paleosalinity from boron in illites and shales[J]. *AAPG*, 1963, 92: 837–841.
- [22] Couch E L. Calculation of Paleosalinities from boron and clay mineral data[J]. *AAPG*, 1971, 55(10): 1829–1837.
- [23] 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.
- [24] Francois R. The study on the regulation of the concentrations of some trace metals(Rb, Sr, Zn, Cu, V, Cr, Ni, Mn, and Mo) in Saanich inlet sediments, British Columbia, Canada[J]. *Marine Geology*, 1988, 83: 285–308.
- [25] Russell A D, Morford J L. The behavior of redox—sensitive metals across a laminated—massive—laminated transition in Saanich Inlet, British Columbia[J]. *Marine Geology*, 2001, 174: 341–354.
- [26] Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update[J]. *Chem. Geol.*, 2006, 232: 12–32.
- [27] 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.
- [28] Hatch J R, Leventhal J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the upper pennsylvanian (Missourian) stark shale member of the dennis limestone, Wabaunsee County, Kansas, U.S.A [J]. *Chem. Geol.*, 1992, 99(1/3): 65–82.
- [29] Scheffler K, Buehmann D, Schwark L. Analysis of Late Palaeozoic glacial to postglacial sedimentary successions in South Africa by geochemical proxies——Response to climate evolution and sedimentary environment[J]. *Palaeo*, 2006, 240(6): 184–203.
- [30] Jones B, Manning D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chem. Geol.*, 1994, 111(1/4): 111–129.
- [31] Lermanm A. *Lakes: Chemistry, Geology, Physics* [M]. Berlin: Springer—Verlag, 1978.
- [32] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715–717.
- [33] 宋明水. 东营凹陷南斜坡沙四段沉积环境的地球化学特征[J]. 矿物岩石, 2005, 25(1): 67–73.
- [34] 朱筱敏, 张义娜, 杨俊生, 等. 准噶尔盆地侏罗系辫状河三角洲沉积特征[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(2): 244–251.
- [35] Taylor S R, McLennan S M. *The continental crust: Its composition and evolution* [M]. Oxford: Blackwell, 1985.
- [36] Haskin M A, Frey F A. Dispersed and not—so—rare earths [J]. *Science*, 1966, 152: 299–314.
- [37] Cullers R L, Basu A, Suttner L J. Geochemical signature of provenance in sand—size mineral in soil and stream near the tobacco root batholith, Montana, USA[J]. *Chem. Geol.*, 1988, 70: 335–348.

- [38] McLennan S M, Taylor S R. Sedimentary rocks and crustal evolution revisited: tectonic setting and secular trends[J]. J. Geol., 1991, 99: 1-21.
- [39] Floyd P A, Leveridge B E. Tectonic Environment of the Devonian Gramscatho Basin, South Cornwall: framework mode and geo-chemical evidence from turbiditic sandstones [J]. Journal of the Geological Society, 1987, 144(4): 531-542.
- [40] Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstone[J]. J. Geol., 1983, 91(6): 611-627.
- [41] Shao L, Statterger K, Garbe S C. Sandstone petrology and geochemistry of the Turpan Basin (NW China): implications for the tectonic evolution of a continental basin[J]. Journal of Sedimentary Research, 2001, 71(1): 37-49.
- [42] 方世虎, 郭召杰, 宋岩, 等. 准噶尔盆地南缘侏罗纪沉积相演化与盆地格局[J]. 古地理学报, 2005, 7(3): 347-356.
- [43] 鲍志东, 刘凌, 张冬玲, 等. 准噶尔盆地侏罗系沉积体系纲要[J]. 沉积学报, 2005, 23(2): 194-202.
- [44] 龚清. 准噶尔盆地南缘和东源地区侏罗系沉积特征及构造背景[D]. 中国地质大学硕士学位论文, 2015.
- [45] 程先钰, 李以科, 董满华, 等. 阿拉善右旗特拜金矿赋矿地层时代厘定及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(6): 1565-1577.
- [46] 孟贵祥, 邓霞, 祁光, 等. 新疆东准噶尔成矿带浅覆盖区地质填图效果——以杜热一带浅覆盖区基岩地质填图为例[J]. 地质通报, 2022, 41(2/3): 374-387.
- [47] 蔡洪明, 王蓉, 刘桂萍, 等. 东天山晚泥盆世二长花岗岩的发现及其对阿奇山-雅满苏带构造演化的制约[J]. 地质通报, 2022, 41: 1184-1190.
- [48] 金若时, 滕雪明. 中国北方砂岩型铀矿大规模成矿作用[J]. 华北地质, 2022, 45(1): 43-57.
- [49] 毕君辉, 葛文春, 周红英, 等. 黑龙江省东北部勤得利—街津口地区基性侵入岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 华北地质, 2021, 44(1): 1-3.