

内蒙古准格尔旗下侏罗统延安组砒砂岩地球化学特征及其对风化、物源的指示

范淑花^{1,3}, 秦富仓^{2,3}, 车志晖⁴, 盛艳^{1,3}

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2.内蒙古自治区林业科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010; 3.荒漠生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018; 4.内蒙古工业大学 建筑学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: [目的] 研究砒砂岩的风化程度和物源特征, 为砒砂岩的深入研究及岩土侵蚀防治提供基础理论依据。[方法] 选取内蒙古准格尔旗下侏罗统延安组砒砂岩为研究对象, 通过野外调查及试验研究, 利用主量元素、微量元素及稀土元素地球化学方法对砒砂岩化学蚀变指数(CIA)、斜长石蚀变指数(PIA)、轻重稀土元素比(LREE/HREE)及相关微量、稀土元素关系进行了分析。[结果] ①准格尔旗下侏罗统延安组砒砂岩以 SiO_2 和 Al_2O_3 为主, 大部分主量元素含量低于平均上地壳标准化值(UCC); 地球化学分类图显示砒砂岩主要为页岩、亚长石砂岩和岩屑砂岩; 砒砂岩CIA值为64.95~86.57, 平均值为77.46。这与研究区周边的中三叠统二马营组特征较为一致, 反映经历共同的岩石风化历史。②砒砂岩中粉砂岩和泥岩中各微量元素含量均高于砂岩, 其中Ba含量最高, Zr次之; 砒砂岩形成古温度为10.67~22.78℃, 平均17.68℃, PIA值为70.48~97.13, 平均值为89.76。③砒砂岩稀土元素配分模式与UCC一致, 整体呈现轻稀土富集、重稀土亏损、弱负铕异常(δEu)特征; 粉砂岩和泥岩总稀土(ΣREE)、轻重稀土比(LREE/HREE)、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值均高于砂岩。这种分异主要是由于表生作用中岩石风化溶出的主要微量元素大多被黏土矿物吸附或水力分选所致。[结论] 内蒙古准格尔旗下侏罗统延安组砒砂岩为成分成熟度、分选程度较低的陆源碎屑沉积岩, 源区经历了中等—强烈的化学风化; 砒砂岩形成时为干旱—半湿润的古气候条件; 砒砂岩稀土元素配分模式结合主、微量元素判别图指示延安组砒砂岩来自鄂尔多斯盆地北部阴山—大青山地区的海西—印支期花岗岩类。

关键词: 砒砂岩; 地球化学; 风化程度; 物源; 下侏罗统延安组; 准格尔旗

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0196-09

中图分类号: X142

文献参数: 范淑花, 秦富仓, 车志晖, 等. 内蒙古准格尔旗下侏罗统延安组砒砂岩地球化学特征及其对风化、物源的指示[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 196-204. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20240612.001; Fan Shuhua, Qin Fucang, Che Zhihui, et al. Geochemical characteristics and their indication to weathering and provenance of Pisha sandstone from Lower Jurassic Yan'an Formation in Jungar Banner, Inner Mongolia Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 196-204.

Geochemical Characteristics and Their Indication to Weathering and Provenance of Pisha Sandstone from Lower Jurassic Yan'an Formation in Jungar Banner, Inner Mongolia Autonomous Region

Fan Shuhua^{1,3}, Qin Fucang^{2,3}, Che Zhihui⁴, Sheng Yan^{1,3}

(1.College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural

University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2.Inner Mongolia Academy of Forestry

Science, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China; 3.Key Laboratory of Desert Ecosystem Conservation and

Restoration, State Forestry and Grassland Administration of China, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;

4.School of Architecture, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China)

Abstract: [Objective] The weathering degree and provenance of the Pisha sandstone from the Lower Jurassic

收稿日期: 2024-02-21

修回日期: 2024-05-22

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄河中游砒砂岩自生蒙脱石的识别及对骨架颗粒溶蚀响应机制研究”(42207392)、“砒砂岩区裸露基岩—土壤复合坡面侵蚀过程研究”(41967008); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2020BS04006; 2023LHMS05025); 内蒙古农业大学青年教师科研能力提升专项(BR220134); 内蒙古农业大学高层次人才引进科研启动项目(NDYB2019-36)

第一作者: 范淑花(1985—), 女(汉族), 内蒙古自治区商都县人, 博士, 讲师, 主要从事表生地质环境与岩土侵蚀方面的研究。Email: fshczc@imau.edu.cn.

通信作者: 秦富仓(1966—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与荒漠化防治、林业方面的研究。Email: qinfuc@126.com.

Yan'an formation in Jungar, Inner Mongolia Autonomous Region was analysed in order to provide a basis for further research on the origins and epigenetic evolution of the Pisha sandstone, and the prevention and control of soil erosion. [Methods] We conducted field investigation and geochemical analyses, including major, trace, and rare earth element analyses, and calculated the chemical alteration index (CIA), plagioclase alteration index (PIA), light-to-heavy rare earth element ratio (LREE/HREE), and related trace and rare earth element relationships in the Pisha sandstone. [Results] ① The geochemical classification diagram showed that the Pisha sandstone in Jungar comprised shale, subarkose, and lithic sandstone facies. The Pisha sandstone was mainly composed of SiO_2 and Al_2O_3 . The content of most of the major elements was lower than that in the average upper crust (UCC). The CIA value ranged from 64.95 to 86.57, with an average of 77.46. This was consistent with the characteristics of the Pisha sandstone from the Middle Triassic Ermaying Formation near the study area, reflecting a common history of rock weathering. ② The siltstone and mudstone facies had a higher trace element content than the sandstone facies, with Ba being the most abundant element, followed by Zr. The paleotemperature of the deposition of the Pisha sandstone was 10.67—22.78 °C, with an average value of 17.68 °C; the PIA value was 70.48—97.13, with an average of 89.76. ③ The rare earth element distribution pattern in the Pisha sandstone was consistent with that in the UCC, showing the characteristics of light rare earth enrichment, heavy rare earth depletion, and weak negative Eu anomalies. The total rare earth ($\sum\text{REE}$), light-to-heavy rare earth ratio (LREE/HREE) and $(\text{La}/\text{Yb})_N$ values of the siltstone and mudstone facies were higher than those of the sandstone facies. This difference was mainly due to the attraction of most of the trace elements released by rock weathering during epigenetic processes by clay minerals, or due to hydraulic sorting. [Conclusion] The Pisha sandstone from the Lower Jurassic Yan'an Formation in Jungar, Inner Mongolia, consists of terrestrial clastic sedimentary rocks with a low compositional maturity and sorting, sourced from an area that had experienced moderate to strong chemical weathering. The Pisha sandstone formed under arid to semi-humid conditions. The rare earth element distribution pattern combined with the discrimination diagram of major and trace elements indicates that the Pisha sandstone from the Yan'an Formation originated from Hercynian-Indosinian granites in the Yinshan-Daqingshan area, in the Northern Ordos Basin.

Keywords: Pisha sandstone; geochemistry; weathering; provenance; Lower Jurassic Yan'an Formation; Jungar Banner

陆源碎屑沉积岩的地球化学特征,是源区物质经物理化学风化、侵蚀、搬运、沉积及成岩改造综合作用的结果^[1]。规定主量元素之和为100%,因此各元素彼此会受到限制或相互制约,可用来反映岩石风化历史;微量、稀土元素含量的变化幅度远大于主量元素,且化学性质稳定,不易受风化和蚀变的影响,因而它们在碎屑岩中的含量及相互关系能够反映盆地的物源特征及构造环境。因此,碎屑岩地球化学特征被广泛用于物源示踪、风化作用研究及沉积期古气候、古构造的重建^[2]。分布于黄河中游的砒砂岩是由古生界二叠系至中生界三叠系、侏罗系及白垩系的厚层含砾砂岩、砂岩、粉砂岩和泥岩组成的一套陆源碎屑沉积岩,由石英、长石、蒙脱石、方解石和赤铁矿等组成,主要氧化物为 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 和 CaO ^[3]。由于岩层被强烈风化侵蚀,极易发生水土流失,是黄河粗泥沙的主要来源区,当地群众视其危害毒如砒霜,故称之为“砒砂岩”^[4]。由于其严峻的环境问题,砒砂岩近年来受到不同领域专家的广泛关注,主要集中在砒

砂岩侵蚀类型、产流产沙、力学性能、侵蚀成因分析及水土流失治理等方面^[5-7],而与砒砂岩地球化学组成相关的风化特征、物源等研究却鲜有报道,这在一定程度上制约了对砒砂岩弱抗侵蚀性成因的深入研究。黄河中游地区广泛分布下侏罗统延安组地层,研究表明,延安组与其上覆直罗组之间存在短期沉积间断,延安组遭受风化剥蚀,并在其顶部发育风化壳^[8]。经过强烈的烃类流体改造后^[9],形成的漂白砂岩变得更加疏松,极易遭受侵蚀造成水土流失,这与作者在准格尔旗野外调查的结果一致(图1)。然而目前延安组的研究主要集中在煤、油气及铀矿方面,很少有研究关注其严重的水土流失现状及其地质背景。基于此,本文选取内蒙古准格尔地区下侏罗统延安组地层为研究对象,开展主量元素、微量元素和稀土元素研究,深入探讨砒砂岩的风化程度和物源特征,以期对该区早侏罗世古风化、古气候及物质来源有进一步的认识,同时为砒砂岩的深入研究及岩土侵蚀防治提供基础理论依据。



图 1 准格尔旗下侏罗统延安组砒砂岩水土流失现状

Fig.1 Current situation of soil erosion of Pisha sandstone from Lower Jurassic Yan'an Formation in Jungar Banner

1 材料与方法

1.1 研究区地质概况

砒砂岩分布于鄂尔多斯盆地东北部,地理坐标范围 $38^{\circ}10' - 40^{\circ}10'N, 108^{\circ}45' - 111^{\circ}31'E$ ^[10]。鄂尔多斯盆地横跨陕、甘、宁、蒙 4 省,总面积达 $2.50 \times 10^5 \text{ km}^2$,是中国第二大内陆沉积盆地。盆地南北分别为祁连—秦岭褶皱带和天山—兴蒙褶皱带,西边为贺兰—六盘山,东临太平洋构造域^[11]。该盆地可划分为伊盟隆起,晋西挠褶带,伊陕斜坡,天环拗陷,西缘逆冲带和渭北隆起 6 个一级构造单元,如今呈一南北翘起,西翼陡而短,东翼缓而长的不对称向斜。自中生代以来,鄂尔多斯盆地发生了至少 4 期不均匀抬升和地层剥蚀事件,白垩纪末为强度最大的一期,差异剥蚀明显,剥蚀量由西向东、由南向北逐渐增大,导致盆地东北部某些地区甚至剥蚀到三叠系上统,至内蒙古准格尔旗一带剥蚀量高达 1 400 m 以上^[12],使其成为当前黄河中游剧烈的基岩侵蚀中心。因此本文选取位于伊盟隆起东北部的内蒙古准格尔旗作为研究区。

1.2 样品采集与测试

在 1:20 万准格尔旗幅地质图内,以系为单元结合岩性,沿标准地层剖面采集代表性砒砂岩样品。要求岩石样品尽可能新鲜,每个样品由采样点周围 3 处以上同一岩性的新鲜岩石碎块聚合而成,严格避免混入不同岩性样品。一般在建组地层剖面中,样品数控制在 3~5 件组合样品。所有采样点必须有 GPS 现场定位、必须拍摄照片并现场填写野外记录簿。

研究区下侏罗统延安组砒砂岩岩性主要为浅灰色粉砂岩、泥岩夹淡黄色块状砂岩,野外破碎程度表现为:泥岩>粉砂岩>砂岩。按照样品采集要求结合砒砂岩 3 类主要岩性,本次研究的样品于 2022 年 10 月 3 日采自内蒙古准格尔地区下侏罗统延安组野外

露头,通过实测地质剖面结合采样难易程度,采用拣块法共采集砒砂岩 9 件,其中砂岩样品 3 件,粉砂岩样品 4 件,泥岩样品 2 件。预期通过准格尔旗下侏罗统延安组 9 件不同岩性砒砂岩样品的地球化学特征反映其风化、物源特征。样品前期处理在河北省欣航测绘院完成,主微量、稀土元素测试于 2023 年 5 月在贵州同微测试科技有限公司完成。

根据国家标准《耐火材料 X 射线荧光光谱化学分析熔铸玻璃片法(GB/T21114—2019)》^[13],利用帕纳科 Axios PW4400 型 X 射线荧光光谱仪对延安组砒砂岩主量元素进行分析。具体流程为:120 °C 下烘烤 8 h 后置于干燥器中;将复合熔剂放入马弗炉中 650 °C 灼烧 6 h,冷却后放入干燥器备用;称取 0.5 g 样品,5.0 g 复合熔剂,1.0 g NH_4NO_3 氧化剂;将样品混匀倒入白金坩埚,滴 3 滴 10% 的 LiBr 脱模剂;白金坩埚放置于熔片机中,温度升至 700 °C,持续 5 min;再梯度升温至 1 150 °C,持续 7 min,准备样品熔融。熔融过程中,要不停摇动白金坩埚,然后倒入成型模具,冷却至 700 °C,取出玻璃熔片;最后进行样品测试,分析误差小于 5%。烧失量(LOD)是样品经过 1 h 的 1 000 °C 高温加热,通过计算质量差获得。

根据国标《硅酸盐岩石化学分析方法第 30 部分:44 个元素量测定(GB/T14506.30-2010)》^[14],利用赛默飞(Thermo Fisher)ICP-MSX2 电感耦合等离子质谱仪对延安组砒砂岩微量、稀土元素进行测试。具体方法为:取 50 mg 粉末样品放入盛有 $\text{HF} + \text{HNO}_3$ (4:1) 的 Teflon 溶样弹中,185 °C 下放置 3 d 确保其完全溶解,蒸干溶液;再将样品溶解在 1:1 的 HNO_3 溶液中并再次蒸干。然后将样品溶解到 3 ml 的 2 mol/L HNO_3 溶液中;最后用 2% 的 HNO_3 溶液稀释样品至 3 000 倍用来分析测试,微量、稀土元素含量分析误差小于 5%。

1.3 数据分析

运用 Excel 2003, Excel 2016 进行数据分析计算,采用 Geoplot 地球化学投图软件和 Origin 2022 绘图软件对延安组砭砂岩主量、微量元素各参数进行投图分析,制图主要利用 CorelDRAW X4SP2 图形设计软件进行。

2 结果与分析

2.1 主量元素特征

延安组砭砂岩主量元素特征如表 1 所示,砭砂岩样品以 SiO₂ 和 Al₂O₃ 为主。砂岩 SiO₂ (71.39%~89.01%,平均 80.38%)含量明显高于粉砂岩(41.60%~67.91%,平均 59.90%)和泥岩(61.80%~65.18%,平均 63.49%)。Al₂O₃ 和全铁(TFe₂O₃)在粉砂岩

(9.88%~17.99%,平均 14.98%;4.66%~6.78%,平均 5.59%)和泥岩(18.37%~18.39%,平均 18.38%;3.65%~7.15%,平均 5.40%)中的含量远远高于砂岩(5.30%~8.85%,平均 6.50%;0.42%~1.91%,平均 1.12%)。MgO, TiO₂, Na₂O 和 P₂O₅ 与 Al₂O₃, TFe₂O₃ 具有与 SiO₂ 和 Al₂O₃ 相同的变化特征。CaO 在砂岩 Ya₃(10.93%)和粉砂岩 Ya₇(19.21%)含量较高,其余几乎均低于 1%。K₂O 在砂岩、粉砂岩和泥岩中含量变化不明显。从延安组砭砂岩主量元素上地壳(upper continental crust, UCC)标准化图(图 2)可以看出,除个别样品外,粉砂岩和泥岩主量元素分布特征较为一致,除 TiO₂, Al₂O₃, TFe₂O₃ 及个别样品 MnO 富集外,其余主量元素均呈现不同程度的亏损;砂岩中除 SiO₂ 富集外,其余主量元素普遍亏损。

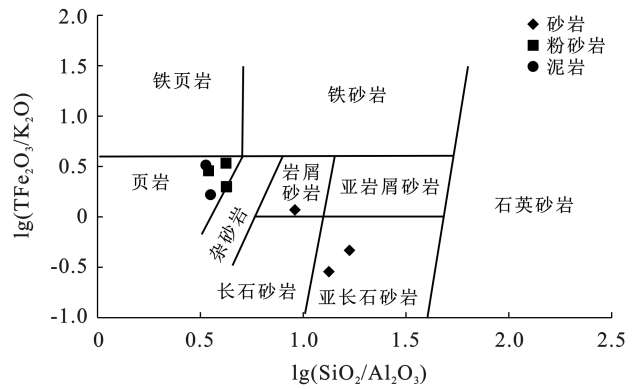
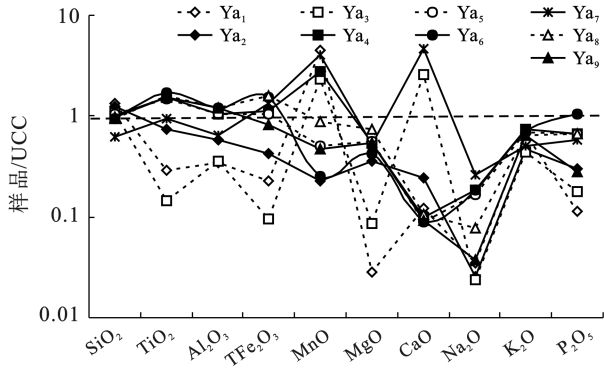


图 2 延安组砭砂岩主量元素 UCC 标准化图^[15]和 log(TFe₂O₃/K₂O)-log(SiO₂/Al₂O₃) 地球化学分类图^[16]

Fig.2 Major element normalized to UCC for Yan'an Formation Pisha sandstone and geochemical classification of log(TFe₂O₃/K₂O)-log(SiO₂/Al₂O₃)

表 1 延安组砭砂岩样品主量元素含量

Table 1 Major element concentrations of Pisha sandstone from Yan'an Formation

主量元素	砂岩			粉砂岩			泥岩			%
	Ya ₁	Ya ₂	Ya ₃	Ya ₄	Ya ₅	Ya ₆	Ya ₇	Ya ₈	Ya ₉	
SiO ₂	89.01	80.74	71.39	67.78	67.91	62.30	41.60	61.80	65.18	
TiO ₂	0.15	0.37	0.07	0.76	0.73	0.85	0.46	0.79	0.77	
Al ₂ O ₃	5.30	8.85	5.35	16.03	16.02	17.99	9.88	18.37	18.39	
TFe ₂ O ₃	1.04	1.91	0.42	4.98	4.66	6.78	5.93	7.15	3.65	
MnO	0.31	0.02	0.16	0.19	0.04	0.02	0.28	0.06	0.03	
MgO	0.06	0.78	0.19	1.18	1.24	0.94	1.15	1.64	1.20	
CaO	0.52	1.02	10.93	0.42	0.37	0.38	19.21	0.45	0.39	
Na ₂ O	0.14	0.10	0.09	0.73	0.64	0.71	1.02	0.31	0.14	
K ₂ O	2.23	1.62	1.48	2.51	2.33	2.36	1.74	2.19	2.20	
P ₂ O ₅	0.02	0.06	0.04	0.13	0.13	0.21	0.12	0.14	0.06	
LOI	1.17	4.56	9.82	5.25	5.95	7.48	18.59	7.17	7.75	
合计	99.94	100.03	99.95	99.96	100.02	100.03	99.99	100.06	99.75	
CIA	64.95	80.96	73.73	78.65	80.31	82.09	65.39	84.53	86.57	

注: TFe₂O₃ 表示以 Fe₂O₃ 代替全铁含量; LOI 为烧失量; CIA 为化学蚀变指数。

砭砂岩地球化学分类图(图 2)显示,砭砂岩样品主要为页岩、亚长石砂岩和岩屑砂岩,反映砭砂岩为

不成熟的陆源碎屑沉积岩。下侏罗统延安组砭砂岩主量元素特征与宋土顺等^[17]报道的漂白砭砂岩差别

较大,但与研究区周边的中三叠统二马营组较为一致,反映经历共同的岩石风化历史。

2.2 微量元素特征

延安组砒砂岩微量元素特征详见表 2。总体来看,粉砂岩和泥岩中各微量元素含量均高于砂岩,粉砂岩和泥岩中含量相似。其中 Ba 含量最高,砂岩中 Ba 含量为 $5.03 \times 10^{-4} \sim 8.71 \times 10^{-4}$,平均 6.51×10^{-4} ,粉砂岩中 Ba 含量为 $6.11 \times 10^{-4} \sim 7.50 \times 10^{-4}$,平均 6.82×10^{-4} ,泥岩中 Ba 含量为 $5.27 \times 10^{-4} \sim 5.68 \times 10^{-4}$,平均 5.48×10^{-4} 。Ba 为碱土金属,性质更接近于 K,在水溶液中极易被水解沉淀的黏土矿物吸附,因此 Ba 一般在粉砂岩和泥岩中含量较高,在砂岩中变化幅度较大,文中 Ba 在泥岩中含量较低的原因可能与其中的蒙脱石等黏土矿物成因有关。其次为 Zr,砂岩中 Zr 含量为 $0.78 \times 10^{-4} \sim 1.63 \times 10^{-4}$,平均 1.30×10^{-3} ,粉砂岩中 Zr 含量为 $1.52 \times 10^{-4} \sim 2.55 \times 10^{-4}$,平均 2.14×10^{-4} ,泥岩中 Zr 含量为 $1.18 \times 10^{-4} \sim 1.82 \times 10^{-4}$,平均 1.50×10^{-4} 。Zr 为典型的惰性元素,化学稳定性高,风化时随着颗粒逐渐变细,Zr 滞留在残一坡积层,赋存在重矿物中,因此 Zr 在粉砂岩和泥岩中表现得更为富集。然后是 Sr,砂岩中 Sr 含量为 $9.10 \times 10^{-5} \sim 9.80 \times 10^{-5}$,平均 9.30×10^{-5} ,粉砂岩中 Sr 含量为 $7.90 \times 10^{-5} \sim 1.65 \times 10^{-4}$,平均 1.09×10^{-4} ,泥岩中 Sr 含量为 $6.90 \times 10^{-5} \sim 7.30 \times 10^{-5}$,平均 7.10×10^{-5} 。Sr 也属于碱土金属,风化成壤过程中释放出的 Sr 大部分以离子形式随水溶液迁移,小部分被黏土矿物吸附滞留在原地,使得 Sr 在粉砂岩中更容易富集。另外,砂岩中 Rb 含量为 $5.20 \times 10^{-5} \sim 9.30 \times 10^{-5}$,平均 6.80×10^{-5} ,粉砂岩中 Rb 含量为 $7.10 \times 10^{-5} \sim 1.05 \times 10^{-4}$,平均 9.20×10^{-5} ,泥岩中 Rb 含量为 $9.50 \times 10^{-5} \sim 1.03 \times 10^{-4}$,平均 9.90×10^{-5} ,这是由于 Rb 属于典型的亲石分散稀有碱金属元素,在表生作用中,岩石风化溶出的 Rb 主要被黏土矿物吸附所致^[18],故 Rb 在泥岩中更富集。

2.3 稀土元素特征

延安组砒砂岩稀土元素特征详见表 3。砒砂岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(图 3)显示,各样品稀土元素分布曲线相互平行,具有与 UCC 一致的稀土配分模式。砂岩中稀土元素总量($\sum \text{REE}$)为 $4.30 \times 10^{-5} \sim 8.50 \times 10^{-5}$,平均值 6.60×10^{-5} ,粉砂岩中 $\sum \text{REE}$ 为 $1.41 \times 10^{-4} \sim 2.59 \times 10^{-4}$,平均值 1.86×10^{-4} ,泥岩中 $\sum \text{REE}$ 为 $1.57 \times 10^{-4} \sim 1.77 \times 10^{-4}$,平均值 1.67×10^{-4} 。粉砂岩和泥岩中 $\sum \text{REE}$ 均高于 UCC,而砂岩中 $\sum \text{REE}$ 低于 UCC,粉砂岩和泥岩中稀土元素高于砂岩与分选作用有关^[19]。

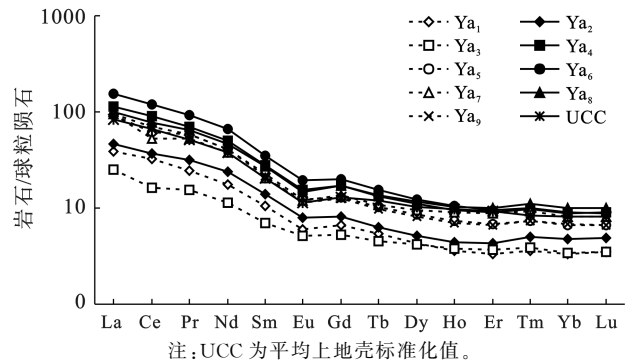


图 3 延安组砒砂岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式图^[15]

Fig.3 Chondrite-normalized rare earth element diagram for Yan'an Formation Pisha sandstone^[15]

延安组砒砂岩样品整体呈现轻稀土富集,重稀土亏损,弱负 Eu 异常特征。粉砂岩、泥岩较砂岩轻重稀土分馏较明显,轻稀土比重稀土(LREE/HREE)平均值分别为 11.17, 10.72, 8.87, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 平均值分别为 13.90, 12.16, 9.58, δEu 值分别为 0.71, 0.69, 0.77, 与前人研究的鄂尔多斯盆地北部海西—印支期长英质侵入岩类接近^[20]。

3 讨论

3.1 风化与古气候

3.1.1 砒砂岩风化特征 化学蚀变指数(CIA)是定量分析硅质碎屑岩风化作用的重要参数,反映碎屑岩中长石和黏土矿物的比例^[21]。计算公式为:

$$\text{CIA} = \left[\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}} \right] \times 100 \quad (1)$$

式中: CIA 为化学蚀变指数,各氧化物含量均为摩尔分数; CaO^* 指硅酸盐矿物中的 CaO 。为了避免繁琐的程序, CaO^* 计算简化为: $\text{CaO}^* = \text{CaO} - \text{P}_2\text{O}_5 \times 10/3$, 当 CaO^* 小于 Na_2O 时,采用 CaO^* 计算值; 当 CaO^* 大于 Na_2O 时,则采用 Na_2O 值^[22]。

$\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}) - \text{K}_2\text{O}$ 图解(图 4)显示,准格尔旗下侏罗统延安组砒砂岩样品 CIA 值明显高于平均上地壳(UCC),且大多数样品 $\text{CIA} > 70$, 风化趋势与 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}$ 边平行,说明这些砒砂岩经历了中等—强烈的化学风化, Na 元素强烈流失,斜长石几乎风化殆尽,矿物以高岭石、伊利石和钾长石为主,这与全岩粉晶 X 射线衍射分析结果一致。化学风化的加强与更高的温度、更多的酸沉降或更快的成土速率有关。从图 4 可知,延安组砒砂岩源区应为安山岩和花岗岩混合的上地壳岩石^[21]。碎屑岩的成分成熟度和分选程度可以用 Zr/Sc 与 Th/Sc 关系来反映。从表 2 可以看出,准格尔旗下侏罗统延安组砒砂岩中

砂岩较粉砂岩和泥岩 Zr/Sc 值和 Th/Sc 值较高,但后期循环改造影响较小,这与其地球化学分类图结果总体来看,该套砂岩成分成熟度、分选程度不高,受一致。

表2 延安组砂岩样品微量元素含量

Table 2 Trace element concentrations of Yan'an Formation Pisha sandstone

10⁻⁶

微量元素	砂岩			粉砂岩			泥岩		
	Y _{a1}	Y _{a2}	Y _{a3}	Y _{a4}	Y _{a5}	Y _{a6}	Y _{a7}	Y _{a8}	Y _{a9}
Sc	2.23	6.17	1.97	11.90	12.40	12.40	8.52	16.30	12.00
V	36.80	21.00	13.30	83.50	87.70	110.00	65.40	119.00	124.00
Cr	14.70	23.80	12.10	79.20	85.00	94.60	102.00	109.00	84.50
Co	3.01	2.85	1.00	26.80	12.50	14.50	12.50	22.10	17.40
Ni	81.50	7.35	3.84	38.60	22.30	49.40	24.40	44.40	20.30
Cu	19.90	2.01	3.18	16.60	19.80	32.60	14.30	30.20	16.30
Zn	48.10	12.30	10.20	95.80	82.90	126.00	58.50	114.00	76.20
Ga	4.87	9.80	4.84	18.60	18.50	20.90	13.00	24.10	22.70
Rb	92.50	58.60	51.90	105.00	97.60	95.10	71.00	103.00	95.10
Sr	90.80	97.80	91.70	98.20	78.60	94.60	165.00	72.90	68.70
Y	7.87	10.20	10.50	23.00	16.70	23.50	27.50	24.80	16.10
Cs	1.51	0.91	0.72	5.35	5.20	9.23	3.98	8.54	10.80
Ba	871.00	579.00	503.00	686.00	611.00	750.00	680.00	527.00	568.00
Pb	29.60	11.90	10.20	59.80	16.50	19.10	14.10	20.60	21.50
Th	6.74	6.78	2.13	9.87	8.55	8.00	5.50	10.70	11.00
U	1.97	1.18	0.61	1.89	1.93	3.55	1.51	2.15	3.30
Nb	2.89	5.62	1.36	12.80	12.90	14.50	8.56	13.90	13.40
Zr	150.00	163.00	78.20	255.00	218.00	230.00	152.00	182.00	118.00
Hf	3.80	4.19	2.04	6.14	5.36	5.52	3.57	4.67	3.27
Zr/Sc	67.26	26.42	39.70	21.43	17.58	18.55	17.84	11.17	9.83
Th/Sc	3.02	1.10	1.08	0.83	0.69	0.65	0.65	0.66	0.92
La/Th	2.09	2.54	4.32	4.21	3.96	7.04	6.38	3.46	3.19

表3 延安组砂岩样品稀土元素含量

Table 3 Rare earth element concentrations of Yan'an Formation Pisha sandstone

10⁻⁶

稀土元素	砂岩			粉砂岩			泥岩		
	Y _{a1}	Y _{a2}	Y _{a3}	Y _{a4}	Y _{a5}	Y _{a6}	Y _{a7}	Y _{a8}	Y _{a9}
La	14.10	17.20	9.21	41.60	33.90	56.30	35.10	37.00	35.10
Ce	31.30	35.00	15.70	85.90	58.80	115.00	51.10	73.50	67.10
Pr	3.36	4.38	2.10	9.64	8.01	12.80	7.26	8.86	7.91
Nd	12.50	16.90	8.03	35.70	29.40	46.80	27.20	33.00	28.70
Sm	2.46	3.20	1.60	6.46	5.30	8.01	4.74	6.24	4.98
Eu	0.52	0.69	0.45	1.33	1.06	1.69	1.03	1.29	0.98
Gd	2.05	2.51	1.62	5.25	4.00	6.11	4.20	5.24	3.87
Tb	0.31	0.36	0.26	0.76	0.60	0.89	0.62	0.80	0.56
Dy	1.62	1.96	1.59	4.19	3.26	4.73	3.63	4.47	3.09
Ho	0.30	0.38	0.32	0.81	0.62	0.89	0.76	0.88	0.60
Er	0.83	1.08	0.92	2.25	1.71	2.38	2.19	2.49	1.67
Tm	0.13	0.18	0.14	0.35	0.26	0.36	0.33	0.39	0.26
Yb	0.83	1.17	0.84	2.18	1.64	2.23	2.03	2.47	1.67
Lu	0.14	0.19	0.13	0.34	0.25	0.33	0.31	0.38	0.26
δEu	0.70	0.75	0.86	0.70	0.70	0.74	0.71	0.69	0.68
(La/Yb) _N	11.44	9.93	7.37	12.90	13.97	17.06	11.68	10.12	14.20
(Gd/Yb) _N	1.99	1.74	1.56	1.95	1.98	2.22	1.68	1.72	1.88
La/Yb	16.93	14.70	10.91	19.08	20.67	25.25	17.29	14.98	21.02
ΣREE	70.44	85.20	42.92	196.76	148.81	258.52	140.51	177.00	156.75
LREE	64.24	77.37	37.09	180.63	136.47	240.60	126.43	159.89	144.77
HREE	6.21	7.82	5.83	16.13	12.34	17.92	14.08	17.11	11.97
LREE/HREE	10.35	9.89	6.37	11.20	11.06	13.43	8.98	9.34	12.09

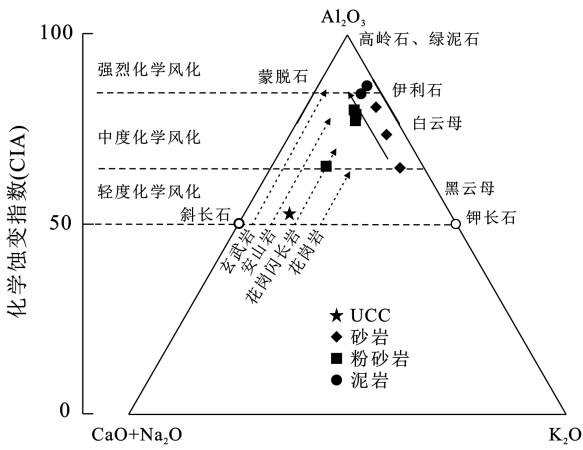


图 4 延安组砒砂岩 $Al_2O_3-(CaO+Na_2O)-K_2O$ 图解^[21]
Fig.4 $Al_2O_3-(CaO+Na_2O)-K_2O$ diagram for Yan'an Formation Pisha sandstone

3.1.2 古气候 除源区风化程度外, CIA 也被广泛用于古气候研究。准格尔旗下侏罗统延安组砒砂岩 CIA 值为 64.95~86.57, 平均 77.46, 反映了干旱—半湿润的古气候条件。此外, 温度也可以作为研究古气候的重要指标。根据 Yang J 等^[23] 的研究, 古温度计算公式为:

$$T = 0.56 \times CIA - 25.7 \quad (2)$$

式中: T 为古温度($^{\circ}C$); (CIA) 为化学蚀变指数。

计算得出砒砂岩古温度为 10.67~22.78 $^{\circ}C$, 平均 17.68 $^{\circ}C$, 反映鄂尔多斯盆地早侏罗世相对温暖。研究表明, 砒砂岩中存在一定程度的钾交代作用, 导致 CIA 计算结果偏低。为了消除这一影响, Fedo C M 等^[24] 提出了斜长石蚀变指数(PIA), 规定

$$PIA = \frac{(Al_2O_3 - K_2O)}{(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O - K_2O)} \times 100 \quad (3)$$

式中: PIA 为斜长石蚀变指数, 各氧化物含量均为摩尔分数, CaO^* 的计算方法同计算 CIA 相同。

延安组砒砂岩 PIA 值为 70.48~97.13, 平均 89.76, 反映中等—强烈的风化程度和较温暖湿润的古气候。

3.2 物源特征

沉积岩的主、微量元素地球化学特征蕴藏着重要的源区信息。由于 Al, Ti 为惰性元素, 因此二者比率可用于指示源区。根据 Hayashi K I 等^[25] 等研究, $Al_2O_3/TiO_2 < 8$ 为基性岩物源区, $Al_2O_3/TiO_2 = 8 \sim 21$ 为中性岩物源区, $Al_2O_3/TiO_2 > 21$ 为酸性岩物源区。准格尔旗下侏罗统延安组砒砂岩样品 $Al_2O_3/TiO_2 = 21.20 \sim 36.01$, 平均值 29.54, 主要为酸性岩物源区。 $TiO_2-Al_2O_3$ 判别图(图 5)显示, 这些砒砂岩样品中砂岩和泥岩全部落入长英质火成岩源区, 粉砂岩位于长英质和中性岩分界线上。研究的砒砂岩 La/Th 为

2.09~7.04, 平均值 4.13, 在 $La/Th-Hf$ 二元判别图上(图 6), 绝大多数砒砂岩样品落入长英质物源区, 两个粉砂岩样品靠近安山岩岛弧物源, 说明延安组砒砂岩主要为长英质物源, 另外也存在少量安山岩混合物源^[26]。

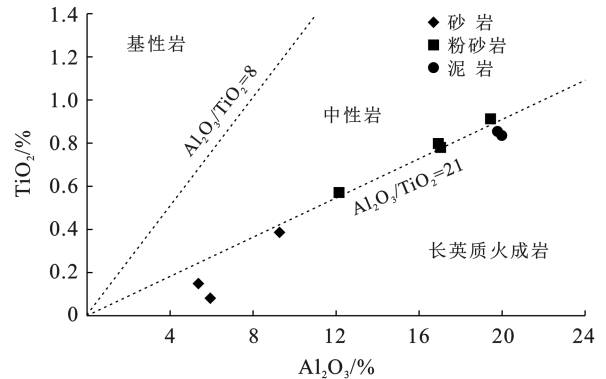


图 5 延安组砒砂岩 $TiO_2-Al_2O_3$ 物源判别^[25]
Fig.5 $TiO_2-Al_2O_3$ provenance discrimination of Yan'an Formation Pisha sandstone

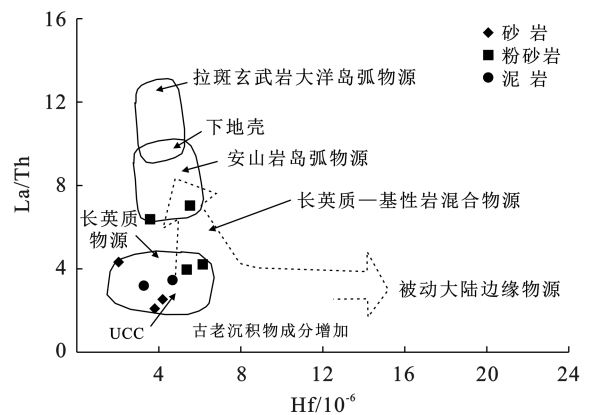


图 6 延安组砒砂岩 $La/Th-Hf$ 物源判别^[26]
Fig.6 $La/Th-Hf$ provenance discrimination of Yan'an Formation Pisha sandstone

稀土元素由于其稳定的化学性质而被用来指示物源。一般长英质物源具有较高的 LREE/HREE 和负 Eu 异常, 而基性物源 LREE/HREE 较低且没有明显的 Eu 异常^[27], 此类: Eu 异常是指 Eu 的含量相对于其他轻重稀土元素的含量出现显著偏差的现象, 用 δEu 表示。 $\delta Eu = Eu_N / (Sm_N \times Gd_N)^{1/2}$, N 为经球粒陨石标准化的比值。准格尔旗下侏罗统延安组砒砂岩 LREE/HREE 为 6.37~13.43, 平均 10.30, δEu 介于 0.68~0.86 之间, 平均 0.73, 砂岩、粉砂岩和泥岩之间差别不大, LREE/HREE 比较高, 负 Eu 异常也较为明显, 说明物源以长英质为主。在 $La/Yb-\Sigma REE$ 判别图(图 7)中, 除一个砂岩外, 其他砒砂岩样品均落在花岗岩区域, 表明物源以花岗岩类为主。研究表明, 太古宙地层 $(Gd/Yb)_N > 2$, $\delta Eu > 0.85$, 后太古宙

地层 $(Gd/Yb)_N < 2$, δEu 介于 0.65~1 之间^[16]。延安组砒砂岩样品 $(Gd/Yb)_N$ 为 1.56~2.22, 平均 1.86, 除一个样品 $(Gd/Yb)_N$ 等于 2.22, 一个样品 δEu 等于 0.86外, 其他样品 $(Gd/Yb)_N$ 均小于 2, δEu 介于 0.68~0.75 之间, 表明它们来源于后太古宙地层。

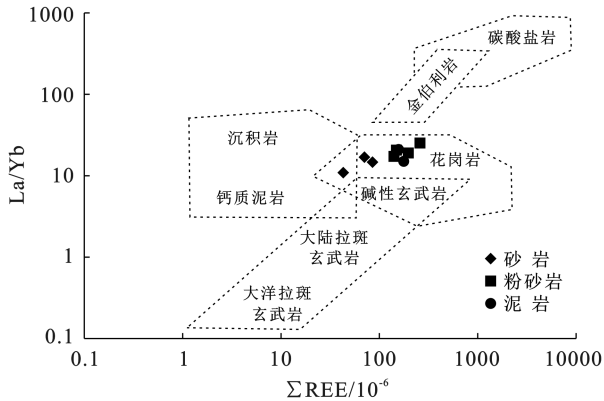


图7 延安组砒砂岩 La/Yb- Σ REE物源判别图^[28]

Fig.7 La/Yb- Σ REE provenance discrimination diagram for Yan'an Formation Pisha sandstone

大多数对延安组沉积岩的研究^[29-30]表明, 其物源主要来自北部阴山—大青山—乌拉山地区的前寒武纪变质岩、侵入岩以及海西—印支期侵入岩。内蒙古准格尔旗下侏罗统延安组砒砂岩稀土元素配分模式显示出与北部海西—印支期侵入岩高度相似的特征, 即轻稀土富集、重稀土平坦的特点(图3)。图7显示研究区物源主要为花岗岩类, 表明前寒武纪变质岩没有提供物源。结合前人发表的岩石年代学成果, 认为中—晚三叠世由于受软流圈和幔源物质上涌的影响, 鄂尔多斯盆地进入张性伸展盆地发展阶段, 盆地北部可提供稳定的物源供给。

4 结论

内蒙古准格尔旗下侏罗统延安组砒砂岩以 SiO_2 和 Al_2O_3 为主, 大部分主量元素含量低于平均上地壳 UCC, CIA 值介于 64.95~86.57 之间(平均 77.46), 说明其经历了中等至强烈的化学风化, 与研究区周边的中三叠统二马营组有相似的风化历史。地球化学分类图显示砒砂岩主要为页岩、亚长石砂岩和岩屑砂岩。大部分微量稀土元素在粉砂岩、泥岩中较砂岩更为富集, 主要是由于表生作用中岩石风化溶出的微量元素大多被黏土矿物吸附或水力分选所致。Zr/Sc 与 Th/Sc 关系显示砒砂岩成分成熟度、分选程度不高, 受后期循环改造影响较小。砒砂岩形成时古温度为 10.67~22.78℃(平均 17.68℃), PIA 值为 70.48~97.13(平均 89.76), 反映了延安组砒砂岩形成于干旱—半湿润的古气候条件。主、微量元素判别图

结合稀土元素配分模式显示, 延安组砒砂岩物源区为长英质岩石, 为鄂尔多斯盆地北部阴山—大青山地区的海西—印支期花岗岩类。

参考文献(References)

- [1] 姚纪明, 于炳松, 陈建强, 等. 中扬子北缘上侏罗统一白垩系沉积岩地球化学特征与构造背景分析[J]. 地球化学, 2009, 38(3): 231-241.
Yao Jiming, Yu Bingsong, Chen Jianqiang, et al. The geochemical characteristics of the Upper Jurassic to Cretaceous sedimentary rocks in north margin of the mid Yangtze and tectonic setting discrimination [J]. Geochimica, 2009, 38(3): 231-241.
- [2] Jian Xing, Guan Ping, Zhang Wei, et al. Geochemistry of Mesozoic and Cenozoic sediments in the northern Qaidam Basin, northeastern Tibetan Plateau: Implications for provenance and weathering [J]. Chemical Geology, 2013, 360: 74-88.
- [3] 李长明, 宋丽莎, 王立久. 砒砂岩的矿物成分及其抗蚀性[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(2): 11-16.
Li Changming, Song Lisha, Wang Lijiu. Mineral composition and anti-erodibility of Pisha sandstone [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(2): 11-16.
- [4] 王立久, 李长明, 董晶亮. 砒砂岩分布及岩性特征[J]. 人民黄河, 2013, 35(12): 91-93.
Wang Lijiu, Li Changming, Dong Jingliang. Study on distribution and lithologic characters of feldspathic sandstone [J]. Yellow River, 2013, 35(12): 91-93.
- [5] 杨具瑞, 方铎, 毕慈芬, 等. 砒砂岩区小流域沟冻融风化侵蚀模型研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(2): 87-93.
Yang Jurui, Fang Duo, Bi Cifen, et al. Study on the model of freeze-thaw and weathering erosion of smaller watershed in soft rock area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(2): 87-93.
- [6] 李晓丽, 于际伟, 刘李杰, 等. 鄂尔多斯砒砂岩力学特性的试验研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(5): 118-123.
Li Xiaoli, Yu Jiwei, Liu Lijie, et al. The experimental research on mechanical properties of Pisha-sandstone of Erdos [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(5): 118-123.
- [7] 张攀, 姚文艺, 刘国彬, 等. 砒砂岩区典型小流域复合侵蚀动力特征分析[J]. 水利学报, 2019, 50(11): 1384-1391.
Zhang Pan, Yao Wenyi, Liu Guobin, et al. Dynamic characteristics of complex erosion in a typical small watershed of soft sandstone area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(11): 1384-1391.
- [8] 张龙, 刘池洋, 雷开宇, 等. 鄂尔多斯盆地东北部侏罗系延安组漂白砂岩成因和古风化壳形成环境探讨[J]. 地质学

- 报, 2017, 91(6): 1345-1359.
- Zhang Long, Liu Chiyang, Lei Kaiyu, et al. White bleached sandstone genesis and paleo-weathered crust forming environment of the Jurassic Yanan Formation in the northeastern Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(6): 1345-1359.
- [9] 马艳萍, 刘池洋, 张复新, 等. 鄂尔多斯盆地东胜砂岩型高岭土矿特征及成因机制[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, 37(5): 929-936.
- Ma Yanping, Liu Chiyang, Zhang Fuxin, et al. Genesis and characteristics of the Dongsheng Kaolin deposits in Ordos Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2007, 37(5): 929-936.
- [10] 王愿昌, 吴永红, 寇权, 等. 砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J]. *中国水土保持科学*, 2007, 5(1): 14-18.
- Wang Yuanchang, Wu Yonghong, Kou Quan, et al. Definition of arsenic rock zone borderline and its classification [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, 5(1): 14-18.
- [11] 邓军, 王庆飞, 高帮飞, 等. 鄂尔多斯盆地演化与多种能源矿产分布[J]. *现代地质*, 2005, 19(4): 538-545.
- Deng Jun, Wang Qingfei, Gao Bangfei, et al. Evolution of Ordos Basin and its distribution of various energy resources [J]. *Geoscience*, 2005, 19(4): 538-545.
- [12] 陈瑞银, 罗晓容, 陈占坤, 等. 鄂尔多斯盆地中生代地层剥蚀量估算及其地质意义[J]. *地质学报*, 2006, 80(5): 685-693.
- Chen Ruiyin, Luo Xiaorong, Chen Zhankun, et al. Estimation of denudation thickness of Mesozoic strata in the Ordos Basin and its geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(5): 685-693.
- [13] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 耐火材料 X 射线荧光光谱化学分析熔铸玻璃片法: GB/T 21114-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Refractories Chemical analysis by X-ray fluorescence (XRF)-Fused cast-bead method: GB/T21114-2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [14] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 硅酸盐岩石化学分析方法 第 30 部分: 44 个元素量测定: GB/T 14506.30-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Methods for chemical analysis of silicate rocks-Part 30: Determination of 44 elements: GB/T14506.30-2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [15] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 1985: 328.
- [16] Herron M M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1988, 58(5): 820-829.
- [17] 宋土顺, 刘立, 王玉洁, 等. 鄂尔多斯盆地漂白砒砂岩特征及成因[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(5): 679-684.
- Song Tushun, Liu Li, Wang Yujie, et al. Characteristics and genesis of the bleached Pisha sandstone in Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(5): 679-684.
- [18] 张静然, 贾玉连, 申洪源, 等. 湖泊沉积物不同粒级组分的元素含量特征及其环境指示意义: 以内蒙古黄旗海为例[J]. *沉积学报*, 2011, 29(2): 381-387.
- Zhang Jingran, Jia Yulian, Shen Hongyuan, et al. Element Features in Different Grain Size Fractions of Lacustrine Sediment and Their Environmental Implication: A case study of Huangqihai Lake [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(2): 381-387.
- [19] Mohammedyasin M S, Wudie G. Provenance of the cretaceous debre libanos sandstone in the blue Nile Basin, Ethiopia: Evidence from petrography and geochemistry [J]. *Sedimentary Geology*, 2019, 379: 46-59.
- [20] 王挽琼, 徐仲元, 刘正宏, 等. 华北板块北缘中段早中二叠世的构造属性: 来自花岗岩类锆石 U-Pb 年代学及地球化学的制约[J]. *岩石学报*, 2013, 29(9): 2987-3003.
- Wang Wanqiong, Xu Zhongyuan, Liu Zhenghong, et al. Early-Middle Permian tectonic evolution of the central-northern margin of the North China Craton: Constraints from zircon U-Pb ages and geochemistry of the granitoids [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(9): 2987-3003.
- [21] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. *Nature*, 1982, 299: 715-717.
- [22] McLennan S M. Weathering and global denudation [J]. *Journal of Geology*, 1993, 101(2): 295-303.
- [23] Yang J, Cawood P A, Du Y, et al. Global continental weathering trends across the Early Permian glacial to postglacial transition: Correlating high- and low-paleolatitude sedimentary records [J]. *Geology*, 2014, 42(10): 835-838.
- [24] Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance [J]. *Geology*, 1995, 23(10): 921.

- Environmental Science, 2020,41(7):3426-3433.
- [25] 刘卉,周清明,黎娟,等.生物炭施用量对土壤改良及烤烟生长的影响[J].核农学报,2016,30(7):1411-1419.
Liu Hui, Zhou Qingming, Li Juan, et al. Effect of biochar application amount on the soil improvement and the growth of flue-cured tobacco [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016,30(7):1411-1419.
- [26] 张广雨,褚德朋,刘元德,等.生物炭及海藻肥对烟草生长、土壤性状及青枯病发生的影响[J].中国烟草科学,2019,40(5):15-22.
Zhang Guangyu, Chu Depeng, Liu Yuande, et al. Effects of biochar and seaweed fertilizers on tobacco growth, soil properties and bacterial wilt occurrence [J]. Chinese Tobacco Science, 2019,40(5):15-22.
- [27] 陈心想,何绪生,耿增超,等.生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J].生态学报,2013,33(20):6534-6542.
Chen Xinxiang, He Xusheng, Geng Zengchao, et al. Effects of biochar on selected soil chemical properties and on wheat and millet yield [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(20):6534-6542.
- [28] 陈温福,张伟明,孟军.农用生物炭研究进展与前景[J].中国农业科学,2013,46(16):3324-3333.
Chen Wenfu, Zhang Weiming, Meng Jun. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013,46(16):3324-3333.
- [29] Cornelissen G, Kukulska Z, Kalaitzidis S, et al. Relations between environmental black carbon sorption and geochemical sorbent characteristics [J]. Environmental Science & Technology, 2004,38(13):3632-3640.
- [30] 陈懿,陈伟,林叶春,等.生物炭对植烟土壤微生态和烤烟生理的影响[J].应用生态学报,2015,26(12):3781-3787.
Chen Yi, Chen Wei, Lin Yechun, et al. Effects of biochar on the micro-ecology of tobacco-planting soil and physiology of flue-cured tobacco [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015,26(12):3781-3787.
- [31] 张继旭,张继光,张忠锋,等.秸秆生物炭对烤烟生长发育、土壤有机碳及酶活性的影响[J].中国烟草科学,2016,37(5):16-21.
Zhang Jixu, Zhang Jiguang, Zhang Zhongfeng, et al. Effects of straw biochar on tobacco growth, soil organic carbon and soil enzyme activities [J]. Chinese Tobacco Science, 2016,37(5):16-21.
- [32] 牛政洋,闫仲,郭青青,等.生物炭对两种典型植烟土壤养分、碳库及烤烟产质量的影响[J].土壤通报,2017,48(1):155-161.
Niu Zhengyang, Yan Shen, Guo Qingqing, et al. Effects of biochar on yield and quality of flue-cured tobacco and nutrients and carbon pool in two typical soils planted with tobacco [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017,48(1):155-161.

(上接第 204 页)

- [25] Hayashi K I, Fujisawa H, Holland H D, et al. Geochemistry of 1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997,61(19):4115-4137.
- [26] Floyd P A, Leveridge B E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho Basin, south Cornwall; Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones [J]. Journal of the Geological Society, 1987,144(4):531-542.
- [27] Cullers R L. The controls on the major and trace element variation of shales, siltstones, and sandstones of Pennsylvanian-Permian age from uplifted continental blocks in Colorado to platform sediment in Kansas, USA [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994,58(22):4955-4972.
- [28] Allègre C J, Minster J F. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978,38(1):1-25.
- [29] 雷开宇,刘池洋,张龙,等.鄂尔多斯盆地北部侏罗系泥岩地球化学特征:物源与古沉积环境恢复[J].沉积学报,2017,35(3):621-636.
Lei Kaiyu, Liu Chiyang, Zhang Long, et al. Element geochemical characteristics of the Jurassic Mudstones in the Northern Ordos Basin: Implications for tracing sediment sources and paleoenvironment restoration [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35 (3): 621-636.
- [30] 俞初安,李彤,杨桐旭,等.鄂尔多斯盆地西南缘中下侏罗统地层物源及构造演化对铀成矿的制约[J].地球科学,2024,49(5):1793-1809.
Yu Reng'an, Li Tong, Yang Tongxu, et al. Provenance and tectonic evolution of the Middle and Lower Jurassic strata constraints on the uranium mineralization in southwest margin of Ordos Basin [J]. Earth Science, 2024,49(5):1793-1809.