

大兴安岭中南段下二叠统寿山沟组典型泥岩地球化学特征及其地质意义

周成林¹, 唐友军¹, 刘 彬²

1. 长江大学 资源与环境学院, 湖北 武汉 430100; 2. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100

摘 要: 西乌珠穆沁旗地区下二叠统寿山沟组泥岩为大兴安岭中南段发育的较好烃源岩. 通过对寿山沟组泥岩中的主量、微量、稀土元素特征的分析, 深入剖析了寿山沟组的物源、构造背景及其风化作用. 岩石样品 ICV 值分布于 1.15~1.57, 平均值为 1.33, 认为样品基本未受到二次成岩作用影响. 通过 A-CN-K 三角图判断寿山沟组泥岩受到一定的钾交代作用, 经过校正得到 CIA_{cor} 值为 54.28~70.06, 平均值为 65.33, 表明物源区经历了初等—中等的化学风化作用. 通过主量—微量元素多变量物源区环境分析, 认为寿山沟组泥质沉积物主要来源于长英质物源区, 且混有少量铁镁质火山岩源区物质, 其构造背景为大陆岛弧. 综合分析认为, 大兴安岭中南段下二叠统寿山沟组泥岩的沉积特征归因于古亚洲洋二叠纪初期洋壳的俯冲作用.

关键词: 寿山沟组; 泥岩; 地球化学; 物源; 风化作用; 构造背景; 大兴安岭

TYPICAL MUDSTONE OF THE LOWER PERMIAN SHOUSHANGOU FORMATION IN MIDDLE-SOUTH DAXINGANLING MOUNTAINS: Geochemical Characteristics and Geological Implications

ZHOU Cheng-lin, TANG You-jun, LIU Bin

1. School of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China;

2. School of Earth Sciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

Abstract: The mudstones of Lower Permian Shoushangou Formation in Xi Ujimqin Qi of Inner Mongolia are well-developed source rocks in middle-south Daxinganling Mountains. With study on the characteristics of major, trace and rare earth elements in the mudstones, the paper analyzes the provenance, tectonic setting and weathering of Shoushangou Formation in depth. The ICV values of rock samples ranging from 1.15 to 1.57 (averagely 1.33) show that the samples are basically not affected by secondary diagenesis. According to the A-CN-K triangular diagram, the mudstones are subjected to certain K-metasomatism. The CIA_{cor} values of 54.28–70.06 (averagely 65.33) are gained after correction, indicating the provenance has experienced primary-moderate weathering. Based on the analysis on the multivariable environment of major and trace elements, it is concluded that the argillaceous sediments of Shoushangou Formation are mainly derived from the felsic provenance, mixed with minus materials from the femic volcanic rock provenance, under the tectonic background of continental island arc. From the above, it is thought that the sedimentary

收稿日期: 2018-11-30; 修回日期: 2018-12-20. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局“松辽外围南部盆地群油气基础地质调查”项目(编号 DD20160167); 中国石油科技创新基金项目(编号 2017D-5007-0105).

作者简介: 周成林(1993—), 男, 土家族, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事岩石地球化学及油气地球化学研究, 通信地址 湖北省武汉市蔡甸区大学路特一号, E-mail//497462574@qq.com

通信作者: 唐友军(1975—), 男, 副教授, 博士研究生, 地球探测与信息技术专业, 主要从事油气地球化学研究, 通信地址 湖北省武汉市蔡甸区大学路特一号, E-mail//309378729@qq.com

features of the mudstones in the study area are attributed to the subduction of the Paleo-Asian Oceanic crust in early Permian.

Key words: Shoushangou Formation; mudstone; geochemistry; provenance; weathering; tectonic setting; Daxinganling Mountains

0 前言

近年来,东北地区上古生界的油气地质调查引起了广泛关注,其中早二叠世寿山沟组因发育有巨厚的暗色泥页岩而成为了研究重点^[1-4].前人通过对大兴安岭中南段寿山沟组的岩性组合及古生物的研究,总体上认为其沉积环境应为浅海—半深海^[5],有关有机地球化学研究认为寿山沟组泥岩干酪根为Ⅲ型,且见镜质体,生物标志化合物也指示有机质来源以高等植物为主^[6].尽管该区寿山沟组发育的暗色泥页岩具有一定的生油气潜力,但是对于该套泥页岩的沉积物源、形成的构造背景及其所经历风化作用等问题还缺乏深入的研究.

国内外大量研究表明,泥页岩中元素地球化学特征可以更好地示踪沉积岩的物源、构造背景及其风化作用^[7-12].关于内蒙古中东部地区二叠纪的构造背景问题至今仍未取得统一认识,部分学者认为古亚洲洋在二叠纪末—三叠纪初闭合,构造背景为古亚洲洋俯冲有关的大陆边缘弧、岛弧环境或弧后盆地^[13-15];还有部分学者认为古亚洲洋在二叠纪已经闭合,构造背景为古亚洲洋闭合后拉张环境下的陆内裂谷或裂陷槽环境^[16-19].寿山沟组为大兴安岭中南段地区二叠系最下部层位的结论现已被多数学者认可^[20-22].因此,本文通过对大兴安岭中南段内蒙古西乌旗塔宾庙林场寿山沟组中发育的暗色泥岩主量、微量元素等地球化学特征进行分析,厘定其物源区特征、风化作用及构造背景,以期为大兴安岭中南段早二叠世地质构造演化提供有价值的依据,同时为古亚洲洋闭合的时限提供可靠的信息.

1 区域地质概况及野外剖面位置

内蒙古西乌珠穆沁旗地区位于大兴安岭中南段,靠近松嫩地块与兴安地块的缝合带,在大地构造位置上属于松嫩地块西南缘(图1).该区寿山沟组发育良好,岩性相对稳定,沉积厚度大,有机质丰度高,且岩石

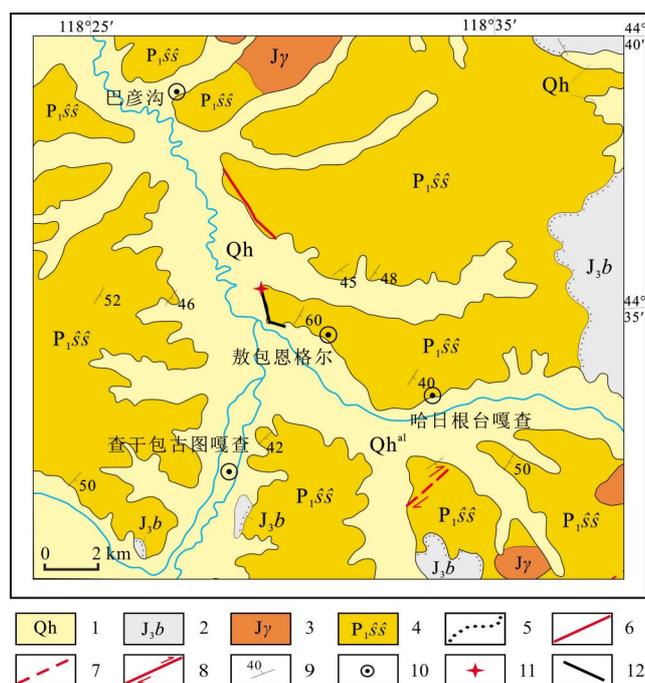


图1 内蒙古西乌珠穆沁旗塔宾庙地区地质简图及剖面位置
(据文献[5, 21]修改)

Fig. 1 Geological sketch map of Tabinmiao area in Xi Ujimqin Qi of Inner Mongolia and with profile position
(Modified from References [5, 21])

1—第四系(Quaternary); 2—白音高老组(Baiyingaolao fm.); 3—侏罗纪花岗岩(Jurassic granite); 4—寿山沟组(Shoushangou fm.); 5—岩相分界线(lithofacies boundary); 6—实测性质不明断层(surveyed fault); 7—推测性质不明断层(inferred fault); 8—平移断层(strike-slip fault); 9—岩层产状(attitude of strata); 10—地名(place name); 11—剖面起点(starting point of profile); 12—剖面位置(profile position)

变质作用较弱.通过对内蒙古西乌珠穆沁旗地区塔宾庙林场剖面进行实测,认为该区发育的寿山沟组为一套深水复理石建造^[5],岩性为暗色细碎屑岩沉积,局部夹有灰岩透镜体.这为烃源岩提供了非常好的岩性基础.

大兴安岭中南部二叠系地层自下而上依次为:寿山沟组、大石寨组、哲斯组、林西组^[21].寿山沟组为二叠纪最早的地层单位,前人通过地质调查认为寿山沟组地层呈超覆不整合于老的地层或地质体之上^[17].

2 样品采集及测试

本次研究的 12 件样品采自西乌珠穆沁旗塔宾庙地区的下二叠统寿山沟组(表 1),全部为暗色泥(页)岩. 将采集的样品自然风干,捣碎后取 100 g 以上用玛瑙研钵磨至 200 目的粒度,将筛选好的样品在 105 ℃ 烘干,用于之后的元素地球化学分析. 本次样品的主量元素、微量元素及稀土元素的测定均在自然资源部东北矿产资源监督检测中心完成. 主量元素在 X 射线荧光光谱仪 (AXIOS) 上测试,分析过程按国家标准 GB/T14506.28-2010 进行; 稀土元素与微量元素在电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS-XSeries II)上进行分

析,分析过程按国家标准 DZ/T0223-2001 等进行. 测试精度均优于 5%.

3 结果

如表 1 所示,寿山沟组泥岩 SiO₂ 含量为 60.37%~66.13%, 平均为 62.28%; Al₂O₃ 含量较高, 分布于 14.90%~17.14%之间,平均为 16.31%,符合泥质岩的特征. 样品 CaO 含量为 0.71%~1.88%, 平均 1.17%; K₂O 含量为 1.66%~3.71%, 平均 3.09%. 泥岩的 CaO 含量低于 MgO 含量,可能与泥岩中方解石和白云石丰度有关.

表 1 内蒙古西乌珠穆沁旗地区寿山沟组泥岩主量元素分析结果

Table 1 Major element contents of the mudstones from Shoushangou Formation in Xi Ujimqin Qi, Inner Mongolia

样品号	T606-1	T606-2	T606-3-1	T606-3-2	T606-5	T606-6	T606-7	T606-9	T606-10	T606-11	T606-12	T606-13	平均值	最小值	最大值
SiO ₂	62.58	61.74	63.06	62.05	60.37	61.66	66.13	61.14	63.07	62.44	61.17	61.97	62.28	60.37	66.13
Al ₂ O ₃	16.43	16.73	15.66	16.72	17.08	16.27	14.90	16.59	15.74	16.39	16.09	17.14	16.31	14.90	17.14
Fe ₂ O ₃ T	6.49	6.32	5.24	6.27	5.97	6.63	5.47	6.46	6.16	6.47	6.35	6.26	6.17	5.24	6.63
Fe ₂ O ₃	3.44	3.47	0.84	3.37	2.19	4.58	1.92	2.47	4.41	3.51	4.00	4.31	3.21	0.84	4.58
FeO	2.74	2.56	3.95	2.61	3.39	1.84	3.19	3.59	1.57	2.66	2.11	1.75	2.66	1.57	3.95
CaO	0.84	0.98	1.88	0.79	1.50	1.51	1.56	1.21	1.26	0.79	0.99	0.71	1.17	0.71	1.88
MgO	2.31	2.32	2.73	2.32	2.39	2.44	1.90	2.79	2.01	2.40	3.98	2.02	2.47	1.90	3.98
K ₂ O	3.09	3.29	2.02	3.41	3.71	2.67	1.66	3.34	3.57	3.47	3.21	3.61	3.09	1.66	3.71
Na ₂ O	2.67	2.86	4.73	2.89	2.60	2.83	4.46	3.25	2.13	2.67	2.65	2.68	3.04	2.13	4.73
TiO ₂	0.77	0.79	0.65	0.78	0.85	0.76	0.55	0.75	0.76	0.76	0.75	0.80	0.75	0.55	0.85
P ₂ O ₅	0.15	0.13	0.13	0.14	0.28	0.16	0.12	0.13	0.15	0.16	0.14	0.14	0.15	0.12	0.28
MnO	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.07
LOI	4.47	4.63	3.70	4.42	4.97	4.88	3.08	4.12	4.93	4.19	4.46	4.47	4.36	3.08	4.97
总和	99.53	99.55	99.39	99.54	99.38	99.66	99.53	99.43	99.68	99.48	99.61	99.64	99.53	99.38	99.68
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	21.28	21.31	24.28	21.38	20.16	21.32	27.04	22.18	20.68	21.59	21.48	21.34	22.00	20.16	27.04
Fe ₂ O ₃ T+MgO	8.80	8.64	7.96	8.60	8.36	9.07	7.37	9.25	8.17	8.88	10.34	8.28	8.64	7.37	10.34
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.26	0.27	0.25	0.27	0.28	0.26	0.23	0.27	0.25	0.26	0.26	0.28	0.26	0.23	0.28
Al/Na	3.55	2.01	3.52	3.99	3.50	2.03	3.10	4.49	3.73	3.69	3.89	2.15	3.30	2.01	4.49
Na/K	1.32	3.54	1.28	1.06	1.61	4.07	1.48	0.90	1.17	1.26	1.13	3.83	1.89	0.90	4.07
ICV	1.23	1.26	1.57	1.25	1.29	1.34	1.41	1.41	1.26	1.27	1.54	1.15	1.33	1.15	1.57
CIACorr	68.73	67.17	54.28	68.13	67.09	64.25	55.28	64.01	68.40	69.04	67.51	70.06	65.33	54.28	70.06
F1	-0.92	-0.97	0.25	-1.26	-1.58	-0.09	1.47	-1.30	-1.74	-1.58	-3.76	-0.99	-1.04	-3.76	1.47
F2	-3.58	-3.09	-3.95	-2.99	-2.33	-4.03	-3.94	-3.34	-2.60	-3.17	-5.27	-2.44	-3.39	-5.27	-2.33

注:样品由自然资源部东北矿产资源监督检测中心分析测试,含量单位%; Al/Na、Na/K 为分子摩尔比; ICV=(Fe₂O₃+K₂O+Na₂O+CaO+MgO+MnO+TiO₂)/Al₂O₃,式中氧化物以摩尔数为单位; F1、F2 函数数据 Roser and Korsch (1988).

寿山沟组泥岩稀土元素含量及特征如表2所示, ΣREE 为 $66.83 \times 10^{-6} \sim 188.69 \times 10^{-6}$, 均值为 118.63×10^{-6} , 低于北美页岩(图2a), 这可能与风化作用或有机质含量较高有关; $\Sigma \text{LREE} / \Sigma \text{HREE}$ 为 2.31~7.24, 均值为 6.17; $\delta \text{Eu} = 0.46 \sim 1.03$, 均值为 0.80, 为弱负异常; $\delta \text{Ce} = 0.80 \sim 0.95$, 均值为 0.86, 也为弱负异常, 可能指示样品原岩为偏酸性岩, 或沉积环境的弱氧化性。球粒陨石标准化配分型式均为轻稀土富集、重稀土平坦, 与海相沉积环境的稀土元素特征相似(图2b)。

4 讨论

4.1 风化作用

现在普遍认为泥质岩相比其他碎屑岩具有更好的均质性和低渗透性, 能将物源区信息更好地保留, 所以泥岩比与其共生的砂岩更能反映源区风化强度的变化^[7, 9-10, 22]。CIA 指数能很好地定量表示硅酸盐矿物的化学风化强度^[8]。目前认为碎屑沉积岩的 CIA 值在 50 左右可视为其物源区岩石基本未遭受化学风化, CIA 值在 50~60 之间反映了物源区弱的化学风化程度, CIA 值在 60~80 之间反映了中等的化学风化程度, CIA 值

在 80~100 之间反映了强烈的化学风化程度^[26-27]。

为了得到准确的 CIA 值, 还必须通过其他参数研究母岩在风化和沉积过程中是否还经历了二次成岩作用、钾交代作用等, 从而将影响因素排除^[28]。二次成岩过程可能使母岩物质再次风化, 从而导致 CIA 值偏大。为此前人提出了成分变异指数 ICV, 在研究物源区的风化程度时, 应当选取 $\text{ICV} > 1$ 的样品^[29-30]。寿山沟组泥岩的 ICV 值 1.15~1.57, 平均值为 1.33(表1), 可以认为样品基本未受到二次成岩作用影响, 可以进行下一步分析。

成岩作用过程中钾交代作用会使岩石样品中钾元素含量增加, 从而导致 CIA 计算值偏低, 所以需要进行校正。钾交代作用可用 A-CN-K 三角图 $[\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O}) - \text{K}_2\text{O}]$ 进行校正^[31-32]。图3中的实线 a 和 b 代表未发生钾交代作用的泥质岩风化趋势; 实线 d 代表发生钾交代作用的风化趋势。从图上可以看出内蒙古西乌珠穆沁旗地区下二叠统寿山沟组泥岩发生了钾交代作用, ①和②与①和③之间的范围分别表示泥质岩发生钾交代作用之后和之前的 CIA 值^[33]。校正公式如下:

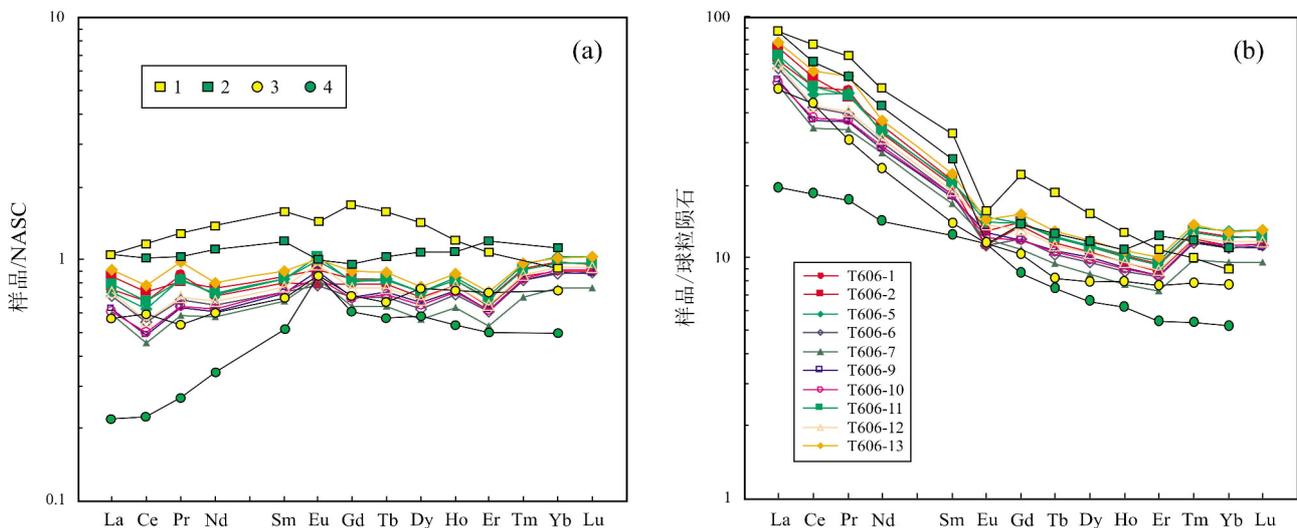


图2 寿山沟组泥岩与不同构造背景杂砂岩的稀土元素北美页岩标准化曲线和球粒陨石标准化曲线对比图
(据文献[23-25])

Fig. 2 Comparison between the NASC-normalized and chondrite-normalized REE patterns of the mudstones from Shoushangou Formation and greywackes of different tectonic settings

(After References [23-25])

1—被动大陆边缘(passive continental margin); 2—活动大陆边缘(active continental margin); 3—大陆岛弧(continental island arc); 4—大洋岛弧(oceanic island arc)

表 2 内蒙古西乌珠穆沁旗地区寿山沟组泥岩部分微量元素和稀土元素分析结果

Table 2 Trace element and REE contents of the mudstones from Shoushangou Formation

样品号	T606-1	T606-2	T606-3-1	T606-3-2	T606-5	T606-6	T606-7	T606-9	T606-10	T606-11	T606-12	T606-13	平均值	最小值	最大值
Th	6.56	7.51	3.67	25.27	6.53	6.36	4.46	6.09	6.52	6.80	6.51	8.41	7.89	3.67	25.27
Hf	4.96	5.85	3.22	6.63	5.53	5.19	4.13	5.38	5.23	5.50	5.48	6.39	5.29	3.22	6.63
Sc	15.48	16.92	14.64	16.42	18.27	16.36	12.82	17.89	17.62	17.55	18.00	16.45	16.54	12.82	18.27
La	24.01	27.25	13.52	28.39	23.56	22.55	18.95	20.04	19.49	25.47	23.36	28.92	22.96	13.52	28.92
Ce	49.04	53.81	22.90	55.13	45.39	40.00	32.93	35.69	36.28	48.95	40.51	56.87	43.12	22.90	56.87
Pr	6.80	6.40	3.31	7.94	6.58	5.39	4.64	4.99	5.06	6.46	5.53	7.77	5.91	3.31	7.94
Nd	23.40	25.17	13.69	29.65	23.53	21.47	19.21	19.99	20.59	23.98	22.13	26.41	22.44	13.69	29.65
Sm	4.59	4.86	2.80	9.18	4.76	4.20	3.84	4.13	4.19	4.73	4.38	5.14	4.73	2.80	9.18
Eu	0.98	1.12	0.88	1.38	1.23	0.97	1.04	1.11	1.05	1.28	1.19	1.25	1.12	0.88	1.38
Gd	4.12	4.31	2.41	9.15	4.26	3.65	3.31	3.61	3.60	4.24	3.98	4.66	4.28	2.41	9.15
Tb	0.67	0.70	0.41	2.17	0.71	0.60	0.54	0.62	0.61	0.70	0.65	0.75	0.76	0.41	2.17
Dy	4.03	4.28	2.54	15.73	4.28	3.63	3.26	3.83	3.74	4.24	3.98	4.49	4.84	2.54	15.73
Ho	0.81	0.86	0.52	3.27	0.88	0.74	0.65	0.77	0.76	0.85	0.81	0.91	0.99	0.52	3.27
Er	2.19	2.34	1.41	9.18	2.41	2.07	1.80	2.09	2.10	2.31	2.20	2.50	2.72	1.41	9.18
Tm	0.42	0.46	0.28	2.01	0.48	0.41	0.35	0.41	0.42	0.45	0.43	0.49	0.55	0.28	2.01
Yb	2.78	3.02	1.85	13.50	3.19	2.72	2.36	2.75	2.80	2.98	2.89	3.16	3.67	1.85	13.50
Lu	0.43	0.46	0.28	2.00	0.50	0.43	0.36	0.42	0.43	0.47	0.45	0.50	0.56	0.28	2.00
Th/Sc	0.42	0.44	0.25	1.54	0.36	0.39	0.35	0.34	0.37	0.39	0.36	0.51	0.48	0.25	1.54
La/Th	3.66	3.63	3.68	1.12	3.61	3.55	4.25	3.29	2.99	3.74	3.59	3.44	3.38	1.12	4.25
La/Sc	1.55	1.61	0.92	1.73	1.29	1.38	1.48	1.12	1.11	1.45	1.30	1.76	1.39	0.92	1.76
Ti/Zr	31.70	31.24	30.43	34.67	30.46	31.67	33.14	31.48	29.43	32.40	30.70	34.44	31.81	29.43	34.67
ΣREE	124.28	135.03	66.83	188.69	121.74	108.83	93.25	100.45	101.12	127.11	112.48	143.80	118.63	66.83	188.69
ΣLREE/ΣHREE	7.04	7.22	5.88	2.31	6.29	6.64	6.38	5.92	5.99	6.83	6.31	7.24	6.17	2.31	7.24
(Dy/Sm) _N	1.36	1.37	1.41	2.66	1.40	1.34	1.32	1.44	1.38	1.39	1.41	1.35	1.48	1.32	2.66
δEu	0.69	0.75	1.03	0.46	0.83	0.76	0.89	0.88	0.82	0.87	0.87	0.78	0.80	0.46	1.03
δCe	0.90	0.95	0.80	0.86	0.85	0.85	0.82	0.84	0.86	0.89	0.84	0.89	0.86	0.80	0.95

注:样品由自然资源部东北矿产资源监督检测中心分析测试,含量单位 10⁻⁶; δCe=Ce_N/(La_N×Pr_N)^{1/2}; δEu=Eu_N/(Sm_N×Gd_N)^{1/2}; N 表示球粒陨石标准化(Taylor and McLennan, 1985).

$$CIA_{corr} = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O_{corr})] \times 100 \quad (1)$$

$$K_2O_{corr} = [m \cdot Al_2O_3 + m \cdot (CaO^* + Na_2O)] / (1 - m) \quad (2)$$

式中氧化物以摩尔数为单位,其中 K₂O_{corr} 为未发生钾交代作用的泥质岩中 K₂O 的含量; m 值可通过图 3 得到,图中近似平行于 A-CN 连线的实线 a 的延长虚线与 CN-K 坐标轴的交点即为母岩的 m 值,从图中得到 m 值为 0.08; CaO* 是指硅酸盐矿物中的 CaO. 本次研究采用 McLennan 提出的 CaO* 校正方法^[11]:

CaO_{剩余} = CaO - P₂O₅ × 10/3, 如果 CaO_{剩余} < Na₂O, 则 CaO* = CaO_{剩余}; 如果 CaO_{剩余} > Na₂O, 则 CaO* = Na₂O. 计算后得到 CIA_{corr} 值为 54.28~70.06, 平均值为 65.33, CIA_{corr} 值基本都落在 50~70, 属于初等—中等风化强度.

4.2 物源

由于泥质岩的性质, 它们也被认为是最适合进行地球化学物源研究的碎屑岩^[34]. 根据 Roser and Korsch 提出的主量元素多变量物源区环境的判别函数^[35-36],

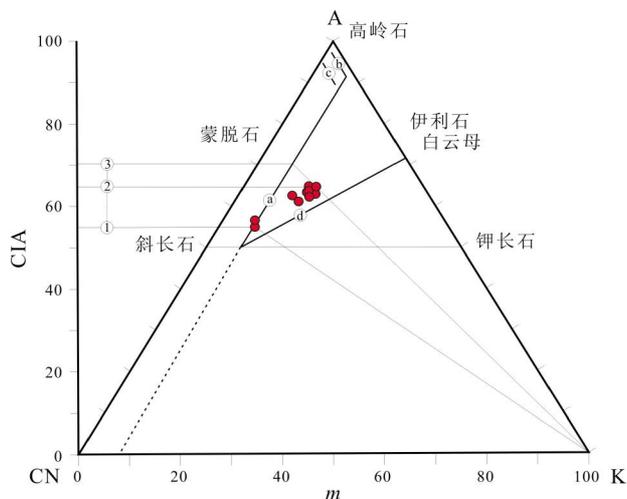


图 3 研究区寿山沟组泥岩 A-CN-K 图解
(据文献[26, 28]修改)

Fig. 3 The A-CN-K diagram of the mudstones from Shoushangou Formation
(Modified from References [26, 28])

寿山沟组泥岩样品基本落入富含石英质沉积岩物源区, 少量落入铁镁质火山岩物源区(图 4), 但是基本落在不同物源区的分界线附近, 可能指示物源的多源性。砂岩和泥岩中的 Al_2O_3/TiO_2 值一般与其母岩保持一致, 当沉积物 $Al_2O_3/TiO_2 < 14$ 时, 沉积物的母岩可能来自镁铁质岩; 而当 Al_2O_3/TiO_2 的值介于 19~28 时, 沉积物的母岩可能来源于长英质岩[37]。寿山沟组泥岩 Al_2O_3/TiO_2 值为 20.16~27.04, 平均值为 22.00, 说明样品母岩应该主要来源于长英质岩。

在风化、剥蚀以及沉积后作用过程中, 岩石中的 La、Th、Sc 等元素较为稳定, 元素含量基本不受影响, 因此常应用 La/Th、La/Sc 等值判别碎屑沉积岩物源属性[12, 38]。在 La/Th-Hf 图解中[39], 大多数样品落入长英质源区, 少数样品落入长英质/基性混合源区(图 5)。前人一般认为, 当 $Th/Sc < 1$ 时, 其物源为年轻未分异弧; $Th/Sc = 1$ 时, 其物源为古老大陆的上地壳; 当 $Th/Sc > 1$ 时, 其物源为再循环沉积岩[23]。样品 Th/Sc 的值为 0.25~1.54, 平均值为 0.48, 指示寿山沟组物源并非来源于古老克拉通。

4.3 构造背景

因为稀土元素和部分微量元素(如 Th、Sc、Zr)在岩石中的稳定性, 也被广泛地应用到物源区构造背景的研究中[39-42]。将寿山沟组的样品投影到 La-Th-Sc

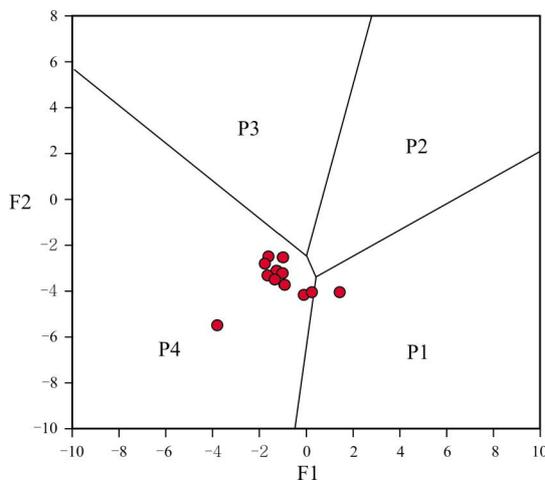


图 4 研究区寿山沟组泥岩 F2-F1 物源判别图解
(据文献[36])

Fig. 4 The F2-F1 provenance discrimination diagrams for the mudstones from Shoushangou Formation
(After Reference [36])

P1—铁镁质火山岩物源区 (femic volcanic rock); P2—中性火山岩物源区 (intermediate volcanic rock); P3—酸性火山岩物源区 (acid volcanic rock); P4—富含石英质沉积岩物源区 (quartz-rich sedimentary rock)

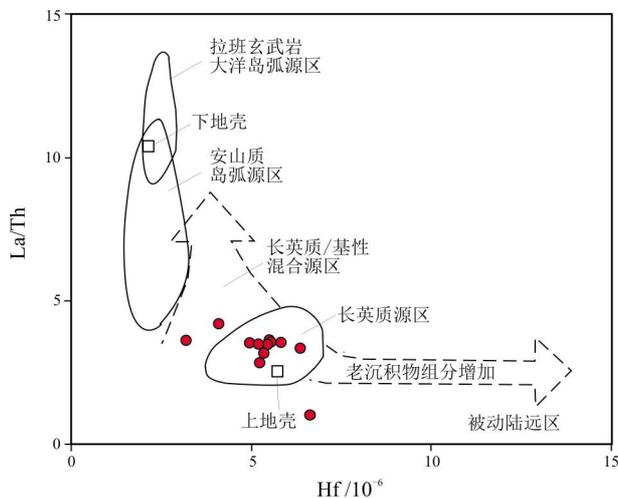


图 5 研究区寿山沟组泥岩源岩成分 Hf-La/Th 判别图
(据文献[37])

Fig. 5 The Hf-La/Th discrimination diagrams for source rock compositions of the mudstones from Shoushangou Formation
(After Reference [37])

及 La-Sc-Zr/10 三角图中, 可以发现样品基本落入大陆岛弧背景源区内(图 6)。在 La/Sc-Ti/Zr 判别图中, 样品也主要落入大陆岛弧构造环境, 但向大洋岛弧构造环境倾斜(图 7)。

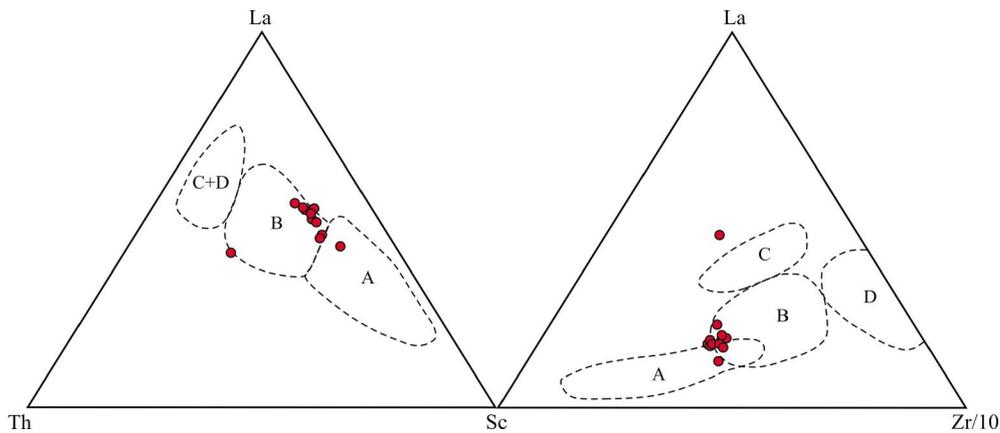


图6 研究区寿山沟组泥岩形成构造背景 La-Th-Sc 和 La-Sc-Zr/10 判别图
(据文献[40])

Fig. 6 The La-Th-Sc and La-Sc-Zr/10 discrimination diagrams for tectonic setting of the mudstones from Shoushangou Formation
(After Reference [40])

A—大洋岛弧(oceanic island arc); B—大陆岛弧(continental island arc); C—活动大陆边缘(active continental margin); D—被动大陆边缘(passive continental margin)

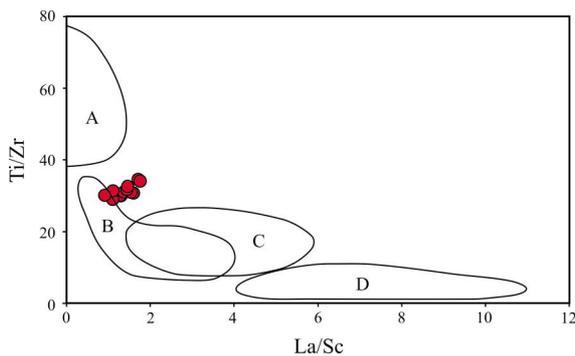


图7 研究区寿山沟组泥岩形成构造背景 La/Sc-Ti/Zr 判别图
(据文献[40])

Fig. 7 The La/Sc-Ti/Zr discrimination diagrams for tectonic setting of the mudstones from Shoushangou Formation
(After Reference [40])

A—大洋岛弧 (oceanic island arc); B—大陆岛弧 (continental island arc); C—活动大陆边缘(active continental margin); D—被动大陆边缘 (passive continental margin)

通过对西乌珠穆沁旗地区寿山沟组泥岩的稀土元素配分曲线与不同构造背景下杂砂岩^[25-26]的稀土元素配分曲线的对比分析,发现研究区寿山沟组泥岩的稀土元素球粒陨石标准化曲线和北美页岩标准化曲线的分布模式均与大陆岛弧杂砂岩的稀土元素配分曲线(图2)相似。

综合风化作用、物源分析及构造背景分析结果,笔者认为洋壳俯冲作用导致本区下二叠统寿山沟组泥岩

的沉积。板块俯冲作用使原本的浅海—半深海的还原环境变为氧化环境,使原岩受到弱的风化作用,但是这个过程并不影响沉积之后的有机质保存,而且洋壳俯冲作用还会造成大量的陆源物质进入海相沉积环境,形成了物源的多源性,有机质也呈现出海相与陆源输入为主的特点。

5 结论

通过对内蒙古西乌珠穆沁旗地区下二叠统寿山沟组泥岩样品开展系统的主量、微量元素地球化学研究,可以获得如下结论:

- 1)泥岩样品基本未受到二次成岩作用影响,但受到一定的钾交代作用,且风化强度为初等—中等级别。
- 2)主量元素地球化学特征指示寿山沟组泥质沉积物主要来源于长英质物源区,且混有少量铁镁质火山岩源区物质。

3)主量、微量元素地球化学特征综合分析表明,内蒙古西乌珠穆沁旗地区寿山沟组沉积时期的构造背景为大陆岛弧。推测古亚洲洋可能在早二叠世并未闭合,洋壳俯冲作用导致本区下二叠统寿山沟组泥岩的沉积。

参考文献:

- [1]张兴洲,周建波,迟效国,等. 东北地区晚古生代构造—沉积特征与油

- 气资源[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2008,38(5):719-725.
- [2]王成文,马志红,孙跃武,等. 晚古生代海相地层——东北地区油气勘查的一个新层系[J]. 世界地质,2008,27(2):113-118.
- [3]周建波,张兴洲,马志红,等. 中国东北地区的构造格局与盆地演化[J]. 石油与天然气地质,2009,30(5):530-538.
- [4]韩春元,金凤鸣,王静,等. 内蒙古二连盆地上古生界油气勘探前景[J]. 地质通报,2011,30(Z1):243-249.
- [5]公繁浩,黄欣,郑月娟,等. 内蒙古西乌旗下二叠统寿山沟组海底扇的发现及意义[J]. 地质与资源,2013,22(6):478-483.
- [6]公繁浩,黄欣,陈树旺,等. 内蒙古西乌珠穆沁旗地区寿山沟组烃源岩有机地球化学特征[J]. 地质通报,2013,32(8):1322-1328.
- [7]Wronkiewicz D J, Condie K C. Geochemistry and provenance of sediments from the Pongola Supergroup, South Africa: Evidence for a 3.0-Ga-old continental craton[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53(7):1537-1549.
- [8]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.
- [9]Nesbitt H W, Young G M, McLennan S M, et al. Effects of chemical weathering and sorting on the petrogenesis of siliciclastic sediments, with implications for provenance studies[J]. *Journal of Geology*, 1996, 104(5):525-542.
- [10]Nesbitt H W, Young G M. Petrogenesis of sediments in the absence of chemical weathering: Effects of abrasion and sorting on bulk composition and mineralogy[J]. *Sedimentology*, 1996, 43(2):341-358.
- [11]McLennan S M. Weathering and global denudation[J]. *Journal of Geology*, 1993, 101(2):295-303.
- [12]Cullers R L. The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, USA: Implications for provenance and metamorphic studies[J]. *Lithos*, 2000, 51(3):181-203.
- [13]陶继雄,白立兵,宝音乌力吉,等. 内蒙古满都拉地区二叠纪俯冲造山过程的岩石记录[J]. 地质调查与研究,2003,26(4):241-249.
- [14]李朋武,高锐,管焯,等. 内蒙古中部索伦-林西缝合带封闭时代的古地磁分析[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2006,36(5):744-758.
- [15]李大鹏,陈岳龙,王忠,等. 内蒙古中-东部兴蒙造山带古生代沉积记录:对物源特征及中亚造山带构造演化的指示[J]. 科学通报,2012,57(7):647-656.
- [16]吕志成,段国正,郝立波,等. 大兴安岭中段二叠系大石寨组细碧岩的岩石学地球化学特征及其成因探讨[J]. 岩石学报,2002,18(2):212-222.
- [17]鲍庆中,张长捷,吴之理,等. 内蒙古东南部西乌珠穆沁旗地区石炭纪一二叠纪岩石地层和层序地层[J]. 地质通报,2006,25(5):572-579.
- [18]晨辰,张志诚,郭召杰,等. 内蒙古达茂旗满都拉地区早二叠世基性岩的年代学、地球化学及其地质意义[J]. 中国科学:地球科学,2012,42(3):343-358.
- [19]徐备,赵盼,鲍庆中,等. 兴蒙造山带前中生代构造单元划分初探[J]. 岩石学报,2014,30(7):1841-1857.
- [20]胡兆珣,郑春子. 吉林桦甸早二叠统寿山沟组的苔藓虫[J]. 微体古生物学报,1984,1(1):72-81,117-118.
- [21]郑月娟,公繁浩,陈树旺,等. 内蒙古西乌珠穆沁旗地区下二叠统原寿山沟组碎屑锆石 LA-ICP-MSU-Pb 年龄及地质意义[J]. 地质通报,2013,32(8):1260-1268.
- [22]Garzanti E, Padoan M, Andò S, et al. Weathering and relative durability of detrital minerals in equatorial climate: Sand petrology and geochemistry in the East African Rift[J]. *Journal of Geology*, 2013, 121(6):547-580.
- [23]Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution, an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks[J]. *Journal of Geology*, 1985, 94(4):632-633.
- [24]Bhatia M R. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control[J]. *Sedimentary Geology*, 1985, 45(1):97-113.
- [25]刘彬,王学求. 长江中下游地区早古生代沉积岩地球化学特征及其构造背景与物源分析[J]. 大地构造与成矿学,2018,42(1):163-176.
- [26]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):921-924.
- [27]李徐生,韩志勇,杨守业,等. 镇江下蜀土剖面的化学风化强度与元素迁移特征[J]. 地理学报,2007,62(11):1174-1184.
- [28]徐小涛,邵龙义. 利用泥质岩化学蚀变指数分析物源区风化程度时的限制因素[J]. 古地理学报,2018,20(3):515-522.
- [29]Cox R, Lowe D R, Cullers R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59(14):2919-2940.
- [30]Kamp P C, Leake B E. Petrography and geochemistry of feldspathic and mafic sediments of the northeastern Pacific margin[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth Sciences*, 1985, 76(4):411-449.
- [31]Nesbitt H W, Young G M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(7): 1523-1534.
- [32]Nesbitt H W, Young G M. Formation and diagenesis of weathering Profiles[J]. *Journal of Geology*, 1989, 97(2):129-147.
- [33]Panahi A, Young G M, Rainbird R H. Behavior of major and trace elements (including REE) during Paleoproterozoic pedogenesis and diagenetic alteration of an Archean granite near Ville Marie, Québec, Canada[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(13): 2199-2220.

- [34] 闫臻, 王宗起, 王涛, 等. 秦岭造山带泥盆系形成构造环境: 来自碎屑岩组成和地球化学方面的约束[J]. 岩石学报, 2007, 23(5): 1023-1042.
- [35] Roser B P, Korsch R J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data[J]. Chemical Geology, 1988, 67(1): 119-139.
- [36] 田洋, 赵小明, 王令占, 等. 鄂西南利川三叠纪须家河组地球化学特征及其对风化、物源与构造背景的指示[J]. 岩石学报, 2015, 31(1): 261-272.
- [37] Girty G H, Ridge D L, Knaack C. Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite, Sierra Nevada, California[J]. Journal of Sedimentary Research, 1996, 66(1): 107-118.
- [38] 张力强, 顾雪祥, 章永梅, 等. 西天山博罗科努地区古生代地层物源分析及构造意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014, 33(5): 582-597.
- [39] 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.
- [40] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 1986, 92(2): 181-193.
- [41] 李双应, 杨栋栋, 等. 南天山中段上石炭统碎屑岩岩石学、地球化学、重矿物和锆石年代学特征及其对物源区、构造演化的约束[J]. 地质学报, 2014, 88(2): 167-184.
- [42] 路远发. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 2004, 33(5): 459-464.

(上接第 133 页 /Continued from Page 133)

参考文献:

- [1] 李锦铁, 高立明, 孙桂华, 等. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束[J]. 岩石学报, 2007, 23(3): 565-582.
- [2] 李锦铁, 曲军峰, 张进, 等. 中国北方造山区显生宙地质历史重建与成矿地质背景研究进展[J]. 地质通报, 2013, 32(2/3): 207-219.
- [3] 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 2009, 36(1): 1-28.
- [4] 刘训, 李廷栋, 耿树芳, 等. 中国大地构造区划及若干问题[J]. 地质通报, 2012, 31(7): 1024-1034.
- [5] 孙德有, 吴福元, 李惠民, 等. 小兴安岭西北部造山后 A 型花岗岩的时代及与索伦山-贺根山-扎赉特碰撞拼合带东延的关系[J]. 科学通报, 2000, 45(20): 2217-2222.
- [6] 付俊俊, 汪岩, 那福超, 等. 内蒙古哈达阳镁铁-超镁铁质岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征: 对嫩江-黑河地区晚泥盆世俯冲背景的制约[J]. 中国地质, 2015, 42(6): 1740-1753.
- [7] 白文吉, 杨经绥, 胡旭峰, 等. 内蒙古贺根山蛇绿岩岩石成因和地壳增生的地球化学制约[J]. 岩石学报, 1995, 11(S1): 112-124.
- [8] 包志伟, 陈森煌, 张桢堂. 内蒙古贺根山地区蛇绿岩稀土元素和 Sm-Nd 同位素研究[J]. 地球化学, 1994, 23(4): 339-349.
- [9] 赵春荆, 彭玉鲸, 党增欣, 等. 吉黑东部构造格架及地壳演化[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 1996: 2-36.
- [10] 孙德有, 吴福元, 高山, 等. 吉林中部晚三叠世和早侏罗世两期铝质 A 型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约[J]. 地学前缘, 2005, 12(2): 263-275.
- [11] 常丽华, 陈曼云, 金巍, 等. 透明矿物薄片鉴定[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 92-96, 150-161.
- [12] 卢良兆, 许文良. 岩石学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 54-62.
- [13] 徐夕生, 邱检生. 火成岩岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 2011: 170-172.
- [14] 常丽华, 曹林, 高福红. 火成岩鉴定手册[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 32-36.
- [15] 陈曼云, 金巍, 郑常青. 变质岩鉴定手册[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 83-105.