



# 海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

地球化学组成对浑善达克沙地与科尔沁沙地风化和沉积循环特征及其物源的指示

刘 璐, 谢远云, 迟云平, 康春国, 吴 鹏, 魏振宇, 张月馨, 张 曼

**Geochemical compositions of the Onqin Daga Sand Land and Horqin Sand Land and their implications for weathering, sedimentation and provenance**

LIU Lu, XIE Yuanyun, CHI Yunping, KANG Chunguo, WU Peng, WEI Zhenyu, ZHANG Yuexin, and ZHANG Man

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2020123102>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

[长江与黄河黏土粒级沉积物地球化学特征及其物源指示意义](#)

Geochemical characteristics of clay-sized sediments of the Yangtze and Yellow Rivers and their implications for provenance  
海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(3): 109

[西太平洋新不列颠海沟表层沉积物的地球化学特征及其物源指示](#)

The geochemical characteristics of the surface sediments in the New Britain Trench of the Western Pacific Ocean and their implications for provenance  
海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(3): 12

[冲绳海槽表层沉积物元素地球化学及其对物源和热液活动的指示](#)

Elemental geochemistry of surface sediments in Okinawa Trough and its implications for provenance and hydrothermal activity  
海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(2): 25

[中国东南入海河流沉积物的稀土元素地球化学特征](#)

Rare earth element geochemistry of the sediments from small rivers draining southeast China  
海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(1): 139

[青海湖湖东沙地全新世风成沉积物磁化率特征及其环境意义](#)

Magnetic susceptibility of aeolian sediments deposited since Holocene in the East of Qinghai Lake and its environmental implications  
海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(2): 175

[南海琼东南海域沉积物的微量元素地球化学特征及其对天然气水合物的指示意义](#)

TRACE ELEMENT GEOCHEMISTRY OF SEDIMENTS IN QIONGDONGNAN AREA, THE SOUTH CHINA SEA, AND ITS IMPLICATIONS FOR GAS HYDRATES

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(5): 70



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020123102

# 地球化学组成对浑善达克沙地与科尔沁沙地风化和沉积循环特征及其物源的指示

刘璐<sup>1</sup>, 谢远云<sup>1,2</sup>, 迟云平<sup>1,2</sup>, 康春国<sup>3</sup>, 吴鹏<sup>1</sup>, 魏振宇<sup>1</sup>, 张月馨<sup>1</sup>, 张曼<sup>1</sup>

1. 哈尔滨师范大学地理科学学院, 哈尔滨 150025

2. 哈尔滨师范大学寒区地理环境监测与空间信息服务黑龙江省重点实验室, 哈尔滨 150025

3. 哈尔滨学院地理系, 哈尔滨 150086

**摘要:** 对浑善达克沙地与科尔沁沙地河流砂和风成砂的细颗粒组分 ( $<10 \mu\text{m}$  和  $<63 \mu\text{m}$ ) 进行了地球化学元素 (常量、微量元素) 和 Sr-Nd 同位素分析, 评估了浑善达克沙地与科尔沁沙地的化学风化、沉积再循环特征和物质源区, 探讨了西拉沐沦河对两个沙地物质交换的贡献。浑善达克沙地与科尔沁沙地沉积物的地球化学分析 (低的 CIA 值、PIA 值和 CIW 值, 高的 WIP 和 ICV 值, 低的 Zr/Sc 比值以及 A-CN-K 和 MFW 图解等) 表明这些沉积物处于化学风化初期阶段, 成熟度低, 仅经历了简单的沉积再循环过程。物源判别图解表明浑善达克沙地与科尔沁沙地的母岩以中酸性花岗岩石为主, 并且具有一个混合源区, 华北克拉通北部的燕山褶皱带和中亚造山带东部的大兴安岭山脉分别为它们提供了物质来源。此外, 两个沙地的细颗粒物质 (特别是  $<10 \mu\text{m}$  组分) 在地球化学组成上具有很强的相似性, 我们认为西拉沐沦河起到关键的桥梁作用, 浑善达克沙地的细颗粒物质通过西拉沐沦河的搬运输送至科尔沁沙地, 同时, 地表盛行风的搬运也起到一定作用。

**关键词:** 地球化学; 化学风化; 沉积循环; 物源; 浑善达克沙地; 科尔沁沙地

中图分类号:P531

文献标识码:A

## Geochemical compositions of the Onqin Daga Sand Land and Horqin Sand Land and their implications for weathering, sedimentation and provenance

LIU Lu<sup>1</sup>, XIE Yuanyun<sup>1,2</sup>, CHI Yunping<sup>1,2</sup>, KANG Chunguo<sup>3</sup>, WU Peng<sup>1</sup>, WEI Zhenyu<sup>1</sup>, ZHANG Yuexin<sup>1</sup>, ZHANG Man<sup>1</sup>

1. College of Geographic Science, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

2. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Geographical Environment Monitoring and Spatial Information Service in Cold Regions, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

3. Geography Department, Harbin Institute, Harbin 150086, China

**Abstract:** Sand and fine sand fractions ( $<10 \mu\text{m}$  and  $<63 \mu\text{m}$ ) collected from the Onqin Daga Sand Land and the Horqin Sandy Land are analyzed for geochemical elements including major elements, trace elements, rare earth elements and Sr-Nd isotopes, in order to evaluate the chemical weathering, sedimentary characteristics, source areas, and the contribution of the Xar Moron River to the mass exchange between the two sands. The sediments are characterized by such features as low CIA, PIA and CIW values, high WIP and ICV values, low Zr/Sc ratio, A-CN-K and MFW diagram suggesting that the sediments are in the early stage of chemical weathering and low in maturity, and only experienced a simple process of sedimentary recycling. The provenance discrimination diagram shows that the parent rocks of Onqin Daga Sand and Horqin Sandy Land are dominated by intermediate-acid granitic rocks and have a mixed source from the western part of the Great Hinggan Mountains and the northern part of the North China Craton. In addition, the fine components, especially the component  $<10 \mu\text{m}$ , are very similar in geochemical composition for the two sandy areas, and it is believed that fine grain matters may have been transported from the Onqin Daga Sand Land to the Horqin Sand Land taking the Xar Moron River as a bridge. At the same time, atmospheric dust transport under prevailing winds may also play a certain role in fine sediment transportation.

**Key words:** geochemistry; chemical weathering; sediment recycling; provenance; Onqin Daga Sand Land; Horqin Sandy Land

---

资助项目:国家自然科学基金“钻井岩芯记录的松嫩平原松花江第四纪水系演化:对构造-地貌-气候变化的响应”(41871013); 黑龙江省自然科学基金“松嫩平原第四纪沉积记录对松花江水系演化及区域干旱化进程的响应”(LH2020D009)

作者简介:刘璐(1995—),女,硕士,主要研究方向为第四纪地质与环境变化, E-mail: 513596087@qq.com

通讯作者:谢远云(1971—),男,博士,教授,主要从事第四纪地质研究, E-mail: xyy0451@hrbnu.edu.cn

收稿日期:2020-12-31; 改回日期:2021-03-03。 文凤英编辑

沙地、沙漠等干旱环境下形成的地表沉积物占据了中国北方地区面积的大部分, 受冬季风的影响, 向下风向区域持续不断地输送大量粉尘, 因此中国北方地区是亚洲重要的粉尘排放源区之一<sup>[1-8]</sup>。沙地的形成和发展经过了一系列复杂的过程, 如粉尘的产生、搬运、沉积和成壤作用等, 使得后期的改造和风化作用的程度各不相同。因此, 了解沙地沉积物的风化程度, 评估后期改造的影响, 找出沉积物所代表的初始特征信息, 是风尘系统“源-汇”过程研究的重点<sup>[9]</sup>。粉尘传输过程还可能会引发扩散造成大气污染。因此, 研究沙地的物源对确定沙地物质来源、揭示沙漠物质源区和示踪来源物质的迁移路径提供更深层次的解读<sup>[10]</sup>。迄今为止, 尽管中亚大部分沙地的地球化学研究已经取得了较大进展, 但对中国东北地区的浑善达克与科尔沁沙地的风化、循环和物源示踪研究仍然很少涉及, 目前对于浑善达克沙地和科尔沁沙地的研究仅仅是通过少数几个样品来确定的, 存在较大的偶然性。

本文对浑善达克沙地与科尔沁沙地的地表沉积物进行横向大范围取样, 对其中的细颗粒物质( $<10\text{ }\mu\text{m}$  和  $<63\text{ }\mu\text{m}$ )进行地球化学元素及 Sr-Nd 同位素分析, 评估其化学风化程度、成熟度及沉积再循环特征, 并追踪其物质源区, 进而探讨西拉沐沦河对沙地间物质交换的连接作用。该研究有助于增强我们对东北平原西部沙地物质源区及迁移路径的理解。

## 1 自然地理概况

浑善达克沙地处在内蒙古高原中东部, 面积约为  $21400\text{ km}^2$ , 属于温带干旱-半干旱气候区, 年降水量约为  $200\sim350\text{ mm}$ , 广泛发育风蚀残丘和半固定-固定草丛沙堆<sup>[11]</sup>。科尔沁沙地地处内蒙古东南部的西辽河中下游地区(赤峰市和通辽市之间), 面积约为  $50600\text{ km}^2$ , 在中国北方是面积最大的沙地, 属于温带半干旱-半湿润的大陆性季风气候, 年降水量约为  $300\sim500\text{ mm}$ 。西拉沐沦河和老哈河共同被喻为母亲河(图 1), 它们联合滋养了这片土地。浑善达克沙地沙层覆盖广泛, 丘间平地较为开阔, 西北-东南走向的固定-半固定风成沙丘随处可见, 活动风成沙丘也分布其中。受太平洋暖低压和蒙古冷高压相互消长变化以及大兴安岭山脉的影响, 西北风是浑善达克沙地的主导风向, 而西南风是科尔沁沙地主导风向<sup>[12-13]</sup>。

为了沙地物源研究, 将浑善达克和科尔沁沙地

分为西、中、东三段。浑善达克沙地的东段包括克什克腾旗-达里若尔湖-乌兰布统, 沙地规模较小, 多以固定沙丘为主; 中段包括正蓝旗北部的乌日图-那日图-桑根达来等, 以大中型沙堆为主; 西段, 正镶白旗北部的乌兰察布和巴彦淖尔至苏尼特右旗, 以小型沙堆为主, 多在  $1\sim2\text{ m}$ , 地表明显粗化, 见大量因风蚀而残留下来的粗沙颗粒, 甚至含少量的细小砾石( $2\sim5\text{ mm}$ )。科尔沁沙地的东段, 即双辽-通辽-科左后旗一带, 以固定沙丘为主, 规模较小; 中段, 即开鲁-库伦旗一带, 以半固定-固定沙丘为主, 规模较东段大; 西段为奈曼旗至翁牛特旗区域, 沙丘规模达到最大, 以固定-半固定沙丘为主, 也见活动沙丘。

## 2 材料与方法

风成砂和河流砂经过风力和水力的充分搬运混合, 其细颗粒组分可代表较大区域的平均物质组成<sup>[14-16]</sup>, 本文所有样品来自沙地的风成砂和河流砂, 其中河流砂来源于河流阶地和现代河床, 风成砂是下伏河湖相沉积物经过风力再改造就地堆积的风积物, 在地貌上形成风成丘状。取样位置远离城镇, 地表取样深度  $<5\text{ cm}$ 。浑善达克沙地取样 26 个(风成砂 8 个, 河流砂 18 个), 其中东部沙地 12 个, 中部 10 个, 西部 4 个; 科尔沁沙地取样 38 个(风成砂 28 个, 河流砂 10 个), 其中东部沙地 19 个, 中部 9 个, 西部 10 个。

由于中国东北地区大部分黄土沉积物的颗粒粒径  $<63\text{ }\mu\text{m}$ <sup>[15]</sup>, 因此本研究选取  $<63\text{ }\mu\text{m}$  和  $<10\text{ }\mu\text{m}$  两个组分进行地球化学分析。这样选择的目的是消除风成黄土在搬运和沉积过程中矿物分选的影响, 并在同一粒度范围内对不同样品进行地球化学对比<sup>[16]</sup>。将样品分别经过 250 目和 1300 目标准筛进行筛分, 分别得到  $<63\text{ }\mu\text{m}$  和  $<10\text{ }\mu\text{m}$  两个组分的子样, 这些子样用于地球化学分析。

常量元素采用玻璃熔片法制备, 制备完成后, 用 XRF 光谱仪进行测量。微量元素和稀土元素采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定, 结果显示元素的相对误差都小于 2%。Sr 和 Nd 同位素比值用表面热电离同位素质谱仪测定。将浑善达克沙地与科尔沁沙地  $<63\text{ }\mu\text{m}$  组分的子样在  $0.5\text{ mol/L}$  的醋酸溶液中浸泡 4 h, 将酸不溶物烘干, 研磨至 200 目后分成两份进行  $\text{Sr}(\text{ }^{87}\text{Sr}/\text{ }^{86}\text{Sr})$  和  $\text{Nd}(\text{ }^{143}\text{Nd}/\text{ }^{144}\text{Nd})$  同位素比值测定。Sr 和 Nd 的分离采用标准离子交换法。浑善达克沙地与科尔沁沙地测定的 Sr 和 Nd 同位素比值分别用  $\text{ }^{86}\text{Sr}/\text{ }^{88}\text{Sr}=0.1194$  和  $\text{ }^{146}\text{Nd}/\text{ }^{144}\text{Nd}$

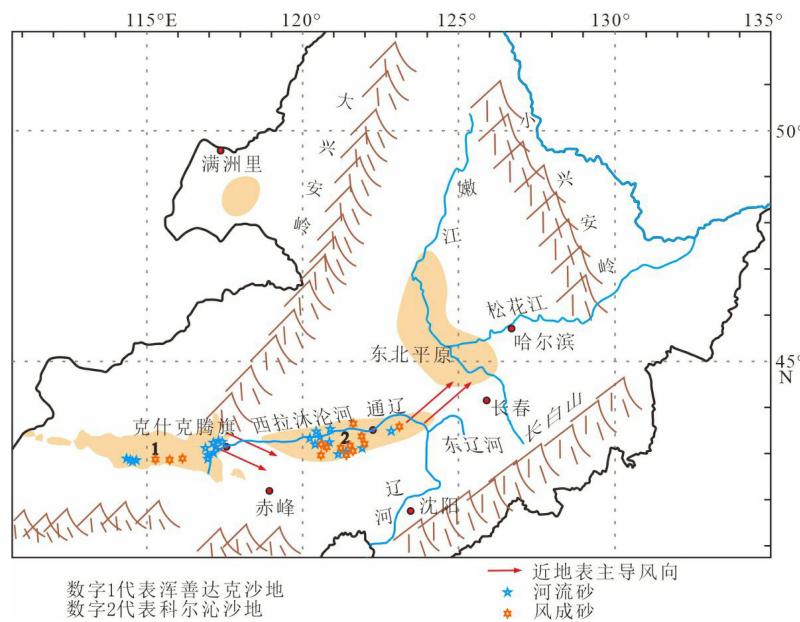


图1 浑善达克沙地、科尔沁沙地以及西拉沐沦河位置图

Fig.1 Location map of the Onqin Daga Sand Land, the Horqin Sandy Land and the Xar Moron River

$^{144}\text{Nd}=0.7219$  进行质量分馏校正。仪器的准确度分别对国际标样 NBS987 和 JMC 进行检测, 测定值分别为  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710250\pm7(2\sigma)$  和  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512109\pm3(2\sigma)$ 。Nd 同位素组成用  $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$  值表示, 采用  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512638$  的球粒陨石均一源(CHUR)现代值。

### 3 结果与分析

#### 3.1 常量元素

浑善达克与科尔沁沙地的常量元素分布特征呈现出高度的均一性(图2), 但是浑善达克沙地比科尔沁沙地的 CaO 含量略高(表1)。浑善达克与科

尔沁沙地与 UCC 相比,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$  和  $\text{P}_2\text{O}_5$  明显亏损,  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{K}_2\text{O}$  轻微亏损,  $\text{MnO}$ 、 $\text{TiO}_2$  明显富集,  $\text{SiO}_2$  的含量与 UCC 基本一致。浑善达克沙地  $<63\text{ }\mu\text{m}$  组分的  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{TiO}_2$  较  $<10\text{ }\mu\text{m}$  组分略高, 而  $\text{MgO}$  和  $\text{CaO}$  略低; 科尔沁沙地  $<63\text{ }\mu\text{m}$  组分的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{TiO}_2$  和  $\text{P}_2\text{O}_5$  略低于  $<10\text{ }\mu\text{m}$  组分, 而  $\text{K}_2\text{O}$  略高。

#### 3.2 微量元素

浑善达克与科尔沁沙地的微量元素分布表现出很强的相似性(图3)。浑善达克与科尔沁沙地和上地壳标准含量(UCC)相比, 过渡金属元素(TTE)中 Sc、Co、Ga、Ni、Zn 的含量中度亏损, 而 Cr 和

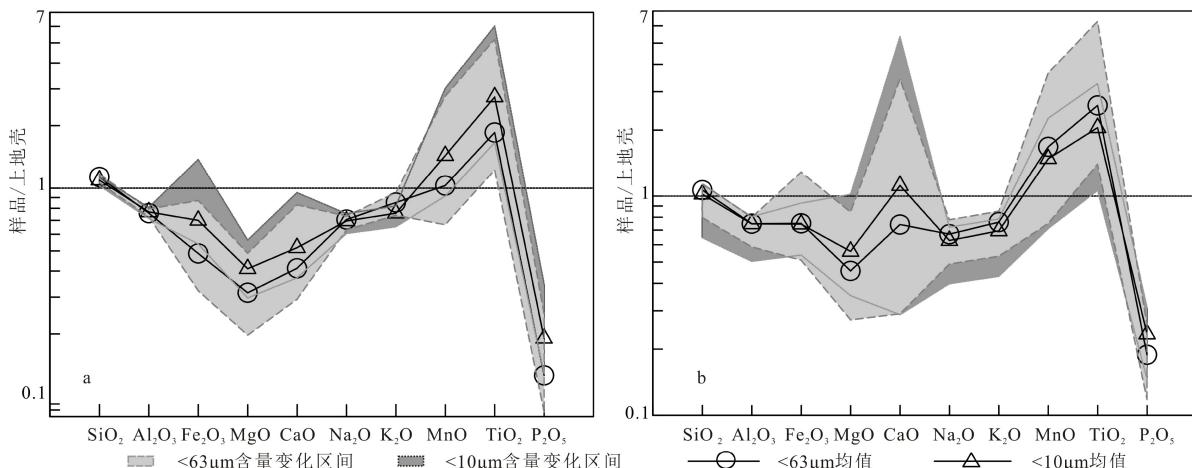


图2 科尔沁沙地(a)与浑善达克沙地(b)的常量元素组成

Fig.2 The composition of major elements for the Horqin Sand Land (a) and the Onqin Daga Sandy Land (b)

表 1 科尔沁沙地与浑善达克沙地的常量元素组成  
Table 1 Concentrations of major elements for the Horqin Sand Land and the Onqin Daga Sandy Land

样品号	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
T2 (<63 μm)	72.44	11.53	2.84	0.984	2.57	2.77	2.74	0.811	0.09
T3 (<63 μm)	64.26	11.23	2.73	1.56	5.99	2.34	2.61	0.694	0.106
T4 (<63 μm)	74.15	11.14	1.89	0.679	2.53	2.73	2.99	0.844	0.06
T5 (<63 μm)	71.4	11.33	2.13	0.83	2.98	2.73	2.89	0.602	0.086
T7 (<63 μm)	73.89	11.78	2.11	0.573	1.29	2.67	3.08	0.656	0.063
T8 (<63 μm)	75.18	11.7	1.95	0.526	1.27	2.81	3.06	0.71	0.055
T12 (<63 μm)	74.86	11.71	1.98	0.561	1.3	2.84	3.03	0.596	0.058
T13 (<63 μm)	73.07	11.82	2.37	0.65	1.32	2.64	3.06	0.796	0.074
T14 (<63 μm)	71.05	11.76	2.62	0.766	2.33	2.52	2.74	0.921	0.066
T15 (<63 μm)	73.74	11.87	2.49	0.691	1.4	2.67	2.84	0.823	0.042
T16 (<63 μm)	74.06	11.46	2.09	0.592	1.85	2.76	3	0.796	0.047
HQ1 (<63 μm)	73.65	11.34	2.04	0.711	2.43	2.58	2.96	0.791	0.056
HQ2 (<63 μm)	76	11.6	1.96	0.567	1.35	2.81	3.08	0.673	0.042
HQ3 (<63 μm)	71.15	11.44	4.36	1.01	2.47	2.71	2.52	2.6	0.124
HQ5 (<63 μm)	73.07	11.09	3.67	0.817	2.35	2.72	2.66	1.66	0.087
HQ6 (<63 μm)	74.83	11.49	2.54	0.719	1.54	2.73	2.95	0.913	0.066
HQ7 (<63 μm)	74.58	12.06	2.41	0.738	1.42	2.82	2.9	0.701	0.053
HQ8 (<63 μm)	74.53	11.19	2.75	0.789	2.02	2.71	2.68	0.965	0.081
HQ9 (<63 μm)	74.35	11.3	3.05	0.724	1.76	2.7	2.71	1.28	0.077
HQ10 (<63 μm)	75.45	11.33	2.42	0.672	1.58	2.84	2.87	0.968	0.064
HQ12 (<63 μm)	75.51	11.56	2.04	0.622	1.38	2.84	3.03	0.635	0.056
HQ13 (<63 μm)	75.1	11.66	2.28	0.715	1.44	2.79	2.88	0.701	0.066
HQ14 (<63 μm)	75.76	11.56	2.01	0.613	1.35	2.81	3.02	0.646	0.058
HQ15 (<63 μm)	75.44	11.77	2.1	0.642	1.34	2.81	3.02	0.65	0.06
HQ16 (<63 μm)	76.53	11.45	1.83	0.487	1.27	2.81	3.19	0.623	0.043
HQ17 (<63 μm)	75.28	11.73	2.08	0.611	1.34	2.76	2.98	0.611	0.057
HQ18 (<63 μm)	75.03	11.68	2.11	0.63	1.38	2.82	2.9	0.626	0.061
HQ19 (<63 μm)	74.01	11.81	2.3	0.811	2.04	2.68	2.8	0.892	0.056
HQ20 (<63 μm)	69.92	12.02	3.02	1.07	3.49	2.46	2.77	0.744	0.068
HQ21 (<63 μm)	75.42	11.27	2.42	0.609	1.87	2.86	2.81	1.48	0.053
HQ22 (<63 μm)	77.15	11.37	1.61	0.434	1.23	2.83	3.24	0.614	0.042
HQ23 (<63 μm)	75.7	11.45	2.03	0.56	1.33	2.8	2.95	0.68	0.053
HQ1 (<10 μm)	69.33	11.7	3.22	1.03	3.4	2.51	2.59	1.42	0.092
HQ2 (<10 μm)	73.69	11.99	2.85	0.791	1.7	2.84	2.78	1.03	0.067
HQ3 (<10 μm)	69.03	12.29	4.71	1.21	2.56	2.94	2.52	2.43	0.173
HQ5 (<10 μm)	67.93	10.86	6.88	1.1	3.01	2.53	2.22	3.01	0.166
HQ7 (<10 μm)	73.43	12.15	3.14	0.833	1.56	2.81	2.66	0.828	0.069
HQ8 (<10 μm)	71.87	11.27	4.11	0.981	2.42	2.62	2.4	1.47	0.119
HQ9 (<10 μm)	71.86	11.34	4.33	0.94	2.12	2.6	2.44	1.83	0.117
HQ10 (<10 μm)	73.83	11.47	3.28	0.837	1.82	2.75	2.58	1.21	0.095
HQ12 (<10 μm)	73.8	11.72	2.79	0.814	1.65	2.77	2.67	0.931	0.076

续表1

样品号	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%
HQ13 (<10 μm)	73.13	11.72	3.19	0.888	1.77	2.7	2.57	1.11	0.095	
HQ15 (<10 μm)	73.22	11.87	3.24	0.855	1.66	2.75	2.65	1.06	0.084	
HQ16 (<10 μm)	74.17	11.51	2.92	0.69	1.72	2.78	2.7	1.24	0.067	
HQ17 (<10 μm)	73.54	11.83	2.85	0.775	1.6	2.8	2.67	0.91	0.074	
HQ18 (<10 μm)	73.47	11.8	2.71	0.762	1.6	2.79	2.59	0.89	0.079	
HQ19 (<10 μm)	70.94	11.94	3.35	1.06	2.74	2.57	2.49	1.41	0.096	
HQ20 (<10 μm)	67.79	12.02	3.59	1.24	4	2.36	2.53	0.908	0.091	
HQ21 (<10 μm)	73.61	11.47	3.15	0.787	2.11	2.89	2.53	1.8	0.087	
HQ22 (<10 μm)	74.88	11.41	2.7	0.654	1.68	2.81	2.79	1.2	0.064	
OD1 (<63 μm)	74	11.45	3.13	0.764	1.93	2.88	2.85	1.27	0.084	
OD2 (<63 μm)	75	11.46	2.71	0.6	1.6	2.85	2.85	1.18	0.059	
OD3 (<63 μm)	73.98	11.62	3.37	0.731	1.77	2.81	2.81	1.45	0.07	
OD4 (<63 μm)	74.85	11.45	2.81	0.689	1.6	2.87	2.88	1.17	0.082	
OD6 (<63 μm)	66.42	12.15	3.51	1.46	4.71	2.31	2.67	0.716	0.121	
OD8 (<63 μm)	71.68	11.63	3.83	0.966	2.51	2.81	2.72	1.74	0.098	
OD9 (<63 μm)	74.4	11.86	2.94	0.776	1.54	2.87	2.9	0.882	0.08	
OD10 (<63 μm)	73.39	12.1	3.09	0.694	1.72	3.04	2.76	1.31	0.085	
OD11 (<63 μm)	73.02	11.9	3.11	0.843	1.53	2.66	2.76	1.05	0.095	
OD12 (<63 μm)	75.13	11.65	2.55	0.691	1.22	2.73	2.58	0.699	0.067	
OD13 (<63 μm)	69.07	11.33	5.38	0.963	2.34	2.54	2.56	3.14	0.088	
OD14 (<63 μm)	70.13	11.58	3.52	1	1.68	2.67	2.34	0.983	0.108	
OD15 (<63 μm)	68.61	11.13	6.43	1.11	2.71	2.48	2.45	2.15	0.129	
OD16 (<63 μm)	71.21	11.9	4	1.14	1.58	2.53	2.44	0.984	0.128	
OD17 (<63 μm)	68.73	11.46	5.3	1.2	2.7	2.4	2.37	1.4	0.121	
OD18 (<63 μm)	52.61	8.91	4.26	1.35	14.38	1.91	1.81	1.12	0.104	
OD19 (<63 μm)	69.05	10.53	2.72	1.86	4.28	2.27	2.47	0.709	0.079	
OD20 (<63 μm)	64.36	10.62	4.93	1.21	6.24	2.39	2.33	1.39	0.099	
OD1 (<10 μm)	71.61	11.65	4.18	0.987	2.22	2.71	2.56	1.46	0.135	
OD2 (<10 μm)	72.93	11.63	3.71	0.765	1.72	2.81	2.57	1.37	0.086	
OD3 (<10 μm)	71.55	11.93	4.56	0.95	1.94	2.75	2.54	1.63	0.11	
OD4 (<10 μm)	72.99	11.89	3.53	0.934	1.65	2.79	2.67	1.18	0.13	
OD6 (<10 μm)	62.62	12.23	4.13	1.78	5.7	2.03	2.43	0.797	0.155	
OD8 (<10 μm)	69.18	11.8	4.57	1.22	3.03	2.65	2.46	1.49	0.144	
OD9 (<10 μm)	73.24	12.01	3.13	0.959	1.62	2.75	2.66	0.956	0.109	
OD12 (<10 μm)	74.66	11.55	2.75	0.761	1.19	2.64	2.33	0.726	0.072	
OD15 (<10 μm)	70.65	12.01	4.19	1.28	2.25	2.47	2.46	0.963	0.142	
OD16 (<10 μm)	71.73	12.11	3.46	1.21	1.51	2.55	2.34	0.727	0.135	
OD17 (<10 μm)	68.15	12.02	4.64	1.36	2.75	2.35	2.33	1.02	0.134	
OD18 (<10 μm)	41.92	7.54	2.65	1.4	22.48	1.53	1.44	0.522	0.093	
OD19 (<10 μm)	65.54	10.63	3.17	2.24	5.4	2.16	2.24	0.743	0.102	
OD20 (<10 μm)	55.66	9.87	3.44	1.39	12.22	2.03	1.97	0.778	0.1	
UCC	66	15.2	5	2.2	4.2	3.9	3.4	0.5	0.5	

注: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>代表总铁含量, UCC为上陆壳。

V 轻度富集, Cu 含量变化大; 低场强元素(LFSE)中 Rb 轻度亏损, Sr 明显亏损, Ba、Pb、Cs 与 UCC 轻度富集或含量相当; 高场强元素(HFSE)中 Ta 明显亏损, Y 稍微富集或含量相当, Zr、Hf 和 Nb 含量相当或稍微亏损, Th 和 U 含量变化大。浑善达克沙地  $<63 \mu\text{m}$  组分相对于  $<10 \mu\text{m}$  组分具有更多的 Nb、Ta 和更少的 Co、Ni、Cu、Th、Sr、Cs; 科尔沁沙地  $<63 \mu\text{m}$  组分相对于  $<10 \mu\text{m}$  组分有较多的 Rb、Ba 元素, 其他元素均比  $<10 \mu\text{m}$  组分含量少。浑善达克沙地 Cr、Co、Ni 元素含量比科尔沁沙地轻度富集, Cu 元素比科尔沁沙地明显富集, 而 Rb 元素比科尔沁沙地轻度亏损。

### 3.3 稀土元素

浑善达克沙地与科尔沁沙地稀土元素总量( $\Sigma\text{REE}$ )分别为  $(121.84\sim386)\times10^{-6}$  和  $(89.10\sim386.16)\times10^{-6}$ , 平均值分别为  $213.27\times10^{-6}$  和  $210.63\times10^{-6}$ , 二者

均高于 UCC ( $146.37\times10^{-6}$ )、PAAS(后太古宙页岩) ( $184.77\times10^{-6}$ ) 以及地壳平均值 ( $178\times10^{-6}$ ), 它们均与 PASS 和 UCC 的稀土元素配分模式相似, 且都为明显的右倾型分布模式, 即轻稀土富集、重稀土亏损、显著 Eu 负异常的分布模式。球粒陨石标准化后的浑善达克与科尔沁沙地的 REE 分布曲线(图 4)彼此近于平行, 呈 V 字型, La-Eu 曲线较陡, Eu-Lu 曲线趋于平缓, 为 LREE 相对 HREE 富集, 分布曲线均为负斜率。所有样品的  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  值均小于 1, Eu 呈较为明显的负异常程度。它们的  $\text{Ce}/\text{Ce}^*$  均值为 0.9, 显示出轻微的负异常。浑善达克沙地  $<63 \mu\text{m}$  组分与  $<10 \mu\text{m}$  组分的稀土元素整体差别不大, 科尔沁沙地  $<63 \mu\text{m}$  组分的稀土元素略低于  $<10 \mu\text{m}$  组分。科尔沁沙地  $<63 \mu\text{m}$  的稀土元素比同粒级的浑善达克沙地波动范围大, 科尔沁沙地  $<10 \mu\text{m}$  的稀土元素要高于同粒级的浑善达克沙地。科尔沁沙地与浑善达克沙地相比 La、Ce、Pr、Nd、Sm 元素轻

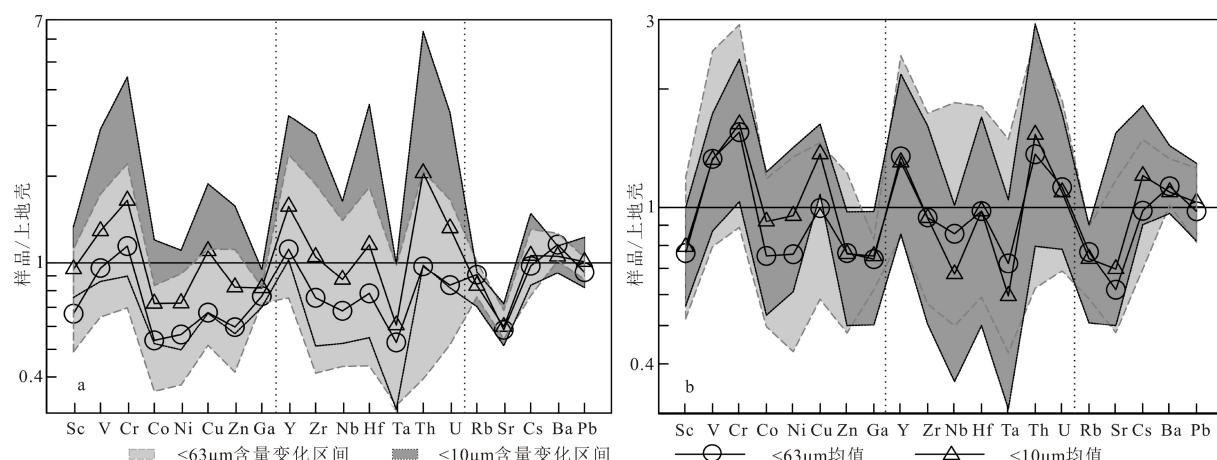


图 3 科尔沁沙地(a)与浑善达克沙地(b)的微量元素组成

Fig.3 The composition of trace elements for the Horqin Sand Land (a) and the Onqin Daga Sandy Land (b)

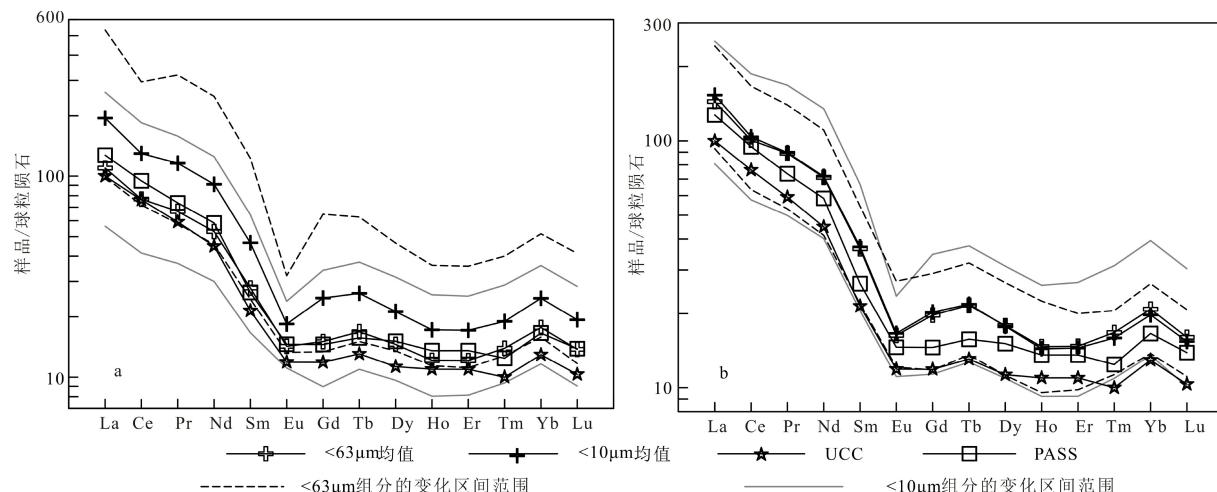


图 4 科尔沁沙地(a)与浑善达克沙地(b)的稀土元素分布模式

Fig.4 Distribution patterns of rare earth elements in the Sand of Horqin (a) and Onqin Daga (b)

度富集。

### 3.4 Sr-Nd 同位素

科尔沁沙地样品不同组分的 Sr-Nd 同位素组成均具有显著的差异(图 5),  $<63 \mu\text{m}$  组分  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值为  $0.709898\sim0.712122$ ,  $\varepsilon\text{Nd}(0)$  值为  $-12.39\sim-5.77$ ,  $<10 \mu\text{m}$  组分  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值为  $0.709436\sim0.712091$ ,  $\varepsilon\text{Nd}(0)$  值为  $-10.42\sim-4.27$ 。浑善达克沙地样品不同组分的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  和  $\varepsilon\text{Nd}(0)$  数据均表现出显著的变化,  $<63 \mu\text{m}$  组分  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值为  $0.709618\sim0.712293$ ,  $\varepsilon\text{Nd}(0)$  值为  $-14.98\sim-6.61$ ,  $<10 \mu\text{m}$  组分  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值为  $0.710638\sim0.712339$ ,  $\varepsilon\text{Nd}(0)$  值为  $-12.37\sim-6.38$ 。这种显著的变化表明了浑善达克沙地和科尔沁沙地 Sr-Nd 同位素组成的不均一性。

## 4 讨论

### 4.1 化学风化特征

化学风化指标是依据主量元素而计算,能够反映化学风化的强度,并通过选用的主量元素差异,建立多种类型的化学风化指标,如 CIA、CIW、WIP 和 PIA 等(见表 2)。为了克服单一指标可能存在的偏差,本文同时采用了上述 4 个指标,以清晰地反映化学风化作用强度的变化。元素地球化学循环的重要环节之一是化学风化过程,而化学蚀变指数(CIA)是衡量沉积物化学风化强度的一个重要指

标,被广泛应用在风尘物源的研究中<sup>[17]</sup>。CIA 值通常也被用于探究古气候环境演化,公式为:  $\text{CIA}=[\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}^*+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})]\times100$ 。其中,  $\text{CaO}^*$  的分子量仅为硅酸盐中的含量。当  $\text{CaO}>\text{Na}_2\text{O}$  的摩尔数时认为  $m\text{CaO}^*=m\text{Na}_2\text{O}$ , 当  $\text{CaO}\leqslant\text{Na}_2\text{O}$  的摩尔数时则  $m\text{CaO}^*=m\text{CaO}$ <sup>[18]</sup>。样品中长石风化成黏土矿物的程度可以通过 CIA 值有效地表示出来。比值越小就表示处在干冷的气候条件下且基本未遭受后期风化的作用,比值越大就代表沉积物处在温暖潮湿的环境中,所经历的风化程度越强。浑善达克沙地和科尔沁沙地的 CIA 值处于很窄的范围内,科尔沁沙地  $<63 \mu\text{m}$  组分的 CIA 值为  $49.22\sim54.07$ ,  $<10 \mu\text{m}$  组分的 CIA 值为  $50.29\sim54.40$ ; 浑善达克沙地  $<63 \mu\text{m}$  组分的 CIA 值为  $49.40\sim55.92$ ,  $<10 \mu\text{m}$  组分的 CIA 值为  $50.89\sim56.93$ , 它们均接近于 UCC, 表明二者均处于弱风化-初等风化程度。两个沙地沉积物的 CIA 值均低于 60, 暗示了浑善达克与科尔沁沙地经历了长期且稳定的寒冷干燥气候环境。同组分的浑善达克沙地沉积物 CIA 值比科尔沁沙地略高,也说明浑善达克沙地沉积物的风化程度和气候干冷程度要略微高于科尔沁沙地。

由于 CIA 在细碎屑岩的成岩过程中可能会受到 K 交代作用的影响,使得源岩的化学成分发生改变。因此,对于化学风化指标(CIW),需要在 CIA 的基础上除去 K 含量变化的影响。CIW 也被广泛应用于判断物质源区的化学风化程度和古气候条件<sup>[19-20]</sup>,并且可以有效避免钾在成岩作用或变

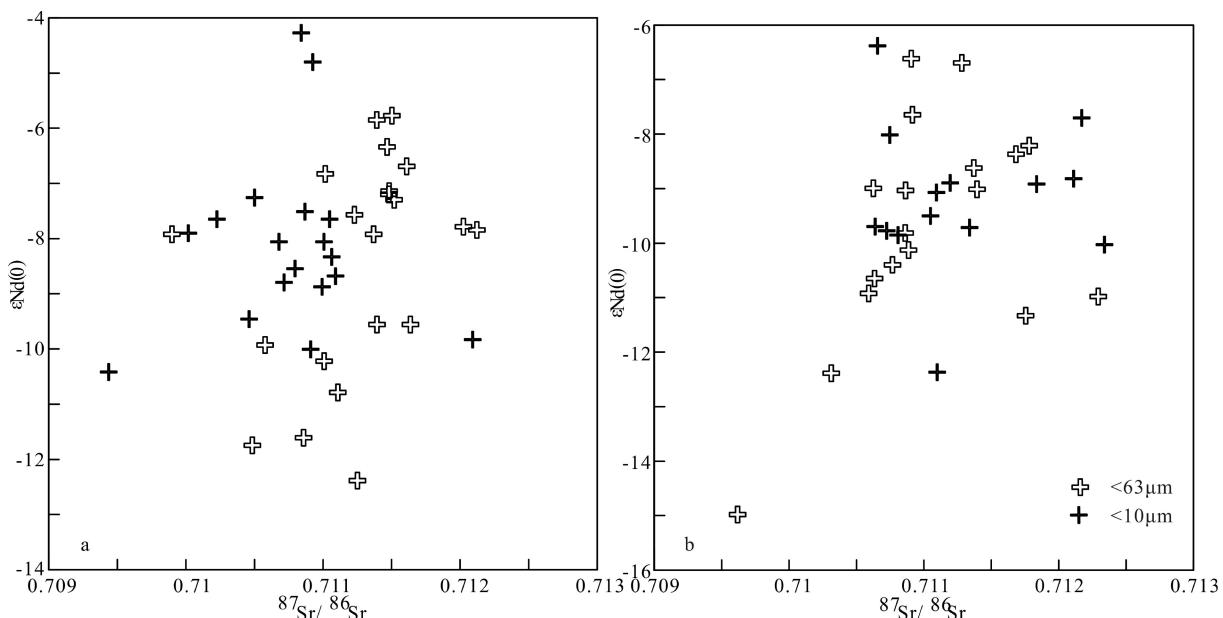


图 5 科尔沁沙地(a)与浑善达克沙地(b)的 Sr-Nd 同位素组成对比

Fig.5 Sr-Nd isotope compositions of the Horqin Daga Sand Land (a) and the Onqin Sandy Land (b)

表 2 科尔沁沙地与浑善达克沙地 CIA、CIW、PIA、WIP 值  
Table 2 CIA, CIW, PIA, WIP values of the Horqin Daga Sand Land and the Onqin Sandy Land

样品名	CIA	CIW	PIA	WIP	样品名	CIA	CIW	PIA	WIP
T2 (<63 μm)	49.01	56.10	48.67	57.84	HQ3 (<10 μm)	50.97	57.50	51.26	57.86
T3 (<63 μm)	51.60	59.33	52.17	53.50	HQ5 (<10 μm)	50.29	56.61	50.38	51.10
T4 (<63 μm)	47.73	55.43	46.85	58.75	HQ7 (<10 μm)	54.40	62.47	55.93	54.60
T5 (<63 μm)	48.32	55.78	47.70	58.35	HQ8 (<10 μm)	50.52	57.20	50.68	53.07
T7 (<63 μm)	54.25	64.12	56.14	55.49	HQ9 (<10 μm)	51.91	59.07	52.52	52.36
T8 (<63 μm)	53.61	63.23	55.19	56.46	HQ10 (<10 μm)	52.42	60.11	53.25	53.95
T12 (<63 μm)	53.47	62.92	54.96	56.64	HQ12 (<10 μm)	53.28	61.36	54.45	54.47
T13 (<63 μm)	54.44	64.27	56.40	55.30	HQ13 (<10 μm)	53.40	61.17	54.56	53.42
T14 (<63 μm)	51.21	58.82	51.63	54.40	HQ15 (<10 μm)	53.73	61.77	55.04	54.23
T15 (<63 μm)	54.47	63.44	56.23	54.13	HQ16 (<10 μm)	52.35	60.40	53.21	54.68
T16 (<63 μm)	50.90	59.51	51.27	57.18	HQ17 (<10 μm)	53.60	61.70	54.88	54.52
HQ1 (<63 μm)	49.22	57.19	48.91	56.89	HQ18 (<10 μm)	53.82	61.73	55.13	53.69
HQ2 (<63 μm)	52.91	62.43	54.19	56.99	HQ19 (<10 μm)	51.69	58.54	52.21	53.74
HQ3 (<63 μm)	50.10	56.91	50.13	55.11	HQ20 (<10 μm)	53.35	60.75	54.43	52.17
HQ5 (<63 μm)	49.24	56.48	48.98	55.68	HQ21 (<10 μm)	50.74	57.76	50.98	55.44
HQ6 (<63 μm)	52.64	61.68	53.73	55.97	HQ22 (<10 μm)	51.94	60.24	52.68	55.53
HQ7 (<63 μm)	54.07	62.95	55.67	56.17	OD1 (<63 μm)	50.68	58.71	50.93	57.56
HQ8 (<63 μm)	50.77	58.48	51.04	54.86	OD2 (<63 μm)	52.06	60.57	52.86	56.07
HQ9 (<63 μm)	52.06	60.22	52.83	54.19	OD3 (<63 μm)	51.99	60.21	52.74	56.12
HQ10 (<63 μm)	51.87	60.50	52.62	56.28	OD4 (<63 μm)	52.01	60.62	52.81	56.68
HQ12 (<63 μm)	52.79	62.11	53.98	57.02	OD6 (<63 μm)	53.65	61.52	54.90	53.39
HQ13 (<63 μm)	53.39	62.30	54.75	55.66	OD8 (<63 μm)	49.40	56.48	49.20	57.81
HQ14 (<63 μm)	53.08	62.48	54.40	56.55	OD9 (<63 μm)	53.08	61.79	54.29	56.95
HQ15 (<63 μm)	53.58	62.98	55.10	56.60	OD10 (<63 μm)	52.55	60.41	53.45	57.54
HQ16 (<63 μm)	52.66	62.63	53.90	57.50	OD11 (<63 μm)	54.51	63.18	56.22	53.93
HQ17 (<63 μm)	53.79	63.15	55.38	55.72	OD12 (<63 μm)	55.47	64.00	57.46	51.93
HQ18 (<63 μm)	53.50	62.50	54.91	55.74	OD13 (<63 μm)	50.72	57.92	50.96	53.55
HQ19 (<63 μm)	51.71	59.64	52.33	55.80	OD14 (<63 μm)	54.33	61.68	55.69	51.22
HQ20 (<63 μm)	51.99	59.76	52.69	54.89	OD15 (<63 μm)	50.71	57.70	50.94	52.51
HQ21 (<63 μm)	50.53	58.53	50.73	56.56	OD16 (<63 μm)	55.92	63.86	57.88	50.85
HQ22 (<63 μm)	52.44	62.59	53.61	57.86	OD17 (<63 μm)	52.26	59.20	52.95	51.15
HQ23 (<63 μm)	53.12	62.39	54.44	55.68	OD18 (<63 μm)	51.93	58.64	52.50	41.16
HQ1 (<10 μm)	51.39	58.62	51.84	53.82	OD19 (<63 μm)	50.92	58.50	51.24	52.34
HQ2 (<10 μm)	53.02	61.18	54.12	56.14	OD20 (<63 μm)	50.54	57.46	50.71	50.73
OD1 (<10 μm)	51.53	58.75	52.03	54.72	OD12 (<10 μm)	56.57	64.57	58.73	49.07
OD2 (<10 μm)	52.94	60.64	53.94	54.00	OD15 (<10 μm)	53.38	60.56	54.43	52.52
OD3 (<10 μm)	53.07	60.48	54.06	54.18	OD16 (<10 μm)	56.93	64.65	59.10	50.18
OD4 (<10 μm)	53.87	62.01	55.25	54.81	OD17 (<10 μm)	53.95	60.85	55.11	50.68
OD6 (<10 μm)	56.76	64.68	58.95	49.01	OD18 (<10 μm)	53.34	59.96	54.28	33.77
OD8 (<10 μm)	50.89	57.51	51.15	54.86	OD19 (<10 μm)	52.71	59.93	53.57	50.17
OD9 (<10 μm)	54.32	62.47	55.84	54.41	OD20 (<10 μm)	52.82	59.64	53.65	44.01

质过程中的迁移。其表达式为:  $CIW = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O) \times 100$ , 科尔沁沙地和浑善达克沙地均表现出较低的 CIW 值, 科尔沁沙地  $< 63 \mu m$  组分的 CIW 值为  $56.48 \sim 63.15$ ,  $< 10 \mu m$  组分的 CIW 值为  $56.61 \sim 62.47$ ; 浑善达克沙地  $< 63 \mu m$  组分的 CIW 值为  $56.48 \sim 64.00$ ,  $< 10 \mu m$  组分的 CIW 值为  $57.51 \sim 64.68$ , 表明浑善达克与科尔沁沙地仅仅经历了低等程度的化学风化, 并处在化学风化的初级阶段。浑善达克与科尔沁沙地的 CIW 值均小于 70, 暗示了气候相对干冷。对于  $< 63 \mu m$  和  $< 10 \mu m$  组分沉积物, 浑善达克沙地的 CIW 值均高于科尔沁沙地, 说明浑善达克沙地的化学风化程度和环境干冷度比科尔沁沙地略高, 这也与 CIA 值一致。

由于 CIW 在处理富钾长石的岩石时, 数值会变高, 于是产生了 CIW 的替代指标 PIA, 其值与 CIA 的一致性较好。为了减小后期成岩作用和交代作用的影响, Fedo 等<sup>[21]</sup> 提出采用斜长石蚀变指数(PIA)来校正斜长石的风化作用, 能够更加精确地推断源区的风化程度及物源区古气候环境。其表达式为:  $PIA = [(Al_2O_3 - K_2O) / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O - K_2O)] \times 100$ 。科尔沁沙地和浑善达克沙地均表现出较低的 PIA 值, 科尔沁沙地  $< 63 \mu m$  组分的 PIA 值为  $48.91 \sim 55.67$ ,  $< 10 \mu m$  组分的 PIA 值为  $50.38 \sim 55.93$ ; 浑善达克沙地  $< 63 \mu m$  组分的 PIA 值为  $49.20 \sim 57.88$ ,  $< 10 \mu m$  组分的 PIA 值为  $51.15 \sim 59.10$ , 表明二者的沉积物处于化学风化的初等阶段。可以通过 PIA 值看出, 无论是  $< 63 \mu m$  还是  $< 10 \mu m$  组分的两个沙地, 浑善达克沙地的化学风化和气候干冷度比科尔沁沙地略高。

Parker<sup>[22]</sup> 提出的包括碱性和碱土金属元素的化学风化指数(WIP)也反映不同的古气候条件, 但是 WIP 适用范围较窄, 仅仅包括碱性和碱土金属元素。计算公式为:  $WIP = 100 \times [(2Na_2O / 0.35) + (MgO / 0.9) + (2K_2O / 0.25) + (CaO^* / 0.7)]$ , WIP 对沉积循环和分选作用引起的石英和锆石富集更为敏感。科尔沁沙地和浑善达克沙地均展现出较高的 WIP 值, 科尔沁沙地  $< 63 \mu m$  组分的 WIP 值为  $54.19 \sim 57.86$ ,  $< 10 \mu m$  组分的 WIP 值为  $51.10 \sim 57.86$ ; 浑善达克沙地  $< 63 \mu m$  组分的 WIP 值为  $41.16 \sim 57.81$ ,  $< 10 \mu m$  组分的 WIP 值为  $33.77 \sim 54.86$ , 浑善达克沙地比科尔沁沙地的 WIP 值略低, 显示出浑善达克比科尔沁沙地的风化和干旱程度略高, 以上结果均表明浑善达克与科尔沁沙地的沉积物仅经历了低等程度的化学风化且受到干冷环境的影响。

碎屑岩在成岩过程中如果受到 K 交代作用的

影响, 计算出的化学风化指标会出现误差, 不能反映真实的化学风化程度。A-CN-K 三角图解与 CIA 指数具有良好的一致性, 样品的落点可以反映 CIA 指数的高低。A-CN-K 三角模型被 Nesbitt<sup>[23]</sup> 和 Fedo 等<sup>[21]</sup> 提出用来反映源区的化学风化特征, 能够预测长石的风化趋势, 可用于检测未经风化的源岩成分, 还有助于探索风尘沉积组分变化的气候状况。若风化趋势趋近含钾矿物(蒙脱石和伊利石等)的连线, 则表示化学风化程度高; 风化趋势接近于斜长石和钾长石连线, 表明斜长石尚未完全风化。若平行于 A-K 连线, 表明风化程度加剧, K 从含钾矿物中大量淋失, 蒙脱石和伊利石脱钾转变成高岭石等含铝矿物, 风化趋势向 A 靠近, 最终到达顶点 A。将浑善达克与科尔沁沙地的风尘沉积物投在 A-CN-K 三角模型中(图 6a), 发现图中各采样点均被紧密地包围在一起, 集中在 UCC 附近且与 A-CN 的连线平行, 表明科尔沁沙地和浑善达克沙地均经历了一个较低程度的化学风化过程, 并且经历了一个相对稳定的构造和气候条件。

#### 4.2 成熟度与沉积循环特征

通常运用成分变异指数(ICV 指数)来评估沉积物的成熟度特征<sup>[24]</sup>。公式为:  $ICV = (CaO + K_2O + Na_2O + Fe_2O_3 + MgO + TiO_2 + MnO) / Al_2O_3$ , CaO 是包括碎屑碳酸钙等在内的所有组分中的 CaO,  $Fe_2O_3$  代表总铁含量, 其他常量元素含量用质量百分比表示。比值  $> 1$  为高 ICV 值, 表示富含非黏土矿物的成分不成熟, 比值  $< 1$  则为低 ICV 值, 意味着沉积物成分成熟。科尔沁沙地和浑善达克沙地 ICV 平均值分别为 1.06 和 1.32, 说明沉积物中含有少量黏土矿物, 成分成熟度低, 科尔沁沙地沉积物成熟度略高于浑善达克沙地。

风化指数(WIP)也可以用来区分首次循环和再循环沉积物<sup>[25]</sup>, 其反映了 Ca、Na、Mg 和 K 元素的浓度, 化学风化和再循环作用越强, 其值越低; 化学风化和再循环作用越弱, 其值越高。当 CIA/WIP 值小于 10 时为初次循环沉积物,  $10 < CIA/WIP < 100$  时则为多次循环沉积物。科尔沁与浑善达克沙地的 CIA/WIP 值均小于 2, 表明浑善达克与科尔沁沙地均是由初次循环沉积物形成的。在图 6b 中, 浑善达克沙地与科尔沁沙地的大部分数据点接近化学风化线, 且都在风化线以下, 化学风化弱, 石英富集程度较低, 说明科尔沁沙地和浑善达克沙地中沉积物再循环程度低, 大部分沉积物是由初次循环所组成的。

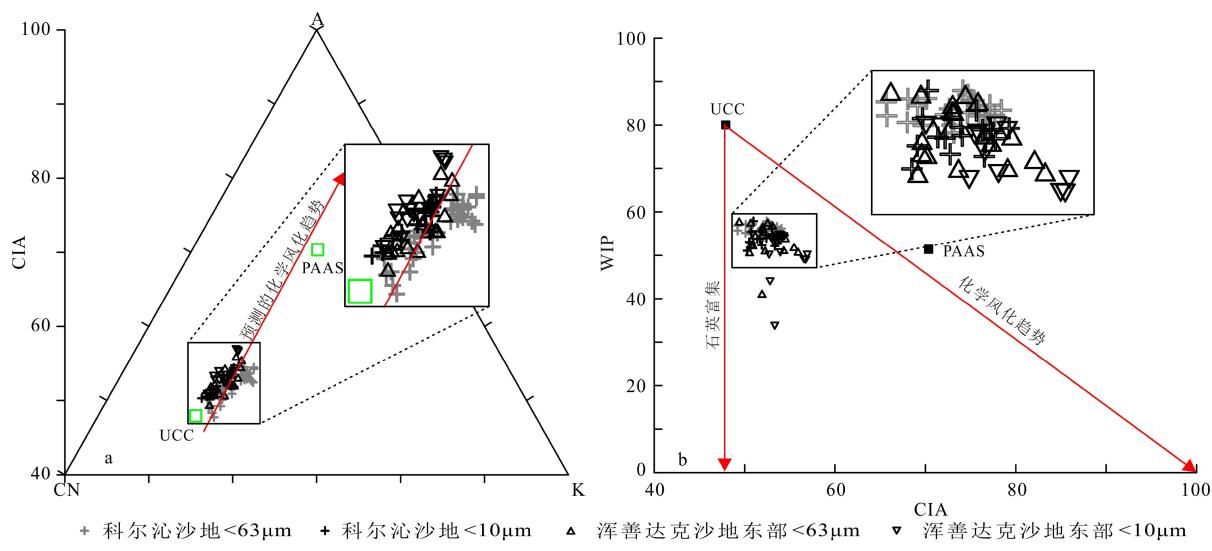


图 6 科尔沁沙地和浑善达克沙地的 A-CN-K 三角图 (a) 和 CIA-WIP 图解 (b)

Fig.6 A-CN-K triangle diagram (a) and CIA-WIP diagram (b) of the Horqin Sand Land and the Onqin Daga Sandy Land

MFW 三角图解可以用来区分循环沉积类型,也可以反映沉积物初始母岩的组成<sup>[26]</sup>。W 表示岩浆母岩的化学风化程度, M 代表铁镁质母岩, F 代表长英质岩浆母岩。长英质火成岩的风化趋势沿 F-W 的曲线发展,而镁铁质岩的风化趋势则沿 M-W 线发展。科尔沁沙地样品 <63 μm 组分的 W 指数为 18.06~28.93, 平均值为 23.11; 科尔沁沙地 <10 μm 组分的 W 指数为 25.08~31.21, 平均值为 26.33, 浑善达克沙地样品 <63 μm 组分的 W 指数为 22.45~32, 平均值为 24.79; 浑善达克沙地 <10 μm 组分的 W 指数为 24.55~30.80, 平均值为 24.87, 说明源区化学风化程度低。如果沉积物来源于岩浆母岩,那么沉积

物组成趋势线与岩浆岩组成的趋势线相交;如果是再循环沉积物,则岩浆组成趋势线与取样点组成趋势线不相交。就浑善达克与科尔沁沙地而言(图 7a),取样点靠近 UCC(上地壳)分布,远离 PAAS(后太古宙页岩)分布,并且与岩浆所组成的趋势线大致平行分布,表明浑善达克与科尔沁沙地经历了初级化学风化程度和沉积物的再循环特征。

最能够反映沉积物分选和再循环特征的地球化学手段是 Th/Sc 与 Zr/Sc 二元图解<sup>[30]</sup>。沉积分选和再循环过程往往伴随着稳定重矿物(如锆石)的富集,而 Zr 元素主要赋存在锆石中。因此 Zr/Sc 比值能有效地反映沉积物再循环的程度, Th/Sc 比

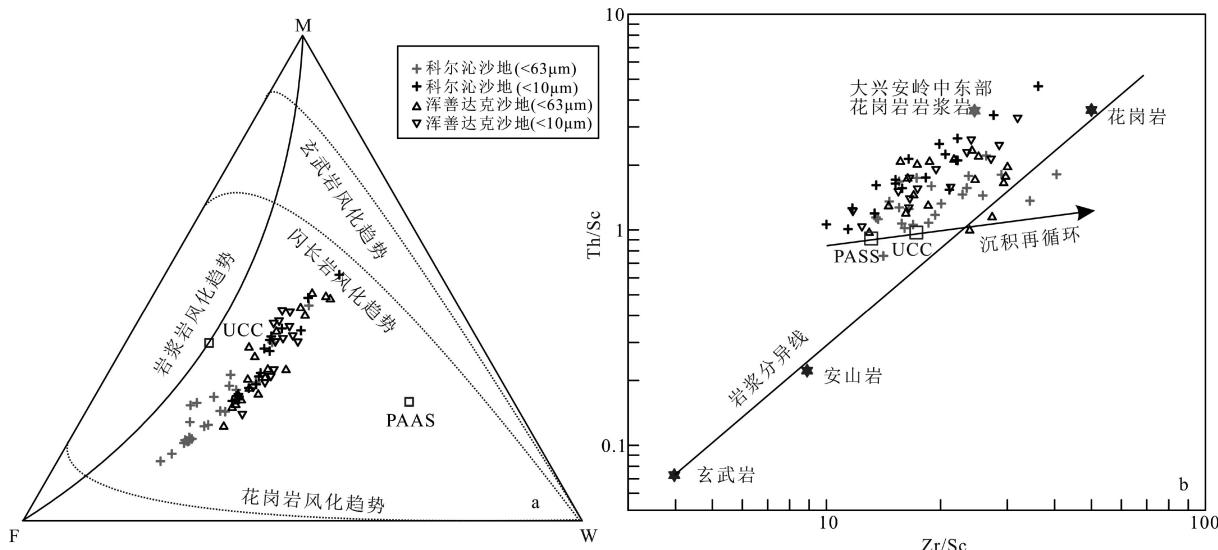


图 7 首次循环和再循环沉积物的 MFW (a) 与 Th/Sc-Zr/Sc 图解 (b)

岩浆岩的平均组成参考文献 [27], UCC 和 PASS 值参考文献 [28], 大兴安岭东部花岗质岩石的平均组成参考文献 [29]。

Fig.7 MFW (a) and Th/Sc-Zr/Sc (b) of the first-cycle and recycled sediments with chemical weathering indices

值对判断岩浆化学分异过程和物源组成成分具有重要的指示意义。在图7b中,浑善达克沙地与科尔沁沙地大部分沉积物沿岩浆成分分异线呈线性分布,表明受分选和再循环的影响较小,大部分沉积物是由初次循环形成,有一小部分沉积物偏离岩浆分异线,沿着沉积再循环作用的趋势线分布,推测可能受到沉积物分选和再循环沉积作用的影响,这一小部分样品为再循环沉积物。

### 4.3 浑善达克与科尔沁沙地的物质源区

一些性质稳定的过渡元素(例如Co、Sc元素等),稀土元素(例如Al、Ti、Sc、Th、Zr元素等)和高场强元素(例如Th、Ti、Zr、Hf元素等)在风化、迁移、成岩和变质作用的地质过程中不易转移和淋失,因此这些稳定的元素被广泛应用于辨别陆源碎屑沉积的物源类型。图7b中浑善达克与科尔沁沙地样品均在大兴安岭中东部花岗质岩浆岩与花岗岩的附近聚集,并沿花岗岩、PASS和UCC的趋势线分布,表明科尔沁沙地与浑善达克沙地的初始物源区可能为中酸性母岩。通常认为酸性岩的Sc、Cr和Co元素明显亏损,而La和Th元素明显富集,因此La/Sc和Th/Co参数可用于判断物源的组成成分<sup>[31]</sup>。浑善达克沙地<63 μm组分样品中La/Sc为3.236~7.215,平均值为5.146, Th/Co为0.998~3.391,平均值为1.942;浑善达克沙地<10 μm组分样品中La/Sc为3.373~7.589,平均值为5.266, Th/Co为0.771~3.927,平均值为1.779。科尔沁沙地样品<63 μm组分中La/Sc为3.039~6.390,平均值为

4.499, Th/Co为1.007~3.935,平均值为1.937;科尔沁沙地样品<10 μm组分中La/Sc为3.079~10.884,平均值为5.587, Th/Co为1.370~5.683,平均值为3.043,所得比值均与酸性物源相符,并且在La/Sc-Th/Co二元判别图解中观测到二者数据点均落在酸性来源的沉积物范围附近(图8a)。在La-Th-Sc判别图解<sup>[32]</sup>中(图8b),所有样品都聚集在花岗岩、TTG和长英质火山岩周围,进一步确定浑善达克沙地与科尔沁沙地的物源均以长英质中酸性花岗岩类为主。

谢静<sup>[11]</sup>等通过U-Pb测年分析发现浑善达克沙地的沙沉积物主要来自华北克拉通的燕山褶皱带和中亚造山带,证明了周围山地是附近低地的沙地物质源区<sup>[8]</sup>,这也符合沙地物质的近源性特征。考虑到中亚造山带位于浑善达克沙地和科尔沁沙地的北部,并且浑善达克沙地的粒径自西北向东南方向上有逐渐变小的趋势,而科尔沁沙地是自西南向东北方向上有逐渐减少的趋势,根据它们的空间位置和主导风向对比,认为风力是搬运中亚造山带物质的主要动力。从地理位置和主导风向之间的空间关系(图1)来看,由于受到冬季西北风的影响,浑善达克沙地与科尔沁沙地的潜在源区可能为华北克拉通的燕山褶皱带以及中亚造山带的大兴安岭山脉。浑善达克沙地和科尔沁沙地的Sr-Nd同位素组成与中国干旱区(OD鄂尔多斯干旱地区、NMPT青藏高原北缘干旱地区)均具有明显的成分差异,但与中国北方边界附近干旱地区(NBC)有所交集(图9),推测可能是大兴安岭中东部对科尔沁与浑

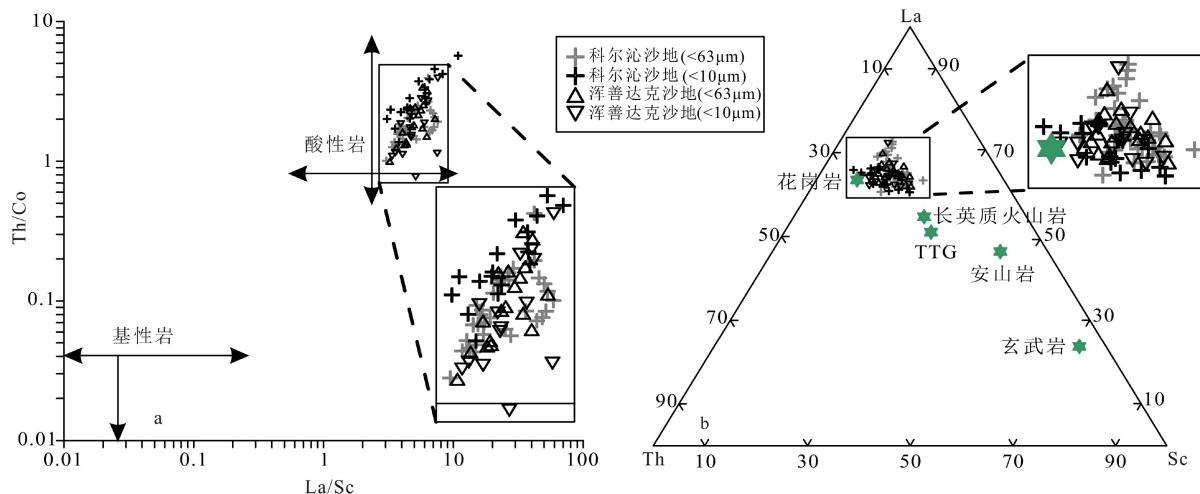


图8 陆源碎屑物源判别图解

a. La/Sc-Th/Co图解, b. La-Th-Sc三角图解。

Fig.8 Identification diagram of terrigenous clastic source

a. La/ Sc-Th/Co diagram, b. La-Th-Sc triangle diagram.

善达克沙地进行了物质输送。图 9 中显示出 NBC 与两个沙地的共同区域范围略有不同, 与科尔沁沙地的交汇范围要略微大于浑善达克沙地, 表明中亚造山带的大兴安岭山脉对科尔沁沙地的输送程度要明显高于浑善达克沙地。浑善达克和科尔沁沙地  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值较低,  $\epsilon\text{Nd}(0)$  值较高, 暗示了在中亚造山带的基础上, 可能有华北克拉通物质的混入, 且二者的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  和  $\epsilon\text{Nd}(0)$  值介于中亚造山带(分别为  $0.710\,587\sim0.713\,900$  和  $-8.7\sim-0.9$ )<sup>[33]</sup> 和华北克拉通(分别为  $0.714\,824\sim0.719\,218$  和  $-17.2\sim-11.8$ )<sup>[33]</sup> 之间, 显示了中亚造山带的大兴安岭西部和华北克拉通北部燕山山脉的物质混合物为浑善达克沙地和科尔沁沙地的物质来源。但是浑善达克沙地的  $\epsilon\text{Nd}(0)$  均值更接近于华北克拉通, 科尔沁沙地的  $\epsilon\text{Nd}(0)$  均值更接近于中亚造山带, 表明浑善达克沙地的主要物质源区为华北克拉通的燕山山脉, 而科尔沁沙地的主要物质源区为中亚造山带的大兴安岭山脉。

#### 4.4 西拉沐沦河对沙地地球化学组成的影响

风和水的搬运作用在干旱-半干旱区域的粉尘“源-汇”系统中扮演着重要的角色, 它在不同时空尺度上受地形、气候、水文、植被等因素的影响而表现不同。河流在风沙地貌发育的过程中起到关键作用, 一方面河流起到输沙的动力运输作用, 为沙地与外界提供物质联系, 另一方面基底床面也可以为风沙地貌的发育提供场所<sup>[36]</sup>。西拉沐沦河为西辽河的北源, 发源于克什克腾旗西南部的浑善达

克沙地, 流经整个科尔沁沙地。本文采集的浑善达克沙地东缘样品分布在克什克腾旗的南部(东南、西南), 主要分布在正南(西拉沐沦河流域)和西南一带, 因此可以将浑善达克沙地东缘的样品视为西拉沐沦河流域的上游。

在本文的研究中浑善达克沙地和科尔沁沙地在物源上主要分别受到华北克拉通北部的燕山山脉以及中亚造山带东缘的大兴安岭山脉的约束, 但是浑善达克与科尔沁沙地却在地球化学组成中呈现出很大的相似性, 例如二者具有相似的稀土元素配分模式、低等级的化学风化程度、成熟度和沉积再循环程度。由于某些不活动元素在风化、沉积和搬运的地质过程中表现相对稳定, 较好地保存了母岩的特性, 因此可以用地球化学组成中的不活动元素来追踪沉积物的物源及源区组成<sup>[27,32,37]</sup>。在图 10a 和 10b 中, 仅用单一元素的比值可能存在偏差, 因此在图 10c 中选取了多个元素比值来消除误差。在图 10c 中, 浑善达克沙地东部  $<10\,\mu\text{m}$  的细颗粒组分与科尔沁沙地相同粒级组分有更紧密的亲缘关系。在图 10 中, 科尔沁沙地的样品均与浑善达克沙地东部有较多的地球化学亲缘关系, 暗示了发源于浑善达克沙地东部的西拉沐沦河可能起到纽带连接作用, 为科尔沁沙地提供了部分颗粒物质。

在物源示踪方面, 沉积物的 Sr-Nd 同位素组成提供了更为精确的信息, 因此在沉积物物源鉴别方面具有更大的潜力<sup>[38]</sup>。来自不同地质体的沉积物由于物源和沉积年龄不同有明显不同的 Sr-Nd 同位素组成, 并且 Sr-Nd 同位素组成在风化、搬运和

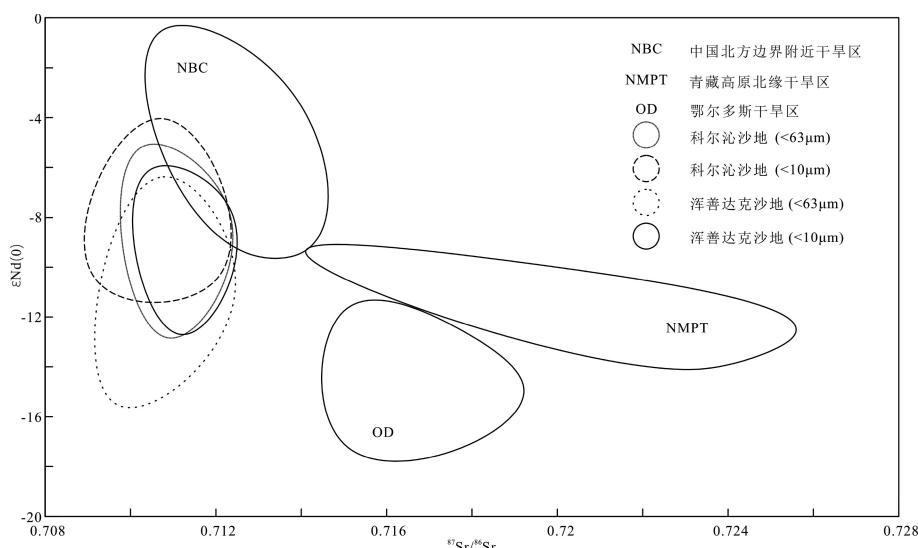


图 9 科尔沁与浑善达克沙地和中国粉尘源区的 Sr-Nd 同位素组成对比

NBC、OD、NMPT 数据来自文献 [34-35]

Fig.9 Sr-Nd isotope compositions of Onqin Sandy Land and Hoqin Sandy Land, in comparison to dust provenance in China

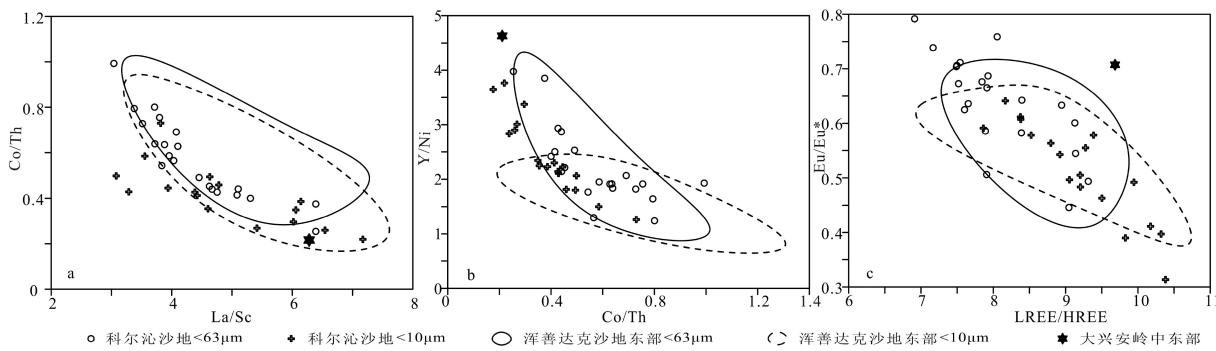


图 10 不活动元素比值的物源辨别图解

Fig.10 Provenance discrimination diagrams involving immobile elements

沉积等过程中能保持很高的稳定性<sup>[39]</sup>, 所以 Sr-Nd 同位素比值被广泛用来解译亚洲风尘物源示踪<sup>[33-35,39,40]</sup>。将浑善达克与科尔沁沙地数据点投影到图 9 中, 发现浑善达克沙地(特别是<10 μm 组分)(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 值为 0.710 638~0.712 339, εNd(0) 值为 -12.37~-6.38)与科尔沁沙地(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 值为 0.709 436~0.712 122, εNd(0) 值为 -12.39~-4.27)样品的 Sr-Nd 同位素含量较为接近(图 9 中科尔沁沙地<63 μm 和<10 μm 组分充分混合, 不易区分), 表明浑善达克沙地可能经过西拉沐沦河的搬运作用向科尔沁沙地提供了部分颗粒物质。但是, 相比于<63 μm 的颗粒组分, 浑善达克沙地<10 μm 组分与科尔沁沙地不同粒级组分有更紧密的同位素亲缘关系, 表明<10 μm 组分更容易受到河流搬运作用的影响, 西拉沐沦河可能会携带更多的细颗粒物质以悬浮搬运的方式到下游, 而粗颗粒物质则只能通过跳跃或滚动的方式在河流中搬运。由于西拉沐沦河流域地处于干旱区, 自然降水补给量逐年减少, 并且上游农业水土流失严重, 根据下游水文站历年监测数据发现, 西拉沐沦河在近 25 年内共有 12 年断流, 水动力条件弱, 所以粗颗粒物质只能近距离搬运<sup>[41]</sup>。以上证据表明浑善达克沙地与科尔沁沙地通过西拉沐沦河进行了物质交换, 西拉沐沦河是两个沙地间细颗粒物质搬运的桥梁。

风力搬运在沙漠、沙地的形成和发展过程中也是一种必不可少的动力介质<sup>[42]</sup>。20 μm 通常被大多数学者认为是不同粉尘沉积物搬运方式的粒级界限, 地表风通常能把<20 μm 的细颗粒组分的粉尘搬运数百甚至数千千米<sup>[43]</sup>。在图 9 中, 科尔沁沙地与浑善达克沙地<10 μm 的细颗粒组分相似程度更高。浑善达克沙地与科尔沁沙地由于受到长期稳定的干冷气候影响, 使得春季西南风的势力范围持续扩大, 将细颗粒粉尘物质搬运至更远的地方。结合研究区空间位置关系(图 1), 科尔沁沙地与浑善

达克沙地均位于哈尔滨的西南方向上, 并被大兴安岭、小兴安岭以及长白山等山脉三面包围, 且沙地面积广阔, 使得到达东北平原的西北风只能从西南方向的浑善达克与科尔沁沙地进入。研究表明, 哈尔滨现代尘暴天气主要是受春季的西南风所影响, 其主要来源于内蒙古中东部和蒙古中部地区, 通过西南气流的输送, 先后经过浑善达克沙地和科尔沁沙地, 最后漂浮到哈尔滨<sup>[44]</sup>。这也与本文沙地的粒径方向一致。总之, 这两个沙地在同一粉尘搬运通道上, 浑善达克沙地的细颗粒粉尘可以通过降雨、降雪等方式沉降于科尔沁沙地, 沙尘天气起到了桥梁的沟通作用。因此, 根据研究区的空间位置、主导风向以及地球化学组成对比, 认为风力搬运在沙地间<10 μm 的细颗粒组分运输中也起到了一定的作用。因此, 浑善达克沙地和科尔沁沙地间细颗粒物质的交换可能是风力和流水共同作用的结果。

## 5 结论

(1) 浑善达克与科尔沁沙地具有较低的 CIA 值、PIA 值和 CIW 值, 高的 WIP 值, 结合 A-CN-K 图解, 表明它们仅经历了低等程度的化学风化。

(2) 浑善达克与科尔沁沙地具有高的 ICV 值、低的 Zr/Sc 比值以及 MFW 图解表明沉积物成熟度较低, 经历了简单的沉积再循环过程。

(3) 物源判别图解表明浑善达克沙地与科尔沁沙地的母岩以中酸性花岗岩石为主, 并且具有一个混合源区, 华北克拉通北部的燕山褶皱带和中亚造山带东部的大兴安岭山脉分别为它们提供了物质来源。

(4) 浑善达克沙地的细颗粒物质通过西拉沐沦河的搬运作用进行了物质交换, 输送到下游的科尔沁沙地, 其中<10 μm 组分的细颗粒物质还受到了地表盛行风搬运作用的影响。

**致谢:** 地球化学组成分析得到中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室黄俊华研究员的支持。研究生孙磊和王嘉新参加了部分野外取样和实验室样品处理工作,在此一并表示感谢。

## 参考文献 (References)

- [1] Che X D, Li G J. Binary sources of loess on the Chinese Loess Plateau revealed by U-Pb ages of zircon [J]. *Quaternary Research*, 2013, 80(3): 545-551.
- [2] Zhang H Z, Lu H Y, Xu X S, et al. Quantitative estimation of the contribution of dust sources to Chinese loess using detrital zircon U-Pb age patterns [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2016, 121(11): 2085-2099.
- [3] Sun J M. Source regions and formation of the loess sediments on the high mountain regions of northwestern China [J]. *Quaternary Research*, 2002, 58(3): 341-351.
- [4] Shi Z G, Liu X D. Distinguishing the provenance of fine-grained eolian dust over the Chinese Loess Plateau from a modelling perspective [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2011, 63(5): 959-970.
- [5] Chen Z, Li G J. Evolving sources of eolian detritus on the Chinese Loess Plateau since early Miocene: tectonic and climatic controls [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 371-372: 220-225.
- [6] Nie J S, Peng W B, Möller A, et al. Provenance of the upper Miocene-Pliocene red clay deposits of the Chinese Loess Plateau [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 407: 35-47.
- [7] Nie J S, Peng W B. Automated SEM-EDS heavy mineral analysis reveals no provenance shift between glacial loess and interglacial paleosol on the Chinese Loess Plateau [J]. *Aeolian Research*, 2014, 13: 71-75.
- [8] 陈骏, 李高军. 亚洲风尘系统地球化学示踪研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 54(9): 1279-1301. [CHEN Jun, LI Gaojun. Geochemical studies on the source region of Asian dust [J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(9): 1279-1301.]
- [9] 陈骏, 安芷生, 刘连文, 等. 最近2.5 Ma以来黄土高原风尘化学组成的变化与亚洲内陆的化学风化[J]. *中国科学(D辑)*, 2001, 44(5): 403-413. [CHEN Jun, AN Zhisheng, LIU Lianwen, et al. Variations in chemical compositions of the eolian dust in Chinese Loess Plateau over the past 2.5 Ma and chemical weathering in the Asian inland [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2001, 44(5): 403-413.]
- [10] 杨杰东, 陈骏, 饶文波, 等. 中国沙漠的同位素分区特征[J]. *地球化学*, 2007, 36(5): 516-524. [YANG Jiedong, CHEN Jun, RAO Wenbo, et al. Isotopic partition characteristics of Chinese deserts [J]. *Geochimica*, 2007, 36(5): 516-524.]
- [11] 谢静, 吴福元, 丁仲礼. 浑善达克沙地的碎屑锆石U-Pb年龄和Hf同位素组成及其源区意义[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 523-528. [XIE Jing, WU Fuyuan, DING Zhongli. Detrital zircon composition of U-Pb ages and Hf isotope of the Hunshandake sandland and implications for its provenance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2): 523-528.]
- [12] 朱迎新. 章古台沙地樟子松人工林固沙效果探究[J]. *理论界*, 2014(5): 62-64. [ZHU Yingxin. Study on the effect of pinus sylva plantation on sand fixation in Zhanggu sandy land [J]. *Theory Horizon*, 2014(5): 62-64.]
- [13] 杨艳, 程捷, 田明中, 等. 近50年来哈尔滨市沙尘暴发生规律及气象特征研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(11): 54-60. [YANG Yan, CHENG Jie, TIAN Mingzhong, et al. The spatial and temporal distribution of dust-storm and its meteorological in Harbin [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(11): 54-60.]
- [14] 谢远云, 孙磊, 康春国, 等. 松嫩沙地Sr-Nd同位素组成特征[J]. *沉积学报*, 2020, 38(4): 771-780. [XIE Yuanyun, SUN Lei, KANG Chunguo, et al. Sr-Nd isotopic partition characteristics of the Songnen sandy land [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(4): 771-780.]
- [15] Xie Y Y, Kang C G, Chi Y P, et al. The loess deposits in Northeast China: the linkage of loess accumulation and geomorphic-climatic features at the easternmost edge of the Eurasian loess belt [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 181: 103914.
- [16] Xie Y Y, Liu L, Kang C G, et al. Sr-Nd isotopic characteristics of the Northeast Sandy Land, China and their implications for tracing sources of regional dust [J]. *Catena*, 2020, 184: 104303.
- [17] 张晓娟, 季宏兵, 冯晓静, 等. 岩溶盆地红土风化剖面的元素地球化学研究[J]. *地理科学*, 2017, 37(6): 944-951. [ZHANG Xiaojuan, JI Hongbing, FENG Xiaojing, et al. Element geochemistry characteristic of the red soil weathering profiles in the Karst Basin [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(6): 944-951.]
- [18] McLennan S M. Weathering and global denudation [J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(2): 295-303.
- [19] 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.
- [20] Harnois L. The CIW index: A new chemical index of weathering [J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 55(3-4): 319-322.
- [21] 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.
- [22] Parker A. An index of weathering for silicate rocks [J]. *Geological Magazine*, 1970, 107(6): 501-504.
- [23] 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.
- [24] Cullers R L, Podkovyrov V N. Geochemistry of the mesoproterozoic Lakhanda shales in southeastern Yakutia, Russia: implications for mineralogical and provenance control, and recycling [J]. *Precambrian Research*, 2000, 104(1-2): 77-93.
- [25] 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]. *The Journal of Geology*, 2013, 121(6): 547-580.
- [26] Ohta T, Arai H. Statistical empirical index of chemical weathering in igneous rocks: a new tool for evaluating the degree of weathering [J]. *Chemical Geology*, 2007, 240(3-4): 280-297.

- [27] Condie K C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales [J]. *Chemical Geology*, 1993, 104(1-4): 1-37.
- [28] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. London: Blackwell Scientific, 1985.
- [29] Yang H, Ge W C, Yu Q, et al. Zircon U-Pb-Hf isotopes, bulk-rock geochemistry and petrogenesis of Middle to Late Triassic I-type granitoids in the Xing'an Block, northeast China: Implications for early Mesozoic tectonic evolution of the central Great Xing'an Range [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 119: 30-48.
- [30] McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics [M]//Johnsson M J. *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*. Boulder: Geological Society of America, 1993, 284: 21-40.
- [31] 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.
- [32] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 92(2): 181-193.
- [33] Li G J, Pettke T, Chen J. Increasing Nd isotopic ratio of Asian dust indicates progressive uplift of the north Tibetan Plateau since the middle Miocene [J]. *Geology*, 2011, 39(3): 199-202.
- [34] Chen J, Li G J, Yang J D, et al. Nd and Sr isotopic characteristics of Chinese deserts: implications for the provenances of Asian dust [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(15): 3904-3914.
- [35] Li G J, Chen J, Ji J F, et al. Natural and anthropogenic sources of East Asian dust [J]. *Geology*, 2009, 37(8): 727-730.
- [36] 李小妹, 严平, 钱瑶, 等. 西拉木伦河流域地表沉积物粒度、化学元素分布特征[J]. 干旱区研究, 2017, 34(1): 191-199. [LI Xiaomei, YAN Ping, QIAN Yao, et al. Spatial distribution of grain size and chemical elements in surface sediments in the Xar Moron River Basin [J]. Arid Zone Research, 2017, 34(1): 191-199.]
- [37] Condie K C. Another look at rare earth elements in shales [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(9): 2527-2531.
- [38] Xie Y Y, Chi Y P, Meng J, et al. Grain-size and Sr-Nd isotopic compositions of dry- and wet-deposited dusts during the same dust-storm event in Harbin, China: implications for source, transport-deposition modes, dynamic mechanism and formation of eolian loess [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(8): 6489-6502.
- [39] Grousset F E, Biscaye P E. Tracing dust sources and transport patterns using Sr, Nd and Pb isotopes [J]. *Chemical Geology*, 2005, 222(3-4): 149-167.
- [40] Rao W B, Chen J, Yang J D, et al. Sr-Nd isotopic characteristics of eolian deposits in the Erdos Desert and Chinese Loess Plateau: implications for their provenances [J]. *Geochemical Journal*, 2008, 42(3): 273-282.
- [41] 曹建华, 刘志辉, 李俊有. 克什克腾旗“三河源”生态保护区人工增雨工程建设的必要性 [J]. *内蒙古科技与经济*, 2016(14): 69-70. [CAO Jianhua, LIU Zhihui, LI Junyou. A study on artificial precipitation in the Hexigtenqi ecological protection zone [J]. *Inner Mongolia Science Technology & Economy*, 2016(14): 69-70.]
- [42] 张瀚之, 麋化煜, 戈双文, 等. 中国北方沙漠/沙地锆石形态特征及其对物源的指示 [J]. *第四纪研究*, 2013, 33(2): 334-344. [ZHANG Hanzhi, LU Huayu, YI Shuangwen, et al. Zircon typological analyses of the major deserts/sand fields in northern China and its implication for identifying sediment source [J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(2): 334-344.]
- [43] Sun D H, Bloemendal J, Rea D K, et al. Bimodal grain-size distribution of Chinese loess, and its palaeoclimatic implications [J]. *Catena*, 2004, 55(3): 325-340.
- [44] 谢远云, 孟杰, 郭令芬, 等. 哈尔滨沙尘沉降物稀土元素地球化学特征及其物源分析 [J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2013, 38(5): 923-933. [XIE Yuanyun, MENG Jie, GUO Lingfen, et al. REE geochemistry for sand-dust fallouts in Harbin, Heilongjiang province and provenance analysis [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2013, 38(5): 923-933.]