

doi: 10.12029/gc20210622

孙磊, 谢远云, 康春国, 迟云平, 杜慧荣, 王嘉新. 2021. 呼伦贝尔沙地重矿物、Sr-Nd 同位素组成及其对亚洲风尘系统的指示[J]. 中国地质, 48(6): 1965-1974.

Sun Lei, Xie Yuanyun, Kang Chunguo, Chi Yunping, Du Huirong, Wang Jiixin. 2021. Heavy minerals, Sr-Nd isotopic composition of sandy land in Hulun Buir, Inner Mongolia and their implications for Asian aeolian dust system[J]. *Geology in China*, 48(6): 1965-1974(in Chinese with English abstract).

## 呼伦贝尔沙地重矿物、Sr-Nd 同位素组成及其对亚洲风尘系统的指示

孙磊<sup>1</sup>, 谢远云<sup>1,2</sup>, 康春国<sup>3</sup>, 迟云平<sup>1,2</sup>, 杜慧荣<sup>1</sup>, 王嘉新<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江 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, 黑龙江 哈尔滨 150025; 3. 哈尔滨学院地理系, 黑龙江 哈尔滨 150086)

**摘要:** 呼伦贝尔沙地作为中国北方沙漠的重要组成部分, 对其物质组成的深入探讨对于亚洲风尘系统的研究具有重要意义。重矿物特征和 Sr-Nd 同位素组成是解开沉积物演化过程和物源示踪的重要工具, 但分选作用所造成的“粒度效应”一直是沙地重矿物和 Sr-Nd 同位素组成的制约因素。为分析呼伦贝尔沙地的物质组成及探讨分选作用对重矿物和 Sr-Nd 同位素组成的影响, 采集了呼伦贝尔沙地 19 个风成沙和河流沙样品, 并进行了分粒级处理。其中, 对 12 个子样 (<73 μm 和 73~125 μm 两个粒级) 进行了重矿物的鉴定分析, 对 23 个子样 (<63 μm、<30 μm 和 <11 μm 三个粒级) 进行了 Sr-Nd 同位素的测定。结果表明: 不同粒度组分重矿物含量、重矿物指数(ATi、GZi 和 ZTR) 和重矿物组合存在明显差异; 稳定和极其稳定矿物优先富集于细颗粒, 使细颗粒沉积物的总体稳定程度加强。与以往 Sr-Nd 同位素粒度控制的研究结果不同, 本文研究结果显示, <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值受粒度的影响很小, 但 Nd 同位素组成明显受粒度效应的影响, 并表现出粗颗粒组分有更高 Nd 同位素比值的趋势。Sr-Nd 同位素组成存在时间效应, 随时间发生变化, 表明了风尘源区地球化学组成的不稳定性, 这对于利用重矿物和 Sr-Nd 同位素进行亚洲风尘系统研究具有重要指示, 在物源示踪时必须考虑宽/多粒度窗口以及充足的样品量以弥补粒度和时间效应带来的偏差。

**关键词:** 重矿物; Sr-Nd 同位素; 物源; 气候变化; 环境地质调查工程; 呼伦贝尔沙地; 内蒙古

**中图分类号:** P736.2   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1000-3657(2021)06-1965-10

## Heavy minerals, Sr-Nd isotopic composition of sandy land in Hulun Buir, Inner Mongolia and their implications for Asian aeolian dust system

SUN Lei<sup>1</sup>, XIE Yuanyun<sup>1,2</sup>, KANG Chunguo<sup>3</sup>, CHI Yunping<sup>1,2</sup>, DU Huirong<sup>1</sup>, WANG Jiixin<sup>1</sup>

(1. College of geographic science, Harbin Normal University, Harbin 150025, Heilongjiang, China 2. Heilongjiang province key laboratory of geographical environment monitoring and spatial information service in cold regions, Harbin Normal University, Harbin 150025, Heilongjiang, China 3. Geography Department, Harbin institute, Harbin 150086, Heilongjiang, China)

收稿日期: 2019-05-03; 改回日期: 2019-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871013, 42171006)和黑龙江省自然科学基金项目(LH2020D009)联合资助。

作者简介: 孙磊, 男, 1993 年生, 硕士生, 主要研究方向为亚洲风尘系统物源示踪; E-mail: 784374602@qq.com。

通讯作者: 谢远云, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事第四纪地质研究; E-mail: xyy0451@hrbnu.edu.cn。

**Abstract:** As an important part of Northern China Desert, Hulun Buir sandy land is of great significance to the study of dust system in Asia. The characteristics of heavy minerals and the composition of Sr–Nd isotopes are the important tools to reveal the sediment evolution process and trace the provenance. But the "grain size effect" caused by sedimentary sorting has always been the limiting factor for the composition of heavy minerals and Sr–Nd isotopes in sandy land. Totally 19 aeolian sand and fluvial sand samples were collected from Hulun Buir sandy land and screened to analyze the material composition and discuss the effect of separation on the composition of heavy minerals and Sr–Nd isotopes. Among them, 12 sub-samples (<73  $\mu\text{m}$  and 73–125  $\mu\text{m}$ ) were identified and analyzed for heavy minerals, and 23 sub-samples (<63  $\mu\text{m}$ , <30  $\mu\text{m}$  and <11  $\mu\text{m}$ ) were determined for Sr–Nd isotopes. The results show that there are significant differences in heavy mineral content, heavy mineral index (ATi, GZi and ZTR) and heavy mineral assemblage with different particle sizes. The stable and extremely stable minerals are concentrate preferentially onto the finer particles, which enhances the overall stability of the fine-grained sediments. Different from previous studies on Sr–Nd isotopic grain size control, our results show that the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio is slightly affected by the grain size effect, but the Nd isotopic composition is significantly affected by it, and the coarse-grained components tend to have a higher Nd isotopic ratio. The Sr–Nd isotopic composition of Hulun Buir sandy land has "time effect". It shows that the geochemical composition of the dust source area is unstable. This study is of great significance for the understanding of Asian aeolian dust system study using heavy mineral and Sr–Nd isotopic composition. The wide or multiple grain size window as well as substantial amount of samples must be considered for source tracing.

**Key words:** heavy mineral; Sr–Nd isotopic ratio; provenance; climatic change; environmental geological survey engineering; Hulun Buir sandy land; Inner Mongolia

**About the first author:** SUN Lei, male, born in 1993, master candidate, engaged in the study of Asian aeolian dust systems; E-mail: 784374602@qq.com.

**About the corresponding author:** XIE Yuanyun, male, born in 1971, doctor, professor, Ph.D supervisor, engaged in teaching and study of Quaternary geology; E-mail: xyy0451@hrbnu.edu.cn.

**Fund support:** Supported by National Natural Science Foundation of China (No.41871013, No.42171006) and Natural Science Foundation of Heilongjiang Province of China (No.LH2020D009).

## 1 引 言

亚洲内陆的沙漠/沙地为下风向地区提供了大量的细颗粒粉尘物质,研究粉尘源区沉积物对于了解沙漠/沙地的形成和演化以及该地区的古气候变化和全球风尘系统的关系具有重要的意义(Zhang et al., 1997; Sun, 2002; Rao et al., 2006; Chen et al., 2007; Shi et al., 2011; Chen et al., 2013; Nie et al., 2014; 刘瑾等, 2015; 袁方等, 2018; Wu et al., 2021)。碎屑沉积物具有解开过去地质作用过程的巨大潜力,重矿物是较精确灵敏的指示剂,通过对重矿物组合的分析及其与可能源区的对比,可以定性地给出源区的位置和源区岩石的组成特征(Morton et al., 1985)。Sr–Nd同位素的组成在不同物源和不同年龄的沉积物中明显不同,并且在风化、搬运和沉积等表生过程中很少被改变,在限定风尘物源方面得到广泛认可(Grousse et al., 2005; Rao et al., 2006; Chen et al., 2007)。

目前对沙漠沙地物质组成的研究主要分布在西北地区,但对于中纬度干旱带地区最东端纬度最

高的呼伦贝尔沙地物质组成的研究还比较薄弱,可获得的数据很少,这影响了对该地区风尘系统的深入理解,而且缺乏对重矿物粒度依靠的理解,对于Sr–Nd同位素组成的粒度影响的认识是基于少数几个样品,尚缺乏对潜在源区Sr–Nd同位素地球化学组成稳定性认识。对呼伦贝尔沙地的风成沙和河流沙进行采样,提供不同粒级组分下的重矿物及Sr–Nd同位素组成特征,为丰富亚洲风尘系统研究以及对沙漠的形成和演化、确定沙漠物质来源、揭示沙漠物质的成因机制等提供深层次的理解。

## 2 材料与方 法

### 2.1 研究区域概况

呼伦贝尔沙地位于内蒙古东北部呼伦贝尔高原(图1)。东部为大兴安岭西麓丘陵漫岗,西对达赉湖和克鲁伦河,南与蒙古相连,北达海拉尔河北岸,地势由东向西逐渐降低,南部高于北部,平均海拔600~800 m。呼伦贝尔沙地大多分布在冲积、湖积平原上,主要集中在海拉尔河南部、新巴尔虎左

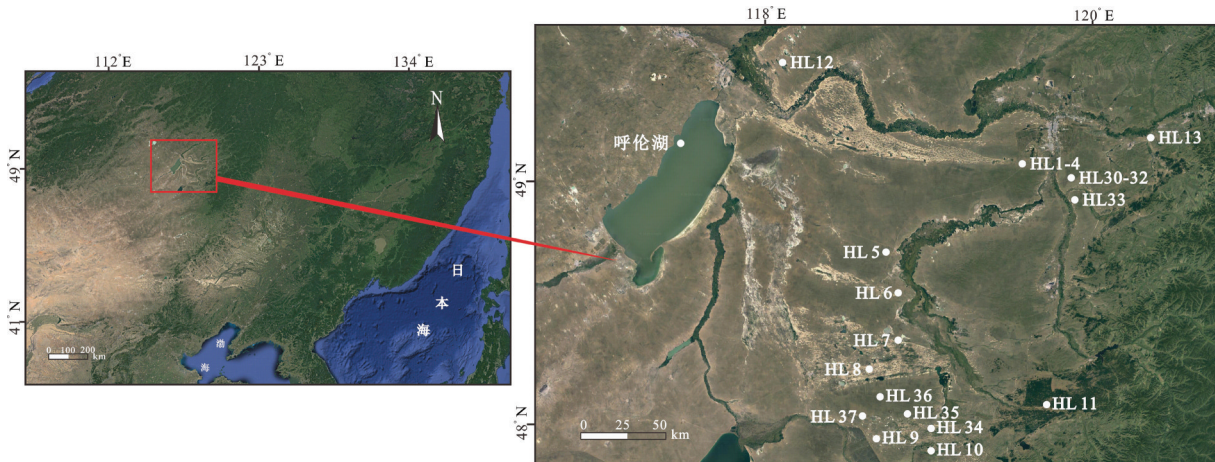


图1 呼伦贝尔沙地地貌及采样位置示意图

Fig.1 Topography of Hulun Buir sandy land, showing the sampling location of the study area

旗的阿木古郎镇、在达赉湖东岸湖滨沙带以及伊敏河及其支流锡尼河等沿岸也有流动沙丘及半固定沙丘分布(刘海江等,2008)。

## 2.2 样品采集

风成沙和河流沙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。因此笔者系统采集了呼伦贝尔沙地19个风成沙和河流沙样品,覆盖了呼伦贝尔沙地绝大部分地区,将这些样品通过干筛法进行了分粒级制备,对12个分粒级子样(<73 μm和73~125 μm)进行了重矿物的鉴定分析、对23个分粒级子样(<63 μm、<30 μm和<11 μm)进行了Sr-Nd同位素的测定。

## 2.3 实验方法

12个分粒级重矿物子样在廊坊诚信地质公司进行鉴定,首先将样品烘干称重,将样品使用淘洗法提取重部分,把剩余尾砂及淘洗污水进行称重计算损耗率,利用三溴甲烷(密度2.89 g/cm<sup>3</sup>)将轻重矿物分离,经分离的样品用酒精反复冲洗,60℃恒温烘干后再称重,可得重矿物部分的含量。将分离出来的重矿物部分在实体显微镜下采用条带法随机选取10个视域进行矿物鉴定,并取其平均值来减小分析误差。个别样品需磨切片在偏光显微镜下确认。每个重矿物样品鉴定颗粒数均在600粒以上,然后计算出每种重矿物的颗粒百分含量。

23个Sr-Nd同位素分粒级子样在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室测定。通过表面热电离同位素质谱仪(thermal

ionization mass spectrometry, TIMS)获得Sr-Nd同位素比值。将(<63 μm)子样用0.5 mol/L醋酸浸泡4 h,将酸不溶物烘干,研磨至200目,分成两份,分别供Sr(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)和Nd(<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)同位素比值测定。Sr和Nd的分离采用标准离子交换方法。样品测定的Sr和Nd同位素比值分别用<sup>86</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr = 0.1194和<sup>146</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.7219进行了质量分馏校正。仪器的准确度分别用国际标样NBS 987和JMC进行检测,测定值分别为<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr = 0.710250 ± 7 (2σ)和<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.512109 ± 3 (2σ)。化学分析空白:对Sr为<1 ng,对Nd为<50 pg。Nd同位素组成用ε<sub>Nd</sub>(0)值表示,采用<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd=0.512638的球粒陨石均一源(CHUR)现代值。

## 3 结果与讨论

呼伦贝尔沙地重矿物组成如表1所示。

### 3.1 重矿物组成

呼伦贝尔沙地检测出的重矿物有锆石、磷灰石、金红石、榍石、锐钛矿、白钛石、蓝晶石、独居石、石榴子石、角闪石、电气石、绿帘石、钛铁矿、赤褐铁矿、磁铁矿、辉石、黄铁矿共17余种,其中黄铁矿仅在个别样品中出现为偶见矿物,和其他矿物未在表1中列出。

呼伦贝尔沙地(<73 μm)的重矿物以钛铁矿、绿帘石、石榴子石为主,占44.59%;次为磁铁矿、锆石、榍石和角闪石占28.63%;其他重矿物占26.78%。重矿物组合为钛铁矿+赤褐铁矿+绿帘石+角闪石+



表1 呼伦贝尔沙地重矿物种类及含量(%)

Table 1 Heavy mineral types and contents in Hulun Buir sandy land(%)

编号	锆石	磷灰石	金红石	锐钛矿	白钛石	榍石	独居石	蓝晶石	石榴子石	电气石	绿帘石	角闪石	钛铁矿	赤褐铁矿	辉石	磁铁矿
< 73 μm																
HL30	10.2	2.44	0.29	0.91	2.36	0.19			0.30	0.30	8.33	0.90	11.6	26.5		27.6
HL33	6.23	1.73	1.15	0.33	1.77	1.44	0.20	0.24	4.25	1.30	23.3	19.4	21.3	5.72		2.18
HL34	7.63	0.73	1.23	0.03	0.40	2.73	0.26		21.5	0.99	9.66	10.9	25.7	6.99	0.99	
HL35	11.7	0.79	2.00	0.22	1.07	1.42	0.28		12.8	1.04	12.8	6.10	27.8	5.57	0.34	7.20
HL36	9.33	0.51	0.90	0.11	1.92	3.12	0.23	0.11	11.3	2.61	14.6	10.2	27.5	5.40	0.69	2.07
HL37	8.02	0.71	0.92	0.21	1.36	1.64	0.09	0.06	9.41	0.90	10.5	8.69	14.1	31.7	0.54	3.88
73~125 μm																
HL30	13.5	0.29	0.47	0.60	2.61	2.49		0.08	0.09	0.09	3.04		21.5	11.5		38.5
HL33	4.53	1.07	0.70	0.07	2.71	4.50	0.81	0.18	25.7	3.54	20.6	9.70	13.2	4.15	1.07	0.85
HL34	5.54	0.12	0.45	0.02	1.58	3.58	0.22	0.20	48.4	1.64	16.4	2.92	5.85	5.48	0.18	0.72
HL35	2.68	0.28	1.35	0.02	2.36	4.24	0.41	0.75	38.1	0.55	15.3	2.21	23.0	0.73		1.04
HL36	2.82	1.66	1.30	0.03	1.48	5.08	0.39	0.15	29.2	0.17	21.2	24.1	3.74	1.19		0.77
HL37	3.27	1.21	1.57	0.03	2.45	4.93	0.97	0.36	26.0	0.19	24.8	16.0	5.40	6.17		1.29

石榴子石+磁铁矿+锆石。

根据矿物的稳定性可将重矿物分为4类见表2, 研究结果显示:呼伦贝尔沙地(<73 μm)沉积物中以稳定矿物(平均55.4%)为主, 相对稳定矿物(平均16.15%)和极稳定矿物(平均11.15%)含量次之, 不稳定矿物(平均10.03%)含量最低。

为了更加准确地反映复杂物源, 在表3中列出了呼伦贝尔沙地的ATi指数、GZi指数和ZTR指数。ATi指数=100×磷灰石%/(磷灰石%+电气石%), 可以指示地层是否受到酸性地下水循环的影响, 常用于判断岩浆岩中磷灰石的风化程度和酸性火成岩物源特征, 由于磷灰石在酸性条件下极易溶蚀, ATi指数还受到源区化学风化作用程度的控制。GZi指数=100×石榴子石%/(石榴子石%+锆石%), 直接反映物源区含石榴子石的母岩组成(片岩、角闪岩和麻粒岩), GZi指数与特征矿物石榴子石有很好的正相关性。ZTR指数=锆石%+电气石%+金红石%, 用于判断重矿物成熟度, 由Hubert

于1962年首次提出, 指锆石、金红石和电气石占总重矿物的百分含量, ZTR指数往往用于判断物源的搬运距离和物源方向(Pettijohn et al., 1977; Morton et al., 1995; Morton et al., 1999; 赵红格等, 2003; 王中波等, 2006)。

### 3.2 分选作用对重矿物组成的影响

沉积物在搬运和沉积过程中, 由于动力分选, 粗、细颗粒将发生分离, 从而导致混合矿物分离进入不同粒级组分。为了探讨自然分选作用对重矿物特征的影响, 笔者将(<73 μm)和(73~125 μm)两组粒级的子样进行对比。(73~125 μm)子样品中以石榴子石、绿帘石、钛铁矿和角闪石为主, 占68.04%; 磁铁矿、赤褐铁矿、锆石和榍石次之占21.61%; 其他重矿物占10.35%, 重矿物组合为石榴子石+绿帘石+钛铁矿+角闪石+磁铁矿+榍石; 辉石在(73~125 μm)组分中只存在于个别样品, 蓝晶石在(<73 μm)组分中仅在个别样品中出现。综合对比发现: 两个粒级的石榴子石、钛铁矿、绿帘石、独居石和赤褐铁矿含量存在明显差别, 但两粒级组分之间的重矿物组合种类及重矿物含量分布相关性很高, 说明矿物源区一致, 但分选作用使不同粗细的矿物颗粒分离, 富集于不同粒级组分中。

图2为(<73 μm)与(73~125 μm)两个粒级子样不同重矿物组成的相对含量偏差(RD)分布情况。其计算公式如下(杨守业等, 1999):

$$(RD) = \frac{C_a - C_b}{C_a + C_b} \times 200 \quad (1)$$

式中,  $C_a$ 为(<73 μm)粒级组分中的矿物平均含

表2 呼伦贝尔沙地矿物稳定性分类

Table 2 Classification of mineral stability in Hulun Buir sandy land

极稳定矿物	稳定矿物	相对稳定矿物	不稳定矿物
锆石	钛铁矿	绿帘石	角闪石
电气石	赤褐铁矿	榍石	辉石
金红石	磁铁矿	磷灰石	
	白钛石		
	锐钛矿		
	石榴子石		

表3 呼伦贝尔沙地重矿物特征指数

Table 3 Characteristic index of heavy minerals in Hulun Buir Sandy Land

	<73 μm						73~125 μm					
	HL30	HL33	HL34	HL35	HL36	HL37	HL30	HL33	HL34	HL35	HL36	HL37
ATI	89.059	57.0207	42.5925	43.1372	16.3415	44.0049	76.4705	23.316	7.167	34.088	90.75	86.263
GZI	2.8409	40.5263	73.8558	52.2708	54.8594	54.0049	0.6734	85.011	89.735	93.44	91.215	88.843
ZTR	10.852	8.7	9.856	14.814	12.852	9.857	14.133	8.78	7.645	4.587	4.294	5.04

量;  $C_b$  为(73~125 μm) 粒级组分的矿物平均含量。 $RD$  的绝对值越大, 表明(<73 μm) 粒级组分中的矿物平均含量与(73~125 μm) 粒级组分的矿物平均含量相差越大。

赤褐铁矿、锐钛矿、钛铁矿、锆石  $RD$  值相对较高, 说明这些矿物在(<73 μm) 的粒级组分中较(73~125 μm) 组分富集。石榴子石、独居石、榍石和蓝晶石矿物在(<73 μm) 粒级中的含量明显低于(73~125 μm) 的组分, 说明这些矿物在(73~125 μm) 组分中较为富集。

总体而言, (<73 μm) 的重矿物组分中极稳定矿物(锆石、金红石和电气石) 平均含量为 11.16%, 高于(73~125 μm) 的组分的平均含量(7.413%)。

在稳定矿物中, (<73 μm) 组分的赤褐铁矿的平均含量为 13.65%, 显著高于(73~125 μm) 组分的平均含量(4.877%)。(<73 μm) 组分中的钛铁矿平均含量为 21.39%, 显著高于(73~125 μm) 组分的平均含量(12.15%), 石榴子石在(73~125 μm) 组分中的平均含量为 27.96%, 显著高于(<73 μm) 组分的石榴子石平均含量。而其他稳定矿物, 如锐钛矿和磁铁矿的平均含量略高于(73~125 μm) 组分, 白钛石的平均含量则略低于(73~125 μm) 组分, (<73 μm) 组分

的稳定矿物平均含量(55.4%) 略高于(73~125 μm) 组分(54.52%)。

在相对稳定矿物中, 绿帘石为主要矿物, 在(73~125 μm) 组分中的平均含量为 16.93%, 高于(<73 μm) 组分的平均含量(13.23%), 其他相对稳定矿物, 榍石的平均含量分别为 1.759% 和 4.142%, (73~125 μm) 组分略高于(<73 μm) 组分, 磷灰石则略低于(<73 μm) 的组分。总体来看, (73~125 μm) 组分的稳定矿物平均含量(21.85%) 高于(<73 μm) 组分的稳定矿物平均含量(16.15%)。

在不稳定矿物中, (<73 μm) 组分的角闪石平均含量略低于(73~125 μm) 组分, 而辉石则高于(73~125 μm) 组分, 总体而言, (73~125 μm) 组分的不稳定矿物平均含量(11.63%) 略高于(<73 μm) 组分(10.03%)。

图3 为呼伦贝尔沙地两个组分稳定性对比图, 从图中可以看出两个组分高度重合, 但是稳定矿物和极稳定矿物优先富集于细颗粒组分, 说明分选作用加强了细颗粒组分的稳定性。

图4 为呼伦贝尔沙地重矿物特征指数曲线, 其中, 两种粒级组分的  $ATI$  指数总体区别不大, 但河流

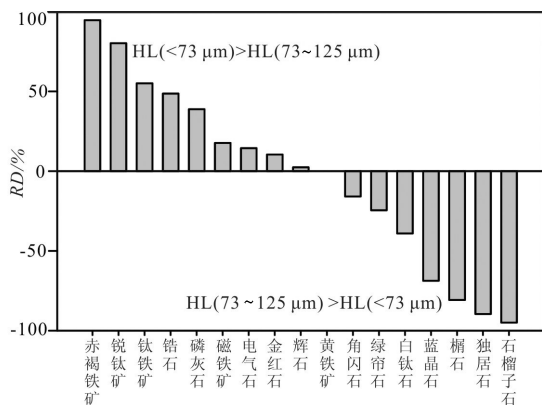


图2 呼伦贝尔沙地两粒级组分重矿物含量偏差( $RD$ )图  
Fig.2 Comparison of relative deviation ( $RD$ ) contents of two kinds of particles heavy mineral

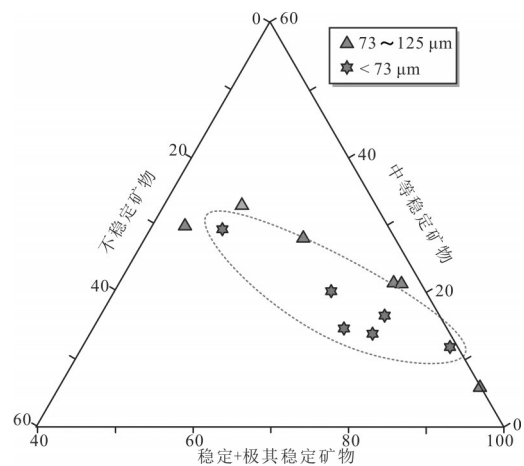


图3 呼伦贝尔沙地两个组分稳定性对比图  
Fig.3 Comparison of stability of two components in Hulun Buir sandy land

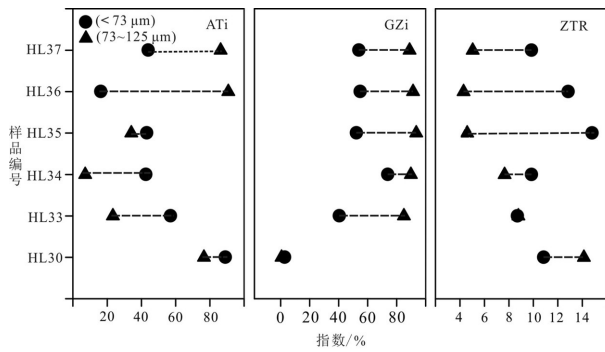


图4 呼伦贝尔沙地重矿物指数曲线  
Fig.4 Heavy mineral index of Hulun Buir sandy land

沙(HL36、HL37)与风成沙样品(HL30、HL33、HL34、HL35)的ATi指数发生转变;(73~125 μm)组分的GZi指数总体大于(<73 μm)组分;(<73 μm)组分的ZTR指数总体高于(73~125 μm)组分。

ATi指数增大的原因有两种可能:一是沉积物源区发生调整,含有磷灰石的母岩增加;二是沉积环境发生变化,水动力加强,沉积速率加快,致使磷灰石风化程度减弱。同一源区不同强度分选作用下的ATi指数存在差异,在风成沙中(弱分选)磷灰石优先富集于细颗粒组分中,所以细颗粒的ATi指数高于粗颗粒,而采集的HL36和HL37样品为风蚀洼地地下覆的河流沙,由于水动力分选作用较强,粗颗粒组分沉积速率较快,风化程度弱,ATi指数较低。GZi与石榴子石的含量有很好的正相关性,(73~125 μm)组分的GZi指数总体大于(<73 μm)组分,相比之下较高的GZi指数反映沉积环境发生了变化或是水动力加强,分选作用下的石榴子石优先

富集于粗颗粒组分,使GZi指数高于细颗粒组分,但河流沙与风成沙没有显著变化,说明GZi指数在不同强度下的分选作用影响不大。(<73 μm)粒级组分的ZTR指数总体高于(73~125 μm)粒级组分,这说明细颗粒组分的成熟度更高;在河流沙中,(73~125 μm)组分中的ZTR指数显著低于(<73 μm)组分,较强的分选作用同时作用于粗细颗粒,但细颗粒组分更易被风化磨蚀,搬运距离更远,使细颗粒组分的成熟度更高。

综合重矿物含量、重矿物组合、重矿物稳定性和重矿物指数来看,分选作用对重矿物的影响主要有:(1)石榴子石、独居石、榍石富集于较粗颗粒;赤褐铁矿、锐钛矿、钛铁矿、金红石、电气石和锆石富集于较细颗粒。(2)两个组分的平均ATi指数总体区别不大,(73~125 μm)组分的GZi指数总体大于(<73 μm)组分,(<73 μm)组分的ZTR指数总体高于(73~125 μm)组分。(3)两个粒级组分在不同强度分选作用下的ATi和ZTR指数存在差异,对GZi指数的影响不大。(4)分选作用下的稳定和极其稳定矿物优先富集于细颗粒,使细颗粒组分沉积物的总体稳定性更强。

### 3.3 Sr-Nd同位素组成

Sr-Nd同位素组成在风化搬运和沉积等地表过程中能保持很大的稳定性,因此被广泛应用于风尘物源的追踪。表4为呼伦贝尔沙地的Sr-Nd同位素组成,呼伦贝尔沙地的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值较为稳定,在0.709322~0.710348(均值0.709835),但ε<sub>Nd</sub>(0)值变化较大,在-4.954~-9.636(均值-7.285)。与黄土高原

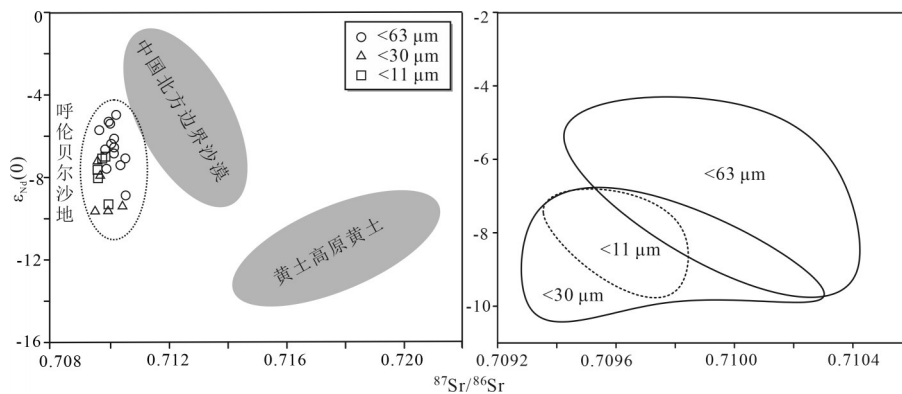


图5 呼伦贝尔沙地不同粒度Sr-Nd同位素组成与中国北方边界沙漠、黄土高原黄土Sr-Nd同位素组成对比  
Fig.5 Sr-Nd isotopic compositions of the Hulun Buir sandy land, in comparison with those of the loess in the CPL, the deserts around northern boundary of China



黄土(Rao et al., 2008; Li et al., 2009)及中国北方边界沙漠(Chen et al., 2007; Li et al., 2009)相比,呼伦贝尔沙地的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值明显低于黄土高原黄土和略低于北方边界沙漠,但 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值略低于北方边界沙漠和略高于黄土高原黄土(图5)。

### 3.4 粒度对Sr-Nd同位素组成的影响

粒度对沉积物Sr-Nd同位素组成的影响,尽管存在不同意见(Derry et al., 1996; Smith et al., 2003; Feng et al., 2009; Li et al., 2015; Bayon et al., 2015; Bi et al., 2017),但普遍认为(Dasch et al., 1969; Goldstein et al., 1984; Nakai et al., 1993; 饶文波等, 2005; Rao et al., 2006; Chen et al., 2007; Meyer et al., 2011; Shi et al., 2011; Dou et al., 2016; Rao et al., 2017),沉积物Nd同位素组成没有受到粒度变化的明显影响,基本继承了其母岩的特征。然而,沉积物Sr同位素组成的影响因素较多,不仅受母岩Sr同位素组成的影响,还受粒度和化学风化作用的制约。

普遍认为沉积物中的Nd同位素基本不受粒度的影响,但也有一些其他的研究结果(Bayon et al., 2015; Bi et al., 2017)。一些研究显示,沉积物的粒度越细, $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值越高,而某些小型河流沉积物则没有表现出与Nd同位素组成的相关关系。另外,不同类型沉积物的Nd同位素组成与粒度的关系模式也不尽相同(Feng et al., 2009),黄土的 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值很少受粒度的影响,但现代尘暴沉降物的Nd同位素值受粒度的影响明显。在笔者的研究中(表4),不同粒度组分的 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值存在高达4.66  $\epsilon$ 单位的变化,而且表现出细颗粒组分有更低 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值的趋势(图5)。

一些研究认为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值随着粒度变细而增加(Dasch et al., 1969; 饶文波等, 2005; Rao et al., 2006; Meyer et al., 2011; Dou et al., 2016),因为沉积物中的细颗粒组分通常含有更多的富含Rb(K)的黏土矿物(具有更高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值)。但是在我们的研究中(表4),不同粒度组分的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化很小,最大变化仅为0.000801,远小于黄土高原风尘物质(黄土和红黏土)的0.003516~0.011821的变化区间(Rao et al., 2006; Chen et al., 2007),同样远小于区域样品之间的变化(一般小于0.004000),不同粒度组分中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值并没有表现出细颗粒组分为较高值的趋势,比值分布并没有明显的变化规律(图5)。这表明样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值主要受物源的影响,

表4 呼伦贝尔沙地的Sr-Nd同位素组成

Table 4 Sr and Nd isotopic compositions of the Hulun Buir sandy land

粒度	编号	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$
<63 $\mu\text{m}$	HL1	0.710035	0.512384	-4.95
	HL2	0.710361	0.512184	-8.85
	HL3	0.710182	0.512259	-7.39
	HL4	0.709834	0.512362	-5.38
	HL5	0.709465	0.512346	-5.69
	HL6	0.709662	0.512298	-6.63
	HL7	0.709782	0.512367	-5.28
	HL8	0.709961	0.512288	-6.82
	HL9	0.709967	0.512325	-6.10
	HL10	0.709966	0.512303	-6.53
	HL11	0.710348	0.512276	-7.06
	HL12	0.709708	0.51225	-7.56
	HL13	0.70987	0.512312	-6.35
<30 $\mu\text{m}$	HL1	0.709767	0.512145	-9.61
	HL3	0.709507	0.512233	-7.90
	HL4	0.709418	0.512269	-7.19
	HL5	0.710266	0.512158	-9.36
	HL6	0.709322	0.512144	-9.63
	<11 $\mu\text{m}$	HL1	0.70964	0.512274
HL3		0.709585	0.512274	-7.10
HL4		0.709419	0.512228	-7.99
HL5		0.709777	0.512159	-9.34
HL6		0.709392	0.512247	-7.62

受粒度的影响较小(Li et al., 2015)。

由于动力分选作用,不同源区(具有不同Sr-Nd同位素组成特征)和不同粒径的沉积物在迁移和沉积的途中被分离并富集于不同粒度组分中。所以,沉积物Sr-Nd同位素在不同粒度组分中的分布可以由具有单一物源纯粹动力分选引起,同样也可以由不同物源沉积物的混合引起,但如何区别它们是一个值得探讨的问题。对于单一物源的沉积物而言,如果我们接受细颗粒组分具有更高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,而Nd同位素比值几乎不受粒度的影响或富集在细颗粒组分中,那么Sr-Nd同位素组成富集在粗颗粒组分中(或者与粒度的相关性较差)完全可以用不同物源的混合来解释。因此,本研究中的Sr-Nd同位素组成在不同粒度组分中的富集表现进一步说明了沉积物Sr-Nd同位素组成主要受控于源区母岩的变化。

### 3.5 Sr-Nd同位素组成随时间的变化

本研究在呼伦贝尔沙地的其中一个剖面进行了纵向上的采样测试,用以了解该区域Sr-Nd同位素组成随时间的变化,自下而上分别为含砾的粗砂、粗砂、

中细砂,剖面上沉积物的Sr-Nd同位素比值发生很大变化,特别是 $\epsilon_{Nd}(0)$ 值发生显著变化,所有剖面的 $\epsilon_{Nd}(0)$ 值的变化都在1 $\epsilon$ 单位以上,最大可达3.9 $\epsilon$ 单位,说明沉积物的Nd同位素组成随时间发生了明显变化。沉积物Sr-Nd同位素组成随时间的变化反映了潜在源区地球化学组成的稳定性,这种变化在分析风尘系统物源示踪时带来深层次的理解。

首先,对比沉积物与潜在源区的地球化学组成,是物源示踪的主要的方法,潜在源区的地球化学组成通常是对源区的表土进行采样分析,而表土的地球化学特征与风尘黄土堆积时期的源区表土特征并非相同。因为这种不等时性,对源区和潜在源区的地球化学组成简单地对比有很大可能是错误的。

其次,风尘黄土物源是否发生过变化一直是黄土高原黄土风尘物源研究的争论点,多数研究基于剖面上黄土物质组成随时间的变化而得出的结论,在纵向上随时间的变化,地球化学组成发生变化通常被归因于粉尘源区的改变。同一粉尘源区,由于粉尘源区的地球化学组成会随时间的发生变化,发生了变化的粉尘供应同样会导致堆积区风尘物质组成的变化。所以,堆积区风尘物质地球化学组成的变化不一定意味着物源区的变化,也可能是同一物源区提供的风尘物质的地球化学特征的变化。

### 3.6 对亚洲风尘系统的指示

重矿物(Nie et al., 2013; Peng et al., 2016)和Sr-Nd同位素(Chen et al., 2007; Li et al., 2009)在亚洲风尘系统研究中被广泛用于物源示踪。沙漠、沙地与黄土在成因和气候演变过程中具有耦合关系,亚洲粉尘源自中亚内陆区广泛分布的荒漠地带,通过释放和搬运,堆积在下风方向地区,这些堆积的粉尘物质随着气候变化形成黄土-古土壤序列。在沙漠、沙地腹地及边缘的风成沉积物(风成沙和黄土)被广泛用于气候环境变化研究,为揭示亚洲内陆干旱化、北半球风尘源区、过去大气环流格局及全球古气候变化、构造-地貌-水系演化地表过程等重要信息提供了重要档案。

如上所述,在物源一致的条件下,重矿物组成在不同粒度下的特征是不同的,存在明显的粒度效应。而且,不同样品同一粒度组分重矿物组成特征也差异明显。所以,在利用重矿物进行物源示踪

研究时,需谨慎使用,单个样品很难具有区域代表性,需保证足够的样品量,且在同一粒度中进行对比。同时,在风尘物源研究中,Nd同位素组成的粒度效应和Sr-Nd同位素组成的“时间效应”也是需要考虑的。鉴于如上因素,在利用重矿物和Sr-Nd同位素组成进行亚洲风尘系统研究时,为了从沉积物中获取相对清晰和完整的源区地质信息,宽/多粒度组分(粒度窗口)以及充足的样品量必须被充分考虑,如此才能最小化或消除粒度和时间效应带来的偏差。

## 4 结 论

对呼伦贝尔沙地分粒度组分的重矿物和Sr-Nd同位素组成的分析得出以下主要结论:

(1)受分选作用的影响,不同矿物优先富集于不同粒度组分中,重矿物含量、重矿物指数和重矿物组合均发生了改变。稳定和极其稳定矿物优先富集于细颗粒,细颗粒沉积物的总体稳定程度加强。

(2) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值受粒度的影响很小,但Nd同位素组成明显受粒度效应的影响,并表现出粗颗粒组分有更高Nd同位素比值的趋势,这与以前的Sr-Nd同位素的粒度依靠的研究结果不同;呼伦贝尔沙地的Sr-Nd同位素组成存在时间效应,即随时间发生了明显变化,表明了风尘源区地球化学组成的不稳定性。

(3)由于粒度和时间效应模糊了沉积物所携带的源区地质信息,在利用重矿物和Sr-Nd同位素组成进行风尘系统研究时,应充分考虑宽/多粒度组分以及充足的样品量以弥补粒度和时间效应带来的偏差。

**致谢:**河北廊坊诚信地质公司的张佩萱、李鹏、王晓飞、周佳、张云丹、李必成和刘铮等做了大量的样品测试工作,吴鹏和魏振宇参加了呼伦贝尔沙地的部分野外取样,张月馨、张曼和刘璐参与了样品的分粒度处理,在此一并表示衷心的感谢!

## References

- Bayon G, Toucanne S, Skonieczny C, André L, Bermell S, Cheron S, Dennielou B, Etoubleau J, Freslon N, Gauchery T, Germain Y, Jorry S J, Ménot G, Monin L, Ponzevera E, Rouget M L, Tachikawa K, Barrat J A. 2015. Rare earth elements and neodymium isotopes in world river sediments revisited[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 170: 17-38.
- Bi L, Yang S, Zhao Y, Wang Z, Dou Y, Li C, Zheng H. 2017.



- Provenance study of the Holocene sediments in the Changjiang (Yangtze River) estuary and inner shelf of the East China sea[J]. *Quaternary International*, 441: 147–161.
- Chen J, Li G, Yang J, Rao W, Lu H, Balsam W, Ji J. 2007. Nd and Sr isotopic characteristics of Chinese deserts: Implications for the provenances of Asian dust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(15): 3904–3914.
- Chen J, Li G. 2011. Geochemical studies on the source region of Asian dust[J]. *Science China Earth Sciences*, 54(9): 1279.
- Chen Z, Li G. 2013. Evolving sources of eolian detritus on the Chinese Loess Plateau since early Miocene: Tectonic and climatic controls[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 371: 220–225.
- Dasch E J. 1969. Strontium isotopes in weathering profiles, deep-sea sediments, and sedimentary rocks[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 33(12): 1521–1552.
- Derry L A, France Lanord C. 1996. Neogene Himalayan weathering history and river  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ : Impact on the marine Sr record[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 142(1–2): 59–74.
- Dou Y, Yang S, Shi X, Clift P. D, Liu S, Liu J, Li C, Bi L, Zhao Y. 2016. Provenance weathering and erosion records in southern Okinawa Trough sediments since 28 ka: Geochemical and Sr–Nd–Pb isotopic evidences[J]. *Chemical Geology*, 425: 93–109.
- Feng J L, Zhu L P, Zhen X L, Hu Z G. 2009. Grain size effect on Sr and Nd isotopic compositions in eolian dust: implications for tracing dust provenance and Nd model age[J]. *Geochemical Journal*, 43(2): 123–131.
- Goldstein S L, O'Nions R K, Hamilton P J. 1984. A Sm–Nd isotopic study of atmospheric dusts and particulates from major river systems[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 70(2): 221–236.
- Grousset F E, Biscaye P E. 2005. Tracing dust sources and transport patterns using Sr, Nd and Pb isotopes[J]. *Chemical Geology*, 222(3/4): 149–167.
- Li G, Pettke T, Chen J. 2011. Increasing Nd isotopic ratio of Asian dust indicates progressive uplift of the north Tibetan Plateau since the middle Miocene[J]. *Geology*, 39(3): 199–202.
- Li G, Chen J, Ji J, Yang J, Conway T. M. 2009. Natural and anthropogenic sources of East Asian dust[J]. *Geology*, 37(8): 727–730.
- Li T, Xu Z, Lim D, Chang F, Wan S, Jung H, Choi J. 2015. Sr–Nd isotopic constraints on detrital sediment provenance and paleoenvironmental change in the northern Okinawa Trough during the Late Quaternary[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 430: 74–84.
- Liu Haijiang, Chai Huixia, Cheng Weiming, Zhong Decai, Zhou chenghu. 2008. A research of aeolian landform in northern China based on remote sensing imagery[J]. *Geographical Research*, 27(1): 109–118 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jin, Wang Yong, Yao Peiyi. 2015. A study of paleoclimate changes in east Inner Mongolia since the Last deglaciation on the basis of aeolian sand–paleosol series geochemical records[J]. *Geology in China*, (4): 1103–1114 (in Chinese with English abstract).
- Meyer I, Davies G R, Stuut J B W. 2011. Grain size control on Sr–Nd isotope provenance studies and impact on paleoclimate reconstructions: An example from deep-sea sediments offshore NW Africa[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12(3): 1–4.
- Morton A C, Hallsworth C R. 1999. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones[J]. *Sedimentary Geology*, 124(1/4): 3–29.
- Morton A C, Hallsworth C. 1994. Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones[J]. *Sedimentary Geology*, 90(3/4): 241–256.
- Morton A C, Johnsson M J. 1993. Factors influencing the composition of detrital heavy mineral suites in Holocene sand of the Apure River drainage basin, Venezuela[C]//Processes Controlling the Composition of Siliciclastic Sediments. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 284: 171–185.
- Morton A C. 1985. Heavy Minerals in provenance studies[C]//Provenance of Arenites. Springer, Dordrecht: 249–277.
- Morton A, Hurst A. 1995. Correlation of sandstones using heavy minerals: An example from the Statfjord Formation of the Snorre Field, northern North Sea[J]. *Geological Society*, 89(1): 3–22.
- Nakai S, Halliday A N, Rea D K. 1993. Provenance of dust in the Pacific Ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, (1/2): 143–157.
- Nie J S, Peng W B, Pfaff K, Möller A, Garzanti E, Andò S, Stevens T, Birde A, Chang H, Song Y G, Liu S P, Ji S C. 2013. Controlling factors on heavy mineral assemblages in Chinese loess and Red Clay[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 381/382: 110–118.
- Nie J, Peng W, Möller A, Song Y, Stockli D F, Stevens T, Gong H. 2014. Provenance of the upper Miocene–Pliocene Red Clay deposits of the Chinese loess plateau[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 407: 35–47.
- Nie J, Peng W. 2014. Automated SEM–EDS heavy mineral analysis reveals no provenance shift between glacial loess and interglacial paleosol on the Chinese Loess Plateau[J]. *Aeolian Research*, 13: 71–75.
- Peng W B, Wang Z, Song Y G, Pfaff K, Luo Z, Nie J S, Chen W H. 2016. A comparison of heavy mineral assemblage between the loess and the Red Clay sequences on the Chinese Loess Plateau[J]. *Aeolian Research*, 21: 87–91.
- Pettijohn F J, Potter Paul E, Siever Raymond. 1977. Sand and Sandstone[M]. Beijing: Science Press, 35–40 (in Chinese with English abstract).
- Rao W, Chen J, Yang J, Ji J, Li G, Tan H. 2008. Sr–Nd isotopic characteristics of eolian deposits in the Erdos Desert and Chinese Loess Plateau: Implications for their provenances[J]. *Geochemical Journal*, 42(3): 273–282.
- Rao W, Mao C, Wang Y, Huang H, Ji J. 2017. Using Nd–Sr isotopes

- and rare earth elements to study sediment provenance of the modern radial sand ridges in the southwestern Yellow Sea[J]. *Applied geochemistry*, 81: 23–35.
- Rao W, Yang J, Chen J, Li G. 2006. Sr–Nd isotope geochemistry of eolian dust of the arid–semiarid areas in China: Implications for loess provenance and monsoon evolution[J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(12): 1401–1412.
- Rao Wenbo, Yang Jiedong, Chen Jun, Ji Junfeng, Li Gaojun. 2005. Discussion on the influencing factors of Sr–Nd isotopic composition change in northern dust[J]. *Quaternary Sciences*, 25(4): 531–532(in Chinese with English abstract).
- Shi Z, Liu X. 2011. Distinguishing the provenance of fine–grained eolian dust over the Chinese Loess Plateau from a modelling perspective[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 63(5): 959–970.
- Smith J, Vance D, Kemp R A, Archer C, Toms P, King M, Zárate M. 2003. Isotopic constraints on the source of Argentinian loess—with implications for atmospheric circulation and the provenance of Antarctic dust during recent glacial maxima[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 212(1/2): 181–196.
- Sun J. 2002. Provenance of loess material and formation of loess deposits on the Chinese Loess Plateau[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 203(3/4): 845–859.
- Sun J. 2002. Source regions and formation of the loess sediments on the high mountain regions of northwestern China[J]. *Quaternary Research*, 58(3): 341–351.
- Wang Zhongbo, Yang Shouye, Li ping, LI Congxian, Cai Jingong. 2006. Detrital mineral compositions of the Changjiang River sediments and their tracing implications[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(4): 570–578(in Chinese with English abstract).
- Wu P, Xie Y Y, Chi Y P, Kang C G, Sun L, Wei Z Y, Zhang M, Zhang Y X. 2021. Loess accumulation in Harbin with implications for Late Quaternary aridification in the Songnen Plain, Northeast China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 570(1): 110365.
- Yang Shouye, Li Congxian. 1999. Element composition and tracer action of modern surface sediments in Yangtze River and Yellow River[J]. *Progress in Natural Science*, 9(10): 930–937(in Chinese with English abstract).
- Yuan Fang, Xie Yuanyun, Chi Yunping. 2018. Material characteristics of dust fallouts during the dust–storm weather in Harbin: Constraint on the provenance[J]. *Geology in China*, 45(6): 1177–1187(in Chinese with English abstract).
- Zhang X Y, Arimoto R, An Z S. 1997. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D23): 28041–28047.
- Zhao Hongge, Liu Chiyang. 2003. Approaches and prospects of provenance analysis[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(3): 409–415(in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 刘瑾, 王永, 姚培毅, 迟振卿, 李廷栋, 耿树方. 2015. 末次冰消期以来内蒙古东部气候变化——基于风成砂–古土壤序列的地球化学记录[J]. *中国地质*, 42(4): 1103–1114.
- 刘海江, 柴慧霞, 程维明, 钟德才, 周成虎. 2008. 基于遥感的中国北方风沙地貌类型分析[J]. *地理研究*, 27(1): 109–118.
- 饶文波, 杨杰东, 陈骏, 季峻峰, 李高军. 2005. 北方风尘中Sr–Nd同位素组成变化的影响因素探讨[J]. *第四纪研究*, 25(4): 531–532.
- 王中波, 杨守业, 李萍, 李从先, 蔡进功. 2006. 长江水系沉积物碎屑矿物组成及其示踪意义[J]. *沉积学报*, 24(4): 570–578.
- 杨守业, 李从先. 1999. 长江与黄河现代表层沉积物元素组成及其示踪作用[J]. *自然科学进展*, 9(10): 930–937.
- 袁方, 谢远云, 迟云平. 2018. 哈尔滨尘暴天气沉降物的物质组成及其对物源的限制[J]. *中国地质*, 45(6): 1177–1187.
- 赵红格, 刘池洋. 2003. 物源分析方法及研究进展[J]. *沉积学报*, 21(3): 409–415.