



东北沙地重矿物组成及其对物源的指示

张鑫茹, 谢远云, 迟云平, 康春国, 孙磊, 吴鹏, 魏振宇

Heavy mineral compositions in the northeast sandy lands and the provenance analysis

ZHANG Xinru, XIE Yuanyun, CHI Yunping, KANG Chunguo, SUN Lei, WU Peng, and WEI Zhenyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022110501>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

闽江河口表层沉积物重矿物特征与物源示踪

Heavy mineral composition in surface sediments of the Minjiang River estuary and its implications for provenance

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(1): 87-95

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

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

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 192-206

南海东北部GMGS2-16站位自生矿物特征及对水合物藏演化的指示意义

Authigenic minerals at site GMGS2-16 of northeastern South China Sea and its implications for gas hydrate evolution

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(5): 144-155

文登近岸海域重矿物组合分布及对沉积动力环境的指示

Distribution of heavy mineral assemblages in Wendeng nearshore waters and their implications for sedimentary dynamic environment

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(1): 127-138

珠江口内伶仃洋晚第四纪黏土矿物组成特征及对源区气候变化的指示

Late Quaternary clay minerals in the inner Lingdingyang of the Pearl River Estuary, southern China: Implications for paleoclimate changes at the provenance

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 202-209

渤海西部表层沉积物中黏土矿物分布特征及物源指示

CLAY MINERALS DISTRIBUTION PATTERN IN SURFACE SEDIMENTS OF WESTERN BOHAI AND THEIR PROVENANCE IMPLICATIONS

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(1): 51-58



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张鑫茹, 谢远云, 迟云平, 等. 东北沙地重矿物组成及其对物源的指示[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(6): 181-190.

ZHANG Xinru, XIE Yuanyun, CHI Yunping, et al. Heavy mineral compositions in the northeast sandy lands and the provenance analysis[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(6): 181-190.

东北沙地重矿物组成及其对物源的指示

张鑫茹¹, 谢远云^{1,2}, 迟云平^{1,2}, 康春国³, 孙磊¹, 吴鹏¹, 魏振宇¹

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: 了解中国东北沙地的重矿物组成并探讨其在亚洲风尘系统研究中的作用具有重要意义。目前较少甚至缺乏的重矿物数据, 这影响了对该地区风尘系统的深入理解。为分析东北沙地的重矿物组成并探究其在东北风尘系统研究中的作用, 分别从浑善达克沙地 (OD)、科尔沁沙地 (HQ)、呼伦贝尔沙地 (HL) 和松嫩沙地 (SN) 采集了 34 个风成沙和河流沙样品并进行了分粒级处理 ($<63\ \mu\text{m}$ 及 $63\sim125\ \mu\text{m}$)。同时, 从哈尔滨荒山黄土剖面采集了 4 个末次冰期黄土样品 ($<63\ \mu\text{m}$), 利用 Frequentist 模型对哈尔滨黄土物源进行了定量重建。通过范围检验、非参数 Kruskal-Wallis H 检验和逐步判别函数分析 (DFA), 选择了 7 种重矿物及特征指数 (蓝晶石、锐钛矿、石榴子石、辉石、钛铁矿 (磁性)、稳定系数 W 、GZi 指数) 作为最佳复合指标进行定量重建。结果表明, 钛铁矿 (磁性) 为浑善达克沙地的特征矿物, 磁铁矿为科尔沁沙地的特征矿物, 氧化铁矿物 (赤铁矿、褐铁矿) 为呼伦贝尔沙地的特征矿物, 氧化铁矿物 (磁性)、绿帘石、角闪石和石榴子石为松嫩沙地的优势矿物; 不同粒度组分重矿物含量存在明显差异, 极稳定矿物优先富集于细颗粒。哈尔滨黄土与松嫩和呼伦贝尔沙地 ($<63\ \mu\text{m}$ 组分) 具有相近的重矿物组成, 而与浑善达克和科尔沁沙地有一定程度的差异。根据 Frequentist 模型, 哈尔滨黄土的来源贡献依次为: 松嫩沙地 (44%~86%)、呼伦贝尔沙地 (10%~39%)、科尔沁沙地 (3%~16%) 和浑善达克沙地 (0~7%)。本研究突出了细颗粒沉积物的重矿物组成结合定量模型在风尘物源示踪研究中具有很好的应用前景。

关键词: 重矿物组成; 哈尔滨黄土; 定量物源重建; 中国东北部沙地

中图分类号: P532

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022110501

Heavy mineral compositions in the northeast sandy lands and the provenance analysis

ZHANG Xinru¹, XIE Yuanyun^{1,2}, CHI Yunping^{1,2}, KANG Chunguo³, SUN Lei¹, WU Peng¹, WEI Zhenyu¹

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

2. Heilongjiang Province 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: To understand the role of play in the Asian aeolian dust system, the heavy mineral composition of the sandy land in Northeast China was analyzed. At present, in-depth study in this regard is lacking, which limited our understanding of the wind dust system in this area. Therefore, 34 samples of eolian and fluvial sand were collected from Onqin Daga sandy land (OD), Horqin sandy land (HQ), Hulun Buir sandy land (HL), and Songnen sandy land (SN), from which two particle-size fractions ($<63\ \mu\text{m}$, $63\sim125\ \mu\text{m}$) were processed and analyzed. In addition, four loess samples ($<63\ \mu\text{m}$) of the Last Glacial Period were collected from a loess profile in barren mountains near Harbin. The source areas of the Harbin loess were reconstructed quantitatively in the Frequentist model. After the range test, non-parametric Kruskal-Wallis H-test, and stepwise discriminant function analysis, seven heavy minerals (kyanite, anatase, garnet, pyroxene, ilmenite etc), and four characteristic indices indicating anti-erosion ability and mother-rock composition were selected for quantitative reconstruction. Results show that ilmenite (magnetic) is the characteristic mineral of OD, magnetite is that of HQ, iron oxide minerals (hematite, limonite) are those of HL, and iron oxide minerals (magnetic), epidote, amphibole and garnet are dominant minerals of SN. The contents of heavy minerals in various grain

资助项目: 国家自然科学基金“松嫩平原下更新统砂砾石地层特征及其对构造-地貌-气候-水系演化的指示”(42171006), “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)

作者简介: 张鑫茹 (1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为第四纪地质与环境变化, E-mail: 18646899608@163.com

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

收稿日期: 2022-11-05; **改回日期:** 2023-01-17. 文凤英编辑

size fractions are different, and highly stable minerals are preferentially enriched in fine particles. The Harbin loess and SN and HL ($<63\ \mu\text{m}$ component) have similar heavy mineral assemblages, but different from OD and HQ to some extents. The result of the Frequentist model shows that the contribution rate to the source of supply to the Harbin's loess is SN (44%~86%), HL (10%~39%), HQ (3%~16%), and OD (0~7%). This study highlights that the heavy mineral composition of fine sediment combined with the quantitative model has a good application prospect in the source tracing of wind dust.

Key words: heavy mineral compositions; Harbin loess; quantitative provenance reconstruction; sandy land in Northeast China

沙地作为潜在的粉尘源区,其重矿物组成研究是亚洲风尘系统研究的一项重要基础工作,对加深了解沙尘的形成和演化,以及沙尘的形成机制、来源和迁移路径提供了更好的理解^[1],对重建过去大气环流的演变具有重要意义。目前对沙地的研究主要分布在中国西部三大内陆盆地及西部和北部的戈壁、沙漠^[2-4],对中国东北部沙地地表物质组成的研究涉及很少^[5],可获得的数据很少,而且缺乏对重矿物粒度分选影响程度的理解。

重矿物具有密度高和稳定性强的特点,风化、搬运及成岩作用对其影响较弱,可以在很大程度上保留源区母岩的特征,因此在物源研究中得到了广泛的应用^[6-11]。传统的重矿物物源分析,通常利用重矿物的组合及分布规律、ZTR 指数或通过统计学方法来判断母岩类型并恢复不同物源体系的发育范围^[3,12-13]。最近,基于 R 语言分析的新型沉积物源指纹技术已成功应用于识别河流和风成沉积物的来源,并定量评估潜在来源的相对贡献^[14-17]。这种沉积物源指纹模型对于揭示粉尘沉积物的定量物源信息具有很大的潜力,但这种分析技术还未应用于重矿物物源分析中。

本研究从中国东北部 4 个沙地和哈尔滨地区末次冰期以来的黄土-古土壤序列中采集样本,提供沙地不同粒级组分下的重矿物组成特征,以期探讨中国东北部沙地物质组成以及分选作用对沙地重矿物组成的影响。运用 Frequentist 模型,定量评估各沙地对哈尔滨黄土的贡献,为丰富亚洲风尘系统研究以及深层次理解东北平原风尘系统提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

中国东北部沙地位于我国内蒙古自治区东部、黑龙江省和吉林省西部,包括浑善达克沙地(OD)、科尔沁沙地(HQ)、呼伦贝尔沙地(HL)和松嫩沙地(SN)(图 1)^[5]。浑善达克沙地(OD)面积为 52 000 km²,平均海拔约 1 100 m,位于内蒙古中部锡林郭勒草原

南端,以固定或半固定沙丘为主^[18]。科尔沁沙地(HQ)面积为 42 300 km²,在中国北方是面积最大的沙地,大部分为半稳定和稳定沙丘^[19],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),并通过西辽河与浑善达克沙地相连^[19-20]。呼伦贝尔沙地(HL)面积为 9 440 km²,是中国纬度最高的沙地之一,位于大兴安岭西部^[18]。松嫩沙地(SN)面积约为 17 800 km²,主要为半稳定和稳定沙丘,位于松嫩平原中部和西部^[21],主要分布在嫩江和松花江的洪泛平原和河流阶地上^[1,22]。

哈尔滨荒山黄土(HB, 45°47'N、126°47'E)位于松花江第二阶地上,距离哈尔滨市以东约 16 km,海拔 180 m,东侧为长白山余脉丘陵区,西与东北平原腹地相接,北临松花江干流^[23]。

1.2 样品采集

为了探讨中国东北部沙地的平均物质组成并避免人为因素干扰,本研究在远离市区的地方采集了 34 个沙地样品(这些样品覆盖了沙地绝大部分地区),其中 13 个样品来自浑善达克沙地,10 个样品来自科尔沁沙地,6 个样品来自呼伦贝尔沙地,5 个样品来自松嫩沙地。采集了哈尔滨荒山剖面 4 个末次冰期(L1)黄土样品(图 1)。以上每个采样点的地理位置用手持 GPS 确定。

1.3 实验方法

通过干筛法对沙地样品进行了分粒级制备($<63\ \mu\text{m}$, $63\sim125\ \mu\text{m}$),并对所有黄土样品进行了湿筛,以获得小于 $63\ \mu\text{m}$ 的部分,用于重矿物分析。

中国东北部沙地沉积物重矿物鉴定在河北省廊坊诚信地质公司完成,具体鉴定步骤如下:

(1)称重:将分粒级后的样品烘干后称重,并记录其原始的质量。

(2)分离:加入分散剂进行初淘得到灰砂,利用三溴甲烷(密度 $2.89\ \text{g}/\text{cm}^3$)进行分离,获得重矿物部分,待用酒精冲洗干净后,60 °C 恒温烘干称重,记录重矿物质量,为保证准确性每个样品中重矿物的总质量在 1 g 以上。

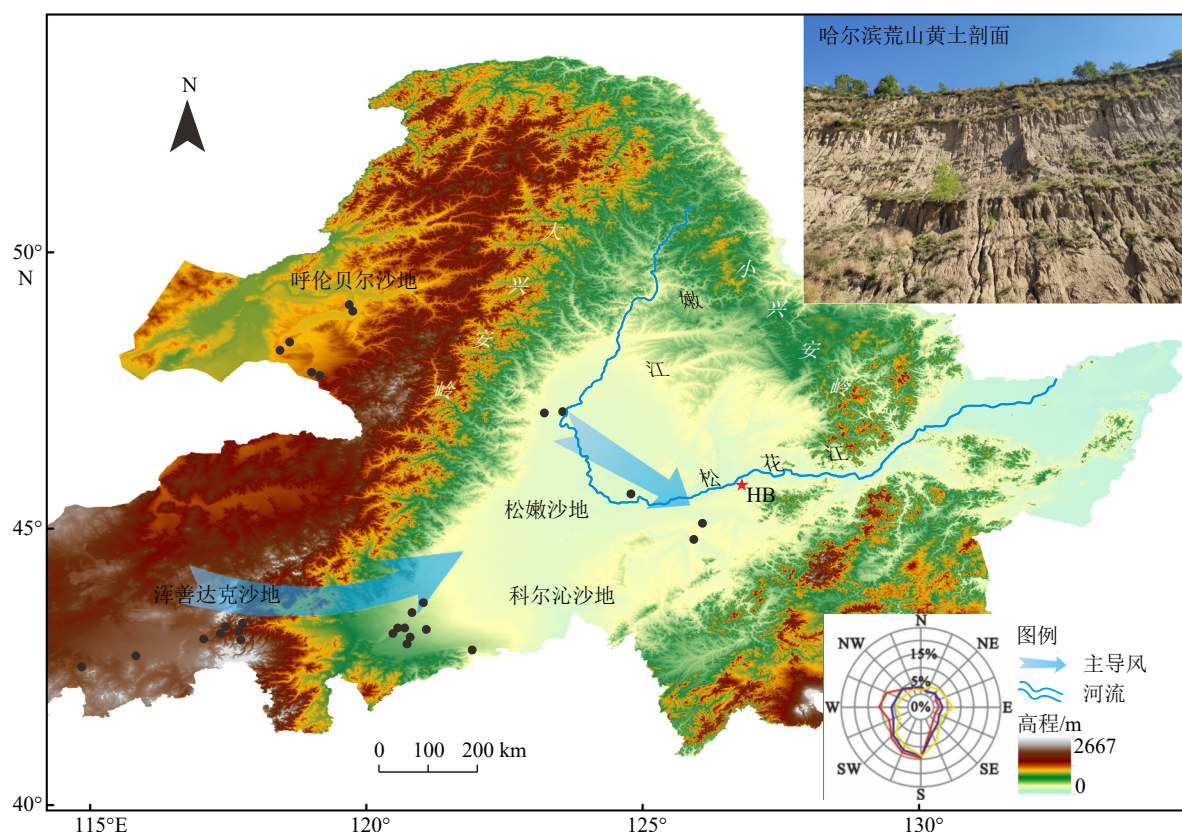


图 1 研究区 DEM 图

Fig.1 Digital elevation model map of the study area

(3)磁选:通过磁选分离出强磁矿物(如磁铁矿等)、电磁矿物(角闪石、石榴子石、辉石、橄榄石、电气石、榍石等)、无磁矿物(锆石、磷灰石、独居石等)以及其他矿物。

(4)镜下鉴定:对分离后不同磁性的矿物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,每个重矿物样品鉴定颗粒数超过 600,计算出每种重矿物的颗粒百分含量。

1.4 统计方法与模型

本研究区所处地理位置纬度较高,气候干冷,重矿物颗粒主要以物理破碎为主,化学风化极其微弱,重矿物的风化蚀变程度较低。此外,已存在大量包含赤铁矿、褐铁矿等相关的重矿物物源示踪研究^[5,13,24-25]。

稳定系数(W)指稳定重矿物与不稳定重矿物的含量之比,通常按照风化的难易程度,将搬运过程中可以稳定存在的矿物归为相对稳定矿物,搬运过程中易发生破碎不可以稳定存在的归为相对不稳定矿物。在本研究中极稳定矿物包括锆石、金红石、电气石,稳定矿物包括锐钛矿、白钛石、石榴子石、榍石、钛铁矿、氧化铁矿物(赤铁矿、褐铁矿)、

磁铁矿,不稳定重矿物包括绿帘石、磷灰石、角闪石、辉石^[7]。一般来说,重矿物稳定系数与沉积物受搬运的时间和距离成正比^[26-29]。

ZTR 指数为锆石、金红石及电气石在重矿物中所占的比例,其中锆石和金红石属于极稳定重矿物,而电气石也很稳定,因此可以用来确定成熟度和风化成壤作用的强弱,进而用来研究碎屑沉积物的搬运方向和搬运距离。ATi 指数($100 \times \text{磷灰石} / (\text{磷灰石} + \text{电气石})$),常用于揭示沉积物以母岩类型是酸性火成岩为主的物源变化情况。值得注意的是,ATi 指数还受到源区化学风化作用程度的控制。GZi 指数($100 \times \text{石榴子石} / (\text{石榴子石} + \text{锆石})$),主要用来揭示以石榴子石为主的母岩即角闪岩和麻粒岩的变化情况^[8,30-32]。

在本研究的指纹分析中,采用了 4 阶段统计程序来追踪物源^[16,33]。选择了 18 种重矿物和 4 种重矿物特征指数作为下一次统计分析的指纹属性。首先,进行指纹特性的范围测试^[34],以确定黄土特性的平均值和极值是否在潜在源区样品可观察的范围内,然后通过测试的属性可以在下一步中使用。其次,使用非参数 Kruskal-Wallis H 检验来检验哪些属性在潜在来源之间表现出显著差异^[35]。第三,采

用逐步判别函数分析(DFA)进一步识别最终的复合指纹,根据 Wilks'λ 的最小化,提供了潜在源区之间的最佳区分^[36]。最后,基于 DFA 筛选出的最佳复合指纹,使用 Frequentist 模型量化潜在物源对给定黄土样本的相对贡献^[16,33]。

本研究在标准线性多元混合框架下,采用 Frequentist 模型定量识别沉积物来源^[16],具体公式参考文献^[14]。Frequentist 模型采用基于 FingerPro 的方法,在 R 软件环境(版本 4.0.3)中实现。

2 结果与讨论

2.1 重矿物含量特征

沙地重矿物组成不仅由源区控制,而且与沉积环境、水动力作用和成岩作用有关,对区域沉积物

物质来源和演化研究具有重要意义,相关分析工作是重矿物分析的基础。中国东北部沙地检测出的重矿物有锆石、磷灰石、蓝晶石、金红石、锐钛矿、白钛石、独居石、榍石、石榴子石、电气石、角闪石、绿帘石、钛铁矿、氧化铁矿物(赤铁矿、褐铁矿)、辉石、磁铁矿、氧化铁矿物(磁性)、钛铁矿(磁性)共 18 余种,其他矿物仅在个别样品中出现,未在表 1 中列出。在本研究中,颗粒百分含量超过 6% 的重矿物被视为主要矿物,1%~6% 为次要矿物,小于 1% 为微量矿物。

浑善达克沙地中<63 μm 组分中的主要矿物为钛铁矿、绿帘石、锆石、钛铁矿(磁性)、辉石、角闪石、磁铁矿、石榴子石,次要矿物为氧化铁矿物、电气石、磷灰石,微量矿物有锐钛矿、金红石、白钛石、榍石、独居石。63~125 μm 组分中的主要矿物为石榴子石、绿帘石、钛铁矿、氧化铁矿物,次要矿

表 1 中国东北部沙地与哈尔滨黄土重矿物统计																		
Table 1 Statistics of heavy minerals in sandy land of Northeast China and loess in Harbin																		%
编号	锆石	磷灰石	蓝晶石	金红石	锐钛矿	白钛石	独居石	榍石	石榴子石	电气石	角闪石	绿帘石	钛铁矿	氧化铁矿物	辉石	磁铁矿	氧化铁矿物 (磁性)	钛铁矿 (磁性)
OD	<63 μm																	
	9.7	1.3	0	1.0	1.0	0.9	0.6	0.8	6.4	3.4	8.7	11.0	21.1	3.6	9.2	6.6	0	9.2
	63~125 μm																	
	4.0	0.4	0.2	1.7	0.1	1.9	1.2	4.3	27.4	0.9	5.0	20.2	20	5.7	0.8	1.5	0	0
HQ	<63 μm																	
	7.1	1.9	0	2.5	1.4	0.7	0.8	1.9	12.8	1.9	7.2	17.9	23.6	5.4	9.4	0.1	0	0
	63~125 μm																	
	3.9	0.1	0.2	1.5	0.1	2.3	1.9	4.8	34.6	1.6	2.5	21.2	16.1	2.7	1.1	0.6	0	0
HL	<63 μm																	
	8.9	1.2	0.1	1.1	0.3	1.5	0.3	1.8	10	1.2	9.4	13.2	21.4	13.6	0.4	7.2	0	0
	63~125 μm																	
	5.4	0.8	0.3	1.0	0.1	2.2	0.5	4.2	28.0	1.0	9.2	16.9	12.1	4.9	0.2	7.0	0	0
SN	<63 μm																	
	6.7	1.4	0	0.7	0.2	0.8	0.1	3.7	1.3	0.4	17.9	23.2	11.7	13.7	0.7	2.7	10	0
	63~125 μm																	
	1.6	1.0	0	0.2	0	0.7	0	4.8	0.9	0.1	28.2	27.7	7.3	13.0	1.3	0.9	6.6	0
HB2	<63 μm																	
	1.9	0	0	0.2	0.1	0.3	0	0.7	2.4	0.2	9.3	13.8	18.5	28.9	0	15.5	0	0
HB4	9.9	0.6	0	0.9	0.4	0.9	0	2.0	7.0	0.3	4.7	12.5	5.5	39.3	0.3	10.1	0	0
HB5	10	0.5	0	0.7	0.4	0.7	0	1.3	3.8	0.1	1.9	10.6	4.7	49.1	1.4	9.2	0	0
HB7	7.8	0.6	0	0.5	0.2	1.3	0	6.0	2.7	0	18.3	15.6	30.4	7.1	0	5.3	0	0

物为角闪石、榍石、锆石、白钛石、金红石、磁铁矿、独居石, 常见的微量矿物有电气石、辉石、磷灰石。

科尔沁沙地 $<63\ \mu\text{m}$ 组分中, 钛铁矿、绿帘石、石榴子石、辉石、角闪石、锆石为主要矿物, 次要矿物为氧化铁矿物、金红石、电气石、榍石、磷灰石、锐钛矿, 常见的微量矿物有独居石、白钛石、磁铁矿。 $63\sim125\ \mu\text{m}$ 组分中主要矿物为石榴子石、绿帘石、钛铁矿, 次要矿物为榍石、锆石、氧化铁矿物、角闪石、白钛石、独居石、电气石、金红石、辉石, 微量矿物有磁铁矿、蓝晶石、磷灰石、锐钛矿。

呼伦贝尔沙地 $<63\ \mu\text{m}$ 组分中的主要重矿物为钛铁矿、氧化铁矿物、绿帘石、石榴子石、角闪石、锆石、磁铁矿, 次要矿物为榍石、白钛石、电气石、磷灰石、金红石, 常见的微量矿物为辉石、独居石、锐钛矿、蓝晶石。 $63\sim125\ \mu\text{m}$ 组分中石榴子石、绿帘石、钛铁矿、角闪石、磁铁矿为主要矿物, 次要矿物为锆石、氧化铁矿物、榍石、白钛石、电气石、金红石, 微量矿物为磷灰石、独居石、蓝晶石、辉石、锐钛矿。

松嫩沙地 $<63\ \mu\text{m}$ 组分中, 主要以绿帘石、角闪石、氧化铁矿物、钛铁矿、氧化铁矿物(磁性)、锆石为特征, 并含有榍石、磁铁矿、磷灰石、石榴子石, 微量矿物为白钛石、金红石、辉石、电气石、锐钛矿、独居石。 $63\sim125\ \mu\text{m}$ 组分中主要矿物为角闪石、绿帘石、氧化铁矿物、钛铁矿、氧化铁矿物(磁性), 并含有榍石、锆石、辉石、磷灰石, 微量矿物为磁铁矿、石榴子石、白钛石、金红石、电气石、独居石、锐钛矿。

哈尔滨黄土沉积物的重矿物组成与中国东北部沙地具有相似的成分, 钛铁矿、绿帘石和锆石为主要矿物, 其他原生重矿物还包括磁铁矿、角闪石。除此之外, 其氧化铁矿物含量极高。

4 个沙地的重矿物特征整体上较为相似, 重矿物组合均为钛铁矿-绿帘石-角闪石, 其中浑善达克沙地与科尔沁沙地更为相似, 这种相似在细粒组分中格外明显, 但某些矿物的含量存在差别。如钛铁矿(磁性)只在浑善达克沙地的细粒组分中含量较高, 科尔沁沙地中磁铁矿含量较低, 呼伦贝尔沙地和松嫩沙地中氧化铁矿物含量均较高, 氧化铁矿物(磁性)只大量存在于松嫩沙地, 松嫩沙地绿帘石和角闪石的含量格外高, 而石榴子石的含量格外低。除此之外, 哈尔滨黄土中的优势矿物氧化铁矿物在 4 个沙地中广泛存在。其次, 4 个沙地的主要矿物钛铁矿、绿帘石和角闪石在哈尔滨黄土中的含量也较高。

2.2 粒度对沙地重矿物特征的影响

沉积物随着搬运动力的增强和减弱, 由于颗粒大小、形状或矿物密度的差异, 会发生一定程度上的分离, 并不同程度地富集于不同的粒级组分^[26,37]。目前本区域缺乏对重矿物分粒级的深入分析, 本研究将沙地 $<63\ \mu\text{m}$ 和 $63\sim125\ \mu\text{m}$ 两组粒级的子样进行对比, 来探讨自然分选作用对重矿物特征的影响。

不同沙地两个粒级的重矿物含量分布相关性很高, 但部分重矿物存在明显差别, 如石榴子石、锆石、辉石、磁铁矿、氧化铁矿物含量。这表明矿物的源区没有变化, 而是分选作用造成了粗细矿物颗粒富集于不同粒级组分中。

为了更好地探究分选作用的影响, 引入了相对含量偏差(RD)的概念^[38-39]。其计算公式为:

$$RD = (C_a - C_b) / (C_a + C_b) \times 100 \quad (1)$$

式中, C_a 为 $<63\ \mu\text{m}$ 粒级组分中的矿物平均含量; C_b 为 $63\sim125\ \mu\text{m}$ 粒级组分的矿物平均含量。不同粒级组分中的重矿物组成相对含量偏差(RD)分布情况如图 2 所示。

RD 的值越大, 表明该矿物在 $<63\ \mu\text{m}$ 组分中的平均含量比 $63\sim125\ \mu\text{m}$ 组分的平均含量高。可以看出锐钛矿、锆石、电气石、钛铁矿、金红石在 $<63\ \mu\text{m}$ 组分中较 $63\sim125\ \mu\text{m}$ 组分富集, 绿帘石、石榴子石、独居石和蓝晶石在 $63\sim125\ \mu\text{m}$ 组分中较为富集。

浑善达克沙地 $<63\ \mu\text{m}$ 重矿物组分中极稳定矿物平均含量为 11.16%, 高于 $63\sim125\ \mu\text{m}$ 组分的平均含量(6.65%); 科尔沁沙地 $<63\ \mu\text{m}$ 重矿物组分沉积物中极稳定矿物平均含量为 11.58%, 高于 $63\sim125\ \mu\text{m}$ 组分的平均含量(7.07%); 呼伦贝尔沙地 $<63\ \mu\text{m}$ 重矿物组分中极稳定矿物平均含量为 11.16%, 高于 $63\sim125\ \mu\text{m}$ 组分的平均含量(7.42%); 松嫩沙地 $<63\ \mu\text{m}$ 重矿物组分中极稳定矿物平均含量为 7.71%, 高于 $63\sim125\ \mu\text{m}$ 的平均含量(1.83%)。

综合对比发现, 稳定性更高的矿物优先富集于细颗粒组分中, 如锐钛矿、锆石和电气石, 使细颗粒组分沉积物的总体稳定性更强, 这种规律在呼伦贝尔沙地和松嫩沙地体现得尤为明显。而不稳定矿物在各个沙地不同粒级组分的分布存在差异, 这可能受限于区域的岩性分布。

2.3 东北沙地对风尘物源的指示

亚洲粉尘沉积物作为反映全球环境与气候变

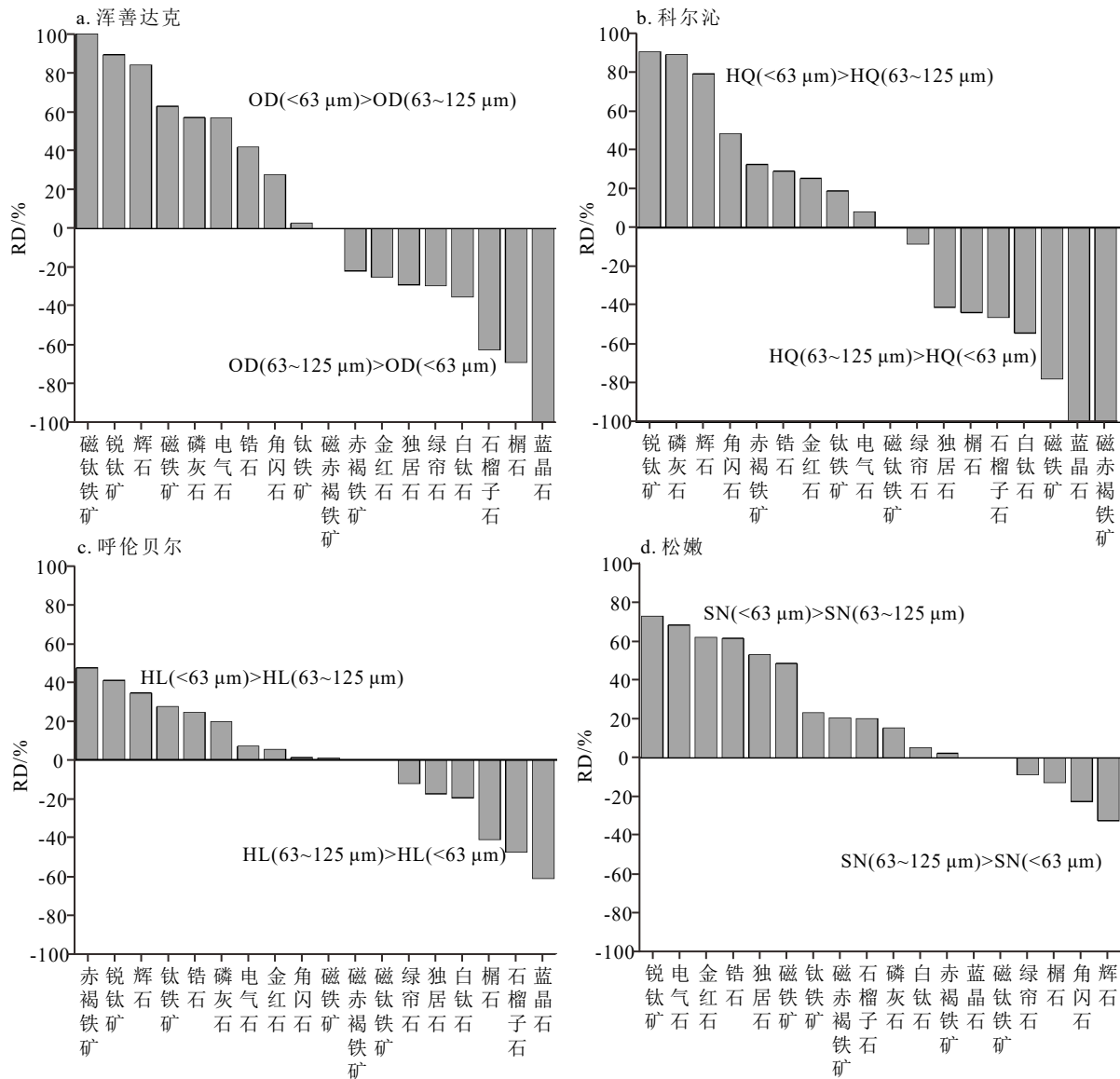


图2 东北沙地两粒级组分重矿物含量偏差 (RD) 图

Fig.2 Comparison of relative deviation (RD) in the contents of two grain-size fractions of heavy minerals

化的敏感指示剂,研究粉尘沉积物源区对于了解沙地的形成和演化以及该地区的风尘系统具有重要的意义^[40-49]。而沙漠作为沙尘产生的源区和沙尘沉积的过渡区域,对中国东北部沙地和黄土堆积之间联系的认识不足,阻碍了对该地区过去地质时期的大气环流和尘源-汇路径的理解。

哈尔滨的盛行风在春季和夏季为西南风,冬季为西北风。中国东北部沙地,包括科尔沁沙地(HQ)、浑善达克沙地(OD)、呼伦贝尔沙地(HL)和松嫩沙地(SN),位于哈尔滨盛行风的上风区,在以往的研究中被认为是其重要的潜在源区^[50-53](图1)。然而,目前尚不清楚它们是否或在多大程度上提供了哈尔滨黄土的灰尘^[54-55]。

为了更好地约束黄土的物源,在这里选择细粒

组分(<63 μm)进行哈尔滨黄土的物源分析。黄土中的主要矿物为氧化铁矿物、钛铁矿、绿帘石、磁铁矿、角闪石和锆石,这些矿物在4个沙地中含量均较高,进一步表明这4个沙地为哈尔滨黄土的潜在源区。氧化铁矿物为哈尔滨黄土的特征矿物,可以用来识别物源。氧化铁矿物在呼伦贝尔沙地和松嫩沙地的含量高于其他两个沙地,结合地理位置来看,哈尔滨黄土的主要源区为松嫩沙地,呼伦贝尔沙地为次级源区,浑善达克与科尔沁沙地对哈尔滨黄土的贡献相对较小。

为了对哈尔滨黄土进行物源的定量重建,采用了Frequentist模型。在本研究中,我们选择18种重矿物类型和4种重矿物特征指数(W 、 ZTR 、 ATi 和 GZi)用于指纹统计分析。首先,在排除了哈尔滨黄

土的示踪剂特性(位于沉积物来源的最低值和最高值之间)后,6 种示踪剂氧化铁矿物、钛铁矿、金红石、榍石、锆石、ZTR 未通过范围测试,因此被认为是非保守的。其次,从原始数据集中排除潜在物源之间没有显著差异的示踪剂。在这一阶段,3 种示踪剂,磷灰石、白钛矿、角闪石,未通过 Kruskal-Wallis H 测试,被排除在数据集之外。最后,使用 Wilk 的 Lambda 准则进行逐步 DFA 变量选择,最大化物源之间的区分,同时最小化示踪剂的数量。在所有跟踪程序中,DFA Test()函数是最严格的。最终 7 种示踪剂,*W*、GZi、蓝晶石、锐钛矿、石榴子石、辉石、钛铁矿(磁性),通过逐步 DFA 选择用于复合特征。经过上述严格控制程序后,通过测试的示踪剂(仅 31%)能够完全区分 4 个潜在源区(图 3)。在 LDA 图中可以看出浑善达克沙地与科尔沁沙地存在着重叠的区域,我们认为这可能是由于西辽河/西拉穆伦河的碎屑物质传输作用导致了两个沙地存在着相似的重矿物组成。

表 2 列出了基于 Frequentist 模型的不同来源的粉尘对哈尔滨黄土贡献的平均值和标准差。哈尔滨黄土的物源贡献如下:SN>HL>HQ>OD(表 2)。根据表 2 结果,松嫩沙地对哈尔滨黄土的贡献占主导地位(60.75%),远侧呼伦贝尔沙地占 28.25%,而科尔沁沙地与浑善达克沙地的贡献很少(分别为 8.5%、2.5%)。GOF 值通常用于评估模型判别结果的准确性,大于 0.8 的值表示可接受的模型判别结果^[15,33],频度模型的高 GOF 值(0.77~0.93)保证了重建结果的可靠性(表 2)。然而,同一沙地的重矿物组成并非绝对均质,定量重建结果在某些样品中存在一定差异,比如松嫩沙地。Frequentist 模型应用于物源分析实际上所用到的参数都是物源追踪指标,而常用的物源指标除地球化学外,还包括锆石的 U-Pb 年龄和重矿物等。除此之外,前人曾将该模型应用于哈尔滨黄土的地球化学分析,得到的结果为松嫩沙地占主导贡献^[14],与本研究的定量重建

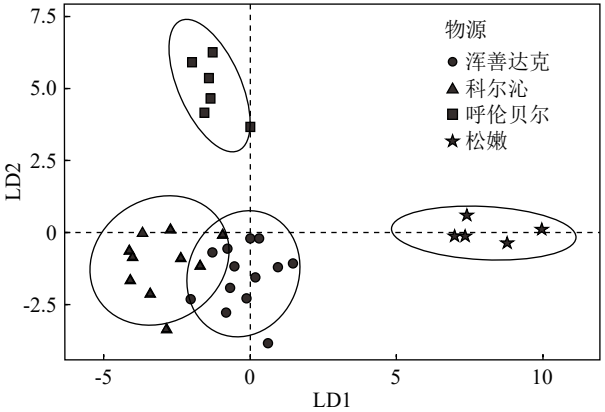


图 3 哈尔滨黄土 4 个源区的重矿物数据的线性判别分析 (LDA) 图

Fig.3 Linear discriminant analysis (LDA) plots of heavy minerals from four source regions of the Harbin Loess

结果相似,因此重建结果具有较高的可靠性。

中国黄土高原的黄土-古土壤序列揭示了间冰期以夏季风为主和冰期以冬季风为主的交替,突出了冰期和间冰期两种不同的环流模式。基于松嫩平原盛行风系统的两种不同的大气环流模式已被用于解释中国东北部黄土堆积的输送和沉积^[54-55]。一种是东亚冬季风,由西伯利亚反气旋和阿留申气旋之间的压差驱动,以西北风为主,另一种是受蒙古气旋控制的西南风。哈尔滨黄土物源定量结果说明了松嫩平原冰期的环流模式,主要是西北风,在较小程度上是西南风。哈尔滨沙尘物源的定量重建揭示了与松嫩平原当前风场相似但不完全相同的大气环流模式。在这种模式中,哈尔滨黄土主要由西北方向的松嫩沙地贡献,这意味着西北方向的沙尘输送路径占主导地位,与松嫩平原冰期的环流模式非常吻合^[54],并且松嫩沙地的地理位置较其他沙地距哈尔滨黄土更近。哈尔滨黄土其次由西北方向的呼伦贝尔沙地贡献,我们认为这是由于冰期东亚冬季风盛行造成的。黄土物源研究也显示,黄土是近源与远源粉尘的混合堆积^[56-57]。科尔沁和

表 2 哈尔滨黄土定量物源混合贡献比例重建结果及标准差 (SD)									
Table 2 Quantitative reconstruction results and standard deviation of Harbin Loess provenance based on Frequentist model									
样品号	浑善达克		科尔沁		呼伦贝尔		松嫩		GOF
	比例/%	SD	比例/%	SD	比例/%	SD	比例/%	SD	
HB2	2	0.06	10	0.08	28	0.17	60	0.11	0.77
HB4	1	0.02	16	0.09	39	0.22	44	0.15	0.83
HB5	7	0.05	5	0.07	35	0.21	53	0.15	0.80
HB7	0	0.01	3	0.03	11	0.07	86	0.07	0.93

浑善达克沙地在本研究中对哈尔滨黄土的贡献很微弱,可能是由于地理位置距离哈尔滨黄土较远。结合上述分析,说明松嫩沙地为哈尔滨黄土的主要物源区,也表明沉积物源定量模型应用于重矿物分析,对于揭示粉尘沉积物物源信息具有一定的可靠性。

3 结论

(1)中国东北部沙地的重矿物特征整体上体现相似的特征,但某些重矿物的含量存在显著差异,如在浑善达克沙地的细粒组分中发现高含量的氧化铁矿物,磁铁矿在科尔沁沙地含量较低,氧化铁矿物在松嫩和呼伦贝尔沙地含量均较高,氧化铁矿物(磁性)在松嫩沙地含量较高,而石榴子石含量较低。因此钛铁矿(磁性)、磁铁矿、氧化铁矿物、石榴子石以及氧化铁矿物(磁性)可以作为区别东北沙地的特征性矿物。

(2)不同粒度组分重矿物含量存在明显差异,稳定性更高的矿物(如极稳定矿物)优先富集于细颗粒组分,使细颗粒组分沉积物的总体稳定性更强,这种规律在呼伦贝尔和松嫩沙地体现的尤为明显。

(3)以重矿物组成判别为基础,结合地理位置分析,频度模型的定量评估表明,松嫩沙地对哈尔滨黄土的贡献度为44%~86%,呼伦贝尔沙地贡献度为10%~39%,科尔沁沙地贡献度为3%~16%,浑善达克沙地贡献度为0~7%。黄土物源定性分析和定量重建的结果,明确了松嫩沙地为哈尔滨黄土的主要物源区,表明定量模型在重矿物物源分析中具有很好的应用前景。

致谢: 河北廊坊诚信地质公司的张佩萱、张云丹、李鹏、王晓飞和周佳等做了大量的样品测试工作,汪烨辉、赵延卓、刘若男、时蕴琳参与了野外取样工作,硕士研究生赵慧莹、符锦霞、宋莹、刘俊贺、高宏宇参与实验室样品处理工作,在此一并表示感谢!

参考文献 (References)

- [1] 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.
- [2] 崔颖颖, 周亚利, 陈国祥, 等. 毛乌素沙地样品扫描电镜的矿物定量分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1505-1513. [CUI Yingying, ZHOU Yali, CHEN Guoxiang, et al. Mineral quantitative analysis of Mu Us sandy land with QEMSCAN [J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(6): 1505-1513.]
- [3] Zhang C, Li Z L, Chen Q J, et al. Provenance of eolian sands in the Ulan Buh Desert, northwestern China, revealed by heavy mineral assemblages [J]. *CATENA*, 2020, 193: 104624.
- [4] 张诚. 阿拉善沙漠风积砂重矿物组成及物源分析[D]. 兰州大学硕士学位论文, 2020. [ZHANG Cheng. Heavy mineral assemblages and provenance analysis of eolian sand in the Alashan Desert, Northwest China [D]. Master Dissertation of Lanzhou University, 2011.]
- [5] 谢静, 丁仲礼. 中国东北部沙地重矿物组成及沙源分析[J]. *中国科学 D 辑:地球科学*, 2007, 50(11): 1715-1723. [XIE Jing, DING Zhongli. Compositions of heavy minerals in Northeastern China sandlands and provenance analysis [J]. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 2007, 50(11): 1715-1723.]
- [6] Morton A C. Heavy minerals in provenance studies[M]//Zuffa G G. Provenance of Arenites. Dordrecht: Springer, 1985: 249-277.
- [7] Morton A C, Hallsworth C. Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones [J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 90(3-4): 241-256.
- [8] 赵红格, 刘池洋. 物源分析方法及研究进展[J]. 沉积学报, 2003, 21(3): 409-415. [ZHAO Hongge, LIU Chiyang. Approaches and prospects of provenance analysis [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(3): 409-415.]
- [9] Nie J S, Peng W B, Pfaff K, et al. Controlling factors on heavy mineral assemblages in Chinese loess and Red Clay [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, 381-382: 110-118.
- [10] Peng W B, Wang Z, Song Y G, et al. A comparison of heavy mineral assemblage between the loess and the Red Clay sequences on the Chinese Loess Plateau [J]. *Aeolian Research*, 2016, 21: 87-91.
- [11] 刘腾, 陈刚, 徐小刚, 等. 物源分析方法及其发展趋势[J]. *西北地质*, 2016, 49(4): 121-128. [LIU Teng, CHEN Gang, XU Xiaogang, et al. Methods and development trend of provenance analysis [J]. *Northwestern Geology*, 2016, 49(4): 121-128.]
- [12] 呼其图, 关平, 王大华, 等. 柴达木盆地北缘东段中侏罗统物源分析: 来自重矿物、元素地球化学及碎屑锆石年代学的证据[J/OL]. 沉积学报, 2022: 1-25. (2022-05-20) [2022-10-06]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.044>. [HU Qitu, GUAN Ping, WANG Dahua, et al. Provenance analysis of the middle Jurassic in Northeastern Qaidam Basin: Evidence from heavy minerals, elemental geochemistry and detrital zircon U-Pb geochronology [J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022: 1-25. (2022-05-20) [2022-10-06]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.044>.]
- [13] 操应长, 宋玲, 王健, 等. 重矿物资料在沉积物物源分析中的应用: 以涠西南凹陷古近系流三段下亚段为例[J]. 沉积学报, 2011, 29(5): 835-841. [CAO Yingchang, SONG Ling, WANG Jian, et al. Application of heavy mineral data in the analysis of sediment source: A case study in the paleogene lower submember of the third member of the Liushagang Formation, Weixinan depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(5): 835-841.]
- [14] Wu P, Xie Y Y, Li Y, et al. Decoupling between circulation pattern and dust path since the last glacial in the Songnen Plain, NE China: Insights from quantitative provenance reconstruction of the Harbin dust sediments [J]. *Aeolian Research*, 2022, 57: 100818.

- [15] Song Y G, Chen X L, Li Y, et al. Quantifying the provenance of dune sediments in the Taklimakan Desert using machine learning, multidimensional scaling and sediment source fingerprinting [J]. *CATENA*, 2022, 210: 105902.
- [16] Hu W J, Du S S, Tan L H, et al. Provenance and formation mechanism of Aeolian sands on the eastern bank of Co Nag Lake on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *CATENA*, 2022, 208: 105786.
- [17] García-Comendador J, Martínez-Carreras N, Fortesa J, et al. Combining sediment fingerprinting and hydro-sedimentary monitoring to assess suspended sediment provenance in a mid-mountainous Mediterranean catchment [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 299: 113593.
- [18] Yang X P, Liang P, Zhang D G, et al. Holocene Aeolian stratigraphic sequences in the eastern portion of the desert belt (sand seas and sandy lands) in northern China and their palaeoenvironmental implications [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(8): 1302-1315.
- [19] Chen B, Yang X P, Jiang Q D, et al. Geochemistry of Aeolian sand in the Taklamakan Desert and Horqin Sandy Land, northern China: Implications for weathering, recycling, and provenance [J]. *CATENA*, 2022, 208: 105769.
- [20] Yang X P, Li H W, Conacher A. Large-scale controls on the development of sand seas in northern China [J]. *Quaternary International*, 2012, 250: 74-83.
- [21] 裘善文. 中国东北西部沙地与沙漠化[M]. 北京: 科学出版社, 2008. [QIU Shanwen. Sandy Land and Desertification in Western Northeast China[M]. Beijing: Science Press, 2008.]
- [22] Xie Y Y, Kang C G, Chi Y P, et al. Reversal of the middle-upper Songhua River in the late Early Pleistocene, Northeast China [J]. *Geomorphology*, 2020, 369: 107373.
- [23] 吴鹏, 谢远云, 康春国, 等. 哈尔滨荒山黄土的成因: 粒度、地球化学、磁化率、沉积和地貌特征的整合记录[J]. 地球学报, 2020, 41(3): 420-430. [WU Peng, XIE Yuanyun, KANG Chunguo, et al. The genesis of Huangshan loess in Harbin: integrated evidence from grain size, geochemistry, magnetization, sedimentation and landform [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2020, 41(3): 420-430.]
- [24] 王嘉新, 谢远云, 康春国, 等. 哈尔滨荒山岩芯重矿物特征对松花江第四纪水系演化的指示[J]. 第四纪研究, 2020, 40(1): 79-94. [WANG Jiaxin, XIE Yuanyun, KANG Chunguo, et al. The indication of the heavy mineral characteristics of the core in Harbin Huangshan to the quaternary drainage evolution of Songhua river [J]. *Quaternary Sciences*, 2020, 40(1): 79-94.]
- [25] 孙磊, 谢远云, 康春国, 等. 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, 2021, 48(6): 1965-1974. [SUN Lei, XIE Yuanyun, KANG Chunguo, et al. 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*, 2021, 48(6): 1965-1974.]
- [26] Shi G Z, Wang H, Huang C Y, et al. Provenance and tectonic setting of middle-upper Devonian sandstones in the Qinling Orogen (Shanyang area): New insights from geochemistry, heavy minerals and tourmaline chemistry [J]. *Tectonophysics*, 2016, 688: 11-25.
- [27] 李艳, 李安春, 黄朋. 大连湾近海表层沉积物重矿物组合分布特征及其物源环境指示[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(6): 13-20. [LI Yan, Li Anchun, HUANG Peng. Distribution of heavy mineral assemblages in subsurface sediments of Dalian Bay and their implications for provenance and environment [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(6): 13-20.]
- [28] Yang S Y, Wang Z B, Guo Y, et al. Heavy mineral compositions of the Changjiang (Yangtze River) sediments and their provenance-tracing implication [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35(1): 56-65.
- [29] Zhang X J, Pease V, Omma J, et al. Provenance of Late Carboniferous to Jurassic sandstones for southern Taimyr, Arctic Russia: A comparison of heavy mineral analysis by optical and QEMSCAN methods [J]. *Sedimentary Geology*, 2015, 329: 166-176.
- [30] Hubert J F. A zircon-tourmaline-rutile maturity index and the interdependence of the composition of heavy mineral assemblages with the gross composition and texture of sandstones [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1962, 32(3): 440-450.
- [31] Morton A C, Hallsworth C R. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones [J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 124(1-4): 3-29.
- [32] 王中波, 杨守业, 李萍, 等. 长江水系沉积物碎屑矿物组成及其示踪意义[J]. 沉积学报, 2006, 24(4): 570-578. [WANG Zhongbo, YANG Shouye, LI Ping, et al. Detrital mineral compositions of the Changjiang river sediments and their tracing implications [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(4): 570-578.]
- [33] Li X J, Zan J B, Yang R S, et al. Grain-size-dependent geochemical characteristics of Middle and Upper Pleistocene loess sequences from the Junggar Basin: Implications for the provenance of Chinese eolian deposits [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 538: 109458.
- [34] Collins A L, Zhang Y, Walling D E, et al. Tracing sediment loss from eroding farm tracks using a geochemical fingerprinting procedure combining local and genetic algorithm optimisation [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(22): 5461-5471.
- [35] Gholami H, Rahimi S, Fathabadi A, et al. Mapping the spatial sources of atmospheric dust using GLUE and Monte Carlo simulation [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 723: 138090.
- [36] Collins A L, Walling D E, Leeks G J L. Fingerprinting the origin of fluvial suspended sediment in larger river basins: combining assessment of spatial provenance and source type [J]. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 1997, 79(4): 239-254.
- [37] 李思琪, 谢远云, 康春国, 等. 物源—河流过程—化学风化对松花江水系沉积物重矿物组成的影响[J]. 地质科学, 2022, 57(1): 207-229. [LI Siqi, XIE Yuanyun, KANG Chunguo, et al. Influence of provenance-river process-chemical weathering on heavy mineral composition of the Songhua River sediment [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2022, 57(1): 207-229.]
- [38] 杨守业, 李从先. 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, 1999, 9(10): 930-937. [YANG Shouye, LI Congxian. The composition and its tracing meaning of surficial sediments from the Changjiang and Huanghe River [J]. *Advances of Natural Sciences*, 1999, 9(10): 930-937.]

- [39] 孙磊. 呼伦贝尔沙地重矿物与Sr-Nd同位素组成特征研究[D]. 哈尔滨师范大学硕士学位论文, 2020. [SUN Lei. Composition characteristics of heavy minerals and Sr-Nd isotopes in HulunBeier Sandy Land[D]. Master Dissertation of Harbin Normal University, 2020.]
- [40] Zhang X Y, Arimoto R, An Z S. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102 (D23): 28041-28047.
- [41] 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.
- [42] Rao W B, Yang J D, Chen J, et al. 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*, 2006, 51 (12): 1401-1412.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 刘瑾, 王永, 姚培毅, 等. 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, 2015, 42 (4): 1103-1114. [LIU Jin, WANG Yong, YAO Peiyi, et al. 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*, 2015, 42 (4): 1103-1114.]
- [48] 袁方, 谢远云, 迟云平. 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, 2018, 45 (6): 1177-1187. [YUAN Fang, XIE Yuanyun, CHI Yunping. Material characteristics of dust fallouts during the dust-storm weather in Harbin: Constraint on the provenance [J]. *Geology in China*, 2018, 45 (6): 1177-1187.]
- [49] Wu P, Xie Y Y, Chi Y P, et al. Loess accumulation in Harbin with implications for Late Quaternary aridification in the Songnen Plain, Northeast China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021, 570: 110365.
- [50] 康春国, 李长安, 谢远云, 等. 哈尔滨地区风尘黄土重矿物特征及物源分析[J]. 自然灾害学报, 2011, 20 (4): 43-51. [KANG Chunguo, LI Chang'an, XIE Yuanyun, et al. Heavy mineral characteristics of eolian loess deposits in Harbin area and its provenance implications [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2011, 20 (4): 43-51.]
- [51] 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.]
- [52] 杜慧荣, 谢远云, 康春国, 等. 哈尔滨黄土的粒度与地球化学特征及其对粉尘物源的指示[J]. 中国沙漠, 2020, 40 (1): 64-76. [DU Huirong, XIE Yuanyun, KANG Chunguo, et al. Grain-size and geochemical compositions of the Harbin loess deposits and their implications for eolian dust provenances [J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40 (1): 64-76.]
- [53] 汪进秋, 谢远云, 康春国, 等. 中更新世以来的哈尔滨黄土物源变化: 来自TIMA自动定量矿物的证据[J]. 中国沙漠, 2022, 42 (5): 25-35. [WANG Jinqiu, XIE Yuanyun, KANG Chunguo, et al. Changing provenance of Harbin loess since the Middle Pleistocene: Evidence from TIMA automated quantification of minerals [J]. *Journal of Desert Research*, 2022, 42 (5): 25-35.]
- [54] Xie Y Y, Meng J, Guo L F. REE geochemistry of modern eolian dust deposits in Harbin city, Heilongjiang province, China: Implications for provenance [J]. *CATENA*, 2014, 123: 70-78.
- [55] Xie Y Y, Chi Y P. Geochemical investigation of dry-and wet-deposited dust during the same dust-storm event in Harbin, China: Constraint on provenance and implications for formation of Aeolian loess [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 120: 43-61.
- [56] Ben-Israel M, Enzel Y, Amit R, et al. Provenance of the various grain-size fractions in the Negev loess and potential changes in major dust sources to the Eastern Mediterranean [J]. *Quaternary Research*, 2015, 83 (1): 105-115.
- [57] Chen X L, Song Y G, Li J C, et al. Size-differentiated REE characteristics and environmental significance of Aeolian sediments in the Ili Basin of Xinjiang, NW China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 143: 30-38.