

松嫩沙地 Sr-Nd 同位素组成特征

谢远云^{1,2}, 孙磊¹, 康春国³, 迟云平^{1,2}, 刘璐¹, 王嘉新¹, 杜慧荣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 作为亚洲风尘源区的中国北方干旱—半干旱地区的 Sr-Nd 同位素组成已得到很好的研究, 但位于欧亚黄土带最东端的松嫩沙地尚是空白, 这影响了对该地区风尘系统的深入理解。为此, 系统采集了松嫩沙地 19 个区域 90 个河流沙和 7 个风成沙样品, 并对这些样品进行了分粒级处理 (<63 μm 、63~30 μm 、30~10 μm 、<10 μm 和 <30 μm)。对 116 个分粒级子样的酸不溶物(硅酸盐组分)进行了 Sr-Nd 同位素组成的测定。研究表明, 松嫩沙地可划分出两个大区(嫩江水系和松花江水系)和七个小区, 嫩江水系沉积物的 Nd 同位素组成显著高于松花江水系, 而 Sr 同位素组成明显偏低。松嫩沙地 8 个剖面纵向上的同位素特征显示, Sr-Nd 同位素组成存在“时间效应”, 即随时间发生了明显变化, 表明了源区地球化学组成的不稳定性。分粒级组成表明, 粒度对 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的影响很小, 但对 Nd 同位素组成有明显影响, 且存在 Nd 同位素比值富集在粗颗粒组分中的趋势, 这与以往的研究结果不同。无论是地质历史时期还是现在, 嫩江水系沉积物(大庆、杜蒙、齐齐哈尔、泰来、白城)对哈尔滨粉尘的贡献都很小。哈尔滨黄土与现代尘暴粉尘有不同的物源, 哈尔滨黄土是春季尘暴天气作用的产物, 有一个混合源, 松花江水系沉积物(扶余、德惠、榆树等地)是哈尔滨黄土的主要粉尘源区, 内蒙古中东部的沙地也为哈尔滨黄土贡献了部分的细颗粒粉尘。

关键词 Sr-Nd 同位素组成; 松嫩沙地; 哈尔滨黄土; 粉尘源区; 物源示踪

第一作者简介 谢远云, 男, 1971 年出生, 博士, 教授, 河流地貌过程和亚洲风尘系统, E-mail: xyy0451@hrbnu.edu.cn

中图分类号 P597 P512.2 **文献标志码** A

0 引言

中国北方广泛分布的戈壁、沙漠和沙地主要受高空西风环流和近地表冬季风的影响, 向下风向持续输送大量粉尘, 被认为是亚洲粉尘的重要源区^[1-12]。对这些粉尘源区进行地球化学特别是同位素特征的研究是亚洲风尘系统研究重要的基础性工作, 对了解沙漠的形成和演化、确定沙漠物质来源、揭示沙漠物质的成因机制、示踪来源物质的迁移路径等提供深层次的理解, 并可能对重建过去大气环流的演变具有重要的科学意义。

Sr-Nd 同位素组成在不同成因、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^[1-2, 13], 因而在亚洲风尘系统物源示踪方面发挥着重要作用。一些开创性的研究工作已经很好地建立起中国北方戈壁和沙漠的 Sr-Nd 同位素组成数据库^[2-3, 14-17], 为亚洲风尘系统研究作

出重要贡献。但对于位于欧亚黄土带最东端的松嫩沙地的同位素组成研究尚是空白, 这严重影响了对该地区风尘系统的深入理解, 理解风尘物源需要系统建立所有潜在源区的同位素特征。同时, 目前对于 Sr-Nd 同位素组成的粒度影响的认识是基于少数几个样品获得的, 缺乏统计意义, 尚缺乏对潜在源区 Sr-Nd 同位素地球化学组成稳定性的认识。为此, 本研究拟通过对松嫩沙地大面积横向和纵向采样, 对其中的细颗粒物进行 Sr-Nd 同位素组成测定, 建立松嫩沙地详细的 Sr-Nd 同位素组成基础数据库, 并探讨其对该地区风尘物质物源追踪的可能意义, 为丰富亚洲风尘系统研究以及深层次理解松嫩平原风尘系统提供重要参考。

1 材料与方法

研究区位于松嫩平原, 属于半湿润—半干旱温

收稿日期: 2019-03-25; 收修改稿日期: 2019-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871013, 41471070, 41601200)[**Foundation:** National Natural Science Foundation of China, No. 41871013, 41471070, 41601200]

带大陆性季风气候,冬季受蒙古西北气流控制,同时也受东部鄂霍次克寒流影响,夏季多受太平洋西伸北跃西南气流的影响。松嫩平原是在中生代断陷盆地的基础上发展起来的冲湖积平原,由周边向中部缓倾斜的半封闭不对称盆地,西、北、东面分别被大兴安岭、小兴安岭及张广才岭所围限,南由微隆起的松辽分水岭与西辽河平原相隔。研究区内地形大体可分为东部高平原,中部低平原及西部山前倾斜平原三个部分。松嫩沙地年平均气温 3.3°C ,年平均风速 3.8 m/s ,大风日 27.2 d/a ,沙尘暴日 $2.0\text{ d/a}^{[18]}$ 。

松嫩沙地面积约 $8\,355.95\text{ km}^2$,占松嫩平原总面积的 $6.51\%^{[18]}$,分布在松嫩平原的中西部,南宽北窄(图1)。沙地主要分布在吉林省的长岭、白城、镇赉、大安、扶余等地,以及黑龙江省的泰来、龙江、甘南、富裕、齐齐哈尔、杜蒙、大庆、肇源等地,沿嫩江和松花江及其支流的河漫滩和河流阶地分布,以半固定和固定沙丘为主,活动沙丘较少。根据沙地的形态、规模、连续性、分布及与河湖的关系,松嫩沙地进一步划分为杜蒙沙地、齐齐哈尔沙地、泰来沙地、扶余沙地和舍力沙地。

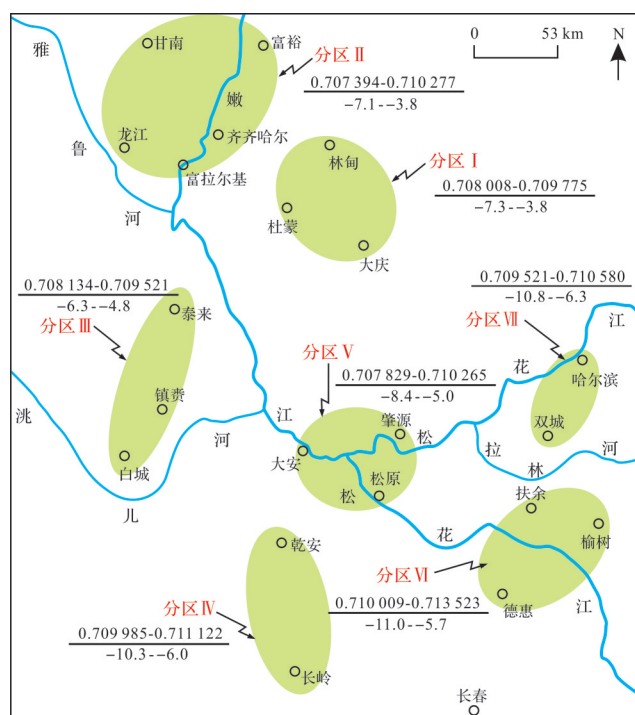


图1 松嫩沙地位置及分区示意图

分区名附近的数字区间分别代表Sr(上)和Nd(下)同位素组成

Fig.1 Sketch map of the Songnen Sandy Land, showing location of the study area. The numerical expressions next to the isotopic partition names represent Sr (upper) and Nd (lower) isotopic composition

样品主要为风成沙和河流沙,覆盖了松嫩沙地绝大部分地区(图1)。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成分。根据粉尘可能的搬运路线以及与河湖的相对关系,将松嫩沙地划分为7个分区(图1)。共获取90个样品,各个地区的样品数分别为:杜蒙17个,林甸1个,富拉尔基7个,富裕1个,甘南1个,龙江4个,泰来5个,镇赉1个,白城1个,乾安6个,长岭1个,大安1个,肇源5个,松原6个,富裕20个,榆树3个,德惠1个,双城6个,哈尔滨3个。由于风尘黄土粒级的绝大部分在 $<63\ \mu\text{m}$ 范围,所以对所测定样品的粒级也选择在 $<63\ \mu\text{m}$ 。样品通过干筛法获取它们的 $<63\ \mu\text{m}$ 子样,即过240目($63\ \mu\text{m}$)的标准分样筛。同时,为了评估粒度对Sr-Nd同位素组成的影响,对12个样品还进行了干筛法分粒级处理,得到不同粒级组分的子样(共26件),包括 $63\sim 30\ \mu\text{m}$ 、 $30\sim 10\ \mu\text{m}$ 、 $<10\ \mu\text{m}$ 和 $<30\ \mu\text{m}$ 等。

为了探讨松嫩沙地对区域粉尘的可能贡献,还收集了一些风尘黄土和现代尘暴粉尘堆积物。黄土样品来自哈尔滨天恒山L1黄土层,共8块样品,样品被碾碎,获得 $<63\ \mu\text{m}$ 子样。2011年5月11日东北地区遭受强沙尘暴天气,3件哈尔滨尘暴沉降物被收集。

共127件子样的Sr-Nd同位素组成在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室用表面热电离同位素质谱仪(thermal ionization mass spectrometry, TIMS)测定。具体分析方法如下:将 $<63\ \mu\text{m}$ 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($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)和Nd($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)同位素比值测定。Sr和Nd的分离采用标准离子交换方法。测定的样品Sr和Nd同位素比值分别用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 进行了标准化以进行质量分馏效应的校正。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 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710\,250\pm 7\ (2\sigma)$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512\,109\pm 3\ (2\sigma)$ 。化学分析空白:对Sr为 $<1\text{ ng}$,对Nd为 $<50\text{ pg}$ 。Nd同位素组成用 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值表示,采用 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512\,638$ 的球粒陨石均一源(CHUR)现代值。

2 结果与讨论

松嫩沙地样品的Sr-Nd同位素分析结果见图2所示。

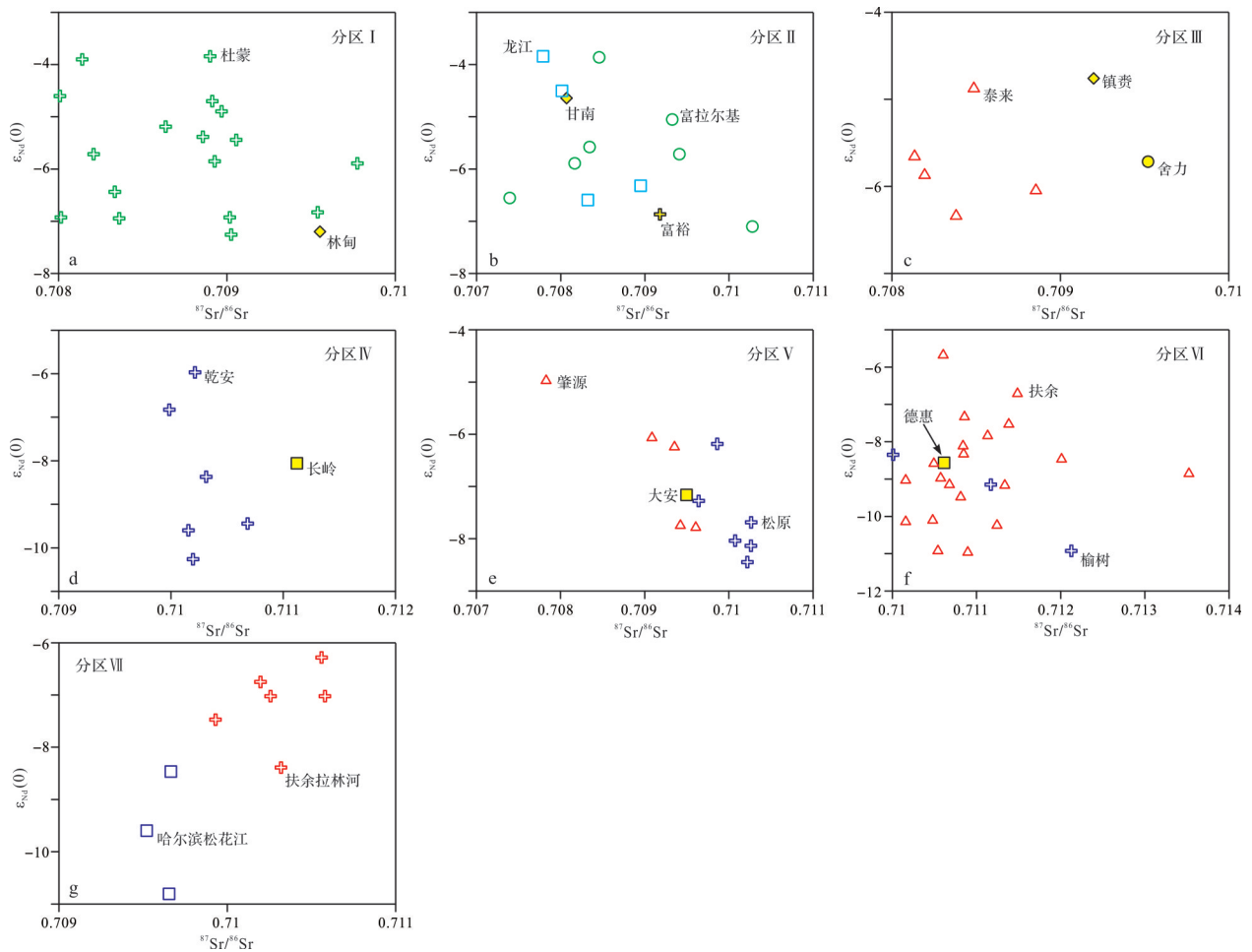


图2 松嫩沙地七个分区的Sr-Nd同位素组成

Fig.2 Sr-Nd isotopic partition characteristics of the Songnen Sandy Land

2.1 Sr-Nd同位素分析误差的估计

在讨论样品的Sr-Nd同位素数据之前,有必要估计它的分析误差,以便正确地判断样品之间的相似性或差异性。

同位素质谱仪的单个样品¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd测定误差一般在±0.000 020之内,这导致ε_{Nd}(0)值在±0.3 ε单位之内变化。总的实验误差包括仪器对样品的多次测定误差、对标样的校正误差和前处理的化学误差等,这个总实验误差一般在±0.000 050之内,即ε_{Nd}(0)值总的实验误差在±0.7 ε单位之内。因此,只有当样品ε_{Nd}(0)值之间的差值大于0.7 ε单位时,才可以认为样品之间的Nd同位素组成是不同的;否则,认为样品之间的Nd同位素组成在实验误差范围内是相同的。0.7 ε单位一般被当作是样品Nd同位素比较的“阈值”^[19-22]。本研究接受Bayon *et al.*^[23]提出的样品Nd同位素比较的“阈值”为1,即只有当样品ε_{Nd}(0)值之间

的差值大于1 ε单位时,样品之间的Nd同位素变化才能被认为受控于地质因素而非实验误差^[22]。

样品⁸⁷Sr/⁸⁶Sr测定的实验误差与¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd一致,也在±0.000 050之内,这已经远远小于样品之间的变化^[21]。因此当样品之间的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值的差异大于0.000 050时,样品之间绝对的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr差异才有地质意义^[22]。也有不同意见认为^[21],只有当样品之间的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr差异大于±0.001 500时,才能认为它们的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值不同。

2.2 松嫩沙地Sr-Nd同位素组成的分区性

分区 I (杜蒙分区,图2a):⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值为0.708 008 ~ 0.709 775,ε_{Nd}(0)值为-7.3~-3.8,平均值-5.7。分区 II (齐齐哈尔分区,图2b):⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值为0.707 394 ~ 0.710 277,ε_{Nd}(0)值为-7.1~-3.8,平均值-5.6。分区 III (泰来—白城分区,图2c):⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值为0.708 134 ~ 0.709 521,ε_{Nd}(0)值为-6.3~-4.8,平均

值-5.6。分区IV(长岭—乾安分区,图2d): $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.709 985~0.711 122, $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值为-10.3~-6.0,平均值-8.4。分区V(松原—肇源分区,图2e): $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.707 829~0.710 265, $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值为-8.4~-5.0,平均值-7.1。分区VI(扶余分区,图2f): $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.710 009~0.713 523, $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值为-11.0~-5.7,平均值-8.9。分区VII(哈尔滨分区,图2g): $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.709 521~0.710 580, $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值为-10.8~-6.3,平均值-8.0。

从测试结果可见,黑龙江省的杜蒙、齐齐哈尔、泰来以及吉林省的镇赉、白城等沙地的Nd同位素组成最高,其 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值为-7.3~-3.8(平均值-5.7),而吉林省的其他沙地的 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值最低,为-11.0~-7.3(平均值-9.1)。也就是说,嫩江水系沉积物的Nd同位素比值明显高于松花江水系沉积物。但拉林河沉积物的Nd同位素组成是例外,拉林河现代河床冲积物(即双城样品)的 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值为-8.4~-6.3(平均值-7.2),介于嫩江水系沉积物和松花江水系沉积物之间。

2.3 Sr-Nd同位素组成随时间的变化

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。对松嫩沙地的8个剖面进行了纵向上的采样测试(图3),用以了解该区域Sr-Nd同位素组成随时间的变化。剖面上沉积

物的Sr-Nd同位素比值发生很大变化,其中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的最大变化可达0.002 900,而所有剖面的 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值的变化都在1 ϵ 单位以上,最大可达2.1 ϵ 单位,远超样品Nd同位素存在差异的“阈值”1,说明沉积物的Nd同位素组成随时间发生了明显变化。本研究将Nd同位素组成随时间发生明显变化称之为Nd同位素的“时间效应”。

粉尘源区Nd同位素组成的“时间效应”给予深层次理解风尘系统物源示踪带来有益的启示。其一,通过对比风尘物质与潜在源区的地球化学组成,揭示风尘与源区之间的物质关联,是示踪地质时期风尘物源最主要的方法。潜在源区的地球化学组成往往来自对源区表土的采样,而表土的地球化学特征不一定代表了风尘黄土堆积时期的源区表土特征,正如本研究揭示的一样,粉尘源区的同位素特征会发生随时间的变化。这种不等时(用现在的潜在源区特征对比地质时期粉尘特征)的地球化学组成对比显然是有偏差的。其二,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,各方观点都是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则被解释为风尘物源的改变,这是风尘物源示踪常用的研究方法。鉴于粉尘源区

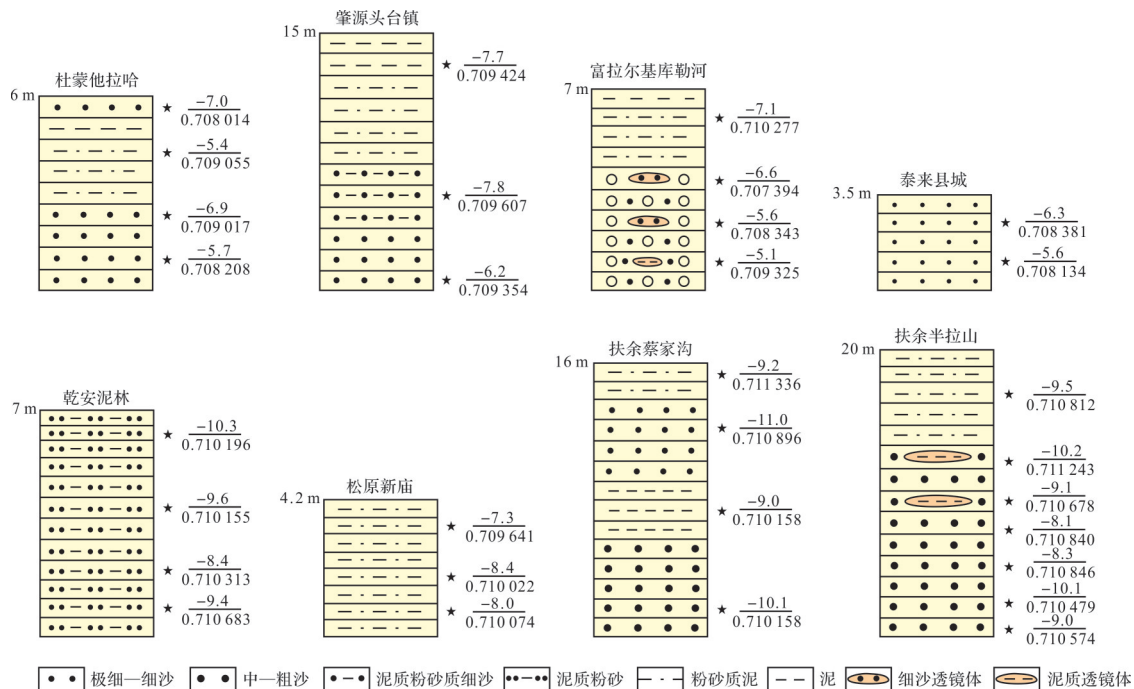


图3 松嫩沙地8个剖面的Sr-Nd同位素组成

Fig.3 Sr-Nd isotopic compositions for eight sections in the Songnen Sandy Land

的地球化学特征会随时间的推移而发生变化,同一个粉尘源区,但地球化学特征发生了变化的粉尘供应同样会导致堆积区风尘物质的物质组成的变化。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。

2.4 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,尽管存在若干不同意见^[23-28],但普遍认为^[1-3,29-34],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同位素组成受到的影响因素众多,不仅受母岩Sr同位素组成的影响,而且还受粒度变化和化学风化作用的制约。

一般而言,沉积物中的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值随着粒度变细而增加,这被解释为细颗粒组分含有更多的富含Rb(K)的黏土矿物(具有更高的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值)^[1,22,29-31]。但也有细颗粒组分(相对于粗颗粒组分)有更低的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值的例子^[26-27]。对于本研究(表1),⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值在不同粒级组分的变化很小,最大变化仅为0.000 537,远小于黄土高原风尘物质(黄土和红黏土)的0.003 516~0.011 821的变化区间^[1-2],也远小于区域样品之间的变化(一般小于0.004 000,如图2

所示)。进一步观察可知,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值在不同粒级组分中的分布并没有规律而言,并没有表现出在细颗粒组分中为最高值的趋势(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值在<10 μm组分达到最高的仅占1/3)。表明样品⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值主要受物源而非粒度的影响^[26]。

尽管沉积物Nd同位素组成基本不受粒度的影响已成为共识,但也有不同的研究结果。根据Bayon *et al.*^[23]和Bi *et al.*^[28]的研究结果,沉积物Nd同位素组成与粒度的关系表现出“两面性”。例如,一些大型河流沉积物,如密西西比河、尼罗河、伏尔加河和湄公河等,表现出粒度越细, $\epsilon_{Nd}(0)$ 值越高;而某些小型河流沉积物则没有表现出Nd同位素组成的粒度依靠^[23]。Bi *et al.*^[28]的研究也有相似的结论:东海内陆架MD06-3040孔岩芯的Nd同位素比值与粒度没有相关关系,而长江河口CM97孔岩芯的 $\epsilon_{Nd}(0)$ 值与粒度呈正相关关系,粗颗粒沉积物有更高的 $\epsilon_{Nd}(0)$ 值。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^[25],黄土的 $\epsilon_{Nd}(0)$ 值很少受到粒度的影响,但现代尘暴沉降物的Nd同位素值受粒度的影响明显。在本研究中(表1),不同粒级分组的 $\epsilon_{Nd}(0)$ 值存在高达2.7 ϵ 单位的变化,而且表现出细颗粒组分有更低 $\epsilon_{Nd}(0)$ 值的趋势($\epsilon_{Nd}(0)$ 值在<10

表1 松嫩沙地不同粒级分组的Sr-Nd同位素组成对比

Table 1 Correlation between Sr-Nd isotopic compositions and grain size fractions in the Songnen Sandy Land

样品(分粒级)	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	$\epsilon_{Nd}(0)^a$	样品(分粒级)	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	$\epsilon_{Nd}(0)^a$		
SN15	<63 μm	0.709 086	0.512 327	-6.1	JL16	<63 μm	0.710 22	0.512 205	-8.4
	30~63 μm	0.709 372	0.512 366	-5.3		<30 μm	0.710 575	0.512 225	-8.1
	10~30 μm	0.709 428	0.512 318	-6.2		<10 μm	0.710 444	0.512 167	-9.2
	<10 μm	0.709 587	0.512 279	-7		JL17	<63 μm	0.709 641	0.512 265
SN21	<63 μm	0.709 552	0.512 269	-7.2	<30 μm		0.709 955	0.512 209	-8.4
	30~63 μm	0.709 567	0.512 349	-5.6	<10 μm	0.709 837	0.512 203	-8.5	
	10~30 μm	0.709 636	0.512 332	-6	JL43	<63 μm	0.710 479	0.512 12	-10.1
<10 μm	0.709 644	0.512 3	-6.6	<30 μm		0.710 747	0.512 139	-9.7	
JL10	<63 μm	0.709 985	0.512 288	-6.8	<10 μm	0.710 848	0.512 132	-9.9	
	<30 μm	0.710 095	0.512 339	-5.8	JL44	<63 μm	0.710 846	0.512 211	-8.3
	<10 μm	0.710 067	0.512 201	-8.5		<30 μm	0.710 626	0.512 126	-10
JL11	<63 μm	0.710 214	0.512 332	-6	<10 μm	0.710 697	0.512 16	-9.3	
	<30 μm	0.710 148	0.512 227	-8	JL45	<63 μm	0.710 574	0.512 178	-9
	<10 μm	0.710 11	0.512 21	-8.3		<30 μm	0.710 843	0.512 183	-8.9
JL13	<63 μm	0.710 262	0.512 221	-8.1	<10 μm	0.710 877	0.512 158	-9.4	
	<30 μm	0.710 537	0.512 265	-7.3	JL46	<63 μm	0.710 84	0.512 222	-8.1
	<10 μm	0.710 48	0.512 331	-6		<30 μm	0.710 651	0.512 167	-9.2
JL15	<63 μm	0.710 074	0.512 226	-8	<10 μm	0.710 593	0.512 152	-9.5	
	<30 μm	0.710 611	0.512 235	-7.9					
	<10 μm	0.710 474	0.512 156	-9.4					

注: Note: ^a $\epsilon_{Nd}(0) = [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{sample}} / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - 1] \times 10\ 000$; $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512\ 638$.

μm 组分达到最低值的占2/3)。Bayon *et al.*^[23]对细颗粒有更高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值作出了解释,火山岩(比如玄武岩)或/和沉积岩的优先风化,导致Nd同位素组成在不同粒径组分中发生分离,使得细颗粒组分有更高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值。但本研究的结果与上述文献的认识相反。

来自不同源区(具有不同Sr-Nd同位素组成特征)的粉尘在搬运和沉积过程中,由于动力分选,粗、细颗粒将发生分离,从而导致不同源区的Sr-Nd同位素分离进入不同粒径组分。因此,沉积物Sr-Nd同位素在不同粒径组分中的分布可以由具有单一物源纯粹由动力分选引起,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径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。

2.5 松嫩沙地对区域粉尘的贡献

黄土与潜在源区的Sr-Nd同位素组成的对比揭示了中国黄土均来自其上风向邻近的干旱区,具有近源性,与黄土含大量粉砂颗粒吻合^[3]。沙漠起源与近源性的黄土特性使得我们有理由认为松嫩沙地是哈尔滨风尘(黄土及现代尘暴天气沉降物)堆积的物源区,但究竟是松嫩沙地的哪个区域提供了粉尘贡献我们还不清楚。

尽管Sr-Nd同位素组成在示踪风尘物源方面具有巨大潜力,但在示踪物源之前,非物源因素(比如风化和粒度分选等)必须首先被排除^[26]。正如前述,尽管样品的Sr-Nd同位素组成表现出一定的时间效应,剖面上 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值最大变化达0.002 900,而 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值的变化范围为1~2.1 ϵ 单位,但这些变化都被限制在区域样品之间的变化范围之内(区域样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值变化范围为2.1~5.3 ϵ 单位)。另外,如果纵向和横向上的样品都被收集作为潜在源区的地球化学组成,那么Sr-Nd同位素组成的时间效应可以被忽略(因为扩大的潜在源区地球化学组成)。粒度对 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的影响很小,尽管粒度对 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值有一定程度的影响,但这种影响同样被限制在区域样品之间的变化

范围之内。为了进一步了解粒度效应是否会影响风尘物源示踪,将10个样品的三个粒径组分(<63 μm 、<30 μm 和<10 μm)的Sr-Nd同位素组成绘制成图。从图4中可见,分别由三个粒径组分构成的各个区域高度重叠,表明粒度效应不会影响物源示踪。因此,本研究样品的Sr-Nd同位素数据可以用于粉尘的物源示踪。

将松嫩沙地各个分区以及哈尔滨风成粉尘的Sr-Nd同位素组成一起投影到图5,两个不同的区域清晰可见,分区I-III分布在图的左上角,为嫩江水系分区,而分区IV-VII分布在图的右下角,为松花江水系分区。分区I和V有极小部分的重叠。哈尔滨黄土Sr-Nd同位素组成区域特征明显,其整体变化范围(特别是Sr同位素)小于潜在源区物质,反映不是所有潜在源区都有物源贡献。嫩江水系分区,即松嫩沙地的分区I-III,包括哈尔滨西北方向的大庆、杜蒙、齐齐哈尔、泰来、白城等地,由于其同位素组成特征与哈尔滨风成粉尘差异巨大,可以断定,无论是地质历史时期还是现在,嫩江水系沉积物对哈尔滨粉尘的贡献都很小。

分区VII的拉林河(双城)和松花江(哈尔滨)无论是 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值还是 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值都与哈尔滨黄土有明显的差异,表明它们不太可能为哈尔滨黄土提供粉尘。尽管个别哈尔滨黄土样品数据点靠近分区V,但分区V的 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值明显高于哈尔滨黄土,而 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值显著小于哈尔滨黄土,这两方面的差异综合表明分区V和哈尔滨黄土可怜的物质联系。哈尔滨黄土完全落在分区VI(在一定程度上也包括IV区域)的范围

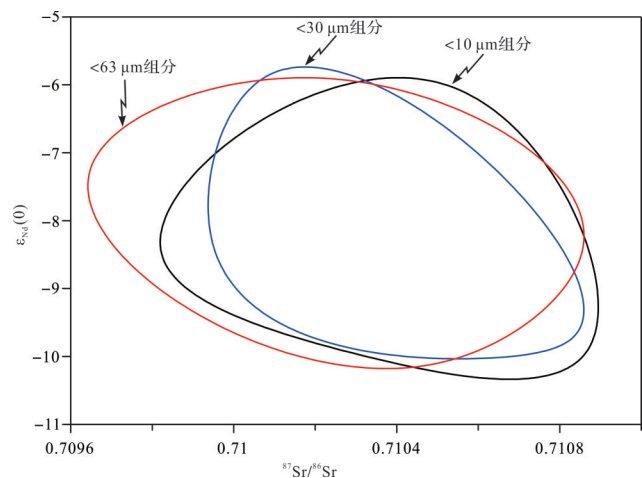


图4 三个不同粒径组分的Sr-Nd同位素组成对比
Fig.4 Correlation between Sr-Nd isotopic compositions and three grain size fractions

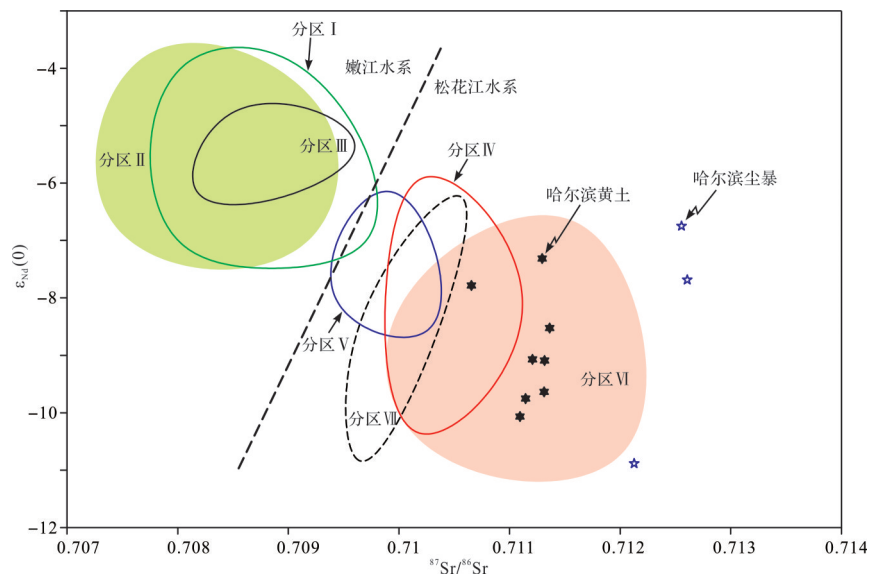


图5 松嫩沙地与哈尔滨风成粉尘的Sr-Nd同位素组成对比

Fig.5 Correlation between Songnen Sandy Land and Harbin eolian dust in terms of Sr-Nd isotopic compositions

内,表明了它们之间紧密的同位素亲缘关系。哈尔滨西南方向的松花江水系(扶余、德惠、榆树),在一定程度上,长岭和乾安,都是哈尔滨黄土的主要粉尘源区。

大面积黄土堆积的形成,需要以下几个条件:1)宽广的干旱一半干旱区作为粉尘源区,以持续提供大量的粉尘物质;2)搬运粉尘的强盛风力;3)合适的地貌条件(如平坦的基地);4)相对稳定的构造条件以防止黄土堆积后的侵蚀。

哈尔滨尘暴天气主要出现在春季,春季的盛行风向有西南风(占85.7%)、西北风(占11.1%)和东风(占3.2%),全年主导风向是西南风。哈尔滨东向区域无粉尘源区。因此,理论上讲,西北方向的呼伦贝尔沙地和嫩江水系区域,以及西南方向的近源松花江水系区域和远源浑善达克和科尔沁沙地都可以为哈尔滨提供粉尘颗粒。由于大兴安岭的阻挡以及缺乏大风通道,呼伦贝尔沙地的粉尘不能到达哈尔滨,而且Sr-Nd同位素地球化学组成也不支持西北方向沙地(即嫩江水系沉积物)对哈尔滨的粉尘贡献。然而,西南方向的沙地,地形平坦开阔,风力强盛,植被稀疏,地表裸露,可以为哈尔滨提供大量粉尘颗粒。这也是哈尔滨尘暴天气频繁被西南风输送的重要原因。

哈尔滨黄土与现代尘暴沉降物的Sr-Nd同位素组成有显著的差异(图5),显示了它们不同的粉尘源区。这暗示了冰期形成的黄土与间冰期形成的粉尘

有不同的物源。间冰期增强的夏季风将带来充沛的降水和植被覆盖,这时粉尘源区将向西退缩;而冰期增强的冬季风将导致降水下降、植被覆盖降低和地表大面积裸露,这时粉尘源区将向东扩展。因此,冰期时,黄土多为近源堆积,而间冰期时,多为远源堆积^[35]。气象记录也显示,频繁出现在松嫩平原的尘暴天气是源于蒙古国中部和内蒙古中东部的沙尘暴天气在西南气流的输送下,先后途径辽宁中西部和吉林中西部飘浮来到达哈尔滨^[36]。地球化学组成揭示了哈尔滨尘暴粉尘来自内蒙古中东部半干旱区(如浑善达克沙地和科尔沁沙地),本地源和临近源(如松嫩沙地)没有粉尘贡献^[36]。

对于黄土粉尘搬运的大气环流模式,目前有三种观点^[37]:冬季风、西风环流和春季尘暴。冬季风是近地表的西北风,被认为是近距离搬运黄土的主要营力。西风环流由西向东,对中国西部内陆粉尘的自西向东的搬运有重要贡献,被认为是细颗粒粉尘高空长距离搬运的动力。而黄土高原黄土是冬季风低空短距离搬运粗颗粒和高空西风长距离搬运细颗粒的混合^[8,38-39]。然而也有研究认为^[40],黄土记录了春季尘暴的发生而非冬季风,春季尘暴是黄土的搬运方式。黄土的春季尘暴搬运模式也得到黄土中的细颗粒物($<20\ \mu\text{m}$)可以通过形成集合体或附着在大颗粒表面的方式进行沉降^[37]以及中国中东部地区频发的春季尘暴事件^[41]的证实。

尽管哈尔滨黄土与现代尘暴沉降物的物源不

同,但粉尘搬运方向都是一致的,都是来自哈尔滨西南方向。现代尘暴堆积是地质历史时期黄土堆积的继续,是黄土堆积的现代类似物。由此可以推断,冰期黄土堆积时,尽管近源成分占主导,但远源也可以贡献部分细颗粒粉尘给哈尔滨黄土。黄土物源研究也显示,黄土是近源与远源粉尘的混合堆积^[42-43],特别是间冰期的粉尘堆积往往是非尘暴近源堆积和高空西风远源搬运的混合^[44]。因此,基于主导风向、粉尘来源以及黄土与现代尘暴粉尘相同的搬运方向,结合冬季风盛行期间(一般来说,11月至来年3月)地表粉尘被冻结不易被风吹蚀扬起(低的粉尘释放量不足以堆积形成黄土)的事实,本研究认为,哈尔滨黄土是春季尘暴天气作用的产物,内蒙古中东部的沙地(浑善达克沙地和科尔沁沙地)为哈尔滨黄土贡献了部分的细颗粒粉尘。

3 结论

对松嫩沙地 116 个细颗粒组分($<63 \mu\text{m}$ 、 $63\sim 30 \mu\text{m}$ 、 $30\sim 10 \mu\text{m}$ 、 $<10 \mu\text{m}$ 和 $<30 \mu\text{m}$)的 Sr-Nd 同位素组成的分析得出如下主要结论:

(1) 松嫩沙地可划分为七个 Sr-Nd 同位素分区,嫩江水系沉积物的 Nd 同位素组成明显高于松花江水系沉积物。

(2) 松嫩沙地的 Sr-Nd 同位素组成存在时间效应(即随时间的变化),表明了风尘源区地球化学组成的不稳定性,这对于理解黄土物源的变化性有重要意义。

(3) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 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 同位素的粒度控制的研究结果不同。

(4) 无论是地质历史时期还是现在,嫩江水系沉积物对哈尔滨粉尘的贡献都很小。

(5) 哈尔滨黄土的物源不同于现代尘暴粉尘,表明冰期形成的黄土与间冰期形成的粉尘存在不同的物源。

(6) 哈尔滨黄土是春季尘暴天气的产物,有一个混合源,松花江水系沉积物提供了哈尔滨黄土主要的粉尘物质,内蒙古中东部的沙地也为哈尔滨黄土贡献了部分的细颗粒粉尘;而哈尔滨尘暴粉尘来源于内蒙古中东部沙地,本地和邻近源没有粉尘贡献。

致谢 Sr-Nd 同位素组成得到中国地质大学

(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的英俊华研究员的大力支持,张红和谢雨希参加了松嫩沙地的部分野外采样,魏振宇和吴鹏参加了哈尔滨黄土的野外取样,在此一并表示感谢。

参考文献(References)

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Chen J, Li G J. Geochemical studies on the source region of Asian dust [J]. Science China Earth Sciences, 2011, 54 (9) : 1279-1301.
- [4] 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, 1997, 102 (D23) : 28041-28047.
- [5] 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.
- [6] Sun J M. Provenance of loess material and formation of loess deposits on the Chinese Loess plateau[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 203(3/4) : 845-859.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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, 2016, 121(11): 2085-2099.

- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 杨杰东, 陈俊, 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.]
- [18] 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.]
- [19] Wang Y X, Yang J D, Chen J, et al. The Sr and Nd isotopic variations of the Chinese Loess Plateau during the past 7 Ma: Implications for the East Asian winter monsoon and source areas of loess[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 249(3/4): 351-361.
- [20] 杨杰东, 李高军, 戴澧, 等. 黄土高原黄土物源区的同位素证据[J]. *地学前缘*, 2009, 16(6): 195-206. [Yang Jiedong, Li Gaojun, Dai Yun, et al. Isotopic evidences for provenances of loess of the Chinese Loess Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(6): 195-206.]
- [21] Yang J D, Li G J, Rao W B, et al. Isotopic evidences for provenance of East Asian Dust[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(29): 4481-4490.
- [22] Rao W B, Mao C P, Wang Y G, et al. 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*, 2017, 81: 23-35.
- [23] Bayon G, Toucanne S, Skonieczny C, et al. Rare earth elements and neodymium isotopes in world river sediments revisited [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, 170: 17-38.
- [24] Smith J, Vance D, Kemp R A, et al. 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*, 2003, 212(1/2): 181-196.
- [25] Feng J L, Zhu L P, Zhen X L, et al. Grain size effect on Sr and Nd isotopic compositions in eolian dust: Implications for tracing dust provenance and Nd model age[J]. *Geochemical Journal*, 2009, 43(2): 123-131.
- [26] Li T G, Xu Z K, Lim D, et al. Sr-Nd isotopic constraints on detrital sediment provenance and paleoenvironmental change in the northern Okinawa Trough during the Late Quaternary [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, 430: 74-84.
- [27] Derry L A, France-Lanord C. Neogene Himalayan weathering history and river $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$: Impact on the marine Sr record[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 142(1/2): 59-74.
- [28] Bi L, Yang S Y, Zhao Y, et al. Provenance study of the Holocene sediments in the Changjiang (Yangtze River) estuary and inner shelf of the East China Sea [J]. *Quaternary International*, 2017, 441: 147-161.
- [29] 饶文波, 杨杰东, 陈俊, 等. 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*, 2005, 25(4): 531-532. [Rao Wenbo, Yang Jiedong, Chen Jun, et al. Influences on Sr-Nd isotopic compositions in eolian dust, North China[J]. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(4): 531-532.]
- [30] Dasch E J. Strontium isotopes in weathering profiles, deep-sea sediments, and sedimentary rocks[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1969, 33(12): 1521-1552.
- [31] Meyer I, Davies G R, Stuut J B W. 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*, 2011, 12(3): Q03005.
- [32] Goldstein S L, O'Nions R K, Hamilton P J. A Sm-Nd isotopic study of atmospheric dusts and particulates from major river systems [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1984, 70(2): 221-236.
- [33] Nakai S, Halliday A N, Rea D R. Provenance of dust in the Pacific Ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 119(1/2): 143-157.
- [34] Dou Y G, Yang S Y, Shi X F, et al. Provenance weathering and erosion records in southern Okinawa Trough sediments since 28 ka: Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic evidences [J]. *Chemical Geology*, 2016, 425: 93-109.
- [35] Yan Y, Sun Y B, Chen H Y, et al. Oxygen isotope signatures of quartz from major Asian dust sources: Implications for changes in the provenance of Chinese loess[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 139: 399-410.
- [36] 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.
- [37] Qiang M, Lang L, Wang Z. Do fine-grained components of loess indicate westerlies: Insights from observations of dust storm deposits at Lenghu (Qaidam Basin, China) [J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(10): 1232-1239.
- [38] Sun D H. Monsoon and westerly circulation changes recorded in the Late Cenozoic aeolian sequences of Northern China [J]. *Global and Planetary Change*, 2004, 41(1): 63-80.
- [39] 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.
- [40] Roe G. On the interpretation of Chinese loess as a paleoclimate indicator[J]. Quaternary Research, 2009, 71(2): 150-161.
- [41] Sun J M, Zhang M Y, Liu T S. Spatial and temporal characteristics of dust storms in China and its surrounding regions, 1960-1999: Relations to source area and climate[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(D10): 10325-10333.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] Prins M A, Vriend M. Glacial and interglacial eolian dust dispersal patterns across the Chinese Loess Plateau inferred from decomposed loess grain-size records [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2007, 8(7): Q07Q05.

Sr-Nd Isotopic Partition Characteristics of the Songnen Sandy Land

XIE YuanYun^{1,2}, SUN Lei¹, KANG ChunGuo³, CHI YunPing^{1,2}, LIU Lu¹, WANG JiaXin¹, DU HuiRong¹

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: Ninety samples from nineteen sites in the Songnen Sandy Land, along with eight L1 loess deposit samples from the Harbin Tianheng mountain, were separated into different grain size fractions ($<63 \mu\text{m}$, $63-30 \mu\text{m}$, $30-10 \mu\text{m}$, $<10 \mu\text{m}$ and $<30 \mu\text{m}$) and 124 acid-insoluble residues of the sub-samples were determined for Sr-Nd isotopic composition. The results showed that the Songnen Sandy Land is divided into two large areas (Nenjiang River drainage and Songhua River drainage) and seven small areas. The Nd isotope composition of sediments in the Nenjiang River Basin is significantly higher than for the Songhua River Basin, while Sr isotope composition is significantly lower. The isotopic characteristics of the eight areas showed that Sr-Nd isotope composition of the Songnen Sandy Land varied obviously with time, referred to as the "time effect". The Sr-Nd isotopic composition of different grain-size fractions revealed that the particle size had little influence on the Sr isotopic ratio but clearly influenced Nd isotopic composition, with a variation of 2.7 ϵ units and enrichment in the coars-grained fractions. The time effect on Sr-Nd isotopic composition and the grain-size effect of Nd isotopic composition in the Songnen Sandy Land are well confined within the variation range between the regional samples and thus do not affect their application in pinpointing dust sources. The Sr-Nd isotopic composition presented in this study indicated that the sediments in the Nenjiang River drainage system have contributed very few dust particles to the Harbin eolian deposits throughout the geological past, and that the material sources of Harbin loess was different from modern dust-storm deposits. Harbin loess is the product of spring dust-storm weather and has a mixed source, with the dominant dust particles feeding to the Harbin loess being sediments of the Songhua River drainage (Fuyu, Dehui, and Yushu), but not the Nenjiang River drainage (Daqing, Dumeng, Qiqihar, Tailai and Baicheng). The sandy lands in the middle and eastern parts of Inner Mongolia fed some of the fine particle dust to the Harbin loess.

Key words: Sr-Nd isotopic composition; Songnen Sandy Land; Harbin loess; dust provenance; source tracing