

doi:10.3799/dqkx.2014.013

# 黄土高原风尘堆积物源研究进展

曾方明<sup>1</sup>, 向树元<sup>2</sup>, 刘向军<sup>1</sup>, 张玲<sup>3</sup>

1. 中国科学院青海盐湖研究所中国科学院盐湖资源与化学重点实验室, 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 青海西宁 810008

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

3. 安徽三联学院工商管理系, 安徽合肥 230601

**摘要:** 黄土高原风尘堆积是开展古环境变化研究的重要沉积物, 其源区的具体位置和变化程度对于揭示东亚大气环流演化具有关键意义, 而且一直被学术界广泛关注, 存在较大争议。前人通过地球化学(Sr-Nd-Pb 同位素、元素地球化学、碎屑锆石 U-Pb 年龄)、矿物学(白云石、重矿物)、物理学(释光灵敏度、电子自旋共振信号和环境磁学)、气象观测与模拟、地貌学等方法对黄土高原风尘堆积及其潜在源区(北方荒漠和戈壁以及青藏高原东北部)开展了大量示踪研究。研究表明青藏高原东北部、阿拉善高原、塔里木盆地和蒙古戈壁可能是非常重要的源区。目前存在的问题:(1)源区的具体区位;(2)源区物质供给系统是否存在时空变化;(3)第四纪以来的黄土研究居多, 而更老时间尺度上风尘堆积的物源研究较少。因此, 今后开展更多粉尘物源示踪方法学的研究, 并加强第四纪以前黄土高原风尘堆积的物源研究, 是风尘堆积物源研究的重要内容。

**关键词:** 黄土高原; 风尘堆积; 物源; 荒漠; 青藏高原; 地球化学。

中图分类号: P534.6; P531

文章编号: 1000-2383(2014)02-0125-16

收稿日期: 2013-10-20

## Progress in Tracing Provenance of Eolian Deposits in Chinese Loess Plateau

Zeng Fangming<sup>1</sup>, Xiang Shuyuan<sup>2</sup>, Liu Xiangjun<sup>1</sup>, Zhang Ling<sup>3</sup>

1. Key Laboratory of Salt Lake Resources and Chemistry, Qinghai Provincial Key Laboratory of Salt Lake Geology and Environment, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China

2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Department of Business Administration, Anhui Sanlian University, Hefei 230601, China

**Abstract:** Eolian deposits accumulated in the Chinese Loess Plateau (CLP) are valuable archive for reconstruction of paleoenvironmental change in East Asia. The source area of the eolian deposits in the CLP is correlated with the evolution of past atmospheric circulation of East Asia, so it is highly focused by researchers. However, the controversies are still being debated. During the past, methods of geochemistry (isotope geochemistry, element geochemistry, and detrital zircon U-Pb age), mineralogy (dolomite, heavy mineral composition), optically stimulated luminescence (OSL) sensitivity, electronic spin resonance (ESR) signal intensity, environmental magnetism, meteorological observation and modeling, and geomorphic methods were applied to track the source area of the eolian deposits by comparative study of the sediments in the CLP and the potential source areas (e.g., gobi and deserts in north China and the northeast Qinghai-Tibet Plateau) surrounding the CLP. The results show that the source area of eolian deposits in the CLP lies in the north and northwest of the CLP, and northeast Qinghai-Tibet Plateau, the Alashan Plateau (Badan Jaran desert, Tengger desert), Tarim basin and Mongolia would be the most important source areas. The controversies mostly focus on which detail area can be the source area of the eolian deposits in the CLP and whether the source area changed temporarily and spatially. Recent provenance studies of the eolian deposits in the CLP are mainly concentrated on the Quaternary loess deposits, but the studies of older deposits are relatively few. Thus, more methodologies of tracing the source area of eolian deposits and more studies for provenance of eolian deposits which accumulated before

**基金项目:** 青海省科技厅自然科学基金青年项目(No.2012-Z-933Q); 中国科学院盐湖资源与化学重点实验室开放基金(No.KLSLRC-KF-13-DX-11); 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部博士资助项目”; 国家自然科学基金项目(No.41201014)。

**作者简介:** 曾方明(1982-), 男, 助理研究员, 博士, 从事风尘堆积地球化学研究。E-mail: fzmeng@163.com

Quaternary would be the main task in the future.

**Key words:** Chinese Loess Plateau; eolian deposit; provenance; desert; Qinghai-Tibet Plateau; geochemistry.

黄土高原广泛发育风尘堆积,其北边分布着广袤的戈壁和荒漠(图 1).黄土高原风尘堆积主要包括:第四纪黄土(0~2.6 Ma)(Heller and Liu,1982;刘东生等,1985;曾方明等,2007;秦小光等,2011;Zeng *et al.*,2011;Hao *et al.*,2012),晚中新世—上新世三趾马红粘土(2.6 Ma~约 8 Ma,主要分布在六盘山以东)(Ding *et al.*,1999;An *et al.*,2001),晚渐新世—上新世黄土(约 3.5 Ma~约 25 Ma,分布在六盘山以西)(Guo *et al.*,2002;Hao and Guo,2004;Lu *et al.*,2004;Qiang *et al.*,2011;Zhan *et al.*,2011;Ge *et al.*,2012).由于风尘堆积是风力作用下的产物,记录了沉积物从源区到沉积区的搬运和堆积过程,从而为研究东亚古大气环流演化规律和机制提供了独特的近乎连续的陆相沉积记录.风尘堆积通常在平坦的高地上堆积发育,对下伏基底的构造变动极其敏感,容易遭受侵蚀,也是研究青藏高原隆升和地貌演化较为理想的沉积物(Zhan *et al.*,2011).此外,开展风尘堆积物质来源的研究对于理解我国西北内陆荒漠化的形成机理和防治具有重要意义.

黄土高原风尘堆积物源研究取得了众多成果,存在的争议也较大.迄今为止,前人对黄土高原风尘堆积的物质来源开展了大量研究(Liu *et al.*,1994;Chen *et al.*,2007;张小曳,2007;陈洪云和孙有斌,2008;Chen and Li,2011;Li *et al.*,2011;Pullen *et al.*,2011;陈骏,2012;Xiao *et al.*,2012),主要采

用了以下方法:(1)地球化学方法(同位素地球化学、元素地球化学、碎屑锆石 U-Pb 年龄);(2)矿物学方法(白云石、重矿物);(3)物理学方法(释光灵敏度、电子自旋共振信号、环境磁学);(4)其他方法(现代气象观测与模拟、地貌分析).早年,刘东生等(1985)依据黄土高原第四纪黄土的粒度从西北往东南方向变细,宏观上推测它们主要来自上风风向地带的西北内陆荒漠和戈壁地区.通过对比黄土高原黄土和潜在源区沉积物的 Sr 同位素和微量元素组成,Sun(2002)认为塔里木盆地、准噶尔盆地和柴达木盆地均不是黄土高原黄土的主要源区;通过对比黄土高原黄土与北方各大沙漠的 Sr、Nd 同位素组成特征,Chen *et al.*(2007)认为黄土主要来自巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠和柴达木沙漠;依据黄土碎屑锆石的 U-Pb 年龄谱,Pullen *et al.*(2011)认为柴达木盆地可能是黄土高原第四纪冰期黄土的主要源区.显然,在具体到某一区域(如柴达木盆地)能否作为黄土高原风尘堆积的主要源区存在完全不同的认识.此外,自晚中新世以来,关于黄土高原风尘堆积的源区的稳定性也存在不同的看法(Sun,2005;Wang *et al.*,2007).因此,黄土高原风尘堆积的物源研究十分复杂,它们的源区在哪里?源区自新近纪以来是否发生过重大变化?黄土高原不同部位和不同时期(如冰期、间冰期)的风尘堆积的来源是否相同?这些都是物源研究中存在的重要问题.本文综述了黄土高原风尘堆积物源研究的主要成果,对存

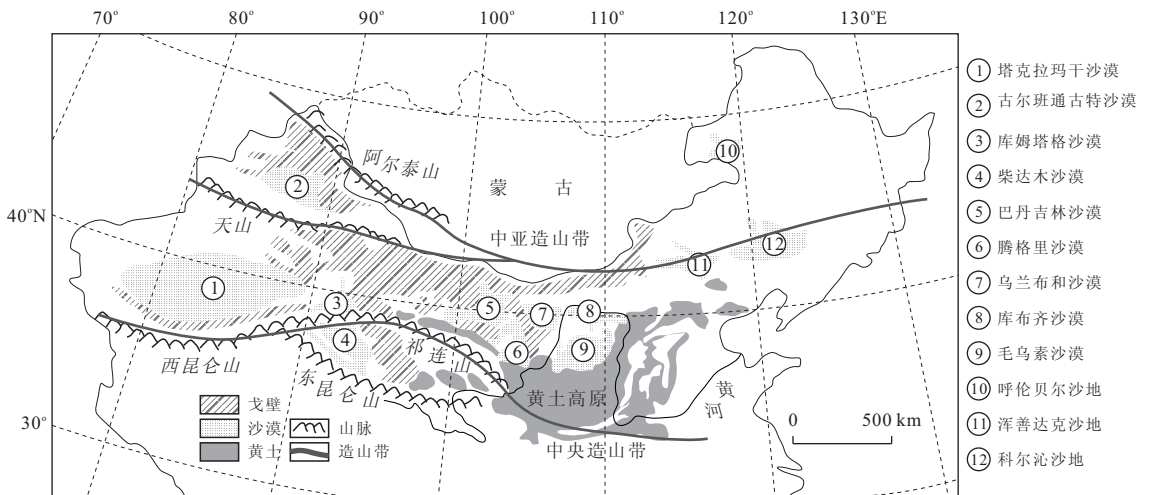


图 1 黄土高原与北方戈壁、荒漠(据 Sun,2002 和 Chen *et al.*,2007 修改)

Fig.1 Chinese Loess Plateau, gobi and deserts in North China

在的问题进行了分析。

## 1 地球化学方法

### 1.1 同位素地球化学

Sr、Nd、Pb 同位素组成在不同成因和年龄的岩石矿物中存在明显差异,且在地球表生环境的迁移过程中被认为基本不发生改变,从而可以有效地示踪沉积物的来源(Biscaye *et al.*, 1997; Faure, 1998),被广泛应用于各类粉尘沉积物的物源示踪研究(Nakai *et al.*, 1993; Liu *et al.*, 1994; Jahn *et al.*, 2001; Sun, 2005; Rao *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2011)。

**1.1.1 Sr-Nd 同位素** (1)第四纪黄土. Sr-Nd 同位素示踪是风尘堆积物源研究的重要手段(Liu *et al.*, 1994; Gallet *et al.*, 1996; Chen *et al.*, 2007; Rao *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2009)。黄土高原中部洛川黄土的同位素组成( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ : 0.715 147 ~ 0.716 150;  $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ : -11.2 ~ -10.9)与塔里木盆地西南部黄土/黄土状沉积( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ : 0.712 293 ~ 0.715 915;  $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ : -12.0 ~ -9.11)接近,但与天山北部的黄土/黄土状沉积( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ : 0.711 270;  $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ : -5.31)存在明显差别,从而表明黄土高原的黄土可能来自塔里木盆地,但明显不是来自天山北部(Liu *et al.*, 1994)。

受所处构造部位的约束,中国北方十大沙漠/沙地表层砂(上部 30 cm,  $<75\ \mu\text{m}$ )硅酸盐组分的 Sr-Nd 同位素组成具有空间分异特征:①受中亚造山带影响的中国北部边界沙漠区(西部的古尔班通古特沙漠,东部的呼伦贝尔沙地、浑善达克沙地、科尔沁沙地),  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ : 0.710 587 ~ 0.713 653,  $\epsilon_{\text{Nd}}(0) > -7.0$ ;②青藏高原北缘沙漠区(塔克拉玛干沙漠、柴达木沙漠、巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠),  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ : 0.713 214 ~ 0.720 709,  $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ : -11.9 ~ -7.4;③鄂尔多斯高原沙漠区(库布齐沙漠和毛乌素沙漠),  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ : 0.714 824 ~ 0.719 218,  $\epsilon_{\text{Nd}}(0) < -11.5$  (Chen *et al.*, 2007)。对比研究(Chen *et al.*, 2007; Chen and Li, 2011)显示黄土高原环县、西峰和洛川末次冰期黄土( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ : 0.718 258 ~ 0.718 417;  $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ : -10.0 ~ -9.2)的主要源区为巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠和柴达木沙漠,而不是鄂尔多斯高原。青藏高原东北部的黄土、河床沉积物和湖底沉积物样品以及蒙古国南部二连浩特的沙漠砂样品的 Sr-Nd 同位素组成(Yang *et al.*, 2009)支持上述结

论。青藏高原东北部的河流碎屑沉积和中亚造山带的沙漠砂 Sr-Nd 同位素研究结果表明,青藏高原北部和中亚造山带西段的高山剥蚀物质共同对黄土高原风尘堆积提供物质贡献;最近 15 Ma 以来,随着青藏高原北部的不断隆升,来自该区的剥蚀物所占的比例相对于中亚造山带逐渐增高(Li *et al.*, 2011)。

东秦岭造山带地区的第四纪黄土(Zhang *et al.*, 2012),除了来自远源地区外,还有一部分物质直接来自东秦岭(图 2)。

(2)三趾马红粘土. Sun(2005)对 8 Ma 以来的泾川剖面风尘堆积(由第四纪黄土和三趾马红粘土组成) $<20\ \mu\text{m}$  硅酸盐组分的 Sr-Nd 同位素组成进行了研究,发现第四纪黄土的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  平均值为 0.724 730 ( $n=66$ ),  $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$  平均值为 -10.88 ( $n=28$ );三趾马红粘土的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  平均值为 0.725 106 ( $n=96$ ),  $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$  平均值为 -10.55 ( $n=15$ )。Sr-Nd 同位素(Sun, 2005)和  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值(Sun and Zhu, 2010)在约 2.6 Ma 时期存在拐点(图 3),表明黄土高原风尘堆积的源区在约 2.6 Ma 可能发生重大变化,可能是气候变冷和晚新生代造山带隆升造成了冰蚀作用加强,从高处的造山带带来了更多年轻的长英质地壳物质(Sun and Zhu, 2010)。然而, Wang *et al.* (2007)对 7 Ma 以来的灵台剖面风尘堆积(位于泾川剖面东南部约 30 km)的 Sr-Nd 同位素组成进行了研究(图 3),发现同位素组成变化在仪器引起的误差范围内,认为在整个沉积阶段风尘堆积的源区稳定不变。

(3)新近纪黄土. 甘肃天水—秦安地区的 QA-I 剖面(Guo *et al.*, 2002)、QA-III 剖面(Hao and Guo, 2007)及 ML-V 剖面(孙斌, 2006; Guo *et al.*, 2008)新近纪黄土的 Sr-Nd 同位素组成与黄土高原第四纪黄土具有一致的特征(梁美艳, 2009; Chen and Li, 2011; 曾方明, 2011),表明黄土高原新近纪黄土与第四纪黄土具有相似的源区。

本文综合了前人采用 Sr-Nd 同位素手段示踪黄土高原风尘堆积物源的部分研究结果(图 2),发现青藏高原东北部、阿拉善高原、塔里木盆地、柴达木盆地沉积物与黄土高原风尘堆积的 Sr-Nd 同位素组成较为一致,表明上述区域可能是黄土高原风尘堆积的重要源区;东北沙地、准噶尔盆地、鄂尔多斯高原沉积物与黄土高原风尘堆积的 Sr-Nd 同位素存在显著差异。黄土高原风尘堆积的 Sr-Nd 同位素分布范围较宽的原因除了受到自身的物质成分以

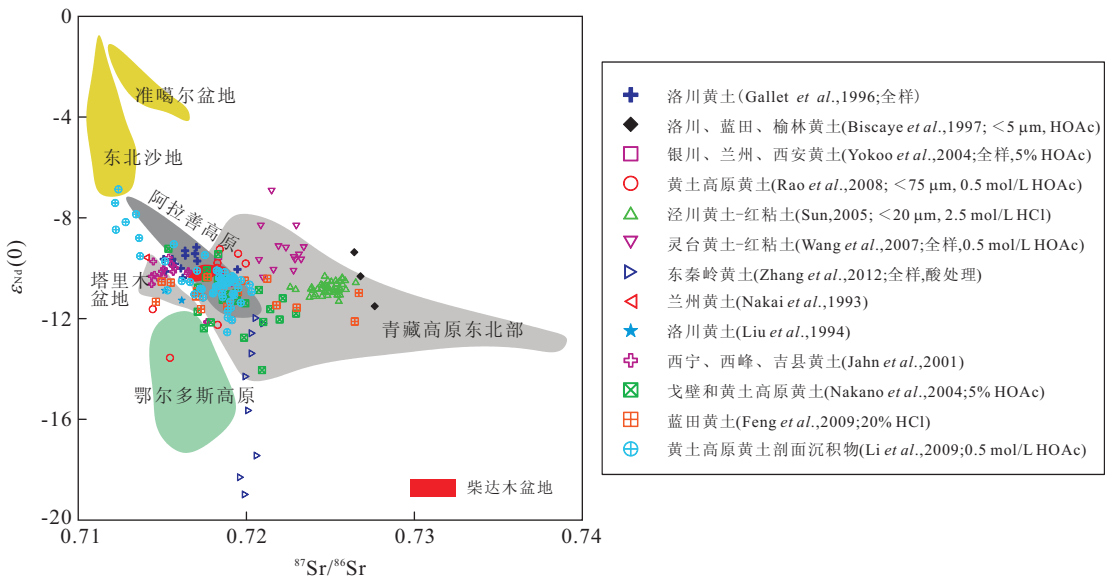


图 2 黄土高原风尘堆积与潜在源区的 Sr-Nd 同位素组成

Fig.2 Sr-Nd isotope composition of the eolian deposits in northern China and their possible source areas

潜在源区阿拉善高原、鄂尔多斯高原、塔里木盆地、柴达木盆地、准噶尔盆地和东北沙地的数据来自 Chen *et al.*, 2007; 青藏高原东北部的数据来自 Yang *et al.*, 2009 和 Li *et al.*, 2011

及沉积区域的造山带物质(Zhang *et al.*, 2012)的影响以外,还受到测试样品粒径的选取和前处理方法的影响,将在下文进一步予以讨论。

**1.1.2 Pb 同位素** 李锋(2007)对北方沙尘源区风成砂(表层以下 30 cm)的 Pb 同位素组成进行了研究,发现它们具有空间分异特征,毛乌素沙漠的<sup>206,207,208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 比值最低,而塔克拉玛干沙漠的<sup>206,207,208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 比值最高;发现黄土高原第四纪黄土的 Pb 同位素比值(Biscaye *et al.*, 1997)与塔克拉玛干沙漠相似,而与毛乌素沙漠存在明显差异,从而认为黄土高原黄土的主要源区可能是塔克拉玛干沙漠,而不是毛乌素沙漠。

Wu *et al.*(2011)对西峰剖面黄土和古土壤层(L15-S0 共 9 个层位)4 个粒度组分(< 1 μm, <2.5 μm, <10 μm, <30 μm)的 Pb 同位素组成进行了研究,发现蒙古国南部的戈壁和沙漠区域是西峰黄土的主要源区,而且西峰剖面各层位样品的 Pb 同位素组成没有明显的变化,表明约 1.26 Ma 以来(L15 黄土层底部)(Ding *et al.*, 2002)在冰期和间冰期时间尺度上黄土的源区是稳定的。

**1.1.3 分粒级和去除碳酸盐对同位素组成的影响** 由于 Sr、Nd、Pb 同位素比值受沉积物粒度效应引起的矿物分异的影响,并且沉积后期阶段形成的碳酸盐矿物会对物源示踪产生干扰,所以样品测试粒径的选取以及去除碳酸盐是关键的一环。沉积物中细

颗粒组分中含有更多的富 Rb 粘土矿物和云母,从而导致<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值在细粒组分中最高(图 4a),受粒度效应影响显著(Asahara *et al.*, 1995; Chen *et al.*, 2007)。相对于<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值,<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 比值受粒度效应影响要小一些(Chen *et al.*, 2007; Feng *et al.*, 2009)。但是,现代尘暴样品(WJ-1)和蓝田第四纪黄土样品(LT-25)各粒级的 ε<sub>Nd</sub>(0)的变化值分别达到 2.77 和 1.18 ε 单位(Feng *et al.*, 2009),表明粒度对<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 比值具有一定的影响(图 4b)。黄土高原第四纪黄土样品(LH1-3)的 Pb 同位素比值(<sup>206,207,208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)在各粒度组分中不相同(图 4c),表明 Pb 同位素比值受粒度效应影响比较明显,而且没有特定的规律(Feng *et al.*, 2010)。泾川剖面风尘堆积在约 2.6 Ma 时期存在的<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 比值变化(Sun and Zhu, 2010)可能就受到了粒度效应的影响。过去在选择粒径方面,主要有全岩(Liu *et al.*, 1994)、<20 μm(Sun, 2005)和<75 μm(Chen *et al.*, 2007)等方法。由于选取的粒径不同,风尘堆积 Sr-Nd 同位素组成特征会产生较大差异(图 3a, 3b, 图 4)。

此外,样品前处理去除碳酸盐采用的试剂主要为盐酸(HCl)和醋酸(HOAc),它们的浓度对于去除结果有重要的影响。采用盐酸时,1 mol/L HCl 不仅溶解碳酸盐组分,而且溶解一部分硅酸盐矿物(如斜长石)(刘连文等, 2002; Yang *et al.*, 2007);

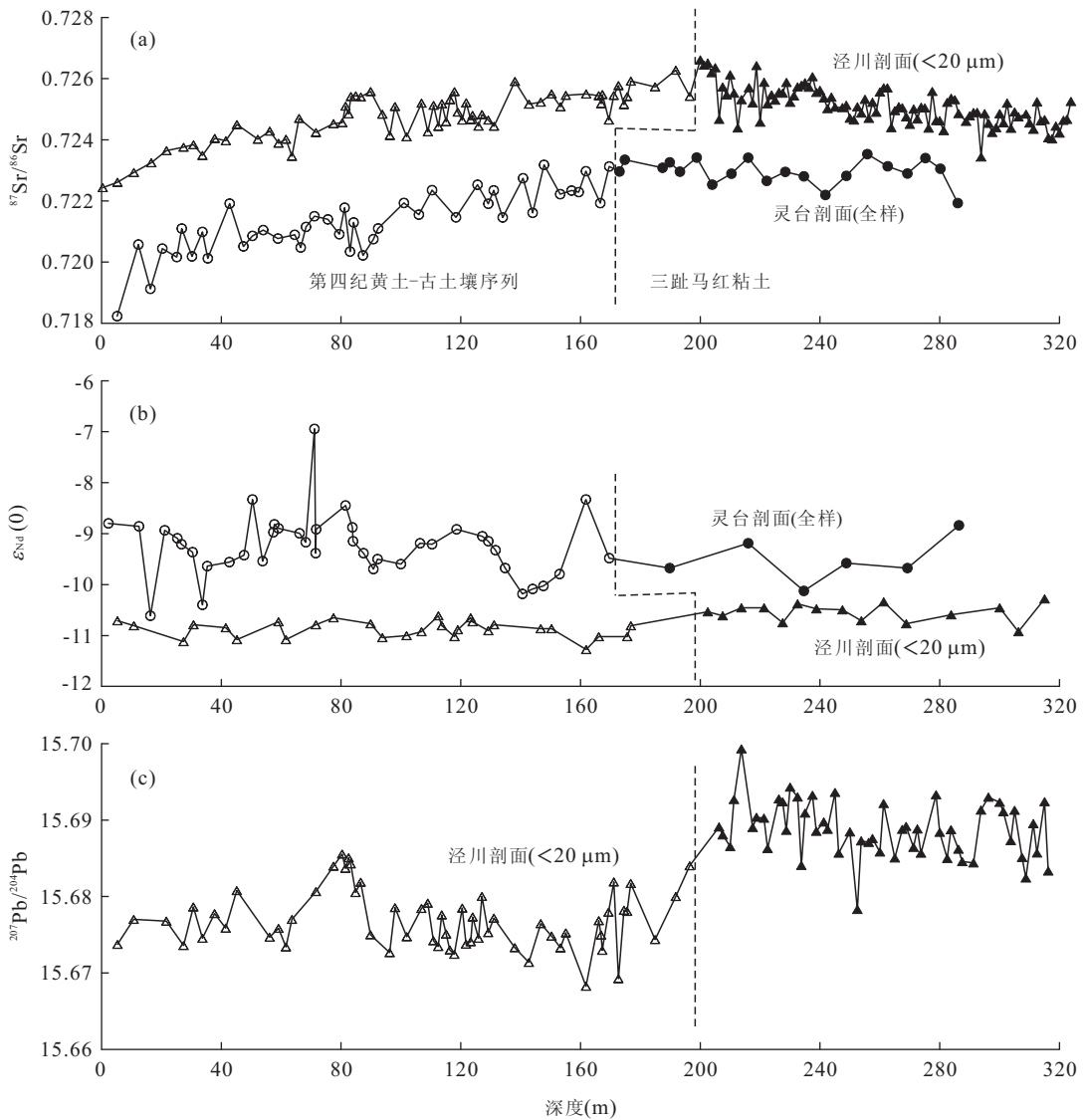


图3 泾川、灵台剖面风尘堆积 Sr、Nd 和 Pb 同位素比值的演化

Fig.3 Sr, Nd and Pb isotopic ratios of eolian deposits in the Jingchuan and Lingtai sections

a 和 b.数据来自 Sun, 2005 和 Wang *et al.*, 2007; c.数据来自 Sun and Zhu, 2010

2 mol/L HCl 不仅淋洗出碳酸盐矿物(如方解石)中的 Sr, 而且淋洗出粘土矿物中的 Sr (Gallet *et al.*, 1996); 2.5 mol/L HCl 处理黄土样品 20 h 后, 样品中的粘土矿物等碎屑矿物硅酸盐组分中的 Rb 遭到一定程度的溶解 (Asahara *et al.*, 1999). 采用醋酸时, 0.5 mol/L HOAc 可以有效去除黄土中的碳酸盐矿物方解石, 而对碎屑矿物白云石以及硅酸盐组分的破坏程度可以忽略不计, 酸洗后的不溶组分基本代表了粉尘物质的原始信息 (Yang *et al.*, 2000); 1 mol/L 的醋酸可以完全溶解碳酸盐, 对非碳酸盐组分(如硅酸盐、铁的氧化物)中的 Sr 的溶解非常微弱, 可以忽略不计 (Quade *et al.*, 1997; 刘连文等, 2002; Wu *et al.*, 2009), 但是记录了风尘堆积源区

信息的碎屑白云石矿物也会被溶解. 因此, 在去除风尘堆积样品的碳酸盐时, 0.5 mol/L HOAc 溶液可能是较好的选择. 综上所述, 在开展同位素地球化学手段示踪风尘堆积的物源研究时, 样品测试粒径的选取以及前处理去除碳酸盐是一个不应忽略的重要环节.

## 1.2 元素地球化学

沉积物的某些元素在风化、搬运和沉积阶段通常保持稳定, 保留了沉积母岩的信息, 从而可以用于物源研究 (Bhatia and Crook, 1986; Liu *et al.*, 1993; McLennan *et al.*, 1993; Sun, 2002; Hao *et al.*, 2010). 能用于风尘堆积物源示踪的常量元素地球化学指标有  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$  比值 (程燕等, 2003)、 $\text{TiO}_2/$

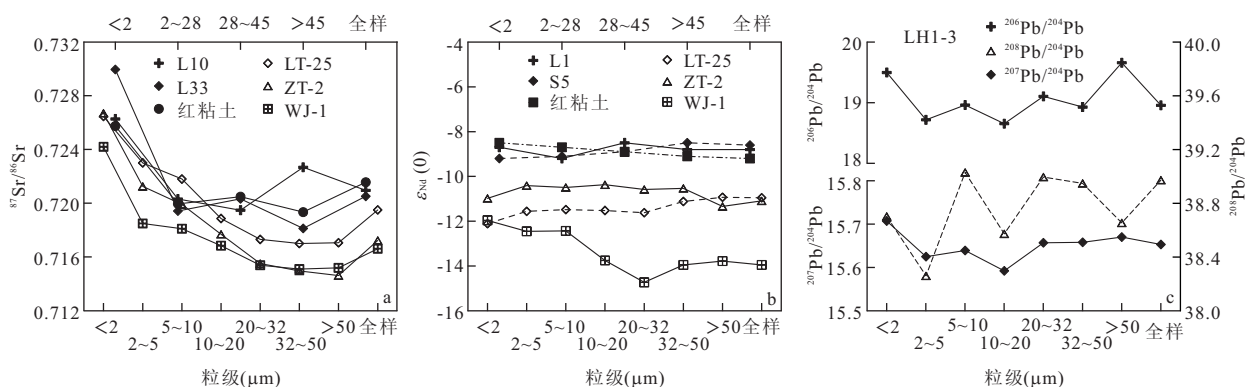


图 4 风尘物质中不同粒级组分中 Sr、Nd 和 Pb 同位素比值

Fig.4 Sr, Nd and Pb isotopic compositions of eolian deposits in different grain-size components

样品 L10、L33、L1、S5 和红粘土数据依据 Rao *et al.*, 2006; 样品 LT-25、ZT-2 和 WJ-1 数据依据 Feng *et al.*, 2009; 样品 LH1-3 的 Pb 同位素比值依据 Feng *et al.*, 2010

$Al_2O_3$  值 (Sheldon and Tabor, 2009; Hao *et al.*, 2010) 和  $K_2O/Al_2O_3$  值 (Hao *et al.*, 2010) 等。微量元素 (如 Zr、Ti、Hf、Nb) 和稀土元素的地球化学行为表现为惰性, 迁移较弱, 也常用于风尘堆积的源区示踪 (Sun, 2002; Hao *et al.*, 2010; Ferrat *et al.*, 2011)。

Sun (2002) 研究了内陆三大盆地 (准噶尔盆地、塔里木盆地和柴达木盆地) 和黄土高原黄土沉积物 ( $<20 \mu m$  组分) 的微量、稀土元素组成, 并结合 Sr 同位素组成, 发现它们具有不同的组成特征, 认为内陆三大盆地都不是黄土高原黄土的主要源区。

第四纪黄土—三趾马红粘土 (西峰剖面) 和中新世黄土 (QA-I 剖面) 的元素组成特征 (Liang *et al.*, 2009) 基本一致, 表明它们具有相似的源区; 但是与第四纪黄土相比, 中新世黄土的  $K_2O$ 、 $Fe_2O_3$  和  $MgO$  含量稍高,  $Na_2O$  含量较低, 且中新世黄土的化学风化指数 CIA 平均值 (68.73) 高于第四纪黄土—古土壤序列的 CIA 平均值 (65.30), 可能与中新世时期较暖湿的气候有关。

黄土高原蓝田、天水、定西剖面的 S1 古土壤层的 Al-Ti-Zr 比值接近, La/Th 和 Ce/Pb 比值以及稀土元素配分模式均与上地壳接近, 表明黄土高原 S1 古土壤的来源物质在沉积之前就经历了多次的物质循环, 从而具有均一性 (汪海斌等, 2011)。

沙漠表层砂 (塔克拉玛干沙漠、柴达木沙漠、腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠)、黄土高原黄土—红粘土、青藏高原泥炭土 (若尔盖红原) 的全样和不同粒级组分 (如  $<4 \mu m$ ,  $16 \sim 32 \mu m$ ,  $>63 \mu m$ ) 的常量和微量元素组成研究表明: Y/ $\Sigma REE$ , La/Er 和 Eu/Eu\* 等比值基本不受粒度效应影响, 可以用于沉积

物源示踪; 各类样品的 La/Gd、Sc/Y 比值等指示青藏高原可能是黄土高原黄土的重要源区 (Ferrat *et al.*, 2011)。

然而, 由于黄土高原风尘堆积源岩经历过多次的循环和混合过程造成其元素地球化学组成均一化 (Taylor *et al.*, 1983; Gallet *et al.*, 1998), 所以常量、微量和稀土元素较难示踪出中国北方风尘堆积及其潜在源区的细微差别 (Chen and Li, 2011)。

### 1.3 碎屑锆石的 U-Pb 年龄谱

锆石 ( $ZrSiO_4$ ) 含有长寿命的放射性元素 U 和 Th, 其 U-Th-Pb 同位素体系具有极高的封闭温度, 通常大于  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  (Lee *et al.*, 1997)。碎屑锆石在沉积物中分布广泛、稳定性极强, 保存了大量初始源区 (岩浆岩和变质岩) 的信息, 记录了源区岩石的年龄和演化信息, 其 U-Pb 年龄谱是研究风尘堆积物源的重要手段 (谢静等, 2007)。

Stevens *et al.* (2010) 对黄土高原北部环县末次冰期黄土和周边沙漠/沙地 (腾格里、毛乌素沙漠, 科尔沁、浑善达克沙地) 表层砂的碎屑锆石的 U-Pb 年龄和形态进行了研究, 发现科尔沁、浑善达克沙地和毛乌素沙漠含有中生代 ( $252.2 \sim 66.0 \text{ Ma}$ ) 的锆石颗粒, 而环县黄土和腾格里沙漠样品中没有发现这一时期的锆石颗粒 (图 5)。黄土和塔克拉玛干沙漠的锆石年龄中均存在中元古代 ( $1600 \sim 1000 \text{ Ma}$ ) 的谱峰, 黄土锆石中广义的加里东时期的组分可能与祁连山和柴达木盆地出露的结晶岩有关, 从而认为祁连山地区、塔克拉玛干沙漠可能是黄土高原黄土的主要源区。

柴达木盆地沉积物 (第四纪洪积物, 上新世—更新世湖积物) 和青藏高原北部沉积物 (三叠纪砂岩)

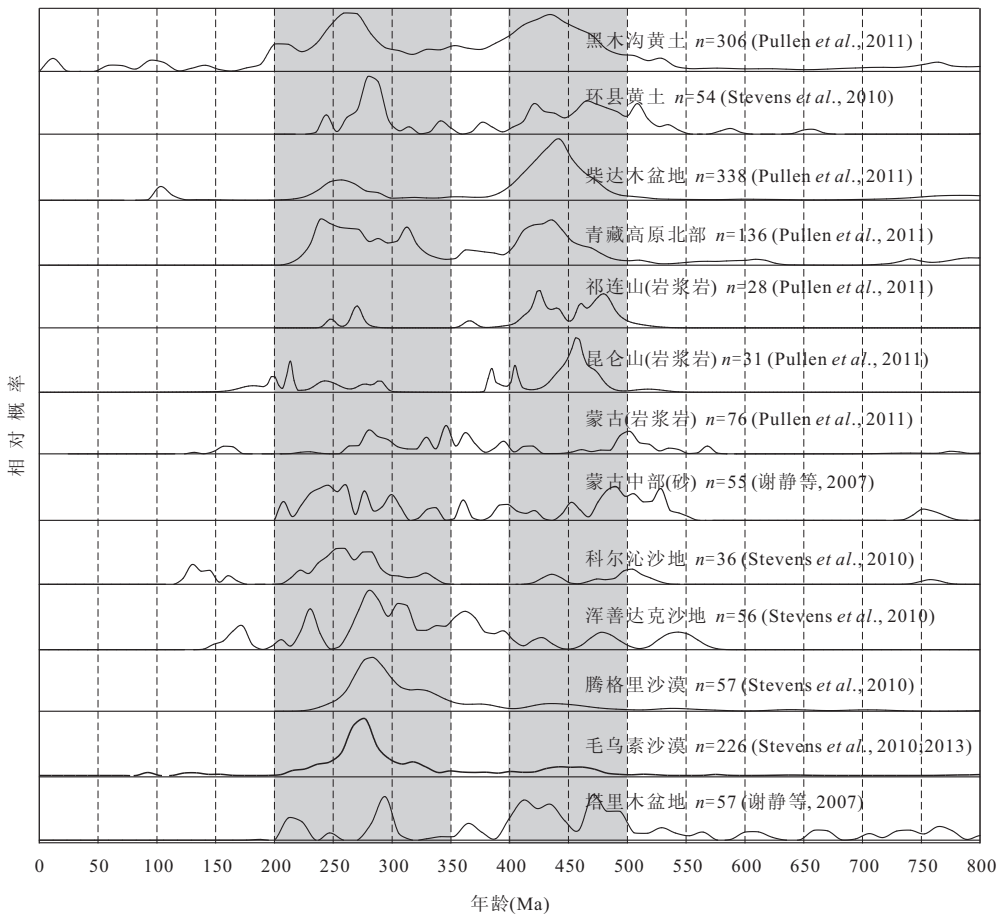


图 5 黄土高原黄土与潜在源区碎屑锆石的 U-Pb 年龄谱

Fig.5 Detrital zircon U-Pb age spectra for loess in the Chinese Loess Plateau and possible source areas

和黄土高原黑木沟剖面冰期黄土(L1, L9, L15 和 L33)的碎屑锆石的 U-Pb 年龄谱具有相似性, 从而认为在冰期柴达木盆地和青藏高原北部是黄土高原黄土的主要粉尘源区, 这两个地区空间上的地貌特征也指示了在全新世之前碎屑物质在西风急流作用下往东迁移(Pullen *et al.*, 2011)。

黄土高原西部(西宁)、中部(西峰)和东南部(渭南)末次冰期黄土(L1)和间冰期古土壤(S0, S1)样品的碎屑锆石 U-Pb 年龄表明至少在最后一个冰期一间冰期旋回相同地点冰期和间冰期的风尘堆积的来源不同, 而且黄土高原不同部位黄土的来源也存在差别, 从而揭示出黄土高原黄土的源区是复杂多样的, 并存在空间上的变化(Xiao *et al.*, 2012)。

黄土高原黄土及其潜在源区碎屑锆石的 U-Pb 年龄综合结果(图 5)表明: 在 200~350 Ma 的锆石年龄组分中, 青藏高原北部、腾格里沙漠和蒙古戈壁、毛乌素沙漠、科尔沁沙地的年龄谱与黑木沟和环县的黄土相似; 在 400~500 Ma 的年龄组分中, 柴达木盆地、青藏高原北部的年龄谱与黑木沟和环县

黄土相似。上述结果表明青藏高原北部、腾格里沙漠、柴达木盆地和蒙古戈壁可能是黄土的重要源区。毛乌素沙漠和黑木沟、环县黄土均存在 250~300 Ma 的年龄谱峰, 表明毛乌素沙漠对黄土高原黄土可能有一定的贡献。

## 2 矿物学方法

### 2.1 白云石

Li *et al.* (2007) 对中国北方风尘堆积及其潜在源区(北方干旱一半干旱区)的碎屑成因白云石矿物开展了研究, 东部沙地(呼伦贝尔、浑善达克、科尔沁沙地)、古尔班通古特沙漠、库布齐沙漠、毛乌素沙漠、乌兰布和沙漠以及我国东北黄土样品均没有检测到白云石, 在洛川、环县、西峰和曹峴第四纪黄土样品中检测到了白云石, 在青藏高原东北缘(包括柴达木沙漠、三江源、河西走廊、巴丹吉林沙漠、库姆塔格沙漠和塔克拉玛干沙漠)样品中检测到白云石, 主要与这一区域出露的白云岩有关, 认为青藏高原东

北缘的碎屑物质可能对黄土高原黄土有重要贡献。此外, Maher *et al.* (2009) 在蒙古国戈壁样品中也检测到了白云石, 表明该区域可能对黄土高原黄土有贡献。

洛川、西峰、环县和曹峴剖面中末次盛冰期的 L1 黄土层位均检测到白云石, 但是对于全新世时期 S0 古土壤层只在位于西北方向的环县和曹峴剖面检测到白云石 (Li *et al.*, 2007)。位于南部的洛川和西峰剖面 S0 古土壤层没有检测到白云石的原因可能是强烈的夏季风带来的降水 (年降水量超过 540 mm) (Liu *et al.*, 2006) 引起碳酸盐矿物的淋溶。

## 2.2 重矿物

重矿物 (比重大于  $2.9 \text{ g/cm}^3$ ) 可以用来恢复源岩矿物组成, 当风化、搬运和成岩等作用对重矿物组成的影响较小时也可以作为沉积物源区示踪的有效指标 (Xie and Ding, 2007)。石榴子石、电气石、白云母、锆石等是示踪沉积物源区的重要矿物 (Belousova *et al.*, 2002; Xie and Ding, 2007; Jeong and Lee, 2010)。Jeong and Lee (2010) 在黄土高原第四纪黄土样品中发现了黑云母矿物中的微包裹体 (重晶石和天青石), 可能是疏松沉积物与高盐度溶液相互反应形成的产物, 推测祁连山、柴达木盆地可能是黄土高原第四纪黄土的重要源区。

## 3 物理学方法

### 3.1 释光灵敏度

石英颗粒的释光灵敏度信号受源岩类型和当地埋藏条件的影响, 可以提供粉尘源区物质的相关信息 (Lai and Wintle, 2006)。Lü and Sun (2011) 对中国北方现代沙丘砂、靖边剖面的第四纪黄土和三趾马红粘土的释光灵敏度进行了研究, 发现不同区域沙丘砂的石英颗粒 ( $90 \sim 125 \mu\text{m}$ ) 中  $110^\circ\text{C}$  热释光峰灵敏度和光释光灵敏度不同, 具有空间分异特征, 从而具有源区示踪的潜力。根据释光灵敏度将中国北方沙漠划分为 4 个区域, 但是 IV 区 (塔里木盆地和柴达木盆地) 完全包含在 II 区 (阿拉善高原和鄂尔多斯高原) 内。此外, 在  $64 \sim 90 \mu\text{m}$  的石英颗粒中, 靖边剖面三趾马红粘土的释光信号比第四纪黄土高, 认为新近纪和第四纪之交风尘堆积的源区物质发生了改变。然而, 将靖边第四纪黄土与北方沙丘砂样品的释光灵敏度进行比较, 发现黄土样品的释光灵敏度与准噶尔盆地 (III 区)、塔里木盆地和柴达木盆地 (IV 区)、阿拉善高原和鄂尔多斯高原 (II 区) 基本一

致, 与之前采用元素地球化学方法排除内陆三大盆地 (塔里木盆地、准噶尔盆地和柴达木盆地) 作为黄土高原黄土主要源区的结论不相吻合 (Sun, 2002)。该研究选择的靖边剖面位于黄土高原北缘, 没有对黄土高原中部和南部的样品开展研究, 而且石英释光信号的影响因素复杂 (郑辰鑫和周力平, 2012), 采用释光灵敏度示踪风尘堆积的物源还需要开展更进一步的工作。

### 3.2 电子自旋共振信号

风成细颗粒 ( $\leq 20 \mu\text{m}$ ) 石英晶体  $E_1'$  中心 (氧原子空位中的 1 个电子) 电子自旋共振 (ESR) 信号强度数值记录了源区石英的形成年龄, 中国北方各大沙漠和戈壁的石英 ESR 信号强度具有空间分异特征, 从而具有物源指示意义 (Ono *et al.*, 1998; Sun *et al.*, 2007)。值得注意的是, 样品的石英颗粒 ESR 信号强度具有显著的粒度效应,  $\leq 20 \mu\text{m}$  石英颗粒的 ESR 信号强度要高于  $> 20 \mu\text{m}$  的强度 (Ono *et al.*, 1998)。

我国北方和蒙古国南部的戈壁沙漠的表层样品石英颗粒 ( $< 16 \mu\text{m}$ ) 的 ESR 信号强度表明在同一个沙漠内部信号强度较稳定, 但是不同沙漠和戈壁的信号强度存在明显的变化 (Sun *et al.*, 2007)。进一步地, Sun *et al.* (2008) 对西峰和渭南剖面晚第四纪黄土石英 ( $< 16 \mu\text{m}$ ) 的 ESR 信号强度进行了研究 (图 6), 认为西峰和渭南细粒粉尘堆积主要来自巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、库布齐沙漠和蒙古国南部的戈壁地区, 至少从末次间冰期以来不是来自塔克拉玛干沙漠, 还认为晚第四纪黄土的物源在冰期和间冰期存在变化, 冷期主要来自蒙古国南部的戈壁, 而暖期则主要来自巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠。需要说

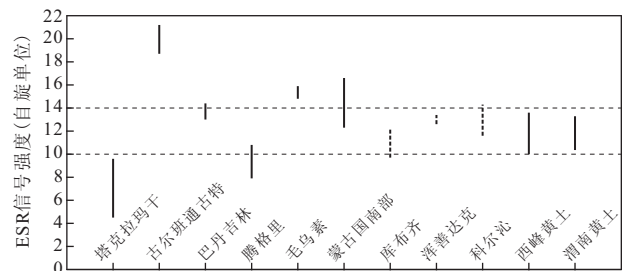


图 6 西峰和渭南晚第四纪黄土与潜在源区石英颗粒 ( $< 16 \mu\text{m}$ ) 的 ESR 信号强度 (据 Sun *et al.*, 2007, 2008)

Fig. 6 Electronic spin resonance (ESR) signal intensity of quartz grain ( $< 16 \mu\text{m}$ ) in sediments at Xifeng and Weinan sections and possible source areas of the eolian deposit



明的是,东北沙地的 ESR 信号强度与第四纪黄土的十分接近,与采用 Sr-Nd 同位素手段得出的结果存在明显差异(Chen *et al.*,2007)。

### 3.3 环境磁学

Maher *et al.*(2009)发现蒙古国南部戈壁表层样品( $<38\ \mu\text{m}$ )和黄土高原末次冰期黄土的磁化率存在显著的差异,主要表现为戈壁表层样品的磁化率变化很大,而末次冰期黄土的磁化率变化很小,从而推测黄土源区物质在黄土高原沉积前就经历了充分的混合过程,黄土高原晚第四纪黄土的来源应该是多源和广域的,某个特定的沙漠区域不太可能是其主要源区.这一推测得到了最近碎屑锆石 U-Pb 年龄研究结果的印证(Xiao *et al.*,2012)。

## 4 其他方法

### 4.1 现代气象观测和气候模拟

在2003年3月4日发生于拉萨的一次尘暴事件过程中,上升气流将不同粒径的沙尘颗粒提升到不同的高度,并在西风急流的作用下,往东运输至黄土高原西部地区,较粗颗粒的物质基本下落在青藏高原东部并以黄土的形式堆积(Fang *et al.*,2004),从而暗示青藏高原可能是黄土高原黄土的一个重要源区。

Zhang *et al.*(2003)利用区域气溶胶模式 NARCM 和地面气象站点数据对过去43年(1960—2002年)亚洲粉尘释放进行了模拟,发现蒙古国沙漠和塔克拉玛干沙漠、巴丹吉林沙漠对总的粉尘释放贡献量约为70%(其中塔克拉玛干沙漠贡献量为21%),上述区域也可以被视为黄土高原风尘堆积的主要源区(张小曳,2007)。

Shi and Liu(2011)从区域气候模拟的角度,以现代气候为边界条件,对粉尘浓度、风力方向和大小以及粉尘的沉积通量进行模拟,揭示邻近的北方沙漠是黄土高原物质的主要源区(贡献量为83.7%),而塔克拉玛干沙漠对黄土高原黄土的贡献较小(贡献量仅为6.4%)。气候模拟在评估塔里木盆地对于黄土高原粉尘沉积的贡献量时结果不一致(Zhang *et al.*,2003;Shi and Liu,2011)。

### 4.2 地貌学方法

柴达木盆地位于黄土高原的西北方向,南北被昆仑山和祁连山围限,气候极其干旱,年降水量仅为25 mm(Bowler *et al.*,1987).在这种干旱条件下,高海拔山系通过冰川和冰缘作用产生的细粒碎屑物质

被搬运至地势较低的河流冲积平原,为风蚀过程提供了物质条件,粉砂和粘粒物质被风力往东搬运出柴达木盆地;柴达木盆地雅丹区域的下风向广泛分布纵向沙丘和新月形沙丘,而且青海湖周边地区分布的黄土沉积底界年龄为全新世,未见全新世以前的黄土沉积,可能是柴达木盆地经过脱粉砂过程,其物质往东输送,从而被认为是黄土的主要源区(Bowler *et al.*,1987).重建的风力格局和风尘搬运的数值模拟表明风力作用下从柴达木盆地搬运出的物质总量( $32\ 000\ \text{km}^3$ )占黄土高原第四纪沉积物总量( $60\ 000\ \text{km}^3$ )的一半多,从而表明柴达木盆地是黄土高原黄土的主要源区(Kapp *et al.*,2011)。

## 5 讨论

### 5.1 黄土高原风尘堆积的主要源区

通过实验分析和数值模拟获得黄土高原风尘堆积的主要源区位置是风尘堆积物源研究的重要目标.根据近地面盛行风向,普遍认为黄土高原风尘堆积的主要源区位于高原上风向(西边和北边)的戈壁和荒漠地区,但是具体到哪个戈壁和沙漠区域可以作为黄土高原风尘堆积的主要源区存在争议.多数证据表明阿拉善高原和青藏高原东北部可能是黄土高原最重要的源区,但是对于其他一些潜在源区存在不一致的看法(表1)。

鄂尔多斯高原的毛乌素沙漠位于黄土高原以北.现代沙尘暴分析(Sun *et al.*,2001)、元素地球化学(Sun,2002)和粒度特征(Yang and Ding,2008)表明这一区域可以作为黄土高原黄土的主要源区.然而,毛乌素沙漠的 Sr-Nd、Pb 同位素组成与黄土高原风尘堆积存在很大的差异(Chen *et al.*,2007;李锋,2007),而且毛乌素沙漠所在的鄂尔多斯高原没有大型山脉,缺乏高山物质风化剥蚀形成碎屑细颗粒物条件,不能提供足够的粉尘物质(李高军,2010),从而表明毛乌素沙漠对黄土高原风尘堆积的贡献较小,不是主要的源区.但是一项最新的研究成果认为黄河泛滥可对毛乌素沙漠进行物质补给,并为黄土高原持续提供物源(Stevens *et al.*,2013)。

塔里木盆地的塔克拉玛干沙漠是中国面积最大的沙漠.Sr-Nd 同位素(Liu *et al.*,1994;Rao *et al.*,2006;Yang *et al.*,2009)、Pb 同位素(李锋,2007)、碎屑锆石 U-Pb 年龄(Stevens *et al.*,2010)、数值模拟(Zhang *et al.*,2003)等物源示踪手段表明塔里木盆地是黄土高原风尘堆积的主要源区.但元素地球

表 1 黄土高原风尘堆积主要源区研究结果

Table 1 The source areas of the eolian deposits in Chinese Loess Plateau

| 阿拉善高原 <sup>a</sup> | 青藏高原 | 鄂尔多斯高原 <sup>b</sup> | 塔里木盆地 | 柴达木盆地 | 准噶尔盆地 | 参考文献                         |
|--------------------|------|---------------------|-------|-------|-------|------------------------------|
|                    |      |                     |       | ✓     |       | Bowler <i>et al.</i> , 1987  |
|                    |      |                     | ✓     |       |       | Liu <i>et al.</i> , 1994     |
| ✓                  |      | ✓                   | ×     |       |       | Sun <i>et al.</i> , 2001     |
| ✓                  |      | ✓                   | ×     | ×     | ×     | Sun, 2002                    |
| ✓                  |      |                     | ✓     |       |       | Zhang <i>et al.</i> , 2003   |
|                    | ✓    |                     |       |       |       | Fang <i>et al.</i> , 2004    |
|                    |      |                     | ✓     |       |       | Honda <i>et al.</i> , 2004   |
| ✓                  | ✓    |                     | ✓     |       |       | Rao <i>et al.</i> , 2006     |
| ✓                  |      | ×                   |       | ✓     |       | Chen <i>et al.</i> , 2007    |
| ✓                  | ✓    |                     |       | ✓     |       | Li <i>et al.</i> , 2007      |
|                    |      | ×                   | ✓     |       |       | 李锋, 2007                     |
| ✓                  |      |                     |       | ✓     |       | 杨杰东等, 2007                   |
|                    |      | ✓                   |       |       |       | Rao <i>et al.</i> , 2008     |
| ✓                  |      | ✓                   | ×     |       |       | Sun <i>et al.</i> , 2008     |
|                    |      | ✓                   |       |       |       | Yang and Ding, 2008          |
| ✓                  | ✓    |                     | ✓     |       |       | Yang <i>et al.</i> , 2009    |
|                    | ✓    |                     |       | ✓     |       | Jeong and Lee, 2010          |
|                    | ✓    |                     | ✓     |       |       | Stevens <i>et al.</i> , 2010 |
|                    | ✓    |                     |       |       |       | Ferrat <i>et al.</i> , 2011  |
|                    |      |                     |       | ✓     |       | Kapp <i>et al.</i> , 2011    |
|                    | ✓    |                     |       | ✓     |       | Pullen <i>et al.</i> , 2011  |

✓: 是风尘堆积的主要源区; ×: 不是风尘堆积的主要源区; a. 阿拉善高原: 包括巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠和乌兰布和沙漠; b. 鄂尔多斯高原: 包括库布齐沙漠和毛乌素沙漠。

化学 (Sun, 2002)、石英颗粒 ESR 信号强度 (Sun *et al.*, 2008) 表明塔里木盆地不是风尘堆积的主要源区, 理由是塔里木盆地的粉尘在西风急流作用下被抬升至海拔 5 000 m 以上的高空, 往东远距离输送至太平洋, 从而对黄土高原粉尘的贡献较弱。

对于柴达木盆地, Sun (2002) 根据元素地球化学组成推测其不是黄土高原风尘堆积的主要源区, 但是地貌 (Bowler *et al.*, 1987)、风蚀模型 (Kapp *et al.*, 2011)、Sr-Nd 同位素 (Chen *et al.*, 2007; 杨杰东等, 2007)、黑云母微包裹体 (Jeong and Lee, 2010) 以及碎屑锆石 U-Pb 年龄 (Stevens *et al.*, 2010; Pullen *et al.*, 2011) 等证据都支持柴达木盆地是黄土高原黄土的重要源区。

不同的源区示踪手段在判别黄土高原风尘堆积的主要源区上存在的分歧和争论, 可能与示踪手段本身存在的弱点有关, 也可能是研究分析所选择的样品受到了局地因素的影响而不具备较好的区域代表性, 需要将来进一步地研究。

## 5.2 黄土高原风尘堆积源区的稳定性

冰期和间冰期以及构造尺度上黄土高原风尘堆积的源区是否发生重大改变? 黄土高原不同部位 (如西部、东部) 风尘堆积的物质来源是否相同? 以上两个问题是黄土高原风尘堆积源区稳定性研究最

核心的问题, 以往在这方面开展了较多的研究, 存在不同的观点。

黄土高原风尘堆积的源区在冰期和间冰期没有发生变化, 具有较好的稳定性。800 ka 以来洛川剖面的 Sr-Nd 同位素组成 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ : 0.715 ~ 0.719;  $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ : -10.5 ~ -9.2) 基本上没有变化, 表明最近 0.8 Ma 以来黄土源区可能是非常均一和稳定的 (Gallet *et al.*, 1996)。约 1.26 Ma 以来, 西峰剖面黄土—古土壤序列的 Pb 同位素数据在冰期和间冰期没有明显变化, 表明在冰期和间冰期尺度上黄土的源区是稳定的 (Wu *et al.*, 2011)。

黄土高原风尘堆积的源区在冰期和间冰期发生变化。石英颗粒 ESR 信号强度表明晚第四纪黄土的物源在冰期和间冰期存在变化, 冰期主要来自蒙古国南部的戈壁, 而间冰期主要来自阿拉善高原 (Sun *et al.*, 2008)。黄土高原风尘堆积在冰期和间冰期存在变化, 而且黄土高原西部、中部和东南部的物质来源也不相同, 已经被样品中的碎屑锆石 U-Pb 年龄所证实 (Xiao *et al.*, 2012)。依据黄土高原中西部 Sr-Nd 同位素组成与东部不同, Rao *et al.* (2008) 推测东部黄土高原的主要源区可能为鄂尔多斯高原, 表明黄土高原中西部和东部的物源不同。

在构造尺度上, 对于 2.6 Ma 时期黄土高原源区

物质是否发生重要变化,也存在争议(Sun, 2005; Wang *et al.*, 2007).最近的研究表明,黄土高原风尘堆积主要来自青藏高原造山带和中亚造山带西段所产生的风化剥蚀物质,自中新世以来伴随着青藏高原北部造山带的隆升,源区物质成分发生相应的变化,也说明黄土高原风尘堆积的源区物质发生变化(Li *et al.*, 2011).

综上所述,黄土高原风尘堆积源区的稳定性研究对于理解我国西北地区过去的环境演变模式和规律具有十分重要的意义,观点上存在的分歧需对现代过程和地质记录开展更加深入的研究.

## 6 结论

黄土高原风尘堆积物源示踪的主要目标是识别出风尘堆积源区的主要区位,为深入理解东亚大气环流演化机制提供关键证据.黄土高原风尘堆积的物源研究主要有地球化学、矿物学、物理学、气象观测与模拟、地貌学方法.多数研究结果表明青藏高原东北部和阿拉善高原(包含巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠)是黄土高原的重要源区,但是对于其他潜在源区(如塔里木盆地、柴达木盆地和毛乌素沙漠)存在较大争议.

目前对黄土高原风尘堆积源区位置的争议可能与所采取的示踪方法本身的局限性有关.Sr、Nd、Pb同位素和元素地球化学手段是对全岩样品的硅酸盐组分进行分析,对黄土高原风尘堆积的单个潜在源区的识别能力受到一定限制,且Sr同位素受粒度显著影响.碎屑锆石U-Pb年龄方法是针对单矿物进行物源示踪的方法,对单个潜在源区的示踪能力较强,但由于仪器分析测试的束斑直径一般大于 $20\ \mu\text{m}$ (谢静, 2007),难以对包含丰富物源信息的 $<20\ \mu\text{m}$ 颗粒的锆石进行分析,从而所获取的物源信息并不全面.降水等因素引起的矿物淋溶(Liu *et al.*, 2006)和转化对采用矿物学方法示踪物源有一定的限制.石英光释光信号的影响因素复杂(郑辰鑫和周力平, 2012),石英电子自旋共振信号具有显著的粒度效应(Ono *et al.*, 1998),在示踪黄土高原风尘堆积物源的应用上需要做更进一步的工作.受选择的气候参数、边界条件和模型的影响,采用气候模拟手段追踪黄土高原风尘堆积源区会得出不一致的结果(Zhang *et al.*, 2003; Shi and Liu, 2011).地貌学方法可以为研究黄土高原风尘堆积的源区提供直接的证据,但是由于侵蚀导致的地貌特征保存不完

整,从而增加物源识别的难度.将来开展更多黄土高原风尘堆积物源示踪方法学的研究和多种方法的联立研究是必要的.

黄土高原风尘堆积源区在时间和空间尺度上的变化也是争议的焦点.有证据表明黄土高原各部分风尘堆积的物质并非均一的(Rao *et al.*, 2008; Xiao *et al.*, 2012),与均一看法(Gallet *et al.*, 1996; Wu *et al.*, 2011)相矛盾.黄土高原风尘堆积的源区在冰期和间冰期是变化的,但对于冰期和间冰期黄土高原风尘堆积的源区位置存在不同的看法(Sun *et al.*, 2008; Pullen *et al.*, 2011; Xiao *et al.*, 2012).因此,黄土高原风尘堆积物质成分是否均一?冰期和间冰期物源是否发生变化?是黄土高原风尘堆积物源示踪需要解决的关键问题,需要开展相同年代条件下潜在源区沉积物和黄土高原不同部位风尘堆积的对比研究,并进一步开展冰期与间冰期大气环流格局的研究,加强不同时期干旱区范围的重建.

粉尘能够为大洋提供丰富的营养元素和铁等微量元素从而提高大洋生产力(Ridgwell 2002; Maher *et al.*, 2010),25 Ma以来东亚粉尘沉积的起源对全球生物地球化学循环具有重要意义.然而,过去的研究主要集中在第四纪时期的风尘堆积,对于三趾马红粘土和新近纪黄土的物源研究较少.加强三趾马红粘土和新近纪黄土的物源研究有助于准确识别风尘堆积的物质来源,为理解我国西北地区的古气候格局演化和全球变化提供重要证据.

总之,目前关于黄土高原风尘堆积源区的研究还没有达成共识.今后开展新方法和多手段研究,加强第四纪以前黄土高原风尘堆积的物源研究,进一步开展冰期与间冰期大气环流格局和干旱区范围的重建研究,有望在黄土高原物源研究上取得更大进步.

致谢:中国地质大学(武汉)地球科学学院肖国桥博士、中国科学技术大学地球和空间科学学院周鑫博士和审稿专家对论文提出了建设性意见,在此表示感谢.

## References

- An, Z. S., Kutzbach, J. E., Prell, W. L., et al., 2001. Evolution of Asian Monsoons and Phased Uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene Times. *Nature*, 411: 62–66. doi: 10.1038/35075035
- Asahara, Y., Tanaka, T., Kamioka, H., et al., 1995. Asian Continental Nature of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  Ratios in North Central

- Pacific Sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 133(1-2): 105-116. doi: 10.1016/0012-821X(95)00048-H
- Asahara, Y., Tanaka, T., Kamioka, H., et al., 1999. Provenance of the North Pacific Sediments and Process of Source Material Transport as Derived from Rb-Sr Isotopic Systematics. *Chemical Geology*, 158(3-4): 271-291. doi: 10.1016/S0009-2541(99)00056-X
- Belousova, E., Griffin, W., O'Reilly, S. Y., et al., 2002. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602-622. doi: 10.1007/s00410-002-0364-7
- Bhatia, M. R., Crook, K. A. W., 1986. Trace Element Characteristics of Graywackes and Tectonic Setting Discrimination of Sedimentary Basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2): 181-193. doi: 10.1007/BF00375292
- Biscaye, P. E., Grousset, F. E., Revel, M., et al., 1997. Asian Provenance of Glacial Dust (Stage 2) in the Greenland Ice Sheet Project 2 Ice Core, Summit, Greenland. *Journal of Geophysical Research*, 102(C12): 26751-26781. doi: 10.1029/97JC01249
- Bowler, J. M., Chen, K. Z., Yuan, B. Y., 1987. Systematic Variations in Loess Source Areas: Evidence from Qaidam and Qinghai Basins, Western China. In: Liu, T. S., ed., *Aspects of Loess Research*. China Ocean Press, Beijing, 39-51.
- Chen, H. Y., Sun, Y. B., 2008. Study on Provenance of Eolian Dust Deposits on the Chinese Loess Plateau: Retrospects and Prospects. *Quaternary Sciences*, 28(5): 892-900 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J., 2012. Progress of Aeolian Sediments and Dust Geochemistry in Asia in the New Century. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 31(5): 433-446 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J., Li, G. J., 2011. Geochemical Studies on the Source Region of Asian Dust. *Sci. China: Earth Sci.*, 54(9): 1279-1301. doi: 10.1007/s11430-011-4269-z
- Chen, J., Li, G. J., Yang, J. D., et al., 2007. Nd and Sr Isotopic Characteristics of Chinese Deserts: Implications for the Provenances of Asian Dust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(15): 3904-3914. doi: 10.1016/j.gca.2007.04.033
- Cheng, Y., Zhang, X. Y., Lu, H. Y., et al., 2003. Variations of Elemental Geochemistry in Chinese Loess during the Last 140 ka BP and Their Paleoclimatological Implications. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 23(3): 103-108 (in Chinese with English abstract).
- Ding, Z. L., Derbyshire, E., Yang, S. L., et al., 2002. Stacked 2.6 Ma Grain Size Record from the Chinese Loess Based on Five Sections and Correlation with the Deep-Sea  $\delta^{18}\text{O}$  Record. *Paleoceanography*, 17(3). doi: 10.1029/2001PA000725
- Ding, Z. L., Xiong, S. F., Sun, J. M., et al., 1999. Pedostratigraphy and Paleomagnetism of a ~7.0 Ma Eolian Loess-Red Clay Sequence at Lingtai, Loess Plateau, North-Central China and the Implications for Paleomonsoon Evolution. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 152: 49-66. doi: 10.1016/S0031-0182(99)00034-6
- Fang, X. M., Han, Y. X., Ma, J. H., et al., 2004. Dust Storms and Loess Accumulation on the Tibetan Plateau: A Case Study of Dust Event on 4 March 2003 in Lhasa. *Chinese Science Bulletin*, 49(9): 953-960. doi: 10.1007/BF03184018
- Faure, G., 1998. Isotope Geochronology and Its Applications to Geology. *Earth Science Frontiers*, 5(1-2): 17-40.
- Feng, J. L., Hu, Z. G., Cui, J. Y., et al., 2010. Distributions of Lead Isotopes with Grain Size in Aeolian Deposits. *Terra Nova*, 22(4): 257-263. doi: 10.1111/j.1365-3121.2010.00941.x
- Feng, J. L., Zhu, L. P., Zhen, X. L., et al., 2009. Grain Size Effect on Sr and Nd Isotopic Compositions in Eolian Dust: Implications for Tracing Dust Provenance and Nd Model Age. *Geochemical Journal*, 43: 123-131. doi: 10.2343/geochemj.1.0007
- Ferrat, M., Weiss, D. J., Strekopytov, S., et al., 2011. Improved Provenance Tracing of Asian Dust Sources Using Rare Earth Elements and Selected Trace Elements for Palaeomonsoon Studies on the Eastern Tibetan Plateau. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(21): 6374-6399. doi: 10.1016/j.gca.2011.08.025
- Gallet, S., Jahn, B., Torii, M., 1996. Geochemical Characterization of the Luochuan Loess-Paleosol Sequence, China, and Paleoclimatic Implications. *Chemical Geology*, 133: 67-88. doi: 10.1016/S0009-2541(96)00070-8
- Gallet, S., Jahn, B., van Vliet Lano, B., et al., 1998. Loess Geochemistry and Its Implications for Particle Origin and Composition of the Upper Continental Crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 156: 157-172. doi: 10.1016/S0012-821X(97)00218-5
- Ge, J. Y., Guo, Z. T., Zhan, T., et al., 2012. Magnetostratigraphy of the Xihe Loess-Soil Sequence and Implication for Late Neogene Deformation of the West Qinling Mountains. *Geophysical Journal International*, 189(3): 1399-1408. doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05461.x

- Guo, Z. T., Ruddiman, W. F., Hao, Q. Z., et al., 2002. Onset of Asian Desertification by 22 Myr Ago Inferred from Loess Deposits in China. *Nature*, 416: 159—163. doi: 10.1038/416159a
- Guo, Z. T., Sun, B., Zhang, Z. S., et al., 2008. A Major Reorganization of Asian Climate by the Early Miocene. *Climate of the Past*, 4: 153—174. doi: 10.5194/cp-4-153-2008
- Hao, Q. Z., Guo, Z. T., 2004. Magnetostratigraphy of a Late Miocene-Pliocene Loess-Soil Sequence in the Western Loess Plateau in China. *Geophysical Research Letters*, 31:L09209. doi:10.1029/2003GL019392
- Hao, Q. Z., Guo, Z. T., 2007. Magnetostratigraphy of an Early-Middle Miocene Loess-Soil Sequence in the Western Loess Plateau of China. *Geophysical Research Letters*, 34:L18305. doi:10.1029/2007GL031162
- Hao, Q. Z., Guo, Z. T., Qiao, Y. S., et al., 2010. Geochemical Evidence for the Provenance of Middle Pleistocene Loess Deposits in Southern China. *Quaternary Science Reviews*, 29: 3317—3326. doi:10.1016/j.quascirev.2010.08.004
- Hao, Q. Z., Wang, L., Oldfield, F., et al., 2012. Delayed Build-up of Arctic Ice Sheets during 400 000-Year Minima in Insolation Variability. *Nature*, 490: 393—396. doi: 10.1038/nature11493
- Heller, F., Liu, T. S., 1982. Magnetostratigraphical Dating of Loess Deposits in China. *Nature*, 300: 431—433. doi: 10.1038/300431a0
- Honda, M., Yabuki, S., Shimizu, H., 2004. Geochemical and Isotopic Studies of Aeolian Sediments in China. *Sedimentology*, 51(2): 211—230. doi:10.1111/j.1365-3091.2004.00618.x
- Jahn, B., Gallet, S., Han, J., 2001. Geochemistry of the Xining, Xifeng and Jixian Sections, Loess Plateau of China: Eolian Dust Provenance and Paleosol Evolution during the Last 140 ka. *Chemical Geology*, 178: 71—94. doi:10.1016/S0009-2541(00)00430-7
- Jeong, G. Y., Lee, K. S., 2010. A Mineral Tracer toward High-Resolution Dust Provenance on the Chinese Loess Plateau: SEM, TEM, and Sulfur Isotopes of Sulfate Inclusions in Biotite. *American Mineralogist*, 95(1): 64—72. doi:10.2138/am.2010.3234
- Kapp, P., Pelletier, J. D., Rohrmann, A., et al., 2011. Wind Erosion in the Qaidam Basin, Central Asia: Implications for Tectonics, Paleoclimate, and the Source of the Loess Plateau. *GSA Today*, 21: 4—10. doi: 10.1130/GSATG99A.1
- Lai, Z. P., Wintle, A. G., 2006. Locating the Boundary between the Pleistocene and the Holocene in Chinese Loess Using Luminescence. *The Holocene*, 16(6): 893—899. doi:10.1191/0959683606hol980rr
- Lee, J. K. W., Williams, I. S., Ellis, D. J., 1997. Pb, U and Th Diffusion in Natural Zircon. *Nature*, 390: 159—162. doi: 10.1038/36554
- Li, F., 2007. Distribution Characteristics of Lead Isotope in Dust Source Areas and Its Trace Significance in the North of China. *Journal of Desert Research*, 27(5): 738—744(in Chinese with English abstract).
- Li, G. J., 2010. Trace the Source Regions of East Asia Dust Using Geochemical Tools (Dissertation). Nanjing University, Nanjing(in Chinese with English abstract).
- Li, G. J., Chen, J., Chen, Y., et al., 2007. Dolomite as a Tracer for the Source Regions of Asian Dust. *Journal of Geophysical Research*, 112: D17201. doi: 10.1029/2007JD008676
- Li, G. J., Chen, J., Ji, J. F., et al., 2009. Natural and Anthropogenic Sources of East Asian Dust. *Geology*, 37(8): 727—730. doi:10.1130/G30031A.1
- Li, G. J., Pettke, T., Chen, J., 2011. Increasing Nd Isotopic Ratio of Asian Dust Indicates Progressive Uplift of the North Tibetan Plateau since the Middle Miocene. *Geology*, 39(3): 199—202. doi:10.1130/G31734.1
- Liang, M. Y., 2009. Geochemical Characteristics of the Miocene Eolian Deposits in Northern China: Their Provenance and Climatic Implications (Dissertation). Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Liang, M. Y., Guo, Z. T., Kahmann, A. J., et al., 2009. Geochemical Characteristics of the Miocene Eolian Deposits in China: Their Provenance and Climate Implications. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 10: Q04004. doi: 10.1029/2008GC002331
- Liu, C. Q., Masuda, A., Okada, A., et al., 1993. A Geochemical Study of Loess and Desert Sand in Northern China: Implications for Continental Crust Weathering and Composition. *Chemical Geology*, 106: 359—374. doi: 10.1016/0009-2541(93)90037-J
- Liu, C. Q., Masuda, A., Okada, A., et al., 1994. Isotope Geochemistry of Quaternary Deposits from the Arid Lands in Northern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 127: 25—38. doi:10.1016/0012-821X(94)90195-3
- Liu, D. S., 1985. Loess and Environment. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Liu, L. W., Wang, H. T., Chen, J., 2006. Reconstruction of the Rainfall on the Chinese Loess Plateau during the Past 130 ka from the Dolomite Distributions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18): A363. doi:10.1016/j.gca.

2006.06.735

- Liu, L. W., Wang, H. T., Cheng, Y., et al., 2002. Chemical Leaching of Loess Deposits in China and Its Implications for Carbonate Composition. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(1): 69–73 (in Chinese with English abstract).
- Lu, H. Y., Wang, X. Y., An, Z. S., et al., 2004. Geomorphologic Evidence of Phased Uplift of the Northeastern Qinghai-Tibet Plateau since 14 Million Years Ago. *Science in China (Series D)*, 47(9): 822–833. doi:10.1360/03yd0315
- Lü, T. Y., Sun, J. M., 2011. Luminescence Sensitivities of Quartz Grains from Eolian Deposits in Northern China and Their Implications for Provenance. *Quaternary Research*, 76(2): 181–189. doi:10.1016/j.yqres.2011.06.015
- Maher, B. A., Mutch, T. J., Cunningham, D., 2009. Magnetic and Geochemical Characteristics of Gobi Desert Surface Sediments: Implications for Provenance of the Chinese Loess Plateau. *Geology*, 37(3): 279–282. doi:10.1130/g25293a.1
- Maher, B. A., Prospero, J. M., Mackie, D., et al., 2010. Global Connections between Aeolian Dust, Climate and Ocean Biogeochemistry at the Present Day and at the Last Glacial Maximum. *Earth-Science Reviews*, 99: 61–97. doi:10.1016/j.earscirev.2009.12.001
- McLennan, S. M., Hemming, S., McDaniel, D. K., et al., 1993. Geochemical Approaches to Sedimentation, Provenance, and Tectonics. *Geological Society of America Special Paper*, 284: 21–40.
- Nakai, S., Halliday, A. N., Rea, D. K., 1993. Provenance of Dust in the Pacific Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 119(1–2): 143–157. doi:10.1016/0012-821X(93)90012-X
- Nakano, T., Yokoo, Y., Nishikawa, M., et al., 2004. Regional Sr-Nd Isotopic Ratios of Soil Minerals in Northern China as Asian Dust Fingerprints. *Atmospheric Environment*, 38(19): 3061–3067. doi:10.1016/j.atmosenv.2004.02.016
- Ono, Y., Naruse, T., Ikeya, M., et al., 1998. Origin and Derived Courses of Eolian Dust Quartz Deposited during Marine Isotope Stage 2 in East Asia, Suggested by ESR Signal Intensity. *Global and Planetary Change*, 18(3): 129–135. doi:10.1016/S0921-8181(98)00012-5
- Pullen, A., Kapp, P., McCallister, A. T., et al., 2011. Qaidam Basin and Northern Tibetan Plateau as Dust Sources for the Chinese Loess Plateau and Paleoclimatic Implications. *Geology*, 39(11): 1031–1034. doi:10.1130/G32296.1
- Qiang, X. K., An, Z. S., Song, Y. G., et al., 2011. New Eolian Red Clay Sequence on the Western Chinese Loess Plateau Linked to Onset of Asian Desertification about 25 Ma Ago. *Sci. China: Earth Sci.*, 54(1): 136–144. doi:10.1007/s11430-010-4126-5
- Qin, X. G., Ning, B., Yin, Z. Q., et al., 2011. Evolution of Soil Organic Carbon Pool in Weinan Loess Region since the Last Interglacial Period. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(2): 386–392 (in Chinese with English abstract). doi:10.3799/dqkx.2011.043
- Quade, J., Roe, L., DeCelles, P. G., et al., 1997. The Late Neogene <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr Record of Lowland Himalayan Rivers. *Science*, 276(5320): 1828–1831. doi:10.1126/science.276.5320.1828
- Rao, W. B., Chen, J., Yang, J. D., et al., 2008. Sr-Nd Isotopic Characteristics of Eolian Deposits in the Erdos Desert and Chinese Loess Plateau: Implications for Their Provenances. *Geochemical Journal*, 42(3): 493–506.
- Rao, W. B., Yang, J. D., Chen, J., et al., 2006. Sr-Nd Isotope Geochemistry of Eolian Dust of the Arid-Semiarid Areas in China: Implications for Loess Provenance and Monsoon Evolution. *Chinese Science Bulletin*, 51(12): 1401–1412. doi:10.1007/s11434-006-2008-1
- Ridgwell, A. J., 2002. Dust in the Earth System: The Biogeochemical Linking of Land, Air and Sea. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 360(1801): 2905–2924. doi:10.1098/rsta.2002.1096
- Sheldon, N. D., Tabor, N. J., 2009. Quantitative Paleoenvironmental and Paleoclimatic Reconstruction Using Paleosols. *Earth-Science Reviews*, 95: 1–52. doi:10.1016/j.earscirev.2009.03.004
- Shi, Z. G., Liu, X. D., 2011. Distinguishing the Provenance of Fine-Grained Eolian Dust over the Chinese Loess Plateau from a Modelling Perspective. *Tellus*, 63(5): 959–970. doi:10.1111/j.1600-0889.2011.00561.x
- Stevens, T., Carter, A., Watson, T. P., et al., 2013. Genetic Linkage between the Yellow River, the Mu Us Desert and the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 78: 355–368. doi:10.1016/j.quascirev.2012.11.032
- Stevens, T., Palk, C., Carter, A., et al., 2010. Assessing the Provenance of Loess and Desert Sediments in Northern China Using U-Pb Dating and Morphology of Detrital Zircons. *Geological Society of America Bulletin*, 122(7–8): 1331–1344. doi:10.1130/B30102.1
- Sun, B., 2006. A Preliminary Study on Magnetostratigraphy and Sedimentology of the Miocene Eolian Deposit in Gaojiazhuang, Center-South of Gansu (Dissertation). Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Sun, J. M., 2002. Provenance of Loess Material and Formation

- of Loess Deposits on the Chinese Loess Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 203: 845–859. doi: 10.1016/S0012-821X(02)00921-4
- Sun, J. M., 2005. Nd and Sr Isotopic Variations in Chinese Eolian Deposits during the Past 8 Ma: Implications for Provenance Change. *Earth and Planetary Science Letters*, 240(2): 454–466. doi: 10.1016/j.epsl.2005.09.019
- Sun, J. M., Zhang, M. Y., Liu, T. S., 2001. Spatial and Temporal Characteristics of Dust Storms in China and Its Surrounding Regions, 1960–1999: Relations to Source Area and Climate. *Journal of Geophysical Research*, 106(D10): 10325–10333. doi: 10.1029/2000JD900665
- Sun, J. M., Zhu, X. K., 2010. Temporal Variations in Pb Isotopes and Trace Element Concentrations within Chinese Eolian Deposits during the Past 8 Ma: Implications for Provenance Change. *Earth and Planetary Science Letters*, 290: 438–447. doi: 10.1016/j.epsl.2010.01.001
- Sun, Y. B., Tada, R., Chen, J., et al., 2007. Distinguishing the Sources of Asian Dust Based on Electron Spin Resonance Signal Intensity and Crystallinity of Quartz. *Atmospheric Environment*, 41(38): 8537–8548. doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.07.014
- Sun, Y. B., Tada, R., Chen, J., et al., 2008. Tracing the Provenance of Fine-Grained Dust Deposited on the Central Chinese Loess Plateau. *Geophysical Research Letters*, 35: L01804. doi: 10.1029/2007GL031672
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., McCulloch, M. T., 1983. Geochemistry of Loess, Continental Crustal Composition and Crustal Model Ages. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47(11): 1897–1905. doi: 10.1016/0016-7037(83)90206-5
- Wang, H. B., Yu, Y. P., Liu, X. B., et al., 2011. Geochemical Characteristics of Last Interglacial Paleosols in the Chinese Loess Plateau and Its Implications to Loess Provenance. *Quaternary Sciences*, 31(2): 338–346 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1001-7410.2011.02.16
- Wang, Y. X., Yang, J. D., Chen, J., et al., 2007. 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. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 249: 351–361. doi: 10.1016/j.palaeo.2007.02.010
- Wu, F., Ho, S. S. H., Sun, Q. L., et al., 2011. Provenance of Chinese Loess: Evidence from Stable Lead Isotope. *Terrrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 22(3): 305–314. doi: 10.3319/tao.2010.11.19.01(TT)
- Wu, W. H., Xu, S. J., Yang, J., et al., 2009. Sr Fluxes and Isotopic Compositions in the Headwaters of the Yangtze River, Tongtian River and Jinsha River Originating from the Qinghai-Tibet Plateau. *Chemical Geology*, 260: 63–72. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.12.007
- Xiao, G. Q., Zong, K. Q., Li, G. J., et al., 2012. Spatial and Glacial-Interglacial Variations in Provenance of the Chinese Loess Plateau. *Geophysical Research Letters*, 39: L20715. doi: 10.1029/2012GL053304
- Xie, J., 2007. Tracing the Provenance of the Eastern China Sandlands and Its Geological Significance (Dissertation). Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Xie, J., Ding, Z. L., 2007. Compositions of Heavy Minerals in Northeastern China Sandlands and Provenance Analysis. *Science in China (Series D)*, 50(11): 1715–1723. doi: 10.1007/s11430-007-0110-0
- Xie, J., Wu, F. Y., Ding, Z. L., 2007. Detrital Zircon Composition of U-Pb Ages and Hf Isotope of the Hunshandake Sandland and Implication for Its Provenance. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 523–528 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. D., Chen, J., An, Z. S., et al., 2000. Variations in  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  Ratios of Calcites in Chinese Loess: A Proxy for Chemical Weathering Associated with the East Asian Summer Monsoon. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 157(1): 151–159. doi: 10.1016/S0031-0182(99)00159-5
- Yang, J. D., Chen, J., Rao, W. B., et al., 2007. Isotopic Partition Characteristics of Chinese Deserts. *Geochimica*, 36(5): 516–524 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. D., Li, G. J., Rao, W. B., et al., 2009. Isotopic Evidence for Provenance of East Asian Dust. *Atmospheric Environment*, 43(29): 4481–4490. doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.06.035
- Yang, S. L., Ding, Z. L., 2008. Advance-Retreat History of the East-Asian Summer Monsoon Rainfall Belt over Northern China during the Last Two Glacial-Interglacial Cycles. *Earth and Planetary Science Letters*, 274: 499–510. doi: 10.1016/j.epsl.2008.08.001
- Yang, S. Y., Jiang, S. Y., Ling, H. F., et al., 2007. Sr-Nd Isotopic Compositions of the Changjiang Sediments: Implications for Tracing Sediment Sources. *Science in China (Ser. D)*, 50(10): 1556–1565. doi: 10.1007/s11430-007-0052-6
- Yokoo, Y., Nakano, T., Nishikawa, M., et al., 2004. Mineralogical Variation of Sr-Nd Isotopic and Elemental Compositions in Loess and Desert Sand from the Central Loess Plateau in China as a Provenance Tracer of Wet

- and Dry Deposition in the Northwestern Pacific. *Chemical Geology*, 204: 45–62. doi: 10.1016/j.chemgeo.2003.11.004
- Zeng, F. M., 2011. Provenances of the Different Cenozoic Deposits in the Tianshui-Qinan Regions (Dissertation). Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zeng, F. M., Xiang, S. Y., Lu, Y. L., et al., 2007. Environmental Evolution of Late Pleistocene Loess Deposits at Lintao County, Gansu Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(5): 703–712 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, F. M., Xiang, S. Y., Zhang, K. X., et al., 2011. Environmental Evolution Recorded by Lipid Biomarkers from the Tawan Loess-Paleosol Sequences on the West Chinese Loess Plateau during the Late Pleistocene. *Environmental Earth Sciences*, 64(7): 1951–1963. doi: 10.1007/s12665-011-1012-1
- Zhan, T., Guo, Z. T., Wu, H. B., et al., 2011. Thick Miocene Eolian Deposits on the Huajialing Mountains: The Geomorphic Evolution of the Western Loess Plateau. *Sci. China: Earth Sci.*, 54(2): 241–248. doi: 10.1007/s11430-010-4051-7
- Zhang, H. Y., Lu, H. Y., Jiang, S. Y., et al., 2012. Provenance of Loess Deposits in the Eastern Qinling Mountains (Central China) and Their Implications for the Paleoenvironment. *Quaternary Science Reviews*, 43: 94–102. doi: 10.1016/j.quascirev.2012.04.010
- Zhang, X. Y., 2007. Review on Sources and Transport of Loess Materials on the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Sciences*, 27(2): 181–186 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. Y., Gong, S. L., Zhao, T. L., et al., 2003. Sources of Asian Dust and Role of Climate Change versus Desertification in Asian Dust Emission. *Geophysical Research Letters*, 30(24): 2272. doi: 10.1029/2003gl018206
- Zheng, C. X., Zhou, L. P., 2012. Further Investigations of Quartz Luminescence Signals as a Tool for Dust Source Tracing. *Quaternary Sciences*, 32(5): 1036–1045 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1001-7410.2012.05.19
- 回顾与展望. 第四纪研究, 28(5): 892–900.
- 陈骏, 2012. 新世纪亚洲风尘系统地球化学研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 31(5): 433–446.
- 程燕, 张小曳, 鹿化煜, 等, 2003. 最近 140 ka 以来黄土元素地球化学演化及其古气候意义. 海洋地质与第四纪地质, 23(3): 103–108.
- 李锋, 2007. 中国北方沙尘源区铅同位素分布特征及其示踪意义的初步研究. 中国沙漠, 27(5): 738–744.
- 李高军, 2010. 东亚风尘物源地球化学示踪研究(博士学位论文). 南京: 南京大学.
- 梁美艳, 2009. 中国北方中新世风尘物质来源及古气候的地球化学指示(博士学位论文). 北京: 中国科学院研究生院.
- 刘东生, 1985. 黄土与环境. 北京: 科学出版社.
- 刘连文, 王洪涛, 陈昶, 等, 2002. 黄土醋酸淋溶实验及其碳酸盐组分的地球化学特征. 岩石矿物学杂志, 21(1): 69–73.
- 秦小光, 宁波, 殷志强, 等, 2011. 末次间冰期以来渭南黄土地区土壤有机碳碳库的演变. 地球科学——中国地质大学学报, 36(2): 386–392.
- 孙斌, 2006. 甘肃中南部高家庄中新世风尘堆积磁性地层和沉积学特征的初步研究(硕士学位论文). 北京: 中国科学院研究生院.
- 汪海斌, 于英鹏, 刘现彬, 等, 2011. 黄土高原 S1 古土壤的地球化学特征及其对物源的指示. 第四纪研究, 31(2): 338–346.
- 谢静, 2007. 中国东部沙地物源示踪及地质意义(博士学位论文). 北京: 中国科学院研究生院.
- 谢静, 吴福元, 丁仲礼, 2007. 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. 岩石学报, 23(2): 523–528.
- 杨杰东, 陈骏, 饶文波, 等, 2007. 中国沙漠的同位素分区特征. 地球化学, 36(5): 516–524.
- 曾方明, 2011. 甘肃天水—秦安地区新生代沉积物物源示踪研究(博士学位论文). 北京: 中国科学院研究生院.
- 曾方明, 向树元, 路玉林, 等, 2007. 甘肃临洮晚更新世黄土环境变迁. 地球科学——中国地质大学学报, 32(5): 703–712.
- 张小曳, 2007. 有关中国黄土高原黄土物质的源区及其输送方式的再评述. 第四纪研究, 27(2): 181–186.
- 郑辰鑫, 周力平, 2012. 石英释光信号作为粉尘物源示踪手段的再研究. 第四纪研究, 32(5): 1036–1045.

#### 附中文参考文献

陈洪云, 孙有斌, 2008. 黄土高原风尘沉积的物质来源研究: