

doi: 10.12029/gc20180608

袁方, 谢远云, 迟云平. 2018. 哈尔滨尘暴天气沉降物的物质组成及其对物源的限制[J]. 中国地质, 45(6): 1177–1187.

Yuan Fang, Xie Yuanyun, Chi Yunping. 2018. Material characteristics of dust fallouts during the dust-storm weather in Harbin: Constraint on the provenance[J]. Geology in China, 45(6): 1177–1187(in Chinese with English abstract).

哈尔滨尘暴天气沉降物的物质组成 及其对物源的限制

袁方 谢远云 迟云平

(哈尔滨师范大学, 黑龙江 哈尔滨 150025)

摘要: 本文对哈尔滨尘暴事件(2011年5月11日)的干沉降和湿沉降粉尘进行了粒度、REE和Sr-Nd同位素组成分析。同时,为了限制尘暴粉尘的源区,还对东北沙地(科尔沁沙地和呼伦贝尔沙地)进行了表土采样。结果显示,干沉降粉尘呈双峰态粒度分布,众数值分别为3.6 μm 和28 μm ,而湿沉降呈单峰态粒度分布,众数值为6 μm 。哈尔滨尘暴事件粉尘的粒度分布模式可与黄土高原黄土、红黏土及世界上其他地区的长距离搬运粉尘相对比。这些尘暴粉尘来自遥远的源区。干沉降和湿沉降粉尘表现出相同的REE模式和Sr-Nd同位素组成,它们来自科尔沁沙地和浑善达克沙地。现代尘暴事件的干沉降与湿沉降粉尘相同的物质来源暗示了黄土高原黄土的细颗粒和粗颗粒组有相同的风尘源区。

关键词: 尘暴沉降物;黄土;粉尘源区;东北沙地;物质组成;细颗粒

中图分类号:P585 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2018)06-1177-11

Material characteristics of dust fallouts during the dust-storm weather in Harbin: Constraint on the provenance

YUAN Fang, XIE Yuanyun, CHI Yunping

(Harbin Normal University, Harbin 150025, Heilongjiang, China)

Abstract: The dry- and wet-deposited dust depositions of the dust-storm event in Harbin on May 11, 2011 as well as the surface sediments from the potential sources were collected for investigation of grain-size, REE and Sr-Nd isotopic compositions. Some conclusions have been reached: The dry-deposited dusts are marked by bimodal grain-size distributions with fine mode at 3.6 μm and coarse mode at 28 μm whereas the wet-deposited dusts are indicative of unimodal grain-size modes with a fine mode at 6 μm . The grain-size modes for Harbin dust-storm dusts are compatible with CLP loess and Pliocene eolian red clay as well as the eolian dust entrained for a long distance in other regions of the world. These dust-storm depositions have a derivation from distinct sources. There are identical REE patterns and Sr-Nd isotopic compositions for dry- and wet-deposited dusts, suggestive of the

收稿日期:2016-11-09;改回日期:2017-03-15

基金项目:国家自然科学基金项目(41471070)资助。

作者简介:袁方,女,1992年生,硕士生,主要研究方向为亚洲风尘系统物源示踪;E-mail:535038276@qq.com。

通讯作者:谢远云,男,1971年生,博士,教授,主要从事第四纪地质研究;E-mail:xyy0451@163.com。

derivation from Horqin Sandy Land and, to a certain extent, Onqin Daga Sandy Land. The corresponding Sr–Nd isotopic compositions for dry- and wet-deposited dusts give clues to suggest that fine grains in the CLP loess deposits are expected to be of derivation identical to coarse grains.

Key words: dust-storm depositions; loess; dust provenance; northeastern sandy land; material composition; fine particles

About the first author: YUAN Fang, female, born in 1992, master candidate, mainly engages in the study of Asian aeolian dust systems; E-mail: 535038276@qq.com.

About the corresponding author: XIE Yuanyun, male, born in 1971, doctor, professor, mainly engages in teaching and study of Quaternary geology; E-mail: xyy0451@163.com.

Fund support: Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41471070).

1 引 言

黄土高原广泛分布的风尘堆积为研究第四纪气候变化及粉尘的搬运-沉积模式提供了有价值的档案(An et al., 1991; An, 2000; Porter, 2001)。风尘物质的研究为亚洲粉尘的释放、搬运和沉积提供了重要信息(Hao et al., 2010)。为此,在过去的几十年里,黄土沉积成为亚洲风尘系统研究的热点之一。然而,人们对黄土形成的认识仍然很模糊,例如,黄土高原风成黄土的细颗粒与粗颗粒组分是否具有相同的粉尘源区仍存在广泛的争议(Sun et al., 2001, 2002, 2003, 2004, 2008a; Sun, 2004; Chen et al., 2007; Sun et al., 2008b; Crouvi et al., 2008, 2010, 2012; Enzel et al., 2010; Amit et al., 2014)。现代尘暴天气粉尘的研究提供了解决这些问题的方法,因为尘暴是黄土形成主要的粉尘搬运机制,现代尘暴粉尘(或称之为“现代黄土”)的研究在解释黄土形成问题上提供了重要的现代类似物(谢远云等, 2013; Yan et al., 2015)。另外,作为地质历史时期风尘活动黄土堆积的继续,尘暴天气沉降物被认为是黄土的原始物质,对其研究无论对正确认识黄土的堆积和演化,或者对于干旱区沙漠化的影响均有重要的理论和实践意义。

尘暴天气过程中的粉尘有两种沉降方式,一是干沉降,即与水无关的以其自身重力作用直接沉降到地表;一是湿沉降,即粉尘物质借助于降雨的形式从大气中沉降下来。2011年5月12日,源于内蒙古中西部地区的一次尘暴天气到达哈尔滨,11点—13点哈尔滨能见度达到最低,晚上18点哈尔滨地区开始降雨,悬浮在空中的粉尘被冲刷沉降到地面。尘暴天气期间,哈尔滨近地表风速较小(轻风,风速 $<3\text{ m/s}$),这表明哈尔滨本地粉尘卷入到这次尘暴事

件的可能性很低,因此哈尔滨2011年的这次尘暴天气沉降物为我们提供了更精确的粉尘源区信息,并更好地理解尘暴过程中粉尘的搬运和沉积过程。笔者对这次尘暴期间的干沉降和湿沉降分别进行了收集,对其进行了粒度、稀土元素(REE)和Sr–Nd同位素组成的测试分析。这次研究的主要目的是阐明在同一次尘暴天气过程中干沉降和湿沉降粉尘的物质组成特征,进而对尘暴粉尘的物质来源以及这次尘暴事件对黄土形成的指示意义展开讨论。研究结果将有助于加深对黄土形成等关键科学问题的理解。

2 材料和方法

2.1 天气过程

2011年5月12日晨,哈尔滨开始出现沙尘天气,整个市区上空呈现浅黄褐色,能见度不到1 km,空气中含有大量沙尘颗粒。中午11:00~13:00沙尘天气达到最大,能见度不到200 m。此后,沙尘天气呈现逐渐减弱趋势。傍晚18:00左右,哈尔滨出现一次降雨过程,降雨携带悬浮在空气中的沙尘物质以湿沉降的方式沉降到地表,此次降雨堪称“泥浆雨”,露天行驶或停放的汽车车身均布满了黄褐色的“泥浆”沉降物。

2.2 样品采集

2011年5月12日早6:20~8:30期间,在哈尔滨师范大学江南校区教学楼顶平台(楼顶高度为18~20 m; $45^{\circ}43'40''\text{N}$, $126^{\circ}36'50''\text{E}$)设置大容量圆柱形玻璃器皿集尘器,收集尘暴天气干沉降样品。为使降尘接近自然界实际的风尘沉积过程,采用干法收集,在容器底部铺设2层直径为1.5 cm的玻璃球,以有效减少坠入降尘缸内的风尘再次逃逸。收集时间持续7~8 h。因教学楼远离闹市区,粉尘采集点

距离地面达18~20 m,加之周围树林覆盖和建筑物阻挡,能最大限度地减少市区近地面粉尘的干扰,可视为纯粹的尘暴粉尘干沉降样品(样品编号为DD1、DD2、DD3和DD4)。同时,采集了学校露天停车场汽车车顶上的风尘物质,其主体为当天沙尘天气的干沉降,但不可避免地受到车身附近近地面粉尘的影响,可视为略受近地面粉尘干扰的尘暴粉尘干沉降样品(样品编号为DD5、DD6、DD7和DD8)。傍晚18:05左右,在室外离地面1.6 m高度放置PVC大容量塑料集尘器,以尽可能多地收集尘暴天气湿沉降。过后用蒸馏水清洗PVC桶内壁,洗下的悬浊液在室内静置一周后将上层清水抽去,置入烘箱低温烘干备用。共获尘暴粉尘湿沉降样品6个(样品编号为WD1~WD6)。

为了限定尘暴粉尘的源区,分别从呼伦贝尔沙地(10个样品)、科尔沁沙地(7个样品)获取地表沙(土)样品(图1)。对沙地样品进行了粒度组分的提取,将样品过250目的标准分样筛,取得 $<63\ \mu\text{m}$ 粒度范围的子样。

2.3 实验方法

粒度测试在中国科学院地球环境研究所使用英国Malvern公司的Mastersizer 2000激光粒度仪,粒度测量范围为 $0.02\sim 2000\ \mu\text{m}$,重复测量误差小于2%。样品的粒度分布是对 $0.03\sim 1900\ \mu\text{m}$ 测量范围内的80个粒度等级(每个等级 $0.2\ \Phi$)进行计算。在核工业北京地质研究院分析测试研究中心用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)完成REE的测定。为了监控测试精度和准确度,进行了国际标样、重复样与空白样品分析,结果表明元素的相对偏差均小于2%。6个尘暴样品和17个沙地表土子样进行了Sr-Nd同位素组成的测定。样品的酸不溶残留物的Sr-Nd同位素比值是在核工业北京地质研究院用热电离同位素质谱仪(TIMs)测定。对样品的Sr和Nd同位素比值进行了标准化校正,Sr同位素分馏用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 校正,Nd同位素分馏用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 校正。实验室对Sr标样(NBS987)的测定结果为: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = (0.710250 \pm 7)$ (2σ),Nd标样(JMC)的测定结果为: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = (0.512109 \pm 3)$ (2σ)。整个流程中Sr和Nd的化学分析空白分别为 $<1\ \text{ng}$ 和 $<50\ \text{pg}$ 。

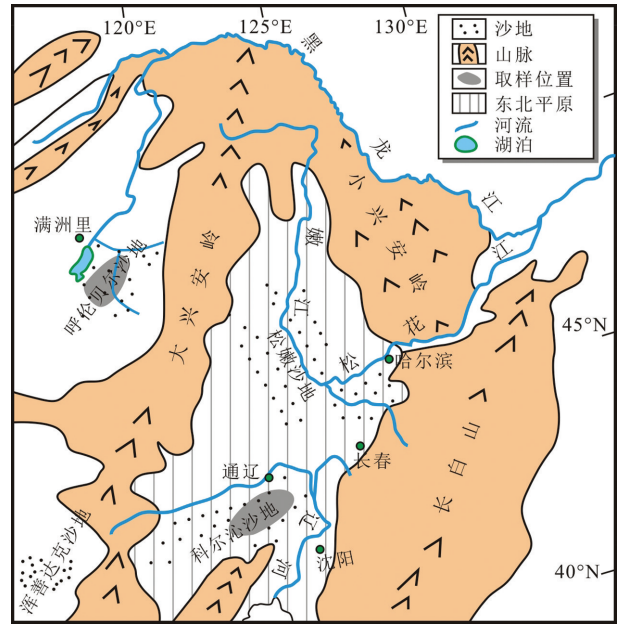


图1 东北平原地貌略图及采样位置示意图

Fig.1 Sketch map for the Northeast Plain, showing sandy land in northeastern China suggested to be potential candidates for dust source, and location of sampling sites

3 结果

3.1 粒度组成和分布

尘暴沉降物的粒度分布见图2。风尘物质的粒度组成提供了丰富的地质信息(McTainsh et al., 1997; Derbyshire et al., 1998; 谢远云等, 2005; Lim et al., 2006, 2008a; Crouvi et al., 2008; 殷志强等, 2008; Sun et al., 2001, 2002; Crouvi et al., 2010; Qiang et al., 2010)。干沉降粉尘含少量的沙颗粒组分($>63\ \mu\text{m}$)($<7\%$),而湿沉降粉尘基本不含 $>63\ \mu\text{m}$ 的粒度组分。 $20\sim 63\ \mu\text{m}$ 的粗粉沙组分在干沉降和湿沉降粉尘中分别占到37%和11%。 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 组分的含量,干沉降(21%)略高于湿沉降(17%)。 $1\sim 10\ \mu\text{m}$ 的细粒组分,干沉降(31%)明显低于湿沉降(62%)。对于 $<1\ \mu\text{m}$ 的超细粒组分而言,干沉降略低于(或相近)湿沉降。干沉降与湿沉降粉尘的平均粒径分别为 $12.1\ \mu\text{m}$ 和 $6\ \mu\text{m}$ 。

沉积物的粒度分布提供了大量的沉积物搬运和沉积过程中的相关信息(Tsoar et al., 1987; McTainsh et al., 1997; Derbyshire et al., 1998; Sun et al., 2003, 2004, 2008a; Sun, 2004; An et al., 2012;)。

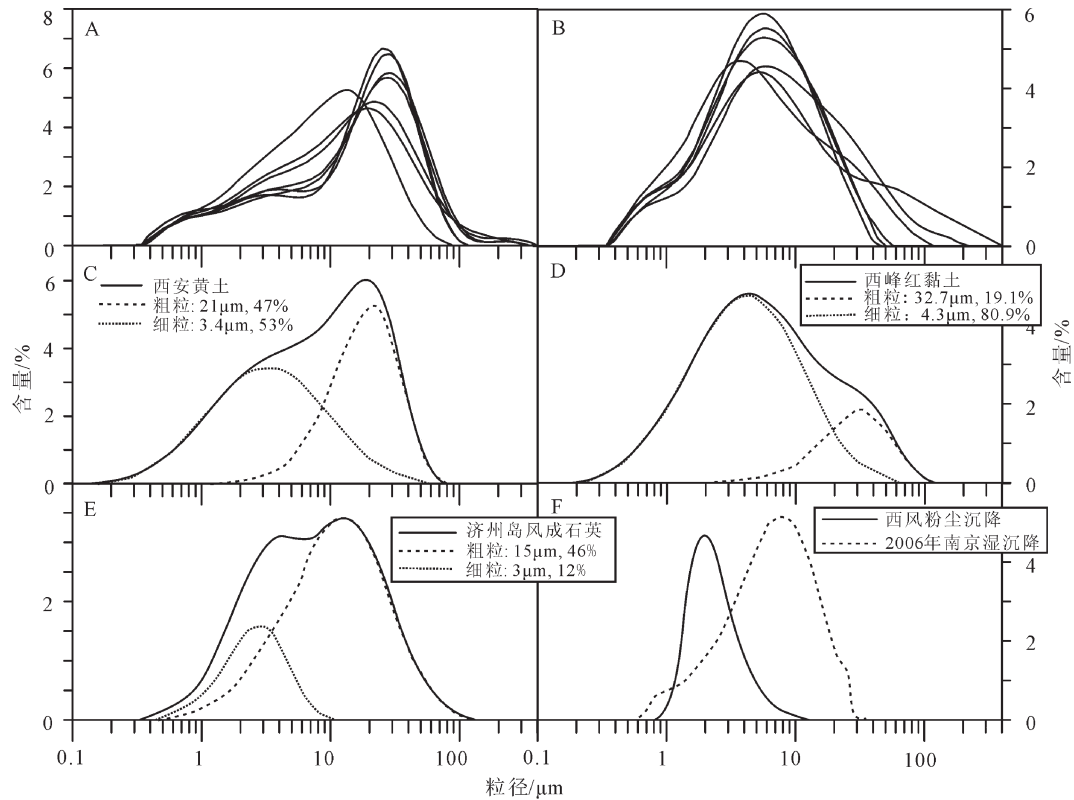


图2 哈尔滨与其它地区尘暴天气沉降物粒度分布对比图

A—干沉降粉尘; B—湿沉降粉尘; C—西安黄土(Sun et al., 2002; Sun, 2004); D—西峰红黏土(Sun et al., 2002; Sun, 2004); E—韩国济州岛风成石英(Lim et al., 2006, 2008a); F—北太平洋西风粉尘(Rea et al., 1995)和南京雨土(李徐生等, 2009b)

Fig.2 The comparison of grain-size distributions for dust fallouts from Harbin with other regions during dust-storm weather
A—The dry-deposited dusts; B—The wet-deposited dusts; C—Xi'an loess (after Sun et al., 2002; Sun, 2004); D—Xifeng red clay (after Sun et al., 2002; Sun, 2004); E—Aeolian quartz in Cheju Island, Korea (after Lim et al., 2006, 2008a); F—Westerly dust in North Pacific Ocean (after Rea et al., 1995) and rain dust in Nanjing (after Li et al., 2009b)

来自不同沉积环境的沉积物的多峰态分布指示了不同粒度组分的混合,反映了不同的搬运或沉积过程,这是因为多峰态沉积物是由来自不同沉积环境的沉积组分混合而成,在粒度分布上表现为一系列相互重叠的曲线。考虑到超细粒组分($<1\ \mu\text{m}$)是通过与粉尘搬运过程无关的化学和/或生物化学过程形成,笔者在解释尘暴沉降物的粒度分布时不考虑由超细粒组分形成的细微众数峰($<1\ \mu\text{m}$)。哈尔滨尘暴天气干沉降样品的粒度为双峰态分布(图2):粗颗粒组分的众数值在 $13\sim 30\ \mu\text{m}$,主要集中在 $28\ \mu\text{m}$,分选好,对称分布;细颗粒组分的众数值为 $3.6\ \mu\text{m}$,分选差。与干沉降相比,湿沉降样品表现为单峰态分布,细颗粒是统治性的粒度组分,众数值为 $6\ \mu\text{m}$,明显大于干沉降细颗粒组分的众数值($3.6\ \mu\text{m}$)。干沉降和湿沉降样品都表现出一个众数值为 $0.8\ \mu\text{m}$ 的超细粒组分(图2)。

3.2 REE分布模式

REE在表生环境下行为一致,基本不受风化、搬运、沉积、成岩(和/或变质)的影响(谢远云等, 2013; Nesbitt, 1979)。因为在沉积过程中相对较低的活动性质以及在水体中低的滞留时间(Bhatia, 1985; Bhatia et al., 1986),REE在沉积过程中几乎等量地从水体进入到沉积物之中(Condie, 1991),因此沉积物的REE组成及分布模式反映了物源(母岩)的性质,很适合用于物源追踪(Taylor et al., 1985)。哈尔滨尘暴天气沉降物的REE分布模式表现为轻稀土富集(干沉降和湿沉降的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值分别为9.06和9.96)、重稀土亏损和显著Eu负异常(干沉降和湿沉降的 Eu/Eu^* 值分别为0.80和0.64),与UCC和PASS的REE分布模式相似(图3)。干沉降和湿沉降粉尘都有均一的REE含量(表1), ΣREE 含量分别为 $181.35\sim 199.73$ (均值为189.48)和 $220.09\sim$

233.73 (均值为 223.48)。干沉降和湿沉降的(La/Sm)_N比值分别为 3.67 和 4.12,反映了 LREE 之间显著的分馏和 LREE 的富集;而(Gd/Yb)_N比值分别为 1.39 和 1.61,反映了相对扁平的 HREE 分布模式和显著的 HREE 亏损。尘暴天气沉降物的 Ce 异常不明显。

3.3 Sr-Nd 同位素组成

Sr-Nd 同位素组成是亚洲风尘物源追踪最常用的方法(Chen et al., 2007; Grousset et al., 2005; Li et al., 2009a, 2011; Yang et al., 2009)。来自不同地质体的沉积物有明显不同的 Sr-Nd 同位素组成,这取决于沉积物的物源和年龄。Sr-Nd 同位素组成在风化、搬运和沉积等表生过程中能保持很大的稳定性(Grousset et al., 2005),因此它们被广泛用来追踪风成黄土的物源(Liu et al., 1994; Gallet et al., 1996, 1998; Jahn et al., 2011; Chen et al., 2007; Li et al., 2009a)。沉积物硅酸盐组分的 Sr-Nd 同位素组成的系统研究(Chen et al., 2007)表明黄土高原黄土及亚洲风尘潜在源区的细颗粒组分(<75 μm)的 Sr-Nd 同位素组成在过去几百万年来一直保持相当大的稳定性。

表 2 列出了哈尔滨尘暴天气沉降物及潜在风尘源区的酸不溶物硅酸盐组分的 Sr-Nd 同位素组成,图 4 显示了哈尔滨尘暴天气沉降物与其潜在源区沙地表土的 Sr-Nd 同位素组成的比较,同时黄土高原黄土及三个主要潜在亚洲风尘源区的 Sr-Nd 同位

素组成也一并表现在图 4。尘暴沉降物的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值和 ε_{Nd}(0) 值相当稳定,分别在很小的范围 0.712187~0.712723 (平均值 0.712530) 和 -8.23~-7.20(平均值-7.72)内变化。

4 讨论

4.1 沉积物的粒度分布指示风尘源区

风尘沉积物的粒度分布反映了风力搬运和沉积过程(Crouvi et al., 2008),因此大量研究使用沉积物的粒度特征来限制风尘的源区(McTainsh et al., 1997; Derbyshire et al., 1998; Lim et al., 2006, 2008a; Crouvi et al., 2008)。根据已有的研究(Tsoar et al., 1987; Crouvi et al., 2008),20 μm 被认为是两种不同粉尘搬运机制的粒度界限。>20 μm 的粗颗粒组分通常被地表风以短期悬浮的方式搬运几百千米(<300 km)(Sun, 2004; Sun et al., 2008),通常在邻近下风向地区堆积形成黄土。然而,<20 μm 的细颗粒组分,一旦从地面扬起,能分散在广阔的空间范围内,主要以长期悬浮的方式在更高的高度(可以超过 5 km)搬运几百甚至远离源区几千千米(Sun et al., 2002, 2003, 2004)。因此,粗于 20 μm 的颗粒被认为来自邻近的粉尘源区,而细于 20 μm 的颗粒既可以来自遥远也可以来自邻近的粉尘源区(Tsoar et al., 1987; Crouvi et al., 2008)。像北太平洋和格陵兰这种远离粉尘源区的区域只接受细颗粒粉尘,而下风向毗邻粉尘源区的区域,粗颗粒和细颗粒粉尘都会接收到(Sun, 2004; Lim et al., 2008a)。此外,粉尘沉积物粒度众数的个数在诊断不同源区粉尘是否经过混合的作用也逐渐得到认识,双峰态的粒度分布通常指示了来自不同源区和/或搬运-沉积过程沉积物的混合(McTainsh et al., 1997; Sun et al., 2001, 2002, 2003, 2004, 2008a; Sun, 2004; Lim et al., 2006, 2008a)。

哈尔滨尘暴天气沉降物的粒度分布显示,干沉降粉尘具有双峰态粒度分布,众数分别为 28 μm 和 3.6 μm,而湿沉降粉尘为单峰态分布,众数是 6 μm。笔者认为,众数值为 28 μm 的粗颗粒组分和众数值为 3.6~6 μm 的细颗粒组分主要来自非本地区的粉尘颗粒。这种解释的证据如下:

(1) 10~20 μm 是区分长距离和短距离粉尘搬运机制的粒度界限(Tsoar et al., 1987; Crouvi et al.,

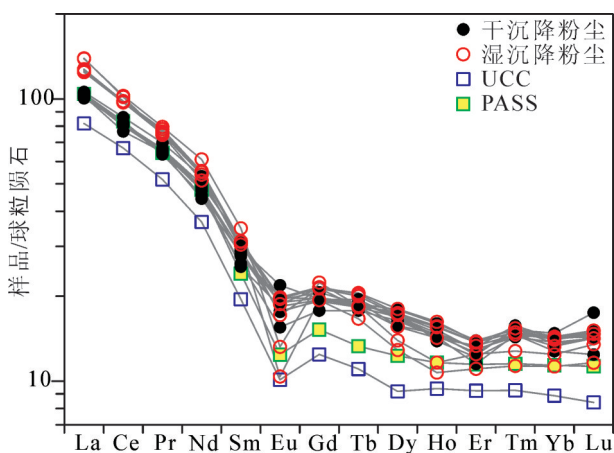


图 3 哈尔滨尘暴天气沉降物的 REE 分布模式

Fig.3 The chondrite-normalized REE patterns of the dust-storm deposits in Harbin

表1 哈尔滨尘暴天气沉降物的REE含量(10^{-6})
Table 1 Concentrations of REE for Harbin dust-storm deposits (10^{-6})

REE	干沉降粉尘								湿沉降粉尘					
	DD1	DD2	DD3	DD4	DD5	DD6	DD7	DD8	WD1	WD2	WD3	WD4	WD5	WD6
La	37.5	38.2	38.8	38.3	37.7	36.9	37.6	37.3	46.7	46.2	45.6	46.6	51.1	50.9
Ce	73.4	77.7	82.3	77.9	78.7	78.2	76.8	78.8	93.9	93.1	92.9	93.2	97.1	98
Pr	8.89	8.97	9.57	9.12	8.7	9.12	8.88	8.92	10.7	10.4	10.3	10.5	10.2	10.9
Nd	31.5	33.9	37.8	34.5	32.4	35.4	33.7	34.2	39.2	39.1	38.3	39.4	36.5	43.4
Sm	6.53	5.87	6.8	6.41	6.01	7.29	6.48	6.71	7.21	7.19	7.2	7.23	7.03	8.03
Eu	1.65	1.6	1.9	1.72	1.35	1.69	1.54	1.53	1.49	1.63	1.7	1.72	0.903	1.15
Gd	6.02	5.93	5.97	5.98	5.44	6.31	5.87	5.91	6.51	6.52	6.53	6.58	5.92	6.83
Tb	1.1	1.13	1.07	1.1	1.03	1.09	1.06	1.09	1.06	1.16	1.19	1.18	0.965	1.07
Dy	5.98	6.3	6.67	6.4	6.23	6.82	6.42	6.51	5.94	6.53	6.87	6.63	4.91	5.31
Ho	1.25	1.24	1.18	1.23	1.22	1.36	1.26	1.29	1.21	1.32	1.38	1.33	0.912	0.99
Er	3.08	3.28	3.02	3.13	2.86	3.47	3.23	3.21	3.32	3.41	3.44	3.42	2.75	3.1
Tm	0.547	0.56	0.51	0.54	0.52	0.541	0.51	0.52	0.52	0.53	0.547	0.53	0.403	0.455
Yb	3.36	3.51	3.6	3.5	3.16	3.66	3.4	3.5	3.3	3.47	3.56	3.51	2.79	3.08
Lu	0.538	0.566	0.54	0.55	0.473	0.666	0.54	0.57	0.54	0.56	0.575	0.56	0.442	0.514

2008), <20 μm 的细粒组分能长距离搬运。<20 μm 的细粒组分分别是湿沉降和干沉降粉尘的统治性的和主要的粒度组分, 平均含量约占86%和61%。

(2) 众数值在1~10 μm 的单峰态粒度分布是长距离搬运粉尘的典型特征(图2)。哈尔滨湿沉降粉尘粒度的单峰态与世界上其它地区的长距离搬运粉尘有相似的粒度分布模式(图2)。例如, 来自北非的长期悬浮搬运的远源粉尘的众数值在4~10 μm (Crouvi et al., 2008)。来自塔克拉玛干沙漠由西风搬运到日本的粉尘粒度是单峰态分布, 众数值在1~10 μm (Lim et al., 2006)。西非马里的尘柱(云)是典型的来自单一物源无本地源贡献的长距离搬运粉尘, 单峰态粒度分布, 众数值2.6 μm (McTainsh et al., 1997)。2006年3月11日的南京雨尘被认为是来自华北的尘暴事件, 经过长距离搬运而来, 众数粒径在7.68 μm (李徐生等, 2009b)(图2f)。来自亚洲干旱内陆的北太平洋粉尘由单峰细颗粒组分组成, 粒度范围在0~10 μm , 众数粒径在2 μm (Rea et al., 1995)(图2f)。

(3) 哈尔滨干沉降粉尘的双峰态粒度分布模式(粗、细众数分别为28 μm 和3.6 μm) 与其他长距离搬运粉尘及黄土高原黄土保持很好的一致性(图2)。从韩国济州岛玛珥湖提取的风成石英颗粒表

现出双峰态粒度分布(Lim et al., 2006, 2008b)(图2e), 众数分别为3 μm 和15 μm , 表明了分别由西风搬运塔克拉玛干沙漠的细颗粒物物质和近地表冬季风搬运蒙古南部戈壁沙漠及毗邻的中国北方戈壁和沙漠的粗颗粒粉尘的混合(Lim et al., 2006, 2008a, 2008b)。黄土高原典型黄土一致地表现出双众数粒度分布模式, 主众数在16~32 μm , 次众数在3.2 μm (图2c)。而且, 哈尔滨干沉降粉尘的双众数粒度分布模式也与黄土高原上新世风成红黏土非常相似(图2d), 这些红黏土的粒度分布普遍为双众数, 众数值分别为5.7 μm 和32 μm (Sun et al., 2002; Sun, 2004)。值得注意的是, 从黄土源区, 比如阿拉善高原(包括巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠), 到黄土高原主体的距离大致等于浑善达克沙地到哈尔滨的距离。

(4) 不稳定气流及温度随高度的快速下降将促使粉尘随强风上升到更高的高度并分散到更广阔的范围, 因此, 在强气旋风暴条件下, >20 μm 的粗颗粒组分能够被传输3000 km 的距离(Tsoar et al., 1987)。例如, 经过长距离搬运的北京2006年4月16~17日的重尘暴粉尘含有大量的>20 μm 的粗颗粒组分(占60%)和一定数量的>63 μm 的沙颗粒组分(占9.6%)(Feng et al., 2008)。这说明>20 μm 的

表2 哈尔滨尘暴天气沉降物及潜在源区的Sr-Nd同位素组成
Table 2 Sr-Nd isotopic compositions for dust fallouts during Harbin dust-storm weather and potential sources

样品	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2σ	ε _{Nd(0)} ^a
哈尔滨尘暴天气沉降物					
DD1	0.712453	0.000016	0.512221	0.000006	-8.13
DD2	0.712646	0.000012	0.512234	0.000005	-7.88
DD3	0.712723	0.000010	0.512268	0.000007	-7.22
WD3	0.712567	0.000017	0.512271	0.000004	-7.16
WD5	0.712187	0.000009	0.512216	0.000008	-8.23
WD6	0.712606	0.000013	0.512244	0.000006	-7.69
科尔沁沙地					
T1	0.711521	0.000017	0.512194	0.000006	-8.66
T5	0.711271	0.000014	0.51218	0.000007	-8.93
T8	0.711739	0.000012	0.512096	0.000006	-10.57
T11	0.711737	0.000013	0.512219	0.000007	-8.17
T12	0.711703	0.000009	0.512156	0.000008	-9.40
T15	0.711487	0.000014	0.512233	0.000007	-7.90
T16	0.711131	0.000011	0.512265	0.000007	-7.28
呼伦贝尔沙地					
HL1	0.710035	0.000012	0.512384	0.000008	-4.95
HL4	0.709834	0.000016	0.512362	0.000006	-5.38
HL5	0.709465	0.000013	0.512346	0.000004	-5.70
HL6	0.709662	0.000024	0.512298	0.000005	-6.63
HL7	0.709782	0.000010	0.512367	0.000008	-5.29
HL9	0.709967	0.000018	0.512325	0.000007	-6.11
HL10	0.709966	0.000020	0.512303	0.000004	-6.53
HL11	0.710348	0.000013	0.512276	0.000007	-7.06
HL12	0.709708	0.000011	0.512250	0.000007	-7.57
HL13	0.709870	0.000011	0.512312	0.000006	-6.36

注:^a ε_{Nd(0)} = [(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{sample} / (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{CHUR} - 1] × 10000;
(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{CHUR} = 0.512638。

粗颗粒组分,甚至是>63 μm的细沙颗粒,能够在源区被强风长距离搬运,当风速降低或遭遇降水时分别以干沉降和湿沉降的方式在下风向进行沉积。因此,一定量的>20 μm的粗颗粒组分出现在长距离搬运的粉尘中是很自然的。

(5)哈尔滨尘暴天气期间近地表风速较小(风速<3 m/s),本地粉尘对尘暴粉尘的贡献的可能性很低。

(6)哈尔滨尘暴粉尘的Sr-Nd同位素组成显示远

离粉尘沉降点的浑善达克沙地和/或科尔沁沙地作为哈尔滨尘暴天气粉尘的源区(图4,详情见下文)。

4.2 哈尔滨尘暴粉尘的物源

哈尔滨2011尘暴天气沉降物属于远源沉积,然而粉尘的粒度组成不能确定具体的源区,只能提供有关粉尘源与汇之间相对距离的信息。科尔沁沙地还是呼伦贝尔沙地为哈尔滨尘暴天气提供重要的粉尘贡献仍存在许多争议(谢远云等,2013)。沉积物的地球化学组成在解译粉尘源区方面具有巨大的潜力,尽管许多地质过程(比如:风化、剥蚀、搬运、沉积和成岩等)可能会修改沉积物的初始化学组成,但普遍认为沉积物的地化组成仍主要受控于它们的源区(Absar et al., 2009; Ahmad et al., 2016)。某些不活动元素(在水体中有较短滞留时间)因能几乎等量地被转换进入沉积物之中而被广泛用于物源追踪(Taylor et al., 1985)。相对于其他不活动元素而言,REE被优先考虑用于物源追踪,

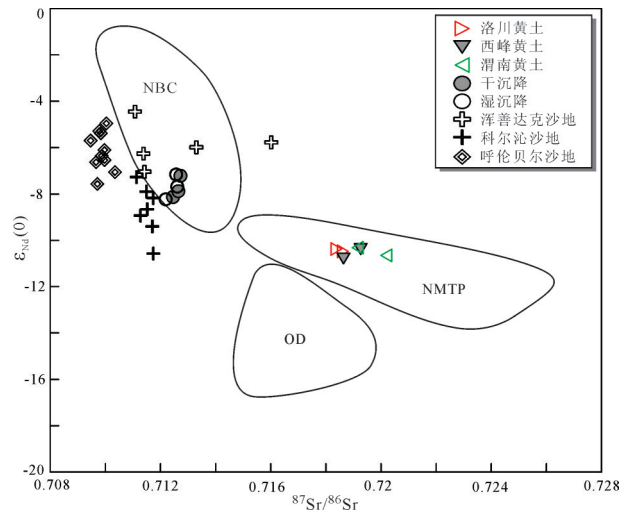


图4 哈尔滨尘暴天气沉降物的Sr-Nd同位素组成及与东北风尘潜在源区、亚洲风尘潜在源区和黄土(Chen et al., 2007; Li et al., 2009a)的对比

NBC—中国北方边界沙漠; NMTP—青藏高原北缘干旱区; OD—鄂尔多斯沙漠(包括库布齐和毛乌素沙漠)

Fig.4 Sr-Nd isotopic composition for dust fallouts during Harbin dust-storm weather, in comparison with the potential dust source areas of Northeast and Asian dusts as well as the CLP loess (after Chen et al., 2007; Li et al., 2009a)

NBC—The deserts around northern boundary of China; NMTP - The arid lands of the northern margin of the Tibetan Plateau; OD—The Ordos Desert (including Hobq and Mu Us Desert)

因其很少(或不明显)受到次生过程和重矿物分异的影响(Absar et al., 2009)。在包含REE参数的物源判别图解上(图5),尘暴沉降物落在或接近科尔沁沙地而远离呼伦贝尔沙地,表明了科尔沁沙地的粉尘贡献。

Sr-Nd同位素组成为哈尔滨尘暴天气沉降物物源判别提供了更重要的证据。粉尘的Sr-Nd同位素组成提供了大量有价值的风尘源区信息,因此在限定风尘物源方面比常量和微量元素更有意义。哈尔滨尘暴粉尘的Sr-Nd同位素组成落在中国北方边界沙漠区域(图4),接近科尔沁沙地和浑善达克沙地,而远离呼伦贝尔沙地和黄土高原黄土。尘暴沉降物的Sr-Nd同位素组成表明:(1)哈尔滨尘暴粉尘与黄土高原黄土有明显不同的物源,青藏高原北缘的干旱地区(比如阿拉善高原的巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠)以及鄂尔多斯沙漠(包括库布齐沙漠和毛乌素沙漠)不可能是哈尔滨尘暴天气的物源;(2)科尔沁沙地和浑善达克沙地是哈尔滨尘暴天气的策源地,呼伦贝尔沙地不可能为哈尔滨沙尘天气提供粉尘物质。哈尔滨2011尘暴天气沉降物的科尔沁沙地和浑善达克沙地来源得到气象记录的支持(谢远云等, 2013)。

4.3 对风成黄土形成的指示意义

黄土形成研究中的一个重要问题是争论了很长时间的黄土粉尘的物质来源(Honda et al., 2004;

Mahe et al., 2009; Pullen et al., 2011; Che et al., 2013)。然而,近些年来,随着对黄土高原黄土和潜在源区表土的Sr-Nd同位素组成研究的逐步展开,对黄土粉尘颗粒的来源已取得普遍一致的认识(Chen et al., 2007)。进一步的研究显示,与<63 μm 的粗颗粒组分一样,黄土高原黄土中的<5 μm 的细颗粒粉尘具有与阿拉善高原的巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠的细颗粒硅酸盐组分相似的Sr-Nd同位素组成,说明黄土粉尘源区位于粉尘沉降区的上风方向邻近地区。黄土物源的近源性也得到黄土高原黄土和沙漠表土细颗粒石英(<16 μm)的电子自旋共振信号强度和结晶指数的证实(Sun et al., 2008b)。基于地球化学的研究,风成黄土中的细颗粒粉尘具有与粗颗粒粉尘相同的邻近源区。

与此相反,基于对黄土双峰态粒度分布模式的认识,黄土被认为由粗颗粒组分(中粉砂和粗粉砂)和细颗粒组分(细粉砂和黏土)两部分组成,粗颗粒组分由近地表的冬季风从邻近的源区搬运而来,而细颗粒组分是从遥远的源区由高空西风搬运而来。根据沙颗粒碰撞模式(Crouvi et al., 2008, 2010, 2012; Enzel et al., 2010; Amit et al., 2014),作为黄土主要组成物质的粉砂颗粒可以通过高海拔冷沙漠(Amit et al., 2014)或低海拔亚热带暖沙漠(Crouvi et al., 2008, 2010, 2012; Enzel et al., 2010)活动沙海中的沙颗粒的风蚀形成,而细颗粒来自更遥

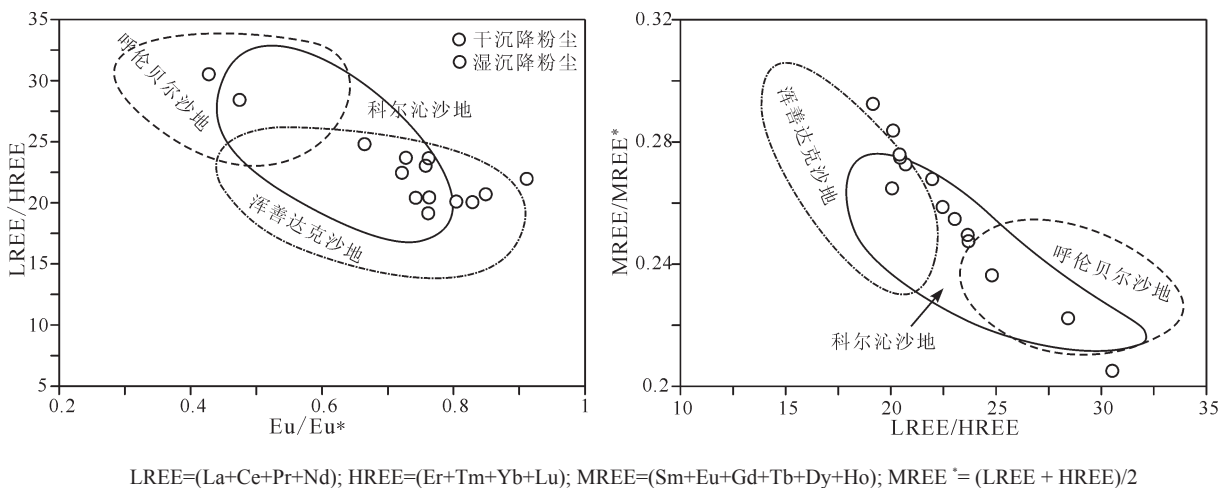


图5 哈尔滨尘暴天气沉降物的REE物源判别图解
(浑善达克沙地数据来自风成砂的<125 μm 粒级组分, Liu et al., 2013)

Fig.5 Binary diagrams incorporating REE parameters for Harbin dust-storm deposits
(The Data for Onqin Daga Sandy Land are from <125 μm fraction of the aeolian sands, after Liu et al., 2013)

远的源区。针对黄土粗颗粒和细颗粒粉尘的来源,地球化学组成和粒度组成在认识上存在巨大的差异,这引起一个重要问题:黄土中的粗颗粒和细颗粒是否来自相同的粉尘源区。

然而,笔者对同一次尘暴事件的干、湿沉降物的地球化学组成研究显示,干沉降和湿沉降粉尘具有相同的REE和Sr-Nd同位素组成。从图4中可以看出,干沉降和湿沉降粉尘的Sr-Nd同位素数据紧紧丛簇在一起,表明了细颗粒粉尘有与粗颗粒粉尘相同的物源。现代尘暴事件是地质历史时期风成黄土堆积的继续,而尘暴天气沉降物是黄土堆积的初始物质。因此,本研究揭示的源于同一次尘暴天气的干沉降和湿沉降粉尘具有相同物源的论断为黄土高原黄土中的粗、细颗粒来源提供了进一步的研究实证。笔者认为风尘黄土中的细颗粒粉尘具有与粗颗粒粉尘一致的来源,都是来自临近的沙漠源区。

5 结 论

对哈尔滨尘暴天气粉尘的粒度和地球化学组成的研究结果显示如下:

(1) <20 μm 组分是尘暴粉尘统治性的粒度组成,特别是对于湿沉降粉尘。干沉降粉尘具有双峰态粒度分布,众数分别为3.6 μm 和28 μm ,粒度组成与黄土高原黄土和红黏土相似;湿沉降粉尘为单峰态粒度分布,众数为6 μm ,粒度组成与世界上其他地区的长距离搬运粉尘相似。

(2) REE和Sr-Nd同位素地球化学组成显示,哈尔滨尘暴粉尘来自科尔沁和浑善达克沙地,而非呼伦贝尔沙地。

(3) 同一次尘暴天气的干沉降和湿沉降粉尘具有相同的地球化学组成,这反映了黄土高原风成黄土的粗颗粒和细颗粒物质来源于相同的粉尘源区。

致谢: 粒度分析得到中国科学院西安地球环境研究所的孙有斌研究员的帮助,REE和Sr-Nd同位素组成得到核工业北京地质研究院分析测试中心刘牧老师的大力支持,张红和谢雨希参加了部分野外取样工作,审稿专家对论文提出了宝贵修改意见,在此一并表示感谢。

References

Absar N, Raza M, Roy M, Naqvi S M, Roy A K. 2009. Composition and weathering conditions of Paleoproterozoic upper crust of

Bundelkhand craton, Central India: Records from geochemistry of clastic sediments of 1.9 Ga Gwalior Group[J]. *Precambrian Research*, 168: 313–329.

Ahmad I, Mondal M E A, Satyanarayanan M. 2016. Geochemistry of Archean metasedimentary rocks of the Aravalli craton, NW India: Implications for provenance, paleoweathering and supercontinent reconstruction[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 126: 58–73.

Amit R, Enzel Y, Mushkin A, Gillespie A, Batbaatar J, Crouvi O, Vandenberghe J, An Z S. 2014. Linking coarse silt production in Asian sand deserts and Quaternary accretion of the Chinese Loess Plateau[J]. *Geology*, 42(1): 23–26.

An F Y, Ma H Z, Wei H C, Lai Z P. 2012. Distinguishing aeolian signature from lacustrine sediments of the Qaidam Basin in northeastern Qinghai–Tibetan Plateau and its palaeoclimatic implications[J]. *Aeolian Research*, 4: 17–30.

An Z. 2000. The history and variability of the East Asian paleomonsoon climate[J]. *Quaternary Science Reviews*, 19: 171–187.

An Z, Kukla G J, Porter S C, Xiao J. 1991. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of central China during the last 130,000 years[J]. *Quaternary Research*, 36: 29–36.

Bhatia M R. 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control[J]. *Sedimentary Geology*, 45: 97–113.

Bhatia M R, Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92: 181–193.

Che X D, Li G J. 2013. Binary source of loess on the Chinese Loess Plateau revealed by U–Pb ages of zircon[J]. *Quaternary Research*, 80: 545–551.

Chen J, Li G J, Yang J D, Rao W B, Lu H Y, Balsam W, Sun Y B, Ji J F. 2007. Nd and Sr isotopic characteristics of Chinese deserts: Implications for the provenances of Asian dust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71: 3904–3914.

Condie K C. 1991. Another look at rare earth elements in shales[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55: 2527–2531.

Crouvi O, Amit R, Enzel Y, Porat N, Sandler A. 2008. Sand dunes as a major proximal dust source for late Pleistocene loess in the Negev Desert, Israel[J]. *Quaternary Research*, 70: 275–282.

Crouvi O, Amit R, Enzel Y, Gillespie A R. 2010. Active sand seas and the formation of desert loess[J]. *Quaternary Science Reviews*, 29: 2087–2098.

Crouvi O, Schepanski K, Amit R, Gillespie A R, Enzel Y. 2012. Multiple dust sources in the Sahara Desert: The importance of sand dunes[J]. *Geophysical Research Letters*, 39(13): L13401.

Derbyshire E, Meng X M, Kemp R A. 1998. Provenance, transport and characteristics of modern aeolian dust in western Gansu Province, China, and interpretation of the Quaternary loess record[J]. *Journal*

- of Arid Environments, 39: 497–516.
- Enzel Y, Amit R, Crouvi O, Porat N. 2010. Abrasion– derived sediments under intensified winds at the latest Pleistocene leading edge of the advancing Sinai– Negev erg[J]. *Quaternary Research*, 74: 121–131.
- Feng J L, Zhu L P, Ju J T, Zhou L P, Zhen X L, Zhang W, Gao S P. 2008. Heavy dust fall in Beijing, on April 16– 17, 2006: Geochemical properties and indications of the dust provenance[J]. *Geochemical Journal*, 42: 221–236.
- Gallet S, Jahn B, Torii M. 1996. Geochemical characterization of the Luochuan loess paleosol sequence, China, and paleoclimatic implications[J]. *Chemical Geology*, 133: 67–88.
- Gallet S, Jahn B M, Lanoe B V V, Dia A, Rossello E. 1998. Loess geochemistry and its implications for particle origin and composition of the upper continental crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 156: 157–172.
- Grousset F E, Biscaye P E. 2005. Tracing dust sources and transport patterns using Sr, Nd and Pb isotopes[J]. *Chemical Geology*, 222: 149–167.
- Hao Q Z, Guo Z T, Qiao Y S, Xu B, Oldfield F. 2010. Geochemical evidence for the provenance of middle Pleistocene loess deposits in southern China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 29: 3317–3326.
- Honda M, Yabuki S, Shimizu H. 2004. Geochemical and isotopic studies of aeolian sediments in China[J]. *Sedimentology*, 51(2): 211–230.
- Jahn B, Gallet S, Han J M. 2001. Geochemistry of the Xining, Xifeng and Jixian sections, loess plateau of China: Eolian dust provenance and paleosol evolution during the last 140 ka[J]. *Chemical Geology*, 178: 71–94.
- Li G J, Chen J, Ji J F, Yang J D, Conway T M. 2009a. Natural and anthropogenic sources of East Asian dust[J]. *Geology*, 37(8): 727–730.
- 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[J]. *Geology*, 39(3): 199–202.
- Li Xusheng, Han Zhiyong, Chen yingyong, Cai Yuanfeng, Yang Dayuan. 2009b. Characteristics and source of rain dust in Nanjing on March 11, 2006[J]. *Quaternary Sciences*, 29(1): 43– 54 (in Chinese with English abstract).
- Lim J and Matsumoto E. 2006. Bimodal grain– size distribution of aeolian quartz in a maar of Cheju Island, Korea, during the last 6500 years: Its flux variation and controlling factor[J]. *Geophysical Research letters*, 33.
- Lim J and Matsumoto E. 2008a. Fine aeolian quartz records in Cheju Island, Korea, during the last 6500 years and pathway change of the westerlies over east Asia[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(D8): 1–9.
- Lim J and Matsumoto E. 2008b. Estimation of aeolian dust flux on Cheju Island, Korea, during the Mid– to Late Holocene[J]. *Quaternary International*, s176–177(1): 104–111.
- Liu C Q, Masuda A, Okada A, Yabuki S, Fan Z L. 1994. Isotope geochemistry of Quaternary deposits from the arid lands in northern China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 127: 25–38.
- Liu Z T, Yang X P. 2013. Geochemical– geomorphological evidence for the provenance of aeolian sands and sedimentary environments in the Hunshandake Sandy Land, eastern Inner Mongolia, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(3): 871–884.
- 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[J]. *Geology*, 37(3): 279–282.
- McTainsh G H, Nickling W G, Lynch A W. 1997. Dust deposition and particle size in Mali, West Africa[J]. *Catena*, 29: 307–322.
- Nesbitt H W. 1979. Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite[J]. *Nature*, 279: 206–210.
- Porter S C. 2001. Chinese loess record of monsoon climate during the last glacial– interglacial cycle[J]. *Earth Science Reviews*, 54: 115–128.
- Pullen A, Kapp P, McCallister A T, Chang H, Gehrels G E, Garzzone C N, Heermance R V, Ding L. 2011. Qaidam basin and northern Tibetan Plateau as dust sources for the Chinese Loess Plateau and paleoclimatic implications[J]. *Geology*, 39(11): 1031–1034.
- Qiang M, Lang L, Wang Z. 2010. 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*, 74: 1232–1239.
- Rea D K, Hovan S A. 1995. Grain size distribution and depositional processes of the mineral component of abyssal sediments: Lessons from the North Pacific[J]. *Paleoceanography*, 10(2): 251–258.
- Sun D H, An Z S, Su R X, Wu X H, Wang S M, Sun Q L. 2001. Mathematical approach to sedimentary component partitioning of polymodal sediments and its applications[J]. *Progress in Natural Science*, 11(5): 374–382.
- Sun D H, Bloemendal J, Rea D K, Vandenberghe J, Jiang F C, An Z S, Su R X. 2002. Grain– size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components[J]. *Sedimentary Geology*, 152: 263–277.
- Sun D H, An Z S, Su R X, Lu H Y, Sun Y B. 2003. Eolian sedimentary records for the evolution of monsoon and westerly circulations of northern China in the last 2.6 Ma[J]. *Science in China (Series D)*, 46(10): 1049–1059.
- Sun D H. 2004. Monsoon and westerly circulation changes recorded in the late Cenozoic aeolian sequences of Northern China[J]. *Global and Planetary Change*, 41: 63–80.
- Sun D H, Bloemendal J, Rea D K, An Z S, Vandenberghe J, Lu H Y, Su R X, Liu D S. 2004. Bimodal grain–size distribution of Chinese loess, and its palaeoclimatic implications[J]. *Catena*, 55: 325–340.

- Sun D H, Su R X, Bloemendal J, Lu, H Y. 2008a. Grain-size and accumulation rate records from Late Cenozoic aeolian sequences in northern China: Implications for variations in the East Asian winter monsoon and westerly atmospheric circulation[J]. *Paleogeography, Paleoclimatology, Palaeoecology*, 264: 39–53.
- Sun Y B, Tada R, Chen J, Liu Q S, Toyoda S, Tani A, Ji J F, Isozaki Y. 2008b. Tracing the provenance of fine-grained dust deposited on the central Chinese Loess Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 35, L01804.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. London: Oxford Blackwell, 1–312.
- Tsoar H, Pye K. 1987. Dust transport and the question of desert loess formation[J]. *Sedimentology*, 34: 139–153.
- Xie Yuanyun, He Kui, Kang Chunguo. 2005. Grain-size distribution of fall-outs of an exceedingly large dust storm in Harbin City and its implications[J]. *Geology in China*, 32(3): 502–506 (in Chinese with English abstract).
- Xie Yuanyun, Meng Jie, Guo Lingfen, He Kui. 2013. REE geochemistry for sand-dust fallouts in Harbin, Heilongjiang province and provenance analysis[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(5): 923–933 (in Chinese with English abstract).
- Yan Y, Sun Y B, Ma L, Long X. 2015. A multidisciplinary approach to trace Asian dust storms from source to sink[J]. *Atmospheric Environment*, 105: 43–52.
- Yang J D, Li G J, Rao W B, Ji J F. 2009. Isotopic evidences for provenance of East Asian Dust[J]. *Atmospheric Environment*, 43: 4481–4490.
- Yin Zhiqiang, Qin Xiaoguang, Li Yumei, Ning Bo. 2008. Influence of the dust source distance on the multimodal grain-size distribution characteristics of loess[J]. *Geology in China*, 35(5): 1037–1044 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 李徐生, 韩志勇, 陈英勇, 蔡元峰, 杨达源. 2009. 2006年3月11日南京“泥雨”降尘特征及其粉尘来源[J]. *第四纪研究*, 29(1): 43–54.
- 谢远云, 何葵, 康春国. 2005. 哈尔滨市特大沙尘暴沉降物的粒度分布及意义[J]. *中国地质*, 32(3): 502–506.
- 谢远云, 孟杰, 郭令芬, 何葵. 2013. 哈尔滨沙尘沉降物稀土元素地球化学特征及其物源分析[J]. *地球科学*, 38(5): 923–933.
- 殷志强, 秦小光, 李玉梅, 宁波. 2008. 源区距离对黄土粒度多组分分布特征的影响[J]. *中国地质*, 35(5): 1037–1044.