

doi:10.3799/dqkx.2013.091

哈尔滨沙尘沉降物稀土元素地球化学特征及其物源分析

谢远云, 孟杰, 郭令芬, 何葵

哈尔滨师范大学地理环境遥感监测黑龙江省普通高等学校重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150025

摘要: 为了对哈尔滨沙尘天气的物质来源进行追踪, 对哈尔滨沙尘沉降物及其作为潜在源区的科尔沁沙地和松嫩沙地 ($<11\ \mu\text{m}$ 和 $11\sim 30\ \mu\text{m}$ 粒级组分) 进行了稀土元素分布特征的研究。结果表明: 哈尔滨 2002 年沙尘物质的 ΣREE 为 189.67×10^{-6} , 2007 年为 175.57×10^{-6} , 2008 年为 174.68×10^{-6} , 2011 年为 181.35×10^{-6} 。沙尘沉降物的 REE 集中分布在一个很窄的范围, 显示哈尔滨沙尘的来源相当稳定。沙尘沉降物的稀土元素分布模式十分相似, Eu 较明显亏损 (2002 年、2007 年以及 2008 年沙尘的 δEu 在 $0.71\sim 0.75$ 之间, 2011 年沙尘的 δEu 值为 0.92), Ce 弱负异常 (δCe 值在 $0.89\sim 0.92$ 之间, 平均值为 0.90)。沙尘沉降物与潜在源区物质的 REE 含量、分布模式、特征参数以及 $\delta\text{Eu}-\Sigma\text{REE}_s$ 、 $\delta\text{Eu}-(\text{LREE}/\text{HREE})$ 和 $(\text{LREE}/\text{HREE})-\text{La}_N$ 关系图解均显示哈尔滨沙尘沉降物的 REE 组成与科尔沁沙地 (特别是 $11\sim 30\ \mu\text{m}$ 粒级组分) 十分接近, 显示哈尔滨沙尘起源于科尔沁沙地而非松嫩沙地, 科尔沁沙地对哈尔滨沙尘的物质贡献主要体现在 $11\sim 30\ \mu\text{m}$ 粒级组分。哈尔滨沙尘的科尔沁沙地起源的研究结果得到气象资料和气象记录的支持。

关键词: 沙尘沉降物; 物源分析; 稀土元素; 哈尔滨; 松嫩沙地; 科尔沁沙地; 地球化学。

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2013)05-0923-11

收稿日期: 2012-12-03

REE Geochemistry for Sand-Dust Fallouts in Harbin, Heilongjiang Province and Provenance Analysis

XIE Yuan-yun, MENG Jie, GUO Ling-fen, HE Kui

Key Laboratory of Remote Sensing Monitoring of Geographic Environment for Heilongjiang Province, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

Abstract: To determine provenance of sand-dust fallouts in Harbin area, Heilongjiang Province, the sand-dust fallouts in Harbin and two different grain size fractions ($<11\ \mu\text{m}$ and $11-30\ \mu\text{m}$) of samples from the potential source areas, including Horqin sandy land and Songneng sandy land, are studied for rare earth element (REE) compositions. The results indicate that ΣREE for sand-dust fallouts in 2002 ranges from 179.07×10^{-6} to 200.92×10^{-6} with an average value of 189.67×10^{-6} , ΣREE varied ranges from 166.70×10^{-6} to 184.44×10^{-6} with an average value of 175.57×10^{-6} for sand-dust fallouts in 2007, from 166.91×10^{-6} to 182.45×10^{-6} with an average value of 174.68×10^{-6} in 2008, ΣREE in 2011 is 181.35×10^{-6} . The REE distribution for all sand-dust fallouts focuses on very narrow scopes, which displays provenance for sand-dust fallouts in Harbin is very stable. The dust falls show very similar REE distribution patterns and characteristic parameters with distinct negative Eu anomalies (δEu value for dust falls in 2002, 2007, 2008 varied from 0.71 to 0.75, δEu value in 2011 was 0.92) and slightly negative Ce anomalies (δCe value was in the range from 0.89 to 0.92 with an average of 0.90). The relatively large amount of evidence, such as REE values and distribution patterns and characteristic parameters and δEu vs. ΣREE_s diagram and δEu vs. $(\text{LREE}/\text{HREE})$ diagram and $(\text{LREE}/\text{HREE})$ vs. La_N diagram, indicate that REE compositions for dust falls in Harbin are quite similar to those of Horqin sandy land (specially $11-30\ \mu\text{m}$ grain size fractions), showing sand-dust in Harbin stems from Horqin sandy land but not Songneng sandy land, and showing material contribution of Horqin sandy land to dust falls in Harbin is mainly $11-30\ \mu\text{m}$ grain-size fractions. It is confirmed that dust falls in Harbin are from Horqin sandy land by relevant mete-

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.41072259)。

作者简介: 谢远云 (1971-), 男, 教授, 博士, 主要从事第四纪地质研究。E-mail: xyy0451@163.com

orological records and meteorological data.

Key words: sand-dust fallouts; provenance analysis; rare earth elements; Harbin; Songneng sandy land; Horqin sandy land; geochemistry.

稀土元素(REE, rare earth element)包括元素周期表上 15 个镧系元素(原子序数从 57 到 71), 另外, 元素 Y 因其同 REE 性质相似也常被视为稀土元素。研究认为, 沉积物稀土元素特征主要受控于源区物质成分, 这是因为: (1) REE 主要以颗粒态搬运沉积, 在水中溶解度含量极低; (2) REE 在水体中滞留时间较短; (3) 在母岩风化、搬运、沉积及成岩等过程中, REE 组成变化较小, 几乎等量地转移到沉积物中而不发生迁移或流失, 其携带的物源区信息一般不会丢失。因而 REE 是物源追踪研究中一种重要的源区示踪剂(Taylor and McLennan, 1985; Nesbitt *et al.*, 1990; Nesbitt and Young, 1996)。

沙尘沉降物富含沙尘源区信息, 是沙尘天气研究的一扇窗口。哈尔滨地区地表植被匮乏, 地表松散裸露严重, 沙尘物质丰富, 大风天气盛行, 沙尘释放过程强烈, 每年春季都会遭遇到沙尘天气。尽管对哈尔滨沙尘天气沉降物的来源一直存在争议, 但这些争议都没有提供自己相应的地球化学数据支持。笔者曾对哈尔滨沙尘沉降物的物质组成进行了初步研究(谢远云等, 2005, 2006; Xie *et al.*, 2006)。作为哈尔滨沙尘天气研究的一部分, 本文在以往研究的基础上, 重点分析了哈尔滨 2002 年 3 月 20 日、2007 年 5 月 8 日、2008 年 5 月 28 日和 2011 年 5 月 12 日沙尘沉降物的 REE 地球化学特征, 并结合科尔沁沙地和松嫩沙地分粒级组分的 REE 数据, 对哈尔滨沙尘沉降物的来源进行解析, 为探讨沙尘沉降物的物质来源提供 REE 地球化学证据。

1 材料与方 法

2002 年 3 月 20 日的样品来自覆盖在树叶上的沙尘, 共获 5 个样品; 2007 年 5 月 8 日和 2008 年 5 月 28 日的沙尘沉降物样品来自汽车顶, 各获 2 个样品; 2011 年 5 月 12 日沙尘样品 1 个, 用圆柱形玻璃器皿收集。为了对沙尘沉降物的物源进行分析, 在杜蒙县采集松嫩沙地样品 12 个, 采集科尔沁沙地样品 10 个, 获取的沙地样品覆盖区域广泛, 具有较高的代表性。沙尘沉降物为全岩样品。由于沙尘沉降物的粒级绝大部分小于 $30\ \mu\text{m}$ (Xie *et al.*, 2006), 对沙地样品进行分粒级处理, 提取 $<11\ \mu\text{m}$ 和 $11\sim 30\ \mu\text{m}$

两个粒级组分进行 REE 分析, 提取方法如下: 将样品分别过 $11\ \mu\text{m}$ (1 350 目)和 $30\ \mu\text{m}$ (500 目)的标准分样筛, 取得 $<11\ \mu\text{m}$ 和 $11\sim 30\ \mu\text{m}$ 粒级范围的分粒级样品。利用激光粒度分析仪测试随机的分粒级样品, 分别重复测试 3 次, 3 次测试所得的样品粒度数据与筛网记录的粒级区间吻合良好, 说明粒径提取效果较好。

样品的测试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)完成稀土元素的测定。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%。此次分析元素包括 La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, 其中前 6 个元素统称为轻稀土元素(LREE); 后 8 个元素统称为重稀土元素(HREE)。

2 测试结果

2.1 REE 组成

表 1 列出了哈尔滨沙尘沉降物及其他沉积物的 REE 分量和稀土元素总量(ΣREE)。2002 年沙尘沉降物的 ΣREE 在 $179.07\times 10^{-6}\sim 200.92\times 10^{-6}$ 之间, 变化范围不大, 平均丰度为 189.67×10^{-6} , 各样品的 REE 分量值也变化不大, 5 个沉降物样品 REE 各分量值的标准偏差均小于 3×10^{-6} , 变异系数均小于 5%, 表明作为同一次沙尘天气的产物, 全部沙尘样品的 REE 含量具有较强的稳定性; 2007 年沙尘样品的 ΣREE 在 $166.7\times 10^{-6}\sim 184.44\times 10^{-6}$ 之间, 平均 175.57×10^{-6} ; 2008 年沙尘样品的 ΣREE 在 $166.91\times 10^{-6}\sim 182.45\times 10^{-6}$ 之间, 平均 174.68×10^{-6} ; 2011 年沙尘样品的 ΣREE 为 181.35×10^{-6} 。沙尘沉降物无论是同一时期不同样品, 还是不同时期样品, 其 REE 分量和 ΣREE 以及 ΣLREE 、 ΣHREE 均集中分布在一个很窄的范围, 在所有 10 块沙尘样品中, REE 各分量值的标准偏差均小于 4×10^{-6} , 变异系数均小于 7%, 表明哈尔滨沙尘样品的 REE 组成具有较强的均一性和稳定性。沙尘沉降物中 REE 含量大体遵循以下顺序: $\text{Ce}>\text{La}>\text{Nd}>\text{Pr}>\text{Sm}>\text{Gd}>\text{Dy}>\text{Er}, \text{Yb}>\text{Eu}, \text{Ho}>\text{Tb}, \text{Tm}, \text{Lu}$, 与稀土元素在地壳中丰度的排序

表 1 哈尔滨沙尘沉降物与潜在源区物质稀土元素含量 (10^{-6})
Table 1 REE contents of sand-dust fallouts in Harbin and materials of latent dust provenance

样品	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ LREE	Σ HREE	Σ REE
Hb-1	42.07	80.06	9.82	37.24	7.40	1.44	6.75	1.07	6.01	1.21	3.24	0.61	3.47	0.53	178.03	22.89	200.92
Hb-2	37.62	71.10	8.67	32.81	6.63	1.25	6.04	1.00	5.35	1.11	3.15	0.57	3.27	0.50	158.08	20.99	179.07
2002 沙尘																	
Hb-4	39.89	76.73	9.48	34.89	7.20	1.32	6.45	1.03	5.56	1.18	3.16	0.60	3.29	0.49	169.51	21.76	191.27
Hb-5	37.39	73.32	8.94	33.78	6.95	1.38	6.23	1.02	5.76	1.12	3.20	0.59	3.42	0.52	161.76	21.86	183.62
Hb-6	40.28	74.98	9.25	38.12	7.32	1.41	6.35	1.06	5.89	1.17	3.18	0.58	3.38	0.51	171.36	22.12	193.48
2007 沙尘																	
Hb-7	40.76	73.88	8.65	32.8	6.62	1.22	6.02	0.97	5.34	1.04	2.95	0.54	3.17	0.48	163.93	20.51	184.44
Hb-8	35.71	66.05	7.96	30.46	6.32	1.25	5.53	0.93	4.81	0.99	2.79	0.51	2.94	0.45	147.75	18.95	166.70
2008 沙尘																	
Hb-9	38.32	72.50	8.84	34.13	6.76	1.37	6.19	0.97	5.24	1.07	2.92	0.55	3.11	0.48	161.92	20.53	182.45
Hb-10	33.74	67.62	7.64	31.25	6.35	1.28	5.62	0.94	4.86	0.98	2.76	0.48	2.93	0.46	147.88	19.03	166.91
2011 沙尘																	
Hb-11	37.50	73.40	8.89	31.50	6.53	1.65	6.02	1.10	5.98	1.25	3.08	0.55	3.36	0.54	159.47	21.88	181.35
松嫩沙地																	
<11 μ m	51.18	106.53	12.17	45.06	8.15	1.84	7.50	1.23	6.45	1.25	3.55	0.58	3.84	0.63	224.92	25.02	249.95
11~30 μ m	41.30	87.05	9.95	37.00	6.85	1.71	6.27	1.05	5.49	1.08	3.04	0.51	3.38	0.53	183.87	21.34	205.20
科尔沁沙地																	
<11 μ m	52.11	101.13	12.34	45.91	8.74	1.69	7.61	1.26	6.83	1.36	3.72	0.61	3.96	0.65	221.92	25.98	247.89
11~30 μ m	36.88	72.82	8.95	33.66	6.38	1.49	5.88	0.94	5.44	1.03	2.97	0.48	3.09	0.50	160.18	20.33	180.50

一致,说明沙尘沉降物中稀土元素含量分布主要受元素的地壳丰度控制。

与科尔沁沙地和松嫩沙地潜在源区物质的 REE 数据比较可以发现,沙尘沉降物的 Σ REE 以及 Σ LREE、 Σ HREE 略低于松嫩沙地 11~30 μm 粒级组分(Σ REE 为 161.54~390.96,均值 205.20),远低于沙地 <11 μm 粒级组分,与科尔沁沙地 11~30 μm 粒级组分(Σ REE 为 138.72~248.26,均值 180.50)相当.与其他地区的沙尘沉降物相比,哈尔滨沙尘沉降物的 Σ REE 与北京 1998 沙尘的 177.93(叶玮等,2008)及西安 1998 沙尘的 197.08(曹军骥等,2001)相近,而明显低于北京 2006 沙尘沉降物的 231.65(张崧等,2008).与其他地区风尘物质的进一步对比可以发现,哈尔滨沙尘沉降物的 Σ REE、 Σ LREE 和 Σ HREE 值明显高于西北地区的中国黄土(Σ REE 为 159.21)(吴明清等,1991),略高于中国南方网纹红土(Σ REE 为 174.80)(朱丽东等,2007),而略低于镇江下蜀土(Σ REE 为 207.74)(李徐生等,2006).现代风尘物质的 Σ REE 值都要明显高于地质时期风尘物质黄土,而显著低于风尘潜在源区地表物质(<11 μm 粒级组分),这与风尘物质从粉尘源区到沉降区的传输过程中由于人类活动引起的稀土元素含量普遍增高的认识(曹军骥等,2001)不相符。

2.2 REE 分布模式

图 1 给出了沙尘沉降物及其潜在源区物质球粒陨石标准化后的稀土元素分布模式,可以看出,哈尔滨沙尘沉降物的稀土元素分布模式十分相似,均属轻稀土富集、右倾斜型 Eu 负异常的分布模式(图 1a).由于轻、重稀土元素的分馏,La-Eu 曲线较陡, Eu-Lu 曲线较缓,呈 LREE 相对 HREE 富集, Eu 较明显亏损(2011 年的 Eu 负异常不明显), Ce 弱负异常.与上陆壳(UCC)的稀土分布模式相比,曲线形态相似,彼此平行,但 REE 各分量高于 UCC,特别是 HREE 各分量显著高于 UCC,表现为沙尘沉降物的 REE 分布模式曲线位于 UCC 曲线之上.同一时期不同沙尘样品稀土元素的分布模式十分相似,说明沙尘沉降物在哈尔滨城区空间分布均一,局地环境对其影响较小;而不同时期沙尘样品具有相似的稀土元素分布模式,且与 UCC 稀土分布模式基本一致,表明哈尔滨沙尘源区较为稳定,来自上地壳不同源区的粉尘物质在风力搬运过程中高度混合。

与科尔沁沙地和松嫩沙地潜在源区相比(图 1b),沙尘沉降物与潜在源区物质的稀土元素分布

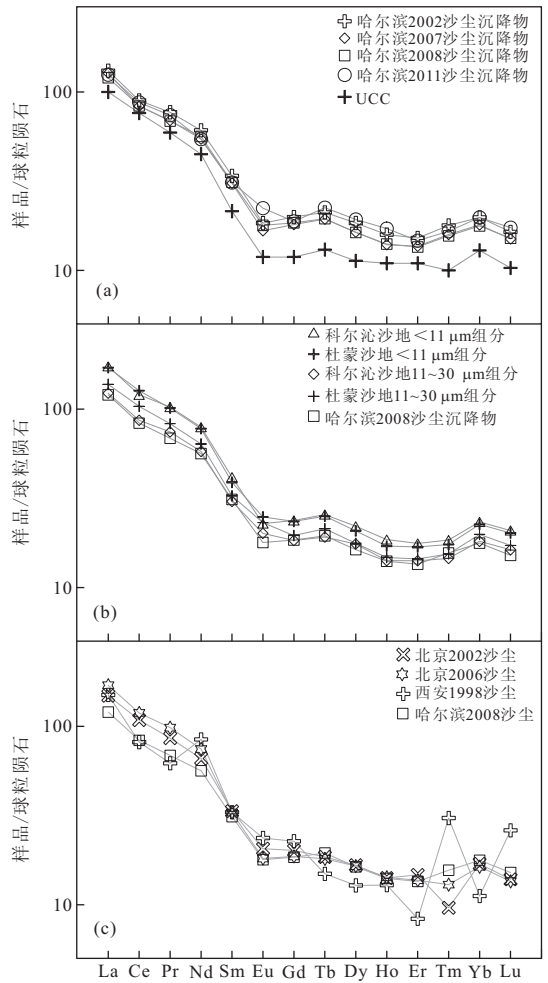


图 1 沙尘沉降物与潜在源区物质稀土元素分布模式

Fig.1 Chondrite-normalized REE distribution patterns for dust falls and materials in latent dust provenance

数据来源:北京 2002 沙尘和北京 2006 沙尘(Yang *et al.*, 2007),西安 1998 沙尘(曹军骥等,2001)

模式曲线形态相似,沙尘沉降物 REE 各分量与潜在源区的 11~30 μm 粒级组分 REE 各分量相近,特别是更接近于科尔沁沙地 11~30 μm 粒级组分的 REE 各分量,而低于潜在源区 <11 μm 粒级组分 REE 各分量.与其他地区的沙尘沉降物相比(图 1c),哈尔滨沙尘沉降物与北京沙尘的稀土分布模式有一定的相似性,但北京沙尘 Σ LREE 要高于哈尔滨沙尘,在分布模式上表现为北京沙尘的 La-Eu 曲线较陡,位于哈尔滨沙尘 La-Eu 曲线之上,而且北京沙尘 Tm 出现明显的负异常.与西安 1998 年沙尘的稀土分布模式有较大差别。

图 2 为经 UCC 标准化后沙尘沉降物与其他风尘物质的 REE 分布模式.经 UCC 标准化后,沙尘沉降物和中国黄土均呈稍微左倾斜较平坦直线型分布(图 2a),表明它们均与 UCC 的 REE 组成相似,

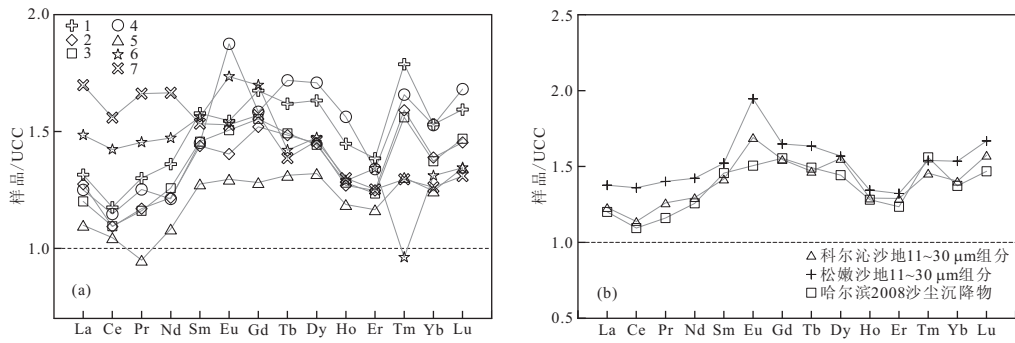


图 2 风尘物质及潜在源区物质 REE 的 UCC 标准化分布模式

Fig.2 UCC-normalized REE distribution patterns for dust falls and materials in latent dust provenance

1.哈尔滨 2002 沙尘;2.哈尔滨 2007 沙尘;3.哈尔滨 2008 沙尘;4.哈尔滨 2011 沙尘;5.中国黄土(吴明清等,1991);6.北京 2002 沙尘(Yang et al.,2007);7.北京 2006 沙尘(Yang et al.,2007)

表 2 哈尔滨沙尘沉降物与潜在源区物质稀土元素特征参数

Table 2 REE characteristic parameters for dust falls in Harbin and materials in latent dust provenance

样品	LR/HR	δCe	δEu	$(La/Yb)_N$	$(La/Sm)_N$	$(Gd/Yb)_N$	La/Ce	La/Nd	Ce/Nd	Sm/Nd	Eu/Sm	
2002 沙尘	7.65	0.89	0.71	6.64	3.89	1.00	0.52	1.12	2.13	0.20	0.19	
2007 沙尘	7.90	0.89	0.71	7.09	4.14	1.00	0.55	1.21	2.21	0.20	0.19	
2008 沙尘	7.83	0.92	0.75	6.76	3.85	1.04	0.51	1.10	2.14	0.20	0.20	
2011 沙尘	7.29	0.91	0.92	6.32	4.02	0.95	0.51	1.19	2.33	0.21	0.25	
松嫩沙地	<11 μm	8.97	0.97	0.85	7.48	4.39	1.02	0.48	1.14	2.38	0.18	0.23
	11~30 μm	8.57	0.97	0.96	6.90	4.22	0.98	0.47	1.12	2.37	0.19	0.26
科尔沁沙地	<11 μm	8.53	0.90	0.73	7.46	4.17	1.03	0.51	1.13	2.21	0.19	0.19
	11~30 μm	7.82	0.90	0.88	6.73	4.06	1.01	0.51	1.10	2.16	0.19	0.24

相对于 UCC, LREE 和 HREE 皆相对富集, 但 HREE 比 LREE 富集程度更为明显. 与北京沙尘沉降物相比, 北京沙尘为稍微右倾较平坦直线型分布, 表明相对于 UCC, LREE 比 HREE 更为富集. 沙尘沉降物的 UCC 标准化分布曲线与潜在源区形态基本相似, 且与科尔沁沙地接近而远离松嫩沙地(图 2b).

2.3 稀土元素特征参数

$\sum LREE/\sum HREE(LR/HR)$ 、 δCe 、 δEu 、 $(La/Yb)_N$ 、 $(La/Sm)_N$ 、 $(Gd/Yb)_N$ 、 Sm/Nd 、 Eu/Sm 、 La/Ce 、 La/Nd 、 Ce/Nd 等稀土元素特征参数反映了源区物质组成, 同时也受风化作用和成土作用等的影响. 表 2 给出了沙尘沉降物与潜在源区物质的 REE 特征参数. $\sum LREE/\sum HREE$ 和 $(La/Yb)_N$ 反映了轻、重稀土的分馏程度, 表 2 数据显示哈尔滨沙尘的轻、重稀土分馏程度与 11~30 μm 粒级组分的科尔沁沙地相近, 而明显低于松嫩沙地以及科尔沁沙地的 <11 μm 粒级组分. 沙尘中表征轻稀土元素间分馏程度的 $(La/Sm)_N$ 值与科尔沁沙地的 11~30 μm 粒级组分相近, 而明显小于松嫩沙地. 哈尔滨沙尘的

δCe 值在 0.89~0.92 之间, 平均值为 0.90, 显示为 Ce 弱负异常, 与科尔沁沙地相近, 而小于松嫩沙地. 2002 年沙尘、2007 年沙尘以及 2008 年沙尘的 δEu 特别稳定, 在 0.71~0.75 之间, 显示为 Eu 较明显亏损, 而 2011 年沙尘的 δEu 值为 0.92, 显示 Eu 负异常不明显. 哈尔滨沙尘 δEu 的均值为 0.77. 沙尘的 $(Gd/Yb)_N$ 、 Sm/Nd 、 Eu/Sm 、 La/Ce 、 La/Nd 、 Ce/Nd 等稀土元素特征参数与潜在源区物质相近.

3 讨论

3.1 REE 组成的影响因素

黄土研究表明, REE 含量在区域分布上的差异与黄土在空间分布上的粒度分带性相一致, 即自西北向东南, 随着黄土粒度由粗到细, 由砂黄土带过渡到黄土带再到粘黄土带, REE 含量有逐渐增加的趋势(吴明清等, 1991), 细颗粒有利于 REE 的富集. 其他的研究(李徐生等, 2006) 也认为, REE 含量的差异可能主要受控于粒度的分选, 并对此解释为粘土矿物吸附态是风化壳中稀土元素的主要存在形式

(马英军等, 2004), 沉积物中粘土矿物对 REE(尤其是 LREE)具有一定的吸附作用, 可以导致 REE 含量的明显增加(吴明清等, 1991; 马英军等, 2004). 从科尔沁沙地和松嫩沙地潜在源区物质不同粒级组分的 REE 分布来看(表 1, 图 1b), 11~30 μm 粒级组分中的 REE 含量要明显低于 <11 μm 粒级组分, 显示出沉积物中的 REE 含量随着粒度降低而增加分布规律. 以上结果印证了以下推论: 后太古代的沙和砂岩中的 ΣREE 含量要低于页岩(Taylor and McLennan, 1985), 由于页岩中粘土矿物是 REE 的主要携带者(Condie, 1991). 沉积物中的 ΣREE 含量随粒度的变化从沙尘沉降物到黄土、再到沙依次降低(Yang *et al.*, 2007).

对于沙尘沉降物自身而言, 2002 年沙尘沉降物的粒度较粗, 中值粒径为 29.50 μm (谢远云等, 2005; Xie *et al.*, 2006), 2007 年、2008 年和 2011 年沙尘沉降物的中值粒径分别为 15.00 μm 、13.50 μm 和 18.21 μm (未发表数据), 而 2002 年、2007 年、2008 年和 2011 年沙尘物质 ΣREE 含量分别为 189.67×10^{-6} 、 175.57×10^{-6} 、 174.68×10^{-6} 和 185.05×10^{-6} , 沙尘沉降物 ΣREE 含量表现出与其粒度呈正相关关系. 不仅仅是哈尔滨降尘, 北京沙尘 ΣREE 含量与其粒度也表现出正相关关系: 北京 2006 年降尘粗颗粒组分的 ΣREE (225×10^{-6}) 稍大于细颗粒组分中的含量(207×10^{-6})(张崧等, 2008). 进一步的对比发现, 北京 1998 年降尘的中值粒径为 7.6 μm (Sun *et al.*, 2000), 1999 年降尘为 1 月份非尘暴的降尘物质, 其粒度应较 1998 年尘暴过程的降尘颗粒更小, 2002 年与 2006 年降尘的中值粒径分别为 25.21 μm (王赞红和夏正楷, 2004) 和 27.1 μm (刘东生等, 2006), 而北京 1998 年、1999 年、2002 年和 2006 年降尘的 ΣREE 含量为 203.9×10^{-6} (Sun *et al.*, 2000)、 191.64×10^{-6} (李德成等, 2001)、 224.2×10^{-6} (Yang *et al.*, 2007) 和 231.7×10^{-6} (张崧等, 2008). 由此似乎可以认为, 沙尘沉降物 ΣREE 含量与其粒度存在一定的正相关关系, 而沙地表土物质等沉积物则相反. 当然, 这还需要更多的研究加以证实.

REE 含量还受风化成壤作用的影响, 风化成壤过程导致风化产物中 REE 富集, 且 REE 总量与成土年龄呈显著正相关, 是指示土壤发育程度的良好指标(黄成敏和龚子同, 2000). 图 3 显示了沙尘沉降物及潜在源区物质 REE 总量与表征沉积物化学风化程度的化学蚀变指数(CIA)的关系, 可以看出,

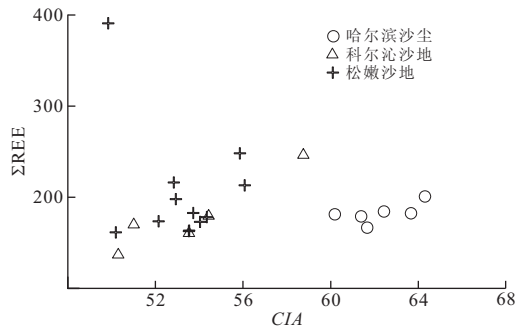


图 3 沙尘沉降物及潜在源区物质 ΣREE 与 CIA 的关系
Fig.3 ΣREE vs. CIA diagram for dust falls in Harbin and materials in latent dust provenance

ΣREE 与 CIA 之间并不存在显著的相关性, 显示风化作用不是控制沉积物 REE 分布的主要因素. 在风化作用过程中, 虽然化学性质极为一致的稀土元素通常作为一个整体活动, 但由于它们性质上的微小差异也会发生一定分馏, 这种分馏通常受环境条件的控制. 在岩石或沉积物风化过程中, 由于重稀土元素较轻稀土元素活泼, 重稀土更易在溶液中形成重碳酸盐和有机络合物, 优先被溶解迁移, 轻稀土则趋向于在风化产物中被粘土优先吸附而得以富集, 轻、重稀土元素发生分馏, 轻稀土相对富集, 重稀土亏损(Nesbitt, 1979). 随风化程度的增强, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 比值增大(王中刚等, 1990; 黄成敏和龚子同, 2000; 黄成敏和王成善, 2002; 马英军等, 2004). 但是与 ΣREE 一样, 沙尘沉降物和潜在源区物质的 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 比值与 CIA 之间也不存在显著的相关性. $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 比值还受粒度分选的影响(表 2), 表 2 显示 <11 μm 粒级组分的 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 比值要明显高于 11~30 μm 粒级组分, 说明细颗粒组分遭受了更明显的轻、重稀土分馏作用.

普遍认为风化成土过程中 Ce 有向正异常方向演化的趋势(Braun *et al.*, 1993), 被认为是成土过程中氧化环境变化所致(黄成敏和王成善, 2002). 在风化作用过程中, Ce^{3+} 容易被氧化为 Ce^{4+} 形成难溶的氢氧化物(Braun *et al.*, 1990), 并通过水解沉淀而与其他 REE 产生分离, 从而造成 Ce 在风化产物中相对富集, 形成正异常(Nesbitt, 1979; Braun *et al.*, 1990; 王中刚等, 1990). 同时, 在氧化环境中, 由于粘土矿物的吸附, 有利于 Ce 的富集(Marker and De Oliveira, 1990). 然而以下事实似乎又不支持以上观点: 沙尘沉降物中表征化学风化程度的 CIA 平均值为 62.28, 明显大于松嫩沙地(CIA 均值

52.32),而沙尘沉降物的 δCe (平均值 0.90)则小于松嫩沙地(δCe 均值 0.97);经历了较强化学风化过程的下蜀土表现出轻微的 Ce 负异常(δCe 为 0.95)(李徐生等,2006),而仅经历了较弱化学风化过程的黄土则表现为轻微的 Ce 正异常(δCe 为 1.08)(吴明清等,1991);洛川黄土与古土壤在稀土元素组成上最显著的区别是古土壤表现出明显的 Ce 负异常(δCe 为 0.65),而黄土则没有(δCe 为 0.90)(Gallet *et al.*,1996).

一般认为风化成土作用使 Eu 向负异常演化,这是 Eu^{3+} 还原成 Eu^{2+} 以后,与 Sr^{2+} 一起淋溶损失的结果, Eu 负异常的大小可能反映了土壤还原条件和淋溶程度的强弱(黄成敏和王成善,2002).然而,早先的研究认为,风化作用过程中既不会发生有选择性的 REE 淋失,也不会发生 REE 总体的显著淋失, Eu 异常继承于母岩,分选和风化作用不能改变或引起 Eu 异常,成岩作用也不能(Nesbitt,1979; Taylor and McLennan,1985;Condie,1991).从本次数据看, Eu 异常(δEu)与表征化学风化程度的 CIA 不存在显著的相关关系,但 δEu 明显受粒度的影响,随粒度变细, Eu 有向负异常演化的趋势(表 2).

3.2 沙尘沉降物的物源分析

中国黄土来自其上风向临近干旱区的沙漠起源说(Sun,2002;Li *et al.*,2007;Chen and Li,2011)及黄土物源的近源性(Li *et al.*,2007;Chen and Li,2011),研究结果显示东北黄土与科尔沁沙地和浑善达克沙地物质特征接近(Chen and Li,2011).现代风尘是地质历史时期风尘堆积的继续(刘东生,1985),因此有理由推测科尔沁沙地和松嫩沙地是东北平原中东部沙尘天气的潜在物源区(裘善文,2008).但一直缺乏数据支持.在风化、搬运、沉积和成岩过程中 REE 组成变化较小,其携带的物源区信息一般不会丢失,物源往往成为控制沉积物 REE 组成的最主要因素,因而可用 REE 追踪沉积物物源(Nesbitt,1979; Taylor and McLennan,1985; Nesbitt *et al.*,1990; Condie,1991;Nesbitt *et al.*,1996).REE 含量(表 1)、分布模式(图 1,图 2)和特征参数(表 2)等显示哈尔滨沙尘沉降物的 REE 组成与科尔沁沙地的 11~30 μm 粒级组分接近,这在一定程度上反映了科尔沁沙地对沙尘沉降物的物质贡献.

在稀土元素各特征参数中, Eu 异常主要是由于在环境温度较高(大于 200 $^{\circ}\text{C}$)和低氧化还原电位(还原条件)的内生条件下,部分 Eu^{3+} 可还原为 Eu^{2+} ,出现了 Eu 异常(Cullers *et al.*,1987),而在表

生条件下 Eu 以 Eu^{3+} 价存在,这时的性质与其他 REEs³⁺ 类似,共同迁移,不会产生异常.因此在表生沉积环境下,沉积物在迁移和沉积过程中 Eu 异常的变化很小,沉积区沉积物的 Eu 异常主要继承了源区母岩的特征,不同母岩类型由于不同成岩过程 δEu 表现为不同的异常状况(Gallet *et al.*,1996). REE 含量及 LREE/HREE 比值主要与源区物质组成和气候条件等密切相关(Yang *et al.*,2002).因此,可以综合运用 $\delta\text{Eu}-\Sigma\text{REEs}$ 关系图(蒋富清等,2008)或 $\delta\text{Eu}-(\text{LREE}/\text{HREE})$ 关系图进行物源解析.图 4 显示了沙尘沉降物与潜在源区物质的 $\delta\text{Eu}-\Sigma\text{REEs}$ 及 $\delta\text{Eu}-(\text{LREE}/\text{HREE})$ 相关图解,可以看出,除了个别数据点外,科尔沁沙地和松嫩沙地绝大部分数据都分布在各自不同的区域,而沙尘沉降物落在科尔沁沙地样品的分布区域.进一步的观察发现,2002 年、2007 年和 2008 年沙尘沉降物的数据点都集中分布在科尔沁沙地区域而远离松嫩沙地,说明它们的物质来源比较一致,都来自科尔沁沙地.而对于 2011 年沙尘沉降物,在 $\delta\text{Eu}-\Sigma\text{REEs}$ 图解中,其数据点落在科尔沁沙地与松嫩沙地之间的交接区域,而在 $\delta\text{Eu}-(\text{LREE}/\text{HREE})$ 图解中,数据点落在科尔沁沙地区域. LREE/HREE 比值在反映源区物质组成和气候信息方面要优于 REE 含量(Gallet *et al.*,1996),而且从 $\delta\text{Eu}-\Sigma\text{REEs}$ 和 $\delta\text{Eu}-(\text{LREE}/\text{HREE})$ 图解中科尔沁沙地和松嫩沙地两块区域所含的重叠数据点来看(图 4), $\delta\text{Eu}-\Sigma\text{REEs}$ 图解中两块区域所含的重叠数据点略多于 $\delta\text{Eu}-(\text{LREE}/\text{HREE})$ 图解,显示 $\delta\text{Eu}-(\text{LREE}/\text{HREE})$ 图解在区分松嫩沙地与科尔沁沙地物质方面要优于 $\delta\text{Eu}-\Sigma\text{REEs}$ 图解.因此认为 2011 年沙尘沉降物的 REEs 特征更接近于科尔沁沙地,其物源是科尔沁沙地.

$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 反映了 REE 球粒陨石标准化分布曲线的倾斜程度,采用 La 和 Yb 进行计算是由于它们分别代表了 LREE 和 HREE,而 La_{N} 则代表了 REE 球粒陨石标准化分布曲线中 LREE 的起点.因此有研究用 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}-\text{La}_{\text{N}}$ 图解来进行物源解析(Gallet *et al.*,1996; Yang *et al.*,2007),但具体到本研究发现效果不理想,其理由为:松嫩沙地的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 在 6.35~9.13 之间,平均为 7.48,科尔沁沙地的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 在 6.07~8.71 之间,平均为 7.46,两者的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 几乎相近且变化范围绝大部分重合.而对 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}-\text{La}_{\text{N}}$ 图解改进后的 $(\text{LREE}/\text{HREE})-\text{La}_{\text{N}}$ 图解则较好地解析了哈尔滨沙尘物源.图 5 给出了沙尘沉降物与科尔沁沙地和松嫩沙地的 $(\text{LREE}/\text{HREE})-\text{La}_{\text{N}}$

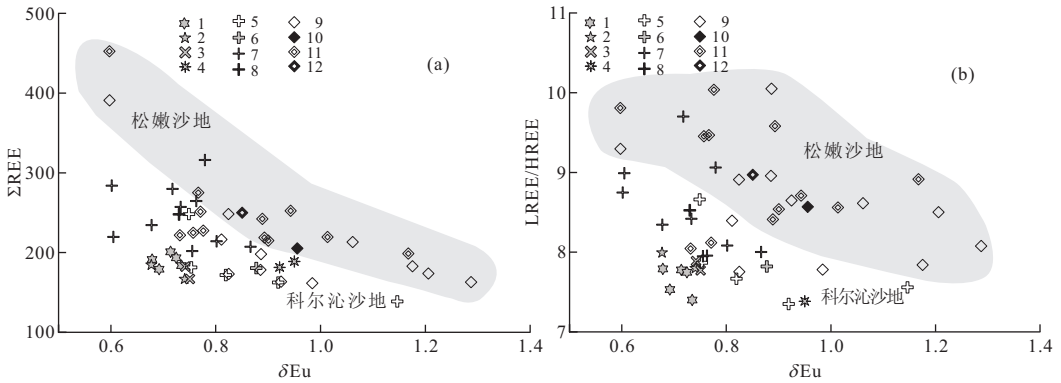


图 4 沙尘沉降物与潜在源区物质 $\delta\text{Eu}-\Sigma\text{REEs}$ 和 $\delta\text{Eu}-(\text{LREE}/\text{HREE})$ 关系图解

Fig.4 δEu vs. ΣREEs and δEu vs. $(\text{LREE}/\text{HREE})$ diagram for dust falls in Harbin and materials in latent dust provenance

1.哈 2002 沙尘;2.哈 2007 沙尘;3.哈 2008 沙尘;4.哈 2011 沙尘;5.科尔沁沙地 11~30 μm 粒径组分;6.科尔沁沙地 11~30 μm 组分均值;7.科尔沁沙地 <11 μm 组分;8.科尔沁沙地 <11 μm 组分均值;9.松嫩沙地 11~30 μm 粒径组分;10.松嫩沙地 11~30 μm 组分均值;11.松嫩沙地 <11 μm 组分;12.松嫩沙地 <11 μm 组分均值

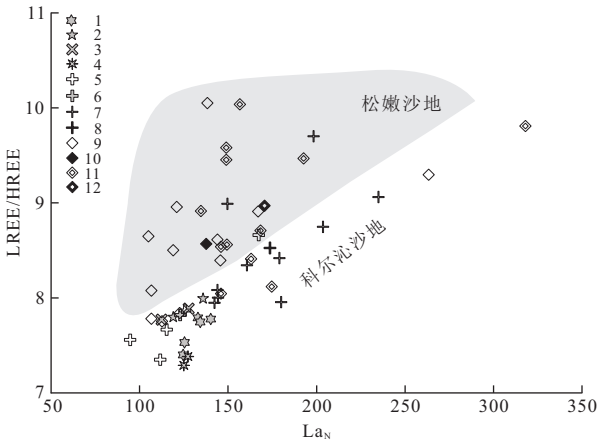


图 5 沙尘沉降物与潜在源区物质 $(\text{LREE}/\text{HREE})-\text{La}_N$ 关系图解(图例同图 4)

Fig.5 $(\text{LREE}/\text{HREE})$ vs. La_N diagram for dust falls in Harbin and materials in latent dust provenance

关系图解,可以看出科尔沁沙地和松嫩沙地的数据点分别集中在各自的区域,而沙尘沉降物的数据点落在科尔沁沙地区域,显示出沙尘沉降物与科尔沁沙地而非松嫩沙地在物质组成上的相似性.进一步观察发现,在科尔沁沙地数据区域,沙尘沉降物的数据点更接近于科尔沁沙地的 11~30 μm 粒径组分,显示科尔沁沙地对哈尔滨沙尘的物质贡献主要集中在 11~30 μm 粒径组分.

REE 数据显示的哈尔滨沙尘起源于科尔沁沙地的研究结果也得到气象资料和气象记录的支持.哈尔滨沙尘天气的发生高度集中在春季,而春季的主导风主要有偏南风(西南大风)、西北风和东风(张丽娟等,2005),全年主导风向为西南方(张丽娟等,

2002).因此可以推断引起哈尔滨沙尘天气的物源地有:西南风的科尔沁沙地、西北风的呼伦贝尔沙地和松嫩沙地,东风的近距离沙源地为哈尔滨周边地区.东风方向无远距离沙源地,由东风引起的沙尘天气出现的次数最少(占 3.2%)(张丽娟等,2005).如此,对哈尔滨沙尘天气有远距离贡献的沙源地仅限于西北方向的呼伦贝尔沙地和松嫩沙地以及西南方向的科尔沁沙地.风向为西北风的沙尘天气所占比例较低(占 11.1%)(张丽娟等,2005),且呼伦贝尔沙地由于大兴安岭的阻隔以及缺乏大风的通道难以进入黑龙江省,同时 REE 地球化学数据也不支持西北方向的松嫩沙地对哈尔滨沙尘的贡献.而科尔沁沙地位于哈尔滨西南方向,三山的开口处,随风进入方便,且面积广阔,可为哈尔滨沙尘天气的发生提供丰富的物质来源,因此西南风是引起哈尔滨沙尘天气主要风向的重要原因(沙尘天气发生时的风向为西南风的占 85.7%)(张丽娟等,2005).2002 年 3 月 20 日哈尔滨沙尘天气的高空气流源自内蒙东部地区(张丽娟等,2007),2011 年 5 月 12 日哈尔滨沙尘天气是由于内蒙古沙尘暴天气在西南气流的输送下,沙尘先后途经辽宁中西部和吉林中西部飘浮到达哈尔滨.这些气象资料和气象记录都显示了内蒙古东部沙地为哈尔滨沙尘天气的初始源地,而 REE 组成为哈尔滨沙尘的科尔沁沙地起源提供了地球化学数据支持.

4 结论

(1) 哈尔滨 2002 年沙尘物质的 ΣREE 为

189.67×10^{-6} , 2007 年为 175.57×10^{-6} , 2008 年为 174.68×10^{-6} , 2011 年为 181.35×10^{-6} . 沙尘沉降物的 REE 分量和 Σ REE 以及 Σ LREE、 Σ HREE 均集中分布在一个很窄的范围, 显示哈尔滨沙尘来源的稳定性。

(2) 沙尘沉降物的稀土元素分布模式十分相似, 呈 LREE 相对 HREE 富集, Eu 较明显亏损(2011 年的 Eu 负异常不明显), Ce 弱负异常。2002 年、2007 年以及 2008 年沙尘的 δ Eu 特别稳定, 在 0.71~0.75 之间, 2011 年沙尘的 δ Eu 值为 0.92; δ Ce 值在 0.89~0.92 之间, 平均值为 0.90。

(3) 科尔沁沙地和松嫩沙地物质的 REE 含量存在随粒度降低而增加分布规律, 而沙尘沉降物则相反; Σ LREE/ Σ HREE 比值和 δ Eu 等特征参数明显受粒度分选的影响, 细颗粒组分的 Σ LREE/ Σ HREE 比值要明显高于粗颗粒组分, δ Eu 有随粒度变细而减小的趋势。

(4) REE 含量、分布模式、特征参数以及 δ Eu- Σ REEs、 δ Eu-(LREE/HREE) 和 (LREE/HREE)- La_N 关系图解均显示哈尔滨沙尘沉降物的 REE 组成与科尔沁沙地(特别是 11~30 μ m 粒级组分)十分接近, 显示哈尔滨沙尘起源于科尔沁沙地而非松嫩沙地。这一点得到气象资料和气象记录的支持。科尔沁沙地对哈尔滨沙尘的物质贡献主要体现在 11~30 μ m 粒级组分。

致谢: 样品测试得到核工业北京地质研究院分析测试研究中心的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, 在此一并表示感谢。

References

Braun, J. J., Pagel, M., Herbilon, A., et al., 1993. Mobilization and Redistribution of REEs and Thorium in a Syenitic Lateritic Profile: A Mass Balance Study. *Geochim Cosmochim Acta*, 57(18): 4419-4434. doi: 10.1016/0016-7037(93)90492-F

Braun, J. J., Pagel, M., Muller, J. P., et al., 1990. Cerium Anomalites in Lateritic Profiles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(3): 781-795. doi: 10.1016/0016-7037(90)90373-S

Cao, J. J., Zhang, X. Y., Wang, D., et al., 2001. REE Geochemistry of Late Cenozoic Eolian Sediments and the Paleoclimate Significance. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 21(1): 97-101 (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

Condie, K. C., 1991. Another Look at Rare Earth Elements in Shales. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(9): 2527-2531. doi: 10.1016/0016-7037(91)90370-K

Cullers, R. L., Barrett, T., Carlson, R., et al., 1987. Rare-Earth Element and Mineralogical Changes in Holocene Soil and Stream Sediment: A Case Study in the Wet Mountains, Colorado, USA. *Chemical Geology*, 63(3-4): 275-297. doi: 10.1016/0009-2541(87)90167-7

Gallet, S., Jahn, B., Torii, M., 1996. Geochemical Characterization of the Luochuan Loess-Paleosol Sequence, China, and Paleoclimatic Implications. *Chemical Geology*, 133(1-4): 67-88. doi: 10.1016/S0009-2541(96)00070-8

Huang, C. M., Gong, Z. T., 2000. Geochemical Implication of Rare Earth Elements in Process of Soil Development. *Journal of the Chinese Rare Earths Society*, 18(2): 150-155 (in Chinese with English abstract).

Huang, C. M., Wang, C. S., 2002. Geochemical Features of Rare Earth Elements in Process of Rock Weathering and Soil Formation. *Chinese Rare Earths*, 23(5): 46-49 (in Chinese with English abstract).

Jiang, F. Q., Zhou, X. J., Li, A. C., et al., 2008. Quantitatively Distinguishing Sediments from the Yangtze River and the Yellow River Using δ Eu_N- Σ REEs Plot. *Science in China (Series D)*, 38(11): 1460-1468 (in Chinese).

Li, D. C., Wang, D. H., Peng, A., 2001. Preliminary Estimates of the Distribution and Source of REEs in Dustfall and Rain in Northwest Skirt Beijing. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 21(5): 640-642 (in Chinese with English abstract).

Li, G. J., Chen, J., Ji, J. F., et al., 2007. Global Cooling Forced Increase in Marine Strontium Isotopic Ratios: Importance of Mica Weathering and a Kinetic Approach. *Earth Planet Science Letters*, 254(3-4): 303-312. doi: 10.1016/j.epsl.2006.11.045

Li, X. S., Han, Z. Y., Yang, D. Y., et al., 2006. REE Geochemistry of Xiashu Loess in Zhenjiang, Jiangsu Province. *Acta Pedologica Sinica*, 43(1): 1-7 (in Chinese with English abstract).

Liu, D. S., 1985. *Loess and Environments*. Science Press, Beijing (in Chinese).

Liu, D. S., Han, J. M., Zhang, D. E., et al., 2006. Falling Dust and Deposits in Anthropogene—I: Preliminary Analysis of the Dust Fall in Beijing on April 16-17, 2006. *Quaternary Sciences*, 26(4): 628-633 (in Chinese with English abstract).

- Ma, Y. J., Huo, R. K., Xu, Z. F., et al., 2004. REE Behavior and Influence Factors during Chemical Weathering. *Advance in Earth Sciences*, 19(1): 87–94 (in Chinese with English abstract).
- Marker, A., De Oliveira, J. J., 1990. The Formation of Rare Earth Element Scavenger Minerals in Weathering Products Derived from Alkaline Rocks of SE-Bahia, Brazil. *Chemical Geology*, 84(1–4): 373–374.
- Nesbitt, H. W., 1979. Mobility and Fractionation of Rare Earth Elements during Weathering of a Granodiorite. *Nature*, 279: 206–210. doi: 10.1038/279206a0
- Nesbitt, H. W., MacRae, N. D., Kronberg, B. I., 1990. Amazon Deep-Sea Fan Muds: Light REE Enriched Products of Extreme Chemical Weathering. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 100(1–3): 118–123. doi: 10.1016/0012-821X(90)90180-6
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1996. Petrogenesis of Sediments in the Absence of Chemical Weathering: Effects of Abrasion and Sorting on Bulk Composition and Mineralogy. *Sedimentology*, 43(2): 341–358. doi: 10.1046/j.1365-3091.1996.d01-12.x
- Qiu, S. W., 2008. Sandy Land and Desertification in West of Northeast China. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Sun, J. M., 2002. Source Regions and Formation of the Loess Sediments on the High Mountain Regions of Northwestern China. *Quaternary Research*, 58(3): 341–351. doi: 10.1006/qres.2002.2381
- Sun, J. M., Liu, T. S., Lei, Z. F., 2000. Sources of Heavy Dust Fall in Beijing, China on April 16, 1998. *Geophysical Research Letters*, 27(14): 2105–2108. doi: 10.1029/1999GL010814
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell, London.
- Wang, Z. G., Yu, X. Y., Zhao, Z. H., et al., 1990. Geochemistry of Rare Earth Elements. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Wang, Z. H., Xia, Z. K., 2004. Dust Flux and Particle Size of Dustfall of the Duststorm on March 20–21, 2002 in Beijing. *Quaternary Sciences*, 24(1): 95–99 (in Chinese with English abstract).
- Wu, M. Q., Wen, Q. Z., Pan, J. Y., et al., 1991. Rare Earth Elements in the Malan Loess from the Middle Reaches of the Huang He River. *Chinese Science Bulletin*, 36(5): 366–369 (in Chinese).
- Xie, Y. Y., He, K., Kang, C. G., 2005. Grain-Size Distribution of Fall-Outs of an Exceedingly Large Dust Storm in Harbin City and Its Implications. *Geology in China*, 32(3): 502–506 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Y. Y., He, K., Zhou, J., et al., 2006. Chemical Characteristic of Duststorm Deposits in Harbin and Its Matter Origin. *Geographical Research*, 25(2): 255–261 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Y. Y., Zhang, Y., He, K., et al., 2006. Features of Sand-Dust Deposits in Harbin City, China. *Chinese Geographical Science*, 16(4): 327–333. doi: 10.1007/s11769-006-0327-4
- Yang, S. Y., Jung, H. S., Choi, M. S., et al., 2002. The Rare Earth Element Compositions of the Changjiang (Yangtze) and Huanghe (Yellow) River Sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 201(2): 407–419. doi: 10.1016/S0012-821X(02)00715-X
- Yang, X. P., Liu, Y. S., Li, C. Z., et al., 2007. Rare Earth Elements of Aeolian Deposits in Northern China and Their Implications for Determining the Provenance of Dust Storms in Beijing. *Geomorphology*, 87(4): 365–377. doi: 10.1016/j.geomorph.2006.10.004
- Ye, W., Yang, L. H., Zhu, L. D., et al., 2008. Characteristics and Origin of Rare Earth Elements of Vermicular Red Earth in Middle Sub-Tropic Zone. *Scientia Geographica Sinica*, 28(1): 40–44 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. J., Zhang, D. Y., Xie, Y. Y., et al., 2007. Research on the Sand-Dust Sources of Harbin City. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 21(2): 138–141 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. J., Zheng, H., Hua, D. Z., et al., 2002. Analysis of Occurrence of Sand-Dust Weather and Environmental Factors in Heilongjiang Province. *Agro-Environmental Protection*, 21(6): 556–558 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. J., Zheng, H., Zhou, J., et al., 2005. Occurrence and Cause of Dust-Storm in Harbin. *Journal of Natural Disasters*, 14(2): 41–46 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S., Liu, P., Jin, C. S., et al., 2008. Geochemistry of the Heavy Dust Fall on 17 April 2006 in Beijing. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 28(3): 35–42 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, L. D., Zhou, S. W., Ye, W., et al., 2007. Preliminary Study on Geochemical Behavior of Rare Earth Element of Plinthitic Red Earth in South China. *Journal of Desert Research*, 27(2): 194–200 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

曹军骥, 张小曳, 王丹, 等, 2001. 晚新生代风尘沉积的稀土元

- 素地球化学特征及其古气候意义.海洋地质与第四纪地质,21(1):97-101.
- 黄成敏,龚子同,2000.土壤发育过程中稀土元素的地球化学指示意义.中国稀土学报,18(2):150-155.
- 黄成敏,王成善,2002.风化成土过程中稀土元素地球化学特征.稀土,23(5):46-49.
- 蒋富清,周晓静,李安春,等,2008. $\delta\text{Eu/N}-\Sigma\text{REEs}$ 图解定量区分长江和黄河沉积物.中国科学(D辑),38(11):1460-1468.
- 李德成,王东红,彭安,2001.北京西北郊降尘和降雨中稀土元素的浓度分布和来源的初步分析.环境科学学报,21(5):640-642.
- 李徐生,韩志勇,杨达源,等,2006.镇江下蜀黄土的稀土元素地球化学特征研究.土壤学报,43(1):1-7.
- 刘东生,1985.黄土与环境.北京:科学出版社.
- 刘东生,韩家懋,张德二,等,2006.降尘与人类世沉积——I:北京2006年4月16-17日降尘初步分析.第四纪研究,26(4):628-633.
- 马英军,霍润科,徐志方,等,2004.化学风化作用中的稀土元素行为及其影响因素.地球科学进展,19(1):87-94.
- 裘善文,2008.中国东北西部沙地与沙漠化.北京:科学出版社.
- 王赞红,夏正楷,2004.北京2002年3月20-21日尘暴过程的降尘量与降尘粒度特征.第四纪研究,24(1):95-99.
- 王中刚,于学元,赵振华,等,1990.稀土元素地球化学.北京:科学出版社.
- 吴明清,文启忠,潘景瑜,等,1991.黄河中游地区马兰黄土的稀土元素.科学通报,36(5):366-369.
- 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.中国地质,32(3):502-506.
- 谢远云,何葵,周嘉,等,2006.哈尔滨沙尘暴的化学特征及其物质源探讨.地理研究,25(2):255-261.
- 叶玮,杨立辉,朱丽东,等,2008.中亚热带网纹红土的稀土元素特征与成因分析.地理科学,28(1):40-44.
- 张丽娟,张冬有,谢远云,等,2007.哈尔滨沙尘天气的源地分析.干旱区资源与环境,21(2):138-140.
- 张丽娟,郑红,华德尊,等,2002.黑龙江省沙尘天气发生规律及环境因子分析.农业环境保护,21(6):556-558.
- 张丽娟,郑红,周嘉,等,2005.哈尔滨市沙尘暴发生规律与成因分析.自然灾害学报,14(2):41-46.
- 张崧,刘平,靳春胜,等,2008.2006年4月17日北京特大降尘的地球化学特征.海洋地质与第四纪地质,28(3):35-42.
- 朱丽东,周尚哲,叶玮,等,2007.网纹红土稀土元素地球化学特征的初步研究.中国沙漠,27(2):194-200.