

中国源区粉尘的元素示踪*

张小曳^{①③} 张光宇^① 朱光华^② 张德二^③

安芷生^① 陈 拓^① 黄湘萍^①

(^① 中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710054; ^② 北京师范大学低能核物理研究所, 北京 100875;

^③ 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081)

摘要 中国北方沙漠 12 个地点大气气溶胶粒子中 10 种粉尘元素的浓度 - 粒度分布显示, 沙漠粉尘是黄土高原风成黄土的源物质, 粉尘在间冰期气候条件下的传输受控于正常的大气搬运过程, 冰期黄土的堆积过程中尘暴的影响明显增强. 基于 4 种粉尘元素 (Al, Fe, Mg, Sc) 的组配特征, 发现中国粉尘的主要源区 - 中国北方沙漠存在 3 个可统计分辨的区域, 即西北部沙漠、北部沙漠高粉尘区和北部沙漠低粉尘区. 应用化学平衡模式, 建立了中国源区粉尘的元素示踪系统.

关键词 中国沙漠 矿物粉尘 大气微量元素 元素示踪

大气矿物粉尘作为一种化学稳定的大气成分, 为研究与之联系的区域和全球尺度的大气运动提供了良好的对象. 源于中国干旱和半干旱区的粉尘, 是北半球中纬地带 ($25^{\circ} \sim 40^{\circ}$) 大气的重要组分^[1, 2]. 但此笼统的源区概念, 包括了类似黄土高原这样的粉尘再搬运区. 所谓“中国粉尘”的起始源地被许多研究更准确判定为是中国北方的沙漠和沙地. 例如: 刘东生和卢演涛等, 较早提出了黄土堆积源于中国沙漠贡献的论点^[3, 4]; 张德二通过历史时期中国降尘的天气气候学分析, 指出中国降尘来自沙漠, 而不是黄土高原^[5]; 张小曳等通过对“近源”中国沙漠与“远源”高空西风粉尘的元素示踪分析, 证明晚第四纪以来输入黄土高原的粉尘其源地主要是中国沙漠^[6].

本文拟在中国北方主要沙漠大气气溶胶粒子的元素化学及其粒度分析基础上, 判明“中国粉尘”源地——北方沙漠是否仍存在可分辨的不同区域, 调查其分布状况, 建立中国源区粉尘的元素示踪系统.

1 实验与分析

1994 年 4 ~ 6 月的高粉尘季节, 使用单孔巴妥耳型分级撞击式采样器 (国际质子激发 X 荧光公司, 佛罗里达, 美国), 在中国北方主要沙漠的 12 个地点采集了距地表 10 m、分 8 级气

1995-12-19 收稿, 1996-03-01 收修改稿

* 国家自然科学基金重大基金、中国科学院沙漠研究所沙坡头沙漠研究实验站基金和中国气象局气候研究开放实验室基金资助项目

溶胶样品共 120 组 960 件, 其中包括 9 组尘暴样品. 采样时间为 5 ~ 10 h, 流量约 $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. 所得粒子 8 个粒级直径 (μm) 分别为: <0.25 , $0.25 \sim 0.50$, $0.50 \sim 1$, $1 \sim 2$, $2 \sim 4$, $4 \sim 8$, $8 \sim 16$ 和 >16 . 采样点见图 1.

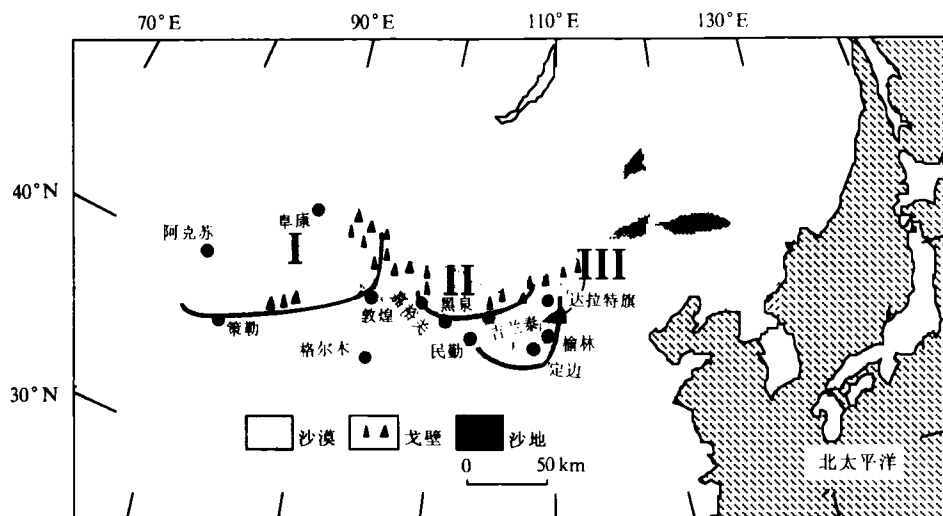


图 1 气溶胶采样位置“●”与中国粉尘源区分布示意图

I. 西北部沙漠, II. 北部沙漠高粉尘区, III. 北部沙漠低粉尘区

此外, 还于 1984 年 3 月 14 ~ 15 日、4 月 19 ~ 20 日、4 月 25 ~ 26 日在兰州¹⁾, 1990 年 4 月 24 ~ 26 日在北京采集了 4 次尘暴过程的降尘样品.

采用质子激发 X 荧光法 (PIXE) 直接测定沙漠气溶胶中 10 种元素的质量浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$). 它们包括: Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Sc, Si, Sr 和 Ti. 测定在北京师范大学低能核物理研究所 $2 \times 1.7 \text{ MV}$ 串列式加速器上进行, 束流 50 nA, 质子能量 2.5 MeV. 元素浓度的测定结果, 经国家黄土标准参考物质 GSS-8^[7] 总计 20 个平行样品精密度 (变异系数 $<10\%$) 及准确度 (变异系数 $<20\%$) 验证, 表明此分析结果良好.

尘暴降尘样品采用等离子体电感耦合-质谱测定其中 Al, Fe, Mg, Sc 的含量, 测定过程详见文献[6].

2 结果与讨论

2.1 大气微量元素的来源及浓度

表 1 和表 2 列出了非尘暴及尘暴期间中国北方主要沙漠气溶胶样品中 10 种元素的整体浓度. 计算包括尘暴与非尘暴数据的每种元素平均浓度相对地壳物质的富集因子 ($EF_{\text{地壳}} = (X/\text{Si})_{\text{大气}} / (X/\text{Si})_{\text{地壳}}$, X 是某元素浓度, Si 为参比元素), 以评价沙漠大气中微量元素与地壳岩石平均含量的关系^[8], 结果表明不同沙漠样品上空 10 种元素的含量均类似于地壳岩石, 因为它们的 $EF_{\text{地壳}}$ 值均接近于 1; Mn, Ca 比地壳平均值稍高但均小于 5 (数据略), 表明这些元素由矿物粉尘携带.

1) 样品由兰州中心气象台李尚诚同志提供

表1 1994年4~6月非尘暴期间中国沙漠大气气溶胶中元素总和浓度(8级之和)算术平均值

	塔克拉玛干沙漠 阿克苏 (n=9)	策勒 (n=9)	古尔班通古特沙漠 早康 (n=15)	库木塔格沙漠 敦煌 (n=7)	巴丹吉林沙漠 嘉峪关 (n=6)	乌兰布和沙漠 吉兰泰 (n=6)	库布齐沙漠 达拉特旗 (n=8)	毛乌苏沙漠 榆林 (n=10)	腾格里沙漠 民勤 (n=9)	柴达木盆地 格尔木 (n=15)
Al	23	30	13	20	18	20	17	25	16	15
Ca	51	74	22	32	35	34	28	37	22	27
Fe	22	35	6.2	14	11	15	9.1	12	5.7	9.7
K	13	20	5.6	8.8	5.7	9.8	6.1	8.4	4.6	6.1
Mg	6.7	6.9	5.0	4.0	5.0	7.0	4.6	7.2	4.2	4.7
Mn	0.78	1.1	0.41	0.67	0.67	0.77	0.56	0.88	0.47	0.45
Sc	6.0	7.7	4.2	4.9	5.8	6.8	5.7	8.8	5.5	4.3
Si	110	140	46	72	54	92	61	88	46	57
Sr	110	93	62	47	110	110	95	120	81	82
Ti	2.7	38	1.3	2.0	1.6	2.5	1.7	2.6	1.4	1.5

表2 中国沙漠尘暴气溶胶整体样品(8级之和)中元素浓度

	策勒32# 1994-05-24	策勒35# 1994-05-24	策勒40# 1994-05-25	策勒39# 1994-05-25	阿克苏51# 1994-05-31	阿克苏52# 1994-05-31	阿克苏48# 1994-05-31	嘉峪关 1994-5-01	吉兰泰 1994-05-15
Al	55	38	64	41	40	28	76	20	30
Ca	160	120	210	140	110	77	200	39	73
Fe	78	59	100	67	43	36	120	13	48
K	43	32	54	35	25	20	60	7.4	30
Mg	4.2	2.1	4.6	4.0	5.2	4.9	12	8.9	3.8
Mn	2.2	1.8	3.3	2.0	1.4	1.2	3.2	0.66	1.7
Sc	15	11	19	12	12	7.7	16	5.9	11
Si	310	240	380	240	210	150	420	71	170
Sr	0.36	0.18	0.15	0.19	0.20	0.06	0.09	0.05	0.23
Ti	8.1	6.3	11	6.8	5.2	4	11	1.9	6.2

中国沙漠 Ca 的浓度高于地壳平均值 3.2 倍; 通过比较中国南方和北方 8 类主要地表土中 Ca 的含量^[7], 发现只有黄土高原中部黄土中 Ca 的含量高于地壳平均含量^[7]1.4 倍, 作者认为这显示出风成黄土上不仅是大气矿物粉尘的堆积物^[9], 且粉尘源于中国沙漠。

尽管尘暴期间各粉尘元素含量(表 2)均高于非尘暴期间(表 1), 但每种地壳元素的最高值并不一定出现在同一尘暴样品中, 暗示出中国沙漠粉尘的元素组配在不同沙漠可能有所差异。

10 种粉尘元素中 Si 的含量最高。在策勒 Si 最高达 $380 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 在阿克苏达 $420 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (表 2)。分别平均尘暴与非尘暴期间各样点所有样品中, 这 10 种典型粉尘元素浓度并求其总和。在策勒和阿克苏此数据分别达到 $410 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $310 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 表明塔克拉玛干沙漠上空是本文所涉及的沙漠粉尘含量最高的区域。而粉尘含量最小值出现在古尔班通古特沙漠南缘阜康 ($100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 和柴达木盆地样点格尔木 ($120 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 它们甚至低于黄土高原南缘的含量^[10]。作者不将此两沙漠视为有效源区, 并在示踪系统中排除相应数据(见后)。

2.2 粉尘元素 Al 的浓度 - 粒度分布 (MSD)

粉尘气溶胶粒子的粒度分布可视为 3 种方式的组合, 每个以对数正态分布为特征, 对应于不同程度的风蚀过程, 相应粒径(直径, μm)是 20 ~ 200(中强程度的粉尘悬浮), 2 ~ 20(一般程度的粉尘悬浮)和 0.04 ~ 1(本底粉尘), 并被分别定义作方式 A, B 和 C^[11]。下文我们

表 3 中国沙漠尘暴与非尘暴粉尘与黄土高原中部黄土, 古土壤在 3 个粒级段上含量频率分布重数值对比

	重数值 / %		
	>20 μm	2 ~ 20 μm	<1 μm
非尘暴粉尘, 中国沙漠 ($n=112$)	6.5	58	33
S1 古土壤, 洛川 ^[9] ($n=22$)	7.8	57	34
尘暴粉尘, 中国沙漠 ($n=9$)	22	54	22
L1 黄土, 洛川 ($n=39$)	30	47	24

沿用这种命名。气溶胶粒子按撞击效率曲线沉降在分级撞击采样器的每一级上, 作为粉尘携带的元素, Al 的 MSD 被认为具有连续的粒度相分布。对其分级数据的对数正态分布拟合显示(方法详见文献[10, 11]), 在 120 条 MSD 曲线拟合中, 回归系数的标准误差均小于 20%, 拟合标准偏差均不大于 2, 拟合曲线

相关系数的置信度均满足 $P < 0.05$, 绝大多数 $P < 0.02$ 。上述结果表明, 对沙漠粉尘完整 MSD 的拟合全部成功。依据拟合的 MSD, 作者计算了方式 A, B 和 C 上粉尘粒子占总量的百分比, 并分别统计了尘暴与非尘暴期间所有样品中 3 个方式上粒子含量的频率分布, 并与黄土高原中部洛川末次冰期旋回的黄土, 古土壤进行了对比(表 3)。

非尘暴期间的沙漠粉尘在 3 个粒子段中含量分布的重数值与末次间冰期古土壤, 以及沙漠尘暴粉尘与末次冰期黄土的相似性再次表明, 沙漠粉尘是黄土高原风成黄土的源物质, 且粉尘在间冰期气候条件下的传输取决于正常的大气搬运过程, 冰期黄土的堆积过程中尘暴的影响明显增强。

2.3 元素示踪系统

为定量解析出混合气溶胶粒子中不同来源的贡献程度, 可通过化学元素平衡模式 (CEB) 实现。它的实质是在接收区与源区元素特征之间作加权多项线性回归^[12]: $C_i = \sum_{j=1}^p X_{ij} S_j$, 其中 C_i 是样品中 i 元素的浓度, X_{ij} 是 i 元素在第 j 个源区特征中的相应数据, S_j 是第 j 个源区特征的系数或称源区强度, p 为源区的数量。第 j 个源区对 i 元素的贡献是 X_{ij} 同 S_j 的乘积。

约定只取大于零的 S_j 值进行 CEB 计算^[13]。

多种元素及其组合形成的某一单独样点元素特征在用于一个示踪系统之前须满足几项条件: 既元素必须是源于拟示踪物质且源区排放稳定, 并经均匀采样与准确测定, 不同源区的元素特征应能统计分辨, 并在传输过程中维持可分辨的特点^[13]。作者拟利用 CEB 这一通常用于污染气溶胶源区判别的方法, 从提取沙漠源区粉尘元素特征入手, 建立中国沙漠粉尘的元素示踪系统。

2.4 中国沙漠源区粉尘的元素特征

中国沙漠粉尘包含所有元素, 没有独特的示踪元素对应于特定的源地。但由于不同源地地表物质或岩石的矿物组构不同, 有理由相信至少某些元素的组配特征随着源地不同而有所差异。在中国沙漠大气中 Al, Ca, Fe, Mg, Mn, K, Sc, Si, Sr 和 Ti 被证明源于沙漠粉尘, 是可选择的示踪元素。

因建立中国沙漠粉尘元素示踪系统的目的, 是在接收区大气粉尘和风成黄土中分辨不同源区的粉尘输出, 而黄土高原大气中 K, Mn 和 Sr 被证明包含非地壳源贡献^[14], 故删除其候选资格。又因风成黄土数据集中缺少 Si 和 Ti 数据, 且 Ca 受到了再作用过程的强烈影响^[15], 故作者试图只利用 Al, Fe, Mg 和 Sc 作为示踪元素。

设计以 4 种粉尘元素对 Al 的比值表征沙漠粉尘的元素特征。使用比值的目地是将诸如使粉尘粘聚、清除等气象因素及粉尘不同时期排放量差异, 不同传输过程的差异归一化。Al 作为含量标尺是因它在不同源区粉尘中含量比例相近, 比值不会倾斜于某一特定源区。

为消除粉尘在不同沙漠样点之间传输的影响, 获得“纯粹”代表各样点的元素特征。单独样点元素特征采用各自元素比值频率分布的重数值, 结果列于表 4。

表 4 中国北方沙漠源区粉尘及 4 次降尘样品元素特征

样品与区域	样品数	Fe/Al	Mg/Al	Sc/Al ($\times 10^{-4}$)
		单独沙漠样点		(重数值)
阿克苏	12	0.84	0.25	2.6
策勒	13	1.2	0.16	2.9
敦煌	7	0.57	0.16	2.5
嘉裕关	7	0.65	0.30	3.4
吉兰泰	7	0.60	0.32	3.5
黑泉	7	0.70	0.31	3.2
民勤	9	0.35	0.22	3.5
定边	10	0.78	0.20	3.1
榆林	10	0.25	0.17	3.7
达拉特旗	8	0.53	0.23	3.4
		沙漠源区 (几何平均值)		
中国西北部沙漠 (I) ^{a)}	32	0.83	0.19	2.7
中国北部沙漠高粉尘区 (II) ^{b)}	21	0.65	0.31	3.4
中国北部沙漠低粉尘区 (III) ^{c)}	37	0.44	0.20	3.4
		尘暴降尘 ^{d)}		
尘暴降尘 A 兰州, 1984 年 3 月 14 ~ 15 日	1	1.1	0.41	4.7
尘暴降尘 B 兰州, 1984 年 4 月 19 ~ 20 日	1	0.68	0.30	2.8
尘暴降尘 C 北京, 1990 年 4 月 24 ~ 26 日	1	0.51	0.18	8.2
尘暴降尘 D 兰州, 1984 年 4 月 25 ~ 26 日	1	0.75	0.36	4.0

a) 阿克苏、策勒、敦煌数据平均; b) 嘉裕关、吉兰泰、黑泉数据平均; c) 民勤、定边、榆林、达拉特旗数据平均; d) 尘暴降尘中 Al 含量 (%): A=2.3, B=2.4, C=6.1, D=1.9

通过对单独沙漠样点元素特征的聚类分析,发现阿克苏、策勒和敦煌数据可归为一类,形成以中国西北部沙漠以北地区为主体的源区(I),其余沙漠数据归为另一类称为中国北部沙漠,北部沙漠还可细分成以嘉裕关、黑泉、吉兰泰一线以北地区为主体的北部沙漠高粉尘区(II),和由民勤、定边、榆林、达拉特旗以北地区为主体的北部沙漠低粉尘区(III)(图1).称“以北”是因高粉尘季节沙漠区近地面受冬季风环流控制,各样点粉尘多来自局地或其北部.“高、低粉尘”是据不同区域粉尘浓度大小而命名的.几何平均单独沙漠样点数据得到3个不同沙漠源区元素特征值(仍见表4).

2.5 元素特征的可分辨性及传输过程中的稳定性

CEB模式的一项最基本假设是源区特征有统计意义上的独立性.建立元素示踪系统的一个重要步骤就是检验源区元素特征的可分辨性.采用费歇准则对导出的3个沙漠源区元素特征作费歇判别分析,表明它们之间存在显著性差异(表5).

1990年一次历时一天完整尘暴过程的元素数据,被用来验证源区元素特征在粉尘搬运过程中的稳定性.此套数据,记录了粉尘自腾格里沙漠南缘沙坡头向黄土高原南缘西安约400 km直接的传输过程^[10, 14].表6中列出了在沙漠区整样中4种元素对Al的比值及粉尘搬运至黄土高原后的相应数据,以及基于分级撞击数据得到的模拟粉尘粗粒子逐渐被干、湿过程清除后比值的变化情况^[10].

表5 中国沙漠源区粉尘元素特征的费歇判别结果^{a)}

源区	均差	p 值
中国西北部沙漠 — 中国北部沙漠高粉尘区	0.01	0.0006
中国西北部沙漠 — 中国北部沙漠低粉尘区	0.09	0.006
中国北部沙漠高粉尘区 — 中国北部沙漠低粉尘区	0.08	0.001

a) 置信水平: 5%

表6 一次约400 km的尘暴传输过程粉尘示踪元素比值及其在假设的粒子清除过程中的变化

	X/Al					
	全样	<16 μm	<8 μm	<4 μm	<2 μm	<1 μm
	源区, 尘暴 E (沙坡头, 1990-04-10)					
Al	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Fe	0.78	0.70	0.72	0.76	0.61	0.84
Mg	0.42	0.42	0.43	0.45	0.40	0.37
Sc/ $\times 10^{-4}$	0.71	1.3	2.0	2.7	6.0	2.4
	接收区, 尘暴 E (草滩, 1990-04-11 上午和下午, 平均值)					
Al	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Fe	0.85	0.86	0.86	1.0	1.2	1.9
Mg	0.47	0.42	0.44	0.42	0.31	0.24
Sc/ $\times 10^{-4}$	1.1	1.3	1.6	2.4	4.3	7.0

若考虑即使是“直航”的尘暴粉尘搬运,仍会或多或少有沿途粉尘的加入,模糊接收区粉尘元素特征.表6中沙漠与黄土区整样中4种元素比值除Sc/Al值变化稍大外,其他元素的比值变化均小于9%的事实确切表明,至少在沙漠源区粉尘传输约400 km后,本文选用的元素特征仍具有可分辨性.

无论在沙漠还是在黄土区,模拟粉尘搬运过程粗粒子逐渐被清除后元素比值的变化显示,在仍有大于2 μm 粉尘粒子存在的各个阶段,元素比值无明显变化,表明至少在大于2 μm 粗粒子被清除之前,本文选用的元素特征在粉尘搬运过程中稳定性良好,暗示本示踪系统有较长距离的示踪能力.

表7 不同粉尘源区对4次尘暴降尘中示踪元素的贡献与源区天动分析结果^[19]对比

源区强度	源区贡献	Al	Fe	Mg	Sc	平均	源区天动分析结果
	尘暴降尘 A						
1.0	% I. 中国西北部沙漠	100	75	46	57	70	“此次降尘的主要源地为新疆沙漠, 尤其是塔克拉玛干沙漠, 其次在天气系统东移过程中沿途的甘肃、宁夏等地也有沙尘物质补充”
	% II. 中国北部沙漠高粉尘区						
	% III. 中国北部沙漠低粉尘区						
	% 其余来源					30	
	尘暴降尘 B						
0.12	% I. 中国西北部沙漠	12	15	7.6	12	11	“源地是蒙古戈壁沙漠和我国巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、库布齐沙漠、毛乌素沙漠、浑善达克沙地等”
0.88	% II. 中国北部沙漠高粉尘区	88	84	91	110	92	
	% III. 中国北部沙漠低粉尘区						
	% 其余来源						
	尘暴降尘 C						
0.19	% I. 中国西北部沙漠	19	31	20	6.3	19	同上
	% II. 中国北部沙漠高粉尘区						
0.81	% III. 中国北部沙漠低粉尘区	81	70	90	34	69	
	% 其余来源					12	
	尘暴降尘 D						
0.24	% I. 中国西北部沙漠	24	27	13	16	20	“源地包括新疆、甘肃、内蒙古、宁夏、陕西的沙漠、沙地和戈壁”
0.76	% II. 中国北部沙漠高粉尘区	76	66	65	65	68	
	% III. 中国北部沙漠低粉尘区						
	% 其余来源					12	

2.6 中国源区粉尘的4元素示踪系统

利用确立的源区粉尘元素特征, 并通过测定4次现代尘暴降尘(A, B, C, D)中相应数据(表4), 使用CEB定量分辨出不同沙漠源对尘暴降尘的贡献(表7)。此外对这4次降尘个例作了天气过程和动力条件分析(简称: 天动分析), 并详细论证了相应环流特征, 沙尘传输的动力条件及源地^[19], 对比结果见表7。

CEB解析出的中国沙漠3源区对4次尘暴降尘中4种示踪元素贡献的平均结果显示, 建立的源区粉尘元素示踪系统分辨出的各源地对接收区降尘的贡献, 与天动分析结论一致, 表明此系统有效工作。在接收区大气粉尘或其沉积物中只要准确测定元素Al, Fe, Mg, Sc的含量, 结合本文导出的中国沙漠源区元素特征值(表4), 在两者之间应用CEB就可定量解析出中国粉尘不同源区输出量的比例。

致谢 中国科学院阿克苏水平衡观测站、策勒沙漠观测站、青藏高原考察基地、沙坡头沙漠研究实验站、民勤治沙综合实验站; 兰州中心气象台李尚诚同志, 新疆农一师8团蒋保明同志, 黑泉乡政府, 及采样点气象站和驻军部队对本文采样工作给予大力支持, 作者谨表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 Uematsu M, Duce R A, Prospero J M *et al.* Transport of mineral aerosol from Asia over the North Pacific Ocean. *J Geophys Res*, 1985, 88:5 343 ~ 5 352

- 2 Prospero J M, Uematsu M, Savoie D L. Mineral aerosol transport to the Pacific Ocean. In: Riley J P, Chesse R, Duce R A, eds. *Chemical Oceanography*. Academic San Diego Ca, 1989, (10): 188 ~ 218
- 3 刘东生. 中国的黄土堆积. 北京: 科学出版社, 1965
- 4 卢演涛. 中国黄土物质来源的初步探讨 - 石粉英砂颗粒表面结构的电子显微镜研究. *地球化学*, 1974, (1): 47 ~ 53
- 5 张德二. 我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析. *中国科学, B 辑*, 1984, (3): 278 ~ 288
- 6 Zhang X Y, Shen Z, Zhang G *et al.* Remote mineral aerosol in Westerlies and their contributions to the Chinese Loess. *Science in China (Series D)*, 1996, 39(1): 67 ~ 76
- 7 GSS. Preparation of geochemical standard reference samples (GSR1-6, GSS1-8, GSD9-12). National Bureau of Chemical Exploration Analysis, P R China, 1984
- 8 Taylor S R. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochim Cosmochim Acta*, 1964, 28: 1 273 ~ 1 285
- 9 Zhang X Y, Arimoto R, An Z *et al.* Late Quaternary records of the atmospheric input of eolian dust to the Center of the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Research*, 1994, 41: 35 ~ 43
- 10 Zhang X Y, Arimoto R, An Z *et al.* Atmospheric trace elements over source regions for Chinese dust: concentrations, sources and atmospheric deposition on the Loess Plateau. *Atmos Envir*, 1993, 27A(13): 2 051 ~ 2 067
- 11 Patterson C C, Gillette D A. Commonalities in measured size distributions for aerosols having a soil-derived component. *J Geophys Res*, 1977, 82: 2 074 ~ 2 082
- 12 Williamson H J, DuBose D A. Users Manual for Chemical Mass Balance Model; Receptor Model Technical Series. U. S. Environmental Protection Agency: Research Triangle Park, NC, 1983, Vol III, EPA-450/4-83-014
- 13 Lowenthal D H, Wunschel K R, Rahn K A. Tests of regional elemental tracers of pollution aerosols. I. Distinctness of regional signatures, stability during transport, and empirical validation. *Environmental Science & Technology*, 1988, 22: 413 ~ 420
- 14 Zhang X Y, An Z, Lin T *et al.* Study on three dust storms in China: source characterization of atmospheric trace element and transport process of mineral aerosol particles. *Chinese Science Bulletin*, 1992, 37(11): 940 ~ 945
- 15 张德二, 王坚红. 降尘过程的环流形势及天气动力条件的初步分析. 见: 刘东生, 安芷生, 吴锡浩主编, 黄土·第四纪地质·全球变化, 第 4 辑. 北京: 科学出版社, 1995. 151 ~ 157