

# 粘土矿物比率对沙尘源区的指示

沈振兴<sup>1,2</sup>, 张小曳<sup>1</sup>, 曹军骥<sup>1</sup>, 王亚强<sup>1</sup>, Sandrine Caquineau<sup>3</sup>, 李旭祥<sup>2</sup>, 张仁健<sup>4</sup>

(1. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪国家重点实验室, 西安 710075; 2. 西安交通大学环境科学与工程系, 西安 710049; 3. Institut de Recherche pour le Développement, Bondy, France; 4. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

**摘要:**为了探讨中国北方沙尘源区矿物组成特征并建立沙尘气溶胶的矿物示踪指标,在亚太地区气溶胶特征实验(ACE-Asia)期间对新疆阿克苏、甘肃敦煌、陕西榆林和内蒙古通辽沙尘气溶胶的矿物组成进行了研究。结果显示,中国主要沙尘源区沙尘气溶胶中高岭石与绿泥石的比率存在明显差异,西部沙尘源区(以阿克苏站点为代表)高岭石与绿泥石的比值较小(平均值为 0.3),而北部沙尘源区(以榆林站点为代表)高岭石与绿泥石的比值相对较高(平均值为 0.7)。沉降区长武尘暴样品的粘土矿物比率和气团轨迹分析证实,在区域范围,高岭石与绿泥石的比值为较好的沙尘源区矿物示踪指标。而亚洲沙尘与撒哈拉沙尘的对比显示,高岭石与绿泥石的比值在全球范围有着沙尘源区指示的意义。

**关键词:**沙尘气溶胶;粘土矿物比率;源区指示

中图分类号:X142 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2005)04-0030-05

## Clay Ratio as a Tracer to Assess the Origin of Soil-Derived Dust

SHEN Zhen-xing<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiao-ye<sup>1</sup>, CAO Jun-ji<sup>1</sup>, WANG Ya-qiang<sup>1</sup>, Sandrine Caquineau<sup>3</sup>, LI Xu-xiang<sup>2</sup>, ZHANG Ren-jian<sup>4</sup>

(1. SKLLQG, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Institut de Recherche pour le Développement, Bondy, France; 4. LAPC, Institute of Atmospheric Physical, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The objectives of this research are to characterise the mineralogy of soil-derived dust in Northern China and to set up the mineralogical signature to trace their origin. Mineral composition of aerosol particles is investigated at five sites (Aksu, Dunhuang, Yulin, Tongliao and Changwu) during the intensive field campaign period of ACE-Asia. The results show that the Kaolinite (K) to Chlorite (C) ratio is sensitive to the regional origin of Asian dust. Western source areas (represented by Aksu) displayed the lowest K/C ratio of 0.3 (in average), while it was found that to increase up to 0.70 (in average) as moving towards north source areas (represented by Yulin). By studying transported dust in a depositional area representative of the Chinese Loess Plateau, the usefulness of the K/C ratio to retrieve the origin of the dust by associating it with back air-mass trajectories is checked. Compared the mineralogical data between Asian dust and Sahara dust, it is shown that K/C ratio is also a good signature to identify the source areas on the global scale.

**Key words:** soil-derived dust; clay ratios; source identify

源于中国北方干旱、半干旱地区土壤风蚀产生的亚洲沙尘气溶胶,每年向大气输入的沙尘量约为  $8 \times 10^8$  t,占全球沙尘释放量的 1/2 左右<sup>[1-3]</sup>。大气中的沙尘粒子不仅通过直接和间接辐射强迫影响着区域或全球气候变化<sup>[4-6]</sup>;而且对区域大气环境质量<sup>[7-12]</sup>以及陆地和海洋生物的产率<sup>[13-15]</sup>也有重要的影响。矿物组成作为沙尘气溶胶的重要理化性质之一,其研究结果对于沙尘源区的指示<sup>[16,17]</sup>及减少沙尘气溶胶辐射强迫效应估算的不确定性<sup>[18,19]</sup>有着重要的作用。

目前,亚洲沙尘来源解析的研究包括利用化学元素组配特征并结合因子分析等统计学方法<sup>[12,20-23]</sup>,根据气象卫星遥感监测,沙尘暴发生频

率、表土结构和组成特征以及沙尘释放速率等综合手段和方法<sup>[24-27]</sup>,此外,碳同位素及其碳酸盐矿物示踪研究工作也相继开展起来<sup>[28,29]</sup>。粘土矿物作为沙尘气溶胶的主要组成矿物,由于其粒径较小( $< 2 \mu\text{m}$ ),因而有较长的大气滞留时间和长距离传输的能力<sup>[30]</sup>,故在沙尘源区示踪研究中应加以关注。本文通过对中国沙尘源区样点新疆阿克苏、甘肃敦煌、陕西榆林、内蒙古通辽和沉降区陕西长武样点沙尘

收稿日期:2004-09-08;修订日期:2004-11-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40405023,40205018);国家重点基础研究发展规划(973)项目(G2000048703);西安交通大学基金项目(XJ2004006)

作者简介:沈振兴(1974~),男,博士,讲师,研究方向为大气环境与大气化学。

气溶胶中粘土矿物组成的研究,探讨建立亚洲沙尘源区分辨的矿物示踪指标。

## 1 样品的采集与实验

气溶胶样品分别采自为新疆阿克苏、甘肃敦煌、内蒙古通辽和陕西榆林,另采集了黄土高原沉降区陕西长武春季的沙尘暴样品。图 1 为各采样点的位置示意图,这些站点均是中日黄沙研究项目和国际亚太地区气溶胶特性实验计划(ACE-Asia)在中国北方干旱、半干旱区设立的观测站点。各样点均使用直径为 4.7 cm 的 Teflon (Cole-Parmer Instrument Company, Vernon Hills, Illinois, USA) 滤膜收集总悬浮颗粒物(TSP)样品,采样日期均为 2001-03-08 ~ 2001-05-31,采样时间在 06:00 至 18:00 之间,共收集到气溶胶样品 236 个。

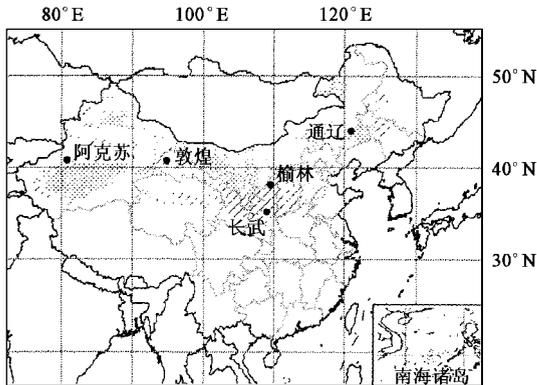


图 1 气溶胶采样点位置

Fig. 1 Location of sampling sites

阿克苏站点( $40^{\circ}16' N$ ,  $80^{\circ}28' E$ )位于塔克拉玛干沙漠北缘的阿克苏市东面,距阿克苏市约 80 km,其代表以塔克拉玛干沙漠为中心的中国西部沙尘源区<sup>[2, 24-27]</sup>样点。榆林站点( $38^{\circ}17' N$ ,  $109^{\circ}42' E$ )位于毛乌素沙漠南缘的榆林市以北方向,距榆林市约 10 km,站点点北部分布着我国巴丹吉林、腾格里、乌兰布和、库布齐和毛乌素等沙漠及戈壁,是春季西北风沙尘搬运的必经之地,其代表以巴丹吉林沙漠为中心的中国北部沙尘源区<sup>[2, 24-27]</sup>样点。敦煌站点( $40^{\circ}30' N$ ,  $94^{\circ}49' E$ )位于库姆塔格沙漠东部的敦煌市东南方向,距敦煌市约 25 km,为西部沙尘源区和北部沙尘源区的过渡区域样点。通辽站点( $43^{\circ}14' N$ ,  $122^{\circ}14' E$ )位于东北科尔沁沙地中部的通辽市以北,距通辽市约 20 km,其代表东北沙地沙尘源区样点。长武站点( $35^{\circ}12' N$ ,  $107^{\circ}40' E$ )位于黄土高原的中西部,西安市的西北方向,距西安约

100 km,其代表沉降区样点。阿克苏、敦煌和长武采样点设置在 3 层建筑物的楼顶,约 10 m 高,榆林和通辽采样点设置在 10 m 高的观测塔顶。阿克苏和敦煌站点的采样仪器为美国 Andersen 公司生产的 Andersen AN200 型采样器,流量为 26.3 L/min,榆林、通辽和长武站点的观测仪器为美国 R&P 公司生产的 2025 序列式采样器,流量为 16.7 L/min。

使用已建立的大气气溶胶微量样品矿物分析方法<sup>[31, 32]</sup>对采集到的沙尘样品进行前处理。由于正常天气收集的样品量在 1 mg 左右,为了获得足够多的样品量(至少需要 2 mg),需要对正常天气的样品进行合并分析<sup>[31]</sup>。X 射线衍射实验在日本理学 D/max-2500 X 射线衍射仪上完成。实验条件为铜靶,管压 50 kV,管流 100 mA。衍射束为石墨晶体单色器,扫描步长为 0.01°,扫描速度为 2°/min,范围 2.6°~50°。然后再进行 24°~26°范围的慢扫,扫描速度为 0.5°/min,目的是精确测定绿泥石 0.353 nm 和高岭石 0.357 nm 的衍射峰强度(矿物衍射峰的面积),对 0.7 nm 衍射峰进行分解。利用 0.358 nm 和 0.353 nm 衍射峰强度比获得高岭石与绿泥石的比率,再利用 1.0 nm 和 0.358 nm 衍射峰强度之比确定伊利石和高岭石的比值。

## 2 结果与分析

### 2.1 沙尘源区粘土矿物比率的变化

衍射结果显示,石英、长石、伊利石、高岭石、绿泥石和方解石为沙尘气溶胶的主要组成矿物。笔者对不同沙尘源区样品中高岭石(Kaolinite, K)和绿泥石(Chlorite, C)、伊利石(Illite, I)和高岭石(Kaolinite, K)的比率进行了计算,不同站点 K/C 与 I/K 的分布、均值及标准差分别如图 2 和图 3 所示。

分析显示,同一站点沙尘暴日和正常天气条件下样品中高岭石与绿泥石的比率(K/C)及伊利石和高岭石的比率(I/K)相似,且在一定的范围内变化(图 2)。先前的研究结果显示<sup>[20]</sup>,同一站点沙尘暴日与正常天气的样品在不同粒级组分的含量上存在明显差异,粗粒组分( $> 20 \mu\text{m}$ )含量在沙尘暴样品( $\sim 22\%$ )中明显高于正常天气样品( $\sim 6.5\%$ ),而粘粒组分( $< 2 \mu\text{m}$ )的含量正好相反。可见,沙尘暴日与正常天气沙尘气溶胶粒级含量的差异反映了风动力条件的不同,但并不影响粘粒中粘土矿物之间的相对含量。

在西部沙尘源区新疆塔克拉玛干沙漠的阿克苏

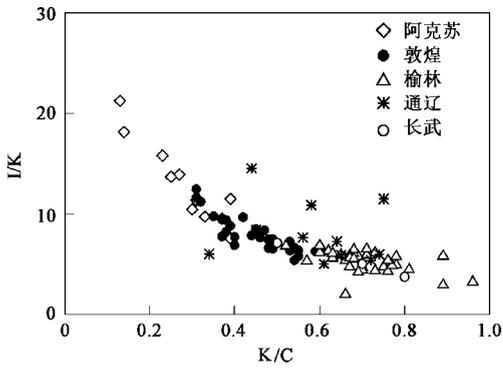


图2 不同站点沙尘样品中  $K/C$  及  $I/K$  的分布

Fig.2 Kaolinite to chlorite ratio versus illite to kaolinite ratio for bulk aerosol samples

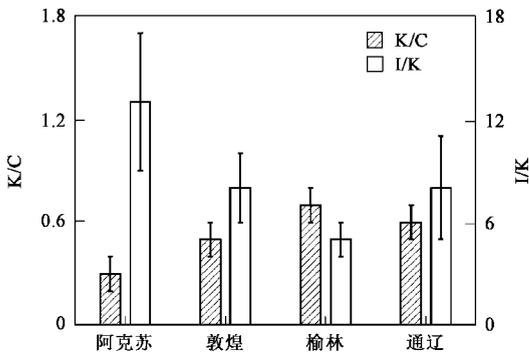


图3 沙尘源区粘土矿物比率的均值和标准差

Fig.3 Clay ratio and standard deviation for dust samples collected in the source areas

站点,沙尘样品中高岭石与绿泥石的比率( $K/C$ )均值为0.3(图3),变化范围在0.1~0.4之间(图2),到了甘肃敦煌站点,沙尘样品的 $K/C$ 均值为0.5,而随着站点东移至中国北部沙漠源区的陕西榆林镇北台,沙尘样品的 $K/C$ 均值上升至0.7,变化范围0.5~1.0,表明随着沙尘源区的东移,沙尘气溶胶中 $K/C$ 值呈增大的趋势。据此推测位于本次研究最东部的中国东北沙地,其沙尘的 $K/C$ 值大于0.7,而分析结果显示,内蒙古通辽站点沙尘样品的 $K/C$ 均值为0.6,且样品的 $K/C$ 值较为分散,范围在0.3~0.8之间,介于西部沙漠源区和北部沙漠源区之间。由于通辽站点位于亚洲沙尘向太平洋输送的路径上,故可能的解释是通辽站点的样品是不同来源的沙尘所混合而成的异类物质。

伊利石和高岭石的比率( $I/K$ )在不同沙尘源区的变化趋势与高岭石与绿泥石的比率( $K/C$ )变化相反,在西部沙漠样点阿克苏,沙尘样品的 $I/K$ 值最大,为13,甘肃敦煌样点沙尘样品的 $I/K$ 值为7.7,到了北部沙漠样点陕西榆林镇北台,沙尘样品的

$I/K$ 值减小至5.3,表明随着沙尘源区的东移,沙尘气溶胶中 $I/K$ 值呈减小的趋势。内蒙古通辽站点(代表东北沙地)沙尘样品的 $I/K$ 值为8.1,介于西部沙漠样点和北部沙漠样点沙尘的 $I/K$ 值之间,可能的原因如前所述。

综上,沙尘气溶胶中粘土矿物的比率在不同沙尘源区有着明显的差异,即西部沙漠源区沙尘的 $K/C$ 值较低(小于0.4)而 $I/K$ 值较高,北部沙漠源区沙尘有较高的 $K/C$ 值(大于0.4)而 $I/K$ 值较低,暗示着粘土矿物的比率对沙尘源区有较好的指示作用。由于 $I/K$ 数据重叠的原因(图2), $K/C$ 可能为区域范围较好的沙尘来源示踪指标。

## 2.2 沉降区沙尘样品中粘土矿物比率的源区指示

2001-04-08、2001-04-29及2001-05-14陕西长武地区出现了3次沙尘暴天气,采集的沙尘气溶胶样品中粘土矿物的比率计算结果为, $K/C$ 值分别为0.7、0.5和0.8, $I/K$ 值分别为5.1、7.2和3.8。由于3次沙尘暴天气样品的 $K/C$ 值均大于0.4,且 $I/K$ 值较小,与榆林镇北台站点沙尘的特征相似,推测沙尘来源于北部沙漠源区。空气气团轨迹分析结果可以用来验证粘土矿物比率对沙尘源区分辨的正确性。

5d后向气团轨迹分析显示(由加拿大全球气团轨迹模式获得,图4),2001-04-08的沙尘暴起源于蒙古国南部,经乌兰布和沙漠、腾格里沙漠和毛乌素沙漠等向南传输至长武地区。2001-04-29的沙尘暴源于内蒙古的巴丹吉林沙漠,途经腾格里沙漠和毛乌素沙漠等传输经过长武地区。2001-05-14的沙尘暴起源于中亚,经新疆北部的沙漠和戈壁地区、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠等向东南方向传输进入长武地区。这3次沙尘暴天气主要源于中国北部沙漠源区,沙尘样品中 $K/C$ 值与北部沙漠源区(以榆林样点为代表)特征一致,空气气团轨迹分析结果进一步证实了粘土矿物比率对沙尘源区分辨的准确性。Sun等<sup>[33]</sup>对1998-04北京1次较大的沙尘暴进行了研究,此次沙尘暴起源于蒙古国南部的戈壁区域及中国北部的沙漠(包括巴丹吉林、腾格里、乌兰布和等沙漠)和戈壁地区,矿物学分析结果显示样品中高岭石与绿泥石比率为0.5,与本文的结果一致。以上的分析证实,在经过至少300 km的较长距离传输后,沙尘中 $K/C$ 能保持不变且仍具有源区分辨性,表明在区域范围内, $K/C$ 为较好的沙尘源区示踪指标。

## 3 讨论

新疆阿克苏、甘肃敦煌、陕西榆林和内蒙古通辽

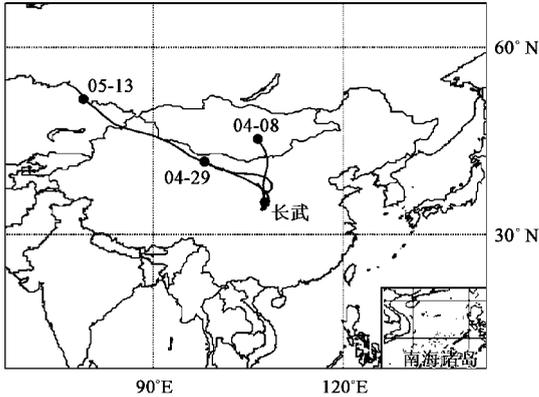


图 4 长武 3 次沙尘暴天气的 5d 后向气团轨迹分析结果

Fig. 4 A 120-hour air mass backward trajectory analyses for three dust storms at Changwu

沙尘气溶胶的矿物学研究显示,中国主要沙尘源区沙尘气溶胶的  $K/C$  值小于 1,且其变化范围在 0.1 ~ 1 之间。Biscaye<sup>[34]</sup>、Svensson<sup>[35]</sup>和 Bory<sup>[36]</sup>等在探讨格陵兰冰芯中粉尘的可能来源时,对全球不同地区(包括了蒙古国北部的戈壁地区及中国北方沙漠和戈壁地区,撒哈拉沙漠地区及北美洲地区)表土样品的矿物组成进行了研究,结果发现位于北半球中纬度的蒙古国北部的戈壁地区及中国北方沙漠和戈壁地区(格陵兰冰芯可能的源区)表土样品与格陵兰冰芯中粉尘样品的  $K/C$  表现出良好的一致性, $K/C$  值相似且均在 0.3 ~ 0.9 之间,据此推断格陵兰冰芯中的粉尘可能来自于亚洲沙尘源区。此外,Drab 等<sup>[37]</sup>对格陵兰积雪样品中粉尘的矿物学研究表明,其粘土矿物比率均值为 0.7,变化范围在 0.3 至 1.2 之间,这个结果与格陵兰冰芯样品及其可能源区表土样品的矿物分析结果有较好的一致性,支持了格陵兰冰芯样品中粉尘来源于亚洲沙尘源区的假说。而本文对亚洲沙尘源区沙尘气溶胶中粘土矿物比率( $K/C$ )的研究结果,进一步证实了格陵兰冰芯和积雪样品中粉尘来源于亚洲沙尘源区。研究结果同时表明,在经过长距离的传输过程后, $K/C$  对沙尘源区仍有较好的指示作用。

中国沙漠源区沙尘气溶胶的矿物学研究显示,西部沙尘源区(以阿克苏站点为代表)高岭石与绿泥石的比率较小(小于 0.4),而北部沙尘源区(以榆林站点为代表) $K/C$  值相对较高(大于 0.4),表明  $K/C$  在区域范围有着源区指示的意义。而在全球范围,粘土矿物的分布受纬度影响较大,在中纬度地区地表物质中绿泥石含量相对较高,而低纬度地区高岭石矿物相对富集<sup>[38]</sup>。北半球的中纬度和低纬度地区分布着全球 2 个主要的沙尘源区,中纬度(北纬 40°左

右)地区以蒙古国南部戈壁和中国北方沙漠和戈壁为主的亚洲沙尘源区,其表土和沙尘气溶胶中  $K/C$  值均小于 1。而低纬度(20°左右)地区以撒哈拉大沙漠为主的非洲沙尘源区,高岭石矿物相对富集,表土及沙尘气溶胶的  $K/C$  大于 2<sup>[39-42]</sup>,甚至由于样品中绿泥石含量较低而检测不到<sup>[16]</sup>。可见, $K/C$  对于亚洲沙尘( $K/C$  小于 1)和撒哈拉沙尘( $K/C$  大于 2)的分辨有着重要的作用,表明粘土矿物的比率在全球范围有着沙尘源区指示的意义,其对于格陵兰冰芯和积雪中沙尘和太平洋东部沙尘来源及输送路径的解析,进而对大气环流的恢复有着重要的作用。

沙尘气溶胶来源示踪研究是一项复杂的工作,示踪指标的选择与沙尘源区的特征密切相关。目前对于中国北方沙尘源区特征的研究包括沙尘暴发生的频次、风速、干旱指数、降雨量、表土结构和组成、沙尘释放速率以及元素组配等特征<sup>[20, 24-27]</sup>,本文对沙尘气溶胶粘土矿物组成的研究进一步丰富了沙尘源区特征的研究内容。而如何结合多个指标更有效地分辨出沙尘来源还需要更深入的研究工作。

#### 4 结论

首次对中国沙尘源区较大范围沙尘气溶胶(TSP)中粘土矿物比率进行了研究,发现以塔克拉玛干沙漠为中心的中国西部沙尘源区与以巴丹吉林、腾格里等沙漠组成的中国北部沙尘源区沙尘气溶胶的粘土矿物比率存在明显差异,说明在区域范围  $K/C$  对沙尘气溶胶的来源有较好的指示作用。而亚洲沙尘与非洲撒哈拉沙尘矿物学研究结果对比显示, $K/C$  在全球范围有着源区指示的意义。研究结果对于沙尘输送模式的验证和大气环流的恢复有着重要的作用。本文主要针对沙尘气溶胶 TSP 的矿物学研究,而对于细粒子(如  $PM_{2.5}$ )的矿物学研究将是今后工作的重点。

#### 参考文献:

- [1] Andreae M O. Climate effects of changing atmospheric aerosol levels [A]. In: Henderson-Sellers A. World Survey of Climatology: Future Climates of the World [C]. New York: Elsevier Sci., 1995. 341 ~ 392.
- [2] Zhang X Y, et al. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(D23): 28041 ~ 28047.
- [3] Duce R A. Sources, distributions and fluxes of mineral aerosols and their relationship to climate [A]. In: Edited by Charlson R J. Aerosol Forcing of Climate [C]. New York: John Wiley, 1995. 43 ~ 72.
- [4] 沈志宝,魏丽.我国西北大气沙尘气溶胶的辐射效应[J].大

- 气科学, 2000, 24(4): 541 ~ 548.
- [ 5 ] Sokolik I N, Toon O B. Direct radiative forcing by anthropogenic airborne mineral aerosols [ J ]. *Nature*, 1996, 380: 681 ~ 683.
- [ 6 ] Tegen I, Andrew A L, Fung I. The influence on climate forcing of mineral aerosols from disturbed soils [ J ]. *Nature*, 1996, 380: 419 ~ 422.
- [ 7 ] 石广玉, 赵思雄. 沙尘暴研究中的若干科学问题[ J ]. *大气科学*, 2003, 27(4): 591 ~ 605.
- [ 8 ] 王式功, 杨民, 祁斌, 等. 甘肃河西沙尘暴对兰州市空气污染的影响[ J ]. *中国沙漠*, 1999, 19(4): 354 ~ 358.
- [ 9 ] 王玮, 王英, 苏红梅. 北京市沙尘暴天气大气气溶胶酸度和酸化缓冲能力[ J ]. *环境科学*, 2001, 22(5): 25 ~ 28.
- [ 10 ] 王明星, 张仁健. 大气气溶胶研究的前沿问题[ J ]. *气候与环境研究*, 2001, 6(1): 119 ~ 124.
- [ 11 ] 任阵海, 高庆先, 苏福庆, 等. 北京大气环境的区域特征与沙尘影响[ J ]. *中国工程科学*, 2003, 5(2): 49 ~ 56.
- [ 12 ] 庄国顺, 郭敬华, 袁蕙, 等. 2000 年我国沙尘暴的组成、来源、粒径分布及其对全球环境的影响[ J ]. *科学通报*, 2001, 46(3): 191 ~ 197.
- [ 13 ] 刘东生. *黄土与环境*[ M ]. 北京: 科学出版社, 1985. 238 ~ 239.
- [ 14 ] 关欣, 李巧云, 文倩, 等. 南疆西部降尘对土壤性质的影响[ J ]. *土壤*, 2000, 4: 178 ~ 182.
- [ 15 ] Zhuang G, Yi Z, Duce R A, *et al.* Link between iron and sulfur cycles suggested by detection of iron in remote marine aerosols [ J ]. *Nature*, 1992, 355: 537 ~ 539.
- [ 16 ] Caquineau S, Gaudichet A, *et al.* Saharan dust: clay ratio as a relevant tracer to assess the origin of soil-derived aerosols [ J ]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25: 983 ~ 986.
- [ 17 ] Schütz L, Seberty M. Mineral aerosol and source identification [ J ]. *Journal of Aerosol Science*, 1987, 18: 1 ~ 10.
- [ 18 ] Sokolik I N, Toon O B, R W Bergstrom. Modeling the radiative characteristics of airborne mineral aerosol at infrared wavelengths [ J ]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(D8): 8813 ~ 8826.
- [ 19 ] Sokolik I N, Toon O B. Incorporation of mineralogical composition into models of the radiative properties of mineral aerosol from UV to IR wavelengths [ J ]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D8): 9423 ~ 9444.
- [ 20 ] Zhang X Y, Zhang G Y, Zhu G H, *et al.* Elemental tracers for Chinese source dust [ J ]. *Science in China (Series D)*, 1996b, 39(5): 512 ~ 521.
- [ 21 ] 张仁健, 徐永福, 韩志伟. ACE-Asia 期间北京  $PM_{2.5}$  的化学特征和来源分析[ J ]. *科学通报*, 2003, 48(7): 730 ~ 733.
- [ 22 ] 王玮, 汤大钢, 刘红杰, 等. 北京市春季沙尘暴天气大气气溶胶污染特征研究[ J ]. *环境科学学报*, 2000, 13(1): 1 ~ 5.
- [ 23 ] 蔡晨霞, 蒋维楸, 等. 我国东南沿海两次沙尘的化学特征及其源地探讨[ J ]. *高原气象*, 2000, 19(2): 179 ~ 186.
- [ 24 ] Sun J M, Zhang M Y, Liu D S. Spatial and temporal characteristics of dust storm in China and its surrounding regions, 1960 ~ 1999: relations to source area and climate [ J ]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 10325 ~ 10333.
- [ 25 ] 钱正安, 宋敏红, 李万元. 近 50 年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[ J ]. *中国沙漠*, 2002, 22(2): 106 ~ 111.
- [ 26 ] Xun J, Sokolik I N. Characterization of sources and emission rates of mineral dust in Northern China [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36: 4863 ~ 4876.
- [ 27 ] Xun J, Sokolik I N, Hao Jinfu, *et al.* Identification and characterization of sources of atmospheric mineral dust in East Asia [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 6239 ~ 6252.
- [ 28 ] 张焱, 董旭辉. 碳酸盐碳测定在沙尘暴来源地识别中的应用[ J ]. *中国环境监测*, 2002, 18(2): 11 ~ 16.
- [ 29 ] 曹军骥, 王亚强, 等. 大气中碳酸盐的碳同位素分析及其来源指示意义[ J ]. *科学通报*, 2004, 49(17): 1785 ~ 1788.
- [ 30 ] Glaccum R A, Prospero J. Saharan aerosols over the tropical North Atlantic [ J ]. *Marine Geology*, 1980, 37: 295 ~ 321.
- [ 31 ] Caquineau S, Magonthier M C, Gaudichet A, *et al.* An improved procedure for the X-ray diffraction analysis of low-mass atmospheric dust samples [ J ]. *European Journal of Mineralogy*, 1997, 9: 157 ~ 166.
- [ 32 ] 沈振兴, 张小曳, 曹军骥, 等. 大气粉尘样品的矿物分析方法初探[ J ]. *岩矿测试*, 2003, 22(3): 165 ~ 168.
- [ 33 ] Sun J M, Liu D S, Lei Z F. Sources of heavy dust fall in Beijing, China of April 16, 1998 [ J ]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(14): 2105 ~ 2108.
- [ 34 ] Biscaye P E, F E Grousset, M Revel, *et al.* Asian provenance of glacial dust (stages 2) in the Greenland Ice Sheet Project [ J ]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 26765 ~ 26781.
- [ 35 ] Svensson A, Biscaye P E, Grousset F E. Characterization of late glacial continental dust in Greenland Ice Core Project ice core [ J ]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(D4): 4637 ~ 4656.
- [ 36 ] Bory A J M, Biscaye P E, *et al.* Seasonal variability of recent atmospheric mineral dust at north GRIP, Greenland [ J ]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 196: 123 ~ 134.
- [ 37 ] Drab E, Gaudichet A, Jaffrezo J L, *et al.* Mineral particles content in recent snow at Summit (Greenland) [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36: 5365 ~ 5376.
- [ 38 ] Heath G R, and N G Piasis. A method for quantitative estimation of clay minerals in North Pacific deep sea sediments [ J ]. *Clays and Clay Minerals*, 1979, 27: 175 ~ 184.
- [ 39 ] Glaccum R A, Prospero J M. Saharan aerosols over the tropical North Atlantic — Mineralogy [ J ]. *Marine Geology*, 1980, 37: 395 ~ 321.
- [ 40 ] Chester R, Sharples E J, Sandres G S. Saharan dust incursion over the Tyrrhenian Sea [ J ]. *Atmospheric Environment*, 1984, 18: 929 ~ 935.
- [ 41 ] Molinaroli E, Guezoni S, Rampazzo G. Contribution of Saharan dust to the central Mediterranean basin [ J ]. *Geological Society of America (special paper)*, 1993, 284: 303 ~ 312.
- [ 42 ] Avila A, Queralt Mitjans I, Alarcón M. Mineralogical composition of African dust delivered by red rains over northeastern Spain [ J ]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D18): 21977 ~ 21996.