

沙尘暴物质来源的研究进展综述

李 锋

(国家林业局荒漠化监测中心, 北京 100714)

摘要:沙尘物质对全球气候变化具有重要影响, 其来源研究一直是沙尘暴研究的热点问题之一。从历史文献资料记录、地质历史记录和现代观测研究、沙尘暴事件研究等方面综述了国内外对沙尘暴物质来源的研究现状, 提出了几点认识, 希望对这方面研究有所裨益。

关键词:沙尘暴; 物质来源; 历史纪录; 现代观测与研究

中图分类号:S157 **文献标识码:**B **文章编号:**1002-6622(2009)01-0101-06

Research Progress of Dust Source of Sand - Dust Storms

LI Feng

(National Desertification Monitoring Center, State Forestry Administration, Beijing 100714, China)

Abstract: Aeolian dust affects significantly global climate change, and its source is one of the focuses in research on sand - dust storms. In this paper, the domestic and foreign research progress of dust source of sand - dust storms are reviewed from the aspects of historic references, geological records, modern long - term observations and sand - dust storm events. Some problems of dust source of sand - dust storms are discussed.

Key words: sand - dust storm, dust source, historic records, modern observations and research

沙尘物质形成的气溶胶对全球气候变化具有重要影响^[1-2]。由于其光学厚度大, 分布范围广, 不仅通过辐射强迫作用对地球系统辐射平衡和全球气候变化产生直接影响^[3], 而且还通过控制输入海洋的风成铁等营养物质控制着海洋的生物产率, 进而影响海洋对 CO₂ 的吸收, 间接对气候造成显著影响^[4-9]。

中国沙尘物质排放总量每年约为 800Tg, 约占全球沙尘排放总量的一半^[10-11], 且约有一半被输送到中国海区和遥远的北太平洋^[11-12], 可见中国沙尘

物质对全球大气具有重要贡献。但长期以来, 中国沙尘源区的具体位置并不清楚, 仅笼统地理解为中国的干旱、半干旱地区^[13]。国内外学者曾利用各种方法致力于这方面的研究工作, 多数研究认为中国沙漠、戈壁及其周边地区是中国沙尘排放的主要源区, 但最近又有学者提出, 中国干旱地区干盐湖可能是沙尘物质来源之一^[14]。本文从历史时期的历史文献资料记录、地质历史记录和现代观测研究、沙尘暴事件研究 4 个方面, 简要介绍了中国沙尘暴物质来源的研究情况, 并提出了几点认识。

收稿日期: 2008-11-14; 修回日期: 2008-11-28

基金项目: 林业公益性行业科研项目(200804020)

作者简介: 李锋(1969-), 男, 黑龙江海伦人, 教授级高工, 主要从事荒漠化监测与评价、沙尘暴监测等方面的生产和科研工作。

1 历史时期沙尘暴物质来源研究

1.1 历史文献资料记录

有文字记载的历史时期,中国曾多次发生沙尘暴现象,沙尘沉降事件在史料中被记录为“雨土”、“雨霾”等。史料中的记载尽管简单、残缺不全,但有关研究者根据对资料的系统研究,仍提取出这一时期沙尘暴物质来源的有关信息。张德二^[15-18]根据地方志、正史、笔记等中对沙尘沉降事件的1 156条历史记录,分析了历史时期沙尘暴的规模、特征、气候背景等问题。认为发生于冷锋天气过程的沙尘暴,沙尘主要起源于我国西北内陆沙漠、戈壁和内蒙古干燥沙漠地区,沙尘源地包括新疆沙漠、内蒙古沙漠和甘肃、宁夏沙漠3个尘源区,其中新疆沙漠尘源基本不会影响华东、华南地区,但内蒙古地区的干湿状况与江南地区的沙尘天气日数具有良好的对应关系。这些研究虽然无法详细描述沙尘暴的具体发生过程,但揭示出一个基本事实,历史时期沙尘暴的沙尘物质主要来源于中国北方地区的沙漠、戈壁地区。

1.2 地质历史记录

已有证据显示,早在白垩纪末就有沙尘暴现象出现^[19],并且在各类地质沉积物中留下了明显纪录。目前,各国学者对中国北方黄土、冰川冰岩芯中沙尘及深海沉积物的来源问题研究较为详细。

中国北方黄土被认为是地质历史时期沙尘物质连续堆积的产物^[20]。在中国北方黄土堆积的外营力研究上,1887年德国地质学家 Richthofen 首次提出了中国北方黄土的风成假说^[20],现代许多研究表明,沙尘暴过程起到了更为重要的作用。戴雪荣等^[21-22]根据兰州黄土记录与现代尘暴样品的粒度分布对比分析结果,认为黄土是地质历史时期沙尘暴物质的堆积产物,黄土沉积物粒度的变化反映了沙尘暴的强度。张小曳等^[23-25]通过对黄土—古土壤序列与现代尘暴和非尘暴气溶胶样品的粒度分布特征比较,证明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,冰期黄土堆积过程中尘暴的影响明显增强。Gallet 等^[26]对洛川黄土—古土壤序列(L1-L7)的REE和同位素地球化学特征研究结果,进一步指出800ka以来洛川黄土物质的源区和沙尘暴路径没有发生变化。在中国北方黄土物质

来源问题上,前苏联地质学家 Обручев^[27-28]把中国北方黄土的成因与沙漠、戈壁联系起来,首次提出中国北方的黄土是亚洲内陆沙漠、戈壁地区(蒙古、中国北方)细粒沙尘经风的长距离搬运在干旱草原地带堆积形成的沉积物。卢演侑^[29]根据黄土中石英颗粒表面结构,较早地从器测方面提出了中国北方黄土物质源于中国沙漠的论点。随着测试分析技术的不断进步,对中国北方黄土物质来源及成因的认识逐步明晰。刘东生^[20]根据地层学、矿物学、地球化学等多方面研究成果,认为在东亚季风环境的主要作用下,中国北方黄土和沙漠形成一个耦合系统,中国北方沙漠和戈壁是沙尘源区,黄土区是沙尘沉积区。文启忠等^[30]从沙漠与黄土REE配分模式的一致性进一步证明了黄土物质源于沙漠的观点。Sun^[31]利用Sr同位素示踪的结果,指出除了蒙古戈壁及其相邻中国戈壁、沙漠是中国北方黄土的主要源区外,塔里木盆地也是其主要源区之一。

冰川冰岩芯中沙尘主要来源于大陆,且与地质历史时期沙尘暴事件关系密切^[19]。刘纯平等^[32-33]研究了祁连山敦德冰岩芯中沙尘含量与沙尘暴及气候的关系,指出尘暴事件是微粒含量增加和粒径变粗的主要原因,冰岩芯中高含量的沙尘物质主要来源于中距离的干旱和半干旱沙漠地区。Biscaye等^[34]根据格陵兰冰川冰岩芯中沙尘物质的矿物组成和同位素特征的研究结果,认为这些沙尘物质主要来自东亚的蒙古戈壁和中国黄土高原。Bory等^[35]研究证明,受中国春夏两季沙尘暴的影响,格陵兰现代积雪中粉尘主要来源于中国塔克拉玛干沙漠。

世界某些海域的深海沉积物被认为主要来源于大陆的风成粉尘^[36],其搬运营力主要与地质历史时期沙尘暴事件有关^[19]。Leinen^[37]、Kyte等^[38]的研究认为,亚洲的干旱和半干旱地区,包括黄土分布区,是北太平洋中部沉积物的主要源区,并且2 500 ka来并未发生明显变化。Pettke等^[39]根据12 000 ka以来北太平洋深海沉积物同位素地球化学特征研究结果,指出12 000 ka以来北太平洋深海沉积物主要来源于青藏高原北部的干旱盆地和戈壁沙漠地区粉尘。

上述有关中国北方黄土、冰川冰岩芯中沙尘及深海沉积物成因及物质来源的研究结果表明,这些沉积物主要来源于中国、蒙古的戈壁、沙漠地区,沙尘物质的搬运营力与地质历史时期沙尘暴过程关系更为密切,且这一过程仍在继续。

2 现代时期沙尘暴物质来源研究

2.1 长期观测研究

受分析测试技术的限制,早期对现代时期沙尘暴物质来源的研究更多局限于矿物学分析描述。日本人高山(1920)和小泉(1934)根据在中国东北、天津、山东、河北以及朝鲜、日本采集的黄沙样品矿物成分分析结果,认为这些地区的沙尘来自于中国黄土高原^[40]。张淑媛^[41]通过对北京几次沙尘天气样品的矿物成分分析,指出这些物质来自于中国西北沙漠和黄土高原。

20世纪80年代以来,随着观测手段和分析测试技术的进步,现代时期沙尘暴物质来源的研究逐步科学化和系统化。国内外学者通过长期观测研究,在现代时期沙尘暴物质来源的认识上取得了较大进步。Xuan等^[42]结合地理、土壤数据和30年(1951—1980年)的气象数据,对中国北方地区沙尘排放的研究成果表明,中国北方地区主要沙尘来源依次是塔克拉玛干沙漠、戈壁滩和阿拉善高原上的沙漠,黄土高原是一个相对较弱的沙尘源。作者进一步指出,中国北方最主要的沙尘源区分别是地势较低的沙漠和戈壁滩(准噶尔盆地、塔里木盆地、柴达木盆地和库姆塔格沙漠)、分布在高原上的沙漠(河西走廊、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠)及干旱农业区的沙漠沙地,这3个区域粒径小于 $10\mu\text{m}$ 的沙尘来源分别占年均排放总量的64%、35%和1%。张小曳等^[10,43-49]根据中国北方地区沙尘排放通量的多年观测结果,对亚洲粉尘的源区分布进行了分析。作者认为中国沙漠是亚洲粉尘的主要源区,中国沙漠粉尘年均排放量占全球沙漠粉尘排放总量的50%,粉尘排放中心分别位于塔克拉玛干沙漠和内蒙古北部沙漠及其临近地区,中国粉尘的主要源区分别是西部沙漠源区(塔克拉玛干沙漠、库姆塔格沙漠)、北部沙漠高粉尘区(巴丹吉林沙漠、乌兰布和沙

漠)和北部沙漠低粉尘区(腾格里沙漠、毛乌素沙地、库布齐沙漠)。邱新法等^[50]利用1971—1996年的地面气象记录月报和地面天气图资料,指出中国沙尘暴主要起源于沙漠及其边缘地区,集中在南疆的塔克拉玛干沙漠及其周边地区、北疆的准噶尔盆地南沿、甘肃河西走廊和内蒙古干燥沙漠及青海柴达木盆地。张宁等^[51]通过对甘肃1986—1996年期间发生的12次较大沙尘暴源地的统计分析,认为这些沙尘暴的源地均位于中国西北地区的新疆、甘肃和内蒙古的干燥沙漠或戈壁地带。全浩^[52]对中国西北和华北沙尘暴发生源地的系统研究认为,西北沙漠戈壁地区和内蒙古干燥沙漠地区是沙尘暴的发生源地。Sun等^[53]对现代沙尘暴的系统研究证实,在蒙古冷高压和青藏高原北部暖低压的共同作用下,塔克拉玛干沙漠地区会产生强烈的上升气流,把大量沙尘带到5000m以上的高空,并通过西风气流输送到遥远的太平洋。

近年来,一些学者提出,干涸湖床沉积物可能是沙尘暴的物质来源之一。岳乐平等^[54-55]通过对北方众多的现代干涸湖泊湖床沉积物粒度的分析,指出干涸湖床沉积物粒径小于 $10\mu\text{m}$ 的颗粒占60%以上,中国西北地区活动沙丘粒度组成小于 $63\mu\text{m}$ 粒径的颗粒很少,小于 $10\mu\text{m}$ 的颗粒微乎其微,因此沙尘暴、扬沙或浮尘天气虽然多发生于中国西部沙漠、阿拉善高原沙区、河西走廊北部沙区以及蒙古东部、中部地区,但由于粗颗粒沙扬起高度与搬运距离有限,真正影响整个华北、华东地区的沙尘物质是小于 $63\mu\text{m}$ 的粉砂级别的颗粒,特别是小于 $10\mu\text{m}$ 的粉尘。作者认为影响东亚地区的粉尘天气物源不仅是中国西部的内陆沙漠、沙地,更重要的是干枯的湖泊、弃耕的荒地与裸露的沙砾草场。Wang等^[56]对黑河流域干涸湖床沉积物、戈壁、农地、严重退化草地和流动沙丘5种景观类型的沙尘排放通量的观测结果表明,沙尘排放通量的大小依次为干涸湖床沉积物>严重退化草地>流动沙丘>戈壁>农地,因此作者认为中国西北地区干涸湖床沉积物、退化草地及沙化土地是风成粉尘的主要来源。但宋阳等^[57]利用中国北方农田、草地、沙地、戈壁、盐壳5种不同下垫面15个气象站点40年的大风与沙尘暴

日数气象数据,对这5种下垫面大风日数与沙尘暴日数之间的关系定量研究结果表明,干盐湖的沙尘暴日数明显少于大风日数,干盐湖沉积物并不是沙尘的主要来源。

上述有关现代时期沙尘暴物质来源的长期观测与研究结果表明,大多数学者的基本共识是:中国北方地区沙漠、戈壁仍是现代时期沙尘暴物质的主要来源。对干涸湖床沉积物是否是沙尘暴主要物质来源问题,不同研究者的认识并不一致。

2.2 沙尘暴事件研究

对沙尘暴具体事件的研究,不同的研究者由于采用的方法不同,对沙尘物质来源往往得出不同的结论。王明星等^[58]利用元素对比值研究了北京地区80年代一次尘暴的物质来源问题,指出这次沙尘暴沙尘物质来自于戈壁滩。但曲绍厚等^[59]对这次尘暴事件的研究认为,尘暴气溶胶的化学组成与马兰黄土相似,除了起风地区沙土外,沿途表层黄土对尘暴的组成也有相当贡献。庄国顺等^[60]利用元素富集系数法分析了2000年4月6日北京沙尘暴的来源问题,认为此次沙尘暴的风沙主要来自于蒙古国和我国内蒙古地区的荒漠,同时还有部分来自于包括陕西和山西等省的黄土高原。但李令军等^[61]利用卫星云图和中尺度数值模式,指出这次沙尘暴的初始发生源地主要分布在浑善达克沙地西部和南部的边缘地区。中科院地学部^[62]在分析了大量数据和资料的基础上,认为2000年春季影响华北地区的沙尘天气主要发源于内蒙古中西部 and 河北西北部,发源地及沿途地表粉尘物质是沙尘的主体,主要分布在内蒙古中西部和河北西北部的沙化草地、撂荒耕地和旱作耕地。王涛等^[63]综合重矿物、地球化学等分析追踪结果和典型沙尘天气过程气象云图,指出北京地区沙尘暴及浮尘物质主要来自上风向沙尘暴多发区,内蒙古高原阴山北坡及浑善达克沙地南缘农牧交错带退化草地和旱作耕地是沙尘的最主要提供者。近年来,一些学者根据沙尘暴具体事件沙尘样品中检测到盐成分,推断干盐湖或盐渍土可能是沙尘暴物质来源之一。张兴赢等^[14]根据2002年3月20日北京特大沙尘暴单颗粒物结构及化学组成分析结果,认为北京沙尘暴不仅来自于其源头

沙漠,沙尘暴所经过的包括干盐湖盐渍土的大范围干旱、半干旱地区的表层土也是其来源之一。但李永良等^[64]利用扫描电镜对这次北京特大沙尘暴单颗粒物的形态和成分分析认为,沙尘暴颗粒物主要是石英、粘土,石英颗粒在沙尘暴颗粒中占有很高的比例,约为30%,作者指出影响我国北方的沙尘暴主要来自蒙古国东南部戈壁荒漠区及我国内蒙古和新疆的沙漠和沙化的草地。

上述有关沙尘暴具体事件沙尘来源的研究结果表明,由于沙尘暴发生过程的复杂性,对沙尘来源的准确判定比较困难,不同的研究者针对的对象不同,采用的方法不同,得出的结论并不相同。目前,沙尘暴具体事件沙尘来源研究存在的主要问题是:不同源区的沙尘物质是否存在可以分辨的有效信息,采用的方法能否有效示踪不同源区的沙尘物质。

3 结语

根据上述研究结果,可以得到以下几点认识。

1) 沙漠、戈壁及其临近地区是中国沙尘排放的主要源区,也是沙尘暴物质来源的主要区域。尽管沙漠、戈壁细粒物质含量较少,但我国沙漠、戈壁面积广阔且物质量大,历史时期沉积记录和现代时期长期观测研究已经证明,中国沙漠、戈壁地区仍是粒径小于 $10\mu\text{m}$ 细粒物质排放的主要源区^[42],且被输送到遥远的太平洋^[11-12]和格陵兰^[34-35]地区。

2) 沙尘暴具体事件沙尘物质的来源确定是一个复杂的问题,沙尘暴沿途地区都可能提供沙尘物质,这主要取决于当地的地表覆盖状况和气象条件,目前尚没有准确的方法确定不同地区的沙尘贡献率,不同源区沙尘物质的有效示踪方法研究是沙尘暴具体事件观测急需解决的问题之一。

3) 我国干旱区内陆湖泊主要分布在沙漠、戈壁地区,由于其干涸湖床沉积物多以细粒物质为主,当沙尘暴途经这些地区时,是有可能提供沙尘物质的。但干盐湖表面有光滑、坚硬、凸凹不平的盐结皮,这层盐结皮不仅增大了地表的粗糙度,增加了起动摩擦风速,同时还下层的土壤和沙粒保护起来,使它们免遭大风吹蚀^[57]。可见干盐湖成分是不易被大风吹起的,即使被吹起,盐分物质也是以吸附状态附

着在沙尘颗粒表面,随沙尘输送到其他地区,但其所占沙尘总量的份额很少。此外,大气气溶胶本身含有一定的盐分组份,城市上空大气气溶胶还含有 NO_x 、 SO_x 等污染物,当沙尘暴途经这些地区时,由于颗粒细小,很容易吸附在沙尘表面并发生二次化学反应^[65],使盐分组份相对富集,造成沙尘中盐分含量较高的现象。这些问题有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] Genthon C. Simulations of desert dust and sea salt aerosols in Antarctica with a general model of the atmosphere[J]. *Tellus*, 1993, 44B, 371–389.
- [2] Joussaume S. Paleoclimatic tracers: an investigation using an atmospheric general circulation model under ice age conditions. 1. Desert dust[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98: 2767–2805.
- [3] Goudie A S, Middleton N J. Saharan dust storms: nature and consequences[J]. *Earth Science Reviews*, 2001, 56: 179–204.
- [4] Gruber N, Sarmiento J L. Global patterns of marine nitrogen fixation and denitrification[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, 11: 235–266.
- [5] Martin J H, Fitzwater S E. Iron deficiency limits phytoplankton growth in the north-east Pacific subarctic[J]. *Nature*, 1988, 331: 341–343.
- [6] Martin J H. Testing the iron hypothesis in ecosystems of the equatorial Pacific Ocean[J]. *Nature*, 1994, 371: 123–129.
- [7] Jicells T D, Dorling S, Deuser W G, et al. Air-borne dust fluxes to a deep water sediment trap in the Sargasso Sea[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1998, 12: 311–320.
- [8] Zhuang G S, Duce R A, Kester D R. The dissolution of atmospheric iron in surface seawater of the open ocean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95(C9): 16207–16216.
- [9] Zhuang G S, Yi Z, Duce R A, et al. Link between iron and sulfur cycles suggested by detection of iron(II) in remote marine aerosols[J]. *Nature*, 1992, 355(6360): 537–539.
- [10] 张小曳. 亚洲粉尘的源区分布、释放、输送、沉降与黄土堆积[J]. *第四纪研究*, 2001, 21(1): 29–39.
- [11] Zhang X Y, Arimoto R, An Z S. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 28041–28047.
- [12] Arimoto R, Duce R A, Ray B J, et al. Relationship among aerosol constituents from Asia and the North Pacific during PEM-West[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(D1): 2011–2023.
- [13] Uematsu M, Duce R, Prospero J, et al. Transport of mineral aerosol from Asia over the North Pacific Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90: 5343–5352.
- [14] 张兴赢, 庄国顺, 袁惠. 北京沙尘暴的干盐湖盐渍土源——单颗粒物分析和 XPS 表面结构分析[J]. *中国环境科学*, 2004, 24(5): 533–537.
- [15] 张德二. 历史时期“雨土”现象剖析[J]. *科学通报*, 1982, 27(5): 294–297.
- [16] 张德二. 我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析[J]. *中国科学(B辑)*, 1984, 278–287.
- [17] Zhang D E. Synoptic-climatic studies of dust fall in China since the historic times. *Scientia Sinica*, 1984, 27(8): 825–836.
- [18] 张德二, 孙霞. 我国历史时期降尘记录南界的变动及其对北方干旱气候的推断[J]. *第四纪研究*, 2001, 21(1): 1–7.
- [19] 王式功, 董光荣, 陈惠忠, 等. 沙尘暴研究的进展[J]. *中国沙漠*, 2000, 20(4): 349–356.
- [20] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 191–400.
- [21] 戴雪荣, 李占军, 俞立中, 等. 末次间冰期甘肃沙尘暴演化历史的黄土记录分析[J]. *地理学报*, 1999, 54(5): 445–453.
- [22] 戴雪荣, 李占军, 俞立中, 等. 兰州风尘沉积的粒度分布模式及其古气候意义[J]. *沉积学报*, 2000, 18(1): 36–42.
- [23] Zhang X Y, Arimoto R, An Z S. Late Quaternary records of the atmospheric input of eolian dust to the center of the Chinese loess Plateau[J]. *Quaternary Research*, 1994, 41: 35–43.
- [24] Zhang X Y, Arimoto R, An Z S. Glacial and interglacial patterns for Asian dust transport[J]. *Quaternary Science Review*. 1999, 18: 811–819.
- [25] Zhang X Y, Arimoto R, An Z S. Atmospheric dust loadings and their relationship to rapid oscillations of the Asian winter monsoon climate: two 250-kyr loess records[J]. *Earth and Planetary Science letters*, 2002, 202: 637–643.
- [26] Gallet S, Jahn B M, Torii M, et al. Geochemical characterization of the Luochuan Loess-paleosol sequence, China and paleoclimatic implications[J]. *Chemical Geology*. 1996, 133: 67–88.
- [27] Обручев В А. К вопросу о происхождении лёсса[М]. Томск, 1911: 8–28.
- [28] Обручев В А. Лёсса Северного Китая[С]// Труды Комиссии по изучению четвертичного периода X IV. Москва: Издательство АН СССР, 1959. 18–53.
- [29] 卢演俦. 中国黄土物质来源的初步探讨——粉沙石英颗粒表面结构的透射电子显微镜研究[J]. *地球化学*, 1976, (1): 48–53.
- [30] 文启忠. 中国黄土地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 66–128.
- [31] Sun J M. Provenance of loess material and formation of loess deposits on the Chinese Loess Plateau[J]. *Earth and Planetary Science letters*, 2002, 203: 845–859.
- [32] 刘纯平, 姚檀栋, Thompson L G, 等. 敦煌冰岩芯中微粒含量与

- 沙尘暴及气候的关系[J]. 冰川冻土, 1999a, 21(1): 9-14.
- [33] 刘纯平, 姚檀栋, 谢树成, 等. 祁连山敦德冰岩芯微粒变化特征和大气环境记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999b, 19(3): 105-113.
- [34] Biscaye P E, Grousset F E, Revel M, et al. Asian provenance of glacial dust (stage 2) in the Greenland Ice Sheet Project 2 Ice Core, Summit, Greenland[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102: 26765-26781.
- [35] Bory A M, Biscaye P E, Svensson A, et al. Seasonal variability in the origin of recent atmospheric mineral dust at North GRIP, Greenland[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 196: 123-134.
- [36] Rea D K. The paleoclimatic record provided by eolian deposition in the deep sea: The geologic history of wind[J]. Reviews of Geophysics, 1994, 32: 159-195.
- [37] Leinen M. The origin of paleoclimatic signatures in North Pacific pelagic clays: Partitioning experiments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1987, 51: 305-319.
- [38] Kyte F T. Cenozoic sedimentation history of the central North Pacific: inferences from the elemental Geochemistry of core LL44-GPC3[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1993, 57: 1719-1740.
- [39] Pettke T, Halliday A N, Hall C M, et al. Dust production and deposition in Asia and the north Pacific Ocean over past 12 Myr[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 178: 397-413.
- [40] 名古屋大学水圈科学研究所. 黄沙[M]. 全浩主译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [41] 张淑媛. 北京风尘的研究[A]. 中国第四纪委员会第二届学术会议论文集[C]. 北京: 科学出版社, 1964: 31-38.
- [42] Xuan J, Sokolik I N. Characterization of sources and emission rates of mineral dust in Northern China[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36: 4863-4876.
- [43] 张小曳, 沈志宝, 张光宇, 等. 青藏高原远源西风粉尘与黄土堆积[J]. 中国科学(D), 1996a, 26(2): 147-154.
- [44] 张小曳, 张光宇, 朱光华, 等. 中国源区粉尘的元素示踪[J]. 中国科学(D), 1996b, 26(5): 423-430.
- [45] Zhang X Y, Arimoto R, An Z S, et al. Atmospheric trace elements over source regions for Chinese dust: Concentrations, sources and atmospheric deposition on the Loess Plateau[J]. Atmospheric Environment, 1993, 27A(13): 2051-2067.
- [46] Zhang X Y, Arimoto R, Zhang D, et al. Atmospheric transport of wind-blown mineral particles in dust storm over northwestern China[J]. Science geology Sinica (supplementary issue), 1995, (1): 135-151.
- [47] Zhang X Y, Shen Z B, Zhang G Y, et al. Remote mineral aerosol in westerlies and their contributions to the Chinese Loess[J]. Science in China(series D), 1996a, 39(1): 67-76.
- [48] Zhang X Y, Zhang G Y, Zhu G H, et al. Elemental tracers for Chinese source dust. Science in China(series D), 1996b, 39(5): 512-521.
- [49] Zhang X Y, Arimoto R, Zhu G H, et al. Concentration size-distribution and deposition of mineral aerosol over Chinese desert regions[J]. Tellus, 1998, 50B(4): 317-331.
- [50] 邱新法, 曾燕, 缪启龙. 我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径[J]. 地理学报, 2001, 56(3): 316-322.
- [51] 张宁, 黄维, 陆荫, 等. 沙尘暴降生在甘肃的沉降状况研究[J]. 中国沙漠, 1998, 18(1): 32-37.
- [52] 全浩. 关于中国西北地区沙尘暴及其黄沙气溶胶高空传输路线的探讨[J]. 环境科学, 1994, 14(5): 60-64.
- [53] Sun J M, Zhang M Y, Liu T S. Spatial and temporal characteristics of dust storms in China and its surrounding regions, 1960-1999: Relations to source area and climate[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106: 10325-10334.
- [54] 岳乐平, 杨利荣, 李智佩, 等. 西北地区干枯湖床沉积粒度组成与东亚沙尘天气[J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 325-331.
- [55] 岳乐平, 杨利荣, 李智佩, 等. 阿拉善高原干涸湖床沉积物与华北地区沙尘暴[J]. 第四纪研究, 2004, 24(3): 311-317.
- [56] Wang G. X., Tuo W. Q., Du M. Y. Flux and composition of wind-eroded dust from different landscapes of an arid inland river basin in north-western China[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 58: 373-385.
- [57] 宋阳, 刘连友, 严平, 等. 中国北方5种下垫面对沙尘暴的影响研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 15-19.
- [58] 王明星, 温彻斯特 J W, 开西尔 T A, 等. 北京一次尘暴的化学成分及其潜分布[J]. 科学通报, 1982, 27(7): 419-422.
- [59] 曲绍厚, 李玉英, 周明煜, 等. 北京地区一次尘暴过程的来源[J]. 环境科学学报, 1984, 4(1): 80-85.
- [60] 庄国顺, 郭敬华, 袁慧, 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.
- [61] 李令军, 高庆生. 2000年北京沙尘暴源地解析[J]. 环境科学学报, 2001, 14(2): 1-3.
- [62] 中科院地学部. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策[J]. 地球科学进展, 2000, 15(4): 361-364.
- [63] 王涛, 陈广庭, 钱正安, 等. 中国北方沙尘暴现状及对策[J]. 中科院院刊, 2001(5): 343-348.
- [64] 李永良, 马辉, 袁慧, 等. 沙尘暴颗粒物的扫描电镜研究[J]. 现代仪器, 2005(1): 14-16.
- [65] 张兴赢, 庄国顺, 陈建民, 等. 沙尘暴颗粒物表面的元素存在形态和组成[J]. 科学通报, 2004, 49(24): 2544-2550.