

# 沙尘天气及沙尘气溶胶影响的研究进展

张宝林

(内蒙古师范大学化学与环境科学学院, 呼和浩特 010020)

**摘要:** 沙尘天气是强风把细小土壤颗粒携带到大气中去的一种现象, 沙尘是连接有机界和无机界的重要媒介。总结了国内外沙尘对气象、生态系统、社会经济活动、人体健康与人类文明等方面影响的研究成果, 提供了沙尘天气及沙尘气溶胶影响的较全面的认识, 以为沙尘研究提供思路和参考。研究表明, 目前对海洋生态系统、人体健康的影响以及沙尘活动与气候变化关系的研究较多, 而对陆地生态系统、气象、气候影响的机理性研究还不够深入, 同时亟需开展沙尘对雾和霾天气的影响以及沙尘携带污染物效应的研究。沙尘影响生物圈的各个层面, 可能引发重大的跨区域环境问题, 因而引起全球关注。沙尘活动的强弱既受气候、环境变化的影响, 也与人类活动密切相关。沙尘影响的研究表明对资源的过度追求而缺乏生态意识, 可能会造成环境灾难和文明的衰退。

**关键词:** 沙尘, 气溶胶, 气候, 生态系统, 环境

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.01.003

## Advances in Studies on the Impacts of Dust Emission and Dust Aerosol

Zhang Baolin

(College of Chemistry and Environmental Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010020)

**Abstract:** Aeolian dust is a phenomenon that strong wind entrains fine particles from soils. Dust is an important medium for coupling the organic and the inorganic spheres. Here we summarize a thorough knowledge of dust impacts on meteorology, climate, ecosystems, social activities, even human health and civilization, hoping to provide ideas and reference to further research. This study demonstrates that there was a better understanding of dust impacts on oceanic ecosystems, human health and the relationship between dust activity and climate change. However, the mechanism involved in the impacts on terrestrial ecosystems, meteorology and climate is remained not so clear so far. The study on the contributions of aeolian dust to haze and the effects of dust-carrying pollutants are urgently needed. In view of its various impacts on biosphere and the possible cross-regional environmental problems, the issue of dust attracts global concerns. The frequency of dust emission may be due to climatic, environmental changes or human activities. Studies on the impacts of dust showed that overuse of resources without ecological consciousness might cause environmental disaster and civilization collapse.

**Keywords:** dust, aerosol, climate, ecosystem, environment

### 0 引言

沙尘为一种悬浮在空气中的气溶胶, 是来自地球组成矿物的释放、传输和运移<sup>[1]</sup>。非洲撒哈拉和萨赫尔地区、亚洲的戈壁、塔克拉玛干和巴丹吉林沙漠、美国大平原、美洲中部、南美和澳大利亚中部、南非和中东地区为世界主要的沙尘源<sup>[2]</sup>。世界沙尘的50%~75%来源于撒哈拉和萨赫尔地区<sup>[3]</sup>, 该地区终年释放沙尘, 影响中东、欧洲、加勒比海和美洲等地区; 撒哈拉沙漠和阿拉伯半岛的沙尘也可能越过天山山脉影响到日本<sup>[4]</sup>。源自中国和蒙古的亚洲沙尘是

全球沙尘的第二大贡献者, 其30%沉降在沙漠地区, 20%传输到中国大陆地区, 剩余的50%降落到太平洋甚至更远的地区<sup>[5]</sup>。在盛行西风的驱动下, 亚洲沙尘可以影响到韩国、日本、太平洋岛屿, 甚至可以跨过太平洋, 到达美国、加拿大、法国的阿尔卑斯山, 甚至是北极<sup>[6-7]</sup>。亚洲沙尘对人口占全球60%的亚洲地区的生产、环境、经济和人类健康有重大影响; 由于在全球气溶胶中的重要性, 亚洲沙尘已经引起广泛的关注, 成为研究的热点<sup>[6, 8-11]</sup>。由此可见, 沙尘是重大的跨区域环境问题<sup>[12]</sup>, 引起了全球关注。

沙尘不仅尘源广阔, 且其影响不是一个简单的区域环境问题, 是一个需要在全局尺度上思考和理解的天气现象。本文从大气环境、气象、生态系统、社会经济活动以及人类健康与文明等多角度出发, 提供了

收稿日期: 2016年11月10日; 修回日期: 2017年6月23日  
第一作者: 张宝林(1971—), Email: zhangbl@imnu.edu.cn  
资助信息: 国家自然科学基金项目(41261048, 40961014)

沙尘天气及沙尘气溶胶影响的全方面认识, 以期对相关研究提供思路和参考。

## 1 沙尘天气和沙尘气溶胶的气候效应

沙尘对气候的影响主要包括直接效应和间接效应, 与沙尘效应相关的“阳伞效应”、“冰核效应”、“酸雨中和效应”和“铁假说”等研究均引起了人们的高度重视。沙尘直接效应是沙尘通过对辐射的影响改变地—气系统的辐射平衡; 而间接影响研究主要集中于由于沙尘改变云物理相关过程以及通过与碳循环间的交互作用机制等对气候变化产生的影响。

沙尘颗粒可以作为雨滴的凝结核<sup>[13]</sup>, 并使云中水汽在较高温度下发生冻结<sup>[14-17]</sup>, 但是也可能抑制降水的形成<sup>[14, 18-21]</sup>, 大气中尘埃物质增加可导致云层中小水滴数量增加, 使得云团变亮而减少抵达地面的太阳辐射, 而且由于小水滴碰撞机会减少而抑制降水的发生。在东亚地区, 卫星遥感证明云滴大小和沙尘气溶胶光学厚度显著负相关, Twomey效应明显<sup>[20]</sup>。另外, 大气中滞留的沙尘可能增加大气稳定度, 导致降水减少, 驱使干旱和沙漠化加剧<sup>[21]</sup>。由于沙尘呈碱性, 碱性离子浓度较高, 可以中和降水的酸度<sup>[22]</sup>。在日本的观测除了证明沙尘作为过冷却云的冻结核, 对形成降水起重要作用外, 也已确认沙尘冰晶核带有碱性, 对防止日本酸雨的产生起着积极作用<sup>[23]</sup>。在甘肃民勤20年的观测也表明沙尘天气在一定程度上中和了降水的酸性, 使降水的pH趋于增大<sup>[24]</sup>。

沙尘的辐射强迫依赖于沙尘粒子的颜色、大小和化学成分<sup>[25]</sup>, 沙尘的净辐射强迫还存在争议。沙尘可以通过对太阳辐射和地表长波辐射的散射和吸收改变地球的辐射状况和大气热力状况<sup>[26-31]</sup>, 直接影响到气候变化和水分循环, 影响全球气候<sup>[13]</sup>。沙尘的产生、运输和沉降在冰期—间冰期时间尺度上受气候变化的影响<sup>[32]</sup>, 但研究表明随着南极冰期温度的降低, 沙尘通量和温度相关性增强是由于南极和低纬度气候的渐进耦合, 冰期沙尘通量的增长是由于冰期水文循环的减缓导致南美洲沙尘源活动增强以及对流层顶部沙尘滞留时间的增长<sup>[33]</sup>。沙尘暴过后在大气中继续滞留的沙尘粒子的长期气候效应意义可能更为深远<sup>[34]</sup>, 且在不同地区的气候效应不同, 在沙漠地区导致地气系统加热<sup>[35]</sup>, 而在低地表反照率的湿润地区冷却地气系统<sup>[36]</sup>。沙尘诱导的区域性温暖化可能在全新世的气候突变中扮演重要角色<sup>[37]</sup>。研究表明, 冰期—间冰期之间大气中CO<sub>2</sub>含量近一半的变化, 是由于尘埃沉积通量变化所导致的南大洋海洋生产力变化引起的<sup>[38]</sup>。极地冰芯中沙尘的分析表明沙尘既是气候的产物, 又

通过海洋“生物泵”对气候起着控制作用<sup>[38]</sup>。沙尘输送的Fe(II)为大洋表层水带去可供生物吸收的营养元素, 使表层生物二甲基硫排放增加<sup>[39]</sup>, 铁和硫的相互耦合及其正反馈过程可能是影响全球气候变化的重要机制之一<sup>[39]</sup>。

## 2 对生态系统的影响

沙尘虽然可能造成多种危害, 但对自然生态系统也具有不可或缺的作用, 是生物地球化学循环中的重要一环, 尤其沙尘沉降在土壤、森林和海洋等生态系统生产力提高方面发挥着重要的“肥料效应”, 在人类文明在地球上出现前后都起到过积极的作用。

### 2.1 对陆地生态系统的影响

风沙活动能局部改变地表形态, 形成各种风沙地貌, 并造成风沙危害。在春季即使在沙漠化程度较轻, 植被盖度较大的固定、半固定沙丘上, 有限的植被高度尚不足以完全防止风蚀<sup>[40]</sup>。沙尘活动引起的营养物质再分配对生态环境有重要影响<sup>[41]</sup>, 王训明等较好地总结了风沙活动对陆地生态系统影响<sup>[42]</sup>。在沙尘源区, 跃移颗粒掩埋植被, 侵蚀植被根部、磨蚀叶片, 抑制植物生长甚至导致植被凋亡<sup>[43]</sup>, 部分以悬移形式搬运的细颗粒也可能被植株株冠俘获, 形成“养分肥岛”<sup>[44]</sup>。由于细颗粒物质和养分的不断损失, 风沙源区地表粗化、养分减少和土壤持水能力下降<sup>[45]</sup>, 区域生态系统植物种群退化及生物多样性减少<sup>[46]</sup>。沙尘活动可使植被群落及生态系统结构发生变化<sup>[47]</sup>, 蠕移和跃移使植物群落在景观上表现为点状或斑块状空间格局<sup>[48]</sup>, 悬移导致土壤物质在景观尺度上表现为连续的面状分异<sup>[49]</sup>。沙尘颗粒物所含的营养物质对陆地生态系统有深远影响, 可提供植被所需的基础养分<sup>[50]</sup>, 改变土壤的酸碱性和理化性质<sup>[51]</sup>, 以及为微生物生长提供碳基质等<sup>[52]</sup>, 从而影响生态系统及地表生物地球化学循环过程。沙尘对沉降区的土壤形成与发育、养分输入<sup>[42, 53]</sup>均有重要影响, 但目前尚缺乏对陆地沉降区生态系统影响的系统研究<sup>[42]</sup>。

### 2.2 对海洋生态系统的影响

目前, 沙尘对海洋生态系统影响的研究比较成熟。每年通过大气输入海洋的沙尘达450 Tg, 其中北大西洋43%, 南大西洋4%, 北太平洋15%, 南太平洋6%, 印度洋25%, 南大洋6%<sup>[54]</sup>。沙尘影响表层水化学, 影响海洋环境和生态系统, 沉降于大洋中的尘埃对海洋浮游植物生产力具有重要影响<sup>[54-59]</sup>, 提供了生物地球化学循环中的重要元素, 尤其是氮<sup>[58]</sup>、磷<sup>[57]</sup>、铁<sup>[60-61]</sup>, Fe(II)为大洋表层水带去可供生物吸收的营养元素。通过大气粉尘提供给远洋的铁主要来自于世

世界各地的沙漠地区，铁的减少导致海洋初级生产力降低<sup>[62-63]</sup>。在亚洲沙尘的高发期之后，在北太平洋观测到海洋初级生产力的增长<sup>[61, 64]</sup>，黄海浮游植物的爆发<sup>[65]</sup>。此外，研究表明沙尘也会从大陆携带氮、磷到加勒比海和亚马孙流域<sup>[25]</sup>。

除了增肥海洋，影响开阔海域浮游生物的种群结构、植物群落初级生产力以及固碳能力之外，沙尘也可能具有负面效应。如前所述，沙尘颗粒可能携带有害物质和微生物，对陆地和海洋生态系统产生不利影响。科学家已经证明尘羽也携带细菌、真菌和病毒等微生物，它们中的大多数是植物的致病菌。例如，加勒比海扇的一种传染病就是由于来自非洲陆地的真菌 *Aspergillus sedowii* 引起的<sup>[66]</sup>。

### 3 对工农业生产和社会经济的影响

#### 3.1 对工业生产活动的影响

风沙通过吹蚀、冲移、破坏和埋压等危害交通线路，磨损钢轨<sup>[67]</sup>，破坏道路、建筑物和机械，影响交通系统。兰新线新疆段和乌吉线多次因沙尘天气造成客车、货车迟发、晚点和停运<sup>[35]</sup>，兰州和敦煌等地机场也因沙尘天气多次关闭<sup>[67]</sup>。强沙尘暴和特强沙尘暴往往携带砂砾，狂风能刮翻车辆。沙尘天气降低能见度<sup>[68]</sup>，可能引发交通事故；沙尘会引起航空器飞行员眩晕，造成安全隐患<sup>[69]</sup>。沙尘影响无线电波的传播<sup>[70]</sup>，伴随强沙尘暴和特强沙尘暴的狂风能刮断电杆，破坏通讯系统。沙尘颗粒也会使输电线路导线电晕放电强度明显增强，电晕损失增大<sup>[71]</sup>。强沙尘暴和特强沙尘暴破坏各种工农业设施<sup>[67]</sup>，对工农业生产产生重大影响，如降低太阳能装置的工作效率<sup>[69]</sup>，损坏风力发电机<sup>[72]</sup>。

#### 3.2 对农业生产活动的影响

据估计，全球每年进入大气中的沙尘气溶胶约有1000~3000 Tg<sup>[73]</sup>，其中大约有800 Tg来自中国沙漠地区<sup>[5]</sup>。强沙尘天气携带走土壤营养（如磷<sup>[74]</sup>），降低土壤肥力和水分保持能力，在春天吹跑种子，掩埋农田，以埋压、风蚀和割打等方式危害农业生产<sup>[67]</sup>，破坏和降低农业生产力。如1934年5月9日1200万吨尘土下降到芝加哥<sup>[75]</sup>；1952年4月9日甘肃永昌县境内被流沙掩埋农田8000多亩（1亩≈666.7 m<sup>2</sup>）；1953年4月7日甘肃民勤昌宁等8乡3360亩农田遭沙埋<sup>[35]</sup>；1983年2月发生于墨尔本的沙尘暴刮走了维多利亚耕地25万吨表层土壤<sup>[76]</sup>；1993年5月5日的沙尘暴在河西走廊使一些农田风蚀深度10~50 cm，平均风蚀量近70 m<sup>3</sup>/亩，大量肥沃土壤被刮走<sup>[67]</sup>；2000年春季内蒙古有23.4万亩农作物因沙尘暴受灾<sup>[72]</sup>。此外，沙尘携带的有害

物质和微生物，也可能给农业生产带来不利影响，如加勒比地区甘蔗锈病是由来自亚洲和非洲的称为 *Puccinia melanocephala* 的真菌引起的，动物口蹄疫也可能由大气传播<sup>[66]</sup>。强沙尘暴和特强沙尘暴还会破坏各种农业设施<sup>[67]</sup>，如1961年5月31日—6月1日，新疆下马崖等地40多孔坎儿井被沙填埋<sup>[35]</sup>，2000年春季内蒙古423眼人畜饮水井被风沙淤埋<sup>[72]</sup>。强风还会造成牲畜伤亡，如2000年春季内蒙古因沙尘暴影响，10471头（只）牲畜死亡，14940头（只）牲畜丢失<sup>[72]</sup>。

#### 3.3 对社会经济的影响

沙尘天气，尤其是沙尘暴，会损坏房屋、影响公路、铁路和民航运输，破坏工农业生产设施，强风还会造成人畜伤亡，造成巨大的经济损失。1988—1992年，西藏的贡嘎机场因风沙天气每年民航运输直接经济损失达72万元；1979年4月10日，沙尘暴使新疆南疆铁路中断行车20天，直接经济损失2000余万元；1993年5月5—6日，4个省（区）72个旗（县）1200万人口受到沙尘暴袭击，毁坏房屋，伤亡人、畜，直接经济损失7.25亿元<sup>[67]</sup>。2000年春季，内蒙古因沙尘暴造成的直接经济损失高达8569万元，其中农业损失7740万元<sup>[72]</sup>。马国霞等采用虚拟市场评价法对2005年中国北方沙尘暴造成的经济损失进行了估算，内蒙古损失最大，达56.9亿元<sup>[77]</sup>。

### 4 对大气环境质量的影响

沙尘使大气中颗粒物浓度急剧增加（TSP、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>浓度升高<sup>[78-79]</sup>），能见度降低，气溶胶光学厚度增大，大气环境质量下降<sup>[80]</sup>，沙尘下落形成的大气降尘是近期中国很多城市发生雾和霾的主要元凶<sup>[81]</sup>。空气质量监测表明沙尘天气对城市大气环境质量产生不利影响，沙尘天气过程使中国北方城市PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>质量浓度分别增加7.5%~1141.2%和344.0%~2562.1%<sup>[82]</sup>。沙尘天气发生时PM<sub>10</sub>是呼和浩特<sup>[83]</sup>、北京<sup>[84]</sup>、上海<sup>[85]</sup>、西安<sup>[86]</sup>、兰州<sup>[87]</sup>等地的主要污染物。此外，无论是从沙尘源地还是在输送途径中获得，沙尘颗粒携带重金属（如砷<sup>[88]</sup>、镉、铝和铅<sup>[89]</sup>）<sup>[90]</sup>、放射性同位素（如钚<sup>[91]</sup>、铯-137<sup>[92]</sup>）、有毒化学物质（如杀虫剂、除草剂<sup>[93-94]</sup>）、硫酸盐<sup>[95]</sup>、硝酸盐、有机复合物、真菌、细菌<sup>[96-99]</sup>或者病毒，影响大气环境质量。但是，沙尘天气也具有清除SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO等污染物作用。大风沙尘天气使这些污染物浓度大幅度下降，对当地人为源所排放污染物具有清除作用，因为伴随沙尘天气的大风等气象条件有利于SO<sub>2</sub>和NO<sub>2</sub>的扩散<sup>[82]</sup>，但也有研究表明沙尘对CO、SO<sub>2</sub>

和NO<sub>2</sub>质量浓度影响不大<sup>[84, 87, 100]</sup>, 且对O<sub>3</sub>的影响还不甚明朗<sup>[82]</sup>。

## 5 对人体健康和人类文明的影响

### 5.1 对人体健康的影响

沙尘污染是城市居民呼吸道感染的主要环境诱因<sup>[101]</sup>, 对暴露人群健康十分不利<sup>[102-103]</sup>。沙尘对人类健康的影响表现在多个方面, 如对细胞膜和DNA的破坏<sup>[104]</sup>、肺部感染(矿物沙尘和有机物质结合<sup>[105]</sup>)、过敏反应(沙尘颗粒上附有细菌和真菌孢子<sup>[3]</sup>)和呼吸系统疾病<sup>[66, 93, 106]</sup>。因为PM<sub>10</sub>等颗粒物易被人体吸入, 长期暴露于沙尘环境使接触人群呼吸、循环等系统患病率显著增高<sup>[107]</sup>, 如非职业性尘肺病<sup>[75, 108]</sup>。Kwon等<sup>[109]</sup>认为在美国风蚀沙尘中的粒径较大的颗粒与死亡率无关, 因为粒径较小的颗粒(如空气动力学粒径<2.5 μm, PM<sub>2.5</sub>)更可能在肺的肺泡区沉积, 它们的排出比呼吸系统中的其他粒子更慢。在韩国进行的相似研究表明亚洲沙尘和死亡风险的相关性较弱, 但是沙尘事件与由于心脑血管和呼吸系统疾病引起的死亡的关联性较强<sup>[109]</sup>。除大风和尘埃颗粒外, 沙尘细颗粒易吸附有害气体、重金属<sup>[88-90, 110-111]</sup>、放射性同位素<sup>[91-92]</sup>、具“三致效应”的有毒化学物质<sup>[93-94]</sup>及病原微生物<sup>[96-97, 112-114]</sup>等, 刺激和腐蚀呼吸道, 影响淋巴结、巨噬细胞的功能, 使免疫力下降, 增加对细菌感染的敏感性。细小的粒子与较粗大的颗粒相比还含有较高浓度的硫酸盐<sup>[95]</sup>、硝酸盐、有机复合物以及容易进行生物转化的金属。沙尘落在人体皮肤上, 可能阻塞皮脂腺和汗腺, 引起皮炎; 落入眼中, 导致结膜炎。沙尘影响紫外线的杀菌作用, 使空气负氧离子减少, 使对天气变化敏感的人感到神经紧张和疲劳; 沙尘使能见度降低, 使人产生压抑和疲倦的感觉。除此之外, 沙尘可能在沿海区域引发有毒性藻类的爆发, 人们通过消费受到污染的海产品而影响到人类的健康<sup>[3]</sup>。强沙尘暴和特强沙尘暴时因天黑迷路, 强风裹挟, 易造成人身伤亡<sup>[35]</sup>。如1993年5月5—6日, 使4×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>范围内的4个省(区)72个旗(县)1200万人口受到袭击, 造成85人死亡, 264人受伤, 31人失踪<sup>[67]</sup>。

### 5.2 对人类文明的影响

沙尘活动的强弱既受气候、环境变化的影响, 也与人类活动密切相关。距今3000多年以前, 我国史书上有关于沙尘天气的记载, 史书中浮尘常记作“雨土”“黄砂”等, 关于沙尘暴的记录有“飞沙如雨”“尘沙涨天”和“黄雾四塞”等<sup>[67]</sup>。中国西北地区的沙尘暴对古代文明产生过重大影响, 如楼兰、尼雅文明的消失<sup>[67]</sup>; 曾经辉煌的美索不达米亚文明也被

沙尘所掩埋。19世纪中叶, 美国鼓励向半干旱的西部大草原移民开荒, 以发展西部并解决就业问题, 大面积不宜农作的天然草原被开垦, 过度垦牧造成土地大面积沙化, 1934年5月12日发生了震惊世界的“黑风暴”事件。研究表明19世纪30—40年代美国南部大平原的沙尘暴与大萧条之间有着密切的联系<sup>[75]</sup>。与此相似, 20世纪30年代加拿大以及60年代的前苏联部分地区沙尘肆虐也是无视生态的大规模开发造成的<sup>[115]</sup>。1954—1965年, 苏联因开垦哈萨克斯坦、西伯利亚的4000万 hm<sup>2</sup>“处女地”引发的灾难, 连邻国罗马尼亚、匈牙利和南斯拉夫也都尘土迷漫。此外, 秘鲁南部冰芯中以公元920和600年为中心的两段130年的沙尘记录也可能与前印加王国农业生产活动有关<sup>[116]</sup>。因此, 对资源的过度追求而缺乏生态意识, 可能会造成环境灾难和文明的衰退。

当然, 沙尘对于人类的影响也具有两面性, 因为沙尘对人类的繁衍生息也做出过重大贡献。例如, 黄土高原的“风成说”认为作为中华文明摇篮的黄土高原就是250万年来由沙尘堆积形成的。

## 6 结语

综上对国内外沙尘效应研究的回顾和分析, 可以看出, 沙尘天气及沙尘气溶胶不仅造成沙尘源区的生态破坏、引发沉降区的环境污染, 还影响着气象、工农业和海洋生产、大洲的形成、动植物的生存, 甚至是人体健康与人类文明。目前, 在沙尘对海洋生态系统和人类健康的影响以及沙尘活动与气候变化关系等方面取得了长足进展, 而对陆地生态系统影响的机理性研究较少, 对气象影响的机理性研究还不够深入和精细化, 同时, 亟需开展沙尘对雾和霾天气的影响以及沙尘载带污染物效应等方面的研究。

### 参考文献

- [1] 牛生杰. 中国北方沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 2011.
- [2] Washington R, Todd M, Middleton N J, et al. Dust-storm source areas determined by the Total Ozone Monitoring Spectrometer and surface observations. *Annals of the Association of American Geographers*, 2003, 93(2): 297-313.
- [3] Griffin D, Kellogg C. Dust storms and their impact on ocean and human health: dust in Earth's atmosphere. *EcoHealth*, 2004, 1(3): 284-295.
- [4] Tanaka T Y, Kurosaki Y, Chiba M, et al. Possible transcontinental dust transport from North Africa and the Middle East to East Asia. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(21): 3901-3909.
- [5] Zhang X Y, Arimoto R, An Z S. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D23): 28041-28047.
- [6] 张宝林, 杨铭德. 内蒙古中东部沙尘源解析. *科学技术与工程*, 2014, 14(4): 7-11.
- [7] Bory A J. A 10000 km dust highway between the Taklamakan Desert and Greenland. *Pages Magazine*, 2014, 22(2): 72-73.
- [8] Zhang B, Tsunekawa A, Tsubo M. Contributions of sandy lands and stony deserts to long-distance dust emission in China and Mongolia during 2000-2006. *Global and Planetary Change*, 2008, 60(3/4): 487-504.

- [9] Zhang B, Tsunekawa A, Tsubo M. Identification of dust hot spots from multi-resolution remotely sensed data in eastern China and Mongolia. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2015, 226(4): 1-18.
- [10] Zhang B, Tsunekawa A, Tsubo M. Satellite monitoring and synoptic analysis of dust storms from China and Mongolia: a case study during 6-11 April, 2001. *Sand Dune Study*, 2008, 55(1): 13-23.
- [11] Zhang B, Guan Z, Luo R. Test of a dust module in a regional climate model over China and Mongolia. *Journal of Agriculture, Biotechnology and Ecology*, 2010, 3(2): 133-149.
- [12] 吴焕忠. 我国沙尘暴灾害述评及减灾对策. *农村生态环境*, 2002, 18(2): 1-5.
- [13] Tegen I, Lacis A A. Modeling of particle size distribution and its influence on the radiative properties of mineral dust aerosol. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, 101(D14): 19237-19244.
- [14] Rosenfeld D, Rudich Y, Lahav R. Desert dust suppressing precipitation: a possible desertification feedback loop. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2001, 98(11): 5975-5980.
- [15] Sassen K. Indirect climate forcing over the western US from Asian dust storms. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(10): 101-103.
- [16] Sassen K, Demott P J, Prospero J M, et al. Saharan dust storms and indirect aerosol effects on clouds: CRYSTAL-FACE results. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(12): 1633.
- [17] Demott P J, Sassen K, Poellot M R, et al. African dust aerosols as atmospheric ice nuclei. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(14): 1732.
- [18] Mahowald N M, Kiehl L M. Mineral aerosol and cloud interactions. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(9): 1475.
- [19] Penner J E, Dong X, Chen Y. Observational evidence of a change in radiative forcing due to the indirect aerosol effect. *Nature*, 2004, 427(6971): 231-234.
- [20] Ou S C, Liou K N, Hsu N C, et al. Satellite remote sensing of dust aerosol indirect effects on cloud formation over Eastern Asia. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(22): 7257-7272.
- [21] Charney J G. Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1975, 101(428): 193-202.
- [22] Lee B K, Hong S H, Lee D S. Chemical composition of precipitation and wet deposition of major ions on the Korean peninsula. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(4): 563-575.
- [23] 翟章, 许宝玉, 贺慧霞. “930505” 沙尘暴的若干启示. *干旱区地理*, 1994, 17(1): 63-67.
- [24] 王荣基, 李军. 民勤地区酸雨变化特征与沙尘的关系. *甘肃农业科技*, 2015(4): 26-29, 30.
- [25] Perkins S. Dust, the thermostat. *Science News Online*, 2001, 160: 13.
- [26] Sokolik I N, Toon O B. Direct radiative forcing by anthropogenic airborne mineral aerosols. *Nature*, 1996, 381(6584): 681-683.
- [27] Alpert P, Kaufman Y J, Shay-El Y, et al. Quantification of dust-forced heating of the lower troposphere. *Nature*, 1998, 395(6700): 367-370.
- [28] Satheesh S K, Ramanathan V. Large differences in tropical aerosol forcing at the top of the atmosphere and earth's surface. *Nature*, 2000, 405(6782): 60-63.
- [29] Kaufman Y J, Tanré D, Dubovik O, et al. Absorption of sunlight by dust as inferred from satellite and ground-based remote sensing. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(8): 1479-1482.
- [30] Kinne S, Pueschel R. Aerosol radiative forcing for Asian continental outflow. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(30): 5019-5028.
- [31] Perkins S. Dust, the thermostat. *Science News*, 2001, 160(13): 200-201.
- [32] Kohfeld K E, Harrison S P. DIRTMAP: the geological record of dust. *Earth-Science Reviews*, 2001, 54(1/2/3): 81-114.
- [33] Lambert F, Delmonte B, Petit J R, et al. Dust-climate couplings over the past 800000 years from the EPICA Dome C ice core. *Nature*, 2008, 452(7187): 616-619.
- [34] 张强, 王胜. 论特强沙尘暴(黑风)的物理特征及其气候效应. *中国沙漠*, 2005, 25(5): 675-681.
- [35] 方宗义, 朱福康, 江吉喜, 等. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997.
- [36] Sokolik I, Golitsyn G. Investigation of optical and radiative properties of atmospheric dust aerosols. *Atmospheric Environment*, Part A. *General Topics*, 1993, 27(16): 2509-2517.
- [37] Overpeck J, Rind D, Lacis A, et al. Possible role of dust-induced regional warming in abrupt climate change during the last glacial period. *Nature*, 1996, 384(6608): 447-449.
- [38] Watson A J, Bakker D C E, Ridgwell A J, et al. Effect of iron supply on Southern Ocean CO<sub>2</sub> uptake and implications for glacial atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nature*, 2000, 407(6805): 730-733.
- [39] 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. *科学通报*, 2001, 46(3): 191-197.
- [40] 刘树林, 王涛, 郭坚. 浑善达克沙地春季风沙活动特征观测研究. *中国沙漠*, 2006, 26(3): 356-361.
- [41] Okin G S, Gillette D A, Herrick J E. Multi-scale controls on and consequences of aeolian processes in landscape change in arid and semi-arid environments. *Journal of Arid Environments*, 2006, 65(2): 253-275.
- [42] 王训明, 周娜, 郎丽丽, 等. 风沙活动对陆地生态系统影响研究进展. *地球科学进展*, 2015, 30(6): 627-635.
- [43] 张琳琳, 赵晓英, 原慧. 风对植物的作用及植物适应对策研究进展. *地球科学进展*, 2013, 28(12): 1349-1353.
- [44] Ravi S, D'Odorico P, Okin G S. Hydrologic and aeolian controls on vegetation patterns in arid landscapes. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(24): L23S-L24S.
- [45] Zobeck T M, Fryrear D W. Chemical and physical characteristics of windblown sediment II. Chemical characteristics and total soil and nutrient discharge. *Transactions of the ASAE*, 1986, 29(4): 1037-1041.
- [46] Okin G S, Murray B, Schlesinger W H. Degradation of sandy arid shrubland environments: observations, process modelling, and management implications. *Journal of Arid Environments*, 2001, 47(2): 123-144.
- [47] Peters D P C, Bestelmeyer B T, Herrick J E, et al. Disentangling complex landscapes: new insights into arid and semiarid system dynamics. *BioScience*, 2006, 56(6): 491-501.
- [48] Peters D P C, Havstad K M. Nonlinear dynamics in arid and semi-arid systems: interactions among drivers and processes across scales. *Journal of Arid Environments*, 2006, 65(2): 196-206.
- [49] Hernández-Cordero A I, Pérez-Chacón Espino E, Hernández-Calvento L. Vegetation, distance to the coast, and aeolian geomorphic processes and landforms in a transgressive arid coastal dune system. *Physical Geography*, 2015, 36(1): 60-83.
- [50] Swap R, Garstang M, Greco S, et al. Saharan dust in the Amazon Basin. *Tellus B*, 1992, 44(2): 133-149.
- [51] von Suchodoletz H, Glaser B, Thrippleton T, et al. The influence of Saharan dust deposits on La Palma soil properties (Canary Islands, Spain). *CATENA*, 2013, 103: 44-52.
- [52] Ley R E, Williams M, Schmidt S K. Microbial population dynamics in an extreme environment: controlling factors in talus soils at 3750 m in the Colorado Rocky Mountains. *Biogeochemistry*, 2004, 68(3): 313-335.
- [53] Bristow C S, Hudson-Edwards K A, Chappell A. Fertilizing the Amazon and equatorial Atlantic with West African dust. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(14).
- [54] Jickells T D, An Z S, Andersen K K, et al. Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate. *Science*, 2005, 308(5718): 67-71.
- [55] Martin J H. Glacial-interglacial CO<sub>2</sub> change: the iron hypothesis. *Paleoceanography*, 1990, 5(1): 1-13.
- [56] Martin J H, Coale K H, Johnson K S, et al. Testing the iron hypothesis in ecosystems of the equatorial Pacific Ocean. *Nature*, 1994, 371(6493): 123-129.
- [57] 金杰, 刘素美. 海洋浮游植物对磷的响应研究进展. *地球科学进展*, 2013, 28(2): 253-261.
- [58] 高会旺, 姚小红, 郭志刚, 等. 大气沉降对海洋初级生产过程与氮循环的影响研究进展. *地球科学进展*, 2014, 29(12): 1325-1332.
- [59] Coale K H, Johnson K S, Fitzwater S E, et al. A massive phytoplankton bloom induced by an ecosystem-scale iron fertilization experiment in the equatorial Pacific Ocean. *Nature*, 1996, 383(6600): 495-501.
- [60] Hand J L, Mahowald N M, Chen Y, et al. Estimates of atmospheric-processed soluble iron from observations and a global mineral aerosol model: biogeochemical implications. *Journal of*

- Geophysical Research: Atmospheres, 2004, 109(D17): D17205.
- [61] Han Y, Zhao T, Song L, et al. A linkage between Asian dust, dissolved iron and marine export production in the deep ocean. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(25): 4291-4298.
- [62] Gregg W W, Conkright M E, Ginoux P, et al. Ocean primary production and climate: global decadal changes. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(15): 1809.
- [63] Martin J H, Fitzwater S E. Iron deficiency limits phytoplankton growth in the north-east Pacific subarctic. *Nature*, 1988, 331(6154): 341-343.
- [64] Young R W, Carder K L, Betzer P R, et al. Atmospheric iron inputs and primary productivity: phytoplankton responses in the North Pacific. *Global Biogeochemical Cycles*, 1991, 5(2): 119-134.
- [65] Tan S, Shi G. Transport of a severe dust storm in March 2007 and impacts on chlorophyll a concentration in the Yellow Sea. *SOLA*, 2012, 8: 85-89.
- [66] Raloff J. Ill winds. *Science News Online*, 2001, 160: 14.
- [67] 王澄海. 气候变化与荒漠化. 北京: 气象出版社, 2003.
- [68] Mahowald N M, Ballantine J A, Feddema J, et al. Global trends in visibility: implications for dust sources. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, 7: 3309-3339.
- [69] Kutiel H, Furman H. Dust storms in the Middle East: sources of origin and their temporal characteristics. *Indoor and Built Environment*, 2003, 12(6): 419-426.
- [70] 杨德保, 尚可政, 王式功. 沙尘暴. 北京: 气象出版社, 2003.
- [71] 刘云鹏, 朱雷, 耿江海, 等. 沙尘粒径效应对分裂导线电晕特性的影响. *高压技术*, 2015, 41(9): 3048-3053.
- [72] 王革丽, 吕达仁, 尤莉. 浑善达克沙地沙尘暴气候特征分析. *气候与环境研究*, 2002, 7(4): 433-439.
- [73] Zender C S, Miller R L R L, Tegen I. Quantifying mineral dust mass budgets: terminology, constraints, and current estimates. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2004, 85(48): 509-512.
- [74] Katra I, Gross A, Swet N, et al. Substantial dust loss of bioavailable phosphorus from agricultural soils. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24736.
- [75] Reis R A. Great historic disasters: the dust bowl. New York: Infobase Publishing, 2008.
- [76] Bell A. Wind erosion: the winnowing of our soils. *Ecos*, 1990, 66(summer 1990/1991): 4-9.
- [77] 马国霞, 石敏俊, 赵学涛, 等. 中国北方地区沙漠化造成经济损失的货币评价. *中国沙漠*, 2008, 28(4): 627-633.
- [78] Pey J, Querol X, Alastuey A, et al. African dust outbreaks over the Mediterranean Basin during 2001-2011: PM<sub>10</sub> concentrations, phenomenology and trends, and its relation with synoptic and mesoscale meteorology. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(3): 1395-1410.
- [79] 何新星, 王跃思, 温天雪, 等. 2004年春季北京一次沙尘暴的理化特性分析. *环境科学*, 2005, 26(5): 1-6.
- [80] Han X, Ge C, Tao J, et al. Air quality modeling for a strong dust event in East Asia in March 2010. *Aerosol and Air Quality Research*, 2012, 12: 615-628.
- [81] 杜宏印, 郭浩, 郭翠萍, 等. 沙尘溯源方法研究进展. *世界林业研究*, 2016, 29(3): 59-64.
- [82] 陈杰, 赵素平, 殷代英, 等. 沙尘天气过程对中国北方城市空气质量的影响. *中国沙漠*, 2015, 35(2): 423-430.
- [83] 谷雨, 李红丽, 董智, 等. 2008年春季呼和浩特沙尘天气与TSP和PM<sub>10</sub>污染的关系. *中国环境监测*, 2009, 25(5): 95-99.
- [84] 李珊珊, 潘涛, 闫静, 等. 2015年春季北京市一次沙尘天气过程分析. *环境科学与技术*, 2016, 39(4): 137-143.
- [85] 李贵玲, 周敏, 陈长虹, 等. 2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征. *环境科学*, 2014, 35(5): 1644-1653.
- [86] 宁海文, 王式功, 杜继稳. 西安沙尘天气特征及其对空气质量的影响. *中国沙漠*, 2005, 25(6): 94-98.
- [87] 郭勇涛, 辛金元, 李旭, 等. 沙尘对兰州市大气环境质量的影响. *中国沙漠*, 2015, 35(4): 977-982.
- [88] Holmes C W, Miller R. Atmospherically transported elements and deposition in the Southeastern United States: local or transoceanic? *Applied Geochemistry*, 2004, 19(7): 1189-1200.
- [89] Batjargal Z, Dulam J, Chung Y S. Dust Storms are an Indication of an Unhealthy Environment in East Asia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 114(1-3): 447-460.
- [90] Rojas C M, Injuk J, Van Grieken R, et al. Dry and wet deposition fluxes of Cd, Cu, Pb and Zn into the Southern Bight of the North Sea. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1993, 27(2): 251-259.
- [91] Hirose K, Igarashi Y, Aoyama M, et al. Recent trends of plutonium fallout observed in Japan: plutonium as a proxy for desertification. *Journal of Environmental Monitoring*, 2003, 5(2): 302-307.
- [92] Papastefanou C, Manolopoulou M, Stoulos S, et al. Coloured rain dust from Sahara Desert is still radioactive. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2001, 55(1): 109-112.
- [93] O'Hara S L, Wiggs G F, Mamedov B, et al. Exposure to airborne dust contaminated with pesticide in the Aral Sea region. *The Lancet*, 2000, 355(9204): 627-628.
- [94] Burkholder J A, Jr. Glasgow H B. *Pfiesteria piscicida* and other Pfiesteria-like dinoflagellates: behavior, impacts, and environmental controls. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42: 1052-1075.
- [95] Usher C R, Al-Hosney H, Carlos-Cuellar S, et al. A laboratory study of the heterogeneous uptake and oxidation of sulfur dioxide on mineral dust particles. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, 107(D23): 11-16.
- [96] Kellogg C A, Griffin D W. African dust carries microbes across the ocean: are they affecting human and ecosystem health? US Department of the Interior, US Geological Survey, 2003.
- [97] Echigo A, Hino M, Fukushima T, et al. Endospores of halophilic bacteria of the family Bacillaceae isolated from non-saline Japanese soil may be transported by Kosa event (Asian dust storm). *Saline Systems*, 2005, 1: 8.
- [98] Maki T, Kurosaki Y, Onishi K, et al. Variations in the structure of airborne bacterial communities in Tsogt-Ovoo of Gobi desert area during dust events. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 2016: 1-12.
- [99] Yamaguchi N, Ichijo T, Sakotani A, et al. Global dispersion of bacterial cells on Asian dust. *Nature Scientific Reports*, 2012, 2.
- [100] 唐红军, 张凯, 刘兵, 等. 北方沙尘天气过程对遂宁市环境空气质量的影响. *环境与健康杂志*, 2015, 32(8): 731-734.
- [101] 董静梅, 刘举科. 沙尘环境与人体微生态免疫调控的关系研究. *环境与职业医学*, 2014, 31(10): 811-815.
- [102] 王金玉, 李盛, 王式功, 等. 沙尘污染对暴露人群呼吸系统健康的影响. *中国沙漠*, 2013, 33(3): 826-831.
- [103] 王菲菲, 郑灿军, 郭新彪. 沙尘与非沙尘PM<sub>2.5</sub>对入肺成纤维细胞缝隙连接通讯的影响. *毒理学杂志*, 2005, 19(3): 308.
- [104] Athar M, Iqbal M, Beg M U, et al. Airborne dust collected from Kuwait in 1991-1992 augments peroxidation of cellular membrane lipids and enhances DNA damage. *Environment International*, 1998, 24(1): 205-212.
- [105] Korényi-Both A L, Molnár A C, Fidelus-Gort R. Al Eskan disease: desert storm pneumonitis. *Military Medicine*, 1992, 157: 452-462.
- [106] Braun-Fahrlander C, Riedler J, Herz U, et al. Environmental exposure to endotoxin and its relation to asthma in school-age children. *New England Journal of Medicine*, 2002, 347(12): 869-877.
- [107] 杨振华, 孟紫强, 潘竞界, 等. 沙尘暴多发地区人群呼吸与循环等系统疾病的现患调查. *环境与职业医学*, 2008, 25(1): 8-12.
- [108] 孟紫强, 杨振华, 潘竞界, 等. 沙尘天气多发区民勤县发现多例非职业性尘肺病. *生态毒理学报*, 2008, 3(4): 337-342.
- [109] Kwon H, Cho S, Chun Y, et al. Effects of the Asian dust events on daily mortality in Seoul, Korea. *Environmental Research*, 2002, 90(1): 1-5.
- [110] 张克磊, 朱建雯, 魏疆. 乌鲁木齐夏季大气降尘中重金属的分布特征. *环境工程*, 2014, 32(2): 98-101.
- [111] 赵锁志, 王沛东, 包凤琴, 等. 呼和浩特市大气降尘中镉赋存形态分析. *岩矿测试*, 2009, 28(4): 329-332.
- [112] 白雪, 史应武, 董秀黄, 等. 塔克拉玛干沙漠西缘春季沙尘天气空气可培养真菌多样性. *新疆农业科学*, 2013, 50(7): 1314-1321.
- [113] 胡克, 吴东辉, 杨德明, 等. 远源沙尘暴对城市生态环境影响的初步研究. *长春科技大学学报*, 2001, 31(2): 176-179.
- [114] 姚檀栋, 向述荣, 张晓君, 等. 马兰和普若岗日冰芯记录的微生物学特征. *第四纪研究*, 2003, 23(2): 193-199.
- [115] 张景全. 20世纪中前期加拿大及前苏联的沙尘灾害. *东北亚论坛*, 2002(4): 56-58.
- [116] Thompson L G, Davis M E, Mosley-Thompson E, et al. Pre-Incan agricultural activity recorded in dust layers in two tropical ice cores. *Nature*, 1988, 336(6201): 763-765.