

亚洲风尘循环的过程、机制和环境效应

刘晓东¹, 宋友桂¹, 孙有斌¹, 刘青松², 车慧正³

(1. 中国科学院地球环境研究所, 西安 710061; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
3. 中国气象科学院, 北京 100081)

摘要:由中国科学院地球环境研究所牵头申报的国家重点研发计划“全球变化及应对”重点项目“亚洲风尘循环的过程、机制和环境效应”获国家科技部批准立项。本文简要介绍了该项目的立项背景、研究意义、研究目标与课题分解、研究内容以及预期成果与效益。项目以亚洲风尘从源到汇的多尺度变化为主线,旨在阐明现代与地质时期亚洲风尘排放、迁移和沉降的时空变化特征及其影响机制,特别是自然因素和人为活动对亚洲风尘释放的相对贡献。基于风尘源区的现代气象观测数据、卫星遥感和大气再分析资料,并整合中亚干旱区、黄土高原以及北太平洋地区的风尘沉积记录,开展从源区排放到近距离迁移、远程输送与沉积的全过程研究。通过数值模拟研究风尘-气候的相互作用,揭示区域和全球大气环流对亚洲风尘循环的调制作用。同时,建立不同尺度亚洲风尘循环模型和时空变化数据平台,评估亚洲风尘对区域气候变化、生态系统和人居环境的影响,为我国生态环境治理和未来风尘变化的环境效应预估提供科学依据。

关键词:重点研发项目; 亚洲风尘循环; 风尘-气候相互作用; 风尘的环境效应

Process, mechanism and environmental effect of the dust cycle in Asia

LIU Xiaodong¹, SONG Yougui¹, SUN Youbin¹, LIU Qingsong², CHE Huizheng³

(1. Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China;
2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
3. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The Ministry of Science and Technology of China has granted a project named “Process, mechanism and environmental effect of the dust cycle in Asia”, which is led by the Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences. This project belongs to the special sub-program “Global Change and Adaptation” of the National Key Research and Development Program. This paper briefly summarizes the background, significance, research objective and task decomposition, the research content and the expected results and benefits. This project will focus on multi-scale changes from the source to sink of Asian dust, clarify the temporal and spatial variations of Asian dust emission, transportation and sedimentation of both modern Asian dust and geological period and their effect mechanism, and especially identify the relative contribution of natural factors and human activities on the Asian dust cycle. Based on the meteorological observations over the source area, satellite and remote sensing and atmospheric reanalysis data, the project will carry out dust emission, proximal migration, and distal transportation and deposition process, coupled with dust records from the Arid Asian Interior, Chinese Loess Plateau and northern Pacific. At the same time, through the numerical simulations with various climate models and the establishment of Asian dust data platform at different time-scales, the project will try to reveal the dust-climate interaction, including the modulation of large-scale atmospheric circulation and climate background to Asian dust cycle, and possible effects of Asian dust to regional climate, ecosystem and human settlements. In addition, the project will also provide the scientific basis for the improvement of the regional ecological environment and the assessment of

environmental effect of dust in the future.

Key words: National Key Research and Development Program of China; Asian dust cycle; dust-climate interaction; environmental effect of dust

1 立项背景与意义

风尘循环包括源区风尘释放、区域至全球尺度的输送和沉降，是地球表层和大气等地球不同圈层间相互作用的重要纽带，也是影响全球变化及其环境效应的一个关键过程（Shao et al, 2011; Choobari et al, 2014）。风尘循环既敏感地响应于全球和区域气候变化，又对区域和全球环境产生重要影响。

亚洲风尘是全球风尘循环中的重要组成部分，其对东亚乃至北半球的气候、生态系统和人居环境产生深远的影响（图1），备受科学界关注。亚洲内陆分布着广袤的干旱-半干旱区，包括塔克拉玛干等一系列沙漠戈壁区，是地球上最重要的风尘源地之一（Zhang et al, 2003a; Chen and Li, 2011）。从内陆源区释放的风尘物质进入大气后成为矿物气溶胶，通过改变辐射强迫和海洋生产力影响气候变化，是气候变化驱动因子中最不确定的因素之一（Jickells et al, 2005; Boucher et al, 2013; Choobari et al, 2014; Huang et al, 2014）。风尘与气候的相互作用主要体现在两个方面，一方面风尘循环在起沙、传输和沉降过程中受到大气环流影响，如亚洲沙尘暴活动与冬季风等大气环流系统（Gong et al, 2006; Lou et al, 2016）以及与地形（Shi et al, 2011; Liu et al, 2015; Li et al, 2016）和下垫面状况（Tegen et al, 2002; Liu et al, 2004）密切相关；另一方面亚洲粉尘通过改变地表辐射收支和大气云物理过程，可能加剧局地的干旱化（Huang et al, 2014），影响下游的空气质量（刘晓东等, 2004; Lin et al, 2004），导致从春季到夏季源区地面温度显著降低，甚至减弱东亚夏季风（Sun et al, 2012）。亚洲风尘不仅影响我国的天气气候（Sun et al, 2012; Huang et al, 2014）和生态环境（王训明等, 2015），还被远距离输送至太平洋等地（Rea et al, 1998; Bailey et al, 2011），通过增加铁元素等海洋营养物质提高海洋生态系统的生产力（Jickells et al, 2005; 高会旺等, 2009），进而成为抑制大气CO₂含量（Mahowald et al, 2006）、调节全球碳循环乃至影响全球气候变化的重要因子（Maher et al, 2010）。

鉴于亚洲风尘在气候系统中的重要性，最近十几年来国内外实施了一系列研究和观测计划，如 ACE-Asia（Asian-Pacific regional Aerosol Characterization Experiment）（Huebert et al, 2003）、ADEC（Aeolian Dust Experiment on Climate Impact）（Mikami et al, 2006）、PACDEX（Pacific Dust Experiment）（Huang et al, 2008; Stith et al, 2009）等，采用地基观测、卫星遥感、统计分析、数值模拟等研究手段，对亚洲现代风尘在局地或区域尺度上的排放、传输、沉降过程和气候环境效应进行了大量观测与模拟研究（Zhang et al, 2003b; Huang et al, 2008; Che et al, 2015; Xia et al, 2016）。与此同时，我国科学家也开展了中国黄土记录的亚洲古风尘和粉尘源区干旱演化的大量研究（An, 2000; Guo et al, 2002; Bronger, 2003; Varga, 2011; Sun et al, 2012）。国际第四纪研究联合会组织实施了DIRTMAP（Dust Indicators and Records of Terrestrial and MArine Palaeoenvironments）（Kohfeld and Harrison, 2001; Derbyshire, 2003; Bullard, 2010）和QUEST（Quantifying Uncertainty in the Earth System）（Sarah Cornell et al, 2011）等风尘研究计划，试图从全球尺度理解风尘循环过程及其气候环境效应（Maher et al, 2010）。这些工作集中于现代粉尘排放和陆地风尘记录，极大地推动了亚洲风尘循环变化特征和规律的认识，但仍缺乏不同时空尺度从源到汇的风尘循环过程和气候环境效应的多学科研究，包括现代风尘活动高时空分辨率观测、海洋-陆地上长期地质记录相结合；风尘记录与数值模拟相结合的综合集成；不同时空尺度从源到汇的风尘循环过程和气候环境效应的多学科综合集成，以及风尘活动现代高时空分辨率观测与长期地质记录相融合的研究。

针对目前亚洲风尘研究中的薄弱环节，以中国科学院地球环境研究所为牵头单位，联合中国科学院地质与地球物理研究所、中国气象科学研究院、中国科学院地理科学与资源研究所、北京师范大学、国家海洋局第一海洋研究所等单位，共同申请科技部重点研发计划“全球变化及应对”重点专项项目《亚

洲风尘循环的过程、机制和环境效应》并获批准(项目编号: 2016YFA0601900, 中央财政专项经费为2500万元, 执行期为2016年7月至2021年6月), 成为国家科技计划管理改革工作开始以来, 国家重点研发计划“全球变化及应对”重点专项首批启动的项目之一。项目承担及参加单位在亚洲风尘排放源汇、风尘迁移、风沙活动过程与历史等研究方面具有深厚的科学积累、多角度的观测测试平台和多学科的研究队伍。项目将经过为期五年的研究, 通过野外监测、气象观测、卫星遥感、风洞模拟、实验分析、数值模拟等多种研究方法的有机结合和亚洲大陆风尘与太平洋风尘记录的定量对比, 系统开展现代和地质时期多尺度亚洲风尘排放、传输和沉降全过程的研究。这一研究不仅有助于深入理解作为全球变化关键过程之一的亚洲风尘循环过程、动力学机制和环境效应, 而且对改善人类生存环境具有重要的现实意义。

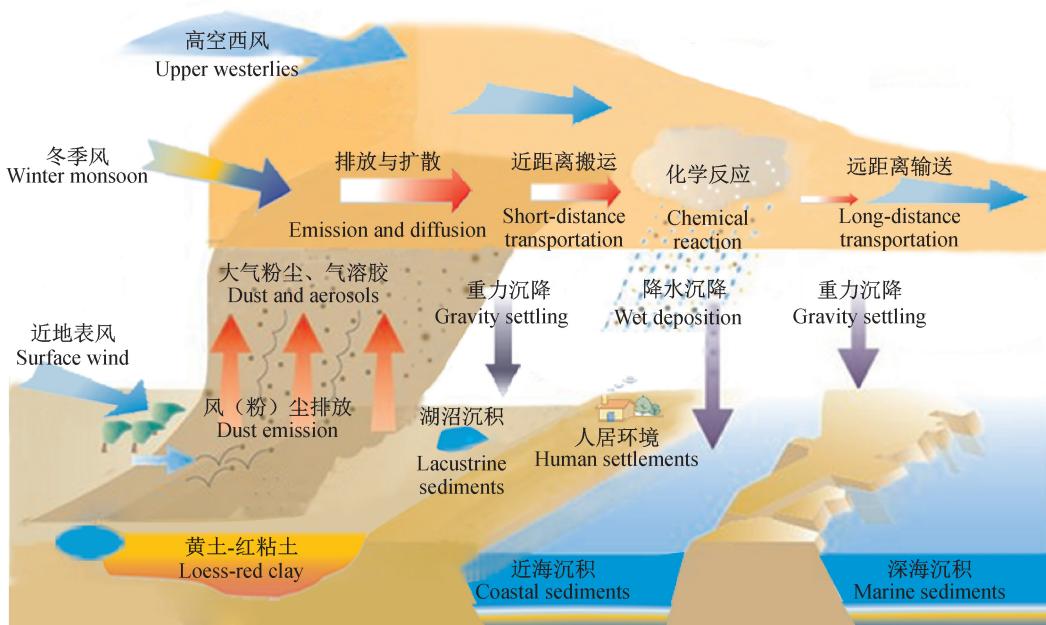


图1 风尘循环与环境效应示意图
Fig.1 Diagram of dust cycle and environment effects

2 研究目标与课题分解

项目将以亚洲风尘从源到汇的多尺度变化为主线, 基于风尘源区的现代器测气象数据、卫星遥感和大气再分析资料, 并整合中亚干旱区、黄土高原以及北太平洋地区的风尘沉积记录, 开展从源区排放到近距离迁移、远程输送与沉积的全过程研究, 阐明现代与地质时期亚洲风尘排放、迁移和沉降的时空变化特征及其影响机制, 特别是自然因素和人为活动对亚洲风尘释放的相对贡献; 通过数值模拟研究风尘-气候的相互作用, 揭示区域和全球大气环流对亚洲风尘循环的调制作用; 建立不同尺度亚洲风尘循环模型和时空变化数据平台, 评估亚洲风尘对区域气候变化、生态系统和人居环境的影响, 为我国生态环境治理和预估未来风尘变化的环境效应提供科学依据, 为提升我国风尘与全球变化研究的竞争力和国际地位做出贡献。

根据上述目标, 项目分解为四个课题, 从而实现亚洲风尘循环研究的古今结合、海陆对比和方法集成。第一课题查明现代背景下风尘排放、迁移过程与环境效应。第二课题研究亚洲大陆风尘时空分布及其与全球变化的联系。第三课题分析亚洲风尘远程输送及其对海洋生态系统的影响。第二和第三课题将大陆和海洋这两个重要风尘沉降区联系起来, 考察风尘循环时空变化特征, 识别自然因素条件下亚洲风尘的迁移规律。第四课题将在前三个课题基础上建立亚洲风尘循环数据库, 通过数值模拟评估亚洲风尘循环环境效应, 探讨风尘循环与气候变化的相互作用。四个课题的逻辑联系如图2所示。

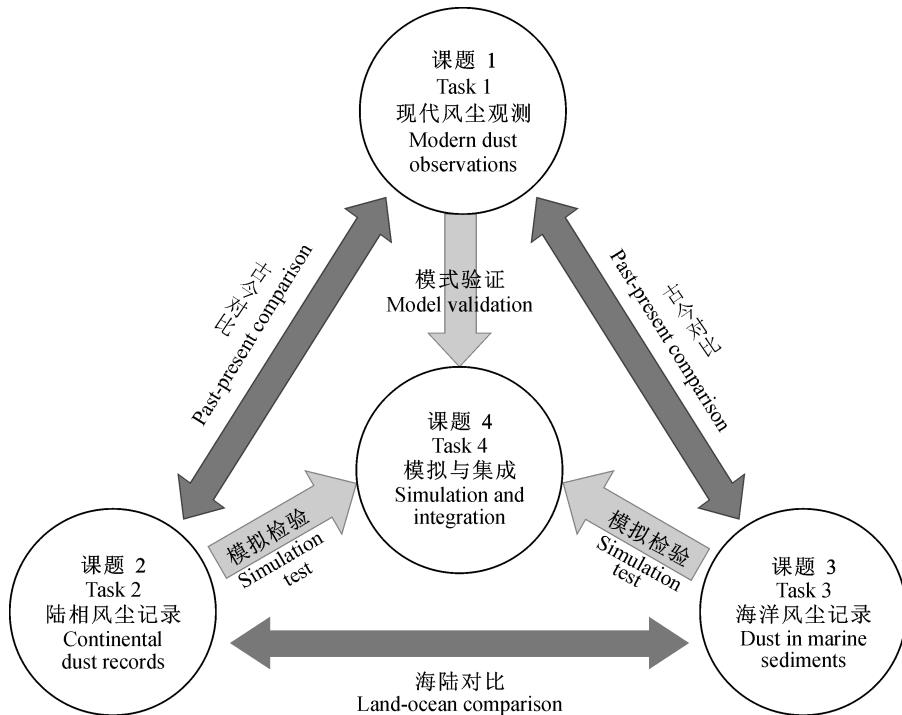


图2 课题之间逻辑联系图
Fig.2 Logical connections among the four tasks of this project

3 研究内容

本项目主要瞄准以下三个关键科学问题：1) 亚洲风尘释放、输送和沉降的时空特征和控制因素是什么？2) 亚洲风尘从源到汇的变化历史和海陆差异如何？3) 亚洲风尘与区域及全球气候变化是如何相互作用的？项目从全球变化视角，以亚洲风尘为联系全球及区域变化的关键纽带，加强古今结合、方法集成和学科交叉，系统开展从源到汇的多尺度亚洲风尘循环机理及环境效应的综合研究。上面四个课题对应的主要研究内容如下：

(1) 亚洲现代风尘排放的源汇模式和迁移机制。综合野外观测、实验分析和风洞模拟，确定亚洲现代风尘重要组分的来源与产率，量化风沙、风化和流水过程对风尘物源的贡献及下垫面对风尘释放的影响，明确风尘形成原因、释放速率和沉降强度，解析特征源区/沉降区风尘矿物与元素组成空间差异。结合高时空分辨率地面气象观测、卫星遥感、大气再分析资料等，利用多元和多尺度统计方法，研究风沙活动的时空特征及其与大气环流之间的联系，确定气象因素对风尘释放和迁移的影响。基于中国自主开发的亚洲沙尘暴数值模式，选取近十几年来对东亚地区有重要影响的沙尘天气过程进行数值模拟，通过与地面观测资料比对，验证模式的可靠性，在此基础上定量计算东亚风尘各源区的释放通量，输送扩散及干、湿沉降等不同过程的贡献。基于野外观测、风洞模拟实验、气象和卫星监测、理化分析多种研究手段，综合评估自然和人为因素对沙尘天气过程的贡献，构建区域地表风尘排放源汇模式，并为完善适用于亚洲陆面过程的气候模拟服务。

(2) 亚洲大陆风尘时空分布及其与气候变化的联系。亚洲内陆干旱区是亚洲风尘的主要源区，中亚-东亚风成沉积是研究大陆风尘时空分布与古环境变化的良好材料。选择中国北方及邻区代表性风尘序列和湖沼沉积，开展不同方法的年代学和多种理化指标测试，定量重建晚新生代风尘通量及铁、碳等关键营养元素变化，恢复末次间冰期以来亚洲风尘排放历史和大陆风尘时空分布特征，揭示千-百年尺度极端风尘活动的强度和频次。通过与区域和全球记录对比，阐明自然因素影响下风尘物质的释放、搬运和

沉降机制, 探讨大陆风尘活动与区域乃至全球气候环境变化的联系, 为源 - 汇和海 - 陆风尘记录对比及数值模拟评估风尘环境效应提供定量参数。

(3) 亚洲风尘远程输送及其对海洋生态系统的影响。亚洲风尘通过西风带远程输送到北太平洋, 对海洋生产力和全球碳循环产生重要影响。拟选择北太平洋中纬度地区沿经向分布的一系列海洋沉积钻孔, 确定其记录的风尘通量、粒径和物源变化信息, 重点揭示第四纪以来尤其末次冰期旋回高精度亚洲风尘演化历史, 追踪亚洲风尘通量从源到汇的变化过程, 探讨风尘的远程输送过程、机制及其与西风和亚洲季风的联系。通过海洋沉积有机碳和生源要素等多元地球化学指标, 重建海洋表层初级生产力, 结合数值模拟, 探索风尘物质输入对海洋生态系统的影响及其与全球碳循环的联系。

(4) 亚洲风尘循环与气候变化相互作用及环境效应。利用地球系统模式及区域气候模式等, 辅以现代气象观测资料和地质时期风尘代用指标, 针对不同时间尺度亚洲风尘与区域及全球气候的相互作用开展数值模拟及统计诊断研究, 探讨全球及区域气候变化对亚洲沙尘气溶胶循环的影响, 揭示典型冷、暖气候条件下亚洲风尘排放强度、输送路径和主要沉降区的基本特征和变化机制, 评估西风环流和亚洲冬季风系统及大尺度大气涡动异常对亚洲内陆源区风尘排放及长距离传输和沉降过程的调控作用。结合与沙尘气溶胶直接 - 间接效应相联系的气溶胶 - 云 - 降水过程等的参数化改进, 探讨在自然和人类活动影响下与陆面过程密切相关的亚洲风尘对辐射收支、区域气候、陆地生态系统和下游城市空气质量可能影响及其物理机制。

4 预期成果与效益

在科学认知层面上, 开展亚洲风尘排放、迁移和沉降的时空变化及其影响机制的研究, 定量估算亚洲沙尘在陆地和海洋上的沉降量, 阐明自然和人为因素影响下亚洲风尘物质的释放、搬运和沉降机制, 全面认识亚洲区域尺度风尘和风沙活动的变化规律和未来趋势。揭示全球和区域气候变化对亚洲风尘循环的影响及风尘对气候变化的反馈作用, 评估亚洲风尘对区域气候变化、生态系统和人居环境的影响。同时, 通过项目的实施, 建立一支多学科交叉的亚洲风尘与环境变化研究队伍, 培养一批青年研究骨干和博士、硕士研究生。

在社会效益层面上, 通过区分自然因素和人为活动对亚洲风尘释放的相对贡献, 有助于促进我国在东亚风尘及风沙活动监测和预警方面的工作, 提升我国大气成分研究并增强为公众和社会的服务能力。当前我国正在大力推行“一带一路”发展战略, 丝路经济带沿线地区也是亚洲风尘主要源区, 本项目中大陆风尘变化研究与丝绸之路经济带密切相关。随着“一带一路”战略的稳步推进, 基础设施建设将大规模展开, 理清丝路经济带沿线环境变化本底和规律, 将有助于基础设施建设项目环境影响评价和环境问题应对措施的选择。全面认识亚洲风尘的环境效应, 形成以风尘变化为核心的应对全球变化咨询报告, 可为改善我国环境质量、指导生态环境治理、服务丝绸之路经济带的建设提供科学支撑。此外, 研究亚洲风尘增加海洋生产力和降低全球大气 CO₂ 浓度方面的正面作用, 将有助于提升我国在气候、环境外交中的科学支撑能力和话语权。

致谢: 本研究受到国家重点研发计划项目“亚洲风尘循环的过程、机制和环境效应”项目(2016YFA0601900)的支持。

参考文献

- 高会旺, 祁建华, 石金辉, 等. 2009. 亚洲沙尘的远距离输送及对海洋生态系统的影响 [J]. 地球科学进展, 24(1): 1–10. [Gao H W, Qi J H, Shi J H, et al. 2009. Long-range transport of Asian Dust and its effects on ocean ecosystem [J]. *Advances in Earth Science*, 24(1): 1–10.]
- 刘晓东, 田良, 张小曳. 2004. 塔克拉玛干沙区春季的沙尘活动对我国西北东部大气 PM₁₀ 含量影响的分析研究 [J]. 中国环境科学, 24(5): 528–532. [Liu X D, Tian L, Zhang X Y. 2004. Influence of spring dust activities over the Taklimakan Desert area on concentrations of atmospheric PM₁₀ in east of Northwest China [J]. *China Environmental Science*, 24(5): 528–532.]

- 王训明,周 娜,郎丽丽,等.2015.风沙活动对陆地生态系统影响研究进展[J].*地球科学进展*,30(6): 627–635. [Wang X M, Zhou N, Lang L L, et al. 2015. Aeolian processes and their effects on terrestrial ecosystem: an overview [J]. *Advances in Earth Science*, 30(6): 627–635.]
- An Z S. 2000. The history and variability of the East Asian paleomonsoon climate [J]. *Quaternary Science Reviews*, 19: 171–187.
- Bailey I, Liu Q S, Swann G E A, et al. 2011. Iron fertilisation and biogeochemical cycles in the sub-Arctic northwest Pacific during the late Pliocene intensification of northern hemisphere glaciation [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 307: 253–265.
- Boucher O, Anderson T L, Pham M. 2013. Clouds and aerosols [M]// Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2013: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press: 571–657.
- Bronger A. 2003. Correlation of loess-paleosol sequences in East and Central Asia with SE Central Europe: towards a continental Quaternary pedostratigraphy and paleoclimatic history [J]. *Quaternary International*, 106: 11–31.
- Bullard J. 2010. Bridging the gap between field data and global models: current strategies in aeolian research [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(4): 496–499.
- Che H, Zhang X Y, Xia X, et al. 2015. Ground-based aerosol climatology of China: aerosol optical depths from the China Aerosol Remote Sensing Network (CARSNET) 2002–2013 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(13): 7619–7652.
- Chen J, Li G J. 2011. Geochemical studies on the source region of Asian dust [J]. *Science China-Earth Sciences*, 54(9): 1279–1301.
- Choobari O A, Zawar-Reza P, Sturman A. 2014. The global distribution of mineral dust and its impacts on the climate system: A review [J]. *Atmospheric Research*, 138: 152–165.
- Derbyshire E. 2003. Loess, and the Dust Indicators and Records of Terrestrial and Marine Palaeoenvironments (DIRTMAP) database [J]. *Quaternary Science Reviews*, 22: 1813–1819.
- Gong S L, Zhang X Y, Zhao T L, et al. 2006. A simulated climatology of Asian dust aerosol and its trans-Pacific transport. Part II: Interannual variability and climate connections [J]. *Journal of Climate*, 19(1): 104–122.
- Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. 2002. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China [J]. *Nature*, 416(6877): 159–163.
- Huang J P, Wang T H, Wang W C, et al. 2014. Climate effects of dust aerosols over East Asian arid and semiarid regions [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 119(19): 11398–11416.
- Huang J, Minnis P, Chen B, et al. 2008. Long-range transport and vertical structure of Asian dust from CALIPSO and surface measurements during PACDEX [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 113(D2), doi:10.1029/2008JD010620.
- Huebert B J, Bates T, Russell P B, et al. 2003. An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 108(D23), doi:10.1029/2003JD003550.
- Jickells T D, An Z S, Andersen K K, et al. 2005. Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate [J]. *Science*, 308(5718): 67–71.
- Kohfeld K E, Harrison S P. 2001. DIRTMAP: the geological record of dust [J]. *Earth-Science Reviews*, 54: 81–114.
- Li X Z, Pan Z T, Liu X D. 2016. Numerical simulation of influence of Tibetan Plateau uplift on winter dust cycle in Asian arid regions [J]. *Environmental Earth Sciences*, 75(7): 1–12.
- Lin C Y, Liu S C, Chou C C K, et al. 2004. Long-range transport of Asian dust and air pollutants to Taiwan [J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 15(5): 759–784.
- Liu X D, Sun H, Miao Y F, et al. 2015. Impacts of uplift of northern Tibetan Plateau and formation of Asian inland deserts on regional climate and environment [J]. *Quaternary Science Reviews*, 116: 1–14.
- Liu X D, Yin Z Y, Zhang X Y, et al. 2004. Analyses of the spring dust storm frequency of northern China in relation to antecedent and concurrent wind, precipitation, vegetation, and soil moisture conditions [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 109(D16), doi:10.1029/2004JD004615.
- Lou S J, Russell L M, Yang Y, et al. 2016. Impacts of the East Asian Monsoon on springtime dust concentrations over China [J].

- Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 121(13): 8137–8152.
- Maher B A, Prospero J M, Mackie D, et al. 2010. Global connections between aeolian dust, climate and ocean biogeochemistry at the present day and at the last glacial maximum [J]. *Earth-Science Reviews*, 99: 61–97.
- Mahowald N M, Muhs D R, Levis S, et al. 2006. Change in atmospheric mineral aerosols in response to climate: Last glacial period, preindustrial, modern, and doubled carbon dioxide climates [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 111(D10), doi:10.1029/2005JD006653.
- Mikami M, Shi G Y, Uno I, et al. 2006. Aeolian dust experiment on climate impact: An overview of Japan-China joint project ADEC [J]. *Global and Planetary Change*, 52: 142–172.
- Rea D K, Snoeckx H, Joseph L H. 1998. Late Cenozoic eolian deposition in the North Pacific: Asian drying, Tibetan uplift, and cooling of the northern hemisphere [J]. *Paleoceanography*, 13(3): 215–224.
- Sarah Cornell C D, House J, Prentice C. 2011. Quantifying and Understanding the Earth System: QUEST Final Programme Report [M]. Bristol: University of Bristol: 1–92.
- Shao Y P, Wyrwoll K H, Chappell A, et al. 2011. Dust cycle: An emerging core theme in earth system science [J]. *Aeolian Research*, 2(4): 181–204.
- Shi Z G, Liu X D, An Z S, et al. 2011. Simulated variations of eolian dust from inner Asian deserts at the mid-Pliocene, last glacial maximum, and present day: contributions from the regional tectonic uplift and global climate change [J]. *Climate Dynamics*, 37: 2289–2301.
- Stith J L, Ramanathan V, Cooper W A, et al. 2009. An overview of aircraft observations from the Pacific Dust Experiment campaign [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 114(D05), doi:10.1029/2008JD010924.
- Sun Y B, Clemens S C, Morrill C, et al. 2012. Influence of Atlantic meridional overturning circulation on the East Asian winter monsoon [J]. *Nature Geoscience*, 5(1): 46–49.
- Tegen I, Harrison S P, Kohfeld K, et al. 2002. Impact of vegetation and preferential source areas on global dust aerosol: Results from a model study [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 107(D21), doi:10.1029/2001JD000963.
- Varga G. 2011. Similarities among the Plio-Pleistocene terrestrial aeolian dust deposits in the World and in Hungary [J]. *Quaternary International*, 234: 98–108.
- Xia X, Che H, Zhu J, et al. 2016. Ground-based remote sensing of aerosol climatology in China: Aerosol optical properties, direct radiative effect and its parameterization [J]. *Atmospheric Environment*, 124: 243–251.
- Zhang X Y, Gong S L, Shen Z X, et al. 2003b. Characterization of soil dust aerosol in China and its transport and distribution during 2001 ACE-Asia: 1. Network observations [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 108(D9), doi:10.1029/2002JD002632.
- Zhang X Y, Gong S L, Zhao T L, et al. 2003a. Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission [J]. *Geophysical Research Letters*, 30(24), doi:10.1029/2003GL018206.