

我国气溶胶污染对农作物影响研究进展

赵俊芳¹ 姜月清² 詹鑫^{1,3} 孔祥娜^{1,3}

(1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 2 国家气象中心, 北京 100081;

3 四川农业大学资源学院, 成都 611130)

摘要: 污染气体形成的大气气溶胶自工业革命以来有大幅度增加。在气溶胶污染日趋严重的背景下, 气溶胶对农业的影响受到科学界的密切关注。综合论述了我国大气气溶胶对作物影响的研究状况, 从气溶胶污染对农作物的可能影响出发, 综述了我国气溶胶污染对作物生长发育以及产量形成影响方面的研究成果; 并通过分析现状, 指出了存在的问题、有待改进的方面和研究发展的方向。

关键词: 气溶胶污染, 辐射效应, 农作物生长发育, 产量, 影响

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.05.001

Advances in Research of Impacts of Aerosol Pollution on Crop in China

Zhao Junfang¹, Jiang Yueqing², Zhan Xin^{1,3}, Kong Xiangna^{1,3}

(1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 National Meteorological Centre, Beijing 100081

3 Resources College, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130)

Abstract: Aerosol emissions formed by polluting gases are rapidly increasing since the industrial revolution. Consequently, haze and fog frequently occur and there are widespread concerns about the possible harmful effects of aerosol pollution on crop. This paper summaries a series of scientific achievements of the impacts of aerosol pollution on crop in China in recent decades, including mainly about the possible impact of aerosol pollution on crop, the impacts of aerosol pollution on crop growth and development and yield formation, and so on. Finally, based on the current researches, we point out the insufficiency at present studies and some areas which is needed to be improved, then put forward prospects of the researches in the future.

Keywords: aerosol pollution, radiation, crop growth and development, yield, effect

0 引言

全球气候变化及其影响是20世纪90年代以来最为引人注目的环境和科学问题之一^[1]。近50多年来, 人为气溶胶含量显著增加, 截获更多的地表向外长波辐射, 而太阳辐射是地球表面能量交换的主要来源, 它为植物光合作用提供能量, 是影响陆地生态系统生产力、碳收支和水循环的重要因子。大气气溶胶是悬浮在大气中的固态和液态颗粒物的总称, 它通过改变太阳辐射平衡、云物理状况和生物地球化学循环过程影响全球气候^[2]。因此, 大气气溶胶不仅在全球气候变化中起着重要作用, 也是区域大气灰霾污染的主要构成。由于大气系统是一个互相联系的整体, 不同种类

的空气污染物通过相互耦合的物化过程引起区域气候变化, 从而对作物的光合作用、呼吸作用造成不同程度的直接或间接影响。气溶胶的辐射效应不仅通过改变光合有效辐射的总量, 还通过改变光谱分布、光的质量以及在直接和散射成分之间的分配, 来影响作物的光合作用, 并最终影响作物产量。因此, 气候变化背景下气溶胶污染对农业生产的影响越来越受到科学家们的重视^[2-4]。

近几十年来, 科学家们在大气气溶胶增加对农业的影响方面, 特别是我国气溶胶污染对作物生长发育以及产量形成影响等方面开展了大量的科学研究工作, 取得了一系列研究成果。本文拟从这些方面对研究成果进行综述, 以期为准评价气候变化对我国农业生产的影响、制订相应对策、采取适应措施等提供理论依据。

1 气溶胶污染及其产生的原因

气溶胶是指大气与悬浮在其中的固体和液体微粒

收稿日期: 2017年11月15日; 修回日期: 2018年4月18日

第一作者: 赵俊芳(1977—), E-mail: zhaojf@cma.gov.cn

资助信息: 中国气象科学研究院基本科研业务费专项资金人才项目(2017R001); 国家重点研发计划项目(2017YFA0603004)

共同组成的多相体系（图1）。尽管气溶胶只是地球大气成分中含量很少的组分，但其对地圈、生物圈的影响与作用不可低估。气溶胶化学成分复杂，其颗粒物可以作为大气中反应表面或催化剂，以及很多气相物质的接收体。大气气溶胶负载的化学物质，特别是工业污染物在风系的作用下，可进行几百至几千千米的长距离传输。大气污染影响是不分国界和地区的，是全球性问题，其对人类生存环境的严重危害已日益加剧。大气输入物质对海洋的生物地球化学循环、大气环境、冰雪化学组成、海底沉积和气候演变等有着重要的影响。从全球变化角度看，大气污染物通过大气的大尺度传输，改变了全球大气化学物质的含量、结构和组成，破坏了全球的辐射平衡，进而可能对全球气候变化造成影响。

既散射又吸收，还有非均相反应

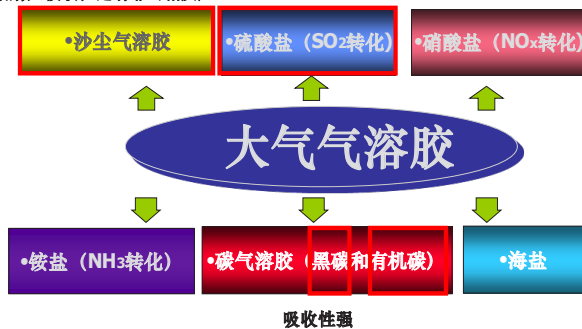


图1 大气气溶胶包含的六类七种粒子组分

Fig. 1 Seven types of six kinds of particle components included in atmospheric aerosols

气溶胶按污染成因可分为一次气溶胶（以微粒形式直接从发生源进入大气）和二次气溶胶（在大气中由一次污染物转化而生成）两种。它们可以来自被风扬起的细灰和微尘、海水溅沫蒸发而成的盐粒、火山爆发的散落物以及森林燃烧的烟尘等天然源，也可以来自化石和非化石燃料的燃烧、交通运输以及各种工业排放的烟尘等人为源。一般说来，半径小于1 μm的粒子，大都是由气体到微粒的成核、凝结、凝聚等过程所生成；而较大的粒子，则是由固体和液体的破裂等机械过程所形成。它们在结构上可以是均相的，也可以是多相的。已生成的气溶胶在大气中仍然有可能再参加大气的化学反应或物理过程。

2 我国气溶胶污染对作物生长发育及产量形成的影响

气溶胶污染对作物生长发育影响如图2所示。接下来从气溶胶辐射效应对作物光合有效辐射的影响、气溶胶污染引起的酸性沉降对作物的影响、气溶胶污染引起昼夜温差减小对作物产量的影响、气溶胶污染

导致的降水变化对作物产量的影响和沙尘气溶胶对作物产量的影响这五方面展开论述。

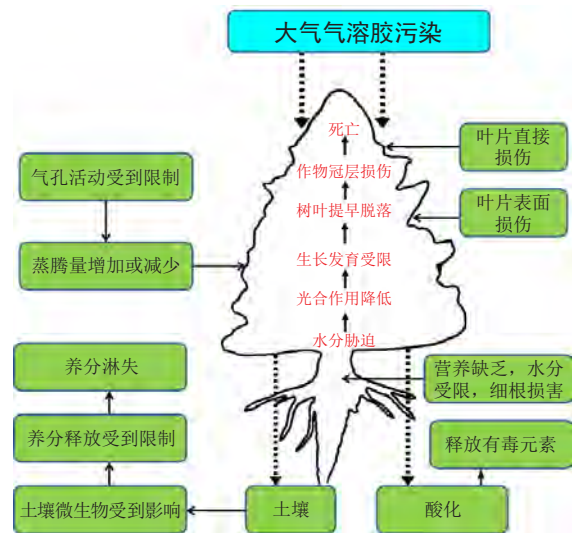


图2 气溶胶污染对作物生长发育的影响

Fig. 2 Effect of aerosol pollution on the growth and development of crop

2.1 气溶胶辐射效应对作物光合有效辐射的影响

太阳辐射是地球大气运动及作物生长的主要动力源泉。但伴随着气溶胶的增加，导致陆地区域云的覆盖度增加了5%~10%，这样就直接造成到达地表的太阳辐射呈现减少的趋势^[5-11]。大气气溶胶一般通过改变作物进行光合作用的唯一能量来源——光合有效辐射（Photosynthetically Active Radiation, PAR）的数量和质量或主要气候要素影响作物的生长发育^[9]，主要表现为太阳辐射受到近地面气溶胶的散射和吸收，造成作物获得的PAR减少，从而影响作物发育。Chameides等^[10]基于CERES作物生长模式评估气溶胶对南京地区冬小麦和水稻产量的影响，以用于衡量气溶胶光学厚度（Aerosol Optical Depth, AOD）对总辐射的削弱结果，发现辐射的降低与产量的降低呈1:1的线性关系，最终造成冬小麦和水稻5%~30%的减产。王春乙等^[12]对南京地区冬小麦和水稻的研究同样证实了气溶胶浓度与光合有效辐射之间负相关性，即气溶胶浓度增加导致生育期内的光合有效辐射减少，冬小麦比水稻的减少趋势更明显。气溶胶辐射效应也并非完全造成不利环境条件，基于全球第一生产力模型，Gu等^[13]发现太阳辐射经气溶胶散射会对陆地生态系统生产力具有有利的影响，例如提高林冠有效光能的利用率，降低林冠光合作用饱和度。

2.2 气溶胶污染引起的酸性沉降对作物的影响

大气气溶胶通过干湿沉降可对农作物产生广泛而深刻的影响。一般认为，导致降水pH<5.6的酸性物质

主要是由人类排放的硫氧化物和氮氧化物引起。大气中的 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 颗粒物是重要的致酸物质。在大气中经过各种氧化反应生成了硫酸盐、硝酸盐气溶胶，这类气溶胶可经远距离迁移，通过干湿沉降抵达地面，导致大面积雨水、土壤、水体酸化；环境保护部联合多部委发布的2014年《中国环境状况公报》显示，在2014年开展降水监测的470个城市（区、县）中，有29.8%的城市出现了酸雨且主要分布在长江以南—青藏高原以东地区^[14]，酸雨频率平均达17.4%，我国南方7省大豆因酸雨受灾面积约158.67万 hm^2 ，因酸雨减产约 20×10^7 kg，减产幅度约6%，平均年经济损失约1400万元。影响了大面积陆生植被、粮食作物和水生生物的生长发育。

酸性沉降对农作物的危害，主要是通过对作物生长环境和生长活动造成破坏，从而产生直接和间接危害，影响作物产量。这种危害在环境上表现为对土壤性质和土壤微生物的影响，作物生长发育上表现为生理状况的破坏：酸性沉降能够改变作物生长所需的元素的吸收，如氮、磷、钾和硫元素，其中对钾元素的吸收影响最严重。酸雨同时也会导致土壤酸化。土壤中原有含铝氢氧化物，经土壤酸化后，形成作物可吸收的形态铝化合物，作物在生育期内吸收过量铝化合物易导致中毒甚至死亡。此外，酸性沉降还能加速土壤矿物质营养元素的流失，改变土壤结构，导致土壤贫瘠化。降低土壤中氨化细菌和固氮细菌的数量，造成土壤细菌个体变小，生长繁殖速度降低，使土壤微生物的氨化作用和硝化作用能力下降^[15]，影响营养元素的良性循环，造成农业减产。

对作物生理状况的影响也尤为显著。酸雨作用于作物叶片，严重时会使保卫细胞的功能丧失，作物对于气体的交换过程失去控制，最终导致蒸发和蒸腾作用失调，使作物更易受到有害气体的伤害，降低对于干旱环境的抵御能力^[16]，同时破坏作物的叶绿体，削弱其光合作用强度，减少作物产量。

2.3 气溶胶污染引起昼夜温差减小对作物产量的影响

气温及其日较差是影响作物生长发育的重要气候因子之一，对农业生产具有十分重要的意义。气溶胶对气温的作用具有双重效应：一方面由于气溶胶光散射和吸收减少了白天直接到达地表的入射光，导致气温降低；另一方面，被气溶胶颗粒物散射的太阳辐射一部分以长波辐射形式被返还到周围大气之中，从而起到了增温的作用，降低了昼夜的气温日较差^[17]。Stenchikov等^[18]运用气候模式发现在没有水汽影响条

件下，气溶胶依旧能够使气温日较差呈现下降趋势。其中由 SO_2 排放所形成的气溶胶对气温日较差影响十分显著^[19]。

气温日较差的减小在理论上不利于作物的干物质积累，但因作物和区域特殊性的缘由，气温日较差变化对作物产量影响模拟试验结果各异^[20-23]。Xiao等^[24]通过对华北地区冬小麦产量结果进行模拟分析，结果表明减小的昼夜温差是该地区冬小麦产量在天气因素驱动下降低的主要因素，而姜丽霞等^[25]在对黑龙江省气温日较差与作物产量的时空变化特征分析中发现春夏季的气温日较差较小，对作物增产有利。

2.4 气溶胶污染导致的降水变化对作物产量的影响

气溶胶污染还会对影响作物产量的重要气候因素——降水量造成影响^[26-28]。一方面气溶胶可起到凝结核的作用，同时对太阳辐射进行吸收和反射，对云层微物理特性和宏观云量产生影响，从而改变大气中的水循环^[29-30]。段婧等^[31]分析了华北地区人为气溶胶污染对区域降水的可能影响，结果表明由于人为气溶胶参与对流活动，影响到了对流云的降水效率，气溶胶污染的确导致局地降水量减少。特别在干旱、半干旱区的春夏季节，这一因素可能对作物产量造成更强烈的负效应。另外，黑碳气溶胶辐射强迫对于降水的影响更为显著。总体上我国在黑碳气溶胶的影响下，冬季和夏季降水量都有明显的减少，分别为20 mm和100 mm，冬季降水量减幅远小于夏季^[32]。具体而言，黑碳气溶胶对我国降水的影响因地区而异，我国南部的降水量会有所增加；因气流下降，我国北部则出现干旱。极端的南涝北旱不仅影响着南北地区农作物生育状况与病虫害，也影响着我国的农业格局^[33]。

2.5 沙尘气溶胶对作物产量的影响

沙尘气溶胶，即矿物沙尘（Mineral Dust），是对流层气溶胶的主要成分之一。据估计，全球每年进入大气的沙尘气溶胶大约占了对流层中气溶胶总量的一半^[34-35]。沙尘气溶胶光学厚度大，分布范围广，对红外辐射表现出较高的吸收率，能够通过直接辐射效应吸收和散射太阳辐射以及地面长波辐射从而影响地球辐射收支和能量平衡^[36]。

沙尘暴是沙尘气溶胶的极端体现，发生时影响范围广，对农作物危害强烈。强劲的气流携带沙砾，通过机械掩埋、风力打击、阻挡光线、大气污染的形式，严重威胁农作物生长发育，同时半干旱地区疏松浅薄的土壤表层极易被风力侵蚀掉，降低农业环境质量，扩大土壤沙化范围。研究显示在我国长江流域，由于植物叶面沙尘气溶胶的积聚，导致35%的光合有

效辐射量被减少^[37], 减少了作物的光合作用, 从而抑制了作物正常的生长^[38-40]。

沙尘气溶胶对于农业生产也有一定有利的作用, 能够远距离搬运沙尘源区地表土壤中的有机质和微量元素, 为沙尘沉降地农作物生长提供有利的种植条件^[41]。同时沙尘气溶胶中的土壤粒子还能对酸雨起到碱化中和的促进作用。Wang等^[42]通过区域沙尘输送模式结合算与数值, 发现由于沙尘的中和作用, 中国北方地区降水的pH值增加0.8~2.5。

3 存在问题与研究展望

大气气溶胶含量增加对农业影响的研究成果, 对准确评价我国气候变化对农业生产的可能影响及其发展趋势、制订适应与减缓气候变化不良影响的对策与措施起到了重要作用。气溶胶污染种类繁多, 形成原因多样, 过程复杂, 影响范围也十分广泛。近年来, 由于大气气溶胶浓度的增加, 气溶胶污染日趋严重, 但因目前认知的局限, 关于气溶胶污染对我国农业影响评估方法和结果方面还存在很大的不确定性和许多亟待解决的问题, 尚需进一步深入研究。

1) 区域尺度上针对气溶胶污染对我国农业生产影响的系统研究有待进一步加强。区域尺度上气溶胶污染对我国农业生产影响的研究是从站点向全球尺度扩展的重要环节, 也是当前气候变化对农业生产影响研究中最不充分的部分, 特别是如何定量揭示气候变化背景下气溶胶污染对我国农作物生长发育及产量形成的影响机理, 仍需要进行大量的基础研究。此外, 目前对于大气气溶胶污染物在大气非均相化学反应中的作用机制, 污染物的空间、季节分布规律与来源仍缺乏深入的了解^[43], 这些必要的基础性研究对进一步完善区域大气污染对农业生产影响的研究具有重要意义。

2) 农作物对气溶胶污染的动态响应研究薄弱。我国农作物类型复杂多样, 各类型作物虽然受气溶胶污染影响的机理过程具有相似性, 但各种过程的反应速度、调节因子、作物生理过程的变化等均存在较大的差异。此外, 影响气溶胶污染物分布的因子很多, 涉及大气、自然环境、人类活动等许多方面, 且各个因子之间的关系比较复杂。因此, 关于农作物对气溶胶污染的动态响应研究有待进一步加强。

3) 气溶胶污染监测预警方法技术上需进一步提高和完善。由于当前大气污染物主要地面监测站分布集中在大中城市, 数量少, 监测手段和精度也各不相同, 不能满足大面积、多种类的大气污染监测。结合卫星遥感监测手段与地面监测站互为补充将成为未来

大气污染监测预警的重要方式, 以达到高效、快速、动态、大尺度反演区域大气污染, 节约经济和人力成本的目的。目前已有国内外学者开始运用卫星遥感、雷达等现代化手段对大气污染进行监测, 但对气溶胶污染的类型、光学厚度的估算等仍存在诸多不足之处^[44]。因此, 准确监测预测气溶胶污染物的动态变化趋势和幅度仍是当前气溶胶污染对农作物影响研究中面临的重要问题。

4) 气溶胶污染对农业生产影响的评估指标体系有待构建。这样一个指标体系是建立在上述对气溶胶污染内外成因和各方面特性综合掌握的基础上, 较准确地量化不同类型气溶胶污染对于农业生产的具体影响, 并为决策部门处理不同类型和等级的污染提供科学依据。

参考文献

- [1] IPCC. Climate Change Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Field C B, Barros V R, Dokken D J, et al(Eds). United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2014.
- [2] Vijayakumar K, Safai P D, Devara P C S, et al. Effects of agriculture crop residue burning on aerosol properties and long-range transport over northern India: A study using satellite data and model simulations. *Atmospheric Research*, 2016, 178-179: 155-163.
- [3] Lu X L, Chen M, Liu Y L, et al. Enhanced water use efficiency in global terrestrial ecosystems under increasing aerosol loadings. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 237: 39-49.
- [4] Roderick M L, Farquhar G D. Geoengineering: Hazy, cool and well fed? *Nature Climate Change*, 2012, 2: 76-77.
- [5] 王民俊, 韩永翔, 邓祖琴, 等. 全球主要沙源区沙尘气溶胶与太阳辐射的关系. *中国环境科学*, 2012, 32(4): 577-583.
- [6] 邓祖琴, 韩永翔, 白虎志, 等. 中国北方沙漠戈壁区沙尘气溶胶与太阳辐射的关系. *中国环境科学*, 2011, 31(11): 1761-1767.
- [7] 沈新勇, 黄伟, 陈明诚, 等. 人为气溶胶的直接辐射效应及其对南亚冬季风的影响. *气候与环境研究*, 2014, 19(4): 393-406.
- [8] Dilip G, Racsh P J, Wang H L, et al. Climate response of the South Asian monsoon system to anthropogenic aerosols. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117: D13209.
- [9] Bergin M. The influence of aerosols on plant growth. Honolulu: Georgia Institute of Technology, 2002.
- [10] Chameides W L, Yu H, Liu S C, et al. Case study of the effects of atmospheric aerosols and regional haze on agriculture: An opportunity to enhance crop yields in China through emission controls. *PNAS*, 1999, 96(24): 13626-13633.
- [11] Eck T F, Holben B N, Dubovik O, et al. Columnar aerosol optical properties at AERONET sites in central eastern Asia and aerosol transport to the tropical mid-Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: D06202.
- [12] 王春乙, 白月明. 臭氧和气溶胶浓度变化对农作物的影响研究. 北京: 气象出版社, 2009.
- [13] Gu L H, Dennis B, Shashi B V, et al. Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107: ACL 2-1-ACL 2-23.
- [14] 中华人民共和国环境保护部. 中国环境状况公报. 北京, 2014.
- [15] 俞元春, 丁爱芳. 模拟酸雨对酸性土壤铝溶出及其形态转化的影响. *土壤与环境*, 2001, 10(2): 87-90.
- [16] 金腊华. 广州地区酸雨特征及其对植物的影响研究. *城市环境与城市生态*, 2002, 11(15): 11-13.
- [17] 汪凯, 叶红, 唐立娜, 等. 气温日较差研究进展: 变化趋势及其影响因素. *气候变化研究进展*, 2010, 6(6): 417-423.

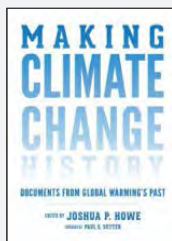
- [18] Stenchikov G L, Robock A. Diurnal asymmetry of climatic response to increased CO₂ and aerosols: forcings and feedbacks. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(D12): 26211-26227.
- [19] Makowski K, Wild M, Ohmura A. Diurnal temperature range over Europe between 1950 and 2005. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8: 6483-6498.
- [20] Peng S B, Huang J L, Sheehy J E, et al. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(27): 9971-9975.
- [21] Lobell D B, Ortiz-Monasterio J I, Asner G P, et al. Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico. *Field Crops Research*, 2005, 94(2): 250-256.
- [22] Kanno K, Makino A. Increased grain yield and biomass allocation in rice under cool night temperature. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2010, 56(3): 412-417.
- [23] Chen C Q, Lei C X, Deng A X, et al. Will higher minimum temperatures increase crop production in Northeast China? An analysis of historical data over 1965-2008. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(12): 1580-1588.
- [24] Xiao D P, Tao F L. Contributions of cultivars, management and climate change to winter wheat yield in the North China Plain in the past three decades. *European Journal of Agronomy*, 2014, 52: 112-122.
- [25] 姜丽霞, 吕佳佳, 王晾晾, 等. 黑龙江省气温日较差的变化趋势及其与作物产量的关系. *中国农业气象*, 2013(2): 179-185.
- [26] Albrecht B A. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. *Science*, 1989, 245(4923): 1227-1230.
- [27] King M D. Radiative properties of clouds. In: Hobbs P V, ed. *Aerosol-Cloud-Climate Interactions*. San Diego, Calif: Academic Press, 1993. 123-149.
- [28] Ferek R J, Hegg D A, Hobbs P V, et al. Measurements of ship-induced tracks in clouds off the Washington coast. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(D18): 23199-23206.
- [29] 邱金桓, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 现代大气物理学研究进展. *大气科学*, 2003, 27(4): 628-652.
- [30] 毛节泰, 李成才. 气溶胶辐射特性的观测研究. *气象学报*, 2005, 63(5): 621-635.
- [31] 段靖, 毛节泰. 华北地区气溶胶对区域降水的影响. *科学通报*, 2008, 53(23): 2947-2955.
- [32] 李建云, 张杰, 田密. 中国地区黑碳气溶胶直接辐射效应的数值模拟研究. *气象与减灾研究*. 2009(1): 17-24.
- [33] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, Luo Y F. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science*, 2002, 297(5590): 2250-2253.
- [34] 郝丽, 杨文, 吴统文, 等. 沙尘气溶胶的光学特性及辐射强迫效应. *中国沙漠*, 2010, 30(6): 1477-1482.
- [35] 盛阳, 杨胜利, 韩永翔, 等. 格尔木地区沙尘气溶胶硝酸盐含量及来源. *中国沙漠*, 2016, 36(3): 792-797.
- [36] 宿兴涛, 王宏, 许丽人, 等. 沙尘气溶胶直接气候效应对东亚冬季风影响的模拟研究. *大气科学*, 2016, 40(3): 551-562.
- [37] Bergin M H, Greenwald R, Xu J, et al. Influence of aerosol dry deposition on photosynthetically active radiation available to plants: A case study in the Yangtze delta region of China. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(18): 3605-3608.
- [38] Sharifi M R, Gibson A C, Rundel P W. Surface dust impacts on gas exchange in Mojave Desert shrubs. *Journal of Applied Ecology*, 1997, 34(4): 837-846.
- [39] 翟薇, 赵艳霞, 王春乙, 等. 大气气溶胶变化对农业影响的研究进展. *气象科技*, 2006, 34(6): 705-710.
- [40] 王宏伟, 曹琼辉, 黄峰, 等. 尘污染对植物的生理和生态特性影响. *广西植物*, 2009, 9(5): 621-626.
- [41] 张万儒, 杨光滢. 强沙尘暴降尘对北京土壤的影响. *林业科学研究*, 2005, 18(1): 66-69.
- [42] Wang Z, Akimoto H, Uno I. Neutralization of soil aerosol and its impact on the distribution of soil aerosol and its impact on the distribution of acid rain over East Asia: observations and model results. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D19): 4389-4395.
- [43] 王峰威, 李红, 柴发合, 等. 大气气溶胶酸度的研究进展. *环境污染与防治*, 2010, (01): 67-72.
- [44] 胡子梅. 基于卫星遥感和地面监测数据的上海市气溶胶污染研究. 上海: 华东师范大学硕士学位论文, 2014.

新书架

NEW BOOK

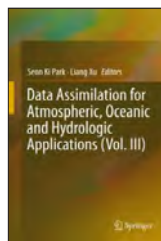
编辑: 张萌

 感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



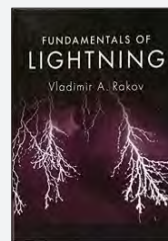
Making Climate Change History: Documents from Global Warming's Past
《描绘气候变化历史: 全球变暖的历史档案》

编著者: Joshua P. Howe等
出版者: University of Washington Press
出版年: 2017



Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications (Vol. III)
《大气、海洋和水文应用中的资料同化(卷三)》

编著者: Seon Ki Park等
出版者: Springer
出版年: 2017



Fundamentals of Lightning
《雷电基本原理》

编著者: Vladimir A. Rakov
出版者: Cambridge
出版年: 2016



Responses to Disasters and Climate Change: Understanding Vulnerability and Fostering Resilience
《应对灾害和气候变化: 了解脆弱性和建立恢复力》

编著者: Michele Companion等
出版者: CRC Press
出版年: 2016