

doi: 10.3969/j.issn.1007-2861.2010.03.002

浓雾天气气溶胶颗粒物的运输和转化特性

丁珏, 李家骅, 翁培奋

(上海大学 上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072)

摘要: 近年来,随着城市建设和经济的发展,气溶胶颗粒物污染问题日益严重,尤其是城市浓雾天气,颗粒物成为首要污染物.因此,消除雾污染,净化空气,引起人们的关注.介绍了气溶胶颗粒物和雾的基本特征,以及雾层内气溶胶颗粒物的湍流扩散、化学转化特性及动力学特性,阐述了有关气溶胶颗粒物运输问题的国内外研究概况,展望了未来研究的方向.

关键词: 雾污染;气溶胶颗粒物;运输;化学转化;动力学特性

中图分类号: O 359

文献标志码: A

文章编号: 1007-2861(2010)03-0226-06

Aerosol Transport and Transformation Characteristics in Foggy Weather

DING Jue, LI Jia-hua, WENG Pei-fen

(Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: In recent years, with the urban construction and economic development, the problem of aerosol pollution is becoming increasingly serious. Especially for foggy weather in urban areas, aerosol particles form a primary pollutant. This calls for people's concern to deal with the fog pollution problem for clean air. This paper focuses on the basic characteristics of aerosol particles and fog, including turbulent diffusion of aerosol particles, chemical transformation and dynamical characteristics. In addition, a detailed investigation on the aerosol transport problem in China and other countries is made, and the direction of the studies is discussed.

Key words: pollution fog; aerosol particles; transport; chemical transformation; dynamical characteristic

近些年,随着城市现代化建设和经济的发展,我国一些发达地区频繁出现城市雾,成为与城市热岛、城市烟岛相伴随的一种重要城市灾害.与常规气象原因形成的雾不同,城市雾中常含有高浓度有害污染物,累积于大气低层,直接影响人类的生存环境,威胁着城市的经济及交通的发展.浓雾天气引起的污染事件屡见不鲜.例如,1930年12月1—5日发生在比利时 Meuse 谷地的浓雾天气,造成雾区近万人

出现哮喘等症状,在3天内死亡60人^[1];1952年12月发生在英国伦敦著名的烟雾事件,使伦敦上空连续四五天浓雾迷漫,烟、粉尘蓄积不散,造成4 000人死亡,震惊一时;2001年2月21—23日,正值国际奥运考察团访问北京期间,北京及周边一带发生历史上罕见的持续60余小时的浓雾天气;2007年11月以来,北京、天津、河北、山西、重庆、江苏及广东等地均发生了大范围的雾霾交织天气(见图1和图2),

收稿日期:2009-06-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10802046);上海市教委基金资助项目(B10-0401-08-003);上海市重点学科建设资助项目(Y0103)

通信作者:丁珏(1973~),女,副研究员,博士,研究方向为环境流体力学等. E-mail:dingjue_lu@shu.edu.cn

给交通运输及人们的工作、生活带来严重影响。



图1 南京雾霾交织天气(2007-09-11)^[2]

Fig.1 Fog haze weather in Nanjing (2007-09-11)



图2 武汉雾霾天气(东湖,2009-01-31)^[3]

Fig.2 Fog haze weather in Wuhan (East Lake, 2009-01-31)

1 气溶胶颗粒物的特征和雾污染形成机制

近些年,气溶胶颗粒物污染问题日益严重,我国近2/3的城市空气质量未达到二级标准。同时,大量观测数据表明,在雾天气下,颗粒物浓度明显增加,成为首要污染物,其中可吸入颗粒物浓度等级最高。

1.1 气溶胶颗粒物的基本特征

气溶胶是指悬浮在气体中的固体和液体颗粒与气体载体共同组成的多相体系,其颗粒物直径大多在0.001~100 μm之间。气溶胶颗粒物来源广泛,一般可分为自然源和人为源。自然源包括扬起的尘土、森林燃烧产生的烟尘等,人为源主要是燃料燃烧形成的烟雾、工农业生产散发的原料或产品微粒、汽车排放出来的含铅化合物等。近十几年来,因气溶胶在大气中停留时间长、来源复杂、有毒有害物质含量高特点,对人体健康、环境产生较大影响而倍受人们的关注。

由于颗粒物的光散射、电荷、吸附毒性和沉积率等均与颗粒物的粒径有关,因此,气溶胶颗粒物的粒径分布是决定颗粒物行为特征的最重要参数。根据颗粒物的形成机制,可将气溶胶颗粒物分成3种模式^[4]:成核模式(粒径<0.1 μm)、积聚模式(粒径分布为0.1~2 μm)、粗微粒模式(粒径分布为2~100 μm)。成核模式主要来源于燃烧过程所产生的一次气溶胶粒子,因粒径小、数量多、表面积大而易碰撞合并,进入积聚模式。积聚模式主要来源于成核模式微粒的凝聚,以及大气化学反应所产生的各种气体分子转化成的二次气溶胶等,积聚型微粒不易沉降。粗微粒模式主要来源于机械过程造成的扬尘、风沙等一次气溶胶粒子,该类型微粒粒径较大,在大气中停留时间较短。此外,依据国内的空气质量标准,还可根据颗粒物的粒径大小,将颗粒物分为总悬浮颗粒物TSP(当量直径≤100 μm)、可吸入颗粒物PM₁₀(当量直径≤10 μm)、细颗粒物PM_{2.5}(当量直径≤2.5 μm)及碳气溶胶,如图3所示。

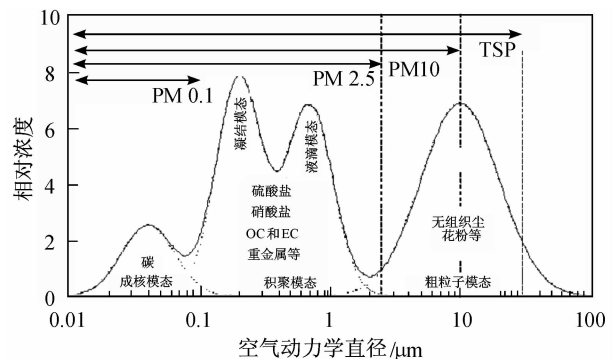


图3 气溶胶颗粒物的粒径分布

Fig.3 Aerosol particle size distributions

气溶胶颗粒物具有粒径小、比表面积大、分布广泛等特点,在大气输运过程中不仅可以作为污染物的载体,而且其表面能为大气化学反应提供场所。

1.2 雾的基本特征

雾是由大量悬浮在近地面空气中的微小水滴或冰晶组成的气溶胶系统,是近地面层空气中水汽凝结(或凝华)的产物。雾滴的尺度比较大,直径大多在4~30 μm左右。雾形成条件为大气形成逆温层,大气层结稳定,并且是微风或静风。雾的浓度通常以水平能见度表示。当能见度降至50 m以下时,为浓雾;能见度为50~500 m时,统称中雾;能见度为500~1 000 m时,称薄雾(或轻雾)。雾层是指雾环境中空气相对湿度大于98%的区域,雾层中特殊的边

界层结构、污染物湍流运动及化学转化等因素影响着雾区气溶胶的污染程度。

1.3 雾污染形成机制与雾层内气溶胶颗粒物的特性

1.3.1 雾层内气溶胶颗粒物的湍流扩散特性

气溶胶颗粒物的扩散过程受多种因素的影响,其中雾区大气湍流结构起重要作用。相比于晴朗或多云天气,在雾形成时大气湍流度较小,近地层存在较强的逆温层,即大气边界层具有较为稳定的动力与热力结构,气溶胶颗粒物不易扩散。在合适的层结和气象条件下,气溶胶颗粒物成为雾的凝结核,促进雾天气的形成。当雾的发展进入稳定期时,雾层内近中性的层结结构改变了气溶胶颗粒物扩散的条件,但雾顶更强的逆温层使颗粒物难以向上层大气扩散。此时,如果大气存在合适的温度和湿度,雾滴会发生蒸发而浓缩,进一步形成更多的气溶胶颗粒(见图4)。经过一定时间的积累,整个雾层内颗粒物浓度严重超标,雾污染严重。当大气边界层层结变为不稳定层结时,湍流运动明显增强,即大气的水平和垂直扩散能力显著提高,雾逐渐消散,气溶胶颗粒物也随之扩散、稀释。

而部分气溶胶颗粒物会被雾滴捕获,从而在雾滴内部氧化形成 SO_4^{2-} ,即通过多相化学反应生成硫酸(硫酸铵盐)颗粒物。在该过程中,一部分雾滴沉降,另一部分雾滴会发生蒸发,形成更多的硫酸铵盐气溶胶颗粒。由此可知,相比于晴朗或多云天气,非均相化学反应是雾环境中颗粒物化学转化的主要形式^[5],它改变着大气环境中雾滴和气溶胶颗粒物的化学组成。

雾环境下气溶胶颗粒物的运动过程非常复杂。气溶胶颗粒物的运动特性^[6]除了受到其本身空气动力学特性的影响和流场中各种力场作用以外,还需考虑气溶胶颗粒物之间、雾滴与气溶胶颗粒物之间的相互作用对颗粒物运动特性的影响。以铵盐粒子为例,因其具有吸湿性,通过吸收水分,使得含水量增加,粒子长大成为液滴,并与雾滴组成气溶胶系统。在该系统中,颗粒物、雾滴与颗粒物由于运动而相互碰撞并粘着成为大颗粒,导致颗粒尺寸增加而数量浓度连续下降。当相对运动是 Brown 运动时,称该过程为热力凝聚。当相对运动是由于重力、静电力或空气动力等外力作用引起时,该过程称为运动凝聚。凝聚的结果是颗粒物总数量持续减少,雾滴的平均直径不断增大,湿沉降量也逐渐增大。

1.4 城市雾污染的危害

1.4.1 对人体健康的影响

当发生浓雾天气时,空气中的 SO_2 , NO_x 等气态污染物遇水汽变成酸雾,从而污染环境,影响人体的健康。同时,在雾的影响下,部分有害元素和化合物富集在细小气溶胶颗粒物上,加重了对人体健康的危害。如易造成上呼吸道感染、支气管炎、气喘、肺炎、肺气肿等疾病。

1.4.2 对空气能见度的影响

根据光的反射、折射原理可以知道,不仅雾的存在会降低空气透明度,气溶胶颗粒物也会降低大气能见度。因此,浓度较大、持续时间较长的雾霾天气,使大气能见度明显降低,对航空、公路交通和内河航运造成重大的影响。

1.4.3 对电力通讯和农业等领域的影响

浓雾会使电线受到“污染”,引起输电线路短路、跳闸等故障,造成电网大面积断电,电力部门称这种现象为“雾闪”。雾对农业生产也有不利影响,研究表明,重庆地区酸雨及酸雾的分布和马尾松林衰亡程度的分布是十分一致的。对马尾松林来说,酸雾的危害甚至比酸雨还严重。

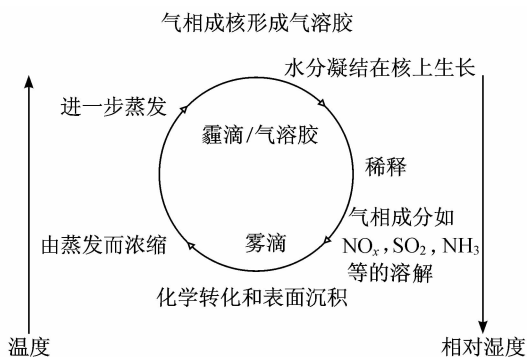


图4 气溶胶颗粒物在雾形成和蒸发中的作用

Fig. 4 Role of aerosol particles in fog formation and evaporation

1.3.2 雾层内气溶胶颗粒物的化学转化特性

城市中普遍存在吸湿性气溶胶颗粒物(如铵盐)。在由气溶胶颗粒物、雾滴及气态污染物组成的大气系统中,空气湿度较大,吸湿性颗粒表面会吸附一层水膜。以大气中的主要气态污染物二氧化硫(SO_2)为例,在水膜中 SO_2 会生成 SO_3^{2-} 或 HSO_3^{-} ,进而在氧化物的作用下形成 SO_4^{2-} ,即通过复相化学反应生成硫酸(硫酸铵盐)细颗粒。同时,该系统中的气态污染物 SO_2 也可通过扩散作用被雾滴吸收,

2 气溶胶颗粒物输运问题的研究进展

近年来,在经济快速发展的国家(如中国),许多城市出现过霾天气(也称灰霾).在有些地方,霾天气还与其他气象天气并存,逐渐结合成为复合型的污染天气(雾霾).这些环境问题引起了科学研究者的高度重视.

该问题的研究方法主要有三种:实地观测或测量、风洞/烟雾箱试验、理论分析及数值模拟^[7].这些方法的研究内容大多集中在污染物浓度分布与大气边界层结构、气象条件之间的关系,以及颗粒污染物来源、物理化学及运动特性方面.

2.1 实地观测或测量

为了深入研究城市大气污染物与大气边界层结构、城市气象条件之间的关系,同时也为大气污染物扩散模式的改进和发展提供必要的观测资料,各国相继开展了一系列大规模的城市边界层集中观测试验^[8].如美国科学家 Podzimek 于 1987 年夏冬季开展了 MUNA (Marine-Urban Napoli Aerosol) 计划^[9].此外,瑞士学者在中部 Mt. Rigi 城市开展了为期 7 年的冬季降水区域的研究,促进了人们对气溶胶颗粒物湿沉降机理的认识^[10].

近 30 年,污染物扩散问题引起了国内研究者的兴趣.中国环境科学研究院、中国科学院大气物理研究所^[11]、北京大学、清华大学^[12]、兰州大学、复旦大学^[13]、华中科技大学、浙江大学、湖南大学和中国气象科学研究院^[14]等许多专家学者在颗粒污染物来源、特性、时空分布及对气候的影响等方面,做了许多有意义的研究工作,开拓了大气污染的研究领域,并取得了有科学价值的成果.如我国于 2001 年冬季和 2003 年夏季,在北京组织实施了“BECAPEX”大气环境科学试验^[15].徐祥德等研究者根据“BECAPEX”大气环境科学试验、北京气象塔梯度观测资料、三层超声风温仪观测资料以及系留气艇垂直探测资料,对北京城市边界层大气过程的垂直动力特征进行分析,研究了在不同城市灾害性天气下(沙尘天气和城市浓雾天气)湍流垂直结构的特征及其与污染物浓度变化的关系^[15].张佃国等研究者利用机载 PMS (Particle Measuring System),对 2003 年夏秋季北京及周边地区进行了不同天气状况下 6 次气溶胶的探测,数据分析表明,北京及周边地区气溶胶粒子的分布在不同天气背景下有较大的差别^[16].上海环境科学研究院的陈明华等研究者对上

海市 PM_{2.5} 的污染现状进行了调查和分析,得出上海市的 PM_{2.5} 年平均浓度值是美国纽约、旧金山等城市的 3 倍左右^[17].此外,陈明华等检测了上海市雾天的大气污染状况,并根据上海 114 年的历史资料的分析得出:上海以辐射雾出现最多,而且在雾的发展期,粒径在 10~30 μm 的雾滴数密度最大.对于雾水的化学成分,正离子以铵(NH₄⁺)和钙(Ca²⁺)为主,负离子以硫酸根(SO₄²⁻)为主.

上述城市的外场观测试验,促进了人们对城市地区的边界层湍流结构、气溶胶颗粒物分布等方面的认识.但由于受到城市边界层大气污染物垂直分布探测手段的限制,在个别区域进行大气边界层和陆面过程的试验,所得到的资料十分有限,尤其是对特殊天气(如浓雾)下大气边界层结构和颗粒污染物运动规律的认识还不足.

2.2 环境风洞/烟雾箱试验

风洞模拟试验为深入了解气溶胶颗粒物的运动规律提供了良好的条件^[18-19].兰州大学郑晓静教授领导的课题组,通过对风沙流中的沙尘气溶胶颗粒带电和由此产生的风沙电场进行风洞试验研究,定量揭示出风沙流中沙粒所带的电荷量和风沙电场随高度、沙粒粒径以及来流风速等参数的变化规律^[18].

烟雾箱是用惰性材料制成的容器(材料可以是塑料膜、玻璃、不锈钢等),主要用于模拟大气层^[20],即在人工模拟环境下,对人们感兴趣物质的大气演化进行研究.国外的烟雾箱研究开始于 20 世纪 70 年代,迄今为止有众多的研究小组有自己的烟雾箱系统.如 CIT (California Institute of Technology) 2001 年建成了一套用于研究大气气溶胶化学的现代烟雾箱设备.该设备配置了 NO_x、O₃ 检测仪和温湿度传感器,还配备了 GC2F ID 和 GC2MS 用来检测碳氢化合物,粒子计数器用来测量气溶胶数量浓度,扫描电子迁移率分光计(SEMS)用来测量气溶胶粒径分布和个数浓度,串连微分迁移率分析仪(TDMA)用来测量吸湿增长因子^[21].

国内的烟雾箱研究起步较晚,我国只有极少的单位有烟雾箱.北京大学唐孝炎的研究小组于 1982 年建成了我国最早的室内光化学烟雾箱.该研究小组针对兰州和北京地区的大气状况,研究了 O₃ 的时空分布、评价源和受体间的关系,以模拟光化学烟雾的时空变化^[22].清华大学郝吉明等人于 2005 年建成了一个可以精确控制温度的大气模拟烟雾箱系统,目的是用烟雾箱研究北京市高 PM 体积分数条

件下的光化学反应^[23].

2.3 理论分析及数值模拟研究

除大量的观测及试验研究外,理论分析和数值模拟技术成为研究气溶胶颗粒物浓度分布、粒径分布和化学组成的重要手段^[24].

Breuer 等^[25]基于两相流理论,数值研究了气溶胶颗粒物在 90°弯管内的运动过程.即采用有限体积法,结合大涡模拟技术对弯管内气相进行研究,采用 Lagrangian 方法跟踪颗粒相(单分散气溶胶颗粒物)的运动. Sturm 等^[26]采用 Monte-Carlo 方法,对气溶胶颗粒物在人体肺泡中的扩散进行了数值模拟. Gaydos 等^[5]发展了三维气溶胶颗粒物的化学输运模型(PMCAMx),并对 2001 年发生在美国东部地区污染事件中气溶胶颗粒物质量和化学成分进行了数值研究.由于模型在研究夜间硝酸形成过程存在困难,因此硝酸盐颗粒物的数值预测存在较大误差.同时,大气中元素碳(EC)的含量也大大超过实测值. Toon 等^[27]研究了 Sahara 沙漠沙尘粒子的输运问题.在模式中将气溶胶颗粒物按粒径大小分为 30 类,给出了沙尘颗粒在输送过程中粒子谱演变特征.但模型中尚未考虑颗粒物聚并等物理过程,也未考虑颗粒物化学成分的演变.此外, Wexler 等^[28]发展了一个气溶胶颗粒物模型,该模型考虑了气-粒之间的质量输送对气溶胶颗粒物化学成分和粒径尺度分布的影响.该模型对气溶胶颗粒物微物理过程处理较细致,但考虑的气溶胶颗粒物化学成分较少,化学过程也很简单.

气溶胶颗粒物的运动特性问题,也引起了国内研究者的兴趣^[29-33].赵春生等^[29]建立了一个包括气溶胶微物理过程并可以描述粒子尺度变化的大气气溶胶动力模式.中国科学院大气物理研究所的张美根等^[30]利用区域大气模式系统(RAMS)和区域大气质量模式系统(CMAQ)耦合的空气质量模式系统,对东亚地区 2001 年春季气溶胶的输运及其化学转化过程进行了研究^[30].此外,在 2002 年立项,由清华大学承担,北京大学、华中科技大学^[33]、天津大学、东南大学和中国环境科学研究院参与的 973 项目“燃烧源可吸入颗粒物的形成和控制技术基础研究”,促进了人们对可吸入颗粒物的形成机制和在各种外加条件作用下的行为规律的认识.

3 结束语

气溶胶颗粒污染物对气候、环境等方面的影响,

近年来引起科学界的重视.国内外研究者在城市污染物的浓度分布及影响因素、细小颗粒物运动特性方面进行了大量工作,取得了较多的成果.然而,城市灾害性天气下(如浓雾天气)气溶胶颗粒物动力学及输运、转化等问题的研究开展得较少,研究成果十分有限.因此,对典型雾层中气溶胶颗粒物输运、扩散及转化过程进行数值分析和试验研究十分重要,并在此基础上,深入讨论气溶胶颗粒物在雾环境中的动力学特性和湍流扩散机理,揭示气溶胶颗粒物运动特性,分析雾层中气溶胶颗粒物速度、浓度、粒径及化学组分的时空分布规律,为浓雾天气气溶胶颗粒物的污染控制提供指导.同时,相关的研究也将丰富和推进气溶胶力学、环境科学与工程等学科的发展.

参考文献:

- [1] NEMERY B, HOET P H M, NEMMAR A. The Meuse Valley fog of 1930 an air pollution disaster [J]. *The Lancet*, 2001, 357:704-708.
- [2] 陈晔华. 武汉:雾霾天气来“拜年”[EB/OL]. [2009-01-31]. http://www.hb.xinhuanet.com/photo/2009-01/31/content_15563784.htm.
- [3] 于丹丹. 南京雾霾交织发布黄色预警信号[EB/OL]. [2009-02-01]. http://www.china.com.cn/city/txt/2007-11/09/content_9200918.htm.
- [4] WHITBY K T. The physical characteristics of sulfur aerosols [J]. *Atmospheric Environment*, 1978, 12:135-159.
- [5] RAVISHANKARA A R. Heterogeneous and multiphase chemistry in the troposphere [J]. *Science*, 1997, 276:1058-1065.
- [6] FUCHS N A. *The mechanics of aerosols* [M]. New York: Pergamon Press, 1964:85-89.
- [7] GAYDOS T M, PINDER R, KOO B, et al. Development and application of a three-dimensional aerosol chemical transport model, PMCAMx [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(12):2594-2611.
- [8] HERCKES P, CHANG H, LEE T, et al. Air pollution processing by radiation fogs [J]. *Water Air Soil Pollut*, 2007, 181:65-75.
- [9] PODZIMEK J. Aerosol particle scavenging by fog and haze droplets [J]. *Studia Geoph et Geod*, 1998, 42:540-560.
- [10] VOLKEN M, SCHUMANN T. A critical review of below-cloud aerosol scavenging results on MT. RIGI [J].

- Water, Air, and Soil Pollution, 1993, 68:15-28.
- [11] 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):591-603.
- [12] 杨复沫,马永亮,贺克斌. 细微大气颗粒物 PM_{2.5} 及其研究概况[J]. 世界环境,2000(4):32-34.
- [13] WANG Y, ZHUANG G S, SUN Y L, et al. Water-soluble part of the aerosol in the dust storm season—evidence of the mixing between mineral and pollution aerosols [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(37):7020-7029.
- [14] 姚文清. 北京城市边界层低层湍流动力结构及其影响特征[D]. 北京:中国气象科学研究院,2005:1-3.
- [15] 徐祥德,卞林根,丁国安,等. 城市大气环境观测工程技术与原理解[M]. 北京:气象出版社,2003:55-60.
- [16] 张佃国,郭学良,肖稳安. 北京及周边地区 2003 年夏秋季气溶胶和云滴分布特征[J]. 南京气象学院学报, 2007,30(3):402-410.
- [17] 陈明华,李德,陈长虹. 上海市微小颗粒物污染现状调查与分析[J]. 上海环境科学,2003,22(12):1038-1055.
- [18] 郑晓静. 风沙运动中的若干力学问题的研究[J]. 中国科学基金,2006(5):285-292.
- [19] 刘江,王元,王大伟,等. 热膜探头在风沙迁移研究中的应用[J]. 实验流体力学,2006,20(3):91-96.
- [20] 唐孝炎,张远航,邵敏. 大气环境化学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [21] COCKER D R, FLAGAN R C, SEINFELD J H, et al. State-of-the-art chamber facility for studying atmospheric aerosol chemistry [J]. Environ Sci Technol, 2001, 35(2):2594-2601.
- [22] 张远航,邵可声,唐孝炎,等. 中国城市光化学烟雾污染研究[J]. 北京大学学报:自然科学版,1998,34(223):392-400.
- [23] LU Z F, HAO J M, LI J H, et al. A new smog chamber to evaluate the effects of highly concentrated pre-existing aerosols on secondary organic aerosol formation: facility and primary results [C] // A&WMA's 99th Annual Conference & Exhibition, New Orleans, Louisiana, US. 2006:7-8.
- [24] SPORTISSE B. A review of current issues in air pollution modeling and simulation [J]. Comput Geosci, 2007, 11(2):159-181.
- [25] BREUER M, BAYTEKIN H T, MATIDA E A. Prediction of aerosol deposition in 90 deg bends using LES and an efficient Lagrangian tracking method [J]. Journal of Aerosol Science, 2006, 37(11):1407-1428.
- [26] STURM R, PAWLAK E, HOFMANN W. Monte-Carlo-Modell der aerosolbolusdispersion in der menschlichen Lunge—teil 2: modellvorhersagen für die kranke lunge [J]. Zeitschrift für Medizinische Physik, 2007, 17(2):136-143.
- [27] TOON O B, TURCO R P, WESRPHAL D, et al. A multidimensional model for aerosols: description of computational analogs [J]. J Atmos Sci, 1988, 45:2123-2143.
- [28] WEXLER A S, LURMAN F W, SEINFELD J H. Modeling urban and regional aerosol—(I): model development [J]. Atmos Environ, 1994, 28:531-546.
- [29] 赵春生,秦瑜. 周秀骥. 海洋大气边界层中大气气溶胶产生和发展的数值模拟[C] // 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响(二). 北京:气象出版社, 1997:215-224.
- [30] 张美根,韩志伟. TRACE-P 期间硫酸盐、硝酸盐和铵盐气溶胶的模拟研究[J]. 高原气象,2003,22(1):1-6.
- [31] 刘大有. 关于颗粒悬浮机理和悬浮功的讨论[J]. 力学学报,1999,31(6):661-669.
- [32] 宣益民,李强,姚正平. 纳米流体的格子 Boltzmann 模拟[J]. 中国科学:E 辑,2004,34(3):280-287.
- [33] ZHAO H B, ZHENG C G. Stochastic algorithm and numerical simulation for drop scavenging of aerosols [J]. Appl Math Mech: Engl Ed, 2006, 27(10):1321-1332.

(编辑:刘志强)