

文章编号 1001-8166(2004)04-0630-06

气溶胶吸收及气候效应研究的新进展^{*}

夏祥鳌, 王明星

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要 最新研究结果表明仅关注气溶胶大气顶辐射强迫是不够的, 特别是对于在短波辐射区域存在较强吸收的气溶胶类型, 如烟尘、沙尘气溶胶。INDOEX 实验表明来自印度次大陆的吸收性气溶胶产生的地表辐射强迫在量值上是大气顶辐射强迫的 3 倍左右, 二者的差额以大气辐射加热的形式出现。气溶胶吸收通过加热气溶胶层所在大气, 减少地表太阳辐射, 影响地面蒸发, 改变大气稳定度, 从而影响水分循环。另外气溶胶的吸收对云产生“燃烧效应”, 从而可能导致云量下降。鉴于气溶胶吸收的重要性, 气溶胶吸收问题是当前气溶胶气候效应研究的一个热点问题。尽管关于气溶胶的吸收问题以及与之有关的气候效应还存在很大不确定性, 根据观测事实或模拟结果得出的结论差别明显, 但毋庸置疑的是气溶胶吸收是一个急需深入探讨的课题。由于我国北方地区春季沙尘活动十分频繁, 而东部地区由于能源结构以及能源利用效率等问题致使气溶胶中吸收性成分(碳黑)含量偏高, 一些资料分析以及模式研究结果均表明我国发生了一些有别于全球或其他地区的独特气候变化现象, 初步分析表明气溶胶吸收在其中可能发挥了一定作用, 因此加强我国气溶胶吸收特性的观测和理论研究, 结合全球或区域气候模式, 深入认识我国气溶胶辐射强迫、气候效应具有重要的科学意义, 另外对于评估我国近年来采取的一些卓有成效的污染控制措施的环境和气候效应也是必不可少的。

关键词 气溶胶, 吸收, 辐射强迫, 气候效应

中图分类号 X513 **文献标识码** A

0 前言

2000 年春季, 由国际大气化学组织(IGAC)牵头、旨在研究亚洲工业和沙尘气溶胶特性的亚洲气溶胶特性实验(ACE-Asia)开始启动, 这是 IGAC 在近几年内组织的第四次大型外场气溶胶综合观测实验。前 3 次依次是针对海洋气溶胶的气溶胶特性实验 1(ACE-1, 1995 年冬, 澳大利亚南部太平洋海域); 针对工业气溶胶的对流层气溶胶辐射强迫观测实验(TARFOX, 1996 年夏, 紧邻美国东海岸); 针对欧洲工业气溶胶和来自非洲长距离输送的沙尘气溶胶的气溶胶特性实验 2(ACE-2, 1997 年夏, 北大

西洋东部), 另外, 其他一些国际合作项目如 INDO-EX SAFARI 2000、PRIDE 等也将气溶胶辐射强迫作为研究核心。这些事实充分说明气溶胶辐射强迫研究已经成为继臭氧亏损、温室效应之后又一个重要的大气科学研究领域。

尽管近年来就气溶胶辐射强迫问题开展了许多大型外场综合观测实验和理论研究, 也取得了许多成果, 但气溶胶辐射强迫仍然是当前气候模拟和未来气候变化情景预测的一个极大的不确定性因素之一。从 IPCC 第三次评估报告中气溶胶辐射强迫评估结果来看^[1], 相对来说, 对硫酸盐气溶胶的直接辐射强迫的认识要好于其他气溶胶类型, 这主要是

* 收稿日期: 2002-11-08, 修回日期: 2003-11-03.

* 基金项目: 国家自然科学基金项目“北京地区大气微量气体的变化特征研究”(编号: 40175008), 国家自然科学基金海外学者合作基金项目“卫星遥感地面辐射收支、云和气溶胶参数及其在气候变化研究中的应用”(编号: 40028503)资助.

作者简介: 夏祥鳌(1973-), 男, 湖南南县人, 助理研究员, 主要从事气溶胶特性及辐射强迫遥感研究. E-mail: xxa@mail.iap.ac.cn

由于硫酸盐气溶胶质量散射效率最高,同时也一直被认为是最主要的人为气溶胶成分,因此以往大多数关于气溶胶辐射强迫的研究都是针对硫酸盐气溶胶^[2,3]。自 IPCC 第二次评估报告发表以来,人们对其他气溶胶类型的辐射强迫问题有了更多的认识,其中烟尘气溶胶由于与热带雨林地区土地利用变化和微量气体排放等科学问题紧密相关而得到重视^[4],如美国和巴西科学家在 90 年代早期联合对亚马孙等地区的烟尘气溶胶进行了 3 次大型外场综合观测实验,依次为:SCAR-(A、B、C)。通过这些实验,加深了对烟尘气溶胶特性、直接与间接辐射强迫的理解。1996 年 Li^[5]在分析大西洋巴巴多斯(Barbados)岛的长期观测资料中发现,尽管来自非洲撒哈拉和撒赫尔地区的沙尘气溶胶质量散射效率仅是硫酸盐气溶胶的 1/4,但总质量却是硫酸盐气溶胶的 16 倍,因此在沙尘源区及其下风方向沙尘气溶胶的辐射强迫将远远超过其他气溶胶成分,因而指出在区域尺度上研究沙尘气溶胶辐射强迫的重要性;Teegen 等^[6]的模式结果表明就全球平均而言,硫酸盐、烟尘、沙尘气溶胶对全球平均气溶胶光学厚度的贡献大体相当,这说明即使在全球尺度上,沙尘气溶胶的辐射强迫问题也不能忽视,Teegen 等^[7]通过对比沙尘输送模式模拟的沙尘分布与卫星观测结果认为,人为因素(主要是在气候脆弱地区的一些不合理农业活动,如滥垦、滥伐、过度放牧等)导致的沙尘气溶胶占大气沙尘总量的 50% ± 20%,这说明沙尘气溶胶辐射强迫不仅来源于自然过程,人为因素在其中也起到了同等重要的作用。这些研究成果从根本上改变了以往关于沙尘气溶胶的认识,从而指出了研究沙尘气溶胶辐射强迫的重要性。

本文将根据一些最新研究成果,详细介绍吸收性气溶胶辐射强迫以及可能的气候效应,在此基础上,结合我国气溶胶的实际情况,指出我国气溶胶辐射强迫研究中的一些迫切问题。

1 吸收性气溶胶大气、地面、大气顶辐射强迫及其气候意义

在以往大量气溶胶辐射强迫研究中着重强调气溶胶对大气顶(TOA)后向散射辐射的贡献,而实际上气溶胶辐射强迫应当包含 3 个层面,即由于气溶胶的存在,导致的大气顶、大气、地面辐射收支的改变。基于能量守恒可知,大气顶气溶胶辐射强迫等于大气与地面辐射强迫之和。由于硫酸盐气溶胶粒子对太阳辐射的吸收极小,从而硫酸盐气溶胶的大

气辐射加热能力很弱,因此大气顶与地面的辐射强迫量值相当,而符号相反。硫酸盐直接辐射强迫作用主要是增加地气系统反照率,减少地气系统的能量输入,从而对气候系统起到冷却作用,而这种冷却作用在一定程度上可能部分抵消温室效应,因此早在 20 世纪 70 年代就有学者指出气溶胶辐射强迫在全球或区域尺度上可能减缓温室气体浓度上升导致的全球变暖。显然对于硫酸盐气溶胶而言,由于硫酸盐气溶胶的大气辐射加热能力很弱,因此仅仅研究大气顶辐射强迫是可以接受的,但烟尘、沙尘气溶胶与硫酸盐气溶胶显著不同的特征是两者对太阳辐射都存在不可忽视的吸收,因此对于这两种气溶胶类型来说,仅关注大气顶的辐射强迫是不够的,还应当知道地面和大气的辐射强迫,因为由于吸收性气溶胶的存在,导致在垂直方向上的太阳辐射能量重新分配,这将直接影响大气对流、云的生消等重要物理过程,从而影响全球和区域气候。

INDOEX 实验的最新研究成果表明由于来自印度次大陆的气溶胶存在很强的吸收能力,导致到达地面的太阳辐射减少量是大气顶太阳辐射增量的 3 倍,而另外理应到达地表的 60% 左右的太阳辐射被气溶胶所吸收^[8]。因此吸收性气溶胶直接辐射强迫的大体框架是减少到达地面的太阳辐射,增加大气吸收和大气顶后向散射,而由于吸收性气溶胶对地表反射辐射的吸收将对大气顶后向散射辐射有一定的补偿作用,因此,一般而言,吸收性气溶胶的大气顶辐射强迫小于纯散射气溶胶类型。但吸收性气溶胶的吸收导致的地面太阳辐射减少、大气稳定度增加对水分循环可能产生负面影响,原因在于对应于地面太阳辐射的减少,地表潜热和感热通量将随之减少(就全球平均而言,约 60% ~ 70% 地球表面吸收的太阳辐射被蒸发所消耗),而蒸发的减弱则有可能导致降水的减少,另外大气稳定度增加、抑制大气对流运动也可能是导致降水减少的一个重要机制^[9]。降水的减少将削弱气溶胶的湿清除过程,增加气溶胶在大气中的寿命,从而增强气溶胶的直接辐射强迫。应当指出的是吸收性气溶胶辐射强迫受许多因素的影响,包括气溶胶的辐射特性、地表状况等,另外云也是影响吸收性气溶胶直接辐射强迫的一个重要因素,反过来气溶胶的吸收也对云量产生影响^[10]。对位于云层以上的吸收性气溶胶而言,云将增加气溶胶辐射强迫,而对处于云层以下的吸收性气溶胶而言,云的覆盖将减少气溶胶直接辐射强迫。INDOEX 观测实验的另一个重要研究成果是印度洋

上空来自印度次大陆的强吸收性气溶胶通过加热大气,对信风积云产生“燃烧作用”(burning effect),从而减少云量。INDOEX 1998 和 1999 年实验结果表明由于这种“燃烧作用”导致云量下降 25% 和 40%^[14],但长期云观测资料表明印度洋上空云量并未出现下降趋势,相反却表现出较弱的上升趋势,这说明还有其他有待认识的因素在其中起作用^[12]。

另一个由于气溶胶的吸收,可能产生了重要气候效应的例子是关于非洲 20 世纪 70 年代以来持续干旱的问题,尽管许多学者从大气环流、海气相互作用等角度对这一现象进行了探讨,但都不能解释为什么北非持续干旱,因此不少学者另辟蹊径,试图寻找这一现象的其他合理解释。Chamey^[13]提出地表覆盖变化与降水之间的正反馈机制来解释这一持续干旱的现象。Brooks^[14]根据沙尘气溶胶卫星观测资料(DDI)和 NCEP 再分析资料的综合分析,提出了沙尘气溶胶与降水之间也可能存在正反馈机制,即降水减少,大气中沙尘气溶胶浓度上升,导致沙尘气溶胶正的大气辐射强迫,负的地表辐射强迫加强,大气稳定度增加,从而抑制大气对流运动,最终导致降水减少。另外研究也表明沙尘气溶胶的大气辐射加热对于影响北非地区夏季降水的天气系统也有一定影响。这些观测事实都说明沙尘气溶胶不仅受气候变化的影响,同时也对气候变化产生不同程度的反馈。

3 我国气溶胶研究中的一些迫切问题

我国西北部地区地处欧亚大陆腹地,属于典型的大陆性干旱、半干旱气候,地表覆盖稀疏,我国主要的沙漠和戈壁均集中在这一地区。每年春季由于极地冷空气活动南下,导致大风天气频繁发生,配合大气强热力不稳定,加上春季西北部地区地表丰富的沙源,使得我国西北部地区成为我国乃至东亚地区主要的沙尘源地。每年春季频繁爆发的沙尘天气(暴)不仅给源区人民生命财产造成严重损失,沙尘气溶胶随高空盛行西风向下游地区的输送也严重影响了我国东部广大地区大气环境质量。通过分析 2000 年 4 月 6 日北京特大沙尘暴期间地面采样观测资料发现北京地区粗、细粒子浓度都几十倍增加,20 种元素总质量浓度高达 $1.536 \mu\text{g}/\text{m}^3$,即使沙尘暴过后沙尘污染仍然十分严重^[15]。另外研究表明某些海域海洋初级生产力受铁元素浓度限制,东亚地区春季大量沙尘气溶胶是北太平洋海域铁元素的重要来源,随沙尘粒子输送的铁元素与海洋硫元素之间的相互耦合与正反馈不仅影响了太平洋海域生

物地球化学循环,对东亚甚至对全球气候都将产生深远影响^[16]。

新世纪以来我国北方地区春季沙尘活动日益频繁,引起了各方面的广泛关注和重视^[17,18]。中国气象局针对这一现象,着手筹建我国北方地区沙尘天气(暴)监测、预报、预警、服务系统。关于沙尘气溶胶辐射强迫及气候效应问题,国内外学者已经在我国西北地区就沙尘气溶胶来源、输送、沉降以及物理、化学、辐射特性开展了一些研究工作^[19~22],但长期、连续性观测计划很少,各观测项目之间也缺乏必要的联系,导致目前对我国沙尘气溶胶大气顶、大气、地面辐射强迫还知之不多。这一缺憾有可能通过目前正在执行的 ACE-Asia 中日黄沙输送研究等国际合作项目得到弥补。在这些国际合作项目中,国内外学者将通过综合地面宽带辐射观测,太阳光度计观测,激光雷达观测,地面气溶胶物理、化学、辐射特性采样分析,配合新一代的卫星遥感资料,结合模式研究,给出我国西部地区沙尘气溶胶辐射强迫的时空变化信息。

利用 47 个日射站 1961—1990 年地面晴天太阳宽带直接辐射,根据邱金桓^[23]提出的反演方法,罗云峰等^[24]反演得到了这 30 年来逐年、逐月 $0.75 \mu\text{m}$ 气溶胶光学厚度,发现我国大部分地区气溶胶光学厚度存在明显的上升趋势。而由于我国能源结构、能源利用效率等因素导致我国气溶胶中黑碳(black carbon)含量要明显高于发达国家。黑碳是大气中首要的吸收性气溶胶成分,而关于气溶胶的吸收问题是当前气溶胶辐射强迫研究的一个热点问题^[25]。最新研究表明黑碳的辐射强迫仅次于 CO_2 ^[26]。尽管黑碳的增温效应与温室气体存在明显差别,如黑碳主要影响太阳辐射,其时空分布远不及温室气体均匀等,但 Hansen 等^[27]仍提出通过削减黑碳排放来控制温室效应。但由于黑碳排放与其他污染物排放有着密切联系,因此相对独立的削减黑碳排放而不牵涉到其他污染物的排放是不大可能的^[28];另外温室效应与气溶胶直接辐射强迫的时空分布,对气候的影响机制也不尽相同。这些区别在气候模拟和研究中都是值得注意的。

在全球变暖、中高纬地区降水有所增加的大背景下,我国南方大部分地区,特别是四川、湖南等地区地面温度却普遍下降,数值模拟结果表明硫酸盐的冷却效应可能在其中起到了重要作用^[29~31]。而最近的一些观测和模拟结果表明我国一些颇具特色的气候变化特征可能与我国气溶胶较强的吸收能力

有关。通过对比分析我国东部地区与美国西南部地区近 40 年的温度变化趋势, Xu^[32] 等认为我国东部地区吸收性气溶胶的加热作用可能是导致我国东部地区冬、春季温度上升的一个因素, 但 Krishnan 等^[33] 的研究成果表明印度地区自 20 世纪 70 年代以来, 吸收性气溶胶浓度上升, 致使到达地表的太阳辐射显著下降, 从而导致地表温度下降大约 0.3, 作者给出的物理解释是印度地区气溶胶吸收的太阳辐射可能通过大气环流被输送到其他地区, 从而加热其他地区。近半个世纪以来, 美国、欧洲大陆、澳洲等地区地面总云量观测资料显示云量呈上升趋势, 这种上升趋势可能与气溶胶间接效应有某种联系, 而 Kaiser^[34] 的研究结果却表明我国近 40 年来总云量呈下降趋势, 而且主要集中在我国东部地区, 尽管目前对于这一观测事实还不能给出满意的物理解释, 但已有学者指出这可能与我国气溶胶吸收有关。70 年代以来我国降水趋势出现比较明显的突变, 由北方地区降水略有增加, 南方降水偏少的空间分布格局转变为南涝北旱^[35]。Menon 等^[36] 运用 GISS 全球环流模式, 在模式中加入观测的气溶胶浓度变化信息和人为设定的吸收能力, 可以比较好的模拟出我国降水的这种突变现象。其物理解释是由于我国长江中下游地区吸收性气溶胶加热低层大气, 导致对流加强, 降水增加, 而我国北方地区下沉增强, 因此降水减少。但是由于模式中没有考虑海洋的反馈机制, 敏感性实验中也仅考虑了气溶胶的直接辐射强迫, 而关于气溶胶间接辐射强迫未加考虑, 从上面的介绍中已经指出气溶胶作为云凝结核, 对云的物理、辐射特性和云的寿命以及覆盖范围都将产生一定影响, 而这些机制有可能导致降水事件发生概率下降; 另外 INDOEX 实验中提出的吸收性气溶胶的云“燃烧作用”也可能导致降水减少, 而且气溶胶的时空分布变化很大, 高气溶胶浓度主要集中在人为活动频繁的地区及其下风方向, 因此气溶胶的这种时空分布特征以及与之密切相连的区域性的气溶胶辐射强迫分布特征对大气环流, 进而对水分循环也将产生不可忽视的影响。因此在分析气溶胶对水分循环的影响这一问题时, 应当充分考虑气溶胶不同气候效应的综合作用, 因为这些效应之间可能互相制约, 因此单纯的强调气溶胶某一气候效应, 而忽视其他气候效应的作用, 显然是很难获得令人信服的结论的。但有一点是毋庸置疑的, 那就是气溶胶在气候系统中扮演着一个重要角色, 而且随着人类活动的加剧, 气溶胶浓度呈现显著的上升趋势, 因此气

溶胶在气候系统的作用显得越来越重要, 而对气溶胶物理、化学和辐射特性以及影响气溶胶特性变化的重要物理、化学机制还缺乏广泛深入理解, 这也就是为什么 IPCC 在第三次评估报告中仍然将气溶胶辐射强迫列为当前气候模拟和气候预测中的一个极不确定性因素之一。既然气溶胶吸收可能对我国气候已经产生深远影响, 另外对大气环境质量的影响也是一个不容忽视的问题, 因此加强我国东部地区气溶胶的观测和理论研究势在必行。鉴于对我国内陆地区, 特别是我国东部地区气溶胶特性的认识仍然十分缺乏, 一些针对我国内陆地区的气溶胶特性、辐射强迫及气候效应的大型气溶胶国际合作项目和国家重大项目也在酝酿之中, 可以预见的是未来数年我国气溶胶研究将迈入一个新的时期。

4 讨论

文中仅讨论了气溶胶直接(半直接)辐射强迫以及可能的气候效应, 而没有涉及到气溶胶的间接辐射强迫, 实际上在这方面也取得了许多重要结论。最新的卫星观测结果证实了关于城市污染气溶胶、沙尘气溶胶间接效应的理论推测, 即气溶胶浓度增加, 云滴尺度变小, 降水得到抑制, 这种效果在比较干净的南半球表现得更加明显^[37]。由于气溶胶的间接效应导致云量增加, 降水减少, 气溶胶的吸收导致地面吸收的太阳辐射大幅下降, 从而对蒸发、地气潜热和感热通量产生影响, 进而影响水分循环。与温室气体显著不同的是, 气溶胶的时空分布差异很大, 人为排放气溶胶主要集中在北半球中纬度地区, 气溶胶的这种空间分布格局以及由此产生的辐射强迫的空间差异对大气环流有何影响? 目前尚难定论, 如若气溶胶的辐射强迫将导致某些气候敏感地区如非洲萨赫勒(Sahel)地区降水减少, 那么不可避免的是将促发以下正反馈过程: 降水减少, 干旱频发, 沙尘天气和生物质燃烧事件发生概率增加, 从而增强气溶胶辐射强迫和气候效应^[38]。Menon 模拟结果表明我国东部地区气溶胶吸收导致对流加强, 对我国甚至全球水分循环都产生了一定影响。如果全面考虑气溶胶直接和间接辐射强迫的影响, 我国东部地区气溶胶对我国甚至全球水分循环起促进还是抑制作用? 目前还存在很多不确定性, 有待于开展大量的观测和模拟研究。1995 年以来我国政府在污染控制方面加大力度, 包括关闭重污染的乡镇企业, 增加能源利用效率, 改变农村能源利用方式等。由于采取了这些有效措施, 我国温室气体、气溶

胶及其前体物排放于 1996 年达到峰值,然后呈现比较明显的下降趋势^[39]。这些措施的气候效应如何?一些研究表明人为污染物如 O_3 、气溶胶等通过直接影响作物生长或通过改变地表太阳辐射收支,从而对我国农业主产区作物生长和产量产生不可忽视的影响,那么我国污染控制措施的执行是否有助于我国农业主产区的农业生产^[40, 41]?这些都值得我们密切关注。

参考文献 (References):

- [1] IPCC. Radiative forcing of climate change [A]. In: Climate change 2001 [C]. Cambridge University Press, 2001.
- [2] Charlson R J, Langner J, Rodhe H, et al. Perturbation of the Northern hemisphere radiative balance by back-scattering from anthropogenic aerosol [J]. *Tellus*, 1991, 43A: 152-163.
- [3] Kiehl J T, Briegleb B P. The relative roles of sulfate aerosols and greenhouse gases in climate forcing [J]. *Science*, 1993, 260: 311-314.
- [4] Hobbs P V, Reid J S, Kotchenruther R A, et al. Direct radiative forcing by smoke from biomass burning [J]. *Science*, 1997, 275: 1776-1778.
- [5] Li X, Maring H, Savoie D, et al. Dominance of mineral dust in aerosol light scattering in the North Atlantic trade winds [J]. *Nature* 1996, 380: 416-419.
- [6] Tegen I, Holmig P, Chin M, et al. Contribution of different aerosol species to the global aerosol extinction optical thickness: Estimates from model results [J]. *Journal Geophysical Research*, 1997, 102: 23 895-23 915.
- [7] Tegen I, Lacis A A, Fung I. The influence on climate forcing of mineral aerosols from disturbed soils [J]. *Nature*, 1996, 380: 419-422.
- [8] Satheesh S K, Ramanathan V. Large differences in tropical aerosol forcing at the top of the atmosphere and earth's surface [J]. *Nature*, 2000, 405: 60-63.
- [9] Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. Aerosol, climate, and hydrological cycle [J]. *Science*, 2001, 294: 2 119-2 124.
- [10] Satheesh S K. Aerosol radiative forcing over land: Effect of surface and cloud reflection [J]. *Annales Geophysicae*, 2002, 20: 1-5.
- [11] Ackern A S, Toon O B, Stevens D E, et al. Reduction of tropical cloudiness by soot [J]. *Science*, 2000, 288: 1 042-1 047.
- [12] Norris J R. Has Northern Indian ocean cloud cover changed due to increasing anthropogenic aerosols? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28: 3 271-3 274.
- [13] Charney J. Drought in the Sahara: A biogeophysical feedback mechanism [J]. *Science*, 1975, 187: 434-435.
- [14] Brooks N, Legrand M. Dust variability over northern Africa and rainfall in the Sahel [A]. In: McLaren S J, Kniveton D R, eds. *Linking Climate Change to Land Surface Change* [C]. Kluwer Academic Publishers, 1999. 1-25.
- [15] Zhang Renjian (张仁健), Wang Mingxing (王明星), Zhang Wen (张文), et al. Physical and chemical characteristics of dust storms in spring, 2000 [J]. *Climate and Environmental research (气候与环境研究)*, 2000, 5: 259-266 (in Chinese).
- [16] Zhang G, Yi Z, Duce R A, et al. Chemistry of iron in marine aerosols [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1992, 6: 161-173.
- [17] Ye Duzheng (叶笃正), Chou Jian (丑纪范), Liu Juyuan (刘纪远), et al. Causes of sand-storm weather in Northern China and control measurements [J]. *Acta Geographica Sinica (地理学报)*, 2000, 55: 513-521 (in Chinese).
- [18] Zhou Xiuji (周秀骥), Xu Xiangde (徐祥德), Yan Peng (颜鹏), et al. Dynamic characteristics of dust storms in spring, 2000 [J]. *Science in China D (中国科学 D 辑)*, 2002, 32: 327-334 (in Chinese).
- [19] Zhang Xiaozhuai (张小曳). Source distributions, emission, transportation, deposition of Asia dust and loess accumulation [J]. *Quaternary Sciences (第四纪研究)*, 2001, 21: 29-40 (in Chinese).
- [20] Shen Zhibao (沈志宝), Wei Li (魏丽). The influences of atmospheric dust on the radiative heating in the earth atmosphere system and atmosphere in the north western China [J]. *Plateau Meteorology (高原气象)*, 1999, 18: 425-435 (in Chinese).
- [21] Shen Zhibao (沈志宝), Wei Li (魏丽). The influence of atmospheric dust on the surface radiative energy budget in Heihe region [J]. *Plateau Meteorology (高原气象)*, 1999, 18: 1-8 (in Chinese).
- [22] Qiu Jinheng (邱金桓), Sun Jinhui (孙金辉). Optical remote sensing and analysis of dust storm [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science (大气科学)*, 1994, 18: 1-10 (in Chinese).
- [23] Qiu Jinheng (邱金桓). Determine atmospheric aerosol optical depth using multi-waved solar direct radiation observation data. I: Theory [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science (大气科学)*, 1995, 19: 385-394 (in Chinese).
- [24] Luo Yunfeng (罗云峰), Li Jidaren (吕达仁), Li Weliang (李维亮), et al. The characteristics of atmospheric optical depth variation over China in recent 30 years [J]. *Chinese Science Bulletin (科学通报)*, 2000, 45: 549-554 (in Chinese).
- [25] Andreae M O. The dark side of aerosols [J]. *Nature*, 409: 671-672.
- [26] Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols [J]. *Nature*, 2001, 409: 695-697.
- [27] Hansen J, Sato M, Lacis A, et al. Perspective: Climate forcings in the industrial era [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1998, 22: 12 753-12 758.
- [28] Smith S J, Wiegley T M L, Edmonds J. A new route toward limiting climate change? [J]. *Science*, 2000, 290: 1 109-1 110.
- [29] Li X W, Zhou X J, Li W L. The cooling of Sichuan province in recent 40 years and its probable mechanism [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1995, 9: 57-68.
- [30] Luo Y F, Zhou X J, Li W L. A numerical study of the atmospheric aerosol climate forcing in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science*

- pheric Science, 1999, 23 : 1-12.
- [31] Qian Yun (钱云), Fu Congbin (符淦斌), Wang Zifa (王自发). The influence of industrial SO_2 on temperature in East Asia and China [J]. Climatic and Environmental Research (环境和气候研究), 1996, 2 : 143-149 (in Chinese).
- [32] Yu S C, Saxena V K, Zhao Z C. A comparison of signals of regional aerosol-induced forcing in eastern China and the southeastern United States [J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28 : 713-716.
- [33] Krishnan R, Ramanathan V. Evidence of surface cooling from absorbing aerosol [J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29 : 10.1029/2002GL014687.
- [34] Kaiser D P. Analysis of total cloud amount over China [J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25 : 3599-3602.
- [35] Xu Q. Abrupt change of the mid-summer climate in central east China by the influence of atmospheric pollution [J]. Atmospheric Environment, 2001, 35 : 5029-5040.
- [36] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India [J]. Science, 2002, 297 : 2250-2253.
- [37] Rosenfeld D. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution [J]. Science, 2000, 287 : 1793-1796.
- [38] Lohmann U. Interactions between anthropogenic aerosols and hydrologic cycles [J]. IGACTivities, 2002, 26 : 3-7.
- [39] Streets D G, Jiang K J, Hu X L, et al. Recent reductions in China's greenhouse gas emissions [J]. Science, 2001, 294 : 1835-1836.
- [40] Chameides W L, Hu H, Liu S, 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? [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1999, 26 : 13626-13633.
- [41] Chameides W L, Li X, Tang X, et al. Is ozone pollution affecting crop yields in China? [J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26 : 867-870.

LATEST ADVANCES IN AEROSOL ABSORPTION AND ITS CLIMATE EFFECTS

XIA Xiang-ao, WANG Ming-xing

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: It's not enough to focus only on Top of Atmosphere (TOA) aerosol direct radiative forcing, especially for absorptive aerosol types such as smoke and dust aerosols. It's shown by INDOEX experiment that absorptive aerosol (mainly from anthropogenic productions) surface radiative forcing in magnitude is nearly 3 times more than that at TOA, the difference between them is the heating of atmosphere that contains absorptive aerosol. Combined with the heating of the atmospheric and reducing in earth's surface radiation due to aerosol absorption, evaporation and atmospheric stability may be affected and it is possible to influence hydrological cycle. Additionally, absorptive aerosol may produce cloud "burning effect", then result in decreased cloud amount. Aerosol absorption has become the hot topic concerning aerosol's effects on climate. It's valuable to study aerosol absorption, since that there are large uncertainties and some inconsistency results have been obtained concerning aerosol absorption and its effects on climate. It's absolutely necessary to strengthen experiment and theory studies on aerosol absorption in China due to high occurrences of dust storms in north China and high concentration of black carbon (BC) in east China. The high concentration of BC is partly resulted by our energy consumption structure and relatively low energy consumption efficiency. It's shown by data and model analyses that aerosol absorption probably plays an important role in unique climate change in China with comparison of other region or globe. It's of significance to deepen our knowledge of aerosol radiative forcing and climate effects in China with the help of global or region climate model, at the same time, it's also helpful to estimate the environment and climate effects of pollution control measures taken by our country in recent years.

Key words: Aerosol; Absorption; Radiative forcing; Climate effect.