

# 空气污染与气候变化

丁一汇 李巧萍 柳艳菊 张 莉 宋亚芳 张 锦

(国家气候中心,北京 100081)

**提 要:** 近50年来,全球气候变化主要由大气温室气体浓度的日益增加引起,而空气污染主要由悬浮于空气中的大气气溶胶粒子造成,它们都主要由矿物燃料的燃烧排放形成。近年的研究表明,大气气溶胶粒子也具有气候效应:一是通过散射和吸收太阳光,减少到达地面的太阳辐射而具有降冷作用,可抵消一部分由温室气体造成的变暖作用;二是可以作为云中凝结核改变云微物理过程和降水性质,改变大气的水循环。大气气溶胶对于经济社会的许多方面,如农业、水资源、人体健康、城市化等也表现出重要的影响。

由于空气污染和气候变化在很大程度上有共同的原因,即主要都是由矿物燃料燃烧的排放造成,因而减轻和控制空气污染与减少温室气体排放保护气候在行动上应是一致的。为了从经济上得到最大的节约和获得双赢的效果,应该采取协同应对空气污染和气候变化的减排战略,即应该采取统一的而不是分离的科学研究和应对战略。

**关键词:** 气候变化 空气污染 大气气溶胶粒子

## Atmospheric Aerosols, Air Pollution and Climate Change

Ding Yihui Li Qiaoping Liu Yanju Zhang Li Song Yafang Zhang Jin

(National Climate Center, Beijing 100081)

**Abstract:** During recent 50 years, the global climate change is mostly caused by increasing atmospheric concentration of greenhouse gases, while air pollution is mainly produced by atmospheric aerosol particles suspended in the air. They are both emitted by burning of fossil fuels. Recent studies have shown that the atmospheric aerosols also have significant climate effects: (1) they can reduce solar radiation reaching the surface through scattering and absorbing the sunlight, thus leading to cooling; and (2) they can modify microphysical processes and precipitation nature as cloud condensation nuclei, thus leading to change in hydrological cycle in the atmosphere. Atmospheric aerosols may exert important impacts in many aspects, such as on agriculture, water resources, human health, urbanization, and so on.

Due to common causes between air pollution and climate change to a greater extent a unified action should be taken for abatement and control of air pollution and mitigation of emission of greenhouse gases, based on the formulation of a win-win efficient strategy.

**Key Words:** climate change air pollution atmospheric aerosol particle

## 引言

空气污染主要由大气气溶胶造成。大气气溶胶是悬浮于空气中固态和液态质点组成的一种复杂的化学混合物,它们的大小从只有几纳米( $10^{-3} \mu\text{m}$ )的超细颗粒到几个微米直径以上的粗颗粒。在两者之间是被称为细颗粒的气溶胶,其直径在  $0.1 \mu\text{m}$  到几个  $\mu\text{m}$ , 所以大气气溶胶的典型尺度是  $0.001 \sim 10 \mu\text{m}$ , 其在大气中的居留期至少为几小时, 平均可达几天、一周到数周, 甚至到数年(如平流层气溶胶)。

大气气溶胶可以作为颗粒物(初生源)直接被排放出来,也可以由气态前体物通过化学反应(如光化反应)间接形成于大气中(次生源)。以排放源分类,大气气溶胶大致可分为自然源和人为源两类。细粒子在大气中一般居留几天到几星期,因而它们在被清除前可输送几千公里的距离。结果全球许多地区经常被大范围的包含大量细粒子污染物的气层所覆盖。在适当的气象条件下,受影响区可扩展到排放源周围几百万平方公里。因而大气气溶胶是造成空气污染的主要原因,尤其是在人类活动排放源很强的工业区,大城市以及频繁生物质燃烧地区及其周边。另一方面,大气气溶胶有明显的气候效应,主要有两个方面:一是对气候系统或气候变化的影响;二是对水圈循环的影响。两者都是表征气候变化的重要分量。大气气溶胶影响气候系统的主要物理过程是通过直接散射和吸收太阳辐射和长波辐射而改变地气系统的辐射平衡。这个机制一般被定义为气溶胶的直接

作用。例如硫酸盐气溶胶具有强的反射太阳辐射的作用,因而可以增加地球的行星反照率而使大气和地表冷却。黑碳气溶胶(烟尘)对太阳光具有更强的吸收作用,因而可以加热大气层,同时由于在大气中通过反射和吸收作用损失了一部分入射的太阳辐射,也使地表冷却。气溶胶的直接作用主要是对太阳短波辐射的作用,而对长波辐射的吸收除了黑碳气溶胶之外,一般很小。

大气气溶胶作为大气水圈循环中的一个有机部分,主要影响云和降水的微物理过程,同时也影响大气稳定性和云的反照率。气溶胶粒子可以作为一种云凝结核(CCN)和冰核(IN)在云雨形成和增长过程中起着重要作用,它不但可以增强或减弱降雨量,并且可以改变云雨的类型,如可使非降水性云转换成降水性云。这种机理称为大气气溶胶的间接作用。通过间接作用能够改变云的辐射特征,云量和生命期,从而也改变降水的分布和强度。

此外,气溶胶还存在着半间接作用和冰晶化作用。前者是指黑碳气溶胶吸收太阳辐射后,由再放射加热大气层,从而增加大气稳定度的现象。其结果使云滴蒸发,降水减少。冰晶化作用是指通过引入气溶胶粒子,增加了冰核(IN)的数量,以后通过冷云下贝吉隆(Bergeron)冰晶增长机制使冰晶迅速增多和长大的过程,它的结果使地面降水(或降雪)增加。不少研究表明,污染性云远比干净的云可能会产生更大的冬季风暴中的降水或降雪量。2008年1月发生在中国南方的严重低温雪灾是否具有这种源于污染物增强的冰晶化过程值得进行研究。

由上可见大气气溶胶的增加降低了空气的质量并减少了到达地面的太阳辐射量。这种负的辐射强迫在决定地面温度、降水和蒸发中与温室气体增暖作用是相反的,互相抵消的。因而空气质量和气候变化两个问题不能孤立地考虑,它们是密切耦合在一起的。许多研究已经指出<sup>[1-3]</sup>,一旦除去气溶胶将会使温室气体产生的增温更显著。因而在环境战略中,当试图把全球变暖维持在一规定的阈值时,不仅需考虑 CO<sub>2</sub> 减排,而且也必须同时考虑改善空气质量的措施及其气候后果。

## 1 大气气溶胶对空气污染的影响

大气气溶胶对空气污染的作用已研究得很多。大气中气溶胶的存在主要是使空气质量变差,尤其是形成大气霾的现象。在强空气污染区,硫化物通过干湿尘降可形成酸雨,从而对土壤、农业和生态系统产生重要的影响。霾日频率增加和区域的扩大可使能见度和日照时间明显减低,对交通等有明显影响。大气气溶胶颗粒物增多和长期悬浮于空气中,吸入后对人体健康有重要影响。这些在第四节将作仔细的讨论。根据全球主要气溶胶(如 NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> 等)排放和大气浓度量级的比较,中国空气污染最严重的城市有北京、上海、沈阳、天津、香港等地。

近 20 年来,SO<sub>2</sub> 与相应的硫酸盐气溶胶含量的变化主要表现为在 1970—1980 年代增长,在 1990 年代曾有明显的缓和;主要排放和影响区在西南和长江中上游地区。本世纪初以后这个问题变得严重起来,最大排放和影响区不但从西南东移到长江流域,江南和华南地区,而且向北方扩展。根据由 SO<sub>2</sub> 排放造成的酸雨观测,北方 7 省的降水 pH 值从 1999 年皆有明显的下降,2006 年达到 4.5 的低值。并且强酸雨事件发生的频率有

明显增加。因而 SO<sub>2</sub> 排放和大气中硫酸盐气溶胶含量的增加与中国 CO<sub>2</sub> 迅速增加期大致是一致的。我们没有 2002 年以后黑碳气溶胶的资料,根据 1991—2002 年排放的趋势<sup>[3-4]</sup>,可以估计在 2002 年之后会有明显的增加。最近对于总气溶胶质量(硫酸盐、硝酸盐、氨氮、黑碳、初生有机气溶胶(POA)和次生有机气溶胶(SOA))在未来 100 年的演变进行了预测。在 A2 排放情景下,到 2100 年,全球平均有明显的增加,由 2.39 μg m<sup>-3</sup> 上升到 4.88 μg m<sup>-3</sup>。在区域上增加最明显的地区是东亚、南亚、非洲、南美和北美,欧洲主要表现为污染区的扩大。因而大气气溶胶的气候效应和空气污染的影响将是长期的。尤其是对中国,中国东部的硫化物气溶胶在 2020 年将明显超过临界含量,因而其长期影响是不容忽视的。

## 2 大气气溶胶影响气候变化的机理及其对中国气候的影响

### 2.1 大气气溶胶影响气候的机理和主要作用

地球-大气系统的能量平衡是决定地球气候状态(如地面温度)的驱动力。在大气顶地气系统收到的太阳短波辐射必须等于地气系统自身射出的长波或红外辐射。无论是什么原因,如果这种平衡发生扰动或破坏,则会引起地球气候发生变化。也就是说,这种扰动或者使收到的太阳辐射减少或增加,或者使射出的地球长波辐射增加或减少,都可以使地气系统的能量收支偏离其平衡态。度量偏离平衡态的一个物理量被称为辐射强迫(RF)。通常用大气顶测量的单位面积能量变化率(W · m<sup>-2</sup>)表示。如果 RF 是正,说明地气系统收到的能量大于损失的能量,地气系统将增温或变暖;反之将冷却。例如,由温室气体增加产生的温室效应,使地气系统向

外射出或损失的长波辐射减少,由于入射的太阳辐射不变,则 RF 为正,地气系统将增温,从而导致全球变暖。因而辐射强迫是一个表征地球气候系统受到多大程度影响的一个十分有用的物理量。

大气气溶胶与温室气体影响地球气候的原理是一样的。但它与温室气体不同。温室气体影响长波辐射,而气溶胶主要影响太阳短波辐射,并且不同类型的气溶胶粒子,由于它们的物理性质不同,即吸收和散射作用的不同,它们在大气顶和大气中产生的辐射强迫是不同的,因而对于地球气候的影响也不完全相同。大气中硫酸盐气溶胶对于短波基本上是完全散射的。在近红外波段吸收很小,因而由于它的存在反射了更多的太阳辐射,它在大气顶产生负的 RF,当太阳光通过大气层时,由于硫酸盐气溶胶吸收很少,到达地面的太阳光与大气顶接受到的基本相近,所以 RF 也是负,且其量值与大气顶的值相近。其结果是在地面和大气中都产生降冷作用。这种作用与温室气体的增暖作用正好相反,它具有抵消温室效应增暖的作用。但温室气体是长生命期的(几年到几百年),且全球是均匀混合的,而硫酸盐气溶胶是短生命期的(几天到几周),且分布十分不均匀。因而其对气候的影响与温室气体在时间和空间分布上不同。

黑碳气溶胶具有强烈吸收太阳辐射的性质,其反射能力很小,因而主要通过吸收太阳辐射在大气中产生正的 RF,导致大气加热。这种作用首先增强了由温室气体产生的增暖作用,与硫酸盐气溶胶对大气的冷却作用是相反的。它对地面而言,与硫酸盐气溶胶一样 RF 是明显的负值,使地面降冷。

另一种有机碳气溶胶吸收太阳辐射的能力较弱,散射十分明显,因而无论在大气顶或地表都产生负的 RF。与硫化物气溶胶相似,地面负 RF 只比大气顶的 RF 在量值上

略大一些。生物质燃烧气溶胶的组成比较复杂,既有散射部分(有机碳和无机化合物)又有吸收部分(黑碳气溶胶),所以其总的 RF 相当不确定。但总的综合结果是一个小的正 RF。硝酸盐气溶胶在可见光谱区基本上是非吸收的,因而其地面的 RF 是负的。

如果考虑由上述主要成分组成的大气气溶胶引起的总直接辐射强迫,根据观测和模式得到的平均结果, $RF = -0.5[\pm 0.4]W \cdot m^{-2}$ 。这意味着,平均而言,大气气溶胶的辐射强迫为负,是使地球温度降低。由于气溶胶在大气中尚有部分的吸收作用,所造成的地面辐射强迫比上述值甚至更负,即对地表的降冷作用更大。但这与所有长生命温室气体由温室效应产生的总辐射强迫 $+2.63[\pm 0.26]W \cdot m^{-2}$ 相比要小得多,不到其五分之一,而其不确定性(见括号内数值)相对则要大得多。但应该指出, $-0.5W \cdot m^{-2}$ 的降温作用也是不可忽略的。观测和模式研究表明,如果没有大气气溶胶的负的直接辐射强迫作用,过去百年来的地球气温要比现在暖很多,未来百年的气候也要暖很多。尤其是近 10 年来,由于大气中黑碳气溶胶具有吸收太阳辐射的作用而使大气加热,有些科学家认为,它也是温度上升或气候变暖的主要原因之一。黑碳气溶胶的排放主要是人为产生的。这个问题更应当引起我们的重视。

大气气溶胶的间接作用对于气候系统中的水循环变化有密切的关系。决定大气气溶胶间接作用最关键的参数是气溶胶颗粒作为云凝结核的有效性,这又是粒子大小、化学成分、混合态和周围环境的函数。如果液态水含量不变,气溶胶通过微物理过程引起的对云滴数浓度的作用,或对云滴大小的作用称为第一类间接作用。由于引入更多的气溶胶粒子作为凝结核,在含水量一定的情况下,云滴互相竞争水汽,而都无法长大到降水质点,因而云中存在着更多的小云滴,其结果导致

降水减少;又由于小云滴反照率增强,产生了更强的反射作用,结果使大气顶和地表产生负 RF,地表和大气变冷,因而这种间接作用也被称为“云的反照率作用”。这表明作为气溶胶颗粒物的空气污染物一旦进入云中,可以改变云的降水性质和辐射特征,从而影响降水与水循环。从这个意义上看,污染区与非污染区的云雨降水性质是不同的。如果污染区的云扩展或持续,干旱的风险将会增大。

另外气溶胶还可对飞机尾迹和冰云有间接作用。前者可产生弱的大气增温。这是一个新问题,将来随着超音速飞机机群的不断扩大,这个问题会逐渐引起更大的关注。对于冰云,气溶胶可以作为冰核在污染的冷云中通过贝吉隆过程加速冰晶粒子的增长,增多,这可使冬季风暴的降水或降雪增加。实际观测证明了在气候变暖条件下冬季风暴的降雨和降雪确实增加了。

## 2.2 大气气溶胶的气候效应

(1) 在地面产生降冷作用,部分抵消温室气体导致的全球气候变暖

在地质年代,气溶胶就对地球气候的演变起了重要作用,如大范围降尘、火山爆发和地壳运动(如板块运动)等释放的气溶胶物质等。但地质年代的气溶胶是自然源的。对于近百年的气候变化,总的趋势是变暖,这主要由人类活动和自然变化共同造成。如果在近百年气候变化的模拟中,不考虑气溶胶的作用,则模拟出的现代气候与观测相比明显偏暖,不能真实地再现现代气候变化的实际情况。另一个重要的问题是现代气候从1910年明显增暖后,在1920—1940年代达到一个峰值,到1950—1970年代又迅速变冷。对于这样一个年代际的气候波动,不少科学家们也是用这些年代全球大量污染物(主要是气溶胶)的排放迅速增加来解释,前面已经指出,气溶胶尤其是硫化物气溶胶在大气和地

面都可产生明显的降冷作用。

在2007年出版的IPCC第四次评估报告中,对于大气气溶胶的气候效应做了更完整和深入的总结,并明确指出气候变化与空气质量问题是通过大气气溶胶紧密耦合在一起。同时专门研究了如果在新的气候模式中去掉大气中所有人为排放的硫化物气溶胶颗粒物未来百年温度变化的趋势(图1,见彩页)。结果表明,全球平均温度将上升 $0.8^{\circ}\text{C}$ 左右。但预测温度的地理分布与只考虑温室气体排放情景的温度变化场相似。上述结果清楚地表明,为了制定更切合实际的气候战略使全球变暖维持在规定的阈值或危险水平之下,不仅必须考虑 $\text{CO}_2$ 排放,而且应同时考虑改进空气污染后的措施及其气候影响。总体上这将进一步增加 $\text{CO}_2$ 减排的强度。同时也必须发展更复杂的地球系统模式和气候与生物地球化学变量的长期监测系统。利用这种复杂的地球系统模式可以更准确地模拟和预报上述两方面的重要物理、化学和生物过程以及反馈机制,这是一个重大的挑战性任务。

### (2) 全球变暗现象

这种现象是全球大范围地区地表出现接受到的太阳辐射减少的现象。在1990年代以前这种现象尤为明显。最近的研究表明全球变暗现象并不是全球性的,主要限于大城市区,这与有人提出的城市浑浊岛现象相近。造成全球变暗现象的原因是复杂的(如云量增加,城市化影响,水汽反馈造成的晴空长波辐射增加等),但比较一致的看法是人类排放的气溶胶的增加,尤其是在城市污染地区。1990年代以后全球变暗现象减弱并逐渐成为“全球变亮”,这可能是由于人类排放的气溶胶减少所致。由于全球变暗现象的出现,地面的日照时间明显减少。中国地区目前年平均日照时数比1960—1970年代减少了100多小时。

全球变暗现象的另一重要影响是蒸发皿测到的蒸发量明显减小。在世界许多地点都测量到这种现象。中国地区蒸发皿蒸发也是减少的,其平均变化速率是 $-34.5\text{mm}(10\text{年})^{-1}$ 。应该指出,蒸发皿蒸发量不代表实际蒸发,实际蒸发量在气候变暖条件下是增加的。气象台用于测量蒸发的小型蒸发皿测得的蒸发量在湿润弱风气候条件下与实际蒸发量比较接近,但在干旱气候或干旱季节天气条件下,由于蒸发皿中水体少、日晒和风吹会使蒸发量值显著偏大。蒸发皿蒸发量与实际蒸发量变化趋势的不一致已成为目前气候变化研究中的一个重要关注问题,这被称作蒸发悖论。国内外都有很多分析和讨论<sup>[1,5-6]</sup>。总的来说与全球变暗现象有密切关系。地面蒸发决定于两个关键因子,一是地表收到的太阳辐射,它是蒸发过程中的有效能量;第二是地表湿度,这在海洋不是问题,但在陆地上与土壤水分含量有关。

在 1950 和 1960 年代初在世界许多地方都观测到云和降水的增加。一方面它确实减少了这些地点用于蒸散量的太阳辐射(全球变暗),同时,降水的增加也使土壤湿度增加,以此增加实际蒸散量。一方面,增加的云量可使温室效应增加,减少地表的射出长波辐射,结果地面净辐射可能变得很小或甚至变正(增加)。这两个原因都可能导致蒸散量增加。在过去 40~50 年间世界上许多地方都得到实际蒸发量表现为增加趋势,而蒸发皿蒸发是减少的。因而最后的结果是:在世界大部分地区,实际蒸散量增加,而蒸发皿蒸发量则减少。两者都与大气环流和相关的天气现象有关。但对于这个问题目前仍遗留的一个问题是云量的变化在多大程度上与气溶胶的变化有关。在污染明显的城区变暗现象十分显著。前面已经指出,气溶胶的增加有利于使液态水重新分布在更多更小的云滴上,这使云反射、散射作用加大,云变亮,减少了

降水的潜力,也可能改变云的生命期(增加),致使长期降水减少。气溶胶的增加也使晴空下地面的直接辐射减少,这可能是解释两种蒸发量不同的一个主要原因。

### (3) 大气棕色云 (ABC: Atmospheric Brown Cloud)

虽然硫化物气溶胶对全球变暖的影响是负的,但黑碳(BC)气溶胶对大气的影响是正确的。在 20 世纪末有人研究了人类产生的黑碳气溶胶对亚洲季风及其降水的影响,在南亚(包括印度洋)和东南亚进行了 INDOEX 试验(印度洋试验)。结果表明,在印度洋上空存在着厚约 3km,面积约 900 万  $\text{km}^2$  的棕色污染物以尘霾的形式笼罩着印度洋、南亚次大陆、海洋大陆(如印尼地区)、东南亚和中国南部上空。后来在西非、南美等地也发现这种棕色云(图 2,见彩页)<sup>[7]</sup>。它主要由黑碳、硫酸盐、硝酸盐、有机碳颗粒、飞灰和矿物沙尘组成,其中以黑碳气溶胶为主。它可在对流层下半部,引起局地空气加热,能够增强云滴的蒸发,因而影响云和降水的特征,主要使云滴变小,降水减少,这主要发生在南亚、东南亚和东亚的夏季。另外,如果黑碳气溶胶和沙尘气溶胶的加热限于边界层和对流层下部,则其作用可使大气稳定度增加,阻止对流发展,总体的效应导致干旱的风险增加。虽然这种气溶胶浓度的变化局地影响很明显,但由各种对流层自然和人为气溶胶变化产生的全球净气候效应并不大,这是由于它们的影响会相互抵消,另外云的存在也可能缓解这种影响。大气棕色云能够吸收和散射太阳光,因而在地面可以产生很大的变暗现象。但黑碳气溶胶主要是吸收作用。最近,大气环流数值试验也表明,由大气气溶胶引起的地表大气变暗现象与大气加热作用还可引起地面蒸发减小,经向海表温度梯度减小,大气稳定度减小和印度北部降水减少。另外,由于北半球海洋地区大气棕色云浓度比

南半球海洋地区高,故前者对地表的冷却作用更明显,可减弱夏季全球尺度的经向环流圈。从而使亚洲季风减弱,并且,大气棕色云的作用可能掩盖了多达50%的由温室气体造成的地表变暖,这意味着大气棕色云减少了多达一半的到达地面太阳辐射。如果没有大气棕色云,地表增温将可能翻倍。但这种影响是局地 and 区域的。这反映了大范围气溶胶污染物对区域气候变化的影响,总体效应是减弱气候变暖并导致降水减少、干旱加剧。

但最近也有人用全球大气环流模式GCM模拟研究了气溶胶的直接作用对季风水循环的影响,提出了所谓“高空热泵”假说。通过这种作用,由吸收性气溶胶(黑碳和沙尘)产生的加热作用通过水循环反馈可以增强南亚季风<sup>[8]</sup>。

#### (4) 对亚洲季风的影响

大气棕色云使亚洲季风减弱,而由黑碳气溶胶造成的青藏高原上空热泵作用又使南亚夏季风增强和爆发提前。在IPCC对气候变化的评估报告中,早期就注意到气溶胶对亚洲季风的影响问题。2007年IPCC第四次评估报告和2005年气候变化国家评估报告的结果进一步肯定了上述结果。但预测也表明,到21世纪末,增加的温室效应将明显超过硫化物气溶胶的冷却作用,这可导致那时季风降水的增加。此外,具有强吸收性的气溶胶(黑碳)在低空大气中吸收太阳辐射,可使地面冷却,大气更加稳定,降水减少。但也有研究表明,高空的尘埃空气层加热可增加深对流的发生,则不同于对流层下部的加热,能够加强亚洲夏季风环流而引起局地降水增加。沙尘气溶胶引起的欧亚大陆与邻近海洋的温差变化(增强)也能触发或调整一种快变的或不稳定的冬季风环流,使冬季的天气气候更为多变。

最近对印度和中国地区硫酸盐和黑碳气溶胶对东亚夏季风的数值模拟研究表

明<sup>[9-10]</sup>,由于硫酸盐气溶胶的作用,亚洲夏季风强度减弱,印度和中国地区季风降水明显减少。

黑碳气溶胶的作用也是使东亚夏季风减弱,并且它可使长江中下游的降水增加,华北和华南降水减少。

总之,上面的分析表明,气溶胶对亚洲季风的总体气候效应主要是减弱夏季风环流和降水,黑碳和沙尘气溶胶可能会使对流与季风降水增强,但只限于局地地区。

#### (5) 对于旱和暴雨的影响

最近20多年,东亚夏季风持续偏弱,江淮流域和华南多雨,经常出现暴雨洪涝,如1991、1998、1999、2003、2005、2006、2007年;而华北持续干旱,尤其从1978年以后。有研究认为<sup>[11]</sup>,近年来华南和沿海地区工业经济迅速发展引起的硫酸盐气溶胶增加是导致我国夏季风雨带南移的重要原因。硫酸盐气溶胶明显削弱到达地面的太阳辐射,而使地表降冷,从而减小了夏季海陆热力差异,造成东亚夏季风环流减弱,西太平洋副热带高压脊线南移,季风雨带偏南。另外,也有研究指出<sup>[10]</sup>,黑碳气溶胶也可能是造成我国雨带南移和长江流域对流性暴雨发生频繁的一种可能机制。

中国的地形云降水是中国许多地区水资源的主要来源,尤其是在干旱和半干旱地区这种降水更为重要。但近年的研究表明<sup>[12]</sup>,自1954年以来,当山区山顶的能见度小于8km时,由于气溶胶增加的影响,地形云降水可能减少30%~50%,这表明由气溶胶造成的空气污染可明显减少山区水资源,干旱条件更易发生。上述研究结果表明,人类活动排放的气溶胶可能是影响中国干旱与暴雨区分布的一个因子,但其不确定性较大。

#### (6) 加速冰雪融化

如果雪面或雪中有烟尘质点存在,则会减少雪面的反照率并影响融雪,初步的计算

表明,通过这种过程黑碳气溶胶可产生 $+0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的正辐射强迫。后来通过更多地点冰雪中黑碳气溶胶的测量结果进行地面和行星反照率变化的计算得到,辐射强迫为 $+0.15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由于不完全了解黑碳气溶胶和雪粒子是内部还是外部相混合以及它们的形状和大小等,上述结果具有较大的不确定性。利用全球模式让黑碳气溶胶通过降水和干沉降进入雪中,以此改变雪的反照率,发现雪和海冰中的黑碳气溶胶可使全球平均地面反照率减少 $0.4\%$ ,北半球平均地面反照率减少 $10\%$ 。目前黑碳气溶胶造成的辐射强迫最可能的值是 $+0.10 \pm 0.10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。黑碳气溶胶对于中国西部冰川和积雪影响的研究尚不多,尤其对青藏高原地区的冰川和积雪影响。1991年由于第一次波斯湾战争油井燃烧释放的大量烟尘气溶胶,曾漂移到新疆地区,但对其影响并不了解。从上述正辐射强迫的结果看,应预期会加强积雪和冰川的融化过程。根据美国西部黑碳气溶胶对积雪的影响研究得到,除了气候变暖以外,那里积雪和冰川的融化黑碳气溶胶起着相当的作用。黑碳气溶胶能多吸收 $43\%$ 来自太阳的热量。但也有研究指出,黑碳气溶胶并非对所有冰川的迅速消退都有影响,更多的是对冰川每年新增的积雪产生影响。这个问题需要在今后专门进行研究。

#### (7) 霾日的增加和大气能见度降低

根据中国气象局的统计和研究结果<sup>[13-14]</sup>,自1957年以来由于霾日的增加,我国的许多地区,特别是东部几乎所有地区能见度均不断下降。年平均水平能见度较1960年代初期都有约 $7 \sim 15 \text{ km}$ 的减少。其中河南中部到南部、湖北北部、安徽中到南部、浙江大部、江苏中到北部、山东东部、珠江三角洲地区等,能见度下降达 $15 \text{ km}$ 。其原因主要由这些地区的霾日增加造成。近二三十年,人类排放的大气气溶胶是其主要原因。

在一定的天气和环流条件下,如下沉气流控制、空气层稳定、混合层降低、地面风速很小或出现所谓的气流停滞区时,可出现严重的灾害性天气,这时能见度可低达几百米以下,空气中积累大量的气溶胶污染物,它对人体健康、交通、电力部门等都会造成明显的影响。

#### (8) 周末效应(Weekend effect)

大气物理条件在周末(星期六到下星期一)和周日(主要是周三到周五)表现出明显的差异,这种一周时间尺度的循环被称为周末效应。根据最近的研究,这种现象在世界许多地区尤其是一些大城市都观测到。周循环或周末现象主要与一周间空气污染物,主要是气溶胶粒子浓度的变化密切相关。而大气中气溶胶污染物的浓度变化又与一周间人类活动造成的污染物排放强度和时空分布有关。因而周循环现象反映的是人类活动通过气溶胶污染物排放影响城市气象条件的一种表现。国内东部地区周循环的研究<sup>[15-16]</sup>揭示的观测结果表明,在一周之初,人类排放的气溶胶逐渐积累在对流层下部,到周中,积累的大气气溶胶可以引起辐射加热,从而使大气低层一中层失稳,产生异常的垂直运动,以此造成较强的风速。风的加大促进了城市通风效应,减低了一周后期边界层中的气溶胶浓度。相应于上述气溶胶周循环,降水频率,尤其是小雨事件,在周中趋于减小,这是由气溶胶间接作用造成,这与观测的人类活动引起的天气循环一致。从1970年代末以来,无论是冬夏周末效应皆有增强,这与中国经济迅速发展和增强的人类活动时期一致。人类产生的气溶胶的直接和间接作用,在引起不同季节的周末效应,具有相反符号中起重要作用。在干燥的冬天,气溶胶浓度的减少通过直接作用,增加近地面总太阳辐射和增加白天温度与最高温度,降低相对湿度而影响DTR。另一方面,在夏天由于气溶胶粒子增



加使云凝结核增加,如果大气中液态水含量不变,则能生成更多更小的云滴,这大大降低对流云的降雨频率,因而在周日由于大气气溶胶达到最高值,可预期有较干的少雨日天气。在周末当气溶胶浓度下降时,雨日偏多,总的太阳辐射减小,最高温度和 DTR 降低。但最近利用 TRMM 卫星对美国东南部城市中对流活动和降雨的观测表明,在周日雷暴更活跃,伸展更高,阵雨增多,而周末则减少。因而大气气溶胶的周循环对局地或区域降水的影响可能因地区而有相当的差别,对其原因尚不很清楚。

### 3 大气气溶胶对我国经济-社会方面的影响

大气气溶胶对我国经济-社会方面的影响已日益引起有关部门和环境科技界的重视,这包括对农业、生态系统、水资源、人体健康、城市化等方面。这些影响主要是通过大气气溶胶的污染特性和气候效应产生的。早在 1960—1970 年代,国内外对于酸雨对农业和生态系统的影响已十分重视,进行了广泛的研究和综合控制与治理,并取得了一定的成效。我国西南和长江流域的酸雨影响在 1980—1990 年代曾一度有明显的减缓,但近 10 年来,这些地区又有加剧现象,并且出现向北方扩展的趋势。与此同时黑碳气溶胶的影响问题又引起国内外的重视,尤其是对中国水资源、人体健康和城市化的影响。因而人类排放的气溶胶对经济社会的影响已成为经济可持续发展的一个重要方面。

#### 3.1 大气气溶胶对农业和生态系统的影响

大气气溶胶和霾区对农业和生态系统的影响主要是通过由它们造成的到达地面的直接太阳辐射的减少引起的。由于太阳光线的减弱,可明显影响作物的光合作用,即改变光合有效辐射的数量和质量及其它相关的气候

因子或条件(如温度、降水、湿度等)来影响作物的生长发育,甚至阻碍农作物的生长。在中国稻米和冬小麦生长的主要农业区之一的长江中下游地区,由于大气气溶胶的散射和吸收作用,可使到达地面的太阳辐射量减少 5%~30%<sup>[18]</sup>。作物响应模式的模拟表明,中国有近 70%的作物受此影响至少减产 5%~30%,即总地面太阳辐射增加(减少)百分比与稻米和小麦产量增加(减少)百分比之比为 1:1 左右。

大气气溶胶对农业影响的第二个重要方面是硫酸盐气溶胶的影响。由矿物燃料燃烧排放出的大量二氧化硫( $\text{SO}_2$ )气体,经气-粒转化过程形成硫酸盐气溶胶。硫酸盐污染物又通过干湿沉降两种形式从大气中降落到地表面。湿沉降主要表现为降水对硫酸盐气溶胶的冲洗作用,其结果形成酸雨。酸雨对农作物、生态系统等有重要的影响,尤其我国西南和长江流域以南地区是全球继北美和欧洲之后的第三大酸雨区。近年来并开始向北方扩展,酸雨区已占国土面积的 40%左右<sup>[19-22]</sup>。酸沉降造成的农作物减产、林木损坏、水果变质、蔬菜污染及牲畜死亡等经济损失每年超过 200 亿元。另外,酸雨可导致土壤酸化,土壤中含有大量铝的氢氧化物,土壤酸化后,可加速形成土壤中含铝的原生和次生矿物风化而释放大量铝离子,形成植物可吸收形态的铝化合物。植物长期和过量的吸收铝离子会中毒,甚至死亡。酸雨尚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,不仅对农业,而且对生态系统(如林业、植被、湿地等)有明显影响。人类排放的氮化物和氟化物类气溶胶对于农作物和植物生长也有影响。氮化物类气溶胶沉降到生态系统中时,也可产生酸化作用。氮氧化物通过光化反应可产生光化学烟雾,致使植物矮化,生长瘦小,坐果率和产量降低。受空气中含氟量高的煤燃烧产生的氟化物的

腐蚀,植物受到严重破坏,森林日趋减少,农作物的生长发育、产量和质量都受到明显的损害。

另外,由工矿企业和居民生活用煤排放的大量煤烟粉尘以及由冶炼工业排放的金属飘尘对农作物和农田土壤有明显的污染作用,其中有些金属毒性很大,随着工业的发展,这个问题已日益引起人们的关注。

### 3.2 大气气溶胶对中国水资源的影响

大气气溶胶对水资源的影响主要是通过改变水循环实现的。最近国内外不少研究都强调,由于大气气溶胶对辐射的散射和吸收作用而导致的大气能量平衡的变化可以影响亚洲季风的水循环<sup>[5-8,9-10]</sup>。这种季风气候条件下的气溶胶-水循环相互作用包括四个方面的结果:大气棕色云使季风降水减少,干旱区加剧;青藏高原对吸收性气溶胶的大尺度输送和动力抬升使南亚夏季风和降水加强,而东亚中部(长江流域)降水减少;改变耦合的大气-海洋-陆面相互作用过程,使季风气候状况(温度和降水等)发生变化;黑碳气溶胶粒子层可能增加季风区的降水。最近的研究表明,由于黑碳气溶胶粒子在大气中具有明显的吸收作用,可以产生加热,而使上升运动增强,增强的上升气流有利于形成云雨层,使降水增加。由于中国的长江流域是主要的黑碳气溶胶污染区,尤其是 1980 年代以后,通过上述过程可带来大量降水,形成明显的降水带,而其南北两侧(华北与华南)为补偿的下沉气流,易出现少雨干旱条件。因而形成南多北少(又通称南涝北旱)的异常降水分布。但这个结果存在一定问题,如大气加热虽然能促进上升运动的加强,但另一方面使大气稳定度变强,从而抑制对流的发生。因而到底黑碳气溶胶是引起降水增加还是减少需要通过进一步研究加以阐明。

### 3.3 大气气溶胶对人体健康的危害

大气气溶胶的成分十分复杂,不但包括自然和人类活动产生的各种气体和颗粒物,而且包含许多种类的微生物,两者都可以对人体健康产生严重的威胁。概括起来有下列三个方面:对人体健康影响最大的是飘浮在大气中时间较长的直径为  $0.1\sim 10\mu\text{m}$  的稳定大气气溶胶粒子(即  $\text{PM}_{10}$ ),它能直接被人体吸入呼吸道内。直径  $0.5\sim 5\mu\text{m}$  的粒子可直接进入肺部或进入肺泡,并能进入血液通往全身。进入肺部的粒子,由于其本身的毒性或携带有毒物质对人体健康有重要危害<sup>[23]</sup>。其中心肺疾病与污染空气中的颗粒物含量有最直接的关系。大气气溶胶对健康影响的第二个方面表现为气溶胶细粒子中重金属成分对人体健康的影响。它们与许多疾病有一定的关系,并且可以危害人体的多种部位,包括神经、肠胃、心脏、肺、肝、肾、皮肤等。虽然这个问题仍有许多不确定性,但已引起相关部门的关注,其中对 5 种金属元素尤为关注,即镉、铅、镍、铍、铊<sup>[24]</sup>。它们主要来自汽车尾气以及矿物燃料的燃烧。大气气溶胶对健康影响的第三个方面是其化学成分中有许多致癌物质,如多环芳烃(PAH)和亚硝酸胺等化合物<sup>[24]</sup>。在 50 多年的时间里,先后发现数百种多环芳烃,在沥青和燃煤的烟气,重烤油脂类食物的烟气,摩托车的尾气,吸烟者吐出的烟气以及火力发电厂的飞灰中都检测出了 PAH 的存在。通过各种试验表明,其中有些化合物肯定具有致癌性活性。

针对上述大气气溶胶对人类健康的影响,世界卫生组织(WHO)制定了修订的 WHO 空气污染指南<sup>[25]</sup>,以最大程度地减少气溶胶颗粒物对人体健康短期和长期危害的风险,如对年平均值界限  $\text{PM}_{10}$  应为  $20\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,日平均界限为  $50\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。另外也做出了 100 万人口大城市中暴露在 50 或

100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 日平均PM10值大气条件下对健康的影响结果。

### 3.4 大气气溶胶对城市化的影响

大气气溶胶对城市的影响包括许多方面,首先是空气污染问题,它主要危害人群的健康,这在上一节已有详细说明,其次是降低城市的能见度,并使霾日(能见度 $<10\text{km}$ )的频率明显增加,它可以严重影响城市地面和空中交通,引发多种意外事故。城市能见度降低是由气溶胶细粒子PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>和NO<sub>x</sub>气体引起的。其化学组成主要有:黑碳、粉尘、硫酸盐、铵盐、硝酸盐等。其中大多是人类活动造成的。许多城市都观测到近二三十年,霾日数不断增加,而能见度则明显降低,例如根据深圳气象局统计,深圳市霾日每年平均达160天左右,平均能见度由1980年代初的20km下降到现在的10km左右。北京、上海、广州等大城市都有类似的现象。如广州从1970年代后期霾日明显上升,到2004年的霾日已达到142天<sup>[26]</sup>,据估计能见度比过去至少降低2~5km。在特定的天气条件下,能见度大大恶化。由于城市能见度明显降低,日照时数一般也有较大减少,有不少城市,一年的日照时数可减少几百小时,这种现象也被称为城市混浊岛现象。它与城市化发展密切相关,是城市环境规划和治理的重要问题之一。

大气气溶胶对城市化的另一重要影响是上节讨论的周循环现象,它致使在一周中间(周末)近地面有更多(更少)的太阳辐射,更高(更低)的最高温度,更大(更小)的温度日变化,更少(更多)的降水事件。但有些城市夏季周日的下午阵雨和雷暴比周末更多,伸展高度更高。由于上述周循环引起的城市气象和环境条件的变化,城市规划、空调使用以及交通条件和人群活动将会受到影响。

## 4 结语

通过上面的分析可以得到,气候变化和空气污染在很大程度上有共同的原因,即主要都是由矿物燃料燃烧的排放造成。一方面,所排放的气溶胶不但造成空气污染,而且还具有明显的气候效应和改变水圈循环的作用;另一方面,由温室气体增加所引起的气候变化也能影响空气污染问题,可加重和放大空气污染对人体健康、农业生产和生态系统的影响。两者在科学问题是密切相关的。因而应该采取统一的而不是分离的科学研究战略。尤其将来随着空气污染的不断治理和改善,将大大降低它们的冷却作用,这将进一步加大未来温室气体的减排量,否则全球气温将以更快的速度和量值上升,今后20~30年以后这将成为一个重要的问题。目前国际上已在计算,如不考虑气溶胶冷却的抵消作用,仅考虑温室气体全球将会再引起多大的温度上升。同时也在研究,在这种情况下,全球的减排责任将会有多大的增加。因而采取和制定协同或耦合的研究和对策战略是必需的,而且是迫切的。这是一种应对气候变化和空气污染的集合对策战略。对于像中国这样经济快速发展的发展中国家,这种战略尤其重要,因为这两个问题不但同时存在,而且同是因经济增长和能源消耗激增而日益使空气污染严重和温室气体排放快速增加。从同一源头上解决这两个问题不但经济上更为有效,而且可同时解决大气环境和气候变化问题,可以从经济上得到最大的节约和获得双赢的效果。在国际上将会树立既积极保护环境又努力减缓气候变化的良好形象。

**致谢:**感谢国家环保部国家环境咨询委员会和科技部2006CB403604与2007BAC0301项目的支持。

## 参考文献

- [1] IPCC, Climate Change 2007: the Physical Science Basis[R]. Eds. By S. Solomon et al., Cambridge University Press, 2007; 996pp
- [2] 丁一汇, 任国玉主编, 中国气候变化科学概论[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [3] 气候变化国家评估报告编写组. 气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [4] Cao, Q. X., W. P. Du, Y. Q. Wang, et al., Inventory of black carbon emission from China[J]. Adv. in Climate Change Res., 2007, 3 (Supplement): 75-81.
- [5] Chung, C. E., V. Ramanathan, D. Kim et al., Global anthropogenic aerosol direct forcing derived from satellite and ground-based observations[J]. J. Geophys. Res. 2005, 110, D24207, doi: 10.1029/2005JD006356.
- [6] Ramanathan, V., P. J. Crutzen, J. T. Kiehl, et al., Aerosols, climate and the hydrologic cycle[J]. Science, 2001, 294: 2119-2124.
- [7] Ding Y. H. and R. S. Sokhi, Global Air pollution and Climate Change[M]. Ed. by R. S. Sokhi, Anthem Press, London, New York, and Dehli, 2007, 48-65.
- [8] Lau, K. M. and M. K. Kim, Observational relationships between aerosol and Asian monsoon rainfall and circulation[J]. Geophys. Res. Lett., 2006, 33, L21810, doi: 10.1029/2006 GL027546.
- [9] Ramanathan, V., C. Chung, D. Kim, et al., Atmospheric brown clouds: impact on South Asian climate and hydrologic cycle[J]. Proc. Natl. Acad. Sci., doi: 10.1073/pnas.0500656102. 2005, 102: 5326-5333.
- [10] Menon, S., Hansen, J., Nazaren, Y. F. Luo, Climate effect of black carbon aerosols in China and India[J]. Science, 2002, 297: 2250-2253.
- [11] Xu, Q., Abrupt change of mid-summer climate in central East China by the influence of atmospheric pollution[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35: 5029-5040.
- [12] Rosenfeld, D., J. Dai, X. Yu, et al. Inverse relations between amounts of air pollution and orographic precipitation [J]. Science, 2007, 315: 1396-1398.
- [13] 吴兑, 吴小京, 朱小祥. 雾和霾[M]. 气象灾害丛书 (即将出版).
- [14] 张小曳, 周凌, 丁国安. 大气成分与环境气象灾害, 气象灾害丛书 (即将出版).
- [15] Gong, D. Y., D. Guo and C. -H. Ho, Weekend effect in diurnal temperature range in China: Opposite signals between winter and summer [J]. J. Geophys. Res., 2006, 111, D18113, doi: 1029/2006 JD007068
- [16] Gong, D. Y., C. -H. Ho, D. L. Chen, et al., Weekly cycle of aerosol-meteorology interaction over China[J]. J. Geophys. Res., D22202, doi: 10.1029/2007JD008888. 2007, 112.
- [17] Foster, P. M., and S. Solomon, Observations of a "weekend effect" in diurnal temperature range[J]. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 2003, 100(20), 11225-11230.
- [18] Chamedies, W. L., H. Yu, S. C. Liu, 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]. Proc. Natl. Aca. Sci., 1999, 96(24): 13626-13633.
- [19] 王文兴. 中国环境酸化问题[J]. 环境科学学报, 1997, 17: 1-11.
- [20] 张林波, 曹柱法, 沈金娃等. 苏, 浙, 皖, 闽, 湘, 鄂赣 7 省酸雨沉降农业危害——酸沉降生态综合危害分析[J]. 中国环境科学, 1998, 18: 12-15.
- [21] 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[J]. 气象科技, 2006, 34: 705-710.
- [22] 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[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [23] 杨民, 丁瑞强, 王式公, 等. 兰州市大气气溶胶的特征及其对呼吸道疾病的影响[J]. 干旱气象, 2006, 23: 54-67.
- [24] 任丽新, 游荣高, 吕位秀, 等. 1999, 城市大气气溶胶的物理化学特性及其对人体健康的影响[J]. 气候与环境研究, 1999, 4: 61-73.
- [25] WHO, 2006. WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005. Summary of Risk Assessment. World Health Organization, Geneva.
- [26] 吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲气溶胶云造成的严重灰霾天气[J]. 自然灾害学报, 2006, 15: 77-83.

## 丁一汇等：空气污染与气候变化

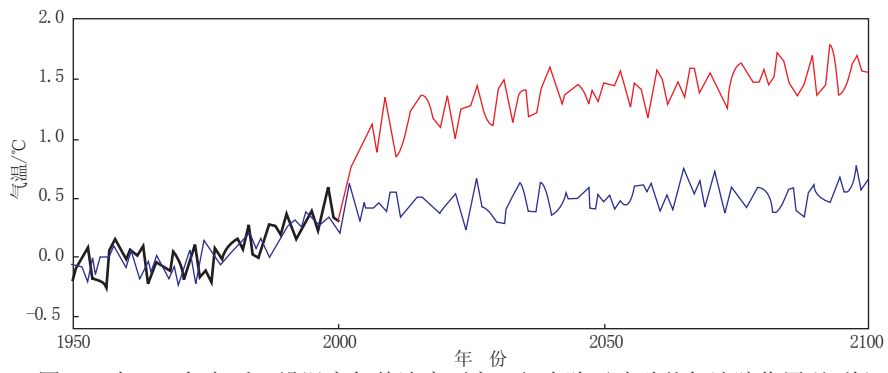


图 1 在2000年之后，设温室气体浓度不变，但去除了硫酸盐气溶胶作用(红线)后，全球平均温度的变化。蓝线是包括温室气体和气溶胶的共同作用<sup>[1]</sup>

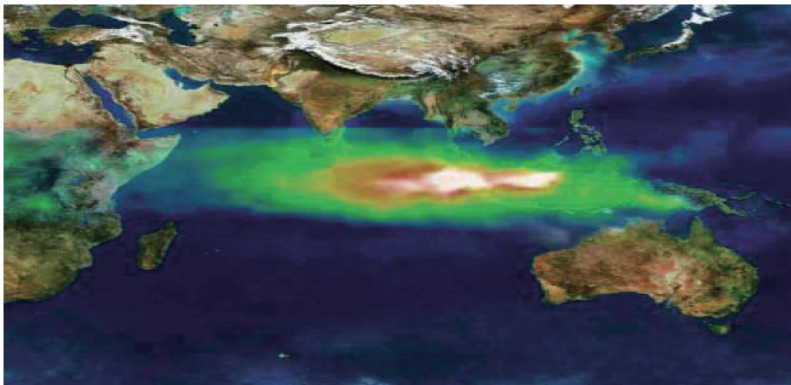


图 2 1997年10月22日一次大气棕色云的卫星照片  
图中显示污染带位于印尼和印度洋上空，它正迅速地向着印度、东南亚和华南扩展<sup>[7]</sup>

## 丁一汇等：空气污染与气候变化

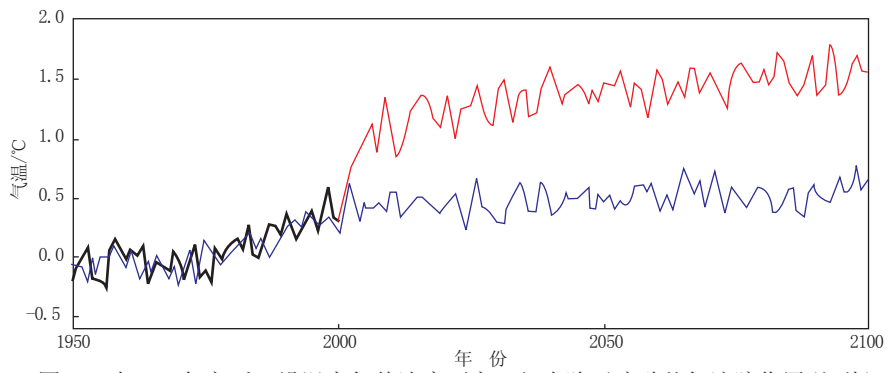


图 1 在2000年之后，设温室气体浓度不变，但去除了硫酸盐气溶胶作用(红线)后，全球平均温度的变化。蓝线是包括温室气体和气溶胶的共同作用<sup>[1]</sup>

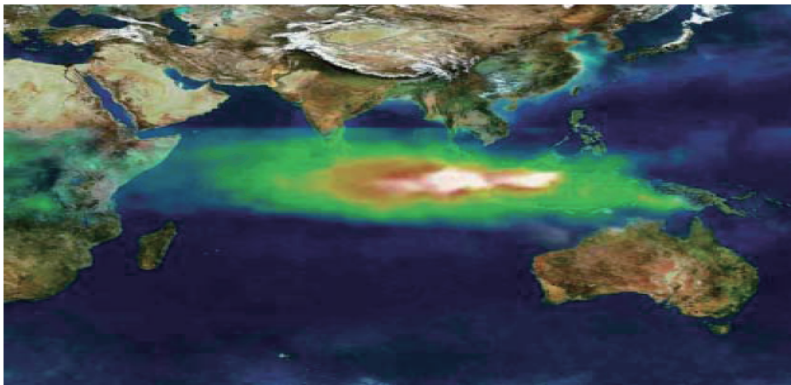


图 2 1997年10月22日一次大气棕色云的卫星照片  
图中显示污染带位于印尼和印度洋上空，它正迅速地向着印度、东南亚和华南扩展<sup>[7]</sup>