

硫酸盐和烟尘气溶胶辐射特性 及辐射强迫的模拟估算*

张立盛 石广玉

(中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

摘要 利用已有的硫酸盐和烟尘气溶胶折射指数资料, 精确计算了这两种气溶胶从太阳短波到红外谱段的辐射特性。然后, 在 LLNL 化学输送模式 (CTM) 模拟的硫酸盐和烟尘气溶胶资料及改进的气溶胶参数化基础上, 在国内首次用 GCM 估算了这两种气溶胶引起的全球辐射强迫。结果表明: (1) 西欧是全球最大的硫酸盐辐射强迫中心, 最大值出现在夏季, 达 -5.0 W/m^2 ; (2) 烟尘强迫的最大中心出现在夏季的南美和非洲中南部, 为 4.0 W/m^2 ; (3) 南半球大陆人为气溶胶的强迫不容忽视; (4) 某些地区人为气溶胶的强迫在量值上可与 CO_2 等温室气体引起的强迫相比拟。

关键词: 硫酸盐; 烟尘; 辐射特性; 辐射强迫

1 引言

气溶胶以两种方式影响着气候, 即除直接散射和吸收太阳辐射 (直接效应) 外, 它还通过作为云凝结核 (CCN) 改变云的光学和微物理特性, 从而使云的寿命和辐射特性发生变化 (间接效应)。一些研究表明, 人为硫酸盐等气溶胶产生的冷却效应在一定程度上可以补偿温室效应, 从而使全球增暖的趋势减缓^[1]。如在最近几十年中, 南半球地表温度的升高比人为气溶胶浓度大的北半球要快^[2]。许多作者通过分析全球不同地区近几十年来太阳辐射的常规观测资料还发现, 在某些地区, 到达地面的太阳辐射存在长期减小的趋势^[3,4]。这些作者的初步分析认为, 除水汽及云量的变化等因素外, 人为硫酸盐等气溶胶的散射效应可能是一个重要的因子。

气溶胶强迫与温室气体强迫的性质截然不同: (1) 对一给定的气体, 分子间的吸收特性是不变的, 但气溶胶粒子的光学特性依赖于粒子的尺度、形状和化学成分等因素; (2) 对流层中气溶胶粒子的源相对集中, 寿命又很短 (几天~几周), 主要受降水等天气系统出现的频率所控制 (如湿沉降)。因此, 不同于均匀混合的温室气体强迫, 气溶胶强迫具有明显的区域性特征; (3) 气溶胶强迫主要是一个短波强迫过程 (对长波尽管有吸收作用, 但影响很小), 因此又具有明显的日变化和季节变化的特征, 在白天和夏季最强。而温室气体强迫则在全天和季节循环中均起作用。(4) 吸湿性气溶胶粒子还可作为云凝结核 (CCN), 与云滴的成核及增长等复杂的微物理过程密切相关。综上所述, 与均匀混合的温室气体相比, 这些差异使得描述气溶胶的气候效应要复杂得多, 不

1999-11-30 收到, 2000-03-09 收到修改稿

* 国家“九五”重中之重 96-908-01-06 专题以及国家自然科学基金资助项目 49875012 共同资助

确定性也要大得多。但这也同时要求在气候模式中要显式计算气溶胶的影响,而非仅仅是与等效的温室气体相反的影响来计算。

90年代初, Charlson 等^[5]首先用一个“箱室”模式估算了北半球人为硫酸盐对晴空辐射平衡的影响,得到的反射通量的平均变化值为 -1.6 W/m^2 。随后,在 Langner 和 Rodhe^[6]模拟的全球硫酸盐分布及考虑全球平均云量的基础上, Charlson 等^[7]用两层模式估算的北半球人为硫酸盐的辐射强迫为 -1.6 W/m^2 ,全球平均为 -0.6 W/m^2 。Kiehl 和 Briegleb^[8]采用与文献[7]相同的硫酸盐分布但不同的气溶胶尺度分布、化学成分和光学特性,用三维诊断模式估算的全球平均人为硫酸盐直接强迫为 -0.28 W/m^2 。赵凤生和石广玉^[9]利用一维 RCM 模拟了几类气溶胶的直接和间接效应,指出了其在地气系统辐射收支及全球气温变化中的重要性。最近,Chuang 等^[10]用一个包含云成核过程参数化的耦合气候/化学模式模拟了全球硫循环,并同时估算了人为硫酸盐的直接和间接效应,他们得出的全球直接辐射强迫约为 -0.4 W/m^2 。胡荣明和石广玉^[11]利用文献[7]的全球硫酸盐分布及简单参数化,由二维水平能量平衡模式估算了人为硫酸盐的直接和间接辐射强迫及全球的温度响应。Haywood 和 Ramaswamy^[12]用 GFDL 模式分别对人为硫酸盐和烟尘气溶胶的直接强迫做了敏感性研究,其中,硫酸盐强迫为 $-0.6 \sim -0.8 \text{ W/m}^2$,烟尘为 0.4 W/m^2 ,并强调了人为烟尘对气候的重要性。Mitchell 等^[13]用 Hadley Centre 的耦合 GCM 模拟的结果也肯定,在模式中考虑气溶胶的直接效应后即改善了对过去温度记录的模拟。

尽管这些估算还存在相当大的不确定性,但毫无疑问,将气溶胶对辐射-气候的影响引入到气候模式中,对于准确地评价气候模式的模拟能力,真实地重现过去的气候状况和可靠地预测将来的气候变化都是基本的,也是十分必要的。本文将首先计算硫酸盐和烟尘气溶胶成分的各种辐射特性随波长的变化,并将结果耦合到 AGCM/LASG 中以改进其中的气溶胶参数化,最后对这两种气溶胶及其混合后导致的辐射强迫进行模拟和估算。

2 气溶胶资料和 GCM 模式

2.1 气溶胶资料

本文采用的是 LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory) 的对流层化学输送模式 GRANTOUR 的结果^[10]。模式考虑了几种主要人为硫源以及自然硫源,全球硫排放为每年 106.0 Tg,其中 80%是由人为因素造成的。资料包括月平均的自然硫酸盐、化石燃料硫酸盐、生物质燃烧硫酸盐和生物质燃烧烟尘四种气溶胶成分浓度的三维分布^[14]。

2.2 GCM 模式

本文所用的模式是 GOALS/LASG 系统中的大气模式 AGCM^[15]。模式为 R15L9 谱模式,模式大气的顶部为 10 hPa,垂直方向采用 η 坐标。时间积分方案采用蛙跳半显式方案,对动力和其他物理过程,时间步长为 30 min,而对辐射过程的步长则取为 3 h。

湿对流调整方案可确保完全消除层结不稳定的现象。云覆盖通过相对湿度和垂直速

度来诊断, 对对流型和非对流型的云则不加以区分。云水路径也是一诊断量, 它通过随高度指数递减的参数化方法进行处理。大尺度凝结降水和湿对流性降水在过饱和条件下产生, 行星边界层 (PBL) 假定为模式大气的最低诊断层。陆面过程则采用 SSiB 方案^[16], 分为 1 个植被层和 3 个土壤层, 共有 11 种植被类型。

模式中耦合了能够将散射和吸收同时处理的辐射传输模式^[17]。模式中将太阳紫外到红外的所有光谱按能量分配和温室气体的分布划分为不等距的 12 个波段, 其中短波部分 (小于 $4 \mu\text{m}$) 5 个波段, 算法采用 δ -Eddington 方法; 长波部分 (大于 $4 \mu\text{m}$) 7 个波段, 采用二流近似计算辐射传输, 算法采用 Toon 等^[18]提出的二流源函数方法。对 H_2O 、 CO_2 、 O_3 、 N_2O 和 CH_4 等几种气体的吸收用石广玉^[19]发展的精确、快速的 k 分布方法, 这是一种精度可与逐线积分 (LBL) 的结果相比拟, 并为国际上广泛采用的较有前途的计算大气透过率的方法^[20]。水汽的连续吸收根据经验公式来计算, 其中 CO_2 的浓度采用 AMIP 计划的建议值体积分数为 345×10^{-6} 。在紫外和可见光波段还考虑了臭氧的吸收。水云的辐射特性用 Stephens^[21]的结果, 并按照模式的波段对长短波做加权平均以得到它的非灰性质。模式中还考虑了太阳辐射的日变化。

3 气溶胶的辐射特性

3.1 辐射特性表达式及 Mie 散射算法

气溶胶的辐射特性是几个表征气溶胶消光能力及大小的量。具体来说, 这些特性包括消光效率因子 (或光学厚度、消光系数)、单次散射反照率和不对称因子 (或相函数), 它们均是波长的函数, 其表达式如下:

消光 (e)、散射 (s) 和吸收 (a) 系数为

$$\sigma_{e,s,a}(\lambda) = \int_{r_1}^{r_2} Q_{e,s,a}(m, \lambda, r) \pi r^2 \frac{dN(r)}{r \ln 10 d(\log r)} dr, \quad (1)$$

其中, $Q_{e,s,a}(\lambda, r, m)$ 是无量纲的消光 (e)、散射 (s) 和吸收 (a) 效率因子, r 是气溶胶粒子的半径, $N(r)$ 为粒子数浓度。在模式计算中, 采用气溶胶的光学厚度, 它可记为

$$\tau_A(\lambda) = \int_{z_1}^{z_2} \sigma_e(\lambda) dz, \quad (2)$$

其中 z 是高度。

单次散射反照率为

$$\omega(\lambda) = \frac{\sigma_s(\lambda)}{\sigma_e(\lambda)} = 1 - \frac{\sigma_a(\lambda)}{\sigma_e(\lambda)}, \quad (3)$$

ω 是用来衡量粒子散射和吸收的相对重要性的量, ω 越大, 表示粒子的散射能力越强。

不对称因子为

$$g(\lambda) = \frac{\int \cos\theta P(\mu, \theta) d\cos\theta}{\int P(\mu, \theta) d\cos\theta}, \quad (4)$$

其中 $P(\mu, \theta)$ 为相函数, μ 为入射角, θ 为散射角。不对称因子反映的是粒子前、后向散射的相对强度, 在-1 (完全后向散射) 到+1 (完全前向散射) 之间变化。

除光学厚度外, 上述所有这些量可直接通过 Mie 散射算法来确定。本文采用的 Mie 散射算法是 Wiscombe 对其以前算法^[22]的修改版本。该算法具有计算稳定、准确和速度快等一些优点, 并可适用于可能出现的最大折射指数和尺度参数。是一个经典和比较成熟的 Mie 算法, 并已为许多气溶胶的研究者所认可和采用^[10]。

在进行 Mie 计算时, 气溶胶粒子的形状假定为球形, 尺度谱分布采用对数正态分布, 粒子半径范围为 0.005~20 μm , 在 0.2~40 μm 波长范围内用搜集并整理的共 72 个波段间隔上的折射指数资料^[14]。因为一些研究结果已证实, 直接人为硫酸盐的强迫对硫酸盐成分 (硫酸铵、硫酸氢铵或硫酸) 的敏感性并不高^[23], 因此本文统称硫酸盐。

3.2 计算结果

因为硫酸盐是吸湿性的粒子, 随相对湿度的变化, 粒子的辐射特性要发生相应的变化。由于相对湿度对吸湿性粒子辐射特性的影响十分复杂, 因此将在另文中讨论。此处给出相对湿度小于 50% 情况下“干”粒子的质量消光效率因子、单次散射反照率以及不对称因子随波长的变化。

计算得到的这两类气溶胶粒子的辐射特性间有很大的差别:

(1) 质量消光效率因子 (图 1a): 烟尘的质量消光效率因子几乎在整个波段范围内都大于硫酸盐的, 但它们随波长变化的总趋势都是在减小。不同的是, 烟尘的质量消光效率因子随波长的增加几乎呈直线减小, 而硫酸盐的则不同, 随着波长增加其趋势虽然也是减小的, 但在整个波段起伏较大, 而这也正是我们采取小波长间隔的原因所在。

(2) 单次散射反照率 (图 1b): 这是最能反映气溶胶粒子散射消光特性的量。由图可见, 这两种成分间的差别也十分明显: 在小于 2 μm 的太阳能量集中的短波区, 硫酸盐的单次散射反照率几乎都等于 1, 充分体现了其对太阳短波辐射极强的散射能力。随着波长的增加, 其值迅速减小, 在长波波段基本小于 0.2, 甚至更小; 而烟尘粒子虽也有一定的散射能力, 但在整个波段, 其单次散射反照率的值均在 0.35 以下, 而且随波长的增加递减很快, 当波长大于 2 μm 时, 基本趋向于零。这说明, 烟尘对太阳辐射的主要作用是吸收。这也充分说明了这些气溶胶粒子主要是对太阳短波辐射有较强的消光作用。

(3) 不对称因子 (图 1c): 烟尘尽管表现了比硫酸盐较强的后向散射能力, 但相对于硫酸盐气溶胶高的单次散射反照率来说, 其作用相对较小。而且, 气溶胶导致的辐射能量的变化是这几个因子共同作用的结果, 相比之下, 由于硫酸盐在大气中的浓度较烟尘为大, 因此其“白房效应”(whitehouse)^[24]更为显著。

将我们计算的这些辐射特性的结果与 Koepke 等^[25]等的计算结果比较后看出, 二者基本相同。但在某些波段, 特别是在长波, 两者间也存在一些差别。这些差别与折射指数资料的不同以及谱积分均有一定的关系。但由于本文所采用的波长间隔 (72 个) 较他们的 (60 或 40 个) 多, 因此也更体现了气溶胶的辐射特性在整个光谱中的细致变化。正如前面所述, 由于气溶胶强迫主要是一个短波强迫过程, 而且太阳的能量也主要集中在短波波段, 长波波段的辐射特性的差别不会对辐射强迫的结果产生很大的影响,

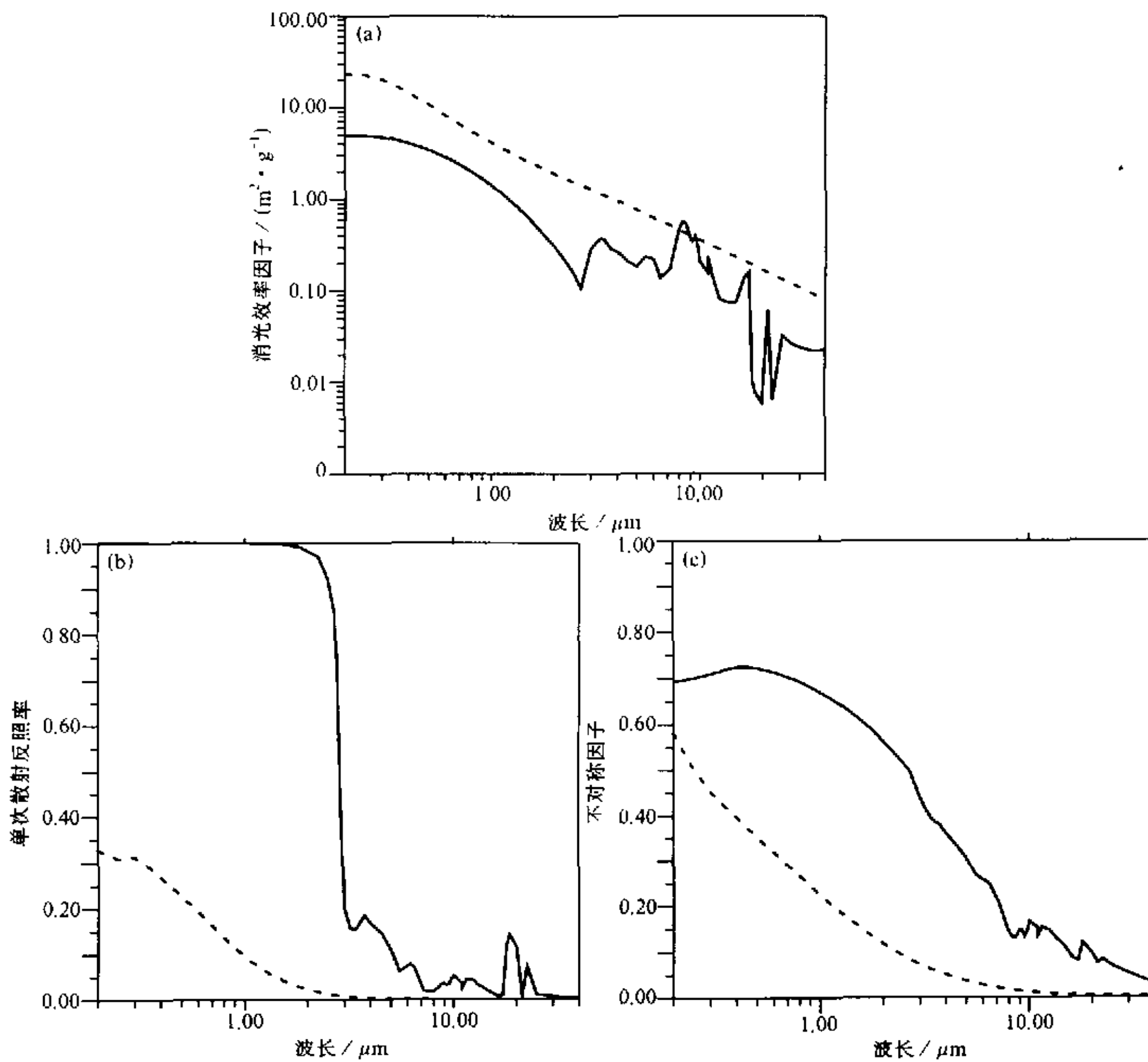


图1 硫酸盐和烟尘气溶胶粒子的质量消光效率因子 (m^2/g) (a), 单次散射反照率 (b) 和不对称因子 (c) 随波长的变化
实线表示硫酸盐, 虚线表示烟尘

因此许多研究者都曾将气溶胶对长波辐射的影响忽略不计^[1]。

4 气溶胶的辐射强迫

4.1 试验设计

在上述计算的基础上, 我们改进了 GOALS / AGCM 中的气溶胶参数化^[14], 使之更适合于气溶胶辐射强迫的估算和气候效应的模拟。

这里共设计了四种试验方案, 即自然硫酸盐、总硫酸盐、烟尘以及总硫酸盐和烟尘外部混合。在辐射强迫计算时, 采用单向嵌套的方法, 模式的积分时间为 2 年。

在实际大气中, 气溶胶粒子是由不同源的粒子所构成。因此, 为了在现有资料的基础上模拟不同成分组成的气溶胶的辐射强迫, 本文采用了外部混合法 (external mixture

method) 来对硫酸盐和烟尘气溶胶粒子进行这样的处理。

混合后气溶胶的尺度分布可由各单个成分气溶胶粒子的数浓度 N_i 来得到, 即

$$\frac{dN}{d(\log r)} = \sum_i \frac{dN_i(r)}{d(\log r)}, \quad (5)$$

显然, 这种相加对粒子的总数浓度和质量浓度均是适用的。

因为气溶胶粒子与辐射场的作用是相互独立的, 在考虑单个成分粒子数浓度的前提下, 粒子的消光效率可通过这些成分的求和来得到。而单次散射反照率和不对称因子则通过不同成分的相应值做加权平均获得。其中, 单次散射反照率需通过消光系数来加权,

$$\omega(\lambda) = \frac{\sum_i \omega_{ci}(\lambda) \sigma_{ei}(\lambda)}{\sum_i \sigma_{ei}(\lambda)}, \quad (6)$$

而不对称因子则通过散射系数来加权,

$$g(\lambda) = \frac{\sum_i g_i(\lambda) \sigma_{si}(\lambda)}{\sum_i \sigma_{si}(\lambda)}. \quad (7)$$

这样, 就可以用这种方法在模式中方便地处理各种不同类型气溶胶混合后的气溶胶粒子。在这种意义上来说, 混合后气溶胶的一个粒子是一个“平均”的粒子, 它可以描述所有成分气溶胶的辐射特性。这是一种描述气溶胶混合的最直接的方法, 而且因为对不同的成分, 相对湿度的影响也不同, 因此这种方法也更易于考虑相对湿度的影响。很显然, 这种方法要优于不同成分间单纯用粒子的混合比来描述的方法。虽然实际大气中相当一部分气溶胶粒子也以内部混合的方式存在, 但由于没有足够的观测资料来进行验证, 因此用内部混合法 (internal mixture method) 得到的结果不确定性也很大, 目前还未得到普遍的应用。

4.2 模拟结果

用上述试验方案模拟的辐射强迫的分布如下。为便于分析其季节变化特征, 这里分别给出各试验夏季和冬季季节平均的辐射强迫。

自然硫酸盐主要源区位于海洋, 即由海洋上的 DMS (二甲基硫) 产生, 因此, 其季节平均的辐射强迫主要分布在 $60^{\circ}\text{S} \sim 60^{\circ}\text{N}$ 之间的海洋地区, 量值基本在 $-0.1 \text{ W} / \text{m}^2$ 左右。强迫的最大中心位于冬季的南印度洋, 中心值为 $-0.3 \text{ W} / \text{m}^2$ 。

总硫酸盐的辐射强迫分布图中 (图 2), 冬季, 以东亚、南美、中北非以及地中海为全球最大的几个中心 ($-0.5 \text{ W} / \text{m}^2$); 相比较而言, 北美、非洲和澳洲相对较小 ($-0.3 \text{ W} / \text{m}^2$), 贝加尔湖以西以及南印度洋也出现了 $-0.3 \text{ W} / \text{m}^2$ 的中心, 而遥远大陆地区的强迫基本在 $-0.1 \text{ W} / \text{m}^2$ 以下。夏季的情形则完全不同: 西欧成为全球最大的强迫中心 ($-5.0 \text{ W} / \text{m}^2$), 北美和非洲次之 ($-1.5 \text{ W} / \text{m}^2$), 而东亚和南美地区的强迫则与西欧地区出现了量级上的差别 ($-0.5 \text{ W} / \text{m}^2$)。这些分布特征与其浓度分布的特征

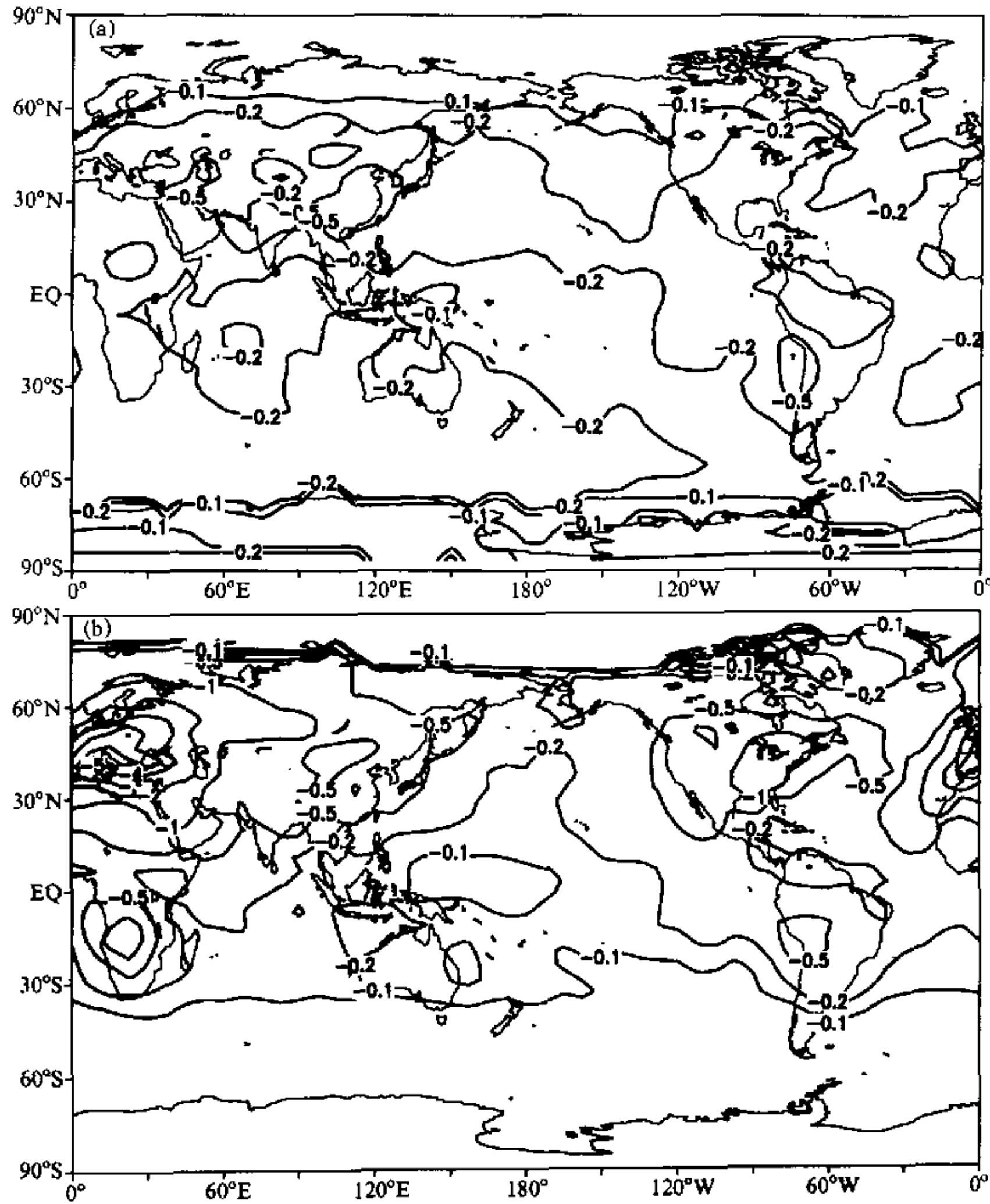


图2 总硫酸盐气溶胶季节平均的辐射强迫 (W/m^2)

(a) 冬季; (b) 夏季

十分相似^[14]。在气溶胶的其他辐射特性相同的前提下, 其浓度及垂直分布直接决定着其光学厚度的变化, 因而便成为辐射强迫的决定性因素。从图中还不难看出, 发达国家以及发展中国家的硫排放是全球硫排放的主要源区, 而为以往大多数研究所不予重视的南半球人类活动的影响也十分显著。

烟尘气溶胶的辐射特性决定了其吸收太阳辐射的特点, 因此可导致不同于硫酸盐的正辐射强迫。而且, 由于烟尘主要由生物质燃烧产生的黑碳成分所构成, 其强迫的分布类型也与硫酸盐强迫有较大的差别(图3)。冬季, 赤道非洲地区明显是其强迫的最大中心 ($3 W/m^2$), 青藏高原附近地区为 $1 W/m^2$, 美洲中部也超过了 $0.8 W/m^2$, 而全球其他地区则基本在 $0.1 W/m^2$ 以下。夏季, 南美为全球最大的强迫中心 ($4 W/m^2$), 中南非洲出现了 $3 W/m^2$ 的次中心, 澳洲和青藏高原附近的强迫也在

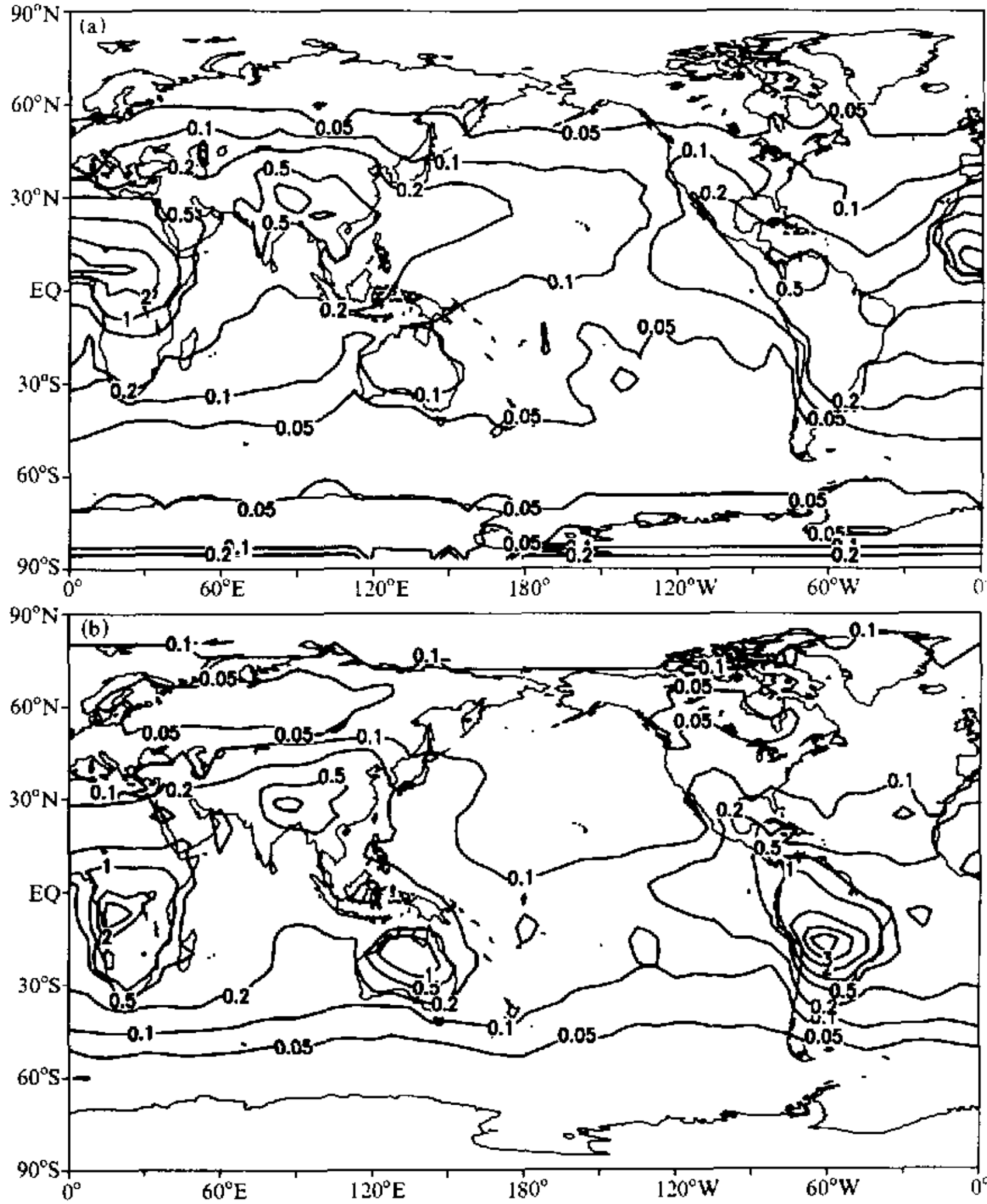


图3 烟尘气溶胶季节平均的辐射强迫 (W/m^2)
(a) 冬季; (b) 夏季

$1 W/m^2$ 以上。显然，这与这些地区的森林大火及其他生物质的燃烧密切相关。北半球的强迫则相对较小，基本在 $0.1 W/m^2$ 以下，只有东亚的部分地区出现了 $1 W/m^2$ 的中心。

总硫酸盐和烟尘气溶胶外部混合后的辐射强迫示于图4中。总体来说，其地理分布类型和各中心的强迫值均与总硫酸盐的强迫出现了明显的差别，即在量值或范围上，这些中心的强迫均有不同程度的减小，其中南半球大陆的几个强迫中心减弱尤为明显，南半球 $-0.1 W/m^2$ 等值线的向北推进也说明了这种减小的趋势。尽管西欧、北美和东亚这几个中心的强迫值基本不变，但范围均有所减小。

从这四个试验辐射强迫的逐月变化趋势图中可见（图5），其辐射强迫均有明显的季节变化的特点：自然硫酸盐的辐射强迫变化比较平缓，基本在 $-0.1 W/m^2$ 左右；烟

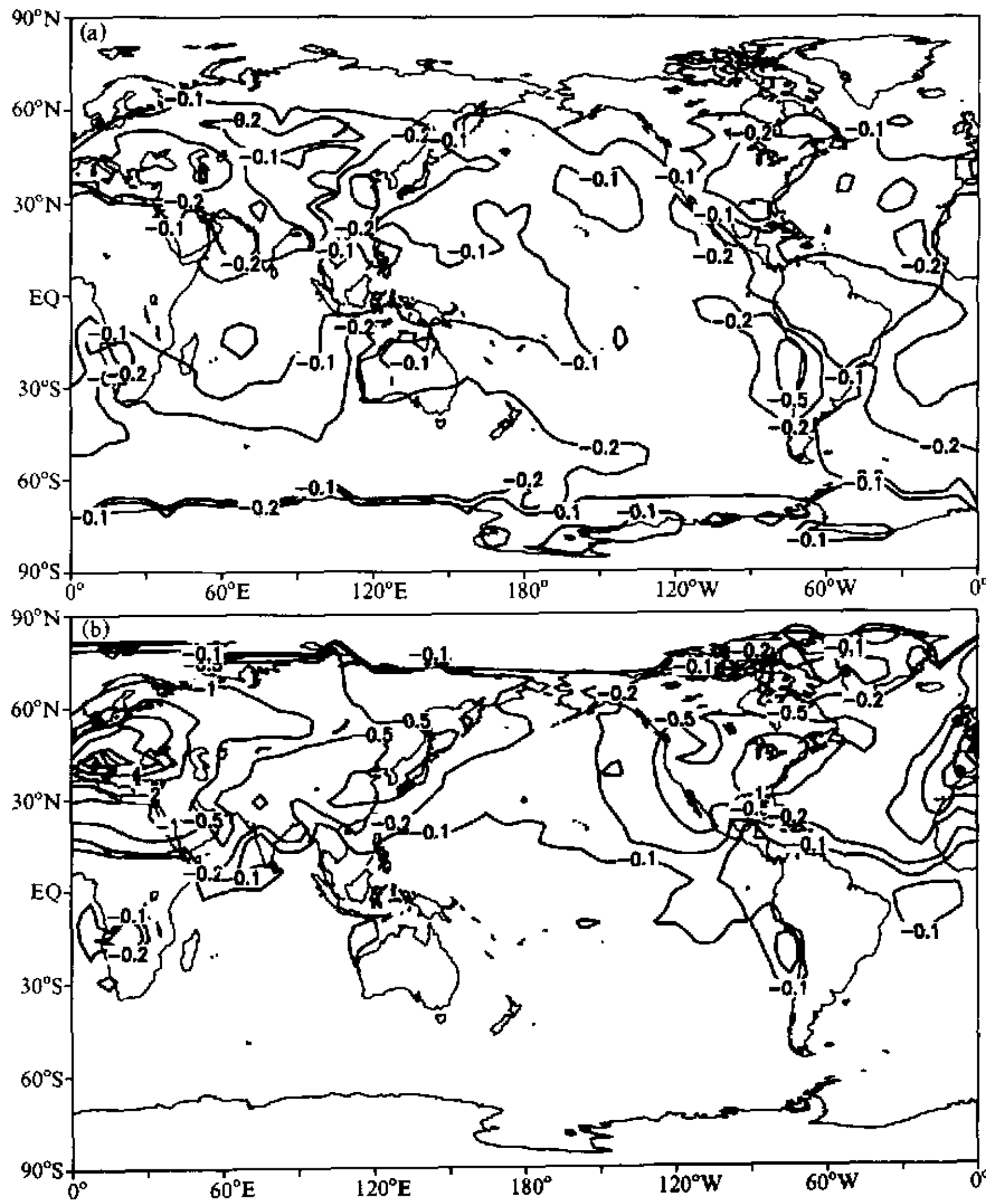


图 4 总硫酸盐和烟尘气溶胶外部混合季节平均的辐射强迫 (W/m^2)
(a) 冬季; (b) 夏季

尘气溶胶的辐射强迫表现为基本相同的双峰结构, 峰值分别在冬季 (2 月) 和夏季 (8 月), 峰值达 $0.3 W/m^2$ 。而总硫酸盐以及外部混合试验的强迫则不同, 在全年中只有一个峰值 (8 月), 分别达 -0.42 和 $-0.3 W/m^2$ 。很明显, 外部混合试验的辐射强迫并非这两种成分各自强迫的简单叠加, 而是由其混合后的辐射特性所决定。

为了与国际上的类似工作比较, 这里也给出了各试验全球年平均的辐射强迫 (表 1)。我们计算的总硫酸盐全球年平均辐射强迫 ($-0.28 W/m^2$) 处于 IPCC^[26] 评估的范围 (约在 $-0.20 \sim -0.8 W/m^2$) 之内, 并与 Kiehl 和 Briegleb^[8] 以及 Boucher 和

表 1 各试验全球年平均的辐射强迫 W/m^2

试验名称	自然硫酸盐	总硫酸盐	烟尘	外部混合
辐射强迫	-0.11	-0.28	0.22	-0.18

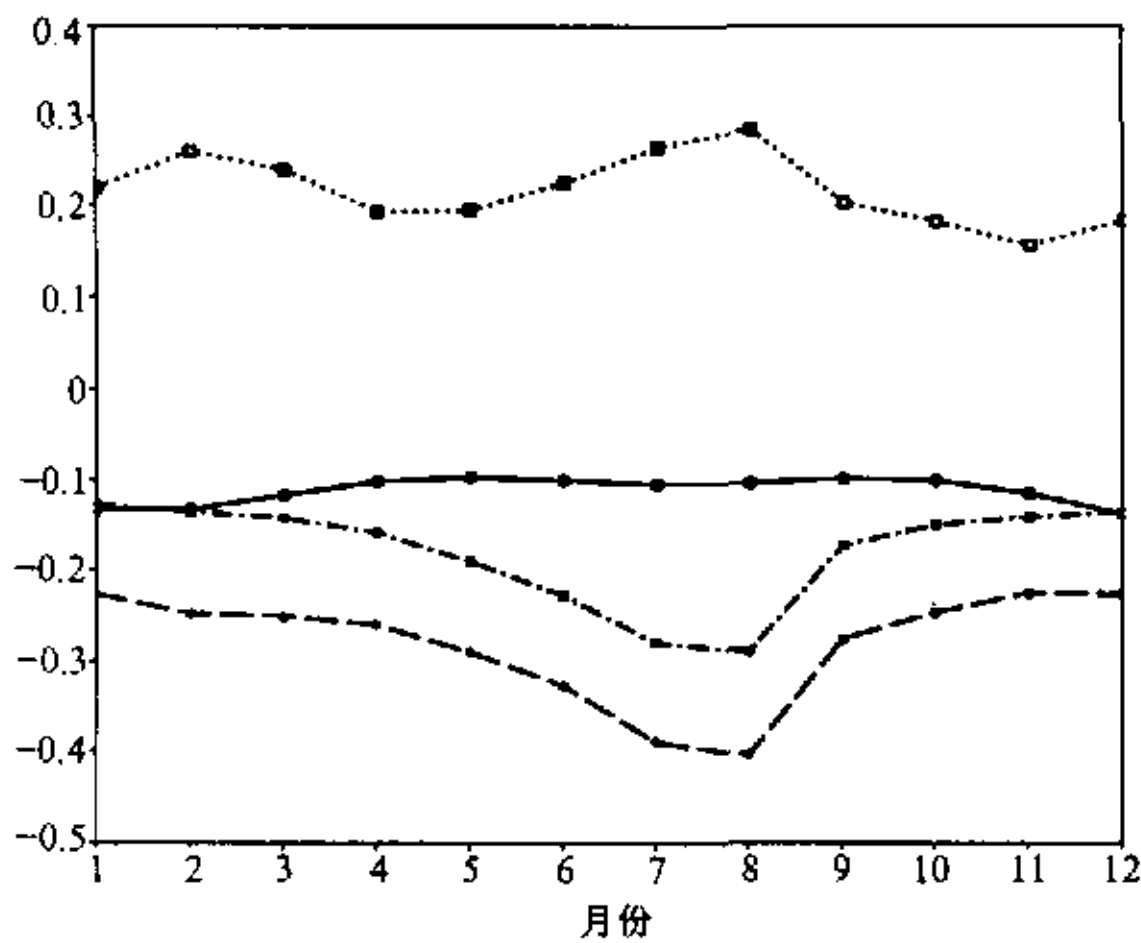


图5 各试验全球平均辐射强迫的逐月变化趋势 (W/m^2)

实线: 自然硫酸盐气溶胶; 虚线: 总硫酸盐气溶胶

点线: 烟尘气溶胶; 点虚线: 总硫酸盐和烟尘气溶胶外部混合

Anderson^[27]等的估算值十分接近。但与使用相同资料的 Chuang 等^[10]的计算结果 ($-0.40 W/m^2$) 存在一些差别。这可能是由于所用的模式、辐射参数化方案以及气候平均场的不同等因素所造成的。这就是说, 即便使用完全相同的资料, 不同模式估算的辐射强迫也不尽相同。这是气溶胶不确定性的一个具体体现, 也是下一步有待研究的课题。

5 结论

(1) 计算气溶胶的辐射特性

时, 由于采用了精细的波段划分, 因而计算结果更清晰地反映了气溶胶在整个光谱中消光的细致变化特征;

(2) 这两种气溶胶的辐射强迫均具有明显的季节变化和区域分布的特点, 辐射强迫的地理分布受人类活动主宰, 南半球人类活动的贡献可与北半球的相比拟;

(3) 硫酸盐的最大强迫中心位于西欧 ($-5.0 W/m^2$), 烟尘的最大中心则出现在南半球的南美和非洲 ($4 W/m^2$).

(4) 各试验全球平均的辐射强迫分别为 $-0.11 W/m^2$, $-0.28 W/m^2$, $0.22 W/m^2$ 和 $-0.18 W/m^2$, 与国际上的工作很接近。

硫酸盐的这种效应虽不能与简单的温室效应相“抵消”, 但在全球的许多地区, 这种效应可足够“补偿”由温室气体引起的变暖。

致谢: 感谢LLNL的Dr. C. C. Chuang提供了硫酸盐和烟尘资料。

参 考 文 献

- 1 Houghton J. T. (eds.), *IPCC 1994: Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*, Cambridge: Cambridge University Press, 1~339.
- 2 Wigley, T. M. L., 1989, Possible climate change due to SO_2 derived cloud condensation nuclei, *Nature*, 1994, 339, 365~367.
- 3 Liepert, B., P. Fabian and H. Grassl, Solar radiation in Germany —observed trends and an assessment of their causes, Part I: Regional approach, *Beitr. Phys. Atmosph.*, 1994, 67, 15~29.
- 4 Li Xiaowen, Zhou Xiuji, Li Weiliang and Chen Longxun, The cooling of Sichuan Province in recent 40 years and its probable mechanisms, *Acta Meteorologica Sinica*, 1995, 9, 57~68.
- 5 Charlson, R. J., J. Langner and H. Rodhe, Sulfate aerosol and climate, *Nature*, 1990, 348, 22~24.
- 6 Langner, J. and H. Rodhe, A global three-dimensional of tropospheric sulfur cycle, *J. Atmos. Chem.*, 1991, 13, 22~263.

- 7 Charlson, R. J., J. Langner, H. Rodhe, C. B. Leovy and S. G. Warren, Perturbation of the northern hemisphere radiative balance by backscattering from anthropogenic sulfate aerosols, *Tellus*, 1991, **43AB**, 152~163.
- 8 Kiehl, J. T. and B. P. Briegleb, The relative roles of sulfate aerosol and greenhouse gases in climate forcing, *Science*, 1993, **260**, 314.
- 9 赵风生、石广玉, 气溶胶气候效应的一维模式分析, *大气科学*, 1994, **18**, 902~909.
- 10 Chuang, C. C., J. E. Penner, K. E. Taylor and J. J. Walton, An assessment of the radiative effects of anthropogenic sulfate, *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**, 3761~3778.
- 11 胡荣明、石广玉, 中国地区气溶胶的辐射强迫及其气候响应试验, *大气科学*, 1998, **22**, 919~925.
- 12 Haywood, J. M. and V. Ramaswamy, Global sensitivity studies of the direct radiative forcing due to anthropogenic sulfate and black carbon aerosols, *J. Geophys. Res.*, 1998, **103(D6)**, 6043~6058.
- 13 Mitchell, J. F. B., T. C. Johns, J. M. Gregory and S. F. B. Tett, Transient climate response to increasing sulfate aerosols and greenhouse gases, *Nature*, 1995, **376**, 501~504.
- 14 张立盛, 硫酸盐和烟尘气溶胶辐射强迫的模拟和估算, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1999, 1~140.
- 15 吴国雄、张学洪、刘辉、俞永强、金向洋、郭裕福、孙菽芬、李伟平、王标、石广玉, LASG全球海洋-大气-陆面系统模式(GOALS/LASG)及其模拟研究, *应用气象学报*, 1997, **8(增刊)**, 15~28.
- 16 Xue, Y. K., P. J. Sellers, J. L. Kinter II, and J. Shukla, A simplified biosphere model for global climate studies, *J. Climate*, 1991, **4**, 345~364.
- 17 王标, 气候模式中的辐射传输模式, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1996, 1~92.
- 18 Toon, O. B., C. P. McKay and T. P. Ackerman, Rapid calculation of radiative heating rates and photodissociation rates in inhomogeneous multiple scattering atmospheres, *J. Geophys. Res.*, 1989, **94(D13)**, 16287~16301.
- 19 Shi Guangyu, An accurate calculation and representation of the infrared transmission function of the atmospheric constituents, Ph. D. Thesis, Dept. of Sci., Tohoku Univ. of Japan, 1981, 191.
- 20 石广玉, 大气辐射计算的吸收系数分布模式, *大气科学*, 1998, **22(4)**, 659~676.
- 21 Stephens, G. L., Radiation profiles in extended water clouds, II: Parameterization schemes, *J. Atmos. Sci.*, 1979, **35**, 2123~2131.
- 22 Wiscombe, W. J., Improved Mie Scattering algorithms, *App. Opt.*, 1980, **19**, 1505~1509.
- 23 Nemesure, S., R. Wagener and S. E. Schwartz, Direct shortwave forcing of climate by the anthropogenic sulfate aerosols: Sensitivity to particle size, composition, and relative humidity, *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**, 26105~26116.
- 24 Schwartz, S. E., The whitehouse effect—Shortwave radiative forcing of climate by anthropogenic aerosols: An overview, *J. Aeros. Sci.*, 1996, **27**, 359~382.
- 25 Koepke, P., M. Hess, I. Schult and E. P. Shettle, Global Aerosol Data Set(GADS), Max-Planck Institute for Meteorology, 1997, Report No. 243, 1~44.
- 26 Houghton J. T. (eds.), *IPCC 1995: Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, Cambridge: Cambridge University Press, 1996, 1~572.
- 27 Boucher, O. and T. L. Anderson, General circulation model assessment of the sensitivity of direct climate forcing by anthropogenic sulfate aerosols to aerosol size and chemistry, *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**, 26117~26134.

The Simulation and Estimation of Radiative Properties and Radiative Forcing due to Sulfate and Soot Aerosols

Zhang Lisheng and Shi Guangyu

(State Key Laboratory of Numerical Modeling Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract Using complex refractive index data of sulfate and soot aerosols, the radiative properties of the aerosols from 0.2~40 μm wavelength were calculated by an accurate Mie scattering algorithm.

Based on the mass concentration data of aerosols simulated by LLNL CTM model and the improved aerosol parameterization in GOALS / AGCM, the radiative forcing of the global anthropogenic sulfate and soot were estimated at first time in China. The results show that: (1) The largest center of the radiative forcing due to sulfate is located at West Europe in summer, and the central value is about $-5.0 \text{ W} / \text{m}^2$; (2) The largest value of the forcing due to soot occurs in South America and South and Central Africa in summer and amounts to $4.0 \text{ W} / \text{m}^2$; (3) The radiative forcing caused by anthropogenic aerosols in the Southern Hemisphere cannot be ignored; (4) The radiative forcing due to human activity in some areas can be comparable in magnitude with the forcing caused by greenhouse gases, such as CO_2 etc.

Key words: sulfate; soot; radiative property; radiative forcing

中日科学家签署沙尘合作研究实施细则协议

2000年11月10日,中国科学院大气物理研究所王明星所长和日本气象研究所中山嵩所长在北京正式签署了中日沙尘合作研究《风送沙尘的形成、输送机制及其气候与环境影响的研究项目》的实施细则协议。

2000年春季我国华北地区多次遭遇沙尘天气,其频数之多,强度之大,为十多年来少见,它给当地及广大下游地区的大气环境质量、交通运输、人民的工作生活带来极为不利的影响,再次引起了中国、日本及其他国家的政府部门和科学家的高度重视。

2000年10月16日,中日双方正式签署了中华人民共和国中国科学院和日本科学技术厅关于《风送沙尘的形成、输送机制及其气候与环境影响的研究项目》的实施协议。协议规定中方项目牵头单位为中国科学院大气物理研究所,日方牵头单位为日本气象厅气象研究所。

至此,为期5年的中日沙尘合作研究正式拉开了序幕。中方首席科学家为大气物理研究所的石广玉,参加单位有大气物理研究所、地球环境研究所、遥感应用研究所、寒区旱区环境与工程研究所、生态与地理研究所及安徽光学精密机械研究所等。日方首席科学家为日本气象厅气象研究所的三上正男博士,参加单位有日本农林水产省、通商产业省、气象厅、理化学研究所、邮政省以及新日本气象海洋株式会社等。中日科学家将联合起来,全面系统地对中国北方沙尘的形成机理、输送过程和气候效应等进行深入的科学考察和研究。

本项目的开展是对国际全球大气化学计划/亚洲气溶胶特性实验(IGAC/ACE-Asia)的积极参与,研究成果将为沙尘暴的预警预报、土地沙漠化的综合治理、土地资源的合理利用以及西部大开发等提供科学依据。

(张仁健)