

相对湿度对气溶胶辐射特性和辐射强迫的影响*

张立盛 石广玉

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

摘 要

采用已有的气溶胶折射指数等资料, 计算了在不同的相对湿度条件下硫酸盐气溶胶的辐射特性。结合两种不同化学输送模式(CTM)的模拟结果及 LASG GOALS/AGCM 模式, 模拟估算了考虑相对湿度影响后全球硫酸盐气溶胶的辐射强迫。结果表明: (1) 随着相对湿度的增加, 硫酸盐气溶胶的质量消光效率因子在短波波段有所减小, 单次散射反照率仅在长波波段有所增加, 不对称因子在整个波段均有所增加; (2) 用两个 CTM 资料模拟辐射强迫的结果相差较大, 其全球平均辐射强迫分别为 -0.268 和 -0.816 W/m^2 ; (3) 在考虑相对湿度的影响后, 硫酸盐气溶胶辐射强迫的分布类型与相应干粒子的强迫分布类型基本相同, 但全球平均的强迫值减少了 6% 左右。

关键词: 相对湿度, 辐射特性, 辐射强迫。

1 引 言

气溶胶通过其直接和间接效应影响着地气系统的能量收支。由于它能产生与温室气体大小相当、符号相反的辐射强迫, 因此, 近年来有关气溶胶的研究备受科学界的关注^[1]。但是, 以往的大多数研究针对的是干环境条件下气溶胶粒子的辐射强迫, 并没有考虑相对湿度对气溶胶辐射特性的影响。而实际大气并非“干燥”的理想大气, 即相对湿度不可能总是小于 50%。因此, 考虑相对湿度的变化对吸湿性气溶胶粒子辐射特性和辐射强迫的影响是十分必要的。

Charlson 等^[2]对近年来不同研究中所采用的消光系数进行了系统总结, 并分析了相对湿度对其的影响, 结果发现, 不同研究所采用的数值间存在着相当大的差异。显然, 在确定辐射强迫时, 对相对湿度和云的处理显得相当重要, 如 Haywood 和 Ramaswamy^[3], Penner 等^[4]以及 Grant 等^[5]给出的归一化辐射强迫要比其他研究结果高 2~3 倍。这些学者认为, 一旦相对湿度超过某一个临界值, 整个网格将会被云覆盖, 这样, 由于强的非线性相对湿度效应, 模式中云方案的使用将会使辐射强迫增强。

Chuang 等^[6]曾做过有/无云方案的数值试验, 得到的辐射强迫要比前几位学者的要小, 而且认为当相对湿度超过 99% 时, 吸湿增长才较显著。但一般来说, 采用平均相对湿度场会导致较小的辐射强迫, 这是由于没有考虑相对湿度的时间变化及其非线性效应。如果改进气溶胶辐射特性对相对湿度的依赖性, 得到的归一化辐射强迫就较大^[7,8]。Haywood 和 Ramaswamy^[3]用 GCM 的研究显示, 当硫酸盐驻留在近地面时, 因为近地面相对湿度较大, 硫酸盐粒子的吸湿增长较快, 辐射强迫也较大。另外一些 GCM 的敏感性研究也表明, 辐射强迫是相对湿度的函数, 但对化学成分并不敏感^[9,10]。而不同学者模拟的云区对全球辐射强迫的贡献相差还较大, 如 4%^[11], 11%^[3], 22%^[9], 27%^[8]等等。

Haywood 等^[12]认为, 大多数 GCM 模拟研究都在面积达 10000 km² 的网格域上取同样的相对湿度值, 并没有考虑相对湿度的次网格尺度变化, 而这种变化可能对硫酸盐气溶胶的直接辐射强迫有着重要的影响。因此, 他们认为以往 GCM 估算的辐射强迫是系统性偏小的。Ghan 和 Easter^[13]却持不同的观点, 认为 Haywood 等^[12]考虑次网格尺度相对湿度的变化后高估了直接辐射强迫, 估算辐射强迫时

* 初稿时间: 2000 年 4 月 5 日; 修改稿时间: 2000 年 10 月 18 日。

资助课题: 中国科学院大气物理研究所创新面上项目 841304 和国家“九五”重中之重项目 96-908-01-06。

也没有必要考虑次网格尺度相对湿度的变化。因为气溶胶的吸水特性主要受气溶胶活化和产生云的条件的影响, GCM 对辐射强迫的估算偏差并没有那么大。如果忽略了活化的气溶胶粒子对辐射强迫的贡献, 那么云区的直接辐射强迫将会大大地减小。在某些条件下, 即便考虑相对湿度的次网格尺度变化, 估算的辐射强迫要比整个网格取平均相对湿度值时所计算的结果要小。

很显然, 国际上有关相对湿度对吸湿性硫酸盐辐射特性和辐射强迫的影响还存在着一些争议, 不确定性也很大。本文从气溶胶最基本的物理和化学特性出发, 精确地计算了相对湿度对硫酸盐气溶胶辐射特性的影响, 并用 GCM 和两种不同 CTM 的结果对硫酸盐的辐射强迫进行了对比模拟。

2 气溶胶资料和 GCM 模式

本文所用的资料包括两部分: 一是气溶胶在整个太阳光谱段(取 0.2~40 μm)的折射指数资料, 二是全球硫酸盐气溶胶浓度的时空分布资料。其中, 浓度资料有两个来源: (1) LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)的对流层化学输送模式 GRANTOUR 的结果^[6](下称 C97); (2) MPI(Max Planck Institute)的化学模式模拟的结果^[14](下称 F97)。这两种资料均包括全球月平均的自然硫酸盐和由化石燃料燃烧等人类活动引起的硫酸盐浓度分布, 每年两种因素引起的全球硫排放量分别为 $106.0 \times 10^7 \text{ kg}$ 和 $97.3 \times 10^7 \text{ kg}$, 其中约 80% 是由人为因素造成的^[15]。

所用的模式是 LASG GOALS/AGCM^[16]。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。模式中包括了各种主要的物理过程, 并考虑了辐射的日变化以及新改进的气溶胶参数化^[17]。

3 辐射特性的变化

不同于烟尘等其他一些非吸湿性的气溶胶粒子, 硫酸盐粒子具有吸湿性的特点。而实际大气并非那么干燥(相对湿度小于 50%), 全球年平均的云

量基本在 60% 左右^[18]。因此, 考虑硫酸盐粒子的这种特性十分必要。

随着相对湿度的增加, 吸湿性和溶解性气溶胶粒子的尺度将随之增大。当然, 这种增大一方面依赖于大气中水汽的含量, 另一方面, 它还依赖于气溶胶粒子的物理特性和化学成分。在粒子与周围空气相互作用的过程中, 气溶胶粒子将会与水混合, 粒子的尺度及其分布、形状以及化学构成均将发生变化, 从而其折射指数和粒子的众数半径也随之改变, 并引起粒子辐射特性的变化。由于对大多数吸湿性盐和盐类混合物来说, 其结晶时的相对湿度基本小于 40%, 因此, 在自然条件下, 由溶解和结晶湿度不同而引起的粒子湿度增长曲线的滞后现象通常可忽略不计^[19]。本文在保持标准偏差不变的前提下, 通过改变随相对湿度变化的粒子的众数半径, 考虑了粒子的尺度分布随相对湿度的变化。表 1 给出了包括干粒子在内的 8 种相对湿度条件下硫酸盐粒子的众数半径和密度值^[20]。不难看到, 在相对湿度为 50% 时, 粒子的半径已经增加了。显然, 零是一个理论上的值, 与湿度约为 30% 的实验室环境条件并不相同。

干硫酸盐粒子的折射指数采用张立盛和石广玉^[15]收集整理的资料。在不同的相对湿度条件下, 考虑到硫酸盐粒子因吸湿而与水混合, 湿硫酸盐粒子的密度和折射指数(包括实部和虚部)可按照下式计算得到:

$$\rho = \rho_{\text{dry}} \frac{r_{m_{\text{dry}}}^3}{r_m^3} + \rho_{\text{water}} \frac{r_m^3 - r_{m_{\text{dry}}}^3}{r_m^3} \quad (1)$$

$$m^* = m_{\text{water}}^* + \left(m_{\text{dry}}^* - m_{\text{water}}^* \right) \frac{r_{m_{\text{dry}}}^3}{r_m^3} \quad (2)$$

其中, ρ 是湿粒子的密度, $r_{m_{\text{dry}}}$ 是干粒子的众数半径, r_m 是某相对湿度下的众数半径。 m^* 是湿粒子的折射指数, m_{water}^* 是水的折射指数, 本文计算中采用 Liou^[21]的资料。这里将计算的不同相对湿度条件下的密度值也列在表 1 中。

根据已得到的粒子的密度及折射指数等的变化, 本文用精确的 Mie 散射算法^[22]计算了 8 种不同相对湿度条件下硫酸盐粒子的辐射特性随相对湿度

表 1 8 种相对湿度条件下硫酸盐气溶胶的众数半径及密度的变化

	相 对 湿 度 (%)							
	0	50	70	80	90	95	98	99
$r_m (\mu\text{m})$	0.070	0.098	0.109	0.118	0.135	0.158	0.195	0.231
$\rho (\text{g}/\text{cm}^3)$	1.70	1.25	1.08	1.14	1.10	1.06	1.03	1.02

的变化。计算中粒子的尺度分布采用对数正态分布假定,众数半径取自表 1,标准偏差均取为 2。计算

结果示于图 1 中(为明确起见,图中只给出了 5 种相对湿度下的结果)。

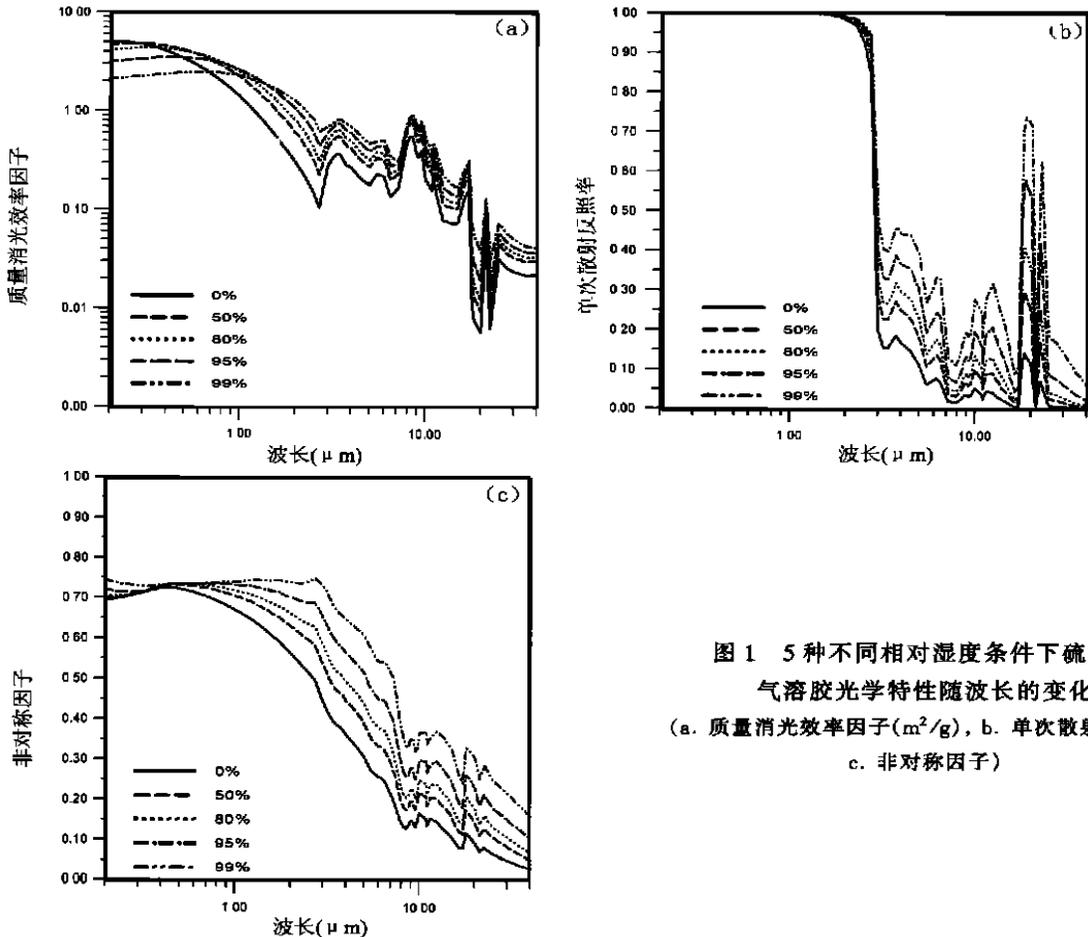


图 1 5 种不同相对湿度条件下硫酸盐气溶胶光学特性随波长的变化
(a. 质量消光效率因子(m^2/g), b. 单次散射反照率, c. 非对称因子)

对于质量消光效率因子(图 1a)来说,在硫酸盐粒子散射能力最强的短波,尤其是小于 $0.7 \mu\text{m}$ 的波段,随着相对湿度的增加,其值有不同程度的减小,最大减小值达 $2 \text{ m}^2/\text{g}$ 。从图中不难看出,在短波波段,随着粒子半径的增加,其质量消光效率因子的最大值也在向波长增加的方向偏离。这也说明,当粒子半径与太阳辐射波长相接近时,粒子的质量消光效率因子最大,散射效率最高。随着波长的增加,在小于 $4 \mu\text{m}$ 的短波波段,该因子均有一些增加,且增幅不小。如果考虑气溶胶粒子与大气中水汽的相互作用,那么,随着相对湿度的增加,气溶胶的质量将会有相当大的增加。当相对湿度超过 99.5% 时,湿硫酸盐气溶胶的质量要比相应干粒子的大 30~40 倍。相应地,光学厚度将增加 10 倍左右^[8]。显然,相对湿度的增加将以两种方式影响光学厚度:(1) 通过增加粒子的尺度改变质量消光效率因子;(2) 通过增强粒子与水的混合而影响粒子

的尺度。

单次散射反照率(图 1b)在小于 $3 \mu\text{m}$ 的短波区几乎没有什么变化,在长波波段则有所增加。长波波段因入射的太阳辐射能量很小,气溶胶粒子的消光效率也很低,因此,气溶胶的影响也很小。已有研究表明,气溶胶在红外波段的辐射强迫只占总强迫的 3% 左右^[23]。

不对称因子变化的特征则有所不同(图 1c),虽然在短波波段其增幅较小,但在整个波段上,随着相对湿度的增加,其值均有所增加。这意味着粒子后向散射能力将有所减小,较大的粒子将会使更多的辐射散射到前向,从而使气溶胶的消光效应有所减小。

对于主要的硫酸盐成分(硫酸、硫酸铵等),有些研究者认为,在对流层典型的相对湿度条件下(75%~80%),它们的粒子每单位质量浓度的光散射约为干粒子的两倍^[18]。但从前面的计算中发现,仅就其

质量消光效率因子来说, 在大于 $1 \mu\text{m}$ 的某些波段上才会出现上述情况, 而在紫外波段, 湿粒子的消光效率却比干粒子的要小; 其他辐射特性的变化也很复杂。很显然, 我们不能以简单的递增关系来描述吸湿性硫酸盐粒子的各种辐射特性随相对湿度的变化。但箱室模式正是存在着这样的不足。因此, 在考虑硫酸盐气溶胶粒子的这种吸湿性特征后, 精确计算其辐射特性的变化是非常必要的。

4 辐射强迫的全球分布及变化特征

文中共设计了 5 个试验方案, 使用了 C97 3 种资料(湿自然硫酸盐、湿总硫酸盐以及湿总硫酸盐和烟尘的外部混合)方案, 2 种 F97 资料(湿自然硫酸盐、湿总硫酸盐)方案。各试验均积分 2 年以模拟检验辐射强迫的季节变化及全球平均特征。

由于烟尘是非吸湿性气溶胶粒子, 因此这里只考虑它与总硫酸盐气溶胶外部混合的情况^[17], 不对它进行单独讨论。这里也不考虑硫酸盐粒子与大气中水汽和云等的相互作用过程。

C97 湿自然硫酸盐引起的辐射强迫的季节分布类型和量值与其干粒子的强迫基本相同(图略), 但也存在一些细微的差别: 夏季, 北太平洋地区略微有所减小, 大陆地区则基本没有明显的变化。

C97 总硫酸盐的辐射强迫中(图 2), 与干粒子的辐射强迫^[24]相比, 冬季, 南半球几块大陆附近相等值线的范围均有所减小; 夏季, 海洋及海陆交界的地区也存在一些小的差别, 总趋势是减小的。从图中易看出, 其辐射强迫大值中心集中在两半球受人类活动影响较大的大陆地区。最大强迫值出现在夏季的西欧地区, 达 -5 W/m^2 。

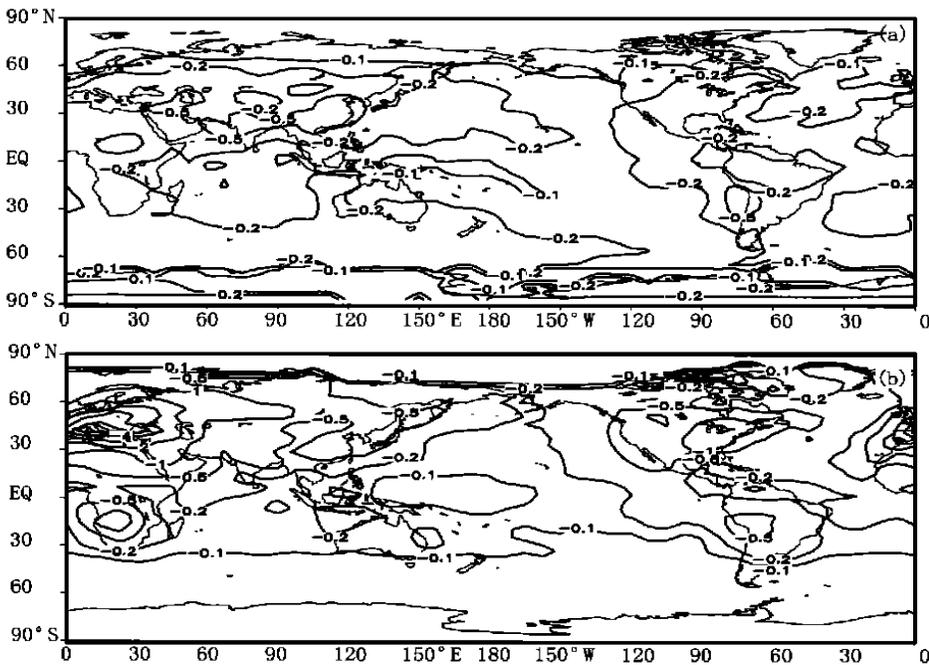


图 2 C97 季节平均的湿总硫酸盐的辐射强迫(W/m^2)

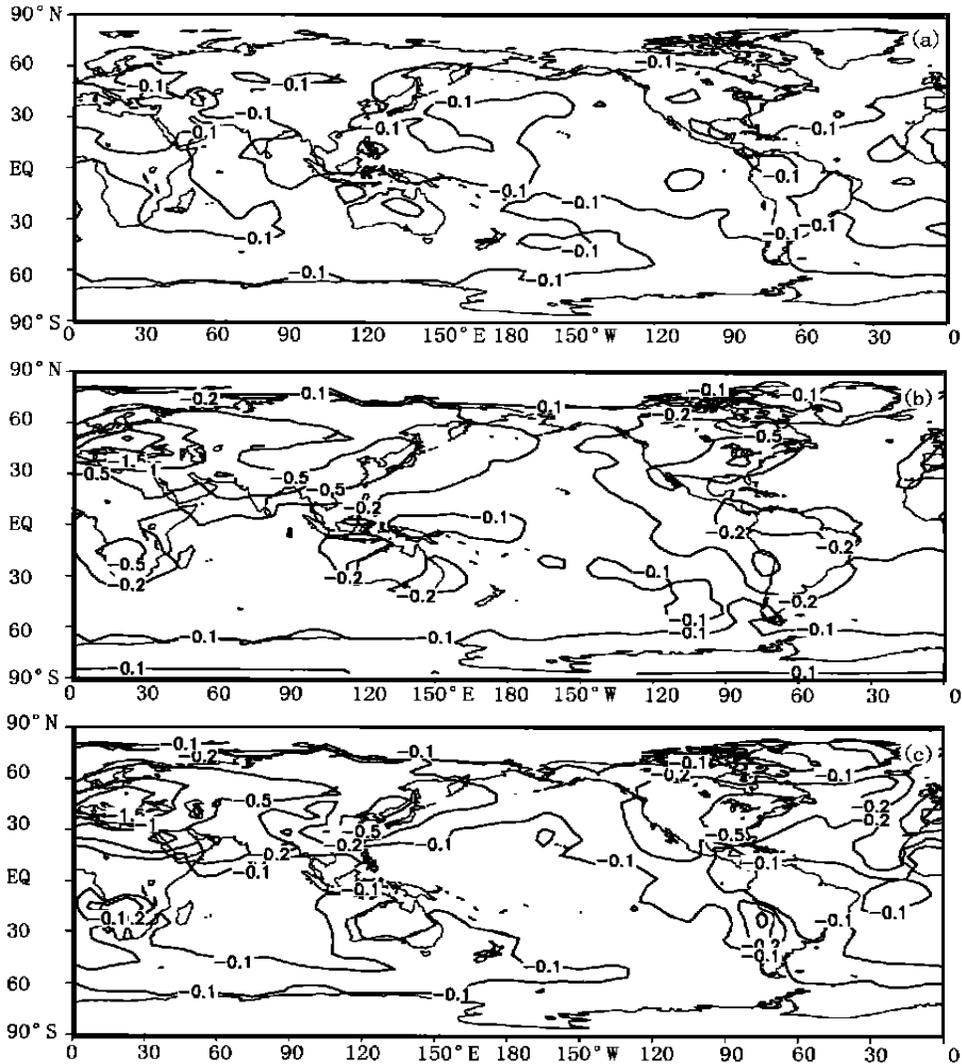
(a. 冬季, b. 夏季)

这里也给出了 C97 的 3 个试验年平均的辐射强迫分布(图 3)。与其干粒子的强迫相比, 除了上述海洋中的一些微小变化外, 自然硫酸盐和总硫酸盐的强迫基本没有明显的变化(图 3a, 3b)。在总硫酸盐和烟尘外部混合导致的辐射强迫图中(图 3c), 较为明显的特征是: 冬季, 赤道太平洋地区 -0.1 W/m^2 等值线范围有所扩大, 而夏季的北太平

洋则有所减小。

用 F97 资料的两个方案中, 不管是自然硫酸盐还是总硫酸盐的辐射强迫(图 4), 其年平均的分布变化在海洋地区相对明显一些, 大陆地区的变化同样很小。年平均的最大强迫值出现在东亚, 达 -3 W/m^2 。

即便从这两种资料的全球平均逐月变化趋势图

图3 C97年平均的辐射强迫(W/m^2)

(a. 自然硫酸盐, b. 总硫酸盐, c. 总硫酸盐和烟尘外部混合)

表2 C97和F97各试验辐射强迫的全球平均值(W/m^2)

	C97			F97	
	自然硫酸盐	总硫酸盐	总硫酸盐+烟尘	自然硫酸盐	总硫酸盐
	-0.106	-0.268	-0.174	-0.47	-0.816
	(-0.11)	(-0.28)	(-0.18)	(-0.50)	(-0.87)

注: 括号内为相应干粒子的辐射强迫^[24]。

中(图略),也很难直观地看出在考虑相对湿度的影响后其辐射强迫的总体变化趋势。因此,此处给出了上述所有试验的全球年平均辐射强迫值(表2)。从表中不难看出,与干粒子的强迫相比,湿硫酸盐粒子的辐射强迫均有不同程度的减小。最大减小值为6%左右(F97总硫酸盐),最小为1%左右(C97总硫

酸盐+烟尘)。

这里必须要说明的是,这里计算的结果与以往的研究结果也有所不同。在最早用箱室模式的简单估算中,Charlson等^[25]认为,随相对湿度的增加,粒子的尺度将会增加,而大粒子可散射更多的太阳辐射,从而在用简单箱室模式时将相对湿度对辐射强

迫的影响因子视为干粒子的 1.7 倍。但由于仅简单考虑了单次散射反照率和不对称因子的影响, 从而放大了相对湿度对气溶胶辐射强迫的影响作用。后来, Haywood 等^[11] 用哈德莱中心 GCM 的模拟得到的湿粒子强迫约为干粒子的 1.6 倍。他们认为, 随相对湿度的增加, 除紫外波段外, 硫酸盐粒子的质量

消光效率总体来说均有所增加, 不对称因子则基本是增加的趋势。Myhre 等^[8] 计算的相对湿度对硫酸盐辐射特性的影响与本文的结果完全一致。但他们的敏感性试验表明, 上述湿度影响因子减小到仅为干粒子的 1.2 倍。并且认为, 随相对湿度的增加, 气溶胶的辐射强迫将有“可能”增加。

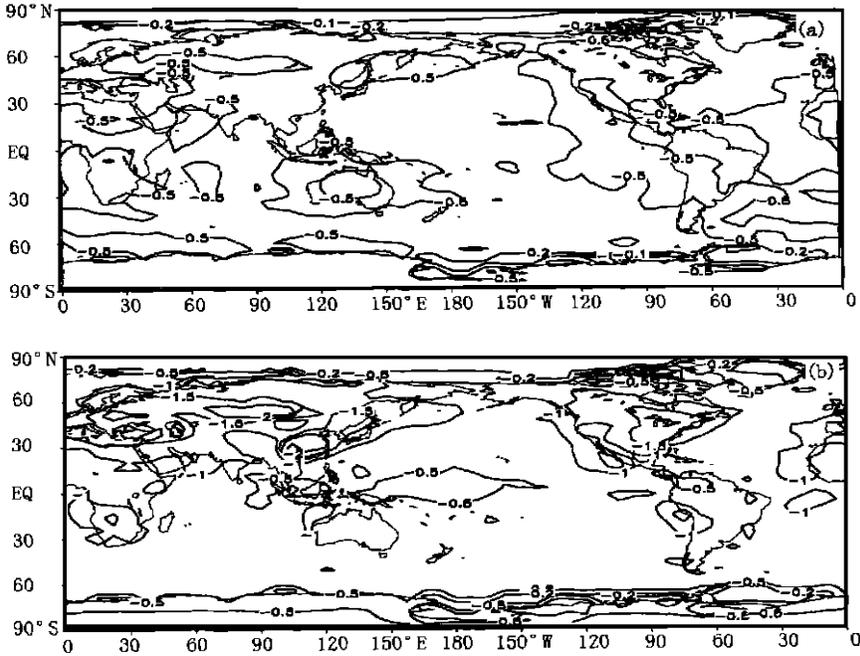


图 4 F97 年平均的辐射强迫 (W/m^2)

(a. 自然硫酸盐, b. 总硫酸盐)

在本试验计算的相对湿度对气溶胶辐射特性的影响中(见图 1), 随着相对湿度的增加, 虽然在大多数波段, 质量消光效率因子有所增加(这有可能使强迫增加)。但在太阳能量集中的短波波段, 粒子的质量消光效率因子有所减小, 即光学厚度将有可能减小; 同时, 不对称因子在整个波段均增大, 即粒子的后向散射能力减弱。这样, 在太阳短波波段单次散射反照率基本保持不变时, 其导致的辐射强迫将有可能减小。在本文的估算中, 全球平均强迫就是存在这种减小的趋势。Haywood 等^[11] 认为, 在相对湿度增加的前提下, 比起增加的质量消光效率因子来说, 增加的不对称因子的影响要小得多。但是, 作为气溶胶 3 个基本辐射特性之一, 不对称因子在气溶胶的辐射强迫计算中占据着同样重要的位置。即便消光效率因子增大, 不对称因子的增加也会导致强迫的减小。单气柱模式的敏感性试验也表明, 尽管

质量消光效率因子有所增加, 但还不足以掩盖不对称因子增加后所导致的影响。

当然, 相对湿度对气溶胶辐射强迫的影响还存在着较大的不确定性, 目前这样的工作也正处在探讨阶段。但在用 GCM 做这样的工作时, 由于受计算时间限制, 不可能将足够精确的辐射特性完全耦合到模式中, 因而计算结果之间存在一些偏差是难免的。另外, 本文并未考虑气溶胶粒子作为 CCN 的情况, 也未考虑其对大气中水汽和云的影响, 因此也会对模拟结果产生一些影响。而充分考虑气溶胶与云的相互作用(间接效应)是目前正在研究的课题。

5 结果和讨论

本文的模式计算结果与以往的研究结果有一些明显的不同, 即考虑相对湿度的影响后全球平均辐射强迫有所减小。在计算的相对湿度对气溶胶辐射

特性的影响中,随着相对湿度的增加,虽然在大部分波段粒子的质量消光效率因子有一些增加,但在短波波段,粒子的质量消光效率有所减小;单次散射反照率的变化在短波波段并不明显;同时,不对称因子又有所增大,即粒子的后向散射能力减小。这样,其导致的整体效应是辐射强迫将减小。这里还应指出的是,与气溶胶的其他两个因子相比,不对称因子在气溶胶的辐射强迫计算中也起着同等重要的作用。

模拟试验表明,当不考虑气溶胶粒子与云水的相互作用时,吸湿性粒子的辐射强迫对相对湿度的影响并不十分敏感。与其干粒子的辐射强迫相比,其最大减小也仅为6%左右。因此从某种程度上可以说,箱室模式夸大了相对湿度对吸湿性气溶胶粒子辐射强迫的影响。

另外的一些计算也曾显示,当云的光学厚度远大于气溶胶的光学厚度时,气溶胶的辐射强迫较小,并且强迫对云和气溶胶相对高度并不敏感^[23, 26]。其他一些GCM的模拟还表明^[3, 9, 18],当云和气溶胶

共同存在于高的相对湿度条件之下时,由于云区产生的辐射强迫要比晴空区小得多,这样总辐射强迫将会减小,减小的幅度基本取决于云的光学厚度。当相对湿度达100%时,辐射强迫会减小50%。但相对湿度小于90%时,只减小5%~20%。减小最大的地区是相对湿度较高的云和气溶胶共同存在的地区。从我们的模拟结果来看,由于与海洋相比,大陆地区的云量相对较少,因此,海洋地区的变化相对明显一些也是合理的。

正如Haywood等^[12]所指出的,由于相对湿度的时空变化非常大,因此,用分辨率为几百甚至上千公里的GCM来模拟吸湿性气溶胶的辐射强迫还存在着一些问题。全球尺度上相对湿度和云的次网格尺度变化也是有待深入研究的课题。

致谢:LLNL的Dr Chuang和MPI的Dr Feichter为作者提供了全球硫酸盐等气溶胶的时空分布资料。在此谨表谢意。

参考文献

- Houghton J T, et al. IPCC 1995, Climate Change 1995: The Science of Climate Change New York. Cambridge: Cambridge University Press, New York, 1996. 572pp
- Charlson R J, Anderson T L, Rodhe H. Direct climate forcing by anthropogenic aerosols: quantifying the link between sulfate and radiation. *Contrib Atmos Phys*, 1999, 72: 79~ 94
- Haywood J M, Ramaswamy V. Global sensitivity studies of the direct radiative forcing due to anthropogenic sulfate and black carbon aerosols. *J Geophys Res*, 1998, 103: 6043~ 6058
- Penner J E, Chuang C C, Grant K. Climate forcing by carbonaceous and sulfate aerosol. *Climate Dyn*, 1998, 14: 839~ 851
- Grant K E, Chuang C C, Grossman A S, et al. Modeling the spectral optical properties of ammonium sulfate and biomass aerosols: Parameterization of relative humidity effects and model results. *Atmos Environ*, 1999, 33: 203~ 2620
- Chuang C C, Penner J E, Taylor K E, et al. An assessment of the radiative effects of anthropogenic sulfate. *J Geophys Res*, 1997, 102: 3761~ 3778
- Kiehl J T, Briegleb B P. The relative roles of sulfate aerosol and greenhouse gases in climate forcing. *Science*, 1993, 260: 311~ 314
- Myhre G, Strordal F, Restad K, et al. Estimates of the direct radiative forcing due to sulfate and soot aerosols. *Tellus*, 1998, 50B: 463~ 477
- Boucher O, Anderson T L. 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
- Nemesure S, Wagoner R, Schwartz S E. Direct short-wave forcing of climate by the anthropogenic sulfate aerosols: Sensitivity to particle size, composition, and relative humidity. *J Geophys Res*, 1995, 100: 26105~ 26116
- Haywood J M, Stouffer R, Wetherald R, et al. Transient response of a coupled model to estimated changes in greenhouse gas and sulfate concentration. *Geophys Res Lett*, 1997, 24: 1335~ 1338
- Haywood J M, Ramaswamy V, Donner L J. A limited-area model case study of the effects of sub-grid scale variations in relative humidity and cloud upon the direct radiative forcing of sulfate aerosol. *Geophys Res Lett*, 1997, 24: 143~ 146
- Ghan S J, Easter R C. Comments on "A limited-area model case study of the effects of sub-grid scale variations in relative humidity and cloud upon the direct radiative forcing of sulfate aerosol". *Geophys Res Lett*, 1998, 25(7): 1039~ 1040
- Feichter J, Lohmann U, Schult I. The atmospheric sulfur cycle in ECHAM-4 and its impact on the shortwave radiation. *Climate Dyn*, 1997, 13: 235~ 246
- 张立盛, 石广玉. 全球人为硫酸盐和烟尘气溶胶资料及其光学厚度的分布特征. *气候与环境研究*, 2000, 5(1): 67~ 74
- 吴国雄, 张学洪, 刘辉, 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

- 17 张立盛. 硫酸盐和烟尘气溶胶辐射强迫的模拟和估算:[学位论文]. 北京: 中国科学院大气物理研究所. 1999. 140pp
- 18 Charlson R J, Langner J, Rodhe H, et al. Perturbation of the northern hemisphere radiative balance by backscattering from anthropogenic sulfate aerosols. *Tellus*, 1991, 43AB: 152~ 163
- 19 Shaw M A, Rood M J. Measurement of the crystallization humidity of ambient aerosol particles. *Atmos Environ*, 1990, 24A(7): 1837~ 1841
- 20 Koepke P, Hess M, Schult I, et al. Global Aerosol Data Set(GADS). Max-Planck Institute for Meteorology, 1997, 243: 1~ 44
- 21 Liou K N. *Radiation and Cloud Processes in the Atmosphere: Theory, Observation and Modeling*. New York: Oxford University Press, 1992. 484pp
- 22 Wiscombe W J. Improved Mie scattering algorithms. *Appl Opt*, 1980, 19: 1505~ 1509
- 23 Haywood J M, Shine K P. Multi-spectral calculations of the direct radiative forcing of tropospheric sulfate and soot aerosols using a column model. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1997: 123: 1907~ 1930
- 24 张立盛, 石广玉. 硫酸盐和烟尘气溶胶辐射特性及辐射强迫的模拟估算. *大气科学*, 2001, 25(3): 231~ 242
- 25 Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, et al. Climate forcing by anthropogenic aerosols. *Science*, 1992, 255: 423~ 430
- 26 Liao H, Seinfeld J H. Effect of clouds on direct radiative forcing of climate. *J Geophys Res*, 1998, 103: 3781~ 3788

THE IMPACT OF RELATIVE HUMIDITY ON THE RADIATIVE PROPERTY AND RADIATIVE FORCING OF SULFATE AEROSOL

Zhang Lisheng Shi Guangyu

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

Abstract

With the complex refractive index data of sulfate and soot aerosols, the radiative property of the aerosol under 8 different relative humidity conditions was calculated in this paper. By using the concentration distribution (from two CTM models) and LASG GOALS/AGCM, the radiative forcing due to hygroscopic sulfate aerosol was simulated. The results showed that: (1) with the increase of relative humidity, the mass extinction efficiency factor decreased in the short wave spectrum; single scattering albedo kept unchanged except for small increase in long wave spectrum, and asymmetry factor increased in whole spectrum; (2) larger differences occurred in radiative forcing simulated by using two CTMs data, and the global mean forcing simulated were -0.268 and -0.816 W/m^2 , respectively; and (3) when the impact of relative humidity on radiative property was taken into account, the distribution patterns of radiative forcing simulated were very similar to that of dry sulfate property, but the forcing value decreased by 6%.

Key words: Relative humidity, Radiative property, Radiative forcing.