

不同混合方案对气溶胶辐射特性的影响

宗鹏程^{1,2}, 缪启龙¹, 魏晓奕²

1. 南京信息工程大学应用气象学院, 江苏 南京 210044

2. 江苏省气候中心, 江苏 南京 210008

摘要: 利用体积权重平均, Maxwell - Garnett 和 Bruggeman 理论, 分别处理半径为 $0.5 \mu\text{m}$ 75% H_2SO_4 气溶胶和黑碳气溶胶 (BC), 以及硫酸盐气溶胶与黑碳气溶胶内混合的情况, 求出其复折射指数. 利用 Mie 理论计算内混合单个气溶胶粒子在 $0.55 \mu\text{m}$ 波长处的辐射特性参量, 其目的在于比较分析 3 种不同混合方案处理的同一混合情况下内混合单个气溶胶粒子辐射特性的差别. 结果表明: 辐射特性的总体变化趋势大致相同, 但采用不同的混合方案处理相同的内混合情况时, 其结果在黑碳混合比为 10% ~ 30% 时差异较大.

关键词: 大气气溶胶; 内混合; 复折射指数

中图分类号: X513 文献标志码: A 文章编号: 1001 - 6929(2010)05 - 0627 - 07

Effect of Different Mixing Scenarios on Aerosol Radiative Properties

ZONG Peng-cheng^{1,2}, MIAO Qi-long¹, WEI Xiao-yi²

1. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

2. Jiangsu Climate Center, Nanjing 210008, China

Abstract: This paper used volume weight average, Maxwell-Garnett and Bruggeman mixing scenarios to analyze internal mixing of black carbon and sulfate or vitriol (75%), computed the effective refractive indices, and then computed the radiative properties of three mixing scenarios at the wavelength of $0.55 \mu\text{m}$ through Mie Theory. This paper aimed at comparing the differences of radiative properties of the three different mixing scenarios when studying the same situation of internal mixing. This study showed that the overall trends were similar for all scenarios, but when using the different mixing scenarios to simulate the internal mixing of the same state, the results varied; the maximum difference occurred when the content of black carbon was 10% - 30%.

Key words: aerosol; internal mixing; refractive index

气溶胶在大气科学和环境科学领域受到日益广泛的关注, 特别是在气候变化研究方面, 气溶胶的辐射特性被认为是十分重要的关键因子. 太阳辐射是地气系统的能量来源, 气溶胶通过对太阳辐射的吸收和散射直接影响天气和气候. 为此需要了解实际大气气溶胶粒子的光学特性.

大气中的气溶胶由许多化学物质组成, 不同排放源排放出不同化学组成的气溶胶. 最主要的气溶胶人为源包括矿物(如煤)燃料燃烧过程, 其在我国北方采暖期占总气溶胶粒子的 67%^[1]. 由此而产生的气溶胶主要成分是硫酸盐和黑碳, 这 2 种成分具有相反的辐射效应. 硫酸盐气溶胶对太阳辐射主

要是反射作用; 黑碳气溶胶虽然浓度相对较低, 但其对太阳辐射有吸收作用^[2]. 而大气气溶胶中还存在吸湿性很强的海盐颗粒以及吸湿性很弱的矿物颗粒和沙尘等. 由于气溶胶的复折射指数是由其化学特性决定的, 具有相同化学组成的气溶胶也有不同的复折射指数, 从而也具有不同的辐射特性. 各种成分的气溶胶粒子由于大气湍流、布朗运动、风切变等因素使之必然发生混合^[1-3], 各粒子相互碰并、融合甚至发生反应. 这种由单化学组成的粒子相互混合后变为多化学组成粒子的混合方案即为内混合. 气溶胶的混合状态对其光学特性有重要影响, 该研究对于利用气溶胶光学散射特性鉴别雾霾的科学研究以及卫星反演均具有重要意义.

人类燃烧农业废弃物等活动向大气中排放大量的碳质气溶胶. 碳质气溶胶又大致分为 2 类: ①元素碳, 即黑碳, 有时也称为煤烟; ②有机碳. 这 2 类碳质气溶胶在光学性质方面具有一个明显的区别,

收稿日期: 2010 - 01 - 11 修订日期: 2010 - 02 - 23

基金项目: 省部共建气象灾害教育部重点实验室资金资助项目 (050103)

作者简介: 宗鹏程 (1982 -), 男, 江苏如皋人, 助理工程师, pc_zong@126.com.

即黑碳对太阳辐射有比较强烈的吸收作用,而有机碳对太阳辐射的影响则主要是散射作用. 黑碳气溶胶是大气气溶胶的重要组成部分,它在大气物理、大气化学、大气光学过程中都具有重要作用,1997年12月的《京都协议书》中未加入有关黑碳气溶胶的内容,这也是被美国作为拒绝参加签定《京都协议书》的原因之一. 由此可见,对于黑碳气溶胶的研究十分重要^[4-6].

人类活动、火山爆发等向大气中不断排放S元素,S经过氧化后以硫氧化物 SO_x 的形式存在于大气中. 在平流层下部,由 SO_x 氧化生成的 H_2SO_4 和 H_2O 可形成 H_2SO_4 液滴. 硫酸与大气中的盐类发生反应可以生成强吸湿性的硫酸盐(如硫酸氨、硫酸钠等),同时通过气-粒转化也可以生成积聚模式的硫酸盐.

硫酸盐气溶胶的辐射特性可以通过Mie散射计算得到. Mie散射理论是在假定粒子为球形的前提下,已知粒子的光学特性及其谱分布,从而计算粒子的辐射特性. 目前在实际应用过程中,一般把硫酸盐气溶胶粒子当作球形来处理;而气溶胶的复折射指数则主要取决于其化学成分和波长. 复折射指数表示为 $m = m_1 - im_2$,其中 m_1 和 m_2 分别是复折射指数的实部和虚部,虚部与吸收对应,实部与散射对应,当虚部越大时,吸收越强. 由硫酸盐气溶胶粒子的复折射指数^[7]可见,在波长小于 $2\ \mu\text{m}$ 时,虚部很小;而当波长超过 $2\ \mu\text{m}$ 时,虚部迅速增加;当波长大于 $3\ \mu\text{m}$ 时,虚部的增加已超过2个数量级. 这说明,在短波部分硫酸盐气溶胶粒子的散射作用相对较强,而吸收较弱;在长波部分,其吸收作用相对较强.

笔者通过3种内混合方案(分别为体积权重平均,Maxwell-Garnett和Bruggeman理论),研究黑碳气溶胶分别与硫酸盐气溶胶和75% H_2SO_4 气溶胶内混合后所生成的气溶胶或等效气溶胶粒子的辐射特性,并作比较.

1 气溶胶内混合模型

1.1 内混合

目前处理气溶胶间内混合的模型主要有4种:
①分层同心球结构. 在粒子的输送过程中水溶性气溶胶可以碰并或凝聚到不溶性气溶胶(如沙尘和黑碳)的表面. 观测与模拟表明, SO_2 气体在沙尘粒子表面上的非均相氧化反应是形成硫酸盐的一条重要途径,由这条途径提供的硫酸盐占其总浓度的

20%~50%^[8-10]. 另外,电子显微镜观测表明,硫气溶胶与沙尘混合物呈现出分层结构^[11],并且 H_2SO_4 气溶胶与氯化钡气溶胶内混合后也可产生同心球结构,并可利用氯化钡薄膜法来检测硫酸盐气溶胶的存在,即气溶胶之间存在内混合^[12]. 鉴于内混合作用的复杂性,人们难以考察其导致的气溶胶光学性质与辐射性质的变化. 为简单起见,气溶胶之间的内混合也可以假定为一种分层同心球的结构,特别是硫酸盐与不溶性气溶胶之间的内混合. ②镶嵌结构. 2种粒子相互混合,其中较小的粒子镶嵌于较大的粒子之中,并被其完全包裹. 著名的Bruggeman和Maxwell-Garnett理论研究的正是这种情况. Maxwell-Garnett理论主要研究的是不溶性颗粒点缀于液态气溶胶之中,与此不同的是,Bruggeman理论主要研究的是干的小气溶胶颗粒点缀于不溶性气溶胶中的情况^[1]. ③Shell-Core结构. 在自然界中气溶胶可以通过气-粒转化形成,在气-粒转化过程中某种成分可凝集在气溶胶粒子周围,所以这种成分中时常包含着更小的气溶胶粒子. 硫酸盐气溶胶与黑碳气溶胶间就常有这种情况,此时硫酸盐为外壳,黑碳为内核^[1]. ④均匀混合结构. 不同化学组成的气溶胶凝聚为一个颗粒后,各种化学成分在新生成的颗粒内均匀混合. 这种情况是一种理想状态,在实际中是不可能的^[13-22]. 对于这种状态的处理可以采用体积权重平均的方法^[1]. 笔者选取Maxwell-Garnett和Bruggeman理论,研究混合后半径为 $0.5\ \mu\text{m}$ 75% H_2SO_4 气溶胶和黑碳气溶胶以及硫酸盐气溶胶与黑碳气溶胶内混合的情况,并就其复折射指数及辐射特性参量与体积权重平均的方案进行对比和分析.

1.2 混合物质的选定

表1为黑碳、硫酸盐和75% H_2SO_4 气溶胶在波长为 $0.55\ \mu\text{m}$ 处的复折射指数.

表1 黑碳、硫酸盐和75% H_2SO_4 气溶胶在波长为 $0.55\ \mu\text{m}$ 处的复折射指数^[13]

Table 1 The refractive index of BC, sulfate, and vitriol at $0.55\ \mu\text{m}$

材料	m_1	m_2
黑碳(BC)	1.75	-0.44
硫酸盐	1.53	-0.006
75% H_2SO_4	1.43	-1.0×10^{-8}

从光学性质上看,硫酸盐气溶胶与75% H_2SO_4 气溶胶对光的影响主要体现在散射上,黑碳气溶胶

对光的影响主要表现在吸收上. 对于波长为 $0.55 \mu\text{m}$ (即尺度参数为 5.71) $75\% \text{H}_2\text{SO}_4$ 气溶胶与黑碳气溶胶相比,其复折射指数虚部小 7 个数量级;硫酸盐气溶胶与黑碳气溶胶相比,也小 2 个数量级. 可见,对于黑碳气溶胶大部分光能被吸收用于散射的很少,而对于硫酸盐气溶胶或 $75\% \text{H}_2\text{SO}_4$ 气溶胶则大部分被散射.

从物理相态上看:①黑碳气溶胶为不溶性固体颗粒物,可悬浮在溶液中或镶嵌于固态气溶胶中. ② $75\% \text{H}_2\text{SO}_4$ 气溶胶(文中均指 $75\% \text{H}_2\text{SO}_4$ 液滴气溶胶)为液态气溶胶,若是其中点缀着黑碳气溶胶,则与 Maxwell - Garnett 理论所研究的情况相似. ③硫酸盐气溶胶为强吸湿性气溶胶. 在其吸收水汽成为溶液前,为干气溶胶颗粒;若其中点缀有黑碳气溶胶,则与 Bruggeman 理论所研究的情况相似;当其吸湿成为硫酸盐溶液(复折射指数与 $75\% \text{H}_2\text{SO}_4$ 相似)后,则与情况①相似.

2 内混合的计算、分析方法

选用体积权重平均, Maxwell - Garnett 和 Bruggeman 理论 3 种内混合方案,分别处理:①黑碳气溶胶与硫酸盐气溶胶;②黑碳气溶胶与 $75\% \text{H}_2\text{SO}_4$ 气溶胶. 研究这 2 种情况在半径为 $0.5 \mu\text{m}$, 波长为 $0.55 \mu\text{m}$ 处的内混合. 并且选取黑碳混合比 (f_{BC} , 体积比) 为 $0\% \sim 100\%$, 以 1% 为间隔, 共 101 个点进行比较分析. 笔者采用下角标 1, 2 和 BC 分别表示硫酸盐, $75\% \text{H}_2\text{SO}_4$ 和黑碳;下角标 V, MG 和 B 分别表示采用体积权重平均, Maxwell - Garnett 和 Bruggeman 理论所计算得到的物理量.

2.1 体积权重平均

假设所有物质混合均匀,且所有粒子均为球形,采用式(1)计算内混合产生粒子的复折射指数.

$$m_{\text{V}} = m_j(1 - f_{\text{BC}}) + m_{\text{BC}}f_{\text{BC}} \quad (1)$$

$(j = 1, 2)$

通过式(1)计算得到复折射指数后,利用 Mie 理论得到 Q_{a} , Q_{s} , Q_{e} 和 g , 即吸收效率、散射效率、消光效率和不对称因子.

2.2 Maxwell - Garnett 理论

假设黑碳气溶胶与硫酸盐气溶胶或 $75\% \text{H}_2\text{SO}_4$ 气溶胶的内混合方式为镶嵌结构,且所有粒子均为球形,采用式(2)计算内混合产生粒子的复介电常数(ε)^[2].

$$\varepsilon_{\text{MG}} = \varepsilon_j \left[\frac{\varepsilon_{\text{BC}} + 2\varepsilon_j + 2f_{\text{BC}}(\varepsilon_{\text{BC}} - \varepsilon_j)}{\varepsilon_{\text{BC}} + 2\varepsilon_j - f_{\text{BC}}(\varepsilon_{\text{BC}} - \varepsilon_j)} \right] \quad (2)$$

$(j = 1, 2)$

对复介电常数进行开方,便可得到复折射指数. 之后,利用 Mie 理论作与体积权重平均相同的处理.

2.3 Bruggeman 理论

假设黑碳气溶胶与硫酸盐气溶胶或 $75\% \text{H}_2\text{SO}_4$ 气溶胶的内混合方式为镶嵌结构,且所有粒子均为球形,采用式(3)求解内混合产生粒子的复介电常数^[2].

$$f_{\text{BC}} \left(\frac{\varepsilon_{\text{BC}} - \varepsilon_{\text{B}}}{\varepsilon_{\text{BC}} + 2\varepsilon_{\text{B}}} \right) + (1 - f_{\text{BC}}) \left(\frac{\varepsilon_j - \varepsilon_{\text{B}}}{\varepsilon_j + 2\varepsilon_{\text{B}}} \right) = 0 \quad (3)$$

$(j = 1, 2)$

将式(3)转化为式(4)后,采用复数迭代法,迭代 50 次后对于实部和虚部均可达到 10^{-10} 的精度.

$$A = -(1 - f_{\text{BC}})f_{\text{BC}}$$

$$\varepsilon_{\text{B}} = \sqrt{\frac{(\varepsilon_j - 2\varepsilon_{\text{BC}} - A\varepsilon_{\text{BC}} + 2A\varepsilon_j)\varepsilon_{\text{B}} - (1 - A)\varepsilon_j\varepsilon_{\text{BC}}}{2(A - 1)}} \quad (4)$$

$(j = 1, 2)$

将求得的复介电常数开方,便可得到内混合产生的粒子的复折射指数. 再将求得的复折射指数代入式(3),得到采用该迭代法所求解出的复折射指数对于式(3)的满足程度.

采用 Bruggeman 理论处理 $75\% \text{H}_2\text{SO}_4$ 气溶胶与黑碳气溶胶内混合(处理硫酸盐气溶胶与黑碳混合后所得回带结果与其相似),用式(4)迭代法求解新生成粒子复折射指数的结果,代回式(3),所得的回带结果[黑碳混合比取 $0\% \sim 100\%$, 以 4% 为间隔,共 26 组数据(表略)]表明,不论对于复折射指数实部还是虚部,该种迭代法所得到的结果与式(3)的差别都在 10^{-2} 数量级以内,结果比较合适. 其中,对于某种物质含量较高而另一种物质含量很少的情况结果相差更小,在这 2 种物质含量相当的情况下,误差再减小 1~9 个数量级.

3 结果分析与比较

3.1 黑碳气溶胶与硫酸盐气溶胶内混合对辐射特性的影响

由图 1 可以看到,采用 3 种混合方案处理的硫酸盐气溶胶与黑碳气溶胶内混合,其复折射指数随黑碳混合比的变化规律极为相似. 不论实部(m_1)还是虚部(m_2),都在硫酸盐气溶胶与黑碳气溶胶复折射指数间呈近似线性变化. 图 1(c)和(d)对采用 Maxwell - Garnett 和 Bruggeman 理论处理结果与采用体积权重平均的结果进行了相对偏差对比. 结果表明:①对于 m_1 而言,Bruggeman 理论处理结果比体积权重平均处理结果普遍偏高,在其中一种物质

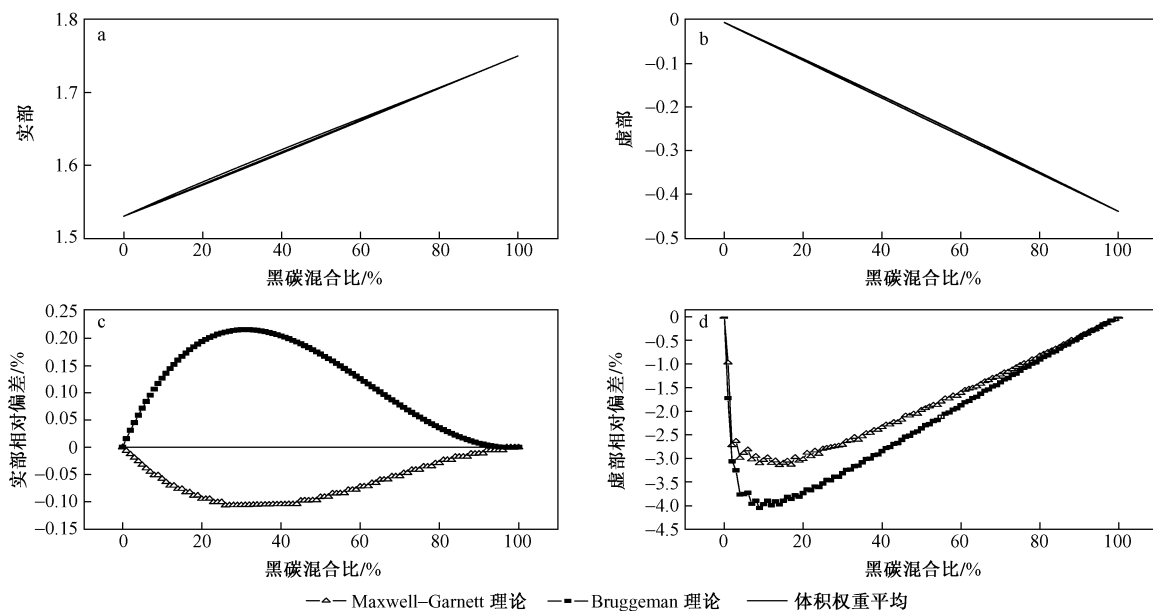


图1 硫酸盐气溶胶与黑碳气溶胶内混合时复折射指数随黑碳混合比的变化

Fig. 1 The relation of refractive index with Volume Fraction of BC (internal mixing of BC and sulfate)

含量较少时结果比较相似,而当2种物质含量相当时结果相差较大,最大值出现在 $f_{BC} = 30\%$ 处,Bruggeman理论处理结果比体积权重平均处理结果高0.2%。而Maxwell-Garnett理论处理结果则普遍比体积权重平均的结果偏低,同样在两端差别小而中间差别大,最大值出现在 $f_{BC} = 35\%$ 左右,其比体积权重平均低约0.1%。②对于 m_2 而言,Bruggeman和Maxwell-Garnett理论处理结果均比体积权重平均处理结果普遍偏低,当黑碳含量较多时相对偏差较小;而当黑碳含量少时,相对偏差随黑碳含量的增加而迅速增大,且在 $f_{BC} = 10\%$ 左右处增至最大,Bruggeman理论的相对偏差达到-4%,Maxwell-Garnett理论的相对偏差达到-3%。

利用Mie理论对于辐射特性的计算结果(图略)表明:①吸收效率(Q_a)。3种混合方案处理的结果几乎一致。②散射效率(Q_s)。3种混合方案的计算结果也几乎一致。只是变化趋势与 Q_a 相反。③消光效率(Q_e)。Maxwell-Garnett理论与体积权重平均结果基本一致,但Bruggeman理论则有略微偏小,总体变化趋势与散射效率相似。④不对称因子(g)。3种混合方案处理的结果的总体变化趋势一致。

图2分别给出了 Q_a, Q_s, Q_e 和 g 采用Maxwell-Garnett和Bruggeman理论处理与采用体积权重平均处理结果的相对偏差。结果表明:①吸收效率。图2(a)表明,当 f_{BC} 小于45%时,Maxwell-Garnett和

Bruggeman理论处理结果均比体积权重平均处理结果小,偏差最大值出现在 $f_{BC} = 5\%$ 左右,但最大偏差也仅为-2.5%。对于 f_{BC} 大于45%的情况,Maxwell-Garnett和Bruggeman理论与体积权重平均相比略为偏高,但偏差极小,为 10^{-3} 数量级,可以忽略。②散射效率。图2(b)表明,散射效率与吸收效率相反,当黑碳含量少时相对偏差为正,而当黑碳含量高时相对偏差为负。对于Maxwell-Garnett理论,其正最大值出现在 $f_{BC} = 15\%$ 左右,相对偏差为1.3%;其负最大值出现在 $f_{BC} = 50\%$ 左右,相对偏差为-0.2%。对于Bruggeman理论,其正最大值出现在 $f_{BC} = 8\%$ 左右,相对偏差为0.5%;其负最大值出现在 $f_{BC} = 35\%$ 左右,相对偏差为-0.4%。③消光效率。总的来说Maxwell-Garnett理论为正相对偏差,最大值出现在 $f_{BC} = 15\%$ 左右,相对偏差为0.25%;Bruggeman理论为负相对偏差,最大值出现在 $f_{BC} = 19\%$ 左右,相对偏差为-0.55%。④不对称因子。总体上Maxwell-Garnett和Bruggeman理论均为负相对偏差,最大值均出现在 $f_{BC} = 15\%$ 左右,相对偏差分别为-0.5%和-1.05%。

3.2 黑碳气溶胶与75% H_2SO_4 气溶胶内混合对辐射特性的影响

由图3可见,黑碳气溶胶与75% H_2SO_4 气溶胶内混合时复折射指数的变化情况,与硫酸盐气溶胶和黑碳气溶胶内混合时相似,只是其变化范围由原来的从硫酸盐气溶胶近线性变化至黑碳气溶胶,改

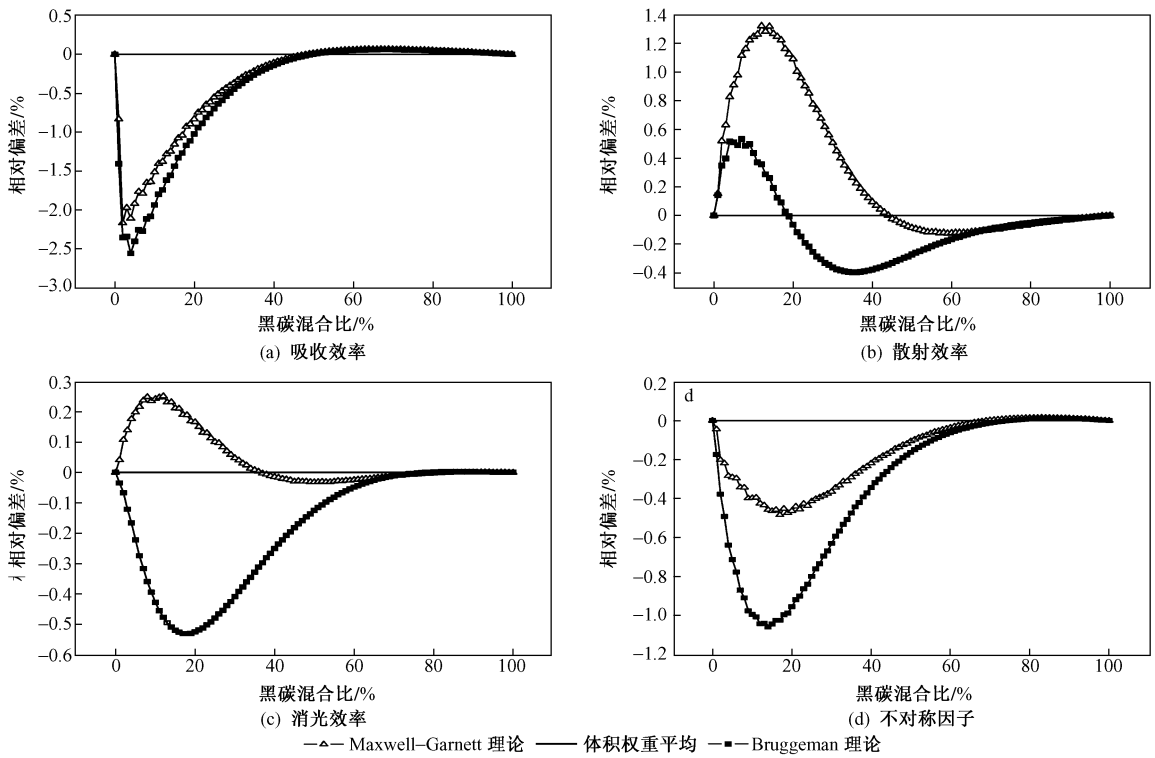


图 2 硫酸盐气溶胶与黑碳气溶胶内混合时 Maxwell - Garnett 和 Bruggeman 理论与体积权重平均相比的相对偏差

Fig. 2 The difference between volume-average and Maxwell-Garnett, and difference between volume-average and Bruggeman (internal mixing of BC and sulfate)

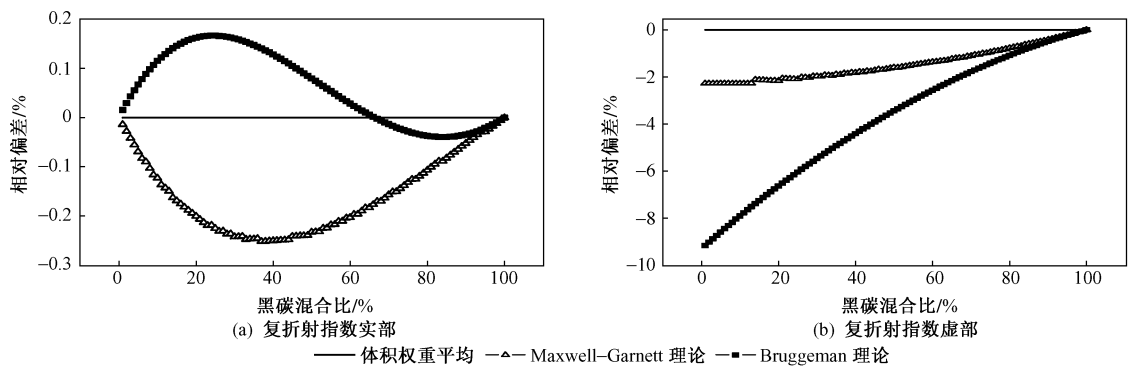


图 3 75% H₂SO₄ 气溶胶与黑碳气溶胶内混合时 Maxwell - Garnett 和 Bruggeman 理论与体积权重平均相比的相对偏差

Fig. 3 The difference between volume-average and Maxwell-Garnett, and difference between volume-average and Bruggeman (internal mixing of BC and vitriol)

为由 75% H₂SO₄ 气溶胶的复折射指数近线性变化至黑碳气溶胶的复折射指数. 但就相对偏差而言, 其实部偏差不大, 最大不超过 ±0.2%. 虚部的偏差却不可忽略, 当黑碳含量较小时 Maxwell - Garnett 理论的相对偏差可达 -2%; 而 Bruggeman 理论的相对偏差则更大, 可达 -10%. 之后它们都随黑碳气溶胶含量的增加而逐渐减小至零. 可见, 在黑碳含

量很少时, 采用体积权重平均处理可能过高估了气溶胶对光的吸收作用.

利用 Mie 理论计算 75% H₂SO₄ 气溶胶与黑碳气溶胶内混合产生的气溶胶粒子的辐射特性, 其 4 个辐射特性参量的总体变化趋势与硫酸盐气溶胶和黑碳气溶胶内混合时的情况相似. 只是其变化范围由原来的从硫酸盐气溶胶变化至黑碳气溶胶的复折

射指数,改为由 75% H_2SO_4 气溶胶变化至黑碳气溶胶的复折射指数(图略).

图 4 给出 4 个辐射特性参量采用 Maxwell - Garnett 和 Bruggeman 理论与体积权重平均相比的相对偏差. 图 4 表明:①吸收效率[见图 4(a)]. 当黑碳含量较小时,相对偏差较大,Maxwell - Garnett 和 Bruggeman 理论分别可达 -2% 和 -9%. 该结果与图 3(b)中复折射指数虚部的相对偏差相对应,偏差均较为显著,都可达 10% 左右. 这又印证了在黑碳含量很少时采用体积权重平均处理很可能过分高估了气溶胶对光的吸收. 这是因为,吸收效率因子主要取决于复折射指数虚部,因此吸收效率因子相对偏差的变化曲线与复折射指数虚部的变化曲线极为相似. ②散射效率[见图 4(b)]. 相对偏差基本上为正值,其变化趋势与硫酸盐气溶胶和黑碳气溶胶内混合时的情况相似,只是最大值出现的位置和数值有所不同. 另外,与硫酸盐气溶胶和黑碳气溶胶

内混合不同的是,该内混合情况中 Bruggeman 理论的相对偏差最大值大于 Maxwell - Garnett 理论. ③消光效率[见图 4(c)]. 在消光效率上,硫酸盐气溶胶与黑碳气溶胶内混合和 75% H_2SO_4 气溶胶与黑碳气溶胶内混合的相对偏差有很大不同. 对于前一种情况,在黑碳含量较少时,Maxwell - Garnett 理论基本为正,Bruggeman 理论基本为负. 对于后一种混合情况,在黑碳含量较少时,Maxwell - Garnett 和 Bruggeman 理论都基本为正,只是 Maxwell - Garnett 理论的最大值大于 Bruggeman 理论;当黑碳含量较大时全都趋向于零. ④不对称因子[见图 4(d)]. Bruggeman 理论的相对偏差与硫酸盐气溶胶和黑碳气溶胶内混合时的情况基本一致. 而 Maxwell - Garnett 理论理论的相对偏差则要比硫酸盐气溶胶与黑碳气溶胶内混合时的情况小得多,其基本在零左右振荡.

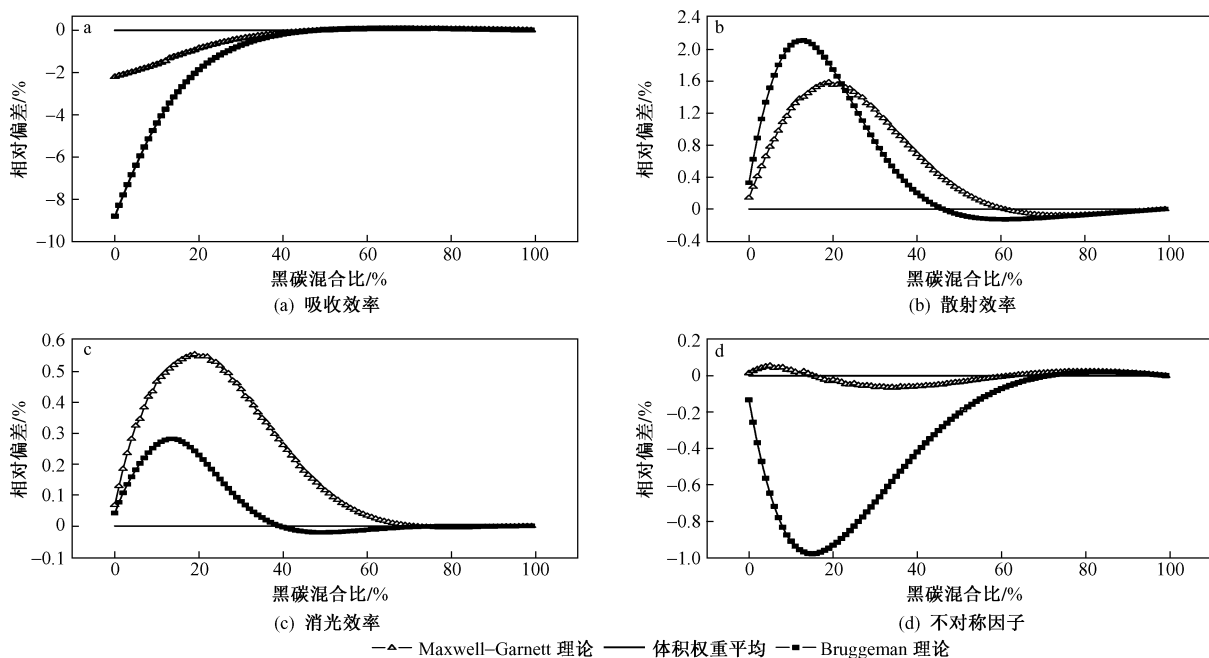


图 4 硫酸盐气溶胶与黑碳气溶胶内混合时辐射特性随黑碳混合比的变化

Fig. 4 The relation of radiative properties with Volume Fraction of BC (internal mixing of BC and sulfate)

4 结论

a. 对于内混合,在黑碳混合比低于 30% 时,各混合方案间差别大,最大可达 10%;当黑碳混合比高于 50% 时,各内混合方案处理结果相差很小,相对偏差为 10^{-3} 数量级.

b. 实际大气中的气溶胶由多种化学成分组成,其间必然发生混合. 对于不同的混合情况应选取不同的混合方案及气溶胶内混合模型,模拟气溶胶内

混合对其光学及辐射特性的影响. 如果具体问题不具体分析,所造成的误差较大,最大相对偏差可达 10%.

c. 除了考虑混合模型外还应该考虑到相对湿度的影响. 如硫酸盐气溶胶在相对湿度为 70% 的情况下即可发生潮解,这与 75% H_2SO_4 气溶胶和黑碳气溶胶内混合的情况相似,因此不能继续使用原来的模型,而要改用镶嵌结构中的 Maxwell - Garnett

理论处理.

d. 对于实际大气中多个气溶胶粒子组成的系统. 在用内混合处理时,还应该考虑到由于粒子发生混合,导致谱分布和数浓度发生的变化对于辐射特性的影响. 该文没有考虑到这些影响,对于实际情况的模拟还存在差异.

e. 在实际大气中气溶胶不仅仅只是2种化学成分发生混合,可能是多种化学成分的混合,并且内混合后各化学成分间还可能发生反应. 因此,要找到一个合适的模型完全模拟气溶胶内外混合的情况是十分困难的,需要作更多的观测和试验研究.

参考文献(References):

- [1] 秦瑜,赵春生. 大气化学基础[M]. 北京:气象出版社,2003:1-200.
- [2] GLEN L, PETR C, ULRIKE L. A study of internal and external mixing scenarios and its effect on aerosol optical properties and direct radiative forcing[J]. *J Geophys Res*, 2002, 107: D10, doi: 10.1029/2001JD000973.
- [3] 卢正永. 气溶胶科学引论[M]. 北京:原子能出版社,2000:65-73.
- [4] 张瑛,高庆先. 硫酸盐和碳黑气溶胶辐射效应的研究[J]. *应用气象学报*, 1997, 8(1): 87-91.
- [5] CHARLSON R J, PILAT M J. Climate: the influence of aerosols[J]. *J Appl Meteor*, 1969, 8: 1001-1002.
- [6] 白建辉,王庚辰. 黑碳气溶胶研究新进展[J]. *科学技术与工程*, 2005, 5(8): 585-592.
- [7] 张立盛. 硫酸盐和烟尘气溶胶辐射强迫的数值模拟[D]. 北京:中国科学院大气物理研究所,1999.
- [8] 肖辉, CARMICHAEL G R, ZHANG Y. 东亚地区沙尘气溶胶影响硫酸盐形成的模式评估[J]. *大气科学*, 1998, 22(3): 343-353.
- [9] IPCC. Radiative forcing of climate change [C]//Climate change 1994. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [10] GALLOWAY J N, LIKENS G E, HAWLEY M E. Acid deposition: natural versus anthropogenic sources[J]. *Sci*, 1984, 226: 829-831.
- [11] TROCHKINE D, IWASAKA Y, MATSUKI A, *et al.* Mineral aerosol particles collected in Dunhuang, China, and their comparison with chemically modified particles collected over Japan[J]. *J Geophys Res*, 2003, 108: D23, ACE10-1-10-10.
- [12] 张代洲,钱公望,秦瑜. 测单个气溶胶粒子的薄膜法[J]. *环境科学研究*, 1995, 8(6): 20-24.
- [13] 尹宏. 大气辐射学基础[M]. 北京:气象出版社,1993:92-96.
- [14] 杨军,李子华,黄世鸿. 相对湿度对大气气溶胶粒子短波辐射特性的影响[J]. *大气科学*, 1999, 23(3): 239-247.
- [15] HANEL G. The physical chemistry of atmospheric particles [C]//RUHNKE L H, DEEPAK A. Hygroscopic aerosols. Hampton, Virginia: A Deepak Publishing, 1984: 1-20.
- [16] TWITTY J T, WEINMAN J A. Radiation properties of carbonaceous aerosols[J]. *J Appl Meteor*, 1971, 10: 725-731.
- [17] IQBAL M. An introduction to solar radiation [M]. New York: Academic Press, 1983: 85-152.
- [18] 董真,黄世鸿,李子华. 相对湿度对大气气溶胶可见辐射吸收的影响[J]. *气象科学*, 2002, 20(4): 487-493.
- [19] 罗云峰,周秀骥,李维亮. 大气气溶胶辐射强迫及气候效应的研究现状[J]. *地球科学进展*, 1998, 13(6): 572-581.
- [20] 高丽洁,王体健,徐永福,等. 中国硫酸盐气溶胶及其辐射强迫的模拟[J]. *高原气象*, 2004, 23(5): 612-619.
- [21] CHARLSON R J, SCHWARTZ S E, HALES J M, *et al.* Climate forcing by anthropogenic aerosols[J]. *Sci*, 1992, 255: 423-430.
- [22] CHYLEK P, WONG J. Effect of absorbing aerosol on global radiation budget[J]. *Geophys Res Lett*, 1995, 22: 929-931.

(责任编辑:潘风云)