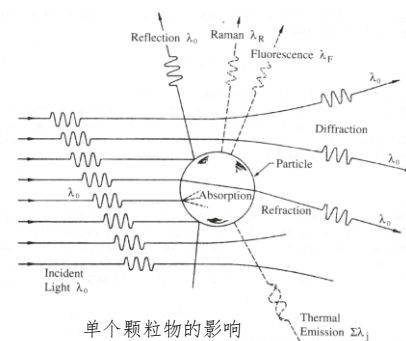


第七章 气溶胶光学特性及其天气气候效应



4.1 气溶胶光学特性

4.1.1 气溶胶光学厚度

4.1.1.1 AOD 的定义和计算

光学厚度 气溶胶光学厚度 (**AOD: Aerosol Optical Depth** 或 **AOT: Aerosol Optical Thickness**)
描述气溶胶通过**吸收****散射**等方式对**通过大气层的太阳光**衰减作用的量。

数学表达 其定义为介质的**消光系数**在**单位面积垂直方向上的积分** $\tau_A(\lambda) = \int_{z_1}^{z_2} \sigma_e(\lambda, z) dz$ $\frac{I}{I_0} = \exp \sigma n l$

单一颗粒 可以使用 Mie code 进行计算。输入参数包括：气溶胶谱分布、折射率、相对湿度

4.1.1.2 AOD 消光系数

影响因子 ① **粒径**: 使用**尺度因子**表征 $\alpha = \frac{\pi D_p}{\lambda} = \frac{\text{圆周}}{\text{入射光波长}}$

空气分子 $\alpha \ll 1$: 瑞利散射 $I_A = \frac{c}{\lambda^4}$ **气溶胶** $\alpha \sim 1$: 米散射(粒径与波长相近时, 散射效率最强)

② **折射率**: 实质是不同成分的气溶胶。 $m = n + ik$ **实部**: 散射效率 **虚部**: 吸收效率

例如: 黑炭 $n = 1.96, k = 0.66$ 水 $n = 1.33, k = 10^{-8}$ 硫酸 $n = 1.47, k = 0$

③ **湿度**: 黑炭质量消光系数起步大, 但基本不受 RH 影响; **海盐、硫酸盐**在 $RH > 70\%$ 时, 质量消光系数均**超过 10**。因为这些**气溶胶会吸湿增长**, 导致消光系数增大。

④ **混合状态**: 详见下方

混合状态 气溶胶消光系数依赖于气溶胶混合状态, 分为**外混**、**内混**
假设条件: 黑炭与硫酸铵的混合、所有颗粒直径 $0.5 \mu m$ 、相对湿度 50%、固定气溶胶质量浓度 $30 \mu g m^{-3}$ 、化学成分从纯黑炭至纯硫酸铵间变化、折射率以 $\lambda = 530 nm$ 为背景):
黑炭 $1.90 - 0.66i$ 硫酸铵 $1.53 - 0i$

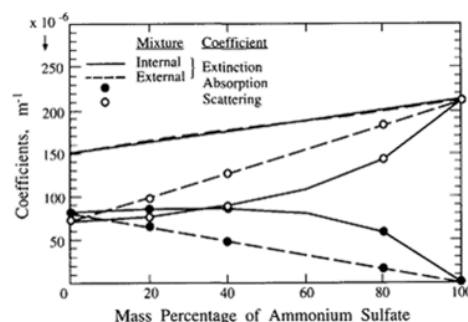
纵坐标: 消光系数 **实线**: 内混 **虚线**: 外混

① **单位质量消光系数**: **硫酸铵** > **黑炭**

② **散射消光系数**: **外混** 虚线空心圈 > **内混** 实线空心圈

③ **吸收消光系数**: **外混** (虚线实心圈) < **内混** (实线实心圈)

④ **总消光系数** (散射消光系数+吸收消光系数): **外混** (虚线) = **内混** (实线)

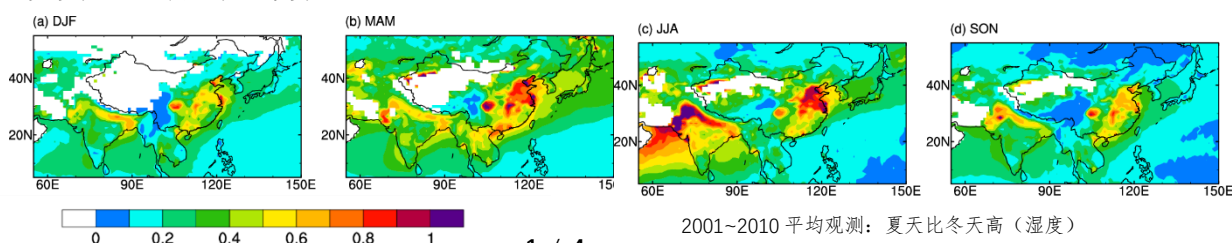


光学厚度 模式中利用**气溶胶质量浓度**计算整层气溶胶光学厚度 $AOD = \frac{[aerosol]}{V \times \rho \times A} \times b_{ext}$

[aerosol]为总气溶胶质量 A为格点面积 $V \times \rho$ 为单个气溶胶的质量 b_{ext} 为单个气溶胶消光系数

4.1.1.3 卫星观测与模式

MODIS 水平分辨率 **3km, 10km**, 可测量气溶胶光学厚度、气溶胶粗细模态、云粒相态、有效云滴半径、云光学厚度、云顶温度、高度。



地基观测 在地表架设多波段太阳光度计，可以得到不同波长的 AOD 情况。

4.1.2 单次散射反照率

定义 SSA 定义为**散射系数与消光系数之比**，是衡量气溶胶吸收强弱的重要光学参数：

$$SSA = \frac{k_{sc}}{k_{ex}} = \frac{k_{sc}}{k_{sc} + k_{ab}} \quad k_{sc} \text{ 为气溶胶散射系数, } k_{ab} \text{ 为气溶胶吸收系数}$$

取值范围 SSA 是无量纲数，取值在 0~1 之间。当气溶胶粒子无吸收时，SSA=1 当粒子为全吸收型时，SSA=0

影响因子 与 AOD 的大致相同。

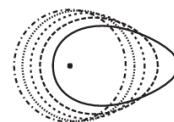
量级情况 在 0.7~0.9 之间，可能超出。

AAOD **吸收性光学厚度** Aerosol absorption optical depth $AAOD = AOD \times (1 - SSA)$
考虑光学厚度中由于吸收引起的那一部分，**计算结果不超过 0.1**，东部较大。

4.1.3 非对称因子

非对称因子 大量散射光子的 $\cos \theta$ 平均值，即 $g \equiv \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} p(\cos \theta) \cos \theta d\omega$ 由此可知， $-1 \leq g \leq 1$

- 情况讨论**
- ① $g > 0$: 光子倾向于散射至前半球，即**前向散射**占主导【除瑞利散射外大部分粒子】。
 - ② $g < 0$: 光子倾向于散射至后半球，即**后向散射**占主导。
 - ③ $g = 1$: 光子散射至与其初始传输方向**完全相同**的方向 ($\theta = 0^\circ$)。
 - ④ $g = -1$: 光子散射至与其初始传输方向**完全相反**的方向 ($\theta = 180^\circ$)。
 - ⑤ $g = 0$: 光子散射至前后半球的概率相等，如**各向同性散射**【瑞利散射】。



4.2 气溶胶辐射强迫

4.2.1 辐射强迫的定义

辐射强迫 Radiative forcing, 是由气候变化的自然或人为因素引起的大气能量通量变化，以 W/m^2 为单位。

正辐射强迫: 地球接收太阳辐射的能量多于它向太空释放辐射的能量，导致地球气候变暖。

负辐射强迫: 地球向太空辐出的能量多于它从太阳接收到的能量，从而**导致地表冷却**。行星与其环绕的恒星和宇宙空间达到辐射平衡状态时，称为**净零辐射强迫**，此时的行星表面温度称为行星平衡温度。

气溶胶效应 ① **直接辐射强迫**: 气溶胶影响**入射光的散射和吸收**

② **间接辐射强迫**: 气溶胶影响**云的形成及其反照率**(第一间接)、**寿命增长**(第二间接)。

第一间接: 气溶胶作为 CCN, 增加云滴数量, 减小半径, 提高云的反照率, 增强对太阳辐射的反射。

第二间接: 云滴半径减小, 抑制降水, 延长云的寿命, 增加云的覆盖范围

③ **半直接效应**: **黑炭加热云滴**导致其**蒸散**, 减少云量, 缩短云的寿命, 降低云的反照率。

4.2.2 辐射强迫的基本特性

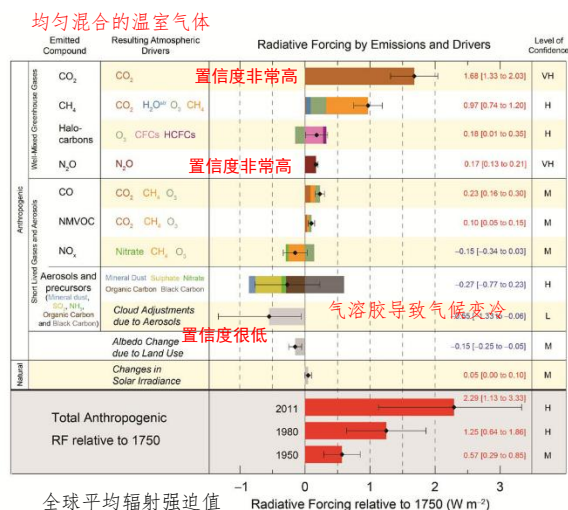
高辐射强迫 **均匀混合的温室气体**: 二氧化碳 CO_2 、甲烷 CH_4 、氧化亚氮 N_2O 等

低辐射强迫 **气溶胶**: 包括**硫酸盐、黑碳、有机碳、海盐、硝酸盐、沙尘**等，具有较短的大气寿命，分布不均，对辐射强迫的影响具有区域性和时效性。

气溶胶分类 **吸收性气溶胶**: 加热云

散射性气溶胶: 致冷 (硫酸盐、硝酸盐、铵盐、有机碳、海盐)

水溶性气溶胶: 制冷 (类型同上)



4.2.3 大气层顶和地表辐射强迫

- 大气层顶 ① 气溶胶**大气顶端辐射强迫可正可负**（依赖不同气溶胶）
- 地表情况 ① 所有气溶胶成分的**地表辐射强迫均为负值**
- ② 地表辐射强迫直接影响到大气稳定度等气象参数

总体情况

