

第七章 气溶胶光学特性及其天气气候效应

7.1 气溶胶光学特性

7.1.1 气溶胶光学厚度

7.1.1.1 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

7.1.1.2 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 $1.53 - 0i$

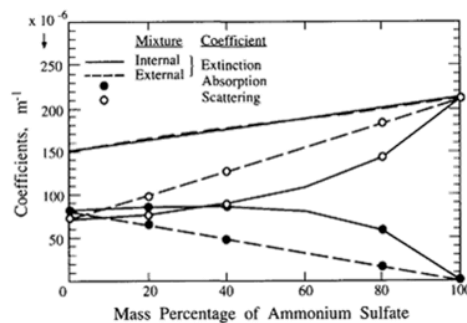
纵坐标：消光系数 **实线**：内混 **虚线**：外混

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 (虚线实圈) < 内混 (实线实圈)

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)



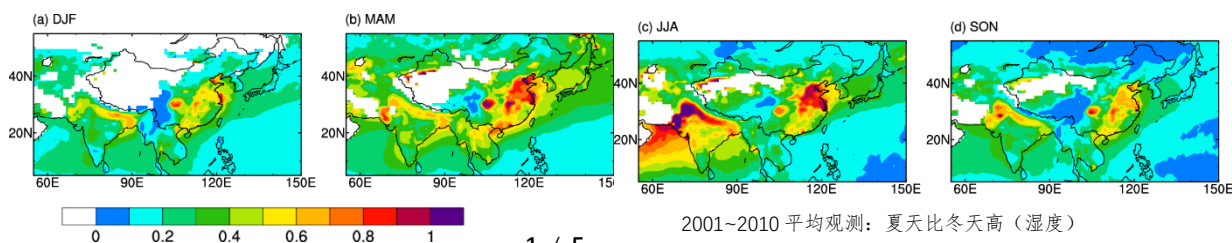
光学厚度 模式中利用**气溶胶质量浓度**计算整层气溶胶光学厚度 $AOD = \frac{[aerosol]}{V \times \rho \times A} \times b_{ext}$

[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

7.1.1.3 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。

7.1.2 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。

7.1.3 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， $-1 \leq g \leq 1$

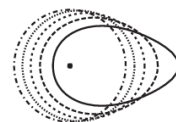
情况讨论 ① $g > 0$ ：光子倾向于散射至前半球，即**前向散射**占主导【除瑞利散射外大部分粒子】。

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】。



7.2 气溶胶辐射强迫

7.2.1 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。

7.2.2 辐射强迫的基本特性

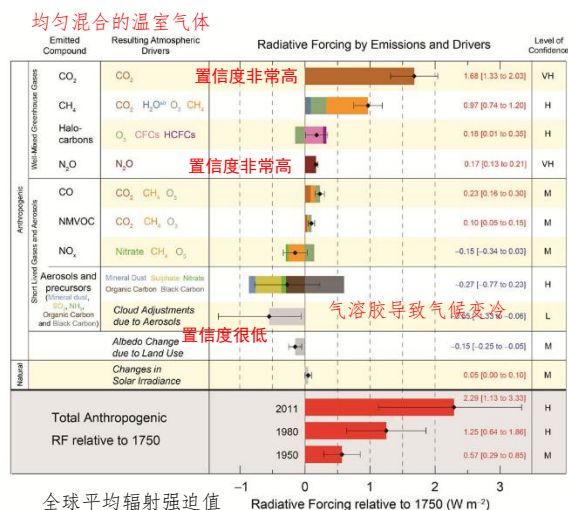
高辐射强迫 **均匀混合的温室气体**：二氧化碳 CO_2 、甲烷 CH_4 、氧化亚氮 N_2O 等

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

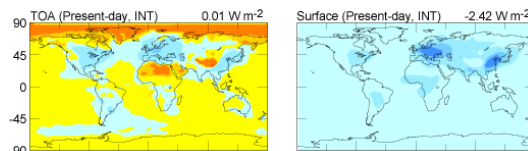
散射性气溶胶：致冷（硫酸盐、硝酸盐、铵盐、有机碳、海盐）

水溶性气溶胶：制冷（类型同上）

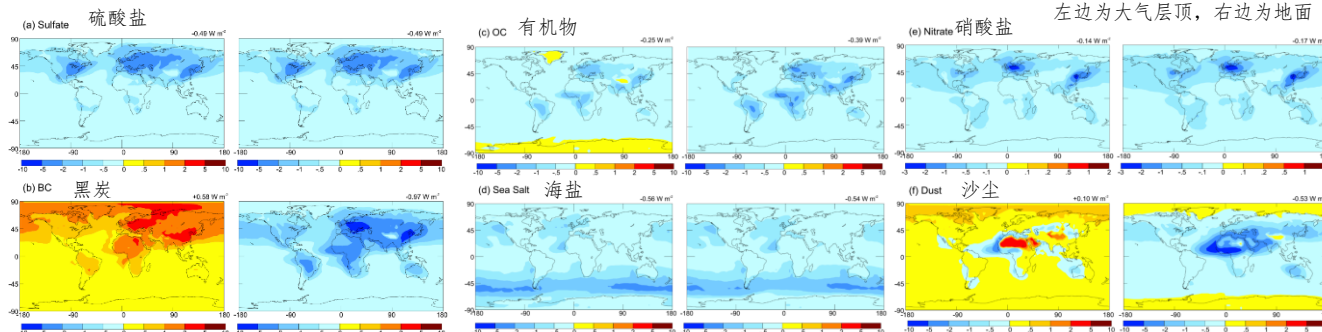


7.2.3 大气层顶和地表辐射强迫

- 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



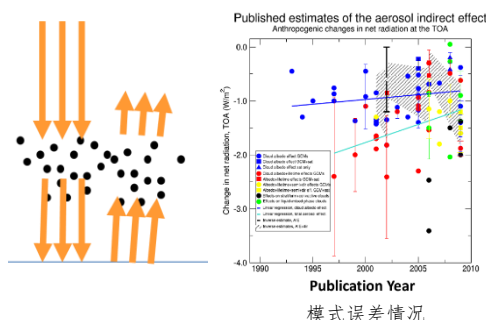
左边为大气层顶，右边为地面



总体情况 温室气体寿命较长，气溶胶寿命较短，气溶胶对于气候的影响接近源区，**区域差异较大**。

7.2.4 冰雪表面的黑碳辐射强迫

- 高反照率** 冰雪表面使得一部分太阳辐射反射出去，**黑炭气溶胶能够二次吸收反射的太阳辐射**，导致**很强的大气增暖**。
- 间接强迫** 不同参数化方案估算的辐射强迫有很大差别。二氧化碳在 $1.6W/m^2$ ，但误差棒非常大。

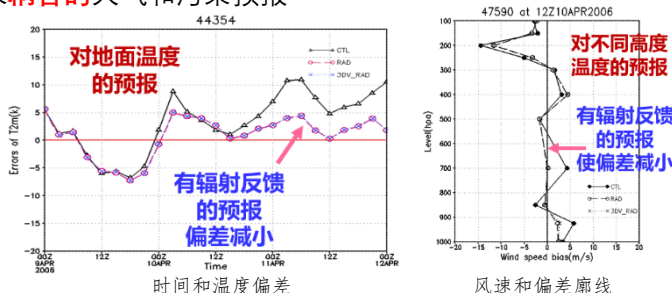


7.3 气溶胶对天气气候的影响

7.3.1 基本概念与模式设置

- 时间尺度** **天气尺度**：数天，污染物-天气预报，例如**雾霾和天气过程**
- 年代际至百年**：污染物-气候预估，例如温室气体等污染物和气候的中长期预估
- 发展趋势** **传统模式**：**天气预报模式**（输入：天气数据分析同化、污染物浓度平均态）+**化学传输模式**（输入：人为排放清单）**各自独立预报**。可以预报未来的天气情况和污染物浓度，没有考虑污染物浓度变化对天气变化的影响的反馈作用。
- 新一代模式**：**化学天气模式同一模式预报**，输入有天气数据和污染数据分析同化、人为排放清单，可以预报未来**耦合**的天气和污染预报

案例分析：



中国气象局污染-天气模式中沙尘气溶胶通过辐射反馈改进温度预报的准确性

虚线考虑了气溶胶的反馈作用
明显地：有反馈的偏差更小

验证内容 气象要素的可靠性、污染物的浓度可靠性。

当前情况 ① 模式能够捕捉到趋势 ② 污染物总量预测较好，但组分有差异。

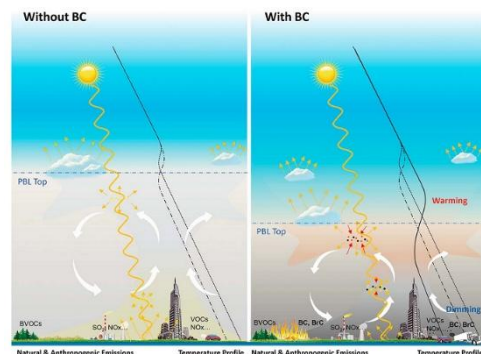
7.3.2 辐射影响天气

- 总体逻辑** 地表辐射减少→温度减少→相对湿度增加→边界层不旺盛，高度减少→不利于气溶胶扩散
- 散射型** 散射性气溶胶使地表相当位温降低。
- 吸收型** 吸收性气溶胶则加热边界层地表减温更大。

穹顶效应

气溶胶（散射性/吸收性气溶胶）减少地面太阳辐射，减弱湍流扩散强度，降低大气边界层高度，从而将污染物抑制在较浅的边界层内。

黑碳气溶胶在污染-边界层双向反馈中扮演着至关重要的角色，通过地表辐射冷却和边界层上层加热两种途径抑制大气边界层的发展，造成明显的逆温。

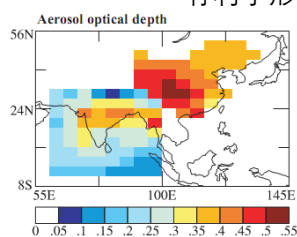
**7.3.3 气候影响天气****气候情况**

我国长三角地区出现了温度降低、降水增加的趋势。

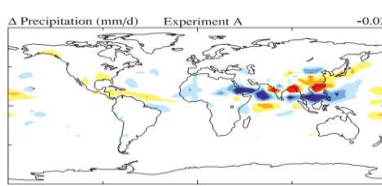
出现了南涝北旱的现象，学界有多种观点：青藏高原热状况异常、对流层中上层大气环流变化、热带海洋的强迫、ENSO 的年代际变化、大气气溶胶等。

黑炭气溶胶

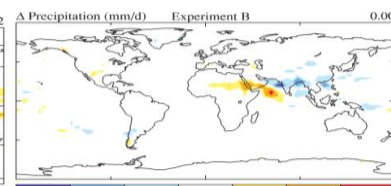
全球气候模式结果显示黑碳可通过改变大气稳定性和垂直运动，进而影响大尺度环流和水分循环，并有利于形成我国“南涝北旱”的降水格局。



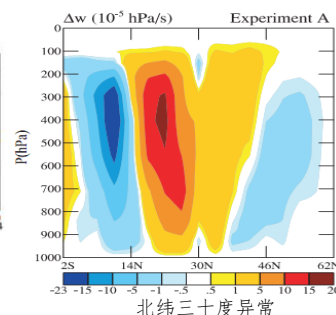
我国气溶胶浓度增加



有气溶胶，有降水异常



无气溶胶，没有现象



北纬三十度异常

可能的原因：气溶胶→太阳辐射减少→陆地地面降温→海陆温差减弱→海陆气压差减弱→副热带高压变弱南退→北风异常→夏季风减弱→长江流域水汽滞留辐合→降水增加→地面温度降低

热抽吸效应

本来南亚季风 5-6 月大陆上空有温度增加，大陆上存在降水；高原有黑炭气溶胶后，高原增温，环流位置迁移，雨带偏移到北方，而下沉气流出现在本来降水的区域，造成农业重大影响。

环流影响

温室气体和气溶胶对哈德来环流改变的量级较为接近。

预测显示，气溶胶变化将在 5°N 到 5°S 之间造成一个异常的反气旋（逆时针）环流，这与冬季（DJF）哈德利环流的相位相反，表明哈德利环流减弱；而在夏季（JJA）期间，这一预测的气溶胶引起的异常环流与哈德利环流同相，因此会增强哈德利环流。

7.4 大气污染与天气相互作用**7.4.1 相互作用****作用情况**

- ① 天气和气候会影响到整个污染物生消的过程：例如排放：植被 VOC 排放受到温度影响、沙尘气溶胶受到风速影响、NO_x 来自于土壤与闪电；化学变化和化学反应，传输，扩散，沉降等。
- ② 污染物又会通过辐射影响天气和气候。

7.4.2 重污染事件与天气相互作用**目的**

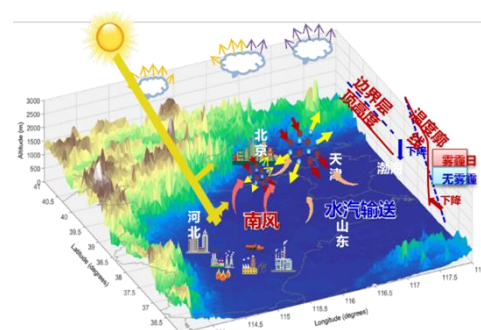
探究重污染时是否有某些独特的天气条件，从而为预报提供范式依据。

方法

- ① 把所有重污染的情况挑选出来，并进行分类（风场、温度场、气压场等），探究天气形势。
- ② 把气象场和多年平均作比较，分析偏差和异常的情况。

机制总结

华北霾污染过程中，持续的南风异常将水汽输送到华北地区，气溶胶的吸湿增长导致了其光学散射和吸收能力增强（爆发性增长），造成地面太阳辐射衰减，地表产生冷却效应，使得大气热力结构，边界层高度显著下降，气溶胶浓度进一步上升。



华北重霾污染

7.5 大气污染与气候相互作用

7.5.1 自然源受到影响

森林大火 到 2050 年，气温升高将导致**野火碳质排放量**比现在**增加 90%**（1996-2005）。
从全球角度考虑，生物质燃烧排放量非常大，同时排放种类繁多复杂。

7.5.2 季风受到影响

季风因素 ① 季风的强弱变化影响气溶胶的季节变化。**季风降雨的湿沉降**和**海洋上来的较清洁的空气**对**夏季中国气溶胶浓度的低值**有**决定性作用**。
② 弱季风年，气溶胶浓度高，臭氧浓度低；强季风年，气溶胶浓度低，臭氧浓度高。

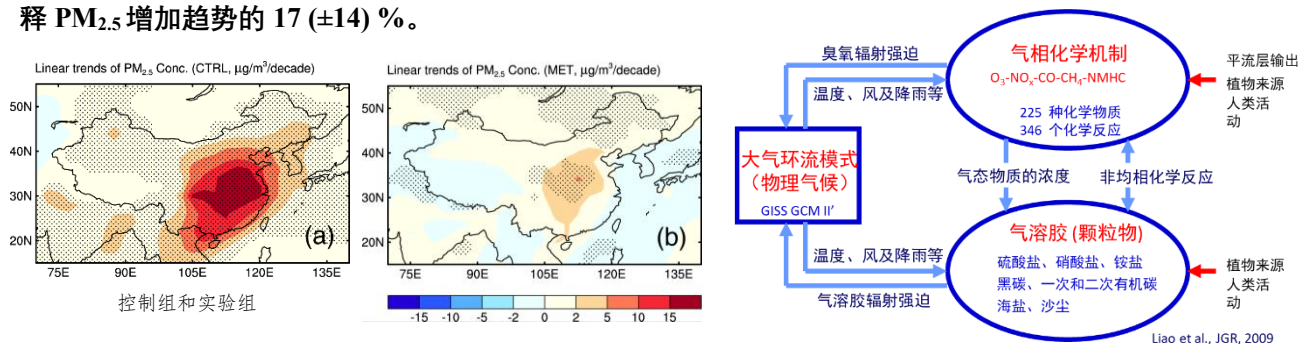
7.5.3 气象参数变化

降水 降水年际变化，**能够差异到90%左右，在冬季的北方地区特别明显**。

湿度 冬季很大，夏季不太明显。

温度 年变化幅度不大，约0.5%。

污染物影响 这种气象参数的变化对污染物浓度的影响：**固定人为排放**，模式获得**气象参数变化**导致的气溶胶浓度年际变化，**平均年际变化幅度达8~17%**，接近“大气污染防治行动计划(2013)”减排目标。
这种量级是非常大的，说明人为排放的影响或控制，可能无法体现在达标情况上。
中国东部 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著增加，线性趋势为 $15 \mu\text{g m}^{-3} \text{ 十年}^{-1}$ ，**气象场长期变化增加 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度，解释 $\text{PM}_{2.5}$ 增加趋势的 $17 (\pm 14) \%$ 。**



耦合模式 探究考虑耦合和不考虑耦合的模式差别：**耦合的模式表现出更强的气候变暖与更强的温度差**。

- ① 气候变暖→中高纬度降雨增加→中高纬度气溶胶减少→温室气体增暖更强。
- ② 气候变暖→大气传输减慢→污染源附近气溶胶、臭氧增加→局地增暖更显著。

7.5.4 评估方法

气溶胶效应 如何评估气溶胶气候效应：**排放通量观测**→验证**排放清单**准确性；**气溶胶浓度观测**→模式可靠性；**气溶胶光学参数模拟**→云的模拟→**外场观测、卫星验证**；上述准确性→气溶胶的气候效应的准确性

减排策略 建立社会经济-空气质量-气候整体评估系统

宏观经济情景→温室气体和污染物排放情景→空气质量、气候变化→影响评估、经济损失