

# 沙尘气溶胶辐射特性及其观测方法初步评述

王娜<sup>1,2,3</sup>, 张镭<sup>1,2</sup>

(1. 兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020;  
3. 陕西省气候中心, 陕西 西安 710014)

**摘要:** 沙尘气溶胶在全球及区域尺度气候和环境变化中起着十分重要的作用, 大气中的沙尘可通过“阳伞效应”、“冰核效应”和“铁肥料效应”影响全球气候。本文对沙尘气溶胶的气候效应及观测方法进行了介绍。

**关键词:** 沙尘气溶胶; 粒子尺度谱; 光学厚度; 辐射强迫

**中图分类号:** P422.9

**文献标识码:** A

## 1 沙尘气溶胶的气候效应

沙尘气溶胶又称为矿物气溶胶, 是对流层气溶胶的主要成分, 占对流层气溶胶总量的一半。全球沙尘气溶胶主要来自撒哈拉沙漠地区、美国西南沙漠区和亚洲地区。亚洲沙尘源区主要分布在中国西北部和北部, 由于源区位于高原, 其地理位置以及形成沙尘天气的天气系统使其起沙后很容易远距离输送。亚洲沙尘起沙量大、扩散范围广, 对区域乃至全球气候与环境都有重大影响。中国沙尘源区主要分布在北方的巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠、乌兰布和沙漠、毛乌素沙漠及其周围地区<sup>[1]</sup>。

沙尘气溶胶能够通过多种方式影响气候。例如, 通过散射和吸收太阳辐射来直接影响, 主要体现在沙尘气溶胶的“阳伞效应”; 以云凝结核形式改变云光学特性和寿命而产生间接影响<sup>[2]</sup>, 主要体现在沙尘气溶胶的“冰核效应”; 沙尘气溶胶含有较高的海水中浮游生物所必需的二价铁, 而海洋中铁元素的供给控制着海洋表层浮游生物的固氮过程, 固氮过程又控制着海洋表层的浮游生物生产量, 浮游生物生产量又通过储存碳和沉积碳来控制大气中的 CO<sub>2</sub> 浓度, 从而对气候产生影响, 这就是沙尘气溶胶的“铁肥料效应”<sup>[3-5]</sup>。沙尘气溶胶以地球化学过

程的方式将陆地、海洋和大气有机地结合起来, 已经逐渐演变为全球物质循环及气候变化中的关键环节<sup>[3-4,6-7]</sup>。

近 30 a 来, 科学工作者对非洲撒哈拉沙漠地区的沙尘气溶胶进行了多方面的研究。主要集中在沙尘暴形成的天气背景、下垫面条件、沙尘的起沙机制、沙尘粒子的空间分布特征、沙尘的长距离输送、沙尘气溶胶的辐射反馈机制等。亚洲地区的沙尘气溶胶的研究目前还处于起始阶段, 沙尘气溶胶的物理、化学、光学特性以及影响沙尘输送的物理过程的研究与撒哈拉沙尘的研究相比还很不够, 有待进一步开展。尤其是由于缺乏相应的观测资料, 往往用撒哈拉沙尘的性质来表示亚洲沙尘的性质, 这会产生很大误差。由于沙尘气溶胶光学厚度大, 且分布范围广, 与硫酸盐和碳黑气溶胶一样, 对地球系统辐射平衡的影响非常重要。由于矿物沙尘的谱分布范围很大, 可以同时散射入射的可见光和出射的地面长波辐射, 与硫酸盐和火山灰气溶胶相比, 沙尘的粒径更大, 对太阳短波辐射的吸收更强。沙尘气溶胶对地面和大气顶对辐射平衡的影响依赖于气溶胶浓度、化学成分、谱分布和垂直分布等参数以及地面反照率、温度等一些外参数<sup>[8]</sup>。

目前已经有很多沙尘模式, 学者们用这些模式计算在干洁大气和有云的条件下, 由沙尘气溶胶引

收稿日期: 2007 - 04 - 29; 改回日期: 2007 - 09 - 04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40675078) 和国家重点基础研究发展规划项目 (2006CB400501) 资助

作者简介: 王娜 (1984 - ), 女, 甘肃陇南人, 硕士研究生, 主要从事大气物理与大气环境研究工作。

\* 通讯联系人: 张镭, zhanglei@lzu.edu.cn

起的大气层顶直接辐射强迫值,并与观测资料进行比较。也有学者计算了沙尘气溶胶对大气辐射通量和加热率的影响。

1996年 Li<sup>[9]</sup>在分析大西洋巴巴多斯 (Barbados) 岛的长期观测资料中发现,尽管来自非洲撒哈拉和撒赫尔地区的沙尘气溶胶质量散射效率仅是硫酸盐气溶胶的 1/4,但总质量却是硫酸盐气溶胶的 16倍。因此,在沙尘源区及其下风方向沙尘气溶胶的辐射强迫将远远超过其他气溶胶成分,在区域尺度上研究沙尘气溶胶辐射强迫十分重要。

Aoki等<sup>[10]</sup>用 SRTMAS 模式 (the Streamer-based Radiative Transfer Model for ADEC Sciences) 计算由沙尘气溶胶的光学、物理特性,地面反照率,太阳天顶角,云覆盖等引起的直接辐射强迫,选取了日本海、塔里木盆地沙漠、撒哈拉沙漠、西伯利亚雪地 4 个地点,这 4 个地方的大气和沙尘气溶胶的廓线是由化学传输模式 MASNGAR 计算得到的。试验结果表明,当大气存在多种类型的气溶胶时,只有包括所有气溶胶类型的大气与除沙尘气溶胶外其它气溶胶类型的大气的净辐射之差,能算出沙尘气溶胶引起的直接辐射强迫。结果显示,沙尘气溶胶在大气顶短波瞬时直接辐射强迫和折射指数的敏感性与地面反照率有很大的关系,不同沙尘气溶胶模式得到的瞬时直接辐射强迫也不同,这个差异在高反照率地面最显著,在海面上相对较小。原因是在高反照率地面,大气(沙尘)与地面的多重反射加强了沙尘粒子的吸收。在沙漠地表上,由沙尘引起的大气顶短波瞬时直接辐射强迫在沙尘气溶胶折射指数的可能范围内时正时负,所以沙尘气溶胶的折射指数是影响直接辐射强迫的最重要因子,日平均直接辐射强迫在地面反照率可能范围内时正时负。有效半径  $< 0.6 \mu\text{m}$  的小沙尘颗粒引起的大气顶短波直接辐射强迫很强的依赖于地表类型。下垫面为海洋和沙漠时,沙尘引起的大气顶任何光谱范围上的直接辐射强迫对云层和沙层垂直位置很敏感,当下垫面是雪地时,云层的作用一般较小,原因是云的反照率与雪地的反照率非常接近。

王宏、石广玉等<sup>[11-12]</sup>分析了东亚沙尘气溶胶的辐射强迫,采用了 ACE - A sia 期间 Gong 等用 CAM 模式模拟沙尘气溶胶日平均浓度资料、NCEP 气象资料和部分沙尘观测资料。其模拟区域为东亚—北太平洋地区 (75 E ~ 225 W, 16 N ~ 70 N)。观测结果表明,与其它沙尘模型相比,源于中国沙漠的沙

尘气溶胶复折射指数偏低,对太阳辐射的吸收性较弱,散射较强,前向散射偏弱,后向散射偏强。计算的 2001 年春季东亚—北太平洋地区光学厚度分布显示,沙尘气溶胶的主要影响范围在中国大陆,影响最大的地区为中蒙边界和内蒙古的戈壁、沙漠地区,其次为河北北部和京津附近地区。东亚—北太平洋地区大气顶的平均净辐射强迫为  $-0.943 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,其中短波  $-1.700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,长波  $0.759 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ;地面净辐射强迫为  $-5.445 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,短波  $-6.250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,长波  $0.805 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,并给出了东亚—北太平洋地区大气顶和地面的辐射强迫分布。

Takemura等<sup>[13]</sup>用气溶胶化学传输和大气环流相耦合的模式 (AGCM) 模拟了气溶胶有关辐射参数。这个模式中考虑了对流层主要气溶胶,包括含碳气溶胶 (OC 和 BC)、硫酸盐、沙尘、海盐。模拟得到 4 种气溶胶混合大气总光学厚度、Ångström 大气浑浊度参数、单次散射反照率,并与 12 个地点的地面观测、卫星遥感反演进行了比较。在大部分区域光学厚度模拟值与观测值的平均误差  $< 30\%$ ,单次散射反照率模拟值与观测值的平均误差  $< 0.05$ 。估计了对流层主要气溶胶的直接辐射强迫,在有云和干净无云条件下,人为引起的含碳气溶胶和硫酸盐气溶胶在对流层顶全球年平均直接辐射强迫值分别为  $-0.19 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $-0.75 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

Gunnar等<sup>[14]</sup>用气象资料和奥斯陆化学传输模式 (Oslo CTM2) 模拟了在撒哈拉沙尘实验 (SHADE) 项目期间沙尘的产生、输送,并与实际观测进行比较,然后计算了撒哈拉沙漠周围大区域的直接辐射强迫。模拟的沙尘光学性质和垂直廓线与实际观测资料大体上是一致的,模拟的辐射效应与观测也有很好的一致性。模拟到的当地最强的短波辐射效应大约是  $-115 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。撒哈拉沙漠地区沙尘气溶胶的辐射效应在全球范围内起到了重大的负辐射强迫。

Haywood和 Shine<sup>[15]</sup>、Hansen等<sup>[16]</sup>发现对于不同的地面反照率 是决定太阳辐射效应正负的决定因素,沙尘的长波辐射效应将会是正的,但是其量级很强的依赖于颗粒的尺度、折射指数和所在高度。所以净辐射效应 (短波与长波之和) 表现出很大的区域变化。

Carlson和 Benjamin<sup>[17]</sup>用一个长短波结合的辐射传输模式,计算了撒哈拉沙尘对大气辐射通量和

加热/冷却率的影响,发现沙尘可以减少到达地表和云顶的辐射通量,从而使其冷却,与此同时在沙尘层中的短波辐射加热和长波辐射冷却均增大,加热大于冷却,总的加热率随气溶胶光学厚度的增大而增大。Tegen等<sup>[18]</sup>用嵌套在 GISS (Goddard Institute for Space Studies) GCM 中的辐射传输模式,计算了来自土壤的矿物气溶胶的辐射强迫。在大气顶,土壤尘的热辐射强迫总是为正,在太阳波段则或正或负,取决于天空状况以及地面反照率,其总的强迫在局地为  $-2.1 \sim +5.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

已有的研究结果认为,沙尘气溶胶的净辐射效应,表现为在地面的冷却和在气溶胶层的加热,原因是沙尘气溶胶在短波光谱区域有散射、吸收作用,在长波光谱区域有吸收和发射的作用,其对短波的作用比对长波的作用要强。

## 2 沙尘气溶胶的观测

研究沙尘气溶胶有很多方法,比如用太阳光度计、卫星、激光雷达、积分浑浊度仪等。本文介绍用激光雷达和积分浑浊度仪观测沙尘气溶胶的方法。激光雷达是探测大气气溶胶和高云光学的一个有效、可靠的手段,有着大范围、长距离、高精度以及连续测量等特点。通过分析激光雷达的回波信号,可以得到大气的物理特征参数。积分浑浊度仪广泛应用于大气气溶胶的研究,它可以直接测量大气气溶胶的散射系数,可以全天候连续自动观测,且定标简单方便。

### 2.1 利用多波段散射激光雷达观测反演沙尘粒子尺度谱

#### 2.1.1 多波长法

气溶胶消光系数对气溶胶尺度谱分布的变化较为敏感,但对气溶胶光学折射率的变化反映并不显著。当气溶胶大粒子较为丰富以及波长较短时尤其如此。这一特点有助于用多波长激光雷达探测气溶胶消光系数,求取气溶胶尺度谱分布。

若多波长脉冲激光雷达所探测距离  $R$  处的球形气溶胶消光系数为  $(R, \lambda_i)$ ,则在 1 次散射条件下,与气溶胶尺度谱分布的关系可表示为:

$$(R, \lambda_i) = \int_0^R Q_{\text{ext}} \left( \frac{2}{\lambda_i} r, m \right) r^2 n(r) dr \quad (1)$$

式中  $Q_{\text{ext}}$  为单个气溶胶粒子的消光效率因子,无量纲量。 $r$  为球形气溶胶粒子的半径,单位  $\mu\text{m}$ 。 $m$  为气溶胶粒子的光学折射率。 $n(r)$  为气溶胶的尺度

谱分布函数,单位  $\text{cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。

由上式可知,若气溶胶粒子的光学折射率  $m$  和谱分布的函数  $n(r)$  已知,而球形粒子的消光效率因子  $Q_{\text{ext}}$  可由 Mie 散射理论求取。于是,由多波长激光雷达所探测气溶胶的消光系数  $(R, \lambda_i)$  就能确定气溶胶谱分布函数中的诸参数,从而获得气溶胶的尺度谱分布。

Deimendjian 气溶胶谱分布函数

$$n(r) = A r^a e^{-br} \quad (2)$$

式中  $A$  决定了气溶胶的数密度,而  $a, b$  则决定了谱分布的形状,且  $a, b$  均为  $R$  的函数。由于 Deimendjian 气溶胶谱分布有 4 个谱分布参数,因此原则上只要由 4 波长激光雷达探测到的气溶胶消光系数,就能求取气溶胶谱分布参数,进而得到气溶胶尺度谱分布。此外,为提高探测精度和可靠性,又加了 1 个激光波长。

将 (2) 代入 (1) 得到:

$$(R, \lambda_i) = \int_0^R Q_{\text{ext}} \left( \frac{2}{\lambda_i} r, m \right) r^2 A r^a e^{-br} dr \quad (3)$$

( $i = 1, 2, 3, 4, 5$ )

以  $i = 1, 2, 3, 4$  时,各式除以  $i = 5$  式,得到:

$$S_i(R) = \frac{(R, \lambda_i)}{(R, \lambda_5)}$$

$$= \frac{\int_0^R Q_{\text{ext}} \left( \frac{2}{\lambda_i} r, m \right) r^2 r^a e^{-br} dr}{\int_0^R Q_{\text{ext}} \left( \frac{2}{\lambda_5} r, m \right) r^2 r^a e^{-br} dr} \quad (4)$$

( $i = 1, 2, 3, 4$ )

由 (4) 式取  $i = 5$  (也可取其他波长),得到距离  $R$  处的谱分布参数  $A$  的表达式

$$A = \frac{(R, \lambda_5)}{\int_0^R Q_{\text{ext}} \left( \frac{2}{\lambda_5} r, m \right) r^2 r^a e^{-br} dr} \quad (5)$$

于是,根据多波长激光雷达探测到的气溶胶消光系数,可得到实际比值  $S_i(R)$ ,然后将其与绘制成以  $a$  为参数,以  $b$  为变数的理论比值曲线  $S_i$  进行拟合,获得最佳拟合时的谱分布参数  $a, b$  的值,再将求取的这些谱分布参数代入 (5) 可求得谱分布参数  $A$ ,由此气溶胶的尺度分布谱就确定了。

这个方法只有当实际大气中气溶胶谱分布函数符合 Deimendjian 谱分布模式时才适用,而且也不能探测较大半径范围的气溶胶尺度谱。若实际大气中气溶胶谱分布函数偏离 Deimendjian 谱分布模式太大 (如出现双峰结构等),则无法得到与实际气溶

胶消光系数相拟合的谱分布参数,此时可采用气溶胶谱分布组合模式的方法,以获得更接近实际的气溶胶的尺度谱分布。

孙景群等<sup>[19-20]</sup>采用 Deimendjian 谱分布模式(修正的伽玛分布),利用多波长激光雷达所探测的气溶胶消光系数,通过与 Mie 散射理论计算的气溶胶消光系数拟合的方法,求取气溶胶的谱分布参数,从而获得了气溶胶的谱分布。Papayannis 等<sup>[21]</sup>在 2000 年 8 月一个典型的沙尘暴期间用 2 台激光雷达观测研究了撒哈拉沙尘气溶胶的特性。陶宗明等<sup>[22-23]</sup>利用消光效率因子计算出 Junge 型气溶胶消光系数与波长的关系,并算出 Deimendjian 型气溶胶的 5 种波长消光系数比值表,根据此表就可拟合出气溶胶的尺度谱。

### 2.1.2 消光法

利用多波长激光雷达所探测的气溶胶消光系数和后向散射系数,用 Mie 散射理论计算得气溶胶消光系数、后向散射系数,用规则方法(regularization method)解 Fredholm 积分方程(6),求解该方程就能从太阳直接辐射谱信息物理特征量的测量中反演出大气柱气溶胶谱分布,此方法称为消光法。

$$(R, \lambda) = \int_0^R Q_{\text{ext}} \left( \frac{2-r}{m}, m \right) r^2 n(r) dr$$

$$(R, \lambda) = \int_0^R Q_s \left( \frac{2-r}{m}, m \right) r^2 n(r) dr$$

式中,  $(R, \lambda)$  为多波长脉冲激光雷达所探测距离  $R$  处的球形气溶胶后向散射系数,  $Q_s$  为单个气溶胶粒子的散射效率因子。其它的参数同上节。

将上 2 式写成更一般的形式:

$$g_i = \int_{x_b}^{x_a} K(x, r, m) n(r) dr \quad (6)$$

其中  $g_i$  代表  $(R, \lambda)$ 、 $(R, \lambda)$ ,  $K(x, r, m)$  是核函数:

$$K(x, r, m) = Q_s \left( \frac{2-r}{m}, m \right) r^2 \text{ 或}$$

$$K(x, r, m) = Q_{\text{ext}} \left( \frac{2-r}{m}, m \right) r^2$$

Pu 等<sup>[24]</sup>采用 Junge 谱分布模式,用此方法反演了气溶胶尺度谱分布,并进行了误差分析。辛金元等<sup>[25]</sup>用消光法对腾格里沙漠 4~9 月份的整层大气气溶胶的光学遥感观测结果进行了分析,在干洁晴好天气下,腾格里沙漠的气溶胶是均一的、稳定的,而且  $>1 \mu\text{m}$  的大粒子浓度很小;气溶胶的谱分布几乎是一致的,谱形大致为 Junge 谱,在粒度  $0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$  范围内有一明显峰值。刘吉等<sup>[26]</sup>从实测的兰

州城市冬季大气气溶胶多波段光学厚度资料出发,应用消光法反演了大气柱气溶胶粒子谱,并对反演程序的可行性、反演结果的可靠性进行了分析讨论。

### 2.1.3 多散射角法

利用多波长激光雷达虽可探测气溶胶尺度谱分布,但由于激光波长的数目和波长范围均受技术条件的限制,因而使探测气溶胶尺度谱分布的半径范围和可靠性存在一定的局限。但利用发射系统和接收系统分设 2 地的单波长双端激光雷达,在发射系统和接收系统的方位与其连线的方位一致的条件下,同步改变它们的仰角,便可探测同一高度不同散射角时的大气散射系数,从而获得气溶胶角散射系数。于是,在大气水平均一,气溶胶光学折射率取常见值,以及气溶胶尺度谱分布形式已知的条件下,将双端激光雷达探测到的多散射角气溶胶的散射系数,与根据 Mie 散射理论计算不同谱分布参数时的气溶胶角散射系数随散射角的变化曲线进行拟合,求取气溶胶谱分布参数,由此获得气溶胶尺度谱分布<sup>[27-31]</sup>。Reagan 等<sup>[27]</sup>利用红宝石双端激光雷达,探测了不同高度的气溶胶尺度谱分布。

### 2.2 3 波段积分浑浊度仪反演粒子谱

利用积分浑浊度仪得出的散射系数反演沙尘粒子谱,其原理是积分浑浊度仪可测出气溶胶在 450 nm、550 nm、700 nm 上的总散射系数和后向散射系数。由于散射系数随波长的变化与气溶胶粒子尺度分布和散射效率有关,所以用测得的 3 个波段的散射系数来反演沙尘气溶胶的尺度分布。

$$s = \int_0^R Q_s(m, r) r^2 \frac{dN(r)}{d \log r} d \log r$$

式中  $N(r)$  为气溶胶粒子的个数尺度分布,  $Q_s(m, r)$  为散射效率因子,它与气溶胶粒子复折射指数有关。

假设沙尘气溶胶粒子的复折射指数,并根据 Mie 散射理论计算  $Q_s$ ,以尺度分布代替个数尺度分布则有:

$$\begin{aligned} s &= \int_0^R \frac{3Q_s(m, r)}{4r} \frac{dV(r)}{d \log r} d \log r \\ &= \int_0^R k(m, r) \frac{dV(r)}{d \log r} d \log r \end{aligned}$$

式中  $k(m, r) = 3Q_s(m, r) / 4r$  是核函数,它表明了最大的光散射效率所处的粒子半径范围,可由 Mie 散射理论精确计算得到。

从 450 nm、550 nm、700 nm 的核函数图知道,对核函数起作用的粒子半径大约在  $0.05 \sim 1.5 \mu\text{m}$  范

围内,所以认为在这 3 个波长范围内散射系数由半径为  $0.05 \sim 1.5 \mu\text{m}$  的沙尘气溶胶粒子而引起的。

对于 3 个波长上的散射系数有:

$$j = \int k_j(r) \frac{dV(r)}{d \log r} d \log r$$

式中  $j$  为  $j$  波长上的散射系数,  $k_j(r)$  为  $j$  波长上的核函数。

上式没有解析解,根据 Heintienberg(1981)提出的直方图方法,即用直方图来表现粒子的尺度分布,将有效的粒子范围分为几等分段,每段上有 1 个粒子尺度分布来解此式,用直方图表示为  $j = \sum_{l=1}^L \bar{k}_{jl} \bar{V}_l$ ; 式中  $L$  为总的分段数,  $\bar{V}_l$  为每  $l$  段上的气溶胶粒子的体积尺度分布,  $\bar{k}_{jl}$  为  $l$  段上对  $\log r$  积分的核函数,  $\bar{k}_{jl} = \int_{\log r} k_j(r) d \log r$ 。

若  $j = l$ ,在数学意义上可以得到解析解,但这个解析解不一定有物理意义,因为粒子的体积尺度分布不可能为负数,所以用 Monte - Carb 方法解这个方程,将  $0.05 \sim 1.5 \mu\text{m}$  的粒子半径分为 4 等份,进行反演可得到沙尘气溶胶的粒子尺度分布。

杜萍<sup>[32]</sup>和胡波等<sup>[33-34]</sup>利用积分浑浊度仪反演了兰州气溶胶的粒子谱及光学厚度,基本上能够反映实际气溶胶尺度分布,反演得到的气溶胶体积谱和数密度谱分布都是稳定的。张武等<sup>[35]</sup>用 3 波段积分混浊度仪观测了兰州市 2001 至 2002 和 2002 至 2003 冬季气溶胶,分析了大气气溶胶的散射特性及与城市污染的关系,结果表明气溶胶散射系数呈 3 峰型结构,并用 Monte - Carb 方法反演尺度谱分布。

### 3 结语和讨论

目前对沙尘直接辐射强迫的研究主要是通过对沙尘性质、下垫面状况等的研究,定性地揭示其直接辐射效应,但定量的影响还很不确定。要正确地估计沙尘的直接辐射效应,就需要对沙尘粒子的粒径、复折射指数,以及沙尘中的矿物成分是外部混合还是是一些聚集体,沙尘粒子的化学、物理特性,尤其是光学性质进一步的观测和了解<sup>[18]</sup>。研究中主要困难是沙尘颗粒的物理、化学性质尤其是光学性质了解不透彻,缺乏资料;在沙尘长距离输送中,沙尘颗粒的物理、化学性质的变化还存在不确定性;来自不同地区沙尘的复折射指数不同,以及地面反照率的区域性差别,使得大气顶的沙尘强迫存在很大的不

确定性。

自从 1970 年气溶胶—辐射—气候相互作用的概念提出后,对其相互作用机制的研究有了稳步的发展,尤其是最近 10 a。对气溶胶观测方法和数值模式模拟的重大改善,特别是气溶胶地面观测网的建立,例如 AERONET,以及一些气溶胶试验收集了很多珍贵的数据,这些数据用来检验卫星反演、模式模拟结果。新的卫星传感器如 POLDER、MOD IS、MISR 可在全球尺度上观测气溶胶,而且有很高的精确度。使我们对全球范围气溶胶性质和气溶胶与短波辐射的相互作用有了更深的认识。MOD IS 得到每日气溶胶光学厚度全球分布,在海洋上其精确度为  $\pm 0.03 \sim \pm 0.05$ <sup>[36]</sup>。全球海洋上日平均光学厚度为 0.14。海洋上 MOD IS 与陆地上 MISR 结合起来反演得到气溶胶光学厚度为 0.17。

综上所述,今后应重点开展的工作如下:

(1) 数据资料的收集整理。现有的观测数据较分散,没有形成整体优势。有必要建一个全国性的气溶胶资料库,系统分析气溶胶的时空特征,提出较为准确的中国气溶胶模型;

(2) 不同遥感方法的综合比较。目前研究气溶胶的方法很多,不同方法适应范围、准确性差别很大。因此,需要开展仪器和方法的比较分析,为气溶胶深入研究提供合理可行的方法;

(3) 同化卫星资料到模式中。为了减少气溶胶模式模拟的不确定性,认识气溶胶生命周期的特点,需要同化卫星资料到模式中,对模式结果进行约束;

(4) 进行长期的气溶胶观测,以便获得气溶胶长期变化趋势,并为气溶胶研究积累基本数据;

(5) 云存在时的气溶胶直接强迫作用。由于缺乏气溶胶和云的周期、垂直廓线,在有云情况下的气溶胶直接辐射强迫很难精确计算。因而地面激光雷达、微波辐射计的网状综合观测非常必要。

#### 参考文献:

- [1] 王涛,陈广庭,钱正安,等. 中国北方沙尘暴现状及对策 [J]. 中国沙漠, 2001, 21(4): 322 - 327.
- [2] 王明星,张仁健. 大气气溶胶研究的前沿问题 [J]. 气候与环境研究, 2001, 6(1): 119 - 124.
- [3] Ridgwell A J. Feedback in the earth system: the biogeochemical linking of land, air and sea [J]. IGBP Global Change Newsletter, 2002, 360: 2905 - 2924.
- [4] Martin J H. Glacial - interglacial CO<sub>2</sub> change: The iron hypothesis [J]. Paleoceanography, 1990, 199(5): 1 - 13.
- [5] Duce R A, Unni C K, Ray B J, et al. Long range atmospheric

- transport of soil dust from Asia to the tropical North Pacific: temporal variability [J]. *Science*, 1980, 209: 1522 - 1524.
- [6] Coale K H, Johnson K S, Fitzwater S E, et al. A massive phytoplankton bloom induced by an ecosystem - scale iron fertilization experiment in the equatorial Pacific Ocean [J]. *Nature*, 1996, 383: 495 - 501.
- [7] 方小敏, 韩永翔, 马金辉, 等. 青藏高原沙尘特征与高原黄土堆积——以 2003 - 3 - 4 拉萨沙尘天气过程为例 [J]. *科学通报*, 2004, 49 (11): 1084 - 1090.
- [8] 钱云, 符淙斌, 王淑瑜. 沙尘气溶胶与气候变化 [J]. *地球科学进展*, 1999, 14 (4): 391 - 394.
- [9] Li X, Maring H, Savoie D, et al. Dominance of mineral dust in aerosol light scattering in the North Atlantic trade winds [J]. *Nature*, 1996, 380: 416 - 419.
- [10] Aoki T, Tanaka T Y, Uchiyama A, et al. Sensitivity Experiments of Direct Radiative Forcing Caused by Mineral Dust Simulated with a Chemical Transport Model [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2005, 83A: 315 - 331.
- [11] Shi G Y, Wang H, Wang B, et al. Sensitivity Experiments on the Effects of Optical Properties of Dust Aerosols on Their Radiative Forcing under Clear Sky Condition [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2005, 83A: 333 - 346.
- [12] 王宏, 石广玉, Aoki T, 等. 2001 年春季东亚—北太平洋地区沙尘气溶胶的辐射强迫 [J]. *科学通报*, 2004, 49 (19): 1993 - 2000.
- [13] Takemura T, Uno I, Nakajima T, et al. Single - Scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global Three - Dimensional model [J]. *Journal of Climate*, 2002, 15 (D4): 333 - 352.
- [14] Gunnar M, Grini A, James M Haywood, et al. Modeling the radiative impact of mineral dust during the Saharan Dust Experiment (SHADE) campaign [J]. *J Geophys Res*, 2003, 108 (D18): 8579 - 8592.
- [15] Haywood J M, Shine K P. The effect of anthropogenic sulfate and soot aerosol on the clear sky planetary radiation budget [J]. *Geophys Res Lett*, 1995, 22: 603 - 606.
- [16] Hansen J, Sato M, Ruedy R. Radiative forcing and climate response [J]. *J Geophys Res*, 1997, 102: 6831 - 6864.
- [17] Carlson T N, Benjamin S. Radiative heating rates for Saharan dust [J]. *Atmos Sci*, 1980, 37: 193 - 197.
- [18] Tegen I, Lacis A A. The influence on climate forcing of mineral aerosols from disturbed soils [J]. *Nature*, 1996, 380: 419 - 422.
- [19] 孙景群, 张海福. 激光遥测大气气溶胶的尺度谱分布 [J]. *气象学报*, 1982, 40 (4): 483 - 489.
- [20] 孙景群, 张海福. 激光遥测大气尘埃质量浓度的理论分析 [J]. *环境科学学报*, 1982, 2 (1): 36 - 43.
- [21] Papayannis A, Balis D, Amiridis V, et al. Measurements of Saharan dust aerosols over the Eastern Mediterranean using elastic backscatter - Raman lidar, spectrophotometric and satellite observations in the frame of the EARLNET project [J]. *Atmos Chem Phys*, 2005, 5: 2065 - 2079.
- [22] Tao Z M, Zhang Y C, Liu X Q, et al. Iteration method for the inversion of simulated multiwavelength lidar signals to determine aerosol size distribution [J]. *Chinese Physics*, 2004, 13 (3): 409 - 412.
- [23] 陶宗明, 张寅超, 张改霞. 气溶胶粒子消光效率因子的特性研究及尺度谱的拟合 [J]. *量子电子学报*, 2004, 21 (1): 103 - 109.
- [24] Pu Q, Nakane H, Sasano Y, et al. Numerical simulation of the retrieval of aerosol size distribution from multiwavelength laser radar measurement [J]. *Applied Optics*, 1989, 28 (24): 5259 - 5265.
- [25] 辛金元, 张文煜, 袁九毅, 等. 消光法反演腾格里沙漠地区沙尘气溶胶谱分布 [J]. *高原气象*, 2004, 23 (5): 654 - 659.
- [26] 刘吉, 陈长和. 兰州地区冬季大气气溶胶粒子谱的反演研究 [J]. *高原气象*, 2004, 23 (1): 103 - 109.
- [27] Reagan J A, Herman B M. Bistatic lidar investigations of atmospheric aerosols 14th Radar Meteorology Conference. Amer Meteor Soc, 1970.
- [28] Herman B M, Browning S R, Reagan J A. Determination of aerosol size distributions from lidar measurements [J]. *J Atmos Sci*, 1971, 28 (5): 763 - 771.
- [29] Reagan J A. Determination of the complex refractive index and size distribution of atmospheric particulates from bistatic - monostatic lidar and solar radiometer measurements [J]. *J Geophys Res*, 1980, 85 (C3): 1591 - 1599.
- [30] Parameswaran K, Rose K O, Muthy B V K. Aerosol characteristics from bistatic lidar observations [J]. *J Geophys Res*, 1984, 89 (D2): 2541 - 2552.
- [31] 孙景群. 激光探测大气污染 [M]. 北京: 科学出版社, 1992. 101 - 107.
- [32] 杜萍. 利用卫星资料反演沙尘气溶胶光学厚度 [D]. 兰州: 兰州大学博士学位论文, 2002, 52 - 58.
- [33] 胡波, 张婕, 张武, 等. 应用积分浑浊度仪研究兰州城市冬季大气气溶胶 [J]. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 2005, 41 (3): 19 - 25.
- [34] 胡波, 张武, 张镭, 等. 兰州市西固区冬季大气气溶胶粒子的散射特征 [J]. *高原气象*, 2003, 22 (4): 354 - 360.
- [35] Zhang W, Hu B, Chen C H, et al. Scattering properties of atmospheric aerosols over Lanzhou City and applications using an integrating nephelometer [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 21 (6): 848 - 856.
- [36] Yu H, Kaufman Y J, Chin M, et al. A review of measurement - based assessments of the aerosol direct radiative effect and forcing [J]. *Atmos Chem Phys*, 2006, 6: 613 - 666.

(下转第 79 页)

## The Major Progress of the Plateau Monsoon Study and its Scientific Significance

QI Dongmei, LI Yueqing

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, CMA, Beijing 100081, China;  
2. Institute of Plateau Meteorology, CMA, Chengdu 610071, China)

**Abstract:** Monsoon is a popular subject in the field of meteorology and has been studied for centuries. Analysis shows that the Asian monsoon system can be categorized into three relatively independent sub-systems, including South Asian monsoon, East Asian monsoon, and plateau monsoon. This paper summarizes the study achievements on plateau monsoon, and it analyzes the characteristics of the plateau monsoon at different research stages. In addition, it points out that the future study should be focused on a better definition about plateau monsoon index and the physical causes of the plateau monsoon change.

**Key words:** plateau monsoon; plateau climate; plateau monsoon index

---

(上接第 73 页)

## Preliminary Summary on Radiative Properties and Observation

### Methods of Dust Aerosol

WANG Na<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Lei<sup>1,2</sup>

(1. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000; 2. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020, China; 3. Shaanxi Climate Center, Xi'an 710014, China)

**Abstract:** Dust aerosol plays more and more important role in the global as well as regional climate and environment change. Dust aerosol affects the earth climate by sun umbrella effect, ice core effect and iron fertilization effect. The climate effect and observation methods of dust aerosol is introduced in this paper.

**Key words:** dust aerosol; aerosol size distribution; aerosol optical depth; radiative forcing