

中国大气气溶胶研究综述^{*}

毛节泰 张军华 王美华

(北京大学物理学院大气科学系 北京, 100871)

摘要

文中综合论述了近 20 年来中国大气气溶胶研究状况, 包括对大气气溶胶的直接采样分析, 地面和卫星的遥感, 大气气溶胶辐射特性及其气候效应的研究以及沙尘暴的形成、输送及气候效应的研究等。直接采样分析不仅研究了气溶胶的浓度和粒子谱分布等特性, 而且也对其化学组分做了分析, 高空气球采样得到了对流层和低平流层的气溶胶样品, 并用 X 能谱电子显微镜进行了分析。地面遥感和多种卫星资料, 包括 AVHRR, SVISSR, TOMS, POLDER 等, 被用来研究大气气溶胶的辐射特性, 并提出了用消光和前向散射相结合和利用天空散射光分布反演粒子谱分布相函数等方法。开展了有关气溶胶气候效应的数值模拟研究, 并对非球形粒子以及吸湿性粒子的作用做了专门的计算。对沙尘粒子的直接观测为研究其生成条件和输送特性提供了基础数据。文中对不同的研究方法进行了初步评述, 并对气溶胶的研究提出几点建议。

关键词: 气溶胶, 大气环境, 气候变化。

1 引言

大气气溶胶是由大气介质和混合于其中的固体或液体颗粒物组成的体系。由于它是由不同相态物体组成, 虽然其含量很少, 但对大气中发生的许多物理化学过程都有重要的影响。例如, 气溶胶对太阳辐射的吸收和散射会改变地球大气系统的行星反照率, 从而影响到地气系统的能量平衡; 大气气溶胶还起到云凝结核的作用; 大量的气溶胶颗粒有可能使云滴的数密度增加, 云滴的平均半径变小, 这有可能使云对太阳辐射的反射率增加或使云的维持时间延长, 甚至使降水减少。这些都会影响到地气系统的能量平衡, 从而对气候变化有影响。

大气气溶胶有着众多的自然源和人为源, 例如火山的喷发, 海水的溅沫, 地面的扬尘, 生物体的燃烧以及人类活动, 燃料的使用等过程产生的各种颗粒物。但由于它在大气中的停留时间较短, 其特性随空间和时间都有明显的变化, 因此到目前为止, 我们尚且还缺少足够的数据来研究大气气溶胶对气候系统的确切影响。根据目前的研究结果, 由气溶胶引起的全球平均辐射强迫和温室气体引起的辐射强迫量级相等, 而性质却相反, 气溶胶引起的温度降低

有可能局部抵消由于温室气体引起的全球温度升高。但相对于温室气体的研究来说, 有关气溶胶辐射强迫研究的可信度都在低或者很低的水平^[1], 因此这还是一个需要进一步加强研究的领域。

为了加强大气气溶胶气候效应的研究, 国际上已经实施了几个较大的气溶胶研究计划, 中国科学家在气溶胶的观测、气溶胶辐射特性以及气溶胶气候效应等方面也作了大量研究工作。为适应中国地区区域气候研究的需要, 国家自然科学基金“九五”重点项目中还专门设立了一个气溶胶辐射特性的研究项目“中国地区大气气溶胶辐射特性研究”。

文中分几个方面总结了近 20 年来中国大气气溶胶研究的主要成果, 对未来气溶胶的研究提出了几点建议, 希望对推动中国气溶胶研究有所帮助。

2 气溶胶的直接采样分析

20 世纪 80 年代以前中国气溶胶研究工作主要集中在根据采样得到的气溶胶粒子, 研究粒子的谱分布及其与地理环境、天气条件的关系, 如邹进上等^[2, 3]研究了长江下游地区吸湿性巨核的分布特点以及与天气过程的关系。游荣高等^[4]1980 年在中国科学院大气物理研究所 325 m 铁塔上利用光学粒

* 初稿时间: 2001 年 3 月 7 日; 修改稿时间: 2001 年 10 月 11 日。

资助课题: 国家自然科学基金项目(49635200)。

子计数器,研究了大气气溶胶和尺度谱的垂直分布特征,利用最小二乘法拟合得到了能见度 5 km 时气溶胶标高 1.41 km。

对于沙尘暴等灾害性天气过程也进行了一些研究,如徐国昌^[5]对 1977 年 4 月 17 日甘肃特大沙尘暴进行了诊断分析,指出翻越天山经南疆进入河西走廊是引起河西春季沙尘暴的重要冷空气路径,并指出强沙尘暴白天产生的正反馈机制使沙尘暴不断加强,傍晚前后沙尘暴产生的负反馈机制使其迅速减弱。周明煜等^[6]直接采样研究了 1980 年 4 月 18 日下午北京地区一次沙尘暴过境时粒子化学成份及谱分布,讨论了沙尘暴传输过程与气象条件的关系。

最近 20 年这方面研究仍然很多。除了地面采样,飞机采样^[7],轮船采样^[8]外,从 1983 年开始在河北香河还进行了多次高空气球探测^[9~11],取得了大量 3000 km 以上的对流层和平流层气溶胶垂直分布资料。根据探测结果,从地面到对流层顶气溶胶浓度大约有 3 个量级的变化,基本符合指数递减规律,标高大约 2 km 左右;验证了 20 km 左右 Junge 层的存在,在该层气溶胶粒子浓度约 1.1 个/ m^3 。在历次探测中有一个值得注意的现象是,几乎每次探测在 5~8 km 左右都有一个气溶胶浓度极大值,这是该地独有的现象,还是一个普遍规律,形成原因是什么,还有待于进一步研究。

气溶胶的分析项目包括不同地区、不同气溶胶粒子的化学成份、物理特征分析。如栾胜基等^[12]利用毛玻璃积分法直接测量了 1983 年 11 月到 1984 年 4 月北京中关村地区气溶胶的吸收系数,并配合光度计测量的大气消光系数估计了该地区气溶胶单次散射反照率和折射率虚部,得到该地采暖期气溶胶吸收系数为 $10^{-4} \sim 10^{-3} m^{-1}$,在非采暖期为 $10^{-4} m^{-1}$,气溶胶单次散射反照率变化范围为 0.76~0.94,折射率虚部变化范围为 0.006~0.035,可以看出同一地区气溶胶光学特性随时间变化非常大。胡欢陵等^[13]同样利用毛玻璃积分法测量了 1984~1988 年期间中国东部城市,皖南农村、黄山山顶、南海等非城市地区的气溶胶吸收系数,并根据米散射理论计算了气溶胶折射率虚部,根据他们的结果,城市地区折射率虚部平均为 0.080,郊区为 0.063,乡村为 0.030,高山为 0.012,南海为 0.006。这与栾胜基等测量的结果相比差别比较明显,栾胜基等的结果较低,由于测量气溶胶吸收系数的方法一致,结果不一致的原因可能出自根据吸收系数计算折射率

虚部的方法不同,具体哪一种方法更准确还有待于进一步研究。如果能够对该方法的准确性作出定量评估,无疑会解决气溶胶光学特性测量中的一个难点,可以用来研究不同地区、不同气溶胶类型的吸收特性和折射率虚部,对气溶胶辐射效应的研究会有很大的帮助。

其他的研究包括张代洲^[14]利用试剂薄膜法分析研究了北京地区单个硝酸盐粒子的特性,得到粗粒子中的硝酸盐主要是在土壤、煤烟、建筑粉尘等表面通过非均相化学反应生成,细粒子主要通过均相反应生成,在一定条件下,北京大气中硝酸盐比例远大于硫酸盐;王明星、任丽新等^[15,16]利用 PIXE 分析方法对华北地区、北京城区气溶胶粒子化学成分进行了分析,结果显示,与美国中部工业城市相比,上述地区 Pb 含量很低,S 含量很高,在采样膜上可见黑色碳粒,说明中国大气污染与欧美有显著不同;沈志来、吴兑等^[17~19]对中国南海地区海盐粒子进行了观测分析,得到在 15.5°N 海域,东北季风期 Cl⁻¹核浓度(878 个/L)比西南季风期(618 个/L)高,气溶胶连续谱宽达 30 μm ,比沿海和内地谱宽,西太平洋热带海域(6.5°N~5°S)是海盐粒子低产区,平均 107 个/L,洋面风速、降雨量是产生差异的主要原因。国家海洋局也多次利用海洋考察船对我国东部海域气溶胶进行了观测分析^[20]。在兰州、重庆、南京等污染较重的城市也进行了一系列的观测研究^[21~23]。

对沙尘暴的采样研究也不断深入,如杨东贞等^[24]研究了 1990 年春季两次沙尘暴过程中离沙尘源不同距离地区的沙尘粒子的物理化学特性,得到在尘暴期间总悬浮颗粒的浓度(TSP)比平时大一个量级以上,沙尘气溶胶主要存在于粒径大于 2.1 μm 的粒子中,污染元素主要存在于粒径小于 2.1 μm 的粒子中。

这里值得一提的是,许黎等^[25]利用高空气球直接采集的样品,分析了 1993 年和 1994 年 8~9 月河北香河地区上空对流层和平流层大气中单个气溶胶粒子的形态及化学元素和化合物的组成。结果发现,1993 年对流层大气中经常出现形状不规则的气溶胶粒子,并有可能是土壤粒子;而在平流层大气中,颗粒物则以具有“卫星”结构的硫酸盐粒子为主;硫酸铵粒子经常出现在对流层的中、下部。香河地区上空气溶胶颗粒物的化学组成比较复杂,单一化学元素组成的粒子较少,粒子主要含有 Si,Fe,Al 和

S等元素。气溶胶粒子的化合物有硫酸盐、硅酸盐、硝酸盐及磷酸盐等。这是到目前为止,国内仅有的一份大气气溶胶化学组成垂直分布的观测分析结果。

通过对气溶胶直接采样分析,得到了不同地区、不同时间气溶胶物理化学特性的时空分布特征以及与周围环境的关系。

3 气溶胶遥感

气溶胶粒子对入射辐射的散射和吸收作用可以使入射辐射的性质和强度发生变化,通过测量入射辐射的变化可以反演气溶胶粒子特性,这是遥感气溶胶的基本原理。利用遥感方法可以直接得到气溶胶辐射特性,并用于气候研究过程。下面分地基遥感和卫星遥感两部分,总结中国科学家在气溶胶遥感研究方面开展的主要工作。

3.1 地基遥感

目前国内开展的地基遥感方法主要有:太阳直接辐射的宽带分光辐射遥感、多波段光度计遥感、根据天空散射亮度分布遥感、全波段太阳直接辐射遥感、华盖计遥感以及激光雷达遥感等。

3.1.1 太阳直接辐射的宽带分光辐射遥感

根据 Angstrom 公式,气溶胶的光学厚度与波长的关系符合:

$$\tau(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha} \quad (1)$$

其中 τ 为大气气溶胶光学厚度, β 表示整层大气气溶胶的浓度,称为 Angstrom 大气浑浊度参数, α 与气溶胶的粒子谱分布有关。

按照式(1),如果已知气溶胶在两个波段的消光,即可求出 β 和 α 的值。根据世界气象组织(WMO)的推荐,利用波长范围分别为 0.53~2.80 μm , 0.63~2.80 μm , 0.7~2.8 μm 的 OG1, RG2, RG8 3 种滤光片测量太阳直接辐射,然后把 3 种滤光片测得的太阳直接辐射相减,可以获得到达地面的 0.53~0.63 μm , 0.63~0.7 μm 波长范围内的太阳直接辐射,根据这两个波段的大气上界太阳辐射常数,可以解方程组得到 β 和 α 的值,从而得到气溶胶浓度和粒子半径的信息^[26]。

位于青海省的瓦里关山中国大气本底基准观测台配备了此种直接辐射仪,祁栋林等^[27]利用 1997 年观测的资料分析了该地大气浑浊度特点,根据他们的结果,该地冬季浑浊度系数最大,夏季最小,冬夏两季的气溶胶波长指数平均为 3.71。这个结果的波长指数接近于大气分子瑞利散射,有点偏大,还应

对这部分资料的处理过程进行进一步研究。如果能够正确处理和利用这些资料,对长时间序列大气浑浊度变化特征的研究非常有利。

3.1.2 多波段光度计遥感

多波段光度计是利用可见到近红外波段范围内一系列窄波段滤光片(通常半波宽度小于 20 nm)测量大气对太阳直接辐射的消光,然后反演大气气溶胶光学厚度和粒子谱。这是目前在气溶胶遥感方法中比较准确,也是应用较多的一种方法。中国较早利用多波段光度计遥感气溶胶的工作是 1980 年赵柏林等^[28]开展的,他们利用自己研制的 7 波段光度计,对北京地区气溶胶进行了 1 a 的遥感观测并反演了粒子谱,毛节泰等^[29]分析了这次遥感得到的气溶胶光学厚度的特征、变化规律及与气象条件的关系。根据这次遥感的结果,北京地区气溶胶光学厚度最大值出现在 5 月份,500 nm 波段光学厚度平均 0.65,9 月份最小,500 nm 光学厚度平均 0.31,波长指数 9 月份最高,11~2 月份较低,说明冬季大粒子较多。到目前为止中国已在不同的地区进行了许多利用光度计遥感气溶胶的研究工作,并取得了一些有代表意义的结果^[30~32]。

为了从消光信息获得尽可能多的气溶胶特性,充分利用有限的光度计遥感结果,李放等^[33]研究了利用两个波段消光差反演气溶胶复折射率的方法,并用于长春静月潭实际遥感结果的分析,根据他们的结果,该地气溶胶折射率虚部范围在 0.01~0.03 之间,这与胡欢陵等^[13]利用积分片测量的结果一致。单纯利用光度计消光信息很难反演气溶胶粒子的相函数、复折射率等多个特性,因此还需要进一步对该方法进行研究,并与其它方法作一些对比试验,确定方法的适应性。

多波段光度计可以准确遥感气溶胶光学厚度,并可以反演 0.1~5 μm 的气溶胶粒子谱等特性,为了获得更大粒子半径的气溶胶信息,还应该考虑气溶胶的散射信息。吕达仁等^[34]提出了同时测量直接消光和小角散射确定气溶胶光学厚度和谱分布的方法,邱金桓等^[35]对该方法进行了试验研究,利用该方法可以较好地提供 0.1~10 μm 粒径范围的气溶胶谱分布信息,目前该方法已经在地面气溶胶遥感中得到了应用。

3.1.3 根据天空散射光亮度分布遥感

来自太阳的入射光被大气分子和大气气溶胶散射,使整个天空都呈现光亮的状态,天空亮度的分布

是由太阳位置和大气中的散射质点特性决定的,分析天空的亮度特征,可以得到气溶胶信息。

邱金桓等^[36]在详细分析了天空亮度与气溶胶光学特性和地面反照率关系的基础上,提出了通过测量 $1^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 的体散射函数、 10° 的散射相函数、 40° 的加权相函数以及 90° 的天空亮度可以分别反演气溶胶粒子谱、气溶胶折射率实部、虚部以及地面反射率的方法。

黎洁等^[37]也提出了一个利用多波段光度计观测太阳直接辐射与太阳所在地平纬圈天空亮度的相对分布同时反演大气气溶胶光学厚度和相函数的方法,并从相函数和光学厚度进一步推算了大气气溶胶的粒子尺度谱和气溶胶粒子折射率,得到北京地区在采暖期气溶胶平均折射率为 $1.517 + 0.034i$,在非采暖期折射率平均为 $1.533 + 0.016i$,折射率虚部与利用积分片测量的结果基本一致;赵增亮等^[38]对这种方法又作了发展,提出了完全通过测量多个天顶角方向的天空亮度相对分布反演气溶胶光学厚度和相函数的方法,避免了仪器定标,反演得到的北京地区 600 nm 处气溶胶不对称因子在 $0.6 \sim 0.7$ 之间。

通常情况下,利用观测天空散射亮度反演气溶胶光学特性的方法要受到地面反照率的影响,为消除地面反照率的影响,邵鸿飞等^[39]提出了利用“频率相近,但气体吸收系数相差很大”的两个波段,构造一个无量纲量,可以使地面反照率的影响减至最小,该方法只是一个理论上的结论,还需要实际遥感的结果作为验证。

利用天空亮度分布遥感气溶胶特性,可以充分利用气溶胶的散射信息,但该方法只适用于大气水均匀的情况,这种条件只有在晴朗的天气情况下才能满足,不适合污染较为严重的天气情况,方法的适用范围受到限制。

3.1.4 利用全波段太阳直接辐射遥感

利用窄波段光度计测量气溶胶光学厚度是一个比较准确有效的方法,但目前还不具备在全国范围内布点进行常规遥感的条件,而国内有几十个日射站全年进行全波段太阳直射辐射的测量,为了能充分利用这些辐射资料研究大气气溶胶特性,邱金桓等^[40]在分析了全波段太阳直接辐射对气溶胶光学

厚度及粒子谱敏感性的基础上提出了从晴天全波段太阳直接辐射信息确定 $0.7\text{ }\mu\text{m}$ 波长气溶胶光学厚度的方法;1997年他又对这个方法作了改进,在加上了能见度信息的基础上,提出了利用全波段太阳短波直接辐射和能见度信息,同时反演整层大气气溶胶光学厚度和平流层光学厚度的方法,并用于长时间序列大气气溶胶特性的研究^[41]。

该方法充分利用了已有的观测资料,可以得到不同地区气溶胶长时间的变化特性,对研究气溶胶特性非常有利,但由于云的影响不能完全去除,遥感的准确度会受影响,具体的准确度需要通过与光度计等遥感手段作对比来确定。

3.1.5 华盖计遥感

华盖计是利用测量太阳附近的天空亮度(华盖区)反演气溶胶特性的一种方法,最早是由 Deirmendjian^[42]在1957年提出。这个区域较强的天空亮度主要是由于气溶胶粒子较强的一次前向散射引起的。通过测量气溶胶的直接消光和华盖区天空亮度,可以反演较大半径粒子的气溶胶光学厚度、粒子谱等信息。1981年吕达仁等^[34]讨论的小角散射就是测量的华盖区粒子散射特性。石广玉等^[①]、Shi等^[43]利用太阳华盖辐射计分别在北京和黑河地区进行了气溶胶光学特性的观测。他们发现,这两个地区的气溶胶光学厚度均较大,即使在晴空条件下, $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 处的光学厚度也可以达到 $0.4 \sim 0.6$;两地的气溶胶体积谱分布均呈现双模结构,第2峰值出现在 $4\text{ }\mu\text{m}$ 附近,但第1峰值的位置略有不同:在北京地区为 $0.3\text{ }\mu\text{m}$,在黑河地区为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 。

3.1.6 激光雷达遥感

以上都是以太阳为光源的被动遥感,并且局限于研究整层气溶胶的特性,而激光雷达是一种主动遥感手段,利用激光雷达可以得到气溶胶的垂直分布信息。20世纪60年代中期中国研制成功第一台激光气象雷达^[44],并开展了一系列激光雷达探测大气的研究^[45 \sim 47]。邱金桓等^[48]于1982年5月首次用激光雷达遥感了沙尘暴粒子的消光特性和沙尘暴垂直分布特性,由于当时所用激光雷达功率较小,只探测到垂直高度大约 2 km 范围,结果显示沙尘暴发生时气溶胶光学厚度可以有一个量级的变化;他们对1988年4月发生的沙尘暴进行的激光雷达探

^① 石广玉,许黎,陈继平等.北京地区1991年春夏之交的大气气溶胶光学特性测量.见:第四届全国气溶胶会议文集,西安,1992,33~38
万方数据

测,垂直高度达到了6 km以上,揭示出沙尘暴垂直结构依赖于风场结构^[49]。1986年,杨舒等^[50]还从理论上研究了利用多波段激光雷达反演气溶胶粒子谱和复折射率的方法。

激光雷达可以遥感气溶胶粒子随高度的分布特征,近几年利用激光雷达遥感气溶胶的研究得到了很大重视,但由于激光雷达设备费用较高,目前仅在合肥、北京等地利用激光雷达进行长期遥感气溶胶的工作。中国科学院安徽光机所^②利用自己研制的523,1064 nm双波长激光雷达从1995年开始进行大气气溶胶的水平和垂直消光特性探测,积累了大量数据,得到了不同大气条件下典型的气溶胶垂直分布廓线和气溶胶指数的特征。石广玉等^[51]与日本合作在西藏拉涉等地也开展了短期激光雷达遥感气溶胶的工作。

3.2 卫星遥感

地面遥感气溶胶可以得到较为准确的气溶胶信息,但是目前这种方法只能在有限的区域进行,不能用来遥感大范围气溶胶光学特性。利用卫星遥感可以弥补这个不足,特别是在环境恶劣的边远地区和广阔的海洋地区,卫星遥感方法更能显出它的优势。

国际上开展卫星遥感气溶胶的工作始于20世纪70年代中期^[52],中国科学家从80年代中期开始也进行了这方面的研究。1986年赵柏林等^[53]利用NOAA AVHRR资料,进行了遥感海上大气气溶胶的研究,由于是尝试阶段,仅对渤海上空一个点进行了遥感。周明煜等^[54]利用NOAA AVHRR资料分析了1993年4月北京、天津上空沙尘暴特性,得到在沙尘暴发生时,AVHRR可见光通道1和可见光通道2的反射率都有增加,沙尘暴强度越大,反射率增加越大,但仅给出了反射率增加的大小,没有根据卫星反射率的变化对沙尘暴进行定量研究;刘莉^[55]利用GMS-5可见光通道研究了遥感湖面上空气溶胶光学厚度的方法和可行性。韩志刚^[56]利用ADEOS上辐射偏振探测器(POLDER)的资料进行了遥感草地上空气溶胶的实验研究。

总的来说,中国科学家已对卫星遥感气溶胶进行了一些研究,但相对于国际上在这个领域的研究工作来说,我们还需要加大研究力度,特别应注重利用卫星遥感中国地区大范围气溶胶光学特性,发挥

卫星遥感的优势,此外还要注意利用新的探测器(如:POLDER, MODIS等)来研究大气气溶胶。

4 气溶胶辐射特性及其气候环境效应的研究

气溶胶的辐射特性是气溶胶遥感和气溶胶气候环境效应研究的基础。前面已经提到的有关气溶胶吸收系数的测定,气溶胶复折射率的测定都是与气溶胶辐射特性有关的基础研究,目前中国有关气溶胶辐射特性的研究主要集中在以下几方面。

4.1 非球形粒子散射和吸收特性研究

1908年Mie G提出的球形粒子散射和吸收的计算方法,奠定了气溶胶光学研究的基础。实际的大气气溶胶粒子并非严格的球形粒子,虽然对于含有大量气溶胶粒子的实际大气气溶胶系统来说,球形粒子是一个很好的假设,但是对于非球形粒子散射特性的研究仍然具有重要的理论和实际价值。非球形粒子的散射特性研究方面的主要工作有:蔡启铭等^[57]利用矢量射线追踪方法研究了六棱柱和三棱锥冰晶的散射相矩阵;刘黎平等^[58]利用扩展边界条件及Monte-Carlo方法计算了非球形粒子的散射和吸收特性;丁继烈等^[59]也讨论了非球形轴对称粒子散射矩阵元素展开系数的数值计算方法。

4.2 环境因素对粒子辐射特性的影响

实际大气中的气溶胶粒子受到周围环境因素的影响,其辐射特性也会发生变化。通常情况下,气溶胶粒子具有吸湿性,特别是硫酸盐等水溶性粒子受周围环境湿度的影响较大,这方面的研究主要集中在大气湿度对气溶胶辐射特性的影响上面。

孙景群^[60]根据3种湿气溶胶模型,理论计算了不同的气溶胶谱分布在激光6943埃波段情况下,湿气溶胶的消光系数和体后向散射的微分截面与湿度的关系。理论计算的结果显示,在受湿度影响粒径增加1倍时,湿气溶胶的消光系数约为干气溶胶的4倍,与气溶胶谱分布和湿气溶胶模型关系不大,但体后向散射微分截面的增加不但与气溶胶粒子谱有明显关系,而且与湿气溶胶模型也有很大关系,因此在环境湿度较大时增加了激光遥感气溶胶的复杂性。这个结论与他在1985年讨论的能见度与相对湿度的关系中的结论一致,实测的海洋气溶胶消光

^② 周军,岳古明,金传佳等. L300可移动式双波长激光雷达对流层气溶胶探测. 中国科学院安徽光学精密机械研究所国家八六三计划“大気污染遥感实验室”L300型激光雷达验收报告,1998

与湿度的关系与理论计算值基本一致^[61]。

李子华、杨军等^[62~64]根据在重庆的实测气溶胶资料,研究了相对湿度对气溶胶粒子短波辐射特性的影响以及考虑了湿度影响以后气溶胶对城市白天和夜间的温度效应,得到相对湿度在65%~95%变化时,相对湿度对气溶胶粒子群体光学特性参数和太阳增温率的影响在量级上与气溶胶浓度加倍的影响相当。对于实际大气,考虑和不考虑相对湿度的影响可以使计算得到的太阳增温率偏差达1.0 K以上;白天气溶胶粒子的存在使边界层中上层增温,近地层降温,大气稳定度增加,夜晚的温度效应与此相反,相对湿度增加对边界层的温度效应与气溶胶增加的温度效应一致。

5 气溶胶的气候环境效应

气溶胶对气候和环境的辐射效应研究基本上是从20世纪90年代开始的,主要包含两部分内容:一是不同地区气溶胶对周围环境的辐射效应研究,主要局限于局地范围和特定的气溶胶类型;二是气溶胶气候效应的模式研究,主要从局域和全球尺度对气溶胶的气候效应进行模拟研究,以阐明气溶胶对气候变化的影响。

在研究局地气溶胶的辐射效应方面,兰州大学作了大量的研究工作。兰州是中国主要的重工业城市,由于其特殊的地理环境,兰州市的大气环境污染是一个非常突出的问题。20世纪80年代开始兰州大学就开展了光化学烟雾等方面的研究工作,90年代开始关注气溶胶对环境的辐射效应,对城市边界层气溶胶的辐射效应进行了很有成效的研究工作,并建立了兰州城市气溶胶光学特性参数化方案,文献[21]对此有详细论述。李子华等^[63~64]对重庆气溶胶辐射特性也进行了详细研究。沈志宝、魏丽等^[65~67]根据“黑河地区地-气相互作用观测试验研究(HEIFE)的地面辐射和大气浑浊度观测资料,配合同期AVHRR卫星观测资料,研究了大气沙尘辐射特性以及大气沙尘对地面辐射收支的影响。张瑛等^[68]还研究了不同比例、不同尺度、不同混合方式情况下硫酸盐和碳黑气溶胶的辐射效应。

目前国际上对于大尺度气溶胶的气候效应的研究主要是建立在模式研究基础之上,中国科学家对气溶胶气候效应也开展了很多研究工作。

尹宏等^[69]利用一维辐射对流模式,采用两流近似和累加法求解多次散射的辐射传输方程,计算了

一般天气条件和沙尘暴天气下气溶胶粒子对太阳辐射的吸收和对大气的加热,得到北京沙尘暴天气发生时大气太阳辐射加热率比无气溶胶大气多80%~318%。

巴勒德等^[70]利用两层大气环流模式,研究了1991年爆发的皮纳图博火山对短期气候的影响,结果显示皮纳图博火山喷发使低纬太阳辐射减少,亚洲和北美大陆中高纬度地面温度上升,火山喷发对辐射的影响使北半球主要的大气活动中心和南方涛动强度减弱。

胡荣明等^[71]根据国内测算的排放因子数据和国家、部委及各省市统计的排放源数据,计算得到了中国大陆 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的SO₂排放分布,应用二维能量平衡模式计算了中国地区人为排放的硫酸盐气溶胶的辐射强迫,得到中国地区由于人为排放的硫酸盐气溶胶引起的辐射强迫和最大地面温度变化都集中在在中国东部长江中下游地区和四川地区,最大辐射强迫达 -3 W/m^2 ,然后他利用该模式研究了平流层气溶胶的辐射强迫水平分布以及皮纳图博火山喷发对地面平衡温度的影响^[72],发现平流层气溶胶辐射强迫水平分布不仅与本身的水平变化有关,而且与下垫面反照率有很大关系,皮纳图博火山喷发后1.5 a左右降温最大,5 a以后降温已经很小。

罗云峰^[73]利用全国42个甲级日射站1979~1990年直接辐射资料,根据改进的邱金桓宽带遥感方法,计算得到了全国范围内气溶胶分布,然后把气溶胶的辐射嵌套于NCAR CCM1三维大气环流模式中,模拟了中国地区气溶胶的直接辐射强迫及其气候效应,结果显示中国地区大气气溶胶辐射强迫春季最大,达 -13 W/m^2 ,冬季1月最小,为 -5.3 W/m^2 ,年平均 -8 W/m^2 ,两个明显的大值区为青藏高原北侧到黄河中上游及河套地区,四川盆地、贵州北部到长江中游以南地区。该研究把气溶胶的辐射嵌套于三维大气环流模式中研究气溶胶的辐射强迫,更能反应实际大气气溶胶对气候的影响,是气溶胶气候效应研究的一个发展方向。

由于复杂的二维能量平衡模式在研究火山活动等气溶胶对气候影响时还有很多不确定性。1999年辛国君^[74]利用比较简单的零维能量平衡模式分析了气溶胶的气候效应,结果表明,气溶胶含量增加能够引起大气温度升高、地表感热输送和蒸发潜热减少,引起全球干旱。气溶胶对大气的温度效应不仅与气溶胶光学特性有关,还强烈依赖于地面反照

率特性,地面反照率的反馈效应使气溶胶的气候效应加强。

虽然对气溶胶的气候效应研究已取得了一些进展,但与国外在这方面的研究相比,不管是研究的深度还是广度都有待于加强,特别是气溶胶的间接辐射效应是目前国际上研究较多的一个问题,中国在这方面作的工作还较少。

6 沙尘暴研究

沙尘暴是一种灾害性天气现象,当沙尘暴发生时,大量沙尘粒子悬浮于空中并随风移动,对人畜及环境造成极大危害。沙尘暴属于大气气溶胶的一种极端情况,由于它的突发性强,危害巨大,在此单独论述有关的研究工作。

中国沙尘暴主要多发于中国西北干旱半干旱地区的春季,有关沙尘暴的研究始于20世纪70年代末,主要针对1977年4月17日甘肃特大沙尘暴的研究^[5]。80年代有关沙尘暴的研究相对较少,1993年5月5日发生在中国西北地区的强沙尘暴,造成了巨大危害,使得沙尘暴的研究再次引起了人们的重视。1993年9月由中国气象局和中国科学院联合在兰州召开了首次沙尘暴天气研讨会,对沙尘暴产生的机制、传输、防灾救灾等方面进行了深入的探讨,朱福康对这次会议的内容进行了详细的综述^[75]。此后在沙尘暴特征分析、轨迹追踪等方面作了许多研究工作,如盛裴轩等^[76]利用三维轨迹法分析了3次沙尘暴的传输路线并分析了与天气过程的关系,杨东贞等^[77]分析了20世纪50年代到1992年中国北方几个沙尘暴多发地区沙尘暴变化趋势。另外在沙尘暴的气象卫星遥感方面也进行了一些研究^[54,78]。

除了有关沙尘暴的特性分析研究,近几年还开展了沙尘暴的模式研究以及沙尘暴的气候效应研究。陈伟民^[79]利用中尺度模式MM4模拟了1994年4月5~11日发生的沙尘暴过程中海平面气压变化及部分地区的大风;刘春涛等^[80]把一个沙尘暴的源、汇项参数化方案和沙尘输送方程引入MM4,模拟了1993年5月沙尘暴系统演变、沙尘粒子浓度垂直分布、粒子输送及沉降过程;刘毅^[81]也利用MM4模拟了1992年4月10日发生的沙尘暴的天气过程

及沙尘气溶胶的输送过程。黄美元等^[82]提出了一个适合中国北方黄沙输送模拟与预报的起沙机制模型,并采用此模型建立了一个适合东亚地区的分谱的黄沙输送模型。肖辉等^[83]利用STEM-II三维区域大气化学模式研究了1994年3月1~14日东亚沙尘气溶胶对硫化物的输送和沉降的影响。

有关沙尘暴的气候效应已包含在气溶胶的气候效应研究里面,在此不再赘述。国内国际沙尘暴研究的详细情况,可以参阅全浩、翟章、朱福康、钱云等从不同的侧面对沙尘暴的研究作的综述以及方宗义等编著的《中国沙尘暴研究》一书^[84~88]。

2000年春季中国北方地区连续发生的多起沙尘暴,再次引起了国家和大气科学界对沙尘暴研究的重视,这必将进一步推动中国的沙尘暴研究工作。

7 几点建议

在大气气溶胶的研究方面,中国科学家已经进行了大量的研究工作,也提出了很多有价值的研究方法,得到了大量的有价值的数据。根据目前的研究状况,我们认为应开展以下几方面工作:

(1) 数据资料的收集整理。这是一项很重要的工作,现有的观测数据大部分分散在各研究单位,虽然资料很多,但没有形成整体优势。可以考虑在全国建一个气溶胶资料库,系统分析气溶胶的时空特征,找出目前研究的不足,然后有针对性的开展一些研究工作,然后提出一个较为准确的中国气溶胶模型。

(2) 不同遥感方法的综合比较试验。目前研究气溶胶的方法很多,不同方法适应范围、准确性如何还需要进一步研究。可以考虑进行一次综合的仪器和方法的比较试验,通过分析同时观测的结果,评价不同方法的准确性、适应范围,为以后的气溶胶研究提供可行方法和评价结果可信性。

(3) 在有条件的地方进行长时间的气溶胶观测,一方面可以得到气溶胶长期变化趋势,另一方面可以为气溶胶研究提供基本的参考数据。

(4) 可以考虑集中各方面人力物力,进行一次大的气溶胶综合试验,促进和加强在气溶胶探测、气溶胶直接和间接辐射效应、气溶胶气候效应等方面的研究。

参考文献

- 1 Summary for Policymakers. A Report of Working Group 1 of the IPCC. 2001 , 8
- 2 邹进上 莫天麟,许绍祖. 夏季长江下游地区吸湿性巨核的分布特点.南京大学学报(自然科学版),1964 ,8 : 148 ~ 165
- 3 邹进上 莫天麟. 南京地区吸湿性巨核的分布特点及其与天气过程的关系.南京大学学报(自然科学版),1965 ,9 : 485 ~ 500
- 4 游荣高,洪钟祥,吕位秀等. 边界层大气气溶胶浓度与尺度谱分布的时空变化.大气科学,1983 ,7(1): 88 ~ 94
- 5 徐国昌,陈敏连,吴国雄. 甘肃省 "4.22"特大沙暴分析.气象学报,1979 ,37(1): 26 ~ 35
- 6 周明煜,曲绍厚,宋锡明等. 北京地区一次沙暴过程的气溶胶特征.环境科学学报,1981 ,1(3): 207 ~ 218
- 7 王庆. 济南市一次晴空气溶胶粒子特征分析.山东气象,1994 ,14(4): 31 ~ 35
- 8 Zhou M Y , Yang S J , Parungo F P et al. Chemistry of marine aerosol over the Western Pacific Ocean. J G R , 1990 , 95(D2) : 1779 ~ 1787
- 9 任丽新,游荣高,张育堂. 0 ~ 33 公里大气气溶胶的垂直分布.科学通报,1984 ,29(18): 1121 ~ 1124
- 10 石广玉,许黎,吕位秀等. 0 ~ 33 公里大气臭氧和气溶胶垂直分布的气球观测.科学通报,1986 ,31(15): 1165 ~ 1167
- 11 石广玉,许黎,郭建东等. 大气臭氧与气溶胶垂直分布的高空气球探测.1996 ,大气科学,1996 ,22(4): 401 ~ 407
- 12 栾胜基,毛节泰. 大气气溶胶吸收系数的测量.气象学报,1986 ,44(3): 321 ~ 327
- 13 胡欢陵,许军,黄正. 中国东部若干地区大气气溶胶虚折射率指数特征.大气科学,1991 ,15(1): 18 ~ 23
- 14 张代洲. 北京市区大气中单个硝酸盐粒子的特征.大气科学,1996 ,20(4): 408 ~ 413
- 15 王明星,吕位秀,任丽新等. 华北地区大气气溶胶的化学成分.大气科学,1981 ,5(2): 136 ~ 144
- 16 任丽新,Winchester J W ,吕位秀等. 北京冬春季大气气溶胶化学成分的研究.大气科学,1982 ,6(1): 11 ~ 17
- 17 沈志来,黄美元,吴玉霞. 西太平洋热带海域海盐粒子的观测和结果.大气科学,1989 ,13(1): 87 ~ 91
- 18 吴兑,毛伟康,甘春玲等. 西沙永兴岛西南季风期大气中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 核的分布特征.热带气象,1990 ,6(4): 357 ~ 364
- 19 吴兑,游积平,关越坚. 西沙群岛大气中海盐粒子的分布特征.热带气象学报,1996 ,12(2): 122 ~ 129
- 20 刘毅,周明煜. 中国东部海域大气气溶胶入海通量的研究.海洋学报,1999 ,21(5): 38 ~ 45
- 21 王式功,张镭,陈长和等. 兰州地区大气环境研究的回顾与展望.兰州大学学报(自然科学版),1999 ,35(3): 189 ~ 201
- 22 陈金荣,周文贤. 重庆市区大气气溶胶粒子的时空分布和物理特性.气象科学,1992 ,12(4): 436 ~ 444
- 23 陈金荣,周文贤,安强. 南京冬季大气气溶胶的特征.南京气象学院学报,1996 ,19(3): 374 ~ 378
- 24 杨东贞,王超,温玉璞等. 1990 年春季两次沙尘暴特征分析.应用气象学报,1995 ,6(1): 18 ~ 26
- 25 许黎,樊小标,石广玉等. 对流层平流层气溶胶粒子的形态和化学组成.气象学报,1998 ,56(5): 551 ~ 559
- 26 尹宏. 大气辐射学基础.北京:气象出版社,1993. 144 ~ 145
- 27 祁栋林,黄建青,赵玉成. 瓦里关山大气浑浊度的初步分析.青海环境,1999 ,9(1): 18 ~ 21
- 28 赵柏林,王强,毛节泰等. 光学遥感大气气溶胶和水汽的研究.中国科学(B),1983 ,10 : 951 ~ 962
- 29 毛节泰,王强,赵柏林. 大气透明度光谱和浑浊度的观测.气象学报,1983 ,41(3): 322 ~ 331
- 30 王栋梁,邱金桓. 塔克拉玛干沙漠春季大气气溶胶光学特性研究.大气科学,1988 ,12(1): 75 ~ 81
- 31 Zhou J , Wang Z E , Han J C et al. Variability of aerosol Optical properties over Hefei during September 1993 to September 1994. Acta Meteor Sinica , 1996 , 10(1): 80 ~ 95
- 32 张军华,刘莉,毛节泰. 地基多波段遥感西藏当雄地区气溶胶光学特性.大气科学,2000 ,24(4): 549 ~ 558
- 33 李放,吕达仁. 利用消光谱反演气溶胶复折射率的一种新方法及其应用.遥感技术与应用,1995 ,10(2): 1 ~ 8
- 34 吕达仁,周秀骥,邱金桓. 消光 - 小角散射综合遥感气溶胶分布的原理与数值试验.中国科学,1981 ,12 : 1516 ~ 1523
- 35 邱金桓,汪宏七,周秀骥,吕达仁. 消光 - 小角散射法遥感气溶胶谱分布的实验研究.大气科学,1983 ,7(1): 33 ~ 41
- 36 Qiu Jinhua , Zhou Xiuji. Simultaneous determination of aerosol size distribution and refractive index and surface albedo from radiance - part I : Theory. Adv Atmos Sci , 1986 , 3(2): 162 ~ 171
- 37 黎洁,毛节泰. 光学遥感大气气溶胶特性.气象学报,1989 ,47(4): 450 ~ 456
- 38 赵增亮,毛节泰. 联合反演大气气溶胶光学特性和地面反照率.大气科学,1999 ,23(6): 722 ~ 732
- 39 邵鸿飞,毛节泰. 适于反演陆面大气气溶胶大气气溶胶光学厚度的物理量.中国科学技术大学学报,1999 ,29(4): 684 ~ 690
- 40 邱金桓. 从全波段太阳直接辐射确定大气气溶胶光学厚度 I 理论.大气科学,1995 ,19(4): 385 ~ 394

- 41 邱金桓,潘继东,杨理权等.中国10个地方大气气溶胶1980~1994年间变化特征研究.《大气科学》,1997,21(6):725~733
- 42 Lenoble J. Atmospheric Radiative Transfer. Hampton: A. Deepak Publishing, 1993. 503
- 43 Shi G Y, Fan X B, Guo J D, et al. Measurements of the atmospheric aerosols optical properties in HEIFE Area. Proceeding of International Symposium on HEIFE, 1994, 640~646
- 44 吕达仁.我国大气物理研究进展.《物理》,1999,28(11):654~661
- 45 中国科学院大气物理所集刊第1号.激光在气象探测中的应用.北京:科学出版社,1973
- 46 周诗健,陶丽君,朱文琴.几种激光探测大气消光系数方法的比较.《大气科学》,1981,5(4):444~448
- 47 孙景群.激光遥测大气消光系数的误差分析.《气象学报》,1989,47(3):332~336
- 48 邱金桓,赵燕曾,汪宏七.激光探测沙暴过程中的气溶胶消光系数分布.《大气科学》,1984,8(2):205~210
- 49 邱金桓,孙金辉.沙尘暴的光学遥感及分析.《大气科学》,1994,18(1):1~10
- 50 Yang S, Zhou X J, Zhao Y Z. A theoretical study of multi-wavelength Lidar exploration of optical Properties of atmospheric aerosol. *Adv Atmos Sci*, 1986, 3: 23~28
- 51 白宇波.拉萨上空气溶胶激光雷达与臭氧高空气球探测[学位论文].北京:北京大学环境科学中心,2000
- 52 Carlson T N, Wending P. Reflected radiance measured by NOAA-3 AVHRR as a function of optical depth for Saharan dust. *J Appl Meteorol*, 1977, 16: 1368~1371
- 53 赵柏林,俞小鼎.海上大气气溶胶的卫星遥感研究.《科学通报》,1986,31:1645~1649
- 54 Zhou M Y, Chen Z, Hunag R, et al. Effects of two dust storms on solar radiation in the Beijing-Tianjin area. *Geophys Res Lett*, 1994, 21(24): 2697~2700
- 55 刘莉.GMS5卫星遥感气溶胶光学厚度的试验研究[学位论文].北京:北京大学地球物理系,1999
- 56 韩志刚.草地上空对流层气溶胶特性的卫星偏振遥感—正问题模式系统和反演初步实验:[学位论文].北京:中国科学院大气物理研究所,1999
- 57 蔡启铭,杨平.六棱柱和三棱锥冰晶的散射相矩阵——一种矢量射线追踪方法.《气象学报》,1990,48(2):198~209
- 58 刘黎平,钱永甫.气溶胶粒子形状对其辐射特性影响的研究.《南京大学学报》,1996,32(2):316~321
- 59 丁继烈,许丽生.非球形轴对称粒子光散射的散射矩阵元素展开系数的数值计算.《成都气象学院学报》,1999,14(3):219~225
- 60 孙景群.湿气溶胶的光散射特性.《高原气象》,1983,2(1):49~54
- 61 孙景群.能见度与相对湿度的关系.《气象学报》,1985,43(2):230~234
- 62 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.《大气科学》,1999,23(2):239~247
- 63 李子华,杨军,黄世鸿.考虑湿度影响的城市气溶胶粒子的白天温度效应.《大气科学》,2000,24(1):87~94
- 64 李子华,涂晓萍.考虑湿度影响的城市气溶胶夜晚温度效应.《大气科学》,1996,20(3):359~366
- 65 魏丽,沈志宝.大气沙尘辐射特性的卫星观测.《高原气象》,1998,17(4):347~355
- 66 沈志宝,魏丽.黑河地区大气沙尘对地面辐射能量收支的影响.《高原气象》,1999,18(1):1~8
- 67 沈志宝,魏丽.中国西北大气沙尘对地气系统和大气辐射加热的影响.《高原气象》,1999,18(3):425~435
- 68 张瑛,高庆先.硫酸盐和碳黑气溶胶辐射效应的研究.《应用气象学报》,1997,8(增刊):87~91
- 69 尹宏,韩志刚.气溶胶对大气辐射的吸收.《气象学报》,1989,47(1):118~123
- 70 巴勒德,吴池胜.皮纳图博火山喷发对气候影响的数值实验.《中山大学学报(自然科学版)》,1997,36(6):102~107
- 71 胡荣明,石广玉.中国地区气溶胶的辐射强迫及其气候响应试验.《大气科学》,1998,22(6):919~925
- 72 胡荣明,石广玉.平流层气溶胶的辐射强迫及其气候响应的水平二维分析.《大气科学》,1998,22(1):18~24
- 73 罗云峰.中国地区气溶胶光学厚度特征及其辐射强迫和气候效应的数值模拟[学位论文].北京:北京大学地球物理系,1998
- 74 辛国君.用零维能量平衡气候模型分析大气气溶胶的气候效应.《北京大学学报(自然科学版)》,1999,35(3):375~382
- 75 朱福康,汤绪.我国沙尘暴天气的研究—全国沙尘暴天气研讨会综述.《气象科技》,1994,1:10~13
- 76 Sheng P X, Meng G L, Dou et al W Y. Trajectory analyses of the dust storms over East Asia. *Acta Meteor Sinica*, 1994, 8(2):238~246
- 77 杨东贞,房秀梅,李兴生.我国北方沙尘暴变化趋势分析.《应用气象学报》,1998,9(3):352~358
- 78 孙司衡,郑新江.沙尘暴的卫星遥感监测与减灾服务.《测绘科学》,2000,25(2):33~36
- 79 陈伟民,王强,牛志敏等.中国西部"4·5"沙尘暴过程中尺度低压的数值模拟.《中国沙漠》,1996,16(2):140~144

- 80 刘春涛,程麟生. 黑风暴的沙尘形成与输送参数化及中尺度数值试验. 气象学报, 1997, 55(6): 726~739
- 81 刘毅,任丽新,周乐义等. 一次黄沙输送过程的数值模拟研究. 大气科学, 1998, 22(6): 905~912
- 82 黄美元,王自发. 东亚地区黄沙长距离输送模式设计. 大气科学, 1998, 22(4): 625~637
- 83 肖辉. 用 STEM-II 模式研究东亚地区春季沙尘气溶胶对硫化物输送和沉降的影响. 气候与环境研究, 1998, 3(2): 106~116
- 84 全浩. 关于黄沙研究与进展. 环境科学与技术, 1994, 17(1): 1~12
- 85 翟章,许宝玉,贺慧霞等. 我国沙尘暴灾害的概况和对策. 中国减灾, 1996, 12(1): 23~26
- 86 朱福康,江吉喜,郑新江等. 沙尘暴天气研究现状和未来. 气象科技, 1999, 4(1): 1~8
- 87 钱云,符淙斌,王淑瑜. 沙尘气溶胶与气候变化. 地球科学进展, 1999, 14(4): 391~394
- 88 方宗义,朱福康,江吉喜等编. 中国沙尘暴研究. 北京:气象出版社, 1997. 15~18

SUMMARY COMMENT ON RESEARCH OF ATMOSPHERIC AEROSOL IN CHINA

Mao jietai Zhang Junhua Wang Meihua

(Department of Atmospheric Science, Peking University, Beijing 100871)

Abstract

The research on atmospheric aerosol in China is summarily commented in this paper, include the direct sample and analyzed, the ground and satellite remote sensing, the research of the radiative property of the atmospheric aerosols and its climate effect, the format and the transport of the dust storm. The direct sample not only analyzed the mass concentration and the size distribution, but also the chemical composition of the aerosol. The balloon observation get the aerosol's samples in the troposphere and lower stratosphere. The particles were analyzed by using a transmission electron microscope equipped with an energy-dispersive X-ray analyzer. Surface remote sensing and multi satellites data, include AVHRR, SIRS, TOMS, POLDER etc was used to retrieval the radiative property of the atmospheric aerosol, special, combining the extinction and forward scattering observation and using the distribution of the sky light, the size distribution and the phase function of the aerosol are retrieval. The Climatic effect of the aerosol was research with the numerical simulation. The influence on non-spheroid particles and water soluble particles are calculated. The directed sample and analyzed of the sand particles provide the basic knowledge used to research the formation and transport of the dust storm. Different method is discussed and several pieces of proposal are brought forward in this research area.

Key words: Aerosol, Atmospheric environment, Climate change.