# 利用 MODIS 卫星资料对中国中东部 和印度次大陆气溶胶特性的分析

## 王 雨 傅云飞

中国科学技术大学地球和空间科学学院,合肥 230026

**摘 要**利用 Terra 和 Aqua 卫星上的 MODIS 探测反演气溶胶产品,比较分析了中国中东部和印度次大陆地 区的气溶胶物理特性的异同。研究结果表明:中国中东部气溶胶类型以烟尘为主,印度次大陆地区东、西部分 别以烟尘和沙尘为主。两地气溶胶光学厚度均有明显的年际变化,冬季低,夏季高。在夏季,两地烟尘所占比 例都很大,且光学厚度也大,故两地污染状况都比较严重。总体来说,中国中东部地区污染程度要高于印度次 大陆地区。

关键词 气溶胶 MODIS 中国中东部 印度次大陆 **文章编号** 1006-9585 (2007) 02-0137-10 **中图分类号** P402 **文献标识码** A

# Comparison on Aerosol Properties Between Central and East China and Indian Subcontinent by Using MODIS Products

WANG Yu and FU Yun-Fei

School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

**Abstract** In order to expose the similarities and differences of aerosol properties, such as aerosol optical depth, aerosol type, mass concentration and fine aerosol fraction, between Central and East China (CEC) and Indian Subcontinent (IS), we studied aerosol properties over the both regions by using standard data sets, aerosol and atmosphere products, derived from the MODIS onboard the Terra and Aqua satellites. Analyzed results show the evident differences of aerosol properties between CEC and IS. Over CEC, the majority of aerosol type is smoke. Higher Aerosol Optical Depth (AOD) and higher ratio of small particles in summer than other seasons indicates severe air pollutant during summer. Over IS, the majority of aerosol is dust in west part and smoke in east part during spring, and AOD is low. But in summer, the whole IS is dominated by smoke aerosols that results in higher AOD. Analysis indicates much more pollutant during summer in IS. But more pollutant can be found in CEC than in IS. Furthermore, AOD of two locations are highest in summer and lowest in winter in interannual variation. **Key words** aerosol, MODIS, Central and East China, Indian Subcontinent

1 引言

大气气溶胶的辐射强迫效应对气候变化的作

用已被观测事实和数值模拟所证实<sup>[1,2]</sup>。但由于气 溶胶时空分布的不确定性、气溶胶粒子物理和化 学特性的多变性,使得气溶胶成为气候变化及其

收稿日期 2005-10-19 收到, 2006-10-14 收到修定稿

**资助项目** 国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418304、中国科学院知识创新工程重要方向项目 ZKCX2-SW-210、国家自然科学基金资助项目 40175015 和 40375018、国家自然科学基金海外杰出青年基金 40428006 以及王宽诚教育基金

作者简介 王雨,男,1977年出生,在职博士生,讲师,从事云和气溶胶研究。E-mail: wangyu09@ustc.edu.cn

预测中一个重要的不确定因子<sup>[3~5]</sup>。气溶胶对气 候的影响机制来自于3方面,首先是气溶胶粒子 对辐射的直接散射和吸收(称之为气溶胶的直接 效应)[6]。其中,它对太阳短波辐射的散射将提高 地球的反照率,使得地气系统获得的太阳短波辐 射减少,从而引起地气系统降温。同时,它对太 阳辐射的吸收将直接加热大气,成为大气热源并 导致大气环流的变化。其次,气溶胶作为云凝结 核(CNN)加入云微物理和化学过程,导致云粒 子减小, 云数量增多, 反照率加强, 云光学厚度 增大, 液态水含量增加, 云生命史延长, 改变云 辐射特性,进而改变地气系统的能量平衡,引起 气候变化(称之为气溶胶的间接效应)[7]。此外, 气溶胶对与气候相关的各种物质(如温室气体) 有间接的化学反应,将改变这些物质的浓度,从 而也可以影响气候<sup>[8]</sup>。比如含氮氧化合物的水溶 性气溶胶粒子水解成 HNO<sub>3</sub> 的反应将消耗 NO<sub>r</sub>, 进而影响 O3 的生成。全球化学模式研究的结果表 明<sup>[9]</sup>,若考虑 N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>的水解反应,O<sub>3</sub> 含量将减少 25%。因此,研究大气气溶胶对深入了解全球辐 射收支平衡、水循环平衡以及气候变化等问题具 有重要意义。

为了理解大气气溶胶这种复杂的辐射强迫效 应,并应用于模式估计和预测其对气候变化的影 响,首先必须准确定量地描述气溶胶的粒子分布 和光学性质参数。目前,用于测量这些参数的主 要手段分为地基、空基和卫星遥感3种<sup>[10~18]</sup>。其 中,由于卫星遥感技术在观测气溶胶的分布和光 学特性等方面不受地理环境因素的限制,故这种 方法备受重视,且被广泛应用于气溶胶的研究领 域<sup>[19~21]</sup>。

中国和印度,作为两个最大的发展中国家, 近些年来经济均快速发展,环境污染问题也越发 突出。据报道<sup>[22]</sup>,中国和印度均是全世界最大的 煤炭能源消费国,煤提供了超过半数的能源需求。 自 1980年以来,煤炭的消费量逐年增长。其中, 2002年两国的煤炭消费量总和已达 10 亿吨,且预 计在 2025年将达到 20 亿吨。由于煤具有高的含 灰量,且两国工业技术的相对落后致使燃烧效率 较低,故如此高的煤炭消费必将导致大量的工业 烟尘排放,如硫氧化物、氮氧化物、黑炭粒子等, 从而使得大气中气溶胶数量增加,改变大气的光 学厚度。但是,由于两国地理环境不同和受控气 候系统的差异,气溶胶种类、性质、浓度,以及 其对大气光学厚度的影响程度是否存在差异尚未 知晓。因此,本文将利用地球观测系统(Earth Observing System, EOS)中的Terra和Aqua两 颗极轨环境遥感卫星上搭载的中分辨率成像光谱 仪(MODerate resolution Imaging Spectro-radiometer, MODIS)的观测反演结果,对经济发展 更快的中国中东部和印度次大陆地区气溶胶状况 进行分析对比,以发现两个区域的气溶胶分布 特征。

## 2 资料

文中使用了 Terra 和 Aqua 卫星上的 MODIS 第二级日气溶胶反演资料 (MOD04、MYD04) 和 第三级月平均格点资料 (MOD08)<sup>[23]</sup>。Terra 和 Aqua 卫星分别于 1999 年 12 月 18 日和 2002 年 5 月 4 日升空,都是太阳同步卫星,各自在大约上 午 1030 UTC 和下午 1330 UTC 穿越赤道,轨道 倾角为 98°,轨道高度和轨道周期均为 705 km 和 98.88 min。

MODIS 是搭载在两颗卫星上的主要探测仪 器,其扫描宽度为2330km(横向)×10km(纵 向),其资料每1到2天覆盖全球一次,能接收包 括可见光和热红外波长在内的 36 个通道数据,分 辦率分别为 250、500 和 1 000 m。这些多波段多 分辨率数据可以同时提供大量的描述大气、陆地 和海洋物理特征的反演参数。其中的7个通道 (波长分别为 0.47、0.55、0.67、0.87、1.24、 1.64 和 2.1 µm)的光谱信息用于反演得到反映陆 地和海洋上气溶胶性质的参数,如不同波长的气 溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, 7,以下 简称 AOD), 粒子浓度 (Mass Concentration, 以 下简称 MC)等。此外, MODIS 也是第一个能够 区分粗粒子和细粒子的卫星遥感仪器,故可得到每 个像素点中细粒子所占比例 (Fine Aerosol Fraction, 以下简称 FAF) 和气溶胶种类参数。这些反 演参数将为研究局地、区域和全球的气溶胶分布细 节特征及相应光学厚度等参数提供了基础。另外, 因反演方法的不断改进及验证等质量控制, 使得数 据的精度和品质不断提高,例如陆地上 AOD 的误 差范围控制在± (0.05+0.2<sub>7</sub>)<sup>[24]</sup>。

MODIS 第二级日气溶胶资料的空间分辨率为 10 km,覆盖全球海洋和近乎全球陆地。本文分别 选取了 Terra 和 Aqua 卫星上 2004 年春季 4 个不 同时间的气溶胶数据,对中国中东部(22.5~ 35.0°N, 110.0~120.0°E) 和印度次大陆地区 (15.0~25.0°N, 70.0~85.0°E)的气溶胶状况进 行个例分析,并对 2004 年 7 月全月的日资料进行 统计分析。分析的参数包括 AOD (0.55 μm)、 MC、气溶胶类型和 FAF。需注意,由于 MODIS 的气溶胶陆地反演算法只用于晴空地区,故有云 区域无法得到反映气溶胶物理特性的反演参数。 另一个需注意的方面是,在 MODIS 气溶胶种类的 反演方案中,气溶胶类型被分为5种,即混合型 (Mixed)、沙尘型 (Dust)、硫酸盐型 (Sulfate)、 烟尘型(Smoke)和二次生物燃烧型(The Second Biomass Burning, SBB)。其中,混合型是指 介于沙尘和烟尘之间的气溶胶类型。此外,由于 硫酸盐型在所研究区域未被反演,故本文将不涉 及此类气溶胶。MODIS 第三级月平均格点资料, 是由第二级日资料插值平均到1°分辨率的网格点 上生成。本文统计分析中,用到了从 2000 年 3 月 到 2005 年 7 月的月平均 AOD (0.55 μm) 和 FAF.

# 3 结果

### 3.1 个例研究

选取的个例分别发生在 2004 年 4 月 27 日 0300 UTC、5 月 17 日 0545 UTC 的中国中东部和 4 月 19 日 0530 UTC、5 月 22 日 0740 UTC 的印 度次大陆地区。图 1 为以上 4 个例气溶胶种类的 空间分布。由图可知,在中国中东部地区,绝大 部分气溶胶粒子类型为烟尘。但印度次大陆地区, 粒子类型分布比较复杂,在其东部地区,主要是 烟尘;而其西部,则以沙尘为主;另外在印度次 大陆的东北部地区为烟尘与沙尘混合的粒子。

一般说来,细粒子是指半径小于1μm的气溶 胶粒子,它主要是由人类活动造成的,如工业污 染、生物燃烧等。因此,细粒子所占比重的大小, 从一个侧面反映了环境污染的程度。图2的细粒 子比例分布与类型分布类似。在烟尘多的区域, 细粒子比例都非常高,可达90%以上,如中国中 东部、印度次大陆东部。而在印度次大陆西部沙 尘区域,细粒子比例在10%以下。由此可见,中 国中东部和印度次大陆东部污染状况严重。

为了进一步定量说明两个区域的差异,我们 对此 4 例各参数进行了统计, 计算结果如图 3 所 示。在气溶胶种类分布方面,中国中东部以烟尘 为主,比例占到60%以上,而沙尘和混合型气溶 胶比例都在 20%以下。此外,还有少量的生物燃 烧型气溶胶。而印度次大陆地区,沙尘比重在 40%以上,高于烟尘(占30%左右)和混合型 (占 20% 左右)。此外,由于气溶胶种类的不同, 导致细粒子比例的统计特点也有所不同:例如中 国中东部地区,80%左右的气溶胶都是细粒子 (细粒子比例在 90%以上我们称之为细粒子,下 同);而印度次大陆地区,由于沙尘类粗粒子的存 在,使得细粒子仅占40%。在粒子质量浓度方面, 由于中国中东部大部分为烟尘,类型较单一,粒 径小,浓度大,浓度范围宽  $(0 \sim 0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2});$ 而印度次大陆地区因为沙尘的存在, 粒径大, 致 使质量浓度低,浓度范围窄  $(0 \sim 0.025 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2})$ 。 然而,印度次大陆西部沙尘粒子虽然浓度小,但 光学厚度更大 (分布图略), 故两个区域光学厚度 分布差别并不是很大。

#### 3.2 统计分析

以上分析表明,中国中东部和印度次大陆地 区的气溶胶分布在春季有较大差异。为了解这种 差异是否具有普遍性,不同季节是否都存在这种 差异,我们对 2000 年 3 月至 2005 年 7 月的气溶 胶月平均资料进行了统计分析。

图4给出了从2000年3月至2005年7月,中 国中东部(22.5~35.0°N,110.0~120.0°E)和 印度次大陆(15.0~25.0°N,70.0~85.0°E)区 域平均气溶胶光学厚度的逐月变化。从图上可以 清楚地看出,两个地区气溶胶光学厚度均存在着 明显的季节变化。其中,中国中东部地区在春夏 季光学厚度最大,冬季光学厚度最小;印度次大 陆地区气溶胶光学厚度同样在冬季最小,最大值 也出现在夏季,但与中国相比,略有两个月左右 的滞后。此外,我们还可以发现,中国中东部的



图 2 同图 1,但为细粒子比例分布 Fig. 2 As in Fig. 1 but distribution of the FAF



图 3 4个例气溶胶物理参数统计特征: (a) 种类; (b) 光学厚度; (c) 质量浓度; (d) 细粒子比例 Fig. 3 Statistical characteristics of aerosol parameters for 4 cases: (a) types; (b) AOD; (c) MC; (d) FAF



图 4 中国中东部和印度次大陆地区气溶胶光学厚度月变化 (2000 年 3 月~2005 年 7 月)

Fig. 4 Monthly variation of AOD over Central and East China and Indian Subcontinent (Mar 2000 to Jul 2005)

气溶胶光学厚度明显高于印度次大陆地区。计算 多年的月平均气溶胶光学厚度,中国中东部为 0.538,印度次大陆地区为0.416。

两地区季节平均气溶胶光学厚度分布如图 5 所示。在中国中东部地区,春夏两季与秋冬两季 差异明显。在春夏两季,气溶胶光学厚度大,这 与该季节大量的麦秆燃烧有关。部分地区,特别 是黄海沿岸,甚至高于1.0,这可能是由于受季风 的影响,在中国东部盛行偏南风,而黄海沿岸处 于其下风,来自中国东南部的气溶胶粒子在此累 积所造成的结果。而秋冬两季光学厚度分布形式 差异不大,并且其值都在 0.6 以下。总体来说, 东部沿海地区的光学厚度比内陆地区大,特别是 春夏季受季风影响的黄海沿岸。计算中国黄海沿 岸 (33.0~38.0°N, 114.0~118.0°E) 和四川盆 地 (28.0~32.0°N, 103.0~107.0°E) 两个气溶 胶光学厚度高值区的多年各季月平均光学厚度, 结果表明,在秋冬两季,黄海沿岸的光学厚度仅 高出四川盆地 0.09, 而春夏两季, 二者的差异可 以达到 0.3, 这或许正是由于前面提到的"处于其 下风"导致积累效应造成的结果。在印度次大陆

141



图 5 季节平均的气溶胶光学厚度分布: (a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

Fig. 5 Seasonal mean distribution of AOD: (a) spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter



图 6 同图 5,但为细粒子比例

Fig. 6 As in Fig. 5, but distribution of the FAF

地区,光学厚度最大和最小值分别出现在夏季和 冬季,特别是次大陆北部,这种变化相当明显。 比较两个区域,与前面光学厚度逐月变化图结论 类似的,无论哪个季节,中国中东部气溶胶光学 厚度均大于印度次大陆。

为了理解各个季节两地的污染情况,我们还 给出了细粒子比例分布的季节变化(图6),从图 中可以看出两地差异较明显。中国中东部地区始 终是以细粒子为主,表明整个中东部地区,在任 何季节,主要的气溶胶粒子都是人为污染产生的, 如烟尘等;而印度次大陆地区,细粒子比例的季 节变化区域性差异大。东部地区,主要以细粒子 为主,夏秋两季与冬春两季相比,细粒子比例有 所增加;西部地区,在冬春两季以粗粒子(沙尘) 为主,而在夏秋两季,细粒子显著增加。即整个 印度次大陆地区在夏秋两季,都是以细粒子为主 导地位,故污染较重。

光学厚度越大,细粒子比例越高,表明人为 环境污染越严重。我们用不同季节所有格点光学 厚度与细粒子比例之间关系的散点图(图7)来进 一步说明两地气溶胶分布及污染程度的差异。在 中国中东部,所有季节细粒子比例都在50%以上, 即一半以上的气溶胶粒子都是污染产生的烟尘。 特别是夏季,细粒子比例更是集中在80%以上。 此外, 在任一季节, 光学厚度的分布范围都比较 广。最低值一般为 0.2。而高值, 秋冬两季均不超 过1.0; 春季有少量统计点在1.0以上; 对于细粒 子多的夏季,更多统计点的光学厚度在1.0以上, 并且,都集中在细粒子比例为90%以上的区域。 从而说明,在中国中东部,夏季气溶胶光学厚度 的增加,主要是由于以烟尘为主的细粒子的增加 造成的。即在夏季,该区域污染更加严重。在印 度次大陆地区, 气溶胶粗细粒子分布比较均匀, 仅在夏秋两季细粒子有所增加,这与图6相对应。 光学厚度方面,除夏季外,其余三季变化范围都 在 0.5 以内。冬季光学厚度最小, 一般不超过 0.5。而在夏季,光学厚度变化较大,有少量统计 点的光学厚度大于1.0,但较大的光学厚度并不完 全与细粒子对应,且光学厚度也较之中国中东部 小。两个区域季节平均的气溶胶光学厚度和细粒 子比例如表1所示。以上分析表明,印度次大陆 地区虽然也在夏季污染更大,但不及中国严重。

#### 表 1 中国中东部和印度次大陆地区季节平均的光学厚度 和细粒子比例

Table 1	Seasonal	mean	AOD	and	FAF	on	Central	and	East
China a	nd Indian	Subcon	tinent	t					

	中国中东部		印度次大陆			
	AOD	FAF/%	AOD	FAF/%		
春季	0.637	96.4	0.436	50.4		
夏季	0.581	98.0	0.564	77.0		
秋季	0.448	96.6	0.346	84.3		
冬季	0.447	94.2	0.299	68.1		

以上分析表明, 在夏季, 两地的光学厚度和 细粒子比例都增加。在此基础上,我们利用 2004 年7月的Terra和Aqua第二级日资料,按前面个 例分析的方法,同样的对 AOD (0.55 μm)、MC、 气溶胶类型和 FAF 这 4 个参数进行了统计,如图 8 所示。气溶胶类型分布表明,与图3相比,两地 的烟尘比例都明显增大。中国中东部地区比例接 近100%,印度次大陆地区也在60%以上。此外, 在夏季,印度次大陆地区的沙尘比例由 40%下降 到小于10%,这也对应了上一节中,夏季印度次 大陆细粒子比例在东西两边均增大的分布情况。 同样,随着烟尘的增加,两地的细粒子比例也与 图3有所差异。中国中东部地区细粒子比例在 90%以上的像素比例也接近100%,而印度次大陆 地区也在 70%以上,明显高于图 3 的比例。在光 学厚度方面,两地 0.75 以上的像素比例也比图 3 增加了很多,中国中东部超过了30%,而印度次 大陆则超过了 50%。在粒子质量浓度方面,高浓 度的像素比例也同样明显增加,大于 0.1 g·m<sup>-2</sup> 的像素比例在中国中东部和印度次大陆地区分别 超过了15%和30%。由此进一步说明,在夏季, 两地烟尘增加污染加重。

## 4 结论

本文利用 Terra 和 Aqua 卫星上 MODIS 的探 测反演结果中的气溶胶产品,分析比较了中国中 东部和印度次大陆地区气溶胶的一些物理特性, 如气溶胶类型、光学厚度分布等,以了解这两个 经济高速发展地区对大气环境的影响程度,为进 一步利用模式模拟两地的辐射强迫异常以及对气



图 7 不同季节光学厚度与细粒子比例关系(左图为中国中东部,右图为印度次大陆地区) Fig. 7 Relationship between AOD and FAF in each season (left panels: Central and East China; right panels: Indian Subcontinent)



图 8 同图 3, 但为 2004 年 7 月 Fig. 8 As Fig. 3, but for July 2004

候变化的影响提供基础。

研究结果表明,中国中东部和印度次大陆地 区的气溶胶物理特性存在着一定差异。个例分析 表明,两个区域的气溶胶种类有所不同,中国中 东部以烟尘等细粒子为主,而印度次大陆地区东 部为烟尘,西部为粗粒子的沙尘,东北部为混合 型气溶胶。气溶胶光学厚度的月变化表明,两地 的光学厚度都有明显的季节变化。其中中国中东 部地区在春夏季大,冬季小;印度次大陆地区同 样冬季最小,夏季最大,但总体来说,前者的光 学厚度更大。进一步地,通过对不同季节光学厚 度和细粒子比例之间的关系、夏季气溶胶物理参 数的统计分析表明,整个中国中东部地区均以人 为污染的细粒子为主,而且在夏季,也是增加的 烟尘决定着光学厚度的增大。故可知,中国中东 部的气溶胶主要是工业排放的烟尘,并且在夏季, 伴随着大量燃烧麦秆产生的细粒子气溶胶的增加, 污染最为严重。特别是在黄海沿岸地区,由于其 位于季风下风向,更多的来自中国南部的气溶胶 粒子在此积累,导致该地区成为光学厚度极值区。 而印度次大陆地区,粗细粒子均存在。但在夏季, 包括西部地区在内,烟尘明显增多,同样光学厚 度也变大,表明该地区在夏季污染也最大。通过 比较可知,包括夏季在内,中国中东部地区的污 染状况明显比印度次大陆地区严重。

#### 参考文献 (References)

- [1] Chylek P, Coakley J A. Aerosol and climate. Science, 1974, 183: 75~77
- Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. Science, 2002, 297: 2250~2253
- Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, et al. Climate forcing by anthropogenic sulfate. Science, 1992, 255: 423
   ~430
- Chylek P, Wong J. Effect of absorbing aerosol on global radiation budget. Geophys. Res. Lett., 1995, 22: 929 ~ 931
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) . Climate Change 2001, The Scientific Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 881pp

- [6] Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. Aerosols, climate, and the hydrological cycle. Science, 2001, 294: 2119~2124
- [7] Coakley J A, Bernstein R L, Durkee P A, et al. Effect of shiptrack effluents on cloud reflectivity. Science, 1987, 237: 1020~1022
- [8] Schwartz S E, Arnold F, Blanchet J-P, et al. Group report: Connection between aerosol properties and forcing of climate. In: Aerosol Forcing of Climate, Charlson R J, Heintzenberg J, Eds. New York: John Wiley & Sons, Ltd., 1995. 251~280
- Dentener F J, Crutzen P J. Reaction of N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> on tropospheric aerosols: Impact on the global distributions of NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub> and OH. J. Geophys. Res., 1993, 98 (D4): 7149~7163
- [10] Luo Y F, Lu D R, Zhou X J, et al. Characteristic of the spatial distribution and yearly variation of aerosol optical depth over China in last 30 years. J. Geophys. Res., 2001, 106 (D13): 14501~14513
- [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.大气科学,1996,20(4):401~407
   Shi Guangyu, Xu Li, Guo Jiandong, et al. Balloon observation of atmospheric ozone and aerosols. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1996, 20(4):401~407
- [12] 李成才,毛节泰,刘启汉,等.利用 MODIS 研究中国东 部地区气溶胶光学厚度的分布和季节变化特征.科学通 报,2003,48 (19):2094~2100
   Li Chengcai, Mao Jietai, Liu Qihan, et al. Distribution and

seasonal characteristics of East China by MODIS. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 2003, 48 (19): 2094 ~ 2100

- [13] 胡茱明,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
  Hu Rongming, Shi Guangyu. The radiative forcing and climate effect due to anthropogenic sulfate aerosols over China. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1998,22 (6):919~925
- [14] 周秀骥,李维亮,罗云峰.中国地区大气气溶胶辐射强迫 及区域气候效应的数值模拟.大气科学,1998,22 (4): 418~427
   Zhou Xiuji, Li Weiliang, Luo Yunfeng. Numerical simula-

tion of the aerosol radiative forcing and regional climate effect over China. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1998, **22** (4): 418~427

 [15] 章文星,吕达仁,王普才.北京地区大气气溶胶光学厚度 的观测和分析.中国环境科学,2002,22 (6):495~500
 Zhang Wenxing,Lü Daren, Wang Pucai. The observation and analysis of atmospheric aerosol optical thickness over Beijing area. *China Environmental Science* (in Chinese), 2002, **22** (6): 495~500

[16] 宗雪梅,邱金桓,王普才.近10年中国16个台站大气气
 溶胶光学厚度的变化特征分析.气候与环境研究,2005,10 (2):201~208

Zong Xuemei, Qiu Jinhuan, Wang Pucai. Characteristics of atmospheric aerosols optical depth over 16 radiation stations in the last 10 years. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (2): 201~208

[17] 夏祥鳌,王普才,陈洪滨,等.中国北方地区春季气溶胶
 光学特性地基遥感研究.遥感学报,2005,9(4):429~
 437

Xia Xiang'ao, Wang Pucai, Chen Hongbin, et al. Groundbased remote sensing of aerosol optical properties over North China in spring. *Journal of Remote Sensing* (in Chinese), 2005, **9** (4): 429~437

- [18] 罗云峰,吕达仁,何晴,等.华南沿海地区太阳直接辐射、能见度及大气气溶胶变化特征分析.气候与环境研究,2000,5(1):36~44
  Luo Yunfeng,Lü Daren, He Qing, et al. An analysis of direct solar radiation, visibility and aerosol optical depth in South China coastal area. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, 5(1):36~44
- [19] Husar R B, Prospero J M, Stowe L L. Characterization of tropospheric aerosols over the oceans with the NOAA AVHRR advanced very high resolution radiometer optical thickness operational product. J. Geophys. Res., 1997, 102 (D14): 16889~16910
- [20] Torres O P, Bhartia P K, Herman J R, et al. Derivation of aerosol properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation: Theoretical basis. J. Geophys. Res., 1998, 103 (D14): 17099~17110
- [21] Kaufman Y J, Tanr D, Remer L A, et al. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer. J. Geophys. Res., 1997, 102 (D14): 17051~17068
- [22] Energy Information Administration. International Energy Outlook 2005. Official Energy Statistics from the U.S. Government, 2005, 49pp
- [23] Savtchenko A, Ouzounov D, Ahmad S, et al. Terra and Aqua MODIS products available from NASA GES DAAC. Adv. Space. Res., 2004, 34 (4): 710~714
- Chu D A, Kaufman Y J, Ichoku C, et al., Validation of MODIS aerosol optical depth retrievel over land, *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29** (12): 1617~1621