

利用 MODIS 光学厚度遥感产品研究北京 及周边地区的大气污染^{*}

李成才^{1,2)} 毛节泰¹⁾ 刘启汉 (Alexis Kai-Hon Lau)²⁾
刘晓阳¹⁾ 刘桂青¹⁾ 朱爱华¹⁾

1) (北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871)
2) (香港科技大学海岸与大气研究中心, 香港九龙)

摘 要 对 2001 年在北京地区利用太阳光度计观测的气溶胶光学厚度和 NASA 发布的 MODIS 气溶胶产品进行了比较, 验证了这一卫星遥感产品的可靠性; 比较了 2001 年 MODIS 气溶胶光学厚度 (AOD) 产品和由空气污染指数 (API) 计算的每日平均可吸入颗粒物 (PM₁₀) 浓度, 得到了比较高的相关系数, 证实该气溶胶产品可用于污染分析。将北京地区 AOD 与气象能见度观测资料进行比较, 得到了不同季节的气溶胶“标高”。利用统计的不同季节的气溶胶标高, 从光学厚度的季节分布得到了能见度 (能见距离) 的季节分布。气溶胶光学厚度图像的个例分析表明, 除局地排放外, 周边区域 (主要为西南和南向) 的输送对北京市区的空气污染贡献份额较大。卫星遥感气溶胶可以比较直观地再现污染物的区域分布和输送, 不仅为研究全球气候变化也为研究区域环境的空气质量提供了一种有效手段。

关键词: 气溶胶光学厚度; 大气污染; 能见度

1 引言

对流层气溶胶是地球—大气—海洋系统的重要组成部分, 以直接强迫和间接强迫两种主要方式影响着短波和长波辐射平衡。气溶胶的存在减小了由于温室气体导致的全球温度的上升^[1, 2]。对流层气溶胶包括起源于城市和工业活动、生物燃烧、土地利用的人为源以及沙尘等自然源。对流层气溶胶所引起的空气质量问题, 包括城市能见度的下降、可吸入颗粒物对人们健康的影响等, 已经在全球范围内引起广泛关注。

20 世纪 70 年代以来, 我国的快速工业化过程也伴随着区域性空气污染问题的出现^[3]。近年来, 北京市能见度下降问题引起社会关注^[4], 恢复“蓝天”的研究工作得到公众和政府的重视。北京市区的空气污染与局地城市排放如机动车排放、矿石燃料燃烧和城市工地扬尘有关, 同时也与周边地区工业排放、燃煤产生的污染物质的区域输送以及远距离的沙尘的输送有关。政府环境控制治理部门迫切需要了解各种因素对北京市区污染产生贡献的份额, 以利于出台的相应政策可以有效改善这一地区的空气

2002-03-31 收到, 2002-10-08 收到修改稿

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目 G1999045700 和国家自然科学基金委员会与香港研究资助局联合科研资助基金项目 NSFC/HKUST36 共同资助

质量。

卫星遥感可以提供广阔背景上的有关气溶胶污染物的区域分布,在污染监测上具有广阔的前景^[5~10]。本文利用美国宇航局(NASA)的地球观测系统(EOS)卫星 Terra 的中分辨率成像光谱仪(MODIS)的气溶胶 Level 2 产品资料,研究了北京及周边地区气溶胶季节分布,并给出季节性地面能见度变化。个例分析表明遥感方法提供了研究城市大气污染的新手段。

2 北京市区空气污染概况

Bergin 等^[4]关于气溶胶光学特性的地面相关观测表明,在低湿环境下北京地区气溶胶散射系数、吸收系数和单次散射反照率平均值分别为 0.488 km^{-1} , 0.088 km^{-1} 和 0.81 ;气溶胶散射系数远远大于西方国家城市地区的一些记录;全年 75% 的能见距离在 6 km 以下,而美国城市地区能见度最差地区平均能见度为 12 km 左右;平均细粒子(PM 2.5)的质量浓度为 $136 \mu\text{g m}^{-3}$ (变化范围 $85 \sim 189 \mu\text{g m}^{-3}$),远远大于美国国家环境空气质量标准(U. S. NAAQS, National Ambient Air Quality Standard)建议的 24 小时平均值 $65 \mu\text{g m}^{-3}$ 。Ando 等^[11]在北京冬季某些居民区地带室内和室外的空气质量监测表明,总悬浮颗粒物和二氧化硫的浓度是在东京一条公路旁监测结果的 4 到 5 倍。邱金桓等^[12]利用太阳直接辐射数据反演的华北地区 1980~1994 年的光学厚度资料表明,包含北京的这一地区具有显著的升高趋势,北京的冬季大约已经上升了 2 倍左右,他们认为矿石燃料的燃烧是导致这种变化的主要因素。Li 等^[13]在 1993 年 3 月到 1995 年 3 月气溶胶光学厚度观测表明,春季和夏季明显高于秋季和冬季。He 等^[14]在 1999 年 7 月到 2000 年 9 月的采样发现 PM 2.5 的质量浓度的季节变化很大,冬季具有最大值,夏季具有最小值,同时对春季沙尘暴具有强烈的影响。

空气污染指数(API)是环保部门通过对可吸入颗粒物(PM10)、二氧化硫、氮氧化物和臭氧在市区不同地点的 24 小时监测而发布的一个与污染物质量浓度相关的可被公众直观理解的一个数据。首要污染物是几种污染物中浓度最高者,空气污染指数是首要污染物质量浓度的经分段线性映射后的结果。在我国的大多数城市,全年大约 85%~90% 的首要污染物为可吸入颗粒物。

图 1 给出北京市 2001 年的 API 变化,从中我们可以了解到北京市空气污染概况:在夏季由于具有较高的混合层,北京市具有平均小于 100 的 API 数据;在冬季由于相反的原因常常出现一些 API 较大的天,平均值和日变化都显著高于夏季。春季沙尘天气对北京空气质量影响显著,4 月和 5 月个别天里 API 最大达到 500,对应可吸入颗粒物浓度达到 $600 \mu\text{g m}^{-3}$ 。2001 年平均 API 值为 110,对应可吸入颗粒物浓度 $170 \mu\text{g m}^{-3}$,这一数值大约是 NAAQS 建议的 24 小时平均可吸入颗粒物浓度 $69 \mu\text{g m}^{-3}$ 的两倍以上。API 超过 100 的天数占 46.5%,对应可吸入颗粒物浓度 $150 \mu\text{g m}^{-3}$ 。由此可见,北京市区的空气污染问题是相当严峻的。

3 卫星遥感的气溶胶光学厚度资料与其他地面观测量的比较

1999 年 12 月发射的极轨卫星 EOS-AM1 (Terra) 开辟了卫星遥感地球一大气系

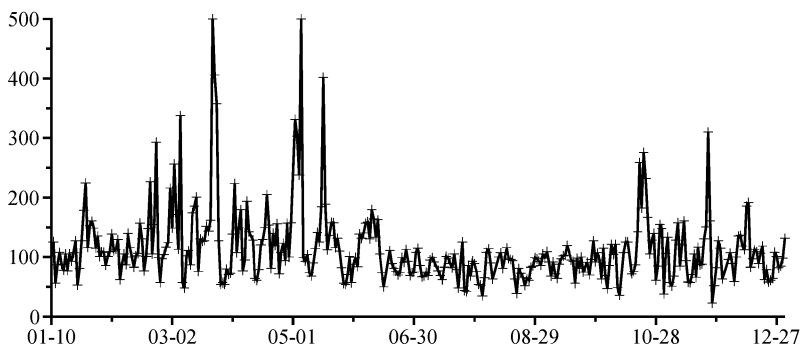


图 1 北京市区 2001 年 API 变化 (资料来自北京环保局每日发布数据)

统的新纪元^[7, 9, 15]。其中“中分辨率成像光谱仪 (MODIS)”具有通道多 (36 个可见光和红外)、覆盖空间广 (2330 km 横向扫描) 等特点, 可以提供有关遥感大气气溶胶、水汽、臭氧、云、地表植被、海色、浮游植物、生物地球化学等产品的丰富信息^[7]。

Kaufman 等^[9, 10]通过大量飞机观测试验表明, MODIS 的通道 1 (620~670 nm) 和通道 3 (459~479 nm) 的地表反射率与通道 7 (近红外 2105~2155 nm) 观测到的表观反射率在密集植被地区甚至较暗反照率土壤地区呈现良好的线性相关, 而且近红外通道 7 的观测基本不受气溶胶的影响, 因此, 他们利用这一通道的数据区分暗背景和亮背景, 并得到通道 1 和通道 3 在暗背景情况下的反照率。气溶胶类型则利用通道 1 和通道 3 的路径辐射比来首先判断是否为沙尘类型, 对于不是沙尘类型的气溶胶, 则根据一个预先设定的按地理分布的划分进一步确定类型。业务运行程序已经可以获取全球陆地除少数沙漠和高原地区以外的大面积地区的气溶胶分布^[9]。

尽管 NASA 得到气溶胶光学厚度 (AOD) 产品是为了在 EOS 计划中研究全球气候变化中气溶胶强迫的目的, 我们利用香港地区的地面可吸入颗粒物浓度监测数据和 MODIS 气溶胶光学厚度的比较、以及中国一些城市发布的 API 资料与 MODIS 气溶胶光学厚度的比较都具有较高相关系数的事实, 发现这一分辨率比较高的气溶胶产品对于研究城市地区的空气污染具有显著的可行性¹⁾。

这里, 我们利用 2001 年设在北京大学物理楼的 10 波段太阳光度计的观测结果, 与 NASA 的 MODIS 气溶胶 Level 2 产品进行了对比, 进一步验证该卫星产品在北京地区的可靠性; 利用北京市区 API 数据推得的 PM10 平均质量浓度与 MODIS AOD 资料进行了比较; 利用地面气象能见度资料与卫星遥感的气溶胶光学厚度资料进行了相关分析。

3.1 MODIS AOD 产品与地面太阳光度计遥感结果的对照

利用多波段光度计遥感气溶胶光学厚度是目前气溶胶遥感手段中最准确的方法, 通常被用来校验卫星遥感的结果。在北京大学物理楼楼顶, 我们建立了长期连续的多

1) Li Chengcai, Alexis Lau, and Mao Jietai, Remote Sensing Aerosols using MODIS Satellite Data over the Pearl River Delta, International workshop on local and regional contribution to air pollution and local radiative balance in Asian developing countries, Guangzhou, China, Sept. 27-29, 2001.

波段太阳光度计观测。该台仪器为北京师范大学光电仪器厂生产的 BB 型 10 波段光度计^[16~18]。探测器采用硅光电二极管，仪器视场为 3°圆形视场，10 个波段中心波长分别位于 450 nm、500 nm、550 nm、600 nm、650 nm、700 nm、750 nm、800 nm、850 nm、900 nm 附近，半波宽度 10~20 nm。该台仪器曾分别在海拔较高、远离城市的河北兴隆天文台（海拔 1000 m）、西藏当雄（海拔 4200 m）、安徽黄山（海拔 1860 m）三个定标点进行 Langley 法定标。订正后总误差在光学厚度比较小的情况下应小于 10%，在中等浑浊度情况下，相对误差在 2%左右^[16]。

图 2 为 2001 年的地面太阳光度计与 MODIS 卫星遥感结果的对比。其中数据点数为 60，相关系数为 0.79，均方根偏差为 0.168。与 2000 年的比较结果^[18]相比，卫星遥感与地面太阳光度计的相关更好，原因主要在于我们调整了太阳光度计的观测时间，尽量与卫星过境的时间一致。这里也发现在气溶胶光学厚度比较小（0.0~0.4）的范围，MODIS 的结果多大于太阳光度计的结果；而在气溶胶光学厚度比较大的范围（0.5 以上），一般太阳光度计给出比较大的结果。产生这种偏差的原因可能是：从卫星遥感的角度来看，地表反射率通过近红外观测来确定带来一定的误差，按照 Kaufman 等^[10]的估计，这种误差将与地表植被的密集程度有关。暗背景密集植被地区误差较小。北京地区冬季以及春季，由于降雪和绿色植被稀疏，达到“暗背景”条件的像素点较少，估计卫星遥感的结果存在一定的误差。在气溶胶光学厚度比较小时，地表反射率的误差成为反演气溶胶光学厚度的主要误差，NASA 算法中利用固定的暗背景条件下，可见光与近红外波段的地表反射率关系对北京城区地表反射率的估计可能偏小。在气

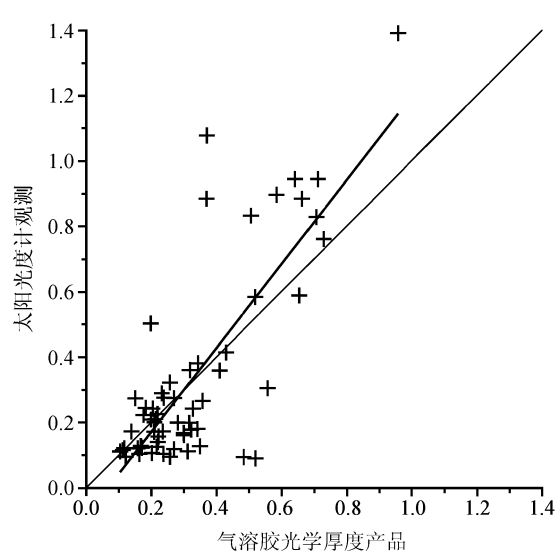


图 2 MODIS 卫星遥感的气溶胶光学厚度与地面太阳光度计观测（550 nm）的对比（北京，2001 年）

溶胶光学厚度比较大的情况下，从时间序列上看，比较大的数值集中在 3~5 月份，实际气溶胶可能沙尘成分较大，而 NASA 算法中采用的气溶胶类型可能存在一些偏差。按照 Kaufman 等^[8, 9]的算法，将非沙尘情况下的中国东部地区全部按工业城市气溶胶处理。气溶胶模型选取的误差一般是光学厚度反演过程中的最大误差。另外一点就是沙尘性气溶胶粒子有效半径较大，对 2.1 μm 近红外通道足以产生影响，尤其对于城市地区本地扬尘天气，沙尘比例大、平均半径大、浓度集中在比较集中的高度。按目前 NASA 的“暗背景”地表反射率算法，沙尘性气溶胶的存在使得地表反射率估计偏高，

将导致气溶胶光学厚度结果偏低。尽管如此，我们认为这一卫星遥感的产品在北京地区的校验达到了相应的精度，可应用于气候和城市污染的研究。

3.2 MODIS AOD 和地面可吸入颗粒物 PM10 平均质量浓度的对比

北京的冬季因为植被稀少、积雪等原因，地表具有较高的反射率，目前 NASA 的

气溶胶产品中在这个季节对于北京城区有效的数据很少。由于地表反射率较高情况下，气溶胶反演的误差增大，在北京比在华南地区具有更大的不确定性，因此在应用这个产品前，这种 AOD 与地面气溶胶污染物浓度的比较很有必要。

我们利用的 API 资料来自环保部门在网站上公开发布的数据。当首要污染物为可吸入颗粒物时，将 API 分段线性地转化为 PM10 的质量浓度。当空气质量非常好，API 小于 50 的情况下，环保部门不发布首要污染物，所以我们分析的数据中不含有 API 小于 100 的情况，对应于 PM10 质量浓度小于 $100\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ 的情况。

图 3 为 2001 年北京城区 MODIS AOD 与平均 PM10 质量浓度的比较。整体上看二者在大多数情况下具有很好的变化趋势，总共 107 个数据点，相关系数为 0.23，超过统计学上可置信度 95% 的要求。由于二者各自具有比较明确的物理意义：气溶胶光学厚度代表垂直方向上消光系数的积分，与对流层垂直方向气溶胶总浓度相关；地面可吸入颗粒物的质量浓度代表地面污染物浓度，它强烈地受到混合层发展、大气稳定度等大气扩散条件的影响。从图 3 中可以看到，夏季相对于冬季，光学厚度一般具有较高的数值，而地面 PM10 的浓度具有较低的数值。这是因为在夏季垂直方向湍流发展强盛，有更多的颗粒物被输送到高空，而水平扩散相对于冬季由于平均风速较小而较弱，因此地面浓度减小，而总光学厚度升高。冬季的情况刚好相反。同时我们还应该注意，来自 API 的 PM10 平均浓度，代表北京城区多个站点 24 小时的平均，而光学厚度是北京时间 10:30 左右卫星过境的瞬间观测。二者的比较和相应的相关系数说明 AOD 数据在同一季节里可以反映地面污染物浓度的变化，也提示我们不同季节间的比较应该考虑混合层发展高度、气溶胶垂直分布特征的因素。

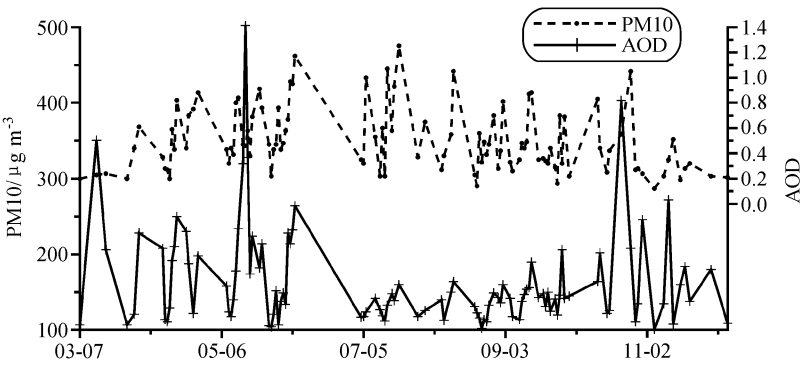


图 3 北京地区 2001 年时间变化的 PM10 地面平均浓度和 MODIS AOD 的对比

3.3 北京地区 2001 年 AOD 和地面能见度的比较

按照通常情况下的假定气溶胶消光系数垂直方向上按指数分布：

$$\beta_z = \beta_0 e^{-\frac{z}{H}},$$

(1)

这里 H 可称为气溶胶“标高”，光学厚度为消光系数垂直方向上的积分：

$$\tau = \int_0^\infty \beta_z dz = \int_0^\infty \beta_0 e^{-\frac{z}{H}} dz = H\beta_0,$$

(2)

地面消光系数与能见距离具有反比关系：

$$\beta_0 = \frac{3.91}{R},$$

(3)

我们得到能见距离和气溶胶光学厚度的关系：

$$R = 3.91H \frac{1}{\tau} \tag{4}$$

由于意识到 AOD 具有季节性变化这样的事实，所以在利用北京气象站能见度数据和 AOD 的比较时，我们采用分季节比较的方法。一年四季的划分采用：3 月、4 月和 5 月为春季，6 月、7 月和 8 月为夏季，9 月、10 月、11 月为秋季，11 月、12 月、1 月和 2 月为冬季。考虑到冬季数据量少以及 11 月应该处于季节交换的情况，11 月的数据被用了 2 次。

图 4 采用了 2000 年 8 月到 2001 年 12 月的 AOD 和能见度资料，给出春、夏、秋、冬四季的拟合结果。双对数坐标下平均的 4 条直线给出不同季节平均的拟合关系。其中气溶胶标高 H 在春季 (A)、夏季 (B)、秋季 (C) 和冬季 (D) 分别为：2221 m、1947 m、1461 m 和 1076 m。春季具有较高的标高主要是因为沙尘暴天气的影响。夏季显著高于冬季是因为夏季混合层高度较高，垂直发展旺盛的缘故。

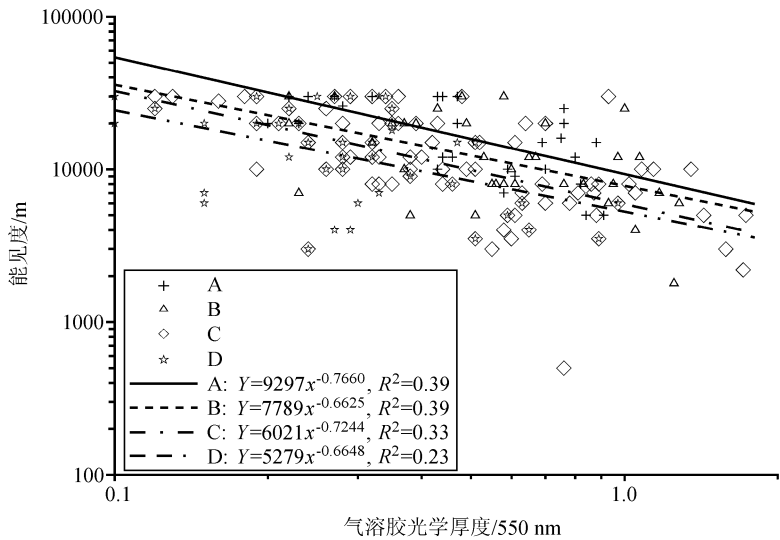


图 4 MODIS 550 nm 的气溶胶光学厚度与气象能见度的比较

这个合理的拟合关系表明气溶胶光学厚度 AOD 产品在同一季节内可以直接比较、不同季节内可以通过简单的校准而用于地面污染研究。

4 从气溶胶光学厚度反演地面能见度的季节变化

4.1 北京及周边地区气溶胶光学厚度的季节变化

图 5 是利用 MODIS 光学厚度产品得到的 2000 年 9 月~2001 年 12 月北京城区光学厚度的月平均变化。空间上取以城市大致中心方圆 25 km 的区域进行平均。可见以下一些特征：北京 AOD 年平均值在 0.5 左右，季节变化明显，6 月和 12 月平均相差 0.5 左右。从冬季到春季，AOD 有显著的跳跃。春天沙尘暴天气对北京影响显著，同时春季北京风速大、干旱、湿度低，城市建筑工地和许多裸露地表的扬尘也严重影响空气

质量。虽然冬季地面污染物浓度经常很高，但 AOD 月平均夏季显著高于冬季。除了冬季受北部清洁冷空气影响外，夏季湿度上升、以及夏季来自北京南部、西南部的区域性输送可能是另外的主要因素。12 月、1~3 月达最低值（大约为 0.2），4 月由于沙尘天气影响，明显急剧上升。两年的数据均显示出 9 月以后开始下降的特征。

4.2 北京及周边地区 AOD 平均季节分布

图 6（见图版 I）描述了北京及周边地区春、夏、秋、冬四季气溶胶光学厚度的变化，图中斜线部分为未获得数据区，包含春季和冬季西北方向大片高反照率背景（半荒芜或雪盖）地区以及渤海湾近岸地区。其中渤海湾水面地区由于海水泥沙含量的影响，反射率远高出深海地区。按照海上遥感算法得出的产品具有较低的准确度。从整体上看，北京西部、北部、东北部四季气溶胶光学厚度明显低于北京西南部、南部、东南部。夏季光学厚度最大，大值区分布最广。冬季和春季有明显的以城区为中心的特征，应该源于局地的城市污染。冬季到春季有显著的跳跃性增加，和春季沙尘天气的影响有关。夏季气溶胶光学厚度平均值最大，应该和混合层发展较高、水平风速小、湿度增加、高温天气促进“气一粒”转换等因素有关，其中气溶胶标高较高应该是一个主要因素。从图 5 可见北京的城区光学厚度与北京西南、南、东南方向基本在这一区域连成一片，尤其西南方向有明显的向北京延伸的迹象，结合北京这一地区显著的“夜间南转北、白天北转南”的山谷风特征可知区域性输送在北京的平均空气质量影响因素中占有比较大的份额。

4.3 北京及周边地区地面能见度的季节分布

从前面 AOD 与地面能见度的比较上看，在同一个季节气溶胶具有相同的标高的情况下，AOD 一般可以直接反映地面能见度的变化，而在不同的季节，为了从 AOD 的分布得到地面空气质量变化情况，必须以不同季节的标高进行订正。图 7（见图版 II）是利用前面回归的不同季节的标高，从 AOD 的分布得到的能见度（能见距离）的四季分布（斜格地区为未获得数据区）。

虽然春季北京的天气受到沙尘暴的影响，气溶胶光学厚度一般具有较大的数值，气溶胶减小了阳光到达地面的份额，同时也影响着地面空气质量，然而春季平均的地面能见距离仍然具有最大的数值。城区大约 15 km，郊区大多数地区为 20 km，北部山区的大多数部分在 30 km 以上。

夏季，城区能见度最差的地区为 12 km，并且等值线向东延伸。城市的郊区能见距离在 12~15 km。北部山区在 20 km 以上。

在秋季，12 km 的等值线区域扩大到西南、南部大面积地区，北京南部的河北省的大部具有较低的能见度，很多地区甚至比北京市区要差得多。

冬季，北京城区具有全年中最底的能见度，平均 10 km 的等值线开始出现在城市中心，表明冬季北京市具有最差的空气质量。

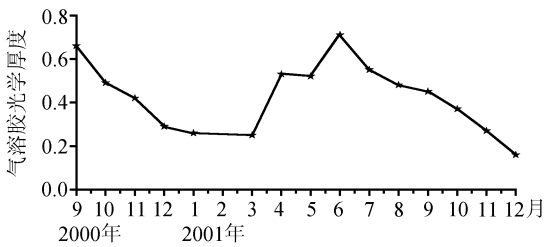


图 5 2000 年 9 月~2001 年 12 月北京城区月平均的气溶胶光学厚度变化

这种方法目前的最大误差在于我们只用了北京一个地面站的能见度资料统计了四季的标高，如果利用整个区域内的气象资料来统计，得到标高的区域变化数据，能见度的分布将更为准确。季节平均应该降低了由于气溶胶垂直分布变化和区域内分布变化带来的误差。同时我们设想如果以激光雷达等垂直探测工具的结果直接获得气溶胶的垂直分布特征，结合卫星遥感的气溶胶光学厚度分布信息，可获得每日而不是统计的地面能见度结果。

5 MODIS 反映的污染个例分析

5.1 例一

图 8（见图版 III）是北京及周边地区气溶胶光学厚度（550 nm）2000 年 9 月 1 日、2 日、3 日和 6 日卫星过境时间的分布。它给出一个区域传输的特征：在 9 月 1 日的分布图上，可以看到北京城区和来自北京西南方向河北重污染区的污染物还没有汇合，而 9 月 2 日、3 日的图像则可以清晰地看到这股来自西南方向的严重污染的大气伸展的区域覆盖了北京及周边大范围地区。

表 1 给出环保部门公布的 2000 年 9 月 1 日到 6 日 API 的变化。从表 1 可以看到，从 9 月 2 日到 3 日北京市区经历了比较严重的污染事件，9 月 2 日、3 日持续两天为 III1 级。AOD 图像给出了污染物的区域分布，9 月 2 日和 3 日在北京及周边广大地区光学厚度数值超过 1.2，9 月 6 日北京及周边地区的光学厚度下降到 0.1~0.2 左右。

表 1 2000 年 9 月 1 日~2000 年 9 月 6 日北京城区 API 的变化

日期	API 和等级	首要污染物	日期	API 和等级	首要污染物
2000-09-01	93 (II)	PM10	2000-09-04	93 (II)	PM10
2000-09-02	124 (III 1)	PM10	2000-09-05	26 (I)	
2000-09-03	120 (III 1)	PM10	2000-09-06	32 (I)	

有关的气象变量可以给出相应的一些天气情况。图 9 为风向和风速 9 月 1 日 00 时~9 日 00 时（北京时）的变化，图中可见 9 月 4 日前最大风速为 3 m s^{-1} ，平均风速为 1.5 m s^{-1} ；风向上每日白天南风为主。图 10 为气温变化，9 月 1 日到 3 日最高气温达 32°C ，最低气温 22°C 。风和温度资料说明 9 月初北京的这几天处于低压系统的前沿，为持续的高温、弱风环境，不利于污染物的远距离扩散，而区域扩散导致北京市区强

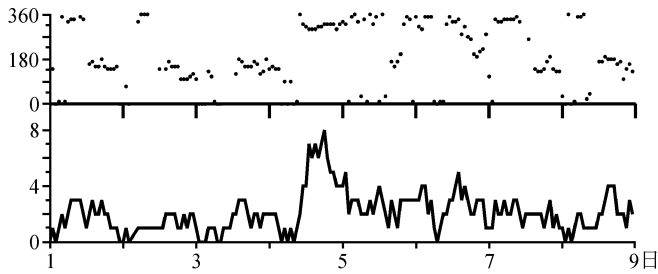


图 9 2000 年 9 月 1 日~9 日风向 [a, 单位: ($^{\circ}$)]、风速 (b, 单位: m s^{-1}) 变化

烈受到西南方向污染源的影响。9 月 4 日，风向的改变、风速的突然增加和温度的骤然下降说明有一个冷空气的侵入过程。API 数值、光学厚度在整个区域的急剧下降，以及地面能见度变化图（图 11）中给出的 9 月 5 日以后能见度迅速变好，都说明这一来自北部的天气过程使得大气中悬浮颗粒物被比较彻底地清除。

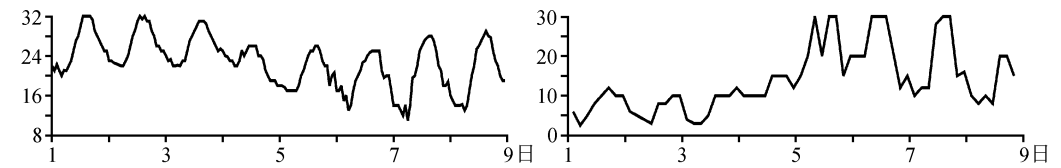


图 10 2000 年 9 月 1 日~9 日气温变化 (单位:℃) 图 11 2000 年 9 月 1 日~9 日能见距离变化 (单位: km)

5.2 例二

图 12（见图版 III）为气溶胶光学厚度在 2000 年 9 月 23 日 03:10（世界时）的分布，从图中可见显著的光学厚度图像在西南—东北方向上有一个清晰的高梯度的分界面，大约 30~50 km 的两侧，光学厚度从 0.2 急剧增为 0.8 左右。图 13 为风向、风速变化，可见 9 月 23 日持续东南方向的弱风是导致污染物的积累的主要原因。9 月 23 日风速的迅速增大、风向改为北风，表示一个锋面系统在过境。图 14 给出了几个城市能见度的变化，张家口、北京、天津和石家庄的能见度在 9 月 22 日 18:00 到 9 月 23 日 06:00 依次变好，其中位于北京西北方向的约 150 km 的张家口比北京提前 4~6 小时左右开始能见度升高。表 2 给出的 API 变化数据显示在 9 月 23 日 API 为 136，相当于地面可吸入颗粒物浓度为 $222\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ ，达到连日最大值；24 日 API 近为 29，相当于地面可吸入颗粒物浓度为 $58\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ ，下降到连日最小。

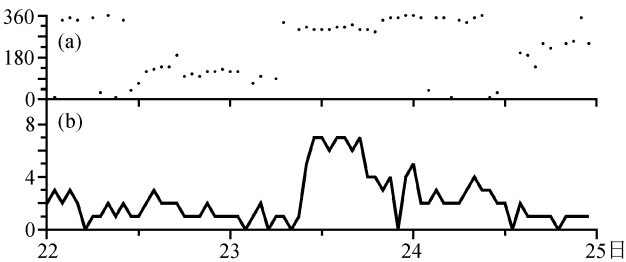


图 13 2000 年 9 月 22 日~25 日风向 [a, 单位: (°)]、风速 (b, 单位: m s^{-1}) 变化

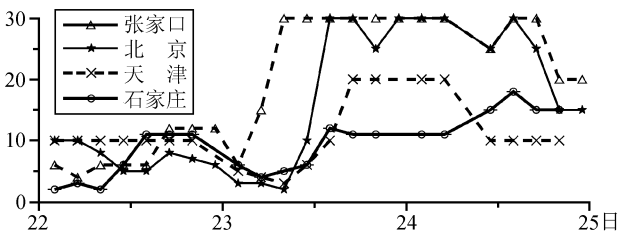


图 14 2000 年 9 月 22~25 日张家口、北京、天津和石家庄能见距离变化 (单位: km)

这个例子同样说明当北京处于锋面系统前面（1 天或以上）时，平均主流风向为偏南，这时区域扩散会导致北京市区可吸入颗粒物浓度的升高；当锋面系统过境后，强

北风会迅速使空气质量好转、能见度提高。

表 2 2000 年 9 月 21 日到 2000 年 9 月 25 日北京城区 API 的变化

日期	API 和等级	首要污染物	日期	API 和等级	首要污染物
2000-09-21	62 (II)	PM10	2000-09-24	29 (I)	
2000-09-22	80 (II)	PM10	2000-09-25	91 (II)	PM10
2000-09-23	136 (III 1)	PM10			

6 结 论

通过可吸入颗粒物平均质量浓度与 MODIS AOD 产品的比较得到一个具有 95% 以上置信度的相关系数, 证明 AOD 可以用来反映地面空气质量。不同季节的光学厚度和能见度之间在双对数坐标下具有良好的线性关系, 由此导出的气溶胶标高夏季高于冬季, 在春季具有最大值。不同季节的气溶胶光学厚度结果显示, 北京地区夏季光学厚度最大, 从夏季到秋季再到冬季呈下降趋势, 从冬季到春季有一个明显的跳跃升高。利用不同季节的标高和光学厚度的季节分布导出的地面能见度的季节分布变化, 证实北京地区在冬季平均能见度最差, 市区中心在 10 km 以下。尽管受到沙尘天气的影响, 春季的平均能见度仍然最好, 城区大约为 15 km。平均光学厚度、平均能见度分布以及污染个例表明, 北京地区的空气污染包含区域性输送和局地城市污染的双重贡献, 当北京处于低压系统、锋面系统天气过程之前 1~2 天时, 比较弱的南风、西南风和东南风环境会导致北京市区主要污染物为可吸入颗粒物的污染事件, 而天气系统过境后, 干冷较强的北风和降水可以有效降低和清除大气中可吸入颗粒物的浓度。这些结果说明 MODIS 卫星遥感气溶胶在研究大气污染尤其是涉及污染物区域性分布、污染来源和输送等问题时提供一个有效的新手段。

致谢: 本文的研究利用了 NASA GSFC 的 MODIS 资料、产品, 在此表示感谢。

参 考 文 献

1 Penner, J. E., R. E. Dickinson, and C. A. Oneill, Effect of aerosol from biomass burning on the global radiation budget, *Science*, 1992, **256** (5062), 1432~1434.

2 Christopher, S. A., D. V. Kliche, J. Chou et al., First estimates of the radiative forcing of aerosols generated from biomass burning using satellite data, *J. Geophys. Res.*, 1996, **101** (D16), 21265~21273.

3 Li Xiaowen, Zhou Xiuji, Li Weiliang et al., The cooling of Sichuan province in recent 40 years and its probable mechanisms, *Acta Meteorologica Sinica*. 1995, **9**, 57~68.

4 Bergin, M. H., G. R. Cass, J. Xu et al., Aerosol radiative, physical, and chemical properties in Beijing during June 1999, *J. Geophys. Res.*, 2001, **106** (D16), 17969~17980.

5 Ferrare, R. A., R. S. Fraser, and Y. J. Kaufman, Satellite Measurements of Large-Scale Air Pollution; Measurements of Forest Fire Smoke, *J. Geophys. Res.*, 1990, **95** (D7), 9911~9925.

6 Kaufman, Y. J., R. S. Fraser, and R. A. Ferrare, Satellite Measurements of Large-Scale Air Pollution; Methods, *J. Geophys. Res.*, 1990, **95** (D7), 9895~9909.

- 7 King, M. D. , Y. J. Kaufman, W. P. Menzel et al. , Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS), *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* , 1992, **30**, 2~27.
- 8 Kaufman, Y. J. , D. Tanré, H. R. Gordon et al. , Passive remote sensing of tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect, *J. Geophys. Res.* , 1997, **102** (D14), 16815~16830.
- 9 Kaufman, Y. J. , D. Tanr , L. Remer et al. , Operational remote sensing of tropospheric aerosol over the land from EOS-MODIS, *J. Geophys. Res.* , 1997, **102** (14), 17051~17068.
- 10 Kaufman, Y. J. , A. E. Wald, L. A. Remer et al. , The MODIS 2.1 m channel-Correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* , 1997, **35** (5), 1286~1298.
- 11 Ando, M. et al. , Indoor and outdoor air pollution in Tokyo and Beijing supercities, *Atmos. Environ.* , 1996, **30**, 695~702.
- 12 Qiu Jinhuan et al. , Variation characteristic of atmospheric aerosol optical depths and visibility in North China during 1980-1994, *Atmos. Environ.* , 2000, **34**, 603~609.
- 13 Li Fang, and Lu Daren, Features of aerosol optical depth with visibility grade over Beijing, *Atmos. Environ.* , 1997, **31**, 3413~3419.
- 14 He Kebin, Yang Fumo, Ma Yongliang et al. , The characteristics of PM2. 5 in Beijing, China, *Atmos. Environ.* , 2001, **35**, 4959~4970.
- 15 Michael, D. K. , Y. J. Kaufman et al. , Remote sensing of Tropospheric Aerosol from Space: Past, Present, and Future, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* , 1999, **80** (11), 2229~2259.
- 16 张军华、王美华、毛节泰, 多波段光度计遥感气溶胶误差分析及订正, 大气科学, 2000, **24** (6), 855~859.
- 17 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征, 大气科学, 2000, **24** (4), 549~558.
- 18 毛节泰、李成才、张军华等, MODIS 卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度及与地面光度计遥感的对比, 应用气象学报, 2002, **13**, 127~135.

Research on the Air Pollution in Beijing and Its Surroundings with MODIS AOD Products

Li Chengcai^{1,2)}, Mao Jietai¹⁾, Alexis Kai-Hon Lau²⁾,

Liu Xiaoyang¹⁾, Liu Guiqing¹⁾, and Zhu Aihua¹⁾

1) (*Department of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871*)

2) (*Center for Coastal and Atmospheric Research, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong*)

Abstract The MODIS aerosol optical depth (AOD) and averaged mass concentration of respirable suspended particulate (PM₁₀) calculated from released API data are compared, and a high correlation coefficient of 0.232 with data pairs of 107 has been gotten. The relations between the visibilities and the AOD values with distinct mean aerosol scale heights in different seasons are also gained. The seasonal AOD variations in Beijing show the mean AOD value is highest in summer, and it has a decreasing trend from summer to autumn, and then to winter. There is a rapid increase from winter to spring due to spring dust in North China. Then the seasonal mean visibility distributions of Beijing and its surroundings are estimated based on the seasonal aerosol scale heights and AOD distributions. The case studies described by the AOD distribution images over Beijing and its surroundings show some dramatic processes, and suggested us the air pollution in Beijing urban area is contributed largely by the regional transport. Remote sensing from space has given us a new view to study the air pollution in describing the aerosol distributions from a large coverage.

Key words: aerosol; air pollution; visibility