

论文

# 城市与冬季北方亮目标地区气溶胶光学厚度反演

李莘莘<sup>①</sup>, 陈良富<sup>①\*</sup>, 陶金花<sup>①</sup>, 韩冬<sup>①</sup>, 王中挺<sup>②</sup>, 苏林<sup>①</sup>, 范萌<sup>①</sup>, 余超<sup>①</sup>

① 中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

② 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100094

\* 联系人, E-mail: lfchen@irsa.ac.cn

收稿日期: 2011-05-17; 接受日期: 2012-01-12

国家自然科学基金(批准号: 41101400, 41130528)和遥感科学国家重点实验室开放基金(编号: OFSLRSS201103)资助

**摘要** 卫星遥感反演气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)的两个关键问题是地气分离问题和气溶胶模式问题. NASA/MODIS 暗像元算法反演植被等反射率较小的陆地气溶胶光学厚度取得了较好的效果, 但该算法对亮目标地区并不适用. 针对城市和冬天我国北方地区由于植被落叶呈现高反射率亮目标特点, 通过分析 MODIS 反演的 2007~2008 年期间每 8 天蓝光波段地表反射率值变化情况和规律, 建立以晴天反演的平均地表反射率为基础的地气分离方法, 并结合与季节相适应的气溶胶模式假设的基础上, 完成了基于 MODIS 数据的城市及冬季北方等高反射地区气溶胶光学厚度的反演. 为了验证反演算法的精度, 将 2008 年冬季北京地区反演结果与 AERONET 地基太阳光度计观测值进行对比, 相关性  $r$  达到 0.931, 特别是在光学厚度较大时( $AOD > 0.4$ ), 满足反演精度的值更多. 分析北京地区城市、农耕地区及山区三种不同反射类型的地表反射率变化情况, 评价其对气溶胶光学厚度反演带来的误差影响. 结果表明在短时期内, 若无异常天气影响, 蓝光波段的地表反射率变化小于 0.02, AOD 反演的绝对误差在 0.08 以内, 相对误差随着 AOD 的增大逐渐减小.

**关键词**

气溶胶光学厚度  
MODIS  
地表反射率  
亮目标

气溶胶通过散射和吸收太阳辐射直接影响或通过充当云凝结核而间接影响着气候变化, 但目前气溶胶的辐射强迫效应仍存在极大的不确定性, 是气候变化机理研究中被广泛关注的问题之一<sup>[1~5]</sup>. 卫星可以从空间尺度上监测气溶胶状况, 卫星遥感反演气溶胶光学厚度存在的两个关键问题是卫星过境时的气溶胶模式未知和地气解耦问题<sup>[6~8]</sup>. 构建像元尺度的地表反射率模型以估算地表反射贡献的方法, 会由于地表覆盖类型和各自比例等因素的未知而无法需要. 为应对地气解耦问题, 针对不同的

卫星数据特点相应提出了不同气溶胶光学厚度的反演算法: 如比较典型的有基于 MODIS 数据的暗像元算法<sup>[6~11]</sup>, 基于 POLDER 数据的偏振算法<sup>[12]</sup>, 基于 MISR 数据的多角度算法<sup>[13]</sup>等. 其中美国 NASA 的 EOS/MODIS 的暗像元算法已经推出第 5 版本的算法.

暗像元算法对浓密植被地区的地表噪声问题解决的比较好, 使气溶胶光学厚度反演具有较好的效果, 其误差控制在“ $\pm 0.05 \pm 0.15 \times AOD$ ”之内<sup>[9]</sup>. 这一方法主要通过大气影响小的近红外波段对地表反射的探测, 依据红、蓝、短波近红外波段反射率之间的线

性关系来消除地表的影响<sup>[6-8]</sup>, 如公式(1):

$$\begin{cases} \rho_s^{\text{red}} = k_{\text{red/nir}} \times \rho_s^{\text{nir}} + b_{\text{red/nir}}, \\ \rho_s^{\text{blue}} = k_{\text{blue/red}} \times \rho_s^{\text{red}} + b_{\text{blue/red}}, \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\rho_s^{\text{nir}}$ ,  $\rho_s^{\text{red}}$ ,  $\rho_s^{\text{blue}}$  分别表示浓密植被(暗像元)短波近红外、红光以及蓝光波段的地表反射率,  $k_{\text{red/nir}}$ ,  $k_{\text{blue/red}}$ ,  $b_{\text{red/nir}}$ ,  $b_{\text{blue/red}}$  分别为红光与短波近红外, 蓝光与红光之间地表反射率斜率和截距<sup>[9-11]</sup>. 实际上, 由于不同地物的反射率光谱差异, 近红外和红、蓝波段之间的线性关系并没得到理论支持(如图 1).

图 1 中, 不同地物之间的线性关系存在较大差异, 另外, 同一类型地物在不同时期由于受到入射太阳光谱能量分布、大气状况以及地表特征变化等因素影响, 其反射率也存在较大变化<sup>[14]</sup>. 当目标物反射率较低时, 如山区, 部分作物覆盖区的耕地和植被覆盖度较高的居住区, 近红外与红光波段的线性关系较好. MODIS 暗像元算法利用 2.1  $\mu\text{m}$  处的反射率来获得目标可见光处的反射率, 主要也是假设反演区域以浓密植被覆盖为主. 而对于亮目标, 如图 1 中部分植被覆盖度较低的居住区类型(这里称为“城市地区 1”),

首都机场附近覆盖类型(“城市地区 2”), 以及冬季以裸土覆盖为主的农耕地区, 近红外和可见光波段地表反射率比率的关系则比较混乱. 所以, 利用卫星遥感反演城市与冬季我国北方地区气溶胶光学厚度, 当像元尺度内浓密植被覆盖率比较低时, 2.1  $\mu\text{m}$  波段的表观反射率受到地表影响比较强, 如果仍然假设为浓密植被的线性关系, 则对可见光波段的地表反射率估算误差较大, 基于暗像元去除地表反射噪声的方法在亮目标地区不再适用. 因此, 亮目标气溶胶光学厚度反演的关键问题主要是由于地表反射率较大, 相对来说气溶胶是弱信息, 亮目标反射率估算误差很容易影响气溶胶反演精度, 所以如何估算地表反射的贡献达到地气解耦的目的, 对亮目标来说其挑战性更大. 偏振探测由于地表的偏振信息较弱而被应用于气溶胶探测, 但偏振探测只对细粒子探测效果较好<sup>[12]</sup>, MISR 的标量多角度探测和 MODIS 数据同样存在地表反射噪声较大的问题<sup>[13]</sup>. 基于大气透过率的结构函数法<sup>[15]</sup>研究试验表明了在高反射率地区气溶胶光学厚度反演的优势, 但该方法要求反演区域属于高反差地表, 对于冬季地表反射率差异不

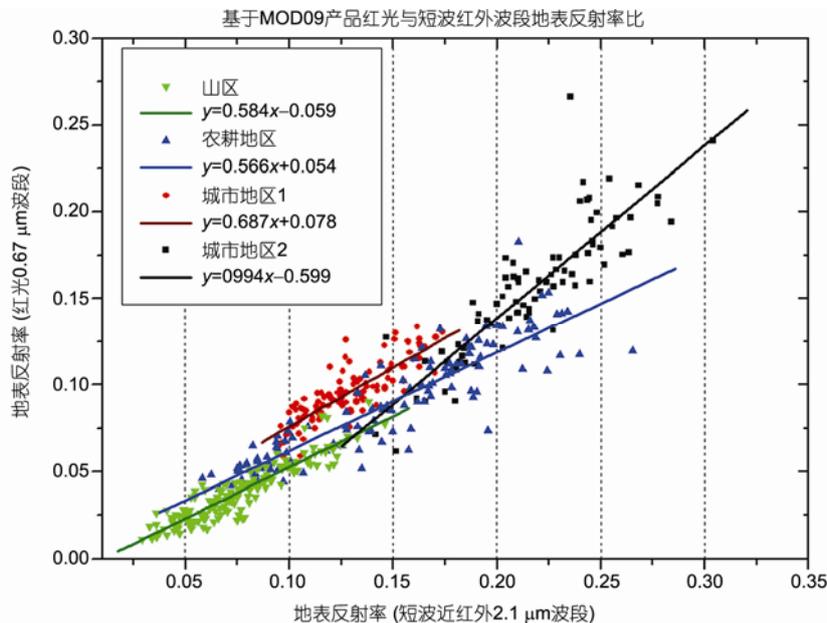


图 1 基于 2008 年 MODIS 地表反射率产品(MOD09), 北京地区山区、农作物覆盖区与城市地区红光(0.67  $\mu\text{m}$ )与短波近红外波段(2.1  $\mu\text{m}$ )地表反射率对比  
城市地区 1 为居住区, 城市地区 2 为北京首都机场附近地区(以水泥地为主)

明显的情况并不适用, 而且由于不同时间图像配准和清晰参考图像的获取问题, 使该方法很难实用<sup>[16]</sup>.

亮目标通常包括城市、冬季植被落叶地区、沙漠以及雪覆盖地区, 本文的亮目标主要局限于城市和冬季植被落叶地区, 不包括沙漠和雪覆盖类型. 利用 MODIS 数据, 建立耦合地表反射率的气溶胶光学厚度反演方法, 实现北京地区的气溶胶光学厚度反演, 弥补 MODIS 暗像元算法的不足.

## 1 反演原理与数据处理

### 1.1 原理

卫星传感器获得的辐射值包括大气程辐射和地表贡献两部分<sup>[16-81]</sup>, 即:

$$L(\mu_v) = L_0(\mu_v) + \frac{\rho_s}{1 - \rho_s S} \mu_s F_0 T(\mu_s) \times T(\mu_v), \quad (2)$$

式中,  $\mu_s = \cos \theta_s$ ,  $\mu_v = \cos \theta_v$ ;  $\theta_s$  和  $\theta_v$  分别为太阳天顶角与观测天顶角;  $L(\mu_v)$  为传感器接受到的辐射亮度,  $L_0(\mu_v)$  为观测方向的路径辐射项;  $\rho_s$  为地表二向反射 (BRDF) 率,  $S$  为大气下界的半球反射率,  $T(\mu_s)$  和  $T(\mu_v)$  分别是太阳辐射方向和观测方向的大气透过率;  $\mu_s F_0$  为大气层顶与太阳光垂直方向的辐射通量密度. 利用入射太阳辐射项  $F_0 \mu_s$  归一化公式(2)可得:

$$\rho_{TOA}(\mu_s, \mu_v, \phi) = \rho_0(\mu_s, \mu_v, \phi) + \frac{T(\mu_s)T(\mu_v)\rho_s(\mu_s, \mu_v, \phi)}{[1 - \rho_s(\mu_s, \mu_v, \phi)S]}, \quad (3)$$

式中,  $\rho_{TOA}$  是大气顶部反射率, 地表反射率  $\rho_s$  是地气解耦的关键. 除  $\rho_s$  以外, 公式(3)右边其他参数如  $\rho_0$ ,  $S$  和  $T$  都是气溶胶模式的函数. 反演时, 首先根据地基观测的气溶胶特性, 如复折射指数与粒子谱分布确定气溶胶模式, 利用辐射传输方程构造查找表; 然后按卫星观测的几何信息来读取查找表中不同光学厚度值对应的  $\rho_0$ ,  $S$ ,  $T$  等参数值或是其内插值; 代入  $\rho_s$  计算不同光学厚度下假定的表观反射率  $\rho_{TOA}$ , 最后根据卫星观测的真实  $\rho_{TOA}$  推演大气气溶胶光学厚度.

### 1.2 地气解耦方法

地气解耦实际上就是地表反射噪声的去除问题. 本文提出利用卫星对地观测同时得到的其他探测通道数据来反演地表反射率, 或利用与反演时间最临近天反演的地表反射率, 作为当天的真实地表反射

率, 来解决地表反射噪声的去除问题. 算法假设短时间内没有突发性天气的影响条件下, 地表覆盖类型不发生变化, 且植被生长带来的影响差异不大. 这一假设给反射率估算带来多大的误差, 需针对 AOD 反演所需的蓝光波段对不同典型地物的反射率值的大小、反射率的角度效应的大小, 以及反射率的季节变化等特点从以下几个方面进行分析.

第一, 从典型地物标准波谱反射率数据分析. 在蓝光波段植被、土壤、沥青、水泥等典型地物(如图 2 所示)的地表反射率较其他波段明显偏低. 已有的星载研究型扫描偏光计观测试验和 MODIS/BRDF 研究结果<sup>[17-20]</sup>表明, 在蓝光波段因观测角引起的角度效应也较小, 观测角  $30^\circ$  之间只有小于 0.02 反射率差异.

第二, 从像元尺度实际的反射率值分析. 为了分析地表反射率在短时期内变化情况, 本文选取了长时间序列蓝光波段的地表反射率值, 即 2007~2008 年两年每 8 天 MODIS 地表反射率产品, 来分析像元尺度地表反射率值的变化情况. 以 2008 年 2 月 2~9 日的京津唐地区蓝光波段 8 天平均反射率分布图(图 3(a))为例, 结合地表分类数据, 在京津唐地区分别选取不同覆盖类型: 北京市城区(图 3(a)A 区域)、农耕地区(图 3(a) B 区域, 冬季裸露无农作物覆盖)和浓密植被覆盖的山区(见图 3(a)C 区域), 并将 A, B 和 C 三个区所有像元的反射率值进行区域平均, 得到两年每 8 天的三个区域平均反射率值的变化结果(图 3(b)). 从这一结果中分析不同类型地表反射率值域变化范围与临近 8 天反射率值的变化情况.

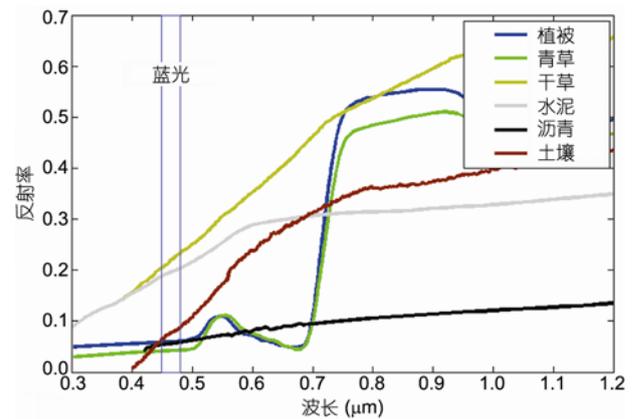


图 2 城市地区植被、青草、干草、水泥、沥青、土壤等典型地物标准波谱反射率

数据下载于“中国典型地物波谱数据库”(http://spl.bnu.edu.cn/index.asp)

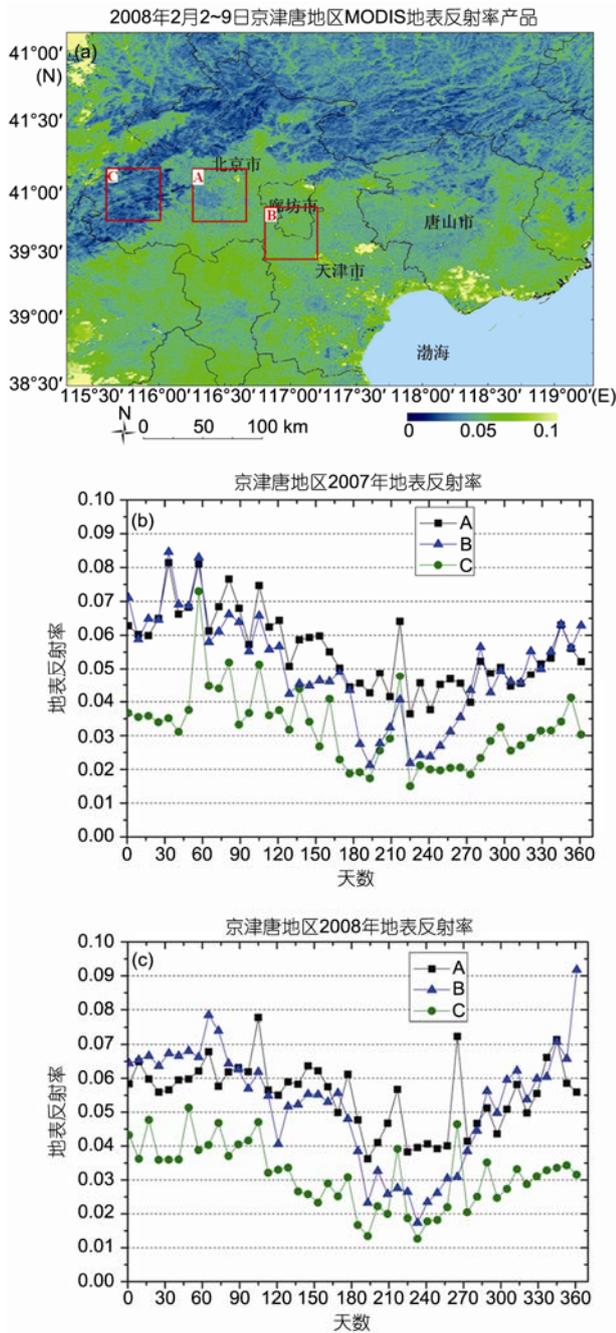


图3 2007~2008北京地区MODIS地表反射率产品

(a) 2008年2月2~9日MODIS地表反射率(蓝光波段)合成产品(MOD09); (b)和(c)2007~2008年北京地区不同地表类型(城市、农耕地区与山区)蓝光波段地表反射率变化情况

从图3(b)可以看出,三个统计区域两年期间每8天平均地表反射率随季节变化较为明显,夏季由于植被比较浓密,地表反射率明显偏低,我们关注的冬

季地表反射率值明显大于其他季节,这主要是因为冬季植被落叶后土壤背景面积比例增大所致.从三种覆盖的差异来看,总得来说,城市地区具有相对较高的地表反射率值,农耕地区次之,山区最小;三种覆盖类型反射率的季节变化特点中,城市地区的地表反射率变化最不明显,这与城市地区主要以沥青马路、水泥建筑物等地物覆盖有关;而农耕地区在冬季农田无农作物基本属于纯土壤地表情况下,具有相对较高的地表反射率值.

Kaufman等<sup>[6-8]</sup>研究表明晴天地表反射率0.01的误差会带来AOD(~1)0.1的误差,利用最临近天的地表反射率假设为反演时的地表反射,这种由于植被生长带来一定的变化,以及不同时间的观测几何变化给地表二向反射率的取值带来一定程度的影响,均对AOD反演带来误差.

### 1.3 四季气溶胶模式假定

气溶胶光学厚度卫星遥感反演的另一个关键问题是假定合适的气溶胶模式.气溶胶模式通常根据地基观测进行确定,随时空变化比较明显.本文以北京地区为例,处理了2005~2009年AERONET北京站和香河站的观测数据,用以分析我国北方城市和农村地区不同季节的气溶胶光学特性.表1给出了2005~2009年北京地区基于地基太阳光度计观测数据处理得到的Angstrom波长指数 $\alpha$ 、复折射指数和气溶胶粒子谱分布季节平均结果<sup>[21,22]</sup>.其中,Angstrom波长指数可以用来确定气溶胶的模式特征,沙尘型粒子一般介于-1~0.5之间<sup>[23]</sup>,煤烟型、城市工业型粒子等则通常大于1.1<sup>[23]</sup>.复折射指数描述气溶胶粒子对光的吸收和散射作用的参数,为复数形式.实部表示对光的散射作用,一般在可见光波段变化不大,干粒子的值在1.5~1.6之间,而对于吸湿粒子来说,其实部值在1.33~1.5之间.复折射指数虚部表示对光的吸收作用,无论在可见光波段或红外波段都有很大变化.城市粒子和煤烟型粒子的复折射指数虚部值较高,其值大多在0.01~0.1之间;而沙尘粒子虚部值随波长增大而减小,通常来自农村、远郊、海洋或土壤的粒子,其虚部值都在0.001~0.1之间.粒子谱分布函数表示每单位粒子半径间隔内的粒子个数,AERONET反演得到气溶胶粒子谱为体积谱分布,粒子半径在0.06~15  $\mu\text{m}$ 之间.比较常用的粒子谱分布函数为:容格谱、伽玛谱、对数正态谱和双对数正态谱,根据已

表1 AERONET 北京站与香河站 2005~2009 年四季气溶胶光学参数观测结果

地区、季节气溶胶光学特性	北京站				香河站			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
Angstrom 波长指数	0.9871	1.2095	1.1788	1.1133	1.0651	1.2039	1.1715	1.1295
复折射指数实部	1.5325	1.4853	1.5280	1.5393	1.5333	1.4637	1.4839	1.5465
复折射指数虚部	0.0090	0.0095	0.0148	0.0129	0.0066	0.0059	0.0098	0.0130
粗粒子平均半径( $\mu\text{m}$ )	0.6370	0.7958	0.7476	0.8287	0.7809	0.7062	0.9148	0.9724
粗粒子标准方差( $\mu\text{m}$ )	0.6687	0.6451	0.6281	0.6126	0.5869	0.6481	0.6030	0.6022
细粒子平均半径( $\mu\text{m}$ )	0.3216	0.0950	0.0839	0.0845	0.2141	0.0830	0.0742	0.1202
细粒子标准方差( $\mu\text{m}$ )	0.6178	0.5246	0.5406	0.6157	0.6788	0.5827	0.5750	0.6135

有的研究成果<sup>[24]</sup>, 本文假定北京地区为双对数正态谱分布.

如表1所示, 春季北京地区 Angstrom 波长指数最低, 复折射指数均值实部约为 1.53, 虚部小于 0.01, 细粒子平均半径明显大于其他季节. 表明春季我国北方易受沙尘天气影响<sup>[25]</sup>, 表现为大模态为主的大陆型气溶胶模式. 夏季北京地区 Angstrom 波长指数最高, 复折射指数均值实部小于 1.5, 为四季最低, 虚部小于 0.01. 夏季华北平原易受阴霾天气影响, 表现为水溶性硫酸盐、硝酸盐等各种有机酸盐<sup>[26]</sup>为主的 城市工业型气溶胶. 秋冬季节北京地区复折射指数虚部明显增高, 表明北方生物质与化石燃料燃烧逐渐增加, 排放了一定的烟雾性气溶胶. 从气溶胶粒子谱分布来看: 粗粒子平均半径则主要在 0.6~1  $\mu\text{m}$  之间分布; 除春季外, 细粒子平均半径通常小于 0.1  $\mu\text{m}$ ; 粗细粒子的标准方差以 0.6~0.7 出现最多. 总得来说, 北京地区城乡气溶胶模式差别不大, 本文针对城市和非城市地区采用统一的气溶胶模式. 针对不同季节的气溶胶模式特点, 基于复折射指数和粒子谱分布, 利用辐射传输软件构建查找表, 用于反演气溶胶光学厚度.

#### 1.4 亮目标气溶胶光学厚度反演流程

本文的亮目标 AOD 反演流程是建立在 NASA/MODIS 暗像元算法基础之上, 对于暗像元算法无法处理的亮目标区域调用本算法, 开展对亮目标 AOD 的反演. AOD 反演需要的数据包括 MODIS L1B 数据、MODIS 云标识数据 MOD35, 以及反演的地表反射率数据 MOD09. 主要步骤包括:

(1) 预处理: AOD 反演前首先要对 MODIS L1B 数据进行预处理, 包括去条带噪声及对吸收气体订

正等.

(2) 像元识别: 城市和冬天北方地区亮目标的识别是反演算法中的关键内容. 在像元识别步骤中进行云、浓密植被与亮目标等不同目标的区分, 生成掩码数据. 其中云标识基于 MODIS 云产品 MOD35 获得<sup>[27]</sup>. 浓密植被和亮目标的识别主要基于 2.1  $\mu\text{m}$  波段表现反射率  $\rho_{TOA}^{2.1}$  和植被指数的方法进行识别<sup>[11,28]</sup>. 中心波长 2.1  $\mu\text{m}$  的 MODIS 短波红外通道位于大气窗口, 由于波长较长气溶胶的影响比可见光波段小 15~30 倍, 因此可以利用  $\rho_{TOA}^{2.1}$  代替  $\rho_S^{2.1}$ . 本文针对反演区域内不包括水体、云、冰和雪的陆面, 采用文献[28]中的判据, 对于反射率值  $\rho_{TOA}^{2.1}$  大于 0.15 的像元作为亮目标处理. 然而 0.15 的阈值并不是一个普适标准, 受大气散射、太阳光谱能量分布等多种因素影响, 容易造成误判. 比如雾霾天气覆盖下的浓密植被, 由于  $\rho_{TOA}^{2.1}$  受到大气散射作用较强, 往往将暗像元错误识别为亮目标. 为了减小像元识别带来的误差, NASA/MODIS 暗像元算法反演 10 km $\times$ 10 km 星下点的网格区域时, 对于  $\rho_{TOA}^{2.1}$  阈值设定不同的优先级, 如 0.05, 0.1 和 0.15, 反演质量随着优先级的降低而降低. 在第五版本以后又根据  $\rho_{TOA}^{2.1}$  亮度对反演区域内像元进行排序, 去掉最亮的 50%和最暗的 20%. 由于 2.1  $\mu\text{m}$  波长处目标物的自身辐射占其反射太阳辐射的比重较小, 本文中并没有考虑目标物的自身辐射影响.

(3) AOD 反演: 根据像元识别后的不同类型数据, 以及部分辅助数据(冰、雪、地表分类等), 对云分布像元不做处理; 对于浓密植被区域采用 NASA/MODIS 数据反演 AOD 的暗像元算法; 对于已经选取

的亮目标, 从亮目标的每个像元读取几何观测信息, 利用查找表反演获得气溶胶光学厚度.

## 2 AOD 反演结果与验证

选择 2008 年 1 和 2 月以及 12 月份冬季期间, 以京津唐冬季植被落叶区域和无植被覆盖区域作为试验区, 选取 Terra 卫星的 MODIS 数据对试验地区的 AOD 反演算法进行试验, 并将反演得到 AOD 结果与 NASA/MODIS 的 AOD 的反演产品进行对比. 图 4 分别是 2008 年 1 月 11 日和 2 月 5 日两天的 MODIS 数据反演试验得到的结果, 其中图 4(a)和(b)是试验区当天的 MODIS 数据真彩合成图, 可以很明显的辨识云的分布; 图 4(c)和(d)是相应日期的 NASA/MODIS 的 AOD 的产品分布图; 图 4(e)和(f)是利用本文提出的耦合地表反射率算法获得的 AOD 结果分布图.

图 4 表明, 基于暗像元法的 NASA/MODIS 气溶胶标准产品(图 4(c)和(d)) 无法给出亮目标区域的气溶胶光学厚度值. 本文的耦合地表反射率算法的反演结果(图 4(e)和(f))弥补了 NASA/MODIS 标准产品的不足, 真彩图(图 4(a)和(b))中无云地表亮目标 AOD 反演较为成功. 由于 NASA/MODIS 气溶胶标准产品是 10 km 分辨率, 本文 1 km 的反演结果信息量更加丰富. 京津唐城市群 AOD 值( $>0.4$ )远大于山区和部分农村地区( $<0.2$ ).

为了验证反演算法精度, 利用北京地区 AERONET 站点(北京站, 香河站)L2 级数据对 AOD 反演结果进行验证. 将 Terra 卫星过境前后一小时地基观测的 AOD 结果进行平均后, 和地基站点位置像元处卫星反演的 AOD 结果进行比较. 为统一比较, 卫星反演的 AOD 和地基观测结果都统一转换为 0.55  $\mu\text{m}$  波段的 AOD 值(如图 5).

如图 5 所示, 从北京地区 2008 年冬季有记录的晴天验证对比结果可知, 耦合地表反射率算法反演得到的 AOD 与地基观测结果具有很好的一致性, 相关关系  $r$  达到 0.931. 可以看出, 在 AOD 较大时, 符合反演精度“ $\pm 0.05 \pm 0.15 \times \text{AOD}$ ”的点数较多. 图 4 中 2008 年 2 月 5 日 AERONET 香河站的观测结果为 0.748, 对应的卫星反演值为 0.912, 相对误差为 21.92%. 而当 AOD 较小时( $\text{AOD} < 0.4$ ), 只有约 55.6% 的反演结果符合误差范围. 图 4 中 2008 年 1 月 11 日 AERONET 香河站的观测结果为 0.101, 对应的卫星

反演值为 0.179, 相对误差则高达 77.22%, 出现这种情况的原因是将在第 3 和 4 部分中进行分析.

## 3 误差分析

气溶胶光学厚度反演的误差主要是由云识别、地表反射率与气溶胶模式等引起<sup>[29]</sup>. 本文引入临近几天地表反射率变化不大的假设, 利用临近的晴天地表反射率代替反演当天的地表反射率值的地气解耦算法, 来反演亮目标地区 AOD, 则由于不同季节植被生长和临近天观测几何引起的反射率角度效应, 均会引起反射率值的变化, 进而对气溶胶光学厚度反演带来误差. 另外, 由于本文采用的蓝光反射率与黄绿光波段相比数值较低, 且变化较小, 因此在蓝光波段的 AOD 转换到 0.55  $\mu\text{m}$  时也会受转换方法等因素影响. 这里主要分析地表反射率的估计以及 AOD 转换中可能出现的误差.

### 3.1 地表反射率变化误差

从图 3 统计的 2007 与 2008 年每相邻 8 天的地表反射率基础上, 对相邻 8 天的反射率值相减就可以获得 2007 年和 2008 年反射率值的变化情况(见图 6(a)); 对两年相应期间的 8 天的区域反射率进行相减, 就获得了年际之间的变化情况(见图 6(b)).

由图 6(a)可知, 每 8 天蓝光波段地表反射率的变化幅度主要集中在 0.01 以内, 排除雨雪等异常天气影响, 地表反射率的变化不超过 0.02. 由图 6(b)可知, 同一时期内的地表反射率年变化幅度也比较小, 亦主要集中在 0.01 以内. 因此, 若无临近晴朗天的地表反射率产品, 可以考虑采用相邻年同一时期的地表反射率反演结果代替. 分析表明, 植被生长和土地利用对较短时间内地表反射率的突变影响较小, 主要与入射太阳光谱能量分布和大气状况, 即气象条件有关, 其中夏季地表反射率在雨后由于土壤中水分的增加会出现偏低情况; 冬季则由于降雪天气过后, 地表面覆盖物以冰雪为主, 冰雪对太阳辐射的反射较强. 另外, 由于存在不同时间影像在观测方向的变化而带来的地表二向反射率数值差异, 所以必须考虑地表二向反射引起的误差. 基于已有的地表 BRDF 研究结果, 在大尺度范围内蓝光波段由观测角度引起的森林、植被、土壤等的 BRDF 相对较小, 可以认为在 0.02 以内<sup>[17-20]</sup>.

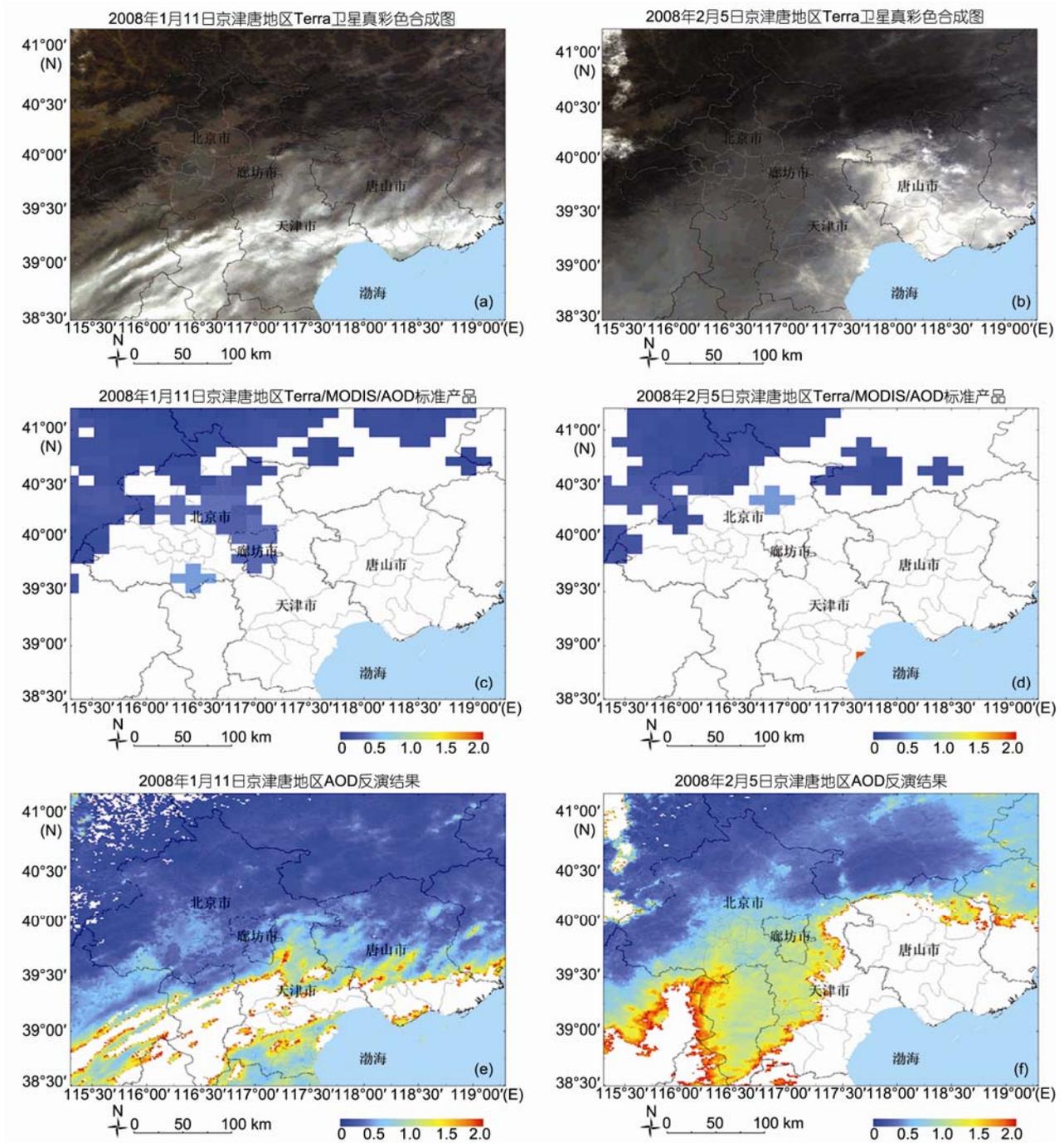


图4 2008年冬季京津唐地区气溶胶光学厚度

2008年1月11日京津唐地区: (a) 真彩图; (c) NASA/MOD04产品(10 km分辨率); (e) 耦合地表反射率的反演产品(1 km分辨率); 2008年2月5日京津唐地区: (b) 真彩图; (d) NASA/MOD04产品; (f) 耦合地表反射率的反演产品. 其中白色部分为云区等无数值区域, 部分红色区域为云/气溶胶交界区域

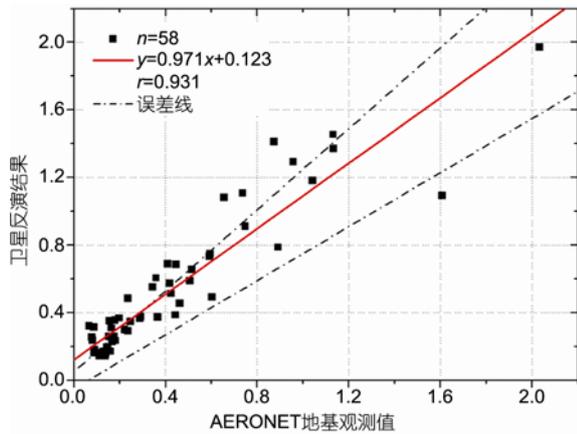


图5 基于 AERONET 北京站与香河站数据验证 2008 年冬季卫星反演结果

中上方的误差虚线采用“ $1.15 \times AOD + 0.05$ ”确定, 下方的误差虚线根据“ $0.85 \times AOD - 0.05$ ”确定

### 3.2 不同波段气溶胶光学厚度转换误差

本文的反演结果的验证采用  $0.55 \mu\text{m}$  的 AOD 进行对比, 在不同气溶胶粒子的谱分布情况下, 气溶胶光学厚度随波长变化的函数也不相同, 这里主要分析容格分布和对数正态分布两种情况. 在气溶胶粒子的谱分布满足容格谱分布的情况下, Angstrom 指出气溶胶的光学厚度跟波长之间的关系可以用下面的公式表示<sup>[30]</sup>:

$$\tau(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha}, \quad (4)$$

其中,  $\alpha$  为 Angstrom 波长指数,  $\beta$  为大气浑浊度系数, 基于公式(4),  $0.55 \mu\text{m}$  AOD 可以表示为

$$\tau_{0.55} = \tau_{0.47} \left( \frac{0.55}{0.47} \right)^{-\alpha}. \quad (5)$$

在气溶胶粒子谱分布满足对数正态分布的情况下, 气溶胶光学厚度随波长变化如公式(6)<sup>[31]</sup>:

$$\ln \tau_{\lambda} = \ln \tau_{\lambda_0} - a \ln(\lambda / \lambda_0) - b \ln^2(\lambda / \lambda_0), \quad (6)$$

其中,  $\lambda_0$  取  $1.02 \mu\text{m}$ ,  $a$  和  $b$  为拟合系数. 基于公式(6),  $0.55 \mu\text{m}$  AOD 可以表示为

$$\tau_{0.55} = \tau_{0.47} e^{\varepsilon}, \quad (7)$$

$$\varepsilon = a \ln \left( \frac{0.47}{1.02} \right) + b \ln^2 \left( \frac{0.47}{1.02} \right) - a \ln \left( \frac{0.55}{1.02} \right) - b \ln^2 \left( \frac{0.55}{1.02} \right). \quad (8)$$

为了分析不同波段 AOD 转换带来的误差, 需要根据地基观测确定  $\alpha$  和  $\varepsilon$  值的变化范围. 通过对

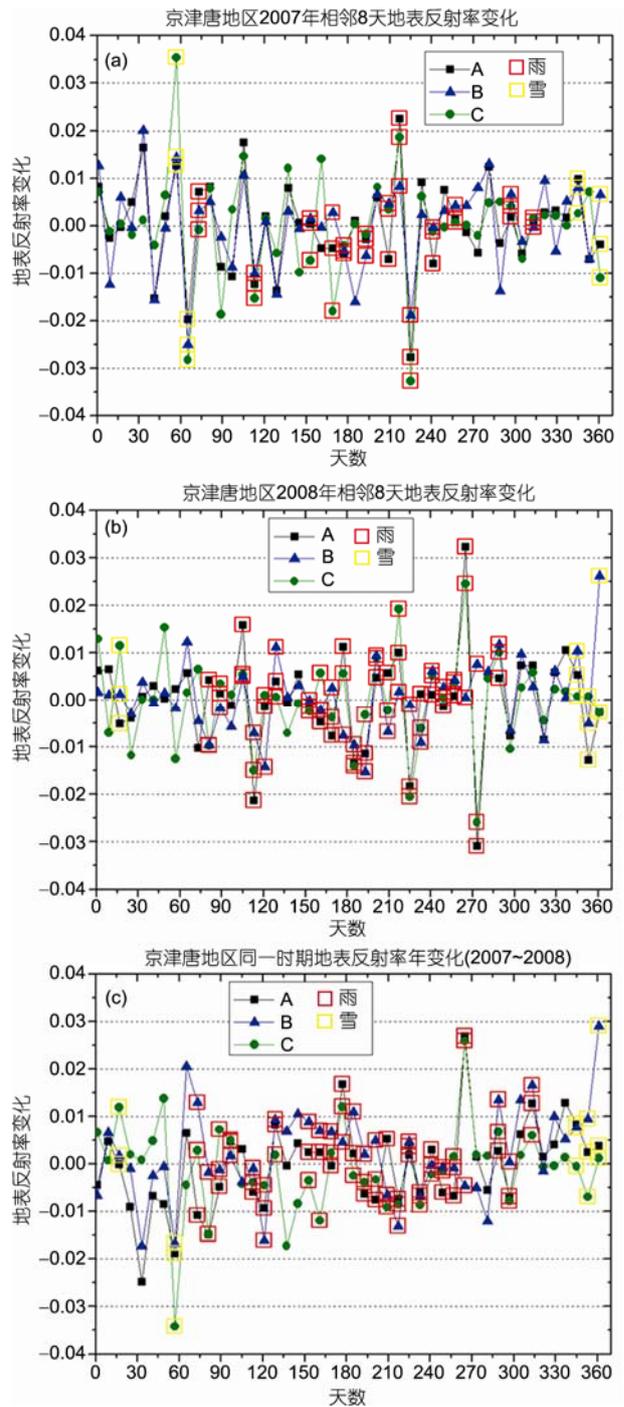


图6 2007~2008 年北京地区不同类型(城市、农耕地区与山区)地表反射率相邻 8 天变化((a), (b))和相邻年同一时期变化(c)

红色方框为雨天出现期, 黄色方框为雪天出现期

AERONET 北京站和香河站 2005~2009 年观测数据进行统计,  $\alpha$  的变化区间主要分布在  $0.8 \sim 1.4$  之间, 则

$\tau_{0.55}$  的变化范围在  $\tau_{0.47} \left(\frac{0.55}{0.47}\right)^{-1.4} \sim \tau_{0.47} \left(\frac{0.55}{0.47}\right)^{-0.8}$  之间, 可以认为误差小于  $0.079\tau_{0.47}$ . 同样, 地基观测的  $\varepsilon$  变化区间主要分布在  $-0.22 \sim -0.12$  之间, 则  $\tau_{0.55}$  的变化范围在  $\tau_{0.47}e^{-0.22} \sim \tau_{0.47}e^{-0.12}$  之间, 可以认为误差小于  $0.084\tau_{0.47}$ .

#### 4 讨论与结论

根据上一节中对不同时间亮目标地表反射率值变化幅度, 以及因角度效应引起的地表反射率误差分析结果, 选取 2008 年 1 月 11 日和 2 月 5 日的 MODIS 数据, 用亮目标算法对实验区内 AOD 进行反演(反演示例如图 4). 实验数据的城市及农村地区蓝光波段的地表反射率变化小于 0.02(如图 6(a)和(b)). 分别将每个像元的地表反射率浮动范围设定为 0.001, 0.005, 0.01 和 0.02, 将因雨雪等异常天气和 BRDF 等影响的变化幅度设为 0.03 和 0.05, 并分别考虑不同气溶胶光学厚度值的情况, 得到不同反射率估计误差给 AOD 反演结果带来的绝对误差如表 2 所示.

由表 2 的结果可知:

(1) 耦合蓝光波段地表反射率反演气溶胶光学厚度, 对地表反射率的低估将导致对 AOD 的高估; 反之, 对地表反射率的高估将导致对 AOD 的低估, 与已有的研究成果较一致<sup>[32]</sup>.

(2) AOD 反演的绝对误差会随着地表反射率的误差增大而增大. 当地表反射率的变化范围小于

0.005 时, 对 AOD 的影响相对较小, 其绝对误差小于 0.02. 当地表反射率变化达到 0.01 时, 对 AOD 的影响达到  $\sim 0.035$ , 小于 Kaufman 等的研究结果. 这主要是因为暗像元算法采用浓密植被的地表反射率值较低, 0.01 的误差变化相对浓密植被的影响大于对亮目标的影响; 另外, 由于反演区域内的 AOD 较高, 也相对减弱了地表贡献. 当无异常天气影响的情况下, 即地表反射率的误差小于 0.02, 则利用临近天地表反射率反演 AOD 的绝对误差在 0.08 范围以内. 对于异常天气影响造成地表反射率的变化幅度达 0.03 和 0.05, 对光学厚度的影响分别到达  $\sim 0.1$  和  $\sim 0.2$ , 通常超出了误差允许范围.

(3) 当气溶胶光学厚度较小时, 如  $AOD < 0.4$ , AOD 相对误差将超过 20%, 符合图 5 的地基验证结果; 当光学厚度达到 1.2 以后, 地表反射率的变化对光学厚度相对误差的影响将逐渐减小. 即随着气溶胶光学厚度的增大, 地表反射率的估计误差给 AOD 反演结果带来的相对误差逐渐减小.

通过以上分析, 可以获得以下结论:

耦合地表反射率的反演算法假定一个较短时期内亮目标蓝光波段的地表反射率的变化不大. 基于 MODIS 数据反演了 2008 年冬季京津唐地区的气溶胶光学厚度, 并利用 AERONET 北京与香河站点数据对卫星反演结果进行验证, 两者的一致性较好(见图 5).

通过对京津唐地区 2007 和 2008 年 8 天地表反射率数据的统计分析, 并利用相临 8 天的地表反射率差异和同时期两年间的反射率差异, 分析了反射率变化对 AOD 反演结果带来的误差. 结果表明当 AOD 较

表 2 地表反射率对气溶胶光学厚度影响

地表反射率及其误差范围		AOD 总体误差	AOD ≤ 0.4	0.4 < AOD ≤ 0.8	0.8 < AOD ≤ 1.2	1.2 < AOD ≤ 1.6	1.6 < AOD ≤ 2
0.001	+0.001	-0.0035	-0.0033	-0.0036	-0.0036	-0.0033	-0.0038
	-0.001	0.0036	0.0042	0.0037	0.0034	0.0037	0.0033
0.005	+0.005	-0.0178	-0.0185	-0.0181	-0.018	-0.0177	-0.0188
	-0.005	0.0173	0.0187	0.0185	0.0169	0.0173	0.0164
0.01	+0.01	-0.0357	-0.0381	-0.0372	-0.0352	-0.0352	-0.0369
	-0.01	0.0345	0.0365	0.0362	0.0339	0.0346	0.0345
0.02	+0.02	-0.0731	-0.0794	-0.0765	-0.0713	-0.0717	-0.0771
	-0.02	0.0675	0.0701	0.0707	0.0673	0.0676	0.0668
0.03	+0.03	-0.1117	-0.1224	-0.1173	-0.1077	-0.1097	-0.1183
	-0.03	0.0996	0.102	0.1041	0.0995	0.101	0.0972
0.05	+0.05	-0.1943	-0.2177	-0.2041	-0.1835	-0.1941	-0.2057
	-0.05	0.1602	0.1658	0.1669	0.1614	0.1635	0.1546
有效像元个数		32965	3806	8539	6959	7545	6116

大时, 地表贡献相对较小, 大部分反演结果在可接受的范围之内。

NASA 对地观测系统 EOS/MODIS 的遥感监测产品中只反演浓密植被气溶胶光学厚度, 不能处理亮目标的状况, 本文提出的反演方法弥补了 MODIS 暗像元算法在城市和冬季植被落叶地区(不包括沙漠和雪覆盖类型)的不足。其中, 亮目标像元采用 MODIS

近红外 2.1  $\mu\text{m}$  通道的表观反射率阈值进行辨识, 通过耦合临近天地表反射率对其进行地气解耦, 进而获得气溶胶光学厚度。总的来说, 本文的处理流程是建立在 MODIS 暗像元算法基础之上的, 所以对 NASA/MODIS 的 AOD 反演来说, 既具有继承性又是一个创新。该算法的实施可以提供我国冬季北方地区和城市地区气溶胶光学厚度信息。

## 参考文献

- 1 Penner J E, Dong X Q, Chen Y. Observational evidence of a change in radiative forcing due to the indirect aerosol effect. *Nature*, 2004, 427: 231–234
- 2 Lohmann U, Lesins G. Stronger constraints on the anthropogenic indirect aerosol effect. *Science*, 2002, 298: 1012–1015
- 3 Li Z, Xia X, Cribb M, et al. Aerosol optical properties and their radiative effects in northern China. *J Geophys Res*, 2007, 112: D22S01, doi:10.1029/2006JD007382
- 4 Tollefson J. Asian pollution delays inevitable warming. *Nature*, 2010, 463: 860–861
- 5 Kaufman Y J, Tanré D, Boucher O. A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, 2002, 419: 215–223
- 6 Kaufman Y J, Tanré D, Remer L A, et al. Remote sensing of tropospheric aerosol from EOS-MODIS over the land using dark targets and dynamic aerosol models. *J Geophys Res*, 1997, 102: 17051–17067
- 7 Kaufman Y J, Wald A E, Remer L A, et al. The MODIS 2.1  $\mu\text{m}$  Channel-Correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1997, 35: 1286–1298
- 8 Kaufman Y J, Tanré D, Gordon H R, et al. Passive remote sensing of tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect. *J Geophys Res*, 1997, 102: 16815–16830
- 9 Remer L, Kaufman Y, Tanre D, et al. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation. *J Atmos Sci*, 2005, 62: 947–973
- 10 Levy R C, Remer L A, Mattoo S, et al. The second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of MODIS spectral reflectance. *J Geophys Res*, 2007, 112: D13211, doi:10.1029/2006JD007811
- 11 Levy R C, Remer L A, Tanre D, et al. Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol over dark targets from MODIS: Collections 005 and 051 : Revision 2, 2009
- 12 Deuzé J L, Bréon F M, Devaux C, et al. Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS-1 polarized measurements. *J Geophys Res*, 2001, 106: 4913–4926
- 13 Diner D J, Braswell B H, Davies R, et al. The value of multiangle measurements for retrieving structurally and radiatively consistent properties of clouds, aerosols, and surfaces. *Remote Sens Environ*, 2005, 97: 495–518
- 14 Wang J, Xu X G, Spurr R, et al. Improved algorithm for MODIS satellite retrievals of aerosol optical thickness over land in dusty atmosphere: Implications for air quality monitoring in China. *Remote Sens Environ*, 2010, 114: 2575–2583
- 15 Tanre D, Deschamps P Y, Devaux C, et al. Estimation of Sahran aerosol optical depth from blurring effects in thematic mapper data. *J Geophys Res*, 1988, 93: 15955–15964
- 16 孙林. 城市地区大气气溶胶遥感反演研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2006
- 17 Hsu C N, Tsay S C, King M D, et al. Aerosol properties over bright-reflecting source regions. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2004, 42: 557–569
- 18 Eklundh L, Jonsson P, Kuusk A. Investigating modeled and observed Terra/MODIS 500-m reflectance data for viewing and illumination effects. *Adv Space Res*, 2007, 39: 119–124
- 19 Knobelspiesse K D, Cairns B, Schmid B, et al. Surface BRDF estimation from an aircraft compared to MODIS and ground estimates at the Southern Great Plains site. *J Geophys Res*, 2008, 113: D20105, doi:10.1029/2008JD010062
- 20 Liang S L, Townshend J R G. A modified hapke model for soil bidirectional reflectance. *Remote Sens Environ*, 1996, 55: 1–10
- 21 Dubovik O, King M D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements. *J Geophys Res*, 2000, 105: 20673–20696
- 22 Tarantola A. *Inverse Problem Theory: Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation*. New York: Elsevier, 1987
- 23 Tanre D, Kaufman Y J, Holben B N, et al. Climatology of dust aerosol size distribution and optical properties derived from remotely sensed

- data in the solar spectrum. *J Geophys Res*, 2001, 106: 18205–18217
- 24 怀红燕, 李正强, 陈良富, 等. 基于地基偏振观测研究北京城区北部大气气溶胶特性变化. *遥感学报*, 2008, 12: 490–497
- 25 申彦波, 沈志宝, 汪万福, 等. 2001年春季中国北方大气气溶胶光学厚度与沙尘天气. *高原气象*, 2003, 22: 185–190
- 26 颜鹏, 潘小乐, 汤洁, 等. 北京市区大气气溶胶散射系数亲水增长的观测研究. *气象学报*, 2008, 66: 111–119
- 27 Platnick S, King M D, Ackerman S A, et al. The MODIS cloud products: Algorithms and examples from Terra. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2003, 41: 459–473
- 28 Li C C, Lau A K, Mao J T, et al. Retrieval, validation and application of the 1-km aerosol optical depth from MODIS measurement over Hong Kong. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2005, 43: 2650–2658
- 29 Chu D A, Kaufman Y J, Zibordi G, et al. Global monitoring of air pollution over land from the Earth Observing System-Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *J Geophys Res*, 2003, 108: 4661, doi:10.1029/2002JD003179
- 30 周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. 高等大气物理学. 北京: 气象出版社, 1991
- 31 Brogniez C, Lenoble J, Hobbs P V, et al. Size distribution of stratospheric aerosols from SAGE II multiwavelength extinctions. *Aerosols Climate*, 1988, 305–312
- 32 张军华, 斯召俊, 毛节泰, 等. GMS 卫星遥感中国地区气溶胶光学厚度. *大气科学*, 2003, 27: 23–35