



论文

一种基于卫星遥感 AOT 估算近地面颗粒物的方法

陶金花^{①②}, 张美根^{①*}, 陈良富^②, 王子峰^②, 苏林^②, 葛萃^①, 韩霄^①, 邹铭敏^②

① 中国科学院大气物理研究所, 大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029;

② 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

* 联系人, E-mail: mgzhang@mail.iap.ac.cn

收稿日期: 2012-04-20; 接受日期: 2012-07-15

国家自然科学基金项目(批准号: 41101327)资助

摘要 本文建立了一种基于卫星遥感 AOT 估算近地面颗粒物浓度的新方法. 该方法考虑大气边界层厚度和近地面相对湿度的区域分布变化情况, 基于大气边界层模式模拟结果和卫星遥感气溶胶光学厚度进行近地面颗粒物浓度估算. 基于 RAMS 模拟结果和 MODIS 气溶胶光学厚度数据, 利用该方法获得了华北地区近地面 PM_{2.5} 质量浓度. 并用研究区域中 16 个地面站点的颗粒物浓度监测数据对估算结果进行了评估. 结果表明, 遥感反演的近地面 PM_{2.5} 与地面监测数据在趋势上基本一致, 二者相关 R^2 达到 0.61. 与此同时, 又利用地面激光雷达和气象仪测量结果对 MODIS 气溶胶光学厚度数据进行了近地面颗粒物估算, 并将估算的结果与新方法得到的估算结果进行了比较. 比较结果表明, 新方法获得的估算结果与地面监测数据具有更好的相关性, 和常规方法相比, 相关 R^2 从 0.32 提高到 0.62.

关键词大气边界层模式
卫星遥感
近地面颗粒物浓度
气溶胶光学厚度

近地面颗粒物信息获取是环境监测的重要内容之一. 目前常规的监测手段为地面仪器进行连续监测. 这种站点式常规监测可以实时掌握观测点上的颗粒物浓度随时间变化的信息, 具有精度高、时间连续等优点. 但由于地面观测站点有限, 利用这种常规观测手段难以掌握区域尺度的颗粒物分布状况^[1], 获取大范围的颗粒污染物信息比较困难, 只能采取“以点代面”方法, 即以某一点的监测结果近似代替其周边区域, 这使得监测点附近的结果可靠性较高, 大范围尺度结果可靠性较低. 与传统的地面监测手段相比, 卫星遥感数据具有区域尺度的优点, 卫星遥感具有在

大空间范围内连续、能够在不同尺度上反映污染物的宏观分布趋势、源汇分布和传输路径, 为大气污染的全方位立体监测提供了重要的信息来源.

已有的研究表明, 气溶胶光学厚度(AOT)和近地面颗粒物浓度之间存在一定的相关性, 并证明了由 AOT 估算近地面颗粒物浓度的可行性^[1-9]. 卫星遥感获得的气溶胶光学厚度是整层大气颗粒物消光系数的积分, 而近地面颗粒物质量浓度是指经过 50℃烘干的干粒子质量浓度, 因此整层气溶胶光学厚度和近地面干粒子质量浓度之间存在以下 2 个影响因素, 即气溶胶垂直分布和大气水汽. 李成才等^[1]在研究北京地区

中文引用格式: 陶金花, 张美根, 陈良富, 等. 一种基于卫星遥感 AOT 估算近地面颗粒物的方法. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 143-154

英文引用格式: Tao J H, Zhang M G, Chen L F, et al. Method to estimate concentration of surface-level particulate matter from satellite-based aerosol optical thickness. Science China: Earth Sciences, 2012, doi: 10.1007/s11430-012-4503-3

(单点)MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)AOT 与 PM₁₀ 浓度相关关系时, 假设气溶胶含量在垂直方向呈负指数递减, 采用气溶胶标高的历史数据归纳出北京地区 4 个季节的平均气溶胶标高, 以此为基础对 AOT 进行垂直订正. 同时采用一个经验气溶胶吸湿增长因子 $f(RH) = 1/(1.0 - RH/100)$, 对 AOT 进行湿度订正. 结果表明, 订正后的气溶胶消光系数与 PM₁₀ 间的相关水平显著提升, R^2 由 0.25 上升到 0.54. Wang 等^[10]在假设气溶胶垂直分布为负指数递减的前提下, 利用激光雷达探测的混合层高度和地面实测的相对湿度对地基反演的 AOT 进行垂直订正和湿度订正, 订正后的 AOT 与 PM₁₀, PM_{2.5} 浓度的相关 R^2 分别达到了 0.65 和 0.62, 最后给出由卫星遥感 AOT 估算近地面颗粒物浓度的经验模型. 在此经验模型基础上, 利用 MODIS AOT 估算了北京地区近地面 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度, 并与观测值进行了比较, 发现二者的相关 R^2 达到 0.47, 且在较大的空间尺度和较长的时间尺度下二者的一致性更好. Engel-Cox 等^[11]和 Hutchison 等^[12]分别利用地基和机载的激光雷达测量了气溶胶垂直分布数据, 对 MODIS AOT 进行垂直订正, 显著提高了 MODIS AOT 与近地面 PM_{2.5} 的相关水平. Pelletier 等^[13]针对 AERONET 提供的地基 AOT 和邻近站点 PM₁₀ 浓度, 建立了一个 AVCM(Additive Varying Coefficient Model)模型, 该模型综合考虑了风速、压力、相对湿度和大气可降水量等气象要素, 使得近地面颗粒物浓度和 AOT 的相关系数 R^2 由 0.27 上升为 0.76. 如上所述, 虽然已有研究工作考虑了气溶胶垂直分布和大气水汽的影响, 提高了 AOT 与近地面颗粒物浓度的相关水平, 但这两个因素随空间和时间变化很大, 将点尺度的相关模型应用于区域尺度, 会导致结果的空间局限性. 例如采用地基激光雷达测得的混合层高度对 AOT 进行垂直订正, 由于地基激光雷达站点数量的有限性, 其监测结果难以匹配区域尺度的卫星像元, 只能采取单点代替或多点内插方法近似得到区域尺度的监测结果. 而星载传感器的幅宽一般都在数百至数千公里, 如 MODIS 的幅宽为 2330 km, 这种尺度下的大气状况差异巨大, 下垫面类型复杂, 气溶胶分布随时间、地域变化很大, 因此上述方法“以点带面”问题, 导致小范围内效果较好, 大区域尺度结果较差. 同理, 湿度订正也同样存在空间局限性问题.

而目前颗粒物估算方法中所需的气溶胶分布及水汽分布等信息一般采用地面站点监测方法, 这种站点式信息获取方法导致了颗粒物估算方法存在空间局限性, 使得在大区域尺度上颗粒物估算结果存在较大的不确定性. 为了改善基于卫星遥感 AOT 估算近地面颗粒物的精度, 本文将大气边界层模式引入到近地面颗粒物估算中. 近 20 多年来, 大气动力学模式^[14-16]有了长足的发展, 已经能够相当合理地描述地形和下垫面不均匀性对大气边界层结构的影响. 大气模式模拟结果具有区域尺度的特点, 正好弥补了地面观测在区域尺度上的不足. 本文探讨采用大气模式模拟卫星过境时的大气边界层高度和近地面相对湿度, 对区域尺度卫星遥感反演的气溶胶光学厚度开展颗粒物监测方法研究, 并利用华北地区地面观测的颗粒物浓度来评估反演结果. 同时评估采用大气模式模拟结果订正与常规采用地面有限点监测结果订正的两种不同颗粒物浓度估算方法. 本文的研究方法和以往研究相比, 共同点是都考虑气溶胶的垂直分布和水汽对气溶胶消光能力的影响, 不同点是本文在校正气溶胶垂直分布和水汽影响时, 充分考虑了这两个因素的空间变化影响, 借助大气模式的区域尺度优势, 尽量降低气溶胶垂直分布和水汽的空间变化影响, 进而在一定程度上提高区域尺度近地面颗粒物浓度的估算精度.

1 模型与方法

1.1 区域尺度近地面水平消光系数获取方法

基于 AOT 获取近地面气溶胶的消光系数, 是颗粒物估算的关键之一. AOT 是近地面颗粒物遥感估算中最主要的信息来源, 它是大气垂直柱内所有气溶胶粒子消光能力的总和, 和近地面颗粒物含量之间的相关关系受气溶胶垂直分布的影响, 该关系随时间和空间发生变化. 由于表述大气物理状况的气压、大气温度和大气湿度, 在垂直方向上的变化远远大于水平方向上的梯度, 在大气辐射传输的许多应用问题中大量假定大气具有水平均一, 垂直分层结构^[17], 大气辐射强度和大气参数(温度和气体分布廓线)在垂直方向上变化^[18], 由于地球重力作用使气溶胶颗粒密度随高度呈负指数递减^[17], 这样大气整层 AOT 和近地面气溶胶消光系数存在以下关系^[10]:

$$\tau_a(\lambda) \approx k_{a,0}(\lambda) \int_0^{\infty} \exp(-z/H_A) dz = k_{a,0}(\lambda) \cdot H_A, \quad (1)$$

其中 $\tau_a(\lambda)$ 为 AOT, $k_{a,0}(\lambda)$ 为近地面水平消光系数, H_A 为气溶胶标高. 由公式(1)可知, 在卫星反演的 AOT 基础上, 只要获得每个 AOT 像元对应的气溶胶标高 H_A , 就可以得到每个像元的近地面水平消光系数 $k_{a,0}(\lambda)$, 此时的近地面水平消光系数受水汽影响.

气溶胶标高定义为假定气溶胶浓度随高度呈负指数递减, 当浓度减少为地面浓度的 $1/e$ 时的高度, 即认为大气中气溶胶浓度随高度保持不变时气溶胶层的等效厚度. 它是一个理想条件下假定的等效高度, 难以在近地面气溶胶消光系数未知的情况下直接测量, 并随时间、地域等变化而不断变化. 由于卫星过境时间很短, 可以忽略其在时间上的变化, 但在卫星影像空间尺度上的变化不能忽略. 基于目前无法通过监测手段获得准确的、大范围区域尺度的气溶胶标高的实际情况, 本文采用大气模式模拟区域尺度不同格网的边界层高度代替气溶胶标高, 实现基于卫星 AOT 数据获取大范围区域尺度的近地面水平消光系数.

采用边界层高度近似代替气溶胶标高是基于以下两点考虑: (1) 大气边界层充分发展, 夜间残留层内污染物基本混入边界层内, 且由于边界层顶部逆温层的存在, 边界层内的污染物难以扩散到该层之上的自由大气中, 因而边界层内集中了大气中绝大部分气溶胶粒子. (2) 通常晴天正午期间, 近地面大气对流混合能力较强, 使边界层内污染物垂直交换充分, 在边界层顶会出现气溶胶浓度的锐减, 在相应的激光雷达回波上表现为一个明显的突变, 此时的边界层高度接近于气溶胶标高的物理含义. (3) 气溶胶标高的间接测量也表明, 气溶胶标高与大气边界层高度具有相似的日变化规律^[19].

1.2 区域尺度近地面消光系数水汽校正方法

空气中的硫酸盐、硝酸盐、铵盐和海盐等无机成分及部分有机物粒子具有吸湿性, 粒子吸湿后会发粒径增长, 致使单个粒子的粒径、质量、密度和折射指数等微物理参数发生变化, 从而气溶胶粒子群宏观上的物理、化学和光学性质发生变化. 一方面随着粒子的吸湿增长, 粒子数谱分布发生整体移动^[20]. 另一方面, 由于粒子整体的复折射指数或折射率是由原来的固态组分和吸附的液态水共同决定, 因此吸湿增长会使粒子的复折射指数或折射率不断改变^[21].

多项研究表明, 空气水汽对颗粒物的复折射指数和消光截面等具有较大影响^[22,23]. 目前地面常规观测站点获得的颗粒物监测结果是经过 50°C 高温烘干的干粒子质量浓度. 所以在考虑近地面水平消光系数与颗粒物质量浓度之间的关系时, 还要考虑消光系数受空气湿度的影响.

消光系数受空气湿度的影响可以通过散射吸湿增长因子来描述. 气溶胶散射吸湿增长因子 $f(RH)$ 定义为大气环境状况下的气溶胶消光系数与空气相对湿度小于或等于 40% 状况下的气溶胶消光系数之比^[24], 即

$$f(RH) = \frac{k_{\text{wet}}(RH)}{k_{\text{dry}}(RH \leq 40\%)}, \quad (2)$$

其中 RH 表示空气相对湿度(用百分数表示), $k_{\text{wet}}(RH)$ 称为环境空气湿度下的近地面水平消光系数, 简称为“湿”消光系数, $k_{\text{dry}}(RH \leq 40\%)$ 表示空气相对湿度小于或等于 40% 时的水平消光系数, 即“干”消光系数. 由公式(2)可知, 获取 k_{wet} 和 $f(RH)$ 后, 即可获得“干”消光系数 k_{dry} .

气溶胶散射吸湿增长因子随环境湿度、试验区域和气溶胶类型等不同而差别较大, 取值可在 1.2~4.1 之间变化^[20,21]. 一般来讲, 海洋型气溶胶的散射吸湿增长因子要明显偏大, 而城市型、陆地型气溶胶的散射吸湿增长因子居于中间, 生物质燃烧源所排放的气溶胶其散射吸湿增长因子是最小的, 这与生物质燃烧产物中碳黑质量分数偏大有明显关系^[20]. 因此, 在分析气溶胶消光系数与质量浓度的相关关系时, 若不考虑粒子的吸湿增长给消光特性带来的变化, 将会给计算引入较大的误差. 大量的观测实验表明, 环境大气中气溶胶粒子的散射吸湿增长因子可近似为相对湿度的函数. 但由于不同地区的气溶胶成分不同, 一些学者提出了适合不同地区的不同的吸湿增长模型^[10,20,21,24-27]. 在北京及周边地区, 考虑气溶胶消光特性的吸湿增长时, 已有部分学者做过研究. 李成才等^[1]在北京市采用模型 $f(RH) = 1/(1.0 - RH/100)$ 取得了较好的效果. Song 等^[28]考虑了季节变化对气溶胶吸湿特性的影响, 采用模型 $f(RH) = b_0 + b_1 \left(1 - \frac{RH}{100}\right)^{-1} + b_2 \left(1 - \frac{RH}{100}\right)^{-2}$, 其中 b_0 , b_1 和 b_2 分别为经验系数, 针对年际状况和 4 个季节分别给出不同的取值. 何秀等^[29]在北京地区采用了以模型 $f(RH) = 1/(1 - RH)$ 为基础, 分别针对 4 个季

节, 拟合了 4 个经验公式, 用于近地面 PM10 反演, 并取得了较好效果. 根据刘新置^[20]的研究结果, 模型 $f(RH) = 1 / \left(1 - \frac{RH}{100} \right)$ 可以有效拟合北京地区的颗粒物散射吸湿增长因子 $f(RH)$. 本文在北京周边地区采用的吸湿增长因子为

$$f(RH) = 1 / \left(1 - \frac{RH}{100} \right). \quad (3)$$

由公式(3)可见, 获取 RH 后即可得到 $f(RH)$. 目前近地面相对湿度 RH 的主要监测手段是通过部署在地面的气象仪监测获得. RH 也是随时间、地域变化而不断变化. 对于小范围区域, 可忽略其在地域分布上的变化, 采用区域内某点的地面监测值近似代替整个研究区域. 但对于大范围区域来说, 相对湿度在地域上的变化不容忽视. 本研究采用大气模式模拟区域尺度的近地面相对湿度, 进而根据公式(3)获取研究区域内的相对湿度因子, 最终根据公式(2)获得区域尺度的近地面“干”消光系数.

1.3 近地面“干”消光系数与近地面颗粒物质量浓度相关模型确定方法

根据 Mie 散射理论, 气溶胶“干”消光系数 E_{dry} 与颗粒物谱分布和消光特性有关^[30], 如(4)式所示:

$$E_{dry} = \pi \int_0^X Q_{ext}(\tilde{m}, r, \lambda) n(r) r^2 dr, \quad (4)$$

其中 $Q_{ext}(\tilde{m}, r, \lambda)$ 为颗粒物散射效率, 与粒子的复折射率 \tilde{m} 、半径 r 和辐射波长 λ 有关; $n(r)$ 为谱分布函数; X 为半径积分上限. 而相同条件下的颗粒物质量浓度 PM_x 可以表达为

$$PM_x = \frac{4}{3} \pi \rho \int_0^X r^3 n(r) dr, \quad (5)$$

其中 ρ 为颗粒物的平均密度. 根据 Hansen 和 Travis^[31] 的工作, 引入归一化颗粒物散射效率 $\langle Q_{ext} \rangle$ 和有效半径 $\langle r \rangle$ 两个参数:

$$\langle Q_{ext} \rangle = \frac{\int_0^X Q_{ext}(\tilde{m}, r, \lambda) n(r) r^2 dr}{\int_0^X n(r) r^2 dr}, \quad (6)$$

$$\langle r \rangle = \frac{\int_0^X r^3 n(r) dr}{\int_0^X r^2 n(r) dr}. \quad (7)$$

由式(4)~(7)可以得到

$$E_{dry} = \frac{3 \langle Q_{ext} \rangle}{4 \langle r \rangle \rho} \cdot PM_x. \quad (8)$$

若颗粒物的类型和谱分布一定, 则 $\langle Q_{ext} \rangle$, $\langle r \rangle$ 和 ρ 可看作常数, 从而“干”气溶胶消光系数与颗粒物浓度存在正相关关系. 而实际上不同地域的颗粒物类型不可能相同, 从而上述关系受颗粒物成分、各成分组成比例及混合状态等因素影响, 由于不同地域及时间内影响该关系的各因素变化很大, 因此该关系受时空变化的限制, 很不稳定. 在较小区域和较短时间范围内可近似认为各影响因素相对稳定, 从而二者相关关系较稳定, “干”气溶胶消光系数与颗粒物浓度的正相关关系已经在很多研究中得到验证^[1,10,29]. 此时通过大量的观测样本数据可以拟合近地面“干”气溶胶消光系数与颗粒物浓度之间的线性模型, 模型见公式(9). 对于长时间序列, 可分季节拟合二者的相关模型. 而对于大范围区域, 可通过将其划分为小区域后进而应用公式(9):

$$PM_{2.5} = A \times E_{dry} + B, \quad (9)$$

其中系数 A 和 B 通过训练样本统计获得, $PM_{2.5}$ 为近地面 PM2.5 质量浓度, 可以通过地面观测直接测量, E_{dry} 为近地面“干”消光系数, 可以通过大气水平消光系数与水平能见度关系获得, 见公式(10):

$$E_{all} = \frac{3.912}{Vis}, \quad (10)$$

其中 Vis 是通过能见度仪直接测得的水平能见度, E_{all} 是近地面 550 nm 大气水平消光系数. 总消光系数 E_{all} 是气溶胶水平消光系数 E_{aer} 和大气分子水平消光系数 E_{mol} 的和, 与气溶胶的影响相比, 边界层中大气分子对消光系数的影响可以忽略不计, 这样 E_{aer} 近似等于总消光系数 E_{all} . 此时的气溶胶消光系数 E_{aer} 是具有一定湿度的大气水汽影响下的消光系数, 即“湿”消光系数 E_{wet} . 由公式(2)和(10)可知, 近地面“干”消光系数可通过近地面相对湿度和“湿”消光系数间接获取.

2 观测资料

2.1 地面站点观测资料

为支持 2008 年北京奥运会和残奥会空气质量保障工作, 中国科学院从 2007 年 8 月开始实施“北京地区大气环境监测行动计划”, 在北京市周边共布设了

16个地面空气质量观测站,进行常规地面监测,都具备近地面颗粒物的监测能力,这16个站点的位置分布见图1中红色圆点所示,每个站点的名称和位置见表1.这16个地面站点观测的颗粒物质量浓度数据,在本文中用于反演结果评估.与此同时,位于中国科学院遥感应用研究所楼顶的中国科学院北京地区空气质量超级监测站(39.9°N, 116.1°E)具备更强的监测能力,该站自2007年6月建成运行,目前已经收集了多年的地面连续监测数据.仪器包括能见度仪、震荡天平、自动气象仪以及双波段偏振激光雷达等,能获取能见度、PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度、近地面气溶胶消光系数、相对湿度以及边界层高度等参数.该数据在本文中用于模型建立.为了减少因大气状况变化而引入的不确定性,所有参与比对分析的数据均为同时获取,并采用小时平均值.

2.2 MODIS AOT 产品

美国 NASA(National Aeronautics and Space Administration)的 MODIS 具有多光谱、宽覆盖和分辨率高等特点,搭载在 TERRA 和 AQUA 两颗卫星上,广泛用于大气气溶胶监测.目前, NASA 每日发布基

于 MODIS 数据的陆地气溶胶光学厚度产品,该产品的空间分辨率为 10 km, 波长为 0.55 μm , 采用暗像元法反演,陆地上空精度约为 15%^[32], 本文所用的 AOT 数据来源于此.

本文选取在中国华北地区每日上午过境 1 次的 TERRA 卫星上的 MODISAOT 结果.由于 7 和 8 月正值北京夏季,云覆盖量大,卫星的 AOT 结果受云影响极大,使数据存在大量无效值,因此对 AOT 数据进行筛选,尽量挑选晴天、少云数据,自 2008 年 7 月 1 日至 2008 年 9 月 30 日,共选取 68 景(天)有效数据.

2.3 RAMS 模拟结果

RAMS 是一个完善的三维非静力中尺度大气模式,在天气过程和下垫面非均匀性对大气边界层结构的影响方面具有很好的模拟能力^[14],目前广泛应用于理论研究和天气预报业务中.本文基于 NCEP 再分析资料,利用 RAMS 模式模拟了用于华北地区的边界层高度、近地面相对湿度.模拟时间自 2008 年 7 月 1 日至 2008 年 9 月 30 日,数据时间频率为 1 小时 1 次.为更好地描述边界层结构, RAMS 模式顶高为 23 km,在垂直方向上分为间距不等的 23 层网格,网格距在 2

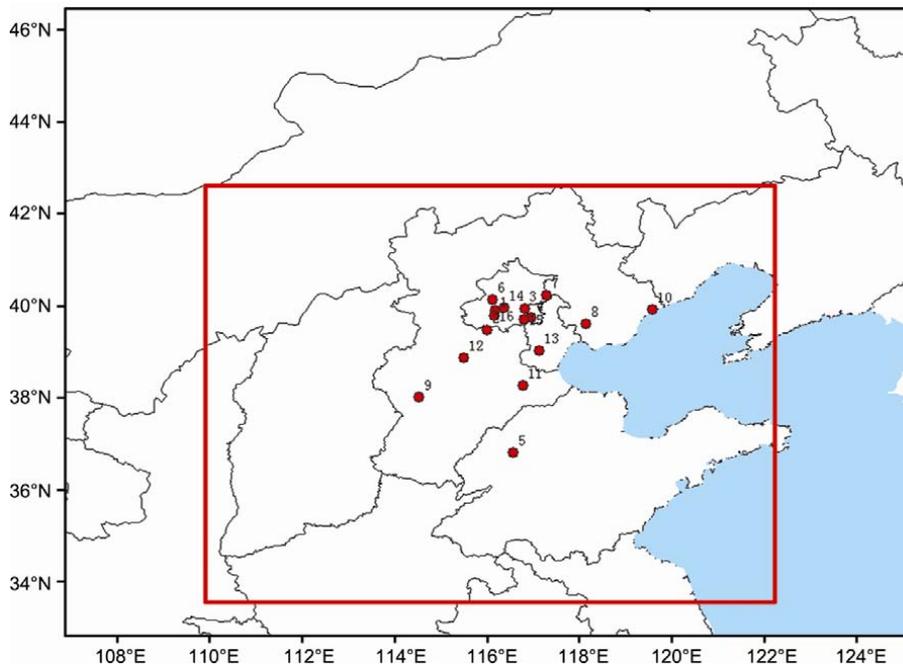


图1 研究区域、模拟区域及地面监测站点分布图

海面上空不模拟, 外围框为模式模拟区域, 红色矩形框内为研究区域, 红色点为地面监测站点

表 1 地面监测站点

标识	站点名称	站点位置
1	首钢	39.905°N, 116.174°E
2	涿州	39.478°N, 116°E
3	燕郊	39.948°N, 116.814°E
4	香河	39.754°N, 116.962°E
5	禹城	36.82°N, 116.57°E
6	阳坊	40.15°N, 116.12°E
7	兴隆	40.24°N, 117.29°E
8	唐山	39.62°N, 118.15°E
9	石家庄	38.02°N, 114.52°E
10	秦皇岛	39.936°N, 119.589°E
11	沧州	38.28°N, 116.77°E
12	保定	38.87°N, 115.5°E
13	天津	39.04°N, 117.12°E
14	北京	39.974°N, 116.371°E
15	永乐店	39.708°N, 116.791°E
16	云岗镇	39.795°N, 116.158°E
17	遥感所	40.005°N, 116.379°E

km 以下的近地层有 9 层分布, 第 1 层厚度为 150 m. 为减少模拟区域边界上模拟精度较差的问题, 模拟区域大于研究区域, 模拟区域见图 1 中所示的外围矩形区域, 具体范围为(106.9°E, 46.4°N)~(126.0°E, 32.8°N), 共包含 94×90 格网, 格点间距均为 16 km, 投影方式为 PS(Polar-Stereographic Projection)投影, 投影中心为(35°N, 110°E), 模式中心点为(40°N, 116°E). 关于 RAMS 模式对气象要素的模拟精度已由张美根^[33]、高怡等^[34]系统的验证过. 张美根^[33]模拟的气象要素(风向、风速、温度和湿度)与 TRACE-P 和 ACE-Asia 期间三架飞机上获取的观测资料的比较结果表明, 模拟值与其相应的观测值具有非常好的一致性, 它们的相关系数都超过了 0.96. 高怡等^[34]利用本文提到的模式系统 RAMS-CMAQ 模拟分析了 2008 年 8 月北京及周边地区近地面 O₃ 浓度的时空变化, 结果表明, 该模式系统可以较好地模拟气象要素以及污染物的变化特征和区域分布情况. 本文采用部署在遥感所的激光雷达和气象仪观测的混合层高度和相对湿度分别对 RAMS 模式模拟的边界层高度及近地面相对湿度进行对比验证, 结果见图 2.

针对于 RAMS 模拟的边界层高度的具体验证如下. RAMS 数据取 2011 年 1 月 16 日至 2011 年 4 月 4 日, 每日 10~15 点, 每整点输出一个模拟值; Lidar 数据取同时间段内的小时平均值; 由于本次探测采用的激光雷达的探测下限为 400 m, 因此剔除 400 m 以下的值; 共获得有效样本 105 个, 二者对比见图 2(a). 由图 2(a)可见, 二者值域范围基本相同且一致性很好;

散点图见图 2(c). 二者相关 R^2 达到 0.57. 针对于 RAMS 模拟的相对湿度的具体验证如下. RAMS 数据取 2011 年 4 月 4 日至 2011 年 6 月 30 日, 每日 10~15 点之间整点输出一个模拟值; 气象仪数据取同时期内的小时均值; 共获得有效数据样本 247 个, 无剔除, 二者对比见图 2(b), 二者值域范围基本相同且一致性很好; 散点图见图 2(d), 二者相关 R^2 达到 0.70. 通过上述对比验证结果可见, RAMS 模拟的边界层高度和相对湿度都与地面观测结果吻合很好.

由于本文选用的 AOT 数据所在的 TERRA 卫星在研究区域的过境时间为北京时间上午 11 点左右, 为了减少卫星监测和 RAMS 模拟在时间上不一致对结果造成的误差, 本文提取 RAMS 模拟数据自北京时间 10~12 点之间的模拟值进行平均, 作为模式数据输出结果.

3 结果与分析

3.1 近地面“干”消光系数与 PM_{2.5} 质量浓度相关模型确定

由 1.3 节所述的模型建立方法, 按季节建立近地面“干”消光系数与近地面 PM_{2.5} 质量浓度相关模型. 模型确定采用遥感所超级站 13 个月的地面监测数据, 包括大气水平能见度、空气相对湿度和近地面 PM_{2.5} 质量浓度等, 监测时间为 2007 年 8 月 15 日至 2008 年 9 月 17 日. 为了尽量减少由于不同季节大气中水汽含量不同而造成对结果的影响, 按季节分别建立二者的相关模型. 散点图如图 3, 春(3~5 月)、夏(6~8 月)、秋(9~11 月)和冬(12~2 月)四个季节拟合结果的 R^2 分别达到 0.4828, 0.6552, 0.6344 和 0.7986.

四个季节的近地面“干”消光系数与 PM_{2.5} 质量浓度相关模型系数分别为: (1) 春季: $A=0.0042$, $B=0.1024$; (2) 夏季: $A=0.0031$, $B=0.013$; (3) 秋季: $A=0.0037$, $B=0.0563$; (4) 冬季: $A=0.0039$, $B=0.0810$.

3.2 区域尺度近地面颗粒物质量浓度获取

考虑到地面验证数据的分布情况, 设定研究区域见图 1 中红色矩形框范围, 位于坐标点(109.8°E, 42.5°N)~(122.2°E, 33.3°N)之间, 形成以北京为中心的华北地区为研究区域. 根据数据获取情况, 将研究时间范围设定为 2008 年 7~9 共三个月.

首先, 将 RAMS 模拟的边界层高度、近地面相

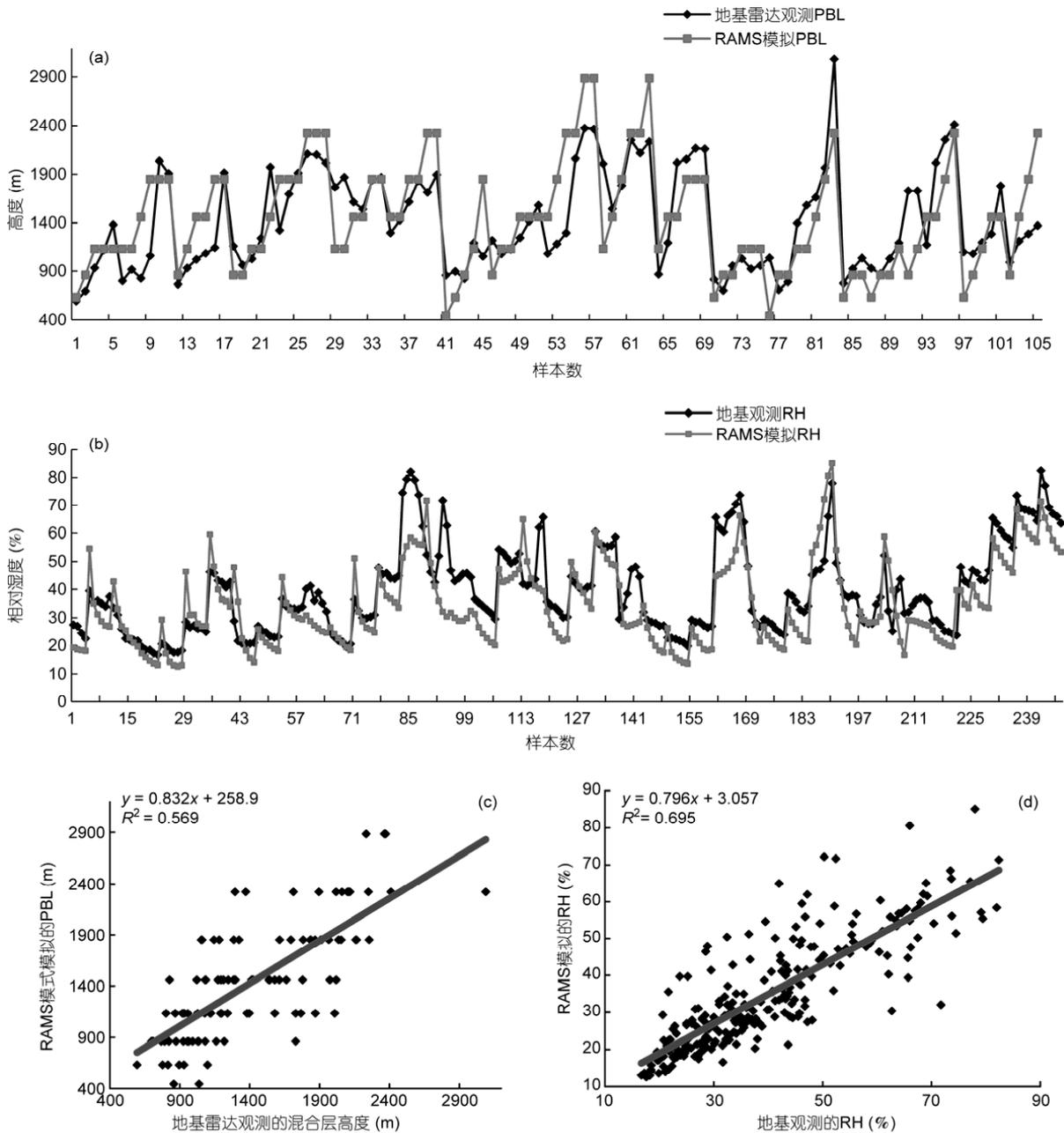


图2 RAMS 模式模拟结果验证

(a) 激光雷达探测的混合层高度与 RAMS 模式模拟的边界层高度对比图; (b) 气象仪监测的相对湿度与 RAMS 模式模拟的近地面相对湿度对比图; (c) 激光雷达探测的混合层高度与 RAMS 模式模拟的边界层高度相关关系; (d) 气象仪监测的相对湿度与 RAMS 模式模拟的近地面相对湿度相关关系

对湿度以及 MODIS AOT 等主要数据分别重采样到 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的等经纬网格下. 其次, 以 MODIS AOT 为基础, 采用 RAMS 模式模拟的边界层高度, 根据公式

(1) 进行逐网格点计算, 获得区域尺度的近地面“湿”消光系数. 进而借助 RAMS 模式模拟的近地面相对湿度, 根据公式(3)计算每个网格点的吸湿增长因子,

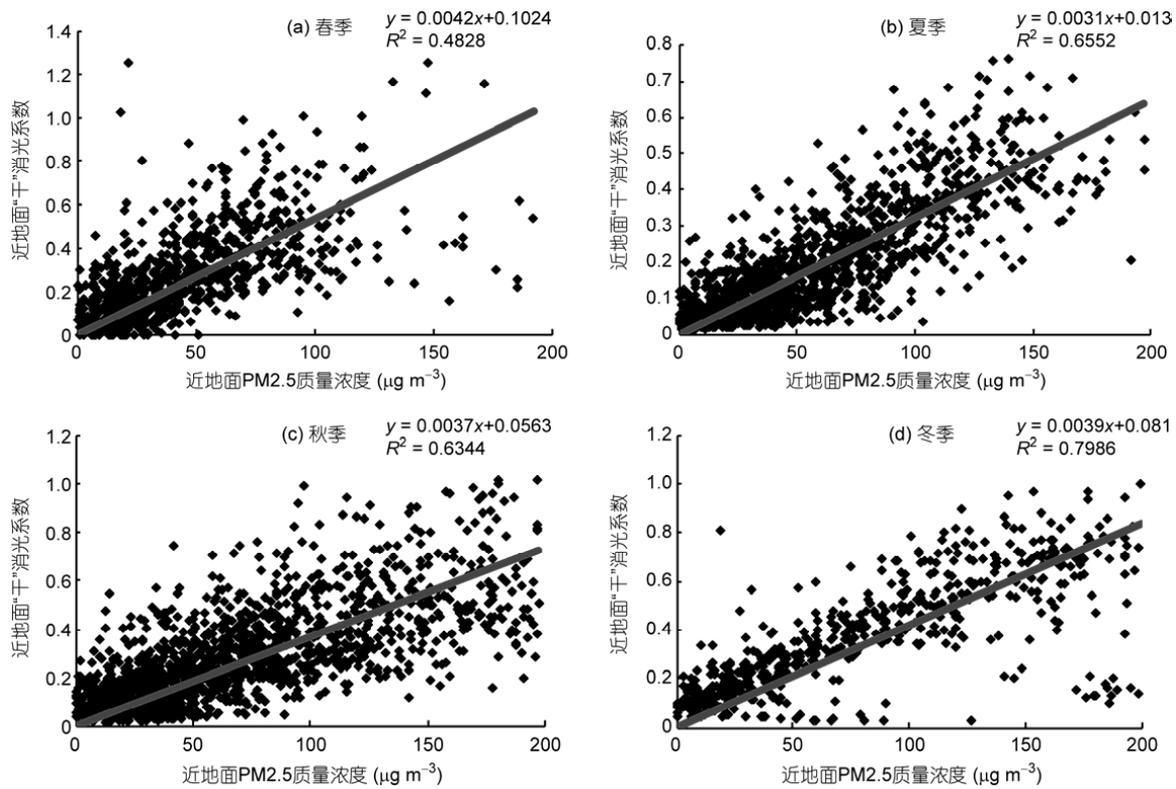


图3 近地面“干”消光系数与近地面 PM2.5 浓度散点图

再根据公式(2)逐网格点计算近地面“干”消光系数, 获得区域尺度近地面“干”消光系数. 最后, 以 3.1 节建立的近地面“干”气溶胶消光系数和近地面颗粒物浓度的分季节相关模型为依据, 逐网格点进行颗粒物浓度的估算, 获得区域尺度的近地面 PM2.5 质量浓度. 图 4 是 2008 年 7~9 三个月近地面 PM2.5 质量浓度的月平均估算结果.

从上述反演结果可以看出, 颗粒物分布具有明显的地域集中特征, 局部地区颗粒物浓度明显高于其他地区, 而且连续 3 个月具有相同的分布趋势, 其中 8 月份近地面颗粒物质量浓度明显低于 7 月和 9 月, 这可能是奥运期间北京及周边的污染控制措施的结果, 以上特征符合颗粒物的客观分布规律.

3.3 颗粒物反演结果评估

为评估上述近地面 PM2.5 质量浓度反演结果, 采用 2.1 节中所述的 16 个地面监测站点的监测数据与反演结果进行对比. 为减少地面监测和卫星过境

时间不同带来的误差, 先对地面数据进行小时均值处理, 再选用和卫星过境时刻最接近的地面小时均值数据, 获得 150 个有效样本, 二者对比结果见图 5. 由图 5 可见, PM2.5 的遥感反演结果与地面监测结果值大小相当, 二者在趋势上一致性很好.

分别对上述 PM2.5 的遥感反演结果和地面监测结果进行相关性分析, 结果见图 6, 两者的相关系数 R^2 达到 0.61.

对反演结果进一步分析, 结果见表 2. 由表 2 可知, 3 个月份遥感反演结果与地面观测结果变化趋势一致, 其中 8 月份最低, 明显低于 7 月和 9 月, 与图 4 所示的各月区域分布变化一致. 3 个月份中, 遥感反演值均高于地面观测值, 说明估算结果系统偏大.

3.4 基于大气模式与基于地面监测的近地面颗粒物卫星遥感反演方法对比

为了评估本方法与基于激光雷达及气象仪监测结果的颗粒物反演方法在区域尺度的应用效果, 下

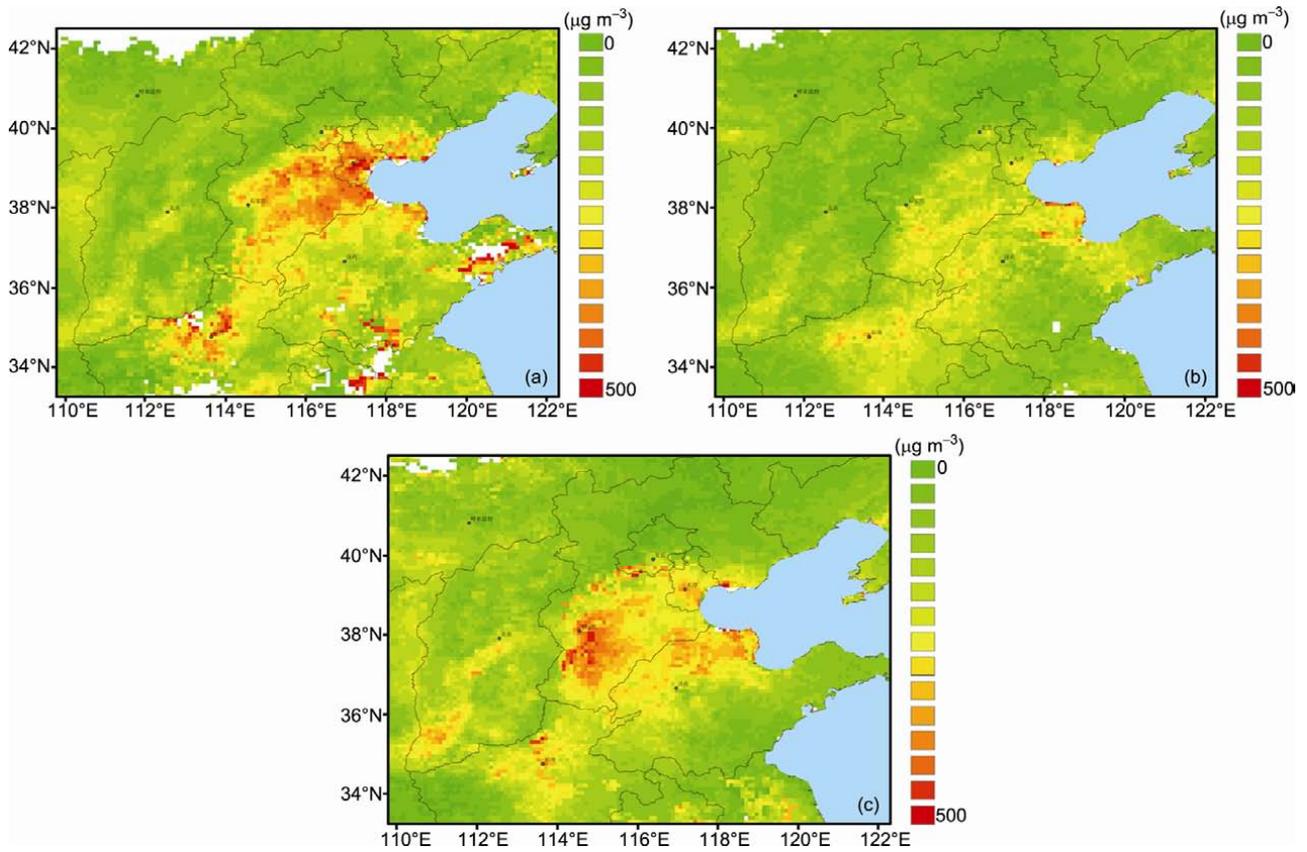


图4 2008年7-9月近地面PM_{2.5}质量浓度分布月均值
(a) 7月; (b) 8月; (c) 9月

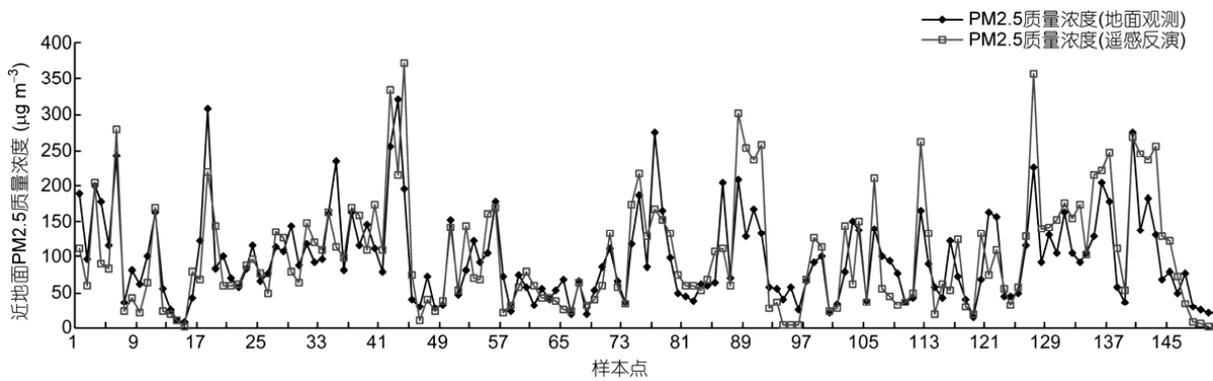


图5 遥感反演PM_{2.5}与地面观测(16个站)PM_{2.5}比较
比对样本数据为150

面比较两种方法在同一时间、同区域的反演结果。

采用部署在遥感所超级站(接近研究区域中心位置)的激光雷达监测获得的混合层高度(共有31天有

效数据)以及自动气象仪监测的相对湿度数据,近似代替整个研究区域的气溶胶标高以及相对湿度,采用公式(1)、(2)及(3)计算得到近地面“干”消光系数,

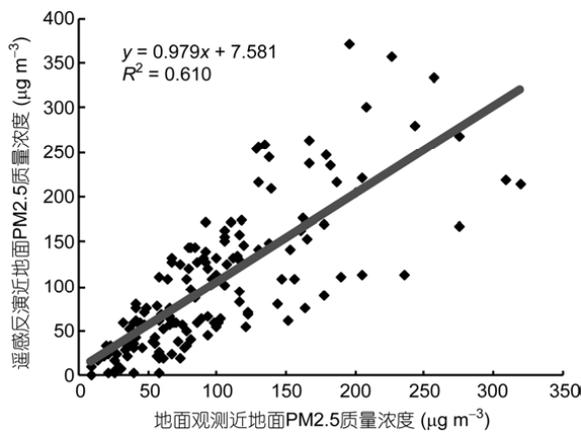


图6 遥感反演 PM2.5 与地面监测 PM2.5 比较
样本数 150

表2 近地面 PM2.5 反演结果分析

	7月	8月	9月
样本数	45	47	58
近地面 PM2.5 质量浓度 地面观测均值($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	126.82	86.79	91.51
近地面 PM2.5 质量浓度 遥感反演均值($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	125.78	94.84	104.62
相对标准偏差(%)	42.06	45.7	54.5

再根据 3.1 节确定的“干”消光系数与近地面颗粒物浓度的相关模型计算得到近地面颗粒物浓度 PM2.5, 将此称为一般方法反演结果。

将 16 个地面站点观测结果、本文提出新方法反演结果以及一般方法反演结果进行比对。通过数据处理, 共获得 43 组数据样本, 由于本次探测采用的激光雷达的探测下限为 400 m, 因此剔除激光雷达探测的混合层高度低于 400 m 所对应的反演结果 4 组, 最终获得 39 组有效数据样本, 对比结果见图 7。由图 7 可见, 两种反演方法得到的近地面 PM2.5 估算结果均与地面监测结果在趋势上一致性较好, 两种反演结果均与地面监测结果相当。

对上述比对结果进一步分析, 基于一般方法反演获得的 PM2.5 与地面监测 PM2.5 的散点图见图 8, R^2 为 0.32; 同样的地面数据样本下, 基于本文提出新方法获得 PM2.5 与地面监测结果的散点图见图 9, R^2 提高到 0.62。均值及标准差见表 3, 本文方法的估算均值与观测均值更接近, 相对标准偏差更小。由此结果表明在区域尺度上, 本文提出的新方法的反演结果与地面监测结果具有更好的相关性。

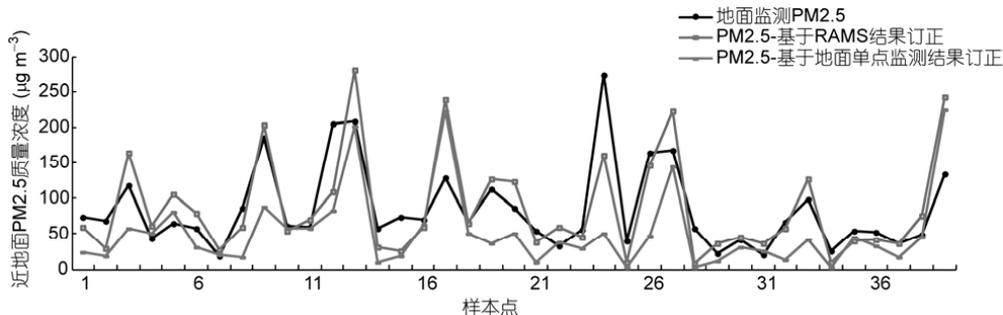


图7 近地面 PM2.5 质量浓度的遥感反演与地面观测(16个站)结果对比
数据样本 39 个

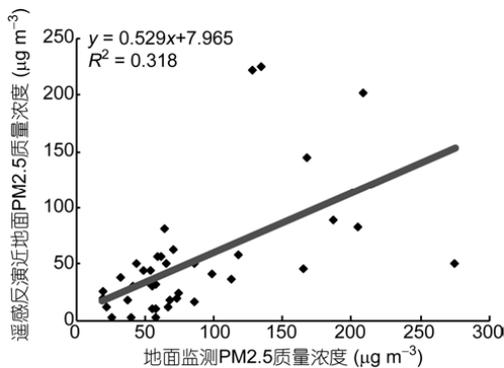


图8 基于一般方法反演获得的 PM2.5 与地面监测 PM2.5 的比较
数据样本 39

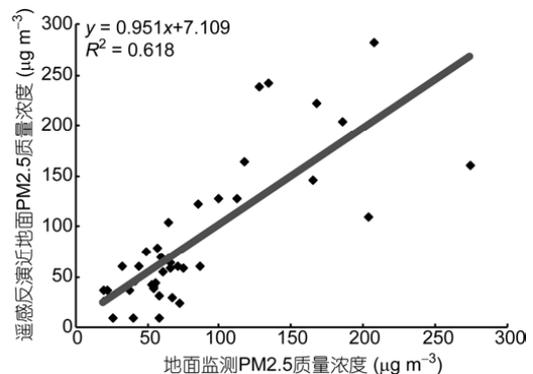


图9 基于本文提出的新方法获得的 PM2.5 与地面监测 PM2.5 的比较
数据样本 39

表3 两种方法反演结果分析

	本文方法	一般方法
观测均值($\mu\text{g m}^{-3}$)	84.49	84.49
估算均值($\mu\text{g m}^{-3}$)	87.46	52.72
相对标准偏差(%)	1.13	3.70

4 结论

本文建立了一种基于卫星遥感 AOT 和大气模式模拟结果进行近地面颗粒物估算的方法, 并利用 RAMS 模式模拟的边界层高度与近地面空气相对湿度信息, 基于 MODIS 的 AOT 产品数据进行了近地面颗粒物估算, 通过对估算结果进行分析, 得到以下结论.

(1) 以卫星遥感获得的整层气溶胶光学厚度为

基础, 借助于大气模式模拟的边界层高度和近地面湿度结果, 可以估算近地面 PM_{2.5} 的质量浓度. 反演结果与地面监测结果在趋势上一致性很好, 与地面监测数据的相关系数 R^2 达到 0.61.

(2) 利用本文提出的方法估算的近地面颗粒物浓度与地面观测结果的相关性明显高于利用地面激光雷达和气象仪监测结果估算的结果, 并已在北京及周边地区得到验证.

(3) 本文提出的方法是在假设边界层内的颗粒物垂直交换充分的前提下进行的, 此时大气边界层高度接近于气溶胶标高的物理含义, 因此本方法在晴天正午时分近地面大气对流混合能力较强, 边界层内污染物垂直交换充分时比较合适, 不适合其他时间.

致谢 感谢中国科学院大气物理研究所王跃思研究员为本研究提供北京周边地区 16 个站点的地面监测数据.

参考文献

- 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. MODIS 卫星遥感气溶胶产品在北京市大气污染研究中的应用. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35(增刊 I): 177-186
- 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. 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. 大气科学, 2003, 27: 869-880
- 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: ACH4-1-ACH4-18
- Slater J F, Dibb J E, Campbell J W, et al. Physical and chemical properties of surface and column aerosols at a rural New England site during MODIS overpass. Remote Sens Environ, 2004, 92: 173-180
- Engel-Cox J A, Holloman C H, Coutant B W. Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality. Atmos Environ, 2004, 38: 2495-2509
- Wang J, Christopher A. Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM_{2.5} mass: Implications for air quality studies. Geophys Res Lett, 2003, 30: 1-4
- Gupta P, Christopher S A, Wang J. Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities. Atmos Environ, 2006, 40: 5880-5892
- 李成才, 毛节泰, 刘启汉. 利用 MODIS 资料遥感香港地区高分辨率气溶胶光学厚度. 大气科学, 2005, 29: 335-342
- Koelemeijer R B A, Homan C D, Matthijssen J. Comparison of spatial and temporal variations of aerosol optical thickness and particulate matter over Europe. Atmos Environ, 2006, 40: 5304-5315
- Wang Z F, Chen L F, Tao J H, et al. Satellite-based estimation of regional particulate matter (PM) in Beijing using vertical-and-RH correcting method. Remote Sens Environ, 2010, 114: 50-63
- Engel-Cox J A, Hoff R M, Rogers R, et al. Integrating lidar and satellite optical depth with ambient monitoring for 3-dimensional particulate characterization. Atmos Environ, 2006, 40: 8056-8067
- Hutchison K D, Faruqui S J, Smith S. Improving correlations between MODIS aerosol optical thickness and ground-based PM_{2.5} observations through 3D spatial analyses. Atmos Environ, 2008, 42: 530-543
- Pelletier B, Sater R, Vidot J. Retrieving of particulate matter from optical measurement: A semiparametric approach. J Geophys Res, 2007, 112: 1-18
- Pielke R A, Cotton W R, Walko R L, et al. A comprehensive meteorological modeling system RAMS. Meteorol Atmos Phys, 1992, 49: 69-91
- Xue M, Droegemeier K K, Wong V. The advanced regional prediction system (ARPS)—A multiscale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool, part I: Model dynamics and verification. Meteorol Atmos Phys, 2000, 75: 161-193

- 16 Fang X Y, Jiang W M, Miao S G, et al. The multiscale numerical modeling system for research on the relationship between urban planning and meteorological environment. *Adv Atmos Sci*, 2004, 21: 103–112
- 17 徐希孺. 遥感物理. 北京: 北京大学出版社, 2005. 298–299
- 18 廖国男. 大气辐射传输导论. 第 2 版. 北京: 气象出版社, 2002. 31–32
- 19 Gerasopoulos E, Andreae M O, Zerefos C S, et al. Climatological aspects of aerosol optical properties in Northern Greece. *Atmosph Chem Phys*, 2003, 3: 2025–2041
- 20 刘新罡. 大气气溶胶吸湿性质观测、模型研究——以北京、珠江三角洲地区为例. 博士学位论文. 北京: 北京大学, 2008. 67–121
- 21 潘小乐. 相对湿度对气溶胶散射特性影响的观测研究. 硕士学位论文. 北京: 中国气象科学研究院, 2007. 3–4
- 22 Malm W C, Day D E, Kreidenweis S M. Light scattering characteristics of aerosol as a function of relative humidity: Part I—A comparison of measured scattering and aerosol concentrations using the theoretical models. Technical Report. J Air Waste Manage Assoc, 2000
- 23 张立盛, 石广玉. 相对湿度对气溶胶辐射特性和辐射强迫的影响. *气象学报*, 2002, 60: 230–237
- 24 Kotchenruther R A, Hobbs P V, Hegg D A. Humidification factors for atmospheric aerosol off the mid-Atlantic coast of the United States. *J Geophys Res*, 1999, 1043: 2239–22511
- 25 Kotchenruther R A, Hobbs P V. Humidification factors of aerosols from biomass burning in Brazil. *J Geophys Res*, 1998, 103: 32081–32089
- 26 Im J, Saxena V K, Wenny B N, et al. An assessment of hygroscopic growth factors for aerosols in the surface boundary layer for computing direct radiative forcing. *J Geophys Res*, 2001, 106: 20213–20224
- 27 Magi B I, Hobbs P V. Effects of humidity on aerosols in southern Africa during the biomass burning season. *J Geophys Res*, 2003, 108, doi: 10.1029/2002JD002144
- 28 Song C H, Park M E, Lee K H, et al. An investigation into seasonal and regional aerosol characteristics in East Asia using model-predicted and remotely-sensed aerosols. *Atmosph Chem Phys*, 2008, 8: 6627–6654
- 29 何秀, 邓兆泽, 李成才, 等. MODIS 气溶胶光学厚度产品在地面 PM₁₀ 监测方面的应用研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2009, 2: 178–184
- 30 王子峰. 卫星遥感估算近地面颗粒物浓度的算法研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2010. 85–86
- 31 Hansen J E, Travis L D. Light scattering in planetary atmospheres. *Space Sci Rev*, 1974, 16: 527–610
- 32 Levy R C, Remer L A, Kleidman R G. Global evaluation of the Collection 5 MODIS dark-target aerosol products over land. *Atmosph Chem Phys*, 2010, 10: 10399–10420
- 33 张美根. 多尺度空气质量模式系统及其验证 I. 模式系统介绍与气象要素模拟. *大气科学*, 2005, 29: 805–813
- 34 高怡, 张美根. 2008 年奥运会期间北京地区大气 O₃ 浓度模拟分析. *气候与环境研究*, 2010, 15: 643–651