

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0641

黄观, 刘伟, 刘志红, 等. 2016. 乌鲁木齐市 MODIS 气溶胶光学厚度与 PM<sub>10</sub> 浓度关系模型研究[J]. 环境科学学报, 36(2): 649-657

Huang G, Liu W, Liu Z H, et al. 2016. Relationship between MODIS aerosol optical depth and PM<sub>10</sub> ground concentration in Urumchi[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(2): 649-657

# 乌鲁木齐市 MODIS 气溶胶光学厚度与 PM<sub>10</sub> 浓度关系模型研究

黄观, 刘伟\*, 刘志红, 张颖, 何沐全

成都信息工程大学资源环境学院, 成都 610225

收稿日期: 2015-07-22

修回日期: 2015-09-01

录用日期: 2015-09-01

**摘要:** 为了建立乌鲁木齐市近地面 PM<sub>10</sub> 浓度监测的关系模型, 利用乌鲁木齐市 2013 年 3—11 月、2014 年 3—11 月 MODIS AOD 产品与同期地面观测的 PM<sub>10</sub> 质量浓度进行相关分析, 结果表明二者直接相关程度较低 ( $r=0.433, p<0.01$ ); 然后以 WRF 模式模拟的大气边界层高度及地面观测的相对湿度数据对 AOD 进行垂直、湿度订正后, 二者相关性得到较大程度提高 ( $r=0.630, p<0.01$ ); 按照季节分类统计和订正春、夏、秋季的相关系数  $r$  分别为 0.779、0.393、0.523, 均大于统计学上 99% 的置信度要求, 其中春季的订正最为有效, 可用性更高; 最后, 建立全年和各季 AOD-PM<sub>10</sub> 最优拟合模型并反演乌鲁木齐市地面 PM<sub>10</sub> 质量浓度, 全年和四季的反演结果与实测数据的相关系数分别为 0.757、0.748、0.652、0.715 ( $p<0.01$ ); 同时基于卫星遥感 AOD 反演得到的 PM<sub>10</sub> 质量浓度的空间分布与 AOD 呈现出整体的一致性, 并且 3 个季节 AOD 平均值表现为: 春季>秋季>夏季, 证实了卫星遥感 AOD 经过垂直和湿度订正后, 可以作为辅助监测乌鲁木齐市 PM<sub>10</sub> 地面浓度分布的一个有效手段。

**关键词:** MODIS; 气溶胶光学厚度 (AOD); PM<sub>10</sub>; 拟合模型; 乌鲁木齐市

文章编号: 0253-2468(2016)02-649-09

中图分类号: X513

文献标识码: A

## Relationship between MODIS aerosol optical depth and PM<sub>10</sub> ground concentration in Urumchi

HUANG Guan, LIU Wei\*, LIU Zhihong, ZHANG Ying, HE Muquan

College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

Received 22 July 2015;

received in revised form 1 September 2015;

accepted 1 September 2015

**Abstract:** Based on the MODIS AOD product and the simultaneous ground concentration of PM<sub>10</sub> from March to November in 2013 and 2014 in Urumchi, this study analyzed their correlations in order to establish the PM<sub>10</sub> ground concentration monitoring models in Urumchi. The results indicated that the direct correlation between AOD and PM<sub>10</sub> ground concentration was relative low ( $r=0.433, p<0.01$ ). Correlation was greatly improved ( $r=0.630, p<0.01$ ) after the vertical correction of atmospheric boundary layer height (ABLH) by using WRF model simulation and the relative humidity (RH) correction by using the ground observed data. With season classification and correction, the correlation coefficient of spring, summer and autumn was 0.779, 0.393 and 0.523, respectively (confidence 99%). The correction was more effective in spring. Finally, the best fitting models of AOD and PM<sub>10</sub> ground concentration in different seasons and the whole year were established, and the PM<sub>10</sub> ground concentration in Urumchi was retrieved. The correlation coefficient of inversion result and observed PM<sub>10</sub> ground concentration in the whole year and three seasons was 0.757, 0.748, 0.652 and 0.715 ( $p<0.01$ ), respectively. Meanwhile, the spatial distribution of the PM<sub>10</sub> ground concentration retrieved from the MODIS AOD was almost the same as that of AOD, and the average value of AOD in three seasons was presented as: spring>autumn>summer. This study confirmed that MODIS AOD can be used to retrieve PM<sub>10</sub> ground concentration in Urumchi after taking aerosol vertical distribution and influence of RH into consideration.

**基金项目:** 国家自然科学基金 (No.41405124); 四川省科技支撑计划项目 (No.2015GZ0241); 四川省社会科学研究规划项目 (No.SC14C007, SC15ZD01); 成都信息工程大学中青年学术带头人科研基金 (No.J201213); 大气环境模拟与污染控制四川省高校重点实验室资助课题 (No.ZZKT2014004)

**Supported by** the National Natural Science Foundation of China (No.41405124), the Key Technology Research and Development Program of Sichuan Province (No.2015GZ0241), the Social Science Research Plan of Sichuan Province (No.SC14C007, SC15ZD01), the Scientific Research Funds of Young Academic Leaders in CUIT (No.J201213) and the Air Environmental Modeling and Pollution Controlling Key Laboratory of Sichuan Higher Education Institutes (No.ZZKT2014004)

**作者简介:** 黄观 (1991—), 女, E-mail: 416092456@qq.com; \* 通讯作者 (责任作者), E-mail: weling9@163.com

**Biography:** HUANG Guan (1991—), female, E-mail: 416092456@qq.com; \* Corresponding author, E-mail: weling9@163.com

**Keywords:** MODIS; aerosol optical depth (AOD); PM<sub>10</sub>; fitting model; Urumchi

## 1 引言 (Introduction)

近年来,随着经济的快速发展和城镇化进程的日益加快,我国环境污染效应不断累积,大气污染呈现出的区域化特点愈加明显,面临严峻挑战(张晖等,2014)。其中,可吸入颗粒物(PM<sub>10</sub>,空气动力学直径小于或等于10 μm的粒子)已成为空气污染中的最主要污染物之一,不仅对公众健康造成严重威胁(Pope, 2000; Chu *et al.*, 2006; 谢鹏等, 2009)还对可见光具有较强的消光(散射和吸收)作用,导致大气能见度下降(宋宇等, 2003; 姚剑等, 2010),对城市交通和市民日常生活造成不便。PM<sub>10</sub>质量浓度是表征城市空气质量的重要指标之一,快速了解其区域浓度分布,有利于控制大气颗粒物的质量浓度,提高空气质量。目前,我国很多城市均建立了环境监测站来监测PM<sub>10</sub>浓度,尽管PM<sub>10</sub>地面监测手段能够提供时间连续的监测数据,但监测站点分布不均匀且有限,不能得到连续的空间覆盖信息,难以有效反映PM<sub>10</sub>污染的时-空演变趋势(薛文博等, 2015)。研究表明,卫星遥感观测的覆盖范围广,具有宏观性、经济性、长期动态监测等优势(Kaufman *et al.*, 1997; 李成才等, 2003),能够弥补地面监测站点在空间分布上的不足(高大伟等, 2012; 何秀等, 2010; 郑卓云等, 2011),在污染监测上具有广泛的应用前景。

美国国家宇航局(NASA)建立的地球观测系统计划(EOS)上搭载的中分辨率成像光谱仪(MODIS)自2000年来开展大气气溶胶光学厚度AOD反演业务,为大范围进行遥感大气气溶胶监测提供了可能(刘浩等, 2014)。如何使卫星遥感获得的AOD成为合理反映近地面可吸入颗粒物的指标,是卫星遥感资料在空气质量监测和评价中应用的难点和重点(张晖等, 2014),为此,国内外学者进行了大量针对性研究。Chu等(2003)利用MODIS Level2 AOD产品研究了全球、区域和局部大气污染状况,证实了用AOD产品监测大气污染的可行性;Wang等(2003)利用在美国阿拉巴马州的一个城市多个站点的地面和卫星资料进行研究,表明PM<sub>2.5</sub>质量浓度与AOD相关系数在0.7以上,AOD可以被定量地用于空气质量的评估;Tian等(2010)采用多元回归方法并考虑了边界层高度、对流层底部相对湿度廓线均值、近地表相对湿度和气温等气象因子对

PM-AOD关系的影响,分析了利用MODIS AOD估算Southern Ontario地区PM<sub>2.5</sub>的能力和效果。国内何秀等(2010)在对AOD进行垂直与湿度订正后和地面观测PM<sub>10</sub>浓度数据进行了对比分析,证实了MODIS产品可用于PM<sub>10</sub>质量浓度的监测;张晖(2014)等研究了西安市及周边地区MODIS AOD与PM<sub>10</sub>浓度的关系模型,发现经垂直标高-湿度订正后,二者的相关系数从0.36提高到0.65;薛文博等(2015)利用CMAQ模型模拟的PM<sub>2.5</sub>垂直分层数据和WRF模型模拟的高分辨率湿度数据,分别对MODIS AOD资料进行垂直与湿度订正,订正后其线性相关系数 $r=0.77$ ,并基于此线性拟合模型,首次反演了2013年1月全国10 km分辨率PM<sub>2.5</sub>月均浓度的空间分布特征。

现有研究表明MODIS AOD产品在城市大气颗粒物污染监测方面有重要应用价值,证实了MODIS AOD运用于近地面大气污染监测的可行性。但现阶段国内研究主要集中在东部沿海经济发达区,对于我国西部地区尤其是新疆的相关研究较少,而新疆的首府乌鲁木齐市近年来经济发展迅速,人均GDP不断升高,经济发展伴随着严重的环境问题,因此有必要对乌鲁木齐市的大气污染作出更为深入的分析研究。本文利用MODIS AOD产品和空气污染监测数据,在考虑气象因素的情况下建立乌鲁木齐市全年、春季、夏季、秋季的PM<sub>10</sub>遥感反演模型,讨论二者之间的关系,从而全面了解乌鲁木齐市近地面PM<sub>10</sub>质量浓度的分布及季节性差异,证实了卫星遥感气溶胶光学厚度在监测PM<sub>10</sub>污染方面的应用价值,以期为乌鲁木齐市大气污染进行宏观、长期的监测以及政府环境治理与经济协调发展规划提供参考依据。

## 2 材料与方法 (Materials and methods)

### 2.1 数据来源与处理

(1) AOD: 本文采用NASA发布的MODIS-Terra 2013年3—11月、2014年3—11月(共18个月)、版本为C5.1、波段为550 nm的Level 2 AOD产品,其为每日气溶胶数据集,空间分辨率为10 km × 10 km,通过ENVI软件对其进行几何校正、矢量裁剪等操作,并提取出对应于5个地表监测站点经纬度的非空白AOD值,对其以日为单位进行平均值运算,最终得到2013—2014年乌鲁木齐市共146日

有效 AOD 日均值数据。

(2) 颗粒物浓度数据 (PM<sub>10</sub>): 研究所用的 PM<sub>10</sub> 浓度数据采用乌鲁木齐市环境监测站获得的监测结果, 乌鲁木齐市环境监测站每日提供 9 个站点的数据信息, 本文选取其中时间序列全且具有代表性的 5 个站点, 根据卫星的过境时间 (11:30 am), 选取地面站实测数据中相应日期 11:00、12:00 的 PM<sub>10</sub> 质量浓度数据统计主城区平均 PM<sub>10</sub> 浓度。所选监测站点分别为: 监测站、收费所、铁路局、31 中学、74 中学, 站点的相关信息如表 1 所示。

表 1 乌鲁木齐市 PM<sub>10</sub> 监测站点信息

Table 1 Information of PM<sub>10</sub> monitoring sites in Urumchi

站点名称	经度 (E)	纬度 (N)	站点位置
监测站	87°34'43.56"	43°49'36.93"	市区中心
31 中学	87°38'25.93"	43°49'44.11"	市区中心
收费所	87°36'14.22"	43°46'05.71"	市区南部
铁路局	87°33'41.57"	43°51'31.94"	市区北部
74 中学	87°36'14.22"	43°46'05.71"	市郊

(3) 相对湿度 (RH): 来源于新疆气象局, 为逐时数据, 为了与 Terra 星过境时间 (地方时 11:30 am 左右) 相对应, 选取 2013—2014 年与 AOD 数据对应日期 11:00、12:00 的数据, 计算其均值作为当日的相对湿度数据。

(4) 大气边界层高度 (ABLH): 本文利用新一代中尺度天气研究和预报模式 WRF 模拟的 ABLH 进行研究, WRF 模式初始场和侧边界条件由 NCEP FNL 资料 (时间间隔 6 h, 空间分辨率 1°×1°) 提供。结合卫星过境时间, 从模拟所得数据中提取与 AOD 数据对应日期 03 时 (北京时间 11 时, 接近于 Terra 星过境时间) 的 ABLH 作为订正的重要参数, 以月为单位求取 ABLH 平均值作为对应月份的边界层高度数据。

## 2.2 数据匹配

研究中涉及到的变量有 MODIS AOD、近地表 PM<sub>10</sub> 浓度、相对湿度、大气边界层高度。本文对上述数据进行了处理和匹配以便于建模、验证和分析, 数据匹配原则是空间上以 PM<sub>10</sub> 监测站点为准, 时间上以卫星过境时间为准, 选取数据对中晴空无云天气, 剔除 RH > 80% (降水天气) 的数据。经匹配处理后共得到研究区 2013 年 3 月 1 日—2013 年 11 月 30 日、2014 年 3 月 1 日—2014 年 11 月 30 日间的数

据 146 对, 其中包括春季 (3—5 月) 48 对、夏季 (6—8 月) 51 对、秋季 (9—11 月) 47 对。冬季卫星遥感产品在“亮背景”下反演效果较差、有效数据较少, 考虑到这点我们没有进行冬季的建模与检验。将 PM<sub>10</sub> 按照升序排列后, 每隔 3 个样本选取 1 个样本作为模型验证数据, 最后得到建模数据 98 对, 验证数据 48 对。

## 2.3 方法与思路

本研究方法与思路为:

(1) 直接相关: 对 AOD 不进行任何订正, 直接分析卫星遥感 AOD 与近地面 PM<sub>10</sub> 监测浓度之间的相关性;

(2) 垂直-湿度订正: 利用新一代中尺度天气研究和预报模式 WRF 模拟的大气边界层高度数据以及地面观测的相对湿度数据对 AOD 进行垂直、湿度订正, 分析订正前后 AOD 与近地面 PM<sub>10</sub> 质量浓度之间的相关性;

(3) 拟合模型优选: 利用 SPSS 17.0 软件建立经垂直-湿度订正后的 AOD 与近地面 PM<sub>10</sub> 质量浓度之间的拟合模型 (全年、春季、夏季、秋季), 依据决定系数高低, 选取全年和各季节的最优拟合模型;

(4) 模型精度验证: 利用全年、各季节最优拟合模型反演乌鲁木齐市地面 PM<sub>10</sub> 质量浓度, 并结合地面监测站的实测数据分析二者相关性, 以验证各拟合模型的精度;

(5) PM<sub>10</sub> 浓度反演: 利用选取的最优拟合模型, 通过 ArcMap 软件反演乌鲁木齐市全年和各季节 10 km 分辨率 PM<sub>10</sub> 浓度空间分布。

## 3 结果与讨论 (Result and discussion)

### 3.1 AOD 与 PM<sub>10</sub> 关系模型的建立

3.1.1 直接相关 图 1 为 2013—2014 年研究区内 98 对 AOD 与 PM<sub>10</sub> 浓度间的直接比较, 二者相关系数  $r=0.433$  ( $p<0.01$ ), 证明了由 AOD 估算近地面 PM<sub>10</sub> 浓度的可行性。然而, 由于 AOD 反映了气溶胶在从地面至大气层顶垂直方向上消光系数的积分, 而 PM<sub>10</sub> 浓度只是地面测量值, 因此两者具有不同的物理意义, 它们之间的相关性会受到气溶胶垂直分布的影响。此外, 大气相对湿度也会通过影响气溶胶的消光系数进而对二者的关系产生重要影响, 使得相关性  $r$  不理想, 不能直接用 AOD 进行地面大气污染程度的监测和防控。对此, 需进一步引入大气边界层高度和相对湿度等气象因子对 AOD 进行垂直订正和湿度订正, 以提高 PM<sub>10</sub> 监测结果的精度。

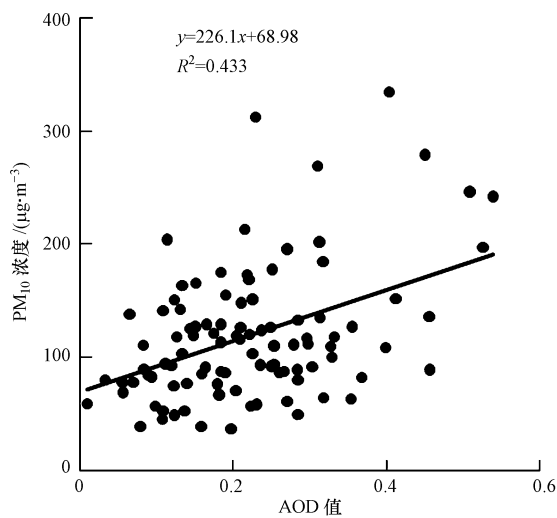


图1 MODIS AOD 与  $PM_{10}$  浓度的比较

Fig.1 Comparison of MODIS AOD with  $PM_{10}$  concentration

### 3.1.2 垂直-湿度订正

#### (1) 垂直订正

AOD 是气溶胶粒子对特定波长的光在垂直方向上消光系数的积分,而  $PM_{10}$  的实测值仅代表近地面空气质量(薛岩松等,2014),因此,为了减少关系模型的不确定性、更好地利用卫星反演的 AOD 资料来估算近地面  $PM_{10}$  质量浓度,需要对 AOD 数据进行垂直订正.本文主要参考陶金花等(2013)的算法,即利用边界层高度数据代替气溶胶标高,对 AOD 进行垂直订正,获得近地面消光系数.其主要依据气溶胶消光系数随高度增加呈指数下降的假设而获得,即满足如下方程:

$$\tau_a(\lambda) \approx E_{a,0}(\lambda) \int_0^x \exp(z/HA) dz = E_{a,0}(\lambda) \cdot H_A \quad (1)$$

式中,  $\tau_a(\lambda)$  为卫星监测所得像元的气溶胶光学厚度,本文中是 MODIS AOD 值;  $E_{a,0}(\lambda)$  表示地面处的消光系数;  $z$  为高度的积分变量;  $H_A$  为气溶胶标高,本文用 WRF 模拟获得的 ABLH 来代替,利用求得的 ABLH 月均值对对应月份的 AOD 进行垂直订正.

#### (2) 湿度订正

气溶胶粒子的吸湿增长也是颗粒物浓度估算中一个重要的不确定因素.由于近地面  $PM_{10}$  质量浓度的测定要经历一个干燥的过程,测量结果代表干燥空气下的质量浓度情况,而 AOD 则在环境背景下获取的,较高的大气湿度将使气溶胶粒子吸湿膨胀,会明显地影响复合折光指数,造成 AOD 值变大(薛岩松等,2014;李成才等,2005).因此,为了减少由粒子吸湿增长引入的不确定性以及 AOD 与  $PM_{10}$  质量浓度在监测环境上的差异,提高二者的相关性,还需进行适当的湿度订正(王子峰,2010).湿度影响因子可表示为:

$$f(RH) = 1/(1.0 - RH/100) \quad (2)$$

式中, RH 为相对湿度,将 AOD 除以  $f(RH)$  对其进行湿度订正.

#### (3) 订正结果

对卫星遥感的 AOD 进行垂直和湿度订正后,分析二者的相关性,表 2 和图 2 分别为经 AOD 垂直和湿度订正前后, AOD 与  $PM_{10}$  相关系数和相关性的变化情况.

表 2 AOD 与  $PM_{10}$  质量浓度相关系数

Table 2 Correlation coefficients between AOD and  $PM_{10}$  concentration

		AOD	AOD 垂直订正	AOD 垂直-湿度订正
$PM_{10}$ 质量浓度	Pearson 相关性	0.433 **	0.524 **	0.630 **
	显著性(双侧)	0.000	0.000	0.000
	N	98	98	98

注: \*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关.

结合表 2 和图 2 可知,  $PM_{10}$  质量浓度与无订正 AOD 值、垂直订正 AOD 值和垂直-湿度订正 AOD 值的相关性系数  $r$  依次为 0.433、0.524、0.630,均大于统计学上 99% 的置信度要求.经过垂直和湿度订正后的 AOD 与  $PM_{10}$  质量浓度的相关系数有了明显的提高,说明订正后 AOD 对  $PM_{10}$  质量浓度的解释

程度提高,这证实了本研究所采用垂直-湿度订正方法的有效性.利用订正后的 AOD 对地面观测的  $PM_{10}$  数据进行匹配,并分别进行线性、对数、一元二次、一元三次、乘幂和指数 6 种类型的建模拟合,结果如表 3 所示.

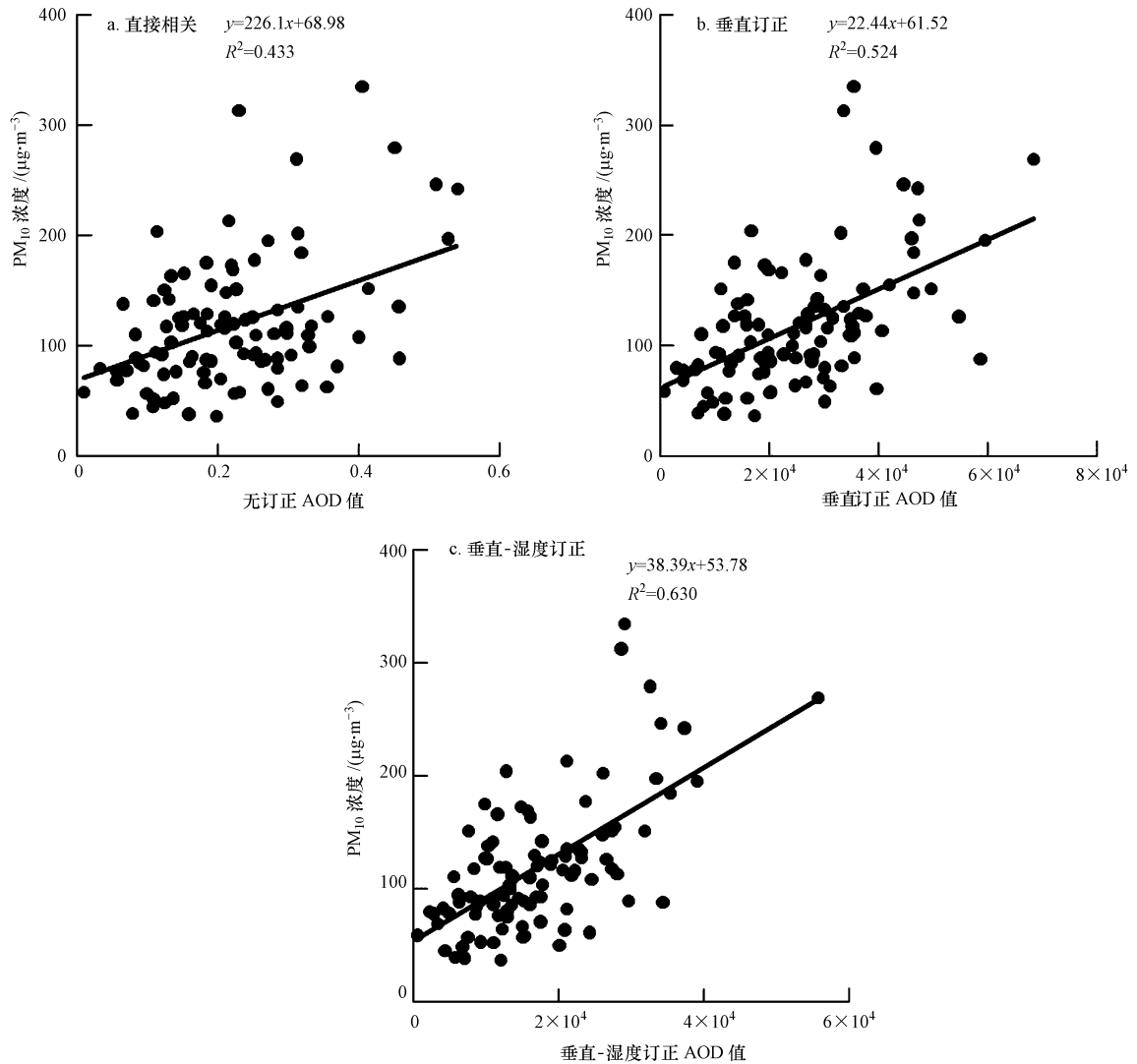


图2 AOD 与 PM<sub>10</sub>质量浓度相关性

Fig.2 The correlation between AOD and PM<sub>10</sub> concentration

表3 6种拟合模型对比

Table 3 Comparison of six models

模型类型	拟合模型方程	R 值	R <sup>2</sup> 检验值
线性	$y = 383970.263x + 53.784$	0.630	0.397
对数	$y = 43.612\ln x + 505.926$	0.526	0.277
一元二次	$y = 2.675 \times 108x^2 + 268319.717x + 63.262$	0.634	0.402
一元三次	$y = -1.69 \times 1012x^3 + 1.591 \times 109x^2 - 8082.334x + 77.519$	0.638	0.407
乘幂	$y = 2513.393x^{0.356}$	0.540	0.292
指数	$y = 65.091e^{2916.866x}$	0.602	0.362

注: 自变量为:垂直-RH 订正后 AOD,因变量:PM<sub>10</sub>.

从表 3 中可以看出,用垂直-湿度订正后的 AOD 数据与 PM<sub>10</sub>进行模型拟合,不论采用何种拟合方法,均在一定程度上提升了 AOD 与 PM<sub>10</sub>之间的决定系数 R<sup>2</sup>.其中一元三次模型决定系数最高

(R<sup>2</sup>=0.407),即为全年最优拟合模型.

3.1.3 各季节 PM<sub>10</sub>-AOD 关系模型 乌鲁木齐市不同季节气溶胶的来源差异较大,不同来源的气溶胶理化特征和大气边界层存在较大差异,因而垂直订

正和湿度订正的效果可能存在不同.为了研究不同季节 AOD 与 PM<sub>10</sub>质量浓度的相关性,将 98 对数据按照春、夏、秋 3 个季节进行统计,以分析不同季节

经垂直订正和湿度订正后 AOD 和近地面 PM<sub>10</sub>质量浓度的相关关系.表 4 为 3 个季节经 AOD 垂直和湿度订正前后二者相关系数的变化情况.

表 4 各季节 AOD 与 PM<sub>10</sub>质量浓度相关系数

Table 4 Correlation coefficients between AOD and PM<sub>10</sub> concentration in each season

		N	AOD	AOD 垂直订正	AOD 垂直-湿度订正
PM <sub>10</sub> 质量浓度	春季	Pearson 相关性	0.704 **	0.723 **	0.779 **
		显著性(双侧)	0.000	0.000	0.000
	夏季	Pearson 相关性	0.319 *	0.342 *	0.393 **
		显著性(双侧)	0.048	0.032	0.005
	秋季	Pearson 相关性	0.338	0.390 *	0.523 **
		显著性(双侧)	0.058	0.027	0.002

注: \*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关.\*. 在 0.05 水平(双侧)上显著相关.

从表 4 可以看出:经垂直-湿度订正后的 AOD 与 PM<sub>10</sub>的相关系数显著提高,春、夏、秋 3 个季节二者的相关系数  $r$  依次为 0.779、0.393、0.523,均大于统计学上 99% 的置信度要求.分季节后,夏、秋季二者的相关系数较全年有所降低,春季的较全年增大,表明受到不同季节气溶胶来源、特征及数据样本差异的影响,春季的订正更为有效,可用性更高.

为了更具体地说明春、夏、秋季经垂直-湿度订正后的 AOD 与地面观测的 PM<sub>10</sub>质量浓度之间的关系,分别对 3 季进行线性、对数、一元二次、一元三次、乘幂和指数 6 种类型的建模拟合,并考虑模型易于利用的因素,依据各拟合模型决定系数大小选取各季最优拟合模型,所选结果如表 5 所示.

表 5 各季节最优拟合模型

Table 5 Best fitting model in each season

季节	模型类型	拟合模型方程	R 值	R <sup>2</sup> 检验值	样本数
春季	一元三次	$y = -4.3 \times 10^{12} x^3 + 4.381 \times 10^9 x^2 - 540110.926x + 88.481$	0.798	0.638	32
夏季	乘幂	$y = 542.578x^{0.191}$	0.44	0.193	34
秋季	一元三次	$y = 1.577 \times 10^{12} x^3 - 1.053 \times 10^9 x^2 + 452866.462x + 70.772$	0.537	0.289	32

### 3.2 模型精度验证

利用从表 3 和表 5 中选取的全年、各季节最优拟合模型反演了乌鲁木齐市地面 PM<sub>10</sub>质量浓度,并结合地面监测站的实测数据分析二者相关性,图 3 显示了全年和 3 个季节 PM<sub>10</sub>的模型反演结果与实测数据的散点图.从图 3 中可以看出,PM<sub>10</sub>的模型反演结果与实测数据有比较好的符合,全年和 3 个季节二者的相关系数  $r$  分别为 0.757、0.748、0.652、0.715,均大于统计学上 99% 的置信度要求.说明 MODIS AOD 资料可以用于反演地面 PM<sub>10</sub>浓度值.

### 3.3 地面 PM<sub>10</sub>质量浓度反演

本文将全年和各季节最优拟合模型应用在了卫星遥感监测乌鲁木齐市 PM<sub>10</sub>质量浓度的监测实践中.首先对全年(2013 年 3—11 月、2014 年 3—11 月)、春季、夏季、秋季的 AOD 分别进行平均值运算,得到全年(图 4a)和 3 个季节(图略)乌鲁木齐市 AOD 空间分布图,然后将对应的最优拟合模型应用

到 AOD 均值相应的网格中(10 km x 10 km 分辨率),进而反演得到全年(图 4b)和 3 季(图略)乌鲁木齐市 10 km 分辨率 PM<sub>10</sub>质量浓度的遥感监测图.

图 4a、图 4b 分别为乌鲁木齐市年平均 AOD 和 PM<sub>10</sub>浓度的空间分布,由图可知,基于卫星遥感 AOD 反演得到的 PM<sub>10</sub>质量浓度的空间分布与 AOD 呈现出整体的一致性.从年平均分布来看,整个研究区大体上呈现出以西北区域为高值区向东、西、南 3 个方向逐渐递减的格局.高值区主要分布在以天山区、沙依巴克区、水磨沟区等中心市区为核心的西北部,其 PM<sub>10</sub>质量浓度在 200  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  以上,该区域是乌鲁木齐市现代工业、农业、交通信息、教育科技等最为发达的核心区域,也是中国西部最重要的制造业基地之一,集中了乌鲁木齐市大部分工业,是其重要的经济增长极,此外,乌鲁木齐市地处中天山北麓、准噶尔盆地南缘,地势为东南高、西北低,起伏较大,东、南、西三面环山,北部为倾斜平原,大

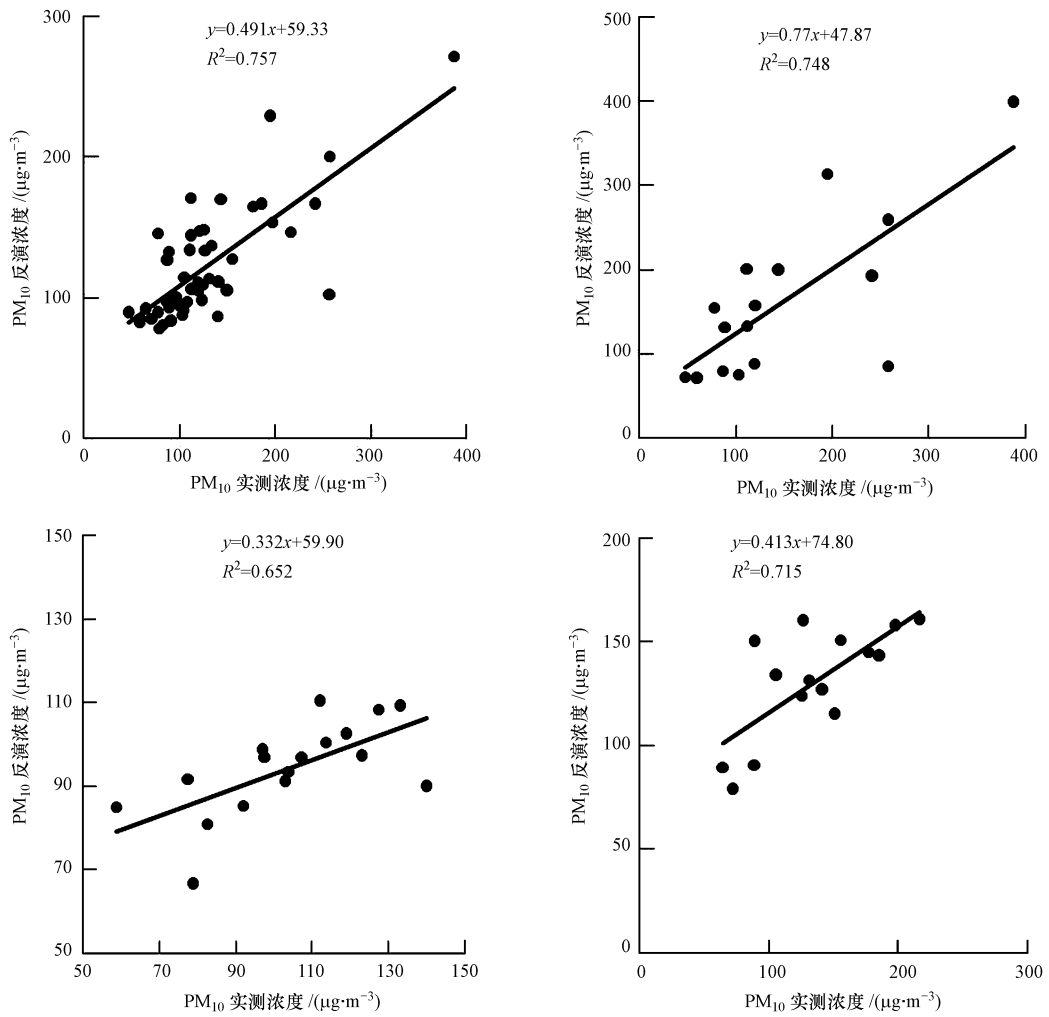


图 3 PM<sub>10</sub>反演结果与实测结果的散点图

Fig.3 Scatter diagram of inversion result and observed PM<sub>10</sub> cocentration

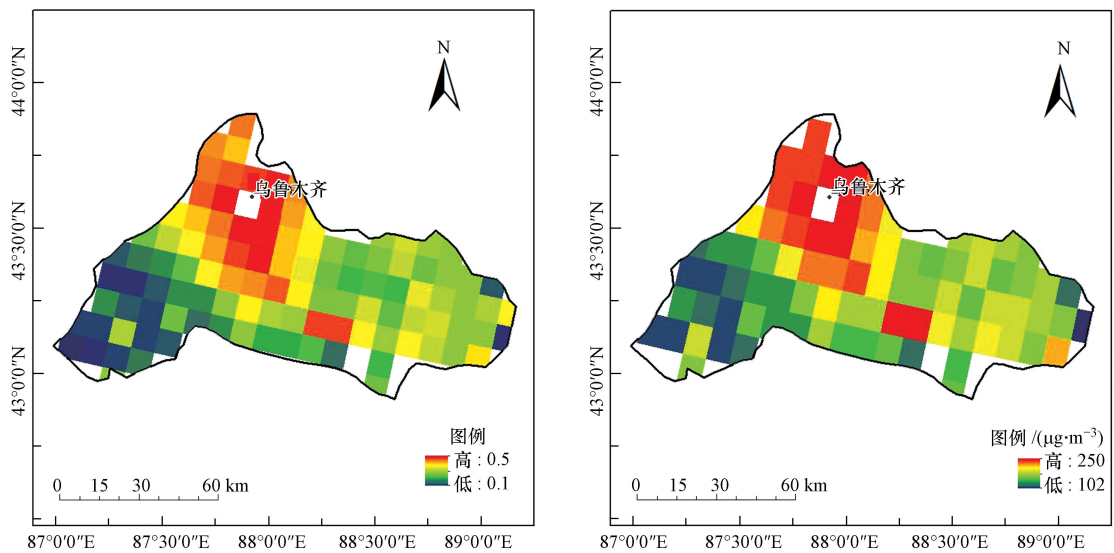


图 4 乌鲁木齐市年平均 AOD 和 PM<sub>10</sub> 质量浓度的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of the annual average AOD and the retrieved PM<sub>10</sub> concentration in Urumchi

体为开口朝北的“喇叭口”地形(赵克明等,2014),受山脉、峡谷复杂地形及气候的影响,致使乌鲁木齐西北区域的 AOD 和  $PM_{10}$  浓度相对较高;次高值区分布在乌鲁木齐东部的达坂城区,其  $PM_{10}$  质量浓度为  $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  左右,相较低值区而言,这一区域主要受城市化和人口密集、工业发展的影响,而人类活动产生的大气污染物排放大致和人口密度成正比,因此也使其大气颗粒物浓度处于一个较高的水平;低值区分布在乌鲁木齐西南部的县城和郊区,其  $PM_{10}$  质量浓度在  $100\sim 130 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  之间,这一区域的南部为天山山脉,海拔较高且工业污染源较少、人口密度较低、农牧场和旅游资源较为丰富,其本身空气污染不严重,因此 AOD 和  $PM_{10}$  值也不高。

此外,基于各季节最优拟合模型反演得到了乌鲁木齐市春、夏、秋季  $PM_{10}$  浓度的空间分布(图略)。由反演结果可知,3个季节的  $PM_{10}$  浓度空间分布与年平均  $PM_{10}$  浓度的空间分布表现出较好的一致性,均呈现出以西北区域为高值区向东、西、南3个方向逐渐递减的格局;乌鲁木齐市  $PM_{10}$  质量浓度呈现明显的季节变化趋势:春季污染程度较高,秋季次之,夏季最低。

春季最高(平均值为  $256.87 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),主要是由于乌鲁木齐市春季大风天气居多,降水偏少,气候干燥,西北风强劲,易引发起沙尘、扬尘天气或沙尘暴现象(刘新春等,2010),地面土壤扬尘及西北地区沙尘传输造成的自然降尘对大气中颗粒物浓度的贡献很大;秋季次之(平均值为  $130.98 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),由于乌鲁木齐市春、秋两季一半时间处于供暖期,受燃煤供暖锅炉的影响, $PM_{10}$  污染程度较高,而秋季扬尘天气发生的频率低于春季,使得其  $PM_{10}$  污染程度低于春季;夏季最低(平均值为  $107.27 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),主要是由于夏季温度上升,大气稳定度低,利于颗粒物扩散,同时降雨较多,大气湿度相对较大,不利于地面扬尘的发生(朱少钧等,2012)。

#### 4 结论(Conclusions)

通过本研究可以获得以下几个方面的结论:

1)采用 MODIS AOD 产品和地面观测的  $PM_{10}$  浓度数据,分析了二者之间的相关性,结果表明,二者直接相关程度不理想,不能直接用于城市空气污染监测;利用 WRF 模式模拟的大气边界层高度数据以及地面观测的相对湿度数据对 AOD 进行垂

直、湿度订正后, $PM_{10}$  质量浓度与 AOD 之间的相关性显著提高,从最初的 0.433 提升至 0.630 ( $p < 0.01$ );按照季节分类统计和订正春、夏、秋季的相关系数  $r$  分别为 0.779、0.393、0.523,均大于统计学上 99% 的置信度要求,表明受到不同季节气溶胶来源、特征及数据样本差异的影响,春季的订正更为有效,可用性更高。

2)建立并选取经垂直-湿度订正后的 AOD 与地面观测的  $PM_{10}$  质量浓度之间全年和春、夏、秋季的最优拟合模型,进而反演乌鲁木齐市地面  $PM_{10}$  质量浓度,并结合地面监测站的实测数据分析二者相关性,发现  $PM_{10}$  的模型反演结果与实测数据有比较好的符合,全年和3个季节二者的相关系数  $r$  分别为 0.757、0.748、0.652、0.715,均大于统计学上 99% 的置信度要求,说明 MODIS AOD 资料可以用于反演地面  $PM_{10}$  浓度值。

3)将全年和各季节最优拟合模型应用在卫星遥感监测乌鲁木齐市  $PM_{10}$  质量浓度的监测实践中,反演得到全年和第三季乌鲁木齐市 10 km 分辨率  $PM_{10}$  质量浓度的遥感监测图,发现基于卫星遥感 AOD 反演得到的  $PM_{10}$  质量浓度的空间分布与 AOD 呈现出整体的一致性并且三个季节 AOD 平均值表现为:春季 > 秋季 > 夏季。

本文的研究表明,经过垂直-湿度订正后的 AOD 能较为准确地反演地面  $PM_{10}$  质量浓度,可应用在乌鲁木齐市无地面空气监测站点的  $PM_{10}$  质量浓度监测;利用卫星遥感数据有助于分析区域颗粒物浓度的空间分布特征,弥补了地面监测在空间分布上的不足,从宏观的角度给出区域污染的相对程度,为乌鲁木齐市颗粒物污染的监测和区域联防联控提供了一个有效的新途径。然而, $PM_{10}$  质量浓度还受到气温、气压、风速和能见度等气象因素的影响,在一定区域某段时间内污染物种类与排放量稳定的情况下,气象因素是影响污染浓度及分布的主要因素之一(Simimov *et al.*, 2003;李霞,2006)。因此,未来要考虑多因素的 AOD 订正,使 MODIS AOD 在监测大气污染方面有更高的应用价值。

#### 参考文献(References):

- Chu D A, Kaufman Y J, Zibordi G, *et al.* 2003. Global monitoring of air pollution over land from Earth Observing System-Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) [J]. *J Geophys Res*, 108 (D21): 4664-467
- 高大伟,徐宏辉,郁珍艳,等.2012.MODIS 气溶胶光学厚度在临安大



- 气颗粒物监测中的应用[J].环境科学研究,25(7):739-744
- 何秀,邓兆泽,李成才,等.2010.MODIS 气溶胶光学厚度产品在地面 PM<sub>10</sub>监测方面的应用研究[J].北京大学学报(自然科学版),46(2):178-184
- J. Tian, D. Chen. 2010. A semi-empirical model for predicting hourly ground-level fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) concentration in southern Ontario from satellite remote sensing and ground-based meteorological measurements[J]. Remote Sensing of Environment, 114(2):221-229
- Kaufman Y J, Tanre D, Gordon H R, et al. 1997. Passive remote sensing of tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect[J]. Journal of Geophysical Research, 102 (D14): 16815-16830
- 李成才,毛节泰,刘启汉,等.2003.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[J].大气科学,27(5):869-880
- 李成才,毛节泰,刘启汉,等.2005.MODIS 卫星遥感气溶胶产品在北京市大气污染研究中的应用[J].中国科学:地球科学,35(增刊1):177-186
- 刘浩,高小明,谢志英,等.2014.京津冀晋鲁区域气溶胶光学厚度的时空特征[J].环境科学学报,DOI:10.13671/j.hjkxxb.2014.0949.9
- 李霞.2006.乌鲁木齐气象要素对大气气溶胶光学特性的影响[J].干旱区研究,23(3):484-488
- 刘新春,钟玉婷,何清,等.2010.乌鲁木齐及周边城市空气质量变化特征及影响因素分析[J].沙漠与绿洲气象,4(4):12-16
- Pope C A.2000.Review:epidemiological basis for particulate air pollution health standards[J]. Aerosol Science and Technology,32(1):4-14
- Pope C A, Dockery D W. 2006. Health effects of fine particulate air pollution; Lines that connect [J]. Journal of the Air & Waste Management Association,56(4):709-742
- Smimov A, Holben B N, Eck T F, et al.2003. Effect of wind speed on columnar aerosol optical properties at Midway Island[J]. J Geophys Res, 108(D24):4802
- 宋宇,唐孝炎,方晨,等.2003.北京市能见度下降与颗粒物污染的关系[J].环境科学学报,23(4):468-471
- 陶金花,张美根,陈良富,等.2013.一种基于卫星遥感 AOT 估算近地面颗粒物的方法[J].中国科学:地球科学,43(1):143-154
- Wang J, Christopher S A. 2003. Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM<sub>2.5</sub> mass: Implications for air quality studies. Geophysical Research Letters, 30(21): Art. No. 2095, doi: 10.1029/2003GL018174
- 王子峰.2010.卫星遥感估算近地面颗粒物浓度的算法研究[D].北京:中国科学院遥感应用研究所
- 谢鹏,刘晓石,刘兆荣,等.2009.我国人群大气颗粒物污染暴露-反应关系的研究[J].中国环境科学,29(10):1034-1040
- 薛文博,武卫玲,付飞,等.2015.中国2013年1月PM<sub>2.5</sub>重污染过程卫星反演研究[J].环境科学,36(3):794-800
- 薛岩松,俞乐,徐鹏炜.2014.利用 MODIS 气溶胶产品反演 PM<sub>10</sub>质量浓度:以杭州为例[J].遥感信息,29(1):74-77
- 姚剑,王广华,林俊,等.2010.上海大气颗粒物与能见度的关系[J].气象与环境学报,26(4):17-21.
- 张晖,王伯铎,陈良富,等.2014.西安市及周边地区 MODIS 气溶胶光学厚度与 PM<sub>10</sub>浓度关系模型研究[J].环境工程学报,8(2):665-671
- 赵克明,李霞,卢新玉,等.2014.峡口城市乌鲁木齐冬季大气污染的时空分布特征[J].干旱区地理,37(6):1108-1116
- 朱少钧,董雯,许嘉钰.2012.乌鲁木齐市 PM<sub>2.5</sub>污染特征及其溯源与追踪分析[J].新疆环境保护,34(3):06-11
- 郑卓云,陈良富,郑君瑜,等.2011.高分辨率气溶胶光学厚度在珠三角及香港地区区域颗粒物监测中的应用研究[J].环境科学学报,31(6):1154-1161