第12卷 第2期
2018年4月
沙 漠 与 绿 洲 气 象
Desert and Oasis Meteorology

陈鹏,张青,李悦.乌鲁木齐市 MODIS 气溶胶光学厚度与空气质量指数相关性分析[J].沙漠与绿洲气象,2018,12(2):71-77.
doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2018.02.011

乌鲁木齐市MODIS气溶胶光学厚度与空气质量指数相关性分析

陈 鹏,张 青*,李 悦
(乌鲁木齐气象卫星地面站,新疆 乌鲁木齐830011)

摘 要:利用MODIS 气溶胶光学厚度(AOD,Aerosol Optical Depth)产品与同期乌鲁木齐市空气质量指数进行相关性分析,得到二者的相关系数为0.664。对MODIS AOD产品进行垂直和湿度订正后,二者的相关性显著提高,相关系数从0.664提高到0.805。订正后按季节分类统计,春、夏、秋3季的相关系数分别为0.775、0.608和0.822,其中秋季的订正更为有效,可用性更高。这可能受到不同季节气溶胶来源、特征以及数据样本差异的影响。最后分别建立全年、春季、夏季和秋季的线性、对数、一元二次、乘幂和指数5种类型的拟合模型。考虑模型易于利用的因素,依据各拟合模型相关系数的大小得到全年以及各季节最优拟合模型,该模型函数可用来反演和监测乌鲁木齐市空气质量指数。

关键词:MODIS Aerosol Optical Depth;空气质量指数;相关系数;拟合模型
中图分类号:P427.2 **文献标识码**:A **文章编号**:1002-0799(2018)02-0071-07

近年来,随着我国经济的快速发展和城镇化进程的日益加快,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。各大城市雾霾天数有愈演愈烈的趋势,在不同程度上影响着居民的生活环境,其中可吸入颗粒物污染成为空气污染中的最主要污染物之一[1,2]。气溶胶污染由于其对人体健康及大气能见度的重要影响受到了国内外研究人员的广泛关注。现有的环境监测站点难以在空间尺度和尚无监测点的区域获得可吸入颗粒物的时空分布与变化资料,而卫星遥感观测的覆盖范围广泛,能够弥补地面监测站点在空间分布上的不足,成为空气污染监测的新手段[3,4]。

空气污染指数(API,Air pollution Index)是我国广泛采用评价城市空气质量水平的一种标准,它能够向公众提供及时、准确、易于理解的空气质量状况,并可用来进行环境现状评价、回顾性评价和趋势评价[5-9]。2012年出台规定,将用空气质量指数(AQI,Air Quality Index)替代原有的API。AQI与API有着很大的区别。AQI分级计算参考的标准是新的环境空气质量标准(GB3095-2012),参与评价的污染物为SO_2、NO_2、PM_{10}、$PM_{2.5}$、O_3、CO;而API分级计算参考的标准是老的环境空气质量标准(GB3095-1996),评价的污染物仅为SO_2、NO_2和PM_{10},且AQI采用分级限制标准更严。因此AQI较API监测的污染物指标更多,其评价结果更加客观[10,11]。

卫星遥感反演的气溶胶主要为气溶胶光学厚度(AOD),它是整层大气气溶胶消光系数的积分。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,为此国内外学者进行了大量针对性的研究。李成才等对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,并证明了气溶胶光学厚度具有明显的时空变化特征[12]。他们还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

收稿日期:2017-08-24;**修回日期**:2017-10-04
基金项目:自治区科技支疆项目(2016E02104)资助。
作者简介:陈鹏(1987-),男,工程师,主要从事遥感应用服务与技术开发。E-mail:wxzchenpeng@sina.com
通讯作者:张青(1969-),女,高级工程师,从事遥感应用服务工作。E-mail:zhqing168@sohu.com

学厚度的比较发现MODIS气溶胶光学厚度产品对于研究城市地区的空气污染具有可行性[13]。王皓以南京市为研究区，建立MODIS反演的气溶胶光学厚度AOD与空气污染指数API的关系，试图以气溶胶光学厚度AOD来反映大气污染状况[14]。刘勇在此基础上，考虑了气象因子的影响，探讨空气污染指数和气溶胶光学厚度的关系，更能真实地反映地面空气的污染状况[15]。何秀等利用两年的MODIS AOD数据与PM_{10}质量浓度资料进行了对比分析，发现气溶胶光学厚度经过垂直和湿度影响的订正后，可用于地面PM_{10}的监测[16]；蒋民等利用AOD产品与南京市区API转换得到的PM_{10}质量浓度进行了相关分析，发现对气溶胶光学厚度进行垂直和湿度影响订正后，相关系数显著提高[17]；王静等利用AOD数据与$PM_{2.5}$质量浓度进行了比较，发现利用相对湿度和气溶胶标高等气象条件进行校正后，AOD与$PM_{2.5}$具有较高的相关性[18]。从以上科研成果可以看出MODIS AOD数据与空气污染指数以及具体污染物之间有一定的相关性，并且可以建立关系模型来反映大气污染状况。对MODIS AOD数据进行垂直和湿度影响订正后，可以显著提高MODIS AOD数据与空气污染指数以及具体污染物之间的相关系数。本文利用MODIS AOD产品和空气质量监测数据，在考虑气象因素的情况下建立乌鲁木齐市全年(除冬季外剩余三季)、春季、夏季、秋季气溶胶光学厚度和AQI的关系模型，分析两者的相关性，但必要条件是研究区域某天的首要污染物为可吸入颗粒物，才能对AOD和AQI进行相关性分析[19]。通过本文的研究证实了卫星遥感气溶胶光学厚度在监测空气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。

1 研究区概括

乌鲁木齐市位于86°37′~88°58′E，42°45′~44°08′N，是新疆维吾尔自治区首府，我国西北地区重要的中心城市和面向中亚西亚的国际商贸中心。是全疆政治、经济、文化、科教和交通中心。市域面积为14 216.3 km^2，辖7区1县，2016年末常住人口为355万。乌鲁木齐市位于欧亚大陆腹地，地处天山北坡，东南西三面环山，北面为冲积平原。呈喇叭口形状。地势东南高，西北低。全年盛行东北风和西南风，早晚温差较大，春秋换季多大风，年平均风速不大，冬季静风频率高，风速较小。稳定天气居多，降水少，雾霾天较多，逆温频率高[20,21]。

根据乌鲁木齐市环保局2016年环境质量公报报导：首府乌鲁木齐市环境质量优良天数为246 d，占全年天数的67.2%，轻度、中度、重度、严重污染比例分别为10.4%、6.8%、12.0%、3.6%。空气中可吸入颗粒物、细颗粒物、二氧化硫和二氧化氮年均浓度分别为115、74、14 μg/m^3和53 μg/m^3。可吸入颗粒物、细颗粒物、二氧化氮年均浓度均超过国家二级标准，二氧化硫年均浓度达到国家二级标准。与上年相比，优良天数比例增加2.0个百分点，空气质量略有好转。细颗粒物和二氧化氮年均浓度分别上升12.1%和1.9%，可吸入颗粒物和二氧化硫年均浓度分别下降13.5%和6.7%。

2 数据资料与处理方法

2.1 遥感数据

AOD数据为美国NASA所发布的MOD04_L2气溶胶产品数据，其空间分辨率为10 km。数据可从NASA的GSFC(Goddard Space Flight Center)中下载(http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search。 html)。每日气溶胶产品文件(MOD04)包括陆地和海洋上空的气溶胶光学性质参数，其中陆上AOD主要反演方法为暗像元算法，为了提高亮目标陆表AOD的反演精度，后又增加了深蓝算法[22]。本文采用2016年3—11月上午星TERRA的MODIS AOD产品，版本为C5.1、波长为550 um的Lever 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、投影、矢量裁剪以及AOD数值提取等操作，最终得到覆盖研究区域的Geo TIFF格式文件，投影方式为等经纬度投影的AOD日数据。

2.2 空气质量指数及气象数据

采用的AQI数据源于国家环境保护部网上公布的乌鲁木齐市空气质量日报资料，并从中选择每日的首要污染物为可吸入颗粒物的情况[11]。气象数据来源于新疆气象局信息中心提供的乌鲁木齐市共6个(米泉站、乌鲁木齐站、乌鲁木齐牧试站、达坂城站、天山大西沟站以及小渠子站)地面气象观测站资料。为了与TERRA卫星过境时间(地方时11:30 am左右)相对应，选取2016年3—11月期间与AOD对应日期的11:00、12:00的相对湿度以及水平能见度要素，计算其均值作为当日的有效值。

2.3 数据匹配

研究中涉及到的变量有MODIS AOD、空气质量指数(AQI)、相对湿度(RH)、水平能见度(V)。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AQI为准,时间上以卫星过境时间为准,选取晴空无云天气,剔除RH>80%(降水天气)的数据。经匹配处理后共得到研究区2016年3月1日—11月30日期间140对数据,其中包括春季(3—5月)43对、夏季(6—8月)52对、秋季(9—11月)45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,因此没有进行冬季的数据统计。将AQI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94对,验证数据46对[23]。

3 讨论与分析

3.1 AOD与AQI线性关系模型

将建模用的140对数据中的AOD作为自变量,AQI作为因变量进行相关性分析(图1),二者相关系数为0.664,大于统计学上99%的置信度要求。证明了由AOD估算近地面空气质量指数的可行性。

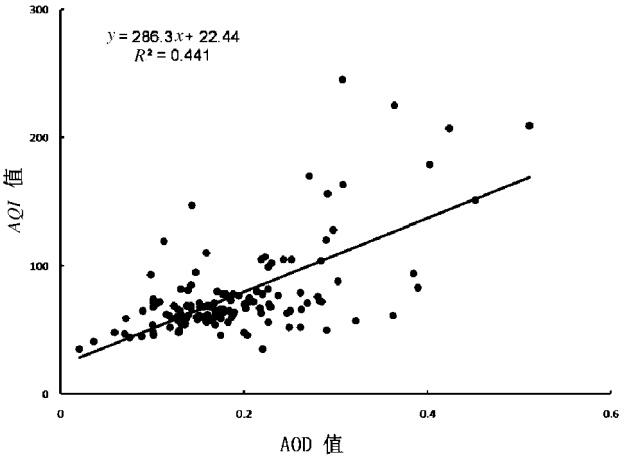


图1 MODIS AOD与AQI的相关性分析

3.2 AOD垂直订正和湿度订正

AOD反映了气溶胶从地面至大气层顶垂直方向上消光系数的积分,而AQI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,使得相关性不理想。因此不能直接用AOD进行地面大气污染程度的监控。

AOD是从遥感角度表征整层大气中气溶胶消光特性的指标,同地面观测的AQI值物理属性上有较大的差异。考虑到两者的差异对AOD进行垂直订正有望提高其与AQI的相关性。本文采用李成才的垂直订正方法[12],即假定大气气溶胶在垂直方向上按照指数递减分布,大气气溶胶标高(H)定义为整个大气气柱中颗粒物按地面浓度在垂直方向上均匀分布所能达到的高度,利用AOD与整层大气气溶胶消光系数的积分公式可以得到H与AOD、V之间的关系式为:

$$H=\frac{(V\times AOD)}{3.91} \quad 。 \qquad (1)$$

式中V表示水平能见度,利用公式(1)得到每日垂直标高H,然后将AOD除以标高,完成气溶胶垂直订正,得到订正后的气溶胶消光系数。

由于空气质量指数一般是在干燥的环境下测量得到的,而AOD是在大气环境下获取的,较高的大气湿度将使气溶胶颗粒物吸湿膨胀,造成AOD变大[13]。对AOD进行湿度订正有望减小其与AQI在监测环境上的差异,进而提高两者的相关性。湿度影响因子可表示为:

$$f(RH)=\frac{1}{(1.0-\frac{RH}{100})} \quad 。 \qquad (2)$$

式中,RH为相对湿度,将AOD除以f(RH)对其进行湿度订正。经AOD垂直和湿度订正后,分析两者的相关性,相关系数达0.805。订正前后两者的相关性变化如图2所示。

分析图2可知,AQI与AOD、AOD垂直订正值和AOD垂直湿度订正值的相关系数依次为0.664、0.752,0.805,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AQI的相关系数有了明显的提高。利用订正后的AOD对地面观测的AQI数据进行匹配,并分别进行线性、对数、一元二次、乘幂和指数 5种类型的建模拟合,结果见表2、图3。

表2 5种拟合模型对比

模型类型	拟合模型方程	R^2值
线性	y= 524.6x + 16.09	0.648
对数	y= 55.52lnx + 202.4	0.470
一元二次	$y= 1417x^2 + 62.90x + 46.21$	0.696
乘幂	$y= 257.1x^{0.566}$	0.520
指数	$y= 40.12e^{4.981x}$	0.620

注:自变量为垂直湿度订正后的AOD值,因变量为AQI值。

从表2可以看出,用垂直订正和湿度订正后的AOD数据与AQI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AQI之间的决定系数R^2。其中一元二次模型决定系数最高,为

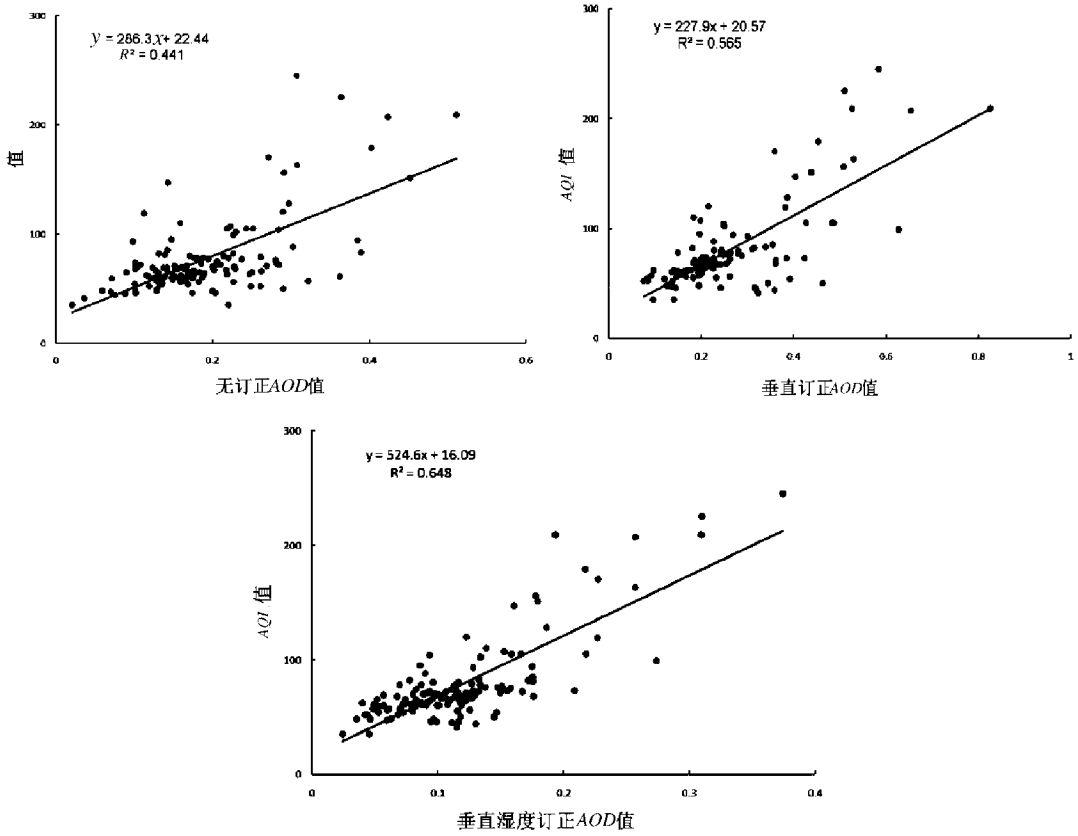


图2 订正前后AOD与AQI的相关性变化

0.696,即为全年(除冬季外剩余3季)最优拟合模型。

3.3 各季节AOD与AQI关系模型

乌鲁木齐市不同季节的气溶胶来源差异较大,夏季主要是大风扬起的沙尘气溶胶,春季、秋季主要是供暖等释放的黑碳气溶胶。不同来源的气溶胶理化特征和大气边界层可能存在较大差异,因而不同季节的垂直订正和湿度订正效果也可能不同。为了研究不同季节AOD与AQI的相关性,本文按照季节对MODIS AOD产品进行了分季节订正拟合(表3)。

由表3可知,按照季节分类统计和订正,春、夏、秋3季的相关系数R分别为0.775、0.608和0.822,均大于统计学上99%的置信度要求。与全年相关系数0.805相比,春、夏两季的相关系数较全年有所降低,秋季较全年增大,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,秋季的订正更为有效,可用性更高。综合以上因素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节最优拟合模型,所选结果见表4。

表3 AOD与AQI各季节回归拟合模型

季节	模型类型	拟合模型方程	R^2值
春季	线性	y= 544.4x + 16.07	0.601
	对数	y= 63.17lnx + 223.6	0.516
	一元二次	$y= 505.9x^2 + 384.0x + 26.27$	0.604
	乘幂	$y= 341.1x^{0.682}$	0.619
	指数	$y= 38.08e^{5.504x}$	0.632
夏季	线性	y= 199.3x+ 45.86	0.370
	对数	y= 16.35lnx + 104.3	0.318
	一元二次	$y= 1363x^2 - 73.06x + 58.20$	0.398
	乘幂	$y= 114.8x^{0.241}$	0.306
	指数	$y= 48.65e^{2.904x}$	0.347
秋季	线性	y= 591.1x + 8.559	0.675
	对数	y= 63.71lnx + 221.9	0.472
	一元二次	$y= 2167x^2 - 124.8x + 56$	0.762
	乘幂	$y= 274.4x^{0.591}$	0.474
	指数	$y= 39.22e^{5.201x}$	0.609

注:自变量为垂直湿度订正后的AOD值,因变量为AQI值。

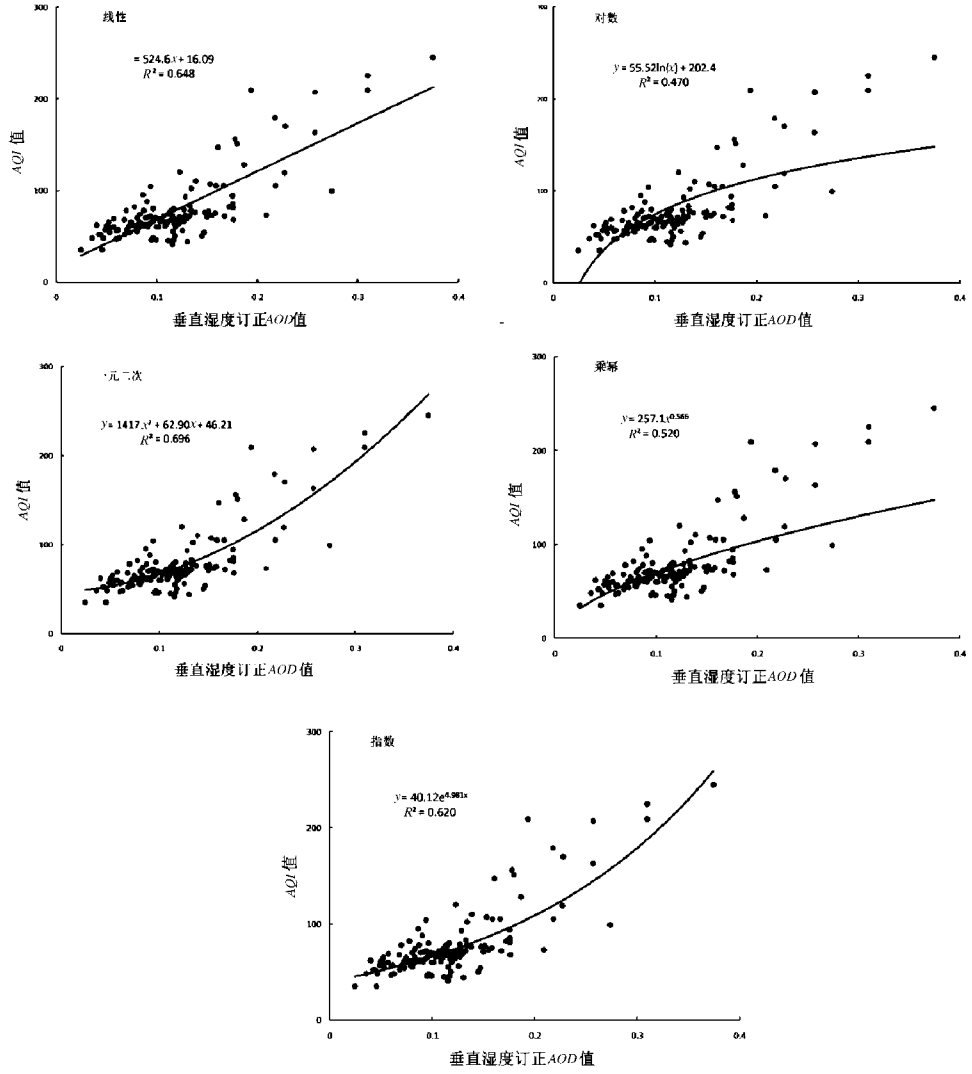


图3 基于散点数据的模拟结果

表4 各季节最优拟合模型

季节	模型类型	拟合模型方程	R^2值
春季	指数	$y= 38.08e^{5.504x}$	0.632
夏季	一元二次	$y= 1363x^2-73.06x+58.20$	0.398
秋季	一元二次	$y= 2167x^2-124.8x+56$	0.762

注:自变量为垂直湿度订正后的AOD值,因变量为AQI值。

3.4 模型精度验证

将表2和表4中建立的全年（除冬季外剩余三季)、春季、夏季、秋季最优拟合模型分别应用于验证数据，然后将估算得到的AQI指数与实测数据进行相关分析(图4)。

由图4可知全年(除冬季外剩余三季)、春季、秋季的AQI模型反演结果与实测数据比较符合，二者的相关系数R分别为0.879、0.867、0.917,均为强相关且大于统计学上 99% 的置信度要求,说明全年(除冬季外剩余3季)、春季、秋季的MODIS AOD资料可以很好地反演AQI值。而夏季的AQI模型反演结果与实测数据的相关系数仅为0.457,为中等相关,故夏季MODIS AOD资料反演AQI值效果一般。

4 结论

通过利用乌鲁木齐市2016年3—11月共140组有效AOD数据和AQI数据，在考虑气象因素的情况下分析两者之间的相关性,并建立回归关系模型,从而实现了利用遥感手段来对城市空气污染状况进行监测的目的。本文得到以下几个方面的结论:

(1)采用MODIS AOD产品与空气质量指数进行相关性分析,结果表明,二者相关系数为0.664。利用

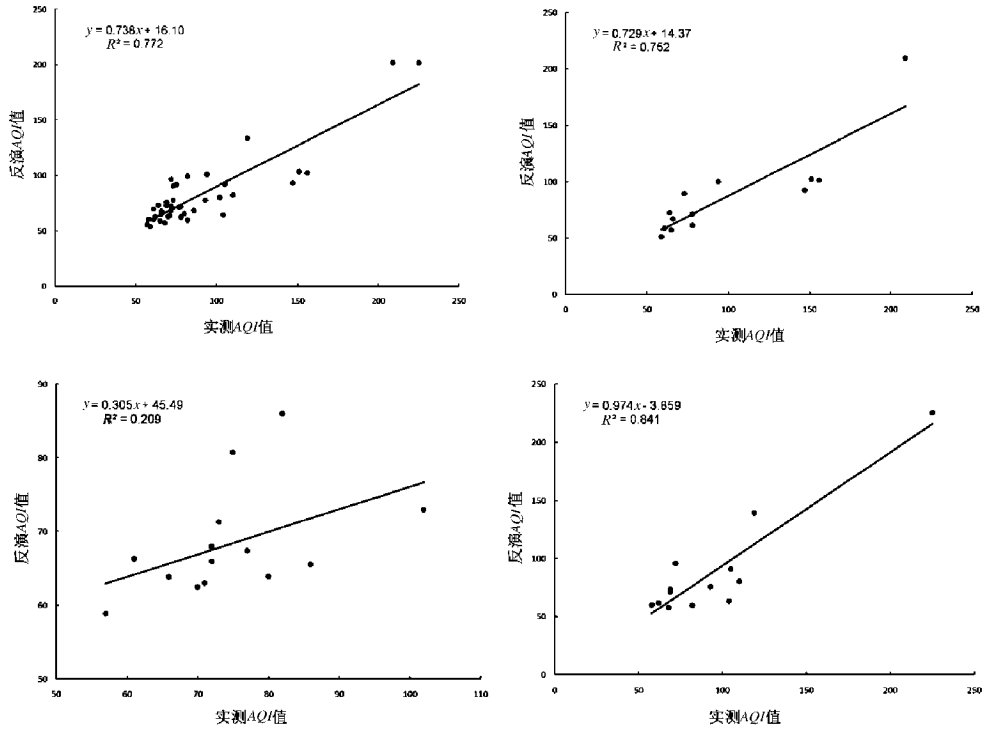


图4 AQI实测结果与反演结果散点图

气象要素水平能见度数据以及相对湿度数据对AOD进行垂直、湿度订正后，两者的相关系数从原来的0.664提升至0.805。

(2)按照季节分类统计订正，春、夏、秋3季的相关系数R分别为0.775、0.608、0.822，均大于统计学上99%的置信度要求。分季节后，春、夏两季的相关系数较全年有所降低，秋季较全年增大，表明受到不同季节气溶胶来源、特征以及数据样本差异的影响，秋季的订正更为有效，可用性更高。

(3)利用订正后的AOD对AQI数据进行匹配，分别建立了全年(除冬季外剩余3季)、春季、夏季和秋季的线性、对数、一元二次、乘幂和指数5种类型的拟合模型。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全年以及各季节最优拟合模型，进而反演乌鲁木齐市AQI值。结合实测数据分析二者的相关性发现全年(除冬季外剩余3季)、春季、秋季的AQI模型反演结果与实测数据比较符合，二者的相关系数r分别为0.879、0.867、0.917，均为强相关且大于统计学上 99% 的置信度要求，说明全年(除冬季外剩余3季)、春季、秋季的MODIS AOD资料可以很好地反演AQI值。而夏季为中等相关，相关系数仅为0.457，故夏季MODIS AOD资料反演AQI值效果一般。

参考文献：

[1] 谢鹏，刘晓云，刘兆荣，等.不同控制指标下的大气PM10浓度对人群的健康影响—以2006年珠江三角洲地区为例[J].中国环境科学，2010，30(1)：25-29.

[2] 韩茜，魏文寿，刘新春，等.乌鲁木齐市PM10、PM2.5、和PM1.0浓度及分布变化特征 [J]. 沙漠与绿洲气象，2015(1)：32-38.

[3] 高大伟，徐宏辉，郁珍艳，等.MODIS气溶胶光学厚度在临安大气颗粒物监测中的应用. 环境科学研究，2012，25(7)：739-744.

[4] 王静，杨复沫，王鼎益，等.北京市MODIS气溶胶光学厚度和PM2.5质量浓度的特征及其相关性[J].中国科学院研究生院学报，2010，27(1)：10-16.

[5] 郭勇涛，佘峰，王式功，等.兰州市空气质量状况及与常规气象条件的关系 [J]. 干旱区资源与环境，2011，25(11)：100-105.

[6] 潘本峰，宫正宇，王帅，等.环境空气质量指数在应用中存在的问题及建议[J].中国环境监测，2015，31(1)：64-67.

[7] 杨云芸，李跃清，周慧，等.长沙市API指数时空变化特征及气象条件影响[J].气象与环境科学，2017，40(1)：108-113.

[8] 王冠岚，薛建军，张建忠.2014年京津冀空气污染时空分布特征及主要成因分析 [J]. 气象与环境科学，2016，39(1)：34-42.

[9] 张建忠，孙瑾，王冠岚，等.北京地区空气质量指数时空分布特征及其与气象条件的关系 [J]. 气象与环境科学，

2014,37(1):33-39.
[10] 袁鹰,刘明源.浅议空气质量指数(AQI)与空气污染指数(API)的差异[J].广州化工,2014,42(12):164-166.
[11] 康恒元,刘玉莲,李涛.黑龙江省重点城市AQI指数特征及其与气象要素之间关系 [J]. 自然资源学报,2017,32(4):692-703.
[12] 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 [J]. 中国科学(D辑),2005,35(S1):177-186.
[13] 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 [J]. 大气科学,2005,29(3):335-342.
[14] 王皓.南京市区空气污染指数与MODIS气溶胶光学厚度的回归分析[D].南京:南京师范大学,2006.
[15] 刘勇.MODIS气溶胶光学厚度与南京主城区空气污染指数的关系研究[D].南京:南京师范大学,2007.
[16] 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[J].北京大学学报(自然科学版),2010,46(2):178-184.
[17] 蒋民,马贞立.南京市MODIS气溶胶光学厚度与PM10质量浓度的相关性分析 [J]. 科学技术与工程,2012,12(31):8327-8331.
[18] 王静,杨复沫,王鼎益,等.北京市MODIS气溶胶光学厚度和PM2.5质量浓度的特征及其相关性[J].中国科学院研究生院学报,2010,27(1):10-16.
[19] 洪超,麻金继.北京市气溶胶光学厚度与空气污染指数关系研究[J].石家庄学院学报,2013,15(3):75-81.
[20] 韩文堂,陈学刚,孙蓉花.乌鲁木齐城市化进程对局地气候变化的影响研究 [J]. 沙漠与绿洲气象,2016,10(6):54-58.
[21] 刘盛梅,成鹏.乌鲁木齐地区近50年来平均气温及极端气温变化特征[J].干旱区资源与环境,2011,25:(6)138-146.
[22] 谢志英,刘浩,唐新明.北京市MODIS气溶胶光学厚度与PM10质量浓度的相关性分析 [J]. 环境科学学报,2015,35(10):3292-3299.
[23] 李超群,郭生练,张俊. hv-block交叉验证法在率定水文模型参数中的比较研究[J].水文,2006,26(5):25-28.

Analysis on Correlation between MODIS Aerosol Optical Depth Values and Air Quality Indices in Urumqi

CHEN Peng,ZHANG Qing,LI Yue
(Urumqi Meteorological Satellite Ground Station,Urumqi 830011,China)

Abstract The correlation analysis between the MODIS aerosol optical depth products and the air quality index in Urumqi at the same time was carried out,and the correlation coefficient of the two was 0.664. After correcting the vertical and humidity of MODIS AOD products, the correlation coefficient between the two values increased from 0.664 to 0.805. According to the seasonal classification, the correlation coefficients in spring, summer and autumn were 0.775, 0.608 and 0.822, respectively, and the correction coefficient in autumn was more effective and available, which may be influenced by aerosol sources, properties, and data sample differences from different seasons. Finally, five types of fitting models were established respectively in whole year, spring, summer and autumn. Considering the factors that the model is easy to use, the best fitting model of the whole year and season was obtained according to the correlation coefficient of each fitting model. The model function can be used to retrieve and monitor the air quality index of Urumqi.

Key words MODIS aerosol optical depth; air quality index;correlation coefficient;fitting model