

Spatial and Temporal Distribution of Aerosol Optical Thickness in Urumqi and Its Influencing Factors

Mingyuan Zhang

School of Architecture and Surveying Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi

Email: 290271560@qq.com

Received: June 5th, 2019; accepted: June 20th, 2019; published: June 27th, 2019

Abstract

In recent years, the problem of atmospheric environmental quality has become increasingly serious. The problems of poor air quality and low visibility in various regions of Urumqi have seriously affected people's lives. AOD is subject to complex diversity and inhomogeneity due to the influence of surface human activities and the type of underlying surface. Studying the spatiotemporal distribution of aerosol optical thickness through a large amount of data helps to grasp the distribution law of AOD and plays an important role in monitoring and predicting atmospheric particulate pollution. In this study, using MODIS1 B-level data MOD021 KM daily data to reflect the AOD spatiotemporal dynamics during a severe haze weather in Urumqi in early 2016, combined with meteorological data and using the backward airflow trajectory analysis model, the pollutants spread over Urumqi during this period. The process was analyzed, and the source and destination of atmospheric particulate matter during the weather process were analyzed.

Keywords

MODIS, Remote Sensing, Aerosol Optical Thickness

乌鲁木齐市一次灰霾天气过程中的AOD时空动态分析

张明远

江西理工大学, 建筑与测绘工程学院, 江西 赣州

Email: 290271560@qq.com

收稿日期: 2019年6月5日; 录用日期: 2019年6月20日; 发布日期: 2019年6月27日

摘要

近年来大气环境质量问题日益严重,乌鲁木齐市各地区空气质量差、能见度低等问题严重影响到了人们的生活。AOD受地表人类活动以及下垫面类型的影响而产生了复杂多样性以及不均匀等性质。通过大量数据研究气溶胶光学厚度的时空分布,有助于掌握AOD的分布规律,对大气颗粒物污染的监测和预测具有十分重要的作用。本文利用MODIS1 B级数据MOD021 KM日数据反演出2016年初乌鲁木齐市一次严重灰霾天气过程中的AOD时空动态情况,初步分析了这次天气过程中大气颗粒物的来源与去向。

关键词

MODIS, 遥感, 气溶胶光学厚度

Copyright © 2019 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 选题背景和意义

1.1.1. 研究背景

大气中悬浮的直径在 0.001~100 μm 的固体小颗粒、液滴以及有机物等众多物质共同构成的稳定混合物都被称作大气气溶胶。大气气溶胶由众多复杂物质构成,同时这些物质又来源于不同的地方,也是构成陆地-大气-海洋系统的一个非常重要的部分[1] [2]。悬浮在大气中的气溶胶粒子直径很小,尽管如此,由大量小颗粒悬浮物质组成的气溶胶对于太阳辐射以及环境的影响却很大[3]。在 IPCC 第四次评估报告当中重点指出过气溶胶研究具有重大意义[4],基于气溶胶组成物质多样来源复杂等原因,当前对于气溶胶理化性质及其时空分布特征的研究还不够充分,不能很好地掌握气溶胶的变化规律从而导致气溶胶分析预测成为难点,气溶胶本身的复杂性以及不确定性增加了大气环境变化研究的难度。气溶胶对全球陆地气系统以及气候变化的影响主要体现为直接和间接的强迫辐射效应。直接辐射强迫效应主要基于气溶胶本身的物理性质直接地影响到太阳辐射的传播情况,减少到达对流层及地面的辐射量。单位体积中的云粒子数量会因此增多,最终导致了整个全球地气系统中的短波及长波辐射全部受到影响[5] [6] [7];气溶胶的直接强迫辐射的相关研究仍然存在一定的困难。大气气溶胶的组成及光学特性导致在各种类型的气溶胶分类当中很难确定人为因素及自然因素所占比例,特别是对于灰碳性气溶胶的构成方面进一步研究进行的很缓慢。气溶胶对于全球气候系统的间接辐射强迫主要是指,气溶胶中的颗粒会有一部分称为云凝结核从而间接地改变云的理化性质,在大气运动过程当中,气溶胶对于云凝结核以及云辐射直接的复杂情况也产生了重要影响[8];直接强迫辐射以及间接强迫辐射本身的复杂性经过学者们的许多研究仍然没有得到满意的结果,因此,在这个方向的研究也是了解气溶胶与大气环境及气候变化的重点。

1.1.2. 研究意义

中国区域的气溶胶时空分布的研究区域主要都是经济发达或者经济发展迅速的城市,对于远离海洋、经济发展相对来说较为缓慢的中国西北地区的气溶胶时空分布研究不多。国家对于西北地区经济发展一

直都很重视,大力扶持西北地区经济发展的同时也很关注经济发展带来的各种环境问题。“十三五”规划提出深入实施西部大开发,并且在经济迅速发展的同时也要不断强化生态环境保护,通过培育城市群的发展带动西部经济发展。工业发展带动经济的发展,同时也带来了例如能见度下降、可吸入悬浮颗粒等许多环境问题,严重影响到了人们的生活及健康。因此,在发展经济的同时也必须注重环境的保护。在本次前期的资料及文献的相关阅读中,发现西北地区大气悬浮颗粒物监测站点数量较少,地面监测数据时间上不连续。由于气溶胶研究较少涉及到西北地区,因此有必要利用遥感技术研究西北地区 AOD 的时空分布特征,这有利于西北地区经济和环境的可持续发展。

1.2. 国内外研究进展

国内外学者首次注意到气溶胶是在 1999 年,在亚洲南部区域的天空上出现了一片厚度大致为 3 KM 的棕色云[9]。我国也有学者将其称为灰霾[10],这一现象已经出现,越来越多地吸引到了世界各地学者们的注意,随着进一步的研究发现了其组成部分主要是沙尘等固体颗粒物。卫星监测得到的遥感数据使用到了适用于海洋或陆地等多种地区的反演产品也越来越多,并且精度也明显地得以提高,有利于研究气溶胶给环境带来的问题,也有利于环境的保护。Meij 等[11]利用 MODIS AOD 产品和 MISR 数据估算了 2000~2009 年全球和区域 AOD 变化趋势,发现欧洲和南美 AOD 下降,东南亚 AOD 上升。研究表明,AOD 的增加主要与工业活动污染的增加有关。Floutsi 等[12]利用 2002 年~2014 年 MODIS AQUA 最新数据集(C006),研究地中海在过去的 12 年当中变化特征并且结合了地面气象站获得的基本数据进行了影响因素的分析。进一步分析表明,地中海地区 AOD 呈由北向南递减趋势。地中海北部人口密集,经济发展迅速,根据其来源可以归类为人为气溶胶,而南部地区独特的地理环境与气候条件决定了其中所含沙尘较多,因此将其分类到自然源因素,适用于较大的区域。大多数气候模型都是基于云滴浓度与气溶胶浓度之间的经验关系来评价气溶胶的间接影响。微气溶胶产品为气溶胶模型中气溶胶间接效应参数化的改进提供了良好的数据基础。Huang *et al.* [13]利用 2001 年 4 月至 2004 年 6 月中国西北地区 MODIS 卫星和 CERES 卫星的数据,探究了气溶胶和云以及云水路径等影响因素之间的关联度。利用 2001 年 4 月至 2004 年 6 月中国西北地区 MODIS 卫星和 CERES 卫星的数据,定量评价了沙尘气溶胶对冰云粒子有效半径、云光学厚度和冰水路径的影响以及由此产生的辐射力。Costantino [14]结合 MODIS 气溶胶产品、阳伞云有效半径和 CALIOP/CALIPSO 气溶胶垂直剖面产品研究了西非气溶胶的间接影响。结果表明,当云和气溶胶分离时,气溶胶光学厚度与雾滴半径之间不存在相关关系。但是当气溶胶和云混合在一起时,它们之间有很强的相关性。Ma yue 和 Xue huiwen [15]利用 Cloud Satellite 和 MODIS 数据研究了气溶胶对东亚太平洋热带地区层积云微物理特征的影响。Ou *et al.* [16]使用 MODIS 气溶胶和云产品研究了东亚尘埃气溶胶的间接影响。结果表明,云粒子的有效半径与尘埃气溶胶的光学厚度呈负相关,与拖曳效应一致。Tang *et al.* [17]利用 MODIS 云滴有效半径和 AOD 数据,分析了华东地区气溶胶-暖云滴有效半径的关系。结果表明,当 AOD 小于 0.3 时,东海和南海的有效半径呈负相关。当 AOD > 0.3 时,中国东部和黄海的有效半径与云滴的有效半径正相关。此外,背景气象条件在气溶胶间接影响研究产生的一些影响也是很重要的一个方面。卫星观测也广泛用于沙尘暴监测和预测[18] [19]。胡秀清等[20]和高清贤等[21]开展了利用静止气象卫星(gms-5)监测沙尘暴的研究。陈永航[22]通过 CALIOP 观测资料,如分析于 2007 年 3 月 28 日~4 月 2 日,研究了影响来自中国东西部省、市、自治区的远程传播过程,强尘污染后系数,衰落比例,光学性能参数的研究,如颜色比显示 CALIPSO 数据可以很好的反应尘埃气溶胶光学性质在远程传输过程中的垂直分布和季节变化。许成鹏等[23]利用 2006 年 6 月至 2012 年 5 月的 CALIOP 资料,分析了我国典型地区沙尘气溶胶的垂直分布和季节变化。Ren *et al.* [24]使用 TOMS 数据反演得到的遥感数据产品对华北 AOD 时空分布以及变化趋势进行了研究。

2. 方法

2.1. MODIS 气溶胶反演原理及方法

MODIS 1B 级 1KM 地球数据产品：包含 MODIS 波段 8 至 36 的校准地球观测值观测结果，空间分辨率为 1 千米。它还包含来自 MODIS 频段 1 到 7 的校准数据，每个频段聚合到 1 km 分辨率。从 MODIS 双面扫描镜的一侧扫描的地球视图部分扫描出沿轨道 10 个像素的区域，通过 1354 个像素(或帧)交叉轨道。在最低点，这些像素是 1 × 1 公里。每帧包括来自 36 个频带中的每一个的 10 个像素(沿着轨道)。两个 250 米波段的每个像素具有 16 个子帧(数字样本)，并且五个 500 米波段的每个像素具有 4 个子帧。此外，频段 13 和 14 输出高增益和低增益值。因此，每个帧由 830 个数字(DN)组成。每个值由带，检测器，子帧和镜像侧(BDSM)索引，并且每个值都是独立校准的。

2.1.1. 气溶胶光学厚度反演的基本原理

遥感检测领域之中越来越多的运用到了 AOD 反演技术通过反演获得 AOD 产品对于研究十分的方便，气溶胶对辐射的散射及吸收作用会减弱辐射强度甚至是改变辐射的基本性质。对气溶胶进行反演其实就是测量辐射的变化情况。将地球表面假设为伯朗面，卫星观测的反射率为：

$$\rho^* = \rho_a + \frac{\rho}{1 - \rho \cdot s} \cdot T(\theta_s) T(\theta_v) \quad (2.1)$$

在此公式之中 ρ_a 为大气中悬浮着的气溶胶在大气层中的大气分子的反射率，后面一项则用来表示气溶胶与大气和地表共同的反射率， ρ 为地表反射率， s 为大气球面反照率， $T(\theta_s)$ ， $T(\theta_v)$ 上下层大气透过率， θ_s 为太阳天顶角、 θ_v 为卫星天顶角进行气溶胶反演之前一定要首先确定气溶胶的类型以及地表反射率数据在反演过程之中必不可少，本研究当中提到的反演方法主要就是暗像元法又被称为浓密植被法，其原理是植被密集区域的影响之下，传感器接收地表反射率会受到一定的影响特别是在是在可见光蓝(0.459~0.479 μm)、红(0.620~0.670 μm)两个波段，Kaufinan 等[14]经过大量研究表示暗像元法的关键在于首先应该获得蓝波波段、红波波段长出的地表反射率以及在 2.2 微米出的短波红外的地表反射率的系数；当 NDVI > 0.2，红波与短波红外的系数为 0.550，其关系式为：

$$\rho_{470\text{nm}} = 0.32\rho_{2100\text{nm}} \quad (2.2)$$

蓝波与短波红外波长的系数为 0.320，其关系式如下

$$\rho_{660\text{nm}} = 0.55\rho_{2100\text{nm}} \quad (2.3)$$

地面红波段和蓝波段的反射率与短波红外的反射率的关系分别为

$$\rho_B = \frac{\rho_{2.1}}{4}$$

$$\rho_R = \frac{\rho_{2.1}}{2}$$

通过红蓝波段与短波红外反射率的关系可以推测出气溶胶类型。基于大陆气溶胶查表(LUTs)反演，以红波与蓝波通道系数的比值为基础，确定气溶胶类型是否为粉尘；non-sand 尘埃的类型、地理分布的方法被用来确定硫酸气溶胶类型，生物燃烧或其他混合类型，然后是 AOD 的红色和蓝色波段气溶胶模型修正达到陆地气溶胶光学厚度的反演。

通过红蓝波段与短波红外反射率的关系可以推测出气溶胶类型。基于大陆气溶胶查表(LUTs)反演，以红波与蓝波通道系数的比值为基础，确定气溶胶类型是否为粉尘；non-sand 尘埃的类型、地理分布的

方法被用来确定硫酸气溶胶类型,生物燃烧或其他混合类型,然后是 AOD 的红色和蓝色波段气溶胶模型修正达到陆地气溶胶光学厚度的反演。

2.1.2. 气溶胶光学厚度反演方法

本章反演使用到的方法为暗像元法也叫暗目标法。气溶胶的影响是气候模拟中最大的不确定性来源之一。气溶胶在空间上的时间不同,可能导致云微物理的变化,从而影响云的辐射特性和气候。将暗目标(DT)气溶胶检索算法应用于多光谱卫星传感器数据,并推导出气溶胶特性,包括陆地和海洋上的气溶胶光学厚度(AOD),以及海洋上的光谱 AOD 和气溶胶尺寸参数。DT 检索产品用于开发全球和区域气溶胶气候学,研究气溶胶与云的相互作用,以及空气质量评估和预报。

DT 算法已经应用于 MODIS 传感器的数据,从 1999 年的 Terra 卫星开始,然后是 2001 年的 Aqua。实际上有两个独立且不同的“暗目标”(DT)算法。第一个用于检索海洋上的气溶胶信息(可见和较长波长的黑暗),第二个用于植被/黑暗污染的土地。自 Terra 推出以来,这些算法不断完善和改进。更新的算法定期应用于原始数据以生成新的数据产品集合。

尽管最初开发用于 MODIS 传感器,但这些算法可应用于任何测量反射率的传感器,该传感器测量覆盖可见光(VIS),近红外(NIR)和短波红外(SWIR)的适当波段。目前,DT 检索算法正被移植到其他传感器上,包括 SUOMI-NPP 上的 VIIRS, AHI, EPIC 以及通常在 ER2 上飞行的机载传感器 eMAS,并将在不久的将来应用于 ABI (GOES-R-16)。

2.2. MODIS 气溶胶反演过程及结果

2.2.1. 反演过程

利用 MODIS L1B 数据反演气溶胶的流程如图 1。

1) MODIS 数据使用 MODISL1B 1KM (MOD021KM)数据。操作应严格按照说明书进行,需要注意的地方主要是数据分辨率为 1 KM,数据合成时反射率在上,发射率在下部。

2) 在对于乌鲁木齐市的气溶胶反演过程当中,主要就是使用 ENVI5.1 对 MOD02 数据进行辐射校正、几何校正、角度校正后将经过辐射校正和反射校正后的影像数据进行合成,将角度数据校正完合成之后还要经过 BAND MATH 工具处理,最后将经过云处理插件处理的影像数据、查找表和角度数据载入气溶胶反演工具当中,就可得到反演结果。

3) mod02 气溶胶数据反演过程当中使用到的反演算法是经典的暗像元法也被称为浓密植被法。

4) 气溶胶反演工具中需要的查询表是从网上找到的适用于处理冬季影像数据其主要原理就是通过 IDL 调用 6S 大气辐射传输模型。另外还用到了两个 ENVI 插件, modis Aerosol inversion 和 modis cloud。

2.2.2. 反演结果与分析

2016 年乌鲁木齐市空气质量问题还很严重,虽然不断的施行环境保护方面的措施,空气质量情况良好的时间占全年仅有百分之六十左右。全年大气污染主要由颗粒物引起。PM_{2.5} 是污染的主要原因。冬季空气质量污染最为严重,且优良率仅为 4.88%。这主要是因为与冬季其他季节相比,乌鲁木齐的气候及地理特征都不利于污染物的扩散。整个城市呈现出由北向南递增的格局。乌鲁木齐市山谷风盛行白天风速明显大于夜间,因此,水塔山可以阻断污染物向南方的传播和扩散。市中心很高,周围很低,除自然来源外主要是由于燃烧燃料和大气颗粒物污染物来自城市汽车尾气。

反演结果如图 2 所示。乌鲁木齐 AOD 在城市高于农村整体分布,高值区主要集中在乌鲁木齐市天山区,沙区,水磨沟区,头屯河,米东区的市中心位置,达坂城区,乌鲁木齐市郊区位置低 AOD 区域,从郊区到市中心 AOD 的增长加快。AOD 的高值区域是局部聚集现象,主要集中在天山区和沙依巴克区的市区。大气悬浮的各种污染物不易扩散,在此地区 AOD 的不断积累促进了城市 AOD 的增长。

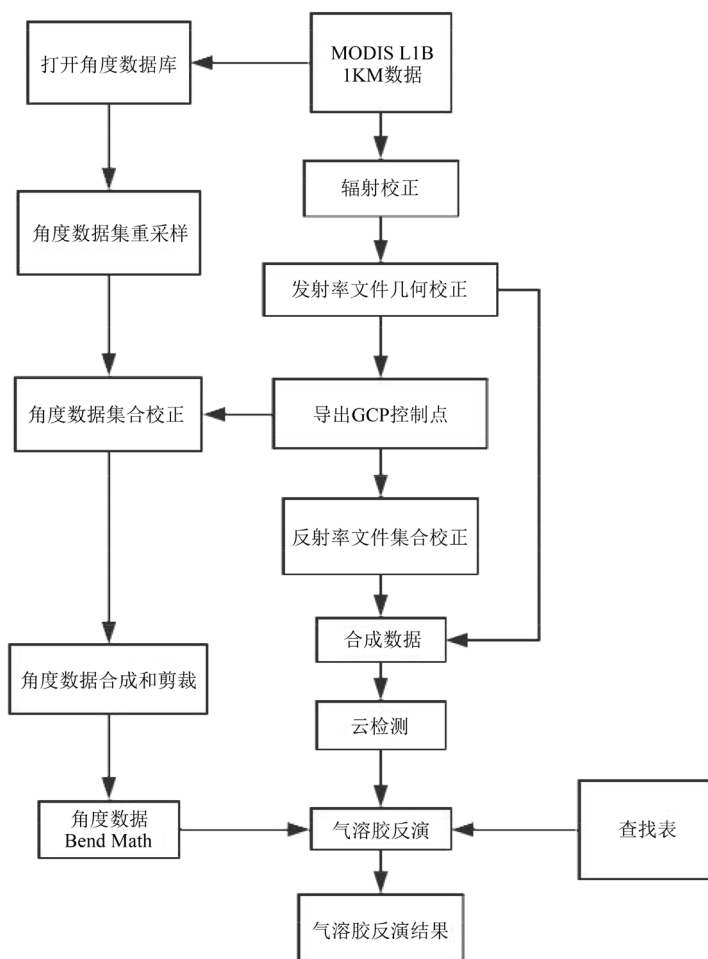


Figure 1. Inversion flow chart
图 1. 反演流程图

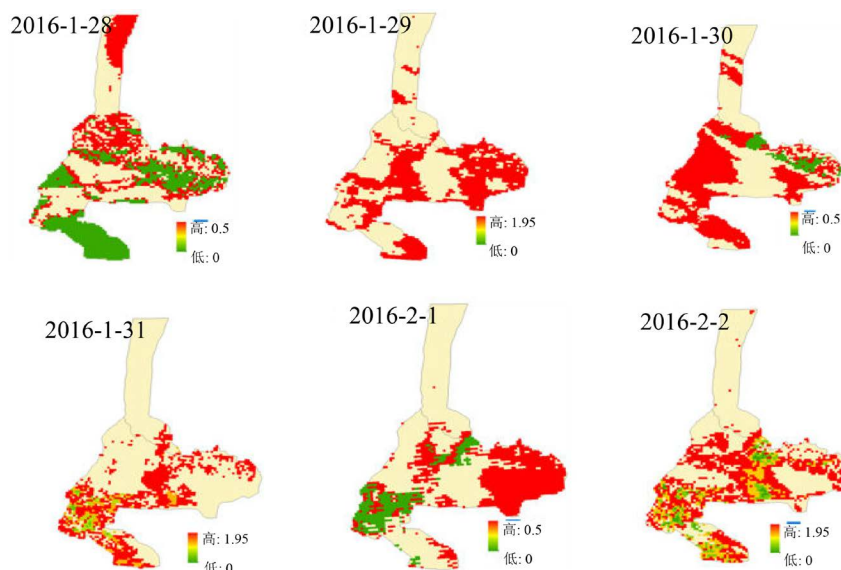


Figure 2. Inversion result
图 2. 反演结果

3. 乌鲁木齐市灰霾天气过程中的 AOD 时空动态分析

乌鲁木齐地处中部天山北麓，准噶尔盆地南缘。乌鲁木齐是新疆维吾尔自治区首府，是自治区的经济、政治、科技、金融、文化中心和交通枢纽。乌鲁木齐三面环山。乌鲁木齐北部与准噶尔盆地相连，准噶尔盆地大致是向北开放的敞开状。乌鲁木齐市地形地貌复杂，山谷气候复杂，经常受到东南风的袭击。乌鲁木齐特殊的地形和气象条件不利于大气污染物的扩散。此外，乌鲁木齐作为工业城市，已基本形成以煤炭、钢铁、陶瓷、化工、建材为主导的产业经济体系，能源结构以燃煤为主，环境压力较大。

3.1. 污染过程分析

据历史气象资料统计可知，2016年1月23日至2016年2月9日乌鲁木齐市出现了一次严重污染过程如图3所示，重污染过程期间AQI指数均超过200，1月的28、29及2月的8、9号，出现五次AQI指数超过300为严重污染。

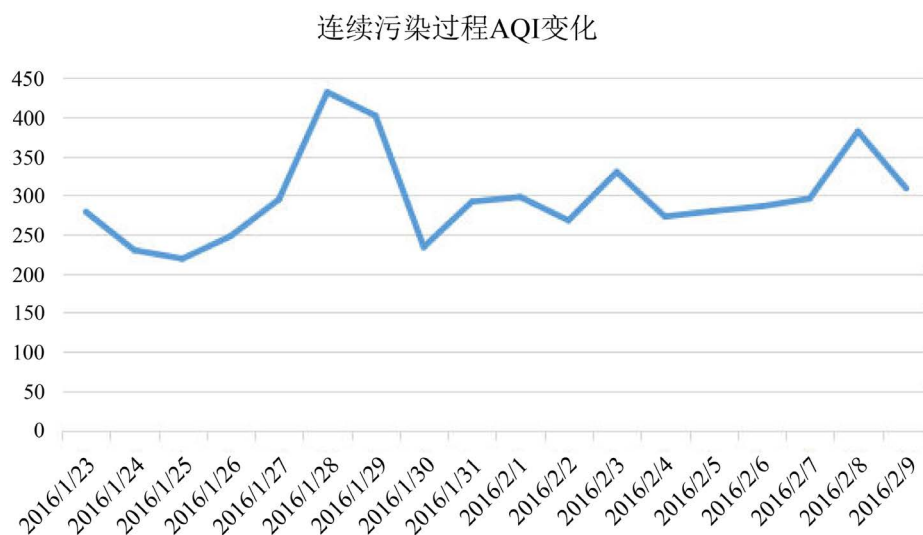


Figure 3. AQI changes

图 3. AQI 变化

由表1可以知道在这次严重的天气污染过程AQI值与6种大气污染颗粒物的相关系数，分别为0.960 (PM₁₀)，0.999 (PM_{2.5})、-0.194 (SO₂)、0.096 (NO₂)、0.246 (CO)和0.057 (O₃)，其值从大到小排列为PM_{2.5} > PM₁₀ > NO₂ > CO > O₃ > SO₂。在此次污染过程中，PM_{2.5}与PM₁₀和AQI的相关性很高，尤其是AQI与PM_{2.5}相关系数达到0.9，由此表可看出在乌鲁木齐的这次天气过程当中空气中的可吸入颗粒物PM_{2.5}和PM₁₀是主要的污染物。

Table 1. Correlation coefficient with AQI

表 1. 与 AQI 的相关系数

	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃ _8 h
相关系数	0.9	0.96	-0.19	0.69	0.25	0.06

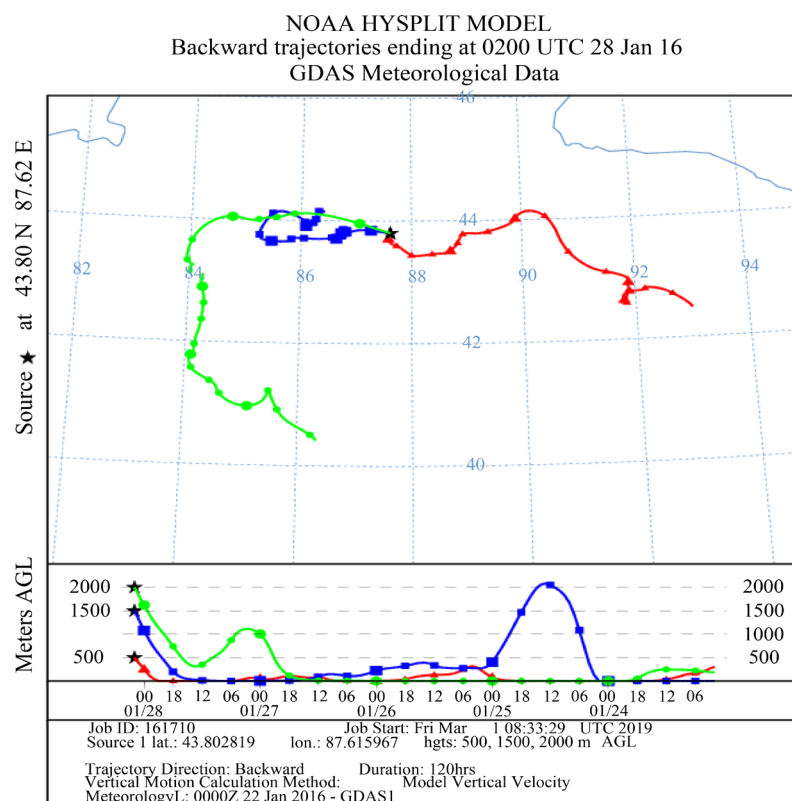
由表2可以看出，在本次污染过程中，AQI，PM₁₀，PM_{2.5}，O₃和气温显著相关，相关系数从大到小排列为r(O₃) > r(AQI) > r (PM_{2.5}) > r (PM₁₀)。NO₂和风速负相关，风速较大有利于NO₂的扩散。

Table 2. Correlation analysis**表 2.** 相关性分析

相关系数	平均气温	平均风速	平均相对湿度	降水量
AQI	0.609	0.110	-0.276	0.151
PM10	0.521	0.139	-0.357	0.182
PM2.5	0.601	0.099	-0.278	0.151
SO ₂	0.156	0.207	0.060	0.100
NO ₂	-0.339	-0.611	-0.124	-0.435
CO	0.075	-0.384	-0.453	-0.563
O ₃	0.778	0.465	-0.276	-0.021

3.2. 灰霾天气过程中气流轨迹分析

Hysplit-4 模型是 NOAA 空气资源实验室和澳大利亚在过去 20 当中年联合开发的专业模型，主要是通过大气运动情况来预测出大气污染物的扩散情况。该模型具有较为完整的运动、扩散和沉积模型，能够处理多个气象输入场、多个物理过程和不同类型的污染物排放源。Hysplit-4 气流轨迹分析模型分为前向和后向两种分析方式可以用来前推或者后推出气流轨迹的变化情况。在线地址为 http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php。使用到的数据集是 NCEP GDAS 把全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 数据插值到正形投影的地图上需要注意的是使用的时间为 UTC 时间，该数据每月都会更新，2005 年起每七天数据为一组。

**Figure 4.** Backward airflow trajectory analysis**图 4.** 后向气流轨迹分析

选择 2016 年 1 月 28 日上午 10 点对应 UTC 为 2 点, 地点设置为新疆维吾尔自治区省会乌鲁木齐, 向后回推 120 h 的模拟轨迹图。在图中分别有红绿蓝三条轨迹线路, 其中红线为 500 米高度轨迹, 蓝线为 1500 米高度轨迹, 绿线为 2000 米高度轨迹。结果如图 4 所示, 乌鲁木齐地区近地面风场受地形影响严重, 在乌鲁木齐附近可能发生山谷风, 地面高度 1500 m 以上, 地形对气象影响很微弱; 由后向气流轨迹模型可知, 乌鲁木齐主要受三种气流控制, 即吐鲁番盆地的东南气流、来自准噶尔盆地的西北气流以及从天山西南附近的气流影响, 大气污染物会在乌鲁木齐滞留。这一现象的主要原因是白天, 天山斜率接收太阳辐射、空气温度升高, 热空气在山坡上上升, 沿着山坡寒冷的空气上升到山顶, 从顶部流向准噶尔盆地和吐鲁番盆地。该盆地抑制了盆地内强上升气流的形成, 而乌鲁木齐南部吐鲁番盆地和西北部准噶尔盆地则以弱上升或弱下沉气流为主, 天山、乌鲁木齐山谷和盆地均是如此。它们之间形成热循环, 直接导致上层难以进入, 不利于大气污染物的扩散。

据气象资料显示, 1 月 24 日至 28 日夜间, 天空云层较多, 乌鲁木齐附近最高风速仅为 1.3 m/s, 风力很弱影响大气污染物的扩散。

4. 结论

2016 年乌鲁木齐市一次严重灰霾天气情况过程表明, 乌鲁木齐市 AOD 整体分布趋势为市区高于郊区, 乌鲁木齐市经济的发展以及大量重工业产生的污染对该市 AOD 增长起促进作用, 另外其地形特征会阻碍大气污染物的扩散容易使得污染物产生堆积的情况出现。与其他季节相比, 在冬季乌鲁木齐大气中会出现逆温层, 逆温层较厚且维持时间较长也会阻碍大气中污染物的扩散。整个城市呈现南北递增的态势。主要原因是乌鲁木齐市城区河谷风盛行, 白天河谷风速明显高于夜间的山风, 因此水塔山在一定程度上可以阻断污染物向南方的传播和扩散。

参考文献

- [1] 章宜洁. 安庆市地表水污染特征分析及防治对策[J]. 安庆师范学院学报(自然科学版), 2012, 18(1): 87-90.
- [2] Iii, D.J.E., Oglesby, R.J. and Marshall, S. (1995) Climate Response to Indirect Anthropogenic Sulfate Forcing. *Geophysical Research Letters*, **22**, 2017-2020. <https://doi.org/10.1029/95GL01660>
- [3] IPCC (2007) Climate Change 2007: The Physical Scientific Basic. Fourth Assessment Report, Cambridge University Press, New York.
- [4] Rasool, S.L. and Schneider, S.H. (1971) Atmospheric Carbon Dioxide and Aerosols: Effects of Large Increases on Global Climate. *Science*, **173**, 138-141. <https://doi.org/10.1126/science.173.3992.138>
- [5] Twohy, C.H., Durkee, P.A. and Huebert, B.J. (1995) Effects of Aerosol Particles on the Microphysics of Coastal Stratiform Clouds. *Journal of Climate*, **8**, 773-783. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1995\)008<0773:EOAPOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1995)008<0773:EOAPOT>2.0.CO;2)
- [6] Toon, O.B. (2001) How Pollution Suppresses Rain. *World Environment*, **287**, 1763-1765 <https://doi.org/10.1126/science.287.5459.1763>
- [7] 朱恩云, 马俊. 中国大气气溶胶研究现状[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(12): 57-59.
- [8] 郎凤玲, 闰伟奇, 张泉, 等. 北京大气颗粒物数浓度粒径分布特征及与气象条件的相关性[J]. 中国环境科学, 2013, 33(7): 1153-1159.
- [9] Ramanathan, V., Crutzen, P.J., Mitra, A.P., et al. (2002) The Indian Ocean Experiment and the Asian Brown Cloud. *Current Science*, **83**, 947-955.
- [10] 吴兑. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论[J]. 气象, 2005, 31(4): 3-7.
- [11] Justice, C.O., Vermote, E., Townshend, J.R.G., et al. (1998) The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land Remote Sensing for Global Change Research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **36**, 1228-1249. <https://doi.org/10.1109/36.701075>
- [12] Quaas, J., Ming, Y., Menon, S., et al. (2009) Aerosol Indirect Effects-General Circulation Model Intercomparison and Evaluation with Satellite Data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **9**, 8697-8717.
- [13] Huang, J.P., Minnis, P., Lin, B., et al. (2006) Possible Influences of Asian Dust Aerosols on Cloud Properties and Ra-

diative Forcing Observed from MODIS and CERES. *Geophysical Research Letters*, **33**, L06824
<https://doi.org/10.1029/2005GL024724>

- [14] Costantino, L. and Breon, F.M. (2010) Analysis of Aerosol-Cloud Interaction from Multi-Sensor Satellite Observations. *Geophysical Research Letters*, **37**, L11801. <https://doi.org/10.1029/2009GL041828>
- [15] 马月, 薛惠文. 利用 CloudSat 和 MODIS 数据研究气溶胶对层积云的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012, 48(2): 239-245.
- [16] Ou, S.C., Liou, K.N., Hsu, N.C., *et al.* (2012) Satellite Remote Sensing of Dust Aerosol Indirect Effects on Cloud Formation over Eastern Asia. *International Journal of Remote Sensing*, **33**, 7257-7272
<https://doi.org/10.1080/01431161.2012.700135>
- [17] Tang, J.P., Wang, P.C., Mickley, L.J., *et al.* (2014) Positive Relationship between Liquid Cloud Droplet Effective Radius and Aerosol Optical Depth over Eastern China from Satellite Data. *Atmospheric Environment*, **84**, 244-253.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.08.024>
- [18] 申莉莉, 盛立芳, 陈静静. 一次强沙尘暴过程中沙空气溶胶空间分布的初步分析[J]. 中国沙漠, 2010, 30(6): 1483-1490.
- [19] Huang, J., Liu, J., Chen, B., *et al.* (2015) Detection of Anthropogenic Dust Using CALIPSO Lidar Measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **15**, 11653-11665. <https://doi.org/10.5194/acp-15-11653-2015>
- [20] 胡秀清, 卢乃锰, 张鹏. 利用静止气象卫星红外通道遥感监测中国沙尘暴田[J]. 应用气象学报, 2007, 18(3): 266-275.
- [21] 高庆先, 任阵海, 张运刚, 等. 利用静止卫星资料跟踪沙尘天气的发生、发展及其传输[J]. 资源科学, 2004, 26(5): 24-29.
- [22] 陈勇航, 毛晓琴, 黄建平, 等. 一次强沙尘输送过程中气溶胶垂直分布特征研究[J]. 中国环境科学, 2009, 29(5): 449-454.
- [23] 徐成鹏, 葛勤铭, 黄建平, 等. 基于 CALIPSO 星载激光雷达的中国沙空气溶胶观测[J]. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1353-1362.
- [24] Ren, X.Y., Xie, Y. and Ren, G.Y. (2017) Spatiotemporal Characteristics of TOMS-Based Dust Aerosol Optical Depth in Northern China during 1978-2005. *Earth Science Informatics*, **10**, 41-53. <https://doi.org/10.1007/s12145-016-0277-z>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5485, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aep@hanspub.org