

内蒙古气溶胶光学厚度时空特征及其气象因子响应研究

苏日娜¹, 都瓦拉^{2*}, 玉山^{1,3}

¹内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

²中国农业科学院草原研究所, 内蒙古 呼和浩特

³内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2022年6月18日; 录用日期: 2022年7月15日; 发布日期: 2022年7月25日

摘要

随着大气环境的恶化, 愈来愈多的研究学者研究了很多关于气溶胶的研究。影响大气环境的因素雾霾其实上可以说是由各种原因所形成的气溶胶。气溶胶光学厚度(aerosol optical thickness, 简称AOT)或(aerosol optical depth, 简称AOD)表示的是电磁波在单位截面的垂直气柱上的透过率, 可以用气溶胶来表示空气中的混浊程度。AOD作为气候与环境变化的关键性因子, 它所能影响的气象要素有很多。本文利用MODIS气溶胶产品数据, 分析了2017年至2020年内蒙古地区气溶胶光学厚度时空分布特征, 再结合National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)气象数据, 进一步分析了气溶胶光学厚度对气象因子的响应, 从而得知以下结论: 1) 在空间分布上: 气溶胶光学厚度高值分布在兴安盟、通辽、赤峰东部区和阿拉善、鄂尔多斯等西部区, 内蒙古东西两端, 北纬47°以南, 其主要原因为此地区沙漠较多, 远离海洋, 湖泊干枯, 湿地消失, 植被退化, 周围群山环抱, 生物多样性减少, 常年干旱多降雨少; 低值分布在巴彦淖尔到锡林郭勒盟的中部区和高纬度呼伦贝尔地区, 其主要原因为这部分地区常年下雨的次数多, 草原多, 人类活动也比较其他城市少。植被覆盖度高, 生物多样性, 从而导致空气污染少。2) 在时间分布上: 气溶胶光学厚度高值主要分布在3、4、5、6月份, 其主要原因为沙尘暴季节、植被覆盖返青期从而导致污染程度高; 低值主要分布8、9、10月份, 其主要原因为植被生长期, 覆盖度高从而空气质量好。3) 对气象因子的响应上: 风速对气溶胶光学厚度的影响最高, 正相关, 即风速越大气溶胶光学厚度越高; 降水和气溶胶光学厚度, 表现弱相关, 即降水量越大气溶胶光学厚度越高; 相对湿度跟气溶胶表现为显著负相关, 空气湿度越高, 空气质量好, 从而气溶胶光学厚度的值就低。

关键词

气溶胶光学厚度(AOD), MODIS气溶胶数据, 时空分布, 降水, 风速, 相对湿度

*通讯作者。

Study on the Space-Time Characteristics of Aerosol Optical Thickness and Its Meteorological Factor Response in Inner Mongolia

Rina Su¹, Wala Du^{2*}, Shan Yu^{1,3}

¹College of Geographical Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

²Grassland Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot Inner Mongolia

³Key Laboratory of Remote Sensing and Geographic Information System of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot Inner Mongolia

Received: Jun. 18th, 2022; accepted: Jul. 15th, 2022; published: Jul. 25th, 2022

Abstract

With the deterioration of the atmospheric environment, more and more researchers have studied aerosols. Aerosol optical thickness (AOT) or aerosol optical depth (AOD) is the rate of penetration of electromagnetic waves on vertical columns of the unit cross-section, which can be used to indicate the degree of turbidity in the air. Using MODIS aerosol product data, this paper analyzes the space-time distribution characteristics of aerosol optical thickness in Inner Mongolia from 2017 to 2020, and then combines NOAA meteorological data to further analyze the response of aerosol optical thickness to meteorological factors, so as to learn the following conclusions: 1) In the spatial distribution: The high value of aerosol optical thickness is distributed in Xing'an League, Tongliao, Chifeng East and Alashan, Ordos and other western regions, Inner Mongolia east and west ends, north latitude 47 degrees south. The main reason is that the desert in this area is more far from the ocean, full of dry lakes, lost wetlands and degraded vegetation, surrounded by mountains, with reduced biodiversity, year-round drought and less rainfall; The low values is in the central region of Bayan-gar to Xilin Guolemen and the high-latitude Hulun Buir region. The main reason is that in this area, there is more rainfall and grassland, and human activities are less than other cities, and high vegetation cover and biodiversity lead to less air pollution. 2) In the time distribution: aerosol optical thickness is mainly distributed in March, April, May and June. The main reasons are sandstorm season, vegetation yellowing period leading to high pollution levels; The low values are mainly distributed in August, September and October, and the main reason is the vegetation growth period, high coverage and good air quality. 3) Response to meteorological factors: Wind speed has the highest effect on aerosol optical thickness, significantly positive correlation, that is, the higher the wind speed, the higher the aerosol optical thickness. There is a weak correlation between precipitation and aerosol optical thickness, that is, the greater the precipitation, the higher the aerosol optical thickness. There is a significant negative correlation between relative humidity and aerosol. The higher the air humidity is, the better the air quality is, so the value of aerosol optical thickness is lower.

Keywords

AOD, MODIS Aerosol Data, Space-Time Distribution, Precipitation, Wind Velocity, Relative Humidity

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

全球气候变化是目前世界各国政府及各国卫生院所关注的热门话题之一, 根据 2013 年联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的第五次评估报告指出, 由温室气体增加所导致的“温室效应”和由人为排放所导致的气溶胶的增加, 是全球和区域气候改变的两大重要因素[1]。气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)作为影响大气气候变化和环境问题的关键性因子, 能够反映区域大气的污染程度。AOD 也能反映气溶胶的消光特性以及含量, 是气溶胶的特性与大气校正中特别关键的参数之一[2]。大气分子分布在整层大气中。大气气溶胶分布易受到气象条件的影响, 气象条件也会进一步影响气溶胶的扩散、沉降, 从而影响气溶胶浓度。不同气象条件对气溶胶浓度的影响也有着明显差别。因此, 气象因子和气溶胶浓度的关系引起学者的关注。目前在全球上气溶胶有着大面积覆盖的特性, AOD 的常用监测有两种: 一是 AOD 地面监测, 二是 AOD 遥感监测。用地面监测的数据较为精准, 一般是用来验证卫星产品的精度, 而用遥感监测的数据则是宏观的, 对地球的关键参量测量能够大范围的覆盖。总的来说, 用 AOD 监测的话会省时省力, 也能点对点精确地获取所需要的数据。准确获取 AOD 的信息对气候、降水、温度、环境、遥感探测等方面的研究有重要的意义。由于气溶胶在时间和空间上高度的可变性, 气溶胶时空分布特征的研究在准确评估气溶胶的气候效应方面变得十分重要。因此, 利用 MODIS 数据开展对气溶胶光学特性及时空分布特征的研究也是十分必要的。

随着 Terra 和 Aqua 卫星的发射, MODIS 传感器的传输, 更多的卫星遥感使国内外学者也投入了更多的研究[3]。美国国家海洋和大气管理局利用可见光通道(AVHRR, 0.63 μm)研究了海洋上空气溶胶光学厚度特征[4]。Kaufman 等(1998 年)发展了暗像元研究方法, 为之后的相关研究工作做了很好的铺垫作用[4]。Vountas Marco 等(2020 年), 研究了基于多光谱和多视角星载测量反演气溶胶光学厚度和地表参数[5]。Zhang Yumeng 等(2021 年)研究了基于蓝/红相关的中国 GF-1 数据反演北京上空的地面气溶胶[6]。国内用卫星遥感来探测 AOD 的时空分布特征的学者有很多。岳辉等(2020 年)用 MODIS 气溶胶数据研究了中国的气溶胶光学厚度时空变化[7]。林泓锦等(2018 年)也研究了内蒙古区域 AOD 的时空分布特征[8]。姚玲玲(2017 年)研究了中国以及典型地区 AOD 的时空分布特征及影响因素[9]。曾昭亮(2017 年)研究了基于 CALIOP 和 MODIS 数据的气溶胶时空分布特征对比分析[10]。

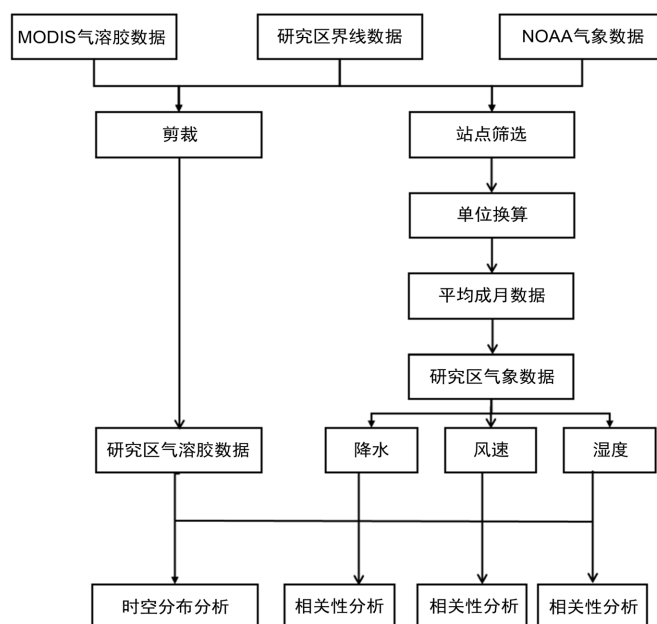


Figure 1. Technology roadmap

图 1. 技术路线图

以内蒙古为研究区对象,对 MODIS 气溶胶数据进行裁剪等处理,得到四年的气溶胶时空分布图,并对图进行了分析。对 NOAA 气象数据的降水、风速和相对湿度进行站点筛选、单位换算、平均以及与气溶胶数据进行了相关性分析。如图 1 所示。

2. 数据来源与研究方法

2.1. 研究区概况

内蒙古的地理位置是北纬: $37^{\circ}24' \sim 53^{\circ}23'$, 东经: $97^{\circ}12' \sim 126^{\circ}04'$ 方向。内蒙古地区的面积是 118.3 万平方公里, 占全国总面积的 12.3%。内蒙古有十二个地级行政区, 这里面有九个地级市, 三个盟。二十三个市辖区, 四十九个旗。人口约有 2540 万。内蒙古自治区的地形复杂高, 地势也比较高, 海拔高度达到一千米, 类型是高原地貌, 东西跨度大, 内蒙古地区草原多, 距离海洋比较远。冬季与夏季的温差高, 大风天气比较多; 冬季秋季温度下降寒冷, 冰霜雪来得早。但是内蒙古的日照和光充足。图 2 为内蒙古自治区概况图。

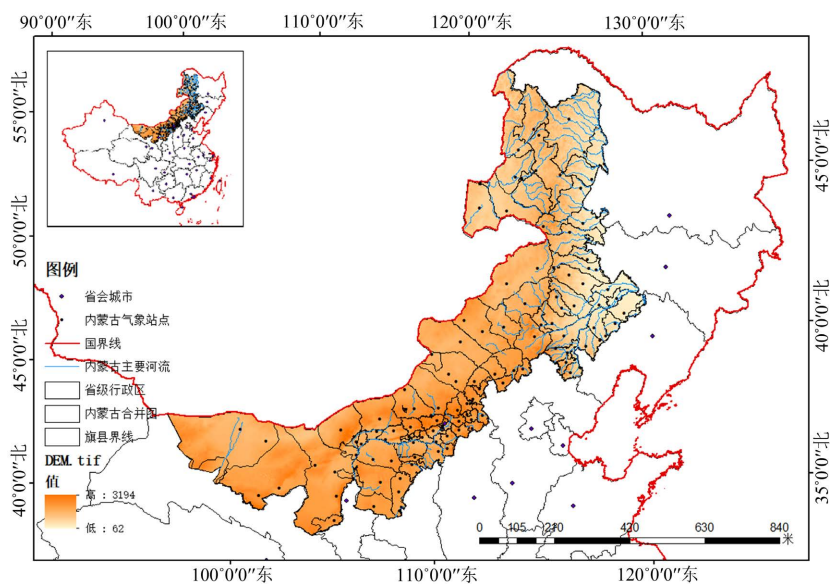


Figure 2. Overview map of Inner Mongolia Autonomous Region

图 2. 内蒙古自治区概况图

2.2. 数据来源

本文使用的是 MODIS 气溶胶数据和气象数据。MODIS 气溶胶数据: MYD08_M3 数据产品, 使用的是 6.1 的版本, 空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。数据集为: Aqua Aerosol Cloud Water Vapor Ozone Monthly L3 Global 1Deg CMG。下载的网站是: https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order/1/MYD08_M3--61, 数据采用的波段是第 98 波段: AOD_550nm_Dark_Target_Deep_Blue_Combined_Mean_Mean。时间序列: 从 2017 年 1 月~2020 年 12 月。这个下载的 MODIS 气溶胶数据是月尺度的数据, 一个月有一个, 五年的共下载了 48 个 HDF 数据。下载的影像是中国地图。然后将中国地图在 ArcMap 里面进行裁剪。

中国气象数据: 获取的网站是: NOAA 气象数据下载:

<http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=clim&cfg=cdo&theme=hourly&layers=1&node=gis>, 除了这个网站还可以从中国气象数据网 <http://data.cma.cn/> 里面下载所需要的数据。我下载的气象因子数据分别是 2017~2020 年的降水数据, 风速数据和湿度数据。然后将下载的日降水, 日风速, 湿度数据在 Excel 里面

进行换算, 降水数据的单位换算成mm, 风速数据的单位换算成 m/s, 从而将日数据按月平均值, 年平均值算出来。

2.3. 研究方法

通过对全部数据进行批量裁剪, 投影, 栅格计算等一系列的处理, 获得近 4 年的内蒙古总体分布状况、各月份、各年份不同时间尺度的 AOD 均值分布。

1) 趋势分析: 用趋势分析来模拟每个栅格的变化趋势, 通过不同时间单个像元的空间变化特征, 综合表征一定时间序列区域格局演变规律。这个方法对数据误差具有较强的抵抗能力, 能客观地反映长时间序列 AOD 的演化趋势, 计算公式如下:

$$S_{\text{AOD}} = \text{Median} \left(\frac{\text{AOD}_a - \text{AOD}_b}{a - b} \right) \quad (2.3.1)$$

公式中, S_{AOD} 是一元线性拟合方程的斜率; AOD_a 是第 a 年的 AOD 值; AOD_b 是第 b 年的 AOD。 $S_{\text{AOD}} > 0$ 时, 表明 AOD 变化呈现增加趋势, 反之, 就表明 AOD 呈减少趋势。

2) 标准偏差分析: 采用标准偏差分析法来计算 2017~2020 年每个栅格 AOD 的标准偏差。用标准偏差来评估 AOD 在时间序列上的稳定性, 计算公式如下:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{AOD}_i - \overline{\text{AOD}})^2}{n-1}} \quad (2.3.2)$$

公式中, SD 为标准偏差; AOD_i 是第 i 年的 AOD 值; $\overline{\text{AOD}}$ 是 n 年的 AOD 均值; n 为时段的长度。 SD 值越小, 表明数据分布越集中, 从而有较好的稳定性。反之, 就表明数据分布分散, 稳定性程度较差。

3. 内蒙古气溶胶光学厚度时空分布特征及其与气象因子响应研究

3.1. 内蒙古地区气溶胶时空分布特征分析

3.1.1. 内蒙古气溶胶光学厚度空间分布特征研究

为了分析气溶胶光学厚度空间分布, 我分别分析了 2017~2020 年各个年份的变化分布图以及四年总平均空间分布图。得到的结果如下:

图 3 为 2017~2020 年内蒙 AOD 年平均值空间分布图。图中呈现了 AOD 值从往年到近年不停地减少的状态。中西部变化大, 东西两端变化小。中西部地区主要包括巴彦诺尔、呼包鄂核心区域以及乌海。这一部分地区 AOD 值呈现明显下降的趋势。AOD 变少的原因: 该地区里面包括内蒙古的首府呼和浩特市。AOD 值的下降体现出了内蒙古政府及环保部门对环境保护意识的提高以及对环境保护治理取得了好的效果。近年来主要的保护措施有: 呼和浩特市明确规定了禁止燃放东西, 在当地何人何地何人都禁止燃放烟花或者爆竹。此外, 对于禁止燃放的地方进行全天时严谨的监管。对于违反规定的人进行处罚, 对严重者进行拘留等保护措施。

AOD 低值区主要是集中在内蒙古的北部及中部地区, 而且这两个地区的 AOD 值近年的变化差异也不明显。其中北部地区(呼伦贝尔)的 AOD 值常年保持在低值, 从而年际变化不显著。导致低值的原因可能是北部地区(呼伦贝尔)常年下雨的次数多, 草原极多, 还有就是这里的人类活动也比较其他城市少。另一个变化不显著的内蒙古中部地区(锡林郭勒盟)大部分为草原, 植被覆盖度高, 生物多样性, 从而导致空气污染少, AOD 值低。

图 4 为 2017~2020 年内蒙的多年平均气溶胶光学厚度分布图。从图中可以看出内蒙古 AOD 全年月平均值在 0.06~0.3 之间。AOD 高值主要分布在内蒙古的两个部分: 分别是西部地区以及东北部地区。

内蒙古的西部地区主要指阿拉善盟，此地区的 AOD 值分布在 0.2~0.28。AOD 值高的原因是此地区沙漠较多，远离海洋，湖泊干枯，湿地消失，植被退化，周围群山环抱，生物多样性减少，常年干旱多降雨少，四季的气候特征比较明显。阿拉善主要以沙漠为主。所以地表面干旱裸露，当春季或秋季刮风时空气中携带沙粒物，沙漠化严重，常年发生沙尘暴，从而导致空气污染，大气环境质量下降，AOD 值高。

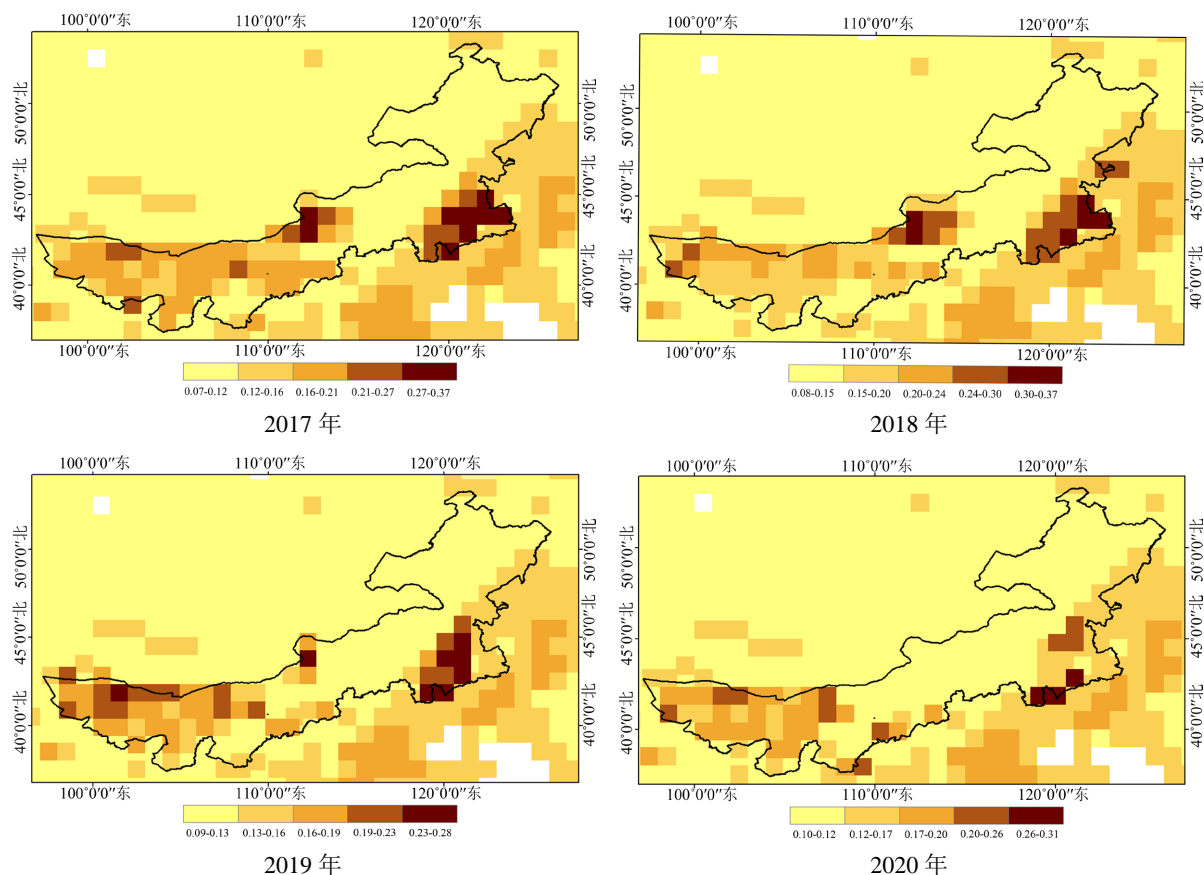


Figure 3. Spatial map of the annual average of AOD in Inner Mongolia 2017~2020
图 3. 2017~2020 年内蒙古 AOD 年平均值空间分布图

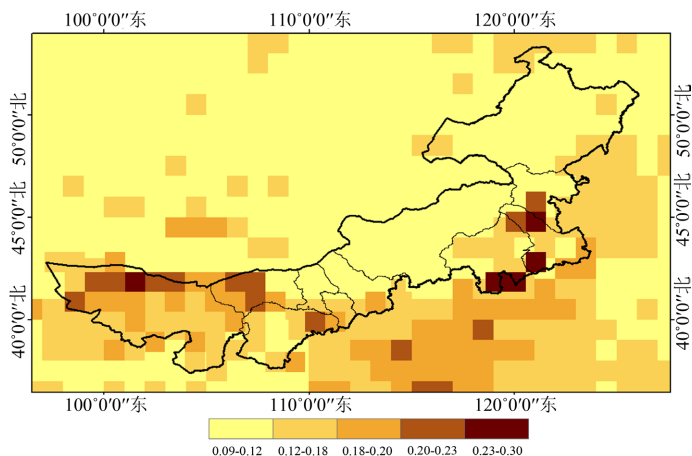


Figure 4. 2017~2020 Inner Mongolia multi-year average Inner Mongolia AOD spatial distribution map
图 4. 2017~2020 年内蒙古多年平均内蒙古 AOD 空间分布图

还有一个 AOD 高值在东北地区分布, 东北部地区主要指兴安盟, 通辽, 赤峰。此地区的 AOD 值高的原因是首先东北地区与我国的东三省相邻, 重工业工厂遍布在东三省周围, 很多大型的矿石工厂排放大量的污染物。其次, 东北部地区(通辽一带)冬季严寒, 因为冷而需要烧掉大量的煤炭, 从而导致空气污染严重, AOD 值高。而且该地区的 AOD 高值与东北三省 AOD 分布有较好的连续性。这与张宸赫(2017 年)的研究结果是一致的。然而 AOD 低值低值分布在巴彦淖尔到锡林郭勒盟的中部区和高纬度呼伦贝尔地区, 其主要原因为可能北部地区(呼伦贝尔)常年下雨的次数多, 草原多, 还有就是这里的人类活动也比较其他城市少。另一个变化不显著的内蒙古中部地区(锡林郭勒盟)大部分为草原, 植被覆盖度高, 生物多样性, 从而导致空气污染少。

3.1.2. 内蒙古气溶胶光学厚度时间分布特征

为了分析气溶胶光学厚度时间分布, 逐月平均了 4 年的像元数据。得到的结果如下图 5 所示:

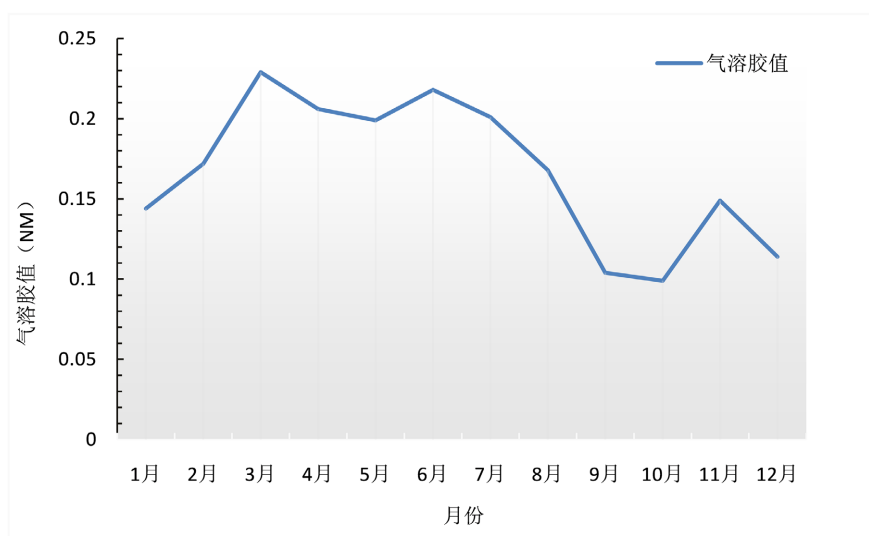


Figure 5. Month-to-month change in the average AOD value in Inner Mongolia 2017~2020
图 5. 2017~2020 年内蒙古平均 AOD 值逐月变化图

图 5 为 2017~2020 年内蒙古平均 AOD 值逐月变化图。从图中可以看出, 内蒙古近四年时间序列的分布特征与上面所看到的空间分布特征大致相应的。年均各月份的值在 0.1~0.25 之间。气溶胶光学厚度高值主要分布在 3、4、5、6 月份, 其主要原因为沙尘暴季节、植被返青期从而导致污染程度高; 低值主要分布 8、9、10 月份, 其主要原因为植被生长期, 覆盖度高从而空气质量好。

3.2. 内蒙古气溶胶光学厚度对气象因子的响应研究

由于内蒙古地区的 AOD 值常年在平缓状态, 所以 AOD 与气象因子的相关性与时空分布相吻合。这里的 r 值代表的是相关系数; p 值所代表的是显著性检验。大部分地区的两个要素的相关与否用显著性来检验[11]。当 $p < 0.05$ 是显著; 当 $p < 0.01$ 时极显著。根据以下取值范围来判断降水量和风速两个因素与 AOD 的相关程度。

1) 降水量与 AOD 的相关系数值 $r = 0.174$, $p = 0.587$ 代表降水量与 AOD 之间的相关关系是弱相关。这说明降水量对于 AOD 的作用不是很明显, 可能是因为随着 AOD 的增加云滴有效粒子半径会降低, 这样会导致降水量少或者会推迟降水。AOD 不是直接的影响降水, 而是间接的影响降水。从而导致 AOD 与降水成弱相关。如图 6 所示:

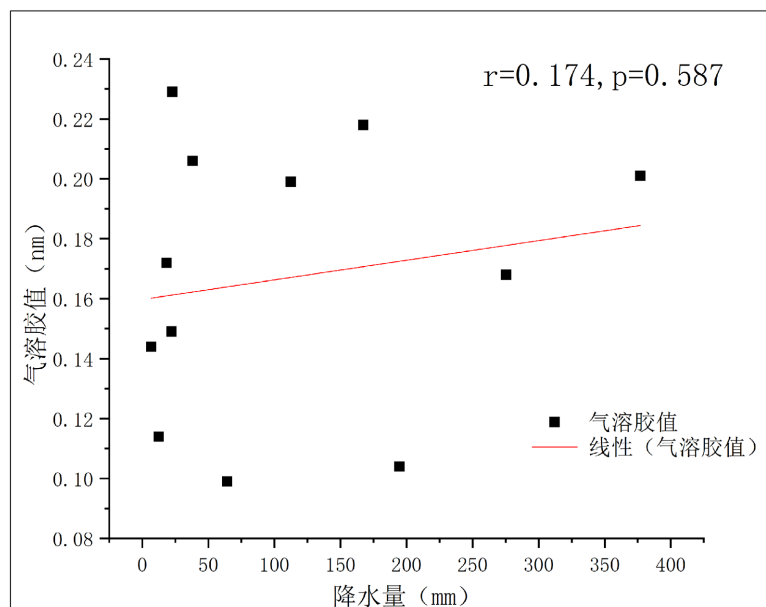


Figure 6. Correlation between AOD values and precipitation in Inner Mongolia 2017~2020
图 6. 2017~2020 年内蒙古 AOD 值与降水的相关关系

2) 从图中可以看出风速与 AOD 的相关关系是正相关。风的指数越高，空气质量不好，从而气溶胶的指数越高。这说明风速能直接影响 AOD 的程度。在乡村地区风多的话空气中的沙粒子会影响空气的污染。如图 7 所示：

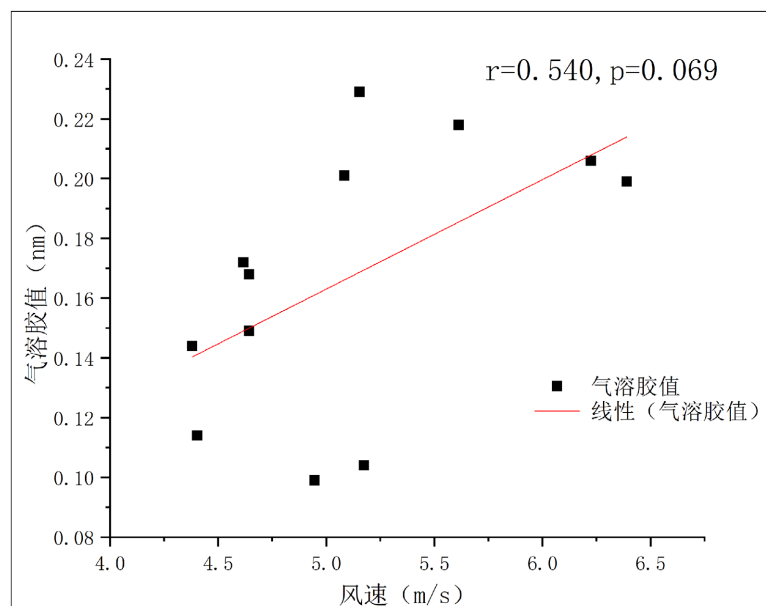


Figure 7. Correlation between AOD values and wind speed in Inner Mongolia 2017~2020
图 7. 2017~2020 年内蒙古 AOD 值与风速的相关关系

3) 相对湿度与 AOD 的相关系数 $r = -0.59, p = 0.04$ 代表相对湿度与 AOD 的相关关系是显著负相关。可以看出 AOD 值会随着相对湿度增高而减少。这说明 AOD 值能直接影响相对湿度。空气湿度越高，空气质量好，从而气溶胶光学厚度的值就低。如图 8 所示：

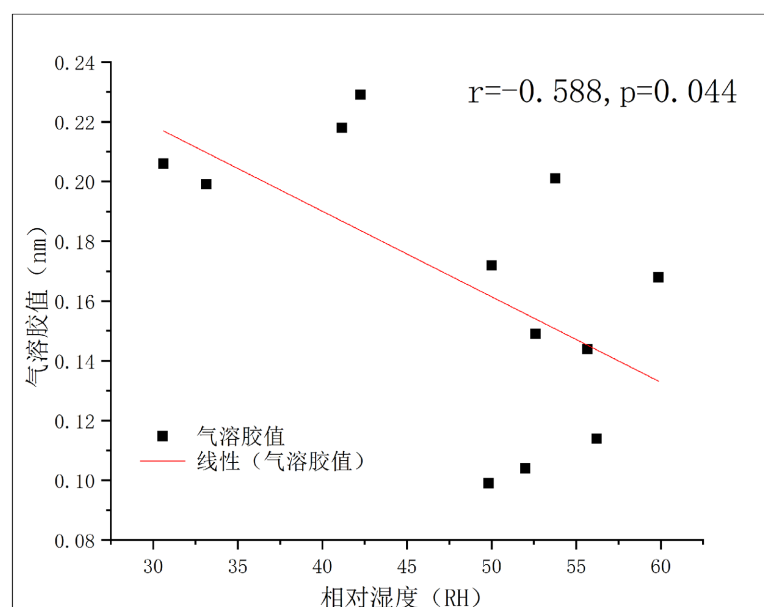


Figure 8. Correlation between AOD values and relative humidity in Inner Mongolia 2017~2020
图 8. 2017~2020 年内蒙古 AOD 值与相对湿度的相关关系

4. 结论

本文利用了 MODIS 气溶胶数据以及气象因子(降水量、风速和相对湿度), 以内蒙古自治区为研究对象, 研究分析了 2017~2020 年内蒙古地区的气溶胶空间分布特征和时间分布特征以及 AOD 与降水, 风速和相对湿度等气象因子之间的相关性。经过研究分析之后得出的结论如下:

1) 在空间分布上: 气溶胶光学厚度高值分布在兴安盟、通辽、赤峰东部区和阿拉善、鄂尔多斯等西部区, 内蒙古东西两端, 北纬 47°以南, 其主要原因为此地区沙漠较多, 远离海洋, 湖泊干枯, 湿地消失, 植被退化, 周围群山环抱, 生物多样性减少, 常年干旱多降雨少; 低值分布在巴彦淖尔到锡林郭勒盟的中部区和高纬度呼伦贝尔地区, 其主要原因为这部分地区常年下雨的次数多, 草原多, 人类活动也比较其他城市少。植被覆盖度高, 生物多样性, 从而导致空气污染少。

2) 在时间分布上: 气溶胶光学厚度高值主要分布在 3、4、5、6 月份, 其主要原因为沙尘暴季节、植被返青期从而导致污染程度高; 低值主要分布 8、9、10 月份, 其主要原因为植被生长期, 覆盖度高从而空气质量好。

3) 对气象因子的响应上: 风速对气溶胶光学厚度的影响最高, 正相关, 即风速越大气溶胶光学厚度越高; 降水 and 气溶胶光学厚度, 表现弱相关, 即降水量越大气溶胶光学厚度越高; 相对湿度跟气溶胶表现为显著负相关, 空气湿度越高, 空气质量好, 从而气溶胶光学厚度的值就低。

基金项目

内蒙古科技计划项目(2022YFSH0027); 内蒙古专项项目(2020ZD0028); 内蒙古自然科学基金项目(2017MS0409)。

参考文献

- [1] 茆佳佳. 华东地区气溶胶特性的 MODIS 资料反演及其时空分布特征的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.

-
- [2] 余璐. 基于 Himawari-8/AHI 数据的气溶胶光学厚度反演和沙尘监测研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2018.
- [3] 张军强, 薛闯, 高志良, 颜昌翔. 云与气溶胶光学遥感仪器发展现状及趋势[J]. 中国光学, 2015, 8(5): 679-698. <https://doi.org/10.3788/co.20150805.0679>
- [4] 彭艳. 关中盆地气溶胶变化特征及其与气象因子关系[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院地球环境研究所), 2017.
- [5] Vountas, M., Belinska, K., Rozanov, V.V., Lelli, L., Mei, L.L, Jafariserajehlou, S. and Burrows, J.P. (2020) Retrieval of Aerosol Optical Thickness and Surface Parameters based on Multi-Spectral and Multi-Viewing Space-Borne Measurements. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **256**, Article ID: 107311. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.107311>
- [6] Zhang, Y.M., Chen, H. and Wang, Z.T. (2021) Terrestrial Aerosol Retrieval over Beijing from Chinese GF-1 Data based on the Blue/Red Correlation. *Remote Sensing Letters*, **12**, 216-225. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2020.1856959>
- [7] 岳辉, 刘英, 张元敏. 基于 MODIS 数据的中国地区气溶胶光学厚度时空变化特征[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(1): 89-93.
- [8] 林泓锦, 都瓦拉, 玉山, 苏玥. 基于 MODIS 的内蒙古气溶胶时空分布特征分析[J]. 环境科学学报, 2018, 38(12): 4573-4581.
- [9] 姚玲玲. 中国及典型地区气溶胶光学厚度的时空分布特征及影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [10] 曾昭亮, 郭建平, 马大喜, 刘洪利, 吴文正, 桂柯, 娄梦筠. 基于 CALIOP 和 MODIS 数据的气溶胶时空分布特征对比分析[J]. 大气与环境光学学报, 2017, 12(3): 210-220.
- [11] 李晓静, 刘玉洁, 邱红, 张玉香. 利用 MODIS 资料反演北京及其周边地区气溶胶光学厚度的方法研究[J]. 气象学报, 2003(5): 580-591+644.