

中文摘要

内蒙古作为我国北方生态屏障，常年受沙尘天气影响，尤其是内蒙古西部地区，受蒙古气旋影响，还会发生沙尘暴。为了减轻沙尘暴事件的负面影响，了解典型沙尘暴的时空变化及其影响因素是至关重要的。首先，利用颗粒物的地面测量数据和遥感数据（如 MODIS 和 CALIPSO 数据等）进行空间统计分析，研究了 2021 年 3 月发生在中国内蒙古的一次典型沙尘暴事件的气溶胶污染源和气溶胶光学特性，还利用 HYSPLIT 模型研究了沙尘暴过程中的气团运动轨迹，并对运动轨迹进行了聚类分析，分析了沙尘暴发生前沙尘的运移过程，并以此判断此次沙尘暴的沙尘源。其次，研究区的自然地理环境是发生沙尘天气的重要原因之一，所以，在研究了典型沙尘事件的基础上，分析内蒙古受沙尘天气影响的内在原因。沙尘天气的发生与该地区的土壤风蚀特性密切相关，故通过风场强度、土壤干旱指数、植被覆盖度和地形起伏幅度的单因子分析和多因子叠加分析，分析了内蒙古的土壤风蚀敏感性。最后，确定了研究区综合风蚀敏感性较高的区域，并根据敏感性等级进行分区，给出符合研究区实际情况的指导建议。

结果表明，第一，沙尘暴期间 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度都远远超过国家空气质量标准，且 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比值不超过 0.6，表明环境空气中天然颗粒物占主导地位。随后经过计算得到 2021 年 3 月 15 日研究区沙尘事件中心 550nm 处的气溶胶光学厚度（AOD）值在 0.75-1 之间，并能够从高气溶胶值的空间位置看出其迁移过程；另外，由于风速和风向与气溶胶光学厚度有相关关系，结合 AOD 资料和野外观测站的风速风向资料，对风速风向以及 AOD 变化进行了拟合，得到了较好的拟合效果，且风向与 AOD 值的迁移过程一致，2021 年研究区沙尘暴主要发生在内蒙古中西部地区，通辽、赤峰部分地区受沙尘天气影响。硬颗粒物在大气中具有垂直分布特征，根据 CALIPSO 在 532 nm 处的总衰减后向散射系数，发现该地区对流层气溶胶的主要成分分布在 0-12 km 的范围内，污染物颗粒的运移一般发生在 3 km 以上的高度处，所以据此可以得出内蒙古沙尘暴发生前后存在远距离输送。由 HYSPLIT 模型模拟的沙尘暴发生前 48 小时的后向轨迹以及对 24 小时的后向轨迹聚类分析，推断此次沙尘暴的沙尘源在蒙古南部的戈壁沙漠地带和中国西北地区的塔克拉玛干沙漠，受蒙古气旋及西风影响，污染物颗粒向南、向西迁移，影响我国内蒙古及其周边大部分地区。第二，通过对研究区土壤风蚀敏感性的调查，发现内蒙古西部风场强度大、植被覆盖度低，地势起伏度小，土地干旱严重，是典型的生态脆弱区，而西北部边界和阿拉善盟的荒漠区是主要的生态敏感区，极易受恶劣天气影响成为沙尘源，进而影响周边地区。这些结论可为减轻沙尘暴灾害、加强生态治理提供参考和建议。

关键词：典型沙尘事件；遥感卫星；时空特征；风蚀敏感性

ABSTRACT

As an ecological barrier in the north of China, Inner Mongolia is affected by sand and dust weather all year round, especially in the western part of Inner Mongolia, affected by the Mongolian cyclone, sandstorms will occur. In order to mitigate the negative effects of dust storm events, it is critical to understand the spatio-temporal variations of typical dust storms and the factors that influence them. Firstly, the ground measurement data and remote sensing data (such as MODIS and CALIPSO data, etc.) of particulate matter are used for spatial statistical analysis, we studied the aerosol pollution source and aerosol optical characteristics of a typical sandstorm event in Inner Mongolia, China in March 2021, and also used the HYSPLIT model to study the air mass movement trajectory during the sandstorm, And cluster analysis of the motion trajectory is carried out. The migration process of dust before sandstorm is analyzed, and the dust source of this sandstorm is determined. Secondly, the natural geographical environment of the study area is one of the important reasons for the influence of dust weather. Therefore, based on the study of typical dust events, the internal reasons for the influence of dust weather in Inner Mongolia are analyzed. The occurrence of dust weather is closely related to the characteristics of soil wind erosion in this region. Therefore, the sensitivity of soil wind erosion

in Inner Mongolia was analyzed by single factor analysis and multiple factor superposition analysis of wind field intensity, soil drought index, vegetation coverage and topographic relief amplitude. Finally, the regions with high comprehensive wind erosion sensitivity in the study area are determined, and the regions are divided according to the sensitivity level, and the policy recommendations in line with the actual situation of the study area are given.

The results show that, first, the concentration of $PM_{2.5}$ and PM_{10} during the sandstorm far exceeds the national air quality standard, and the ratio of $PM_{2.5}/PM_{10}$ does not exceed 0.6, indicating that natural particles dominate the ambient air. The aerosol optical thickness (AOD) at 550nm of the dust event center in the study area on March 15, 2021 is between 0.75-1, and the migration process can be seen from the high aerosol value space location. In addition, due to the correlation between wind speed and wind direction and aerosol optical thickness, combined with AOD data and wind speed and direction data from field observation stations, the wind speed and direction and AOD changes were fitted, and a good fitting effect was obtained, and the migration process of wind direction and AOD value was consistent. In 2021, sandstorms in the study area mainly occurred in the central and western regions of Inner Mongolia. Some areas of Tongliao and Chifeng were affected by the dust weather. Hard particulate matter has vertical distribution characteristics in the

atmosphere. According to the total attenuation backscattering coefficient of CALIPSO at 532 nm, it is found that the main components of tropospheric aerosol in this region are distributed in the range of 0-12 km, and the migration of pollutant particles generally occurs at a height of more than 3km. Therefore, it can be concluded that there is long-distance transportation before and after the occurrence of sandstorms in Inner Mongolia. The backward track of 48 hours before the occurrence of sandstorm simulated by HYSPLIT model and the cluster analysis of the backward track of 24 hours, it is inferred that the dust source of the sandstorm was in the Gobi Desert in southern Mongolia and the Taklimakan Desert in northwest China. Affected by the Mongolian cyclone and the west wind, the pollutant particles migrated south and west, affecting Inner Mongolia and most of the surrounding areas in China. Second, through the investigation of soil wind erosion sensitivity in the study area, it is found that the western Inner Mongolia is a typical ecologically fragile area with high wind intensity, low vegetation coverage, low relief degree and severe land drought, while the northwestern border and the desert area of Alxa League are the main ecologically sensitive areas, which are easily affected by bad weather and become dust sources, thus affecting the surrounding areas. These conclusions can provide reference and suggestions for reducing sandstorm disaster and strengthening ecological governance.

Key words: Sandstorm Event; Remote Sensing; Spatio-Temporal Characteristics;
Sensitivity of Wind Erosion

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 文献综述	2
1.2.1 沙尘暴研究进展	2
1.2.2 基于卫星数据的沙尘暴研究进展	4
1.2.3 土壤风蚀研究进展	5
1.2.4 文献述评	6
1.3 研究意义	6
1.4 研究内容	7
1.5 技术路线图	9
1.6 创新点	9
第二章 研究区概况	11
2.1 自然地理	11
2.2 气候特征	12
2.3 社会经济与生态问题	13
第三章 内蒙古典型沙尘事件的时空特征分析	15
3.1 数据来源及数据预处理	15
3.1.1 大气颗粒物地面数据	15
3.1.2 气溶胶遥感数据	15
3.1.3 风速风向数据	16
3.1.4 CALIPSO Level 1 数据以及后向轨迹数据	17
3.2 典型沙尘天气过程中的气溶胶污染	18
3.2.1 典型沙尘事件期间 PM _{2.5} 与 PM ₁₀ 变化特征	18
3.2.2 典型沙尘事件期间的气溶胶污染特征	19
3.3 区域 AOD 评价	20
3.3.1 气溶胶光学厚度	20

3.3.2 研究区气溶胶光学厚度 (AOD) 空间分布.....	22
3.3.3 风速风向与 AOD 的空间相关性分析.....	23
3.4 沙尘事件期间的沙尘轨迹.....	24
3.4.1 垂直方向的沙尘分析.....	24
3.4.2 HYSPLIT 模型.....	26
3.4.3 沙尘后向轨迹分析.....	26
3.4.4 沙尘后向轨迹聚类分析.....	28
3.4.5 影响沙尘迁移的因素特征.....	29
3.5 小结.....	31
第四章 内蒙古土壤风蚀敏感性分析	32
4.1 数据来源及数据处理.....	32
4.1.1 气温、降水、风速数据.....	32
4.1.2 植被数据.....	32
4.1.3 DEM 数据.....	33
4.1.4 风蚀敏感性评价标准.....	33
4.2 单因子土壤风蚀敏感性.....	34
4.2.1 风场强度敏感性.....	34
4.2.2 土壤干旱敏感性.....	35
4.2.3 植被因子敏感性.....	37
4.2.4 地势起伏敏感性.....	39
4.3 多因子叠加土壤风蚀敏感性.....	40
4.3.1 敏感因子权重的确定.....	40
4.3.2 一致性检验.....	41
4.3.3 综合敏感性分析.....	42
4.4 分区方案及保护措施.....	44
4.4.1 分区方案.....	44
4.4.2 保护措施.....	44
4.5 小结.....	45
第五章 结论与展望	46

5.1 结论.....	46
5.2 不足之处及展望.....	47
参考文献.....	49
作者简介及攻读硕士学位期间获得成果	53
致谢.....	54

第一章 绪论

1.1 研究背景

沙尘暴一般是指沙暴天气和尘暴天气的总称,两者同时发生时天气较为恶劣。根据现行国家标准^[1],按照水平能见度进行分类,扬沙天气能见度在 1~10km,浮尘天气的能见度一般小于 10 km,通常水平能见度低于 1 km 的恶劣天气现象就被称为沙尘暴。沙尘暴事件多发生在干旱、半干旱、荒漠化地区,特定的地理环境和天气背景促使此类灾害性天气的频繁发生。

当强风吹过并将未稳定的土壤颗粒从干燥的表面分离时,硬物质颗粒在空气中聚集并传输就会引发沙尘事件,在中国内蒙古很常见^[2-5]。这些沙尘天气事件不仅会对气候和人类健康产生负面影响,还会对环境和社会经济产生不利影响^[6-8],已经成为制约人类持续健康发展的重要因素,对沙尘暴的深入研究并进行沙漠化防治以及预防沙尘暴变得尤为重要。沙尘天气对生态环境影响非常大,其中包含的矿物质气溶胶会影响土壤养分含量,还能利用海洋的“生物泵”作用降低 CO₂ 浓度从而影响全球气候变化^[9-11];此外,风吹尘是一个重要的贡献者病原体和污染物的运输载体,这可能会影响空气质量,降低能见度和改变空气污染物的性质^[12];沙尘暴中的尘埃和沙土会侵蚀土壤,导致土地荒漠化和植被被严重破坏,会进一步加剧干旱和水资源短缺问题,严重威胁生态环境。另一方面,当沙尘天气发生时,空气含有的颗粒物以及携带的有害物质,可能会对眼睛造成不同程度的伤害;这种灰尘也可以通过增加空气中的可吸入灰尘引起呼吸道疾病,过敏和皮肤病^[13];沙尘暴中的颗粒物进入消化道,会对黏膜产生刺激,在不知不觉中可能引起胃炎、胃溃疡等肠胃疾病。不仅如此,沙尘天气对经济发展的影响也非常巨大,风将沙尘、颗粒物从地面卷起,使空气浑浊,水平能见度降低,严重影响人们的视觉,因沙尘天气能见度降低导致的交通事故屡见不鲜;再者,沙尘天气污染水源、风沙影响土壤质量、严重时还会破坏基础设施^[11],这就会消耗大量的人力、物力以及财力,影响人们的生产生活,阻碍经济快速向前发展,带来不可估量的双重损失。内蒙古西北地区作为中亚沙尘暴地区的一部分,特别是阿拉善地区,气候干燥风沙频繁,特别容易发生沙尘暴,是东亚地区沙尘气溶胶的主要来源地^[14,15]。丰富的沙尘源、干燥的天气、大风和不稳定的热力条件是沙尘事件发生的先决条件^[16]。在这样的事件中,沙漠风可以将沙尘暴源的颗粒

输送到距其源区数千公里的地方^[2,17,18]。此外，沙尘事件的强度在强风下进一步增强，并在其输送过程中造成更严重的土壤风蚀^[19]。土壤风蚀是具有稳定沙源的干旱荒漠区沙尘暴发生的主要原因，与土壤性质密切相关。

内蒙古作为我国北方生态屏障，拥有丰富的矿产资源，对我国的生态与经济持续健康发展发挥着重要作用。但内蒙古在春秋季节沙尘天气频发，虽然较历史同期有所减缓，但形式依然严峻。2023年6月7日中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平在内蒙古自治区巴彦淖尔市考察，主持召开加强荒漠化综合防治和推进“三北”等重点生态工程建设座谈会并发表重要讲话^[20]，发出“努力创造新时代中国防沙治沙新奇迹”的时代号召，旨在从根源上解决土地荒漠化问题，沙漠化问题解决好，那么沙尘天气也就会得到遏制。因此，研究沙尘暴的运动轨迹对改善脆弱地区的植被状况、减轻沙尘灾害具有重要意义，通过查阅相关文献及历史新闻报道发现，2021年3月14日至15日晨，受冷空气影响，内蒙古及山西北部、河北北部、北京、天津等地出现扬沙或浮尘，部分地区出现沙尘暴。这是近10年中国遭遇强度最大的一次沙尘天气过程，沙尘暴范围也是近10年最广^[21]。故选择此次沙尘天气事件为典型沙尘事件，研究此次沙尘事件的时空演变过程，并通过对内蒙古风蚀敏感性的探究，综合分析内蒙古沙尘天气特点与成因。

1.2 文献综述

1.2.1 沙尘暴研究进展

国外从20世纪20年代就开始了沙尘暴特征、时空分布、成因、结构及预防措施的研究。国外学者Sutton（1875）对“Habood”型沙尘暴的气流变化进行了研究^[22]，对未来的沙尘暴研究产生了深远影响。发展到80年代，Hee-Jin In（2002）根据典型黄沙沙尘事件，开发出了一种用于分析沙尘暴产生、传播及沉降的气溶胶模型，用以研究沙尘的传输过程^[23]；而Brazel（1986）则为亚利桑那州总结出了沙尘暴发生前的四种天气形式，为沙尘暴灾害预防提供了依据^[24]；Goudie（1992）指出全球典型沙尘暴多发区沙尘暴频数变化趋势没有固定模式^[25]。近年来随着空气中硬颗粒污染物对于生态环境、人类的生产生活以及社会经济发展的影响日益加剧，激发了研究者们以新的角度和新的方式研究沙尘暴问题。Suwaidi（2010）等人运用热成像技术监控阿联酋的沙尘暴现象，因为它能够监测颗粒物之间的粒度差异，从而确定沙尘的时空分布^[26]；诸多学者也从近地面数据入手，例如风

速、降水、气温等构建指数模型，GH McTainsh（2010）等人运用气象数据确定澳大利亚东部的两个主要风蚀区域，取得了不错的研究进展；数值模拟也是研究沙尘微观运动的有效手段，Ashrafi（2015）等人通过数值模拟的方法得到颗粒物悬浮值的大小与土壤的风蚀通量密切相关^[27]；卫星技术的发展，对沙尘暴进行监测逐渐普及化，Huang（2015）等人运用卫星数据研究出识别气溶胶的新方法，丰富了沙尘暴监测的理论基础^[28]；机器学习、深度学习算法的发展，促进了计算机技术在沙尘暴预测领域的应用，Gholami（2020）采用 8 种机器学习算法对伊朗西南部库泽斯坦省的沙尘暴源区进行了预测^[29]，具有很高的预测精度。

我国对于沙尘天气的研究起始于 20 世纪 70 年代，但发展迅速。1977 年 4 月 22 日在甘肃省河西地区发生了一次特强沙尘暴，徐国昌（1979）等人对此次沙尘暴事件进行了分析，首次提出了黑风的概念，并构建了黑风演变的正反馈模型，对黑风的预防工作起了重要作用^[30]。而赵兴梁（1993）则根据 1993 年 5 月 5 日发生的一次特强沙尘暴进行了成因分析，并提出要加快建设绿洲防护体系的建议^[31]。本世纪初，我国沙尘天气频发，激发了有关沙尘暴研究的热潮，沙尘天气的时空演变、遥感监测、数值模拟、风蚀特性以及成因等研究相继展开。成秀萍（2009）等对西北地区的一次强沙尘暴天气进行了研究，指出沙尘暴前期的持续增温为沙尘暴的发生提供了有力的热力条件，高空急流对沙尘暴起着重要作用，同时特殊的地形地貌也有利于沙尘暴的发生^[32]；任余龙（2009）等人则从数值模拟的角度，利用 NCEP(1°×1°)资料和 GRAPESSDM 沙尘暴模式对中国北方一次强沙尘暴进行了数值模拟，指出高原高压脊对低压槽的阻滞作用是沙尘暴能够持续较长时间的原因^[33]；海全胜（2009）基于热辐射理论，以内蒙古为例，构建了一个能够稳定判断沙尘暴强度的沙尘指数模型（DSI），并经过多次验证，该指数能够较精确的监测沙尘暴的强度和范围^[34]；康玲（2009）运用地面气象资料，研究了内蒙古 1995-2007 年 13 年的沙尘暴分布特征，确定了不同范围、不同强度的沙尘暴标准，给出了特强、强、次强弱的沙尘暴个例谱^[35]。近年来，在全球气候变暖的大背景下，沙尘暴的频次虽然较以往有所减弱，但是沙尘暴的成因确发生了变化^[3]。邢彬（2022）利用等熵位涡分析法对内蒙古西部一次强沙尘暴特征进行分析，指出强沙尘暴发生区域之间存在明显的数值关系和位置关系^[36]；吴进（2022）通过对 2021 年和 2022 年中国北方沙尘天气气象因素及沙源地条件进行了对比分析，得出蒙古沙源地条件的差异是两个时期差异的主要原因^[37]。

1.2.2 基于卫星数据的沙尘暴研究进展

沙尘是对流层气溶胶负荷的主要来源，是气候气溶胶强迫研究的重要参数，因此必须对沙尘事件进行监测^[38-40]。然而，传统的监测方法在时间和空间上的覆盖范围有限，不适合研究沙尘暴的远距离传输。卫星数据与传统的地面数据不同，一是卫星数据具有广阔的监测范围，对于沙尘暴这种跨越大范围并且迅速变化的现象尤为重要；二是卫星数据可以进行高频率的监测，从而可以监测沙尘暴的动态特性；三是卫星数据具有多波段（可见光、红外、微波）的观测能力，可以从多角度分析沙尘暴；四是卫星数据可以进行实时的数据获取，有助于对沙尘暴的预警；五是卫星数据具有高历史可用性，提供了宝贵的历史记录，便于科学家进行沙尘天气的趋势研究。Baddock（2021）等人指出遥感是识别和监测沙尘暴的有效方法^[41-43]；而郑新江等人则详细介绍了基于卫星数据进行沙尘暴监测的原理和方法^[44]。Fanatic、Filonchyk（2017）等人分别基于来自 MODIS、CALIPSO 和其他卫星的沙尘气溶胶数据，已经进行了大量关于大空间尺度沙尘传输的研究^[45,46]。下面将从 MODIS、CALIPSO 和 HYSPLIT 模型三方面分别进行介绍。

MODIS 具有 36 个波段，波段范围广，可以同时提供反映陆地表面状况、云边界、气溶胶等特征信息。Li（2016）等人提出了三种基于 MODIS 数据的沙尘事件监测方法，利用不同传感器通道和沙尘事件光谱的特征^[47]。Liu（2019）等在沙尘暴识别模型（SVI）的基础上，结合 MODIS 数据和气象观测站的观测数据，对地面条件进行了监测和分析^[48]。Sun（2017）等基于 MODIS 的 MOD 09 A1 产品开发了一种动态阈值沙尘暴监测方法^[45]。然而，通过卫星获得的气溶胶光学厚度数据由于所采用的数据处理算法的限制，精度低，时间序列短^[41]。邱昀（2018）等人基于 Himawari8 卫星数据，利用污染物颗粒、云以及地面物质对在不同波段的亮温值不同，实现了对我国北方沙尘天气的动态监测^[49]。本文同样选用了 MODIS MCD19A2 数据产品对典型沙尘暴事件进行时空演变分析。

CALIPSO 卫星携带的主要仪器是激光雷达（LIDAR），LIDAR 观测可以准确反映沙尘垂直分布的详细信息，如高度、密度等；然而，这样的沙尘站分布稀疏^[50]。Hunt（2009）等人就对 LIDAR 激光雷达的设计与性能进行了描述，指出该卫星在激光能量、信噪比、整体长期稳定性等关键领域表现优异^[51]。Huang（2008）等人利用 CALIPSO 卫星对亚洲沙尘远程传输的垂直结构进行了分析，指出夹带的尘埃气溶胶可能通过对流层上层西风急流进行远距离输送，并在中国东部和西太平洋上空 8 至 10 公里处还发现了一个非常明显的去极化层^[52]。贾惠婷

(2022)首次利用 CALIPSO 数据对气溶胶粒子的光学特性进行分析,最终实现能见度的反演与预测。本文利用该卫星数据获取观测气溶胶的垂直分布。

HYSPLIT 模型能够计算单个或多个粒子在特定时间和位置的大气轨迹,从而确定污染源和受影响区域,是国内外学者研究区域性大气污染传输路径的常用方法。周沙(2017)等人利用该模型对 2013-2015 年上海市霾污染事件的源区进行了分析,并得出污染源来自北方路径和西北方路径的结论^[53];吴芷瑜(2023)等人基于 HYSPLIT 模式的西北干旱区典型沙尘事件沙源地及沙尘传输路径探析,推断出西北地区污染物颗粒可能来源于南疆盆地,这为西北地区抑制沙尘暴,实现生态的可持续发展提供了重要的理论依据^[54]。利用 HYSPLIT 模式,结合 MODIS、和 CALIPSO 等资料,利用颗粒物的地面观测资料,对内蒙古沙尘暴的气溶胶输送路径和沙尘源进行了研究。

1.2.3 土壤风蚀研究进展

沙尘暴这个恶劣天气现象的发生与该地区的自然地理环境的关系十分密切,植被覆盖度、风的强弱、气温、降水以及特殊的地形地貌为沙尘暴的传播扩散提供了有利条件^[55]。土壤风蚀是指风吹动地表的土壤,携带土壤到空气中,对空气行程污染,是风与地表土壤相互作用的结果^[56];Zou(2015)等人分析了现有风蚀模型的优缺点,从动力学的角度将土壤的风蚀因子分为三类,还提出了土壤风蚀标准图的概念,并根据风对土壤的剪切力,提出了土壤风蚀的动力学概念模型^[57]。土壤风蚀是干旱、半干旱地区的典型特征,会造成这些地区的水土流失,土地荒漠化、使当地环境恶化,极易发生沙尘天气,影响生态平衡和社会经济的持续向前发展^[58],因此土壤风蚀越来越受到国际社会的广泛关注。近年来,有关土壤风蚀的研究逐渐深入,学者们从土壤的风蚀动力学、风蚀影响因子、风蚀预报与评估模型以及风蚀防治等多个角度分别进行了深入研究。周炎广(2023)对浑善达克沙地风蚀形态变化及其动力学机制进行了研究^[59];吴冰(2018)等人对蒙古高原的风蚀颗粒进行了数值模拟和预报^[60];苑森朋则对毛乌素沙地的光伏项目的施工地风蚀防治的植物措施配置与效益进行了分析^[61]。陈家欢(2021)等人从植被角度研究不同种植制度对土壤风蚀的影响^[62]。李斌鹏(2022)等根据不同的水分条件对内蒙古草原的风蚀影响进行了研究^[63];风速的类型及风速的分辨率对土壤风蚀数值模拟的结果有不同程度的影响^[64,65]。高睿瑜(2021)对豫东北黄泛区耕地易蚀性土壤与风蚀特征研究,为防治耕地风蚀、改善生态环境提供了科学

依据^[66]；毛旭芮（2020）根据结皮面积和结皮分布对土壤的风蚀影响进行了分析^[67]。张婷婷（2017）选取了风场强度、植被覆盖度、地势起伏度以及土壤干燥度四种风蚀影响因素对准格尔盘底土壤风蚀进行了等级划分，并提出分区保护与建设措施，为该地区的经济发展和生态保护提供了科学参考^[68]。本文根据卫星和实地观测数据，并结合植被覆盖度、气温、降水、地形地貌以及风场强度等影响因素综合分析研究区的风蚀敏感性以识别风蚀敏感性高的区域。研究结果可为类似地区生态脆弱区减轻沙尘暴危害提供科学参考。

1.2.4 文献述评

为研究内蒙古典型沙尘暴的时空特征以及该地区的土壤的风蚀敏感性，查阅相关文献并对文献进行了整理。首先，对沙尘暴的国内外研究现状进行了整理，了解到国外对沙尘暴的研究起步比国内早，国内最早研究沙尘暴是在上世纪 70 年代，但进展飞速，我国沙漠化防治取得了不错的成绩，沙尘暴频率明显减少，但沙尘暴的发生成因也有所改变，科学技术发生了翻天覆地的变化，学者们纷纷以新的技术手段研究沙尘暴的成因、时空演变以及对沙尘暴的监测预测。其次，由于本文研究利用了卫星数据，故此介绍了运用卫星数据进行研究的文献，了解到了卫星数据的优点及使用场景，同时介绍了获取沙尘后向轨迹的 HYSPLIT 模型的相关研究。最后，整理了沙尘天气频发区风蚀敏感性的相关研究，为风蚀敏感因子的选择提供了理论基础。理清有关沙尘暴研究进展，在此基础上，本文弥补了地面数据覆盖面小的缺点，从多角度和深度对所研究地区的沙尘暴特征进行分析，为沙尘暴的研究献策献力。

1.3 研究意义

一、沙尘暴是地球系统中地表、大气、生物圈和水圈相互作用的产物，是生态环境中的一环，研究沙尘暴的时空演变、成因、作用机制等对沙尘暴的监测、预测以及预防具有重要作用。而卫星数据提供了大范围的有关沙尘暴如何在大气中形成、发展和消散的重要信息，有助于深化对大气运动、风速模式、气压系统等大气系统动力学的理解。

二、卫星数据具有大范围监测的能力，可以实现多波段的高频监测，并且还可以进行实时的数据和历史的数据获取。本文结合多种卫星数据产品，将卫星遥感、星载激光雷达等与地面气象站的数据相结合的手段，实现对沙尘暴时空演变及影响因素的研究，实现了沙尘暴特征的多方面整合。这对沙尘源区建立完整的

监测体系，实现对沙尘事件的形成、发展、传播的实时监测和预警，有助于我们及时做好沙尘天气灾害的预防工作。利用卫星数据研究沙尘暴的时空特征对于深化我们对地球大气系统、气候变化和环境影响的理论理解具有重要意义。

三、以往的研究发现，沙尘暴的产生和发展受到当地气候因素的影响，如温度、降水、风、湿度和土地覆盖变化。因此，分析区域性沙尘暴源区土壤风蚀敏感性，对于判断区域性沙尘暴发生的可能性和发展程度，识别生态敏感区，预测区域性沙尘暴的发生和移动具有重要意义。

1.4 研究内容

沙尘暴的发生具有季节特点，尤其在春季和秋季表现得更为明显，对沙尘暴事件进行研究，一般从两个方面考虑，其一是沙尘暴事件影响范围要广，其二是影响强度大。本文研究的研究内容主要分为两个部分，第一部分是根据有关研究内蒙古沙尘暴论文^[69]和网页文献^[21]选取了 2021 年 3 月 14 日、15 日一次典型沙尘暴事件研究它的时空特征和演变过程并推断沙尘源；第二部分主要根据影响沙尘暴发生的各种影响因素，研究内蒙古的土壤风蚀敏感性，以便更加清晰的了解内蒙古的地形地貌以及气候特点，给出内蒙古综合各种因素的土壤风蚀敏感性；最后，结合典型沙尘暴的特征和该地区的土壤风蚀特征，从而给出更加合理化的建议，为内蒙古的沙尘天气灾害的治理预防提供理论依据。下面分别介绍各章的主要内容：

第一章：绪论

本章主要从研究背景、研究意义、文献综述、创新点等四方面进行介绍。通过查阅相关文献和历史资料，介绍了沙尘暴发生时的特点、危害以及国家对沙尘暴治理的高度关注；整理参考文献，理清国内外关于沙尘暴研究的进展，为进一步研究沙尘暴打好理论基础；最后根据研究内容整理出技术路线图，理清了文章脉络。

第二章：研究区概况

内蒙古作为中国北方的生态屏障，无论从资源、能源、经济可持续发展还是国内环境的屏障作用，都具有举足轻重的作用。结合第一章整理的内容，既要有扎实的理论基础，又要与实际情况进行结合。本章则从内蒙古的自然地理环境、气候条件和经济与生态问题三个角度介绍，目的是了解该地区的地形地貌、气候和经济条件，侧面反映内蒙古生态保护的重要性。

第三章：内蒙古典型沙尘暴事件的时空特征

结合相关研究的理论知识和实际背景，选取内蒙古的一次典型沙尘暴事件进行研究，因为典型沙尘暴事件的影响范围及影响强度使得沙尘暴具有典型的时空特征。本章节利用 Excel、ENVI5.3、ArcGIS10.8、HDF-explorer、Meteoinfo 等工具，处理近地面和卫星数据，分析研究区典型沙尘事件的污染物浓度特征、确定沙尘事件的中心、了解沙尘的垂直分布特征，并根据 HYSPLIT 模型确定沙尘的移动轨迹和推断出沙尘源区，从而综合判断研究区的典型沙尘事件期间的时空演变过程。最后，对沙尘迁移过程中环境因素的特征进行评价。

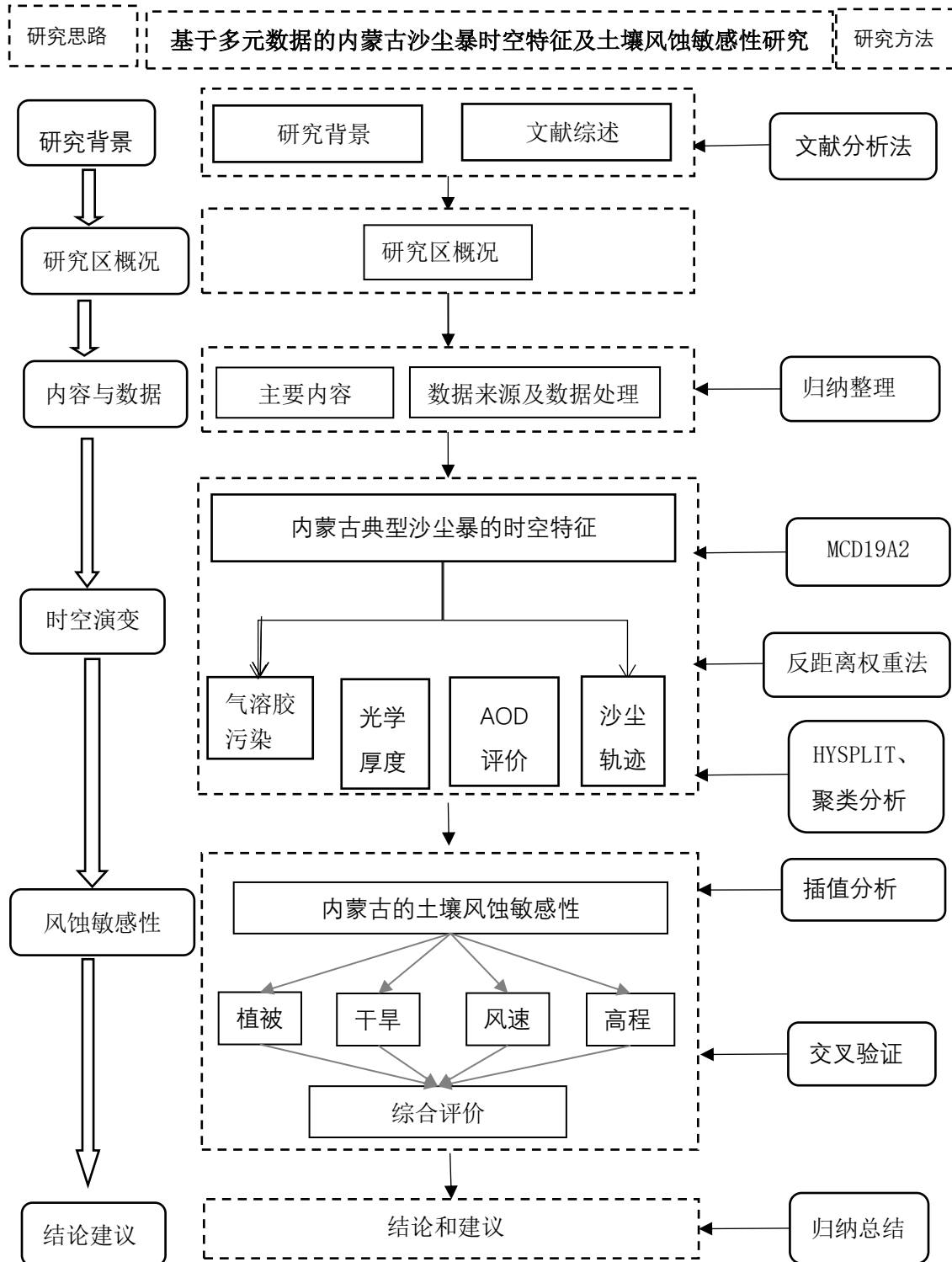
第四章：内蒙古的土壤风蚀敏感性

典型沙尘暴的发生通常是一个地区较差的自然地理环境的映射，因此在研究典型沙尘暴事件的基础上，本章对研究区的土壤风蚀敏感性进行研究，探究研究区沙尘事件的成因。研究区春季气温升高提前，降水量低，土壤干燥，植被覆盖低，在强风的作用下将地表污染物颗粒携带至空中并传播产生沙尘天气，严重时甚至发生沙尘暴。故为研究内蒙古的土壤风蚀敏感性，本文选取了风场强度、植被覆盖度、地势起伏度以及土壤干旱指数四个因子，利用 ArcGIS 分别分析了单因子以及多因子叠加对研究区的土壤风蚀敏感性的影响，并给出评价。最后根据土壤风蚀敏感性分级，对研究取得自然地理环境进行分区，并依据不同分区的特点给出不同的建议。

第五章：结论及展望

结合本文研究内容及研究特点，对研究结果进行了统一整理，理清文章逻辑。根据已做的工作，总结自己的不足之处，并对希望进行深入研究的内容概述。

1.5 技术路线图



1.6 创新点

一、论文采用了新的研究视角，结合多种类型的数据进行对沙尘暴的空间统计分析。一般而言，沙尘暴的研究通常使用一种类型的数据进行统计分析，而本

文则采用了多种类型的数据，包括地面数据、卫星数据产品、激光雷达等，来综合分析沙尘事件的时空特征。地面数据虽然具有较高的精度，能够准确反映特定地区的特点。然而，地面数据的局限性在于无法进行大尺度的沙尘空间监测。相比之下，卫星数据产品可以进行大范围的沙尘监测，虽然精度较差，但能够从宏观角度反映沙尘暴的时空演变以及动力学因素，并从多个角度研究了研究区单个沙尘事件的沙尘时空分布特征。通过综合分析沙尘发生时的相关因子变化、气溶胶光学厚度、沙尘的垂直分布以及对沙尘源的推断等因素，揭示了沙尘事件的全貌。通过整合不同类型的数据，本文的研究方法能够提供更全面、综合的对沙尘暴的分析。这种研究视角的创新为我们对沙尘暴的理解和监测提供了新的思路和方法。

二、沙尘暴的发生与研究区的自然地理环境关系密切，本文从风场动力学的角度研究内蒙古的土壤风蚀敏感性，并对原始数据的选择进行了优化。利用修正的风蚀方程计算风场强度；考虑到沙尘暴的发生一般在春季，故既考虑了植被覆盖度的尽可能最大化，同时考虑了春季植被覆盖的不足，利用春季的植被覆盖数据代替了全年数据；地势起伏采用 30m 精度的高分辨率高程数据，能够更好的反映研究区的地势起伏实际情况。结合统计学、数学、地理学、生态学、气象学等学科交叉运用，叠加分析内蒙古的土壤风蚀敏感性，全面了解研究区沙尘暴成因的地理环境和社会经济影响，融合地区特点进行分区并给出合理化建议。

第二章 研究区概况

2.1 自然地理

内蒙古自治区位于中国的北部，由东北向西南延申，呈狭长形分布，经纬度西起东经 97°12′，东至东经 126°04′，横跨 2400 多公里；南起北纬 37°24′，北至北纬 53°23′，纵占纬度 19°59′。并且东邻辽宁、吉林，南临河北、山西，西隔边界线与陕西、宁夏相望，北濒俄罗斯和蒙古国，全区总面积 118.3 万平方公里，占全国土地总面积的 12.3%，是一个面积辽阔、自然地理特征多样的地区。内蒙古地势大致分为西高东低的倾斜地形（图 2-1），东部是较为平坦的河谷和草原地带，而西部则是高原和山脉，阴山、翰林山、大青山等山脉纵贯境内。内蒙古有

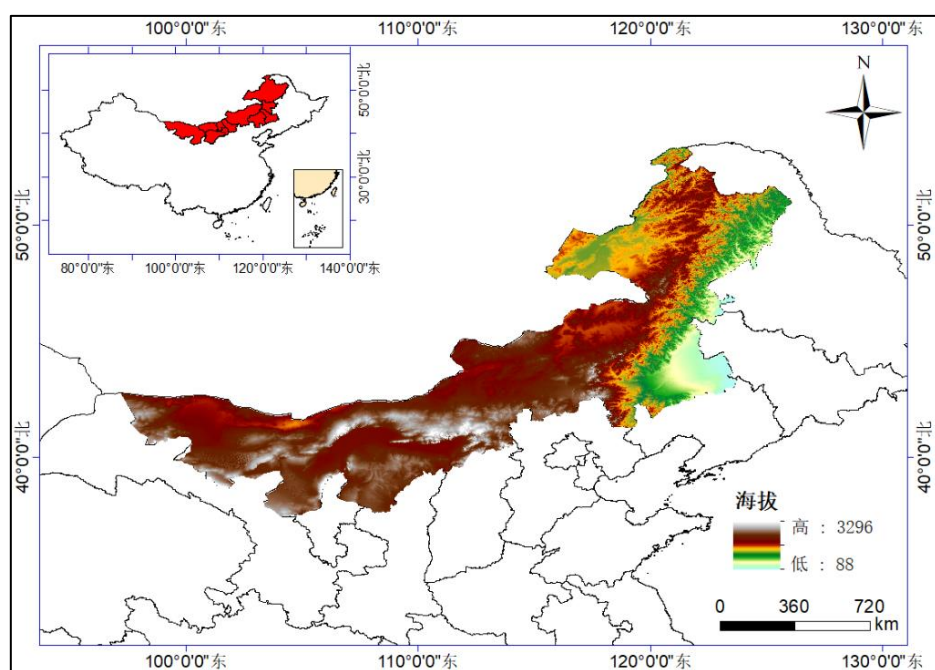


图 2-1 内蒙古地形图

众多河流，主要包括在东北地区的黑龙江、辉南江、大兴安岭脚下的额尔古纳河等，以及位于内蒙古中西部的黄河几字弯形成了大片的冲积平原，是该地区的主要水系之一，同时也是影响京津和东部地区沙尘暴的重要沙源区和路径区。内蒙古的自然环境适合草原动植物的生长，因此该地区拥有丰富的动植物资源，例如，内蒙古是著名的骆驼、羊驼产区，也是马、牛等牲畜的重要产地。不仅如此，内蒙古地下埋藏着丰富的煤炭、石油、天然气、铁矿等矿产资源，是中国重要的能源和矿产资源基地之一。内蒙古的地形非常多样化，包括平原、高原、山脉、

河流和沙漠。内蒙古有多个沙漠地区，包括库布齐沙漠、腾格里沙漠、阿拉善沙漠以及乌兰布和沙漠等，沙地有科尔沁沙地以及毛乌素沙地等，这些沙漠、沙地地区主要分布在内蒙古的中西部，气候干燥，缺乏植被覆盖，位势较高，且风力较大，容易形成沙尘天气，形成的沙尘暴容易向中部和南部扩散，影响我国大部分地区的生态环境，这种现象在干旱季节或风力较大时更为明显。总的来说，内蒙古的自然地理特征多样，既有广袤的草原和丰富的动植物资源，又有多样的气候和地形，形成了独特的自然景观。

2.2 气候特征

内蒙古其地理位置较为特殊，东西跨度大南北纬度层次高，其广大的地理范围以及复杂的地形地貌特征，使得内蒙古的气候特征在不同地区有所差异。一般来说，内蒙古主要的气候类型为温带大陆性气候和温带季风气候，这种气候类型可以概括为冬季漫长寒冷干燥，春季风大少雨，夏季短而炎热，秋季温度骤降且变化无常。内蒙古的温度分布由大兴安岭向东南、西南递增，年降水量的分布与气温刚好相反，中西部地区降水稀少，东南、东北部降水递增，虽然东南部地区稍微湿润一些，但总体来说，降水相对较少，且降水主要集中在夏季，降水不均匀，容易出现干旱现象，这样就形成了在热量最多的地区降水最少，热量最少的地区降水最多的水热分布不平衡格局。以 2021 年内蒙古年平均气温和年平均降水量为例（图 2-2），东北地区的年平均气温在 4.87 °C 以下，西南地区年平均气温在 7.5 °C~11.8 °C 之间波动，与之相反，内蒙古东北部地区年平均降水量在 2.78 mm~8.28 mm，而中西部地区年平均降水量不足 1 mm。此外，内蒙古常常受到强风影响，全年大风日数平均在 10 至 40 天，70% 发生在春季和秋季，其中锡林郭勒、乌兰察布高原达 50 天以上；大兴安岭北部山地，一般在 10 天以下，沙暴日数大部分地区为 5 至 20 天，阿拉善西部和鄂尔多斯高原地区达 20 天以上，阿拉善盟额济纳旗的呼鲁赤古特大风日，年均 108 天。由于内蒙古地形特点和植被覆盖状况复杂，地势较为平坦的地区容易受到风力影响，特别是春季和秋季，植被覆盖较少，且植被类型多为草原灌木，土壤容易暴露，加之独特的气候条件，形成了干旱、半干旱的气候特点，常常受到强风和风沙的影响，严重时还会发生沙尘暴。当地表温度升高，导致气流上升，形成对流层不稳定；降水稀少，土壤干燥，大风会吹起地表的干燥土壤和沙尘，有利于沙尘的悬浮和扩散，风沙天气比较频繁，对当地的生活和农业产生影响。

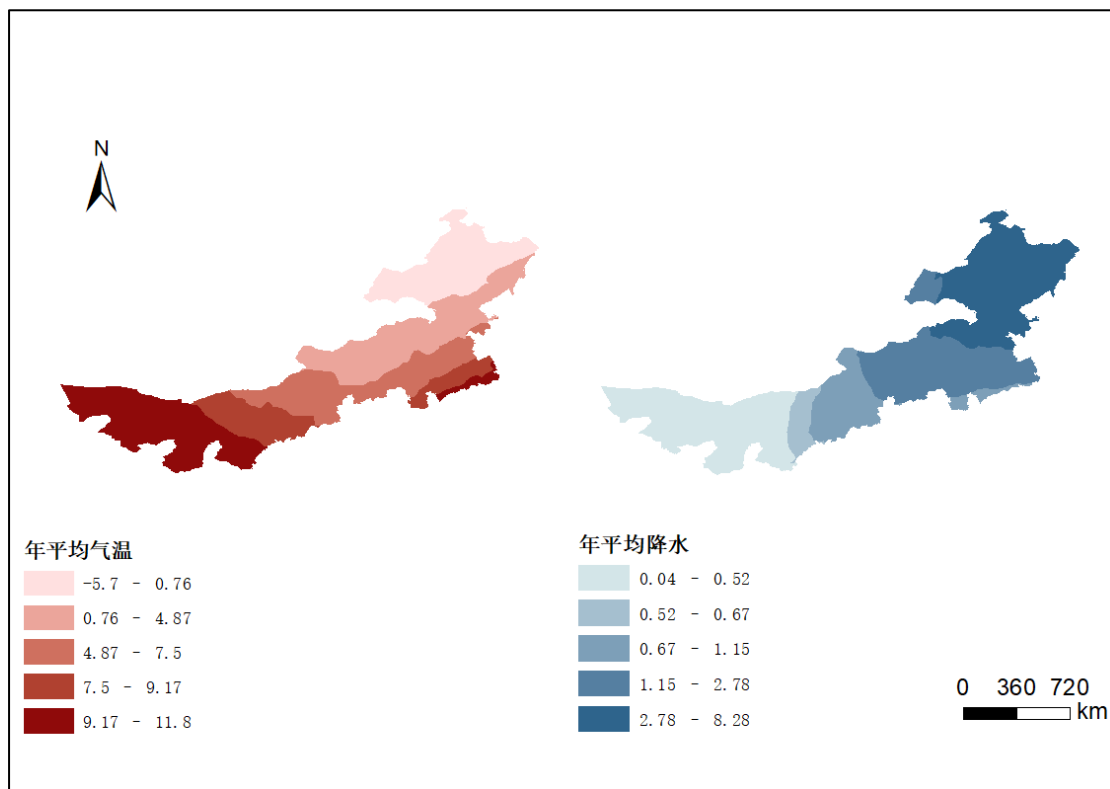


图 2-2 2021 年年平均气温降水图

2.3 社会经济与生态问题

内蒙古自治区位于中国北方，是少数民族蒙古族的聚集地，具有独特的民族背景和民族文化。这个美丽的地方不仅拥有壮丽的自然风光，而且具有丰富的自然资源，拥有大量的煤炭、石油、天然气等能源资源，在中国的能源版图中具有举足轻重的地位，其中煤炭资源探明储量居全国第一位，2022 年煤炭保供量达 9.45 亿，煤炭资源开采业也是内蒙古自治区传统的支柱型产业；同时具有丰富的稀土等资源，在能源与新材料领域引领着内蒙古的发展，对中国的发展也具有重要作用。此外内蒙古草原面积广大，是欧亚大陆草原的重要组成部分，占全国草原面积的 22%，占全区国土面积的 74%，因此区内草原牧场遍布，畜牧业十分发达，天然的草料场，使得这里的牛羊肉肉质鲜美，营养丰富，得天独厚的气候及地理条件，造就了内蒙古自治区生产优质奶源，奶制品十分发达，坐落于呼和浩特的蒙牛总部，其生产的奶制品不仅能满足国内的市场的需求，而且远销海外，促进并引领了内蒙古经济的发展。内蒙古自治区日照充足，光能、风能资源非常丰富，着眼于可持续发展的目标，内蒙古新能源产业得到了快速的发展，“十四

五”时期，内蒙古可再生能源发电装机达 1.35 亿千瓦以上，其中风电 8900 万千瓦，光伏发电 4500 万千瓦，占全国新能源总发电量的 8.8%，居全国首位。

然而，处在干旱半干旱区的内蒙古生态环境脆弱，春秋季节常常伴有沙尘天气的发生。沙尘天气伴随强风，会侵蚀土壤，使得沙尘可能发生远距离传播，原有地区失去土壤覆盖，对生态系统中的植被、微生物以及动物都产生负面影响；沙尘中含有污染物质，沙尘沉积致使水质污染；沙尘还会对人类的呼吸系统产生影响，可能诱发哮喘等慢性呼吸道疾病的加重，危害人类健康；遇到强风天气还可能会发生沙尘暴，可能会破坏基础设施，造成严重的经济损失。不难发现，经济与生态问题可以相互促进，也可能会相互制约。大力发展经济，就有可能破坏生态环境，而生态环境的破坏又会制约经济的持续健康发展。

总之，自然资源不是取之不尽用之不竭的，“绿水青山就是金山银山”才是经济高质量发展的巨大背景，内蒙古经济的发展得益于得天独厚的气候地理条件，但是随着经济的不断发展，能源枯竭，过度放牧，草场沙化以及沙尘天气频发带来的影响确阻碍了经济的高质量发展，能源可持续利用，合理放牧，防沙治沙，有效遏制沙尘暴等恶劣天气的发生成为重中之重。

第三章 内蒙古典型沙尘事件的时空特征分析

研究区平均每年发生沙尘暴约为 9 次，且大多数发生在春季，近年来沙尘天气较历史同期有所减少，但是受蒙古气旋影响，沙尘迁移路径、影响范围以及影响强度较以往不同，本章节结合历史资料并查阅相关文献，选取 2021 年 3 月 15 日前后的影响范围最广且影响强度最大的典型沙尘事件作为研究对象，探究研究区典型沙尘事件的时空特征及演变过程。

3.1 数据来源及数据预处理

3.1.1 大气颗粒物地面数据

PM_{2.5}是指包含直径小于或等于 2.5 微米颗粒的空气颗粒，PM₁₀则是指直径小于或等于 10 微米的硬颗粒物。对于气溶胶污染分析，大气颗粒物（PM_{2.5}和 PM₁₀）数据来自国家环境监测总站城市空气质量实时发布平台（<https://data.cma.cn/>），通过绘制各城市站点的颗粒物浓度折线图了解研究区沙尘事件前后的典型特征。

3.1.2 气溶胶遥感数据

随着卫星技术的发展，用于观测气象信息的卫星也越来越多，根据卫星、空间分辨率（MODIS 一般提供 250 米、500 米和 1 千米的不同分辨率）以及用途的不同，选择不同的数据产品，不同产品所使用的气溶胶反演方式不同，计算精度也不一样。早期的气溶胶反演主要集中在海洋、湖泊等反射率低的地方，城市、干旱半干旱地区的气溶胶反演比较困难，目前常用的算法有以下几种，一是基于偏振的算法，即根据地表辐射和大气分子散射的偏振性不同，可以将两种辐射信息分离，但是偏振算法对粒子形状有严格的要求；二是结构函数法，该算法是通过大气透过率获取气溶胶信息，但是结构函数对于地表反射和大气粒子散射相近的情况反演效果不好；暗像元法则是根据不同波段之间的关系来推算红蓝波段的反射率，从而计算气溶胶光学厚度，不同波段之间的组合还能够适应不同的场景；深蓝算法是用在干旱半干旱地区的常用方法，因为地表物质在波段较短的深蓝波段（412nm）的反射率都相对加较小，明显低于其它波段，所以卫星可以接收来

自地表的大气信息，结合红蓝波段可以用来反演气溶胶信息，但受地表反射率误差影响较大。

为分析沙尘气溶胶的光学特性，使用了由 MODIS 气溶胶光学厚度（AOD）数据衍生的 MODIS MCD19A2 数据（<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>）产品，空间分辨率为 1km，该数据使用 MAIAC（多角度大气校正算法），数据产品从不同角度获取遥感数据产品进行反演，以更准确的估算和校正大气效应，从而使得遥感数据的质量和可用性得到提高，弥补了前几种算法的不足之处，并以反演的范围广和反演的精度高而被广泛应用。

文中结果（图 4-3）通过使用 HDF-explorer、ENVI5.31、ArcGIS 等软件进行处理，处理流程如下（图 3-1）：

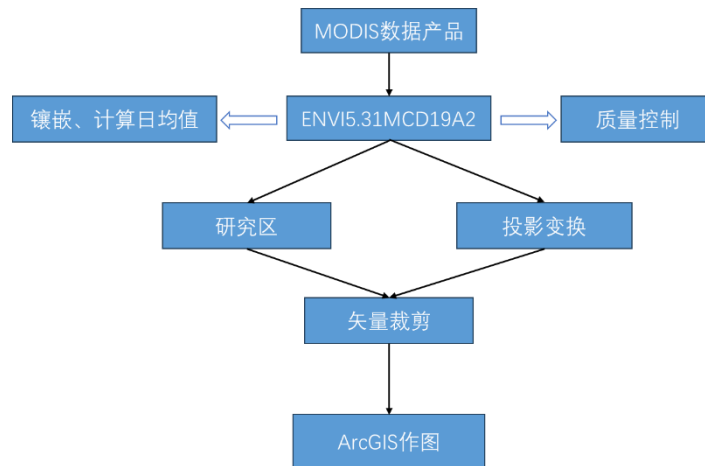


图 3-1 MODIS 数据处理

MCD19A2 工具能够将原始数据进行去云层处理，并去除了缺失值和异常值，最后将不同波段的数据经过质量控制与精度验证后取均值得到气溶胶光学厚度值。

3.1.3 风速风向数据

选取中国气象数据服务中心中国地面气候数据 3 月 14 日至 3 月 16 日数据集的风速和风向数据进行（风向数据以角度形式存储），由于风向风速数据在距离近时相关程度大，故采用反距离权重法（IDW）对风速风向数据进行插值处理，IDW 公式通常表示为：

$$V(x) = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d(x, x_i)^p} \times V(x_i) \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d(x, x_i)^p} \right)} \quad \text{公式 (3-1)}$$

其中， $V(x)$ 表示待估计点 x 的值， n 是用于估计已知点的数量， $V(x_i)$ 是第 i 个已知点的值， $d(x, x_i)$ 是待估计点 x 与第 i 个已知点之间的距离， p 是幂参数，用于控制距离对权重的影响程度， p 值越大，紧邻点的影响就越显著。

运用 excel、ArcGIS 等软件对风速风向数据进行 IDW 插值，处理流程如下（图 3-2）：

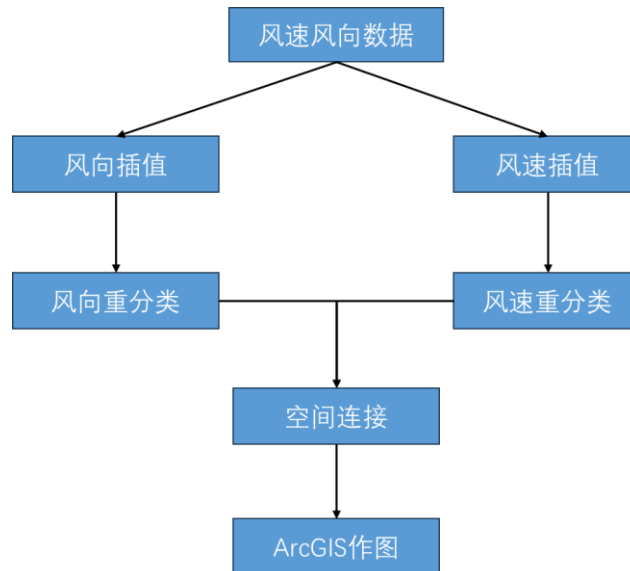


图 3-2 风速风向数据处理

风向风速插值所用数据都是取自气象站点一天中分为 6 个时间点的均值，将重分类后的风速风向数据通过渔网进行空间连接，最后将风速风向数据与 AOD 值进行拟合。

3.1.4 CALIPSO Level 1 数据以及后向轨迹数据

CALIPSO（云-气溶胶激光雷达与红外探测卫星）Level 1 垂直廊线数据来自 (<https://www.example.com>)，通常包括卫星仪器捕获的原始测量数据，反映云与气溶胶的分布与组成，利用 CALIPSO 工具对沙尘天气进行了垂直方向的沙尘分析。

HYSPLIT 模型模拟的后向轨迹 (<https://www.arl.noaa.gov/hysplit/>)，对沙尘迁移过程进行了全面研究。这些轨迹是全球数据同化 (GDAS) 的一部分，由国家环境预测中心 (NCEP) 的空气资源实验室处理。NOAA HYSPLIT 模型有助于了解到达调查区域的空气质量的起源。根据研究区受影响严重情况，由于气流的反轨迹模拟只能在特定点进行^[46]，故选取了受影响严重的典型城市作为后向轨迹研究的特定点进行计算：43°66'N 122°25'E（通辽），42°27'N 118°93'E（赤

峰), 41°02'N 113°11'E (乌兰察布), 40°82'N 111°67'E (呼和浩特), 39°06'N 109°79'E (鄂尔多斯), 40°63'N 109°93'E (包头), 40°75'N 107°39'E (巴彦淖尔), 40°02'N 103°74'E (阿拉善盟), 选取一天中的四个时段进行计算, 因为其它时段是由 00 时、06 时、12 时、18 时四个时段拟合出来的。

3.2 典型沙尘天气过程中的气溶胶污染

3.2.1 典型沙尘事件期间 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 变化特征

气溶胶污染是指空气中悬浮的微小固体颗粒或液滴, 这些颗粒或液滴统称为气溶胶。它们可能由自然源(如火山灰、沙尘暴、森林火灾产生的烟雾等)或人为源(如汽车尾气、工业排放、农业活动等)产生。气溶胶改变了地气系统的辐射平衡, 进而影响气候、环境和人类身体健康都有显著影响。此外, 沙尘暴中的气溶胶颗粒比较大, 主要由自然来源的矿物质组成, 如硅酸盐、钙质和黏土矿物等, 直径范围可以从几微米到几十微米不等, 细分散气溶胶代表了沙尘暴期间释放的粉尘中所包含的气溶胶颗粒的主要部分, 因此, 控制 PM₁₀、PM_{2.5} 中颗粒物的含量是沙尘气溶胶监测系统中的一个重要因素^[70]。

内蒙古的沙尘暴一般发生在春季, 并导致沙尘暴发生地区的气溶胶污染水平很高。例如, 2021 年 3 月 10 日至 3 月 20 日, 由于内蒙古发生了一场持续数日的影响范围广且影响强度大的沙尘天气过程, 受影响该地区上空出现了严重的气溶胶污染。大气颗粒物 (PM_{2.5} 和 PM₁₀) 数据取自国家环境监测中心城市空气质量实时发布平台, 根据国家环境空气质量标准 (NAAQS), 规定 PM_{2.5} 浓度日均值不能超过 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM₁₀ 浓度日均值不能超过 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。研究区沙尘事件期间各城市 PM_{2.5} 浓度 (图 3-3 左), 3 月 13 日巴彦淖尔 PM_{2.5} 浓度率先从 12 日的 33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 迅速上升到 172 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 3 月 15 日阿拉善盟、乌海市、鄂尔多斯、包头

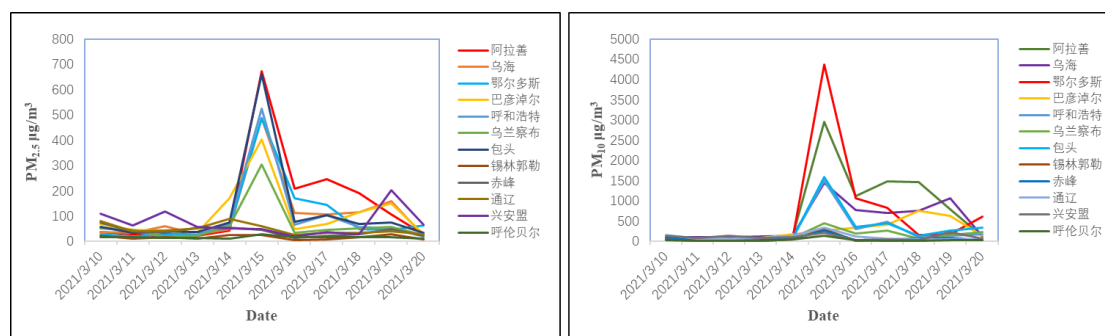


图 3-3 沙尘暴期间内蒙古城市 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度变化

、呼和浩特以及乌兰察布的 $PM_{2.5}$ 浓度分别上升至 $672\mu g/m^3$ 、 $487\mu g/m^3$ 、 $486\mu g/m^3$ 、 $663\mu g/m^3$ 、 $525\mu g/m^3$ 和 $304\mu g/m^3$ ，3月16日 $PM_{2.5}$ 浓度有所下降，但依旧远超 NAAQS 所规定的日均值 $35\mu g/m^3$ 标准。研究区 PM_{10} 浓度（图 3-3 右）在沙尘暴事件期间也发生明显变化，最突出的就是鄂尔多斯市，在3月14开始的 $92\mu g/m^3$ 飙升至3月15的 $4375\mu g/m^3$ ，可以初步判断此次沙尘事件的中心就在鄂尔多斯市，但是依据并不充分，也可能市其它原因导致的；除此之外，阿拉善盟、乌海市、包头以及呼和浩特 PM_{10} 浓度分别从3月14日的 $146\mu g/m^3$ 、 $151\mu g/m^3$ 、 $94\mu g/m^3$ 和 $97\mu g/m^3$ 开始上升，3月15日达到最高峰，3月16日逐步下降，17日、18日以及19日 PM_{10} 浓度仍处于较高的水平，而乌兰察布、锡林郭勒、通辽、赤峰以及兴安盟的 PM_{10} 浓度虽然不像阿拉善盟等城市的极高 PM_{10} 浓度外，但是其在沙尘暴事件期间的 PM_{10} 浓度依然超过 NAAQS 规定的 $150\mu g/m^3$ 的标准。

综上所述，内蒙古沙尘暴事件期间，除了呼伦贝尔外，内蒙古各地级市 PM_{10} 浓度均超过国家空气质量标准，中西部地区 $PM_{2.5}$ 浓度也超过规定指标，且从各地级市空气污染物的分布来看，气溶胶污染浓度从西南向东北部逐渐减弱。可以看出，气溶胶污染物从西南向东北部迁移，影响内蒙古各盟市的空气质量。

3.2.2 典型沙尘事件期间的气溶胶污染特征

沙尘暴事件发生期间，大气中的可吸入颗粒物明显增加，成为对流层气溶胶的主要成分之一。在这一事件期间，沙尘中心和受影响地区的颗粒物浓度也增加。因此，沙尘暴事件的气溶胶污染是一个重要的研究参数，气溶胶污染的分析有助于对沙尘暴事件的全面了解。由于大气中细小颗粒物（ $PM_{2.5}$ ）和高度分散的气溶胶颗粒（ PM_{10} ）具有不同的来源，从而在大气中具有不同的行为、物理性质和化学性质。此外， $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比值可用作大气中这些颗粒物数量的指标，并有助于确定这些颗粒物的来源及其形成过程^[71,72]，高 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比率表明污染是人为的，细颗粒物质的参与程度更高，而低比率可能表明污染事件涉及大量来自自然来源的硬颗粒^[73]，这可能是沙尘暴事件。

本小结利用典型城市的空气污染浓度 PM_{10} 及 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比值来探讨周边地区的空气污染特性。从西南至东北选取研究区域内的六个典型城市作为本研究的代表城市，因为由上节结果可以判断哪些城市受影响比较大且具有代表性。然后，根据这些城市城区大气颗粒物监测数据，估计了这些城市的大气污染源性。所选

PM₁₀ 浓度在上节中已经讨论过，其值在沙尘暴事件期间均超过国家环境控制质量标准，但是仅凭此指标并不能判断为沙尘暴的发生，一般认为 PM_{2.5}/PM₁₀ 的值低于 0.6，即表明该时段大气颗粒物中细颗粒物所占比例较小。如（图 3-4），3 月 15 日前后，阿拉善盟、鄂尔多斯以及锡林郭勒盟 PM_{2.5}/PM₁₀ 的最高值分别为 0.30、0.60、0.59，比值均低于 0.6，说明受自然降尘源的影响，导致这些城市大气中可吸入颗粒物含量增加，受沙尘暴事件影响明显；乌兰察布和通辽市的最高值虽然略高于 0.6，但是从图中趋势不难看出，沙尘暴事件期间，比值呈现下降趋势，说明其变化来自硬颗粒物，受自然污染源的影响；巴彦淖尔市的情况较为特殊，沙尘暴事件期间，PM_{2.5} 浓度出现高于 PM₁₀ 浓度的情况，从图中可以看出，PM_{2.5}/PM₁₀ 的比值是高于 0.6，甚至高于 1，因此，难以判断该市高污染的空气环境主要受认为污染还是自然尘源污染。综上，内蒙古绝大部分地区受沙尘暴事件影响，该地区的空气质量下降严重。为了获得沙尘暴期间气溶胶的空间分布，确定研究区受沙尘暴影响的范围、强度以及演变过程，有必要对该地区进行大尺度的卫星监测。

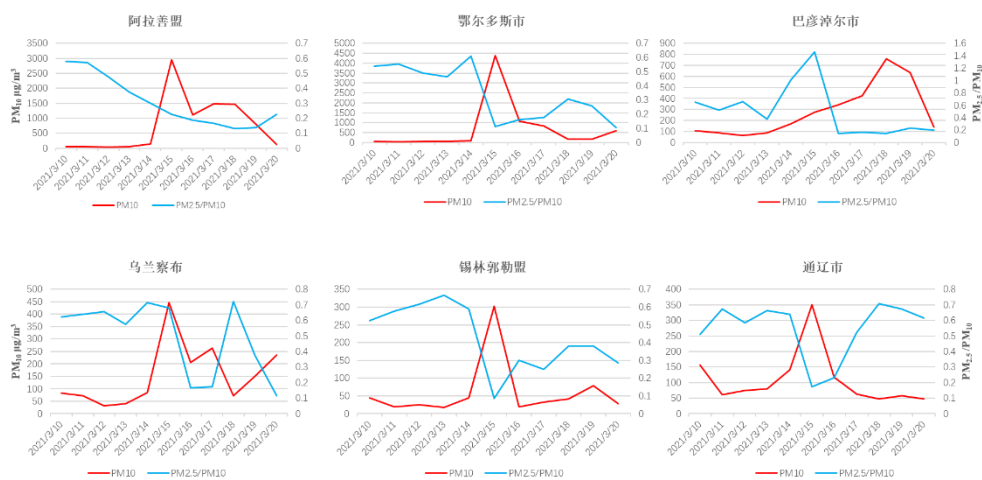


图 3-4 典型沙尘事件期间 PM₁₀ 浓度和 PM_{2.5}/PM₁₀ 比值变化趋势

3.3 区域 AOD 评价

3.3.1 气溶胶光学厚度

吸收和散射是气溶胶对光消减的两种主要方式，两者相比，散射作用对光的衰减作用更强。对电磁波的散射强弱与气溶胶粒子的大小呈正相关性，瑞利散射、米氏散射以及非选择性散射是电磁波气溶胶粒子大小不同产生的三种方式。当引起散射的气溶胶粒子直径远小于入射电磁波波长即为瑞利散射；当引起散射的气

溶胶粒子直径与入射电磁波波长相当即为米氏散射；当引起散射的气溶胶粒子直径远大于电磁波波长即为非选择性散射。

气溶胶光学厚度是一个无量纲的量，是指在电磁波的传输路径上，气溶胶粒子对光吸收作用和散射作用的衰减量总和，其的计算公式如下：

$$\delta = \int_0^1 K'_{ex} \rho dl \quad \text{公式 (3-2)}$$

或

$$\delta = \int_0^1 K_{ex} \rho dl \quad \text{公式 (3-3)}$$

公式中 K'_{ex} 和 K_{ex} 分别表示气溶吸收和散射的质量削弱吸收和体积削弱系数， l 代表大气厚度， ρ 为气溶胶密度。气溶胶光学厚度反映的是大气中的光学特性，即反映了大气中的颗粒物质对光的衰减作用，沙尘暴天气发生时，大气中 PM_{10} 浓度增加，对大气中光的消减作用增强，所以能够反映大气中小于或等于 10 微米的颗粒物浓度和由沙尘导致的空气污染情况。通过获取内蒙古典典型沙尘事件期间的气溶胶光学厚度，分析研究区受沙尘天气影响的特征。

卫星绕地旋转，可以接收来自地球大气散射和地表反射的辐射信息。假设地球表面是理想反射表面，且在垂直方向上大气均匀衰减，则 L 为卫星接收到的辐射亮度值，则有：

$$L(\tau_\alpha, \mu_s, \mu_v, \phi) = L_0(\tau_\alpha, \mu_s, \mu_v, \phi) + \mu_s F_0 T(\tau_\alpha, \mu_s) T(\tau_\alpha, \mu_v)^\rho / (1 - \rho S(\tau_\alpha)) \quad \text{公式 (3-4)}$$

其中， $\mu_s = \cos \theta_s$, $\mu_v = \cos \theta_v$, θ_s 是太阳天顶角， θ_v 表示卫星天顶角， ϕ 为相对方位（太阳方位角与卫星方位角的差值）； τ_α 是大气中的气溶胶光学厚度； L_0 为整层大气反射的太阳辐射，主要源自气溶胶粒子的散射， ρ 和 S 分别代表地表反射率和大气半球反射率，向下总透过率为 $T(\tau_\alpha, \mu_s)$ ， $T(\tau_\alpha, \mu_v)$ 为向上至卫星的高度的大气透过率； F_0 为大气层顶太阳光的辐射通量密度。

表现反射率（指从一个表面反射出来的光线与入射到该表面的光线之比，通常以百分比表示）和卫星获得 L 值得关系为：

$$\rho^* = \frac{\pi L D^2}{\mu_s E_s} \quad \text{公式(3-5)}$$

其中, ρ^* 是表现反射率, L 为卫星观测到的亮温值, E_s 为太阳平均辐射亮度, D 为日地距离。

卫星传感器获得到的总辐射亮度值是包括气溶胶粒子散射辐射和地表反射辐射的, MODIS 数据产品中是采用一定方法将两种亮温值分离, 生成出只具有 AOD 值得辐射信息, AOD 值越高, 大气污染程度越高, 能见度越低。

3.3.2 研究区气溶胶光学厚度 (AOD) 空间分布

准确观测气溶胶光学特性是对沙尘暴事件进行综合科学评价的基础。气溶胶光学厚度是气溶胶光学特性的主要物理参数之一, 可以用来表征气溶胶含量和大气污染程度^[74,75]。沙尘能降低地面能见度, 增加气溶胶光学厚度, 由于其特殊的消光效应, 导致气溶胶光学厚度的变化。在这项研究中, 通过卫星观测资料获得区域 AOD^[76]。由于沙尘天气过程一般是连续的, 且随时间地域呈现不同变化, 为了更好的分析沙尘暴事件期间的时空演变过程, 选择 3 月 12 日至 3 月 17 日共计六天的时间范围, 利用 MODIS MCD19A2 数据产品中的陆地气溶胶光学厚度资料, 分析了区域气溶胶光学特性。从气溶胶光学厚度数据可以看出, 2021 年沙尘暴事件期间, 内蒙古大气气溶胶光学厚度的空间分布发生了显著变化, 并随时间呈现出区域性变化 (图 3-5)。3 月 12 日, 气溶胶光学厚度 (AOD) 值较高的地区主要分布在鄂尔多斯、呼和浩特以及通辽等地, 但是 AOD 值低于 0.6, 这与上述 PM_{10} 浓度的分布不一致, 这是因为不能排除其他颗粒污染物导致消光效应高值的可能性。3 月 13 日起, 库布奇沙漠部分地区及其周边地区开始出现异常高气溶胶光学厚度值, 3 月 14 日, 高 AOD 值出现在乌兰察布和锡林郭勒部分地区, 表明可吸入硬颗粒物由西南向东北部运移; 通辽及赤峰部分地区可吸入硬颗粒物则由东南向西北方向移动。3 月 15 日阿拉善盟与鄂尔多斯南部气溶胶值达到最高, 通辽、赤峰、锡林郭勒 AOD 值虽降低, 但是影响范围很大。(这里内蒙古中西部的 AOD 高值区域与 3.1.1 节中 PM_{10} 的高值区域可能有些出入, 一是可能是因为 PM_{10} 选取的典型城市, 而 AOD 值的获取来自卫星数据, 覆盖范围更广, 结果更具有普遍性; 二是选取的 MODIS MCD19A2 数据产品来自白天各波段的平均值, 并不包含夜间数据)。3 月 16 日、17 日, 内蒙古西南部的巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠以及库布奇沙漠 AOD 再次出现高值, 但最高值并没有超过 15 日, 东南部分地区也受到影响。

总体而言, 内蒙古大气气溶胶光学厚度的空间分布具有明显的区域差异。沙

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/887106002105010014>