

基于Himawari-8卫星数据的内蒙古地区云参量时空变化特征研究

苏亚拉布仁

内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2025年2月20日; 录用日期: 2025年4月19日; 发布日期: 2025年4月29日

摘 要

全球气候变化正逐渐威胁到人类的生存环境及社会经济的可持续发展。云作为调节气候的重要因素之一,是气温及降水等气象因子发生变化的主要原因,其形成与变化对调节地球气候起着重要作用。其中,云特性变化可能对气候产生重大影响,反之,气候变化也会引起云特性的调整。本文利用Himawari-8云产品数据分析了2015年7月~2020年6月内蒙古地区的云特性参量,包括不同类型云的云量、云光学厚度和云有效粒子半径等时空变化特征,因此得出以下主要结论。内蒙古地区总云中高云所占比例相对较大,在年平均总云云量、云光学厚度和云有效离子半径之中高云的贡献率分别达到38.09%、51.46%、63.02%。在年尺度上,总云主要分布在内蒙古东部和中部地区,呈现出云参量从东北向西南减少的特征;高云主要分布在内蒙古东部、北部和中部地区。在季节尺度上,总云和高云的云量、云光学厚度和云有效粒子半径夏季达到最大值,夏季总云云量的平均值达到63%,总云光学厚度的平均值达到9.44,总云有效离子半径的平均值达到9.37 μm 。夏季总云与高云的云量主要分布在内蒙古中、东部地区,夏季总云与高云的云量呈增加趋势的区域主要分布在内蒙古西部地区,冬季总云和高云的云光学厚度和云有效离子半径值相对较少,主要分布在内蒙古东北部地区。

关键词

Himawari-8云产品, 云参量, 时空分布, 内蒙古地区

Study on Spatiotemporal Variation of Cloud Parameters over the Inner Mongolia Based on Himawari-8 Satellite Data

Suyala Buren

College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

Received: Feb. 20th, 2025; accepted: Apr. 19th, 2025; published: Apr. 29th, 2025

文章引用: 苏亚拉布仁. 基于 Himawari-8 卫星数据的内蒙古地区云参量时空变化特征研究[J]. 地理科学研究, 2025, 14(2): 435-455. DOI: 10.12677/gser.2025.142044

Abstract

Global climate change is gradually threatening the living environment of human beings and the sustainable development of the social economy. As one of the important factors regulating climate, the cloud is the main reason for the change of meteorological factors such as temperature and precipitation, and its formation and change play an important role in regulating the earth's climate. Among them, the change in cloud characteristics may have a significant impact on the climate, and conversely, climate change will also cause the adjustment of cloud characteristics. In this paper, the Himawari-8 cloud product data is used to analyze the cloud characteristic parameters in Inner Mongolia from July 2015 to June 2020, including the temporal and spatial variation characteristics of cloud amount, cloud optical thickness and cloud effective particle radius of different cloud types, so the following main conclusions are drawn. The proportion of high clouds in the total cloud in Inner Mongolia is relatively large, and the contribution rates of high clouds in the annual average total cloud quantity, cloud optical thickness and cloud effective ion radius reach 38.09%, 51.46% and 63.02%, respectively. At the annual scale, the total clouds are mainly distributed in the eastern and central regions of Inner Mongolia, and the cloud parameters decrease from northeast to southwest. High clouds are mainly distributed in the eastern, northern and central parts of Inner Mongolia. On the seasonal scale, the cloud cover, cloud optical thickness and cloud effective particle radius of total and high clouds reached the maximum values in summer, and the mean of total cloud cloud amount reached 63%, the mean of total cloud optical thickness reached 9.44, and the mean of total cloud effective ion radius reached 9.37 μm in summer. The cloudiness of summer total clouds and high clouds were mainly distributed in the central and eastern parts of Inner Mongolia, while the cloudiness of summer total clouds and high clouds increased mainly in the western part of Inner Mongolia. The cloud optical thickness and cloud effective ion radius of winter total clouds and high clouds were relatively less, mainly distributed in the northeast part of Inner Mongolia.

Keywords

Himawari-8 Cloud Products, Cloud Parameters, Spatiotemporal Distribution, Inner Mongolia Region

Copyright © 2025 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

1.1. 研究背景及意义

云覆盖地球 50%到 70%的天空[1]。云是天气预报的主要对象之一，也是影响气候变化的重要因素之一[2]。它反映了地球上的天气和气候系统状态，不同的云类型由于产生了不同的大气热力、动力条件，其存在反映出该地区大气状态[3]。云量、云光学厚度、云有效粒子半径和云相态等云特性的变化可能对气候产生重大影响[4]，反之，气候变化也可能引起云特性的调整[5]。已有研究表明，云特性变化对区域生态、生活和生产等领域造成重大影响。因此，云参数的分析不仅对区域和全球气候变化具有十分重要的科学意义，也能为农牧业、工业、能源(太阳能)以及防灾减灾等诸多领域提供信息服务。

由于内蒙古地区特殊的地理环境，以及对云参量和云辐射强迫等重要气候调节因子详细定量的研究，导致研究者对内蒙古地区气候变化响应机制认识不足。为了保护草原的生态环境和游牧民族的生存环境，

了解内蒙古地区上云的特征是十分必要的。因此,分析内蒙古地区云参量长时间序列的变化,这有助于促进内蒙古地区复杂气候系统的机理研究发展,评估云在气候变化中的作用具有重要意义。

1.2. 国内外研究进展

目前,研究云气候特征的资料主要有 4 类,即地面观测资料、大气再分析资料、模式模拟资料和卫星遥感。地面观测资料具有高频率和高精度的优势,广泛应用云参量的时空分布与变化以及相关再分析资料、模式模拟和卫星反演的数据验证。

大气再分析数据在一定程度上能够描述云参数的时空分布特征,尽管这些数据存在一定的误差。例如:Zib 等人(2012) [6]利用 MERRA、CFSR、20CR、ECMWF/ERA-I 和 DOE (NCEP-Department of Energy)/R² 等再分析资料研究显示,在北极地区所有再分析资料的云量和地表辐射之间存在较大的误差,尤其在冬季更为显著;遥感卫星数据时间持续性好、空间遮盖范畴大等长处,已成为云特征研究的首要数据来源。近年来,研究者利用遥感卫星资料对云参数的时空变化进行了有关研究。其中,利用 20 世纪 80 年代以来积累的多颗静止卫星和极轨卫星覆盖全球的观测数据与全球大气热力模式反演得到的 ISCCP 的 D 系列数据,以相对丰富的云要素和长时间序列(1983~2009 年)的特点,广泛应用于分析云特性时空变化以及评估气候模式的准确性方面的研究[7]-[9]。但是该数据并不能很好地反映内蒙古地区复杂下垫面条件下的云特性变化,且由于空间分辨率较低的原因,这导致笔者在分析内蒙古地区云参量空间变化的细节时不够严谨。另外 2010 年后该数据没有更新,空间分辨率为 2.5 度,导致云特性空间变化呈现能力较厚等问题。Himawari-8 气象卫星是日本宇宙航空研究开发机构设计制造的先进地球静止气象卫星[10]。Himawari-8 卫星搭载先进的 AHI (Advanced Himawari Imager)成像仪具有全盘和区域扫描的能力。该卫星于 2014 年 10 月 7 日发射,具有高空间分辨率、高观测频次和高时效特点,包含从 0.46 μm 到 13.3 μm 的 16 通道[11] [12]。全盘、日本、热带气旋敏感区和澳大利亚边缘和角是 Himawari-8 观测的四个区域。AHI 全盘成像的时间分辨率为 10 分钟,扇形区域约 2.5 分钟。其中第一波段(红)、第二波段(绿)和第三波段(蓝)的空间分辨率分别为 1 km、1 km 和 0.5 km。研究表明,在青藏高原地区, Himawari-8 卫星产品的云量和 MODIS 卫星产品的云量出现类似的时空分布特征,并且青藏高原地区最小云量和最大云量分别出现在北京时间上午 12:00 和下午 18:00 [13]。

1.3. 研究目标

本文在对 Himawari-8 遥感数据进行分析之后,利用该数据集对内蒙古地区近 5 年云参量时空变化进行监测,并获得了该地区云参量时空变化的特征,例如区域差异性,揭示云特性参量变化趋势,评估云在该地区气候变化中的作用与反馈机制。对发展适合于内蒙古地区气候模式的云参数化方案,减少气候模式在高原地区数值模拟存在的不确定性等相关研究提供重要的空间信息与参考依据。

具体目标如下所示:在 Himawari8-AHI 数据分析的基础上,整理 2015 年 7 月~2020 年 6 月期间 Himawari-8 卫星 2 级云产品数据(包含云量、云光学厚度和云有效粒子半径等参数集)。利用云分类法对云进行分类,并对提取及分类的云参量按不同的时间尺度(日、月、季和年)进行空间统计,分析内蒙古地区不同时间尺度不同类型云的云量、云光学厚度和云有效粒子半径等参量的时空变化特征。

2. 数据与方法

2.1. 研究区概况

内蒙古地区属于亚洲内陆高原,处于中亚戈壁沙漠地区至西伯利亚森林地区延伸的过渡地带,以丰富的矿产资源和奇特的景观而闻名。本文以内蒙古自治区作为研究区(图 1),面积约 120 万 km^2 ,平均海

拔 1053 m, 共包括 12 个地级行政区, 其中 9 个地级市、3 个盟, 共有 23 个市辖区、11 个县级市、17 个县、49 个旗, 3 个自治旗; 范围为北纬 37°24′~53°23′、东经 97°12′~126°04′。

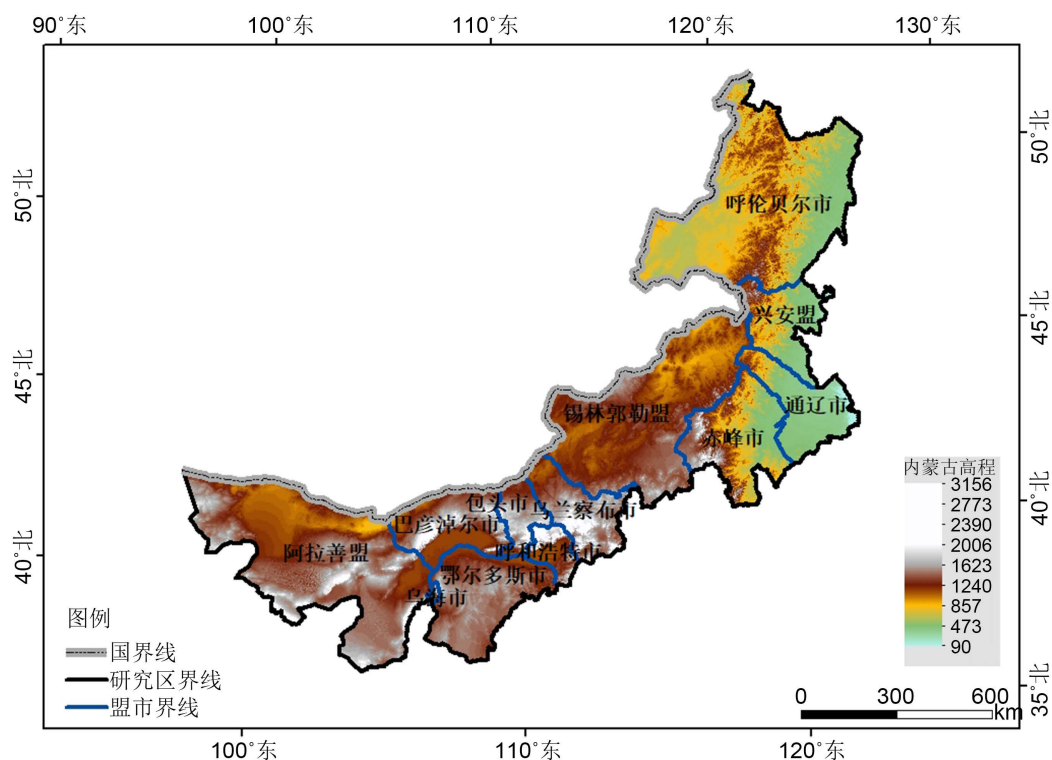


Figure 1. Overview of the study area

图 1. 研究区概况图

2.2. 研究数据

2.2.1. 遥感数据

Himawari-8 气象卫星是日本宇宙航空研究开发机构设计制造的先进地球静止气象卫星。Himawari-8 卫星搭载先进的 AHI (Advanced Himawari Imager) 成像仪具有全盘和区域扫描的能力。该卫星于 2014 年 10 月 7 日发射, 它具有高空间分辨率、高观测频次和高时效特点, 包含从 0.46 μm 到 13.3 μm 的 16 通道。Himawari-8 观测包括四个区域: 全盘、日本、热带气旋敏感区和澳大利亚边缘和角。AHI 全盘成像的时间分辨率为 10 分钟, 扇形区域约 2.5 分钟。其中第一波段(红)、第二波段(绿)和第三波段(蓝)的空间分辨率分别为 1 km、1 km 和 0.5 km。JMA 的气象卫星中心(Meteorological Satellite Center, MSC)开发了 Himawari-8/AHI 云掩膜产品(Cloud Mask Product, CMP), 包括云有效半径(Cloud Effective Radius)、云光学厚度(Cloud Optical Thickness)、云顶高度(Cloud Top Height)、云顶温度(Cloud Top Temperature)和云类型(Cloud Type)等参数, 为云特性研究提供服务[14]。这些云参量数据能每天覆盖内蒙古地区。本文用 Himawari-8 卫星 2015 年 7 月~2020 年 6 月之间 2 级云产品数据, 数据来自于 JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency, <http://www.eorc.jaxa.jp/>)。Himawari-8 卫星云产品数据具有较好的可信度。

2.2.2. 其他数据

本文利用的数字地形高程模型(Digital Elevation Model, DEM)为 90 m 分辨率的 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)数据, 来自于 CGIAR-CSI (A Global Agricultural Research Partnership-Consortium for

Spatial Information)官方网站(<http://www.cgiar-csi.org/>)。内蒙古自治区的省、盟市边界数据来自于地理国情监测云平台官方网站(<http://www.dsac.cn/>)。

2.3. 研究方法

结合 Himawari-8 卫星 2 级云产品数据, 收集内蒙古地区云特性参量数据, 其中包含云类型、云光学厚度、云有效粒子半径等参数集。

本文在云参量数据收集工作的基础上, 以云分类方法为基础, 只考虑单层云的前提下, 结合湿度阈值法和波段阈值法, 将 $CF \geq 80\%$ 和 $0 < COT < 379$ 的像元定义为云, 即定义为总云。在此基础上将 $50 \text{ hPa} < CTP < 440 \text{ hPa}$ 定义为高云, 包括卷云、卷层云和深对流云。 $440 \text{ hPa} \leq CTP \leq 680 \text{ hPa}$ 为中云, 包括高积云、高层云和雨层云。 $CTP > 680 \text{ hPa}$ 为低云[15], 包括积云、层积云和层云。本文将利用小时尺度的云分类数据, 对不同类型云的云量、云光学厚度和云有效半径进行月、季节和年尺度的空间分布统计, 分析不同时间尺度下的云参量时空变化特征。其中, 为了研究季节特征, 将月数据整理成春季、夏季、秋季和冬季(分别为 3 至 5 月、6 至 8 月、9 至 11 月和 12 至次年 2 月)等四个季节具体处理。技术路线如图 2 所示。

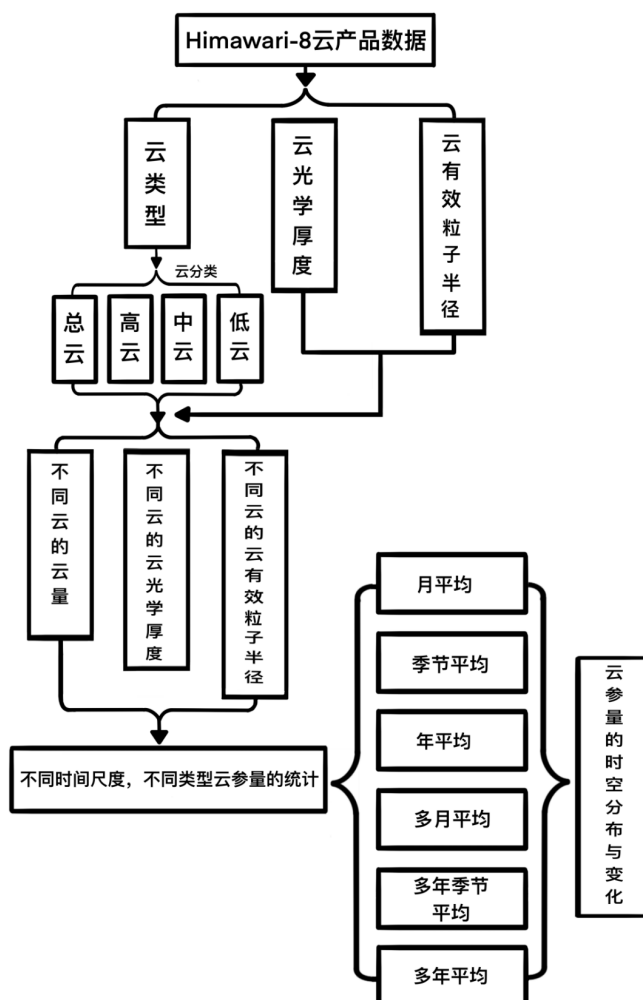


Figure 2. The flow chart of research process
图 2. 技术路线图

3. 云参量时空变化特征

为了分析内蒙古地区不同类型云的时空变化特征，按高度把云类型分为高云、中云和低云。本文利用 2015 年 07 月~2020 年 06 月期间 Himawari-8 云产品数据分析内蒙古地区不同类型云的云量、云光学厚度和云有效粒子半径参量的时空变化特征。

3.1. 云量时空变化特征

3.1.1. 云量时间变化特征

利用 2016 年 01 月~2019 年 12 月 Himawari-8 卫星数据的大气云产品白天数据集，分析内蒙古地区近 4 年不同类型云量的时间分布特征，结果如图 3。从图 3 可知，在内蒙古地区年平均总云中高云占的比例比其他两个类型高些，例如：2016 总云云量中高云占 37.21%，而低云和中云分别占 30.23%和 32.56%。可以明显地看出四年间低云云量的变化相对平稳，低云和中云云量最大值没超过 15% (低云最大值 13%，中云最大值 14%)。总云云量四年间都超过了 40% (最低值 41%)。

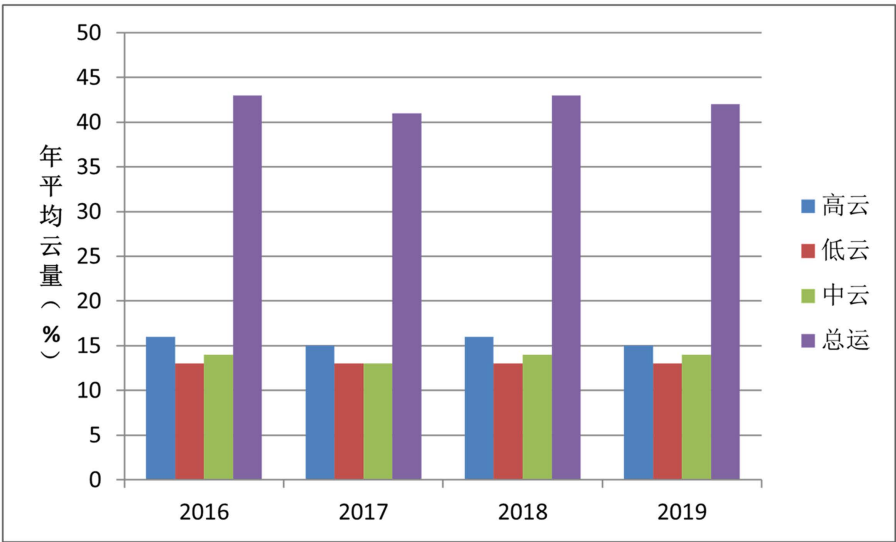


Figure 3. Annual mean cloud fraction (high/mid/low/total) from Himawari-8
图 3. 基于 Himawari-8 卫星数据的年平均高云、低云、中云和总云的云量分布

从年平均不同类型云的云量时间分布图(图 3)和云量极值分布表(表 1)得知，年平均总云中低云和中云所占比例较大，在多年年平均总云中低云的贡献率为 60%而中云贡献率为 38%；高云云量较为接近且年际变化相对平稳；中云和低云的云量分布较为接近；在 4 年间，中云、低云和高云云量相对相等，没有太大的变化，而总云云量相对较高。

Table 1. Extreme values of cloud fraction for different cloud types (Unit: %)
表 1. 不同类型云的云量极值(单位: %)

类型	最大值(年份)	最小值(年份)
高云	27.09% (2016)	8.84% (2017)
低云	49.88% (2016)	5.30% (2017)
中云	31.39% (2016)	7.80% (2017)
总云	82.71% (2016)	25.35% (2017)

从多年月平均不同类型云的云量分布图(图 4)得知,内蒙古地区云量分布出现明显的季节性变化和周期性变化特征。其中,从图 4 得知,高云云量呈现出单峰的分布特征,在 6~8 月份呈现较高云量(云量超过 25%);低云云量则年内变化相对平稳,云量主要分布在[12%,15%]的区间。高云和低云在 3 月和 9 月后出现交点;而中云云量也呈现单峰的分布特征,在 5~10 月期间呈现出较高的云量(高于 15%);高云和中云在 3 月和 9 月出现交点。中云和低云在 4 月、11 月和 12 月出现交点;总云侧在 6~8 月平均云量超过 60%;4~9 月高云云量比中云和低云云量高,相反 1~3 和 10~12 相对低。如此看来,低云和中云多年月平均云量相似。

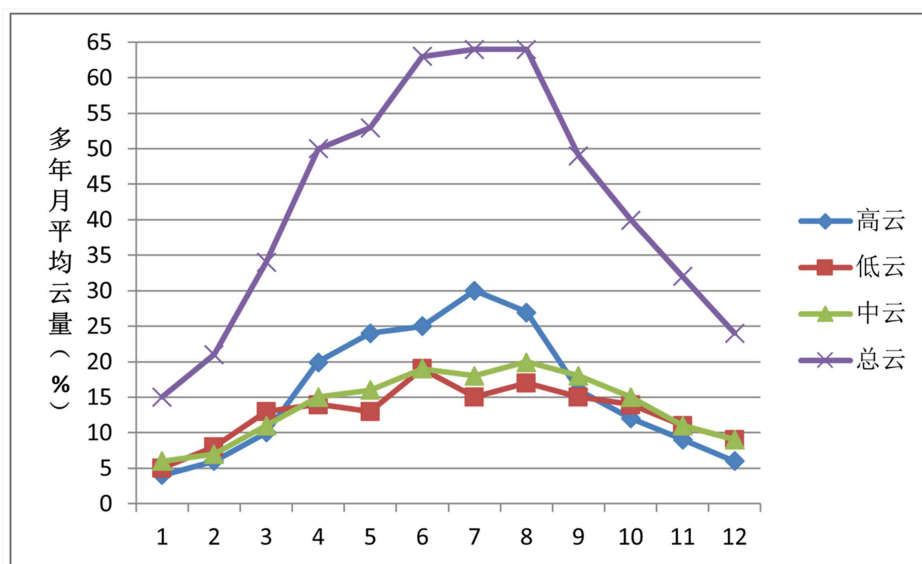
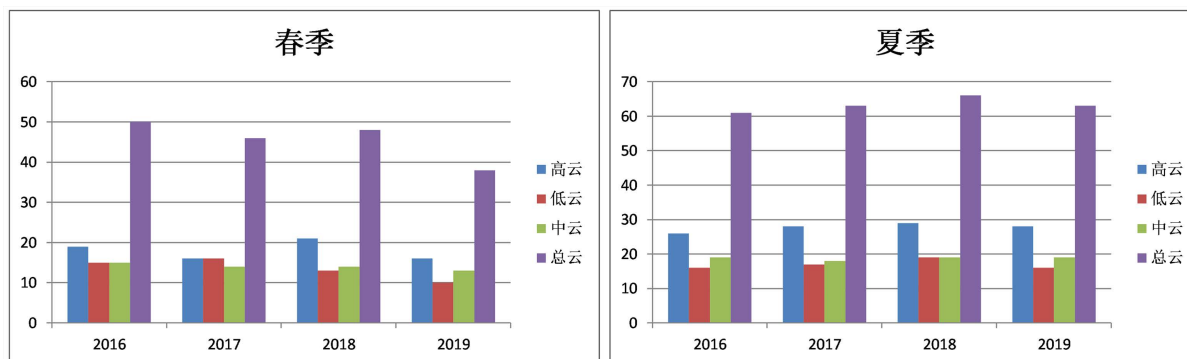


Figure 4. Multi-year monthly mean cloud fraction distribution for different cloud types
图 4. 多年月平均不同类型云的云量分布

从不同季节不同类型云的云量年际变化图 5 得知,在春季,2017 年的高云云量(15%)和低云云量(15%)相等,总云云量最大值达到(50%);在夏季中云和低云云量变化基本相等,高云云量明显高于低云云量和中云云量,总云云量最大值达到 66%。总云、高云、中云和低云的云量变化相对小于其它季节;在秋季高云、低云和中云年平均云量相对较低,高云云量最小值为 11%,总云云量依然较高,最大值达到 42%。低云云量变化显著增加;在冬季,高云、低云、中云和总云云量小于其他季节,高云云量最小值为 4%,最大值为 6%。低云云量变化显著增加,最大值为 11%。2016 年和 2017 年的中云云量均为 6%,总云云量最大值为 26%。



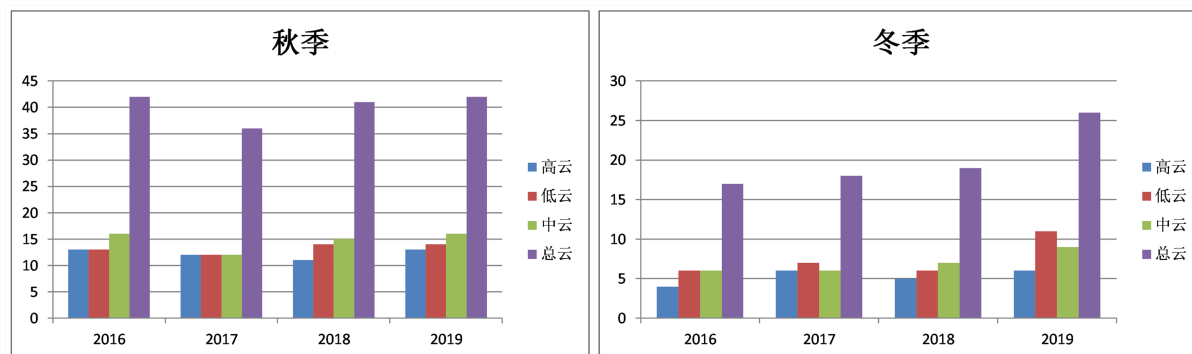


Figure 5. Interannual variations of cloud fraction by cloud type and season

图 5. 不同季节不同类型云的云量年际变化

3.1.2. 云量空间变化特征

从 2016~2019 年内蒙古地区多年平均不同类型云的云量空间分布图(图 6)得知: ① 总云云量在 86% 以上的像元较少; 总云云量主要集中在 40%~70%之间, 云量在 40%~45%的像元主要分布在阿拉善盟北部、呼伦贝尔满洲里市地区和锡林浩特盟西北部地区; 云量在 70%~80%的像元主要分布在鄂尔多斯市南部地区(图 6(a)). ② 高云云量主要集中在 14%~35%之间, 云量在 35%以上的像元主要分布在鄂尔多斯市南部和阿拉善盟南部地区(图 6(b)); 中云云量在 18%以上的像元主要分布于额尔古纳市、牙克石市和扎兰屯市。以及往东地区(图 6(c)); 而低云云量主要集中在 10%~20%之间, 云量在 12%以下的像元主要分布在阿拉善盟地区(图 6(d)). 呈现出云量从东北向西南减少的分布特征。

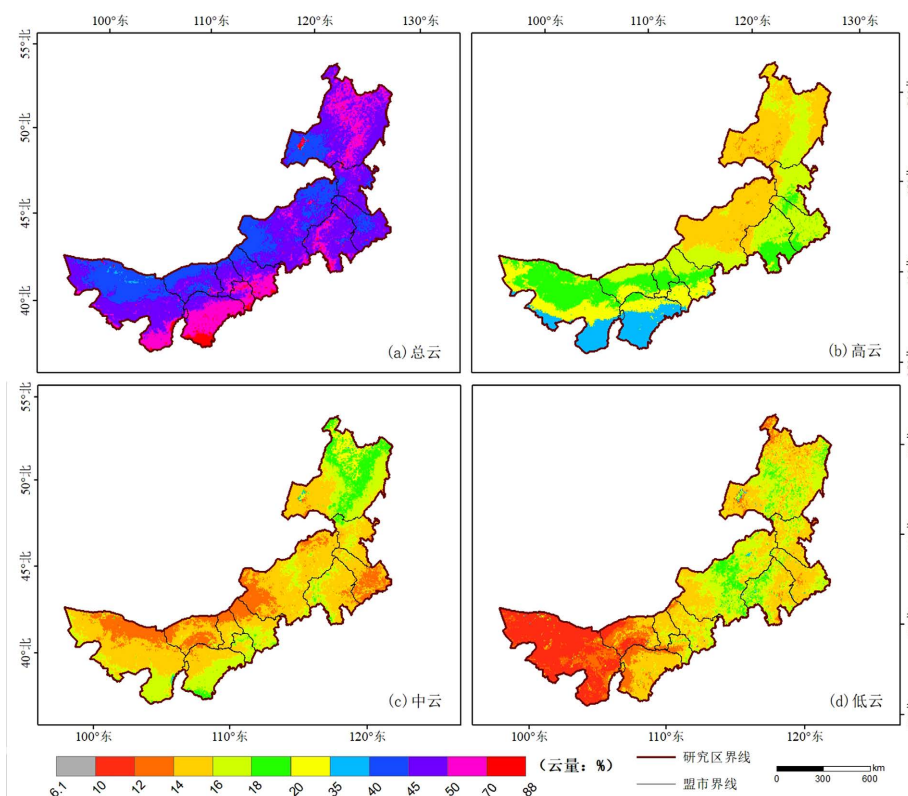


Figure 6. Spatial distribution of multi-year mean cloud fraction for different cloud types over Inner Mongolia

图 6. 内蒙古地区多年平均不同类型云的云量空间分布

从图 3 和图 6 可知, 在内蒙古地区总云量中高云量所占比例相对较大, 且呈明显的季节性变化和空间分布特征, 因此对 2016~2019 年多年季节平均总云量和高云量空间分布进行了更加深刻的讨论, 其总云量多年季节平均空间分布如图 7 所示。在春季, 内蒙古地区上总云量大部分地区大于 30% 以上, 在呼伦贝尔市部分地区云量达到 85% 以上, 鄂尔多斯市南部地区云量也达到 60% 以上(图 7(a))。在夏季, 内蒙古地区总云量达到四季之中的最大值, 与春季相比在中东部地区, 云量与云覆盖面积显著增加, 云量在 60%~80% 的区域扩大到研究区面积的 3/4 左右(图 7(b))。在秋季, 内蒙古地区上的云量与夏季相比显著减少, 其中在内蒙古西部地区云量减少到 20% 之内(图 7(c))。在冬季, 虽然最高云量(81.76%) 出现, 但呼伦贝尔市地区云量在 15% 左右, 这足以说明呼伦贝尔市地区冬季寒冷而雪大, 经常性的出现白毛风; 反而内蒙古西部地区(以乌兰察布往西)冬季暖和而雪少, 云量较多, 这将导致夏季干旱且降水量少(图 7(d))。

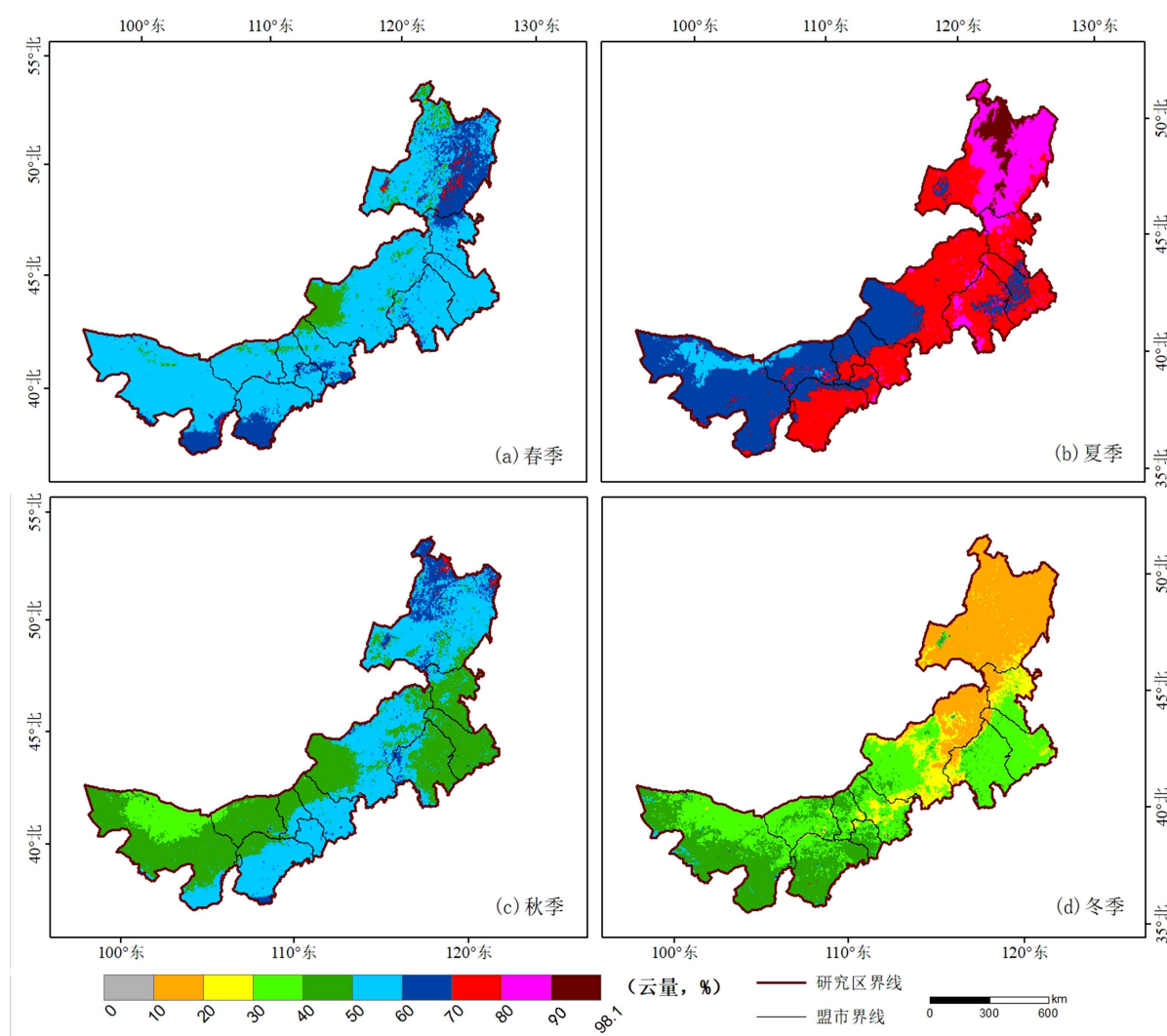


Figure 7. Seasonal mean spatial distribution of total cloud fraction over Inner Mongolia

图 7. 内蒙古地区总云量多年季节平均分布

从多年季节平均高云量空间分布特征得知(图 8), 在春季, 高云量大于 20% 以上的区域占研究区面积的大部分地区, 其中云量 26% 以上的区域主要分布在鄂尔多斯市南部、阿拉善盟南部和东部边疆地

区(图 8(a)); 在夏季, 内蒙古地区大部分区域云量达到 30%以上, 且在鄂尔多斯市南部、呼和浩特市、赤峰市南部和呼伦贝尔市东部等地区达到 34%以上, 呼伦贝尔市西部和锡林浩特盟地区云量为 30%以下(图 8(b)); 在秋季, 内蒙古地区大部分区域云量降到 20%之下, 且锡林浩特盟北部、呼伦贝尔市东部和阿拉善盟北部部分地区出现云量 12%以下(图 8(c)); 在冬季, 内蒙古地区大部分区域云量直降到 12%以下, 只有阿拉善盟西边和南部地区以及鄂尔多斯市南部地区的云量介于 12%~20%之间(图 8(d))。

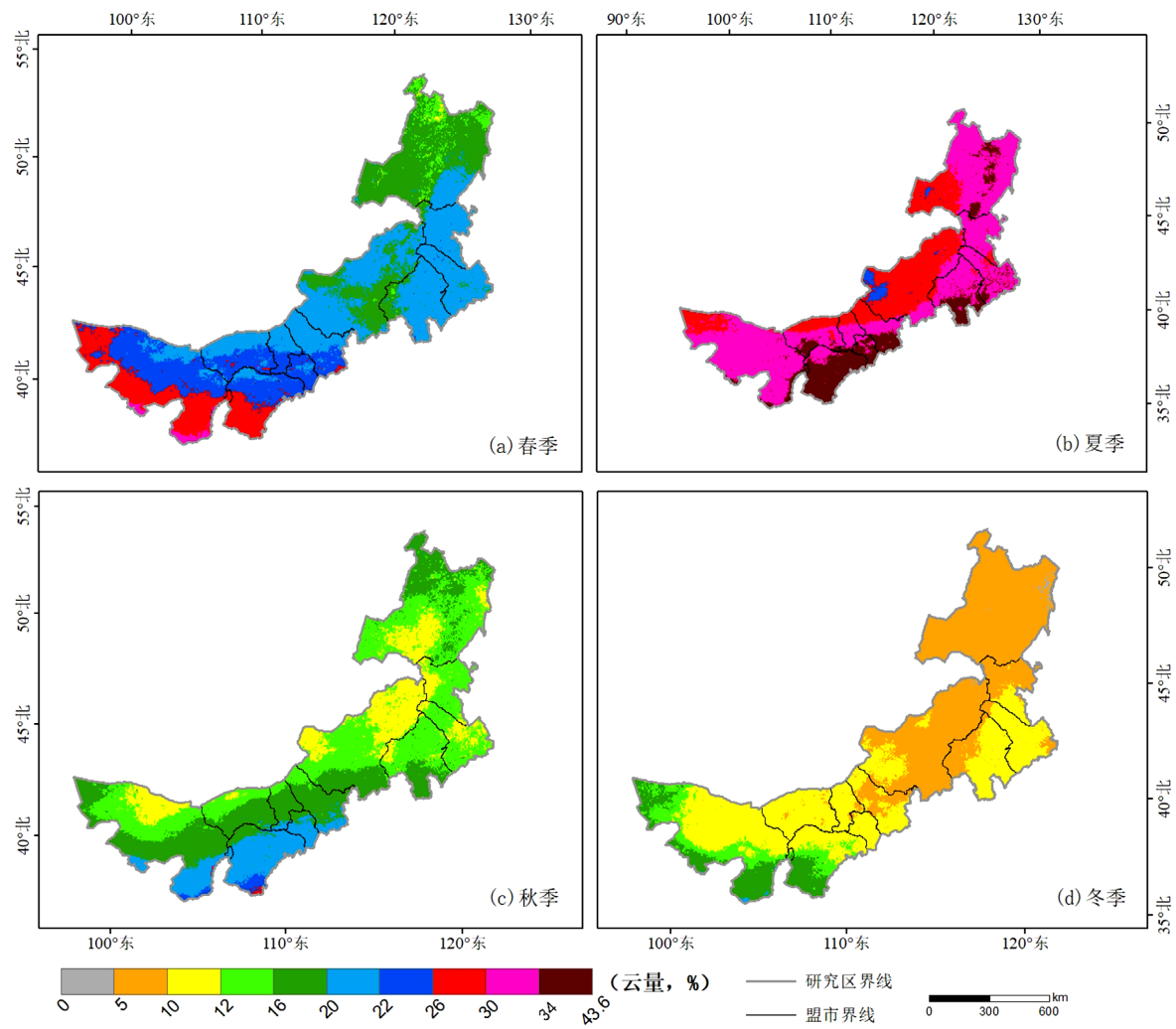


Figure 8. Climatological seasonal distribution of high-level cloud fraction over Inner Mongolia

图 8. 内蒙古地区多年季节平均高云的云量分布

3.2. 云光学厚度时空变化特征

3.2.1. 云光学厚度时间变化特征

从年平均不同类型云的云光学厚度分布图(图 9)和极值分布表(表 2)得知, 年平均总云光学厚度中高云所占比例相对较大, 平均贡献率分别为 53.3%, 中云(31.6%)的平均贡献率也均超过了 30%, 而低云的平均贡献率则最小(15.1%); 云光学厚度极值与云量极值分布年份一样, 总云和中云光学厚度均在 2016 年达到最大值(总云 5.56, 中云 1.99), 而且该年的高云光学厚度也相对较高(高云 2.85)。低云光学厚度四年间没超过 1, 最大值为 0.87。

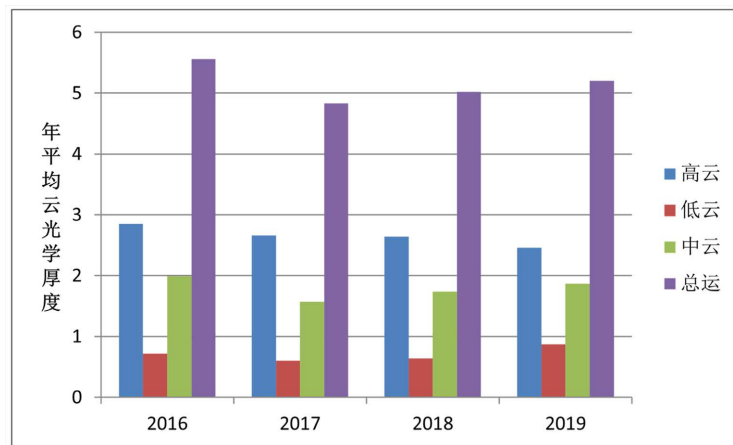


Figure 9. Annual mean cloud optical thickness by cloud type over Inner Mongolia
图 9. 内蒙古地区年平均不同类型云的云光学厚度

Table 2. Extreme values of cloud optical thickness by cloud type
表 2. 不同类型云的云光学厚度极值

类型	最大值(年份)	最小值(年份)
高云	5.25 (2016)	1.19 (2017)
低云	4.56 (2016)	0.08 (2017)
中云	5.85 (2016)	0.50 (2017)
总云	12.27 (2016)	2.21 (2017)

从多年月平均不同类型云的云光学厚度分布图(图 10)得知, 内蒙古地区上云光学厚度在一年里呈现出明显的季节性变化特征。从图 10 得知, 总云在 5~10 月平均云光学厚度超过了 5, 呈现出单峰的分布特征; 高云光学厚度也呈现出单峰的分布特征, 且在 7~8 月份呈现较高的云光学厚度(大于 6), 3~9 月云光学厚度高于中云, 相反 9~12 月低于中云; 中云光学厚度呈现单峰的分布特征, 且云光学厚度相对低(最小值为 0.34), 1~3 月和 11~12 月云光学厚度不到与 1, 而 6~10 月云光学厚度相对平稳, 高于 2; 低云光学厚度相对平稳, 且云光学厚度相对较低(最小值为 0.22); 除 12 月以外的其它月份均低于 1; 3~11 月可以明显看出高云和中云光学厚度都比低云高; 而 1~3 月和 11~12 月低云比高云和中云相对高。

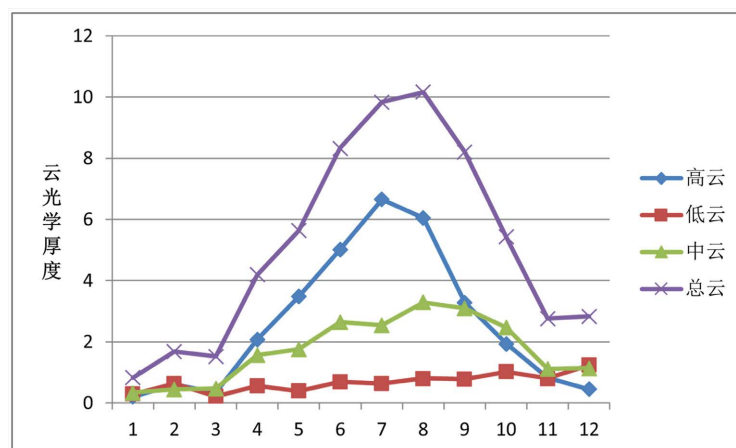


Figure 10. Multi-year monthly mean cloud optical thickness by cloud type over Inner Mongolia
图 10. 内蒙古地区多年月平均不同类型云的云光学厚度

从不同季节不同类型云的云光学厚度年际变化图(图 11)得知,在春季,低云光学厚度相对较薄,在 2017 年为最小值 0.01(图 11 春季);在夏季,高云和总云光学厚度相对厚,高云光学厚度最大值达到 6.23,总云光学厚度最大值达到 9.87,变化趋势相对平稳,而低云和中云光学厚度相对薄,低云光学厚度最小值为 0.64,比起其他季节,夏季的高云和总云光学厚度相对厚(图 11 夏季);在秋季,云光学厚度比起夏季较薄,高云和中云光学厚度相对一样,如 2016 年高云光学厚度为 2.69,中云光学厚度为 2.63。总云光学厚度最大值达到 6.3(图 11 秋季);在冬季,高云、低云、中云和总云光学厚度比其他季节相对薄,2016、2017 和 2018 年总云光学厚度没超过 1.5(最大值达到 1.44)。2019 年起,显然提升。由于内蒙古大部分地区冬季云量少,而导致云光学厚度也薄(图 11 冬季)。

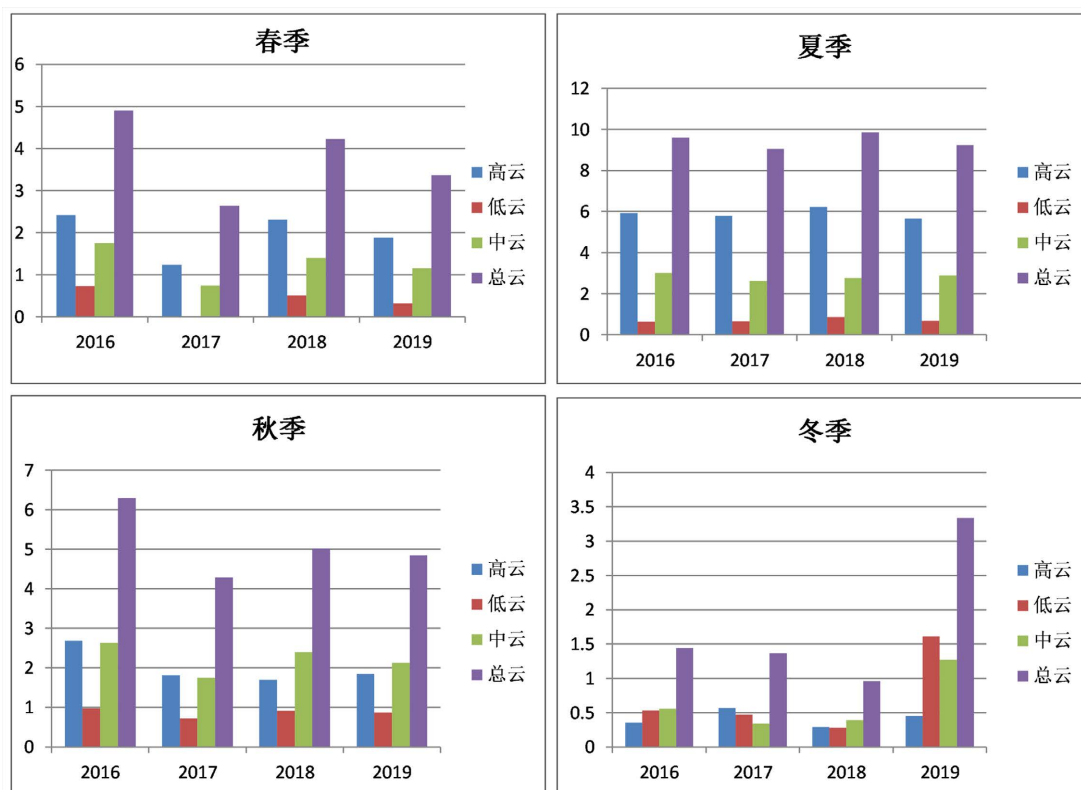


Figure 11. Interannual variations of cloud optical thickness by season and cloud type

图 11. 不同季节不同类型云的云光学厚度年际变化

3.2.2. 云光学厚度空间变化特征

从 2016~2019 年内蒙古地区多年平均不同类型云的云光学厚度(COT)空间分布图(图 12)得知: ① 总云 $COT \leq 5$ 的区域主要分布在阿拉善盟北部、巴彦淖尔市北部和南部地区, 约占研究区面积的 13.62%; 而 $COT > 5$ 的区域约占研究区面积的大部分地区, 其中内蒙古中部和东部部分高海拔地区 COT 达到了 7 以上(图 12(a)). ② 高云 COT 的值域分布于[1.51, 5.12]之间, $COT > 2.5$ 的区域主要分布在内蒙古大部分地区, 约占研究区面积的 5/6, 其中, $COT > 3$ 的区域主要集中在内蒙古南部和东部地区(图 12(b)). ③ 中云 COT 虽然值域分布在[0.59, 3.93]之间, 但 $COT \leq 2.5$ 的区域达到研究区面积的大部分地区, COT 相对较高的区域主要分布在呼伦贝尔市中部、东部、赤峰市和锡林浩特盟边疆地区(图 12(c)); 在所有类型云中低云 COT 相对较低, $COT < 1$ 的区域仅占研究区面积的约 2/5, $COT < 0.5$ 的区域主要分布在阿拉善盟北部地区(图 12(d)).

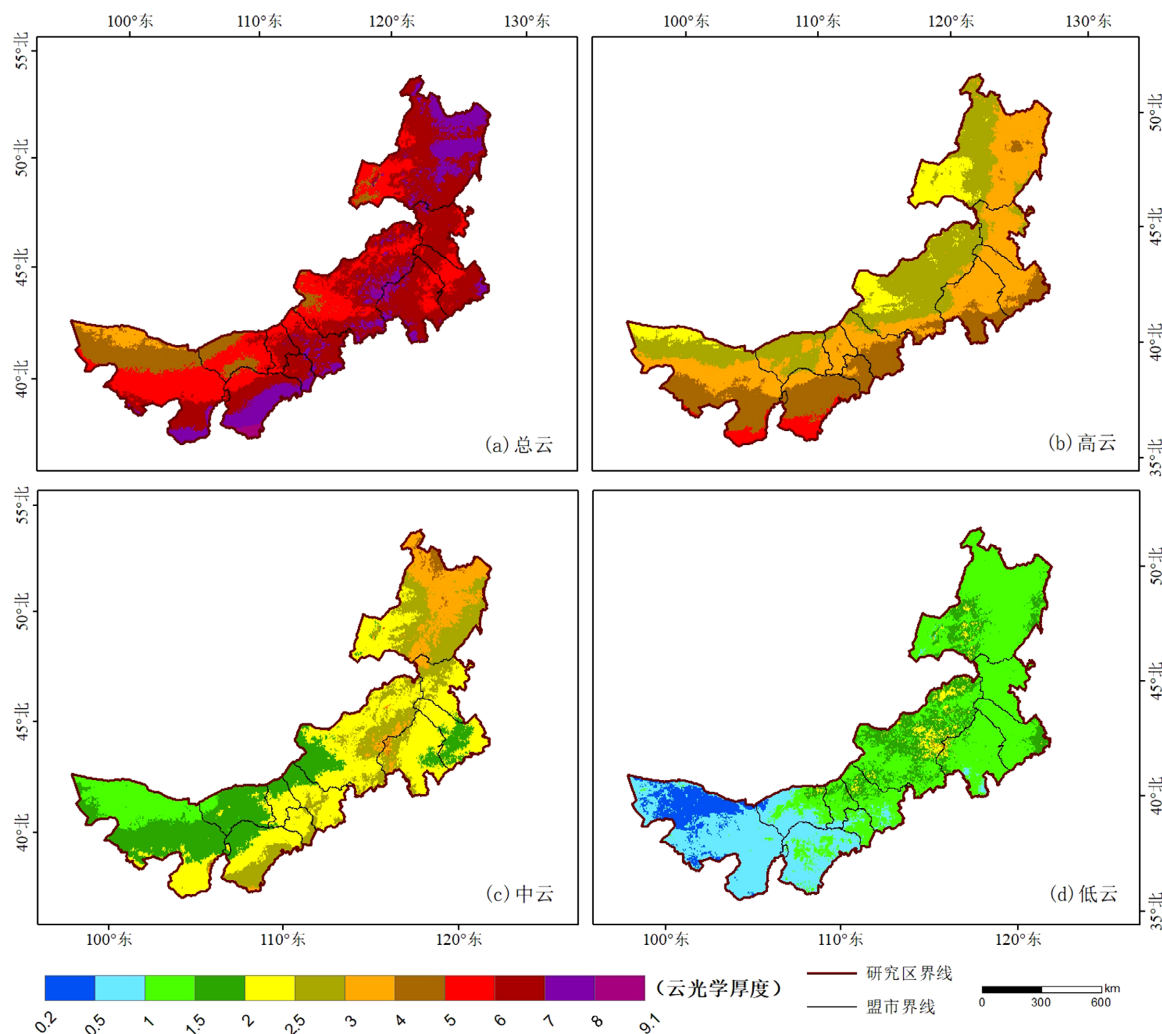


Figure 12. Climatological mean cloud optical thickness for total, high-, mid-, and low-level clouds over Inner Mongolia
图 12. 内蒙古地区多年平均总云、高云、中云和低云的云光学厚度

从多年季节平均总云光学厚度空间分布图得知(图 13): ① 在春季, 总云 $COT > 5$ 的区域占研究区面积的将近 1/2, 主要分布在内蒙古东部以及东南部地区, $3 < COT < 4$ 的区域主要分布在内蒙古西北和中北部地区(图 13(a)); ② 在夏季, 内蒙古大部分地区的总云 COT 达到较大值, 其中, $COT < 8$ 的区域占研究区面积的较小部分, 主要分布在锡林浩特盟西北部和阿拉善盟北部地区(图 13(b)). ③ 在秋季, 内蒙古大部分地区的总云 COT 值比夏季减少, 其中, 总云 $COT < 3$ 的区域主要分布在阿拉善盟北部地区(图 13(c)). ④ 在冬季, 总云 COT 最低值达到 0.34, 其值域分布于 $[0.34, 10.49]$ 之间, 总云 $1 < COT < 2$ 的区域主要分布在呼伦贝尔市地区(图 13(d)).

从多年季节平均高云云光学厚度空间分布特征得知(图 14): ① 在春季, 高云 COT 主要介于 $(2, 4]$ 之间, 约占研究区面积 3/5, $COT < 2$ 的区域主要分布在呼伦贝尔市大部分地区和锡林浩特盟西部地区(图 14(a)). ② 在夏季, 高云 COT 整体达到最大, 其值域分布于 $[3.35, 9.78]$ 之间, 其中, $COT > 7$ 的区域达到研究区面积的大部分地区, $4 < COT < 6$ 的区域主要分布在呼伦贝尔市新巴尔虎右旗地区(图 14(b)). ③ 在秋季, 高云 COT 比夏季 COT 有所减少, 其 $COT > 4$ 的区域主要分布在内蒙古西南部地区, $COT < 1$ 的区域主要分布在阿拉善盟北部地区(图 14(c)); 在冬季, 高云 COT 整体达到最小, $COT \leq 1$ 的区域达到

研究区面积的大部分地区， $COT > 1.4$ 的区域主要分布在阿拉善盟南部地区和鄂尔多斯市南部地区(图 14(d))。

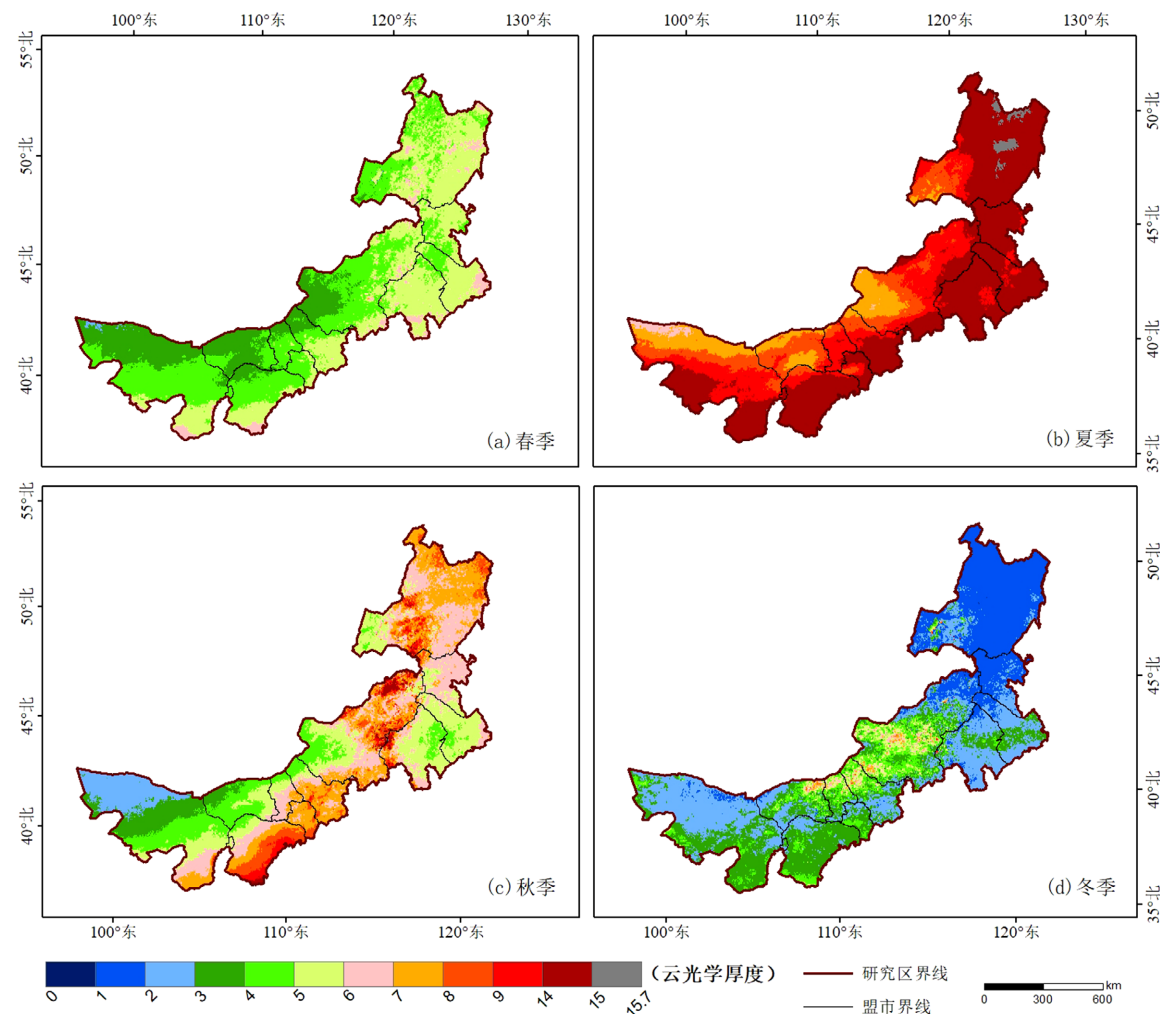
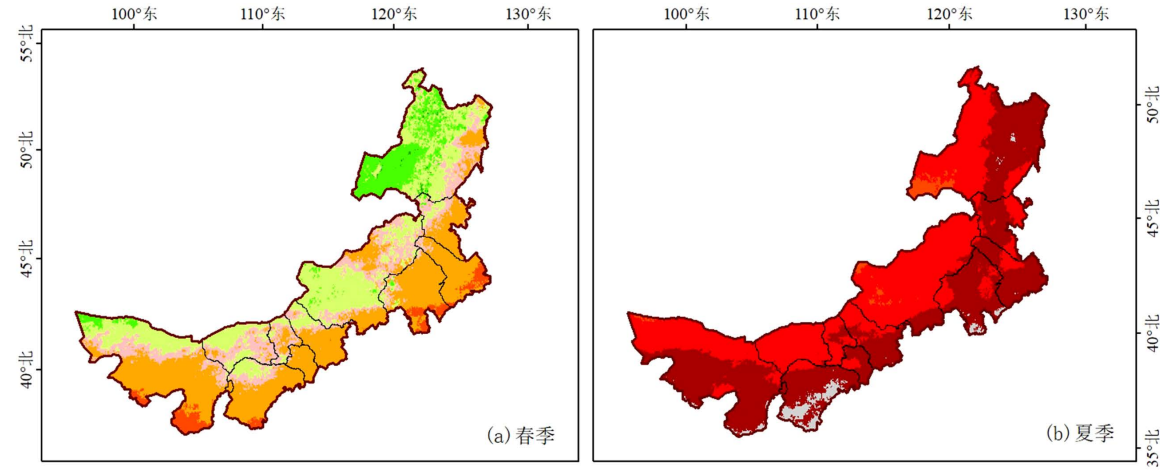


Figure 13. Climatological seasonal mean cloud optical thickness for total cloud cover over Inner Mongolia
图 13. 内蒙古地区多年季节平均总云云光学厚度



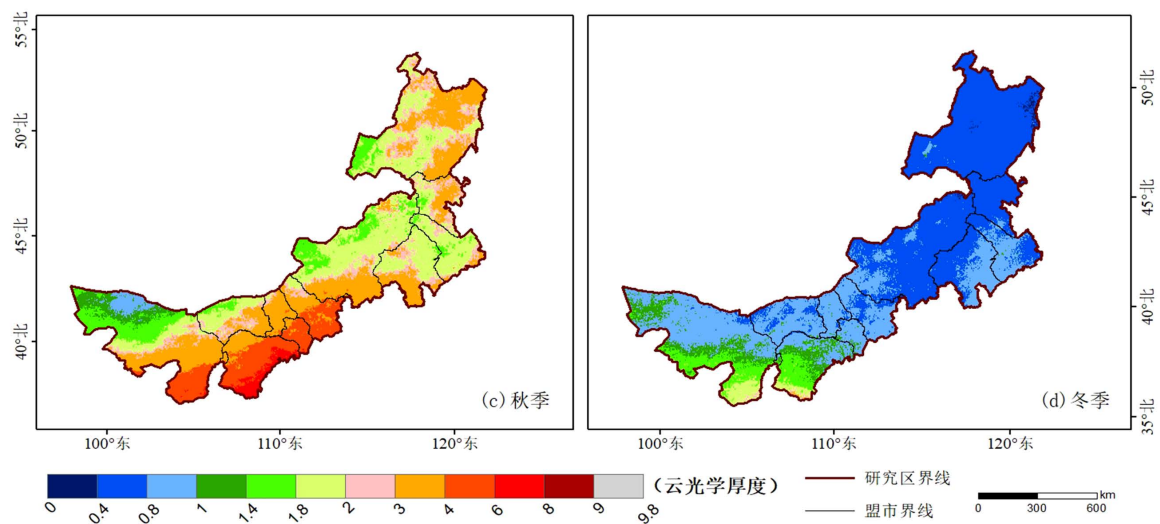


Figure 14. Seasonal mean cloud optical thickness of high-level clouds over Inner Mongolia
图 14. 内蒙古地区季节平均高云云光学厚度

3.3. 云有效粒子半径时空变化特征

3.3.1. 云有效粒子半径时间变化特征

从年平均不同类型云的有效粒子半径分布图(图 15)和极值分布表(表 3)得知, 年平均总云有效粒子半径中高云所占比例相对较大, 平均贡献率为 51.24%, 低云(38.21%)的平均贡献率也均超过了 35%, 而中云的平均贡献率则最小(37.23%); 云有效粒子半径极值与云量极值分布年份一样, 总云和中云有效粒子半径均在 2019 年达到最大值, 而且该年的高云光学厚度也相对较高。

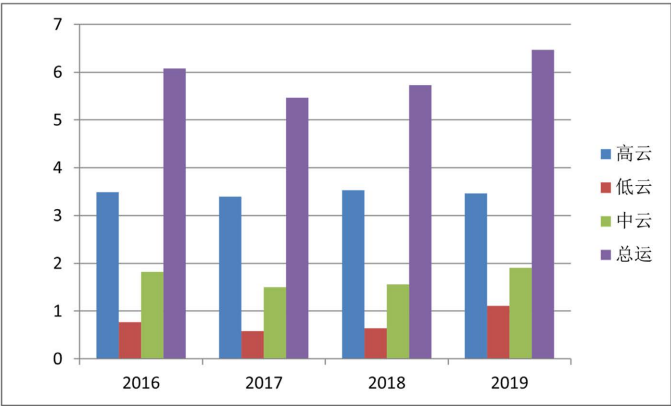


Figure 15. Annual mean effective particle radius by cloud type over Inner Mongolia
图 15. 内蒙古地区年平均不同类型云的有效粒子半径

Table 3. Effective particle radius (μm) of different cloud types in Inner Mongolia
表 3. 内蒙古地区不同类型云的有效粒子半径(μm)

类型	最大值(年份)	最小值(年份)
高云	5.78 μm (2016)	1.70 μm (2017)
低云	4.31 μm (2016)	0.01 μm (2017)
中云	4.20 μm (2016)	0.39 μm (2017)
总云	11.28 μm (2016)	2.92 μm (2017)

从多年月平均不同类型云的有效粒子半径分布图(图 16)得知, 内蒙古地区上云的有效粒子半径在年内呈现出明显的季节性特征。从图 16 得知, 月平均总云有效粒子半径在 5~8 月超过了 $8\ \mu\text{m}$, 呈现出单峰的分布特征; 高云有效粒子半径也呈现出单峰的分布特征, 且在 6~8 月份呈现较大的云有效粒子半径(大于 $6\ \mu\text{m}$), 3~10 月高云有效粒子半径大于中云, 相反 10~12 月小于中云; 中云有效粒子半径呈现相对平稳的分布特征, 且云有效粒子半径相对小, 1~3 月和 11~12 月云有效粒子半径不大于 $1\ \mu\text{m}$, 而 4~10 月云有效粒子半径比较平稳, 在 $2\ \mu\text{m}$ 附近波动; 低云有效粒子半径呈现比较低的单谷现象, 且云有效粒子半径相对较小; 除 11 月和 12 月以外的其它月份均小于 $1\ \mu\text{m}$; 3~10 月可以明显看出高云和中云有效粒子半径都比低云大。

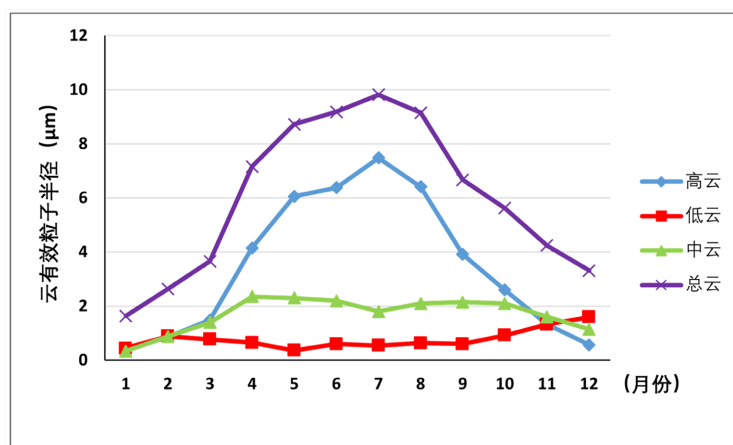
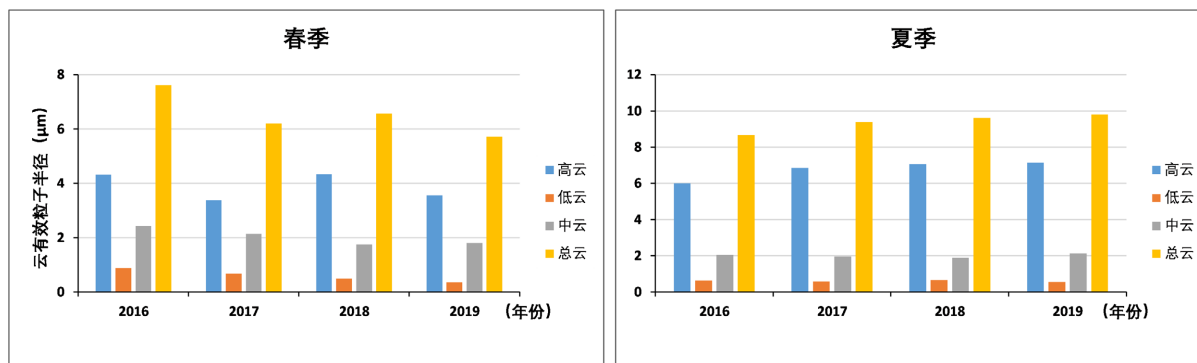


Figure 16. Multi-Year Monthly Mean Effective Particle Radius by Cloud Type over Inner Mongolia
图 16. 内蒙古地区多年月平均不同类型云的有效粒子半径

从不同季节不同类型云的有效粒子半径的年际变化图(图 17)得知: 在春季, 低云有效粒子半径(2016~2019)逐渐减小。在一年四季里, 低云有效粒子半径没有太大变化, 相对平稳。中云有效粒子半径(2016~2018)也逐渐减小。总云有效粒子半径出现在 2016 年大小接近于 $8\ \mu\text{m}$; 而高云有效粒子半径在 2016 年和 2018 年特别接近; 在夏季, 四年间低云有效粒子半径没超过 $1\ \mu\text{m}$, 变化相对平稳。而高云和总云有效粒子半径逐渐增大, 总云有效离子半径最高值接近于 $10\ \mu\text{m}$; 在秋季, 高云有效粒子半径比起夏季小, 总云有效粒子半径也一样; 而低云有效粒子半径在 2018 年和 2019 年比夏季大; 在冬季, 内蒙古地区云量相对少, 天空晴朗, 导致云有粒子半径也很小。只有 2019 年总云有效粒子半径相对大。低云有效粒子半径前三年没超过 $2\ \mu\text{m}$, 但是在 2019 年超过了 $2\ \mu\text{m}$, 很明显的看出 2019 年低云有效粒子半径直接影响了 2019 年总云有效粒子半径值。



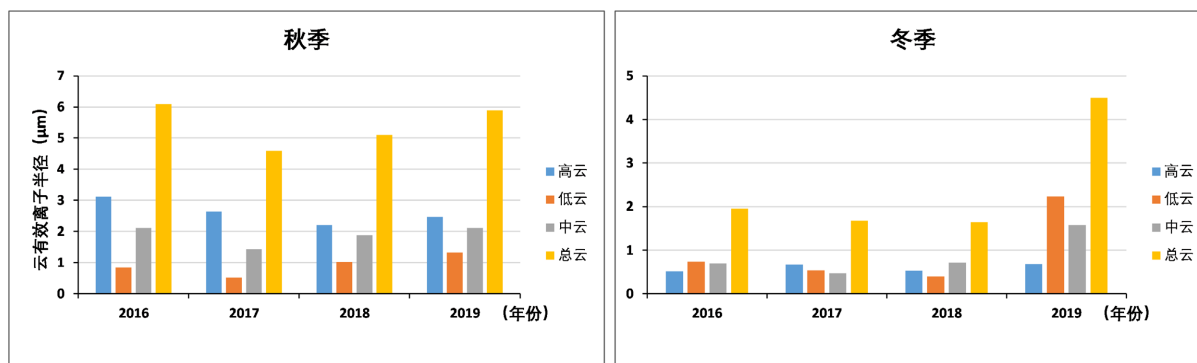


Figure 17. Seasonal mean effective particle radius for total, high-, mid-, and low-level clouds

图 17. 季节平均总云、高云、中云和低云有效粒子半径

3.3.2. 云有效粒子半径空间变化特征

从 2016~2019 年内蒙古地区多年平均不同类型云的有效粒子半径(CER)空间分布图(图 18)得知: ① 总云 $CER \leq 6 \mu m$ 的区域主要分布在内蒙古阿拉善盟北部地区和锡林浩特盟西部地区; 而 $CER > 6 \mu m$ 的区域约占研究区面积的大部分地区, 其中鄂尔多斯市南部、呼和浩特市和乌兰察布市南部地区 CER 达到了 $8 \mu m$ 以上(图 18(a)). ② 高云 CER 的值域分布于 $[1.96 \mu m, 5.65 \mu m]$ 之间, $CER > 3.5 \mu m$ 的区域主要分布在研究区大部分地区, 约占研究区 4/5, 其中, $CER > 5$ 的区域主要集中在内蒙古西南部地区(图 18(b)). ③ 中云 CER 虽然值域分布在 $[0.46 \mu m, 3.44 \mu m]$ 之间, 但 $CER \leq 2.5 \mu m$ 的区域达到研究区面积的大部分地区, CER 相对较高的区域主要分布在呼伦贝尔市地区(图 18(c)); 在所有类型云中低云 CER 相对较低, $CER < 1 \mu m$ 的区域仅占研究区面积的较少部分, 且主要分布在阿拉善盟地区(图 18(d)).

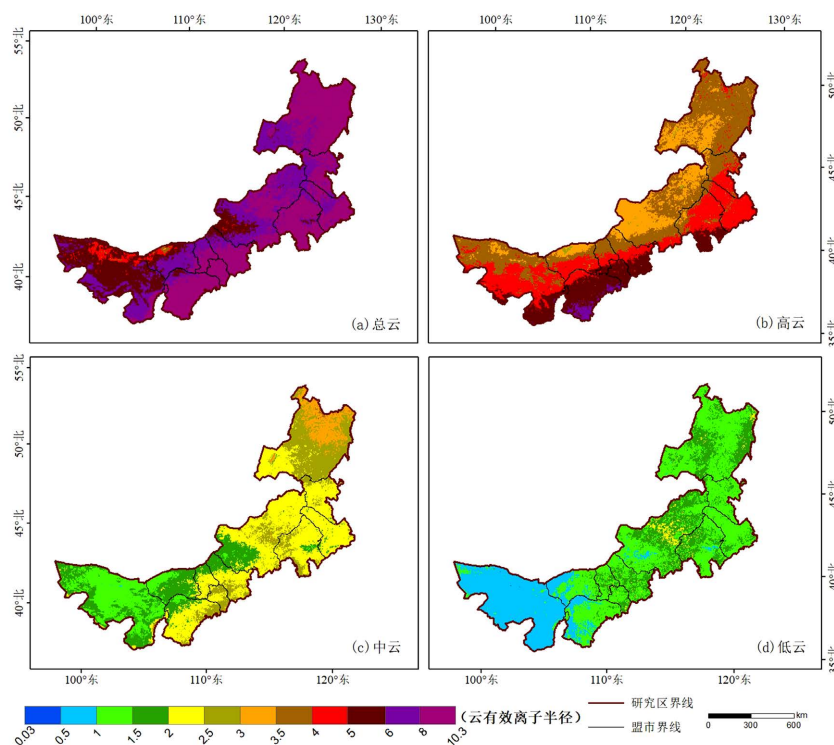


Figure 18. Climatological mean effective particle radius for total, high-, mid-, and low-level clouds over Inner Mongolia

图 18. 内蒙古地区多年平均总云、高云、中云和低云有效粒子半径

从多年季节平均高云有效粒子半径空间分布特征得知(图 19): ① 在春季, 高云 CER 主要介于($4\ \mu\text{m}$, $6\ \mu\text{m}$]之间, 约占研究区面积 4/5, 其中, $\text{CER} > 6\ \mu\text{m}$ 的区域主要集中在内蒙古西南部分地区(图 19(a))。② 在夏季, 高云 CER 整体达到最大值, 其值域分布于 $[4.53\ \mu\text{m}, 9.45\ \mu\text{m}]$ 之间, 其中, $6\ \mu\text{m} < \text{CER} < 7\ \mu\text{m}$ 的区域达到研究区面积的 2/6 地区, 主要分布在锡林浩特盟北部和阿拉善盟北部地区(图 19(b))。③ 在秋季, 高云 CER 比夏季高云 CER 有所减少, 其 $\text{CER} > 3\ \mu\text{m}$ 的区域主要分布在内蒙古大部分地区, 高云 $\text{CER} > 5\ \mu\text{m}$ 区域主要分布在鄂尔多斯市和呼和浩特市南部地区(图 19(c)); 在冬季, 高云 CER 整体达到最小, $\text{CER} \leq 1\ \mu\text{m}$ 的区域达到研究区面积的大部分地区, 而 $\text{CER} > 1.5\ \mu\text{m}$ 的区域主要分布在鄂尔多斯市南部、阿拉善盟南部和西部地区(图 19(d))。

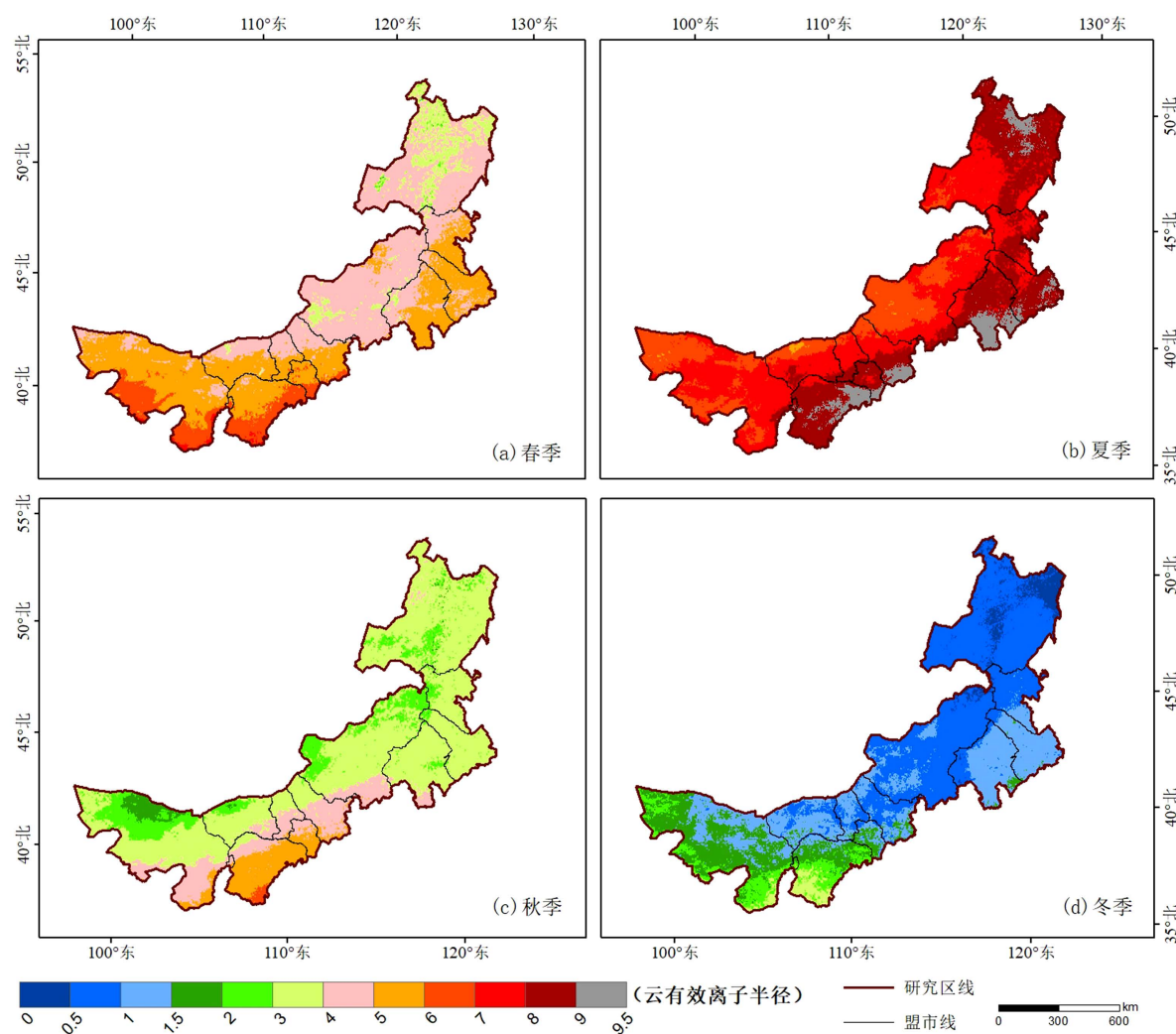


Figure 19. Climatological seasonal mean effective particle radius of high-level clouds over Inner Mongolia

图 19. 内蒙古地区多年季节平均高云有效粒子半径

从多年季节平均总云有效粒子半径空间分布特征得知(图 20): ① 在春季, 总云 $\text{CER} > 8\ \mu\text{m}$ 的区域占研究区面积的将近 1/3, 主要分布在内蒙古东部地区和西南部地区(图 20(a))。② 在夏季, 内蒙古大部分地区的总云 CER 达到最大值, 其中, 总云 $\text{CER} > 14\ \mu\text{m}$ 的区域面积达到研究区面积的将近 1/6, 主要分布在呼伦贝尔市北部地区(图 20(b))。③ 在秋季, 内蒙古大部分地区的总云 CER 值比夏季减少, 其中,

总云 CER $< 5 \mu\text{m}$ 的区域主要分布在内蒙古西北部地区(图 20(c))。④ 在冬季, 总云 CER 最低值达到 $0 \mu\text{m}$, 其值域分布于 $[0 \mu\text{m}, 9.45 \mu\text{m}]$ 之间, 总云 CER $< 2 \mu\text{m}$ 的区域主要分布在呼伦贝尔市地区(图 20(d))。

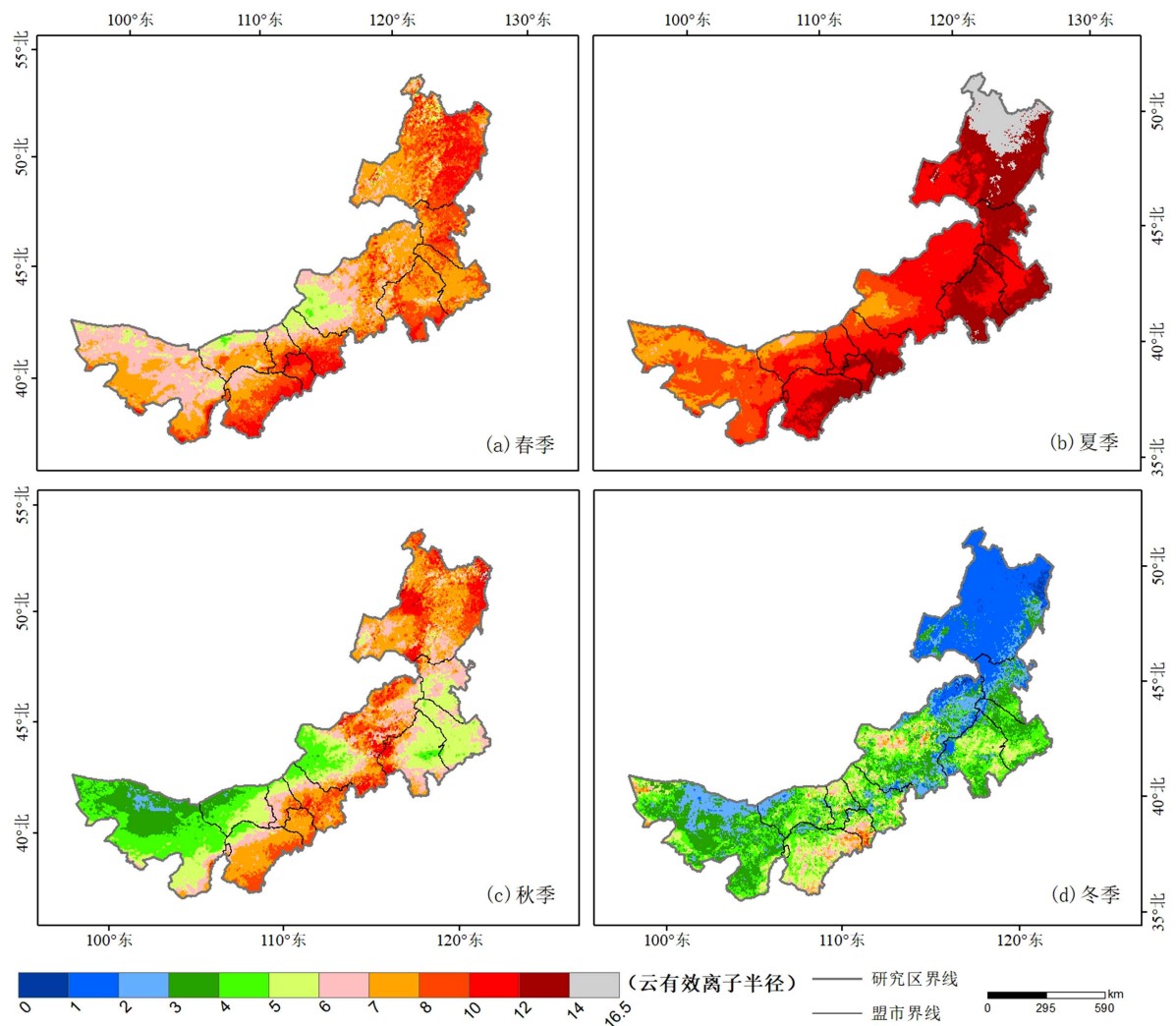


Figure 20. Climatological seasonal mean effective particle radius of total cloud cover over Inner Mongolia

图 20. 内蒙古地区多年季节平均总云有效离子半径

4. 结论与讨论

4.1. 结论

内蒙古地区云量时空分布与变化分析表明, 该地区总云云量夏季呈现增加趋势, 冬季呈现出下降的趋势, 而且内蒙古地区云光学厚度和云有效粒子半径也呈现相似的分布特征。在年平均总云云量中, 高云所占比例最大, 其中年平均总云云量、云光学厚度和云有效粒子半径之中高云的贡献率分别达到 38.09%、51.46%、63.02%。本文主要针对 2015 年 7 月~2020 年 6 月内蒙古地区云量、云光学厚度和云有效粒子半径的总云、高云、中云和低云时空变化特征进行了分析, 得出以下主要结论:

(1) 在年尺度上, 总云主要分布在内蒙古东部和中部地区, 其云量达到 35%以上, 云光学厚度大于 3, 云有效粒子半径大于 $4 \mu\text{m}$, 呈现出云参量从东北向西南减少的分布特征, 并且经分析表明云量变化的

原因之一,很可能是温度的升高;高云主要分布在内蒙古西部和南部地区,其云量为 14%以上,云光学厚度大于 2,云有效粒子半径大于 3 μm ,内蒙古地区中心区域的云参量值相对较低。

(2) 在季节尺度上,总云和高云的云量、云光学厚度和云有效粒子半径呈现出明显的季节性变化和空间分布特征。① 高云的云量在夏季整体达到四季之中最大值,其中,在内蒙古南部地区、东部地区和东北部地区云量的值相对较大;在该季节呈现出增加趋势的区域主要分布在内蒙古西南部地区,呈现出减少趋势的区域主要分布在内蒙古中北部地区;春季的云量仅次于夏季,但在该季节云量主要呈现出增加趋势;冬季的云量相对较小,总云和高云云量最小值达到 10%和 5%,而秋季的云量主要呈现出减少趋势,冬季的总云、高云和中云云量呈现出增加趋势。② 总云和高云光学厚度的时空变化特征中得知:夏季达到最大值(总云 COT 15.74,高云 COT 9.78),秋季的云光学厚度仅次于夏季,但在该季节云光学厚度主要呈现减少趋势;冬季的云光学厚度相对较小(最小值接近于 0),而春季的云光学厚度主要呈现增加趋势,冬季除了低云的云光学厚度以外,其余的云光学厚度呈现增加趋势;③ 总云和高云有效粒子半径的时空变化特征中得知:与云光学厚度类似,在夏季达到最大值(总云 CER 16.54 μm ,高云 CER 9.45 μm);不同之处在于总云和高云有效粒子半径的值在春夏相对较大,仅次于秋季。

4.2. 讨论

由于内蒙古地区的水汽来源受到地表摩擦和地形阻挡的作用,促使该地区云参量(云量、云光学厚度和云有效粒子半径)分布呈明显的区域和季节特征,其分布与内蒙古地区上的山脉、山岭分布和水汽输送结构等关系密切,显示了内蒙古地区周围水循环过程与海拔高度和季风演化的相互作用特征。内蒙古地区水汽主要来自太平洋,在夏季尤为明显[16]。夏季,除内蒙古地区西缘与地形动力强迫密切相关外,云参数的分布也与该地区非均匀水汽“湿锋”密切相关[17]。

参考文献

- [1] 韩成鸣,李耀东,史小康.云分析预报方法研究进展[J].地球科学进展,2015,30(4):505-516.
- [2] 达布希拉图,苏立娟,邓晓东.内蒙古地区云量时空分布及变化趋势分析[J].气象科技,2009,37(3):306-310.
- [3] 吴晓,游然,王旻燕,谷军霞.基于 MODIS 云宏微观特性的卫星云分类方法[J].应用气象学报,2016,27(2):201-208.
- [4] Hartmann, D.L. and Doelling, D. (1991) On the Net Radiative Effectiveness of Clouds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **96**, 869-891. <https://doi.org/10.1029/90jd02065>
- [5] Ding, S. (2004) Analyzing Global Trends of Different Cloud Types and Their Potential Impacts on Climate by Using the ISCCP D2 Dataset. *Chinese Science Bulletin*, **49**, 1301-1306. <https://doi.org/10.1360/03wd0614>
- [6] Zib, B.J., Dong, X., Xi, B. and Kennedy, A. (2012) Evaluation and Intercomparison of Cloud Fraction and Radiative Fluxes in Recent Reanalyses over the Arctic Using BSRN Surface Observations. *Journal of Climate*, **25**, 2291-2305. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-11-00147.1>
- [7] 刘洪利,朱文琴,宜树华,等.中国地区云的气候特征分析[J].气象学报,2003,61(4):466-473.
- [8] 王艺,伯玥,王澄海.青藏高原中东部云量变化与气温的不对称升高[J].高原气象,2016,35(4):908-919.
- [9] Zhou, X., Zhang, H., Jing, X., et al. (2016) Distribution and Variation Trends of Cloud Amount and Optical Thickness over China. *Journal of Atmospheric & Environmental Optics*, **11**, 1-10.
- [10] 朝鲁门,宁小莉,包玉海,胡斯勒图,秦福莹,尚华哲.基于葵花-8 卫星的白天冰云识别初探[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2019,40(2):45-49.
- [11] 肖武平.日本首颗新一代气象卫星向日葵-8 入轨[J].国际太空,2015(434):87-91.
- [12] 闵敏,王富.日本新一代静止气象卫星葵花 8 号科学产品近实时处理系统[C]//中国气象学会.第 33 届中国气象学会年会 S21 新一代气象卫星技术发展及其应用.2016:187-196.
- [13] Shang, H., Letu, H., Nakajima, T.Y., Wang, Z., Ma, R., Wang, T., et al. (2018) Diurnal Cycle and Seasonal Variation of Cloud Cover over the Tibetan Plateau as Determined from Himawari-8 New-Generation Geostationary Satellite Data.

Scientific Reports, **8**, Article No. 1105. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19431-w>

- [14] 今井崇, 吉田良. Himawari-8 云掩模产品的算法理论基础[R]. 气象卫星中心技术报告, 2016.
- [15] Bao, S., Letu, H., Zhao, C., Tana, G., Shang, H., Wang, T., *et al.* (2019) Spatiotemporal Distributions of Cloud Parameters and the Temperature Response over the Mongolian Plateau during 2006-2015 Based on MODIS Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **12**, 549-558.
<https://doi.org/10.1109/jstars.2018.2857827>
- [16] 王菱, 甄霖, 刘雪林, 等. 蒙古高原中部气候变化及影响因素比较研究[J]. 地理研究, 2008, 27(1): 171-180.
- [17] 苗秋菊, 徐祥德, 施小英. 青藏高原周边异常多雨中心及其水汽输送通道[J]. 气象, 2004, 30(12): 44-46.