

基于ERA5数据的内蒙古降水量时空变化特征研究

兴安

内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2023年12月19日; 录用日期: 2024年2月24日; 发布日期: 2024年2月29日

摘要

本文采用内蒙古自治区1979~2018年精度为1小时的ERA5降水数据, 通过使用趋势分析法、线性拟合和统计分析法计算获得月降水量, 四季降水量和近40年平均降水量的时间和空间分布。经过研究结果表明, 不同时间段里, 各个地区的降水量变化特征不一样, 东部呼伦贝尔一带地区、中部赤峰地区和西部阿拉善一带地区的气候倾向率不同; 并且1979年到2018年降水量呈现出减少趋势, 一年中降水量主要分布在夏季, 夏季降水量是214毫米; 一年里降水量最少的季节是冬季, 降水量仅有14毫米左右。内蒙古地区在近40年平均降水量空间分布图上在呼伦贝尔市最多, 其次是赤峰一带地区, 在阿拉善盟降水量分布最少。

关键词

降水量, ERA5, 内蒙古, 时空演变

Research on Temporal and Spatial Variation Characteristics of Precipitation in Inner Mongolia Based on ERA5 Data

An Xing

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

Received: Dec. 19th, 2023; accepted: Feb. 24th, 2024; published: Feb. 29th, 2024

Abstract

Using Inner Mongolia Autonomous Region's ERA5 reanalysis precipitation data with an accuracy

of 1 hour from 1979 to 2018, the temporal and spatial distribution of monthly precipitation, four-season precipitation and the average precipitation in the past four decades are calculated by using the trend analysis method, linear fitting and statistical analysis method. After research results, the characteristics of precipitation changes in different regions are different in different time periods. The climate tendency rates of the eastern Hulunbuir area, the central Chifeng area and the western Alxa area are different; and the precipitation from 1979 to 2018 shows a decreasing trend, the precipitation in a year is mainly distributed in summer, with summer precipitation being 214 mm; the least precipitation season of the year is winter, with precipitation only about 14 mm. On the spatial distribution map of average precipitation in the past 40 years, Inner Mongolia has the largest amount of precipitation in the Hulunbuir League, followed by the Chifeng area, and the least in the Alxa League.

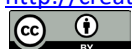
Keywords

Precipitation, ERA5, Inner Mongolia, Temporal and Spatial Evolution

Copyright © 2024 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

降水从古至今都与人类的生活有着密不可分的关系，是气候研究人员、农牧民和国家一直以来关注的问题。降水是一个最重要的也是最难预测的气象要素，跟踪、监测、分析、预测降水对于水资源的调控和利用以及农业和牧业的产量具有重要且直接的影响，同时降水与泥石流、洪水、干旱等灾害密切相关[1][2]。降水作为水循环中一个重要组成部分，对于了解内蒙古地区水循环有着至关重要的意义。极端降水天气对人类造成的伤亡不可估量，特别是强对流天气。典型的强对流天气具有影响范围和空间尺度小以及强度大和破坏性强等特点。内蒙古地区常见的冰雹、大风雷阵雨和短时强降雨等都是强降水造成的。它们的突发性和强大的破坏力让农民和牧民猝不及防，进而会导致严重的经济损失。因此我们必须提升对降水的观察测量精度[3]。

内蒙古坐落于中国北部边疆，气候相对复杂、降水量在夏季比较集中，多数为大强度的阵性降水。内蒙古大部分地区的土壤类型为沙壤土，沙壤土的土质疏松。一些植物的生长状况不好往往是降水量少造成的[4]。内蒙古地区的降水量少，是因为位于干旱和半干旱区域，所以生态环境薄弱，对气温升高、降水量减少等环境变化的适应能力有限，所以内蒙古地区属于气候变化敏感地区。随着二氧化碳、甲烷等全球温室气体排放量的增加，内蒙古地区正在经历明显的升温和干旱以及日益严重的水资源短缺。通过对过去近40年的观测数据分析发现，近几十年在内蒙古地区的变暖趋势高于全球平均值，并且降水量有着明显的减少趋势。

1.2. 国内外研究进展

雨量计和气象雷达以及遥感卫星是当前主流的降水测量方法。雨量计的宏观缺点是数量少、分布不均匀不平衡，不能很好地反映降水量的时空变化特征，测量大空间尺度的降水时非常有难度。气象雷达能测量到大面的数据，但由于系统误差精度不是很高。而气象卫星可以提供覆盖范围大、分辨率高以及

不受地形影响的降水数据。气象卫星的分辨率高且覆盖面积大，因为它的轨道离地面高度是 700 到 1000 公里，并且静止气象卫星和采用太阳同步轨道的卫星可以实时获取降水信息。

在国外，Alan K. Betts 等(2019)使用加拿大卡斯柯彻温省四个气象站的降水数据、Mekis 和 Vincent 的第二代调整后的降水数据集和 ERA5 降水数据进行了对比评估。对于温暖的季节，ERA5 具有比 Mekis 数据集高 $8\% \pm 9\%$ 的偏差。ERA5 比冬季的 Mekis 估计低 $-22\% \pm 7\%$ ，这表明他们对降雪的校正幅度可能太大，对降水偏差可能很小[5]。Mostafa Tarek 等(2019)使用 ERA5 的降水和温度作为水文建模过程中观测的代理，使用 3138 个北美集水区的两个集总水文模型，评估 ERA5 再分析作为水文建模的潜在参考数据集。这项研究表明，基于 ERA5 的水文模型性能等同于在北美大部分地区使用观测数据，但美国东部地区除外，在该观测数据中，观测值会持续获得更好的性能。与 ERA-Interim 相比，ERA5 的温度和降水偏差持续降低，并且在系统水文模拟方面更加准确[6]。Crossett C C 等(2020)比较了美国东北部地区 ERA5 全球再分析降水数据和美国全球历史气候网络(以下简称 GHCN)的每日降水累积量。研究发现，距大西洋海岸的距离以及 ERA5 估算值和 GHCN 观测值之间的高程差都会影响这两个数据集之间的降水关系。ERA5 沿岸的降水量少于 GHCN 观测值，但内陆则多于 CHCN 观测值。ERA5 和 GHCN 观测值之间的海拔差异与降水差异呈正相关[7]。

在国内，赵平伟等(2021)对比分析了 GPM IMERG 和 ERA5 降水数据在云南地区的实用性，分别与地面气象观测数据进行了比较。结果表明，两种数据在测量小雨时出现高估，但测量中雨及以上量级的雨量时出现了降水量低估问题，GPM IMERG 数据空报和漏报并存[8]。Qin jiang 等(2020)评估欧洲中程天气预报中心(ECMWF)最新发布的第五代再分析产品(即 ERA5)对 2003~2015 年期间中国大陆降水的准确性。结果表明，ERA5 倾向于分别高估和低估轻度降水事件以及测量中度和重度降水事件。基于对 ERA5 在台风诱发的极端降水过程中的准确性的分析，ERA5 可以识别降水分布和中心，但低估了极端降水[9]。段晓梅、王英二人利用 1970~2015 内蒙古 110 个气象站的年降水数据，基于 EOF 统计分析方法，计算出各个降水场特征向量以及时间系数，以特征向量的方差为基础对内蒙古自治区降水特征分析，获得内蒙古自治区降水场的时间分布和空间分布有三种模式，累计贡献率为 51.03%，并且还分析了降水量的年际变化特征[10]刘临春等人对内蒙古河套地区 1961~2018 年 34 个国家气象站降水资料进行研究，分析了近 58 年极端降水事件以及降水过程的时间和空间分布特征，还选取了其中的典型过程分析环流对极端降水过程产生的影响及特征，结果表明，年降水量多年平均值由东到西降水量逐渐减少，七月和八月份降水量最高，之后降水显著减少，5、6 和 12 月降水量明显开始增加[11]。

2. 数据与方法

2.1. 研究区概况

图 1 为研究区概况图，内蒙古自治区位于中国北部，经纬度介于 $37^{\circ}24' \sim 53^{\circ}23'N$ ， $97^{\circ}12' \sim 126^{\circ}04'E$ ，地域狭长，横跨东北、华北和西北呈现出东北 - 西南走向，总面积 118.3 万平方公里，占全国总面积 12.2%。内蒙古自治区位于蒙古高原南部，地形以高原为主，约占全区 1/2 以上，平均海拔 1000 m 左右[12]；由于东西跨度大，所以内蒙古气候的转变很明显，离海洋远，边缘地区有山脉阻挡，降水量少且降水量不均匀，常年风大，寒暑变化明显，温带大陆性气候占全区大部分地方，东部少数地区为温度季风气候，由东向西分别是半湿润、半干旱、干旱气候，对应土壤为灰化土、棕壤、栗钙土或漠土，相应分布的植被依次是森林、草原、荒漠[13]，1951~2014 年年平均气温为 $3.9^{\circ}C$ ，年平均降水量为 300.3 mm (218.3~443.7 mm)，由东北向西部递减；内蒙古地区包括我国第二大河—黄河有多达上千条的河流，因此成为了我国畜牧业发展的重要基地。

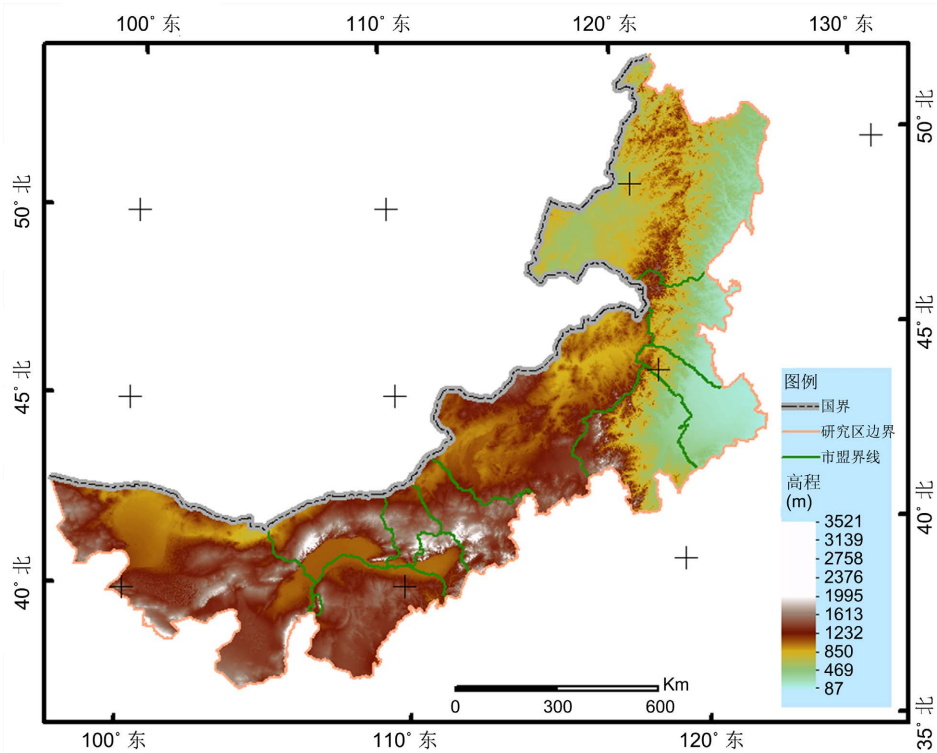


Figure 1. Administrative divisions of Inner Mongolia
图 1. 内蒙古行政区划图

2.2. 研究数据

(1) 再分析资料

欧洲中期天气预报中心(ECMWF)进行并通过哥白尼气候变化服务(C3S)开发的最新精度为一小时的ERA5再分析是第五代大气层再分析(ECMWF)数据。它使用了最新版本的地球系统模型之一,并在ECMWF上应用了数据同化方法,与ERA-Interim中使用的较旧版本相比,它使其能够使用现代的地球过程参数化方法。许多研究报告称,ERA5具有比其前身更好的性能,这一点已通过各种观察得到了证实。评估了ERA5和其他重新分析中,发现ERA5与ERA-Interim和MERRA-2相比,平均偏差降低了50%至75% [6]。ERA5再分析数据可以从哥白尼数据存储中获取(<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form>)。

(2) 其他数据

本研究中使用的内蒙古自治区盟市边界数据是从地理国情监测云平台的官方网站(<http://www.dsac.cn/>)中获取的。数字地形高程模型(Digital Elevation Model, DEM)是基于90m分辨率的SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)数据。该数据可以在CGIAR-CSI的官方网站获得。

2.3. 研究方法

(1) 趋势分析法

将研究区内每个像元1979~2018年的季节平均降水量进行Theil-Sen Median趋势分析,得到的趋势值 α 的空间分布。如果 $\alpha > 0$,表示该像元的降水量呈增加趋势;如果 $\alpha < 0$,则表示该像元的降水量呈减少趋势;若 $\alpha = 0$ (由于基本上不存在严格等于0的区域,所以本文把 $-0.2 < \alpha < 0.1$ 的区间视为0),则表

示降水量在这期间稳定不变。

(2) 线性拟合

是一种曲线拟合。设 x 和 y 都是观察到的量，并且 y 是 x 的函数： $y = f(x; b)$ ，线性拟合是求参数 b 的最优估计，参数 b 通过 x , y 的观察得到，以及寻找最佳理论曲线 $y = f(x; b)$ 。

2.4. 技术路线

图 2 展示的技术路线图概述了分析降水数据的全过程。首先，我们从欧洲中期天气预报中心(ECMWF)官方网站获取原始数据集。对这些数据进行预处理，以确保数据的准确性，这一步骤至关重要。预处理过程采用交互式数据语言(IDL)完成，以便处理每日降水量的计算任务。选择 IDL 的原因是在数据处理和数组操作方面的强大能力，这对于处理庞大的气象数据集至关重要。计算日降水量是一个关键步骤，它是计算年度和季节降水量指标的基础。这些指标对于理解气候模式和趋势极为重要。分析阶段重点研究降水的时间和空间分布。通过时间分析，我们可以识别降水量随时间的变化规律及异常现象；而空间分析则有助于探究降水量随地理位置的变化以及地形和其他地方因素的潜在影响。

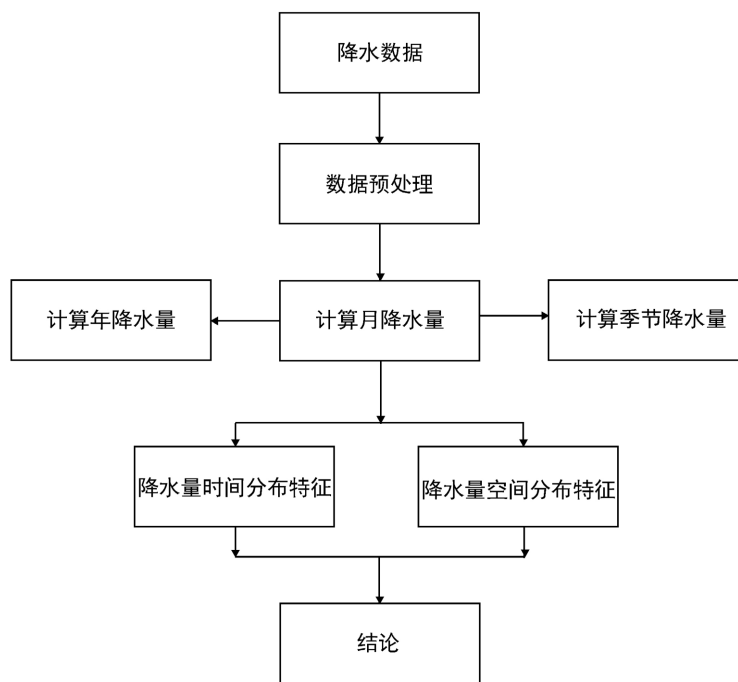


Figure 2. Technology roadmap

图 2. 技术路线图

3. 研究结果

3.1. 降水量的空间变化特征

通过图 3 的内蒙古年降水量空间分布图可以得知近 40 年内的降水空间分布特征。由图 3 可知，在内蒙古地区降水量低值在 41 mm 左右，最高值超过了 712 mm，总体上分布规律是西南到东北降水量逐渐增加，降水量平均值在 362 mm 左右，大部分地区降水量主要集中在 250 mm~350 mm 之间，呼伦贝尔降水量相对丰富达到了 700 mm 以上，再往西南走降水量了很多，在兴安盟、通辽、赤峰、呼和浩特和乌兰察布南部地区降水量是 380 mm~450 mm 左右，到锡林郭勒、乌兰察布北部、包头、鄂尔多斯、巴彦淖

尔、乌海和阿拉善一带地区年降水量会再次下降到 60 mm 到 210 mm 之间，其降水量最低值出现在阿拉善盟额济纳旗，额济纳旗的年降水量是 40 mm。

图 4 是通过趋势分析法计算获得的内蒙古地区降水倾斜率分布图。由图 4 得知近 40 年降水量减少趋势最明显的地区是赤峰市东北地区 and 通辽市西北地区，降水倾斜率达到了 $-5.9 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。在阿拉善盟、乌海市、鄂尔多斯市大部分地区和巴彦淖尔市西部地区降水量不变或有稍微增加趋势。

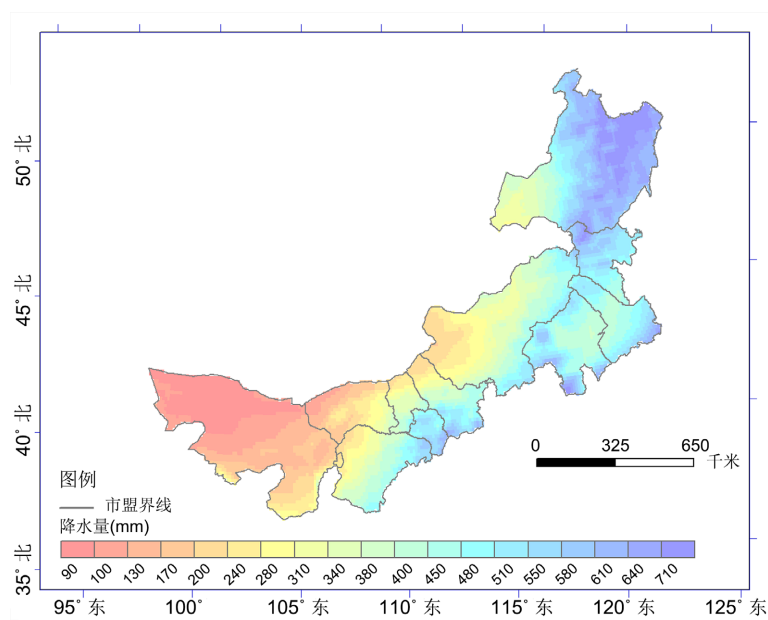


Figure 3. Precipitation space in the past 40 years

图 3. 近 40 年降水量空间分布图

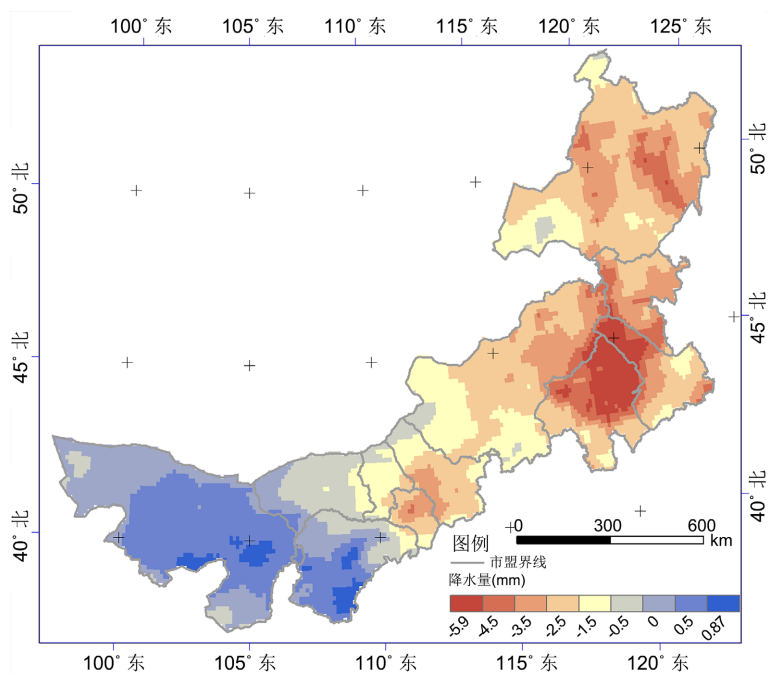


Figure 4. Distribution of precipitation slope in Inner Mongolia in the past 40 years

图 4. 内蒙古近 40 年降水倾斜率分布图

(2) 季节降水量的空间分布特征

季节降水量的分布特征如图 5, 夏季降水量达到了 214 mm, 其次是秋季和春季降水量分别是 69.5 mm 和 63.9 mm, 冬季的降水量在一年四季里是最少, 只有 14 mm 左右。春季、夏季和秋季降水量的分布规律大致一样, 呼伦贝尔降水量最多, 降水量主要集中在鄂伦春自治旗、莫力达瓦达翰尔族自治旗、根河市、阿荣旗和扎兰屯等地区。从东北往西南方向, 从兴安盟通辽市开始到阿拉善盟降水量逐渐减少。而冬季降水量的分布, 跟春季、夏季和秋季不一样, 降水量最多是呼伦贝尔, 但降水量最高值出现在兴安盟科尔沁右翼前旗西北、新巴尔虎左旗东南部和鄂温克族自治旗南部地区, 降水量在 40 mm 左右, 降水量的分布也是从东北到西南降水量减少。

内蒙古自治区的降水量不高是因为内蒙古的所在纬度高和高原面积比例多以及离海洋远, 边缘地区有山脉围绕。作为温带大陆性气候和季风气候边缘区的内蒙古地区, 春季是大气环流状况转变的季节, 但受西风带系统的影响。具有雨量少和雨量不均匀, 风速大, 冷热交换剧烈等特点。大兴安岭的北部为寒温带大陆性季风气候, 巴彦浩特、海勃湾和巴彦高勒以西地区为大陆性季风气候地带。总体上的特征为春季多风大气温度骤升, 夏季短而炎热, 秋季大气温度骤降, 冬季长且寒冷, 霜冻来的早, 降水量主要集中在夏季。

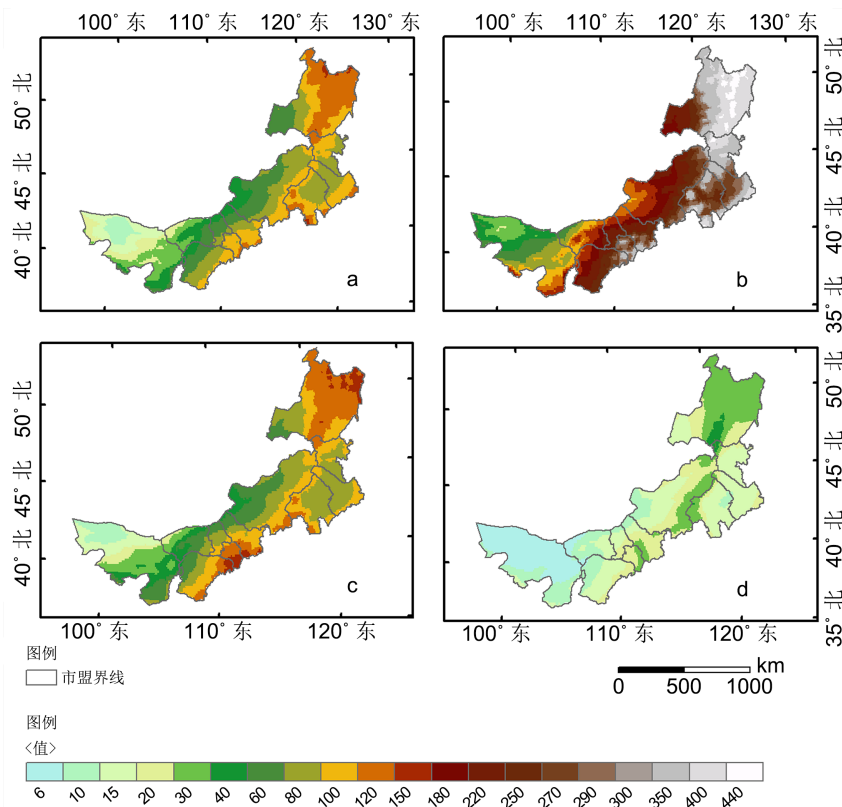


Figure 5. Seasonal distribution map of multi-year average precipitation. (a) spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

图 5. 多年平均降水量季节分布图。(a) 春; (b) 夏; (c) 秋; (c) 冬

(3) 月降水量的空间分布特征

月降水量的分布可以从图 6 得知。1 月和 12 月的降水量分布大致相同, 降水量集中在呼伦贝尔市, 降水量最高值出现在兴安盟西北部和呼伦贝尔西南地区, 降水量最高值在 13 mm 左右, 往西南方向降水

量逐渐减少,在阿拉善盟阿拉善右旗南部和额济纳旗降水量连 1 mm 都不到。2 月和 11 月的降水量空间分布很相似,呼伦贝尔市的降水量最高,阿拉善盟降水量最低,降水量最高值在 18 mm 左右,最低值不到 1 mm,降水量高值出现在呼伦贝尔市西南地区、兴安盟西北、赤峰市西部、呼和浩特市和乌兰察布南部等地区。4 月份和 5 月份降水量空间分布状况大致相同,但降水量不一样,4 月降水是 19 mm 左右,5 月份降水量是 32.5 mm 左右,降水量在呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市和赤峰市集中,4 月降水量最高值超过了 41 mm,5 月份的降水量超过了 62 mm,在阿拉善盟额济纳旗和阿拉善右旗 4、5 月份降水量均在 2 mm 左右。3 月和 10 月降水量空间分布大致相同,降水量集中在呼伦贝尔市、赤峰市西部、锡林郭勒盟南部、乌兰察布南部、呼和浩特市和鄂尔多斯市东南部地区。3 月份降水量最高值在 2 mm 左右,10 月份降水量最高值在 41 mm 左右,在阿拉善盟额济纳旗和阿拉善右旗 3、10 月份降水量均在 3 mm 左右。6、7 和 8 月的降水量空间分布形状是相同的,降水量最多是呼伦贝尔市,6、7 和 8 月的内蒙古降水量分别是 56 mm、86 mm 和 72 mm,降水量主要集中在呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市、赤峰市、呼和浩特市和乌兰察布市南部地区,在锡林郭勒盟西部、乌兰察布北部、包头市、巴彦淖尔市、鄂尔多斯市和乌海市等地区降水量相对小一些,降水量在 20 mm 到 35 mm 左右,在阿拉善盟的额济纳旗降水量是非常少,降水量只有 3 mm 左右。9 月份降水量主要集中在呼伦贝尔市和呼和浩特市,9 月份内蒙古降水量在 41 mm 左右,降水量最高值在呼和浩特市超过了 85 mm,最低值在阿拉善盟额济纳旗,降水量在 3 mm 左右。

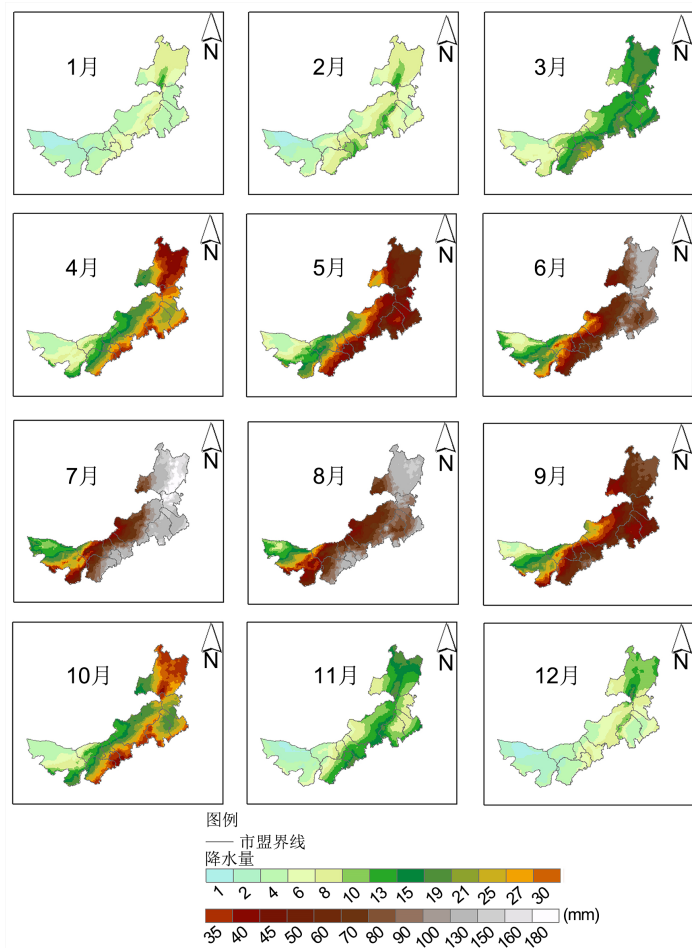


Figure 6. Monthly spatial distribution of multi-year average precipitation
图 6. 多年平均降水量月空间分布图

3.2. 降水量的时间变化特征

(1) 降水量的年变化特征

对 1979~2018 年内蒙古春季降水的 4 个年代降水量随时间变化特征进行了分析。图 7 是 1979~2018 年内蒙古降水量的变化特征进行分析的折线图,从折线图可以得知 1979 年到 2018 年 40 年平均降水量是 362.1 mm, 前 20 年降水量高于 362.1 mm, 后 20 年降水量低于 362.1 mm, 显然可以知道这 40 年里年降水量有减少的趋势[14]。导致降水量减少的原因可能是全球气候变暖, 全球气候变暖会使赤道地带降水量增加, 因为对流变的更强生了; 中纬度地区的降水量减少, 因为蒸发变的强烈[15]; 高纬度温度升高会使高纬度地区的降水会增加。内蒙古自治区位于中纬度地区, 所以导致降水量减少。内蒙古自治区的大部分地区年平均降水远远少于 400 mm, 由东北向西, 降水逐渐减少。其原因在于内蒙古西部距离平风场较弱, 内蒙古中东部距离平风场较远。对流层低层可见的距平风场有利于降水在内蒙古东部地区降水的形成, 而对内蒙古东部偏北部地区来说, 西风距平不会导致内蒙古中西部地区降水的明显异常[16]。

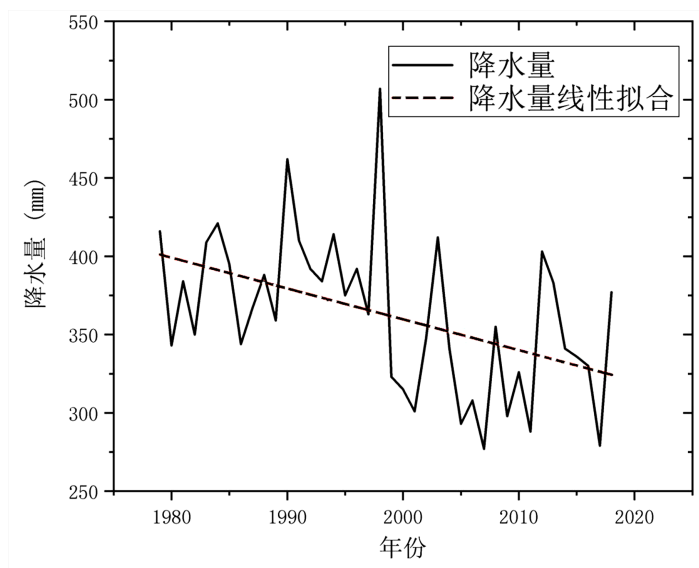


Figure 7. Time distribution of annual precipitation in the past 40 years
图 7. 近 40 年年降水量时间分布图

(2) 降水量季节变化特征分析

春天是大气环流由冬向夏转换的季节, 春季降水量极不稳定, 多为阵雨, 降水量少, 换季速率大, 内蒙古地区春末夏初容易发生春旱。与此同时, 春播又是内蒙古自治区春播作物的重要时期, 干旱使播种的种子不能发芽出苗, 造成缺苗。所以降水量成为了研究春播旱灾和旱灾的重要指标, 雨量对春播作物的影响很大。内蒙古春雨多在东部地区, 而中西部地区则较少, 内蒙古西部地区是我国西北地区的一部分, 气候条件相似。从图 8 得知, 只有 1996、2002 和 2010 这三年, 全区降水量偏大。这表明内蒙古春旱情与中国西北地区旱情的特点是一致的, 一种普遍现象, 在不同地区会有不同程度的干旱。根据图 8 可知, 春季降水也有下降的趋势[17]。春季过后, 受季风影响, 内蒙古大部分地区处于雨季, 降水集中。大部分年份中, 内蒙古夏季降水量较多; 但由于季风气候使降水略有变化, 因此, 一些年份, 例如 2001、2007 和 2010 年夏季降水量较少, 内蒙古夏季平均降水量约为 214 mm, 而且夏季也呈下降趋势[18] [19]。因为内蒙古地区秋季降水量稀少并且分布不均匀, 加上全球异常气候现象频繁发生, 内蒙古地区秋季降水量也受到影。秋季降水量异常性状对内蒙古主要作物如向日葵、玉米、大豆的成熟、收割和晾晒有

一定影响。降水最高值出现在 1995 年，最低值出现在 2005 年，且总体呈下降趋势。1989 年冬季降雨量最大，2011 年降雨量最小，总体上呈下降趋势。

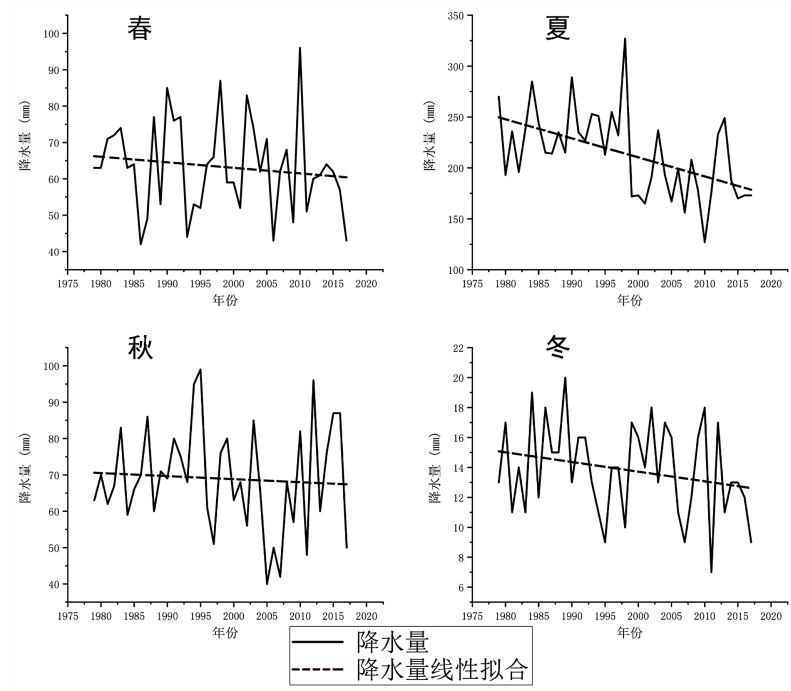


Figure 8. Time distribution of seasonal precipitation in the past 40 years
图 8. 近 40 年季节降水量时间分布图

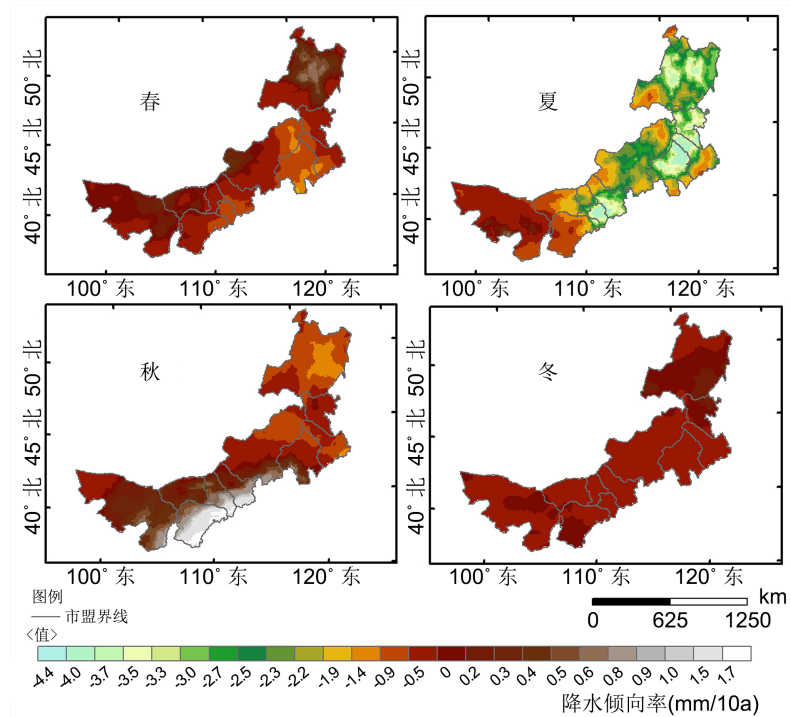


Figure 9. Distribution of precipitation tendency rates in four seasons in the past 40 years
图 9. 近 40 年四季降水倾向率分布图

图9是通过趋势分析法计算得到的近40年四季降水倾向图。从图9中得知，春季降水量变化最大的区域是呼伦贝尔市、锡林郭勒盟东部和赤峰市以及通辽市西南部，降水量增加最大地方的是呼伦贝尔牙克石市地区，其值在 $0.6 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 左右，降水量减少最大值在西乌珠穆沁旗、翁牛特旗和奈曼旗地区，其减少数值是 $-1.9 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 左右。内蒙古夏季降水量除了阿拉善盟中部地区没有变化以外，其他地区降水量均减少了，夏季降水量减少最大的地区是阿鲁科尔沁旗和扎鲁特旗地区，其最高值在 $-1.1 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 左右。内蒙古秋季降水量在内蒙古中东部地区减少，西部地区增加了，降水量增加最高的地区是鄂尔多斯市南部、呼和浩特市南部和乌兰察布南部，其增加量在 $1.5 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 以上，在鄂伦春自治旗西部和阿荣旗地区秋季降水量减少量最大，减少数值在 $-1.4 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 左右。内蒙古冬季降水量除了呼伦贝尔市中南部、兴安盟和阿拉善盟中部以及鄂尔多斯市南部没有变化以外，其他地区降水量均减少了 $-0.5 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 左右。

(3) 研究区月降水量变化分析

利用1979年1月至2018年12月ERA5卫星的降水数据集，分析内蒙古近40年月降水量量的时间分布特征，结果如图10。从图中得知1月份降水量波动不是很大，2000年1月份的降水量是最大的，近40年一月份平均降水量为3.9 mm，内蒙古地区整体上出现了降水量减少的趋势。2月份降水量很稳定，没有异常值降水量，降水量最高值出现在1979年，2月份降水量也出现了减少趋势。3月份降水量的波动有点大，最高值出现在1990年，最低值在2014年出现，近40年3月份降水量整体有明显的下降趋势。

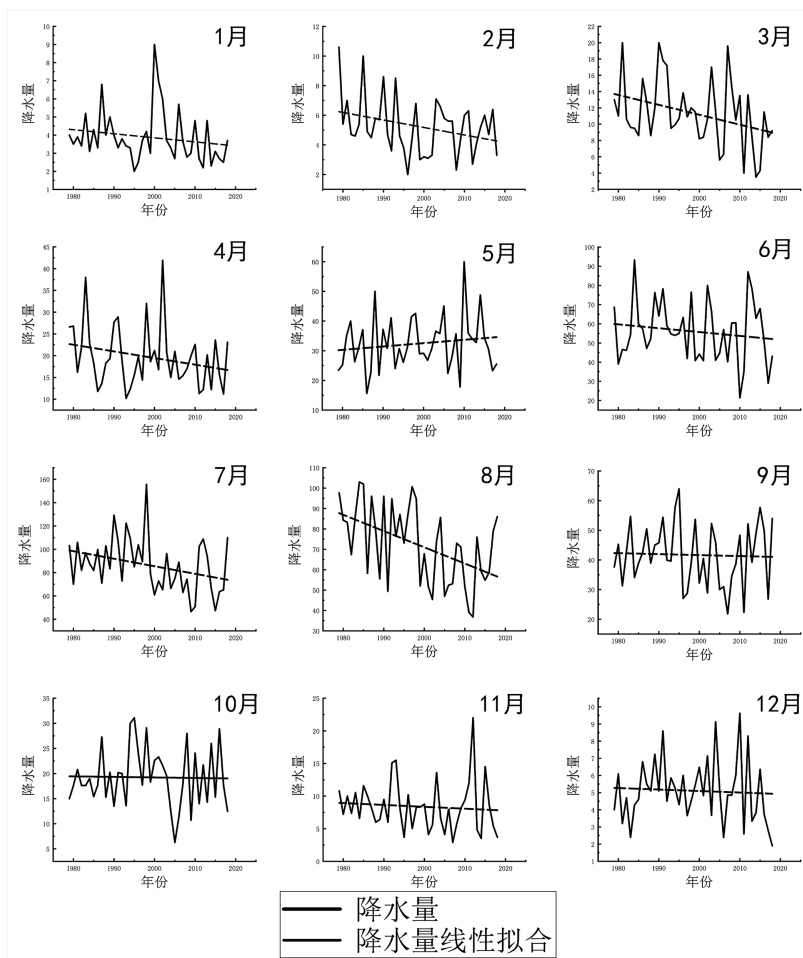


Figure 10. Time distribution of monthly average precipitation in the past 40 years
 图10. 近40年降水量月平均降水量时间分布图

4. 研究结论

本文通过对内蒙古自治区近 40 年的 ERA5 降水数据进行了多年尺度、年尺度、季节尺度和月尺度的时空分布特征分析, 所得的主要结果如下:

近 40 年平均降水量在空间上的分布特征是内蒙古地区的西部降水量比内蒙古东部降水量少, 东部呼伦贝尔市北部年降水量超过了 710 mm, 而阿拉善盟地区降水量最高数值才达到了 300 mm 左右, 而在额济纳旗地区降水量不到 100 mm, 年降水量整体上呈现出东多西少的分布。近 40 年降水量在季节分布上主要集中在夏季, 夏季平均降水量 214 mm 左右, 秋季和春季降水量分别在 69 mm 和 63 mm 左右, 冬季降水量仅仅达到了 14 mm。近 40 年降水量在月份分布上主要集中在 6、7 和 8 月份, 降水量分别达到了 56、86 和 72 mm, 降水量最少的是 1 月, 降水量是 3.9 mm 左右。近 40 年降水量在时间上的分布特征是 1979 年到 2018 年降水量呈现出减少的趋势。季节降水量也跟年降水量一样呈现出减少趋势, 降水量减少量最大是夏季。

基金项目

内蒙古师范大学高层次人才科研启动经费项目, 2020YJRC052。

参考文献

- [1] 曲学斌, 付亚男, 袁秀芝, 谢晓丽, 白明. GPM-IMERG 日降水数据在内蒙古地区的适用性分析[J]. 暴雨灾害, 2020, 39(3): 293-299.
- [2] 李海燕. 黑河流域气候变化特征及降水影响因子的初步分析[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2009.
- [3] 马爱华, 岳大鹏, 赵景波, 胡倩. 近 60a 来内蒙古极端降水时空变化及其影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 74-85.
- [4] 庞波, 毛文书, 张禄英. 近 50 年内蒙古夏季降水气候特征分析[J]. 成都信息工程大学学报, 2019, 34(4): 428-434.
- [5] Betts, A.K., Chan, D.Z. and Desjardins, R.L. (2019) Near-Surface Biases in ERA5 over the Canadian Prairies. *Frontiers in Environmental Science*, 7, Article 129. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00129>
- [6] Tarek, M., Brissette, F.P. and Arsenault, R. (2020) Evaluation of the ERA5 Reanalysis as a Potential Reference Dataset for Hydrological Modelling over North America. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24, 2527-2544. <https://doi.org/10.5194/hess-24-2527-2020>
- [7] Crossett, C.C., Betts, A.K., Dupigny-Giroux, L.A.L., et al. (2020) Evaluation of Daily Precipitation from the ERA5 Global Reanalysis against GHCN Observations in the Northeastern United States. *Climate*, 8, Article 148. <https://doi.org/10.3390/cli8120148>
- [8] 赵平伟, 李斌, 王佳妮, 杨宏庆, 郭萍, 龚丽军. GPM IMERG 和 ERA5 降水数据精度在云南复杂地形区域的评估检验[J]. 气象科技, 2021, 49(1): 114-123.
- [9] Jiang, Q., et al. (2020) Evaluation of the ERA5 Reanalysis Precipitation Dataset over Chinese Mainland. *Journal of Hydrology*, 595, Article ID: 125660. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125660>
- [10] 段晓梅. 1970~2015 年呼和浩特市降水趋势变化特征分析[J]. 绿色科技, 2020(14): 21-24.
- [11] 刘林春, 刘炜, 孙鑫, 等. 内蒙古河套地区极端降水特征分析[J]. 干旱气象, 2020, 38(4): 535-542.
- [12] 裴浩, Alex Cannon, Paul Whitfield, 等. 近 40 年内蒙古候平均气温变化趋势近[J]. 应用气象学报, 2009, 20(4): 443-450.
- [13] Wang, W., Yi, Z. and Chen, D. (2021) Mann-Kendall Mutation Analysis of Temporal Variation of Apparent Stress in Qinba Mountains and Its Adjacent Areas. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 660, Article 012112. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/660/1/012112>
- [14] 李虹雨. 内蒙古地区气候因子变化及干旱特征研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016: 38-42.
- [15] Bao, S., Letu, H., Zhao, C., 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] 姜学恭, 李彰俊, 王春燕, 等. 2009年初内蒙古降水分布特征与成因[J]. 气象科技, 2011, 39(1): 56-60.
- [17] 李海英, 高晶, 张宇, 司瑶冰. 内蒙古春季降水的气候特征及预测思路[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(4): 79-87.
- [18] 高晶. 内蒙古夏季降水变化特征及其影响因子的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [19] 任志艳, 延军平, 王鹏涛. 1960-2012年内蒙古降水集中度和降水集中中期时空变化[J]. 中国沙漠, 2016, 36(3): 760-766.