

内蒙古极端降水特征及预报

江靖¹, 迎春^{2*}, 宋桂英¹, 侯婷¹, 张璐¹

¹内蒙古自治区气象台, 内蒙古 呼和浩特

²内蒙古自治区锡林郭勒盟气象局, 内蒙古 锡林浩特

Email: *15147991650@139.com

收稿日期: 2021年2月29日; 录用日期: 2021年3月23日; 发布日期: 2021年3月31日

摘要

极端天气事件是全球气候变化研究的热点, 而中纬度内陆半干旱地带出现极端降水则是气象学面临的新问题。近年内蒙古地区夏季暴雨多发, 2012年到2019年逐年出现极端降水事件的站次为25次、26次、12次、31次、12次、22次、47次, 2019年无极端降水事件。本文采用1954年至今的历史降水资料、2011年至今的常规气象观测、NCEP再分析资料, 分析内蒙古极端降水与特征, 总结其与暴雨的预报指标异同, 结果表明: 1) 内蒙古极端降水阈值范围15.3~120.9毫米, 并呈现西低东高的态势。阿拉善盟西部极端降水阈值 ≤ 25 毫米, 为最小; 兴安盟、呼伦贝尔市中东部极端降水阈值最大, 为90~110毫米。2) 内蒙古极端降水次数呈现增多趋势, 年平均10.19次。1988年后, 内蒙古极端降水次数明显增多。3) 内蒙古极端降水频次空间分布较为分散, 大值中心在内蒙古中部及东北部, 0.12~0.48次/年。4) 内蒙古极端降水、暴雨的天气型均可分为北槽南涡型、西来槽型、冷涡型、切变型四类。北槽南涡型均是最常见类型, 西来槽型次之, 冷涡型、切变型较少。5) 极端降水、暴雨四类天气型中, 预报指标具有一致的差异性。极端降水CAPE阈值比暴雨高。K指数接近。极端降水低层比湿与暴雨阈值相近或更大。极端降水低层T-Td阈值下限接近或小于暴雨, 上限更大, 即上干下湿更加明显。低空700 hPa南风到达的纬度值极端降水与暴雨相近或纬度低于暴雨, 南风风速阈值高于暴雨。极端降水Pw阈值明显高于暴雨。

关键词

极端降水事件, 暴雨, 年变化, 频次, 阈值

Characteristics and Forecast of Extreme Precipitation in Inner Mongolia

Jing Jiang¹, Chun Ying^{2*}, Guiying Song¹, Ting Hou¹, Lu Zhang¹

¹Meteorological Observatory of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot Inner Mongolia

²Xilingol Meteorological Bureau of Inner Mongolia, Xilinhot Inner Mongolia

Email: *15147991650@139.com

*通讯作者。

Abstract

Extreme weather events are a hot topic in global climate change research, and extreme precipitation in mid-latitude inland semi-arid areas is a new problem for meteorology. Rainstorms have frequently occurred in Inner Mongolia in recent years, and from 2012 to 2019, the station numbers of extreme precipitation events occurred each year respectively are 25, 26, 12, 31, 12, 22, 47, and 0. In this paper, based on historical precipitation data from 1954 to the present, conventional meteorological observations from 2011 to the present, and NCEP reanalysis data, extreme precipitation and characteristics in Inner Mongolia were analyzed, and the similarities and differences between the forecast index and heavy rain were summarized. The results show: 1) The threshold of extreme precipitation in Inner Mongolia ranges from 15.3 to 120.9 millimeters, showing a low trend in the west and high in the east. The min extreme precipitation threshold appears at the western part of Alxa League, with the value below 25 mm, and the max appears at the central and eastern parts of Xing'an League and Hulunbuir, with the value ranging from 90 to 110 mm. 2) The number of extreme precipitation events in Inner Mongolia showed an increasing trend, with an annual average of 10.19. After 1988, the number of extreme precipitation in Inner Mongolia increased significantly. 3) The spatial distribution of extreme precipitation frequencies in Inner Mongolia is relatively scattered, with large value centers in central and northeastern Inner Mongolia at 0.12 to 0.48 times/year. 4) The weather patterns of extreme precipitation and heavy rain in Inner Mongolia can be divided into north trough south vortex type, west trough type, cold vortex type and shear type. The northern vortex and southern vortex are the most common types, followed by the western vortex and the cold vortex and shear types are the least. In the four types of weather patterns of extreme precipitation and heavy rain, the forecast indicators have consistent differences. CAPE of the extreme precipitation threshold is higher than the heavy rainfall, while K index of the extreme precipitation threshold is close with the heavy rainfall. The specific humidity in low level of extreme precipitation is similar to or greater than the threshold of wet and heavy rainfall. The lower limit of the T-Td threshold for extreme precipitation is close to or less than the heavy rain, and the upper limit is greater, that is, the upper-dry and lower-wet state is more obvious. The latitude value reached by the southerly wind of low level in 700 hPa is similar to the torrential rain or the latitude is lower than the torrential rain. The Pw threshold of extreme precipitation is significantly higher than the heavy rain.

Keywords

Extreme Weather Events, Heavy Rainfall, Annual Change, Frequency, Threshold

Copyright © 2021 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

极端天气事件通常是全球气候变化的最新和最显著表现, 在近期气候变化研究中倍受关注[1]。联合国跨政府气候变迁专家小组(IPCC)发布报告[2]称, 随着地球气候变暖, 本世纪极端炎热天气几乎肯定将增加, 更强烈的降雨、洪水、台风、滑坡和干旱现象也变得很有可能。但对于这个预测趋势的区域表现和机制则需要各地区进行具体的研究。Brian Luckman 认为[3], 近期的异常环流模式在漫长的记录中是前所未有的。

在全球气候变暖的背景下极端天气、水旱灾害不仅多发重发，其突发性、反常性、不可预见性也将日益凸显。极端天气似乎已经不是一个“小概率事件了”。翟盘茂等[4] [5] [6]指出：在全球气候变暖的大背景下，近年来我国发生的极端天气日益呈现的特征：从地域上看，往年干旱少雨的北方地区罕见地被雨带长期笼罩。以往“南涝北旱”的气候特征，正被极端天气“改写”。王苗等[7]认为，对极端降水的主要关注点是极端降水表征值的确定、极端降水分布和演变趋势、可能影响极端降水因子分析以及运用模式对极端降水进行模拟并进行评估 4 个方面。

张文等、罗伯良等[8] [9]对极端强降水的气候特征和成因进行了深入研究，丁裕国、杨金虎等[10] [11]对极端强降水事件的发生发展规律有了一定认识。随着集合预报的发展，Lalurette [12]开发了极端预报指数(EFI)。但是，姜学恭等[13]指出：要提前预报极端强降水，还需对强降水发生前的天气形势有更深入的认识，这样对短期预报才有更直接的指导意义。对极端强降水天气进行天气分型后，更有利于对其发生发展的机理进行更深入细致的研究[14] [15]。

内蒙古干旱-半干旱带主要属于温带内陆季风末端区，气候变率大，地表生态系统脆弱，对气候变化的容忍度低，在全球变暖大背景下，内蒙古年均气温普遍上升。内蒙古西部的沙地和沙漠表现出变暖和变干的趋势，内蒙古东部降水增加缓慢。同时，内蒙古地区极端气温和降水事件出现频率和灾害损失程度均呈上升趋势，汛期极端降水事件发生的频次在河套区表现为较明显的增长趋势[16] [17] [18]。内蒙古暴雨预报研究已有不少成果，但近几年我国极端天气日益呈现，内蒙古历史上暴雨分布、特别是极端暴雨历史数据库缺乏，近十几年几乎没有完善的暴雨预报研究工作。因此需要气象工作者对暴雨天气预报基础工作做新的补充。

2. 数据及方法

2.1. 内蒙古地区极端降水概况

2011 年以来，内蒙古地区夏季暴雨多发，中西部干旱地区极端降水事件频发。2012 年内蒙古地区出现极端降水天气过程 7 次，阿拉善盟、鄂尔多斯市、包头市、巴彦淖尔市、呼和浩特市、乌兰察布市、锡林郭勒盟和通辽市八个盟市共 25 站次出现极端降水事件。

2013 年内蒙古地区出现极端降水天气过程 12 次，鄂尔多斯市、包头市、巴彦淖尔市、呼和浩特市、乌兰察布市和呼伦贝尔市六个盟市共 26 站次出现极端降水事件。

2014 年内蒙古地区出现极端降水天气过程 11 次，内蒙古鄂尔多斯市、锡林郭勒盟、赤峰市、通辽市、兴安盟和呼伦贝尔市六个盟市共出现了 12 站次极端降水事件。

2015 年内蒙古地区出现极端降水天气过程 13 次，内蒙古阿拉善盟、包头市、巴彦淖尔市、呼和浩特市、乌兰察布市、锡林郭勒盟和通辽市十个盟市共出现了 31 站次极端降水事件。

2016 年内蒙古地区出现极端降水天气过程 4 次，内蒙古鄂尔多斯市、呼和浩特市、乌兰察布市、赤峰市和通辽市五个盟市共出现了 12 站次极端降水事件。

2017 年内蒙古地区出现极端降水天气过程 11 次，内蒙古阿拉善盟、鄂尔多斯市、包头市、巴彦淖尔市、呼和浩特市、乌兰察布市、锡林郭勒盟、赤峰市和通辽市等八个盟市共出现了 22 站次极端降水事件。

2018 年内蒙古地区出现极端降水天气过程 18 次。内蒙古境内十二个盟市都出现了极端降水，累计共 47 站次。而 2019 年内蒙古境内无极端降水事件。

但极端降水事件的天气过程还很不清楚，使该区在天气预报方面面临巨大挑战。可见，伴随全球变暖，处于中纬度内陆半干旱地带的内蒙古中部地区发生极端天气过程事件的成因机制是亟待研究的新问题。

为此，本文通过历史资料、NCEP 再分析、常规观测等资料分析，对内蒙古极端降水特征进行更深入的研究，以便对强降水短期预报有更直接的指导意义。

2.2. 数据来源及处理方法

文中采用的历史资料为 1954 年至 2019 年内蒙古 119 站 08-08 时的日降水量资料。

常规观测资料为 2011 年至 2019 年的高空和地面观测资料，高空观测资料包括 500 hPa、700 hPa、850 hPa 位势高度、风、气温等，观测时间 08 时、20 时。地面观测要素主要为气温、气压、露点温度、风、降水量等，观测时间为逐 6 小时。

NCEP 再分析资料采用 NCEP/NCAR 提供的 2011 年至 2019 年全球逐 6 小时再分析资料，包括 1000 hPa~100 hPa 各层的位势高度、气温、风、及相对湿度等，水平网格距为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。

极端降水事件监测指标计算方法采用排位法计算，对某一指标历史序列从小到大进行排位，定义序列第 95 百分位值为极端多事件。

极端日降水量具体计算方法为：取某站气候标准期内每年日降水量的极大值和次大值，形成一个共 60 个数的序列。对获得的 60 个值进行排序，选取第 3 大值作为极端日降水的阈值，当日降水量大于或等于该阈值则称该站出现了极端日降水。

一个台站日降水量超过其极端阈值，则记为一个极端降水事件。

3. 结果与讨论

3.1. 内蒙古极端降水时空分布特征

3.1.1. 内蒙古极端降水阈值的空间分布特征

采用极端降水事件监测指标计算方法，计算内蒙古 119 站的极端降水阈值，分析内蒙古极端降水阈值全区分布(图 1)可见：内蒙古极端降雨阈值范围为 15.3~120.9 毫米，呈现西低东高的态势。阿拉善盟、巴彦淖尔市北部、包头市北部、乌兰察布市北部、锡林郭勒盟北部极端降水阈值 ≤ 50 毫米，其中，阿拉善盟西部、巴彦淖尔市西北部极端降水阈值 ≤ 25 毫米；呼和浩特市、包头市中部南部、鄂尔多斯市、赤峰市北部、兴安盟西北部、呼伦贝尔市西部极端降水阈为 60~80 毫米，赤峰市中部南部、通辽市、兴安盟大部、呼伦贝尔市中部东部极端降水阈值为 90~110 毫米，最大值区主要分布在通辽市南部和兴安盟，达 110 毫米。最小值区分布在阿拉善盟、巴彦淖尔市北部。

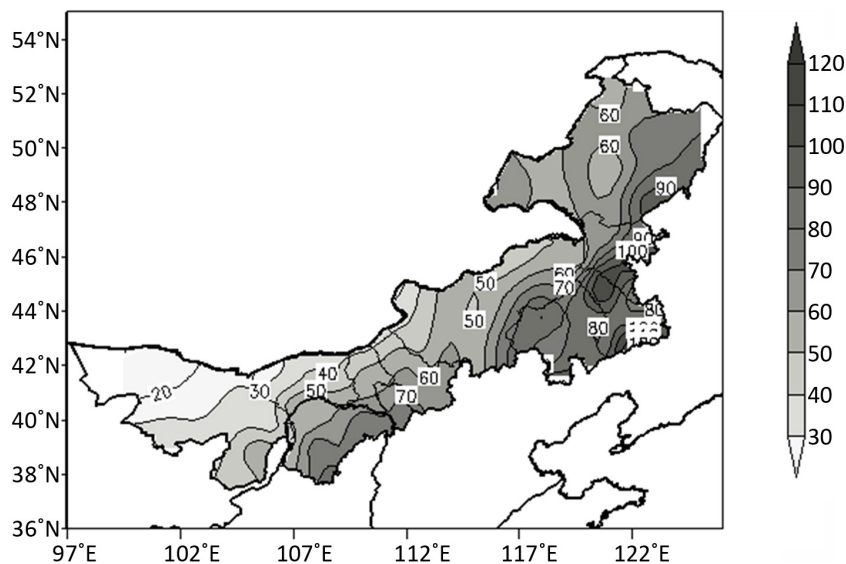


Figure 1. Spatial distribution of extreme precipitation thresholds in Inner Mongolia (Unit: mm)
图 1. 内蒙古极端降水阈值空间分布

3.1.2. 内蒙古极端降水次数的年代演变特征

统计1954年至2019年内蒙古119站极端降水历史总次数,分析内蒙古极端降水的年代变化特征(图2)。

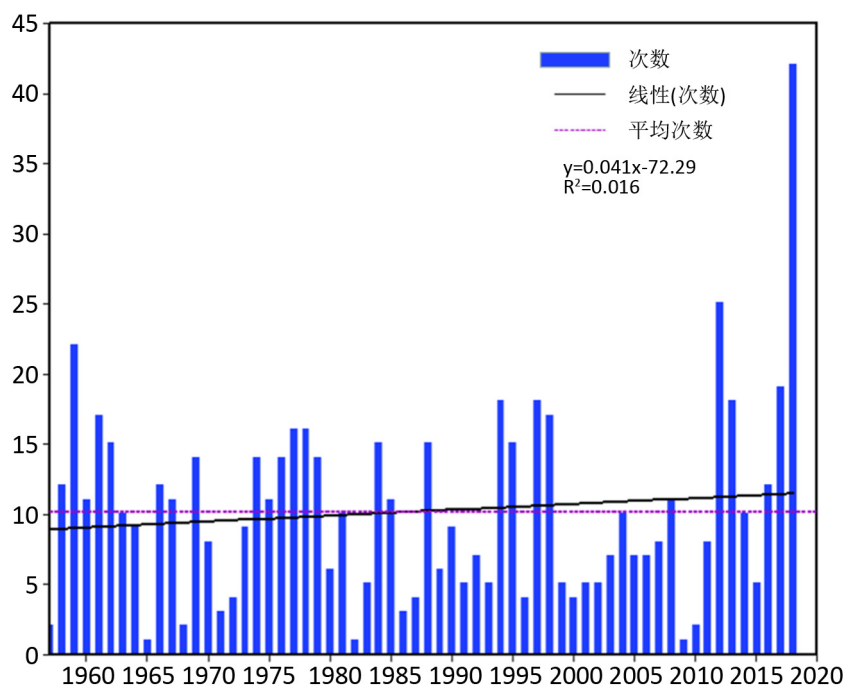


Figure 2. Time series of total numbers of extreme precipitation in Inner Mongolia 119 station from 1954 to 2019

图2. 内蒙古119站1954年至2019年极端降水总次数时序

由图2, 内蒙古地区极端降水总发生次数呈现逐年上升趋势, 年平均发生次数为10.19次。1988年前, 内蒙古极端降水次数线低于多年平均, 1988年后, 内蒙古极端降水次数线高于多年平均, 极端降水次数增长明显。2010年后, 内蒙古极端降水频发、高发, 2012年达到25站次之多。2015年达到31站次, 2017年出现22站次, 2018年内蒙古极端降水达到47站次。其次是1994年、1997年、1998年达到约17、18站次, 2016年12站次, 而2019年内蒙古境内无极端降水事件。

3.1.3. 内蒙古极端降水频次的空间分布特征

分析1954年至2019年内蒙古119站极端降水频次的空间分布(图3)可见: 全区极端降水发生频次空间分布较为分散, 大值中心分布在巴彦淖尔市东部、鄂尔多斯市北部、呼和浩特市、包头市南部、锡林郭勒盟西部、呼伦贝尔市中部, 在0.12~0.48次/年。

3.2. 内蒙古极端降水天气学分析

筛选2011年后具有代表性的内蒙古区域极端降水过程20次, 以北半球700 hPa低层的影响系统进行天气学分型, 分型时着眼于影响系统的源地、路径和流场辐合形式[19]。内蒙古极端降水天气型分为北槽南涡型、冷涡型、切变型、西来槽型四类[20]。其中, 20次极端降水过程中, 北槽南涡型11次, 占比55%; 冷涡型1次, 占比5%; 切变型4次, 占比20%; 西来槽型4次, 占比20%。内蒙古中西部极端降水过程中, 北槽南涡型占比最高, 超过半数, 切变型、西来槽型次之, 均占比20%, 冷涡型占比最少, 仅占5%。

“暴雨”指日雨量 ≥ 50.0 mm的降雨, 为对比极端降水与典型暴雨的异同, 筛选出2011年后内蒙古区域性暴雨过程13次。根据700 hPa影响系统及内蒙古暴雨研究已有成果, 其影响系统也分为北槽南涡

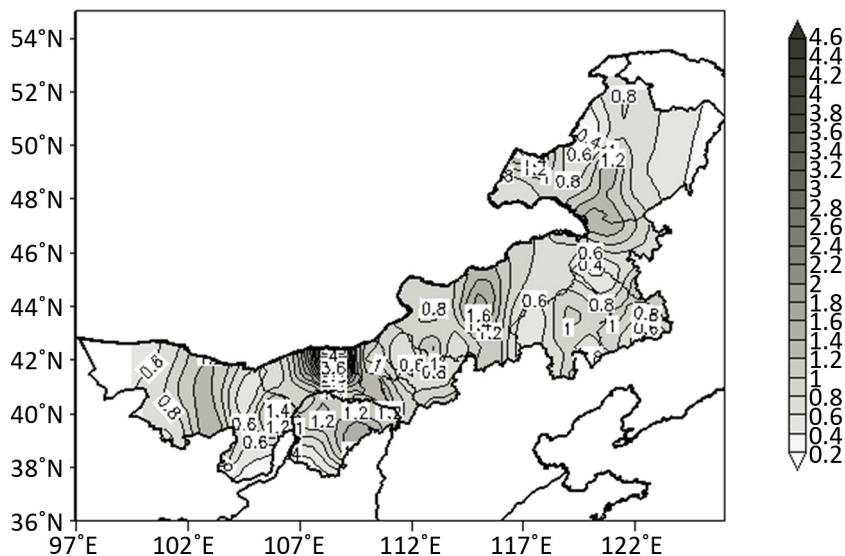


Figure 3. Distribution of annual average extreme precipitation times in Inner Mongolia 119 stations from 1954 to 2018 (Unit: Times $\times 10$, interval 0.2)

图 3. 内蒙古 119 站 1954 年至 2018 年极端降水次数年平均分布(次数 $\times 10$, 间隔 0.2)

型、冷涡型、切变型、西来槽型四类。13 次区域性暴雨过程中，北槽南涡型为 7 次，占比 54%；冷涡型暴雨 1 次，占比 8%；切变型暴雨 1 次，占比 8%；西来槽型暴雨 4 次，占比 31%。在内蒙古暴雨过程中，北槽南涡型占比最高，约为半数；西来槽型次之，占比 31%；冷涡型、切变型最少，占比 8%。

由此，内蒙古极端降水、典型暴雨天气形势，均可分为北槽南涡型、冷涡型、切变型、西来槽型四类。北槽南涡型是极端降水、典型暴雨中最常见类型，占比约半数；西来槽型极端降水、典型暴雨占比相近，约 20%~31%。冷涡型极端降水占比 5%、典型暴雨占比 33%，相差较大；切变型极端降水占比 20%、典型暴雨占比 8%，相差较大。

按照 700 hPa 主要影响系统类别，诊断分析内蒙古极端降水、典型暴雨，对比二者气象要素、物理量因子等差异，总结内蒙古极端降水、典型暴雨预报指标异同点[21]-[28]。

3.2.1. 北槽南涡型极端降水、典型暴雨预报指标异同

北槽南涡型极端降水、典型暴雨对比结果(表 1)：极端降水的 cape 值、K 指数阈值高于普通暴雨，SI 指数低于典型暴雨。

极端降水的 850 hPa 低层比湿阈值明显较大，850 hPa 低层的 T-Td 阈值明显比暴雨低，中高层 T-Td 阈值比暴雨高，极端降水上干下湿更显著。

极端降水南风到达的纬度较低、南风风速阈值与暴雨相近，说明极端降水南风、垂直速度较容易达到。Pw 极端降水阈值比典型暴雨上限更高。

Table 1. Comparison of north vortex southern vortex extreme precipitation and typical rainstorm indicators

表 1. 北槽南涡型极端降水、典型暴雨指标对比

物理量	1、探空资料分析	
	极端降水	普通暴雨
SI 指数($^{\circ}\text{C}$)	-2.77~1.71	-1.42~5.3
cape (J/kg)	89.2~491.4	23.8~456.1

Continued

K (°C)		30.9~39	24~36
Li 指数(°C)		-1.86~1.14	-1.98~4.66
2、层结资料			
指标	层次	极端降水	普通暴雨
比湿(g/kg)	700 hPa	7~11	6~12
	850 hPa	10~17	5~12
T-Td (°C)	500hPa	8~13	2~4
	700 hPa	3~13	1.4~5
	850 hPa	1~4	0.9~7
低空南风风速(m/s)	/	8~14	7~14
700 hPa 南风到达的纬度(°N)	/	38~49	43.7~55
Pw (kg/m ²)	/	16~59.8	16~46

3.2.2. 西来槽型极端降水、典型暴雨指标对比分析

西来槽型极端降水、典型暴雨对比结果(表 2): 极端降水的 cape 值、Li 指数高于普通暴雨, SI 指数低于典型暴雨, K 指数阈值相近。

850 hPa 低层比湿极端降水的阈值明显较大, 850 hPa 低层的 T-Td 阈值相近, 中高层 T-Td 阈值比暴雨高, 极端降水上干下湿更显著。

极端降水南风到达的纬度较低、南风风速与暴雨接近。Pw 极端降水阈值比典型暴雨上限更高。

Table 2. Comparison of west trough type extreme precipitation and typical rainstorm indicators

表 2. 西来槽型极端降水、典型暴雨指标对比

1、探空资料分析			
物理量		极端降水	普通暴雨
SI 指数(°C)		-2.77~1.71	-0.21~2.2
cape (J/kg)		89.2~491.4	0~449
K (°C)		30.9~39	30~37
Li 指数(°C)		-1.86~1.14	-3.56~0.43
2、层结资料			
指标	层次	极端降水	普通暴雨
比湿(g/kg)	700 hPa	6.3~10.3	8~11
	850 hPa	10~17	9~14
T-Td (°C)	500 hPa	8~13	1~12
	700 hPa	3~13	1~8
	850 hPa	1~4	0.6~4
低空南风风速(m/s)	/	8~14	4~20
700 hPa 南风到达的纬度(°N)	/	38~43.7	43.7~60
Pw (kg/m ²)	/	32~59.8	16~31

3.2.3. 切变型极端降水、典型暴雨指标对比分析

切变型极端降水、典型暴雨对比结果(表 3): cape 值极端降水阈值比典型暴雨阈值略高, K 指数极端降水阈值与典型暴雨数值相近。

极端降水与典型暴雨的 700 hPa、850 hPa 低层比湿阈值相近; T-Td 极端降水阈值下限相近, 上限比典型暴雨大, 说明极端降水高层更干。

700 hPa 南风到达的纬度极端降水与典型暴雨差别不大, 低空南风风速极端降水阈值比典型暴雨阈值明显高。Pw 阈值也明显偏高。

Table 3. Comparison of shearing type extreme precipitation and typical rainstorm indicators

表 3. 切变型极端降水、典型暴雨指标对比

1、探空资料分析			
物理量		极端降水	普通暴雨
SI 指数(°C)		-0.49~5.2	1.05~1.71
cape (J/kg)		75.6~547.2	23.8~456.1
K (°C)		28~41	30~42
Li 指数(°C)		-2.56~5.4	-0.58~3
2、层结资料			
指标	层次	极端降水	普通暴雨
比湿(g/kg)	700 hPa	8~9	8~15
	850 hPa	12~12.4	11~13
	500hPa	9~26	8~13
T-Td (°C)	700 hPa	1~3	3~5
	850 hPa	2~8	3~4
低空南风风速(m/s)	/	9~15	2~6
700 hPa 南风到达的纬度(°N)	/	38~43.7	40.5
Pw (kg/m ²)	/	32~59.8	31~47

3.2.4. 冷涡型极端降水、典型暴雨指标对比分析

冷涡型极端降水、典型暴雨对比结果(表 4): 极端降水的 cape 值、Li 指数高于典型暴雨阈值, K 指数相近。

极端降水与典型暴雨低层比湿阈值相近。极端降水与典型暴雨低层 T-Td 阈值下限相近, 上限明显偏大, 高层干空气明显。

极端降水的 700 hPa 南风到达纬度、南风风速、Pw 均比典型暴雨高。说明冷涡型极端降水在南来暖湿气流方面, 低层高能、暖湿特征显著。

Table 4. Comparison of cold vortex type extreme precipitation and typical rainstorm indicators

表 4. 冷涡型极端降水、典型暴雨指标对比

1、探空资料分析		
物理量	极端降水	普通暴雨
SI 指数(°C)	-0.78~1.63	0.67~2.11

Continued

cape (J/kg)		50~242.5	15
K (°C)		30~39	35~39
Li 指数(°C)		2.03~4.81	-0.79~0.8
2、层结资料			
指标	层次	极端降水	普通暴雨
比湿(g/kg)	700 hPa	5.2~7.5	4~6
	850 hPa	7.3~9.2	6~8
T-Td (°C)	500hPa	9~16	1~3
	700 hPa	1~5	1.2~6
	850 hPa	1~5	0.7~4
低空南风风速(m/s)	/	11~27	7~20
700 hPa 南风到达的纬度(°N)	/	38~43.7	35
Pw (kg/m ²)	/	32~59.8	27~30

4. 结论

1) 内蒙古极端降水阈值范围为 15.3~120.9 毫米, 空间分布呈现西低东高的态势。阿拉善盟至锡林郭勒盟北部 ≤ 50 毫米, 阿拉善盟西部 ≤ 25 毫米; 呼和浩特市、包头市至兴安盟西北部、呼伦贝尔市西部为 60~80 毫米, 通辽市、兴安盟、呼伦贝尔市中东部极端降水阈值为 90~110 毫米, 最大值区主要分布在通辽市南部和兴安盟, 达 110 毫米。

2) 内蒙古地区极端降水总发生次数呈现逐年上升趋势, 年平均发生次数为 10.19 次。1988 年前, 内蒙古极端降水次数线低于多年平均, 1988 年后, 内蒙古极端降水次数线高于多年平均, 极端降水次数增长明显。

3) 极端降水发生频次空间分布较为分散, 大值中心分布在巴彦淖尔市东部、鄂尔多斯市北部、呼和浩特市、包头市南部、锡林郭勒盟西部、呼伦贝尔市中部, 在 0.12~0.48 次/年。

4) 内蒙古极端降水、典型暴雨的天气型均可以分为北槽南涡型、冷涡型、切变型、西来槽型四类。北槽南涡型均是最常见类型, 西来槽型次之, 冷涡型、切变型较少。

5) 极端降水、典型暴雨四类天气型中, 预报指标具有一定的差异性。极端降水和典型暴雨预报指标对比, 在探空资料指标中, cape 指标阈值极端降水比典型暴雨阈值高。K 指数接近。层结资料中, 低层比湿极端降水与典型暴雨阈值相近或更大。极端降水低层 T-Td 阈值下限接近或更低, 上限却更高, 即上干下湿更加明显。低空 700 hPa 南风到达的纬度极端降水与典型暴雨纬度阈值相近或低于暴雨纬度; 南风风速阈值高于暴雨。极端降水 Pw 阈值明显高于暴雨。

基金项目

中国气象局预报员专项 2019, 内蒙古暴雨预报专家团队共同资助, 内蒙古自治区锡林郭勒盟科技计划项目(201802)共同资助。

参考文献

- [1] 王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 等. 全球变暖的科学[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(3): 228-231.

- [2] 秦大河, 罗勇, 陈振林, 等. 气候变化科学的最新进展-IPCC 第四次评估综合报告解析[J]. 气候变化研究进展, 2007, 6(3): 311-314.
- [3] Villalba, R., et al. (2012) Unusual Southern Hemisphere Tree Growth Patterns Induced by Changes in the Southern Annular Mode. *Nature Geoscience*, 5, 793-798. <https://doi.org/10.1038/ngeo1613>
- [4] 黄琰, 封国林, 董文杰. 近 50 年中国气温、降水极值分区的时空变化特征[J]. 气象学报, 2011, 69(1): 125-136.
- [5] 廖晓农, 魏东, 石增云, 等. 连续少雨背景下北京暴雨的若干特征[J]. 高原气象, 2011, 30(3): 749-759.
- [6] 翟盘茂, 刘静. 气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾[J]. 中国工程科学, 2012, 14(9): 55-63+84.
- [7] 王苗, 郭品文, 邬昀, 等. 我国极端降水事件研究进展[J]. 气象科技, 2012, 40(1): 79-86.
- [8] 张文, 寿绍文, 杨金虎, 等. 近 45a 来中国西北汛期降水极值的变化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(12): 126-132.
- [9] 罗伯良, 张超, 林浩. 近 40 年湖南省极端强降水气候变化趋势与突变特征[J]. 气象, 2008, 34(1): 80-85.
- [10] 张永领, 丁裕国. 我国东部夏季极端降水与北太平洋海温的遥相关研究[J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(2): 244-252.
- [11] 杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 陈彦山. 中国年极端降水事件的时空分布特征[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(1): 75-83.
- [12] Ratcliff, R. and Dongen, H.P.A.V. (2011) Diffusion Model for One-Choice Reaction-Time Tasks and the Cognitive Effects of Sleep Deprivation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108, 11285-11290. <https://doi.org/10.1073/pnas.1100483108>
- [13] 姜学恭, 李彰俊, 宫春宁, 等. 蒙贝低涡类环北京暴雨过程分型研究[J]. 大气科学学报, 2010, 33(4): 412-419.
- [14] 李江萍, 杜亮亮, 张宇, 等. 玛曲地区夏季强降水的环流分型及水汽轨迹分析[J]. 高原气象, 2012, 31(6): 1582-1590.
- [15] 刘国忠, 黄开刚, 罗建英, 农孟松. 基于概念模型及配料法的持续性暴雨短期预报技术探究[J]. 气象, 2013, 39(1): 20-27.
- [16] 裴浩, 郝璐, 韩经纬. 近 40 年内蒙古候降水变化趋势[J]. 应用气象学报, 2012, 23(5): 543-550.
- [17] 乌云娜, 裴浩, 白美兰. 内蒙古土地沙漠化与气候变化和人类活动[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 292-297.
- [18] 白美兰, 郝润全, 邸瑞琦, 等. 内蒙古东部近 54 年气候变化对生态环境演变的影响[J]. 气象, 2006, 32(6): 31-36.
- [19] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [20] 顾润源. 内蒙古自治区天气预报手册[M]. 北京: 气象出版社, 2012.
- [21] 丁一汇. 高等天气学[M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- [22] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 气象出版社, 1980.
- [23] 曹晓岗, 王慧, 邹兰军, 等. 上海“010805”特大暴雨与“080825”大暴雨对比分析[J]. 高原气象, 2011, 30(3): 739-748.
- [24] 袁美英, 李泽椿, 张小玲, 等. 中尺度对流系统与东北暴雨的关系[J]. 高原气象, 2011, 30(5): 1224-1231.
- [25] 李青春, 苗世光, 郑祚芳, 等. 北京局地暴雨过程中近地层辐合线的形成与作用[J]. 高原气象, 2011, 30(5): 1232-1242.
- [26] 易笑园, 李泽椿, 孙晓磊, 等. 渤海西岸暴雨中尺度对流系统的结构及成因[J]. 应用气象学报, 2011, 22(1): 23-34.
- [27] 赵大军, 江玉华, 李莹. 一次西南低涡暴雨过程的诊断分析与数值模拟[J]. 高原气象, 2011, 30(5): 1158-1169.
- [28] 梁军, 李英, 隋洪起, 等. 两例大连春季暴雨的环流特征和诊断分析[J]. 高原气象, 2011, 30(5): 1243-1254.