

文章编号: 2096-1618(2025)02-0212-08

# 1983–2022年中亚季节极端降水事件的时空特征分析

梁雨欣, 陈樟, 赵勇, 刘文丽  
(成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225)

**摘要:**为更好地了解中亚地区极端降水事件的时空分布特征,利用CPC的逐日降水数据,基于百分位法和极端降水指数研究1983–2022年中亚地区季节极端降水事件的空间特征及其趋势变化,初步探讨极端降水对气温的响应关系。结果表明:极端降水事件具有明显的空间差异和季节差异。(1)极端降水阈值、极端降水平均强度、1日最大降水量在春、秋、冬3个季节均表现为南高北低的空间分布特征,在夏季则表现为北高南低;四季的极端降水日数和持续湿期表现为由西南向东北递增,持续干期与之相反;极端降水贡献率的空间分布在春季和冬季较为均匀,而在夏季和秋季表现为西南低东北高。(2)极端降水日数、极端降水贡献率、持续湿期等在春、秋、冬季均表现正趋势,其中春季信号最强;持续干期在春、冬季表现为减弱趋势。1日最大降水量仅在春季有显著增加趋势。四季极端降水平均强度均无显著的变化趋势。(3)极端降水日数在春季对日最低气温的响应比最高气温更敏感,夏季则与日最高气温呈负相关,秋季和冬季对日最高、最低温度都有显著相关。

**关键词:**中亚地区;极端降水;时空分布;变化趋势;温度;季节

**中图分类号:**P467

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2025.02.012

## 0 引言

全球变暖导致全球和区域尺度的水循环加剧,极端降水事件频率增多、强度增强<sup>[1]</sup>。极端降水容易引发如洪涝、滑坡和泥石流等自然灾害,对自然生态系统和人类社会造成重大风险<sup>[2–4]</sup>,已成为全球气候变化及影响研究的热点问题。

中亚地处欧亚大陆腹部,远离海洋,气候干燥,是全球最大的非地带性干旱区。中亚区域天气气候系统与欧洲和东亚地区显著不同<sup>[5–7]</sup>,对全球气候变化响应更为敏感<sup>[8–11]</sup>。中亚地区近百年的气候变暖幅度明显高于同期的全球升温速率,是北半球的两倍多<sup>[8,12]</sup>。中亚干旱区降水对全球变暖的响应复杂,20世纪以来年降水整体上表现出增加趋势,但存在明显的空间差异和季节差异<sup>[9,13–14]</sup>。气候变暖同样影响中亚极端降水事件的发生。中亚极端降水存在明显的空间差异性和高海拔依赖性,高原和山区附近极端降水事件频发<sup>[15–16]</sup>。Zhang等<sup>[10]</sup>和黄鑫等<sup>[16]</sup>基于观测资料研究中亚极端降水事件变化特征,指出除最大连续无降水日数显著减少,其他极端降水指标均呈现增加趋势,中亚极端降水事件的频率和强度都明显增加。Ma等<sup>[15]</sup>基于再分析资料指出中亚夏季极端降水具有显著的增

加趋势,夏季极端降水发生概率和强度在2000年前后发生突变,突变年后均明显增加。古再丽努尔·亚森等<sup>[17–18]</sup>评估了CMIP6模式模拟中亚极端降水的情况,结果显示,在SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下,中亚强降水的发生频率和强度都将增加,中南部高海拔山区增加的幅度更大。

中亚生态环境脆弱,经济发展落后,极端降水事件危害极大<sup>[19]</sup>。作为中国天气气候的上游区以及“丝绸之路”的核心区域,中亚极端降水事件变化特征及相关物理机制的研究日益受到关注,并取得一些重要进展。然而,目前的研究主要针对中亚年极端降水<sup>[10,16]</sup>或者夏季极端降水<sup>[15]</sup>,对其他季节极端降水的变化特征研究较少。事实上,与东亚区域以夏季降水为主不同,除哈萨克斯坦地区四季降水较均匀,中亚其他四国以冬春降水为主<sup>[9]</sup>。因此,分四个季节对中亚区域极端降水变化特征进行系统性分析具有重要意义。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

本文所研究的中亚地区地处欧亚大陆腹部,是深居内陆的最大干旱区,包括哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦、吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦5个国家,地形复杂多样,总体呈现东南地势高,西北地势低的空间分布特征(图1)。

收稿日期:2023-10-11

基金项目:四川省杰出青年科技计划资助项目(2020JDJQ0050)

通信作者:陈樟. E-mail:chenzhang@cuit.edu.cn

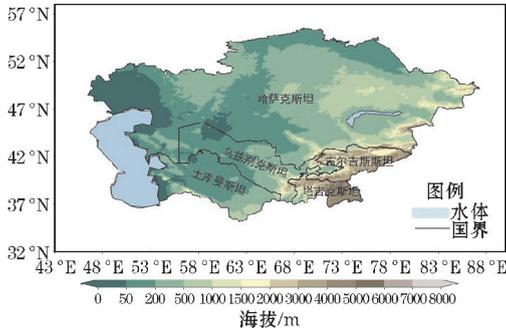


图 1 中亚地形图

### 1.2 研究资料

本文采用美国国家海洋和大气管理局气候预测中心 (climate prediction center, CPC) 提供的逐日降水数据集和日最高温度、日最低温度数据集,空间分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  [20]。研究指出 CPC 逐日降水资料可以较好地描述中亚地区的降水变化 [15,21],但对中亚降水情况有所低估 [22]。研究时段为 1983-2022 年,春季 (MAM) 为 3、4、5 月,夏季 (JJA) 为 6、7、8 月,秋季 (SON) 为 9、10、11 月,冬季 (DJF) 为当年 12 月至次年 1、2 月。

### 1.3 极端降水指数的定义

本文采用百分位法定义极端降水事件的阈值,并对极端降水事件进行检测。具体方法如下:对每个格点每个季节,将 1983-2022 年该季节内降水量  $\geq 0.1 \text{ mm}$  的所有样本按升序排序,取第 90 百分位的日降水量定义为气候平均极端降水阈值,作为确定极端降水事件的标准。

参考世界气象组织和世界气候研究计划等联合成立的气候变化监测和指数专家组定义的典型气候指数,选取和定义包括极端降水日数、极端降水平均强度、极端降水量对季节降水量的贡献率、1 日最大降水量 (Rx1day)、持续干期 (CDD) 和持续湿期 (CWD) 等 6 个极端降水指数,指数定义详情见表 1。

表 1 极端降水指数定义

极端降水指数	定义
极端降水日数/d	季节内日降水量大于 90% 分位值的降水发生次数
极端降水强度/(mm/d)	季节内日降水量大于 90% 分位值的降水量总和/极端降水日数
极端降水贡献率/%	季节内日降水量大于 90% 分位值的降水量总和/季节降水量和
1 日最大降水量/mm	季节内 1 日最大降水量
持续湿期/d	季节内日降水量 $\geq 1 \text{ mm}$ 的最大持续日数
持续干期/d	季节内日降水量 $< 1 \text{ mm}$ 的最大持续日数

## 2 结果与分析

### 2.1 中亚极端降水事件的空间分布和趋势变化

中亚地区极端降水阈值表现出明显的空间差异和季节差异 (图 2)。春季 (图 2a)、秋季 (图 2c) 和冬季

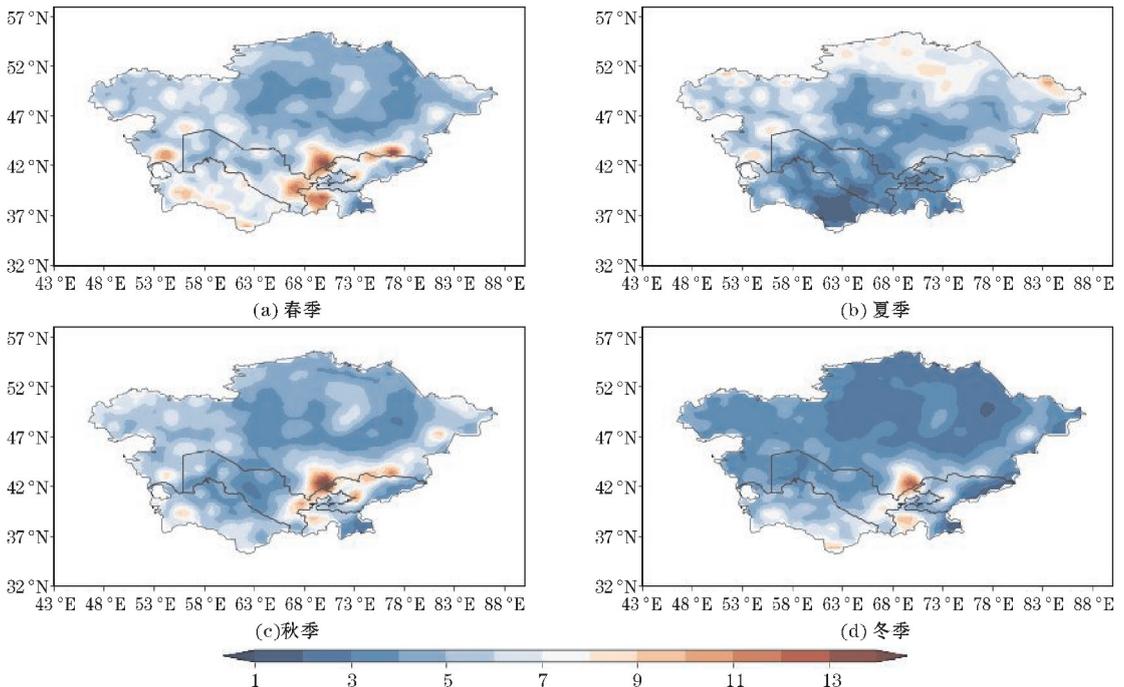


图 2 中亚地区四季极端降水阈值的空间分布

(图 2d) 极端降水阈值整体呈现北低南高,山区阈值高的空间分布特征,最大值可达 12 mm 以上。极端降水阈值的低值主要位于哈萨克斯坦北部,春季和秋季为 3~6 mm,冬季为 1~3 mm。夏季(图 2b)极端降水阈值的空间分布与其他 3 个季节截然不同,表现为从南向北逐渐增高,最大值位于哈萨克斯坦北部,为 7~9 mm。这一结果印证了区分季节研究中亚极端降水的必要性。值得注意的是,极端降水阈值空间分布与季节降水气候态(图略)相似,气候态降水大值区普遍对应着极端降水阈值的高值区。

图 3 为中亚地区四季极端降水日数的多年平均及其线性趋势的空间分布。4 个季节极端降水发生频次的空间分布基本一致,整体呈现由北向南逐渐递减,极

端降水最频发的区域位于哈萨克斯坦北部和天山山脉,高值中心可达 4 d 以上(图 3a~d)。土库曼斯坦和乌兹别克斯坦极端降水事件发生较少(图 3a~d)。极端降水日数的趋势变化呈现出明显的区域差异和季节差异。中亚春季极端降水日数普遍呈增多趋势,且大部分区域通过 95% 显著性检验,其中中亚中部增加幅度最大,可达 1.5 d/10a(图 3a)。夏季哈萨克斯坦东北部极端降水发生频次显著增加,可达 1 d/10a,其他区域无明显趋势变化(图 3b)。秋季中亚东部极端降水频次呈现显著增加趋势(图 3c)。冬季除吉尔吉斯斯坦南部极端降水日数呈显著减少趋势,其余大多数区域呈显著增多趋势,哈萨克斯坦北部和南部可达 1.5 d/10a(图 3d)。

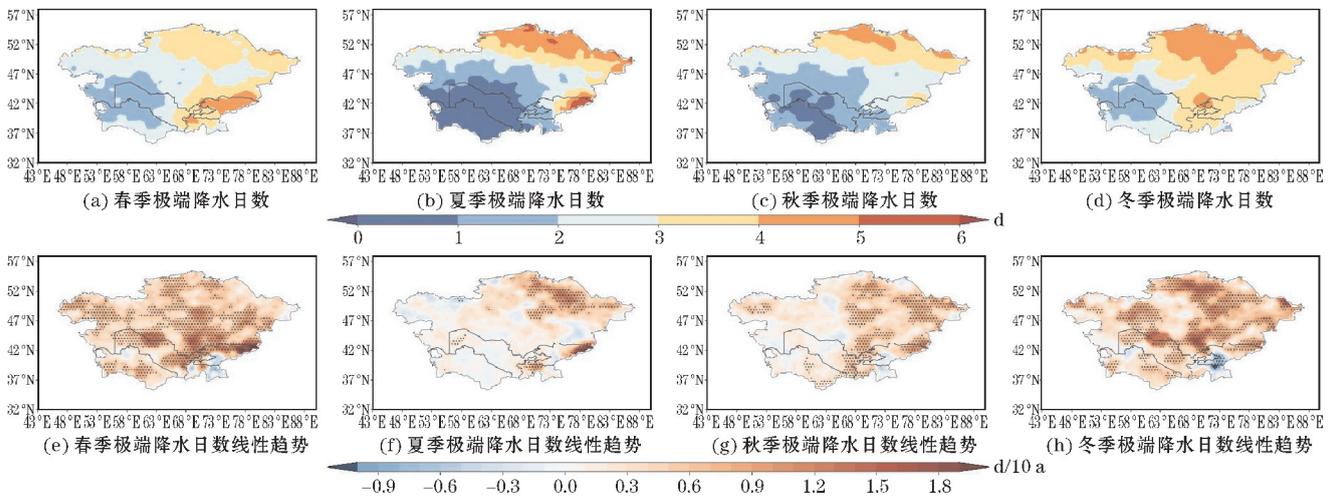


图 3 中亚地区四季极端降水日数的多年平均及其线性趋势的空间分布(打点区域表示通过 0.05 的显著性检验)

强度是衡量极端降水的重要要素,强度越大越可能造成自然灾害。图 4 为中亚地区 4 个季节极端降水事件平均强度及其线性趋势的空间分布。从图 2 与图 4(a)~(d)可以看出,各个季节的极端降水平均强度与极端降水阈值在空间上分布一致。春、秋、冬季的极端降水平均强度均表现为由北向南递增,最强值位于山区附近,均超过 20 mm/d;普遍而言,春季强度最大,

秋季次之,冬季最小(图 4a,c,d)。夏季极端降水强度北高南低,最大值位于哈萨克斯坦北部和西部,约 12 mm/d(图 4b)。4 个季节的极端降水强度均没有明显的趋势变化(图 4e~h),夏季和秋季,吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦交界处强度有增强趋势,可达 3 mm·d<sup>-1</sup>/10a,但未通过显著性检验(图 4f~g)。

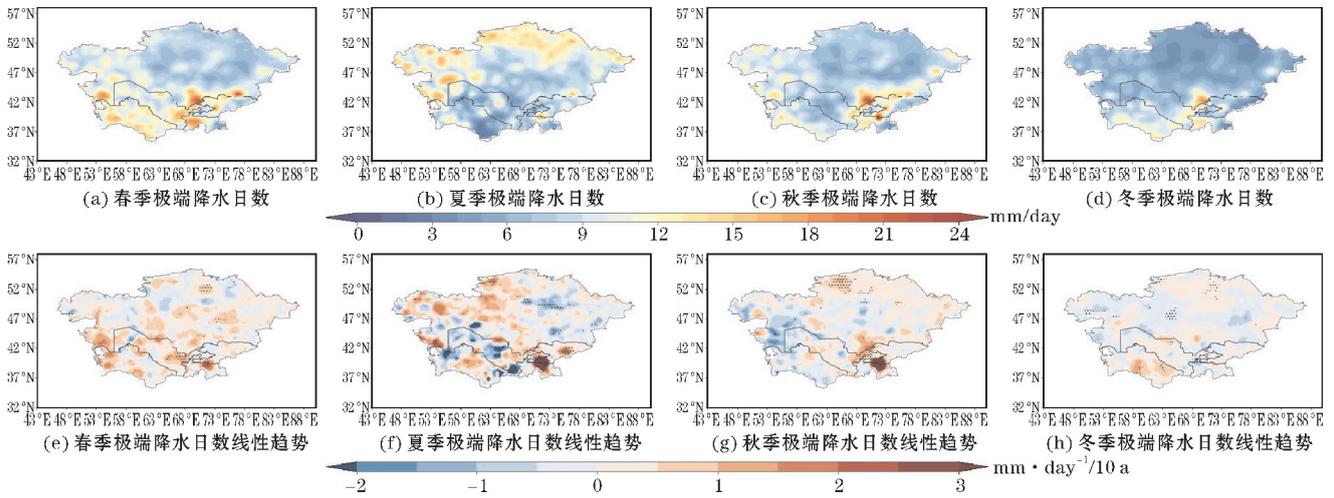


图 4 中亚地区四季极端降水平均强度及其线性趋势的空间分布(打点区域表示通过 0.05 的显著性检验)

季节极端降水量贡献率反映了极端降水事件降水量对季节总降水量的贡献。图 5 为中亚地区四季的极端降水贡献率及贡献率趋势变化的空间分布。春季极端降水贡献率在整个中亚地区分布较均匀,为 34% ~ 42% (图 5a)。夏季极端降水贡献率在中亚西南部最低,在 20% 以下。这可能与中亚西南地区极端降水发生较少有关(图 3b);哈萨克斯坦和吉尔吉斯斯坦等区域的极端降水贡献率较为均匀且较高,可达 40% ~ 50% (图 5b)。秋季极端降水贡献率空间分布同夏季相似,呈现西南低、东北高的分布特征。但相比于夏季,秋季中亚西南部极端降水贡献率增高,北方和东部的贡献

率降低(图 5c)。冬季极端降水贡献率分布较为均匀,数值略低与春季(图 5d)。极端降水贡献率的变化趋势与极端降水日数的趋势变化较为一致。从图 5(e) ~ (h)与图 3(e) ~ (h)可以看出,春季大部分地区呈升高趋势,显著区域位于 48°N 以南,最大增加速率为 16 %/10a(图 5e)。夏季,大多数区域贡献率的趋势变化不明显(图 5f)。秋季极端降水贡献率显著升高的区域位于中亚东部(图 5g),与该区域极端降水频次增多有关(图 3g)。冬季哈萨克斯坦北部和图兰平原有显著的正趋势,而在塔吉克斯坦的高原地区有负趋势(图 5h)。

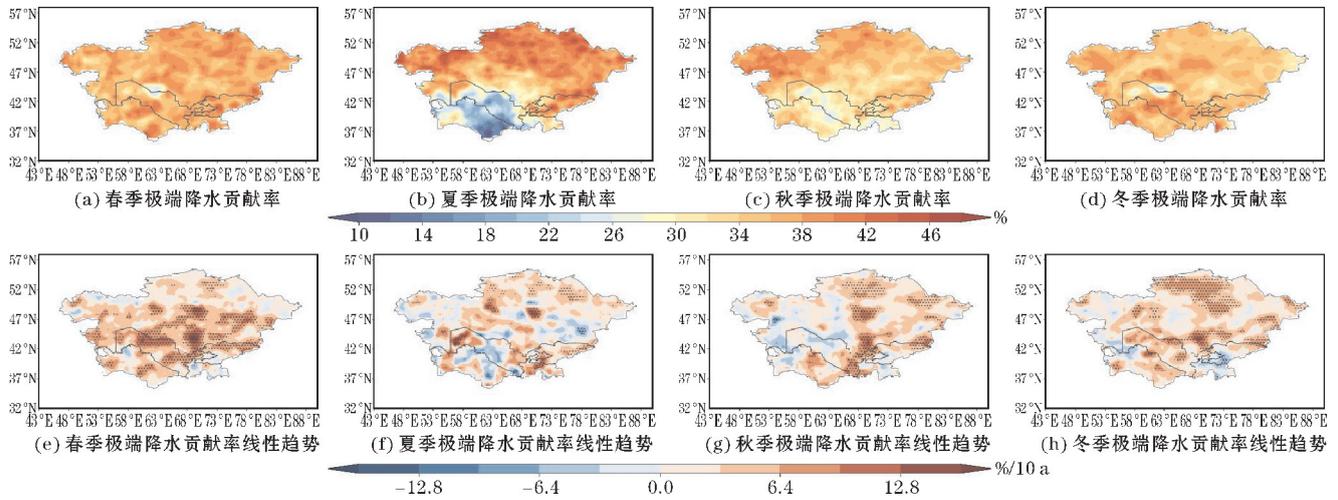


图 5 中亚地区四季极端降水贡献率及其线性趋势的空间分布(打点区域表示通过 0.05 的显著性检验。)

1 日最大降水量(Rx1day)也可以表示降水强度,4 个季节的 Rx1day 整体空间分布(图 6a ~ d)与季节降水气候态(图略)、极端降水阈值(图 2a ~ d)以及极端降水平均强度(图 4a ~ d)一致。春季、秋季和冬季 Rx1day 的最大值位于山区,其中春季可达 25 mm,秋季和冬季约 20 mm(图 6a, c, d)。夏季 Rx1day 呈现北高

南低,哈萨克斯坦北部最大值可达 17 ~ 21 mm (图 6b)。从线性趋势变化来看(图 6e ~ h),春季大多数区域 Rx1day 呈升高趋势,最大可达到 4 mm/10a (图 6e)。其他 3 个季节趋势变化分布零散,除夏季和秋季塔吉克斯坦升高趋势显著,超过 4.3 mm/10a,其他区域的趋势变化都不显著(图 6f ~ h)。

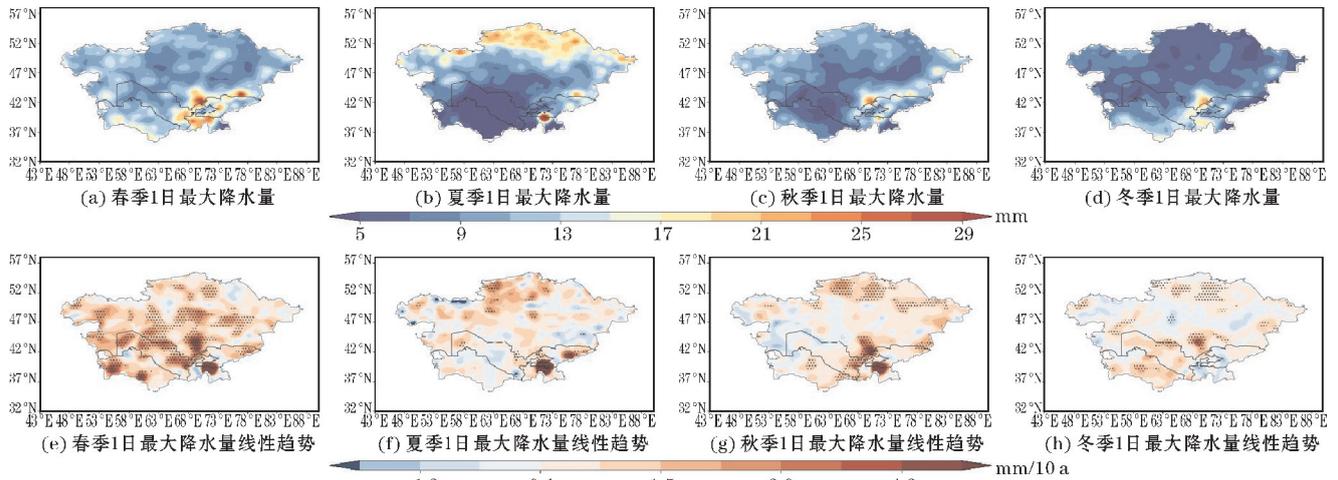


图 6 中亚地区四季 1 日最大降水量及其线性趋势的空间分布(打点区域表示通过 0.05 的显著性检验)

四季持续湿期(CWD)的空间分布(图7a~d)整体与极端降水日数(图3a~d)分布基本一致,4个季节都呈现出由西南向东北递增,西南部的持续湿期日数较少,哈萨克斯坦北部为CWD大值中心。其中春季塔吉克斯坦和吉尔吉斯坦的CWD值也较大,可到5 d,西南部CWD约为3 d(图7a);夏季哈萨克斯坦北部CWD可超过6 d,但西南部CWD仅为1 d(图7b);

秋季和冬季西南部CWD为2 d左右(图7c~d)。持续湿期的趋势变化空间分布(图7e~h)与极端降水日数的趋势变化(图3e~h)相似。春季和冬季,大多数区域尤其是哈萨克斯坦表现为CWD显著正趋势(图7e、h),秋季增加趋势的幅度略低于春季和冬季(图7g),夏季显著正趋势主要局限在哈萨克斯坦东北部(图7f)。

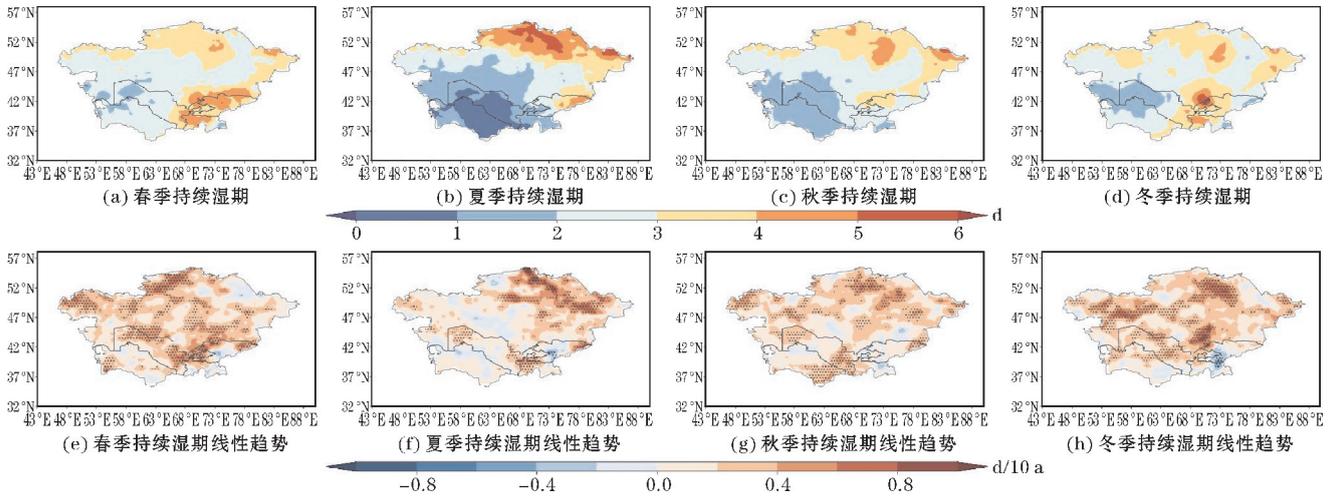


图7 中亚地区四季持续湿期及其线性趋势的空间分布(打点区域表示通过0.05的显著性检验)

中亚地区持续干期(CDD)空间分布(图8a~d)与持续湿期的空间分布(图7a~d)特征相反,大体表现为由西南向东北方向递减。春季和冬季,CDD极小值位于塔吉克斯坦和吉尔吉斯坦,为15~20 d(图8a、d),这与该区域降水集中在冬春季(图略)有

关。夏季和秋季CDD极大值位于中亚西南部,夏季可达70 d以上(图8b),秋季约为60 d(图8c),这与该区域夏季和秋季气候态降水稀少(图略)相符。与持续湿期的正趋势变化相反,大部分区域持续干期表现为负趋势,但显著区域分布较为零散(图8e~h)。

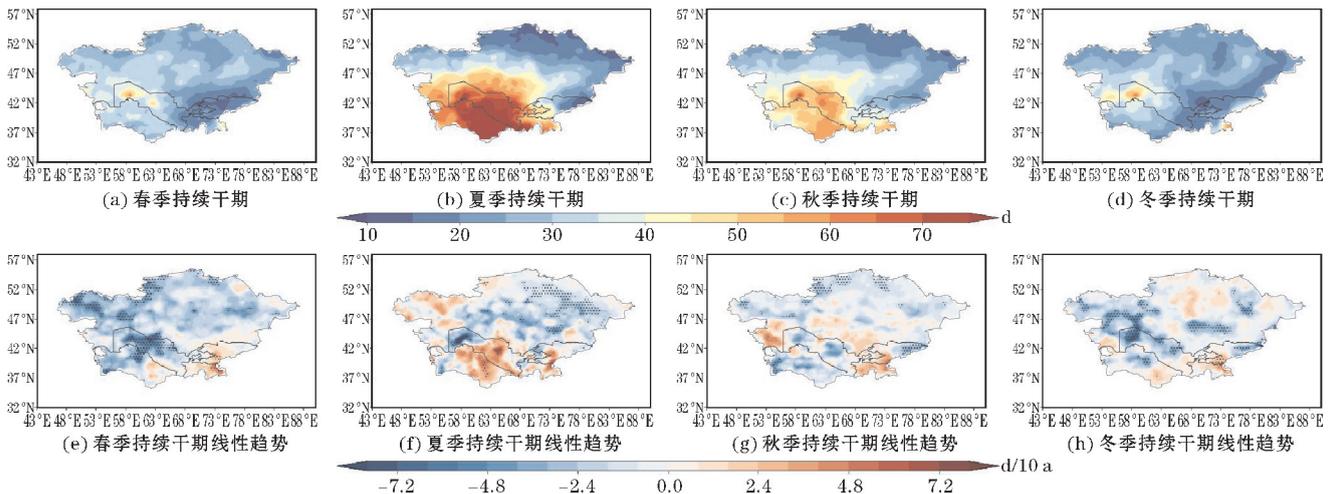


图8 中亚地区四季持续干期及其线性趋势的空间分布(打点区域表示通过0.05的显著性检验)

## 2.2 极端降水频次与气温的关系

地面温度升高会加剧地表蒸发,大气保持水分能力增强,进而改变降水量和极端降水的频率和强

度<sup>[23]</sup>,因此本节将探讨中亚极端降水对气温变化的响应如何,主要考虑极端降水日数和日最高气温、日最低气温的相关性。

春季极端降水日数与日最高气温的相关系数分布

较为零散,大多数区域并不显著(图9a);但与日最低气温普遍呈正相关,显著区域位于哈萨克斯坦中部(图9e)。说明中亚春季极端降水对日最低气温的变化响应显著,日最低气温升高有利于极端降水事件的发生,最高气温的变化对春季极端事件影响不明显。与之相反,夏季中亚极端降水日数与最低气温关系较弱(图9f),与日最高气温呈显著负相关(图9b)。这种负相关可能是因为降水发生时,大气中云量增多,影响进

入大气的短波辐射,从而降低了日最高温度。秋季,中亚东部的极端降水与日最高温度呈负相关,与日最低温度关系较弱;而中亚西部的极端降水频次与日最低温度呈正相关,与日最高温度关系较弱(图9c、g)。冬季,哈萨克斯坦的极端降水频次与日最高温度和日最低温度都呈显著正相关(图9d、h),温度的升高有利于极端降水的发生。

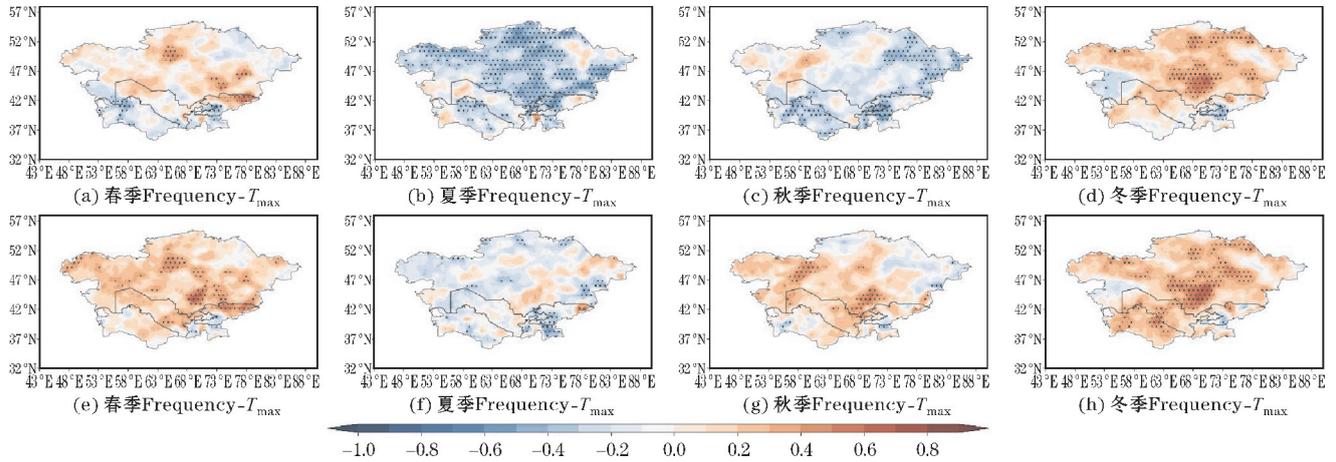


图9 中亚地区四季极端降水日数与日最高气温、日最低气温的相关系数(打点区域表示通过0.05的显著性检验)

### 3 结论

本文基于CPC逐日格点降水数据和日最高、日最低温度数据,分析1983-2022年中亚地区4个季节极端降水指数的空间分布特征和趋势变化特征,以及中亚极端降水频次与气温的关系,主要结论如下:

(1) 中亚地区极端降水阈值和极端降水指数表现出明显的空间差异和季节差异,不同降水指数之间也存在一定差异。春季、秋季和冬季的极端降水阈值、极端降水平均强度,1日最大降水量等在空间上的分布相一致,均表现为由北向南逐渐递增,山区为大值区的特征;而夏季的空间分布特征与之相反,由北向南逐渐递减,哈萨克斯坦北部为大值区。四个季节的极端降水日数在空间分布基本一致,整体呈现从西南到东北逐渐递增,极端降水频发区域位于哈萨克斯坦北部和山区,高值中心可达4 d以上,而土库曼斯坦和乌兹别克斯坦极端降水事件发生较少。持续湿期CWD在每个季节上的空间分布与极端降水日数的空间分布类似,与持续干期CDD的空间分布特征相反。春季和冬季极端降水贡献率在整个中亚地区分布较为均匀,为30%~40%;夏季和秋季极端降水贡献率表现为西南低东北高,在哈萨克斯坦和吉尔吉斯斯坦等区域可达

40%~50%,说明这些区域的极端降水对总降水起到重要贡献。

(2) 中亚极端降水变化趋势也存在明显季节差异和指数差异。极端降水日数、极端降水贡献率、持续湿期均在春、秋、冬3个季节中呈现显著的增加趋势,春季幅度最强,冬季次之,夏季没有明显的趋势变化。春季和冬季的持续湿期有减小趋势,夏季和秋季趋势较弱。4个季节的极端降水强度均没有明显的趋势变化。1日最大降水量在春季呈现大范围的增加趋势,其他3个季节除塔吉克斯坦升高趋势明显,其他区域无明显趋势变化。上述结果表明,在研究中亚极端降水趋势变化时需要标明所选极端降水指标,否则可能会影响所得结论。

(3) 中亚极端降水日数与气温之间的关系存在明显的季节差异。春季哈萨克斯坦中部极端降水日数与日最低气温呈显著正相关,与日最高气温关系较弱。而夏季中亚大部分区域的极端降水日数与日最高气温呈显著负相关,对日最低气温的响应不明显。秋季,中亚东部极端降水与日最高温度呈负相关,中亚西部极端降水与日最低温度呈正相关。冬季,哈萨克斯坦极端降水日数与日最高和日最低气温都呈显著正相关。

致谢:感谢成都信息工程大学科研基金项目(KYTZ201706)对本文的资助

## 参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis [M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2021.
- [2] Madakumbura G D, Thackeray C W, Norris J, et al. Anthropogenic influence on extreme precipitation over global land areas seen in multiple observational datasets [J]. Nature Communications, 2021, 12 (1): 3944.
- [3] Reichstein M, Riede F, Frank D. More floods, fires and cyclones-plan for domino effects on sustainability goals [J]. Nature, 2021, 592: 347-349.
- [4] Liang X Z. Extreme rainfall slows the global economy [J]. Nature, 2022, 601: 193-194.
- [5] Aizen E M, Aizen V B, Melack J M, et al. Precipitation and atmospheric circulation patterns at mid-latitudes of Asia [J]. Int J Climatol, 2001, 21: 535-556.
- [6] Lioubimtseva E, Henebry C M. Climate and environmental change in arid Central Asia: Impacts, vulnerability, and adaptations [J]. Journal of Arid Environments, 2009, 73 (11): 963-977.
- [7] Chen F H, Chen J, Huang W, et al. Westerlies Asia and monsoonal Asia: spatiotemporal differences in climate change and possible mechanisms on decadal to sub-orbital timescales [J]. Earth Science Reviews, 2019, 192: 337-354.
- [8] Chen F H, Wang J S, Jin L Y, et al. Rapid warming in mid-latitude central Asia for the past 100 years [J]. Front. Earth Sci. China, 2009, 3 (1): 42-50.
- [9] Chen F H, Huang W, Jin L Y, et al. Spatiotemporal precipitation variations in the arid Central Asia in the context of global warming [J]. Sci. China Earth Sci., 2011, 54 (12): 1812-1821.
- [10] Zhang M, Chen Y N, Shen Y J, et al. Changes of precipitation extremes in arid Central Asia [J]. Quaternary International, 2017, 436: 16-27.
- [11] Jiang J, Zhou T J, Chen X L, et al. Future changes in precipitation over Central Asia based on CMIP6 projections [J]. Environmental Research Letters, 2020, 15 (5).
- [12] Hu Z, Zhang C, Hu Q, et al. Temperature changes in Central Asia from 1979 to 2011 based on multiple datasets [J]. Journal of Climate, 2014, 27 (3): 1143-1167.
- [13] Huang A N, Zhou Y, Zhang Y C, et al. Changes of the annual precipitation over central Asia in the twenty-first century projected by multimodels of CMIP5 [J]. Journal of Climate, 2014, 27 (17): 6627-6646.
- [14] Hu Z Y, Zhou Q M, Chen X, et al. Variations and changes of annual precipitation in Central Asia over the last century [J]. International Journal of Climatology, 2017, 37: 157-170.
- [15] Ma Q R, Zhang J, Game A T, et al. Spatiotemporal variability of summer precipitation and precipitation extremes and associated large-scale mechanisms in Central Asia during 1979-2018 [J]. Journal of Hydrology X, 2020, 8: 100061.
- [16] 黄鑫, 焦黎, 马晓飞, 等. 基于 RCLIMDEX 模型的近 60 a 中亚极端降水事件变化特征 [J]. 干旱区地理, 2023, 46 (7): 1039-1051.
- [17] 古再丽努尔·亚森, 张京朋, 赵天保. CMIP6 多模式对 21 世纪中亚极端降水未来变化预估 [J]. 气候与环境研究, 2023, 28 (3): 286-302.
- [18] Yao J, Chen Y, Chen J, et al. Intensification of extreme precipitation in arid Central Asia [J]. Journal of Hydrology, 2021, 598 (12): 125760.
- [19] 姚俊强, 曾勇, 李建刚, 等. 中亚区域干湿及极端降水研究综述 [J]. 气象科技进展, 2020, 10 (4): 7-14.
- [20] Chen M, Shi W, Xie P, et al. Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global daily precipitation [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2008, 113: D04110.
- [21] Rana S, McGregor J, Renwick J. Wintertime precipitation climatology and ENSO sensitivity over central southwest Asia [J]. International Journal of Climatology, 2017, 37 (3): 1494-1509.
- [22] Chen J, Yao J, Dilinuer T, et al. Central Asia daily extreme precipitation in observations and gridded datasets: A threshold criteria perspective [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 1007365.
- [23] 翟盘茂, 王萃萃, 李威. 极端降水事件变化的观测研究 [J]. 气候变化研究进展, 2007 (3): 144-148.

## Spatial and Temporal Features of Seasonal Extreme Precipitation Events over Central Asia during 1983–2022

LIANG Yuxin, CHEN Zhang, ZHAO Yong, LIU Wenli

(College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** To better understand the spatial and temporal features of seasons of extreme precipitation events in Central Asia, using CPC daily precipitation data, the spatial distribution characteristics and the long-term trends of extreme precipitation events over Central Asia in four seasons during 1983–2022 were analyzed based on percentile threshold method and extreme precipitation indices, the responses of extreme precipitation to temperature were also discussed. The results are as follows: The extreme precipitation events have obvious spatial and seasonal differences. (1) The spatial distribution of the threshold and intensity of extreme precipitation and Rx1day all show higher values in the south than in the north in spring, autumn, and winter, while higher values in the north and lower in the south in summer. Both the frequency and CWD gradually increased from the southwest to the northeast in four seasons, while CDD was the opposite. The contribution rate of extreme precipitation is evenly distributed in spring and winter, while displays are low in the southwest and high in the northeast in summer and autumn. (2) The frequency, CWD, and Rx1day of four seasons are generally increasing in spring, autumn, and winter, among which the spring signal was the strongest and the summer trend change was weak; CDD in spring and winter shows a decreasing trend. Rx1day has a significant increase trend only in spring. There is no obvious trend in the intensity of the extreme events in the four seasons. (3) The response of extreme precipitation to the daily minimum temperature is more sensitive than to the maximum temperature in spring, while the frequency is negatively correlated with the daily maximum temperature in summer, and significantly correlated with both maximum and minimum temperature in autumn and winter.

**Keywords:** Central Asia; extreme precipitation; spatial and temporal distribution; change trend; temperature; seasons