暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

1961—2022年三江源地区降水时空变化特征及成因初探

段海霞 姚秀萍

Characteristics and causes of precipitation in the Three River Headwaters Region from 1961 to 2022

DUAN Haixia，YAO Xiuping

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2023-169

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

赣江流域近50 a来极端降水时空变化特征

Spatial and temporal characteristics of extreme precipitation in Ganjiang River Basin in the past 50 years

暴雨灾害. 2020, 39(1): 102-108 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.01.012

夏季江淮地区降水的气候变化研究进展

A review of studies on climate change of summer precipitation in the Jianghuai region

暴雨灾害. 2020, 39(4): 317-324 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.04.001

近25 a重庆地区小时降水时空分布特征分析

Analysis on the characteristics of temporal and spatial distribution of hourly precipitation in Chongqing during recent 25 years

暴雨灾害. 2020, 39(1): 71-80 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.01.008

西南地区东部夏季降水转化率特征及成因分析

Characteristics and cause analysis of summer precipitation conversion rate in eastern Southwest China

暴雨灾害. 2024, 43(5): 499-508 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-010

黄河流域夏季6—8月极端强降水的主要环流型

Characteristics of the synoptic conditions of summer extreme heavy precipitation in the Yellow River Basin

暴雨灾害. 2022, 41(5): 536-543 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-028

山东省三个不同区域降水雨滴谱特征的对比分析

Comparison study of raindrop size distribution in three regions of Shandong Province

暴雨灾害. 2023, 42(5): 585-594 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-187

关注微信公众号，获得更多资讯信息

段海霞,姚秀萍.2025. 1961—2022 年三江源地区降水时空变化特征及成因初探[J].暴雨灾害,44(2):144−155. DUAN Haixia, YAO Xiuping. 2025. Characteristics and causes of precipitation in the Three River Headwaters Region from 1961 to 2022 [J]. Torrential Rain and Disasters,44(2):144−155 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−169

1961—2022 年三江源地区降水时空变化特征及成因初探

段海霞[1],姚秀萍[2]

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所,甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室/中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室 兰州 730000; 2. 中国气象局干部培训学院,北京 10081)

摘　要: 三江源地区 (Three River Headwaters Region, TRHR) 是中国生态系统最为敏感和脆弱的地区,其降水影响着本区及下游地区水资源安全、生态系统可持续发展。基于 1961—2022 年 TRHR 22 个国家气象观测站逐日降水资料,采用 MK 检验、距平分析、趋势分析等方法,分析了该地区 62 a 以来降水时空变化特征,并初步探究其成因。结果表明:(1) TRHR 降水空间差异明显,呈现出自西北向东南递增的分布特征,与地形自西向东递减走势特征一致。(2) 近 62 a 来 TRHR 年平均降水量整体呈显著增加趋势,1990 年前后发生突变,1990 年以后降水量增加趋势更为显著,春、夏、秋三季增加明显,冬季呈减少趋势;强降水日和降水强度明显增多,特别是 1990 年以后增加趋势更为明显。(3) 1990 年以后降水增加趋势以东部和南部增加为主,澜沧江和黄河源区部分站点增加趋势较长江源区更为显著,且夏季增加趋势明显,特别是黄河源区东部增加较多,冬季则略有减少。(4) 500 hPa 蒙古高压增强、西西伯利亚冷空气增强、700 hPa 西风减弱、东风增强、垂直上升运动增强、TRHR 水汽通量辐合增强。动力和水汽条件同时增强是 1990 年以后降水增加的可能原因。

关键词: 降水; 三江源地区; 时空变化; MK 检验

中图法分类号: P447　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023−169

Characteristics and causes of precipitation in the Three River Headwaters Region from 1961 to 2022

DUAN Haixia[1], YAO Xiuping[2]

(1. *Institute of Arid Meteorology of CMA*, *Key Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of China Meteorological Administration* (*CMA*) *and Gansu Province*, *Lanzhou* 730000; 2. *China Meteorological Administration Training Centre*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081)

Abstract: The Three River Headwaters Region (TRHR) is the most sensitive and fragile area of China's ecosystem. Its precipitation is a key factor affecting water resource security and sustainable development of the ecosystem in this and downstream areas. Using daily precipitation data from 22 national stations in TRHR from 1961 to 2022, the spatiotemporal characteristics and trend changes of precipitation in the region over the past 62 years were analyzed using methods such as MK test, cumulative anomaly analysis, and trend analysis,and its causes were preliminarily explored. The results are as follows. (1) The TRHR precipitation showed significant regional differences, with a spatial pattern of increasing from northwest to southeast, consistent with the decreasing trend of terrain from west to east. (2) The average annual precipitation of the TRHR showed a significant increase trend over the past 62 years, with a turning point around 1990. After 1990, the increase trend of the average annual precipitation had become more significant, with a significant increase in spring, summer, and autumn, and a decreasing trend in winter. The number of heavy rainfall days and precipitation intensity had significantly increased, especially since 1990. (3) The increasing trend of precipitation was mainly in the eastern and southern regions, with some stations in the Lancang River source area and the Yellow River source area showing a longer increase trend. The increase trend was more significant in the river source area in summer, especially in the eastern part of the Yellow River source area where there was a greater increase and a slight decrease in winter. (4) After 1990, The Mongolian high pressure at 500 hPa was enhanced, and the cold air in

收稿日期: 2023−08−07; **定稿日期**: 2024−12−22

资助项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0105); 国家重点研发计划项目 (2023YFC3007502); 甘肃省自然科学基金项目 (21JR7RA697)

第一作者: 段海霞, 主要从事天气气候变化和中尺度数值模拟研究。E-mail: dhx8199@hotmail.com

通信作者: 姚秀萍, 主要从事高原气象和天气动力学研究。E-mail: yaoxp@cma.gov.cn

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

West Siberia was enhanced. The westerly wind was weakened at 700 hPa, with the easterly wind strengthened. The vertical upward movement was enhanced, and the convergence of the TRHR water vapor flux was enhanced. The simultaneous enhancement of power and water vapor conditions was a possible reason for the increase in precipitation after 1990.

Key words: precipitation; the Three River Headwaters Region; spatiotemporal change; MK test

引　言

青藏高原降水具有显著的区域性特征, 降水量的变化对该区域冰川、沼泽、湿地等重要生态系统演化具有深远意义, 一直是科学家关注的热点问题。三江源地区 (Three River Headwaters Region, TRHR) 位于青藏高原腹地的青海省南部, 是长江、黄河和澜沧江三大河流发源地, 是亚洲、北半球乃至全球气候变化的敏感区, 具有重要的生态战略地位 (姚秀萍等, 2022)。在全球变暖的大背景下, TRHR 正经历着急速变暖、变湿的过程。在过去 50 a 里, TRHR 逐渐暖湿化且极端事件频次显著增加 (Gao et al., 2014; Xi et al., 2018; 靳铮等, 2020; 李红梅等, 2022), 在温度增幅明显的背景下, TRHR 的降水量总体也呈现增加趋势, 每 10 a 增加 2.2% (陈德亮等, 2015)。李红梅等 (2022) 和 Yi 等 (2010) 的研究指出 TRHR 降水在过去几十年总体成增加趋势, 其中夏季和秋季降水均经历了明显的年际和年代际变化, 且子源区总体降水在 20 世纪 90 年代中后期出现增强信号 (刘晓琼等, 2019; 孟宪红等, 2020; 姚秀萍等, 2021)。

针对 TRHR 降水多尺度时空变化的研究已有很多, 并得到很多有意义的结论。王根绪等 (2001) 的研究表明 1960—2000 年 TRHR 春季降水和 1985—2000 年冬季降水明显增加, 夏季降水却明显减少; Yi 等 (2010) 指出澜沧江源区夏季降水和长江源区秋季降水在 1961—2010 年是减少的; 刘晓琼等 (2019) 的研究也证实了澜沧江源区夏季降水的减弱趋势。三江源地区降水的空间分布与海拔高度呈负相关关系, 降水量随海拔高度的增加而减少 (强安丰等, 2020), 年平均降水量大致呈由东南向西北递减的空间分布, 具有季节性集中的特征 (姚秀萍等, 2022), 且存在自西向东幅度增大的变暖变湿的空间分异特征 (靳铮等, 2020)。

前人在 TRHR 降水气候突变方面也做了许多研究, 2018 年以前的研究普遍认为 2005 年是 TRHR 年降水量和年降水日数的突变点 (唐红玉等, 2007; 李璠等, 2016; 强安丰等, 2018), 但随着气候变暖, 以及资料时段的延长, TRHR 的年降水量和年降水日数的突变年份可能会发生变化。以上研究主要关注 TRHR 年降水量以及年降水日数的变化, 对强降水日频次的变化关注较少。近几十年来, 在西北地区暖湿化趋势 (丁一汇等, 2023) 的背景下, 降水主要以极端和强降水的增加为主 (王澄海等, 2021)。因此有必要分析 TRHR 近 60 a 来强降水日频次的变化趋势。

对于 TRHR 降水变化成因也有许多研究。TRHR 位于中纬度西风带环流控制区, 同时也是亚洲季风北边缘影响区, 降水受西风带和季风转换控制影响 (Xu et al., 2014; 张宇等, 2019; 杨浩等, 2023)。同时, 大尺度环流系统、高原地形热力和动力作用以及北大西洋涛动 (NAO)、厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO) 通过海-气相互作用调制季风系统和副热带高压变化的影响 (刘青春等, 2007; Zhang et al., 2019; 王腾, 2021; Wang et al., 2021; 华维等, 2024) 都是三江源降水形成机制。

综合前人研究可见, TRHR 降水特征在气候变化大背景下发生了明显变化, 但之前的研究基于较早的降水数据集, 且结合大气环流变化分析降水突变原因的研究还相对欠缺。因此本文拟利用 TRHR 1961—2022 年 62 a 22 个国家气象观测站逐日降水资料, 利用距平分析、趋势分析、MK 检验等方法, 对 TRHR 降水的时空分布、趋势演变、突变等特征进行分析, 并从大气环流、水汽条件等方面探讨降水突变的原因, 以期为进一步认识三江源地区乃至整个青藏高原的降水规律、大气环流变化, 更好地保护三江源地区提供参考。

1　研究区、数据和方法

1.1　研究区概况

TRHR 位于青海省南部、青藏高原东部, 是青藏高原的腹地和主体 (图 1a 红框), 研究区内以山地地貌为主, 山脉绵延, 地势复杂, 平均海拔在 3 335~6 564 m, 地形走势呈自西向东递减的趋势。区内沼泽湿地、冰川等水体广布, 是中国江河重要的水源涵养区、补给区乃至亚洲重要的水源区。TRHR 包括三个子源区, 分别是长江源区、黄河源区以及澜沧江源区 (图 1b)。本文用于研究的区内国家气象站共 22 个 (图 1b 黑点), 其中长江源区国家气象站有沱沱河、五道梁、曲麻莱、清水河、玉树 5 个站; 黄河源区国家气象站有湟源、湟中、玛多、达日、玛沁、久治、兴海、泽库、尖扎、循化、夏河、河南、同仁、果洛、贵南 15 个站, 澜沧江源区站点有杂多、囊谦 2 个站。

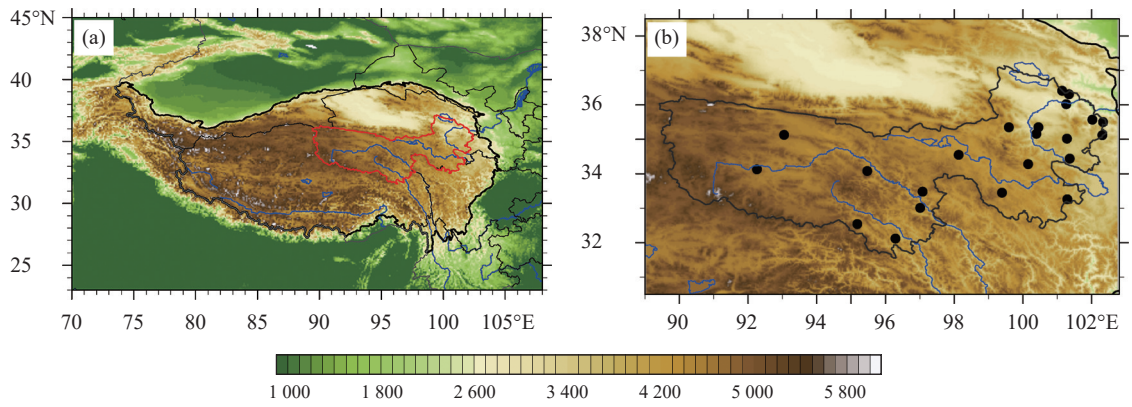


图 1 TRHR 地理位置 (红框)、地形高度 (填色, 单位: m) (a) 和 TRHR 国家气象观测站点 (黑点) 分布 (b)

Fig. 1 Distribution of (a) geographical position and topography (color-filled, unit: m) of the TRHR (red box) and the (b) national meteorological stations (black dots) of the TRHR

1.2 数据来源

本文所用的降水资料为中国气象局提供的中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集 (V3.0), 该数据集覆盖时段为 1951—2022 年。因 1961 年以前该地区的降水资料缺测率大于 10%, 所以本文选取时间段为 1961—2022 年。

本文将日降水量>25 mm 定义为 TRHR 强降水日, 将所有>25 mm 的降水量都统计在一起, 然后对强降水频次和降水总量计算所有站点的平均, 得到强降水多年平均的频次和强度。在讨论降水时间变化特征时所用的区域平均降水量为 22 个气象站的算术平均法计算所得。降水距平百分率计算时平均时间为 1961—2022 年的多年平均。此外, 本文所说的季节为气候学意义上的四季。

1.3 研究方法

本文使用 MK 检验方法对降水趋势和突变特征分析。MK 检验是一种基于秩的非参数检验, 其优点是能够检验线性或非线性趋势, 是气候诊断和预测的经典技术 (Hamed, 1998; 陈中平和徐强, 2016), 在气象学中常被用来分析气温、降雨量、风速等气象要素的趋势性, 从而预测天气气候变化和极端气候事件趋势。使用 MK 是因为它是无分布的、对异常值的鲁棒性和对非正态分布数据的高容量 (Yue et al., 2002)。本研究将利用时间序列数据分析降水的趋势及其突变特征。距平分析用于分析逐年降水与多年平均降水的差距。

2 结果分析

2.1 降水空间分布特征

TRHR 区内地域广阔, 地形复杂, 降水量存在区域差异。由图 2 可见, TRHR 1961—2022 年平均降水量自西向东、自西北向东南增加。其中澜沧江源区和黄河源区东南部有 6 个站点多年平均降水量达到 500 mm 以上; 而长江源区中西部三个站点年平均降水量<300 mm, 东部的玉树和清水河两站超过 400 mm; 黄河源区平均降水超过 300 mm 以上, 其中达日、兴海、久治和河南四站超过 500 mm。

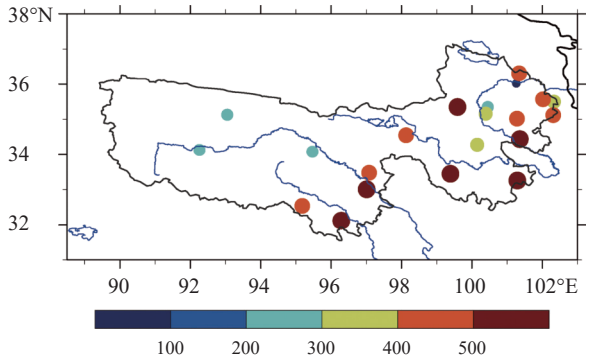


图 2 1961—2022 年 TRHR 22 个国家气象观测站平均降水量 (单位: mm) 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of multi-year average precipitation (unit: mm) of 22 national stations in the TRHR from 1961 to 2022

图 3 给出了 TRHR 1961—2022 年季节平均降水量分布, 可见 TRHR 平均降水量大值主要集中在夏季。夏季平均降水量分布与年平均降水量的分布特征基本一致, 自西北向东南方向递增。其中澜沧江源区的杂多和囊谦站夏季平均降水量达 200 mm 以上; 长江源区降水量自西向递增的特征最为明显, 西部的沱沱河和五道梁两站夏季平均降水量为 100 mm 以上, 东部的玉树和清水河站达 250 mm 以上; 黄河源区夏季平均降水量在三个源区中最大, 其中有 8 站夏季平均降水量可达 250 mm 以上。

春季 TRHR 平均降水量在 100 mm 以下, 其中长江源区三个站点和黄河源区的 2 个站点平均降水量<50 mm, 其余站点均在 50 mm 以上。秋季降水量较春季略偏多, 所有站点均超过 50 mm, 其中 8 个站点

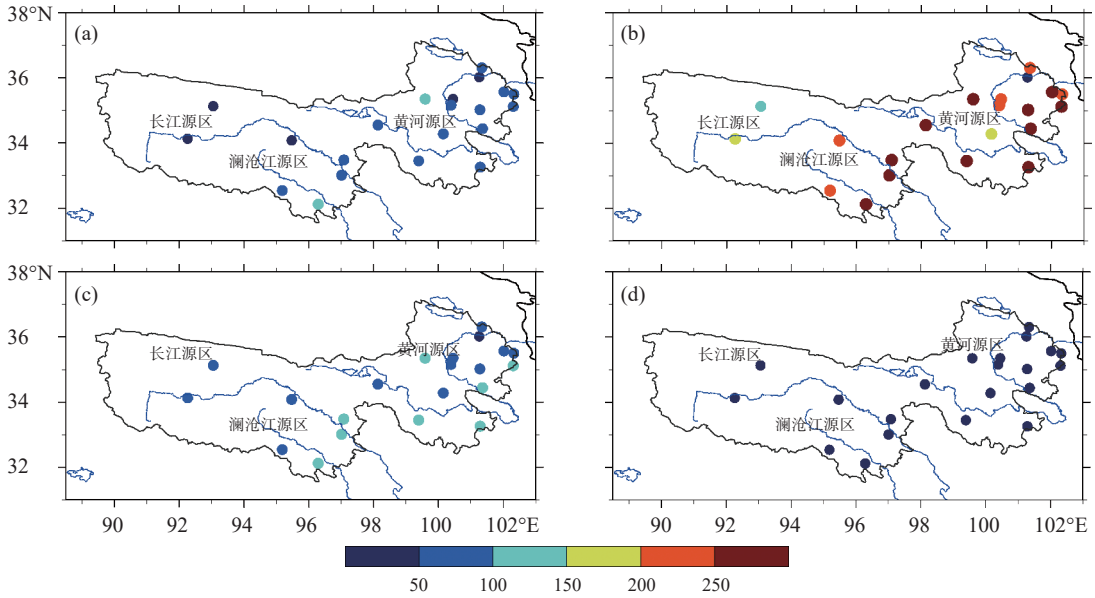


图 3 1961—2022 年 TRHR 22 个国家气象站春季 (a)、夏季 (b)、秋季 (c) 和冬季 (d) 平均降水量 (单位: mm) 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of (a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter average precipitation (unit:mm) of 22 national stations in the TRHR from 1961 to 2022

超过 100 mm。冬季降水量最少, TRHR 平均降水量均在 50 mm 以下。

从逐月平均降水量分布 (图 4) 来看, 月平均降水量分布与年、季节平均降水量分布情形基本一致。1 月, 全区平均降水量均<5 mm。2 月, 降水量开始逐渐增多, 长江源头的沱沱河站、澜沧江源区的囊谦和黄河源区的达日、久治和兴海三站降水量增多超过 5 mm。3 月, 沱沱河站及澜沧江和黄河源区中东部部分站点月平均降水量已超过 10 mm。这些站点在 4 月, 平均降水量超过 20 mm。5 月, 所有站点降水量均>20 mm, 南部和东部已达 40 mm 以上, 其中兴海和囊谦站超过 60 mm。6 月, 长江源区东部和玉树和清水河月平均降水量达到 100 mm 以上, 黄河源区大部地区降水量超过 60 mm。7—8 月, 除长江源区中部和黄河源区西北部的部分站点月平均降水量仍在 10 mm 以下外, TRHR 其余站点月平均降水量均超过了 20 mm; 全区月平均降水量在这两个月基本在 60 mm 以上。9 月, 降水量开始减小, 但基本维持在 40 mm 以上。10 月, 减小到 20~40 mm, 12 月全区降水量均在 5 mm 以下。

整体来看, TRHR 降水量大值主要集中在夏季; 降水量在空间上呈现出自西北向东南递增的分布特

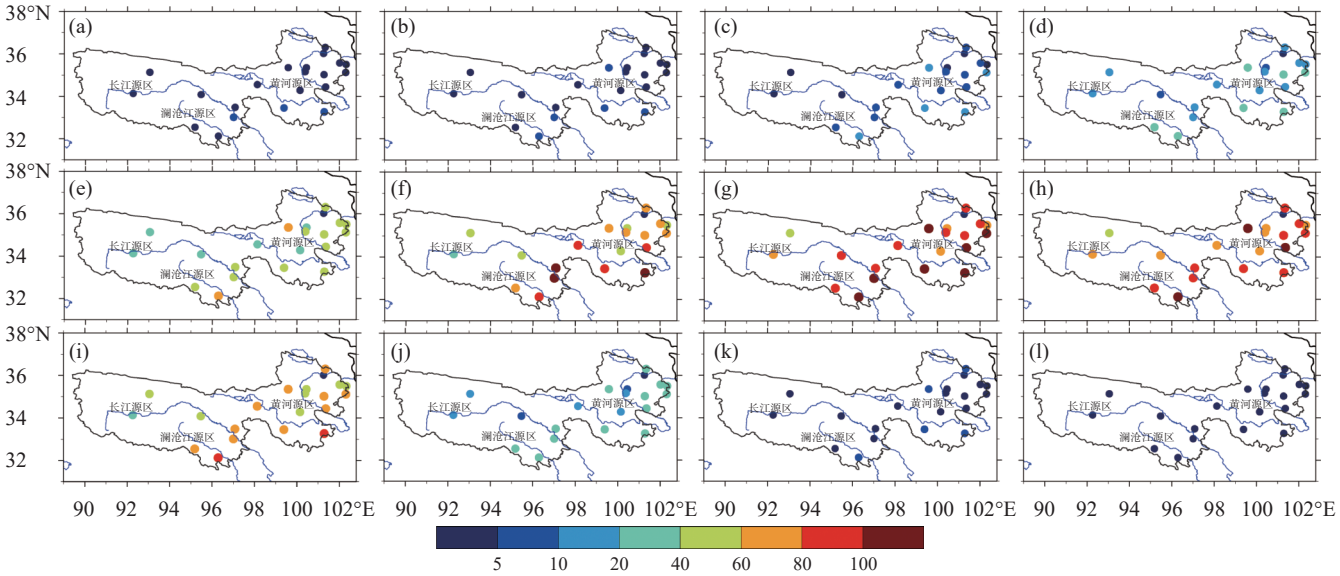


图 4 1961—2022 年 TRHR 1—12 月 (a—l) 平均月降水量 (单位: mm) 空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of monthly average precipitation (unit: mm) from (a-l) January to December in the TRHR from 1961 to 2022

征, 与地形自西向东递减特征相一致; 西部海拔较高的地区降水较少, 年平均降水量在 300 mm 左右; 东部海拔较低的地区降水较多, 降水中心出现在东部地区, 年平均降水量可达 500 mm 以上。

2.2 降水的时间变化特征

从 TRHR 区域平均降水量逐月演变 (图 5) 来看, 5—9 月是 TRHR 主要雨季, 其中 6—8 月为主雨季, 降水量平均可达 70 mm 以上。9 月的月平均降水量也接近 60 mm, 5 月平均降水量为 42 mm。

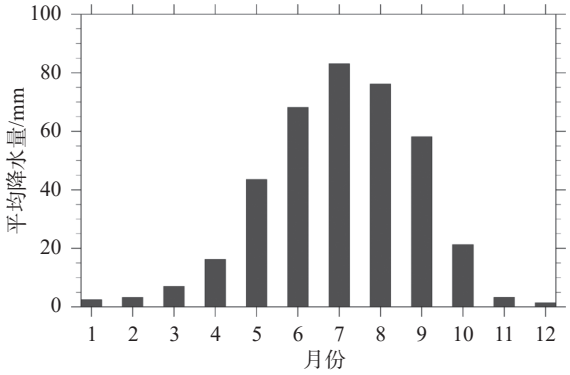


图 5 1961—2022 年 TRHR 平均降水量逐月变化

Fig. 5 Change of average monthly precipitation in the TRHR from 1961 to 2022

图 6 给出了 1961—2022 年 TRHR 年平均、季节平均降水量的逐年演变图。可见 TRHR 年平均降水量呈多波动增长趋势, 其中 1980—1990 年、2008—2020 年是两个多雨期, 这两个时期降水量距平百分率均为正, 降水最多年为 2018 年, 降水量达 518 mm, 1962 年最少为 294 mm (图 6a)。1961—2022 年降水增加速率为 6.2 mm·(10 a)$^{-1}$。根据 MK 检验结果显示, TRHR 年平均降水量在 1990 年前后发生显著突变, 其中 1990—2022 年降水量增加趋势较 1961—1990 年更为显著 (图 6a), 突变前降水增加速率为 17.7 mm·(10 a)$^{-1}$, 突变后为 27.2mm·(10 a)$^{-1}$, 突变后降水量增加了 31.2 mm。

TRHR 春季降水量在 1982—1990 年、1996—1998 年、2002—2006 年以及 2010—2022 年四个时段为正距平, 其余时段基本为负距平, 降水最多年为 2016 年, 降水量为 107.8 mm, 最少为 2000 年, 降水量为 41.8 mm。MK 检验显示, 1990 年突变期后, 春季降水量增加趋势趋于减缓 (图 6b), 突变前降水增加速率为 7.9 mm·(10 a)$^{-1}$, 突变后为 7.3 mm·(10 a)$^{-1}$, 突变后降水量增加了 11.2 mm。

夏季降水量也呈现增加趋势, 但没有全年和春季的趋势显著, 降水百分率距平也呈现波动特征 (图 6c), 降水最多年为 2018 年, 降水量为 313.3 mm, 最少为 2002 年, 降水量为 172.6 mm。突变后降水量增加了 11.9 mm, 突变前降水增加速率为 6.8 mm·(10 a)$^{-1}$, 突变后为 10.1 mm·(10 a)$^{-1}$。秋季降水量变化趋势与夏季相似, 波动特征明显, 降水最多出现在 2008 年, 降水量为 119 mm, 最少在 1972 年, 降水量为 40.8 mm。

秋季降水量虽整体呈增加趋势, 但 1990 年突变期前变化不大, 突变期后呈显著增加趋势 (图 6d), 突变后降水量增加了 6.3 mm, 突变前降水增加速率为 2.3 mm·(10 a)$^{-1}$, 突变后为 10 mm·(10 a)$^{-1}$。冬季, TRHR 降水量在 1990 年突变期前呈现增加趋势, 突变期后则呈下降趋势 (图 6e), 但 1990 年以后平均降水仍较 1990 年以前增加了 1.9 mm, 突变前降水增加速率为 1.2 mm·(10 a)$^{-1}$, 突变后为−0.3 mm·(10 a)$^{-1}$。以上趋势分析, 除夏季未通过 0.05 显著性水平检验, 年平均和季节平均降水量趋势均通过了 0.05 显著性水平检验。

综上, TRHR 年平均降水量 62 a 来整体呈显著增加趋势, 特别是 1990 年以后增加趋势更为显著, 1990 年以前增加速率为 17.7 mm·(10 a)$^{-1}$, 1990 年以后增加速率为 27.2mm·(10 a)$^{-1}$。但从季节变化来看, 春季增多更明显, 其次是夏季和秋季, 1990 年以后冬季降水呈减小趋势。这与张青等 (2022) 得到的 1996 年是 TRHR 降水突变点有所不同, 这主要是由于他们的研究是基于 TRHR 14 个观测站点, 且研究对象为候平均降水; 与刘晓琼等 (2019) 利用 13 个站点得到的 2002 年为突变点也明显不同。由此可见, 研究对象和数据样本的不同会造成降水突变点的研究结果明显不同。

2.3 1990 年突变前后降水变化差异

由以上分析可见, 1990 年是 TRHR 降水的突变期, 以下分别分析 1961—1990 年和 1991—2022 年两个时段 TRHR 年平均和季节平均降水量趋势的空间分布特征。1961—1990 年期间, 长江源区的曲麻莱和澜沧江源区的囊谦两站降水量为略微减少趋势, 其他所有站点均呈增加趋势 (图 7a), 且大部分站点通过了 0.05 显著性水平检验; 1991—2022 年期间除长江源头的沱沱河为减少趋势外, 其余所有站点为增加趋势, 其中黄河中东部部分地区趋势达到 25.4 mm·(10 a)$^{-1}$。1990 年以后曲麻莱和囊谦两站转为增加趋势 (图 7b); 1991 年以后, TRHR 通过 0.05 显著性检验的降水增加趋势的站点较 1990 年以前更多。

1990 年以前, TRHR 春季全区为降水增加趋势, 其中 TRHR 中部有 6 个站点通过了 0.05 显著性水平检验 (图 7c); 1990 年以后, 除长江源区的沱沱河和黄

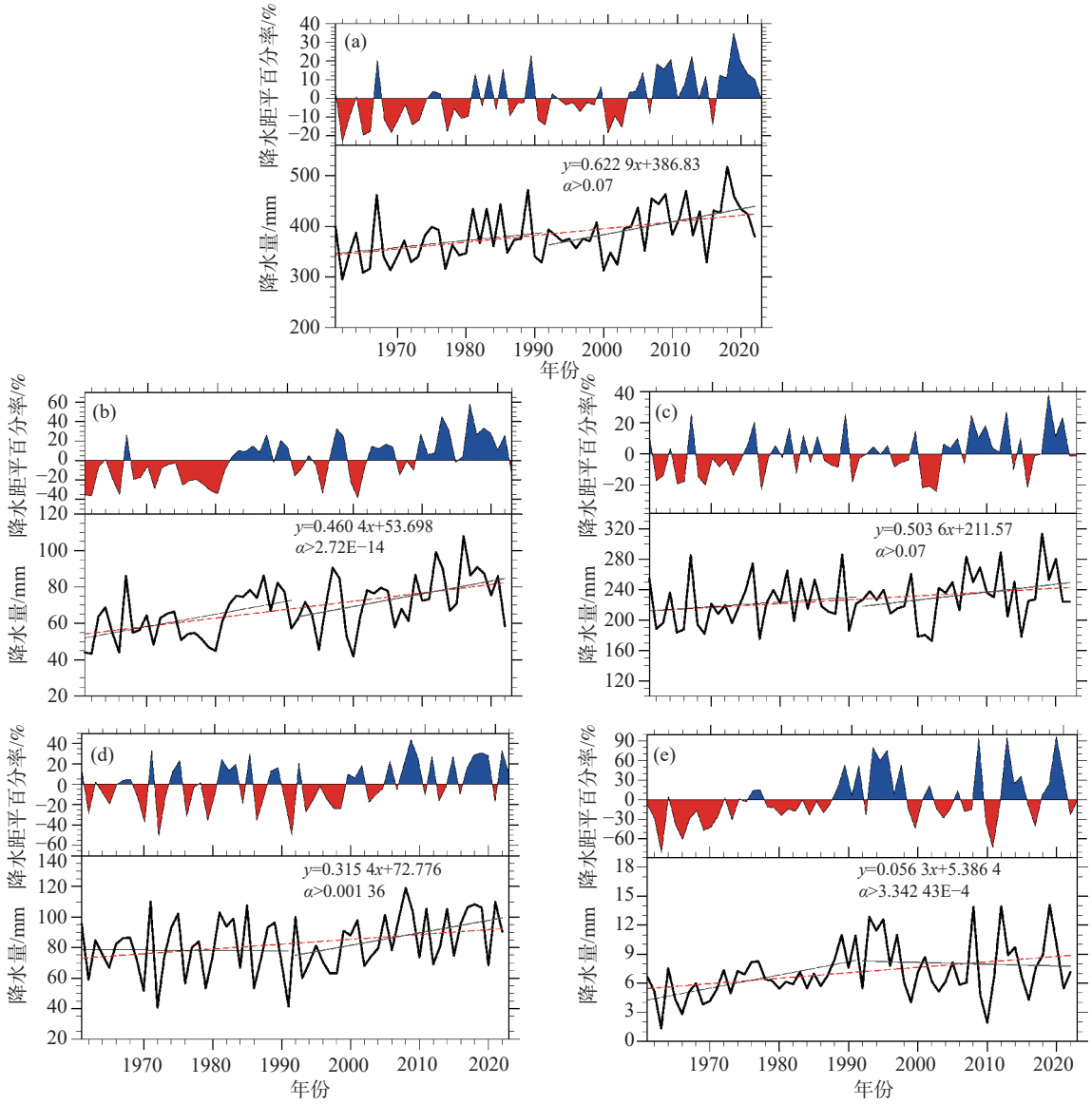


图 6 1961—2022 年 TRHR 年 (a) 和春季 (b)、夏季 (c)、秋季 (d)、冬季 (e) 降水距平百分率和降水量年际变化 (黑色粗实线)、MK 检验 (红色虚线) 及分段变化趋势 (灰色细实线)

Fig. 6 Evolution of anomaly percentage and interannual variation (black solid line), MK test (red dashed line), segmented trend (gray solid line) of (a) annual, (b) spring, (c) summer, (d) autumn, (e) winter average precipitation from 1961 to 2022 in the TRHR

河源区的兴海两站为减少趋势外, 其余站点仍呈增加趋势, 特别是黄河源区西部和中东部地区降水增加趋势明显 (图 7d), 有 8 个站点通过了 0.05 显著性水平检验。夏季, 1990 年以前澜沧江源区的囊谦站、长江源区的曲麻莱、清水河以及黄河源区的达日和久治为降水减少趋势, 其余站点为增加趋势 (图 7e), 其中澜沧江源区的杂多及黄河源区部分站点通过了 0.05 显著性水平检验, 1990 年以后, 这些站均转为增加趋势, 而澜沧江源区的杂多、长江源区的沱沱河、玉树和黄河源区的玛多和兴海转为减少趋势 (图 7f), 但黄河源区东部降水增加趋势更为显著且通过了 0.05 显著性水平检验。秋季, 长江源区西部、黄河源区北部在 1990 年以前为降水减少趋势 (图 7g), 1990 年以后 TRHR 全区降水均转为增加趋势, 其中黄河源区增加趋势较澜沧江和长江源区明显 (图 7h)。冬季, 除长江源区的清水河站降水减少, 其余所有站降水均呈现略增加趋势 (图 7i), 1990 年以后, 除长江源区西部、澜沧江源区东部以及黄河源区东部部分站点降水略有增多外, 其余大部地区降水均略减少 (图 7j), 冬季减少和增加趋势均未通过 0.05 显著性检验。

综上, 1961—2022 年 TRHR 降水量无论从年平均降水量还是季节平均降水量的变化来看, 整体均呈现出增加趋势, 增加趋势呈现自西向东、自北向南增加的空间分布特征; 其中澜沧江源区和黄河源区部分站点增加趋势较长江源区更为显著。1990 年以

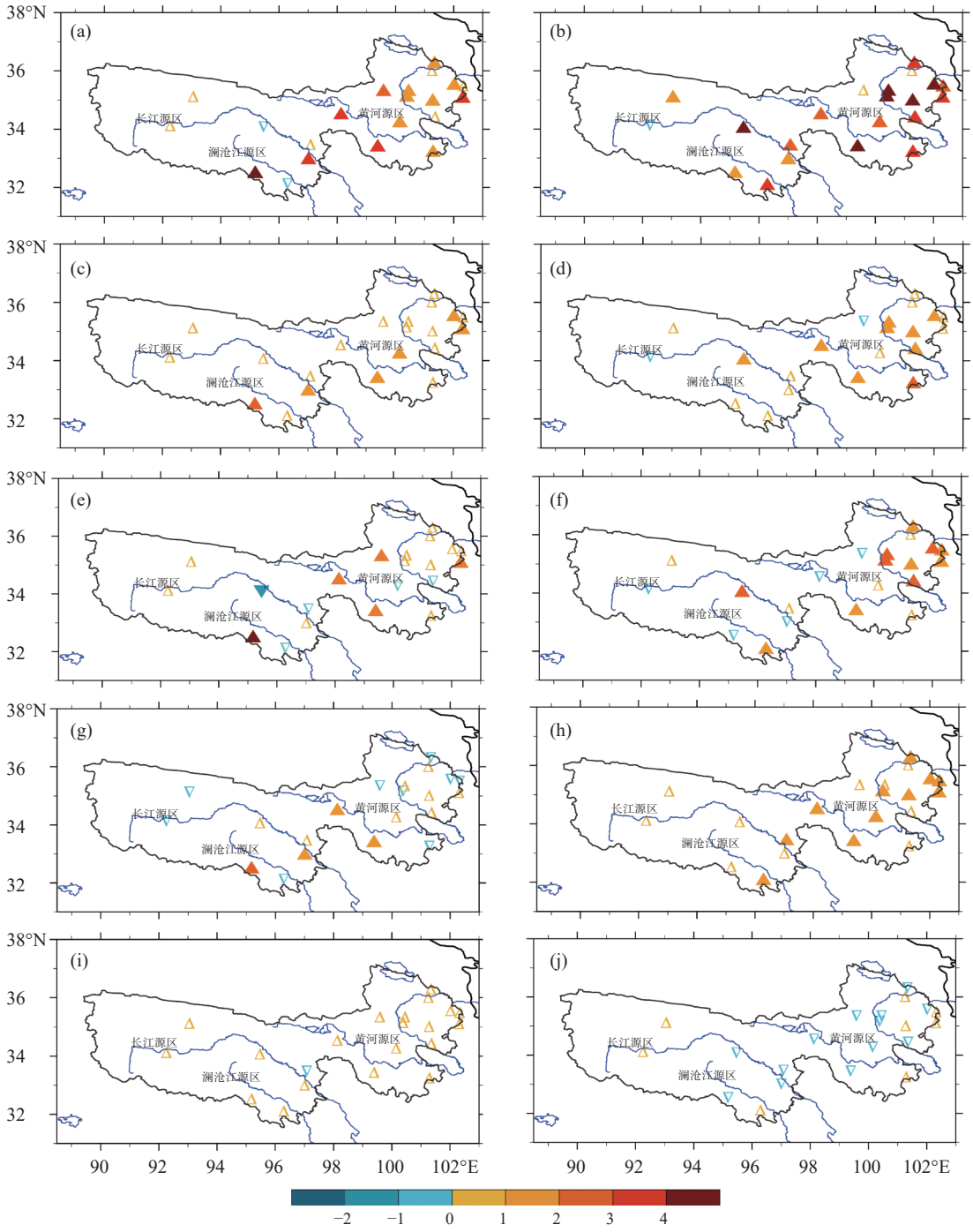


图 7 1961—1990 年 (a、c、e、g、i) 和 1991—2022 年 (b、d、f、h、j) TRHR 年平均 (a、b) 和春季 (c、d)、夏季 (e、f)、秋季 (g、h)、冬季 (i、j) 季节平均降水量趋势 (填色) 分布 (图中正三角形表示趋势为正, 倒三角形表示趋势为负, 实心三角形为通过了 0.05 显著性水平检验的站点)

Fig. 7 Distribution of (a, b) annual, (c, d) spring, (e, f) summer, (g, h) autumn and (i, j) winter average precipitation trend (color-filled) of the TRHR refer to the period from (a, c, e, g, i) 1961 to 1990 and (b, d, f, h, j) 1991 to 2022 (The positive triangles indicate a positive trend, whereas inverted triangles indicate a negative trend. The solid arrow represents the site that passed the 0.05 significance test)

来, TRHR 整体呈增加趋势, 夏季增加趋势明显, 特别是黄河源区东部增加较多, 冬季则略有减少。与刘晓琼等 (2019) 研究显示的“三江源降水量总体呈现弱增趋势, 春季降水趋于增加、夏季降水弱度减少”的结果相比, 本文的研究结果反映三江源降水量总体呈显著增加趋势, 春、夏季增加更明显。与刘光生等 (2010) 研究显示的“长江源区和澜沧江源区的年降水增加趋势比黄河源区更明显”的结果相比, 本文的结果则显示澜沧江和黄河源区增加趋势较长江源区明显。

2.4 强降水变化特征

近几十年来, 受全球气候变化和人类活动的共同影响, 西北地区气候表现为显著的暖湿化趋势 (张强等, 2021; 陈发虎等, 2023; 丁一汇等, 2023), 降水增加主要以极端和强降水的增加为主 (王澄海等, 2021)。因此为了解 TRHR 近 60 a 来强降水的变化趋势, 以下分析 TRHR 强降水日频次变化特征。图 8 给出了 1961—2022 年强降水日总频次分布, 可见 TRHR 西南部和东部地区强降水发生频次较多, 其中澜沧江源区的囊谦和黄河源区的兴海两站频次达到 100 次以上, 特别是兴海站达到 120 次以上, 黄河源区东部部分站点也达到 60 次以上。三江源中部地区强降水发生频次较少, 基本在 40 次以下 (图 8a)。春季, 兴海站强降水在 62 a 来共发生 18 次, 黄河源区东部有四站共发生 10 次以上, 其余站点均在 5 次以下 (图 8b)。夏季兴海站达到 106 次, 囊谦站达到 85 次, 黄河源区东部达到 40 次以上, 其余站点均在 20~40 次 (图 8c)。秋季, 兴海和囊谦两站达到 15 次以上, 黄河源区东部出现 5~10 次强降水日, 其余站点强降水日在 5 次以下 (图 8d)。冬季, TRHR 内所有站点均未出现强降水日 (图略)。

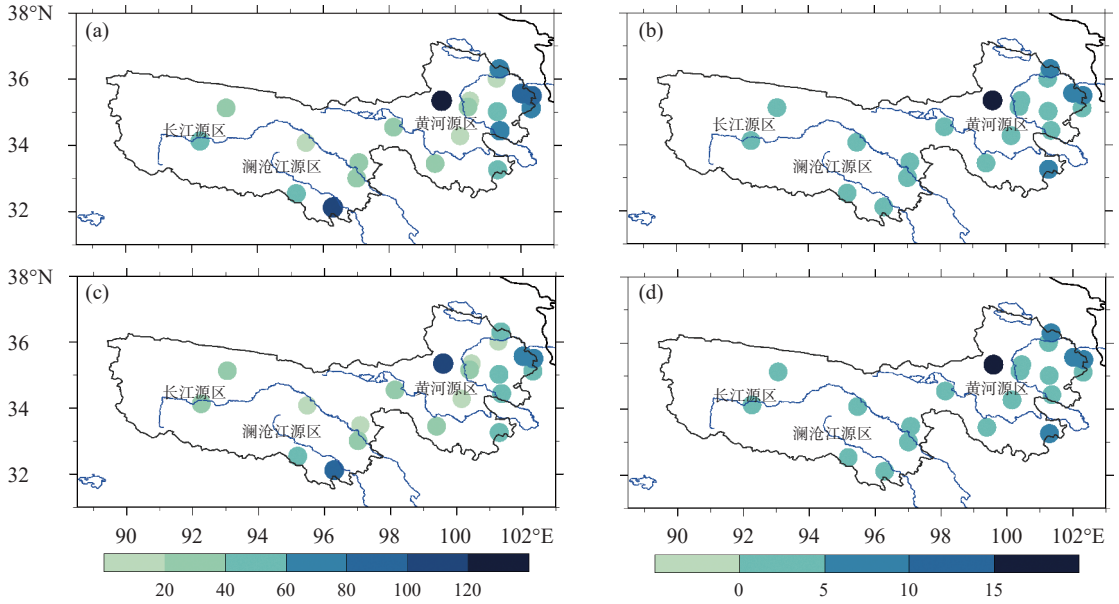


图 8 1961—2022 年 TRHR 年 (a)、春季 (b)、夏季 (c) 和秋季 (d) 强降水日总频次空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of (a) year , (b) sping, (c) summer, (d) autumn of heavy rainfall days in the TRHR from 1961 to 2022

从强降水日总频次逐年演变来看 (图 9a), 强降水日频次波动变化特征明显, 1951—1970 年、1992—1996 年、2006—2010 年、2016—2020 年是几个强降水日频次较多的时段, 特别是 2016—2020 年期间强降水发生频次较多。从强降水日区域平均降水量来看 (图 9b), 1961—2022 年 62 a 来, 降水在波动变化过程中呈整体增加趋势, 降水增加速率为 1.7 mm·(10 a)$^{-1}$, 强降水日频次较多的时段也是降水量较多的时段 (图 9b)。强降水日频次最多在 2008 年, 出现了 48 次, 区域平均降水量达到 70 mm。从 MK 检验及分段趋势可见, 强降水频次和区域平均降水量在 62 a 期间整体呈增加趋势, 其中在 1990 年以前呈现减小趋势, 降水变化速率为-2.4 mm·(10 a)$^{-1}$, 1990 年以后转为增多趋势, 降水变化速率为 3.4 mm·(10 a)$^{-1}$。

以上分析可见, 1961—2022 年 TRHR 强降水日和降水强度明显增多, 特别是 1990 年以来增加趋势更为明显。

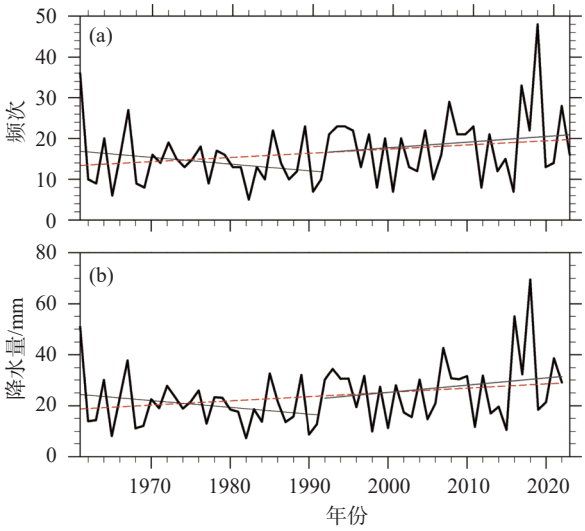


图 9 1961—2022 年 TRHR 强降水日频次 (a) 及区域平均降水量 (b) 年际变化 (黑色实线)、MK 检验 (红色虚线) 及分段变化趋势 (灰色实线)

Fig. 9 The (a) frequency of the TRHR heavy rainfall days and (b) regional average precipitation interannual variation (black solid line), MK test (red dashed line), and segmented trend (gray solid line) from 1961 to 2022

3 大气环流对 TRHR 降水突变的影响

图 10 为年平均和四季 500 hPa 位势高度和 700 hPa 风场在 1990 年前后北半球大气环流年代际差异场 (1991—2022 年减去 1961—1990 年), 可见 1991—2022 年北半球 500 hPa 平均位势高度整体较 1961—1990 年偏高, 特别是蒙古国西部至中国西北部地区为一个正高压异常控制, 风场为反气旋性环流, 研究区 TRHR 风场差值以东风为主, 且有较强的水汽通量辐合 (图 10a)。春季和夏季, 环流差值场与年平均差异场基本相似, 但夏季蒙古高压强度更强范围更广, 水汽通量辐合程度也更强, TRHR 东风异常更强, 说明夏季风影响程度更显著 (图 10b)。秋季, 大气环流有所调整, 蒙古高压正差值中心北抬, 我国西北地区位势高度正异常强度较夏季更强, 受高压异常控制, 风场也仍以东风异常为主, 水汽通量仍以辐合为主 (图 10c)。冬季, 蒙古高压异常范围更广, 中国北方都在其控制之下, 700 hPa 风场仍以东风异常为主, 但水汽通量转为辐散 (图 10d), 这也是 1990 年以后冬季降水趋势转为减少趋势的可能原因之一。

为揭示引起降水变化的动力条件, 分析 1990 年突变前后的垂直速度和水平散度垂直剖面的年代际

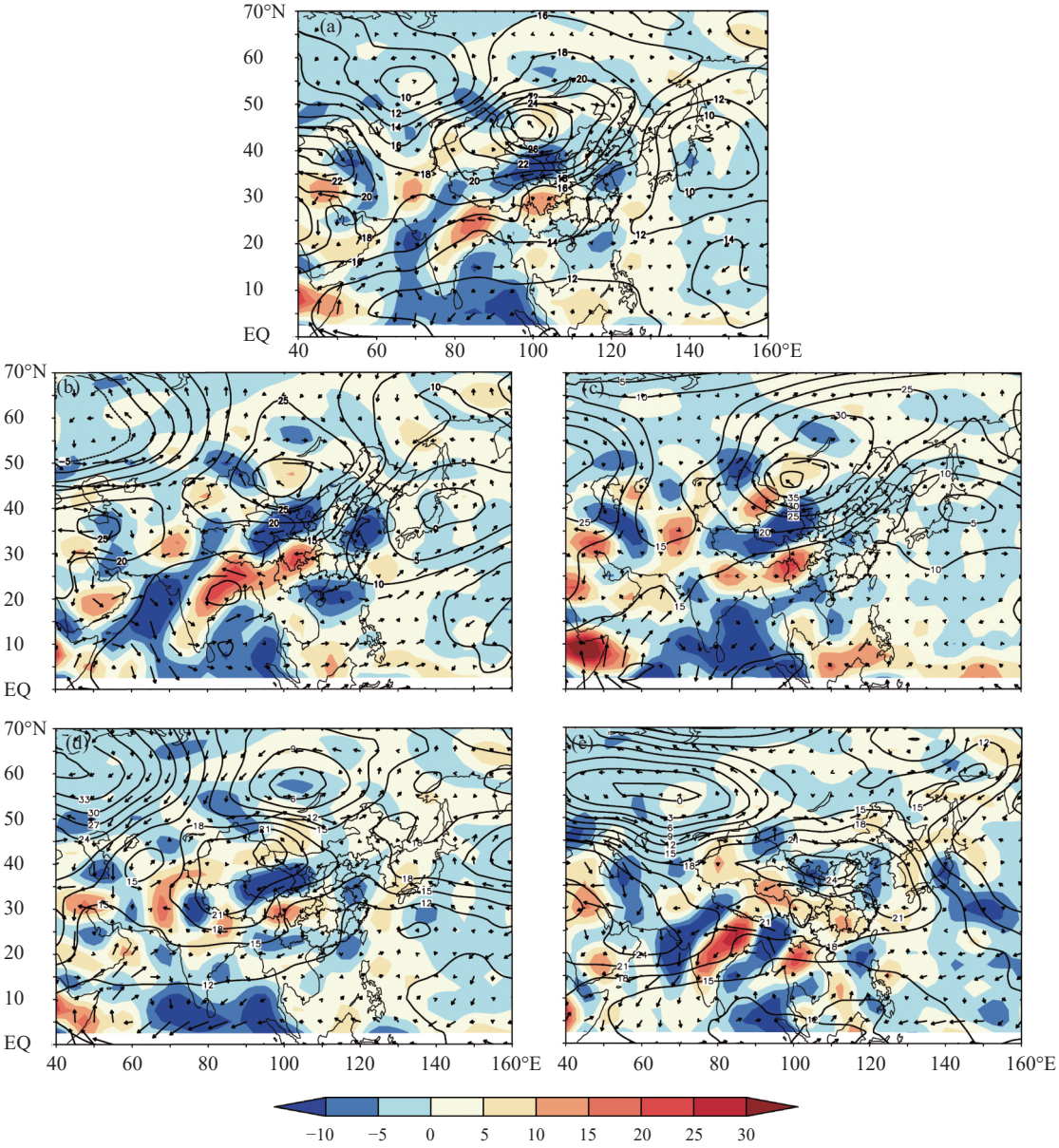


图 10 1961—1990 年和 1991—2020 年年平均 (a)、春季 (b)、夏季 (c)、秋季 (d) 和冬季 (e) 500 hPa 位势高度 (等值线, 单位: gpm)、700 hPa 风场 (箭头, 单位: $m \cdot s^{-1}$) 和水汽通量散度 (填色, 单位: $10^{-6}\ g \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1}$) 的差异场

Fig. 10 Distribution of inter decadal difference field of (a) annual average, (b) spring, (c) summer, (d) autumn and (e) winter at 500 hPa geopotential height (contour line, unit: gpm), 700 hPa wind field (arrow, unit: $m \cdot s^{-1}$) and water vapor flux divergence (color-filled, unit: $10^{-6}\ g \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1}$) between 1961-1990 and 1991-2020

差异场。由图 11a 可见, TRHR 上空垂直速度的年代际差异场在中层基本为弱的上升运动, TRHR 东部中高层为风场辐合, 说明 1990 年以后 TRHR 上空上升运动较 1990 年以前增强, 加之水汽通量辐合增强, 造成 1990 年以后降水增强。春季在 TRHR 西部中层为上升运动异常, 东部低层为上升运动异常, 中层则为下沉运动异常, 东部上层为风场辐合异常 (图 11b)。夏季 TRHR 低层基本为下沉运动异常, 中层至高层基本为上升运动异常 (图 11c)。秋季 TRHR 上空整层为上升运动异常 (图 11d), 冬季仅在 TRHR 东部低层为上升运动异常, 中高层和西部整层均为下沉运动异常 (图 11d), 垂直运动条件加之水汽条件也有所减弱是 1990 年以后冬季降水减弱的可能原因之一。

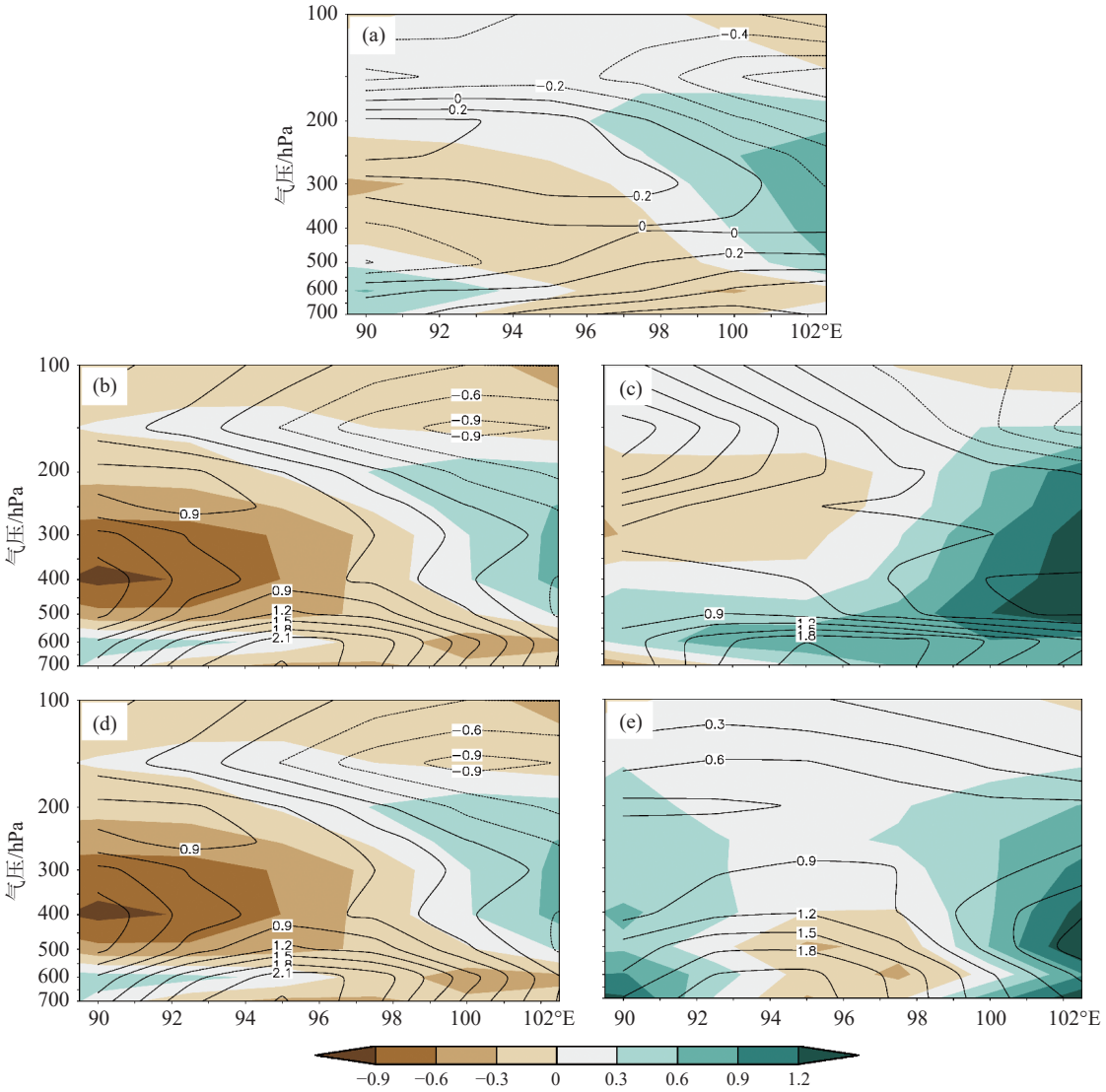


图 11 1961—1990 年和 1991—2020 年 TRHR 上空区域年 (a)、春季 (b)、夏季 (c)、秋季 (d)、冬季 (e) 平均垂直速度 (填色, 单位: 10^{-2} Pa·s^{-1}) 和水平散度 (等值线, 单位: s^{-1}) 年代际差异场

Fig. 11 Distribution of inter decadal difference field of (a) annual average, (b) spring, (c) summer, (d) autumn, (e) winter average vertical velocity (shaded, unit:10^{-2} Pa·s^{-1}) and horizontal divergence (isoline,unit: s^{-1}) in the TRHR between 1961—1990 and 1991—2020

综上, 影响 TRHR 降水的 500 hPa 环流场上蒙古高压在 1990 年降水突变后增强, 来自西西伯利亚的冷空气增强, 但 700 hPa 西风减弱, 东风增强, 说明夏季风强度增强, 来自东部海洋的暖湿水汽增强, 加之上升运动有所增强, 水汽通量辐合有所增强, 因此造成 1990 年以后 TRHR 降水较 1990 年以前有所增强。

4 结论与讨论

本文利用 1961—2022 年三江源地区 (TRHR) 22 个国家气象观测站逐日降水资料, 采用 MK 检验、距平分析、趋势分析等方法, 分析了该地区 62 a 以来降水时空变化特征, 并初步探究其成因, 主要得

到以下结论:

(1) TRHR 降水区域差异明显,在空间上呈现出自西北向东南递增的分布特征,与地形自西向东递减特征相一致,即西部海拔较高的地区降水较少,东部海拔较低的地区降水较多,降水中心出现黄河源区东部。

(2) TRHR 年平均降水量 62 a 来整体呈显著增加趋势,1990 年前后发生突变,1990 年以前全年和四季均为增加趋势;1990 年以后除冬季外,其他季节增加趋势都较 1990 年以前更为显著,其中春季和夏季增多更明显,而冬季则呈减少趋势。

(3) TRHR 自 1961 年以来,降水增多明显,增加趋势呈现自西向东、自北向南增加的空间分布特征,其中澜沧江源区和黄河源区部分站点增加趋势较长江源区更为显著,且夏季增加趋势明显,特别是黄河源区东部增加较多,冬季则略有减少。另外,TRHR 强降水日和降水强度明显增多,特别是 1990 年以来增加趋势更为明显。夏季为强降水主要发生季节,冬季无强降水发生。

(4) 500 hPa 蒙古高压增强,西西伯利亚冷空气增强,700 hPa 西风减弱,东风增强,垂直上升运动增强,TRHR 水汽通量辐合增强,动力和水汽条件同时增强是降水增加的可能原因。

上述研究结果有助于加深对 TRHR 降水变化特征,为 TRHR 乃至整个青藏高原的降水规律、大气环流变化,更好地保护三江源地区提供科学参考。在全球气候变暖背景下,未来极端天气气候事件不论在强度上还是频率上都会进一步增强 (陈权亮等,2024)。受此影响,青藏高原特别是 TRHR 降水的时间和空间上势必会发生相应变化,因此 TRHR 未来演变趋势预测以及气候变暖对该地区强降水影响机制是值得深入探讨的科学问题。

参考文献 (References):

陈德亮,徐柏青,姚檀栋,等.2015.青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来[J].科学通报,60(32):3023−3035. Chen D L, Xu B Q, Yao T D, et al. 2015. Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 60(32):3023−3035 (in Chinese). doi:10.1360/N972014−01370

陈发虎,谢亭亭,杨钰杰,等.2023.我国西北干旱区“暖湿化”问题及其未来趋势讨论[J].中国科学:地球科学,53(6):1246−1262. Chen F H, Xie T T, Yang Y J, et al. 2023. Discussion of the “warming and wetting” trend and its future variation in the drylands of Northwest China under global warming [J]. Science China Earth Sciences, 66(6):1241−1257 (in Chinese). doi:10.1007/s11430−022−1098−x

陈权亮,刘皓,胡淼,等.2024.青藏高原东侧复杂地形区极端降水研究进展[J].暴雨灾害,43(3):255−265. Chen Q L, Liu H, Hu M, et al. 2024. A review of the studies on extreme precipitation in the complex terrain region on the eastern side of the Tibetan Plateau [J]. Torrential Rain and Disasters,43(3):255−265 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−216

陈中平,徐强.2016. Mann-Kendall 检验法分析降水量时程变化特征[J].科技通报,32(6):47−50. Chen Z P, Xu Q. 2016. Analysis of precipitation characteristics in Jinhua by Mann-Kendall test method [J]. Bulletin of Science and Technology,32(6):47−50 (in Chinese). doi:1001−7119(2016)06−0047−04

丁一汇,柳艳菊,徐影,等.2023.全球气候变化的区域响应: 中国西北地区气候“暖湿化”趋势、成因及预估研究进展与展望[J].地球科学进展,38(6):551−562. Ding Y H, Liu Y J, Xu Y, et al. 2023. Regional responses to global climate change: progress and prospects for trend, causes, and projection of climatic warming-wetting in Northwest China [J]. Advances in Earth Science,38(6):551−562. doi:10.11867/j.issn.1001−8166.2023.027

华维,邓浩,夏昌基,等.2024.青藏高原水循环中高原低涡及多季风交汇的研究进展[J].沙漠与绿洲气象,18(2):1−11. Hua W, Deng H, Xia C J, et al. 2024. Advance of research on Plateau vorlex and multi-monsoon interaction in water cycle of Tibetan Plateau [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(2):1−11 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.02.001

靳铮,游庆龙,吴芳营,等.2020.青藏高原三江源地区近 60 a 气候与极端气候变化特征分析[J].大气科学学报,43(6):1042−1055. Jin Z, You Q L, Wu F Y, et al. 2020. Changes of climate and climate extrmes in the Three-Rivers Headwaters' Region over the Tibetan Plateau during the past 60 years [J]. Transactions of Atmospheric Scienses,43(6):1042−1055 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20201008001

李红梅,颜亮东,温婷婷,等.2022.三江源地区气候变化特征及其影响评估[J].高原气象,41(2):306−316. Li H M, Yan L D, Wen T T, et al. 2022. Characteristics of climate change and its impact assessment in the Three-River Regions [J]. Plateau Meteorology,41(2):306−316. doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2021.00101

李璠,肖建设,颜亮东,等.2016. 1964—2014 年青海省三江源地区日降水格局分析[J].干旱地区农业研究,34(5):282−288. Li F, Xiao J S, Yan L D, et al. 2016. Precipitation pattern of Three-River Source Area in Qinghai from 1964to 2014 [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,34(5):282−288 (in Chinese). doi:10.7606/j.issn.1000−7601.2016.05.43

刘光生,王根绪,胡宏昌,等.2010.长江黄河源区近 45 年气候变化特征分析[J].资源科学,32(8):1486−1492. Liu G S, Wang G X, Hu H C, et al. 2010. Climate change characteristics in the source regions of the Yangtze River and Yellow River over the past 45 years [J]. Resources Science,32(8):1486−1492 (in Chinese). doi:1007−7588(2010)08−1486−07

刘青春,秦宁生,靳力亚,等.2007.三江源地区春夏季降水与太平洋海温的关系[J].气象科技,35(3):335−339. Liu Q C, Qin N S, Jin L Y, et al. 2007. Relationship between spring and summer rainfall in Three-River source region and Pacific SST [J]. Meteorological Ssience and Technology,35(3):335−339 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.2007.03.007

刘晓琼,吴泽洲,刘彦随,等.2019. 1960—2015 年青海三江源地区降水时空特征[J].地理学报,74(9):1803−1820. Liu X Q, Wu Z Z, Liu Y S, et al. 2019. Spatial-temporal characteristivs of precipitation from 1960 to 2015 in the Three Rivers Headstream region, Qinghai, China [J].

Acta Geographica Sinica,74(9):1803−1820 (in Chinese). doi:10.11821/dlxb201909008

孟宪红,陈昊,李照国,等.2020.三江源区气候变化及其环境影响研究综述[J].高原气象,39(6):1133−1143. Meng X H, Chen H, Li Z G, et al. 2020. Review of climate change and its environmental influence on the Three-River Regions [J]. Plateau Meteorology,39(6):1133−1143 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2019.00144

强安丰,魏加华,解宏伟.2018.青海三江源地区气温与降水变化趋势分析[J].水电能源科学,36(2):10−14. Qiang A F, Wei J H, Xie H W. 2019. Trend analysis of temperature and precipitation in Sanjiangyuan region of Qinghai Province [J]. Wate Resour Power,36(2):10−14 (in Chinese). doi:1000−7709(2018)02−0010−05

强安丰,汪妮,魏加华,等.2020.近 50 年三江源地区云水资源分布及降水效率研究[J].应用基础与工程科学学报,28(3):574−593. Qiang A F, Wang N, Wei J H, et al. 2020. Study on cloud water resourtces distribution and precipitation efficiency in the Three River Headwaters Region during the past 50 years [J]. Journal of Basic Science Engineer,28(3):574−593 (in Chinese). doi:10.16058/j.issn.1005−0930.2020.03.007

唐红玉,杨小丹,王希娟,等.2007.三江源地区近 50 年降水变化分析[J].高原气象,26(1):47−54. Tang H Y, Yang X D, Wang X J, et al. 2007. Analyses of precipitation change in the source regions of Three Rivers during 1956-2004 [J]. Plateau Meteorology,26(1):47−54 (in Chinese). doi:1000−0534(2007)01−0047−08

王澄海,张晟宁,张飞民,等.2021.论全球变暖背景下中国西北地区降水增加问题[J].地球科学进展,36(9):980−989. Wang C H, Zhang S N, Zhang F M, et al. 2021. On the increase of precipitation in the Northwestern China under the global warming [J]. Advances on Earty Science,36(9):980−989 (in Chinese). doi:10.11867/j.issn.1001−8166.2021.087

王根绪,李琪,程国栋,等.2001. 40 年来江河源区的气候变化特征及其生态环境效应[J].冰川冻土,23(4):346−352. Wang G X, Li Q, Cheng G D, et al. 2001. Climate change and its impact on the eco-environment in the source regions of the Yangtzw and Yellow Rivers in recent 40 years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,23(4):346−352 (in Chinese). doi:1000−0240(2001)04−0346−07

王腾.2021.三江源地区冬季降水的年际和年代际变化特征及相关动力机制[D]. 南京: 南京信息工程大学. Wang T. 2021. The interannual and decadal variation characteristics and related dynamic mechanisms of winter precipitation in the Sanjiangyuan region [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese)

姚秀萍,包晓红,刘俏华,等.2021.近 10 a 高原切变线研究进展综述[J].暴雨灾害,40(6):569−576. Yao X P, Bao X H, Liu Q H, et al. 2021. Review on the research advances of the Tibetan Plateau shear line in the last decade [J]. Torrential Rain and Disasters,40(6):569−576 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.06.001

姚秀萍,谢启玉,黄逸飞.2022.中国三江源地区降水研究的进展与展望[J].大气科学学,45(5):688−699. Yao X P, Xie Q Y, Huang Y F. 2022. Advances and prospects on the study of precipitation in the Three-River-Source Region in China [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,45(5):688−699 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20211220001

杨浩,李红莉,王斌,等.2023.青藏高原三江源和河湾区夏季降水变化特征及对高原夏季风的响应[J].大气科学,47(3):881−892. Yang H, Li H L, Wang B, et al. 2023. Variations in summer precipitation over the Three-River Headwaters region and the Yarlung Zangbo River Basin and their response to the Tibetan Plateau summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,47(3):881−892 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2207.22089

张宇,李铁健,李家叶,等.2019.西风带和南亚季风对三江源雨季水汽输送及降水的影响[J].水科学进展,30(3):348−358. Zhang Y, Li T J, Li J Y, et al. 2019. Influence of the westerlies and the South Asia monsoon on water vapor transport and precipitation in the Three-River Hwadwaters region during the rainy season [J]. Advances in Water Science,30(3):348−358 (in Chinese). doi:10.14042/j.cnki.32.1309.2019.03.005

张青,陈丹,唐忠涛,等.2022. 1961—2020 年三江源地区候降水变化特征分析[J].青海草业,31(1):46−52. Zhang Q, Chen D, Tang Z T, et al. 2022. Analysis of rainfall change characteristics in the source area of the Sanjiang River from 1961-2020 [J]. Qinghai Prataculture,31(1):46−52 (in Chinese). doi:1008−1445(2022)01−0046−07

张强,朱飙,杨金虎,等.2021.西北地区气候湿化趋势的新特征[J].科学通报,66(Z2):3757−3771. Zhang Q, Zhu B, Yang J H, et al. 2021. New characteristics about the climate humidification trend in Northwest China [J]. Chinese Science Bulletin,66(Z2):3757−3771 (in Chinese). doi:10.1360/TB−2020−1396

Gao Y, Lan C, Zhang Y. 2014. Changes in moisture flux over the Tibetan Plateau during 1979-2011 and possible mechanisms [J]. Journal of Climate,27:1876−1893. doi:10.1175/JCLI−D−13−00321.1

Hamed K H, Rao A R. 1998. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data [J]. Journal of Hydrology,204(1-4):182−196. doi:10.1016/S0022−1694(97)00125−X

Wang T, Sun B, Wang H J. 2021. Interannual variations of monthly precipitation and addociated mechanisms over the Three River Source region in China in winter months [J]. International Journal of Climatology,41(4):2209−2225. doi:10.1002/joc.6954

Xi Y, Miao C Y, Wu J, et al. 2018. Spatiotemporal changes in extreme temperature and precipitation events in the three-rivers headwater region, China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,123:5827−5844. doi:10.1029/2017JD028226

Xu X D, Zhao T L, Lu C, et al. 2014. An important mechanism sustaining the atmospheric "water tower" over the Tibetan Plateau [J]. Atmospheric Chemistry and Physics,14(20):11287−11295. doi:10.5194/acp−14−11287−2014

Yi X S, Li G S, Yin Y Y. 2010. Spatio-temporal variation of precipitation in the Three-River Headwater Region from 1961 to 2010 [J]. Journal of Geogrophy Science,23(3):447−464. doi:10.1007/s11442−013−10210y

Yue S, Pilon P, Phinney B, et al. 2002. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series [J]. Hydrological Processes,16(9):1807−1829. doi:10.1002/hyp.1095

Zhang Y, Huang W Y, Zhong D Y. 2019. Major moisture pathways and their importance to rainy season precipitation over the Sanjiangyuan region of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Climate,32(20):6837−6857. doi:10.1175/jcli−d−19−0196.1

(责任编辑　唐国瑛)