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

2021年秋季华北降水异常偏多的成因分析

王艳 裴宇 李晶晶 赵尚卓 张卉

Possible causes for the more precipitation over North China in autumn 2021

WANG Yan，PEI Yu，LI Jingjing，ZHAO Shangzhuo，ZHANG Hui

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-101

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

2021年山东秋季降水异常偏多成因分析

Analysis on the causes of positive precipitation anomaly in Shandong in the autumn of 2021

暴雨灾害. 2023, 42(2): 179-187 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-054

2021年中国降水异常气候特征及4次典型极端天气过程分析

Analysis of unusual climatic characteristics of precipitation and four typical extreme weather processes in China in 2021

暴雨灾害. 2022, 41(5): 489-500 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-045

干冷空气入侵台风“海棠”残余低压引发的华北地区大暴雨分析

Analysis of the heavy rain in North China for dry cold air intruding into typhoon "Begonia" depression

暴雨灾害. 2020, 39(3): 241-249 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.03.004

江西春季降水异常的环流特征及其对ENSO事件的响应

Characteristics of atmospheric circulationforspring precipitation anomalies in Jiangxi Province and its response to ENSO Events

暴雨灾害. 2021, 40(4): 410-418 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.009

2015年冬季云南两次极端降水事件及环流异常特征分析

Analysis of two extreme precipitation events and circulation anomalies in Yunnan province in winter of 2015

暴雨灾害. 2019, 38(4): 380-385 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2019.04.011

2024年2月我国中东部两次持续性低温雨雪冰冻过程的环流异常特征分析

Characteristics of circulation anomalies of two continuous low temperature rain and snow freezing weather processes in eastern China in February 2024

暴雨灾害. 2024, 43(4): 384-394 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-108

关注微信公众号，获得更多资讯信息

王艳,裴育,李晶晶,等.2025. 2021 年秋季华北降水异常偏多的成因分析[J].暴雨灾害,44(1):52−59. WANG Yan, PEI Yu, LI Jingjing, et al. 2025. Possible causes for the more precipitation over North China in autumn 2021 [J]. Torrential Rain and Disasters,44(1):52−59 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−101

2021 年秋季华北降水异常偏多的成因分析

王艳, 裴育, 李晶晶, 赵尚卓, 张卉
（山西省长治市气象局, 长治 046000）

摘　要: 2021 年秋季华北地区降水量为自 1961 年以来同期最大值, 采用国家级气象站逐日观测降水数据、ERA5 再分析数据和 NOAA 海温资料, 结合拉格朗日水汽后向追踪分析方法, 对降水异常偏多特征及成因进行分析。结果表明: (1) 华北区域 2021 秋季共经历了 5 次强降水过程, 总降水量达 284 mm, 较气候态年平均 (105.5 mm) 偏多 169.2%。2021 年秋季华北地区水汽最大源地为中国东部海域, 水汽输送贡献达到 41%, 远大于气候平均态的 21%。(2) 2021 年秋季中纬度异常偏强的东北亚高压引导的偏东气流使得来自东海、黄海和西北太平洋水汽输送明显偏强。北半球欧亚大陆表现为一槽一脊环流型特征, 华北地区位于低槽后方, 北方冷空气活跃且不断影响华北。(3) 弱 La Niña 事件造成华北区域近地面气压较常年异常偏低, 冬季风环流系统迟迟未建立, 夏季风环流系统尚稳定维持, 导致异常的偏东气流带来更多的水汽输送, 最终造成华北秋季降水异常偏多。

关键词: 秋季降水; 水汽输送; 大气环流; 海温异常; 华北地区
中图法分类号: P426.6　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−101

Possible causes for the more precipitation over North China in autumn 2021

WANG Yan, PEI Yu, LI Jingjing, ZHAO Shangzhuo, ZHANG Hui

(*Changzhi Meteorological Bureau of Shanxi Province*, *Changzhi* 046000)

Abstract: In the autumn of 2021, the North China experienced the highest historical precipitation of the same period since 1961. Using daily precipitation data from national meteorological observation stations, ERA5 reanalysis data, and NOAA SST data, the characteristics and impact factors of more precipitation were analyzed. The results are as follows. (1) The North China region experienced a total of 5 heavy rainfall processes in the autumn of 2021, with the total precipitation being the highest in history since 1961, reaching 284 mm, which is 169.2% higher than the average climate (105.5 mm). In the autumn of 2021, the largest source of water vapor in the North China was in the eastern seas of China, with a contribution of 41% to water vapor transport, far exceeding the climate average of 21%. (2) The eastward airflow guided by the abnormally strong Northeast Asian high pressure in the autumn of 2021 resulted in significantly stronger water vapor transport from the East China Sea, Yellow Sea, and Northwest Pacific. The circulation over the Eurasian high latitude region presented a pattern of one trough and one ridge, while the North China region was located behind the low trough, with active cold air from the north continuously affecting North China. (3) The weak La Niña event caused abnormally low ground pressure in North China, and the winter monsoon circulation system was not yet established. On the contrary, the summer monsoon circulation system remained stable, leading to abnormal southeast winds bringing more water vapor transport and ultimately resulting in abnormally high autumn precipitation in North China.

Key words: autumn precipitation; water vapor transport; atmospheric circulation; sea surface temperature anomaly; North China

引　言

近年来, 随着全球气候变暖, 中国降水总量虽然没有太大变化, 但是极端强降水事件显著增多 (Yang et al., 2024), 不同地区降水强度以及时空分布均发生了明显的变化 (杨梦兮等, 2020; Cao et al., 2021)。华北地区位置特殊, 极大地受到季风气候的影响, 四季分明, 不同季节降水差异较大, 降水量主要集中在夏季, 占全年降水量的 65% ~ 75%, 是我国东部地区降

收稿日期: 2024−05−16; **定稿日期**: 2024−11−12
资助项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC3007700); 山西省气象局面上项目 (SXKMSTQ20236336)
第一作者: 王艳, 主要从事短期天气预报及气候变化研究。E-mail: 1284590653@qq.com
通信作者: 裴育, 主要从事数值预报及天气诊断研究。E-mail: 838911938@qq.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

水程度最集中的区域 (赵琳等, 2022)。华北雨季已有明确定义 (崔童等, 2019), 一般从 7 月中下旬到 8 月中上旬, 这段时期华北地区的降水最活跃。国内外大量的研究对华北雨季特征以及降水异常机制等进行了全面探讨, 取得了丰硕的成果 (赵树云等, 2017; 李刚等, 2020; 郝立生等, 2020; 崔童等, 2022; 孙婉怡和祝从文, 2023), 但是主要集中在夏季降水, 秋季降水的多寡对华北地区同样会产生重大影响, 直接关系到农业秋收秋种及粮食产量。

2021 年秋季期间, 中国降水整体表现为“北多南少”的分布特征, 西北和华北区域降水均为有完整观测记录以来历史同期最多, 其中华北南部和黄淮北部地区局地偏多 2 倍以上 (李多和顾薇, 2022)。9 月和 10 月, 全国平均降水量较常年同期分别偏多 28.5% 和 45.4% (汪小康等, 2022)。9 月份北方多个省 (直辖市) (辽宁、河北、北京、天津、河南、陕西和山西) 降水总量均为 1961 年以来历史同期最多, 10 月全国平均降水量为 1961 年以来同期第四多 (汪小康等, 2022)。大气环流的异常变化会直接造成大范围的降水异常。前人研究揭示出华西秋雨的重要影响因子包括西太平洋副热带高压 (以下简称西太副高)、印缅槽和贝加尔湖低槽, 而且这些因子呈现出明显的年代际变化特征。当高纬贝加尔湖槽、低纬印缅槽加深, 同时西太副高西伸加强时, 华西秋雨较常年偏多 (Zhi et al., 2020; 汪小康等, 2022)。

前人关于秋季降水的研究多数围绕华西秋雨, 但是对其它区域秋季降水特征的研究相对不多, 通常不同时期、不同地区的强降水存在显著差异。2021 年秋季华北地区降水偏多程度打破历史记录, 对农业生产和人们生活造成了严重影响 (赵琳等, 2022)。本文从 2021 年秋季华北地区降水时空分布特征入手, 进一步讨论导致降水异常的水汽输送以及大气环流特征, 对于了解华北秋雨变化规律和提高气候预测水平具有一定的参考意义。

1　资料与方法

本文所用资料包括: (1) 来自国家气象信息中心的全国范围内国家气象观测站 (以下简称国家站) 日降水量, 时间段为 1961—2021 年秋季 (9—11 月)。参考孙婉怡和祝从文(2023)的研究, 同时为了便于开展水汽追踪模拟, 华北区域范围选取 (110°—120°E, 34°—42°N), 经过质量控制, 该区域共选取 325 个代表性站点 (图 1)。(2) 来自 NCEP/NCAR(美国国家环境预报中心和美国国家大气研究中心) 逐月的大气环流再分析资料, 水平分辨率 2.5°×2.5°, 网址 https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html, 包括温度 (*T*)、压强 (*P*)、比湿 (*SH*)、风速 (*U*/*V*) 等气象要素。(3) 来自美国国家海洋大气局 (NOAA) 的逐月海温 (SST) 数据。文中将 1991—2020 年的平均值作为气候平均态。

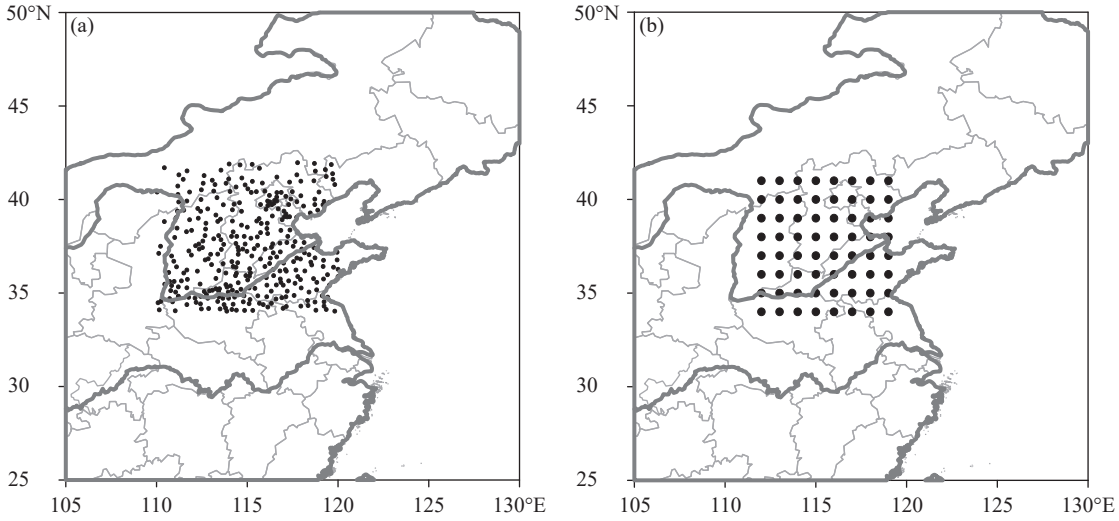


图 1 华北地区 325 个国家气象观测站 (a) 以及水汽追踪模拟起始格点 (b) 分布

Fig. 1 Geographic distribution of the (a) 325 national meteorological observed stations in North China and the (b) starting grid points for water vapor tracking simulation

华北秋季降水水汽输送特征分析中用到了拉格朗日水汽后向追踪分析方法, 目标区域为强降水落区 (110°—120°E, 34°—42°N), 共 64 个点。由于水汽输送多集中在对流层中低层, 初始高度为水汽集中层 850 hPa (1 500 m), 模拟空气块后向追踪 10 d 的三维运动轨迹, 每 6 h 输出一次轨迹点的位置, 并插值得到相应位置上空气块的物理属性 (如相对湿度、温度等), 每隔 6 h 所有轨迹初始点重新后向追踪模拟

10 d, 表征水汽来源地 (Yang et al., 2022)。为了对不同地区的水汽输送贡献进行定量统计, 需要采用簇分析方法分别对 2021 年秋季和气候态的所有轨迹进行聚类, 并最终确定出不同的水汽输送通道。将某一水汽输送通道的贡献率 (Q_s) 定义如下

$$Q_s = \left(\sum_1^m q / \sum_1^n q \right) \times 100\% \quad (1)$$

其中, q 表示某一通道单条轨迹的比湿, m 表示该通道包含的轨迹数, n 表示所有通道轨迹总条数 (Yang et al., 2022)。

2 2021 年秋季华北降水异常特征

2.1 空间分布特征

2021 年秋季, 全国平均降水量为 159.7 mm, 较常年同期 (119.8 mm) 偏多 33.3% (李多和顾薇, 2022)。华北地区秋季降水整体呈现中间多南北少的分布特征, 大部分区域降水量超过 300 mm, 山西和河北南部、河南和山东北部超过 400 mm, 其中山西和山东局地超过 500 mm, 山东泰安降水量达 696.4 mm (图 2a)。距平场同样呈现东西带状分布型, 大值中心位于河北和山西南部, 其中河北中南部、山东西北部和渤海沿岸等局地偏多 350% 以上, 天津塘沽较气候常年平均偏多达 472% (图 2b)。

2.2 季节内演变特征

2021 年 8 月底 9 月初, 整个秋季华北共经历了 5 次强降水过程。雨带有一个明显的从江淮向华北推进的过程, 秋季开始华北地区便经历了一次强降水过程 (图 3)。随后 9 月中上旬华北地区处于降水空窗期, 9 月下旬华北中南部连续出现两次强降水过程, 10 月上旬的降水过程大值中心位于华北中部。此后华北地区没有发生大范围降水, 直到 11 月上旬再次出现一次强降水过程, 此次降水过程没有前几次降水强度大, 但是范围更广, 从南到北覆盖了整个华北地区。

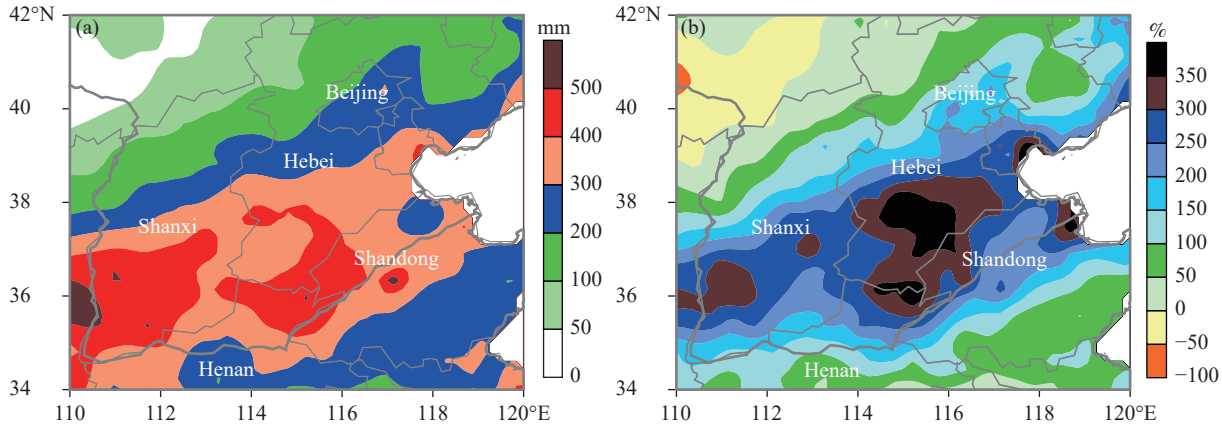


图 2 2021 年秋季华北地区降水量 (a) 和距平百分率 (b, 相对 1991—2020 年) 分布 (Beijing、Hebei、Shanxi、Shandong、Henan 分别表示北京、河北、山西、山东、河南)

Fig. 2 Distribution of (a) total precipitation and (b) percentage anomalies (compared to 1991-2020) over North China in autumn 2021

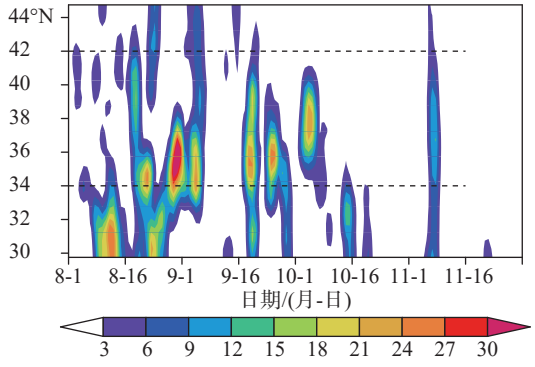


图 3 2021 年 8—11 月华北地区 (110°—120°E 平均) 逐日降水量时间-纬度剖面图 (单位: mm)

Fig. 3 Time-latitude cross sections of daily precipitation amount (unit: mm) in North China (110°-120°E average) from August to November 2021

2.3 气候变化特征

从 1961—2021 年华北逐年秋季降水量 (图 4) 可

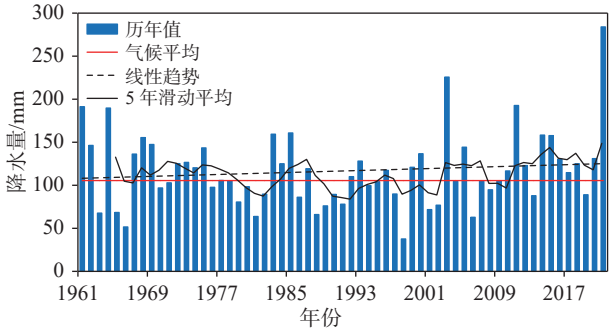


图 4 1961—2021 年秋季华北降水量逐年演变

Fig. 4 Time series of yearly precipitation in North China in autumn during 1961-2021

见, 近 60 a 华北秋季降水量总体呈现上升趋势, 降水倾向率为 2.8 mm·(10 a)$^{-1}$。1998 年华北秋季降水量最少, 为 37.6 mm, 而 2021 年为历史同期最多的年份, 达 284 mm, 较气候常年平均 (105.5 mm) 偏多 169.2%。通过对华北秋季降水量进行年低通滤波处理, 得到了 5 a 滑动平均曲线 (图 4), 可以看出, 60 年代到 70 年代末华北秋季降水偏多, 90 年代降水偏少, 21 世纪以来降水再次偏多。

3 降水异常偏多的水汽及环流特征

3.1 降水异常偏多的水汽输送特征

3.1.1 定量的水汽追踪模拟

导致降水异常最直接的原因就是水汽输送的异常。本文将 HYSPLIT 轨迹模式的后向追踪模拟结果整理统计, 得到 2021 年和气候态华北秋季期间水汽输送特征。图 5 给出 2021 年秋季空气块及其携带的水汽到达华北地区前 10 d 的空间分布和距平分布。10 d 前水汽基本能够追踪到其源地 (杨浩等, 2014), 华北秋季的水汽向东可以追踪到西太平洋地区, 向南可以追踪到我国的南海海域, 向西可以追踪到欧洲大陆一带 (图 5a)。由于华北地区入秋以后, 盛行偏西风, 因此水汽整体呈现东西向分布。

水汽源地的大值中心主要位于黄海、东海以及华南沿海附近, 西太平洋次之, 中亚地区和青藏高原南侧也是重要的水汽源地 (图 5a)。此外, 从空气块和比湿分布来看, 来自中亚地区的空气粒子数量与来自我国东部沿海的数量相当, 但是中亚的比湿却远低于东部沿海, 说明中亚和东欧陆地上空的空气粒子的湿度比较小, 空气相对干燥。距平场显示, 2021 年秋季来自中国东部沿海、南海以及西太平洋地区的水汽明显偏多, 而来自西方欧亚大陆的水汽偏少 (图 5b), 可能是由于 2021 年秋季华北地区偏东风和偏南风更强, 而偏西风较弱造成的。

上述分析揭示了 2021 年秋季华北地区水汽源地的大致分布情况, 下面利用轨迹聚类方法对水汽输送贡献进行定量统计。

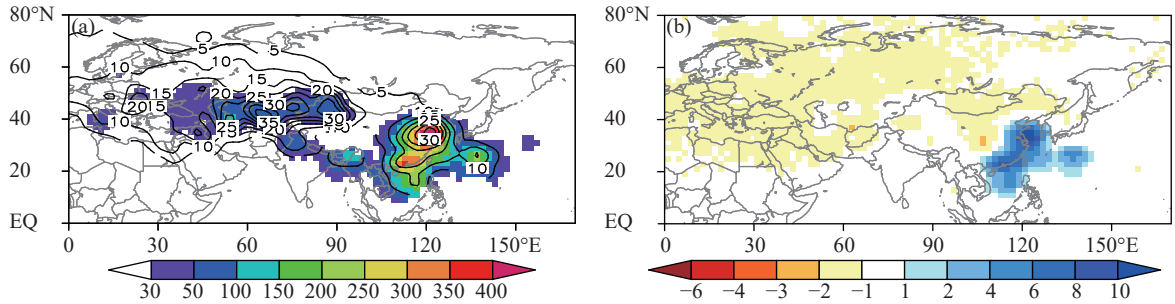


图 5 2021 年秋季华北区域空气块 (等值线, 单位: 个) 及其携带水汽 (阴影: 单位: g·kg^{-1}) 到达目标区域前 10 d 的空间分布 (a) 及水汽相对气候态距平 (阴影: 单位: g·kg^{-1}) (b)

Fig. 5 The spatial distribution of air particles (contour lines) and water vapor (shaded, unit: g·kg^{-1}) which 10 days before reaching North China in (a) autumn 2021 and (b) water vapor anomaly (shaded, unit: g·kg^{-1})

2021 年秋季, 华北地区降水的最大水汽输送通道来自东南方向, 由东海经过江苏和安徽进入华北, 水汽和轨迹比例分别达到 41% 和 29%。西北方向水汽通道有两条, 一条通道较长, 来自欧洲东部, 经过中亚北部、蒙古国和内蒙古区域进入华北, 水汽和轨迹比例分别为 27% 和 32%。另一条来自我国西北地区, 经过甘肃、陕西等地进入华北, 水汽和轨迹比例分别为 32% 和 39% (图 6a)。与图 5a 结果基本一致, 水汽主要来自东部沿海, 西北方向的空气比较干燥, 因此通道的水汽比例低于轨迹比例。

气候态水汽通道相比于 2021 年有较大差异, 来自南方的水汽通道较短, 秋季南风偏弱, 水汽和轨迹比例分别为 21% 和 15%。西北方向的两条水汽通道相比于 2021 年都更长, 一条来自欧洲地区, 经过中亚北部、蒙古国和内蒙古区域进入华北, 水汽和轨迹比例分别为 37% 和 40%。另一条来自中亚北部, 经过新疆、内蒙古等地进入华北, 水汽和轨迹比例分别为 42% 和 45% (图 6b)。2021 年相比于气候态, 来自西北方向的水汽和轨迹比例均较低, 而来自东部沿海的水汽和轨迹比例均更多。

3.1.2 水汽输送通量特征

水汽输送异常对降水的影响不仅表现在拉格朗日场上, 从欧拉场角度同样可以看出水汽的异常特征。对对流层整层 (1 000—300 hPa) 水汽进行积分, 图 7 显示 2021 年华北秋季降水的水汽输送通道主要有三个。其一是印度季风水汽, 源于印度洋, 夹带来自孟加拉湾的强盛水汽经中南半岛北部及我国云贵地区输送到华北; 其二是来自低纬度西太平洋的水汽, 这支水汽经西太平洋和南海地区, 在中南半岛转向汇入印度季风水汽 (图 7a)。这两个水汽通道均为

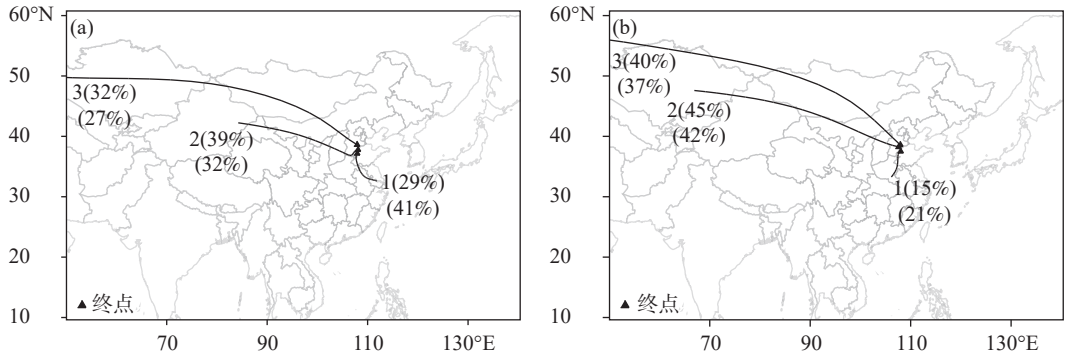


图 6 基于后向追踪轨迹聚类方法的华北地区 2021 年秋季 (a) 和 1991—2020 年秋季气候平均水汽通道 (b) (上、下数字分别表示轨迹和比湿比例)

Fig. 6 Clustering of backward tracking trajectories of water vapor in North China for (a) autumn 2021, (b) autumn climate average from 1991 to 2020 (upper and lower numbers represent trajectories and specific humidity ratios, respectively)

明显的经向水汽输送, 这是我国东部降水水汽输送的重要特征。值得注意的是, 距平场显示, 第三个重要的水汽通道来自中纬度西太平洋和我国东部海域。这条来自我国东部沿海的东南风异常水汽输送和来自孟加拉湾的西南风异常水汽输送在华北地区交汇, 给华北区域带来了大量的水汽, 并且在华北上空产生辐合, 造成降水异常偏多。与此同时, 我国南海东部到台湾以及华南地区表现为明显的水汽异常辐散 (图 7b), 使得秋季我国南方地区降水偏少。

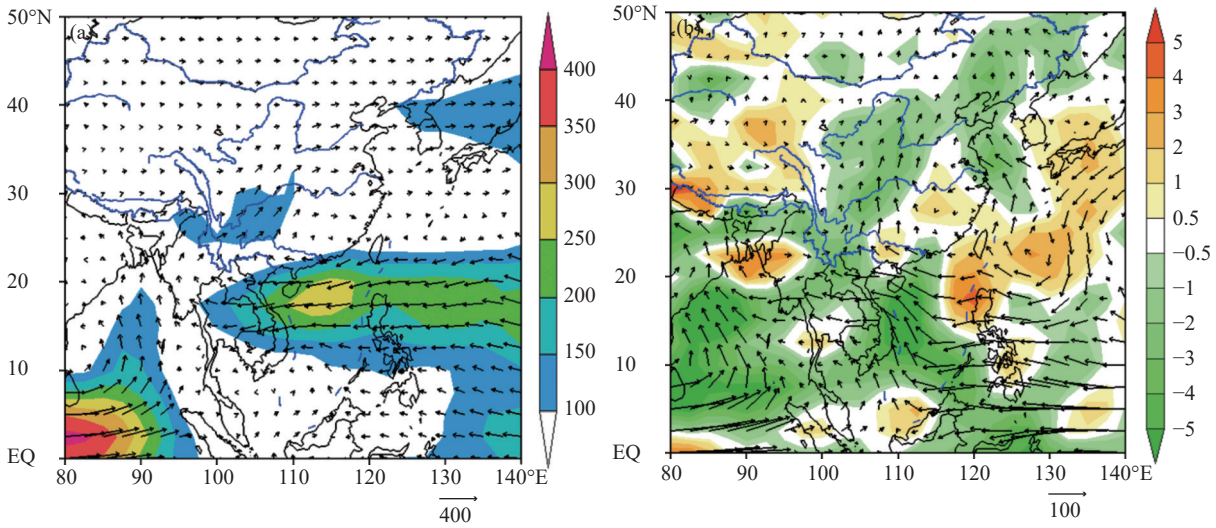


图 7 2021 年秋季地面到 300 hPa 垂直积分的水汽通量 (a, 箭头和阴影, 单位: $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$), 水汽通量距平 (箭头) 和散度场 (b, 阴影, 单位: $10^{-5} \cdot kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)

Fig. 7 Vertical integration from the ground to 300 hPa of (a) water vapor flux (arrows and shaded, unit: $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$) and (b) water vapor flux anomaly (arrows) and divergence (shaded, unit: $10^{-5} \cdot kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) in autumn 2021

3.2 降水偏多的异常环流特征

众所周知, 导致降水和水汽输送异常的最直接因素就是大气环流的配置变化 (袁媛等, 2017; Ding et al., 2021)。正常情况下, 中国东部秋季大气环流相较夏季存在明显差异, 例如西太副高减弱东退, 中高纬度西风带则显著增强并控制中国北方大部地区 (陈丽娟等, 2019)。研究表明, 在华北雨季偏多年, 500 hPa 高度场上, 渤海到日本海范围的位势高度偏强, 华北区域表现为“东高西低”的典型环流特征, 低纬度热带区域沃克环流增强, 同时东亚副热带高空急流向北移动明显, 这些条件有利于华北地区产生更多的对流活动 (于晓澄等, 2019; 赵琳等, 2022)。

分析 2021 年秋季东亚环流情况 (图 8) 可知, 500 hPa 高度上, 中低纬地区西太副高 5 880 gpm 脊点已东退到 140 °E, 中高纬欧亚大陆呈现一槽一脊的环流型特征, 贝加尔湖周围表现为弱高压脊, 日本海附近为弱东亚低槽, 华北地区位于低槽后方, 北方冷空气活跃, 不断影响华北。850 hPa 高度上中国东部表现为反气旋性环流, 华北地区位于环流北部 (图 8a)。环流距平图显示, 在对流层中上层, 我国东北北部气压

异常偏高, 中心最大偏高 50 gpm, 西西伯利亚地区气压异常偏低。对流层中下层, 鄂霍茨克海附近表现出反气旋型异常, 华北地区上空为偏东气流和弱偏北气流的异常辐合区 (图 8b), 说明异常偏强的东北亚高压引导的来自西北太平洋、东海和黄海水汽输送明显偏多。国家气候中心监测的东亚季风指数显示, 此时虽然已进入秋季, 但是季风仍维持较强的夏季风特征 (图略)。

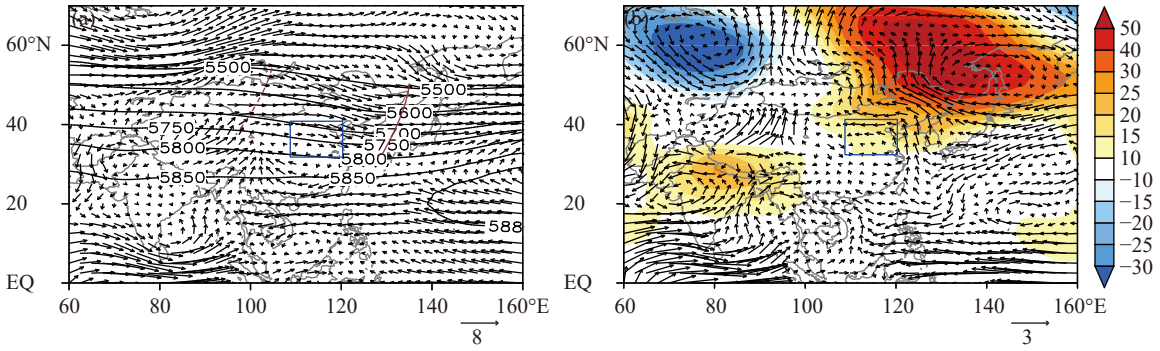


图 8 2021 年秋季 500 hPa 位势高度场 (等值线, 单位: gpm) 和 850 hPa 风场 (箭头, 单位: m·s^{-1}) (a) 和二者距平 (b, 阴影和箭头分别表示位势高度和风) (棕色实线和虚线分别表示槽和脊的位置)

Fig. 8 500 hPa geopotential height (contours, unit: gpm) and 850 hPa horizontal wind (vector, unit: m·s^{-1}) in autumn 2021 (a) and (b) their anomaly (shaded and vectors indicate the geopotential height and wind) (The solid and dashed brown lines indicate the trough and ridge, respectively)

4 降水异常偏多的外强迫因子

上文指出, 2021 年秋季华北地区受异常偏东气流影响, 存在更多的偏东水汽输送, 是造成降水偏多的最直接原因。大气运动一个重要的热强迫来自海洋 (赵树云等, 2017), 此外还与积雪异常、植被异常等因素密切相关 (张少波等, 2013; 肖志祥等, 2023)。前人研究指出, 影响华北地区降水的大气环流异常与同期低纬度太平洋中东部的海温偏冷现象 (La Niña) 关系密切 (韩晋平等, 2013; 赵琳等, 2022)。2021 年秋季海温距平场 (图 9) 显示, 我国东海、黄海以及南海, 菲律宾以东部分海域海温偏高 0.5 ℃ 以上, 日本海以及太平洋北部海温偏高超过 2 ℃, 而赤道中东太平洋海温偏低 1 ℃ 左右。来自国家气候中心的 SST 监测显示, 赤道中东太平洋海温自 2021 年 7 月以后不断下降, 到 10 月份时达到中等强度的 La Niña 状态, 从 2020 年开始持续 2 a 冬季呈现 La Niña 的双峰型状态 (赵俊虎等, 2021)。李多和顾薇 (2022) 研究指出, La Niña 过程中, 西太副高较常年同期偏北, 欧亚中高纬环流表现为经向型分布, 导致冷空气比较活跃, 北方降水偏多, 与本文研究结论一致。

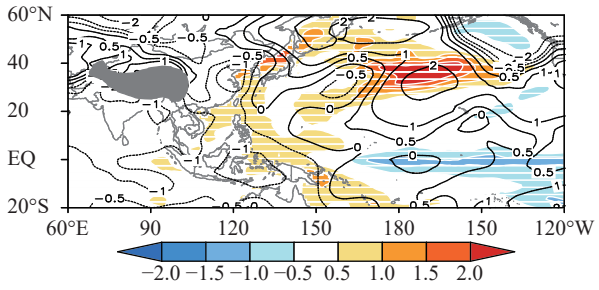


图 9 2021 年秋季太平洋海温 (阴影, 单位: ℃) 和海平面气压 (等值线, 单位: gpm) 距平分布

Fig. 9 Anomaly of the Pacific SST (shaded, unit: ℃) and sea level pressure (contour, unit: gpm) in autumn 2021

与此同时, 2021 年秋季的海平面气压场也具有明显的异常分布 (图 9)。我国东北和西北地区为正异常, 其他地区尤其是东部沿海为负异常, 整个亚太地区的正异常大值中心位于北太平洋区域。通常情况下, 进入秋季之后, 大陆冷高压逐步发展, 东亚副热带地区由夏季风逐步转变为冬季风, 太平洋气压减小。可是在 2021 年秋季, 华北地区地面气压较常年异常偏低, 冬季风环流系统迟迟没有建立, 夏季风环流系统尚稳定维持, 导致异常的东南风给华北带去更多的水汽。

5 结论与讨论

结合多源数据资料和定量水汽追踪方法, 深入分析了华北地区 2021 年秋季降水的异常特征及水汽输送贡献, 对比了其与同期气候态的差异, 最后讨论了导致降水异常的大气环流异常及海温外强迫因子。得出主要结论如下:

(1) 2021 年秋季华北降水为 1961 年以来同期最大, 达 284 mm, 较气候常年平均 (105.5 mm) 偏多 169.2%。距平场呈现东西带状分布型, 偏多大值中心位于河北和山西南部, 天津塘沽较气候常年平均偏多达 472%。近 60 a 华北秋季降水量总体呈现上升趋势, 具有明显的年代际变化特征, 21 世纪以来降水量再次偏多。

(2) 定量水汽输送贡献分析表明，2021 年秋季来自东南沿海和西太平洋的水汽和空气粒子比例分别为 41% 和 29%，均远大于气候平均态的比例 (21% 和 15%)。来自西北方向欧亚大陆的两条输送通道的水汽贡献分别为 27% 和 32%，低于气候平均态。2021 年秋季华北水汽最大源地为中国东部沿海。

(3) 环流异常特征分析发现，2021 年秋季，中高纬欧亚大陆上空表现为一槽一脊的环流型，华北地区位于低槽后方，北方冷空气活跃且不断影响华北。异常偏强的东北亚高压引导的偏东气流使得来自东海、黄海和西北太平洋水汽输送明显偏强。弱 La Niña 事件造成华北地区地面气压较常年偏低，冬季风环流系统迟迟未建立，夏季风环流系统尚稳定维持，导致异常的东南风携带更多的水汽输送，最终造成华北秋季降水异常偏多。

本文的结果进一步揭示了华北地区秋季天气气候成因的复杂性。然而在大气运动过程中，自身内部的动力学机制具有明显的非线性特征，我国华北区域雨量的多少和降水落区由外部强迫和大气内部变率共同作用 (戴新刚等, 2003; 赵嘉诚等, 2023)，本文仅初步探讨了华北秋季降水的多尺度系统相互作用，下一步需要利用数值模式开展敏感性试验，进一步验证相关结论。

参考文献 (References):

陈丽娟,赵俊虎,顾薇,等.2019.汛期我国主要雨季进程成因及预测应用进展[J].应用气象学报,30(4):385−400. Chen L J, Zhao J H, Gu W, et al. 2019. Advances of research and application on major rainy seasons in China [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 30(4):385−400 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20190401

崔童,张若楠,郝立生,等.2022.华北雨季降水年代际变化与水汽输送的联系[J].大气科学,46(4):903−920. Cui T, Zhang R N, Hao L S, et al. 2022. Relationship between the interdecadal variation of rainy season precipitation and water vapor transport in North China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,46(4):903−920 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2107.21059

崔童,孙丞虎,王冀,等. 2019. QX/T 495-2019 中国雨季监测指标: 华北雨季[S].北京:气象出版社. Cui T, Sun C H, Wang J, et al. 2019. Monitoring indices of rainy season in China: rainy season of North China: QX/T 495- 2019 [S]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)

戴新刚,汪萍,丑纪范.2003.华北汛期降水多尺度特征与夏季风年代际衰变[J].科学通报,48(23):2483−2487. Dai X G, Wang P, Chou J F. 2003. Multiscale characteristicstic s of the rainy season rainfall and interdecadal decaying of summer monsoon in North China [J]. Chinese Science Bulletin,48(23):2483−2487 (in Chinese). doi:10.1360/csb2003−48−23−2483

韩晋平,张人禾,苏京志.2013.中国北方秋雨与热带中太平洋海表冷却的关系[J].大气科学,37(5):1059−1071. Han J P, Zhang R H, Su J Z. 2013. Relationship between cooling of tropical Pacific sea surface temperature and autumn precipitation in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,37(5):1059−1071 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2013.12042

郝立生,TimLi,马宁,等.2020. MJO 对 2018 年华北夏季降水的影响[J].大气科学,44(3):639−656. Hao L S, Li T, Ma N, et al. 2020. Influence of MJO on summer precipitation in North China in 2018 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,44(3):639−656 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1912.19217

李多,顾薇.2022. 2021 年秋季我国北方地区降水异常偏多的特征及成因分析[J].气象,48(4):494−503. Li D, Gu W. 2022. Analysis of characteristics and causes of precipitation anomalies over Northern China in autumn 2021 [J]. Meteorological Monthly,48(4):494−503 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2022.032101

李刚,李崇银,晏红明,等.2020. 南太平洋和北太平洋年代际振荡与华北盛夏降水的关系及可能物理机制[J].地球物理学报,63(11):3952−3966. Li G, Li C Y, Yan H M, et al. 2020. The relationships of mid-summer rainfall over North China with North Pacific Decadal Oscillation and South Pacific Decadal Oscillation and their possible physical mechanisms [J]. Chinese Journal of Geophysics,63(11):3952−3966 (in Chinese). doi:10.6038/cjg2020N0417

孙婉怡,祝从文.2023.东亚副热带季风季节循环年际变化对华北夏季降水的影响[J].大气科学,47(5):1466−1480. Sun W Y, Zhu C W. 2023. Interannual variation in the seasonal cycle of the east Asian subtropical monsoon and its impact on summer rainfall in North China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,47(5):1466−1480 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2111.21184

肖志祥,卢伟萍,罗小莉.2023.青藏高原冬季积雪与华南前汛期降水年际变率的联系[J].大气科学学报,46(2):283−296. Xiao Z X, Lu W P, Luo X L. 2023. Connections between winter snow depth over the Tibetan Plateau and the interannual variation of precipitation during the first rainy season in South China [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,46(2):283−296 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20220503001

杨浩,江志红,刘征宇,等.2014.基于拉格朗日法的水汽输送气候特征分析——江淮梅雨和淮北雨季的对比[J].大气科学,38(5):965−973. Yang H, Jiang Z H, Liu Z Y, et al. 2014. Analysis of climatic characteristics of water vapor transport based on the Lagrangian method: A comparison between Meiyu in the Yangtze-Huaihe River region and the Huaibei rainy season [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,38(5):965−973 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1402.13228

杨梦兮,刘梅,柯丹,等.2020.2020 年江淮地区梅雨异常的成因分析[J].暴雨灾害,39(6):555−563. Yang M X, Liu M, Ke D, et al. 2020. Cause analysis of Meiyu anomaly in Jianghuai region in 2020 [J]. Torrential Rain and Disasters,39(6):555−563 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2020.06.002

于晓澄,赵俊虎,杨柳,等.2019.华北雨季开始早晚与大气环流和海表温度异常的关系[J].大气科学,43(1):107−118. Yu X C, Zhao J H, Yang L, et al. 2019. The relationship between the onset date of the rainy season in North China and the atmospheric circulation and SST [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,43(1):107−118 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1801.17242

袁媛,高辉,李维京,等.2017.2016 年和 1998 年汛期降水特征及物理机制

对比分析[J].气象学报,75(1):19−38. Yuan Y, Gao H, Li W J, et al. 2017. Analysis and comparison of summer precipitation features and physical mechanisms between 2016 and 1998 [J]. Acta Meteorologica Sinica,75(1):19−38(in Chinese). doi:10.11676/qxxb2017.019

汪小康,杨浩,崔春光,等.2022.2021 年中国降水异常气候特征及 4 次典型极端天气过程分析[J].暴雨灾害,41(5):489−500. Wang X K, Yang H, Cui C G, et al. 2022. Analysis of unusual climatic characteristics of precipitation and four typical extreme weather processes in China in 2021 [J]. Torrential Rain and Disasters, 41(5):489−500 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−045

张少波,陈玉春,吕世华,等.2013.青藏高原植被变化对中国东部夏季降水影响的模拟研究[J].高原气象,32(5):1236−1245. Zhang S B, Chen Y C, Lv S H, et al. 2013. Numerical simulation of impact of vegetation in Qinghai-Xizang Plateau on summertime precipitation in Eastern China [J]. Plateau Meteorology,32(5):1236−1245 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2012.00119

赵嘉诚,李清泉,丁一汇,等.2023. 21 世纪第 2 个 10 年初华北夏季降水年代际增加及与大气环流异常的联系[J].气象学报,81(5):764−775. Zhao J C, Li Q Q, Ding Y H, et al. 2023. Interdecadal increase of summer precipitation in North China in the early 2010s and its association with atmospheric circulation anomalies [J]. Acta Meteorologica Sinica,81(5):764−775 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2023.20220198

赵俊虎,张涵,熊开国,等.2021. 2020 年江淮流域超强梅雨年际异常的驱动因子分析[J].大气科学,45(6):1433−1450. Zhao J H, Zhang H, Xiong K G, et al. 2021. What drives the super strong precipitation over the Yangtze–Huaihe River basin in the Meiyu period of 2020? [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,45(6):1433−1450 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2104.21011

赵琳,孙林海,竺夏英,等.2022. 2021 年华北雨季气候特征及华北降水偏多成因初探[J].气象与环境科学,45(2):20−26. Zhao L, Sun L H, Zhu X Y, et al. 2022. Climate characteristics of rainy season and causes for more precipitation in North China in 2021 [J]. Meteorological and Environmental Sciences,45(2):20−26 (in Chinese). doi:10.16765/j.cnki.1673−7148.2022.02.003

赵树云,陈丽娟,崔童.2017. ENSO 位相转换对华北雨季降水的影响[J].大气科学,41(4):857−868. Zhao S Y, Chen L J, Cui T. 2017. Effects of ENSO phase-switching on rainy-season precipitation in North China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,41(4):857−868 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1701.16226

Cao F Q, Gao T, Dan L. 2021. Contributions of natural climate variability on the trends of seasonal precipitation extremes over China [J]. International Journal of Climatology,41:5226−5242. doi:10.1002/joc.7126

Ding Y H, Liu Y Y, Hu Z Z. 2021. The record-breaking Meiyu in 2020 and associated atmospheric circulation and tropical SST anomalies [J]. Advances in Atmospheric Sciences. doi:10.1007/s00376−021−0361−2

Yang H, Deng Y, Cui C G, et al. 2022. Dynamic trigger and moisture source of two typical Mei-yu front rainstorms associated with eastward-moving cloud clusters from the Tibetan Plateau [J]. Journal of Meteorological Research,36(3):478−499. doi:10.1007/s13351−022−1179−2

Yang H, Cui C G, Wu C H, et al. 2024. Analysis and comparison of water vapor transport features and circulation anomalies during the super-strong Meiyu period of 2020 and 1998 [J]. Weather and Climate Extremes,44:100654. doi:org/10.1016/j.wace.2024.100654

Zhi R, Zhao J H, Zhou J, et al. 2020. Inter-decadal variation of autumn rain of west China and its relationship with atmospheric circulation and sea surface temperature anomalies [J]. International Journal of Climatology,40(13):5700−5713. doi:10.1002/joc.6545

(责任编辑　杨　浩)