第 72 卷 第 5 期
2026 年 10 月

武汉大学学报(理学版)
J. Wuhan Univ. (Nat. Sci. Ed.)

Vol. 72 No. 5
Oct. 2026,743~757

DOI: 10.14188/j.1671-8836.2025.0151

中亚五国地区生长季干旱的水汽输送异常溯源

柳睿涵[1],周海轩[2],王天航[1],王思翔[2],顾西辉[2†]

1. 中国地质大学(武汉)环境学院,湖北 武汉 430074;
2. 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院,湖北 武汉 430074

收稿日期:2025-07-17 † 通信联系人 E-mail:guxh@cug.edu.cn
基金项目:国家重点研发计划国际科技创新合作重点专项(2025YFE0103300,2023YFE0103900)
第一作者:柳睿涵,女,硕士生,现从事极端天气气候事件研究。E-mail:ruihanliu@cug.edu.cn

摘　要:中亚五国地区长期遭受干旱灾害,水资源短缺问题突出,尤其是发生在生长季(4—6月)的干旱严重威胁当地生态和经济发展。聚焦中亚五国1961—2022年间4次(1975、1977、2012年和2021年)典型生长季干旱事件,通过构建陆-气水平衡框架、利用HYSPLIT模型溯源水汽输送,并结合水汽收支分解方法,系统分析了生长季干旱期间导致中亚五国大气水汽亏缺的水汽输送异常及水汽源地,并评估其主导物理驱动因子。结果表明:1)中亚五国生长季干旱期间降水不足的主要原因是由平流输入水汽所贡献的降水量显著下降,而由蒸发水汽所贡献的降水量减少加剧了干旱的严重程度;2)中亚五国生长季干旱期间水汽亏缺的关键因素是起源于地中海(1975、2012年和2021年)或北欧、北大西洋地区(1977年)的气团所输送的水汽显著不足,水汽源地里海和土库曼斯坦地区的水汽贡献量显著减少;3)中亚五国生长季干旱期间水汽输送主要受定常涡旋变化影响,其中风场变化引起的动力效应(尤其是辐散动力效应)导致水汽收支变化呈负异常,主导了中亚五国上空的大气水汽亏缺状态。

关　键　词:中亚五国;生长季干旱;水汽收支;水汽输送;动力机制;热力机制
中图分类号:P426.616;P434.5　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-8836(2026)05-0743-15

Source of Anomalous Moisture Transport During the Growing-Season Droughts in the Five Central Asian Countries

LIU Ruihan[1], ZHOU Haixuan[2], WANG Tianhang[1], WANG Sixiang[2], GU Xihui[2†]

1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China;
2. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China

Abstract: The five Central Asian countries have long suffered from drought disasters, with severe water scarcity. In particular, droughts occurring during the growing season (April—June) pose severe threats to local ecosystems and economic development. Based on reanalysis data from 1961 to 2022, four typical growing-season drought events (in 1975, 1977, 2012, and 2021) in the five Central Asian countries were identified. By constructing a land-atmosphere water balance framework, tracing moisture transport using the HYSPLIT model, and applying a moisture budget decomposition method, this study systematically analyzes the anomalous moisture transport and source regions responsible for atmospheric moisture deficits during growing-season droughts, and evaluates the dominant physical driving processes. The results show that: 1) During growing-season droughts in the five Central Asian countries, the marked reduction in precipitation contributed by advected moisture emerges as the primary cause of rainfall deficiency, while diminished precipitation contributed by evaporative recycling further intensifies drought severity. 2) Moisture deficits associated with air parcels originating from the Mediterranean region (in 1975, 2012, and 2021) or from northern Europe and the North Atlantic (in 1977) are key factors leading to atmospheric moisture shortages during growing-season droughts. Specifically, in terms of moisture sources, the contributions from the Caspian Sea and Turkmenistan decreased substantially. 3) The moisture transport during growing-season droughts is mainly

引用格式:柳睿涵,周海轩,王天航,等. 中亚五国地区生长季干旱的水汽输送异常溯源[J]. 武汉大学学报(理学版),2026,72(5):743-757. DOI:10.14188/j.1671-8836.2025.0151.

LIU Ruihan, ZHOU Haixuan, WANG Tianhang, *et al*. Source of Anomalous Moisture Transport During the Growing-Season Droughts in the Five Central Asian Countries [J]. *J Wuhan Univ* (*Nat Sci Ed*), 2026, 72(5): 743-757. DOI: 10.14188/j.1671-8836.2025.0151(Ch).

influenced by changes in stationary vortices. The dynamic effects induced by wind changes (especially divergent dynamic effects) lead to negative anomalies in the moisture budget and dominate the atmospheric moisture deficit over the five Central Asian countries.

Key words: the five Central Asian countries; growing-season drought; moisture budget; moisture transport; dynamic mechanism; thermodynamic mechanism

0 引 言

中亚五国地区位于欧亚大陆腹地,包括哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、土库曼斯坦和乌兹别克斯坦5个国家,是北半球陆地温带面积最大的干旱区,为亚洲中部干旱区的重要组成部分[1]。中亚五国地区地势东南高、西北低,位于东南部的天山山脉和帕米尔高原截获了沿西风带向东输送的水汽,并阻挡了从太平洋和印度洋向中亚五国输送的水汽,导致该地区降水缺乏且时空差异较大。中亚五国地区全年降水主要集中在春、夏季,大多数地区的年降雨量不足200 mm[2-3],水资源短缺问题突出,易发生干旱灾害[4],影响生长季植被生长[5]。中亚五国农业优势突出,经济发展依赖包括农业在内的第一产业[6-7],发生在生长季的干旱灾害严重威胁当地生态系统和经济发展。近几十年来,中亚的气候呈现变暖趋势[5],年降水量显著减少[5,8],干旱事件发生频率增加[8-9]。另据预测,该地区的干旱风险未来还可能加剧[10-12]。因此,对中亚五国生长季干旱的发生机制进行深入研究对当地生态环境和经济发展具有重要意义。

中亚五国地区地处西风带,北大西洋、地中海和里海等海洋和湖泊的水汽沿着西风带被输送至中亚五国,是该区域降水的重要水汽来源[8,13-15]。局地循环水汽对于中亚降水的作用有限,但在维持中亚水循环中也有不可忽略的影响[15-16]。Brubaker二元大气水汽通量模型[17]能够分离并量化包括降水、蒸发和水汽输送等水循环过程,通过计算降水再循环率,估计外部水汽输入和局地水汽循环对区域降水的贡献[18-23]。混合单粒子拉格朗日综合轨迹模型HYSPLIT(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)具备更多水汽输送细节,能够定量描述水汽输送过程并确定水汽来源,被普遍应用于降雨或干旱事件期间的水汽来源研究中[23-26]。本文将Brubaker和HYSPLIT模型应用于中亚五国生长季干旱事件期间的水汽收支异常研究,以厘清导致干旱事件期间水汽亏缺的水汽来源异常。

根据大气水汽收支方程,与水汽亏缺程度变化有关的水汽收支异常主要由动力效应和热力效应两种物理过程驱动[27-30]。动力效应主要表现为大气环流(即风场变化)直接控制的水汽输送量变化,热力效应则指与温度变化有关的大气含水量变化(即比湿变化)调节的水汽输送量变化。目前,分解动力、热力效应对水汽收支影响的方法已广泛应用于水汽收支研究中[23,27,31-33],能够分离动力效应和热力效应引起的水汽收支变化,探究主导水汽亏缺的关键物理驱动过程。

本文聚焦1961—2022年间中亚五国主要生长季(4—6月)的典型干旱事件,利用上述方法开展研究,旨在解决以下问题:1)中亚五国典型生长季干旱事件中外部平流水汽和内部蒸发水汽的作用;2)导致中亚五国生长季干旱事件的水汽通道和水汽源地;3)影响水汽输送异常的关键物理驱动因子。

1 研究数据

1.1 ERA5再分析数据

使用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的第五代再分析资料[34](ERA5,https://www.ecmwf. int/en/forecasts/dataset/ ecmwf-reanalysis-v5),进行干旱特征和干旱期间的水汽异常输送分析,空间分辨率为0.25°×0.25°。用于分析的月尺度数据变量包括降水、蒸发、潜在蒸散发、地表气压、整层积分的水汽通量及其散度等单层变量,以及1~1 000 hPa(37个气压层)的比湿和水平风场等多层变量。日尺度数据由6 h间隔(00:00、06:00、12:00、18:00 UTC)数据合成获得,包括降水、潜在蒸散发、比湿和水平风场等变量。

1.2 NCEP/NCAR再分析数据

使用美国国家环境预报中心/国家大气研究中心(National Centers for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research, NCEP/NCAR)的再分析数据集(https://www. ready.noaa. gov/data/archives/reanalysis)进行气团后向轨迹追踪[35]。该数据集包括地表气压、6 h累计降水、2 m气温和10 m水平风场等单层变量,以及10~1 000 hPa(17个气压层)的位势高度、气温、水平风

场、垂直速度和相对湿度等多层变量,时间分辨率为6 h,空间分辨率为2.5°×2.5°。

2　研究方法

2.1　干旱事件时空分析

使用基于降水和潜在蒸散发计算的标准化降水蒸散发指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index,SPEI)衡量干旱严重程度[36],通过不同时间尺度的SPEI值对中亚五国生长季干旱事件进行时空特征分析。其中,SPEI-1反映1个月尺度的短期干旱状况,SPEI-3反映3个月尺度的季节性干旱状况。使用R包"SPEI"(https://cran.r-project.org/package=SPEI)计算6月SPEI-3值,评估生长季干旱严重程度的空间分布,并根据降水和潜在蒸散发之差的31 d滑动均值计算4—6月每日SPEI-1,进一步探讨干旱事件的时空演变特征。

2.2　降水再循环率和陆-气水平衡

根据大气水汽平衡框架,特定地区的降水量(P)可以分解为外部平流水汽贡献的降水分量(P_a)和内部蒸发水汽贡献的降水分量(P_e),即$P=P_a+P_e$。利用Brubaker等[17]提出的二元大气水汽通量模型计算降水再循环率(γ),衡量区域总降水量中局地蒸发水汽的贡献:

$$\gamma=\frac{P_e}{P}=\frac{E\times A}{E\times A+2F_{in}} \tag{1}$$

式中:E为研究区域的平均蒸发量;A为区域面积;F_{in}为流入该区域的整层平流水汽。该区域的平流流出水汽(F_{out})分别来自平流流入水汽中未形成降水的部分(F_{out}^{a})和蒸发水汽中未参与降水再循环的部分(F_{out}^{e}),即:

$$\begin{cases}F_{in}=P_a+F_{out}^{a}\\E=P_e+F_{out}^{e}\\F_{out}=F_{out}^{a}+F_{out}^{e}\end{cases} \tag{2}$$

受限于数据精度和模型假设,由式(2)计算得到的F_{out}与边界实际流出水汽不完全一致,本文将这一差值视为残差项(Res)。此外,根据水量平衡框架,特定区域的径流(R)和陆地储水量变化($\triangle S$)之和可以由降水量与蒸发量之差表示:

$$R+\triangle S=P-E \tag{3}$$

结合式(1)~(3),进一步构建了干旱期间的陆-气水平衡框架,详细分析外部和内部水汽输送变化对中亚五国生长季干旱事件降水不足的影响。

2.3　水汽追踪模型及方案

使用HYSPLIT模型分析水汽来源。该模型可以计算简单的气团轨迹以及复杂的传输、扩散、化学转化和沉积模拟[35],广泛用于分析气团后向轨迹并建立源-受体关系[23,35,37]。利用NCEP/NCAR再分析数据驱动HYSPLIT模型,从特定区域和高度出发,向后追踪气团轨迹,以确定水汽来源。轨迹追踪高度为1 000~5 500 m(间隔500 m),每6 h开展一次后向轨迹追踪。考虑到水汽在大气中的平均停留时间(约10 d)[38],轨迹追踪在目标日期的前10 d内进行。

2.4　水汽贡献溯源

由于气团在移动过程中可能经过多个蒸发和降水过程,采用Sodemann等[39]提出的加权水源诊断方法估算水汽源地对中亚五国生长季水汽亏缺程度(即$P-E$)的贡献。利用气团在运动过程中的比湿变化表示蒸发和降水主导过程:

$$P-E=-m\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} \tag{4}$$

式中:m为气团质量;$\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}$为气团在特定时间步长(本文以6 h为时间步长)的比湿变化。采用气团比湿变化判断水汽源位置:若气团沿轨迹在一个时间步长内(前向时间)比湿增加,则该位置被识别为水汽源;若气团沿轨迹的比湿减少,则气团从先前水汽源吸收的水汽发生损失,水汽源贡献需减去损失水汽后重新计算[39]。这种加权水源诊断方法计算得到的沿轨迹水汽贡献最终映射到1°×1°的网格上,反映各个格点的水汽贡献。此外,使用CCToolbox(Curve Clustering Toolbox)[23,40]工具对所有气团移动轨迹进行聚类,得到几个主要水汽输送通道。

2.5　水汽收支分解

利用大气水汽收支方程评估定常涡旋(stationary eddies,SE)和瞬变涡旋(transient eddies,TE)导致的水汽收支变化对中亚五国生长季水汽亏缺程度的影响[27]:

$$\delta\left(\bar{P}-\bar{E}\right)\approx\underbrace{\delta\left(-\frac{1}{\rho_w g}\int_{p_t}^{p_s}\nabla\cdot\bar{q}\,\overline{\vec{V}}\,\mathrm{d}p\right)}_{\delta\mathrm{SE}}+\underbrace{\delta\left(-\frac{1}{\rho_w g}\int_{p_t}^{p_s}\nabla\cdot\overline{q'\vec{V}'}\mathrm{d}p\right)}_{\delta\mathrm{TE}} \tag{5}$$

式中:$\bar{P}$和$\bar{E}$分别为降水量和蒸发量的月平均值;ρ_w为水汽密度;g为重力加速度(9.8 m/s^2);p_s和p_t分别为地表气压和大气层顶气压,dp为气压微分;∇为散度算子;$\bar{q}$和$\overline{\vec{V}}$分别为比湿和水平风场的月平均值;q'和$\vec{V}'$分别为二者相较月均值的偏差

($q'=q-\bar{q}$,$\vec{V}'=\vec{V}-\overrightarrow{V}$),$\nabla\cdot\overline{q'\vec{V}'}$代表由瞬变涡旋引起的月平均水汽输送辐合/辐散;$\delta(\cdot)$表示括号内变量相较气候态时期(1981—2010年)均值的距平值。根据该方程,水汽亏缺程度的变化可以分解为定常涡旋水汽变化(δSE)和瞬变涡旋水汽变化(δTE)。其中,定常涡旋水汽变化可以分解为动力效应(mean circulation dynamics,MCD)和热力效应(thermodynamics,TH)的贡献[27]:

$$\delta\mathrm{SE}\approx \underbrace{-\frac{1}{\rho_w g}\int_{p_t}^{p_s}\nabla\cdot\bar{q}_c\delta\overrightarrow{V}\,\mathrm{d}p}_{\delta\mathrm{MCD}}\underbrace{-\frac{1}{\rho_w g}\int_{p_t}^{p_s}\nabla\cdot\delta\bar{q}\,\overrightarrow{V}_c\,\mathrm{d}p}_{\delta\mathrm{TH}} \quad (6)$$

式中:$\bar{q}_c$和$\overrightarrow{V}_c$分别表示月平均比湿和水平风场的气候平均值。动力效应导致的水汽变化(δMCD)受大气平均环流变化影响,热力效应导致的水汽变化(δTH)受比湿变化影响。

进一步将动力和热力效应导致的水汽变化分解为辐散项(divergence,用下标D表示)和平流项(advection,用下标A表示),分别用来描述辐合/辐散过程和平流过程导致的水汽变化[27,41]:

$$\delta\mathrm{MCD}= \underbrace{-\frac{1}{\rho_w g}\int_{p_t}^{p_s}\bar{q}_c\nabla\cdot\delta\overrightarrow{V}\,\mathrm{d}p}_{\delta_{\mathrm{MCD_D}}}\underbrace{-\frac{1}{\rho_w g}\int_{p_t}^{p_s}\delta\overrightarrow{V}\cdot\nabla\bar{q}_c\,\mathrm{d}p}_{\delta_{\mathrm{MCD_A}}} \quad (7)$$

$$\delta\mathrm{TH}= \underbrace{-\frac{1}{\rho_w g}\int_{p_t}^{p_s}\delta\bar{q}\nabla\cdot\overrightarrow{V}_c\,\mathrm{d}p}_{\delta\mathrm{TH_D}}\underbrace{-\frac{1}{\rho_w g}\int_{p_t}^{p_s}\overrightarrow{V}_c\cdot\nabla\delta\bar{q}\,\mathrm{d}p}_{\delta\mathrm{TH_A}} \quad (8)$$

由此,δMCD可描述为气候态比湿场下的辐合/辐散风变化($\delta\mathrm{MCD_D}$,称为辐散动力项)和风场改变导致的气候态比湿平流变化($\delta\mathrm{MCD_A}$,称为平流动力项);δTH可以描述为气候态辐合/辐散风背景下的比湿变化($\delta\mathrm{TH_D}$,称为辐散热力项)和气候态环流场下的比湿平流变化($\delta\mathrm{TH_A}$,称为平流热力项)。

3 研究结果

3.1 中亚五国典型生长季干旱事件特征及大气水汽循环

图1(a)显示了中亚五国6月区域平均SPEI-3的年际变化。1961—2022年期间,中亚五国6月SPEI-3以每10年-0.13的速度显著下降($p<0.05$),表明在这62年间中亚五国生长季呈显著变干趋势,尤其是2001—2022年间,干旱状态频繁出现。1961年以来,最严重的4次生长季干旱分别发生在1975、1977、2012年和2021年。其中,1975、1977年和2012年6月SPEI-3均介于-1.5至-1.0之间,意味着在这3次生长季发生了中度干旱;2021年6月SPEI-3达到了-1.64($-2.0<$SPEI-3<-1.5),表明发生了重度干旱。

图1(b)~1(e)为上述4次生长季干旱事件的时空演变特征。从空间分布看,1975、2012年和2021年生长季干旱的重灾区出现在西部,主要分布于哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦和土库曼斯坦。尤其是2021年,不仅上述3国经历了大范围的极端干旱(SPEI-3<-2.0),吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦的大部分地区干旱严重程度也达到了中度及以上(SPEI-3<-1.0)。1977年生长季干旱发生时,干旱重灾区集中在哈萨克斯坦中、东部地区。从时空演变看,在1975年4—6月,中亚五国东部部分地区主要处于无旱状态(SPEI-1>-0.5),而其他3次事件期间,中亚五国几乎全区域都发生了干旱。经向平均SPEI-1结果显示,1975、2012年和2021年生长季期间均出现极端干旱(SPEI-1<-2.0),但发生位置和事件具有较大差异:1975年和2012年的极端干旱发生在5月,主要覆盖中亚五国西部地区;2021年极端干旱发生在6月,集中在中部地区。

本文将上述4次生长季干旱事件作为典型案例进行分析,以1981—2010年作为气候态参考期,探究中亚五国生长季干旱期间的水汽异常和物理驱动因子。

图2为中亚五国生长季的大尺度环流异常模式。从气候态时期(1981—2010年)的平均状态看(图2(a)),中亚五国在生长季处于水汽辐散状态,主要受西风带控制。西风带携带的水汽向东输送,抵达中亚五国并被帕米尔高原和天山山脉拦截,主要在山区形成降水[1]。4次生长季干旱期间的合成异常环流模式显示(图2(b)),相对于气候平均态,在中亚五国的北方上空存在反气旋式异常环流。在异常反气旋控制下,东北气流抑制了西风带水汽向中亚五国的输入,导致部分地区(尤其是哈萨克斯坦)的水汽辐散相较气候态显著加强($p<0.05$),加剧了当地大气的水汽亏缺状态。在1975年和2021年生长季干旱期间,强烈的异常反气旋出现在中亚五国西北部(图2(c)和2(f)),可能是导致这两次生长季干旱的极端干旱区集中在哈萨克斯坦西部(图1(b)和1(e))的主要环流因素。1977年事件期间,异常反气旋中心位于哈萨克斯坦北方(图2(d)),受强烈的异常东北风影响,哈萨克斯坦的东部地区发生极端干旱(图1(c))。此外,在2012年和2021年生长季干旱期间,中亚五

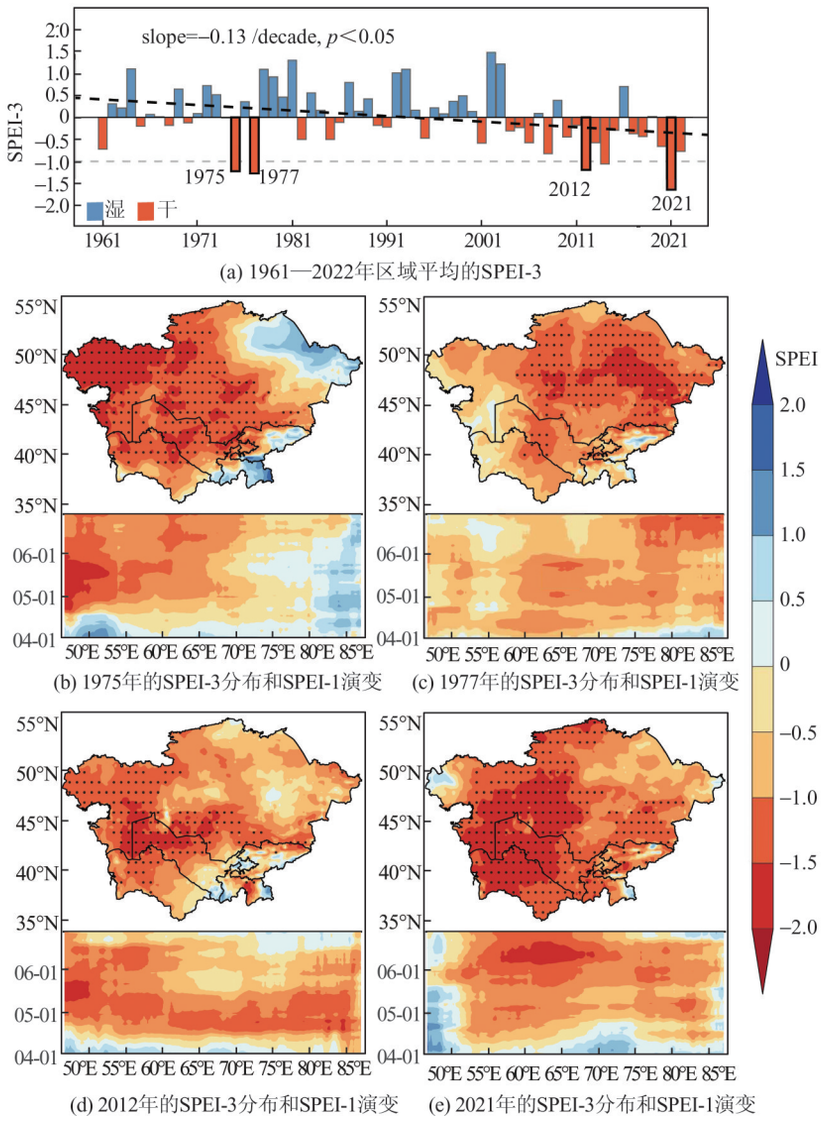


图1　(a) 中亚五国1961—2022年6月SPEI-3值年际趋势;(b)-(e) 4次生长季干旱事件的时空特征

(a) 中黑色虚线表示SPEI-3演变趋势,采用Mann-Kendall检验方法进行显著性检验;灰色虚线表示SPEI-3=－1.0的阈值;(b)-(e)中,上半部分为6月SPEI-3的空间分布,黑点表示该格点的SPEI-3值处于1961—2022年间最低水平(5%);下半部分为4—6月每日SPEI-1的时间-经度分布

Fig. 1　(a) Interannual trend of SPEI-3 values in June of the five Central Asian countries from 1961 to 2022; (b)-(e) the spatio-temporal characteristics of the four growing-season droughts

(a): the black dashed line indicates the SPEI-3 trend, with significance tested by the Mann-Kendall method; the gray dashed line marks the threshold of SPEI-3=－1.0; (b)-(e), the upper part shows the spatial patterns of SPEI-3 in June, where black dots indicate cells with SPEI-3 values falling within the lowest 5% during 1961—2022; the lower part shows the time-longitude distribution of daily SPEI-1 from April to June

国以南出现气旋式环流异常(图2(e)和图2(f)),其东风异常支流与异常反气旋汇合,进一步增强了对西风带水汽输送的抑制。

图3所示为中亚五国生长季气候态和干旱事件期间的陆-气水循环过程。根据陆-气水平衡框架结果(图3(a)),在中亚五国生长季,气候平均态的降水再循环率(γ)高达(36.48±1.11)%,表明蒸发提供的水汽贡献了超过1/3的气候态降水,大部分降水仍以外部输入水汽的贡献为主。输入到中亚五国的外部水汽中约57%形成降水,其他外部水汽与未参与降水再循环的蒸发水汽一起流出中亚。4次事件的合成分析结果(图3(b))显示,中亚五国在生长季干旱期间的降水相较气候平均值显著下降了26%($p<0.05$),外部输入水汽中形成降水的部分占全部输入水汽的比例下降了约11%,可以解释约64%的降水减少。尤其是在1977年(图3(d))和2012年(图3(e))生长季干旱期间,超过70%的总降水减少是由外部水汽贡献的降水显著减少

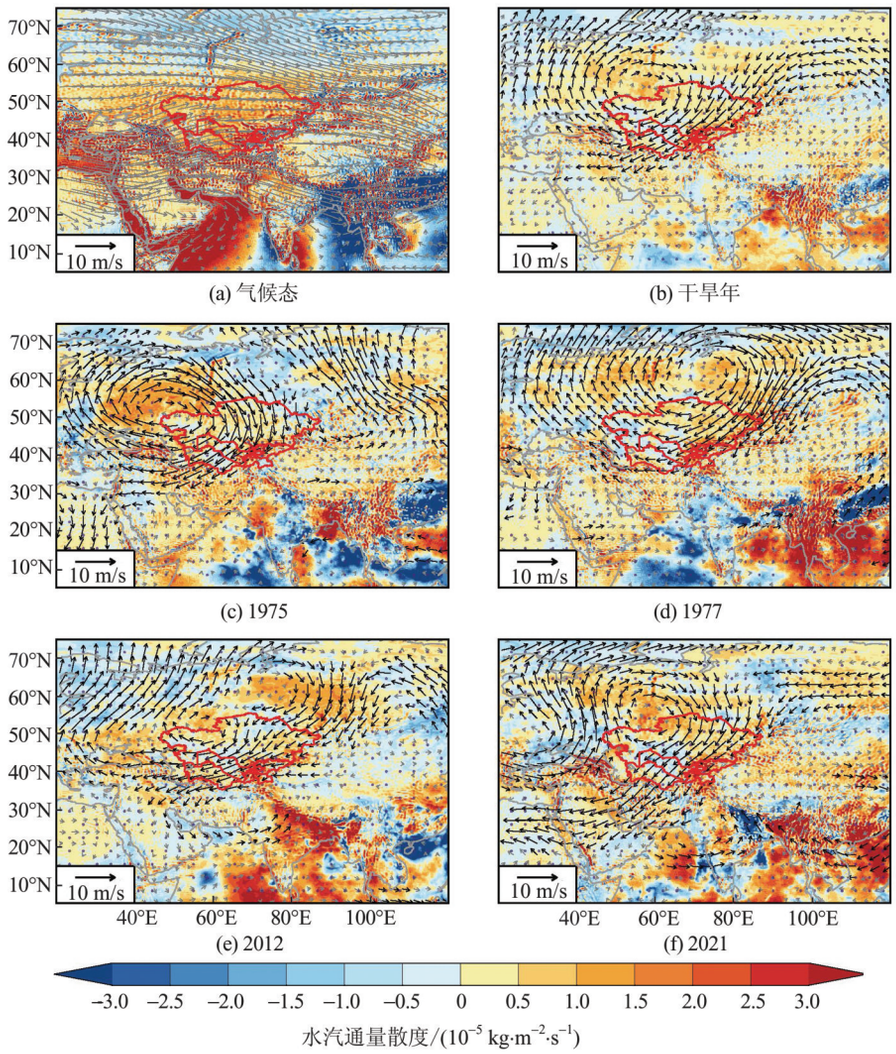


图2 中亚五国生长季的大尺度环流异常模式

(a)气候态时期(1981—2010年)平均的整层积分水汽通量散度(填色图)和500 hPa风场(矢量图);(b)4次生长季干旱事件相较气候平均态的合成距平;(c)-(f)分别为1975、1977、2012年和2021年生长季干旱期间相较气候平均态的距平;(b)-(f)中的深紫色点表示该格点的水汽通量散度异常通过显著性检验($p<0.05$,基于双尾Student's t检验)

Fig. 2 Large-scale circulation anomaly patterns during the growing season in the five Central Asian countries

Panel (a) shows the climatological mean (1981—2010) of vertically integrated moisture flux divergence (shaded) and 500 hPa wind fields (vectors); Panel (b) shows the composite anomalies of the four growing-season droughts relative to the climatological mean; Panels (c)-(f) present the anomalies relative to the climatological mean during the growing-season droughts in 1975, 1977, 2012, and 2021, respectively; In panels (b)-(f), the dark purple dots indicate cells with statistically significant anomalies ($p<0.05$) in moisture flux divergence based on a two-tailed Student's t-test

($p<0.05$)所导致。在这两组事件期间,尽管来自蒸发的再循环水汽相较气候平均态显著减少,但仍为当地降水提供了重要水汽补给,导致降水再循环率显著增加($p<0.05$)。而在1975年(图3(c))和2021年(图3(f))生长季干旱期间,降水再循环率分别下降至31.97%和34.40%,蒸发水汽的贡献减少对这两次事件期间的降水不足有着重要影响。值得注意的是,在这4次干旱期间,来自外部水汽贡献的降水减少程度相近。但1975年和2021年事件期间由蒸发水汽贡献的降水剧烈减少,进一步加剧了这两次生长季的降水不足,导致其干旱程度更加严重。

3.2 水汽输送溯源和水汽贡献异常分析

图4显示了中亚五国在生长季期间的气候态水汽来源。图4(a)显示,中亚五国生长季的气候平均态水汽来自4条主要水汽输送通道:1)起源于北欧挪威海域,途经波罗的海,穿过东欧平原进入中亚五国的西北风通道(占总水汽贡献的20.88%);2)起源于西北大西洋,沿西风带向东经过欧洲大陆,穿越黑海进入中亚五国的远距离西风通道(占17.50%);3)起源于地中海,途经伊朗高原并穿过里海深入中亚腹地的西南风通道(占29.36%);4)起源

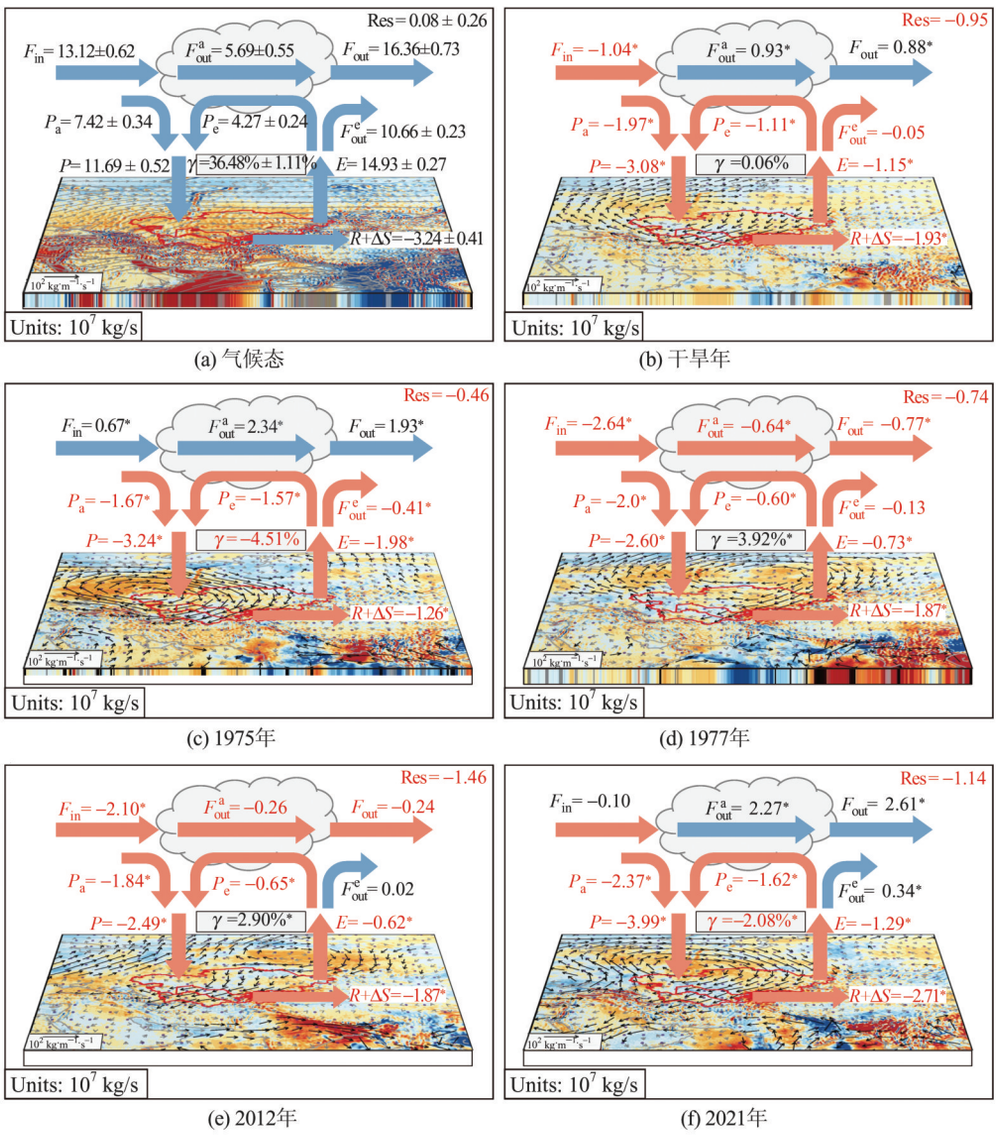


图3　中亚五国生长季气候态和干旱事件期间的陆-气水循环过程

(a)气候态时期(1981—2010年)陆-气水循环过程的平均值及其95%置信区间;(b)4次生长季干旱事件相较气候平均态的合成距平;(c)-(f)分别为1975、1977、2012年和2021年生长季干旱期间相较气候平均态的距平;(b)-(f)中的橙色和蓝色箭头分别表示水汽输送相较气候平均值减少和增加;*表示通过显著性检验($p<0.05$,基于双尾Student's t检验)

Fig. 3　Land-atmosphere water cycle processes during the climatological period and growing-season droughts in the five Central Asian countries

Panel (a) shows the climatological mean (1981—2010) of the land - atmosphere water cycle and its 95% confidence interval; Panel (b) shows the composite anomalies of the four growing-season droughts relative to the climatological mean; Panels (c)-(f) present the anomalies relative to the climatological mean during the growing-season droughts in 1975, 1977, 2012, and 2021, respectively; In panels (b)-(f), the orange and blue arrows respectively indicate a decrease and increase in moisture transport compared to the climatological mean; * denotes statistically significant anomalies ($p<0.05$) based on a two-tailed Student's t-test

于中亚五国北侧陆地向东输送的中亚陆地通道(32.26%)。其中,中亚陆地通道输送的水汽占比最高,西南风通道次之。从水汽贡献及其标准差的空间分布看(图4(a)和图4(b)),里海和土库曼斯坦地区对气候态时期生长季的平均水汽贡献较高且标准差较大,表明来自这些地区的水汽贡献较多但极不稳定,容易出现水汽贡献异常,从而影响中亚五国的水汽亏缺程度。趋势分析显示(图4(c)),在气候态时期,里海地区的水汽贡献表现出显著减少趋势($p<0.05$),甚至达到了每10年2%的下降速度,进一步说明里海地区的水汽供应对中亚五国生长季期间的大气水汽收支状态具有重要影响。

图5为中亚五国生长季干旱期间的水汽贡献分布情况。4次生长季干旱事件的合成分析结果显示

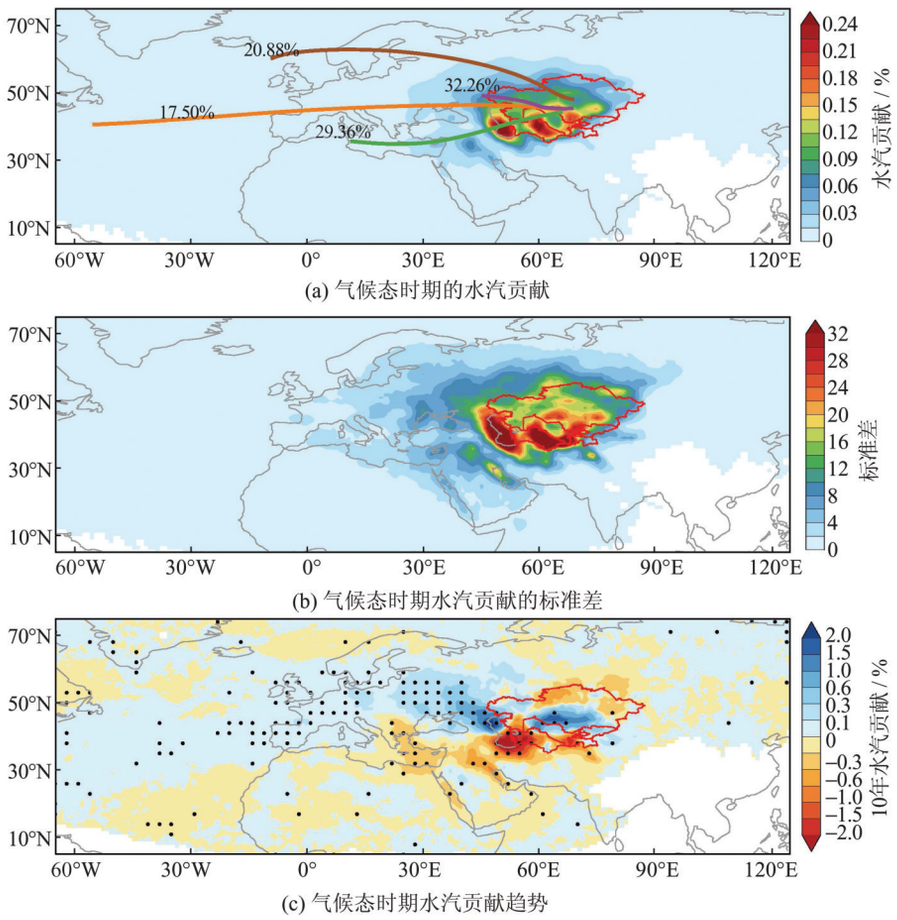


图 4 中亚五国生长季期间的气候态水汽来源

(a)气候态时期(1981—2010年)平均的水汽来源空间分布(填色图)和主要水汽通道分布(轨迹图);(b)气候态时期水汽贡献标准差的空间分布;(c)气候态时期水汽贡献的年际变化趋势,黑点表示该格点的水汽贡献趋势通过显著性检验($p<0.05$,基于Mann-Kendall检验)

Fig. 4 Climatological moisture sources during the growing season in the five Central Asian countries

Panel (a) shows the spatial distribution of the climatological mean (1981—2010) moisture sources (shaded) and major moisture transport channels (trajectories); Panel (b) shows the spatial distribution of the standard deviation of moisture contribution during the climatological period; Panel (c) shows the trend of moisture contribution during the climatological period; The black dots indicate cells with statistically significant trend ($p<0.05$) based on the Mann-Kendall test

(图 5(a)),沿中亚陆地通道输送的水汽比例仍占据首位,达 36.82%,较气候平均值有所增长。而西南风通道输送的水汽占比明显减少,气候平均值由 29.36% 下降至干旱事件期间气候平均值的 23.89%,尤其是在 2012 年(图 5(d))和 2021 年(图 5(e))事件期间,西南风通道的水汽输送占比均下降了约 8%,是导致干旱期间水汽亏缺的主要原因。沿远距离西风通道的水汽输送占比在干旱期间也明显下降,尤其是在 1977 年生长季干旱期间(图 5(c)),较气候平均值下降了约 4%。此外,1977 年事件的另一个重要水汽输送异常通道是西北风通道,其水汽贡献下降了 3.61%。

从空间分布看,生长季干旱期间中亚五国最主要的水汽供应区仍是中亚西南地区以及天山山脉西侧,与气候态时期的重要水汽来源较为一致(图 4)。然而距平分析结果显示(图 5(f)),里海和土库曼斯坦地区的水汽贡献显著减少,大部分格点较气候平均水汽贡献的负距平达 −0.03% 甚至更低,这与西南风通道的水汽输送占比明显减少是一致的(图 5(a))。值得注意的是,与其他 3 次事件相比,1977 年事件期间水汽贡献异常表现出独特的空间分布(图 5(h)),在里海和土库曼斯坦地区呈现出“减少—增加—减少”的西北-东南向分布格局。

为进一步从区域角度追溯中亚五国生长季干旱期间的水汽亏缺起源,本文参考 IPCC(政府间气候变化专门委员会)第六次评估报告(AR6)采用的气候分区[42](图 6(a)),根据气团起源对干旱期间的所有水汽轨迹及其贡献进行源地划分,计算各个分区的水汽贡献,并重点分析贡献占比超过 1% 的气团源区。气候平均态的源区贡献结果显示(图 6(b)),在

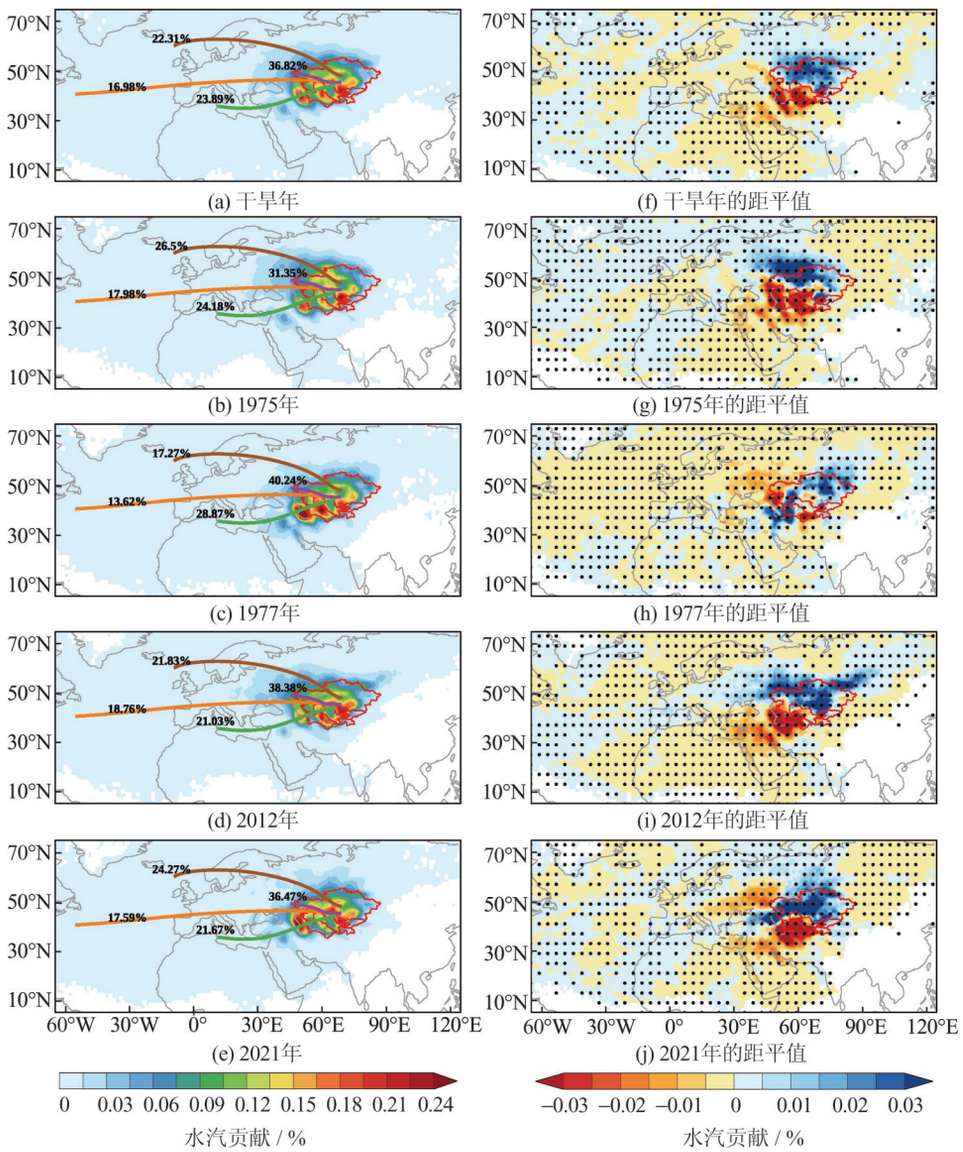


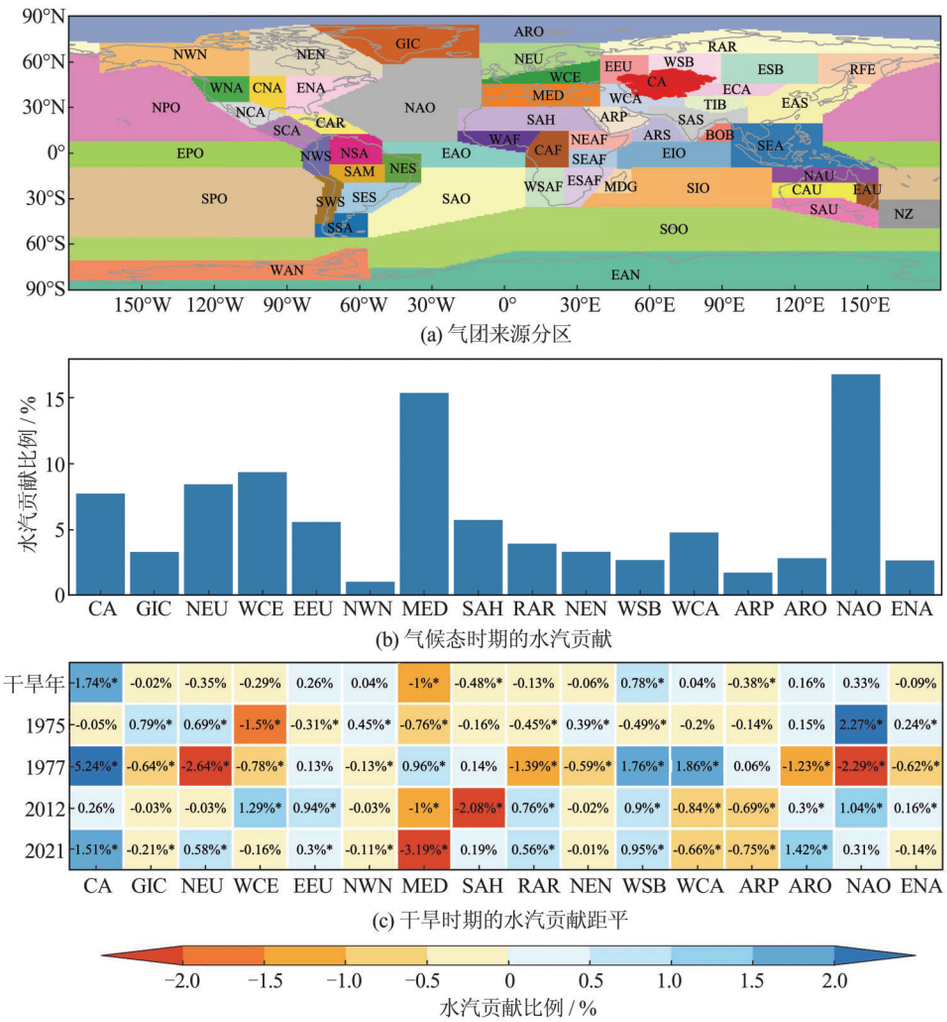
图5　中亚五国生长季干旱事件期间的水汽来源

(a) 4次干旱事件的合成平均水汽贡献;(b)-(e)分别为1975、1977、2012年和2021年干旱事件期间的水汽贡献;(f)-(j)分别为对应事件相对于气候平均态的水汽贡献距平

Fig. 5　Moisture sources during growing-season droughts in the five Central Asian countries

Panel (a) presents the composite mean of moisture contribution of the four droughts; Panels (b)-(e) present respectively the moisture contribution during the 1975, 1977, 2012, and 2021 droughts; Panels (f)-(j) present the anomalies in moisture contribution during the corresponding events on the right relative to the climatological mean

中亚五国上空造成降水的气团主要起源于北大西洋(NAO)、地中海地区(MED)、欧洲中西部(WCE)、欧洲北部(NEU)和中亚五国本地(CA),起源于这些源区的气团所提供的水汽贡献占比均超过了7%,尤其是北大西洋和地中海源区气团的水汽贡献占比超过了15%(图6(b))。从4次干旱事件的合成分析看(图6(c)),地中海地区是导致中亚五国生长季干旱期间水汽亏缺的关键轨迹源区,起源于该地的气团对中亚五国的水汽贡献占比显著减少,降幅超过1%。具体到各次干旱事件,地中海气团提供的水汽贡献在1975、2012年和2021年事件中表现为一致的显著下降(图6(c)),这与此前基于水汽通道的分析结果相一致,即这三次事件期间沿西南风通道(起源于地中海)输送的水汽占比减少(图5(b)(d)(e))。此外,欧洲中西部气团和撒哈拉沙漠(SAH)气团在1975年和2012年事件期间所贡献的水汽也显著减少。1977年干旱事件表现出不同的特点,欧洲北部和北大西洋是水汽贡献减少最突出的气团源区(图6(c));与之相应的是,西北风通道(起源于欧洲北部)与远距离西风带通道(起源于北大西洋)的水汽贡献占比在



CA:中亚五国本地;GIC:格陵兰/冰岛;NEU:欧洲北部;WCE:欧洲中西部;EEU:欧洲东部;NWN:北美洲西北部;MED:地中海地区;SAH:撒哈拉沙漠;RAR:俄罗斯极区;NEN:北美洲东北部;WSB:西西伯利亚;WCA:中亚西部;ARP:阿拉伯半岛;ARO:北冰洋;NAO:北大西洋;ENA:北美洲东部;WNA:北美洲西部;CNA:北美洲中部;NCA:中美洲北部;SCA:中美洲南部;CAR:加勒比地区;NWS:南美洲西北部;NSA:南美洲北部;NES:南美洲东北部;SAM:南美洲季风区;SWS:南美洲西南部;SES:南美洲东南部;SSA:南美洲南部;WAF:西非;CAF:中非;NEAF:东非北部;SEAF:东非南部;WSAF:南非西部;ESAF:南非东部;MDG:马达加斯加;ESB:东西伯利亚;RFE:俄罗斯远东;ECA:中亚东部;TIB:青藏高原;EAS:东亚;SAS:南亚;SEA:东南亚;NAU:澳大利亚北部;CAU:澳大利亚中部;EAU:澳大利亚东部;SAU:澳大利亚南部;NZ:新西兰;EAN:南极洲东部;WAN:南极洲西部;NPO:北太平洋;EPO:赤道太平洋;SPO:南太平洋;EAO:赤道大西洋;SAO:南大西洋;ARS:阿拉伯海;BOB:孟加拉湾;EIO:赤道印度洋;SIO:南印度洋;SOO:南大洋

图 6 中亚五国生长季干旱事件的主要气团源区及其水汽贡献

(a)参考 IPCC 气候分区划分的 59 个气团源区;(b)生长季期间各源区对中亚五国气候态时期(1981—2010 年)的平均水汽贡献占比(仅显示贡献超过 1% 的气团源区);(c)图为(b)图中气团源区在生长季干旱事件中的水汽贡献占比相对于气候平均态的距平,*表示通过显著性检验($p<0.05$,基于双尾 Student's t 检验)

Fig. 6 Major air parcel source regions and their moisture contributions during growing-season droughts in the five Central Asian countries

Panel (a) shows the 59 air parcel source regions based on the IPCC climate reference regions; Panel (b) shows the climatological mean (1981—2010) moisture contribution percentages of each source region to the five Central Asian countries during the growing season, displaying only regions with contributions greater than 1%; Panel (c) shows the anomalies in moisture contribution percentages from the source regions in Panel (b) during the growing-season droughts relative to the climatological mean; * indicates statistically significant anomalies ($p<0.05$) based on a two-tailed Student's t-test

此次事件中也同步下降(图 5(c))。

3.3 水汽收支异常的物理驱动因子

为进一步探究生长季干旱事件期间导致中亚五国上空水汽亏缺的物理驱动因子,基于大气水汽收支方程进行拆解和量化分析。相对于气候平均态,生长季干旱期间定常涡旋主导的水汽输送变化显著强于瞬变涡旋(图 7(a)),使区域平均水汽收支以异常减少为主,是导致中亚五国水汽亏缺的主要物理驱动过程。定常涡旋主导的水汽收支变化可以分解为动力效应和热力效应的贡献,从区域平均结

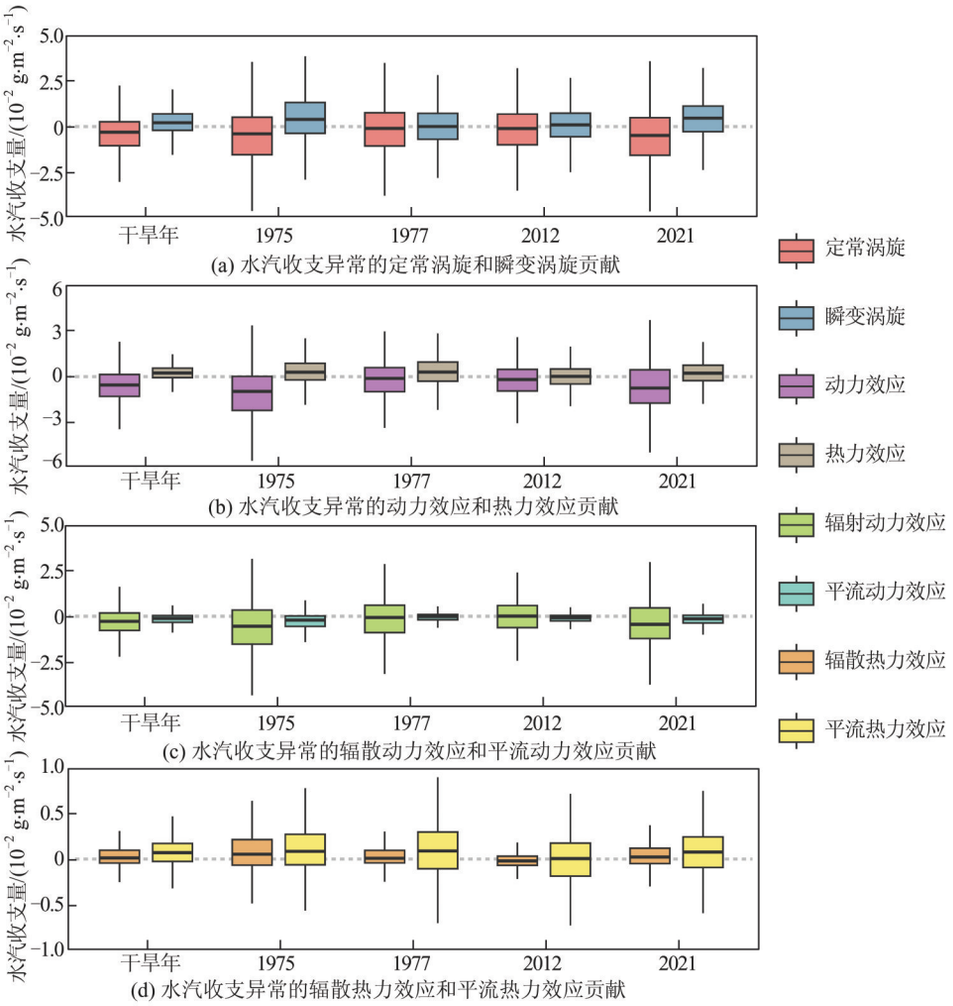


图7　中亚五国生长季干旱事件期间水汽输送异常的物理过程贡献

Fig. 7　Contributions of physical processes to anomalous moisture transport during growing-season droughts in the five Central Asian countries

果看(图7(b)),风场变化引起的动力效应导致的水汽收支变化在4次干旱期间均为负异常,而比湿变化引起的热力效应则以导致水汽正收支异常为主。因此,中亚五国生长季干旱期间的水汽异常减少主要受环流异常的动力作用影响。从大气平流和辐合/辐散过程看,辐散动力效应引起的水汽收支异常在动力效应中占主导地位(图7(c)),是导致中亚五国生长季干旱期间大气处于水汽亏缺状态的最主要物理驱动因子,尤其是在1975年和2021年两次干旱事件期间引起了较强的负水汽收支。对于以正水汽收支贡献为主的热力效应(图7(d)),平流过程在其中起到的作用比辐合/辐散过程更明显。

4　讨　论

本文定量解析了中亚五国生长季干旱期间导致水汽亏缺的动力效应驱动主导机制,强调了大气环流异常对干旱期间的水汽输送的决定性影响。研究发现,在4次生长季干旱期间,中亚五国北部均出现反气旋环流异常。强反气旋异常通过下沉气流抑制了水汽的抬升,并通过辐散动力效应使大气中缺乏充足的水汽形成降水。副热带西风的位置和强度与包括中亚五国在内的中亚降水密切相关[43]。从气候平均态看,西风控制中亚上空纬向水汽输送,将来自大西洋和高纬度欧洲大陆的水汽带到中亚。但在4次生长季干旱期间,受异常反气旋影响,中亚及其西侧的异常东风削弱了副热带西风强度,纬向水汽输送被抑制,输入中亚五国的水汽减少,导致干旱期间降水不足。中亚五国生长季干旱的发生还与多海域海温遥相关,与区域热力异常和人为活动等内、外强迫因子有关:

1)印度洋海温异常和青藏高原热效应通过副热带西风急流调节中亚五国降水。以往研究强调了印度洋海温异常和南亚夏季风强度对中亚降水

的调节作用,尤其是热带印度洋海盆尺度海温异常[44],通过副热带西风急流间接影响中亚降水。Wei等[45]发现南亚夏季风较强时(如1975年和1977年),中亚地区的降水减少。这是因为当印度洋海温较低时,南亚季风加强,印度降水受到影响,进而通过热力适应在中亚地区激发异常反气旋[46],对应副热带西风急流向北移动,导致中亚降水减少。然而受AMO(大西洋多年代际振荡)相变影响,印度洋海温异常与中亚夏季降水之间的相关性自1990年代以来有所减弱[47]。青藏高原热效应也会通过副热带西风急流等关键环流影响中亚降水。青藏高原中东部较强的地表感热异常(如2012年)导致南亚高压东移,并削弱了副热带西风急流[48],同时北非副高偏西偏北[49],水汽输送条件较差。

2)北大西洋和太平洋海温异常以及人为活动加剧了中亚五国生长季干燥趋势。Ren等[50]关于中亚夏季干旱的研究发现,北大西洋中高纬的海温异常会通过海-气相互作用,促进了北美至东亚的异常遥相关波列的形成,导致中亚上空受异常高压控制,激发异常反气旋环流,从而影响中亚地区干旱发生。Jiang和Zhou[12]还强调了IPO(太平洋多年代际振荡)对中亚生长季干旱的调节作用,IPO发生正负相变是导致1990年代以来中亚生长季呈现干燥趋势的原因之一,近几十年AMO的位相转换对加剧中亚干季干燥趋势也具有重要作用[8]。因此,对于1990年代以后的中亚五国生长季干旱,还需要考虑北大西洋海温和太平洋海温的影响。此外,人为活动(特别是温室气体排放)导致全球变暖加速了中亚地区地表蒸散,尤其是1990年代后变暖速度加快[51],放大了生长季期间的水汽亏缺,从而加剧了中亚生长季的干燥趋势[12]。尽管全球变暖会提高大气持水能力,但在中亚五国生长季干旱期间,与比湿变化有关的热力效应对水汽收支的作用有限,人为气候变暖更可能通过改变热力结构和影响气候系统[52-53]调控大气环流,从而间接影响中亚五国生长季干旱。

5 结 语

本文针对中亚五国的生长季(4—6月),利用SPEI指数识别出1961—2022年期间发生在生长季的最严重的4次干旱事件(1975、1977、2012年和2021年)。通过Brubaker、HYSPLIT、水汽溯源诊断、水汽收支分解等多种模型和方法,对4次典型生长季干旱期间的水汽输送异常情况进行溯源,并分析评估水汽输送异常的关键物理驱动因子。主要研究结论如下:

1)1961—2022年期间,中亚五国地区在生长季呈显著干燥趋势,2001年以后频繁发生干旱事件,1975、1977、2012年和2021年6月的SPEI-3值均低于−1.0,达到了中度甚至重度(2021年6月SPEI-3低于−1.5)干旱水平。在4次干旱发生期间,受北侧异常反气旋影响,中亚五国部分地区的水汽辐散相对于气候平均态显著加强,沿西风带至中亚五国的水汽输送被抑制,缺乏充足水汽来形成降水。

2)平流输入水汽和局地蒸发水汽对中亚五国生长季降水均具有重要影响。在4次生长季干旱期间,外部输入水汽的贡献减少是中亚五国降水不足的主要原因,导致了约64%的降水减少。蒸发再循环水汽所贡献的降水量显著下降,尤其是在1975年和2021年,进一步加剧了中亚五国的降水不足,从而导致更严重的生长季干旱。

3)在生长季期间,西北风通道、远距离西风通道、西南风通道和中亚陆地通道是向中亚五国输送水汽的关键水汽通道,其中中亚陆地通道的贡献最高(32.26%)。生长季干旱期间的水汽亏缺主要源于里海和土库曼斯坦地区的水汽贡献减少,导致沿西南风通道(1975、2012年和2021年)或沿西北风通道和远距离西风通道(1977年)输送的水汽严重不足。与水汽通道的异常模式对应,水汽贡献显著减少的气团源区可分别追溯至地中海地区(1975、2012年和2021年)以及欧洲北部和北大西洋(1977年)。

4)中亚五国生长季干旱期间的水汽收支变化几乎完全受定常涡旋影响,大气水汽亏缺主要由定常涡旋的动力效应部分导致。其中,辐散动力效应引起的水汽收支负异常较平流动力效应更明显,是导致生长季干旱期间水汽亏缺的主导物理驱动因子。

参考文献:

[1] 胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊, 等. 中亚(五国)干旱生态地理环境特征[J]. 干旱区研究, 2014, **31**(1): 1-12. DOI:10.13866/j.azr.2014.01.001.
HU R J, JIANG F Q, WANG Y J, *et al*. Arid ecological and geographical conditions in five countries of central Asia [J]. *Arid Zone Research*, 2014, **31**(1): 1-12. DOI:10.13866/j.azr.2014.01.001(Ch).

[2] CHEN X, WANG S S, HU Z Y, *et al*. Spatiotemporal characteristics of seasonal precipitation and their relationships with ENSO in Central Asia during 1901-2013[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, **28**(9): 1341-

1368. DOI:10.1007/s11442-018-1529-2.

[3] ZHU Y C, YANG P, XIA J, *et al*. Drought propagation and its driving forces in central Asia under climate change [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, **636**: 131260. DOI:10.1016/j.jhydrol.2024.131260.

[4] 郭利丹, 周海炜, 夏自强, 等. 丝绸之路经济带建设中的水资源安全问题及对策[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, **25**(5): 114-121. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2104.2015.05.015.
GUO L D, ZHOU H W, XIA Z Q, *et al*. Water resources security and its countermeasure suggestions in building silk road economic belt[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, **25**(5): 114-121. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2104.2015.05.015(Ch).

[5] FENG K T, CAO Y P, DU E J, *et al*. Spatiotemporal dynamics of drought and the ecohydrological response in central Asia[J]. *Remote Sensing*, 2025, **17**(1): 166. DOI: 10.3390/rs17010166.

[6] VARIS O. Resources: Curb vast water use in central Asia [J]. *Nature*, 2014, **514**(7520): 27-29. DOI: 10.1038/514027a.

[7] 王慧敏, 翟雪玲. 中国与中亚五国农业合作的潜力研究[J]. 经济研究参考, 2017(31): 43-51. DOI:10.16110/j.cnki.issn2095-3151.2017.31.012.
WANG H M, ZHAI X L. Study on the potential of agricultural cooperation between China and five central Asian countries[J]. *Review of Economic Research*, 2017(31): 43-51. DOI:10.16110/j.cnki.issn2095-3151.2017.31.012(Ch).

[8] REN Y, YU H P, LIU C X, *et al*. Attribution of dry and wet climatic changes over central Asia[J]. *Journal of Climate*, 2022, **35**(5): 1399-1421. DOI:10.1175/jcli-d-21-0329.1.

[9] MOHAMMAT A, WANG X H, XU X T, *et al*. Drought and spring cooling induced recent decrease in vegetation growth in Inner Asia [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, **178-179**: 21-30. DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.09.014.

[10] HUA L J, ZHAO T B, ZHONG L H. Future changes in drought over Central Asia under CMIP6 forcing scenarios[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, **43**: 101191. DOI:10.1016/j.ejrh.2022.101191.

[11] GUO H, HE S F, LI M, *et al*. Future changes of drought characteristics in Coupled Model Intercomparison Project phase 6 Shared Socioeconomic Pathway scenarios over Central Asia [J]. *International Journal of Climatology*, 2022, **42**(7): 3888-3908. DOI:10.1002/joc.7450.

[12] JIANG J, ZHOU T J. Agricultural drought over water-scarce Central Asia aggravated by internal climate variability [J]. *Nature Geoscience*, 2023, **16**(2): 154-161. DOI:10.1038/s41561-022-01111-0.

[13] BOTHE O, FRAEDRICH K, ZHU X H. Precipitation climate of Central Asia and the large-scale atmospheric circulation[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2012, **108**(3): 345-354. DOI:10.1007/s00704-011-0537-2.

[14] YAN D N, XU H, LAN J H, *et al*. Solar activity and the westerlies dominate decadal hydroclimatic changes over arid Central Asia[J]. *Global and Planetary Change*, 2019, **173**: 53-60. DOI:10.1016/j.gloplacha.2018.12.006.

[15] 赵文清, 马耀明, 曹殿斌. 中亚干旱地区降水异常及其影响机制研究[J]. 大气科学学报, 2023, **46**(1): 18-29. DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20221115001.
ZHAO W Q, MA Y M, CAO D B. Review of increasing precipitation in Central Asia and its possible mechanism[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2023, **46**(1): 18-29. DOI:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20221115001(Ch).

[16] 高洁, 赵勇, 姚俊强, 等. 气候变化背景下中亚干旱区大气水分循环要素时空演变[J]. 干旱区研究, 2022, **39**(5): 1371-1384. DOI:10.13866/j.azr.2022.05.04.
GAO J, ZHAO Y, YAO J Q, *et al*. Spatiotemporal evolution of atmospheric water cycle factors in arid regions of Central Asia under climate change[J]. *Arid Zone Research*, 2022, **39**(5): 1371-1384. DOI:10.13866/j.azr.2022.05.04(Ch).

[17] BRUBAKER K L, ENTEKHABI D, EAGLESON P S. Estimation of continental precipitation recycling[J]. *Journal of Climate*, 1993, **6**(6): 1077-1089. DOI:10.1175/1520-0442(1993)006<1077:EOCPR>2.0.CO;2.

[18] 李永生, 张丽霞, 王波. 局地蒸发和外部水汽输送对松花江流域夏季降水的贡献[J]. 大气科学, 2020, **44**(3): 611-624. DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.1909.19177.
LI Y S, ZHANG L X, WANG B. Contributions of local and remote water vapor transport to precipitation variations over Songhua River Basin[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2020, **44**(3): 611-624. DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.1909.19177(Ch).

[19] 赵丹, 张丽霞, 周天军. CMIP6模式对中国东部地区水循环的模拟能力评估[J]. 大气科学, 2022, **46**(3): 557-572. DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.2106.21030.
ZHAO D, ZHANG L X, ZHOU T J. Performance assessment of CMIP6 model in simulating the water cycle over East China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2022, **46**(3): 557-572. DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.2106.21030(Ch).

[20] GUO L, KLINGAMAN N P, DEMORY M E, *et al*. The contributions of local and remote atmospheric moisture fluxes to East Asian precipitation and its variability[J]. *Climate Dynamics*, 2018, **51**(11): 4139-4156. DOI: 10.1007/s00382-017-4064-4.

[21] YAO J Q, CHEN Y N, ZHAO Y, *et al*. Climatic and

associated atmospheric water cycle changes over the Xinjiang, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, **585**: 124823. DOI:10.1016/j.jhydrol.2020.124823.

[22] ZHAO Y, ZHOU T J. Interannual variability of precipitation recycle ratio over the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, **126**(2): e2020JD033733. DOI:10.1029/2020JD033733.

[23] GUAN Y S, GU X H, SLATER L J, *et al*. Tracing anomalies in moisture recycling and transport to two record-breaking droughts over the Mid-to-Lower Reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, **609**: 127787. DOI:10.1016/j.jhydrol.2022.127787.

[24] 杨浩, 江志红, 刘征宇, 等. 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, 2014, **38**(5): 965-973. DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13228.
YANG H, JIANG Z H, LIU Z Y, *et al*. 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*, 2014, **38**(5): 965-973. DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13228(Ch).

[25] 庄晓翠, 李博渊, 赵江伟, 等. 基于HYSPLIT模式分析的塔克拉玛干沙漠南缘暴雨水汽特征[J]. 气象, 2022, **48**(3): 311-323. DOI:10.7519/j.issn.1000-0526.2022.011801.
ZHUANG X C, LI B Y, ZHAO J W, *et al*. Water vapor characteristics of rainstorm in southern Taklimakan Desert based on HYSPLIT model analysis[J]. *Meteorological Monthly*, 2022, **48**(3): 311-323. DOI:10.7519/j.issn.1000-0526.2022.011801(Ch).

[26] GONG G Q, ZHANG S Y, LI B N, *et al*. Anomalous water vapor circulation in an extreme drought event of the mid-reaches of the Lancang-Mekong River Basin[J]. *Earth's Future*, 2024, **12**(8): e2023EF004292. DOI: 10.1029/2023EF004292.

[27] SEAGER R, NAIK N, VECCHI G A. Thermodynamic and dynamic mechanisms for large-scale changes in the hydrological cycle in response to global warming[J]. *Journal of Climate*, 2010, **23**(17): 4651-4668. DOI: 10.1175/2010JCLI3655.1.

[28] ZENG L L, SCHMITT R W, LI L F, *et al*. Forecast of summer precipitation in the Yangtze River Valley based on South China Sea springtime sea surface salinity[J]. *Climate Dynamics*, 2019, **53**(9): 5495-5509. DOI:10.1007/s00382-019-04878-y.

[29] LI J, ZHAO Y, CHEN D L, *et al*. Future precipitation changes in three key sub-regions of East Asia: the roles of thermodynamics and dynamics[J]. *Climate Dynamics*, 2022, **59**(5): 1377-1398. DOI:10.1007/s00382-021-06043-w.

[30] WEN N, LIU S J, LI L Z X. Diagnosing the dynamic and thermodynamic effects for the exceptional 2020 summer rainy season in the Yangtze River valley[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2022, **36**(1): 26-36. DOI: 10.1007/s13351-022-1126-2.

[31] HAN Z X, SU T, HUANG B C, *et al*. Changes in global monsoon precipitation and the related dynamic and thermodynamic mechanisms in recent decades[J]. *International Journal of Climatology*, 2019, **39**(3): 1490-1503. DOI:10.1002/joc.5896.

[32] YIN Y X, KE H, TU Y D, *et al*. Changes of summer meteorological drought and their relationship with the dry and wet circulation patterns in the Huai River basin, China[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, **52**: 101710. DOI:10.1016/j.ejrh.2024.101710.

[33] SHENG B S, WANG H L, LI H Y, *et al*. Thermodynamic and dynamic effects of anomalous dragon boat water over South China in 2022[J]. *Weather and Climate Extremes*, 2023, **40**: 100560. DOI:10.1016/j.wace.2023.100560.

[34] HERSBACH H, BELL B, BERRISFORD P, *et al*. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, **146**(730): 1999-2049. DOI: 10.1002/qj.3803.

[35] STEIN A F, DRAXLER R R, ROLPH G D, *et al*. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, **96**(12): 2059-2077. DOI: 10.1175/BAMS-D-14-00110.1.

[36] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration Index[J]. *Journal of Climate*, 2010, **23**(7): 1696-1718. DOI:10.1175/2009JCLI2909.1.

[37] FLEMING Z L, MONKS P S, MANNING A J. Review: Untangling the influence of air-mass history in interpreting observed atmospheric composition[J]. *Atmospheric Research*, 2012, **104-105**: 1-39. DOI:10.1016/j.atmosres.2011.09.009.

[38] NUMAGUTI A. Origin and recycling processes of precipitating water over the Eurasian continent: Experiments using an atmospheric general circulation model[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, **104**(D2): 1957-1972. DOI:10.1029/1998JD200026.

[39] SODEMANN H, SCHWIERZ C, WERNLI H. Interannual variability of Greenland winter precipitation sources: Lagrangian moisture diagnostic and North Atlantic Oscillation influence[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, **113**(D3): 2007JD008503. DOI:10.1029/

2007JD008503.

[40] GAFFNEY S J, ROBERTSON A W, SMYTH P, *et al*. Probabilistic clustering of extratropical cyclones using regression mixture models[J]. *Climate Dynamics*, 2007, **29**(4): 423-440. DOI:10.1007/s00382-007-0235-z.

[41] HAN Z X, SU T, ZHANG Q, *et al*. Thermodynamic and dynamic effects of increased moisture sources over the Tropical Indian Ocean in recent decades [J]. *Climate Dynamics*, 2019, **53**(11): 7081-7096. DOI: 10.1007/s00382-019-04977-w.

[42] ITURBIDE M, GUTIÉRREZ J M, ALVES L M, *et al*. An update of IPCC climate reference regions for subcontinental analysis of climate model data: Definition and aggregated datasets[J]. *Earth System Science Data*, 2020, **12**(4): 2959-2970. DOI:10.5194/essd-12-2959-2020.

[43] 任国强, 赵勇. 中亚副热带西风急流的年代际变化及其与环流和降水的联系[J]. 气候与环境研究, 2023, **28**(4): 356-366. DOI:10.3878/j.issn.1006-9585.2022.21196.
REN G Q, ZHAO Y. Decadal variability of the subtropical westerly jet and its association with circulation and rainfall over central Asia[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2023, **28**(4): 356-366. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9585.2022.21196(Ch).

[44] MENG L X, ZHAO Y, LI M G. Effects of whole SST anomaly in the tropical Indian Ocean on summer rainfall over central Asia [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, **9**: 738066. DOI:10.3389/feart.2021.738066.

[45] WEI W, ZHANG R H, WEN M, *et al*. Relationship between the Asian westerly jet stream and summer rainfall over central Asia and North China: Roles of the Indian Monsoon and the south Asian high[J]. *Journal of Climate*, 2017, **30**(2): 537-552. DOI:10.1175/jcli-d-15-0814.1.

[46] WEI Y, YU H P, LI S L, *et al*. Impact of north Indian atmospheric diabatic heating on summer precipitation in central Asia[J]. *Journal of Climate*, 2023, **36**(13): 4345-4362. DOI:10.1175/jcli-d-22-0928.1.

[47] WEI Y, YU H P. The interdecadal weakening of the relationship between Indian Ocean Sea surface temperature and summer precipitation in central Asia [J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, **51**(4): e2023GL107371. DOI:10.1029/2023GL107371.

[48] WANG H, ZHANG J, CHEN L, *et al*. Relationship between summer extreme precipitation anomaly in Central Asia and surface sensible heat variation on the Central-Eastern Tibetan Plateau[J]. *Climate Dynamics*, 2022, **59**(3): 685-700. DOI:10.1007/s00382-022-06148-w.

[49] 卢星, 赵勇. 北非副热带高压与中亚夏季降水的关系[J]. 干旱区地理, 2022, **45**(4): 1050-1060. DOI:10.12118/j.issn.1000-6060.2021.508.
LU X, ZHAO Y. Relationships between North Africa subtropical high and summer precipitation over Central Asia[J]. *Arid Land Geography*, 2022, **45**(4): 1050-1060. DOI:10.12118/j.issn.1000-6060.2021.508(Ch).

[50] REN Y, YU H P, HUANG J P, *et al*. Impact of mid-high latitude circulation and surface thermal forcing on drought events in Central Asia[J]. *Climate Dynamics*, 2025, **63**(2): 90. DOI:10.1007/s00382-024-07577-5.

[51] PENG D D, ZHOU T J, ZHANG L X, *et al*. Detecting human influence on the temperature changes in Central Asia [J]. *Climate Dynamics*, 2019, **53**(7): 4553-4568. DOI:10.1007/s00382-019-04804-2.

[52] COUMOU D, DI CAPUA G, VAVRUS S, *et al*. The influence of Arctic amplification on mid-latitude summer circulation[J]. *Nature Communications*, 2018, **9**: 2959. DOI:10.1038/s41467-018-05256-8.

[53] 胡婷, 孙颖. IPCC AR6报告解读:人类活动对气候系统的影响[J]. 气候变化研究进展, 2021, **17**(6): 644-651. DOI:10.12006/j.issn.1673-1719.2021.205.
HU T, SUN Y. Interpretation of IPCC AR6 on human influence on the climate system[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2021, **17**(6): 644-651. DOI:10.12006/j.issn.1673-1719.2021.205(Ch).

□