卢珊，于海鹏，任钰，等，2026. 基于水循环过程的陕西地区气候干湿变化研究[J].高原气象，45(5)：1341−1353. Lu Shan，Yu Haipeng，Ren Yu，et al.，2026. Study on climatic aridity and humidity variations based on hydrologic cycle process over Shaanxi [J].Plateau Meteorology，45(5)：1341−1353. DOI：10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2026. 00012. CSTR：32265. 14. gyqx. CN62−1061/P. 2026. 00012.

基于水循环过程的陕西地区气候干湿变化研究

卢 珊[1,4]，于海鹏[2]，任 钰[3]，张宏芳[4]，沈姣姣[4]，姚 静[5]

（1. 泾阳县气象局，陕西 咸阳 713700；
2. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学与冻土工程全国重点实验室，那曲高寒气候环境西藏自治区野外科学观测研究站，甘肃 兰州 730000；
3. 兰州大学 大气科学学院，甘肃 兰州 730000；
4. 陕西省气象服务中心，陕西 西安 710014；
5. 陕西省气象台，陕西 西安 710014）

摘要：由气候干湿变化所引发的水资源问题是影响人民生存、生态安全和可持续发展的核心问题。近年来陕西地区气温和降水发生了显著变化，准确识别水文气候条件的变化并了解其驱动机制，对水资源管理具有重要意义。本文从水循环过程出发，使用降水蒸散差综合分析了陕西地区气候干湿变化特征，并总结了导致年代际干湿变化的物理机制。结果表明，夏季陕西地区在1981—2022年存在着气候变干趋势，中南部的气候变干较为突出，进一步分析发现陕西夏季气候干湿特征在1996年前后经历了由湿到干的明显转变。分析气候因子对突变前后陕西夏季蒸散发的贡献发现，水汽压差增大对夏季蒸散发增强的贡献最大达53. 0%，净辐射和气温增加对蒸散发增强的贡献占28. 3%和18. 5%。各气候因子变化均使得陕西北部夏季蒸散发减弱，中南部夏季蒸散发加强。但由于降水下降的幅度较蒸散发下降幅度更大，从而造成了降水蒸散差在陕西各地呈下降趋势并导致夏季气候变干。水汽输送与陕西夏季气候干湿变化关系密切，1997—2022年夏季陕西及其周边地区受反气旋式偏差环流影响，水汽以辐散为主，水汽净收入明显减少。北大西洋西北部年代际海温异常对夏季陕西地区气候干湿变化有重要影响。当北大西洋西北部年代际海温偏暖时，会激发横跨欧亚大陆的大气波列并向下游传播，使陕西及周边地区出现位势高度正异常和反气旋式偏差环流，进而导致陕西夏季水汽辐散和气候趋于变干。

关键词：气候干湿变化；水循环；水汽输送；年代际信号

文章编号：1000−0534(2026)05−1341−13 **中图分类号**：P426 **文献标识码**：A

DOI：10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2026. 00012

CSTR: 32265. 14. gyqx. CN62−1061/P. 2026. 00012

1 引言

在全球气候变暖背景下，区域气候干湿格局的演变深刻影响着生态安全与农业的可持续发展。自施雅风等(2002，2003)提出中国西北气候可能转向暖湿化的推断以来，这一议题持续受到广泛关注。然而西北地区幅员辽阔、内部地理与气候差异显著，其暖湿化趋势并非均一。大量研究表明，近年来西北整体呈现暖湿化，西北地区西部等典型干旱区域暖湿化趋势表现为显著且稳定的特征(李庆祥等，2010；杜懿等，2021；李欣，2021；姜旭涛等，2026)，但其东部地区的干湿演变则呈现出复杂的时空差异和阶段性特征(翟禄新，2008；刘莉红等，2010；张秀娟，2012；王亚萍等，2023；朱姜

收稿日期：2025-05-15；**定稿日期**：2026-01-15

资助项目：陕西省自然科学基础研究计划项目(2023-JC-QN-0285)；中国气象局雷达气象重点开放实验室开放课题(2025LRM-B04)；中国科学院西部之光交叉团队重点实验室专项(xbzg-zdsys-202409)；中央引导地方科技发展项目(24ZYQA031)

作者简介：卢珊(1985—)，女，陕西石泉人，正高级工程师，主要从事气候变化与极端天气研究. E-mail：lushan660@163. com

通信作者：于海鹏(1987—)，男，山东临沂人，研究员，主要从事寒旱区气候变化研究. E-mail：yuhp@lzb. ac. cn

© Editorial Department of *Plateau Meteorology* (CC BY-NC-ND)

韬等，2023）。陕西地处西北地区东部，位于东南季风边缘与西北干旱区的过渡带，地形地貌复杂，属于典型的生态脆弱区，这使得在陕西地区开展气候干湿变化研究显得尤为必要。

针对陕西及所在区域的气候变化，已有研究普遍证实了该区域气候的暖化趋势（屈振江等，2010；万相均等，2013），但干湿变化更为复杂（彭艳等，2016；朱晓华等，2019；赵爱莉等，2020；袁瑞瑞等，2021；刘元波等，2022；刘玉鹏等，2025）。有研究指出，包括陕西在内，半干旱区降水量和湿润指数趋于减小，浅层土壤在逐渐变干（马鹏里等，2020；肖潇等，2023；朱飙，2022；朱飙等，2023；杨雅青等，2024）。黄河流域气候变干主要出现在春秋两季，且在20世纪末至21世纪初存在着从暖干向暖湿的突变性转变（巩杰等，2022；郝睿超等，2024；程泳铭等，2025）。但是现有的研究多聚焦于降水等单一气象要素或简化指标，而从区域水分平衡理念出发，整合降水、蒸散发等水循环全过程要素，综合分析干湿变化特征的研究相对不足。在形成机理方面，除了有关干湿年际变率成因的分析之外（Zhou and Huang，2010；王远皓等，2012；赵强等，2013；刘畅，2018；卢珊等，2018），研究日益关注年代际尺度的驱动因素（Peng and Zhou，2017；王鹏祥等，2007；王鹏祥，2008；王澄海等，2021；张强等，2023）。众多研究强调了ENSO、PDO、AMO等海气遥相关型对区域气候年代际变率的影响（贾艳青和张勃，2020；刘晨汐，2022；符淙斌和马柱国，2023）。有研究发现陕西冬季干湿状况与ENSO和AO存在多尺度的显著相关关系（Liu et al.，2018），而PDO和AMO的协同作用被指出是决定干旱半干旱降水年代际特征的主因，能通过激发遥相关波列导致我国干旱区夏季降水出现西湿东干的反相变化。虽然大尺度气候模态的响应已被识别，但将其与陕西区域干湿变化的年代际转化特征相耦合，并阐明其影响机理的研究仍较为鲜见，特别是针对水循环各环节对干湿变化贡献的定量化分析不足。

因此，本研究以区域水分平衡为依据，从水循环的全过程综合分析陕西地区气候干湿变化特征，并在此基础上重点探究大尺度海气遥相关对陕西干湿年代际变率的调控机理，以期深化对区域气候系统与水循环相互作用的理解，为应对气候变化、保障陕西及类似过渡带生态安全和可持续发展提供科学参考。

2 数据来源和方法介绍

2.1 数据来源

本文所使用的ERA5（the fifth generation of the ECMWF Reanalysis）逐月再分析资料源自欧洲中期天气预报中心（ECMWF）全球气候的第五代大气再分析数据集（下载网址：https：//cds. climate. copernicus. eu/），近年来被广泛地应用于西北地区气候变化及环境监测研究等相关领域（李培荣等，2022；马荣君等，2022；王勇等，2024）。相关研究指出相比于ECMWF的第四代再分析产品ERA-Interim，ERA5的数据质量有很大的提升（Hersbach et al.，2020；Nogueira，2020）。文中所用资料长度从1981年1月至2022年12月，要素包括降水量P，2 m温度t_{2m}，2 m露点温度d_{2m}，地面净辐射str，地面净太阳辐射ssr，潜在蒸散发pev，蒸散发e，水平纬向风u，水平经向风v，地面气压sp，比湿rh，相对湿度sh，位势高度h，其中P、e、t_{2m}、d_{2m}、str、ssr、pev水平分辨率为0. 1°×0. 1°，u、v、rh、sh、h水平分辨率为0. 25°×0. 25°，在垂直方向上有11层（1000，925，850，800，700，600，500，400，300，200和100 hPa）。在使用ERA5逐月再分析资料前，利用陕西省99站地面气象监测数据对ERA5逐月再分析资料做评估发现，经双线性插值后的降水、气温、湿度、风速等再分析数据与实况监测数据的相关系数均在0. 9以上，能较好地反映各类要素的季节变化和气候特征。

文中所用的同期逐月全球海洋最优插值温度场数据集OISST（Optimum Interpolation Sea Surface Temperature，下载网址：https：//coastwatch. pfeg. noaa. gov/）是美国国家海洋大气局（NOAA）利用卫星、浮标、船测等数据，在COADS（Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set）资料基础上改进而成（Reynolds et al.，2002，2007），水平分辨率为0. 25°×0. 25°。

文中涉及的地图是基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS（2016）1569号的中国地图制作，底图无修改。

2.2 方法介绍

2.2.1 BUDYKO-PENMAN水分收支

Budyko假设是目前国际上主流的水文−气候−依赖关系理论框架（Budyko，1974）。该假设认为实际蒸散发量主要受水分供应（降水量）和能量供应（潜在蒸散发量）的控制。在Budyko假设的基础

上，Choudhury（1999）推导出水热耦合平衡方程，并被广泛应用于地表水和能量平衡。

$$E = \frac{P \times \mathrm{E}T_0}{(P^n + ET_0^n)^{\frac{1}{n}}} \tag{1}$$

式中：E为多年平均实际蒸散发量（单位：mm）；P为多年平均降水量（单位：mm）；ET_0是多年平均潜在蒸散发量（单位：mm）；n为反映流域下垫面特征的参数。

另一个基于Budyko假设被广泛应用的方程（Fu，1981）如下

$$E = P + E_0 - (P^\omega + E_0^\omega)^{1/\omega} \tag{2}$$

式中：ω为一个类似于n的参数。Yang et al.（2008）研究式（1）和式（2）后发现ω和n之间存在着线性关系。

$$\omega = n + 0.72 \tag{3}$$

通过对ω的计算可以求得下垫面参数n。由于研究时段相对较短，因此在研究中不考虑n的变化。基于上述假定，E的整体差异可以表示为：

$$dE = \frac{\partial E}{\partial P}dP + \frac{\partial E}{\partial E_0}dE_0 \tag{4}$$

式中：E_0可用粮农组织推荐的彭曼公式（Allen et al.，1998）进行计算：

$$E_0 = \frac{[(R_\mathrm{n} - G)\Delta(T_\mathrm{a}) + \rho_\mathrm{a}C_\mathrm{p}DC_\mathrm{H}|u|]}{[\Delta(T_\mathrm{a}) + \gamma(1 + r_\mathrm{s}C_\mathrm{H}|u|)]} \Big/ L_v \tag{5}$$

式中：R_n为地表净辐射（单位：MJ·m^{-2}·d^{-1}）；G为土壤热通量（单位：MJ·m^{-2}·d^{-1}）；T_a为2 m高度的平均气温（单位：K）；D为水汽压差（单位：Pa）；u为2 m高度的风速（单位：m·s^{-1}）；γ为干湿表常数（单位：Pa·K^{-1}）；ρ_a为空气密度（单位：kg·m^{-3}）；C_p为常压下比热（单位：J·kg^{-1}·K^{-1}）；$\Delta(T_\mathrm{a})$饱和水汽压−温度曲线斜率（单位：Pa·K^{-1}）；L_v为汽化潜热（单位：MJ·kg^{-1}）；r_s为总表面阻力（单位：s·m^{-1}）；C_H为总体输送系数。

由上可见，E_0为T_a、D、u和$R_\mathrm{n} - G$的函数，T_a、D、u和$R_\mathrm{n} - G$对E_0变化的贡献可以表示为：

$$\begin{aligned} dE_0 \approx{}& \frac{\partial E_0}{\partial(R_\mathrm{n} - G)}d(R_\mathrm{n} - G) + \frac{\partial E_0}{\partial T_a}dT_\mathrm{a} \\ &+ \frac{\partial E_0}{\partial u}du + \frac{\partial E_0}{\partial D}dD \end{aligned} \tag{6}$$

式中：dE_0、$d(R_\mathrm{n} - G)$、dT_a、du、dD分别为E_0、$R_\mathrm{n} - G$、T_a、u和D在给定时期内的平均变化。$\partial E_0/\partial(R_\mathrm{n} - G)$、$\partial E_0/\partial T_a$、$\partial E_0/\partial u$、$\partial E_0/\partial D$为各要素对$E_0$的敏感性。$[\partial E_0/\partial(R_\mathrm{n} - G)]d(R_\mathrm{n} - G)$、$[\partial E_0/\partial T_a]dT_\mathrm{a}$、$[\partial E_0/\partial u]du$、$[\partial E_0/\partial D]dD$代表对$E_0$变化的贡献。各气候要素在$E$变化中的相对作用可以通过比较各要素的贡献来进行比较。

2.2.2　整层水汽输送通量

单位整层大气水汽通量$\mathcal{Q}$（单位：kg·m^{-1}·s^{-1}）的计算公式为：

$$\mathcal{Q} = -\frac{1}{g}\int_{p_\mathrm{s}}^{100}\vec{V}\cdot q\mathrm{d}p \tag{7}$$

上式分解成纬向和经向水汽输送通量$\mathcal{Q}_\lambda$和$\mathcal{Q}_\varphi$的计算公式如下：

$$\mathcal{Q}_\lambda = -\frac{1}{g}\int_{p_\mathrm{s}}^{100}u\cdot q\mathrm{d}p \tag{8}$$

$$\mathcal{Q}_\varphi = -\frac{1}{g}\int_{P_\mathrm{s}}^{100}v\cdot q\mathrm{d}p \tag{9}$$

式中：q为单位气柱的比湿（单位：×10^{-5} kg·kg^{-1}）；u和v分别为纬向风和经向风分量（单位：m·s^{-1}）；p_s是地面气压（单位：Pa）；g =9.8 m·s^{-2}是重力加速度。

2.2.3　水汽收支

通过以下公式（Feng and Zhou，2012；Xu et al.，2020）计算目标区域四边的水汽通量及净水汽通量：

$$\mathcal{Q}_\mathrm{S} = \int_{\lambda_\mathrm{W}}^{\lambda_\mathrm{E}}\mathcal{Q}_{\varphi_\mathrm{S}}a\cos\varphi_\mathrm{S}\mathrm{d}\lambda \tag{10}$$

$$\mathcal{Q}_\mathrm{N} = -\int_{\lambda_\mathrm{W}}^{\lambda_\mathrm{E}}\mathcal{Q}_{\varphi_\mathrm{N}}a\cos\varphi_\mathrm{N}\mathrm{d}\lambda \tag{11}$$

$$\mathcal{Q}_\mathrm{W} = \int_{\varphi_\mathrm{S}}^{\varphi_\mathrm{N}}\mathcal{Q}_{\lambda_\mathrm{W}}a\mathrm{d}\varphi \tag{12}$$

$$\mathcal{Q}_\mathrm{E} = -\int_{\varphi_\mathrm{S}}^{\varphi_\mathrm{N}}\mathcal{Q}_{\lambda_\mathrm{E}}a\mathrm{d}\varphi \tag{13}$$

$$\mathcal{Q}_\mathrm{T} = \mathcal{Q}_\mathrm{S} + \mathcal{Q}_\mathrm{N} + \mathcal{Q}_\mathrm{W} + \mathcal{Q}_\mathrm{E} \tag{14}$$

式中：$\mathcal{Q}_\mathrm{S}$、$\mathcal{Q}_\mathrm{N}$、$\mathcal{Q}_\mathrm{W}$、$\mathcal{Q}_\mathrm{E}$分别为南边界、北边界、西边界、东边界的水汽通量（单位：kg·m^{-1}·s^{-1}）；$\mathcal{Q}_\mathrm{T}$为研究区净水汽通量；λ_W代表西部边界的经度；λ_E为东部边界的经度；φ_S代表南部边界纬度；φ_N为北部边界的纬度；$\mathcal{Q}_{\lambda_\mathrm{W}}$和$\mathcal{Q}_{\lambda_\mathrm{E}}$代表通过西部和东部边界相应的纬向整层水汽通量；$\mathcal{Q}_{\varphi_\mathrm{S}}$和$\mathcal{Q}_{\varphi_\mathrm{N}}$为通过南部和北部边界的经向整层水汽通量；$a$ =6.37×10^6 m为地球平均半径。定义流入目标区域的水汽通量为正，流出的为负，净水汽通量为流入和流出的水汽通量和。

此外，文中采用M-K方法和累积距平方法进行气候突变检验，采用t检验进行年代际时间尺度差异和回归系数的显著性检验。

3　结果分析

3.1　干湿变化特征

考虑到陕西地区南北气候差异，统计分析了1981—2022年沿105°E—111°E平均的陕西地区气候干湿分布及变化趋势。陕西地区降水主要集中

在6—9月，且呈现出明显的南多北少的空间分布特征，降水大值中心位于关中南部及陕南地区（图略）。近年来，降水量在陕西地区整体上呈现出不显著的减少趋势，其中关中南部及陕南地区夏季降水量下降趋势最大，42 a累积减少12 mm以上[图1(a)]。陕西中南部地区的蒸散发同样强于北部，4—9月的蒸散相较其他月份更强（图略）。观察近年来的蒸散变化趋势发现，以34°N为界，陕西春夏季蒸散呈现出南增北减的变化趋势，且在夏季表现最为明显[图1(b)]。整体上看，各月降水蒸散差在陕西地区均为下降趋势，其中夏季陕南地区的下降最为明显[图1(c)]。

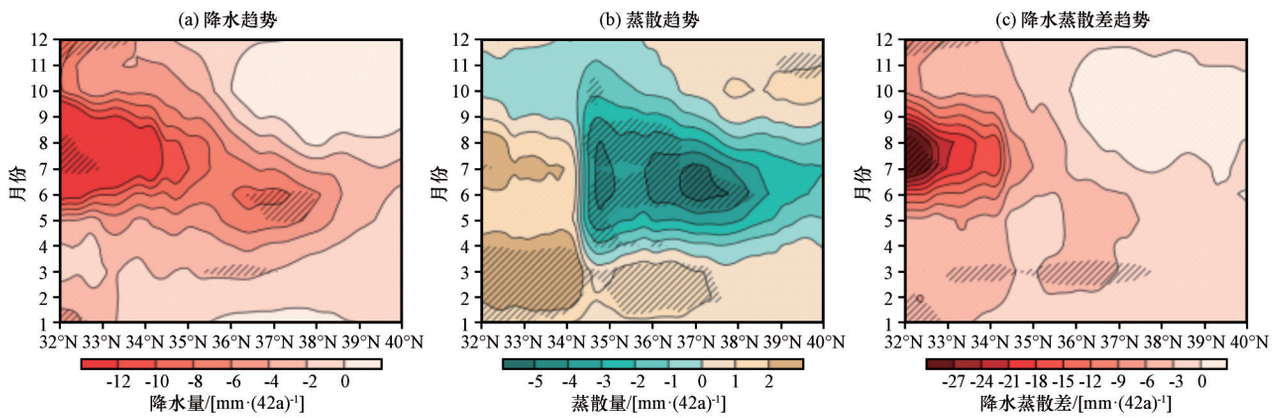


图1 1981—2022年陕西地区沿105°E—111°E平均的降水量、蒸散量及降水蒸散差变化趋势[单位：mm·(42a)$^{-1}$]

黑色阴影斜线表示变化通过0.05显著性检验

Fig. 1 The meridional changes along 105 °E—111°E in the precipitation, evapotranspiration, and precipitation-evapotranspiration of Shaanxi during 1981—2022. Unit: mm·(42a)$^{-1}$. The black shaded slash indicates that the changes are significant at the 0.05 level

针对近年来陕西地区夏季气候干湿特征的显著性变化，下文重点针对陕西夏季干湿气候特征进行分析和机理研究。从图2(a)可见，夏季总降水量在陕西全域表现为下降趋势，其中关中及陕南绝大

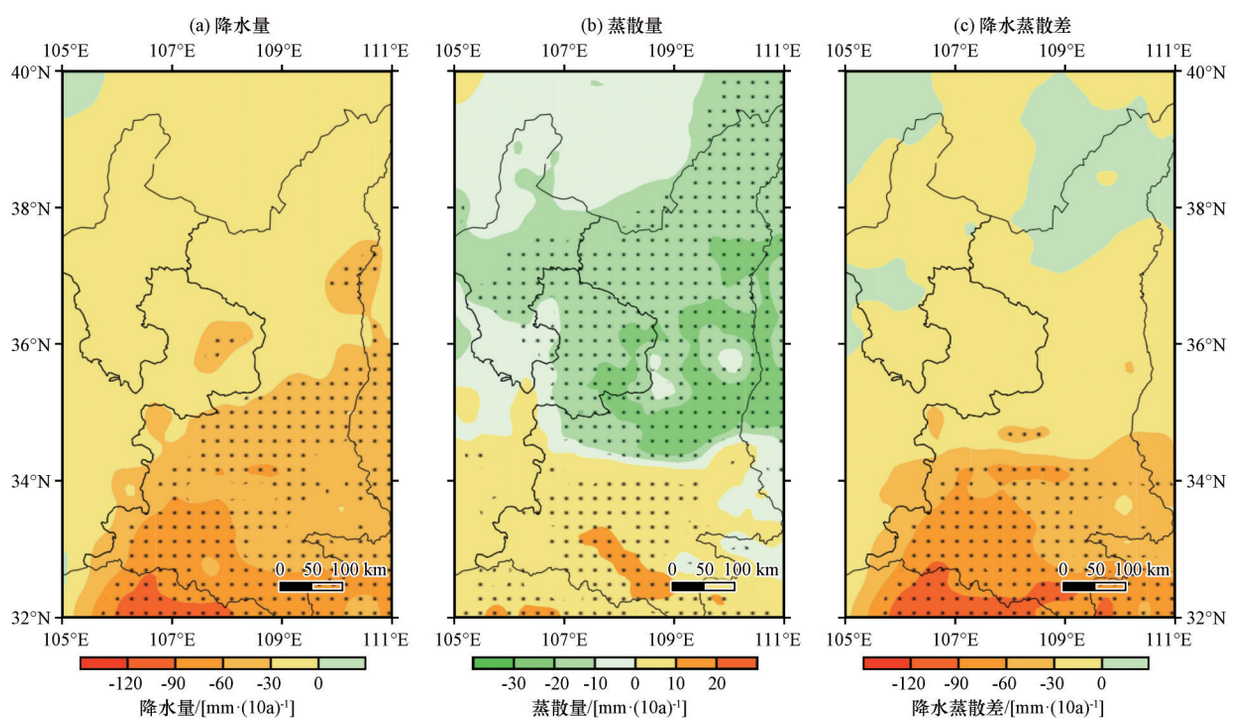


图2 1981—2022年夏季陕西地区降水量、蒸散量及降水蒸散差变化空间分布[单位：mm·(10a)$^{-1}$]

打点代表变化通过0.05显著性水平（下同）

Fig. 2 Variation of precipitation, evapotranspiration and precipitation-evapotranspitation for 1981—2022 in summer of Shaanxi. Unit: mm·(42a)$^{-1}$. The dots indicate changes are statistically significant at the 0.05 level (the same as after)

部分地区的下降趋势是显著的。夏季蒸散发在空间上表现为南北反向的变化特征，蒸散发在陕北及关中北部地区显著减少，同时在关中南部及陕南大部地区呈显著增加趋势[图2(b)]。夏季降水蒸散差在近些年的变化可以看到类似的分布特征[图2(c)]，除陕北北部部分地区外，陕西大部地区夏季气候都有变干趋势，其中关中南部及陕南地区的变干趋势显著。

观察陕西地区夏季降水蒸散差距平逐年变化曲线[图3(a)]可见，夏季降水蒸散差总体上表现为显著的下降趋势，在20世纪90年代末及本世纪初，经历了从正到负的转变。采用M-K方法对夏季降水蒸散差进行突变检验发现[图3(b)]，UF和UB曲线在20世纪80年代和90年代经历了数次相交，最后一次发生在1996年前后，此后UF曲线为一致的下降趋势，并在2014年达到显著性水平，因此可以确定陕西地区夏季降水蒸散差的突变性减少发生在1996年。此外，采用累积距平方法分析发现，1996年之前夏季降水蒸散差表现为一致的上升趋势，此后至今持续下降，这同样意味着降水蒸散差在1996年前后发生了明显的变化(图略)。因此将研究时段划分为1981—1996年和1997—2022年，并以此进行不同时段的水分收支分析，以期揭示导致这些变化的相关机制。

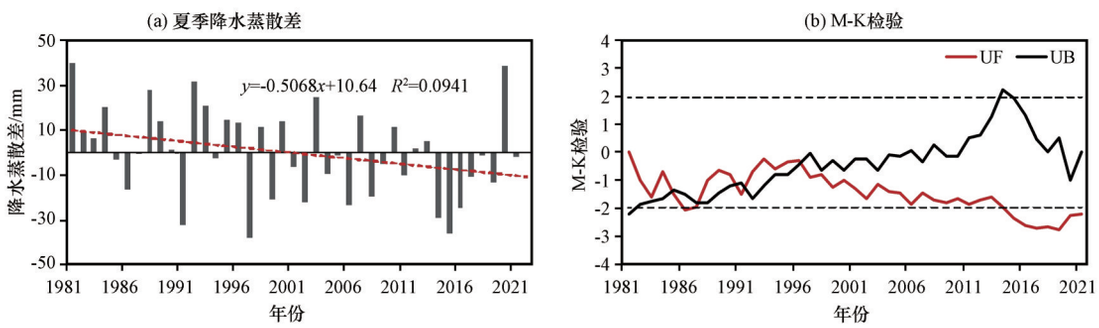


图3　陕西地区夏季降水蒸散差距平变化及其M-K检验

Fig. 3　Annual variation of precipitation-evapotranspiration anomalies and the Mann-Kendall test in summer of Shaanxi

3.2　夏季水分收支

蒸散发是水循环的关键变量之一，其长期变化直接影响区域水资源的时空分布格局。文中首先基于地表水平衡计算了陕西地区(105°E—111°E，32°N—40°N，下同)降水、气温、风速、水汽压差和净辐射这5种气候因子变化对突变前后陕西夏季蒸散发变化的平均贡献率。在整个区域平均上，水汽压差变化对陕西夏季蒸散发的影响最大，突变后区域平均水汽压差增大，其变化对夏季蒸散发增加的贡献达到53.0%。此外，净辐射和气温的变化对蒸散发的影响也很显著，突变后区域平均净辐射增加，同时气温升高，二者均使得夏季蒸散发增强，贡献率分别为28.3%和18.5%。降水变化同样使得夏季蒸散发增强，但其贡献率仅为0.9%。与此同时，风速变化是唯一使得陕西夏季蒸散发减弱的气候因子，贡献率−0.7%。

但在上一节中已提到夏季蒸散发在陕西不同地区明显的差异性变化特征，因此对各气候因子及其贡献的空间分布进行进一步的探讨。各地的夏季降水量在突变后均出现了明显减少，其中在陕南西南部及关中西部降幅较大，降水敏感性$\partial E/\partial P$以秦岭为界呈现出北正南负分布，这应该是因为在干旱半干旱地区，蒸散发主要由水分控制，降水的减少会直接导致蒸散发减少，而在湿润地区蒸散发由能量控制，降水减小对其影响有限。因此，降水变化使得陕西北部蒸散发增强，同时南部地区蒸散发减弱，但整体幅度均偏小[图4(a)，(f)，(k)]。气温在突变之后出现了显著的增温，其中陕北东北部及关中中部的增温最为强烈，部分地区增温超过1.4 K。夏季气温敏感性($\partial E/\partial T_a$)以秦岭山脉为界呈现出明显的南正北负分布特征，这可能是因为陕西中南部地区气候湿润，气温升高会通过多种机制协同促进蒸散发；而北部地区属于干旱半干旱气候，在水分受限的环境下，高温的正向效应往往被其加剧水分胁迫的负向效应所抵消或超越。受气温个别变化及敏感性影响，气温对夏季蒸散发变化的贡献[$(\partial E/\partial T_a)/dT_a$]表现为北负南正特征，也就是说气温的升高使得陕西北部地区蒸散发减小，同时使得中南部地区蒸散发加强[图4(b)，(g)，(l)]。水汽压差和净辐射在突变后均呈现出全域的增加趋势，且在陕北及关中北部的增幅较大[图4(n)，(o)]。在水分充足的条件下，水汽压差增加代表着大气对水汽的需求增加，有利于陆面中的水通过蒸散发的形式进入大气；当净辐射增加时，更多能量会分配到潜热，有利于蒸散发过程。但同时水汽压

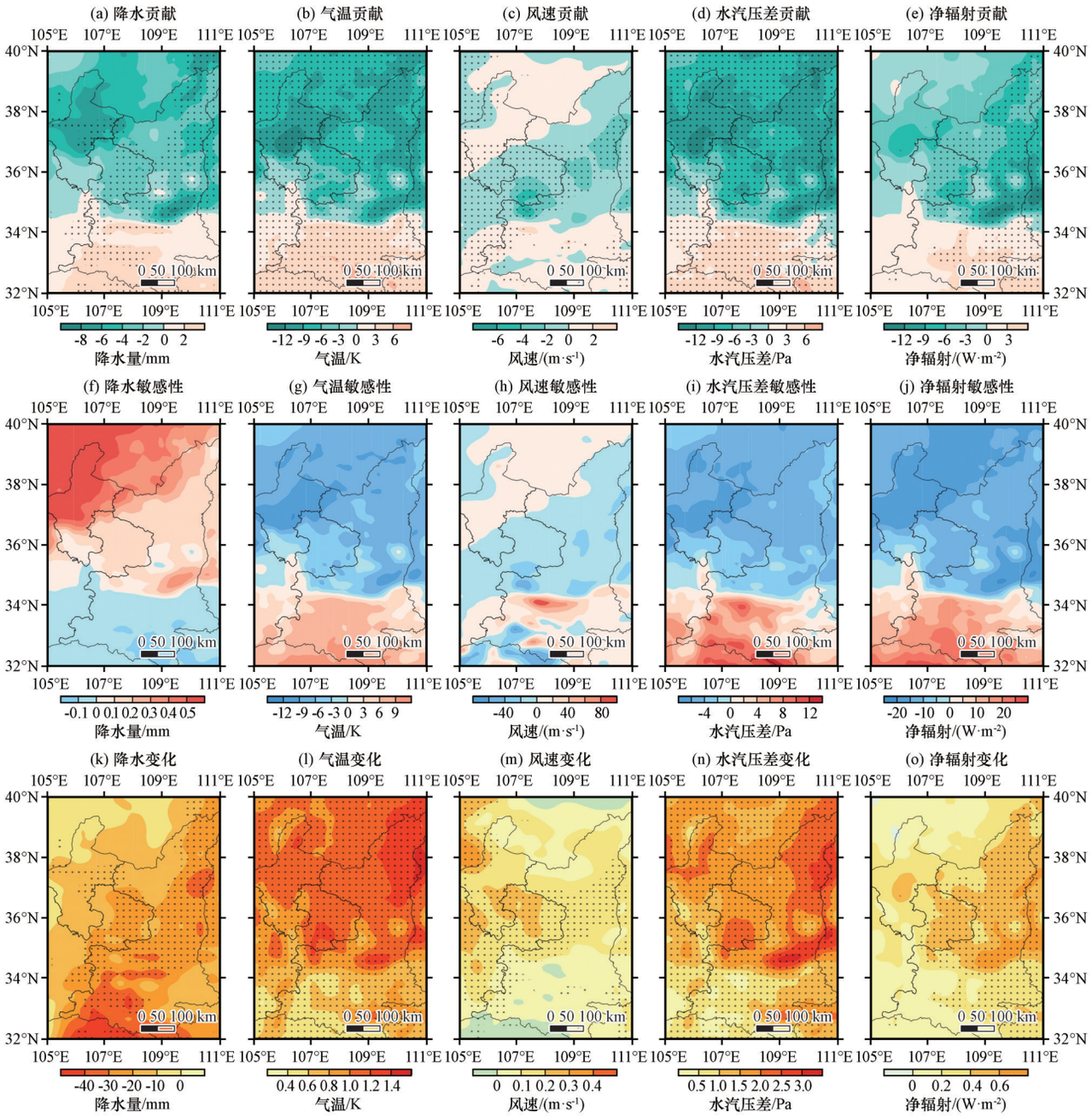


图4 1997—2022年与1981—1996年期间与夏季蒸散发相关的水分收支各项变化的空间分布

降水量单位：mm、气温单位：K、风速单位：m·s^{-1}、水汽压差单位：Pa、净辐射单位：W·m^{-2}

Fig. 4 The spatial patterns of Budyko-Penman budget components for evapotranspiration changes in summer over Shaanxi between the 1997—2022 and 1981—96 periods. The unit of precipitation: mm, near-surface temperature: K, wind speed: m·s^{-1}, vapor pressure deficit: Pa, and net radiation: W·m^{-2}

差和净辐射敏感性表现为类似气温敏感性的空间分布特征[图4(i),(j)]，这是因为在南部湿润地区，水汽压差和净辐射属于蒸散发的能量供应因子，而在中北部干旱地区，由于土壤有效水分低，使得蒸散发受到抑制甚至出现负值。在上述变化影响下，水汽压差和净辐射的增加使得陕西北部地区夏季蒸散发减弱，中南部地区蒸散发加强[图4(d),(e)]。风速在突变后呈弱增加趋势，受风速敏感性($\partial E/\partial u$)叠加影响，风速对陕西中南部夏季蒸散发的贡献为正，同时对北部的贡献为负，不过贡献值明显小于其他因子[图4(c),(h),(m)]。综上可见，各气候因子的变化均使得陕西北部夏季蒸散发减弱，中南部夏季蒸散发加强，夏季蒸散发呈现出南增北减的空间变化特征[见图2(b)]。对于陕北及关中北部来说，其受到水分限制更大，即使其蒸散发在下降，但由于降水下降的幅度超过了蒸散

发下降的幅度，故降水蒸散差的变化仍表现为降低，呈现显著的变干趋势。对于关中南部及陕南地区而言，相较于北部更为湿润一些，在能量和水分供应的共同调控下蒸散发增加，从而也造成降水蒸散差下降，变干显著。

3.3　环流异常分析

为了进一步探究陕西夏季气候干湿变化的驱动机制，基于陕西夏季干湿变化的年代际特征，分析了干湿变化与水汽输送及大气环流之间的关系。从突变前后夏季200 hPa和500 hPa高度场变化(图5)中可见，从北大西洋到中国北方地区，存在着显著的纬向波列结构，东亚中纬地区中高层均为明显的东高西低配置，中国北方地区受一强大的反气旋型环流控制，陕西地区位于反气旋性环流的底部。受中高层环流系统对水汽输送的引导作用影响，陕西地区整层水汽通量以偏东方向为主，其中东边界为主要的入流边界，说明1996年以后东边界的水汽输入是增加的，与此同时西边界为主要的出流边界，意味着后一阶段西边界的水汽输入减少。此外，南边界的水汽也以流出为主[图6(a)]。受各边界水汽输送变化影响，陕西大部地区的水汽通量散度为正，其中陕北南部、关中西南部及陕南南部部分地区存在着水汽通量散度的大值中心，说明上述地区上空夏季水汽通量是向外辐散的，这与夏季降水减少的主要区域相重叠。观察突变前后夏季各边界的水汽收支差异也可观察到类似的现象[图6(b)]，对于陕西地区来说，受东亚夏季风影响，西边界和南边界一般是陕西夏季主要的水汽输入边界，东边界和北边界为主要输出边界。相较1981—1996年，1997—2022年西边界和南边界的水汽输入分别减少了14.6 kg·m^{-1}·s^{-1}和1.6 kg·m^{-1}·s^{-1}，东边界和北边界分别增加了9.7 kg·m^{-1}·s^{-1}和0.03 kg·m^{-1}·s^{-1}，陕西地区夏季水汽净收入整体减小了6.5 kg·m^{-1}·s^{-1}，仅为1981—1996年的64.7%。

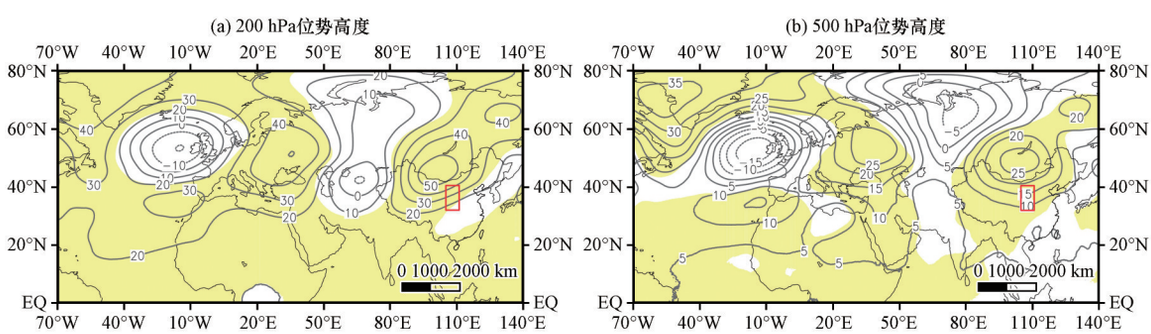


图5　1997—2022年与1981—1996年期间夏季200 hPa和500 hPa高度场差异(单位：gpm)

Fig. 5　The differences in eddy 200 hPa and 500 hPa geopotential height over Shaanxi between 1997—2022 and 1981—1996 periods. Unit: gpm

可见，突变之后，从北大西洋至我国北方地区形成了显著的纬向波列结构，东亚中纬度中高层大气出现东高西低的位势高度配置，我国北方上空受一强大的反气旋式环流控制，陕西位于其底部，引导性气流系统性地改变了陕西夏季各边界的水汽输送，使得西、南边界水汽输入减少，东边界输入一定程度增加，最终导致水汽净收入下降和水汽辐散，从而驱动陕西夏季气候向偏干转变。

研究表明，大气遥相关型在不同时间尺度上与西北地区降水特征存在着密切关系，海温变化可以通过调节大气环流和水汽输送路径影响陕西及其周边地区的降水分配(马鹏里等，2020；贾艳青和张勃，2020)，因此突变后在中高纬地区形成的显著纬向波列结构可能受到了上游海温或大气环流异常激发的遥相关影响。为探究海温变化影响陕西夏季气候的可能机制，分析了1997—2022年与1981—1996年期间全球平均海温的变化发现，海温变化最为显著的地区集中在北大西洋中高纬地区，特别在格陵兰岛附近海域的海温出现了明显的增温(图7)。因此，将30°W—60°W，55°N—65°N这一海温明显增加的区域定义为海温增加关键区。从该关键区平均海温年代信号回归的夏季200 hPa和500 hPa高度场(图8)上可以看到，从北大西洋、经过东欧平原、巴尔喀什湖、贝加尔湖至我国北方地区，中高层均存在着显著的大气遥相关波列，其中在北大西洋及巴尔喀什湖附近地区为显著的位势高度负异常，在东欧平原及贝加尔湖至我国北方地区为位势高度正异常，该分布特征与突变前后夏季200 hPa和500 hPa高度差值场(图5)基本一致。这意味着格陵兰岛附近关键区海域海温的年代际变化正异常可能激发其东部海域出现位势高度负异常，并通过大气遥相关波列的形式向下游传播，使得陕西地区出现位势高度正异常和反气旋式偏差环流，从而导致陕西地区夏季水汽辐散和气候变

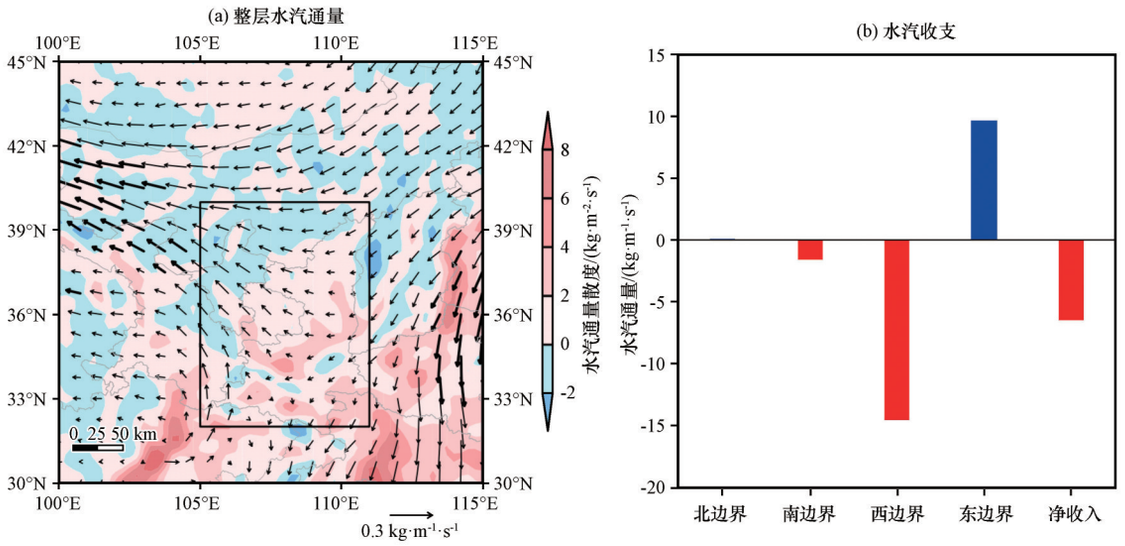


图6 1997—2022年与1981—1996年期间夏季整层水汽通量(矢量，单位：kg·m^{-1}·s^{-1})和水汽通量散度(阴影，单位：kg·m^{-2}·s^{-1})(a)及陕西地区(黑框区域)各边界水汽收支(b，单位：kg·m^{-1}·s^{-1})差异

Fig. 6 The corresponding composite differences of integrated moisture flux(vector arrows, unit: kg·m^{-1}·s^{-1}) and moisture flux divergence (shading, unit: kg·m^{-2}·s^{-1}) (a) and flux on different boundaries (b, unit: kg·m^{-1}·s^{-1}) in summer over Shaanxi (black box area) between 1997—2022 and 1981—1996 periods

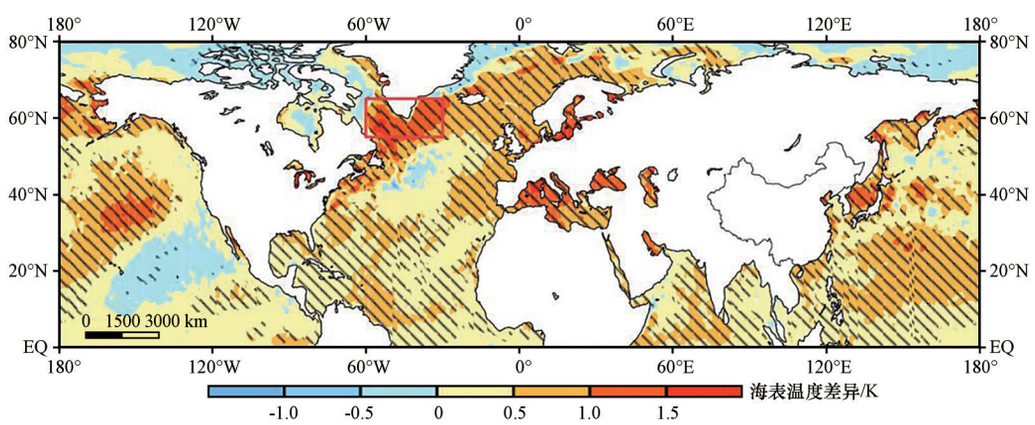


图7 1997—2022年与1981—1996年期间夏季海表温度差异(单位：K)

黑色阴影斜线表示差异通过0.05显著性检验

Fig. 7 Differences in sea surface temperature in summer between 1997—2022 and 1981—1996 periods. Unit: K. The black shaded slash indicates that the differences are significant at the 0.05 level

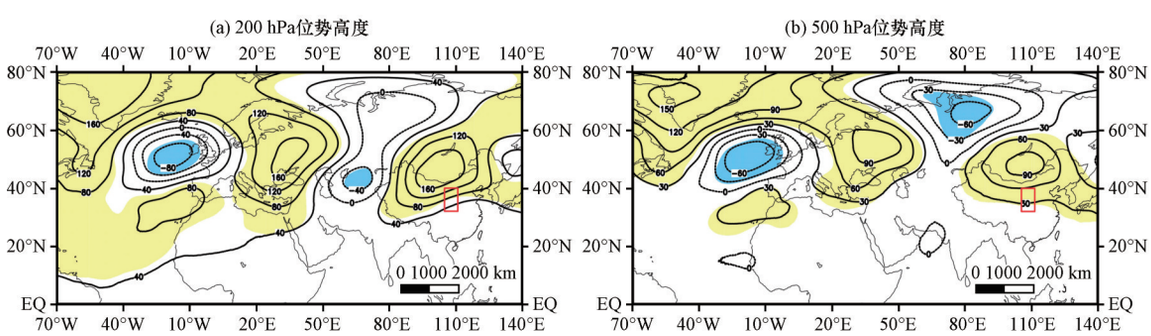


图8 海温关键区夏季年代际信号回归的200 hPa和500 hPa位势高度场(单位：gpm)

彩色阴影表示回归系数通过0.05显著性检验

Fig. 8 Geopotential height at 200 hPa and 500 hPa of regression of interdecadal averaged sea surface temperature in summer over the key region. Unit: gpm. The color shading indicates that the regression coefficients are significant at the 0.05 level

干。北大西洋中高纬度海温增暖与大西洋多年代际振荡(AMO)的变化密切相关。20世纪80年代中期以来,夏季AMO由冷位相向暖位相转变,偏暖的北大西洋通过激发一条从北大西洋向下游传播的中纬度大气罗斯贝波列,会加强蒙古反气旋异常(Ding et al., 2022;丁一汇等, 2023),陕西省位于蒙古反气旋的东南侧,为其变干提供了有利的动力条件。同时,AMO也会与热带海洋相互作用,AMO正位相会引起热带西太平洋和海洋性大陆暖异常,使得局地降水增多。进一步,热带西太平洋和海洋性大陆对流活动和大气加热会激发西北太平洋对流层低层反气旋式环流异常,造成西太平洋副热带高压西伸,东亚夏季风增强(Si and Yu, 2023;姜大膀等, 2024)。

4　结论

本文利用1981—2022年ERA5逐月再分析资料及全球最优插值海温数据集,从水循环的全过程出发,在综合分析陕西地区气候干湿变化特征的基础上,量化对比了各气候因子对陕西地区夏季蒸散发变化的贡献,并初步总结了干湿变化的年代际变化机制,得到以下主要结论:

(1)陕西地区各月降水量在近年来均表现为下降趋势,其中关中及陕南地区夏季总降水量的下降趋势较为显著。夏季蒸散发以秦岭为界呈现为南北反向的变化特征,夏季蒸散发在陕北及关中北部显著减少,而在关中南部及陕南地区呈弱增加趋势。总体上看,陕西地区夏季气候在整体上有变干趋势,其中关中南部及陕南地区的气候变干最为明显。检测发现1996年之前降水蒸散差表现为一致的上升趋势,此后持续下降,意味着陕西夏季气候干湿特征在此前后发生了由湿到干的明显转变。

(2)分析气候因子对突变前后陕西夏季蒸散发的贡献发现,在区域平均上,水汽压差增大对夏季蒸散发增强的贡献最大达53.0%,净辐射和气温增加对蒸散发增强的贡献也很显著,贡献率分别为28.3%和18.5%。各气候因子变化均使得陕西北部夏季蒸散发减弱,中南部夏季蒸散发加强。对于陕北及关中北部,即使蒸散发在下降,但由于降水下降幅度超过了蒸散发下降幅度,故降水蒸散差仍表现为降低,夏季气候呈现变干趋势。对于关中南部及陕南地区而言,在能量和水分供应的共同调控下蒸散发增加,从而也造成降水蒸散差下降和夏季气候变干。

(3)通过进行与气候干湿变化相关的大气环流分析发现,水汽输送与陕西夏季气候变干存在密切关系。1996年之后,夏季陕西地区位于强大的反气旋式偏差环流底部,水汽输送以辐散为主,后一阶段陕西地区夏季水汽净收入仅为前一阶段的64.7%。进一步分析海温变化发现北大西洋西北部年代际海温正异常会激发横跨欧亚大陆的大气波列并向下游传播,使得陕西及周边地区出现位势高度正异常和反气旋式偏差环流,进而导致陕西地区夏季水汽辐散和气候变干。

参考文献(References):

Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al., 1998. Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements[M]. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 174.

Budyko M I, 1974. Climate and life[M]. New York: Academic Press, 508.

Choudhury B, 1999. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model[J]. Journal of Hydrology, 216(1-2): 99-110. DOI: 10.1016/s0022-1694(98)00293-5.

Ding Yihui, Wu Ping, Liu Yanju, 2022. Modulation of sea surface temperature in three oceans on precipitation increase over Northwest China during the past 60 years: a review[J]. Frontiers in Climate, 4: 1015225. DOI: 10.3389/fclim.2022.1015225.

Feng Lei, Zhou Tianjun, 2012. Water vapor transport for summer precipitation over the Tibetan Plateau: Multidata set analysis[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 117(D20): 2011JD017012. DOI: 10.1029/2011jd017012.

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

Liu Zhiyong, Zhang Xin, Fang Ruihong, 2018. Multi-scale linkages of winter drought variability to ENSO and the Arctic Oscillation: a case study in Shaanxi, North China[J]. Atmospheric Research, 200: 117-125. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.10.012.

Nogueira M, 2020. Inter-comparison of ERA-5, ERA-interim and GPCP rainfall over the last 40 years: Process-based analysis of systematic and random differences[J]. Journal of Hydrology, 583: 124632. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124632.

Peng Dongdong, Zhou Tianjun, 2017. Why was the arid and semiarid northwest China getting wetter in the recent decades?[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 122(17): 9060-9075. DOI: 10.1002/2016jd026424.

Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al., 2002. An improved *in situ* and satellite SST analysis for climate[J]. Journal of Climate, 15(13): 1609-1625. DOI: 10.1175/1520-0442(2002)0151609:aiisas>2.0.co;2.

Reynolds R W, Smith T M, Liu Chunying, et al., 2007. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature[J]. Journal of Climate, 20(22): 5473-5496. DOI: 10.1175/

2007jcli1824. 1.

Si Dong，Yu Liwei，2023. Impact of the Atlantic multidecadal variability on East Asian summer climate in idealized simulations[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters，16(5)：100399. DOI：10. 1016/j. aosl. 2023. 100399.

Xu Kepiao，Zhong Lei，Ma Yaoming，et al.，2020. A study on the water vapor transport trend and water vapor source of the Tibetan Plateau[J]. Theoretical and Applied Climatology，140(3)：1031-1042. DOI：10. 1007/s00704-020-03142-2.

Yang Hanbo，Yang Dawen，Lei Zhidong，et al.，2008. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation[J]. Water Resources Research，44(3)：2007WR006135. DOI：10. 1029/2007wr006135.

Zhou Liantong，Huang Ronghui，2010. Interdecadal variability of summer rainfall in Northwest China and its possible causes[J]. International Journal of Climatology，30(4)：549-557. DOI：10. 1002/joc. 1923.

程泳铭，刘浏，程湫雅，等，2025. 黄河上中游植被动态及其对干湿转换的响应[J]. 生态学报，45(4)：1788-1798. Cheng Yongming，Liu Liu，Cheng Qiuya，et al.，2025. Vegetation dynamics and its response pattern to dry-wet transition in the upper and middle reaches of the Yellow River[J]. Acta Ecologica Sinica，45(4)：1788-1798.

翟禄新，2008. 近50a来中国西北气候变化及其水文响应分析[D]. 兰州：兰州大学. Zhai Luxin，2008. Climatic variability and impact on hydrology in recent 50 years in Northwest China[D]. Lanzhou：Lanzhou University.

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 Yihui，Liu Yanju，Xu Ying，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.

杜懿，王大刚，祝金鑫，2021. 基于CMIP5的中国西北地区暖湿化演变研究[J]. 水资源与水工程学报，32(5)：61-69，77. Du Yi，Wang Dagang，Zhu Jinxin，2021. Study on warming and humidification evolution in northwest China based on CMIP5[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering，32(5)：61-69，77. DOI：10. 11705/j. issn. 1672-643X. 2021. 05. 09.

符淙斌，马柱国，2023. 全球干旱/半干旱区年代尺度干湿变化研究的进展及思考[J]. 大气科学学报，46(4)：481-490. Fu Congbin，Ma Zhuguo，2023. Progress and reflection on the study of interdecadal changes in dry and wet conditions in global arid and semiarid regions[J]. Transactions of Atmospheric Sciences，46(4)：481-490. DOI：10. 13878/j. cnki. dqkxxb. 20230517001.

傅抱璞，1981. 论陆面蒸发的计算[J]. 大气科学，5(1)：23-31. Fu Baopu，1981. On the calculation of the evaporation from land surface[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences，5(1)：23-31.

巩杰，高秉丽，李焱，等，2022. 1960-2020年黄河流域气候干湿状况时空分异及变化趋势[J]. 中国农业气象，43(3)：165-176. Gong Jie，Gao Bingli，Li Yan，et al.，2022. Spatiotemporal variation of climate dry-wet condition and its potential trend in the Yellow River Basin from 1960 to 2020[J]. Chinese Journal of Agrometeorology，43(3)：165-176. DOI：10. 3969/j. issn. 1000-6362. 2022. 03. 001.

郝睿超，王淇葆，王辰，等，2024. 气候变化背景下黄土高原干湿演变特征及成因分析[J]. 灌溉排水学报，43(12)：74-83. Hao Ruichao，Wang Qibao，Wang Chen，et al.，2024. Alterations in drying and wetting spells and their determinants in the Loess Plateau under the influence of climate change[J]. Journal of Irrigation and Drainage，43(12)：74-83. DOI：10. 13522/j. cnki. ggps. 2023544.

贾艳青，张勃，2020. 1960-2017年中国北方气候干湿变化及其与ENSO的关系[J]. 地理科学，40(12)：2115-2124. Jia Yanqing，Zhang Bo，2020. Correlation analysis of variation of dry-wet climate and ENSO in Northern China during 1960-2017[J]. Scientia Geographica Sinica，40(12)：2115-2124. DOI：10. 13249/j. cnki. sgs. 2020. 12. 018.

姜大膀，司东，缪家鹏，2024. 大西洋多年代际振荡对东亚气候影响的综述[J]. 大气科学，48(1)：261-272. Jiang Dabang，Si Dong，Miao Jiapeng，2024. Impacts of Atlantic multidecadal oscillation on the East Asian climate：a review[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences，48(1)：261-272. DOI：10. 3878/j. issn. 1006-9895. 2307. 23311.

姜旭涛，于晓晶，杨霞，等，2026. 1961-2021年中国西北干旱区降水时间均匀性的时空演变特征[J]. 高原气象，45(3)：730-743. Jiang Xutao，Yu Xiaojing，Yang Xia，et al.，2026. Spatiotemporal variations in temporal homogeneity of precipitation over arid region of northwest China from 1961 to 2021[J]. Plateau Meteorology，45(3)：730-743. DOI：10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2025. 00099.

李培荣，姚静，张煦庭，等，2022. 西安冬季不同环流形势下大气细颗粒物的输送特征研究[J]. 陕西气象(4)：7-14. Li Peirong，Yao Jing，Zhang Xuting，et al.，2022. Study on the transport of atmospheric fine particles under different circulation in winter in Xi’an[J]. Journal of Shaanxi Meteorology(4)：7-14. DOI：10. 3969/j. issn. 1006-4354. 2022. 04. 002.

李庆祥，董文杰，李伟，等，2010. 近百年中国气温变化中的不确定性估计[J]. 科学通报，55(16)：1544-1554. Li Qingxiang，Dong Wenjie，Li Wei，et al.，2010. Uncertainty estimation of temperature change in China in recent hundred years[J]. Chinese Science Bulletin，55(16)：1544-1554.

李欣，2021. 近60年来中国土壤干旱变化时空特征研究[D]. 南京：南京信息工程大学. Li Xin，2021. Spatial and temporal characteristics of soil drought change in China during the past 60 years[D]. Nanjing：Nanjing University of Information Science & Technology.

刘畅，2018. 1961-2015年中国陆地干湿变化特征及成因分析[D]. 兰州大学. Liu Chang，2018. Spatiotemporal variations of aridity in China[D]. Lanzhou：Lanzhou University.

刘晨汐，2022. 干旱半干旱区水循环变化及其对气候变暖的响应[D]. 兰州：兰州大学. Liu Chenxi，2022. Water cycle change of drylands and its response to climate warming[D]. Lanzhou：Lan-

zhou University.

刘莉红，翟盘茂，郑祖光，2010. 中国北方夏半年极端干期的时空变化特征[J]. 高原气象，29(2)：403−411. Liu Lihong，Zhai Panmao，Zheng Zuguang，2010. Spatial and temporal variation characteristics of the extreme dry spells in summer half year of northern China[J]. Plateau Meteorology，29(2)：403−411.

刘玉鹏，钞锦龙，路亚敏，等，2025. 1959—2018年黄土高原地区降水时空变化研究[J]. 高原气象，44(3)：616−625. Liu Yupeng，(Chao/miao) Jinlong，Lu Yamin，et al.，2025. Study on the spatio-temporal changes of precipitation in Loess Plateau from 1959 to 2018[J]. Plateau Meteorology，44(3)：616−625. DOI：10.7522/j. issn. 1000−0534. 2024. 00104.

刘元波，邱国玉，张宏昇，等，2022. 陆域蒸散的测算理论方法：回顾与展望[J]. 中国科学：地球科学，52(3)：381−399. Liu Yuanbo，Qiu Guoyu，Zhang Hongsheng，et al.，2022. Theoretical methods for calculating land evapotranspiration：review and prospect[J]. Scientia Sinica (Terrae)，52(3)：381−399.

卢珊，张宏芳，屈直，等，2018. 1961—2015年陕西省不同等级降水事件变化特征[J]. 气象与环境科学，41(1)：77−85. Lu Shan，Zhang Hongfang，Qu Zhi，et al.，2018. Variation characteristics of precipitation events in different levels in Shaanxi Province from 1961 to 2015[J]. Meteorological and Environmental Sciences，41(1)：77−85. DOI：10. 16765/j. cnki. 1673−7148. 2018. 01. 010.

马鹏里，杨金虎，卢国阳，等，2020. 西北地区东部气候的转折性变化[J]. 高原气象，39(4)：840−850. Ma Pengli，Yang Jinhu，Lu Guoyang，et al.，2020. The transitional change of climate in the east of northwest China[J]. Plateau Meteorology，39(4)：840−850. DOI：10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2019. 00093.

马荣君，李潇斐，毛彦霖，等，2022. 陕西省冰雹气候变化特征及其关键影响因素分析[J]. 干旱区研究，39(3)：767−773. Ma Rongjun，Li Xiaofei，Mao Yanlin，et al.，2022. Characteristics and causes of climate change in hail in occurrence Shaanxi Province[J]. Arid Zone Research，39(3)：767−773. DOI：10. 13866/j. azr. 2022. 03. 10.

彭艳，王钊，董妍，等，2016. 1960—2012年陕西降水变化特征及可能成因分析[J]. 高原气象，35(4)：1050−1059. Peng Yan，Wang Zhao，Dong Yan，et al.，2016. Characteristics and reasons of local Change of precipitation over Shaanxi during 1960−2012[J]. Plateau Meteorology，35(4)：1050−1059. . DOI：10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2015. 00023

屈振江，鲁渊平，雷向杰，2010. 陕西近45a各季气温和降水异常时空特征分析[J]. 干旱区资源与环境，24(7)：110−114. Qu Zhenjiang，Lu Yuanping，Lei Xiangjie，2010. Space-time circulation features for the abnormality of temperature and precipitation in Shanxi in recent 45a[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment，24(7)：110−114. DOI：10. 13448/j. cnki. jalre. 2010. 07. 004.

施雅风，沈永平，胡汝骥，2002. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土，24(3)：219−226. Shi Yafeng，Shen Yongping，Hu Ruji，2002. Preliminary study on signal，impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology，24(3)：219−226. DOI：10. 3969/j. issn. 1000−0240. 2002. 03. 001.

施雅风，沈永平，李栋梁，等，2003. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究，23(2)：152−164. Shi Yafeng，Shen Yongping，Li Dongliang，et al.，2003. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm wet in northwest China[J]. Quaternary Sciences，23(2)：152−164. DOI：10. 3321/j. issn:1001−7410. 2003. 02. 005.

万相均，任志远，张翀，2013. 陕西省气温与降水变化时空分布研究[J]. 干旱区资源与环境，27(6)：140−147. Wan Xiangjun，Ren Zhiyuan，Zhang Chong，2013. Research on spatial-temporal distribution of temperature and precipitation changes in Shaanxi[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment，27(6)：140−147. DOI：10. 13448/j. cnki. jalre. 2013. 06. 030.

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 Chenghai，Zhang Shengning，Zhang Feimin，et al.，2021. On the increase of precipitation in the northwestern China under the global warming[J]. Advances in Earth Science，36(9)：980−989.

王鹏祥，2008. 西北地区干湿演变及其成因分析[D]. 南京：南京信息工程大学. Wang Pengxiang，2008. Analysis on Evolution and Causes of Aridity-Wetness in Northwest China[D]. Nanjing：Nanjing University of Information Science & Technology.

王鹏祥，杨金虎，张强，等，2007. 近半个世纪来中国西北地面气候变化基本特征[J]. 地球科学进展，22(6)：649−656. Wang Pengxiang，Yang Jinhu，Zhang Qiang，et al.，2007. Climate change characteristic of northwest China in recent half century[J]. Advances in Earth Science，22(6)：649−656. DOI：10. 3321/j. issn:1001−8166. 2007. 06. 013.

王亚萍，王帅，丁婧祎，等，2023. 气候变化背景下全球陆地干湿变化研究综述[J]. 生态学报，43(2)：475−486. Wang Yaping，Wang Shuai，Ding Jingyi，et al.，2023. A review on the changes in wetting and drying over land under global climate change：trend，mechanism，and prospect[J]. Acta Ecologica Sinica，43(2)：475−486. DOI：10. 5846/stxb202109072527.

王勇，周子涵，王澄海，等，2024. 1979—2020年西北地区地表风速的年代际变化特征[J]. 高原气象，43(6)：1380−1396. Wang Yong，Zhou Zihan，Wang Chenghai，et al.，2024. Decadal variation characteristics of surface wind speed in northwest China during 1979−2020[J]. Plateau Meteorology，43(6)：1380−1396. DOI：10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2024. 00024.

王远皓，陈文，张井勇，2012. 东亚中纬度干旱/半干旱区降水年际变化及其可能成因[J]. 气候与环境研究，17(4)：444−456. Wang Yuanhao，Chen Wen，Zhang Jingyong，2012. Interannual variations of summer rainfall and their causes in the mid-latitude arid/semi−arid areas of east Asia[J]. Climatic and Environmental Research，17(4)：444−456. DOI：10. 3878/j. issn. 1006−9585. 2012. 10169.

肖潇，邱新法，徐金勤，2023. 基于 TerraClimate 数据集的1960−2019年中国干湿气候变化特征[J]. 长江科学院院报，40(2)：

27−33，43. Xiao Xiao，Qiu Xinfa，Xu Jinqin，2023. Characteristics of dry and wet climate change in China from 1960 to 2019 based on TerraClimate dataset[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute，40(2)：27−33，43. DOI：10. 11988/ckyyb. 20211079.

杨雅青，张翀，张婕，等，2024. 关中地区土壤干湿变化及对气候的响应[J]. 干旱区研究，41(2)：261−271. Yang Yaqing，Zhang Chong，Zhang Jie，et al.，2024. Changes in soil moisture and dryness and their response to climate change in the Guanzhong region [J]. Arid Zone Research，41(2)：261−271. DOI：10. 13866/j. azr. 2024. 02. 09.

袁瑞瑞，黄萧霖，郝璐，2021. 近40年中国饱和水汽压差时空变化及影响因素分析[J]. 气候与环境研究，26(4)：413−424. Yuan Ruirui，Huang Xiaolin，Hao Lu，2021. Spatio-temporal variation of vapor pressure deficit and impact factors in China in the past 40 years[J]. Climatic and Environmental Research，26(4)：413−424. DOI：10. 3878/j. issn. 1006−9585. 2021. 20086.

张强，杨金虎，马鹏里，等，2023. 西北地区气候暖湿化增强东扩特征及其形成机制与重要环境影响[J]. 干旱气象，41(3)：351−358. Zhang Qiang，Yang Jinhu，Ma Pengli，et al.，2023. The enhancement and eastward expansion of climate warming and humidification，formation mechanism and important environmental impacts in Northwest China[J]. Journal of Arid Meteorology，41(3)：351−358. DOI：10. 11755/j. issn. 1006−7639(2023)−03−0351.

张秀娟，2012. 西北四省区气候干湿变化及其成因初探[D]. 兰州：兰州大学. Zhang Xiujuan，2012. Studies on climate change with aridity or wetness and its causes in four provinces of Northwest China[D]. lanzhou：Lanzhou University.

赵爱莉，张晓斌，郝改瑞，等，2020. 1971—2018年汉江流域陕西段降水时空特征分析[J]. 水资源与水工程学报，31(6)：80−87. Zhao Aili，Zhang Xiaobin，Hao Gairui，et al.，2020. Spatial and temporal characteristics of precipitation in Shaanxi section of Hanjiang River Basin during 1971−2018[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering，31(6)：80−87. DOI：10. 11705/j. issn. 1672−643X. 2020. 06. 13.

赵强，郭莉，张鸿雁，等，2013. 盛夏西太平洋副热带高压对陕西降水的影响[J]. 中国农业气象，34(3)：278−283. Zhao Qiang，Guo Li，Zhang Hongyan，et al.，2013. Impacts of western Pacific subtropical high on mid-summer precipitation in Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology，34(3)：278−283. DOI：10. 3969/j. issn. 1000−6362. 2013. 03. 004.

朱飙，2022. 西北地区气候暖湿化背景下水汽、潜在蒸散及极端温度和降水的变化特征[D]. 兰州：兰州大学. Zhu Biao，2022. Variation Characteristics of Vapor，Potential Evapotranspiration and Extreme Temperature and Precipitation under the Background of Warming-Wetting in Northwest China[D]. Lanzhou：Lanzhou University.

朱飙，张强，李春华，等，2023. 我国干旱半干旱区气候变化特征及其对干湿波动的影响[J]. 大气科学学报，46(1)：42−54. Zhu Biao，Zhang Qiang，Li Chunhua，et al.，2023. Characteristics of climate change in arid and semi-arid areas of China and its influence on climatic dry-wet fluctuation[J]. Transactions of Atmospheric Sciences，46(1)：42−54. DOI：10. 13878/j. cnki. dqkxxb. 20221101012.

朱姜韬，杨庆怡，李旭，等，2023. 中国西北地区夏季降水及其东部降尺度预测模型[J]. 高原气象，42(3)：646−656. Zhu Jiangtao，Yang Qingyi，Li Xu，et al.，2023. Characteristics and east downscaling forecast model of summer precipitation in northwest China[J]. Plateau Meteorology，42(3)：646−656. DOI：10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2022. 00102.

朱晓华，徐芳，姬祥祥，等，2019. 基于PenPan模型中国蒸发皿蒸发量的时空变化及成因分析[J]. 节水灌溉(7)：87−94，100. Zhu Xiaohua，Xu Fang，Ji Xiangxiang，et al.，2019. Spatiotemporal variation and causes of pan evaporation in China based on PenPan model[J]. Water Saving Irrigation(7)：87−94，100. DOI：10. 3969/j. issn. 1007−4929. 2019. 07. 018.

Study on climatic aridity and humidity variations based on hydrologic cycle process over Shaanxi

Lu Shan[1, 4], Yu Haipeng[2], Ren Yu[3], Zhang Hongfang[4], Shen Jiaojiao[4], Yao Jing[5]

(1. *Jingyang Meteorological Bureau, Xianyang* 713700, *Shaanxi, China*;
2. *Key Laboratory of Cryospheric Science and Frozen Soil Engineering, Nagqu Plateau Climate and Environment Observation and Research Station of Tibet Autonomous Region, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *Gansu, China*;
3. *College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou* 730000, *Gansu, China*;
4. *Shaanxi Meteorological Service Center, Xi'an* 710014, *Shaanxi, China*;
5. *Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an* 710014, *Shaanxi, China*)

Abstract: Water scarcity issues triggered by climatic aridity and humidityrepresent the core challenge affecting human survival, ecological security and sustainable development. In recent years, significant changes in temperature and precipitation have occurred in Shaanxi. Accurately identifying variations in hydroclimatic conditions and understanding the driving mechanisms are of great importance for water resource management. Based on the water cycle process, this study comprehensively analyzes the characteristics of climatic aridity and humidity variations in Shaanxi using precipitation minus evapotranspiration (P-ET), and summarizes the physical mechanisms responsible for the interdecadal dry-wet variations. The results show a drying trend in summer over Shaanxi during the period 1981—2022, with a more pronounced trend in the central and southern regions. Further analysis detected a distinct transition from wet to dry conditions in summer around 1996. Analysis of the contributions of climatic factors to summer evapotranspiration in Shaanxi before and after the shift reveals that the increase in vapor pressure deficit accounts for the largest contribution (53. 0%) to the enhancement of evapotranspiration. The increases in net radiation and near-surface temperature contribute 28. 3% and 18. 5%, respectively. Changes in all climatic factors lead to weakened summer evapotranspiration in northern Shaanxi and strengthened evapotranspiration in the central and southern parts. However, because the decrease in precipitation is greater than the decrease in evapotranspiration, precipitation-evapotranspiration shows a declining trend across Shaanxi, resulting in a drier summer climate. Moisture transport is closely related to summer dry-wet variations in Shaanxi. During 1996—2022, summer circulation over Shaanxi and its surrounding areas is influenced by an anticyclonic anomalous circulation, leading to predominant moisture divergence and a significant reduction in net moisture income. Interdecadal sea surface temperature (SST) anomalies in the northwestern North Atlantic play an important role in influencing summer dry-wet conditions in Shaanxi. When the interdecadal SST in the northwestern North Atlantic is anomalously warm, it excites an atmospheric wave train that propagates downstream across Eurasia. This results in positive geopotential height anomalies and an anticyclonic anomalous circulation over Shaanxi and adjacent regions, consequently leading to moisture divergence and a tendency towards drier summer in Shaanxi.

Key words: dry and wet climatic changes; hydrologic cycle; water vapor transport; interdecadal signals