近几十年中国西北夏秋季干湿年代际变化及成因初步分析 1

马潇祎 1, 3 范可*2 2 1 中国科学院大气物理研究所,北京,100029 3 2 中山大学大气科学学院,南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海),珠海 519082 4 5 3中国科学院大学,北京,100049

6 摘要 本文利用观测和再分析资料,分析了 1961~2014 年中国西北地区(35°-50°N,75°-7 95°E)夏秋季节干湿线性变化趋势特征,定量计算了蒸散量和降水量对干湿变化趋势的贡 献,同时分析了其年代际变化特征及其相关的大尺度环流和水汽收支变化。结果表明,西 8 9 北夏季和秋季干旱变率在四季中最大,是干旱最易发生季节。西北地区在1961~2014年夏 秋季显著变湿,其中蒸散和降水在西北地区的线性变湿趋势中占主要作用,降水量的增加 10 和蒸散量的减少对西北变湿都有正贡献,二者趋势总贡献率夏季为 93.4%,秋季为 11 67.5%。夏秋季西北干湿变化的年代际转折在 1987 年前后, 自 1987 年后, 夏季西北年代际 12 变湿,主要受到蒸散量和降水量变化影响,地面风速减小所造成的蒸散量降低有利于该地 13 14 区年代际变湿:西北地区水汽输送通量异常辐合导致其降水量增加。水汽诊断分析进一步 表明,夏季降水量的增加主要来自于局地蒸发的增强,贡献率达到约 80%,表明局地蒸发 15 是降水的重要水汽源。此外,夏季水汽平流项为正值(即水汽通量辐合加强),有利于降水 16 量增加,该贡献主要由与风速有关的动力学分量引起。而秋季,1987年后西北地区的净辐 17 射通量和地面风速减小共同导致该地区蒸散量降低,进而造成西北地区的年代际变湿。 18 关键词:中国西北干湿变化趋势和年代际变化;成因;蒸散和降水贡献;水汽收支 19

文献识别码 中国分类号 20 文章编号 2021115A

21 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2112.21115

> 收稿日期 2021-12-31 网络预出版日期 资助项目:国家自然科学基金资助项目(42088101, 41730964)和南方海洋科学与工程广东省实验室(珠 海)创新团队建设项目(311020001) 马潇祎, 1996.09, 女,硕士研究生,从事气候动力学研究。E-mail: maxiaoyi@mail.iap.ac.cn 通讯作者:范可,女,教授,从事气候动力学和气候预测研究。E-mail: fanke@mail.iap.ac.cn Funded by National Nature Science Foundation of China (Grants 42088101, 41730964), Innovation Group Project of Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai) (Grant 311020001)

Preliminary Analysis on the Interdecadal Change and Cause
 of Summer and Autumn Dryness and Wetness over

Northwest China in Recent Decades

25

26

27

29

24

Ma Xiaoyi^{1, 3} Fan Ke^{*2}

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
 School of Atmospheric Science, Sun Yat-sen University, and Southern Marine Science and

28

Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Based on the observation and reanalysis data during 1961–2014, the spatial and 30 31 temporal features of the dry and wet changes in summer and autumn in Northwest China (35°-32 50°N, 75°-95°E) are investigated. We examine the contribution of evapotranspiration and 33 precipitation to the linear trend of dryness and wetness. Meanwhile, the large-scale atmospheric 34 circulations and water vapor budget related to interdecadal characteristics of dryness and wetness 35 are analyzed. Results show that the drought variability in summer and autumn in Northwest China 36 is the largest in the four seasons, and these two seasons are the highest probability of drought. However, there was a significant increasing trend of wetness in Northwest China from 1961 to 37 38 2014, in which evapotranspiration and precipitation play a significant role in the upwards trend in 39 humidity over Northwest China. The increase in precipitation and the decrease in 40 evapotranspiration both positively contribute to the trend of wetness in Northwest China. The total contribution rate of the two trends is 93.4% in summer and 67.5% in autumn. The interdecadal 41 shift from dry to wet happened in summer and autumn around 1987 over Northwest China. Since 42 43 1987, the interdecadal humidification was mainly affected by changes in evapotranspiration and 44 precipitation over Northwest China in summer. The decrease in evapotranspiration has a positive 45 contribution to the humidification of the area, which is caused by the decrease in surface wind 46 speed. The anomalous convergence of water vapor transport flux has led to an increase in 47 precipitation in Northwest China. The water vapor diagnostic analysis further shows that the increase in precipitation mainly comes from the enhancement of local evaporation, with a 48 49 contribution rate of 80%, indicating that local evaporation is an essential source of water vapor

for precipitation. In addition, the summer water vapor advection term is positive (that is, water vapor flux convergence is strengthened), which has a positive contribution to the increase in precipitation. This contribution is mainly caused by the dynamic component related to wind speed. In comparison, the decrease in net radiation flux and surface wind speed simultaneously led to a decrease in evapotranspiration in Northwest China in autumn after 1987, which caused interdecadal humidification in the region.

56 Keywords: trends and interdecadal changes of dryness and wetness in Northwest China; trend and

57 decadal; cause; contribution of evapotranspiration and precipitation; water vapor budget

58 1 引言

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告(AR6)指出,2006~2015 年期 59 间,陆地平均气温比 1850~1999 年期间高出 1.53 摄氏度,全球变暖会导致热浪、干旱等 60 极端事件并发的概率增加(IPCC, 2021)。中国西北位于欧亚大陆腹地,是中国的于旱地 61 区,对全球变暖非常敏感(Chen et al., 2012; Huang et al., 2017)。由于降雨不足和降雨事 62 件少,干旱地区更易发生干旱(Dai, 2011a)。干旱可能导致缺水、作物歉收、土地退化和 63 64 土壤侵蚀,这对当地农业和经济的可持续发展具有重要影响(He et al., 2014)。因此,研 65 究西北地区的干湿变化特征及成因,从而加强对干旱灾害的监测力度,对于区域防灾减灾 具有重要意义。 66

在过去的几十年里,中国干旱地区的气候发生了显著的变化。施雅风等(2002)最早 67 提出了西北地区从暖干型气候过渡到暖湿型气候的观点,即干旱发生的情况有所缓解。靳 68 69 立亚等(2004)分析了西北干旱区四个季节干燥指数近 50 年的线性变化趋势。黄小燕等 70 (2011)利用湿润指数研究了 1960~2009 年西北地区年平均的干湿变化特征,发现西北地 区地表有明显的变湿趋势,并且 1987 年以来湿润指数明显增加。 Liu et al. (2013) 指出 71 72 1960~2010 年西北地区干旱指数显著下降,四个季节西北呈湿润变化趋势。Yang et al. 73 (2021) 指出随着 20 世纪 90 年代末西北地区的降水量增加,西北东部地区由暖干向暖湿 74 过渡,其中降水对西北暖湿度的贡献明显大于温度的贡献。然而,由于选取时段的不同, 西北地区的变湿趋势仍存在部分争议。Long et al. (2018)基于标准化水分距平指数研究发 75 76 现 1948~2010年西北西部气候由暖干向暖湿转变的趋势并不明显。张永等(2007)通过分 77 析 1953~2003 年西北地区帕尔默干旱指数(PDSI)指出,以 100℃ 以西的西北西部地区具 78 有湿-干-湿的变化趋势。

针对上述西北地区近 50 年温度升高和降水增加的特点, Huang et al. (2019) 从气候系 79 统和大气环流等角度揭示西北暖湿变化的成因。陈冬冬和戴永久(2009)研究表明北大西 80 洋涛动、北半球和亚洲对流层极涡面积与 1958~2002 年夏季西北降水的西增东减存在联 81 系。亚洲副热带西风急流南移致使西北地区上空出现正涡度平流异常,产生异常上升运 82 动,从而使西北地区降水增加,并且减弱的南亚夏季风可能是造成这种大气环流异常的可 83 能原因(Zhao et al., 2014)。Li and Ma(2018)研究发现印度洋和中亚上空的大范围环流 84 异常是西北干旱地区 1991 年夏季降水年代际变化的重要原因。Li et al. (2016) 发现 1987 85 年后西北干旱区降水量增加与西伯利亚高压和北美副热带高压的加强有显著的相关性。 86 Zhu et al. (2019) 指出乌拉尔山阻塞高压与 1987 年西北地区降水量出现年代际变化密切相 87 关。研究还发现,在 1961~1986 年期间,前期冬、春季持续的印度洋热带海洋表面温度可 88 通过导致南亚高压异常来影响西北地区夏季降水;而在 1986~2015 年期间,夏季降水主要 89 90 受前期冬季的厄尔尼诺-南方涛动变化的影响(Huang et al., 2011)。

干旱程度除了取决于气温和降水的变化,也取决于降水和潜在蒸散之间不平衡的累积 91 效应(Shuttleworth, 1993; Dai, 2011b)。在干旱或半干旱地区,降水和温度的微小变化容 92 易引起水文过程的显著变化(Gan, 2000; Ma et al., 2004)。蒸散量是水循环中一个重要的 93 94 通量项,它综合了大气需求和地表条件,也是决定干旱和半干旱地区气候干旱的一个重要 因素。因此,一些研究更加关注气温、蒸散量和降水量对中国西北地区干湿变化的综合影 95 响。已有研究表明 1955~2008 年降水量增加和蒸散量减少的协同作用共同导致西北地区的 96 干旱趋势有所缓解(Huo et al., 2013)。但是关于西北地区潜在蒸散的变化存在一些矛盾结 97 论。一种观点认为西北地区的蒸散量在所有季节都呈现下降趋势,其中风速是主要影响因 98 素(Thomas, 2000; Song et al., 2010; Yin et al., 2010)。Wang et al. (2020)研究 1960~2017 99 年干湿变化对蒸散和降水的敏感性及相对贡献,发现风速降低和降水量增加造成蒸散量下 100 降,导致干旱地区出现湿润趋势。另一种观点认为蒸散量在 20 世纪 90 年代后期有增加的 101 102 趋势,并对西北地区的干湿变化有重要影响(Dong et al., 2020; Li et al., 2013)。其中, Li et al. (2013b)研究表明西北西部地区潜在蒸散量以 1993 年为转折点,由显著下降转为显 103 著上升。1993年前地表风速变化是引起潜在蒸发量下降的主导因素;而在 1993年之后, 104 相对湿度的减少、温度和风速的升高抵消了净辐射的影响,导致潜在蒸发量增加。 105

106 上述关于西北地区干湿趋势变化的研究,因选取时段和季节的不同,结论有所争议,107 目前相对较少去量化降水量和蒸散量对西北干湿变化趋势的贡献。因此,本文针对西北地

108 区夏季和秋季最易发生干旱的季节,首先分析近几十年西北地区干湿变化的基本特征,计
109 算和量化蒸散和降水对西北地区干湿变化线性趋势的贡献,并初步揭示蒸散和降水变化对
110 西北自 1987年后变湿的影响,有助于更准确地理解西北地区干湿变化的气候成因。

111 2 数据和方法

112 2.1 数据来源



113 采用 0.25°×0.25°分辨率的格点资料,该格点资料基于中国 2400 站的观测资料,使用距
平逼近法,由气候场和距平场分别插值后叠加得到(吴佳和高学杰,2013)(以下简称
115 CN05.1)。日本气象厅(JMA)提供的 55 年再分析的全球逐月大气资料(JRA-55),该
116 数据集的水平分辨率为 1.25°×1.25°,垂直高度为 1~1000hPa 共 37 层(Kobayashi et al.,
117 2015; Harada et al., 2016)。选取以上多套资料共同时段 1961~2014年,并将其统一双线
118 性插值为 2.5°×2.5°的分辨率。

Palmer 干旱指数(PDSI)是根据观测的降水和温度强迫的水量平衡模式计算,既考虑 119 了水分亏缺和持续时间两个因素,也包含了前期天气条件对干旱程度的影响(Palmer, 1965: 120 Burke and Brown, 2008; Rind et al., 1990)。PDSI 能够更加合理、准确地描述中国北方干旱 121 各项特征(卫捷等, 2004)。为更好表示不同气候区域之间的 PDSI 值, Wells et al. 122 (2004)对该指数进行了修订,提出了自校正 Palmer 干旱指数(scPDSI),并使用 123 124 Penman-Monteith 方程进行误差最小化,该方程考虑了辐射、湿度和风速的影响(Allen et al., 1998)。scPDSI 指数提高了空间可比性,并使用了更实际的潜在蒸散量估计,从而提 125 126 高了其在全球变暖情景下的适用性(Van et al., 2006)。本文使用的 Palmer 干旱指数数据 来源于 Dai et al. (2004) 估算的全球 PDSI 格点数据,后修正为 scPDSI 指数,空间分辨率 127 为 2.5°×2.5°。有关 PDSI 数值所表示的干湿等级如表 1 所示。 128



表 1 PDSI 指数干湿等级



133 2.2.1 蒸散量

130

134 本文采用在国际上已得到充分肯定和广泛应用的蒸散量的计算公式 (Allen et al.,
 135 1998):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_m + 273} U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \tag{1}$$

136	
137	其中 ET_0 为参考作物蒸散量 ($mm d^{-1}$); Δ 为温度水汽压曲线斜率 ($kPa \circ \mathbb{C}^{-1}$); R_n
138	为是作物表面净辐射 ($MJ m^{-2} d^{-1}$); G 为土壤热通量密度 ($MJ m^{-2} d^{-1}$), 它是土
139	壤加热所用的能量(白天可以忽略,即 $G \approx 0$); γ 为湿度常数($kPa \circ \mathbb{C}^{-1}$); T_m 为日
140	平均气温(°C); $U_2 \ge 2m$ 高度的风速($m s^{-1}$)。
141	2.2.2 趋势贡献率
142	采用 Yin et al. (2010)的方法估算了蒸散量和降水量变化对干湿趋势的相对贡献

- 143 (Con_{x_i})。式中的相对变化趋势($Trend_{x_i}$)采用传统的最小二乘线性拟合法计算了时
- 144 间序列在 54 年的趋势:

$$Con_{x_i} = S_{x_i} \times RC_{x_i} \tag{2}$$

$$RC_{x_l} = \frac{54 \times Trend_{x_l}}{|ave|_{x_l}}$$
 (3)146
1471481491491491491491491491491501511521531541541551561571581591591511521531541541551561571581591591511521531541551561571581591591501511521531541551561571581591591591501511521531541551551561571581591591591501511521531541551561571581591591591501511521531541551561571581591591591501

165 3 西北夏季和秋季干湿长期线性变化趋势及降水量和蒸散量的相对贡献

166 对 1961~2014年 6~11 月平均 scPDSI 进行 REOF 分解,表 2 列出前 10 个 REOF 特征
167 向量对平均 scPDSI 总方差的贡献率和累积贡献率,累积方差为 61.8%。根据图 1 中第一模
168 态旋转载荷向量空间分布场,以旋转载荷向量通过 0.1 显著性水平所包含的范围为分区依
169 据,得到了西北地区 (35°-50°N, 75°-95°E)。

- 170 表 2 1961~2014 年中国 6~11 月平均 scPDSI 的 REOF 旋转载荷向量对总方差的贡献率和累积贡献率
- 171 Table 2 Contribution and cumulative contribution of REOF rotated eigenvectors to the average scPDSI in China



180 可见,四个季节的干旱指数标准差空间分布基本一致,但每个季节的标准差都具有空间分
181 布的差异性。总体上西北地区四个季节的干旱指数变率以 40°N 为分界线表现出了明显的
182 南北差异,40°N 以北地区的 scPDSI 值整体偏低,最低值中心在准噶尔盆地,最小值的范

183 围为 0.8~1.4。而 40°N 以南地区 scPDSI 干旱指数值整体偏高,塔里木盆地是最高值中
心,最大变率值在 3.2~3.4 之间。与其它季节相比,夏秋季节干旱指数变率较大。其中,
185 夏季,干旱变率最大值位于塔里木盆地的西部边缘和东部地区,最大值分别达到 3.2 和
186 3.4。秋季干旱变率最大值分布与夏季基本一致,但西部边缘地区和东部地区的最大值均达
187 到 3.4。以上表明西北地区的夏季和秋季是更容易发生干旱的季节。因此本文主要研究西北
188 地区夏秋季的干湿变化。





221 因此,秋季主要是蒸散量的减少导致西北地区出现长期变湿趋势。



243 1987 年左右,且交点在临界线之间,表明 1987 年为西北夏季和秋季从干显著变湿的年代
244 际突变点。滑动 T 检验方法的结果与 M-K 检验一致(图略)。

(a) JJA scpdsi series (b) SON կեղին կովրիզին vear¹⁹⁹ yea¹⁹⁹ (c) JJA (d) SON MK MK UB UB 1965 1970 1975 1980 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015 1960 1965 1970 1975 1980 1985 1990 1995 2000 2005 2010 20 图 5 1961~2014 年(a) 夏季和(b) 秋季西北地区 scPDSI 干旱指数时间变化序列; 1961~2014 年(c) 夏季和(d)秋季 scPDSI 时间序列 Mann-Kendall 检验,虚线为 α=0.05 显著性水平临界值 Fig.5 Evolution of the scPDSI over northwestern China in summer (a) and autumn (b) from 1961 to 2014. Significant test for decadal mutation by Mann-Kendall test in summer (c) and autumn (d) during 1961-2014. The

250 dotted line in (c, d) represents $\alpha = 0.05$ significant level, respectively.

251 4.1 1987 年前后大气环流对蒸散变化的影响

245

246

247

248

249

图 6a 和 b 分别是夏季和秋季西北地区蒸散量在 1987 年前后气候的年代际差异场
(1988~2014 减 1961~1986 年)。夏季(如图 6a)和秋季(如图 6b),在 1987 年后西北地
区全区蒸散量显著降低,大部分地区通过 0.01 的显著性水平。在夏季(图 6a),1987 年
后,塔里木盆地蒸散量降低最明显,减小值最大可达到-0.6 mm/day 以下,蒸散量减少造成
西北地区存在由于变湿的年代际变化。秋季(图 6b),西北地区的蒸散量在 1987 年后整
体降低,降低最明显区域在塔里木盆地,减小值最大为-0.3 mm/day,与夏季相比强度偏
低。

259 已有研究指出蒸散过程受到若干近地表参数的强烈影响,包括 2m 气温、相对湿度、
地面风速和净地表辐射(Chattopadhyay and Hulme., 1997; Allen et al., 1998)。因此,表 3
261 给出了 1961~2014 年西北地区四个气象变量(净地表辐射、2m 气温、相对湿度、地面风
262 速)与区域平均蒸散量之间的偏相关系数。由表 3 可知,在夏季,地面风速与蒸散量有显
263 著的正相关性,相关系数为 0.37,通过了 0.01 的显著性水平,而 2m 气温、相对湿度和净
264 地表辐射与蒸散量的偏相关系数没有通过显著性检验;在秋季,净辐射和风速与蒸散量都

265 存在显著的正相关性,其偏相关系数分别为 0.22 和 0.28,均通过了 0.1 的显著性水平。因
266 此,从夏季和秋季西北地区蒸散量与 2m 气温、相对湿度、地面风速和净地表辐射偏相关
267 的计算说明,夏季蒸散量主要受到地面风速的影响,而秋季蒸散量主要受净地表辐射和地

268 面风速的共同影响。

269

表 3 1961~2014 年夏秋季各气象要素与蒸散量的偏相关系数

- 270 Table 3 Partial correlation coefficients between meteorological elements and evapotranspiration in summer and
- 271

	au	tumn during 1961-2	014.	
del	净辐射	2m 气温	相对湿度	地面风速
夏季	0.17	0.12	-0.04	0.37**
秋季	0.22*	0.07	-0.02	0.28*

272 *代表通过 0.1 显著性水平, **代表通过 0.01 显著性水平



274 图 6 (a) 夏季和 (b) 秋季西北地区蒸散量年代际差异场 (单位: m d⁻¹); (c) 夏季西北地区降水量年代
275 际差异场 (单位: m d⁻¹); (d) 夏季和 (e) 秋季西北地区地面风速年代际差异场 (单位: m s⁻¹); (f) 秋
276 季西北地区净辐射年代际差异场 (单位: W m⁻²): 1988~2014 年减 1961~1986 年。打点表示通过 0.01 显

277	著性水平
278	Fig.6 The decadal-anomaly evapotranspiration over Northwest China in (a) summer and (b) autumn between 1988-
279	2014 and 1961-1986 (units: m d ⁻¹). (c) Same as (a), but for precipitation (units: m d ⁻¹). (d, e) Same as (a, b), but for
280	surface wind speed (units: m s ⁻¹). (f) Same as (b), but for net radiation (units: W m ⁻²). Dotted area represents
281	passing 99% significant test.
282	由于地面风速和净地表辐射是影响西北地区夏季和秋季蒸散变化的主要因素(表 3),
283	进而分析 1987年前后的大气环流变化对西北地区夏季和秋季地面风速和净地表辐射变化的
284	影响。
285	自 1974 年开始,中国年平均风速呈现十分明显的持续性下降趋势,由 2.8 m/s 下降到
286	目前的 2.2 m/s (任国玉等, 2005)。根据道尔顿公式, 蒸发可简化为
287	$E \propto f(W) \times (e[surf] - RH \times e[air])$,其中W 为近地表风速, $e[surf]$ 为表面饱和
288	水汽压, e[air] 是近地表空气饱和水汽压, RH 为近地表空气的相对湿度。图 6d、e 表
289	明, 1988~2014年与 1961~1986年相比, 夏季(图 6d)和秋季(图 6e)西北地区风速减
290	小,减小最大值区域在塔里木盆地,夏季减小最大值可达到-1.2 m/s,秋季减小最大值为-
291	0.8 m/s, 大部分区域通过 0.01 的显著性水平。地面风速与蒸发量呈显著的正相关关系,风
292	速的减小使得蒸散量降低,不利于蒸散过程。
293	从 700 hPa 平均风场分析, 夏季(图 7a、b)和秋季(图 7d、e)西北地区以盛行西风
294	为主。但年代际差异场可以发现,在夏季(如图 7c),相较于 1961~1986年,1988~2014

295 年西北地区出现异常的东风,全区基本通过 0.05 的显著性水平。因此在 1987 年后西风减
296 弱,造成西北地区风速减小(图 6d)。在秋季(如图 7f),西北地区在 1987 年后出现异常
297 东风,通过显著性区域主要在西北中部,该区域风速减小(图 6e)。



300 图 7 (a~c) 夏季和 (d~f) 秋季 700 hPa 风场的气候态及年代际差异场 (单位: m s⁻¹); (g~i) 夏季 700
 301 hPa 水汽输送的气候态及年代际差异场 (单位: 10⁻³ kg m⁻¹ s⁻¹); (a、d、g) 1961~1986 年; (b、e、h)
 302 1988~2014 年; (c、f、i) 1988~2014 年减 1961~1986 年; 红色和橙色分别表示通过 0.05 和 0.1 显著性
 303 水平



308 净表面辐射可以为蒸发过程提供能量,有利于蒸发过程。净辐射越高,蒸发速率就越
309 高。从图 6f 中可以看出,在 1987 年后秋季西北地区净地表辐射有显著减少趋势,尤其是
310 西北东南部,减少最大值可达到-0.4 W/m²,均通过 0.01 的显著性水平,说明秋季净辐射的
311 减小会抑制该地区的蒸发,进而造成蒸散量降低。

312







323 从 1987年前后年代际大气环流变化分析,秋季 700 hPa 位势高度年代际差异场表明
324 (图 8a),在西北地区存在负位势高度异常,有利于西北地区出现南风异常和北风异常的
325 汇合(图略),进而造成低层的异常辐合(图略),有利于上升运动(图 8c),高层有异常
326 辐散(图 8b)。西北地区异常的上升运动会进一步导致该地区上空云量略有增加(图 8d)。
327 云层的增多不利于短波辐射的入射,秋季西北地区入射的短波辐射减少(图 8e),虽

328 然净长波辐射通量有增加趋势(图 8f),总体上总辐射通量有略微减少趋势(图 8g),对西
329 北地区的蒸散具有正贡献,造成蒸散量降低。通过上述辐射和物理过程,秋季西北地区上
330 空的正位势高度异常可导致该地区蒸散量的减少。

331 因此,在1987年后,夏季西北地区出现东风异常,导致该地区西风减弱,风速的减小
332 进一步造成蒸散量降低。在秋季,1987年后西北地区异常东风造成风速减小,同时西北地
333 区上空的正位势高度异常导致净地表辐射减小,两者共同造成蒸散量降低。

334 4.2 1987 年前后水汽输送和水汽收支对降水变化的影响

335 降水也对西北地区的干湿变化有极为重要的影响。由西北地区区域平均降水量对 scPDSI 干旱指数的相对趋势贡献率可知(图 4a、b),降水量变化对干旱指数的贡献主要在 336 夏季。因此分析夏季西北地区降水量年代际差异场(图 6c)表明,夏季西北地区降水量在 337 1987年之后有增加的趋势,年代际差异场的空间分布表现出西北-东南差异,即增加的降水 338 量从西北向东南基本呈减少趋势,其中增加最明显的区域在准噶尔盆地,最大值可达到 0.2 339 mm/day 以上,通过了 0.01 的显著性水平。进一步分析水汽通量场,图 7g、h 分别是 340 1961~1986年和 1988~2014年夏季 700 hPa 平均水汽通量场,夏季西北地区的气候态降水 341 主要由盛行的西风控制,盛行的西风直接将水汽输送到北纬 43°N 的西北地区。 342

343 为了揭示引起降水变化的异常水汽输送,分析后一时段减去前一时段的年代际差异场
344 (图 7i),在夏季西北地区西侧为西南风水汽输送,使得该地区水汽输入加强,东侧为异常
345 东风水汽输送,减弱了该地区水汽输出。因此西北地区为水汽异常辐合,全区基本通过
346 0.05的显著性水平,1987年后该地区年代际变湿。

347 通过进行水汽诊断分析,我们进一步揭示了降水量增加造成西北夏季年代际变湿的物
348 理机制。西北降水的区域平均水汽收支如图 9a 所示。图 9a 表明,夏季西北地区降水的气
349 候量级与蒸发量几乎相等,表明局地蒸发是降水的重要水汽源,前者异常能够引起后者的
350 变化。

351 在气候态上纬向平流和经向平流都为正值(即水汽通量辐合,图 9a),水汽输送散度
352 对西北地区夏季降水有正贡献。风辐合项值很小,对降水的贡献可忽略。在 1987 年之后,
353 夏季西北地区蒸发量和降水量有明显的年代际增加(图 9b),蒸发量的增加会导致大气中
354 的水汽含量增多,所以降水量的增加主要来自于局地蒸发的增强,贡献率达到 80%,表明
355 局地蒸发是降水的重要水汽源。经向平流项有略微下降的趋势,纬向平流项和环流散度项
356 的贡献不明显。所以夏季西北地区的年代际变湿主要是由于蒸发量的减少所造成,水汽平



359 图 9 1961~1986 年和 1988~2014 年夏季西北地区区域平均的水汽诊断各分量(a、c)气候态和(b、d)
 360 前后时段气候差(单位: mm d⁻¹)。(其中(c、d)纬向平流项-< udq > 分为热力学项-< udq' >、
 361 动力学项-< u'dq > 和非线性项-< u'dq' >;风辐合项-< wdq > 分为热力学项-< wdq' >、
 362 动力学项-< w'dq > 和非线性项-< w'dq > 和非线性项-< w'dq' >)

Fig.9 (a, c) Climatological and (b, d) anomalous moisture budget components between 1961-1986 and 1988-2014 over the northwestern China in summer (units: mm d⁻¹). ((c, d)The zonal advection term $- \langle udq \rangle$ (wind convergence term $- \langle wdq \rangle$) is broken into thermodynamic term $- \langle udq' \rangle$ ($- \langle wdq' \rangle$), dynamic term $- \langle u'dq \rangle$ ($- \langle w'dq \rangle$) and nonlinear term $- \langle u'dq' \rangle$ ($- \langle w'dq' \rangle$)).

367 水汽平流项分为纬向和经向平流项的热力分量、动力分量和非线性分量。从气候态上
368 看(图 9c),夏季,水汽平流项对降水量增加的正贡献主要是由与风速有关的动力学分量
369 引起,如图 9d 中所示,该风量的作用在 1987 年之后有所增强。经向平流的热力学分量也
370 起到一定的正贡献,但在 1987 年之后风散度项的值较小,因此风散度变化的贡献可忽略不
371 计。所以,夏季西北地区降水量减去蒸发量的年代际增加主要由与水汽输送有关的动力项
372 决定,其次是经向平流的热力项。

373 5总结

358

374 在 1961~2014 年,西北地区的干旱变率在夏季和秋季最大,是干旱最易发生的季节,
375 并且在 1961~2014 年出现显著的长期线性变湿趋势。定量分析蒸散、降水和其它要素(土
376 壤湿度和径流)对干旱指数的相对趋势贡献率,结果表明蒸散和降水在西北地区的长期变

377 湿趋势中占主要作用,且夏季和秋季蒸散量的减少和降水量的增加都对该地区线性变湿趋378 势有正贡献。夏季二者趋势贡献率和为 93.4%,秋季二者和为 67.5%。

379 进一步分析表明,夏秋季节西北地区干湿变化的年代际转折发生在 1987 年。在夏季,
1987 年后西北地区年代际变湿主要受到蒸散量和降水量的共同作用,地面风速减小所造成
的蒸散量降低有利于该地区年代际变湿;同时蒙古上空的异常反气旋和中亚上空的异常气
旋导致西北地区水汽输送通量异常辐合,进而导致该地区降水增加。水汽诊断分析表明,
383 降水量的增加主要来自于局地蒸发的增强,贡献率达到 80%,表明局地蒸发是降水的重要
384 水汽源。夏季水汽平流项为正值,水汽通量辐合对西北地区降水量的增加有正贡献,该贡
385 献主要是由与风速有关的动力学分量引起,其次是与温度有关的经向平流热力项。

386 秋季与夏季有所不同,1987年后西北地区年代际变湿主要受到蒸散量的影响。其中蒸
387 散主要是受到地面风速和净地表辐射的变化来影响西北地区,净地表辐射和地面风速与蒸
388 散量的相关系数分别为 0.28 和 0.22,均通过了 0.1的显著性水平。在 1987年后,地面风速
389 的减小会导致蒸散量减少。同时秋季西北上空存在异常高压,造成西北大部分地区上空高
390 层辐散,产生异常的上升运动,导致总云量增加。云层的增多不利于短波辐射的入射,总
391 辐射通量减少,对西北地区的蒸散量减少具有正贡献,有利于西北年代际变湿。

392 致谢:本论文受到国家自然科学基金资助项目(42088101 和 41730964)和南方海洋科学与
 393 工程广东省实验室(珠海)创新团队建设项目(项目号 311020001)支持。

394

参考文献(Reference)

- Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing
 crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56[J]. Fao, Rome, 300(9):
 D05109.
- Burke E J, Brown S J. 2008. Evaluating uncertainties in the projection of future drought[J].
 Journal of Hydrometeorology, 9(2): 292-299.

Chattopadhyay N, Hulme M. 1997. Evaporation and potential evapotranspiration in India under
conditions of recent and future climate change[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 87(1):
55-73.

- 403 陈冬冬, 戴永久. 2009. 近五十年中国西北地区夏季降水场变化特征及影响因素分析[J].大气
- 404 科学, 33(6): 1247-1258. Chen Dongdong, Dai Yongjiu. 2009. Characteristics and analysis 405 of typical anomalous summer rainfall patterns in northwest China over the last 50 years[J].
- 406 Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 33(6): 1247-1258.

- 407 Chen Y N, Yang Q, Luo Y, et al. 2012. Ponder on the issues of water resources in the arid region
 408 of northwest China[J]. Arid Land Geography, 35(1): 1-9.
- 409 Dai A, Trenberth K E, Qian T. 2004. A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870–
- 2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming[J]. Journal of
 Hydrometeorology, 5(6): 1117-1130.
- 412 Dai A. 2011a. Drought under global warming: a review[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews:
 413 Climate Change, 2(1): 45-65.
- 414 Dai A. 2011b. Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index
 415 during 1900-2008[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 116(D12).
- 416 Dong Q, Wang W, Shao Q, et al. 2020. The response of reference evapotranspiration to climate
- change in Xinjiang, China: Historical changes, driving forces, and future projections[J].
 International Journal of Climatology, 40(1): 235-254.
- Gan T Y. 2000. Reducing vulnerability of water resources of Canadian Prairies to potential
 droughts and possible climatic warming[J]. Water Resources Management, 14(2): 111-135.
- Harada Y, Kamahori H, Kobayashi C, et al. 2016. The JRA-55 reanalysis: Representation of
 atmospheric circulation and climate variability[J]. Journal of the Meteorological Society of
 Japan. Ser. II, 94(3): 269-302.
- He B, Cui X, Wang H, et al. 2014. Drought: The most important physical stress of terrestrial
 ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(4): 179-183.
- Helton J C. 1993. Uncertainty and sensitivity analysis techniques for use in performance
 assessment in radioactive waste disposal[J]. Reliability Engineering? System Safety, 42(2-3):
 327-367.
- 429 黄小燕, 张明军, 贾文雄, 等. 2011. 中国西北地区地表干湿变化及影响因素[J]. 水科学进展,
 430 22(2): 151-159. Huang Xiaoyan, Zhang Mingjun, Jia Wenxiong, et al. 2011. Variations of
 431 surface humidity and its influential factors in northwest china[J]. Advances in Water Science,
- 432 22(2): 151-159.
- Huang J, Li Y, Fu C, et al. 2017. Dryland climate change: Recent progress and challenges[J].
 Reviews of Geophysics, 55(4): 719-778.

- Huang J, Ma J, Guan X, et al. 2019. Progress in semi-arid climate change studies in China[J].
 Advances in Atmospheric Sciences, 36(9): 922-937.
- Huang G, Qu X, Hu K M. 2011. The impact of the tropical Indian ocean on South Asian High in
 boreal summer[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 28(2): 421-432.
- 439 Huo Z, Dai X, Feng S, et al. 2013. Effect of climate change on reference evapotranspiration and
- 440 aridity index in arid region of China[J]. Journal of Hydrology, 492: 24-34.
- 441 IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I
- to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [MassonDelmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L.
- 444 Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T.
- 445 Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- 446 靳立亚, 李静, 王新, 等. 2004. 近 50 年来中国西北地区干湿状况时空分布[J]. 地理学报, 59(6):
- 847-854. Jin Liya, Li Jing, Wang Xin, et al. 2004. The temporal and spatial distribution of
 surface dry-wet conditions over northwestern China in recent 50 years[J]. Acta Geographica
 Sinica, 2004, 59(6): 847-854.
- Kobayashi S, Ota Y, Harada Y, et al. 2015. The JRA-55 reanalysis: General specifications and
 basic characteristics[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 93(1): 5-48.
- Li Z, Chen Y, Shen Y, et al. 2013. Analysis of changing pan evaporation in the arid region of
 Northwest China[J]. Water Resources Research, 49(4): 2205-2212.
- Li B, Chen Y, Chen Z, et al. 2016. Why does precipitation in northwest China show a significant increasing trend from 1960 to 2010?[J]. Atmospheric Research, 167: 275-284.
- Li M, Ma Z. 2018. Decadal changes in summer precipitation over arid northwest China and
 associated atmospheric circulations[J]. International Journal of Climatology, 38(12): 4496458
 4508.
- Liu X, Dan Z, Luo Y, et al. 2013. Spatial and temporal changes in aridity index in northwest
 China: 1960 to 2010[J]. Theoretical and Applied Climatology, 112(1-2): 307-316.
- Long B, Zhang B, He C, et al. 2018. Is there a change from a warm-dry to a warm-wet climate in
- the inland river area of China? Interpretation and analysis through surface water balance[J].
- Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123(14): 7114-7131.

- Ma Z, Dan L, Hu Y. 2004. The extreme dry/wet events in northern China during recent 100 years.
 J. Geogr. Sci. 14, 275–281.
- 466 McCuen R H. 2010. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating 467 evaporation[J]. Jawra Journal of the American Water Resources Association, 10(3): 486-497.
- 468 Palmer W C. 1965. Meteorological drought[M]. US Department of Commerce, Weather Bureau.
- 469 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 2005. 近 50 年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报, 63(6): 942-
- 470 956. Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. 2005. Climate changes of China's mainland
 471 over the past half century[J]. Acta Meteorologica Sinica, 63(6): 942-956.
- 472 Rind D, Goldberg R, Hansen J, et al. 1990. Potential evapotranspiration and the likelihood of
 473 future drought[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 95(D7): 9983-10004.
- 474 Saltelli A, Marivoet J. 1990. Non-parametric statistics in sensitivity analysis for model output: a
- 475 comparison of selected techniques[J]. Reliability Engineering & System Safety, 1990, 28(2):
- 476 229-253.
- 477 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].
- 478 冰川冻土, 24(3): 219-226. Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. 2002. Preliminary study on
 479 signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in northwest
 480 China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 24(3): 219-226.
- 481 Shuttleworth W J. 1993. Evaporation in: Maidment, DR handbook of hydrology[J].
- 482 Song Z W, Zhang H L, Snyder R L, et al. 2010. Distribution and trends in reference
 483 evapotranspiration in the north China plain[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering,
 484 136(4): 240-247.
- Thomas A. 2000. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over
 China[J]. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological
 Society, 20(4): 381-396.
- 488 Trenberth K E, Guillemot C J. 1995. Evaluation of the global atmospheric moisture budget as seen
 489 from analyses[J]. Journal of Climate, 8(9): 2255-2280.
- 490 Van D, Briffa K R, Jones P D, et al. 2006. Summer moisture variability across Europe[J]. Journal
 491 of Climate, 19(12): 1013–1017.

- Wang S, Zhang Q, Yue P, et al. 2020. Effects of evapotranspiration and precipitation on
 dryness/wetness changes in China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 142(3): 10271038.
- Wells N, Goddard S, Hayes M J. 2004. A self-calibrating Palmer Drought Severity Index[J].
 Journal of Climate, 17(12): 2335-2351.
- 497 卫捷, 张庆云, 陶诗言. 2004. 1999 及 2000 年夏季华北严重干旱的物理成因分析[J]. 大气科学,
- 2010, 28(1): 125-137. Wei Jie, Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 2004. Physical causes of the
 1999 and 2000 summer severe drought in north China[J]. Chinese Journal of Atmospheric
 Sciences, 28(1): 125-137.
- 501 吴佳, 高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比. 地球物理学
- 502报, 56(4): 1102-1111. Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset over503China region and comparison with the other datasets[J]. Chinese Journal of Geophysics-
- 504 Chinese Edition, 56(4): 1102-1111.
- Yang J, Zhang Q, Lu G, et al. 2021. Climate Transition from Warm-Dry to Warm-Wet in Eastern
 Northwest China[J]. Atmosphere, 12(5): 548.
- 507 Yin Y, Wu S, Gang C, et al. 2010. Attribution analyses of potential evapotranspiration changes in
 508 China since the 1960s[J]. Theoretical & Applied Climatology, 101(1): 19-28.
- 509 张永,陈发虎,勾晓华等. 2007. 中国西北地区季节间干湿变化的时空分布——基于 PDSI 数
- 510 据[J]. 地理学报, 62(11): 1142-1152. Zhang Yong, Chen Fahu, Gou Xiaohua, et al. 2007. The
- 511 temporal and spatial distribution of seasonal dry-wet changes over the northwestern China:
- 512 Based on PDSI[J]. Acta Geographica Sinica, 62(11): 1142-1152.
- Zhao Y, Huang A, Zhou Y, et al. 2014. Impact of the middle and upper tropospheric cooling over
 central Asia on the summer rainfall in the Tarim Basin, China[J]. Journal of Climate, 27(12):
 4721-4732.
- 516 Zhu Y, Liu Y, Wang H, et al. 2019. Changes in the interannual summer drought variation along
- with the regime shift over Northwest China in the late 1980s[J]. Journal of Geophysical
 Research: Atmospheres, 124(6): 2868-2881.