中国东部降水中大尺度环流和局地陆气相互作用的贡献:河 1 南"21.7"强降水事件特征影响因子探究 2 陈玥1 王爱慧 2 支蓉 3 封国林 3 3 4 1 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000 5 2 中国科学院大气物理研究所竺可桢一南森国际研究中心,北京 100029 6 3 国家气候中心气候研究开放实验室,北京 100081 7 摘要: 2021 年 7 月河南省遭遇突破历史极值的极端强降雨,造成极大人员伤亡和经济损失, 8 同时此次事件暴露出对中国东部汛期降水预测存在一定不足,提示我们需要加强汛期降水和 9 10 传统影响因子不匹配的机理研究。本文首先利用再分析 ERA5 月资料识别了与今年7月有相 11 似环流背景的中国东部夏季降水事件;进一步利用基于相似环流型的动力调整方法,对 12 1979-2021年7月中国东部降水距平开展了大尺度环流动力影响和局地陆面作用分离;最后, 量化研究了上述两个作用对此次极端降水事件的贡献。得到如下主要结论: 2011 年是 2021 13 14 年 7 月的 500hPa 环流相似年,然而相应降水场在华北到长江中下游地区呈现显著差异。利 用动力调整方法从降水距平中分离出大气环流的影响,相关分析表明余项反映局地陆气反馈 15 作用。降水余项是引起 2021 年 7 月江淮到长江下游地区的异常强降水的主要原因。归因分 16 析表明,余项主要是由局地热力因子变化引起的,其中,蒸发加强,感热通量显著降低,增 17 加了大气强对流不稳定能量,并通过影响大气相对湿度和边界层高度,使得降水增加。推广 18 到 1979-2021 年 7 月降水的演变过程发现,中国东部降水余项的年际变率很强,极端降水异 19 20 常主要体现在余项中,而环流分量相对稳定,结果强调了局地热力作用对夏季极端降水的重 21 要影响。本研究表明,中国东部夏季降水的预测需要同时考虑大尺度大气环流特征和局地热 力作用的贡献,后者对于极端降水预测的贡献尤为重要。 22

收稿日期 2022-10-11 网络预出版日期

作者简介 陈玥, 女, 1996 年出生, 博士研究生, 主要从事陆一气相互作用研究。 E-mail: cheny17@lzu.edu.cn

通讯作者 王爱慧, E-mail: <u>wangaihui@mail.iap.ac.cn</u>

资助项目 国家杰出青年科学基金 41925021, 国家自然科学基金 41875106、41975088 **Funded by** National Natural Science Fund for Distinguished Young Scholars (41925021) and the National Natural Science Foundation of China (41875106 and 41975088).

23	关键词:强降水,河南,动力调整方法,大尺度环流,局地热力作用
24	文章编号: doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2208.21239
25	Contributions of Large-Scale Circulation and Local
26	Land-Atmosphere Interaction to Precipitation in Eastern
27	China: Investigation on Influencing Factors of the July 2021
28	Heavy Precipitation Event in Henan Province
29	CHEN Yue ¹ , WANG Aihui ² , ZHI Rong ³ and FENG Guolin ³
30	1 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000
31	2 Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences,
32	Beijing 100029
33	3 Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081
34	STAN THE
35	Abstract A record-breaking precipitation event happened in Henan Province in July 2021, which
36	caused great casualties and economic losses. This event exposed some deficiencies of precipitation
37	prediction in flood-season in Eastern China. This study applied the ERA5 reanalysis product and a
38	dynamic adjustment (DA) approach to explore the respective contributions of large-scale
39	circulation and local land-atmosphere interaction in this extreme precipitation event. In DA, the
40	500ha geopotential height constructed circulation analogs were used to separate the effects of
41	large-scale circulation dynamics and local land surface effects on precipitation anomalies in
42	Eastern China from 1979 to 2021. Finally, the contribution of these two effects to the extreme
43	precipitation event is quantified. The main conclusions are as follows: 2011 is the similar year of
44	500hPa circulation with July 2021, while the corresponding precipitation fields show significant
45	differences from North China to the middle and lower reaches of the Yangtze River. The influence
46	of atmospheric circulation is separated from precipitation anomaly after DA. The correlation
47	analysis shows that the residual component of precipitation anomaly reflects local
48	land-atmosphere feedback. The residual is the main cause of the anomalous heavy precipitation
49	from Jianghuai region to the lower Reaches of the Yangtze River in July 2021. Attribution analysis
50	shows that the residual component is mainly caused by the change of local thermal factors,

51 enhanced evaporation reduces sensible heat flux and increases precipitation by affecting 52 atmospheric relative humidity and boundary layer height. Among them, evaporation is 53 strengthened, sensible heat flux is significantly reduced, and the unstable energy of atmospheric 54 strong convection is increased, and precipitation is increased by influencing atmospheric relative 55 humidity and boundary layer height. Extended to the precipitation evolution process from 1979 to 56 2021 in July, it is found that the interannual variability of precipitation residual component is very 57 strong, the extreme precipitation anomaly is mainly reflected in the residual component, and the 58 circulation component is relatively stable. The results emphasize the important influence of local 59 thermal effect on summer extreme precipitation. This study shows that taking both the 60 characteristics of large-scale atmospheric circulation and the contribution of local thermal effects into consideration is necessary to improve the prediction of summer precipitation in Eastern China, 61 62 and the latter is particularly important to the prediction of summer extreme precipitation. Keywords Heavy precipitation, Henan, Dynamic adjustment approach, Large-scale circulation, 63 64 Local thermal effects

65

66 1. 引言

中国东部地区人口密集、经济发达,是农业种植和工业生产的重要基地,同时在东亚夏 67 季风影响下也是我国旱涝极端事件频发的区域。我国东部地区包含多种地形,属于干湿过渡 68 的气候区域,复杂因子共同影响下夏季气候变率强,预测难度较大(2010)。在近几十年全球 69 70 气候变暖背景下,极端事件发生频率上升,灾害性天气、气候事件对于经济社会发展和人民 财产安全造成极大损失(Li and Wang, 2018)。研究表明, 1961~2015年中国东部夏季极端降 71 水呈现增长趋势,并在1990年前后存在显著的年代际转变,极端降水由偏少转为偏多(杨涵 72 73 洧等, 2021)。《中国气候变化蓝皮书(2021)》中指出, 1961~2020年, 中国极端强降水事 74 件和气候风险指数均呈升高趋势; 1991~2020年, 中国气候风险指数平均值(6.8)较 1961~ 75 1990年平均值(4.3)增加了58%(中国气象局气候变化中心,2021)。因此,中国东部地区夏 季降水变化的预测和汛期旱涝趋势的预测是气候学研究的重要课题之一(龚志强和封国林, 76 2008),对异常旱涝年进行详细探讨和归因研究有助于提高短期气候预测水平。 77

78 2021年夏季全国平均降水量 334.1 毫米,较常年同期(325.2 毫米)偏多 2.7%,主要多
79 雨区出现在我国北方。7 月中下旬,河南遭遇了历史罕见的极端强降雨, 7 月 17 日至 21
80 日河南省平均降雨量达 144.7 毫米,郑州 1 小时最大雨强达 201.9 毫米,创造了中国大陆小

81 录(下文简 称 " 21.7 " 时 降 雨 量 纪 事件, http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/zwfw/202108/t20210803 582255.html[2021-12-11 82 1)。此次暴雨导致河南省内郑州、鹤壁等多个城市发生严重内涝,造成了重大人员伤亡和巨 83 大经济损失(张霞等, 2021)。历史研究表明,河南省年内降水分配不均,夏季降水占全年降 84 水的一半左右(竹磊磊等, 2012),其预测一直是一个难点,研究夏季强降水事件形成及其水 85 汽来源的对提高降水预测准确性机制具有重要意义。 86

中国东部旱涝事件的发生与东亚夏季风系统和 ENSO 事件紧密相关(Ding and Chan, 87 88 2005; Zhang, 2015)。金祖辉和陶诗言(1999)研究指出拉尼娜年夏季我国长江-黄河之间及东南 部雨量偏少,而其北侧和西南正常偏多。从前秋厄尔尼诺趋于成熟直到当年夏季拉尼娜开始 89 90 发展的演变过程中,我国华北和长江流域夏季都可能降水偏多(郝立生等,2012)。2021年夏 季为拉尼娜次年,但是根据西太副高脊线等环流背景得到的汛期预测对北方多雨的极端性估 91 92 计不足。这一结论提示我们还需要加强汛期降水和传统影响因子不匹配、非对称的机理研究。 河南省位于中国干湿气候过渡区内(Li and Ma, 2012; Wang et al., 2017),即处于东亚夏季风摆 93 动的边缘地带,其降水除季风环流外还受到陆气耦合的协同影响。关于中国东部降水影响因 94 子的研究多集中于海气耦合作用,对局地地表影响考虑有限。以往基于气候模式的模拟结果 95 96 的研究中,强调了海表面气温强迫是热带和冬季中纬度内陆的主要贡献因子,而土壤湿度在 夏季中纬度起主导作用(Conil et al., 2007),且中国华北到江淮地区也是夏季土壤湿度和降水 97 耦合最强烈的地区之一(Koster et al., 2004)。 98

作为陆面过程中最为重要的一个物理量,土壤湿度对陆面能量和水循环中均有关键作 99 100 用,从而影响气候变化(Shukla and Mintz, 1982;林朝晖等, 2008)。土壤湿度与降水的相关性 101 常作为陆地-大气相互作用研究中的耦合强度指标(Koster et al., 2004; Zhang et al., 2008)。陆 面向大气提供的水汽可能来自土壤、植被、河流、湖泊等。前人大量研究表明我国夏季降水 102 与土壤湿度间存在较强耦合,且证实土壤湿度在我国短期气候预测中具有重要作用(刘婷婷 103 等, 2016; 左志燕和张人禾, 2007)。在全球变暖背景下, 土壤湿度引起的陆面热力异常对极 104 105 端气候事件影响显著(Fischer et al., 2007; Orth and Seneviratne, 2016)。此外,陆面模式模拟的 土壤湿度具有较高时空连续性,数据适用性也得到广泛验证(Wu et al., 2021)。基于上述因素, 106 本文以土壤湿度作为衡量陆面过程变化的指标进行中国东部降水的归因分析。 107

108 区域降水的水汽来源包含大尺度平流输送和局地陆面蒸散发两方面,某地区总降水等于
109 外部水汽输送和水汽再循环形成的降水之和(Brubaker et al., 1993)。为了研究引起气候要素变
110 化的主要因子,国内外学者采用动力调整(Dynamic Adjustment,简称 DA)方法,将大尺

度环流因子和局地陆面因子对气候要素特征变化的贡献进行了分离,在全球不同区域开展了 111 很多研究(Nicolai-Shaw et al., 2016; Smoliak et al., 2015)。动力调整方法的分解结果依赖于其 112 基于的具体统计方法和环流因子的选取,以往一些研究主要利用海平面气压为环流因子对气 113 温进行动力调整,将长期气候变化趋势中大气环流动力作用和由人类活动主导的热力作用区 114 分开来(Guan et al., 2015)。500hPa 位势高度场是中层大气环流场的代表,也是一般气候数值 115 116 模式输出的主要高度场之一。Merrifield et al. (2017)对美国中部地区两个 500hPa 环流配置相 似而气温存在差异的7月进行动力调整,发现在移除大气环流的影响以后,剩余的那部分气 117 温变化反映了陆面要素的反馈作用。动力调整后,与大尺度环流作用无关的那部分气温和降 118 水具有较高变率,对气候极值贡献较大(Saffioti et al., 2017; Saffioti et al., 2016)。国内的一些 119 模拟工作也证实了土壤湿度等陆面要素在夏季极端事件中的重要作用,去除陆面过程影响后 120 中国东部夏季典型旱涝事件的强度均显著减弱(Wu and Zhang, 2013)。然而对于大尺度环流和 121 122 陆面过程对于极端降水特征的影响贡献的研究工作较少。本文意图从"21.7"与历史上环流 最相似的一个7月对比入手,通过动力调整方法探讨大尺度环流和陆面反馈对于本次暴雨事 123 124 件的贡献,并探讨降水分量的性质及其普适性。对大尺度大气环流贡献的分离旨在加深对 中国东部地区尤其是河南省极端降水的认识,同时为汛期降水预测提供参考。 125

- 126
- 127 2. 数据与方法
- 128 2.1 数据



为了开展中国东部降水水汽来源及机理研究,本研究利用欧洲中期天气预报中心 129 130 (ECMWF) 全球气候的第五代大气再分析 1979 年-2021 年 7 月值数据(ERA5), 空间分辨 率为 0.25°×0.25°(Hersbach et al. 2020)。研究表明, ERA5 对中国东部降水事件的再现反映 131 能力较强,能较好地捕捉中国东部地区的暴雨事件(刘婷婷等, 2021)。为了评估 ERA5 132 降水数据,研究也利用了基于 1979-2016 年中国气象站点观测构建的 0.25°×0.25°的格点数 133 134 据 CN05.1(吴佳等, 2013)。为了将观测数据延伸到 2021 年, 我们从国家统计局的《中国统计 135 年鉴》(中华人民共和国统计局, 2018, 2019, 2020, 2021)中获得 2017-2020 年我国东部主要城 市7月降水量均值近似代替,河南省降水以郑州市近似代替。图1a、b分别给出了1979-2021 136 年 7 月中国东部和河南省区域平均 ERA5 降水与观测的距平场时间序列及空间相关系数。 137 138 ERA5 在中国东部和河南省均可以较准确地描述观测降水的演变, 空间相关系数分别为 0.75 139 和 0.90, 均通过了信度为 0.05 的统计检验。因此,鉴于观测数据的不连续,本研究中利用 ERA5 数据作为中国东部和河南省降水进行分析和讨论。除了 ERA5 降水之外,本研究中还 140

141 分析了以下变量:地面潜热和感热通量、地面净短波和长波辐射、体积土壤含水量(共 4
142 层,分别为距地表深 0-7cm、7-28cm、28-100cm 和 100-289cm)、边界层高度、对流有效位
143 能、K 指数、大尺度降水、对流降水,以及 500hPa 位势。



150 的空间相关系数,其中左侧纵轴和蓝色实线表示 500hPa 位势高度的相关,右侧纵轴和橙色实线

151 表示降水的相关,灰色圆点表示空间相关系数未通过信度为0.05的统计检验

152 Figure 1. Applicability verification of ERA5 reanalysis July precipitation field in Eastern China and

- 153 Henan Province in 1979-2021 based on observation, and spatial correlation coefficients of 500hPa
- 154 potential height and precipitation from 1979 to 2020 with July 2021. Latitudinal weighted regional
- 155 mean anomaly series of precipitation in ERA5 reanalysis and CN05.1 in (a) East China and (b) Henan
- 156 Province, where the solid green line represents the observation of CN05.1, the solid black line
- 157 represents ERA5, and the dotted green dash line represents the estimated values of total precipitation in

158 major cities in July from China Statistical Yearbook. (c) The spatial correlation coefficients between

159 July 500hPa geopotential height and precipitation anomaly from 1979 to 2020 and corresponding

160 elements in July 2021. The left vertical axis and blue solid line represent the correlation between

161 500hPa geopotential height, the right vertical axis and orange solid line represent the correlation

162 between precipitation, and gray dots indicate that the spatial correlation coefficients are not significant

163 at 95% confidence level

164 2.2 基于相似环流型的动力调整方法

利用 DA 方法的目的是确定和分离要素场中大气环流的贡献, 其中, 环流分量的物理意 165 义与大尺度环流因子的选择有关。相似环流型方法最早由 Lorenz(1969)提出, Deser(2016)以 166 海表面气压为环流因子,对1963-2012年北美冬季表面气温进行动力调整,利用此方法分离 167 了气候变化中大气环流的贡献。由于对流层中层 500hPa 近似为无辐散层,且 ECWMF 提供 168 169 的位势高度预测场准确率较高,具有预测实际指导意义。本研究利用 1979-2021 年 7 月 ERA5 再分析数据中的 500hPa 位势高度(Z500)对陆地降水(Pr)进行环流作用的分离。研究表明动力 170 调整结果对于环流范围的敏感性不高(郭瑞霞, 2019),且选择环流因子范围时应包含上游的 171 主要影响系统(Merrifield et al., 2017)。环流因子的范围相比于降水研究区域经向和纬向覆盖 172 173 范围均有所扩大,将高纬和海洋上空的影响系统的作用充分考虑进来。因此,本研究中选择 500hPa 位势区域为 0°-60°N, 20°E-180°, 而其他数据的范围为 15°N-55°N, 100° 174 E-155°E。我们以 2021 年 7 月 Pr 为例进行简要说明,研究方法如图 2 所示。在除目标年份 175 外的所有 42 个 Z500 场中随机选取 Na(这里取为 30)个,对目标年份的 Z500 做最优线性 176 177 拟合,得到第1组最优线性拟合系数以及最优拟合的第一个环流型C1。将上述最优线性拟 合系数应用到与随机选取的 Na 个 Z500 场对应的 Pr 场,得到第1组 2021 年7月大气环流 178 导致的降水分量场 P1。将随机拟合环流和降水的过程重复 100 次,得到 100 组环流对 2021 179 年 7 月的最优拟合环流型(C1, C2, …, C100),和相应的 100 组环流对应的降水分量场 180 (P1,P2,…,P100)。取 C1, C2, …, C100 的均值 C 作 2021 年 7 月的最优拟合环流型, 取 P1, 181 P2, …, P100 的均值 P 作为 2019 年 6 月大气环流导致的降水量,称为环流分量 (Pr-Circ)。 182 总降水距平与环流分量的差值则为余项 (Pr-Res)。 然后对 1979-2021 年 7 月降水按上述步骤 183 运算,即可得到整个研究时段内的动力分解结果。 184

185 2.3 陆气耦合和对流指标的选取

186 土壤湿度-降水反馈通过调节蒸散发实现,蒸散发改变了行星边界层内的有效水汽。土
187 壤中的水汽蒸发,水的相变改变了陆面有效能量(净短波辐射-净长波辐射-地表热通量)在

188 感热通量和潜热通量之间的分配(地表热通量变化量级较小,故不考虑)。也就是说,蒸散
189 发影响陆面有效能量向湍流热量通量的转化,这种影响可以通过蒸发分数(evaporative
190 fraction, EF)进行量化(Smoliak et al., 2010),



191

192 其中,LHF为潜热通量,SHF为感热通量,Rnet为陆面有效能量,GHF为地表热通量。对
193 于不同的蒸发分数范围,蒸发的主要限制因子不同,即水汽由陆面向大气传输的机制也存在
194 差异。当蒸发分数数值在 0.0-0.5 之间时,有效能量更多转化为感热。对应的区域陆面相对
195 干旱,称之为水分限制区域。蒸发分数在 0.5~1.0 之间的区域内土壤湿度充沛,有效能量主
196 要用于蒸散发,即能量限制区域。



197

198 图 2. 基于相似环流型的动力调整方法过程示意图

199 Figure 2. Schematic diagram of dynamic adjustment approach based on constructed circulation analogs 土壤湿度通过影响地表通量变化调节边界层的发展及大气中的水汽供给,影响边界层高 200 201 度、湿静力能、抬升凝结高度及夹卷,从而导致降水变化(Seneviratne et al., 2010)。已有研究 202 表明,边界层高度与我国夏季对流性降水间呈显著负相关关系,而与非对流性降水在全年的 相关性均较弱(姜荣升, 2021)。同时暴雨与边界层内强水平辐合紧密相关,且动量热量和水 203 204 汽先在边界层内累积然后再向上传输造成暴雨和强对流天气(陶诗言等, 1980)。对流有效位 205 能(CAPE)与垂直温度梯度有关,是水汽凝结成降水释放的潜热通量,也通常用于表示大 206 气静力稳定度,量化水汽凝结过程对降水的能量供应(孙继松和陶祖钰, 2012)。气团指数(K 207 指数)是描述对流层中下层的湿度廓线,也是反映中低层大气稳定度和湿度条件的综合指标,
208 一般 K 值愈大愈有利降水发生(孟妙志, 2003)。综上所述,本研究中以地表能量和热量通量

209 以及边界层高度作为描述陆面反馈的指标,以 CAPE 值和 K 指数为对流指标,并将其应用

210 于动力调整后降水距平余项物理意义的探讨中。

211

212 3. 中国东部相似环流下的两个7月降水对比

213 3.1 2021 年 7 月及其环流相似年中国东部降水距平及其动力调整

考虑到中国东部降水受到海气耦合、陆气耦合及地形等复杂过程的共同影响,相似的高 214 215 空环流型下可能产生不同的降水距平分布。我们分析了 2021 年 7 月 500hPa 位势高度和降水 与 1979-2020 年 7 月要素场的空间相关性,发现降水和环流的相似年并非一一对应 (图 lc)。 216 其中,500hPa 位势高度场中与 2021 年 7 月环流配置最相似的为 1999 年 7 月,然而 1999 年 217 7月与 2021年7月降水的距平空间相关系数约为-1,即降水分布相反。综合环流场和降水 218 219 场的空间相关性,我们选择 2011 年作为 2021 年的环流相似年(赵俊虎等, 2014),两者相关 220 系数为 0.49。由降水距平分布(图 3a,d)可知,两个 7 月东北和华南地区的降水距平分布 相似,差异主要体现在华北到长江中下游地区的经向区域。统计结果表明,拉尼娜事件与河 221 南省多次致灾面积极大的特旱、特涝年相对应(程炳岩等、1999)。2011年和2021年均为拉 222 223 尼娜事件次年,7月位势高度正距平中心位置相较于1979-2021年气候态均偏北,其中2021 年高压强度相对于 2011 年偏强, 2011 年高值中心位置则更偏北(图 3a, d)。2011 年 7 月 224 50°N 以北的正距平表明高纬冷空气活动少,华北和黄淮地区受反气旋性环流控制,500hPa 225 环流系统不利于降水产生。而 2021 年 7 月河南省处于异常偏强偏北的西太平副热带高压和 226 227 大陆高压以及西太平洋和南海热带气旋之间(图 3a),台风"烟花"和副热带高压之间强气 压梯度力加强了偏东风,来自西太平洋暖湿空气得以向内陆输送。 228

为了讨论 500hPa 相似环流在两个 7 月降水中的作用,接下来对这两个环流相似年的 7
月降水距平进行动力调整。根据 2021 年 7 月 500hPa 位势高度距平的相似环流分布(图 3b)
推测,即使副高南侧的偏东风向黄淮地区输送了大量水汽,500hPa 中高纬位势高度的普遍
正距平不利于降水产生。2021 年 7 月降水距平与环流分量和余项的空间相关系数分别为 0.36
和 0.69,两分量间的相关系数为-0.43,均通过了信度为 0.05 的统计检验。环流分量在河南
和山东省显著减弱,在长江中游地区增强。而移除环流作用后,2021 年 7 月降水距平余项
的高值区位于江淮到长江下游地区(图 3c),成为 "21.7"事件强降水的主要来源。同时,



236 2011年江淮到云南地区的干旱也主要体现在余项中(图 3f)。由动力调整的概念可知,环流
237 分量的物理意义非常明确,即受大尺度环流的影响产生的那部分降水,而余项的物理意义还
238 需要进行对比讨论才能确定。



240 图 3. 2021 年 7 月和 2011 年 7 月中国东部陆地降水距平及其分量(填色,单位 mm/day)和 500hPa
241 位势高度距平及其相似环流(等值线,单位 gpm)分布。其中(ad)分别为 2021 年和 2011 年 7 月
242 降水距平和 500hPa 位势高度距平,(b)为 2021 年和 2011 年 7 月降水距平环流分量和 500hPa 相
243 似环流距平,(c)为 2021 年和 2011 年 7 月降水距平余项。实线黑色等值线表示位势高度距平为
244 正,黑色虚线表示距平为负,绿色等值线表示 500hPa 位势高度 5880gpm 线

- Figure 3. The precipitation anomaly and its components (shaded, unit: mm/day), 500hPa geopotential
- 246 height anomaly and its similar circulation distribution (contour, unit: gpm) over Eastern China in July
- 247 2021 and 2011. (a, c) Precipitation anomaly and 500hPa geopotential height anomaly in July 2021 and
- 248 2011, respectively. (b, e) The precipitation anomaly circulation component and 500hPa similar
- circulation anomaly in July 2021 and 2011. (c, f) The residual of precipitation anomaly in July 2021
- and 2011. Solid contour line indicates positive potential height anomaly, and dotted line indicates
- 251 negative potential height anomaly
- 252

239

253 3.2 降水距平余项的物理机制

254 为了理解降水余项的物理意义,我们比较了相似环流背景下两个7月中国东部区域平均

的陆面水热指标和对流指数的异常(图4)。从土壤湿度-降水相互作用的机制出发,参考蒸 255 256 发分数的定义(Seneviratne et al., 2010),以土壤湿度、感热和潜热通量、地面净长波和短波辐 射作为陆面要素进行讨论。并利用边界层高度、对流有效位能和 K 指数来描述近地面湍流 257 和对流强度,即垂直环流的影响。上述陆面水热和对流异常用其距平与长期平均值的百分 258 比来表示。研究表明,全球气候模式中一般呈现出土壤湿度对于降水的正反馈,其机制主要 259 为土壤偏湿,蒸发增大使得边界层空气变增湿,对流抑制能减小,CAPE 增加,有利于对流 260 的激发(Eltahir, 1998)。中国东部地区两个7月间感热通量、净长波辐射、CAPE值、K指数 261 均差异显著,其中 CAPE 值差异最大,K 指数反号,表明 2011 年和 2021 年 7 月中国东部降 262 水的差异可能与对流强度的差异关系紧密。2011年7月陆面有效能量,即净长、短波辐射 263 之和,相对于 2021 年 7 月更强,蒸发比值与土壤湿度成正比,有效能量主要转化为感热通 264 量,蒸发较弱,不利于降水产生。2021年7月的对流强度强于2011年,以往研究表明对流 265 266 活动的发生发展带来了云和降水,减少了到达地表的太阳辐射,从而抑制了边界层高度的发 展(Liu and Liang 2010)。以往模拟研究(Zhang et al., 2013)指出夏季华北地区潜热显著负 267 距平与强干旱紧密相关,这与我们的结论一致。对比两个对流系数可知,2011年7月中国 268 东部区域不稳定能量显著偏弱,2021年7月的热力不稳定度均较强。 269



271 图 4. 2021 年和 2011 年 7 月中国东部陆面和近地面对流因子相对于 1979-2021 年 7 月气候态的距
272 平百分率(%), 8 个因子分别为表层土壤湿度(0-7cm)、潜热通量、感热通量、净长波辐射、

270

273 净短波辐射、边界层高度、对流有效位能和 K 指数,其中深蓝色柱表示 2021 年 7 月,红色柱表
274 示 2011 年 7 月

Figure 4. Anomaly percentage (%) of land surface and near surface convection factors in July 2021 and 2011 in Eastern China relative to the July climate state from 1979 to 2021. The eight factors are surface soil moisture (0-7cm), latent heat flux, sensible heat flux, net long wave radiation, net short wave radiation, planetary boundary layer height, convection available potential energy and K index, respectively, in which the dark blue column represents July 2021 and the red column represents July

280 281 2011

上述分析结果表明,降水距平余项可能是由陆面驱动的,接下来根据 7 月降水距平即 282 DA 分量与夏季土壤湿度的相关性作进一步论证。图 5 给出了中国东部地区 1979-2021 年 6、 283 7、8月土壤湿度与7月降水余项及其 DA 分量的距平相关系数(填色区域均通过了信度为 284 0.05 的统计检验)。7 月总降水距平和余项与 6、7、8 月局地 4 层土壤湿度总和距平的相关 285 均十分相似(空间相关系数分别为0.71,0.70和0.67,均通过了信度为0.05的统计检验), 286 表明土壤湿度变化对于降水的影响主要体现在余项当中,即余项的物理意义为陆面反馈的贡 287 献。6月土壤湿度变化对于7月降水对110°E以东地区起到负贡献,而对110°E以西地区以 288 正贡献为主,体现出土壤湿度-降水反馈的东西区域性差异(图 5a)。这种东西差异也同时反 289 290 应在土壤湿度对余项的影响中(图 5c)。进一步由蒸发比值的概念(见 2.3 节)可知,相对 干旱的区域内蒸发的主要限制因子为土壤含水量。当前期土壤偏湿时,蒸发增强,有利于7 291 月降水产生。6月土壤湿度对7月降水余项的负反馈机制可能与土壤偏湿引起的感热通量减 292 弱,近地面气温降低,边界层发展受限,不利于对流形成和增强(Ek and Holtslag, 2004)。同 293 294 时,总降水距平与6月土壤湿度在内蒙古和黑龙江北部以及长江中游地区的负相关也反应在 环流分量中(图 5b),即此地区 6 月土壤湿度的异常主要通过调节 500hPa 环流系统影响 7 295 月降水。左志燕等(2007)发现,当华北到长江中下游地区春季土壤偏湿时,地表蒸发增强温 296 度降低,海陆温差减弱,造成夏季风偏弱,雨带偏南,不利于华北地区降水。这一结论与图 297 5b 中的负相关中心一致,即 6 月土壤湿度偏高使得华北地区降水环流分量减弱。7 月同期土 298 壤湿度与降水余项间相关系数分布与总降水相似,正相关大值区位于黄土高原到东北地区南 299 部(图 5f)。其中河南省北部土壤湿度与降水余项的相关系数在 0.4 以上,表明此区域土壤 300 湿度-降水耦合较强。而代表 500hPa 系统影响的环流分量与同期土壤湿度间以负相关为主。 301 302 此外,由7月降水余项与8月土壤湿度间的相关性可知,7月降水对华北到江淮地区土壤湿 度的影响可以持续到次月(图 5i)。上述分析证实了降水距平余项代表陆气耦合作用下降水 303 的变化,同时华北到江淮地区是土壤湿度反馈的热点(Merrifield et al., 2017)。 304



308 填色区域均通过了信度为 0.05 的统计检验

305

306

309 Figure 5. Correlation between (a, d, g) precipitation anomaly, its (b, e, h) circulation components and (c,

- f, i) the residual in Eastern China in July from 1979 to 2021 and soil moisture anomaly from June to
- 311 August of the same year. Column 1, 2 and 3 are the correlation coefficients between precipitation

anomaly and soil moisture anomaly in June, July and August of the same year, respectively. The shaded

313 area denotes correlation coefficients pass the statistical tests with reliability of 0.05

314 3.3 大尺度和对流降水的动力调整

ECMWF 综合预报系统(IFS)中总降水分为大尺度降水和对流降水两部分,其中前者 315 主要由层云产生的降水,其空间尺度大于等于模式网格;后者表示由积云对流产生的降水, 316 其空间尺度小于模式网格。对流降水变量中包含了由大尺度配置激发的中小尺度的对流过 317 程。对流降水动力调整后得到的余项中可能包含了地形、陆面异常引起的垂直运动等的影响。 318 也就是说 ERA5 的对流降水和大尺度降水变量中均包含大气环流和局地过程两方面的影响, 319 对总降水和降水分量进行动力调整得到的分量物理意义并不相同。 2021 年 7 月大尺度和对 320 流降水的分布均与总降水类似,大值区位于华北、江淮和长江中下游地区,其中大尺度降水 321 的正距平更显著(图 6a, c)。由大尺度降水动力调整的结果可知,500hPa环流系统本身并不 322 323 能使得其在华北到江淮地区增加(图 6b)。移除对流层中层环流影响后,地形和局地对流的 作用使得大尺度降水余项显著增强(图 6c)。500hPa环流不利于华北到江淮地区形成对流降 324 水,对流降水正距平中心主要受陆面反馈过程贡献产生。研究表明,土壤湿度-降水耦合主 325 要通过调节局地过程驱动和影响对流降水(Koster et al., 2006),水汽再循环对于对流降水的影 326 327 响强于大尺度降水(Wei and Dirmeyer, 2012)。

328 结合上述分析, ECMWF系统和动力调整分别对降水从空间尺度和物理机制上进行了划
329 分,这种交叉的分类结果有助于我们更全面立体地理解这次降水过程。ECMWF系统分类中
330 大尺度降水对"21.7"事件起到主要贡献,而经动力调整后则由降水余项主导。通过这种简
331 单的交叉分类,可以对某一年7月降水的主要空间尺度和驱动因子有一个初步的判断。





347 的范围与环流分量十分相似。此外,中国东部的箱线图中环流分量的分布还表现出正负非对
348 称的特征,对流层中层环流对于旱涝事件的影响可能存在较大差异。因此接下来对分量贡献
349 随总降水距平的变化展开讨论。



351 图 7.1979-2021 年 7 月中国东部的(a)降水距平及环流分量和余项的箱线图和(b)降水距平按百分
352 位数分段和对应的动力调整分量贡献率均值,其中箱线图中的加号表示离群值,柱状图中的蓝色
353 条形表示降水距平环流分量,绿色条形表示降水距平余项

350

Figure 7. (a) Boxplot of precipitation anomaly and circulation components and residuals and (b) precipitation anomaly segmented by percentiles and the corresponding mean contribution rate of dynamic adjustment components in Eastern China from 1979 to July 2021. The plus sign in the boxplot represents outliers, the blue and the green bar in the histogram represents circulation component and the residual of precipitation anomaly

将 1979-2017 年 7 月中国东部和河南省内区域平均的降水距平按照 25 和 75 百分位数进 359 行分段,以此来讨论两分量对不同干湿程度降水距平的贡献度(图7b)。首先对总降水距平 360 361 按正负分段,对于干旱情形,根据负距平绝对值百分位数进行分段。其中横轴的-75th 表示 降水距平小于负距平绝对值 75 百分位,即 "<-75th" 对应严重干旱的情形,其余各分段含 362 义同理。在研究时段内,对于降水异常较小的7月而言,中国东部的降水距平由环流作用主 363 导,抵消了局地热力作用的负贡献。而当旱涝严重程度超过25百分位数后,余项的贡献由 364 负转正。中国东部干旱严重程度介于25和75百分位数间的情形下,环流分量的贡献接近于 365 1,余项贡献可不略不计。而当干旱程度进一步加强时,余项的贡献则更为重要。Orth 和 366 Seneviratne (2016)利用全球气候模式敏感性试验发现,土壤湿度对于不同纬度带的气温和降 367

368 水的影响均表现出不对称性,对于极端高温和降水的影响最强,这可以通过土壤湿度和蒸发
369 比值之间的不对称关系来解释,且在干旱情形下这种不对称会更显著。上述个例讨论中得出
370 华北到长江中下游地区 2011 年偏干和 2021 年洪涝事件中余项的主导作用的结论,并不意味
371 着否定环流作用的重要影响,而是对于旱涝严重程度大于 75 百分位数的事件而言大气环流
372 的影响小于平均情形。也就是说,干旱事件中大尺度环流的贡献很微弱,总降水距平由余项
373 的强负距平主导。

374

385

375 4. 大尺度环流和陆气耦合在河南"21.7"事件中的贡献

上述中国东部7月降水的动力调整表明,对流和陆气耦合等局地因素是2021年暴雨的 376 重要成因。接下来聚焦河南省分析"21.7"事件的极端性是否与局地过程紧密相关。2021 377 年7月河南地区降水整体偏强,大值中心位于河南省北部。对2021年7月河南省降水距平 378 379 进行动力调整,其分布如图8所示,降水余项在河南省表现出很强的区域性特征。除信阳市 南部外, 2021年7月河南省降水正距平主要由余项贡献产生(图 8ac),强调了余项在"21.7" 380 降水事件中的重要作用。河南省上空 500hPa 相似环流为高压南侧边缘区域,环流分量在河 381 南省中部的负中心被余项抵消(图 8b)。上述结果表明,即使 500hPa 环流系统对于中国东 382 383 部夏季降水有决定性影响,河南省区域强降水的预测中若仅考虑大气环流作用是不充分的。 2011年7月河南北部在环流分量主导下偏湿,南部则在余项主导下偏干。 384



386 图 8. 2021 年 7 月河南省陆地降水距平及其分量(填色,单位 mm/day)和 500hPa 位势高度距平
387 及其相似环流(等值线,单位 gpm)分布,其中(a)为 2021 年 7 月降水距平和 500hPa 位势高度
388 距平,(b)为 2021 年 7 月降水距平环流分量和 500hPa 相似环流距平,(c)为 2021 年 7 月降水距平
389 余项

Figure 8. The precipitation anomaly and its components (shaded, unit: mm/day), 500hPa geopotential
height anomaly and its similar circulation distribution (contour, unit: gpm) in Henan Province in July
2021 and 2011. (a) Precipitation anomaly and 500hPa geopotential height anomaly, (b) the precipitation

393 anomaly circulation component and 500hPa similar circulation anomaly, (c) the residual of

394 precipitation anomaly in July 2021

395 接下来从相似环流年的余项影响因子对比,分析陆面过程对于"21.7"河南暴雨的贡献。 对比河南省 2021 年和 2011 年 7 月陆面水热状态和对流因子距平百分率 (图 9),发现表层 396 土壤湿度、感热通量、地表净短波和长波辐射、CAPE 值和 K 指数的符号均相反。其中河南 397 省感热通量在 2021 年 7 月显著偏弱,距平百分率接近-20%,在 2011 年 7 月则超过 35%, 398 399 与强旱涝事件发生紧密相关。CAPE 值的显著差异体现了水汽对降水能量供给的差异,2011 400 年 7 月蒸发释放潜热相对于气候态偏低 40%以上,陆面有效能量主要转化为感热。与整个 中国东部(图4)相比,河南省陆面和对流因子的距平百分率存在较大差异,符号和量级上 401 都有很强的特殊性。与环流相似的干旱年份相比,感热通量和对流有效位能的差异引起了余 402 项的显著干湿差异。研究指出,我国北方干旱半干旱区是我国陆气相互作用的热点地区,土 403 404 壤湿度增大导致潜热通量增加,为降水提供了所需的水汽条件,同时感热通量减小使得温度 不利于气团的抬升凝结(杨扬等, 2021)。 降低,对边界层的驱动减弱, 405



406

Figure 9. Anomaly percentage (%) of land surface and near surface convection factors in July 2021 and
2011 in Henan Province relative to the July climate state from 1979 to 2021. The meanings of the eight
factors are the same as Fig4

412 为了在更普遍的情形下讨论余项对于河南省极端降水的贡献,图 10 给出了河南省
413 1979-2021 年 7 月降水距平的年际变率。研究时段内河南省 7 月降水的年际变率呈西北低东
414 南高的分布,两个动力调整分量的分布型与总体相似。但环流分量的年际变率明显偏小,表
415 明仅考虑 500hPa 环流系统作用时,不能反映河南省的极端旱涝事件。降水余项在西部较小,
416 从分布来看可能与太行山和伏牛山的地形阻挡有关。暴雨的形成与地形作用密切相关,山地
417 地形使得气旋性环流得到发展,且有利于在山地地区形成高温和高湿中心,进而形成对流不

⁴⁰⁷ 图 9. 2021 年和 2011 年 7 月河南省陆面和近地面对流因子相对于 1979-2021 年 7 月气候态的距平

⁴⁰⁸ 百分率 (%), 8个因子的含义同图 4

418 稳定层结,有利于暴雨发生(翟国庆等, 1995)。考虑到统计方法难以分离出地形的影响,有

419 待在后续工作中利用数值模式敏感性试验对地形作用展开详细讨论。



420

421 图 10. (a-c) 1979-2021 年 7 月河南省降水及其分量的年际变率(单位 mm/day)分布,分别对应(a)
422 陆地降水距平及其(b)环流分量和(c)余项,(d) 1979-2021 年 7 月河南省的降水距平及环流分量和
423 余项的箱线图

Figure 10. (a-c) Interannual variability (unit: mm/day) distribution of precipitation and its components in Henan Province from 1979 to July 2021, corresponding to (a) land precipitation anomaly and its (b) circulation component and (c) the residual, respectively. And (d) boxplot of precipitation anomaly and its circulation component and residual in Henan Province from 1979 to July 2021

428

429 5. 结论与讨论

430 2021 年 7 月我国多地出现暴雨、大暴雨,部分地区出现特大暴雨,其中郑州观测站突
431 破中国大陆小时降雨量突破历史极值,累积降水量为 1961 年以来之最。本文利用 ERA5
432 月值再分析资料和基于相似环流性的动力调整方法,探讨 2021 年 7 月与历史相似环流年降

433 水的差异及其成因。在分离大尺度环流动力作用后,讨论了陆气耦合过程对于中国东部和河434 南省降水的可能影响,得到如下主要结论:

435 1)综合 500hPa 位势高度和降水距平空间相关性分析可知,与 2021 年 7 月中国东部
436 500hPa 环流型最相似的一年为 2011 年 7 月,但其对应的降水分布在华北到长江中下游地区
437 体现出显著差异。

438 2)对 1979-2021 年 7 月中国东部降水距平进行基于相似环流型的动力调整,划分为环
439 流分量和余项两部分,总降水距平与余项的空间相似性强于环流分量,其中 2021 年 7 月江
440 淮到长江下游地区的降水高值区主要体现在余项中。

441 3)动力调整的物理意义取决于环流因子的选择,根据无辐散层 500hPa 位势高度的相似
442 型分离 7 月陆地降水距平,由相关分析得出余项可以描述陆气耦合影响下产生的那部分降水
443 变化,2021 年 7 月河南省的强降水与感热显著负距平和强对流不稳定能量有关。

444 4)1979-2021 年 7 月降水距平的分布和年际变率表明,大尺度环流作用主导了较弱的
445 降水波动,而陆气耦合过程对于 7 月降水的极值起主要贡献,中国东部夏季极端降水的预测
446 中应该提高对陆面反馈的重视程度。同时环流作用对于强旱涝事件的作用是不对称的。

本研究中对降水动力调整后余项的分析中仅考虑了土壤湿度对降水的直接和作用。 447 448 事实上,土壤湿度对降水可能也存在非局地和间接作用。前人研究证实土壤湿度异常通 过影响地表湍流通量(感热通量和潜热通量)调节空气性质特性(温度湿度等),从而 449 可能通过平流对大尺度环流产生一定影响。由于土壤湿度的记忆性,这种影响也并不是 450 瞬时过程,而是有一定的滞后。Rowntree 和 Bolton(1983)首先发现中欧土壤湿度异常通过 451 改变湍流通量的分配影响降水,这种效应在偏南气流作用下得以延伸到斯堪的纳维亚南 452 部。后续一些研究也表明,土壤湿度异常并没有直接改变大气环流型,而是调节了空气 453 湿度等性质,其变化又在大尺度环流作用下向下游输送(Liu et al., 2017: Yang and Wang, 454 2019: 孙莉娟等, 2015)。综上所述, 我们认为在本研究中, 使用基于相似环流型的动力 455 调整方法来区分研究大气环流和陆面过程的贡献是合理的且有效的,而关于陆面过程对 456 降水的间接影响也将会在今后研究中利用数值模式来开展。另外,本文研究结果强调了 457 局地热力作用在夏季极端降水预测中的重要意义,可以为汛期降水预测提供一定参考。 458 此外,东北—西南向的太行山与东西向的嵩山在河南省西侧形成喇叭口地形,在陡峭的 459 460 复杂地形条件下,边界层的作用是十分重要的,统计方法难以直接分析地形对于边界层 发展的影响,有待于借助数值模式模拟试验进一步研究和讨论。 461

462

致谢 感谢高学杰研究员提供的 CN05.1 观测数据和两位评审专家的宝贵意见。

参考文献(References)

465	参考又献(References)
466	钱维宏和陆波. 2010. 我国汛期季度降水预报得分和预报技巧 [J]. 气象, 2010, 36: 1-7, Qian
467	Hongbo, Lu Bo. 2010. Score and skill of seasonal forecasts of Summer Precipitation in China
468	[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 29(8): 313-320.,
469	10.7519/j.issn.1000-0526.2010.10.001.
470	J. Li and B. Wang. 2018. Predictability of summer extreme precipitation days over eastern China.[J].
471	Climate Dynamics, 51, 4543-4554, 10.1007/s00382-017-3848-x.
472	杨涵洧, 龚志强, 王晓娟, 等. 2021. 中国东部夏季极端降水年代际变化特征及成因分析 [J]. 大
473	气科学, 2021, 45: 683-696, Yang Hanwei, Gong Zhiqiang, Wang Xiaojuan, et al. 2021.
474	Analysis of the characteristics and causes of interdecadal changes in the summer extreme
475	precipitation over Eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),
476	45(3): 683-696., 10.3878/j.issn.1006-9895.2007.19247.
477	中国气象局气候变化中心 2021. 中国气候变化蓝皮书(2021). 科学出版社. CMA Climate Change
478	Centre, 2021. Blue Book on Climate Change in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science
479	Press.
480	龚志强和封国林. 2008. 中国近 1000 年旱涝的持续性特征研究 [J]. 物理学报, 2008, 57:
481	3920-3931, Gong Zhiqiang, Feng Guolin. 1999. The research of durative characteristics of dry
482	wet series of China during the past 1000 years[J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 57(6):
483	3920-3931., 10.3321/j.issn:1000-3290.2008.06.102.
484	张霞, 杨慧, 王新敏, 等. 2021. "21.7"河南极端强降水特征及环流异常性分析 [J]. 大气科学学
485	报, 2021, 44: 672-687, Zhang Xia, Yang Hui, Wang Xinmin, et al. 2021. Analysis on
486	characteristic and abnormality of atmospheric circulations of the July 2021 extreme
487	precipitation in Henan[J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(5):
488	7672-687., 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210907001.
489	竹磊磊, 常军和张善强. 2012. 河南夏季干旱气候特征分析 [J]. 气象与环境科学, 2012, 35: 49-55,
490	Zhu Leilei, Chang Jun, Zhang Shanqiang. 2014. Characteristic analysis of summer drought in
491	Henan Province[J]. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 35(1): 49-55.,
492	10.3969/j.issn.1673-7148.2012.01.009.
493	Y. Ding and J. C. L. Chan. 2005. The East Asian summer monsoon: an overview.[J]. Meteorol. Atmos.
494	Phys., 89, 117-142, 10.1007/s00703-005-0125-z.
495	R. Zhang. 2015. Changes in East Asian summer monsoon and summer rainfall over eastern China
496	during recent decades.[J]. Chin. Sci. Bull., 60, 1222-1224,
497	<u>https://doi.org/10.1007/s11434-015-0824-x</u> .
498	金祖辉和陶诗言. 1999. ENSO 循环与中国东部地区夏季和冬季降水关系的研究 [J]. 大气科学,
499	1999, 23: 663-672, Jin Zuhui and Tao Shiyan. 2017. A study on relationshipes between ENSO
500	cycle and rainfalls during summer and winter in Eastern China[J]. Chinese Journal of
501	Atmospheric Sciences (in Chinese), 23(6): 663-672.
502	郝立生,丁一汇和闵锦忠. 2012. 东亚季风环流演变的主要模态及其与中国东部降水异常的联系
503	[J]. 高原气象, 2012, 31: 1007-1018, Hao Lisheng, Ding Yihui, Min Jinzhong. 2012. Main
504	modes in East Asian monsoon circulation evolution and its relationship with precipitation
505	anomaly in Eastern China[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 31(4): 1007-1018.

506	M. Li and Z. Ma. 2012. Soil moisture-based study of the variability of dry-wet climate and climate
507	zones in China.[J]. Chinese Science Bulletin, 58, 10.1007/s11434-012-5428-0.
508	L. Wang, W. Chen, G. Huang, et al. 2017. Changes of the transitional climate zone in East Asia: past
509	and future.[J]. Climate Dynamics, 49, 1463-1477, 10.1007/s00382-016-3400-4.
510	S. Conil, H. Douville and S. Tyteca. 2007. The relative influence of soil moisture and SST in climate
511	predictability explored within ensembles of AMIP type experiments.[J]. Clim. Dyn., 28,
512	125-145, 10.1007/s00382-006-0172-2.
513	R. Koster, P. Dirmeyer, Z. Guo, et al. 2004. Regions of strong coupling between soil moisture and
514	precipitation.[J]. Science, 305, 1138-40, 10.1126/science.1100217.
515	J. Shukla and Y. Mintz. 1982. Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate.[J].
516	Science, 215, 1498-1501, 10.1126/science.215.4539.1498.
517	林朝晖, 刘辉志, 谢正辉, 等. 2008. 陆面水文过程研究进展 [J]. 大气科学, 2008, 32 (4): 935-949,
518	Lin Zhaohui, Liu Huizhi, Xie Zhenghui, et al. Recent progress in the land-surface and
519	hydrological process studies. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2008, 32
520	(4): 935-949., 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.19.
521	J. Zhang, W. Wang and J. Wei. 2008. Assessing land-atmosphere coupling using soil moisture from the
522	Global Land Data Assimilation System and observational precipitation.[J]. J. Geophys. Res.:
523	Atmos., 113, 10.1029/2008JD009807.
524	刘婷婷, 陈海山, 蒋薇, 等. 2016. 基于土壤湿度和年际增量方法的我国夏季降水预测试验 [J].
525	大气科学, 2016, 40 (3): 591-603, Liu Tingting, Chen Haishan, Jiang Wei, et al. 2016. Summer
526	precipitation prediction in China using soil moisture and the year-to-year increment approach
527	[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (3): 591–603.,
528	10.3878/j.issn.1006-9895.1507.15161.
529	左志燕和张人禾. 2007. 中国东部夏季降水与春季土壤湿度的联系 [J]. Chinese Science Bulletin,
530	2007, 52: 1722-1724, Zuo Zhiyan, Zhang Renhe. 2007. Relationship between summer
531	precipitation and spring soil moisture in eastern China[J]. Chinese Science Bulletin (in
532	Chinese), 52(14): 1722–1724., 10.3321/j.issn:0023-074x.2007.14.021.
533	E. M. Fischer, S. I. Seneviratne, P. L. Vidale, et al. 2007. Soil Moisture-Atmosphere Interactions during
534	the 2003 European Summer Heat Wave.[J]. J. Climate, 20, 5081-5099, 10.1175/jcli4288.1.
535	R. Orth and S. Seneviratne. 2016. Variability of soil moisture and sea surface temperatures similarly
536	important for warm-season land climate in the Community Earth System Model.[J]. J. Climate,
537	30, 10.1175/JCLI-D-15-0567.1.
538	Z. Wu, H. Feng, H. He, et al. 2021. Evaluation of Soil Moisture Climatology and Anomaly
539	Components Derived From ERA5-Land and GLDAS-2.1 in China.[J]. Water Resour Manag,
540	35, 629-643, 10.1007/s11269-020-02743-w.
541	K. L. Brubaker, D. Entekhabi and P. S. Eagleson. 1993. Estimation of Continental Precipitation
542	Recycling.[J]. Journal of Climate, 6, 1077-1089,
543	10.1175/1520-0442(1993)006<1077:Eocpr>2.0.Co;2.
544	N. Nicolai-Shaw, L. Gudmundsson, M. Hirschi, et al. 2016. Long-term predictability of soil moisture
545	dynamics at the global scale: Persistence versus large-scale drivers.[J]. Geophys. Res. Lett.,
546	10.1002/2016GL069847.
547	B. V. Smoliak, J. M. Wallace, P. Lin, et al. 2015. Dynamical adjustment of the Northern Hemisphere
548	surface air temperature field: Methodology and application to observations.[J]. J. Climate, 28,
549	1613-1629, 10.1175/JCLI-D-14-00111.1.

550 X. Guan, J. Huang, R. Guo, et al. 2015. The role of dynamically induced variability in the recent 551 warming trend slowdown over the Northern Hemisphere.[J]. Scientific Reports, 5, 12669, 552 10.1038/srep12669. 553 A. Merrifield, F. Lehner, S.-P. Xie, et al. 2017. Removing circulation effects to assess central U.S. 554 land-atmosphere interactions in the CESM Large Ensemble.[J]. Geophys. Res. Lett., 44, 555 9938-9946, 10.1002/2017GL074831. C. Saffioti, E. M. Fischer and R. Knutti. 2017. Improved consistency of climate projections over 556 557 Europe after accounting for atmospheric circulation variability.[J]. J. Climate, 30, 7271-7291, 558 10.1175/JCLI-D-16-0695.1. 559 C. Saffioti, E. M. Fischer, S. C. Scherrer, et al. 2016. Reconciling observed and modeled temperature 560 and precipitation trends over Europe by adjusting for circulation variability.[J]. Geophys. Res. 561 Lett., 43, 8189-8198, 10.1002/2016gl069802. 562 L. Wu and J. Zhang. 2013. Role of land-atmosphere coupling in summer droughts and floods over 563 eastern China for the 1998 and 1999 cases.[J]. Chinese Science Bulletin, 58, 3978-3985, 564 10.1007/s11434-013-5855-6. 刘婷婷, 朱秀芳, 郭锐, 等. 2021. ERA5 再分析降水数据在中国的适用性分析 [J]. 干旱区地理, 565 566 2021: 16, Liu Tingting, Zhu Xiufen, Guo Rui, et al. 2021. Analysis on the applicability of 567 ERA5 reanalysis of precipitation data in China[J/OL]. Arid Land Geography (in Chinese). http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20211103.1509.002.html. 568 吴佳和高学杰. 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 [J]. 地球物理学 569 570 报, 2013, 56: 1102-1111, Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset over 571 China region and comparison with the other datasets [J]. Chinese Journal of Geophysics (in 572 Chinese), 56(4): 1102-1111. 573 中华人民共和国统计局 2018. 中国统计年鉴一2018. 中国统计出版社. National Bureau of 574 Statistics of China, 2018. China Statistical Yearbook-2018 (in Chinese) [M]. Beijing: China 575 Statistics Press. 576 中华人民共和国统计局 2019. 中国统计年鉴一2019. 中国统计出版社. National Bureau of 577 Statistics of China, 2019. China Statistical Yearbook-2019 (in Chinese) [M]. Beijing: China 578 Statistics Press. 579 中华人民共和国统计局 2020. 中国统计年鉴一2020. 中国统计出版社. National Bureau of 580 Statistics of China, 2020. China Statistical Yearbook-2020 (in Chinese) [M]. Beijing: China 581 Statistics Press. 中华人民共和国统计局 2021. 中国统计年鉴一2021. 中国统计出版社. National Bureau of 582 583 Statistics of China, 2021. China Statistical Yearbook-2021 (in Chinese) [M]. Beijing: China 584 Statistics Press. 585 E. Lorenz. 1969. Atmospheric predictability as revealed by naturally occurring analogues.[J]. J. Atmos. 586 Sci., 26, 636-646, 10.1175/1520-0469(1969)26<636:APARBN>2.0.CO;2. C. Deser, L. Terray and A. S. Phillips. 2016. Forced and internal components of winter air temperature 587 588 trends over North America during the past 50 Years: Mechanisms and implications.[J]. J. 589 Climate, 29, 2237-2258, 10.1175/JCLI-D-15-0304.1. 590 郭瑞霞.2019. 北半球中高纬度冷季气温和降水变化的归因分析 [D]. 兰州大学博士学业论文. 591 Guo Ruixia. 2019. Attribution of winter temperature and precipitation change over 592 mid-to-high latitude in Northern Hemisphere[D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Lanzhou 593 University

594 B. V. Smoliak, J. M. Wallace, M. T. Stoelinga, et al. 2010. Application of partial least squares 595 regression to the diagnosis of year-to-year variations in Pacific Northwest snowpack and 596 Atlantic hurricanes.[J]. Geophys. Res. Lett., 37, 10.1029/2009gl041478. 597 S. I. Seneviratne, T. Corti, E. L. Davin, et al. 2010. Investigating soil moisture-climate interactions in a 598 changing climate: A review.[J]. Earth-Sci. Rev., 99, 125-161, 599 https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004. 姜荣升. 2021. 基于 CWRF 研究我国降水变化及其与边界层高度的关系 [D]. 南京信息工程大学 600 601 博士学位论文. Jiang Rongsheng. 2021. Study on precipitation variation and its relationship 602 with boundary layer height in China based on CWRF[D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), 603 Nanjing University of Information Science and Technology. 604 陶诗言, 丁一汇和周晓平. 1980. 暴雨和强对流天气的研究 [J]. 大气科学, 1980. 3: 227-238, Tao 605 Shiyan, Ding Yihui, Zhou Xiaoping. 1980. Study on Rainstorm and severe convective 606 weathert [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 3(3): 227-238., 10.3878/j.issn.1006-9895.1979.03.05. 607 孙继松和陶祖钰. 2012. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题 [J]. 气象, 2012, 38: 164-173, 608 609 Sun Jisong, Tao Zuyu. 2012. Some essential issues connected with severe convective weather 610 analysis and forecast [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 38(2): 164-173., 611 CNKI:SUN:QXXX.0.2012-02-007. 孟妙志. 2003. K 指数在暴雨分析预报中的应用 [J]. 气象, 2003, 29: 65-66, Meng Miaozhi, 2017. 612 613 Application of K index in rainstorm analysis and forecast [J]. Meteorological Monthly (in 614 Chinese), 29(8): 313-320., 10.7519/j.issn.1000-0526.2003.8.014. 赵俊虎, 支蓉, 申茜, 等. 2014. 2012 年我国夏季降水预测与异常成因分析 [J]. 大气科学, 2014, 615 616 38: 237-250, Zhao Junhu, Zhi Rong, Shen Qian, et al. 2014. Prediction of the distribution of 617 the 2012 summer rainfall in China and analysis of the cause for anomaly[J]. Chinese Journal 618 of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(2): 237-250., 10.3878/j.issn.1006-9895. 程炳岩, 钱晓燕和朱业玉. 1999. ENSO 事件与河南旱涝年型的关系 [J]. 气象与环境科学, 1999: 619 620 22-23, Cheng Bingyan, Qian Xiaoyan, and Zhuyeyu. 1999. Relationship between ENSO 621 events and drought and flood years in Henan Province[J]. Henan Meteorology (in Chinese), 622 (02): 22-23, CNKI:SUN:HNQX.0.1999-02-015. 623 E. A. B. Eltahir. 1998. A soil moisture-rainfall feedback mechanism: Theory and observations.[J]. 624 Water Resources Research, 34, 10.1029/97WR03497. M. B. Ek and A. A. M. Holtslag. 2004. Influence of soil moisture on boundary layer cloud 625 626 development.[J]. J. Hydrometeor., 5, 86-99, 627 10.1175/1525-7541(2004)005<0086:IOSMOB>2.0.CO;2. R. D. Koster, Z. C. Guo, P. A. Dirmeyer, et al. 2006. GLACE: the global land-atmosphere coupling 628 629 experiment. Part II: analysis.[J]. Journal of Hydrometeorology, 7, 10.1175/JHM511.1. 630 J. Wei and P. A. Dirmeyer. 2012. Dissecting soil moisture-precipitation coupling.[J]. Geophysical Research Letters, 39, 19711, 10.1029/2012GL053038. 631 R. Orth and S. I. Seneviratne. 2016. Variability of Soil Moisture and Sea Surface Temperatures 632 633 Similarly Important for Warm-Season Land Climate in the Community Earth System 634 Model.[J]. Journal of Climate, 30, 2141-2162, 10.1175/JCLI-D-15-0567.1. 635 杨扬,杨启东,王芝兰,等.2021.中国区域陆气耦合强度的时空分布特征 [J].干旱气象,2021, 636 39: 374-385, Yang Yang, Yang Qidong, Wang Zhilan, et al. A study of spatial and temporal 637 distribution of land-atmosphere coupling strength in China[J]. Journal of Arid Meteorology,

638	2021, 39(3): 374-385., 10.11755/j.issn.1006-7639(2021)-03-0374.
639	翟国庆, 高坤, 俞樟孝, 等. 1995. 暴雨过程中中尺度地形作用的数值试验 [J]. 大气科学, 1995,
640	19 (4): 475-480, Zai Guoqing, Gao Kun, Yu Zhangxiao, et al. 1995. Numerical simulation of
641	the effects of mesoscale topography in a heavy rain process [J]. Chinese Journal of
642	Atmospheric Sciences (in Chinese), 19(4): 475-480., 10.3878/j.issn.1006-9895.1995.04.10.
643	P. R. Rowntree and J. A. Bolton. 1983. Simulation of the atmospheric response to soil moisture
644	anomalies over Europe.[J]. Q.J.R. Meteorol. Soc., 109, 501-526,
645	https://doi.org/10.1002/qj.49710946105.
646	L. Liu, R. Zhang and Z. Zuo. 2017. Effect of spring precipitation on summer precipitation in Eastern
647	China: role of soil moisture.[J]. J. Climate, 9183–9194, 10.1175/JCLI-D-17-0028.1.
648	K. Yang and C. Wang. 2019. Seasonal persistence of soil moisture anomalies related to freeze-thaw
649	over the Tibetan Plateau and prediction signal of summer precipitation in eastern China.[J].
650	Clim. Dyn., 53, 10.1007/s00382-019-04867-1.
651	孙莉娟,陈海山,潘敖大,等.2015. 土壤湿度年际异常对中国春、夏季气候模拟的影响 [J]. 气象
652	科学, 2015, 35 (05): 521-533., Sun Lijuan, Chen Haishan, Pan Aoda, et al. 2015. Impacts of
653	interannual soil moisture anomaly on climate simulation in spring and summer over China[J].
654	Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 35(05): 521-533.,
655	10.3969/2014jms.0099.
656	ser th



XX

173

7

