

华北近 60 年夏季降水年际异常与大气动力、水汽条件关系的研究

摘要: 为认识华北夏季降水年际异常成因和改进气候监测预测技术, 本文基于华北夏季降水数据、NCEP/NCAR 再分析环流数据, 采用相关、合成和环流异常回归重构等方法, 分析了东亚副热带夏季风指数、华北大气动力上升指数与华北夏季降水的关系。主要结果如下: (1) 东亚副热带夏季风指数和华北大气动力上升指数与华北夏季降水有很好的对应关系。当两个指数偏强时, 华北夏季降水会异常偏多; 两个指数偏弱, 华北夏季降水异常偏少; 如果两个指数强弱不一致时, 华北会出现区域性降水偏多情况, 但全区整体降水量基本为正常值。(2) 华北夏季降水异常是东亚副热带夏季风和华北大气动力上升运动协同作用的结果。在东亚副热带夏季风指数、华北大气动力上升指数偏强年, 夏季 500hPa 层贝加尔湖槽会加深、西北太平洋副热带高压会偏北, 华北处于“东高西低”的环流型控制下, 西部低槽东移受阻, 在华北维持较长时间的大气上升运动; 850hPa 层印度夏季风、东亚副热带夏季风会偏强, 这时热带印度洋西风水汽输送以及东亚副热带地区偏南风水汽输送、或东南风水汽输送会加强, 华北水汽来源充足。这种高、低空环流配置非常有利于造成华北夏季降水异常偏多。反之, 华北夏季降水会异常偏少。(3) 前期 4-5 月, 东亚副热带夏季风指数、华北大气动力上升指数偏强, 可以作为华北夏季降水异常偏多的一个气候监测预测指标。

关键词: 华北; 夏季; 降水异常; 大气环流; 影响机制

Study on the Relationship between Interannual Anomaly of Summer Precipitation in North China and Atmospheric Dynamics, Water Vapor Conditions in Recent 60 Years

Abstract: In order to understand the cause of the interannual anomaly of summer precipitation in North China and improve the climate monitoring and prediction technology, based on the summer precipitation data in North China and the NCEP/NCAR reanalysis circulation data, this paper analyzes the relationship between the East Asian subtropical summer monsoon index (EAMI), the North China atmospheric dynamic rise index (HBDRI) and the summer precipitation in North China by using the methods of correlation, synthesis and circulation anomaly regression reconstruction. The main results are as follows: (1) The East Asian subtropical summer monsoon index and the North China atmospheric dynamic rise index have a good correspondence with the summer precipitation in North China. When the two indexes are stronger, the summer precipitation in North China will be above mean. When the two indexes are weaker, the summer precipitation in North China will be below mean. If the strength of the two indexes is not consistent, North China will have a regional precipitation above mean, but the overall precipitation in the whole region is basically normal. (2) The summer precipitation anomaly in North China is the result of the synergistic effect of the East Asian subtropical summer monsoon and the upward movement of atmospheric dynamics North China. In the year when the East Asian subtropical summer monsoon index and the North China atmospheric dynamic rise index are stronger, the Baikal Lake trough at the 500hPa level will deepen in summer, the Northwest Pacific subtropical high will be northward, so that North China is under the control of the circulation pattern of "high in the east and low in the west", and the western low trough will be blocked from moving eastward, and the atmospheric rising movement will be maintained for a long time in North China. The Indian summer monsoon and the East Asian subtropical summer monsoon will be stronger at 850hPa level. At this time, the westerly wind water vapor transport in the tropical

42 Indian Ocean, the southerly wind water vapor transport in the East Asian subtropical region, or the southeast wind
43 water vapor transport will be strengthened, and the source of water vapor in North China will be sufficient. This
44 configuration of high and low level circulation is very conducive to causing more summer precipitation in North
45 China. On the contrary, the summer precipitation in North China will be unusually below mean. (3) The stronger
46 the East Asian subtropical summer monsoon index and the North China atmospheric dynamic rise index in the
47 early April-May period can be used as a climate monitoring and prediction predictor for the abnormally high
48 summer precipitation in North China.

49 **Key words:** North China; Summer; Precipitation anomaly; Atmospheric circulation; Influence mechanism

50

51 0 引言

52 华北地区位于东亚夏季风北边缘, 降水季节分配不均, 降水量高度集中在夏季, 占全年降水总
53 量的 65%以上, 是我国东部地区降水集中程度最大的一个地区(韦志刚等, 1999; 刘海文和丁一汇,
54 2011; 桑林和余乐福, 2018; 郝立生和侯威, 2018; 谭政华和巩远发, 2022), 常常引发严重洪涝和干
55 旱等重大自然灾害, 对该地区工农业生产、生态环境建设和人民生命财产安全带来很大威胁, 有时
56 会造成严重损失(黄荣辉等, 2003; 符淙斌等, 2005; 丁一汇等, 2013b; 冉令坤等, 2021; Luo et al,
57 2022)。认识华北夏季降水异常变化规律和改进降水预测技术, 对科学调度工农业生产、防灾减灾
58 和生态建设等都非常重要。

59 对华北夏季降水异常的认识, 最早始于对季风的研究(竺可桢和李良骥, 1934; 涂长望和黄士松,
60 1944; 丁一汇等, 2018)。华北降水主要受东亚夏季风影响, 东亚夏季风包含热带夏季风、副热带夏
61 季风(Tao 和 Chen, 1987; Zhu et al., 1986; Li 和 Zeng, 2003; Ding 2004; Ding 和 Chan, 2005), 它们之间
62 存在相互作用, 直接影响中国大范围旱涝。传统认为, 东亚夏季风最先在南海地区爆发, 5 月中下
63 旬北移至华南地区, 形成华南前汛期降水(Ding et al., 2004); 之后, 夏季风雨带经历两次北跳和停
64 滞, 先后形成江淮梅雨和华北雨季(陈隆勋等, 1991; Ding, 2004)。大多数研究(陈隆勋等, 2000; Wang
65 和 Lin, 2002; Wang 等, 2004; Ding, 2004; Ding et al., 2007; He 和 Zhu, 2016)表明, 华北夏季降水异常
66 是南海热带季风爆发后逐渐向北推进的结果(Lau 和 Yang, 1997; Webster et al., 1998; 陈丽娟等,
67 2019); 另有研究(何金海等, 2007, 2008; Zhao et al., 2007; 胡亮等, 2011; 郝立生和丁一汇, 2023)
68 认为, 华北雨季并非是后者向北推进的结果, 东亚热带季风和副热带季风的降水性质明显不同。总
69 之, 东亚夏季风系统的协同作用或异常是造成华北夏季降水异常的一个重要原因(Chen et al., 2020)。

70 在动力条件影响方面, 赵平等(2008)曾提出亚洲-太平洋涛动(Asian-Pacific Oscillation, APO)
71 概念, 进一步研究(章颖和赵平, 2012)表明, 当夏季亚洲-太平洋涛动指数 APO 偏高(低)时, 西
72 北太平洋副热带高压偏强(弱)并偏北(南), 东亚低层西南风偏强(弱), 华北以及东北亚降水
73 偏多(少)。胡泊(2019)研究发现, 欧亚遥相关型 EU (Eurasian teleconnection, EU) 和东亚-太平
74 洋遥相关型 EAP (East Asia-Pacific teleconnection pattern, EAP) 两者具有独立性, 它们的协同作用
75 可造成华北地区夏季降水异常。Wang 等(2018)研究表明, EAP 型正(负)位相期间长江流域及其
76 以南地区表现出持续性多雨(少雨)的天气特征。杨洁凡和郭品文(2021)发现, 在欧亚遥相关型
77 EU 负位相, 如果印度夏季风偏强, 则华北夏季降水就会偏多。在水汽输送影响方面, 季风异常是影

78 响水汽输送的重要因子（竺可桢和李良骐, 1934; 涂长望和黄士松, 1944; 丁一汇等, 2018）。Zhou 等
79 （2010）研究表明, 水汽输送的北移与我国东部雨带的季节性行进非常吻合, 近年东亚夏季季风减
80 弱引起东亚水汽输送减少是造成华北夏季降水减少的一个重要原因。桓玉和李跃清（2018）认为,
81 东亚季风较南亚季风偏弱时, 偏南风水汽输送很难到达华北地区, 造成夏季降水异常偏少。王映思
82 等（2021）发现, 季风环流系统的不同配置会通过对水汽的影响, 对不同区域降水产生不一样的影
83 响。在华北夏季降水预测技术方面, 如有研究发现（郭其蕴和王继琴, 1988; 郝立生等, 2007; 刘芸芸
84 和丁一汇, 2008; 林大伟等, 2016,2018; 杨洁凡和郭品文, 2021）, 华北夏季降水与印度降水有较好的
85 一致性, 并提出了预测华北夏季降水的指标。阮成卿和李建平（2016）采用偏相关预报因子挑选法
86 和条件降尺度法作华北汛期（7-8 月）降水预测, 将预测符号一致率从 70%提高到 87%。尽管相关
87 研究取得较好成果, 汛期降水预测质量也有了很大提高, 但预测结果不稳定, 尤其对阶段性转折性
88 有时很难预测出来, 仍需进一步开展相关研究（Piao et al., 2021, 2022; 刘海文等, 2022）。

89 由于影响华北夏季降水的因子较多且关系复杂（郝立生和丁一汇, 2012）, 造成华北夏季降水预
90 测难度较大（丁一汇等, 2013a）, 关于华北夏季降水异常及预测技术一直是备受关注的问题（郝立
91 生等,2021）。从以上研究可知, 造成华北夏季降水异常的原因主要有两个方面: 一个是大气动力条
92 件, 另一个是大气水汽条件, 尤其对于强降水和持续性降水, 缺一不可。传统认为, 东亚夏季风偏
93 强年, 华北夏季降水偏多, 反之, 夏季降水偏少, 但也有很多不一致的年份。这是由于水汽条件只
94 是产生降水的一个方面, 如果大气动力条件不好, 也很难造成降水偏多, 以往研究对两者的综合作
95 用关注不够。本文将在年际变化上从大气动力条件和大气水汽输条件方面综合分析华北夏季降水异
96 常的原因, 为认识华北夏季降水异常发生规律和改进预测技术提供科学参考依据。

97 1 资料与方法

98 1.1 所用数据

99 （1）降水资料。使用国家气象信息中心整理的1961-2022年全国2400余站月降水量资料, 华北
100 选用148个站为代表站（图1篮框内）, 华北夏季降水量序列是148站平均值。（2）环流资料。使用
101 美国国家环境预报中心和国家大气研究中心（National Centers for Environmental Prediction/National
102 Center for Atmospheric Research, NCEP/NCAR）联合制作的再分析资料（Kalnay et al., 1996）, 从美
103 国国家海洋和大气管理局（简称 NOAA）的官方网站
104 <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/index.html>[2023-3-6]下载。资料水平分辨率 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 选用
105 时段为1961-2022年月值资料, 要素为850 hPa层的纬向风速 u （U850）、经向风速 v （V850）、比湿 q
106 （Q850）, 500 hPa层的位势高度 h （H500）等。

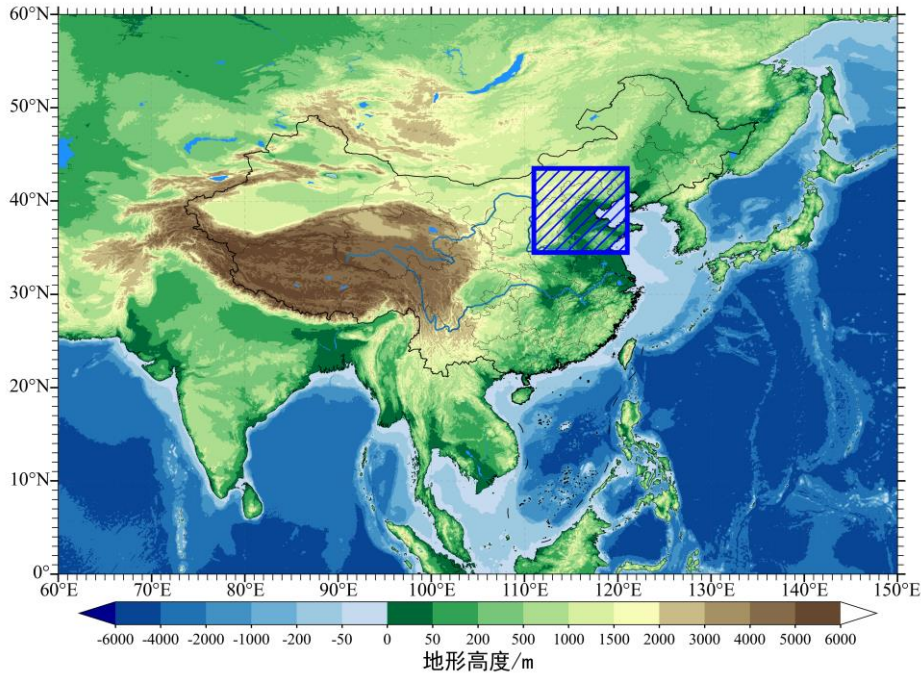


图 1 华北地区位置 (蓝框区域, 下同)

Fig.1 North China location (blue boxed area, below).

107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117

1.2 主要方法

1、东亚副热带夏季风指数 (East Asian subtropical summer monsoon index, 简称 EAMI)

华北夏季降水与东亚夏季风密切相关, 为定量分析两者之间的联系, 首先要定义东亚副热带夏季风指数。由于季风变化的复杂性, 气象界已先后定义了数十个季风指数 (Wang 等, 2008a; 陈海山和陈健康, 2017), 从不同角度分析了季风的变化与气候、降水的关系。参考以往研究, 这里选择东亚副热带范围 (110°E-120°E, 25°N-45°N) 的 850hPa 经向风 V_{850} 来定义东亚副热带夏季风指数。先计算 1981-2010 年 360 个月 V_{850} 的均值 va 和均方差 $vstd$, 然后对 1961-2022 年各月的 V_{850} 作标准化处理, 得到东亚季风指数, 其中夏季部分就是东亚副热带夏季风指数 EASMI。计算公式如下:

$$va = \frac{1}{360} \sum_{i=1981.01}^{2010.12} v_i$$

$$vstd = \frac{1}{360} \sum_{i=1981.01}^{2010.12} (v_i - va)^2$$

$$EAMI_i = \frac{v_i - va}{vstd}$$

118
119
120
121
122
123
124

式中 i 代表月份, v_i 代表月值经向风速, va 代表经向风速 1981-2010 年 360 个月平均值, $vstd$ 代表经向风速 1981-2010 年 360 个月均方差, EASMI 代表东亚副热带夏季风指数。

2、华北大气动力上升指数 (North China Atmospheric Dynamical Rise Index, 简称 HBDRI)

用 500hPa 层华北东侧范围 (120°E-140°E, 30°N-50°N) 高度场减去华北西侧范围 (95°E-115°E,

125 35°N-55°N) 高度场 (参考图 2), 再用其 1981-2010 年 360 个月平均值、均方差作标准化处理, 就
126 得到华北动力上升指数, 选取 1961-2022 年夏季部分 (6-8 月平均值) 作分析。计算公式如下:

127
$$hd_i = ha_i(120^\circ\text{E} - 140^\circ\text{E}, 30^\circ\text{N} - 50^\circ\text{N}) - ha_i(95^\circ\text{E} - 115^\circ\text{E}, 35^\circ\text{N} - 55^\circ\text{N})$$

128
$$hda = \frac{1}{360} \sum_{i=1981.01}^{2010.12} hd_i$$

129
$$hdstd = \frac{1}{360} \sum_{i=1981.01}^{2010.12} (hd_i - hda)^2$$

130
$$HBDRI_i = \frac{hd_i - hda}{hdstd}$$

131 式中 i 代表月份, ha 代表区域平均高度值, hd 代表两区域之间的高度值差, hda 代表区域高度差值
132 1981-2010 年 360 个月平均值, $hdstd$ 代表区域高度差值 1981-2010 年 360 个月均方差, $HBDRI$ 代表
133 华北动力上升指数。

134 3、环流异常场回归重构方法

135 如果知道某要素时间变化序列或某空间场多年变化的时间系数, 可采用线性回归方法重构与
136 对应的异常场。设 x_i 为某要素时间序列, y_i 为要重构的环流场某一点的实际序列值, 则

137
$$y_i = a \cdot x_i + b$$

138 式中, a 为重构的环流异常值, b 为重构后的常数项。 a 的空间分布即是重构的环流异常场。为了使
139 重构的环流异常值与实际场接近, 回归计算时, 应将 x_i 作标准化或极值归一化处理。Wang 等(2008b)、
140 郝立生和侯威 (2018) 曾用该方法对时间序列重构风速场、高度场、降水量的空间异常场, 并分析
141 主模态的年代际变化。该方法是作异常场分析的一种有效方法。

142 其他, 为重点分析年际变化之间的关系, 在计算相关系数和环流回归重构时, 将降水量序列、
143 东亚夏季风指数、华北大气动力上升指数、环流数据等均减去了线性趋势成分和 10 年以上年代际变
144 化成分。本文还用到相关分析、合成分析、高斯低通滤波等方法, 相关性显著性采用 t 检验方法,
145 回归重构显著性采用 F 检验方法。

146 2 华北夏季降水异常的环流背景

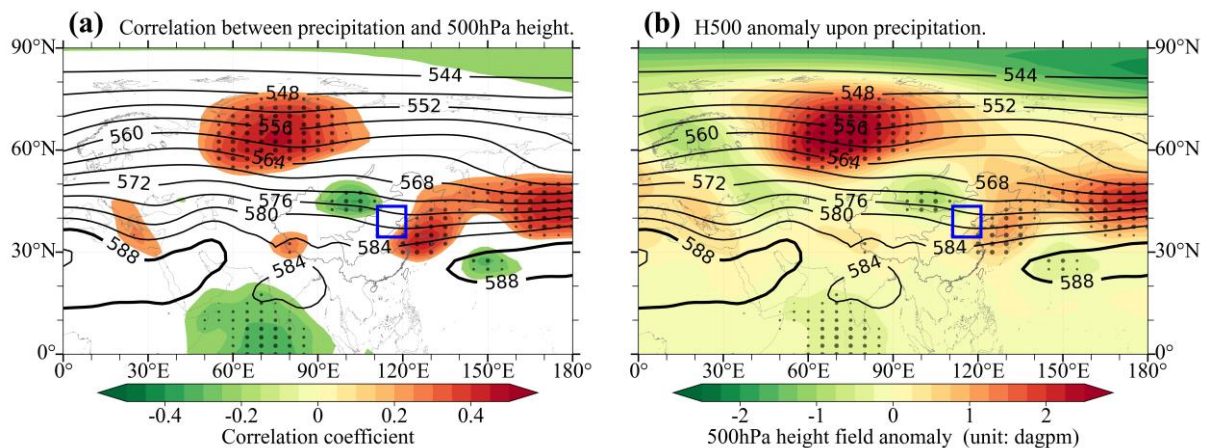
147 2.1 大气动力条件

148 降水的发生通常有两个条件: 一个是大气动力上升条件, 另一个是水汽条件, 尤其对于强降水
149 和持续性降水, 缺一不可。

150 图 2 是 1961-2022 年华北夏季降水量与夏季 500hPa 高度场相关系数以及与降水偏多对应的
151 500hPa 高度场异常的空间分布。在图 2a 上, 正相关区位于乌拉尔山、朝鲜半岛, 负相关区位于贝
152 加尔湖南部、日本以东海面上, 在中高纬形成正、负传播的扰动波列特征。在图 2b 上, 高度场在乌
153 拉尔山为正常、贝加尔湖负异常、朝鲜半岛正常、日本以东的海上负异常。这种异常分布在华

154 北形成“东高西低”的阻挡环流型，由于西侧低槽东移时受东部高压脊阻挡，华北易出现动力上升运
155 动。这时，如果水汽条件也比较有利，华北夏季就会出现降水异常偏多情况。

156 由上可知，对应华北夏季降水偏多年，500hPa 高度场异常主要是乌拉尔山正异常、贝加尔湖负
157 异常、朝鲜半岛正异常。也就是夏季，乌拉尔山高压脊偏强、贝加尔湖槽偏深、副高在朝鲜半岛附
158 近加强，华北处于“东高西低”的环流型控制下，动力上升条件有利。这是华北夏季降水异常偏多
159 对应的大气动力条件。



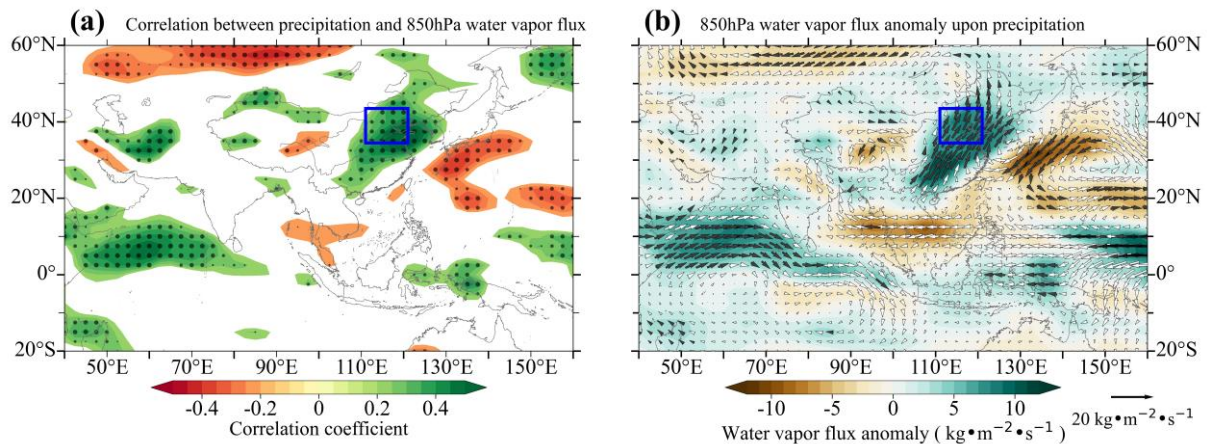
160
161 图2 1961-2022年 (a) 华北夏季降水量与夏季500hPa高度场相关系数(阴影区. 黑色点区通过了0.05信度检验)
162 及(b)与降水偏多对应的500hPa高度场异常(阴影区. 单位: dagpm. 黑色点区通过了0.05信度检验)的空间分布.
163 等值线是多年平均夏季500hPa高度环流场. 异常值是对夏季降水序列回归重构的结果.

164 Fig.2 Spatial distribution of (a) the correlation coefficient between summer precipitation in North China and summer
165 500hPa height field (Shaded area. Black dotted areas passed the 0.05 reliability test) and (b) the 500hPa height field
166 anomalies corresponding to more precipitation (Shaded area. Unit: dagpm. Black dotted areas passed the 0.05 reliability test)
167 in 1961-2022. The isoline is the annual average of the summer 500hPa height field. The anomalies are the result of regression
168 reconstruction upon the summer precipitation series.

169 2.2 大气水汽条件

171 图3是1961-2022年华北夏季降水量与夏季850hPa层水汽通量相关系数以及与夏季降水偏多对
172 应的850hPa层水汽通量异常的空间分布。在图3a上，最显著的相关区位于东亚地区，为明显的正
173 相关；其次显著相关区位于热带印度洋，也为正相关。在图3b上，东亚为显著的偏南风水汽输送异
174 常、热带印度洋为显著的偏西风水汽输送异常。这种情况下，华北水汽来源充足，如果动力上升条
175 件也比较有利，华北就会出现夏季降水异常偏多的情况。

176 由上可知，对应华北夏季降水偏多年，850hPa层印度夏季风、东亚副热带夏季风均偏强。也就
177 是，夏季印度季风、东亚副热带夏季风同时偏强时，华北水汽来源充足。这是华北夏季降水异常偏
178 多对应的大气水汽输送环流条件。



179

180 图3 1961-2022年(a)华北夏季降水量与夏季850hPa水汽通量相关系数(阴影区,黑色点区通过了0.05信度检验)
 181 及(b)与降水偏多对应的850hPa层水汽通量异常的空间分布(阴影区和箭头,黑色箭头区通过了0.05信度检验.单
 182 位: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).异常值是对降水序列回归重构的结果.

183 Fig. 3 Spatial distribution of (a) the correlation coefficients between summer precipitation in North China and summer
 184 850hPa water vapour flux (Shaded areas. Black dotted areas passed the 0.05 confidence test) and (b) the 850hPa water vapor
 185 flux anomalies corresponding to more precipitation (Shaded areas and arrows. Black arrow passed the 0.05 confidence test.
 186 Unit: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) in 1961-2022. The anomalies are the result of regression reconstruction upon the precipitation series.

187

188 3 动力、水汽条件变化对华北夏季降水的影响

189 3.1 对应关系统计特征

190 图4是1961-2022年东亚副热带夏季风指数、华北大气动力上升指数与华北夏季降水量变化曲
 191 线。三个量均已去掉了线性趋势和10年以上年代际变化成分。可以看到,降水变化与两个指数有很
 192 好的对应关系,计算相关系数发现也呈显著的正相关,都通过了0.05信度检验,其他相关系数见表
 193 1。

表1 1961-2022年华北夏季降水量与东亚副热带夏季风指数、华北大气动力上升指数的相关系数.

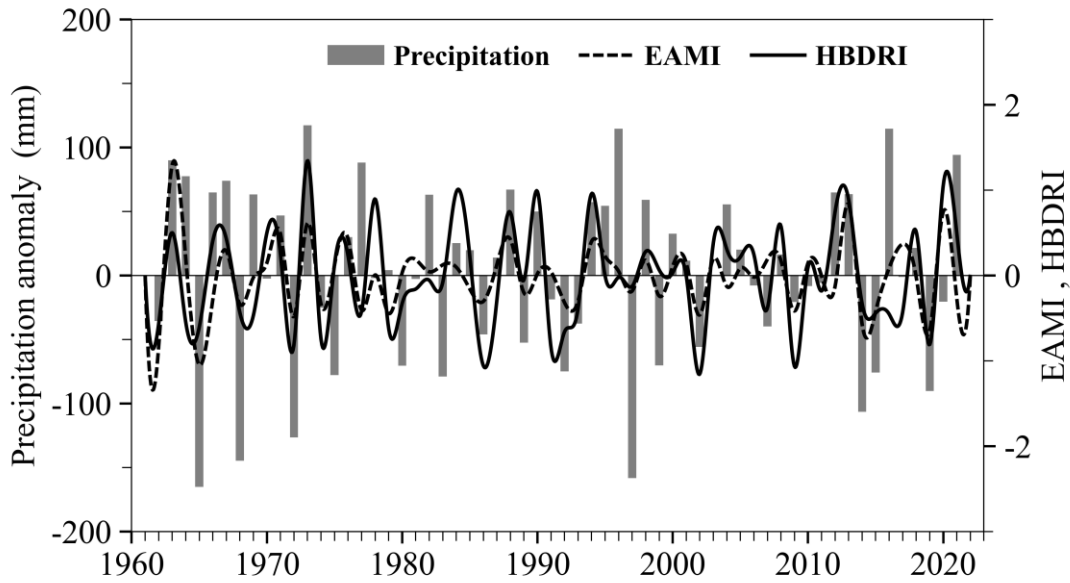
Table.1 Correlation coefficient between the summer precipitation in North China and the East Asian subtropical summer monsoon index and the North China atmospheric dynamic rise index during 1961-2022.

变量	直接相关			偏相关		复相关
	Precipitation	EAMI	HBDRI	EAMI(-GBDRI)	HBDRI(-EAMI)	EAMI, HBDRI
Precipitation	1.0**	0.5491**	0.4948**	0.3580**	0.2397*	0.5845**
EAMI	0.5491**	1.0**	0.6128**			
HBDRI	0.4948**	0.6218**	1.0**			

**通过了0.05信度检验; *通过了0.10信度检验

194

195 图4是华北夏季降水距平和东亚副热带夏季风指数、华北大气动力上升指数变化曲线。三个数
 196 据均减去了线性趋势成分和10年以上年代际变化成分。可以看到,降水与两个指数有较好的对应关
 197 系,即东亚副热带夏季风指数、华北大气动力上升指数偏强年,华北夏季降水偏多。如果两个指数
 198 强弱不一致时,华北夏季降水基本为正常;如果两个指数都偏弱,则华北夏季降水异常偏少。



199

200 图 4 1961-2022 年华北夏季降水量距平、东亚副热带夏季风指数、华北大气动力上升指数变化曲线（均已去掉
201 线性趋势和 10 年以上年代际变化成分）。

202 Fig. 4 Variation curves of summer precipitation anomaly in North China, East Asian subtropical summer monsoon index and
203 North China atmospheric dynamic rise index from 1961 to 2022 (linear trend and decadal variation components above 10
204 years have been removed).

205

206

207

208

209

210

211

212

213

214

215

216

217

为作进一步的定量统计分析，将东亚副热带夏季风指数、华北动力上升指数和华北夏季降水量距平大于或小于 0.5 个标准差定义为异常年，即偏强年、偏多年或偏弱年、偏少年，介于 ± 0.5 标准差之间的年份称为正常年。表 2 是东亚副热带夏季风指数、华北动力上升指数与华北夏季降水的对应关系统计结果。对应东亚副热带夏季风指数：指数偏强年，华北夏季降水一般会偏多，没有出现降水偏少的年份；指数正常年，华北夏季降水大都为正常年，也有偏多、偏少的年份；指数偏弱年，华北夏季降水大都偏少，也有极少数年份偏多，这主要是由东南风水汽输送偏强造成的结果（郝立生等，2016）。对应华北大气动力上升指数：指数偏强年，华北夏季降水一般会偏多，没有出现降水偏少的年份；指数正常年，华北夏季降水大都为正常年，也有偏多、偏少的年份；指数偏弱年，华北夏季降水大都偏少，也有 1 年偏多。一般而言，东亚副热带夏季风指数、华北动力上升指数都偏强时，则华北夏季降水偏多，反之，两指数都偏弱时，则华北夏季降水偏少。但也有少数年份不一致。

表 2 1961-2022 年东亚副热带夏季风指数、华北大气动力上升指数与华北夏季降水的关系统计。单位：年

Table.2 Statistics of the relationship between the East Asian subtropical summer monsoon index, the North China atmospheric dynamic rise index and the summer precipitation in North China during 1961-2022. Unit: year.

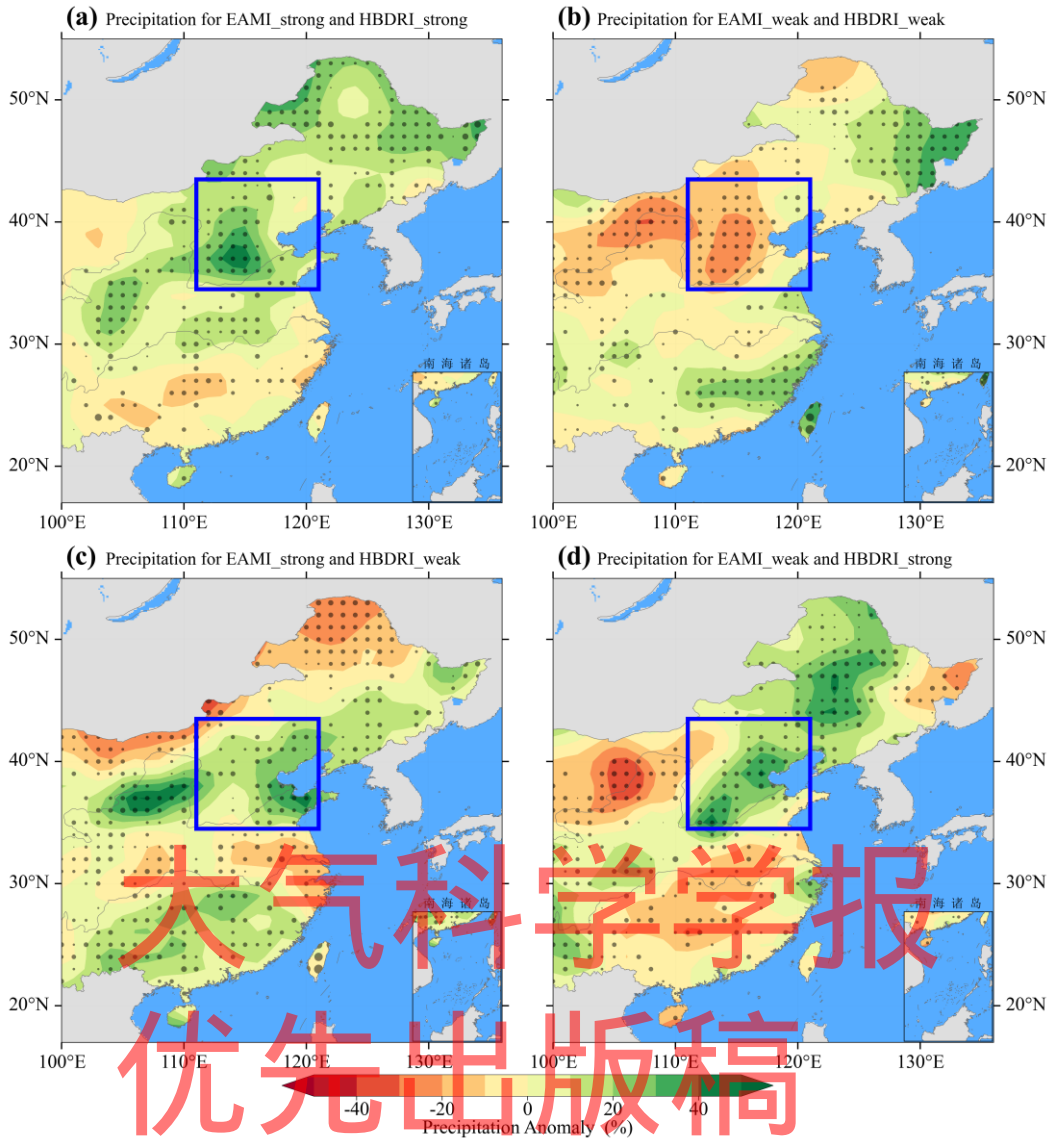
		华北夏季降水偏多 [0.5 σ , + ∞)	华北夏季降水正常 (-0.5 σ , 0.5 σ)	华北夏季降水偏少 (- ∞ , -0.5 σ]	合计
东亚副热带夏季风指数	偏强 [0.5 σ , + ∞)	8	4	0	12
	正常 (-0.5 σ , 0.5 σ)	9	14	8	31
	偏弱 (- ∞ , -0.5 σ]	2	6	11	19

华北大气 动力上升 指数	偏强 $[0.5\sigma, +\infty)$	12	7	0	19
	正常 $(-0.5\sigma, 0.5\sigma)$	6	12	9	27
	偏弱 $(-\infty, -0.5\sigma]$	1	5	10	16
合 计		19	24	19	62

218

219 下面选择两个指数偏强年（1963、1973、2013、2020）、两指数偏弱年（1962、1965、2002、
 220 2019）、夏季风指数偏强而动力上升指数偏弱年（1964、2017）、夏季风指数偏弱而动力上升指数
 221 偏强年（1966、2021）作合成对比分析。图 5 是东亚副热带夏季风指数和华北大气动力上升指数不
 222 同配置对应的夏季降水异常合成空间分布。对应两个指数偏强年（图 5a），华北夏季降水明显偏多，
 223 全区整体平均降水量会明显偏多；对应两个指数偏弱年（图 5b），华北夏季降水明显偏少，全区整
 224 体平均降水量会明显偏少；对应季风指数偏强而动力上升指数偏弱年（图 5c），主要在华北东部地
 225 区降水偏多，全区整体平均降水量可能在正常值上下范围；对应季风指数偏弱而动力上升指数偏强
 226 年（图 5d），主要在华北西南至东北方向上降水偏多，全区整体平均降水量可能在正常值上下范围。
 227 由此可以看出，东亚副热带夏季风指数和华北大气动力上升指数对华北夏季降水异常有很好的指示
 228 意义。

大气科学学报 优先出版稿



229
230

231 图5 东亚副热带夏季风指数和华北大气动力上升指数不同配置对应的夏季降水异常合成空间分布. 单位:%.
232 黑色点区通过了0.05 信度检验. (a) 对应EAMI 强、HBDRI 强; (b) 对应EAMI 弱、HBDRI 弱;
233 (c) 对应EAMI 强、HBDRI 弱; (d) 对应EAMI 弱、HBDRI 强.

234 Fig.5 Compositd spatial distribution of summer precipitation anomalies corresponding to the different combination
235 scenarios of East Asian subtropical summer monsoon index and North China atmospheric dynamic rise index. Unit:%. Black
236 dotted area passed the 0.05 reliability test. (a) strong EAMI and strong HBDRI; (b) weak EAMI and weak HBDRI; (c) strong
237 EAMI and weak HBDRI; (d) weak EAMI and strong HBDRI

238
239

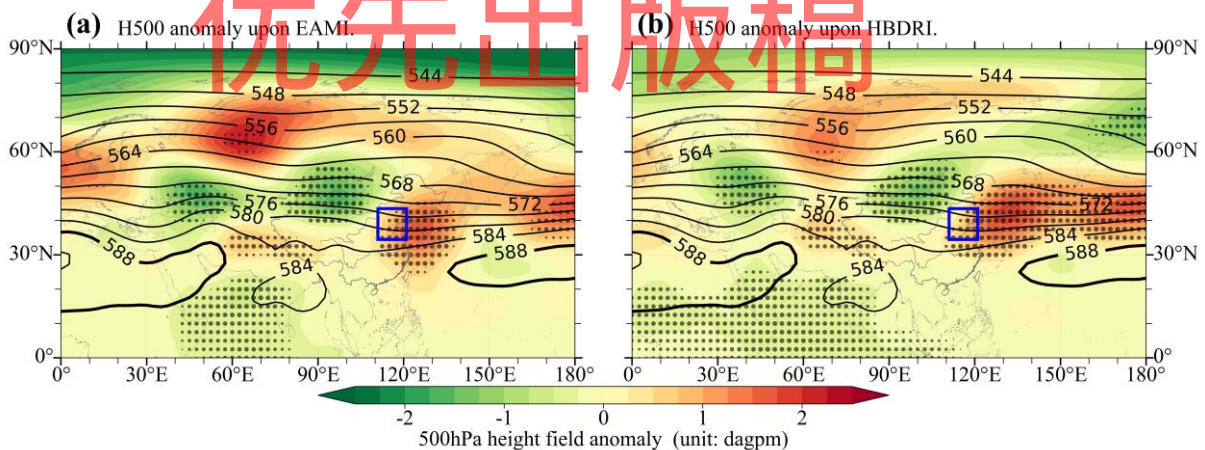
3.2 影响机制

240 由于 500hPa 层是带来降水过程的重要动力层, 850hPa 层是降水发生的重要水汽输送层, 下面
241 重点从 500hPa 层环流变化、850hPa 层水汽输送变化来认识其影响规律. 图 6 是对应东亚副热带夏
242 季风指数、华北动力上升指数偏强时的 500hPa 高度场异常空间分布. 图 7 是对应东亚副热带夏
243 季风指数、华北动力上升指数偏强时的 850hPa 层水汽通量异常空间分布. 异常值是对指数回归重构的
244 结果, 所有数据均已去掉线性变化趋势和 10 年以上年代际变化成分.

245 在图 6 上，对应东亚副热带夏季风指数（图 6a），贝加尔湖至蒙古地区为显著的负异常，朝鲜
 246 半岛附近为显著正异常。对应华北动力上升指数（图 6b），贝加尔湖至蒙古为显著负异常，朝鲜半
 247 岛附近为显著正异常。可见，东亚副热带夏季风变化、华北动力上升指数变化主要是通过夏季贝加
 248 尔湖槽加深、西北太平洋副热带高压的北抬来影响华北夏季降水的。

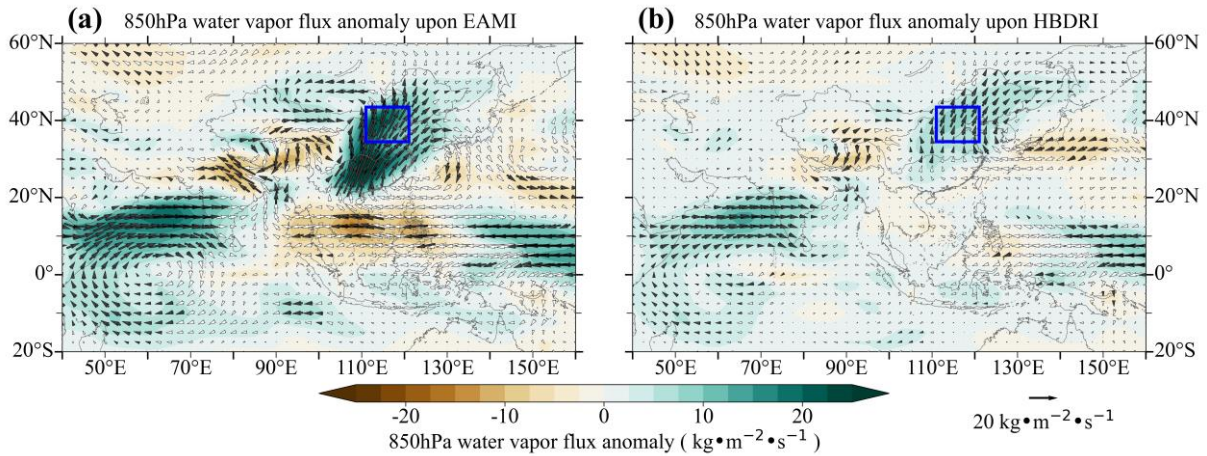
249 在图 7 上，对应东亚副热带夏季风指数（图 7a），东亚地区为显著的偏南风水汽输送正异常，
 250 热带印度洋为西风水汽输送正异常。对应华北动力上升指数（图 7b），东亚地区北部为明显的偏南
 251 风水汽输送正异常，但主要是东部海上东南风转向而来，与图 7a 不同；热带印度洋也为明显的西风
 252 风水汽输送正异常。可见，在 850hPa 层，东亚副热带夏季风变化、华北动力上升指数变化主要是通过
 253 东亚偏南风或东南风水汽输送异常、热带印度洋西风水汽输送异常来影响华北夏季降水的。

254 由此可知，在东亚副热带夏季风指数偏强（华北动力上升指数偏强）年，夏季 500hPa 层贝加尔
 255 湖槽会加深、西北太平洋副热带高压会偏北，华北处于“东高西低”的环流型控制下，西部低槽东移
 256 受阻，会在华北维持较长时间的动力上升运动；850hPa 层印度夏季风、东亚副热带夏季风会偏强，
 257 这时热带印度洋西风水汽输送以及东亚副热带地区偏南风水汽输送、或东南风水汽输送会加强，华
 258 北水汽来源充足。这种高、低空环流配置非常有利于造成华北夏季降水异常偏多。在东亚副热带夏
 259 季风指数偏弱（华北动力上升指数偏弱）年，500hPa 层贝加尔湖槽会变浅或转为脊、西北太平洋副
 260 热带高压会偏南，华北处于“东低西高”的环流型控制下，低槽位置偏于华北东部且移动速度快，华
 261 北大气动力上升条件较差；850hPa 层印度夏季风、东亚副热带夏季风均会偏弱，这时热带印度洋西
 262 风水汽输送减弱、东亚地区出现北风水汽输送异常，华北水汽来源明显减少。这种高、低空环流配
 263 置不利于华北夏季降水过程的发生，往往会造成华北夏季降水异常偏少。



264
 265 图 6 1961-2022 年对应(a)东亚副热带夏季风指数、(b)华北动力上升指数偏强时夏季 500hPa 高度场异常空间分布(阴
 266 影区)，等值线是多年平均夏季高度场。异常值是对指数回归重构的结果，黑色点区通过了 0.05 信度检验。单位：
 267 dagpm。

268 Fig. 6 Spatial distribution of summer 500 hPa height field anomalies (shaded areas) corresponding to (a) the stronger East
 269 Asian subtropical summer monsoon index and (b) the stronger North China atmospheric dynamical rise index in 1961-2022, ,
 270 with the contours being the multi-year average summer height field. The anomalies are the result of regression reconstruction
 271 upon the indices, and black dotted areas passed the 0.05 confidence test. Unit: dagpm.



273

274

275 图 7 1961-2022 年对应(a)东亚副热带夏季风指数、(b)华北动力上升指数偏强时的夏季 850hPa 层水汽通量异常空间
 276 分布(阴影区和箭头). 异常值是对指数回归重构的结果, 黑色箭头区通过了 0.05 信度检验. 单位: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

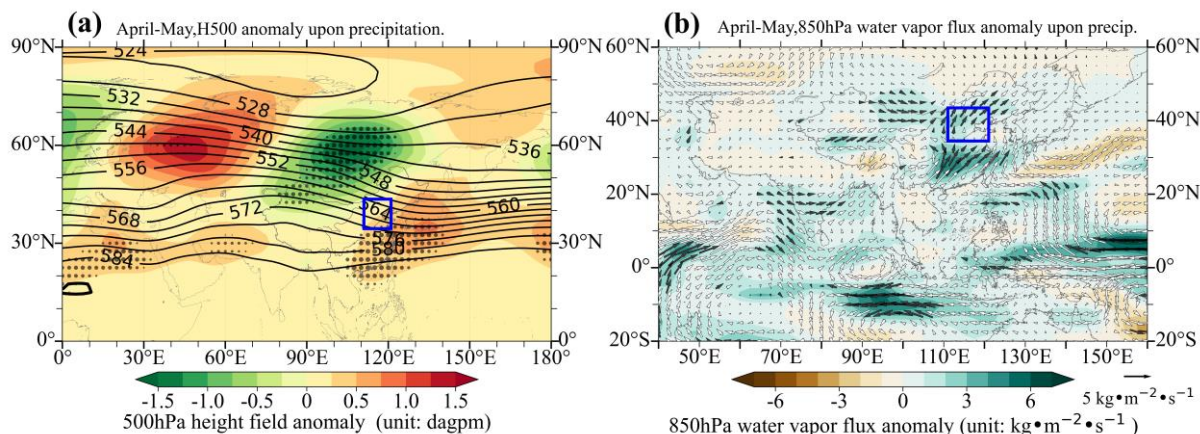
277 Fig. 7 Spatial distribution of summer 850hPa water vapour flux anomalies (shaded areas and arrows) corresponding to (a)
 278 the stronger East Asian subtropical summer monsoon index and (b) the stronger North China atmospheric dynamical rise
 279 index in 1961-2022. The anomalies are the result of regression reconstruction upon the indices, with black arrows passed the
 280 0.05 confidence test. Unit: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

281

282 3.2 前兆信号

283 因为东亚副热带夏季风和华北大气动力环流演变在季节上有前后连续性, 为改进预测技术, 需
 284 要关注其前期变化和环流演变特征。图 8 是对应华北夏季降水偏多时的前期 4-5 月 500hPa 高度场环
 285 流异常和 850hPa 水汽通量异常空间分布, 异常值是对降水序列回归重构的结果。计算时, 去除了降
 286 水量序列和环流要素场中的线性趋势成分和 10 年以上年代际变化成分。在 500hPa 层 (图 8a), 贝
 287 加尔湖附近为显著的负异常, 朝鲜半岛附近为显著的正异常。在 850hPa 层 (图 8b), 东亚地区为
 288 明显的偏南风水汽通量异常, 印度半岛为较为明显的偏西风水汽通量异常, 东亚热带南海地区基本
 289 为正常状态。所以, 4-5 月, 如果东亚副热带夏季风指数和华北大气动力上升指数偏强就, 即 500hPa
 290 层上贝加尔湖槽偏深、朝鲜半岛附近高压脊偏强, 850hPa 层上印度夏季风、东亚副热带夏季风明显
 291 偏强和东亚热带南海夏季风正常, 则到夏季 (6-8 月), 500hPa 层贝加尔湖附近槽会偏深、西北太
 292 平洋副热带高压会偏北、850hPa 层东亚副热带夏季风会偏强, 华北大气动力上升条件和水汽来源充
 293 足, 华北夏季就会出现降水异常偏多。

294 因此, 前期 4-5 月, 东亚副热带夏季风指数和华北大气动力上升指数偏强, 也就是 500hPa 层贝
 295 加尔湖槽加深、朝鲜半岛附近高压脊偏强、850hPa 层印度夏季风和东亚副热带夏季风明显偏强, 可
 296 以作为华北夏季降水异常偏多的一个前兆预测信号。



297
298 图 8 1961-2022 年对应华北夏季降水量偏多的前期 4-5 月 (a) 500hPa 环流异常 (阴影区, 黑色点区通过了 0.05
299 信度检验. 等值线是多年平均 4-5 月高度场. 单位: dagpm) 和 (b) 850hPa 层水汽通量异常 (阴影区和箭头, 黑色箭头
300 通过了 0.05 信度检验. 单位: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 的空间分布, 异常值是对降水序列回归重构的结果。

301 Fig.8 Spatial distribution of (a) height field anomaly of 500hPa level (shaded areas, with black dotted areas passed the 0.05
302 reliability test. The isoline is the multi-year average of height field from April to May. Unit: dagpm) and (b) water vapor flux
303 anomaly at 850hPa level (shaded areas and arrows, with black arrow passed the 0.05 reliability test. Unit: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) in the
304 early April to May corresponding to more summer precipitation in North China during 1961-2022.). The abnormal value is
305 the result of regression reconstruction upon precipitation series.

306

307 4 小结与讨论

308 东亚副热带夏季风指数和华北大气动力上升指数与华北夏季降水有很好的对应关系。当两个指
309 数偏强时, 华北夏季降水会异常偏多; 两个指数偏弱, 华北夏季降水异常偏少; 如果两个指数强弱
310 不一致时, 华北地区会出现区域降水偏多情况, 但华北地区整体夏季降水量基本为正常值。

311 在影响机制方面, 在东亚副热带夏季风指数偏强 (华北动力上升指数偏强) 年, 夏季 500hPa 层
312 贝加尔湖槽会加深、西北太平洋副热带高压会偏北, 华北处于“东高西低”的环流型控制下, 西部低
313 槽东移受阻, 会在华北维持较长时间的动力上升运动; 850hPa 层印度夏季风、东亚副热带夏季风会
314 偏强, 这时热带印度洋西风水汽输送以及东亚副热带地区偏南风水汽输送、或东南风水汽输送会加
315 强, 华北水汽来源充足。这种高、低空环流配置非常有利于造成华北夏季降水异常偏多。反之, 华
316 北夏季降水会异常偏少。因此, 华北夏季降水异常偏多或偏少是东亚副热带夏季风和华北大气动力
317 上升运动协同作用的结果。

318 前期 4-5 月, 如果 500hPa 层贝加尔湖槽加深、西北太平洋副热带高压偏北, 850hPa 层印度夏季
319 风、东亚副热带夏季风偏强、东亚热带夏季风正常, 则华北夏季降水可能异常偏多。即 4-5 月, 东
320 亚副热带夏季风指数、华北大气动力上升指数偏强, 可以作为华北夏季降水异常偏多的一个前期监
321 测预测指标。

322 中高纬度扰动波列是如何形成的, 其季节内变化如何影响华北夏季降水? 亚洲夏季风系统 (印
323 度夏季风、南海夏季风、东亚副热带夏季风) 的协同作用以及季节内变化如何影响华北夏季降水?
324 这些问题尚需作进一步研究。

325

326 参考文献:

- 327 Chen B Y,Wang L,Wu M M,. 2020. Contrasting the Indian and western North Pacific summer monsoons in terms of their intensity of interannual
328 variability and biennial relationship with ENSO[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 13(5):462-469.
329 DOI:10.1080/16742834.2020.1806683
- 330 Ding Y H, Johnny C L Chan, 2005. The East Asian summer monsoon: An overview[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 89(3):117-142. DOI:
331 10.1007/s00703-005-0125-z.
- 332 Ding Y H, 2004.. Seasonal march of the East-Asia summer monsoon. In: Chang C P, ed. East Asian Monsoon. Singapore: World Scientific Publishing,
333 p3-53. https://doi.org/10.1142/9789812701411_0001.
- 334 Ding Y H, Li C Y, Liu Y J, 2004. Overview of the South China Sea monsoon experiment[J]. Adv Atmos Sci,21(3): 343 -360. DOI:
335 10.1007/BF02915563.
- 336 Ding Y H, Wang Z Y, Sun Y, 2007. Interdecadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian
337 summer monsoon. Part I: Observed evidences[J]. International Journal of Climatology, 28(9):1139-1161. DOI:10.1002/joc.1615.
- 338 He J H, Zhu Z W, 2016. The relation of South China Sea monsoon onset with the subsequent rainfall over the subtropical East Asia[J]. International
339 Journal of Climatology, 35(15): 4547 -4556. DOI: 10.1002/joc.4305.
- 340 Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al., 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bull. Amer Meteor Soc, 77(3):437-472. DOI:
341 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- 342 Lau K M, Yang S, 1997. Climatology and interannual variability of the southeast Asian summer monsoon[J]. Adv Atmos Sci, 14(2):141-162.
343 DOI:10.1007/s00376-997-0016-y.
- 344 Li J P, Zeng Q C, 2003. A unified monsoon index[J]. Geophys Res Lett, 29(8): 1151–1154. DOI:10.1029/2001GL013874.
- 345 Luo Yali, Zhang Jiahua, Yu miao, et al., 2023. On the influences of urbanization on the extreme rainfall over Zhengzhou on 20 July 2021: a
346 convection-permitting ensemble modeling study[J]. Adv. Atmos. Sci., 40(3):393-409.In press. DOI: 10.1007/s00376-022-2048-8.
- 347 Piao Jinling, Chen Wen, Chen Shangfeng, et al., 2021. Mean states and future projections of precipitation over the monsoon transitional zone in China
348 in CMIP5 and CMIP6 models[J]. Climatic Change, 169(3):1-24. DOI: 10.1007/s10584-021-03286-8.
- 349 Piao Jinling, Chen Wen; Wang Lin, et al., 2022. Future projections of precipitation, surface temperatures and drought events over the monsoon
350 transitional zone in China from bias-corrected CMIP6 models[J]. International Journal of Climatology, 42(2):1203-1219. DOI:10.1002/joc.7297.
- 351 Tao S Y, Chen L X, 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China. In: Chang C P, Krishnamurti T N, eds. Monsoon
352 Meteorology[M]. Oxford: Oxford University Press, 60–92.
- 353 Wang B, Lin H, 2002. Rainy season of the Asian-Pacific summer monsoon[J]. Journal of Climate, 15(4):386–398.
354 DOI:10.1175/1520-0442(2002)015<0386:RSOTAP>2.0.CO;2
- 355 Wang B, Lin H, Zhang Y S, et al., 2004. Definition of South China Sea monsoon onset and commencement of the East Asia summer monsoon[J].
356 Journal of Climate, 17(4): 699–710. DOI: 10.1175/2932.1.
- 357 Wang B, Wu Z W, Li J P, et al., 2008a. How to measure the strength of the East Asian summer monsoon[J]. Journal of Climate, 21(17):4449-4463.
- 358 Wang Bin, Yang J, Zhou T J, et al., 2008b. Interdecadal changes in the major modes of Asian–Australian monsoon variability: Strengthening
359 relationship with ENSO since the late 1970s[J]. J. Climate, 21(8):1771–1789. DOI:10.1175/2007JCLI1981.1
- 360 Wang L J, Wang C, Guo D, 2018. Evolution mechanism of synoptic-scale EAP teleconnection pattern and its relationship to summer precipitation in
361 China[J]. Atmospheric Research, 214:150-162. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.07.023.
- 362 Webster P J, Magana V O, Palmer T N, 1998. Monsoon: Process, predictability, and the prospects for prediction[J]. J Geophys Res, 103:14451–14510.
363 DOI: 10.1029/97JC02719.
- 364 Zhao P, Zhang R H, Liu J P, et al., 2007. Onset of southwesterly wind over eastern China and associated atmospheric circulation and rainfall[J]. Clim
365 Dyn, 28: 797–811. DOI: 10.1007/s00382-006-0212-y.
- 366 Zhou Xiao-Xia, Ding Yi-Hui,Wang Pan-Xing, 2010. Moisture transport in the Asian Summer Monsoon region and its relationship with summer
367 precipitation in China[J]. Acta Meteorologica Sinica,24(1):31-42.
- 368 Zhu Q G, He J H, Wang P X, 1986. A study of circulation differences between East-Asian and Indian summer monsoons with their interaction[J]. Adv
369 Atmos Sci, 3(4):466–477. DOI: 10.1007/BF02657936.
- 370 陈海山, 陈健康,. 2017. 东亚夏季风指数的分类及物理特征分析[J]. 大气科学学报, 40(3):299-309. Chen H S, Chen J K, 2017. Classification of
371 East Asian summer monsoon indices and their basic physical features[J]. Trans Atmos Sci (in Chinese), 40(3):299-309.
372 DOI:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20160323001.
- 373 陈丽娟, 赵俊虎, 顾薇, 等, 2019. 汛期我国主要雨季进程成因及预测应用进展[J]. 应用气象学报,30(4):385-400. Chen Lijuan, Zhao Junhu, Gu
374 Wei, et al., 2019. Advances of research and application on major rainy seasons in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science(in
375 Chinese), 30(4): 385-400. DOI:10.11898/1001-7313.20190401.
- 376 陈隆勋, 李薇, 赵平, 等,. 2000. 东亚地区夏季风爆发过程[J]. 气候与环境研究, 5(4): 346–355 Chen L X, Li W, Zhao P, et al., 2000. On the

377 process of summer monsoon onset over East Asia[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 5(4):345-355.
378 DOI:10.3878/j.issn.1006-9585.2000.04.02
379 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦, 等., 1991. 东亚季风[M]. 北京: 气象出版社, 191pp. Chen L X, Zhu Q G, Luo H B, et al., 1991. The East Asian
380 Monsoon(in Chinese)[M], Beijing: China Meteorological Press, 191pp.
381 丁一汇, 司东, 柳艳菊, 等., 2018. 论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化[J]. 大气科学, 42(3): 533-558. Ding Yihui, Si Dong, Liu Yanju, et
382 al., 2018. On the characteristics, driving forces and inter-decadal variability of the East Asian summer monsoon[J]. Chinese Journal of
383 Atmospheric Sciences(in Chinese), 42(3): 533-558. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1712.17261
384 丁一汇, 孙颖, 刘芸芸, 等., 2013a. 亚洲夏季风的年际和年代际变化及其未来预测[J]. 大气科学, 37(2): 253-280. Ding Yihui, Sun Ying, Liu
385 Yunyun, et al., 2013a. Interdecadal interannualvariabilities Asiansummer monsoon itsprojection futurechange ChineseJournal
386 AtmosphericSciences(in Chinese),37(2):253-280. DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12302.
387 丁一汇, 朱定真, 石曙卫, 等., 2013b. 中国自然灾害要览(上卷)[M]. 北京:北京大学出版社, 508pp. Ding Y H, Zhu D Z,Shi S W, et al., 2013b.
388 Overview of Natural Disasters in China(Volume One)(in Chinese)[M]. Beijing: Peking University Press,508pp.
389 符淙斌, 安芷生, 郭维栋, 2005. 我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究:主要研究成果[J]. 地球科学进展, 20(11): 5-15. Fu C B, An Z S,
390 Guo W D., 2005. Evolution of life-supporting environment in our nation and the predictive study of aridification in northern china (I): main
391 scientific issues and achievements[J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 20(11): 5-15. DOI:10.11867/j.issn.1001-8166.2005.11.1157.
392 郭其蕴, 王继琴, 1988. 中国与印度夏季风降水的比较研究[J]. 热带气象学报, 4(1): 53-60. Guo Q Y, Wang J Q, 1988. A comparative study on
393 summer monsoon in China and India[J]. Journal of tropical Meteorology(in Chinese), 4(1): 53-60.
394 郝立生, 丁一汇, 2012. 华北降水变化研究进展[J]. 地理科学进展, 31(5): 593-601. Hao L S, Ding Y H, 2012. Progress of precipitation research in
395 North China[J]. Progress in Geography(in Chinese), 31(5):593-601. DOI:10.11820/dlkxjz.2012.05.007.
396 郝立生, 丁一汇, 闵锦忠., 2016. 东亚夏季风变化与华北夏季降水异常的关系[J]. 高原气象, 35(5):1280-1289. Hao L S, Ding Y H, Min J Z, 2016.
397 Relationship between summer monsoon changes in East Asia and abnormal summer rainfall in North China[J]. Plateau Meteorology(in Chinese),
398 35(5): 1280-1289. DOI:10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00085.
399 郝立生, 何雨焯, 程善俊, 等., 2021. 海河流域雨季气候特征及监测分析[J]. 地理科学进展, 40(7): 1181-1194. Hao L S, HE L Y, Cheng S J, et al.,
400 2021. Climatic characteristics and monitoring analysis of rainy season in the Haihe River Basin[J]. Progress in Geography(in Chinese), 40(7):
401 1181-1194. DOI: 10.18306/dlkxjz.2021.07.009.
402 郝立生, 侯威, 2018. 华北夏季降水变化及预测技术研究[M]. 北京:气象出版社, 201pp. Hao L S, Hou W, 2018. Study on Summer Precipitation
403 Change and Prediction Technology in North China(in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 201.
404 郝立生, 闵锦忠, 姚学祥, 2007. 华北和印度夏季降水变化的对比分析[J]. 气候变化研究进展, 3(5): 271-275. Hao L S, Min J Z, Yao X X,
405 2007. Comparison of summer monsoon rainfall changes between North China and India[J]. Adv Clim Change Res (in Chinese), 3(5): 271-275.
406 郝立生,丁一汇, 2023. 华北夏季降水异常与华南前汛期降水异常的关系[J].高原气象,42(2). Hao L S, Ding Y H, 2023. Relationship between
407 summer precipitation anomaly in North China and precipitation anomaly in the pre-flood season in South China[J]. Plateau Meteorology(in
408 Chinese), 42(2). DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2022.00063.
409 何金海, 祁莉, 韦晋, 等., 2007. 关于东亚副热带季风和热带季风的再认识[J]. 大气科学, 31(6): 1257-1265. He J H, Qi L, Wei J, et al., 2007.
410 Reinvestigations on the East Asian subtropical monsoon and tropical monsoon[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese), 31(6):
411 1257-1265. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2007.06.20.
412 何金海, 赵平, 祝从文, 等., 2008. 关于东亚副热带季风若干问题的讨论[J]. 气象学报, 66(5): 683-696. He J H, Zhao P, Zhu C W, et al., 2008.
413 Discussions on the East Asian subtropical monsoon[J]. Acta Meteorologica Sinica(in Chinese), 66(5): 683-696. DOI:10.11676/qxb2008.063.
414 胡亮, 李耀东, 杨松, 等., 2011. 东亚热带与副热带季风区对流降水和层云降水季节变化特征对比分析研究[J]. 中国科学:地球科学,
415 41(8):1182-1191. Hu L, Li Y D, Yang S, et al., 2011. Seasonal variability in tropical and subtropical convective and stratiform precipitation of
416 the East Asian monsoon[J]. Sci China Earth Sci (in Chinese), 41(8):1182-1191. DOI: 10.1007/s11430-011-4225-y.
417 胡泊, 2019. EAP 和 EU 遥相关型的配置对东北亚夏季降水的影响研究[D]. 兰州大学. Hu P, 2019. Joint effect of EAP and EU teleconnections on
418 the summer precipitation pattern in Northeast Aisa[D]. Lanzhou University. (in Chinese)
419 桓玉, 李跃清, 2018. 夏季东亚季风和南亚季风协同作用与我国南方夏季降水异常的关系[J]. 高原气象, 37(6):1563-1577. Huan Y, Li Y Q,
420 2018. The synergy between the East Asian summer monsoon and the South Asian summer monsoon and its relations with anomalous rainfall in
421 Southern China[J]. Plateau Meteorology(in Chinese), 37(6): 1563-1577. DOI: 0.7522/j.issn.1000-0534.2018.00044.
422 黄荣辉, 陈际龙, 周连童, 等., 2003. 关于中国重大气候灾害与东亚气候系统之间关系的研究[J]. 大气科学, 27(4): 770-787. Huang R H, Chen J
423 L, Zhou L T, et al., 2003. Studies on the relationship between the severe climatic disasters in China and the East Asia climate system[J]. Chinese
424 Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese), 27(4):770-788. DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.22.
425 林大伟, 布和朝鲁, 谢作威, 2016. 夏季中国华北与印度降水之间的关联及其成因分析[J]. 大气科学, 40(1): 201-214. Lin D W, Bueh C L, Xie Z
426 W, 2016. Relationship between summer rainfall over North China and India and its genesis analysis[J]. Chinese Journal of Atmospheric
427 Sciences(in Chinese), 40(1): 201-214. DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14339.

- 428 林大伟, 布和朝鲁, 谢作威, 2018. 夏季中国华北降水、印度降水与太平洋海面温度的耦合关系[J]. 大气科学, 42(6): 1175-1190. Lin D W,
429 Bueh C L, Xie Z W, 2018. A study on the coupling relationships among the Pacific sea surface temperature and summer rainfalls over North
430 China and India[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese), 42(6): 1175-1190. DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.1712.17183.
- 431 刘海文, 丁一汇, 2011. 华北夏季降水的年代际变化[J]. 应用气象学报, 22(2): 129-137. Liu H W, Ding Y H, 2011. The interdecadal variability of
432 summer precipitation over North China[J]. Journal of Applied Meteorological Science,22(2):129-137.
- 433 刘海文, 袁帅, 杨朝虹, 等, 2022. 华北汛期降水长期变化规律研究新进展[J]. 大气科学学报,45(5):700-712. Liu Haiwen, Yuan Shuai, Yang
434 Zhaohong, et al., 2022. New research progress on long-term variation of precipitation in flood season in North China[J]. Trans Atmos Sci(in
435 Chinese),45(5):700-712. DOI:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20211017007
- 436 刘芸芸, 丁一汇, 2008. 印度夏季风与中国华北降水的遥相关分析及数值模拟[J]. 气象学报, 66(5): 789-799. Liu Y Y, Ding Y H, 2008. Analysis
437 and numerical simulation of the teleconnection between Indian summer monsoon and precipitation in North China[J]. Acta Meteorologica
438 Sinica(in Chinese),66(5): 789-799. DOI:10.11676/qxxb2008.072.
- 439 冉令坤, 李舒文, 周玉淑, 等, 2021. 2021 年河南“7.20”极端暴雨动、热力和水汽特征观测分析[J]. 大气科学, 45(6): 1366-1383. Ran L K, Li S W,
440 Zhou Y S, et al., 2021. Observational analysis of the dynamic, thermal, and water vapor characteristics of the “7.20” extreme rainstorm event in
441 Henan Province, 2021[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(6): 1366-1383. DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.2109.21160.
- 442 阮成卿, 李建平, 2016. 华北汛期降水分离时间尺度降尺度预测模型的改进[J]. 大气科学, 40(1): 215-226. Ruan C Q, Li J P, 2016. An
443 improvement in a time-scale decomposition statistical downscaling prediction model for summer rainfall over North China[J]. Chinese Journal of
444 Atmospheric Sciences(in Chinese), 40(1): 215-226. DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14317.
- 445 桑林, 余乐福, 2018. 华北地区夏季降水的气候特征分析[J]. 气象研究与应用, 39(1): 24-27. Sang L, Yu L F, 2018. Analysis of summer
446 precipitation characteristics in North China[J]. Journal of Meteorological Research and Application(in Chinese), 39(01):24-27.
- 447 谭政华, 巩远发, 2022. 亚洲夏季风北部边缘带变化及中高纬度行星波对其影响[J]. 地理学报, 77(5): 1120-1137. Tan Z H, Gong Y F, 2022.
448 Characteristics of the northern marginal zone of the Asian summer monsoon and the influence of planetary waves in middle-high latitudes on its
449 variation[J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 77(5): 1120-1137. DOI: 10.11821/dlxb202205006.
- 450 涂长望, 黄士松, 1944. 中国夏季风之进退[J]. 气象学报, 18(1):82-92. Tu C W, Huang S S, 1944. The advance and retreat of the summer monsoon
451 in China[J]. Acta Meteorologica Sinica(in Chinese),18(1): 82-92.
- 452 王映思, 肖天贵, 董雪峰, 等, 2021. 东亚和南亚季风协同作用对西南地区夏季降水的影响[J]. 气象学报,79(4):541-557. Wang Y S, Xiao T G,
453 Dong X F, et al., 2021. Influence of East Asian monsoon and South Asian monsoon synergy on summer precipitation in Southwest China[J].
454 Acta Meteorologica Sinica(in Chinese), 79(4):541-557. DOI:10.11676/qxxb2021.043.
- 455 韦志刚, 董文杰, 范丽军, 1999. 80 年代以来华北地区气候和水量变化的分析研究[J]. 高原气象, 18(4): 525-534. Wei Z G, Dong W J, Fan L J,
456 1999. Analysis and research on relationship between the climatic and run-off variation since 1980s in North China[J]. Plateau Meteorology(in
457 Chinese),18(4): 525-534.
- 458 杨洁凡, 郭品文, 2021. 欧亚遥相关型对印度夏季风与华北夏季降水间关系的影响[J]. 大气科学学报, 44(5): 764-772. Yang J F, Guo P W, 2021.
459 Effect on the relationship between Indian summer monsoon and North China summer rainfall by Eurasian teleconnection[J]. Transactions of
460 Atmospheric Sciences(in Chinese), 44(5): 764-772. DOI:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20190102001
- 461 章颖, 赵平, 2012. 夏季亚洲-太平洋遥相关季节演变与大气环流和降水[J]. 气象学报, 70(5):1055-1063. Zhang Y, Zhao P, 2012. Seasonal
462 evolutions of the summer Asian-Pacific teleconnection and associated atmospheric circulation and rainfall[J]. Acta Meteorologica Sinica(in
463 Chinese), 70(5): 1055-1063. DOI:10.11676/qxxb2012.088.
- 464 赵平, 陈军明, 肖栋, 等, 2008. 夏季亚洲-太平洋涛动与大气环流和季风降水[J]. 气象学报, 66(5):716-729. Zhao P, Chen J M, Xiao D, et al.,
465 2008. Summer Asian-Pacific oscillation and its relationship with atmospheric circulation and monsoon rainfall[J]. Acta Meteorologica Sinica(in
466 Chinese), 66(5): 716-729. DOI:10.11676/qxxb2008.066.
- 467 竺可桢, 李良骥, 1934. 华北之干旱及其前因后果[J]. 地理学报, 1(2):98-109. Zhu K Z, Li L Q, 1934. The aridity of North China: its causes &
468 consequences[J]. Acta Geographica Sinica(in Chinese), 1(2): 98-109. DOI:10.11821/xb193402007.
- 469