

2022年华南极端“龙舟水”与大气环流和海温异常的关系

伍红雨^{①,②}, 吴遥^③, 郑璟^①

①广东省气候中心 广州 510641;

②中国气象局广州热带海洋气象研究所/广东省区域数值天气预报重点实验室 广州 510641;

③重庆市气候中心 重庆 401147;

*联系人, E-mail: 492019784@qq.com

2022-12-12 收稿,

2022 年度省级灾害防治及应急管理专项资金 (粤财资环 (2022) 16 号) 项目“2022 年应急风险分析与应急能力建设研究”; 广东省气象局科技创新团队 (GRMCTD202101)

摘要 2022 年“龙舟水”期间 (5 月 21 日-6 月 21 日), 华南平均降雨量 472.5 mm, 为有气象记录以来历史同期第二多, 其中广东为 1951 年以来历史同期第 3 多, 广西为历史同期最多。受其影响, 珠江流域出现流域性洪水, 北江流域出现特大洪水, 造成严重洪涝灾害。利用华南 192 个国家气象观测站逐日降水资料, NCEP/NCAR 大气环流再分析资料, NOAA 月平均海表温度资料 (ERSST V5)、向外长波辐射 (OLR) 资料, 采用相关、合成分析的方法研究了 2022 年华南“龙舟水”异常与大气环流和海温异常的关系。结果表明, 2022 年“龙舟水”期间, 东亚大槽、东北冷涡偏强, 南下冷空气偏强, 同时西太平洋副热带高压和南支槽均偏强, 在华南存在明显水汽辐合。2022 年发生的拉尼娜事件, 大气环流对其有明显响应, Walker 环流增强, 华南对流明显加强, 菲律宾以东存在异常反气旋环流, 副高加强导致其西北侧的西南风加强, 向华南水汽输送显著增强, 同时华南存在显著的上升运动。大气环流和海温的异常导致 2022 年华南极端“龙舟水”。

关键词 极端“龙舟水”; 华南; 大气环流; 海温

每年的 5 月下旬到 6 月中旬, 正值华南端午节前后龙舟竞渡之时, 是广东以及华南前汛期降水最多, 最为集中的时段, 常常出现持续大范围区域性暴雨过程, 容易引发严重洪涝灾害, 并对早稻等农作物产生严重影响, 称之为“龙舟水” (钱光明, 2008)。前汛期暴雨、包括“龙舟水”的发生与冷暖气流交汇的锋面降水以及南海夏季风爆发的季风对流降水密切相关 (郑彬等, 2006; 林良勋等, 2006)。“05.6”西江、北江、增江大洪水, “94.6”西江、北江大洪水、“98.6”西江、粤西南大洪水、2008 年华南最强“龙舟水”等都出现“龙舟水”期间。1961-2017 年广东综合强度指数评估最强的 23 次区域性暴雨过程 (伍红雨等, 2019) 中有 18 次是“龙舟水”过程。这些“龙舟水”过程造成华南严重的人员伤亡和财产损失。所以研究前汛期强降水, 特别是“龙舟水”异常对防灾减灾意义重大。华南前汛期强降水一直是我国气象学者关注的热点和研究的重点 (黄土松等, 1986; 陈丽娟等, 2019), 并取得有意义的成果。较强的南海地区偏南风、东亚大槽以及南支西风急流的相互作用是影响广东前汛期降水偏多的直接原因 (梁建茵和吴尚森, 2001)。华南前汛期降水与其北侧有无低

35 值系统向南发展关系密切（吴志伟等，2006）。东北冷涡加强有利于冷空气南下，华南前汛期降水偏
36 多（苗春生等，2006）。南海夏季风爆发偏早，华南春季冷空气活跃，降水偏多（林爱兰等 2010）。
37 华南前汛期持续性暴雨与太平洋年代际振荡(PDO)的位相背景有关（王彦明等，2015），PDO 冷暖背
38 景下华南前汛期锋面和季风降水的水汽输送存在差异（李俊杰等，2022）。纪忠萍等（2021）指出
39 2019 年华南前汛期连续暴雨与大气低频振荡有关。华南前汛期区域性暴雨过程的强度异常（伍红雨
40 等，2021）、区域性持续强降水的年际变化（林爱兰等，2022）与大气环流和海温异常密切。大气环
41 流系统的年代际异常是华南前汛期降水年代际异常的重要原因（李丽平等，2018）。

42 范伶俐和郭品文（2009）指出“龙舟水”期间,冷空气南下影响、副热带高压加强西伸、华南沿
43 海暖湿气流加强、对流旺盛等为强降水提供充足的水汽、能量和动力条件，是“龙舟水”形成的重要
44 原因。2008 年广东最强“龙舟水”与东亚槽、副高、低空急流等天气系统的异常（林良勋等，2009）、
45 大气低频振荡（谷德军和纪忠萍，2011）有关。2008 年华南前汛期异常降水与南海季风涌的频繁活
46 动，500hPa 我国东部大陆和孟加拉湾地区位势高度负异常有关（王东海等，2017）。同时 2008 年前
47 冬青藏高原积雪面积偏大、东亚阻塞高压的异常强大、冷空气强等共同导致华南前汛期异常降水（王
48 红军和潘维玉，2009）。但由于“龙舟水”具有显著的年际和年代际变化（伍红雨等，2017），每年
49 “龙舟水”的大气环流和海温背景等存在差异，仍需要对其特征和成因进行进一步的诊断分析。

50 2022 年“龙舟水”期间（5 月 21 日-6 月 21 日），华南（华南、广西、海南）平均降雨量为 472.5mm，
51 仅次于 2008 年，为 1951 年以来第 2 多，其中广西为历史同期最多，广东为历史同期第三多，粤北韶
52 关、清远破当地历史纪录；珠江出现流域性洪水，北江发生了特大洪水，为 1915 年以来最大，西江
53 也出现了近年少见的洪水。6 月 19 日，京广高铁、普铁线路出现晚点或停运。据广东省应急厅统计，
54 2022 年“龙舟水”过程造成广东韶关、河源、梅州等 14 个市 61 个县受灾，受灾人口 156.5 万人，
55 直接经济损失 73.42 亿元（王丹丹，2022）。广西死亡失踪 12 人，直接经济损失 23.13 亿元。那么
56 2022 年这次华南极端“龙舟水”有何特点？造成这次极端“龙舟水”的成因？与气象学者对历史
57 “龙舟水”的成因研究有何异同？这是当前防灾减灾和决策服务的迫切需求。本文利用 NCEP/NCAR 再
58 分析资料、大气向外长波辐射（OLR）资料、NORAA（ERSST V5）海表温度资料以及华南国家气象观测
59 站降水资料，采用相关和合成分析的方法对其同期大气环流和前期海温的异常进行分析，探讨 2022
60 年华南极端“龙舟水”的成因，为“龙舟水”业务和决策服务提供参考。

61 1 资料和方法

62 （1）采用 1961-2022 年华南 192 个国家气象观测站日降水资料；NCEP/NCAR 大气环流再分析资料
63 （Kalnay E, et al, 1996），包括高度场、风场、海平面气压场；NOAA 月平均向外长波辐射（OLR）

64 资料 (Liebmann et al,1996) 和NOAA海温 (ERSST V5) 资料 (Huang B, et al, 2017)。

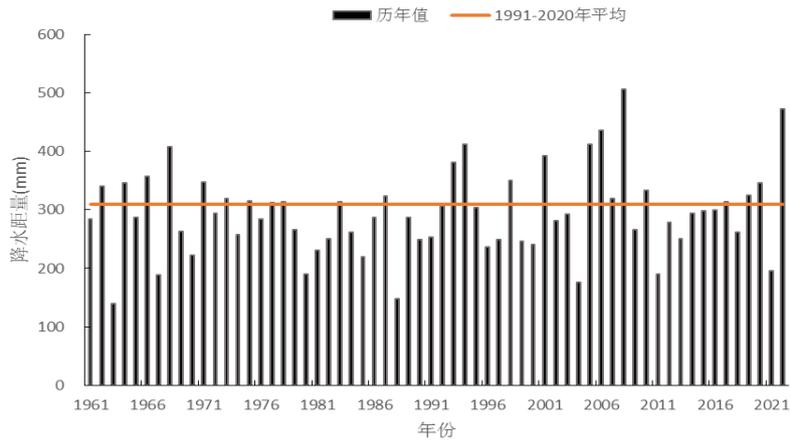
65 (2) 1961-2022 年华南逐年“龙舟水”期间 (5 月 21 日-6 月 21 日) 192 个站平均的降水标准化距
66 平序列, 对其与同期高、中低层大气环流场, 包括 100 hPa、500 hPa 位势高度场、850 hPa 风场、海
67 平面气压场进行相关分析。

68 (3) 采用NCEP/NCAR逐日再分析资料、向外长波辐射距平场 (OLR) 资料, 分别对2022年5月
69 21-6月21日华南“龙舟水”期间100 hPa和500 hPa位势高度场、850 hPa风场、海平面气压场的平均场及
70 异常, 2022年5-6月OLR距平场以及整层 (1000~300 hPa) 水汽通量和水汽通量散度异常进行合成分
71 析。采用NOAA月平均海表温度资料 (ERSST V5), 对前期3-5月海温场异常进行合成分析。

72 (4) 华南包括广东、广西和海南; 气候平均为1991-2020年平均。

73 2 2022 年华南“龙舟水”特点

74 2022 年华南“龙舟水”具有极端性强、累计雨量大、强降水过程频繁等特点。1) 降水极端性强。
75 “龙舟水”期间, 华南平均降雨量为 472.5 mm, 较常年同期偏多 52.7%, 为 1951 年以来第 2 多, 仅次
76 于 2008 年 (506.7 mm) (图 1)。其中广东全省平均降雨量 514.5 mm, 较常年同期偏多 54%, 仅次
77 于 2008 年 (625.6 mm) 和 2006 年 (574.3 mm), 为有气象记录以来历史同期第三多, 其中乐昌、佛
78 冈、翁源等 18 个站为历史同期最多。广西全区平均降雨量为 490.8mm, 为 1951 年以来最多; 三江、
79 龙胜、临桂等 17 个站破历史同期纪录。期间, 广西兴安和环江、广东韶关共 3 个国家气象观测站的
80 日雨量突破建站以来历史极值。国家站最大累计雨量出现在英德, 为 1280.5mm。2) “龙舟水”空间分
81 布不均, 北多南少 (图 2a)。与常年同期比较, 华南北部偏多 5 成~2.7 倍, 海南、粤西南沿海、广
82 西南部沿海局地偏少 1~8 成, 其余大部偏多 2~5 成(图 2b)。3) 累计雨量大, 强降雨区主要位于粤
83 北桂北。5 月 21 日-6 月 21 日, 广东中南部、广西大部、海南岛中东部累计降雨量有 200~500 mm,
84 广东韶关、清远、河源、汕尾和惠州, 广西桂林、柳州、河池、贺州、梧州和来宾等地的部分地区有
85 600~1000 mm, 广东韶关和清远、广西桂林和贺州超过 1000 mm; 其中广东累计降雨量大的乡镇出
86 现在连南县大麦山镇 1689.2 mm, 翁源县新江镇 1652.7 mm; 广西出现在桂林临桂区 1616.1 mm、柳
87 州融水县 1612.4 mm。4) 强降水过程频繁。“龙舟水”期间, 华南连续出现 6 次强降雨过程, 分别在 5
88 月 21-24 日、27-30 日, 6 月 3-6 日、7-11 日、12-16 日、17-21 日 (图 3)。华南国家站区域平均日降
89 水最大出现在 6 月 11 日, 达 31.1mm。持续强降水导致“龙舟水”后期, 珠江流域出现流域性洪水,
90 北江流域出现特大洪水。



91

92

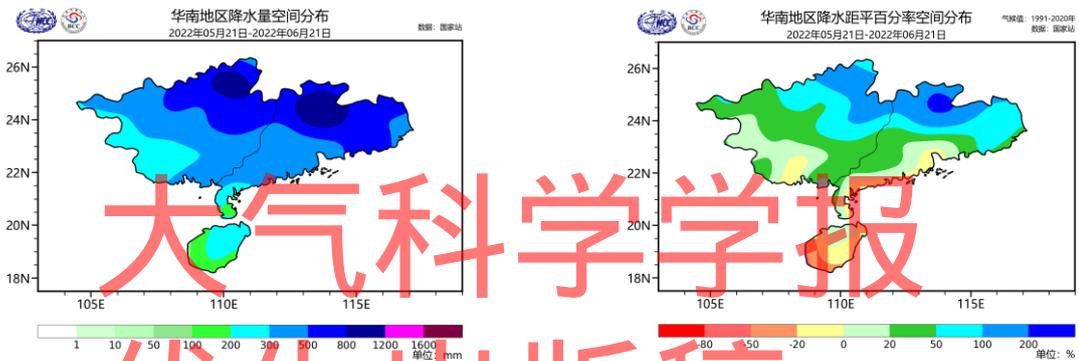
图1 1961-2022年在5月21日-6月21日华南降水距平百分率逐年变化(单位:%)

93

Fig.1 Annual change of the anomalous percentage of precipitation in South China from May 21 to June 21

94

during 1961-2022 (unit:%)



95

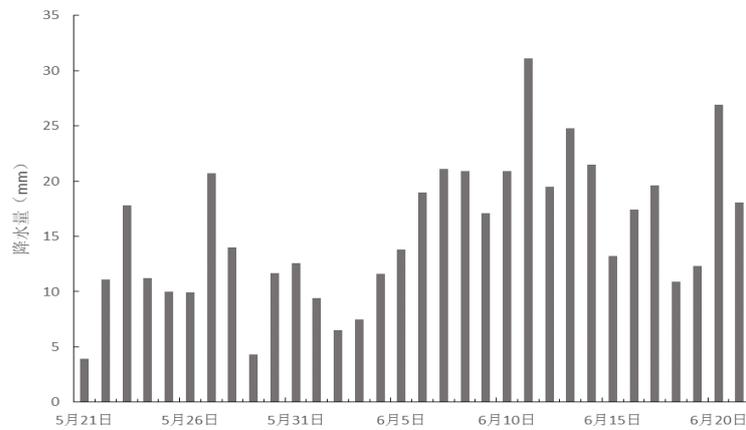
图2 2022 华南“龙舟水”(a)(单位: mm)和距平百分率(单位:%) (b)的空间分布

96

Fig.2 Spatial distribution of Dragon-boat precipitation (unit: mm) (a) and the anomaly percentage (unit: %)

97

(b) in South China in 2022



98

99

图3 2022年“龙舟水”期间华南区域平均降水量逐日变化(单位: mm)

100

Fig. 3 Daily Change of regional average precipitation during the Dragon-boat precipitation period in

101

South China in 2022(unit: mm)

102 3 华南“龙舟水”与大气环流的关系

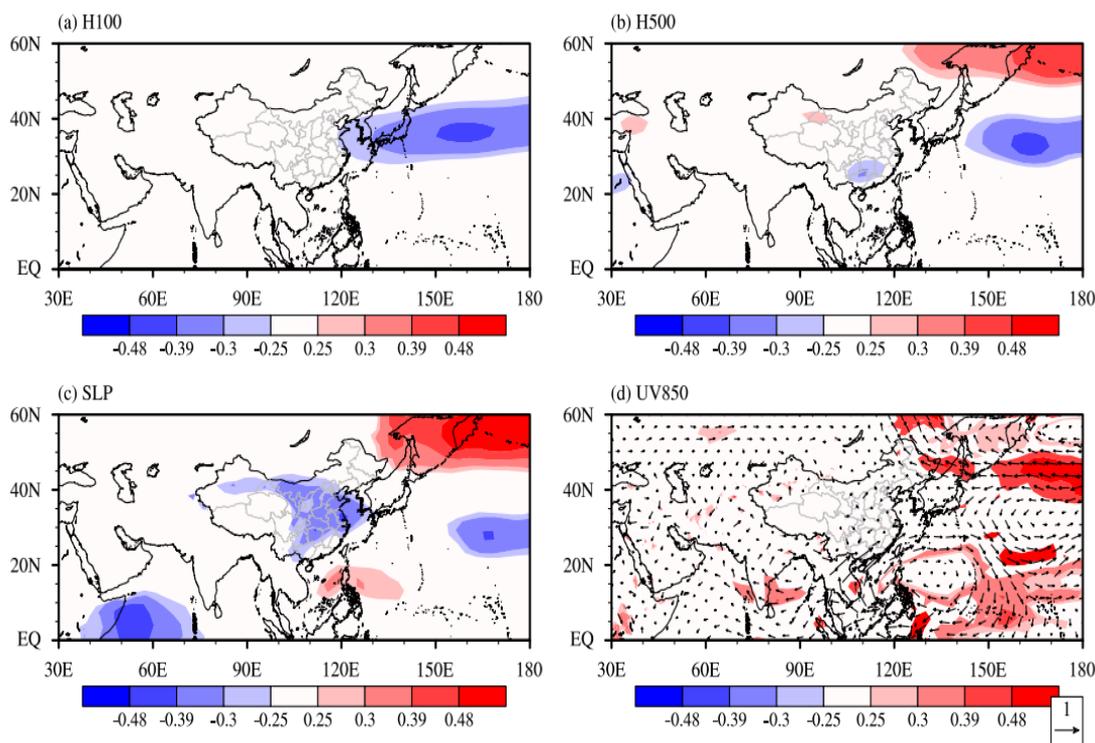
103 由于大气环流异常是导致降水异常的直接原因,下面对近 62 年在 5 月 21 日-6 月 21 日期间华南“龙
104 舟水”标准化距平序列(以下简称“龙舟水”序列)与同期大气环流场进行相关分析,以此来寻找影响“龙
105 舟水”异常的关键环流系统。

106 图 4a 为“龙舟水”序列与对流层高层 100hPa 位势高度场的相关系数分布,可见,在日本海以东的
107 西北太平洋存在显著负相关区,说明“龙舟水”期间,日本海以东的西北太平洋位势高度降低,有利于
108 “龙舟水”偏多。

109 图 4b 为“龙舟水”序列与对流层中层 500 hPa 位势高度场的相关系数分布,可见在 50°N 以北的鄂
110 霍次克海附近存在显著正相关,而在 40°N 以南,日本海以东的西北太平洋存在显著负相关,我国长
111 江以南大部为显著负相关,特别是华南北侧相关最显著。说明“龙舟水”期间,北太平洋“北高南低”的
112 位势异常分布,以及华南北侧位势高度的降低,有利于“龙舟水”偏多。

113 图 4c 为“龙舟水”序列与海平面气压场的相关系数分布,可见在我国中东部、北太平洋
114 中部存在显著负相关,在鄂霍茨克海、菲律宾附近热带西太平洋存在显著正相关,说明北半球中高纬
115 “北高南低”的海平面气压分布,同时大陆高压减弱,鄂霍茨克阻塞高压加强,有利于冷空气的南下,
116 海平面气压从高纬到低纬“+ - +”环流形势的稳定维持,有利于“龙舟水”偏多。

117 图 4d 为“龙舟水”序列与对流层低层 850hPa 风场的相关系数分布,可见在南海、热带西太平洋存
118 在显著相关反气旋环流,其中心位于菲律宾以东的热带西太平洋,华南位于反气旋西北侧的西南气流
119 影响下,有利于南海、西太平洋的水汽向华南输送。菲律宾以东反气旋环流的存在,导致其西北侧南
120 海北部、华南暖湿偏南气流加强,带来丰富的水汽、能量,同时在华南北部存在北风相关,说明华南
121 北部冷空气加强,冷暖气流在华南北部交汇也有利于“龙舟水”偏多。



122

123 图4 1961—2022年在5月21日-6月21日华南“龙舟水”序列和同期(a)100 hPa 位势高度场;(b)500 hPa
 124 位势高度场;(c)海平面气压场;(d)850 hPa 风场的相关系数分布
 125 阴影区表示通过0.05显著性水平检验

126 Fig.4 Distribution of correlation between Dragon_boat precipitation Sequence in South China and (a) 100
 127 hPa geopotential height field, (b) 500 hPa geopotential height field, (c) sea level pressure field, (d) 850
 128 hPa wind field in the same period from May 21 to June 21 during 1961-2022. Shaded areas pass 0.05
 129 significance level test.

130 3.2 2022年“龙舟水”期间大气环流异常特征

131 下面分析2022年华南“龙舟水”期间（5月21日-6月21日），对流层高、中、低层大气环流的异
 132 常特征以及对流层整层的水汽异常分布。

133 从100 hPa 位势高度场及异常分布（图5a）可见，北半球副热带的亚欧大陆为正异常，中心位于
 134 青藏高原，说明南亚高压较常年同期偏强，而在日本海及以东的西北太平洋存在位势高度负异常，中
 135 心位于西北太平洋上。

136 从500 hPa 位势高度场及异常（图5b）可见，欧亚中高纬度为两槽一脊的形势，经向环流明显。
 137 鄂霍次克海存在正距平中心，日本海及以东的西北太平洋为位势高度负距平，中心在西北太平洋。东
 138 亚中高纬维持“北高南低”稳定的环流形势。我国长江以南大部为负距平。说明东亚大槽在日本海附
 139 近明显加深。西太平洋副热带高压（以下简称副高）总体较常年同期面积偏大，强度偏强，西伸脊点
 140 偏西，但副高脊线阶段变化明显。东亚大槽明显加强表现为东北冷涡加强并向南发展，不仅引导冷空

141 气南下影响华南，导致“龙舟水”期间华南平均气温较常年同期偏低，而且也使副高在5月下旬到6
142 月上旬位置偏南，来自副高西侧热带西太平洋和南海的水汽输送到华南地区，冷暖空气在华南交汇，
143 造成华南在5月下旬、6月上旬出现大范围区域性暴雨天气过程（韩旭卿和张涛，2022）。这与苗
144 春生等（2006）指出华南前汛期东北冷涡强，华南降水多的结论相同。6月中旬副高西伸北抬（图略），
145 副高北侧西南季风引导偏南低空暖湿急流的一直维持，与短波槽叠加（孟庆涛和于超，2022），导致
146 华南在6月中旬出现连续性区域性特大暴雨天气，降水显著偏多。可见锋面降水和季风降水的显著偏
147 多导致2022年华南“龙舟水”异常偏多。

148 从海平面气压场及其异常（图5c）可见，在鄂霍茨克海附近存在海平面气压正异常中心，中低
149 纬度（25-45°N）的欧亚大陆和北太平洋为负异常，说明鄂霍茨克海阻塞高压加强、夏威夷群岛以东
150 的北太平洋高压明显减弱，北半球海平面气压从高纬到中纬呈“北高南低”的异常分布，有利于北方
151 冷空气的南下，2022年华南“龙舟水”偏多。

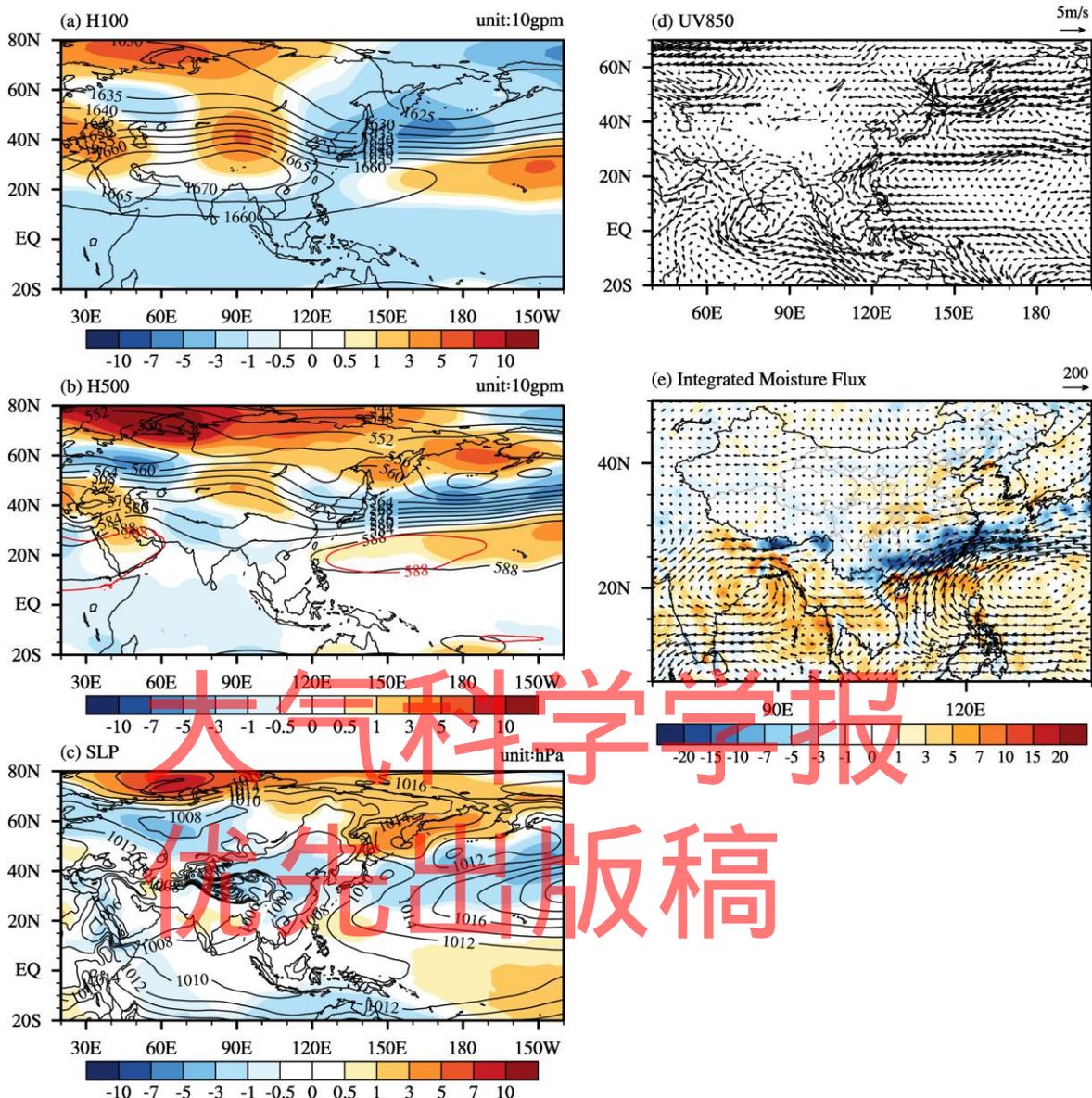
152 从低层850 hPa异常风场上（图5d）可见，在南海、西太平洋存在异常反气旋环流，中心位于
153 菲律宾以东，反气旋环流西北侧的偏南气流把热带西太平洋、南海的暖湿气流向华南输送。在70-90°
154 E的热带印度洋地区存在异常的气旋环流，有利于位于孟加拉湾90°E附近的南支槽增强，华南存在
155 异常偏南气流，同时其北部存在异常北风，桂北、粤北和珠三角北部地区位于异常冷暖气流的交汇处，
156 有利于该地区降水的异常偏多。

157 从“龙舟水”期间整层水汽通量和水汽通量散度异常分布（图5e）可见，长江以南地区处于水汽
158 辐合区，大值区位于华南北部和华东沿海。南海、西太平洋存在异常反气旋环流，其西北侧的异常偏
159 南、西南气流可以把南海、西太平洋、孟加拉湾的暖湿气流向华南输送，桂北、粤北以及珠三角北部
160 地区位于异常水汽辐合高值区，有利于极端降水的发生。2022年“龙舟水”期间，华南、华东以及黄
161 海、东海、日本海的水汽辐合明显加强，有利于降水明显增多。2022年5月、6月，华南、华东降水显
162 著偏多与水汽输送密切相关（韩旭卿和张涛，2022；孟庆涛和于超，2022）。

163 2022年南海夏季风于5月第3候爆发（具体是5月12日），较常年（5月第4候）偏早1候。
164 南海夏季风的爆发和建立偏早，意味着越赤道气流以及从孟加拉湾、南海、西太平洋的水汽通道打开，
165 季风环流引导西南水汽向华南输送加强，由于2022年“龙舟水”期间季风指数都较气候平均值偏弱，
166 向北推进慢，导致雨带长时间的滞留华南，带来持续的强降水。

167 从上分析可见，华南“龙舟水”期间大气环流场的合成分析得到了和前面相关分析一致的结论。
168 另外，2022年“龙舟水”期间，位于东亚沿岸的东亚大槽在对流层高、中、低层的日本海及附近都有
169 明显的表现，存在位势高度负异常以及风速的切变，说明东亚大槽加强，在低层850hPa上与东北冷
170 涡、气旋环流配合，是个深厚稳定的天气系统，说明东亚大槽加强，东北冷涡加强南移，影响华南的

171 冷空气偏强，是导致华南“龙舟水”偏多的重要原因之一，这与华南发生秋冬春干旱时东亚大槽减弱，
 172 冷空气弱的环流特征相反（伍红雨等，2022）。



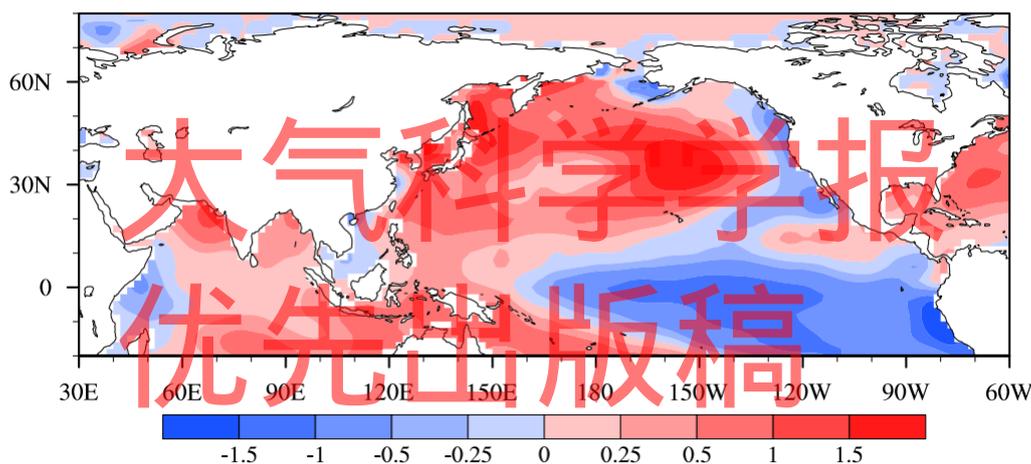
173
 174 图5 2022年华南“龙舟水”期间环流特征 (a) 100 hPa位势高度场及异常; (b) 500 hPa 位势高度场及
 175 异常; (c) 海平面气压场及异常; (d)850 hPa 风场异常; (e)整层水汽通量 (箭头; 单位: $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)
 176 及水汽通量散度异常 (阴影, 单位: $10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

177 Fig.5 Circulation characteristics during Dragon-boat precipitation period in South China in 2022 (a) 100 hPa
 178 geopotential height field and anomalies, (b) 500 hPa geopotential height field and anomalies, (c) sea
 179 level pressure field and anomalies, (d) 850 hPa wind field anomalies, (e) water vapor flux (vector,
 180 unit: $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$) and water vapor flux divergence anomalies (Shadow area, unit: $10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) in
 181 the whole layer

182 4 华南“龙舟水”与海温的关系

183 4.1 2022 年华南“龙舟水”期间海温的异常

184 华南前汛期强降水与热带太平洋海温关系密切(吴志伟等, 2006; Gu 等, 2018; 林爱兰等, 2022)。
185 从 2022 年 3-5 月海温异常分布(图 6b)可见, 在北印度洋存在海温正异常, 特别是阿拉伯海、孟加
186 拉湾存在 0.5~1.0℃的海温正异常中心; 在南海北部和我国东部近海, 存在 0~-0.25 的海温负异常;
187 赤道西太平洋(120° 160° E), 以及海洋性大陆和北太平洋大部为海温正异常, 在鄂霍次克海以及
188 东北太平洋夏威夷群岛东北部存在海温正异常中心; 160° E 以东的赤道中东太平洋存在-0.5~-1.0℃
189 的海温负异常。赤道太平洋海温从西向东存在“-+”异常分布, 即拉尼娜事件的海温异常分布。国
190 家气候中心监测表明, 在 2021 年 9 月开始的拉尼娜事件, 预计将持续到 2022/2023 年冬季, Nino3.4
191 区的海温异常在 2022 年 3-5 月达到峰值, 为-1.1℃。从以上分析可见, 2022 年华南极端“龙舟水”发生
192 在拉尼娜的背景下, 以下分析热带太平洋到北半球副热带地区大气环流对这次拉尼娜事件的响应特
193 征。



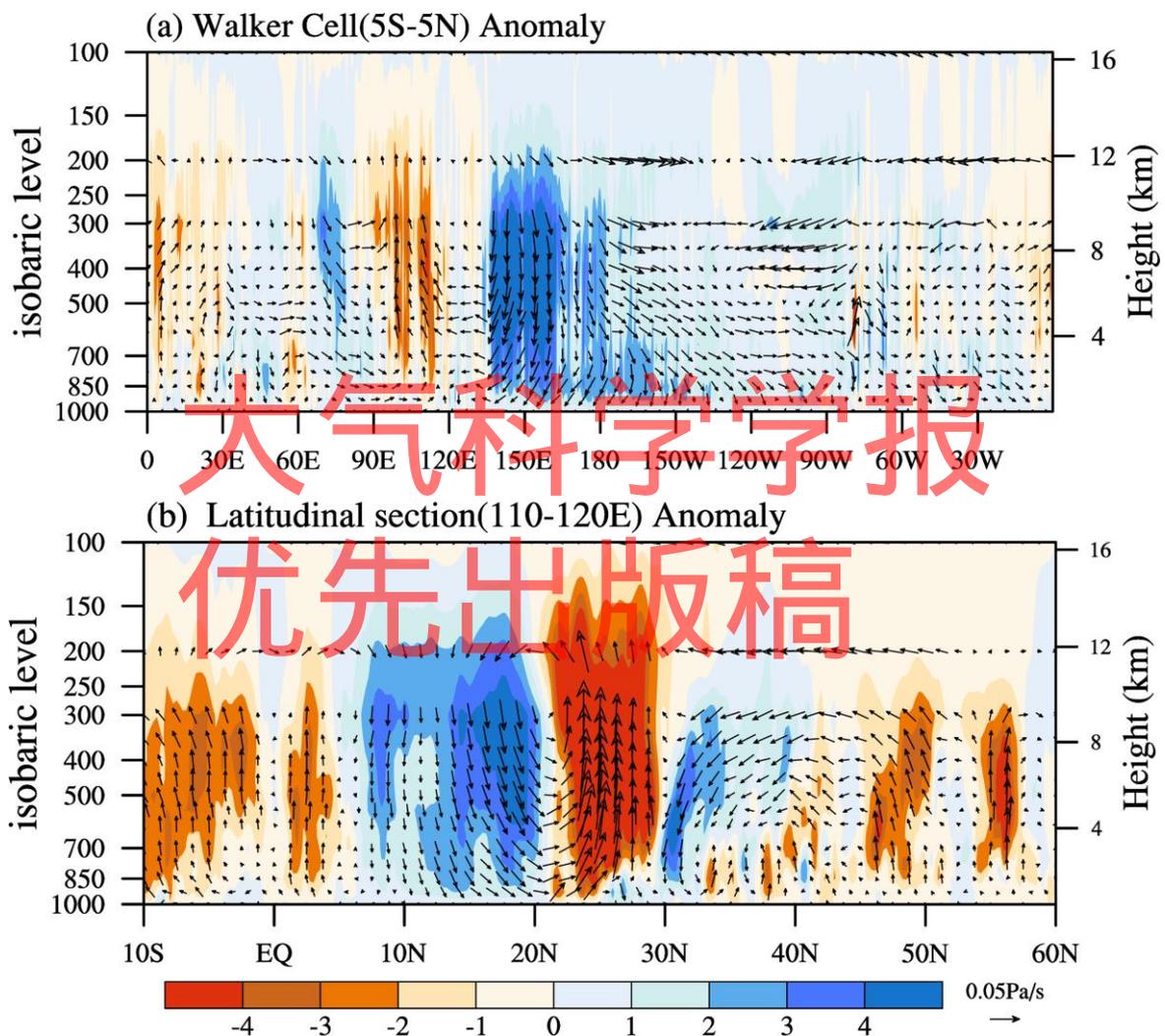
194 图 6 2022 年 3-5 月海温异常分布

195 Fig. 6 Distribution of SST anomalies in March-May in 2022

196 4.2 2022 年华南“龙舟水”期间 Walker 环流和垂直运动上升

197 2022 年华南“龙舟水”期间, 沿赤道 5° S-5° N 区域的经度-高度距平环流剖面(图 7a)可反映 Walker
198 环流情况。可见较强上升运动出现在赤道西太平洋(100°-135° E), 上升运动的高度达到 200 hPa 以
199 上, 而下沉运动主要出现在赤道中东太平洋, 特别在日界线附近(140° E-170° W), 可见大气环流对
200 拉尼娜事件有明显响应, 赤道太平洋 Walker 环流加强。图 7b 为 2022 年“龙舟水”期间, 沿 110°-120° E
201 区域的纬度-高度距平环流剖面图, 可见华南地区(20°-29° N)上升运动非常明显, 上升高度可达 150
202 hPa 以上, 而下沉运动主要出现在 7°-20° N, 30°-35° N, 在低纬度存在华南上升、其周边地区下沉的异
203 常垂直环流, 为 2022 年华南极端“龙舟水”提供了稳定的上升运动背景。这种垂直运动也可在 5-6 月
204 向外长波辐射(OLR)距平场(图 8)得到体现。图 8 可见, 在赤道中东太平洋(140° E-90° W)对
205 流活动受到抑制, 而在赤道西太平洋(90°-140° E)对流活动加强。同时在我国长江以南、南海大部、

206 海洋性大陆以及印度洋北部大部地区的对流较常年同期加强，华南特别是广东北部、广西北部处于负
 207 异常大值区，对流明显加强；而在菲律宾以东的热带西太平洋（130° -150° E，10° -22° N）上空对
 208 流活动较常年同期减弱，相应非绝热加热减弱，通过激发大气中的 Rossby 波使得菲律宾以东出现异
 209 常反气旋环流（图 5 d），南海到华南为异常的偏南气流影响，有利于南海和西太平洋暖湿水汽向华
 210 南输送，导致极端“龙舟水”的发生。这与陈丽娟等（2019）指出菲律宾附近异常反气旋的存在有利
 211 于华南前汛期降水偏多的结果一致。计算 1961-2022 年华南“龙舟水”序列与前汛期（4-6 月）降水
 212 序列的相关系数为 0.62，通过 0.001 的显著性水平检验，相关非常显著，说明龙舟水偏多（少）与前
 213 汛期降水偏多（少）的一致变化，降水异常的成因也相似。满足异常的垂直上升气流和异常的水汽是
 214 发生极端降水要满足的两个基本条件（钱维宏等，2020），而 2022 年“龙舟水”这两个条件都满足。



215
 216 图 7 2022 年华南“龙舟水”期间，(a) 热带太平洋 Walker 环流（沿 5°S-5°N 区域的经度-高度距平环
 217 流剖面，箭矢： ω 与 u 异常合成，阴影： ω 异常）；(b) 沿 100°-110°E 区域的纬度-高度距平环流剖
 218 面（箭矢： ω 与 v 异常合成，阴影： ω 异常）
 219 Fig.7 during the Dragon-boat precipitation period in 2022 (a) Walker circulation in the Tropical Pacific
 220 (5°S-5°N), (vector: anomalies synthesis of ω and u ; shaded: anomalies of ω); (b) Zonal-height profile
 221 in 100°-110°E region (vector: anomalies synthesis of ω and v ; shaded: anomalies of ω)

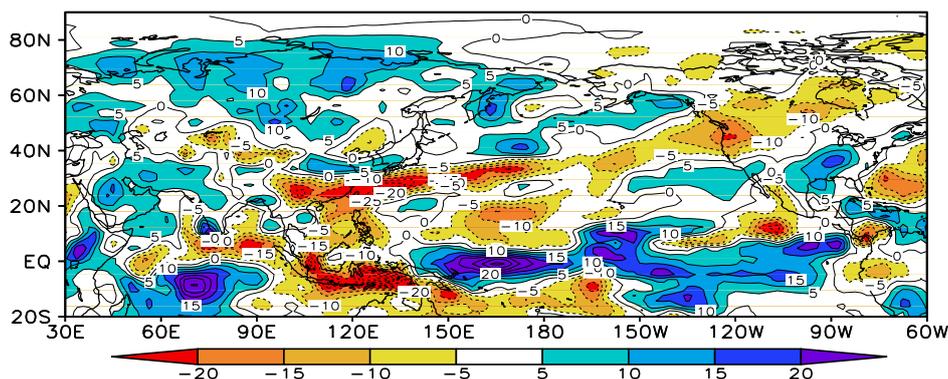


图8 2022年5-6月大气向外射出长波辐射（OLR）距平场（单位： $W \cdot m^{-2}$ ）

Fig. 8 Atmospheric outward long wave radiation (OLR) anomaly field from May to June in 2022

(unit: $W \cdot m^{-2}$)

5 结论和讨论

本文首先分析了 2022 年华南极端“龙舟水”的特征，然后采用相关和合成分析的方法对其同期大气环流和前期海温的异常进行分析，探讨 2022 年华南极端“龙舟水”的成因，分析结果如下：

(1) 2022 年“龙舟水”期间，华南平均降雨量 472.5 mm，为有气象记录以来历史同期第二多。其中广东、广西分别为历史同期第三多、最多。华南出现持续时间长的大范围暴雨引发珠江流域出现流域性洪水，北江流域出现特大洪水，造成严重的人员伤亡和财产损失。

(2) 2022 年“龙舟水”期间，东亚大槽明显加强，东北冷涡偏强，导致影响华南的冷空气，南支槽增强，在菲律宾以东存在异常反气旋环流，副高偏强，其西北侧的偏南季风气流把热带西太平洋、南海的暖湿气流向华南输送，且西南季风暖湿气流长时间在华南的维持，鄂霍茨克海阻塞高压的加强，地面北半球海平面气压从高到中低纬呈“北高南低”的异常分布，华南上升运动非常显著且存在明显水汽辐合，导致 2022 年华南“龙舟水”极端偏强。

(3) 2022 年赤道中东太平洋发生拉尼娜事件，大气对其有明显响应，Walker 环流增强。“龙舟水”期间，在菲律宾以东对流活动受到抑制，通过激发大气中的 Rossby 波使得菲律宾以东出现异常的反气旋环流，南海到华南为异常的偏南气流影响，有利于南海和西太平洋暖湿水汽向华南输送，同时在华南存在显著的上升运动，有利于华南“龙舟水”显著偏多。

2008 年、2006 年、2022 年分别是有气象记录以来华南“龙舟水”最多的前三位，其异常成因存在异同。在海温方面，相同点是这三年“龙舟水”的前期冬春赤道中东太平洋海温为负距平，其中在 2008 年、2022 年还处在拉尼娜的背景下。在其影响下，这三年“龙舟水”期间，影响华南的冷空气都偏强，赤道太平洋 Walker 环流加强。大气环流方面，“龙舟水”期间，对流层高层南亚高压偏强，中层日本海以东的西北太平洋位势高度降低，北太平洋“北高南低”的位势异常分布，低层菲律宾以东存在异常反气旋环流，华南受强的西南气流影响，在华南存在水汽的辐合，且这 3 年南海夏季风爆

247 发都较常年偏早，这些共同的特点都有利于华南极端“龙舟水”的发生。

248 但由于前期 3-5 月海温异常的分布存在差异。2006 年，赤道太平洋海温负距平有两个中心，分

249 别位于日界线附近和赤道东太平洋，而印度洋北部和南海海温接近常年同期，北太平洋大部为海温负

250 距平。2008 年，赤道太平洋海温负距平中心位于日界线附近，而印度洋北部、南海、都是海温负异

251 常，北太平洋大部为海温正距平。2022 年，赤道太平洋海温负距平中心位于赤道东太平洋，南海北

252 部为海温负距平，而印度洋北部、北太平洋大部为海温正距平。“龙舟水”期间，大气环流在这三年

253 也存在差异。如副高、东亚大槽的强度和位置都存在差异。2006 年副高接近常年，略有偏强，2008

254 年副高明显偏弱、偏东，2022 年副高明显偏强，偏西；东亚大槽在 2006 年，以 40° N 为界，北段减

255 弱，南段加强；2008 年东亚大槽偏弱，而 2022 年东亚大槽明显偏强。环流差异导致水汽辐合的位置

256 不同，相应“龙舟水”降水的大值区也存在差异，2006 年在华南东部，2008 年在广东，2022 年在华

257 南北部。影响华南极端“龙舟水”的因子很复杂，是多因子共同作用的结果。

258

259 参考文献 (References)

- 260 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.
- 261 Chen L J, Zhao J H, Gu W, et al., 2019. Advances of research and application on major rainy seasons in China[J]. Journal of
- 262 Applied Meteorological Science, 30 (4) :385-400. (in Chinese).
- 263 Gu W, Lin W, Hu Z Z, et al., 2018. Interannual variations of the first rainy season precipitation over South China[J]. J Climate,
- 264 31(2):623-640.
- 265 范伶俐, 郭品文, 2009. 广东“龙舟水”降水量成因分析[J]. 广东海洋大学学报, 29(6): 61-67. Fan L L, Guo P W. 2009.
- 266 Analysis on the cause of precipitation of Dragon-boat precipitation in Guangdong. Journal of Guangdong Ocean University,
- 267 29 (6):61-67. (in Chinese).
- 268 苗春生, 吴志伟, 何金海, 等, 2006.近50年东北冷涡异常特征及其与前汛期华南降水的关系分析[J].大气科学, 30(6):
- 269 1249-1256. Miao C S, Wu Z Wi, He J H, et al., 2006. The Anomalous Features of the Northeast Cold Vortex During the
- 270 First Flood Period in the Last 50 Years and Its Correlation with Rainfall in South China [J]. Chinese Journal of
- 271 Atmospheric Sciences, 30(6): 1249-1256. (in Chinese).
- 272 谷德军, 纪忠萍, 2011. 2008年广东强龙舟水与准10天振荡[J]. 热带气象学报, 27(1): 11-21. Gu D J, Ji Z P.2011.The strong
- 273 Dragon-boat precipitation of Guangdong in 2008 and quasi-10-day oscillation[J].Journal of Tropical Meteorology, 27(1):
- 274 11-21. (in Chinese).
- 275 韩旭卿, 张涛, 2022. 2022年5月大气环流和天气分析[J].气象, 48(8):1070-1076. Han X Q, Zhang T, 2022. Analysis of the
- 276 May 2022 Atmospheric Circulation and Weather. Meteor Mon, 48(8):1070-1076. (in Chinese).
- 277 黄士松, 1986.华南前汛期暴雨 [M]. 广州:广东科技出版社, 108-120. Huang S S. 1986, Rainstorms in the early flood season
- 278 in South China [M], Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 108-120. (in Chinese).
- 279 纪忠萍, 源艳芬, 徐艳虹, 等, 2021. 2019年广东前汛期连续暴雨与大气季节内振荡的联系[J]. 大气科学, 45(3): 588-604.
- 280 Ji Z P, Yuan Y F, Xu Y H, et al., 2021. The Relationship between continuous rainstorms and atmospheric intraseasonal
- 281 oscillation during the first rainy season in Guangdong in 2019 .Chinese Journal of Atmospheric Sciences [J]. 45(3):
- 282 588-604. (in Chinese).
- 283

284 Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., et al., 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project[J].*Bulletin of the American*
285 *Meteorological Society*, 77(3), 437-471.

286 梁建茵, 吴尚森, 2001. 广东省汛期旱涝成因和前期影响因子探讨[J].*热带气象学报*, 17(2): 97-108. Liang J Y, Wu S S.
287 2001. Formation reasons of drought and flood in the rain season of Guangdong and preceding impact factors[J].*Journal of*
288 *Tropical Meteorology*, 17(2): 97-108. (in Chinese).

289 李丽平, 周林, 俞子闲, 2018. 华南前汛期降水的年代际异常特征及其成因[J].*大气科学学报*, 41(2): 186-197. Li L P,
290 Zhou L, Yu Z X, 2018. Interdecadal anomaly of rainfall during the first rainy season in South China and its possible
291 causes[J].*Trans Atmos Sci*, 41(2) : 186-197. (in Chinese).

292 李俊杰, 范伶俐, 梁梅, 等, 2022. 不同PDO 背景下华南前汛期锋面和季风降水的水汽输送差异[J].*大气科学学报*,
293 45(4) : 539-551. Li J J, Fan L L, Liang M, et al., 2022. Water vapor transport differences of frontal and monsoon
294 precipitation during South China pre-flood season under different PDO phases[J].*Trans Atmos Sci*, 45(4) : 539-551. (in
295 Chinese).

296 Liebmann B, Smith C A.1996. Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. *Bull Amer Meteor*
297 *Soc*, 77:1275-1277.

298 林爱兰, 谷德军, 李春晖, 等, 2010. 南海夏季风爆发与华南前汛期锋面降水异常变化的联系[J]. *中山大学学报自然科*
299 *学版*, 49(5): 127-133. Lin A L, Gu D J, Li C H, et al.,2010. Relationship between the onset of the South China sea summer
300 monsoon and abnormal variations of frontal precipitation during the first rainy period in South China[J].*Acta Scientiarum*
301 *Naturalium Universitatis Sunyatseni*,49(5): 127-133. (in Chinese).

302 林爱兰, 李春晖, 郑彬, 等, 2013. 广东前汛期持续性暴雨的变化特征及其环流形势[J].*气象学报*, (4): 628-642. Lin A L,
303 Li C H, Zheng B, Gu D J. et al.,2013. Variation characteristics of sustained torrential rain during the pre-flooding season in
304 Guangdong and the associated circulation pattern[J]. *Acta Meteorologica Sinica*. (4): 628-642. (in Chinese).

305 林爱兰, 谷德军, 李春晖, 等, 2022. 影响华南汛期持续性强降雨年际变化的天气环流和海温异常[J].*热带气象学*
306 *报*, 38(1):1-10. Lin A L, Gu D J, Li C H, et al., 2022. Atmospheric circulation and sea surface temperature anomalies
307 associated with the interannual variation of persistent heavy precipitation in flood season of South China[J].*Journal of*
308 *Tropical Meteorology*, 38(1):1-10. (in Chinese).

309 林良勋, 吴乃庚, 黄忠, 等, 2009. 广东2008年罕见“龙舟水”特点及成因诊断分析[J]. *气象*, 35(4): 43-50. Lin L X, Wu
310 N G, Huang Z , et al., 2009. Causality analysis of the infrequent Dragon Boat Precipitation in Guangdong Province in
311 2008[J].*Meteor Mon*, 35(4):43-50. (in Chinese).

312 林良勋, 2006. 广东省天气预报技术手册[M].北京: 气象出版社, 103-174. Lin Liangxun.2006. Manual of Weather Forecast
313 Technique in Guangdong Province [M]. Beijing: China Meteorological Press, 103-174. (in Chinese).

314 孟庆涛, 于超, 2022. 2022年6月大气环流和天气分析.*气象*, 48(9):1209-1216. Men Q T, YU Chao, 2022. Analysis of the June
315 2022 Atmospheric Circulation and Weather. *Meteor Mon*, 48(9):1209-1216. (in Chinese).

316 钱光明, 2008. 广东省气候业务技术手册[M]. 北京: 气象出版社, 65-83. Qian G M. 2008. Guangdong Province climate
317 business technical manual [M]. Beijing: China Meteorological Press, 65-83. (in Chinese).

318 钱维宏, 艾阳, 陈绿文, 等, 2020. 一次广东典型龙舟水暴雨过程的扰动形势分析[J]. *热带气象学报*, 36(4): 433-443.
319 Qian W h, Ai Yang, Chen L W, et al., 2020. Anomalous synoptic pattern of typical dragon boat precipitation process in
320 Guangdong province [J]. *Journal of Tropical Meteorology of Meteorological*, 36(4):433-443. (in Chinese).

321 Huang B., Thorne, P. W., Banzon, V. F., et al., 2017. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5):
322 upgrades, validations, and intercomparisons [J]. *J Climate*, 30(20):8179-8205.

323 王丹丹, 2022. 今年6月以来广东省暴雨洪涝灾害应对过程分析[J]. *中国减灾*, 10月上:40-43. Wang D D, 2022. Analysis of
324 the response process to rainstorm and flood disasters in Guangdong province since June this year [J]. *China Disaster*
325 *Reduction*, October 1: 40-43. (in Chinese).

326 王东海, 夏茹娣, 刘英, 2011. 2008年华南前汛期致洪暴雨特征及其对比分析[J]. *气象学报*, 69(1):137-148. Wang D H,
327 Xia R D, Liu Y. 2011. A preliminary study of the flood causing rainstorm during the first rainy season in South China in

- 328 2008[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 69(1):137-148. (in Chinese).
- 329 王红军, 潘维玉, 2009. 2008年华南前汛期异常降水的大尺度环流特征及成因分析. *热带地理*, 29(3): 219-224. Wang H J,
- 330 Pan W Y.2009. A Study on the Causes and the Atmospheric Circulation Characteristics of Abnormal Rainfall in South
- 331 China during 2008. *Tropical Geography*, 29(3): 219-224. (in Chinese).
- 332 王彦明, 高建芸, 池艳珍, 等, 2015. 太平洋海温场不同时间尺度背景下华南前汛期持续性暴雨的统计特征[J]. *大气*
- 333 *科学学报*, 38(1) : 126-131. Wang Y M, Gao J Y, Chi Y Z, et al., 2015. Statistical characteristics of persistent heavy
- 334 rainfall during the first rainy season in South China under the background of Pacific sea temperature fields on different
- 335 time scales[J]. *Trans Atmos Sci*, 38(1) : 126-131. (in Chinese).
- 336 吴志伟, 江志红, 何金海, 2006. 近50年华南前汛期降水、江淮梅雨和华北雨季旱涝特征对比分析[J]. *大气科学*,
- 337 30(3):391-401. Wu Z W, Jiang Z H, He J H. 2006.The Comparison analysis of flood and drought features among the first
- 338 flood period in South China, Meiyu period in the Yangtze river and the Huaihe river valleys and rainy season in North
- 339 China in the Last 50 Years[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,30(3): 391-401. (in Chinese).
- 340 伍红雨, 李春梅, 王迪龙, 2017. 近55年广东“龙舟水”华南“龙舟水”异常特征及成因分析[J]. *热带气象学报*, 33
- 341 (6):608-616[J]. Wu H Y, Li C M, Wang D L. 2017. Analysis on characteristics and abnormal causes of dragon-boat
- 342 precipitation in Guangdong in the past 55 years [J]. *Journal of Tropical Meteorology*. 2017, 33(5): 608-616. (in Chinese).
- 343 伍红雨, 邹燕, 刘尉, 2019. 广东区域性暴雨过程的量化评估及气候特征[J]. *应用气象学报*, 30 (2):233-244. Wu H Y,
- 344 Zou Y, Liu W.2019. Quantitative assessment of regional heavy rainfall process in Guangdong and its climatological
- 345 characteristics[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 30 (2):233-244. (in Chinese).
- 346 伍红雨, 郭尧, 邹燕, 等, 2021. 华南区域性暴雨过程的客观评估及异常机理分析[J].*暴雨灾害*, 40(3):306-315. Wu H Y,
- 347 Guo Y, Zou Y, et al., 2021. Objective assessment and analysis of abnormal causes of regional rainstorm events in South
- 348 China. [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 40(3):306-315. (in Chinese).
- 349 伍红雨, 吴遥, 郭尧, 2022. 2020-2021年广东秋冬春干旱的成因分析[J]. *气象*, 48(6):783-793. Wu H Y, Wu Y, Guo Y,
- 350 2022.Cause Analysis of Drought in Autumn, Winter and Spring in Guangdong from 2020 to 2021[J].*Meteor*
- 351 *Mon*,48(6):783-793. (in Chinese).
- 352 郑彬, 梁建茵, 林爱兰, 等, 2006. 华南前汛期的锋面降水和夏季风降水I.划分日期的确定[J]. *大气科学*, 30(6): 1207-1216.
- 353 Zheng B, Liang J Y, Lin A L, et al., Frontal rain and summer monsoon rain during pre-rainy season in South China. part I :
- 354 Determination of the division dates[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30(6):1207-1216. (in Chinese).

357 **The Relationship between the Extreme Dragon-boat Precipitation and**

358 **the Atmospheric Circulation and SST Anomaly in South China in 2022**

359 WU Hongyu^{1,2} WU Yao³ ZHENG Jing¹

360 ¹Climate Center of Guangdong Province, Guangzhou 510641,China;

361 ²Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration / Guangdong

362 Provincial Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, Guangzhou 510641,China;

363 ³Chongqing Climate Center, Chongqing 401147,China;

364

365 **Abstract:** During the Dragon-boat precipitation period in 2022 (from May 21 to June 21), the average

366 precipitation in South China is 472.5 mm, which is the second largest in the same period in history, it is the third

367 largest in Guangdong, Guangxi is the largest in the same period since there are meteorological records history in

368 1951. Under its influence, River basin flood occurs in the Pearl River basin, and catastrophic floods occurs in the
369 Beijiang River basin. Using the daily precipitation data of 192 national meteorological observation stations in
370 South China, NCEP/NCAR atmospheric circulation, atmospheric outward long wave radiation(OLR) data and
371 NOAA monthly scale SST reanalysis data, the characteristics of South China Dragon-boat precipitation anomaly in
372 2022 and its relationship with atmospheric circulation and sea surface temperature are studied by using correlation
373 and composite analysis methods. The results show that the East Asia Trough and the Northeast Cold Vortex are
374 significantly strengthened, the cold air affecting South China is strong. The Western Pacific Subtropical High and
375 the South Branch Trough are both relatively strong, and there is significant water vapor convergence in South
376 China during the Dragon-boat precipitation period in 2022. The atmospheric response to the La Nina event is
377 obvious in 2022, and the Walker circulation is enhanced. The convection in South China strengthened obviously.
378 An abnormal anticyclone circulation was in the east of the Philippines. The Western Pacific Subtropical High
379 becomes stronger, the southwest wind on its northwest side is stronger. Water vapor transmission to South China
380 has increased significantly, Water vapor transmission to South China increased significantly. the significant
381 enhancement of water vapor transport to South China. A significant upward movement at the same time in South
382 China. The abnormality of atmospheric circulation and SST lead to the extreme Dragon-boat precipitation in South
383 China in 2022.

384 **Key words:** Extreme Dragon-boat precipitation; South China; atmospheric circulation; SST

大气科学学报 优先出版稿