

1 华南冬季雾日年际变化特征及其与 ENSO 的关系

2 植炫惠^{1,2} 徐海明^{1,2} 马静^{1,2} 植石群³

- 3 1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室/气候与环境
4 变化国际合作联合实验室, 南京 210044;
5 2. 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044
6 3. 广东省气候中心, 广州 510080

7 **摘要** 本文基于 1979–2016 年华南地区 52 个台站逐日雾观测数据和 ERA5 再分析资料等,
8 采用 EOF 分解等多种统计方法, 研究了 ENSO 对华南冬季雾日年际变化的影响, 并进一步
9 探讨了华南冬季雾日年际变化与 ENSO 关系的年代际转变。结果表明: (1) 华南地区冬季
10 雾日具有区域一致的变化特征, 呈现出明显的年际变化和线性增加的趋势。在冬季, 华南
11 地区近地面层北风减弱, 大气层结更加稳定, 同时温度露点差降低, 空气中水汽含量增加,
12 为雾的形成提供了有利的背景场条件。(2) ENSO 与华南地区冬季雾日的年际变化存在显
13 著相关关系, 在 El Niño 年的冬季, 菲律宾海上空存在一个异常的反气旋环流, 反气旋西
14 侧的异常暖湿西南气流给华南地区带来充沛的水汽, 有利于雾日的形成。La Niña 年雾日
15 的变化则与 El Niño 年相反。这种显著相关关系主要取决于大雾日数, 而非轻雾日数。(3)
16 ENSO 与华南地区冬季雾日年际变化的关系在 1996 年前后出现明显年代际转折, 在
17 1979–1996 年期间, 两者相关性较弱, 1997 年之后相关性显著增强。这种关系的转变可能
18 受到北大西洋年代际振荡 (Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO) 的调控。

19 **关键词** 华南地区; 冬季雾日; 年际变化; ENSO

20 **文章编号** 2021159B

21 **doi:** 10.3878/j.issn.1006-9895.2202.21159

22 **Interannual Variability of Winter Fog Days over Southern** 23 **China and Its Relationship With ENSO**

24 Xuanhui ZHI^{1,2}, Haiming XU^{1,2}, Jing MA^{1,2}, Shiqun ZHI³

- 25 1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters
26 (CICFEMD) / Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME) /
27 Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC),
28 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044;

29 收稿日期: 2021-08-22; 网络与出版日期:

30 第一作者: 植炫惠, 女, 1997 年出生, 硕士研究生, 主要从事海气相互作用研究。E-mail: shefie_zhi@163.com

31 通讯作者: 徐海明, E-mail: hxu@nuist.edu.cn

32 资助项目: 国家自然科学基金 (41975106)

33 Funded by : National natural science foundation of China (41975016)
34

35 2. *School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology,*
36 *Nanjing 210044*

37 3. *Guangdong Climate Center, Guangzhou 510080*

38 **Abstract** Based on the observed daily fog data from 52 meteorological stations in southern
39 China and ERA5 reanalysis data from 1979 to 2016, effects of ENSO on the interannual
40 variability of winter fog days over southern China and the interdecadal variation of the
41 relationship between them are investigated using the EOF analysis and other statistical methods.
42 Results are shown as follows: (1) The winter fog days over southern China (WFDC) exhibit a
43 whole-region consistent pattern and display evident interannual variability and significant
44 increasing trend. The WFDC is closely related to the weakened northerly wind, more stable
45 atmosphere and the decreasing $T-T_d$ near surface, which implies that the water vapor in air is
46 increasing, providing favorable meteorological background fields for the maintenance and
47 development of fog over southern China. (2) There is a close relationship between ENSO and the
48 interannual variability of WFDC, which mainly depends on heavy fog days rather than light fog
49 days. During El Niño winters, an anomalous anticyclone tends to occur over the Philippine Sea,
50 and the warm moist anomaly southwesterlies on the western flank of this anticyclone brings
51 abundant water vapor to southern China, conducive to the fog formation. Roughly opposite
52 changes of fog days occur during La Niña winters. (3) The interannual ENSO-WFDC
53 relationship exhibits an obvious interdecadal change around 1996, with a low correlation during
54 the period of 1979-1996 but a high correlation after 1997. A further analysis shows that this
55 change in the relationship might be modulated by the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO).

56 **Keywords:** Southern China; Winter fog days; Interannual variation; ENSO

57 1 引言

58 根据中国气象局《地面气象观测规范》(2013)中的定义,雾是指大量微小水滴浮游空
59 中,使水平能见度小于 1.0 km 的天气现象,轻雾则是指微小水滴或已湿的吸湿性质粒所
60 构成的灰白色稀薄雾幕,水平能见度在 1.0 km-10.0 km 范围内。随着近年来社会经济的
61 迅猛发展和出行交通方式的改变,雾逐渐成为一种不利于水陆空交通运输的灾害性天气现
62 象,影响着人们的生活和出行(Niu et al., 2010a; 张金满等, 2016)。华南地区发生的因
63 雾天气导致的公路路障事故比北方地区更频繁,冬季是华南雾的高发季节,其次是春季和
64 秋季(Jiang et al., 2020)。因此,开展华南地区冬季雾天气变化特征及其成因的研究工作
65 具有十分重要的意义。

66 国外对雾天气的气候学研究开展地相对较早,主要包括雾的气候特征统计分析、水文
67 气象条件分析和发生时的天气形势分析等(Fuzzi et al., 1996; Bendix et al., 2002; Syed et
68 al., 2012)。中国地区雾的早期研究多集中于个例的过程分析(何晖等, 2009; 陆春松等,
69 2010),一系列研究指出中国冬季雾在局地生消过程中受到动力因子和热力因子的共同影
70 响,其中动力因子包括近地面风速、对流层中低层水平风的垂直切变等,热力因子则包括
71 近地面的大气稳定度及水汽含量等(Zhang et al., 2013; Wang et al., 2020)。研究还表明,
72 雾的局地生消与云况(Guo et al., 2020)、降水(闫敬华等, 2001; Kutty et al., 2019)、地
73 形强迫(吴兑等, 2007)等因素也有关。

74 随着地面气象台站长期观测资料的逐步完善,雾的长期变化趋势及其影响因素开始受

75 到越来越多学者的关注 (吴兑等, 2011; Ding et al., 2014; 孔锋, 2020)。研究表明, 中
76 国东部如京津冀、长江三角洲、珠江三角洲等地区的雾日长期变化主要受区域尺度的气候
77 变化、城市化和气溶胶污染的影响 (史军等, 2010; Yan et al., 2019), 其中长江三角洲地
78 区雾日减少还与相对湿度的下降趋势有关 (Ding et al., 2014; Liu et al., 2018), 而华南冬
79 季雾日的形成则受水汽输送影响较大, 且与降水有显著相关关系 (闫敬华等, 2001; 张璐
80 等, 2019)。北极涛动 (Arctic Oscillation, AO) 同样对中国东部地区冬季雾日的长期变化
81 有影响, 当冬季 AO 处于正位相时, 中国冬季更容易出现雾和轻雾, 其中雾日数较多的地
82 区为华北地区和华东地区, 华南地区则因为上空大气变得不稳定, 雾日数和轻雾日数相对
83 较少, 降水反而增加 (Liu et al., 2020; Yu et al., 2021)。此外, 当东亚冬季风环流减弱时,
84 一方面近地面风速减小, 使南下的干冷空气减少, 有利于雾在近地面的聚集; 另一方面水
85 平风垂直切变的减小使垂直对流活动减少, 有利于近地面雾的形成和维持 (Niu et al.,
86 2010b; Li et al., 2016)。

87 厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 是热带海-气耦合系统中最
88 强的年际变率信号 (Rasmusson et al., 1983), 可对全球气候产生重大影响。因此, ENSO
89 可能通过调节大尺度大气环流来影响当地的气象条件, 从而影响中国冬季雾日变化。前人
90 指出, ENSO 对中国东部冬季尤其是初冬 (11-12 月) 的雾日有显著影响, 在 El Niño 年期
91 间, 中国东部地区雾日在初冬和晚冬 (1-2 月) 呈现出不同的异常分布, 且 ENSO 主要影
92 响北部地区 (约 30-40°N) 初冬的雾日, 对华南地区没有显著影响 (Yu et al., 2019a)。进
93 一步的研究表明, ENSO 与 AO 对中国东部冬季雾日的整体效应远大于它们各自效应的总
94 和, 初冬时前者的影响大于后者, 而在晚冬则相反 (Yu et al., 2021)。不同类型的 ENSO
95 事件对中国东部雾日的影响也有所差异, Hu 等 (2020) 指出中国东部冬季雾日的年际变化
96 主要受 La Niña 事件和 EP 型 El Niño 事件影响, 且 ENSO 可以通过菲律宾海和日本海上
97 空两个异常反气旋中心, 对中国华北和华南地区的冬季雾日均产生显著影响, 这与在 Yu
98 等 (2019a) 的研究结果略有不同。

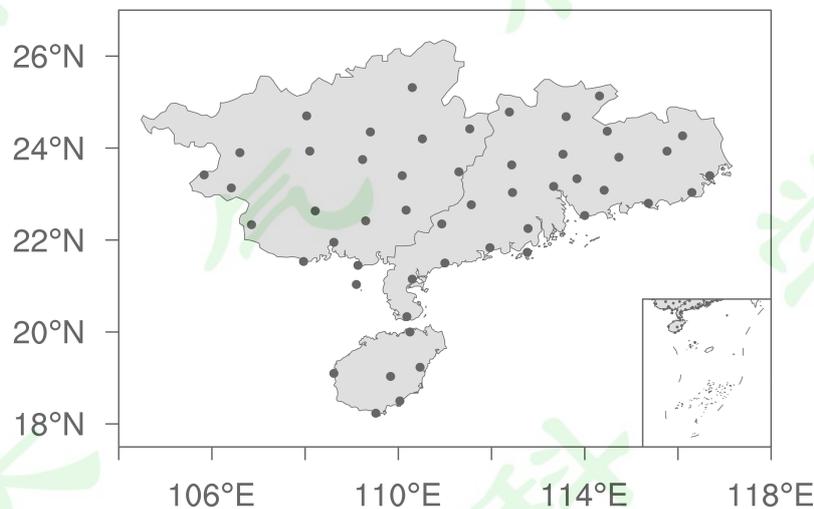
99 综上所述, ENSO 事件的发生发展对研究中国东部地区冬季雾日的变化有重要意义。
100 一方面, 雾是一种局地性较强的天气现象, 在不同区域雾的形成存在一定的差异, 因此前
101 人在对中国地区雾日的长期变化及其成因进行研究时, 常分区讨论 (王丽萍等, 2005; 孙
102 彧等, 2013), 然而以往关于 ENSO 对中国冬季雾日影响的研究, 多是针对京津冀地区和
103 长三角地区, 或者建立在中国东部地区整体范围上, 缺乏对华南地区的单独讨论, 且前人
104 的研究结果也存在差异 (Yu et al., 2019a; Hu et al., 2020), 缺乏较为一致的结论。因此,
105 有必要深入探讨华南地区冬季雾日与 ENSO 的关系。另一方面, 近年来一系列研究指出,
106 基于 ENSO 发生的不同年代际背景, ENSO 对亚洲季风 (Xu et al., 2021)、中国各季降水
107 (宗海锋等, 2010; Li et al., 2012) 等气候现象的影响都具有阶段性差异, 然而前人在研
108 究 ENSO 与中国冬季雾日的影响时, 大多基于两者在过去几十年的整体相关关系上, 不同
109 年代际背景下 ENSO-雾日关系是否会发生转变这个问题尚未得到解决。因此, 本文将深入
110 研究 ENSO 对华南冬季雾日年际变化特征的影响, 并进一步讨论华南冬季雾日年际变化与
111 ENSO 关系的年代际转变。

112 2 资料与方法

113 2.1 资料与方法

114 本文使用的资料主要有: (1) 由广东省气候中心提供的《中国地面气候资料天气现象
115 日值数据集》, 从中挑选出华南地区 52 个国家气象站 1979-2016 年共 38 年的逐日雾观测数

116 据。资料中包含“轻雾”、“大雾（雾）”现象的记录，当某日出现轻雾或大雾天气时，对应
117 天气现象一栏的日值数据标记为“1”，若未出现，则标记为“0”。本文将“轻雾日数”和
118 “大雾（雾）日数”之和称为“总雾日数”，以下简称“雾日”（孔锋，2020）。气象站点包
119 括海南省的7个站点，广西省的20个站点，以及广东省的25个站点。各站点（图1）地
120 理位置分布较为均匀，可较好地代表华南地区；（2）1979–2016年美国国家海洋和大气管
121 理局（NOAA）月平均SST扩展重建资料（ERSST.V5）（Huang et al., 2017），水平分辨
122 率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ ；（3）1979–2016年第五代欧洲中期天气预报中心（ECMWF）月平均再分析资
123 料（ERA5）（Hersbach et al., 2020），水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ，包括风场、位势高度场
124 和温度场等；（4）1979–2016年美国国家海洋和大气管理局（NOAA）逐月北大西洋年代
125 际振荡（Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO）指数（Enfield et al., 2001）及太平洋年
126 际振荡（Pacific Decadal Oscillation, PDO）指数（Newman et al., 2016），分别来自NOAA
127 的官方网站 <https://psl.noaa.gov/data/correlation/amon.us.data>[2021-12-4]和
128 <https://psl.noaa.gov/data/correlation/pdo.data>[2022-2-22]。本文冬季取12月至次年2月平均。



129
130 图1 华南地区52个国家气象站分布图

131 Fig. 1 Spatial distribution of 52 meteorological stations of Southern China

132 本文使用的方法包括经验正交函数分解（EOF）和相关分析、回归分析等常用的统计
133 分析方法。此外，本文运用高斯滤波方法分离研究要素的年际分量和年代际分量（施能等，
134 2001）。如无特殊说明，后文在分析雾日年际变化特征及其与ENSO关系时所使用的海温、
135 位势高度和风场等相关要素场均已去除线性趋势和年代际分量。

136 2.2 ENSO事件的定义

137 本文采用美国国家海洋和大气管理局气候预测中心（NOAA CPC）对ENSO事件的定义
138 选择ENSO事件：当连续5个月以上海洋尼诺指数（Ocean Niño Index） $I_{on} \geq +0.5^{\circ}\text{C}$ （ \leq
139 -0.5°C ）时称为一次El Niño事件（La Niña事件）（许武成等，2009），其中 I_{on} 是基于NOAA
140 月平均SST扩展重建资料（ERSST.V5）计算的Nino3.4区海表温度距平的3个月滑动平
141 均值。如表1，共挑选出10次El Niño事件（1982/83, 1986/87, 1991/92, 1994/95, 1997/98,
142 2002/03, 2004/05, 2006/07, 2009/10和2015/16）和10次La Niña事件（1983/84, 1984/85,
143 1988/89, 1995/96, 1999/2000, 2005/06, 2007/08, 2008/09, 2010/11和2011/12），其
144 中包括5次东部型（即EP型）和5次中部型（即CP型）El Niño事件（La Niña事件）
145 （Zhu et al., 2021）。

146
147

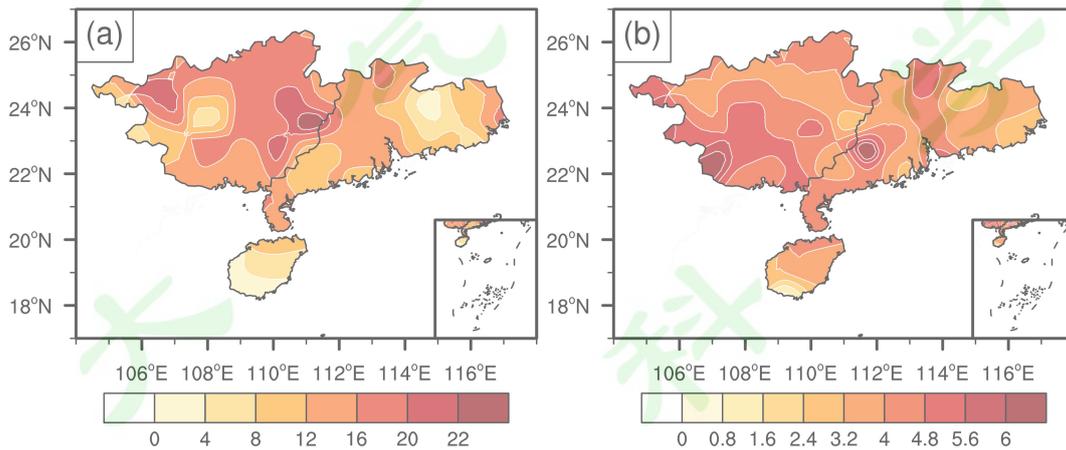
表 1 1979–2016 年间的两类 ENSO 事件
Table 1. Two types of ENSO events during 1979–2016.

	EP 型	CP 型
El Niño 事件	1982/83, 1986/87, 1991/92, 1997/98, 2015/16	1994/95, 2002/03, 2004/05, 2006/07, 2009/10
La Niña 事件	1984/85, 1995/96, 1999/2000, 2005/06, 2007/08	1983/84, 1988/89, 2008/09, 2010/11, 2011/12

148 3 华南冬季雾日的变化特征

149 3.1 华南冬季雾日的变化特征

150 图 2 给出了 1979–2015 年华南地区冬季雾日多年平均及其标准差分布。由冬季雾日平
 151 均分布可以看出，华南地区冬季雾日数分布存在空间差异，大值区主要位于两广交界的中
 152 部地区及广西北部，中心值最大达 22 天。雾日标准差（图 2b）反映了多年来华南冬季雾
 153 日的活跃程度，可以看到华南地区雾日标准差均较大，即整个华南地区冬季的雾日变化均
 154 较为明显，主要的标准差大值区位于广西西南部。

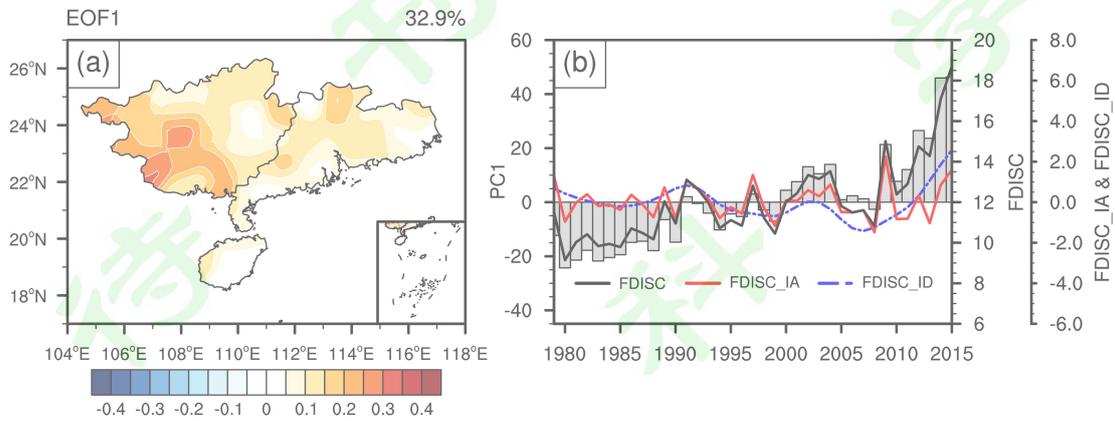


155
156
157
158

图 2 1979–2015 年华南地区冬季雾日 (a) 多年平均 (单位: d) 及 (b) 标准差 (单位: d)
 Fig.2 Spatial distribution of (a) climatological winter fog days (units: d) and (b) its standard deviation (units: d)
 over Southern China during 1979-2015

159 为进一步了解华南地区冬季雾日的时空变化特征,对华南 52 个站点 1979–2015 年的冬
 160 季雾日距平场做 EOF 分析,得到前三模态的方差贡献率为 32.9%、23%和 8.3%。根据 North
 161 等 (魏凤英, 2007) 提出的经验判据,对特征向量进行显著性检验,发现前三模态彼此相
 162 互独立 (图略)。由第一模态的空间分布 (图 3a) 可知,华南地区冬季雾日的第一特征向
 163 量表现出明显的区域一致性变化特征,即一致偏多或偏少型,分布型与雾日标准差 (图 2b)
 164 类似,最大中心位于广西西南部。由此可见,冬季雾日标准差和 EOF 分解第一模态都一致
 165 地反映了雾日的强度变化,故综合考虑雾日标准差分布和 EOF 分解结果,取华南地区雾日
 166 数进行区域平均后得到的雾日时间序列,定义为华南雾日指数 (Fog Days Index of Southern
 167 China, FDISC)。图 3b 为华南雾日指数及其年际分量 (the Interannual Component of Fog Days
 168 Index of Southern China, FDISC_IA)、年代际分量 (the Interdecadal Component of Fog Days
 169 Index of Southern China, FDISC_ID) 与 EOF 第一模态的时间序列 (PC1)。比较华南雾日
 170 指数与 PC1 序列,两者的相关系数高达 0.96。为突出年际变化特征,进一步对去除了线性

171 趋势和年代际分量的华南冬季雾日年际分量距平场做 EOF 分解（图略），结果表明华南地区
 172 区的冬季雾日具有明显的年际变化特征，并在空间分布上仍基本呈现区域一致性；同时，
 173 再次比较所得 PC1 和华南雾日指数年际分量，两者的相关系数为 0.95，说明 PC1 和华南雾
 174 日指数在年际尺度上仍存在高相关性，即所定义的指数可以很好地表征华南地区冬日雾日
 175 的年际变化特征。



176
 177

图 3 1979–2015 年华南地区冬季雾日距平场 EOF 第一模态

178 (a) 空间模态（填色）和 (b) 时间序列（灰色柱体）以及华南雾日指数（FDISC；黑色实线）及指数的
 179 年际分量（FDISC_IA；红色实线）和年代际分量（FDISC_ID；蓝色虚线）

180 **Fig. 3** (a) Spatial pattern (shading) and (b) principal component (grey bars) of the first EOF mode of winter fog
 181 days anomaly over Southern China during 1979-2015. The Total Fog Days index of Southern China (FDISC;
 182 solid black line), defined as winter fog days averaged over Southern China, is also plotted in (b), together with its
 183 interannual component (FDISC_IA; solid red line) and interdecadal component (FDISC_ID; dashed blue line).

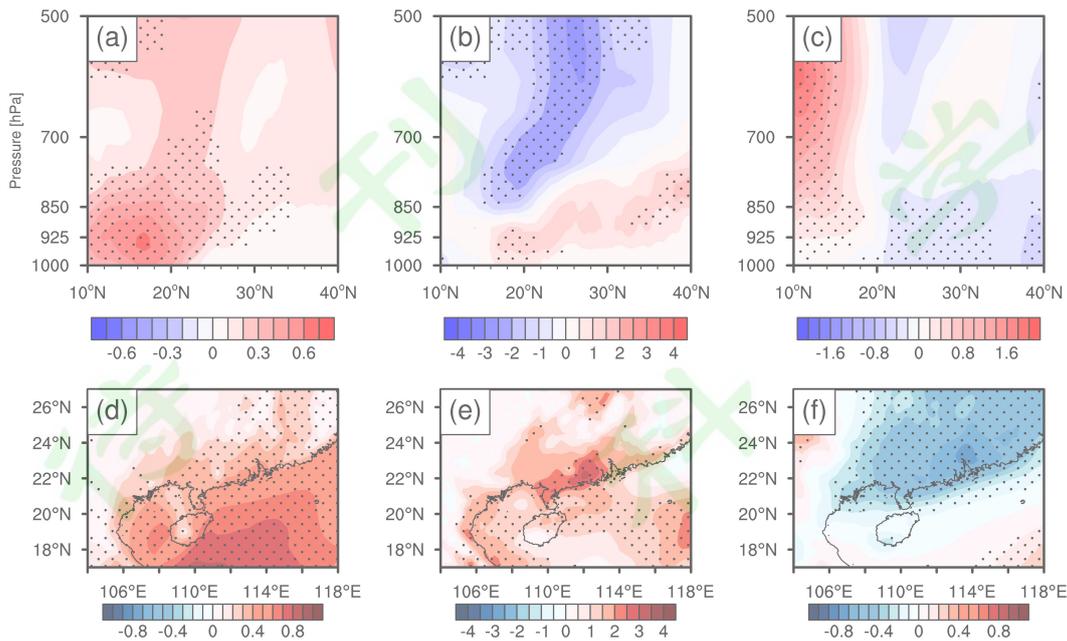
184 以上分析说明，华南地区冬季雾日存在明显的年际变化，并且整体表现为显著的线性
 185 增加趋势（通过 95% 信度水平的显著性检验）。由于年际变化是雾日长期变化的一个重要
 186 组成部分，本文将主要分析华南冬季雾日年际变化的成因。

187 3.2 华南冬季雾日年际变化与局地要素场的关系

188 根据前人研究，在天气尺度上雾的形成与地面风速、大气层结稳定度、气温、湿度等
 189 气象因素有密切的联系（Zhang et al., 2013; Lyu et al., 2021）。当地面风速减小和近地面
 190 大气层结处于稳定状态时，雾得以在近地面附近积聚。而从水汽条件来看，雾形成的必要
 191 条件之一是局地大气中充沛的水汽含量，当水汽接近或达到饱和时，便会凝结成小水滴悬
 192 浮空中，从而形成雾。大气达到饱和状态有两种可能原因，一种是温度保持不变，增加大
 193 气中的水汽含量，另一种是水汽含量不变而温度降低（Yu et al., 2019a），因此可以用大
 194 气温度与露点的差值即温度露点差（ $T-T_d$ ）来表征大气中的水汽饱和度，以更好地描述大
 195 气中温度和湿度的综合效应。

196 由于雾是一种局地性比较强的天气现象，因此有利于形成雾的局地气象条件可能因地
 197 理位置的差异而有所不同，为检验这些气象条件是否同样对华南地区冬季雾日产生影响，
 198 将 104–118°E 平均的经向风、静力稳定度及温度露点差回归到冬季标准化华南雾日指数年
 199 际分量上。其中，经向风速为动力因子，静力稳定度和温度露点差为热力因子（Zhang et al.,
 200 2013）。如图 4a 所示，10–30°N 对流层低层均为正经向风异常，对应于冬季近地面附近北风
 201 风速减小，有利于雾在大气低层的聚集。同时，20°N 附近 925–1000hPa 为正静力稳定度异
 202 常，说明近地面大气层结更加稳定，可为雾的维持和发展提供有利条件（图 4b）。图 4c 则
 203 显示了 20–30°N 对流层低层存在负露点温度差异异常，这意味着华南地区上空的水汽含量明

204 显增加，为雾的形成提供了有利的水汽条件。



205

206 **图 4** 1979–2015 年沿 104–118°E 纬向平均的 (a) 经向风 (单位: m/s)、(b) 静力稳定度 (单位: 10^5K/Pa) 与 (c) 温度露点差 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 对冬季标准化华南雾日指数年际分量的回归场。黑点表示通过 95% 信度
207 与 (c) 温度露点差 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 对冬季标准化华南雾日指数年际分量的回归场。黑点表示通过 95% 信度
208 水平的显著性检验。(d–f) 同 (a–c), 但为 950hPa 的 (d) 经向风、(e) 静力稳定度和 (f) 温度露点差

209

Fig. 4 Latitude-height cross-section of regression coefficients of (a) meridional wind (units: m/s), (b) static
210 stability (units: 10^5K/Pa) and (c) $T-T_d$ (units: $^{\circ}\text{C}$), zonally averaged over 104–118° E, onto the simultaneous
211 winter standardized FDISC_IA during 1979–2015. The black dots indicate the values significant at the 95%
212 confidence level. (d–f) Same as (a–c), but for (d) meridional wind, (e) static stability and (f) $T-T_d$ at 950hPa.

213

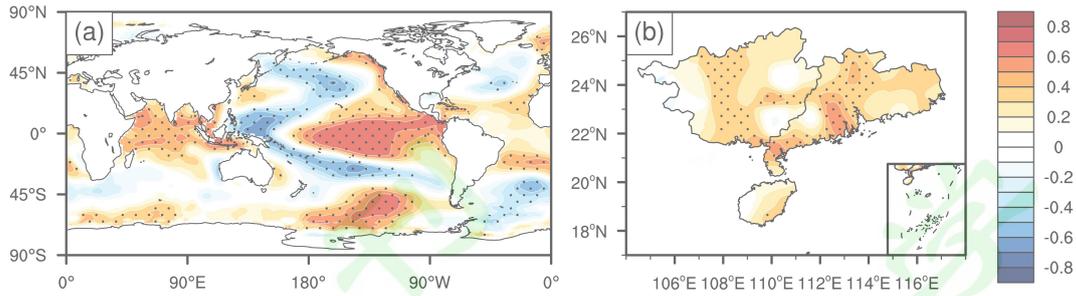
将 950hPa 的经向风、静力稳定度和温度露点差回归到冬季标准化华南雾日指数年际分
214 量上 (图 4d–f), 可以更清楚地看到华南区域 (22°N 附近) 近地面层存在正经向风异常、
215 正静力稳定度异常和负温度露点异常, 对应着北风减弱、低层大气层结更加稳定以及大
216 气中水汽含量增加, 这些气象背景场都有利于雾天气的发生和发展。

217 4 ENSO 对华南冬季雾日年际变化的影响

218 4.1 华南冬季雾日年际变化与 ENSO 的关系

219

作为年际气候变率的最强信号, ENSO 可以在区域乃至全球范围内引起显著的气候异
220 常, 因此华南冬季雾日年际变化与 ENSO 之间可能存在相关关系。图 5a 为冬季标准化华
221 南雾日指数年际分量 (FDISC_IA) 与同期海温的线性相关分布。由图可见, 显著相关区域
222 在热带太平洋呈现出偶极子结构, 从 180° 以东至美洲西岸的热带中东太平洋海域为显著
223 正相关区, 而热带西太平洋则为显著负相关区。与此同时, 热带印度洋区域为大范围的显
224 著正相关。图 5b 为华南各站点冬季雾日数的年际变化序列与同期 Niño3.4 指数的相关场,
225 可以看到华南大部分地区为显著正相关分布。这说明, 在华南地区冬季雾日偏多 (偏少)
226 年份, 热带中东太平洋海温异常偏高 (偏低), 而热带西太平洋海温异常偏低 (偏高), 同
227 时热带印度洋海温呈现为一致的异常增暖 (变冷), 这种海温异常分布与典型的 El Niño
228 年 (La Niña 年) 海温异常分布一致, 这清楚表明华南地区的冬季雾日年际变化与 ENSO
229 之间存在显著相关。

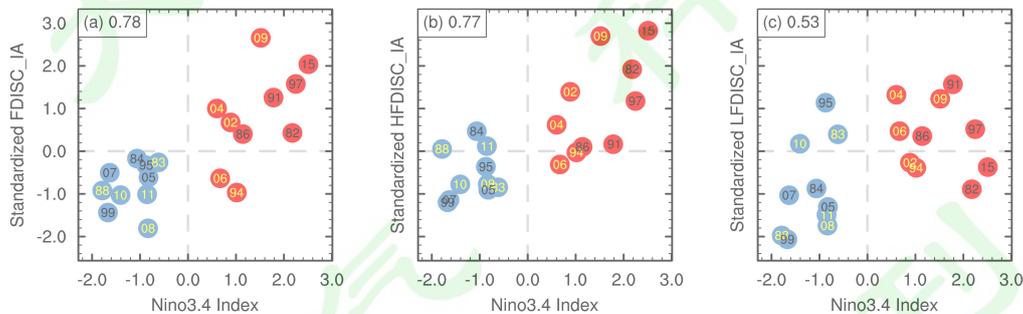


230

231 **图 5** 1979–2015 年 (a) 冬季标准化华南雾日指数年际分量与同期全球海温 (单位: °C) 及 (b) 冬季 Niño3.4
232 指数与冬季华南雾日数年际变化 (单位: d) 的相关 (黑点表示通过 95% 信度水平的显著性检验)

233 **Fig. 5** Linear correlation coefficients between (a) standardized FDISC_IA and the simultaneous winter (DJF)
234 SST (unit: °C) and (b) the winter Niño3.4 index and the simultaneous interannual variation of winter fog days of
235 southern China (units: d) during 1979–2015. The black dots indicate the values significant at the 95% confidence
236 level.

237 前文讨论了 ENSO 与华南冬季雾日年际变化之间的关系, 然而 ENSO 事件在空间上具
238 有多样性。根据海温异常中心的位置可以将 ENSO 事件分成东部型 (EP 型) 和中部型 (CP
239 型) (Ashok et al., 2007), 最近的一些研究也指出 CP 型 ENSO 事件对东亚降水、气溶胶
240 等的影响与传统的 EP 型 ENSO 事件不同 (陈文等, 2018; Zhu et al., 2021)。那么, 华南
241 冬季雾日年际变化与两种类型 ENSO 事件的关系是否也有不同呢? 值得注意的是, 本文的
242 雾日 (即总雾日数) 定义为大雾日数和轻雾日数之和。为更清楚地描述华南冬季雾日与不
243 同类型 ENSO 事件的关系, 沿用前文定义华南雾日指数的方法, 将 1979–2015 年华南地区
244 冬季的大雾日数和轻雾日数分别进行区域平均, 从而得到大雾日和轻雾日的时间序列, 并
245 分别定义为华南大雾日指数 (Heavy Fog Days index of Southern China, HFDISC) 和华南轻
246 雾日指数 (Light Fog Days index of Southern China, LFDISC)。



247

248 **图 6** 20 次 ENSO 事件的冬季标准化 (a) 华南雾日指数年际分量、(b) 华南大雾日指数年际分量及 (c)
249 华南轻雾日指数年际分量和同期 Niño3.4 指数的散点图。红色、蓝色圆点分别表示 10 次 El Niño 事件和
250 10 次 La Niña 事件, 黑色、黄色数字分别代表 EP 型、CP 型 ENSO 事件年份。

251 **Fig. 6** Scatter plot between standardized (a) FDISC_IA, (b) HFDISC_IA and (c) LFDISC_IA and corresponding
252 Niño3.4 (°C) indices for 20 ENSO events. A total of 10 El Niño and 10 La Niña events are indicated by red and
253 blue circles, respectively. The number inside each circle denotes the calendar year, with black and yellow for EP
254 and CP ENSO events, respectively.

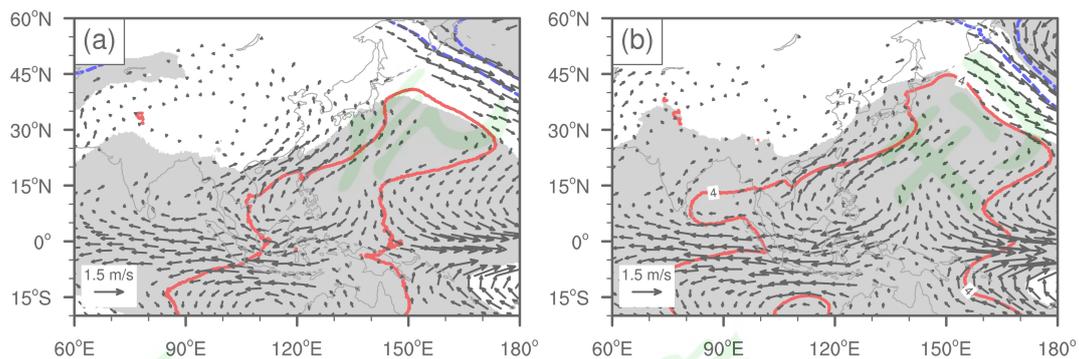
255 图 6 为 20 次 ENSO 事件 (如表 1) 冬季标准化华南雾日指数、大雾日指数和轻雾日指
256 数的年际分量与同期 Niño3.4 指数的散点图。由图 6a 可以看到, 华南雾日指数和 Niño3.4
257 指数的相关系数为 0.78, 通过 99% 信度水平的显著性检验, 这进一步表明华南地区冬季雾
258 日与 ENSO 事件存在显著正相关关系: 在 EP 型 El Niño 事件和大部分 CP 型 El Niño 事件

259 (占 60%) 期间, 华南地区冬季雾日将增加, 而在所有的 La Niña 事件期间, 华南雾日则
 260 都会减少。由图 6b 可知, 华南大雾日与 EP 型 ENSO 事件存在显著相关, 但与 CP 型 ENSO
 261 事件之间没有较为一致的关系, 如 3 个 CP 型 El Niño 事件 (2002/03, 2004/05, 2009/10)
 262 对应的大雾日指数为正值, 另外 2 个事件 (1994/95, 2006/07) 对应的大雾日指数为负值,
 263 也即 CP 型 El Niño 事件可分为两组, 一组与冬季华南地区大雾日数的增加有关, 而另一组
 264 则对应着大雾日数的减少。由图 6c 可知, 华南轻雾日指数与 Niño3.4 指数的散点图分布较
 265 为散乱, 没有较为一致的关系。这表明, 华南地区冬季雾日与 ENSO 事件间的显著相关关
 266 系主要取决于大雾日数, 而非轻雾日数。因此, 我们接下来主要采用华南大雾日指数来分
 267 析 ENSO 影响华南冬季雾日的可能机制。

268 4.2 ENSO 影响华南冬季雾日的可能机制

269 前人指出, 菲律宾异常反气旋 (气旋) 是 ENSO 影响东亚气候变率过程中的关键系统
 270 (Xie et al., 2009), 这种异常反气旋受赤道太平洋海温异常的激发, 通常在 El Niño 年的
 271 冬季出现 (Wang et al., 2000; Wu et al., 2017)。已有研究也表明, 中国北方霾日年际变
 272 化主要受中纬度系统调控, 而华南霾日则受菲律宾异常反气旋的影响 (He et al., 2019)。
 273 因此, 为确定 ENSO 对华南地区雾日的影响机制, 我们进一步讨论华南雾日年际变化对应
 274 的大气环流异常分布。

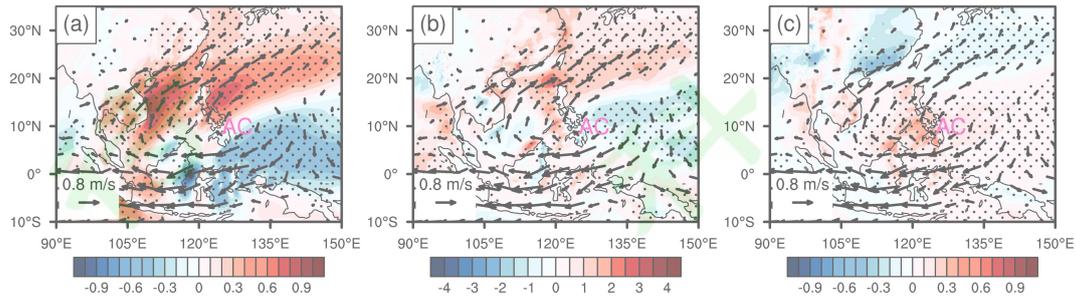
275 将 850hPa 位势高度场和水平风场分别回归到冬季标准化华南大雾日指数年际分量 (图
 276 7a) 和 Niño3.4 指数 (图 7b) 上, 可以看到回归结果非常相似。由位势高度异常场可知,
 277 广大的热带地区, 特别是中国南海和菲律宾以东的西北太平洋的副热带地区为显著的高压
 278 正异常, 表明西北太平洋副热带高压强度明显增强。由水平风异常场可以看到, 140°E 以
 279 东的赤道太平洋对流层低层为一致的西风异常, 而在赤道印度洋至 140°E 以西的赤道西太
 280 平洋区域则为一致的东风异常, 这与 ENSO 期间赤道海洋上空对流层低层典型的风场异常
 281 分布相一致 (Rasmusson and Carpenter, 1982; Wallace et al., 1998)。同时, 在菲律宾海上
 282 空存在一个显著的反气旋环流异常中心, 反气旋环流西侧的异常暖湿西南气流减弱了华南
 283 地区对流层低层的北风输送 (图 4a), 并从西太平洋和南海上空给华南地区带来充沛水汽,
 284 为雾日提供了有利的形成条件。这表明, 菲律宾异常反气旋是影响华南冬季雾日年际变化
 285 的关键系统。



286
 287 图 7 1979-2015 年 850hPa 水平风场 (矢量, 单位: m/s) 及位势高度场 (等值线, 单位: gpm, 等值线间
 288 隔 4gpm) 对冬季 (a) 标准化华南大雾日指数年际分量和 (b) Niño3.4 指数的回归场。红色实线 (蓝色虚
 289 线) 为正 (负) 值, 0 值线已略去, 阴影区表示通过 95% 信度水平的显著性检验

290 **Fig. 7** Regression coefficients of horizontal wind (vectors, units: m/s) and geopotential height (contours, units:
 291 gpm, contours interval: 4gpm) at 850hPa onto the (a) winter standardized HFDISC_IA and (b) winter Niño3.4
 292 index during 1979-2015. Red Solid (blue dashed) lines indicate positive (negative) values, zero lines are omitted.
 293 The shadings indicate the values exceeding the 95% confidence level.

294 为进一步说明 ENSO 如何通过菲律宾异常反气旋影响华南冬季雾日，将低层经向风速
 295 等与雾形成有关的气象要素场同时回归到冬季 Niño3.4 指数上（图 8）。可以清楚看到，华
 296 南地区上空对流层低层上空为一致的正经向风异常（图 8a）和正的静力稳定度异常（图 8b），
 297 这表明 El Niño 年冬季华南地区近地面北风减弱、大气层结稳定度增加。由图 8c 也清楚可
 298 见，整个华南地区为一致的负温度露点差异常，表明华南地区近地面附近大气中的水汽含
 299 量明显增加。以上气象要素场的显著改变明显与菲律宾异常反气旋西北侧盛行的异常西南
 300 气流有关，反气旋西侧的异常西南气流通过向华南地区输送水汽、减弱冬季盛行的北风以
 301 及增加低层大气稳定度，从而导致华南冬季雾日的增加。



302
 303 **图 8** 1979–2015 年 (a) 850hPa 水平风场 (矢量, 单位: m/s) 和 950hPa 经向风 (填色, 单位: m/s) 对冬
 304 季 Niño3.4 指数的回归场, (b–c) 同 (a), 但 950hPa 的要素场为 (b) 静力稳定度 (填色, 单位: 10^{-5} K/Pa)
 305 和 (c) 温度露点差 (填色, 单位: $^{\circ}$ C)。黑点表示通过 95% 信度水平的显著性检验

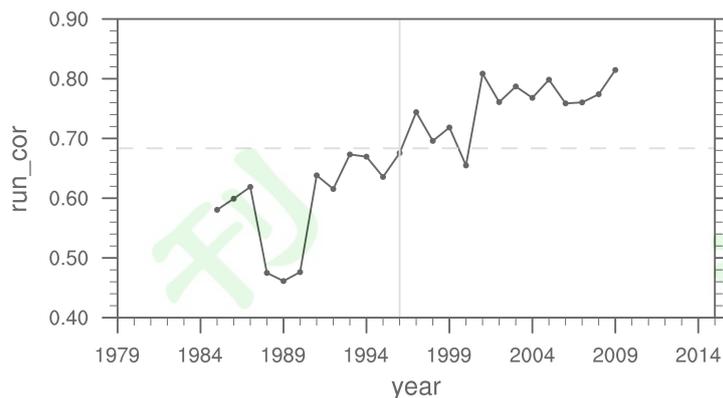
306 **Fig. 8** Regression coefficients of (a) horizontal wind (vectors, units: m/s) at 850hPa and meridional wind
 307 (shading, units: m/s) at 950hPa onto the winter Niño3.4 index during 1979–2015. (b–c) Same as (a), but for (b)
 308 static stability (shading, units: 10^{-5} K/Pa) and (c) $T-T_d$ (shading, units: $^{\circ}$ C) at 950hPa. The black dots indicate the
 309 values significant at the 95% confidence level

310 以上分析表明，华南地区冬季雾日主要受低纬环流系统的影响。ENSO 可以通过影响
 311 菲律宾异常反气旋的形成，提供有利于形成雾的局地气象条件尤其是水汽条件，进而影响
 312 华南冬季雾日的年际变化。

313 5 ENSO 与华南冬季雾日关系的年代际变化特征

314 第 4 节的分析已经清楚表明，华南地区冬季雾日的年际变化与 ENSO 具有显著的相关
 315 关系。然而气候变化往往会因为年代际背景的不同而表现出阶段性的差异，气候因子之间
 316 的关系也会随之发生改变。已有研究也指出，我国多种气候现象年际变化特征与 ENSO 之
 317 间的关系存在明显的年代际转变（朱益民等，2007）。那么，基于 ENSO 发生的不同气候
 318 背景，冬季华南地区雾日年际变化与 ENSO 之间的关系是否稳定呢？本节就这个问题做进
 319 一步的探讨。

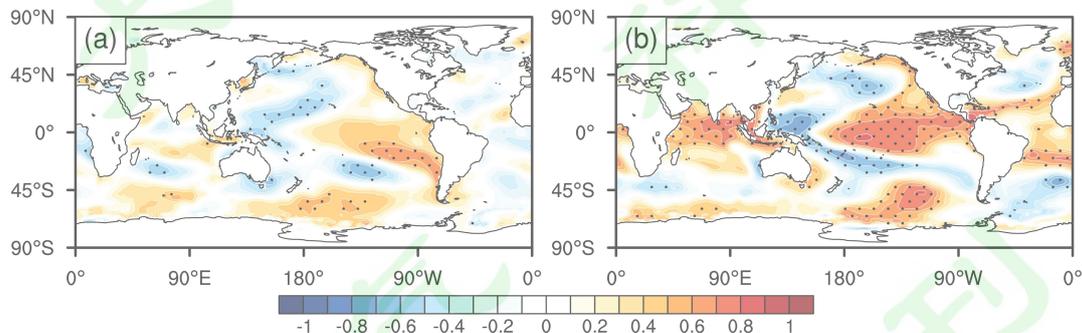
320 图 9 给出了 1979–2015 年冬季标准化华南雾日指数年际分量与同期 Niño3.4 指数的 13
 321 年滑动相关，可以看到两者之间的相关关系可以分为两个阶段：1979–1996 年为低相关时
 322 期，在这个阶段华南地区冬季雾日年际变化与 ENSO 虽然为正相关，但相关性较差，不能
 323 通过 99% 信度水平的显著性检验；1997–2015 年为高相关时期，这个时期雾日指数和 Niño3.4
 324 指数的滑动相关曲线基本超过了显著性检验线，说明在这个阶段两者具有稳定且可信的正
 325 相关关系。这种相关关系的转变，表明华南冬季雾日年际变化与 ENSO 的关系存在明显的
 326 年代际变化。因此，我们令 1979–1996 年（共 18 年）为 T1 时期，1997–2015 年（共 19 年）
 327 为 T2 时期，进一步揭示不同年代际背景之下 ENSO 对华南冬季雾日年际变化影响的差异。



328
329 图 9 1979-2015 年冬季标准化华南雾日指数年际分量与同期 Niño3.4 指数的 13 年滑动相关。灰色虚线表示
330 99%信度水平的显著性检验线

331 Fig. 9 13-year sliding correlation coefficients between standardized FDISC_IA and corresponding Niño3.4 index
332 during 1979-2015. The grey dashed line indicate the 99% confidence level.

333 图 10 为 T1 时期和 T2 时期的冬季标准化华南雾日指数年际分量分别与同期海温场的
334 相关分布。由图 10a 可以看到显著相关区域主要位于赤道以南的热带东太平洋，表明在 T1
335 时期的雾日偏多（偏少）年份，热带中东太平洋海温虽然为正（负）异常，但异常中心偏
336 南，强度也偏弱，与典型 El Niño 年（La Niña 年）的海温异常分布之间存在差异。这一时
337 期雾日指数年际分量与 Niño3.4 指数的相关系数为 0.46，不能通过 99%信度水平的显著性
338 检验，即该阶段华南地区冬季雾日与 ENSO 的相关性较弱。T2 时期（图 10b）相关场分布
339 则发生了明显变化，热带太平洋中东部的正相关区和西部的负相关区范围明显扩大，相关
340 程度也明显加强，热带印度洋区域由不相关转变为显著正相关，整体相关分布与图 5a 几乎
341 一致。这一时期雾日指数与 Niño3.4 指数的相关系数为 0.81，通过了 99%的显著性水平检
342 验。这表明，1996 年以后 ENSO 与华南地区雾日的相关关系明显增强。

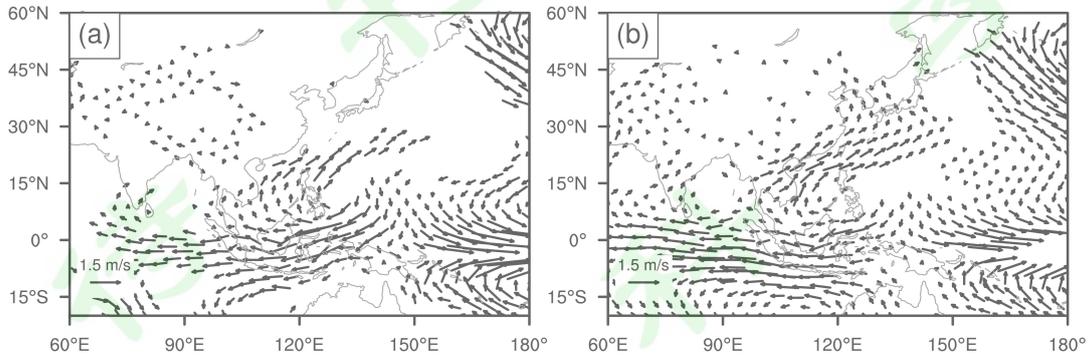


343
344 图 10 (a) T1 时期 (1979-1996 年) 及 (b) T2 时期 (1997-2015 年) 冬季标准化华南雾日指数年际分量
345 与同期全球海温的线性相关 (黑点表示通过 95%信度水平的显著性检验)

346 Fig. 10 Linear correlation coefficients between standardized FDISC_IA and the simultaneous winter (DJF) SST
347 (unit: °C) during (a) T1 period (from 1979 to 1996) and (b) T2 period (from 1996 to 2015), respectively. The
348 black dots indicate the values significant at the 95% confidence level.

349 进一步探讨两个时期对流层低层环流场的变化情况。将 850hPa 水平风场回归到 T1 时
350 期冬季 Niño3.4 指数 (图 11a) 上，可以看到，菲律宾海上空存在异常反气旋，其西北侧存
351 在西南暖湿气流向北输送水汽，但反气旋强度整体偏弱，中心位置位于菲律宾以东的太平
352 洋上，无法影响到华南地区。这表明，T1 时期 ENSO 通过菲律宾异常反气旋影响部分水汽
353 输送，但对华南地区冬季雾日的影响较小。

354 T2 时期的大气环流形势相对于 T1 时期发生了较大的改变。由 850hPa 水平风对雾日指
355 数的回归场（图 11b）可知，菲律宾异常反气旋显著增强，中心位置明显西移至菲律宾上
356 空，影响范围明显扩大，异常反气旋西北侧的偏南气流与来自孟加拉湾的西南气流在南海
357 上空汇合北上，这使得整个华南上空都盛行西南风异常，大量水汽随暖湿气流输送至华南
358 地区，为雾日的形成提供了充沛的水汽。因此，在 T2 时期，ENSO 可通过菲律宾海上空强
359 度明显增强、影响范围有所扩大的异常反气旋（气旋）环流对华南冬季雾日产生显著影响。

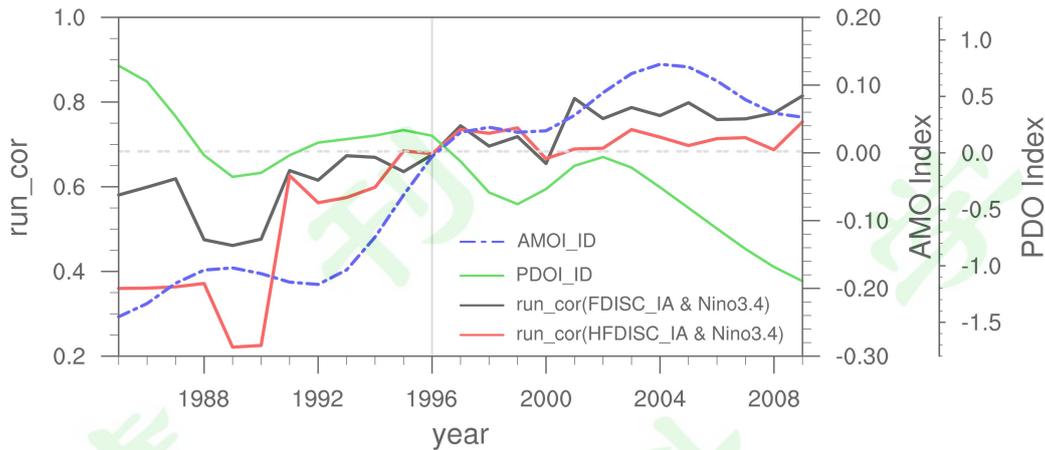


360
361 图 11 (a) T1 时期和 (b) T2 时期 850hPa 水平风场（矢量，单位：m/s）对冬季 Niño3.4 指数的回归场，
362 仅画出通过 95% 信度水平显著性检验的值

363 Fig. 11 Regression coefficients of horizontal wind (vectors, units: m/s) at 850hPa onto the winter Niño3.4 index
364 during (a) T1 period and (b) T2 period. Only the values significant at the 95% confidence level are plotted.

365 那么，是何种原因导致了 ENSO 对华南地区冬季雾日的不同影响呢？ENSO 事件的发生
366 发展已经被作为预测中国年际气候异常的前期重要信号之一，但前人发现 ENSO 与中国
367 气候异常的关系是不稳定的，往往在一段时期较为明显，而另一段时期却转变为不明显（朱
368 益民等，2007）。以往的研究指出，这种不确定性一方面可归因于 ENSO 自身的年代际变
369 化（Zhang et al., 2019）；另一方面，ENSO 与气候年际异常的关系还会受到如太平洋年代
370 际振荡（PDO；朱益民和杨修群，2003）和北大西洋年代际振荡（AMO）等年代际变率信
371 号的影响（李双林等，2009；Xu et al., 2021）。

372 为此，将冬季标准化华南雾日指数年际分量、华南大雾日指数年际分量分别与同期
373 Niño3.4 指数作 13 年滑动相关，并与 1979–2015 年的冬季 AMO 指数年代际分量及 PDO 指
374 数年代际分量作比较（图 12），可以看到，ENSO 与华南雾日年际异常关系在 1996 年发生
375 转折，此时 AMO 也发生了由负位相到正位相的转变。同时，两者的相关系数为 0.83，通
376 过了 99% 信度水平的显著性检验。ENSO 与华南大雾日数的年际关系也存在类似变化，在
377 1996 年前为低相关时期，1996 年之后相关系数在 0.7 附近波动，相关关系趋于稳定，并且
378 ENSO 与华南大雾日数年际关系的转变时期基本与 AMO 的位相变化相对应。而 PDO 虽然
379 在 1996 年附近由正位相转换成负位相，但从 1979–2015 年整体看来，PDO 的位相变化与
380 华南冬季雾日和 ENSO 关系的年代际变化没有较好的对应关系。这表明，ENSO 与华南冬
381 季雾日关系的年代际转变很可能受到 AMO 的调控。当 AMO 处于暖（正）位相时，在 El Niño
382 年冬季，西伯利亚高压显著减弱，冷空气活动减少（Li and Bates, 2007），同时菲律宾异
383 常反气旋明显加强（Hao, 2017），反气旋西北侧的异常西南风向华南地区输送更多水汽，
384 使得华南冬季的雾日增加；在 La Niña 年冬季，菲律宾海上空的异常气旋增强，其西北侧
385 的东北风异常减弱了向北的水汽输送（Geng et al., 2016），不利于华南雾日的形成，这使
386 得 ENSO 与华南冬季雾日年际变化在暖（正）AMO 阶段呈现为显著的正相关关系。而当
387 AMO 处于冷（负）位相时，与 ENSO 相关的东亚环流异常并不明显（Geng et al., 2016；
388 Hao, 2017），因此在冷（负）AMO 阶段 ENSO 与华南冬季雾日年际变化的相关关系并不
389 显著。



390

391 图 12 1979–2015 年冬季 Niño3.4 指数分别与同期标准化华南雾日指数年际分量（黑色实线）、华南大雾日
 392 指数年际分量（红色实线）的 13 年滑动相关曲线和同期 AMO 指数年代际分量（蓝色虚线）及 PDO 指数
 393 年代际分量（绿色实线）。灰色虚线表示 99% 信度水平的显著性检验线

394 Fig. 12 13-year sliding correlation coefficients between standardized FDISC_IA and corresponding Niño3.4
 395 index (black solid line) and standardized HFDISC_IA and corresponding Niño3.4 index (red solid line) and the
 396 interdecadal component of the simultaneous AMO index (blue dashed line) and PDO index (green solid line)
 397 during 1979–2015. The grey dashed line indicate the 99% confidence level.

398 6 结论与讨论

399 本文利用 1979–2016 年华南地区 52 个国家气象站的逐日雾观测资料、NOAA 海温和
 400 ERA5 再分析数据集等资料，首先分析了华南地区冬季雾日的年际变化特征，然后探讨了
 401 年际尺度上华南冬季雾日与 ENSO 的关系，并在此基础上，进一步讨论了在不同年代际背
 402 景下雾日与 ENSO 关系的转变。得出以下主要结论：

403 （1）在空间分布上，华南地区冬季雾日多年平均分布存在空间差异，大值区主要位于
 404 两广交界的中部地区及广西北部，整个华南地区的雾日具有区域一致的变化特征。而在时
 405 间分布上，华南地区冬季雾日存在明显的年际变化，并且整体表现为显著的线性增加趋势。
 406 在冬季，华南地区近地面层北风风速减弱，大气层结更加稳定，同时温度露点差降低，空
 407 气中的水汽含量增加，为雾的维持和发展提供了有利的背景场条件。

408 （2）ENSO 与华南地区冬季雾日的年际变化存在显著相关关系，前者通过调节大尺度
 409 大气环流影响局地气象条件，从而影响后者。具体表现为：在 El Niño 年的冬季，菲律宾
 410 海上空存在一个异常的反气旋环流，反气旋西侧的异常暖湿西南气流给华南地区带来充沛
 411 的水汽，有利于雾日的形成。La Niña 年雾日的变化则与 El Niño 年相反。另外，这种线性
 412 相关关系主要取决于大雾日数，而非轻雾日数。

413 （3）ENSO 与华南地区冬季雾日年际变化的关系存在明显年代际差异，可以划分为 2
 414 个阶段：在 1979–1996 年，两者相关性较弱，1997 年之后相关性显著增强。在不同年代际
 415 背景下，影响华南地区冬季雾日的大气环流特征不同，ENSO 与华南雾日的关系也随之发
 416 生转变。在 1979–1996 年中，ENSO 通过菲律宾异常反气旋影响部分水汽输送，但反气旋
 417 强度偏弱，中心位置位于菲律宾以东的太平洋上，难以影响到华南地区；而在 1997–2015
 418 年中，菲律宾异常反气旋明显增强，中心位置明显西移至菲律宾上空，影响范围扩大，其
 419 西侧的异常西南气流输送充沛水汽至华南上空，整个华南地区盛行西南风异常，有利于华
 420 南冬季雾的形成。进一步结果表明，这种相关关系的年代际转变可能受到 AMO 的调控。

421 以上分析表明 ENSO 与华南地区冬季雾日的年际变化存在密切关系, 并且在不同年代
422 际背景之下, 这种关系会存在明显转变。在以往的研究中, Yu 等 (2019a) 认为 ENSO 对
423 华南冬季雾日的影响并不明显, 然而本文的结论表明, 在年际尺度上 ENSO 与华南冬季雾
424 日的变化是显著相关的, 这与 Hu 等 (2020) 的结论一致, 区别在于 Hu 等 (2020) 认为
425 ENSO 通过菲律宾海和日本海上空两个异常反气旋中心共同调节中国东部冬季雾日, 而本
426 研究发现华南地区的冬季雾日主要是受到菲律宾异常反气旋的影响。ENSO 与东亚环流系
427 统之间相互作用复杂, 究竟是何种物理机制造成了 ENSO 与华南冬季雾日关系之间的年代
428 际转变, 还有待进一步的研究。

429 参考文献

- 430 Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection [J]. *Journal of*
431 *Geophysical Research: Oceans*, 112(C11): C11007.
- 432 Bendix J. 2002. A satellite-based climatology of fog and low-level stratus in Germany and adjacent areas [J].
433 *Atmospheric Research*, 64(1-4): 3-18.
- 434 陈文, 丁硕毅, 冯娟, 等. 2018. 不同类型 ENSO 对东亚季风的影响和机理研究进展 [J]. *大气科学*, 42(3):
435 640-655. Chen Wen, Ding Shuoyi, Feng Juan, et al. 2018. Progress in the study of impacts of different
436 types of ENSO on the East Asian monsoon and their mechanisms [J]. *Chinese Journal of Atmospheric*
437 *Sciences (in Chinese)*, 42(3): 640-655.
- 438 Ding Y H, Liu Y J. 2014. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in recent 50 years and their
439 relations with atmospheric humidity [J]. *Science China Earth Sciences*, 57(1): 36-46.
- 440 Enfield D B, Mestas - Nuñez A M, Trimble P J. 2001. The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to
441 rainfall and river flows in the continental US [J]. *Geophysical Research Letters*, 28(10): 2077-2080.
- 442 Fuzzi S, Facchini M C, Orsi G, et al. 1996. The NEVALPA project: A regional network for fog chemical
443 climatology over the Po Valley basin [J]. *Atmospheric Environment*, 30(2): 201-213.
- 444 Guo L J, Guo X L, Luan T, et al. 2021. Radiative effects of clouds and fog on long-lasting heavy fog events in
445 northern China [J]. *Atmospheric Research*, 252: 105444.
- 446 Geng X, Zhang W J, Stuecker M F, et al. 2017. Decadal modulation of the ENSO-East Asian winter monsoon
447 relationship by the Atlantic multidecadal oscillation[J]. *Climate Dynamics*, 49(7): 2531-2544.
- 448 Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. *Quarterly Journal of the Royal*
449 *Meteorological Society*, 146(730): 1999-2049.
- 450 何晖, 郭学良, 刘建忠, 等. 2009. 北京一次大雾天气边界层结构特征及生消机理观测与数值模拟研究 [J].
451 *大气科学*, 33(6): 1174-1186. He Hui, Guo Xueliang, Liu Jianzhong, et al. 2009. Observation and
452 simulation study of the boundary layer structure and the formation, dispersal mechanism of a heavy fog
453 event in Beijing area [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33(6): 1174-1186.
- 454 He C, Liu R, Wang X M, et al. 2019. How does El Niño-Southern Oscillation modulate the interannual
455 variability of winter haze days over eastern China? [J]. *Science of the Total Environment*, 651: 1892-1902.
- 456 Hao X, He S P. 2017. Combined effect of ENSO-like and Atlantic multidecadal oscillation SSTAs on the
457 interannual variability of the East Asian winter monsoon [J]. *Journal of Climate*, 30(7): 2697-2716.
- 458 Huang B Y, Thorne P W, Banzon V F, et al. 2017. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5
459 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons [J]. *Journal of Climate*, 30(20): 8179-8205.
- 460 Hu S Q, Zhang W J, Turner A G, et al. 2020. How does El Niño-Southern Oscillation affect winter fog frequency
461 over eastern China? [J]. *Climate Dynamics*, 54(1): 1043-1056.
- 462 Jiang Y, Zhang N, Li A X, et al. 2020. Effects of weather on highway traffic capacity in China: Characteristics

463 and causes of roadblocks due to fog events [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 177(10): 5027-5040.

464 孔锋. 2020. 1961-2016 年中国雾与霾日数时空演变特征及区域差异研究 [J]. *灾害学*, 35(1): 131-137.

465 Kong Feng. 2020. Spatial and temporal evolution characteristics and regional differences of fog and haze

466 days in China from 1961 to 2016 [J]. *Journal of Catastrophology*, 35(1): 131-137.

467 Kutty S G, Agnihotri G, Dimri A P, et al. 2019. Fog occurrence and associated meteorological factors over

468 Kempegowda International Airport, India [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 176(5): 2179-2190.

469 李双林, 王彦明, 郜永祺. 2009. 北大西洋年代际振荡(AMO)气候影响的研究评述 [J]. *大气科学学报*,

470 32(3): 458-465. Li Shuanglin, Wang Yanming, Gao Yongqi. 2009. A review of the research on the Atlantic

471 Multidecadal Oscillation (AMO) and its climate influence [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in*

472 *Chinese)*, 32(3): 458-465.

473 陆春松, 牛生杰, 杨军, 等. 2010. 南京冬季一次雾过程宏微观结构的突变特征及成因分析 [J]. *大气科学*,

474 34(04): 681-690. Lu Chunsong, Niu Shengjie, Yang Jun, et al. 2010. Jump features and causes of macro

475 and microphysical structures of a winter fog in Nanjing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in*

476 *Chinese)*, 34(4): 681-690.

477 Li S L, Bates G T. 2007. Influence of the Atlantic multidecadal oscillation on the winter climate of East China [J].

478 *Advances in Atmospheric Sciences*, 24(1): 126-135.

479 Li C, Ma H. 2012. Relationship between ENSO and winter rainfall over southeast China and its decadal

480 variability [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 29(06): 1129-1141.

481 Li Q, Zhang R H, Wang Y. 2016. Interannual variation of the wintertime fog-haze days across central and eastern

482 China and its relation with East Asian winter monsoon [J]. *International Journal of Climatology*, 36(1):

483 346-354.

484 Liu W J, Han Y X, Li J X, et al. 2018. Factors affecting relative humidity and its relationship with the long-term

485 variation of fog-haze events in the Yangtze River Delta [J]. *Atmospheric Environment*, 93: 242-250.

486 Liu P, Tang M Y, Yu H Y, et al. 2020. Influence of Arctic oscillation on frequency of wintertime fog days in

487 eastern China [J]. *Atmosphere*, 11(2): 162.

488 Lyu R, Wang Y Y, Peng Y R, et al. 2021. Long-term variation characteristics and influencing factors of

489 low-visibility events on the coast of China [J]. *Atmospheric Research*, 257: 105583.

490 Newman M, Alexander M A, Ault T R, et al. 2016. The Pacific decadal oscillation, revisited [J]. *Journal of*

491 *Climate*, 29(12): 4399-4427.

492 Niu F, Li Z Q, Li C, et al. 2010b. Increase of wintertime fog in China: Potential impacts of weakening of the

493 Eastern Asian monsoon circulation and increasing aerosol loading [J]. *Journal of Geophysical Research:*

494 *Atmospheres*, 115(D7): D00K20.

495 Niu S J, Lu C S, Yu H Y, et al. 2010a. Fog research in China: An overview [J]. *Advances in Atmospheric*

496 *Sciences*, 27(3): 639-662.

497 Rasmusson E M, Carpenter T H. 1982. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields

498 associated with the Southern Oscillation/El Niño [J]. *Monthly Weather Review*, 110(5): 354-384.

499 Rasmusson E M, Wallace J M. 1983. Meteorological aspects of the El Niño/southern oscillation [J]. *Science*,

500 222(4629): 1195-1202.

501 史军, 崔林丽, 贺千山, 等. 2010. 华东雾和霾日数的变化特征及成因分析 [J]. *地理学报*, 65(5): 533-542.

502 Shi Jun, Cui Linli, He Qianshan, et al. 2010. The changes and causes of fog and haze days in eastern China

503 [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 65(5): 533-542.

504 施能, 马丽, 袁晓玉, 等. 2001. 近 50a 浙江省气候变化特征分析 [J]. *大气科学学报*, 24(2): 207-213. Shi

505 Neng, Ma Li, Yuan Xiaoyu, et al. 2001. Climate variation features over Zhejiang province in the last 50

506 years [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 24(2): 207-213.

507 Syed F S, Körnich H, Tjernström M. 2012. On the fog variability over south Asia [J]. *Climate dynamics*, 39(12):
508 2993-3005.

509 孙彧, 马振峰, 牛涛, 等. 2013. 最近 40 年中国雾日数和霾日数的气候变化特征 [J]. *气候与环境研究*,
510 18(3): 397-406. Sun Yu, Ma Zhenfeng, Niu Tao, et al. 2013. Characteristics of climate change with respect
511 to fog days and haze days in China in the past 40 years [J]. *Climatic and Environmental Research (in*
512 *Chinese)*, 18(3): 397-406.

513 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 120pp Wei Fengying. 2007.
514 *Modern Statistical Diagnosis and Prediction Technology on Climate (in Chinese) [M]*. 2nd ed. Beijing:
515 *China Meteorological Press*, 120pp.

516 吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 2011. 中国大陆 1951—2005 年雾与轻雾的长期变化 [J]. *热带气象学报*, 27(2):
517 145-151. Wu Dui, Wu Xiaojing, Li Fei, et al. 2011. Long-term variation of fog and mist in 1951-2005 in
518 mainland China [J]. *Journal of Tropical Meteorological (in Chinese)*, 27(2): 145-151.

519 吴兑, 赵博, 邓雪娇, 等. 2007. 南岭山地高速公路雾区恶劣能见度研究 [J]. *高原气象*, V26(3): 649-654.
520 Wu Dui, Zhao Bo, Deng Xuejiao, et al. 2007. A study on bad visibility over foggy section of freeway in
521 Nanling mountainous region [J]. *Plateau Meteorological (in Chinese)*, V26(3): 649-654.

522 Wu B, Zhou T J, Li T. 2017. Atmospheric dynamic and thermodynamic processes driving the western North
523 Pacific anomalous anticyclone during El Niño. Part II: Formation processes [J]. *Journal of Climate*, 30(23):
524 9637-9650.

525 王丽萍, 陈少勇, 董安祥. 2005. 中国雾区的分布及其季节变化 [J]. *地理学报*, 60(4): 689-697. Wang
526 Liping, Chen Shaoyong, Dong Anxiang. 2005. The distribution and seasonal variations of fog in China [J].
527 *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 60(4): 689-697.

528 Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific–East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate?
529 [J]. *Journal of Climate*, 13(9): 1517-1536.

530 Wang H B, Zhang Z W, Liu D Y, et al. 2020. Study on a large-scale persistent strong dense fog event in central
531 and eastern China [J]. *Advances in Meteorology*, 2020(4): 1-15.

532 Wallace J M, Rasmusson E M, Mitchell T P, et al. 1998. On the structure and evolution of ENSO-related climate
533 variability in the tropical Pacific: Lessons from TOGA [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*,
534 103(C7): 14241-14259.

535 Xie S P, Hu K, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo–western Pacific climate during the
536 summer following El Niño [J]. *Journal of Climate*, 22(3): 730-747.

537 许武成, 王文, 马劲松, 等. 2009. 1951-2007 年的 ENSO 事件及其特征值 [J]. *自然灾害学报*, 18(4): 18-24.
538 Xu Wucheng, Wang Wen, Ma Jinsong, et al. 2009. ENSO events during 1951-2007 and their characteristic
539 indices [J]. *Journal of Natural Disasters (in Chinese)*, 18(4): 18-24.

540 Xu M, Xu H M, Ma J, et al. 2021. Impact of Atlantic multidecadal oscillation on interannual relationship
541 between ENSO and East Asian early summer monsoon [J]. *International Journal of Climatology*, 41(4):
542 2860-2877.

543 Yu H Y, Liu P, Zhang Y. 2021. The combined effects of ENSO and Arctic Oscillation on wintertime fog days in
544 eastern China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 144(3): 1233-1251.

545 Yu H Y, Li T, Liu P. 2019a. Influence of ENSO on frequency of wintertime fog days in Eastern China [J].
546 *Climate Dynamics*, 52(9): 5099-5113.

547 Yu X C, Wang Z L, Zhang H, et al. 2019b. Impacts of different types and intensities of El Niño events on winter
548 aerosols over China [J]. *Science of the Total Environment*, 655: 766-780.

549 闫敬华, 徐建平. 2001. 华南地区降水与雾的关系初探 [J]. *广东气象*, (2): 19-21. Yan Jinghua, Xu Jianping.
550 2001. A study on the relationship between fog and rainfall over south China [J]. *Guangdong Meteorological*

551 (in Chinese), (2): 19-21.

552 Yan S Q, Zhu B, Kang H Q. 2019. Long-term fog variation and its impact factors over polluted regions of East
553 China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(3): 1741-1754.

554 中国气象局. 2003. 地面气象观测规范 [M]. 北京: 气象出版社, 21-27. China Meteorological
555 Administration. 2003. Standard of the Surface Observation about Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing:
556 China Meteorological Press (in Chinese), 21-27.

557 Zhu A B, Xu H M, Deng J C, et al. 2021. El Niño–Southern Oscillation (ENSO) effect on interannual variability
558 in spring aerosols over East Asia [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(8): 5919-5933.

559 宗海锋, 陈烈庭, 张庆云. 2010. ENSO 与中国夏季降水年际变化关系的不稳定性特征 [J]. *大气科学*, 34(1):
560 184-192. Zong Haifeng, Chen Lieting, Zhang Qingyun. 2010. The instability of the interannual
561 relationship between ENSO and the summer rainfall in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*
562 (in Chinese), 34(1): 184-192.

563 张璐, 刘鹏, 张文君, 等. 2019. 中国不同区域气候条件对冬季雾日形成的差异性分析 [J]. *气候与环境研*
564 *究*, 24(5): 585-596. Zhang Lu, Liu Peng, Zhang Wenjun, et al. 2019. Analysis of variations of winter fog
565 days formation across different regional climatic conditions in China [J]. *Climatic and Environmental*
566 *Research (in Chinese)*, 24(5): 585-596.

567 张金满, 谭桂容, 武辉芹, 等. 2016. 灾害性天气交通事故特征及雾天公路通行预警指标体系 [J]. *干旱气*
568 *象*, 34(2): 370-375. Zhang Jinman, Tan Guirong, Wu Huiqin, et al. 2016. Characteristics on highway
569 traffic accidents caused by the disastrous weather in Hebei and the early-warning indexes system of
570 highway traffic under foggy weather condition [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 34(2): 370-375.

571 Zhang W J, Li S, Jin F F, et al. 2019. ENSO regime changes responsible for decadal phase relationship variations
572 between ENSO sea surface temperature and warm water volume[J]. *Geophysical Research Letters*, 46(13):
573 7546-7553.

574 Zhang R H, Li Q, Zhang R N. 2014. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over
575 eastern China in January 2013 [J]. *Science China Earth Sciences*, 57(1): 26-35.

576 朱益民, 杨修群. 2003. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系 [J]. *气象学报*, 61(6): 641-654. Zhu
577 Yimin, Yang Xiuqun. 2003. Relationships between Pacific decadal oscillation (PDO) and climate
578 variabilities in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 61(6): 641-654.

579 朱益民, 杨修群, 陈晓颖, 等. 2007. ENSO 与中国夏季年际气候异常关系的年代际变化 [J]. *热带气象学报*,
580 23(2): 105-116. Zhu Yimin, Yang Xiuqun, Chen Xiaoying, et al. 2007. Interdecadal variation of the
581 relationship between ENSO and summer interannual climate variability in China [J]. *Journal of Tropical*
582 *Meteorology (in Chinese)*, 23(2): 105-116.