| 1  | 张颖, 刘鹏. 2021. 西南地区秋冬雾日年际与年代际变化的对比研究[J]. 气候与环境研究,  |
|--|---|
| 2  | Zhang Ying, Liu Peng. 2021. Comparative study on the interannual and interdecadal changes of autumn and winter  |
| 3  | fog days in Southwest China[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese)  |
| 4  |   |
| 5  | 西南地区秋冬雾日年际与年代际变化的对比研究   |
| 6  | 张颖   刘鹏   |
| 7  | 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象  |
| 8  | 灾害预报预警与评估协同创新中心,南京,210044   |
| 9  |   |
| 10<br>11<br>12<br>13<br>14<br>15<br>16<br>17<br>18<br>19<br>20<br>21<br>22<br>22 | <b>摘要:</b> 雾是一种严重的天气灾害,极大地影响了交通和日常生活,并可能带来巨大的经济损失。本文利用 1958-2007 年 503 个中国地面观测站点的雾日数资料,分析了全国秋冬雾日数的时空特征。结果表明,西南地区在秋冬发生雾日频率较高,达到了 18 天以上,是中国东部地区同期雾日数的 2 倍以上。西南地区秋冬雾日存在显著的年际和年代际尺度气候变率。在两个时间尺度上,发生雾日的气象条件存在显著差异。在年际尺度上,西南地区中高层北风异常较为显著,因而将北方的冷空气带到西南地区,使得西南地区中高层出现了显著的冷空气异常。由于该地区处于雨带的北侧,存在一定的温湿空气,上空伴随着异常下沉运动,将高层的冷空气带到低层,而此时低层大气的温度、湿度异常偏高,冷暖空气汇合,容易过饱和,所以雾日偏多。在年代际尺度上,西南地区低层异常北风相比于年际尺度更为显著,因而低层北方冷空气的南下,使西南地区出现显著的降温降湿,但是温度下降速率快于湿度下降速率,所以温度露点差为负,空气容易达到饱和,伴随大气较为稳定,导致雾日偏多。 <b>关键词:</b> 西南地区 秋冬雾日 年际 年代际 水汽条件 |
| 23<br>24   | 文章编号  中图分类号 P467 文献标识码 A<br>doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.21049   |
| 25   | Comparative analysis on interannual and interdecadal changes of   |
| 26   | autumn and winter fog in southwest China  |
| 27<br>28<br>29<br>30<br>31<br>32   | ZHANG Ying, LIU Peng<br>Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Joint International Research<br>Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/Collaborative Innovation Center on Forecast and<br>Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science and<br>Technology, Nanjing 210044  |

### 收稿日期 2021-03-18, 收修定稿 2023-01-28

**作者简介** 张颖,1995年9月出生,女,硕士研究生,主要从事气候变化及其区域响应 **通讯作者** 刘鹏, E-mail: <u>liupeng1998@nuist.edu.cn</u> **资助项目** 国家重点研发计划专项项目 2016YFA0600402 33 Abstract Fog is a severe weather hazard that greatly influences traffic and daily life with 34 potentially heavy economic loss. Based on the 503 observed fog station data from 1958 to 2007, the temporal and spatial characteristics of fog days in autumn and winter were analyzed. It was 35 found that the fog in autumn and winter occurs frequently over Southwest China. The annual 36 average number of fog days in autumn and winter in Southwest China is more than 18 days, which 37 38 is twice as many as that in eastern China in the same period. Moreover, there is a significant climate variability of fog days in autumn and winter in Southwest China, which is mainly reflected 39 40 in the interannual and interdecadal scales, and there are significant differences in the 41 meteorological conditions of fog days in different climate scales. On the interannual scale, the 42 north wind anomaly in the middle and upper levels is more significant, which brings the cold air 43 from the north to the southwest, causing the cold air anomaly in the middle and upper levels over 44 the southwest. Moreover, due to the strong sinking movement over the region, the cold air in the 45 upper levels is brought to the lower levels. At this time, because of the abnormally high 46 temperature and humidity in the lower levels, the cold and warm air converges over Southwest 47 China which is located in the north of the rain belt. In a result, the air is easily oversaturated, resulting the number of fog days increasing. On the interdecadal scale, the anomalous northerly 48 49 wind in the lower level is more significant compared with the interannual scale, which brings the 50 cold air in the lower level from the north to the southwest. This results in the decreasing of 51 temperature, specific humidity and temperature dew point difference and further leads to the supersaturation of water vapor in the Southwest China because the temperature drops faster than 52 53 the humidity. At the same time, the atmosphere is relatively stable, increasing the number of fog 54 days.

55 Keywords Southwest China, Fog days in autumn and winter, Interannual variability,

56 Interdecadal variability, Water vapor condition

57

58 1.引言

59 雾是边界层中常见的天气气候现象。它的定义如下:悬浮水滴或冰晶的集合,导致 1
60 公里以下的水平能见度降低(Yang et al., 2011)。当风速较低、相对湿度较高、大气较为稳
61 定且气温接近露点时,空气中的水蒸气会凝结成雾(Sachweh and Koepke, 1997; Niu et al.,
62 2010a)。近年来,人们广泛研究了雾对经济、社会发展和人类健康的深刻而复杂的影响(Pu
63 et al., 2008; Gultepe et al., 2007; Niu et al., 2010b; Cai et al., 2017)。

64 中国的雾具有显著的季节变化,最常出现在秋冬季节(陈潇潇等,2008;吴兑等,2011;
65 Wang et al., 2005;孙彧等,2013)。我国的地理特征和区域气候复杂,以往许多学者也对雾
66 的划分进行了研究。总体上,我国雾主要集中在华北、长江流域、华南和西南地区。西南地
67 区为我国发生雾日最多的地区,并且具有显著的年际和年代际变化特征(张璐等,2019)。
68 近年来,学者们开始关注雾频率与北极涛动(AO)、欧亚遥相关、东亚冬季风(EAWM)、
69 ENSO 等的关系(Ye et al., 2008; Niu et al., 2010b; Yu et al., 2019; Li et al., 2019)。其中的主

70 要结果仅显示出这些气候系统与中国东部雾日有显著的关系,而与西南雾日的关系较弱。例
71 如 Li et al. (2016)指出,东亚冬季风的强度与中国东部低层风场的相关性较高,而与西南
72 风场的相关性不显著。Hu et al. (2020)通过计算冬季雾日与中国 Niño3.4 指数的回归系数,
73 发现中国东部雾日与 ENSO 之间存在显著的正相关关系。在 ENSO 事件发生的年份,西南
74 地区雾日变化不明显(Yu et al., 2019)。以上研究表明,西南地区雾日的形成机制与中国东
75 部地区雾日的形成机制可能存在显著不同,西南地区是较为独特的的地区,且目前对该地区
76 的研究较少,值得深入研究。

77 本文根据全国站点雾日数据,首先分析了西南地区雾日相比于中国其他地区的特殊性,
78 以及其季节特点。然后再进一步对比了西南雾日在不同时间尺度的强度,分析了不同气象要
79 素以及水平和垂直环流在年际与年代际雾日异常年份的特点,并讨论这些要素在不同时间尺
80 度的相同与不同之处。厘清在年际与年代际尺度上,影响西南雾日的气候异常特点,为提高
81 对西南雾的预测预警能力提供良好的科学基础,以便减少由雾害造成的损失。

82

96

#### 83 2. 数据和方法

本文利用中国气象局国家气候中心提供的 1958-2007 年中国 503 个气象站(图 la 黑色 84 85 点)的雾日资料,利用区域平均的方法计算了我国西南区域(102°E-112°E, 28°N-32°N)内 31个站点(图 la 橙色点)1-12 月雾日的平均值和标准差(图 lb),从图 lb 可以看出,西 86 南地区 1 月、10 月、11 月和 12 月的雾日的平均值分别为 3.6 天、3.2 天、3.9 天以及 4.5 天, 87 标准差分别为 1.2 天、1.0 天、1.2 天以及 1.3 天,而 2-9 月雾日的平均值均小于 2.0 天,标 88 89 准差均小于 0.7 天。综上我们可以知道, 西南地区雾日 1 月、10 月、11 月和 12 月的平均值 和标准差均大于 2-9 月的平均值和标准差,即西南地区的雾日在这四个月份发生频率最高且 90 91 存在显著的气候变率,因此,本文中所指的秋冬季节包括 10 月、11 月、12 月和次年 1 月。

92 用于大气环流分析的数据包括由 NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996)提供的 1958-2007
93 年水平分辨率为 2.5°×2.5°的海温、气温、比湿、相对湿度、纬向风和经向风、位势高度和
94 垂直速度的再分析数据,经过季节平均(10月-次年1月)处理,得到 1958-2006 年逐年秋
95 冬季资料。本文中的大气稳定度由 K 指数来表征,其计算公式如下:

$$K = (T_{850hPa} - T_{500hPa}) + Td_{850hPa} - (T_{700hPa} - Td_{700hPa})$$
(1)

97 当 K 指数值越大时,说明大气越不稳定。

98 本文使用的分析方法主要是九点平滑以及合成分析法,我们利用九点平滑的方法将雾日

99 分为年际尺度和年代际尺度进行对比分析研究,利用合成分析方法探究环流差异对不同时间





107

# 108 3. 西南地区秋冬年际与年代际雾日的时空分布特征



115 与前人工作所得结论一致(刘小宁等,2005;陈潇潇等,2008;吴兑等,2011;孙彧等,2013)。
116 从图 2a 还可知,我国东部地区的秋冬季雾日存在的三个雾日大值区,分别为华北地区、华

117 南地区以及西南地区,其中西南地区雾日平均值达到了 21 天及以上。

118 图 2b 是全国秋冬季雾日标准差分布图,反映了不同区域的秋冬季雾日活跃程度,雾日
9 变化较活跃的地区集中于西南地区,可以达到 7 天以上。总体而言,雾日标准差大值区与气
120 候态分布存在一定的相似性。西南地区无论是从气候态空间分布,还是标准差的空间分布来
121 看,均是十分显著的大值区,虽然长江中下游部分地区也能得到类似的结论,但是引言中提
122 到很多文章大多揭示了我国东部地区发生雾日的气候机制,而西南地区发生雾日的气候机制
123 与东部地区并不相同且前人少有研究,因而集中研究影响西南地区雾日的气候机制是十分必
124 要的。



127 图 3 (a)西南地区 1958-2006 年秋冬季雾日区域平均不同尺度(黑色:原始;橙色:趋势;红
128 色:年际;蓝色:年代际)时间序列(单位:天),(b)西南地区不同尺度雾日的标准差平
129 均(单位:天),(c)年际、(d)年代际秋冬季雾日独立性验证(打点区域表示各个尺度秋冬
130 季雾日与全国各站点秋冬季雾日相关系数通过 90%信度的显著性检验)

Fig 3 (a) Time series (unit: day) of mean different scales (black: primitive; orange: trend; red:
interannual; blue: interdecadal) of foggy days in autumn and winter in southwest China from 1958
to 2006, (b) mean standard deviation of foggy days in different scales in southwest China (unit:
day), (c) interannual (d) Independence verification of interdecadal autumn and winter fog days

135 (the dotted area indicates that the correlation coefficient between autumn and winter fog days at

various scales and autumn and winter fog days at all stations in the country has passed the

significance test of 90% reliability)

136

137

138 我们将图 2a 中黑框区域内(102°E-112°E、28°N-32°N)的西南秋冬季雾日做区域平均, 得到一个 1958-2006 年的 49 年时间序列, 对应图 3a 中的黑色实线, 图 3a 中黄色实线为其 139 趋势线,去除趋势之后将其划分为年际尺度和年代际尺度,分别对应图 3a 中红色虚线和蓝 140 色实线。从年代际尺度上来看,西南地区 1958-1972 年以及 1996-2006 年为少雾的负位相, 141 1973-1995 为多雾的正位相。图 3b 为西南地区不同尺度雾日的标准差平均,其中原始雾日 142 标准差平均约为 6.1 天, 年际雾日标准差平均约为 4.4 天, 年代际雾日标准差平均约为 2.9 143 天,这也表明西南地区不同尺度秋冬雾日存在着显著的差异。综上可以看到,西南地区秋冬 144 季雾日可以划分为年际尺度和年代际尺度进行研究,且不同时间尺度秋冬季雾日的标准差存 145 146 在着显著的差异。

147

148

149

### 表1 西南地区区域平均不同尺度秋冬雾日正负异常年

Table 1 the positive and negative anomaly years of autumn and winter foggy days on different scales in southwest China

|     | 正异常年                           | 负异常年                           |
|-----|--------------------------------|--------------------------------|
| 原始  | 1971,1977,1979,1980,1982,1985, | 1960,1961,1966,1967,1969,1974, |
|     | 1986,1989,1990,1991,1993       | 1997,1999,2003,2005,2006       |
| 年际  | 1958,1964,1965,1970,1971,1977, | 1960,1961,1966,1969,1974,1981, |
|     | 1982,1985,1987,1990,2002,2004  | 1984,1988,1992,1997,2003,2005  |
| 年代际 | 1972-1995                      | 1958-1970,1996-2006            |

图 3c、d 为图 3a 中的西南秋冬季雾日做区域平均得到的年际以及年代际尺度的时间序 150 列分别与全国站点的秋冬雾日 49 年时间序列做相关,其中打点区域为通过 90%信度检验的 151 152 区域。图 3c、d 通过显著性检验的地区主要集中在西南地区,这表示我们通过区域平均计算 得到的西南地区秋冬雾日具有一定的独立性。主要体现为,该地区年代际雾日与其他地区的 153 154 雾日并不存在显著的相关,但是年际雾日与长江中下游地区有一定的相关性,这也可能是图 2 中西南地区与长江中下游地区均是气候态和标准差的显著大值区的原因,即在年际尺度上 155 西南地区与东部地区形成雾日的气候机制可能存在一定的联系,但是西南地区与东部地区在 156 年代际尺度上可能存在显著的差异。 157

# 158 4. 西南地区秋冬年际与年代际雾日形成机制

159 表 2 西南地区正异常年雾日数以及负异常年雾日数(单位:天)

160 Table 2 the number of positive abnormal fog days and negative abnormal fog days (in days) in

161

168

|     | southwest China |      |  |
|-----|-----------------|------|--|
|     | 正异常年            | 负异常年 |  |
| 原始  | 4.1             | -4.5 |  |
| 年际  | 2.3             | -3.0 |  |
| 年代际 | 2.1             | -2.2 |  |

为了进一步对比西南地区原始、年际和年代际尺度的秋冬雾日的变化特征,利用图 3a
的时间序列,以 0.8 个标准差的标准挑选出正负异常年(表 1)进行合成分析,其中原始雾
日正、负异常年样本量分别为 11 年,年际尺度雾日正、负异常年样本量分别为 12 年,而年
代际尺度雾日正、负异常样本量分别为 24 年。经过合成后,可以发现原始雾日正、负异常
年天数分别为 4.1 天、-4.5 天,年际雾日正、负异常年天数分别为 2.3 天、-3.0 天,年代际
雾日正、负异常年天数分别为 2.1 天、-2.2 天(表 2)。





171 图 4 (a)(b)原始、(c)(d)年际、(e)(f)年代际 1000hPa 气温(单位: K)合成分布,左侧为雾日
172 的正异常年,右侧为负异常年,打点区域表示通过了 90%信度检验
173 Fig 4 (a) (b) The composite distribution of 1000 hPa temperature (unit: K) in the original, (c) (d)
174 inter-annual and (e) (f) inter-decadal areas. The left side is the positive abnormal year of the fog

day, and the right side is the negative abnormal year. The dotted area indicates that the 90%
 reliability test has been passed

177 图 4 是不同尺度雾日正负异常年 1000hPa 气温的合成,通过分析可以看到,原始雾日正
178 异常年西南地区出现了气温微弱的上升,年际雾日正异常年西南地区东部出现了气温显著的
179 上升。年代际雾日正异常年西南地区则是出现了与年际合成相反的气温显著的下降,原始雾
180 日正异常年基本表现为年际和年代际尺度之和,不同尺度的负异常年的合成结果则与正异常
181 年相反。这表明,从年际尺度上来看,当西南地区地面气温上升时,雾日增多,地面气温下
182 降时,雾日减少;从年代际尺度上来看,当西南地区地面气温下降时,雾日增多,地面气温
183 上升时,雾日减少。

图 5 是不同尺度雾日正负异常年 1000hPa 比湿的合成, 通过分析可以看到, 原始雾日正 184 异常年西南地区东西部差异较大,东部为比湿微弱的上升,西部为微弱的下降。年际雾日正 185 异常年西南地区东部出现了比湿的上升,但是并不显著,而负异常年则是存在显著的比湿的 186 下降。年代际雾日正异常年西南地区出现了显著的比湿的下降,负异常年的合成结果则与正 187 异常年相反,是上升的。从年际尺度上来看,当西南地区地面比湿上升时,雾日增多,地面 188 比湿下降时,雾日减少;从年代际尺度上来看,当西南地区地面比湿下降时,雾日增多,地 189 面比湿上升时,雾日减少。综合图 5、图 6 可以发现,在年际尺度上,增湿和增温有利于雾 190 日增多,而在年代际尺度上,降温降湿有利于雾日增多,为了找出不同时间尺度西南雾日存 191 192 在上述相反机制的原因,以下将进一步分析大气稳定度、以及环流特征。





195

196 图 5 (a)(b)原始、(c)(d)年际、(e)(f)年代际 1000hPa 比湿(单位:g/kg)合成分布,左侧为雾
197 日的正异常年,右侧为负异常年,打点区域表示通过了 90%信度检验

Fig 5 (a) (b) The synthetic distribution of 1000 hPa specific humidity (unit: g/kg) in the original,
(c) (d) inter-annual and (e) (f) inter-decadal areas. The left side is the positive abnormal year of the
fog day, and the right side is the negative abnormal year. The dotted area indicates that the 90%

 201
 reliability test has been passed

 202
 图 6 为不同时间尺度雾日正负异常年 K 指数的合成,原始雾日正异常年西南地区出现

 203
 了 K 指数正异常,年际雾日正异常年西南地区也为 K 指数的正异常,而年代际雾日正异常

 204
 年西南地区则是出现了与年际合成相反的 K 指数的负异常,不同尺度的负异常年的合成结

 205
 果则与正异常年相反。从年际尺度上来看,当西南地区雾日增多,中层大气是不稳定的,反

 206
 之,当雾日较少时,中层大气是较为稳定的;从年代际尺度上来看,当西南地区雾日增多,

207 中层大气是较为稳定的,反之,当雾日较少时,中层大气是不稳定的。



211 图 6 (a)(b)原始、(c)(d)年际、(e)(f)年代际 K 指数合成分布, 左侧为雾日的正异常年, 右侧为
 212 负异常年, 打点区域表示通过了 90%信度检验

213 Fig 6 (a) (b) The composite distribution of the original, (c) (d) interannual and (e) (f) interdecadal 214 K-index. The left side is the positive abnormal year of the fog day, and the right side is the negative abnormal year. The dotted area indicates that the 90% reliability test has been passed 215 216 图7是年际和年代际尺度雾日正负异常年降水的合成图,可以解释图6的稳定度在不同 时间尺度的差异。年际雾日正异常年西南地区处于降水正异常区的北侧,而年代际雾日正异 217 常年西南地区则为降水的负异常,因此在年际尺度上,西南地区为大气不稳定区域,而在年 218 代际尺度上,西南地区则为大气稳定区,不同尺度雾日的负异常年的合成结果则与正异常年 219 220 相反。

221



224 图 7 (a)(b)年际、(c)(d)年代际降水(单位: mm)合成分布,左侧为雾日的正异常年,右侧
 225 为负异常年,打点区域表示通过了 90%信度检验

Fig 7 (a) (b) Inter-annual and (c) (d) interdecadal precipitation (unit: mm) composite distribution.

The left side is the positive abnormal year of fog day, and the right side is the negative abnormal
year. The dotted area indicates that it has passed the 90% reliability test

229 综合以上分析,我们可以看到当西南地区气温上升、比湿上升、中层大气相对不稳定的
230 状态下,此时该地区位于降水带的北侧,年际雾日处于正位相,即发生雾的天数较多,这种
231 雨带北侧雾日增加的现象,也是经常发生在中国东部地区(Yu et al., 2019; Liu et al., 2020)。
232 当气温下降、湿度下降、大气处于稳定的状态时,该地区降水偏少,年代际雾日处于正位相,
233 即此时雾日较多。



235 236

237

234

图 8 (a)(b)年际、(c)(d)年代际 500hPa 位势高度场(单位: dagpm)合成分布,左侧为雾日的 正异常年,右侧为负异常年,打点区域表示通过了 90%信度检验

Fig 8 (a) (b) Inter-annual, (c) (d) interdecadal 500hPa geopotential height field (unit: dagpm)
composite distribution, the left side is the positive abnormal year of fog day, the right side is the

negative abnormal year, and the dotted area indicates that it has passed the 90% reliability test
图 8 为年际和年代际尺度 500hPa 位势高度场合成分布,图 8a 表明年际尺度秋冬季雾日
正异常年,西南地区位于槽后脊前,受到北风增强的影响较大,将北方的冷空气带到西南地
区上空,使得西南地区上空气温下降。当年际尺度雾日处于负异常年时(图 8b),西南地

244 区位于槽前脊后,受到南风增强的影响较大,将洋面上的的暖空气带到西南地区上空,使得

245 西南地区气温上升。当西南地区年代际尺度雾日处于正位相时(图 8c),其上空存在一个
246 显著的高压异常,西南地区位于高压脊前,受到东北风的影响增大,将北方的冷空气带到西
247 南地区上空,使得西南地区气温下降。当西南地区年代际尺度雾日处于负位相时(图 8d),
248 此时位势高度场存在负异常,北风分量减弱,冷空气难以到达西南地区,因而西南地区气温
249 上升。



500hPa air temperature (shadow, unit: K) composite distribution, the left side is the positive
abnormal year of fog day, the right side is the negative abnormal year, the dotted area indicates
that 90% reliability test has been passed

260 图 9 反映了年际和年代际尺度雾日正负异常年 850hPa 风场及 500hPa 温度场的合成,在
261 年际尺度正异常年(图 9a),西南地区 500hPa 的气温是下降的,而 850hPa 存在北风分量;
262 在年际尺度负异常年(图 9b),西南地区 500hPa 的气温是上升的,而 850hPa 存在东风分量。在年代际尺度正异常年(图 9c),西南地区 500hPa 的气温也是下降的,850hPa 也存在
264 北风分量;在年代际尺度负异常年(图 9d),西南地区 500hPa 的气温是上升的,而 850hPa
265 存在南风分量。综合图 8 与图 9,发现无论是年际还是年代际尺度,西南雾日增多,都伴随
266 北风增强以及中层气温的下降。



269 图 10 (a)(b)年际、(c)(d)年代际气温(阴影,单位:K)以及温度露点差(等值线,单位:K)
 270 (102°E-112°E范围内纬向平均)纬度-高度剖面合成图,左侧为雾日的正异常年,右侧
 271 为负异常年,打点区域表示通过了 90%信度检验

Fig 10 (a) (b) Inter-annual, (c) (d) interdecadal air temperature (shadow, unit: K) and temperature
dew point difference (isoline, unit: K) (zonal mean in the range of 102 ° E-112 ° E)
latitude-altitude profile composite map, the left side is the positive abnormal year of fog day, the
right side is the negative abnormal year, the dotted area indicates that 90% reliability test has been
passed

278 图 10 展示了年际以及年代际尺度 102°E-112°E 范围内气温和温度露点差的纬度-高度剖 面合成图,在年际尺度雾日正异常年(图 10a),西南地区低层气温较高,而中高层气温较 279 低,同时中高层的温度露点差为负值,此时空气容易达到饱和,从而产生雾。在年际尺度雾 280 日负异常年(图 10b),西南地区低层气温较低,而中高层气温较高,同时中高层的温度露 281 点差为正值,此时空气不易达到饱和,因此雾日数较少。在年代际尺度雾日正异常年(图 282 10c),西南地区上空整层气温均较低,同时中高层的温度露点差为负值,此时空气容易达 283 到饱和,从而产生雾。在年代际尺度雾日负异常年(图10d),西南地区上空整层气温较高, 284 同时中高层的温度露点差为正值,此时空气不易达到饱和,因此雾日数较少。 285



287

288 图 11(a)(b)年际、(c)(d)年代际比湿(阴影,单位:g/kg)以及风场(矢量箭头,单位:m/s)
 289 (102°E-112°E范围内纬向平均)纬度-高度剖面合成图,左侧为雾日的正异常年,右侧
 290 为负异常年,打点区域表示通过了 90%信度检验

Fig 11 (a)(b) The annual and (c)(d) interdecadal specific humidity (shadow, unit: g/kg) and wind field (vector arrow, unit: m/s) (zonal average in the range of 102 ° E-112 ° E) latitude-altitude profile composite map, the left side is the positive abnormal year of fog day, the right side is the negative abnormal year, and the dotted area indicates that 90% reliability test has been passed 图 11 为年际以及年代际尺度 102°E-112°E 范围内比湿和垂直风场的纬度-高度剖面合成
图,在年际尺度雾日正异常年(图 11a),西南地区低层存在比湿的升高,同时伴随着下沉 运动,但不是十分显著,而高层存在比湿的下降,伴随着北风较强。在年际尺度雾日负异常

298 年(图 11b),西南地区低层存在比湿的升高,同时伴随着下沉运动,但不是十分显著,而
299 高层存在比湿的下降,伴随着低层强上升运动,高层南风显著。在年代际尺度雾日正异常年
300 (图 11c),西南地区低层存在比湿的下降,同时伴随着北风分量显著,高层存在下沉运动。
301 在年代际尺度雾日负异常年(图 11d),西南地区低层存在比湿的上升,同时伴随着南风,
302 高层存在上升运动。

图 12 主要画出了西南地区年际秋冬季雾日正异常年(蓝色实线)、年际秋冬季雾日负 303 异常年(橙色实线)、年代际秋冬季雾日正异常年(红色虚线)以及年代际秋冬季雾日负异 304 常年(绿色虚线)不同高度区域平均纬向风。对比两个尺度正异常年纬向风随高度的变化来 305 看,年际尺度正异常年北风在低层小于年代际尺度,而到了中高层则大于年代际尺度,这表 306 明当西南雾日较多时,年际尺度主要是中高层北风起到了主要作用,而年代际尺度则主要是 307 低层北风占主导作用。从负异常年的对比来看,这个结论更为显著,年际尺度负异常年南风 308 309 在低层小于年代际尺度,而到了中高层则大于年代际尺度,这表明当西南雾日较少时,年际 尺度主要是中高层南风起到了主要作用,而年代际尺度则主要是低层南风占主导作用。 310



311

图 12 西南地区不同尺度秋冬雾日正负异常年不同高度区域平均纬向风(单位: m/s)
 Fig 12 Regional mean zonal wind(unit: m/s) at different altitudes in the years of more and less fog
 days in autumn and winter with different scales in Southwest China

315 分析不同尺度秋冬季雾日大气环流条件对雾形成的影响(图 8-12),可以看到,在年
316 际尺度正异常年,西南地区 500hPa 的气温是下降的,伴随着中高层较强的北风分量,将高
317 纬度冷空气带到西南地区上空,同时西南地区上空存在湿度的下降,而低层有不显著的湿度
318 的上升(图 11a),此时高层的温度露点差下降(图 10a),空气容易达到饱和,从而产生
319 雾。在年际尺度负异常年,西南地区 500hPa 的气温是上升的,伴随着中高层较强的南风分量,将低纬度暖空气带到西南地区上空,同时西南地区上空存在湿度的上升,而低层有显著

321 的湿度的下降(图 11b),此时高层的温度露点差上升(图 10b),空气不容易达到饱和,
322 从而使得雾日较少。在年代际尺度正异常年,西南地区 500hPa 的气温也是下降的,伴随着
323 低层较强的北风分量,将高纬度冷空气带到西南地区上空,同时西南地区中低层存在湿度的
324 下降(图 11c),此时高层的温度露点差下降(图 10c),空气容易达到饱和,从而产生雾。
325 在年代际尺度负异常年,西南地区 500hPa 的气温也是上升的,伴随着低层较强的南风分量,将低纬度暖空气带到西南地区,同时西南地区中低层存在湿度的上升(图 11d),此时高层
326 的温度露点差上升(图 10d),空气不容易达到饱和,从而使得雾日较少。

328 年际雾日主要受中高层北风的影响较大,从图 12 中可以看到,年际尺度正异常年,西
329 南地区 700hPa 及以上的北风分量几乎都大于年代际尺度,将冷空气带到西南地区上空,从
330 而使得西南地区中高层气温较低。低层的下沉气流较大,此时低层气温主要受到华北地区暖
331 湿气流的影响,导致西南地区的东北部分气温略有升高,而此时西南地区低层湿度是上升的,
332 西南地区雾日增多,但不是十分显著。

333 年代际雾日主要受中低层北风的影响较大,在图 12 中,年代际尺度正异常年,西南地
334 区 700hPa 以下的北风分量都大于年际尺度,中低层冷空气南下,导致西南地区气温下降,
335 湿度也下降,但是温度下降速率快于比湿,因而使得温度露点差为负,空气容易达到饱和,
336 西南地区雾日增多。

337

#### 338 5. 总结与讨论

339 本文基于 50 年(1958-2007 年) 我国 503 个基准站的地面常规观测资料,分析了秋冬
340 季西南地区雾日数的时空分布特征,根据秋冬季雾日时间特征划分尺度,分析了西南雾日不
341 同尺度下的气温、比湿等特征,得出以下结论:

342 (1)西南地区雾在秋冬季(10月至次年1月)发生频率较高,分布呈现显著的空间差
343 异,呈现出东南部多西北部少的特点,其中西南地区秋冬季雾日年平均达到了18天以上,
344 是中国东部地区同期雾日数的2倍以上。从时间演变特点来看,西南地区秋冬季雾日存在显
345 著的年际和年代际变化,年际标准差4.4天,年代际标准差2.9天,且在不同气候尺度,雾
346 日产生的气象条件存在显著的差异。

347 (2)通过分析引起西南雾日年际与年代际异常的环流发现,似乎存在着相反的物理机
348 制,即年际尺度上,低层大气增温增湿,易多发生雾日,而年代际尺度上,低层大气降温降
349 湿,易多发生雾日。经过对比分析发现,高低空冷空气的强度差异造成了西南地区秋冬雾日
350 年际和年代际两种时间尺度的物理机制的差异。年际尺度方面,中高层北风异常较为显著,

351 因而将北方的冷空气带到西南地区,使得西南地区中高层出现了冷空气异常,但是由于该地
352 区上空伴随着很强的下沉运动,将高层的冷空气带到低层,而此时低层的气温是较高的,冷
353 暖空气汇合,且处于雨带的北侧,存在一定的温湿空气,造成湿度较高,雾日数增多。年代
354 际尺度方面,低层北风异常较为显著,因而将低层北方的冷空气带到西南地区,使得西南地
355 区出现了显著的冷空气异常,且此时低层空气以冷干为主,虽然湿度较低,但是气温下降速
356 率快于比湿,使得温度露点差较低,空气容易达到饱和,从而使得雾日增多。

- 357
- 358 参考文献
- Yang, J., Chen, B.J., Yin, Y. (2011) Physics of clouds and precipitation. China Meteorological
  Press, Beijing, pp 76-81 (in Chinese)
- 361 Sachweh, M., Koepke, K.P. (1997) Fog dynamics in an urbanized area. Theoretical And Applied
  362 Climatology, 58, 87-93.
- Niu, S.J., Lu, C.S., Yu, H.Y. Zhao, L.J., Lv, J.J. (2010a) Fog research in China: an overview.
  Advances in Atmospheric Sciences, 27(3), 639-662.
- Pu, M.J., Yan, W.L., Shang, Z.T., Yang, J., Li, Z.H. (2008) Study on the Physical Characteristics of
  Burst Reinforcement during the Winter Fog of Nanjing. Plateau Meteorology, 27(5),
  1111-1118.
- 368 Gultepe, I., Tardif, R., Michaelides, S.C., Cermak, J., Bott, A., Bendix, J., Müller, M.D., Pagowski,
- M., Hansen, B., Ellrod, G., Jacobs, W., Toth, G., Cober, S.G. (2007) Fog research: a review of
  past achievements and future perspectives. Pure Appl Geophys, 164, 1121-1159.
- Niu, F., Li, Z.Q., Li,C., Lee, K.H., Wang, M.Y. (2010b) Increase of wintertime fog in China:
  Potential impacts of weakening of the eastern Asian monsoon circulation and increasing
  aerosol loading. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 115(D7),
  D00K20:1-D00K20:12.
- Cai, W.J., Li, K., Liao, H., Wang, H.J., Wu, L.X. (2017) Weather conditions conducive to Beijing
  severe haze more frequent under climate change. Nature Climate Change, 7(4), 257-262.
- 377 陈潇潇,郭品文,罗勇,等.中国不同等级雾日的气候特征[J].气候变化研究进展, 2008,
- 4(2):106-110. Climate Characteristics of Fog Days of Various Categories in China[J]. Climate
  Change Research, 2008, 4(002): 106-110.
- 380 吴兑,吴晓京,李菲,等.中国大陆 1951—2005 年雾与轻雾的长期变化[J].热带气象学报, 2011,

- 27(2):145-151. Wu Dui, Wu Xiaojing, Li Fei, et al. 2011. Long-term variation of fog and mist
  in 1951-2005 in mainland China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 27(2):
  145-151.
- Wang, L.P., Chen, S.Y., Dong, A.X., Song, L.C. (2005) Spatiotemporal distribution characteristics
- 385of the fog regions in China. Journal Of Geographical Sciences, 60(4), 134-139. (in Chinese)

386 孙彧,马振峰,牛涛,等.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,

- 2013, 18(3):397-406. SUN Yu, MA Zhenfeng, NIU Tao, FU Ruyou, HU Junfeng.2013.
  Characteristics of Climate Change with Respect to Fog Days and Haze Days in China in the
  Past 40 Years[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese],18(3):397-406.
- 390 张璐,刘鹏,张文君,张乐楠.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
- 境研究, 2019, 24(5), 585-596. ZHANG Lu, LIU Peng, ZHANG Wenjun, ZHANG 391 392 Lenan.2019. Analysis of Variations of Winter Fog Days Formation across Different Regional Conditions 393 Climatic in China[J]. Climatic and Environmental Research (in 394 Chinese],24(5):585-596.
- Ye, H.C. (2008) The influence of air temperature and atmospheric circulation on winter fog
  frequency over Northern Eurasia. International Journal of Climatology, 29(5), 729-734.
- Yu, H., Li, T.M., Liu, P. (2019) Influence of ENSO on frequency of wintertime fog days in Eastern
  China. Climate Dynamics, 52, 5099-5113.
- Li, Y., Sheng, L.F., Li, C., Wang, Y.H. (2019) Impact of the Eurasian Teleconnection on the
  Interannual Variability of Haze-Fog in Northern China in January. Atmosphere, 10, 113.
- Li, Q., Zhang, R.H., Wang, Y. (2016) Interannual variation of the wintertime fog-haze days across
  central and eastern China and its relation with East Asian winter monsoon. International
  Journal of Climatology, 36, 346-354.
- Hu, S.Q., Zhang, W.J., Andrew, G., Turner, Sun, J. (2020) How does El Niño-Southern Oscillation
  affect winter fog frequency over eastern China? Climate Dynamics, 54, 1043-1056.
- Kalnay, E., Coauthors. (1996) The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull. Amer. Meteor.
  Soc, 77, 437-472.
- 408 刘小宁,张洪政,李庆祥,等.我国大雾的气候特征及变化初步解释[J].应用气象学报, 2005,
- 409 16(2):220-229. Liu Xiaoning, Zhang Hong zheng, Li Qing xiang, et al. Preliminary research
- 410 on the climatic characteristics and change of fog in China. J Appl Meteor Sci, 2005, 16(2):

- 411 220-230.
- Liu, P., Tang, M.Y., Yu, H.Y., Zhang, Y. (2020) Influence of Arctic Oscillation on Frequency of
- 413 Wintertime Fog Days in Eastern China. Atmosphere, 11(2), 162.