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]. 气候与环境研究, 24(5): 585−596. ZHANG Lu, LIU Peng, ZHANG Wenjun, et al. 2019. Analysis of Variations of Winter Fog Days Formation across Different Regional Climatic Conditions in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(5): 585−596. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18038

中国不同区域气候条件对冬季雾日形成的差异性分析

张璐[1,2] 刘鹏[1] 张文君[1] 张乐楠[1]

1 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/气象灾害预报预警与评估协同创新中心，南京 210044

2 内蒙古自治区气象台，呼和浩特 010051

摘 要 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。利用1958～2007年678个中国地面观测站点的雾日数资料，采用相关系数分析、合成分析等方法分析了冬季雾日数的时空特征，发现冬季多雾地区和年际变率较强地区集中在西南、华北和华南等地区。根据冬季雾日分布特征，将中国划分为3个较为独立的雾区，从水汽条件、大气稳定度及大气环流背景等方面讨论了区域气候条件差异对局地雾形成机制的影响，发现不同区域冬季雾日产生的气候条件有着明显的差异性。结论如下：西南区冬季雾的形成受水汽输送影响较小，受大气稳定度影响较大，且巴尔喀什湖东侧高压脊加强，冷空气南下，西南较易发生雾；华北冬季雾日的形成受水汽输送影响较大，伴随长江中下游水汽异常推进偏北，水汽异常大值中心偏北，且西伯利亚高压、东亚大槽以及东北低压减弱，冷空气活动较弱，华北较易发生雾。华南冬季雾日的形成受水汽输送影响较大，伴随长江中下游水汽异常推进偏弱，水汽异常大值中心偏南，且东亚大槽减弱，华南较易发生雾。

关键词 冬季雾日 时空分布 区域性差异 水汽条件 大气稳定度

文章编号 1006-9585(2019)05-0585-12 **中图分类号** P468.0+28 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18038

Analysis of Variations of Winter Fog Days Formation across Different Regional Climatic Conditions in China

ZHANG Lu[1,2], LIU Peng[1], ZHANG Wenjun[1], and ZHANG Lenan[1]

1 *Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education/Joint International Research Laboratory of Climate and Environmental Change/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044

2 *Inner Mongolia Autonomous Region Meteorological Observatory*, *Huhhot* 010051

Abstract Fog is a severe weather hazard that greatly influences traffic and daily life, potentially contributing to heavy economic losses. Based on the observed fog data from 1958 to 2007, using correlation coefficient analysis and composite analysis, the temporal and spatial characteristics of fog days in winter were analyzed. It was found that fog in winter frequently occurred, and the interannual variability in winter fog days was relatively strong, mainly over southwestern China, northern China, and Fujian. According to the distribution patterns of the winter fog days, we defined three relatively independent fog areas. The influence of regional climatic conditions on local fog formation mechanisms is

收稿日期 2018-03-14；**网络预出版日期** 2018-04-10

作者简介 张璐，1992年出生，女，硕士研究生，主要从事气候变化及其区域响应。E-mail: luzhangcloud@qq.com

通讯作者 刘鹏，E-mail: liupeng1998@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目41405068、41605045，江苏省333和六大人才高峰项目41675073

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41405068 and 41605045), Jiangsu 333 and Six Talent Peak Project (Grant 41675073)

discussed from the aspects of water vapor transport, atmospheric stability, and atmospheric circulation. There was a significant difference in climatic conditions for winter fog formation among the different regions. Winter fog formation over southwestern China was less affected by water vapor transport, while more affected by the atmospheric stability and the southward cold air. Winter fog formation over northern China was affected by water vapor transport; they occurred more frequently when water vapor was transported farther north and convective instability occurred over the middle and lower Yangtze River. Meanwhile, the formation and maintenance of winter fog days over southern China were also found to be influenced by vapor transport; when water vapor was transported farther south, the fog occurred more frequently. In terms of atmospheric circulation, winter fog formation was mainly affected by the deepening high-pressure ridge, east of the Balkhash Lake over southwestern China, weakening of East Asia trough and Siberian High over northern China, and the weakening of the Siberian High over southern China.

Keywords Winter fog days, Temporal and spatial distribution, Regional differences, Water vapor transport, Atmospheric stability

1 引言

在《地面气象观测规范》（中国气象局，2003）中，雾天气被这样定义："雾是指悬浮在贴近地面的大气中的大量微细水滴（或冰晶）的可见集合体，雾的有效能见度小于1000 m，相对湿度常为100%或接近100%，有明显的潮湿感觉"。浓雾已成为影响经济和社会发展以及人民健康的重要灾害性天气之一，鉴于雾所造成危害的严重性，许多学者对其展开了研究。雾的研究始于对单次雾过程的个例分析（李子华和张利民，1992；Teixeira et al.，1999；吴洪等，2000；Bendix et al.，2002；Friedlein et al.，2004；马禹等，2005）；随着空间上大范围雾资料质量的提高，一方面雾的微观特征被学者们所关注（濮梅娟等，2008；罗宁等，2008；Niu S et al.，2010；李子华等，2011；Quan et al.，2011；Liu et al，2012；Niu et al.，2012；Lu et al.，2013；Zhou et al.，2013；张苏平等，2014），另一方面长期雾日序列的气候特征和变化趋势也越来越被关注。总体而言，我国大雾分布基本呈现东南多西北少的特点；且雾有显著的季节变化，春季少，冬季多（刘小宁等，2005；陈潇潇等，2008；吴兑等，2011；孙彧等，2013）。在全球变暖的背景下，我国大部分地区大雾日数呈减少趋势（刘小宁等，2005；陈潇潇等，2008；；林建等，2008；Niu S et al.，2010；吴兑等，2011；孙彧等，2013；Ding et al.，2014；史军等，2015）。

基于统计分析方法，以往研究已经探讨了局地雾的时空分布特征及其与气象因子之间的关系。王丽萍等（2005）指出了相对湿度、温度和大雾关系密切；毛冬艳和杨贵名（2006）分析了华北平原地区雾发生时低层要素的特征，发现低层水平风很弱、饱和湿空气气层稳定或者弱不稳定时较易发生雾；张人禾等（2014）通过对中国东部一次雾过程中气象因子的分析，发现风速以及水平风垂直切变、温度露点差、中低层大气稳定度以及逆温与雾有显著关系；尹志聪等（2015a）分析了华北黄淮地区冬季雾的时空变化特征，发现雾日数和降水量、相对湿度间有一定正相关关系。浓雾事件对交通运输的影响很大，严明良（2011）和严明良等（2011）对沪宁高速公路区域的一次大雾天气过程进行了数值模拟，发现近地层涡度场存在较弱的负值区、地面风场出现辐合、北方有冷空气南下时，有利于浓雾的形成、维持与发展；吴兑等（2007）对南岭山地高速公路雾区进行了研究，南岭山地高速公路雾区浓雾受地形影响比较大，迎风坡出现雾的频率比背风坡高；赵博（2005）发现降温与南岭山地高速公路的雾形成有很明显的正相关，同时需要一定的水汽和平流条件；雾的生成与发展还与一些大尺度气候系统密切联系。Ye et al.（2008）等分析了欧亚大陆北部雾日数与AO（北极涛动）的关系，发现在大部分地区雾日数减少往往伴随西伯利亚高压减弱以及AO增强；Niu F et al.（2010）发现东亚冬季季风环流减弱有利于雾的形成；于华英等（2014）发现AO和ENSO对南京雾日有密切影响。

我国地理特征和区域气候复杂，因此，在不同地理特征和气候条件下，对雾的形成起到显著影响的气象因子可能有很大的差异，那么在研究中就有必要对雾的形成进行分区讨论。以往的很多学者也进行了对雾的分区研究，王丽萍等（2005）将年均

雾日数大于20 d的地区分为6个雾区，发现大多数雾区雾日有下降趋势，秋、冬雾日最多，春、夏较少。陈潇潇等（2008）通过计算各站点间相关系数，并结合雾日空间分布特征以及地形分布，指出除东北、西北天山山脉区外，33°N 以南的内陆区、南部沿海雾生时间多在夜晚，而 33°N 以北及东部沿海多在清晨；沿海地区、华北区及陇东—山西区较其余各区持续时间在12 h以上的雾日有更高的出现几率。孙丹等（2008）根据浓雾频数将全国分为9个区域，发现黄土高原、华南、长江中下游和西南地区雾频数在1960 年代和1970年代呈逐渐增大趋势，1980 年代达到最大值，而后逐渐减少，华北平原雾频数随时间呈明显增加趋势，东北、内蒙古、青藏高原和新疆地区雾频数随时间逐渐减少；孙彧等（2013）通过对雾日分布做REOF（旋转自然正交分解法）分析把全国分为10个大区，16个小区，发现华北区、川渝区以及长江中下游区雾出现频率较高。

这些研究大致给出了不同地区雾的气候特征。然而，不同地理及气候条件对雾生成原因的讨论目前较少，其机制仍不清楚。本文根据冬季雾日特征划分雾区，尝试分析各雾区气候条件的差异对雾的形成造成的影响，探讨区域性的气候差异如何影响我国冬季雾的形成，以便了解各地区雾形成的气候条件的差异，进一步理解雾的形成机制，提高对雾的预测预警能力，减少由雾害造成的损失。

2 资料与方法

本文利用1958～2007年的两套资料：（1）逐月NCEP/NCAR 再分析资料，包括风场（u、v）、位势场（hgt）、比湿场（shum）、地面气压场（pres）经过季节平均（11月至次年2月）处理，得到49年逐年冬季资料；（2）国家气象信息中心提供的全国678个基准站的地面观测资料，且通过了国家气象中心资料室的质量检验，本文用到的观测变量是雾日数资料。另外，全文中的图如无特别说明，都是利用NCEP/NCAR再分析资料处理得到的。

在本文的分析中，用到了相关分析以及合成分析等统计分析方法。另外，还用到了一个表征大气热力不稳定度的常用指数K指数，计算公式（章国材等，2007）为

$$K=(T_{850}-T_{500})+T_{d850}-(T_{700}-T_{d700}), \quad (1)$$

其中，T和T_d分别为气温和露点温度，下标850、700和500表示T和T_d所在的高度分别为850、700和500 hPa。K指数在实际天气业务中常常用来判别大气层结稳定性，K指数的值越大，表示大气层结越不稳定。

3 我国冬季雾日及雾区分布特征

3.1 我国冬季雾日空间分布特征

利用全国678个中国地面观测站点的雾日数资料，发现雾在冬季（11月至次年2月）发生频率较高（图1a），新疆南部地区冬季雾发生的比例超过90%，在雾频发的东南部地区，冬季雾日数占全年雾日数百分比超过50%，在华北地区、江南地区、西南地区超过60%，本文选取冬季雾日作为研究对象。冬季雾日分布（图1b）可以看出，冬季雾日分布呈现明显的空间差异，有东南部多西北部少的特点，东南部大部分地区的冬季雾日数为15～21 d，西北部多数地区不足10 d且站点较分散，因此我们不对图1a中新疆南部地区冬季雾日高比例区的雾进行讨论。冬季多雾地区集中在四川东部，云南南部、华南以及华北地区，其中四川东部地区冬季雾日数最多，超过21 d；其次是长江中下游、福建沿海以及华北地区，冬日雾日数超过12 d。

冬季雾日标准差（图1c）反映了近50年来冬季雾日分布年际尺度上的活跃程度。比较图1b和1c可见，冬季雾日标准差大值区与冬季雾日年平均分布相似，集中在四川南部，云南南部、华南以及华北地区，中心值最大可达8 d，说明上述地区冬季不仅是雾的高发区，也是年际变化较明显的区域。

3.2 各雾区划分及时空分布特征

雾是一种局地性很强的天气现象。水汽含量丰富、近地面大气层结稳定、冷暖平流交汇、辐射冷却使水汽凝结、特殊的地形等下垫面条件都是影响雾形成的重要条件。雾的地理分布比较复杂，有必要分地区研究区域气候差异对雾形成与维持造成的影响。

地理条件的差异可以导致雾形成的气候条件的差异，以此为基础对雾进行分区。上文分析表明，我国冬季多雾及年际变率较明显的地区主要分布在西南、华北和华南等地区。选取冬季雾日频发（图1b）且年际变化较明显（图1c）的地区，并结合我国地形的自然分布形态，分为3个雾区（图2a），各区分别为：西南区（41个站点）、华北区（35个

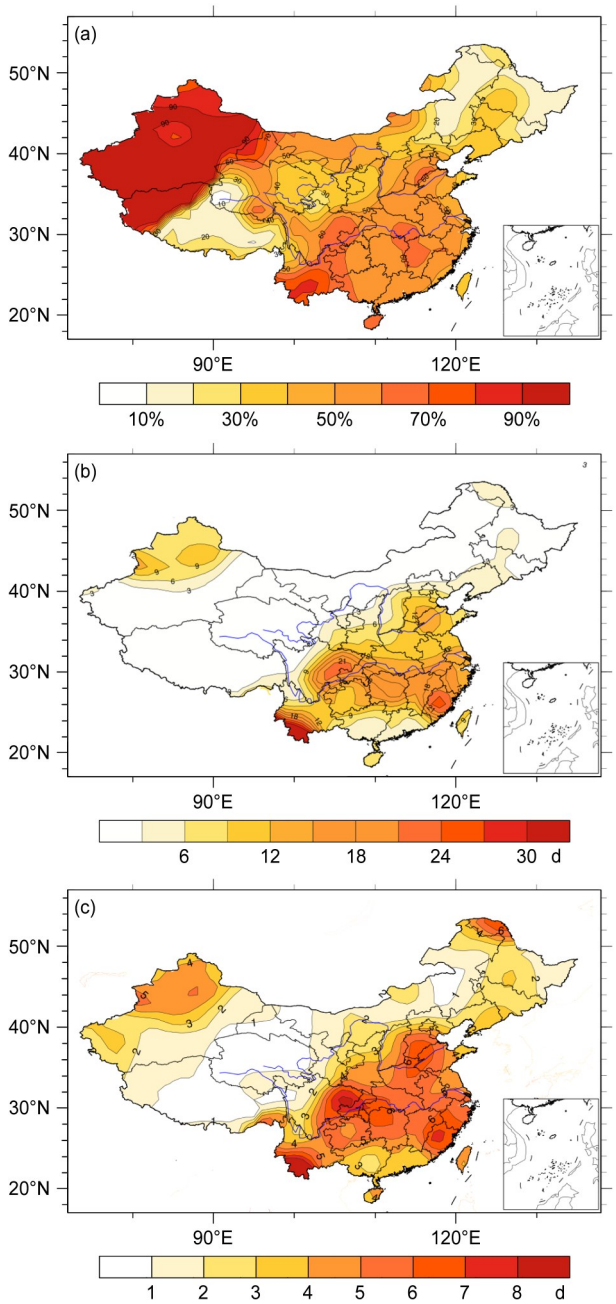

图 1 1958～2007 年全国冬季雾日（a）占全年雾日比例（单位：%）、（b）气候态（单位：d）和（c）标准差（单位：d）分布

Fig. 1 (a) Percentage (units: %) of winter fog days, (b) climatological winter fog days, and (c) standard deviation of winter fog days (units: d) during 1958–2007

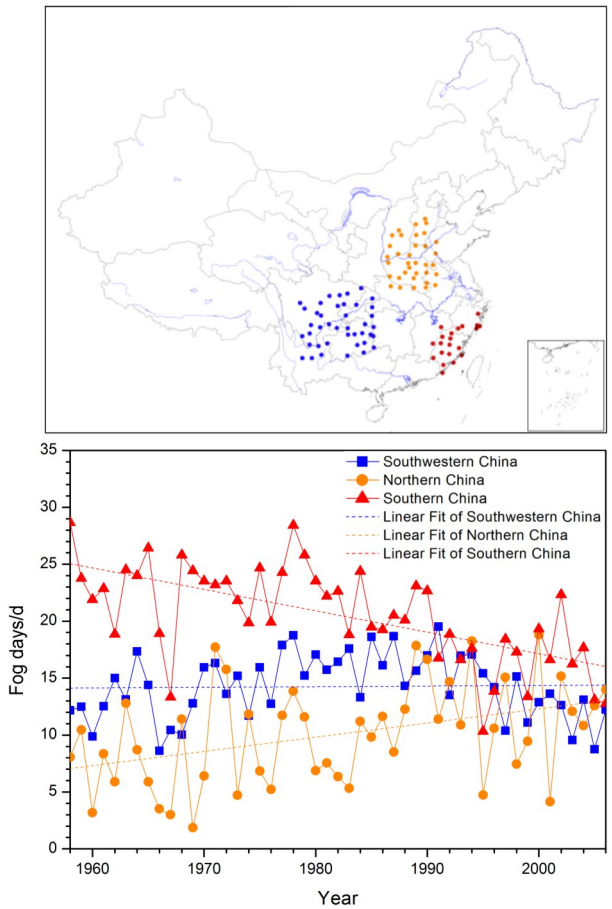

图 2 （a）我国雾区分布（深蓝点代表西南区站点，黄点代表华北区站点，红点代表华南区站点）；（b）1958～2007 年 3 个雾区（西南区、华北区、华南区）冬季雾日数年际变化及变化趋势

Fig. 2 (a) Distribution of stations in three fog areas (dark blue, yellow, and red dots represent the regions of southwestern China, northern China, and southern China, respectively). (b) Interannual variations in winter fog days over southwestern China, northern China, and southern China during 1958–2007

站点）和华南区（21 个站点）。需要说明的是，云南南部地区虽然多雾及年际变率明显，但云南南部地区只有 13 个站点，且分布较零散，不能很好地表现该地区冬季雾日的特征，故不对其进行讨论。我们对全国 678 个站点做了 EOF 分析，EOF 的不同模态也大致体现了以上分区（图略），说明了本文分区的合理性。

图 2b 给出西南区、华北区、华南区冬季雾日数年际变化。可以看出，3 个雾区冬季雾日由多到少依次为：华南区、西南区、华北区。西南区冬季雾日年际变化呈略有增加的趋势，1991 年最多，约为 20 d，而 1966 年最少，只有 8 d。华北区冬季雾日年际变化的增加趋势及变化幅度与西南区相比更为明显，最小值出现在 1969 年，仅为 2 d，之后在波动中上升，最大值出现在 2000 年，约为 19 d。华南区整体雾日是 3 个雾区中最多的，减少趋势也最明显，1958 年雾日最多，约为 29 d，之后在波动中下降，在 1995 年达到冬季雾日的最小值，约为 10 d。值得注意的是，华北区和华南区冬季雾日变

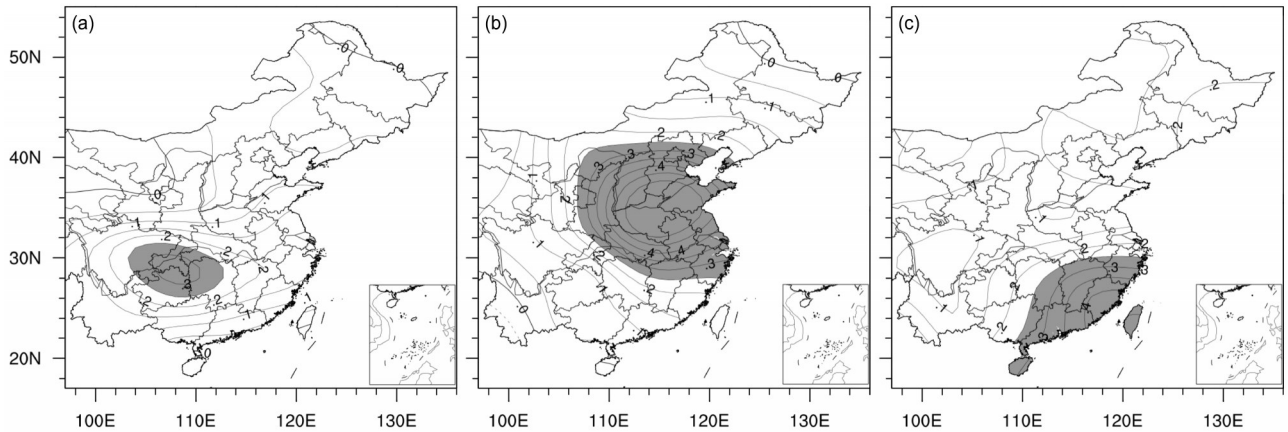

图3 （a）西南区、（b）华北区、（c）华南区冬季雾日独立性验证（阴影区表示各雾区冬季雾日年际变化与全国各站点冬季雾日年际变化相关系数为正且达到90%信度）

Fig. 3 Independence verification of winter fog days over (a) southwestern China, (b) northern China, and (c) southern China. Gray shading indicates correlation coefficients for the interannual variations in winter fog days at each station with the means of the three fog areas and each station in China, were positive and exceeded the 90% confidence level

化呈相反趋势，华北区冬季雾日数的上升趋势可能与东亚冬季风的年代际减弱有关（尹志聪等，2015b；Li et al.，2015），华南区冬季雾日数的下降趋势可能与近年来沿海地区相对湿度明显下降有关（Niu S et al.，2010）。

由上文的分析可知，冬季雾日分布有较强局地性。根据雾日的区域分别对雾日形成机制进行探讨，就需要各雾区冬季雾日的变化能体现该地区成雾的特点，也就是该地区雾日的变化有一定独立性。为此，我们采取计算3个雾区区域平均的冬季雾日数年际变化与全国各站点冬季雾日数年际变化的相关系数，对3个雾区独立性进行验证。西南区（图3a）通过显著性检验的区域主要集中在四川东部、重庆以及贵州和湖北交界处。华北区（图3b）通过显著性检验地区集中在华北地区以及黄淮地区。华南区（图3c）通过显著性检验地区集中在广东、福建、江西、湖南东南部以及浙江南部。以上3个雾区通过显著性检验的区域较集中且具有一定的范围，大致与雾区站点覆盖范围重合。总体而言，3个雾区冬季雾日变化有一定独立性，再次说明我们分区的合理性和必要性。

4 各雾区成雾机制差异分析

有研究表明，雾的形成与水汽条件及大气的稳定程度有直接关系（王丽萍等，2005,2006；张人禾等，2014）。利用1958～2007年NCEP月平均大气再分析资料，从水汽条件、大气稳定度及环流背景场方面，对3个雾区（西南区、华北区、华南区）冬季雾日形成有较大影响的气候条件（大气可降水量、850 hPa风场、500 hPa位势场、降水场、K指数场、比湿场及假相当位温随高度的变化）进行分析，具体结果如下。

4.1 各雾区水汽条件对冬季雾形成的影响差异分析

雾是由空气中的水汽凝结成小水滴悬浮在近地面大气中形成的，从水汽条件上看，雾形成的必备条件是局地水汽充沛和水汽接近或达到饱和。水汽的饱和程度，用相对湿度和温度露点差衡量，关于相对湿度及温度露点差对雾的影响前人已有非常充分的探讨（王丽萍等，2005，2006；陈潇潇等，2007；孙彧等，2013；张人禾等，2014）。相对湿度越高，温度露点差越低，对应水汽饱和程度越高，越有利于雾的形成。雾能否形成的另一个重要条件是局地水汽是否充沛。本文从3个雾区冬季雾日与水汽输送的关系上讨论局地水汽差异对雾形成机制的影响。采用从地面气压往上垂直积分至300 hPa的方式，计算大气可降水量，计算公式为

$$W = -\frac{1}{g}\int_{p_s}^{p} q\,\mathrm{d}p\ , \qquad (2)$$

其中，W为大气可降水量，单位为kg m^{-2}；g为重力加速度，单位为m/s；q为各层比湿，单位为g/kg；大气层顶p=300 hPa，p_s为地面气压。

图4给出了3个雾区冬季雾日受水汽条件影响

的程度。局地水汽条件对冬季雾形成的影响通过冷空气活动体现，气温降低与温度露点差直接相关。温度露点差衡量水汽饱和程度，寒潮过境时，干冷空气的补充使空气中水汽含量下降，在水汽充沛地区，水汽含量下降幅度较小，露点温度下降幅度小于温度下降幅度，温度露点差减小，有利于雾的形成；反之，在水汽匮乏地区，水汽含量下降幅度较大，露点温度下降幅度大于温度下降幅度，温度露点差增加，阻碍了雾的形成；在水汽匮乏的地区，雾的形成需要依靠水汽的输送。可以看出，西南区（图4a）冬季雾日与局地大气可降水量为负相关关系，且基本上通过90%信度的显著性检验，配合850 hPa风场（图5a）西南区为偏北风，有利于西南区气温降低，促使西南区冬季雾日增加。西南区受季风槽及盆地地形影响，局地水汽充沛，冷空气过境，水汽饱和程度增加，有利于雾的生成和维持。华北区（图4b）和华南区（图4c）冬季雾日与局地大气可降水量为正相关关系且基本上通过0.1信度的显著性检验，配合华北区（图5b）和华南区（图5c）850 hPa风场上为偏南风，将水汽向北输送，表明华北区和华南区局地水汽增加，有利于华北区和华南区冬季雾日形成。华北区和华南区冬季雾的形成受水汽输送影响较大，当水汽输送较强时，上述区域较容易产生和维持雾；反之，不易于产生和维持雾。

由以上对水汽条件的讨论可以看出：西南区冬季雾的形成和维持不依靠水汽输送，主要受水汽饱和程度影响；华北区和华南区冬季雾的形成和维持对水汽输送有较大的依赖性，因此，3个雾区水汽区域条件对雾形成的影响有一定的差异。

4.2 各雾区大气稳定条件对冬季雾形成的影响差异分析

对雾的形成有直接影响的另一个因素是大气稳定度，用K指数进行分析。图6给出了3个雾区冬季雾日受K指数影响的差异。可以看出，西南区（图6a）冬季雾日与局地的K指数为负相关关系且基本上通过0.1信度的显著性检验，表明西南区K指数小，大气层结较稳定，有利于西南区冬季雾日形成。华北区（图6b）和华南区（图6c）冬季雾日似乎与局地大气层结稳定度关系不大。

由以上讨论可以发现：西南区冬季雾日形成的特征较其他2个雾区更明显，对水汽输送依赖较小，而受大气稳定度的影响较大。但是从水汽条件

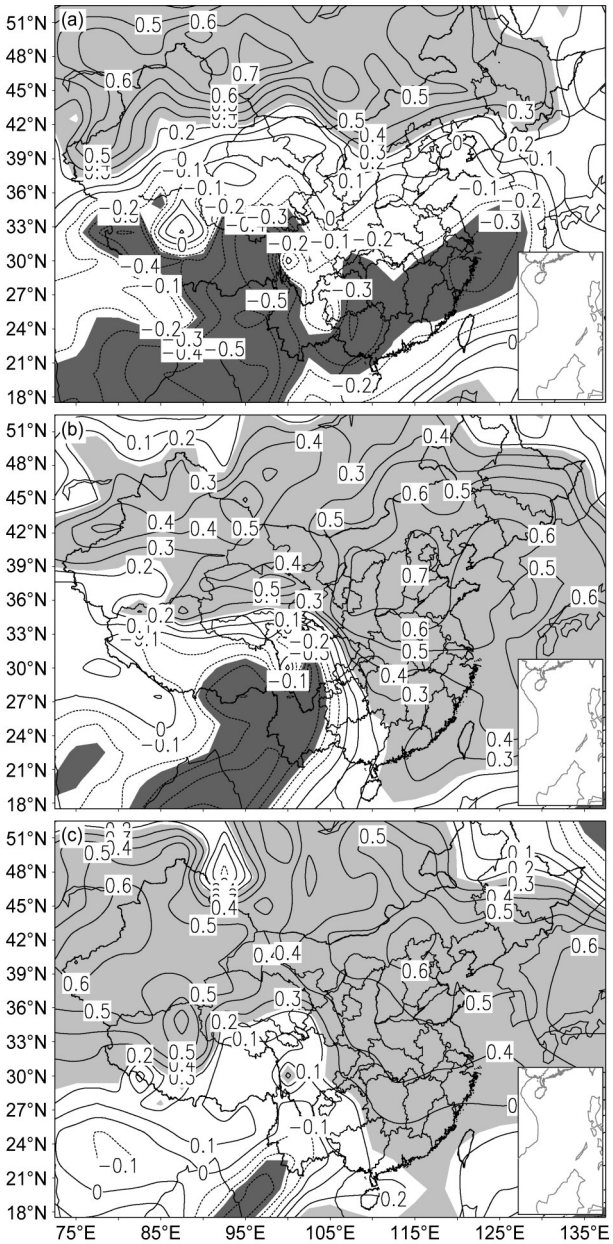

图4 （a）西南区、（b）华北区、（c）华南区冬季雾日与大气可降水量相关系数分布（浅色阴影区表示相关系数为正且达到90%信度，深色阴影区表示相关系数为负且达到90%信度）

Fig. 4 Correlation coefficients between average atmospheric perceptible water and winter fog days over (a) southwestern China, (b) northern China, and (c) southern China. Light (dark) shading represents where the correlation coefficients were positive (negative) and exceeded the 90% confidence level

和大气稳定度上看，华北区和华南区局地气候条件对冬季雾日影响的差异并不明显。雾的形成需要水汽过饱和，降水的形成也需要水汽过饱和，这导致了雾有时会和降水同时发生。华北区和华南区雾的形成依赖水汽输送（图4、图5），水汽输送往往伴

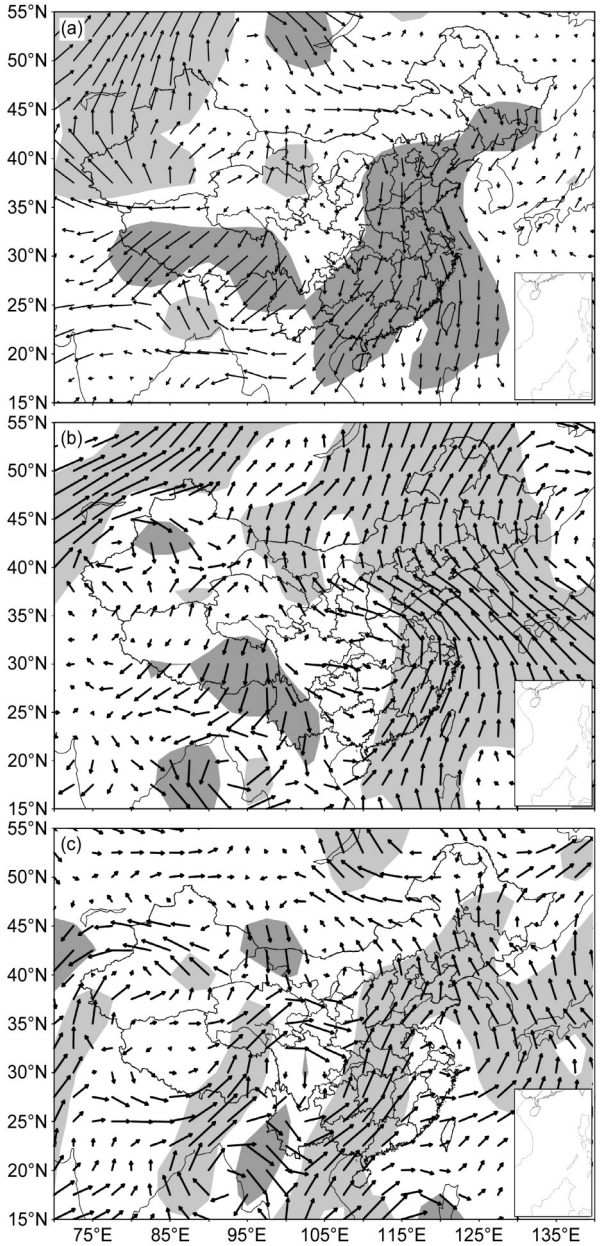

图5 （a）西南区、（b）华北区、（c）华南区冬季雾日与850 hPa风场相关系数分布。西南、东北方向箭头代表相关系数为正，其余方向箭头代表相关系数为负，浅色阴影区表示经向风相关系数为正且达到90%信度，深色阴影区表示经向风相关系数为负且达到90%信度

Fig. 5 Correlation coefficients between wind field at 850 hPa and winter fog days over (a) southwestern China, (b) northern China, and (c) southern China. Vectors toward the southwest or northeast indicate that the correlation coefficients were positive, otherwise were negative. Light (dark) shading represents where the correlation coefficients were positive (negative) and exceeded the 90% confidence level

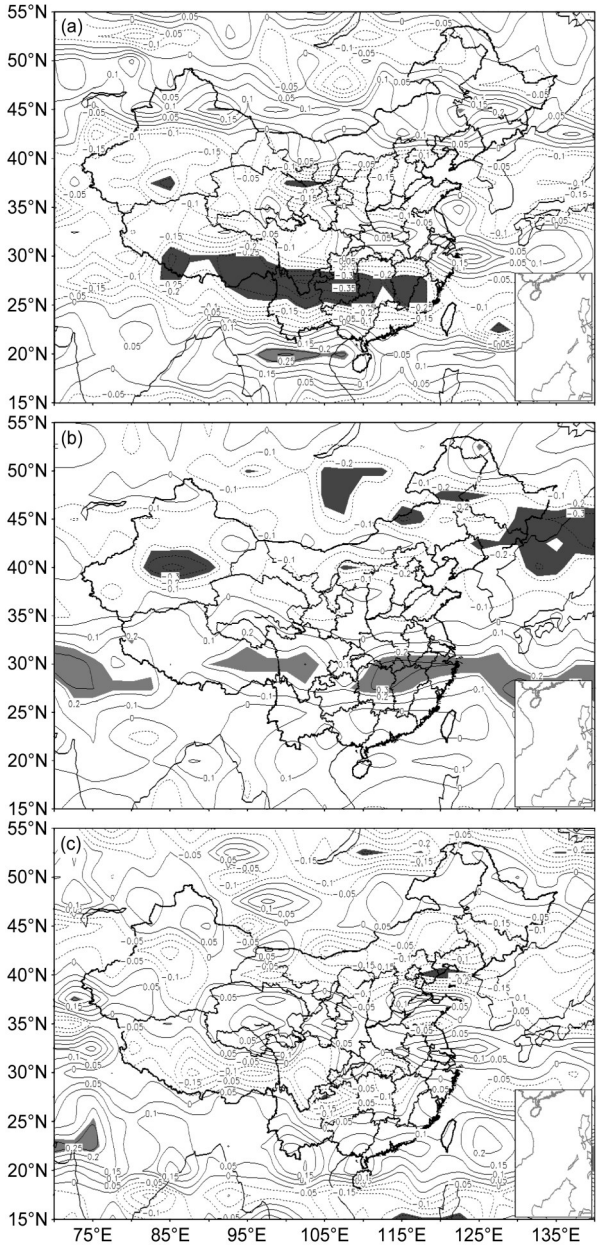

图6 （a）西南区、（b）华北区、（c）华南区冬季雾日与*K*指数相关系数分布（浅色阴影区表示相关系数为正且达到90%信度，深色阴影区表示相关系数为负且达到90%信度）

Fig. 6 Correlation coefficients between K index and winter fog days over (a) southwestern China, (b) northern China, and (c) southern China. Light (dark) shading represents where the correlation coefficients were positive (negative) and exceeded the 90% confidence level

随降水，因此分析多雾与少雾年的大气稳定度异常和降水场异常场的差异，有利于我们理解雾形成与水汽输送特征的关系。长江中下游地区的*K*指数与华北区冬季雾日存在明显的正相关关系（图6b），表明长江中下游大气对流强，有利于华北雾的形成，而华南区冬季雾日和*K*指数的关系并不明显。由此入手，对3个雾区异常年降水场进行分析，以平均值±1个标准差选取冬季雾日正异常年和负异常年（表1），对降水距平场进行合成，可以看到

当西南区冬季雾日偏多（图7a）时，对应长江中下游以南地区降水出现负异常，大气较稳定，水汽输送不强烈；当华北区冬季雾日偏多（图7b）时，对应华北区以南地区降水出现明显正异常，大部分地区达到了30 mm，水汽异常大值中心偏北，位于长江中下游地区；而当华南区冬季雾日偏多（图7c）时，对应长江中下游以南地区降水出现正异常，大部分地区达到了10 mm，水汽异常大值中心偏南，从湖南南部到浙江南部，呈带状分布，在范围和强度上较华北区明显偏弱。

降水异常场的分析可以发现，华北区和华南区多雾时都伴随降水场正异常，但是伴随特点有较大差异。华北区多雾时降水正异常出现在其南部，华南区多雾时降水正异常覆盖了雾区，强度和范围上也有明显差异。讨论其背后的原因，选取比湿q及假相当位温随高度的变化$\partial\theta_{se}/\partial p$，对110°E～120°E进行平均，从垂直层上对华北区和华南区雾发生时降水异常的差异进行分析。比湿可以反映空气中水汽含量，而$\partial\theta_{se}/\partial p$作为对流性不稳定的判据，其值大于零对应对流性稳定，反之，对应对流性不稳定。可以看到，多雾时，华北区和华南区中低层都有明显的比湿正异常（图8a），且长江中下游都对应$\partial\theta_{se}/\partial p$负异常（图9b），程度和范围上，华北区较华南区（图8b、9b）明显偏强，与华北区多雾时长江中下游降水正异常明显强于华南区对应。多雾时，华北区和华南区水汽均较充沛，当长江中下游水汽异常推进偏北，水汽异常大值中心偏北时，华北区较易发生雾；当水汽异常推进偏弱，水汽异常大值中心偏南时，华南区较易发生雾。

表1 西南区、华北区、华南区冬季雾日正、负异常年选取

Table 1 Selection of positively and negatively anomalous years for winter fog days over southwestern China, northern China, and southern China

	雾日正异常年	雾日负异常年
西南区	1964年、1977年、1978年、1980年、1983年、1985年、1987年、1990年、1991年、1994年	1960年、1966年、1967年、1968年、1997年、1999年、2003年、2005年
华北区	1971年、1972年、1989年、1990年、1992年、1994年、1997年、2000年、2002年、2006年	1960年、1966年、1967年、1969年、1973年、1976年、1983年、1995年、2001年
华南区	1963年、1964年、1965年、1968年、1969年、1975年、1977年、1978年、1979年、1984	1967年、1995年、1996年、1999年、2003年、2005年、2006年

由以上讨论可以发现：西南区冬季雾的形成对水汽输送依赖较小，而受冷空气南下及大气稳定度的影响较大；华北区和华南区冬季雾的形成依赖水汽输送，当长江中下游水汽异常推进偏北，水汽异常大值中心偏北时，华北区较易发生雾；当水汽异

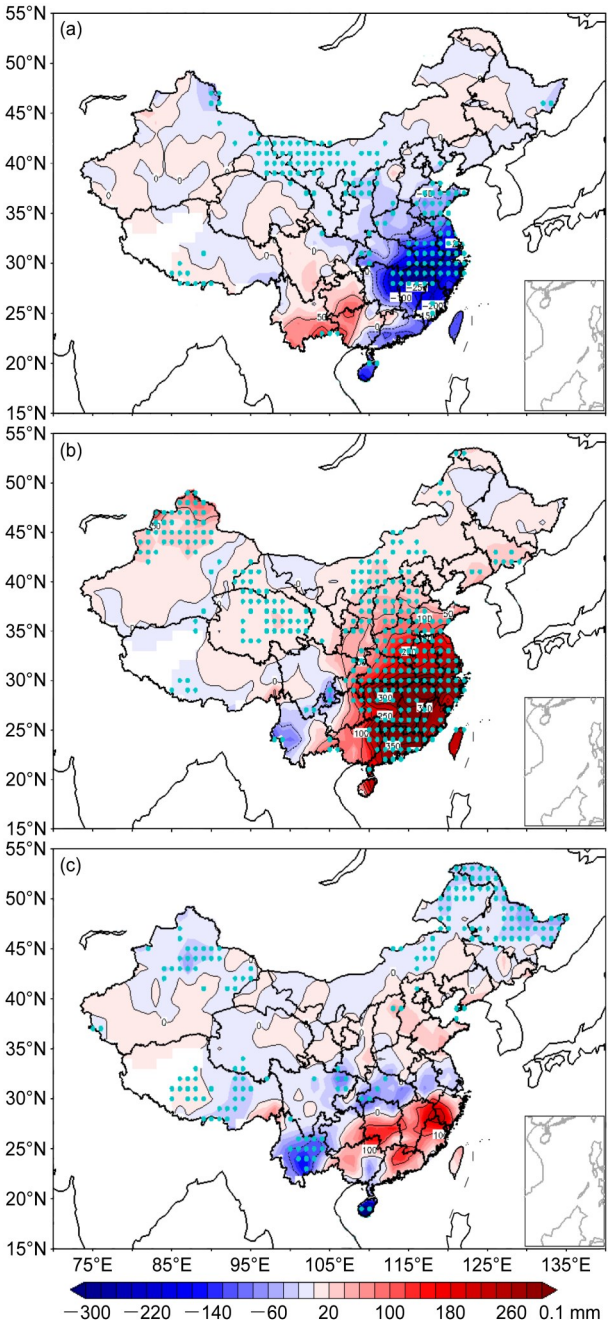

图7 （a）西南区、（b）华北区、（c）华南区冬季雾日正、负异常年降水量差值场（单位：0.1 mm，打点区域表示达到90%信度）

Fig. 7 Differences in precipitation fields between positive and negative anomaly years for winter fog days over (a) southwestern China, (b) northern China, and (c) southern China (units: 0.1 mm). The dot area represents where values exceeded the 90% confidence level

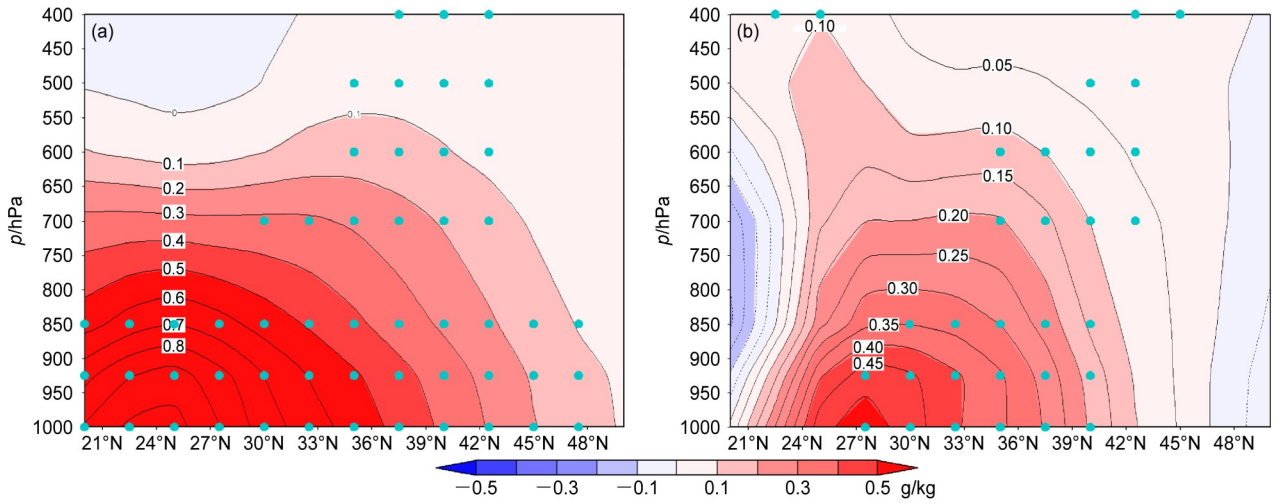

图8 （a）华北区、（b）华南区冬季雾日正、负异常年垂直层比湿场差值（110°E～120°E平均，单位：g/kg，打点区域表示达到90%信度）

Fig. 8 Differences in specific humidity fields for winter fog days of vertical height between positive and negative anomaly years over (a) southwestern China, (b) northern China (averaged from 110° E to 120° E, units: g/kg). The dot area represents where values exceeded the 0.1 confidence level

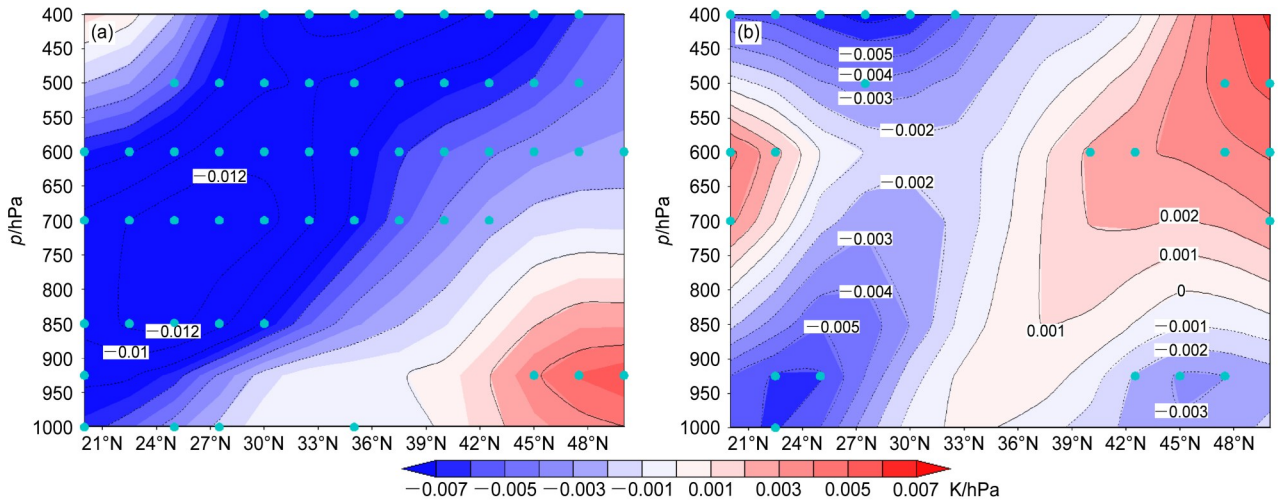

图9 （a）华北区、（b）华南区冬季雾日正、负异常年垂直层 $\partial\theta_{se}/\partial p$ 差值（110°E～120°E平均，单位：K/hPa，打点区域表示达到90%信度）

Fig. 9 Differences in $\partial\theta_{se}/\partial p$ fields for winter fog days of vertical height between positive and negative anomaly years over (a) southwestern China and (b) northern China (averaged from 110°E to 120°E, units: K/hPa). The dot area represents that the values exceed the 90% confidence level

常推进偏弱，水汽异常大值中心偏南时，华南区较易发生雾。

4.3 各雾区大气环流形势对冬季雾形成的影响差异分析

大雾天气主要是天气系统影响下的高压雾，与环流配置关系密切。分析3个雾区冬季雾日大气环流对雾形成的影响（图10、图11），可以看到，西南区（图10a）冬季雾日形成主要受巴尔喀什湖以东的高压脊影响，高压脊加深，利于脊前西北气流引导冷空气南下，西南区气温下降幅度大于露点温度下降幅度，水汽饱和程度增加，有利于西南区雾的形成，与上文分析（图4）一致；对华北区冬季雾日影响较大的是西伯利亚高压、东北低压（图11a）和东亚大槽的减弱（图10b）。作为冬季寒潮的冷空气关键区，西伯利亚高压减弱，冷空气堆积程度减弱，南下后对华北地区影响减弱，有利于水汽的集聚，有利于雾的形成；东亚大槽和东北低压的减弱，不利于引导北方冷空气南下，此时低层有

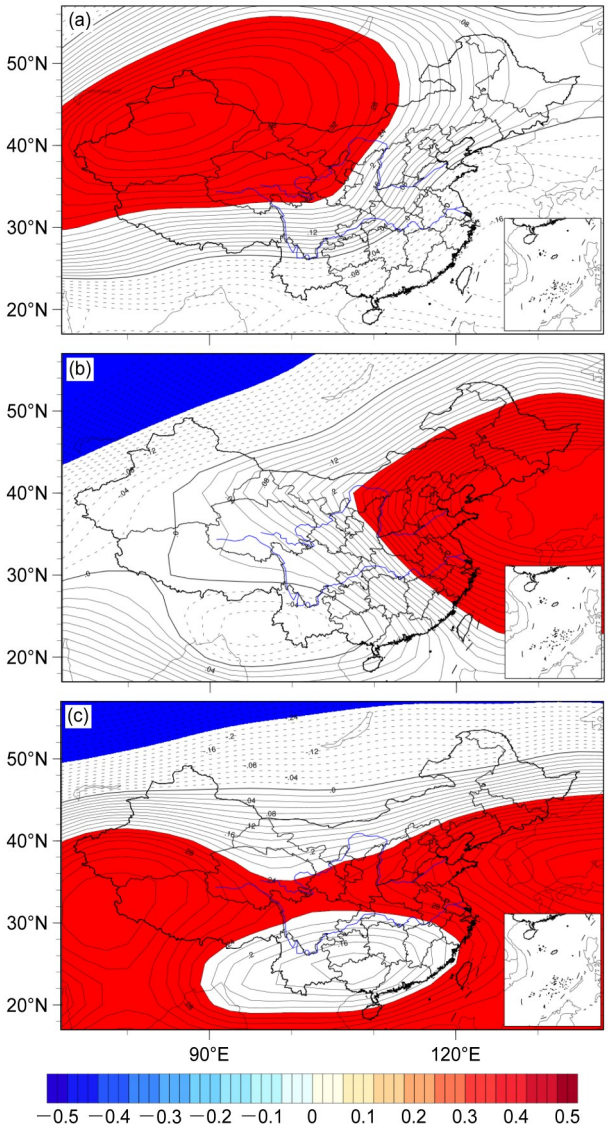

图 10 （a）西南区、（b）华北区、（c）冬季雾日与 500 hPa 位势场相关系数分布（红色阴影区表示相关系数为正且达到 90% 信度，蓝色阴影区表示相关系数为负且达到 90% 信度）

Fig. 10 Correlation coefficients between circulation field at 500 hPa and winter fog days over (a) southwestern China, (b) northern China, and (c) southern China. Red (blue) shading represents where correlation coefficients were positive (negative) and exceeded the 90% confidence level

暖的空气在北方堆积，有利于华北区雾的形成；华南区冬季雾日 500 hPa 上受到低纬度增温的影响（图 10c），除此之外也受到东亚大槽减弱的影响。东亚大槽的减弱，不利于引导北方冷空气南下，有利于华南区雾的形成。

综合以上水汽条件、大气稳定度及天气系统对 3 个雾区冬季雾日形成机制影响的分析，可以发现

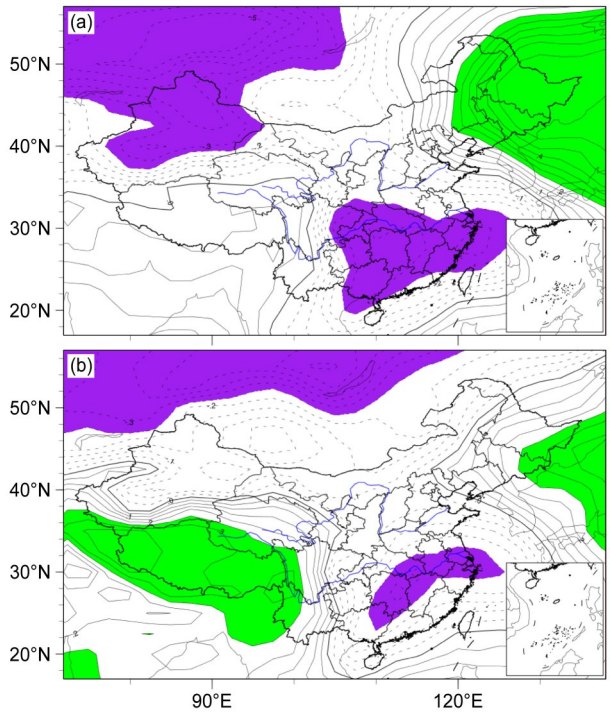

图 11 （a）华北区、（b）华南区冬季雾日与地面气压场相关系数分布（绿色阴影区表示相关系数为正且达到 90% 信度，蓝色阴影区表示相关系数为负且达到 90% 信度）

Fig. 11 Correlation coefficients between surface pressure field and winter fog days over (a) northern China and (b) southern China. Green (blue) shading represents where correlation coefficients were positive (negative) and exceeded the 90% confidence level

西南区局地水汽条件充沛，其冬季雾的形成受水汽输送影响较小，受大气稳定度影响较大，且巴尔喀什湖东侧高压脊加强，冷空气南下，西南较易发生雾；华北冬季雾日的形成受水汽输送影响较大，伴随长江中下游水汽异常推进偏北，水汽异常大值中心偏北，且西伯利亚高压、东亚大槽以及东北低压减弱，冷空气活动较弱，华北较易发生雾。华南冬季雾日的形成受水汽输送影响较大，伴随长江中下游水汽异常推进偏弱，水汽异常大值中心偏南，且东亚大槽减弱，华南较易发生雾。

5 结论

本文基于近 50 年（1958～2007 年）我国 678 个基准站的地面常规观测资料，分析了冬季雾日数的时空分布以及年际变化特征，根据冬季雾日分布特征划分雾区，从水汽条件和大气稳定度 2 方面讨论了区域气候条件差异对局地雾形成机制的影响，得出以下结论：

（1）我国雾在冬季（11月至次年2月）发生频率较高，冬季雾日年平均分布呈现明显的空间差异，呈东南部多西北部少的特点，冬季多雾地区和年际变率较强地区集中在西南、华北和华南等地区。根据以上冬季雾日特征将全国分为3个雾区：西南区、华北区和华南区，3个雾区冬季雾日年际变化有较明显的差异。

（2）从水汽条件、大气稳定度以及环流背景场分析3个雾区气候条件差异对局地雾形成机制的影响。西南区冬季雾的形成受水汽输送影响较小，受大气稳定度影响较大，且巴尔喀什湖东侧高压脊加强，冷空气南下，西南较易发生雾；华北冬季雾日的形成受水汽输送影响较大，伴随长江中下游水汽异常推进偏北，水汽异常大值中心偏北、偏强，且西伯利亚高压、东亚大槽以及东北低压减弱，冷空气活动较弱，华北较易发生雾。华南冬季雾日的形成受水汽输送影响较大，伴随长江中下游水汽异常推进偏弱，水汽异常大值中心偏南、偏弱，且东亚大槽减弱，华南较易发生雾。

总体而言，我们较为初步的工作表明冬季雾日分布具有明显的局地性，尤其区域性气候条件对雾日的影响存在显著的差异性，甚至影响是相反的。因此，我们在讨论雾的形成时有必要分区域分析不同区域不同的物理机制，这也要求在业务预测中，我们要充分考虑局地差异性。

参考文献（References）

Bendix J. 2002. A satellite-based climatology of fog and low-level stratus in Germany and adjacent areas [J]. Atmospheric Research, 64 (1–4): 3–18. doi:10.1016/S0169-8095(02)00075-3

陈潇潇, 郭品文, 罗勇, 等. 2008. 中国不同等级雾日的气候特征 [J]. 气候变化研究进展, 4(2): 106–110. Chen Xiaoxiao, Guo Pinwen, Luo Yong. 2008. Climate characteristics of fog days of various categorics in China [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 4(2): 106–110.

Ding Y H, Liu Y J. 2014. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in recent 50 years and their relations with atmospheric humidity [J]. Science China: Earth Sciences, 57: 36–46. doi:10.1007/s11430-013-4792-1

Friedlein M T. 2004. Dense fog climatology [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 85(4): 515–517.

李子华, 张利民. 1992. 论山风对重庆雾形成和发展的作用 [J]. 重庆环境科学, 14(3): 7–11. Li Zihua, Zhang Limin. 1992. The effects of mountainous wind on the formation and developmemt of Chongqing fog [J]. Chongqing Environmental Science (in Chinese), 14(3): 7–11.

李子华, 刘端阳, 杨军. 2011. 辐射雾雾滴谱拓宽的微物理过程和宏观条件 [J]. 大气科学, 35(1): 41–54. Li Zihua, Liu Duanyang, Yang Jun. 2011. The microphysical processes and macroscopic conditions of the radiation fog droplet spectrum broadening [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(1): 41–54. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.01.04

林建, 杨贵名, 毛冬艳. 2008. 我国大雾的时空分布特征及其发生的环流形势 [J]. 气候与环境研究, 13(2): 171–181. Lin Jian, Yang Guiming, Mao Dongyan. 2008. Spatial and temporal characteristics of fog in China and associated circulation patterns [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13(2): 171–181.

Liu D Y, Niu S J, Yang J, et al. 2012. Summary of a 4-year fog field study in northern Nanjing. Part 1: Fog boundary layer [J]. Pure Appl. Geophys., 169(5–6): 809–819.

刘小宁, 张洪政, 李庆祥, 等. 2005. 我国大雾的气候特征及变化初步解释 [J]. 应用气象学报, 16(2): 220–230, 271. Liu Xiaoning, Zhang Hongzheng, Li Qingxiang, et al. 2005. Preliminary research on the climatic characteristics and change of fog in China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 16(2): 220–230, 271.

Lu C, Liu Y, Niu S, et al. 2013. Examination of microphysical relationships and corresponding microphysical processes in warm fogs [J]. Acta Meteorl Sin, 27: 832–848. doi: 10.1007/s13351-013-0610-0

罗宁, 文继芬, 赵彩, 等. 2008. 导线积冰的云雾特征观测研究 [J]. 应用气象学报, 19(1): 91–95. Luo Ning, Wen Jifen, Zhao Cai, et al. 2008. Observation study on properties of cloud and fog in ice accretion areas [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 19(1): 91–95.

马禹, 任宜勇, 陈春艳, 等. 2005. 40年来新疆雾的演变特征及大雾天气过程分析 [J]. 干旱区地理, 28(4): 474–478. Ma Yu, Ren Yiyong, Chen Chunyan, et al. 2005. Change characteristic of fog and analysis on weather process of heavy fog in Xinjiang in nearly 40 years [J]. Arid Land Geography (in Chinese), 28(4): 474–478. doi:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2005.04.011

毛冬艳, 杨贵名. 2006. 华北平原雾发生的气象条件 [J]. 气象, 32(1): 78–83. Mao Dongyan, Yang Guiming. 2006. Meteorological conditions for fog formation over North China Plain [J]. Meteorological (in Chinese), 32(1): 78–83.

Niu F, Li Z Q, Li C, et al. 2010. Increase of wintertime fog in China: Potential impacts of weakening of the eastern Asian monsoon circulation and increasing aerosol loading [J] . J. Geophys. Res., 115: D00K20. doi:10.1029/2009jd013484

Niu S, Lu C, Yu H Y, et al. 2010. Fog research in China: An overview [J] . Adv. Atmos. Sci., 27(3): 639–662. doi: 10.1007/s00376-009-8174-8

Niu S, Zhou Y, Jia R, et al. 2012. The microphysics of ice accretion on wires: Observations and simulations [J]. Sci. China Earth Sci., 55(3): 428–437.

濮梅娟, 严文莲, 商兆堂, 等. 2008. 南京冬季雾爆发性增强的物理特征研究 [J]. 高原气象, 27(5): 1111–1118. Pu Meijuan, Yan Wenlian, Shang Zhaotang, et al. 2008. Study on the physical characteristics of burst reinforcement during the winter fog of Nanjing [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27(5): 1111–1118.

Quan J, Zhang Q, He H, et al. 2011. Analysis of the formation of fog and haze in North China Plain (NCP) [J]. Atmos. Chem. Phys., 11 (15): 8205–8214. doi:10.5194/acp-11-8205-2011

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. Shi Jun, Cui Linli, He Qianshan, et al. 2010. The changes and causes of fog and haze days in eastern China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 65(5): 533–542.

孙丹, 朱彬, 杜吴鹏. 2008. 我国大陆地区浓雾发生频数的时空分布研究 [J]. 热带气象学报, 24(5): 497–501. Sun Dan, Zhu Bin, Du Wupeng. 2008. The temporal and spatial distribution of thick fog frequency in China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 24(5): 497–501. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2008.05.011

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, 18(3): 397–406. Sun Yu, Ma Zhenfeng, Niu Tao, et al. 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.

Teixeira J. 1999. Simulation of fog with ECMDF prognostic cloud scheme [J]. Q. J. R. Meteorol. Soc., 125: 529–552.

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 Liping, Chen Shaoyong, Dong Anxiang. 2005. The distribution and seasonal variations of fog in China [J]. Acta Geographica Sinca(in Chinese), 60(4): 689–697.

王丽萍, 陈少勇, 董安祥. 2006. 气候变化对中国大雾的影响 [J]. 地理学报, 61(5): 527–536. Wang Liping, Chen Shaoyong, Dong Anxiang. 2006. Impact of climate warming on fog in China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 61(5): 527–536.

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, 26(3): 649–654. Wu Dui, Zhao Bo, Deng Xuejiao, et al. 2007. A study on bad visibility over foggy section of freeway in Nanling mountainous region [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26(3): 649–654.

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): 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.

吴洪, 柳崇健, 邵洁, 等. 2000. 北京地区大雾形成的分析和预报 [J]. 应用气象学报, 11(1): 123–127. Wu Hong, Liu Chongjian, Shao Jie, et al. 2000. Analysis and forecast on fog formation in Beijing area [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 11 (1): 123–127.

严明良. 2011. 沪宁高速公路低能见度浓雾特征及其数值模拟研究 [D]. 南京信息工程大学, 21–23. Yan Mingliang. 2011a. The charaeteristies and numerical simulations of heavy fog along Nanjing to shanghai expressway [D]. Nanjing University of Information Science and Technology, 21–23.

严明良, 缪启龙, 袁成松等. 2011. 沪宁高速公路一次大雾过程的数值模拟及诊断分析 [J]. 高原气象, 30(2): 428–436. Yan Mingliang, Miu Qilong , Yuan Chengsong, et al. 2011b. Numerical simulation and diagnostic analysis of a heavy fog process in Shanghai-Nanjing expressway [J]. Plateau Meteor(in Chinese), 30 (2): 428–436.

Ye H C. 2008. The influence of air temperature and atmospheric circulation on winter fog frequency over northern Eurasia [J]. International Journal of Climatology, 29(5): 729–734. doi: 10.1002/joc.1741

尹志聪, 王会军, 郭文利. 2015a. 华北黄淮地区冬季雾和霾的时空气候变化特征 [J]. 中国科学: 地球科学, 45(5): 649–655. Yin Zhicong, Wang Huijun, Guo Wenli. 2015. Climatic change features of fog and haze in winter over North China and Huang-Huai area [J]. Science China: Earth Sciences(in Chinese), 45(5): 649–655.

尹志聪, 王会军, 袁东敏. 2015b. 华北黄淮冬季霾年代际增多与东亚冬季风的减弱 [J]. 科学通报, 60(15): 1395–1401. Yin Zhicong, Wang Huijun, Yuan Dongmin. 2015. Interdecadal increase of haze in winter over North China and the Huang–Huai Area and the weakening of the East Asia Winter Monsoon [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 60(15): 1395–1401.

于华英, 牛生杰, 刘鹏. 2014. 2007年12月南京大雾频发的多尺度特征研究 [J]. 热带气象学报, 30(1): 167–175. Yu Huaying, Niu Shengjie, Liu Peng. 2014. Multi-scale features of fog in December 2007 in Nanjing [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 30(1): 167–175.

章国材, 矫梅燕, 李延香. 2007. 现代天气预报技术和方法 [M]. 北京: 气象出版社, 371pp. Zhang Guocai, Jiao Meiyan, Li Yanxiang. 2007. Techniques and Methods of Contemporary Weather Forecast (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 371pp.

张人禾, 李强, 张若楠. 2014. 2013年1月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析 [J]. 中国科学: 地球科学, 44(1): 27–36. Zhang Renhe, Li Qiang, Zhang Ruonan. 2014. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013 [J]. Science China: Earth Sciences(in Chinese), 44(1): 27–36. doi:10.1360/zd-2014-44-1-27

张苏平, 龙景超, 尹跃进, 等. 2014. 我国东部沿海一次局地海雾抬升成云过程分析 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 44(2): 1–10. Zhang Suping, Long Jingchao, Yin Yuejin, et al. 2014. Analysis of the process of A local sea fog lifted into low cloud in eastern China [J]. Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 44(2): 1–10. doi:10.16441/j.cnki.hdxb.2014.02.001

赵博. 2005. 南岭山地高速公路浓雾能见度特征与影响因子研究 [D]. 中山大学, 15–19. Zhao Bo. 2005. Research on the Features And the Affect Factors of the Dense Fog over Highway in Nanling Mountain Area [D]. Sun Yat-sen University, 15–19.

中国气象局. 2003. 地面气象观测规范 [M]. 北京: 气象出版社, 8pp. China Meteorological Administration. 2003. Standard of the Surface Observation about Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese), 8pp.

Zhou Y, Niu S J, Lü J J.2013. The influence of freezing drizzle on wire icing during freezing fogevents [J]. Adv. Atmos. Sci., 30(4): 1053–1069. doi:10.1007/s00376-012-2030-y