

淮河流域中部强浓雾和重度霾环流形势对比分析*

王苏瑶^{1,2} 石春娥² 吴照宪³ 李欣然¹ 殷晗¹

1.安徽省淮北市气象局,安徽 淮北 235000

2.安徽省气象科学研究所/大气科学与卫星遥感安徽省重点实验室,安徽 合肥 230031

3.安徽省池州市气象局,安徽 池州 247000

摘要: 为探究重度霾向强浓雾转化的关键气象因子,利用多要素斜交旋转主成分分析法和 ERA5 再分析资料分别对准河流域中部地区连续 40a (1980-2019 年)强浓雾高发时段 (08 时) 247 个强浓雾和 96 个重度霾个例近地层环流客观分型,分析各类环流形势特征及强浓雾形成机制,对比大尺度环流形势相似的重度霾和强浓雾地面和边界层气象条件的差异。结果表明:(1)强浓雾时的近地层环流可分为 5 类,每一类形势场上,中国西北或东北都有一冷高压,淮河流域都有弱高压、锋面或倒槽等次天气尺度系统;雾区位于弱高压北部 (33%) 或内部 (19%)、锋前 (29%)、倒槽前 (11%) 或冷高压底部 (7%),地面为西南风、南风或东风,平均风速 ≤ 1.6 m/s; 925 hPa,研究区域位于暖脊内、低湿度区,平均风速 2 m/s;相对湿度随高度迅速下降,有利于地面辐射降温,平均降温幅度 ≥ 3.0 °C,形成深厚的近地层逆温,975 hPa 与地面温差 2-4 °C。(2)重度霾时近地面环流可分为 3 类,研究区域分别位于地面高压的前部 (56%)、底部 (19%) 和后部 (26%),但淮河流域无次天气尺度系统或系统较弱。(3)相似背景条件下重度霾不能发展为强浓雾的原因有:①水汽来源不足 (地面偏北风,占比 56%);②地面降温幅度偏低 (均值低于 3.1 °C),且风速偏大 (≥ 2.2 m/s),占比 45%。(4)研究区域附近的次天气尺度系统是重度霾能否发展为强浓雾的关键原因,该系统决定了局地气象条件,如是否具备小风、显著降温和充足的水汽来源。还分析了各环流形势下强浓雾的月际变化和生消时间。

关键词: 强浓雾; 重度霾; 环流形势; 客观分型; 对比分析; 次天气尺度系统

文章编号: Q23054

中图分类号: P426.4

文献标识码: A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2023.22000

Comparative analysis of the circulation patterns of extremely dense fog and heavy haze in the central area of the Huaihe River Basin

WANG Suyao^{1,2} SHI Chune² WU Zhaoxian³ LI Xinran¹ YIN Han¹

1. Huabei Meteorological Bureau, Huaibei 235000, Anhui, China

2. Anhui Institute of Meteorological Sciences/Anhui Province Key Laboratory of Atmospheric Sciences and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031, Anhui, China

3. ChiZhou Meteorological Bureau, Chizhou 247000, Anhui, China

Abstract: To explore the key meteorological factors for the transformation from heavy haze (HH) to extremely dense fog (EDF), the near-surface circulation patterns of 247 EDF and 96 HH cases in the central area of the Huaihe River Basin (HRB) at 08:00 (high-intensity period) for 40 years (1980-2019) were objectively classified respectively, using the multi-element oblique rotation principal component analysis method, together with the ERA5 reanalysis data. Based on the results of classification, the formation mechanisms for EDF under various

收稿日期 2023-06-05; 收修定稿日期 2023-12-05

作者简介 王苏瑶,女,1990年出生,硕士,高级工程师,主要从事短期天气预报及环境气象研究。E-mail:jslskxg@163.com。

通讯作者 石春娥, E-mail:shichune@sina.com,主要从事大气物理与大气环境研究。

资助项目:国家自然科学基金项目(41875171),安徽省重点研究和开发计划项目(1804a0802215),中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J022)

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41875171), Key Research and Development Project of Anhui Province (Grant 1804a0802215), and Innovative Development Special Project of China Meteorological Administration (Grant CXFZ2023J022)

circulation patterns were analyzed, and the differences of meteorological conditions in the surface and boundary layer of HH and EDF with similar large-scale circulation patterns were compared. The results show that: (1) The circulation of EDF can be divided into five types, with a cold high in northwest or northeast China for each type, and a sub-synoptic system in the HRB, such as weak high, frontal or inverted trough; The studied area is located in the north (33%) or inside (19%) of the weak high, in front of the front (29%) or the invert trough (11%) or at the bottom of the cold high (7%), prevailing with southwest, south or east wind with average wind speed lower than 1.6 m/s at ground level. At 925 hPa, the study area is located in the warm ridge and low humidity area, with an average wind speed of 2 m/s. In the vertical, the relative humidity (RH) decreases rapidly with height, and to below 60% at 925 hPa or 850 hPa, which is conducive to the surface radiation cooling, with an average temperature decrease range larger than 3°C, forming a deep near-surface inversion, with a temperature difference of 2-4°C between 975 hPa and the ground. (2) The near-surface circulation for HH can be divided into three types, which are all related to high pressure system. The study area is located in the front (56%), bottom (19%) or rear (26%) of the surface high, but there is no sub-synoptic scale system or the system is weak in the HRB. (3) The reasons for HH cannot develop into EDF include: ① insufficient water vapor source (due to northerly wind on the ground); ② low cooling range at ground level (the average lower than 3.1°C) with relative high wind speed (the average over 2.2 m/s). (4) The sub-synoptic scale system near the study area is the key reason for whether HH can develop into EDF. This system determines local meteorological conditions, such as whether there are light winds, significant cooling, and sufficient sources of water vapor. The inter-monthly variation and generation and disappearance time of EDF under various circulation patterns are also analyzed.

Key words: extremely dense fog, heavy haze, circulation pattern, objective classification, comparative analysis, sub-synoptic weather system

1 引言

强浓雾（能见度 $V < 200$ m）对各类交通运输安全都有不利影响，随着我国交通运输业的高速发展，其影响日益突出。因此，准确预报强浓雾的生消对防灾减灾具有重要意义。但目前数值天气预报模式中仍无对雾的直接预报，部分业务单位根据大气化学模式预报的气溶胶质量浓度来预报能见度，但这并非真正的雾数值预报（章国材，2016），更多的是对数值天气预报解释应用，如基于模式产品开展雾的诊断预报，往往空报率较高（Zhou & Du, 2010; Bergot and Koracin, 2021），因为在诊断预报方案中主要使用地面气象要素（Zhou and Du, 2010; 张庆奎等，2015），而地面要素受下垫面影响较大，如 300 m 以下风和湿度预报偏差较大（李耀孙等，2012; 石春娥等，2015）。因此，与其他常规要素的预报相比，雾的预报仍处于较低的水平（周斌斌等，2016）。

重度霾（ $V < 2$ km）本质上是比较严重的颗粒物污染（中国气象局，2019），根据能见度，也可以归为轻雾。欧洲学者基于大量的观测与对比研究，定义了“准雾”（quasi-fog, $V < 2$ km）（Bergot et al., 2007; Haeffelin et al., 2010, 2013），根据定义，准雾属于“轻雾”范畴，但更像重度霾。基于模式产品的雾的诊断预报的空报很多发生在观测为准雾，也即“重度霾”的情形（Shi et al., 2012; 石春娥等，2013）。

雾和霾都是发生在大气边界层内的低能见度天气现象，霾有空气质量指示意义，雾（或轻雾）与特定的天气系统相联系（吴兑等，2006），如陈东辉等（2017）采用天气学方法将环渤海地区 63 次区域性雾的地面形势分为锋面、高压前部、均压场和弱高压 4 种类型；许爱华等（2016）等分析了江西 54 次区域性平流雾的天气形势，发现地面形势多为弱低压倒槽和锋面前部的低压，其次为高压底部。然而，近年来

的研究发现长三角地区和长江中游地区的重度霾或 PM_{2.5} 污染时的地面形势背景也主要包括为冷锋、高压前后部的弱气压场或均压区（许建明等，2016；王莹等，2022）、甚至低压倒槽（戴竹君等，2016）。可见，雾和霾发生的天气形势比较相似。为提高雾预报的准确率，一些学者通过比较大尺度气象条件相似情况下的雾与准雾日地面和边界层气象条件的差异，探索雾形成的关键因子，并取得了一些有意义的结论。如 Fedorova 等（2013、2015）、Bossche 等（2016）研究发现，大尺度气象条件接近的雾日与非雾日，虽然夜间风速都在 2 m/s 以下，但有雾的夜晚风速、风向的变化比较大。但上述研究多为个例研究。Fitzjarrald 等（1989）研究发现雾形成与否取决于 100 m 以上是否存在干平流，上层若有干平流会促进下层的辐射冷却。但鲜有学者研究大尺度环流在重度霾发展为强浓雾中的作用，尽管孙彧等（2016）利用聚类方法对华北 2000-2013 年一定规模的雾和霾天气环流形势进行客观分型与对比分析，但对比的时次不同，因而不能排除地表气象要素昼夜变化的影响。

中国雾具有鲜明的地域和季节特征，其中，淮河流域是 6 大雾区之一（王丽萍等，2005），如位于淮河流域中部的安徽淮河以北东部地区属于强浓雾高发区（石春娥等，2021，2022）。为探讨环流形势在重度霾向强浓雾转化中的作用，本文以安徽淮河以北东部地区为例，通过对 40 年相同时次（08 时）的强浓雾与重度霾个例的地面与 925 hPa 环流形势进行客观分类，对比研究相似环流形势下强浓雾与重度霾的近地层气象要素的异同，揭示重度霾向强浓雾转化的关键因子。本文的重度霾特指强浓雾高发时段的低能见度现象，也即属于“准雾”。

2 资料与方法

2.1 资料

研究区域为图 1（石春娥等，2021）中的区域 2，位于淮河流域中部，境内下垫面较均一，地形平坦，区域南侧的淮河及众多支流、东南方向的洪泽湖可能对本地区雾的生消有一定的影响。境内 7 个地面观测站（图 1）的常规气象观测资料均来自安徽省气象信息中心，时间为 1980—2019 年。该资料用于确定强浓雾日和重度霾日。应用欧洲第五代 ECMWF 全球大气再分析资料（ERA5）

（<https://cds.climate.copernicus.eu/>）进行强浓雾日和重度霾日环流分型，该资料空间分辨率为 0.25°×0.25°；时间分辨率 1 h。另外，还用到生态环境部公布的淮北市和宿州市 2015-2019 年地面 PM_{2.5} 浓度资料（<http://106.37.208.233:20035/>）。

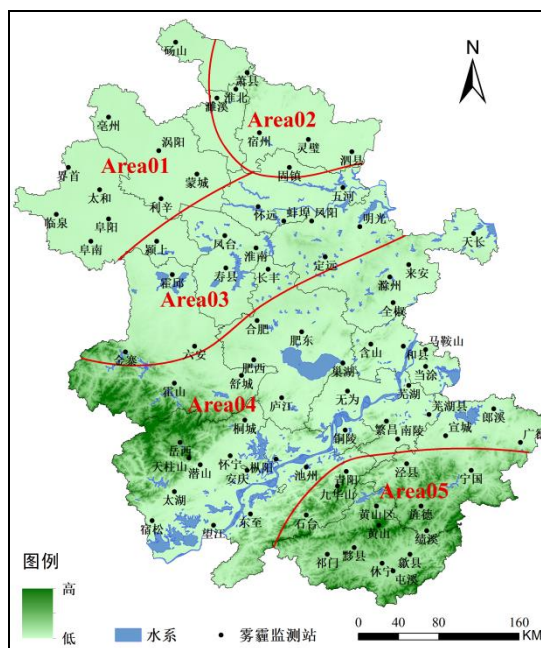


图 1 安徽省强浓雾分区结果（绿色表示地形高低，红线为各区分界线）（石春娥等，2021）

Fig. 1 Partition results of Anhui province based on the consistency of extremely dense fog

（Areas shaded in green indicate the elevation of the terrain. The red lines are the regional boundaries）（Shi et al., 2021）

2.2 研究方法

常规气象观测对雾的记录并不分等级，本文的强浓雾、重度霾是根据有关标准（中国国家标准化管理委员会，2011；中国气象局，2010），综合利用能见度、相对湿度、天气现象等确定的，方法为：利用 08 时数据，当能见度（ V ）低于 0.2 km,相对湿度（ RH ） $>90\%$,且当日天气现象记录里有“雾”,则记为强浓雾；同样可诊断“浓雾”（ $0.2\text{ km}\leq V<0.5\text{ km}$, $RH>90\%$ ）和“大雾”（ $0.5\text{ km}\leq V<1.0\text{ km}$, $RH>90\%$ ），排除雾和雨，当出现能见度（ V ）低于 2.0 km,若 $RH\leq 90\%$,即为重度霾，否则，为“准雾”（石春娥等，2021）。雾的发生显著地受下垫面条件的影响（Nomoto, 2003; Izett et al.,2019; Akimoto et al., 2015），为减少局地下垫面因子的影响，本文根据石春娥等（2022）选取区域性强浓雾个例，当研究区域内有 3 个站同时出现强浓雾，或者同时有 2 个站出现强浓雾并有 2 个站出现浓雾，算一个区域性强浓雾日（简称“强浓雾日”）。因为 2016 年之前一般气象站一天只有 3 次或 4 次能见度观测，其中，08 时是区域性强浓雾的峰值时间，本文统一应用 08 时样本，1980—2019 年 08 时研究区域内有强浓雾日 247 个。本研究目的是为了明晰重度霾向强浓雾转化的关键因子，因此，选取 08 时的重度霾个例进行对比，参考中国气象局（2019），即：当区域内有 3 个及以上的站点能见度在 1—2 km,则算一个区域性重度霾日（简称“重度霾日”），1980—2019 年研究区域内共出现重度霾日 96 个。需要说明的是，这里没有考虑相对湿度和 $PM_{2.5}$ 质量浓度，也就是说，本文的“重度霾”包含上文定义的“准雾”。根据 2015 年之后的个例，本研究确定的重度霾日 08 时淮北市和宿州市 $PM_{2.5}$ 浓度超过 $75\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ （轻度污染等级下限值）占比 94%，宿州市相对湿度 71%-90%，淮北市相对湿度 85%-99%，表明本研究的重度霾个例都属于重度霾或雾霾混合的情况。

环流分型是将环流特征相似的样本场按一定的规则进行聚类。雾、霾都是发生在边界层内的天气现象，

石春娥等(2022)的研究表明,安徽沿淮淮北多雾与少雾的1月,海平面气压场和925 hPa风场存在明显的差异,因此,本研究运用COST733分型软件,结合ERA5资料,同时对30~40 N, 110~125 E范围的海平面气压场和925 hPa高度场进行斜交旋转分解,分别对上述247个强浓雾日和96个重度霾日08时近地层环流形势进行聚类,确定环流形势总类别的原则是各类环流总的方差贡献率达到85%。根据分类结果,可得到各类环流形势下海平面和925 hPa气温、湿度和风的分布以及研究区域中心各环流形势下的平均温、湿度垂直分布。COST733分型软件(<http://www.cost733.org>) (Philipp et al., 2010)中采用T-模态斜交旋转主成分分析法(简称TPCA) (Huth et al., 2008),充分考虑了数据矩阵内部的特殊结构及主成分之间的关系,可以准确地反映原始环流场的特征,该软件已在国内得到广泛应用(Zhao et al., 2013; 许建明等, 2016)。

吴兑(2006)指出必须环境空气有足够的饱和度时,霾滴才能越过饱和驼峰、吸湿增长成为雾滴,降温是空气达到饱和的最主要、且最重要的物理过程;雾过程的降温机制主要有湍流、辐射和陆-气相互作用(Bergot and Koracin, 2021),湍流对雾的作用比较复杂,过强则雾不能形成,过弱也会遏制雾的发展(Zhou and Ferrier, 2008)。没有湍流和辐射的直接监测资料,本文利用强浓雾次数最多的灵璧站地面资料,进一步分析各类环流形势下的风速和降温幅度(与前一日20时相比)统计特征(图2),根据925hPa的相对湿度反推辐射降温的条件。下面首先分析强浓雾的各类环流特征及风、温、湿分布特征;然后,分析重度霾的各类环流特征及风、温、湿分布特征,重点是与强浓雾的环流形势对比,分析未能成雾的原因。

3 强浓雾的环流形势分类结果

强浓雾日08时的环流形势可分为5类。各类环流的共同之处是,海平面气压场上,中国西北或东北都有一冷高压,研究区域位于此高压前部或底部的均压区内,除了最后一类,影响强浓雾形成的天气系统除了冷高压,淮河流域都有一个次天气尺度的系统,依据此系统对各类环流形势命名为弱高压北部型(fog-1, 占比33%)、锋前型(fog-2, 29%)、弱高压内部型(fog-3, 19%)、倒槽型(fog-4, 11%)和高压底部型(fog-5, 7%),这与前人关于环渤海地区雾(陈东辉等, 2017)和江西雾(许爱华等, 2016)地面形势分类的结论基本一致。

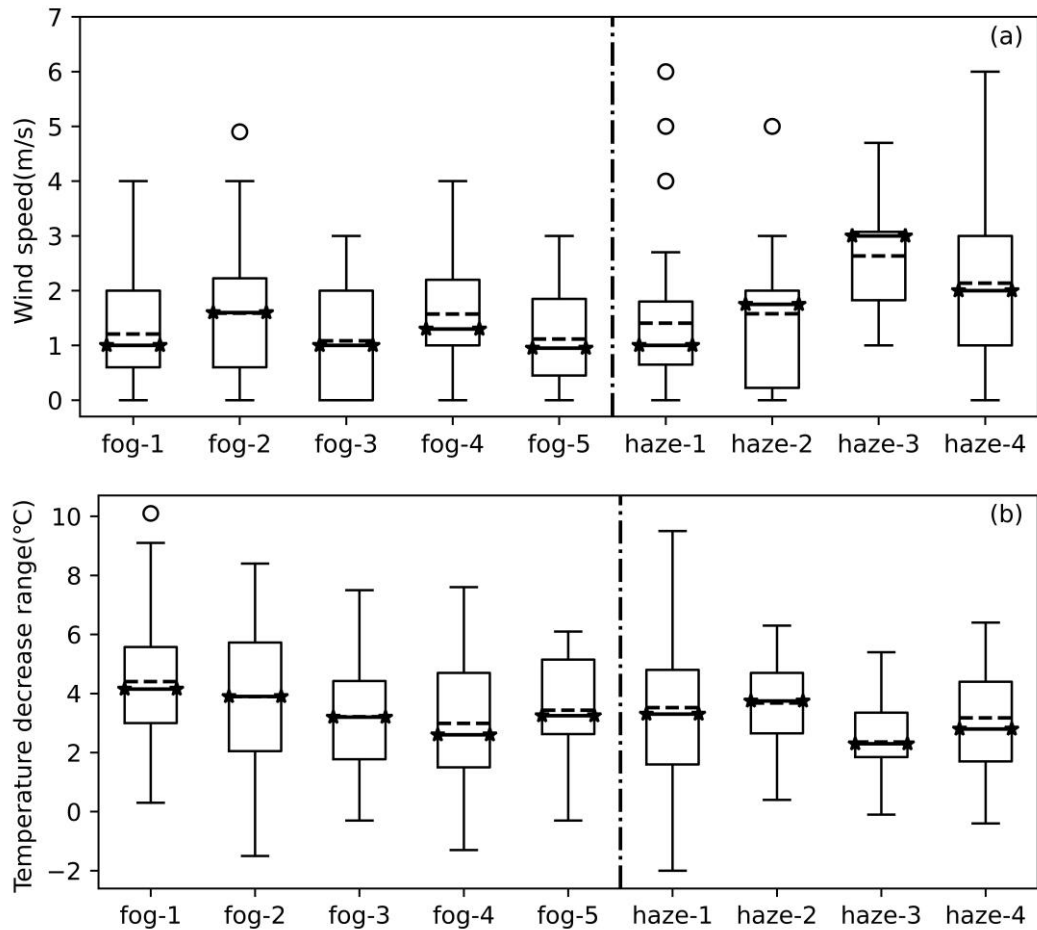


图 2 灵璧站 08 时各类强浓雾和重度霾对应的风速 (a) 及降温幅度 (b) 箱线图 (上下两个横线表示最大、最小值; 长方形中的虚线表示平均值, 实线加五角星表示中值; 长方形的下、上边分别为第一、三四分位值, 圆圈为异常值)

Fig. 2 Box-plot of wind speed (a) and temperature decrease range (b) for various types of extremely dense fog (EDF) and heavy haze (HH) at 08:00 BT of Lingbi Station (the upper and lower lines beyond a rectangle represent maximum and minimum; dashed line and solid line with stars within a rectangle represent mean and median; the lower and upper borders of a rectangle represent the 25th and 75th. The circles are outliers.)

3.1 弱高压北部型

海平面气压场 (图 3b) 上, 冷高压中心位于蒙古高原, 淮河流域位于高压前部的均压场中, 安徽南部有一弱高压; 雾区位于弱高压北部, 10 m 风场上, 可分辨出弱的西南偏西风, 有利于地面增湿, 同时有弱的风向辐合。925 hPa, 高压中心位于内蒙中西部, 雾区位于高压东南部等高线稀疏区, 盛行西北风 (图 3a,c), 河南到淮河流域西部为一暖舌, 雾区在暖舌下游, 有弱暖平流, 有助于加强近地层逆温; 研究区域相对湿度低于 60%, 上游相对湿度低于 50%, 结合比湿分布, 研究区域有干平流, 有助于地面辐射冷却 (Fitzjarrald et al., 1989)。由图 3d 可见, 相对湿度随高度上升迅速下降 (850 hPa 相对湿度约为 40%), 地面至 975 hPa 为逆温层, 1000 hPa 与地面的温差超过 3°C。由图 2 可见, 灵璧站降温幅度中值与均值都超过 4°C, 且地面风速上四分位值低于 2 m/s, 说明此类雾以辐射雾为主 (Tardif et al., 2007)。

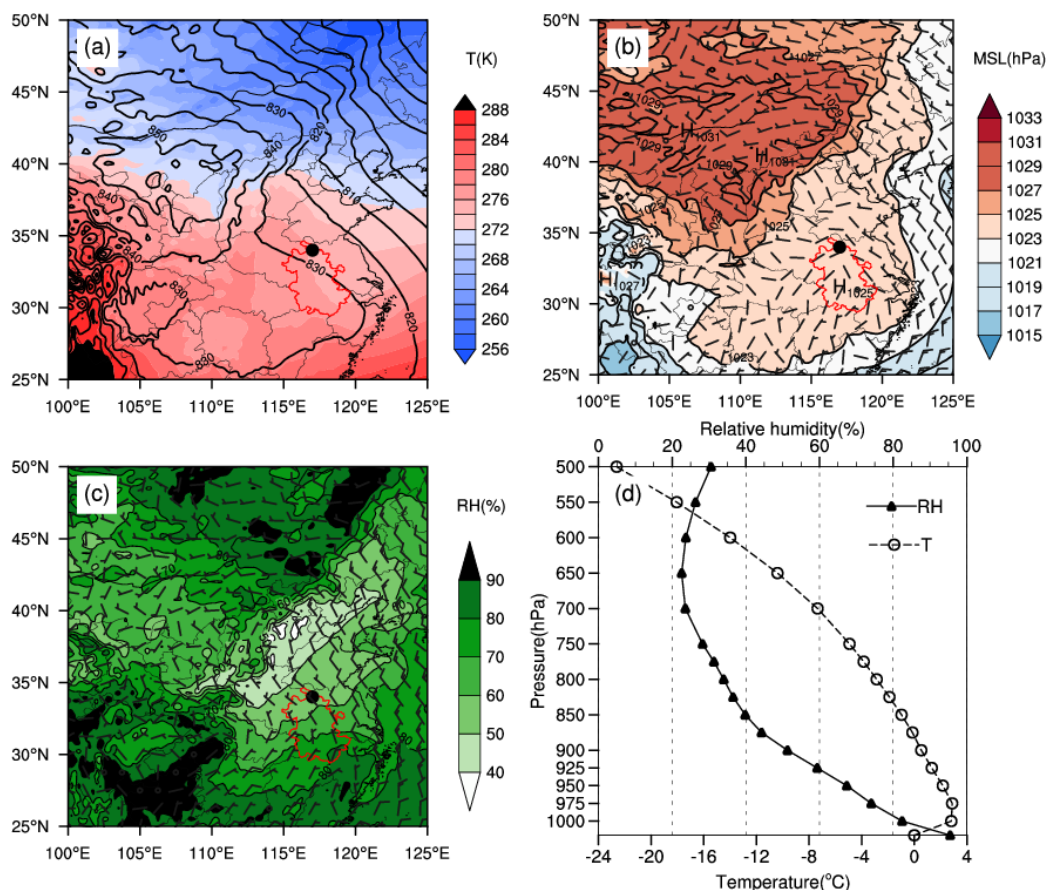


图3 弱高压北部型雾：（a）925 hPa 高度场(实线，单位：gpm)及温度场（填色，单位：K）、（b）海平面气压场（填色，单位：hPa）及10 m 风向杆、（c）925 hPa 的风及相对湿度(填色，单位：%)、（d）研究区域中心点(33.5 E, 117.5 N)温度、相对湿度平均廓线（图 a,b,c 中黑色实心圆表示研究区域的中心位置，也是层结曲线绘制点,以下同类图相同）

Fig.3 Fog pattern of north to weak High pressure: (a) Geopotential height (solid line, unit: gpm) and temperature (shaded, unit: K) at 925 hPa, (b) Sea level pressure (solid line, unit: hPa) and wind barb at 10 m, (c) Wind barb and relative humidity (shaded, unit: %) at 925 hPa, (d) Profiles of temperature and relative humidity at the center point of studied area (33.5 E, 117.5 N) (The black solid circles in figure a, b and c denote the center of studied area, also starting site of the temperature and relative humidity profiles, same below)

3.2 锋前型

锋前型（图4）环流形势的主要特征为925 hPa 高度场上华北经河南至湖南有一低槽，等高线与等温线交角较大，说明地面有锋区存在。海平面气压场上，西北和长江流域下游地区分别为2个高压区，结合925 hPa 温度、高度场及地面风场，可以看出锋面存在于两个高压之间，雾区处于锋前，地面盛行2 m/s 的偏南风。925 hPa，研究区域位于湿度低值区，相对湿度低于60%，盛行西南风，暖平流明显，有弱的湿度平流。垂直方向，相对湿度随高度上升迅速下降，850 hPa 相对湿度低于40%，975 hPa 以下为逆温层（图4d）。上层低湿有利于地面辐射降温，尽管近地面为偏南风，存在暖平流，灵璧站地面降温幅度均值和中位值仍达3.9°C（图2），各类中第二；另外，锋前易出现锋面逆温，尽管地面降温幅度不及第一类，但975 hPa 与地面温差超过第一类，达3.5°C（图4d）。此类型的雾地面风速偏大，且925 hPa 有暖湿平流，

根据平流雾的定义（杨军等，2011），可能以平流雾为主，或者说平流雾的占比较大。

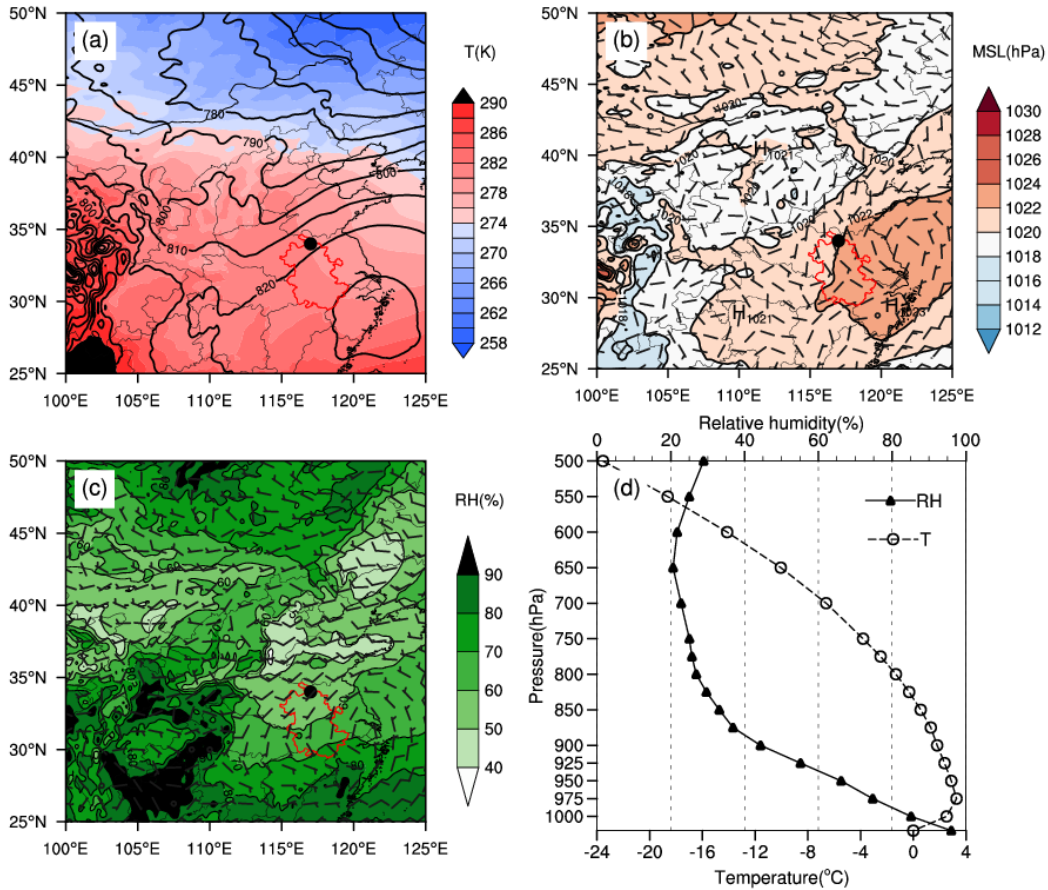


图4 锋前型雾：（a）925 hPa 高度场(实线，单位：gpm)及温度场（填色，单位：K）、（b）海平面气压场（填色，单位：hPa）及 10 m 风向杆、（c）925 hPa 风场及相对湿度(填色，单位：%)、（d）研究区域中心点(33.5 E, 117.5 N)温度、相对湿度平均廓线

Fig.4 Fog pattern prefrontal: (a) Geopotential height (solid line, unit: gpm) and temperature (shaded, unit: K) at 925 hPa, (b) Sea level pressure (solid line, unit: hPa) and wind barb at 10 m, (c) Wind barb and relative humidity (shaded, unit: %) at 925 hPa, (d) Profiles of temperature and relative humidity at the center point of studied area (33.5 E, 117.5 N)

3.3 弱高压内部型

弱高压内部型的海平面气压场上华北到蒙古国为大范围高压系统，苏皖北部到鲁南由一弱高压控制，雾区位于弱高压内部，地面接近静风（图 5b）。925 hPa，高压中心位于河套地区，研究区域位于高压东南部的均压区内，盛行偏北到西北风，相对湿度 60%~70%，上游为一暖脊，也是相对湿度和比湿低值区，因此，存在暖干平流，风向与等温线交角不大，暖平流较弱（图 5a、c）。垂直方向，相对湿度随高度上升而迅速下降，850 hPa 相对湿度约 45%，925 hPa 和 850 hPa 的相对湿度都高于前 2 类，因此，地面辐射降温不及前 2 类，如灵璧站的降温幅度中值为 3.2°C，低于前 2 类，尽管逆温层顶也达到 975 hPa，但 975 hPa 与地面温差仅 2°C。但是，本类型中地面风速最低，均值仅 1.1 m/s（图 2），说明湍流最弱。

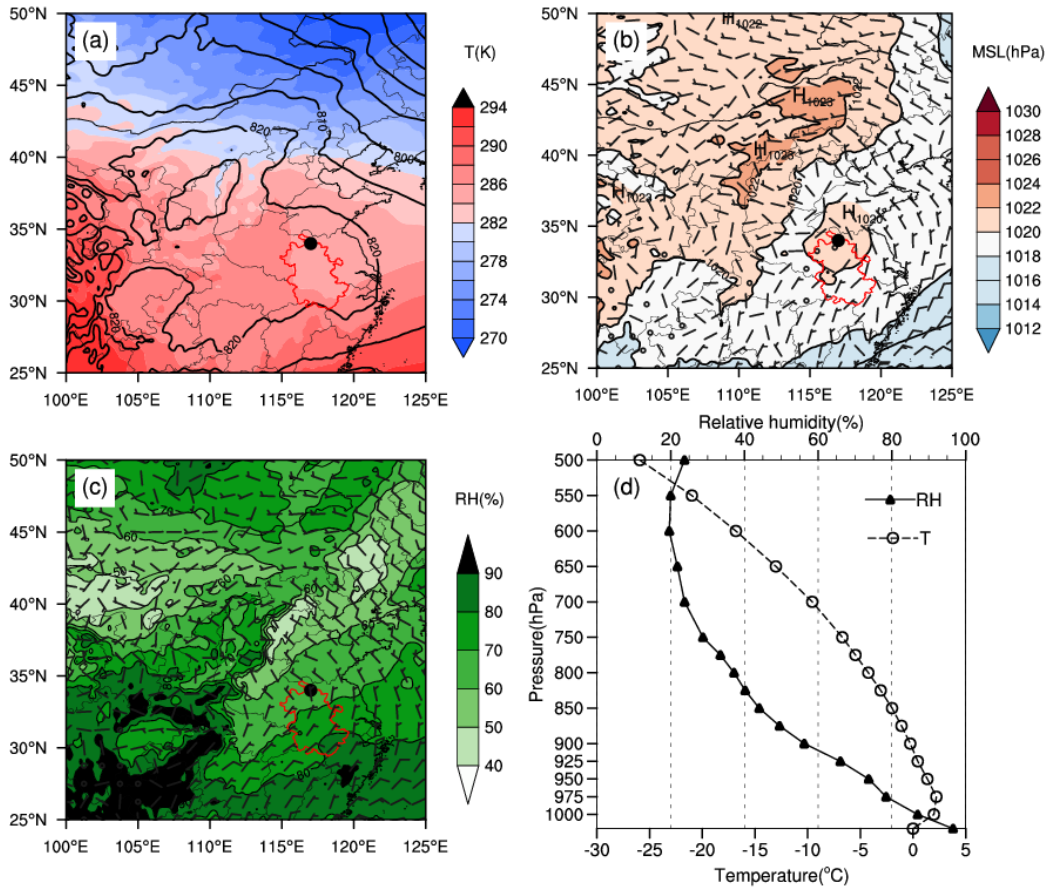


图 5 弱高压内部型雾：（a）925 hPa 高度场(实线，单位：gpm)及温度场（填色，单位：K）、（b）海平面气压场（填色，单位：hPa）及 10 m 风向杆、（c）925 hPa 风场及相对湿度(填色，单位：%)、（d）研究区域中心点(33.5 E, 117.5 N)温度、相对湿度平均廓线

Fig.5 Fog pattern inside weak High pressure: (a) Geopotential height (solid line, unit: gpm) and temperature (shaded, unit: K) at 925 hPa, (b) Sea level pressure (solid line, unit: hPa) and wind barb at 10 m, (c) Wind barb and relative humidity (shaded, unit: %) at 925 hPa, (d) Profiles of temperature and relative humidity at the center point of studied area (33.5 E, 117.5 N)

3.4 倒槽型

冷高压中心位于蒙古国，与第 1 类相比，高压前部等压线较密；同时华西川渝地区有一低压中心，雾区位于华西低压前的均压区内，地面为较弱的东南偏东风（图 6b）。925 hPa，倒槽从华西低压伸至山东半岛，河北至山西一带等温线密集且与等高线交角较大（图 6a），表明地面冷高压前部伴有冷锋南下，研究区域处于地面冷锋前部的倒槽附近，盛行西南风（图 6c），结合温、湿度分布（图 6a），雾区上空有明显的暖湿平流；在锋前增温和暖平流的共同作用下，形成深厚的逆温层，975 hPa 与地面温差达到 4°C（图 6d），5 类中最大。垂直方向，925 hPa 以下湿度仍随高度上升而迅速下降，但 925 hPa-850 hPa 的相对湿度比前 3 类都大，因而地面降温幅度不及前 3 类，灵璧站的降温幅度各类中最低，中值仅 2.6°C（图 2），但有低风速、强逆温，且地面东南偏东风有充足的水汽输入，即使降温幅度不及其它类型，也形成了强浓雾。此类型的雾地面风速较弱，925 hPa 有明显的暖湿平流，且 925 hPa 的相对湿度偏大，根据平流雾的定义（杨军等，2011），有平流雾的贡献。以淮北站观测资料为例，根据许爱华等（2016）依据 925 hPa 暖

湿平流及前一日 20 时云量定义平流雾的方法，普查该类型中有 32% 的雾为平流雾。

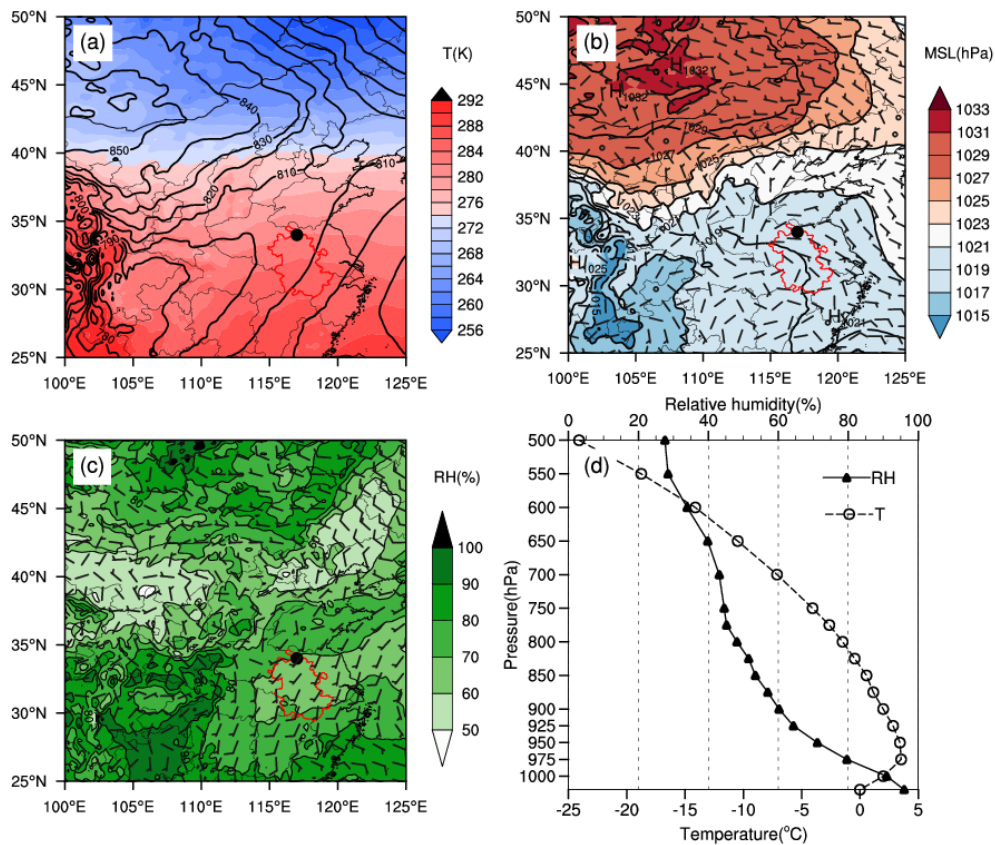


图 6 倒槽型雾：（a）925 hPa 高度场(实线，单位：gpm)及温度场（填色，单位：K）、（b）海平面气压场（填色，单位：hPa）及 10 m 风向杆、（c）925 hPa 风场及相对湿度(填色，单位：%)、（d）研究区域中心点(33.5 E, 117.5 N)温度、相对湿度平均廓线

Fig.6 Fog pattern with inverted Trough: (a) Geopotential height (solid line, unit: gpm) and temperature (shaded, unit: K) at 925 hPa, (b) Sea level pressure (solid line, unit: hPa) and wind barb at 10 m, (c) Wind barb and relative humidity (shaded, unit: %) at 925 hPa, (d) Profiles of temperature and relative humidity at the center point of studied area (33.5 E, 117.5 N)

3.5 高压底部型

与前 4 类相比，高压底部型地面高压主体位置偏东（图 7b），中心位于内蒙古东部，雾区位于高压底部的等压线稀疏区，冷空气从东路南下，山东半岛东部洋面上偏北风风速达到 4 m/s，研究区域盛行 2 m/s 左右的偏东风；半岛南部的偏东风不仅有助于将东部洋面水汽向雾区输送，也会给雾区带来冷空气，既有助于增湿也有助于降温，说明这类环流形势下的雾具有平流雾的特点。925 hPa，研究区域位于高压内部，盛行偏东风，位于暖脊内，相对湿度 70%~80%，温、湿度平流均不明显(图 7a,c)。从湿度廓线看，975 hPa 至 925 hPa 相对湿度随高度下降较慢且偏高，不利于地面辐射降温，因此，此类环流形势下贴地逆温强度最弱，975 hPa 与地面温差不到 2°C。地面降温幅度 5 类中居中，中值超过 3.2°C，降温原因可能源于地面有冷空气入侵。

表 1 总结了上述各环流类型研究区域的地面和边界层气象要素特征。各类环流形势下，地面气象要素

大多具有辐射雾的典型特征：明显降温（均值 $\geq 3.0^{\circ}\text{C}$ ）、贴地逆温、静小风（灵璧风速均值 $\leq 1.6\text{ m/s}$ ）。另外，地面无北风，基本上都以偏南风为主，有充足的水汽来源；925 hPa，以干、暖平流为主，平均风速 2 m/s；边界层存在及地逆温，大多存在上干下湿结构。如前所述，部分类型也具有平流雾的特征，如锋前型、倒槽型和高压底部型。

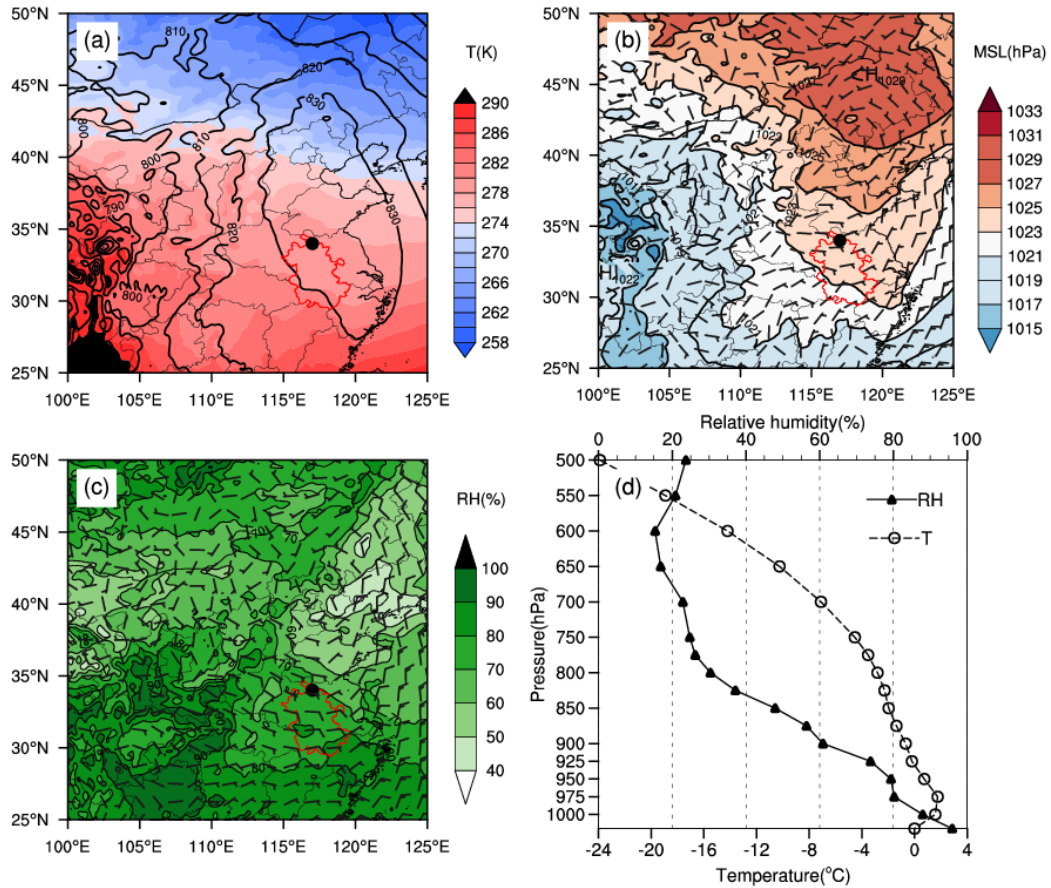


图 7 高压底部型雾：（a）925 hPa 高度场(实线，单位：gpm)及温度场（填色，单位：K）、（b）海平面气压场（填色，单位：hPa）及 10 m 风向杆、（c）925 hPa 风场及相对湿度(填色，单位：%)、（d）研究区域中心点(33.5°E, 117.5°N)温度、相对湿度平均廓线

Fig.7 Fog pattern in the bottom of High pressure: (a) Geopotential height (solid line, unit: gpm) and temperature (shaded, unit: K) at 925 hPa, (b) Sea level pressure (solid line, unit: hPa) and wind barb at 10 m, (c) Wind barb and relative humidity (shaded, unit: %) at 925 hPa, (d) Profiles of temperature and relative humidity at the center point of studied area (33.5°E, 117.5°N)

表 1 强浓雾不同环流型地面和 925 hPa 气象要素特征

Table 1 Characteristic of meteorological parameters for different circulation patterns of EDF

环流形势	弱高压北部型 (33%)	锋前型 (29%)	弱高压内部型(19%)	倒槽型 (11%)	高压底部型 (7%)
10 m 风向、风速 (m/s)	SW、~0	S、~2	静风	ESE、~0	E、2
925hPa 风向、风速 (m/s)	NW、~2	SW、~2	N、~2	SW、~2	ESE、~2
925hPa 相对湿度	50%~60%	50%~60%	60%~70%	60%~70%	$\geq 70\%$
925hPa 温度平流	弱暖	暖	弱暖	暖	不明显
925hPa 湿度平流	干	湿	干	湿	不明显
975hPa 与地面温差 ($^{\circ}\text{C}$)	3.0	3.5	2.0	4.0	2.0
灵璧地面平均降温 ($^{\circ}\text{C}$)	4.4	3.9	3.2	3.0	3.4
灵璧地面平均风速 (m/s)	1.2	1.6	1.1	1.6	1.1

3.6 强浓雾的月际变化和生消时间

为加深对各类强浓雾形成背景和影响的理 解，分析了各类强浓雾的月际变化（图 8）和平均生消时间（表 2）。由图 8 可见，弱高压北部型主要出现在冬季（12、1、2 月）；锋前型在秋末至初春各月（11 月—3 月）出现次数比较均衡；弱高压内部型主要出现在 10—11 月；倒槽型主要出现在 11—12 月，高压底部型主要出现在 11 月。这种分布与淮河流域的季风气候有关。如我国冬季主要受大陆冷高压控制，冬季冷高压背景下的弱高压北部型最多；秋季是夏季风向冬季风过渡的季节，各种天气系统都有可能出现。3—4 月控制我国大陆的西伯利亚气团和热带海洋气团势力相当，互有进退，是锋系及气旋活动最盛的时期（朱乾根等，2007），因而，弱高压北部型显著减少，锋前型的比例最高。

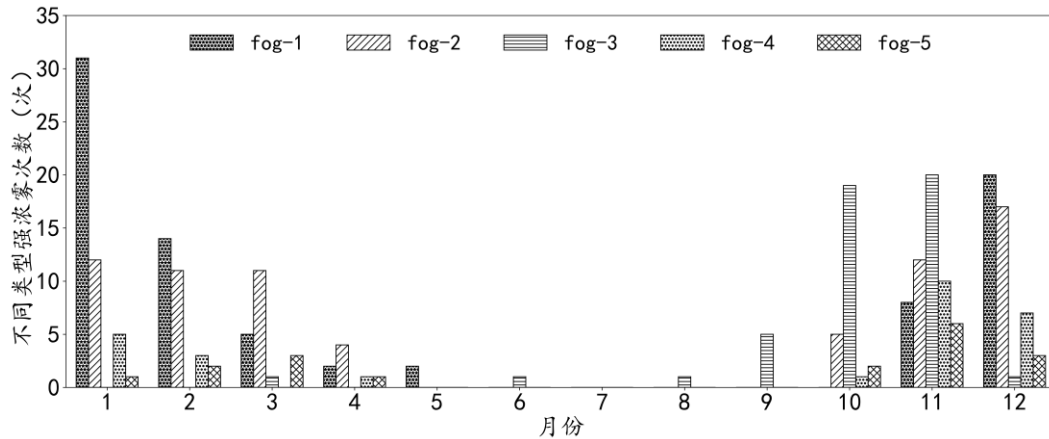


图 8 1980—2019 年各类型区域性强浓雾的月际变化

Fig.8 Monthly variation of REDF with different circulation types from 1980 to 2019

上述强浓雾个例中有 21 个出现在 2016—2019 年，基于逐时资料统计了各类强浓雾的开始和结束时间（表 2）。由表可见，强浓雾最早开始于 23 时，最迟消散于 11 时，平均而言，前 3 类平均开始时间接近，可能因为这 3 类都是以辐射雾为主，地面降温主要为辐射降温。倒槽型和高压底部型样本较少，这 2 类强浓雾开始较早，地面以偏东风为主，有冷空气入侵，同时偏东风也往往伴随水汽输入，有助于雾的形成。雾的平均消散时间都在日出后 1—2 h，说明消散机制主要源于日出后地面升温。除了倒槽型，各类强浓雾的平均持续时间差别不大。倒槽型强浓雾持续时间较长，可能与深厚的逆温及近地层高湿层较厚有关（Shi et al., 2012）。

表 2 各环流形势的强浓雾开始、结束及持续时间

Table 2 Start time, end time, duration of REDF with different circulation patterns

环流形势 (个例数)	最早/平均开始时间	最晚/平均消散时间	平均持续时间 (h)
弱高压北部 (5)	03 时/05 时	11 时/09 时	4.0
锋前型 (9)	23 时/05 时	11 时/09 时	4.7
弱高压内部型 (4)	00 时/04 时	09 时/09 时	5.0
倒槽型 (1)	00 时/00 时	08 时/08 时	8.0
高压底部型 (2)	00 时/01 时	09 时/09 时	5.5

4 重度霾的环流形势分类结果

08 时重度霾的环流形势可分为 4 类，每一类环流形势都与高压系统有关，也都可找到与之相似的强浓雾环流形势，根据研究区域与高压系统的相对位置给 4 类环流形势命名（表 3）。表 3 总结了各类形势下

研究区域地面、925 hPa 和边界层气象要素特征。对应地，图 2 也给出了灵璧站重度霾日各类环流形势下 08 时风速及降温幅度。下面重点分析霾的各类环流形势特征及不能成雾的原因，由于前 2 类形势相似，研究区域都位于高压东南部的均压区内，分析时将这 2 类合并为一类，分为 1 型和 2 型。

4.1 高压前部型(haze-1, haze-2)

高压前部型的 2 类合计占比 56%。海平面气压分布与弱高压北部型强浓雾(fog-1)的形势相似，这里仅给出高压前部 1 型的环流形势等（图 9）。霾区位于高压前部的均压场中，地面为西北偏北风，接近静风；其中，2 型冷高压主体位置略偏南，强度偏弱，1、2 型中心平均气压分别为 1035 hPa，1030 hPa。925 hPa 位势高度分布与海平面气压分布类似，研究区域位于高压前部的等高线稀疏区内，与海平面气压分布相似，2 型高压中心位置偏南（在 35°N 附近），这使得这两型 925 hPa 的风向、风速、相对湿度都有差异（表 3），并进一步影响到温、湿度垂直分布。925 hPa，1、2 型研究区域分别是西北风 2 m/s 和偏北风 4 m/s，相对湿度分别为 60%~70%和 40%~50%，2 型有更强的干平流，且冷平流明显，使得这一类型湿度更低，低湿有利于地面辐射降温，形成贴地逆温，2 型逆温顶高达到 975 hPa，由于上层是冷平流，975 hPa 与地面温差低于强浓雾，仅 2.5℃。第 2 型环流下灵璧站地面降温幅度仅低于强浓雾的弱高压北部型（图 2）。第 1 型，研究区域 925 hPa 风向与等温线接近平行，温度平流不明显，湿度偏高，地面辐射降温略低于第 2 型，逆温层仅存在于地面至 1000 hPa（图 9d）。

表 3 重度霾不同环流型地面和 925hPa 气象要素特征

Table 3 Characteristic of meteorological parameters for different circulation patterns of heavy haze (HH)

环流形势	高压前部型		高压底部型	高压后部型
占比	1 型 (37%)	2 型 (19%)	19%	26 %
相似的强浓雾形势	弱高压北部型		高压底部型	锋前型
10 m 风向、风速 (m/s)	NNW、~0.0	NNW、~0.0	E、~2.0	SSE、~2.0
风向、风速 (m/s)	NW、2.0	N、~4.0	E、2.0	SW、~4.0
925hPa 相对湿度	60%~70%	40%~45%	70%~80%	60%~70%
温度平流	不明显 (冷)	冷	不明显	暖
湿度平流	干	干	不明显	湿
逆温顶	1000 hPa	975 hPa	无逆温	975 hPa
逆温温差 (°C)	1.5	2.5	/	3.0
灵璧 平均降温 (°C)	3.5	3.7	2.3	3.1
平均风速 (m/s)	1.4	1.6	2.7	2.2

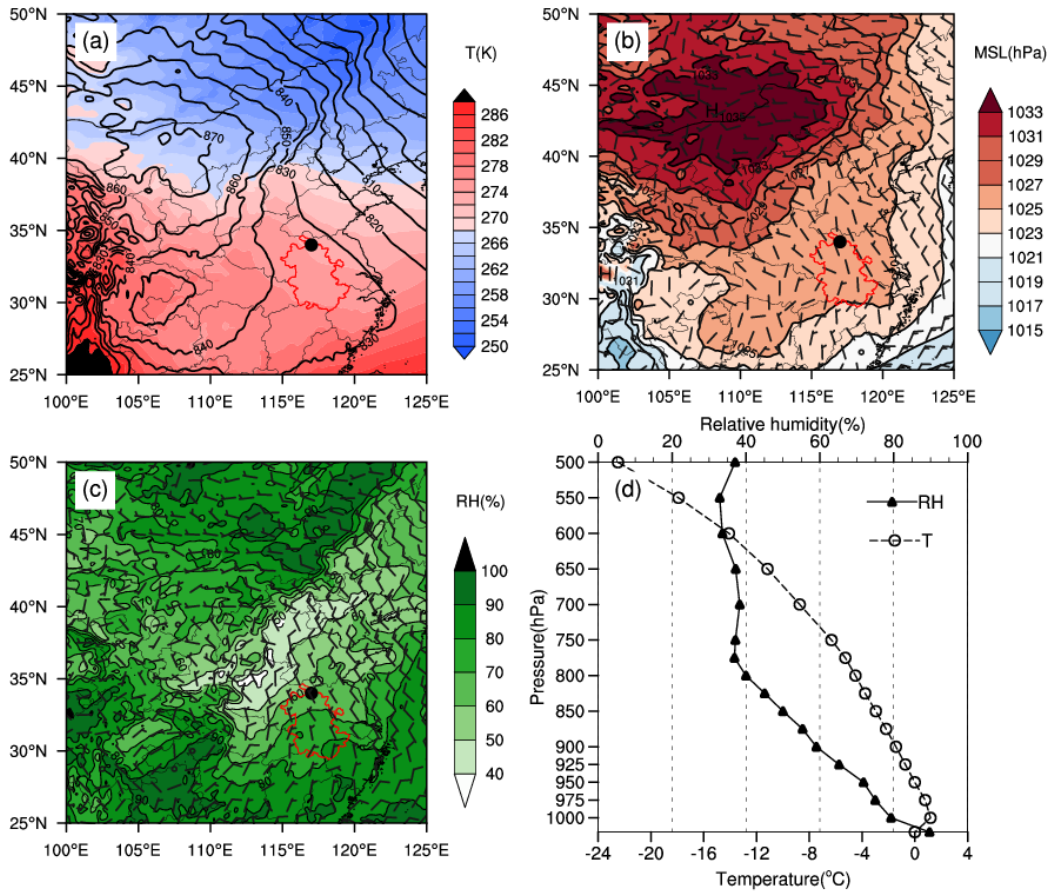


图9 高压前部1型霾：（a）925 hPa 高度场(实线，单位：gpm)及温度场（填色，单位：K）、（b）海平面气压场（填色，单位：hPa）及10 m 风向杆、（c）925 hPa 风场及相对湿度(填色，单位：%)、（d）研究区域中心点(33.5 E, 117.5 N)温度、相对湿度平均廓线

Fig.9 Haze pattern 1 in the front of High pressure: (a) Geopotential height (solid line, unit: gpm) and temperature (shaded, unit: K) at 925 hPa, (b) Sea level pressure (solid line, unit: hPa) and wind barb at 10 m, (c) Wind barb and relative humidity (shaded, unit: %) at 925 hPa, (d) Profiles of temperature and relative humidity at the center point of studied area (33.5 E, 117.5 N)

与强浓雾的弱高压北部型相比，霾的高压前部型海平面气压场上东部地区无弱高压，淮河流域为一致的偏北风（雾时受弱高压影响，研究区域为西南风，有利于淮河及其支流的水汽输入），有利于干冷空气扩散南下，同时也有利于华北高浓度大气颗粒物向南传输，形成重污染（Shi et al., 2018; Jia et al., 2021），但近地层水汽条件差，不利于雾的形成。从图2可见，高压前部型重度霾与强浓雾各型的风速和降温幅度差异不大。可见这一类重度霾没有发展到强浓雾，主要是因为地面水汽条件不好。

4.2 高压底部型 (haze-3)

高压底部型霾与高压底部型雾(fog-5)的海平面气压分布形势相似，比较而言，霾时高压中心强度较弱，东北地区气压梯度较小，淮河流域气压梯度较大，研究区域10 m 平均风都是偏东风2 m/s；但雾时江苏东部洋面为4 m/s 偏北风，而霾时江苏东部洋面为2 m/s 偏东风（图10），这可能使得雾时近地层有冷空气入侵，且伴随水汽输入，而霾时近地面冷空气较弱。另外，近地面弱的偏东风有利于山东、苏北的污染物向研究区域传输（Shi et al, 2018; 王苏瑶等, 2023）。925 hPa，研究区域位于高压底部的等高线稀疏区（图

10a), 风、温、湿度条件与雾时相似, 无明显温、湿度平流, 且属于湿度高值区(相对湿度大于 70%), 不利于地面辐射降温, 近地层气温随高度下降, 无逆温层(图 10d)。总之, 近地面既无冷空气入侵, 辐射降温又弱, 因而, 地面降温幅度各组中最低, 同时, 地面风速最高, 均值和中值都大于 2 m/s(图 2), 较大的风速有助于近地面湍流混合, 不利于雾的形成。

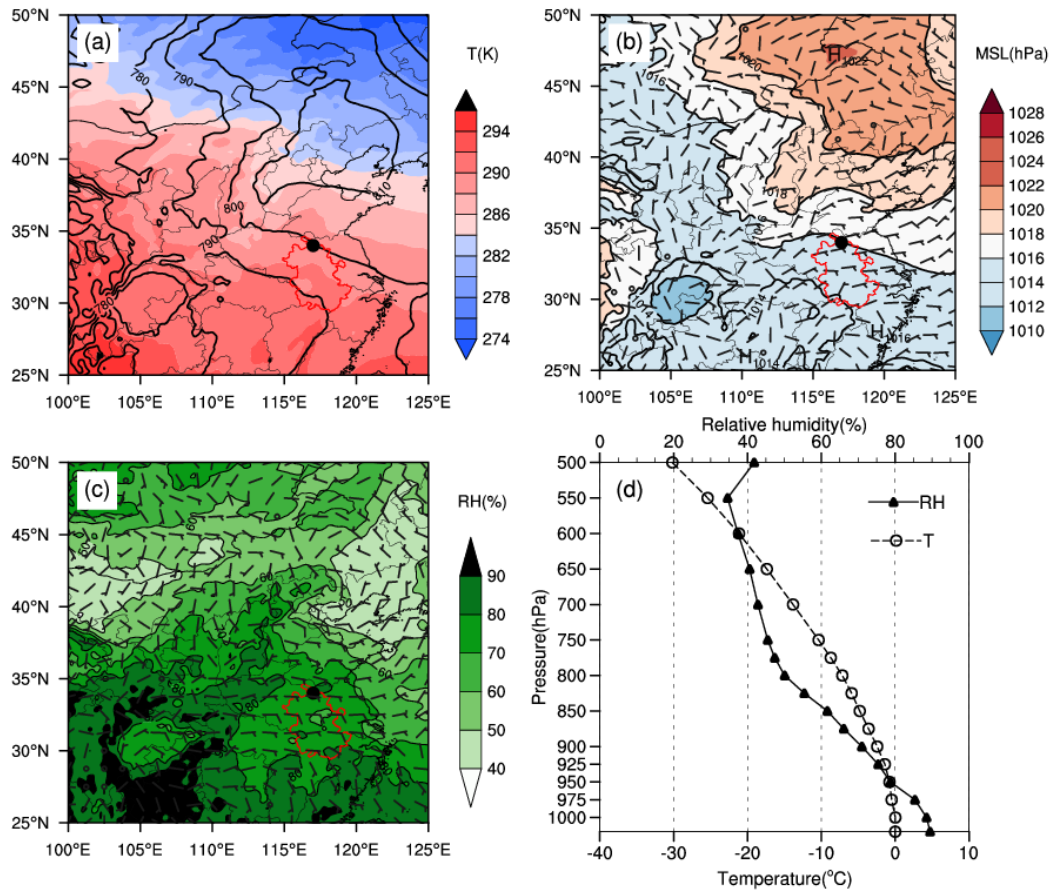


图 10 高压底部型霾: (a) 925 hPa 高度场(实线, 单位: gpm)及温度场(填色, 单位: K)、(b) 海平面气压场(填色, 单位: hPa)及 10 m 风向杆、(c) 925 hPa 风场及相对湿度(填色, 单位: %)、(d) 研究区域中心点(33.5°E, 117.5°N)温度、相对湿度平均廓线

Fig.10 Haze pattern in the bottom of High pressure: (a) Geopotential height (solid line, unit: gpm) and temperature (shaded, unit: K) at 925 hPa, (b) Sea level pressure (solid line, unit: hPa) and wind barb at 10 m, (c) Wind barb and relative humidity (shaded, unit: %) at 925 hPa, (d) Profiles of temperature and relative humidity at the center point of studied area (33.5°E, 117.5°N)

4.3 高压后部型(haze-4)

霾的高压后部型海平面气压和 925 hPa 高度分布形势都与雾的锋前型(fog-2)相似。925 hPa, 从华北到华中有一低槽, 东部地区等高线与等温线交角较大, 槽前地面风向变化较大, 有明显的风向辐合, 研究区域位于偏南风区域, 因而也可以定义为锋前型。地面辐合会造成大气颗粒物浓度显著上升, 形成重污染(Shi et al, 2020)。比较而言, 海平面气压场上, 霾时冷高压位置偏北偏弱, 因而, 两高之间的均压区范围更大, 地面锋面变弱; 925 hPa 华北与淮河流域间的等高线变稀疏(图 11a,b), 因而淮河流域北部

风速变小，研究区域风速变大（4 m/s），同时，研究区域西南风伴暖、湿平流，相对湿度 60%-70%，比雾时大，不利于地面辐射降温。由于 925 hPa 有暖平流，近地面仍存在较强的逆温，975 hPa 与地面温差仍达到约 3°C（图 11d）。由图 2 可见，此类形势下的降温幅度不及雾的前 3 类，但比雾的倒槽型高，且近地面为东南风，水汽条件较好，但风速较大，灵璧风速中值和均值都大于 2 m/s，比雾时高 1 m/s。因此，此种形势未形成强浓雾的主要原因地面风速偏大。

综上所述，尽管重度霾的每一类环流形势都与高压系统有关，但进一步分析的形势特点与上海（许建明等，2016）、江苏（戴竹君等，2016）的 $PM_{2.5}$ 污染或重度霾的形势类似，研究区域位于高压前后的弱气压区或伴随弱冷锋，有利于上游污染物输入或本地累积或传输加累积。与形势相似的强浓雾比较发现，每一类环流形势不能成雾的原因不同。

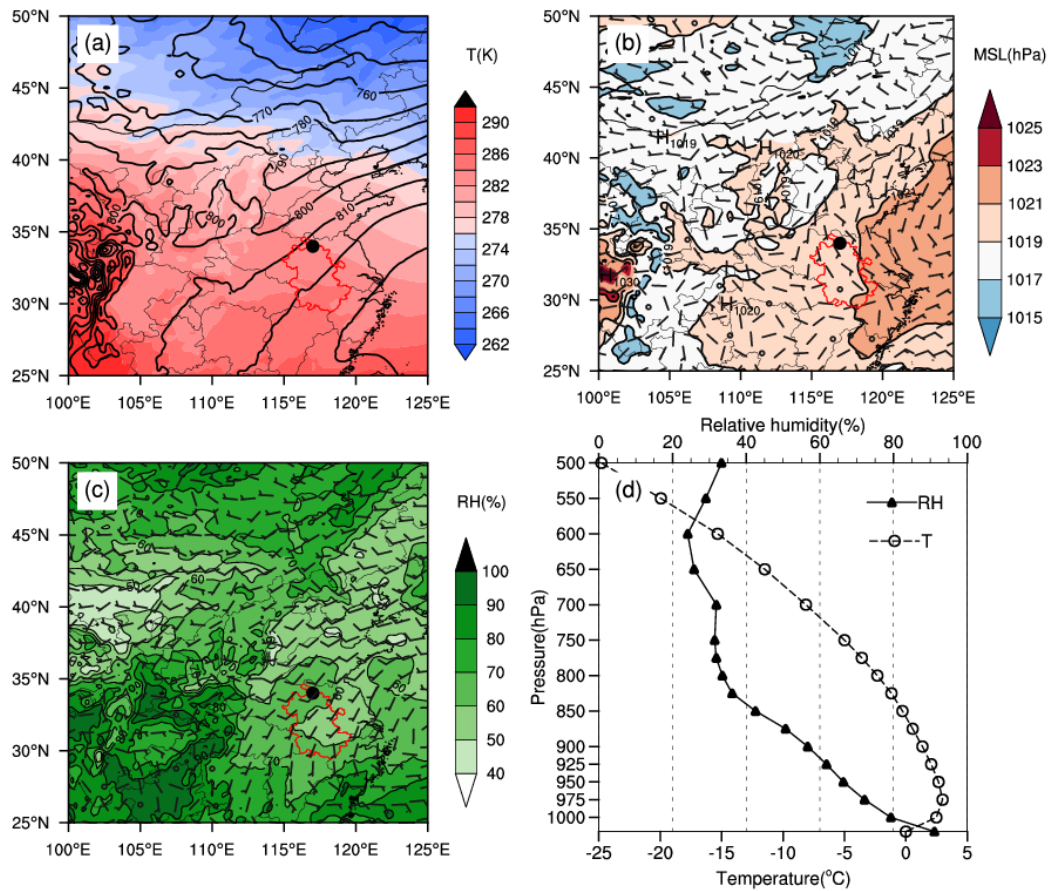


图 11 高压后部型霾：（a）925 hPa 高度场(实线，单位：gpm)及温度场（填色，单位：K）、（b）海平面气压场（填色，单位：hPa）及 10 m 风向杆、（c）925 hPa 风场及相对湿度(填色，单位：%)、（d）研究区域中心点(33.5°E, 117.5°N)温度、相对湿度平均廓线

Fig.11 Haze pattern in the rear of High pressure: (a) Geopotential height (solid line, unit: gpm) and temperature (shaded, unit: K) at 925 hPa, (b) Sea level pressure (solid line, unit: hPa) and wind barb at 10 m, (c) Wind barb and relative humidity (shaded, unit: %) at 925 hPa, (d) Profiles of temperature and relative humidity at the center point of studied area (33.5°E, 117.5°N)

5 结论

为探究重度霾向强浓雾转化的关键因子, 选取海平面气压场和 925 hPa 高度场, 采用多要素斜交旋转主成分分析法, 结合 ERA5 0.25°×0.25°再分析资料, 对淮河以北东部地区 1980—2019 年 08 时区域性强浓雾和重度霾的环流进行客观分型, 然后从大尺度背景、地面和边界层气象条件等方面分析每一类型强浓雾的形成机制, 对比大尺度环流形势相似的重度霾与强浓雾近地层气象条件的差异, 探讨重度霾未能成雾的原因。结果表明:

(1) 强浓雾时的环流形势可以分为 5 类。每一类的海平面气压场上, 中国西北或东北都有一冷高压, 研究区域位于冷高压前部或底部的等压线稀疏区; 925 hPa, 东部地区等高线稀疏 (平均风速约 2 m/s), 研究区域位于暖脊内或暖脊下游的湿度低值区; 垂直方向, 相对湿度随高度上升迅速下降, 至 925 hPa 或 850 hPa, 相对湿度降至 60% 以下, 有利于地面辐射降温; 除了占比最少 (7%) 的最后一类, 淮河流域都有一个次天气尺度系统, 据此系统, 5 类分别命名为: 弱高压北部型 (33%)、锋前型 (29%)、弱高压内部型 (19%)、倒槽型 (11%) 和高压底部型 (7%)。尽管形成机制不同, 每一类环流下, 雾区地面都有小风 (风速均值 ≤ 1.6 m/s)、明显的降温 (平均降温 ≥ 3.0 °C)、充足的水汽来源 (西南风、南风或偏东风), 地面至 975 hPa 均有逆温, 975 hPa 与地面温差 2-4°C。

(2) 重度霾时的环流可分为 3 类: 高压前部型 (56%)、高压底部型 (19%) 和高压后部型 (26%), 前 2 类的高压为大陆高压, 后 1 类高压主体在东海洋面上。每一类环流形势都有与之相似的雾的环流形势, 对形势相似的霾与雾时气象条件比较发现, 重度霾不能发展为强浓雾的原因有: ①水汽条件不好 (近地面偏北风输入干冷空气) (高压前部型, 占比 56%); ②925 hPa 湿度高, 地面辐射降温不足又无冷空气入侵, 且地面风速偏大 (平均风速 ≥ 2.2 m/s, 高压底部型、高压后部型, 占比 44%)。

(3) 强浓雾时淮河流域的次天气尺度系统给强浓雾的形成提供了有利的局地气象条件, 如降温、低风速和水汽来源 (风向决定), 重度霾时的天气系统则比较单一, 基本上都是高压系统, 尽管高压后部型也有冷锋, 但强度较弱。因此, 重度霾发展为强浓雾必须具备静小风、显著降温, 还需要有充足的水汽来源, 而这些因子主要取决于研究区域附近是否存在次天气尺度系统及系统强弱。

致谢: 本文作者感谢下列网站和单位提供了资料!

欧洲第五代 ECMWF 全球大气再分析资料 (ERA5) 下载自: <https://cds.climate.copernicus.eu/>;

地面 PM_{2.5} 浓度资料下载自生态环境部网站: <http://106.37.208.233:20035/>;

地面常规气象资料来自安徽省气象信息中心。

参考文献:

- Akimoto Y, Kusaka H. 2015. A climatological study of fog in Japan based on event data [J]. *Atmospheric Research*, 151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.04.003>
- Bergot T, Terradellas E, Cuxart J, et al. 2007. Intercomparison of single-column numerical models for the prediction of radiation fog [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 46(4):504-521. doi: 10.1175/JAM2475.1
- Bergot, T, Koracin, D. 2021. Observation, Simulation and Predictability of Fog: Review and Perspectives [J]. *Atmosphere* 2021, 12, 235. <https://doi.org/10.3390/atmos12020235>.
- Bossche M Van Den, Wekker S F J De. 2016. Spatiotemporal variability of surface meteorological variables during fog and no-fog events in the Heber Valley, UT; Selected case studies from MATERHORN-Fog [J]. *Pure Appl. Geophys.*, 173:3031-3048.
- Fedorova N, Levit V, Silva A O, et al. 2013. Low Visibility Formation and Forecasting on the Northern Coast of

- Brazil [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 170(4), 689–709.
- Fedorova N, Levit V, Souza J L, et al. 2015. Fog Events at Maceio Airport on the Northern Coast of Brazil During 2002–2005 and 2007 [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2727–2749.
- Fitzjarrald D R, Lala G G. 1989. Hudson valley fog environment [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 28:1303-1328.
- Haefelin M, Bergot T, Elias T, et al. 2010. PARISFOG Shedding new light on fog physical processes [J]. *Bull Am Meteorol Soc*, 91(6):767-783
- Haefelin M, Dupont J-C, Boyouk N, et al. 2013. A comparative study of radiation fog and quasi-fog formation processes during the ParisFog Field Experiment 2007 [J]. *Pure Appl Geophys*, 170, 2283–2303
- Huth R, Beck C, Philipp A, et al, 2008. Classifications of Atmospheric Circulation Patterns [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146(1):105-152. DOI: 10.1196/annals.1446.019.
- Izett J G, Wiel B J H, Baas P, et al. 2019. Dutch fog: On the observed spatio-temporal variability of fog in the Netherlands [J]. *Q J R Meteorol Soc*, 145:2817–2834. <https://doi.org/10.1002/qj.3597>
- Jia W, Zhang Z, Wang Y. 2021. Assessing the pollutant evolution mechanisms of heavy pollution episodes in the Yangtze-Huaihe valley: A multiscale perspective [J]. *Atmospheric Environment*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117986>.
- Nomoto S. 2003. Decreases in the number of foggy days in Thailand and Japan, and possible causes [J]. *J. Int. Econ. Stud.* 17:13–28.
- Philipp A, Bartholy J, Beck C, et al, 2010. Cost733cat – A database of weather and circulation type classifications [J]. *Physics & Chemistry of the Earth*, 35(9-12):360-373. DOI: 10.1016/j.pce.2009.12.010.
- Shi C E, Wang L, Zhang H, et al. 2012. Fog simulations based on multi-model system: A feasibility study [J]. *Pure Appl Geophys*, 169(5-6):941-960. doi: 10.1007/s00024-011-0340-0.
- Shi C E, Yuan R M, Wu B W, et al, 2018. Meteorological conditions conducive to PM_{2.5} pollution in winter 2016/2017 in the Western Yangtze River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 642:1221-1232.
- Shi C E, I C. Nduka, Yang Y J, et al, 2020. Characteristics and Meteorological Mechanisms of Transboundary Air Pollution in A Persistent Heavy PM_{2.5} Pollution Episode in Central-East China [J]. *Atmospheric Environment*, 223.
- Tardif R, Rasmussen R M. 2007. Event-Based Climatology and Typology of Fog in the New York City Region [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46:1141-1168.
- Zhao Y Y, Zhang Q H, Du Y, et al, 2013. Objective analysis of circulation extremes during the 21 July 2012 torrential rain in Beijing [J]. *Acta Meteor Sinica*, 27(5):626-635. DOI: 10.1007/s13351-013-0507-y.
- Zhou B, Ferrier, BS, 2008. Asymptotic analysis of equilibrium in radiation fog [J]. *Journal of Applied Meteor and Clim.* 47, 1704–1722.
- Zhou B, Du J, 2010. Fog prediction from a multimodel mesoscale ensemble prediction system[J]. *Wea Forecasting*, 25:303-322.
- 陈东辉, 尚子激, 宁贵财, 等. 2017. 环渤海地区雾天气分型及预报方法[J]. *气象*, 43(1):46-55. Chen Donghui, Shang Ziwei, Ning Guicai, et al. 2017. Classification of Fog Synoptic Situation and Forecasting Method Around Bohai Sea Coastal Areas [J]. *Meteor Mon*, 43(1):46-55 (in Chinese).
- 戴竹君, 刘端阳, 王宏斌, 等. 2016. 江苏秋冬季重度霾的分型研究[J]. *气象学报*, 74(1):133-148. Dai Zhujun, Liu Duanyang, Wang Hongbin, et al. The classification study of the heavy haze during autumn and winter of Jiangsu [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2016, (1): 133-148 (in Chinese).
- 李耀孙, 石春娥, 杨军, 等. 2012. 我国东部地区冬季模式边界层探空效果评估[J]. *高原气象*, 31(6):1690-1703. Li Yaosun, Shi Chun'e, Yang Jun, et al. 2012. Assessed Sounding Effect in Planetary Boundary Layer in East China in Winter [J]. *Plateau Meteorology*. 2012, 31(6): 1690-1703.
- 石春娥, 吴照宪, 张浩, 等. 2013. MM5 与 MM5-PAFOG 区域雾预报效果评估比较[J]. *高原气象*, 32(5):1349-1359. Shi Chun'e, Wu Zhaoxian, Zhang Hao, et al. 2013. Validation and Comparison of Regional Fog Forecast by MM5 and MM5-PAFOG Models [J]. *Plateau Meteorology*. 2013, 32(5): 1349-1359
- 石春娥, 李耀孙, 杨军, 等. 2015. MM5 和 WRF 对中国东部地区冬季边界层模拟效果比较[J]. *高原气象*, 34(2):389-400. Shi Chun'e, Li Yaosun, Yang Jun, et al. 2015. Comparison of simulations on winter sounding profiles in PBL in East China between WRF and MM5 [J]. *Plateau Meteorology*, 34(2):389-400.
- 石春娥, 李耀孙, 张浩, 等. 2021. 安徽省不同等级雾和重度霾时空分布特征及地面气象条件比较[J]. *气象学报*, 79(5):828-840. Shi Chun'e, Li Yaosun, Zhang Hao, et al. 2021. Comparisons of spatiotemporal distribution characteristics and surface meteorological conditions for fog and heavy haze events of different levels in Anhui province [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(5):828-840.
- 石春娥, 张浩, 杨关盈, 等. 2022. 安徽省区域性强浓雾气候特征及影响因子[J]. *气象学报*, 80(6):924-939. DOI: 10.11676/qxxb2022.062. Shi Chun'e, Zhang Hao, Yang Guanying, et al. 2022. Climatic characteristics and influencing factors of regional extremely dense fog in Anhui province [J]. *Acta Meteorologica Sinica*.

doi: 10.11676/qxxb2022.062.

- 孙戡, 牛涛, 乔林, 等. 2016. 华北地区雾和霾天气环流特征聚类分析[J]. 气候与环境研究, 21(5):601-613. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15119. Sun Yu, Niu Tao, Qiao Lin, et al. 2016. Cluster Analysis of the Circulation Situation Occurring during Fog and Haze Weather in North China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21(5):601-613.
- 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 SINICA, 60(4): 689-697(in Chinese).
- 王苏瑶, 邓学良, 胡建林, 等. 2023. 2015-2018年淮北市冬半年重污染天气大气环流分型研究[J]. 气象与环境学报. 39(4): 74-83. Wang Suyao, Deng Xueliang, Hu Jianlin, et al. 2023. Research on atmospheric synoptic classification of heavy pollution weather during winter half year from 2015 to 2018 in Huaibei city [J]. Journal of Meteorology and Environment, 39(4): 74-83.
- 王莹, 智协飞, 白永清, 等. 2022. 长江中游地区 PM_{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响. 环境科学. 2022(08): 3913-3922. Wang Ying, Zhi Xiefei, Bai Yongqing, et al. 2022. Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM_{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin [J]. Environmental Science. 2022(08): 3913-3922(in Chinese).
- 吴兑. 2006. 再论都市霾与雾的区别[J]. 气象, 32(4):9-15. Wu Dui. 2006. More discussions on the differences between haze and fog in city [J]. Meteorological Monthly, 32(4):9-15(in Chinese).
- 许爱华, 陈翔翔, 肖安, 等. 2016. 江西省区域性平流雾气象要素特征分析及预报思路[J]. 气象, 42(3):372-381. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.3.013. Xu Aihua, Chen Xiangxiang, Xiao An, et al. 2016. Analysis on the Characteristics of Meteorological Factors and Forecast Ideas for Regional Advection Fog in Jiangxi [J]. Meteor Mon, 42(3):372-381.
- 许建明, 常炉予, 马井会, 等. 2016. 上海秋冬季 PM_{2.5} 污染天气形势的客观分型研究[J]. 环境科学学报, 36(12):4303-4314. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2016.0224. Xu Jianming, Chang Luyu, Ma Jinhui, et al. 2016. Objective synoptic weather classification on PM_{2.5} pollution during autumn and winter seasons in Shanghai [J], 36(12): 4303-4314.
- 杨军, 陈宝君, 银燕. 2011. 云降水物理学[M]. 北京:气象出版社, pp77-78. Yang Jun, Chen Baojun, Yin Yan. 2011. Physics of Clouds and Precipitation[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), pp77-78.
- 章国材. 2016. 中国雾的业务预报和应用[J]. 气象科技进展, 6(2):42-48. Zhang Guocai. 2016. The Progress of Fog Forecast Operation in China [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 6(2): 42-48.
- 张庆奎, 项阳, 王莹, 等. 2015. 安徽阜阳市大雾天气的潜势预报方法[J]. 干旱气象, 33(6):1045-1049. DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2015)-06-1045. Zhang Qingkui, Xiang Yang, Wang Ying, et al. 2015. Research on the Method of Fog Potential Forecast in Fuyang of Anhui [J]. Journal of Arid Meteorology, 33(6):1045-1049. DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2015)-06-1045.
- 中国国家标准化管理委员会. 2011. 雾的预报等级[S]. 北京:中国标准出版社, 16pp. China National Standardization Administration Committee. 2011. GB/T 27964-2011 Grade of fog forecast[S]. Beijing: China Standards Press, 16pp (in Chinese)
- 中国气象局. 2010. 霾的观测与预报等级[S]. 北京:气象出版社, 8pp. China Meteorological Administration. 2010. QX/T113-2010 Observation and forecasting levels of haze [S]. Beijing: China Meteorological Press, 8pp (in Chinese).
- 中国气象局. 2019. 霾天气过程划分: QX/T513-2019[S].北京:气象出版社, 8pp. China Meteorological Administration. 2019. Classification for haze weather process (QX/T 513-2019) [S]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese) .
- 周斌斌, 蒋乐, 杜钧. 2016. 航空气象要素以及基于数值模式的低能见度和雾的预报[J]. 气象科技进展, 6(2):29-41. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.02.003. Zhou Binbin, Jiang Le, Du Jun. 2016. Aviation Weather and Model-Based Operational Forecasts of Low Visibility and Fog [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 6(2):29-41.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2007. 天气学原理和方法(第四版)[M]. 北京:气象出版社, pp62-63. Zhu Qiangen, Lin Jingrun, Shou Shaowen, et al. 2007. Principles and Methods of Synoptic Meteorology (Fourth Edition) [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), pp62-63