潘劲松, 李超. 2020. 2013 年 12 月华东地区持续性霾天气成因分析 [J]. 气候与环境研究, 25(1): 55−63. PAN Jinsong, LI Chao. 2020. Analysis on the Formation of Persistent Severe Haze Event over East China in December 2013 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25(1): 55−63. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18054

2013 年 12 月华东地区持续性霾天气成因分析

潘劲松[1] 李超[2, 3]

1 浙江省气象台，杭州 310017
2 深圳市气象局，广东深圳 518040
3 浙江省气象科学研究所，杭州 310008

摘 要 2013 年 12 月华东地区发生历史罕见的超过 20 d 连续重度霾天气过程。本文利用 NCEP/NCAR 再分析资料、华东地区大气细颗粒浓度资料以及常规气象观测资料对此次天气过程的环流形势、持续机制和前期外强迫因子展开分析。结果表明，此次华东连续重度霾天气和东亚中高纬阻塞高压活动密切相关。2013 年 12 月白令海到鄂霍茨克海阻塞活动加强导致东亚地区天气瞬变扰动异常偏弱，贝加尔湖东侧弱高空脊长时间维持，我国东部地区受弱偏北风影响，大气扩散条件较差，有利于华东本地大气细颗粒物积累和北方霾粒子向华东地区输送。进一步研究表明 2013 年 12 月鄂霍茨克海阻塞高压活动偏强可能和前期热带印度洋暖海温异常有关。

关键词 霾 鄂霍茨克海阻塞高压 瞬变扰动 热带印度洋海温
文章编号 1006-9585(2020)01-0055-09 **中图分类号** P404 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18054

Analysis on the Formation of Persistent Severe Haze Event over East China in December 2013

PAN Jinsong[1] and LI Chao[2, 3]

1 *Zhejiang Meteorological Observatory*, *Hangzhou* 310017
2 *Meteorological Bureau of Shenzhen Municipality*, *Shenzhen*, *Guangdong Province* 518040
3 *Zhejiang Institute of Meteorological Sciences*, *Hangzhou* 310008

Abstract East China was dominated by a strongly intense, long-duration, and extensive-coverage haze in December 2013. The synoptic characteristics, persistent mechanism, and precursory oceanic conditions for the persistent haze in December 2013 are studied using a monthly NCEP/NCAR reanalysis dataset, particulate matter observations in Huadong, and other regular observational data during 1981−2014. This persistent haze may be closely related to the activity of blocking over East Asia. The blocking over the Bering Sea−Okhotsk Sea, weakened transient eddy over East Asia, persistent trough over Lake Baikal, and attenuated northerly winds over east China would favor a worse diffusion condition for local accumulation and more transportation of particulate matter to East China in December 2013. Moreover, the enhanced blocking over Okhotsk Sea in December 2013 is probably related to the warm sea surface

收稿日期 2018-04-18；**网络预出版日期** 2019-12-30
作者简介 潘劲松，男，1968 年出生，硕士，正研级工程师，主要从事天气学研究。E-mail: js_p@mail.iap.ac.cn
通讯作者 李超，E-mail: lichao@mail.iap.ac.cn
资助项目 国家自然科学基金项目 41405047、91544102，中国气象局预报员专项 CMAYBY2019081，广东省气象局重点项目 GRMC2018Z06，广东省科技厅科技项目 2014A020218014、2016A020223016、2019B020208016
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41405047 and 91544102), China Meteorological Administration Forecaster Special Research Project (Grant CMAYBY2019081), Guangdong Meteorological Bureau Science and Technology Project (Grant GRMC2018Z06), Science and Technology Planning Project of Guangdong Province (Grants 2014A020218014, 2016A020223016, and 2019B020208016)

temperature over the tropical Indian Ocean.

Keywords Haze, Blocking over Okhotsk Sea, Transient eddy, Indian Ocean sea surface temperature

1 引言

随着社会经济发展和城市规模扩大，大气细颗粒物浓度增加，我国东部地区以低能见度为主要特征的霾天气日益增加（Ding and Liu，2014），大城市霾天气尤为严重（Che et al.，2009），引起了社会广泛关注。由于地形和影响系统差异，不同地区霾天气特点差异显著（Quinn and Bates，2003）。华南珠三角地区20世纪80年代以后霾天气低能见度急剧增加，已有研究对华南地区霾天气变化特征和形成机制进行了深入分析（Fan et al.，2015；Liao et al.，2015；Chen et al.，2016）。近年来，京津冀晋等地冬季霾天气频繁发生，大量研究通过诊断分析和数值模拟等方法对华北地区典型霾天气过程的边界层条件、大气细颗粒物来源等进行了广泛分析（闵敏等，2009；高怡和张美根，2013；刘瑞婷等，2014）。华东长三角地区城市密集，也是冬季霾天气发生频率较高区域之一，2013年华东地区发生多次持续性重度霾天气（高岑等，2012；刘梅等，2014）。

霾天气的本质是大气细颗粒物污染，大气污染物排放是霾天气内因，而气象条件是霾天气变化的外因（吴兑等，2006）。大气细颗粒物排放短期稳定条件下，霾天气变化主要受气象因子影响。特别是持续性霾天气往往是在低层弱风场、较低逆温层等稳定气象层结条件长时间维持时出现（Zhang et al.，2014）。静稳大气层结长时间维持通常是在大尺度环流异常背景下出现的。吴兑等（2010）研究指出对流层中低层弱高压脊维持时，近地面风较小，有利于重度霾天气发生。有研究指出近年来霾天气增多可能和东亚冬季风以及东亚大槽持续减弱导致近地面风速减小有关（Chen and Wang，2015；Yin et al.，2015）。大量研究表明东亚持续性环流异常和海温海冰等外强迫因子异常有密切关系（Guo et al.，2017；Wu et al.，2017a，2017b）。在一定前期外强迫条件下，东亚中高纬度环流通过降水和冷空气活动可以对冬季霾发生区域和发生频率产生影响。Wang et al.（2015）研究指出前期秋季北极海冰减少可以引起东亚地区气旋活动减少，从而导致近年来我国冬季霾日数增多。Yin and Wang（2016）研究发现前期西太平洋副热带冷海温异常可以通过减弱东亚冬季风使得华北地区霾天气日数增加。

迄今为止，相关研究主要针对我国霾天气识别、气候特征及对应的大气环流特点，对人们普遍关注的持续性霾天气研究还相对较少。2013年12月华东长三角地区出现历史罕见的连续重度霾天气过程，此次霾过程的持续机制还并不十分清楚。本文重点分析影响此次天气过程的大气环流特点以及外强迫因子，为华东持续性霾天气预测提供参考。

2 资料和方法

本文使用全国中东部地区共480个观测站的水平能见度、相对湿度和降水资料，选用14时资料作为当日观测值（Ding and Liu，2014）；同时使用上海、南京、杭州和合肥平均PM2.5（空气动力学当量直径小于等于2.5 μm的颗粒物）、PM10（空气动力学当量直径小于等于10 μm的颗粒物）代表华东地区大气细颗粒物浓度。大气环流资料使用NCEP/NCAR发布的全球逐日和逐月再分析资料（Kalnay et al.，1996），该资料水平分辨率为2.5°（纬度）×2.5°（经度），分析的要素有位势高度场、风场和温度场。海温资料为英国气象局Hadley中心提供的全球逐月海表温度（SST）数据（Rayner et al.，2003），该数据资料水平分辨率为1°（纬度）×1°（经度）。

为了讨论中高纬度阻塞高压对冬季灰霾天气影响，使用Barriopedro et al.（2010）等提出的两维阻塞指数识别阻塞高压和计算阻塞发生频率。天气扰动能量使用带通滤波从逐日风场滤出2.5～6 d的天气尺度波动，并以纬向风和经向风的天气尺度滤波方差之和计算得到（Blackmon et al.，1977）。此外，我们使用天气扰动能量和Eliassen-Palm（EP）通量（Plumb，1985）对天气过程进行诊断。EP通量在对数压力坐标系中为

$$F_s = p\cos\phi \times \left[v'^2 - \frac{1}{2\Omega a \sin 2\phi}\frac{\partial(v'\Phi')}{\partial\lambda} - u'v' + \frac{1}{2\Omega a \sin 2\phi}\frac{\partial(u'\Phi')}{\partial\lambda} \right], \quad (1)$$

其中，Ω 为地转角速度，a 为地球半径，ϕ 为纬度，λ 为经度，p 为气压，u、v 分别为纬向风和经向风，Φ 为位势高度，公式中距平为纬向距平。在分析前期海洋状况对大气环流影响中，我们使用一元线性回归，并采用 t 检验来验证其显著性。文中气候态使用 1981～2010 年平均，距平是对该气候态的差值。

3　天气过程特征

2013 年 12 月我国华东出现了大范围能见度小于 10 km 的霾天气（图 1a），其中江苏和浙江杭嘉湖等地区水平能见度甚至小于 6 km。Ding and Liu（2014）研究指出相对湿度 90% 是区分雾和霾的重要气象指标。分析时段内华东地区 14:00（北京时间，下同）相对湿度仅 17%～18% 日较高约为 82%，因而小于 10 km 的低水平能见度主要反映了华东地区的霾天气。根据能见度分布特征，我们选取上海、江苏、浙江和安徽三省一市共 31 个观测站代表华东区域（图 1a）。2013 年 12 月华东地区平均能见度为 9.7 km，较 1981～2014 年气候平均能见度 13.9 km 偏低约 29.2%（图 1b）。2013 年 12 月除华东外，从河北中南部到湖北也出现了大范围水平能见度小于 10 km 的霾天气。华东水平能见度明显小于华北等地区，一方面和华东大气细颗粒物浓度较高有关，另一方面可能和华东相对湿度较高有关。华东 12 月平均相对湿度为 45.4%，而京津冀、河南和山东区域平均相对湿度仅为 37.3%，相对湿度较高有利于霾颗粒物吸湿增长导致能见度降低。

我们以华东地区的上海、南京、杭州和合肥为代表，使用水平能见度和大气细颗粒物 PM2.5 等观

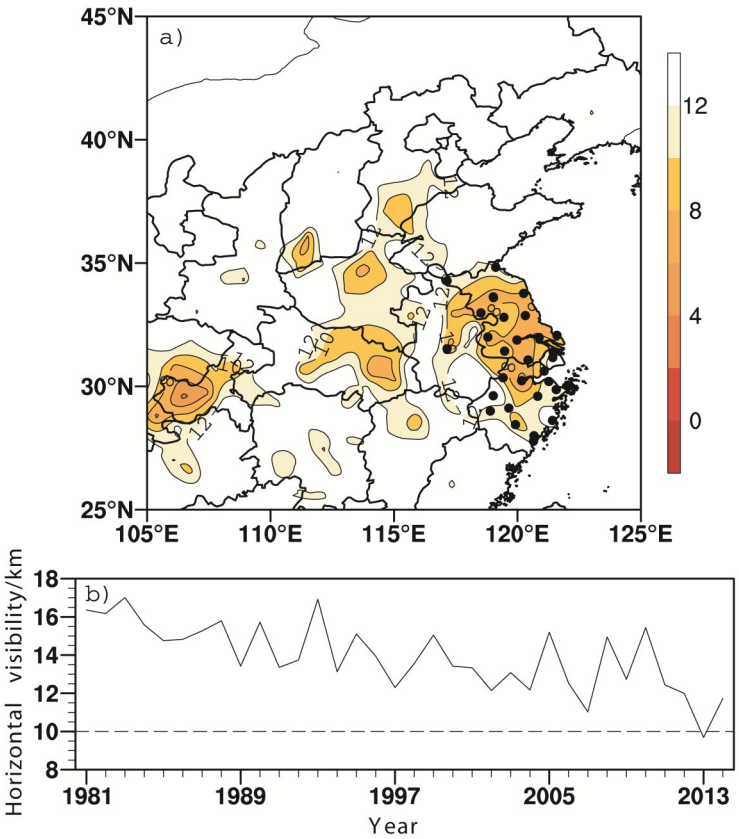

图 1　（a）我国中东部地区 2013 年 12 月平均水平能见度（单位：km）空间分布和（b）1981～2014 年 12 月平均华东地区水平能见度时间序列。图 a 中黑点为华东地区观测站点分布

Fig. 1　(a) Spatial distribution of monthly mean horizontal visibility (units: km) over eastern China in December 2013 and (b) time series of monthly mean horizontal visibility over East China during 1981–2014. Filled circles in (a) denote the meteorological stations in East China

测进一步说明2013年12月华东霾天气演变特征（图2）。2013年12月华东连续重度霾天气历史罕见的超过20 d，连续霾天气分为3个阶段，分别为1～10日、11～18日和19～27日。第一阶段霾天气最为严重，华东地区平均能见度持续低于10 km，其中7日平均能见度甚至低于2.5 km，大气细颗粒物PM2.5和PM10浓度异常偏高，峰值分别达到296.9和310.9 μg m^{-3}，充分说明了霾天气的本质是大气细颗粒物污染。12月华东PM2.5日均浓度超过150 μg m^{-3}，甚至超过了华北典型重度霾天气过程（韩霄和张美根，2014）。霾天气第二和第三阶段大气细颗粒物浓度略偏低，15～18日华东地区出现了强降水，其中16日区域平均降水量达到20 mm，第二阶段霾天气消散和强降水有关。强降水发生后，PM2.5和PM10大气颗粒物浓度迅速降低到42.7和52.5 μg m^{-3}，18日水平能见度恢复到10 km以上，可能和降水湿清除（唐仁茂等，2017）以及降水后冷空气活动加强有关（图4）。

4 霾天气持续机制分析

2013年12月华东持续霾天气过程中东亚中高纬环流稳定少变，我们给出了12月1～8日，19～26日500 hPa高度平均场分布（图3）。华东连续霾天气第一阶段过程中，白令海附近为正高度距平中心，表明阻塞发生位置较为偏东，阻塞中心在白令海附近（图3a）。鄂霍茨克海地区为高压脊未达到阻塞识别标准，但鄂霍茨克海地区高压脊对上游天气系统东移的阻挡作用非常明显，有利于贝加尔湖弱高压脊长时间维持。第一阶段过程中阻塞高压发生位置偏东，我国东部地区环流呈现较强的纬向性特点（图3a），华东地面维持偏北风且平均风速最小（图4和图6d），大气扩散条件较差，有利于北方污染物颗粒输送和华东本地污染颗粒物积累，导致第一阶段霾天气最为严重。8日白令海附近阻塞高压崩溃，伴随冷空气活动华东地区地面风速明显增大（图4），大气扩散条件转好，华东霾天气第一阶段结束。

华东连续霾天气第二阶段过程中，阻塞高压主要发生在鄂霍次克海附近，图5给出45°N～75°N平均阻塞高压发生频率时间—经度剖面。当阻塞频率径向平均大于0时，判断阻塞高压出现，减弱至0则判断阻塞消亡。阻塞高压11日在鄂霍茨克海建立后并维持到18日，19日鄂霍次克海阻塞高压崩溃西退至贝加尔湖东侧。第二阶段阻塞高压位置较第一阶段偏西，我国东部地区环流经向性有所加强，对应于华东地面风速略偏大（图4），大气扩

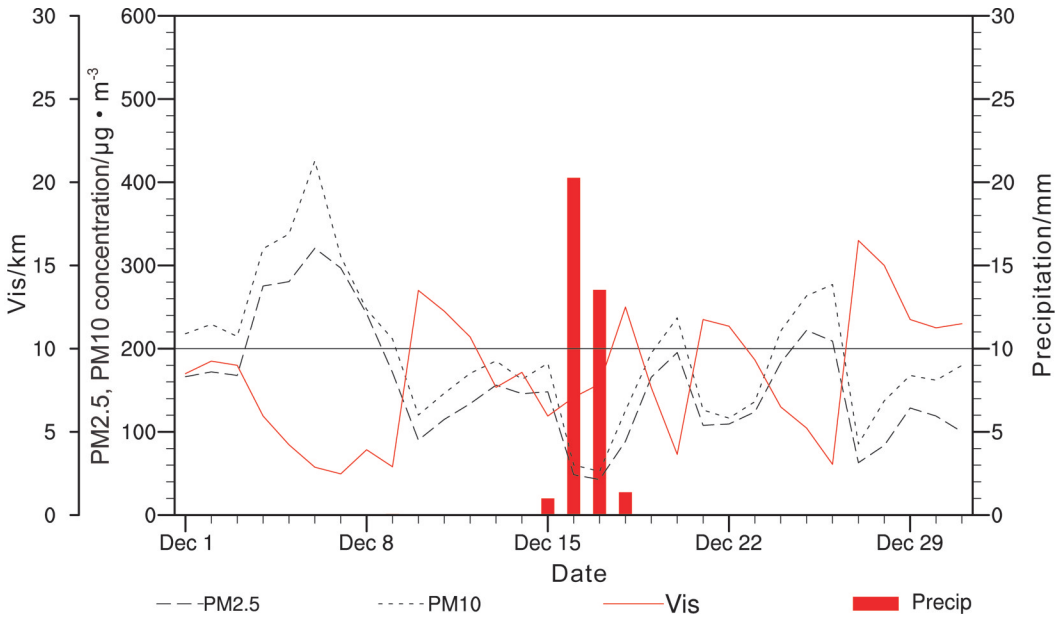

图2 2013年12月华东（合肥、南京、上海和杭州平均）水平能见度（单位：km）、降水量（单位：mm）和PM2.5、PM10浓度（单位：μg m^{-3}）时间序列

Fig. 2 Time series of horizontal visibility (units: km) and precipitation (units: mm) and PM2.5, PM10 concentration (units: μg m^{-3}) in Huadong (Shanghai, Nanjing, Hangzhou, and Hefei) during December 2013

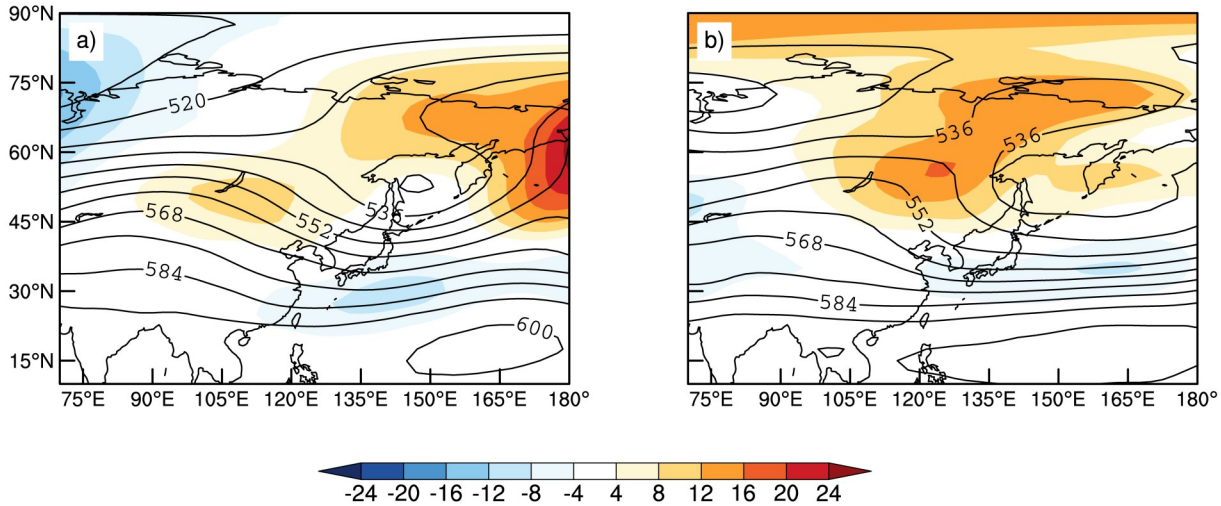

图 3　2013 年 12 月（a）1～8 日，（b）19～26 日 500 hPa 高度平均场（等值线，单位：dagpm）和高度对气候态的距平场（填色，单位：dagpm）

Fig. 3　500-hPa geopotential height (contour, units: dagpm) and corresponding anomalies against climatology (colored, units: dagpm) for (a) 1−8 and (b) 19-26 December 2013

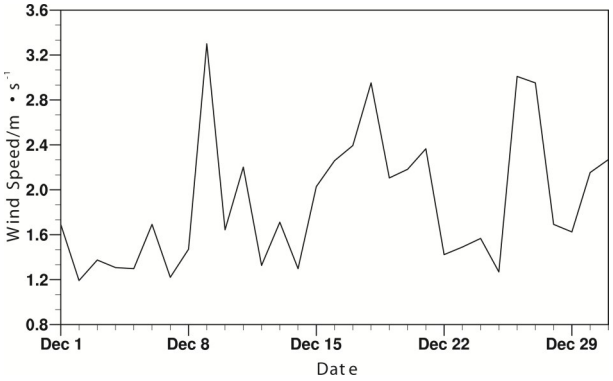

图 4　2013 年 12 月华东地区地面平均风速（单位：m s^{-1}）时间序列

Fig. 4　Time series of surface wind speed (units: m s^{-1}) over East China during December 2013

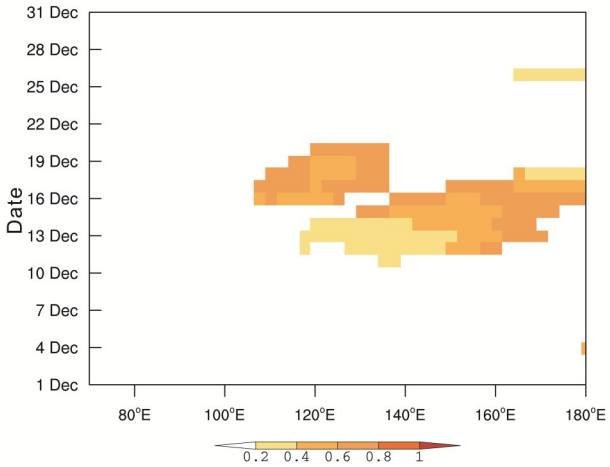

图 5　2013 年 12 月 45°N～75°N 平均阻塞高压发生频率时间—经度剖面

Fig. 5　Hovmöller diagram of blocking high occurrence frequency averaged over 45°N−75°N during December 2013

散条件略偏好，因而第二阶段霾颗粒物浓度略偏低。12 月中旬华东地区发生了一次大范围降水，此次降水可能和北大西洋涛动位相转变过程上游 Rossby 波东传加强有关（Li and Sun，2015），降水湿清除作用使得连续霾天气暂时减弱。降水结束后，华东霾天气再次发展。

华东连续霾天气第三阶段初期阻塞高压发生在贝加尔湖东侧（图 5），随后 21 日减弱为高压脊并维持到 26 日（图 3）。由图 3b 可见，东亚中纬度地区环流纬向性进一步减弱，对应华东地面风速进一步增大，19～26 日地面平均风速为 1.9 m s^{-1}，仍比 12 月地面风速气候态 2.9 m s^{-1} 明显偏小（图 4）。我国东部地区受高空脊东侧弱偏北风影响，有利于北方大气颗粒物向华东地区输送。26 日后贝加尔湖高空脊东移，华东地面风速再次明显增大，第三阶段霾天气消散。由上分析可见，2013 年 12 月东亚中高纬阻塞环流从白令海西退至贝加尔湖东侧，华东地区连续霾天气发生和鄂霍次克海地区阻塞高压或高压脊密切相关，霾天气减弱消散和冷空气活动、降水有关。

大气边界层层结条件是影响霾天气直接的气象因子，我们进一步分析东亚中高纬阻塞高压对华东

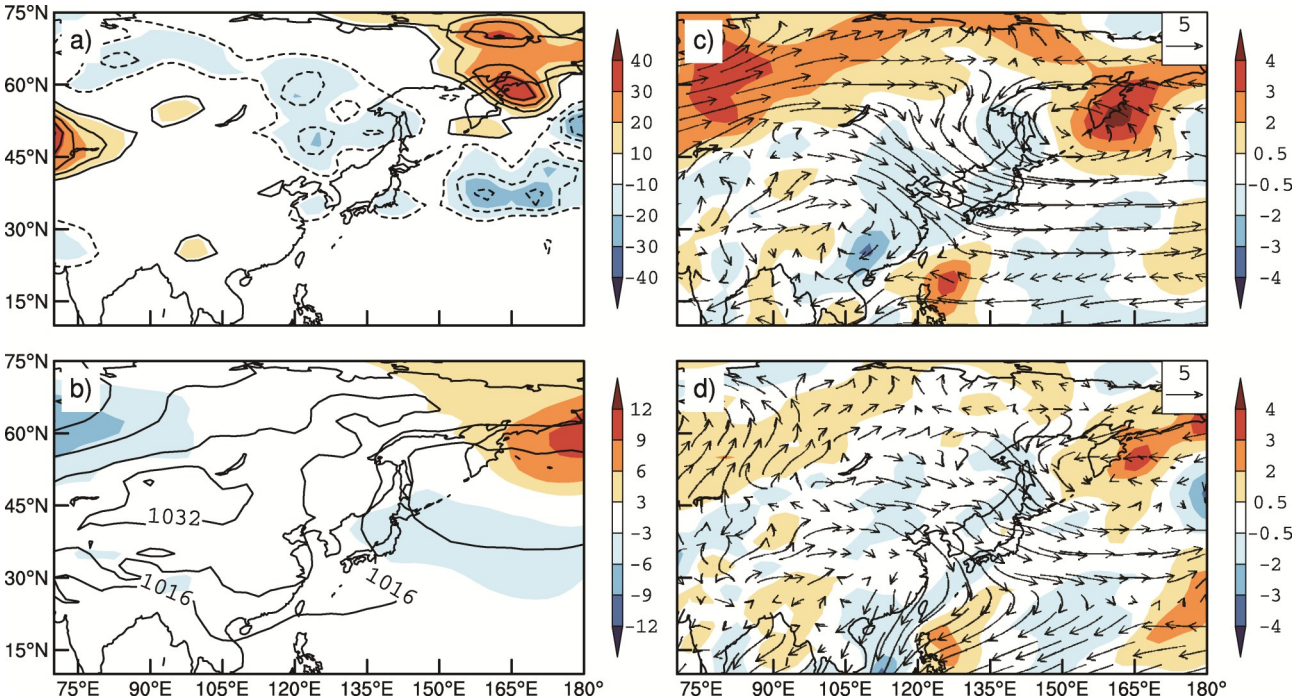

图6 2013年12月（a）300 hPa天气扰动能量距平场（单位：$m^2\ s^{-2}$）、（b）海平面气压（等值线，单位：hPa）和距平（填色，单位：hPa）、（c）850 hPa风场（箭头，单位：$m\ s^{-1}$）和经向风距平（填色，单位：$m\ s^{-1}$），（d）同（c），地面风场和经向风距平

Fig. 6 Distributions of (a) 300-hPa transient eddy energy anomalies (unit: $m^2\ s^{-2}$), (b) sea level pressure (contour, units: hPa) and associated anomalies (colored, units: hPa), (c) 850-hPa wind (vector, units: $m\ s^{-1}$), and associated meridional wind anomalies (colored, units: $m\ s^{-1}$) in December 2013, (d) same as (c), but for surface wind and associated meridional wind anomalies

大气层结条件影响。受下游鄂霍茨克海阻塞高压或高压脊阻挡作用，贝加尔湖弱高压脊长时间维持（图3a），华东地区850 hPa为偏北风异常控制（图6a）。海平面气压对气候态的距平分布呈现“西低东高”特点，乌拉尔山地区为气压负距平，白令海附近为正距平，这和鄂霍茨克海阻塞高压加强是一致的。海平面气压距平场“西低东高”特点对应于气压纬向梯度减弱，有利于东亚冬季风异常偏弱和华东地面风速偏小（图6d）。高低空环流场差异使得850 hPa冷平流更加明显，降温幅度大于地面（图7）。逆温层结主要在850～600 hPa加强，逆温层高度较其它典型重度霾天气明显偏高。2013年1月华东地区出现持续性霾天气（石春娥等，2014），我们计算给出两次过程中华东地区温度异常的高度剖面（图6）。2013年1月850 hPa以下大气温度升高幅度随高度增加，有利于低层大气逆温层结维持，而2013年12月的温度异常的垂直分布则不利于逆温层结的维持。以上分析说明鄂霍茨克海阻塞维持时，对流层低层弱偏北风长时间维持有利于北方大气细颗粒物向华东输送，而华东地区较高的逆温层对霾天气维持加强作用则相对有限。

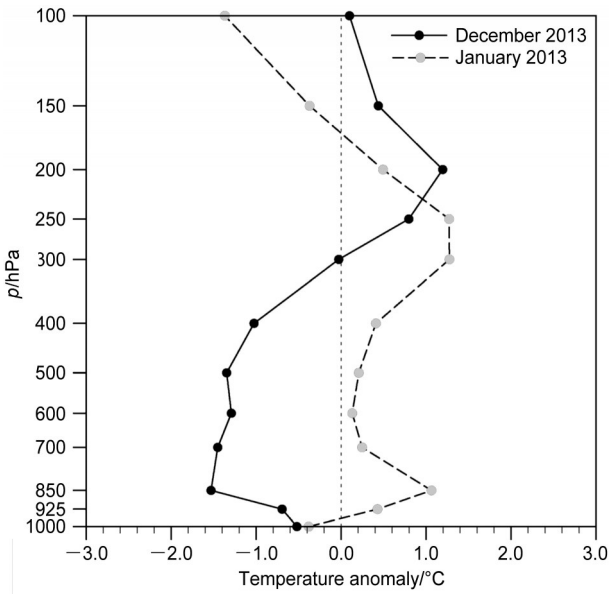

图7 2013年12月和2013年1月华东温度异常（单位：℃）垂直剖面

Fig. 7 Vertical profile of temperature anomalies (unit: °C) over East China during December 2013 and January 2013

2013年12月鄂霍次克海阻塞高压或高压脊维持，阻挡了上游天气系统东移，导致贝加尔湖东侧天气瞬变扰动异常偏弱（图6a），天气尺度波动异

常偏弱说明了2013年12月东亚地区环流形势稳定少变，从而有利于华东地区霾天气的长时间维持，进一步说明鄂霍茨克海阻塞高压维持在此次持续性霾天气中作用。

5 前期外强迫信号

前面分析指出鄂霍茨克阻塞高压是影响2013年12月华东地区连续霾天气的重要环流系统，大气内部环流持续异常往往和前期海温等外强迫因子有关。从给出前期11月的海表温度对历史同期11月气候态的距平分布（图8）可见，2013年11月海温异常主要为热带印度洋的暖海温。

我们根据印度洋海温异常分布选择区域（0°～30°S，40°E ～100°E），对区域平均海表温度建立逐年变化时间序列，用前期11月海温时间序列回归12月的300 hPa高度场和对应的EP通量（图9）。500 hPa高度回归场（图略）和300 hPa基本一致，只是Rossby波能量传播特征在对流层中上层更为明显。低纬地区为显著的300 hPa高度正回归系数区，Rossby波能量自孟加拉湾地区向东北方向传播，300 hPa位势高度场的回归系数在我国东海上空为“负”中心，鄂霍次克海地区为显著的“正”中心，形成向东北方向传播的波列异常分布。热带印度洋的暖海温异常可以通过激发向东北传播的Rossby波能量导致鄂霍次克海高压加强。前期热

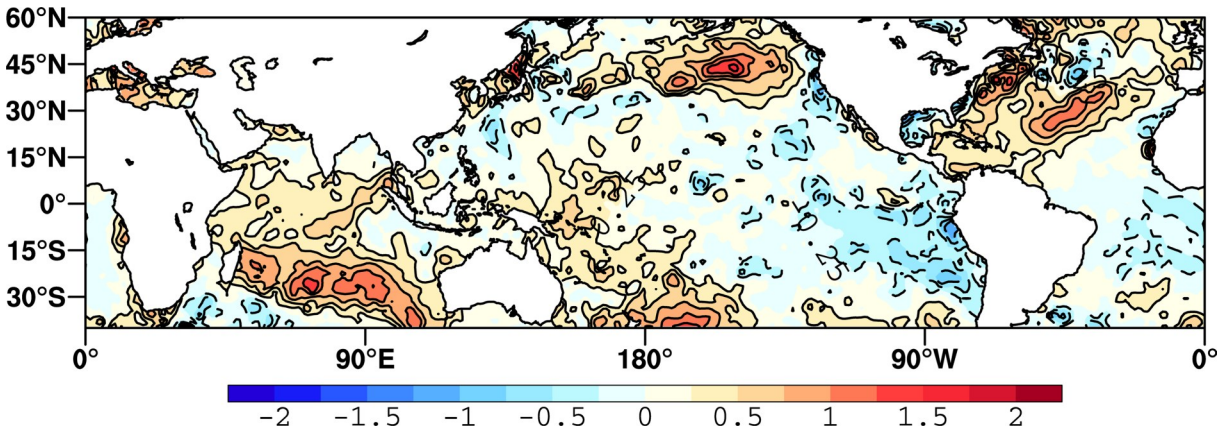

图8　2013年11月平均海表温度距平场（单位：℃）分布

Fig. 8　Distribution of sea surface temperature anomalies (SSTA, units: °C) averaged in November 2013

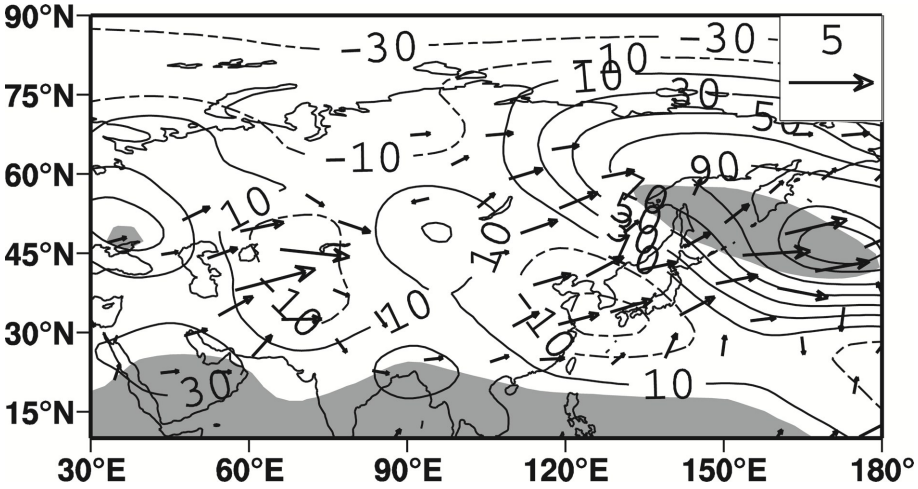

图9　1981～2014年11月平均热带印度洋（30°S～15°S，40°E～100°E）海温回归的300 hPa位势高度距平（等值线，单位：dagpm）以及对应EP通量（箭头，单位：$m^2\ s^{-2}$），阴影区代表300 hPa高度回归场信度水平超过90%的区域

Fig. 9　Regressed pattern of December 300-hPa geopotential height anomalies (contour, units: dagpm) and corresponding EP (Eliassen-Palm) flux (vector, units: $m^2\ s^{-2}$) onto the November SSTA over the Indian Ocean (30°S–15°S, 40°E–100°E) during 1981–2014. Shadings denote the regions above 90% significant levels for the regressed 300-hPa geopotential height anomalies

带印度洋暖海温异常可以较好解释2013年12月影响华东霾天气的东亚中高纬环流异常。

6 结论和讨论

2013年12月华东地区出现了历史罕见的连续时间超过20 d的霾天气，气象条件是影响华东地区连续霾的重要因子。文中探讨了影响2013年12月华东连续重度霾的大气环流特点以及对前期印度洋海温异常的响应。主要结论如下：

（1）白令海和鄂霍次克海阻塞高压长时间维持，贝加尔湖地区受高空脊控制，东亚中纬度天气瞬变扰动异常偏弱，中纬度纬向环流稳定维持为此次华东地区连续霾天气提供有利的环流背景。

（2）受鄂霍茨克海阻塞高压和贝加尔湖高压脊影响，我国东部地区850 hPa长时间受弱偏北风控制，有利于北方大气颗粒物向华东地区输送。华东地面弱风场有利于大气污染物积累和霾天气加强。降水和鄂霍茨克海阻塞崩溃后的冷空气活动加强是华东连续霾天气减弱消散的重要气象条件。

（3）前期热带印度洋暖海温异常有利于鄂霍次克海高压出现和维持，天气瞬变扰动减弱，为华东地区连续霾天气提供有利的环流背景。前期外强迫因子可以为华东地区霾天气预测提供一定依据。

需要指出的是，本文仅从一次典型天气过程分析了鄂霍茨克海阻塞高压对华东地区霾天气影响，未来仍需要进一步通过多个例系统分析东亚中高纬环流对华东不同类型霾天气影响。此外，热带印度洋海温异常对我国冬季天气影响还存在着不确定性，需要未来进一步使用数值模拟等方法进行验证。

参考文献（References）

Barriopedro D, García-Herrera R, Trigo R M. 2010. Application of blocking diagnosis methods to general circulation models. Part I: A novel detection scheme [J]. Climate Dyn., 35(7-8): 1373-1391. doi: 10.1007/s00382-010-0767-5

Blackmon M L, Wallace J M, Lau N C, et al. 1977. An observational study of the Northern Hemisphere wintertime circulation [J]. J. Atmos. Sci., 34(7): 1040-1053. doi: 10.1175/1520-0469(1977)034<1040:AOSOTN>2.0.CO;2

Che H Z, Zhang X Y, Li Y, et al. 2009. Haze trends over the capital cities of 31 provinces in China, 1981-2005 [J]. Theor. Appl. Climatol., 97(3-4): 235-242. doi:10.1007/s00704-008-0059-8

Chen H P, Wang H J. 2015. Haze days in North China and the associated atmospheric circulations based on daily visibility data from 1960 to 2012 [J]. J. Geophys. Res., 120(12): 5895-5909. doi: 10.1002/2015JD023225

Chen W H, Wang X M, Cohen J B, et al. 2016. Properties of aerosols and formation mechanisms over southern China during the monsoon season [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 16(20): 13271-13289. doi:10.5194/acp-16-13271-2016

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(1): 36-46. doi: 10.1007/s11430-013-4792-1

Fan Q, Lan J, Liu Y M, et al. 2015. Process analysis of regional aerosol pollution during spring in the Pearl River Delta region, China [J]. Atmos. Environ., 122: 829-838. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.09.013

高岑, 王体健, 吴建军, 等. 2012. 2009年秋季南京地区一次持续性灰霾天气过程研究 [J]. 气象科学, 32(3): 246-252. Gao Cen, Wang Tijian, Wu Jianjun, et al. 2012. Study on a continuous haze weather event during autumn of 2009 in Nanjing [J]. J. Meteor. Sci. (in Chinese), 32(3): 246-252. doi:10.3969/2012jms.0079

高怡, 张美根. 2014. 2013年1月华北地区重雾霾过程及其成因的模拟分析 [J]. 气候与环境研究, 19(2): 140-152. Gao Yi, Zhang Meigen. 2014. Numerical simulation of a heavy fog-haze episode over the North China plain in January 2013 [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 19(2): 140-152. doi: 10.3878/j. issn. 1006-9585. 2014.13135

Guo Z, Zhou T J, Wu B. 2017. The asymmetric effects of El Niño and La Niña on the East Asian winter monsoon and their simulation by CMIP5 atmospheric models [J]. J. Meteor. Res., 31(1): 82-93. doi: 10.1007/s13351-017-6095-5

韩霄, 张美根. 2014. 2013年1月华北平原重霾成因模拟分析 [J]. 气候与环境研究, 19(2): 127-139. Han Xiao, Zhang Meigen. 2014. Model analysis of haze formation over the North China plain in January 2013 [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 19(2): 127-139. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13136

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77(3): 437-472. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2

Li C, Sun J L. 2015. Role of the subtropical westerly jet waveguide in a southern China heavy rainstorm in December 2013 [J]. Adv. Atmos. Sci., 32(5): 601-612. doi:10.1007/s00376-014-4099-y

Liao W H, Wang X M, Fan Q, et al. 2015. Long-term atmospheric visibility, sunshine duration and precipitation trends in South China [J]. Atmos. Environ., 107: 204-216. doi: 10.1016/j. atmosenv. 2015. 02.015

刘梅, 严文莲, 张备, 等. 2014. 2013年1月江苏雾霾天气持续和增强机制分析 [J]. 气象, 40(7): 835-843. Liu Mei, Yan Wenlian, Zhang Bei, et al. 2014. Analysis on persistence and intensification mechanism of fog and haze in Jiangsu in January 2013 [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 40(7): 835-843.

刘瑞婷, 韩志伟, 李嘉伟. 2014. 北京冬季雾霾事件的气象特征分析 [J]. 气候与环境研究, 19(2): 164-172. Liu Ruiting, Han Zhiwei,

Li Jiawei. 2014. Analysis of meteorological characteristics during winter haze events in Beijing [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 19(2): 164−172. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13224

闵敏, 王普才, 宗雪梅, 等. 2009. 灰霾过程中的气溶胶特性观测研究 [J]. 气候与环境研究, 14(2): 153−160. Min Min, Wang Pucai, Zong Xuemei, et al. 2009. Observation and study on aerosol properties in hazy days [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 14 (2): 153−160.

Plumb R A. 1985. On the three-dimensional propagation of stationary waves [J]. J. Atmos. Sci., 42(3): 217−229. doi: 10.1175/1520-0469 (1985)042<0217:OTTDPO>2.0.CO;2

Quinn P K, Bates T S. 2003. North American, Asian, and Indian haze: Similar regional impacts on climate? [J]. Geophys. Res. Lett., 30 (11): 1155. doi:10.1029/2003GL016934

Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century [J]. J. Geophys. Res., 108(D14): 4407. doi:10.1029/2002JD002670

石春娥, 邓学良, 杨元建, 等. 2014. 2013年1月安徽持续性霾天气成因分析 [J]. 气候与环境研究, 19(2): 227−236. Shi Chune, Deng Xueliang, Yang Y J, et al. 2014. Analyses on the causes of the persistent haze in Anhui Province in January 2013 [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 19(2): 227−236. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13112

唐仁茂, 李德俊, 柳草, 等. 2017. 一次重雾霾天气成因及湿清除特征分析 [J]. 气候与环境研究, 22(6): 699−707. Tang Renmao, Li Dejun, Liu Cao, et al. 2017. Characteristic analysis of a muti−day pollution event and wet removal of aerosols [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 22(6): 699−707.

Wang H J, Chen H P, Liu J P. 2015. Arctic sea ice decline intensified haze pollution in eastern China [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 8(1): 1−9. doi:10.3878/AOSL20140081

Wu B, Zhou T J, Li T. 2017a. Atmospheric dynamic and thermodynamic processes driving the Western North Pacific anomalous anticyclone during El Niño. Part I: Maintenance mechanisms [J]. J. Climate, 30(23): 9621−9635. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0489.1

Wu B, Zhou T J, Li T. 2017b. Atmospheric dynamic and thermodynamic processes driving the western North Pacific anomalous anticyclone during El Niño. Part II: Formation processes [J]. J. Climate, 30(23): 9637−9650. doi:10.1175/JCLI-D-16-0495.1

吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 2006. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究 [J]. 气象学报, 64(4): 510−517. Wu Dui, Bi Xueyan, Deng Xuejiao, et al. 2006. Effect of atmospheric haze on the deterioration of visibility over the Pear River delta [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 64(4): 510−517. doi:10.11676/qxxb2006.050

吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 2010. 1951~2005年中国大陆霾的时空变化 [J]. 气象学报, 68(5): 680−688. Wu Dui, Wu Xiaojing, Li Fei, et al. 2010. Temporal and spatial variation of haze during 1951−2005 in Chinese mainland [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 68(5): 680−688. doi:10.11676/qxxb2010.066

Yin Z C, Wang H J. 2016. The relationship between the subtropical Western Pacific SST and haze over North−Central North China plain [J]. Int. J. Climatol., 36(10): 3479−3491. doi:10.1002/joc.4570

Yin Z C, Wang H J, Guo W L. 2015. Climatic change features of fog and haze in winter over North China and Huang−Huai area [J]. Science China Earth Sciences, 58(8): 1370−1376. doi: 10.1007/s11430-015-5089-3

Zhang R H, Li Q, Zhang R N. 2014. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013 [J]. Science China Earth Sciences, 57(1): 26−35. doi:10.1007/s11430-013-4774-3