科学通报 2015 年 第 60 卷 第 12 期: 1132 ~ 1143
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

中国大地形东侧霾空间分布“避风港”效应及其“气候调节”影响下的年代际变异

徐祥德[①*], 王寅钧[①②], 赵天良[②], 程兴宏[③], 孟莹莹[①②], 丁国安[①]

① 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081;
② 南京信息工程大学, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044;
③ 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081
* 联系人, E-mail: xuxd@cams.cma.gov.cn

2014-06-13 收稿, 2014-10-10 接受, 2015-03-24 网络版发表
财政部公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406001)、环保公益性行业(气象)科研专项(201509001, 201409027)、科技支撑计划(S2014BAC22B04)和国家自然科学基金重点项目(41130960)资助

摘要 研究发现中国区域霾日空间分布的大地形影响与季节特征显著, 在西风带背景下高原大地形东侧背风坡可构成“避风港”效应, 其可能是中国东部区域霾日高频区域性分布重要的影响因素之一; 中国区域冬季为霾日高频时段, 春、夏、秋季大部分区域为霾日数低频区, 但近10年大气污染物排放持续加剧, 中国东部霾高发时段由冬季延伸至春、秋、夏季, 其呈现出大气环境恶化的“强信号”特征. 虽然中国区域霾日数年际变化趋势主要依赖于污染源排放程度, 值得注意的是虽然20世纪80, 90年代中国区域CO_2排放强度加大, 但中国东部霾日频数年际变化却表现出波动型相对“平稳”缓升特征, 此阶段中国东部对流层中下层出现了大气温度距平垂直结构“上冷下暖”的“不稳定”状态, 其有利于中国东部大气扩散或对流; 而近10年阶段中国东部出现霾天气与大气污染排放同步加剧异常变化, 2001~2012年期间中国东部对流层中下层则呈“上暖下冷”类似“逆温盖”, 即大气温度距平垂直结构出现年代际“逆转”趋势, 此大气温度垂直结构年代际特征可能加剧了大气污染排放的环境影响效应, 引发了中国东部大范围霾天气变异现象.

关键词
大地形
霾
气候调节
逆温盖
年代际变化

近年来, 随着工业发展与人类活动的加剧, 人们十分关注气溶胶的影响及其气候效应问题, 与人为气溶胶相关的“变异”云现象亦是十分引人注目的焦点. 印度洋试验(INDOEX)的科学家所提出的“亚洲棕色云”这一名词, 它被用来描述1~3月间出现在南亚地区、热带印度洋、阿拉伯海和孟加拉湾上空的“棕色霾”[1,2]. 这种霾已经被新闻界称作“地毯似的污染”, 这种污染决不是只在亚洲地区, 也出现在北美、欧洲和世界其他地区的大城市中, 在大西洋上空可延伸1000多公里[3]. 近年来伴随着经济的高速增长有更多的污染气体排入大气中. 大量人为影响生成的气溶胶使环境恶化, 其时间长、分布广、影响范围大, 还可对区域气候造成一定影响, 但同样霾也可受到气象条件及其环流背景的调制[4]. 尤其对于城市霾的影响越来越受到政府与公众的关注. 我国的大气污染已经从20世纪80年代的点源污染发展到90年代的城市污染, 21世纪开始演变为区域性、复合性大气污染[5]. 经济的快速发展和城市化导致大量的污染物集中排放到大气中, 从能源消费来看, 2000~2010年仅10年期间我国能源消费总量就增加120%, 其中煤炭占一次能源比例高达70%, 远高于发达国家20%~30%的比例, 且绝大多数煤炭消费集中在华北、

引用格式: 徐祥德, 王寅钧, 赵天良, 等. 中国大地形东侧霾空间分布“避风港”效应及其“气候调节”影响下的年代际变异. 科学通报, 2015, 60: 1132–1143
Xu X D, Wang Y J, Zhao T L, et al. “Harbor” effect of large topography on haze distribution in eastern China and its climate modulation on decadal variations in haze China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 1132–1143, doi: 10.1360/N972014-00101

华中及华东等重度霾污染地区[6~8]. 上述地区多种污染物均以高浓度同时存在, 进而发生复杂的相互作用, 形成大气复合污染和霾现象[9].

图1为卫星遥感MODIS反演的中国区域2001~2011年平均的气溶胶光学厚度分布, 可发现气溶胶高值区亦与上述能源消耗重点区相吻合. 气溶胶高值区域(北京与南部地区)亦呈相对稳定的南北向带状分布, 即北京地区气溶胶高值影响域可延伸至河北、河南及山东、山西及其南方等省, 这表明大地形“谷地”内北京地区的污染程度与南部周边各省的污染排放源影响密切相关. 这反映北京及其南方城市群落大范围气溶胶影响域相对稳定或持续维持现象, 此现象与文献[10]研究结论相吻合.

2013年1月, 我国中东部地区持续遭遇霾天气影响, 而同年在11, 12月又发生遍及中国东部大范围地区的霾过程, 且北京市污染尤为严重, 珠三角、长三角也发生时间长、污染重的霾天气. 不少城市气象台同步发布了气象史上首个霾橙色预警. 霾的问题日益成为人们关注的重点. 其中关于霾长期变化特征方面的研究, 亦得到很有科学价值基本一致的研究结果, 研究表明我国年霾日呈现出明显上升并导致中国东部大部分地区呈大气能见度下降的趋势[11]. 另外, 在雾、霾成因及其与能见度相关机理已取得重要进展[10~18]. 有关文献指出在霾日总体上升过程中, 可以划分为3个阶段, 20世纪60~70年代是缓慢上升阶段, 平均上升率为2.3 d(10 a^{-1}); 20世纪80~90年代是平稳阶段, 维持在每年平均5.2 d的霾日; 从2001年开始到2011年, 是快速上升阶段, 上升率平均为8.8 d (10 a). 为什么最近10年霾日出现如此快速上升的趋势, 其原因尚不清楚[12]. 霾日的季节差异不大可能与污染源排放的差异有关, 可能更主要与大气环流条件(包括风场、层结条件、水汽、温度以及降水等条件)有关[12]. 图1描述出冬季中国东部气溶胶高值区位于青藏高原、黄土高原东侧高原与平原的过渡带, 且高值区呈南-北向带状分布, 另外, 青藏高原东缘四川盆地亦有另一气溶胶高值中心. 由图1可发现冬季中国东部气溶胶分布与大地形结构可能存在某种相关关系. 本文将近一步探讨中国东部霾日频数时空变化分布的相关影响因素, 如由于青藏高原、黄土高原与东部平原“三阶梯”特殊的大地形作用下的大气环流背景的“气候调节”是否可导致中国东部城市群落上空污染源排放颗粒物长期累积状况(图1)及其变化, 是否会造成具有显著年代际气候特征的跨省、跨区域大气污染“空气穹隆”? 另外, 中国东部区域霾日频数是否亦如表现出显著的季节性特征, 其是否亦存在年代际变化趋势? 大气热力结构及其

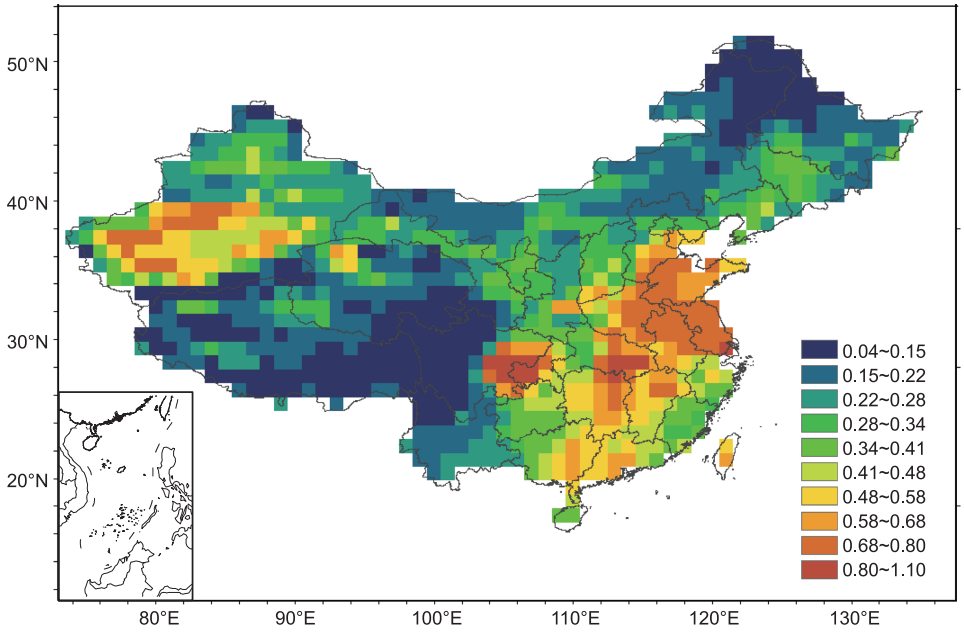


图 1 卫星遥感 MODIS 反演的中国区域 2001~2011 年平均的(550 nm)气溶胶光学厚度

Figure 1 Distribution of (550 nm) aerosol optical depth in China derived from the satellite MODIS remote sensing averaged over 2001–2011

环流变化是否也会影响大范围“霾”生消长周期(年代际)变异现象?

1 资料与方法

本文资料源为国家气象信息中心新编的质量控制和检验1951~2012年全国霾的逐日及温、湿、风气象要素数据, NCEP再分析数据、卫星遥感MODIS反演的中国区域2001~2011年平均的气溶胶光学厚度、CO_2排放总量资料源自Carbon Dioxide Information Analysis Center[19], 以及2013年1月PM_{10}和$PM_{2.5}$的浓度观测值, 中国气象局探空观测网L波段垂直高分辨率探空数据. 中国区域霾主要出现在100°E以东, 40°N以南地区, 其中珠江三角洲、华北大部、华东以及华中等地是霾天气高发的区域[20]. 霾日数的分布与城市工业化程度密切相关, 重霾污染区大都是在工业城市以及高度发达的城市. 该分布特点与之前的研究较为一致[15,21]. 因此, 本文研究选取中国东部110°E以东为重点研究区, 针对中国区域CO_2排放年代际变化三阶段(1961~1980, 1981~2000和2001~2012年)本文计算分析年代际三阶段1~12月霾年频数空间分布特征, 并将青藏高原、黄土高原大地形东侧范围作为探讨地形影响效应的关键区. 本文还计算分析了25°~37.5°N纬带80°~130°E东-西向大气温度层结垂直剖面图, 以研究上述霾频数三阶段年代际变化对应的中国东部大气垂直结构特征.

2 中国东部区域霾日变化三阶段特征

根据图2中中国区域CO_2排放源强度年际变化曲线的变速状况可将其划分为A, B, C三个阶段, 即A阶段1961~1980年缓升阶段、B阶段1981~2000年显著上升阶段、C阶段2001~2012年急剧上升阶段; 上述中国区域CO_2排放A, B, C三阶段与中国东部(110°E以东)霾日数年际变化呈显著相关(信度标准达95%以上)(图2), 但两者随时间年际变化并呈现简单的“线性”相关特征, 值得探讨的是中国东部自1980年前(A阶段)CO_2排放与霾日两者同步线性上升, 且霾日上升较CO_2排放趋势更为显著(图2); 但到了1981~2000年(B阶段)CO_2排放量状况加强, 而中国霾日频数却处于年际弱波动的“平缓”变化阶段. 2000~2012年CO_2加剧上升第三阶段, 中国东部霾日数量虽亦有年际波动但两者均呈同步急剧上升显著阶段. 上述分析结果表明霾日数时空变化特征虽主要依赖CO_2排放

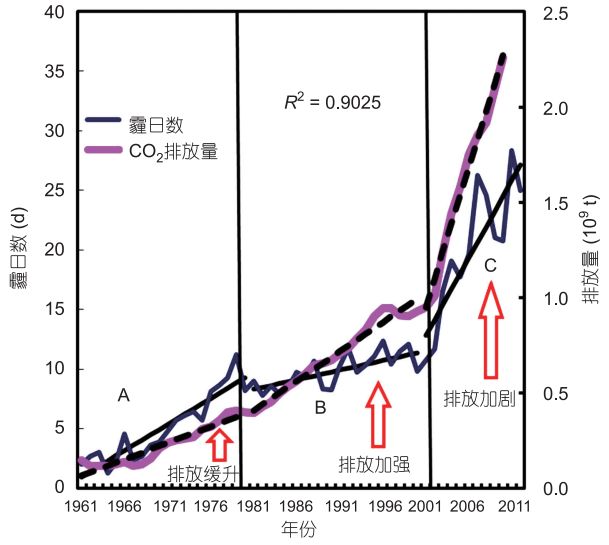


图 2 1961~2012 年中国区域 CO_2 排放与中国东部区域霾日年际变化

Figure 2 Interannual variations in CO_2 emission of China and number of days with haze regionally averaged over eastern China from 1961 to 2012

程度, 但也可能存在气象条件显著影响. 本文将此B阶段中国区域CO_2排放上升与霾日变化却“平缓”亦称之为类似于年代际变化“气候调节”效应. 为何初始A阶段两者呈年代际同步上升特征, 在B阶段伴随着CO_2排放显著持续, 中国东部霾日却表现出年代际“平稳”波动变化? 而近10年C阶段又出现霾日增加与CO_2年代际同步异常加剧的现象? 本文将在CO_2排放影响背景下气象诸多气候影响因子中选取中国大地形动力效应与大气热力结构的年代际两影响因素, 以重点探讨20世纪80年代后中国区域工业与城市发展快速阶段B与C阶段中霾天气“缓变”与频发异常的“气候调节”效应.

3 中国区域CO_2排放年代际三阶段与不同季节霾时空分布变异相关特征

霾天气发生的高频区主要集中在人口较为密集的大城市以及煤炭基地, 如环北京地区、山西和陕西以及河南局部地区. 霾天气的季节变化相当明显, 各高值中心的季节性变化也相当明显. 这其中的原因有待进一步深讨[20].

针对中国区域CO_2排放年代际变化三阶段(1961~1980, 1981~2000和2001~2012年)本文计算分析年代际三阶段1~12月霾年频数空间分布特征(图S1(a)~(d)), 研究表明针对CO_2排放初始缓升的1961~1980年A阶段, 中国区域霾的季节特征尤为显著, 冬季中国

区域青藏高原大地形以东为霾日相对高频时段, 其相对集中于青藏、黄土高原东缘大地形背风坡且呈南-北向带状. 绝大部分区域在夏、秋、春季均为霾日数低频区(清洁区). 相对而言春季霾日数亦偏多, B阶段(80, 90年代)CO_2排放持续加强, 并较显著上升, 高原东缘冬季南-北向带状"背风坡"东侧霾高发区频数增多, 且高频区有所扩展, 总体上秋季大地形东缘霾频发区呈南-北带状范围有所扩展状况, 但春、夏季霾高频区变化不明显(图S1(e)~(h)). 此B阶段霾日频数时空分布特征与本文提及的B阶段中国区域霾日总体变化相吻合(图2), 如图2所示CO_2排放加强、霾日增多并不显著, 且呈"平稳"弱波动状况; 近10年CO_2排放持续, 排放量呈加剧上升趋势, 此C阶段中国东部霾日数频发区出现了加剧变异现象, C阶段在高原东侧相对于前二个阶段(A, B)冬季与秋季霾频发区显著扩展, 甚至在春、夏季相对"清洁时段"高原东侧霾频发区亦扩展霾日时空分布原季节性特征变得"模糊", 且呈频发"变异"特征, 过去除冬季外中国东部沿海霾偏少区亦发生了"突变", 由冬季霾高发区蔓延至春、秋、夏季, 其中京津冀、长三角、珠三角为3个霾高发的集中区, 并有向东北地区"蔓延"的趋势(图S1(i)~(l)). 这表明中国区域排放加速影响, 以及年代际气候背景变化均可能对中国霾频发区季节特征产生了重要的"调节"作用, C阶段(2001~2012年)这种与CO_2排放量剧增同步的霾高发区分布"变异"特征已构成中国大气污染恶化的大范围区域性"强信号". 这将提示我们思考在高原东侧特殊大地形背景下中国东部区域大气环境承载能力"阈值"对气候季节性调制的影响问题.

本文为探讨图3(a)~(d)中大地形东侧不同季节背风坡环流效应及其对霾日频数空间分布季节特征, 进一步计算了各季与年平均东-西向风场偏差垂直剖面图, 以分析各季大地形背风坡环流效应的季节性特征. 比较图3(a)~(d)各季与年平均东-西向风场偏差垂直剖面图, 可发现冬季高原东侧为显著的下沉气流区. 显然, 该季节不利于高原东侧大气对流扩散; 春季、夏季高原东侧均为显著上升气流, 且夏季还呈高原东部与平原过渡区为上升支的气旋性环流圈的上卷气流. 另外, 对照图S1中A, B, C阶段秋季霾日分布可发现在东部沿海区域秋季较春、夏季霾日高频区更为显著. 图3(c)中秋季110°E以西为上升支, 其中沿海高频区对应110°E以东则为下沉气流. 由此, 导致秋季霾日高频状况较春、夏季更为明显, 但远弱于冬季. 同理计算分析了其他月份东-西向背风坡特征均可得到上述类似的结论(图略).

4 中国区域霾空间分布特征与大地形东侧"避风港"效应

在西风带背景下中国"三阶梯"大地形动力效应显著影响着中国区域天气气候特征, 对于处于大地形东侧中国东部霾天气频发时空分布是否亦存在大地形动力、热力效应. 很多研究亦指出大气环流、局地气象要素、边界层结构与特殊地形叠加极其不利于污染物扩散[9,22]. 京津冀山前平原地区强而厚的逆温层和低的混合层高度将污染物强烈地压缩于近地层[9]. 本文将大地形东侧背风坡"下卷气流"形成的"弱风区"称为"避风港"效应. 例如在异常的静稳型天气背景下, 2013年1月13~14日我国中东部$PM_{2.5}$质量浓度高值分布在大地形东侧(图S2). 对于北京而言, 特殊的地理条件(西北多山, 无风条件下不利于污染物扩散)和区域污染物输送也对此次霾日频发有所贡献[23]. 本文采用1961~2012年NCEP再分析资料, 分析计算了西风带背景下高原大地形东侧"背风坡"环流及其季节特征, 探讨了大地形动力效应与中国东部霾高发区时空分布相关特征; 由图4(a)可发现冬季青藏高原东侧大地形"背风坡"气流伴随下卷气流, 构成了长期性顺时针垂直涡旋结构, 此类大地形背风坡环流圈下沉气流区(图4(a)). 另外, 此大地形东侧"弱风区"亦恰对应图4(b)中25°~37.5°N纬带上近地层风速$|\vec{V}|$的低值区(弱风区), 大地形东侧100°~117°E均呈风速低值中心区, 该区域恰对应图4(a)的"背风坡"垂直环流图主体"下卷气流区", 也恰对应图4(c)中25°~37.5°N纬带中国区域冬季平均霾日数的峰值区(110°~125°E), 此类高原"背风坡"的环流圈东侧下沉气流动力效应不利于中国东部群工业区与城市群区大气污染排物扩散, 尤其抑制了污染物向高空的对流输送, 图4(c)大地形东侧"避风港"冬、秋季"弱风区"亦对应着图S1中三阶段冬季与秋季相对中国东部高原东缘南-北带状霾频发区. 由图4(c)可发现春、夏、秋、冬不同季节霾日相对峰值位于大地形背风坡反气旋涡旋下沉处(110°~115°E), 且冬季霾日发生双峰现象, 第二峰值为120°E沿海处, 秋、春、夏季峰值大小依次降低.

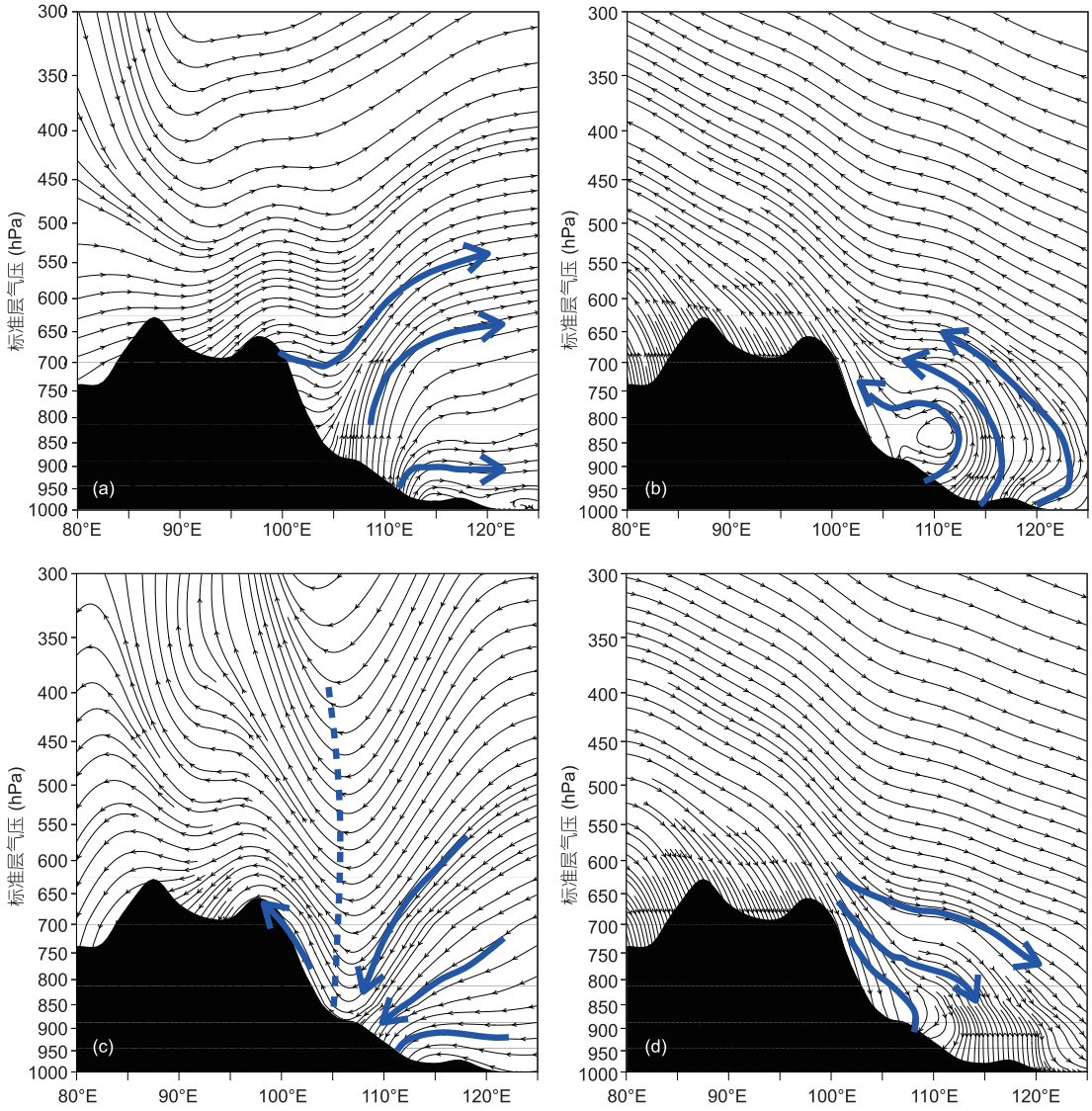


图 3 1961~2012 年 25°~37.5°N 纬带各季与年平均环流结构偏差东-西向垂直剖面图. (a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季, (d) 冬季. 虚线为上升与下沉气流交界处

Figure 3 Vertical sections of differences of seasonal and annual mean circulations in (a) spring, (b) summer, (c) autumn and (d) winter averaged along 25°~37.5°N from 1961 to 2012. The dashed lines are the borders between ascend and descend air flows

中国区域CO_2排放具有A, B, C三阶段中国区域冬季霾日纬向分布及其年代际阶段性特征, 由图5可发现, 对应于CO_2排放量A, B, C三阶段, 中国区域100°E以东为冬季霾日数频发变幅显著区, 此区域恰对应图4(a)青藏、黄土高原东侧大地形背风坡, 其中110°~117°E范围为冬季霾日高频区, 且该区域亦为图4(b)大地形背风坡"弱风区", 在A, B, C各阶段, 此"弱风区"霾日频数峰值现象亦揭示出随着大气污染排放增幅, 大地形东侧背风坡的"避风港"效应, 分析表明, 该区域对污染物扩散抑制效应更为显著, 且此影响域呈向下游扩展的高频区"双峰"趋势; 1961~1980年冬季霾日频数处于相对低的峰值, 1981~2000年峰值上升, 2001~2012年冬季霾日频数增加幅度显著, 且处于高峰阶段, 尤其110°E以东增长显著, 且有向东部沿海扩展的势头, 冬季霾日频数增长呈双峰趋势区(图5).

5 霾天气空间分布年代际变异与大气热力结构相关特征

通过BECAPEX现场试验城市低层边界层热力结

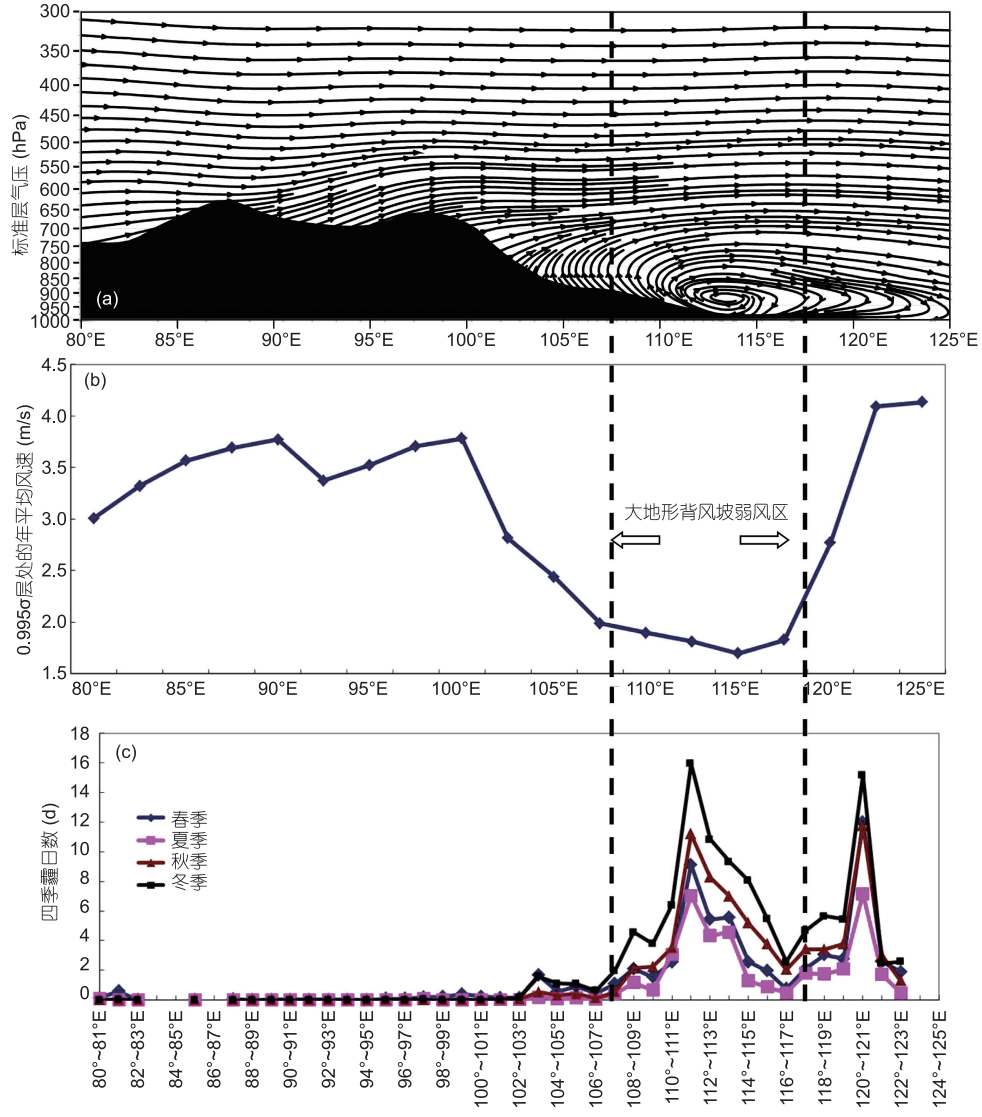


图 4 1961~2012 年 25°~37.5°N 纬带环流与中国区域霾日数纬向分布特征. (a) 年平均垂直环流结构, (b) 年平均近地层风速, (c) 四季霾日数

Figure 4 Zonal distribution averaged over 25°~37.5°N from 1961–2012 with (a) annual mean of vertical circulation, (b) annual mean of near surface wind and (c) seasonal number of days with haze

构与南北剖面大气污染测点平均浓度的综合相关分析可发现, 2001年1~3月城市4个测点平均污染浓度与城区低层(925~1000 hPa)温度垂直偏差之间, 两者高相关区域呈东北-西南向带状区域, 城区平均污染浓度与大范围垂直温差热力结构高相关区特征揭示了北京地区污染过程低层大范围垂直热力结构弱变化或逆温层结构; 此结论与有关北京地区冬季大气稳定度按Pasquil分类为E和F级别(较稳定大气)的比率占50%以上的统计结果一致[24].

2013年1月我国中东部出现持续大范围霾天气, 由中国气象局L波段高垂直分辨率探空站温度垂直廓线图可发现北京及河北周边在此两次重污染过程2000 m以下存在显著的大范围区域逆温结构. 如图S2(a)和(b)可见, 2013年1月13~14日以及1月29日北京及南部, 并涉及南方呈南-北向大范围高浓度PM_{10}, $PM_{2.5}$分布区域, 上述2001年BCEAPEX现场试验有关大范围大气逆温层结对区域大气污染影响的研究结果已在2013年1月中国东部区域大地形东侧大范围霾高频发生现象再次得到印证.

本文计算了大气层结稳定度特征计算过程(1961~2012年)850与925 hPa温度上下层偏差场, 计算分析可发现中国东部区域大气温度层结大尺度特征亦具

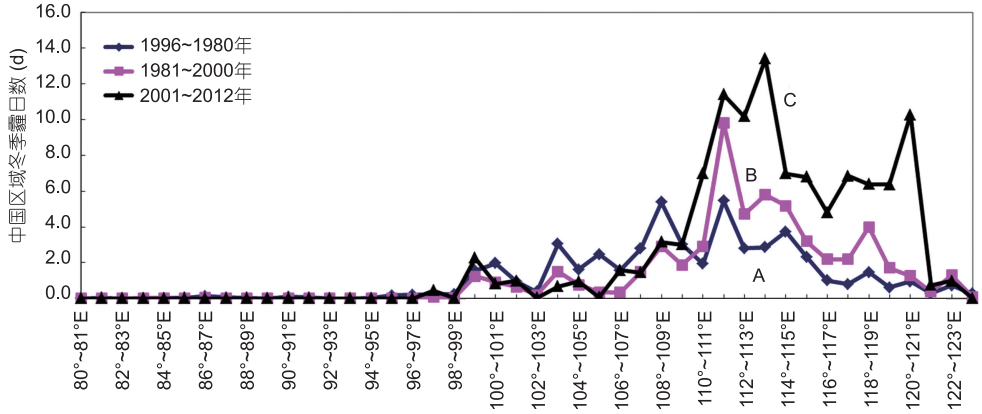


图 5 中国区域冬季霾日纬向分布曲线. 曲线 A, 1961~1980 年; 曲线 B, 1981~2000 年; 曲线 C, 2001~2012 年

Figure 5 Zonal variations in number of days with haze in winter averaged over 1961–1980 (curve A), 1981–2000 (curve B) and 2001–2012 (curve C)

有显著的季节性特征, 在冬季(12, 1, 2月)中国东部存在显著大尺度的逆温层结, 即850与925 hPa温度偏差场中国东部区域温度层结构特征呈显著正偏差区分布, 由此表明冬季中国东部呈大范围大气温度层结(下冷上暖)分布特征, 其极不利于大气污染的扩散与对流, 反之其他季节上述大尺度递温特征亦不显著(图略).

值得探讨的问题是对应中国东部霾年代际变异现象是否亦受类似上述大尺度大气热力层结特征影响? 本文计算结果也可发现25°~37.5°N纬带80°~130°E东-西向垂直剖面图(图6)上1961~1980, 1981~2000, 2001~2012年三阶段过程大气温度层结呈显著的差异, 1961~1980年第一阶段中国东部区域青藏高原以东温度垂直结构均为负距平, 且大气垂直层结特征不显著; 1981~2000年第二阶段中国东部虽处于CO_2排放持续上升阶段, 但霾日数增加趋势却处于平缓略升阶段, 值得注意的是此阶段高原东部大气层结亦为正距平, 且青藏高原上空及其东部大气对流层中下层出现了"上冷下暖"的年代际相对不稳定层结(图6(b)), 此类大气层结有利于大气污染排放物垂直交换及其对流扩散, 虽然上述已分析的B阶段中国区域CO_2排放上升, 而1981~2000年阶段性大气层结"气候调节"效应可能导致霾日未增, 却处"平稳"变化状况; 众所周知近10年(2001~2012年)中国东部霾频发现象已引起社会公众与政府的关注. 从中国区域排放状况(图2)可知近10年亦为CO_2排放加速期, 但从上述高原东部大气层结特征影响的视角出发, 通过计算分析亦可发现自高原上空, 并延伸至中国东部区域近地层~300 hPa为温度正距平, 即高原上空及其东部呈东-西向的对流层中部(800~400 hPa)为"暖区"(正距平高值区), 相对而言, 对流层低层(850 hPa以下)大气温度为弱正距平, 两者使C阶段构成了"上暖下冷"的大尺度"逆温盖"距平年代际结构特征(图6(c)), 这意味着C阶段与B阶段霾日不增的"平稳"变化状况大气不稳定热力距平结构呈"反位相"特征. 因此, 研究表明2000~2012年(C阶段)CO_2排放加速与上述"逆温盖"大气垂直距平结构年代际特殊背景共同作用, 导致中国东部大范围霾频发"突变"现象. 此结论与有关2013年1月强雾霾天气过程分析研究结果相吻合, 该文献指出重雾霾天气气象条件对流层内几乎一致增温, 对流层低层异常逆温层使得大气变得更加稳定. 这些异常大气背景都有利于雾霾天气维持与发展[22].

为了进一步印证上述中国区域霾日频数年际变化与大气热力结构的相关特征, 本文计算了中国区域霾日频数与大气各层气温相关场, 图7(a)和(b)两相关结构在中国东部(高原东侧)呈显著反位相特征, 其中600 hPa相关场上中国东部为显著正相关区(图7(b)), 850 hPa相关场中国东部区域则为负相关区(图7(a)), 即中国区域霾日频数偏多时高原东部大气热力结构为"上暖下冷"结构, 其类似C阶段大气热力结构距平场特征, 反之, 中国区域霾日偏少阶段高原东部则为"上冷下暖"结构距平场特征, 其类似B阶段大气热力结构距平场特征, 上述中国区域霾日频发状况与大气热力结构相关性亦可从(图7(c)和(d))中得到印证, 该图揭示出高原东侧850 hPa以上两者为正相关, 850 hPa以下两者为负相关, 其亦可表现出霾日频发年代际阶段"上暖下冷"的大范围逆温盖现象.

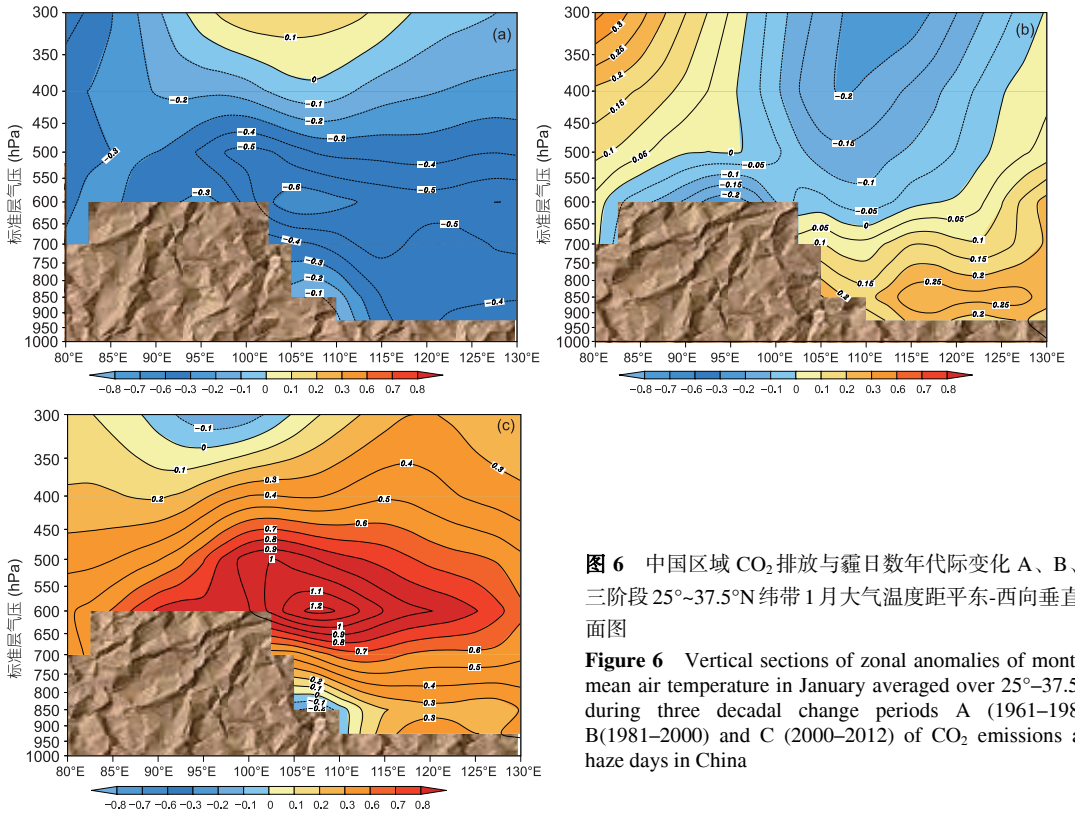


图 6 中国区域 CO_2 排放与霾日数年代际变化 A、B、C 三阶段 25°~37.5°N 纬带 1 月大气温度距平东-西向垂直剖面图

Figure 6 Vertical sections of zonal anomalies of monthly mean air temperature in January averaged over 25°–37.5°N during three decadal change periods A (1961–1980), B(1981–2000) and C (2000–2012) of CO_2 emissions and haze days in China

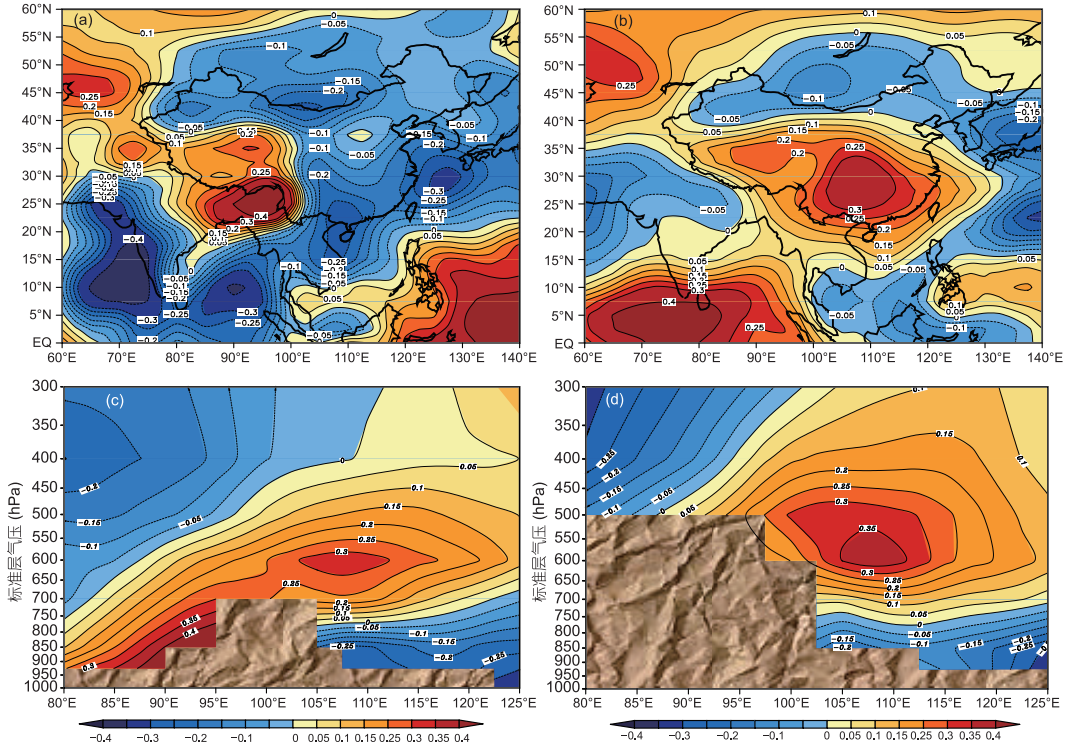


图 7 中国区域 1 月霾日频数与气温的相关场的(a) 850 hPa 水平分布, (b) 600 hPa 水平分布, (c) 25°N 垂直剖面, (d) 30°N 垂直剖面

Figure 7 Correlations between air temperature and haze event frequencies over China in horizontal distribution at (a) 850 hPa and (b) 600 hPa as well as vertical sections at (c) 25°N and (d) 30°N

从三阶段霾频发状况与中国东部大气热力结构相关联的视角出发, 本文进一步分析中国东部110°E以东25°~40°N纬带三阶段年代际大气温度垂直廓线. 由图8(a)可发现近10年C阶段大气温度结构较前两阶段(A, B)发生异变现象, 此阶段大气气温垂直廓线600 hPa高度出现了显著的"逆温盖"距平特征, 此现象与上述分析的C阶段"上暖下冷"距平结构相吻合. 在近10年中国区域CO_2排放加剧的大背景下, 此大气温度特殊的垂直结构可能是中国东部区域霾频发的重要"气候调节"因素之一. 对比A, B两阶段可以发现大气气温垂直结构与C阶段成"反位相", A和B两阶段大气层结如图8(a)所示, 在600 hPa为相对"低谷", 其以下大气结构呈"上冷下暖"的"反位相"距平特征. B阶段在CO_2排放虽然处于显著上升阶段, 中国东部霾日变化却处于平缓状态, 并未显著上升, 这说明B阶段的大气垂直热力结构对CO_2排放引发的霾天气起了重要抑制作用. 另外, 由图8(b)亦可发现对应于A, B, C三阶段大气结构变化的状况, C阶段大气风速垂直距平结构亦与A, B两阶段存在显著的差异, 尤其在600 hPa高度以下C阶段大气风速为"低谷"状况, 这现象可能说明近10年大气风速不仅在边界层减弱, 而且大气风速垂直廓线在对流中下层(600 hPa以下)亦出现年代际异常弱风速特征, 这些因素均可造成此阶段在该区域大气污染扩散与对流受到严重抑制.

6 结论

(1) 中国区域霾日数年际变化主要依赖于污染源排放程度. 根据中国区域霾日和CO_2排放量年际变化曲线的变速状况可将其划分为A(1961~1980年)、B(1981~2000年)和C(2001~2012年)3个阶段. 中国区域近50多年(1961~2012年)CO_2排放A, B, C三阶段持续递增, 与中国区域霾日数年际变化呈显著正相关.

(2) 研究发现青藏高原东侧"背风坡"呈季节性顺时针垂直环流结构, 冬季与春季及其秋季西风带背景下高原大地形东侧背风坡环流均存类似的顺时针垂直环流圈; 夏季背风坡则为上升气流区; 此类大地形背风坡特殊环流圈的下卷气流区恰对应背风坡弱风区霾日频发峰值区, 此现象表现出大地形背风坡弱风区及其下卷气流不利于大气扩散或对流, 形成类似静稳天气的"避风港"效应; 不同季节霾日频数峰值大小依次为冬、秋、春、夏季. 计算各季与年平均背风坡垂直环流偏差场可发现冬季高原东侧为显著的主体下卷气流区; 春季、秋季高原东侧110°E以东均为部分下沉气流区, 且夏季高原东侧呈逆时针垂直环流圈的上卷气流区. 以上高原背风坡垂直环流结构季节性特征与中国区域霾日空间分布季节差异相吻合.

(3) 研究表明中国区域霾的季节特征显著, 如CO_2排放初始缓升的A阶段(20世纪60, 70年代), 冬季为霾日相对略高频时段, 在夏、秋、春季绝大部分区域均为霾日数低频区(清洁区). B阶段(20世纪80, 90年代)CO_2排放持续, 并较为显著上升, 冬季南-北带状霾高频区有在中国东部30°~35°N区域向东扩展特征, 而总体上其他季节霾日增多趋势并不显著, 霾天气分布仍维持原季节特征; 近10年C阶段CO_2排放持续, 加剧上升, 中国东部霾日数频发区出现了变异,

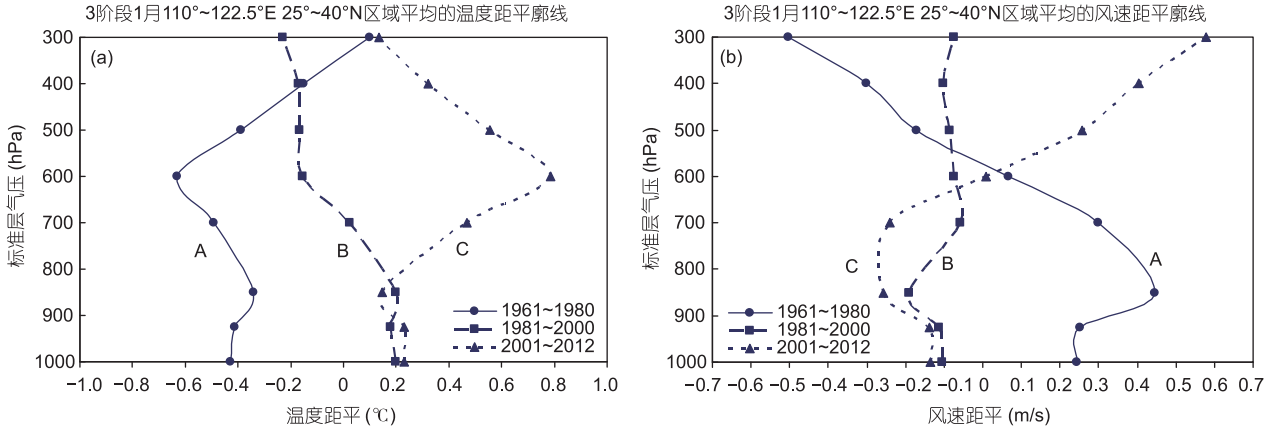


图 8 霾频数年际变化 A、B、C 三阶段大地形 110°E 以东(25°~40°N)纬带距平垂直廓线. (a) 气温, (b) 风速

Figure 8 Vertical profiles of zonal anomalies of (a) air temperature and (b) horizontal wind averaged over 25°–40°N in the east of 110°E within China during three decadal periods A, B and C of haze frequency changes

尤其原季节性特征变得“模糊”, 中国东部沿海霾日偏少区亦发生了“突增”, 且由冬季霾高发区蔓延至春、秋、夏季, 其中京津冀、长三角、珠三角维持3个霾高发区, 并有向东北地区“蔓延”的趋势. 这种霾高发区分布“变异”特征已构成中国大气污染恶化的大范围区域性“强信号”. 这将提示我们思考在高原东侧特殊大地形背景下中国东部区域大气环境承载能力“阈值”对气候季节性调制的影响问题.

(4) 研究结果表明中国区域CO_2排放三阶段中, B(1981~2000年)阶段CO_2较显著持续上升, 但中国东部霾日年际变化却表现出“平稳”缓慢变化的非同步异常特征, 而近10年C阶段中国东部霾天气剧增, 且与CO_2排放同步加剧. 这意味在CO_2排放持续的背景下B, C前后两年代际阶段中国东部霾天气发生转折性的异常变化; 此表明中国区域霾日数时空变化特征虽主要依赖于区域CO_2排放程度, 但也存在年代际变化过程的“气候调节”效应.

(5) 研究发现冬季中国东部对流层中下层存在显著大范围的“逆温盖”距平年代际特征, 不利于污染物的扩散与对流, 易于形成有利于污染物累积的静稳天气气候背景. B阶段(1981~2000年)对流层中下层出现了“上冷下暖”类似不稳定层结距平特征, 其有利于大气污染排放物扩散或对流, 此阶段虽然中国区域CO_2排放持续上升, 但霾日数却处于平缓非同步弱变化阶段; C阶段(2001~2012年)大气层结出现逆转, 对流层中下层呈“上暖下冷”类似大尺度“逆温盖”距平年代际结构特征, 其与近10年CO_2排放加速共同作用, 导致了中国东部大范围霾频发年代际变异现象. 上述两类对流层中下层大范围大气“反位相”层结可能均起了年代际“气候调节”的重要效应, 本文通过中国区域霾日频数与大气各层气温相关计算亦可印证上述结论.

本文的研究结果发现冬季中国东部霾天气大范围频发现象不仅与局地天气尺度过程大气低层强逆温结构密切相关, 而且年代际尺度区域性对流中上层“逆温盖”温度距平垂直结构亦可为大范围霾天气频发提供了关键“气候调节”背景, 此类年代际尺度大气“上暖下冷”垂直结构将抑制污染物对流扩散, 加剧大气污染排放对区域霾天气频发的影响持续效应.

另外, 需进一步探索霾时空分布特征受区域工业布局、城市群分布排放状况的影响. 加强在特殊大地形背风坡背景下中国东部环境承载量阈值与气候调节能力直接的相关关系研究. 大气环境承载容量的大小取决于该区域内大气环境的自净能力以及自净介质的总量. 若超过了环境容量的阈值, 将削弱气候调节能力, 尤其大气环流季节性特征的影响能力亦将失调. 区域生态环境的良性循环受到破坏、人群健康及其生存环境将受到难以挽回的危害.

有关研究指出当今不论是霾还是雾, 其背后都有大量与人类活动有关的气溶胶粒子参与(例如: $PM_{2.5}$), 都已经不是完全的自然现象. 减少雾-霾天气所带来的影响, 必须对这种变化背后的大气气溶胶污染给予特别重视. 雾-霾还导致大气层结稳定度增加有利其维持和发展[23]. 本文的研究揭示了高原东侧对流层中高层“逆温盖”大气垂直结构距平年代际特征与中国东部区域霾频发现象的关联性, 着重于分析了年代际气候背景变化问题, 但未涉及大气低层污染过程气溶胶理化特征与大气层结的互反馈问题, 值得探讨的是低层大气气溶胶与大气稳定度结构的互反馈效应是否会影响对流层中高层大气垂直结构. 此问题同样启示我们思考雾与霾的形成过程中大气气溶胶与水汽成核和增长的机制及其大尺度大气垂直结构、湍流运动、辐射效应的复杂影响作用.

参考文献

1 Ramanathan V, Chung V C, Kim D. Atmospheric brown clouds: Impacts on South Asian climate and hydrological cycle. Proc Natl Acad Sci USA, 2005, 102: 5326–5333

2 Seinfeld J. Atmospheric science: Black carbon and brown clouds. Nat Geosci, 2008, 1: 15–16

3 Center for Clouds, Chemistry and Climate (C4). UNEP Assessment Report. San Diego: University of California, 2002. 12–55

4 Ramanathan V, Ramana M V, Roberts G. Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption. Nature, 2007, 448: 575–578

5 Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China. Atmos Environ, 2008, 42: 1–42

6 NBS (Natural Bureau of Statistics). China Energy Statistical Yearbook 2012 (in Chinese). Beijing: China Statistical Press, 2001 [国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴2001. 北京: 中国统计出版社, 2001]

7 NBS (Natural Bureau of Statistics). China Energy Statistical Yearbook 2012 (in Chinese). Beijing: China Statistical Press, 2011 [国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴2011. 北京: 中国统计出版社, 2011]

8 Shi X H, Xu X D. Progress in the study of regional impact of aerosol and related features of heavy fog in Beijing city (in Chinese). Chin J Geophys, 2012, 55: 3230–3239 [施晓晖, 徐祥德. 北京及周边气溶胶区域影响与大雾相关特征的研究进展. 地球物理学报, 2012, 55: 3230–3239]

9 Wang Y S, Yao L, Wang L L, et al. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China. Sci China Earth Sci, 2014, 57: 14–25 [王跃思, 姚利, 王莉莉, 等. 2013年元月我国中东部地区强霾污染成因分析. 中国科学: 地球科学, 2014, 44: 15–26]

10 Xu X D, Shi X H, Zhang S J, et al. Aerosol influence domain of Beijing and peripheral city agglomeration and its climatic effect. Chin Sci Bull, 2006, 51: 2016–2026 [徐祥德, 施晓辉, 张胜军, 等. 北京及周边城市群落气溶胶影响域及其相关气候效应. 科学通报, 2005, 50: 2522–2530]

11 Zhang L, Wu J, Zhang W. Analysis of visibility variations in China from 1955 to 2000 (in Chinese). J Lanzhou Univ (Natural Sciences), 2011, 47: 46–55 [张利, 吴涧, 张武. 1955~2000年中国能见度变化趋势分析. 兰州大学学报(自然科学版), 2011, 47: 46–55]

12 Ding Y H, Liu Y J. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in recent 50 years and their relations with atmospheric humidity (in Chinese). Sci China Earth Sci, 2014, 44: 37–48 [丁一汇, 柳艳菊. 近50年我国雾和霾的长期变化特征及其与大气湿度的关系. 中国科学: 地球科学, 2014, 44: 37–48]

13 Liu X N, Zhang H Z, Li Q X, et al. Preliminary research on the climatic characteristics and change of fog in China (in Chinese). J Appl Meteorl Sci, 2005, 16: 220–230 [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. 应用气象学报, 2005, 16: 220–230]

14 Zhang X Y, Zhou L X, Ding G A. Meteorological disasters books-Atmospheric composition and environment disasters (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press: 142 [张小曳, 周凌晞, 丁国安. 大气成分与环境气象灾害. 北京: 气象出版社, 2009, 142]

15 Gao G. The climatic characteristics and change of haze days over China during 1961–2005 (in Chinese). Acta Geogr Sin, 2008, 63: 762–768 [高歌. 1961~2005年中国霾日气候特征及变化分析. 地理学报, 2008, 63: 762–768]

16 Hu Y D, Zhou Z J. Climatic characteristics of haze in China (in Chinese). Meteorl Mon, 2009, 35: 83–78 [胡亚旦, 周自江. 中国霾天气的气候特征分析. 气象, 2009, 35: 83–78]

17 Wu D, Wu X J, Zhu X X. Fog and Haze (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2009, 198 [吴兑, 吴晓京, 朱小祥. 雾和霾. 北京: 气象出版社, 2009, 198]

18 Wu D, Wu X J, Li F, et al. Long time variation of fog and mist in 1951–2005 in mainland China (in Chinese). J Trop Meteorl, 2011, 27: 146–151 [吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 中国大陆1951~2005年雾与轻雾的长期变化. 热带气象学报, 2011, 27: 146–151]

19 Bpden T, Marland G, Andres B. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO_2 Emissions. Technical Report. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. 2013

20 Sun Y, Ma Z F, Niu T, et al. Characteristics of climate change with respect to fog days and haze days in China in the past 40 years (in Chinese). Clim Environ Res, 2013, 18: 397–406 [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. 气候与环境研究, 2013, 18: 397–406]

21 Wu D, Wu X J, Li F, et al. Temporal and spatial variation of haze during 1951–2005 in Chinese mainland (in Chinese). Acta Meteorol Sin, 2010, 68: 680–688 [吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 1951~2005年中国大陆霾的时空变化. 气象学报, 2010, 68: 680–688]

22 Zhang R H, Li Q, Zhang R N. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013. Sci China Earth Sci, 2014, 57: 26–35 [张人禾, 李强, 张若楠. 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. 中国科学: 地球科学, 2014, 44: 27–36]

23 Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, et al. Factors contributing to haze and fog in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2013, 58: 1178–1187 [张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考. 科学通报, 2013, 58: 1178–1187]

24 Lee D O. The influence of atmospheric stability and the urban heat island on urban rural wind speed differences. Atmos Environ, 1979, 13: 1175–1180

“Harbor” effect of large topography on haze distribution in eastern China and its climate modulation on decadal variations in haze

XU XiangDe[1], WANG YinJun[1,2], ZHAO TianLiang[2], CHENG XingHong[3], MENG YingYing[1,2] & DING GuoAn[1]

[1] *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;*
[2] *Nanjing University of Information Science & Technology, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing 210044, China;*
[3] *China Meterological Administration Public Weather Service Center, Beijing 100081, China*

The impact of large topography on regional distribution of haze occurrences and the distinct seasonal variation of haze pollution in China are studied. The “harbor” effect on the eastern lee of the Tibetan Plateau’s large topography on the westerlies is possibly an important factor influencing the regional distribution of haze frequency in eastern China. High haze frequency in winter and low haze frequency in spring, summer and fall are observed in China. With the enhanced pollutant emissions in China over recent 10 years, this seasonality of haze turned into indistinct with the frequent haze event extending from winter to spring, autumn and summer, implying a strong signal of atmospheric environmental degradation in China. Although the trends in interannual variations in haze occurrences largely depend on pollutant emissions in China, it is noteworthy that the interannual variation of haze pollution presented a smooth rise in eastern China from the 1980s to the 1990s asynchronously with the increased CO_2 emission in China, and during the two decades, the anomalous pattern of “upper cooling and bottom warming” air temperature in the middle and lower troposphere similarly to the unstable stratification is favorable to air pollutant diffusion and convection. while the haze events in eastern China was synchronously significantly intensified with the sharp increasing CO_2 emissions in China over recent more than 10 years, when the “shield” of temperature inversion in the middle and lower troposphere is found with an interdecadal reversion in anomalies of vertical temperature over eastern China during the period C (2001–2012), which could aggravate the environmental effects of air pollutant emissions leading to the anomalous haze weather in a large region over eastern China.

large topography, haze events, climate modulation, temperature inversion, decadal changes

doi: 10.1360/N972014-00101

补充材料

图 S1 1961~2012 年 A 阶段(1961~1980 年)、B 阶段(1981~2000 年)、C 阶段(2001~2012 年)全国霾年日数季节分布

图 S2 中国气象局探空观测网 L 波段垂直高分辨率探空重污染过程逆温特征

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.