

孙家仁, 许振成, 刘煜, 等. 2011. 气候变化对环境空气质量影响的研究进展 [J]. 气候与环境研究, 16 (6): 805-814. Sun Jiaren, Xu Zhencheng, Liu Yu. 2011. Advances in the effect of climate change on air quality [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (6): 805-814.

气候变化对环境空气质量影响的研究进展

孙家仁¹ 许振成¹ 刘煜² 彭晓春¹ 陈来国¹
李海燕³ 陶俊¹ 林泽健¹

1 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655
2 中国气象科学研究院, 北京 100081
3 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080

摘要 回顾了国内外气候变化对环境空气质量影响的相关研究成果。已有研究表明, 气候变化可以通过改变地面气温而加速某些大气污染成分(如 O₃)的前体物(如 VOCs)的自然源排放, 可以通过改变化学反应速率、边界层高度和天气系统出现频率等来影响污染物的垂直混合和扩散速度, 还可以通过改变大气环流形势, 进而改变污染物的传输方式; 气候变化不仅影响到室外空气质量, 还可以影响室内空气质量, 给人体健康带来威胁。因而, 气候变化可以影响局地或地区的大气环境质量, 也可以带来室内空气质量的改变, 这些认识已被学者们达成一致。但是这些影响仍存在着诸多不确定性因素, 主要包括: 未来气候变化的趋势和程度, 未来的大气污染物及其前体物的排放量, 大气污染成分与气候变化因子间的相关关系, 不同大气组分间在不同气象条件作用下的物化过程和机理的认识等。我国在涉及气候变化对环境空气质量影响研究方面处于起步阶段, 建议今后加强该项研究, 尤其是在气候变化对与空气质量相关的公共健康影响方面的研究。

关键词 气候变化 环境空气质量 公共健康

文章编号 1006-9585 (2011) 06-0805-10 **中图分类号** P467, X513 **文献标识码** A

Advances in the Effect of Climate Change on Air Quality

SUN Jiaren¹, XU Zhencheng¹, LIU Yu², PENG Xiaochun¹,
CHEN Laigu¹, TAO Jun¹, and LIN Zejian¹

1 *South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655*
2 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*
3 *Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080*

Abstract The current understanding about the effects of climate change on air quality is reviewed. It has been found that the increase of surface air temperature can accelerate the natural source emission of the precursors (e. g. VOCs) of some air pollutions (e. g. O₃); it can change the vertical mixing and diffusion rate by modifying the chem-

收稿日期 2010-05-27 收到, 2011-08-15 收到修定稿

资助项目 中央级公益科研院所基本科研业务专项基金 zx20080905, 气象行业专项 GYHY200906020, 国家重点基础研究发展计划项目 2011CB403403, 国家环保公益性行业科研专项项目 200809011

作者简介 孙家仁, 男, 1978年生, 硕士, 工程师, 主要从事大气化学数值模拟研究。E-mail: sunjiaren@scies.org

ical reaction rate, the height of Planetary Boundary Layer (PBL), and the occurrence frequency of weather systems; it can also alter the atmospheric circulation and thereby change the manner of pollution transport. Climate change can affect not only the outdoor air quality but also the indoor air quality, hence there might be a threat to human health. Thus, climate change can impact the regional or local outdoor and indoor air quality, on which most scholars have reached an agreement. However, these impacts still have some major uncertainties: The trend and intensity of future climate change, the future emission of air pollutions and their precursors, the correlation between atmospheric pollution and climate change factors, and the physical and chemical mechanisms of atmospheric constituents in the diverse meteorological conditions. The topic on the effect of climate change on air quality is still at the initial stage in China. Therefore, the authors suggest discreetly that the research projects on this topic, especially, on the impacts of climate change on air-pollution-related public health, should be launched in China.

Key words climate change, air quality, public health

1 引言

CO₂等温室气体增加对于全球变暖有重要贡献, 据 IPCC AR4 (Forster et al., 2007) 估计, 由于温室气体增多, 使得自 1850 年以来地表平均温度升高了 0.76 °C。而气溶胶浓度增加可以改变大气的辐射特征, 进而通过直接或间接辐射强迫影响地气系统的辐射收支, 引起全球大气环流和水循环的变化 (Ramanathan et al., 2001)。近年来, 随着区域环境空气质量的进一步恶化, 如对流层臭氧 (O₃) 浓度升高、超级城市和城市群光化学烟雾和大气灰霾等复合污染加剧 (Suhadi et al., 2005; Chan and Yao, 2008; Deng et al., 2008), 引起人们对区域环境空气质量与公共健康关系问题的普遍关注 (Jerrett et al., 2005; Parent et al., 2007; Tie et al., 2009)。由此, 气候与环境相互作用问题越来越为学者们所关注。但以往研究偏重于讨论温室气体与气溶胶排放对气候系统的影响, 而气候变化对环境空气质量影响的研究相对较少。

实际上, 环境空气质量除了直接受局地大气污染物排放影响, 也必然依赖于区域和全球气候变化。如气候变化所带来的气温升高、中纬度气旋减弱或北移、天气系统停滞 (或阻塞) 现象多发、风速减小、热带气旋频数降低等事件都可能引起区域或局地大气污染的加剧 (Anderson et al., 2001; Hogrefe et al., 2004a, 2004b, 2004c, 2005a, 2005b, 2006; Bell et al., 2007; Jacobson, 2008; Leibensperger et al., 2008; Jacob and Winner, 2009)。由于气候变化对环境空

气质量影响的研究直到最近几十年才在国际上开展起来, 许多问题尚处于科学探索阶段, 如上述大尺度气候因子与区域对流层 O₃、颗粒物污染的相关性研究, 气候变化对 O₃ 前体物 (如挥发性有机化合物 VOCs、氮氧化物 NO_x) 及对流层 O₃ 浓度影响的空间差异, 尤其是气候变化对颗粒物影响方面, 所涉及的影响因素比较复杂, 仍存在很大的不确定性。全球气候背景下, 严重影响人体健康的大气毒害污染物 (如持久性有机污染物 POPs、大气汞等) 的自然源排放和环境浓度的气候学响应至今少有人谈及。因此, 弄清楚气候变化可能对哪些大气污染成分造成影响, 影响机理如何, 以及会在多大程度上影响区域环境空气质量, 仍是当前气候与环境相互作用研究中亟待深入探索的科学问题。与此同时, 因为气候变化改变环境空气质量进而给公共健康带来间接影响, 针对气候变化引起的环境空气质量状况的改变进行科学的评估, 对于减缓或应对由气候变化引发的环境健康威胁有重要现实意义。

值得欣慰的是, 目前联合国已协同多个国家开展了一系列研究计划, 和包括中国在内的世界上 7 个国家联合开展了气候与健康计划。以调研未来的气候变化和污染源排放将在多大程度上影响区域环境空气质量进而影响人类健康为目的的新兴研究计划在国际上开展起来。比如美国的纽约气候与健康计划, 其中重要的一部分就是对美国东部地区未来 O₃ 变化的潜在健康影响作了预测; 英国在“气候变化潜在影响评价项目”中, 也将气候变化对环境空气质量的影响列为主要研究内容。我国目前没有直接针对气候变化对环境空气质量影响的相关研究, 但是 2008 年 4 月 7

日，中国卫生部 and 世界卫生组织合作负责的“中国/世界卫生组织气候变化与健康项目”正式启动，意味着从环境保护角度评估气候变化对人类赖以生存的生态环境的影响具有重要的意义，而气候变化对中国区域的环境空气质量的影响研究应该作为其中重要的一部分加以开展。

本文总结了国内外气候变化对环境空气质量影响的研究进展，分析了此项研究中存在的不确定性，对今后在我国开展此项研究提出了一些建议和展望。

2 气候变化对室外空气质量的影响

2.1 O₃ 及其前体物

现场观测和数值模拟研究表明，O₃生成与其前体物（NO_x和VOCs）呈高度非线性关系，多数城市处于O₃生成的VOCs控制区或过渡区，而乡村则处于NO_x控制区（唐孝炎和张远航等，2006）。较早的观测研究就表明，气候变化伴随的气温升高将增加很多区域VOCs的生物源排放，而暖湿气候条件下的闪电可以增加NO_x的产生率（EPA U. S.，2009）。因此，气候变化可能会通过增加O₃的主要前体物（VOCs和NO_x）浓度而加速O₃的生成，使地面O₃增加。人体的O₃暴露增多，会加重慢性呼吸系统和心血管疾病，改变个体免疫机能，造成肺组织的损伤和过早衰竭，对癌症的发病有贡献（Bernard et al.，2001）。

Hogrefe et al.（2004a，2004b，2004c，2005a，2005b，2006）在气候变化对地表O₃影响研究中做了较多工作。他们根据IPCC SRES（Standardized Reference Emission Scenarios）A2和B2情景（Nakicenovic et al.，2000），对从20世纪90年代到21世纪80年代的逐时气象数据进行模式拟合，运用MM5模式对美国东部地区进行气候模拟，之后将模拟结果输入到CMAQ（Community Multiscale Air Quality）中，对O₃浓度进行了模拟。研究中选择了4个10年（即20世纪90年代、21世纪20、50、80年代），对每个10年期间5年的夏季（6~8月）气象场做了模拟，根据美国环境保护局基于1996年的全国大气污染源数据估算了美国东部O₃前体物的排放水平。研究结果表明：与O₃的实际监测数据相比，

早期预测结果和上世纪90年代美国东部的O₃时空分布模式保持一致。由于气候变化，到了21世纪20、50、80年代，日均8小时最大浓度预计将会分别增加2.7、4.2、5.0 ppb。到了21世纪50年代，气候变化对O₃日均值的影响程度将接近于全球O₃背景值升高所带来的影响，但气候变化对极值的影响程度较大。随着温度升高，生物排放的VOCs增加，可以预料，由此产生的O₃额外增加量将大致等于仅由气候变化引起的增加量。气候变化把O₃浓度水平提升到一个新的高度，未来数十年O₃浓度的相对增加量将会增大。Bell et al.（2007）对大西洋中部地区的研究显示，和人为排放相比，O₃对生物源的排放变化更为敏感。作为英国气候变化潜在影响评价项目中的一部分，Anderson et al.（2001）在研究中，将依据IPCC报告中IS92a情景预测的直到2099年12月的每日气象参数运用于象征着不列颠群岛的单个网格点上，运用一个全球三维化学模式来推算源自人类活动的甲烷、一氧化碳（CO）和NO_x的2100年估计增长量对全球O₃分布所造成的影响。结果显示，气候变化能引起诱发夏季O₃污染事件的气象条件出现频率的增加，并加强了这种污染事件的严重程度。但由于欧洲排放的O₃前体物种类发生变化，会减弱这一增加趋势。Leung and Gustafson（2005）应用全球气候模式的动力学降尺度模拟生成区域尺度的气候变化的情景，评估了气候变化对美国空气质量的潜在影响。他们比较了基于IPCC SRES A1b情景下的2045~2055时间段模拟结果和1995~2005控制实验模拟结果，得出大尺度大气变化可能在美国的几个区域影响空气质量变化。在夏季，气候变化所致的地表空气温度、向下太阳辐射、降水频率、天气形势停滞事件发生频率以及大气流通状态等变化对美国中西部（Midwest）和德克萨斯州（Texas）的空气质量呈现出不同的影响迹象，上述气候变化因子对Texas夏季的空气质量有负面影响，而对Midwest无影响。而在秋季，大尺度的增温、太阳辐射强度的增强导致降水频率减少，天气形势停滞现象多发，美国西部空气流通减弱，种种迹象表明气候变化对美国秋季的空气质量有负面影响。但由于他们的研究中没有加入大气化学过程的模拟，仅根据已有研究结论对气象因子变化可能导致的

环境空气质量变化情况进行了预估,因而存在一定的不确定性。Jacob and Winner (2009) 在回顾了最近关于气候变化与空气质量之间的关系的研究成果基础上得出:空气质量对天气条件有较强的依赖性,由此,它对气候变化也十分敏感。由于大气环流的减弱和中纬度气旋的减少,未来气候学风场的流动性将变差等诸多因素都可能有利于污染物浓度的增加,见 Leibensperger et al. (2008) 图 9a。观测研究表明,地表 O_3 浓度与污染区域的气温之间存在着正相关关系,即气温升高有利于 O_3 污染的恶化,见 Bernard et al. (2001) 图 3。全球气候—化学耦合模式 (Coupled GCM-CTM) 模拟研究表明,气候变化将在未来 10 年里使夏季地球表面 O_3 浓度增加 1~10 ppb,且污染过程中尤其对城市区域的影响最大。这种气候后果意味着污染物排放强度控制需要满足一个给定的空气质量标准。未来气候背景带来的高水汽条件有利于降低 O_3 背景浓度,因此 O_3 污染浓度与 O_3 背景浓度对气候变化的敏感度是相反的。Jacob and Winner (2009) 也对此类研究提出了几点展望,并给出了数值模式研究框架,见 Jacob and Winner (2009) 图 5。他们认为,未来主要的研究议题应着眼于提升全球气候模式 (GCMs) 的模拟能力,具体表现在以下几个方面:(1) 对区域空气污染气象条件的模拟;(2) 区域空气污染气象条件对气候变化的敏感性模拟;(3) 大气自然源(如异戊二烯)排放对气候变化的响应性模拟;(4) 气候变化对大气汞排放的影响,尤其是对北方生态系统中植被呼吸作用所驱动的地表大气汞排放增加潜势的评估。

如前所述,气温升高可能会使 O_3 的主要前体物 VOCs 的排放量增加,使现有 O_3 污染事件加剧和持续。丁一汇等 (2007) 研究表明,与全球气候变暖的趋势相一致,中国区域的气温也呈现上升趋势,见丁一汇等 (2007) 图 1。近百年来的地表气温的增温幅度比全球同期水平略高,可达 0.5~0.8 $^{\circ}C$ 。而且未来气候预估研究(丁一汇等, 2006; 许吟隆等, 2006) 也显示,未来 20~100 年,中国地表气温增加明显,到 2100 年,中国区域的气温将相对于 1960~1990 的平均水平上升 3.9~6.0 $^{\circ}C$ 。Leibensperger et al. (2008) 研究表明,中纬度气旋发生频率降低与 O_3 超标日出现频

率呈现很好的相关性。姚素香等 (2003) 根据 1948~2000 年共 53 年的 NCEP/NCAR 逐日海平面气压再分析资料,分析了春季 (3、4、5 月) 东亚内陆和沿海地区温带气旋活动频数、气旋移动路径等气候特征及其年际、年代际变化,结果表明在春季的 3、4、5 月中,内陆存在 3 个明显的气旋活动频数较大的地区,分别位于 (45 $^{\circ}N$, 101 $^{\circ}E$) 附近的蒙古高压南缘、贝加尔湖以东的 (53 $^{\circ}N$, 115 $^{\circ}E$) 附近地区和我国东北北部 (53 $^{\circ}N$, 126 $^{\circ}E$) 附近地区。发现这 3 个温带气旋多发区域的春季气旋出现的总频数在 1970~2000 年的 30 年间整体上呈下降的趋势,见姚素香等 (2003) 图 4d。王新敏等 (2007) 在对北半球温带气旋的频数研究回顾的基础上得出了类似结论。即在全球变暖背景下,北半球气旋活动显示出在中纬度明显减少,而在高纬度增加的趋势,意味着气旋的路径已经明显地北移。由此我们推测,中国区域气温升高和温带气旋的频数降低或北移可能会引起该区域 O_3 污染加剧。金赛花等 (2008) 的研究结果从某种意义上证实了这个推测。他们对我国青海瓦里关全球大气本底监测站的 1994~2002 年的地面 O_3 的连续观测资料进行了分析。结果表明,瓦里关地面 O_3 浓度呈波动上升趋势,见金赛花等 (2008) 图 1。

2.2 大气颗粒物

与 O_3 相比,气候变化对大气颗粒物的影响更加复杂,不确定性也更大。降水频率和混合层的厚度是对颗粒物浓度最重要的影响因子,也是最不确定性因子。GCM-CTM 模拟研究发现,未来 10 年间,气候变化引起的颗粒物的环境浓度变化范围是在 -1.1~0.9 $mg \cdot m^{-3}$ 之间,气候变暖导致的自然大火可能成为颗粒物污染加剧的元凶 (Jacob and Winner, 2009)。

Jacobson (2008) 运用一个耦合了气候和空气污染的三维模式 (GATOR-GCMOM) 进行模拟,对比分析了工业化前和当前大气中 CO_2 水平的健康效应。结果显示, CO_2 浓度的升高,导致了对流层中 $PM_{2.5}$ (空气动力学当量直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物) 和 O_3 浓度的增加,而温度每升高一度, $PM_{2.5}$ 和 O_3 相关的死亡率则比基线水平上升了 1.1%。Jacobson (2008) 估计,在增加的死亡率中,大约有 40% 可归因于 O_3 ,剩下的

部分则是颗粒物浓度升高引起的；而且空气质量越差，增加的死亡率越多。另一项来自英国的研究预测，气候变化将会明显减少高颗粒物污染的天数。然而，在纽约气候与健康计划中，PM_{2.5}的浓度将随气候变化而升高，增幅则因组成成分的不同而不同；其中，由硫酸盐和一次颗粒物浓度升高明显，而硝酸盐和有机颗粒物却下降了，主要原因在于这些组分是可挥发的。Takemura et al. (2001) 对东亚地区未来 50 年气溶胶的污染特征进行了预估，得出，即使在低排放情景 (SRES B1) 下，到 2050 年，黑碳气溶胶 (BC) 的排放也会增加，东亚地区的黑碳气溶胶 (BC) 和有机碳气溶胶 (OC) 浓度将会升高。此排放情景下，2050 年东亚地区硫酸盐气溶胶的排放和浓度较 2000 年无明显变化；SRES A2 (高排放情景) 下，到 2050 年，碳气溶胶和硫酸盐气溶胶的排放和浓度在东亚地区都有显著升高。陈训来等 (2008) 利用 Models-3 (MM5/ SMOKE/ CMAQ) 模式模拟研究了珠江三角洲地区离岸背景风和海陆风的共同作用对一次灰霾天气污染过程的影响，研究得出：在这次灰霾天气过程中，由于离岸型背景风与陆风风向一致，在陆风维持的情况下，内陆源区的 PM₁₀ (空气动力学当量直径小于等于 10 μm 的颗粒物) 被输送到沿海地区，导致沿海城市和海面上 PM₁₀ 浓度比较高；而在海风维持的情况下，海风与离岸型背景风方向相反，造成海风较小，使整个珠江三角洲地区灰霾污染严重。中国北方春季沙尘暴天气盛行，春季温带气旋的发生频率可能对沙尘暴天气发生次数有重要影响。姚素香等 (2003) 研究指出，春季气旋发生频数与我国北方地区春季沙尘暴天气具有较好的对应关系。一般来说，春季气旋发生频数高的时段，我国北方地区春季沙尘暴次数较多。张莉和任国玉 (2003) 利用地面气象观测资料，分析了中国北方 1954~2001 年的年、季沙尘暴发生日数的演变规律及其与风速、相对湿度、降水、气温和干燥度的相关关系。结果表明，中国北方沙尘暴发生日数在 1954~2001 年呈波动下降的趋势，春季下降趋势最明显。沙尘源区的气候要素对北方沙尘暴发生日数具有比较明显的影响，其中风是影响较大的因子。范一大等 (2005) 对 1951~2002 年 50 年间中国沙尘暴变化趋势进行了

分析，得出这 50 年间我国北方沙尘暴天气总体呈下降趋势之结论。

可见，气候变化对不同种类颗粒物的影响是不尽相同的，即使同一种颗粒物在不同区域也可能存在较大差异，研究结果仍然存在很大的不确定性。

2.3 大气污染物输送

Heald et al. (2006) 研究发现，亚洲地区人为排放气溶胶通过跨太平洋的长距离输送和沉降作用，影响到了美国的地面环境空气质量。Takemura et al. (2001) 对比模拟和观测的气溶胶光学厚度结果后发现，除日本以外的东亚地区人为气溶胶 (碳和硫酸盐气溶胶) 和沙尘气溶胶长距离输送对日本春季的环境空气质量有较大影响。Liu et al. (2004) 研究指出，尽管亚洲沙尘暴是影响气溶胶浓度最常见的天气现象，但冬春季节通过长距离输送到台湾的 PM₁₀ 所占份额不到 15%。冬季风盛行下的东北向冷峰过境是污染物长距离输送的主要过程。据他们评估，长距离输送对台湾北部和东部 PM₁₀ 浓度贡献约为 30 μg · m⁻³，而对台湾西部贡献较小。长距离输送对颗粒物中硫酸根、硝酸根和铵根离子的浓度贡献分别为 10 μg · m⁻³、30 μg · m⁻³ 和 3 μg · m⁻³，而对气体中 CO 和 O₃ 的贡献率分别为 230 ppb 和 40 ppb。

气候变化可能导致某些区域风场减弱，天气系统停滞现象出现频率增多，这可能会削弱大气污染物长距离输送造成的污染，使局地污染加剧。Mickley et al. (2005) 在大尺度下对美国大陆做污染分析后预计，从 2000 年到 2052 年，由于气候变化 (IPCC SRES A1b 情景) 会减少来自加拿大的锋面过境频率，可能削弱停滞在美国中西部偏北地区上空的污染驱散力度，因而这些地区的大气污染会越来越严重。

诸多观测和模拟结果显示，近年来中国区域的风速呈现减弱趋势 (王遵娅等，2004；荣艳淑和梁嘉颖，2008；张爱英等，2009；杨雪艳等，2009；江滢等，2010)，这有可能会减弱中国区域大气流动对污染物扩散的驱动力，给环境空气质量带来负面影响 (Wu et al., 2005；吴兑等，2008)。已有证据表明，台风的登陆对污染物的扩散和清除可能有促进作用 (Wu et al., 2005；赵强等，2008)。然而，统计研究表明，中国区域台

风和热带气旋的生成个数有减少趋势(王凌等, 2006), 登陆我国的热带气旋的频数也有减少趋势(王凌等, 2006; 杨玉华等, 2009), 这可能是又一个导致中国区域空气污染加剧的因素。也有研究表明, 由于中国区域人为气溶胶的排放可能导致东亚季风强度的减弱(Xu et al., 2006; 孙家仁和刘煜, 2008a, 2008b; Liu et al., 2009; 王志立等, 2009), Jacobson and Kaufman (2006)也在他们的研究中指出, 中国地区的气溶胶排放对该区域风速的减小有直接影响。东亚季风的减弱可能会削弱中国区域大气污染物的输送和扩散能力, 从而进一步恶化大气环境。从这一角度来说, 增加人为硫酸盐和黑碳等气溶胶的排放不仅对环境空气质量恶化带来直接影响, 还可能间接地改变大气状态, 从而为不良环境空气质量的持续创造条件。因此, 控制人为气溶胶向大气中的排放量可能在改善大气环境质量中收到双重作用效果。

3 气候变化对室内空气质量的影响

生活在大都市中的人们大部分时间处于室内, 因而从某种程度来说, 室内空气质量对健康的影响比室外的更大(魏复盛等, 2000; 吴鹏章等, 2003; 王国利, 2009)。实际上, 气候变化除了影响室外空气质量, 亦可对室内空气质量产生影响。

Mudarri (2010) 较全面地总结了气候变化可能引发的室内空气质量影响及其公共健康问题。归纳起来具体表现在以下几个方面: (1) 气候变化引发的室外空气中 O_3 浓度水平升高, 通过空气交换引起室内空气 O_3 浓度增加。而室内 O_3 易于和室内常用的香水、清洁剂等挥发的萜烯成分以及地毯、涂料等产生的 VOCs 发生化学反应, 生成毒害产物。这些产物可能含有细/超细颗粒物、甲醛和其它醛类(如丙烯醛)等化学物质。室内 O_3 浓度的增加有可能会增加这些毒害产物在室内的蓄积量, 给人体健康带来潜在威胁; (2) 气候变化导致的室内气温升高, 可刺激室内地毯、涂料、清洁剂中 VOCs 或 SVOCs 物质的挥发, 这些物质吸入人体也会对人体造成伤害; (3) 气候变化引发的空气流通变差可能导致室内生成的污染物的积聚; (4) 气候变化引发的环境湿度增加可能导致室内霉菌和蚊虫滋生, 使得室内空气中过敏原

增加, 诱发人体各种过敏性疾病和呼吸系统疾病; (5) 气候变化导致的洪水等极端天气事件增多, 为躲避这些灾害, 新建临时性住房是常见的手段, 这些临时性住房中较高浓度的甲醛和 VOCs 成分将会增加人体的暴露; (6) 全球气候变化导致的热浪等极端气候事件的增加, 将使室内空调使用量增加, 进而带来温室气体排放增加, 由此陷入全球气候持续变暖的恶性循环中。中国学者张长兴等(2008)在调研国内外相关研究进展基础上指出, 温度升高、相对湿度增大会对室内甲醛含量升高产生协同效应。当二者同时增大时, 将会联合加重室内的甲醛污染。尤其在室内甲醛浓度较大时, 温度、相对湿度对室内甲醛释放的影响效果更为显著。但是相对湿度对室内的 O_3 浓度的影响与甲醛的相反, 适当地增加房间内的相对湿度可以降低房间内 O_3 浓度。同时, 相对湿度升高还可能有利于室内空气生物污染(如尘螨、真菌、致病性细菌和病毒等)的滋生。张小会等(2009)通过分析上海市室内空气质量的影响因素得出类似结论, 即不同干湿条件下的室内空气质量水平不同, 湿润空气的污染水平高于干燥空气, 随着室内空气湿度增大, 甲醛在室内空气中的浓度增大。吕春梅等(2005)对哈尔滨室内空气甲醛和氨与室内外温差的相关性进行了研究。结果表明, 在夏季, 由于热压渗风的作用, 一天当中甲醛浓度的变化与室内外温差的变化呈较好的正相关关系。而在冬季晴朗的天气, 室内外温度差对室内甲醛浓度也有一定的影响, 但是相关性不如夏季好。尤其在大风的天气, 室内甲醛浓度与温度差的相关性不明显, 这说明在冬季不仅由温度引起的热压差是甲醛浓度的变化主要影响因素, 风压渗风也是主要影响因素之一。室内外温差不是决定氨的浓度变化的主导因素, 氨的变化规律受多个因素影响。

可见, 气候变化引发的室内空气质量影响及人体健康效应也是不同忽视的。

4 结语和展望

由上述国内外研究进展可见, 气候变化可以通过改变地面气温而加速某些大气污染成分(如 O_3)的前体物(如 VOCs)的自然源排放, 可以

通过改变化学反应速率、边界层高度和天气系统出现频率等来影响污染物的垂直混合和扩散速度，还可以通过改变大气环流形势，进而改变污染物的传输方式；气候变化不仅影响到室外空气质量，还可以影响室内空气质量，进而带来人体健康威胁。因而，气候变化可以影响局地或区域的大气环境质量，也可以带来室内空气质量的改变，对这些认识学者们已基本达成共识。但是这些影响仍存在着诸多不确定性因素。比如，未来气候变化的趋势和程度，大气污染物及其前体物的排放量的未来变化趋势，大气污染成分与气候变化因子间的相关关系，不同大气组分间在不同气象条件作用下的物化过程和机理的认识水平等。在经济较发达的国家，O₃ 前体物的排放已趋于稳定，在考虑了不确定因素后，据上述相关研究预测，气候变化仍然会增加对流层 O₃ 的浓度。而在我们国家，则相关研究处于起步阶段。另外，由于在涉及气候变化对颗粒物污染程度的影响的研究在世界范围内仍然较少，因此，判别气候变化对颗粒物影响的程度仍缺乏强有力的证据。

为了缩小气候变化对环境空气质量的影响的不确定性，这就要求我们除了深入认识已有的气候变化诸多事实，还应发展更为精细的气候系统模式以预测未来的气候变化；除了需在缩小气候变化对 O₃、颗粒物等污染物影响程度的不确定性方面开展深入研究，还需开展气候变化对 POPs、大气汞等多种大气毒害污染物的影响评估；除了关注气候变化对室外环境空气质量的影响，还应关注气候变化对室内环境空气质量影响及潜在的公共健康威胁；除了认清气候变化对环境空气质量造成的影响这一科学事实，还应制定出相应的技术措施和环境保护策略，以减缓和应对气候变化对人群健康带来的危害。我国至今基于该项议题的直接研究较少，我们认为主要还需在以下几个方面加强研究：

(1) 开展气候变化因子与大气污染物（如 O₃、颗粒物、大气汞、VOCs、POPs 等）的污染事件出现频率、影响强度等的相关关系的观测研究；

(2) 参照国外相关研究思路，开展 IPCC SRES 全球气候背景下中国区域 O₃、颗粒物和其它大气污染物浓度水平的数值模拟预估研究，掌

握其变化趋势；

(3) 在假定人为源排放恒定的情况下，评估气候变化对大气自然源排放的影响。如地面气温、降水等气候因子的变化对植被异戊二烯等 VOCs 以及地表大气汞等易挥发性污染源排放的影响；

(4) 通过流行病学调查与大气污染物浓度长期监测相结合的手段，建立起环境空气质量与人群健康间的“剂量—反应”关系模型，进而探究气候变化对与空气质量相关的人群健康的影响；

(5) 气候变化对室内环境空气质量的影响研究。例如，研究气温升高，对室内甲醛、VOCs 等易挥发性污染物排放的影响，以及对空调使用量的增加导致的温室气体排放量增加的评估研究。

在对上述研究结果综合分析的基础上提出减缓气候变化可能引起的环境空气质量恶化以及威胁人群健康的污染事件的应对策略。

参考文献 (References)

- Anderson H R, Derwent R G, Stedman J. 2001. Air pollution and climate change [C] //Health Effects of Climate Change in the UK Department of Health, London; UK Department of Health, 193-217.
- Bell M L, Goldberg R, Hogrefe C, et al. 2007. Climate change, ambient ozone, and health in 50 US cities [J]. *Climatic Change*, 82: 61-76.
- Bernard S M, Samet J M, Grambsch A, et al. 2001. The potential impacts of climate variability and change on air pollution-related health effects in the United States [J]. *Environmental Health Perspectives*, 109 (suppl. 2): 199-209.
- Chan C K, Yao X. 2008. Air pollution in mega cities in China [J]. *Atmos. Environ.*, 42: 1-42.
- 陈训来, 冯业荣, 范绍佳, 等. 2008. 离岸型背景风和海陆风对珠江三角洲地区灰霾天气的影响 [J]. *大气科学*, 32 (3): 530-542. Chen Xunlai, Feng Yerong, Fan Shaojia, et al. 2008. Effect of the off-shore background flow and sea-land breezes on haze weather over the Pearl River delta region [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (3): 530-542.
- Deng X J, Tie X, Wu D, et al. 2008. Long-term trend of visibility and its characterizations in the Pearl River Delta Region (PRD), China [J]. *Atmos. Environ.*, 42: 1424-1435.
- 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 2006. 气候变化国家评估报告 (I): 中国气候变化的历史和未来趋势 [J]. *气候变化研究进展*, 2 (1): 3-9. Di Yihui, Ren Guoyu, Shi Guangyu, et al. 2006. National assessment report of climate change (I): Climate change in China and its future trend [J]. *Advances in Climate*

- Change Research (in Chinese), 2 (1): 3-9.
- 丁一汇, 任国玉, 赵宗慈, 等. 2007. 中国气候变化的检测及预估 [J]. 沙漠与绿洲气象, 1 (1): 1-10. Di Yihui, Ren Guoyu, Zhao Zongci, et al. 2007. Detection, attribution, and projection of climate change over China [J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese), 1 (1): 1-10.
- Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, et al. 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing [C] // Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press.
- 范一大, 史培军, 周俊华, 等. 2005. 近 50 年来中国沙尘暴变化趋势分析 [J]. 自然灾害学报, 14 (3): 22-28. Fan Yida, Shi Peijun, Zhou Junhua, et al. 2005. Research on change of dust storm in China in recent 50 years [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 14 (3): 22-28.
- EPA U. S. 2009. Assessment of the Impacts of Global Climate Change on Regional U. S. Air Quality: A Synthesis of Climate Change Impacts on Ground-Level Ozone [R]. An interim report of the USGCRP, epa/600/R-07/094F.
- Heald C, Jacob D J, Park R J, et al. 2006. Transpacific transport of Asian anthropogenic aerosols and its impact on surface air quality in the United States [J]. J. Geophys. Res., 111, D14310, doi: 10.1029/2005JD006847.
- Hogrefe C, Lynn B, Civerolo K, et al. 2004a. Simulating changes in regional air pollution over the eastern United States due to changes in global and regional climate and emissions [J]. J. Geophys. Res., 109, D22301, doi: 10.1029/2004JD004690.
- Hogrefe C, Civerolo K, Ku J Y, et al. 2004b. Modeling the Air Quality Impacts of Climate and Land Use Change in the New York City Metropolitan Area [R]. Models-3 Users' Workshop, 18-20 October 2004. Research Triangle Park, NC. Available: http://www.cmascenter.org/html/2004_workshop/abstracts/Climate%20Multiscale/Hogrefe_abstract.pdf.
- Hogrefe C, Biswas J, Lynn B, et al. 2004c. Simulating regional-scale ozone climatology over the Eastern United States: model evaluation results [J]. Atmos. Environ., 38: 2627-2638.
- Hogrefe C, Leung R, Mickley L, et al. 2005a. Considering climate change in air quality management [J]. Environmental Manager, October: 19-23.
- Hogrefe C, Lynn B, Rosenzweig C, et al. 2005b. Utilizing CMAQ Process Analysis to Understand the Impacts of Climate Change on Ozone and Particulate Matter [R]. Models-3 Users' Workshop, 26-28 September 2005. Chapel Hill, NC. Available: http://www.cmascenter.org/conference/2005/abstracts/3_2.pdf.
- Hogrefe C, Civerolo K, Ku J Y, et al. 2006. Air quality in future decades-determining the relative impacts of changes in climate, anthropogenic and biogenic emissions, global atmospheric composition, and regional land use [C] // Borrego C, Norman A L, Eds. Air Pollution Modeling and Its Application XVII. Proceedings of the 27th NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and Its Application, 25-29 October 2004, Banff, Canada. New York: Springer, 217-226.
- Jacob D J, Winner D A. 2009. effect of climate change on air quality [J]. Atmos. Environ., 43: 51-63.
- Jacobson M Z, Kaufman Y J. 2006. Wind reduction by aerosol particles [J]. Geophys. Res. Lett., 33, L24814, doi: 10.1029/2006GL07838.
- Jacobson M Z. 2008. On the causal link between carbon dioxide and air pollution mortality [J]. Geophys. Res. Lett., 35, L03809, doi:10.1029/2007GL031101.
- Jerrett M, Burnett RT, Ma R J, et al. 2005. Spatial analysis of air pollution and mortality in Los Angeles [J]. Epidemiology, 16 (6): 727-736.
- Leung R L, Gustafson W I Jr. 2005. Potential regional climate change and implications to US air quality [J]. Geophys. Res. Lett., 32, L16711, doi: 10.1029/2005GL022911.
- Leibensperger E M, Mickley L J, Jacob D J. 2008. Sensitivity of U. S. air quality to midlatitude cyclone frequency and implications of 1980-2006 climate change [J]. Atmos. Chem. Phys., 8: 7075-7086.
- 江滢, 罗勇, 赵宗慈. 2010. 全球气候模式对未来中国风速变化预估 [J]. 大气科学, 34 (2): 323-336. Jiang Ying, Luo Yong, Zhao Zongci. 2010. Projection of wind speed changes in China in the 21st century by climate models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (2): 323-336.
- 金赛花, 樊曙先, 王自发, 等. 2008. 青海瓦里关地面臭氧浓度的变化特征 [J]. 中国环境科学, 28 (3): 198-202. Jin Saihua, Fan Shuxian, Wang Zifa, et al. 2008. The variation characteristics of surface ozone concentration at Waliguan in Qinghai [J]. China Environmental Science (in Chinese), 28 (3): 198-202.
- Liu S C, Li C D, Zheng M T, et al. 2004. Impacts of long-range transport on air pollutants in Taiwan [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment (English suppl.), 18 (1): 203-210.
- Liu Y, Sun J R, Yang B. 2009. The effects of black carbon and sulphate aerosols in China regions on East Asia monsoons [J]. Tellus B, 61 (4): 642-656.
- 吕春梅, 王琨, 李玉华, 等. 2005. 室内空气甲醛和氨与室外气象条件相关性研究 [J]. 建筑科学, 21 (4): 51-54. Lü Chunmei, Wang Kun, Li Yuhua, et al. 2005. Study on relationship between the indoor formaldehyde and ammonia and the outdoor climate conditions [J]. Building Science (in Chinese), 21 (4): 51-54.
- Mickley L J, Jacob D J, Field B D, et al. 2004. Effects of future climate change on regional air pollution episodes in the United States [J]. Geophys. Res. Lett., 31, L24103, doi: 10.1029/2004GL021216.
- Mudarri D. 2010. Public Health Consequences and Cost of Climate

- Change Impacts on Indoor Environments [M]. Prepared for: The Indoor Environments Division Office of Radiation and Indoor Air. Washington, D. C.: U. S. Environmental Protection Agency, 79pp.
- Nakicenovic N, Alcamo J, Davis G, et al. 2000. Special Report on Emissions Scenarios [C] // A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York; Cambridge University Press, USA, 599.
- Parent M, Rousseau M, Boffetta P, et al. 2007. Exposure to diesel and gasoline engine emissions and the risk of lung cancer [J]. American Journal of Epidemiol. 165 (1): 53-62. doi:10.1093/aje/kwj343.
- Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. 2001. Aerosols, climate, and the hydrological cycle [J]. Science, 294 (5549): 2119-2124.
- 荣艳淑, 梁嘉颖. 2008. 华北地区风速变化的分析 [J]. 气象科学, 28 (6): 655-658. Rong Yanshu, Liang Jiaying. 2008. Analysis of variation of wind speed over North China [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 28 (6): 655-658.
- Suhadi D R, Awang M, Hassan M N, et al. 2005. Review of photochemical smog pollution in Jakarta metropolitan, Indonesia [J]. American Journal of Environmental Sciences, 1 (2): 110-118.
- 孙家仁, 刘煜. 2008a. 中国区域气溶胶对东亚夏季风的可能影响 (I): 硫酸盐气溶胶的影响 [J]. 气候变化研究进展, 4 (2): 111-116. Sun Jiaren, Liu Yu. 2008a. Possible effect of aerosols over China on East Asian summer monsoon (I): Sulfate aerosols [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 4 (2): 111-116.
- 孙家仁, 刘煜. 2008b. 中国区域气溶胶对东亚夏季风的可能影响 (II): 黑碳气溶胶及其与硫酸盐气溶胶的综合影响 [J]. 气候变化研究进展, 4 (3): 161-166. Sun Jiaren, Liu Yu. 2008b. Possible effects of aerosols over China on East Asian summer monsoon (II): Black carbon and its joint effects with sulfate aerosols [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 4 (3): 161-166.
- 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 2006. 大气环境化学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 232, 262. Tang Xiaoyan, Zhang Yuanhang, Shao Min. 2006. Atmospheric Environmental Chemistry [M] (in Chinese). Beijing; Higher Education Press, 232, 262.
- Tie X X, Wu D, Brasseur G, et al. 2009. Lung cancer mortality and exposure to atmospheric aerosol particles in Guangzhou, China [J]. Atmos. Environ., 43 (14): 2375-2377.
- Takemura T, Nakajima T, Nozawa T, et al. 2001. Simulation of future aerosol distribution, radiative forcing, and long-range transport in East Asia [J]. J. Meteor. Soc. of Japan, 79 (6): 1139-1155.
- 魏复盛, 胡伟, 滕恩江, 等. 2000. 空气污染对人体健康影响研究的进展 [J]. 世界科技研究与发展, 22 (3): 14-18. Wei Fusheng, Hu Wei, Teng Enjiang, et al. 2000. Advance of study on the impact of air pollution on human health [J]. World Scientific and Technological Research and Development (in Chinese), 22 (3): 14-18.
- 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 2004. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析 [J]. 气象学报, 62 (2): 228-236. Wang Zunya, Ding Yihui, He Jinhai, et al. 2004. An updating analysis of the climate change in china in recent 50 years [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (2): 228-236.
- 王凌, 罗勇, 徐良炎, 等. 2006. 近 35 年登陆我国台风的年际变化特征及灾害特点 [J]. 科技导报, 24 (11): 23-25. Wang Ling, Luo Yong, Xu Liangyan, et al. 2006. Review of typhoon and its related natural disasters over the past 35 years in China [J]. Science and Technology Review (in Chinese), 24 (11): 23-25.
- 王志立, 张华, 郭品文. 2009. 南亚地区黑碳气溶胶对亚洲夏季风的影响 [J]. 高原气象, 28 (2): 419-424. Wang Zhili, Zhang Hua, Guo Pinwen. 2009. Effects of black carbon aerosol in South Asia on Asian summer monsoon [J]. Plateau Meteorological (in Chinese), 28 (2): 419-424.
- 王新敏, 邹旭凯, 翟盘茂. 2007. 北半球温带气旋的变化 [J]. 气候变化研究进展, 3 (3): 154-157. Wang Xinmin, Zou Xukai, Zhai Panmao. 2007. Researches on extratropical cyclone variability in the Northern Hemisphere [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3 (3): 154-157.
- 王国利. 2009. 室内环境对人体健康的影响 [J]. 内蒙古环境科学, 21 (6): 214-216. Wang Guoli. 2009. The indoor environment to human health influence [J]. Inner Mongolia Environmental Science (in Chinese), 21 (6): 214-216.
- Wu D, Tie X X, Li C C, et al. 2005. An extremely low visibility event over the Guangzhou region; A case study [J]. Atmos. Environ., 39: 6568-6577.
- 吴兑, 廖国莲, 邓雪娇, 等. 2008. 珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究 [J]. 应用气象学报, 19 (1): 1-9. Wu Dui, Liao Guolian, Deng Xuejiao, et al. 2008. Transport condition of surface layer under haze weather over the Pearl River delta [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 19 (1): 1-9.
- 吴鹏章, 张晓山, 牟玉静, 等. 2004. 室内空气质量与人体健康 [J]. 环境科学与技术, 27 (2): 40-77. Wu Pengzhang, Zhang Xiaoshan, Mu Yujing, et al. 2004. Indoor air quality and health [J]. Environmental Science and Technology (in Chinese), 27 (2): 40-77.
- 许吟隆, 张勇, 林一骅, 等. 2006. 利用 PRECIS 分析 SRES B2 情景下中国区域的气候变化响应 [J]. 科学通报, 51 (17): 2068-2074. Xu Longyin, Zhang Yong, Lin Yihua, et al. 2006. The analysis of climate change response on SRES B2 scenario in china region based on PRECIS [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 51 (17): 2068-2074.
- Xu M, Chang C P, Fu C, et al. 2006. Steady decline of East Asian monsoon winds, 1969-2000; Evidence from direct ground meas-

- urements of wind speed [J]. *J. Geophys. Res.*, 111, D24111, doi: 24110.21029/22006JD007337.
- 姚素香, 张耀存, 周天军. 2003. 近 50 a 春季东亚温带气旋活动频数的气候特征及其变化 [J]. *南京气象学院学报*, 26 (3): 317-323. Yao Suxiang, Zhang Yaocun, Zhou Tianjun. 2003. Climatic characteristics of extratropical cyclone frequency and its variations over East Asia during recent 50 years in spring [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 26 (3): 317-323.
- 杨玉华, 应明, 陈葆德. 2009. 近 58 年来登陆中国的热带气旋气候变化特征 [J]. *气象学报*, 67 (5): 689-696. Yang Yuhua, Ying Ming, Chen Baode. 2009. The climatic changes of landfall tropical cyclones in china over the past 58 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 67 (5): 689-696.
- 杨雪艳, 田广元, 常义. 2009. 近 40 年中国东北地区平均风速的气候变化特征分析 [J]. *吉林气象*, 15 (2): 2-4. Yang Xueyan, Tian Guangyuan, Chang Yi. 2009. The analysis of climatic change characteristics of Mean wind speed in recent 40 a over northeast of China [J]. *Jilin Meteorology (in Chinese)*, 15 (2): 2-4.
- 张小会, 吕志江, 刘鹏鹏, 等. 2009. 上海城市室内空气质量影响因素分析 [J]. *上海地质*, 4: 49-54. Zhang Xiaohui, Lü Zhi-jiang, Liu Kunpeng, et al. 2009. Analysis of influence factors for indoor air quality in Shanghai [J]. *Shanghai Geology (in Chinese)*, 4: 49-54.
- 赵强, 杨世植, 乔延利, 等. 2008. 台风对沿海地区气溶胶光学特性的影响分析 [J]. *光学学报*, 28 (11): 2046-2050. Zhao Qiang, Yang Shizhi, Qiao Yanli, et al. 2008. Analysis of the optical characteristic of littoral aerosol influenced by typhoon [J]. *Acta Optica Sinica (in Chinese)*, 28 (11): 2046-2050.
- 张莉, 任国玉. 2003. 中国北方沙尘暴频数演化及其气候成因分析 [J]. *气象学报*, 61 (6): 744-750. Zhang Li, Ren Guoyu. 2003. Change in dust storm frequency and the climatic controls in northern China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 61 (6): 744-750.
- 张长兴, 胡松涛, 李安桂, 等. 2008. 空气相对湿度对室内污染物浓度的影响 [J]. *环境与健康杂志*, 25 (9): 840-842. Zhang Changxing, Hu Songtao, Li Angui, et al. 2008. Influence of air relative humidity on indoor air quality [J]. *Journal of Environment and Health (in Chinese)*, 25 (9): 840-842.
- 张爱英, 任国玉, 郭军, 等. 2009. 近 30 年我国高空风速变化趋势分析 [J]. *高原气象*, 28 (3): 680-687. Zhang Aiyang, Ren Guoyu, Guo Jun, et al. 2009. Change trend analyses on upper air wind speed over China in past 30 Years [J]. *Plateau Meteorological (in Chinese)*, 28 (3): 680-687.