气候变化、对流层臭氧和颗粒物及健康影响

Kristie L. Ebi[1] and Glenn McGregor[2]

[1]ESS, LLC, Alexandria, Virginia, USA; [2]The University of Auckland, Auckland, New Zealand

目的：由于大气层的状态决定了大气污染物的产生、传播、扩散和沉积，因而气候变化可以影响大气污染相关的发病率和死亡率，这一问题引起了人们的关注。那么，气候变化是如何影响对流层的臭氧和颗粒物（PM）的浓度，以及这些浓度的改变能对人群健康造成多大影响了？我们对此进行了文献综述。

数据源：我们预测了气候变化对大气质量的影响，以及气候变化对发病率和死亡率影响的研究。

数据综合：气候变化可以改变化学反应速率和边界层高度来影响污染物的垂直混合，也可以改变天气气流模式，进而决定污染物的传输模式。因而，气候变化可以影响某地或地区的大气质量。不确定因素包括：气候变化大小，大气污染物及其前体物的排放量，以及人群易感性的变化趋势及程度。至少在高收入国家，臭氧前体物的排放已经趋于稳定。在考虑了不确定因素后，气候变化据预测仍然会增加对流层臭氧的浓度，进而会增加人群的发病率和死亡率。而在中低收入国家，则缺乏相关的研究。对于PM，则缺乏强有力的证据，主要是由于几乎没有进行相关的研究。

结论：要更好地理解气候变化对大气污染相关健康效应的潜在影响，尚需进一步的研究。如果优化的数学模型不断地警示我们，气候变化与臭氧浓度升高有关，那么减少温室气体的排放将会提高我们和子孙后代的健康水平。

关键词：大气污染；气候变化；健康影响；臭氧；颗粒物 **This translated article is the property of the U.S. government and is therefore without copyright. Please cite to the original English version of this article—** ***Environ Health Perspect*** **118:000–000 (2010). doi:10.1289/ehp.11463 available via** ***http://dx.doi.org/*** **[Online10 July 2008]**

大量的文献表明，大气中污染物尤其是臭氧、可吸入颗粒物（PM_{10}）、细颗粒物（$PM_{2.5}$）、二氧化硫、二氧化氮、一氧化碳和铅浓度的升高，与一系列不良健康结局有关。来自世界卫生组织的全球数据显示，2000年城市空气污染相关的呼吸道疾病、肺病和癌症，相当于80万死亡和790万伤残调整寿命年的损失。

由于大气的状态决定了大气污染物的产生、传播、扩散和沉积，气候变化可以影响上述气态污染物和细颗粒物相关的疾病负担和死亡率。这一问题引起了人们的关注。因此，我们综述了那些预测了气候变化对大气质量的影响以及气候变化对发病率和死亡率的影响的研究。鉴于近年来相关数学模型显著改进，我们仅纳入了最近的研究文献，特别是发表于2000年以后的。

1气象与大气污染

大气污染水平是当地气候模式、大气循环特征、风、地形、人类活动（即交通和火力发电）、人类对天气变化的反应（也即冷暖期相交之际可能会增加取暖和降温的需要，进而增加耗能）以及其他因素综合作用的结果。各地的气候模式和地形特征很不不同，可能会加快二次污染的化学反应并限制污染物的扩散，因而某些地方的大气质量“本底值”较差。

一些大气污染物有着明确的季节周期。一定的天气环境为一系列污染相关事件提供必要的气象条件。大气污染事件通常与静止不动的或者缓慢转移的反气旋或高压系统有关，因为它们降低了污染物的传播、扩散和沉积能力。三维风场及其湍流和垂直温度是三个重要的因素。气象条件也影响二次污染物（比如臭氧）形成的理化过程。反气旋系统两侧的气流能运送臭氧前体物，进而为臭氧生成创造了条件。有些巨大的气流并不一定和反气旋系统相关，可能和局部地形、江河湖海和陆风或高山峡谷风发生相互作用，增加了污染浓度。远距离的天气系统（比如热带气旋和沿海地带的低压系统）可能导致污染水平升高。

气候变化通过直接影响化学反应速率和边界层厚度（边界层就是指受昼夜热度、湿度和地表能量转移影响的近地大气层），进而影响到污染物的垂直混合和能决定污染物传输的天气气流模式，从而引起局部到区域的大气质量的变化。天气尺度与中纬度地区的高低压系统（其水平长度大约有1000公里或620英里）的大小保持一致。气候变化也可以间接发生作用，比如通过人类行为的改变增加或减少人为排放，或者鉴于气候变暖和陆地面积的减少，改变生物排放水平。温度升高可以增加异戊二烯（由木材加工厂排放的一种可挥发的碳氢化合物和臭氧前体物）的排放。尽管如此，要建立大气质量变化的大小（本地、区域、和全球水平）和方向（改善或恶化）却是充满挑战的。相比其他大气污染物而言，气候变化对近地面臭氧水平的潜在影响已得到较为充分的研究和认识。

臭氧

近地水平的臭氧是一种已知的肺刺激物，能危害呼吸道粘膜、其他肺组织和呼吸功能。随着环境空气中臭氧浓度升高，肺炎、慢性阻塞性肺疾病、哮喘、变态反应性鼻炎以及其他呼吸道疾病的入院率和早产儿的死亡率随之升高。决定臭氧暴露多少的两个主要因素是户外臭氧浓度和活动模式。在欧洲和北美，人们对臭氧的健康效应已有相当了解，但在其他地区却缺乏相关的研究。

在近地水平，臭氧可以自然生成，也可以作为一种二次污染物，在高温和强日照的情况下，由氮氧化物和挥发性有机化合物等经由一系列光化学反应合成，是构成城市烟雾的主要成分。上个世纪以来，土地利用情况发生了显著变化，改变了植被型，影响到有关臭氧生成的挥发性有机化合物的排放，因而对大气中的臭氧浓度产生了影响。另外，城市化所带来的“热岛效应”也能影响臭氧的局部生成和扩散。在市区，汽油发动机是挥发性有机化合物的主要产生源，而化石燃料可以产生氮氧化物。温度、通风、太阳辐射、大气湿度、通风和混合能影响臭氧前体物的排放和臭氧的生成。由于臭氧的生成有赖于日照，因此（尽管证据不一），在夏季臭氧的浓度通常是最高的。观测数据显示，过去数十年来，对流层臭氧的变化趋势不定，时升时降，而且还有地域差别，比如在低纬度地区臭氧浓度呈显著上升趋势。

对流层臭氧浓度随着气候变化而变化

当预测并评估对流层臭氧浓度变化的健康影响时，存在着两大不确定因素：臭氧前体物排放量的改变多少；天气条件能在多大程度上增高臭氧浓度。未来的排放量显然是不确定的，它取决于人口增长、经济发展、管制行为和能源消耗。对以汽油为动力的发动机进行更为严格的管制，以限制挥发性有机化合物和氮氧化物的人为排放，很有可能

Address correspondence to K.L. Ebi, ESS, LLC, 5249 Tancreti Lane, Alexandria, VA 22034 USA. Telephone: (703) 304-6126. E-mail: krisebi@essllc.org

The authors declare they have no competing financial interests.

Received 7 March 2008; accepted 9 July 2008.

This translation is provided by School of Public Health, Fudan University, China. EHP strives to ensure that its foreign-language materials are faithful translations of their original English-language counterparts. Please report any problems or discrepancies to hu1@niehs.nih.gov.

促使包括火灾在内的生物质燃烧成为更为重要的臭氧前体物来源。若假定臭氧前体物的排放保持不变，那么气候变化将在多大程度上影响臭氧污染事件的发生率，这取决于必要气象条件的出现频率。当没有边界层通风，和出现高温、无云、强太阳辐射时，气候变化将导致稳定反气旋气团出现率升高；在我们做出这样的预测同时，当地的空气质量很有可能超标。

未来一段时间的空气质量（特别是局部到地区水平）将会部分取决于全球污染物的浓度水平。早在工业化尚未开始前，由于甲烷、一氧化碳和氮氧化物的排放增加，大气中臭氧的浓度就已经开始升高了，并且基于年平均最大浓度的预测值，这一趋势预计还将延续五十年。尽管如此，由于许多大城市计划减少机动车尾气中污染物的排放，可以预料城市大气中的臭氧浓度增速将会放缓，或者将会逐步降低。例如，据估计，美国若削减其甲烷排放量的一半，高臭氧事件的发生率也将降低一半左右。由于在臭氧形成的过程中也有紫外辐射的参与，如果平流层臭氧浓度降低，会使到达地面的紫外辐射量增加，因而也就有可能导致近地面臭氧浓度的上升。

在世界范围内，人们已就污染物排放情景和（或）天气模式如何引起近地面臭氧浓度的变化做出大量预测，其中大多数此类研究是在欧洲和北美地区进行的。我们在以下各段中，对这些研究做了概述。这些研究采用了不同的方法并考虑了不同的影响因素，但是大多数研究还是做出了对流层臭氧浓度将升高的预测，尽管地区间的预测结果存在着较大的差异。于是，国际气候变化专家小组得出了下述结论：气候变化将会造成决定空气质量的多种化学物质和理化过程的改变，并且这种净效应很可能随着地区的不同而变化。

从全球来看，如果把上世纪九十年代年视作参考时期，中欧、中国、巴西、南非和北美东部地区夏季的臭氧年平均最大浓度的预测值是60 ppb。直到2030年前，由于有一个高排放情景（标准化参考排放情景，Standardized Reference Emission Scenarios，SRES，见附录1的A2情景），在这些臭氧背景值在60ppb的地区，预计其臭氧浓度将会显著上升，特别是在欧洲和北美地区。直到2060年前，在绝大多数这类有人定居的大陆地区，其臭氧浓度将会保持在60ppb以上。直到2100年前，预计北半球大部以及南半球绝大部分定居区的年平均最大臭氧浓度将会保持在60ppb 左右。然后，Liao等根据 SRES A2情景，认为由于气象化学方面的变化，人为造成的气候变化将能减轻全球臭氧负担。Liao还预计，在有人定居的地区和燃烧生物质的地区及其附近，近地面的臭氧浓度将会上升。

在 SRES A2 情景下，人们运用全球大气环流耦合模型，对全世界10个地区在2030年的臭氧浓度做了预测。有证据显示，按照当前条件拟合的臭氧浓度与地表直接测量值在相当程度上是一致的。可以预料，与2000年相比，按照全球平均人口加权的8小时臭氧浓度最大值将会增加十亿分之九点四体积（9.4ppbv），其中，南亚增幅最大（近15ppbv），中东、东南亚、拉美和东亚的增幅也比较大。

在 IS92a 情景下，Forkel和Knoche在德国上世纪90年代的臭氧水平上，对21世纪30年代的臭氧浓度做出了预测。随着温度上升，可以预计，生物源的挥发性有机化合物和土壤氧化亚氮排放量都将上升。在整个研究地区，预计每日臭氧浓度最大值将升高两到六个ppb（6~10%）；在21世纪30年代，每日臭氧最大浓度值超过90 ppb的天数将增加近4倍，即从99天增加到384天。

Murazaki和Hess根据SRES A1 情景，运用全球臭氧及其相关化学物质传输模型（Model of Ozone And Related chemical Tracers, version 2, MOZART-2），预测到二十一世纪末，单单是人为造成的气候变化就可以降低美国全国的臭氧背景水平，而尽管其国内的臭氧产生量会增长。就美国西部而言，这两种反方向的变化趋势大致相等。笔者预测，对美国东部而言，每日臭氧最大浓度超过80ppbv 的天数每年将会新增12天。

Taha 对从两个全球环流模型所获得信息和未来氧化亚氮、挥发性有机化合物、生物源的碳氢化合物、以及硫化物的排放量做了模型拟合，并根据用于评价当地空气质量随之变化的空气污染模型和上述拟合结果，估算出了加州两个大城市在本世纪末的臭氧浓度增加量。在该研究中挑选了两个通常引用的模型拟合实例，即根据洛杉矶1987年8月26日到28日的臭氧污染事件所做的2010年预测研究和根据萨克拉门托河谷1990年7月11日到13日的臭氧污染事件所做的2005年预测研究。把每起污染事件的最后一天的臭氧浓度数据输入模型。在假设未来数年排放得到控制的情况下，模拟结果显示，当洛杉矶盆地和萨克拉门托河谷出现基础峰浓度时（即分别达到26ppb和12ppb时），臭氧浓度将会有显著的上升，分别将升高约24%和10%。1996年，Aw和Kleeman利用观测到的气象学资料和高温对南加州1996年的污染事件做了模型拟合。结果显示，温度升高5度，臭氧浓度可升高16%；但对于$PM_{2.5}$，则会出现不同的结果，这取决于继发颗粒物的形成量或者硝酸盐颗粒物的蒸发损失量是否是更为重要的。Steiner等对加州全境的研究显示，在小尺度下（四千米的网格分辨率），温度、绝对湿度、生物源的挥发性有机化合物的排放量和污染边界条件引起臭氧浓度的变化量各不相同。

Mickley等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（依据SRES A1b情景）会减少来自加拿大的锋面过境频率，对停滞在美国中西部偏北地区上空的污染驱散力度将会被削弱，因而这些地区的大气污染（以可燃的一氧化碳和黑炭作为人为空气污染的示踪物来加以估计）会越来越严重。Leung和Gustafson 对温度、太阳辐射、降水和气滞/通风做了区域性气候模拟，与1995年到2005年相比，预计从2045年到2055年间德克萨斯州的大气质量将会恶化而美国中西部地区的大气质量将会好转。Bell等对大西洋中部地区的研究显示，和人为排放相比，臭氧对生物源的排放变化更为敏感。

作为纽约气候与健康计划的一部分，Hogrefe和他的同事们运用一套综合模拟系统对未来气候变化对当地大气污染的影响做了分析，以研究纽约市区气候和土地使用方面的变化对高温和臭氧相关的健康效应的潜在影响。根据SRES A2和B2情景，他们对从上世纪九十年代到21世纪八十年代的每小时气象数据做了模型拟合。对于美国东部地区，他们运用MM5（即国家气候研究中心的中间比例五号模型，National Center for Atmospheric Research Mesoscale Model 5）区域气候模型，把全球气候模拟信息精密化（分辨率提高到36千米网格）；MM5 结果随之被输入到CMAQ（社区空气质量多尺度换算模型，Community Multiscale Air Quality）区域大气质量模型；在此期间，他们选择了四个十年（20世纪90年代、21世纪20、50、80年代），并以36千米网格的分辨率，对每个十年期间五年的夏季（6月到8月）气象数据做了模拟；根据美国环境保护局基于1996年的全国排放水平所做的预测，计算出美国东部污染前体物的排放水平。和臭氧的实际监测数据相比，早期预测结果和上世纪90年代美国东部的臭氧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，气候变化对臭氧日均值的影响程度将会接近于全球臭氧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，生物排放的挥发性有机物增加，可以预料，由此所带来的臭氧额外增加量将大致等于仅由气候变化引起的增加量。气候变化把臭氧浓度水平提升到一个新的高度，未来数十年臭氧浓度的相对增加量将会增大。

颗粒物

众所周知，颗粒物能影响发病率和死亡率，因而空气中颗粒物浓度增高将会产生一系列显著的不良健康效应。Jacobson 运用一个耦合了气候和空气污染的三维模型，对比分析了工业化前和当前大气中二氧化碳水平的健康效应。结果显示，二氧化碳浓度的升

高，导致了对流层中臭氧和$PM_{2.5}$浓度的增加，而温度每升高一度，臭氧和$PM_{2.5}$相关的死亡率则比基线水平上升了1.1%。Jacobson 估计，在增加的死亡率中，大约有40%可归因于臭氧，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。

与臭氣相比，目前几乎没有气候变化影响其他污染物的评价资料。当地污染控制策略应着眼于预测颗粒物和二氧化硫之类的污染物未来的浓度水平，并把工作重点从预测污染物的绝对浓度值逐步转移到推测其超标的概率上来。地区间结果各异。由于气候变化减少了地表气旋的形成率，可以预计美国中东部地区在2045年到2052年前的这段时间内，夏季区域性空气污染事件（燃烧型一氧化碳和黑炭）无论是其严重程度或是持续时间都将增加。一项英国的研究预测，由于气象条件方面的变化，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，$PM_{2.5}$的浓度预计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形成的浓度升高明显，而有机物和硝酸盐却下降了，主要原因在于这些组分是可蒸发的。

由于污染物的跨境流动是决定某地或某区域大气质量的一个重要因素，因而全球水平或半球水平上的大气环流模式，在决定未来大气质量中很可能起着和区域大气环流模式同等重要的作用。

潜在的健康影响

表一概括了在几项对臭氧浓度的预测研究中，基于当前的暴露—死亡率关系所做出的发病率和死亡率预测。臭氧浓度增加将会影响到某地区空气质量目标的实现。在中低收入国家，空气污染负担很重，然而大概是由于经费短缺的缘故，一直缺乏相关的预测研究。

纽约气候与健康计划对美国东部地区的未来臭氧浓度变化的潜在健康影响做了预测。Knowlton和他的同事们推算出21世纪50年代纽约市区的臭氧相关夏季每日绝对死亡数和较之上世纪90年代水平的百分增加量。有了县级水平的臭氧浓度预测资料，使得气候变化对中心城区的影响与对乡村地区的影响之间的比较成为可能。对31个县的数据分析表明，气候变化会使臭氧相关死亡率增加，增幅从0.4%到7.0%不等。Bell等扩大了这项研究，对东部50个城市的数据展开了分析。结果显示，预计到了本世纪50年代，平均臭氧浓度将上升4.4ppb（7.4%），变化范围是0.8–13.7%；臭氧红色预警的天数将增加68%；上述改变将导致非事故性死亡率上升0.11–0.27%，心血管病死亡率也将平均升高0.31%。

根据SRES A2 排放情景，Hwang等对洛杉矶和圣地亚哥两地在2050年的臭氧浓度做了预测。他们对臭氧暴露—反应关系做了几种估计，预测臭氧相关疾病死亡率和入院率总和都将升至3.7%左右，其中的绝大多数疾病增幅都将低于1%，这取决于城市和健康结局的不同。

作为英国气候变化潜在影响评价项目中的一部分，Anderson等在研究中，把直到2099年12月的每日气象参数预测值（由国际气候变化专家小组的IS92a情景计算得到）运用于象征着不列颠群岛的单个网格点上；还运用了一种全球三维化学模型，来推算源自人类活动的甲烷、一氧化碳和氮氧化物的2100年估计增长量对全球臭氧分布所造成的影响。结果显示，气候变化能引起夏季臭氧污染事件相关的气象条件出现的频率和严重程度增加，但由于欧洲排放的臭氧前体物种类发生了变化，会减弱这一增加趋势。若假定臭氧的健康效应存在一阈值，那么臭氧相关的健康影响增加将会变得不那么明显了；若假定不存在这一阈值，那么随着臭氧浓度的增加，到了2020年、2050年和2080年早产儿的死亡数将分别增加10%、20%和40%。

根据SRES A2情景，臭氧浓度升高和全世界10个地区的人口增长预计到

表一.气候变化与臭氧相关健康效应的预测研究

研究地区	健康效应指标	研究模型	气候情景模式与预测年限	温度升高与基线值	基于人群和排放的假设	主要成果	参考文献
美国纽约市区	以县为单位的臭氧相关死亡率	从文献中获得浓度—反应关系曲线；源自CMAQ 网格化的臭氧浓度数据	使用MM 5模型将 SRES A2情景下的GISS环流模型缩小尺度；本世纪50年代	到本世纪50年代将升高1.6—3.2℃；上世纪90年代的温度水平	人口和年龄结构维持在2000年的水平;污染物排放清单维持在1996年的水平；SRES A2情景； NOx 和VOCs浓度持续增加	A2模式下：死亡率升高4.5%；所有县的臭氧浓度上升。A2模式和臭氧前体物：死亡率上升4.4%；由于和NOx的相互作用，所有县的臭氧浓度无升高	Knowlton et al. 2004
美国东部50个城市	臭氧相关入院率和死亡率	源自文献的浓度—反应关系曲线；源自CMAQ 网格化的臭氧浓度数据	使用MM 5模型将 SRES A2情景下的GISS环流模型缩小尺度；本世纪50年代	到本世纪50年代将升高1.6—3.2℃；上世纪90年代的温度水平	人口和年龄结构维持在2000年的水平;污染物排放清单维持在1996年的水平；SRES A2情景； NOx 和VOCs浓度持续增加	所有城市的最大臭氧浓度上升；夏季超标天数增加68%；死亡率增加0.11–0.27%；心血管病死亡率平均升高0.31%	Bell et al. 2007
美国加州的洛杉矶和圣地亚哥	臭氧相关入院率和死亡率	源自文献的浓度—反应关系曲线；源自CMAQ 网格化的臭氧浓度数据	用MM 5 将SRES A2情景下的Had CM3环流模型缩小尺度；光化学模型CAM;本世纪50和90年代	本世纪50年代温度升高2.1– 2.7℃;90年代将升高4.6–5.5℃；上世纪90年代水平	人口和年龄结构维持不变;排放清单维持在1997年的水平；SRES A2情景； NOx 和VOCs浓度持续增加	臭氧平均峰值分别升高2.0– 3.2 和3.1 –4.8 ppb；最大峰值升高1–2倍；每日死亡率分别增加0.08–0.46和0.12–0.69；入院率升高更多	Hwang R, et al. 2004
英国的英格兰和威尔士	臭氧、颗粒物和氮氧化物的超标天数	对高污染当天的气象资料进行统计分析；预测英国和西北欧城市交通的臭氧前体物排放	UKCIP情景；本世纪20、50、80年代。	温度分别升高0.57–1.38℃、0.89–2.44℃和1.13–3.47℃；1961到1990年水平	人口和年龄结构保持不变	高颗粒物和SO_2 污染天数均明显降低；其他污染物略有下降，但臭氧升高；假定存在一阈值，臭氧不引起明显的健康影响；若存在，早产儿死亡率分别升高10%、20%和40%	Anderson HR, et al. 2001
全球十大地区	急性臭氧暴露所致的早产儿死亡率	从一项涉及美国95个城市的研究中获取臭氧–死亡率系数	耦合了交互化学作用的大气环流模型；SRES A2 情景；2030年	2030年的基线水平与2000年相仿	人口增长和污染排放遵循SRES A2模式；新近颁行了一些控制臭氧的法规；可行的能最大幅度减少前体物排放的措施	臭氧浓度大幅升高；人口加权8小时浓度升高9.4ppbv；新增约50万例死亡；假定阈值为25 ppbv，当前的法规能避免19万1千例死亡；若运用最优控制措施，可避免45万8千例死亡	West et al. 2007.

注：CMAQ，社区空气质量多尺度换算模型；GISS，美国戈达德空间爱你科学研究中心；HadCM3，英国气象局哈德利气候预报研究中心的气候模型之一；NOx，氮氧化物；UKCIP，英国气候影响计划；VOC，挥发性有机化合物。

了2030年将会导致死亡数新增大约50万。单位臭氧体积的每日急性死亡率系数（1/10亿）引自一项涉及美国95个城市的研究。假定存在一个低浓度阈值（25ppb）并考虑到新近颁行了一些旨在控制臭氧前体物排放的法规，那么预计全球将会避免多达19万1千例死亡（占估计的2030年全球总死亡数的0.2%）。而且，如果把现行的排放控制技术强有力地推广到全球，那么预计全球将会减少45万8千例死亡（占估计的2030年全球总死亡数的0.5%）。灵敏度分析显示，预测结果受到所假定的阈值和所采用的每日急性臭氧死亡率系数的显著影响。

讨论

目前，数百万人们的健康受到空气质量恶化的影响。气候变化通过影响区域天气模式，有可能增加人们暴露于高浓度臭氧和高浓度$PM_{2.5}$的机会。然而，预测结果存在着较高的不确定性，包括：变化的不只是气候，还有温室气体、臭氧前体物等其他污染物的排放水平和排放模式；人群易感性和活动模式也可能发生变化。

鉴于上述不确定因素，绝大多数旨在预测气候变化对大气质量影响的研究都假定臭氧前体物排放在预测年限内保持不变。因此，研究的侧重点应是检验臭氧浓度对未来气候变化的灵敏度，而不是力图预测臭氧的实际浓度值。基于有限的模拟研究，在高收入国家、当假定臭氧前体物排放保持恒定时，气候变化很可能增加大气中臭氧的浓度，进而导致相关疾病的发病率和死亡率升高。气候变化对$PM_{2.5}$的影响也存在大量的不确定性。

臭氧、$PM_{2.5}$等污染物会造成不良的健康影响。可以预料，随着证据的积累，有关部门将会出台更多且更为严厉的排放控制措施。因此，气候变化能在多大程度上影响空气质量，这将部分取决于现行的臭氧和$PM_{2.5}$ 的管控措施。与此同时，由于医学的进步和危险因素的变化，人群易感性可能会发生变化。

面对气候变化所可能带来的健康隐患，公共卫生界主要的应对策略是控制和适应。适应不是一种针对空气质量恶化的有效风险管理策略，其原因在于，体内虽然存在一套能降低臭氧和其他大气污染物的易感性的生理机制，但是这种防御功能是受限的。因此，如果优化的研究不断得出气候变化可能导致臭氧浓度增加的结论，那么我们就应迅速地削减来自矿物燃料的排放，以保护我们及子孙后代的健康。有证据显示，目前有些地方的对流层臭氧浓度正在逐步降低，使得相关的发病率和死亡率也得到了降低，显著减少了医疗费用。

为使有关部门尽快形成合适的应对策略，尚需要进一步的研究，以减少同类研究的不确定性。若要更好地理解气候变化对健康的影响这一问题，我们还需要进行以下研究：污染物排放和扩散模式的影响；气候变化对细颗粒物和其他气态污染物的影响；天气模式是如何影响大气污染事件发生的频率和严重程度的；人群易感性；上述因素间可能存在的相互作用。温室气体的排放量不断增加，这要求我们应提高管控力度，加强新技术的研发和推广，否则，未来的空气质量将会降低。

附录一 标准化参考排放情景 (Standardized Reference Emission Scenarios SRES)

SRES 是由国际气候变化专家小组提出，以刻画未来的污染物排放情况。四种不同的情景都是围绕着温室气体排放的促进因素和温室气体演变之间的相互关系而展开描述的。对于每一种情景，其概率并不是事先给定的，因而并不存在所谓的最可能的情景。所有四种情景没有一种反映了对所有促进因素或排放的集中趋势。

这四种SRES情景代表了未来发展的四种不同方向，以至于它们之间的差别越来越大，越来越不可逆转。这些情景是沿着二维的主线发展的：一个是全球或地区性的发展模式；另一个则是经济问题优先还是环境问题优先考虑。需要注意的是，上述四种情景并非囊括了未来全部可能的发展方向。例如，SRES并没有包含一个绝对收入保持恒定或稳步降低的情景。在拟合健康影响时，我们通常采用A2和B2 情景。

A2 描述了一幅异质的情景，其中各因素都是相互独立的，都保持着自身的特征。地区间的生育模式变化较慢，以至于全球人口持续不断地增长。经济发展主要是朝着区域化的方向进行的，并且其他情景相比，人均经济发展和技术革新是缓慢且微不足道的。

B2 则描述了另外的一幅情景。对于经济、社会和环境的可持续发展问题，它强调从局部寻找解决方法。全球人口仍然持续增长，但增长率低于A2；经济发展程度一般，发展速度不快；技术革新更加多元化。

在A2 情景下，全球2010年的二氧化碳累计排放水平很高（大于1万8千亿吨碳），但在B2 情景下却在中低水平（1万1千亿到1万4千亿吨碳之间）。

References

Alvarez E, de Pablo F, Tomás C, Rivas L. 2000. Spatial and temporal variability of ground-level ozone in Castilla-León (Spain). Int J Biometeorol 44: 44–51.

Anderson HR, Derwent RG, Stedman J. 2001. Air pollution and climate change. In: Health Effects of Climate Change in the UK Department of Health, London:UK Department of Health, 193–217.

Ansmann A, Bosenberg J, Chaikovsky A, Comeron A, Eckhardt S, Eixmann R, et al. 2003. Long-range transport of Saharan dust to northern Europe: The 11-16 October 2001 outbreak observed with EARLINET. J Geophys Res Atmos 108(D24):4783.

Aw J, Kleeman MJ. 2003. Evaluating the first-order effect of inter-annual temperature variability on urban air pollution. J Geophys Res 108:7/1–7/18.

Bates DV. 2005. Ambient ozone and mortality. Epidemiology 16(4):427–429.

Bell ML, Goldberg R, Hogrefe C, Kinney PL, Knowlton K, Lynn B, et al. 2007. Climate change, ambient ozone, and health in 50 US cities. Clim Change 82:61–76.

Bell ML, McDermott A, Zeger SL, Samet JM, Dominici F. 2004. Ozone and mortality in 95 US urban communities, 1987 to 2000. JAMA 292:2372–2378.

Bergin MS, West JJ, Keating TJ, Russell AG. 2005. Regional atmospheric pollution and transboundary air quality management. Annu Rev Environ Resources 30:1–37.

Bernard SM, Samet JM, Grambsch A, Ebi KL, Romieu I. 2001. The potential impacts of climate variability and change on air pollution-related health effects in the United States. Environ Health Perspect 109:199–209.

Buchanan CM, Beverland IJ, Heal MR. 2002. The influence of weather-type and long-range transport on airborne particle concentrations in Edinburgh, UK. Atmos Environ 36:5343–5354.

Chan CY, Chan LY, Lam KS, Li YS, Harris JM, Oltmans SJ. 2002. Effects of Asian air pollution transport and photochemistry on carbon monoxide variability and ozone production in subtropical coastal south China. J Geophys Res Atmos 107(D24):4746.

Cheng WL, Pai JL, Tsuang BJ, Chen CL. 2001. Synoptic patterns in relation to ozone concentrations in west-central Taiwan. Meteorol Atmos Phys 78:11–21.

Cifuentes L, Borja-Aburto VH, Gouveia N, Thurston G, Davis DL. 2001. Assessing the health benefits of urban air pollution reductions associated with climate change mitigation (2000–2020): Santiago, São Paulo, Mexico City, and New York City. Environ Health Perspect 109: 419–425.

Civerolo, K, Hogrefe C, Lynn B, Rosenthal J, Ku J-Y, Solecki W, et al. 2007. Estimating the effects of increased urbanization on future surface meteorology and ozone concentrations in the New York City metropolitan region. Atmos Environ 41(9):1803–1818.

Claiborn, CS, Finn D, Larson TV, Koenig JQ. 2000. Windblown dust contributes to high PM25 concentrations. J Air Waste Manag Assoc 50:1440–1445.

Confalonieri U, Menne B, Akhtar R, Ebi KL, Hauengue M, Kovats RS, et al. 2007. Human health. In: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hansson CE, eds). Cambridge, UK:Cambridge University Press.

Dayan U, Levy I. 2002. Relationship between synoptic-scale atmospheric circulation and ozone concentrations over Israel. J Geophys Res Atmos 107(D24):4813.

Derwent RG, Collins WJ, Johnson CE, Stevenson DS. 2001. Transient behaviour of tropospheric ozone precursors in a global 3-D CTM and their indirect greenhouse effects. Clim Change 49:463–487.

Dominici F, Peng RD, Bell ML, Pham L, McDermott A, Zeger SL, et al. 2006. Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases. JAMA 295(10):1127–1134.

Eiguren-Fernandez A, Miguel AH, Froines JR, Thurairatnam S, Avol EL. 2004. Seasonal and spatial variation of polycyclic aromatic hydrocarbons in vapor-phase and PM2.5 in Southern California urban and rural communities. Aerosol Sci Technol 38:447–455.

Fiore AM, Jacob DJ, Field DB, Streets DG, Fernandes SD, Jang C. 2002. Linking ozone pollution and climate change: the case for controlling methane. Geophys Res Lett 29 (19):919.

Forkel R, Knoche R. 2006. Regional Climate Change and Its Impact on Photooxidant Concentrations in Southern Germany: Simulations with a Coupled Regional Climate-chemistry Model. J Geophys Res 111.

Gallardo L, Olivares G, Langner L, Aarhus B. 2002. Coastal lows and sulfur air pollution in Central Chile. Atmos Environ 36:3829–3841

Grossi P, Philippe T, Martilli A, Clappier A. 1999. Effect of sea breeze on air pollution in the greater Athens area. Part II: Analysis of different emission scenarios. J Appl Meteorol 39:563–575.

Gryparis A, Forsberg B, Katsouyanni K, Analitis A, Touloumi G, Schwartz J, et al. 2004. Acute effects of ozone on mortality

from the "air pollution and health: a European approach" project. Am J Respir Crit Care Med 170:1080–1087.
Guttikunda SK, Carmichael GR, Calori G, Eck C, Woo J-H. 2003. The contribution of megacities to regional sulfur pollution in Asia. Atmos Environ 37:11–22.
Hazenkamp-Von Arx ME, Gotschi T, Ackermann-Liebrich U, Bono R, Burney P, Cyrys J, et al. 2004. PM2.5 and NO2 assessment in 21 European study centres of ECRHS II: annual means and seasonal differences. Atmos Environ 38:1943–1953.
He Z, Kim YJ, Ogunjobi KO, Hong CS. 2003. Characteristics of PM2.5 species and long-range transport of air masses at Taean background station, South Korea. Atmos Environ 37:219–230.
Helmis CG, Moussiopoulos N, Flocas HA, Sahm P, Assimakopoulos VD, Naneris C, et al. 2003. Estimation of transboundary air pollution on the basis of synoptic-scale weather types. Int J Climatol 23:405–416.
Hess GD, Tory KJ, Puri K, Cope ME, Lee S, Manins PC, et al. 2003. The Australian air quality forecasting system. Part II: case study of a Sydney 7-day photochemical smog event. J Appl Meteorol 43:663–679.
Hicks BB. 2003. Planning for air quality concerns of the future. Pure Appl Geophys 160(1–2): 57–74.
Hogrefe C, Biswas J, Lynn B, Civerolo K, Ku J-Y, Rosenthal J, et al. 2004a. Simulating regional-scale ozone climatology over the Eastern United States: model evaluation results. Atmos Environ 38:2627–2638.
Hogrefe C, Civerolo K, Ku J-Y, Lynn B, Rosenthal J, Knowlton K, et al. 2004b. Modeling the Air Quality Impacts of Climate and Land Use Change in the New York City Metropolitan Area, Models-3 Users' Workshop, 18–20 October 2004. Research Triangle Park, NC. Available: http://wwwcmascenterorg/html/2004_workshop/abstracts/Climate%20Multiscale/Hogrefe_abstractpdf [accessed 15 September 2008].
Hogrefe C, Civerolo K, Ku J-Y, Lynn B, Rosenthal J, Solecki B, 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. In: Air Pollution Modeling and Its Application XVII (Borrego C, Norman AL, eds). 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.
Hogrefe C, Leung R, Mickley L, Hunt S, Winner D. 2005a. Considering climate change in air quality management. EM (Environmental Manager) October:19–23.
Hogrefe C, Lynn B, Civerolo K, Ku J-Y, Rosenthal J, Rosenzweig C, et al. 2004c. Simulating changes in regional air pollution over the eastern United States due to changes in global and regional climate and emissions. J Geophys Res 109:D22301
Hogrefe C, Lynn B, Rosenzweig C, Goldberg R, Civerolo K, Ku J-Y, et al. 2005b. Utilizing CMAQ Process Analysis to Understand the Impacts of Climate Change on Ozone and Particulate Matter, Models-3 Users' Workshop, 26–28 September 2005. Chapel Hill, NC. Available: http://www.cmascenter.org/conference/2005/abstracts/3_2.pdf [15 September 2008].
Holloway T, Fiore A, MG Hastings MG. 2003. Intercontinental transport of air pollution: will emerging science lead to a new hemispheric treaty? Environ Sci Technol 37:4535–4542.
Hwang R, Burer MJ, Bell M. 2004. Smog in the Forecast: Global Warming, Ozone Pollution and Health in California. San Francisco:National Resources Defense Council.
Ibald-Mulli A, Wichmann HE, Kreyling W, Peters A. 2002. Epidemiological evidence on health effects of ultrafine particles. J Aerosol Med 15:189–201.
Ito K, De Leon SF, Lippmann M. 2005. Associations between ozone and daily mortality: analysis and meta-analysis. Epidemiology 16:446–457.
Jacobson MZ. 2008. On the causal link between carbon dioxide and air pollution mortality. Geophys Res Lett 35:L03809; doi:10.1029/2007GL031101. [Online 12 February 2008].
Jaffe D, Bertschi I, Jaegle L, Novelli P, Reid JS, Tanimoto H, et al. 2004. Long-range transport of Siberian biomass burning emissions and impact on surface ozone in western North America. Geophys Res Lett 31:L16106.
Jaffe D, McKendry I, Anderson T, Price H. 2003. Six 'new' episodes of trans-Pacific transport of air pollutants. Atmos Environ 37:391–404.
Jensen SS, Berkowicz R, Winther M, Palmgren F, Zlatev Z. 2001. Future air quality in Danish cities due to new emission and fuel quality directives of the European Union. Int J Vehicle Design 27:195–208.
Johnson CE, Stevenson DS, Collins WJ, Derwent RG. 2001. Role of climate feedback on methane and ozone studied with a coupled ocean-atmosphere-chemistry model. Geophys Res Lett 28:1723–1726.
Jones JM, Davies TD. 2000. The influence of climate on air and precipitation chemistry over Europe and downscaling applications to future acidic deposition. Clim Res 14(1):7–24.
Kappos AD, Bruckmann P, Eikmann T, Englert N, Heinrich U, Hoppe P, et al. 2004. Health effects of particles in ambient air. Int J Hyg Environ Health 207: 399–407.
Kassomenos PA, Sindosi OA, Lolis CJ, Chaloulakou A. 2003. On the relation between seasonal synoptic circulation types and spatial air quality characteristics in Athens, Greece. J Air Waste Manag Assoc 53:309–324.
Kato S, Kajiia Y, Itokazuc R, Hirokawad J, Kodae S, Kinjof Y. 2004. Transport of atmospheric carbon monoxide, ozone, and hydrocarbons from Chinese coast to Okinawa island in the Western Pacific during winter. Atmos Environ 38: 2975–2981.
Kellogg CA, Griffin DW. 2006. Aerobiology and the global transport of desert dust trends. Ecol Evol 21(11):638–644.
Kinney P, Rosenthal J, Rosenzweig C, Hogrefe C, Solecki W, Knowlton K, et al. 2006. Assessing the potential public health impacts of changing climate and land use: NY Climate and Health Project. In: Regional Climate Change and Variability: Impacts and Responses (Ruth M, Donaghy K, Kirshen P, eds). New Horizons in Regional Science Series. Cheltenham, UK:Edward Elgar, 161–189.
Kitada T, Regmi RP. 2003. Dynamics of air pollution transport in late wintertime over Kathmandu valley, Nepal, as revealed with numerical simulation. J Appl Meteorol 12:1770–1798.
Knowlton K, Rosenthal JE, Hogrefe C, Lynn B, Gaffin S, Goldberg R, et al. 2004. Assessing ozone-related health impacts under a changing climate. Environ Health Perspect 112:1557–1563.
Kossmann M, Sturman A. 2004. The surface wind field during winter smog nights in Christchurch and coastal Canterbury, New Zealand. Int J Climatol 24: 93–108.
Langmann B, Bauer SE, Bey I. 2003. The influence of the global photochemical composition of the troposphere on European summer smog. Part I: Application of a global to mesoscale model chain. J Geophys Res Atmos 108(D4): 4146.
Lennartson GJ, Schwartz MD. 1999. A synoptic climatology of surface-level ozone in Eastern Wisconsin, USA. Clim Res 13:207–220.
Leung RL Gustafson WI Jr. 2005. Potential regional climate change and implications to US air quality. Geophys Res Lett 32(16).
Liang Q, Jaegle L, Jaffe DA, Weiss-Penzias P, Heckman A, Snow JA. 2004. Long-range transport of Asian pollution to the northeast Pacific: seasonal variations and transport pathways of carbon monoxide. J Geophys Res Atmos 109(D23):D23S07.
Liao H, Chen WT, Seinfeld JH. 2006. Role of climate change in global predictions of future tropospheric ozone and aerosols. J Geophys Res Atmos 111:D12304.
Liu HP, Chan JCL. 2002. Boundary layer dynamics associated with a severe air-pollution episode in Hong Kong. Atmos Environ 36:2013–2025.
Ma YM, Lyons TJ. 2003. Recirculation of coastal urban air pollution under a synoptic scale thermal trough in Perth, Western Australia. Atmos Environ 37: 443–454.
Martin BD, Fuelberg HE, Blake NJ, Crawford JH, Logan LA, Blake DR, et al. 2002. Long-range transport of Asian outflow to the equatorial Pacific. J Geophys Res Atmos 108(D2):8322.
McGregor GR. 1999. Basic meteorology. In: Air Pollution and Health (Holgate S, Samet JM, Koren HS, Maynard RL, eds). London:Academic Press, 21–49.
Metcalfe SM, Whyatt JD, Derwent RG, O'Donoghue M. 2002. The regional distribution of ozone across the British Isles and its response to control strategies. Atmos Environ 36:4045–4055.
Mickley LJ, Jacob DJ, Field BD, Rind D. 2004. Effects of future climate change on regional air pollution episodes in the United States. Geophys Res Lett 31: L24103.
Moore KG, Clarke AD, Kapustin VN, Howell SG. 2003. Long-range transport of continental plumes over the Pacific Basin: aerosol physiochemistry and optical properties during PEM-Tropics A and B. J Geophys Res Atmos 108(D2):8236.
Mott JA, Mannino DM, Alverson CJ, Kiyu A, Hashim J, Lee T, et al. 2005. Cardiorespiratory hospitalizations associated with smoke exposure during the 1997 Southeast Asian forest fires. Int J Hyg Environ Health 208: 75–85.
Mudway IS, Kelly FJ. 2000. Ozone and the lung: a sensitive issue. Mol Aspects Med 21:1–48.
Murazaki K, Hess P. 2006. How does climate change contribute to surface ozone change over the United States? J Geophys Res 111:D05301; doi:10.1029/2005JD005873, 2006. [Online 1 March 2006].
Nagendra S, Khare M. 2003. Diurnal and seasonal variations of carbon monoxide and nitrogen dioxide in Delhi City. Int J Environ Pollut 19:75–96.
Nakicenovic N, Alcamo J, Davis G, de Vries B, Fenhann J, Gaffin S, et al., eds. 2000. Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge, U.K.:Cambridge University Press.
Nilsson ED, Paatero J, Boy M. 2001a. Effects of air masses and synoptic weather on aerosol formation in the continental boundary layer. Tellus Series B: Chem Phys Meteorol 53:462–478.
Nilsson ED, Rannik U, Kulmala M, Buzorius G, O'Dowd CD. 2001b. Effects of continental boundary layer evolution, convection, turbulence and entrainment, on aerosol formation Tellus Series B: Chem Phys Meteorol 53: 441–461.
Ostro BD, Tran T, Levy JI. 2006. The health benefits of reduced tropospheric ozone in California. J Air Waste Manag Assoc 56:1007–1021.
Pal Arya S. 2000. Air pollution meteorology and dispersion. Bound Lay Meteorol 94: 171–172.
Pillai PS, Moorthy KK. 2001. Aerosol mass-size distributions at a tropical coastal environment: response to mesoscale and synoptic processes. Atmos Environ 35: 4099–4112.
Pope CA III, Burnett RT, Thun MJ, Calle EE, Krewski D, Ito K, et al. 2002. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. JAMA 287:1132–1141.
Prather M, Gauss M, Berntsen T, Isaksen I, Sundet J, Bey I, et al. 2003. Fresh air in the 21st century? Geophys Res Lett 30(2):1100.
Racherla PN, Adams PJ. 2006. Sensitivity of global tropospheric ozone and fine particulate matter concentrations to climate change. J Geophys Res Atmos 111: D24103.
Rainham DGC, Smoyer KE, Burnett RT. 2001. Spatial synoptic classification of air pollution and human mortality associations in Toronto, Canada: past relationships and policy implications. Am J Epidemiol 153(suppl S):1015.
Rao ST, Ku JY, Berman S, Zhang D, Mao H. 2003. Summertime characteristics of the atmospheric boundary layer and relationships to ozone levels over the eastern United States. Pure Appl Geophys 160:21–55.
Rappengluck B, Oyola P, Olaeta I, Fabian P. 1999. The evolution of photochemical smog in the metropolitan area of Santiago de Chile. J Appl Meteorol 39: 275–290.
Ryall DB, Derwent RG, Manning AJ, Redington AL, Corden J, Millington W, et al. 2002. The origin of high particulate concentrations over the United Kingdom, March 2000. Atmos Environ 36:1363–1378.
Schichtel BA, Husar RB. 2001. Eastern North American transport climatology during high- and low-ozone days. Atmos Environ 35:1029–1038.
Scott GM, Diab RD. 2000: Forecasting air pollution potential: a synoptic climatological approach. J Air Waste Manag Assoc 50:1831–1842.
Semazzi F. 2003. Air quality research: perspective from climate change modelling research. Environ Int 29:253–261.
Slanina S, Zhang YH. 2004. Aerosols: connection between regional climatic change and air quality (IUPAC Technical Report). Pure Applied Chem 76:1241–1253.
Solomon KR, Tang XY, Wilson SR, Zanis P, Bais AF. 2003. Changes in tropospheric composition and air quality due to stratospheric ozone depletion. Photochem Photobiol Sci 2:62–67.
Solomon S, Qin D, Manning M, Alley RB, Berntsen T, Bindoff NL, et al. 2007. Technical summary. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change(Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K, Tignor M, Miller HL, eds). Cambridge, UK,/New York, NY:Cambridge University Press, 19–91.
Sousounis PJ, Scott CPJ, Wilson ML. 2002. Possible climate

change impacts on ozone in the Great Lakes region: some implications for respiratory illness. J Great Lakes Res 28:626–642.

Steiner AL, Tonse S, Cohen RC, Goldstein AH, Harley RA. 2006. Influence of future climate and emissions on regional air quality in California. J Geophys Res Atmos 111: D18303.

Stevenson DS, Johnson CE, Collins WJ, Derwent RG, Edwards JM. 2000. Future estimates of tropospheric ozone radiative forcing and methane turnoveræthe impact of climate change. Geophys Res Lett 27:2073–2076.

Suh HH, Bahadori T, Vallarino J, Spengler JD. 2000. Criteria air pollutants and toxic air pollutants. Environ Health Perspect 108(suppl 4):625–633.

Swart R, Amann M, Raes F, Tuinstra W. 2004. A good climate for clean air: linkages between climate change and air pollution. Clim Change 66:263–269.

Syri S, Karvosenoja N, Lehtila A, Laurila T, Lindfors V, Tuovinen JP. 2002. Modeling the impacts of the Finnish Climate Strategy on air pollution. Atmos Environ 36: 3059–3069.

Taha H. 2001. Potential Impacts of Climate Change on Tropospheric Ozone in California: A Preliminary Episodic Modeling Assessment of the Los Angeles Basin and the Sacramento Valley. LBNL-46695. Berkeley, CA:Lawrence Berkeley National Laboratories.

Takemura T, Nakajima T, Nozawa T, Aoki K. 2001. Simulation of future aerosol distribution, radiative forcing, and long-range transport in East Asia. J Meteorol Soc Japan 79:1139–1155.

Tanner PA, Law PT. 2002. Effects of synoptic weather systems upon the air quality in an Asian megacity. Water Air Soil Pollut 136:105–124.

Triantafyllou AG. 2001. PM10 pollution episodes as a function of synoptic climatology in a mountainous industrial area. Environ Poll 112:491–500.

Tu FH, Thornton DC, Brandy AR, Carmichael GR, Tang YH, Thornhill KL, et al. 2004. Long-range transport of sulfur dioxide in the central Pacific. J Geophys Res Atmos 109(D15):D15S08.

U.S. EPA. 2007. Review of the National Ambient Air Quality Standards for Ozone: Policy Assessment of Scientific and Technical Information. OAOPS Staff Paper. EPA-452/R-07-007. Research Triangle Park, NC:U.S. Environmental Protection Agency. Available: http://www.epa.gov/ttnnaaqs/standards/ozone/data/2007_07_ozone_staff_paper.pdf [accessed 1 May 2008].

Wang T, Kwok JYH. 2002. Measurement and analysis of a multiday photochemical smog episode in the Pearl River delta of China. J Appl Meteorol 42:404–416.

Webster MD, Babiker M, Mayer M, Reilly JM, Harnisch J, Hyman R, et al. 2002. Uncertainty in emissions projections for climate models. Atmos Environ 36: 3659–3670.

West JJ, Szopa S, Hauglustaine DA. 2007. Human mortality effects of future concentrations of tropospheric ozone. CR Geoscience 339:775–783.

WHO. 2002. World Health Report 2002: Reducing Risks, Promoting Healthy Life. Geneva:World Health Organization.

Yarnal B, Comrie AC, Frakes B, Brown DP. 2001. Developments and prospects in synoptic climatology. Int J Climatol 21:1923–1950.