“双碳”目标对我国未来空气污染治理和气候变化的影响评估

徐北瑶¹, 王体健^{1*}, 李树¹, 庄炳亮¹, 谢旻¹, 李蒙蒙¹, 谢晓栋²

1. 南京大学大气科学学院, 南京 210023;

2. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044

* 联系人, E-mail: tjwang@nju.edu.cn

2021-10-22 收稿, 2022-01-13 修回, 2022-01-14 接受, 2022-01-29 网络版发表

国家自然科学基金(42077192, 41621005)、国家重点研发计划(2020YFA0607802, 2019YFC0214603)和埃默里大学-南京大学合作研究基金资助

摘要 近期,我国提出实现碳达峰、碳中和的“双碳”目标和时间节点,未来我国空气污染治理和气候变化的发展趋势备受关注.本研究利用区域气候-化学-生态耦合模型RegCM-Chem-YIBs,基于代表性浓度途径气候情景RCP4.5,使用中国未来排放动态预测模型(Dynamic Projection model for Emissions in China, DPEC)2030年排放数据,模拟预测了考虑实现“双碳”目标的情景下,未来区域减排政策和全球气候变化对我国空气污染治理与气候变化的影响.研究表明,相对于2015年,在未来区域减排政策和全球气候变化的共同作用下,2030年中国地区细颗粒物(PM_{2.5})、臭氧(O₃)、二氧化碳(CO₂)平均浓度相对2015年分别下降了36.8、19.8 $\mu\text{g m}^{-3}$ 和1.9 ppm(1 ppm=1 $\mu\text{L L}^{-1}$).我国南方地区的气温将有明显升高,升高幅度在0.5~1.5 K之间,降水和云量分别减少了1~2 mm d⁻¹和3%~6%;北方地区气温有所降低,一般在1 K以下,降水和云量分别增加了2 mm d⁻¹和6%左右.总体而言,区域减排政策对于PM_{2.5}、O₃和CO₂浓度的影响较大,是未来空气质量变化的主导因素,而全球气候变化对气温、云和降水的影响更大.“双碳”目标下的减排政策将大大改善空气质量,但会导致我国部分地区的气温有所上升.因此,缓解区域气候变化需要更为合理的温室气体与大气污染协同减排政策和全球的共同参与.

关键词 碳达峰, 碳中和, 气候变化, 空气质量

空气污染治理与气候变化两者紧密关联^[1].一方面,气候变化直接影响空气污染治理,二氧化碳等温室气体引起气候变暖,平均气温上升,这会影响臭氧和细颗粒物污染物的形成,也可能导致大气环流的格局发生变化,影响污染物的输送和扩散;还可以影响云和降水,从而改变大气污染物的浓度.另一方面,空气污染治理又反作用于气候变化,气候变化与地球大气系统辐射收支有关,臭氧和细颗粒等大气污染物可以通过改变辐射、云和降水过程,从而导致气候发生变化.

影响空气污染治理和气候变化的主要物质为短寿命污染物(细颗粒物、臭氧等)与长寿命温室气体(二氧化碳、甲烷等),它们都来自于能源消费,因此需要协同治

理.丁一汇等人^[2]认为,由于空气污染治理和气候变化在很大程度上有共同的原因,即主要都是由矿物燃料燃烧的排放造成,因而减轻和控制空气污染治理与减少温室气体排放保护气候在行动上应是一致的.为了从经济上得到最大的节约和获得双赢的效果,应该采取协同应对空气污染治理和气候变化的减排战略,即采取统一的而不是分离的科学研究和应对战略.2020年9月,我国提出“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”的目标.党的十九届五中全会把碳达峰、碳中和作为“十四五”规划和2035年远景目标.因此,未来我国在空气污染治理和气候变化应对方面的工作任重道远.

引用格式: 徐北瑶, 王体健, 李树, 等. “双碳”目标对我国未来空气污染治理和气候变化的影响评估. 科学通报, 2022, 67: 784–794

Xu B Y, Wang T J, Li S, et al. Assessment of the impact of “dual-carbon” goal on future changes in air pollution and climate in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 784–794, doi: [10.1360/TB-2021-1091](https://doi.org/10.1360/TB-2021-1091)

区域气候和化学耦合模式是研究空气污染、气候变化及其相互作用的有力工具。Partanen等人^[3]利用气溶胶-气候模型ECHAM-HAMMOZ研究了3个代表性浓度途径下气溶胶缓解与气候变化和公共卫生之间的关系,发现气溶胶的减少会导致升温,但会降低死亡率。Li等人^[4]利用区域气候-化学模型RegCM4-Chem研究了东亚夏季风对中国地表臭氧的影响,发现东亚夏季风的年际变化可以通过对流层低层的风、云量和向下的短波辐射影响臭氧的空间分布,从而影响臭氧的传输和化学形成。蒲茜^[5]同样利用RegCM4-Chem研究了全球变暖背景下频发的高温热浪极端天气事件对臭氧形成机理的影响。张冬峰和高学杰^[6]使用RegCM4预测了21世纪不同时期RCP4.5与RCP8.5两种排放路径下的中国气候变化。

为了科学认识区域臭氧和细颗粒物等大气污染物的时空分布特征及其与二氧化碳的相互作用规律,研究大气污染物、温室气体与区域气候相互影响的过程和机理,开展大气污染控制和气候变化应对, Xie等人^[7,8]发展了区域气候-化学-植被耦合模式RegCM-Chem-YIBs。该模式是基于区域气候-化学模式RegCM-Chem和植被模式YIBs发展而来, RegCM-Chem输出的气象因子(如气温、湿度、降水、辐射等)和大气污染物(臭氧和颗粒物)浓度输入YIBs,由YIBs模拟植被的生理过程(如光合作用、呼吸作用等),计算陆地生态系统的二氧化碳通量、生物源挥发性有机物(biogenic volatile organic compounds, BVOC)排放量以及气孔导度等陆面参数。YIBs计算的结果进一步反馈给RegCM-Chem,对大气中的二氧化碳、臭氧和颗粒物浓度以及大气低层的温湿度、环流等气象场进行调整,从而实现了气候、化学和生态不同过程之间的耦合。

本研究基于RegCM-Chem-YIBs对“双碳”目标情景下我国未来空气污染和气候变化状况进行了评估。通过设计数值试验,分别对区域减排政策、全球气候变化以及两者的共同影响进行模拟分析,预测2030年我国细颗粒物、臭氧和二氧化碳的浓度变化,以及地表气温、云和降水的变化,为空气质量改善和气候变化应对提供科学依据。

1 模式和试验

1.1 耦合模式框架

RegCM-Chem-YIBs耦合模式在原有的RegCM-

Chem基础上新增了CO₂物种,考虑大气中CO₂的源汇、输送和扩散过程。CO₂的源汇过程主要涉及化石燃料排放、生物质燃烧排放、大气-海洋CO₂交换通量以及陆地生态系统CO₂通量对大气CO₂浓度的影响。其中,化石燃料排放、生物质燃烧和海气CO₂交换通量在模式中是提前给定的,而陆地生态系统CO₂通量则通过耦合的陆地生态系统模式YIBs在线计算。

耦合模式系统中,每隔6 min将RegCM-Chem模式输出的气象因子(如气温、湿度、降水、辐射等)和大气污染物(臭氧和颗粒物)浓度输入YIBs模式,由YIBs模式模拟植被的生理过程(如光合作用、呼吸作用等),计算陆地生态系统的CO₂通量、BVOC排放量以及气孔导度等陆面参数。YIBs模式计算的结果进一步反馈给RegCM-Chem模式,对下个时刻大气中的二氧化碳、臭氧和颗粒物浓度以及大气低层的温湿度、环流等气象场进行调整,从而实现气候、化学和生态之间的耦合。

1.2 模式设置

模式的分辨率60 km×60 km,覆盖了东亚大部分地区。垂直分辨率设置为18层,顶层气压为50 hPa。采用ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)的中期再分析(ERA-Interim)数据提供气象边界条件。海平面温度(sea surface temperature, SST)数据来源于美国国家海洋与大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)周平均的最优插值SST产品(Weekly Optimum Interpolation SST: OI_WK SST)^[9]。CO₂物种的初边界条件来源于NOAA地球系统研究实验室(Earth System Research Laboratory, ESRL)开发的CarbonTracker全球碳同化系统^[10],能够提供全球每3 h一次的CO₂三维浓度数据产品。该产品水平分辨率为3°×2°,垂直方向25层的CO₂三维浓度数据产品。本研究中使用的是2019年更新的CT2019B产品(数据下载地址为<ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/products/carbontracker>),其他大气化学成分如臭氧等的初边界条件来自于全球大气化学输送模式MOZART(Model of Ozone and Related Chemical Tracers)的模拟结果^[11,12]。2015年人为排放数据来自空间分辨率为0.25°×0.25°的亚洲人为排放清单MIX(<http://www.meic-model.org>)^[13],其中中国地区的人为排放数据来自2015年中国多尺度排放清单模型MEIC。

RegCM模式提供了多种物理、化学参数化选项,

本研究选择的主要物理和化学参数方案如下: 积云对流方案选择了Grell方案^[14], 侧边界条件方案选择了松弛边界条件, 边界层方案选择了Holtslag PBL方案^[15], 辐射方案选择了CCM3^[16], 海洋通量选择了Zeng方案^[17].

1.3 数值试验方案

为了模拟PM_{2.5}、O₃、CO₂和气象变量对2030年区域减排政策与全球气候变化的响应, 设计了3组数值试验. 其中Baseline为基准情景, 模拟了2015年的真实情况, 使用了2015年中国的排放数据和全球气候背景场. ER和FC为对比试验, ER使用2030年排放水平和2015年的全球气候场, FC使用2030年排放水平和2030年的全球气候场. 2030年CO₂、SO₂、NO_x、NH₃、VOC、

CO、OC和BC的排放量基于清华大学使用中国未来排放动态预测模型DPEC碳中和情景(ambitious-pollution-neutral-goal)生成^[18], 2030年的全球气候场采用代表性浓度路径RCP4.5情景^[19]. 对比试验ER和Baseline可以得到区域排放变化的影响, 对比试验ER和FC可以得到全球气候变化的影响, 对比试验FC与Baseline可以得到区域排放和全球气候变化的共同影响.

2 结果和讨论

2.1 模式验证

2.1.1 气象场验证

为了验证模拟的气象场, 将模式结果与欧洲中心的再分析数据(ERA-Interim)进行对比. 从图1可以看出,

图1 ERA-Interim数据(a, c)和模拟结果(b, d)在500 hPa(a, b)和850 hPa(c, d)的气温(彩色填充, K)、比湿(等值线, kg kg⁻¹)和风场(流线, m s⁻¹)

Figure 1 ERA-Interim data (a, c) and simulation results (b, d) at 500 hPa (a, b) and 850 hPa (c, d) for air temperature (filled in color, K), specific humidity (contours, kg kg⁻¹) and wind field (streamlines, m s⁻¹)

总体而言, RegCM-Chem-YIBs能够较好地模拟东亚地区大气动力场和热力场的空间分布, 不同高度模拟的气温、比湿和风场与再分析数据具有很好的一致性. 500 hPa的模拟结果与再分析资料更为接近, 模拟的850 hPa新疆地区的湿度偏低, 东南亚地区的气温偏高. 500 hPa气温、经向风、纬向风和比湿的模拟结果与再分析资料的空间相关系数(均方根误差)分别为0.94 (0.48 K)、0.96(0.81 m s⁻¹)、0.92(1.3 m s⁻¹)、0.89 (0.00015 kg kg⁻¹). 850 hPa气温、经向风、纬向风和比湿的模拟结果与再分析资料的空间相关系数(均方根误差)分别为0.93(1.4 K)、0.60(1.4 m s⁻¹)、0.74(1.7 m s⁻¹)、0.69(0.00085 kg kg⁻¹). 使用中国地面气候资料日值数据集(V3)(下载地址: <https://data.cma.cn>)2015年698个国家级基准和基本站的温度、气压、相对湿度及风速数据对模式近地面气象要素的模拟结果进行验证. 温度、气压、相对湿度和风速的观测数据与模拟结果的时间相关系数(均方根误差)分别为0.84~0.98°C (1.3~2.1°C)、0.82~0.98 hPa(0.40~1.9 hPa)、0.38~0.87 (0.07~0.27)、0.94~0.99 m s⁻¹(0.08~0.38 m s⁻¹).

2.1.2 CO₂验证

为了验证模拟的CO₂浓度的合理性, 将模拟结果与世界温室气体数据中心(World Data Center for Greenhouse Gases, WDCGG)提供的观测数据进行比较(下载地址: <https://gaw.kishou.go.jp/>). 由于二氧化碳观测点的数量较少, 本研究选择了6个观测点进行比较. 图2给出了模拟的CO₂空间分布, 表1给出了各观测点的地理位置、站点高度、观测站点和模拟值的2015年CO₂浓度的平均值、时间相关系数和相对偏差. 观测和模式模拟的CO₂浓度的相关系数在0.53~0.99之间, 相对偏差在-0.52%~3.82%之间. 两个站点(HKO、HKG)的模拟结果与观测值相关性相对较低, 这是由于两个城市站

图2 模拟2015年年均CO₂浓度. 1 ppm=1 μL L⁻¹
Figure 2 Simulated annual average CO₂ concentration in 2015. 1 ppm=1 μL L⁻¹

点CO₂浓度受局地人为排放的影响较大, 而模式使用的是月平均排放源数据, 很难模拟局地排放源的日变化特征.

2.1.3 PM_{2.5}和O₃验证

使用中国环境监测中心发布的366个站点的逐小时PM_{2.5}和O₃观测数据(下载地址: www.cnemc.cn)与模拟值进行比较. 图3显示了各监测点的近地面PM_{2.5}和O₃浓度的年平均观测与模拟值. PM_{2.5}模拟与观测的平均值分别为51.7和50.5 μg m⁻³, 时间相关系数为0.45~0.74. O₃模拟与观测的平均值分别为76.3和78.0 μg m⁻³, 时间相关系数为0.34~0.77. PM_{2.5}和O₃的模拟与观测基本一致. 通过双侧T检验方法(two-sided t-test)对每两组数值试验间差异的显著性进行了检验, 均通过90%信度检验.

2.2 区域减排政策的影响

图4显示了由于区域减排政策导致的PM_{2.5}、O₃和

表1 CO₂观测站点的信息和观测与模拟结果的对比

Table 1 Information of CO₂ observation sites and comparison of observation and simulation results

站点	纬度(°N)	经度(°E)	高度(m)	观测值(ppm)	模拟值(ppm)	相关系数	相对偏差(%)
SDZ	40.65	117.12	287	402.6	414.5	0.86	2.96
TAP	36.73	126.13	20	409.3	416.5	0.72	1.76
UUM	44.44	111.09	992	401.8	399.7	0.90	-0.52
WLG	36.29	100.90	3810	401.0	400.2	0.99	-0.20
HKG	22.21	114.26	60	402.8	418.2	0.53	3.82
HKO	22.31	114.17	65	407.8	420.5	0.54	3.11

图3 2015年平均PM_{2.5}(a)与O₃(b)浓度模拟结果和站点观测结果(圆圈)

Figure 3 Simulated results and station observations (circles) of average PM_{2.5} (a) and O₃ (b) concentrations in 2015

CO₂浓度和气候因子的变化. 可见, 区域减排对PM_{2.5}的浓度影响最为显著(图4(a)), 由于前体物的排放显著减少, 导致PM_{2.5}浓度急剧下降, 最大降幅达90.8 $\mu\text{g m}^{-3}$. 由于PM_{2.5}在大气中的寿命较短, 其浓度变化主要集中在污染严重的华北平原地区. 区域减排对O₃的影响主要体现在浓度高值区, 最大减少了20.9 $\mu\text{g m}^{-3}$ (图4(b)). 新疆西北部的O₃浓度略有升高. 一方面, 可能是由于这些地区原本的O₃浓度已经很低, 减排带来的影响微乎其微, 边界传输的作用更为明显; 另一方面, 云量的减少促进了光化学反应生成O₃(图4(e)). 从图4(c)可以看出, 区域减排导致CO₂的浓度明显下降. 其中, 华中地区和华北地区的CO₂浓度降幅较大, 最大可达6.7 ppm.

除西南地区 and 东南沿海地带以外, 大部分地区的降水均有所上升(图4(d)), 在华北平原地区, 大幅降低的PM_{2.5}浓度使得该区域的降水显著增加, 最高增加了3.3 mm d^{-1} , 这与气溶胶的直接和间接效应可以抑制降水有关^[20-22]. 云量变化的空间分布与降水较为一致(图4(e)), 除西南地区、东部沿海地区和东北部分地区, 云量下降了2%左右, 其他地区的云量上升了2%~4%.

影响地表气温的主要物理过程包括人为温室气体排放导致的全球变暖和自然与人为活动形成的气溶胶导致的降温^[23]. Kiehl和Briegleb^[24]指出, 气溶胶的负强迫在一些地区足以大大减少温室气体增加带来的正强迫. 模拟结果显示, PM_{2.5}减少导致的增暖效应抵消了部分CO₂和O₃降低带来的冷却效应, 中国大部分地区都呈现变暖的趋势, 尤其是在南方地区, 升温幅度在0.3~0.8 K之间(图4(f)). 在降水明显增多的华北地区和东北部分地区, 气温下降了0.1~0.4 K.

2.3 全球气候变化的影响

全球气候变化导致了我国降水的明显变化(图5(d)). 整体来看, 除部分地区如东北地区的降水有所上升, 上升幅度均在3 mm d^{-1} 之内, 大部分地区的降水量呈现明显的下降趋势. 南方地区的降水下降幅度最大, 可达到5.7 mm d^{-1} . 云量变化的空间分布特征与降水基本一致(图5(e)), 但降水的变化范围相对较为集中. 在全球气候变化的影响下, 南方地区的云量下降了3%左右. 在RCP4.5情景的控制下, 预计中国绝大多数地区的气温将上升0.5 K以上(图5(f)). 东南沿海省份的气温预计将上升1~2 K, 东北地区的气温下降了1 K左右, 这可能会导致北方更冷, 南方更暖. 东北地区的气温下降与温室气体有关, 该地区CO₂浓度下降了2~4 ppm(图5(c)).

相对区域减排, 全球气候变化对PM_{2.5}、O₃和CO₂的影响相对较小, 大部分地区的PM_{2.5}浓度均下降了1 $\mu\text{g m}^{-3}$ 以上, 其中华北平原地区降幅最大达到了6.6 $\mu\text{g m}^{-3}$ (图5(a)). O₃浓度在中部地区呈现下降趋势(图5(b)), 气候变化导致了中部地区的云量和降水的增加, 进而减少了到达地面的太阳辐射. 东部沿海地带的O₃浓度呈现上升趋势, 但幅度较小, 一般在2 $\mu\text{g m}^{-3}$ 以内.

全球气候变化将导致大多数地区的CO₂升高约1 ppm(图5(c)). 气候变化所带来的南方地区温度的明显升高, 增强了该地区植被的呼吸作用^[25], 净初级生产力(net primary production, NPP)随之下降, 释放出更多的CO₂; 同时, 颗粒物减少引起的地表散射辐射比例的减少会抑制植被的光合作用^[26], 总初级生产力(gross primary production, GPP)下降, 陆地生态系统对CO₂的吸

图4 区域减排对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度(a)、 O_3 浓度(b)、 CO_2 浓度(c)、降水(d)、云量(e)、气温(f)的影响

Figure 4 The color contours in the maps show the changes: $\text{PM}_{2.5}$ concentrations (a), O_3 concentrations (b), CO_2 concentrations (c), precipitation (d), cloud fraction (e), and temperature (f), respectively, caused by regional emission reduction

收减少. 因此, 在植被丰富的南方地区, CO_2 最高升高了 2.8 ppm.

2.4 区域减排政策和全球气候变化的协同影响

相对于全球气候变化的影响, $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 和 CO_2 浓度的变化主要由排放控制(图6). 由于区域减排的实施, 截至2030年, 我国绝大部分地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均至少降低了 $10 \mu\text{g m}^{-3}$ (图6(a)), 尤其在污染严重的华北平原地区, $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度至少减少了 $40 \mu\text{g m}^{-3}$. 区域减排对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献远远超过了全球气候变化的影响, 与

同类研究的结果一致. 如Colette等人^[27]认为, 影响未来空气质量的主要因素是污染物的排放, 而不是气候变化或污染的洲际传输. Liu等人^[28]研究发现, 与可持续发展相关的减排引起的 $\text{PM}_{2.5}$ 变化比气象变化引起的变化大10倍以上.

O_3 浓度也将在2030年呈现下降趋势(图6(b)). 在东部地区, 中国 O_3 浓度将下降 $6 \mu\text{g m}^{-3}$ 以上. 特别是在 O_3 污染问题日益突出的华北平原地区, O_3 浓度最大降幅为 $20.1 \mu\text{g m}^{-3}$. 在中国西北部地区, 由于外界传输和光化学作用, O_3 浓度有一定程度的升高, 但一般低于

图5 全球气候变化对PM_{2.5}浓度(a)、O₃浓度(b)、CO₂浓度(c)、降水(d)、云量(e)、气温(f)的影响

Figure 5 The color contours in the maps show the changes: PM_{2.5} concentrations (a), O₃ concentrations (b), CO₂ concentrations (c), precipitation (d), cloud fraction (e), and temperature (f), respectively, caused by global climate change

$3 \mu\text{g m}^{-3}$.

CO₂浓度的变化也更多地受到区域减排政策的影响(图6(c)). 区域减排政策和全球气候变化对CO₂浓度的作用相反, 但区域减排的作用更加突出, 导致CO₂浓度在整个中国地区都有不同程度的下降. 在人口密集的京津冀、长江三角洲和珠江三角洲地区, CO₂浓度的下降更加剧烈, 最多降低了12.6 ppm.

降水和云的变化分布更接近于全球气候变化影响下的变化分布(图6(d), (e)). 南方地区的降水量普遍呈现降低趋势, 一般降低0~2 mm d⁻¹, 北方地区除河南省

以外则呈现升高趋势, 最多升高了5.2 mm d⁻¹. 云量变化的分布特质与降水量类似, 但南北的差异更加明显.

气温变化是由全球气候变化的影响主导的. 在我国东部的大多数地区, 气温将上升到1 K以上(图6(f)). 尤其是沿海城市, 气温将上升约1~2 K. 东北地区的气温则有所下降, 下降幅度在0.5~1.5 K之间.

3 结论

本研究应用区域气候-化学-生态耦合模型RegCM-Chem-YIBs, 通过数值试验评估了“双碳”目标下区域减

图6 区域减排政策和全球气候变化对PM_{2.5}浓度(a)、O₃浓度(b)、CO₂浓度(c)、降水(d)、云量(e)、气温(f)的影响

Figure 6 The color contours in the maps show the changes: PM_{2.5} concentrations (a), O₃ concentrations (b), CO₂ concentrations (c), precipitation (d), cloud fraction (e), and temperature (f), respectively, caused by regional emission and global climate change

减排政策和全球气候变化对我国区域气候与空气污染的影响,得到的主要结论如下。

(1) 区域减排政策和全球气候变化的协同作用对2030年我国空气污染与气候变化具有重要影响。PM_{2.5}、O₃和CO₂平均浓度分别下降了36.8、19.8 $\mu\text{g m}^{-3}$ 和1.9 ppm,其中区域减排政策使PM_{2.5}、O₃和CO₂平均浓度分别降低了35.2、20.0 $\mu\text{g m}^{-3}$ 和1.1 ppm,全球气候变化使PM_{2.5}与CO₂平均浓度分别下降了1.5 $\mu\text{g m}^{-3}$ 和0.7 ppm, O₃浓度上升了0.2 $\mu\text{g m}^{-3}$ 。

(2) 全球气候变化对气温和水循环的影响比区域

减排政策更为显著。在两者协同作用的共同影响下,我国南方地区的气温将有明显升高,升高幅度在0.5~1.5 K之间,降水和云量分别减少了1~2 mm d⁻¹和3%~6%;北方地区气温有所降低,一般在1 K以下,降水和云量分别增加了2 mm d⁻¹和6%左右。

(3) 严格的减排政策是实现碳中和目标不可或缺的条件之一。与缓解全球变暖的预期相反,区域排放的剧降将导致颗粒物的冷却效果减弱,反而会引起部分地区升温。全球气候变化是导致气温变化的主要原因,区域减排造成的气温变化相对较小,但也应引起足够

重视.

本研究对2030年区域减排政策与全球气候变化对我国空气污染和气候变化的综合影响进行了分析,结果表明,在实现碳中和目标的过程中,细颗粒物、臭氧

和二氧化碳浓度将大幅减少,但我国南方地区的气温有所上升.如果要遏制局部地区的气候变暖,更为合理的温室气体与大气污染协同减排政策和全球共同减排是当务之急.

致谢 文中涉及的中国地图经自然资源部地图技术审查中心审查,审图号为GS(2022)546号.

参考文献

- 1 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]
- 2 Ding Y H, Li Q P, Liu Y J, et al. Atmospheric aerosols, air pollution and climate change (in Chinese). *Meteorol Mon*, 2009, 35: 3–14 [丁一汇, 李巧萍, 柳艳菊, 等. 空气污染与气候变化. 气象, 2009, 35: 3–14]
- 3 Partanen A I, Landry J S, Matthews H D. Climate and health implications of future aerosol emission scenarios. *Environ Res Lett*, 2018, 13: 024028
- 4 Li S, Wang T, Huang X, et al. Impact of East Asian summer monsoon on surface ozone pattern in China. *J Geophys Res Atmos*, 2018, 123: 1401–1411
- 5 Pu X. Study on formation mechanism and radiation effect of ozone during high temperature heat wave in Yangtze River Delta (in Chinese). Master Dissertation. Nanjing: Nanjing University, 2017 [蒲茜. 长三角高温热浪期间臭氧的形成机理及辐射效应研究. 硕士学位论文. 南京: 南京大学, 2017]
- 6 Zhang D F, Gao X J. Climate change of the 21st century over China from the ensemble of RegCM4 simulations (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 2516–2526 [张冬峰, 高学杰. 中国21世纪气候变化的RegCM4多模拟集合预估. 科学通报, 2020, 65: 2516–2526]
- 7 Xie X, Wang T, Yue X, et al. Numerical modeling of ozone damage to plants and its effects on atmospheric CO₂ in China. *Atmos Environ*, 2019, 217: 116970
- 8 Xie X, Wang T, Yue X, et al. Effects of atmospheric aerosols on terrestrial carbon fluxes and CO₂ concentrations in China. *Atmos Res*, 2020, 237: 104859
- 9 Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. An improved *in situ* and satellite SST analysis for climate. *J Clim*, 2002, 15: 1609–1625
- 10 Peters W, Jacobson A R, Sweeney C, et al. An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2007, 104: 18925–18930
- 11 Emmons L K, Walters S, Hess P G, et al. Description and evaluation of the Model for Ozone and Related chemical Tracers, version 4 (MOZART-4). *Geosci Model Dev*, 2010, 3: 43–67
- 12 Horowitz L W, Walters S, Mauzerall D L, et al. A global simulation of tropospheric ozone and related tracers: Description and evaluation of MOZART, version 2. *J Geophys Res Atmos*, 2003, 108: 29
- 13 Li M, Zhang Q, Kurokawa J, et al. MIX: A mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP. *Atmos Chem Phys*, 2017, 17: 935–963
- 14 Grell G A. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Mon Weather Rev*, 1993, 121: 764–787
- 15 Holtslag A A M, De Bruijn E I F, Pan H L. A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting. *Mon Weather Rev*, 1990, 118: 1561–1575
- 16 Kiehl J T, Hack J J, Bonan G B, et al. Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3). Technical Report. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 1996
- 17 Zeng X, Zhao M, Dickinson R E. Intercomparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using TOGA COARE and TAO data. *J Clim*, 1998, 11: 2628–2644
- 18 Cheng J, Tong D, Zhang Q, et al. Pathways of China's PM_{2.5} air quality 2015–2060 in the context of carbon neutrality. *Natl Sci Rev*, 2021, 8: nwab078
- 19 Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Technical Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- 20 Chen W D, Fu D H, Miao S G, et al. Impacts of aerosols from Beijing and the surrounding areas on urban precipitation (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 2124–2135 [陈卫东, 付丹红, 苗世光, 等. 北京及周边城市气溶胶污染对城市降水的影响. 科学通报, 2015, 60: 2124–2135]
- 21 Huang R X, Jin X. On the boundary conditions applied to the sea-ice coupled model. *J Geophys Res*, 2007, 112: 17
- 22 Wang Y, Ma P L, Jiang J H, et al. Toward reconciling the influence of atmospheric aerosols and greenhouse gases on light precipitation changes in

- Eastern China. *J Geophys Res Atmos*, 2016, 121: 5878–5887
- 23 Li X Y, Chen X R. Main processes affecting global average surface temperature (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 4017–4027 [李心月, 陈显尧. 影响全球平均表面温度的主要过程. 科学通报, 2021, 66: 4017–4027]
- 24 Kiehl J T, Briegleb B P. The relative roles of sulfate aerosols and greenhouse gases in climate forcing. *Science*, 1993, 260: 311–314
- 25 Tan K Y, Zhou G S, Ren S X. Response of leaf dark respiration of winter wheat to changes in CO₂ concentration and temperature (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 1158–1163 [谭凯炎, 周广胜, 任三学. 冬小麦叶片暗呼吸对CO₂浓度和温度协同作用的响应. 科学通报, 2013, 58: 1158–1163]
- 26 Fu C B, Dan L. Influence of intensified air pollution on the sunny diffuse radiation fraction in China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 2655–2665 [符传博, 丹利. 大气污染加剧对中国区域散射辐射比例的影响. 科学通报, 2018, 63: 2655–2665]
- 27 Colette A, Bessagnet B, Vautard R, et al. European atmosphere in 2050, a regional air quality and climate perspective under CMIP5 scenarios. *Atmos Chem Phys*, 2013, 13: 7451–7471
- 28 Liu S, Xing J, Wang S, et al. Health benefits of emission reduction under 1.5°C pathways far outweigh climate-related variations in China. *Environ Sci Technol*, 2021, 55: 10957–10966

Summary for “‘双碳’目标对我国未来空气污染和气候变化的影响评估”

Assessment of the impact of “dual-carbon” goal on future changes in air pollution and climate in China

Beiyao Xu¹, Tijian Wang^{*}, Shu Li¹, Bingliang Zhuang¹, Min Xie¹, Mengmeng Li¹ & Xiaodong Xie²

¹ School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

² School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

* Corresponding author, E-mail: tjwang@nju.edu.cn

Carbon neutrality refers to achieving net-zero carbon dioxide emissions. Reducing CO₂ emissions is one of the major ways to achieve carbon neutrality and control air temperature rise. So far, numerous countries have pledged their goals of achieving carbon neutrality. In September 2020, China proposed a national dual-carbon goal and the associated timeline to achieve peak carbon and carbon neutrality. Therefore, how the proposal will lead to future changes in air quality and climate in China is of great interest. In the context of the dual-carbon goal, a series of emission reduction policies for different types of industries will be implemented to achieve CO₂ reductions. As a result, emissions of other pollutants will be reduced as well. Furthermore, future global climate change is also one of the main concerns.

Most previous studies have focused on one single impacting factor without consideration of the dual-carbon goal. While carbon neutrality is an inevitable global trend, studies of its implication on air quality and climate change in China are still rare. Considering both regional emissions and global climate change will help predict future climate. Taking the dual-carbon goal into account will help adjust current emission reduction policies. In this study, we simulate the impacts of both regional emissions and global climate change in the future on China's air quality and climate in the future under the dual-carbon goal scenario using a regional climate-ecology coupled model RegCM-Chem-YIBs, based on the Representative Concentration Pathway (RCP4.5) climate scenario and China's 2030 emission data based on dynamics projection model (DPEC). Numerical simulations for present climate and present emissions, present climate and future emissions, and future climate and future emissions were performed. The comparison between the three sets of simulations provides how future regional emission reduction and global climate change will affect air pollution and climate in 2030.

The study shows that, compared with 2015, the concentrations of fine particulate matter (PM_{2.5}), ozone (O₃), and carbon dioxide (CO₂) in China will decrease by approximately 36.8, 19.8 μg m⁻³ and 1.9 ppm in 2030, respectively, under the combined effect of future regional emissions and global climate change. The temperature in the southern part of China will increase significantly, with an increase between 0.5 and 1.5 K. Precipitation and clouds decrease by 1–2 mm d⁻¹ and 3%–6%, respectively. The temperature in the northern part decreases slightly, generally below 1 K. Precipitation and clouds increase by approximately 2 mm d⁻¹ and 6%, respectively. Overall, regional emission changes have a larger impact on PM_{2.5}, O₃ and CO₂ concentrations, which are the main influencing factors for future air quality changes, while global climate change has a greater impact on temperature, clouds and precipitation. Emission reduction policies under the dual-carbon target will significantly reduce air pollution, but may exacerbate warming at the surface because these policies will inevitably diminish the cooling effect of particulate matter. The mitigation of climate change will require GHG (greenhouse gas) and air pollution synergistic emission reduction policies and worldwide cooperation.

carbon peak, carbon neutrality, climate change, air quality

doi: [10.1360/TB-2021-1091](https://doi.org/10.1360/TB-2021-1091)