

目次

气候变化对中国夏季臭氧影响	胡安琪, 谢晓栋, 龚康佳, 侯宇晖, 胡建林 (1801)
基于 EOF 分解和 KZ 滤波的 2019~2021 年中国臭氧时空变化及驱动因素分析	王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 王艳阳, 戴启立, 毕晓辉, 吴建会, 冯银厂 (1811)
华北工业城市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	郑镇森, 姜建平, 张国涛, 李丽明, 徐勃, 杨文, 白志鹏 (1821)
2015~2020 年中国城市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染时空演变特征	牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 易嘉慧, 慕航, 吴倩, 洪松, 何超 (1830)
2015~2021 年京津冀及周边地区 PM _{2.5} 和臭氧复合污染时空特征分析	宋小涵, 燕丽, 刘伟, 贺晋瑜, 王亚晨, 黄同林, 李园园, 陈敏, 孟静静, 侯战方 (1841)
2000~2020 年中国典型经济区 PM _{2.5} 时空变化及其与植被景观格局的关系	徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉 (1852)
北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析	赵宇, 李贝贝, 黄玉虎, 梁静, 杨洪玲, 秦建平, 朱玲 (1865)
南京近郊农田大气颗粒物及金属干沉降输入特征	刘翠英, 靳浩, 樊建凌 (1873)
西安冬季 PM _{2.5} 中不同极性水溶性有机物的污染特征及氧化潜势	罗玉, 黄沙沙, 张甜, 孙健, 沈振兴 (1882)
机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征	王红磊, 刘思略, 孙杰娟, 刘煥武, 赵天良, 裴宇僊, 可玥, 武自豪, 刘诗云 (1890)
伊犁河谷核心区春季 PM _{2.5} 组分特征及来源解析	谷超, 徐涛, 马超, 伊布提哈尔·加帕尔, 郭丽瑶, 李新琪, 杨文 (1899)
基于高分辨率网格的郑州市城镇居民 PM _{2.5} 暴露浓度与健康风险变化评估	李媛, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 王申博, 王克, 张瑞芹 (1911)
基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单	刘晓, 胡京南, 王红梅, 杨丽, 张皓 (1924)
开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	施雨其, 郑凯允, 丁玮婷, 刘金平, 陈洪光, 高光, 王玲玲, 王楠, 马双良, 郑瑶, 谢绍东 (1933)
2020 年和 2021 年南京城区臭氧生成敏感性和 VOCs 来源变化分析	陆晓波, 王鸣, 丁峰, 喻义勇, 张哲海, 胡崑 (1943)
北京市城区夏季大气 VOCs 变化特征及臭氧生成潜势	张蕊, 孙雪松, 王裕, 王飞, 罗志云 (1954)
青岛市臭氧污染与非污染期间 VOCs 化学特征及来源解析	贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 吴建会, 刘保双 (1962)
基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季 O ₃ 生成特征	俞辉, 韦娜娜, 徐学哲, 刘芊芊, 姚易辰, 赵卫雄, 张为俊 (1974)
“大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应	李少林, 王齐齐 (1985)
北京市减污降碳协同控制情景模拟和效应评估	俞珊, 张双, 张增杰, 翟艳芝, 刘桐坤 (1998)
基于不同排放清单的长三角人为 CO ₂ 排放模拟	马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)
武汉汉江水源水质变化趋势及风险分析	卓海华, 姜保峰, 徐杰, 陈洁, 陈杰, 兰秀薇, 范文重, 欧阳雪姣, 兰静 (2022)
长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价	李柏林, 张贺, 王俊, 沙雪妮, 陈晓飞, 卓海华 (2032)
陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析	吴喜军, 董颖, 赵健, 刘静, 张亚宁 (2040)
典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子	谢贵娟, 龚伊, 朱富成, 刘昌利, 卢宝伟, 邓辉, 汤祥明 (2052)
桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估	李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 林才霞, 舒小华, 张倩 (2062)
长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价	张静, 胡愈圻, 胡圣, 黄杰 (2072)
环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用	纪璐璐, 赵璐, 欧阳添, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴 (2083)
武汉市 3 种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因素	张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 彭雪, 张心怡, 张淑烟, 李竹栖, 葛芳杰, 张璐, 吴振斌, 刘碧云 (2093)
重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响	何一凡, 肖新宗, 王佳文 (2103)
亳清河水体细菌群落的结构和分布特征	王森, 陈建文, 张红, 李君剑 (2113)
微塑料暴露对小棒指软珊瑚 (<i>Sinularia microclavata</i>) 共生细菌群落结构和功能的影响	刘敏, 车文学, 曾映旭, 边伟杰, 吕淑果, 穆军 (2122)
上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价	严棋 (2136)
铝改性生物炭对水体低浓度氟的吸附特性	刘艳芳, 高玮, 刘蕊, 尹思婕, 张妙雨, 刘晓帅, 李再兴 (2147)
典型雌激素在微塑料上的吸附特征及位点能量分布	刘姜艳, 郑密密, 胡嘉梧, 柳玉荣, 贺德春, 潘杰 (2158)
面向工业园区废水臭氧氧化深度处理性能评价的模型污染物选择与评估	辛勃, 单超, 吕路 (2168)
基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别	张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 崔瀚文, 黄月美 (2177)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析	马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵 (2192)
基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估	黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳 (2204)
基于 BP 神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量	马赛炎, 魏海英, 马瑾, 刘奇缘, 吴颐杭, 屈雅静, 田雨欣, 赵文浩 (2215)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估	赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江 (2223)
典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险	邓帅, 段佳辉, 宁墨兔, 谭林, 蒲刚, 陈际行, 齐小兵, 蒋尚智, 谢桃园, 刘意章 (2234)
岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及玉米籽实 Cd 含量预测	戴亮亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊 (2243)
龙岩市不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染风险与贡献分析	王蕊, 陈楠, 张二喜 (2252)
小麦籽粒镉含量影响因素 Meta 分析和决策树分析	刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳 (2265)
黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征	刘涵宇, 刘颖异, 张琦, 封伦, 高起乾, 任成杰, 韩新辉 (2275)
短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响	江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌 (2283)
黄河源区斑块退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应	杨鹏年, 李希来, 李成一, 段成伟 (2293)
不同海拔箭筈锦鸡儿根际和非根际土壤细菌群落多样性及 PICRUSt 功能预测	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞 (2304)
模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响	王楠, 钱少郁, 潘小承, 陈一磊, 白尚斌, 徐飞 (2315)
磷石膏和碱蓬对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (2325)
菌渣与化肥肥施对稻田土壤微生物群落组成及多样性的影响	耿和田, 王旭东, 石思博, 叶正钱, 周文晶 (2338)
增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响	胡锦涛, 薛利红, 钱聪, 魏利祥, 曹帅 (2348)
外源褪黑素对胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响	储玉檀, 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春 (2356)
面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价	付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩 (2365)
农田土壤微塑料分布、来源和行为特征	薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩 (2375)
农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展	胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 徐明恺, 张惠文, 魏树和 (2384)
我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望	李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 胡文友, 田康, 黄标, 吴祥为, 刘峰, 赵玉国, 赵永存 (2395)
《环境科学》征订启事(1910)	《环境科学》征稿简则(1984)
信息	(2167, 2191, 2324)

气候变化对中国夏季臭氧影响

胡安琪¹, 谢晓栋¹, 龚康佳¹, 侯宇晖², 胡建林^{1*}

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室, 大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044; 2. 桐乡市气象局, 嘉兴 314000)

摘要: 气象条件对近地层臭氧(O_3)的生成有重要影响. 为了探讨未来气候变化如何影响中国不同地区的 O_3 浓度, 本研究将全球耦合模式比较计划 CMIP5 提供的 CESM 地球系统模式的气候预测数据作为 WRF 区域气象模式的初始边界条件, 降尺度模拟了 3 种代表情景(RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5)下的未来 2046~2055 年夏季气候变化情况, 并驱动 CMAQ 区域空气质量模式模拟气候变化对 O_3 的影响. 结果表明, 气候变化使中国夏季边界层高度、温度均值和高温天数增加, 相对湿度有所降低, 近地面风速无明显变化. 在气象要素的共同影响下, O_3 浓度在京津冀、四川和华南等地区呈现增加趋势, O_3 每日最大 8 h 滑动平均(MDA8)极值在不同情景下增幅为: RCP8.5 ($0.7 \mu g \cdot m^{-3}$) > RCP6.0 ($0.3 \mu g \cdot m^{-3}$) > RCP4.5 ($0.2 \mu g \cdot m^{-3}$). 夏季 MDA8 超标日变化与高温天数变化有较为相似的分布, MDA8 超标的发生与高温天气有密切关联. 气候变暖背景下高温日数增加导致 O_3 极端污染事件增加, 未来中国夏季 O_3 持续污染的可能性增加.

关键词: 气候变化; 浓度路径(RCP); 温度; 臭氧(O_3); 区域差异

中图分类号: X515 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2023)04-1801-10 **DOI:** 10.13227/j.hj.kx.202203085

Impact of Climate Change on Summer Ozone in China

HU An-qi¹, XIE Xiao-dong¹, GONG Kang-jia¹, HOU Yu-hui², HU Jian-lin^{1*}

(1. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Tongxiang Meteorological Bureau, Jiaxing 314000, China)

Abstract: Meteorological conditions have important impacts on surface ozone (O_3) formation. To evaluate the influence of future climate change on O_3 concentrations in different regions of China, this study employed the climate data from the community earth system model provided by the CMIP5 under the RCP4.5, RCP6.0, and RCP8.5 scenarios to generate the initial and boundary conditions for the WRF model. Then, the dynamic downscaling WRF results were fed into a CMAQ model as meteorological fields with fixed emission data. Two 10-year periods (2006-2015 and 2046-2055) were selected in this study to discuss the impacts of climate change on O_3 . The results showed that climate change increased boundary layer height, mean temperature, and heatwave days in China during summer. Relative humidity decreased and wind speed near the surface showed no obvious change in the future. O_3 concentration showed an increasing trend in Beijing-Tianjin-Hebei, Sichuan Basin, and South China. The extreme value of O_3 maximum daily 8-hour moving average (MDA8) showed an increasing trend, following the order of RCP8.5 ($0.7 \mu g \cdot m^{-3}$) > RCP6.0 ($0.3 \mu g \cdot m^{-3}$) > RCP4.5 ($0.2 \mu g \cdot m^{-3}$). The number of days exceeding the standard for summer O_3 had a similar spatial distribution with the heatwave days in China. The increase in heatwave days led to the increase in O_3 extreme pollution events, and the possibility of a long-lasting O_3 pollution event will increase in China in the future.

Key words: climate change; representative concentration pathway(RCP); temperature; ozone (O_3); regional differences

随着中国大范围的城市化和经济的快速增长, 工业和人口密度较大的东部地区面临严重的空气污染问题^[1-3]. 近地层的臭氧(O_3)和细颗粒物($PM_{2.5}$)是目前中国东部地区的主要大气污染物, 对大气环境、生态系统和人体健康都造成严重影响^[4,5]. 自 2013 年 9 月实行《大气污染防治行动》以来, 中国的 $PM_{2.5}$ 污染得到了明显改善, 但近地层 O_3 污染却呈逐渐严重趋势^[6,7]. 在低纬度地区的部分城市, O_3 已经成为对人类活动影响最大的污染物之一^[8-10].

近地层 O_3 是前体物氮氧化物(NO_x)和挥发性有机物(VOCs)经一系列大气光化学反应生成的产物. 气象条件, 如温度(T)、相对湿度(RH)、行星边界层高度(PBLH)和风速(WS)等气象条件对 O_3 的生成有重要影响^[6,11-13]. 王玫等^[14]基于 2014~2017

年京津冀 13 座城市的 O_3 浓度数据, 发现夏季和秋季温度是影响 O_3 浓度变化的主要因素. 针对夏季的高 O_3 浓度污染事件, Ma 等^[15]运用三维区域大气模式 WRF (weather research and forecasting model) 和 CMAQ (community multi-scale air quality model) 分析了气象要素与 O_3 浓度间的关系, 发现高温对高 O_3 浓度污染事件具有推动作用. 刘妍妍等^[16]基于观测数据对 2015~2020 年期间湖南省 14 个地级市 O_3 污染浓度的时空演化特征进行了分析, 发现气象对 O_3 浓度的上升起促进作用, 其平均影响的程度达到了 $1 \mu g \cdot (m^3 \cdot a)^{-1}$.

气候变化将导致未来平均温度升高, 但是温度

收稿日期: 2022-03-09; 修订日期: 2022-07-05

作者简介: 胡安琪(1995~), 女, 硕士, 主要研究方向为气候变化与大气污染, E-mail: 20191212002@nuist.edu.cn

* 通信作者, E-mail: jianlinhu@nuist.edu.cn

的变化在区域上呈现很大的差异性^[17~19]. 未来气候变化对不同地区 O₃ 的影响是气象条件变化与排放特征共同作用的结果^[20~22]. 有研究发现, 气候变化导致近地层温度变化, 而温度变化间接通过影响边界层高度等改变低层 O₃ 浓度^[23,24]. 政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 基于更完善且分辨率较高的 CMIP5 (coupled model inter comparison project phase 5) 结果提出 4 个温室气体浓度情景, 按低至高浓度排列分别为 RCP2.6 (低)、RCP4.5 (中低)、RCP6.0 (中高) 和 RCP8.5 (高). 其中 RCP 表示浓度路径 (representative concentration pathway), 数字后缀表示 2100 年相比于 1750 年的辐射强迫^[25]. 通过模拟 CMIP5 不同路径情景下的 O₃ 浓度变化, Sun 等^[26] 的研究发现, 在 RCP8.5 路径下未来美国东部的 O₃ 浓度将降低, 西部的 O₃ 浓度增加. Hou 等^[27] 基于 RCP8.5 路径模拟后发现 2100 年高温热浪导致的高 O₃ 污染事件比 2001 年增加了约 25%. Yahya 等^[28] 经过对比后发现, RCP8.5 路径下美国大部分地区 O₃ 浓度上升, 而 RCP4.5 路径下 O₃ 浓度降低. Zhang 等^[29] 进一步研究发现 RCP8.5 路径下因热浪, 静稳大气以及两者的综合情景导致 2046~2066 年美国出现高 O₃ 污染的天数较 2001~2010 年平均多约 16、0.5 和 5 d.

全球气候模式 (GCM) 已经被广泛应用于气候变化的研究和预测中. 但是全球气候模型空间分辨率粗糙, 无法很好地预测区域天气特征, 不适合用于高分辨率的区域气候、空气质量和健康影响研究^[30]. 因此降尺度模拟被应用到区域气候变化及空气质量影响的研究中^[31,32]. 王莹等^[19] 利用 CMIP5 模式的结果作为侧边界数据驱动 WRF 模式得到降尺度结果, 然后与历史时期 (1996~2005 年) 的气温观测数据相比, 发现在空间分布上有较高的吻合度, 证实了降尺度方案可以为未来区域气温变化的预估提供较为可靠的数据. 本研究使用 CMIP5 提供的 CESM (community earth system model) 模式的预测结果为 WRF 模式提供初始边界条件, 降尺度模拟了 2006~2015 和不同 RCP 情景下 2046~2055 年的气象条件, 再用得到的气候数据驱动区域空气质量模型 CMAQ, 分析了不同情景下 O₃ 浓度变化情况. 本研究结果将帮助人们更好地理解并预测未来气候变化对中国 O₃ 污染的影响, 以期在气候变化情景下持续改善 O₃ 污染提供参考.

1 材料与方法

1.1 数据介绍

本研究使用 CMIP5 中的 CESM 版本 1 生成的

全局偏差校正数据, 数据来源于网站 (<https://rda.ucar.edu/datasets/>). 该数据中所有变量都有 26 层, 时间分辨率为 6 h, 且提供历史 (1951~2005 年) 和未来 (2006~2100 年) 的 4 种典型浓度路径情景 (RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5). 该数据已经根据 Bruyère 等^[33] 的方法使用欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF) 1981~2005 年中期再分析资料 (ERA-Interim) 进行偏差校正. 由于 CESM 模型错误导致数据损坏, RCP2.6 中没有偏差修正数据. 因此, 本研究选择 3 个排放情景 (RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5) 进行未来 (2046~2055 年) 的气候降尺度模拟, 利用 2006~2015 年进行过去的模拟作为 Basecase 进行未来气候变化的参照. 具体情景设置及时间范围设定见表 1.

表 1 情景设置以及时间范围设定

Table 1 Scenario settings and time range settings		
情景	年份	气象初始场设置 ¹⁾
Basecase	2006~2015	RCP6.0 模拟结果
RCP4.5	2046~2055	RCP4.5 情景结果
RCP6.0	2046~2055	RCP6.0 情景结果
RCP8.5	2046~2055	RCP8.5 情景结果

1) 基于 CMIP5-CESM 模式

1.2 模型设置

使用 CESM 粗分辨 (0.9375° × 1.25°) 的模拟结果驱动 WRF v3.8 进行降尺度模拟, 从而得到的全国 2006~2015 年和 2046~2055 年的气象数据. WRF 模拟区域覆盖整个东亚, 空间分辨率为 36 km × 36 km, 时间分辨率为 1 h. 模拟区域见图 1. WRF 模型在垂直方向上设置了 44 层, 其中 1 km 以下设置 18 层以便更好地描述大气边界层结构, 具体 WRF 模型气象参数的配置信息如表 2 所示^[34]. 空气质量的模拟采用 CMAQ 空气质量模型. CMAQ 模拟区域与 WRF 模拟区域一致. 气相化学反应机制为 SAPRC07, 气溶胶机制为 AERO6. 为了研究气候变化对大气污染物的影响, 模拟中固定排放不变, 选择 2015 年的排放作为排放输入数据, 进行 2006~2015 年和 2046~2055 年的模拟. 人为排放清单来自清华大学开发的中国多尺度排放清单模型 MEICv1.3 网格化的 2015 年数据 (<http://www.meicmodel.org>), 水平分辨率为 0.25° × 0.25°^[35]. 生物源排放数据使用 MEGANv2.1 模拟结果^[36], 其中叶面积指数数据来自 MODIS 卫星资料, 植被功能类型数据来自通用陆面模型 CLM 3.0. 生物质燃烧排放清单来自 NCAR 的 FINN 数据^[37].

中国地域辽阔, 不同地区气候类型也有所不同.

表 2 WRF 模型参数化方案选择¹⁾
Table 2 Parameterization scheme of WRF

物理过程	参数	对应方案
微物理参数化方案	mp_physics = 8	新 Thompson 方案
长波辐射方案	ra_lw_physics = 1	RRTM 方案
短波辐射方案	ra_sw_physics = 2	Goddard 短波方案
近地面层方案	sf_sfclay_physics = 1	Monin-Obukhov 相似理论
陆面过程方案	sf_surface_physics = 2	MM5 陆面模式
边界层参数化方案	bl_pbl_physics = 1	YSU 边界层方案
积云对流参数化方案	cu_physics = 3	Grell-Devenyi 集合方案
城市冠层模式	sf_urban_surface = 0	关闭

为了更好地探讨中国范围内不同地区的气候变化,本研究把中国分为 7 个不同区域(图 1),分别为华东(E)、华北(N)、华中(C)、华南(S)、西南(SW)、西北(NW)和东北(NE)。

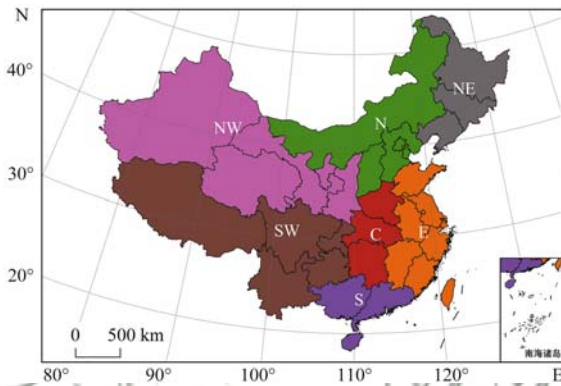


图 1 模拟区域和分区设置
Fig. 1 Simulation area and partition settings

1.3 模型模拟验证方法

对模型模拟结果的评估是验证模型模拟数据可用性的重要步骤. WRF 模拟结果使用欧洲中心再分析数据(ERA5)进行数据验证,该数据是从网站(<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!dataset/>)上获取. 逐小时 O₃ 观测数据从国家环境监测中心空气质量发布网站(<http://113.108.142.147:20035/emcpublish/>)上获得. 本研究使用美国环

保署推荐的统计参数和标准^[34],计算了观测值和模拟值的标准平均偏差(NMB)和标准平均误差(NME)以及相关系数(*R*),来定量评估模拟结果与观测值的吻合程度,相应公式如下所示.

$$NMB = \sum \frac{(P_j - O_j)}{O_j} \times 100 \tag{1}$$

$$NME = \sum \frac{|P_j - O_j|}{O_j} \times 100 \tag{2}$$

$$R = \frac{\sum [(P_j - \bar{P}) \times (O_j - \bar{O})]}{\sqrt{\sum (P_j - \bar{P})^2 \times \sum (O_j - \bar{O})^2}} \tag{3}$$

式中, *P_j* 表示时间序列中的模拟值, *O_j* 表示对应的观测值.

2 结果与讨论

2.1 模型验证

本研究选取了对 O₃ 的生成有重要影响的气象因子:PBLH、10 m 高度风速(*WS*₁₀)、RH 和 2 m 高度温度(*T*₂)进行分析. 图 2 显示了本研究的 Basecase 情景的 *T*₂ 模拟结果和 ERA5 再分析数据的空间分布,可以看到二者空间分布相似,可以认为降尺度模拟结果能够较好地模拟这些气象要素的空间特征^[38]. 表 3 给出了具体的统计参数,可以看出, *T*₂ 和 RH 的结果与 ERA5 数据结果较为一致,PBLH(ERA5:631.94 m,WRF:737.51 m)和 *WS*₁₀(ERA5:3.59 m·s⁻¹,WRF:4.32 m·s⁻¹)有所高估,但这 4 个气象因子整体来看都符合正常范围内,可以认为本研究针对以上气象因子的模拟结果具有较高的可用性. 对于 O₃ 的模拟,美国环保署推荐的模式性能标准值为 NMB 小于 ±0.3,NME 小于 0.5, *R* 大于 0.4^[34]. 图 3(a)和图 3(b)显示了本次 CMAQ 模拟结果较好地再现了 2013~2015 年 O₃ 每日最大 8 h 滑动平均(MDA8)的时空分布,而且统计参数也满足模式性能标准值,为接下来的探究提供了可靠性.

表 3 相关统计参数¹⁾
Table 3 Relevant statistical parameters

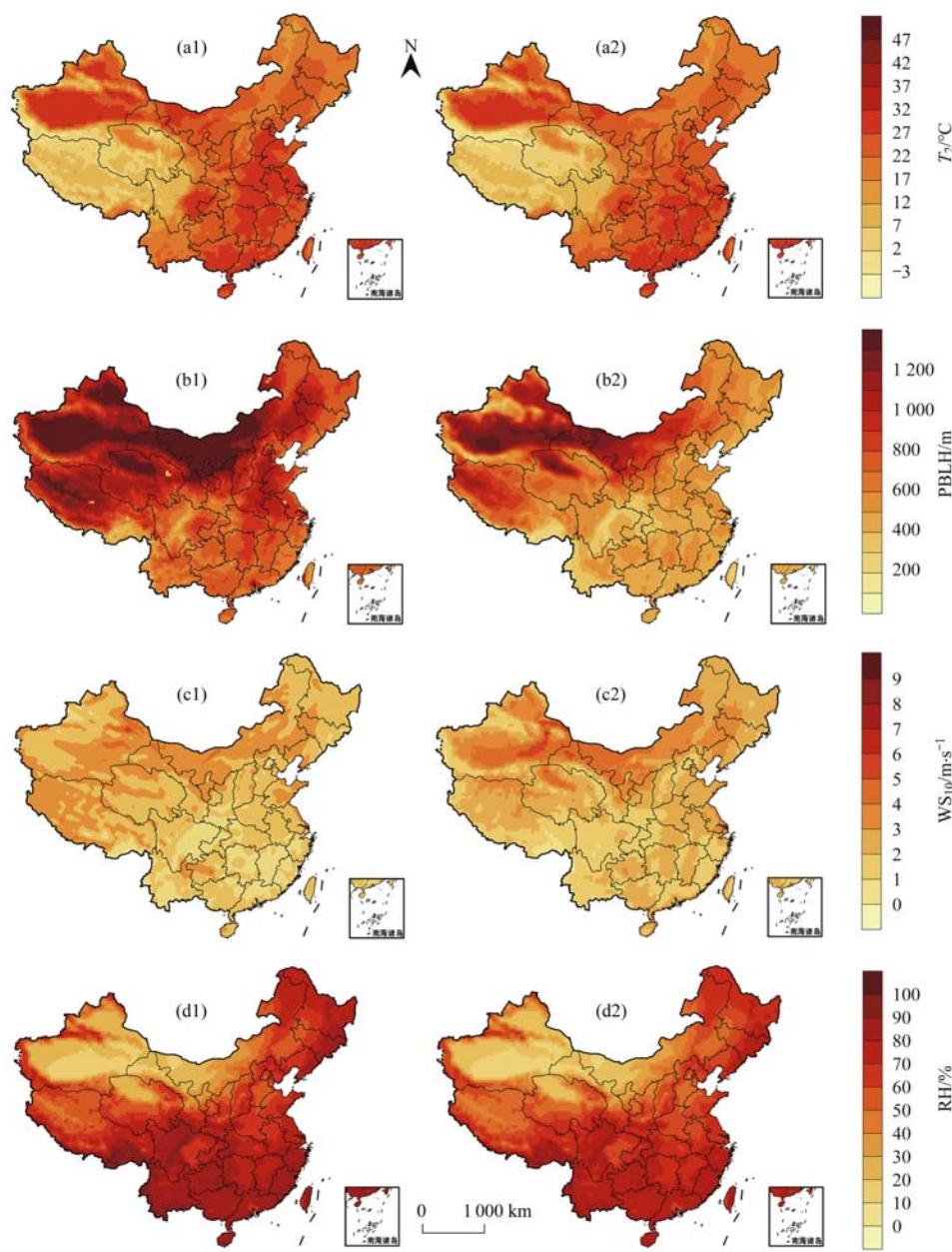
气象因子	Mo	Mp	Bias	ME	NMB	NME	RMSE	<i>R</i>	LoA
<i>T</i> ₂ /℃	22.37	22.93	0.56	1.14	0.00	0.00	1.45	0.98	0.99
PBLH/m	631.94	737.51	105.56	188.96	0.17	0.30	227.98	0.77	0.82
<i>WS</i> ₁₀ /m·s ⁻¹	3.59	4.32	0.74	1.02	0.21	0.28	1.24	0.86	0.86
RH/%	69.9	70.7	0.76	5.3	0.01	0.08	6.7	0.95	0.97

1) Mo 表示 ERA5 数据均值,Mp 表示 WRF 模拟均值,Bias 表示平均偏差,ME 表示总误差,NMB 表示标准平均偏差,NME 表示标准平均误差, RMSE 表示均方根误差, *R* 表示相关系数(无单位),LoA 表示一致性指数(无单位)

2.2 气候变化对气象条件的影响

降尺度模拟提供了更高分辨率的气候模拟结果^[39,40]. 图 4 显示的是中国 2046~2055 年相对 2006~2015 年夏季 PBLH、*WS*₁₀、RH 和温度均值

(*T*_{mean})的时空变化. Basecase 情景的各区域气象具体数值见表 4. 在 RCP8.5 与 RCP4.5 情景下京津冀地区出现了全国最明显的显著增加趋势;而 RCP6.0 情景下东北地区以及 RCP8.5 和 RCP4.5 情景下



(a1) ~ (d1) 分别为 T_2 、PBLH、 WS_{10} 和 RH 的模拟值, (a2) ~ (d2) 分别为 T_2 、PBLH、 WS_{10} 和 RH 的 ERA5 再分析数据

图2 Basecase 的气象模拟值与 ERA5 再分析数据对比

Fig. 2 Basecase meteorological simulation values compared with ERA5 reanalysis data

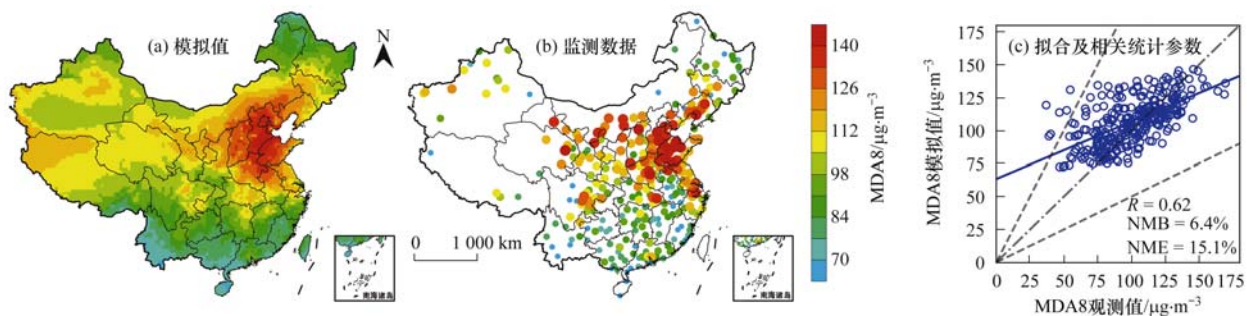


图3 Basecase 的 MDA8 模拟值和监测数据对比

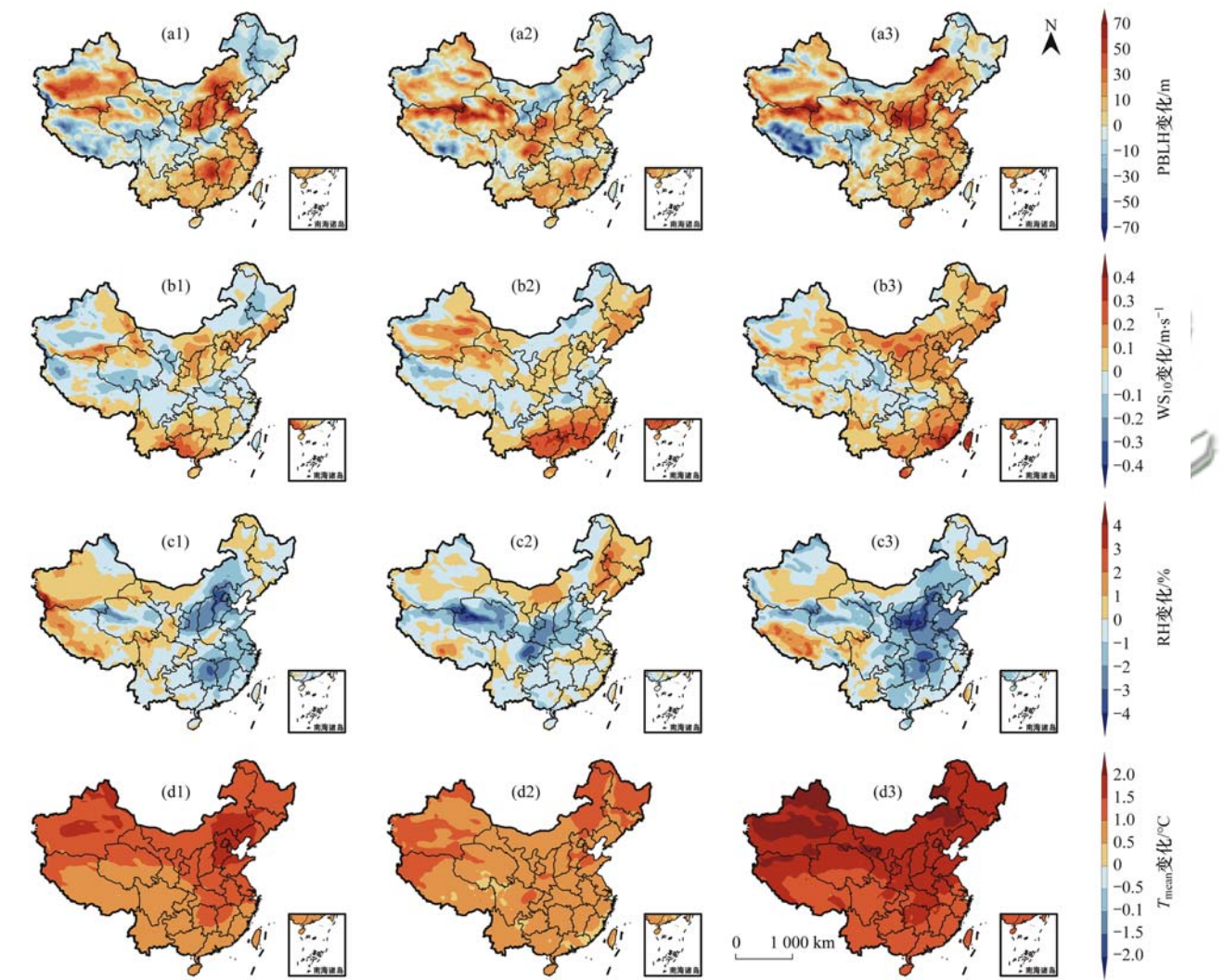
Fig. 3 Comparison of MDA8 simulated values and monitoring data of Basecase

四川盆地和西藏地区均出现显著降低趋势,这可能是 Basecase 情景下对西藏和东北地区 PBLH 的高估所导致的. 在 3 种情景下变化趋势较为一致

的是华南地区与华中南部地区,均出现显著增加趋势,但鉴于 Basecase 情景下整体对 PBLH 的高估,因此实际增长幅度可能比预测略低. 3 种 RCP

情景下夏季 WS_{10} 的最大值、最小值和均值几乎一致. 相比于冬季, 夏季各地区 WS_{10} 的差异较小, 只在西北地区吐鲁番盆地-阿拉善高原一带出现 WS_{10} 较大的区域. RCP4.5 情景下各地区的变化幅度都较小, RCP6.0、RCP8.5 情景下在南方的两广丘陵与东南丘陵地区 WS_{10} 均有升高趋势, 此外 RCP8.5 情景下华北大部分地区 WS_{10} 也有显著升高. 在未来中国夏季, RH 表现出大范围的降低趋势, 整个中国平均降低幅度为: RCP8.5 (1.0%) >

RCP6.0 (0.5%) > RCP4.5 (0.3%), 空间上呈现华中、华北和华南沿海等地区降低, 西北、西南和东北略有增加. 所有情景都对未来夏季 T_2 做出了全国大范围上升的预测, 其中 RCP8.5 的上升幅度最大, 整体上升了 1.7℃, 综合来看长江以北地区的升温幅度要高于南方地区, 中低纬度内陆地区的升温幅度要高于沿海地区^[41,42]. 略有不同的是 RCP6.0 情景, 预测的各地区夏季的升温情况差异较小.



(a1) ~ (a3) 表示 PBLH; (b1) ~ (b3) 表示 WS_{10} ; (c1) ~ (c3) 表示 RH, (d1) ~ (d3) 表示 T_{mean} . (a1)、(b1)、(c1) 和 (d1) 表示 RCP4.5-Basecase, (a2)、(b2)、(c2) 和 (d2) 表示 RCP6.0-Basecase, (a3)、(b3)、(c3) 和 (d3) 表示 RCP8.5-Basecase

图 4 PBLH、 WS_{10} 、RH 和 T_{mean} 的时空变化分布

Fig. 4 Spatiotemporal variation in PBLH, WS_{10} , RH, and T_{mean}

表 4 Basecase 情景下不同区域气象分布

气象因子	不同区域						
	E	N	C	S	SW	NW	NE
PBLH/m	704.7	1 047.9	740.1	632.4	724.9	1 025.7	725.7
$WS_{10}/m \cdot s^{-1}$	3.3	4.0	3.2	3.2	3.6	3.9	3.7
RH/%	76.8	52.4	75.1	84.7	75.4	43.4	74.1
$T_2/^\circ C$	27.3	23.1	27.3	27.5	13.5	18.4	21.4

为了更好地探究不同区域的气象条件变化,图 5 给出了中国夏季的区域气候变化及显著性分布情况. 夏季 PBLH 降低的区域主要为 NE, 3 种情景均呈现不同程度的下降 (-10.54 、 -15.12 、 -0.33 m), 其中, RCP6.0 整体来看, 不同地区增加幅度大于降低幅度, E 的增加幅度最大, 并在 RCP4.5 情景下通过显著性检验 (置信度为 0.95). RCP6.0 情景下 S 的 WS_{10} 有显著增加, 且增加幅度最大, 各地区

的 WS_{10} 的变化幅度与差异同样不明显. 大部分地区 RH 呈降低趋势, 但是降低幅度较小, 值得注意的是 RCP8.5 情景下 C 呈显著降低趋势 (置信度为 0.95). 除 RCP4.5 情景下的 S 外, 各情景下全国各地夏季 T_2 均出现显著性升高, 除了 RCP4.5 情景下的 S, 其他地区置信度都为 0.99, 且夏季 T_2 的升高幅度与冬季相比更大, 相同情景下 N、NE、NW 这些北方地区增幅更大.

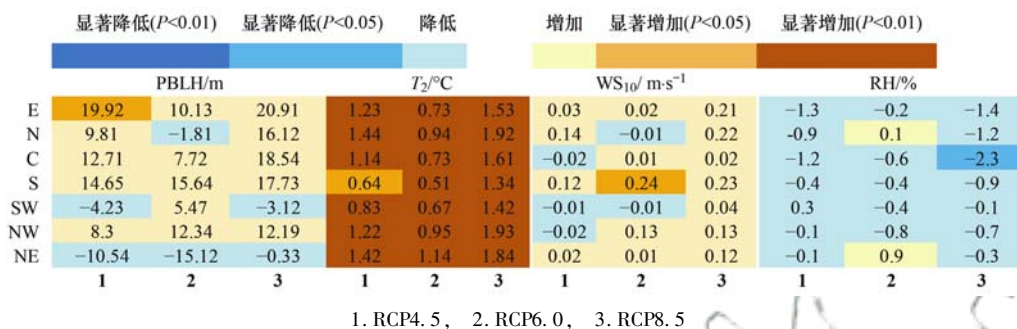


图 5 夏季区域气候变化和显著性分布

Fig. 5 Regional climate change in summer and its significance distribution

根据中国气象学的定义, 将日最高温度达到或超过 35°C 定义为高温天, 并统计了不同情景下不同区域的 10 a 总高温天的变化. 如图 6 所示, 中国各个分区的高温天数都有所增加, 但气候变化对不同 RCP 情景和不同分区的影响有所不同^[43,44]: 除了 S、SW, 其他分区的变化呈现 RCP8.5 > RCP4.5 > RCP6.0 的规律, 这与温度的平均变化也呈现 RCP8.5 (1.7°C) > RCP4.5 (1.1°C) > RCP6.0 (0.8°C) 有关. 未来中国 C 和 E 地区夏季的高温天数平均每年增加 5~13 d, N、S 和 NW 的平均每年增加 3~8 d.

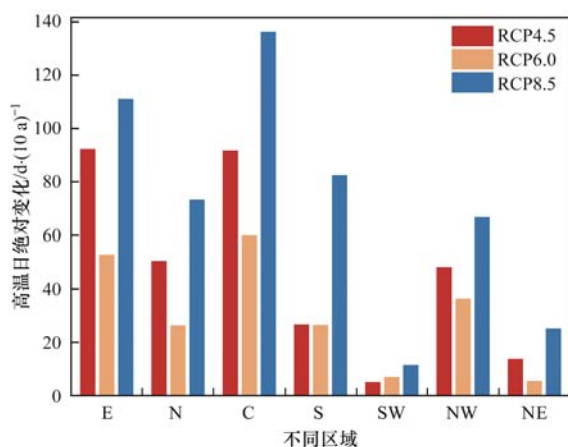


图 6 不同情景下不同区域的高温天变化

Fig. 6 Daily distribution of high temperature under different scenarios in different regions

2.3 气候变化对 O_3 的影响

图 7(a1) 显示了 MDA8 高值主要分布在中国北方^[45,46]. MDA8 的变化分布表明了, 在 RCP4.5 情景

下, 中国华北地区部分城市呈现增长趋势, 京津冀增长幅度最大 ($5.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 其他地区主要呈现降低趋势, 整个中国区域平均变化值为 $-0.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; RCP6.0 情景下中国东北、华中和西南部分地区略有增加, 其他地区呈现降低趋势; 在 RCP8.5 情景下, 东北和华南部分地区呈现增加趋势, 整个中国区域平均变化值为 $-1.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是降低幅度最大的情景. 虽然所有情景下中国所有地区温度升高, 但 MDA8 均值并不是都呈现上升趋势. 相反, 从中国区域变化均值来看, 虽然部分地区呈现增加趋势, 最高能增加 $3.1 \sim 5.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 但是未来夏季 O_3 浓度总体呈现下降趋势, 下降幅度为 $-0.6 \sim -1.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

MDA8 极值是使用 MDA8 浓度的 95% 分位计算得到的. 与之不同的是, MDA8 极值整体呈现增加趋势, 整个中国变化均值为 $0.2 \sim 0.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 不同情景下变化幅度为: RCP8.5 ($0.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > RCP6.0 ($0.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > RCP4.5 ($0.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 变化的空间分布与 MDA8 均值相似, 但是呈现增加趋势地区的增加幅度要大于 MDA8 均值, 因此导致整个区域变化均值为正. 值得注意的是在 RCP8.5 和 RCP4.5 情景下, 京津冀和华南沿海地区有较大的增加幅度, 最大能达到 $14.5 \sim 22.83 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 由于固定了排放, 因此只探讨了气象条件通过影响污染物传输和化学转化途径引起的 O_3 浓度变化. 需要注意的是, 气候变化也会引起排放的变化. 有研究发现温度的升高会造成更多的天然源排放, 从而对 O_3 有促进作用^[47,48]. 因此气候变化对 O_3 的实际影响可

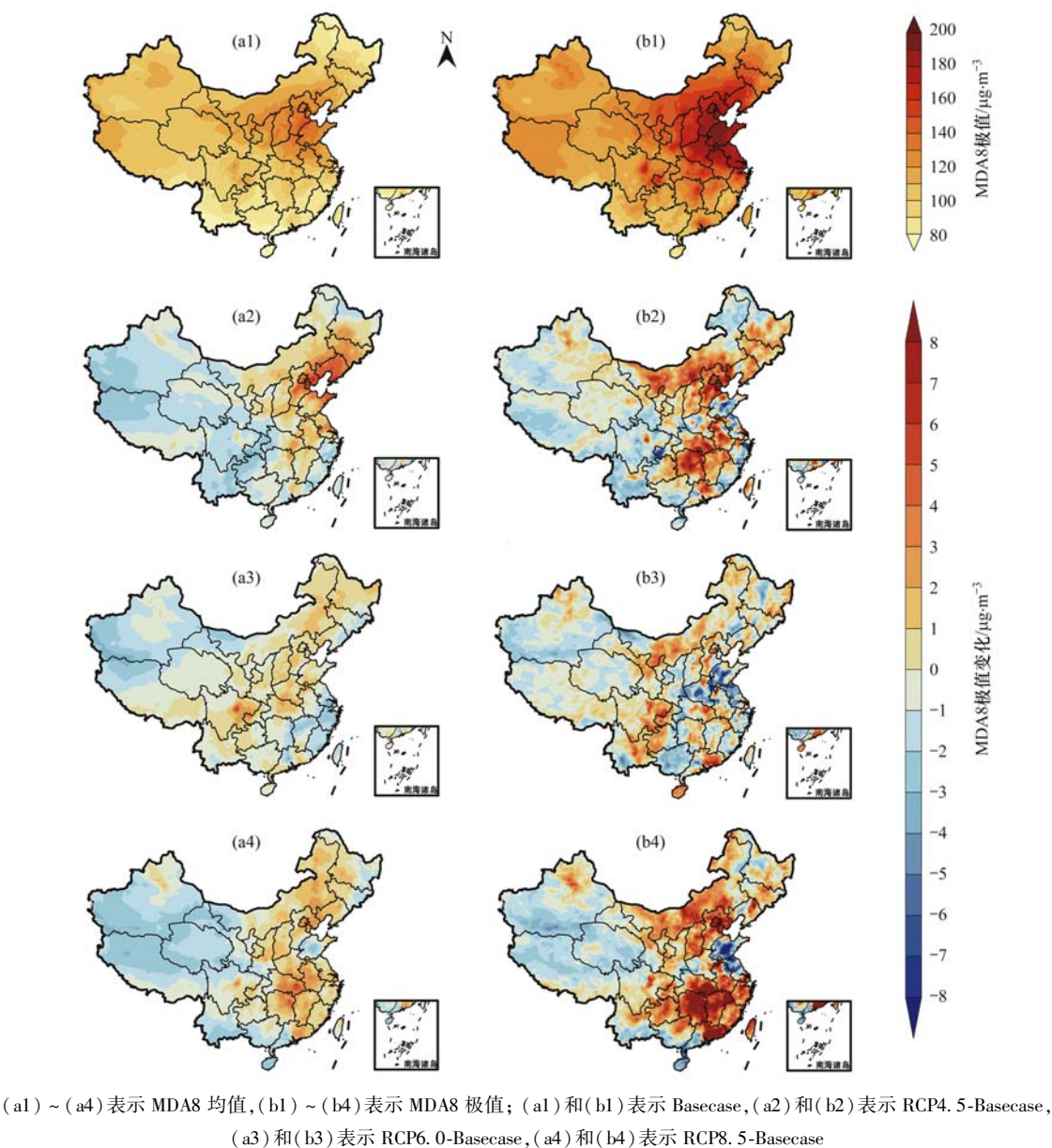


图 7 MDA8 日均值和极值的空间分布及变化

Fig. 7 Spatiotemporal variation and changes in MDA8 daily mean and extreme values

能超过本研究中的结果。

根据中国于 2016 年 1 月 1 日起实施的空气质量标准^[49],MDA8 的二级浓度限值为 $160\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。因此在本研究中将 MDA8 值大于 $160\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的天定义为超标日。并统计不同区域的 10 a 总超标日变化,结果见图 8。从中可知,中国各个分区的超标天几乎都有所增加或无明显变化,但不同 RCP 情景和不同分布的变化有所不同:除了 SW 和 NE 地区,其他分区的变化幅度都呈现 RCP4.5 和 RCP8.5 相当,但明显大于 RCP6.0 的规律;在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的未来夏季,E、N 和 C 这些地区 MDA8 超标日增加幅度较大,平均每年增加 0.6~0.8 d,结合图 5,可以发现未来中国夏季 O_3 超标日与中国夏季的高温天变化有较为相似的分布,因此高温天可能是

导致 MDA8 超标的因素之一。此外,未来要重点关注 E、N 和 C 地区高温天气下可能出现的 MDA8 超标情况。

统计中国范围内所有格点 MDA8 连续超标天数发生频率(图 9),以便于同时探究不同情景的分布。如图 9 所示,以 10 a 为尺度,未来可发生连续 20 d 以上的 MDA8 超标事件,其中主要可能发生在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景。3 个 RCP 情景的 MDA8 连续超标天数发生频率几乎一直保持大于 Basecase 情景,而且随着 MDA8 连续超标天数的增加,这种趋势更加明显。当发生 MDA8 连续超标天数在 8 d 以内时,3 个 RCP 情景呈现如下规律:RCP4.5 和 RCP8.5 情景发生频率更大,RCP6.0 次之;当发生 MDA8 连续超标天数在 9~12 d 以内时,RCP4.5 情

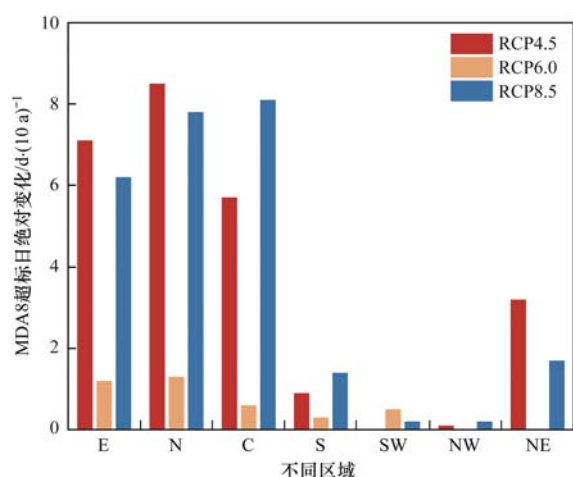


图 8 不同情景下不同区域 MDA8 超标日变化

Fig. 8 Daily variation in MDA8 exceeding the standard in different regions under different scenarios

景发生的频率最大, RCP6.0 情景最小; 当发生 MDA8 连续超标天数在大于 13 d 时虽然有一些波动, 但整体是 RCP8.5 情景发生的频率最大. 因此, 可以认为在 2046 ~ 2055 年由于高温天数的变化导致中国夏季发生更加极端的 MDA8 连续超标事件, 其中 RCP8.5 情景最严重, RCP4.5 情景次之.

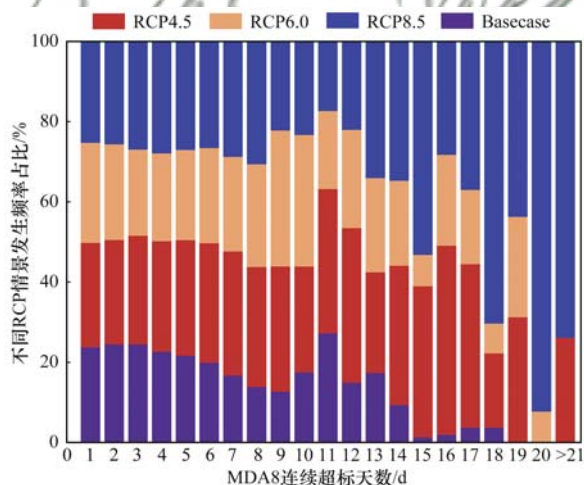


图 9 不同情景 MDA8 连续超标天数发生频率占比

Fig. 9 Frequency proportion of consecutive days exceeding the MDA8 standard in different scenarios

3 结论

(1) 气候变化使中国夏季温度均值和高温天数增加. C 和 E 地区夏季高温天数每年平均增加 5 ~ 13 d, N、S 和 NW 地区的每年平均增加 3 ~ 8 d, RCP8.5 情景增温幅度最大. 边界层高度增加, 相对湿度有所降低, 近地面风速无明显变化.

(2) 在气候变暖背景下, O_3 均值和 MDA8 均值整体呈现降低趋势, 只在京津冀、四川和华南部分地区呈现增加趋势, 但 MDA8 极值呈现增加趋势, 在京津冀、内蒙古和四川等地区增幅较大.

(3) 夏季 MDA8 超标日变化与高温天数变化有较为相似的分布, MDA8 超标的发生与高温天气有密切关联.

(4) 未来中国夏季可能会发生更多持续时间更久的 MDA8 连续超标事件, 其中 RCP8.5 情景最严重, RCP4.5 情景次之.

参考文献:

- [1] 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[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(1): 37-48.
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[J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57(1): 36-46.
- [2] 符传博, 丹利. 重污染下我国中东部地区 1960 ~ 2010 年霾日数的时空变化特征[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(2): 219-226.
Fu C B, Dan L. Spatiotemporal characteristics of haze days under heavy pollution over central and eastern China during 1960-2010 [J]. Climatic and Environmental Research, 2014, 19(2): 219-226.
- [3] Wang P F, Guo H, Hu J L, et al. Responses of $PM_{2.5}$ and O_3 concentrations to changes of meteorology and emissions in China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 662: 297-306.
- [4] 李云燕, 葛畅. 我国三大区域 $PM_{2.5}$ 源解析研究进展[J]. 现代化工, 2017, 37(4): 1-5, 7.
Li Y Y, Ge C. Research progress of $PM_{2.5}$ source analysis in three main regions of China [J]. Modern Chemical Industry, 2017, 37(4): 1-5, 7.
- [5] Liu T, Wang C L, Wang Y Y, et al. Impacts of model resolution on predictions of air quality and associated health exposure in Nanjing, China [J]. Chemosphere, 2020, 249, doi:10.1016/j.chemosphere.2020.126515.
- [6] Shi Z H, Huang L, Li J Y, et al. Sensitivity analysis of the surface ozone and fine particulate matter to meteorological parameters in China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, 20(21): 13455-13466.
- [7] 姜华, 常宏咪. 我国臭氧污染形势分析及成因初探[J]. 环境科学研究, 2021, 34(7): 1576-1582.
Jiang H, Chang H M. Analysis of China's ozone pollution situation, preliminary investigation of causes and prevention and control recommendations [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(7): 1576-1582.
- [8] 邓爱萍, 陆维青, 杨雪. 2013 年-2017 年江苏省环境空气中首要污染物变化分析研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(12): 19-22.
Deng A P, Lu W Q, Yang X. Analysis on change of primary pollutant in ambient air of Jiangsu Province during 2013 and 2017 [J]. Environmental Science and Management, 2017, 42(12): 19-22.
- [9] 沈劲, 杨士士, 晏平仲, 等. 广东省臭氧污染特征及其成因分析[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(12): 90-95.
Shen J, Yang T S, Yan P Z, et al. Characteristics and causes of ozone pollution in Guangdong Province [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(12): 90-95.
- [10] Rasmussen D J, Hu J L, Mahmud A, et al. The ozone-climate penalty: past, present, and future[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(24): 14258-14266.
- [11] Liu P F, Song H Q, Wang T H, et al. Effects of meteorological

- conditions and anthropogenic precursors on ground-level ozone concentrations in Chinese cities [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **262**, doi:10.1016/j.envpol.2020.114366.
- [12] Yin Z C, Li Y Y, Cao B F. Seasonal prediction of surface O₃-related meteorological conditions in summer in North China [J]. *Atmospheric Research*, 2020, **246**, doi:10.1016/j.atmosres.2020.105110.
- [13] 严晓瑜, 蔡晓辉, 杨婧, 等. 中国典型城市臭氧变化特征及其与气象条件的关系 [J]. *高原气象*, 2020, **39**(2): 296-299.
- Yan X Y, Gou X H, Yang J, *et al.* The variety of ozone and its relationship with meteorological conditions in typical cities in China [J]. *Plateau Meteorology*, 2020, **39**(2): 296-299.
- [14] 王玫, 郑有飞, 柳艳菊, 等. 京津冀臭氧变化特征及与气象要素的关系 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(7): 2689-2698.
- Wang M, Zheng Y F, Liu Y J, *et al.* Characteristics of ozone and its relationship with meteorological factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7): 2689-2698.
- [15] Ma M C, Gao Y, Wang Y H, *et al.* Substantial ozone enhancement over the North China Plain from increased biogenic emissions due to heat waves and land cover in summer 2017 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(19): 12195-12207.
- [16] 刘妍妍, 杨雷峰, 谢丹平, 等. 湖南省臭氧污染基本特征分析及长期趋势变化主控因素识别 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1246-1255.
- Liu Y Y, Yang L F, Xie D P, *et al.* Analysis of ozone pollution spatio-temporal evolution characteristics and identification of its long-term variation driving factor over Hunan Province [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1246-1255.
- [17] 陈颖, 张冬峰, 王林, 等. RegCM4 对华北区域 21 世纪气候变化预估研究 [J]. *干旱气象*, 2022, **40**(1): 1-10.
- Chen Y, Zhang D F, Wang L, *et al.* Estimation of climate change in the 21st century in North China by RegCM4 [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2022, **40**(1): 1-10.
- [18] 敖雪, 赵春雨, 崔妍, 等. 中国东北地区气温变化的模拟评估与未来情景预估 [J]. *气象与环境学报*, 2021, **37**(1): 33-42.
- Ao X, Zhao C Y, Cui Y, *et al.* Evaluation and projection of temperature change in Northeast China [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2021, **37**(1): 33-42.
- [19] 王莹, 马红云, 李海俊. 长三角城市群夏季高温对未来全球增暖的响应 [J]. *气象科学*, 2021, **41**(3): 285-294.
- Wang Y, Ma H Y, Li H J. Responses of summer high temperature of urban agglomeration in Yangtze River Delta to global warming in the future [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2021, **41**(3): 285-294.
- [20] 张天奇, 高阳. 气候变化和污染源对中国华北地区臭氧的影响 [J]. *中国海洋大学学报*, 2021, **51**(3): 100-109.
- Zhang T Q, Gao Y. The impact of climate change and emissions on ozone in North China [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2021, **51**(3): 100-109.
- [21] 高达, 谢旻, 陈星, 等. 气候变化对长三角臭氧污染影响的数值模拟研究 [J]. *装备环境工程*, 2019, **16**(6): 115-122.
- Gao D, Xie M, Chen X, *et al.* Numerical modeling of effects of climate change on air quality in the Yangtze river delta region [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, **16**(6): 115-122.
- [22] 符传博, 周航. 中国城市臭氧的形成机理及污染影响因素研究进展 [J]. *中国环境监测*, 2021, **37**(2): 33-43.
- Fu C B, Zhou H. Research progress on the formation mechanism and impact factors of urban ozone pollution in China [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, **37**(2): 33-43.
- [23] Gao Y, Fu J S, Drake J B, *et al.* The impact of emissions and climate change on ozone in the United States under Representative Concentration Pathways (RCPs) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(4): 11315-11355.
- [24] Fiore A M, Naik V, Leibensperger E M. Air quality and climate connections [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2015, **65**(6): 645-685.
- [25] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点 [J]. *冰川冻土*, 2013, **35**(5): 1068-1076.
- Shen Y P, Wang G Y. Key findings and assessment results of IPCC WGI fifth assessment report [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, **35**(5): 1068-1076.
- [26] Sun J, Fu J S, Huang K, *et al.* Estimation of future PM_{2.5}-and ozone-related mortality over the continental United States in a changing climate: an application of high-resolution dynamical downscaling technique [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2015, **65**(5): 611-623.
- [27] Hou P, Wu S L. Long-term changes in extreme air pollution meteorology and the implications for air quality [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**, doi: 10.1038/srep23792.
- [28] Yahya K, Campbell P, Zhang Y. Decadal application of WRF/chem for regional air quality and climate modeling over the U. S. under the representative concentration pathways scenarios. Part 2: current vs. future simulations [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **152**: 584-604.
- [29] Zhang J X, Gao Y, Luo K, *et al.* Impacts of compound extreme weather events on ozone in the present and future [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(13): 9861-9877.
- [30] Hong C P, Zhang Q, Zhang Y, *et al.* Multi-year downscaling application of two-way coupled WRF v3.4 and CMAQ v5.0.2 over east Asia for regional climate and air quality modeling: model evaluation and aerosol direct effects [J]. *Geoscientific Model Development*, 2017, **10**(6): 2447-2470.
- [31] 徐忠峰, 韩瑛, 杨宗良. 区域气候动力降尺度方法研究综述 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, **49**(3): 487-498.
- Xu Z F, Han Y, Yang Z L. Dynamical downscaling of regional climate: a review of methods and limitations [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, **62**(2): 365-375.
- [32] Oh S G, Park J H, Lee S H, *et al.* Assessment of the RegCM4 over East Asia and future precipitation change adapted to the RCP scenarios [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, **119**(6): 2913-2927.
- [33] Bruyère CL, Done JM, Holland GJ, *et al.* Bias corrections of global models for regional climate simulations of high-impact weather [J]. *Climate Dynamics*, 2014, **43**(7-8): 1847-1856.
- [34] Hu J L, Chen J J, Ying Q, *et al.* One-year simulation of ozone and particulate matter in China using WRF/CMAQ modeling system [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(16): 10333-10350.
- [35] Li M, Liu H, Geng G N, *et al.* Anthropogenic emission inventories in China: a review [J]. *National Science Review*, 2017, **4**(6): 834-866.
- [36] Guenther A, Karl T, Harley P, *et al.* Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions

- of Gases and Aerosols from Nature)[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6**(11): 3181-3210.
- [37] Wiedinmyer C, Akagi SK, Yokelson RJ, *et al.* The Fire INventory from NCAR (FINN): a high resolution global model to estimate the emissions from open burning[J]. *Geoscientific Model Development*, 2011, **4**(3): 625-641.
- [38] Emery C, Liu Z, Russell AG, *et al.* Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2017, **67**(5): 582-598.
- [39] 王苗, 刘敏, 任永建. 基于高分辨率模拟数据 RCP4.5 情景下的华中区域气候变化预估[J]. *气象与环境学报*, 2021, **37**(3): 65-72.
- Wang M, Liu M, Ren Y J. Projection of climate change over Centre China by high-resolution simulation data under RCP4.5 scenario[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2021, **37**(3): 65-72.
- [40] Kuo C C, Gan T Y, Wang J W. Climate change impact to Mackenzie river Basin projected by a regional climate model[J]. *Climate Dynamics*, 2020, **54**(7): 3561-3581.
- [41] 云翔, 程嘉艺, 李庆祥. CMIP5 气候模式对亚洲升温幅度的模拟与预估[J]. *气象*, 2020, **46**(2): 145-157.
- Yun X, Cheng J Y, Li Q X. Estimation of CMIP5 multi-mode on the extent of rise in air temperature in Asia[J]. *Meteorological Monthly*, 2020, **46**(2): 145-157.
- [42] 肖登攀, 赵彦茜, 柏会子, 等. CMIP5 全球气候模式对华北平原气候的模拟和预估[J]. *地理与地理信息科学*, 2020, **36**(2): 75-82.
- Xiao D P, Zhao Y X, Bai H Z, *et al.* Simulation and projection of climate change in North China plain by CMIP5 multi-model[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2020, **36**(2): 75-82.
- [43] 李娟, 闫会平, 朱志伟. 中国夏季极端气温与降水事件日数随平均气温变化的定量分析[J]. *高原气象*, 2020, **39**(3): 532-542.
- Li J, Yan H P, Zhu Z W. Quantitative analysis of changes of summer extremes temperature and precipitation days over China with respect to the mean temperature increase[J]. *Plateau Meteorology*, 2020, **39**(3): 532-542.
- [44] Tao H R, Xing J, Pan G F, *et al.* Impact of anthropogenic heat emissions on meteorological parameters and air quality in Beijing using a high-resolution model simulation[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2022, **16**(4), doi:10.1007/s11783-021-1478-3.
- [45] Wang T, Xue L K, Brimblecombe P, *et al.* Ozone pollution in China: a review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **575**, doi:10.1016/j.scitotenv.2016.10.081.
- [46] Li Y P, Zhang Z C, Xing Y S. Long-Term change analysis of PM_{2.5} and ozone pollution in China's most polluted region during 2015-2020[J]. *Atmosphere*, 2022, **13**(1), doi:10.3390/atmos13010104.
- [47] 罗瑞雪, 刘保双, 梁丹妮, 等. 天津市郊夏季的臭氧变化特征及其前体物 VOCs 的来源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 75-87.
- Luo R X, Liu B S, Liang D N, *et al.* Characteristics of ozone and source apportionment of the precursor VOCs in Tianjin suburbs in summer[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 75-87.
- [48] Liu S, Xing J, Zhang H L, *et al.* Climate-driven trends of biogenic volatile organic compound emissions and their impacts on summertime ozone and secondary organic aerosol in China in the 2050s[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **218**, doi:10.1016/j.atmosenv.2019.117020.
- [49] 姜华, 高健, 李红, 等. 我国大气污染协同防控理论框架初探[J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(3): 601-610.
- Jiang H, Gao J, Li H, *et al.* Preliminary research on theoretical framework of cooperative control of air pollution in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(3): 601-610.

CONTENTS

Impact of Climate Change on Summer Ozone in China	HU An-qi, XIE Xiao-dong, GONG Kang-jia, <i>et al.</i> (1801)
Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Ozone in China from 2019 to 2021 Based on EOF Technique and KZ Filter	WANG Hao-qì, ZHANG Yu-fen, LUO Zhong-wei, <i>et al.</i> (1811)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in an Industrial City in the North China Plain	ZHENG Zhen-sen, DOU Jian-ping, ZHANG Guo-tao, <i>et al.</i> (1821)
Spatiotemporal Evolution Characteristics of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020	NIU Xiao-xiao, ZHONG Yan-mei, YANG Lu, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of PM _{2.5} and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021	SONG Xiao-han, YAN Li, LIU Wei, <i>et al.</i> (1841)
Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020	XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (1852)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing	ZHAO Yu, LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (1865)
Input Characteristics of Dry Deposition of Atmospheric Particulates and Metals in Farmland in the Suburb of Nanjing	LIU Cui-ying, JIN Hao, FAN Jian-ling (1873)
Pollution Characterizations and Oxidative Potentials of Water-Soluble Organic Matters at Different Polarity Levels in Winter PM _{2.5} Over Xi'an	LUO Yu, HUANG Sha-sha, ZHANG Tian, <i>et al.</i> (1882)
Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels	WANG Hong-lei, LIU Si-han, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (1890)
Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in the Core Area of Ili River Valley in Spring	GU Chao, XU Tao, MA Chao, <i>et al.</i> (1899)
Evaluation of Changes in PM _{2.5} Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids	LI Yuan, XU Yi-fei, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (1911)
Emission Inventory of Building Material Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration	LIU Xiao, HU Jing-nan, WANG Hong-mei, <i>et al.</i> (1924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City	SHI Yu-qi, ZHENG Kai-yun, DING Wei-ting, <i>et al.</i> (1933)
Changes in O ₃ -VOCs-NO _x Sensitivity and VOCs Sources at an Urban Site of Nanjing Between 2020 and 2021	LU Xiao-bo, WANG Ming, DING Feng, <i>et al.</i> (1943)
Variation Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Urban Beijing in Summer	ZHANG Rui, SUN Xue-song, WANG Yu, <i>et al.</i> (1954)
Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao	JIA Zhi-hai, GU Yao, KONG Cui-li, <i>et al.</i> (1962)
Characteristics of O ₃ Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical	YU Hui, WEI Na-na, XU Xue-zhe, <i>et al.</i> (1974)
Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect	LI Shao-lin, WANG Qi-qi (1985)
Scenario Simulation and Effects Assessment of Co-control on Pollution and Carbon Emission Reduction in Beijing	YU Shan, ZHANG Shuang, ZHANG Zeng-jie, <i>et al.</i> (1998)
Simulation of Anthropogenic CO ₂ Emissions in the Yangtze River Delta Based on Different Emission Inventories	MA Xin-yi, HUANG Wen-jing, HU Ning, <i>et al.</i> (2009)
Water Quality Change Trend and Risk Analysis of Wuhan Hanjiang River Water Source	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, XU Jie, <i>et al.</i> (2022)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Resistance Genes in Different Water Sources in the Wuhan Section of the Yangtze River	LI Bo-lin, ZHANG He, WANG Jun, <i>et al.</i> (2032)
Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China	WU Xi-jun, DONG Ying, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (2040)
Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes	XIE Gui-juan, GONG Yi, ZHU Fu-cheng, <i>et al.</i> (2052)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water of Different Functional Parks in Guilin	LI Pei-zhao, WU Li, HUANG Fei-fei, <i>et al.</i> (2062)
Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin	ZHANG Jing, HU Yu-xin, HU Sheng, <i>et al.</i> (2072)
Influence and Driving of Environmental Heterogeneity on the Epilithic Diatom Community in Xiangxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	JI Lu-lu, ZHAO Lu, OUYANG Tian, <i>et al.</i> (2083)
Characteristics of Phytoplankton Communities and Key Impact Factors in Three Types of Lakes in Wuhan	ZHANG Hao-kun, MIN Fen-li, CUI Hui-rong, <i>et al.</i> (2093)
Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats	HE Yi-fan, XIAO Xin-zong, WANG Jia-wen (2103)
Structure and Distribution Characteristics of Bacterial Community in Boqing River Water	WANG Sen, CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2113)
Effects of Microplastic Exposure on the Community Structure and Function of Symbiotic Bacteria in <i>Sinularia microclavata</i>	LIU Min, CHE Wen-xue, ZENG Ying-xu, <i>et al.</i> (2122)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai	YAN Qi (2136)
Adsorption Characteristics of Fluoride in Low-Concentration Water by Aluminum and Zirconium-Modified Biochar	LIU Yan-fang, GAO Wei, LIU Rui, <i>et al.</i> (2147)
Sorption Characteristics and Site Energy Distribution Theory of Typical Estrogens on Microplastics	LIU Jiang-yan, ZHENG Mi-mi, HU Jia-wu, <i>et al.</i> (2158)
Selection and Evaluation of Model Pollutants for Performance Assessment of Advanced Treatment of Industrial Park Wastewater by Ozonation	XIN Bo, SHAN Chao, LÜ Lu (2168)
Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data	ZHANG Hong-ze, CUI Wen-gang, LIU Sui-hua, <i>et al.</i> (2177)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	MA Jie, SHEN Zhi-jie, ZHANG Ping-ping, <i>et al.</i> (2192)
Contamination and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around a Lead-Zinc Smelter	HUANG Jian-bo, JIANG Deng-deng, WEN Bing, <i>et al.</i> (2204)
Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network	MA Sai-yan, WEI Hai-ying, MA Jin, <i>et al.</i> (2215)
Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, <i>et al.</i> (2223)
Accumulation and Pollution Risks of Heavy Metals in Soils and Agricultural Products from a Typical Black Shale Region with High Geological Background	DENG Shuai, DUAN Jia-hui, NING Mo-huan, <i>et al.</i> (2234)
Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize	DAI Liang-liang, XU Hong-gen, GONG Hao, <i>et al.</i> (2243)
Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (2252)
Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis	LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, <i>et al.</i> (2265)
Response Characteristics of Soil Organic Carbon Pool and Its Chemical Composition During Secondary Forest Succession in the Loess Plateau	LIU Han-yu, LIU Ying-yi, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (2275)
Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains	JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, <i>et al.</i> (2283)
Response of Soil Microbial Diversity to Long-term Enclosure in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Zone of the Yellow River	YANG Peng-nian, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (2293)
Diversity and Predictive Functional of <i>Caragana jubata</i> Bacterial Community in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil at Different Altitudes	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i> (2304)
Effects of Simulated Acid Rain and Nitrogen Deposition on Soil Bacterial Community Structure and Diversity in the Masson Pine Forest	WANG Nan, QIAN Shao-yu, PAN Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2315)
Effects of Phosphogypsum and <i>Suaeda salsa</i> on the Soil Moisture, Salt, and Bacterial Community Structure of Salinized Soil	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (2325)
Effects of Combined Application of Fungal Residue and Chemical Fertilizer on Soil Microbial Community Composition and Diversity in Paddy Soil	GENG He-tian, WANG Xu-dong, SHI Si-bo, <i>et al.</i> (2338)
Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields	HU Jin-hui, XUE Li-hong, QIAN Cong, <i>et al.</i> (2348)
Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress	CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong, <i>et al.</i> (2356)
Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035	FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, <i>et al.</i> (2365)
Distribution, Sources, and Behavioral Characteristics of Microplastics in Farmland Soil	BO Lu-ji, LI Bing, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2375)
Research Progress on the Remediation Technology of Herbicide Contamination in Agricultural Soils	HU Fang-yu, AN Jing, WANG Bao-yu, <i>et al.</i> (2384)
Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China	LI Rui, WU Qiu-mei, ZHAO Gui-mei, <i>et al.</i> (2395)