

中国能源模型论坛研究报告

中国 2050 低排放发展战略研究（CEMF02） 系列报告执行摘要汇编（四）

气候模式 · 空气质量

【编者按】

中国能源模型论坛旨在集合国内外能源、经济、环境研究领域领先的模型团队，共同探讨模型方法的最新进展与未来趋势，促进国内外模型团队的写作、互动与沟通，提高模型团队开发和应用模型的能力，提升研究成果和政策建议的针对性、时效性、可实施性及影响力，加强模型工作者与政策制定者之间的交流。

《巴黎协定》邀请所有缔约方在 2020 年前提提交长期温室气体低排放发展战略。习近平主席在十九大报告指出：加快生态文明体制改革，建设美丽中国。到 2035 年，生态环境根本好转，美丽中国目标基本实现；到本世纪中叶，把我国建设成富强民主文明和谐美丽的社会主义现代化强国。

CEMF02 于 2016 年底启动，旨在运用并比较多种不同的能源、经济、环境模型，以十三五、十四五的近中期发展目标为实践节点，并探讨到 2050 年的低温室气体（包括非二氧化碳温室气体）排放发展的长期目标，构建符合中国技术的政策要求的低排放发展路径。

为实现研究目标，CEMF 委托国内知名模型团队开展了相应研究，包括：

- 宏观经济模型组。利用自上而下的宏观经济模型，分析和讨论 2050 中国宏观经济情景。
- 能源系统模型组。利用自下而上的能源系统模型，实现特定社会经济情景下能源供给与需求的平衡。
- 农业与土地利用组。具体分析农业温室气体排放和土地利用碳汇。
- 废弃物与非二氧化碳排放组。具体分析城市垃圾、其他废弃物、废水的温室气体排放，油气行业中产生的甲烷排放等。
- 环境污染与健康组。具体分析大气环境、水环境、土壤污染和人体健康的关系。
- 气候变化与适应组。具体开展气候风险性评价，脆弱性评价及生态系统适应评价。

本研究工作是在 CEMF 学术委员会的指导下完成的，研究过程中，得到了来自清华大学、北京大学、中国农业科学研究院、国家发展和改革委员会能源研究所、国家应对气候变化战略中心、国家信息中心、国务院发展研究中心、交通部科学研究院、中国环境科学研究院、生态环境部环境规划院等多家单位的专家学者的大力支持，同时也离不开 CEMF 秘书处的协调工作。

CEMF 研究报告将陆续刊发 CEMF02 各研究报告的摘要版本，供读者参考。如您对本研究有咨询和建议，**请联系北京市清华大学公共管理 615 室，中国能源模型论坛（100084）**，或发送邮件至 cemf@tsinghua.edu.cn。我们的官方网站是 www.cemf.net.cn。

中国能源模型论坛主题研究2(CEMF02)
中国 2050 低排放发展战略研究

第 20 期

2019 年 12 月

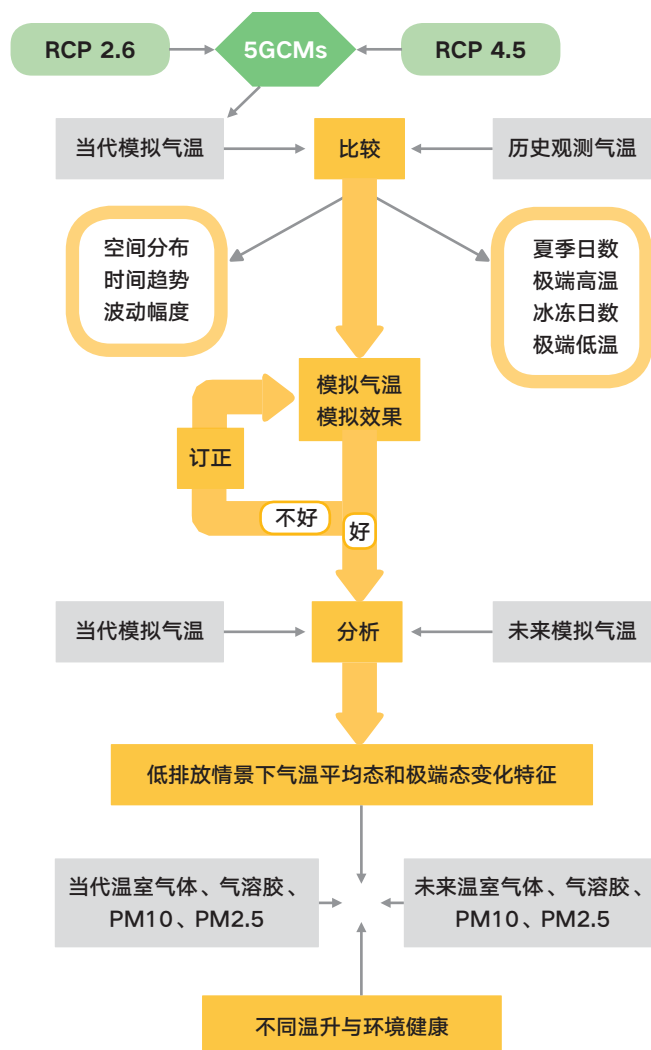


低排放发展战略下气候变化研究

背景意义

低排放发展战略需要明晰低排放情景下的气候变化状态，从而为能源、环境、经济的分析提供气候约束条件和气候科学参考信息。因此，分析低排放情景下的气候平均状况和极端事件的变化，探讨不同温升目标情景与环境健康的关系，对于低排放发展战略的制定和执行具有一定的参考意义。

模型方法



IPCC 于 2007 年提出了温室气体的稳定情景，建议用典型浓度路径（RCPs - Representative Concentration Pathways）来表示新情景。它根据辐射强迫水平和路径形态定义了 4 类 RCPs 情景，其中 RCP2.6 为严格减排低稳定情景，是把全球平均温度上升限制在 2℃ 之内的情景，RCP4.5 是 2100 年辐射强迫稳定在 4.5W/ m²。这两个情景设定的温室气体排放水平相当于中 - 低排放水平，因此我们采用了这两个情景作为低排放发展战略下的气候变化研究情景。方法如左图所示：

结果分析

通过比较分析,5套全球气候模式的气温模拟结果不管是气候平均态的空间分布还是空间平均的气候趋势,均再现了1961-2000年的实际气候状况,5个模式的模拟效果良好,可用于未来的气温变化分析,但时间趋势及年际波动模拟值之间存在差异。极端气温事件的空间分布也能良好再现,但在细节描述上也存在一定差异。这将可能导致各模式模拟的未来气候存在较明显差异,故有必要进行多模式比较和分析,从模式差异中获取确定的气候信息和共性特征。

多模式分析结果表明,在低排放情景下,与1961-2000年相比,2020-2059年全国均呈现升温趋势,北方升温大于南方,我国的南北温差将缩小(图2),其中RCP4.5情景升温幅度普遍大于RCP2.6情景,且大体上最低气温升温≥平均气温升温≥最高气温升温。此外,在RCP2.6情景下,日最低气温和平均气温的未来年际波动有可能变小,日最高气温则反之;RCP4.5情景下的气温年际波动均增大(图1)。因此,我们需要关注冷热事件频率和强度增大的可能性。

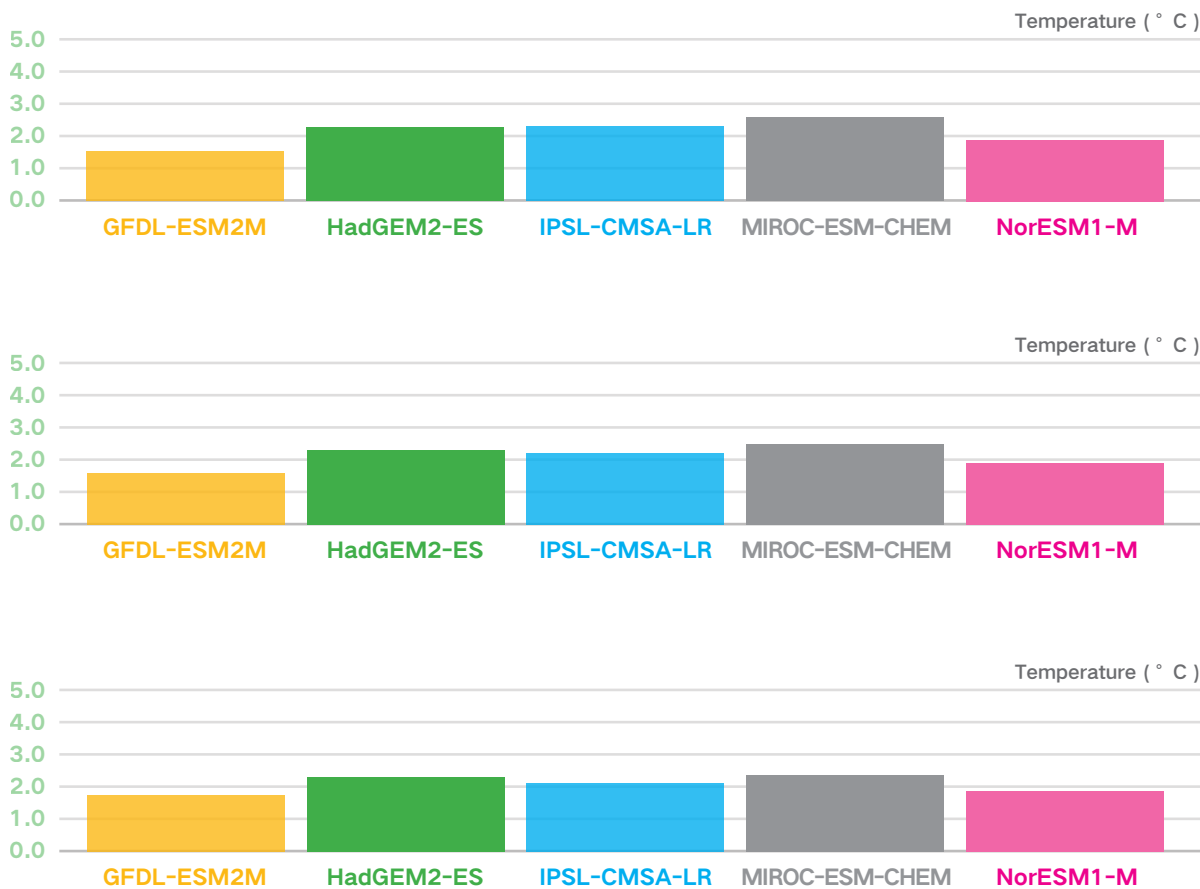


图 1 RCP4.5 下相对于 1961-2000 年 2020-2059 年我国陆地平均的气温变化 (单位: °C)
从上至下分别为: 最低气温, 平均气温, 最高气温

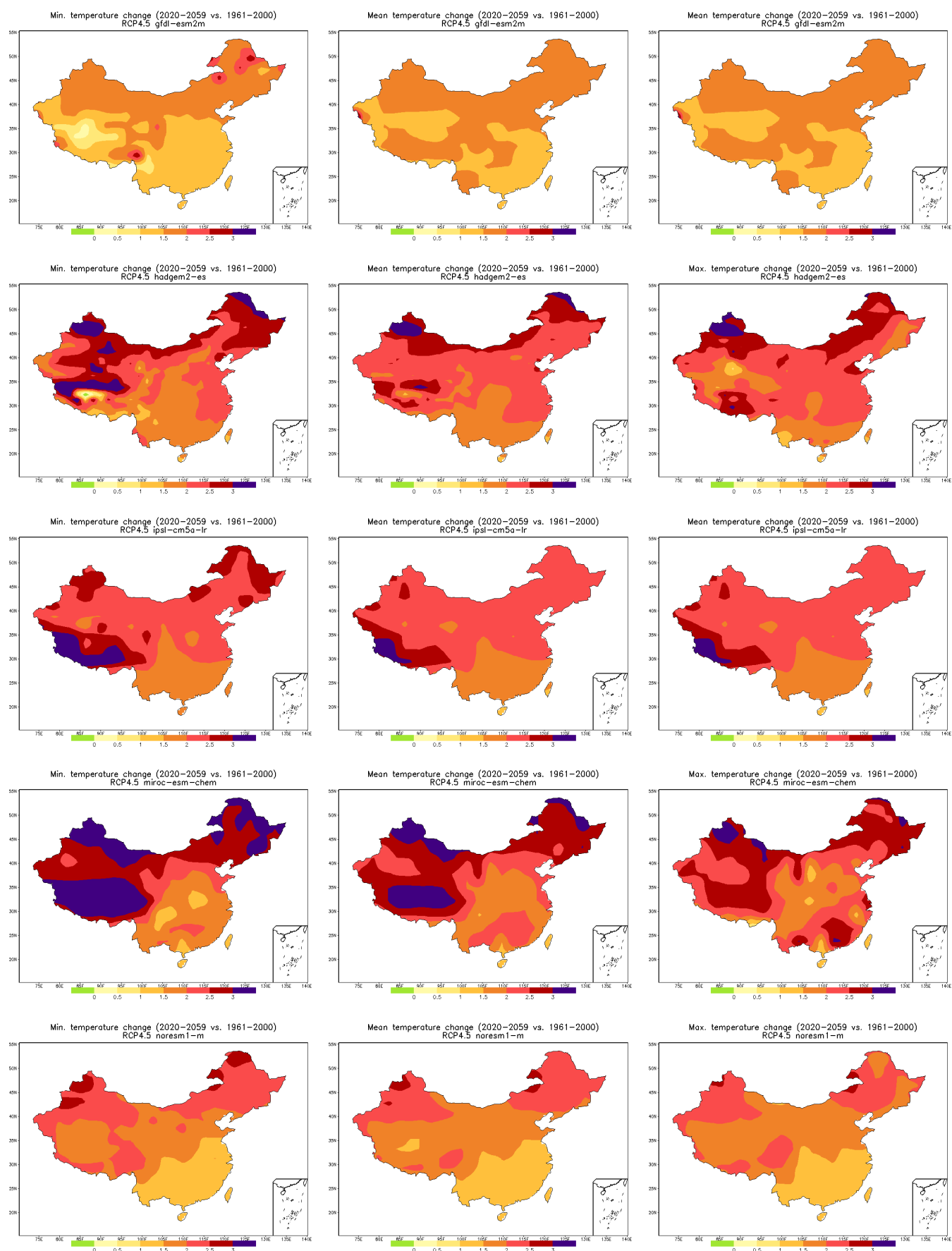


图 2 RCP 4.5 情景下 2020-2059 年相对于 1961-2000 年气温变化 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

从上至下分别为 5 个模式

从左至右分别为: 最低气温, 平均气温, 最高气温

在低排放情景下全国大部分地区夏季日数增多（图 3），人口密集地区多数每年夏季日数增加 20 天以上，部分地区增加多达 70 天以上，意味着这些地区夏季延长了两个多月，同时极端高温阈值也普遍升高，由此带来的能源压力不可忽视。

RCP4.5 情景下的夏季日数、极端高（低）温阈值增加幅度大于 RCP2.6 情景。在增暖背景下，冰冻日数在全国大部分地区呈减少趋势，但在 RCP4.5 情景下也有少部分地区反而增加，反映了这些地区年内温差变大、冷热不均，需警惕寒冷和炎热天气的不良影响。

二氧化碳以及所有温室气体和气溶胶的排放与全球和中国升温变化曲线趋势相似，排放浓度越高，未来升温越明显，而在严格减排的低稳定情景（RCP2.6）下，升温速率较缓慢甚至有速率降低的趋势（图 4）。

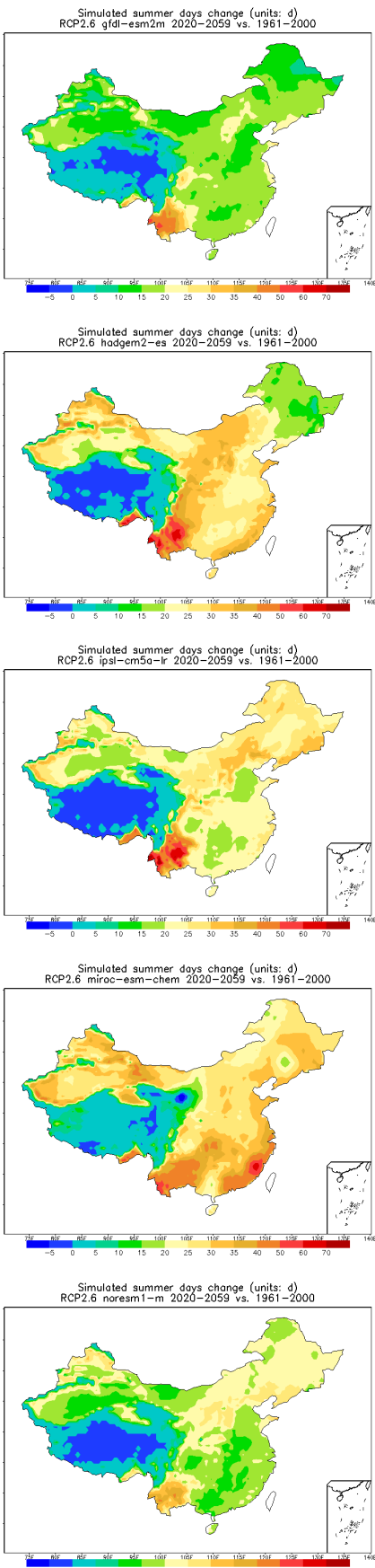
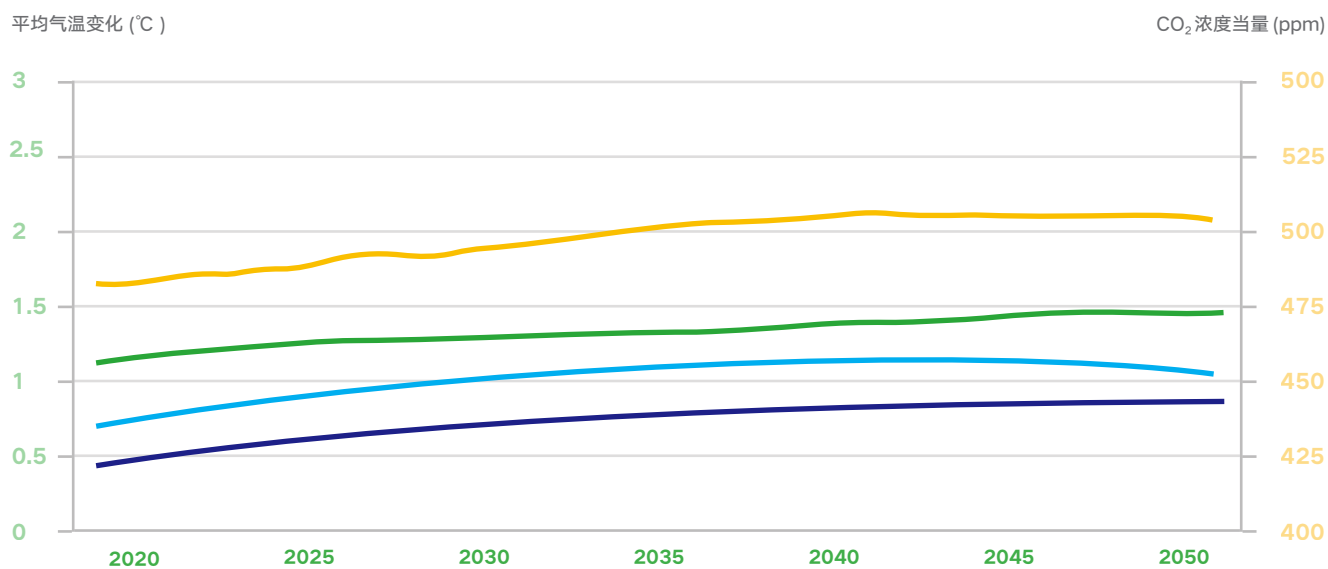


图 3 RCP2.6 情景下相对于 1961-2000 年 2020-2059 年的夏季日数变化(单位: 天/年)

CO₂ 和升温（相当于 1961-2000）10 年滑动平均 RCP2.6



CO₂ 和升温（相当于 1961-2000）10 年滑动平均 RCP4.5

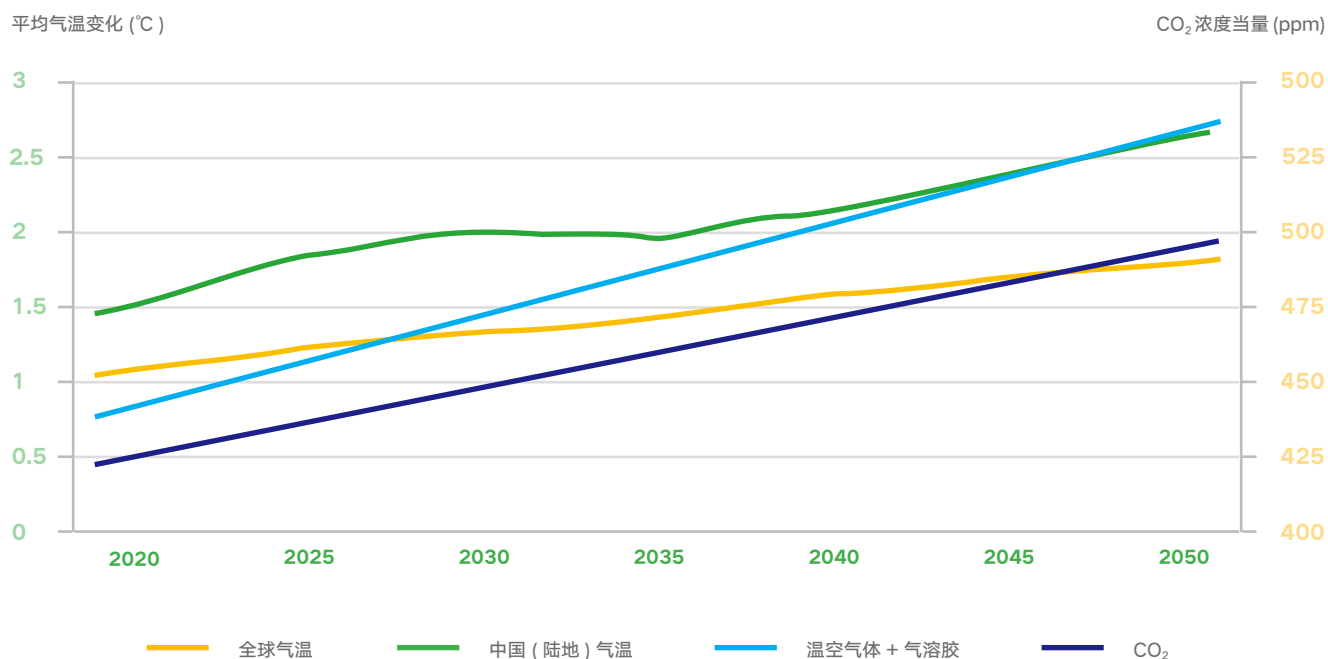


图 4 RCP 2.6（上）和 RCP 4.5（下）情景下 2020-2059 年相对于 1961-2000 年的升温 and 温室气体浓度 10 年滑动平均

红色实线：全球平均气温变化；红色虚线：中国陆地平均气温变化 蓝色实线：CO₂ 浓度；蓝色虚线：温室气体和气溶胶浓度
红色线值对应左纵坐标，蓝色线值对应右纵坐标

低排放情景（RCP2.6）下，颗粒物浓度以减少为主，汾渭平原尤为明显。中低排放情景（RCP4.5）下，汾渭平原 PM 2.5 以下颗粒物浓度也是减少为主，而京津冀、华北大部分地区颗粒物浓度增加，华北地区的东北部颗粒物浓度增加了 10% 以上。可见，随着排放的增加，全球平均气温升高，污染物浓度也将增大。

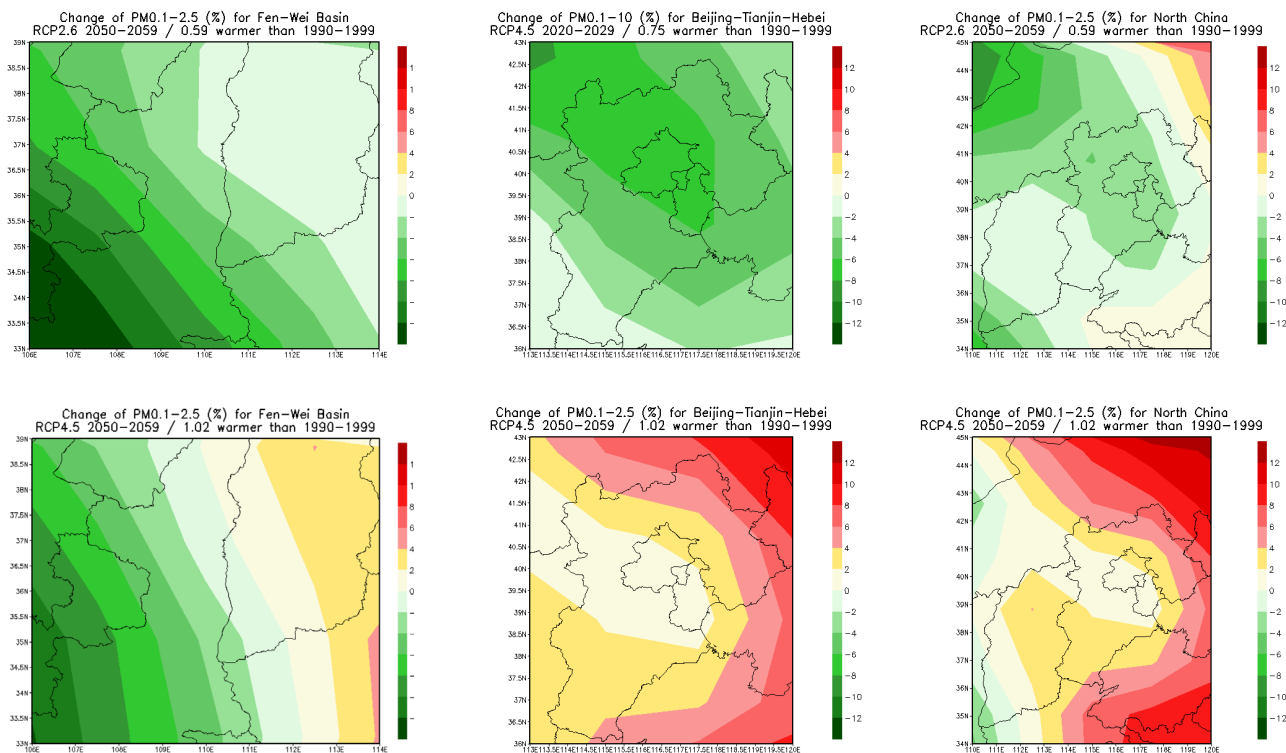


图 5 RCP 情景下 2050-2059 年 PM 2.5 以下颗粒物浓度相对于 1990-1999 年的变化百分比
上：RCP 2.6 情景；下：RCP 4.5 情景
左：汾渭平原；中：京津冀地区；右：华北地区

主要结论与政策建议

由上述结果可知，全球温室气体排放的增加导致全球和中国升温，即使在低排放情景下，仍然存在极端气候事件增多、能源压力增大的风险，同时，环境污染物浓度升高、区域扩大等问题也不容忽视，因此需要控制温室气体排放、采取合理措施应对气温升高带来的影响。

中国能源模型论坛主题研究 2(CEMF02)
中国 2050 低排放发展战略研究

第 21 期

2019 年 11 月



空气质量模型 与在中国低碳发展中国的应用

研究背景

近几年来，我国通过提出“十三五规划”、“大气十条”、“打赢蓝天保卫战三年行动计划”等政策措施，逐步推进了大气污染防治工作，具体措施有火电、钢铁行业超低排放改造；淘汰燃煤锅炉，推行清洁能源替代；推进公转铁建设；北方城市清洁取暖改造；对重污染天气进行应急管理，如错峰生产、机动车限行等；开展源解析及组分分析等工作，精准治霾。尤其针对重点地区，以上措施的实施有效减少了燃煤带来的颗粒物、二氧化硫等污染物排放，有效预警并减少了重污染天气的发生和持续时间，空气质量得到了显著改善。然而当前我国产业结构、能源结构、交通运输结构仍存在问题，低附加值落后产能仍有较大比例，能源以燃煤为主，公路运输体量庞大，大气污染物控制形势仍然严峻，传统管控措施和手段带来的收益逐渐达到上限，制约了空气质量的进一步改善。

大气环境质量改善的本质是产业结构、能源结构的改善，是经济社会的转型升级，因此从经济能源的角度出发，温室气体减排与空气质量改善是协同发展的。长期来看，如果要进一步推进大气质量的改善，需要采取长期的战略性措施，推进能源转型，大力压减化石燃料的使用，走向用能方式的完全清洁化，同时，能源结构的改善也将促进温室气体减排，支持全球 2 度升温目标的实现。将大气质量的提升，和温室气体减排相结合，可以更好地设计双赢的政策，降低投入的总成本。

《大气污染防治行动计划》实施以来，全国环境空气质量持续改善。2017 年，全国 338 个地级及以上城市可吸入颗粒物（PM₁₀）平均浓度为 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，比 2013 年下降 18%。细颗粒物（PM_{2.5}）平均浓度为 43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，同比 2016 年下降 6.5%，其中 74 个可比城市与 2013 年相比平均下降 34.7%。但我国 PM_{2.5} 浓度仍处于高位，特别是京津冀、长三角、汾渭平原等重点地区远超国家平均水平。2017 年全国、京津冀、长三角、汾渭平原分别是国家环境空气质量二级标准的 1.23 倍、1.83 倍、1.26 倍和 1.86 倍。根据我国“十四五”规划以及“美丽中国”战略预测，我国的大气环境质量将在未来年持续改善，预计在 2025 年全国 338 个地级及以上城市 PM_{2.5} 浓度下降至 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下，在 2035 年达到 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下。

模型与方法

IPAC-AIM 技术模型的目的是对能源服务及其设备的现状和未来发展进行详细描述，对能源消费过程进行模拟，它采用最小成本法进行分析，即具有所设置的各种成本最小的技术能够被选中以提供能源服务，主要计算未来各种情景下各终端能源部门的分品种能源需求量，并进而计算出 CO₂ 的排放量。它的一个重要作用是评价不同的技术对策对技术引进和温室气体减排的影响。本报告根据 IPAC-AIM 模型模拟得到的未来情景，以及计算得到的各类大气污染物的排放量，再通过 WRF-CMAQx 模型对未来各年份进行模拟，进而得到未来年的空气质量情况。

CMAQ 模型主要由边界条件模块（BCON）、初始条件模块（ICON）、光分解率模块（JPROC）、气象-化学预处理模块（MCIP）和化学输送模块（CCTM）构成。化学输送模块（CCTM）是 CMAQ 模型的核心，污染物在大气中的扩散和输送过程、气相化学过程、气溶胶化学过程、液相化学过程、云化学过程以及动力学过程均由 CCTM 模块模拟完成。本报告基准年设为 2017 年，采用 MEIC 的 2017 年全国排放清单，对基准年进行模拟，得到 2017 年的全国 PM_{2.5} 年均浓度为 43.0 μg/m³，根据分析得到的基准情景、2 度情景、1.5 度情景，对排放情况进行调整，模拟得到未来 2020 年、2025 年、2030 年、2040 年、2050 年的空气质量情况，从而可以看出空气质量和碳减排的协同改善效果。

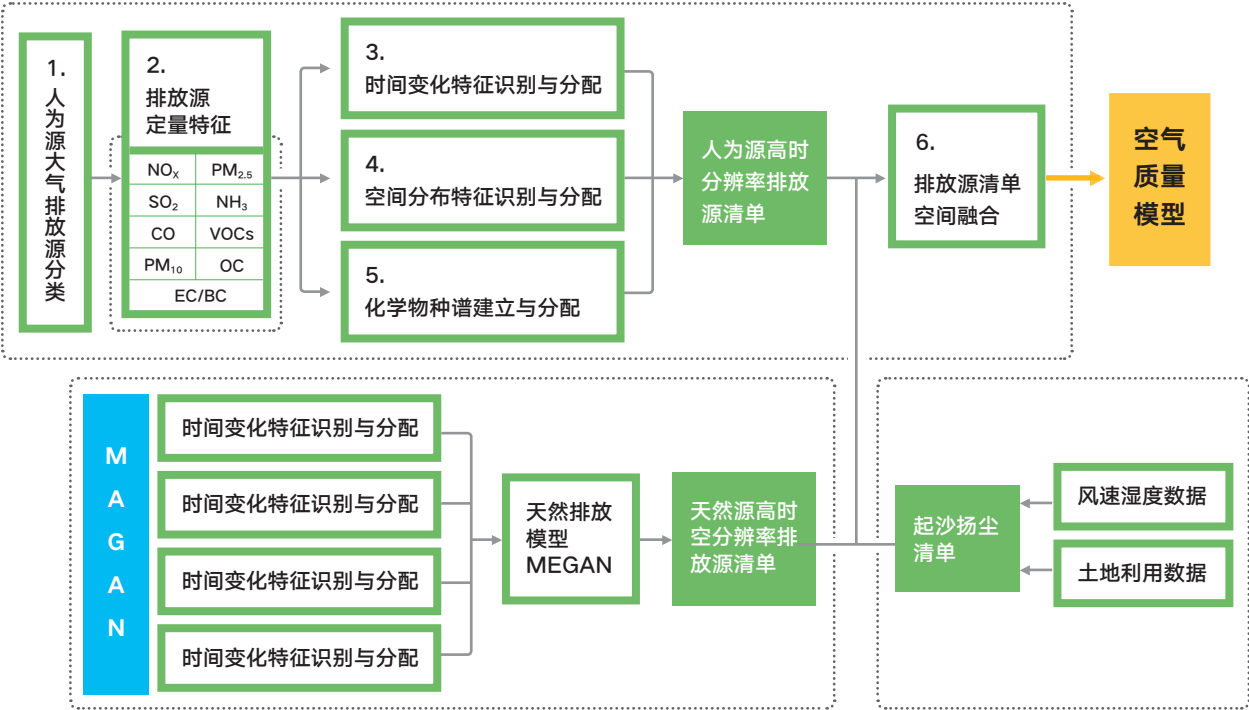


图 1 排放清单时空化学分配

情景分析

1、经济与能源发展情景

预计到 2020 年，2030 年和 2050 年我国的人口总数分别为 14.3 亿、14.7 亿、14.1 亿。同时 2020 年，2030 年和 2050 年我国 GDP 总量会从 2010 年 40.3 万亿元，上升到 130 万亿元、290 万亿元和 520 万亿元（按照现价计算）。2 度情景下，大气污染控制措施将加快能源转型，气候变化减缓也需要能源的转型，综合考虑我国的发展规划，设置我国未来经济能源发展情景：未来我国经济转型明显，2015 年之后大部分高耗能产品生产达到峰值，之后开始下降；可再生能源发展情景非常快速；天然气发展快速，煤炭消费量逐年降低。

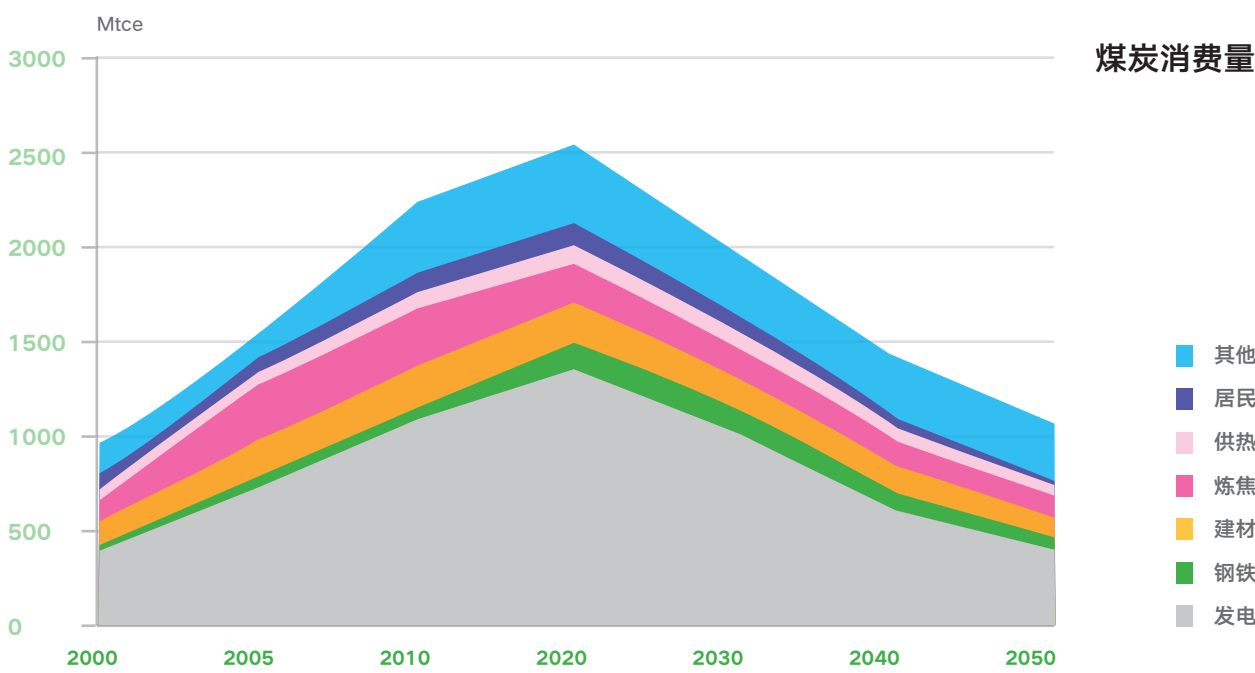


图 2 2 度情景下我国未来煤炭消费量预测

2、污染物减排情景

本报告设置了 3 种减排情景，分别为 2 度情景、1.5 度情景和基准情景，其代表的分别为满足升温 2℃、1.5℃和基准情景，基于产业结构变化、能源结构调整及污染物减排措施，经过计算得到不同情景下未来 2020 年、2030 年、2050 年各类大气污染物排放量如图 3 所示。

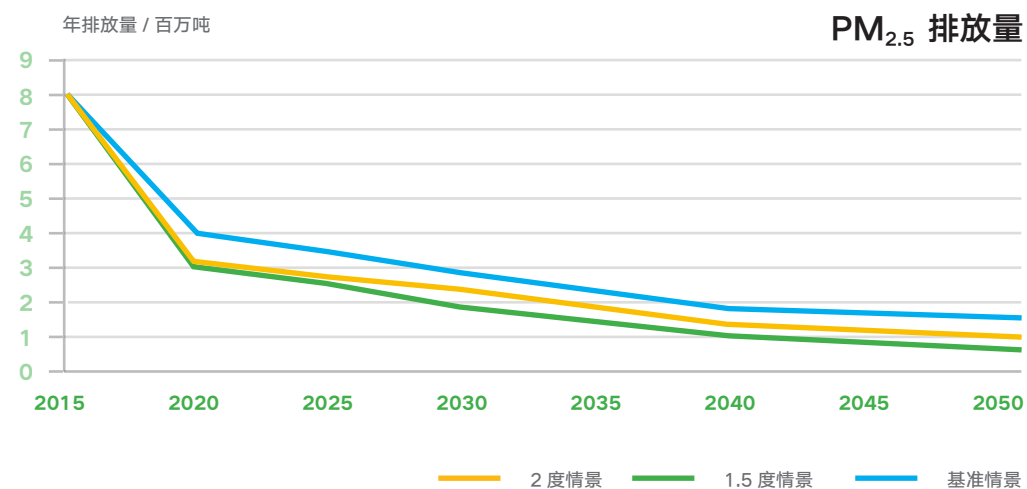
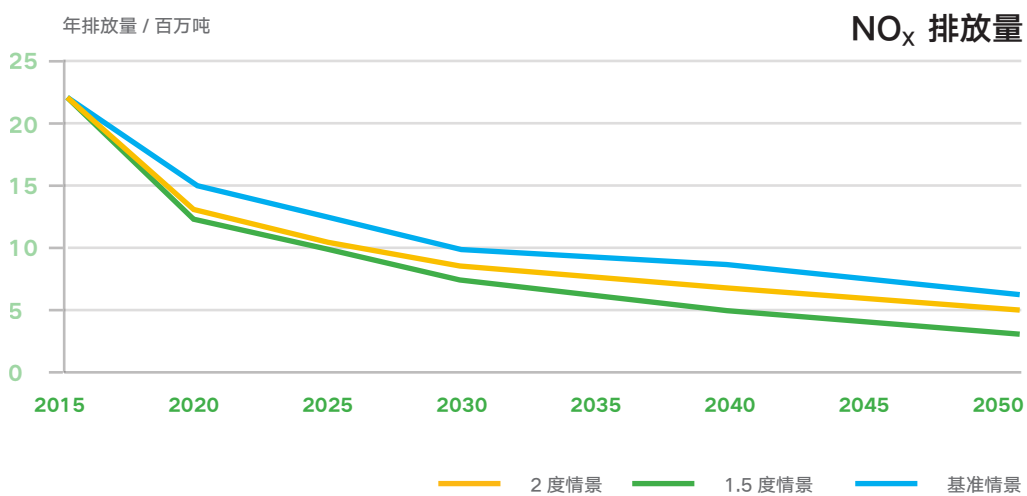
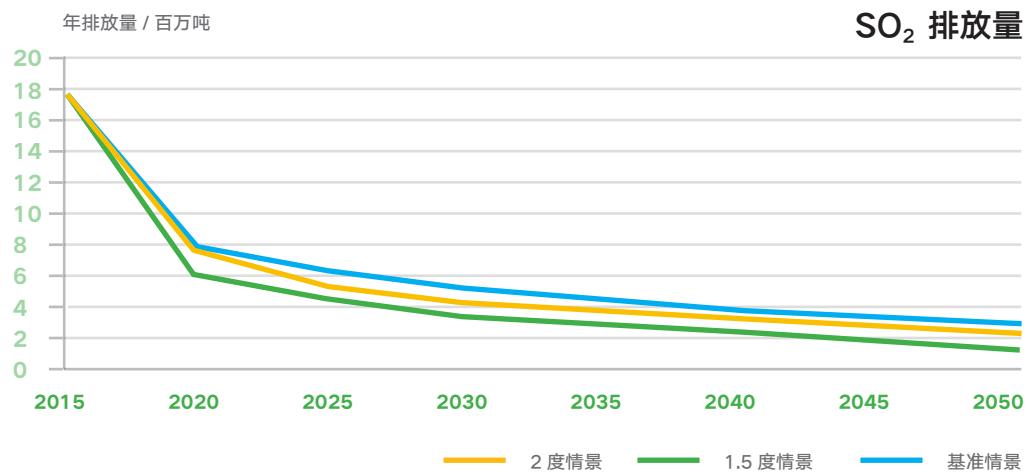


图 3 未来年排放情景

低碳清洁化发展路径对空气质量的改善效果分析

根据以上减排情景，以 2017 年的空气质量及排放量作为基准年，经过 WRF/CMAQx 模型模拟，得到基准情景下 2025 年、2030 年、2040 年、2050 年的全国 PM2.5 年均浓度分别为：33.41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、28.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、19.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、15.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；2 度情景下未来年度全国 PM2.5 年均浓度分别为：30.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、24.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、17.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、13.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；1.5 度情景下未来年度全国 PM2.5 年均浓度分别为：27.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、21.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、14.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、10.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。通过上述结果可以看出，在基准情景下，2025 年全国 PM2.5 年均浓度将达到 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下，远期在 2050 年可以达到 15.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，接近世界卫生组织提出的 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 标准，但尚未达到。在 2 度情景下，2025 年达到 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下，在 2050 年达到世界卫生组织 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的标准。结论表明，通过一系列大气污染控制减排措施和能源结构调整，在各情景下，我国大部分地区在 2025 年之前 PM2.5 年均浓度将会达标（35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ），但同时也可以看出，在经过初期较大幅度的浓度下降后，未来的 PM2.5 年均浓度下降幅度逐步减小，减排难度增大，在 2 度情景下预计 2050 年 PM2.5 平均浓度达到 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的世界卫生组织标准。由于模拟未来年年份较远，其不确定性有许多来源，例如：气象因素，气象条件会对空气质量带来较为明显的影响，WRF 提供的气象模拟在未来年存在一定的误差；排放量预测，未来不同的产业结构、市场结构将会对减排量预测带来较大的影响，影响模拟结果。

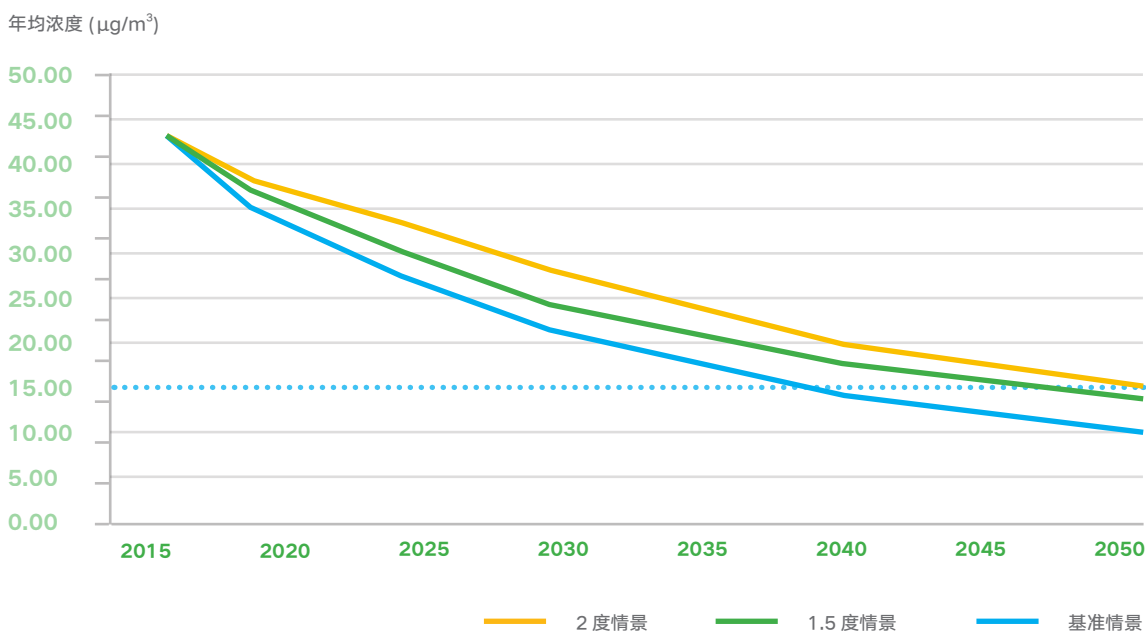


图 4 各情景下未来年的 PM2.5 年均浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

中立
Neutrality

独立
Independence

协同
Synergy

透明
Transparency

公正
Fairness



官网二维码



微信公众号

清华大学产业发展与环境治理研究中心
Center for Industrial Development and Environmental Governance
清华大学公共管理学院 615
Room 615, School of Public Policy and Management, Tsinghua University
邮箱: cemf@tsinghua.edu.cn
E-mail: cemf@tsinghua.edu.cn
电话: (010) 62789263
Tel: (010) 62789263
网站: www.cemf.net.cn
Website: www.cemf.net.cn