

基于污染物浓度设计值和相对响应因子的 空气质量达标控制情景预测方法 ——以四川省“十四五”规划为例

黄冉^{1,†} 王馨陆¹ 王聪² 杜云松³ 晏波¹ 张雯娴¹ 罗彬² 张巍³ 胡泳涛⁴

1. 杭州矮马科技有限公司, 杭州 311121; 2. 四川省环境政策研究与规划院, 成都 610041; 3. 四川省生态环境监测总站, 成都 610091; 4. School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta 30332;
† E-mail: ranhuang2019@163.com

摘要 提出一种基于污染物浓度设计值和相对响应因子的空气质量达标规划预测方法。首先通过数值模拟, 评估最近5年年际气象条件差异对空气污染物浓度的影响, 筛选出最接近5年平均气象条件的一年作为基准年, 将该基准年气象场和各排放情景作为输入进行空气质量模拟, 降低气象条件年际差异对未来污染物浓度水平预测的影响。然后, 基于基准情景和控制情景在不同排放水平的空气质量模式模拟结果, 将控制情景相对于基准情景的污染物模拟浓度的变化比例(相对响应因子)与污染物浓度设计值相结合, 进行控制情景的空气质量水平预测和达标分析。以四川省为例, 围绕相关减排政策, 设计多个虚拟控制情景, 对全省城市未来空气质量进行情景预测和达标分析, 为“十四五”空气质量规划落地策略的制定提供科学支撑。

关键词 “十四五”规划; 控制情景预测; 空气质量达标规划; 相对响应因子; 设计值

Future Year Air Quality Attainment Prediction Method Based on Design Value and Relative Response Factor: A Case Study Focusing on Implementation Planning of the 14th Five-Year Plan in Sichuan Province

HUANG Ran^{1,†}, WANG Xinlu¹, WANG Cong², DU Yunsong³, YAN Bo¹, ZHANG Wenxian¹, LUO Bin², ZHANG Wei³, HU Yongtao⁴

1. Hangzhou AiMa Technologies, Hangzhou 311121; 2. Sichuan Academy of Environmental policy and planning, Chengdu 610041; 3. Sichuan Bio-Environmental Monitoring Center, Chengdu 610091; 4. School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta 30332; † E-mail: ranhuang2019@163.com

Abstract A novel future year air quality attainment prediction method, which is based on the design value of air pollutant concentration and relative response factor (RRF), has been developed to predict pollutant concentration levels under different emission control scenarios. The method first conducts numerical simulations to evaluate the effect of annual meteorological differences among the recent five years on the concentrations of air pollutants. The “typical” year, of which the meteorological condition is the closest to the five-year average, is selected as the base year. The air quality is simulated with the meteorological field and emission scenarios of the base year as the input of model so as to reduce the influence of inter-annual differences in meteorological conditions on the prediction of future pollutant concentration levels. Then it applies the regional air quality model for multiple times to simulate the pollutant concentration levels with different emission inputs that represent base and control emission scenarios. Lastly, it multiplies the design value of pollutant concentrations with the RRF derived from the ratios between the simulated concentrations of the control and base scenarios, to predict the future pollutant levels and to conduct air

quality attainment tests. The method is applied to conduct scenario predictions and air quality attainment tests for the cities in Sichuan Province by designing multiple virtual air pollutant emission control scenarios based on the relevant emission reduction policies. The air quality attainment prediction results under different control scenarios, which aim to accomplish the goals of the 14th Five-Year Plan on air quality, can be useful for refining the local implementation strategies for control of air pollution.

Key words the 14th Five-Year Plan; air quality attainment prediction; air quality attainment implementation planning; relative response factor (RRF); design value

为改善空气质量,国务院于2013年和2018年先后出台《大气污染防治行动计划》^[1]和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》^[2],提出通过大幅减少主要大气污染物排放量,协同减少温室气体排放,推进区域大气污染联防联控,显著降低PM_{2.5}浓度,改善区域空气质量。到2020年底,全国大部分地区的空气质量都得到明显的提升,主要污染物浓度出现不同程度的下降,例如PM_{2.5}年均浓度从2013年的72 μg/m³^[3]降至2020年的33 μg/m³^[4]。2018年^[5]和2019年^[6],分别首次实现全国所有城市SO₂浓度和CO浓度达标。尽管空气质量在持续改善,但近年来污染物浓度的下降速度却逐步放缓^[7],且当前重点区域和城市的主要污染物浓度离达标浓度仍有一定的距离。全国337个城市中,仍有47.2%的城市PM_{2.5}年均浓度超过GB3095—2012《环境空气质量标准》二级标准限值(35 μg/m³),仅有4.5%的城市达到世界卫生组织(World Health Organization, WHO)推荐的PM_{2.5}年均浓度限值(10 μg/m³)^[6]。同时,随着PM_{2.5}浓度的下降,另一个主要污染物臭氧出现浓度不断上升的情况^[8-9]。如何在持续降低PM_{2.5}浓度的基础上,协同推进臭氧浓度下降,全面减少大气污染对人体健康的影响,是我国“十四五”计划以及更远景规划中大气环境治理的重点^[10]。空气质量达标规划是辅助决策支持,实现大气环境治理目标的重要科学手段。《中华人民共和国大气污染防治法》^[11]明确规定,未达到国家大气环境质量标准城市的地方政府,应当及时编制大气环境质量限期达标规划,采取措施,按照国务院或省级人民政府规定的期限,达到大气环境质量标准。为了顺利且高效地实现本地区“十四五”大气环境保护目标,可以充分利用空气质量达标规划这一科学手段来辅助政府部门完善污染控制决策过程。

情景分析方法常用来进行空气质量达标规划研究。目前常用的情景分析研究通常是针对污染物排放量的预测估算,例如鱼智霞等^[12]对全国2020和2030年的SO₂和NO_x排放总量分情景进行预测;安

文辉等^[13]以经济、政策和能源为驱动因子,对西安市2020年SO₂和NO_x的排放量设置3个减排情景进行估算。但是,考虑到污染物排放与浓度之间的非线性关系,尤其是像臭氧和二次细颗粒物这类污染物的浓度水平与其前体物之间具有高度的非线性关系^[14-15],仅对污染物排放进行预测,不能有效地估计污染物浓度的未来状况。对此,可以将污染物排放的估算情况作为输入条件,利用空气质量模型对污染物浓度进行估算。薛文博等^[16]利用WRF-CAMx模型,以城市PM_{2.5}年均浓度达标为约束,估算全国SO₂,NO_x,一次PM_{2.5}和NH₃的环境容量。谢放尖等^[17]利用WRF-CMAQ模型,以2030年南京市6项污染物达标为约束,通过情景分析预测排放清单,模拟4种减排情景的空气质量变化,预测2030年达标约束下大气污染物总量控制水平。Tong等^[18]同样利用WRF-CMAQ模型,设计两个能源情景,对京津冀地区2030年PM_{2.5}达标情况进行预测分析。

这些针对未来排放情景的空气污染浓度水平的预测,都是直接基于空气质量模式的模拟结果,未考虑空气质量模型本身对污染物浓度模拟的较大误差,因此这些达标分析的结果具有很大的不确定性。模型模拟中,无论气象^[19-20]或排放清单^[21-22]输入,还是模型本身的物理、化学机制等^[23],都存在不确定性,都会导致对污染物浓度的估算误差。不过,模式因输入条件的变化计算得到的模拟浓度的相对差异却较为准确,因此基于排放变化的未来情景模拟和基准情景模拟的浓度结果的相对变化比例,可以较为准确地估算未来情景相对于基准年份观测浓度的变化情况^[24]。基于此,美国环保局针对臭氧和细颗粒物的达标规划,推荐基于相对响应因子(relative response factor, RRF)的预测方法,即将RRF应用于基准年的设计值(design value,即以基准年为中心的3~5年的观测值的平均值,从而剔除年际气象差异对污染物观测浓度的影响)来求取未来的达标设计值,依此预测未来的达标状况^[25]。

其中, RRF 是未来情景模拟结果与基准模拟结果的比值, 即模式模拟结果计算得到的因排放变化导致的污染物浓度的相对变化比例。该方法本质上是将基于多年观测平均值的基准年设计值, 利用模式模拟结果的相对变化比例来做外推处理。

另外, 基于模型对未来污染物浓度的预测研究中, 未对基准年(或者模拟时段)进行专门的科学选择和讨论, 通常是选取特定的政策实施的起始或结束年份(或特定的重污染时段), 没有针对气象情况对模拟年份(或模拟时段)进行挑选。然而, 气象条件的年际变化对污染物浓度的影响是不可忽略的^[26-27], 采用污染气象条件的极端不利年份或极端有利年份进行未来排放情景的污染浓度水平预测, 极有可能在一定程度上导致达标结果误判。针对此问题, 国外早期使用 CART 模型对污染时段的污染气象特征进行典型性评估和筛选, 摒弃其中非典型的极端气象条件污染时段^[28]。近年来, 美国环保局推荐在模拟基准年份及时段的选择上, 针对臭氧的评估模拟需要包括整个臭氧季节^[29], 针对颗粒物要求直接模拟全年^[30], 且该年份在连续数年中属于污染气象条件的正常年份, 即相对于其他年份, 该年份的气象条件在规划未来年份出现的机率更高^[25]。

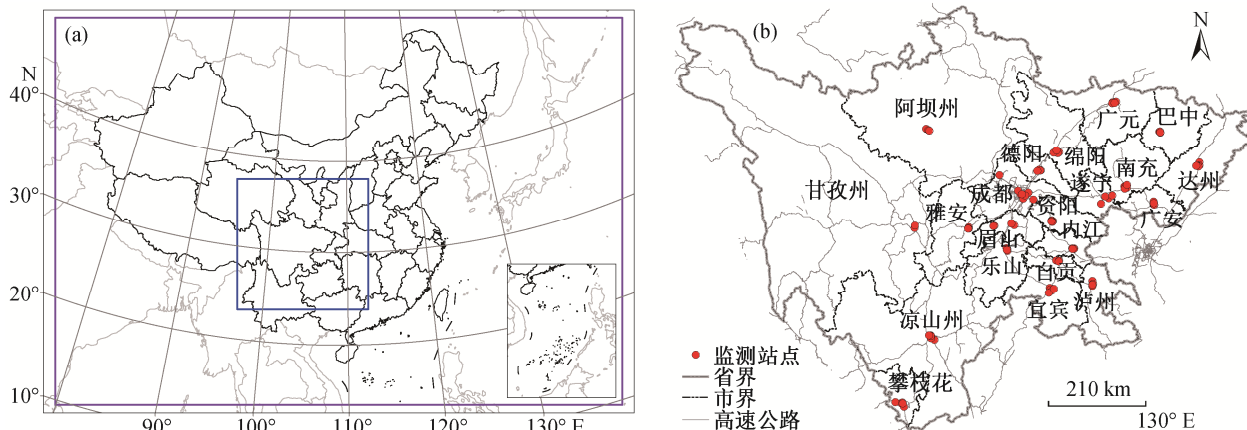
本研究针对空气质量达标规划实践中的上述问题, 结合我国实际情况, 提出一种新的实用的空气质量达标规划方法, 即通过模式模拟, 挑选最接近多年平均气象条件的年份作为基准年, 并基于污染物浓度设计值和相对响应因子来进行控制情景的污染物浓度水平预测及达标分析。使用该方法, 以四

川省为例, 围绕“十四五”相关减排政策设计多个虚拟控制情景, 对全省城市空气质量, 尤其是细颗粒物和臭氧进行达标分析, 以期“十四五”期间排放控制落地策略的制定, 尤其是本地大气污染精细化管控提供科学支撑。

1 资料与方法

1.1 观测数据

空气质量观测数据来源于四川省空气质量监测网络管理平台(<http://www.scnewair.cn:3389/smartadmin>)。我们搜集了四川省共 94 个国控监测站以及成都、德阳、眉山和资阳(成德眉资)四市共 35 个区县站点 2016—2020 年逐日的细颗粒物、臭氧以及其他标准污染物浓度数据。需要注意的是, 为了提高与国外污染物质量浓度监测结果的可比性, 生态环境部自 2018 年 9 月 1 日起, 将国控监测站点颗粒物及气态污染物的监测状态定义由原来的标准状态分别修改为实际状态和参考状态(298 K 和 1013 hPa)。因此, 为了确保评估中空气质量观测数据的一致性, 分别对国控站点历史观测数据(2018 年 9 月 1 日之前)和区县站点历史观测数据(2019 年 1 月 1 日之前)进行状态转换, 即将颗粒物和气态污染物小时浓度由标准状态分别转换为实际状态和参考状态, 转换中使用的气温和气压小时数据来自空气质量站点临近的气象站点实测数值。利用全省区域 21 个市、州(图 1(b))以及相应国控站点的污染物观测数据, 剔除城市对照点, 计算分析各城市的污染物平均浓度, 用于评估城市空气质量。



(a) 双层嵌套网格, 紫色方框为 36 km 网格模拟范围, 蓝色方框为 12 km 网格模拟范围;
 (b) 四川省观测站, 红色圆点代表空气质量国控监测站点

图 1 研究区域
 Fig. 1 Study area

1.2 空气质量模式模拟

空气质量数值模拟采用多尺度化学传输模式 CMAQ (Community Multiscale Air Quality model, 5.3.1 版本)。该模型在源排放和气象场等输入数据的驱动下,对空气污染物(包括气态污染物和气溶胶)在大气中迁移、转化等物理和化学过程进行模拟,计算得到污染物的时空分布场^[23,31]。CMAQ 模拟选用 SAPRC07tc 气相反应机理^[32]和 AERO6 气溶胶模块^[33]。

采用双层嵌套网格进行模拟,水平分辨率分别为 36 和 12 km。外层网格覆盖包括青藏高原在内的所有中国地区以及部分东南亚和印度次大陆,第二层网格覆盖四川省全境及周边省市部分地区(图 1 (a))。其中,气象场输入数据来自中尺度天气预报模式 WRF^[34] (Weather Research and Forecast Model, 3.6.1 版本)的回溯模拟结果。采用 Lambert 投影坐标,垂直方向从地面到 50 hPa 共分为 35 个 σ 层。主要物理过程分别采用 Kain-Fritsch 积云方案、YSU 边界层参数化方案、NOAH+MOSAIC 陆面模式以及 Lin 微物理参数化方案。WRF 回溯模拟采用 GDAS 全球再分析资料以及 ADP 全球地面和高空观测数据作为输入。对 2016—2020 年共 5 年的气象条件进行回溯模拟。CMAQ 输入使用的基准年源清单为四川省 2019 年排放清单,该清单是在四川省空气质量数值预报系统 2017 年排放清单的基础上,经优化、迭代调整后形成^[35]。现状年(2020 年)和控制情景的源排放清单都是在基准年的清单基础上进行削减或增加。

空气质量模拟分为两部分:首先利用相同的清单输入和不同年份的气象场输入来模拟评估气象条件的年际差异对污染物浓度的影响,进而选择模拟基准年;然后,利用选定的基准年气象场,输入不同的排放清单(基准年清单、现状清单和控制情景清单)来模拟排放变化造成的污染物浓度差异。

1.3 达标规划控制情景污染物浓度水平预测方法

1.3.1 达标规划模拟基准年的选取

达标规划模拟的目的是准确地预测相关控制政策引起的排放变化导致的污染物浓度的变化,以此为基础进行达标分析。因此,模拟基准年的选择需要确保基准年气象条件的典型性,即对未来年份污染物浓度预测误差的影响尽可能小,不宜选取污染

气象条件为极端有利或者极端不利的情况。采取数值模拟方法,即利用相同的清单和不同年份的气象场输入空气质量模式来评估气象条件的年际差异对污染物浓度的影响,进而选取气象条件较为典型的年份,计算公式如下:

$$iMET_{y\&5\text{-year}} = \left(\frac{SIM_y - \overline{SIM_{5\text{-year}}}}{\overline{SIM_{5\text{-year}}}} \right) \times 100\%, \quad (1)$$

其中, y 代表模拟当前年份,分别对应 2016, 2017, 2018, 2019 和 2020 年, 5-year 指 2016—2020 的 5 年平均; $iMET_{y\&5\text{-year}}$ 是当前年相对于 5 年平均的气象条件的年际差异对污染物浓度的影响; SIM_y 代表当前年污染物模拟浓度, $\overline{SIM_{5\text{-year}}}$ 代表污染物 5 年平均的模拟浓度。

以四川省“十四五”空气质量达标规划为例,从“十三五”计划覆盖的 5 年(2016—2020 年)中选取基准年。在逐年的空气质量模拟过程中,使用逐年的气象回溯模拟结果作为气象输入,排放输入则保持为 2019 年排放清单不变。可将模拟得到的污染物浓度的年际差异视为仅由气象条件的年际变化导致,这样将每一年的污染物浓度与 5 年平均的浓度进行比较,就可以筛选出最接近 5 年平均气象条件的一年作为基准年,即典型气象年份。

1.3.2 虚拟情景设计和排放预测

空气质量达标规划模拟,是针对基准排放情景和控制排放情景(包括现状情景)进行不同排放水平的空气质量模拟,根据模拟结果,计算控制情景(包括现状情景)相对于基准情景的模拟污染物浓度的变化比例,用于后续预测和分析。基准年确定后,基准排放情景即已确定,针对四川省“十四五”规划,基准排放情景水平为 2019 年排放清单。控制情景是相对于现状排放情景而言的,因此需要先确定现状情景的排放水平,并在现状排放水平的基础上预测各控制情景下的排放水平。

“十三五”规划的最后一年 2020 年,为“十四五”规划的现状年,其排放水平即为现状排放情景。利用四川省 2019 年排放清单推算到 2020 年,考虑到当年疫情的影响和经济变化的具体情况,在 2019 年排放清单的基础上进行相应的调整(表 1)。上述调整按年排放量的全省平均状况进行,没有考虑疫情封城期间和疫情后期经济恢复过程中的季节差异和地区差异。

表 1 四川省 2020 年排放清单相对于 2019 年排放清单 (wryb2019ff) 的调整比例

Table 1 Adjustment ratios of Sichuan 2020 emission inventory relative to 2019 emission inventory (wryb-2019ff)

| 污染物 | 调整比例/% |
|-------------------|--------|
| CO | -1 |
| NO _x | -4 |
| VOCs | 1 |
| SO ₂ | -14 |
| PM _{2.5} | -2 |
| PMC | -2 |
| NH ₃ | -2 |

四川省当前空气污染物的主要排放源是工艺过程源、扬尘源、移动源和固定燃烧源^[36], 其中工业源(包括工艺过程源和固定燃烧源)和移动源减排是四川省“十四五”规划的重点^[37]。为探究不同减排水平的污染物浓度变化及达标情况, 依据当前排放水

平, 结合本地历史减排政策效果评估, 设置 11 个虚拟的现实可能排放控制情景。这些虚拟控制情景主要针对工业源和移动源进行减排。其中, nocontrol 表示无控制情景, 仅考虑“十四五”期间因经济增长造成的排放增量; median0 是经控制政策梳理并核算出相应减排比例的正常减排情景; median-3~median-1 以及 median+1 是在 median0 基础上上下浮动(加强或减弱减排力度)的 4 个控制情景, 其减排比例比 median0 更宽松或更严格; medianX, medianY 和 medianZ 是在 median0 和 median-1 的基础上专门针对 NO_x 和 VOCs 额外增加的控制情景, 主要考虑臭氧与前体物之间的非线性关系; median2030 和 median2035 是两个远期减排情景。11 个控制情景的减排比例详见表 2。对 11 个控制情景分别进行模拟, 各情景与 2020 年现状情景之间的污染物浓度差值即各情景减排(变化)对空气质量改善(变化)的贡献。

表 2 相对于 2020 现状情景的 11 个控制情景减排比例

Table 2 Reduction ratios of 11 control scenarios relative to Sichuan 2020 emission inventory

| 情景代码 | 排放源 | 减排比例/% | | | | | |
|------------|-----|-----------------|------|-----------------|-----|-------------------|-----|
| | | NO _x | VOCs | SO ₂ | CO | PM _{2.5} | PMC |
| nocontrol | 工业源 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| | 移动源 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| medianX | 工业源 | -36 | -35 | -48 | -23 | -9 | -9 |
| | 移动源 | -40 | -10 | 0 | -26 | -10 | -10 |
| medianY | 工业源 | -26 | -20 | -38 | -13 | -4 | -4 |
| | 移动源 | -30 | 0 | 0 | -16 | -5 | -5 |
| medianZ | 工业源 | -36 | -10 | -48 | -23 | -9 | -9 |
| | 移动源 | -40 | 0 | 0 | -26 | -10 | -10 |
| median-3 | 工业源 | -10 | -10 | -18 | 0 | 0 | 0 |
| | 移动源 | -10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| median-2 | 工业源 | -16 | -20 | -28 | -3 | 0 | 0 |
| | 移动源 | -20 | 0 | 0 | -6 | 0 | 0 |
| median-1 | 工业源 | -26 | -35 | -38 | -13 | -4 | -4 |
| | 移动源 | -30 | -10 | 0 | -16 | -5 | -5 |
| median0 | 工业源 | -36 | -50 | -48 | -23 | -9 | -9 |
| | 移动源 | -40 | -20 | 0 | -26 | -10 | -10 |
| median+1 | 工业源 | -46 | -65 | -58 | -33 | -19 | -19 |
| | 移动源 | -50 | -30 | 0 | -36 | -20 | -20 |
| median2030 | 工业源 | -55 | -70 | -80 | -40 | -40 | -40 |
| | 移动源 | -60 | -40 | 0 | -40 | -40 | -40 |
| median2035 | 工业源 | -80 | -80 | -90 | -60 | -50 | -50 |
| | 移动源 | -80 | -60 | 0 | -60 | -50 | -50 |

1.3.3 基于情景模拟结果的污染物浓度水平预测和达标分析方法

参考美国环保局的达标测试方法,利用未来情景(以及现状情景)模拟结果与基准年(基准情景)模拟结果之间的相对变化比例(即 RRF 值),分别对基准年的观测数据和设计值(2018—2020 年观测平均)进行外推处理,从而估算未来情景(包括现状情景)的达标情况。

具体方法是,利用 11 个未来情景和现状情景的模拟结果(2019 年气象+各情景排放清单)和基准年 2019 年回溯模拟结果(2019 气象条件+2019 年排放清单),计算每日各市、州以及市、州各区、县污染物浓度的情景模拟日值数据(24 小时平均浓度或日最大 8 小时平均浓度)与基准年模拟日值数据的比值,得到相对响应因子 RRF(式(2)),再将相对响应因子乘以基准年的观测数据或设计值,最后针对各情景预测污染物浓度水平(式(3)),进行达标情况分析。

$$RRF_{sp}^i = \frac{SIM_{sp}^i}{SIM_{2019sp}^i}, \quad (2)$$

$$[C^*]_{sp}^i = RRF_{sp}^i \times [C]_{sp}^i, \quad (3)$$

其中, SIM^i 表示现状情景及未来情景的污染物浓度日值, SIM_{2019} 表示基准年污染物浓度日值, sp 表示 $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 , CO 或 O_3 , i 表示 2019 年对应的每一天, $[C]$ 表示各污染物当天观测浓度或设计值, $[C^*]$ 表示应用相对响应因子 RRF 之后的现状情景或未来情景对应的污染物浓度预测值,即预测的未来设计值。基准年设计值是将各污染物 2018—2020 年的观测浓度值分别从高到低进行排序,同时对 2019 年的实际日期进行标记,计算每一组 3 个年份日值浓度的平均值,即为 2019 年该标记日的设计值。在计算基准年设计值的时候,采用 2019 年日期对设计值进行标记,是为了在利用基准年的观测浓度值或利用基准年设计值作为现状浓度来预测未来情景条件下的污染物浓度水平时,可以同时超标天数和优良天数率的相对变化情况进行估算。

与美国环保局推荐做法的不同之处在于,本研究添加了基于基准年观测数据的分析,主要原因是自 2013 年以来,全国各地在“大气污染防治行动计划”^[1]的执行推动下,每年的污染物排放削减都较为

显著,各项污染物观测浓度也都显著降低,排放情况的年际变化对污染物浓度的影响往往大于年际气象条件波动对污染物浓度的影响,因此多年观测平均值可能不能准确地代表污染物现状浓度水平。另外,我国的国家监测网络目前还没有普及对细颗粒物组分的观测,因此这里只对细颗粒物的质量浓度进行外推估算。

2 结果与讨论

2.1 基准年的确定及模拟效果评估

2.1.1 选取 2019 年为模拟基准年

四川省各城市 2016—2020 年 5 年的气象条件变化对 $PM_{2.5}$ 年均浓度影响的评估结果(附录 1)显示,2019 年是 5 年中气象条件最接近于 5 年平均状况的一年。

总体来看,全省城市平均气象条件相对于 5 年平均气象条件的差异对该年的全省城市 $PM_{2.5}$ 年均浓度的变化贡献约等于 0。分城市来看,除阿坝、甘孜和凉山 3 个自治州(三州地区)外,各城市 2019 年相对于 5 年平均气象条件的差异对该年该城市 $PM_{2.5}$ 年均浓度变化的贡献基本上都在 $\pm 2\%$ 以内,其中成都、绵阳、宜宾和自贡等城市气象条件波动的贡献都在 $\pm 0.5\%$ 以内。对其他污染物的模拟和分析结果也表明,2019 年的污染气象条件是 2016—2020 年中最典型的一年,因此选择 2019 年作为模拟基准年。另外,2019 年排放清单是基于 2019 年回溯模拟结果,结合 2019 年观测值进行调整得来,进一步保障了基准情景排放清单的准确性以及基准年污染物浓度模拟结果的准确性。

2.1.2 气象模拟效果评估

WRF 回溯模拟结果与地面观测数据的时间序列对比(附录 2)表明,模拟结果非常好地再现了湿度、气温、风向和风速的时间变化趋势,但由于盆地内全年风速偏低,对风速的模拟普遍存在高估的问题。2019 年 12 个月的逐月 WRF 回溯模拟各气象要素模拟效果统计指标计算结果(附录 3)表明,2019 年的气象回溯模拟结果总体上能够满足空气质量模拟的要求。

2.1.3 空气质量模拟效果评估

四川省各城市 2019 年 $PM_{2.5}$ 的年平均模拟浓度普遍低于观测浓度(附录 4)。其中,成都平原和川南地区城市模拟浓度比观测值低约 8%,川东北地区模拟浓度比观测值低 21% 左右,三州地区低估较

多, 达50%。对模拟的评估结果(附录5)也表明, 四川省各城市PM_{2.5}浓度普遍被低估, 大部分城市的平均百分比偏差等偏差类统计参数皆为负数。但是, 成都平原、川南地区以及川东北地区(达州除外)城市的标准化平均偏差(NMB)、误差(NME)都在文献推荐值^[38]范围内(NMB<±30%, NME<50%)。相关性方面, 除马尔康和康定两市, 其余城市的相关系数都大于0.4, 符合推荐标准, 成都平原、川东北以及川南地区城市的平均相关系数大于0.7, 模拟表现较好。

四川省各城市2019年臭氧日最大8小时平均值第90百分位数普遍高于观测浓度(附录6)。其中, 成都平原和川南地区城市模拟浓度比观测值分别高估约4%和2%, 川东北地区模拟浓度比观测值高估10%左右, 而三州地区低估25%。针对臭氧季(4月1日—10月31日)的模拟评估结果(附录7)表明, 四川省大部分城市臭氧模拟浓度相对于观测值有所高估, 但NMB和NME都在文献推荐值^[38]范围内(NMB<±15%, NME<25%)。相关性方面, 除康定外, 其余城市的相关系数都大于0.5, 符合推荐标准, 成都平原、川东北以及川南地区城市的平均相关系数都大于0.69。

总的来说, 除三州地区外, 四川省各城市PM_{2.5}和臭氧的模拟水平总体较好。三州地区的回溯模拟表现较不理想的原因主要是由于排放清单的估算困难, 可获得的排放资料有限, 导致排放估算有较大的误差。

2.2 2020年现状情景预测与2020年实测的对比

将预测的2020年现状情景结果与2020年实际观测值进行对比(各城市数据见附录8, 分区域及全省平均比例见表3), 结果显示, 无论是基于2019观测值或2019设计值来预测的各城市或全省平均优良天数比例都与2020年实际情况非常接近, 尤其是基于2019设计值的结果与2020年实际情况更加类似, 绝对误差在±3%以内。

PM_{2.5}预测的现状情景比实际观测值略有高估(表4和附录9), 其中基于2019设计值的预测结果与2020实际观测值更为接近, 全省范围预测值高估6%左右。分区域来看, 预测高估3%~9%, 成都平原地区高估最多, 主要是由于部分城市(如乐山和雅安)高估超过10%。但有部分城市预测值与观测值非常接近, 例如成都和德阳等城市的预测值与观测值的误差在±5%以内。

表3 基于2019观测值、2019设计值预测的2020现状情景的全省及区域优良天数比例与2020年观测值的对比

Table 3 Comparison of annual proportion of good and excellent air quality days for the current scenario between the predictions based on 2019 observations, 2019 design values and the 2020 observations in Sichuan Province and sub-regions

| 区域 | 优良天数比例/% | | |
|------|-----------------|-----------------|---------|
| | 基于2019观测值 预测 | 基于2019设计值 预测 | 2020观测值 |
| 成都平原 | 87 | 87 | 88 |
| 川南 | 83 | 84 | 86 |
| 川东北 | 91 | 92 | 94 |
| 三州 | 98 | 99 | 99 |
| 全省 | 90 | 91 | 92 |

表4 基于2019观测值、2019设计值预测的2020现状情景的全省及区域PM_{2.5}年均浓度与2020年观测值的比较

Table 4 Comparison of annual PM_{2.5} concentration of current scenario between the predictions based on 2019 observations, 2019 design values and 2020 observations in Sichuan Province and sub-regions

| 区域 | PM _{2.5} 年均浓度/(μg·m ⁻³) | | |
|------|--|-----------------|---------|
| | 基于2019观测值 预测 | 基于2019设计值 预测 | 2020观测值 |
| 成都平原 | 36 | 36 | 33 |
| 川南 | 41 | 40 | 39 |
| 川东北 | 36 | 34 | 32 |
| 三州 | 19 | 18 | 19 |
| 全省 | 33 | 32 | 31 |

针对臭氧来看, 同样是基于2019设计值的预测结果与2020实际观测值更为接近(表5和附录10)。臭氧污染相对严重的成都平原和川南地区, 预测的现状情景较之实际观测值低估, 比如成都低估6%, 乐山低估10%。臭氧污染较轻的地区预测比实测稍有高估, 但数值接近, 全省总体来看预测值低估不到1%。

考虑到2020年气象条件相对有利于污染物的扩散(附录1), 且因为2020年初新冠疫情封城对人为源排放, 尤其是移动源和工业源排放的影响^[39-40], 导致短时间内排放显著下降, 全年排放可能也在时空上发生变化, 然而这些相对变化未能在现状排放情景的简单调整中准确地反应出来, 导致现状情景的排放(尤其是与移动源密切相关的NO_x)有很大的可能性出现高估的情况, 因此预测值对PM_{2.5}的高估和对臭氧的低估误差在合理范围内。对2020年

表 5 基于 2019 观测值、2019 设计值预测的 2020 现状情景的全省及区域臭氧日最大 8 小时浓度的第 90 百分位数与 2020 年观测年均浓度的比较

Table 5 Comparison of the 90th percentile of daily maximum 8-hour average ozone concentration of current scenario between the predictions that based on 2019 observations, 2019 design values and 2020 observations in Sichuan Province and sub-regions

| 区域 | 臭氧浓度/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) | | |
|------|--|-------------------|----------|
| | 基于 2019 观测值 预测 | 基于 2019 设计值 预测 | 2020 观测值 |
| 成都平原 | 141 | 142 | 149 |
| 川南 | 146 | 145 | 147 |
| 川东北 | 120 | 121 | 121 |
| 三州 | 122 | 119 | 116 |
| 全省 | 132 | 132 | 133 |

现状情景预测结果的评估表明, 基于情景模拟结果的污染物浓度水平预测方法是有效的, 可以较准确地预测未来情景的污染物浓度水平。该方法的预测误差在很大程度上取决于未来年份气象条件与典型年份污染气象条件的差异以及对排放水平相对变化的估算误差。

2.3 利用基准年观测值和设计值的市州达标分析结果对比

利用基准年观测值和设计值的情景预测结果(表 6)显示, 两种方法预测的全省优良天数比例仅在少部分情景出现 1% 的差别。以成都市为例,

表 6 基于 2019 观测值 and 2019 设计值预测的不同控制情景下的四川省优良天数比例

Table 6 Predicted annual proportions of days with good and excellent air quality under different scenarios in Sichuan Province based on 2019 observations or 2019 design values

| 情景 | 优良天数比例预测值/% | |
|------------|-------------|-------------|
| | 基于 2019 观测值 | 基于 2019 设计值 |
| nocontrol | 87 | 88 |
| medianX | 92 | 92 |
| medianY | 91 | 92 |
| medianZ | 92 | 92 |
| median-3 | 90 | 91 |
| median-2 | 91 | 91 |
| median-1 | 91 | 92 |
| median0 | 92 | 92 |
| median+1 | 93 | 93 |
| median2030 | 94 | 95 |
| median2035 | 95 | 96 |

$\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度都很近似, 部分情景间相差 1~2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (表 7); 两者不同情景下臭氧日最大 8 小时浓度的第 90 百分位数相差均小于 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (表 8)。利用基准年观测值预测结果与利用设计值预测结果的近似主要是由于近年来, 随着空气质量进一步提高, 污染物浓度的下降速度逐渐趋于缓和^[7], 污染物浓度的观测值与设计值较为接近。以 $\text{PM}_{2.5}$ 为例, 各城市 and 区域的基准年观测值和设计值年均浓度相差都在 $\pm 3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以内(附录 11)。

表 7 基于 2019 观测值和 2019 设计值预测的各情景成都市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度

Table 7 Predicted annual $\text{PM}_{2.5}$ concentrations under different scenarios in Chengdu based on 2019 observations or 2019 design values

| 情景 | $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度预测值/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) | |
|------------|---|-------------|
| | 基于 2019 观测值 | 基于 2019 设计值 |
| nocontrol | 46 | 48 |
| medianX | 38 | 39 |
| medianY | 39 | 40 |
| medianZ | 38 | 39 |
| median-3 | 41 | 42 |
| median-2 | 40 | 41 |
| median-1 | 39 | 40 |
| median0 | 38 | 39 |
| median+1 | 36 | 37 |
| median2030 | 33 | 33 |
| median2035 | 30 | 30 |

表 8 基于 2019 观测值和 2019 设计值预测的各情景成都市臭氧日最大 8 小时浓度的第 90 百分位数

Table 8 The predicted 90th percentile of daily maximum 8-hour average ozone concentrations under different scenarios in Chengdu based on 2019 observations or 2019 design values

| 情景 | 臭氧浓度预测值/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) | |
|------------|---|-------------|
| | 基于 2019 观测值 | 基于 2019 设计值 |
| nocontrol | 162 | 163 |
| medianX | 152 | 155 |
| medianY | 155 | 158 |
| medianZ | 153 | 157 |
| median-3 | 158 | 159 |
| median-2 | 157 | 159 |
| median-1 | 154 | 157 |
| median0 | 151 | 155 |
| median+1 | 148 | 151 |
| median2030 | 145 | 148 |
| median2035 | 135 | 137 |

2.4 四川省市、州以及主要城市区、县“十四五”规划达标分析

考虑到利用基准年观测值和设计值的情景预测结果近似，且基于设计值的现状情景预测值与实测更接近，因此下面仅以设计值的预测结果为例，分析四川省市、州及主要城市区、县的达标情况。

从全省来看，仅无控制情景的优良天数比例低于90%，其余各情景的优良天数比例皆超过91%；其中三州和川东北地区的优良天数比例普遍好于成都平原和川南地区；尤其是川南地区，区域平均优良天数比例为全省最低，主要是由区域内宜宾、自贡两市空气质量较差导致(表9和附录12)。

全省PM_{2.5}在所有情景下皆达标。分区域看，川南是PM_{2.5}污染的重点区域，在多数情景下区域平均PM_{2.5}都有超标风险，超标比例为3%~23%；在城市层面，除川南的泸州、宜宾和自贡三市外，成都平原的成都、德阳和川东北的达州、南充等城市在多数情景下都有超标风险，尤其是成都、宜宾、自贡、达州和南充，除远期减排情景(median2030和median2035)以外，在其余情景下都有不同程度的超标风险(表10和附录13)。以正常控制情景(median0)为例，全省PM_{2.5}浓度(表10)同比现状情景(表4)降低9%，优良天数比例提高2个百分点(表3和6)。21个市州中，成都、宜宾、自贡、达州和南充PM_{2.5}超标，同比现状情景分别下降9%，11%，9%，5%和5%，降幅显著；德阳、乐山、绵阳和泸

表9 基于基准年(2019)设计值预测的全省及区域各情景优良天数比例

Table 9 Predicted proportion of days with good or excellent air quality based on 2019 design values under different scenarios in Sichuan Province and sub-regions

| 情景 | 优良天数比例预测值/% | | | | |
|------------|-------------|----|-----|-----|----|
| | 成都平原 | 川南 | 川东北 | 三州 | 全省 |
| nocontrol | 83 | 80 | 91 | 99 | 88 |
| medianX | 90 | 87 | 93 | 99 | 92 |
| medianY | 89 | 86 | 93 | 99 | 92 |
| medianZ | 90 | 87 | 93 | 99 | 92 |
| median-3 | 88 | 85 | 92 | 99 | 91 |
| median-2 | 88 | 85 | 92 | 99 | 91 |
| median-1 | 90 | 86 | 93 | 99 | 92 |
| median0 | 90 | 87 | 93 | 99 | 92 |
| median+1 | 92 | 88 | 93 | 99 | 93 |
| median2030 | 93 | 91 | 94 | 100 | 95 |
| median2035 | 95 | 93 | 95 | 100 | 96 |

表10 基于基准年(2019)设计值预测的全省及区域各情景PM_{2.5}年均浓度

Table 10 Predicted annual PM_{2.5} concentration based on 2019 design values under different scenarios in Sichuan Province and sub-regions

| 情景 | PM _{2.5} 年均浓度预测值/(μg·m ⁻³) | | | | |
|------------|---|----|-----|----|----|
| | 成都平原 | 川南 | 川东北 | 三州 | 全省 |
| nocontrol | 36 | 40 | 34 | 18 | 32 |
| medianX | 39 | 43 | 36 | 20 | 35 |
| medianY | 32 | 37 | 33 | 17 | 30 |
| medianZ | 33 | 38 | 33 | 17 | 30 |
| median-3 | 32 | 37 | 33 | 17 | 30 |
| median-2 | 35 | 39 | 34 | 18 | 31 |
| median-1 | 34 | 39 | 34 | 18 | 31 |
| median0 | 33 | 38 | 33 | 17 | 30 |
| median+1 | 32 | 36 | 33 | 17 | 29 |
| median2030 | 30 | 35 | 32 | 16 | 28 |
| median2035 | 28 | 33 | 31 | 15 | 27 |

州退出不达标城市行列，PM_{2.5}浓度同比现状情景分别下降10%，13%，8%和5%；其他城市稳定达标。值得注意的是，即使在加严控制情景下，成都、宜宾、自贡、达州和南充的PM_{2.5}仍有所超标，尤其是川南地区，PM_{2.5}整体上浓度较高，需要重点关注。

针对臭氧，从全省范围看，城市达标压力较小，仅成都市在无控制情景下臭氧全年日最大8小时平均值第90百分位数超标2%左右(表11和附录14)。

表11 基于基准年(2019)设计值预测的全省及区域各情景臭氧全年日最大8小时平均值第90百分位数

Table 11 The predicted 90th percentile of daily maximum 8-hour average ozone concentration that based on 2019 design values under different scenarios in Sichuan Province and sub-region

| 情景 | 臭氧浓度预测值/(μg·m ⁻³) | | | | |
|------------|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | 成都平原 | 川南 | 川东北 | 三州 | 全省 |
| nocontrol | 147 | 149 | 124 | 120 | 135 |
| medianX | 134 | 139 | 119 | 117 | 127 |
| medianY | 137 | 141 | 120 | 118 | 129 |
| medianZ | 135 | 139 | 119 | 117 | 128 |
| median-3 | 140 | 144 | 121 | 119 | 131 |
| median-2 | 139 | 143 | 121 | 118 | 130 |
| median-1 | 136 | 141 | 120 | 118 | 129 |
| median0 | 134 | 139 | 119 | 117 | 127 |
| median+1 | 131 | 136 | 117 | 117 | 125 |
| median2030 | 129 | 134 | 116 | 116 | 124 |
| median2035 | 123 | 129 | 113 | 115 | 120 |

对成德眉资四市的区县达标情况进行分析,其中成都市金牛区由于观测数据的缺失不纳入分析。四市的各区县及城市所有区县平均的优良天数比例结果(附录 15)显示,成都市各区县整体优良天数率在大部分情景下相对较低,普遍低于 90%,仅远期预测情景(median2035)的平均区县平均优良天数率大于 90%;成都主城区和近郊区的优良天数率普遍较低,其中成华区、温江区、新都区和新津区在大部分控制情景下优良天数率低于 80%,是空气质量较差的区。德阳、眉山和资阳整体污染状况较好,各情景的优良天数率普遍在 80%~95%之间,部分区县(如德阳市的什邡市、绵竹市、眉山市的仁寿县以及资阳市的安岳县)相对于各市其他区县空气质量较差,但三市整体在大部分控制情景下优良天数率仍在 90%左右。

针对 $PM_{2.5}$ 来看(附录 16),成都市各区县 $PM_{2.5}$ 达标($\leq 35 \mu g/m^3$)任务艰巨,眉山和德阳 $PM_{2.5}$ 达标有压力,资阳 $PM_{2.5}$ 达标压力较小。成都市下辖的区县在多数情景下 $PM_{2.5}$ 年均浓度超标,尤其是成都市主城区及紧邻主城区的近郊区, $PM_{2.5}$ 普遍不达标,其中,武侯区、成华区、锦江区、青羊区、温江区、青白江区、双流区、郫都区、新都区、新津区、彭州市和崇州市是 $PM_{2.5}$ 污染较严重的区县,在各模拟情景中臭氧浓度基本上都不达标。德阳市各区县在不同情景下总体 $PM_{2.5}$ 污染情况一般,全市区县各情景平均的 $PM_{2.5}$ 年均浓度在部分情景下超标,其中什邡市、绵竹市和罗江区 $PM_{2.5}$ 污染情况稍重,在多数情景下浓度都稍超标。眉山市全市区县各情景的平均 $PM_{2.5}$ 年均浓度在基础情景(basecase)、无控制情景(nocontrol)、宽松控制情景(median-2、median-3)下稍超标,其中彭山区、仁寿县和丹棱县 $PM_{2.5}$ 污染情况比其他区县略重。资阳市各区县在不同情景下总体 $PM_{2.5}$ 污染情况较轻,全市区县各情景的平均 $PM_{2.5}$ 年均浓度仅在无控制情景下稍超标,其中安岳县在全部情景下 $PM_{2.5}$ 年均浓度有所超标,污染情况稍严重。

针对臭氧(附录 17),成都市各区县臭氧污染情况相对严峻,德阳、眉山和资阳臭氧达标压力较小。成都市下辖的区县在多数情景下臭氧达标的压力都较大,尤其是成都市主城区及紧邻主城区的近郊区,部分区县臭氧不达标(超过 $160 \mu g/m^3$);其中,武侯区、成华区、郫都区、新都区和新津区是臭氧污染较严重的区县,在各模拟情景中臭氧浓度基本

上都不达标。德阳市、眉山市和资阳市的各区县在不同情景下总体臭氧污染情况较轻,全市区县各情景平均的全年臭氧日最大 8 小时平均值第 90 百分位数全部达标,其中德阳市罗江区和资阳市雁江区相对其他区县臭氧污染情况稍重。

上述结果表明,按市州与按区县的达标分析结果之间有一定的差异,两者的差异来源于市州达标分析是按国控站点进行,区县达标分析是按省控站点进行,区县站点的覆盖率在空间上分布更均匀。例如,市州达标分析结果显示,眉山市仅在无控制情景下 $PM_{2.5}$ 有超标风险,资阳市在所有的情景下 $PM_{2.5}$ 都达标;但区县达标分析结果显示,眉山市区县的 $PM_{2.5}$ 在无控制情景和宽松控制情景下都有可能超标,资阳市区县 $PM_{2.5}$ 在无控制情景下可能超标,眉山的仁寿县和资阳的安岳县 $PM_{2.5}$ 超标情况都较为严重,在多数控制情景下都可能超标。类似的情况在臭氧分析结果中也出现,市州达标分析结果显示,成都市仅无控制情景下可能出现臭氧不达标情况。尽管市州达标分析结果显示成都市仅无控制情景下臭氧不达标,但在区县层面,武侯区、成华区、郫都区、新都区和新津区臭氧污染较严重,在各模拟情景中臭氧浓度基本上都不达标。由于国控站点的设置集中在主城区,因此以国控站点观测值为基础的市州达标分析可能会忽略邻近主城区的郊区污染,区县达标分析与市州达标分析的差异验证了这一点。

3 结论

本文提出一种新的空气质量达标规划情景预测方法,以四川省“十四五”规划为例,针对移动源和工业源减排,设计 11 个虚拟控制情景及现状情景,模拟评估各情景下空气质量相对基准情景的改善效果,得到如下结论。

1) “十四五”期间,各情景下预测的四川省 $PM_{2.5}$ 和臭氧浓度都持续下降,优良天数比率持续提高,空气质量进一步改善。

2) 部分区域的污染问题仍需重点关注。各情景预测结果及达标分析结果均显示,川南地区和成都平原地区的 $PM_{2.5}$ 和臭氧污染相对突出,需要加强二者的协同控制,因地制宜地制定不同区域和城市的控制方案。

3) 市州达标分析与重点城市区县达标分析结果有一定的差异,以国控站点观测为基础的市州达

标分析可能会忽略邻近主城区的郊区污染。

需要注意的是,本文仅针对四川省设计各控制情景下的减排比例,没有考虑周边省市的减排,例如重庆市的排放变化对川南地区有显著影响。另外,情景模拟采用2019年的气象条件,2019年的污染气象条件在2016—2020年中是最接近5年平均的污染气象状况的。因此,“十四五”规划期间,在周边省市同步采取减排措施且气象条件不差于2019年的前提下,四川省空气质量将好于上述情景预测结果。

参考文献

- [1] 国务院. 大气污染防治行动计划. 北京: 人民出版社, 2013
- [2] 国务院. 国务院关于印发打赢蓝天保卫战三年行动计划的通知[EB/OL]. (2018-06-27) [2021-03-23]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2018-07/03/content_5303158.htm
- [3] 中华人民共和国环境保护部. 2013 中国环境状况公报[EB/OL]. (2014-05-27) [2021-03-21]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/201605/P020160526564151497131.pdf>
- [4] 中华人民共和国环境保护部. 2020 中国环境状况公报[EB/OL]. (2020-06-02) [2021-03-21]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202006/P020200602509464172096.pdf>
- [5] 中华人民共和国环境保护部. 2018 中国环境状况公报[EB/OL]. (2019-05-29) [2021-03-21]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/201905/P020190619587632630618.pdf>
- [6] 中华人民共和国环境保护部. 2019 中国环境状况公报[EB/OL]. (2020-06-02) [2021-03-21]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202006/P020200602509464172096.pdf>
- [7] 亚洲清洁空气中心. 大气中国 2020: 中国大气污染防治进程[EB/OL]. (2020-09-28) [2022-04-07]. <http://allaboutair.cn/uploads/soft/211011/1-211011213J5.pdf>
- [8] 张倩倩, 张兴赢. 基于卫星和地面观测的 2013 年以来我国臭氧时空分布及变化特征. 环境科学, 2019, 40(3): 1132-1142
- [9] 孟晓艳, 宫正宇, 张霞, 等. 全国及重点区域臭氧污染现状. 中国环境监测, 2017, 33(4): 17-25
- [10] 雷宇, 严刚. 关于“十四五”大气环境管理重点的思考. 中国环境管理, 2020, 12(4): 35-39
- [11] 中华人民共和国生态环境部. 中华人民共和国大气污染防治法(1987)[EB/OL]. (2018-11-13) [2022-04-07]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/fl/201811/t20181113_673567.shtml
- [12] 鱼智霞, 曹国良, 安文辉, 等. 中国区域 2020 和 2030 年的 SO₂ 和 NO_x 排放总量情景预测. 环境工程学报, 2017, 11(4): 2355-2362
- [13] 安文辉, 曹国良, 蒙小波, 等. 情景分析法预测西安市大气污染物排放总量. 环境工程, 2016, 34(8): 99-103
- [14] Sillman S. The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments. Atmospheric Environment, 1999, 33(12): 1821-1845
- [15] Hidy G M. Ozone process insights from field experiments — part I: overview. Atmospheric Environment, 2000, 34(12): 2001-2022
- [16] 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 基于全国城市 PM_{2.5} 达标约束的大气环境容量模拟. 中国环境科学, 2014, 34(10): 2490-2496
- [17] 谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 等. 基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟. 环境科学, 2019, 40(7): 2967-2976
- [18] Tong D, Geng G, Jiang K, et al. Energy and emission pathways towards PM_{2.5} air quality attainment in the Beijing-Tianjin-Hebei region by 2030. Science of The Total Environment, 2019, 692: 361-370
- [19] Pielke R A, Uliasz M. Use of meteorological models as input to regional and mesoscale air quality models — limitations and strengths. Atmospheric Environment, 1998, 32(8): 1455-1466
- [20] Mcnider R T, Pour-Biazar A. Meteorological modeling relevant to mesoscale and regional air quality applications: a review. Journal of the Air & Waste Management Association, 2020, 70(1): 2-43
- [21] Zhao Y, Nielsen C P, Lei Y, et al. Quantifying the uncertainties of a bottom-up emission inventory of anthropogenic atmospheric pollutants in China. Atmos Chem Phys, 2011, 11(5): 2295-2308
- [22] Li M, Liu H, Geng G, et al. Anthropogenic emission inventories in China: a review. National Science Review, 2017, 4(6): 834-866
- [23] Appel K W, Bash J O, Fahey K M, et al. The community multiscale air quality (CMAQ) model versions 5.3 and 5.3.1: system updates and evaluation. Geosci Model Dev, 2021, 14: 2867-2897
- [24] Cohan D S, Chen R. Modeled and observed fine

- particulate matter reductions from state attainment demonstrations. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2014, 64(9): 995–1002
- [25] USEP. Modeling guidance for demonstrating air quality goals for ozone, PM_{2.5}, and regional haze [R/OL]. (2018–11) [2022–04–07]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100W5V2.PDF?Dockey=P100W5V2.PDF>
- [26] Xiao Q, Zheng Y, Geng G, et al. Separating emission and meteorological contribution to PM_{2.5} trends over East China during 2000–2018. *Atmos Chem Phys*, 2021, 21(12): 9475–9496
- [27] Chen L, Zhu J, Liao H, et al. Meteorological influences on PM_{2.5} and O₃ trends and associated health burden since China's clean air actions. *Science of the Total Environment*, 2020, 744: 140837
- [28] Burrows W R, Benjamin M, Beauchamp S, et al. CART decision-tree statistical analysis and prediction of summer season maximum surface ozone for the Vancouver, Montreal, and Atlantic regions of Canada. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1995, 34(8): 1848–1862
- [29] Vizuete W, Biton L, Jeffries H E, et al. Evaluation of relative response factor methodology for demonstrating attainment of ozone in Houston, Texas. *J Air Waste Manag Assoc*, 2010, 60(7): 838–848
- [30] Morris R E, Koo B, Guenther A, et al. Model sensitivity evaluation for organic carbon using two multipollutant air quality models that simulate regional haze in the southeastern United States. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(26): 4960–4972
- [31] Byun D, Schere K L. Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system. *Applied Mechanics Reviews*, 2006, 59(2): 51–77
- [32] Hutzell W, Luecken D, Appel K, et al. Interpreting predictions from the SAPRC07 mechanism based on regional and continental simulations. *Atmospheric Environment*, 2012, 46: 417–429
- [33] Pye H O, Pouliot G A. Modeling the role of alkanes, polycyclic aromatic hydrocarbons, and their oligomers in secondary organic aerosol formation. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(11): 6041–6047
- [34] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Technical note-475+STR, 2008: doi:10.5065/D68S4MVH
- [35] 杜云松, 黄冉, 王馨陆, 等. 利用简化空气质量模型快速构建臭氧生成等浓度曲线及其应用. *北京大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(2): 311–321
- [36] 徐晨曦, 陈军辉, 李媛, 等. 四川省基于第二次污染源普查数据的人为源大气污染源排放清单及特征. *环境科学*, 2020, 41(10): 4482–4494
- [37] 四川省人民政府. 四川省“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要[EB/OL]. (2021–02–02)[2021–03–23]. <http://www.sc.gov.cn/10462/10464/10797/2021/3/16/2c8e39641f08499487a9e958384f2278.shtml>
- [38] Emery C, Liu Z, Russell A G, et al. Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2017, 67(5): 582–598
- [39] Wang Y, Yuan Y, Wang Q, et al. Changes in air quality related to the control of coronavirus in China: implications for traffic and industrial emissions. *Science of the Total Environment*, 2020, 731: 139133
- [40] Chen Y, Zhang S, Peng C, et al. Impact of the COVID-19 pandemic and control measures on air quality and aerosol light absorption in Southwestern China. *Science of The Total Environment*, 2020, 749: 141419

附录

附录 1 四川省各城市 2016—2020 年气象条件相对 5 年平均气象条件的变化对 PM_{2.5} 年均浓度的贡献比例(%)

Appendix 1 2016–2020 contributions to PM_{2.5} annual concentration due to the variation of annual meteorological conditions relative to five-year averaged meteorological conditions in cities of Sichuan Province (%)

| 城市 | 2016 年 | 2017 年 | 2018 年 | 2019 年 | 2020 年 |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|
| 成都 | 7.5 | 0.8 | -4.7 | -0.4 | -4.2 |
| 德阳 | 8.7 | -1.5 | -3.1 | -0.6 | -4.6 |
| 乐山 | 7.1 | 0.2 | -7.7 | 1.4 | -2.2 |
| 眉山 | 6.7 | 1.0 | -7.8 | 1.3 | -2.4 |
| 绵阳 | 8.2 | -3.3 | -1.6 | 0.3 | -4.7 |
| 遂宁 | 7.0 | 5.0 | -4.3 | -2.2 | -6.9 |
| 雅安 | 4.5 | -0.2 | -6.3 | 0.7 | 0.7 |
| 资阳 | 8.6 | 2.9 | -7.4 | -1.7 | -3.9 |
| 泸州 | 2.5 | 6.0 | -7.5 | 0.7 | -2.7 |
| 内江 | 7.2 | 3.6 | -8.1 | -0.7 | -3.4 |
| 宜宾 | 5.8 | 2.0 | -7.4 | 0.3 | -1.7 |
| 自贡 | 6.2 | 2.9 | -7.8 | -0.2 | -2.2 |
| 巴中 | 6.8 | 0.7 | 0.3 | 1.2 | -10.6 |
| 达州 | 5.8 | 1.6 | -0.8 | 1.0 | -8.8 |
| 广安 | 3.8 | 4.4 | -5.4 | 1.4 | -5.1 |
| 广元 | 5.4 | -0.4 | 0.6 | 1.1 | -7.5 |
| 南充 | 6.2 | 4.6 | -4.2 | -1.3 | -6.5 |
| 阿坝 | 0.0 | -11.1 | 4.8 | -5.3 | 9.1 |
| 甘孜 | 5.1 | 2.4 | 5.1 | -7.1 | -7.1 |
| 凉山 | 0.0 | 4.8 | 0.0 | -9.3 | 3.3 |
| 攀枝花 | -3.6 | 4.0 | 5.2 | -3.0 | -3.3 |
| 全省 | 5.7 | 2.1 | -4.1 | 0.0 | -3.7 |



附录 2 2019 年四川省地面气象观测站点平均的湿度、气温、风向、风速模拟值和观测值时间序列对比

Appendix 2 Comparison of daily surface specific humidity, air temperature, wind direction, and wind speed time series in 2019 between simulations and observations averaged at weather stations in Sichuan Province

附录3 2019年分月及全年气象要素模拟效果统计指标

Appendix 3 Annual and monthly metrological model performance statistics against surface observations at weather stations in Sichuan Province in 2019

| 月份 | Hmd Bias | Hmd GE | TMP Bias | TMP RMSE | WD Bias | WD GE | WS Bias | WS RMSE |
|----|----------|--------|----------|----------|---------|-------|---------|---------|
| 1 | 0.2 | 0.47 | -0.89 | 2.96 | 5.83 | 51.81 | 0.85 | 1.96 |
| 2 | 0.26 | 0.54 | -1 | 3.29 | 6.73 | 49.19 | 1 | 2.19 |
| 3 | 0.3 | 0.6 | -0.95 | 3.32 | 7.81 | 52.68 | 0.82 | 2.04 |
| 4 | 0.32 | 0.86 | -0.86 | 3.24 | 8.07 | 53.82 | 0.79 | 2.07 |
| 5 | 0.49 | 0.9 | -0.6 | 2.68 | 7.99 | 53.26 | 0.7 | 1.89 |
| 6 | 0.18 | 1.26 | -0.7 | 3.05 | 8.04 | 59.4 | 0.79 | 1.96 |
| 7 | 0.28 | 1.13 | -0.63 | 2.36 | 7.02 | 55.76 | 0.51 | 1.65 |
| 8 | 0.35 | 1.24 | -1.04 | 2.56 | 6.68 | 55.91 | 0.37 | 1.51 |
| 9 | 0.16 | 0.92 | -0.88 | 2.36 | 6.01 | 53.6 | 0.53 | 1.59 |
| 10 | 0.18 | 0.75 | -0.78 | 2.39 | 7.79 | 52.23 | 0.63 | 1.63 |
| 11 | 0.19 | 0.6 | -0.85 | 2.48 | 6.87 | 52.77 | 0.67 | 1.72 |
| 12 | 0.02 | 0.45 | -0.93 | 2.77 | 5.44 | 48.17 | 0.72 | 1.79 |
| 年均 | 0.24 | 0.81 | -0.84 | 2.79 | 7.02 | 53.22 | 0.7 | 1.83 |

说明: 表中平均偏差(Bias)、平均绝对误差(GE)、均方根误差(RMSE)等统计指标计算公式分别为 $Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)$, $GE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i|$, $RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}$, 其中, N 为样本数, P 为模拟值, O 为观测值。

附录 4 四川省各城市 2019 年 PM_{2.5} 全年平均浓度(μg/m³)Appendix 4 Annual PM_{2.5} concentration in cities of Sichuan Province in 2019 (μg/m³)

| 区域 | 城市 | 观测 | 模拟 | 比例/% |
|-------|-----|-------|-------|------|
| 成都平原 | 成都 | 40.03 | 37.68 | -6 |
| | 德阳 | 40.34 | 36.46 | -10 |
| | 乐山 | 41.92 | 36.11 | -14 |
| | 绵阳 | 37.44 | 35.37 | -6 |
| | 眉山 | 34.75 | 33.41 | -4 |
| | 遂宁 | 31.64 | 30.63 | -3 |
| | 雅安 | 33.98 | 27.64 | -19 |
| | 资阳 | 34.48 | 33.54 | -3 |
| | 平均 | 36.82 | 33.86 | -8 |
| 川南地区 | 泸州 | 40.84 | 38.76 | -5 |
| | 内江 | 35.34 | 36.29 | 3 |
| | 宜宾 | 47.79 | 37.6 | -21 |
| | 自贡 | 47.85 | 43.38 | -9 |
| | 平均 | 42.96 | 39.01 | -9 |
| 川东北地区 | 巴中 | 30.48 | 23.29 | -24 |
| | 达州 | 45.43 | 31.44 | -31 |
| | 广安 | 32.52 | 31.87 | -2 |
| | 广元 | 27.45 | 21.7 | -21 |
| | 南充 | 42.12 | 30.34 | -28 |
| | 平均 | 35.60 | 27.73 | -22 |
| 三州 | 马尔康 | 15.49 | 2.82 | -82 |
| | 康定 | 11.24 | 3.11 | -72 |
| | 攀枝花 | 29.6 | 35.93 | 21 |
| | 西昌 | 19.68 | 6.66 | -66 |
| | 平均 | 19.00 | 12.13 | -36 |

附录5 四川省各城市 2019 年 PM_{2.5} 模拟评估结果Appendix 5 Model performance statistics of daily PM_{2.5} concentrations in cities of Sichuan Province in 2019

| 城市 | 平均百分比偏差 (FB) | 平均百分比误差 (FE) | 平均标准化偏差 (MNB) | 平均标准化误差 (MNE) | 标准化平均偏差 (NMB) | 标准化平均误差 (NME) | 相关性 (R) |
|-------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------|
| 成都 | -0.2 | 0.46 | -0.05 | 0.42 | -0.09 | 0.38 | 0.74 |
| 德阳 | -0.16 | 0.44 | -0.01 | 0.44 | -0.08 | 0.38 | 0.74 |
| 乐山 | -0.24 | 0.47 | -0.1 | 0.43 | -0.15 | 0.39 | 0.7 |
| 绵阳 | -0.14 | 0.46 | 0.02 | 0.46 | -0.04 | 0.42 | 0.7 |
| 眉山 | -0.21 | 0.5 | -0.05 | 0.46 | -0.03 | 0.42 | 0.75 |
| 遂宁 | -0.19 | 0.51 | -0.02 | 0.48 | -0.04 | 0.43 | 0.69 |
| 雅安 | -0.3 | 0.5 | -0.15 | 0.43 | -0.18 | 0.39 | 0.78 |
| 资阳 | -0.12 | 0.46 | 0.03 | 0.45 | -0.02 | 0.39 | 0.74 |
| 成都平原 | -0.20 | 0.48 | -0.04 | 0.45 | -0.08 | 0.40 | 0.73 |
| 泸州 | -0.24 | 0.54 | -0.06 | 0.5 | -0.05 | 0.48 | 0.68 |
| 内江 | -0.08 | 0.47 | 0.1 | 0.5 | 0.03 | 0.44 | 0.71 |
| 宜宾 | -0.31 | 0.51 | -0.16 | 0.43 | -0.22 | 0.42 | 0.67 |
| 自贡 | -0.18 | 0.44 | -0.04 | 0.42 | -0.08 | 0.38 | 0.73 |
| 川南地区 | -0.20 | 0.49 | -0.04 | 0.46 | -0.08 | 0.43 | 0.70 |
| 巴中 | -0.33 | 0.5 | -0.18 | 0.42 | -0.23 | 0.39 | 0.71 |
| 达州 | -0.37 | 0.51 | -0.23 | 0.41 | -0.31 | 0.41 | 0.69 |
| 广安 | -0.1 | 0.49 | 0.11 | 0.53 | -0.01 | 0.42 | 0.71 |
| 广元 | -0.25 | 0.4 | -0.16 | 0.32 | -0.2 | 0.34 | 0.75 |
| 南充 | -0.47 | 0.59 | -0.28 | 0.45 | -0.28 | 0.42 | 0.7 |
| 川东北地区 | -0.30 | 0.50 | -0.15 | 0.43 | -0.21 | 0.40 | 0.71 |
| 马尔康 | -1.38 | 1.38 | -0.81 | 0.81 | -0.81 | 0.81 | 0.36 |
| 康定 | -1.23 | 1.25 | -0.72 | 0.74 | -0.73 | 0.74 | 0.3 |
| 攀枝花 | 0.04 | 0.47 | 0.24 | 0.56 | 0.19 | 0.54 | 0.51 |
| 西昌 | -0.99 | 1 | -0.64 | 0.65 | -0.67 | 0.67 | 0.48 |
| 三州 | -0.89 | 1.03 | -0.48 | 0.69 | -0.51 | 0.69 | 0.41 |

附录6 四川省各城市 2019 年全年 O₃ 日最大 8 小时平均值第 90 百分位数(μg/m³)

Appendix 6 The 90th percentile of daily maximum 8-hour average ozone concentration in cities of Sichuan

Province in 2019(μg/m³)

| 区域 | 城市 | 观测 | 模拟 | 比例/% |
|-------|-----|-----|-----|------|
| 成都平原 | 成都 | 160 | 158 | -1 |
| | 德阳 | 147 | 149 | 1 |
| | 乐山 | 132 | 151 | 14 |
| | 绵阳 | 152 | 157 | 3 |
| | 眉山 | 137 | 147 | 7 |
| | 遂宁 | 135 | 144 | 7 |
| | 雅安 | 130 | 143 | 10 |
| | 资阳 | 147 | 145 | -1 |
| | 平均 | 143 | 149 | 4 |
| 川南地区 | 泸州 | 147 | 147 | 0 |
| | 内江 | 140 | 153 | 9 |
| | 宜宾 | 146 | 146 | 0 |
| | 自贡 | 155 | 153 | -1 |
| | 平均 | 147 | 150 | 2 |
| 川东北地区 | 巴中 | 110 | 126 | 15 |
| | 达州 | 126 | 131 | 4 |
| | 广安 | 136 | 141 | 4 |
| | 广元 | 101 | 120 | 19 |
| | 南充 | 129 | 140 | 9 |
| | 平均 | 120 | 132 | 10 |
| 三州 | 马尔康 | 109 | 83 | -24 |
| | 康定 | 94 | 87 | -7 |
| | 攀枝花 | 145 | 89 | -39 |
| | 西昌 | 140 | 110 | -21 |
| | | 平均 | 122 | 92 |

附录 7 四川省各城市 2019 年臭氧季 O₃ 日最大 8 小时平均浓度模拟评估结果

Appendix 7 Model performance statistics of daily maximum 8-hour average ozone concentrations in cities of Sichuan Province in 2019

| ozone season | | | | | | | |
|--------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------|
| 城市 | 平均百分比偏差 (FB) | 平均百分比误差 (FE) | 平均标准化偏差 (MNB) | 平均标准化误差 (MNE) | 标准化平均偏差 (NMB) | 标准化平均误差 (NME) | 相关性 (R) |
| 成都 | 0.09 | 0.27 | 0.18 | 0.34 | 0.02 | 0.26 | 0.75 |
| 德阳 | 0.15 | 0.26 | 0.23 | 0.33 | 0.09 | 0.25 | 0.75 |
| 乐山 | 0.16 | 0.25 | 0.26 | 0.34 | 0.12 | 0.24 | 0.74 |
| 绵阳 | 0.16 | 0.26 | 0.25 | 0.34 | 0.12 | 0.25 | 0.71 |
| 眉山 | 0.05 | 0.23 | 0.11 | 0.27 | 0 | 0.22 | 0.74 |
| 遂宁 | 0.18 | 0.26 | 0.26 | 0.34 | 0.13 | 0.24 | 0.79 |
| 雅安 | 0.17 | 0.26 | 0.25 | 0.34 | 0.14 | 0.26 | 0.66 |
| 资阳 | 0.06 | 0.18 | 0.09 | 0.2 | 0.03 | 0.17 | 0.82 |
| 成都平原 | 0.13 | 0.25 | 0.20 | 0.31 | 0.08 | 0.24 | 0.75 |
| 泸州 | 0.14 | 0.28 | 0.25 | 0.38 | 0.07 | 0.27 | 0.72 |
| 内江 | 0.16 | 0.25 | 0.22 | 0.3 | 0.12 | 0.24 | 0.79 |
| 宜宾 | 0.09 | 0.24 | 0.15 | 0.28 | 0.04 | 0.23 | 0.74 |
| 自贡 | 0.08 | 0.23 | 0.13 | 0.26 | 0.03 | 0.22 | 0.74 |
| 川南地区 | 0.12 | 0.25 | 0.19 | 0.31 | 0.07 | 0.24 | 0.75 |
| 巴中 | 0.31 | 0.35 | 0.6 | 0.64 | 0.27 | 0.32 | 0.75 |
| 达州 | 0.22 | 0.32 | 0.37 | 0.46 | 0.17 | 0.31 | 0.62 |
| 广安 | 0.14 | 0.26 | 0.23 | 0.34 | 0.08 | 0.24 | 0.76 |
| 广元 | 0.34 | 0.38 | 0.67 | 0.7 | 0.32 | 0.38 | 0.56 |
| 南充 | 0.2 | 0.26 | 0.29 | 0.34 | 0.17 | 0.25 | 0.76 |
| 川东北地区 | 0.24 | 0.31 | 0.43 | 0.50 | 0.20 | 0.30 | 0.69 |
| 马尔康 | -0.13 | 0.25 | -0.08 | 0.24 | -0.16 | 0.24 | 0.57 |
| 康定 | 0.02 | 0.28 | 0.19 | 0.43 | -0.02 | 0.28 | 0.18 |
| 攀枝花 | -0.13 | 0.28 | -0.07 | 0.28 | -0.17 | 0.26 | 0.66 |
| 西昌 | -0.23 | 0.31 | -0.16 | 0.28 | -0.25 | 0.3 | 0.57 |
| 三州 | -0.12 | 0.28 | -0.03 | 0.31 | -0.15 | 0.27 | 0.50 |

附录 8 基于 2019 观测值、2019 设计值的 2020 现状情景的全省优良天数比例与 2020 年实际优良天数比例比较

Appendix 8 Comparison of the predicted proportion of days with good or excellent air quality between current scenario that based on 2019 observations and 2019 design values respectively with 2020 observations in cities of Sichuan Province

| 区域 | 城市 | 基于 2019 观测值 | 基于 2019 设计值 | 2020 观测值 |
|------|-----|-------------|-------------|----------|
| 成都平原 | 成都 | 79 | 78 | 77 |
| | 德阳 | 85 | 83 | 81 |
| | 乐山 | 84 | 87 | 87 |
| | 眉山 | 87 | 85 | 87 |
| | 绵阳 | 90 | 87 | 89 |
| | 遂宁 | 94 | 94 | 95 |
| | 雅安 | 91 | 94 | 96 |
| | 资阳 | 87 | 88 | 89 |
| | 平均 | 87 | 87 | 88 |
| 川南 | 泸州 | 84 | 87 | 89 |
| | 内江 | 88 | 89 | 90 |
| | 宜宾 | 81 | 82 | 84 |
| | 自贡 | 81 | 78 | 81 |
| | 平均 | 83 | 84 | 86 |
| 川东北 | 巴中 | 95 | 96 | 97 |
| | 达州 | 83 | 86 | 89 |
| | 广安 | 91 | 90 | 91 |
| | 广元 | 98 | 97 | 97 |
| | 南充 | 89 | 90 | 94 |
| | 平均 | 91 | 92 | 94 |
| 三州 | 阿坝 | 98 | 99 | 99 |
| | 甘孜 | 99 | 100 | 100 |
| | 凉山 | 98 | 99 | 98 |
| | 攀枝花 | 98 | 99 | 99 |
| | 平均 | 98 | 99 | 99 |
| 全省 | | 90 | 91 | 92 |

附录 9 基于 2019 观测值、2019 设计值的 2020 现状情景的全省城市 PM_{2.5} 年均浓度与 2020 年 PM_{2.5} 年均浓度比较(μg/m³)

Appendix 9 Comparison of predicted annual PM_{2.5} concentration between current scenario that based on 2019 observations and 2019 design values respectively with 2020 observations in cities of Sichuan Province (μg/m³)

| 区域 | 城市 | 基于 2019 观测值 | 基于 2019 设计值 | 2020 观测值 |
|------|-----|-------------|-------------|----------|
| 成都平原 | 成都 | 42 | 43 | 41 |
| | 德阳 | 39 | 39 | 37 |
| | 乐山 | 41 | 39 | 35 |
| | 眉山 | 35 | 34 | 32 |
| | 绵阳 | 37 | 37 | 34 |
| | 遂宁 | 31 | 30 | 29 |
| | 雅安 | 30 | 30 | 27 |
| | 资阳 | 34 | 32 | 30 |
| | 平均 | 36 | 36 | 33 |
| 川南 | 泸州 | 41 | 37 | 38 |
| | 内江 | 35 | 34 | 34 |
| | 宜宾 | 45 | 44 | 40 |
| | 自贡 | 44 | 45 | 43 |
| | 平均 | 41 | 40 | 39 |
| 川东北 | 巴中 | 32 | 30 | 28 |
| | 达州 | 45 | 42 | 39 |
| | 广安 | 33 | 34 | 32 |
| | 广元 | 27 | 26 | 25 |
| | 南充 | 42 | 40 | 37 |
| | 平均 | 36 | 34 | 32 |
| 三州 | 阿坝 | 16 | 14 | 16 |
| | 甘孜 | 11 | 11 | 9 |
| | 凉山 | 20 | 20 | 22 |
| | 攀枝花 | 28 | 28 | 30 |
| | 平均 | 19 | 18 | 19 |
| 全省 | | 33 | 32 | 31 |

附录 10 基于 2019 观测值、2019 设计值预测的 2020 现状情景的全省城市 O₃ 日最大 8 小时浓度的第 90 百分位数与 2020 年观测值的比较(μg/m³)

Appendix 10 Comparison of predicted 90th percentile of daily maximum 8-hour average ozone concentration between current scenario that based on 2019 observations and 2019 design values respectively with 2020 observations in cities of Sichuan Province(μg/m³)

| 区域 | 城市 | 基于 2019 观测值 | 基于 2019 设计值 | 2020 观测值 |
|------|-----|-------------|-------------|----------|
| 成都平原 | 成都 | 159 | 159 | 169 |
| | 德阳 | 146 | 148 | 159 |
| | 乐山 | 131 | 129 | 144 |
| | 眉山 | 150 | 153 | 156 |
| | 绵阳 | 136 | 141 | 151 |
| | 遂宁 | 135 | 134 | 132 |
| | 雅安 | 129 | 124 | 132 |
| | 资阳 | 146 | 145 | 148 |
| | 平均 | 141 | 142 | 149 |
| 川南 | 泸州 | 146 | 142 | 142 |
| | 内江 | 139 | 140 | 143 |
| | 宜宾 | 145 | 146 | 151 |
| | 自贡 | 154 | 154 | 152 |
| | 平均 | 146 | 145 | 147 |
| 川东北 | 巴中 | 110 | 111 | 118 |
| | 达州 | 125 | 122 | 112 |
| | 广安 | 136 | 135 | 138 |
| | 广元 | 101 | 113 | 122 |
| | 南充 | 128 | 127 | 114 |
| | 平均 | 120 | 121 | 121 |
| 三州 | 阿坝 | 109 | 109 | 107 |
| | 甘孜 | 94 | 104 | 102 |
| | 凉山 | 145 | 132 | 126 |
| | 攀枝花 | 139 | 132 | 128 |
| | 平均 | 122 | 119 | 116 |
| 全省 | | 132 | 132 | 133 |

附录 11 四川省各城市 PM_{2.5} 年均浓度: 2019 观测值与 2019 设计值对比(μg/m³)

Appendix 11 Comparison of the annual PM_{2.5} concentration in cities of Sichuan Province between 2019 observations and 2019 design values (μg/m³)

| 区域 | 城市 | 2019 观测值 | 2019 设计值 |
|------|-----|----------|----------|
| 成都平原 | 成都 | 43 | 44 |
| | 德阳 | 40 | 40 |
| | 乐山 | 42 | 40 |
| | 眉山 | 36 | 35 |
| | 绵阳 | 38 | 38 |
| | 遂宁 | 31 | 31 |
| | 雅安 | 31 | 31 |
| | 资阳 | 35 | 33 |
| | 平均 | 37 | 37 |
| 川南 | 泸州 | 41 | 38 |
| | 内江 | 35 | 35 |
| | 宜宾 | 47 | 45 |
| | 自贡 | 45 | 46 |
| | 平均 | 42 | 41 |
| 川东北 | 巴中 | 32 | 31 |
| | 达州 | 46 | 43 |
| | 广安 | 34 | 35 |
| | 广元 | 28 | 26 |
| | 南充 | 43 | 41 |
| 三州 | 阿坝 | 16 | 14 |
| | 甘孜 | 11 | 11 |
| | 凉山 | 20 | 20 |
| | 攀枝花 | 30 | 29 |
| | 平均 | 19 | 19 |
| 全省 | | 34 | 34 |

附录 12 基于基准年(2019)设计值的全省各市各情景优良天数比例(%)

Appendix 12 The predicted proportion of days with good or excellent air quality that based on 2019 design values under different scenarios in cities of Sichuan Province (%)

| 区域 | 城市 | nocontrol | medianX | medianY | medianZ | median-3 | median-2 | median-1 | median0 | median+1 | median 2030 | median 2035 |
|------|-----|-----------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|----------|-------------|-------------|
| 成都平原 | 成都 | 73 | 82 | 79 | 81 | 78 | 78 | 80 | 82 | 84 | 86 | 91 |
| | 德阳 | 79 | 86 | 85 | 86 | 85 | 85 | 85 | 86 | 88 | 90 | 93 |
| | 乐山 | 82 | 91 | 90 | 91 | 88 | 88 | 90 | 91 | 93 | 94 | 96 |
| | 眉山 | 82 | 92 | 90 | 92 | 87 | 88 | 90 | 92 | 92 | 94 | 97 |
| | 绵阳 | 83 | 90 | 89 | 90 | 88 | 88 | 89 | 90 | 91 | 93 | 95 |
| | 遂宁 | 92 | 95 | 95 | 95 | 94 | 95 | 95 | 96 | 96 | 96 | 96 |
| | 雅安 | 90 | 96 | 96 | 96 | 95 | 95 | 96 | 96 | 97 | 98 | 99 |
| | 资阳 | 85 | 91 | 91 | 91 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 93 | 96 |
| | 平均 | 83 | 90 | 89 | 90 | 88 | 88 | 90 | 90 | 92 | 93 | 95 |
| 川南 | 泸州 | 86 | 90 | 88 | 90 | 87 | 88 | 88 | 90 | 91 | 92 | 93 |
| | 内江 | 86 | 92 | 91 | 92 | 89 | 90 | 91 | 92 | 92 | 93 | 95 |
| | 宜宾 | 76 | 86 | 85 | 86 | 83 | 83 | 85 | 86 | 87 | 90 | 93 |
| | 自贡 | 73 | 82 | 81 | 82 | 79 | 80 | 81 | 82 | 84 | 87 | 90 |
| | | 平均 | 80 | 87 | 86 | 87 | 85 | 85 | 86 | 87 | 88 | 91 |
| 川东北 | 巴中 | 95 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 |
| | 达州 | 85 | 87 | 87 | 87 | 86 | 86 | 87 | 87 | 88 | 90 | 90 |
| | 广安 | 88 | 92 | 91 | 92 | 91 | 91 | 91 | 92 | 92 | 93 | 93 |
| | 广元 | 96 | 98 | 98 | 98 | 97 | 98 | 98 | 98 | 98 | 99 | 99 |
| | 南充 | 88 | 92 | 92 | 92 | 91 | 91 | 92 | 92 | 93 | 94 | 95 |
| | 平均 | 91 | 93 | 93 | 93 | 92 | 92 | 93 | 93 | 93 | 94 | 95 |
| 三州 | 阿坝 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 |
| | 甘孜 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | 凉山 | 98 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 100 |
| | 攀枝花 | 97 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 100 | 100 |
| | | 平均 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 100 |
| | 全省 | 88% | 92 | 92 | 92 | 91 | 91 | 92 | 92 | 93 | 95 | 96 |

附录 13 基于基准年(2019)设计值的各情景 PM_{2.5} 年均浓度(μg/m³)Appendix 13 The predicted annual PM_{2.5} concentration that based on 2019 design values under different scenarios in cities of Sichuan Province (μg/m³)

| 区域 | 城市 | nocontrol | medianX | medianY | medianZ | median-3 | median-2 | median-1 | median0 | median+1 | median 2030 | median 2035 |
|------|-----|-----------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|----------|-------------|-------------|
| 成都平原 | 成都 | 48 | 39 | 40 | 39 | 42 | 41 | 40 | 39 | 37 | 33 | 30 |
| | 德阳 | 42 | 35 | 36 | 35 | 38 | 37 | 36 | 35 | 33 | 31 | 29 |
| | 乐山 | 44 | 34 | 35 | 34 | 38 | 37 | 35 | 34 | 32 | 29 | 26 |
| | 眉山 | 38 | 29 | 31 | 29 | 33 | 32 | 31 | 29 | 28 | 26 | 23 |
| | 绵阳 | 41 | 34 | 35 | 34 | 37 | 36 | 35 | 34 | 33 | 30 | 28 |
| | 遂宁 | 32 | 28 | 29 | 28 | 30 | 29 | 29 | 28 | 28 | 27 | 26 |
| | 雅安 | 34 | 26 | 28 | 26 | 29 | 29 | 27 | 26 | 25 | 23 | 20 |
| | 资阳 | 35 | 29 | 30 | 29 | 31 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 25 |
| | 平均 | 39 | 32 | 33 | 32 | 35 | 34 | 33 | 32 | 30 | 28 | 26 |
| 川南 | 泸州 | 40 | 35 | 36 | 35 | 37 | 36 | 36 | 35 | 34 | 33 | 31 |
| | 内江 | 36 | 32 | 32 | 32 | 34 | 33 | 32 | 32 | 31 | 29 | 28 |
| | 宜宾 | 48 | 39 | 40 | 39 | 42 | 42 | 40 | 39 | 37 | 34 | 31 |
| | 自贡 | 49 | 41 | 42 | 41 | 44 | 43 | 42 | 41 | 39 | 36 | 34 |
| | | 平均 | 43 | 37 | 38 | 37 | 39 | 39 | 38 | 36 | 35 | 33 |
| 川东北 | 巴中 | 31 | 29 | 29 | 29 | 30 | 30 | 29 | 29 | 29 | 28 | 27 |
| | 达州 | 44 | 40 | 41 | 40 | 42 | 41 | 41 | 40 | 39 | 38 | 37 |
| | 广安 | 36 | 32 | 33 | 32 | 34 | 33 | 33 | 32 | 31 | 30 | 29 |
| | 广元 | 27 | 24 | 25 | 24 | 25 | 25 | 25 | 24 | 24 | 23 | 22 |
| | 南充 | 43 | 38 | 38 | 38 | 40 | 39 | 38 | 38 | 37 | 36 | 34 |
| | 平均 | 36 | 33 | 33 | 33 | 34 | 34 | 33 | 33 | 32 | 31 | 30 |
| 三州 | 阿坝 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 13 |
| | 甘孜 | 12 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 10 | 10 | 9 |
| | 凉山 | 22 | 18 | 18 | 18 | 19 | 19 | 18 | 18 | 17 | 15 | 14 |
| | 攀枝花 | 33 | 26 | 27 | 26 | 28 | 28 | 27 | 26 | 24 | 21 | 19 |
| | | 平均 | 20 | 17 | 17 | 17 | 18 | 18 | 17 | 17 | 16 | 15 |
| 全省 | | 35 | 30 | 30 | 30 | 31 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 25 |

附录 14 基于基准年设计值预测的各情景 O₃ 全年日最大 8 小时平均值第 90 百分位数(μg/m³)Appendix 14 The predicted 90th percentile of daily maximum 8-hour average ozone concentration that based on 2019 design values under different scenarios in cities of Sichuan Province(μg/m³)

| 区域 | 城市 | nocontrol | medianX | medianY | medianZ | median-3 | median-2 | median-1 | median0 | median+1 | median2030 | median2035 |
|------|-----|-----------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|----------|------------|------------|
| 成都平原 | 成都 | 163 | 155 | 158 | 157 | 159 | 159 | 157 | 155 | 151 | 148 | 137 |
| | 德阳 | 155 | 140 | 143 | 141 | 147 | 145 | 143 | 140 | 136 | 134 | 126 |
| | 乐山 | 135 | 120 | 123 | 120 | 127 | 126 | 123 | 120 | 117 | 115 | 108 |
| | 眉山 | 159 | 142 | 145 | 142 | 150 | 148 | 145 | 141 | 138 | 136 | 129 |
| | 绵阳 | 147 | 134 | 136 | 134 | 139 | 138 | 136 | 134 | 131 | 129 | 123 |
| | 遂宁 | 135 | 129 | 130 | 129 | 133 | 132 | 130 | 129 | 128 | 127 | 123 |
| | 雅安 | 129 | 116 | 118 | 116 | 122 | 120 | 118 | 116 | 113 | 111 | 104 |
| | 资阳 | 149 | 139 | 141 | 139 | 144 | 143 | 141 | 139 | 137 | 134 | 130 |
| | 平均 | 147 | 134 | 137 | 135 | 140 | 139 | 136 | 134 | 131 | 129 | 123 |
| 川南 | 泸州 | 145 | 137 | 140 | 138 | 141 | 140 | 139 | 137 | 136 | 135 | 133 |
| | 内江 | 144 | 133 | 135 | 133 | 139 | 138 | 135 | 133 | 131 | 130 | 126 |
| | 宜宾 | 150 | 140 | 141 | 140 | 144 | 143 | 141 | 139 | 136 | 134 | 125 |
| | 自贡 | 159 | 146 | 149 | 146 | 152 | 151 | 149 | 145 | 142 | 139 | 132 |
| | | 平均 | 149 | 139 | 141 | 139 | 144 | 143 | 141 | 139 | 136 | 134 |
| 川东北 | 巴中 | 113 | 109 | 110 | 109 | 111 | 111 | 110 | 109 | 107 | 106 | 104 |
| | 达州 | 125 | 119 | 121 | 120 | 122 | 121 | 121 | 119 | 118 | 118 | 115 |
| | 广安 | 137 | 131 | 132 | 131 | 134 | 133 | 132 | 131 | 130 | 128 | 124 |
| | 广元 | 114 | 112 | 112 | 112 | 113 | 113 | 112 | 112 | 111 | 110 | 108 |
| | 南充 | 129 | 123 | 125 | 123 | 126 | 126 | 124 | 123 | 120 | 119 | 116 |
| | 平均 | 124 | 119 | 120 | 119 | 121 | 121 | 120 | 119 | 117 | 116 | 113 |
| 三州 | 阿坝 | 110 | 107 | 107 | 107 | 108 | 108 | 107 | 107 | 107 | 106 | 105 |
| | 甘孜 | 105 | 101 | 102 | 101 | 103 | 103 | 102 | 101 | 100 | 99 | 97 |
| | 凉山 | 132 | 131 | 131 | 131 | 132 | 132 | 131 | 131 | 131 | 130 | 129 |
| | 攀枝花 | 133 | 131 | 131 | 131 | 132 | 131 | 131 | 130 | 130 | 129 | 127 |
| | | 平均 | 120 | 117 | 118 | 117 | 119 | 118 | 118 | 117 | 117 | 116 |
| 全省 | | 135 | 127 | 129 | 128 | 131 | 130 | 129 | 127 | 125 | 124 | 120 |

附录 15 基于基准年设计值(2019)的各情景下成德眉资四市各区县及城市所有区县平均的优良天数比率
 Appendix 15 The predicted proportion of days with good or excellent air quality that based on 2019 design values under different scenarios in sub-districts of Chengdu, Deyang, Meishan, and Ziyang

| 城市 | 区县 | nocontrol | medianX | medianY | medianZ | median-3 | median-2 | median-1 | median0 | median+1 | median 2030 | median 2035 |
|------|------|-----------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|----------|-------------|-------------|
| 成都 | 武侯区 | 68 | 81 | 79 | 80 | 77 | 78 | 80 | 81 | 83 | 85 | 90 |
| | 成华区 | 69 | 79 | 77 | 78 | 75 | 75 | 78 | 80 | 82 | 83 | 86 |
| | 锦江区 | 77 | 86 | 85 | 86 | 83 | 83 | 85 | 86 | 87 | 90 | 93 |
| | 龙泉驿区 | 84 | 92 | 91 | 92 | 88 | 89 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 |
| | 青羊区 | 74 | 81 | 80 | 81 | 78 | 79 | 80 | 81 | 83 | 85 | 89 |
| | 温江区 | 64 | 77 | 75 | 77 | 72 | 72 | 75 | 77 | 81 | 83 | 88 |
| | 青白江区 | 70 | 81 | 80 | 81 | 78 | 78 | 80 | 81 | 83 | 85 | 89 |
| | 双流区 | 67 | 81 | 79 | 80 | 75 | 76 | 79 | 81 | 82 | 85 | 90 |
| | 郫都区 | 70 | 82 | 79 | 81 | 77 | 78 | 79 | 82 | 83 | 86 | 92 |
| | 新都区 | 63 | 77 | 75 | 77 | 71 | 73 | 75 | 77 | 79 | 82 | 85 |
| | 新津区 | 68 | 80 | 79 | 80 | 76 | 77 | 79 | 80 | 83 | 85 | 91 |
| | 蒲江县 | 75 | 87 | 86 | 87 | 83 | 84 | 86 | 87 | 88 | 91 | 95 |
| | 金堂县 | 79 | 87 | 86 | 87 | 85 | 86 | 86 | 87 | 88 | 90 | 92 |
| | 彭州市 | 72 | 83 | 81 | 82 | 78 | 80 | 81 | 83 | 85 | 88 | 92 |
| | 邛崃市 | 76 | 86 | 83 | 86 | 81 | 82 | 83 | 86 | 87 | 88 | 93 |
| | 大邑县 | 82 | 92 | 90 | 92 | 87 | 89 | 90 | 92 | 93 | 95 | 95 |
| | 崇州市 | 72 | 83 | 82 | 83 | 79 | 80 | 82 | 83 | 84 | 88 | 92 |
| | 都江堰市 | 77 | 87 | 86 | 87 | 84 | 85 | 86 | 87 | 90 | 91 | 94 |
| | 简阳市 | 82 | 89 | 88 | 89 | 85 | 87 | 88 | 89 | 90 | 92 | 94 |
| | 金牛区 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 成都平均 | 74 | 84 | 83 | 84 | 80 | 81 | 83 | 84 | 86 | 88 | 91 | |
| 眉山 | 仁寿县 | 79 | 86 | 85 | 86 | 82 | 84 | 85 | 87 | 88 | 89 | 92 |
| | 彭山区 | 79 | 89 | 87 | 89 | 84 | 85 | 87 | 89 | 91 | 92 | 95 |
| | 洪雅县 | 82 | 91 | 90 | 91 | 88 | 89 | 90 | 92 | 94 | 96 | 98 |
| | 青神县 | 87 | 95 | 93 | 95 | 92 | 92 | 93 | 95 | 95 | 96 | 98 |
| | 丹棱县 | 78 | 88 | 87 | 88 | 84 | 85 | 88 | 88 | 91 | 92 | 95 |
| | 东坡区 | 83 | 92 | 90 | 92 | 88 | 89 | 90 | 92 | 93 | 94 | 96 |
| | 眉山平均 | 81 | 90 | 89 | 90 | 86 | 87 | 89 | 90 | 92 | 93 | 96 |
| 德阳 | 广汉市 | 80 | 88 | 88 | 88 | 85 | 87 | 88 | 88 | 91 | 92 | 95 |
| | 旌阳区 | 81 | 90 | 88 | 90 | 86 | 87 | 88 | 90 | 91 | 93 | 95 |
| | 什邡市 | 79 | 89 | 88 | 88 | 85 | 86 | 88 | 89 | 90 | 92 | 94 |
| | 绵竹市 | 78 | 86 | 84 | 86 | 83 | 84 | 84 | 87 | 88 | 91 | 93 |
| | 中江县 | 88 | 93 | 92 | 93 | 91 | 91 | 92 | 93 | 95 | 96 | 96 |
| | 罗江区 | 78 | 86 | 85 | 86 | 82 | 83 | 85 | 86 | 88 | 91 | 93 |
| | 德阳平均 | 81 | 89 | 88 | 89 | 85 | 86 | 88 | 89 | 91 | 92 | 94 |
| 资阳 | 乐至县 | 91 | 94 | 94 | 94 | 94 | 94 | 94 | 94 | 95 | 96 | 96 |
| | 安岳县 | 85 | 88 | 88 | 88 | 87 | 88 | 88 | 88 | 89 | 91 | 93 |
| | 雁江区 | 88 | 93 | 92 | 93 | 90 | 92 | 92 | 93 | 94 | 96 | 97 |
| | 资阳平均 | 88 | 92 | 92 | 92 | 91 | 91 | 92 | 92 | 93 | 94 | 95 |

附录 16 基于基准年(2019)设计值的各情景下成德眉资四市各区县及城市所有区县平均的 PM_{2.5} 年均浓度(μg/m³)
 Appendix 16 The predicted annual PM_{2.5} concentration that based on 2019 design values under different scenarios in sub-districts of Chengdu, Deyang, Meishan, and Ziyang(μg/m³)

| 城市 | 区县 | nocontrol | medianX | medianY | medianZ | median-3 | median-2 | median-1 | median0 | median+1 | median 2030 | median 2035 |
|------|------|-----------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|----------|-------------|-------------|
| 成都 | 武侯区 | 49 | 40 | 41 | 40 | 43 | 42 | 41 | 39 | 37 | 34 | 30 |
| | 成华区 | 48 | 39 | 41 | 40 | 43 | 42 | 41 | 39 | 37 | 34 | 31 |
| | 锦江区 | 45 | 37 | 38 | 37 | 40 | 39 | 38 | 36 | 35 | 32 | 29 |
| | 龙泉驿区 | 39 | 33 | 34 | 33 | 35 | 35 | 34 | 33 | 31 | 29 | 27 |
| | 青羊区 | 47 | 38 | 39 | 38 | 41 | 40 | 39 | 38 | 36 | 32 | 29 |
| | 温江区 | 52 | 42 | 43 | 42 | 45 | 45 | 43 | 41 | 39 | 36 | 33 |
| | 青白江区 | 49 | 41 | 42 | 41 | 44 | 43 | 42 | 41 | 39 | 36 | 33 |
| | 双流区 | 50 | 41 | 42 | 41 | 44 | 43 | 42 | 41 | 39 | 35 | 32 |
| | 郫都区 | 48 | 39 | 40 | 39 | 43 | 42 | 40 | 39 | 37 | 34 | 31 |
| | 新都区 | 51 | 42 | 43 | 42 | 45 | 45 | 43 | 42 | 40 | 36 | 33 |
| | 新津区 | 47 | 38 | 39 | 38 | 41 | 40 | 39 | 38 | 36 | 33 | 30 |
| | 蒲江县 | 41 | 32 | 33 | 32 | 36 | 35 | 33 | 32 | 30 | 28 | 25 |
| | 金堂县 | 38 | 31 | 32 | 31 | 34 | 33 | 32 | 31 | 30 | 28 | 26 |
| | 彭州市 | 45 | 36 | 38 | 36 | 40 | 39 | 38 | 36 | 34 | 32 | 29 |
| | 邛崃市 | 42 | 34 | 35 | 34 | 37 | 36 | 35 | 34 | 32 | 30 | 27 |
| | 大邑县 | 39 | 32 | 33 | 32 | 35 | 34 | 33 | 32 | 31 | 28 | 26 |
| | 崇州市 | 49 | 40 | 41 | 40 | 44 | 43 | 41 | 40 | 38 | 36 | 33 |
| | 都江堰市 | 41 | 34 | 35 | 34 | 36 | 36 | 35 | 34 | 32 | 30 | 28 |
| | 简阳市 | 39 | 33 | 34 | 33 | 35 | 34 | 34 | 33 | 32 | 30 | 28 |
| | 金牛区 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 成都平均 | | 46 | 37 | 39 | 37 | 40 | 40 | 38 | 37 | 35 | 33 | 30 |
| 眉山 | 仁寿县 | 46 | 38 | 39 | 38 | 41 | 40 | 39 | 38 | 36 | 34 | 32 |
| | 彭山区 | 42 | 34 | 35 | 34 | 37 | 36 | 35 | 34 | 32 | 30 | 27 |
| | 洪雅县 | 41 | 32 | 33 | 32 | 36 | 35 | 33 | 32 | 30 | 28 | 25 |
| | 青神县 | 37 | 29 | 30 | 29 | 32 | 31 | 30 | 29 | 27 | 25 | 23 |
| | 丹棱县 | 43 | 33 | 35 | 33 | 37 | 36 | 34 | 33 | 31 | 29 | 26 |
| | 东坡区 | 38 | 30 | 32 | 30 | 34 | 33 | 32 | 30 | 29 | 26 | 24 |
| | 眉山平均 | | 41 | 33 | 34 | 33 | 36 | 35 | 34 | 33 | 31 | 29 |
| 德阳 | 广汉市 | 44 | 36 | 37 | 36 | 39 | 38 | 37 | 36 | 34 | 31 | 29 |
| | 旌阳区 | 37 | 30 | 31 | 30 | 33 | 32 | 31 | 30 | 29 | 27 | 25 |
| | 什邡市 | 44 | 36 | 37 | 36 | 39 | 38 | 37 | 36 | 34 | 31 | 29 |
| | 绵竹市 | 46 | 38 | 39 | 38 | 41 | 40 | 39 | 38 | 36 | 33 | 31 |
| | 中江县 | 35 | 30 | 31 | 30 | 32 | 32 | 31 | 30 | 29 | 27 | 26 |
| | 罗江区 | 42 | 35 | 36 | 35 | 38 | 37 | 36 | 35 | 33 | 31 | 29 |
| | 德阳平均 | | 41 | 34 | 35 | 34 | 37 | 36 | 35 | 34 | 33 | 30 |
| 资阳 | 乐至县 | 31 | 27 | 28 | 27 | 29 | 28 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 |
| | 安岳县 | 45 | 40 | 41 | 40 | 42 | 41 | 41 | 40 | 39 | 37 | 36 |
| | 雁江区 | 34 | 29 | 30 | 29 | 31 | 30 | 30 | 29 | 28 | 27 | 25 |
| | 资阳平均 | | 37 | 32 | 33 | 32 | 34 | 33 | 33 | 32 | 31 | 28 |

附录 17 基于基准年设计值预测的各情景下成德眉资四市各区县及城市所有区县平均的全年 O₃ 日最大 8 小时平均值第 90 百分位数(μg/m³)

Appendix 17 The predicted 90th percentile of daily maximum 8-hour average ozone concentration that based on 2019 design values under different scenarios in sub-districts of Chengdu, Deyang, Meishan, and Ziyang (μg/m³)

| 城市 | 区县 | nocontrol | medianX | medianY | medianZ | median-3 | median-2 | median-1 | median0 | median+1 | median 2030 | median 2035 |
|------|------|-----------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|----------|-------------|-------------|
| 成都 | 武侯区 | 163 | 161 | 164 | 165 | 165 | 164 | 164 | 164 | 162 | 158 | 155 |
| | 成华区 | 171 | 173 | 166 | 168 | 167 | 170 | 169 | 166 | 164 | 163 | 161 |
| | 锦江区 | 147 | 150 | 142 | 145 | 144 | 146 | 145 | 144 | 141 | 138 | 136 |
| | 龙泉驿区 | 143 | 148 | 139 | 140 | 139 | 142 | 141 | 140 | 139 | 137 | 135 |
| | 青羊区 | 164 | 164 | 158 | 160 | 162 | 163 | 160 | 157 | 157 | 156 | 153 |
| | 温江区 | 175 | 183 | 163 | 166 | 163 | 172 | 169 | 165 | 163 | 159 | 155 |
| | 青白江区 | 164 | 169 | 156 | 158 | 156 | 163 | 161 | 158 | 156 | 154 | 152 |
| | 双流区 | 167 | 173 | 156 | 159 | 157 | 165 | 162 | 159 | 155 | 153 | 150 |
| | 郫都区 | 174 | 182 | 161 | 165 | 161 | 171 | 169 | 164 | 161 | 156 | 150 |
| | 新都区 | 180 | 186 | 167 | 172 | 168 | 178 | 176 | 172 | 166 | 161 | 159 |
| | 新津区 | 174 | 182 | 161 | 165 | 162 | 171 | 168 | 165 | 161 | 154 | 151 |
| | 蒲江县 | 158 | 164 | 147 | 151 | 148 | 156 | 154 | 151 | 147 | 144 | 141 |
| | 金堂县 | 161 | 166 | 151 | 155 | 151 | 159 | 158 | 154 | 151 | 148 | 146 |
| | 彭州市 | 173 | 181 | 157 | 161 | 158 | 168 | 164 | 161 | 157 | 153 | 149 |
| | 邛崃市 | 161 | 169 | 150 | 152 | 150 | 158 | 156 | 152 | 150 | 146 | 142 |
| | 大邑县 | 150 | 156 | 139 | 142 | 139 | 148 | 145 | 142 | 138 | 136 | 133 |
| | 崇州市 | 161 | 167 | 149 | 152 | 149 | 157 | 155 | 151 | 148 | 143 | 140 |
| | 都江堰市 | 157 | 163 | 147 | 150 | 148 | 155 | 153 | 150 | 146 | 143 | 141 |
| | 简阳市 | 147 | 151 | 142 | 143 | 142 | 146 | 145 | 143 | 142 | 140 | 139 |
| | 金牛区 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 成都平均 | 164 | 152 | 154 | 153 | 158 | 156 | 153 | 151 | 148 | 145 | 139 | |
| 眉山 | 仁寿县 | 149 | 153 | 142 | 144 | 142 | 147 | 146 | 144 | 142 | 139 | 137 |
| | 彭山区 | 150 | 155 | 139 | 143 | 140 | 148 | 146 | 143 | 139 | 136 | 134 |
| | 洪雅县 | 146 | 151 | 135 | 138 | 135 | 143 | 141 | 138 | 135 | 131 | 128 |
| | 青神县 | 138 | 142 | 128 | 131 | 128 | 136 | 134 | 131 | 127 | 125 | 123 |
| | 丹棱县 | 153 | 161 | 142 | 145 | 142 | 150 | 148 | 145 | 142 | 139 | 136 |
| | 东坡区 | 151 | 155 | 143 | 146 | 144 | 150 | 149 | 146 | 143 | 140 | 137 |
| | 眉山平均 | 153 | 138 | 141 | 138 | 146 | 144 | 141 | 138 | 135 | 132 | 125 |
| 德阳 | 广汉市 | 150 | 157 | 140 | 143 | 141 | 148 | 146 | 143 | 140 | 137 | 134 |
| | 旌阳区 | 153 | 158 | 143 | 145 | 143 | 151 | 149 | 145 | 142 | 140 | 137 |
| | 什邡市 | 151 | 157 | 140 | 144 | 141 | 148 | 146 | 143 | 140 | 135 | 132 |
| | 绵竹市 | 149 | 154 | 141 | 144 | 141 | 148 | 145 | 143 | 141 | 137 | 134 |
| | 中江县 | 138 | 142 | 131 | 133 | 131 | 136 | 134 | 133 | 131 | 129 | 128 |
| | 罗江区 | 160 | 165 | 152 | 155 | 153 | 159 | 157 | 155 | 152 | 149 | 147 |
| | 德阳平均 | 156 | 141 | 144 | 141 | 148 | 146 | 144 | 141 | 138 | 135 | 128 |
| 资阳 | 乐至县 | 130 | 132 | 124 | 126 | 125 | 129 | 127 | 126 | 124 | 122 | 122 |
| | 安岳县 | 128 | 130 | 125 | 126 | 125 | 128 | 127 | 126 | 125 | 124 | 123 |
| | 雁江区 | 140 | 143 | 133 | 135 | 133 | 138 | 137 | 135 | 133 | 131 | 130 |
| | 资阳平均 | 135 | 128 | 129 | 128 | 131 | 130 | 129 | 127 | 126 | 125 | 121 |