陆成伟,鲁 惠,杨欣悦,等.基于园区排放增减平衡的 $PM_{2.5}$ 最大允许排放增量衡算研究 [J]. 中国环境科学, 2026,46(3):1256-1263.
Lu C W, Lu H, Yang X Y, et al. Calculation of maximum allowable increased $PM_{2.5}$ emissions based on environmental benefit balance of emission increases and reductions in industrial parks and surrounding areas [J]. China Environmental Sciences, 2026,46(3):1256-1263.

基于园区排放增减平衡的 $PM_{2.5}$ 最大允许排放增量衡算研究

陆成伟[1],鲁 惠[2],杨欣悦[1],宋丹林[1],祝义平[2],鲍文毅[2],佘 睿[3],张子健[4],黄兰熠[5],赵 彬[1*] (1.成都市环境保护科学研究院,四川 成都 610072；2.成都市生态环境工程评估与绩效评价中心,四川 成都 610072；3.四川天府新区生态环境和城市管理局,四川 成都 610000；4.成都市龙泉驿生态环境局,四川 成都 610100；5.成都市双流生态环境局,四川 成都 610200)

摘要：为探索园区大气污染物排放量与环境质量挂钩,实现以环境质量底线为约束的精细化管控,提出了一种基于园区周边缓冲区减排及园区内增排造成的 $PM_{2.5}$ 浓度影响动态平衡的园区最大允许排放增量衡算方法, 通过园区周边缓冲区减排为园区产业落地提供空间,并以成都市天府园区、双流园区和龙泉园区为例开展探索研究.结果表明,园区缓冲区减排造成的园区 $PM_{2.5}$ 浓度下降分别为 2.6,1.7 及 2.1μg/m^3;结合园区站现状浓度和目标浓度,计算园区站浓度升高上限分别为 1.9,1.5 及 2.3μg/m^3.模拟园区单位面积排放序列增加造成的 $PM_{2.5}$ 浓度升高,拟合园区排放—浓度复合响应函数,对浓度升高上限对应的排放进行求解,园区最大允许排放增量分别为 21.5,73.7 和 200.1t.经增减平衡验算,园区最大允许排放增量造成 3 个园区控制站的浓度变化分别为-0.18,-0.44 和-2.50μg/m^3,均未造成控制站空气质量恶化.提出的方法为园区精细化管控提供了新的思路,可在不造成环境质量恶化的前提下,实现园区周边减排支撑园区产业落地,为园区发展提供空间.

关键词：CMAQ；最大允许排放增量；园区增减排平衡；$PM_{2.5}$
中图分类号：X51 **文献标识码**：A **文章标号**：1000-6923(2026)03-1256-08

Calculation of maximum allowable increased $PM_{2.5}$ emissions based on environmental benefit balance of emission increases and reductions in industrial parks and surrounding areas. LU Cheng-wei[1], LU Hui[2], YANG Xin-yue[1], SONG Dan-lin[1], ZHU Yi-ping[2], BAO Wen-yi[2], SHE Rui[3], ZHANG Zi-jian[4], HUANG Lan-yi[5], ZHAO Bin[1*] (1.Chengdu Academy of Environmental Sciences, Chengdu 610072, China；2.Chengdu Eco-Environmental Engineering Appraisal and Performance Evaluation Center, Chengdu 610072, China；3.Sichuan Tianfu New Area Ecological Environment and Urban Management Bureau, Chengdu 610000, China；4.Chengdu Longquanyi Ecological Environment Bureau, Chengdu 610100, China；5.Chengdu Shuangliu Ecological Environment Bureau, Chengdu 610200, China). *China Environmental Sciences*, 2026,46(3)：1256~1263

Abstract：To investigate the correlation between emissions and environmental quality in industrial parks, thereby achieving refined management and control constrained by the environmental quality baseline, this paper proposes a comprehensive method for determining the maximum allowable emission increments in industrial parks based on the dynamic equilibrium of $PM_{2.5}$ concentration impacts. The approach balances emission reductions in surrounding buffer zones against increased emissions within the parks, creating development space through emission mitigation in peripheral areas. Case studies were conducted in industrial parks of Tianfu, Shuangliu, and Longquan district, Chengdu. Evaluations demonstrate that buffer zone emission reductions lowered $PM_{2.5}$ concentrations in park stations by 2.6, 1.7, and 2.1μg/m^3, respectively. Based on current and target concentrations at park stations, the maximum allowable concentration increases were calculated as 1.9, 1.5, and 2.3μg/m^3. Derived from simulated $PM_{2.5}$ concentrations and sequential emission increments, the composite response functions quantified the maximum allowable emission increases at 21.5, 73.7, and 200.1t, respectively. Emission reduction and increasing balance verifications showed that implementing these maximum increments resulted in concentration changes of −0.18, −0.44, and −2.50μg/m^3 at control stations, confirming no deterioration of air quality. This methodology provides a novel approach for refined park management, enabling industrial development through peripheral emission reductions without compromising environmental quality, thereby creating sustainable growth space for industrial parks.

Key words：CMAQ；maximum allowable increased emissions；industrial park emission decreasing-increasing balance；$PM_{2.5}$

利用大气自净能力,针对产业发展可能造成的环境影响开展评估,结合环境容量或最大允许排放量确定区域可容纳的大气污染物排放上限是平

收稿日期：2025-08-13
基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFC3709304)
* 责任作者, 高级工程师, zhaobin@cdaes.org.cn

衡大气环境保护和区域发展的重要手段[1].大气环境容量是大气污染总量控制的理论依据,同时也是大气环境质量管理和控制的重要支撑[2].大气环境容量计算方法包括 A 值法、线性规划法和模型模拟法.其中,A 值法基于箱式模型假设,综合大气自净能力计算研究区域环境容量.由于计算简单,A 值法在大气环境容量研究中得到了广泛应用[3-6].由于 A 值法计算所得的大气环境容量为区域自净能力可容纳的污染物上限,是区域范围内的污染物理想容纳总量,无法直接应用于空气质量管理[7],实际应用中往往还需结合 P 值法进行分配[8].为进一步优化总量约束下的污染源允许排放量分配问题,线性规划法通过联系污染源及其扩散过程与受体点浓度,通过线性优化理论计算受体点浓度达标时的排放量,从而实现受体点浓度达标下的最大允许排放量的测算,方法假设污染排放与浓度呈线性响应,在 PM_{10},NO_2 和 SO_2 等污染物最大允许排放量衡算方面具有广泛应用[9-12].随着我国逐步转为复合型污染,线性规划法受线性响应假设制约,难以满足 $PM_{2.5}$ 等非线性响应的大气环境容量问题.大量研究[13-16]利用第三代空气质量模型的非线性响应模拟能力,基于模型模拟法开展大气环境容量的研究.得益于第三代空气质量模型对复合污染的模拟能力,最大允许排放量的测算可覆盖 $PM_{2.5}$ 等二次影响显著的污染物,模拟方法也不断完善和改进.

综上所述,随着大气环境管理需求的提升,最大允许排放量的研究逐渐精细化,然而现有研究多集中于区域和城市尺度,对工业园区等小尺度 $PM_{2.5}$ 环境容量研究相对不足.工业园区作为产业集聚发展的重要载体,在推动经济增长的同时也面临严峻的大气污染防治挑战.已有研究[17]提出环境质量约束下产业园区污染物允许增减排放量动态管理路径,但研究仅考虑园区通过自身减排为产业发展腾空间,而现实中产业园区往往面临既要促进经济增长的重任,又要落实环境质量改善责任的困局,仅依靠园区自身减排不足以支撑区域环境质量持续改善.因此,在牢守环境质量底线的前提下,创新资源环境要素配置方式,将产业园区及其周边各类排放源统筹减排,实现环境资源优化配置,有助于保障园区发展.

成都市作为西部大开发的核心城市和新型城镇化发展的典型代表,开展工业园区大气最大允许排放量精细化测算具有重要探索意义.以 2023 年为基准年、2025 年为控制年,以成都市双流区、天府新区和龙泉驿区为研究对象,在前期研究[18]的基础上,建立考虑 3 个区县工业园区(分别简称双流园区、天府园区及龙泉园区)相互影响、通过园区周边减排以消除园区污染排放增量环境影响的情景假设,对园区及缓冲区排放增减平衡最大允许排放量衡算技术进行验证,开展园区企业发展与大气环境保护之间矛盾平衡的技术探索.

1　数据与方法

1.1　大气污染源排放清单数据

排放清单数据由 3 部分构成,其中成都市大气污染源排放清单数据来自成都市环境保护科学研究院[19-24],四川省除成都市外的大气污染源排放清单数据由四川省生态环境研究院提供[25-28],模拟区域内其他城市排放清单通过清华大学公开的 MEIC-HR 排放清单[29-30]经迭代优化降尺度[31]而来.模拟区域内的天然源排放使用课题组前期研发的简单天然源模型 SimpleBIO 进行动态衡算[32].

1.2　环境监测数据

大气环境监测数据由四川省成都生态环境监测中心站提供,包括国控站点、市控站点及园区监测站点数据.为评估园区污染排放影响及其对成都市环境质量的影响,将点位分为园区站点及控制站点.其中,园区站点选用距离园区最近的标准环境监测站点,通常为园区自建站点或市控站点,而控制站点则选用距离园区较近的国控站点或市控站点.天府新区选择园区内天科广场(TK)和新兴工业园(XX)站点,双流区选择园区内怡心街道(YX)市控站点,龙泉驿区则选择经开区孵化园(JK)市控站点作为园区站;控制站方面,天府新区选择华阳(HY)和科学城(KX)国控站点,双流区选择白河闸门管理房(BH)及永安小学(YA)市控站点,龙泉驿区则选择龙泉驿区区政府(LQ)及车城东七路(CC)国控站点.园区站及控制站目标浓度由对应区县进行假设.站点分布情况如图 2 所示,不同园区站、控制站 2023 年现状及 2025 年目标浓度(折算为 1、4、7、10 月的均值)如表 1 所示.

表 1 不同工业园区园区站及控制站现状、目标 $PM_{2.5}$ 浓度 ($\mu g/m^3$)

Table 1 Current and target $PM_{2.5}$ concentrations for industrial park stations and control stations($\mu g/m^3$)

区县	园区站现状浓度	园区站目标浓度	控制站现状浓度
天府新区	38.7	37.1	41.4
双流区	38.1	37.1	38.0
龙泉驿区	37.1	36.2	39.5

1.3 研究区域

采用三层嵌套开展气象及空气质量模拟,其中,d01 包括四川省及周边部分区域,空间分辨率为 20km,d02 包括成都平原 8 市,空间分辨率为 4km,d03 则包括成都市双流区、天府新区和龙泉驿区,空间分辨率为 0.8km.模拟区套示意如图 1 所示.

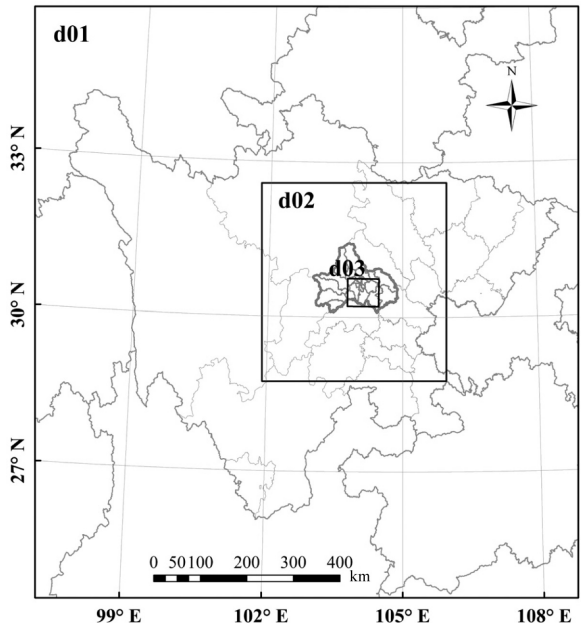


图 1 模拟区域嵌套

Fig.1 Nested model domains

1.4 空气质量模拟系统

使用成都市环境保护科学研究院空气质量模拟系统(CDAQS)[33-34]完成模拟工作,系统经大量本地化工作,对土地利用类型数据、土壤数据和高程数据等模型基础资料进行了更新和替换,同时通过气象参数优化和排放清单优化提高模拟效果.CDAQS 系统集成了天气研究与预报模型[35](WRF)3.9.1.1 版本作为气象模型;使用公共多尺度空气质量模型(CMAQ)5.0.2 版本作为空气质量模型;排放清单数据则使用课题组研发的快速清单处理工具[31](FMEmT)转换为空气质量模型所需的网格化 NetCDF 格式排放数据,FMEmT 工具同时支持通过网格掩码文件和减排情景文件实现排放清单的分区域、分口径污染排放调整,从而实现减排成效评估.基于 CDAQS 系统,使用美国 NCEP 公开的 1°分辨率 FNL 数据作为气象驱动数据,使用 WRF 模型开展气象动力降尺度,并结合大气污染源排放清单数据,开展 2023 年 1、4、7、10 四个季节代表月的空气质量模拟.

1.5 园区周边减排成效评估方法

如图 2,通过地理信息系统工具,利用双流园区、天府园区及龙泉园区边界建立缓冲区,考虑园区周边污染排放管理及污染影响范围,缓冲区范围取园区边界外延 5km.结合 d03 模拟范围建立网格掩码文件,实现园区缓冲区的标记.根据园区周边梳理的不同污染源减排比例制作减排后排放清单,基于 Brute-Force 方法,分别使用 CDAQS 系统模拟原始排放清单和减排后排放清单污染物浓度,提取各园区站点和控制站点所在网格模拟浓度,计算原始排放清单及减排后排放清单模拟浓度差值作为园区缓冲区减排造成的污染物浓度下降.

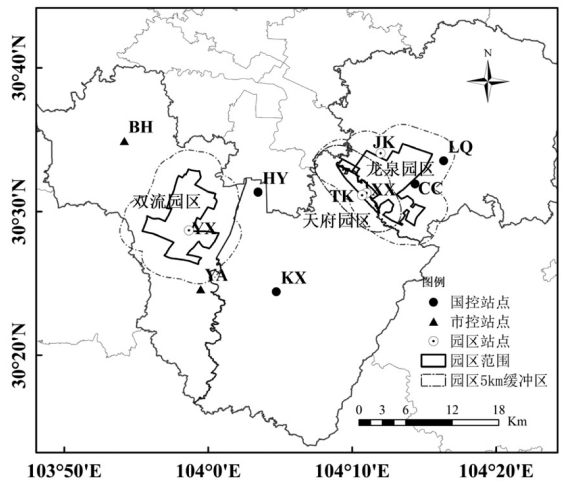


图 2 园区减排缓冲区及站点分布示意

Fig.2 Distributions of park emission reduction buffer zones and monitoring sites

由于缓冲区内减排所得的污染物浓度下降水平直接为园区污染物排放增加提供增量空间,为降低排放清单差异对后续分析的影响,减排削减浓度 ΔC_p 需经园区 $PM_{2.5}$ 实测浓度订正,订正方法如式(1).

$$\Delta C_p = \frac{\left(\mathrm{Cb}_p - \mathrm{Cd}_p\right)\cdot \mathrm{Co}_p}{\mathrm{Cb}_p} \tag{1}$$

式中:ΔC_p 为园区 p 监测站点某污染物缓冲区减排造成的浓度下降;Cb_p 为原始排放清单模拟所得站点污染物浓度;Cd_p 则为减排后排放清单模拟所得站点污染物浓度;Co_p 则为站点基准年实测污染物浓度.

若需环境质量不恶化,园区缓冲区内污染减排造成的污染物浓度下降,抵消园区污染排放增量造成的浓度增加后,最终浓度应低于园区控制点位的目标浓度,即可根据式(2)结合园区基准年实测浓度 Co_p、园区目标浓度 Cy_p 及减排削减浓度 ΔC_p 求解园区排放增量造成的浓度升高上限值 $\Delta\mathrm{Cm}_p$.

$$\Delta\mathrm{Cm}_p = \mathrm{Cy}_p - \mathrm{Co}_p + \Delta C_p \tag{2}$$

1.6　园区排放非线性复合响应函数构建

结合园区空间范围,开发 PARKEMIS 程序用于根据给定的单位面积排放强度生成符合 CMAQ 模型模拟网格的排放清单数据,并进行必要的物种分配、时间分配和垂直分配,以模拟园区工业排放的增加造成的污染物排放.如式(3),PARKEMIS 程序生成的排放数据叠加至原始排放数据后,即可通过 Brute−Force 方法模拟园区增排造成的污染物浓度升高.

$$\Delta\mathrm{Ca}_p = \mathrm{Cc}_p - \mathrm{Cb}_p \tag{3}$$

式中:$\Delta\mathrm{Ca}_p$ 为园区站点 p 因园区污染排放增加造成的浓度增量;Cc_p 为园区污染排放增加后模拟所得污染物浓度;Cb_p 则为使用原始排放清单模拟所得的污染物浓度.利用 PARKEMIS 建立 3 个区县园区每平方公里单位排放强度分别增加 0.1,0.5,1,3,5,7,10,20,30t/a 的排放数据,即 $\mathrm{EMISa}_{p(n)}$.模拟后,得到对应单位排放强度下的园区污染物浓度增加值 $\Delta\mathrm{Ca}_{p(n)}$.如式(4),使用自然样条函数,以单位排放强度为自变量,以对应园区污染物浓度增加值为因变量,拟合得到园区污染排放增量 $\mathrm{EMISa}_{p(n)}$ 与园区站点污染物浓度增加值 $\Delta\mathrm{Ca}_p$ 的响应函数 f_p.

$$\Delta\mathrm{Ca}_p = f_p\left(\mathrm{EMISa}_{p(n)}\right) \tag{4}$$

同理,利用园区周边控制站点的浓度增量模拟结果即可拟合得到园区增量与控制站点浓度的响应函数 $f_E(\mathrm{EMISa}_{p(n)})$.同时,由于 P 个园区之间存在相互影响,某一园区监测站点受不同园区不同污染排放增量影响的浓度 Ct 则为不同园区响应函数带入不同排放增量后的浓度加和,如式(5)所示.

$$\mathrm{Ct} = \sum_{p=1}^{P} f_p\left(\mathrm{EMISa}_{p(n)}\right) \tag{5}$$

1.7　园区最大允许排放增量求解

通过浓度响应函数的反函数求解特定污染物浓度增量对应的污染物排放增量,在满足控制浓度的前提下,各园区最大污染排放增量即为该园区浓度增量全部来自自身排放时对应的排放量 $\Delta\mathrm{EMISm}_p$,而考虑不同园区相互影响时,各园区的最大允许排放增量则介于 0 和 $\Delta\mathrm{EMISm}_p$ 间,其求解结果不具备唯一性.因此,为完成复合响应函数的求解,建立了一套基于穷举法的求解方法.

基于各园区污染排放增量上限,设置穷举求解次数,进行正交化后,即可得到不同园区排放增量的数据集.求解所需计算次数与单个园区求解次数 n 和园区数量 p 的关系为 n^p,求解所取的排放量变化步长 S_p 如式(6).

$$\mathrm{S}_p = \frac{\Delta\mathrm{EMISm}_p}{n} \tag{6}$$

以本文为例,考虑 3 个园区相互影响,每个园区求解 500 次,正交化后需完成 1.25 亿次求解计算,使用向量化计算及并行计算技术对求解过程进行加速,当前主流计算机硬件下,完成四季代表月求解耗时约 17min.

1.8　最大允许排放增量验算

为验证复合响应函数求解所得的园区最大允许排放增量对园区周边控制站点的浓度影响,如式(7),利用前期拟合所得园区排放增量与控制站点浓度的响应函数,带入对应园区最大排放增量 EMISa_p,结合园区控制站点现状浓度 Co_E、目标浓度 Cy_E 及减排削减浓度 ΔC_E 计算控制点位最终浓度 C_E,若 $C_E \leqslant 0$ 则表明园区最大允许排放增量未造成环境质量恶化.

$$C_E = \sum_{p=1}^{P} f_E\left(\mathrm{EMISa}_p\right) - \left(\mathrm{Cy}_E - \mathrm{Co}_E + \Delta C_E\right) \tag{7}$$

2　结果与讨论

2.1　园区缓冲区减排成效评估

结合园区周边污染排放构成,根据园区发展情况和建筑工期,提出缓冲区减排措施(表 2).其中工业减排主要来自工业窑炉,2025 年,各园区及周边缓冲

区预计相较 2023 年削减 8%的污染排放;通过新能源替代、老旧车淘汰等措施,各园区交通排放削减 11.0%~14.8%;通过道路保洁水平提升等措施削减 10.0%的道路扬尘排放,并根据建筑工期估算建筑扬尘排放削减 27.5%~47.9%.

表 2 园区缓冲区内 2025 年较 2023 年污染源减排比例(%)

Table 2 Emission reduction rates of park buffer zones, 2025 to 2023(%)

园区	工业窑炉	交通	道路扬尘	建筑扬尘
天府园区	8.0	14.8	10.0	27.5
双流园区	8.0	13.8	10.0	37.8
龙泉园区	8.0	11.0	10.0	47.9

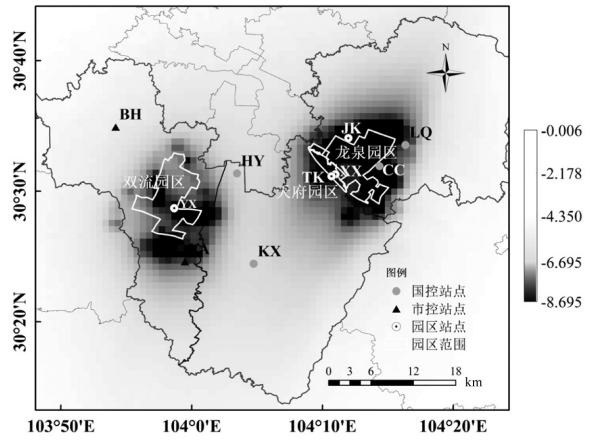


图 3 园区缓冲区减排 $PM_{2.5}$ 浓度(μg/m^3)削减空间分布

Fig.3 Spatial distribution of decreased $PM_{2.5}$ concentrations (μg/m^3) of park buffer zone emission reduction

经统计,园区缓冲区 $PM_{2.5}$ 减排量为 257.5t,其中道路扬尘及建筑扬尘合计减排 240.9t,交通减排 2.8t,工业减排 13.8t.利用 CDAQS 系统进行模拟评估,如图 3 所示,龙泉园区缓冲区减排造成的 $PM_{2.5}$ 浓度下降最为明显,其次为天府园区,双流园区受限于建设强度相对较低,浓度下降幅度略低于其他园区.

结合各园区站园区现状浓度 Co_p、园区目标浓度 Cy_p 及减排削减浓度ΔC_p,根据式(2)计算园区站污染物浓度升高上限值ΔCm_p.如表 3 所示,从缓冲区内减排成效上看,各园区 $PM_{2.5}$ 浓度削减均在 2μg/m^3 左右,天府园区削减比例最大,其次为龙泉园区和双流园区.龙泉园区浓度升高上限最高,可支撑更多园区排放增量,双流园区则最低.

表 3 园区站 $PM_{2.5}$ 减排成效及浓度升高上限

Table 3 $PM_{2.5}$ reductions and maximum allowable increasements in park stations

园区	浓度削减比例 (%)	削减浓度 (μg/m^3)	浓度升高上限 (μg/m^3)
天府园区	6.8	2.6	1.9
双流园区	4.5	1.7	1.5
龙泉园区	5.6	2.1	2.3

2.2 非线性复合响应函数拟合

结合不同园区不同单位面积增排模拟结果,利用自然样条函数进行拟合,得到各园区增排对各园区站的浓度影响关系,以 2023 年 1 月为例,各园区增排对天府园区站的响应如图 4 所示.

从模拟结果上看,由于距离相对较近,各园区新增 $PM_{2.5}$ 排放对站点的影响接近线性关系,而 NO_x 排放对 NO_2 及 $PM_{2.5}$ 浓度的影响则呈现弱非线性影响,且由于 NO_x 转换生成二次颗粒物需反应时间与距离,导致其对园区站及周边控制站的 $PM_{2.5}$ 影响相对较小,后续分析中不考虑 NO_x 等排放对二次 $PM_{2.5}$ 的影响.

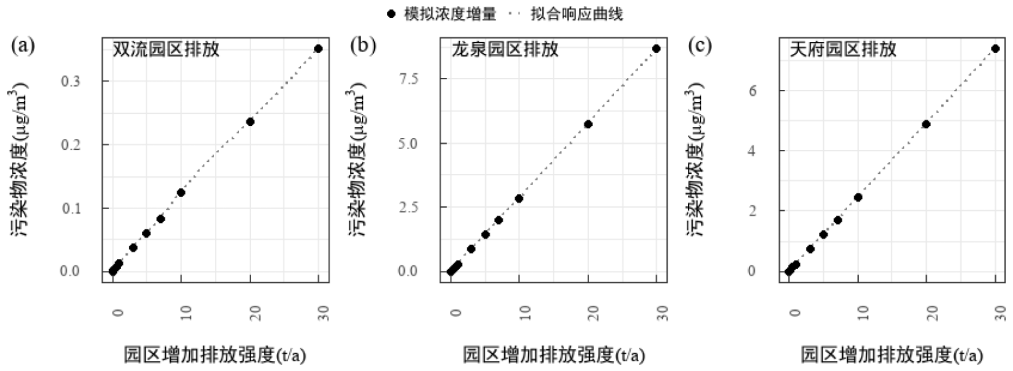


图 4 2023 年 1 月各园区排放对天府园区站 $PM_{2.5}$ 浓度响应

Fig.4 Park emissions and $PM_{2.5}$ concentrations responses at Tianfu park station, January 2023

2.3　园区最大允许增量求解

结合前期求解得到的园区排放增量步长 S_p,结合式(5)计算不同园区特定排放量下造成的园区站污染物浓度升高 C_t,根据园区浓度升高上限值ΔCm_p筛选求解结果,选择同时满足不同园区升高限值的数据.其中,天府园区、双流园区和龙泉园区的最大允许增量分别为 21.5,73.7 和 200.1t/a.

总体而言,综合 3 个园区面积、浓度升高上限及浓度响应差异,计算所得不同园区增量上限存在明显差异.其中,天府园区由于面积最小,园区站 1.9μg/m^3 浓度升高上限下,其 $PM_{2.5}$ 最大允许增量仅为 21.5t;双流园区由于浓度升高上限最低,求解所得最大允许增量为 73.7t;龙泉园区则因面积较大,浓度增量上限较高,加之周边减排造成的浓度下降可观,求解所得最大允许增量达到200.1t.如图 5 所示,浓度升高最为明显的区域为天府园区及龙泉园区北部交界区域,升高幅度超 30μg/m^3.

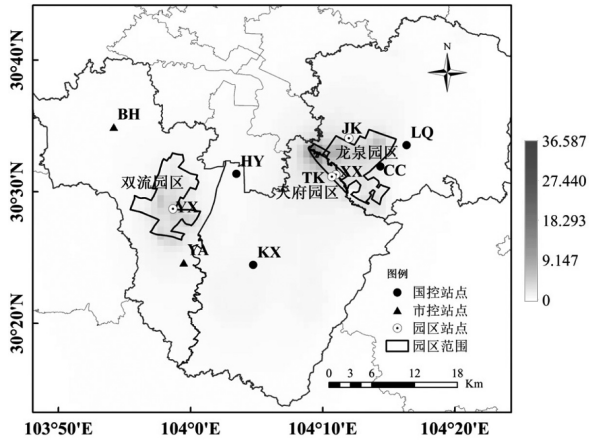


图 5　园区最大允许排放增量造成的 $PM_{2.5}$ 浓度(μg/m^3)升高空间分布

Fig.5　Spatial distribution of $PM_{2.5}$ concentrations (μg/m^3) induced by the maximum allowable emission increments

2.4　园区及缓冲区排放增减平衡验算

利用式(7),计算 3 个园区缓冲区减排和园区增排共同造成的综合浓度影响,如图 6 所示,园区缓冲区减排明显降低了园区增排造成的 $PM_{2.5}$ 浓度升高,减排造成的浓度下降与增排造成的浓度升高主要影响范围集中在园区周边,难以对更远距离造成影响.

提取不同园区控制站模拟结果,如表 4 所示.总体而言,园区控制站浓度影响情况与其相对园区的距离直接相关,天府园区及双流园区控制站距离园区较远,呈现减排影响与增排影响均较低的趋势,园区增排经缓冲区减排抵消后,均未对控制站浓度造成负面影响.

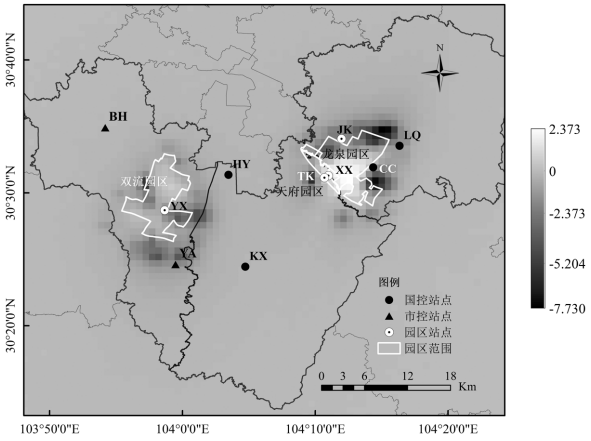


图 6　园区排放增减平衡验算结果

Fig.6　Verification results of emission reduction−increasing balance in parks

表 4　园区控制点 $PM_{2.5}$ 浓度验算结果(μg/m^3)

Table 4　Verification results of $PM_{2.5}$ concentrations at control stations (μg/m^3)

园区	现状浓度	减排浓度	增排浓度	浓度影响
天府园区	41.4	−0.36	0.18	−0.18
双流园区	38.0	−0.61	0.17	−0.44
龙泉园区	39.5	−4.63	2.13	−2.50

在“生态环境分区管控”工作框架下,如何将区域环境质量底线对应的最大允许排放量分配至园区已成为精细化环境管理的关键.现有研究与实践多遵循”总量控制、二次分配”的思路[36],但存在诸多不足:一方面,在测算尺度上,适用于区县级的方法[16]因大气污染过程的复杂性,难以直接精准落地到园区;另一方面,在应用过程中,多数分配方法需依赖园区未来的具体产业规划与排放数据对园区环境影响开展分析[37],导致在规划阶段难以对园区的最大允许排放量进行有效评估.针对上述问题,本文提出一种新的”增减平衡”测算方法,以”区域整体环境质量不恶化”为底线,通过构建园区排放增量与周边区域协同减排量之间的平衡关系,将污染排放的环境效益作为核心约束,反向推算出园区发展的最大允许排放增量.这一思路为园区在规划初期争取环境容量提供了新途径,即通过统筹区域减排来支撑园

区产业的绿色发展.但本方法作为一项初步探索,其结果受限于当前数据的精细化程度(如用地分类、企业排放参数等).后续研究需结合真实园区案例,进一步分析不同缓冲区范围与气象条件的敏感性,以提升方法的实用性与可靠性.

3 结论

3.1 利用园区缓冲区内的污染减排,通过交通、扬尘等源类主导的污染减排,造成天府园区、双流园区和龙泉园区站 $PM_{2.5}$ 浓度削减分别为 2.6,1.7,2.1μg/m^3;结合园区站现状浓度、目标浓度和减排削减浓度,确定园区站浓度升高上限分别为 1.9,1.5,2.3μg/m^3.

3.2 利用复合响应函数求解各园区在园区站浓度升高上限值制约下的最大允许排放总量,天府园区的 $PM_{2.5}$ 最大允许排放增量为 21.5t,双流园区为73.7t,龙泉园区则为 200.1t.不同园区增量差异主要由浓度升高上限、控制站距离和园区面积共同决定.

3.3 经控制站检验,叠加缓冲区减排后,计算所得的最大允许排放增量对天府园区、双流园区和龙泉园区的最终 $PM_{2.5}$ 浓度影响分别为−0.18,−0.44 和−2.50μg/m^3,均未对控制站 $PM_{2.5}$ 浓度造成不利影响.

参考文献:

[1] 马 光,胡仁禄.城市规划中应用环境容量模型的研究 [J]. 东南大学学报, 1999,(1):84−88.
Ma G, Hu R L. A preliminary study on the model of environmental capacity in urban planning [J]. Journal of Southeast University, 1999, 29(1):82−86.

[2] 郝吉明,许嘉钰,吴 剑,等.我国京津冀和西北五省(自治区)大气环境容量研究 [J]. 中国工程科学, 2017,19(4):13−19.
Hao J M, Xu J Y, Wu J, et al. A study of the atmospheric environmental capacity of Jingjinji and of the five northwestern provinces and autonomous regions in China [J]. Engineering, 2017, 19(4):13−19.

[3] 李文慧,陈 洁,王繁强,等.基于修正 A 值法的西安市大气环境容量与剩余容量估算 [J]. 安全与环境工程, 2013,20(4):71−75.
Li W H, Chen J, Wang F Q, et al. Estimation of the Atmospheric Environmental Capacity and RemainingCapacity in Xi'an City Based on Amending A−value Method [J]. Safety and Environment Engineering, 2013,20(4):71−75.

[4] 郭 毅,杨雅媚.基于修正 A 值法估算西安市大气环境容量研究 [J]. 环境科学与管理, 2014,39(2):69−71.
Guo Y, Yang Y M. Estimation of environmental atmosphere bearing capacity of Xi'an city with A−value method [J]. Environmental Science and Management, 2014,39(2):69−71.

[5] 李 蕊,黄 玮,李 蒙.云南大气环境容量系数变化特征及未来变化趋势预估 [J]. 气象与环境科学, 2023,46(1):73−81.
Li R, Huang W, Li M. variation characteristics and trend prediction of the atmospheric environmental capacity coefficient in Yunnan province [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2023,46(1): 73−81.

[6] 沈梦兰,李 静,韩 龙,等.基于修正 A 值法的阿拉善高新技术产业开发区大气环境容量测算与分析 [J]. 中国环境监测, 2025,41(1): 201−205.
Shen M L, Li J, Han L, et al. Calculation and analysis of atmospheric environmental capacity in alashan high−tech industrial development zone based on modified A−value method [J]. Environmental monitoring in China, 2025,41(1):201−205.

[7] 孟 凡,李时蓓.大气环境容量理论的再思考和总量控制 [J]. 环境科学研究, 2021,34(7):1583−1591.
Meng F, Li S B.Revisiting atmospheric environmental capacity theory and emission cap [J]. Research of Environmental Sciences, 2021,34(7): 1583−1591.

[8] 范绍佳,黄志兴,刘嘉玲.大气污染物排放总量控制 A—P 值法及其应用 [J]. 中国环境科学, 1994,14(6):407−410.
Fan S J, Huang Z X, Liu J L.The A−P value method for the control of total atmospheric pollutant emission and its application [J]. China Environmental Science, 1994,14(6):407−410.

[9] 马小明,李诗刚,栾胜基,等.大气污染总量控制方案的区域排放当量制定方法 [J]. 中国环境科学, 1996,16(5):350−353.
Ma X M, Li S G, Luan S J, et al. Using area pollutant emission equimolar concept to formulate total atmospheric pollutant emission control plan [J]. China Environmental Science, 1996,16(5):350−353.

[10] 徐 鹤,丁 洁,冯晓飞.基于 ADMS−Urban 的城市区域大气环境容量测算与规划 [J]. 南开大学学报(自然科学版), 2010,43(4):67−72.
Xu H, Ding J, Feng X F. Calculation and programming of regional atmospheric environmental capacity based on ADMS−urban model [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis, 2010,43(4): 67−72.

[11] 卢聪景,石晓枫.线性规划法计算工业区大气承载力的探讨 [J]. 环境科学与技术, 2008,(10):142−144.
Lu C J, Shi X F. Discussion on linear programming method for calculating atmosphere bearing capacity of an Industrial Park [J]. Environmental Science & Technology, 2008,(10):142−144.

[12] 顾 晨,王佳欣,吕沛诚,等.兰州市 3 种主要污染物大气环境容量季节差异及排放总量控制 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2021, 57(3):302−310,317.
Gu C, Wang J X, Lv P C, et al. Seasonal variations in atmospheric environmental capacity and total quantity control for three criteria pollutants in Lanzhou [J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2021,57(3):302−310,317.

[13] 李 莉,程水源,陈东升,等.基于 CMAQ 的大气环境容量计算方法及控制策略 [J]. 环境科学与技术, 2010,33(8):162−166.
Li L, Cheng S Y, Chen D S, et al. A calculated methodology of atmospheric environmental capacity based on CMAQ and control strategy [J]. Environmental Science & Technology, 2010,33(8):162−166.

[14] 薛文博,付 飞,王金南,等.2014 年全国城市 $PM_{2.5}$ 达标约束的大气环境容量模拟 [J]. 中国环境科学, 2014,34(10):2490−2496.
Xue W B, Fu F, Wang J N, et al. Modeling study on atmospheric environmental capacity of major pollutants constrained by $PM_{2.5}$ compliance of Chinese cities [J]. China Environmental Science, 2014, 34(10):2490−2496.

[15] 常嘉成,赵天良,谭成好,等.基于 WRF−chem 模拟的玉溪市大气环境容量精细估算 [J]. 环境科学学报, 2017,37(10):3876−3884.

Chang J C, Zhao T L, Tan C H, et al. An elaboraive assessment of atmosphere environmenal capacity in Yuxi based on WRF.Chem modeling [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017,37(10):3876−3884.

[16] 钱　骏,何　敏,陈军辉,等.基于区县细颗粒物达标约束的四川盆地城市群大气环境容量模拟研究 [J]. 环境污染与防治, 2022,44(6):699−704.
Qian J, He M, Chen J H, et al. Simulation of atmospheric environmental capacity of urban agglomeration in Sichuan Basin constrained by fine particulatematter compliance of distriets and counties [J]. Environmental Pollution & Control, 2022,44(6):699−704.

[17] 张明博,高照琴,于梓涵,等.环境质量目标约束下产业园区污染物排放量动态管控研究 [J]. 环境影响评价, 2025,47(01):24−29,55.
Zhang M B, Gao Z Q, Yu Z H, et al. Dynamic control of pollutant emissions for industrial parks under the constraints of environmental quality objectives [J]. Environmental Impact Assessment, 2025,47(1):24−29,55.

[18] 陆成伟,谭钦文,杨欣悦,等.基于 CMAQ 模型的快速大气环境容量测算方法、存储介质和终端:201811326127.7 [P]. 2020−04−07.
Lu C W, Tang Q W, Yang X Y, et al. Fast atmospheric environmental capacity calculation method based on CMAQ model, storage medium and terminal: 201811326127.7 [P]. 2020−04−07.

[19] 周子航,邓　也,谭钦文,等.四川省人为源大气污染物排放清单及特征 [J]. 环境科学, 2018,39(12):5344−5358.
Zhou Z H, Deng Y, Tan Q W, et al. Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in the Sichuan province [J]. Environmental Science, 2018,39(12):5344−5358.

[20] 周子航,邓　也,谭钦文,等.四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势 [J]. 环境科学, 2019,40(4):1613−1626.
Zhou Z H, Deng Y, Tan Q W, et al. Speciated VOCs emission inventory and ozone formation potential in Sichuan province [J]. Environmental Science, 2019,40(4):1613−1626.

[21] 周子航,陆成伟,谭钦文,等.成都双流国际机场大气污染物排放清单与时空分布特征 [J]. 中国环境监测, 2018,34(3):75−83.
Zhou Z H, Lu C W, Tan Q W, et al. Emission inventory and spatial and temporal distribution characteristics of air pollutant in Chengdu Shuangliu international airport [J]. Environmental Monitoring in China, 2018,34(3):75−83.

[22] Zhou Z H, Tan Q H, Deng Y, et al. Compilation of emission inventory and source profile database for volatile organic compounds: A case study for Sichuan, China [J]. Atmos. Pollut. Res., 2020,11:105–116.

[23] Feng M, Hu X, Zhou L, et al. Real−World vehicle volatile organic compound emissions and their source profile in Chengdu based on a roadside and tunnel study [J]. Atmosphere, 2021,12,861.

[24] Zhou Z H; Tan Q W, Deng Y, Wu K Y, et al. Emission inventory of anthropogenic air pollutant sources and characteristics of VOCs species in Sichuan Province, China [J]. J. Atmos. Chem, 2019,76:21–58.

[25] 金晨阳,陈军辉,范武波,等.机动车尾气排放模型应用及研究进展 [J]. 环境科学导刊, 2020,39(2):42−48.
Jin C Y, Chen J H, Fan W B, et al. Application and research progress of vehicle emission models [J]. Environmental Science Survey, 2020,39(2):42−48.

[26] 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 [J]. 环境科学, 2020,41(10):4482−4494.
Xu C X, Chen J H, Li Y, et al. Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollution sources based on second pollution source census data in Sichuan province [J]. Environmental Science, 2020,41(10):4482−4494.

[27] 王继钦,陈军辉,韩　丽,等.四川省加油站挥发性有机物排放及控制现状 [J]. 环境污染与防治, 2020,42(6):672−677.
Wang J Q, Chen J H, Han L, et al. Emission and control of volatile organic compounds in service stations in Sichuan [J]. Environmental Pollution & Control, 2020,42(6):672−677.

[28] 冯小琼,陈军辉,姜　涛,等.四川盆地 2018 年畜禽养殖氨排放清单研究 [J]. 四川环境, 2020,39(5):24−31.
Feng X Q, Chen J H, Jiang T, et al. Study on livestock ammonia emission inventory of Sichuan basin in 2018 [J]. Sichuan Environment, 2020,39(5):24−31.

[29] Zheng B, Zhang Q, Tong D, et al. Resolution dependence of uncertainties in gridded emission inventories: a case study in Hebei, China [J]. Atmos. Chem. Phys., 2017,17(2):921−933.

[30] Zheng B, Cheng J, Geng G N, et al. Mapping anthropogenic emissions in China at 1km spatial resolution and its application in air quality modeling [J]. Science Bulletin, 2021,66(6):612−620.

[31] Lu C W, Zhou Z H, Liu H F, et al. An iteratively optimized downscaling method for city−scale air quality forecast emission inventory establishment [J]. Science of The Total Environment, 2024, 176824.https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176824.

[32] 陆成伟,周子航,刘合凡,等.基于动态模型的四川盆地植物挥发性有机物排放 [J]. 环境化学, 2018,37(4):836−842.
Lu C W, Zhou Z H, Liu H F, et al. Emission of biogenic volatile organic compounds in Sichuan Basin using a dynamic model [J]. Environmental Chemistry, 2018,37(4):836−842.

[33] 张恬月,杨欣悦,谭钦文,等.成都市空气质量预报系统的应用及预报效果评估 [J]. 四川环境, 2019,38(3):96−105.
Zhang T Y, Yang X Y, Tan Q W, et al, Application of Chengdu air quality forecast system and evaluation of forecast effect [J]. Sichuan Environment, 2019,38(3):96−105.

[34] 杨欣悦,谭钦文,陆成伟,等.基于 CFSv2 的延伸期空气质量数值预报技术及效果评估 [J]. 中国环境监测, 2021,37(5):175−184.
Yang X Y, Tan Q W, Lu C W, et al. Numerical prediction technology and effect evaluation of extended period air quality based on CFSv2 [J]. Environmental Monitoring in China, 2021,37(5):175−184.

[35] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A description of the advanced research WRF version 3 [Z]. NCAR Tech. Note, 2008,475, 113.

[36] 赵芝灏.”三线一单”及工业园区规划环评分析 [J]. 中国资源综合利用, 2021,39(5):150−152,162.
Zhao Z H. Analysis on “Three Lines and One Order” and environmental impact assessment of industrial park planning [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021,39(5):150−152, 162.

[37] 董红召,廖世凯,杨　强,等.集成 AEC 和时空特征的工业园区 $PM_{2.5}$ 浓度预测 [J]. 中国环境科学, 2022,42(10):4537−4546.
Dong H Z, Liao S K, Yang Q, et al. $PM_{2.5}$ concentration prediction in industrial parks integrating AEC and spatio−temporal characteristics [J]. China Environmental Science, 2022,42(10):4537−4546.

作者简介：陆成伟(1987−),男,四川成都人,高级工程师,博士,主要研究方向为空气质量模拟及预报.发表论文 20 余篇.lcw@cdaes.cn.