

# 重庆土地利用结构低碳优化及其风热环境变化

杨宝钢<sup>1</sup>, 朱浩楠<sup>1</sup>, 陈昉<sup>2</sup>, 王颖<sup>1</sup>, 杨静秋<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国气象局气候资源经济转化重点开放实验室, 重庆市气候中心, 重庆, 401147

<sup>2</sup> 重庆云辑数字科技有限责任公司, 重庆, 401147

**摘要** 建设低碳、宜居新型城市是城市发展的新理念新趋势, 在城市规划建设中同步考虑低碳排放和气候适应性改善, 对降低城镇化进程中的气候变化影响、提高城市生活品质具有重要意义。本文以重庆经济技术开发区为试验区, 基于线性规划对试验区2025年土地利用结构进行低碳优化, 通过微尺度数值模式模拟土地利用低碳和空间优化后试验区1月和7月风热环境的变化。结果表明: (1) 土地利用结构低碳优化后, 试验区减少建设用地等碳源, 增加了林地等碳汇, 年土地碳排放总量减少12.1%, 约为 $19.0 \times 10^4$ t。(2) 低碳和空间优化改善了试验区通风环境, 1月和7月平均风速分别增加0.7%和1.5%, 局地最大增幅8.0%和11.0%; 73.5%和79.3%的地段平均风速增加; 日逐小时序列中分别有11个和20个时次平均风速增加。城市热岛趋于缓解, 1月和7月平均气温分别下降1.3%和0.7%, 局地最大降幅13.2%和5.0%; 76.3%和76.2%的地段平均气温下降; 日逐小时序列中所有时次平均气温都有所下降。对城市土地利用结构进行低碳和空间优化在一定程度上能够同时降低碳排放、改善风热环境、提高城市气候适应性, 本研究可以为制定重庆经济社会发展规划目标和城市总体规划提供参考依据。

**关键词** 土地利用结构 低碳优化 微尺度数值模拟 风热环境 气候适应性

## Effects of land use optimization on carbon emissions and wind-thermal environments in Chongqing

YANG Baogang<sup>1</sup>, ZHU Haonan<sup>1</sup>, CHEN Fang<sup>2</sup>, WANG Ying<sup>1</sup>, and YANG Jingqiu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CMA Key Open Laboratory of Transforming Climate Resources to Economy, Chongqing climate center, Chongqing, 401147

<sup>2</sup> Chongqing Cloud Logic Technology Company

**Abstract** Constructing low-carbon and livable new cities is a new concept and trend in urban development. Considering simultaneously low-carbon emissions and climate adaptability improvements in urban planning and construction holds paramount significance. This approach plays a critical role in mitigating the effects of climate change throughout the urbanization process and enhancing the overall quality of urban life. This study selected the Chongqing Economic and Technological Development Zone as the experimental area, employing linear programming to conduct low-carbon optimization on the land use structure for the year 2025. Utilizing a micro-scale numerical model, the changes in wind-thermal environment were simulated within the experimental area for both January and July following the optimization of land use for low-carbon and spatial efficiency. The results indicate that the following: (1) After optimizing the land use structure for low-carbon, the experimental area reduced carbon sources such as construction land while increasing carbon sinks such as forests. The total annual land carbon emissions decreased by 12.1%, approximately  $19.0 \times 10^4$  tons. (2) The combination of low-carbon optimization and spatial optimization improved the ventilation environment in the experimental area. In January and July, the average wind speeds increased by 0.7% and 1.5%, respectively, with local maximum increases of 8.0% and 11.0%. Average wind speeds increased at 73.5% and 79.3% of the locations, and an observed increase in average wind speed occurred at 11 time points and 20 time points in the daily hourly sequence, respectively. The urban heat island effect tended to alleviate, and the average temperatures in January and July showed reductions of 1.3% and 0.7%, respectively, with maximum localized decreases of 13.2% and 5.0%. Average temperatures decreased at 76.3% and 76.2% of the locations, and all time points in the daily hourly sequence showed a decrease in average temperature. Optimizing urban land use structure for both low-carbon and spatial efficiency holds the potential to concurrently reduce carbon emissions, improve wind-thermal environment, and enhance urban climate adaptability. The study can serve as valuable references for formulating goals for Chongqing's economic and social development planning as well as overall urban planning indicators.

**Key words** Land use structure, Low-carbon optimization, Micro-scale numerical simulation, Wind-thermal environment, Climate adaptability.

## 1 引言

IPCC 第六次评估报告第一工作组报告《气候变化 2021: 自然科学基础》指出全球气候正在经历前所

收稿日期 2023-12-04; 网络预出版日期

作者简介 杨宝钢, 男, 1976 年出生, 硕士, 高级工程师, 主要从事气候应用服务研究工作, E-mail: 282901280@qq.com

通讯作者 朱浩楠, E-mail: 245825875@qq.com

资助项目 重庆市自然科学基金 CSTB2022NSCQ-MSX0890, 重庆市应对气候变化系列试点项目 21C00196, 中国气象局城市气象重点开放实验室开放基金 LUM-2024-14, 重庆市气象部门人才支持性项目 RCZC-202302

未有的变化(翟盘茂等, 2021), 人类活动对大气、海洋和陆地变暖有毋庸置疑的影响(Eyring et al., 2021; Fox-Kemper et al., 2021; Seneviratne et al., 2021)。土地资源作为人类社会赖以生存和发展的物质基础, 人类对土地利用活动的加大引起了温室气体净排放增加(吴建国等, 2020)。土地利用结构变化, 如城市化过程中大量的林地、草地、湿地等转化为建设用地, 将直接导致碳汇能力下降以及碳排放量增长(冯杰等, 2019; 罗谷松等, 2019)。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》提出“顺应城市发展新理念新趋势, 开展城市现代化试点示范, 建设宜居、创新、智慧、绿色、人文、韧性城市”, 在城市规划建设中充分考虑土地利用结构低碳优化和风热环境等气候适应性改善, 对减少城镇化进程中的温室气体排放、提高城市生活品质具有重要意义。

方精云等(2007)利用森林和草场资源清查、农业统计、地面气象观测和卫星遥感资料等, 对1981-2000年中国森林、草地、灌草丛及农作物等陆面植被的碳汇进行了估算, 为后续研究提供了参考。肖红艳等(2012)基于土地利用碳排放/吸收数据, 对重庆市1997-2008年的碳排放演变过程和格局进行了分析, 并预测了2020年的碳排放量, 结果表明重庆市2020年的土地利用规划是符合低碳、环境生态友好的可持续发展规划的, 但减碳压力依然较大。赵荣钦等(2013)基于线性规划方法, 以碳蓄积、碳排放和碳汇为约束条件, 提出了南京市三种土地利用低碳优化方案。彭文甫等(2016)对四川省20年来的土地利用碳排放足迹进行了定量分析, 认为四川省减排的重点应该在保持或增加现有林地的同时降低建设用地的碳排放、碳足迹。王刚等(2017)基于2014年成都市县域单元土地利用遥感图像和能源消耗统计数据, 分析了成都市县域碳收支空间分布特征, 并对碳收支、土地利用和经济发展协同关系进行了研究, 结果表明土地利用开发减少了土地的碳汇功能。近年来, 国内外学者针对土地利用碳收支的强度(曾永年等, 2015; 路昌等, 2016; 顾汉龙等, 2022; 张苗等, 2022)和时空演变特征(马远等, 2021; Lin et al., 2021; 李彦旻等, 2022)等进行了研究, 并基于多种算法评估土地利用结构低碳优化, 为制定区域差别化的节能减排政策、实现“双碳”目标提供参考。朱浩楠等(2019)利用WRF数值模式, 对重庆市梁平区待建湿地公园的位置与面积规划进行敏感性试验, 给出了对当地的局地气候舒适性有较好改善的试验方案, 指出湿地公园的规划应当将局地风环境状况作为重要参考指标。黄晓军等(2022)以西安市为例, 采用遥感影像数据, 对土地利用规模、结构和形态变化与热环境变化关系进行了系统分析, 揭示了土地利用变化对城市热环境的影响。乔治等(2022)提出一种基于土地利用类型的城市热环境变化贡献度算法, 定量计算2005-2020年土地利用类型、自然气候与人类活动对京津冀城市群热环境变化贡献, 以期为适应和减缓全球气候变化提供理论和数据支撑。杨珊珊等(2022)利用气象资料、高分辨率地理信息数据、城区建筑矢量数据、陆地卫星遥感资料, 采用数理统计以及地表温度反演技术等, 综合分析了石家庄风环境、热环境及通风潜力情况, 并结合石家庄实际土地利用现状及未来规划资料, 构建了其核心规划区域的通风廊道系统。徐宏超等(2023)探究了2001-2020年不同土地利用类型对京津冀城市群夏季昼夜区域热环境的影响, 研究结果有助于理解区域热环境分布特征及影响机制, 从而为区域层面的热岛缓解策略制定提供依据。目前大多数的研究关注土地利用变化带来的碳排放的演变过程、土地利用结构低碳优化算法及低碳优化对区域节能减排政策的影响, 亦或着眼不同土地利用类型城市热环境的贡献率、土地利用规模-结构-形态演变对城市热环境的影响、模拟土地利用变化对局地风热环境及气候舒适性的影响, 对土地利用结构低碳优化与局地风热环境变化的协同研究不多见。

重庆经济技术开发区地处重庆中心城区, 是西部地区最早设立的国家级经济技术开发区, 随着开发区城镇化、工业化的进程快速化, 原有的土地利用结构发生改变, 在很大程度上改变了碳源汇格局, 城市热岛效应增强、人体舒适度下降等问题日趋严重(郑箐舟等, 2023)。基于城市建设规划绿色、低碳、宜居等发展趋势, 建立气候适应性城市逐渐成为城市规划建设的重要参考要素(张蔚文等, 2009; Wang et al., 2018; Madsen et al., 2019)。本文结合重庆经济技术开发区当前及未来的相关规划, 对研究区2025年的规划土地利用结构进行了低碳优化, 利用微尺度数值模式开展现行规划方案低碳优化前后风热环境对比敏感试验, 定量评估了土地利用结构低碳优化对局地土地碳排放总量和风热环境的影响。研究中提出思路和方法可以应用于基于土地利用变化的碳排放和风热环境一体化定量评估, 为气候适应型城市建设提供同步实现低碳排放、提升气候适应能力的路径。

## 2 试验区概况与数据来源

### 2.1 试验区概况

本文所选试验区为重庆经济技术开发区东区(以下简称“重庆经开区”), 位于重庆市南岸区, 2025年规划建设面积6080 hm<sup>2</sup>。重庆经开区地处丘陵地带, 东南西三面环丘陵且为南北走向, 北依长江, 海拔高度在200-300m之间。重庆经开区处亚热带湿润季风区, 春早夏长, 秋短冬暖, 1991-2020年年平均气温18.8℃

(最冷月 1 月平均气温 7.5℃、最热月 7 月平均气温 28.2℃), 年平均风速 1.4m/s (最小风速月 1 月平均风速 1.1 m/s、最大风速月 7 月平均风速 1.6 m/s), 以东北和北东北为主导风向。

2.2 数据来源及说明

2.2.1 土地利用数据

本研究中用于碳排放估算和微尺度数值模拟的重庆经开区 2025 年土地利用空间分布图来源于重庆经济技术开发区管委会。空间分布图在满足数值模式输入数据要求基础上经过了涉密模糊化处理, 土地利用分为耕地、草地、林地、建设用地、水域 5 类, 分布图中的耕地包括方精云等 (2007) 中的“耕地”和“其他农业用地”, 林地包括“林地”和“园地”, 草地包括 “草地” 和 “灌草地”。

2.2.2 气象数据

中尺度模拟使用重庆中心城区沙坪坝、渝北、巴南、北碚 4 个国家气象观测站和 209 个区域气象观测站 2017-2021 年 1 月和 7 月气温、气压、相对湿度、风向风速等要素逐小时观测数据进行资料同化, 数据来源于重庆市气象局, 上述气象观测数据均通过了质量控制和均一性检验。中尺度模式模拟的气候态要素场作为微尺度模式初始场和边界场数据。

3 研究方法

3.1 土地利用碳排放强度的确定

《南岸区及 8 镇 (街道) 土地利用总体规划 (2006-2020 年) 调整方案》对包括重庆经开区在内土地利用进行了总体控制规划, 本研究根据该方案中给出的土地利用面积比, 通过面积加权计算试验区土地利用类型的碳排放强度 (赵荣钦等, 2013)。

根据方精云等 (2007)、肖红艳等 (2012) 和王胜蓝等 (2017) 的研究, 重庆地区常用的“耕地”碳排放强度为 0.497 t/hm<sup>2</sup>a、“其他农业用地”一般为-0.005 t/hm<sup>2</sup>a, “林地”的碳排放强度通常为-0.581 t/hm<sup>2</sup>a、“园地”的碳排放强度通常取-0.398 t/hm<sup>2</sup>a, “草地”的碳排放强度取-0.021 t/hm<sup>2</sup>a、“灌草地”碳排放强度为-0.106 t/hm<sup>2</sup>a。试验区 2025 年规划“耕地”与“其他农业用地”面积比约为 3: 1, “林地”面积与“园地”面积比约为 41: 9, “草地”和“灌草地”面积比约为 1: 1。通过面积加权计算得到本研究中合并后的耕地碳排放强度为 0.371 t/hm<sup>2</sup>a, 林地碳排放强度为-0.549, 草地碳排放强度为-0.0635 t/hm<sup>2</sup>a。另外, 根据王胜蓝等 (2017) 的研究, 水域碳排放强度考虑为-0.251 t/hm<sup>2</sup>a。根据周宝同等 (2016) 的研究, 结合《南岸区重庆经开区生态环境保护“十四五”规划 (2021-2025 年) 》, 2025 年重庆经开区建设用地碳排放强度约为 330 t/hm<sup>2</sup>a。重庆经开区 2025 年规划土地利用类型对应的碳排放强度如表 1 所示。

表 1 不同土地利用类型对应的碳排放强度

| Table 1 The carbon emissions of different land use types |      |                             |
|----------------------------------------------------------|------|-----------------------------|
| 序号                                                       | 用地类型 | 碳排放强度 (t/hm <sup>2</sup> a) |
| 1                                                        | 耕地   | 0.371                       |
| 2                                                        | 林地   | -0.549                      |
| 3                                                        | 草地   | -0.0635                     |
| 4                                                        | 水域   | -0.251                      |
| 5                                                        | 建设用地 | 330                         |

3.2 土地利用结构低碳优化模型

本文以线性规划方法建立土地利用结构低碳优化模型, 据表 1, 建立如下模型目标函数:

$$\text{Min}(H(x))=0.371X_1-0.549X_2-0.0635X_3-0.251X_4+330X_5 \tag{1}$$

式 (1) 中  $H(x)$  为年碳排放总量,  $X_{1-5}$  分别代表耕地、林地、草地、水域和建设用地面积。

根据《南岸区及 8 镇 (街道) 土地利用总体规划 (2006-2020 年) 调整方案》、《重庆经济技术开发区总体规划 (2011-2020) 》、《重庆经济技术开发区经济和社会发展的第十四个五年规划和二〇三五年远景目标》、《南岸区重庆经开区生态环境保护“十四五”规划 (2021-2025 年) 》, 试验区土地总面积 6080 hm<sup>2</sup>; 2020 年已有建设用地约 2430 hm<sup>2</sup>, 最多有 5080 hm<sup>2</sup> 可用于规划建设; 2025 年试验区规划预期人口 350000 人, 根据 GM(1,1) 灰色模型预测试验区 2025 年城镇人口平均用地约 0.01234 hm<sup>2</sup>/人, 农业人口平均用地约 0.04785 hm<sup>2</sup>/人; 试验区永久基本农田应占总面积 3.05%, 耕地面积下限 185.4 hm<sup>2</sup>; 到 2025 年试验区绿地不得少于 1445.76 hm<sup>2</sup>, 草地和林地面积比例应大于等于 2:8; 试验区水域面积不应少于当前的 48 公顷。据以上所述分别建立土地总面积、建设用地建设面积、人口数量、耕地面积、林地和草地面积、林地和草地比例、水域面积约束条件如式 (2) - (8)。

$$\sum_{j=1}^5 X_j = 6080 \tag{2}$$

$$2430 \leq X_5 \leq 5080$$

$$350000 \leq X_1 / 0.04785 + X_5 / 0.01234$$

$$185.4 \leq X_1$$

$$1445.76 \leq X_2 + X_3$$

$$0 \leq -2X_2 + 8X_3$$

$$48 \leq X_4$$

(3)
(4)
(5)
(6)
(7)
(8)

3.3 土地利用空间分布风热环境优化

基于土地利用结构低碳优化结果对原规划土地利用空间分布进行调整以提高局地风速、减缓城市热岛，从而改善气候适应性，调整原则如下：(1)主导风向和试验区地形丘陵岭谷走向基本一致，考虑依地形设置通风廊道；(2)降低建设用地聚集度；(3)通过不同土地利用交错分布，降低园区风拖拽系数。

3.4 区域微气候的微尺度数值模拟

本研究利用多尺度数值模拟技术开展重庆经开区风热环境等微气候精细化模拟，区域模式输出的气候态要素场作为初始场和边界场驱动微尺度模式进行精细化微尺度模拟。

3.4.1 区域模式设置

本试验使用新一代中尺度天气预报模式——Weather Research and Forecasting Model 4.1(简称 WRF 模式) (Wang et al., 2012) 进行区域气候数值模拟。模拟采用了四层嵌套，采用兰伯特投影，最外层网格中心经纬度为 35° N 和 94° E。由外至内，各层网格分辨率分别为：27 km、9 km、3 km 和 1 km，网格的空间位置如图 1 所示。模式垂直方向设为 46 层，顶层气压 50 hPa。模式采用的主要物理参数化方案包括：KF 积云对流方案，WSM6 微物理方案，Goddard 短波辐射方案，RRTM 长波辐射方案，Noah 陆面模式，MYJ 边界层参数化方案，同时在第四网格中开启城市冠层参数化方案。

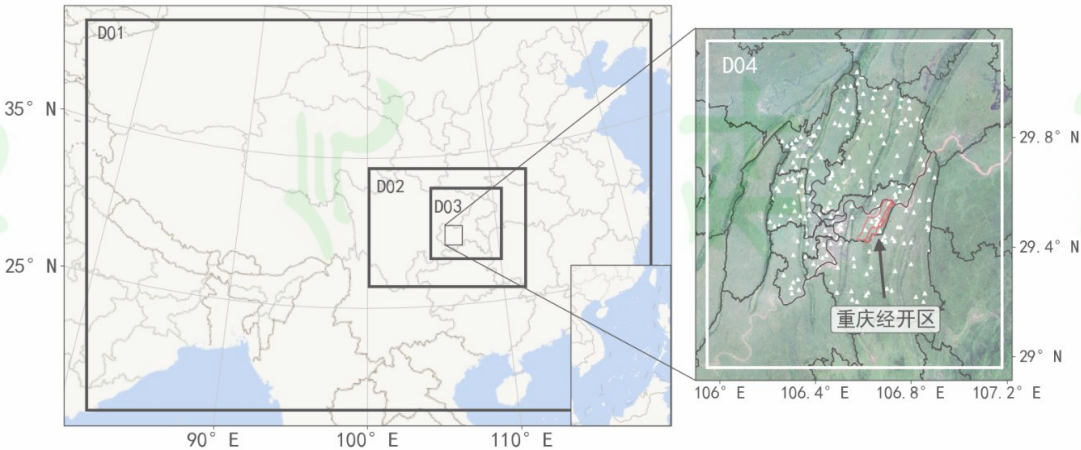


图 1 WRF 模式模拟的多重网格嵌套分布

Fig.1 The multi-grid nesting distribution in the WRF model simulation

为进一步减少模拟误差，在进行中尺度模拟时使用重庆中心城区沙坪坝、渝北、巴南、北碚 4 个国家气象观测站和 209 个区域气象观测站 2017-2021 年 1 月和 7 月气温、气压、相对湿度、风向风速等要素逐小时观测数据进行了资料同化。同化采用的算法为逐小时滚动四维资料同化技术 (Four Dimensional Data Assimilation, FDDA)。

3.4.2 微尺度模式设置

为模拟更精细的气象要素，本试验进一步使用重庆—南京大学微尺度模式进行模拟试验，该模式是在南京大学次网格模式 (蒋维楣等, 2009) 基础上开发的适用于重庆地区边界层微尺度气象模式，模式采用了 klemp 地形跟随坐标系，并考虑 k-ε湍流参数化方案和人为热源参数化方案，适用于复杂地形区域微尺度数值模拟 (刘晓冉等, 2020; 朱浩楠等, 2021)。试验使用 WRF 模式模拟得到了 2017-2021 年 1 月和 7 月逐小时中尺度要素场，根据 1991-2020 年历史观测数据和多年模拟结果，挑选出最接近试验区最冷最小风速月 1 月和最热最大风速月 7 月气候态的日模拟结果作为典型日 (2020 年 1 月 18 日和 2020 年 7 月 29 日)，使用当日要素值作为微尺度模式初边条件，分别使用试验区 2025 年规划和低碳优化后的土地利用分布开展试验区微尺度诊断模拟。

微尺度模式水平分辨率设为 100m，垂直方向 21 层；模式顶海拔为 2500m。积分时，入流边界采用 Davies 边界条件，即不断使用 WRF 模式气候态数据对微尺度模式进行边界强迫；出流边界则使用无梯度边界条件。模式积分步长 0.1s，当检测到变量不再发生明显变化后，即视为积分达到收敛，从而得到模拟范围内的逐小时微尺度大气稳态。另外，为使微尺度模式变量更快适应精细化的下垫面信息，首先对模式的地表辐射模块

做快速积分，然后再进行大气动力部分的模拟(朱浩楠等，2021)。

图 2 给出了微尺度模式模拟范围内地面气象站观测平均值与站点所在位置模拟结果平均值的逐小时序列对比。从图可见，模式能较好地反映试验区 1 月、7 月气温和风速日变化特征，1 月日气温和风速时间序列的均方根误差分别为 1.1 ℃和 0.2 m/s，7 月为 0.3 ℃和 0.4 m/s，误差均在可接受范围内。因此可将微尺度模拟结果作为试验区局地气候状况的近似。

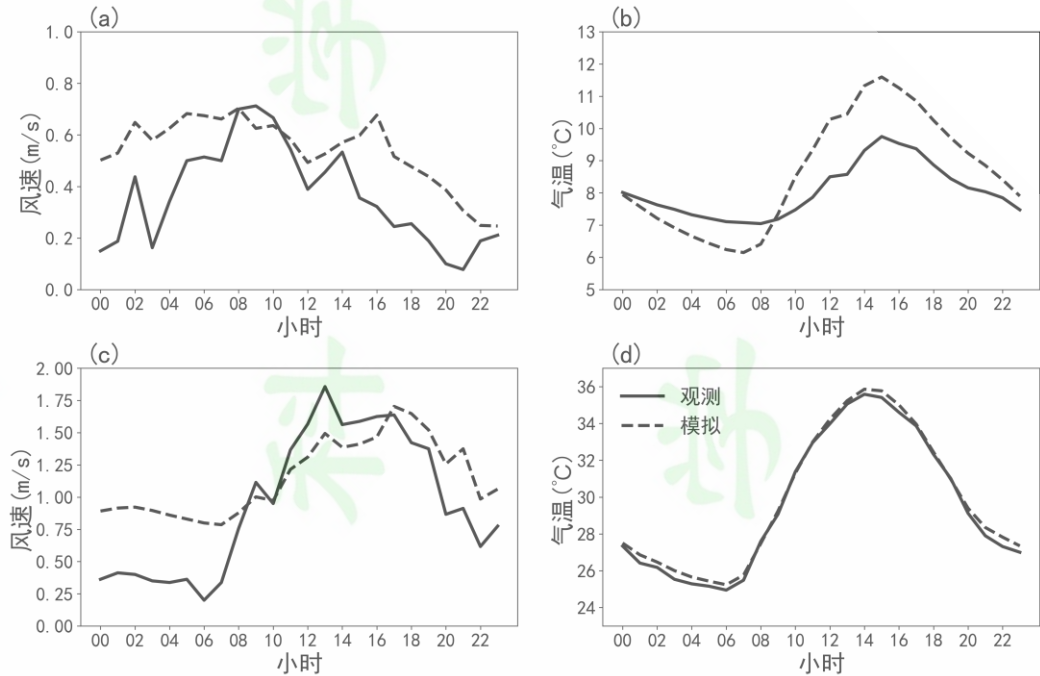


图 2 微尺度模拟结果与站点观测值对比，实线代表站点观测值，虚线代表模拟结果。(a, b) 1 月小时平均风速和平均气温，(c, d) 7 月小时平均风速和平均气温

Fig.2 Comparison between microscale simulation results and station observations, with solid lines representing station observations and dashed lines representing simulation results. (a, b) Hourly average wind speed and hourly average temperature in January, (c, d) Hourly average wind speed and hourly average temperature in July

## 4 结果分析

### 4.1 土地利用结构低碳优化分析

根据 3.2 节的土地利用结构低碳优化模型，最终求解得到以碳排放最小为目标的重庆经开区 2025 年各类土地利用面积，试验区现行规划、低碳优化后土地利用面积和基于表 1 计算得到年碳排放总量如表 2。低碳优化后试验区 2025 年土地碳源即建设用地减少 603 hm<sup>2</sup>，耕地增加 185.4 hm<sup>2</sup>；土地碳汇即林地增加 435.7 hm<sup>2</sup>，草地减少 18.1 hm<sup>2</sup>。当前规划重庆经开区的 2025 年土地利用年总碳排放量 156.4×10<sup>4</sup>t，低碳优化后为 136.4×10<sup>4</sup>t，通过土地利用结构低碳优化减少了 19.0×10<sup>4</sup>t 即 12.1%的年碳排放总量。

表 2 现行规划和优化后的各类土地利用面积和碳排放量

Table 2 The planned and optimized areas of land uses and their carbon emissions

| 土地利用类型 | 现行规划                 |           | 优化结果                 |           |
|--------|----------------------|-----------|----------------------|-----------|
|        | 面积(hm <sup>2</sup> ) | 碳排放量(t)   | 面积(hm <sup>2</sup> ) | 碳排放量(t)   |
| 耕地     | 0                    | 0         | 185.4                | 68.8      |
| 林地     | 932                  | -511.7    | 1367.7               | -750.9    |
| 草地     | 360                  | -22.9     | 341.9                | -21.7     |
| 水域     | 48                   | -12.0     | 48                   | -12.0     |
| 建设用地   | 4740                 | 1564200   | 4137                 | 1365210   |
| 总计     | 6080                 | 1563653.4 | 6080                 | 1364494.2 |

### 4.2 土地利用空间分布风热环境优化

#### 4.2.1 土地利用空间分布优化

图 3 为试验区（图中黑框内）现行 2025 年规划土地利用空间分布（图 3a）、低碳优化后+风热环境优化的土地利用空间分布（图 3b）和优化后的土地利用变化（图 3c）。优化后，原本规划中较为集中的林地、草地依试验区内丘陵岭谷呈条带零散分布，基本形成了与主导风向走向一致的绿地通风廊道，通风廊道密度明显增加，中部通风廊道直通长江；通风廊道内林地和草地交错搭配分布，降低了研究区内风拖拽系数；建设用地被通风廊道分割，降低了建设用地等人为热源聚集度；在研究区中部通风廊道和临江区域新增了耕地，

和其他规划中的生态农田湿地景观隔江相望。

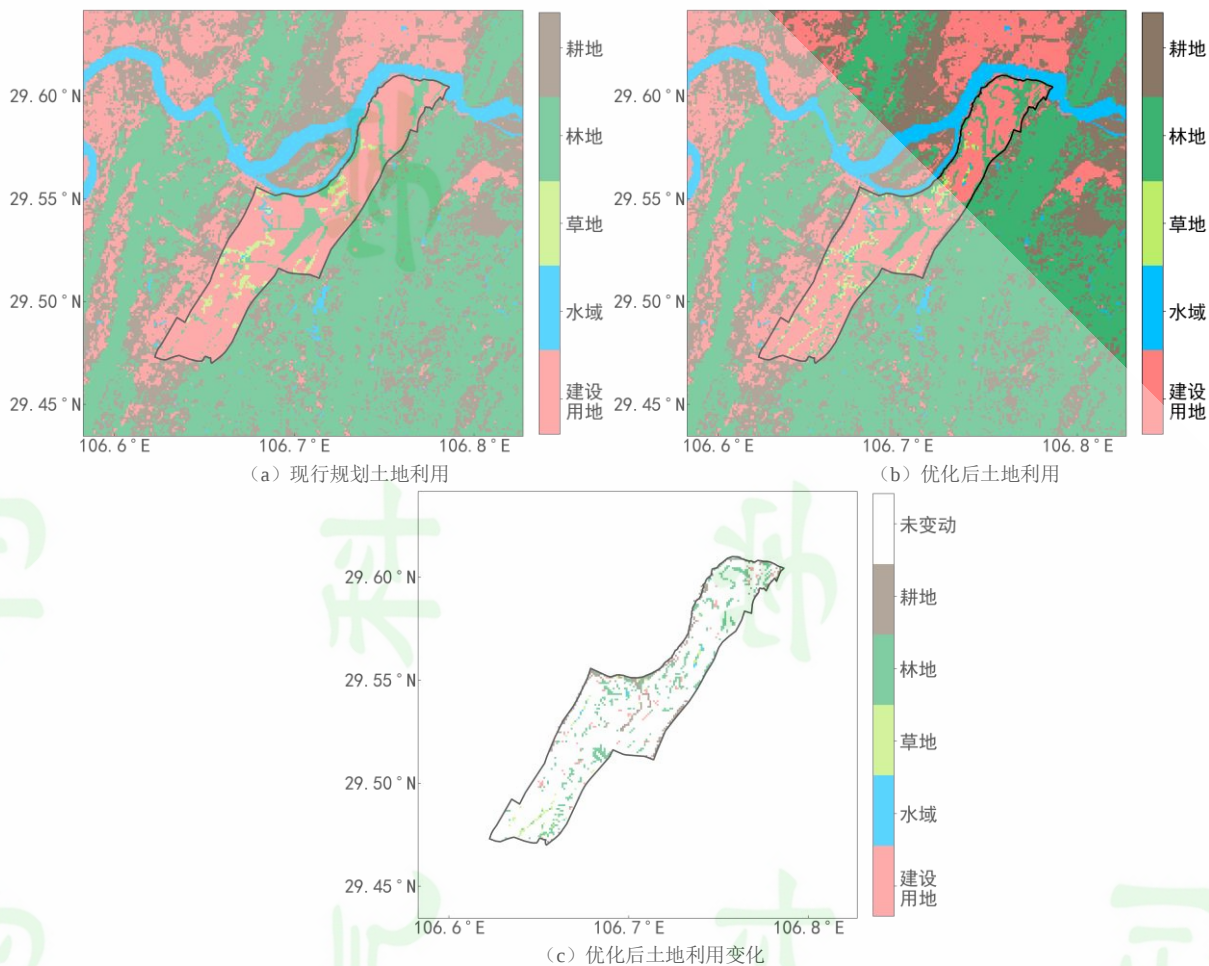


图 3 现行规划土地利用分布、优化后的土地利用分布和优化后的土地利用变化

Fig.3 Current planned land use distribution, optimized land use distribution, and changes in optimized land use.

#### 4.2.2 风热环境微尺度数值模拟

通过 3.4 章节的数值模式对规划土地利用结构低碳优化前后重庆经开区冬季典型月 1 月和夏季典型月 7 月逐小时平均风速进行微尺度数值模拟，优化后与优化前试验区 1 月、7 月昼（09 时-20 时）夜（21 时-08 时）平均风速差值场见图 4（图 a、b、c、d 分别为 1 月白天、夜间和 7 月白天、夜间），1 月、7 月小时平均风速差序列见图 5。

由图 4 可知，低碳优化后：（1）试验区 1 月平均风速差值场有 73.5%的正值区（白天、夜间分别为 81.1%、53.3%），7 月正值区占比 79.3%（白天、夜间分别为 81.9%、73.2%），风速增加地段主要分布在试验区北部、中部和东南部。（2）试验区 1 月白天平均风速增加近 0.01m/s，增加幅度约 1.1%，中部偏西局地最大增加 0.04 m/s，最大增幅达 8.0%；1 月夜间平均风速变化不明显。7 月平均风速明显增加，白天增加近 0.02m/s，增幅 1.8%，中部偏西局地最大增加 0.09 m/s，局地最大增幅 11.0%；7 月夜间平均风速增加近 0.01m/s，增幅 0.9%，局地最大增加 0.04 m/s，局地最大增幅 6.0%。

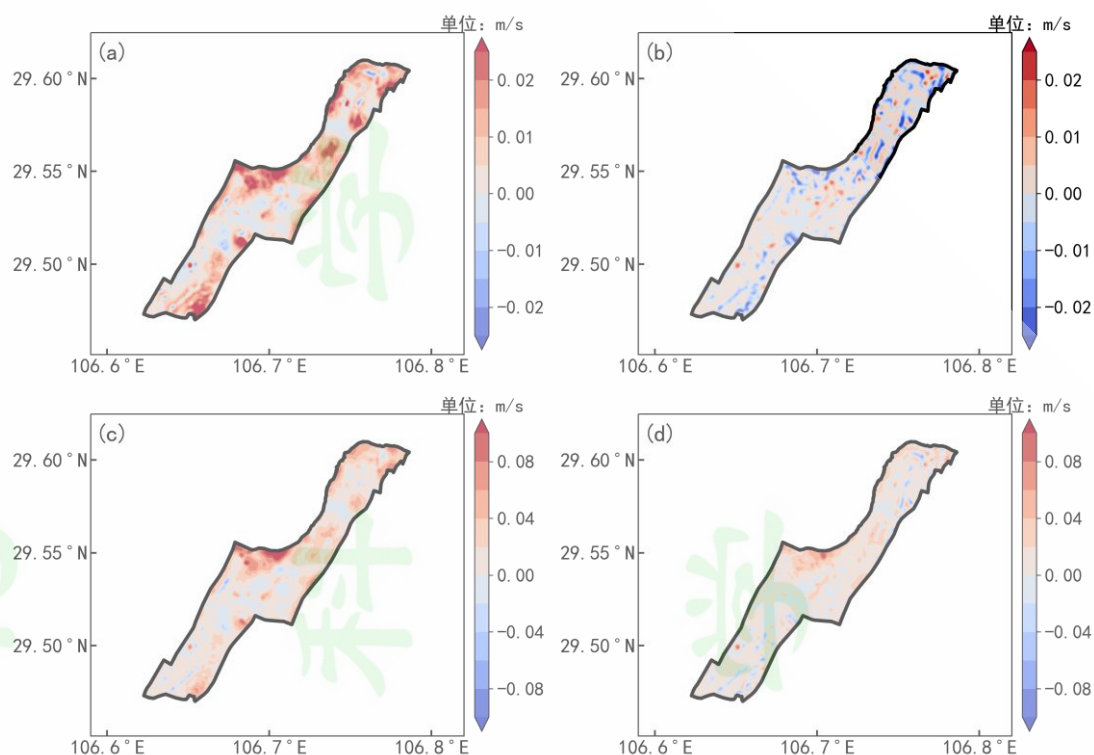


图4 重庆经开区低碳优化方案与当前规划方案平均风速 (m/s) 差值场: (a, b) 1月白天、夜间; (c, d) 7月白天、夜间  
Fig.4 The differences of average wind speed (m/s) between the optimized and planned schemes: (a, b) daytime and nighttime in January; (c, d) daytime and nighttime in July

据重庆经开区1月、7月优化方案与现行规划方案小时平均风速差序列和T检验置信水平(图5), 试验区空间优化后小时平均风速有所增加: (1) 优化后1月有11个时次平均风速增加且超过90%的置信区间, 说明变化显著; 有13个时次无明显变化或风速降低, 但根据置信水平可知变化并不显著。小时平均风速主要增加时段为下午至傍晚, 其中14-16时增加超0.01m/s, 增加幅度约2.0%。(2) 7月有20个时次增加, 其中15个时次达到90%的置信区间, 主要增加时段为下午至凌晨; 4个时次平均风速降低, 但置信水平也较低。其中13时增加超0.02m/s, 增加幅度2.0%。

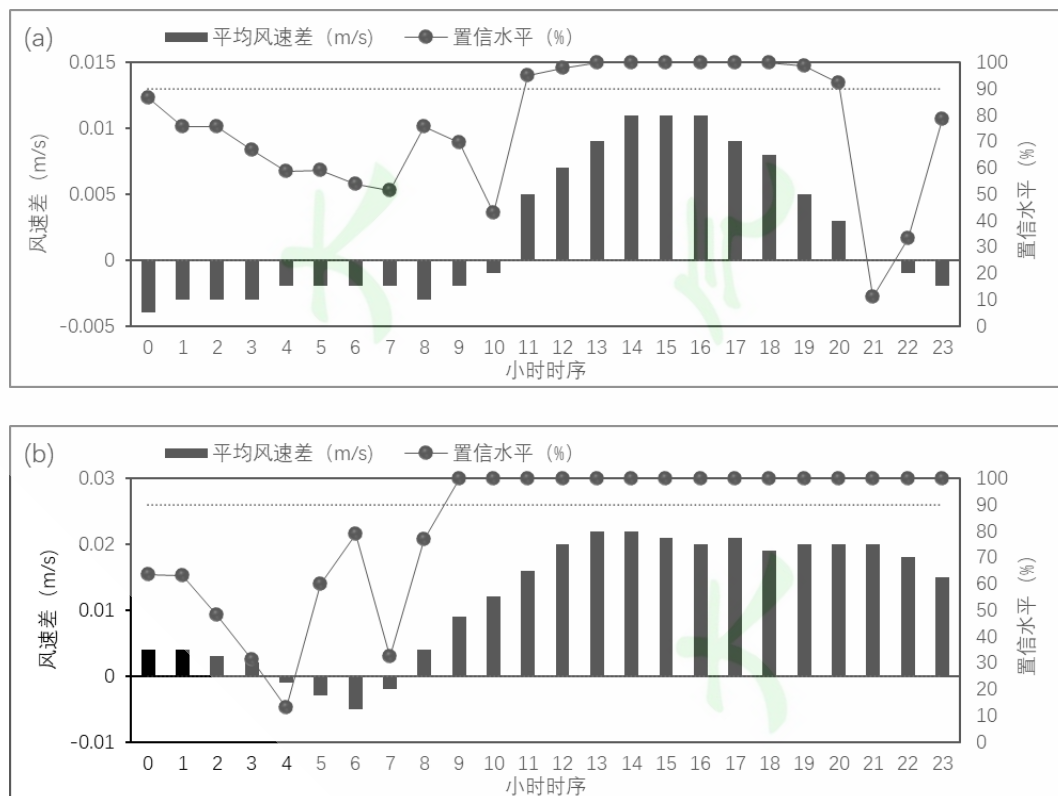


图5 重庆经开区低碳优化方案与当前规划方案典型日逐小时平均风速 (m/s) 差值和置信水平 (%) 序列: (a) 1月, (b) 7月

Fig.5 The differences and confidence level (%) of hourly wind speed (m/s) of hours in typical day between the optimized and planned schemes: (a) January , (b) July

对规划土地利用结构低碳优化前后重庆经开区的 1 月和 7 月昼夜平均气温进行微尺度数值模拟, 优化后与优化前试验区 1 月、7 月昼夜平均气温差值场见图 6 (图 a、b、c、d 分别为 1 月白天、夜间和 7 月白天、夜间), 1 月、7 月小时平均气温差序列见图 7。

由图 6 可知, 优化后重庆经开区 1 月、7 月昼夜平均气温有所下降: (1) 试验区 1 月平均气温差值场负值区占比 76.3% (白天、夜间分别为 76.9%、70.8%), 7 月负值区为 76.2% (白天、夜间分别为 76.2%、76.3%), 负值区主要分布在绿地通风廊道及其周边区域。(2) 试验区 1 月白天平均气温下降 0.11℃, 下降幅度约 1.0%, 局地降温最大可达 0.91℃, 局地最大降幅达 12.9%; 1 月夜间平均气温下降 0.12℃, 下降幅度约 1.4%, 局地降温最大可达 0.88℃, 局地最大降幅达 13.2%; 7 月平均气温下降绝对值增加而降幅有所减小, 7 月白天平均气温下降 0.23℃, 下降幅度 0.7%, 局地最大降温超过 1.5℃, 最大降幅 5.0%; 7 月夜间平均气温下降 0.18℃, 下降幅度 0.6%, 局地最大降温达 1.2℃, 最大降幅 4.3%。

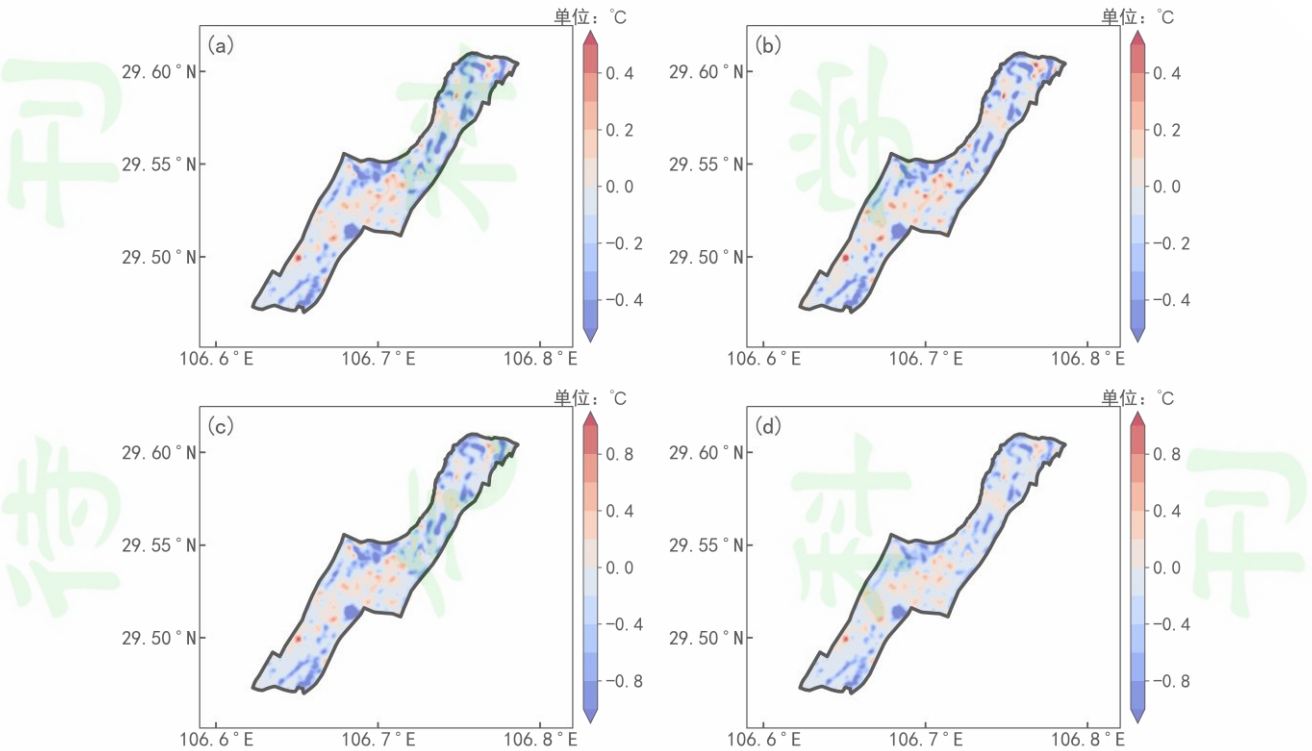
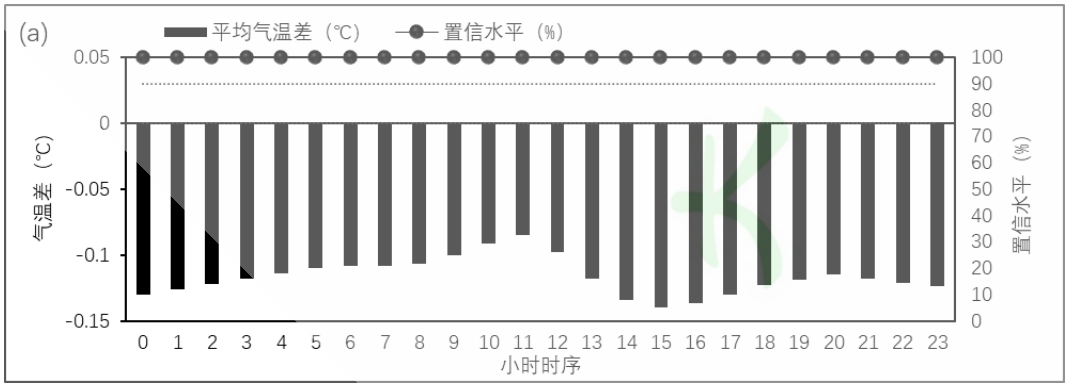


图 6 重庆经开区低碳优化方案与当前规划方案平均气温 (°C) 差值场: (a, b) 1 月白天、夜间; (c, d) 7 月白天、夜间  
Fig.6 The differences of average air temperature (°C) between the optimized and planned schemes: (a, b) daytime and nighttime in January; (c, d) daytime and nighttime in July

根据重庆经开区 1 月、7 月优化方案与现行规划方案逐小时平均气温差序列和 T 检验置信水平 (图 7), 试验区优化后小时平均气温普遍下降, 且所有时次置信水平均超过 90%, 说明变化显著: (1) 1 月所有时次小时平均气温都有所下降, 大部分时间平均气温下降都超过 0.1℃; 最明显下降时段为 13-18 时, 其中 15 时平均气温下降达 0.14℃, 下降幅度约 1.5%。(2) 7 月所有时次小时平均气温都有所下降; 白天比夜间下降更明显, 14 时-19 时为最明显下降时段, 平均气温下降值超过 0.25℃, 其中 16 时平均气温下降达 0.29℃, 下降幅度 0.8%。



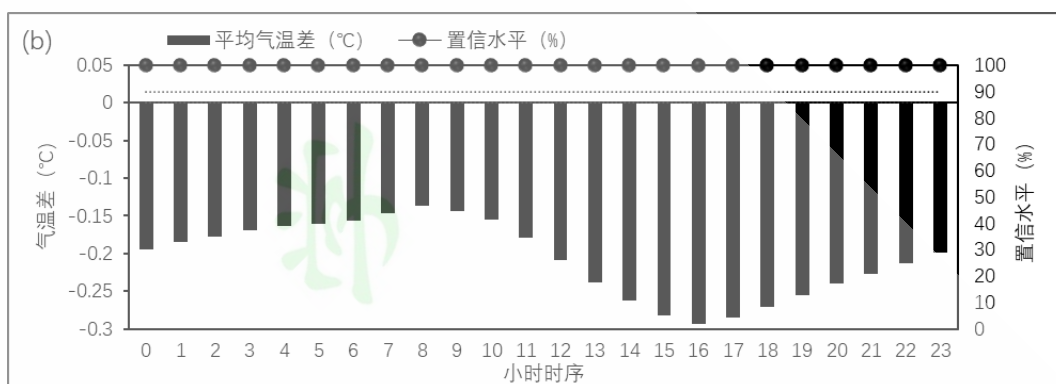


图 7 重庆经开区低碳优化方案与当前规划方案典型日逐小时平均气温 (°C) 差值和置信水平序列: (a) 1 月, (b) 7 月  
Fig.7 The differences and confidence level of hourly air temperature (°C) in typical day between the optimized scheme and planned schemes: (a) January , (b) July

## 5 结论与讨论

以重庆经开区为试验区, 利用线性规划的方法对试验区 2025 年规划土地利用结构进行低碳优化, 进一步通过微尺度数值模拟定量评估优化后的土地利用空间变化对局地风热环境的影响。主要结论如下。

(1)根据试验区相关规划设置约束条件, 基于碳排放最小的目标, 利用线性规划算法得出了满足约束条件时试验区各类土地利用面积。低碳优化后重庆经开区 2025 年建设用地比规划减少了 603 hm<sup>2</sup>, 草地减少了 18.1 hm<sup>2</sup>; 耕地和林地面积较原本规划分别增加了 185.4 hm<sup>2</sup> 和 435.7 hm<sup>2</sup>, 低碳优化方案较现行规划方案减少了年碳排放总量约 19.0×10<sup>4</sup>t, 在满足经济社会发展需求的同时减少了 12.1%的土地碳排放, 说明如果以低碳排放为最高优先, 试验区土地利用结构还有较大调整空间。

(2) 对土地利用结构低碳优化后试验区进行微尺度数值模拟, 结果表明低碳优化后试验区通风廊道更清晰, 通风环境得到改善, 平均风速有所增加, 7 月比 1 月更为明显、白天比夜间更为明显: 空间分布显示优化后 1 月、7 月平均风速分别增加 0.7%、1.5%, 局地最大增幅 8.0%、11.0%, 风速增加地段占比 73.5%、79.3%。从逐小时序列来看, 试验区 1 月有 45.8% 时次平均风速增加且均通过显著性检验, 风速减少时次均未通过显著性检验, 平均风速增加时段主要为中午至傍晚, 14-16 时有最大增幅 2.0%; 7 月有 83.3% 时次平均风速增加、16.7% 时次减少, 风速增加时次基本通过显著性检验, 平均风速增加时段主要为下午至凌晨, 13 时有最大增幅 2.0%。

(3)优化后试验区平均气温有所下降, 在绿地通风廊道设置区尤为明显, 其中 1 月比 7 月更明显: 空间分布显示优化后 1 月、7 月平均气温分别下降 1.3%、0.7%, 局地最大降幅 13.2%、5.0%, 气温下降地段占比 76.3%、76.2%。从逐小时序列来看, 试验区 1 月、7 月所有时次平均气温都有下降且均通过显著性检验, 下午时段变化更为明显, 1 月在 15 时达最大降幅 1.5%, 7 月在 16 时达最大降幅 0.8%。

城市化从根本上改变了区域土地利用结构, 导致陆地碳汇能力下降以及碳排放量增长。城市化过程中大量的人工建筑代替了原有的自然下垫面, 造成了城市局地气候的显著变化, 引发城市热岛、城市通风不畅等城市环境问题, 使城市的气候适应性明显下降。本文以重庆经开区为试验区, 基于其 2025 年相关规划进行土地利用结构低碳优化, 并对优化前后的试验区进行微气候模拟, 评估风热环境等气候适应性, 试验结果表明: 城市土地利用结构低碳优化能有效降低城市土地碳排放, 也能改善城市通风环境、缓解城市热岛效应, 在城市规划中考虑土地利用对碳排放和局地风热环境的影响, 可以实现土地低碳排放和气候适应性改善的有机结合。

本文中的土地利用碳排放系数与其他研究中的南京市 (赵荣钦等, 2013)、海东市 (曾永年等, 2015) 等地, 以及其他学者采用的重庆市 (蓝家程等, 2012; 周宝同等, 2016) 土地利用碳排放系数存在一些差异, 这是采用不同土地利用分级分类标准和不同研究区域、研究时段造成。本文研究表明, 城市园区建设用地、林草地分别对城市热岛效应有正向、负向作用, 与城市群 (徐宏超等, 2023)、城市 (黄晓军等, 2022) 空间尺度建设用地、林草地等土地利用变化对城市热环境影响结论一致。朱浩楠等 (2021) 应用区域模式嵌套微尺度模式方法设计了三组重庆悦来海绵城市规划对风热环境影响的敏感性试验, 悦来与本文试验区基本情况相似, 其模拟的风速、气温变化特征及幅度与本研究结果接近, 采用的敏感性试验证明土地利用空间优化比单纯提高整体绿化率更能有效提高风速、减缓热岛效应; 刘晓冉等 (2020) 应用同样的方法模拟了重庆广阳岛生态规划对局地风热环境及人体舒适度影响, 广阳岛地形平坦, 规划前后风速变化不大, 规划方案中大

幅提高了林草地面积占比,林草地降温效果比本文试验更明显。对于今后的研究,主要有以下三方面的展望:一是本文采用前人研究成果中的土地利用碳排放量强度,碳排放计算可能存在较大不确定性,需进一步明确碳排放误差范围;二是不同的土地利用空间分布方案对风热环境模拟结果可能有较大影响,需要采用不同方案进行对比试验并进行智能优选;三是建立经济社会规划低碳排放目标和气候宜居目标有机结合的区域土地利用评价体系,评价体系的指标随区域不同时期的目标加以构建,比如加入对气候适宜度的考量,在实现低碳排放的同时更直观的考虑气候环境舒适性。

## 参考文献(References)

- Eyring V, Gillett N P, Achuta Rao K M, et al. 2021. Human influence on the climate system [M/OL]//IPCC. Climate change 2021: the physical science basis. [2021-08-06]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#FullReport>.
- 方精云,郭兆迪,朴世龙,等. 2007. 1981~2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学(D 辑:地球科学), 37(6): 804-812. FANG J Y, GUO Z D, PIAO S L, et al. 2007. Estimation of terrestrial vegetation carbon sink in China from 1981 to 2000[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 37(6): 804-812.
- 冯杰,张胜,王涛. 2019. 中国省际土地利用碳排放及其影响因素分析[J]. 统计与决策, 35(05): 141-145. FENG J, ZHANG S, WANG T. 2019. Carbon emissions from land use and its influencing factors among provinces in China[J]. *Statistics & Decision*, 35(05): 141-145.
- Fox-Kemper B, Hewitt H T, Xiao C, et al. 2021. Ocean, cryosphere and sea level change [M/OL]//IPCC. Climate change 2021: the physical science basis. [2021-08-06]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#FullReport>.
- 顾汉龙,马天骏,钱凤魁,等. 2022. 基于 CLUE-S 模型县域土地利用情景模拟与碳排放效应分析[J]. 农业工程学报, 38(09): 288-296. GU H L, MA T J, QIAN F K, et al. 2022. County land use scenario simulation and carbon emission effect analysis using CLUE-S model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 38(09): 288-296.
- 黄晓军,宋涛,王博,等. 2022. 土地利用规模-结构-形态演变对城市热环境的影响—以西安市主城区为例[J]. 地理科学, 42(5): 926-937. Huang Xiaojun, Song Tao, Wang Bo et al. 2022. Study on the influence of land use evolution of scale, structure and pattern on urban thermal environment :A case study of Xi'an[J]. *Scientia Geo-graphica Sinica*, 42(5): 926-937.
- 蒋维楣,周荣卫,刘红年. 2009. 精细城市边界层模式的建立及应用研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 45(6): 769-778. JIANG W M, ZHOU R W, LIU H N. 2009. Development and applications of a fine urban boundary layer model[J]. *Journal of Nanjing University*, 45(6): 769-778.
- 蓝家程,傅瓦利,袁波,等. 2012. 重庆市不同土地利用碳排放及碳足迹分析[J]. 水土保持学报, 26(01): 146-155. LAN Jia-cheng, FU Wa-li, YUAN Bo, et al. 2012. Analysis of Land Use Patterns on Carbon Emission and Carbon Footprint in Chongqing City[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 26(01): 146-155.
- 李彦旻,沈育生,王世航. 2022. 基于土地利用变化的安徽省陆地碳排放时空特征及效应[J]. 水土保持学报, 36(01): 182-188. LI Y M, SHEN Y S, WANG S H. 2022. Spatio-temporal characteristics and effects of terrestrial carbon emissions based on land use change in Anhui province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 36(01): 182-188.
- LIN Q, ZHANG L, QIU B, et al. 2021. Spatiotemporal analysis of land use patterns on carbon emissions in China[J]. *Land*, 10(2): 141
- 刘晓冉,朱浩楠,姜平,等. 2020. 重庆市广阳岛生态规划对局地气候影响的数值模拟试验[J]. 长江流域资源与环境, 29(4): 975-984. LIU Xiao-ran, ZHU Hao-nan, JIANG Ping, et al. 2020. Numerical Simulation Experiment on the Effect of Ecological Planning on Local Climate in Guangyang Island of Chongqing City [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 29(4): 975-984.
- 路昌,雷国平,周浩,等. 2016. 松嫩平原肇源县土地利用结构低碳优化研究[J]. 水土保持研究, 23(05): 310-315+321. LU C, LEI G P, ZHOU H, et al. 2016. Study on optimization of low Carbon-based land use Structure in Zhaoyuan county of Songnen plain[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 23(05): 310-315+321.
- 罗谷松,李涛. 2019. 碳排放影响下的中国省域土地利用效率差异动态变化与影响因素[J]. 生态学报, 39(13): 4751-4760. LUO G S, LI T. 2019. Dynamic change and driving factors of land use efficiency differences affected by carbon emissions at the provincial level in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 39(13): 4751-4760.
- MADSEN S H J, HANSEN T. 2019. Cities and climate change—examining advantages and challenges of urban climate change experiments[J]. *European Planning Studies*, 27(2): 282-299.
- 马远,刘真真. 2021. 黄河流域土地利用碳排放的时空演变及影响因素研究[J]. 生态经济, 37(07): 35-43. MA Y, LIU Z Z. 2021. Study on the spatial-temporal evolution and influencing factors of land use carbon emissions in the Yellow River basin[J]. *Ecological Economy*, 37(07): 35-43.
- 彭文甫,周介铭,徐新良,等. 2016. 基于土地利用变化的四川省碳排放与碳足迹效应及时空格局[J]. 生态学报, 36(22): 7244-7259. PENG W F, ZHOU J M, XU X L, et al. 2016. Effect of land use changes on the temporal and spatial patterns of carbon emissions and carbon footprints in the Sichuan province of Western China, from 1990 to 2010[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 36(22): 7244-7259.

- 乔治,贺瞳,卢应爽,等.2022. 全球气候变化背景下基于土地利用的人类活动对城市热环境变化归因分析[J].地理研究,41(7): 1932-1947. QIAO Zhi, HE Tong, LU Yingshuang, et al. 2022. Quantifying the contribution of land use change based on the effects of global climate change and human activities on urban thermal environment in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. Geographical Research,41(7): 1932-1947.
- Seneviratne S I, Zhang X, Adnan M, et al. 2021. Weather and climate extreme events in a changing climate [M/OL]/IPCC. Climate change 2021: the physical science basis. [2021-08-06]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#FullReport>.
- 王刚,张华兵,薛菲,等. 2017. 成都市县域土地利用碳收支与经济发展关系研究[J].自然资源学报, 32(07):1170-1182. WANG G, ZHANG H B, XUE F, et al. 2017. Relations between land use carbon budget and economic development at county level in Chengdu city[J]. Journal of Natural Resources, 32(07): 1170-1182.
- 王胜蓝,周宝同. 2017. 重庆市土地利用碳排放空间关联分析[J].西南师范大学学报(自然科学版), 42(04):94-101. WANG S L, ZHOU B T. 2017. Spatial association analysis of carbon emission on land use patterns in Chongqing[J]. Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition), 42(04): 94-101.
- WANG W, BEEZLEY C, DUDA M. 2012. WRF ARW V3: User's Guide [M / OL]. <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users>.
- WANG Y, XIANG P. 2018. Urban sprawl sustainability of mountainous cities in the context of climate change adaptability using a coupled coordination model: A case study of Chongqing, China[J]. Sustainability, 11(1): 20.
- 吴建国,翟盘茂,武亚堂. 2020. 对基于土地应对气候变化的新认知[J].气候变化研究进展,16 (1):50-69. Wu J G, Zhai P M, Wu Y T. 2020. New understanding on the land-based response options to climate change [J]. Climate Change Research, 16 (1): 50-69.
- 肖红艳,袁兴中,李波,等. 2012. 土地利用变化碳排放效应研究——以重庆市为例[J].重庆师范大学学报(自然科学版), 29(01): 38-42+115. XIAO H Y, YUAN X Z, LI B, et al. 2012. The effects of land use changes on carbon emission C: take Chongqing as an example[J]. Journal of Chongqing Normal University(Natural Science), 29(01): 38-42+115.
- 徐宏超,李春林,王昊,等. 2023. 土地利用变化对京津冀热环境时空演变的影响[J].中国环境科学,43(3):1340-1348. Impact of land use change on the spatiotemporal evolution of the regional thermal environment in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. China Environmental Science, 43(3):1340-1348.
- 杨珊珊,陈静,韩军彩,等.2022. 基于风热环境和通风潜力的石家庄市通风廊道研究[J].环境科学与管理, 47(10): 49-53. Yang Shanshan, Chen Jing, Han Juncai, et al. 2022. Research on Ventilation Corridors in Shijiazhuang City based on Wind—heat Environment and Ventilation Potential[J]. Environmental Science and Management, 47(10): 49-53.
- 曾永年,王慧敏. 2015. 以低碳为目标的海东市土地利用结构优化方案[J].资源科学, 37(10): 2010-2017. ZENG Y N, WANG H M. 2015. Optimization of land use structure for low-carbon targets in Haidong City, Qinghai Plateau[J]. Resources Science, 37(10): 2010-2017.
- 翟盘茂,周佰铨,陈阳,等. 2021. 气候变化科学方面的几个最新认知[J].气候变化研究进展, 17(6): 629-635. Zhai P M, Zhou B Q, Chen Y, et al. 2021. Several new understandings in the climate change science[J]. Climate Change Research, 17(6): 629-635.
- 张苗, 吴萌.2022. 土地利用对碳排放影响的作用机制和传导路径分析——基于结构方程模型的实证检验[J].中国土地科学, 36(03): 96-103. ZHANG M, WU M. 2022. Analysis on the mechanism and transmission path of the impact of land Use on carbon emissions: empirical test based on structural equation model[J]. China Land Science, 36(03): 96-103.
- 张蔚文,何良将. 2009. 应对气候变化的城市规划与设计——前沿及对中国的启示[J].城市规划, 33(09): 38-43. ZHANG W W, HE L J. 2009. Urban planning and design responding to climate changes: frontiers and enlightenment to China[J]. City Planning Review, 33(09): 38-43.
- 赵荣钦,黄贤金,钟太洋,等. 2013. 区域土地利用结构的碳效应评估及低碳优化[J].农业工程学报, 29(17): 220-229. ZHAO R Q, HUANG X J, ZHONG T Y, et al. 2013. Carbon effect evaluation and low-carbon optimization of regional land use[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 29(17): 220-229.
- 郑箬舟,何军,李深智,等. 2023. 重庆地区城郊人体舒适度变化特征差异及其影响因素分析[J].生态环境学报, 32(6): 1089-1097. ZHENG Qingzhou, HE Jun, LI Shen zhi, et al. 2023. Analysis on the differences and influencing factors of human comfort between urban and rural areas in Chongqing [J]. Ecology and Environmental Sciences, 32(6): 1089-1097.
- 周宝同,邵俊明,刘小波,等. 2016. 重庆市不同功能区建设用地碳排放的库兹涅茨曲线特征分析[J].中国岩溶, 35(06): 619-628. ZHOU B T, SHAO J M, LIU X B, et al. 2016. Characteristics of Kuznets curve to the relationship between construction land expansion and carbon emission intensity in different functional areas of Chongqing [J]. Carsologica Sinica, 35(06): 619-628.
- 朱浩楠,刘晓冉,孙佳,等. 2019. 湿地公园对局地气候舒适性影响的数值试验[J].自然资源学报, 34(2): 412-423. ZHU Hao-nan, LIU Xiao-ran, SUN Jia et al. 2019. Numerical experiments on the impact of wetland park on regional climatic comfort[J]. Journal of Natural Resources, 34(2): 412-423.
- 朱浩楠,刘晓冉,孙佳,等. 2021. 基于遥感和数值模拟的重庆海绵城市热岛效应分析[J].高原气象, 40(5): 1202-1212. ZHU Haonan, LIU Xiaoran, Sun Jia, et al. 2021. Evaluation of the Urban Heat Island Effect of Sponge City in Chongqing using Satellite Remote Sensing Data and Numerical Simulation[J]. Plateau Meteorology, 40(5): 1202-1212.