

重庆市广阳岛生态规划对局地气候影响的数值模拟试验

刘晓冉 朱浩楠 姜平 周杰¹

(重庆市气候中心, 重庆 401147)

【摘要】: 利用城市微尺度模式, 模拟分析了重庆广阳岛城市生态规划对局地气候环境的影响。结果表明: 城市微尺度模式对原始土地利用方案的精细化模拟显示, 广阳岛冬季1月以北风为主, 岛屿西侧风速较东侧偏大, 而夏季7月的主导风向为东风, 岛屿的东北部为偏东风, 西南侧为西北风。广阳岛1月和7月的温度场分布都为东高西低。全岛1月都属于舒适度较高的区域, 其中岛屿东北部舒适度最高, 而7月岛屿东北部由于气温较高, 舒适度较低。生态规划方案的模拟表明, 对局地小气候影响最大的是温度场, 能有效降低了广阳岛的近地面气温。生态规划方案能有效地改善广阳岛的局地小气候, 提高人体舒适度, 广阳岛冬季1月全岛都较为舒适, 而夏季7月舒适度最高的区域位于岛屿中西部。

【关键词】: 生态规划 数值模拟 局地气候 广阳岛

【中图分类号】: X820.3 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2020)04-0974-11

随着经济社会发展, 城市规模逐渐扩大, 城市化问题成为当今世界关注的热点问题。城市化最明显的特征是改变了城市下垫面, 下垫面由原来的草地、水域等变为由混凝土或沥青构成的不透水道路面和屋顶面, 大量增加的建设用地改变了城市原有地气间的物质、能量交换过程, 影响到气温、辐射、风及降水等, 形成局部气候环境^[1,2,3]。城市化对城市气候的影响最显著表现为城市气温的升高, 即形成了城市热岛, 也有研究表明城市化对降水、风速等也有影响^[4,5,6]。随着生态文明建设的快速推进, 以顺应自然、保护自然为基本理念的城市生态规划也迫切需要现代气象技术的支撑。气象环境作为生态环境的重要组成部分备受社会关注。气象因子是影响城市生态规划的重要自然条件, 科学利用气象技术可以显著改善城市生态规划的合理性^[7]。开展基于气象环境影响评估的城市规划设计可以显著改善城市生态环境^[8]。

在城市规划中如何科学评估规划方案对局地气候环境的影响是一个技术难题。数值模拟被认为是一种切实可行的方法, 在城市规划气候环境评估中应用范围越来越广^[8]。数值模拟原理是根据天气气候的基本物理定律, 建立相应的数学物理方程, 在一定的初始条件和边界条件下进行数值计算, 求得不同规划方案对气候环境的影响结果。数值模拟不仅可以弥补特定区域观测资料匮乏的问题, 而且可以充分考虑地形、土地利用类型等不同下垫面条件影响从而对模拟条件进行有效控制, 得到高时空分辨率的模拟结果^[9,10]。Chen 等^[11]总结 WRF 模式在城市气象模拟中的应用及可行性, 认为针对城市气象的多尺度特征应将不同尺度数值模式进行耦合使用。Fang 等^[12]将多尺度数值模式系统成功应用于城市规划的气象环境评估。Chen 等^[13]利用耦合了城市冠层模型的 WRF 模式对中国杭州进行了热岛效应模拟, 表明耦合模式能更好地模拟出热岛效应的时空特征。秦文翠等^[14]基于 ENVI-met 模式对北京的典型住宅区进行了数值模拟分析, 认为 ENVI-met 能较好地反应案例的微气候特征。佟华等^[15]在研究中使用边界层数值模式

¹作者简介: 刘晓冉(1982-), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事天气气候动力学研究。E-mail: liuxiaoran8283@126.com。

基金项目: 中国气象局气候变化专项(CCSF202020); 重庆市气象部门智慧气象技术创新团队项目

(ZHCXTD-201913, ZHCXTD-201916); 重庆市悦来新城海绵城市建设科研项目(城科学 2015 第 2-10 号)。

探索了绿地对其周边区域温度的影响。Zhou 等^[16]利用 CFD(计算流体动力学模型)对辽阳市的绿地规划方案进行了设计和论证。苗世光等^[17]利用城市多尺度数值模拟系统中的城市边界层尺度模式对成都市周边的绿地布局进行了敏感性试验,认为分散式的绿地布局对成都地区的气候调节作用较为明显。冯娴慧等^[18]利用 GRAPES 模式对广州城市的绿地布局进行了规划评估,认为应该建立位于城市上风方向的大规模绿地,而非点小面广的布局。因此,通过区域气象数值模拟结合不同规划下垫面特征可以评估城市规划对局地小气候的影响。

重庆市广阳岛是长江上游面积最大的江心岛,也是距重庆主城区内最近、面积最大的休闲生态岛,正在规划打造长江生态文明创新实验区,评估生态规划前后下垫面的变化将对局地气候的影响是广阳岛总体设计规划的重要组成部分。因此,本文结合规划前后下垫面特征的变化,利用区域模式 WRF 嵌套城市微尺度模式精细化模拟了生态规划前后广阳岛气温、风速、舒适度等气象环境的变化,分析广阳岛生态规划对该地区局地气候的影响,这可为城市快速发展进程中的土地合理开发、生态环境保护提供技术参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

广阳岛位于重庆市南岸区明月山、铜锣山之间的长江江心上,范围为 $106^{\circ} 40' E \sim 106^{\circ} 50' E$, $29^{\circ} 33' N \sim 29^{\circ} 35' N$ 。全岛陆地面积约 7km,陆地最长处约 7km,最宽处约 2km,江岸线长约 16km,为长江流域一个大型的内河岛屿。地形西凸东平,北高南低,最高点海拔 282m。岛上自然生态环境优越,植物生长条件良好,植被覆盖率高,是重庆市区最洁净的农林生态系统^[19]。

1.2 气象观测数据

选择广阳岛周边 5km 范围内 7 个自动气象站 2013~2017 年的逐日气温、降水、风速、风向资料,气象站点位置如图 1 所示。

1.3 数值模式介绍

广阳岛面积仅为 7km²,为达到精细化模拟,采用区域模式嵌套城市微尺度模式进行多尺度数值模拟,即首先使用区域模式进行较大尺度的区域气候模拟,得到当地气候态,然后将气候态作为初始场和边界条件驱动城市微尺度模式进行精细化诊断模拟,最终得到精细化的大气稳态^[20]。



图 1 广阳岛周边 5km 范围自动气象站位置

1.3.1 区域模式介绍

区域模式采用 Weather Research and Forecasting Model (简称 WRF 模式), 是由美国国家大气研究中心 (NCAR)、美国国家环境预报中心 (NCEP) 和美国国家海洋大气管理局 (NOAA) 联合开发的新一代中小尺度天气预报模式^[21]。模式采用完全可压缩及非静力大气方程组, 内置了大量的物理过程参数化方案, WRF 模式在国内外气象领域都得到了大量的应用。在本次试验中, WRF 模式作为区域模式进行模拟, 为城市微尺度模式提供气候态的初始条件、边界条件。

1.3.2 城市微尺度模式介绍

城市微尺度模式采用重庆-南京大学微尺度模式 (简称 NMM), 该模式在南京大学微尺度模式^[22]基础上发展而来。模式改进采用 K1emp 质量-地形跟随坐标系^[23], $k-\epsilon$ 湍流闭合方案, 同时利用强迫-恢复法^[24]计算地表及土壤温度, 并根据网格中不同下垫面类型比率计算最终温度数值。

1.4 模式嵌套设置

图 2 为多尺度数值模拟时采用的嵌套网格及地形分布, 右下角为城市微尺度模式模拟所选广阳岛区域地形, 广阳岛位于区域中心。WRF 模式采用 3 层嵌套, 最外层水平分辨率 27km, 覆盖整个东亚; 最内层水平分辨率 3km, 覆盖重庆市范围。模拟时为尽量减少模式误差, 使用重庆市近两千个区域自动气象站进行了逐小时资料同化, 并使用 FNL 再分析资料对大尺度环流形势进行调整, 最终得到 2017 年 1 及 7 月逐小时模拟结果。为研究广阳岛的精细化气候稳态, 使用每日 12 时 WRF 模式输出结果计算平均值, 将其作为边界场和初始场, 驱动城市微尺度模式进行诊断模拟, 得到广阳岛的 2017 年 1 和 7 月的平均微气候稳态分布。城市微尺度模式水平分辨率设为 30m, 模式最低层为 1m。模式顶高为 2500m。同时, 为提高模拟精度, 使用了清华大学提供的 2017 年 30m 土地利用数据 (<http://data.ess.tsinghua.edu.cn/>) 及美国国家航空航天局 (NASA) 提供的 Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) 30m 分辨率高程数据作为 WRF 模式和微尺度模式所需的下垫面地理信息基础数据。

图 3 为 WRF 模式模拟 7 月逐小时的 2m 温度、2m 湿度、10m 风速、10m 风向和地面气压插值到重庆主城区 214 个自动站的平均状况与原始观测值情况比较, 可见模拟结果与观测数值较为接近, 变化趋势基本一致, 说明该数据能较好地代表当地的大气特征, 能进一步用于城市微尺度模式的驱动场。

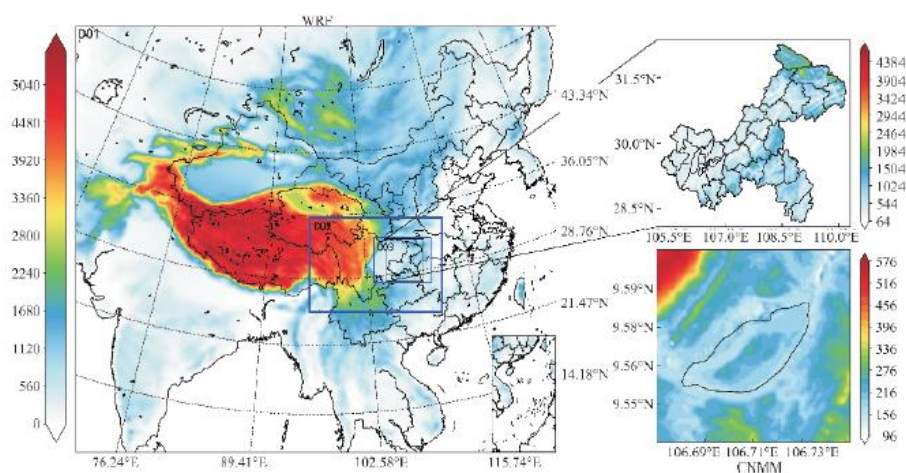


图 2 针对广阳岛的多尺度数值模式嵌套网格及地形分布 (单位:m)

2 广阳岛局地气候环境分析

2.1 气温

图 4a 为广阳岛周边自动气象站统计的年平均气温的空间分布, 所选自动气象站年平均气温呈北高南低的分布形势, 广阳岛年平均气温为 18.7℃ 左右。

广阳岛周边各自动气象站的逐月平均气温变化情况(图 4b)可以看到, 各站月平均气温的月际变化特征基本一致, 均呈现夏热冬冷的单峰型变化特征, 盛夏 7 和 8 月的平均气温最高, 1 和 12 月最低。以各站平均气温作为广阳岛气温, 1 月广阳岛平均气温最低, 为 8.3℃, 之后逐渐升高, 在盛夏 7 月和 8 月广阳岛气温最高, 月平均气温在 28.5℃ 以上, 其中 7 月最高达 29.2℃, 9 月后气温迅速下降, 12 月气温则在 10℃ 以下为 9.3℃。

2.2 降水

图 5a 为广阳岛周边自动气象站年降水总量的空间分布情况, 广阳岛周边区域年降水总量呈现中间少四周高的特征, 广阳岛的年降水总量在 900mm 左右。

广阳岛周边各自动气象站的逐月降水量的月际变化情况(图 5b)可以看到, 各站月降水量呈现一致的双峰型变化特征, 均在初夏 6 月的降水量最多, 初秋 9 月次之, 存在两个峰值。以各站平均降水均值作为广阳岛降水量, 5 和 6 月广阳岛降水量达 100mm 以上, 其中 6 月降水量最大达到 167.9mm, 7 和 8 月降水量降到 90mm 以下, 其中 7 月仅 75.7mm, 而 9 月进入华西秋雨季, 降水量达一年当中次峰值 127.0mm, 10 月份后进入冬半年, 降水减少, 在冬季 12、1 和 2 月的月降水不足 15mm。

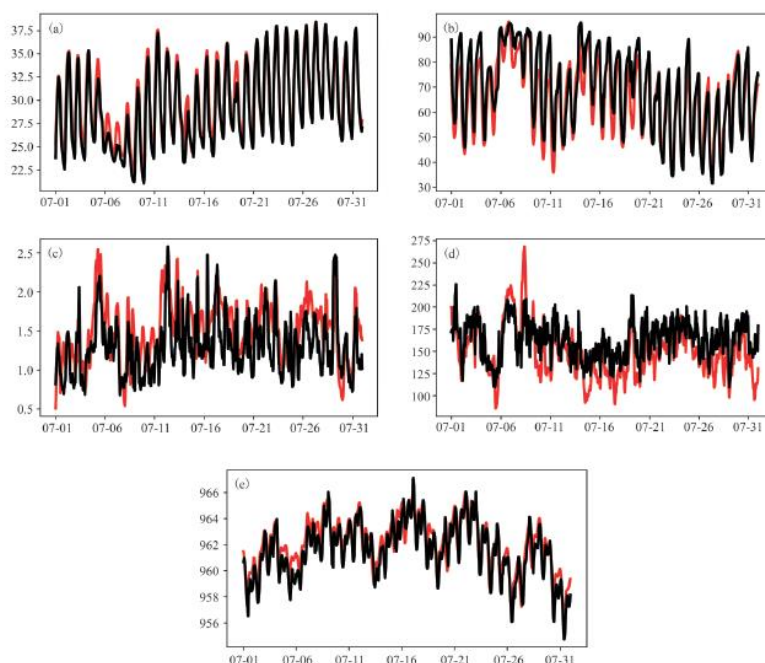


图 3 WRF 模拟 2017 年 7 月主城区逐小时 2m 温度(a)、2m 湿度(b)、10m 风速(c)、10m 风向(d)和地面气压(e)结果(红线)与观测(黑线)对比

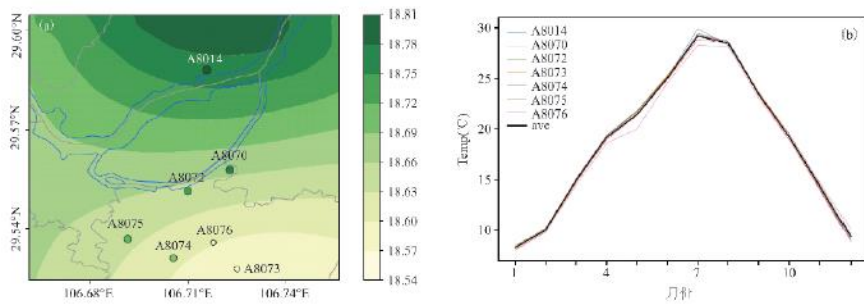


图 4 广阳岛周边自动气象站年平均气温空间分布 (a) 以及逐月平均气温变化 (b)

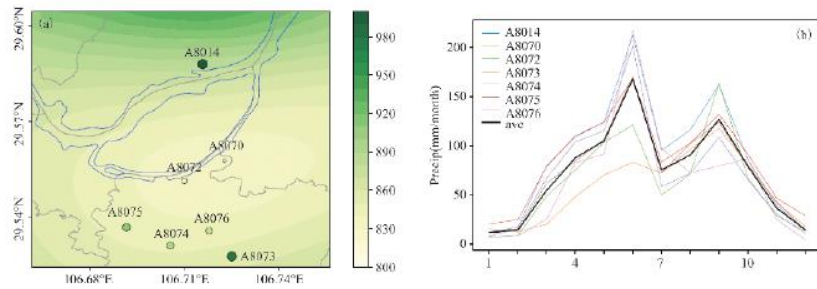
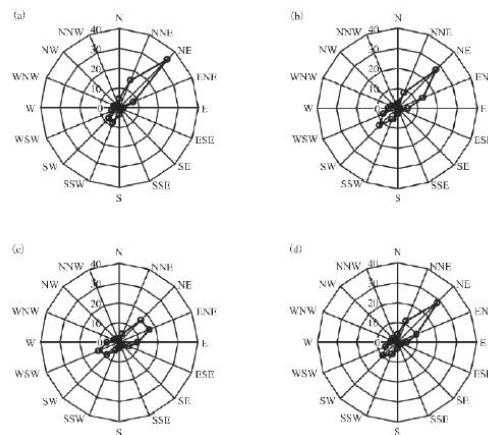


图 5 广阳岛周边自动气象站年降水量空间分布 (a) 以及逐月降水量变化 (b)

2.3 风

经分析, 广阳岛及其周边地区风场分布较为一致。这里以郭家沱气象站为例, 给出 4 个季节代表月份的风向频率图(图 6)。冬季 1 份, 郭家沱附近的主导风向为 NE, 出现频率达到 34.5%, 次主导风向为 NNE, 出现频率为 15.1%。春季 4 月份, 郭家沱附近的主导风向为 NE, 出现频率达到 27.4%, 次主导风向分别为 ENE 和 SW, 出现频率分别为 13.5%和 12.1%。夏季 7 月的主导风向分别为 ENE 和 NE, 出现频率分别为 16.7%和 15.8%, 次主导风向为 WSW, 出现频率为 11.3%。秋季 10 月份的主导风向为 NE, 出现频率达到 28.2%, 次主导风向为 NNE 和 ENE, 出现频率分别为 11.4%和 10.4%。

总体而言, 郭家沱附近 1、4、7 和 10 月各月主导风向均为 NE, 但是在 4 和 7 月, NE 风向的出现频率略有减小, SW 和 WSW 风向的出现频率略有增加, 10 月 NE 风向又成为绝对的主要风向。



3 精细化数值模拟分析

为研究重庆市广阳岛生态规划方案对广阳岛局地微气候的影响,根据生态规划方案的土地利用规划数据,修改模式中原有的土地利用资料,进行下垫面敏感性试验。由于微尺度模式初始场由 WRF 模式 3km 模拟结果插值而来,为充分体现土地利用修改对大气产生的影响,参考前人研究^[25],首先将城市微尺度模式中的陆面模型做 24h 积分,以使地表温度、湿度等陆面要素与 30m 分辨率的下垫面信息相适应,然后再积分大气动力模块得到陆气相互作用后中午 12 时的大气稳态结果。对比作为控制试验的广阳岛原始土地利用分布情况(图 7a)和作为敏感性试验的生态规划方案土地利用分布情况(图 7b),可以看到生态规划方案将广阳岛中西部原农地和建筑规划为林地,同时在广阳岛中部规划了部分建筑群。

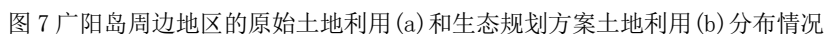


图 8 为按原始土地利用方案模拟得到的广阳岛周边地区冬季和夏季代表月份的近地面气候态精细化空间分布情况,在冬季 1 月(图 8a),模拟郭家沱站附近为东北风,与该站实况的主导风向完全一致(图 6a),表明模式能较好的模拟广阳岛周边微气候状况。从风场来看广阳岛入流风以北风为主,在经过广阳岛东北部时,由于建筑物摩擦作用较大且因迎风坡效应,使得风速较小,气流在绕流时,受河道两岸地形影响形成一定的狭管效应,同时由于河陆热力作用使得岛屿西侧风速较东侧偏大。从温度场分布可知,广阳岛气温分布为东高西低,这主要是由于岛屿东部未被植被覆盖的裸露地面较多、且有一定的建筑物分布,所以气温较高。岛屿西南侧由于以草地为主,植被相对较多,且受到河陆风的冷平流,因而表现为气温较低。

3.3 生态规划方案的微气候模拟

图 9 为生态规划方案布局模拟得到的广阳岛的近地面气候态空间分布,生态规划方案中广阳岛的大部分区域都被树木覆盖,由于树木的拖曳作用比裸土和草地高,因此广阳岛西北侧的风速相对原始土地利用有略微下降,而生态规划方案修改土地利用后最大的改变体现在温度上,可见无论 1 月还是 7 月,广阳岛东北部的相对高温区都明显收缩,这说明新的规划方案能有效降低广阳岛的近地面气温。另外对比土地利用类型(图 7b)可知,图 9 中广阳岛上零星分布的几个高温中心主要为建筑群植被覆盖较少的区域,因此可适当在这些地区增加植被以进一步改善局地小气候。

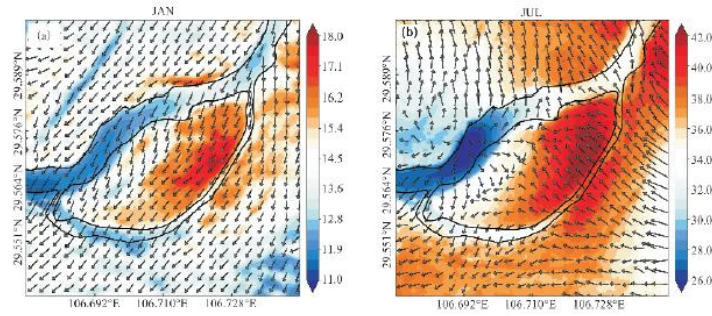


图 8 原始土地利用方案模拟 1 月(a)和 7 月(b)的广阳岛局地气候分布其中箭头为风场, 填色为气温(单位: °C)

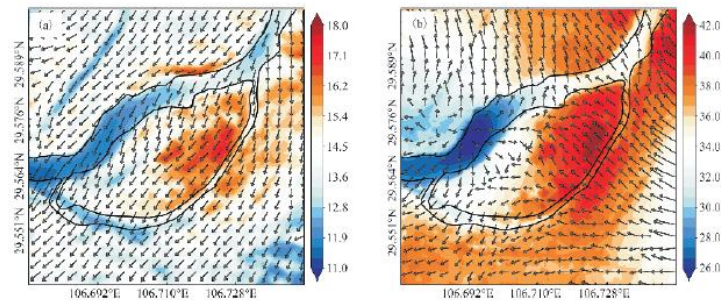


图 9 同图 8, 但为生态规划方案

图 10 所示为广阳岛生态规划方案与原始状态在 1 和 7 月微尺度模拟结果之差。根据图 10a-b, 可见采用生态规划方案后广阳岛大部分地区气温都有所下降, 1 月最大降温达到 1.34°C 以上, 7 月降温更加明显, 最大降温达到 2.72°C 以上。而根据图 10c-d, 可见生态规划方案略微增大了广阳岛南端以及东北部地区的风速, 这有助于当地的热量扩散。

3.4 人体舒适度分析

人体舒适度指数(BCMI)是从气象角度来评价不同气候条件下人的舒适感,表示在某种气温、湿度和风速等条件下人体对空气环境感觉舒适的程度,是根据人类机体与大气环境之间的热交换而制定的生物气象指标。一般而言,气象、相对湿度、风速 3 个气象要素对人体感觉影响最大。为更好地反应广阳岛的舒适度情况,利用常用的人体舒适度公式计算了舒适度指数,计算公式为^[26, 27]:

$$BCMI = \frac{(1.8T + 32) - 0.55(1 - R)}{(1.8T - 26) - 3.2\sqrt{V}} \quad (1)$$

式中:BCMI 为人体舒适度指数;T 为气温,单位为℃,R 为相对湿度,单位是%;V 为风速,单位是 m/s。由于城市微尺度模式未包含湿过程,诊断中湿度不发生变化,因此计算舒适度时相对湿度由 WRF 模式插值得到。BCMI 数值分级和对应的气候舒适性如表 1 所示,可见最佳气候舒适性的人体舒适度数值为 59~70。

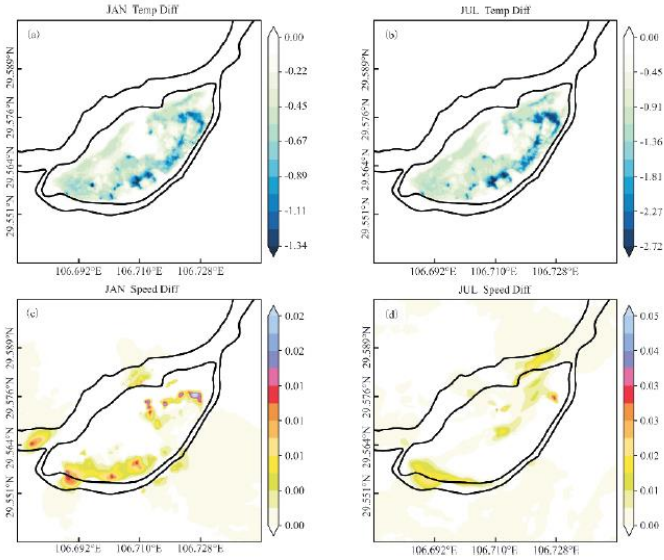


图 10a-b 为微尺度模拟得到广阳岛生态规划方案近地面气温与原始状态近地面气温之差;c-d 为对应的风速之差

表 1 人体舒适度指数分级及对应的气候舒适性

BCMI	气候舒适性	BCMI	气候舒适性
>89	酷热,很不舒适	59~70	最为舒适
86~88	暑热,不舒适	51~58	偏凉,大部分人舒适
80~85	炎热,大部分人不适	39~50	清凉,少部分人不舒适
76~79	闷热,少部分人不舒适	26~38	较冷,大部分人不适
71~75	偏暖,大部分人舒适	0~25	寒冷,不舒适

图 11 为不同土地利用方案得到的 1 和 7 月人体舒适度指数模拟情况,从图中可知,原始土地利用方案模拟的广阳岛在 1 月(图 11a)时全岛人体舒适度指数为 50~75,都属于气候舒适性较高的区域,其中岛屿东北部舒适度最高;而在 7 月时(图 11b),广阳岛东北部由于温度较高,舒适度较低,人体感觉偏热。

而对于生态规划方案模拟的 1 月的人体舒适度并没有明显变化(图 11c),全岛依然属于较为舒适的区域。但对于 7 月(图 11d),广阳岛中低舒适度区域相比原始土地利用方案明显减少,并且岛屿中西部开始变为较为舒适的区域。同时,规划方案中属于商业、体育场等建筑用地的区域依然属于闷热、炎热地区。

综上所述,生态规划方案能有效地改善广阳岛的局地小气候,提高人体舒适度。按新的生态规划方案后,广阳岛冬季 1 月全岛

都较为舒适,夏季7月则舒适度最高的区域位于岛屿中西部。另外可通过在新规划方案中的商业、体育场等建筑物较多区域增种植被,从而进一步优化人体体验。

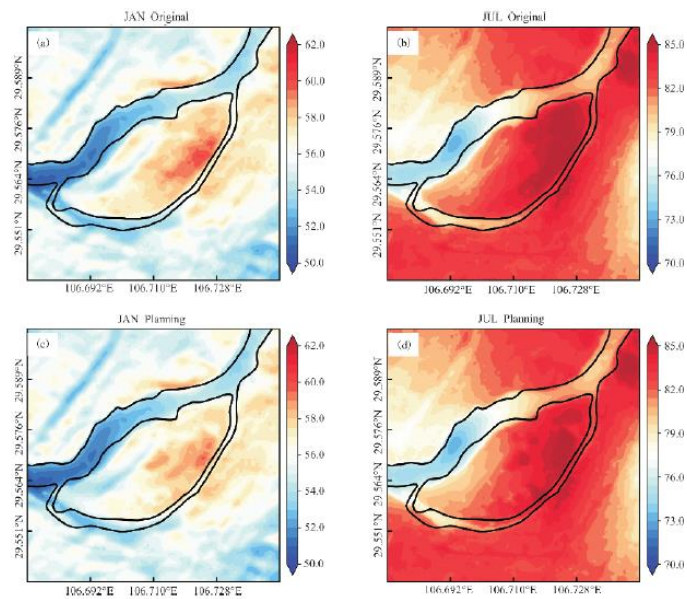


图 11 模拟的广阳岛原始土地利用方案 1(a) 和 7 月(b) 的人体舒适度分布, 以及生态规划方案 1(c) 和 7 月(d) 的舒适度分布

4 结论

本文以重庆广阳岛为例,应用区域模式 WRF 嵌套城市微尺度模式模拟城市生态规划对广阳岛局地气候环境条件的影响,主要结论如下:

(1)城市微尺度模式原始土地利用方案的精细化模拟表明,广阳岛冬季 1 月以北风为主,岛屿西侧风速较东侧偏大,而夏季 7 月的主导风向为东风,岛屿的东北部为偏东风,西南侧为西北风。广阳岛 1 月和 7 月的温度场分布都为东高西低。全岛 1 月都属于舒适度较高的区域,其中岛屿东北部舒适度最高,而 7 月岛屿东北部由于气温较高,舒适度较低。

(2)生态规划方案的模拟表明,相对原始土地利用方案广阳岛西北侧的风速有略微下降,对局地小气候影响最大的是温度场,有效降低了广阳岛的近地面气温。

(3)生态规划方案能有效地改善广阳岛的局地小气候,提高人体舒适度,广阳岛冬季 1 月全岛都较为舒适,而夏季 7 月舒适度最高的区域位于岛屿中西部。

参考文献:

[1]刘德义,黄鹤,杨艳娟,等. 天津城市化对市区气候环境的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(3): 610-614.

[2]侯依玲,陈葆德,陈伯民,等. 上海城市化进程导致的局地气温变化特征[J]. 高原气象, 2008, 27(增刊): 131-137.

[3]郭军,李明财,刘德义. 近 40 年来城市化对天津地区气温的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 29-34.

-
- [4]郑秋萍,刘红年,陈燕,等.城市化发展与气象环境影响的观测和分析研究[J].气象科学,2009,29(2):214-219.
- [5]赵娜,刘树华,虞海燕.近48年城市化发展对北京区域气候的影响分析[J].大气科学,2011,35(2):373-385.
- [6]黄国如,何泓杰.城市化对济南市汛期降雨特征的影响[J].自然灾害学报,2011,20(3):8-12.
- [7]杜吴鹏,房小怡,吴岩,等.城市生态规划和生态修复中气象技术的研究与应用进展[J].中国园林,2017,33(11):35-40.
- [8]汪光焘.气象、环境与城市规划[M].北京:北京出版社,2004.
- [9]刘红年,张宇,吴润,等.水库对局地气候影响的数值模拟研究[J].云南大学学报(自然科学版),2010,32(2):171-176.
- [10]杨艳娟,李明财,任雨,等.天津近海风能资源的高分辨率数值模拟与评估[J].资源科学,2011,33(10):1999-2004.
- [11]CHEN F,KUSAKA H,BORNSTEIN R,et al.The integrated WRF/urban modelling system:Development,evaluation, and applications to urban environmental problems[J].International Journal of Climatology,2011,31(2):273-288.
- [12]FANG X Y,JIANG W M,MIAO S G,et al.The multi-scale numerical modeling system for research on the relationship between urban planning and meteorological environment[J].Advances in Atmospheric Sciences,2004,21(1):103-112.
- [13]CHEN F,YANG X,ZHU W.WRF simulations of urban heat island under hot-weather synoptic conditions:The case study of Hangzhou City,China[J].Atmospheric Research,2014,138(3):364-377.
- [14]秦文翠,胡聘,李元征,等.基于 ENVI-met 的北京典型住宅区微气候数值模拟分析[J].气象与环境学报,2015(3):56-62.
- [15]佟华,刘辉志,李延明,等.北京夏季城市热岛现状及楔形绿地规划对缓解城市热岛的作用[J].应用气象学报,2005,16(3):357-366.
- [16]ZHOU Y,SHI T,HU Y,et al.Urban green space planning based on computational fluid dynamics model and landscape ecology principle:A case study of Liaoyang City,Northeast China[J].Chinese Geographical Science,2011,21(4):465.
- [17]苗世光,王晓云,蒋维楣,等.城市规划中绿地布局对气象环境的影响——以成都城市绿地规划方案为例[J].城市规划,2013,37(6):41-46.
- [18]冯娴慧,高克昌,钟水新.基于 GRAPES 数值模拟的城市绿地空间布局对局地微气候影响研究——以广州为例[J].南方建筑,2014(3):10-16.
- [19]沈亚明,胡辰溪.基于 RS 与 GIS 的区域土地利用变化引起的生态环境效应研究——以广阳岛为例[J].荆楚理工学院学报,2013,28(2):73-79.
- [20]FATIMA S F,CHANUHR Y H N.Steady-state CFD modelling and experimental analysis of the local microclimate in Dubai (UAE).Sustainable Buildings,2017,2,5.

-
- [21]WANG W,BEEZLEY C,DUDA M.WRF ARW V3:User' s Guide[M/OL].<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users>.
- [22] 蒋维楣,周荣卫,刘红年.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),2009,45(6):769-778.
- [23]KLEMP J B.A terrain-following coordinate with smoothed coordinate surfaces[J].Monthly Weather Review,2011,139(7):2163-2169.
- [24]DICKINSON R E.The force-restore model for surface temperatures and its generalizations[J].Journal of Climate,1988,1(11):1086-1097.
- [25]王宝民,孙向明,刘辉志,等.二维街谷热力动力场数值模拟[J].北京大学学报:自然科学版,2004,40(5):774-780.
- [26]郑有飞,尹继福,吴荣军,等.热气候指数在人体舒适度预报中的适用性[J].应用气象学报,2010,21(6):709-715.
- [27]任学慧,李颖,王健.近 60 a 北方沿海城市人居环境气候舒适性评价——以辽宁省为例[J].自然资源学报,2013,28(5):811-821.