

# 城市生态规划和生态修复中气象技术的研究与应用进展

Research and Application Progress of Meteorological Technology in Urban Ecological Planning and Remediation

杜吴鹏 / DU Wu-peng  
房小怡 / FANG Xiao-yi  
吴岩 / WU Yan  
程宸 / CHENG Chen  
刘勇洪 / LIU Yong-hong

**摘要:** 气象因子是影响城市生态规划和生态修复的重要自然条件,科学利用气象技术可以显著改善城市生态规划的合理性。基于气象观测资料统计分析、现场观测、气象卫星遥感反演、气象数值模拟等技术的发展现状,从城市通风廊道规划与构建、城市热岛的减缓与应对、生态绩效评估、生态修复与大气污染管控等方面总结了气象技术在生态规划和生态修复中的研究与应用进展,并提出了如何更好地将气象技术用于支撑生态空间规划及评估生态规划和修复的气候环境效益。

**关键词:** 风景园林; 气象; 城市生态规划; 城市生态修复; 研究和应用; 进展

**文章编号:** 1000-6664(2017)11-0035-06

**中图分类号:** TU 986

**文献标志码:** A

**收稿日期:** 2017-07-06;

**修回日期:** 2017-07-24

**基金项目:** 中国气象局气候变化专项(编号CCSF201728)、国家自然科学基金项目(编号71473146)、北京市科技计划项目(编号Z161100001216011)和北京市气象局“城市气候评估创新团队”共同资助

**Abstract:** Meteorological factors are the important natural conditions that affect urban ecological planning and remediation, as well as the meteorological technology can improve the urban ecological planning rationality significantly. Based on the development status of statistical analysis of meteorological observation data, site observation, meteorological satellite remote sensing inversion, meteorological numerical simulation, it summarized the research and application progress of meteorological technology in urban ecological planning and ecological remediation, the specific fields including urban ventilation corridor planning and construction, urban heat island mitigation and response, ecological performance assessment, ecological remediation and air pollution management, and put forward how to better use meteorological technology to support ecological space planning and evaluate climate and environmental benefits of ecological planning and remediation.

**Key words:** landscape architecture; meteorology; urban ecological planning; urban ecological remediation; research and application; progress

近年来中国已进入了快速城镇化阶段,然而与城镇化进程相伴随的是出现了一系列和人居环境息息相关的生态环境问题,特别是随着城市规模的快速扩张,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以及雾霾、积涝等气象灾害的频发<sup>[1]</sup>。党的十八大以来,随着生态文明建设的快速推进,气候环境作为生态环境中的重要组成部分备受社会关注,以生态文明建设需求为发展导向,以尊重自然、顺应自然、保护自然为基本理念的城市生态规划和生态修复,也迫切需要现代气象技术的支撑。

气象条件是人居环境和生态环境中的一个重要指标,也是影响城市生态规划和生态修复的重要因子<sup>[2]</sup>。城市生态规划是运用系统分

析手段、生态经济学知识和各种社会、自然信息、经验,规划、调节和改造城市各种复杂的系统关系,在城市现有的各种有利和不利条件下寻找扩大效益、减少风险的可行性对策所进行的规划。一方面,气象条件属于上述城市生态规划定义中提到的风险因素,既可能有利,也可能有害;另一方面,社会经济和城市可持续发展对气象为城市规划特别是城市生态规划和生态修复提供科技支撑提出了更高需求。因此,在城市生态规划和生态修复中利用气象技术对改善城市的宜居性和提高规划的合理性具有重要意义。

在城市生态规划和生态修复气象技术的研究与应用方面,不少规划和气象学者进行了探索性研究应用,已有研究表明开展基于气象环

境影响评估的城市规划设计可以显著改善城市生态环境<sup>[3]</sup>。国内也有不少生态规划或生态修复的案例,在对风、水要素及特殊气候的生态规划手法进行探索的基础上,开展区域气候条件与生态规划间相辅相成关系的研究与实践。北京市气候中心早在1999年就开始与中国城市规划设计研究院、北京市城市规划设计研究院等部门联合开展北京城市规划建设与气象条件及大气污染关系研究,初步建立了城市规划气候环境影响统计分析技术和数值模拟技术,并将成果应用于多个城市的生态规划或生态修复中<sup>[4]</sup>。未来随着气象技术特别是数值模拟和气象卫星观测和反演技术的进步,城市生态规划、生态修复与气象的结合将会越来越紧密。因此,本文以气象技术的应用领域为主线,简述了其在城市通风廊道规划与构

建、城市热岛的减缓与应对、生态绩效评估、生态修复与大气污染管控等几个领域的研究和应用进展,以期从气象层面促进城市生态规划技术和理念的进一步发展。

## 1 气象技术方法介绍

气象技术在城市生态规划和生态修复中有广泛的应用前景,特别是在评估生态规划和生态修复的气候环境效果,在空间布局上支撑规划方案的制定、完善和最终确定方面,更能发挥前置作用<sup>[5]</sup>。根据规划目的和规划范围不同,主要的气象技术有现场观测及观测资料统计分析、卫星遥感反演、数值模拟等,基于生态规划和生态修复空间尺度,从宏观、中观和微观3个层面对具体的气象技术方法和应用领域做了归类(表1)。

其中气象观测资料统计分析,主要通过气象、大气环境等数据资料的统计、计算,获得生态规划或生态修复的气候环境背景特征。为了弥补观测资料不足,在部分城市生态规划或修复编制过程中,须利用便携式移动气象站在规划区内开展现场观测,并利用观测得到的数据指导规划方案的制定和调整。卫星遥感反演最常见的是采用遥感数据获得规划区域的下垫面特征,一方面可用于气象数值模式中地面资料的输入,另一方面可应用于城市热岛反演、生态冷源计算和通风潜力评估。

近年来随着计算机科学的进步,数值模拟方法在天气预报、气候预测以及城市规划气候环境评估中的应用范围越来越广,气象数值模拟可概括为利用高性能计算机模拟在一定的控制条件下自然界的天气和气候状况,其原理是根据控制天气气候的基本物理定律,建立相应的数学模式,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。当前,城市生态规划和生态修复气象环境评估中使用的数值模式主要有天气预报模式(WRF、WRF-Chem)、中小尺度气象数值模式(CFD、USSM)以及大气污染扩散模式(Calpuuff、ADMS)等。不同尺度模式与规划领域中的城镇体系规划、总体规划、详细规划等有一定的对应关系(图1)。

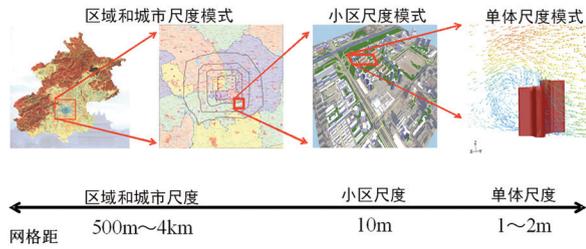


图1 不同尺度气象数值模式示意(房小怡绘)

## 2 主要应用领域

### 2.1 通风廊道规划与构建

城市通风廊道又称城市风道,城市通风廊道建设的最主要目的是把郊区的风引入市区,让中心城区与远郊区域间更好地“换气”<sup>[6]</sup>。城市通风廊道的载体多为绿地、公园、水体等生态用地,如何使这类生态用地发挥最大作用,营造合理的建筑布局、街道走向来适应气候环境,尤其是在通风廊道的合理规划建设以及廊道内的生态用地效益评估中离不开气象技术的支撑。

在具体案例方面,德国斯图加特通过利用城市气候环境图技术,构建通风廊道将郊区新鲜冷空气源地与城市中心地区沟通,确保了有效的空气流动<sup>[7-8]</sup>;日本东京则充分利于城市内部和外部的生态冷源,利用气象中的山谷风、海陆风、公园风等分析方法,将风、绿、水相结合,规划了五级通风廊道<sup>[9]</sup>;在更细微的城市街区尺度,主要关注对象为详细规划层面的街道、建筑物排布和小规模绿地、水体对局地环境的影响,需采用精细化气象数值模拟技术,香港和深圳等城市做了部分有益尝试<sup>[10-11]</sup>。

以近年开展的北京中心城区通风廊道规划为例,气象技术在廊道规划和构建、廊道内的用地修复或生态改善对策建议方面发挥了一定的支撑作用<sup>[12]</sup>。在获得背景风环境(气象观测资料分析、WRF模拟)、城市热岛(Landsat-TM和高分一号卫星遥感影像资料反演)和地表通风潜力(城市地表粗糙度和天空开阔度计算)分

布基础上,提出了北京中心城区通风廊道构建的依据、原则和初步方案<sup>[12]</sup>,并建议通过合理规划城市未来发展布局,优化城市结构,最大程度发挥“主通风廊道引风、二级廊道送风、三级廊道串风”的通风效果;通风廊道的气候和生态效果主要体现在促进空气流通、缓解热岛、降低建筑物能耗、提高城市宜居性以及气候价值高的土地得到合理保护与利用,杜吴鹏等利用现场观测方法获得的结果表明通风廊道在气温较高时有一定的降温作用,可以减缓城市热岛,在中小风速条件下则能明显增加局地风速<sup>[12]</sup>。综合考虑避灾、景观、生态、游憩、污染、降噪以及空气流动等多方面的因素,建议随着疏解非首都功能的推进,对一些不利于廊道构建的“关键节点”,进行严格的生态规划控制和生态修复。例如,十里河区域为北京中轴线通风廊道的重要区域,目前分布有大量的建材批发市场,通过生态环境效益评估,提出了十里河地区综合生态环境整治方案;另外,通过模拟对比和评估前三门盖板河恢复为明河所带来的微气候效应,为局地通风廊道贯通、充分发挥生态环境效益提供了决策依据,最终确定了在未来随着土地使用年限的到期和城市更新过程,邻近盖板河的一些符合规划的建筑物将逐步腾退恢复为生态用地。

### 2.2 城市热岛的减缓与应对

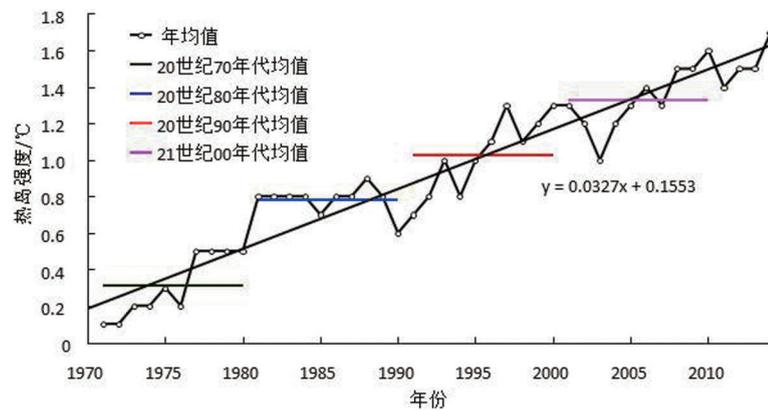
城市热岛是高密度人类活动所导致的自然下垫面改变为城市下垫面所带来的后果,城市热岛效应是某一地区城市化后,低层大

气等温线图上城区为一个明显的高温区，而郊外温度相对较低，如同平静的海面上出现的岛屿，由于这种岛屿代表着高温的城市区域，所以就被形象地称为“城市热岛”<sup>[13]</sup>。城市热岛效应是城市化带来的最明显的生态环境特征之一，作为影响城市环境质量、舒适度的重要因素，城市热岛会对人类生产、生活产生直接和间接的影响，如影响人体健康、降低工作效率、加剧大气污染、增加因空调降温所产生的能耗等，近年越来越引起人们的关注。

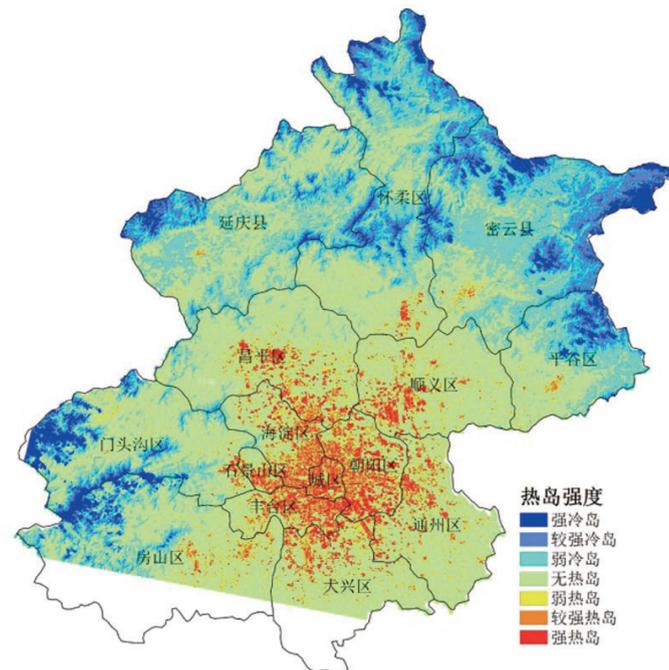
许多学者利用气象观测、遥感监测、数值模拟的手段对城市热岛的成因、时空变化特征、危害以及减缓和应对城市热岛的适应对策进行了大量研究<sup>[14]</sup>。其中，对北京地区气象站观测资料的统计分析表明，20世纪70年代初至今，北京城市热岛强度明显增强(图2)，以年平均气温计算，北京城市热岛强度从70年代的0.31℃发展到近年的1.33℃，热岛强度变率约为0.33℃/10年，明显高于全国平均水平，这种时间变化特征也与城市规模的快速扩张和生态用地的减少有很大关系。

采用气象卫星影像反演得到的地表温度来计算城市热岛强度在城市热岛研究和城市生态规划中较为常见<sup>[15]</sup>，将规划区的地表温度与郊区温度(郊区农田平均地表温度)的差定义为热岛强度，并依照气象部门定义的热岛强度等级标准进行等级划分，如在北京和唐山城市规划案例中，采用Landsat-TM卫星遥感影像资料反演获得热岛强度的空间分布和热岛面积随时间的变化特征(图3、4)。

在以上基础上，可通过分析用地类型与热岛空间分布之间的相互联系，开展用地类型对城市热环境的影响研究，对未来城市空间布局也有一定的指导意义<sup>[16]</sup>。例如，在京津冀城市群热岛特征研究中，由于北京南部和东部的大兴城区、亦庄经济技术开发区、通州城区、通州新城以及外围的第二机场产业区、廊坊、固安、香河、燕郊、大厂等位于京津冀的中心地带，且是北京中心城和天津中心城两大强热岛区域的衔接过渡区，通过气象观测、遥感反演和数值模拟手段获得现状和未来规划情景下的热岛空间分布，得出北京南部和东部区



2



3

图2 北京城市热岛强度的年际变化(杜昊鹏绘)

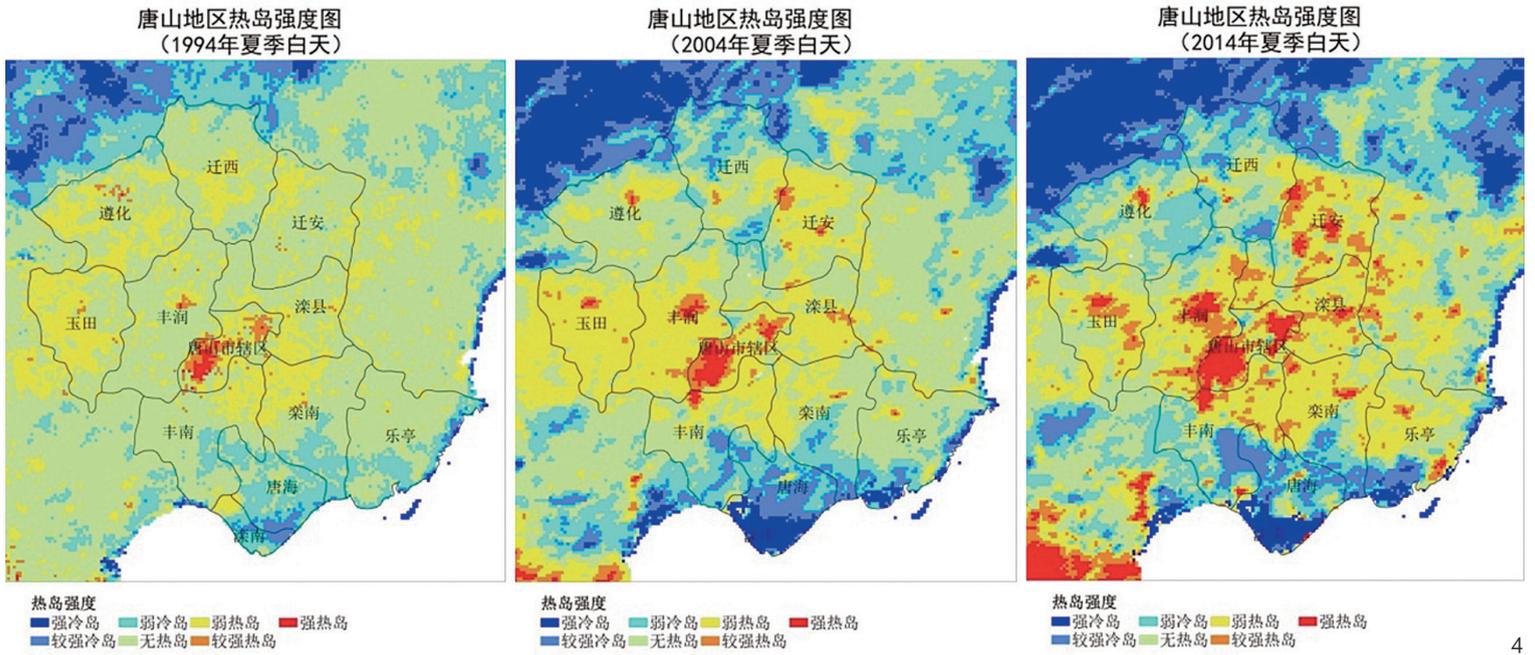
图3 卫星反演北京地区2011年热岛强度空间分布(刘勇洪绘)

域未来热岛将更加明显的结论，若不加以控制，很可能造成京津城市热岛连片，因此提出要统筹考虑区域整体规划，特别是生态用地布局、现有土地的生态修复尤其重要，采用遥感反演和数值模拟方法为区域空间规划和利用生态绿廊、绿楔、绿隔减缓热岛效应提供了研究基础，最终提出优化城市下垫面、合理布局生态用地的方案，为推进绿色经济、低碳经济和区域可持续发展提供了气象技术支持。另外，

在“2004—2020北京城市总体规划”方案中设置了多道绿化隔离地区，土地利用类型中规划了大面积的绿地，通过利用区域边界层模式(Regional Boundary Layer Model, RBLM)模拟不同规划方案实施后的气象环境效果，开展了规划方案的生态环境效应评估，支撑了生态用地空间布局和调整。

### 2.3 生态绩效评估

当前越来越多的城市正在开展生态城市的



4

申报和建设工作的，究竟生态城市是否达到预期要求，急需一种科学、客观评价生态城市建设成效的方法。2015年11月住房和城乡建设部下发试行由国际欧亚科学院、中国城市规划设计研究院等多家单位共同研发完成的《城市生态建设环境绩效评估导则》。这套评估体系包括了一系列与气象和大气环境有关的指标，包括通风潜力指数、热岛比例指数、生态冷源面积比、空气质量达标天数等，用于客观评估城市生态建设对生态环境的影响<sup>[17]</sup>，并以北京怀柔

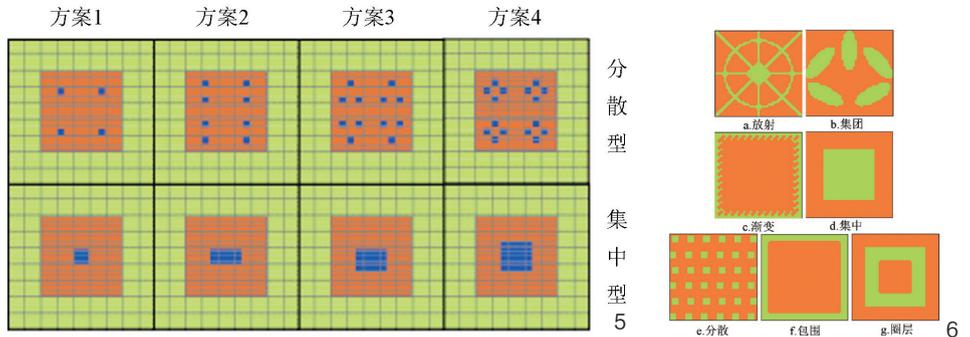


图4 不同年代唐山市域范围热岛强度变化(刘勇洪绘)

图5 不同水体布局方案设计示意(北京市气候中心研究团队绘)

图6 不同绿地布局方案设计示意(北京市气候中心研究团队绘)

表1

城市生态规划和生态修复气象技术应用总结

城市生态规划和生态修复空间尺度	气象技术方法	应用领域
宏观	1)气象观测：使用国家气候基准站和国家气象基本站资料，可代表规划区域和周边区域本底气象特征，观测时长大于10年； 2)卫星遥感：MODIS、风云FY系列气象卫星；分辨率几百米到1km； 3)气象数值模拟：可分辨用地类型的气象数值模式；水平空间分辨率500m~3km；如WRF、WRF-Chem、MM5、RBLM等	城市生态规划气候环境背景分析；城市一级通风廊道或一级生态廊道规划；城市或区域热岛减缓与应对；城市生态绩效评估；城市大气污染管控；城市大型生态用地空间布局气候环境效益分析
中观	1)气象观测：使用国家一般气象站和区域自动气象站，可代表规划区域范围的气象特征，观测时长3~10年； 2)卫星遥感：陆地卫星Landsat、资源系列卫星、环境系列卫星；分辨率几十米； 3)气象数值模拟：可识别城市大片绿地、水体形态以及主要街道、建筑物布局的小尺度气象数值模式，污染扩散模式则需要能确定排放源的位置、排放源形态等信息；水平空间分辨率10~500m；如城市近地面高分辨风场快速更新模型、USSM、ADMS、Calpuff等	城市二级及以下通风廊道或生态廊道规划；城市内部局地热岛减缓与应对；开发区或城市片区生态绩效评估；固定点源污染扩散影响评估
微观	1)气象观测：使用区域自动气象站，可反映局地气象特征，观测时长1~3年； 2)卫星遥感：高分一号卫星，分辨率可达米的量级； 3)气象数值模拟：可识别城市小片区绿地、水体分布形态以及局地街道和建筑物布局的精细尺度数值模式；水平空间分辨率10m以下；如CFD模型中的FLUENT、PHOENICS、NUMECA等	理想生态用地布局方案敏感性试验；街区建筑布局和绿地布局生态效应评估；小片区绿地和水体生态规划或生态修复气候环境效应评估

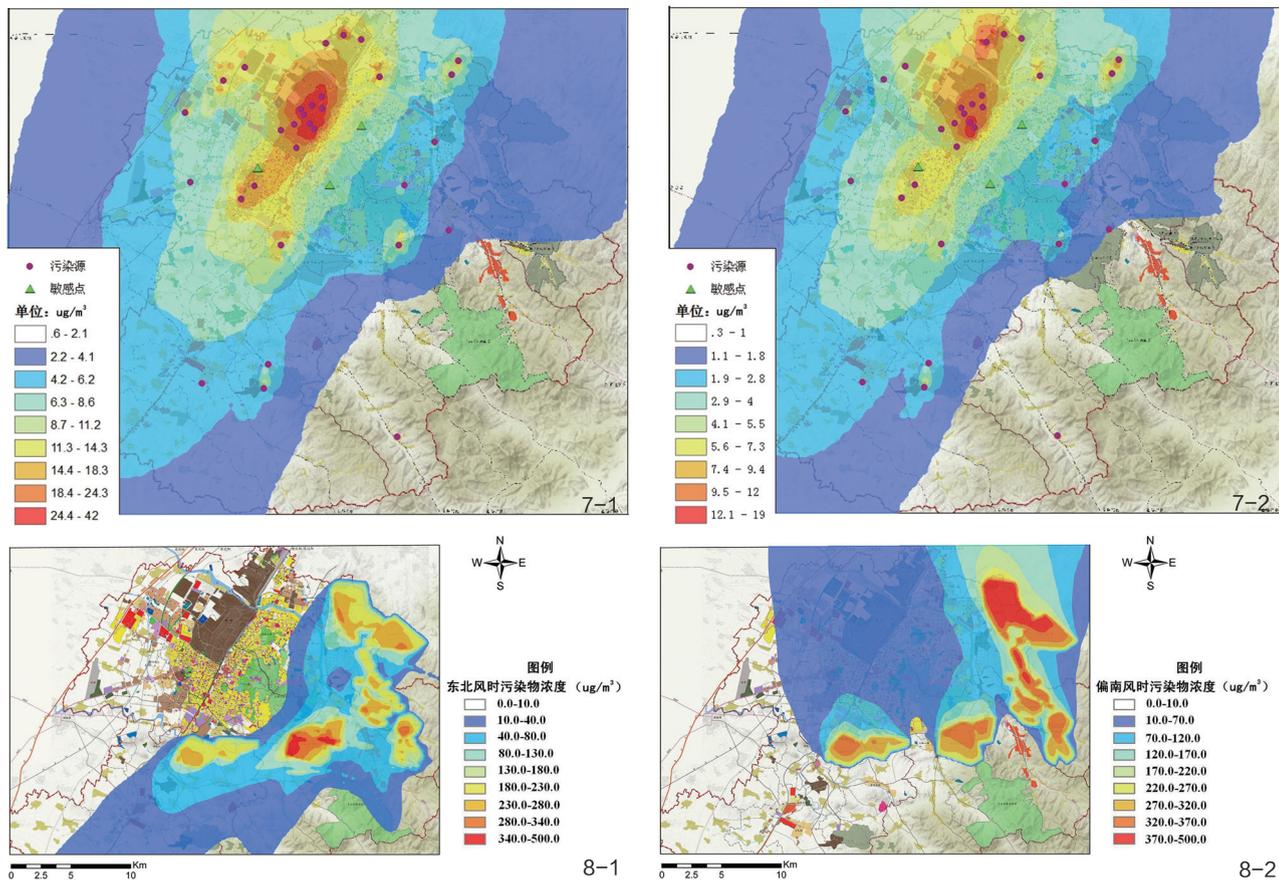


图7 鞍山城区工业点源污染扩散模拟(7-1: SO<sub>2</sub>; 7-2: NO<sub>2</sub>)(程宸绘)

图8 不同主导风条件下排岩场粉尘扩散浓度模拟(8-1: 东北风; 8-2: 偏南风)(杜吴鹏绘)

雁栖湖生态城为例，开展了气象技术在生态城绩效评估中的应用，从气象环境角度给出了定性和定量绩效评估结果。

另外，气象数值模拟技术也应用于不同水体和绿地空间布局气象环境效应的研究和实践中<sup>[18]</sup>。例如，使用城市小尺度气象模式USSM和计算流体力学软件CFD，通过设计理想的水体和绿地分布方案(图5、6)，可开展不同分布类型或相同分布类型下不同分布面积的水体、绿地布局对局地气候环境的影响效果研究，通过获得水体和绿地布局生态环境效益的一般性规模，在具体城市生态规划或生态修复中择优选择合理的生态用地布局方式，对有效缓解夏季酷热、增强大气扩散能力、最大程度发挥水体和绿地的生态效益均有很大帮助。该方法同样适用于城市生态系统修复的气候环境评价，通过模拟对比不同修复方式、不同修复力度情景，在经济投入、生态效益间达到平衡。

## 2.4 生态修复与大气污染管控

气象技术应用于生态修复和大气污染管控，主要基于气象和大气污染扩散数值模拟手段。例如在鞍山市城市总体规划中，利用WRF和ADMS数值模式，对鞍山市内重点大气污染源和代表性排岩场进行了模拟计算和分析(图7、8)，获得重要大气污染源和排岩场粉尘对不同区域大气环境的影响，为产业空间布局、新区选址、生态修复以及制定城市规划方案提供了重要依据。在“伊犁河谷大气环境与城镇及工业园布局”专题研究中，利用气象和污染扩散模式(WRF和Calpuff)对伊犁河谷的风场特征、污染扩散特征以及布局敏感性进行了计算，为最终大气环境红线管控方案的制定提供了科学依据。此外，还有针对工业区布局中常见的厂区分散和集中2种模式的模拟探讨，以城市生态规划中的工业污染源布局选址为例，通过模拟计算不同分散情景下污染物最大落地

浓度和区域平均浓度的变化特征，在严控生态环境影响阈值和环境容量前提下，提出合理的污染源布局模式，可进一步挖掘区域产能，为企业和地方获得最大经济效益提供研究支撑。

## 3 结语

随着国家和民众对生态环境问题的日益关注，城市生态规划和生态修复中利用气象技术提高规划的科学性和合理性必将得到越来越高的重视，本文基于宏观、中观和微观3种尺度，从城市通风廊道规划与构建、城市热岛的减缓与应对、生态绩效评估、生态修复与大气污染管控等几个领域探讨了气象技术在生态规划和生态修复中的研究与应用，特别是如何将其应用于规划的空间支撑以及评估生态规划和修复的气候环境效益。

城市生态规划和生态修复与气象结合未来仍有很多未解决的难题需进一步探索，比如基

于风环境评估的通风廊道规划与构建技术依然存在不少需要改进和提高之处,不同类型城市由于生态要素差别较大,地表通风潜力的划分标准不应相同,缺乏生态环境效益的现场观测与对比,对于研究成果的应用也多停留在概念性规划上,常由于种种因素导致规划方案并未真正实施,在“廊道规划实施后的气候环境效果评估”等方面目前仍很难给出科学的定量回答。热岛强度的时空分布与城市用地类型的关系研究以及在指导用地布局方面还不够切合实际,在水体和绿地布局模拟中,当前仍主要采用理想化方案,与实际的生态规划和生态修复结合较少;在大气污染扩散模拟中,更多考虑的是污染物在动力作用下的传输、沉降等过程,而很少考虑化学过程和二次形成,导致模拟的污染物浓度与实际存在一定偏差。要解决以上问题迫切需要气象部门、生态环境部门与规划部门联合开展相关领域的研究与应用实践,提出并建立基于气象学、生态学和规划学的评估指标,获得用于指导实际城市生态规划和生态修复的定量结论,以此在未来的城市生态规划和修复中发挥更大的效能。

致谢:感谢北京市气候中心和北京市气象局城市气候评估创新团队对本文研究工作的支持和帮助。

- [7] Baumüller J, Esswein H, Hoffmann U, et al. Climate atlas of a metropolitan region in Germany based on GIS[J]. *The seventh International Conference on Urban Climate*, 2009, 10(3): 1282-1286.
- [8] Weber S, Kordowski K, Kuttler W. Variability of particle number concentration and particle size dynamics in an urban street canyon under different meteorological conditions[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 449(2): 102-114.
- [9] 任超, 吴恩融.城市环境气候图:可持续城市规划辅助信息系统工具[M].北京:中国建筑工业出版社, 2012.
- [10] 袁超.缓解高密度城市热岛效应规划方法的探讨:以香港城市为例[J].*建筑学报*, 2010(S1): 120-123.
- [11] 李磊, 吴迪, 张立杰, 等.基于数值模拟的城市街区详细规划通风评估研究[J].*环境科学学报*, 2012(4): 946-953.
- [12] 杜吴鹏, 房小怡, 刘勇洪, 等.基于气象和GIS技术的北京中心城区通风廊道构建初探[J].*城市规划学刊*, 2016(5): 79-85.
- [13] 白杨, 王晓云, 姜海梅, 等.城市热岛效应研究进展[J].*气象与环境学报*, 2013(2): 101-106.
- [14] 陈爱莲, 孙然好, 陈利顶.基于景观格局的城市热岛研究进展[J].*生态学报*, 2012, 32(14): 4553-4565.
- [15] 池腾龙, 曾坚, 王思彤.基于RS和GIS的郑州市植被覆盖度与地表温度演化研究[J].*中国园林*, 2016, 32(10): 78-83.
- [16] 刘勇洪, 栾庆祖, 权维俊, 等.基于多源卫星资料的京津唐城市群热环境研究[J].*生态环境学报*, 2015(7): 1150-1158.
- [17] 汪光焘, 焦舰, 包延慧, 等.城市生态建设环境绩效评估导则技术指南[M].北京:中国建筑工业出版社, 2016.
- [18] 李书严, 轩春怡, 李伟, 等.城市中水体的微气候效应研究[J].*大气科学*, 2008, 32(3): 552-560.

(编辑/王媛媛)

#### 参考文献:

- [1] 史军, 梁萍, 万齐林, 等.城市气候效应研究进展[J].*热带气象学报*, 2011, 27(6): 942-951.
- [2] 徐莹, 周祥.基于多因子生态容量与GIS技术的森林公园总体规划方法改进:以流溪河国家森林公园总体规划为例[J].*中国园林*, 2016, 32(10): 68-72.
- [3] 汪光焘.气象、环境与城市规划[M].北京:北京出版社, 2004.
- [4] 北京城市规划建设与气象条件及大气污染关系研究课题组.城市规划与大气环境[M].北京:气象出版社, 2004.
- [5] 房小怡, 王晓云, 杜吴鹏, 等.我国城市规划中气候信息应用回顾与展望[J].*地球科学进展*, 2015, 30(4): 445-455.
- [6] 任超.城市风环境评估与风道规划:打造“呼吸城市”[M].北京:中国建筑工业出版社, 2016: 53-109.

#### 作者简介:

杜吴鹏/1981年生/男/河南安阳人/北京市气候中心高级工程师/研究方向为应用气候、城市规划气象环境评估、大气环境(北京 100089)

房小怡/1977年生/女/陕西临潼人/北京市气候中心正研级高级工程师/研究方向为城市规划气候可行性论证(北京 100089)

吴岩/1984年生/男/河南洛阳人/中国城市规划设计研究院工程师/研究方向为城市绿地系统规划、风景名胜规划、城市景观规划设计(北京 100044)

程震/1988年生/男/江苏南京人/北京市气候中心工程师/研究方向为应用气候、气候可行性论证(北京 100089)

刘勇洪/1974年生/男/四川广安人/北京市气候中心正研级高级工程师/研究方向为气象遥感与地理信息系统(北京 100089)