

城市气象观测与研究进展综述

张云鹤 朱亚社

杨凌气象局 陕西 杨凌 712199

摘要: 在全球气候变化和快速城市化的综合影响下,环境压力和不利环境效应日益突出,城市热浪、雾霾和暴雨等极端天气、灾害事件对城市居民生活的威胁越来越大,给城市可持续发展带来巨大挑战。因此,在这样的背景下,城市气象业务服务与防灾减灾需求不断提升,这也促使城市气象领域不断深化和发展。城市气象观测在现代城市治理与发展中具有不可替代的核心价值,当前气象深度融入国土空间规划仍存在法规标准缺失、跨部门协同不足等瓶颈,亟需建立气候容量、灾害风险等空间管控指标体系。未来需进一步打通“观测-模拟-服务”全链条,推动城市从被动防灾向主动适应转型。

关键词: 城市气象; 观测试验; 气候效应; 大气污染

城市气象观测是开展天气预报、各类气象服务以及科学研究的重要基础。近二十年来,随着城市气象观测理念、技术和方法的不断进步,世界各国加速构建和完善城市气象综合观测网,推动了城市气象观测与研究快速发展。

1 城市气象观测的重要性

1.1 筑牢气象防灾减灾第一道防线。灾害预警与应急响应,实时监测强降水、台风等极端天气,支撑精准预警信息发布。例如通过递进式气象服务及时发布滑坡预警,高效组织人员转移避险,实现人员零伤亡;构建临灾预警“叫应”机制,在极端特大暴雨中成功转移22万人,灾后12小时恢复城市运行。城市内涝与复合灾害防控,高密度观测网显著提升暴雨内涝、龙卷风等灾害监测能力,为防洪排涝调度提供分钟级决策依据。

1.2 支撑城市规划与绿色发展。优化城市空间布局,气象数据解析城市热岛效应、通风廊道等小气候特征,指导建筑布局与绿地规划,缓解热岛强度并改善空气质量。例如超高分辨率区域气候模式可量化不同降温措施对城市微气候的影响,为韧性城市建设提供科学依据。气候可行性论证前置,通过气象灾害风险区划(如山洪、内涝风险),约束城市土地利用和基础设施选址,避免在灾害高风险区布局敏感设施。将气象评估纳入城乡建设标准制定流程,强化防灾与节能设计。

1.3 赋能城市精细化治理与服务。智慧城市运行保障,融入“城市大脑”平台的气象数据可优化多领域管理:智慧气象平台实时调控供热能耗曲线,指导电网负荷调度;低空气象服务实现500米分辨率航线预报,保障日均千架次无人机安全飞行。民生服务效能提升,居民区气象观测站提供社区级精准天气信息,指导出行安排

与健康防护;基于位置的气象App推送个性化预警,通过靶向发布、“闪信”强制提醒等技术覆盖超千万人次

1.4 驱动多行业高质量发展。能源与交通优化,风能、太阳能功率预测依赖气象观测,提升可再生能源利用率;高速公路气象风险预警系统减少交通事故率。农业与生态保护,精细化农业气象服务(如“农业+保险”机制)帮助农户规避低温冻害损失,促进特色作物稳产增收;依托台风监测数据优化滨海旅游资源开发与生态保护平衡。

1.5 应对气候变化的科学基础。长期气象观测数据揭示城市化与全球变暖的叠加效应,为制定碳中和路径、适应气候变化政策提供关键支撑。中国气象局作为国家应对气候变化科技骨干部门,主导气候系统观测与影响评估,支撑国际气候谈判。

2 城市气象观测如何帮助天气预报

城市气象观测通过高密度数据采集、多源协同分析及智能技术融合,显著提升了天气预报的精度与时效性,具体作用机制如下:

2.1 构建精细化初始场。地面观测网络,城市密集布设自动气象站,实时采集温度、湿度、气压、风速等数据,为数值模式提供高分辨率初始场,减少预报误差。垂直廓线探测,风廓线雷达、北斗探空系统等设备获取大气边界层三维温湿风结构,解决强对流触发机制认知盲区,短临暴雨预报精度提升30%。

2.2 多源协同提升监测能力。卫星与雷达联动,气象卫星(如风云系列)监测云系宏观演变,天气雷达捕捉降水粒子细节,二者协同完整追踪强对流过程,提早识别灾害信号。示例:Ku/Ka双频降水测量雷达实现大气垂直“CT扫描”,精准感知0.2毫米/小时弱降水变化。异构

数据融合，融合物联网积水传感器、无人机低空观测等社会数据，构建分钟级预警系统（如天津积水预测误差 < 1厘米）。

2.3 驱动智能预报范式革新。AI模型训练基础，高精度观测数据训练国产大模型（如“灵犀”系统），替代传统参数化方案，优化极端降水预测能力。灾害快速识别，深度学习算法解析雷达组网数据，将龙卷风等强对流预警时效缩短至分钟级。

3 研究综述与进展的关系

研究综述与进展在学术研究中构成相互依存的动态关系：综述系统梳理已有成果，为进展奠定认知基础；而进展突破既有边界，反过来更新综述内容。二者具体关系如下：

3.1 研究综述：进展的认知基石。成果整合与脉络梳理，研究综述通过对领域内文献的系统分析，归纳已有成果的核心观点、研究方法与技术路线，形成结构化知识体系，为识别研究空白提供基础。例如，城市气象领域通过梳理立体化观测网络等技术创新，明确技术迭代路径。问题诊断与方向锚定，通过批判性评价现有研究的局限性（如观测数据质控瓶颈），综述揭示亟待突破的关键问题，驱动后续研究聚焦核心挑战。如城市气候效应研究中，综述指出“热岛与气溶胶交互机制”的认知不足，引导数值模型优化方向。

3.2 研究进展：综述的更新动力。理论突破与技术革新，进展以原创性突破（如北斗探空系统将测风误差降至0.几米/秒）或方法创新（如多波段雷达协同提升降水监测精度）推动领域边界扩展915，迫使综述内容持续迭代。范式转换与应用拓展，重大进展可颠覆传统认知框架。例如人工智能预报模型（如“灵犀”大模型）重构短临预报范式，促使综述新增“AI驱动”章节；低空气象服务等新场景的出现，也要求综述补充应用维度的评述。

3.3 交互关系：闭环演进系统。综述→进展，提供理论支撑，定位突破点，综述指出现有城市陆面模型缺陷→催生CMA-RA再分析数据集优化；进展→综述，注入新内容，重构知识框架，无人机跨江观测填补数据空白→综述新增“低空监测技术”分类；动态闭环，进展验证综述推论，综述修正进展方向，综述预测“多源数据融合”重要性→雷达组网技术突破验证该趋势→下一轮综述强化该领域权重。研究综述是“学术地图”，标注已知领域与空白区；研究进展则是“探索行动”，通过填补空白拓展地图边界。二者循环推动学科演进，例如城市气象领域依托综述梳理技术瓶颈，催生智能观测装备发展；而天上智能卫星等进展又反向要求综述框架升级。

4 城市气象观测的研究进展

以下是城市气象观测研究的最新进展综述，综合关键技术突破与国际前沿趋势：

4.1 立体化观测技术革新。垂直探测体系升级，超大城市综合观测试验构建风廓线雷达、毫米波测云仪、微波辐射计协同的网络，实现对风、温、湿及水凝物的三维监测，短临暴雨预报精度提升30%。北斗探空系统将测风误差降至0.几米/秒，台风路径预报误差缩减60%。低空监测技术突破，无人机跨江梯度观测填补低空气象数据空白；激光测风雷达与多普勒雷达协同分析，提升晴空回波条件下风场反演精度。成都成立全国首个低空气象实验室，攻关低空风场精细化观测与无人机探测技术，支撑通航物流安全。多源协同与质量控制，C/X波段雷达组网使强降水监测面积扩大30%，定量估测误差降至16.4%。突破探空气球漂移误差订正、云雷达功率谱去噪等质控瓶颈，提升数据可靠性。

4.2 数值模拟与数据集突破。国产化数值产品，中国气象局全球大气再分析产品（CMA-RA V1.5）性能优于国际第三代产品（如JRA-55），支撑AI气象大模型国产化训练。城市陆面过程模型优化，改进城市冠层参数化方案，量化热岛环流与海陆风交互机制，揭示其对降水强度和分布的调控作用。X波段雷达组网系统（BJ-Xnet）生成12类高精度三维风场产品，弥补静锥区探测盲区。

4.3 核心科学问题研究进展。城市化气候效应机制，实证表明城市热岛、人为热排放及气溶胶增加加剧极端天气频率，全球变暖与城市化叠加使城市洪涝风险倍增。多圈层交互作用，研究证实城市粗糙度增强湍流发展，加速气溶胶新粒子生成；城市下垫面改变边界层结构，触发次级环流影响降水分布。

4.4 智慧城市应用拓展。灾害防御精细化，粤港澳大湾区强对流观测试验提升龙卷监测能力；天津积水深度预测系统融合物联网与AI算法，实现涵洞水位分钟级预警。城市治理赋能，超声波微型气象仪以10年寿命、多参数集成特性，助力热岛效应治理；重庆构建“44NN”预警管理体系，贯通三级城市治理中心。

4.5 挑战与未来方向。国际前沿焦点，城市气候适应规划、遥感技术应用、多尺度数值模拟及极端天气响应机制被列为优先领域。关键技术瓶颈，需突破观测-预报-服务链条协同障碍，化解精细化需求与预报能力矛盾；发展天上智能卫星、深化城市气候数据集建设、推动健康气象交叉研究。体制机制创新，建立“科研-用户需求”联动机制，推动气象深度融入国土空间规划标准。

智能装备（如相控阵雷达）、多圈层数据同化、气候韧性城市规划构成未来三大增长点。

5 城市气象观测的未来研究方向

城市气象观测的未来研究方向聚焦智能装备研发、多圈层交互机制、精细化服务等核心领域，结合政策规划与技术演进趋势，主要呈现以下七大方向：

5.1 智能协同观测技术革新。低空经济气象保障，发展水平分辨率100米、时间分辨率10分钟的低空专属数值模型，研发嵌入式微型气象传感器，构建无人机起降点动态感知网络，支撑城市空中交通与物流安全。

5.2 多圈层交互机制研究。城市化气候效应量化，深入解析热岛环流与海陆风交互机制，量化气溶胶-云-降水反馈过程，建立全球变暖与城市化叠加效应的风险评估模型。城市水文气象耦合，研究下垫面改变对暴雨内涝的放大效应，开发融合物联网的积水深度分钟级预警系统。

5.3 人工智能深度赋能。预报范式重构，推动AI算法模块化替代传统数值预报物理过程参数化方案，发展“观测-预报-服务”全链条智能协同平台。极端天气快速识别，利用深度学习优化龙卷风、短时强降水等灾害的雷达组网识别算法，预警时效提升至分钟级。

5.4 双碳目标驱动应用。城市通风效能评估，基于超高分辨率气候模式，量化建筑布局与绿地系统对热岛强度的抑制效果，指导低碳城市规划。碳中和监测支撑，构建碳源汇核查系统，集成卫星与地基CO₂观测数据，服务城市碳排放核算。

5.5 低空监测场景拓展。三维航线预报服务，研发500米分辨率低空气象产品，保障城市无人机物流、应急救援等新型业态安全运行。城市冠层湍流建模，揭示建筑群粗糙度对低空风切变的触发机制，建立通航安全气象风险等级标准。

5.6 新型装备与标准建设。星上智能卫星研发，发展量子雷达、高光谱传感器等天基装备，提升城市气溶胶与温室气体监测能力。多源数据融合规范，制定物联网气象设备、社会观测数据的质量控制标准，破解异构数据协同应用障碍。

5.7 体制机制创新。气候韧性城市规划，推动气象灾害风险区划纳入国土空间规划强制性内容，建立气候容量约束性指标。科研-业务-用户联动，构建城市气象科技联盟（如北京实验室），打通科技成果转化“最后一公里”。

综上所述，城市气象观测从单点观测向“空天地海”立体协同转型，从灾后应对向风险预估转型，最终支撑智慧城市从静态管理到动态适应跃迁。

参考文献

- [1]苗萍.城市气象研究进展[J].气象学报,2020,78(3):477-499.
- [2]国务院.国务院关于印发气象高质量发展纲要(2022—2035年)的通知[J].中华人民共和国国务院公报,2022(16):11-16.
- [3]中国气象局综合观测司.高质量推进观测站网统一规划建设[N].中国气象报,2022-09-07(4).
- [4]中国气象局综合观测司,中国气象局预报司.观测司预报司关于印发《城市气象观测能力建设指导意见》的通知:气测函[2022]233号[A/OL].(2023-01-03)[2024-02-27].
- [5]高君国.上海城市气象综合观测网应用及展望[J].气象科技进展,2022,7(6):99-104.
- [6]王梅力.江苏沿海高速公路低能见度浓雾的气候特征和影响因子研究[J].气象,2022,42(2):192-202.
- [7]沈颖焯.浅谈浙江省大气复合污染立体监测网络[J].环境与可持续发展,2022,43(4):52-54.