

张晔, 裴男才, 何碧红, 等. 无人机技术在广州南沙区河涌景观特征生态调查中的应用研究进展[J]. 生态科学, 2020, 39(3): 231–240.

ZHANG Ye, PEI Nancai, HE Bihong, et al. Review on applications of unmanned aerial vehicles in landscape configurations of river channels in Nansha district, Guangzhou city[J]. Ecological Science, 2020, 39(3): 231–240.

无人机技术在广州南沙区河涌景观特征生态调查中的应用研究进展

张晔¹, 裴男才^{2,*}, 何碧红³, 史欣², 孙冰², 于彬², 尹小阳², 王子研⁴,
唐赛男⁵, 金一博⁶, 刘晓天², 唐艺家², 朱颖芳⁷, 孙倩⁸

1. 中山大学新华学院资源与城乡规划系, 广州 510520
2. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广州 510520
3. 广东省沙头角林场, 深圳 518081
4. 国际竹藤中心, 北京 100102
5. 国家林业和草原局林产工业规划设计院, 北京 100010
6. 中建三局第三建设工程有限责任公司, 武汉 430000
7. 中南林业科技大学理学院, 长沙 410004
8. 澳大利亚墨尔本皇家理工大学科学院地理空间科学系, 维多利亚州墨尔本市 VIC 3001

【摘要】在城市化进程逐步加快、社会经济水平趋于高阶的时代, 城市生态系统是当前开展交叉学科研究的重要对象, 融合了自然科学(如林学、生态学等)和社会科学(如管理学、人文地理学等)领域的思想体系和研究方法。作为一种新兴技术, 无人机遥感已在生物学、地理学、信息科学等多个学科领域广泛使用。主要从监测、研究、评估和保护等四个方面简要叙述了无人机技术在林业生态研究和管理中的应用情况, 并以广州南沙区河涌景观为例简要分析了无人机技术在珠江三角洲地区城市森林景观中的实际应用。试图为我国城市区域的森林生态、生物多样性与人居环境研究和管理工作提供参考。

关键词: 无人机遥感技术; 粤港澳大湾区; 森林城市群; 城市森林与绿地; 人居环境; 生态文明建设

doi:10.14108/j.cnki.1008-8873.2020.03.029 中图分类号: S157.2 文献标识码: A 文章编号: 1008-8873(2020)03-231-10

Review on applications of unmanned aerial vehicles in landscape configurations of river channels in Nansha district, Guangzhou city

ZHANG Ye¹, PEI Nancai^{2,*}, HE Bihong³, SHI Xin², SUN Bing², YU Bin², YING Xiaoyang², WANG Ziyang⁴,
TANG Sainan⁵, JIN Yibo⁶, LIU Xiaotian², TANG Yijia², ZHU Yingfang⁷, SUN Qian⁸

1. Department of Resources and the Urban Planning, Xinhua College of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510520, China
2. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China

收稿日期: 2019-07-01; 修订日期: 2019-09-02

基金项目: 中国林科院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金青年人才项目(CAFYBB2017QB002), 中山大学新华学院博研计划, 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资助(CAFYBB2018GB001)。

作者简介: 张晔(1987.08—), 女, 江西人, 讲师, 硕士, 主要从事园林景观设计等方面的教学和研究工作, E-mail: zhangye87.86@163.com

*通信作者: 裴男才(1984.09—), 男, 江西人, 副研究员, 博士, 硕士生导师, 主要从事森林生物学、城市林业等方面的研究工作, E-mail: nancai.pei@gmail.com

3. Guangdong Provincial Sha Tau Kok Forest Farm, Shenzhen 518081, China
4. International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China
5. Planning and Design Institute of Forest Products Industry, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100010, China
6. The Third Construction Co., Ltd of China Construction Third Engineering Bureau, Wuhan 430000, China
7. School of Science, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, China
8. Geospatial Sciences, School of Science, GPO Box 2476, RMIT University, Melbourne VIC 3001, Australia

Abstract: Urban ecosystem is developing towards a hit in the field of interdisciplinary science, incorporating theoretical frameworks and research approaches from natural sciences (e.g., forestry and ecology) and social sciences (e.g., management science and human geography), particularly in the era of rapid urbanization and advanced society. As an emerging technology, UAV remote sensing has been commonly used in many disciplines including biology, geography, information science, etc. The present paper briefly summarized the applications of UAV in forest research and management, mainly from the perspective of monitoring, research, evaluation and conservation. Furthermore, the paper analyzed landscape components and configurations of river flood in Nansha District, Guangzhou City, which was illustrated as a case study for practical use of UAV in China's urban forestry. This paper tended to shed new light on the research and management on forest ecology, biodiversity and human habitat in urbanized regions.

Key words: drone remote sensing; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area; forest city agglomeration; urban forest and green spaces; human habitat; ecological civilization construction

0 前言

技术进步往往与科学发展相辅相成,特别是在林业科学以及相关的生态学、保护生物学、城市管理学在内的诸多领域,近几年兴起和快速发展的无人机技术(unmanned aerial vehicle, UAV)得到了充分体现。由无人机和遥感技术相结合的无人机遥感技术(UAV remote sensing)具有高时效、高时空分辨率、云下低空飞行、高机动性等优势,能短时间内灵活地、较低成本地获取高分辨率数据,可弥补有人驾驶飞机的人员不足或者卫星遥感获取通用数据的空缺^[1-3]。无人机技术在现代林业研究和实践等方面是否能成功实施,主要依赖于无人机自身性能(如飞行规划利用的灵活性、低成本、可靠性和自动性等)和快捷获取高分辨率数据的能力^[4, 5]。国内外研究表明,限制无人机技术更广泛应用的因素主要有数据处理标准化、飞控政策成熟程度和硬件续航能力等方面,而基于无人机研究的未来发展趋势主要有机身小型化、平台智能化、研究任务多样化、服务目标多功能化、研发技术交流瞬时化等方面^[6-11]。

河岸带生态系统是陆地和水域两个系统的生态过渡区^[12]。城市河涌这一特殊人工河岸带生态系统,在全球化和快速城市化的大趋势下其植被特征、景观风貌及其影响因素正受到更多关注^[13]。广州南沙河涌由上个世界 70 年代集中建设形成,在近海区域人们通过圈围进行渔业养殖,随着南沙陆域斑块的

延伸,人们不断地将基围填土形成陆域,之前用作交通的水道被预留下来,进而形成了河涌。受珠江径流和海水的共同作用,广州市南沙区形成了交错复杂的河涌水网,具有典型的珠三角地域特色,其沿岸植被对河涌植物生态系统维持和景观风貌塑造具有重要意义^[14]。同时,在珠三角地区城镇化快速发展的背景下,人为活动(如沿岸居民对河涌沿岸土地的利用方式和具体工程建设等)在很大程度上影响着河涌沿岸植物生态系统结构和城市河涌生态健康^[15]。无人机技术与地面调查相结合,较好地满足了河岸带特殊生境类型景观要素监测的需要。本文简要综述了无人机技术在现代林业中的应用情况,主要从监测、研究、评估和保护等四方面展开叙述,并以珠江三角洲地区代表城市(广州市)为案例展示无人机技术在解析南沙区河涌景观构建要素和组合方式中的应用,以期在城市化背景下开展林业生态研究和管理工作提供参考。

1 监测:无人机技术可实现点、线、面、体等多个层面的遥感监测

1.1 城市森林资源与生物多样性监测

源自无人机系统高分辨率影像分类数据相当精确,可很好地用于城市森林和湿地生态系统调查与资源监测^[16-19];通过多时相无人机激光雷达和摄影测量相结合,可以监测人工修枝、择伐、火灾、病虫害等引起的森林结构变化以及枝叶生长、落叶等物候变化;对红树林生态系统进行绘图时,

使用无人机的优势超过航空影像^[20]。此外, 还可监测和预警局域尺度上的入侵植物(如薇甘菊)扩散状态, 进而为入侵植物机制研究和精准防治等提供有力支撑^[21]。

基于无人机平台的高精度遥感信息, 能较好地反映生物多样性变化并揭示其驱动机制, 但也存在一些限制, 如软硬件结合匹配程度不够、与传统生物多样性监测手段结合较弱等问题^[22]。利用无人机技术可以对动物发声、迁徙等行为进行监测, 如对回巢过程中蝙蝠的回声定位功能和不同个体间时间频率成形的变化监测, 发现蝙蝠在复杂群组中进行感知时可能使用不同的发声设计, 首次在蝙蝠自然生境中成功记录到动物声音, 体现出无人机是生物声景监测的有效工具^[23]。这种监测技术甚至还能在高空记录鸟类等飞行动物的声音和视频^[24]。与比地面计数方法相比, 使用无人机技术的精确更高, 如在族群鸟类计数其精确度甚至能高出一个数量级^[25]。尽管存在一些技术问题或不足, 但作为一个新的有用工具, 无人机技术正在促进生物多样性监测工作。

1.2 城市生态景观与突发环境事件动态监测

无人机遥感技术可在局域(中小)尺度对城市景观-环境实时监测, 弥补了传统卫星遥感的空间分辨率低、重访周期长、云雾影响等方面的不足, 在城市植被制图、城市森林地形绘图等景观空间生态学研究受到越来越多的关注^[26-29]。随着城市化快速发展, 城市中心和近郊的原生生境破碎化程度较为严重。比如建设工程林区通公路后不久, 原有较稳定的森林结构被破坏而变为开阔地带, 较多阳性物种逐渐出现(如山乌桕), 特别是路旁有外来植物开始入侵且覆盖范围有逐渐扩大的趋势(如薇甘菊)。因此, 在施工过程中需要引起高度注意, 尽量恢复和保护原生生境, 特别是防止入侵植物对本土植被结构造成严重破坏。在城市高度均质化的行道林带和市政景观公园, 森林病虫害也时有发生。通过无人机实时监测, 掌握并划分城市各区域发生病虫害危害的等级, 评价城市森林健康状况^[30]。

使用远程有人遥控飞机和无人机系统相结合的方法, 有望全天候进行有害物质的监测和管理、环境污染、黑臭水体筛查和监管^[31-33]。由于全球气候

变化等不可抗外力和人为剧烈活动等因素, 火灾、地震和泥石流等突发事件在城市区域也时有发生, 基于无人机系统的实时和有效森林火灾探测比固定监测系统反映更大的区域, 进行地质灾害调查和评估^[34,35]。日常管理过程中通过无人机动态监测, 了解重点区域入侵植物和森林病虫害的分布范围, 掌握特殊生境发生突发环境事件的潜在动向, 为制定合理的防治方案提供重要依据。

2 研究: 无人机技术可协助格局、过程、成因等重要环节的实证研究

2.1 分布格局与特征研究

无人机技术将革新空间生态学研究, 特别是随着无人机导航性能提升、测量技术小型化之后, 将大幅提高对生态格局的探测和对动态特征的推演能力。装备了强大传感器的无人机可根据终端使用者定义实时传送高空间分辨率数据^[36]。在生物多样性其中一个重要方面——林冠空隙研究, 无人机遥感潜在地提供针对森林生物多样性监测变量(通常采集于森林清查样地)的协变表面, 通过整合两类数据, 这些变量可被绘制于小的森林区域, 比仅仅基于野外森林清查更具有足够精确水平、具有更高空间分辨率^[37]。在精准林业清查方面, 源自无人机系统数字航空摄影点云的信息可产生空间上和时间上准确清查资料(树高、蓄积量增加值等), 且潜在告知许多可持续林业管理活动^[38, 39]。使用源自无人机系统影像的三维变量, 结合地面参考数据(如平均树高、立木数量、胸高断面积、树干材积)优化线性模型, 无人机系统影像的使用在局部尺度上能提供相对准确和及时的森林清查信息^[17]。在精准农林业研究领域, 无人机遥感可用于干旱胁迫、杂草与病害探测、营养状况与生长活力评价、以及生物量预测^[40]。

2.2 多样性维持机制研究

无人机技术主要在空间尺度上丰富了人们对生物多样性维持机制的认知, 引导研究人员从地面和林下层级逐步转到林冠和近地遥感空间层级。无人机低空遥感系统能适用于物种、种群、群落和生态系统等尺度的研究和维持机制探讨, 也能从物种形态和光谱特征库的建立、物种自动识别、光谱数据与植物生理生态过程之间关系等

维度挖掘森林生态系统不同要素的构建机制,并与三维立体、多来源多尺度遥感数据融合进行综合分析^[41]。在野生动物研究中,无人机作为一种转型变革技术在当前和未来得以应用,能完整、详细地记录野生动物多度、行为和生境等信息,进而探讨动物类群的多样性维持机制^[42]。总之,探讨现存生物多样性的维持机制,依然是该领域学者的研究重要议题。无人机等技术的兴起和广泛应用,在一定尺度上提供了更多的技术支撑,也很大程度上拓展了生物多样性研究内涵和外延,呈现出更加立体的研究思维和概念框架。

3 评估:无人机技术可用于历史、现实、未来等情景模式的评价估算

3.1 生物多样性与生态效益评估

符合成本效益的航片潜在适用于森林生物多样性评价,而林冠目标变量的关联(如与植物或者动物多样性有关的林窗)却未被通过那些航片得以描述。基于航片和地面核查数据显示,详细的、空间隐含的林窗形状矩阵信息充分揭示了干扰格局与植物多样性的强烈依赖关系^[43]。在一个 150 公顷的热带森林冠层收集航空影像数据,通过表面解译图片评估 14 公顷藤本植物侵扰的程度;结果显示,无人机获得的评估与地面调查(个体和样地水平)的结果强烈相关、在多个森林类型和空间分辨也同样^[44],表明无人机为评估热带森林冠层藤本植物侵扰提供了一个新工具。在使用源自无人机影像的三维数据估算热带森林生物量方面,基于不同方法和参数设置自动形成的数字地形模型所估算的生物量,与 107 个样地地面调查结果相比没有显著差异^[45]。另外,为了评估无人机应用于长期生态学研究中的价值,基于无人机的林冠层变量、详细的地面树干数据、地形和土壤变量,在广东鼎湖山 20 公顷的亚热带森林动态监测样地,评估了这些变量在解释局域尺度林分和物种测量中变异的相对重要性。结果发现,基于无人机的林冠层变量较好地解释局域生物多样性格局,且更具体地支持构建所观察到森林生物多样性的林窗动态假说;林分断面积与林冠层封闭度正相关,显示保护老龄林作为碳汇的重要性;地形和土壤变量的重要性也得以证明,支持构建生物多样性

格局的生境差异性假说;物种水平分析显示,喜光物种(与耐荫物种相比)更强烈地与林冠层变量关联^[46]。

3.2 人居环境宜居性评价

基于社区的森林监测小型无人机,在热带区域的性能和潜力评价表明,小型无人机的应用能促进基于社区的森林监测;如果能给社区提供外部协助和资金赞助,这种监测方法在热带地区许多地方是可行的^[47]。基于遥感的无人机演化也能很好地解决当前的城市问题、确保城市区域的可持续性和恢复性^[48]。从无人机遥感影像估算农林牧系统人造林的位置和高度方面,在松树上是可靠的,但对于橡树的可靠性则依赖于树木的尺寸;更小的树格外地存在疑难,因为这些树倾向于拥有不规则的树冠外形,进而导致更大的误差^[49]。目前,政府主管部门和社会各界也意识到无人机使用过程中面临的法律法规不完善、泄露个人隐私等问题^[22];尤其在人口高度密集的城市化区域,更应加强无人机飞行管理、保护公共安全。

4 保护:无人机技术可支撑山水林田湖草生命共同体的综合保护

4.1 保护生物多样性资源与安全

无人机极大地提升了新形势下生态学和保护生物学的技术支撑力度。无人机系统可用于记录野生动物丰富度、行为和生境,获取野外监测区的照片、音视频数据;此外,无人机技术还在促进生物多样性保护等自然科学的发展^[42, 50, 51]。专用于生物多样性保护的低成本自动航空飞机,其飞行距离可达 25 公里,飞行时间可达 50 分钟^[52]。无人机能在异质景观中分辨和量化关键树种,掌握树木健康状况^[53],达到分辨高空中的物种,促进形成针对高空的保护生物学关键技术。无人机在植物保护还有更多真实的案例和经验,如从秘鲁的高山干旱植被到加勒比的干旱森林,以及到南非和巴西亚马孙的湿润森林,4500 多公里的野外飞行经验展示无人机技术如何用于绘图、量化和监测植物物种^[54]。

4.2 保护生态文明价值观与绿色生活方式

落实生态环境保护政策并维持长效保护机制,是保护好全方位生态空间与最普惠生态屏障的重要

手段。保护城市绿色基础设施需要综合考虑数量与质量两方面, 主要有城市森林、绿地、生态廊道、垂直绿化、河涌湿地等类型, 呼吁人们培养不塌红线、严守底线的保护意识^[55]。公众对无人机的普及应用、以及如何更好地开展保护科学存在不同观点或意见; 例如美国民众对使用无人机开展生物多样性保护表现出中等到强烈的支持力度, 但是对其他用途意见不一致, 特别强调主动向公众保证正当使用无人机的重要性, 避免可能刺激下意识产生反对的对抗信息或者暗示^[56]。无人机和遥感应用于墨西哥城市湖泊取样, 从不同空间和时间角度测量都会显著影响水体中蓝藻细菌监测结果, 且光谱分析确认铜绿微囊藻的存在和空间分布^[57]; 通过最细微的藻类研究能真实地反映出当地生态环境质量好与坏, 也一定程度上感知到民众所具有的生态保护意识。当下, 人与自然和谐共处, 城市与乡村协同发展是社会公共希冀, 新兴科技手段的应用应该有机融合进来, 并发挥正面作用。

5 案例分析: 无人机技术助力南沙河涌景观风貌带特征研究

5.1 研究背景

广州市南沙区河涌形态笔直, 并排分布, 这种受海潮影响独具特色的河流形态为 20 世纪 70 年代人工圈围填海所留下的水道, 当地居民沿河涌建造房屋, 利用河涌开展水上交通, 农业生产等活动,

进而形成独具地域特色的河涌景观风貌。河涌自北向南依照形成时间的先后顺序依次分布, 按 1 涌—19 涌依次命名。本案例野外工作开展于 2016 年 7 月, 自北向南依次选取第 3、7、11、14 以及 18 号共 5 条河涌为研究对象, 利用通用无人机技术进行河涌景观风貌带特征研究(图 1); 并采用“点、线、面、体”相结合的方法, 从植物、河流、建筑以及河岸带整体景观风貌等方面对河涌景观特征进行了分析。景观特征评估法将景观视为一个整体, 以一定区域范围为研究对象, 关注景观的“特异性”而非“价值”, 能有效识别区域景观典型特征要素, 把握景观的发展演替规律, 是一种理解景观内涵、发现景观问题、有效指导规划建设实践的有力工具。景观特征评估法有固定的工作步骤, 可根据实际问题和研究目标的不同灵活采用各种方法, 应用到景观管理实践^[58]。景观特征评估的整个过程包括景观的特征化与景观的评估与决策两个阶段, 按照“划定范围—桌面研究—田间调查—特征分区与描述”的步骤依次进行, 景观的评估与决策阶段按照“选定方法—评估—决策”步骤依次进行。

5.2 研究策略与方法

根据广州南沙区土地利用与覆盖资料和卫星遥感影像, 同时比对卫星遥感资料和无人机照片, 考虑区域内地形地貌、植被密度、建筑分布格局、水体形式等信息, 将河涌景观风貌带景观分为聚落景观、自然景观、生产景观、水体景观等四种类型。



注: 左图的阴影区域为南沙区研究样点范围; 右图的实线为 5 条河涌示意图。

图 1 广州市南沙区河涌研究样点区位示意图(基于百度地图)

Figure 1 Location of the study area in Nansha District, Guangzhou City (adopted from Baidu Maps)

基于无人机遥感技术监测了广州市南沙区典型河涌的景观要素地理位置,初步研究了各要素空间分布格局(图 2)。本案例参考英国景观特征评估法,采用桌面研究、实地调研与访谈相结合的方法对 5 条河涌进行景观特征评估,采用桌面研究和实地调研相结合。第一步是划定范围:基于影像卫星影像、无人机照片、相关文献,参照实地的调研情况,划定广州南沙区河涌主体及两岸一定的区域为研究范围,确定河涌景观风貌带范围,从河涌区域尺度出发进行景观特征评估。第二步是景观特征分区:根据南沙河涌风貌带范围内的自然特征和人为特征信息,将各信息地图进行叠加,形成不同类别的景观特征类型,对河涌景观风貌带进行初步景观特征分区;在室内分区基础上,在各特征区域内均匀选取样点进行外业调查,结合现场对河涌景观风貌带典型景观要素判读,归纳景观组合方式,详细记录在室内无法获得感知等方面的信息,进行景观特征分区细化,形成最终南沙河涌景观风貌带特征区域地图,并分区域进行景观特征描述。第三步是景观特征评估:对各河涌景观风貌带进行景观特征评估,拟定景观特征评估体系,根据各特征区域实地调研,获得各特征信息,从水体、岸线、植被、乡愁感知等方面出发进行河涌景观风貌带特征评估,从各河涌风貌带特征和各特征区域两方面进行对比分析,形成河涌景观风貌带特征评估报告。第四步是提出景观建

设策略:在对河涌景观风貌带特征评估的基础上,对河涌沿线居民进行深入访谈,了解河涌的演变历史,同时结合居民对河涌景观风貌建设的评价和意见,提出河涌景观风貌带建设策略。

5.3 主要结果

从 3 涌至 18 涌,河岸带风貌自然度呈降低趋势、景观破碎度呈增加趋势,这可能河涌形成时间有关。河涌形成时间越晚,其景观风貌在形成过程中受城市化影响越大,人们对景观干扰程度更剧烈,因此整体河岸带景观风貌自然度降低,景观破碎度增加。本案例将河岸带景观作为一个整体,发现其沿岸村庄呈带状型分布,呈散点状镶嵌式发展。此外,根据河涌沿岸植物景观要素与建筑、水体等景观要素的空间关系,将其分为风水林、庭院林、道路林、公共游憩林、水岸林,并对各类植物景观要素特征进行分析。结果表明,水岸林是河岸带植物景观风貌的优势主体,且在河涌景观发展过程中没有发生变化。结合实地调查发现,竹林丛生、果树成群的植物景观风貌是南沙区河岸带植物景观风貌的典型特征,但是随着时间的推移,人们对河岸带植物景观风貌的影响在加强,这种景观特征正在逐渐减弱,植物景观风貌开始呈现出果树化、自然生态化向观赏化、城市化转变的趋势。城市化对河岸带植物景观特征具有影响,如何维持和建设功能结



图 2 城市化影响下广州南沙区河涌景观要素组合方式
Figure 2 Landscape components and configurations of river channels in the context of urbanization in Nansha district, Guangzhou city

构稳定、地带性风貌特征突出的河涌植物生态系统已成为当前生态系统建设的重要诉求。基于上述分析结果,对河涌植物景观风貌建设提出了相应的建设策略:建议在保留现有自然粗放的植物景观风貌的基础上,延续现有乔木果树景观风貌,适当增加生态性较强的地方乡土树种以加强其生态防护功能;同时考虑增加观赏性灌木以满足居民审美需求。

南沙河涌主要构景要素为河涌水系(河涌、水塘)、竹林掩映的河岸带、联排河涌居民聚落、建筑外围和水塘周围的林果地以及水工构筑物(桥、水闸、码头)等。当地居民住宅联排沿河涌分布,河涌道路与跨河桥台形成完整的交通系统,呈现出“邻水而居”的聚落布局。河岸带大片的丛生竹可绿化护坡,也可作为房屋建筑、瓜果棚架用材;龙眼、黄皮、杨桃、香蕉等植物除了在聚落道路、庭院等方面起绿化作用,还可为当地民众提供食物补充;黄皮、龙眼、罗汉松、香樟等具有风水寓意的植物用于营造风水林;九里香、鸡蛋花等芳香植物栽种于房前屋后。这种多用途的植物绿化方案,显示出民众对乡土景观文化的偏好与维持,可为岭南地区高度城市化背景下河涌水系、林网绿化、乡土景观与生态环境的保护策略制定和可持续发展提供参考。

6 结论与启示

国内外许多研究都表明,无人机技术已在各行各业有较好的实际应用。在城市化发展水平逐渐提高的时代,以无人机为代表的新兴技术会有更广阔的发展空间,也将促进林业、生态、环保、城市管理更好发展。在珠三角地区,快速城市化使得乡土景观风貌发生巨大改变,河涌作为当地一种特殊的生态系统类型,其现实存在与未来也面临新的挑战。在全球化和城市化大背景下,植物同质化和生境破碎化现象越来越明显^[59]。广州南沙河涌沿岸具有较高的植物丰富度(达 70 科 143 属 159 种)和景观类型,但其地带性风貌特征和生态系统结构功能受到剧烈、频繁的人为干扰,未来该地区的河涌植物生态系统建设应注重保护与恢复重建乡土景观,增加生态和景观功能兼备的地带性乡土树种,如小叶榕、麻楝、蒲桃、假苹婆、大叶相思、丛生竹等,在保留现有自然粗放的植物

景观风貌基础之上,增加其生态防护功能,凸显其独特的水岸植物风貌特征^[15, 60]。已正式发布的《粤港澳大湾区发展规划纲要》这个纲领性文件全面阐述了粤港澳大湾区的战略定位、发展目标、空间布局等重大事项,在推进粤港澳大湾区生态文明建设的具體工作中,以无人机为代表的新兴科技手段,将极大助力美丽湾区建设,进一步掌握并提升区域森林景观与生态环境质量,使大湾区早日实现天更蓝、山更绿、水更清、环境更优美的城市人居环境。

致谢:部分内容源自作者第二届“无人机遥感在生态学地理学中的应用研讨会”上的报告发言。感谢唐洪辉团队在外业中提供的无人机技术支持,杨龙和孙中宇博士在成稿过程提供的宝贵意见。

参考文献

- [1] TANG L, SHAO G. Drone remote sensing for forestry research and practices[J]. *Journal of Forestry Research*, 2015, 26(4): 791–797.
- [2] TORRESAN C, BERTON A, CAROTENUTO F, et al. Forestry applications of UAVs in Europe: a review. *International Journal of Remote Sensing*[J], 2017, 38(8-10): 2427–2447.
- [3] 胡健波, 张健. 无人机遥感在生态学中的应用进展[J]. *生态学报*, 2018, 38(1): 20–30.
- [4] BANU T P, BORLEA G F, BANU C. The use of drones in forestry. *Journal of Environmental Science and Engineering B*[J], 2016, 5: 557–562.
- [5] 刘清旺, 李世明, 李增元, 等. 无人机激光雷达与摄影测量林业应用研究进展[J]. *林业科学*, 2017, 53(7): 134–148.
- [6] 张菁, 孙千惠, 叶震, 等. 生态遥感新锐——轻小型无人机的应用[J]. *热带地理*, 2019, 39(4): 604–615.
- [7] 王俊丽, 任世奇, 张忠华, 等. 基于文献计量评价的无人机生态遥感监测研究进展[J]. *热带地理*, 2019, 39(4): 616–624.
- [8] COLOMINA I, MOLINA P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 92:

- 79–97.
- [9] HASSANALIAN M, ABDELKEFI A. Classifications, applications, and design challenges of drones: a review[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2017, 91: 99–131.
- [10] WHITEHEAD K, HUGENHOLTZ C H. Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 1: a review of progress and challenges[J]. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 2014, 2: 69–85.
- [11] 梁宇哲, 郑荣宝, 徐嘉源, 等. 基于 Citespace 的无人机遥感研究知识图谱分析[J]. *热带地理*, 2019, 39(2): 309–317.
- [12] FORMAN R T T. Foundations[C]. In: *The Ecological Design and Planning Reader*. Edited by Ndubisi FO. Washington, DC: Island Press, 2014.
- [13] 张昶, 王成, 孙睿霖, 等. 城市化地区河岸带植被特征及其与河岸硬度的关系——以晋江市为例[J]. *生态学报*, 2016, 36(12): 3703–3713.
- [14] 任辉, 田恬, 杨宇峰, 等. 珠江口南沙河涌浮游植物群落结构时空变化及其与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2017, 37(22): 7729–7740.
- [15] 唐赛男, 王成, 裴男才, 等. 广州南沙区河涌沿岸植物景观特征及其与人为活动的关系[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, 36(2): 375–385.
- [16] CHABOT D, BIRD D M. Small unmanned aircraft: precise and convenient new tools for surveying wetlands[J]. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 2013, 01(01): 15–24.
- [17] PULITI S, ØRKA H O, GOBAKKEN T, et al. Inventory of Small Forest Areas Using an Unmanned Aerial System[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(8): 9632–9654.
- [18] ZWEIG C L, BURGESS M A, PERCIVAL H F, et al. Use of unmanned aircraft systems to delineate fine-scale wetland vegetation communities[J]. *Wetlands*, 2015, 35(2): 303–309.
- [19] 周在明, 杨燕明, 陈本清. 基于无人机遥感监测滩涂湿地入侵种互花米草植被覆盖度[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(12): 3920–3926.
- [20] RUWAIMANA M, SATYANARAYANA B, OTERO V, et al. The advantages of using drones over space-borne imagery in the mapping of mangrove forests[J]. *PLoS ONE*, 2018, 13(7): e0200288.
- [21] 孙中宇, 荆文龙, 乔曦, 等. 基于无人机遥感的盛花期薇甘菊爆发点识别与监测[J]. *热带地理*, 2019, 39(4): 482–491.
- [22] 郭庆华, 吴芳芳, 胡天宇, 等. 无人机在生物多样性遥感监测中的应用现状与展望[J]. *生物多样性*, 2016, 24(11): 1267–1278.
- [23] KLOEPPER L N, KINNIRY M. Recording animal vocalizations from a UAV: bat echolocation during roost re-entry[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 7779.
- [24] FU Y, KINNIRY M, KLOEPPER L N. The Chirocopter: a UAV for recording sound and video of bats at altitude[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2018, 9(6): 1531–1535.
- [25] HODGSON J C, BAYLIS S M, MOTT R, et al. Precision wildlife monitoring using unmanned aerial vehicles[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 22574.
- [26] IQBAL PUTUT ASH S, ADI W, EKO K, et al. Urban forest topographical mapping using UAV LIDAR[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, 98(1): 012034.
- [27] FENG Q, LIU J, GONG J. UAV remote sensing for urban vegetation mapping using random forest and texture analysis[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(1): 1074–1094.
- [28] CHAMOSO P, GONZÁLEZ-BRIONES A, RIVAS A, et al. The use of drones in Spain: towards a platform for controlling UAVs in urban environments[J]. *Sensors*, 2018, 18(5): 1416.
- [29] 张志明, 徐倩, 王彬, 等. 无人机遥感技术在景观生态学中的应用[J]. *生态学报*, 2017, 37(12): 4029–4036.
- [30] KULHAVY D L, UNGER D R, HUNG I K, et al. Comparison of AR. Drone quadricopter video and the visual CTLA method for urban tree hazard rating[J]. *Journal of Forestry*, 2016, 114(5): 517–523.
- [31] 洪运富, 杨海军, 李营, 等. 水源地污染源无人机遥感监测[J]. *中国环境监测*, 2015, 31(5): 163–166.
- [32] 侍昊, 李旭文, 牛志春, 等. 基于微型无人机遥感数据的城市水环境信息提取初探[J]. *中国环境监测*, 2018, 34(3): 141–147.

- [33] GIORDAN D, HAYAKAWA Y, NEX F, et al. Review article: the use of remotely piloted aircraft systems (RPASs) for natural hazards monitoring and management[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, 18(4): 1079–1096.
- [34] 李军, 李永树, 蔡国林. 利用无人机影像制作地震灾区三维景观图[J]. *测绘工程*, 2012, 21(1): 50–53.
- [35] CRUZ H, ECKERT M, MENESES J, et al. Efficient forest fire detection index for application in unmanned aerial systems (UASs)[J]. *Sensors*, 2016, 16(6): 893.
- [36] ANDERSON K, GASTON K J. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2013, 11(3): 138–146.
- [37] BAGARAM M B, GIULIARELLI D, CHIRICI G, et al. UAV remote sensing for biodiversity monitoring: are forest canopy gaps good covariates?[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(9): 1397.
- [38] GOODBODY T R H, COOPS N C, MARSHALL P L, et al. Unmanned aerial systems for precision forest inventory purposes: a review and case study[J]. *The Forestry Chronicle*, 2017, 93(01): 71–81.
- [39] 杨柳, 陈延辉, 岳德鹏, 等. 无人机遥感影像的城市绿地信息提取[J]. *测绘科学*, 2017, 42(2): 59–64.
- [40] MAES WH, STEPPE K. Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture[J]. *Trends in Plant Science*, 2019, 24(2): 152–164.
- [41] 孙中宇, 陈燕乔, 杨龙, 等. 轻小型无人机低空遥感及其在生态学中的应用进展[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 528–536.
- [42] CHRISTIE K S, GILBERT S L, BROWN C L, et al. Unmanned aircraft systems in wildlife research: current and future applications of a transformative technology[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2016, 14(5): 241–251.
- [43] GETZIN S, WIEGAND K, SCHÖNING I. Assessing biodiversity in forests using very high-resolution images and unmanned aerial vehicles[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2012, 3(2): 397–404.
- [44] WAITE C E, VAN DER HEIJDEN G M F, FIELD R, et al. A view from above: Unmanned aerial vehicles (UAVs) provide a new tool for assessing liana infestation in tropical forest canopies[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2019, 56(4): 902–912.
- [45] KACHAMBA D J, ØRKA H O, GOBAKKEN T, et al. Biomass estimation using 3D data from unmanned aerial vehicle imagery in a tropical woodland[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(11): 968.
- [46] ZHANG J, HU J, LIAN J, et al. Seeing the forest from drones: testing the potential of lightweight drones as a tool for long-term forest monitoring[J]. *Biological Conservation*, 2016, 198: 60–69.
- [47] PANEQUE-GÁLVEZ J, MCCALL M K, NAPOLETANO B M, et al. Small drones for community-based forest monitoring: an assessment of their feasibility and potential in tropical areas[J]. *Forests*, 2014, 5(6): 1481–1507.
- [48] NORZAILAWATI MOHD N, ALIAS A, MAZLAN H. Remote sensing UAV/drones and its applications for urban areas: a review[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 169(1): 012003.
- [49] SUROVÝ P, ALMEIDA R N, Panagiotidis D. Estimation of positions and heights from UAV-sensed imagery in tree plantations in agrosilvopastoral systems[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39(14): 4786–4800.
- [50] IVOŠEVIĆ B, HAN Y G, CHO Y, et al. The use of conservation drones in ecology and wildlife research[J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2015, 38(1): 113–188.
- [51] SCHIFFMAN R. Drones flying high as new tool for field biologists[J]. *Science*, 2014, 344(6183): 459–459.
- [52] KOH L P, WICH S A. Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation[J]. *Tropical Conservation Science*, 2012, 5(2): 121–132.
- [53] BAENA S, MOAT J, WHALEY O, et al. Identifying species from the air: UAVs and the very high resolution challenge for plant conservation[J]. *PLoS ONE*, 2017, 12(11): e0188714.
- [54] BAENA S, BOYD D S, MOAT J. UAVs in pursuit of plant

- conservation-real world experiences[J]. *Ecological Informatics*, 2018, 47: 2–9.
- [55] 杨瑞卿, 唐瓴, 谈海佳, 等. 无人机遥感技术在城市树木智慧化管理中的应用[J]. *中国城市林业*, 2017, 15(6): 29–32.
- [56] MARKOWITZ E M, NISBET M C, DANYLCHUK A J, et al. What's that buzzing noise? Public opinion on the use of drones for conservation science[J]. *BioScience*, 2017, 67(4): 382–385.
- [57] AGUIRRE-GÓMEZ R, SALMERÓN-GARCÍA O, GÓMEZ-RODRÍGUEZ G, et al. Use of unmanned aerial vehicles and remote sensors in urban lakes studies in Mexico[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(8/10): 2771–2779.
- [58] SWANWICK C. The Assessment of Countryside and Landscape Character in England: An Overview[C]. In: *Countryside Planning: New Approaches to Management and Conservation*. Edited by Bishop B, Phillips A. London: Routledge, 2003: 16.
- [59] YANG J, YAN P, HE R, et al. Exploring land-use legacy effects on taxonomic and functional diversity of woody plants in a rapidly urbanizing landscape[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 162: 92–103.
- [60] 裴男才, 陈步峰, 吴敏, 等. 广州市南沙区海岸防护林群落构建技术研究[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(11): 1802–1806.