城市生态公益林再野化的草本植物及其生境热点快速监测识别技术*

杨 博[1,2] 孙彦伟[3,4] 郑思俊[1,2] 朱义[1,2] 陈雪初[5] 黄静蕾[5] 敖东力[5]

1 上海市园林科学规划研究院 上海 200232
2 上海城市困难立地绿化工程技术研究中心 上海 200232
3 上海市建设用地和土地整理事务中心 上海 200232
4 自然资源部大都市区国土空间生态修复工程技术创新中心 上海 200003
5 华东师范大学 上海 200241

摘要：受乔木遮挡影响，难以采用遥感技术监测城市生态公益林内现状草本植被，而人工监测费时费力。为攻关此难题，以生境热点监测识别为突破口，开发一种适用于中观尺度城市生态公益林的快速监测识别技术体系，通过分析高分辨率的遥感影像，快速识别原生草本植物多样性较高的空间范围，对此类空间开展重点法抽样，经对上海市金山区农林水乡生态公益林实地验证，该方法效果较好，具体表现为：单独使用一种抽样法时，重点法的探测效率更高，草本原生种探测效率约为 79%，优于系统法+路径法组合使用(72%)；两种方法组合使用时，重点法能够将物种探测效率提高 16%~24%，其中系统法+重点法的草本原生种探测效率约为 88%，路径法+重点法的草本原生种探测效率约为 96%。研究结果说明生境热点内的草本原生种数量较多，生境热点识别技术有效；明确生境热点的空间范围，能够提高生物多样性监测效率、降低监测人力和时间成本，为生态修复工程规划、设计、施工和评估提供重要的空间信息；同时，利用人工智能技术开展公众参与监测研究，降低了监测成本，能够保障监测识别的准确性和可持续性。因此，该技术能够为城市生态公益林再野化提供有力的技术支持，具有广阔的应用前景。

关键词：城市生态公益林；再野化；草本植物；生境热点；快速监测识别技术
DOI：10.12169/zgcsly.2024.02.07.0001

Rapid Monitoring and Identification Technology for Herbaceous Plants and Their Hotspot Habitats in Rewilding Urban Ecological Forests

Yang Bo[1,2] Sun Yanwei[3,4] Zheng Sijun[1,2] Zhu Yi[1,2] Chen Xuechu[5] Huang Jinglei[5] Ao Dongli[5]
(1. Shanghai Academy of Landscape Architecture and Planning, Shanghai 200232, China; 2. Shanghai Engineering Research Center for Greening Technology ofDifficult Urban Sites, Shanghai 200232, China; 3. Shanghai Construction Land and Land Consolidation Service Center, Shanghai 200003, China; 4. Technology Innovation Center for Land Spatial Eco-restoration in Metropolitan Area, Ministry of Natural Resources, Shanghai 200003, China; 5. East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Due to the shading by trees, it is difficult to use remote sensing technology to monitor the herbaceous vegetation in urban ecological forests, while manual monitoring is time-consuming and

收稿日期：2024-02-07
* 基金项目：自然资源部大都市区国土空间生态修复工程技术创新中心课题（CXZX202305）；上海市社会发展科技攻关项目（22DZ1202105）；上海市社会发展科技攻关项目（22DZ1202605）；上海市社会发展科技攻关项目（23DZ1204400）
第一作者：杨博（1983-），男，硕士，高级工程师，研究方向为城市生态空间规划。E-mail：yb@ shsyky. com
通信作者：郑思俊（1982-），男，博士，教授级高工，研究方向为城市生态修复。E-mail：zsj@ shsyky. com

laborious. To address this challenge, this study puts the focus on habitat hotspot monitoring and identification to develop a rapid monitoring and identification technology system suitable for meso-scale urban ecological forests. With the high-resolution remote sensing images, the technology system is expected to quickly identify the spatial range with native herbaceous plants of high diversity, based which the importance sampling could be conducted. Field verification in Jinshan District of Shanghai shows that this method has good results, especially when only one sampling method could be used. The importance sampling if used along has a high detection efficiency for of native herbaceous plants at 79%, which is better than the combined use of systematic method and path method, which has a detection efficiency at 72%. When in combined use with other sampling methods, the importance sampling method can increase the efficiency of species detection by 16% to 24%. The combined use of systematic and importance sampling methods can improve the detection efficiency of native herbaceous plants up to about 88%, while the detection efficiency of native herbaceous plants using path and importance sampling method is about 96%. This indicates that there are a large number of native herbaceous plant species in habitat hotspots, and habitat hotspot identification technology is effective. Identifying the spatial range of habitat hotspots can improve the efficiency of biodiversity monitoring, reduce manpower/time costs in monitoring, and provide important spatial information for the planning, design, implementation, and evaluation of ecological restoration project. At the same time, using artificial intelligence technology can help with the research on the monitoring of public participation, reduce monitoring costs, and ensure the accuracy and sustainability of the monitoring and identification. This technology could provide a strong technical support for the rewilding of urban ecological forests, which would have broad application prospects and development potential.

Keywords: urban ecological forest; rewilding; herbaceous plant; habitat hotspot; rapid monitoring and identification technology

草本植物群落是森林重要的组成要素，城市生态公益林（以下简称公益林）一般不进行乔木调整，具有调整可行性的林下草本植物是公益林再野化的首要突破口[1]。再野化是近年兴起的生态保护和生态修复的新理念和新方法，通过减少人为干扰、恢复自然状态，提升生态系统韧性和维持生物多样性，使生态系统达到能够自我维持的状态[2-3]。利用公益林现有的原生草本植物开展草本植被恢复是公益林再野化的重要途径[4]，构建高质量的城市森林生境要求草本植被达到合理的规模比例[5]，研究针对林下草本植物的快速监测技术具有显著的科研和应用价值。

森林生物多样性监测研究的热点问题主要聚焦如何集成应用遥感技术、环境 DNA（eDNA）技术、地理信息技术、数据智能化处理技术开展快速、大规模监测，确定生境热点的空间范围（生境热点是指研究范围内生境类型相对丰富，适宜生物生长繁衍、符合生物栖息偏好的地点或交错带，具有潜在较多的生物类群及生物多样性水平[6-7]，为森林管理决策提供动态、准确的支撑信息，对开展森林生态系统服务相关评估具有重要意义[8]。由于环境和生物习性的复杂性，遥感监测技术难以监测识别林下植被，在地抽样监测技术的经费、时间和人力成本较高，很难快速、高效获得现状草本植物多样性信息[9-10]，是开展草本植物多样性调查评估、利用现状草本植物资源开展再野化工作的关键技术瓶颈。目前，尚无成熟且适合我国国情的技术解决方案，亟需自主研发快速监测技术，提高林下植被监测识别效率。

为攻关上述难题，本研究以生境热点监测识别为突破口，开发了一种适用于中观尺度城市生态公益林的快速监测识别技术体系，通过遥感分析技术识别适合原生草本植物生长的空间，对此类空间进行重点监测，能够快速高效获取原生草本植物物种信息，显著提高原生草本植物物种探测效率。

1　研究区概况

上海市金山区农林水乡生态公益林原为一般

农田，在土地整理生态修复工程项目中作为生态修复示范点改造为林水复合的生态公益林（2021 年竣工并投入使用）。乔木主要为樟（*Cinnamomum camphora*）、青甘杨（*Populus przewalskii*）、水杉（*Metasequoia glyptostroboides*）等，林下草本地被大多为原生草本植物，沿园路两旁种植了栽培草本植物。竣工验收后草本地被一直处于低维护、甚至无维护状态，乡土草本植被再野化过程已历时 3 年以上。

2 研究方法

2.1 识别思路

生态公益林通常面积较大，林下植被的空间异质性较强，无人机遥感数据无法直接分析林下草本植物情况，如采用常规的系统抽样法进行地面样方监测，工作量十分巨大、成本较高。如事先识别出林下草本植物丰度潜在较高的生境（识别生境热点），再进行重点抽样，理论上可以提高监测效率。开展生境热点识别，可基于易获取的数据，如用地类型数据、乔木遥感数据，技术方法具有可行性。

生境热点识别的原理是：1）生境热点通常由多种生态系统单元组成，可基于生态型地表类型的多度进行地理信息空间识别，生态型地表类型多的地点是理论上潜在的生境热点[6,11]；2）生境热点同时受人工干扰影响，在识别过程中，人工构筑物及人类活动的影响也应同步考虑；3）综合生态型地表类型多度、人工干扰强度，基于分析网格进行赋值和交互计算后，结果值高的网格范围，即为潜在的生境热点；4）基于专家指导培训和人工智能生物识别技术，可依托一般技术人员或公众志愿者获取草本植物监测数据[12]，进一步提高监测效率。

2.2 识别算法

本文提出的生境热点识别算法是基于地理信息学常用的网格分析法，通过正负赋值、加减计算构建自然因素（生态型用地及植被类型的丰度）与胁迫因素（建构筑及人工干扰类型的丰度）之间的交互关系，计算结果代表单元网格的生境类型丰度与生境可利用程度。分析网格的值=单元网格内的生态型要素赋值之和+人工型要素赋值之和，具体计算公式如下：

$$\begin{aligned}\text{分析网格的值}=&(a\times[\text{林}]+b\times[\text{草}]+c\times[\text{河}]+\\&d\times[\text{渠}]+e\times[\text{塘}]+\cdots\cdots+i\times[\alpha])+\\&(j\times[\text{车行道}]+k\times[\text{园路}]+l\times[\text{建筑}]+\cdots\cdots+z\times[\beta])\end{aligned}\quad(1)$$

式（1）中：α、β 代表用地或植被类型；a~z 为赋值，取值范围一般为［-5，5］（不含零），用以优化生境热点的指向、强化可视化表达。具体应用时，可对用地或植被类型进行细分，如森林可细分为稀树、疏林、密林，以提高算法的识别效能。

2.3 网格设定

1）网格尺寸。本研究采用重点抽样法，需进行空间分层，因此网格信息需具有较高的空间集聚性，基于 5、10、30、50 m 网格提取乔木植被计算莫兰指数，选择空间集聚特征较高的莫兰指数对应的网格尺寸（图 1）。2）卫星定位精度。民用卫星定位精度一般为 10 m（非识别精度），网格尺寸不宜过小，避免在现场难以确定监测点位。3）关键要素尺寸。为便于识别出关键要素，宜根据关键要素的尺度有针对性地设定网格尺寸，如树木为重要识别要素（冠幅 5~15 m），宜以 5~15 m 作为网格尺寸的选择区间。综合空间集聚特征、卫星定位精度、关键要素尺寸后，确定使用 10 m×10 m 的分析网格尺寸。

2.4 抽样设计

抽样时间主要考虑季节和次数，本研究时间段正处于夏季、秋季和冬季，因夏季蚊虫较多，不利于开展监测工作，因此最终选择秋季 10 月、冬季 11 月开展了两次监测。

样本数量主要考虑统计学的样本要求（宜有 30 个以上样本）、监测抽样方法的种类数量，本研究采用 3 种监测抽样方法，秋季、冬季各抽样 1 次，每种方法每次获取 10 个样本，每季合计 30 个样本，总计 60 个样本。

2.5 识别步骤

1）分析空间创建。一般基于 ArcGis 软件创建一个空间坐标系正确、统一的分析空间。如有三调地类数据，一般以三调地类的坐标空间为基准，将遥感航片载入、校正。

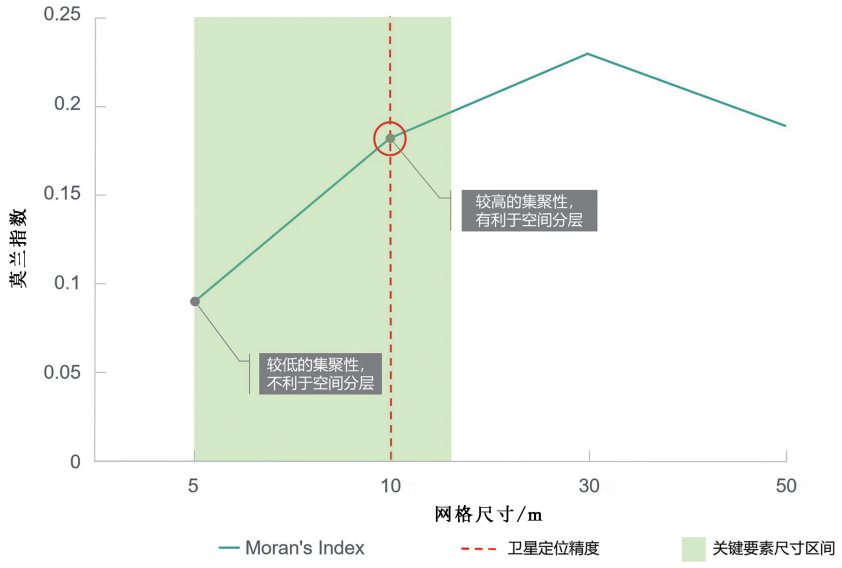


图 1　网格单元尺寸设定分析示意

2）人工要素梳理。基于三调地类数据，将人工构筑物图层分别提取，形成单独图层，如建筑、道路等，可一并将水体斑块提取为单独图层。

3）生态要素梳理。三调地类数据一般已将林地、草地、湿地等进行了分类，可将其分别提取为单独图层；本研究基于多光谱 840 nm 通道、应用 OSAVI 指数，对林、草植被进行分层，按乔木斑块面积占网格面积的比例划定 3 个梯级的乔木盖度，即稀树（<25%），疏林（25%～50%）、密林（>50%）（图 2）。

4）网格分析。生境热点识别算法可以按生境识别目标进行定制，宜开展复合条件识别策略下的生境识别，本研究采用了两套识别算法（表 1），分别考虑日照、湿度条件，将两套数值求平均值，作为网格的最终值。

5）信息可视化。根据网格最终的合计值，在图层属性的符号系统中选择色系，根据可视化需求，合理设定色系梯度（图 3）。

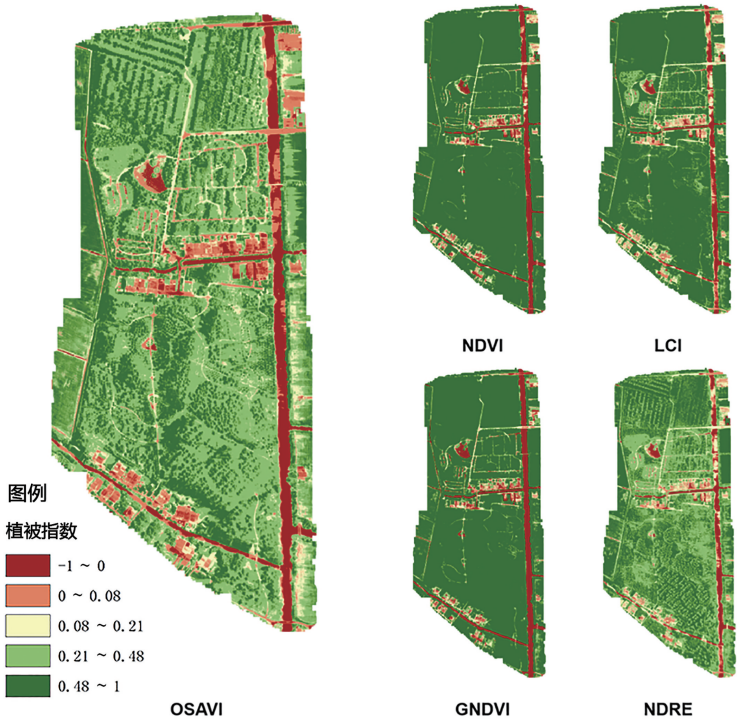


图 2　植被指数分析（最终选用 OSAVI）

表 1 复合条件识别策略下的生境要素赋值

	稀树	疏林	密林	草地	河流	渠	塘	车行道	园路主	园路次	建筑
日照策略	3	2	1	1	3	1	2	−5	−2	−1	−5
湿度策略	1	3	1	1	3	1	2	−5	−2	−1	−5

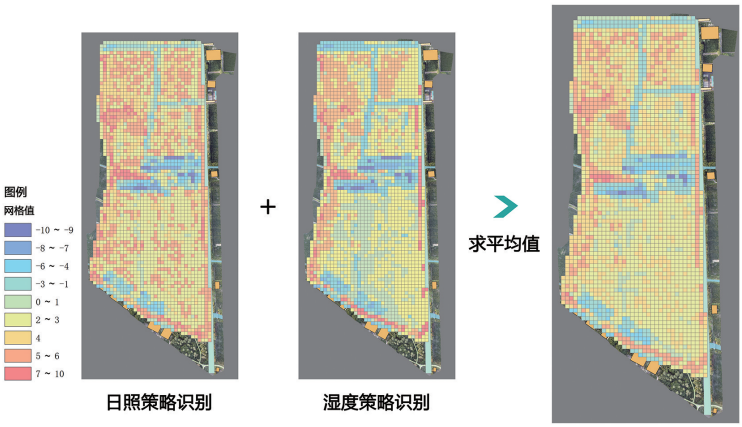


图 3 复合条件识别策略下的生境热点识别示意

2.6 监测过程

1）监测人员的选择。考虑到日后推广应用的普适性，选择没有草本植物知识储备和鉴定能力的志愿者作为监测人员，在现场进行培训后，练习 1~2 个样点后，即独立运用生命观察 APP 开展监测识别工作。第 1 次监测，志愿者 2 名、陪同专家 1 名；第 2 次监测，志愿者 1 名、陪同专家 1 名。

2）抽样样点选择。主要步骤如下：第一，根据遥感和用地资料，识别潜在的生境热点（图 4、图 5），在生境热点分布范围内选择重点抽样样点；本研究采用 3 种抽样方法，样点布局如图 6 所示。第二，基于事先选定的监测样点（可在两步路 APP 事先确定点位），按图索骥，到达样点后，选择有代表性的草本群落（草本植物种类较多）开展监测，样方尺寸约为 2 m×2 m；为提高效率，现场不拉样方，只记录样方范围内各种草本植物种类。第三，志愿者用生命观察手机 APP 拍照记录并识别物种；专家在现场领路，指导 APP 使用，对识别不清的物种进行鉴定。第四，监测识别完成后，对手机上的监测点位置进行检查，如位置不准确，可手动予以调整。工作全部完成后，需将数据上传云端。

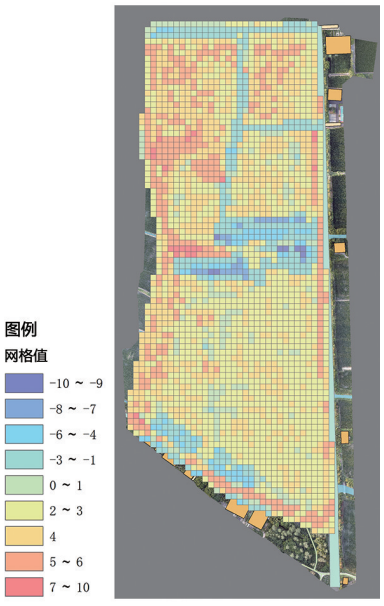


图 4 生境热点识别分析

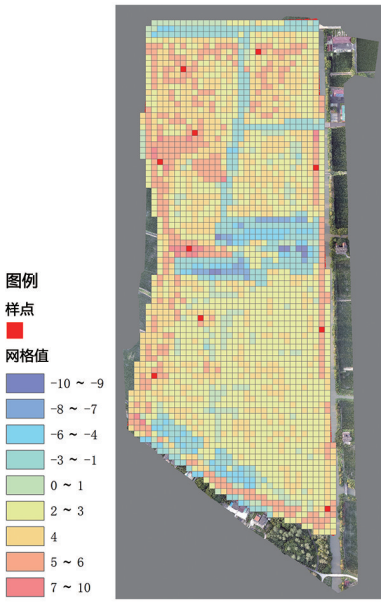


图 5 重点抽样法的样点选择（红点）

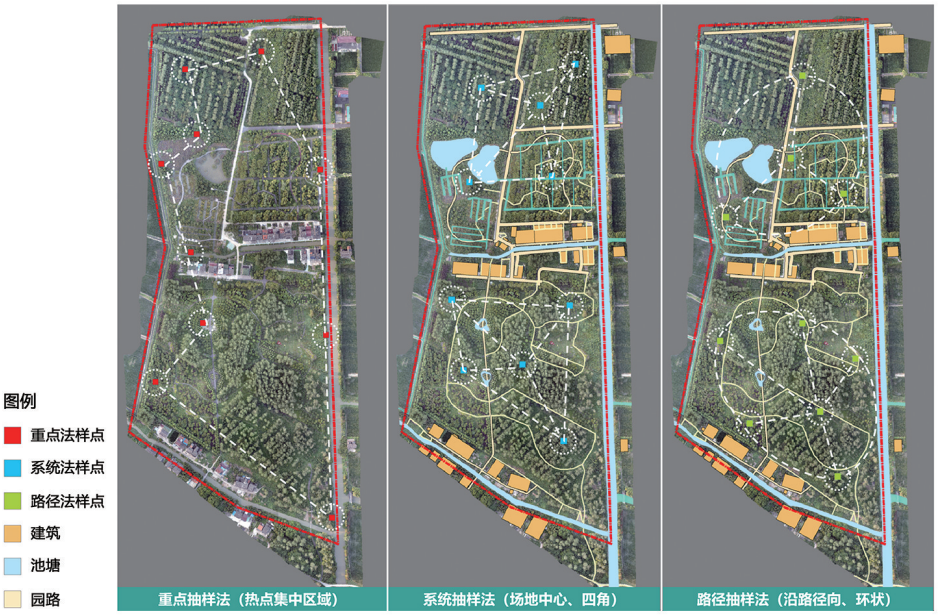


图 6　监测点布局示意（第 1 次监测）

3　结果与分析

3.1　数据可靠性检验

表 2 为各分组的监测数据。平均频次 = 记录次数/物种数，即每探测到一种物种，平均需要进行几次监测记录，平均频次能够反映监测强度，保持合理、一致的监测强度有利于准确、可靠地掌握草本植物多样性信息[13]。目前平均频次达到每种 2 次，能够保障两次确认某种的存在，具有准确性；平均频次的方差为 0.04，表明探测强度稳定且一致，具有可靠性。

表 2　合并抽样数据统计

抽样分组		样本数/个	草本种数/种	记录次数/次	平均频次/（次/种）
秋季	系统抽样法	10	34	82	2.4
	路径抽样法	10	34	70	2.1
	重点抽样法	10	38	81	2.1
冬季	系统抽样法	10	33	81	2.5
	路径抽样法	10	50	99	2.0
	重点抽样法	10	55	114	2.1
方差			89.47	250.97	0.04

3.2　草本植物种类

根据合并抽样数据统计（表 3），农林水乡示范点的草本植物共计 94 种，其中北区 70 种，南区 80 种；原生草本植物 72 种，入侵种 12 种，栽培种 10 种。

表 3　分组抽样数据统计

数据分类		草本种数/种	栽培种数/种	入侵种数/种	原生种数/种
合并统计	系统抽样法	47	6	10	31
	路径抽样法	62	5	8	49
	重点抽样法	69	4	8	57
	秋季	62	6	9	47
	冬季	74	9	9	56
	合计	94	10	12	72

3.3　监测方法效果检验

将两个季节的现场监测数据，基于草本物种总体、原生种、入侵种开展面向 3 种方法及组合应用的物种探测效率对比分析，结果显示：基于生境热点的重点抽样法，在单独应用或组合应用中，均能较好地提高原生草本植物探测效率。

在单独应用 1 种方法时（表 4），重点抽样法的草本物种总体探测效率高于常规方法。在同等监测强度下（相同的监测人员和监测时间），基于生境热点的重点抽样法能够监测到更多的草本物种。

在组合应用两种方法（表 5）时，物种探测效率均有提高。包含重点抽样法的组合方法，其物种探测效率显著提高，其中路径+重点法的物种总体、原生种探测效率均达到 90% 以上，提升程度十分可观。

表 4 单独使用 1 种抽样方法的草本物种探测效率对比

类型	方法	探测率/%
总体	系统法	50
	路径法	66
	重点法	73
原生种	系统法	43
	路径法	68
	重点法	79
入侵种	系统法	83
	路径法	67
	重点法	67

表 5 组合使用 3 种抽样方法的草本物种探测效率对比

类型	方法	探测率/%
总体	系统+路径	77
	系统+重点	88
	路径+重点	91
原生种	系统+路径	72
	系统+重点	88
	路径+重点	96
入侵种	系统+路径	92
	系统+重点	92
	路径+重点	75

4 讨论

将物种监测问题转化为生境识别问题的意义。在生物多样性监测识别方面，以往研究较少涉及时空因子，常用的生物多样性指数、景观格局指数都未引入尺度参数[14]，不具有空间范围信息，因此较难直接指导城市生物多样性监测和生态修复工程实践。本研究将物种监测识别难题转化为物种所在生境识别问题，能够引导监测人员前往物种丰度概率更高的空间开展监测，是对传统监测技术的有效补充，能够提高抽样监测生物识别的物种探测效率，也能够为生态修复工程提供直观的空间识别信息，因此具有较高的实用性。

由生境构成要素开展生境热点识别的技术优势。与 MaxEnt、InVEST 模型不同[15-17]，本研究开发的生境热点识别算法关注生境内部的空间异质性（而非外部因素影响），基于丰度（单个网格内的要素丰度）而非距离（单个网格与网格外相关要素之间的距离）展开计算，在算法的生态学逻辑起点上有本质区别，主要适用于同类型生境内部的物种丰度空间异质性分析，主要优势在于对物种类群丰度的识别更为直接（关注单个网格内生境的生物多样性承载能力），空间尺度及边界更为精细（交互计算仅限于单个网格内，不进行跨尺度量级的远距离影响分析，如网格尺度单位为 m，影响因素距离单位为 km）。

宜面向工程技术人员开发简易快速的分析工具。目前，一般生态修复工程项目在生物多样性监测数据获取、分析和应用方面存在经费、时间、人力等制约短板，迫切需要简易快速的实用工具。在生境热点识别研究方面，本文技术方法更为简易，只需用地类型、无人机遥感数据，无需物种、气温、地形、降雨等监测信息，适合广大工程技术人员快速掌握和使用，适用于各类涉及生物多样性保护修复工程。目前主要不足之处在于应用场景尚不够丰富多样，算法及参数有待经过更多实践检验和进一步优化，未来研究宜积累更为丰富的生境数据库，提高该技术方法的多场景适用性和操作流程的智能化水平。

公众参与对生物多样性保护提升具有促进作用。基于公众参与和人工智能生物识别技术，能够快速获取指示生物信息，有效降低生物多样性监测成本，提高了监测工作的可持续性，能够使监测数据具有时间动态性，对城市生态公益林开展再野化跟踪评估具有积极的支持作用。公众志愿者参与科学研究项目时，能同步获得更为深入的科普教育服务和科研监测技术培训，获得培训和实践的志愿者们还能够为其他科研项目服务，形成科研、科普融合创新的新局面。公众志愿者甚至会主动开展监测研究，有助于形成持续且高质量的生物多样性大数据，对建设生态城市、数字中国具有积极的促进作用。

5 结论

经本研究实地应用检验，基于生境热点的重点抽样法能够快速识别草本植物适生生境，引导监测人员前往草本植物多样性潜在较高的空间开展监测，具有较高的物种探测效率和可靠性，与常用监测方法组合使用，能综合提升物种探测效率至 90%以上。系统抽样法、路径抽样法所选监测点容易错过草本植物丰度较高的区域，基于生境热点的重点抽样法，能够较好地识别草本植物物种丰度较高的区域，有效补充了另外两种方法

的抽样盲区，因此能够提高综合物种探测效率。本研究技术方法结合了公众参与监测研究，能够在保障监测识别的准确性和可持续性的前提下降低监测成本，具有广阔的应用前景和发展潜力。

参考文献

[1]张媛.森林生态系统类型自然保护区生物多样性监测体系构建探索[J].林业资源管理,2018(3):29-34.

[2]张晓禄,范建红,蔡云楠.荒野景观再野化发展及其对我国国家公园建设的启示[J].国家公园(中英文),2023,1(3):201-212.

[3]袁嘉,欧桦杰,金晓东,等.城市荒野生态研究概述[J].生态学报,2023,43(4):1703-1713.

[4]张庆费.城市生态空间再野化及其实施途径探讨[J].中国城市林业,2022,20(6):10-14,40.

[5]赵人镜,戈晓宇,李雄."留白增绿"背景下北京市栖息生境型城市森林营建策略研究[J].北京林业大学学报,2018,40(10):102-114.

[6]XU H,DETTO M,FANG S Q,et al.Habitat hotspots of common and rare tropical species along climatic and edaphic gradients[J].Journal of Ecology,2015,103(5):1325-1333.

[7]ALABIA I D,SAITOH S I,MUGO R,et al.Identifying pelagic habitat hotspots of neon flying squid in the temperate waters of the central North Pacific[J].PLoS One,2015,10(11):e0142885.

[8]ORSI F,CIOLLI M,PRIMMER E,et al.Mapping hotspots and bundles of forest ecosystem services across the European Union[J].Land Use Policy,2020,99:104840.

[9]徐喆.基于无人机遥感与 AI 算法的亚热带森林监测方法研究[D].南昌:江西农业大学,2021.

[10]廖晨阳,杨明乐,高庆,等.eDNA 宏条形码技术在城市生物多样性监测中的适用性与展望[J].中国城市林业,2023,21(3):167-173.

[11]SYDEMAN W J,BRODEUR R D,GRIMES C B,et al.Marine habitat "hotspots" and their use by migratory species and top predators in the North Pacific Ocean:Introduction[J].Deep Sea Research Part II:Topical Studies in Oceanography,2006,53(3/4):247-249.

[12]杨博,郭陶然,郑思俊,等.基于公众参与和人工智能技术的上海草本植物多样性监测实践探索[J].园林,2021,38(12):112-118.

[13]ZHANG J,NIELSEN S E,GRAINGER T N,et al.Sampling plant diversity and rarity at landscape scales:importance of sampling time in species detectability[J].PLoS One,2014,9(4):e95334.

[14]江洪,马克平,张艳丽,等.基于空间分析的保护生物学研究[J].植物生态学报,2004,28(4):562-578.

[15]张达,曾坚,艾合麦提·那麦提.高强度开发地区鸟类自然保护地保护空缺识别:以天津市为例[J].应用生态学报,2023,34(6):1621-1629.

[16]刘滨谊,左佑,张琳.江南水网乡村地方性景观生态系统自然-文化服务耦合协调研究:以长三角生态绿色一体化发展示范区为例[J].中国城市林业,2023,21(5):9-18.

[17]王晓琦,吴承照.基于 InVEST 模型的生境质量评价与生态旅游规划应用[J].中国城市林业,2020,18(4):73-77,82.