

# 基于无人机遥感技术的 广东内伶仃岛植被类型划分与植被图\*

乔雪婷<sup>1,2</sup>, 张娟娟<sup>1,2</sup>, 李文斌<sup>1,2</sup>, 佟森<sup>1,2</sup>,  
李步杭<sup>1</sup>, 杨琼<sup>3</sup>, 徐华林<sup>3</sup>, 陈婷<sup>3</sup>, 余世孝<sup>1,2</sup>

1. 中山大学生命科学学院, 广东 广州 510275
2. 中山大学深圳研究院, 广东 深圳 518057
3. 广东内伶仃福田国家级自然保护区管理局, 广东 深圳 518040

**摘要:** 内伶仃岛植被, 由于自然保护区的建立而得以迅速恢复。对其植被现状进行类型划分并绘制高精度植被图, 对于保护区的科学管理具有重要的指导意义。本研究基于无人机技术所获取的全岛遥感影像, 结合 1 个 15 hm<sup>2</sup> 大样地和 113 个 100 m<sup>2</sup> 样地以及全岛踏查的 317 个样点的实地调查, 对内伶仃岛的植被类型进行了划分, 并绘制数字植被图, 主要结果如下: (1) 内伶仃岛主要的自然植被类型包括亚热带常绿阔叶林、亚热带针阔叶混交林、亚热带常绿灌丛、亚热带竹林, 并伴有滨海砂生灌草丛、红树林分布; (2) 亚热带常绿阔叶林为该区域的气候顶极群落类型, 占全岛植被分布面积的 46.97%, 居绝对优势地位, 群落中优势物种破布叶 *Microcos paniculata* 和血桐 *Macaranga tanarius* 等均为内伶仃岛重点保护对象猕猴 *Macaca mulatta* 的主要食源植物; 红树林退化明显, 仅在东湾咀东侧和黑沙湾东侧海岸边有小面积分布, 主要树种为蜡烛果 *Aegiceris corniculatum*; (3) 人工植被类型主要有台湾相思 *Acacia confusa*、血桐、木麻黄 *Casuarina equisetifolia*、幌伞枫 *Heteropanax fragrans*、椰子 *Cocos nucifera* 和海滨木槿 *Hibiscus hamabo*, 以及荔枝 *Litchi chinensis* 和龙眼 *Dimocarpus longan* 等经济果林类型分布, 其中台湾相思林为最主要人工植被, 植被分布面积达 29.80%, 也是猕猴的最主要食源植物之一; (4) 微甘菊 *Mikania micrantha* 和刺果藤 *Byttneria grandifolia* 分别为该岛屿最主要的外来入侵植物和本地有害植物, 是除猕猴以外, 影响岛内植被变化的重要胁迫因子, 虽长期进行人工及化学防除, 仍蔓延严重。通过无人机遥感影像技术和地面调查手段对内伶仃岛全岛植被进行精准复核, 二者相互补充, 为岛屿植被调查与植被制图提供了新的手段和思路, 运用地理信息系统绘制的数字化植被图, 将为保护区提出合理、科学的植被保护策略和进行信息化管理提供重要依据, 有利于维持内伶仃岛生态系统的稳定发展。

**关键词:** 内伶仃岛; 无人机遥感影像; 植被分类; 植被型; 自然植被; 人工植被; 植被制图

**中图分类号:** Q948.152 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2022)04-0022-09

## Vegetation classification and vegetation map of Neilingding Island in Guangdong Province based on UAV remote sensing technology

QIAO Xueting<sup>1,2</sup>, ZHANG Juanjuan<sup>1,2</sup>, LI Wenbin<sup>1,2</sup>, TONG Sen<sup>1,2</sup>,  
LI Buhang<sup>1</sup>, YANG Qiong<sup>3</sup>, XU Hualin<sup>3</sup>, CHEN Ting<sup>3</sup>, YU Shixiao<sup>1,2</sup>

1. School of Life Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China
2. Research Institute of Sun Yat-sen University in Shenzhen, Shenzhen 518057, China
3. Guangdong Neilingding-Futian National Nature Reserve, Shenzhen 518040, China

\* 收稿日期: 2021-03-22

录用日期: 2021-05-06

网络首发日期: 2021-07-14

基金项目: 深圳市知识创新计划基础研究项目 (基20180285); 深圳市城市管理局科研资助项目 (201802); 广东省自然科学基金 (2021A1515010641)

作者简介: 乔雪婷 (1996年生), 女; 研究方向: 景观生态学; E-mail: qiaoxt@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 余世孝 (1962年生), 男; 研究方向: 生物多样性、景观生态学; E-mail: ssysx@mail.sysu.edu.cn

**Abstract:** The establishment of the Neilingding Island Nature Reserve has gradually restored the vegetation on the island. In this paper, the vegetation of Neilingding Island, which belongs to Guangdong Neilingding Island-Futian National Nature Reserve, was taken as the research object. Based on the remote sensing images obtained by UAV technology, combined with the field investigation, vegetation types on Neilingding Island were classified and the vegetation map was drawn. Four main results were obtained: (1) The main natural vegetation types include the subtropical evergreen broad-leaved forest, the subtropical coniferous and broad-leaved mixed forest, the subtropical evergreen shrub, the subtropical bamboo forest. In addition, the coastal sand shrub, mangrove also distribute in this island. (2) The subtropical evergreen broad-leaved forest is the climatic climax in this region, accounting for 46.97% of the vegetation distribution area, and occupies the absolute dominant position. *Microcos paniculata* and *Macaranga tanarius*, the dominant species in the community, are the main food source plants for *Macaca mulatta*, the main protected species on Neilingding Island. In mangrove, only a small area of *Aegiceras corniculatum* was found on the east Dongwanzui and the east coast of Heishawan. (3) The main types of artificial vegetation are: *Acacia confusa*, *Macaranga tanarius*, *Cathuarina equisetifolia*, *Heteropanax fragrans*, *Cocos nucifera*, *Hibiscus hamabo*, *Litchi chinensis* and *Dimocarpus longan*, *Acacia confusa* is the most important artificial vegetation. It accounts for 29.80% of the vegetation distribution area, and is also one of the main food sources of *Macaca mulatta*. (4) *Mikania micrantha* and *Byttneria grandifolia* are the main invasive plants on Neilingding Island. They result in a serious vegetation degradation. Despite manual removal and chemical control, they are still wreak havoc on this island every year. UAV remote sensing image provides new means and ideas for island vegetation survey and mapping, and the digital vegetation map drawn by GIS can provide important scientific basis for rational information management of the vegetation in the reserve.

**Key words:** Neilingding Island; UAV remote sensing image; vegetation classification; vegetation types; natural vegetation; artificial vegetation; vegetation mapping

海岛同时具备大陆与海洋的特征, 无论是真正的海洋性岛屿, 还是大陆性或陆桥性岛屿, 由于地理隔离及其演化时期的不同, 可能形成其独特的与大陆迥异的生态系统。海岛的面积通常较小, 但隔离度高, 并且特有种丰富, 其植被类型、结构及功能相比于陆地生态系统均具有其特殊性, 在维持全球植物群落类型及物种的多样性方面具有重要作用<sup>[1-2]</sup>。然而, 相对于陆地生态系统, 海岛通常不易抵达、且地势多变, 无论是基于岛屿植被的实地调查, 或是结合遥感技术的植被类型划分, 都需要更高的成本投入, 且植被分类的精准度也亟待提高。

广东内伶仃岛-福田国家级自然保护区, 总面积约 921.64 hm<sup>2</sup>, 由保护红树林的福田红树林 (面积 367.64 hm<sup>2</sup>) 和保护猕猴的内伶仃岛 (面积 554 hm<sup>2</sup>) 两个区域组成, 其中福田红树林已开展过多领域的研究, 如近年来有研究报道福田红树林现存面积 89 hm<sup>2</sup>, 其核心区总碳储量约为 7 903.2 Mg·hm<sup>-2</sup>, 整体景观具有破碎化特征, 且多

呈正方形斑块分布状态<sup>[3-4]</sup>。另外, 最近的研究发现红树林植物生长受 N 养分元素限制, 光照与竞争能够改变其植物叶片化学计量等功能性状<sup>[5]</sup>, 而且由于红树林湿地底栖动物资源尚不能完全满足候鸟迁徙季节的鸟类食物需求, 因此其水鸟数量存在下降的风险<sup>[6]</sup>, 生态系统健康状况稳定性较弱<sup>[7]</sup>。然而, 位于珠江口伶仃洋东部的内伶仃岛保护区的相关研究则相对匮乏。由于历史原因, 长期以来内伶仃岛景观和土地覆被遭受了人为因素的强烈干扰。在 20 世纪 50 年代前原生植被受到严重的人为破坏, 仅留存极少数植被片段化区域。20 世纪 50 年代后, 特别是 1988 年广东内伶仃岛-福田国家级自然保护区建立以后, 植被才逐步得到恢复; 同时, 20 世纪 60 年代至 70 年代人为影响导致种群数量急剧下降, 仅存 60 只左右的猕猴, 保护区成立进行调查时其数量大约为 200 只, 1998 年再次调查已增加到约 600 只, 目前已恢复并且增长至全岛分布约 23 群近 1 200 只的数量, 从而使内伶仃岛成为世界上猕猴分布密度最大的岛屿栖息

地之一。但由于猕猴的取食作用,其对岛内部分食源植物及整体植被的自然更新造成影响。此外,近年来由于微甘菊 *Mikania micrantha*、刺果藤 *Byttneria grandifolia* 入侵极为严重,对岛上植被的演替与恢复构成了严重威胁<sup>[8]</sup>。

历史上虽对内伶仃岛的植被有过多次的实地调查,但由于人为及动物因素的强烈干扰导致植被覆盖变化极为显著,相关的研究结果已难以满足现时保护区实施数字化监测与管护的要求,因此亟待对内伶仃岛植被现状进行更精准的调查,并进行其植被类型划分与植被图绘制。近些年,无人机(UAV,unmanned aerial vehicle)硬件发展迅速,促使了以飞行器平台、机载遥感传感器和地面数据分析处理系统为一体的无人机遥感技术的形成,并逐渐应用于动植物监测、森林物种分类以及植被图测绘等研究领域<sup>[9-12]</sup>,已成为海岛和海岸监测工作的重要技术手段<sup>[13]</sup>。将无人机遥感技术应用于各类生态系统植被类型的研究,不仅能够降低传统植被识别手段的局限性、降低植被调查成本和节省时间,并且能够获取目标区域的完整影像,方便明确植被类型边界,大幅提高植被制图精度,具有良好的应用前景。目前,该技术已被应用于简单生态系统的植被分类和单一物种的识别研究中,如在红树林植物的识别、人工林的树种分类方面,并且成效显著<sup>[14-17]</sup>。然而,迄今为止,将无人机高光谱遥感影像与实地的样方调查数据相结合进行海岛植被的分类研究尚欠缺。本研究将二者结合,基于获取的内伶仃岛无人机影像和实地的样地调查,对全岛植被进行分类和绘制数字化植被图,可为内伶仃岛自然保护区植

被监测及维持该岛屿生态系统稳定和发展提供科学依据和技术支撑。

## 1 研究地及研究方法

### 1.1 研究区域概况

广东内伶仃岛位于珠江口东侧伶仃洋上,地理位置为 22°23'~22°25' N, 113°46'~113°49' E,东距香港 11.12 km,西距珠海 24.08 km,北距深圳蛇口约 16.70 km,西北至东南长约 4 km,南北宽约 2 km,总陆地面积约 4.98 km<sup>2</sup>,属南亚热带季风气候,年平均气温约 23.0 °C,年平均降雨量约 2 055.8 mm,年平均相对湿度高于 70%,年均风速 3 m/s 以上,有明显的干、湿季之分,降水集中在 4~9 月,雨日约 140 d,日照年总量约 2 000 h<sup>[18-19]</sup>。岛上地带性土壤为赤红壤,占总面积的 92%,还有海滨砂土和耕作土等<sup>[20]</sup>。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 野外调查数据** 于 2019 年 9 月~2020 年 12 月,对内伶仃岛进行了多次实地调查,共计建立 1 个 15 hm<sup>2</sup> 大样地(划分为 375 个 20 m × 20 m 样方,并随机选取其中 10 个 20 m × 20 m 样方,于其内部各设立 1 个 4 m × 4 m 小样方调查灌木层和草本层,共 10 个小样方)和 113 个 10 m × 10 m 小样地(每一小样地设 1 个 4 m × 4 m 小样方调查灌木层和草本层),乔木层调查记录胸径 DBH ≥ 5 cm 植株的物种名、胸径、高度等,灌草层调查记录植物物种名、株数、盖度等。此外,对样地外全岛植物进行环岛踏查,共记录 317 个样点的植物群落优势种及地理坐标,样点分布如图 1 所示。

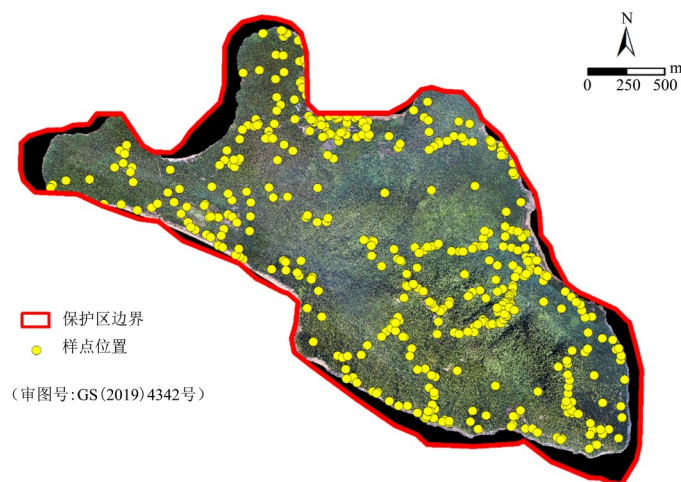


图 1 内伶仃岛野外调查样点分布图

Fig. 1 The distribution mapping of sites for field investigation at Neilingding Island Nature Reserve

1.2.2 无人机遥感数据获取与解译 于2018年10月~11月采用南方测绘ZR-060B无人机对内伶仃岛全岛进行航拍, 所搭载相机型号为SONY DSC-RX1R2 (35 mm), 拍摄区域总覆盖面积为526.35 hm<sup>2</sup> (除岛内受管制限制的小部分区域)。岛内高差起伏较大, 最高海拔340.9 m, 因此采取分层设计进行不同航高飞行, 相对航高150 m; 共

飞行11架次, 获得3 000张影像。使用Sky Photo-super 2.0软件对无人机影像进行几何纠正、拼接等处理, 得到分辨率为3 cm的RGB影像。

基于不同物种在无人机遥感影像中所显示的颜色和纹理特征, 并参照实地调查所获取的样点信息, 人工识别各植被类型特征 (图2), 对影像进行目视解译, 在此基础上划分内伶仃岛主要植

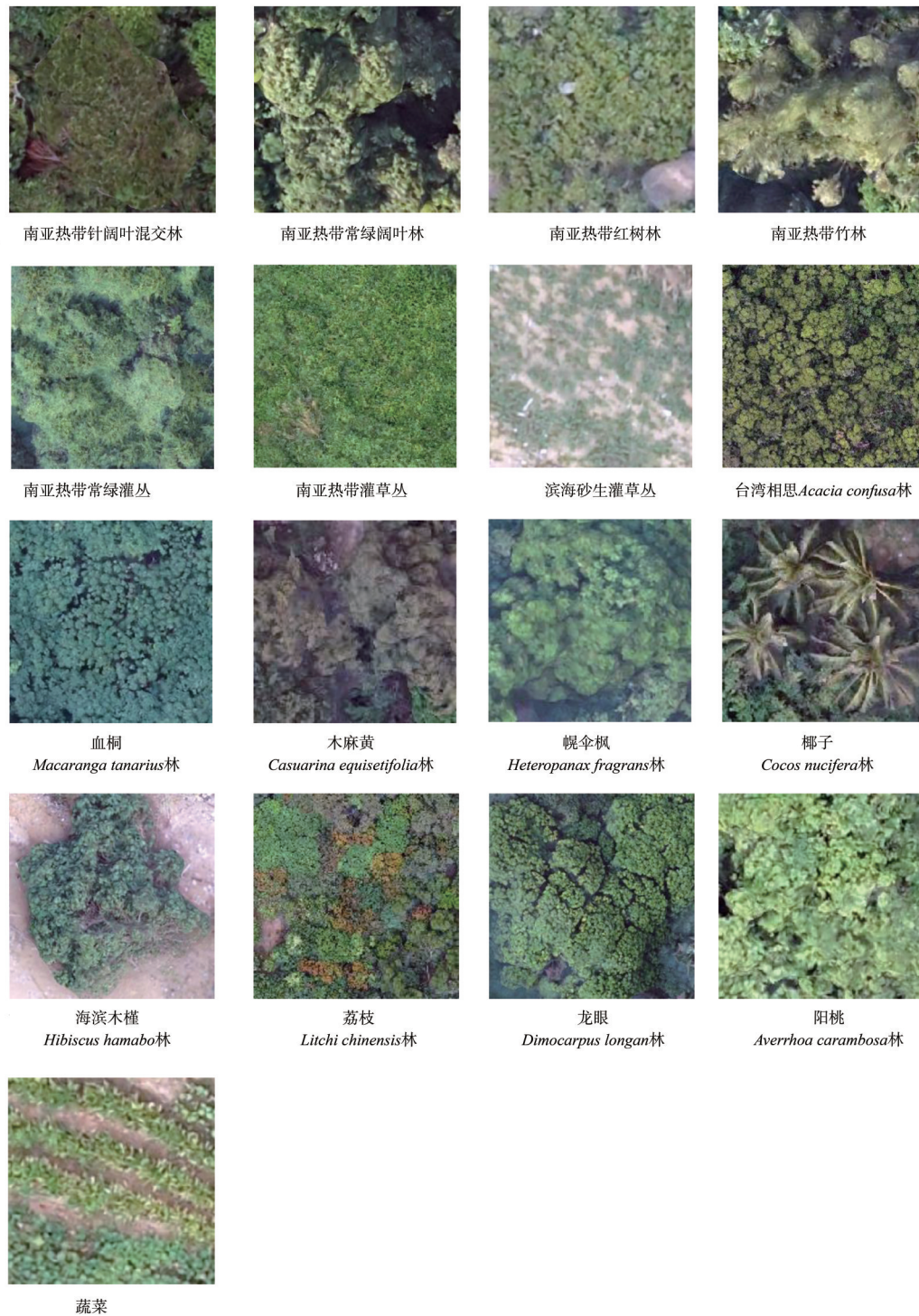


图2 无人机影像中各植被类型特征

Fig. 2 Features of vegetation subtypes identification in UAV image

被类型, 并利用 ArcGIS 10.3 软件绘制内伶仃岛植被类型分布图。

## 2 结果

### 2.1 植被分类方案与植被图

参照“中国植被”和“广东省的植被和植被区划”及前人相关研究中的分类原则<sup>[21-28]</sup>, 将内伶仃岛自然保护区植被划分为自然植被和人工植被, 其中自然植被包括 4 个植被型组、6 个植被型、7 个植被亚型; 人工植被则可划分为 2 个植被型组、3 个植被型、10 个植被亚型(表 1)。结合实地调查与无人机影像解译结果绘制的内伶仃岛植被图(亚型及亚型以上)结果见图 3。

依据植被图的统计结果表明, 自然植被占内伶仃岛植被总面积的 61.66%, 其中常绿阔叶林和灌草丛植被为最主要植被型, 分别占 46.97% 和 7.70%; 在植被亚型方面, 南亚热带常绿阔叶林、南亚热带灌草丛和南亚热带常绿灌丛分布面积分别为 218.65、34.71 和 23.19 hm<sup>2</sup>; 针叶林、竹林、红树林所占面积则较小。人工植被总面积占岛内

植被总面积高达 38.34%, 其中, 台湾相思 *Acacia confusa* 林、血桐 *Macaranga tanarius* 林为主要植被, 其次为荔枝 *Litchi chinensis* 林。

### 2.2 自然植被的主要类型及分布

#### 2.2.1 针叶林

##### 亚热带针叶林

**南亚热带针阔叶混交林** 该类型主要分布于内伶仃岛北部, 即东背坳附近, 北湾南部的道路两边也有少量分布, 其分布面积较小, 马尾松 *Pinus massoniana* 占据乔木上层, 通常较为稀疏。代表性群落类型为马尾松-鹅掌柴+银柴群落 *Pinus massoniana - Schefflera heptaphylla + Aporosa dioica* Community, 其乔木上层高度在 25~40 m, 马尾松为主要优势树种, 下层 8~15 m, 优势树种为鹅掌柴 *Schefflera octophylla* 和银柴 *Aporosa dioica* 等。灌木层种类较为丰富, 主要有九节 *Psychotria rubra*, 豺皮樟 *Litsea rotundifolia* var. *oblongifolia*、银柴和假鹰爪 *Desmos chinensis* 等。层间植物也较为丰富, 主要为山椒子 *Uvaria grandiflora*、青江藤 *Celastrus hindsii* 等, 草本层主要有海金沙 *Lygodium japonicum*、两面针 *Zanthoxylum nitidum* 等。

表 1 内伶仃岛不同植被型组和植被型面积及所占比例  
Table 1 Area and percentage of vegetation formation groups

植被类型	植被型组	植被型	植被亚型	面积/hm <sup>2</sup>	比例/%
自然植被	针叶林	亚热带针叶林	南亚热带针阔叶混交林	7.30	1.57
		阔叶林	常绿阔叶林	218.65	46.97
	竹林	红树林	南亚热带红树林	0.05	0.01
		暖性竹林	南亚热带竹林	2.01	0.43
	灌丛和灌草丛	灌丛	南亚热带常绿灌丛	23.19	4.98
			南亚热带灌草丛	34.71	7.46
		灌草丛	滨海砂生灌草丛	1.13	0.24
人工植被	林用植被	人工林	台湾相思林	138.74	29.80
			血桐林	27.76	5.96
			木麻黄林	1.04	0.22
			幌伞枫林	0.08	0.02
			椰子林	0.07	0.02
			海滨木槿林	1.16	0.25
	农用植被	果树林	荔枝林	8.37	1.80
			龙眼林	0.68	0.15
			阳桃林	0.46	0.10
			蔬菜作物	蔬菜	0.11

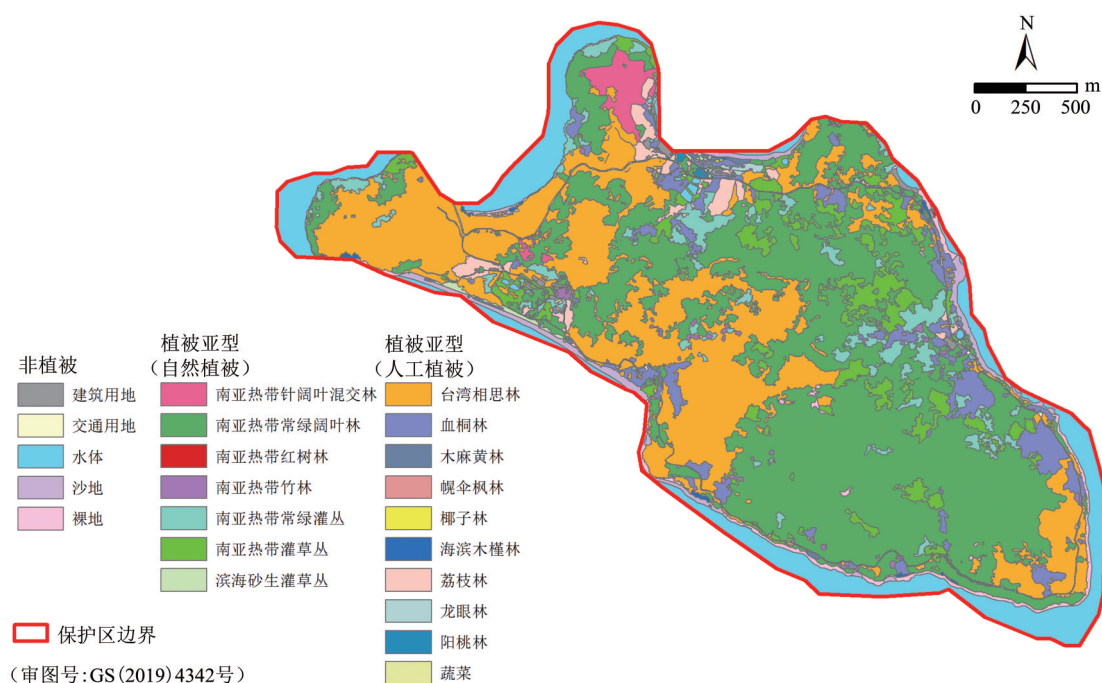


图3 内伶仃岛保护区植被类型分布图

Fig. 3 The distribution mapping of vegetation types at Neilingding Island Nature Reserve

## 2.2.2 阔叶林

### 1) 常绿阔叶林

**南亚热带常绿阔叶林** 该类型属于内伶仃岛保护区地带性植被, 主要位于南峰坳、东湾及中部和西部等区域, 群落树种组成以热带亚热带成分占优势, 并趋向于发育稳定阶段。乔木层优势树种是椴树科的破布叶 *Microcos paniculata*、梧桐科的翻白叶树 *Pterospermum heterophyllum*、大戟科的白楸 *Mallotus paniculatus* 和血桐、桑科的榕树 *Ficus microcarpa*、五加科的鹅掌柴、樟科的华润楠 *Machilus chinensis* 以及棕榈科的刺葵 *Phoenix loureiroi*; 灌木层优势种主要包括九节、假鹰爪、银柴、假苹婆 *Sterculia lanceolata*、豺皮樟和潺槁木姜子 *Litsea glutinosa* 等; 草本层则以海芋 *Alocasia odora*、海金沙、蔓生莠竹 *Microstegium fasciculatum*、芒萁 *Dicranopteris dichotoma*、山麦冬 *Liriope spicata*、羊角拗 *Strophanthus divaricatus*、两面针和假蒟 *Piper sarmentosum* 等为主, 部分区域以箬竹 *Indocalamus tessellatus* 等为主; 层间层主要为藤本植物, 主要为刺果藤、飞龙掌血 *Toddalia asiatica*、龙须藤 *Bauhinia championii*、山椒子、青江藤、山牵牛 *Thunbergia grandiflora*, 以及外来植物微甘菊等。这一类型的代表性群落类型有白楸群落 *Mallotus paniculatus* Community、破布叶群落

*Microcos paniculata* Community、刺葵群落 *Phoenix loureiroi* Community、鹅掌柴群落 *Schefflera heptaphylla* Community、榕树群落 *Ficus microcarpa* Community 等。

### 2) 红树林

**南亚热带红树林** 内伶仃岛周边多为沙滩和砾滩, 不利于红树林生长和发育。目前仅有东湾咀东侧和黑沙湾东侧的海岸边有呈片状分布的蜡烛果 *Aegiceras corniculatum* 群落, 其中黑沙湾现有蜡烛果 19 丛, 高约 0.4~1.1 m, 分布较为稀疏; 东湾东侧分布蜡烛果群落分布区域面积约为黑沙湾的 6~7 倍, 树高约 0.8~2.8 m, 树丛相对密集, 紧密连接成片状。

## 2.2.3 竹林

### 暖性竹林

**南亚热带竹林** 内伶仃岛竹林面积较小, 呈零星小片分布于东角咀至黑沙湾一带, 以及南湾建筑物东部和尖峰山的周围。其中, 青皮竹 *Bambusa textilis* 群落分布范围比较广泛, 高约 5~35 m, 胸径约 4.1~5.0 cm, 在岛内低海拔 (如 7 m、20 m 处) 和高海拔 (约 341 m) 处均有小片分布; 坭竹 *Bambusa gibba* 在海拔 140 m 处有分布, 高约 25 m。此外, 在尖峰山海拔 183~282 m 范围内, 有成片分布于林下的箬竹, 高约 0.3~3.5 m, 在 4 m

× 4 m 的调查样方里, 其盖度最高可达 60%, 多与刺葵-白楸群落或其他常绿灌丛等混生在一起, 因此常伴有鹅掌柴、马缨丹 *Lantana camara*、破布叶、假柿木姜子 *Litsea monopetala* 等乔灌木, 以及青江藤等藤本植物。草本植物以蔓生莠竹为常见种。

2.2.4 灌丛和灌草丛 灌草丛和藤本植物全岛皆有分布, 在岛的东北部有大片聚集。

#### 1) 灌丛

南亚热带常绿灌丛 内伶仃岛原生植被在 20 世纪 50 年代受到人类活动的干扰和破坏严重, 导致岛上植被退化严重, 形成较多次生灌丛, 在岛内海拔 2~273 m 均有分布, 特别是在海拔 200 m 以上分布广泛。主要群落类型有白楸+马缨丹群落 *Mallotus paniculatus* + *Lantana camara* Community、小果叶下珠+钩藤+微甘菊群落 *Phyllanthus reticulatus* + *Uncaria rhynchophylla* + *Mikania micrantha* Community 等。

#### 2) 灌草丛

① 南亚热带灌草丛 主要分布在东湾、南湾的海滨阶地及撂荒地, 微甘菊入侵严重。主要的草本植物为五节芒 *Miscanthus floridulus* 和蔓生莠竹; 蔓生藤本主要为微甘菊, 其次为刺果藤和山牵牛; 零散分布有土蜜树 *Bridelia tomentosa*、九节、白楸、八角枫 *Alangium chinense* 幼树、小果叶下珠 *Phyllanthus reticulatus*、地桃花 *Urena lobata* 和马缨丹等。代表性群落类型有五节芒+微甘菊群落 *Miscanthus floridulus* + *Mikania micrantha* Community、蔓生莠竹+微甘菊群落 *Microstegium fasciculatum* + *Mikania micrantha* Community 等。

② 滨海砂生灌草丛 该类型灌草丛主要分布于东湾及南湾的滨海沙滩及沙堤, 属于防风 and 固沙的先锋植物群落。主要代表性群落是单叶蔓荆+厚藤群落 *Vitex rotundifolia* + *Ipomoea pes-caprae* Community。

### 2.3 人工植被的主要类型

人工植被包括林用植被与农用植被。其中林用植被有台湾相思林、血桐林、木麻黄林、幌伞枫林、椰子林、海滨木槿林等; 农用植被主要是果树林(荔枝林、龙眼林、阳桃林)和蔬菜。

#### 2.3.1 林用植被

##### 1) 人工林

① 台湾相思林 台湾相思林为岛上最主要的人工林, 面积约占全岛植被总面积的 29.80%, 主要分布于岛的西北部、中部偏西以及东南部, 群

落中除台湾相思之外, 常见种还有白楸、破布叶和银柴等。代表性群落类型包括台湾相思-银柴+假苹婆群落 *Acacia confusa* - *Aporosa dioica* + *Sterculia lanceolata* Community、台湾相思-白楸群落 *Acacia confusa* - *Mallotus paniculatus* Community、台湾相思-破布叶群落 *Acacia confusa* - *Microcos paniculata* Community 等。

② 血桐林 血桐林主要分布于岛内东湾、蕉坑湾、东角山以及水湾的低海拔处, 群落郁闭度较高, 血桐占绝对优势, 白楸和破布叶也较为常见。灌木层高约 1~4 m, 以九节占优势, 其次为对叶榕 *Ficus hispida* 和银柴, 以及破布叶、假鹰爪和假柿木姜子等幼树。草本层高约 0.1~1.6 m, 以海芋占优势, 另常见蔓生莠竹、刺果藤、青江藤, 及九节、白楸、破布叶和血桐等树种的幼苗。层间植物以飞龙掌血为主, 其次为黑风藤 *Fissistigma polyanthum*、罗浮买麻藤 *Gnetum luofuense*、羊角拗、龙须藤以及酸叶胶藤 *Urceola rosea*。

③ 木麻黄林 木麻黄主要分布于东湾和南湾海岸, 呈条带状分布, 群落结构简单, 乔木层以木麻黄占绝对优势, 高约 12~35 m, 潺槁木姜子和朴树 *Celtis sinensis* 零星分布。无明显灌木层和层间层。草本层高约 0.2~1.2 m, 主要以铺地黍 *Panicum repens* 为主, 其次为鬼针草 *Bidens pilosa*, 并伴有假马鞭 *Stachytarpheta jamaicensis*、单叶蔓荆 *Vitex rotundifolia*、类芦 *Neyraudia reynaudiana*、厚藤 *Ipomoea pes-caprae*、细圆藤 *Pericampylus glaucus*、南美蟛蜞菊 *Sphagneticola trilobata* 及两面针等出现, 偶见海滨木槿 *Hibiscus hamabo* 幼苗。

④ 幌伞枫林 幌伞枫 *Heteropanax fragrans* 林主要分布于东湾咀和南峰坳交界的路边, 为人工种植试验林, 分布范围较小, 群落结构较为简单, 上层乔木为幌伞枫, 高度可达约 25 m, 胸径可达 43.5 cm, 下层乔木以假苹婆占优势。灌木层以九节为优势植物, 同时可见银柴、假柿木姜子、球花脚骨脆 *Casearia glomerata* 及血桐幼树。草本层以海芋为主, 另外常见九节、幌伞枫和假柿木姜子幼苗等。

⑤ 椰子林 椰子 *Cocos nucifera* 林主要分布于东湾岸边以及保护区管理站附近, 范围很小, 高约 25 m, 血桐为主要的下层乔木。草本层优势植物为海芋。

⑥ 海滨木槿林 海滨木槿林主要呈条带状零

星分布于东湾、北湾、蕉坑湾、东角湾和南湾海岸边,群落组成较为简单,乔木层以海滨木槿占优势地位,下层有白楸、破布叶、朴树、血桐和木麻黄。草本层则主要为竹叶草 *Oplismenus compositus* 和海滨木槿幼苗。

### 2.3.2 农用植被

#### 1) 果树林

① 荔枝林 荔枝林主要分布于南湾、东湾一带低海拔道路两边。目前处于撂荒状态,以荔枝占绝对优势。由于常年无人管理,群落中已有白楸、破布叶、血桐、假柿木姜子、白楸和朴树等定植。灌木层则以银柴和九节为优势植物,伴有假鹰爪、对叶榕、鹅掌柴、白桂木 *Artocarpus hypargyreus* 和破布叶等幼树。草本层以海芋占优势,覆盖度可达60%,其次为艳山姜 *Alpinia zerumbet*、半边旗 *Pteris semipinnata*、海金沙和山麦冬等,另有黑面神 *Breynia fruticosa*、鹅掌柴、假鹰爪、银柴等幼苗。

② 龙眼林 龙眼 *Dimocarpus longan* 林主要分布在蕉坑湾、东湾以及水湾和黑沙湾一带低海拔(2~19 m)地段,面积较小,以龙眼为主要优势植物,也有复羽叶栲树 *Koelreuteria bipinnata*、破布叶、朴树、白楸、土蜜树、血桐和簕欏花椒 *Zanthoxylum avicennae* 等分布。龙眼林周围分布有台湾相思和榕树等高大乔木,高度可达32 m左右。灌木层无明显优势植物,散见九节和九里香 *Murraya exotica*,同时可见破布叶、白楸、银柴、榕木 *Aralia elata* 及粗叶榕 *Ficus hirta* 等幼树。草本层高约0.3~1.6 m,主要优势植物为海芋,其次为细叶结缕草 *Zoysia pacifica*,另外可见蔓生莠竹、傅氏凤尾蕨 *Pteris fauriei*、芒萁以及山牵牛和羊角拗等。层间层物种组成较为简单,常见物种有海金沙、白藤 *Calamus tetradactylus*、山椒子和叶子花 *Bougainvillea spectabilis* 等。

③ 阳桃林 阳桃 *Averrhoa carambosa* 林小面积分布于东湾。此外东湾和南湾还零星分布有小片香蕉 *Musa nana* 林。

#### 2) 蔬菜作物

蔬菜 由于岛上物资运输相比于内陆地区较为困难,因此,人工种植的蔬菜小面积分布于岛上管理站、保安房、派出所及环卫工人居住地附近,常见物种有辣椒、茄子、黄瓜、番茄和多种青菜等,以补给岛上工作人员的日常生活。

## 3 讨论与结论

内伶仃岛陆地面积小,且岛内岩石分布较多,

生态系统相比于陆地生态系统较为简单<sup>[23]</sup>。20世纪50年代,由于人为活动的干扰,如居民的日常生活和农耕活动,以及驻岛部队进行环岛公路、盘山公路以及战壕等工程建设和台湾相思林、马尾松林等的种植,使得内伶仃岛原有植被(南亚热带常绿阔叶林)遭到严重破坏。随着岛上人员的撤离,以及1984年内伶仃岛保护区的建立,岛内植被逐渐得到恢复,目前内伶仃岛自然植被以热带和亚热带植物区系成分为主,主要包括6个植被型7个植被亚型,与1999年有关内伶仃岛植被调查进行的类型划分<sup>[26]</sup>已有了较大变化,其中南亚热带常绿阔叶林已发展成为最主要的森林群落类型,针叶林退化,裸地罕见,但岛上藤本较多,尤其是微甘菊、刺果藤、飞龙掌血藤等藤本植物覆盖范围最为广泛。

随着保护区的建立,岛内主要野生动物猕猴数量急剧增加,猕猴种群对食源植物的高强度取食,可能对岛上森林群落组成和结构产生较大程度的影响。台湾相思作为猕猴的主要食源植物,在岛上分布广泛,但与20世纪90年代调查相比较<sup>[26]</sup>,台湾相思林是衰退最为显著的植被类型之一,南亚热带针叶林、南亚热带针阔叶混交林也显著衰退。而血桐、破布叶、鹅掌柴、假苹婆、翻白叶树及白楸等阔叶树种的更新和发展,使得岛内南亚热带常绿阔叶林逐渐成为主要的植被类型。此外,岛内南亚热带红树林植被类型也发生严重消退,现仅在东湾咀东侧和黑沙湾东侧海岸边有小面积分布,且物种组成单一,可能是内伶仃岛利于红树林生长的泥滩减少的原因。另外,近年来,随着外来植物微甘菊和本地植物刺果藤等的入侵加剧,使得岛上大量小乔木、灌木甚至部分大乔木被覆盖致死,对岛内植被的更新与演替产生不利影响,也破坏了岛上猕猴的生境,减少了其食物来源。而龙眼林、荔枝林和蕉林撂荒后逐渐向南亚热带常绿阔叶林类型发展,可能进一步加剧猕猴食源危机。因此,现阶段关于内伶仃岛猕猴种群数量的维持、入侵植物的分布及控制和猕猴食源植物引种已经成为内伶仃岛生态系统平衡发展面临的主要问题。

本研究首次结合全岛样方调查结果和无人机遥感影像信息对内伶仃岛植被进行分类划分并绘制了植被图,为现代植被制图提供了新的手段和思路,可为保护区植被进行合理的信息化管理提供重要的科学依据。

## 参考文献:

- [1] KIER G, KREFT H, LEE T M, et al. A global assessment of endemism and species richness across island and mainland regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(23): 9322-9327.
- [2] GARNIER E, CORTEZ J, BILL G, et al. Plant functional markers capture ecosystem properties during secondary succession[J]. *Ecology*, 2004, 85(9): 2630-2637.
- [3] 李真, 李瑜, 咎启杰, 等. 深圳福田与香港米埔红树林群落分布与景观格局比较[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2017, 56(5): 12-19.
- [4] LI Z, ZAN Q, YANG Q, et al. Remote estimation of mangrove aboveground carbon stock at the species level using a low-cost Unmanned Aerial Vehicle system [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(9): 1018.
- [5] ZHU D, HUI D, WANG M, et al. Light and competition alter leaf stoichiometry of introduced species and native mangrove species [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 738: 140301.
- [6] 吴海轮, 周琳, 徐华林, 等. 粤港澳大湾区红树林湿地鸟类承载力评估与提升对策——以深圳湾福田红树林为例[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(6): 1056-1064.
- [7] 邱致刚, 林绅辉, 沈小雪, 等. 基于神经网络的福田红树林生态系统健康评估[J]. *植物学研究*, 2019, 8(6): 500-508.
- [8] 黄东光, 邓太阳, 周先叶, 等. 广东内伶仃岛薇甘菊危害与生态因子的关联度分析[J]. *生态科学*, 2008, 27(3): 143-147.
- [9] GUO Q H, SU Y J, HU T Y, et al. An integrated UAV-borne lidar system for 3D habitat mapping in three forest ecosystems across China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(8/9/10): 2954-2972.
- [10] 杨勇强, 王振锡, 师玉霞, 等. 基于无人机遥感的天山云杉林密度估测研究[J]. *新疆农业大学学报*, 2019, 42(3): 194-201.
- [11] 王雅佩, 王振锡, 李擎, 等. 基于无人机影像的天山云杉林伐后更新地林分密度估测研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40(5): 57-66.
- [12] 杨勇强, 王振锡, 师玉霞, 等. 基于无人机影像的天山云杉林更新类别划分及提取[J]. *西北林学院报*, 2020, 35(6): 185-193.
- [13] 许祝华, 张彦彦, 杨晖, 等. 海域无人机遥感监测三维立体监管系统的建设与研究[J]. *海洋开发与管理*, 2013, 30(6): 16-18.
- [14] 金伟, 葛宏立, 杜华强, 等. 无人机遥感发展与应用概况[J]. *遥感信息*, 2009(1): 88-92.
- [15] 李广静. 无人机低空遥感影像的应用及精度实证研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2018.
- [16] CAO J, LENG W, LIU K, et al. Object-based mangrove species classification using unmanned aerial vehicle hyperspectral images and digital surface models[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(1): 89.
- [17] 戴鹏钦, 丁丽霞, 刘丽娟, 等. 基于FCN的无人机可见光影像树种分类[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(10): 36-45.
- [18] 覃朝锋, 李贞, 董汉飞. 珠江口内伶仃岛植被[J]. *生态科学*, 1990(2): 23-34.
- [19] 崔大方, 廖文波, 咎启杰, 等. 广东内伶仃岛国家级自然保护区的植物资源[J]. *华南农业大学学报*, 2000, 21(3): 48-52.
- [20] 蓝崇钰, 廖文波, 王勇军. 广东内伶仃岛的生物资源及自然保护规划[J]. *植物资源与环境学报*, 2002, 11(1): 47-52.
- [21] 方精云, 郭柯, 王国宏, 等. 《中国植被志》的植被分类系统、植被类型划分及编排体系[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(2): 96-110.
- [22] 余世孝, 李勇, 王永繁, 等. 黑石顶自然保护区植被分类系统与数字植被图I. 植被型与群系的分布[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2000, 39(2): 61-66.
- [23] 咎启杰, 廖文波, 陈继敏, 等. 广东内伶仃岛植物区系的研究[J]. *西北植物学报*, 2001, 21(3): 507-519.
- [24] 中国植物委员会. 中国植被[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [25] 广东省农业区划委员会, 中国科学院华南植物研究所. 广东省的植被和植被区划[M]. 北京: 学术书刊出版社, 1989.
- [26] 廖文波, 咎启杰, 崔大方, 等. 内伶仃岛主要植被及群落类型的特征和分布[J]. *生态科学*, 1999, 18(4): 6-19.
- [27] 李勇, 余世孝, 练璐藩, 等. 广东黑石顶自然保护区植被分类系统与数字植被图——II. 群丛的分布[J]. *热带亚热带植物学报*, 2000(2): 147-156.
- [28] 郭柯, 方精云, 王国宏, 等. 中国植被分类系统修订方案[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(2): 111-127.