

深圳福田与香港米埔红树林群落分布与 景观格局比较*

李真¹, 李瑜², 咎启杰^{3,4}, 余世孝¹

- (1. 中山大学生命科学学院//广州市城市景观生态演变重点实验室, 广东 广州 510275;
2. 深圳市野生动物救护中心, 广东 深圳 518035;
3. 深圳大学生命科学学院, 广东 深圳 518060;
4. 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: 改革开放前, 地处深圳湾两岸的福田保护区和米埔保护区的红树林湿地在景观和物种组成等方面相似, 但近30年来深圳城市化高速发展所带来福田红树林湿地的景观破碎化过程, 导致两岸红树林群落特征产生了较为明显差异。以WorldView-2高分辨率影像为数据源, 采用导数光谱法结合基于面向对象的支持向量机的分类方法对深圳湾湿地的红树林群落进行分类, 总体精度达到0.902, Kappa系数为0.859, 符合要求。进一步运用景观指数对其进行定量对比分析。结果表明: ①米埔保护区红树林现存面积为346 hm², 福田保护区红树林现存面积仅为89 hm²; ②秋茄群落是深圳湾两岸湿地的最主要优势景观类型, 白骨壤群落和桐花树群落是优势群落; ③福田保护区红树林的景观破碎化程度比米埔保护区高, 尤其是本地种秋茄群落和白骨壤群落的破碎化程度较高; ④福田保护区景观斑块形状多呈正方形分布的状态, 在一定程度上反映了人类活动的作用, 而处于米埔保护区的天然红树林则呈现不规则的分布状态。

关键词: 福田保护区; 米埔保护区; 红树林; 导数光谱法; 景观格局

中图分类号: Q948.15⁺5 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2017)05-0012-08

A comparison of mangrove community distribution and landscape pattern between Futian and Maipo Nature Reserve at Shenzhen Bay

LI Zhen¹, LI Yu², ZAN Qijie^{3,4}, YU Shixiao¹

- (1. School of Life Sciences//Guangzhou Key Laboratory of Urban Landscape Dynamics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Shenzhen Wild Animal Rescue Center, Shenzhen 518035, China;
3. School of Life Sciences, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
4. Guangdong Neilingding-Futian National Nature Reserve, Shenzhen 518040, China)

Abstract: Before the reform and opening up, the species composition and landscape pattern at Futian Nature Reserve were similar to Maipo Nature Reserve. A rapid urbanization at Shenzhen city during the past 30 years has led to the landscape fragmentation process at Futian mangrove wetland, which resulted in a divergence of mangrove communities or landscape pattern on both coasts. In this study, based on a-

* 收稿日期: 2016-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(31470513); 深圳市城市管理局科研项目

作者简介: 李真(1992年生), 女; 研究方向: 景观生态学; E-mail: lizh69@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 咎启杰(1968年生), 男; 研究方向: 红树林生态保育和城市生态学研究; E-mail: zqjmangrove@126.com

analysis of high resolution WorldView - 2 image, we classified the present pattern of communities and landscape, then qualified the fragmentation degree between both sides. The overall accuracy of mangrove community classification was 0.902, and the Kappa coefficient was 0.859. Our results also indicated: ① The mangrove at Maipo nature reserve covers about 346 hm² while it is about 89 hm² at Futian. *Kandelia candel* community is the leading dominant landscape type at Shenzhen Bay, and *Avicennia marina* community and *Aegiceras corniculatum* community are dominant communities; ② The landscape fragmentation degree at Futian Reserve is higher than that at Maipo Reserve. In particular, the pattern of both local communities *Avicennia marina* community and *Kandelia candel* community fragmented seriously; ③ The landscape patch shape of Futian Reserve is square mostly, which indicated an effect of anthropogenic factor. On the contrary, the pattern at Maipo Reserve showed mainly an irregular distribution, indicated an effect of natural factor.

Key words: Futian Nature Reserve; Maipo Nature Reserve; mangrove; derivative reflectance; landscape pattern

红树林是指生长在热带、亚热带海岸潮间带, 并受周期性潮水浸淹的常绿耐盐灌木或乔木^[1]。红树林湿地生态系统作为海洋与陆地生态系统过渡区域特殊的湿地生态系统, 具有极高生产力, 兼具防风消浪、促淤保滩、固岸护堤、净化海水和空气的功能, 也是候鸟的越冬场所和迁徙中转站, 对维护海岸生态平衡和湿地多样性有不可替代的作用^[2]。

自 20 世纪 80 年代成立深圳经济特区以来, 城市得以高速发展, 由于城市经济发展的需要以及填海造陆等人类活动, 深圳湾北岸的福田红树林湿地受到围海造田、滩涂养殖、城市污水排入、城市化建设等多种人为活动的干扰, 红树林湿地的生态功能和生物多样性明显下降。据相关资料, 1991 年以来滨海大道、广深高速公路、凤塘河排洪工程等城市建设等侵占了红树林湿地 147.2 hm², 直接毁坏红树林 36.13 hm², 占福田红树林总面积的 32.5%^[3]。据统计, 1979 年福田红树林的面积约 79.56 hm², 到 1998 年仅剩 52.65 hm², 虽然自 1984 年建立福田红树林自然保护区以来, 采用育苗造林、引种优良红树植物以及人工造林等措施, 2009 年红树林的面积恢复到 81 hm²^[4], 但是福田红树林湿地仍受到外来种入侵和虫灾的影响, 生态系统处于不稳定的状态^[5]。而与福田保护区仅一水之隔的米埔保护区自 1950 年以来, 香港政府将米埔湿地及周边香港边境地区划为禁止发展区, 使米埔湿地生态环境处于自然更新的状态^[6]。因此, 对比分析米埔保护区与福田保护区近 30 a 来红树林群落的分布状态与景观格局变化, 有助于为福田红树林的重建和湿地生态系统的恢复提供科学指导。

通常由于受淤泥和潮汐的影响, 难以借助传统的野外调查方法对红树林群落的分布进行准确地空间定位。20 世纪 60 年代以来兴起的遥感技术, 因其具有大范围覆盖、数据获取便捷且更新周期短、定位精度高和空间分辨率高等特点, 对大面积红树林湿地及其生态环境进行动态监测和分析具有显著优势, 从而发展成国内外红树林湿地生态研究的主要技术之一。红树林常以单种或两三种形成分布类群, 各自具有不同的几何外观、光谱特征和纹理特征等, 中低分辨率遥感影像数据常难以满足红树林种间分类的要求^[7-9]。而近年来发展起来的多光谱高分辨率遥感影像技术在获取红树林精准分类上具有明显的优势^[10-14]。

景观格局是指大小和形状不一的景观要素在空间上的排列组合, 是景观异质性的具体表现, 也是各种生态过程在不同尺度上作用的结果。通过计算景观指数能够提取高度浓缩景观格局信息, 定量地反映其空间配置, 现被广泛地应用于城市、流域和滨海湿地生态系统的分析^[15]。

本研究以受人为干扰的福田红树林和自然演替为主的米埔红树林为研究对象, 利用 WorldView - 2 卫星影像对保护区的红树林群落进行识别, 并运用景观指数对红树林群落分布进行定量地对比分析, 探讨不同红树林群落的空间分布特征以及深圳湾两岸红树林的景观格局差异, 以期在深圳湾红树林湿地的保护与规划提供理论依据。

1 研究区概况

1.1 福田自然保护区概况

福田自然保护区位于深圳湾东北部, 东起新州河口, 西至海滨生态公园, 南达滩涂外海域和深圳

河口,北至广深高速公路,海岸线长约 9 km,地处 113°45'E, 22°32'N,保护区建于 1984 年 10 月,1988 年 5 月晋升为国家级自然保护区,红线面积为 367.64 hm²,是全国唯一地处城市腹地、面积最小的国家级森林和野生动物类型的自然保护区^[16]。

1.2 米埔自然保护区概况

香港米埔保护区位于深圳湾东南部,被列入拉姆萨尔国际重要湿地,地处 113°59' - 114°03'E, 22°29' - 22°31'N,是深圳河、山贝河及天水围渠的出海口,由米埔沼泽和深圳湾内湾组成,总占地面积达 1 500 hm²。米埔保护区于 1984 年建立,面积为 380 hm²,其中红树林面积达 300 hm²,占香港红树林总面积的 48%。深圳湾两岸保护区的珍稀动植物资源相似并且十分丰富,包括许多珍稀鸟类,如黑脸琵鹭(约占全球 30%)、红隼、白鹳等^[17]。

1.3 野外调查

相关资料表明,福田保护区的红树植物种类以本地树种秋茄 *Kandelia candel*、白骨壤 *Avicennia marina*、桐花树 *Aegiceras corniculatum* 和老鼠簕 *Acanthus ilicifolius* 占绝对优势,木榄 *Bruguiera gymnorhiza* 和海漆 *Excoecaria agallocha* 零星分布于海潮淹没不到的海滩或群落内缘,福田红树林群落类型组成简单,主要是由优势种组成的群落。1993 年引种的海桑属植物,即海桑 *Sonneratia caseolaris* 和无瓣海桑 *Sonneratia apetala* 已发展成繁茂的人工群落,并趋于自然更新状态。米埔保护区的红树植物群落类型远较福田为多,但优势红树群落与福田保护区相似,仍以秋茄群落最为典型,且分布最为广泛^[17]。

2015 年 11 月和 2016 年 1 月对福田红树林开展了 2 次野外调查,福田保护区类的主要红树植物有秋茄、白骨壤、桐花树、木榄、无瓣海桑、老鼠簕,海漆等种类则分布较少。红树林群落外貌简单,林冠较整齐,分布较多的秋茄和白骨壤高度大约 8 m,无瓣海桑最高可达 13 m 左右,桐花树则属于小乔木,主要呈团状分布在沿海高潮区。海桑在 2008 年由于大寒潮导致大面积死亡,仅剩少数几株与无瓣海桑夹杂分布;在保护区西北角有一片约 30 m × 30 m 木榄人工林,平均高度约为 7 m。老鼠簕则属于小灌木,分布于其他红树植物的下层,与其他红树植物共同组成红树植物群落。由于光学遥感影像识别中只能获取植物冠层特征,故本研究识别的红树群落包括秋茄群落、白骨壤群落、

桐花树群落、木榄群落和无瓣海桑群落 5 种优势群落。实地调查中,对每种红树群落选择不少于 40 个采样点,利用差分 GPS (RTKS86,定位精度达到 cm 级)记录采样点的经纬度,用于后续遥感分类的训练样本和验证样本。

2 遥感数据与研究方法

2.1 遥感数据源

本研究采用 WorldView-2 影像,含有分辨率为 1.85 m 的 8 个多光谱波段,包括:蓝色波段、绿色波段、红色波段、近红外线波段、黄色波段、红色边缘波段和近红外 2 波段,以及分辨率为 0.46 m 的全色波段,成像时间是 2015 年 4 月 14 日,研究区上空云量为 0,满足本研究对遥感影像要求。

2.2 导数光谱法

导数光谱法 (derivative reflectance, DR) 也称光谱微分技术,是近年来用于分析高光谱遥感信息较为常用的一种技术,已广泛应用于很多研究领域,如植被研究和水质参数提取等。导数光谱的计算方法是用数学函数对光谱曲线进行微分从而估算整个光谱曲线的斜率。已有相关研究表明,对光谱进行低阶微分处理能够降低噪声对光谱的影响,例如减弱大气散射和吸收对目标光谱特征的影响,从而能更容易提取光谱中有用的信息^[18]。此外,微分数据还能够提取植物生化成分的信息,包括叶绿素、水以及含氮量等,一些植被指数的计算如黄度指数 (yellowness index) 需要提供其差分光谱信息。由于红树林生态系统中的杂光条件和不确定的背景因素等,差分光谱特征可能会进一步提高红树林森林的群落鉴定和组成^[19]。本研究采用二阶光谱导数特征,表达式如下:

$$FDR(\lambda_i) = \frac{R(\lambda_i + 1) - R(\lambda_i - 1)}{2\Delta\lambda}$$

$$SDR(\lambda_i) = \frac{FDR(\lambda_i + 1) - FDR(\lambda_i - 1)}{2\Delta\lambda}$$

式中, $FDR(\lambda_i)$ 为波长为 λ_i 的一阶微分光谱, $SDR(\lambda_i)$ 为波长为 λ_i 的二阶微分光谱, λ_i 为每个波段的波长, $\Delta\lambda$ 为 λ_i 波长到 $\lambda_i + 1$ 的间隔。

2.3 基于面向对象的支持向量机分类方法

基于高分辨率的遥感影像的特点产生了基于面向对象的图像分类方法技术,是一种智能化的影像分析方法。面向对象的分类方法既利用了影像的光谱特征,也利用了对象的空间特征;其针对影像的局部异质性,考虑到了像元与邻近像元间的相互关

系,较好地利用高分辨率影像的纹理信息,相应地减少同物异谱和异物同谱的现象,即面向对象的方法有助于提高影像信息的提取精度,广泛应用于高分辨率影像中^[20]。

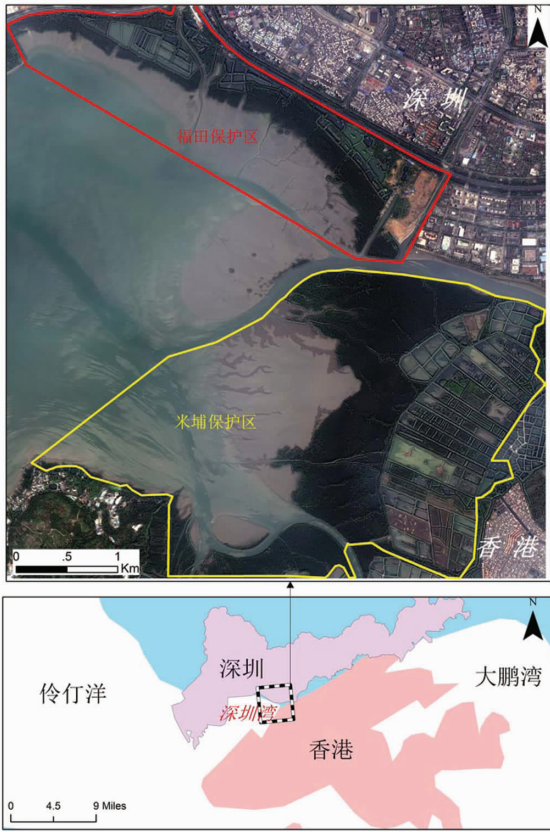


图1 福田保护区和米埔保护区的地理位置

Fig. 1 Location of Futian Reserve and Maipo Reserve

支持向量机 (support vector machine, SVM) 方法是建立在统计学理论的 VC 维 (vapnik-cheronenkis dimension) 理论和结构风险最小原理基础上的一种新的人工智能算法。它的最大特色在于可以根据有限的样本信息在模型的训练能力和复杂性之间找到最佳的方案,使此模型具有最好的推广性。支持向量机方法克服了其他方法中存在的小样本、非线性、过学习、高维度等问题,具有很强的泛化能力^[21]。由于红树林湿地环境恶劣,仅能采集相对较少的红树林群落样本,支持向量机的分类方法能基于较少的训练样本而较准确的分类结果。

2.4 景观指数分析

景观指数是定量地描述景观空间格局最常用的方法,能够提取大量的研究区信息并将其以数据的形式表示。

景观分析指数中的斑块类型水平指数主要统计

单个斑块的个数、面积、形状、边界特征等基础指标。计算各种斑块类型的景观指数的研究意义在于统计同一类型的斑块的特征指数以及反映不同类型斑块间的关系。本研究选取了斑块类型水平上的4个指数:斑块类型面积 (CA)、景观百分比 (PLAND)、最大斑块指数 (LPI) 以及斑块平均面积 (MPS)^[22]。

景观水平的景观指数是基于数理统计学的方法,综合统计了景观中所有斑块类型的研究数据,能够反映出景观的总体结构。基于自然演替和人类干扰的对比分析,本研究在景观水平上选取了具有代表性的4个景观异质性指数:包括蔓延度 (CONTAG)、香农多样性指数 (SHDI)、香农均匀度指数 (SHEI)、破碎度 (LFI) 以及景观形状指数 (LSI)^[22]。

采用景观格局分析软件 Fragstats4.0 来计算上述相关的景观指数。

2.5 红树林群落分类过程

数据预处理和光谱求导是在 ENVI 5.1 软件中进行,预处理的过程是对 WorldView-2 数据采用 ENVI 通用辐射定标工具,将影像的数字量化值 (DN) 转化为辐射率;然后用 FLAASH 大气校正模块中的 MODTRAN5 辐射传输模型,排除大气气溶胶、地形和邻近地物对影像多光谱信息的影响;采用12个地理控制点对影像进行几何精校正,并根据保护区提供的资料,利用 ROI 工具描绘出红树林区域,得到红树林区域的8波段原始影像。光谱求导是将原始8波段影像导入 ENVI5.1 的插件: Image Derivative 中,生成8个二阶导数光谱波段。

对5种红树群落的实地采样点数据分别进行原始影像和二阶导数光谱影像的光谱特征分析 (图2)。纵轴是各种红树植物群落在各多光谱波段上对应的像元均值,横轴是遥感影像的波段号。结果显示,红树植物群落的光谱走向趋势一致而且差异较小 (图2(a)), 但通过光谱求导后在4~6波段的光谱差异较大,可分性较强 (图2(b)), 提高了区分不同红树群落的敏感性。

将福田保护区的原始影像和导数光谱影像导入 eCognition Developer 64 8.7 软件中进行红树林群落分类。由于红树林群落水平上分类的尺度较小,以及不同红树林种类之间的光谱差异较小,综合考虑红树林群落分布,并通过多次交互式分割实验,确定本研究最优空间尺度及分割参数为: Scale = 10, Color = 0.9, Shape = 0.1, Compactness = 0.5, Smoothness = 0.5。然后将野外调查的实地采样点的

一部分导入软件中, 训练出 SVM 分类规则, 再将此规则应用于福田保护区影像得到分类结果, 最后用另一部分实地采样点对分类结果进行验证, 本研究分类流程如图 2 所示。精度达到要求后 (表 1), 将此分类规则再应用于米埔保护区, 得到最终两个保护区红树植物的空间分布格局 (图 3)。

3 结果与讨论

3.1 红树林群落的分类

本研究所用的 WorldView - 2 高分辨率数据, 以及采用的导数光谱法结合基于面向对象的支持向量机的分类方法所得分类结果精度较高, 得到了两个保护区的红树群落分布图 (图 4), 便于后续景观格局的对比分析。从图中可以看出, 红树群落基本呈条带状分布, 从靠岸到沿海大致是木榄 - 秋茄 - 白骨壤 - 桐花树和无瓣海桑。如红树群落分类误差混淆矩阵所示 (表 1): 白骨壤, 无瓣海桑以及木榄的分类精度很高, 是由于白骨壤的树叶叶片腹面绿色, 叶背披灰色柔毛, 群落远观呈灰绿色, 与其他红树群落光谱特征差异较大而容易区分; 无瓣海桑叶片较小且比较稀疏, 与其他红树植物形状差异较大而容易区分; 木榄群落由于大多是人工林, 植株形态差异不大, 数量较少且分布集中, 比较容易提取。秋茄和桐花树皆叶色深绿、叶片大小也相近, 光谱特征与形状特征差异较小, 并且存在夹杂分布的现象, 故秋茄和桐花树群落之间容易产生错分的现象, 所以分类精度相对较低。

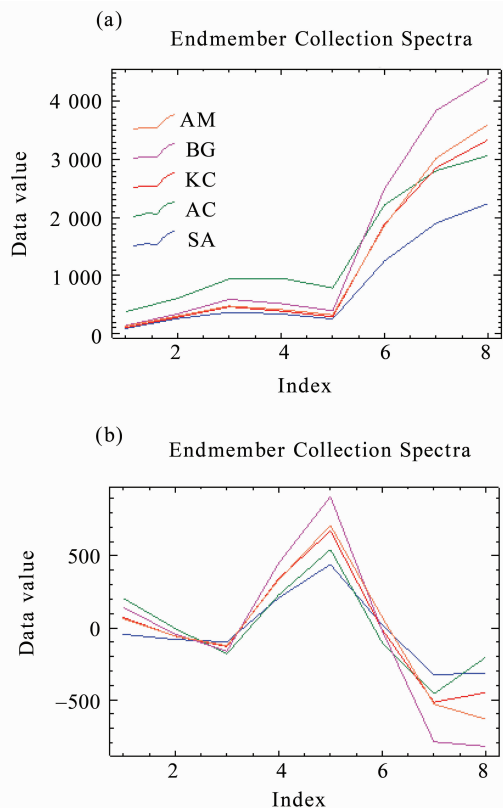


图 2 红树群落的原始影像光谱特征 (a) 以及二阶导数光谱特征 (b)

Fig. 2 The original image spectral characteristics (a) and the 2nd - DR characteristics (b) of mangrove communities (AM 为白骨壤; BG 为木榄; KC 为秋茄; AC 为桐花树; SA 为无瓣海桑)

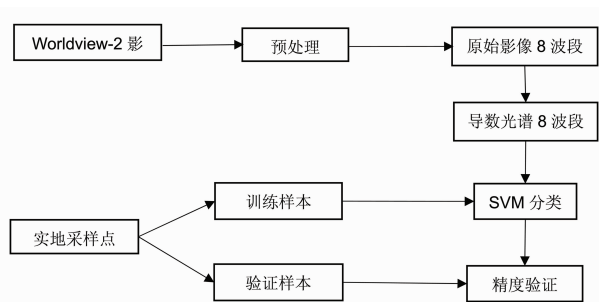


图 3 分类流程图

Fig. 3 Flowchart of the method used



图 4 深圳湾湿地红树群落空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of mangrove communities at Shen Zhen Bay Wetland

表 1 红树林群落分类误差混淆矩阵¹⁾

Table 1 Confusion matrix of mangrove community classification

红树林群落	秋茄	白骨壤	无瓣海桑	木榄	桐花树 - 老鼠簕	制图精度/%
秋茄	76.92	0.00	0.00	0.00	23.08	76.92
白骨壤	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
无瓣海桑	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
木榄	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	100.00
桐花树 - 老鼠簕	2.78	0.00	0.00	0.00	97.22	97.22

1) 总体精度为 0.902; Kappa 系数为 0.859

表 2 两个保护区斑块类型指数¹⁾

Table 2 The indexes of patch types in two reserves

斑块类型	斑块类型面积/hm ²	景观百分比/%	最大斑块指数/%	斑块平均面积/hm ²
秋茄 - F	51.184 3	5.678 3	3.225 6	9.101 05
秋茄 - M	223.061 1	17.281	3.736 4	12.572 49
白骨壤 - F	12.031 8	1.334 8	0.059 7	1.186 8
白骨壤 - M	80.708 5	6.252 6	0.249 4	1.889 82
桐花树 - F	17.179 3	1.905 8	0.071 7	1.533 73
桐花树 - M	33.914 8	2.627 4	0.230 2	1.062 36
无瓣海桑 - F	3.753 3	0.416 4	0.034 1	0.830 19
无瓣海桑 - M	5.540 8	0.429 3	0.010 5	0.578 55
木榄 - F	1.130 4	0.125 4	0.019 5	2.545 95
木榄 - M	2.419 7	0.187 5	0.010 1	1.770 08

1) F 表示福田保护区; M 表示米埔保护区

表 3 两个保护区景观水平指数

Table 3 The indexes of landscape level at two reserves

区域	蔓延度指数 (CONTAG)	香农多样性指数 (SHDI)	香农均匀度指数 (SHEI)	景观破碎度指数 (LFI)	景观形状指数 (LSI)
福田保护区	51.342 5	1.100 2	0.683 6	358.741 6	35.481 1
米埔保护区	57.395 4	0.951 1	0.590 9	298.604 1	111.584 5

3.2 福田与米埔保护区红树林景观格局的比较

基于 worldview - 2 高分遥感数据对深圳福田保护区和香港米埔保护区的红树林群落进行遥感分类, 分类精度达到要求, 从而运用斑块类型面积 (CA)、景观百分比 (PLAND)、最大斑块指数 (LPI) 斑块平均面积 (MPS)、蔓延度 (CONTAG)、香农多样性指数 (SHDI)、香农均匀度指数 (SHEI)、破碎度 (LFI)、景观形状指数 (LSI), 共 8 个景观指数对两个保护区的红树林群落进行对比分析。

斑块类型水平分析结果见表 2。米埔保护区红树林总面积约为 346 hm² 而福田保护区红树林总面积约 89 hm²; 秋茄群落在福田保护区和米埔保护区中占绝对的优势地位, 是两个保护区的优势景观; 白骨壤和桐花树群落次之, 无瓣海桑群落和木

榄群落分布则较少, 这与野外调查的结果基本一致。福田保护区中秋茄群落和白骨壤群落的破碎程度比米埔保护区大, 这可能因为福田保护区受人类活动影响比较严重, 且本地种秋茄群落和白骨壤群落没有完全地恢复自然演替的状态; 而福田保护区中无瓣海桑群落和木榄群落的破碎程度比米埔保护区小, 这是由于无瓣海桑群落和木榄群落在福田保护区中是属于人工林, 分布比较集中, 故破碎化程度较小。

景观水平分析结果见表 3。福田保护区的蔓延度指数较低, 表明保护区的景观由较多小斑块组成; 香农多样性指数较高, 说明福田保护区红树林景观复杂化程度高; 香农均匀度指数较低, 则说明保护区不同红树林群落的均匀程度较低, 各景观斑块之间的差异较大, 综合这 3 个指标间接说明了福田

保护区红树林的景观破碎化程度比米埔保护区高。对比两地的景观破碎度指数,进一步论证了上述结论。而福田保护区景观形状指数远远小于米埔保护区,在一定程度上是由于福田保护区红树林受到人工造林的影响,其景观斑块形状呈正方形分布的状态,而处于米埔保护区的自然演替的红树林则呈现不规则的分布状态。

通过上述景观格局的定量分析发现,福田红树林总面积远小于米埔红树林,很容易受到外界因素的影响,不利于红树林生态系统的稳定。福田保护区近年人工种植的木榄和无瓣海桑群落,在一定程度上降低了红树林的破碎化程度,尤其表现在人为的控制使福田红树林形状规则,近正方形。而实际上在森林景观中,天然林受人类干预较小而形状复杂。分析结果表明福田红树林湿地生态系统处于不稳定的状态,与米埔保护区的天然红树林群落仍有一定的差异。

4 结 论

本研究以 WorldView-2 高分辨率影像为数据源,采用导数光谱法结合基于面向对象的支持向量的分类方法,得到深圳湾湿地红树群落空间分布图,总体精度达到 0.902, Kappa 系数为 0.859。通过分类结果以及景观格局的定量分析发现,米埔保护区红树林总面积约为 346 hm^2 远大于福田保护区红树林总面积约 89 hm^2 ; 秋茄群落是深圳湾湿地的优势景观类型,白骨壤群落和桐花树群落次之;福田保护区红树林的景观破碎化程度比米埔保护区高,尤其是本地种秋茄群落和白骨壤群落的破碎化程度较高;福田保护区景观斑块形状呈正方形分布的状态,而处于米埔保护区的天然红树林则呈现不规则的分布状态。

通过上述结果和分析,可以看出过去人为干扰如滥砍滥伐和围垦填海等对福田红树林生态系统造成了严重影响,以至于福田自然保护区虽然经过了约 30 年的保护和人工恢复,其破碎化程度仍比米埔红树林高,即并没有恢复到自然演替的状态。而人工林种植可以在一定程度上降低红树林整体景观的异质性和非连续性,从而降低斑块的破碎化程度。因此,应加大对福田红树林的保护力度,可通过人工种植的方式扩大福田红树林的面积,同时参考并学习米埔自然保护区的模式,如“禁止进入”从而减少人类活动的干扰。同时,加强研究,如对福田红树林进行长时间的监测,以获得红树林景观演替的内部机制和规律,解释其生态演变过程,最

终使福田保护区的红树林向天然林的方向良性演替。研究结果也表明,3S 技术与景观格局的分析可以帮助我们更好地了解红树林湿地生态系统的分布格局以及量化指标,为红树林湿地的保护和生态系统的恢复提供理论依据和科学指导。

参考文献:

- [1] 林鹏. 中国红树林研究进展[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2001, 40(2): 592-603.
LIN Peng. A review on the mangrove research in China [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2001, 40(2): 592-603.
- [2] KUENZER C, BLUEMEL A, GEBHARDT S, et al. Remote sensing of mangrove ecosystems; A review [J]. Remote Sensing, 2011, 3: 878-928.
- [3] 刘莉娜, 陈里娥, 韦萍萍, 等. 深圳福田红树林自然保护区的生态问题及修复对策研究[J]. 海洋技术, 2013, 32(2): 125-132.
LIU Lina, CHEN Lie, WEI Pingping, et al. Ecological problems and rehabilitation countermeasures of Futian Mangrove Nature Reserve in Shenzhen [J]. Ocean Technology, 2013, 32(2): 125-132.
- [4] 陈保瑜, 宋悦, 咎启杰, 等. 深圳湾近 30 年主要景观类型之演变[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2012, 51(5): 86-92.
CHEN Baoyu, SONG Yue, ZAN Qijie, et al. Dynamics of the main landscape types at Shenzhen Bay during past three decades [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2012, 51(5): 86-92.
- [5] REN Hai, WU Xiaoming, NING Tianzhu, et al. Wetland changes and mangrove restoration planning in Shenzhen Bay, Southern China [J]. Landscape Ecology Engineering, 2011, 7: 241-250.
- [6] 李怡婉. 香港米埔自然保护区保护与发展经验借鉴[C]. 城市规划和科学发展—2009 中国城市规划年会论文集, 2009: 3804-3809.
- [7] 苏岫, 赵冬至, 黄凤荣, 等. 基于高空间分辨率的红树林卫星遥感监测技术进展[J]. 海洋遥感, 2011, 30(3): 38-45.
SU Xiu, ZHAO Dongzhi, HUANG Fengrong, et al. Development of mangrove monitoring technology using high spatial-resolution satellite images [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2011, 30(3): 38-45.
- [8] GIRI S, MUKHOPADHYAY A, HAZRA S, et al. A study on abundance and distribution of mangrove species in Indian Sundarban using remote sensing technique [J]. Journal of Coastal Conservation, 2014, 18: 359-367.
- [9] 孙永光, 赵冬至, 郭永文, 等. 红树林生态系统遥感监测研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4523-

4538.
SUN Yongguang, ZHAO Dongzhi, GUO Wenyong, et al. A review on the application of remote sensing in mangrove ecosystem monitoring[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(15):4523-4538.
- [10] 朱耀军, 郭菊兰, 武高洁, 等. 高分辨率卫星遥感在红树林资源监测中的应用[J]. *世界林业研究*, 2012, 25(4):39-44.
ZHU Yaojun, GUO Julan, WU Gaojie, et al. Application of high resolution satellite remote sensing to mangrove resources monitoring[J]. *World Forestry Research*, 2012, 25(4):39-44.
- [11] MUDITHA K. HEENKENDA, KAREN E, et al. Mangrove species identification: Comparing Worldview-2 with aerial photographs[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6:6064-6088.
- [12] JIA Mingming, ZHANG Yuanzhi, WANG Zongming, et al. Mapping the distribution of mangrove species in the Core Zone of Maipo Marshes Nature Reserve, Hong Kong, using hyperspectral data and high-resolution data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 33:226-23.
- [13] MATTHEW J. McCARTHY, ELIZABETH J, et al. Improved coastal wetland mapping using very-high 2-meter spatial resolution imagery[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 40:11-18.
- [14] 唐焕丽, 刘凯, 朱远辉, 等. 基于 WorldView-2 数据和支持向量机的红树林群落分类研究[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2015, 54(4):102-111.
TANG Huanli, LIU Kai, ZHU Yuanhui, et al. Application of high resolution satellite remote sensing to mangrove resources monitoring[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2015, 54(4):102-111.
- [15] 肖笃宁, 李秀珍, 高峻, 等. 景观生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [16] 廖宝文. 深圳湾红树林恢复技术的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2003.
LIAO Baowen. Techniques for rehabilitation of mangroves in Shenzhen Bay, China[D]. Beijing: Chinese Academy of Forest, 2003.
- [17] 王伯荪, 廖宝文, 咎启杰, 等. 深圳湾红树林生态系统及其持续发展[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [18] 邱琳, 林辉, 臧卓, 等. 基于均值置信区间的湿地植被高光谱特征波段选择[J]. *中南林业科技大学学报*, 2013, 33(1):41-45.
QIU Lin, LIN Hui, ZANG Zhuo, et al. Hyper-spectral characteristic band selection for wetland vegetation based on mean confidence interval[J]. *Journal of Central South Forestry University*, 2013, 33(1):41-45.
- [19] WANG Ting, ZHANG Hongsheng, LIN Hui, et al. Textural-spectral feature-based species classification of mangroves in Maipo Nature Reserve from worldview-3 imagery[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(1):24.
- [20] 莫利江, 曹宇, 胡远满, 等. 面向对象的湿地景观遥感分类—以杭州湾南岸地区为例[J]. *湿地科学*, 2012, 10(2):206-213.
MO Lijiang, CAO Yu, HU Yuanman, et al. Object-oriented classification for satellite remote sensing of wetlands: A case study in southern Hangzhou Bay Area[J]. *Wetland Science*, 2012, 10(2):206-213.
- [21] 王小明, 毛梦祺, 张昌景, 等. 基于支持向量机的遥感影像分类比较研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 2013, 36(4):17-23.
WANG Xiaoming, MAO Mengqi, ZHANG Changjing, et al. Comparative study on classification of remote sensing image by support vector machine[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2013, 36(4):17-23.
- [22] 郭烁, 薛达元, 杜世宏. 景观生态空间格局[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009:160-222.