

北部湾龟仙岛红树林生态系统 NPP 数据集 (2018)

陶进¹, 田义超^{1,2*}, 张强¹, 周国清², 韩鑫¹, 张亚丽¹

1. 北部湾大学资源与环境学院, 钦州 535011;

2. 桂林理工大学广西空间信息与测绘重点实验室, 桂林 541004

摘要: 以北部湾龟仙岛及其邻近区域为研究区, 运用 2018 年无人机季节性航拍采集的影像数据, 以及附近气象站点的降水、气温和太阳辐射等数据, 引入了替代的可见光波段差异性植被指数 VDMI, 采用 CASA 模型估算植被净初级生产力, 得到北部湾龟仙岛红树林生态系统 NPP 数据集 (2018)。数据分析结果表明, 不同季节植被 NPP 的空间差异明显, 春-夏、夏-秋、秋-冬 3 个阶段 NPP 季节性增量百分比分别为 203.67%、-39.06%和-75.16%, 在龟仙岛红树林生态系统 NPP 的变化中, 气温对 NPP 的影响比降水因素更加强烈。该数据集内容包括: (1) 2018 年北部湾龟仙岛红树林生态系统研究区景观图 (.jpg); (2) 2018 年北部湾龟仙岛红树林生态系统研究区植被景观类型、VDMI 植被指数、季节尺度和全年植被净初级生产力点数据 (.shp)。该数据集存储为 .jpg 和 .shp 格式, 共由 9 个数据文件组成, 数据量为 15.5 MB (压缩为 1 个文件, 3.11 MB)。

关键词: 无人机; 红树林生态系统; NPP; VDMI; CASA; 龟仙岛; 北部湾

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2020.04.08>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》出版, 可获取:
<https://doi.org/10.3974/geodb.2020.06.21.V1>。

1 前言

红树林作为滨海湿地“蓝碳”的主要类型之一, 生长在热带和亚热带地区的海岸潮间带滩涂上, 具有防风御浪、促淤造陆、净化环境、为候鸟提供中转站和食物、维持生物多样性等生态功能^[1-2]。红树林单位面积碳储量非常高, 是热带地区含碳量最高的生态系统之一^[2-3]。因此, 估算红树林湿地碳储量对评估红树林生态系统在全球碳循环中的作用具有重要的意义^[4-6]。广西北部湾红树林群落是中国红树林湿地生态系统的重要组成部分, 其中钦州龙门群岛红树林是钦州红树林生长最密集的地区之一, 其周围分布有居民区和多个大型工业区, 部分岛屿长期有人类活动, 因此研究全球气候变化和人类活动干扰下的龙门群岛红树林生态系统碳储量及其空间分布特征具有重要的代表性和典型性。

净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 是绿色植物在单位时间和单位面积上

收稿日期: 2020-09-11; 修订日期: 2020-12-02; 出版日期: 2020-12-24

基金项目: 广西自然科学基金 (2018JJA150135); 广西创新驱动发展专项 (AA18118038); 广西基地和人才项目 (2019AC20088); 北部湾大学 (2019KYQD28)

*通讯作者: 田义超, 北部湾大学资源与环境学院, tianyichao1314@yeah.net

数据引用方式: [1] 陶进, 田义超, 张强等. 北部湾龟仙岛红树林生态系统 NPP 数据集(2018) [J]. 全球变化数据学报, 2020, 4(4): 370-379. <https://doi.org/10.3974/geodp.2020.04.08>.

[2] 陶进, 田义超, 张强等. 北部湾龟仙岛红树林生态系统 NPP 季节数据集(2018) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. <https://doi.org/10.3974/geodb.2020.06.21.V1>.

经光合作用所产生有机质总量中扣除自养呼吸消耗量后的剩余部分^[7]。估算碳储量的变化，取决于净初级生产力的可靠估计^[8]。估算 NPP 的模型主要有统计模型、参数模型和过程模型^[9]，其中光能利用率 CASA（Carnegie Ames Stanford Approach）模型是一种基于过程的遥感模型，在全球和区域尺度生态系统 NPP 估算研究中广泛应用^[7,9-15]。本研究采用了朱文泉改进的 CASA 模型^[7]，以 2018 年四个季节的无人机航拍影像数据和研究区附近气象站点的降水、气温和太阳辐射等共享数据为基础，引入了替代的可见光波段差异性植被指数 VDVI（Visible-Band Difference Vegetation Index）到估算模型参数中，估算了不同季节的北部湾龟仙岛红树林生态系统植被净初级生产力及其空间分布，以期为红树林湿地 NPP 相关研究提供参考。

2 数据集元数据简介

《北部湾龟仙岛红树林生态系统 NPP 季节数据集(2018)》^[16]的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

表 1 《北部湾龟仙岛红树林生态系统 NPP 季节数据集(2018)》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	北部湾龟仙岛红树林生态系统 NPP 季节数据集(2018)
数据集短名	NPP_BeibuGulf Mangrove_2018
作者信息	陶进 AAT-4683-2020, 北部湾大学资源与环境学院, taojin1216@yeah.net 田义超, 北部湾大学资源与环境学院, tianyichao1314@yeah.net 张强 A-6449-2018, 北部湾大学资源与环境学院, 676489898@qq.com 周国清, 桂林理工大学广西空间信息与测绘重点实验室, gzhou@glut.edu.cn 韩鑫, 北部湾大学资源与环境学院, 2383272519@qq.com 张亚丽, 北部湾大学资源与环境学院, 641577425@qq.com
地理区域	北部湾龟仙岛 (21°44'28"N-21°44'58"N, 108°35'24"E-108°35'44"E)
数据年代	2018
数据格式	.jpg、.shp
数据集组成	数据量 15.5 MB (压缩为 3.11 MB) (1) 2018 年北部湾龟仙岛红树林生态系统研究区景观图 (.jpg) (2) 2018 年北部湾龟仙岛红树林生态系统研究区植被景观类型、VDVI 植被指数、季节尺度和全年植被净初级生产力点数据 (.shp)
基金项目	广西自然科学基金 (2018JJA150135); 广西创新驱动发展专项(AA18118038); 广西基地和人才项目 (2019AC20088); 北部湾大学高层次人才引进项目 (2019KYQD28)
数据计算环境	ArcGIS10.2, ENVI5.3
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据(中英文)、通过《全球变化数据仓储电子杂志(中英文)》发表的实体数据和通过《全球变化数据学报(中英文)》发表的数据论文。其共享政策如下:(1)“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放, 用户免费浏览、免费下载;(2)最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源;(3)增值服务用户或以任何形式散发和传播(包括通过计算机服务器)“数据”的用户需要与《全球变化数据学报(中英文)》编辑部签署书面协议, 获得许可;(4)摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则, 即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%, 同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[17]
数据和论文检索系统	DOI, DCI, CSCD, WDS/ISC, GEOSS, China GEOSS, Crossref

3 数据研发方法

本研究采用了朱文泉改进的 CASA 模型^[7],以 2018 年春夏秋冬四个季节无人机季节性航拍采集的研究区 RGB 影像数据和气象共享服务网 (<http://data.cma.cn/>) 提供的研究区附近气象站点的降水、气温以及太阳辐射等共享气象数据为基础,对模型各参数进行了计算,最后借助 CASA 模型^[18]估算了钦州龙门群岛龟仙岛红树林生态系统植被净初级生产力,并根据季节尺度和月尺度进行了相关分析。

3.1 研究区概况

钦州龙门群岛红树林湿地属于被列入中国重要湿地名录的钦州湾红树林湿地四大片区之一,本文选取群岛中的龟仙岛及毗邻的背风墩和周围的红树林湿地群落区域作为研究区,总面积 27.08 km²,岛上建有环岛路、游乐码头、风轮台等旅游设施,并长期伴有人类活动。

研究区影像图和 DEM 如图 1 所示。

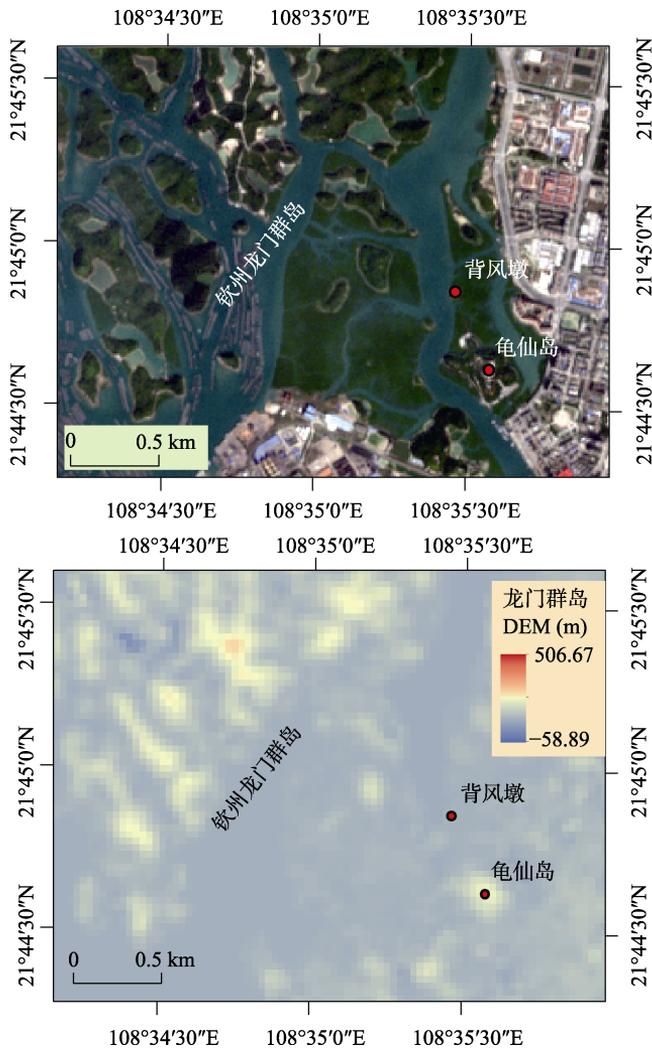


图1 北部湾龟仙岛研究区影像图和 DEM 图

3.2 算法模型

CASA 模型主要由植物的光合有效辐射 (Absorbed Photosynthetic Active Radiation, APAR) 和实际光能利用率 (ε) 两个因子来确定, 其估算公式^[18]如下:

$$NPP(x,t) = APAR(x,t) \times \varepsilon(x,t) \quad (1)$$

式中: $NPP(x,t)$ 为像元 x 上地表植被在 t 月内的净初级生产力 ($t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); $APAR(x,t)$ 为像元 x 上地表植被在 t 月内吸收的光合有效辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$); $\varepsilon(x,t)$ 为像元 x 上地表植被在 t 月内的实际光能利用率 ($\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$)。

植物的光合有效辐射 (APAR) 取决于太阳总辐射量和植被层对入射光合有效辐射的吸收比例, 其中光合有效辐射的吸收比例与植被指数 VDVI 高度相关^[18]。实际光能利用率表示植被把所吸收的光合有效辐射转化为有机碳的效率^[9], 主要受低温和高温胁迫系数、水分胁迫系数和最大光能利用率影响。模型中每个因子的具体算法请详见文献^[18]。

3.3 技术路线

应用光能利用率 CASA 模型估算植被 NPP 过程中, 研究区相关数据的获取与处理和模型参数估计是最核心部分。前期获取的数据包括: (1) 研究区的无人机影像和控制点数据; (2) 研究区 DEM 数据; (3) 研究区降水、气温和太阳辐射等气象数据。数据处理主要包括: 无人机影像数据处理、气象数据处理和模型参数估计。

3.3.1 无人机遥感影像采集与处理

本文采用区域尺度研究龟仙岛红树林湿地 NPP, 基于遥感的估算模型是目前估算区域尺度最有效的途径, 但是不同空间分辨率的遥感数据将带来空间尺度效应。根据《低空数字航空摄影规范》中相对航高公式: $H=f \times \text{GSD}/a$, 式中: H 为相对航高; f 为摄影镜头焦距; GSD , Ground Sample Distance 为地面采样间隔; a 为像元尺寸的大小。因此在固定测区情况下, 采用同型号无人机 (大疆精灵 4Pro) 和同一个规划航线来采集数据, 使采集到的数据拥有几乎相同的 GSD, 从而有效规避基于遥感技术估算模型估算 NPP 时带来的尺度效应。

(1) 航线规划与航摄数据采集

无人机可见光遥感数据的采集通常都是选择空气能见度和光照条件良好、无风或微风的正午前, 因此需要根据测区的位置和地形等条件提前规划好航线。如图 2 所示, 使

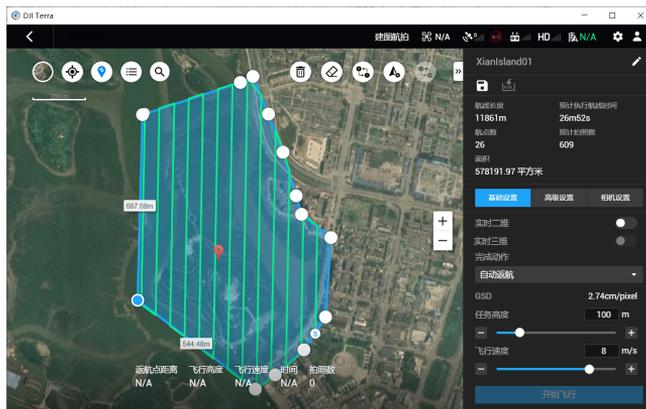


图 2 钦州龟仙岛红树林研究区航线设计图

用大疆智图 Terra 地面站划定了 578,191.97 m² 航测区域, 设置任务高度 100 m, 飞行速度 8 m·s⁻¹, GSD 固定为每个像元 2.74 cm, 旁向重叠率为 64%, 航向重叠率为 80%, 主航线角度为 180°, 相机选择农田白平衡和自动曝光模式。全年中每一次的航拍任务均使用当前已经固定参数的航线进行。

(2) 像控点目标选择与采集

像控点是在影像上能够清楚的辨别出来, 且具有明显特征和地理坐标的地面标识点, 是航拍测绘控制加密和测图的基础。由于本实验采集影像的大疆精灵 4Pro 并不带有 RTK 模块, 因此需要在航带附近布设像控点, 以保证其相对位置的精确性。考虑到龟仙岛是旅游景点且周围红树林密集生长于潮间带的特殊性, 选择后像控点的方式将近于直角形状且近于水平的固定停车场地角、固定道路交叉点明显的标志物作为像控点。如图 3 所示, 采用中纬 Zenith15 Pro RTK 测量所选像控点的准确的地理坐标, 本次实验共采集了 7 个像控点。



图 3 龟仙岛 RTK 实地像控点现场测量照片

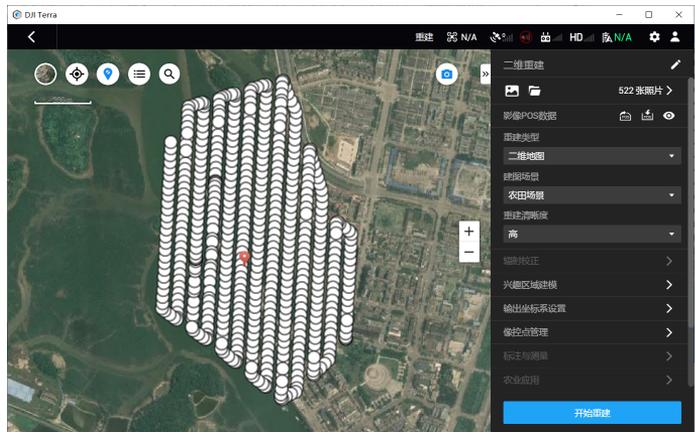


图 4 龟仙岛红树林研究区航拍照片加载图

(3) 像控点导入与刺点处理

使用 Terra 二维重建过程中, 需要先添加照片到工程中, 如图 4 所示。接着导入像控点, 其中 5 个作为控制点, 2 个用来作为检查点。完成导入后, 像控点将显示在空三视图上和像控点列表中, 如图 5 所示。选中任一像控点, 点击照片库中包含此像控点的某张影像, 则空三视图左侧区域将出现刺点视图, 蓝色准星表示所选像控点的预测位置。挪动黄色准星鼠标位置点击进行刺点, 绿色准星为手动标记位置。刺点文件导出: 点击像控点视图上导出像控点按钮将像控点及刺点导出为 json 文件, 用于龟仙岛研究区内包含相同刺点影像的每个航次任务。

(4) 空三解算与优化和二维重建

刺点结束后, 点击按钮进行空三优化解算, 完成后选中任一像控点即可查看空三优化后的重投影误差和三维点误差。若三维点误差较大, 可通过调整刺点, 重新进行空三优化, 直至误差结果满足需求。7 个控制点重投影误差和三维点误差如表 2 所示。

（5）研究区正射影像处理

将得到的龟仙岛研究区可见光正射图成果进行 ROI 裁剪，并保存矢量边界用于其后每

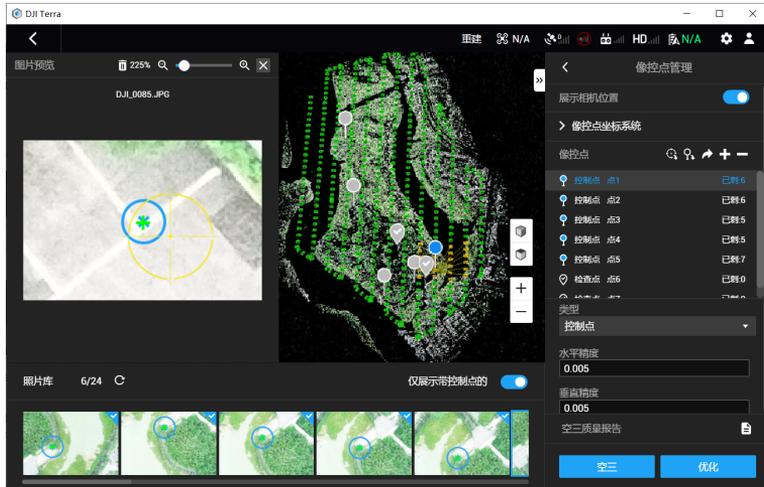


图 5 像控点导入与刺点处理视图

次正射影像裁剪和研究区 DEM 裁剪。利用 ENVI5.3 软件中 CART 方法对裁剪后的数据进行分类解译，通过将非监督分类 ISO data 结果、VDVI 指数、红树林群落的纹理特征和原始正射影像进行波段合成 Layer stacking 组合得到的研究区景观格局图成果。

3.3.2 气象数据处理

将气象站点开放的降水、气温以及太阳辐射等点数据输入到 ArcGIS 软件，利用软件插值工具进行 Kriging 插值处理，得到研究区月降水、月气温以及月太阳辐射气象要素栅格数据，且空间分辨率、投影与 NPP 数据保持一致。

3.3.3 模型参数估计

CASA 模型参数估计主要通过输入前期处理后的无人机影像景观分类数据、VDVI 植被指数栅格数据和降水、气温以及太阳辐射等气象栅格数据和研究区 DEM 数据到模型公式里进行计算，具体技术路线见图 6。

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

该数据集内容包括：（1）2018 年北部湾龟仙岛红树林生态系统研究区中英文版景观图（.jpg）；（2）2018 年北部湾龟仙岛红树林生态系统研究区植被景观类型、VDVI 植被指数、季节尺度和全年植被净初级生产力点数据（.shp）。对应属性表中，字段 FID 是生成属性表

表 2 像控点重投影误差和三维点误差

像控点名称	重投影误差 (px)	三维点误差 (m)
控制点 1	0.156	0.003
控制点 2	0.205	0.011
控制点 3	0.421	0.016
控制点 4	0.304	0.029
控制点 5	0.412	0.009
控制点 6	0.455	0.026
控制点 7	0.297	0.022

过程中自动产生的字段，用来保证要素编号连续性；字段 Shape 表示矢量数据的类型为点类型 Point；字段 VDMI 表示当前点对应的可见光波段差异性植被指数 VDMI 值；字段

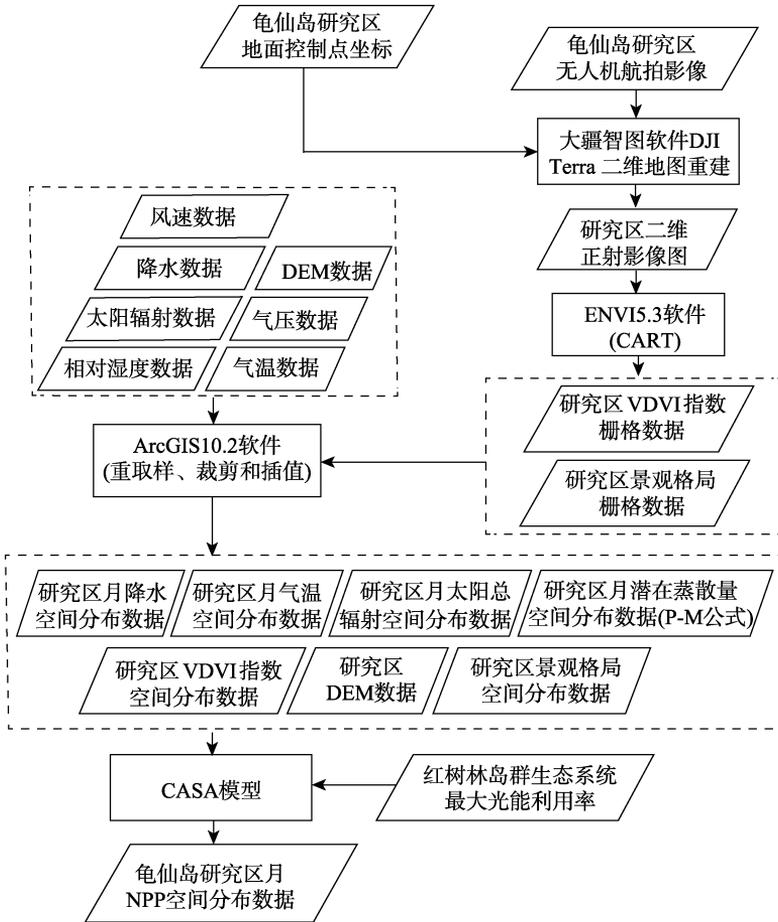


图6 北部湾龟仙岛红树林生态系统 NPP 数据集研发流程技术路线图

NPP_Spring、NPP_Summer、NPP_Autumn、NPP_Winter、NPP_Year 表示当前点春夏秋冬季节尺度和全年植被净初级生产力值；字段 Landscapes 表示当前点所属植被景观类型，其取值为整数，范围为[1,10]，分别对应植被景观类型中的桐花树、白骨壤、秋茄、滩涂、水体、建设用地、道路、草地、灌木和林地。数据集共由 9 个数据文件组成，通过 2 个二级文件夹放置于 NPP_BeibuGulfMangrove_2018 一级文件夹中。

4.2 数据结果

随着北部湾地区夏季太阳辐射增强、气温增高和降水增加，由表 3 可知龟仙岛研究区夏季 NPP 季节总量达到全年最高值 $23,034,806.48 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$ ，相对于春季 NPP 季节总量增加了 203.67%；随着夏季至秋季、秋季至冬季太阳辐射减弱、气温降低和降水减少，秋季和冬季 NPP 季节总量相对各自前一个季节分别减少了 39.06%和 75.16%，冬季 NPP 季节总量达到全年最低值 $3,487,854.52 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

为了更直观的研究 NPP 的季节性变化，将 2018 年春-夏、夏-秋、秋-冬 3 个阶段 NPP

季节性增量进行成图可视化。如图 7 所示，春季至夏季研究区 NPP 增量为正增长，范围为 [0, 527.62]；夏季至秋季研究区 NPP 增量为负增长，范围为 [-443.49, 0]；秋季至冬季研究区 NPP 增量基本为负增长，部分植被伴有微弱正增长（经表格查询为红树林群落），范围为 [-312.04, 19.18]。由图 7 可知，相对于岛墩之上的植被群落，季节性 NPP 变化最为剧烈的区域为龟仙岛和背风墩之间的红树林群落，该群落又被小型潮沟分隔成 3 个子群落。整体上看，岛墩间的红树林群落 NPP 增量变化为西强东弱，推断是由其群落生境决定：西侧是靠海大型潮沟，东侧是靠岸大型潮沟，偏西侧拥有更适宜红树林生长的盐度条件。

表 3 龟仙岛红树林生态系统 2018 年春夏秋冬 NPP 值特征统计表

序号	时间	NPP 季节最小值 ($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	NPP 季节最大值 ($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	NPP 季节平均值 ($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	研究区 NPP 季节 总量 ($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	NPP 季节总量相对 上季增量百分比
1	春季	0	241.05	62.98	7,585,396.78	-
2	夏季	0	647.97	191.26	23,034,806.48	203.67%
3	秋季	0	452.26	116.56	14,038,513.68	-39.06%
4	冬季	0	110.68	28.96	3,487,854.52	-75.16%

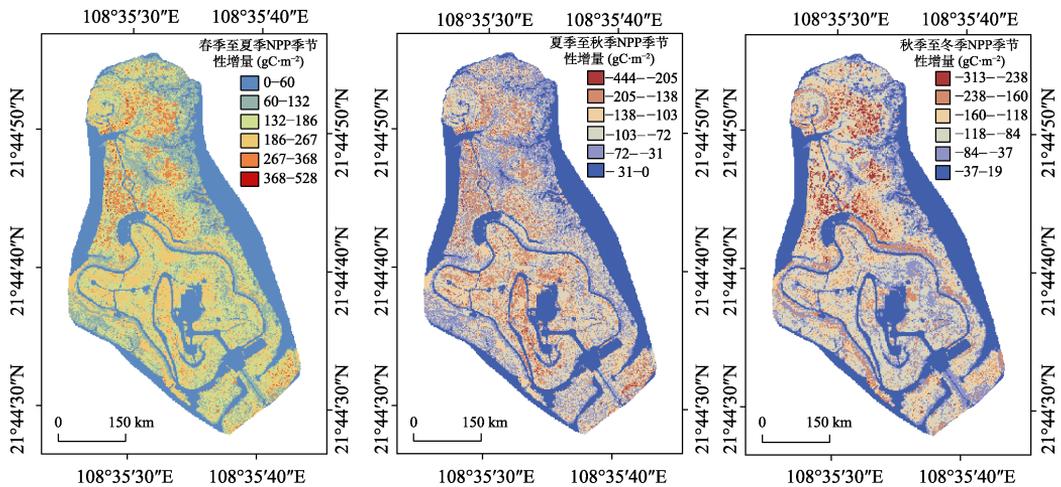


图 7 北部湾龟仙岛红树林生态系统春-夏、夏-秋、和秋-冬 NPP 季节性增量图

植被 NPP 的估算受到植被类型、太阳辐射、气温和降水等因子的影响，为了确定龟仙岛红树林生态系统 NPP 与气温和降水两个影响因子的相关性，统计了研究区 2018 年 12 个月的 NPP、降水和气温数据，如表 4 所示，1 月份是极冷月同时也是降水量最低月，达到全年最低气温 15.47 °C、最低降水量 21.9 mm 和最低 NPP 值 6.83 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$ ；6 月份是极热月，达到全年最高气温 29.34 °C；7 月份是降水量最高月，达到 748.3 mm。

将表 4 数据通过相关分析及回归分析得到 NPP 与气温和降水的相关系数分别为 0.81、0.64，与气温和降水的 P 值分别为 0.001,5、0.026,5，则判定 NPP 与气温呈非常显著正相关关系，NPP 与降水呈一般显著正相关关系，因此在龟仙岛红树林生态系统 NPP 的变化中，气温对 NPP 的影响比降水因素更加强烈。该结论进一步从钦州湾红树林岛群生态系统区域

尺度验证了文献[19–20]中提出的气温是北部湾沿海地区植被 NPP 的主控因子的研究观点。

如图 8 所示, 将 2018 年 1 月 (极冷月和降水最低月)、6 月 (极热月) 和 7 月 (降水最高月) NPP 月值进行了可视化成图, 可见不论在气温最低还是最高月份, 降水最少还是最多月份, 整个龟仙岛红树林生态系统中 NPP 值最高的都出现在岛墩间的红树林区域。

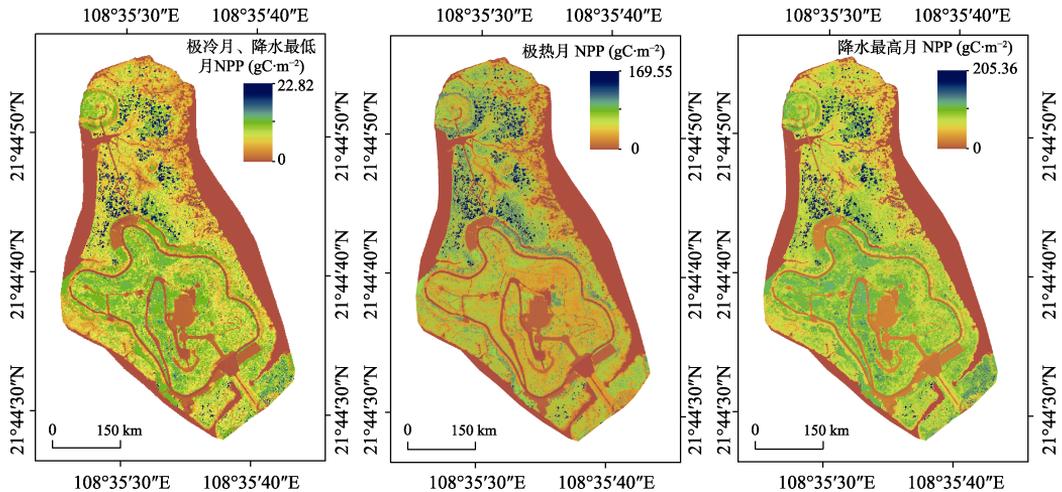


图 8 龟仙岛研究区 2018 年气温极值月和降水极值月 NPP 对比图

5 讨论和总结

本数据集基于无人机遥感 RGB 数据和相关太阳辐射、气温、降水等气象数据, 通过引入了替代植被指数 VDMI 参数到 CASA 模型公式, 估算了红树林群落净初级生产力及其空间分布, 发现 2018 年四个季节研究区内植被 NPP 空间差异明显, 春-夏、夏-秋、秋-冬 3 个阶段 NPP 季节性增量百分比分别为 203.67%、-39.06%和-75.16%。统计了研究区 2018 年 12 个月的 NPP、降水和气温数据, NPP 与气温和降水分别呈非常显著正相关关系、一般显著正相关关系, 得出在龟仙岛红树林生态系统 NPP 的变化中, 气温对 NPP 的影响比降水因素更加强烈。后续研究中将考虑在同区域使用无人机搭载多光谱相机来获取 NDVI 指数信息, 通过对比研究来继续评估 VDMI 替代参数的准确度问题。

作者分工: 陶进、田义超对数据集的开发做了总体设计; 陶进、张强、张亚丽采集和处理了气象站点气温、降水和太阳辐射等气象数据及无人机遥感影像数据; 田义超、周国清设计了模型和算法; 韩鑫做了数据验证; 陶进撰写了数据论文等。

表 4 龟仙岛红树林生态系统 2018 年 NPP、降水和温度数据表

月份	NPP ($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$)	降水 (mm)	气温 ($^{\circ}\text{C}$)
1	6.83	21.9	15.47
2	8.26	27.92	17.82
3	10.54	32.51	20.08
4	18.69	53.06	23.74
5	33.8	148.24	28.29
6	41.32	226.88	29.34
7	64.4	748.3	28.15
8	85.69	211.43	28.67
9	45.04	236.7	27.45
10	39.75	70.36	25.05
11	31.88	272.98	22.59
12	13.89	130.98	15.92

参考文献

- [1] 姜刘志, 杨道运, 梅立永等. 深圳市红树植物群落碳储量的遥感估算研究[J]. 湿地科学, 2015, 13(3): 338–343.
- [2] 彭聪姣, 钱家炜, 郭旭东等. 深圳福田红树林植被碳储量和净初级生产力[J]. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2059–2065.
- [3] 张莉, 郭志华, 李志勇. 红树林湿地碳储量及碳汇研究进展[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 1153–1159.
- [4] Alongi, D. M. Carbon cycling and storage in mangrove forests [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2014, 6(1): 195–219.
- [5] Doughty, C. L., Langley, J. A., Walker, W. S., et al. Mangrove range expansion rapidly increases coastal wetland carbon storage [J]. *Estuaries and Coasts*, 2016, 39(2): 385–396.
- [6] Hua, L., Li, W. Y., Xu, B. Monitoring mangrove forest change in China from 1990 to 2015 using Landsat-derived spectral-temporal variability metrics [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 73(1): 88–98.
- [7] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413–424.
- [8] Bolinder, M. A., Janzen, H. H., Gregorich, E. G., et al. An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, 118: 29–42.
- [9] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 1982–1999 年我国植被净第一性生产力及其时空变化[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001(4): 563–569.
- [10] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力[J]. 植物生态学报, 2001(5): 603–608, 644.
- [11] 张峰, 周广胜, 王玉辉. 基于 CASA 模型的内蒙古典型草原植被净初级生产力动态模拟[J]. 植物生态学报, 2008(4): 786–797.
- [12] 田义超, 黄远林, 张强等. 北部湾南流江流域植被净初级生产力时空分布及其驱动因素[J]. 生态学报, 2019, 21: 8156–8171.
- [13] Schaefer, K., Collatz, G. J., Tans, P., et al. Combined simple Biosphere/Carnegie-Ames-Stanford approach terrestrial carbon cycle model [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: G03034.
- [14] Cao, S., Sanchez-Azofeifa, G. A., Duran, S. M., et al. Estimation of aboveground net primary productivity in secondary tropical dry forests using the Carnegie–Ames–Stanford approach (CASA) model [J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11: 075004.
- [15] Donmez, C., Berberoglu, S., Curran, P. J. Modeling the current and future spatial distribution of NPP in a Mediterranean watershed [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, 13: 336–345.
- [16] 陶进, 田义超, 张强等. 北部湾龟仙岛红树林生态系统 NPP 季节数据集(2018)[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. <https://doi.org/10.3974/geodb.2020.06.21.V1>.
- [17] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策 [OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017 年更新).
- [18] 田义超, 黄远林, 陶进等. 基于无人机影像的北部湾典型岛群红树林生态系统净初级生产力估算[J]. 热带地理, 2019(4): 583–596.
- [19] 田义超, 梁铭忠. 北部湾沿海地区植被覆盖对气温和降水的旬响应特征[J]. 自然资源学报, 2016(3): 488–502.
- [20] 田义超, 黄远林, 张强等. 北部湾南流江流域植被净初级生产力时空分布及其驱动因素[J]. 生态学报, 2019(21): 8156–8171.