

上海市崇明区东滩湿地植被净初级生产力及其时空变化特征

杨瑞妮¹, 韩震^{1,2}, 周恽¹, 翁暄¹

(1.上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2.上海河口海洋测绘工程技术研究中心, 上海 201306)

摘要: [目的] 估算上海市崇明区东滩湿地植被的净初级生产力(net primary production, NPP), 探索小尺度区域湿地植被 NPP 估算方法, 为有效评估湿地生态系统固碳能力提供数据支撑。[方法] 以崇明区东滩湿地作为研究对象, 利用 Sentinel-2B 卫星遥感数据和地面气象数据, 基于 CASA 模型对崇明区东滩湿地 2017—2021 年 NPP 进行了月、季、年尺度上的估算, 并对影响 NPP 时空变化的自然因素做了相关性分析。[结果] ①2017—2021 年崇明区东滩湿地 NPP 均值(以 C 计)分别为 390.22 ± 155.68 , 426.74 ± 102.40 , 575.25 ± 445.51 , 539.29 ± 201.87 和 611.81 ± 464.88 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 总量(以 C 计)分别为 1.56×10^{10} , 1.96×10^{10} , 2.54×10^{10} , 2.70×10^{10} 和 2.94×10^{10} g/a , 增长趋势明显; ②NPP 高值区域不断向海淤积扩展, 芦苇对研究区 NPP 总量的贡献率达 54.73%~70.03%, 其次是互花米草和海三棱藨草; ③月 NPP 均值呈正态分布, NPP 均值随季节变化表现出明显的空间差异, 夏季和秋季 NPP 均值和 NPP 总量有显著提升, 春季和冬季变化不明显。[结论] 月平均温度是影响月 NPP 均值的主要因素。采用高空间分辨率遥感影像获取湿地植被分类结果, 并对估算模型参数本地化, 可以提升估算结果的真实性。

关键词: 净初级生产力; 植被; CASA 模型; 东滩湿地; 上海市崇明区

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2024)03-0136-09

中图分类号: Q948

文献参数: 杨瑞妮, 韩震, 周恽, 等. 上海市崇明区东滩湿地植被净初级生产力及其时空变化特征[J]. 水土保持通报, 2024, 44(3): 136-144. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.03.015; Yang Ruini, Han Zhen, Zhou Yi, et al. Net primary productivity and its spatial-temporal variation of Dongtan wetland at Chongming District, Shanghai City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3): 136-144.

Net Primary Productivity and Its Spatial-temporal Variation of Dongtan Wetland at Chongming District, Shanghai City

Yang Ruini¹, Han Zhen^{1,2}, Zhou Yi¹, Weng Xuan¹

(1.College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2.Shanghai Engineering Research Center of Estuarine and Oceanographic Mapping, Shanghai 201306, China)

Abstract: [Objective] Net primary production (NPP) of vegetation at the Dongtan wetland in Chongming District, Shanghai City was estimated, and methods for NPP estimation in small-scale wetland areas were determined, in order to provide data support for the effective assessment of carbon sequestration capacity in wetland ecosystems. [Methods] The study focused on Dongtan wetland, and used Sentinel-2B satellite remote sensing data and ground-based meteorological data. Monthly, seasonal, and annual-scale NPP estimates were made for 2017—2021 using the CASA model. Correlation analyses were performed to examine natural factors influencing the spatial-temporal variation in NPP. [Results] ① Mean NPP values (calculated by C) for the study area from 2017 to 2021 were 390.22 ± 155.68 , 426.74 ± 102.40 , 575.25 ± 445.51 , 539.29 ± 201.87 and 611.81 ± 464.88 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{yr})$, respectively, with total amounts (calculated by C) of 1.56×10^{10} , 1.96×10^{10} , 2.54×10^{10} , 2.70×10^{10} , and 2.94×10^{10} g/yr , showing a clear increasing trend. ② High NPP areas continuously expanded towards the sea, with *Phragmites australis* accounting for 54.73%—70.03% of

收稿日期: 2023-11-23

修回日期: 2024-01-08

资助项目: 教育部产学合作协同育人项目“海洋遥感数据智能化处理”(202102245031)

第一作者: 杨瑞妮(1995—), 女(汉族), 四川省绵阳市人, 硕士研究生, 主要研究方向为海岸带遥感。Email: 530200340@qq.com。

通信作者: 韩震(1969—), 男(汉族), 山东省德州市人, 博士, 教授, 主要从事海洋信息探测与应用的研究。Email: zhhan@shou.edu.cn。

the total NPP in the study area, followed by *Spartina alterniflora* and *Scirpus mariqueter*. ③ Monthly mean NPP values exhibited a normal distribution, and NPP values showed significant spatial variations with the seasons. Average NPP values and total NPP were notably higher in summer and autumn, with less pronounced changes in spring and winter. [Conclusion] Monthly average temperature was identified as the primary factor influencing monthly mean NPP values. The wetland vegetation classification results was obtained by using high spatial resolution remote sensing images, the authenticity of estimation results could be improved by localizing estimation model parameters.

Keywords: net primary productivity; vegetation; CASA Model; Dongtan wetland; Chongming District, Shanghai City

常用的 NPP 估算方法包括站点实测法和模型估算法等。相比站点实测法,模型估算法能够更快速高效地估算区域植被 NPP^[1]。因为遥感卫星技术具有高时空分辨率、长期监测、多源数据融合等优点,所以遥感影像数据成为了模型估算的重要数据来源^[2]。基于遥感数据的光能利用率模型估算法已经成为主要的研究方法,目前主要的光能利用率模型包括 C-FIX 模型^[3]和 CASA 模型等。CASA 模型的基本原理是将植被生产力与光合作用和养分循环等生态过程相结合^[4]。模型通过考虑光合有效辐射、气温、降水和土壤养分等环境因素,以及植被类型和覆盖度等植被特征,估算湿地植被 NPP 具有很高的准确性^[5]。模拟结果可以用于分析湿地植被的潜在固碳潜力,分析湿地植被 NPP 的时空变化格局,确定湿地植被 NPP 的影响因素。

国内外开展了一些基于 CASA 模型对不同时空尺度上的湿地植被 NPP 研究,如 Aselmann I.等^[6]估算了全球湿地净初级生产力,并在此基础上来估计 CH₄ 排放量;Zhang Cheng 等^[7]利用 CASA 模型研究了 2005—2015 年中国盐沼湿地植被净初级生产力动态变化;王辉等^[8]基于 MODIS 植被指数(NDVI)产品数据反演了 2001—2013 年开孔河流域净初级生产力,并分析了其年际变化特征和季节变化特征;詹长根等^[9]研究了湖北省鄂州市湿地净初级生产力及固碳释氧量估算问题,提出了一种针对中小尺度深水水体和浅水水体湿地 NPP 反演的估算方法。上述研究是将湿地作为一个地物类别,或者根据已有土地利用数据集,通过再分类得到的植被类型来估算以年为单位的 NPP,忽视了研究区域植物的物候特征,导致不同植被类型的光能利用率适用范围出现误差。

本文基于高空间分辨率的遥感影像和光能利用率 CASA 模型,分析了研究区 NDVI 时序变化特征,并对模型参数进行了本地化,研究了 2017—2021 年上海市崇明区东滩典型湿地植被 NPP 在月、季、年尺度上的变化趋势及其影响因素。研究成果为崇明区

世界级生态岛建设,推动小尺度区域滨海湿地 NPP 研究,提升海岸带蓝碳管理提供了科学参考。

1 数据与方法

1.1 研究区域

本文选取的研究区域位于崇明区东滩保护区范围内,崇明区东滩保护区(121°50′—122°05′E, 31°25′—31°38′N)南起奚家港,北至北八滙港,呈仿半椭圆形,属于滩涂地貌。崇明区东滩保护区地处长江三角洲,气候温和湿润,属于亚热带海洋性气候,平均气温为 15℃至 18℃,最高气温为 37.3℃,最低气温为 -10.5℃。冬季温暖湿润,平均气温为 3℃,夏季炎热潮湿,平均气温为 26℃。年降雨量约为 1 000 mm 至 1 200 mm,主要集中在 4—9 月,占全年降雨量的 71%。四季分明的气候条件为保护区内多种多样的湿地植被提供了适宜的生长环境,也为研究保护区内物种多样性的形成和演化提供了条件。崇明区东滩是国际重要湿地,于 1992 年被列入《中国保护湿地名录》^[10],2001 年被正式列入“拉姆萨国际湿地公约”,2005 年被国家林业局批准为国家级鸟类自然保护区^[11]。

20 世纪 90 年代中期,为了护岸固堤,互花米草作为外来物种被引入崇明区东滩湿地,导致物种入侵。经过大规模的生态治理和修复,已经得到有效控制。目前,芦苇、互花米草和海三棱藨草等优势物种成为崇明区东滩湿地生态系统的基础,为各类底栖生物和水鸟提供了栖息觅食的空间。

1.2 研究数据

本研究选用的数据是欧空局 Sentinel-2B 卫星数据,空间分辨率为 10 m。数据可通过网站 <https://scihub.copernicus.eu/> 下载。在数据选取过程中应综合考虑数据的统一性、图像清晰少云、低潮位、具有较为茂盛的植被信息等条件。基于上述考量,选取了时间相近的 2017 年 8 月 2 日,2018 年 8 月 24 日,2019 年 8 月 12 日,2020 年 8 月 16 日和 2021 年 8 月 28 日

Sentinel-2B 遥感影像进行植被分类。利用 Sen2Cor 和 SNAP Desktop 对 Sentinel-2B 影像做大气校正和重采样,用 ENVI 5.3 软件进行波段选择和影像裁剪。

芦苇、海三棱藨草和互花米草为崇明区东滩湿地

的 3 种主要优势群落。通过对 3 种植被的光谱特征和植被指数特征进行了分析,采用监督分类和目视解译的方法对其进行分类(图 1)。结合实地野外调查数据对分类结果进行分类精度验证,5 期影像的分类总体精度均在 91.3% 以上。

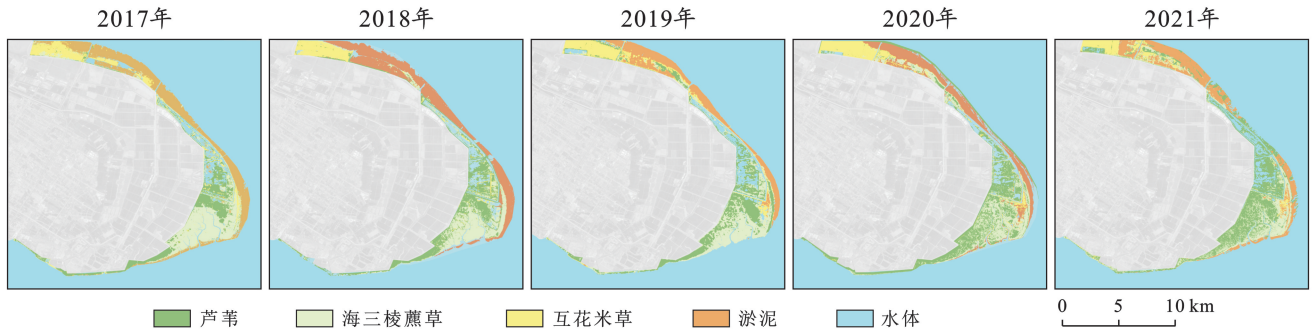


图 1 2017—2021 年崇明区东滩湿地地物分类结果

Fig.1 Classification results of surface objects at Dongtan wetland of Chongming District from 2017 to 2021

月均 NDVI 数据通过 GEE 云计算平台 (<https://code.earthengine.google.com/>) 筛选质量较好的对应月份 sentinel-2B 影像数据集,利用 B8 和 B4 波段计算合成得到 60 景数据,用 NDVI 的变化来代替植被覆盖月变化状况进行定量研究。部分月份数据由于云量较大存在缺失,则利用前后两个月 NDVI 均值进行逐像元时间线性插值。处理好后从 GEE 云计算平台批量下载导出,空间分辨率为 10 m。

气象数据来自上海市崇明区气象站,包括研究区域的月平均气温、月总日照时长、月总降水量等数据。利用 ArcGIS 10.6 软件处理将各个气象数据进行克里金插值、影像裁剪,输出空间分辨率为 10 m 的栅格数据。

1.3 CASA 模型

选用朱文泉等^[12]开发的 CASA 模型计算 NPP, NPP 均以 C 计,主要公式为:

$$FPAR(x, t) = \frac{FPAR(x, t)_{NDVI} + FPAR(x, t)_{SRVI}}{2} \quad (3)$$

$$FPAR(x, t)_{NDVI} = \frac{[NDVI(x, t) - NDVI_{i, \min}] \times (FPAR_{\max} - FPAR_{\min})}{(NDVI_{i, \max} - NDVI_{i, \min})} + FPAR_{\min} \quad (4)$$

$$FPAR(x, t)_{SRVI} = \frac{\{[SRVI(x, t) - SRVI_{i, \min}] \times (FPAR_{\max} - FPAR_{\min})\}}{(SRVI_{i, \max} - SRVI_{i, \min})} + FPAR_{\min} \quad (5)$$

$$SRVI(x, t) = \frac{1 + NDVI(x, t)}{1 - NDVI(x, t)} \quad (6)$$

式中: $FPAR_{\max}$ 取值 0.95, $FPAR_{\min}$ 取值 0.001, $SRVI_{i, \max}$ 和 $SRVI_{i, \min}$ 分别表示某一植被类型 SRVI 的最大值和最小值; $NDVI(x, t)$ 和 $SRVI(x, t)$ 分别表示为位置 x 在 t 月的 NDVI 和 SRVI。

根据文献^[12],海边湿地植被 NDVI 最大值通

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

式中: $NPP(x, t)$ 表示为位置 x 在 t 月的净初级生产力,即生态系统中生物通过光合作用转化的有机物的量 [$g/(m^2 \cdot 月)$]; $APAR(x, t)$ 表示为位置 x 在 t 月的植被吸收光合有效辐射量 [$MJ/(m^2 \cdot 月)$]; $\epsilon(x, t)$ 表示为位置 x 在 t 月的植物实际光能利用率,即生物体吸收的光能中被转化成有机物的比例 (g/MJ)。

$APAR(x, t)$ 计算公式为:

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5 \quad (2)$$

式中: $SOL(x, t)$ 表示为位置 x 在 t 月所接收到的太阳辐射总量 (MJ/m^2); $FPAR(x, t)$ 表示为位置 x 在 t 月的植被有效光合辐射吸收比例 (%); 常数 0.5 表示波长在 $0.38 \sim 0.71 \mu m$ 之间的能被植被利用的太阳辐射量比例,具体计算方法参考文献^[13]。

$FPAR(x, t)$ 与比值植被指数 (SRVI) 以及归一化植被指数 (NDVI) 存在很强的线性关系,计算公式为:

常取值 0.634, 不适用于本研究区域湿地植被类型,且无法对多种植被类型进行区分。因此本研究对 60 景月平均 NDVI 直方图进行数值统计分析,对其进行参数本地化(图 2)。

$\epsilon(x, t)$ 计算公式为:

$$\epsilon(x, t) = T_{e1}(x, t) \times T_{e2}(x, t) \times W_{\epsilon}(x, t) \times \epsilon_{\max} \quad (7)$$

式中: $T_{e1}(x, t)$ 和 $T_{e2}(x, t)$ 为温度胁迫系数, 表示低温和高温对 $\epsilon(x, t)$ 的影响; $W_{\epsilon}(x, t)$ 为水分胁迫系数, 表示水分条件对 $\epsilon(x, t)$ 的影响。 ϵ_{\max} 表示理想条件下的最大光能利用率, 是指某一植被类型不受任何限制的光合有效辐射 (PAR) 利用率, 不同的植物类别具有不同的最大光能利用率 ϵ_{\max} 。 本文根据前人研究进展, 芦苇最大光能利用率取 $1.667 \text{ g/MJ}^{[14]}$; 海三棱藨草最大光能利用率取 $0.517 \text{ g/MJ}^{[15]}$; 互花米草和芦苇同属于禾本科植被, 光合作用效率高, 最大光能利用率也取 1.667 g/MJ 。 研究区 NPP 估算模型本地化参数具体见表 1。

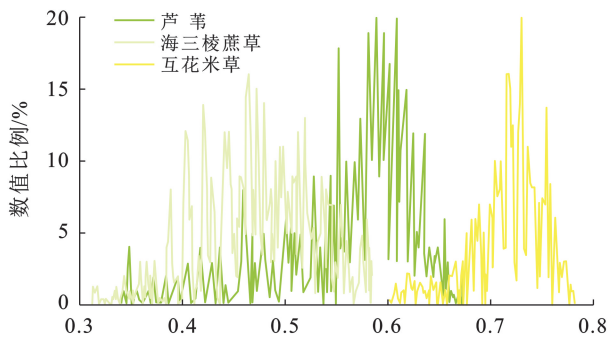


图 2 研究区 3 种典型植被的 NDVI 直方图特征

Fig.2 NDVI histogram characteristics of three typical vegetation types in study area

表 1 研究区植被覆盖类型及 NPP 模型输入参数
Table 1 Vegetation cover types and NPP model input parameters at study area

植被类型	NDVI _{max}	NDVI _{min}	ϵ_{\max}
芦苇	0.67	0.34	1.667
海三棱藨草	0.58	0.31	0.517
互花米草	0.78	0.60	1.667

1.4 NPP 精度验证

通过 2021 年 10 月研究区采集的植物数据, 将生物量转换数据代替 NPP 进行验证, 结果表明本研究估算的结果与实测数据一致性较好, $R^2 = 0.8535$ (图 3)。此外, 还与同类研究结果进行了对比。2017 年 NPP 估算结果与原一荃等^[16]计算的崇明区东滩南部潮沟体系芦苇 $1079.64 \pm 168.34 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 海三棱藨草 $72.12 \pm 53.20 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 互花米草 $585.71 \pm 141.99 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 数据接近; 2019 年 NPP 估算结果与万安娜等^[17]计算的江苏滨海盐沼湿地芦苇 $857.28 \pm 34.28 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 海三棱藨草 $288.5 \pm 3.6 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 互花米草 $1146.47 \pm 22.82 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 数据接近。这证明 CASA 模型可用于本研究区域的 NPP 反演。

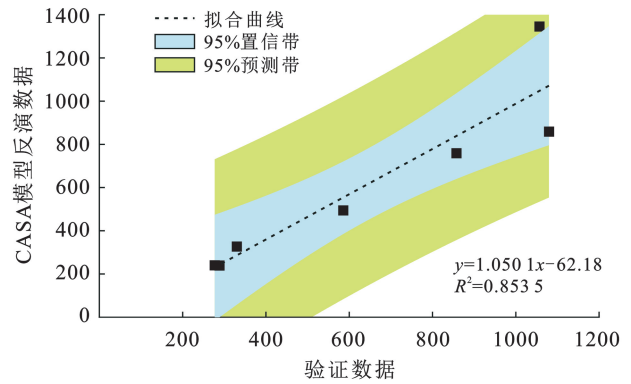


图 3 研究区 NPP 估算值与实测值验证

Fig.3 Validation of vegetation NPP estimates with ground truth data at study area

1.5 NPP 与自然影响因素的相关分析

基于 Pearson 相关性分析方法, 对崇明区东滩湿地 5 a 月平均 NPP 与各影响因子月平均值的相关性关系进行统计分析, 并采用 T 检验判断相关系数的显著性。计算公式为:

$$R_{mn} = \frac{\sum_{i=1}^t [(m_i - \bar{m})(n_i - \bar{n})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^t (m_i - \bar{m})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^t (n_i - \bar{n})^2}} \quad (8)$$

式中: R_{mn} 表示 NPP 和各气候因子的相关系数; m_i 表示第 i 个月的月平均 NPP 值 [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$]; n_i 表示第 i 个月的气候因子的月平均值, 即: 温度 ($^{\circ}\text{C}$), 降水量 (mm) 或辐射量 (MJ); \bar{m}, \bar{n} 分别表示前面两个变量的均值。

2 结果与分析

2.1 2017—2021 年 NPP 的空间变化特征

图 4 为 2017—2021 年崇明区东滩湿地 NPP 均值的空间分布情况, 具有明显的空间异质性。2017—2021 年崇明区东滩湿地植被的 NPP 数值范围在 $50.00 \sim 2147.68 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间, NPP 高值主要集中在崇明区东滩南部盐沼和北八灶靠近堤坝区域, 结合植被分类结果 (图 1) 来看, 对应区域生长着芦苇群落和互花米草群落, 其值通常在 $800 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 以上, 而生长着海三棱藨草群落的区域 NPP 值较低, 通常在 $500 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 以下。NPP 由堤坝向浅海方向随高程降低而减小。

受人类围垦筑堤影响, 崇明区东滩不断向海淤积扩展, 随着时间推移, 潮滩植被也逐渐向外发育演变。2017 年研究区主导优势群落为海三棱藨草, 2021 年芦苇取而代之成为主导优势群落。5 a 间芦苇面积增长了 13.38 km^2 , 海三棱藨草减少了 4.60 km^2 , 互花米草减少了 2.54 km^2 (图 5)。

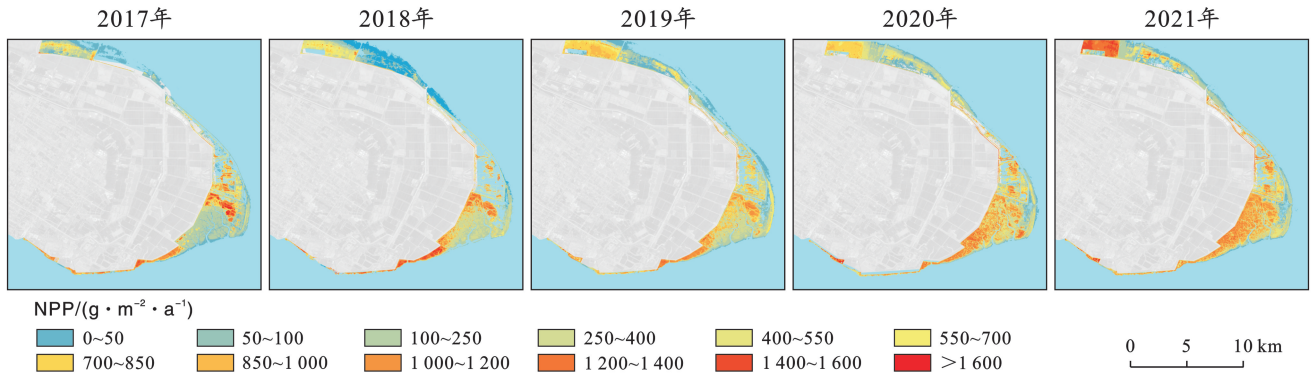


图 4 2017—2021 年崇明区东滩湿地 NPP 的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of annual NPP at Dongtan wetland of Chongming District from 2017 to 2021

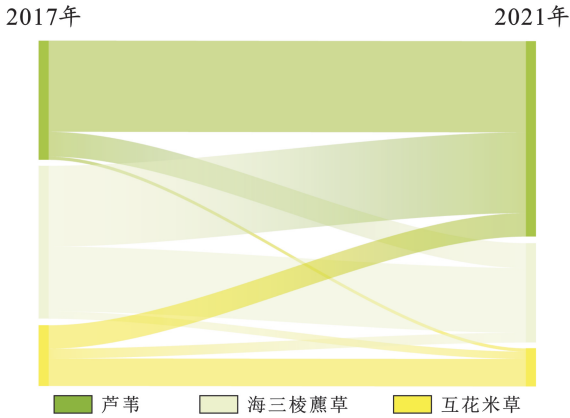


图 5 2017—2021 年崇明区东滩湿地植被类型变化情况
Fig.5 Transformation of vegetation types at Dongtan wetland of Chongming District from 2017 to 2021

2017—2021 年,海三棱藨草和互花米草 NPP 均值表现为上升趋势,芦苇 NPP 均值呈下降趋势。高程

和盐度是影响植被分布的重要因子,由堤坝向海域方向高程递减,形成了天然盐度梯度变化^[18],不同植被生长区域盐度值从大到小分别为互花米草、海三棱藨草和芦苇^[19]。在高程较低的光滩发育,具有高耐盐特性的互花米草和海三棱藨草发育相对稳定,并形成高密度群落。随着泥沙淤积高程增加,芦苇逐步占领光滩生存空间,但是受高程和盐度变化影响较大,并且在生长交错区域,作为外来入侵物种的互花米草在植被高度、盖度方面的优势限制芦苇的生长,导致低潮位高盐度值区域芦苇 NPP 值较小。

芦苇与海三棱藨草 NPP 总量表现为持续上升趋势,2017,2021 年分别增长了 9.13×10^9 g/a 和 2.32×10^9 g/a,互花米草表现为先增长后下降趋势(表 2)。芦苇是全年 NPP 总量的主要贡献者,其比例最高可达 70.03%,其次是互花米草和海三棱藨草。

表 2 2017—2021 年崇明区东滩湿地不同植被类型的 NPP 反演结果

Table 2 NPP retrieval results of different vegetation cover types at Dongtan wetland of Chongming District from 2017 to 2021

覆被类型	NPP 均值/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)					NPP 总量/($\text{g} \cdot \text{a}^{-1}$)				
	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年
芦苇	815.82	774.16	759.36	785.34	749.13	1.09×10^{10}	1.19×10^{10}	1.39×10^{10}	1.55×10^{10}	2.01×10^{10}
海三棱藨草	133.20	224.89	231.17	233.45	269.47	2.32×10^9	3.02×10^9	3.61×10^9	3.34×10^9	3.45×10^9
互花米草	279.48	344.02	870.67	817.54	991.89	2.35×10^9	4.64×10^9	7.89×10^9	8.14×10^9	5.91×10^9

2.2 2017—2021 年 NPP 的时间变化特征

图 6 为 2017—2021 年的崇明区湿地月尺度的 NPP 均值变化趋势。整体来看,NPP 年内变化趋势相同,呈现正弦曲线的变化特征。NPP 在 1—3 月增长缓慢,潮滩植被处于非生长季,只有少量地表微弱光合作用,导致 NPP 数值为全年最低,NPP 均值变化范围在 $10.56 \sim 16.49$ $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$;3 月底至 5 月 NPP 上升趋势显著,芦苇和海三棱藨草在这个阶段开始发芽,湿地植被面积在这一时期急剧增加,导致

NPP 数值增加,NPP 均值变化范围在 $14.20 \sim 111.06$ $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$,波动较大;然后在 6—8 月份温度、水文、日照、营养条件成熟,植被光合作用处于最佳状态,NPP 达到一年的峰值,NPP 均值变化范围在 $75.21 \sim 149.55$ $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$;NPP 在 9 月仍在高位,芦苇和互花米草处于结果阶段;然后 10—12 月研究区植被迅速枯萎,NPP 值显著下降,但是数值仍比 1—2 月稍高一些,NPP 变化范围在 $15.65 \sim 68.76$ $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$ 。

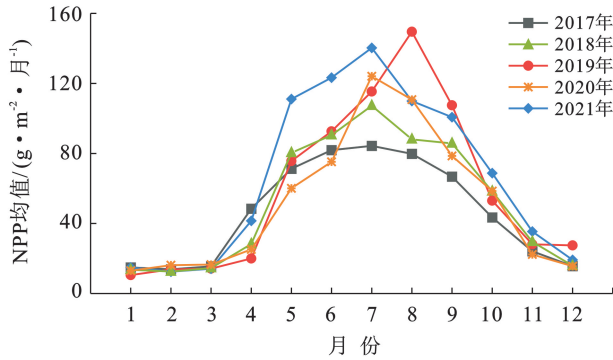


图6 2017—2021年崇明区东滩湿地月NPP值变化情况
Fig.6 Monthly NPP change at Dongtan wetland of Chongming District from 2017 to 2021

不同年份月NPP均值差异显著。2017年月NPP均值要明显低于其他年份数值,随着时间推移,月NPP均值逐渐上升。2017年崇明区湿地主要分布着大面积淤泥,植被覆盖度较低,主要优势群落植被为海三棱藨草,占植被总面积的44.35%,固碳能力相对较弱,因此2017年整体NPP均值要明显低于其他年份。月NPP均值最大值 $149.55\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{月})$ 出现在2019年8月;其他年份月NPP均值最大值均出现在7月。2019年研究区域8月平均温度达到 $31.9\text{ }^\circ\text{C}$,极端最高气温达到 $36.8\text{ }^\circ\text{C}$,太阳辐射量达到 $595.88\text{ MJ}/\text{m}^2$,均高于2021年(平均温度 $30.4\text{ }^\circ\text{C}$,极端最高气温 $36.1\text{ }^\circ\text{C}$,太阳辐射量 $514.64\text{ MJ}/\text{m}^2$),在较短时间内,温度升高对海三棱藨草净光合作用率有持续增长作用^[20],同时对芦苇和互花米草净光合速率有促进作用,这是2019年8月NPP均值高于2021年的原因。

表3 2017—2021年崇明区东滩湿地各季节NPP反演结果

Table 3 NPP retrieval results of different vegetation types in different seasons at Dongtan wetland of Chongming District from 2017 to 2021

季节	NPP均值/ $(\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1})$					NPP总量 $(\text{g}\cdot\text{月}^{-1})$				
	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
春	43.81 ± 28.56	23.80 ± 21.59	30.88 ± 21.83	38.11 ± 19.15	46.50 ± 32.46	1.35×10^9	1.48×10^9	1.88×10^9	1.96×10^9	2.12×10^9
夏	67.08 ± 60.83	95.16 ± 84.18	111.63 ± 84.60	104.50 ± 84.94	107.58 ± 81.19	2.21×10^9	2.92×10^9	3.73×10^9	4.13×10^9	4.43×10^9
秋	33.43 ± 30.56	37.74 ± 27.65	55.81 ± 41.15	57.70 ± 47.93	60.46 ± 44.03	1.34×10^9	1.81×10^9	2.53×10^9	2.52×10^9	2.75×10^9
冬	7.56 ± 3.57	7.80 ± 3.59	12.17 ± 9.06	9.91 ± 5.19	10.90 ± 5.45	2.92×10^7	3.15×10^8	3.43×10^8	3.83×10^8	4.97×10^8

2.3 自然影响因素分析

统计了崇明区东滩湿地月均NPP与各影响因子月均值的相关性关系,结果见图9。

由图9可见,5a的月平均温度与月均NPP之间呈极为显著的正相关关系, $R^2=0.9357(p<0.01)$;月均降水与月均NPP之间呈极为显著的正相关关系, $R^2=0.7111(p<0.05)$;月平均辐射量与月均NPP之间呈显著的正相关关系, $R^2=0.6725(p<0.05)$ 。因

由图7可见2017—2021年5a内NPP的季度变化特征,不同季节NPP具有显著差异。与月尺度NPP趋势相同,冬季NPP总体偏低,NPP变动范围在 $10.00\sim 177.66\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{月})$;春季植被大面积增加,NPP变动范围在 $10.00\sim 547.68\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{月})$;夏季NPP波动范围最大,在 $10.00\sim 1\,045.37\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{月})$,最大值出现在2021年夏季;秋季波动范围在 $10.00\sim 738.45\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{月})$ 。

夏季NPP均值最高,2017年夏季NPP均值为 $67.08\pm 60.83\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{月})$,2019年夏季NPP均值在5a中最高,为 $111.63\pm 84.60\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{月})$,2021年夏季NPP均值为 $107.58\pm 81.19\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{月})$ 。每年夏季的NPP总量占了一年中的 $44.01\%\sim 45.96\%$ 以上,夏季和秋季NPP总量之和占全年的 $72.02\%\sim 73.94\%$ (表3)。整体来看,夏季和秋季的NPP均值和总量增长率极为显著,春季和冬季增长趋势不明显。5a间对应季节NPP增长率从高到低依次为秋季、夏季、冬季和春季。

由图8可见为2017—2021年NPP均值和NPP总量变化情况。5a间研究区域植被覆盖变化较大,光滩逐渐被植被所替代,植被总面积增长了 15.89% 。并且根据植被覆盖类型的变化情况可知,海三棱藨草面积的 27.65% 转化为了芦苇,年NPP均值净增量趋势明显。2017年NPP均值为 $390.22\pm 155.68\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,NPP总量为 $1.56\times 10^{10}\text{ g}/\text{a}$;2021年NPP均值为 $611.81\pm 464.88\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,NPP总量为 $2.94\times 10^{10}\text{ g}/\text{a}$,呈现出快速递增的趋势。

此,各气候因子对NPP的影响:温度>降水量>太阳辐射,NPP主要受温度和降水控制。

3 讨论

本研究结合高空间分辨率遥感影像与CASA模型计算了小尺度区域植被NPP,对CASA模型输入参数本地化,实现了研究区域湿地植被NPP月尺度、季度和年度时空变化分析。

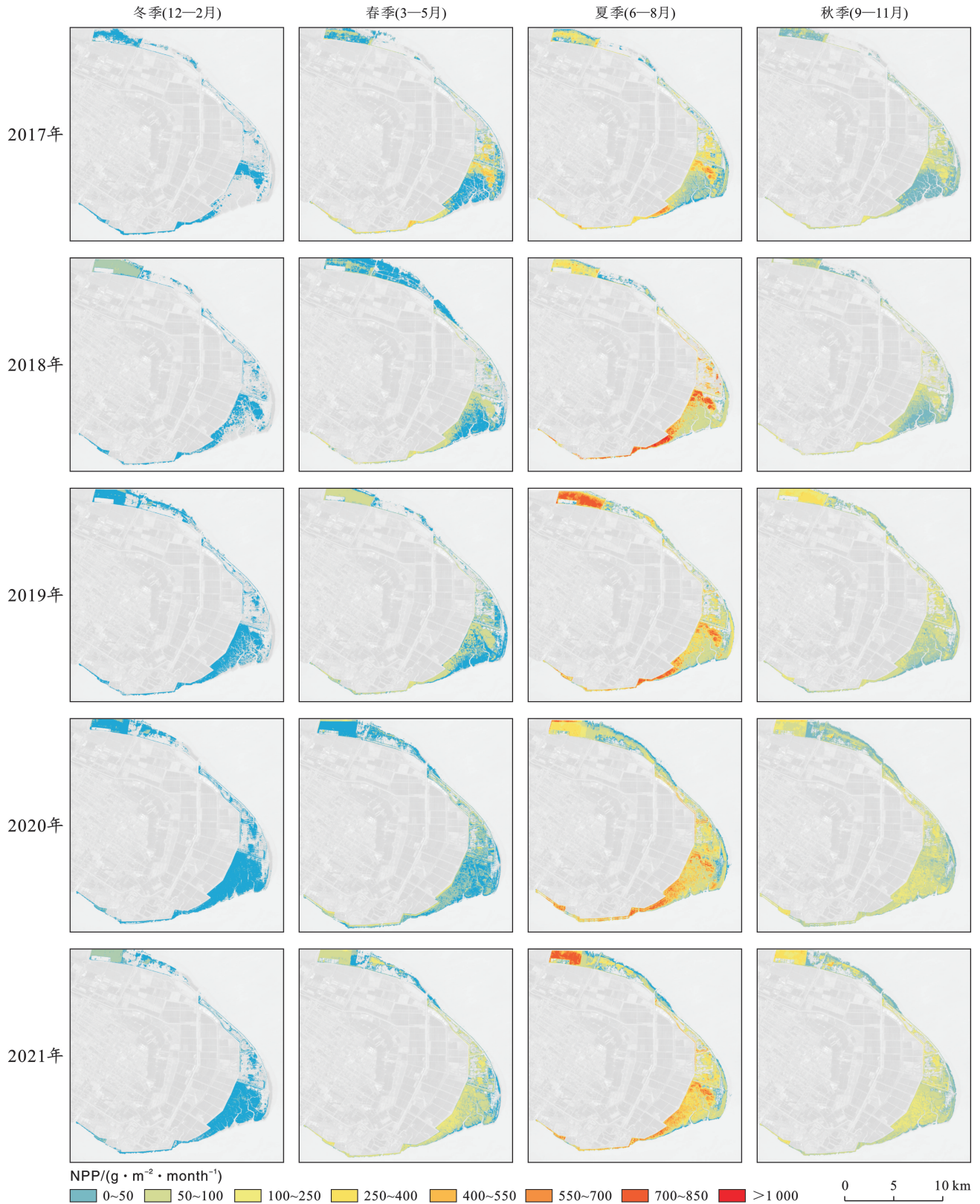


图 7 2017—2021 年崇明区东滩湿地各季节 NPP 空间分布

Fig.7 Spatial distribution of vegetation NPP by season at Dongtan wetland of Chongming District from 2017 to 2021

(1) 利用空间分辨率为 10 m 的 Sentinel-2B 获取得到的植被分类数据以及月平均 NDVI 数据可以有效提高研究区域 NPP 估算的空间分辨率和时间分辨率。

(2) 通过对 CASA 模型中的 NDVI 和最大光能利用参数本地化设置, NPP 计算结果更符合崇明区东滩湿地的实际情况, 能够反映其真实变化过程。

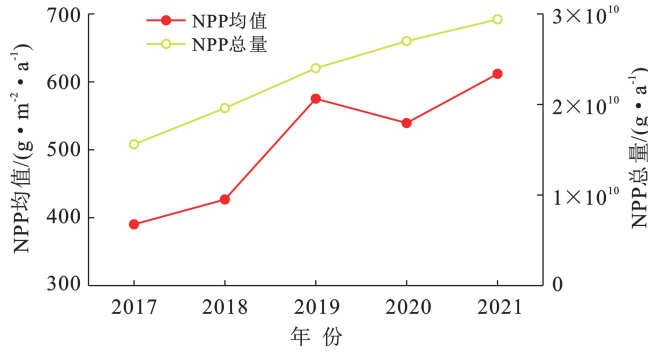


图 8 2017—2021 年研究区 NPP 均值和 NPP 总量变化
Fig.8 Variation characteristic of NPP in study area from 2017 to 2021

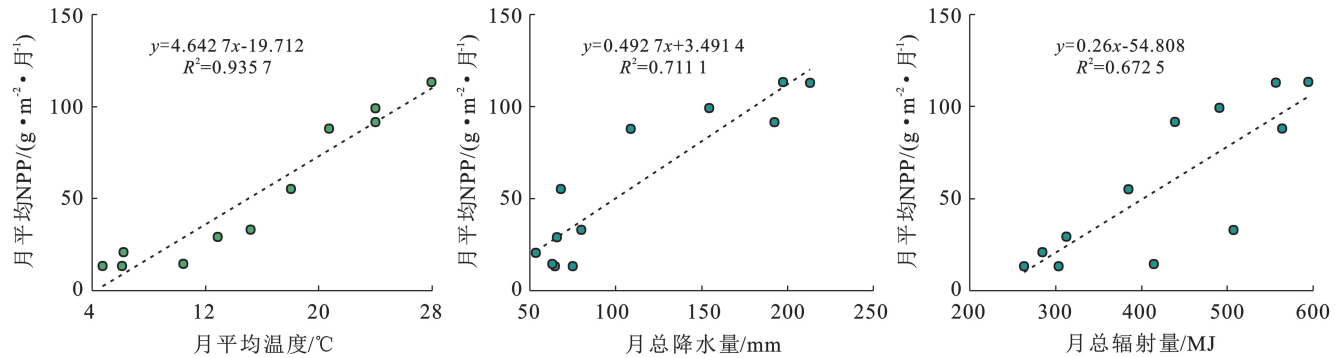


图 9 2017—2021 年研究区月均 NPP 与各影响因子相关关系

Fig.9 Correlation of monthly mean NPP with monthly mean temperature, monthly precipitation and monthly radiation in study area

NPP 季节增长率从大到小依次为秋季、夏季、冬季和春季,秋季和夏季的 NPP 均值和 NPP 总量均有显著性提升,主要增长区域与年 NPP 增长区域相吻合,冬季和春季变化不明显。自然因素对 NPP 的影响从大到小依次为温度、降水量和太阳辐射。

虽然本研究对 NPP 计算结果进行了优化,并取得较好的模拟结果,但仍然存在不足。例如,未考虑植被盖度和高度,潮汐、海浪、海平面高度、筑堤冲淤、土壤盐度变化等影响,实际演变过程更为复杂,会影响 NPP 估算。因此,未来研究将进一步开展复杂环境变化情景下盐沼固碳潜力的变化研究,以更全面地评估湿地生态系统的稳定性和可持续性。

4 结论

(1) 2017 至 2021 年研究区植被面积增加,覆盖区域由堤坝向浅海方向扩张,芦苇取代海三棱藨草成为优势植被群落,芦苇碳汇作为“蓝碳”的主要贡献者,总量比例达到 70.03%,其次是互花米草和海三棱藨草。

(2) 每年 4—10 月是研究区 NPP 的主要累积期,也是 3 种优势植被群落的物候期;夏季植被固碳能力最强,其次是秋季、春季和冬季;2017 至 2021 年

(3) 月尺度、季度和年度时空变化分析,可以更好地反映 NPP 的时间过程信息,有利于对湿地生态系统的动态变化进行更加细致的研究。

研究表明,2017—2021 年崇明区东滩湿地植被 NPP 均值和总量均呈逐年上升趋势,主要由于崇明区东滩湿地的优势群落由海三棱藨草向芦苇转变,尤其是 2017—2019 年增长速率最快,NPP 均值增长了 51.50%,NPP 总量增长了 63.12%。整体来看,NPP 均值从大到小依次为互花米草、芦苇和海三棱藨草,NPP 总量贡献从大到小依次为芦苇、互花米草和海三棱藨草。

研究区的植被碳汇年际变化较大,碳汇呈逐年增加趋势。

(3) 通过研究区多年月均 NPP 与月平均温度、月平均降水量、月平均辐射量相关性分析,发现研究区 NPP 主要受温度控制。

参考文献 (References)

- [1] Cui Jianbo, Li Changsheng, Trettin C. Analyzing the ecosystem carbon and hydrologic characteristics of forested wetland using a biogeochemical process model [J]. *Global Change Biology*, 2005,11(2):278-289.
- [2] Chirici G, Chiesi M, Fibbi L, et al. High spatial resolution modelling of net forest carbon fluxes based on ground and remote sensing data [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022,316:108866.
- [3] Veroustraete F, Sabbe H, Eerens H. Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-Fix model and Euroflux data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002,83(3):376-399.
- [4] Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993,7(4):811-841.
- [5] Sun Jinke, Yue Ying, Niu Haipeng. Evaluation of NPP

- using three models compared with MODIS-NPP data over China [J]. PLoS One, 2021,16(11):e0252149.
- [6] Aselmann I, Crutzen P J. Global distribution of natural freshwater wetlands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality and possible methane emissions [J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 1989, 8(4): 307-358.
- [7] Zhang Cheng, Zhen Haobei, Zhang Shanghong, et al. Dynamic changes in net primary productivity of marsh wetland vegetation in China from 2005 to 2015 [J]. Ecological Indicators, 2023,155:110970.
- [8] 王辉, 刘海隆, 包安明, 等. 2001—2013 年开孔河流域净初级生产力遥感估算及其时空分布特征[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 220-224.
- Wang Hui, Liu Hailong, Bao Anming, et al. Remotely-sensed estimation of net primary productivity and its spatial-temporal characteristics in Kaidu-Kongque River basin from 2001 to 2013 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(5): 220-224.
- [9] 詹长根, 吴金涛. 湖北省鄂州市湿地净初级生产力及固碳释氧量估算[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 321-328.
- Zhan Changgen, Wu Jintao. Estimation of net primary productivity, carbon fixation, and oxygen release in a wetland of Ezhou City, Hubei Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 321-328.
- [10] 郑姚闽, 张海英, 牛振国, 等. 中国国家级湿地自然保护区保护成效初步评估[J]. 科学通报, 2012, 57(4): 207-230.
- Zheng Yaomin, Zhang Haiying, Niu Zhenguo, et al. Preliminary evaluation on the protection effect of China national wetland nature reserve [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(4): 207-230.
- [11] 张群, 李博. 崇明东滩鸟类栖息地优化区海三棱藨草野外恢复实践[J]. 应用生态学报, 2023, 34(10): 2663-2671.
- Zhang Qun, Li Bo. Field practice of *Scirpus mariqueter* restoration in the bird habitats of Chongming Dongtan Wetland, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(10): 2663-2671.
- [12] 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.
- Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Zhang Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing [J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 413-424.
- [13] 童成立, 张文菊, 汤阳, 等. 逐日太阳辐射的模拟计算[J]. 中国农业气象, 2005, 26(3): 165-169.
- Tong Chengli, Zhang Wenju, Tang Yang, et al. Estimation of daily solar radiation in China [J]. Agricultural Meteorology, 2005, 26(3): 165-169.
- [14] 罗玲, 毛德华, 张柏, 等. 芦苇湿地植被 NPP 估算方法探索与应用[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(4): 742-750.
- Luo Ling, Mao Dehua, Zhang Bai, et al. Exploration and application of NPP estimation model for *Phragmites australis* wetlands [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(4): 742-750.
- [15] 梅雪英, 张修峰. 长江口湿地海三棱藨草 (*Scirpus mariqueter*) 的储碳、固碳功能研究: 以崇明东滩为例[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 360-363.
- Mei Xueying, Zhang Xiufeng. Carbon storage and fixation function of *scirpus mariqueter* in Changjiang River estuary: A case study of Chongming Dongtan wetland [J]. Journal of Agro-environment Science, 2007, 26(1): 360-363.
- [16] 原一荃, 薛力铭, 李秀珍. 基于 CASA 模型的长江口崇明东滩湿地植被净初级生产力与固碳潜力[J]. 生态学杂志, 2022, 41(2): 334-342.
- Yuan Yiquan, Xue Liming, Li Xiuzhen. Net primary productivity and carbon sequestration potential of salt marsh vegetation in Chongming Dongtan of the Yangtze estuary based on CASA model [J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(2): 334-342.
- [17] 万安娜, 韩其飞, 李超凡, 等. 江苏滨海盐沼湿地碳动态时空差异及其对气候变化的响应[J/OL]. 生态学杂志, 2023, (2023-09-28). <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20230928.1048.002>
- Wan Anna, Han Qifei, Li Chaofan, et al. Spatial-temporal variation of carbon dynamics and their responses to climate change in Jiangsu coastal salt marshes [J/OL]. Chinese Journal of Ecology, 2023, (2023-09-28). <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20230928.1048.002>
- [18] 詹跃武, 何池全, 孟昭寿, 等. 海三棱藨草盐沼土壤环境因子的时空分布特征[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(6): 765-770.
- Zhan Yuewu, He Chiquan, Meng Zhaoshou, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of *Scirpus mariqueter* in salt soil environmental factors [J]. Marine Environmental Science, 2011, 30(6): 765-770.
- [19] 丁文慧, 姜俊彦, 李秀珍, 等. 崇明东滩南部盐沼植被空间分布及影响因素分析[J]. 植物生态学报, 2015, 39(7): 704-716.
- Ding Wenhui, Jiang Junyan, Li Xiuzhen, et al. Spatial distribution of species and influencing factors across salt marsh in Southern Chongming Dongtan [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(7): 704-716.
- [20] 刘晓彤, 李秀珍, 闫中正, 等. 海三棱藨草对极端高温的生长与生理响应[J]. 生态学杂志, 2020, 39(1): 110-119.
- Liu Xiaotong, Li Xiuzhen, Yan Zhongzheng, et al. Growth and physiological responses of *Scirpus mariqueter* to extremely high temperatures [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(1): 110-119.