

基于CASA模型的常州市森林植被净初级生产力及碳汇估算

周 威^{1,2}, 耿若楠³

(1. 江苏省常州环境监测中心, 江苏 常州 213017; 2. 江苏省环境保护水环境生物监测重点实验室, 江苏 常州 213017;
3. 大地新亚(北京)技术有限公司, 北京 102401)

摘要: 森林植被在碳循环过程中发挥着关键作用,其碳汇分析对于城市生态系统管理有重要意义。基于多种卫星遥感数据、林地分布以及气象资料,结合CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)模型,对2022年常州市森林碳汇进行模拟估算,综合分析其时空变化特征及驱动机制。结果表明:2022年常州市森林年度碳汇量总体达29.94万t,4—8月碳汇量较高;不同类型林地碳汇能力不同,乔木林碳汇能力较强,7月碳汇量最高可达80 gC/m²;气象因素对于森林碳汇具有相关影响,其中温度的影响要高于降水量。

关键词: CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)模型; 森林植被; 净初级生产力; 碳汇

中图分类号: S771.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)11-0202-09

森林植被是陆地生物圈的主体,约有85%的陆地生物量集中在森林植被。森林是陆地生态系统中最大的碳库,单位面积森林存储的碳是农田的20~100倍。因此森林在区域和全球的碳循环中发挥着重要作用,精确估算区域乃至全球尺度的森林碳汇具有十分重要的意义。

森林碳汇估算即测定森林碳的输入量(植被净初级生产力)和碳的输出量(土壤呼吸消耗)主要有样地清查法、微气象学法和遥感模型模拟3种测定方法。其中样地清查法需要大量的野外实地调查,费时费力较难实施,微气象学法需要关键设备进行测定,设备昂贵、测定过程复杂、效率低,而随着遥感技术的飞速发展,高分辨率遥感数据不断新增,为快速高效森林碳汇估算提供了有力支撑。

通过耦合遥感技术获取各种参数信息,如归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、光合有效辐射吸收比例(fraction of photosynthetically active radiation, FPAR)以及从遥感图像中模拟的植被吸收光合有效辐射(assimilated photosynthetically active radiation, APAR)。方精云等^[1]利用多源遥感数据模拟了中国生态系统的年平均碳吸收量,测定1981—2000年中国生态系统年平均吸收量为0.096~0.106 PgC/a。Zhang等^[2]应用CASA(Carnegie-Ames-Stan-

ford Approach)模型估算了中亚地区的净生态系统生产力(net ecosystem productivity, NEP),并评估得出了NEP对气候温度的敏感度高于降水量的结论。Piao等^[3]在对青藏高原NEP模拟中研究得出降水量对于NEP的变化作用大于温度。NEP是区域上估算植被碳源、碳汇的重要指标,尽管在区域尺度上NEP不等于碳汇,但常常作为碳汇大小的量度。

常州市作为华东地区重要的经济发展城市,对于推动森林生态环境保护和实现高质量发展、实现国家“双碳(碳达峰和碳中和)”战略目标具有重要作用。本文综合利用多种时空分辨率卫星遥感数据、土地覆盖和林地分布数据以及气象再分析资料,以目前较为成熟的CASA模型为基础,完成以下研究内容:①估算2022年常州市森林碳汇并分析森林碳汇时空变化特征;②分析森林碳汇与温度、降水、太阳辐射量等气象因素的相关关系;③分析不同类型林地的森林碳汇时空分布特征。研究结果旨在为常州市森林碳汇能力提供科学评估,为遥感技术科学支撑“双碳”战略提供有力参考,为制定应对气候变化的生态保护措施提供数据和技术支撑。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

常州市地处中国华东地区,位于江苏省南部、

收稿日期: 2023-11-13

作者简介: 周威(1980—),男,江苏常州人,硕士,高级工程师,研究方向为湖泊及植被遥感;耿若楠(1993—),女,河北衡水人,硕士,算法工程师,研究方向为卫星遥感应用。

长三角平原腹地、太湖西岸,地理坐标介于东经 119°08′~120°12′,北纬 31°09′~32°04′,东与无锡相邻,西与南京、镇江接壤,南与无锡、宣城交界,总面积 4 385 km²,其中陆地面积 36.18 万 hm²,水域面积 7.33 万 hm²。常州为太湖流域水网平原,属于北亚热带海洋性气候,常年气候温和(年平均温度为 15.4℃,极端最高曾高达 39.4℃),日照充足(年平均日照时间 2 047.5 h),雨量充沛(年平均降水量为 1 071.5 mm),林木覆盖率为 26.89%。

1.2 数据来源和处理

1.2.1 遥感卫星数据产品

1) NASA 中分辨率成像光谱仪(MODIS)标准数据产品

中分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)是 Terra 和 Aqua 卫星上搭载的主要传感器之一,两颗星相互配合每天重复观测整个地球表面,生成全球陆地、海洋和低层大气等观测产品。在森林碳汇分析中引入 MOD13Q1(16 d 观测数据合成的 250 m 空间分辨率的 NDVI 产品)、MOD15A2H(8 d 观测数据合成的 500 m 空间分辨率的 FPAR 产品)、MOD17A2H(8 d 观测数据合成的 500 m 空间分辨率的总初级生产力产品)作为对照。数据来源于“NASA EarthData”(https://search.earthdata.nasa.gov/)。

2) 哥白尼全球土地服务(CGLS)数据

哥白尼全球土地服务(The Copernicus Global Land Service, CGLS)是欧洲地球观测项目(land monitoring core services, LMCS)的一个组成部分,该服务在全球范围内系统地生产一系列关于地表信息和演变情况的地球生物产品,用于监测全球植被、水循环和陆地能量收支。在森林碳汇分析中选取其陆地植被产品数据 NDVI(以 Sentinel-3/OLCI 观测作为输入数据,空间分辨率为 300 m,10 d 合成),FAPAR(以 Sentinel-3/OLCI、PROBA-V 观测作为输入数据,空间分辨率 300 m,10 d 合成)作为对照。数据来源于“哥白尼全球陆地服务”(https://land.copernicus.eu/global/products)

3) Sentinel-2 卫星

Sentinel-2 是高分辨率多光谱成像卫星,搭载多光谱成像仪(MSI),由“双胞胎”Sentinel-2A 和 Sentinel-2B 两颗卫星组成,卫星拍摄的每幅图像均显示 290 km 幅宽扫描,两颗星同时进入运行状态后,可每 5 d 完成一次对地球赤道区域的完整成像。该卫星在运行期间可提供有关城市化、农业、林业

砍伐种植、海水污染等多方面的监测信息,MSI 在近红外(Band8)和红色(Band4)波段的光谱反射率($\rho_{\text{近红外}}$ 和 $\rho_{\text{红}}$)可计算 NDVI。数据来源于“哥白尼数据服务”(https://scihub.copernicus.eu/)。

$$\text{NDVI} = \frac{(\rho_{\text{近红外}} - \rho_{\text{红}})}{(\rho_{\text{近红外}} + \rho_{\text{红}})} \quad (1)$$

1.2.2 土地覆盖数据

1) 高空间分辨率地物分类数据集

达摩院 AI Earth 团队借助深度学习方法,自研生成了中国区 10 m 分辨率地物分类产品。数据来源于“AI EARTH 数据集中心”(https://engine-aiearth.aliyun.com/#/dataset/DAMO_AIE_CHINA_LC)。该团队利用 Sentinel-2 数据集,融合了多时序、多模态、Low Level 约束、半监督等技术进行精细化地物分割,地物分类包含耕地、林地、草地、灌木、湿地、水体、人造地表、裸地、水体。

2) 常州市林地分布数据

根据常州市林地保护利用规划林地落界结果,常州市林地分为乔木林、竹林、疏林地、国家特别规定灌木林地、其他灌木林地、未成林造林地、苗圃地、宜林荒山荒地总共 8 种类型,其分布主要以乔木林为主,占常州市林地总面积的 60.34%,其他林地类型相对较少,灌木林地(国家特别规定灌木林地、其他灌木林地)总占比在 20.41%,为常州市除乔木林之外的主要林地类型。

为应用 CASA 模型,需将常州市上述林地类型按照国际地圈生物圈计划(International Geosphere Biosphere Programme, IGBP)定义的 17 类土地类型(常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、混交林、郁闭灌木林、稀疏灌木林、有林草地、稀树草原、草地、永久湿地、农田、城镇与建成区、农田与自然植被镶嵌体、冰雪、裸地、水体)进行分类,乔木林参考为落叶阔叶林,竹林参考为常绿针叶林,疏林地、宜林荒山荒地参考为稀疏灌木林,国家特别规定灌木林和其他灌木林参考为郁闭灌木林,未成林造林地、苗圃地参考混交林^[4]。为与 MODIS 及 CGLS 标准产品作对照,稀疏灌木林和郁闭灌木林合并为灌木林。

图 1(a)为常州市 MCDLC(NASA 发布基于 MODIS 卫星监测的土地覆盖分类)产品,空间分辨率为 500 m;图 1(b)为 CGLS 提供的土地覆盖分类产品,空间分辨率为 100 m;图 1(c)为综合高空间分辨率地物分类数据集和常州市林地保护利用规划落界资料生成的 10 m 分辨率土地覆盖分类结果。

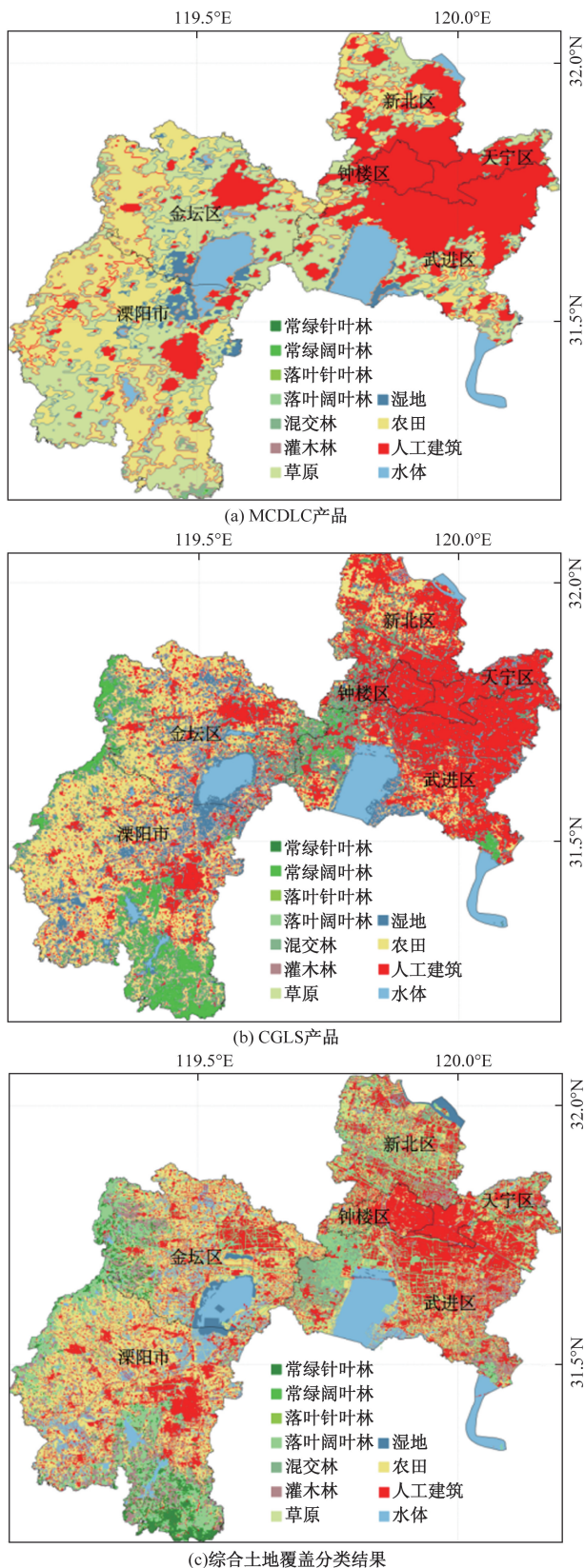


图1 常州市土地覆盖分类结果

1.2.3 气象再分析资料

气象数据来源于 ERA5 再分析资料,这是欧洲天气预报中心对 1950 年 1 月至今全球气候的

第五代大气再分析数据集,提供了全球大气、陆地、海洋等气候变量的每小时估计值。在碳汇相关分析中使用了 ERA5 数据中 2022 年常州市范围内每小时的地面温度(2m temperature)、总降水量(total precipitation)、地面总太阳辐射量(total sky direct solar radiation at surface)3 个主要参数。ERA5 再分析资料的空间分辨率为 0.25° ,进行网格化统一插值为 10 m 空间分辨率。数据来源于“欧洲气候数据中心”(https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels)。

1.3 方法

在森林碳汇估算中,总初级生产力(gross primary productivity, GPP)表示在单位时间和单位面积上的一个生态系统中绿色植物光合作用过程固定的碳总量,决定了进入森林生态系统的初始物质和能量。净初级生产力(net primary productivity, NPP)是光合作用所产生的有机物质减去植物自养呼吸消耗所剩下的部分。净生态系统生产力(net ecosystem productivity, NEP)代表生态系统净累积的有机物质或碳量,是净初级生产力减去异养呼吸消耗(heterotrophic respiration, R_h)之后的剩余部分,反映了生态系统碳吸收和碳释放之间的差值,是量化碳汇能力和碳排放量的有效指标。森林植被净初级生产力(NPP)是植被通过光合作用固定太阳能的产物,它受植被地域分布和气候影响,CASA模型^[5-8]通过光学遥感卫星获取的归一化植被指数(NDVI)等资料驱动,开展植被净初级生产力估算。

植被净初级生产力(NPP)主要由光合有效辐射(APAR)以及光能利用率 ϵ 决定。

$$NPP = APAR \times \epsilon \quad (2)$$

式中:APAR 为计算周期内,植被单位面积吸收到的光合有效辐射能量, MJ/m^2 ; ϵ 为植被的实际光能综合利用率, gC/MJ 。

APAR 取决于地面太阳总辐射和植被的光合有效辐射吸收比例(FPAR)。

$$APAR = SOL \times 0.5 \times FPAR \quad (3)$$

式中:SOL 为计算周期内,植被像元积累到的太阳总辐射量, MJ/m^2 , SOL 由 ERA5 再分析资料中取得;常数 0.5 是指植被所能利用的太阳有效辐射(波长 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$)占太阳总辐射的比例。

FPAR 可由 NDVI 等光谱植被指数直接量化,对于不同的植被类型,该量化标准有所不同。

$$\text{FPAR} = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}} \times (\text{FPAR}_{\max} - \text{FPAR}_{\min}) + \text{FPAR}_{\min} \quad (4)$$

$$\text{FPAR} = \frac{\text{SR} - \text{SR}_{\min}}{\text{SR}_{\max} - \text{SR}_{\min}} \times (\text{FPAR}_{\max} - \text{FPAR}_{\min}) + \text{FPAR}_{\min} \quad (5)$$

$$\text{SR} = \frac{1 + \text{NDVI}}{1 - \text{NDVI}} \quad (6)$$

$$\text{FPAR} = \frac{\text{FPAR}_{\text{NDVI}} + \text{FPAR}_{\text{SR}}}{2} \quad (7)$$

式中: $\text{NDVI}_{\min}$ 、 $\text{NDVI}_{\max}$ 分别对应不同植被类型的 95% 和 5% 下侧百分位数; $\text{FPAR}_{\max}$ 、 $\text{FPAR}_{\min}$ 的取值与植被类型无关, 大小分别是 0.95 和 0.001。 $\text{NDVI}_{\min}$ 取 0.1, $\text{NDVI}_{\max}$ 按照常州市 2022 年 Sentinel-2 卫星观测不同植被类型 NDVI 的 95% 百分位数取值。

光能利用率变化主要是由于气温、水分状态的变化而产生的, 计算公式为

$$\epsilon = T_{\epsilon 1} T_{\epsilon 2} W_{\epsilon} \epsilon_{\max} \quad (8)$$

式中: $T_{\epsilon 1}$ 、 $T_{\epsilon 2}$ 分别为低温和高温对光能利用率的影响, 即温度胁迫因子; W_{ϵ} 为水分胁迫影响系数, 反映水分条件的影响; $\epsilon_{\max}$ 为理想条件下的最大光能利用率, gC/MJ 。不同植被类型的最大光能利用率见表 1^[9]。

温度胁迫因子 $T_{\epsilon 1}$ 反映了低温和高温条件下, 由于植被内在的生化作用限制了光合作用, 植被净初级生产力的降低, 计算公式为

$$T_{\epsilon 1} = 0.8 + 0.02T_{\text{opt}} - 0.0005T_{\text{opt}}^2 \quad (9)$$

式中: T_{opt} 为该区域一年内 NDVI 值达到最高时的平均气温。当某 8 d 的平均温度小于或等于 -10°C 时, $T_{\epsilon 1}$ 取值为 0, $T_{\epsilon 1}$ 的值介于 0.8~1。

温度胁迫因子 $T_{\epsilon 2}$ 表示环境从最适宜温度 T_{opt} 向高温和低温变化时, 植物的光能转化率逐渐变小, 用式(10)计算, 当该月的平均温度比最适宜温度高 10°C 或低 13°C 时, 该月的 $T_{\epsilon 2}$ 为最适宜温度时的 $T_{\epsilon 2}$ 的一半。

$$T_{\epsilon 2} = 1.184 / \{1 + \exp[0.2(T_{\text{opt}} - 10 - T)]\} \times \frac{1}{1 + \exp[0.3(-T_{\text{opt}} - 10 - T)]} \quad (10)$$

表 1 常州市不同类型林地 $\epsilon_{\max}$ 取值

IGBP 土地类型	常州市林地类型	$\epsilon_{\max}$
常绿针叶林	竹林	0.389
落叶阔叶林	乔木林	0.692
混交林	未成林造林地、苗圃林	0.475
灌木林	疏林地、国家特别规定灌木林、其他灌木林地、宜林荒山荒地	0.429

水分胁迫影响系数 W_{ϵ} 反映了植被所能利用的有效水分条件对光能转化率的影响。Sentinel-2 的近红外和短波红外通道反射率可用来反演水分指数/地表湿润度指数 (land soil water index, LSWI), 并进一步估算 W_{ϵ} 的动态变化。

$$W_{\epsilon} = \frac{1 + \text{LSWI}}{1 + \text{LSWI}_{\max}} \quad (11)$$

$$\text{LSWI} = \frac{\rho_{\text{近红外}} - \rho_{\text{短波红外}}}{\rho_{\text{近红外}} + \rho_{\text{短波红外}}} \quad (12)$$

在不考虑其他自然和人为条件影响下, 净生态系统生产力 (NEP) 表示为植被净初级生产力 (NPP) 与土壤微生物呼吸碳 (R_h) 之间的差值。

$$\text{NEP} = \text{NPP} - R_h \quad (13)$$

R_h 是指土壤中的有机物质在土壤微生物和细菌等的作用下向大气中排放 CO_2 , 土壤微生物异养呼吸量与土壤中微生物的数量、种类及底物的质量和有效性有关。采用 Pei 等^[10] 研究的碳排放与环境因子的关系估算土壤生物呼吸的分布状况, 每年平均土壤异养呼吸量计算公式为

$$R_h = 0.22[e^{0.0913T} + \ln^{(0.3145R+1)}] \times 30 \times 46.5\% \quad (14)$$

式中: R_h 为土壤微生物呼吸碳, gC/m^2 ; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; R 为降水量, mm 。

2 结果与分析

2.1 常州市 2022 年森林碳汇时空分布特征分析

结合中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 陆地标准数据产品、欧洲哥白尼全球土地服务 (CGLS) 产品以及使用 Sentinel-2 卫星观测得到的 2022 年常州市每月 NDVI 的空间分布 3 种产品和常州市森林覆盖区域分析, 在空间上常州市森林主要分布于金坛区西部、溧阳市西部和南部、武进区西部等区域, 这些区域在 4—10 月 NDVI 明显高于其他区域, 显示了森林对于碳循环贡献明显优于农田等其他区域; 在时间上, 常州市森林覆盖区域 NDVI 在 1—5 月呈显著增长趋势, 在 10—12 月呈显著降低趋势。以其他两种产品数据对照使用 Sentinel-2 计算的 NDVI、FPAR 等产品, 分别计算每种产品的月平均值和方差。后续在对比 3 种数据源的 NDVI、FPAR、NPP、NEP 数据时, 仅计算常州市森林覆盖区域, 剔除农田、草原、人工建筑及水体区域。

图 2(a) 为 3 种数据源 NDVI 产品的平均值和方差, 图 2(b) 为 3 种数据源 FPAR 产品的平均值和方差。由图 2(a) 每月 NDVI 平均值分析, 常州市

2022年森林覆盖区域NDVI值在4—10月较高,其中MODIS观测NDVI在4—10月和CGLS观测NDVI在6—10月均达到0.6以上,使用Sentinel-2计算的NDVI在5—8月均达到0.5以上,整体变化趋势与MODIS和CGLS标准产品一致,但高值较低。这是由于采用式(1)计算NDVI,该公式的主要缺点是使用了非线性拉伸的方式增强了近红外通道和红通道的反射率的对比度,增强了NDVI低值部分,抑制了高值部分,导致计算结果数值容易饱和,对高植被密度区敏感性降低。而MODIS陆地标准数据产品NDVI产品是由经过大气校正的双向表面反射率计算出来的,屏蔽了水、云、云影等影响,并选择观测视角最小的像元观测值来降低植被冠层双向反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function, BRDF)效应影响^[11],CGLS的NDVI产品通过输入Sentinel-3/OLCI载荷7个近红外和红外通道反射率并应用BRDF校正获得更好的NDVI结果^[12]。另外MODIS和Sentinel-3观测频率远大于Sentinel-2卫星(MODIS重返周期平均为2 d, Sentinel-3重返周期大约为2 d, Sentinel-2两颗星重返周期可达5 d),能够更好地避免云覆盖的影响。

由图2(b)每月FPAR平均值分析,常州市2022年森林覆盖区域FPAR产品变化趋势与NDVI基本一致,在4—10月值较高,3种数据源产品均

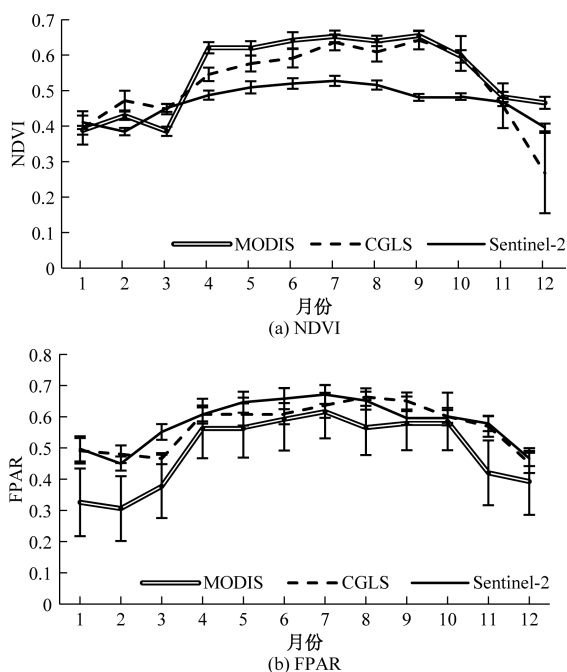


图2 2022年常州市NDVI产品和FPAR产品每月数据分布

达到0.5以上,CGLS产品和使用Sentinel-2卫星计算结果均达到0.6以上。而对于方差,使用Sentinel-2卫星观测计算得到的NDVI和FPAR方差均小于其他两种标准产品数据,这是由于MODIS产品分辨率为250 m和500 m,CGLS产品分辨率为300 m,单像元覆盖土地类型复杂,而使用的Sentinel-2观测数据和林地类型资料均为10 m空间分辨率,在计算时降低了其他土地覆盖类型像元影响。

对于生态系统净初级生产力NPP,NASA基于MODIS数据计算了每日全球总初级生产力(GPP),对公众提供了8 d的GPP总和(MOD17A2H),基于此计算MODIS的每月GPP总和作为使用Sentinel-2卫星计算得到的NPP的对照(图3),净初级生产力(NPP)是植被光合作用产生的有机物质减去自养呼吸消耗剩下的部分,全球NPP估计大约是GPP的一半^[13]。2022年常州市MODIS发布的GPP产品在1、2、12月每月平均值在20~40 gC/m²,同期使用Sentinel-2卫星观测计算NPP每月平均值在10~18 gC/m²;4—10月森林覆盖区域MODIS的GPP产品每月数值大部分集中在110~180 gC/m²(GPP在4—6月较高,考虑原因为4—6月为农作物生长成熟期,MODIS产品空间分辨率较低,在产品中有部分农田GPP影响未被剔除),同期计算的NPP结果每月数值大部分集中在20~60 gC/m²。

基于上述计算,2022年常州市森林覆盖区域碳汇(NEP)时空分布如图4所示,在1—2月、11—12月森林覆盖区域碳汇量较少,4—8月碳汇量较高。其中金坛区西北部、溧阳市南部、武进区西部、太湖北岸的乔木林在7月碳汇量达到峰值,大部分可达60 gC/m²以上,高于同期溧阳市南部竹林和其他灌木林碳汇量,其他灌木林碳汇量次之,竹林最低;金坛区西部国家特别规定灌木林地在7—8月碳汇量较高,可达50 gC/m²以上;武进区西部苗圃地在7—8月碳汇量较高,同样可达到50 gC/m²以上。

2.2 常州市不同林地类型碳汇能力分析

依据常州市林地分布数据对2022年不同林地类型的碳汇量按照季度进行统计分析(表2),其整体生态系统的季度碳汇能力由高到低依次是第3季度、第2季度、第4季度、第1季度,其中第3季度的乔木林碳汇能力最高,为295.87 gC/m²,其次为苗圃林,碳汇值为200.52 gC/m²,竹林的碳汇能力最低,为162.78 gC/m²。同时有着相对较低的植被

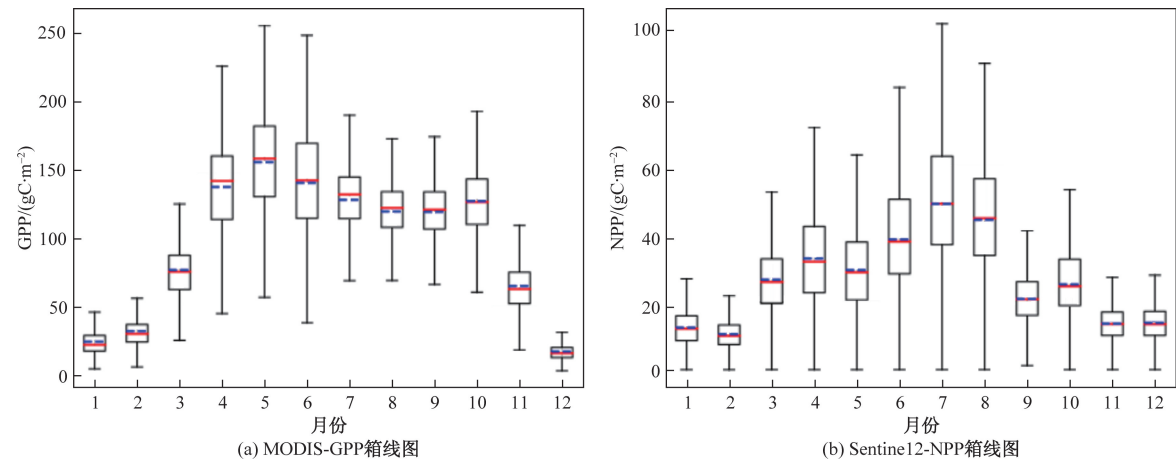


图 3 2022 年常州市森林覆盖区域 GPP 和 NPP 产品每月数据分布

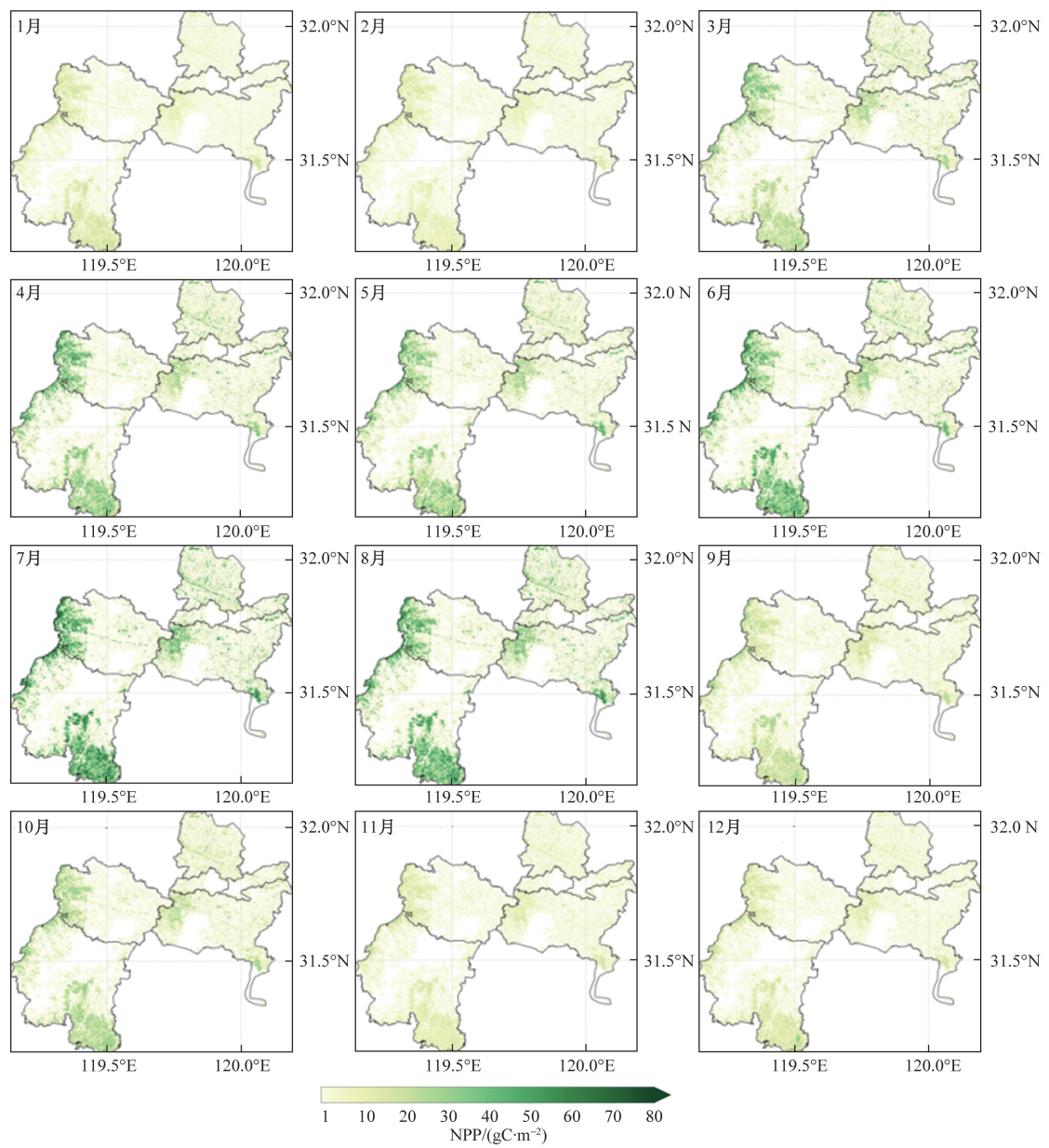


图 4 2022 年常州市森林覆盖区域每月碳汇量

表2 2022年常州市不同类型林地类型碳汇能力
季度变化统计

林地类型	平均碳汇/(gC·m ⁻²)			
	第1季度	第2季度	第3季度	第4季度
乔木林	20.63	231.90	295.87	47.27
竹林	8.07	123.53	162.78	20.65
疏林地	15.18	144.54	169.12	34.50
国家特别规定灌木林地	9.61	137.09	174.27	23.03
其他灌木林地	10.28	136.87	176.71	25.11
未成林造林地	13.23	154.67	197.22	32.23
苗圃地	15.82	160.40	200.52	35.64
宜林荒山荒地	10.88	136.93	171.13	28.63

覆盖度的第1季度的碳汇能力估算结果中,竹林碳汇能力最低为8.07 gC/m²,其次为灌木林地(国家特别规定灌木林地、其他灌木林地),均在10 gC/m²左右。

2.3 森林碳汇与气象因素相关分析

森林碳汇受气象要素影响,2022年常州市森林碳汇随气象因素(太阳辐射量、温度、降水量)的变化特征如图5所示。

随着2022年3—8月常州市地面太阳辐射总量和温度升高,常州市森林碳汇(NEP)显著升高,之后9—12月随着温度和太阳辐射量的降低,碳汇量随之降低。为研究气象因素对于森林碳汇的相关影响,在控制其他两个气象因子基础上计算森林碳汇(NEP)与单个气象因子的偏相关系数,结果(图6)显示常州市大部分森林覆盖地区碳汇量与温度和太阳辐射量呈正相关,与降水量相关关系随空间分布差异较大。统计得到2022年常州市森林碳汇(NEP)与温度的偏相关系数平均值为0.21,其值

大于0.5的区域占有森林区域的20%;森林碳汇(NEP)与太阳辐射量的偏相关系数平均值为0.68,其值大于0.8的区域占有森林区域的30%;森林碳汇(NEP)与降水量的偏相关系数平均值为0.03。因此,在所选时间和空间区域内,太阳辐射量对于森林碳汇的相关影响>温度>降水量。对于不同林地类型,温度和太阳辐射量对于乔木林的影响最大;降水量对于国家特别规定灌木林、苗圃地影响较大,与常州市西部的国家特别规定灌木林区域碳汇量呈正相关性,而与武进区西部的苗圃地碳汇量呈负相关性。

3 结论

综合利用多种时空分辨率卫星遥感数据对2022年常州市森林覆盖区域进行观测,基于目前较为成熟的CASA模型实现了森林碳汇的年度综合计算模拟,并进行了时空变化特征的制图分析。研究可知,2022年常州市森林碳汇在7月达到峰值,其中乔木林碳汇能力最高可达80 gC/m²;在第1和第4季度森林碳汇能力较弱,其中竹林在第1季度总计碳汇量仅有8 gC/m²。最终通过林地面积汇总,常州市2022年森林植被的总体碳汇量为29.94万t,其中乔木林的碳汇值为21.63万t,占常州市2022年碳汇的72%。在计算过程中引入MODIS陆地标准数据产品(NDVI、FPAR、GPP等)和CGLS陆地服务产品(NDVI、FPAR)作为对照,显示了高分辨率影像可以更好地与林地分布数据匹配,剔除农田、草地等植被影响,更准确地反映城市森林碳汇特征。同时针对不同林地类型、不同气象因素对于森林碳汇影响进行分析,结果显示在2022

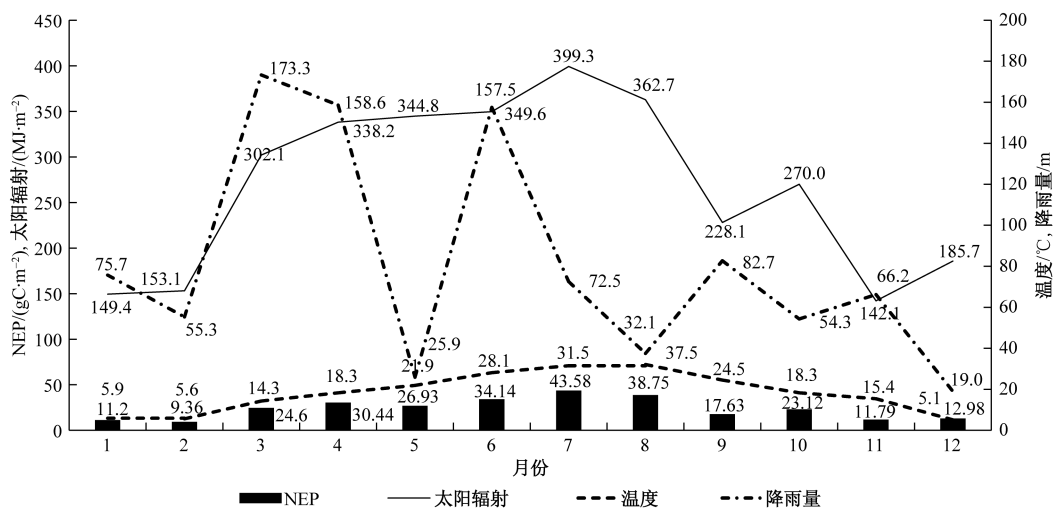


图5 2022年常州市森林覆盖区域每月碳汇量及气象要素变化趋势

年常州市内乔木林碳汇能力最强,苗圃地次之,太阳辐射量对于森林碳汇影响最大,温度次之,

降水量最小。通过对研究结果的分析 and 讨论,能够更好地了解常州市 2022 年森林碳循环的来源和贡献机制,为定量核算森林碳值,分析人类活动、气象等对碳循环的影响机制具有重要的现实意义。

参考文献

- [1] 方精云,郭兆迪,朴世龙. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2007(6): 804-812.
- [2] ZHANG J, HAO X, HAO H, et al. Climate change decreased net ecosystem productivity in the arid region of Central Asia[J]. Remote Sens, 2021, 13: 4449.
- [3] PIAO S L, TAN K, NAN H. J, et al. Impacts of climate and CO₂ changes on the vegetation growth and carbon balance of Qinghai-Tibetan grasslands over the past five decades[J]. Glob. Planet. Chang, 2012, 98/99: 73-80.
- [4] RUNNING S W, LOVELAND T R, PIERCE L L. A vegetation classification logic based on remote sensing for use in global scale biogeochemical models[J]. Ambio, 1994, 23: 77-81.
- [5] 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, 25(5): 603-608.
- [6] 刘文瑞,李晓婷,李彤. 基于 MODIS 和 CASA 模型的伊春市森林植被 NPP 变化特征及其影响因子分析[J]. 生态学杂志, 2022, 4(1): 150-158.
- [7] 张雪蕾,肖伟华,王义成. 基于改进的 CASA 模型三峡库区 NPP 时空特征及气候驱动机制[J]. 生态学报, 2021, 41(9): 3488-3498.
- [8] 任璇. 基于改进 CASA 模型的新疆草地净初级生产力及与气象因子的相关性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017.
- [9] 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.
- [10] PEI Z Y, OUYANG H, ZHOU C P, et al. Carbon Balance in an alpine steppe in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2009, 51(5): 521-526.
- [11] MODIS. MODIS Vegetation Index (MOD13): Algorithm Theoretical Basis Document [EB/OL]. (1999-04-30)[2023-09-15]. http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf.
- [12] Gio Global Land Component-Lot I. Algorithm theoretical basis document, Normalized Difference Vegetation Index(NDVI) Collection 300M[EB/OL]. (2016-03-15) [2023-09-15]. https://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/GIOGL1_ATBD_NDVI300m-V1_IL_02.pdf.
- [13] 方精云,唐志尧,柯金虎,等. 生物生产力的“4P”概念、估算及其相互关系[J]. 植物生态学报, 2001, 25(4): 414-419.

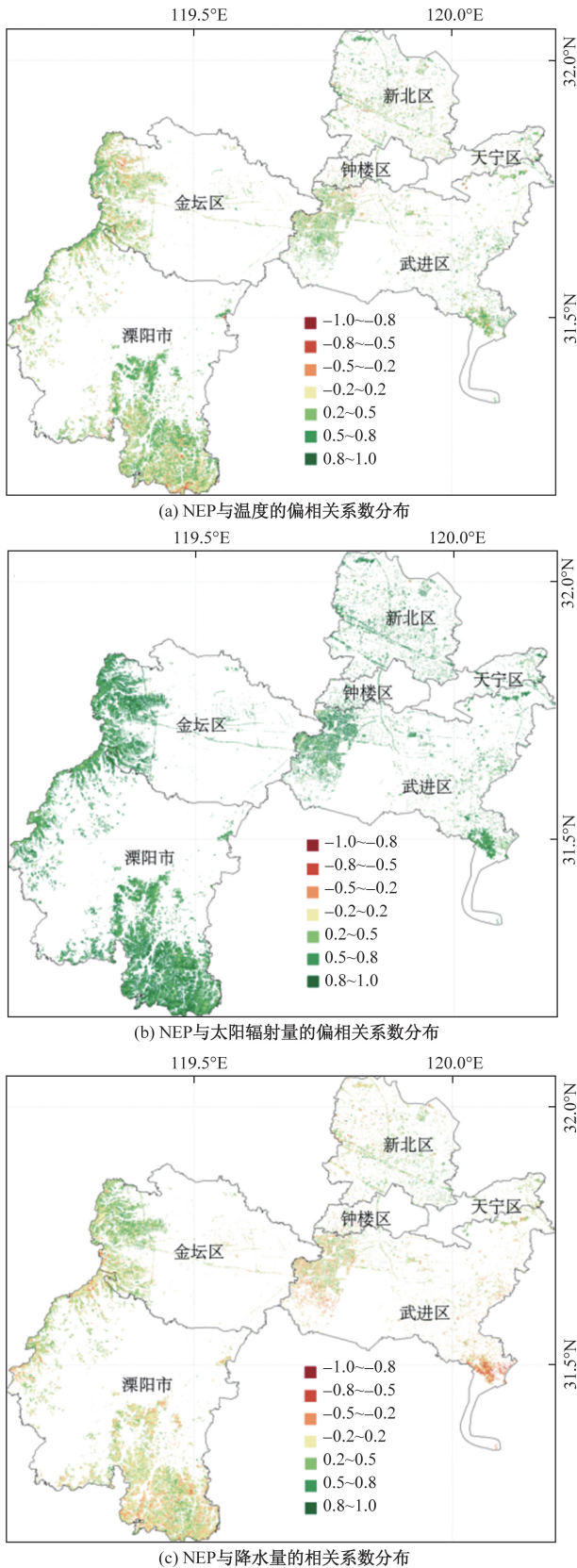


图 6 NEP 与气象要素的偏相关系数分布

Estimation of Net Primary Productivity and Carbon Sink of Forest Vegetation in Changzhou City Based on CASA Model

ZHOU Wei^{1,2}, GENG Ruonan³

(1. Changzhou Environmental Monitoring Center of Jiangsu Province, Changzhou 213017, Jiangsu, China;

2. Key Laboratory for Aquatic Biomonitoring, Jiangsu Environmental Protection, Changzhou 213017, Jiangsu, China;

3. Dadi Weattech (Beijing) Technology Co., Ltd., Beijing 102401, China)

Abstract: Forest plays a crucial role in the world carbon cycle process, and the carbon sink analysis of forest is significant for urban ecosystem management. Based on various satellite remote sensing data, forest land distribution and meteorological data, using CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) model, the forest carbon sink of Changzhou City in 2022 is simulated, and its variation characteristics and mechanisms are comprehensively analyzed. The results show that the overall carbon sink of forest vegetation of Changzhou City in 2022 reached 299.4 thousand tons, with a relatively high carbon sink from April to August. The carbon sink capacity of different types of forest vegetation is different, and the arbor has the strongest ability with the highest carbon sink amount reaching 80 gC/m² in July. Meteorological factors have a related impact on forest carbon sinks with temperature having a higher impact than precipitation.

Keywords: CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) model; forest vegetation; net primary productivity; carbon sink