

林分斑块尺度下的森林群落碳汇研究

杨婷¹, 罗红霞², 魏翔¹

1. 重庆工商大学公共管理学院, 重庆 400076

2. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715

摘要:针对森林碳循环过程模型空间模拟尺度多样化,但数据获取比较困难,森林碳变化响应与适应的研究不可能实现在不同生境下均安置碳通量观测系统的问题,提出利用遥感过程耦合模型定量估算动态 *GPP* 值、*NPP* 值、*RH* 值及 *NEP* 值等,反演森林植被群落不同优势树种碳汇/碳源情况,探寻造林、森林转化和森林人工经营管理等植被恢复措施对森林碳增汇的生态价值,激活碳源效应的促进重建作用。通过以空间代替时间的实地调查采样法和遥感模型相结合,输入 GLOPEM-CEVSA 模型中温度影响系数、蒸散量、水气压影响系数、二氧化碳浓度胁迫、植物呼吸及土壤呼吸等驱动因子,研究在林分斑块尺度下森林碳储量差异。研究表明:(1)从整体情况来看,林地净初级生产力>草地>农业用地>水域>建设用地,林地净生态系统生产力>农业用地>草地>建设用地>水域;(2)从年际 *NPP/NEP* 值来看,森林生态系统大部分表现为大气 CO₂ 碳汇;(3)森林群落自然恢复演替中 *NPP* 值大小关系是:乔幼落叶阔叶林群落(A4)>马尾松/杉木常绿针叶林群落(A5)>柏木常绿针叶林群落(A6)>常绿灌丛/灌草丛/人工灌木群落(A2)>草本群落(A1);*NEP* 值表现为乔幼落叶阔叶林群落>马尾松/杉木常绿针叶林群落>常绿灌丛/灌草丛/人工灌木群落>柏木常绿针叶林群落>草本群落;人工辅助演替中 *NPP* 值大小关系是(慈竹)竹林群落>马尾松/杉木常绿针叶林群落>柏木常绿针叶林群落>常绿灌丛/灌草丛/人工灌木群落;*NEP* 值表现为(慈竹)竹林群落>马尾松/杉木常绿针叶林群落>常绿灌丛/灌草丛/人工灌木群落>柏木常绿针叶林群落,*NPP* 值和 *NEP* 值随顺行演替均呈现出先上升后下降的单峰状发展趋势。

关键词:森林群落;次生演替;耦合模型;碳汇

中图分类号:S718.5 文献标识码:A doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2023.0004.015

Carbon Sinks of Forest Community at the Forest Patch Scale

YANG Ting¹, LUO Hongxia², WEI Xiang¹

1. School of Public Administration, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400076, China

2. School of Geographical Science, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: The spatial simulation scale of forest carbon cycle process models is diverse, but the data acquisition is difficult. It is impossible to install a carbon flux observation system in different environments in the study of forest carbon change response and adaptation. In this paper, the remote sensing process coupling model was proposed to quantitatively estimate the dynamic *GPP* value, *NPP* value, *RH* value, and *NEP* value, to invert the carbon sink/carbon source situation of different dominant tree species of forest vegetation community, to explore the ecological value of vegetation restoration measures such as afforestation, forest transformation, and forest artificial management, and to activate the reconstruction effect of carbon source effect. Through the combination of field survey sampling method with space instead of time and

收稿日期:2022-03-05 修回日期:2022-05-18 文章编号:1672-058X(2023)04-0106-07

基金项目:国家自然科学基金项目(41201436).

作者简介:杨婷(1989—),女,重庆忠县人,硕士,从事遥感与地理信息系统应用研究。

引用格式:杨婷,罗红霞,魏翔.林分斑块尺度下的森林群落碳汇研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2023,40(4):106—112.

YANG Ting, LUO Hongxia, WEI Xiang. Carbon sinks of forest community at the forest patch scale[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023, 40(4): 106—112.

remote sensing model, the driving factors of temperature influence coefficient, evapotranspiration, water-pressure influence coefficient, carbon dioxide concentration stress, plant respiration, and soil respiration in GLOPEM-CEVSA model were input to study the differences of forest carbon storages at the forest patch scale. The research showed that: (1) in the picture as a whole, Net Primary Productivity of Woodland>Grassland>Agricultural Land>Water Area>Construction Land, Net Ecosystem Productivity of Woodland>Agricultural Land>Grassland >Construction land>Water Area; (2) from the inter-annual *NPP/NEP* values, most forest ecosystems showed atmospheric CO₂ carbon sink; (3) the relationship of *NPP* values in the natural restoration succession of forest community was: Deciduous Broad-Leaved Forest Community (A4) > Pinus Massoniana/Cunninghamia Lanceolata Evergreen Coniferous Forest Community (A5) > Cypress Evergreen Coniferous Forest Community (A6) > Evergreen Shrub/Shrub Grass/Artificial Shrub Community (A2) > Herbaceous Community (A1); *NEP* values were as follows: Deciduous Broad-Leaved Forest Community > Pinus Massoniana/Cunninghamia Lanceolata Evergreen Coniferous Forest Community > Evergreen Shrub/Shrub Grass/Artificial Shrub Community > Cypress Evergreen Coniferous Forest Community > Herbaceous Community; the relationship of *NPP* values in artificial assisted succession was as follows: Bamboo Forest Community > Pinus Massoniana/Cunninghamia Lanceolata Evergreen Coniferous Forest Community > Cypress Evergreen Coniferous Forest Community > Evergreen Shrub/Shrub Grass/Artificial Shrub Community; *NEP* values were as follows: Bamboo Forest Community > Pinus Massoniana/Cunninghamia Lanceolata Evergreen Coniferous Forest Community > Evergreen Shrub/Shrub Grass/Artificial Shrub Community > Cypress Evergreen Coniferous Forest Community, and both the *NPP* values and the *NEP* values showed a unimodal development trend of rising first and then decreasing with the sequential succession.

Keywords: forest community; secondary succession; coupling model; carbon sink

1 引言

气候变化愈演愈烈,引起全世界广泛关注,在应对全球气候变化的大背景下,须推动以 CO₂ 为主的温室气体减排或增加吸收汇,相较于工业温室气体减排,森林作为陆地生态系统的主体,森林碳汇更具有成本有效性。由不同林龄或不同演替序列的植被群落林分斑块组成的区域森林对调节全球碳循环、应对全球气候变化、减小 CO₂ 为主的温室气体浓度等方面起到至关重要的作用^[1]。当生态系统的碳排放输出和生物碳输入的平衡状态被打破时,就会出现大气的“碳汇”和“碳源”两种表现情况,碳吸收功能(碳汇)减缓气候变暖进程,碳排放(碳源)则导致加速气候变暖进程。随着森林被大规模的砍伐、不合理的耕作方式和粗放利用土地等,原有森林植被群落遭到破坏,大面积的基岩裸露于地表,从而出现生态系统退化现象,人类采取加强森林经营管理,扩大农林复合林、天然林等造林面积,以生物碳转化为生物燃料的方式转移碳库,减少森林砍伐等治理和恢复措施已达到森林碳增汇减排的目的。因此,森林生态系统碳储量的研究一直是生态学热点研究之一,相关专家学者通过森林资源清查法、碳通量方法、模型模拟与遥感估测等方法对生态系统的生物量和生产力进行了长期的探索和研究^[2-11],相较于单

靠实测数据研究大规模陆地生态系统碳储量的方法来说,样地数据远远不够,而利用不断创新发展的“3S”理论、探测、方法和技术手段进行遥感模型定量估算碳循环动态变化的优势就显而易见了,信息数据来源实时可靠、覆盖广,碳循环研究既经济又高效。在国外,Shikhasmita 等^[12]研究了东北印度锐棱玉蕊洪泛平原森林的生物量和碳储存;Amoah 等^[13]研究了加纳博比里森林保护区龙头竹、阿比西尼亚牛蒡和黄荆人工林的地上生物量、碳储量和燃料价值;Ragavan 等^[14]研究了印度安达曼群岛红树林中的植物生物量。在国内,杜明凤等^[15]研究了贵州省 20 年森林碳储量时空变化;戴子熠等^[16]研究了 1988—2018 年广西北海红树林蓝碳储量变化;张峰等^[17]研究了北京市森林碳储量和碳汇经济价值;于贵瑞等^[18]研究了区域尺度陆地生态系统固碳速率和增汇潜力概念框架及其定量认证科学基础。国内外对碳储量的研究经历了萌芽时期、高潮时期和发展时期,大部分研究学者从只关注某个或某部分生理机理的研究发展到整个能量物质系统的生产、积累、循环及相互作用的研究。直到 21 世纪后我国森林碳储量的系统研究也有了显著成就,碳储量研究方法主要包括森林资源清查法、碳通量法、模型模拟等,而模型模拟方法让区域、全国及全球的碳循环研究具

有可操作性,随着“3S”科学的创新发展,卫星遥感影像直接提取实时可靠的数据让大规模遥感估测法在国内外得到广泛应用。国内外研究学者通过建立耦合模型让碳平衡研究取得实质性进展,致力于弥补不同模型模拟方法的缺陷,过程模型主要模拟植物分解、呼吸和光合作用等,输入参数较多,数据采集难度大,遥感模型利用动态实时的卫星遥感图像建立碳储量模拟模型,解决了传统方法尺度转换的问题。针对大区域尺度森林的碳储量研究已有大量成果,但是在次生演替背景下对林分斑块中不同植被群落的碳储量研究却鲜有报道,本文利用空间代替时间的实地调查采样法和遥感模型反演法相结合,通过遥感图像、植被群落调查数据、土壤和气象数据等建立遥感-过程 GLOPEM-CEVSA 耦合模型,定量演算不同演替阶段植被群落的净初级生产力和生态系统生产力,比较植被群落在退耕还林前后的碳储量变化,分析不同森林植被群落的碳转化和碳吸收能力,评估森林治理恢复对碳增汇功能发挥的生态现实意义,为森林人工经营管理和植被生态系统重建恢复提供参考数据。

2 研究方法数据来源

2.1 野外调查数据

试验区在“一山两槽三岭”的构造地貌上,地处华蓥山向西南延伸的支脉,呈东北-西南走向,分布着马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)、女贞(*Ligustrum lucidum* Ait)、杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook)、柏木(*Cupressus funebris* Endl)、慈竹(*Neosinocalamus affinis* (Rendle) Keng)、斑茅(*Saccharum arundinaceum* Retz)等乔木、藤刺灌丛、草丛。试验区先后出现过几次大规模森林资源砍伐,土壤类型属于三叠纪嘉陵江组石灰岩发育而成的黄色石灰土,浅薄贫瘠的土壤流失严重,基岩裸露地表,植被群落遭到破坏后出现逆行演替。在中梁山典型试验区设立样方,乔木群落样方面积为 10 m^2 ,灌木群落样方面积为 5 m^2 ,草本层样方调查面积为 1 m^2 ,详细记录物种个体信息共计 153 种。分层计算并辨别物种数量和优势种趋势,利用 WinTwins 2.3 软件的双向指示种分析法对样方进行等级划分^[19-22],采用数量分类和排序的方法获取空间代替时间的六种典型次生演替植被类型。

2.2 驱动数据及处理

通过重庆气象局各气象观测站的每年气温、降水

量、日照时数、相对湿度、风速等数据,土壤质地类型数据、北碚土壤类型矢量数据、土壤碳含量数据,重庆岩溶区分布图、植被类型分类图、重庆地区 30 m 数字高程图,计算获取研究区温度影响系数、蒸散量、水气压影响系数、二氧化碳浓度胁迫、植物呼吸及土壤呼吸等数据。

2.3 遥感过程耦合模型(GLOPEM-CEVSA 模型)

对 Landsat-8 OLI 成像仪所采集的 1996—2013 年遥感卫星影像进行几何校正、辐射校正、大气校正、投影转换、数据提取等处理,轨道号为 128/39,分辨率为 30 m,统一投影为 UTM-WGS1984-48 °N。下载 MOD13A3 和 MOD17A3 卫星数据,验证 NDVI 提取及 NPP 值模拟结果。结合植被类型分类图,通过遥感影像的近红外波段和红外波段值提取归一化植被指数,计算比值植被指数、太阳辐射总量、光合有效辐射等,结合 GLOPEM-CEVSA 模型数据反演试验区 NPP、NEP 值:

$$NEP(x, t) = NPP(x, t) - RH(x, t) \quad (1)$$

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t) - Ra \quad (2)$$

NEP(x, t) 净生态系统生产力(Net Ecosystem Production)为大气 CO_2 进入生态系统的净光合产量,表示净初级生产力扣除异养生物异养呼吸消耗光合产物之后的部分,计算方法如式(1)。NPP(x, t) 净初级生产力(Net Primary Production),以干重(gC)表示,为陆地植被通过光合作用固定太阳能,在单位时间内单位面积所获得生物量的净增加量,计算方法如式(2)。Ra 指植物自养呼吸, RH(x, t) (Heterotrophic Respiration) 指异养生物异养呼吸。APAR(x, t) 是太阳总辐射量 SOL 与植被对光合有效辐射的吸收比率 FPAR 之间的参数模型,如式(3):

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

FPAR(x, t) 指植被对光合有效辐射的吸收比率,计算方法如式(4)。其中 NDVI 指归一化植被指数,将植被光合有效辐射比例分成 NDVI 和 SR 两部分进行计算,结合植被指数取值,提高参数输入数据精度,减小模型模拟的误差偶然性。NDVI_{i, max} 代表第 i 种植被类型的最大值,NDVI_{i, min} 代表第 i 种植被类型的最小值,通过 NDVI、NDVI_{i, max}、NDVI_{i, min} 计算出 FPAR_{NDVI}, 计算方法如式(5)。SR(x, t) 指比值植被指数,计算方法如式(7)。通过式(6)计算出 FPAR_{SR}:

$$FPAR(x, t) = \alpha FPAR_{NDVI} + (1 - \alpha) FPAR_{SR} \quad (4)$$

$$FPAR_{NDVI} = \frac{(NDVI - NDVI_{i,min}) \times (FPAR_{max} - FPAR_{min})}{(NDVI_{i,max} - NDVI_{i,min})} + FPAR_{min} \quad (5)$$

$$FPAR_{SR} = \frac{(SR - SR_{i,min}) \times (FPAR_{max} - FPAR_{min})}{(SR_{i,max} - SR_{i,min})} + FPAR_{min} \quad (6)$$

$$SR(x, t) = (1 + NDVI) / (1 - NDVI) \quad (7)$$

$\varepsilon(x, t)$ 为光能利用率,计算方法如式(8):

$$\varepsilon(x, t) = f(par) \times f(T) \times f(W_e) \times f(vpd) \times f(CO_2) \times \varepsilon^* \quad (8)$$

其中: $f(par)$ 指辐射胁迫系数, $f(T)$ 指温度影响系数, $f(W_e)$ 指水分胁迫因子, $f(vpd)$ 指水汽压影响系数, $f(CO_2)$ 指二氧化碳浓度胁迫, ε^* 指理想条件下的最大光能利用率,最大光能利用率的取值精度受到植被分类图的影响。

通过叶、茎、细根、粗根等植被各器官的生物量、维持性呼吸系数、维持性呼吸对温度的敏感性因子、植物总的生长性呼吸占总生长量的比例系数等数据计算得出自养呼吸。通过土壤碳含量、森林生态系统土壤碳含量与土壤呼吸双曲线关系的半饱和常数、土壤呼吸随气温的变化率、月均温度和降水量数据计算得出异氧呼吸。

3 结果与分析

3.1 陆地生态系统不同土地覆被类型碳储量变化

研究区 2013 年林地面积约占陆地生态系统总面积的 62.31%,其中常绿针叶林约占全区面积的 38.94%,阔叶林面积约占 14.01%,灌丛面积为 690.85 hm²,约占 9.37%。草地面积随年份推移增长至 532.36 hm²,水域面积和建设用地面积分别约占全区面积的 0.83%、4.39%,而农田面积有所减少为 1862.53 hm²,约占全区面积的 25.25%。

从净初级生产力均值来看,林地>草地>农业用地>水域>建设用地, NPP 均值分别为 56.47 gC/m²·month⁻¹、27.18 gC/m²·month⁻¹、24.96 gC/m²·month⁻¹、17.82 gC/m²·month⁻¹、14.99 gC/m²·month⁻¹,林地中不同植被类型 NPP 均值也存在差异,阔叶林(54.30 gC/m²·month⁻¹)>常绿针叶林(45.90 gC/m²·month⁻¹)>灌丛(36.29 gC/m²·month⁻¹),建设用地年间变化幅度最小。2001—2013 年间陆地生态系统各土地覆被类型的 NPP 均值对比如图 1 所示, NPP 最大均值是 2013 年阔叶林 85.64 gC/m²·month⁻¹,2013 年阔叶林 $NDVI$ 均值

高达 0.77,灌丛 $NDVI$ 值微低于阔叶林,其均值为 0.73,归一化植被指数 $NDVI$ 值与净初级生产力 NPP 值呈显著正相关关系($R=0.78$),阔叶林、灌丛主要分布于中部山岭和中部山轴,该片区 $NDVI$ 涨幅变化比率较大(25%),人工种植柑橘树、天竺桂、慈竹等次生林让植被得以恢复从而影响森林碳储量变化。

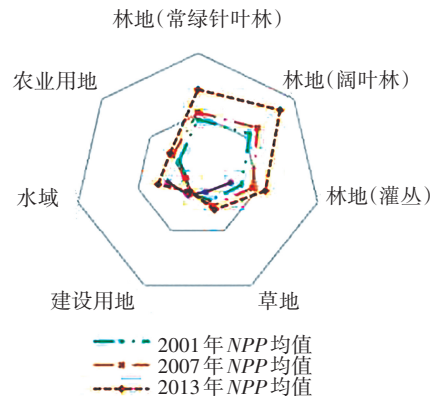


图 1 陆地生态系统净初级生产力情况图

Fig. 1 Distribution chart of NPP in terrestrial ecosystems

从 2001—2013 年整体来看,林地、草地、农田的净生态系统生产力随年份的推移逐年增强,建设用地和水域的 NPP 值呈先上升后下降的趋势,草地和建设用地的变化率较小。数据显示森林生态系统在生态系统的二氧化碳吸收方面有突出优势,林地在各土地覆被类型中 NEP 值均较高,其中阔叶林 NEP 出现最大值为 44.38 gC/m²·month⁻¹,总量值达 92.81 × 10⁷ gC·month⁻¹。其次是常绿针叶林为 32.32 gC/m²·month⁻¹,总量值达 45.87 × 10⁷ gC·month⁻¹,灌丛的净生态系统生产力优于草地,研究区 NEP 负值普遍存在于水域和建设用地中,水域为最小值 -25.84 gC/m²·month⁻¹。2013 年各土地覆被类型 NEP 均值明显高于其他年份,从 2001—2013 年间的净生态系统生产力均值来看,林地>农业用地>草地>建设用地>水域, NEP 均值分别为 18.74 gC/m²·month⁻¹、-10.84 gC/m²·month⁻¹、-11.45 gC/m²·month⁻¹、-19.91 gC/m²·month⁻¹、-24.76 gC/m²·month⁻¹。

3.2 不同年际森林碳储量变化

通过对陆地生态系统的净初级生产力和净生态系统生产力进行年际比较分析,由表 1 可知,研究区 2001—2013 年的 NPP 均值、 NEP 均值都呈现出逐年上升趋势。其中, NPP 上升总量值为 153.75 × 10⁷ gC·month⁻¹,变化均值为 20.92 gC/m²·month⁻¹,2007—2013 年上升幅度明显大于 2001—2007 年,2013 年 $NDVI$ 均值(0.33)>2007 年 $NDVI$ 均值(0.28)>2001 年 $NDVI$ 均

值(0.27), NPP_{max} 值排序为: 2013 年 ($103.29 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{month}^{-1}$) > 2007 年 ($79.93 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{month}^{-1}$) > 2001 年 ($72.81 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{month}^{-1}$)。

表 1 2001—2013 年陆地生态系统 NPP 、 NEP 值变化统计表
Table 1 Change in NPP and NEP values from 2001 to 2013 of terrestrial ecosystem

年间	NPP 均值变化/ 变化 ($\text{gC/m}^2 \cdot \text{month}^{-1}$)	NPP 总量变化/ ($\text{gC/m}^2 \cdot \text{month}^{-1}$)	RH 值 变化	NEP 均值变化/ ($\text{gC} \cdot \text{month}^{-1}$)
2001—2007	8.17	59.83×10^7	0.29	7.57
2007—2013	12.79	93.92×10^7	0.75	11.23
2001—2013	20.92	153.75×10^7	1.04	18.80

RH 异氧呼吸在夏季比较旺盛, 但变化趋势不明显, 日总量变化均值在 $0.588 \sim 0.602 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{day}^{-1}$ 范围内, 与当日土壤温度、降水量等环境因子有关, 也与叶面积指数、植被群落类型等生物因子有关, 同时也与森林利用方式、采伐程度、人工施肥等人为因子有关。2001—2013 年 NEP_{max} 值为 $76.51 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{month}^{-1}$ (2013 年), 2001 年 NEP 值波动范围在 $-54.29 \sim 49.74$ 之间, 2007 年 NEP 值波动范围为 $-57.78 \sim 55.83$, 2013 年 NEP 最小值为 $-61.03 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{month}^{-1}$ 。 NEP 月均值排序为: 2013 年 > 2007 年 > 2001 年, 其中只有 2001 年 NEP 值为负 ($-2.03 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{month}^{-1}$), 表现为大气 CO_2 碳源, 碳吸收量小于碳排放量。

3.3 不同植被群落优势树种碳储量

通过 GLOPEM-CEVSA 遥感过程耦合模型计算得出不同植被优势树种的 NPP 值, 如图 2 所示, 图 2 中编号 A1—A6 依次为 A1 (斑茅+空心莲子草+野菊) 草本群落; A2 (茭苳+竹叶花椒+黄荆+山麻杆+火棘+铁仔) 常绿灌丛、灌草丛群落和 (天竺桂) 人工灌木群落; A3 (慈竹) 竹林群落; A4 (构树+乌桕+朴树+女贞+香椿) 乔幼落叶阔叶群落; A5 (马尾松+杉木+山莓+毛桐) 常绿针叶林群落和 (马尾松-白栎+椴木) 常绿针叶林群落; A6 (柏木-火棘+毛桐) 常绿针叶林群落。各个演替序列表现出不同的植被净初级生产力, NPP 均值最小的是草本群落 (A1), 常绿灌丛/灌草丛/人工灌木群落 (A2) 次之, 马尾松/杉木常绿针叶林群落 (A5) 大于柏木常绿针叶林群落 (A6), 却小于 (慈竹) 竹林群落 (A3), 乔幼落叶阔叶林群落 (A4) 最大, 因此森林植被优势树种 NPP 均值大小关系是: $A4 > A5 > A6 > A2 > A1$ (自然演替); $A3 > A5 > A6 > A2$ (人工演替)。各个森林植被群落占用面积比例有所不同, 影响着植被净初级生产力月总量平均

值的变化, 草本群落、常绿灌丛/灌草丛/人工灌木群落、(慈竹) 竹林群落、乔幼落叶阔叶林群落、马尾松/杉木常绿针叶林群落、柏木常绿针叶林群落森林群落面积比例分别为 10.38%、13.47%、13.18%、20.15%、40.67%、2.15%, 次生演替序列中 NPP 总量大小关系是: $A6 < A1 < A2 < A4 < A5$ (自然演替); $A6 < A2 < A3 < A5$ (人工演替)。

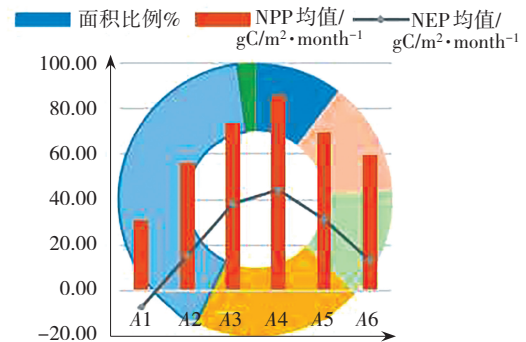


图 2 不同植被群落优势树种碳储量分布图

Fig. 2 Distribution map of carbon reserves of predominant tree species in different vegetation communities

马尾松/杉木常绿针叶林群落的土壤呼吸值最大 ($1.50 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$), 乔幼落叶阔叶林群落的土壤呼吸值最小 ($1.14 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$), A2—A6 群落的土壤呼吸均低于其 NPP 值, NEP 值 > 0 均为正, 表现为碳汇, 而草本群落土壤呼吸量已高于其净初级生产力, NEP 值 < 0 为负, 表现为碳源。

不同植被群落优势树种净生态系统生产力的波动范围在 $-53.72 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{month}^{-1} \sim 76.51 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{month}^{-1}$ 之间。随着演替阶段的顺行更替, NEP 值表现出先上升后下降的趋势, 变化趋势与研究区 NPP 值大体一致。从图 2 可知, 自然演替过程中, NEP 最大均值为 $44.38 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{month}^{-1}$ (A4), 常绿灌丛/灌草丛/人工灌木群落 ($15.37 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{month}^{-1}$) 大于柏木常绿针叶林群落 ($13.42 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{month}^{-1}$), 却小于广泛分布在研究区两翼山岭的马尾松/杉木常绿针叶林群落 ($31.38 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{month}^{-1}$), NEP 最小均值为 $-7.19 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{month}^{-1}$ (A1), 不同植被群落优势树种 NEP 均值大小关系是: $A4 > A5 > A2 > A6 > A1$ (自然演替); $A3 > A5 > A2 > A6$ (人工演替)。在人工辅助演替过程中, (慈竹) 竹林群落 (A3) 的 NEP 均值仅次于 NEP 最大均值, 高出马尾松/杉木常绿针叶林群落 NEP 值 $6.83 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{month}^{-1}$, 在人工演替序列中排序第一位, 而 (慈竹) 竹林群落的土壤呼吸速率仅有 $1.33 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{day}^{-1}$ 。

4 结论

研究采用 GLOPEM-CEVSA 遥感过程耦合模型模拟陆地生态系统不同土地覆被类型碳储量变化、不同年际森林碳储量变化及不同植被群落优势树种碳储量,根据本地化的土壤数据、优势树种、气象因子、植被群落等关键因子参数,定量估算总初级生产力、净初级生产力和净生态系统生产力,模型反演特殊环境下斑块尺度的生态系统碳源/碳汇变化差异,得出如下结论:

(1) 从 2001—2013 年整体情况来看,林地净初级生产力>草地>农业用地>水域>建设用地,林地净生态系统生产力>农业用地>草地>建设用地>水域。林地中阔叶林和灌丛主要分布于中部山岭、中部山轴。年际 *NPP/NEP* 值大小关系均为 2013 年>2007 年>2001 年,2001 年 *NEP* 值为负 ($-2.03 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{month}^{-1}$),表现为大气 CO_2 碳源,碳吸收量小于碳排放量。森林植被优势树种 *NPP* 值乔幼落叶阔叶林群落(A4)>马尾松/杉木常绿针叶林群落(A5)>柏木常绿针叶林群落(A6)>常绿灌丛/灌草丛/人工灌木群落(A2)>草本群落(A1)(自然演替);(慈竹)竹林群落(A3)>A5>A6>A2(人工演替)。*NEP* 均值大小关系是:A4>A5>A2>A6>A1(自然演替);A3>A5>A2>A6(人工演替)。*NPP* 值和 *NEP* 值随顺行演替均呈现出先上升后下降的单峰状发展趋势,乔幼落叶阔叶林、慈竹林的固碳能力呈现递增趋势,对减缓大气的碳源效应有正面推动作用,马尾松覆盖面积较大,中梁山马尾松林的平均恢复年限在 25 年左右,马尾松/杉木常绿针叶林群落属于当地酸性土壤顶级群落,在动态演替过程中呈现峰值区域下降趋势,发展到一定阶段后处于植被群落相对稳定阶段,而储碳量累积占增额碳量的比例减少,从而群落固碳能力相对而言被削弱,适当通过间伐的手段营造最佳营养生长环境。

(2) 合理的人类活动对当地森林生态系统起到了改造、重建和促进作用,(慈竹)竹林群落净初级生产力和净生态系统生产力均较高,成片分布于居民居住区附近和山麓山腰区,是典型的人工种植林,市面上以竹子为原材料既经济又实惠的竹纤维服饰、竹制餐具、竹制家具等低碳产品被广泛推广并应用于城乡生活、工业生产、建筑建材等各个行业,竹林种植数量逐年增加,其生命力旺盛,易存活,生长速度以每年 3% 的速度递增,熟林期短,碳素转化率高,覆盖面积不断扩大的竹林展现出独特的固碳优势,以动态发展的形式适应着周边复杂变化的生存环境。

(3) *NPP* 和 *NEP* 高值区主要分布在山地两翼森林覆盖地,特别是东翼区,而天然林与人工林相比,慈竹林的人工种植面积扩大对森林碳增汇具有一定的正面效果,但是其固碳量仍小于阔叶林,天然林的固碳能力明显高于人工林,应在恢复植被覆盖的同时更加重视对自然林的培育、保护和管理。

参考文献(References):

- [1] Richards K R, Stokes C. A review of forest carbon sequestration cost studies: a dozen years of research [J]. *Climatic Change*, 2004, 63(1-2): 1—48.
- [2] 刘世荣,王晖,栾军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展[J]. *生态学报*, 2011, 31(19): 5437—5448.
LIU Shi-rong, WANG Hui, LUAN Jun-wei. A review of research progress and future prospective of forest soil carbon stock and soil carbon process in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5437—5448.
- [3] 李洁,张远,顾峰雪,等. 中国东北地区近 50 年净生态系统生产力的时空动态[J]. *生态学报*. 2014, 34(6): 1490—1502.
LI Jie, ZHANG Yuan, GU Feng-xue, et al. Temporospatial variations in net ecosystem productivity in Northeast China since 1960 [J]. *Acta Ecologica Sinica*. 2014, 34(6): 1490—1502.
- [4] 王珍,刘金培,肖鹏. 碳减排对 PM2.5 的协同效应与交互效应分析——基于长江经济带 11 省市面板数据的实证[J]. *重庆工商大学学报(自然科学版)*, 2018, 35(6): 63—69.
WANG Zhen, LIU Jin-pei, XIAO Peng, et al. Analysis on the synergistic effect and interaction effect of carbon reduction on PM2.5: an empirical study on panel data of 11 provinces and cities in the Yangtze River Economic Zone [J]. *Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition)*, 2018, 35(6): 63—69.
- [5] 李宁. 辽宁省乔木林的碳储量和碳密度研究[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(16): 27—31.
LI Ning. Carbon storage and carbon density of arboreal forest in Liaoning province [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(16): 27—31.
- [6] 王继丰,黄庆阳,谢立红,等. 黑龙江松嫩草地植物群落物种多样性与植物碳储量的关系[J]. *中国草地学报*, 2022, 44(7): 33—42.
WANG Ji-feng, HUANG Qing-yang, XIE Li-hong, et al. Relationship between plant community species diversity and vegetation carbon storage in Songnen grassland [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(7): 33—42.
- [7] 崔海鸥, 闫然. 我国第九次森林资源清查中的资源动态研

- 究[J]. 西部林业科学. 2020, 49(5): 90—95.
CUI Hai-ou, YAN Ran. Analysis on the results of the 9th national forest inventory [J]. Journal of West China Forestry Science. 2020, 49(5): 90—95.
- [8] 张平平, 李艳红, 殷浩然, 等. 中国南北过渡带生态系统碳储量时空变化及动态模拟[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1183—1197.
ZHANG Ping-ping, LI Yan-hong, YIN Hao-ran, et al. Spatio-temporal variation and dynamic simulation of ecosystem carbon storage in the north-south transitional zone of China [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1183—1197.
- [9] 周志峰, 王耀, 贾刚, 等. 河北省乔木林碳储量现状与固碳潜力预测[J]. 林业资源管理, 2022, 2: 45—53.
ZHOU Zhi-feng, WANG Yao, JIA Gang, et al. Carbon storage status and carbon sequestration potential prediction of arbor forest in Hebei province [J]. Forest Resources Management, 2022, 2: 45—53.
- [10] 王军邦, 刘纪远, 邵全琴, 等. 基于遥感-过程耦合模型的1988—2004年青海三江源区净初级生产力模拟[J]. 植物生态学报, 2009, 33(2): 254—269.
WANG Jun-bang, LIU Ji-yuan, SHAO Quan-qin, et al. Spatial-temporal patterns of net primary productivity for 1988—2004 based on GLOPEM-CEVSA model in the “Three-river Headwaters” region of Qinghai province, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(2): 254—269.
- [11] 洪伟, 吴承祯. 马尾松人工林经营模式及其应用[M]. 北京: 中国林业出版社, 1999.
HONG Wei, WU Cheng-zhen. Business model and its application of masson pine plantation [M]. Beijing: China Forestry Press, 1999.
- [12] NATH S, NATH A, SILESHI G W, et al. Biomass stocks and carbon storage in *Barringtonia acutangula* floodplain forests in North East India [J]. Biomass and Bioenergy, 2017, 98(5): 37—42.
- [13] AMOAH M. Aboveground biomass, carbon storage and fuel values of *Bambusa vulgaris*, *Oxyantheria abyssinica* and *Bambusa vulgaris* var. *vitata* plantations in the Bobiri forest reserve of Ghana [J]. Journal of Sustainable Forestry, 2020, 39(2): 113—136.
- [14] RAGAVAN P, KUMAR S, KATHIRESAN K, et al. Biomass and vegetation carbon stock in mangrove forests of the Andaman Islands, India [J]. Hydrobiologia, 2021, 848(20): 4673—4693.
- [15] 杜明凤, 李明军, 赵文静. 贵州省1995—2015年森林碳储量时空变化研究[J]. 浙江林业科技, 2022, 42(1): 41—47.
DU Ming-feng, LI Ming-jun, ZHAO Wen-jing. Temporal and spatial variation of forest carbon storage in Guizhou from 1995 to 2015 [J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2022, 42(1): 41—47.
- [16] 戴子熠, 廖丽蓉, 梁嘉慧, 等. 1988—2018年广西北海红树林蓝碳储量变化分析[J]. 海洋环境科学, 2022, 41(1): 8—15, 23.
DAI Zi-yi, LIAO Li-rong, LIANG Jia-hui, et al. Blue carbon stocks of mangrove from 1988 to 2018 in Beihai, Guangxi [J]. Marine Environmental Science, 2022, 41(1): 8—15, 23.
- [17] 张峰, 彭祚登. 北京市森林碳储量和碳汇经济价值研究[J]. 林业资源管理, 2021(6): 52—58.
ZHANG Feng, PENG Zuo-deng. Biomass carbon stocks and carbon stock economic value offorests in Beijing [J]. Forest Resources Management, 2021(6): 52—58.
- [18] 于贵瑞, 王秋凤, 刘迎春, 等. 区域尺度陆地生态系统固碳速率和增汇潜力概念框架及其定量认证科学基础[J]. 地理科学进展, 2011, 30(7): 771—787.
YU Gui-rui, WANG Qiu-feng, LIU Ying-chun, et al. Conceptual framework of carbon sequestration rate and potential increment of carbon sink of regional terrestrial ecosystem and scientific basis for quantitative carbon authentication [J]. Progress in Geography, 2011, 30(7): 771—787.
- [19] 邹扬庆. 基于3S技术的中梁山植被演替识别与演替规律研究[D]. 西南大学. 2014.
ZOU Yang-qing. Research on the succession recognition and succession law of Middle Liangshan vegetation based on 3S technology [D]. Southwest University. 2014.
- [20] Hall F G, Botkin D B, Strebel D E, et al. Large-scale patterns of forest succession as determined by remote sensing [J]. Ecology, 1991, 72(2): 628—640.
- [21] 张金屯, 邱扬, 柴宝峰, 等. 晋西吕梁山严村流域撂荒地植物群落演替中的物种多样性变化[J]. 生物多样性, 2000, 8(4): 378—384.
ZHANG Jin-tun, QIU Yang, CHAI Bao-feng, et al. Changes in species diversity in the succession of plant communities of abandoned land in Luliang Mountain, western Shanxi [J]. Chinese Biodiversity, 2000, 8(4): 378—384.
- [22] 任海, 蔡锡安, 饶兴权, 等. 植物群落的演替理论[J]. 生态科学, 2001, 20(4): 59—66.
REN Hai, CAI Xian, RAO Xing-quan, et al. The theory on succession of plant community [J]. Ecological Science, 2001, 20(4): 59—66.