

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第10期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.10.016

论文标题： 北京典型人工针阔混交林碳汇变化特征及其环境调控

作　　者： 王永康，王 迎，陈文婧，等

收稿日期： 2025-10-10

引文格式： 王永康,王迎,陈文婧,等.北京典型人工针阔混交林碳汇变化特征及其环境调控[J].中南林业科技大学学报,2026,46(10):177-188.

Wang Y K, Wang Y, Chen W J, et al. Characteristics of carbon sequestration changes and environmental regulation in a typical artificial coniferous and broad-leaved mixed forest in Beijing[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(10):177-188.

相关论文推荐

Recommended articles

针阔混交林对人工林土壤微生物特征影响的研究进展

Advances in the effects of mixed coniferous and broad-leaved forests on soil microbial characteristics

抚育间伐强度对针阔混交林碳动态变化的影响

Effects of thinning intensity on the carbon dynamics in mixed coniferous forests

小兴安岭天然针阔混交林非结构性碳水化合物对间伐强度的响应

Responses of NSC to different thinning intensities in natural coniferous and broad-leaved mixed forests in Xiaoxing'an mountains

基于机器学习的防护林树种光合调控与碳汇能力评估框架

A machine learning-based framework for evaluating photosynthetic regulation and carbon sequestration capacity among shelter forest species

间伐对长白落叶松人工林碳汇木材复合经济效益的影响

Effects of thinning on the compound economic benefits of carbon and wood for planted *Larix olgensis* forests

2001—2023年春陵水流域植被碳储量时空变化及碳汇潜力分析

Analysis of spatial and temporal changes in vegetation carbon stocks and carbon sink potential in Chongling water basin from 2001 to 2023

第 46 卷 第 10 期
2026 年 10 月
中南林业科技大学学报
Journal of Central South University of Forestry & Technology
Vol. 46 No. 10
Oct. 2026
Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.10.016
http: //qks.csuft.edu.cn

北京典型人工针阔混交林碳汇变化特征及其环境调控

王永康[1]，王　迎[2]，陈文婧[3]，周泽圆[4]，赵洪贤[1]，刘康龙[1]，查天山[1]

（1. 北京林业大学 a. 林木资源高效生产全国重点实验室；b. 水土保持学院，北京 100083；
2. 北京市大兴区林业工作站，北京 102600；3. 南京工业职业技术大学 艺术设计学院，江苏 南京 210023；
4. 北京市园林绿化规划和资源监测中心，北京 101118）

摘　要：【目的】探究人工针阔混交林净生态系统生产力（NEP）的变化特征及其环境调控，阐明北京典型人工针阔混交林生态系统碳汇功能，服务“双碳”目标。【方法】以北京大兴人工针阔混交林生态系统为研究对象，采用涡度相关技术（EC）全年（2023）连续观测其净生态系统生产力；同时，对光合有效辐射（PAR）、饱和水汽压差（VPD）、空气温度（T_a）、土壤含水量（SWC）等环境因子进行原位同步监测，采用随机森林模型计算环境因子的重要性得分，量化环境因子对人工针阔混交林 NEP 及碳汇的影响。【结果】能量闭合率为 0.72，全年 NEP 平均日变化和季节变化均为单峰型，NEP 峰值（11.95 μmol·m^{-2}·s^{-1}）出现在生长季（7 月），生长季（3—11 月）表现为碳汇，其净固碳量为 384.83 g·m^{-2}；非生长季表现为碳源，净释碳量为 1.18 g·m^{-2}，全年净固碳量为 383.65 g·m^{-2}；NEP 季节变化呈先增加后降低趋势，其变化主要受 PAR、SWC、VPD 和 T_a 因子调控（$P < 0.01$）；PAR 的影响最大，随机森林模型输出重要性得分为 56.42，是影响 NEP 及碳汇的主导环境因子；各环境因子影响阈值分别为 400 μmol·m^{-2}·s^{-1}、0.17 m^3/m^3、1.5 kPa 和 28 ℃。当 SWC ＜ 0.1 m^3/m^3 时，SWC 先随 T_a 上升，当 T_a ＞ 10 ℃时，后随 T_a 下降，T_a 对 NEP 的间接调控阈值为 10 ℃。【结论】该人工针阔混交林全年表现为中等强度碳汇，PAR 是碳汇季节变化的主导调控因子，研究结果可为北京人工针阔混交林生态系统碳汇提升管理提供科学支持，观测数据是校验人工林碳汇模型数据库的重要补充。

关键词：针阔混交林；碳通量；涡度相关；随机森林；环境因子
中图分类号：S718.55$^+$6　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)10-0177-12

Characteristics of carbon sequestration changes and environmental regulation in a typical artificial coniferous and broad-leaved mixed forest in Beijing

Wang Yongkang[1], Wang Ying[2], Chen Wenjing[3], Zhou Zeyuan[4], Zhao Hongxian[1], Liu Kanglong[1], Zha Tianshan[1]

(1. a. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources; b. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Beijing Daxing District Forestry Workstation, Beijing 102600, China;
3. School of Arts and Design, Nanjing University of Industry Technology, Nanjing 210023, Jiangsu, China;
4. Beijing Landscape Planning and Resources Monitoring Center, Beijing 101118, China)

Abstract:【Objective】This study aimed to explore the variation characteristics of net ecosystem productivity (NEP) and its environmental regulation in a typical artificial mixed coniferous and broad-leaved forest ecosystem in Beijing, clarify its carbon sequestration function, and to support the goals of carbon peaking and carbon neutrality.【Method】An artificial mixed coniferous and broad-leaved forest ecosystem located in Beijing was selected as the study site. Continuous in-situ observations of NEP were conducted throughout 2023 using the eddy covariance (EC) technique. Simultaneously, environmental factors, including photosynthetically active radiation (PAR), vapor pressure deficit (VPD), air temperature (T_a), and soil water content (SWC), were monitored. The random forest model was used to calculate the importance scores of these environmental factors and to quantify their impacts on NEP and carbon

收稿日期（Received）：2025-10-10　　修订日期（Revised）：2025-12-13
基金项目：国家重点研发计划项目（2020YFA0608103-01）。
第一作者：王永康（wykkk819665956@163.com），硕士研究生。
通信作者：查天山（tianshanzha@bjfu.edu.cn），教授，博士，博士生导师。
引文格式：王永康 , 王迎 , 陈文婧 , 等 . 北京典型人工针阔混交林碳汇变化特征及其环境调控 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(10):177-188.
Wang Y K, Wang Y, Chen W J, et al. Characteristics of carbon sequestration changes and environmental regulation in a typical artificial coniferous and broad-leaved mixed forest in Beijing[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(10):177-188.

sequestration.【Result】The energy closure of the measurements was 0.72, The average daily and seasonal variations of NEP exhibited unimodal trends, with NEP peaking at 11.95 μmol·m^{-2}·s^{-1} in July during the growing season (March–November). The ecosystem acted as a carbon sink during the growing season, with a net carbon sequestration of 384.83 g·m^{-2}, whereas it functioned as a carbon source in the non-growing season, releasing 1.18 g·m^{-2}. The total annual net carbon sequestration was 383.65 g·m^{-2}. Seasonal variations in NEP showed an initial increasing trend followed by a decrease, significantly influenced by PAR, SWC, VPD and T_a ($P < 0.01$). Among these factors, PAR was the dominant environmental factor controlling NEP and carbon sequestration, with an importance score of 56.42 determined by the random forest model. The thresholds of environmental factors influencing NEP were 400 μmol·m^{-2}·s^{-1} (PAR), 0.17 m^3/m^3 (SWC), 1.5 kPa (VPD), and 28 ℃ (T_a). Additionally, when SWC was below 0.1 m^3/m^3, it initially increased with rising T_a, but after exceeding 10 ℃ , SWC decreased. The indirect regulatory threshold of T_a on NEP was thus identified as 10 ℃.【Conclusion】The studied artificial mixed coniferous and broad-leaved forest exhibited moderate carbon sequestration capacity. PAR was the primary factor controlling seasonal variations in carbon sequestration. The findings provide scientific support for managing carbon sink enhancement in artificial mixed coniferous and broad-leaved forest ecosystems in Beijing. Additionally, the observational dataset constitutes an important supplement for validating models used in forest carbon estimation.

Keywords: coniferous and broad-leaved mixed forest; carbon flux; eddy covariance; random forest; environmental factor

陆地生态系统对地球碳循环具有重要影响，自 1960 年以来，全球陆地碳汇增加了近一倍，对气候变暖的减缓作用持续增强 [1]。森林作为主要的陆地生态系统之一，大约覆盖了全球陆地面积的三分之一 [2]，总面积达 4 000 万 km^2，是陆地生态系统中最大的碳库 [3]。森林生态系统根据碳收支情况可分为碳汇和碳源，碳源表示碳排放量大于碳吸收量，碳汇则表示碳吸收量大于碳排放量。森林碳汇作为陆地碳汇的主体，是降低大气中温室气体浓度、缓解全球气候变暖的关键 [4-5]，在抵消人类活动（尤其是化石燃料燃烧）产生的巨量碳排放方面更是发挥着举足轻重的作用 [6-8]。

近年来，在全球气候变暖持续加剧的背景下，森林生态系统的稳定性、恢复力及其核心的碳汇功能遭受严峻威胁。森林生态系统适应性管理和其碳汇功能提升是当前面临的重要挑战。中国的植被动态，特别是其大规模的人工林建设，被证实发挥着主导性的积极作用 [9]。值得注意的是，中国的人工林生态系统对气候变化表现出高度敏感性 [10]。然而，相较于天然林，人工林更易受到人为干扰和环境变化的影响，其碳汇功能具有更大的不确定性 [11]。在众多人工林类型中，人工针阔混交林因其特殊的组成和结构特征而备受关注。这类森林通常由针叶树和阔叶树混交而成，其林分结构往往更为复杂，物种间的相互作用（如资源竞争和互补）使整个生态系统具有较强的稳定性 [12]。从碳汇功能角度看，针阔混交林展现出独特的潜力：针叶树通常具有较高的生长速率和较长的生命周期，以及应对多变气候条件时较强的适应性；而阔叶树具有较大的叶片面积，能够在生长季通过高效的光合作用吸收和固定大量的二氧化碳。更重要的是，针叶树、阔叶树与林下植被（灌木、草本）共同构建了多层次、立体化的林木空间结构。这种结构的复杂性不仅优化了光能资源利用效率，还促进了养分循环，协同增强了林地的整体生态服务功能，特别是碳汇能力 [13]。这种由结构多样性驱动的功能提升，使得人工针阔混交林在促进城市区域碳汇增长以及增强城市生态系统应对气候变化韧性方面乃至全球碳循环，都具有不可忽视的重要生态意义。目前阶段的碳汇研究热点是“如何实现监控管理下的可持续森林碳汇”，通过科学有效地管理森林生态系统使其持续发挥碳汇作用，让森林特别是受管理的人工林，在气候变化、极端天气的影响下能够持续发挥碳汇作用。已有研究证明碳汇在管理和未管理的森林中扮演当前和未来的角色，通过管理可以更好地了解森林在生物圈中的作用以及引起森林碳通量变化的机制 [14-15]。

尽管不同生态系统（如森林、草地、农田）的碳通量日变化特征普遍遵循相似的“U”形曲线，这一特征已被众多研究所证实 [16-18]。然而，在季节尺度或更长时间尺度上，碳通量的变化模式则会表现出显著的空间异质性，这种异质性主要源于研究区生态系统类型和植被组成的差异 [19-20]。其根本原因在于，生态系统碳汇功能的时空变化特征受到多尺度环境因子的复杂调控，环境因子可通过多种生理生态过程直接或间接影响其碳汇变化。现有研究表明，不同生态系统类型的主导调控因子存在明显区别：针阔混交林生态系统中光合有效辐射（Photosynthetically active radiation，PAR）和降水量（Precipitation，P）通常被观察到对碳汇具有显著的直接影响 [21]；灌丛、草地生态系统碳汇对空气温度（T_a）表现出高度敏感性 [22]；而针叶林生态系统的碳通量主要受净辐

射的驱动[23]，有研究探讨了土壤含水量（Soil water content，SWC）和净生态系统生产力（Net ecosystem productivity，NEP）呈一元二次关系，但只考虑了直接的作用机制[24]。但针阔混交林的林分结构复杂，其碳汇调控机制受多种因素影响，不确定性较大，应考虑间接作用机制。其调控机制的研究还较少，缺少对更深层机制的探讨。

涡度相关法经过多年的发展，已经逐步发展成为全世界通用的碳水通量观测标准方法[25-26]，该技术对生态系统的干扰性小，观测准确。涡度相关技术可以长期连续地进行通量监测，提供从分钟到小时、日、月、年以及更长时间尺度的通量观测数据，是唯一一种能直接观测到生态系统水平不同时间尺度的碳、水汽以及能量通量的方法。本研究以北京生态系统观测网络大兴人工针阔混交林为对象，采用涡度相关技术测定其碳通量，同时对空气温度（Air temperature，T_a）、光合有效辐射、饱和水汽压差（Vapor pressure deficit，VPD）、降水量（P）、土壤含水量（SWC）和相对湿度（Relative humidity，RH）等环境因子进行原位同步观测，分析人工针阔混交林生态系统碳汇的季节变化特征及其环境调控机制。本研究对了解人工林生态系统如何响应气候变化，评估人工针阔混交林生态系统稳定性和适应性以及科学管理人工林具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究依托北京大兴人工针阔混交林观测站，站点位于北京市大兴区魏善庄半壁店公园（39°36′ N，116°25′ E），海拔57 m。气候类型属于中纬度温带大陆性季风气候，1991—2020年的多年平均降水量为532.6 mm，年平均气温为10.8 ℃，全年无霜期260 d左右。植被类型为片状人工针阔混交林，针叶优势乔木为侧柏 *Platycladus orientalis*、阔叶优势乔木为刺槐 *Robinia pseudoacacia* 和杨树 *Populus przewalskii*，3种优势乔木占地面积均约为研究样地总面积的30%，平均树高13 m，平均胸径16 cm，其他乔木还有圆柏 *Juniperus chinensis*、赤松 *Pinus densiflora* 和构树 *Broussonetia papyrifera*，约占研究样地面积的10%。优势灌木为荆条 *Vitex negundo* var. *heterophylla*，优势草本为黄花蒿 *Artemisia annua*，斑种草 *Bothriospermum chinense*，土壤类型以褐土为主。

1.2 研究方法

1.2.1 涡度和微气象因子观测

碳通量观测系统由三维超声风速仪（Gill WindMaster, GILL Inc.，英国）、开路式 CO_2/H_2O 分析仪（LI-7500 DS, LI-COR Inc.，美国）和数据采集器（Model LI-7550, LI-COR Inc.，美国）构成。考虑到林木冠层高度，仪器装设高度为20 m。其中，三维超声风速仪用于测定三维风速；开路式 CO_2/H_2O 分析仪主要用于测定森林生态系统与大气之间的 CO_2 交换（NEE）；数据采集器用于记录与存储高频（10 Hz）原始数据和计算半小时平均通量数据。

微气象因子主要包括空气温度、空气相对湿度、土壤含水量、土壤温度、光合有效辐射、风速、风向和降水量等，微气象因子测定与碳水通量监测同步进行。其中，光合有效辐射传感器（LI-190R, LI-COR Inc., 美国）以及雨量筒（TE525, Campbell Scientific Inc.，美国）的安装高度为25 m，风速风向计（034B, Campbell Scientific Inc.，美国）的安装高度为25 m，空气温湿度传感器（HMP155A, Vaisala Inc., 芬兰）的安装高度为5 m和25 m，土壤水分、温度传感器（TEROS11, METERGroup, Inc.，美国）均在土层10 cm深处（表1）。所有微气象设备的观测数据均用数据采集器（CR1000X Campbell Scientific Inc.，美国）每半小时采集一次。

1.2.2 数据处理

对监测所得的10 Hz原始数据使用EddyPro软件（Version 7.0.9 LI-COR Inc.，美国）进行预处理。10 Hz数据预处理流程为异常值去除、坐标轴旋转、光谱校正、超声温度校正、WPL校正和未校正通量计算，最终得到30 min的通量数据[27]。净生态系统生产力（NEP）为–NEE。

由于监测设备运维过程中出现的问题以及外界环境要素（地形、极端天气等）的影响，监测所得数据通常会出现异常和缺失。对30 min的数据进行质量控制，剔除超出仪器量程或合理范围的数据，利用绝对中位差（MAD）剔除离群值，利用五倍标准差法剔除异常值[28]。对于夜间的筛选：由于在夜间弱湍流条件下大气垂直混合能力较差，导致涡度相关测量的通量数据低估实际碳交换，使用摩擦风速（u^*）阈值剔除夜间低湍流条件下的数据[29-30]，本研究中摩擦风速阈值为0.07 $m \cdot s^{-1}$。

对各种原因（如仪器故障、停电、异常值剔除）造成的数据缺失，包括环境因子数据如降水量（P）、空气温度（T_a）、相对湿度（RH）、光合有效辐

表 1 观测站点装设仪器信息
Table 1 Information of instruments installed at observation stations

仪器名称 Name of instrument	布设高度 Layout height	测定指标 Determination index
三维超声风速仪（Gill WindMaster） Three-dimensional ultrasonic anemometer	20 m	三维风速 空气温度
CO_2/H_2O 红外气体分析仪（LI-7500DS） CO_2/H_2O infrared gas analyzer	20 m	CO_2/H_2O 浓度
空气温湿度传感器（HMP155A） Air temperature and humidity sensor	5 m、25 m	空气温度、空气相对湿度
土壤水分和温度传感器（TEROS11） Soil temperature and humidity sensor	地下 10 cm 处	土壤温度、土壤含水量
降水量传感器（TE525）Precipitation sensor	25 m	降水量
光合有效辐射传感器（LI-190R） Photosynthetically active radiation sensor	25 m	光合有效辐射
风速风向计（034B） Anemorumbograph	25 m	风速 风向

射（PAR）、饱和水汽压差（VPD）、土壤含水量（SWC）等，使用以下方法插补。对于缺失时间在 2 h 内的数据采用线性回归法插补；对于缺失时间＞2 h 的数据采用边际分布采样（Marginal distribution sampling，MDS）方法，使用 R 软件中的“REddyProc”程序包插补 [31]。

本研究定义生长季为3—11 月，生长季 NEP ＞ 0[32]。NEP 为正代表此生态系统为碳汇，NEP 为负代表此生态系统为碳源。随机森林模型和环境因子重要性得分采用 R 软件中的“RandomForest”包实现，数据回归分析、能量闭合分析和制图均基于 R 软件和 MATLAB 软件完成。

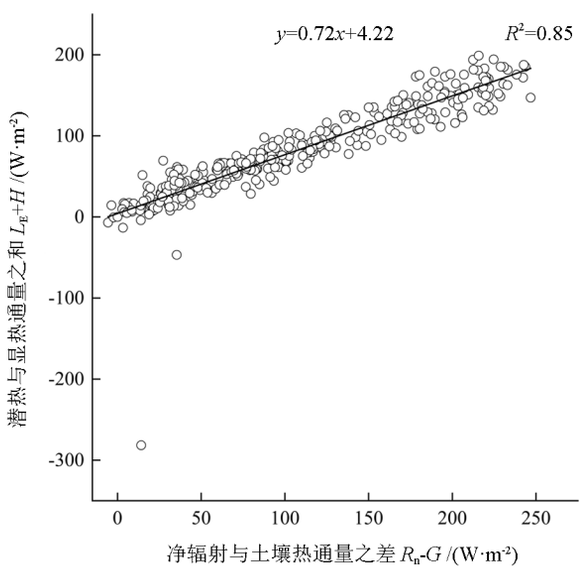
能量闭合是检验生态系统中输出的能量与输入的能量是否一致，是反映仪器和环境状况的一个指标。计算公式为：

$$R_n - G = H + L_E + F_s + Q \quad (1)$$

式中：R_n 为净辐射；G 为土壤热通量；H 为显热通量；L_E 为潜热通量；F_s 为冠层储热；Q 为其他能量输出项。

森林中输入能量有净辐射（Net radiation，R_n）、显热通量（Sensible heat flux，H）、潜热通量（Latent heat flux，L_E）、土壤热通量（Soil heat flux，G）、冠层储热（Canopy heat storage，F_s）和其他能量输出项（Other energy output items，Q）。由于森林生态系统中 F_s 和 Q 所占的比率很小，且数据获取难度较大，故只用剩余参数来计算能量闭合 [33]。

基于 2023 年针阔混交林观测到的逐日 30 min 数据，按照每日均值计算得到针阔混交林生态系统的能量闭合率为 0.72（R^2=0.85），符合以往研究的能量闭合率区间（0.70 ～ 0.90）[34]，表明该研究区能量闭合状况良好（图 1）。



G 表示土壤热通量；R_n 表示净辐射；L_E 表示潜热通量；H 表示显热通量。
G stands for soil heat flux; R_n stands for net radiation; L_E stands for latent heat flux; H stands for sensible heat flux.

图 1 2023 年北京大兴针阔混交林生态系统能量闭合分析
Fig. 1 Energy closure analysis of the coniferous and broad-leaved mixed forest ecosystem in Daxing, Beijing in 2023

1.2.3 数据分析方法

本研究采用机器学习方法来探究净生态系统生产力影响因子的重要性排序 [35]，采用随机森林（Random forest）分析筛选影响生态系统 NEP 或碳汇变化的主要驱动因素。将数据分为 80% 的训练集和 20% 的测试集。使用均方根误差增加百分比（% Increase in MSE）来衡量每个因子的重要性，% Increase in MSE 值越高表明该变量对模型的贡献越大 [36]。在不同的迭代中，变量的重要性排序保持稳定。为评估模型的 R^2 和均方根误差（RMSE），RF 的参数设置为 1 000 个决策树，置换重要性为 550，节点大小为 12 个，数据划分采用自助重采样（Bootstrap）方法。此外，为进一步探讨环境因子对 NEP 的调控，本研究采用非线性回归分析和

逐步回归分析筛选出显著相关的变量，评估其与 NEP 季节变化的解释能力并验证随机森林预测的准确性。

2　结果与分析

2.1　环境因子变化特征

空气温度（T_a）、饱和水汽压差（VPD）、相对湿度（RH）、光合有效辐射（PAR）、土壤含水量（SWC）、降水量（P）均存在季节变化特征。其中，全年 T_a 在 -12 ～ 32.4 ℃之间波动，年均气温为 14.06 ℃（图 2a）。SWC 最高为 0.36 m^3/m^3（图 2e），冬季和春季降水量大多天数为 0 mm（图 2f）。PAR 在 12.36 ～ 562.76 μmol·m^{-2}·s^{-1} 间波动，PAR 年均值为 275.35 μmol·m^{-2}·s^{-1}（图 2d）。VPD 和 RH 变化范围都比较大，整体上呈生长季较高、非生长季较低的趋势（图 2b、c）。

2.2　净生态系统生产力日变化

图 3 为 2023 年 NEP 逐月日变化曲线。结果显示，每日 00:00—09:00 左右和 18:00—24:00 左右的 NEP 呈负值，此时生态系统内植物呼吸作用增强，表现为向大气释放 CO_2。9:00—18:00 的 NEP 呈正值，此时生态系统气温和光照强度增加，植物光合作用增强，表现为吸收 CO_2。各月日变化曲线总体为单峰型，个别月份出现多峰。每个月生态系统碳汇能力不同，各月碳汇强度最大时间基本出现在 13:00—14:00 且在 12:00 附近呈收缩趋势。碳汇峰值最高月份出现在 7 月，NEP 平均日变化吸收峰值为 15.79 μmol·m^{-2}·s^{-1}，峰值最低月份出现在 1 月，为 2.99 μmol·m^{-2}·s^{-1}。固碳最长的月份是 6 月，平均每日固碳 11 h；固碳最短的月份是 12 月，平均每日固碳 5.5 h。

研究区内针阔混交林净固碳量如表 2 所示，生长季净固碳量为 384.83 g·m^{-2}，表现为碳汇；非生长季净固碳量为 -1.18 g·m^{-2}，表现为碳源；全年净固碳为 383.65 g·m^{-2}，为碳汇。

2.3　随机森林模型构建

将训练集和测试集输入设置好相关参数的随机森林模型得出模型性能参数，如表 3 所示。在训练集上，决定系数（R^2）为 0.87，均方根误差为 0.58 μmol·m^{-2}·s^{-1}；在测试集决定系数（R^2）为 0.88，均方根误差为 0.73 μmol·m^{-2}·s^{-1}。此结果证明，随机森林方法在评估净生态系统生产力影响因子重要性时不仅精度较高，而且能有效地控制过拟合现象，因此该方法可应用于净生态系统生产力因子分析。

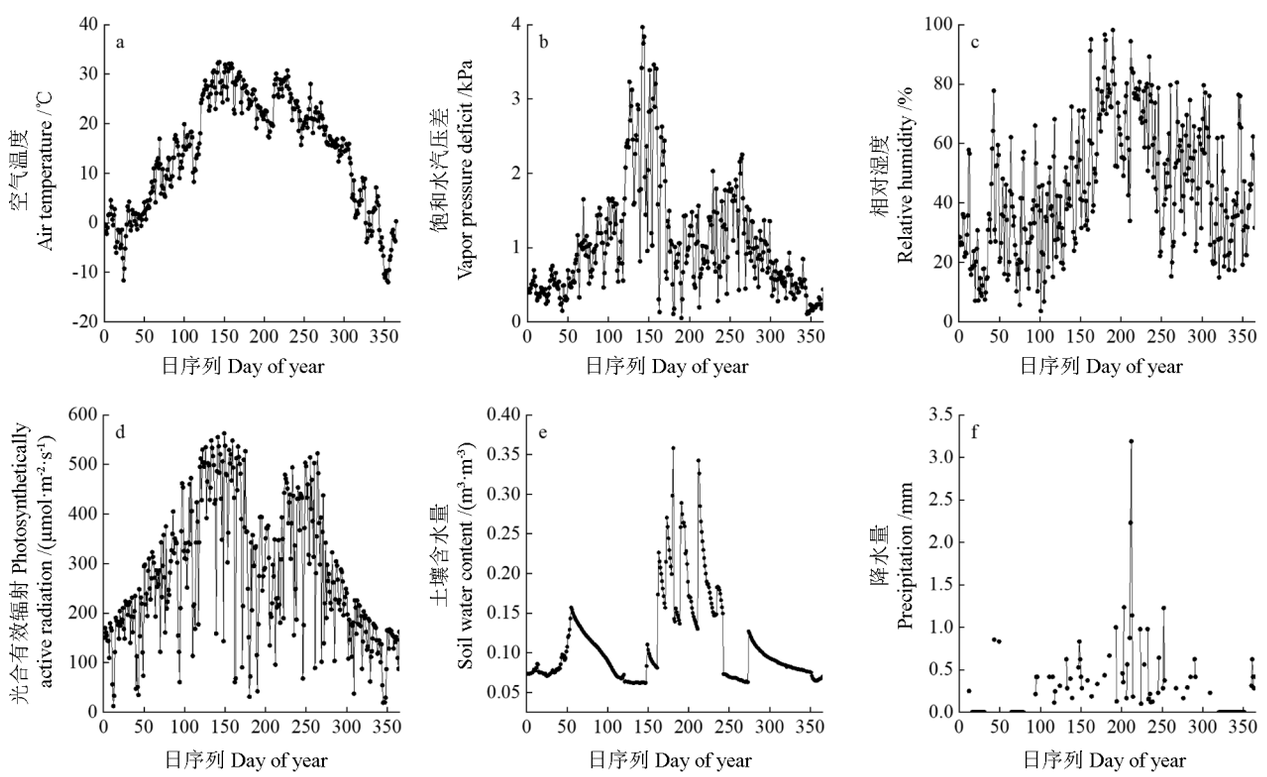


图 2　2023 年北京大兴针阔混交林生态系统环境因子的日平均值变化动态

Fig. 2　Seasonal variations in daily mean values of environmental factors in the mixed coniferous and broad-leaved forest ecosystem in Daxing, Beijing in 2023

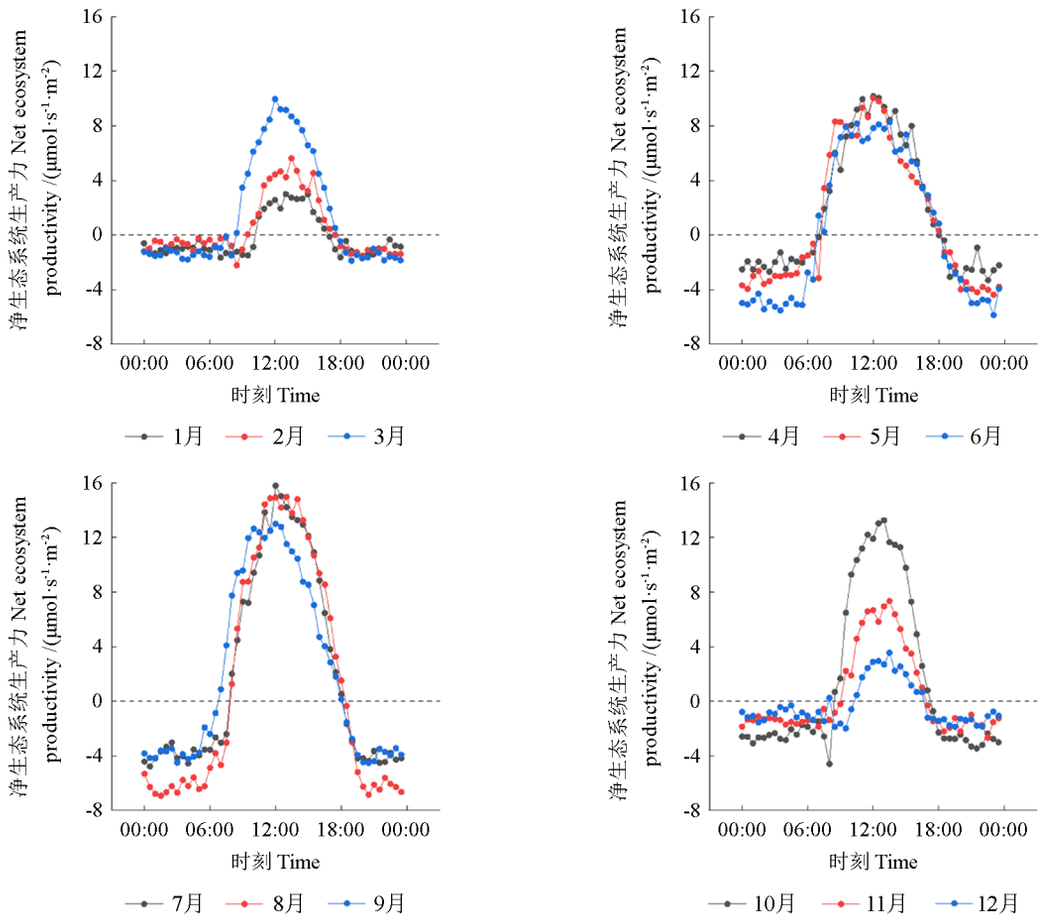


图 3 2023 年北京大兴针阔混交林生态系统的各月净生态系统生产力日平均值变化分布

Fig. 3 The daily mean values of net ecosystem productivity in each month in a mixed coniferous and broad-leaved forest in 2023 in Daxing, Beijing

表 2 2023 年北京大兴针阔混交林生态系统季节累计净固碳量

Table 2 The seasonal cumulative net carbon sequestration of the mixed coniferous and broad-leaved forest ecosystem in Daxing, Beijing in 2023

季节 Season	月份 Month	净固碳量 Carbon sequestration capacity /(g·m^{-2})
生长季 Growing season	3—11 月	384.83
非生长季 Non-growing season	1 月、2 月、12 月	-1.18
全年 Annual	1—12 月	383.65

表 3 随机森林模型精度指标

Table 3 Accuracy index of random forest model

性能指标 Performance metrics	R^2	P	均方根误差 Root-mean-square error /(μmol·m^{-2}·s^{-1})
训练集 Training set	0.87	＜0.01	0.58
测试集 Test set	0.88	＜0.01	0.73

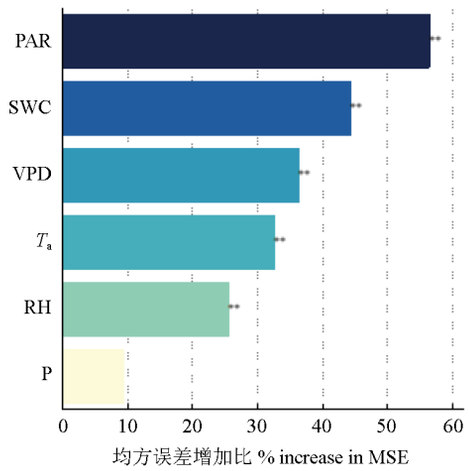
2.4 基于随机森林模型对净生态系统生产力重要性分析

对净生态系统生产力和 6 种环境因子 T_a（空气温度）、SWC（土壤含水量）、VPD（饱和水汽压差）、P（降水量）、PAR（光合有效辐射）、RH（相对湿度）进行重要性和显著性评价。因子重要性随机森林分析的排名如图 4 所示，PAR 是影响净生态系统生产力最重要的因子，其重要性得分为 56.42，其次是 SWC、VPD、T_a、RH、P，其重要性得分分别为 44.25、36.37、32.57、25.61、9.27。

2.5 环境因子对净生态系统生产力的影响

将净生态系统生产力（NEP）数据和环境因子数据的每日均值进行非线性回归分析，将土壤含水量、温度和水分因子联合分布密度分析，得到以下结果：

光合有效辐射（PAR）是影响净生态系统生产力变化的主要环境因子（图 4），将 PAR 与 NEP 进行非线性回归分析，如图 5a 所示，当 PAR ＜ 100 μmol·m^{-2}·s^{-1} 时，NEP ＜ 0，生态系统表现为碳源；当 PAR ＞ 100 μmol·m^{-2}·s^{-1} 时，NEP ＞ 0 表现为碳汇，当 PAR 在 400 μmol·m^{-2}·s^{-1} 左右时，此时植物碳汇能力最强，随着 PAR 升高，渐渐超过了植物光饱和点，碳汇能力逐渐下降。



PAR 表示光合有效辐射；SWC 表示土壤含水量；VPD 表示饱和水汽压差；T_a 表示空气温度；RH 表示相对湿度；P 表示降水量；** 表示此环境因子在 0.01 水平上显著。

PAR indicates photosynthetically active radiation; SWC indicates soil water content; VPD indicates vapor pressure deficit; T_a indicates air temperature; RH indicates relative humidity; P indicates precipitation; ** indicates this environmental factor is significant at the 0.01 level.

图 4　环境因子重要性得分

Fig. 4　Environmental factor importance score

将土壤含水量（SWC）与 NEP 进行非线性回归分析（图 5b），只有在中等 SWC 时，碳汇能力才会比较高。当 SWC ＜ 0.1 m^3/m^3 时，生态系统出现碳源和碳汇 2 种情况。所以将 SWC 和 P、RH、T_a 进行了联合密度分析，当 SWC ＜ 0.1 m^3/m^3 且 -10 ＜ T_a ＜ 10 ℃时，SWC 与 T_a 呈正相关；当 SWC ＜ 0.1 m^3/m^3 且 T_a ＞ 10 ℃时，SWC 和 T_a 的关系变为负相关（图 6c）。由图 6a、b 可以看出，当 SWC ＜ 0.1 m^3/m^3 时，P 和 RH 对 SWC 的调控全部为正向调控，这说明 SWC ＜ 0.1 m^3/m^3 时生态系统的碳源 / 碳汇变化主要受 T_a 调控。

饱和水汽压差（VPD）通过调控植物气孔开闭影响植物光合作用。对 VPD 与 NEP 进行非线性回归分析（图 5c），当 VPD ＜ 0.3 kPa 时，NEP ＜ 0，生态系统表现为碳源；随着饱和水汽压差升高，碳汇能力逐渐增强，在 1.5 kPa 时碳汇能力最强。可以看出，当 VPD ＞ 3.0 kPa 时，生态系统又转为碳源。

空气温度（T_a）通过影响植物光合作用、呼吸作用以及土壤微生物活动等过程，调控生态系统的碳吸收与释放。对 T_a 与 NEP 进行了非线性回归分析（图 5d），-7 ℃以下时，生态系统表现为碳源。0 ～ 30 ℃时，生态系统表现为碳汇。

对相对湿度（RH）与 NEP 进行了非线性回归分析（图 5e），不论相对湿度为多少，生态系统都会出现碳汇和碳源的 2 种情况。

在逐步回归模型中添加了与 NEP 显著相关环境因子的日尺度数据，逐步回归分析结果（表 4）表明，在单变量回归中，PAR 与 NEP 的相关性最强（R^2=0.364），而 SWC、VPD 和 T_a 与 NEP 的相关性均不显著。然而，当这些变量与 PAR 共同纳入回归模型之后，其对 NEP 变化的解释能力显

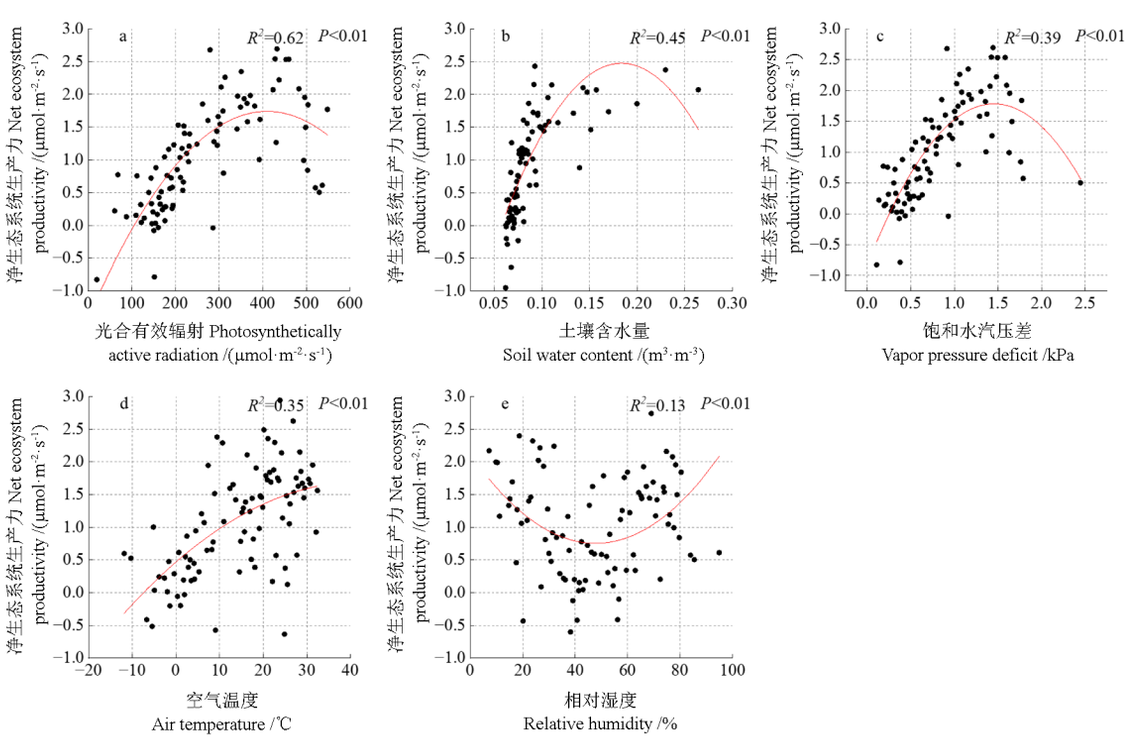


图 5　2023 年北京大兴针阔混交林净生态系统生产力与环境因子的回归分析

Fig. 5　Regression analysis of net ecosystem productivity and environmental factors of coniferous and broad-leaved mixed forest in Daxing, Beijing in 2023

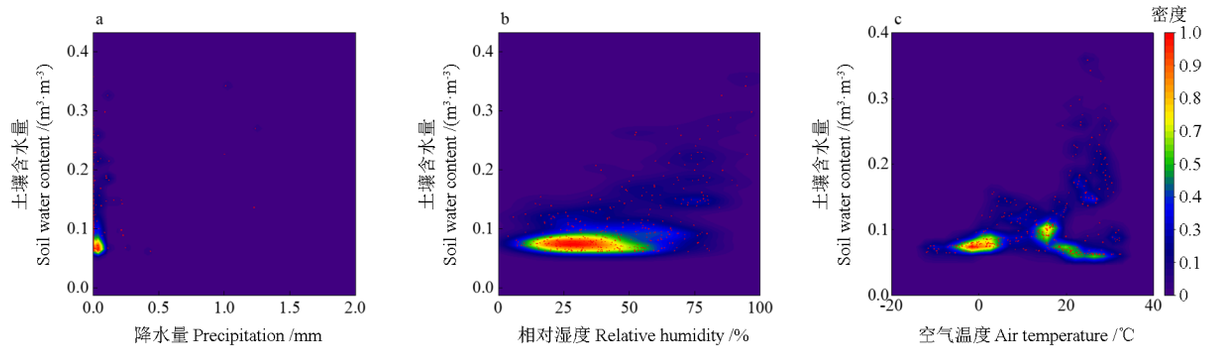


图 6 土壤含水量与空气温度、相对湿度、降水量的联合分布密度分析

Fig. 6 Joint distribution density analysis of soil moisture content with air temperature, relative humidity, and precipitation

表 4 2023 年北京大兴针阔混交林净生态系统生产力与环境因子逐步回归关系 †

Table 4 Stepwise regression relationship between net ecosystem productivity and environmental factors in mixed coniferous-broadleaf forest in Daxing, Beijing in 2023

因变量 Dependent variable	自变量 Independent variable	回归方程 Regression equation	决定系数 R^2 Coefficient of determination
NEP	PAR	$NEP = 0.005 \times PAR - 0.197$	0.364
	PAR、SWC	$NEP = 0.007 \times PAR - 0.408 \times SWC - 0.290$	0.389
	PAR、SWC、VPD	$NEP = 0.006 \times PAR - 0.486 \times SWC + 0.011 \times VPD - 0.290$	0.395
	PAR、SWC、VPD、T_a	$NEP = 0.005 \times PAR - 0.935 \times SWC + 0.054 \times VPD - 0.019 \times T_a + 0.645$	0.428

† NEP 表示净生态系统生产力；PAR 表示光合有效辐射；SWC 表示土壤含水量；VPD 表示饱和水汽压差；T_a 表示空气温度。
NEP indicates net ecosystem productivity; PAR indicates photosynthetically active radiation; SWC indicates soil water content; VPD indicates vapor pressure deficit; T_a indicates air temperature.

著增强，特别是当这些环境因子都结合时模型的拟合度最高，表明这些环境因子对 NEP 具有协同调控作用。

3 讨 论

3.1 净生态系统生产力变化特征

针阔混交林各月净生态系统生产力日平均值变化特征基本为单峰型曲线，这是森林的普遍特征 [37-38]。夜间 NEP 为负值，是因为夜间植物光合作用停止，生态系统只进行呼吸作用释放 CO_2。研究发现，12:00 附近曲线出现收缩现象，13:00—14:00 生态系统碳汇能力达到峰值，与其他生态系统在中午和下午达到峰值的情况一致 [39]。这一现象与北京处于中纬度地区的地理位置和气候有关，正午时分光照最强，温度最高，可能会导致植物气孔关闭，限制 CO_2 吸收，光合速率短暂下降，这是 C_3 植物在高温下的“光合午休”现象 [40]。研究区内刺槐、侧柏都为 C_3 植物；18:00 之后碳通量又逐渐变为正值，这与不同类型生态系统 [41-44] 的日变化研究结果一致。但在生长季正午时分，NEP 出现偶尔的多峰情况，是因为有复杂的针阔混交结构，不同树种对光照和温度的响应策略存在分化与互补，这种生态系统内部的生理多样性削弱了单一树种所表现出的剧烈光合抑制现象，从而使整个生态系统碳汇功能在午间更为平稳，即多峰现象。

净生态系统生产力季节变化可归因于植被物候与气候因子的协同作用。在生长季，春季土壤冻融循环结束与叶片物候发育显著提升植被的碳吸收能力；夏季温度适宜，光照充足，阔叶林与针叶林冠层叠加形成的复合林分结构使碳汇能力达到最强。而在非生长季，研究区内阔叶树种落叶导致的冠层截留损失与低温胁迫共同制约光合作用效率，光合作用几乎停滞，但土壤微生物活动和植物呼吸作用仍在继续，仅针叶林维持基础碳固定水平，整个生态系统呈二氧化碳净排放状态。

3.2 环境因子对人工针阔混交林净生态系统生产力的影响

本研究通过随机森林对环境因子进行重要性分析，确定重要性排序为 PAR、SWC、VPD、T_a、RH，非线性回归分析和逐步回归方程进一步印证了随机森林预测分析的准确性和 PAR 的重要性，能更直观地看到环境因子对 NEP 变化的影响，为 NEP 环境因子模型的构建提供了基础。

光是植物光合作用的必要条件，本研究发现光合有效辐射主导着人工针阔混交林净生态系统生产力的变化，呈非线性变化趋势（图 5a）。随机森林算法的重要性分析结果显示，光合有效辐射对 NEP 的解释贡献度显著高于其他环境因子（图 4），这印证了在昼夜或季节等较短时间尺度上，光合作用是主导生态系统碳循环过程的主要因素 [45]，光合有效辐射是影响北京大兴针阔混交林生态系统 NEP 的重要因子，光是植物光合作用的能量，驱动 CO_2 固定。但在更长时间尺度上（如年际尺度），光照或辐射对 NEP 的调控作用可能会被其他环境因子取代 [46]。

此外，水分同时调控着植物的光合作用和呼吸作用。VPD 和 RH 通过调节蒸腾作用影响植物的水分利用效率，而且与温度的变化密切相关。本研究发现，RH 对 NEP 的调控很微弱，这是因为 SWC、RH 都受 T_a 调控，而植物获取水分的主要途径是吸收土壤水，其次是饱和水汽压差通过影响蒸腾作用间接调控植物的水分吸收。本研究还发现，土壤含水量对 NEP 的调控是直接或间接的，当 SWC ＞ 0.1 m^3/m^3 时，为直接调控；当 SWC ＜ 0.1 m^3/m^3 时，温度控制着土壤含水量的变化。从图 6a 中可以看出，当 SWC ＜ 0.1 m^3/m^3 且温度低于 10 ℃时，SWC 与 T_a 呈正相关，这可能是因为温度升高，积雪融化导致土壤含水量上升。当温度大于 10 ℃时，SWC 和 T_a 转为负相关，高温导致土壤湿度降低，高温下叶片气孔导度和光合作用降低 [47]，这表明 T_a 在影响 NEP 的同时也通过影响 SWC 间接影响 NEP。当 SWC 在 0.22 m^3/m^3 左右时，碳汇能力最强，这与缙云山针阔混交林的研究结果相近 [48]。

温度和饱和水汽压差具有耦合性，低温会导致植物根系水分吸收效率下降，同时植物气孔导度降低会引发 CO_2 同化受阻 [49]，进而抑制光合作用。当 T_a ≥ 20 ℃时，碳汇强度逐渐增大，表明人工针阔混交林光合作用的最适温度阈值位于中高温区间。饱和水汽压差越低表明空气越湿润，越高表明空气越干燥，饱和水汽压差是在一个区间内对植物光合作用产生影响。当空气干燥温度较高时，植物的蒸腾作用加强，引起水分亏缺，这是高温下植物光合作用和固碳能力受限制的主要原因 [50]。已有研究表明，较低或较高的饱和水汽压差均会抑制光合作用 [51]。本研究中，当 VPD ≥ 1.7 kPa 时植物碳汇能力开始减弱，可能是由于空气干燥导致气孔导度降低，使光合作用受到抑制，VPD 的最适宜范围略高于落叶阔叶林生态系统（1 ～ 1.5 kPa）[28]。

4　结　论

北京大兴针阔混交林 2023 年净生态系统生产力变化特征及其影响分析结果表明，研究区全年表现为碳汇。随机森林模型在拟合人工针阔混交林净生态系统生产力方面有较好的适用性。影响因子重要性得分和逐步回归方程表明，PAR 和 VPD 直接调控 NEP，T_a 对 NEP 的调控表现为直接调控或通过影响 SWC 来间接调控，说明 PAR 是 NEP 或碳汇变化的主要调控因子。本试验结果可为深入研究温带人工针阔混交林生态系统提供科学依据。

参考文献：

[1] 朴世龙 , 岳超 , 丁金枝 , 等 . 试论陆地生态系统碳汇在 “ 碳中和 ” 目标中的作用 [J]. 中国科学 : 地球科学 ,2022,52(7):1419-1426.
Piao S L, Yue C, Ding J Z, et al. Perspectives on the role of terrestrial ecosystems in the “carbon neutrality” goal[J]. Science China Earth Sciences,2022,52(7):1419-1426.

[2] Kramer P J. Carbon dioxide concentration, photosynthesis, and dry matter production[J]. BioScience,1981,31(1):29-33.

[3] 毛江涛 , 徐文婷 , 谢宗强 . 森林碳汇研究热点与趋势——基于知识图谱分析 [J]. 生态学报 ,2023,43(19):8241-8253.
Mao J T, Xu W T, Xie Z Q. Research hotspots and trends of forest carbon sinks: based on knowledge graph analysis[J]. Acta Ecologica Sinica,2023,43(19):8241-8253.

[4] Dumitrașcu M, Kucsicsa G, Dumitrică C, et al. Estimation of future changes in aboveground forest carbon stock in Romania: a prediction based on forest-cover pattern scenario[J]. Forests, 2020,11:914.

[5] 杨吉 .“ 双碳 ” 背景下我国林业碳汇经济效率评价及影响因素 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(8):201-208.
Yang J. Evaluation and influencing factors of economic efficiency of forestry carbon sequestration in China under the background of “dual carbon”[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(8):201-208.

[6] Rogelj J, Schaeffer M, Meinshausen M, et al. Zero emission targets as long-term global goals for climate protection[J]. Environmental Research Letters,2015,10:105007.

[7] Fang J Y, Yu G R, Liu L L, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2018,115(16):4015-4020.

[8] Pugh T A M, Lindeskog M, Smith B, et al. Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2019,116(10):4382-4387.

[9] 尉善凯 , 李湘怡 , 王锴 , 等 . 2001—2023 年中国植被持续变绿 [J]. 中国科学 : 地球科学 ,2025,55(4):1099-1108.
Wei S K, Li X Y, Wang K, et al. Two decades of persistent greening in China despite 2023 climate extremes[J]. Scientia Sinica (Terrae),2025,55(4):1099-1108.

[10] 王堃莹 , 邱贵福 , 刘子赫 , 等 . 气候变化对不同退化程度小叶杨林分生长和内在水分利用效率的调节 [J]. 植物生态学报 , 2025,49(2):343-355.
Wang K Y, Qiu G F, Liu Z H, et al. Climate change regulate tree growth and intrinsic water use efficiency of *Populus simonii* at different levels of degradation[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2025,49(2):343-355.

[11] 余蓉 , 项文化 , 宁晨 , 等 . 长沙市 4 种人工林生态系统碳储量与分布特征 [J]. 生态学报 ,2016,36(12):3499-3509.
Yu R, Xiang W H, Ning C, et al. Carbon storage and sequestration in four urban forest ecosystems in Changsha, Hunan[J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(12):3499-3509.

[12] 陈睿 , 汤孟平 . 天目山针阔混交林与常绿阔叶林的空间结构比较 [J]. 林业科学 ,2023,59(5):21-31.
Chen R, Tang M P. Comparison of spatial structure between coniferous and broad-leaved mixed forest and evergreen broad-leaved forest in Tianmu mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023,59(5):21-31.

[13] 吴登瑜 , 窦啸文 , 汤孟平 . 天目山针阔混交林结构与碳储量的关系 [J]. 应用生态学报 ,2023,34(8):2029-2038.
Wu D Y, Dou X W, Tang M P. Relationship between carbon stock and the structure of coniferous and broad-leaved mixed forest in Tianmu mountains, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2023,34(8):2029-2038.

[14] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests[J]. Science,2011,333:988-993.

[15] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. Nature,2009,458:1009-1013.

[16] 张敏霞 , 江洪 , 陈晓峰 , 等 . 亚热带毛竹林生态系统碳通量与土壤呼吸研究 [J]. 东北农业大学学报 ,2016,47(6):41-50.
Zhang M X, Jiang H, Chen X F, et al. Study on the carbon flux and soil respiration of *Phyllostachys edulis* forest ecosystem in subtropic China[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2016,47(6):41-50.

[17] 武荣盛 , 孙小龙 , 顾润源 , 等 . 内蒙古克氏针茅草原生态系统碳通量数据质量评价及日和季节变化特征 [J]. 生态学杂志 , 2014,33(11):2880-2888.
Wu R S, Sun X L, Gu R Y, et al. Quality assessment and diurnal/seasonal variation of net ecosystem carbon flux data from a *Stipa krylovii* steppe in Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014,33(11):2880-2888.

[18] 孙彦坤 , 张胤洲 , 姚维杰 , 等 . 我国东部山地针阔混交林碳通量特征分析 [J]. 中国环境科学 ,2024,44(6):3492-3501.
Sun Y K, Zhang Y Z, Yao W J, et al. Characteristics of carbon flux in mixed coniferous and broad-leaved forests in the mountainous areas of eastern China[J]. China Environmental Science, 2024,44(6):3492-3501.

[19] 彭记永 , 张溪荷 , 王冰 , 等 . 夏玉米农田生态系统碳源汇特征及其气候影响 [J]. 生态学杂志 ,2024,43(10):3121-3131.
Peng J Y, Zhang X H, Wang B, et al. Carbon source and sink characteristics and climate impacts of summer maize cropland ecosystem[J]. Chinese Journal of Ecology,2024,43(10): 3121-3131.

[20] 王斌 , 李洁 , 姜微微 , 等 . 草地退化对三江源区高寒草甸生态系统 CO_2 通量的影响及其原因 [J]. 中国环境科学 ,2012,32(10): 1764-1771.
Wang B, Li J, Jiang W W, et al. Impacts of the rangeland degradation on CO_2 flux and the underlying mechanisms in the Three-River source region on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. China Environmental Science,2012,32(10):1764-1771.

[21] 李鑫豪 , 张德怀 , 张赵森 , 等 . 北京密云油松人工林碳通量组分季节变化及其对环境因子的响应 [J]. 林业科学 ,2023,59(7): 35-44.
Li X H, Zhang D H, Zhang Z S, et al. Seasonal variations in carbon fluxes and their responses to environmental factors in a *Pinus tabuliformis* plantation ecosystem in Miyun, Beijing[J]. Scientia Silvae Sinicae,2023,59(7):35-44.

[22] 李青青 , 甘永德 , 刘艳强 , 等 . 灌丛草地生态系统非生长季碳通量及影响因素 [J]. 环境科学与技术 ,2025,48(3):1-9.
Li Q Q, Gan Y D, Liu Y Q, et al. Net ecosystem CO_2 exchange in the shrubland-grassland ecosystem during the non-growing season and its influencing factors[J]. Environmental Science & Technology,2025,48(3):1-9.

[23] 吕富成 , 酒名扬 , 韩立钦 , 等 . 中国北方针叶林碳通量动态变化及其影响因素分析 [J]. 气候与环境研究 ,2024,29(3):243-252.
Lyu F C, Jiu M Y, Han L Q, et al. Dynamic changes in carbon fluxes of the boreal coniferous forests of China and influencing factor analysis[J]. Climatic and Environmental Research, 2024,29(3):243-252.

[24] 崔皓 , 韩建刚 , 郭俨辉 , 等 . 洪泽湖河湖交汇区典型杨树人工林碳通量月尺度变化特征 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版),2022,46(2):19-26.
Cui H, Han J G, Guo Y H, et al. Monthly scale variation characteristics of net ecosystem exchange (NEE) in poplar plantations at the confluence of Hongze lake and Huai river[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2022,46(2):19-26.

[25] Baldocchi D D. How eddy covariance flux measurements have contributed to our understanding of *Global Change Biology*[J]. Global Change Biology,2020,26:242-260.

[26] 胡海波 , 刘佳璇 , 丁冬霞 , 等 . 森林固碳计量方法研究综述 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(11):58-69.
Hu H B, Liu J X, Ding D X, et al. A review of measurement methods of forest carbon sequestration[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(11):58-69.

[27] 陈文婧 , 李春义 , 何桂梅 , 等 . 北京奥林匹克森林公园绿地碳交换动态及其环境控制因子 [J]. 生态学报 ,2013,33(20):6712-6720.
Chen W J, Li C Y, He G M, et al. Dynamics of CO_2 exchange and its environmental controls in an urban green-land ecosystem in Beijing Olympic forest park[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(20):6712-6720.

[28] 李润东 , 范雅倩 , 冯沛 , 等 . 北京松山天然落叶阔叶林生态系统净碳交换特征及其影响因子 [J]. 应用生态学报 ,2020,31(11):3621-3630.
Li R D, Fan Y Q, Feng P, et al. Net ecosystem carbon exchange and its affecting factors in a deciduous broad-leaved forest in Songshan, Beijing, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(11):3621-3630.

[29] Li X H, Black T A, Zha T S, et al. Long-term trend and interannual variation in evapotranspiration of a young temperate Douglas-fir stand over 2002-2022 reveals the impacts of climate change[J]. Plant, Cell & Environment,2024,47:3966-3978.

[30] 王音 , 同小娟 , 张劲松 , 等 . 干旱对栓皮栎人工林碳水通量及其耦合的影响 [J]. 植物生态学报 ,2024,48(9):1157-1171.
Wang Y, Tong X J, Zhang J S, et al. Impact of drought on carbon and water fluxes and their coupling in a *Quercus variabilis* plantation[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2024,48(9):1157-1171.

[31] Wutzler T, Lucas-Moffat A, Migliavacca M, et al. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc[J]. Biogeosciences,2018,15:5015-5030.

[32] Zha T S, Barr A G, Black T A, et al. Carbon sequestration in boreal jack pine stands following harvesting[J]. Global Change Biology,2009,15:1475-1487.

[33] 冯印成 , 王云琦 , 王玉杰 , 等 . 重庆缙云山针阔混交林水汽通量特征及其影响因子 [J]. 植物生态学报 ,2022,46(8):890-903.
Feng Y C, Wang Y Q, Wang Y J, et al. Water vapor fluxes and their relationship with environmental factors in a conifer-broadleaf mixed forest ecosystem in Jinyun mountain, Chongqing, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2022,46(8):890-903.

[34] Kumagai T, Aoki S, Nagasawa H, et al. Effects of tree-to-tree and radial variations on sap flow estimates of transpiration in Japanese cedar[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2005,135:110-116.

[35] 李珺 , 张贵 , 庞梓亨 , 等 . 长沙市主要优势树种森林碳储量遥感反演 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(2):20-33.
Li J, Zhang G, Pang Z H, et al. Remote sensing inversion of forest carbon stocks dominated by major dominant tree species in Changsha[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(2):20-33.

[36] 陈亮 , 周国模 , 杜华强 , 等 . 基于随机森林模型的毛竹林 CO_2 通量模拟及其影响因子 [J]. 林业科学 ,2018,54(8):1-12.
Chen L, Zhou G M, Du H Q, et al. Simulation of CO_2 flux and controlling factors in moso bamboo forest using Random forest algorithm[J]. Scientia Silvae Sinicae,2018,54(8):1-12.

[37] 吴利禄 , 高翔 , 褚建民 , 等 . 民勤绿洲 - 荒漠过渡带梭梭人工林净碳交换及其影响因子 [J]. 应用生态学报 ,2019,30(10):3336-3346.
Wu L L, Gao X, Chu J M, et al. Net carbon exchange and its driving factors of *Haloxylon ammodendron* plantation in the oasis-desert ecotone of Minqin, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2019,30(10):3336-3346.

[38] 王靖钰 , 李国栋 , 任晓娟 , 等 . 南北过渡带常绿落叶阔叶混交林碳通量特征及其对环境因子的响应 [J]. 生态学报 ,2024,44(14):6243-6253.
Wang J Y, Li G D, Ren X J, et al. Carbon flux characteristics and responses to environmental factors in the evergreen-deciduous broadleaf mixed forest of the north-south transitional zone[J]. Acta Ecologica Sinica,2024,44(14):6243-6253.

[39] 牛晓栋 , 江洪 , 张金梦 , 等 . 浙江天目山老龄森林生态系统 CO_2 通量特征 [J]. 应用生态学报 ,2016,27(1):1-8.
Niu X D, Jiang H, Zhang J M, et al. Characteristics of CO_2 flux in an old growth mixed forest in Tianmu mountain, Zhejiang, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(1):1-8.

[40] 高冠龙 , 冯起 , 刘贤德 . 自然条件下胡杨叶片光合作用的气孔、非气孔限制 [J]. 干旱区资源与环境 ,2020,34(11):182-188.
Gao G L, Feng Q, Liu X D. Stomatal and no-stomatal limitations to photosynthesis of *Populus euphratica* leaves under natural conditions[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020,34(11):182-188.

[41] 郑惠旭 , 张晶 , 刘雅琪 , 等 . 西双版纳橡胶林 CO_2 通量动态特征及其影响因素 [J]. 地球与环境 ,2024,52(6):713-722.
Zheng H X, Zhang J, Liu Y Q, et al. Flux dynamics of CO_2 in a rubber plantation in Xishuangbanna and its influencing factors[J]. Earth and Environment,2024,52(6):713-722.

[42] 孙彦坤 , 张胤洲 , 姚维杰 , 等 . 浙江大毛尖山常绿阔叶林生态系统 CO_2 通量特征分析 [J]. 中国环境科学 ,https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20240022.004.
Sun Y K, Zhang Y Z, Yao W J, et al. Analysis of CO_2 flux

characteristics in the evergreen broadleaf forest ecosystem of Damaojian mountain, Zhejiang[J]. China Environmental Science,https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20240022.004.

[43] 翁升恒 , 姜冬昕 , 李丽纯 , 等 . 武夷山马尾松生长季净碳交换及其昼夜环境影响因子分析 [J]. 环境科学与技术 ,2024,47(9):167-177.
Weng S H, Jiang D X, Li L C, et al. Net carbon exchange and diurnal impact factor of masson pine forests in Wuyishan mountain during its growing season[J]. Environmental Science & Technology,2024,47(9):167-177.

[44] 徐勇峰 , 季淮 , 韩建刚 , 等 . 洪泽湖湿地杨树林生长季碳通量变化特征及其影响因子 [J]. 生态学杂志 ,2018,37(2):322-331.
Xu Y F, Ji H, Han J G, et al. Variation of net ecosystem carbon flux in growing season and its driving factors in a poplar plantation from Hung-tse lake wetland[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018,37(2):322-331.

[45] Ouyang Z T, Chen J Q, Becker R, et al. Disentangling the confounding effects of PAR and air temperature on net ecosystem exchange at multiple time scales[J]. Ecological Complexity, 2014,19:46-58.

[46] Jia X, Zha T S, Gong J N, et al. Multi-scale dynamics and environmental controls on net ecosystem CO_2 exchange over a temperate semiarid shrubland[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2018,259:250-259.

[47] Niu S L, Wu M Y, Han Y, et al. Water-mediated responses of ecosystem carbon fluxes to climatic change in a temperate steppe[J]. New Phytologist, 2008,177:209-219.

[48] 王倩 , 王云琦 , 马超 , 等 . 缙云山针阔混交林碳通量变化特征及影响因子研究 [J]. 长江流域资源与环境 ,2019,28(3):565-576.
Wang Q, Wang Y Q, Ma C, et al. Characteristics of carbon fluxes and their response to environmental factors in ecosystems of mixed coniferous and broad-leaved forests in Jinyun mountain[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2019,28(3):565-576.

[49] Haworth M, Killi D, Materassi A, et al. Impaired stomatal control is associated with reduced photosynthetic physiology in crop species grown at elevated CO_2[J]. Frontiers in Plant Science, 2016,7:1568.

[50] Carrara A, Janssens I A, Yuste J C, et al. Seasonal changes in photosynthesis, respiration and NEE of a mixed temperate forest[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2004,126:15-31.

[51] Zhang L H, Chen Y N, Zhao R F, et al. Significance of temperature and soil water content on soil respiration in three desert ecosystems in northwest China[J]. Journal of Arid Environments, 2010,74:1200-1211.

[本文编校：吴　彬]