

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.023; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.023.

顾宇晨, 张茜, 安宇超, 等. 苏北不同林龄杨树人工林碳储量时空分配格局[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 243-248.

Gu Yuchen, Zhang Qian, An Yuchao, et al. Spatial and temporal distribution pattern of carbon storage in poplar plantations with different ages in northern Jiangsu Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 243-248.

苏北不同林龄杨树人工林碳储量时空分配格局

顾宇晨, 张茜, 安宇超, 王国兵

(南京林业大学 生态与环境学院, 南方现代林业协同创新中心, 南京 210037)

摘要: [目的] 探讨不同林龄对苏北杨树人工林生产力形成及林分碳储量地上、地下空间分配格局的影响及机理, 为提高杨树人工林生态系统碳汇功能以及为杨树人工林经营和管理等提供科学依据。 [方法] 基于江苏省宿迁市泗洪林场, 选取 10 个不同林龄分别为 2, 5, 6, 7, 8, 10, 14, 16, 17, 26 a 生, 林分密度为 6 m × 6 m 的杨树人工林作为试验调查样地。分析了杨树人工林乔木层、草本层及土壤层碳储量净积累随林龄的变化规律及杨树人工林不同层次碳储量变化与土壤理化性质的相关关系。 [结果] (1) 乔木层碳储量在林分发展过程中呈现快速净积累特征, 拟合其年平均积累速率、连年积累速率两条曲线, 表明杨树人工林最佳轮伐期为 15~20 a; (2) 土壤有机碳在林分发展过程中呈现出缓慢的净积累, 林下草本层碳储量随林分发展呈降低趋势; (3) 杨树人工林土壤层和乔木层碳储量与土壤中 SOC, TN, NO₃⁻-N, N/P 呈显著正相关, 与 AP, C/N, pH 呈负相关。 [结论] 在杨树人工林生长过程中施 N 肥以及在土壤固碳水平最佳时期 15~20 a 进行轮作, 有助于林分碳储量增加。

关键词: 碳储量; 杨树人工林; 不同林龄; 苏北地区

中图分类号: S718.55

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0243-06

Spatial and temporal distribution pattern of carbon storage in *Populus L.* with different ages in northern Jiangsu Province

Gu Yuchen, Zhang Qian, An Yuchao, Wang Guobing

(College of Ecology and the Environment, Nanjing Forestry University,

Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing 210037, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the impact of different ages on the formation of productivity and spatial distribution patterns of aboveground and belowground carbon storage in *Populus L.* in northern Jiangsu, and to provide a scientific basis for enhancing the carbon sink function of poplar plantation ecosystems and for the management and operation of *Populus L.* [Methods] Ten poplar plantations of varying ages (2, 5, 6, 7, 8, 10, 14, 16, 17, and 26 years) were selected as experimental plots at Sihong Forest Farm in Suqian City, Jiangsu Province, with a stand density of 6 m × 6 m. Changes in net accumulation of carbon storage were analyzed across arbor layer, herb layer, and soil layer based on plantation age. Additionally, correlations between net accumulation of carbon storage in different layers and soil physical-chemical properties were examined. [Results] (1) The carbon storage of arbor layer showed the characteristics of rapid net accumulation in the development of stand. Fitting two curves of annual average accumulation rate and successive accumulation rate shows that the optimal rotation period of poplar plantation is 15~20 years. (2) Net accumulation of soil organic carbon showed slow growth throughout plantation development while carbon storage in understory herb layer decreased over time. (3) Correlation

收稿日期: 2024-03-04

修回日期: 2024-03-30

资助项目: 国家重点研发计划“森林经营措施对南方杨树人工林碳储量及其组成的影响机制”(2021YFD220040203); 江苏省林业局揭榜挂帅项目(LYKJ[2022]01)

第一作者: 顾宇晨(1997—), 女, 江苏徐州人, 硕士研究生, 主要从事土壤生态学和森林生态学研究。E-mail: 775100606@qq.com

通信作者: 王国兵(1979—), 男, 湖北十堰人, 博士, 副教授, 主要从事土壤生态学和森林生态学研究。E-mail: wangguobing@aliyun.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

analysis revealed positive associations between carbon storage levels within both soil and arbor layers with SOC, TN, NO_3^- -N, N/P and negative associations with AP, C/N, pH. [Conclusion] Applying nitrogen fertilizer during the growth of poplar plantations and conducting crop rotation during the optimal period of 15 to 20 years for soil carbon sequestration can help increase the carbon storage of the stand.

Keywords: carbon storage; poplar plantation; different age; northern Jiangsu

全球变暖正在加速^[1],按照 IPCC 最新评估,截至 2020 年近 140 余年间,大气 CO_2 浓度增加 129 ppmv,全球平均温度增加 1.09 °C,这主要是由化石燃料使用和热带毁林等人为活动所致^[2]。近年来,世界各国先后制定了碳减排目标。目前,中国是世界上最大的二氧化碳排放国。因此,中国在减缓全球气候变暖方面发挥着关键作用^[3]。陆地生态系统特别是森林碳固存具有巨大的环境和经济影响,并对全球变暖提供负反馈作用^[4]。中国很大一部分人为排放的二氧化碳已被陆地碳汇抵消,这是到 2060 年实现碳中和的重要因素^[5]。植树造林除了维持现有的社会责任外,还可以加强碳固定,从而抵消人为 CO_2 排放,被认为是最有效和最环保的措施^[6]。近年来,人们广泛关注人工造林对生态系统碳储量(植被和土壤)的影响^[7]。研究表明,通过人工造林等措施可以显著提高我国森林覆盖率和碳储量,充当碳汇的角色^[8]。

杨树作为中国人工林中的重要组成部分,是世界中纬度平原地区栽培面积最大、木材产量最高的速生用材树种之一^[9]。其中苏北平原地区是我国最大的杨树人工林种植区^[10]。目前对杨树人工林的研究主要集中在栽培方式、施肥措施、生产力和经济效益等方面,忽视了林龄对碳储量的影响,以及比较不同土壤理化因子对碳储量的贡献尚少。中国是“双碳”行动的积极推进者^[11],加强相关研究进而提升碳储量具有重大意义。为此,本试验基于江苏省宿迁市泗洪林场,选取 10 个不同林龄,林分密度为 6 m×6 m 的杨树人工林作为试验调查样地。分析杨树人工林乔木层、草本层及土壤层碳储量净积累随林龄的变化规律,并分析杨树人工林不同层次碳储量的变化与土壤理化性质的相关关系。本次研究结果能够积极推动“双碳”行动,为提升苏北杨树人工林碳储量而制定具有韧性和适应性的系统解决方案提供科学理论参考^[12]。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究样地位于江苏省宿迁市洪泽湖西岸的泗洪林场(33°33'N,118°32'E),占地约 800 hm²,地处亚热带与暖温带过渡地带,气候为典型的亚热带季风气候,平均日照时数 2 327 h/a,年平均气温 14.2 °C,年平均降水量

897 mm。土壤母质为洪泽湖淤积土,土壤质地多为中壤至轻黏。林下植被多为草本植物主要有狗尾草(*Setaria viridis*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、大狼把草(*Bidens frondosa*)、鸭跖草(*Commelina communis*)和牛筋草(*Eleusine indica*)等。

1.2 样地设置

选取立地条件和经营措施一致的杨树人工林(南林 895 杨, *Populus euramericana* ‘Nanlin 895’),采用随机区组设计,设置 10 个不同林龄分别为 2,5,6,7,8,10,14,16,17,26 a 生,4 个 20 m×20 m 林分密度为 6 m×6 m 的重复样方,每个重复样方内保留 10 m 宽的缓冲带,共计 40 个样方,每个林龄样地面积约 0.2 hm²。

1.3 取样与测定

1.3.1 乔木层碳储量估测 在 2023 年 6—7 月,对 10 个不同林龄的杨树人工林样地进行了每木胸径和树高的调查。根据 10 块林分林木的平均胸径、树高数据,选择陈乐蓓建立的杨树单株生物量异速生长方程^[13],分别估算单株生物量,再运用碳—生物量转换系数(0.48)将生物量换算为固碳量,再结合林分密度计算得到不同林龄下单位面积碳储量。其中,杨树单株生物量的异速生长方程如下:

$$W=0.123\ 611\times(D^2H)^{0.804004574}$$

式中: W 为杨树单株生物量(kg); D 为胸径(cm); H 为树高(m)。

1.3.2 草本层碳储量测定 在每个样地内设置 5 个 1 m×1 m 的小样方,称取小样方内全株鲜重,将五点混匀后取 10% 用干冰冷藏带回实验室,置于烘箱后先用 105 °C,5~15 min 杀青,后设置 80 °C,10 h 左右烘干至恒重,根据干重/鲜重计算含水率,推算出单位面积的生物量,再根据碳转换率 0.45^[14] 计算得出碳储量。

1.3.3 土壤层碳储量及理化性质测定 按照“S”型,随机选择 5 个采样点,使用直径为 2 cm 的土钻取 4 层土样,分别是 0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm,40—60 cm,每层取 200 g 左右装于塑料自封袋带回实验室,一半置于 -4 °C 冰箱内一半自然风干,用于不同土壤理化性质的测定。

土壤层有机碳储量的计算公式如下:

土壤有机碳储量(t/hm^2) = 土壤容重(g/cm^3) × 土壤有机碳含量(g/kg) × 土壤厚度(cm) × 10^{-1}

分别对不同林龄样地内不同土层的土壤采用环刀法测定容重;采用电位法测定土壤酸碱度(pH);总有机碳(TOC)及全氮(TN)使用元素分析仪(Vario Element III, Germany)测定;土壤铵态氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N)采用 2 mol/L KCL 浸提法;土壤全磷(TP)、速效磷(AP)采用钼锑抗比色法,通过 TU-1810 紫外—可见分光光度计测定;全钾(TK)采用碱熔法,通过 BWB-XP 火焰光度计测定^[15]。

1.4 数据处理

首先采用 Excel 2021 和 SPSS 27.0 对数据进行统计分析;不同林龄杨树人工林理化性质采用单因素方差分析(One-Way ANOVA, Duncan)、LSD 显著性差异检验,显著性水平($p < 0.05$);不同林龄杨树人工林各组分碳储量净增量的变化采用 Excel 2021 进

行绘图;杨树人工林各组分碳储量与土壤理化性质的相关性分析(pearson 检验)使用 Origin 2022 软件并进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同林龄杨树人工林土壤理化性质的变化

土壤化学性质指标在不同林龄间均存在显著差异($p < 0.05$),且各指标随林龄增加呈现一定的变化(表 1)。随林龄增加,土壤 pH 在 7 a 高于其他林龄;土壤有机碳整体呈现递增趋势;全 N 呈现出先增后减的单峰模式,在 16 a 存在峰值并显著高于其他林龄;硝态氮、铵态氮随林龄增加整体呈现递增趋势,在 10 a 和 14 a 呈现递减趋势;全 P 含量整体变化不明显;速效 P 含量在 7 年中显著高于其他林龄;全 K 含量在 26 年中最高。

表 1 不同林龄杨树人工林土壤理化性质的变化

Table 1 Change in soil physicochemical properties of poplar plantations with different stand ages

林龄/a	pH	有机碳/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	硝态氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	铵态氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全钾/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
2	7.66±0.01b	15.02±0.61b	1.35±0.03f	14.41±0.04h	3.92±0.02g	0.73±0.00d	9.93±0.55cd	9.45±0.39d
5	7.55±0.02a	15.07±0.61ab	1.47±0.02e	17.43±0.01f	4.14±0.05cd	0.75±0.00c	7.60±0.12e	10.76±0.71b
6	7.43±0.01b	15.05±0.61ab	1.53±0.02d	18.25±0.43e	4.14±0.01cde	0.69±0.01f	5.58±0.27f	6.64±0.45f
7	7.81±0.02a	15.03±0.61b	1.60±0.02c	22.14±0.20b	4.25±0.01b	0.77±0.00ab	12.23±0.68a	9.72±0.39cd
8	7.13±0.01b	15.01±0.61b	1.64±0.01b	22.19±0.17b	4.33±0.04a	0.77±0.01ab	11.34±0.28b	9.76±0.30cd
10	7.29±0.01a	15.11±0.62ab	1.65±0.02b	17.54±0.12f	4.08±0.01ef	0.77±0.01b	10.38±0.61c	7.27±0.60ef
14	7.24±0.01b	15.31±0.63ab	1.75±0.01a	16.55±0.30g	4.06±0.02f	0.72±0.01e	5.21±0.73f	10.46±0.49bc
16	7.17±0.02a	15.42±0.63ab	1.78±0.01a	19.44±0.14d	4.09±0.04def	0.75±0.01c	9.40±0.40d	9.29±0.22d
17	7.46±0.03c	15.55±0.63ab	1.63±0.01bc	20.18±0.57c	4.12±0.08cde	0.78±0.01a	10.71±0.44bc	7.90±0.64e
26	7.39±0.03c	16.06±0.66a	1.64±0.04b	23.53±0.29a	4.15±0.02c	0.75±0.01c	7.45±0.27e	12.95±0.73a

注:表中数据为平均值±标准差;不同字母表示同列不同行间差异显著($p < 0.05$),相同字母表示同列不同行间无显著差异。

2.2 不同林龄杨树人工林各组分碳储量及净增量的变化

土壤层碳储量在杨树人工林生态系统碳储量中所占比重最大,但随着林龄的增加其比例逐渐减小;土壤有机碳在林分发展过程中呈现出缓慢的净积累,其年平均积累速率没有明显的峰值且在林分发展后期比较稳定。乔木层碳储量在 14 a 前成倍增加,后期缓慢增长;在林分发展过程中呈现快速净积累特征,并且是杨树人工林发展过程中生态系统总碳储量净积累的最主要贡献者,其年平均积累速率、连年积累速率在 15~20 a, 10~15 a 期间达到峰值,拟合两条曲线在 19 a 出现交点,表明杨树人工林最佳轮伐期为 15~20 a。林下草本层由于主要是一年生植物,其碳储量净积累随林分发展呈现出降低趋势,其对生态系统总碳储量的贡献几乎可以忽略不计(图 1)。

2.3 杨树人工林各组分碳储量与土壤理化性质的相关性分析

土壤层碳储量与 SOC, TN, NO_3^--N , C/P, N/P

显著正相关($p < 0.05$),与 AP, TN, TP, C/N, N/P, NH_4^+-N 没有相关关系($p > 0.05$)。土壤层碳储量与不同土壤理化性质的相关性大小为 $\text{SOC} > \text{C/P} > \text{TN} > \text{N/P} > \text{NO}_3^--\text{N} > \text{TK} > \text{TP} > \text{pH} > \text{AP} > \text{C/N} > \text{NH}_4^+-\text{N}$ 。乔木层碳储量与 SOC, TN, N/P, NO_3^--N 呈显著正相关($p < 0.05$),与 C/N 呈显著负相关。乔木层碳储量与不同土壤理化性质的相关性大小为 $\text{TN} > \text{N/P} > \text{NO}_3^--\text{N} > \text{C/N} > \text{SOC} > \text{TK} > \text{TP} > \text{pH} > \text{C/P} > \text{AP} > \text{NH}_4^+-\text{N}$ 。草本层碳储量与 SOC, NO_3^--N , C/N 和 TK 呈显著负相关关系($p < 0.05$),与不同土壤理化性质的相关性大小为 $\text{TK} > \text{C/N} > \text{NO}_3^--\text{N} > \text{SOC} > \text{N/P} > \text{TN} > \text{C/P} > \text{TP} > \text{NH}_4^+-\text{N} > \text{AP} > \text{pH}$ (图 2)。

3 讨论

3.1 杨树人工林碳储量组成随林分发展的变化

杨树人工林生态系统碳库主要包括 3 个部分,按其碳储量大小顺序排列为土壤层、乔木层和草本层,这与邢玮等研究一致^[14]。土壤层碳储量在杨树人工

林生态系统碳储量中所占比重最大,但随着林龄的增加其比例逐渐减小,影响因素主要体现在地形环

境及理化性质两方面,影响土壤空间变异的主导因子也存在差异^[16]。

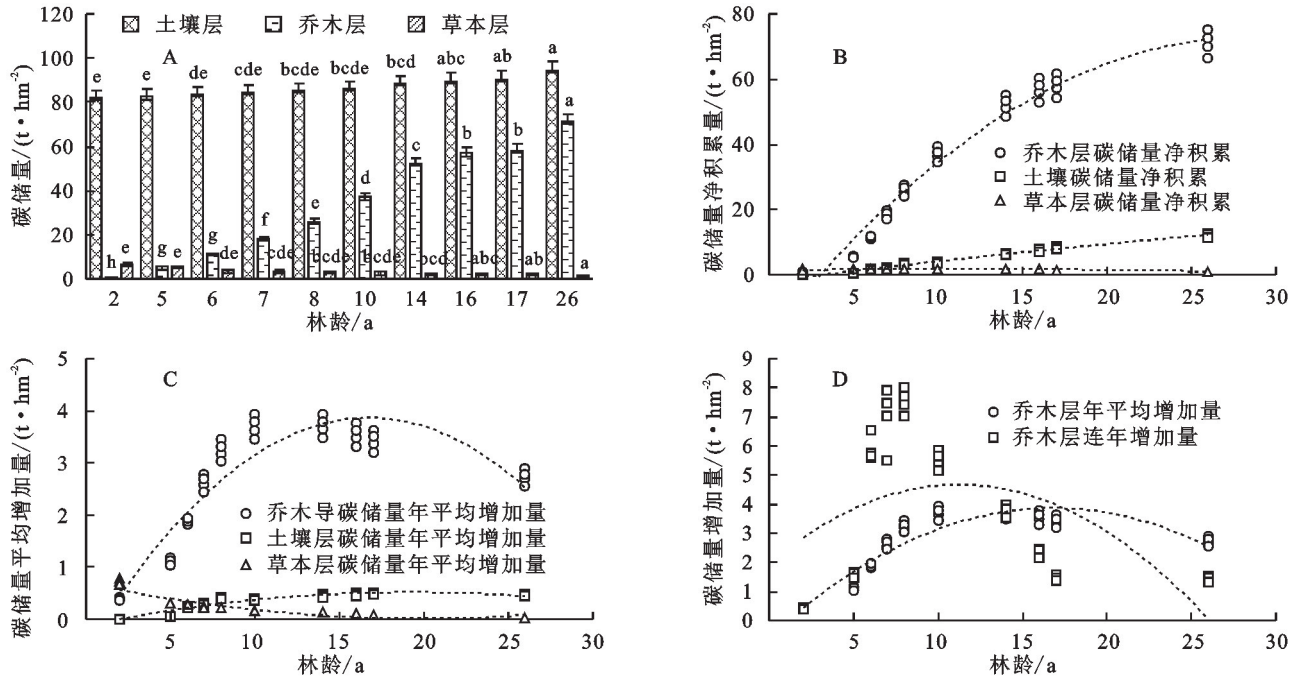
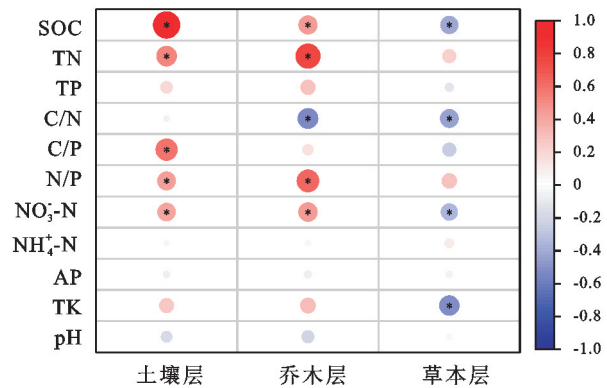


图 1 不同林龄杨树人工林各组分碳储量(A),净积累(B),连年平均增加量(C),乔木层碳储量年平均增加量与净积累变化(D)

Fig. 1 Variation of carbon storage in different components of poplar plantations with different stand ages(A)net accumulation of carbon storage(B)annual average increase of carbon storage (C)annual average increase and net accumulation of carbon storage in the arbor layer(D)



注: SOC 表示土壤有机碳; TN 表示全氮; NH_4^+-N 表示铵态氮; NO_3^--N 表示硝态氮; TP 表示全磷; AP 表示速效磷; TK 表示全钾; C/N 表示碳氮比; C/P 表示碳磷比; N/P 表示氮磷比; * 表示 $p<0.05$ 差异显著。

图 2 土壤层、乔木层、草本层碳储量与土壤理化因子的相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of carbon storage in soil layer, arbor layer, herb layer with soil physicochemical factors

杨树人工林乔木层碳储量随林龄的增加而呈现出快速净积累特征,这与崔鸿侠等研究杨树人工林林木碳储量动态^[17]以及陶玉华等研究马尾松和杉木人工林生态系统的碳储量结果相符合^[18]。14 a 以后杨树人工林碳储量增量减少,这与徐宏远、柴树峰等研究的杨树生长规律相符,由 S 型生长曲线得出在 12 a 以后杨树进入生长缓慢期^[19]。杨树人工林数量成熟

龄即拟合乔木层碳储量年平均积累速率和连年积累速率,表明杨树人工林最佳轮伐期为 15~20 a,这与王国兵研究中国沿海杨树种植确定土壤固碳的最佳轮作年龄结果相似^[20],有利于最大限度土壤固碳。

姜雨佳等研究黑松人工林草本层生物量^[21]以及宋良友等研究杉木人工林草本层碳储量^[22]发现,林下草本层碳储量随林分发展呈现出降低趋势,是因为随着林龄的增大,由于森林郁闭度太高以及种间竞争加剧导致草本光合作用受限,水肥供应不足,而产生了小部分死亡。上述结果与本研究结果相符,再加上本试验样地的草本是一年生植物,所以随林龄变化趋势并不显著。

3.2 杨树人工林各林龄碳储量与土壤理化因子相关性分析

随林龄增加土壤层和乔木层碳储量与 SOC, TN, N/P 和 NO_3^--N 呈显著正相关。王伟峰在模拟氮添加对油松人工林固碳的长期影响中表明不同施氮处理都从一定程度上提高了土壤有机碳储量^[23]。研究土壤 C, N 和 P 的化学计量特征有助于更好地了解土壤地球化学循环、土壤养分储存、森林群落的结构和功能、生态系统稳定性和生产力^[24]。土壤有机质的矿化和分解速率与 C/N 和 C/P 成反比^[25]。研究区土壤呈

现出较低的 C/P 有利于提高土壤中磷的利用率,促进微生物分解有机质和释放养分,从而导致土壤中有效 P 含量持续增加^[26],进而减轻土壤 P 元素对植物生长的限制^[27]。C:N 与微生物活性和土壤有机质的有效性有关^[28]。本试验研究结果与 C/N 呈显著负相关,表明植物根系与微生物对土壤 N 素的竞争加速了土壤有机质的分解速率,促进了微生物活性,从而对土壤碳库的积累产生积极影响^[15]。本样地呈现出较高的 N/P 值说明研究区内磷的有效性较低。张芸等研究结果表明在成熟林时期杉木人工林中土壤 P 元素可利用性降低^[29],这进一步证明随着林分发展,N 和 P 的不平衡输入可能导致人工林生态系统从 N 限制向 P 限制的转变^[30]。

4 结论

乔木层碳储量在林分发展过程中呈现快速净积累特征,土壤有机碳则呈现出缓慢的净积累,林下草本层其碳储量随林分发展呈现出降低趋势,杨树人工林最佳轮伐期在 15~20 a。轮作年龄是杨树土壤固碳的重要因素,因此在林木生长快速期进行合理经营,有助于提高杨树人工林的固碳能力。

杨树人工林土壤层和乔木层碳储量与土壤中 SOC, TN, NO_3^- -N, N/P 呈显著正相关,与 C/N, pH, AP 呈负相关。因此,通过科学合理地施氮肥可促进杨树人工林生态系统碳储量快速且稳定地增加,有利于我国早日实现“双碳”目标。

参考文献(References):

- [1] Xu Y Y, Ramanathan V, Victor D G. Global warming will happen faster than we think[J]. *Nature*, 2018,564:30-32.
- [2] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [3] Liu Z, Deng Z, He G, et al. Challenges and opportunities for carbon neutrality in China[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021,3(2):141-155.
- [4] Wang J, Feng L, Palmer P I, et al. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data[J]. *Nature*, 2020,586(7831):720-723.
- [5] Jiang F, Chen J M, Zhou L X, et al. A comprehensive estimate of recent carbon sinks in China using both top-down and bottom-up approaches[J]. *Scientific Reports*, 2016,6:22130.
- [6] Wang Y L, Wang X H, Wang K, et al. The size of the land carbon sink in China[J]. *Nature*, 2022,603(7901):7-9.
- [7] Wang K B, Deng L, Ren Z P, et al. Dynamics of ecosystem carbon stocks during vegetation restoration on the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(2):207-220.
- [8] 安晓圆,陈辰,张德婧,等.杉木北带东区杉木人工林碳储量影响因素源解析[J].*生态学杂志*, 2024, 43(5): 1477-1487.
An X Y, Chen C, Zhang D J, et al. The influencing factors of carbon storage in Chinese fir plantations in the eastern part of the northern extreme of Chinese fir distribution[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024,43(5):1477-1487.
- [9] 王万江.不同经营模式杨树人工林土壤碳库特征初步研究[D].南京:南京林业大学,2010.
Wang W J. The Study of Soil Carbon Storage under Different Poplar-Crop Intercropping Patterns [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2010.
- [10] 邢玮,戚维隆,赵倩,等.江苏杨树人工林碳储量分析研究[J].*江苏林业科技*, 2015,42(2):15-18.
Xing W, Qi W L, Zhao Q, et al. Analysis on Carbon Storage of Poplar plantation in Jiangsu Province [J]. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 2015,42(2):15-18.
- [11] 习近平.在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[R].中华人民共和国国务院公报,2020.
Xi J P. Statement at the general debate of the 75th Session of the United Nations General Assembly[R]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2020.
- [12] 于贵瑞,郝天象,朱剑兴.中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨[J].*中国科学院院刊*, 2022,37(4):423-434.
Yu G R, Hao T X, Zhu J X. Discussion on action Strategies of China's Carbon peak and Carbon Neutrality [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022,37(4):423-434.
- [13] 陈乐蓓.不同经营模式杨树人工林生态系统生物量与碳储量的研究[D].南京:南京林业大学,2008.
Chen L B. Study on Biomass and Carbon Storage of Different Poplar Agroforestry Patterns [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2008.
- [14] 邢玮,卜丹蓉,葛之葳,等.不同林龄杨树人工林碳储量研究[J].*生态科学*, 2014,33(1):154-160.
Xing W, Bu D R, Ge Z W, et al. Study on Carbon Storage of Poplar Plantation at Different Stand Ages [J]. *Ecological Science*, 2014,33(1):154-160.
- [15] 安宇超,顾宇晨,张茜,等.长期氮添加对苏北杨树人工林碳储量的影响[J].*水土保持研究*, 2024, 31(2): 27-32,42.
An Y C, Gu Y C, Zhang Q, et al. Effects of Long-term Nitrogen Addition on Carbon Storage of Poplar Plantation in north of Jiangsu[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024,31(2):27-32,42.

- [16] 刘亚静,刘红健.燕山南部典型农业区土壤有机碳储量及影响因素研究[J].华北理工大学学报:自然科学版, 2024,46(1):79-88.
Liu Y J, Liu H J. Study on Soil Organic Carbon Storage and Influencing Factors of Typical Agricultural Areas of Southern Yanshan Mountains [J]. Journal of North China University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2024, 46(1): 79-88.
- [17] 崔鸿侠,唐万鹏,胡兴宜,等.杨树人工林生长过程中碳储量动态[J].东北林业大学学报, 2012, 40(2): 47-49, 60.
Cui H X, Tang W P, Hu X Y, et al. Carbon Storage dynamics during the Growth of poplar plantation [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2012, 40 (2): 47-49, 60.
- [18] 陶玉华,冯金朝,曹书阁,等.广西沙塘林场马尾松和杉木人工林的碳储量研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版, 2012, 40(5): 38-44.
Tao Y H, Feng J C, Cao S G, et al. Study on Carbon Storage of *Pinus massoniana*, *Cunninghamia lanceolata* plantations at Shatang, Guangxi Province [J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2012, 40(5): 38-44.
- [19] 徐宏远,陈章水.不同密度 I-69 杨树生长规律的研究 [J].林业科学研究, 1994, 7(1): 61-66.
Xu H Y, Chen Z S. Studies on the Growth of Poplar Plantation of Different Spacings [J]. Forest Research, 1994, 7(1): 61-66.
- [20] Wang G B, Deng F F, Xu W H, et al. Poplar plantations in coastal China: towards the identification of the best rotation age for optimal soil carbon sequestration [J]. Soil Use and Management, 2016, 32(3): 303-310.
- [21] 姜雨佳.临沂市三种人工林生物量与碳储量特征[D].泰安:山东农业大学, 2023.
Jiang Y J. Biomass and Carbon Storage Characteristics of Three Types Plantation in Linyi, Shandong [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2023.
- [22] 宋良友,何功秀.不同林龄阶段杉木人工林生物量和碳储量的分布特征[J].湖南林业科技, 2021, 48(1): 71-75, 94.
Song L Y, He G X. Distribution Characteristics of Biomass and Carbon Storage of *Cunninghamia lanceolata* plantation in Different age Stages [J]. Hunan Forestry Science & Technology, 2021, 48(1): 71-75, 94.
- [23] 王伟峰,段玉玺,王博,等.模拟氮添加对油松人工林固碳的长期影响[J].西部林业科学, 2020, 49(1): 25-30.
Wang W F, Duan Y X, Wang B, et al. Long-term Effects of Simulated Nitrogen Addition on Carbon Sequestration in *Pinus tabulaeformis* Plantations [J]. Journal of West China Forestry Science, 2020, 49(1): 25-30.
- [24] Bai Y F, Chen S Y, Shi S R, et al. Effects of different management approaches on the stoichiometric characteristics of soil C, N, and P in a mature Chinese fir plantation [J]. Science of the Total Environment, 2020, 723: 137868.
- [25] 王薇菡,虞依娜,谢嘉淇,等.中国南亚热带不同造林模式碳汇林土壤碳、氮、磷的积累及化学计量特征[J].生态学报, 2023, 43(5): 1793-1803.
Wang W H, Yu Y N, Xie J Q, et al. Characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus accumulation and their ecological stoichiometry in Chinese subtropical forest under different afforestation patterns [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 1793-1803.
- [26] Liang J, Wang X A, Yu Z D, et al. Effects of Vegetation Succession on Soil Fertility Within Farming-Plantation Ecotone in Ziwuling Mountains of the Loess Plateau in China [J]. Agricultural Sciences in China, 2010, 9(10): 1481-1491.
- [27] 陈婵,张仕吉,李雷达,等.中亚热带植被恢复阶段植物叶片、凋落物、土壤碳氮磷化学计量特征[J].植物生态学报, 2019, 43(8): 658-671.
Chen C, Zhang S J, Li L D, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in leaf, litter and soil at different vegetation restoration stages in the mid-subtropical region of China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, 43(8): 658-671.
- [28] Paul K I, Polglase P J, Nyakuengama J G, et al. Change in soil carbon following afforestation [J]. Forest Ecology and Management, 2002, 168(1/2/3): 241-257.
- [29] 张芸,李惠通,张辉,等.不同林龄杉木人工林土壤 C : N : P 化学计量特征及其与土壤理化性质的关系[J].生态学报, 2019, 39(7): 2520-2531.
Zhang Y, Li H T, Zhang H, et al. Soil C : N : P stoichiometry and its relationship with the soil physicochemical properties of different aged Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 2520-2531.
- [30] 赵月,王光军,陈婵,等.杉木不同器官与土壤的 N : P 生态化学计量相关性[J].中南林业科技大学学报, 2016, 36(11): 73-79.
Zhao Y, Wang G J, Chen C, et al. Relationship of N : P stoichiometry of different organs and soil of *Cunninghamia lanceolata* in Huitong [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2016, 36(11): 73-79.