

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.039.

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.

An Yuchao, Gu Yuchen, Zhang Qian, 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.

# 长期氮添加对苏北杨树人工林碳储量的影响

安宇超, 顾宇晨, 张茜, 王国兵

(南京林业大学 生物与环境学院, 南京 210037)

**摘要:** [目的] 量化分析氮添加对南方杨树人工林碳储量分配格局的影响, 为进一步提升我国杨树人工林在实现“双碳”战略目标中的作用, 进而为我国“双碳”战略新时代背景下杨树人工林生产经营模式优化及技术集成提供理论支撑。[方法] 基于东台林场杨树人工林长期氮添加样地, 采用随机区组设置 5 个不同浓度氮处理:  $N_0$  [0 g/(m<sup>2</sup> · a)],  $N_1$  [5 g/(m<sup>2</sup> · a)],  $N_2$  [10 g/(m<sup>2</sup> · a)],  $N_3$  [15 g/(m<sup>2</sup> · a)],  $N_4$  [30 g/(m<sup>2</sup> · a)], 研究长期氮添加对杨树人工林乔木层、土壤层、凋落物层、林下植被层碳储量的影响。[结果] (1) 与对照相比, 杨树人工林乔木层碳储量在  $N_3$ 、 $N_4$  处理下显著增加, 在  $N_3$  处理下最为显著, 提高了 21.6%; (2) 各处理均显著提高了 0—15 cm 土层的土壤碳储量, 但对 30—45 cm 土层的土壤碳储量没有显著影响; (3)  $N_2$ 、 $N_3$ 、 $N_4$  对凋落物层碳储量影响显著,  $N_3$  对其影响最强, 提高了 49.7%; 各处理均降低了林下植被层碳储量, 但差异不显著; (4) 相关性分析结果表明: 杨树人工林各层碳储量与土壤中 TN, MBN, DON, DOC 呈正相关, 与 pH, C/N 呈负相关。[结论] 在  $N_3$  处理下, 即 15 g/(m<sup>2</sup> · a) 对东台杨树人工林碳储量的影响最大, 有利于其生态系统碳储量快速且稳定积累。

**关键词:** 碳储量; 氮添加; 杨树人工林; 苏北沿海地区

中图分类号: S718.55

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0027-06

## Effects of Long-Term Nitrogen Addition on Carbon Storage of Poplar Plantation in North of Jiangsu

An Yuchao, Gu Yuchen, Zhang Qian, Wang Guobing

(College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** [Objective] In order to further enhance the role of China's poplar plantation in achieving the China's dual carbon goals, the impact of nitrogen addition on the carbon storage allocation pattern of southern poplar plantation was quantitatively analyzed, and theoretical support was provided for the optimization of production and management mode and technology integration of poplar plantation in the new era of China's dual carbon goals. [Methods] Based on the long-term nitrogen addition plot of poplar plantation in Dongtai Forest Farm, five nitrogen treatments with different concentrations,  $N_0$  [0 g/(m<sup>2</sup> · a)],  $N_1$  [5 g/(m<sup>2</sup> · a)],  $N_2$  [10 g/(m<sup>2</sup> · a)],  $N_3$  [15 g/(m<sup>2</sup> · a)],  $N_4$  [30 g/(m<sup>2</sup> · a)], were set in random block groups. The effects of long-term nitrogen addition on carbon storage in tree layers, soil layer, litter layer and understory layer of poplar plantation were studied. [Results] (1) Compared with the control, the carbon storage of poplar plantation significantly increased under the treatments of  $N_3$  and  $N_4$ , and most significantly increased by 21.6%; under the treatment of  $N_3$ . (2) All treatments significantly increased soil carbon storage in 0—15 cm soil layer, but had no significant effect on soil carbon storage in 30—45 cm soil layer. (3)  $N_2$ ,  $N_3$  and  $N_4$  had significant effects on litter carbon storage, and  $N_3$  had the strongest effect, increasing by 49.7%. All treatments reduced the carbon storage of understory vegetation layer, but the difference was not significant. (4) Correlation

收稿日期: 2023-04-18

修回日期: 2023-04-30

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)

第一作者: 安宇超(1998—), 男, 山西晋中人, 硕士研究生, 主要从事土壤生态学和森林生态学研究。E-mail: 951183231@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: wangguobing81@aliyun.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

analysis showed that the carbon storage in each layer of poplar plantation was positively correlated with TN, MBN, DON and DOC in soil, and negatively correlated with pH and C/N. [Conclusion] Under  $N_3$  treatment,  $15 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , had the greatest effect on carbon storage in Dongtai poplar plantation, which was conducive to the rapid and stable accumulation of carbon storage in the ecosystem.

**Keywords:** carbon storage; nitrogen addition; poplar plantation; coastal region of northern Jiangsu Province

目前,人工林的地位举足轻重,在提高世界森林资源质量与提升可持续经营水平中起着关键作用<sup>[1]</sup>。杨树是我国种植面积最广的人工林树种,栽种面积已居世界第一<sup>[2]</sup>,它不仅可以有效缓解木材的供需矛盾,还在增加碳汇方面有着显著作用<sup>[3]</sup>。近年来,随着杨树人工林的发展,地力逐渐衰退<sup>[4]</sup>,其固碳增汇的潜力尚未得到充分改善与显著提升。氮素对于森林生态系统的固碳具有重要意义<sup>[5]</sup>,氮添加可以改善土壤中缺少有效氮的问题,调节植物的生长<sup>[6]</sup>,但过高的氮浓度会产生更多的消极影响,导致土壤肥力下降<sup>[7]</sup>。因此,提高杨树人工林的土壤肥力及固碳增汇的能力需要因地制宜地施肥。

20 世纪 70 年代以来,德国、美国、澳大利亚等发达国家对森林碳汇进行研究,并取得显著成果<sup>[8-10]</sup>。同时,针对森林生态系统的碳储量问题,我国学者也完成大量的工作<sup>[11-12]</sup>。当前我国对于森林碳储量的研究大部分集中在以森林资源清查为主的大范围森林碳储量估计上,而研究小范围、多氮肥梯度处理对杨树人工林生态系统碳储量的影响较少。在我国致力于实现“双碳目标<sup>[13]</sup>”的背景下,增强与其相关研究进而提升碳储量具有重大意义。为此,本研究在江苏省东台林场内展开,通过长期模拟氮添加对苏北杨树人工林生态系统乔木层、土壤层、林下植被层、凋落物层碳储量影响的差异。研究结果可为提高苏北地区杨树人工林生态系统生产力和碳汇功能,以及人工林经营工作提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

研究区位于江苏省盐城市东台林场( $120^{\circ}07' - 120^{\circ}53'E, 32^{\circ}33' - 32^{\circ}57'N$ ),属暖温带和亚热带的过渡区,年平均气温  $15.4^{\circ}\text{C}$ ,降水量  $1\,083.1 \text{ mm}$ ,全年日照  $1\,864.4 \text{ h}$ 。区域内主要林分类型为杨树(*Populus L.*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、银杏(*Ginkgo biloba*)等。林下植被主要有蛇莓(*Duchesnea indica*)、野燕麦(*Avena fatua*)、乌莓(*Cayratia japonica*)等。林下土壤为脱盐草甸土,质地为砂质壤土。

### 1.2 样地设置

在东台林场选择立地条件和经营管理措施一致

的杨树人工林(黑杨派无性系 I-35, *Populus deltoides* CL'35'),采用随机区组设计,设置 5 种不同施氮水平处理,施氮浓度分别为  $N_0[0 \text{ g N}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$ 、 $N_1[5 \text{ g N}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$ 、 $N_2[10 \text{ g N}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$ 、 $N_3[15 \text{ g N}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$ 、 $N_4[30 \text{ g N}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$ 每个处理 4 个重复样方,共计 20 个样方,每个样方面积为  $25 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ ,每个样方间保留  $10 \text{ m}$  宽的缓冲带。施氮试验从 2012 年 5 月开始,每年将各处理所需  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  总量平均分为 6 份,每次取 1 份溶解于  $20 \text{ L}$  水中,依次在 5—10 月(杨树生长季)中旬均匀喷洒于试验样地中,对照处理喷洒等量的水。截至 2022 年 4 月,氮添加处理已连续进行 10 a。

### 1.3 取样与测定

1.3.1 乔木层碳储量估测 在 2022 年 4 月,对杨树人工林样地进行每木胸径和树高的调查。根据胸径、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<sup>[14]</sup>,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,最后根据样地内林木株数累加得到样地内乔木层碳储量,再结合林分密度计算得到不同试验处理的单位面积碳储量(碳密度,  $\text{t}/\text{hm}^2$ )。其中,杨树单株生物量的异速生长方程如下:

$$W = 0.123611 \times (D^2 H)^{0.804004574}$$

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 林下植被层及凋落物层碳储量测定 在每个样地内设置 5 个  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  的林下植被层小样方,分别对其进行全株收获后称取鲜重,各自混匀后取 20% 带回作为样品将样品,带回实验室后于  $80^{\circ}\text{C}$  的恒温箱中烘干至恒重,根据干重/鲜重计算含水率,推算出单位面积的生物量,再根据碳转换率计算得出碳储量。在每个样地内设置 5 个  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  的小样方,从中分别收集凋落物,于  $80^{\circ}\text{C}$  的恒温箱中烘干至恒重,估算凋落物单位面积内的生物量,最后根据碳转换率计算得出碳储量。灌草层与凋落物层碳转换率采用  $0.45^{[15]}$ 。

1.3.3 土壤层碳储量及理化性质测定 采用五点取样法,使用直径为  $2 \text{ cm}$  的土钻在每个样地内按照  $0 - 15 \text{ cm}$ ,  $15 - 30 \text{ cm}$ ,  $30 - 45 \text{ cm}$  土层分 3 层取样,

每层取 300 g 左右样品,共计 60 份土壤样品(5 氮水平×3 土层×4 重复)带回实验室自然风干后研磨过 100 目土筛。将研磨过筛后的土样采用元素分析仪(Vario Element III, Germany)测定其总有机碳(TOC)及全氮(TN)含量。

土壤层有机碳储量的计算公式如下:

$$T_e = \sum_{i=1}^p C_i \times D_i \times W_i \times 10^{-1}$$

式中: $T_e$ 为土壤有机碳储量( $t/hm^2$ ); $C_i$ 为第  $i$  层土壤容重( $g/cm^3$ ); $D_i$ 为第  $i$  层土壤有机碳含量( $g/kg$ ); $W_i$ 为第  $i$  层厚度; $p$  为层数。

表 1 试验地土壤理化性质

Table 1 The basic physicochemical properties of the soil

pH	TN/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	TP/ ( $mg \cdot kg^{-1}$ )	C/N	$NO_3^- - N$ / ( $mg \cdot kg^{-1}$ )	$NH_4^+ - N$ / ( $mg \cdot kg^{-1}$ )	容重/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )
8.27±0.07	0.74±0.03	286.81±54.8	20.61±1.01	4.84±1.51	1.51±0.34	1.26±0.07

1.4 数据处理

利用 Excel 2010 进行数据处理,采用 SPSS 22.0 的单因素方差分析(One-Way ANOVA, Duncan)、相关性分析(Pearson 检验);采用 Origin 2019、R 4.2.3 软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 长期氮添加对人工杨树林乔木层碳储量的影响

由表 2 可知,与对照相比,在  $N_1, N_2, N_3, N_4$  处理下,乔木层碳储量分别增加了 3.35%, 12.2%, 21.6%, 21.1%;  $N_3, N_4$  处理均显著高于对照( $p < 0.05$ ),其中,  $N_3$  处理最高,乔木层碳储量为  $108.15 t/hm^2$ ,而  $N_1, N_2$  处理对其影响不显著( $p > 0.05$ )。根据表 2 中平均胸径和平均树高数据可知,施氮主要促进了树木胸径的生长,对树高没有显著的促进作用,因此由施肥导致的林木胸径的增加是不同处理乔木层碳储量具有显著性差异的主要原因。

表 2 长期氮添加对杨树人工林乔木层生物量与碳储量的影响

Table 2 Effects of long-term nitrogen addition on arbor layer biomass and carbon storage of poplar plantation

施氮处理	平均胸径/cm	平均树高/m	碳储量/ ( $t \cdot hm^{-2}$ )
$N_0$	24.62±0.47b	22.44±0.54a	88.95±4.75b
$N_1$	25.81±0.81ab	21.72±0.33a	91.93±3.77b
$N_2$	26.56±0.28ab	22.71±0.90a	99.76±4.34ab
$N_3$	27.51±2.00a	23.07±0.90a	108.15±6.78a
$N_4$	27.89±0.74a	22.66±0.34a	107.72±5.26a

注:不同小写字母表示不同处理间存在差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

2.2 长期氮添加对人工杨树林林下植被层和凋落物层碳储量的影响

由图 1 可知,和对照相比,不同施氮处理均减少

分别对不同样地内不同土层的土壤采用环刀法测定容重;土壤酸碱度(pH)测定采用电位法。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-可见分光光度计进行测定。可溶性有机碳(DOC)、可溶性有机氮(DON)采用 0.5 mol/L  $K_2SO_4$  浸提;微生物量碳(MBC)、微生物生物量氮(MBN)采用氯仿熏蒸- $K_2SO_4$  浸提,通过岛津 TOC-VCPH 分析仪进行测定。土壤基本理化性质见表 1。

了杨树人工林林下植被层碳储量,较  $N_0$  分别降低了 7.00%, 20.0%, 25.0%, 26.0%, 但差异不显著( $p > 0.05$ ),可能是因为随着施氮水平的增加在一定程度上增加了林分郁闭度,使林下植被所利用的光能减少,导致林下植被层碳储量下降。凋落物层与林下植被层相比,碳储量更大,且变化更为明显。杨树人工林在不同施氮处理下,凋落物层碳储量均显著增加( $p < 0.05$ ),较对照分别增加了 15.4%, 31.5%, 51.0%, 49.7%;其中  $N_3$  处理对凋落物层碳储量影响最大,而  $N_1$  处理对其影响最小。

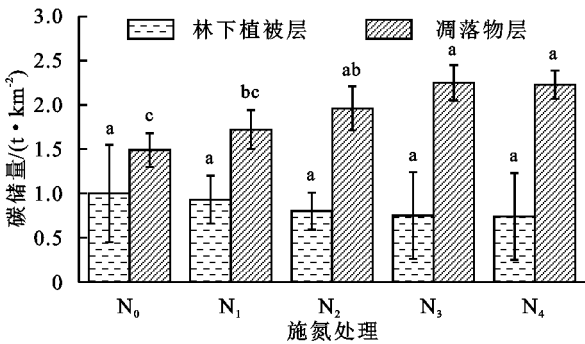


图 1 长期氮添加对林下植被、凋落物碳储量的影响

Fig. 1 Effects of long-term nitrogen addition on carbon storage of understory vegetation and litter

2.3 长期氮添加对人工杨树林土壤层碳储量的影响

由图 2 可知,杨树人工林内不同氮处理水平上,土壤层有机碳含量具有一定的规律性。 $N_2, N_3, N_4$  处理显著提高了 0—15 cm, 15—30 cm 土层中有机碳的含量( $p < 0.05$ ),其中  $N_4$  处理对其影响最大,与对照相比分别在 0—15 cm, 15—30 cm 土层中提高了 12.4%, 8.18%, 而不同施氮处理对 30—45 cm 土层中有机碳含量没有显著影响( $p > 0.05$ )。

在 0—15 cm 土层,各施氮处理均显著提升了土



壤碳储量 ( $p < 0.05$ ),  $N_2$  处理对其影响最大, 在 15—30 cm 土层  $N_2$ ,  $N_3$ ,  $N_4$  处理土壤碳储量显著高于对照 ( $p < 0.05$ ), 而  $N_1$  与对照差异不显著 ( $p > 0.05$ ); 在

30—45 cm 土层, 各处理对土壤碳储量均无显著影响 ( $p > 0.05$ )。在同一施氮处理下, 随着土层深度的增加, 土壤有机碳含量和土壤碳储量均逐渐降低。

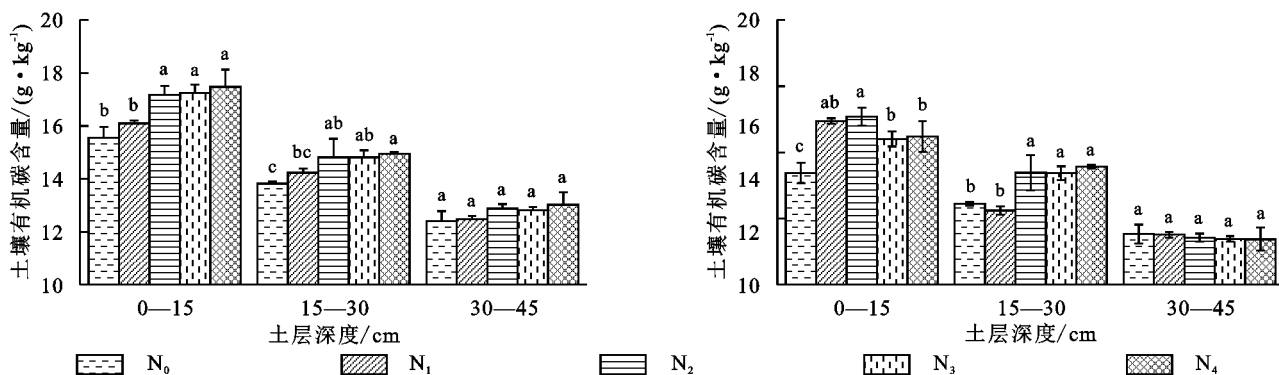


图 2 长期氮添加对土壤有机碳含量垂直分布和碳储量的影响

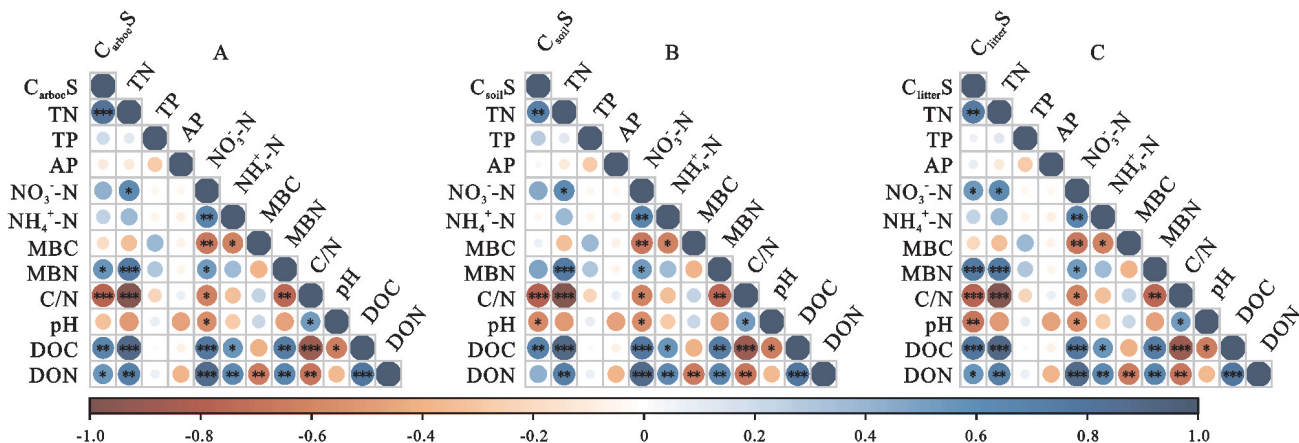
Fig. 2 Effects of long-term nitrogen addition on vertical distribution of soil organic carbon content and carbon storage

## 2.4 杨树人工林各层碳储量与土壤理化因子相关性分析

由图 3 可知, 乔木层碳储量与 MBN、DON 显著正相关 ( $p < 0.05$ ), 但与 MBC 无相关关系 ( $p > 0.05$ ); 乔木层碳储量与 TN、DOC 极显著正相关 ( $p < 0.01$ ), 与 C/N 极显著负相关 ( $p < 0.01$ )。乔木层碳储量与不同土壤理化性质的相关性大小为:  $TN > C/N > DOC > MBN > DON > NO_3^- - N > pH > NH_4^+ - N > TP > MBC > AP$ 。土壤层碳储量与 TN、DOC 极显著正相关 ( $p < 0.01$ ), 与 pH 显著负相关 ( $p < 0.05$ ), 与 MBC、MBN、DON 没有相关关系 ( $p > 0.05$ ); 土壤层碳储量与 C/N 极显著负相关 ( $p <$

0.01)。土壤层碳储量与不同土壤理化性质的相关性大小为:  $C/N > TN > DOC > pH > MBN > NO_3^- - N > DON > TP > MBC > NH_4^+ - N > AP$ 。

凋落物层碳储量与  $NO_3^- - N$ 、DON 显著正相关 ( $p < 0.05$ ), 与 pH 显著负相关 ( $p < 0.05$ ); 凋落物层碳储量与 TN、MBN、DOC 极显著正相关 ( $p < 0.01$ ), 与 C/N 极显著负相关 ( $p < 0.01$ )。凋落物层碳储量与不同土壤理化性质的相关性大小为:  $DOC > C/N > MBN > TN > pH > DON > NO_3^- - N > NH_4^+ - N > MBC > AP > TP$ 。



注: TN 表示全氮;  $NH_4^+ - N$  表示铵态氮; TP 表示全磷; AP 表示速效磷;  $NO_3^- - N$  表示硝态氮; MBC 表示微生物生物量碳; MBN 表示微生物生物量氮; C/N 表示碳氮比; pH 表示土壤酸碱度; DOC 表示可溶性有机碳; DON 表示可溶性有机氮; \* \* \*, \* \* 和 \* 分别表示  $p < 0.001$ ,  $p < 0.01$ ,  $p < 0.05$  上差异显著。

图 3 乔木层 (A)、土壤层 (B)、凋落物层 (C) 碳储量与土壤理化因子的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis of carbon storage in arbor layer (A) soil layer (B) and litter layer (C) with soil physicochemical properties

## 3 讨论

许多学者对不同氮梯度及不同树种生物量的影响开展了诸多研究, 在一定施氮浓度下, 树木的生物量随着施氮浓度的提高而增加, 进而影响其碳储量的

大小。如孟秋实等<sup>[16]</sup>对东北红豆杉施加氮肥后发现, 其生长在氮浓度为 30~90 kg/hm<sup>2</sup> 时最为良好; 王伟峰等<sup>[17]</sup>利用 FORECAST 模型对油松人工林进行研究后发现, 在 30, 60, 90, 120 kg/hm<sup>2</sup> 浓度的氮添加处理下, 均在一定程度上提高了油松人工林乔木层

的碳储量。上述研究结论与本研究不同氮梯度对乔木层碳储量影响结果相似,相关性分析表明乔木层碳储量与 TN 极显著正相关,充分说明了在施用不超过  $30 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  的情况下,均会促进乔木层碳储量的积累;在  $15 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  处理中,对乔木层碳储量增长最为明显,其原因是外源氮能够提高有效氮在土壤中的含量,同时,会使根系分泌物量增加,提高 DOC 的含量<sup>[18]</sup>,有效氮与 DOC 可以作为微生物生长的能量来源,增加其数量与活性,从而加快土壤活性氮组分的转换<sup>[19]</sup>,使树木更易吸收土壤中养分促进乔木层碳储量的积累。但在超过  $15 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  后,对其碳储量的增长效应有所减弱,可能是植物对于氮素的吸收饱和,导致杨树体内氮、磷等营养元素比例失衡<sup>[10]</sup>,使树木生长减缓。在本研究中,随着施氮水平的升高,凋落物量随之显著提高,这与郭洁芸等<sup>[20]</sup>在对 172 篇国内氮添加试验进行分析后得出,氮添加会显著增加森林生态系统中凋落物总量的结论一致,其原因是氮添加会使杨树叶片中的氮含量提高,从而利用其合成更多的光合酶<sup>[21]</sup>,提高杨树的光合速率及森林生产力,由此增加了凋落物总量。

森林生态系统土壤碳库的输入以凋落物为主要形式<sup>[22]</sup>。前人研究发现<sup>[23-24]</sup>,在同一施氮水平中,各层土壤有机碳含量随土层深度的增加而减少,本研究结论与其相同;这是由于表层土壤有着大量的凋落物,其分解后可作为重要的土壤有机碳来源物质<sup>[25]</sup>,随着土层加深,凋落物对土壤有机质含量的影响逐渐减弱。王建楠<sup>[26]</sup>对水杉施加  $0.8, 2.4, 4.0, 4.8 \text{ mol}/\text{m}^2$  的氮肥后发现,氮添加显著提高了水杉林土壤有机碳的含量;Hyvönen 等<sup>[27]</sup>发现,增施氮肥后可以促进欧洲松树林与云杉林的土壤碳储量,每克氮素可土壤碳库增加  $11 \text{ g}$  碳;除此之外,还有很多学者研究得出土壤有机质的变化规律与本文一致<sup>[28-29]</sup>。

本研究发现,土壤碳储量与 TN 呈显著正相关,与 C/N、pH 呈显著负相关,在  $10 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  处理下,土壤碳储量增长最为显著;可能是因为施加氮肥会降低土壤中 C/N,使土壤有机碳矿化速率加快<sup>[30]</sup>,促进微生物的生存活性,从而对土壤碳库的积累产生积极影响;土壤 pH 随施氮量的增加而降低,当 pH 过低时,会导致铝元素活化,对森林生态系统中的植物造成毒害<sup>[31]</sup>;本研究中土壤偏碱性,施氮后使 pH 趋向于中性,而土壤磷酸酶在中性条件下活性最高,更好地促进了有机磷向无机磷的转化,进而缓解土壤磷限制<sup>[32]</sup>,加快了土壤有机碳的矿化和积累。

## 4 结论

综上,氮添加会显著增加杨树人工林生态系统中乔

木层、土壤层及凋落物层碳储量,减少林下植被层碳储量;乔木层作为杨树人工林生态系统中最主要的碳库,在  $15 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  处理下,其碳储量增长速度最快,从而使得杨树人工林生态系统总碳储量显著升高。因此,通过科学合理的施肥可促进杨树人工林生态系统碳储量快速且稳定增加,有利于我国早日实现“碳达峰、碳中和”。本研究结果可为苏北地区杨树人工林科学经营提供参考,同时丰富杨树人工林碳储量研究。

## 参考文献(References):

- [1] Nilsen P, Strand L T. Thinning intensity effects on carbon and nitrogen stores and fluxes in a Norway spruce *Picea abies* (L.) Karst stand after 33 years[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 256(3): 201-208.
- [2] 方升佐. 中国杨树人工林培育技术研究进展[J]. 应用生态学报, 2008, 10(19): 2308-2316.  
Fang S Z. Silviculture of poplar plantation in China: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 10(19): 2308-2316.
- [3] 李平, 肖玉, 杨洋, 等. 天津平原杨树人工林生态系统碳储量[J]. 生态学杂志, 2014, 33(3): 567-574.  
Li P, Xiao Y, Yang Y, et al. Ecosystem carbon storage in poplar plantations of different stand ages in Tianjin plain [J]. Chinese Journal of Ecology 2014, 33(3): 567-574.
- [4] 赵娟, 郑智礼, 郭斌, 等. 杨树连作障碍及生产力维持研究进展[J]. 世界林业研究, 2020, 33(1): 14-19.  
Zhao J, Zheng Z L, Guo B, et al. Research Progress in Continuous Cropping Obstacle and Productivity Maintenance of Poplar[J]. World Forestry Research, 2020, 33(1): 14-19.
- [5] Thomas R Q, Canham C D, Weathers K C, et al. Increased tree carbon storage in response to nitrogen deposition in the US[J]. Nature Geoscience 2010, 3(1): 13-17.
- [6] Sutton M A, Simpson D, Levy P E, et al. Uncertainties in the relationship between atmospheric nitrogen deposition and forest carbon sequestration[J]. Global Change Biology, 2008, 14(9): 2057-2063.
- [7] McDowell W H, Currie W S, Aber J D, et al. Effects of chronic nitrogen amendments on production of dissolved organic carbon and nitrogen in forest soils[J]. Water Air and Soil Pollution, 1998, 105(1): 175-182.
- [8] Rennie P J. The uptake of nutrients by mature forest growth[J]. Plant & Soil, 1955, 7(1): 49-95.
- [9] Delcourt H R, Harris W F. Carbon budget of the Southeastern U. S. Biota: analysis of historical change in trend from source to sink [J]. Science, 1980, 210(4467): 321-323.
- [10] Vesterdal L, Ritter E, Gundersen P. Change: in soil organic carbon following afforestation of former arable

- land[J]. Forest Ecology and Management 2002, 169: 137-147.
- [11] 刘国华,傅伯杰,方精云,等.中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J].生态学报,2000,20(5):733-740.  
Liu G H, Fu B J, Fang J Y, et al. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(5): 733-740.
- [12] 王效科,冯宗炜,欧阳志云,等.中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J].应用生态学报,2001,12(1):13-16.  
Wang X K, Feng Z W, Ouyang Z Y, et al. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(1): 13-16.
- [13] 习近平.习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话[N].人民日报 2020-09-23(1).  
Xi J P. At the General Debate of the 75 th Session of The United Nations General Assembly[N]. People's Daily 2020-09-23(1).
- [14] 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 P. Study on biomass and carbon storage of different poplar agroforestry patterns[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2008.
- [15] 邢玮,卜丹蓉,葛之蕙,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.
- [16] 孟秋实,秦倩倩,刘艳红,等.氮添加对东北红豆杉幼苗生长发育及生理特征的影响[J].生态学杂志,2022,41(12):2325-2334.  
Meng Q S, Qin Q Q, Liu Y H, et al. Effects of nitrogen addition on growth development and physiological characteristics of *Taxus cuspidata* seedlings [J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(12): 2325-2334.
- [17] 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,2020,2(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, 2(1): 25-30.
- [18] 简俊楠,刘伟超,朱玉帆,等.短期氮添加对黄土高原人工刺槐林土壤有机碳组分的影响[J].环境科学,2023,44(05):2767-2774.  
Jian J N, Liu W C, Zhu Y F, et al. Effects of short-term nitrogen addition on soil organic carbon components in *Robinia pseudoacacia* Plantation[J]. Environment Science, 2023, 44(05): 2767-2774.
- [19] 林伟,马红亮,裴广廷,等.氮添加对亚热带森林土壤有机碳氮组分的影响[J].环境科学研究,2016,29(1):67-76.  
Lin W, Ma H L, Pei G T, et al. Effects of nitrogen addition on soil carbon and nitrogen pools in mid-subtropical forest [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(1): 67-76.
- [20] 郭洁芸,王雅歆,李建龙,等.氮添加对中国陆地生态系统植物—土壤碳动态的影响[J].生态学报,2022,42(12):4823-4833.  
Guo J Y, Wang Y X, Li J L, et al. Effects of nitrogen addition on plant-soil carbon dynamics in terrestrial ecosystems of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12): 4823-4833.
- [21] 王芳,张军辉,谷越,等.氮添加对树木光合速率影响的meta分析[J].生态学杂志,2017,36(6):1539-1547.  
Wang F, Zhang J H, Gu Y, et al. Meta-analysis of the effects of nitrogen addition on photosynthesis of forests[J]. Chinese Journal of Ecology 2017, 36(6): 1539-1547.
- [22] Davidson E A, Trumbore S E, Amundson R, et al. Biogeochemistry: soil warming and organic carbon content[J]. Nature 2000, 408(6814): 789-790.
- [23] Lu T P, Zhang W X, Niu J, et al. The vertical characteristics of soil carbon and nitrogen at different rubber plantation ages in xishuang banna southwest China [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2017, 26(2): 1431-1439.
- [24] 杨秀清,韩有志,关帝山森林土壤有机碳和氮素的空间变异特征[J].林业科学研究,2011,24(2):223-229.  
Yang X Q, Han Y Z. Spatial variations of soil organic carbon and nitrogen of forestland in Guandi Mountain [J]. Forest Research, 2011, 24(2): 223-229.
- [25] Rees R M, Bingham I J, Baddeley J A, et al. The role of plants and land management in sequestering soil carbon in temperate arable and grassland ecosystems [J]. Geoderma, 2005, 128(1): 130-154.
- [26] 王建楠.氮磷添加对不同林龄水杉林生态化学计量的影响[D].北京:中国林业科学研究院,2020.  
Wang J N. Effects of N and P addition on ecological stoichiometry of different forest age in *Metasequoia glyptostroboides* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2020.
- [27] 崔容.温带草甸草原常见物种叶功能性状对氮磷耦合效应的响应[D].济南:山东大学,2021.  
Cui R. Responses of leaf functional traits of common species in temperate meadow steppe to coupling effects of nitrogen and phosphorus[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [28] Reay D S, Dentener F, Smith P, et al. Global nitrogen deposition and carbon sinks[J]. Nature Geoscience, 2008, 1(7): 430-437.

- [21] 俞月凤, 卢凌霄, 杜虎, 等. 不同类型森林石灰土的团聚体组成及其有机碳分布特征[J]. 西北植物学报, 2013, 33(5): 1011-1019.
- Yu Y F, Lu L X, Du H, et al. Distribution of organic carbon and aggregation of calcareous soil in different forest types [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013, 33(5): 1011-1019.
- [22] 冷暖. 南亚热带赤红壤团聚体稳定性及其降雨溅蚀响应[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
- Leng N. Aggregate Stability of Lateritic Red Soil and Its Response to Rainfall Splash Erosion in South Subtropical Zone[D]. Nanning: Guangxi University, 2022.
- [23] 王彬. 土壤可蚀性动态变化机制与土壤可蚀性估算模型[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- Wang B. Dynamic Mechanism of Soil Erodibility and Soil Erodibility Calculation Model [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2013.
- [24] Nguetnkam J P, Dultz S. Soil degradation in Central North Cameroon: Water-dispersible clay in relation to surface charge in Oxisol A and B horizons[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 113(1): 38-47.
- [25] Tombácz E, Szekeres M. Colloidal behavior of aqueous montmorillonite suspensions: The specific role of pH in the presence of indifferent electrolytes[J]. Applied Clay Science, 2004, 27(1/2): 75-94.
- [26] Weng L P, Van Riemsdijk W H, Hiemstra T. Humic nanoparticles at the oxide-water interface: Interactions with phosphate ion adsorption [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(23): 8747-8752.
- [27] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Soil fractal characteristics characterized by weight distribution of particle size[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [28] 林立文, 邓羽松, 王金悦, 等. 南亚热带人工林种植对赤红壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3647-3656.
- Lin L W, Deng Y S, Wang J Y, et al. Effects of plantation on aggregate distribution and stability of lateritic red soil in south subtropical China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(11): 3647-3656.
- [29] 赵国政. 典型喀斯特地区小流域石灰土与黄壤理化特征及其水分调节技术研究[D]. 贵阳: 贵州民族大学, 2021.
- Zhao G Z. Soil Physical Characteristics of Calcareous Soil and Yellow Soil in a Small Catchment of Typical Karst Area and Their Water Regulation Techniques [D]. Guiyang: Guizhou Minzu University, 2021.
- [30] 孙兆地. 石灰岩、花岗岩母质发育的土壤-油松林生态系统有机碳、氮、磷、钾的垂直分布特征: 以松山自然保护区为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- Sun Z D. Vertical Distribution Characters of Organic Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Soil-Chinese Pine Forest Ecosystem Developed from Limestone and Granite Parent Materials: Taking Song Mountain Nature Reserve for Example [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.

~~~~~

(上接第32页)

- [29] Zak D R, Holmes W E, Burton A J, et al. Simulated atmospheric  $\text{NO}_3^-$  deposition increases soil organic matter by slowing decomposition[J]. Ecological Applications, 2008, 18(8): 2016-2027.
- [30] 王泽西, 陈倩妹, 黄允优, 等. 川西亚高山森林土壤呼吸和微生物生物量碳氮对施氮的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(19): 7197-7207.
- Wang Z X, Chen Q M, Huang Y Y, et al. Response of soil respiration and microbial biomass carbon and nitrogen to nitrogen application in subalpine forests of western Sichuan [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(19): 7197-7207.
- [31] 陈雨岑, 陈冠陶, 王宇, 等. 10 年模拟氮沉降对苦竹林根际与非根际土壤铝组分的影响[J]. 生态环境学报, 2021, 30(7): 1368-1374.
- Chen Y Q, Chen G T, Wang Y, et al. Effect of ten-year simulated nitrogen deposition on aluminium fractions of rhizospheric and bulk soils in a *Pleioblastus amarus* plantation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(7): 1368-1374.
- [32] 耿玉清, 白翠霞, 赵广亮, 等. 土壤磷酸酶活性及其与有机磷组分的相关性[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(2): 139-143.
- Geng Y Q, Bai C X, Zhao G L, et al. Soil phosphatase activity and its correlation with composition of organic phosphorus[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(2): 139-143.