

湿地松连作对土壤肥力及其生长量的影响

吴昊¹ 方丽丹² 许亮³ 刘乐平²

(1. 湖北省林业科学技术推广中心 武汉 430079; 2. 彭场林场 荆门 446289;
3. 湖北岳华工程项目管理有限公司 武汉 430000)

摘要: 为了研究连作对湿地松纯林土壤肥力及林分生产力的影响,以湖北省荆门市彭场林场中湿地松人工林为研究对象,调查并分析连作林分和非连作林分林地土壤养分含量变化和林木生长量及根系差异。结果表明:0~10 cm土层中非连作林分土壤氮、磷、有机质含量均高于连作林分,>10~20 cm土层中非连作林分土壤的氮和磷含量高于连作林分;非连作林分林木根的长度和表面积均高于连作林分;利用解析木数据拟合林木树高、胸径和单株材积生长曲线,15 a前连作和非连作林分的树高和胸径没有明显差异,但非连作林分的单株材积高于连作林分,而25 a时,非连作林分的胸径和单株材积明显高于连作林分。可见,湿地松连作会导致土壤肥力退化,林分生产力下降,对于连作林分土壤肥力维持至关重要。

关键词: 土壤肥力;森林生产力;连作;湿地松

中图分类号: S725 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-3020(2024)01-0011-08

Effects of Continuous Cropping on Soil Fertility and Stand Productivity of *Pinus elliottii* Pure Forest

Wu Hao¹ Fang Lidan² Xu Liang³ Liu Leping²

(1. Hubei Provincial Forestry Science and Technology Extension Center Wuhan 430079;
2. Pengchang Tree Farm Jingmen 446289;
3. Hubei Yuehua Engineering Project Management Co., Ltd Wuhan 430000)

Abstract: In order to study the effects of continuous cropping on soil fertility and stand productivity in *Pinus elliottii* pure forests. Taking the artificial *P. elliottii* forest in Pengchang Forest Farm, Jingmen City, Hubei Province as the research object, this study investigates and analyzes changes in soil nutrient content and differences in tree growth and root system between continuous and non-continuous cropping forest stands. The results showed that soil nitrogen, phosphorus, and organic matter content of non-continuous cropping stand in 0-10 cm soil layer was higher than those of continuous cropping stand. The soil nitrogen and phosphorus content of non-continuous cropping stand in 10-20 cm soil layer was higher than that of continuous cropping stand; The length and surface area of roots in non-continuous cropping stand was higher than those in continuous cropping stand; Using analytical wood data to fit the growth curves of forest tree height, diameter at breast height, and individual volume, there was no significant difference in tree height and diameter at breast height between continuous and non-continuous cropping stands before 15 years. However, the individual volume of non-continuous cropping stand was higher than that of continuous cropping stands. At 25 years, the breast height and individual volume of non-continuous cropping stands were significantly higher than those of continuous cropping stand. Continuous cropping of *P. elliottii* can lead to soil fertility degradation and a decrease in stand productivity, which is crucial for maintaining soil fertility in continuous cropping forests.

Key words: soil fertility; forest productivity; continuous cropping; *Pinus elliottii*

能否在保持可持续的森林生产力的同时保护森林的完整性成为了森林研究中最具挑战性的问

题之一。全球市场对商用木材产品的巨大需求导致全球森林种植面积从1990年的1.68亿hm²增

* 收稿日期:2023-05-30;修回日期:2023-10-31

基金项目:国家科技支撑计划子课题“北亚热带主要针叶树种速生丰产林定向培育技术研究”(2015BAD09B0104)。

作者简介:吴昊(1984~),男,工程师,主要从事林业站管理、林业科技推广和应用等相关工作。

刘乐平为通讯作者。

加到 2015 年的 2.78 亿 hm^2 , 从占总森林面积的 4.06% 增加到 6.95%^[1-3]。如何保持或提高人工林的生产力, 对于木材产品市场的巨大需求和保护天然林生态系统至关重要。尽管一些用材树种的连续轮作, 如斯威士兰的巴图拉松^[4-5] 和瑞典西南部的欧洲云杉(*Picea abies*)^[6], 并没有导致森林生产力的下降, 但是许多结果表明, 土壤肥力退化和连续轮作致使人工林的生长衰退经常发生^[7]。与 15 a 生柳杉(*Cryptomeria japonica* var. *sinensis*) 第一代林分土壤肥力相比, 15 a 生柳杉第二代和第三代林分有机质含量分别下降了 21% 和 9%, 林分总氮含量下降了 23%^[8]。土壤肥力下降导致林分生产力下降, 杉木(*Cunninghamia lanceolata*) 人工林生物量增长率从第一轮到第二轮下降了 24%, 从第二轮到第三轮下降了 40%^[9]。杨超的结果显示, 11 a 生柳杉第一代和第二代林分的总生物量分别为 85.60 和 71.45 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 减少了 16.53%, 净初级生产率从第一轮的 7.78 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 降至第二轮的 6.49 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[10]。长期研究结果表明, 与第一轮杉木相比, 7 a、11 a、14 a 和 18 a 生林分的第二轮平均单株生物量和林分生物量分别减少了约 18%、17%、7% 和 3%^[11]。杉木人工林第二轮和第三轮的立木材积分别比第一轮低 30% 和 47%^[12]。

湿地松(*Pinus elliottii*) 是一种生长迅速的树种, 原产于美国东南部。由于其快速生长的特性、良好的木材品质以及作为重要的林化产品资源, 湿地松在世界各地被引进并栽培用于木材制品和油树脂^[13-14]。根据第七次中国森林资源调查, 湿地松人工林面积为 134 万 hm^2 , 占中国人工林总面积的 2.85%, 湿地松木材总蓄积量为 4 100 万 m^3 , 占中国人工林总木材蓄积量的 1.63%。

前期对湿地松进行了许多方面的研究, 如叶片结构和生理特性、生态生理学研究、分子生物学研究、高效栽培技术等^[13-15], 然而, 对于连续轮作的湿

地松人工林的肥力状况变化及其对人工林生产力的影响却鲜有人关注。在中国南方早年建立湿地松人工林的地区, 湿地松人工林已经历了 2~3 轮、20~25 年轮作。本研究调查了土壤肥力和湿地松生长的变化, 并评估了连续轮作对湿地松生长的影响。

1 试验地概况

两个试验点均选取在湖北中部低丘地区的彭场林场(N30°25', E112°56')。该林场地处季风气候的北亚热带, 年平均气温 15.5 °C, 年平均有效积温 5 050~5 100 °C, 无霜期约 206 d, 年平均降水量 1 160 mm。土壤主要成土母质为第四纪粘土母质, 主要土壤类型为黄棕壤, 土层深度达 1 m 以上, 质地较黏, 肥力中等, pH 值 5.6~6.8, 呈微酸性至中性反应。

选择林龄均为 14 a 生的非连作和连作林分为研究对象, 非连作林分位于离里河路附近, 为马尾松次生林更新改造林, 面积约 1 hm^2 ; 连作林分位于农舍后, 为湿地松砍伐迹地造林, 面积约 1.5 hm^2 。两者均为 2004 年春季全垦整地, 采用 1 a 生湿地松实生苗造林, 初植密度为 3.5 $\text{m} \times 2.0 \text{ m}$ 。

2 研究方法

2.1 树木测量方法

分别在非连作和连作林分中设置 3 个 20 m \times 30 m 的标准地, 标准地内分别于 2017 年夏季和 2018 年进行了每木生长量调查(表 1)。使用超声波测高仪(Vertex IV, Haglof, 瑞典)测量树高和第一活枝下高, 使用胸径尺测量胸径, 用卷尺测量冠径。每个标准地中根据林分平均胸径选择 3 株解析木, 按 2 m 区分段进行树干解析和内业数据测量。

表 1 2017 年和 2018 年非连作(NCC)和连作(CC)人工林概况

年份	林分类型	胸径/cm	树高/m	第一根活枝距根部高度/m	树冠/m
2017	NCC	15.13±0.46	11.31±0.11	3.51±0.05	5.88±0.11
	CC	11.85±0.13	8.74±0.06	3.75±0.04	5.24±0.05
2018	NCC	15.89±0.22	11.88±0.11	5.43±0.09	6.35±0.10
	CC	12.19±0.13	9.52±0.06	4.62±0.04	6.03±0.07

2.2 土壤和根系取样及营养分析

在每个标准地中, 随机选择 20 株样木, 分别在距离树干基部 50 cm 和 100 cm 两个位置开挖土壤剖面获取土壤和根系样本(图 1)。土壤分为表层

(0~10 cm)和底层(>10~20 cm)两层, 在一小块区域(20 cm \times 20 cm)内挖出, 每层取出约 500 g 土壤, 在 20 cm \times 20 cm \times 20 cm 的土柱中选择所有根段。

所有土壤样品均在阴凉通风的室内干燥, 测定有机物、氮、磷、钾的含量。

使用自来水洗涤新鲜的根碎片,并使用根分析系统 WinRHIZO(STD4800 LA2400,加拿大魁北克省的 Régent Instruments Inc.)进行扫描,以获得总根长和表面积。在形态分析之后,通过在 70 °C 下干燥直至获得恒重(0.000 1 g)来测定根片段的干燥生物量。

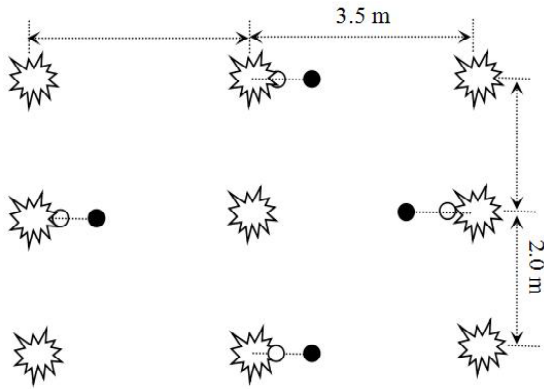


图 1 随机选择土壤和根碎片采样点

注:所有采样点均位于 3.5 m 宽的行之间。星号代表树木。空心圆(○)表示距树干 0.5 m 处的采样点,实心圆(●)表示距树干 1.0 m 处的采样点。土壤样品取自表层土(0~10 cm)和下层土(>10~20 cm),根样品取自土柱(20 cm×20 cm×20 cm)。

2.3 数据处理

利用中国林业科学院资源与信息研究所开发的 ForStat 软件,根据生长年轮资料,进行了树干分析。用软件分析回归方程,使用 SPSS(v. 17,美国芝加哥)以 $p=0.05$ 进行多次比较。为了研究土壤肥力对湿地松生长的影响,采用 SPSS 软件对各小区表层土壤的营养浓度数据进行了描述性统计分析,并用统计方法分析了各小区无树皮胸径和样木材积与土壤肥力的关系。

3 结果与分析

3.1 连作对土壤肥力的影响

2017 年土壤肥力测定数据表明(图 2A1、B1、C1、D1),距树干基部 0.5 m 处,非连作林分 0~10 cm 土层中全氮、全钾、全磷和有机质含量均高于连作林分,但除全磷含量达到显著水平外($p<0.05$),其它均无显著差异($p>0.05$);非连作林分 >10~20 cm 土层中全氮、全磷含量均高于连作林分,而全钾和有机质含量均低于连作林分,但差异均为不显著($p>0.05$)。距树干基部 1.0 m 处,非连作林分 0~10 cm 土层中全氮和全磷含量均显著高于连作林分($p<0.05$),但土壤全钾和有机质含量无显著差异($p>$

0.05);非连作林分 >10~20 cm 土层全氮和全磷含量显著高于连作林分($p<0.05$),而全钾和有机质含量差异不显著(图 2D1)。

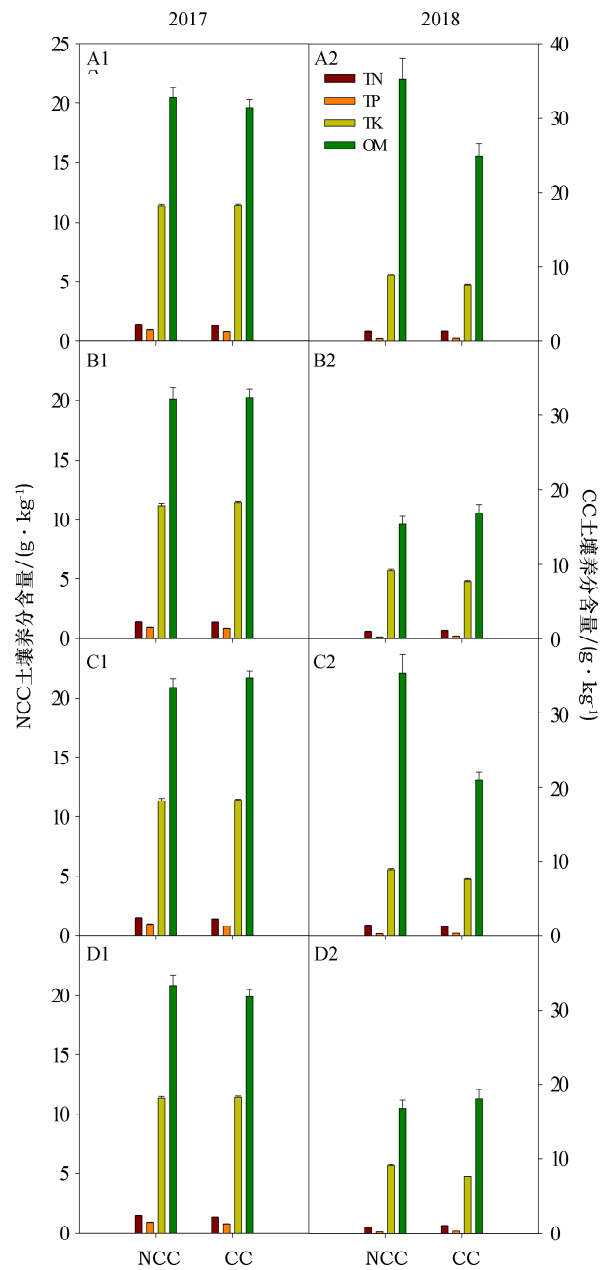


图 2 2017 年和 2018 年非连作和连作样地土壤营养水平的变化

注:A 为距树干 0.5 m 处的表层土壤,B 为距树干 0.5 m 处的下层土壤,C 为距树干 1.0 m 处的表层土壤,D 为距树干 1.0 m 处的下层土壤。

对 2018 年土壤肥力测定数据分析(图 2A2、B2、C2、D2),距树干基部 0.5 m 处,两林分 0~10 cm 土层全氮含量无差异($p>0.05$),非连作林分全磷显著低于连作林分($p<0.05$),但非连作林分全钾和有机质含量显著高于连作林分($p<0.05$);

>10~20 cm 中,非连作林分全氮和全磷含量显著低于连作林分($p<0.05$),而全氮和全磷含量显著高于连作林分($p<0.05$)。两林分有机质含量差异不显著($p>0.05$)。距树干基部 1.0 m 处,非连作林分 0~10 cm 土层全氮含量高于连作人工林,但差异不显著($p>0.05$),而非连作林分全钾和有机质含量显著高于连作林分($p<0.05$),但非连作林分全磷含量显著低于连作林分($p<0.05$)。距树干基部 1.0 m 处,非连作林分 >10~20 cm 土层全氮和全磷含量显著低于连作林分($p<0.05$),而非连作林分全钾含量显著高于连作人工林($p<0.05$),两林分土壤有机质含量差异不显著($p>0.05$)。

3.2 连作对根系生物量、根长和表面积的影响

距树干基部 0.5 m 处和 1.0 m 处的非连作林分根段生物量均高于连作林分,但 2017 年差异不显著($p>0.05$),而 2018 年达显著水平($p<0.05$) (图 3)。非连作林分根段长度和表面积均大于连作林分,除 2017 年距树干基部 0.5 m 处差异不显著外($p>0.05$),距树干基部 0.5 m 处及 2018 年 2 个取样处均为显著差异($p<0.05$) (图 4)。

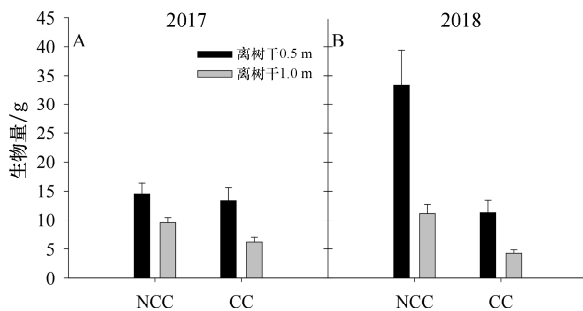


图 3 2017 年(A)和 2018 年(B)在非连作和连作样地采集的根片段生物量变化

3.3 连作对林木生长的影响

以解析木资料分别拟合树高、胸径、单株材积生长曲线,各模型拟合优度 0.78~0.98,其中拟合优度 0.90 以上的比例超过 86%,拟合效果较好(表 2、表 3、表 4)。从拟合曲线上看(图 5),15 a 前非连作林分的树高和胸径与连作林分差异不明显,但其单株材积明显大于后者。到 25 a 主伐时,非连作林分的胸径和单株材积均较明显地大于连作林分,具有更高的林地生产力。

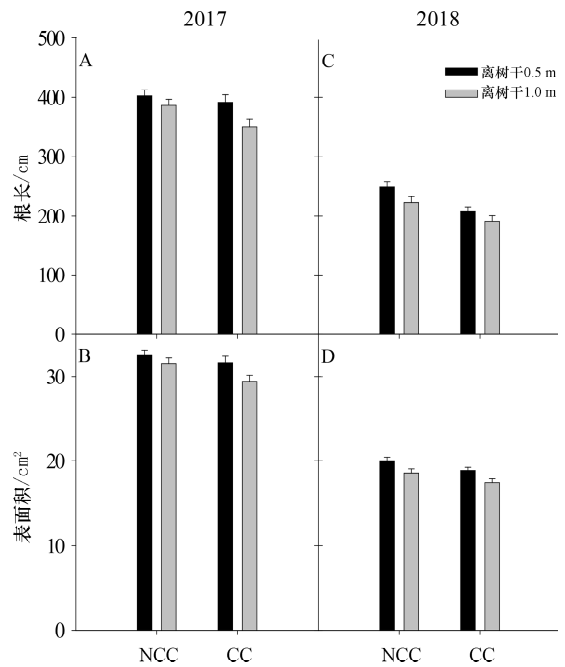


图 4 2017 年和 2018 年在非连作和连作地块收集的根片段长度和表面积的变化

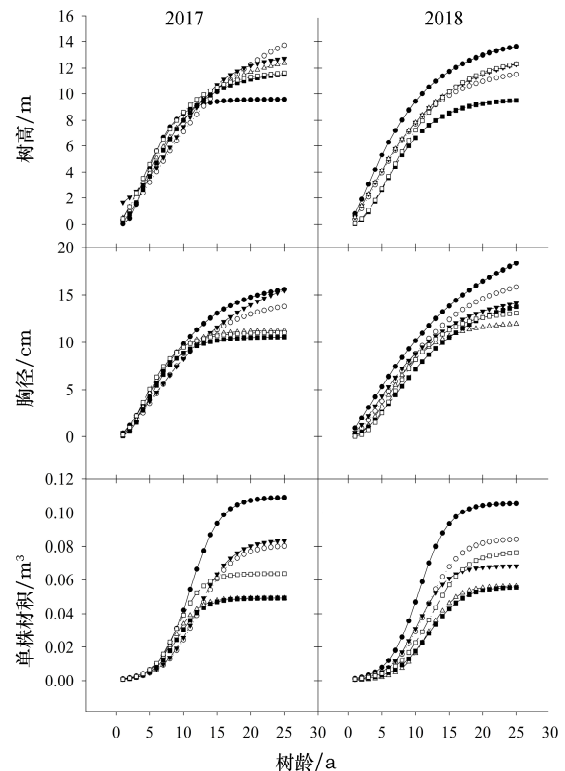


图 5 非连作和连作湿地松人工林生长变化

注: NCC1: 实心圆(●); NCC2: 空心圆(○); NCC3: 实心三角形(▼); CC1: 空心三角形(△); CC2: 实心矩形(■); CC3: 空心矩形(□)。

表 2 非连作和连作林木树高生长曲线

年份	林分类型	方程	R^2
2017	NCC	NCC1 $H=9.554 \times (1 - \exp(-0.371 \times t))^{-4.659}$	0.78
		NCC2 $H=16.307 \times (1 - \exp(-0.0914 \times t))^{-1.619}$	0.97
		NCC3 $H=12.932 / (1 + 8.773 \times \exp(-0.249 \times t))$	0.89
	CC	CC1 $H=13.138 \times (1 - \exp(-0.132 \times t))^{-1.577}$	0.97
		CC2 $H=11.759 \times (1 - \exp(-0.188 \times t))^{-2.34}$	0.95
		CC3 $H=11.841 \times (1 - \exp(-0.185 \times t))^{-1.872}$	0.97
2018	NCC	NCC1 $H=14.281 \times (1 - \exp(-0.136 \times t))^{-1.406}$	0.96
		NCC2 $H=12.031 \times (1 - \exp(-0.147 \times t))^{-1.704}$	0.98
		NCC3 $H=13.272 \times (1 - \exp(-0.119 \times t))^{-1.457}$	0.87
	CC	CC1 $H=10.492 \times (1 - \exp(-0.212 \times t))^{-2.667}$	0.98
		CC2 $H=9.591 \times (1 - \exp(-0.223 \times t))^{-3.245}$	0.91
		CC3 $H=12.909 \times (1 - \exp(-0.163 \times t))^{-2.662}$	0.98

表 3 非连作和连作林木胸径生长曲线

年份	林分类型	方程	R^2
2017	NCC	NCC1 $DBH=16.423 \times (1 - \exp(-0.145 \times t))^{-1.919}$	0.98
		NCC2 $DBH=14.521 \times (1 - \exp(-0.149 \times t))^{-2.193}$	0.97
		NCC3 $DBH=18.174 \times (1 - \exp(-0.094 \times t))^{-1.602}$	0.97
	CC	CC1 $DBH=11.289 \times (1 - \exp(-0.311 \times t))^{-3.711}$	0.98
		CC2 $DBH=10.583 \times (1 - \exp(-0.312 \times t))^{-3.944}$	0.97
		CC3 $DBH=11.076 \times (1 - \exp(-0.301 \times t))^{-3.113}$	0.94
2018	NCC	NCC1 $DBH=22.611 \times (1 - \exp(-0.074 \times t))^{-1.232}$	0.94
		NCC2 $DBH=17.389 \times (1 - \exp(-0.123 \times t))^{-1.968}$	0.97
		NCC3 $DBH=15.067 \times (1 - \exp(-0.131 \times t))^{-1.712}$	0.88
	CC	CC1 $DBH=12.118 \times (1 - \exp(-0.217 \times t))^{-3.191}$	0.96
		CC2 $DBH=14.98 \times (1 - \exp(-0.134 \times t))^{-2.444}$	0.95
		CC3 $DBH=13.263 \times (1 - \exp(-0.217 \times t))^{-4.033}$	0.97

表 4 非连作和连作林木单株材积生长曲线

年份	林分类型	方程	R^2
2017	NCC	NCC1 $V=0.109361 / (1 + 145.844964 \times \exp(-0.4517 \times t))$	0.97
		NCC2 $V=0.080728 / (1 + 115.020793 \times \exp(-0.389727 \times t))$	0.96
		NCC3 $V=0.083749 / (1 + 115.169696 \times \exp(-0.392168 \times t))$	0.96
	CC	CC1 $V=0.049224 / (1 + 115.003336 \times \exp(-0.554585 \times t))$	0.95
		CC2 $V=0.049209 / (1 + 115.001092 \times \exp(-0.523439 \times t))$	0.96
		CC3 $V=0.0637 / (1 + 114.996327 \times \exp(-0.521371 \times t))$	0.96
2018	NCC	NCC1 $V=0.105818 / (1 + 114.986975 \times \exp(-0.451959 \times t))$	0.97
		NCC2 $V=0.084353 / (1 + 114.999765 \times \exp(-0.411231 \times t))$	0.96
		NCC3 $V=0.068461 / (1 + 115.000452 \times \exp(-0.455515 \times t))$	0.84
	CC	CC1 $V=0.056344 / (1 + 305.990208 \times \exp(-0.484069 \times t))$	0.96
		CC2 $V=0.055792 / (1 + 115.001721 \times \exp(-0.397076 \times t))$	0.96
		CC3 $V=0.077 / (1 + 115.043435 \times \exp(-0.386055 \times t))$	0.96

3.4 表层土营养与林木生长的关系

表层土中氮、磷、钾和有机质的含量对林木胸径和单株材积有不同的影响(图6,图7),总的来说,氮和有机质含量对林木胸径和单株材积的影响较明显,且均呈随含量增大而生长量加大的趋势,而磷和钾的含量对生长量的影响较小,且表现为随含量增大而生长量减小的趋势。相关分析表明,与磷和钾含量相比,氮和有机质含量与林木胸径和单株材积的关系更为密切(表5)。

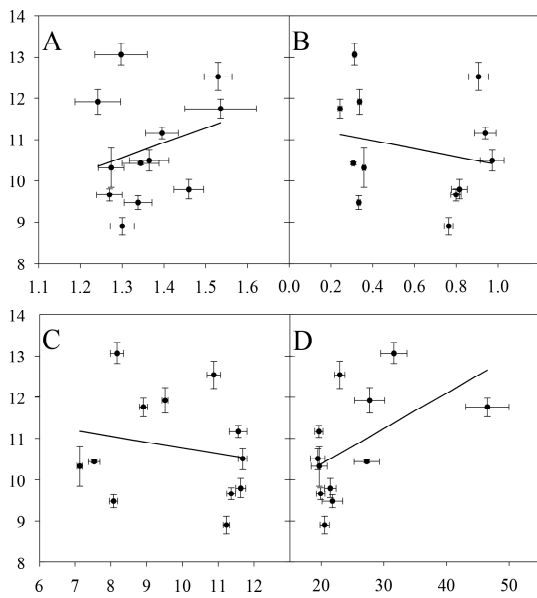


图6 表土营养水平与胸径的关系

注:A:总氮含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);B:总磷含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);
C:总钾含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);D:总有机质含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

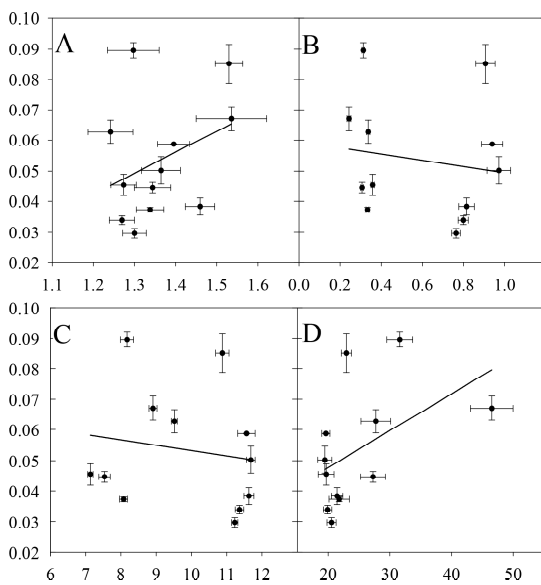


图7 表层土壤营养水平与树木材积的关系

注:同图6。

表5 营养水平与树木生长之间的关系

营养物质	胸径		材积	
	Pearson's	显著性	Pearson's	显著性
氮	0.276	0.385	0.349	0.267
磷	-0.218	0.495	-0.151	0.639
钾	-0.193	0.549	-0.156	0.629
有机质	0.520	0.083	0.483	0.111

4 结论与讨论

土壤肥力退化和林分生产力下降经常发生在连续轮作人工林,这可能会影响木材产品的市场供应和天然森林生态系统的维护。因此,如何保持人工林生产力是至关重要的,特别是对于连续轮作人工林。基于这一现状,有必要对连作条件下土壤肥力和林木生长的变化进行研究,以明确两个事实:①影响土壤肥力变化的因素;②变化的程度。

本研究发现,在表层土中,非连作林分中土壤总氮和有机质水平高于连作林分。湿地松人工林土壤肥力退化是由于表层土壤中凋落物的大量积累和分解所致,土壤有机质总量的减少可能是湿地松和其他植物凋落物积累减少的结果。湿地松人工林凋落物积累的观测资料较少,需要进一步观测。此外,已经有研究结果显示,与第一代人工林相比,第二代人工林土壤磷活化系数降低^[16]。目前尚不清楚这种情况是否发生在连作条件下的湿地松人工林中。澳大利亚东南部伦尼克地区的研究表明,维持辐射松(*Pinus radiate* var. *radiate*)连作林分土壤中养分和有机质水平,最好的办法是保留凋落物和伐木残留物,采伐和经营中造成的营养损失可以用肥料代替^[17]。可见,通过有效管理可以改善湿地松连续轮作引起的土壤肥力退化。

许多研究表明,根生物量随土壤深度的变化而变化,细根主要分布在表层土中^[18]。因此细根分布情况可以反映土壤养分状况。在本研究中,0~20 cm土层中的根系情况,距树干不同距离(0.5 m和1.0 m)中非连作林分中根生物量均高于连作林分。结果表明,连作人工林土壤根系生长减弱。考虑到地上部分和地下部分的关系,这同时也影响连作人工林地上部分的生长。

生长曲线拟合采用树干解析数据,大部分曲线拟合均表现出极大的拟合优度。这些曲线显示了树高、胸径和材积的生长过程,预测显示非连作和连作林分在收获期(25 a轮作)的胸径和材积有很

大差异,表明连作林分类型中胸径和材积减少,可能与连作林分的树冠较小有关。2017年,连作林分的树冠比非连作小 12.21%,2018年为 5.31%。较小的树冠尺寸导致光截获和二氧化碳固定减少,从而降低树木生长。

有研究表明,造成连作土壤养分退化和杉木人工林生长下降的因素主要是连作土壤理化性质的退化和杉木的生物学特性^[19]。土壤物理性质方面,连作导致土壤团聚体退化,容重增加,表层土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度降低。土壤化学性质方面,土壤营养水平,特别是土壤有机碳水平出现了显著下降。杉木连作会引起根际微生物群落及其生化活性的变化^[20]。随着杉木林分连续轮作次数的增加,生物多样性指数下降,特别是与碳氮循环有关的细菌^[20]。在杉木的生物学特性中,杉木凋落物中的化感物质抑制了氮的矿化、土壤呼吸和杉木幼苗的生长^[19],杉木人工林中存在自我生长抑制现象。因此,需要如研究杉木那样来更多地开展对湿地松林分的研究,分析湿地松生长衰退和土壤肥力退化的原因。

混交林在木材生产、森林病虫害控制和应对气候变化带来的日益增加的不确定性方面具有很多优势,在我国南部建立了湿地松和火炬松等树种的混交林^[21-22]。选择与湿地松混交的树种时必须慎重,因为有时混交林中的两个树种并不总是互利的,树种之间也存在着中性、抑制和竞争关系。

综上所述,第二代湿地松人工林土壤肥力退化,导致湿地松生长量下降。目前影响湿地松人工林土壤肥力降低的因素尚不清楚,建立湿地松与其它树种的混交林可能是一种很好的实用策略,而保留凋落物和伐木残留物可以有效保持湿地松人工林的土壤肥力。

参 考 文 献

- [1] KENNETH G, MACDICKEN. Global forest resources assessment 2015: what, why and how[J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, 352: 3-8.
- [2] KEENAN R J, REAMS G A, ACHARD F, *et al.* Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015[J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, 352: 9-20.
- [3] PAYN T, CARNUS J M, FREER-SMITH P, *et al.* Changes in planted forests and future global implications[J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, 352: 57-67.
- [4] EVANS J. Plantation forestry in the tropics-trends and prospects[J]. *The International Tree Crops Journal*, 1986, 4: 3-15.
- [5] EVANS J. The sustainability of wood production from plantations: evidence over three successive rotations in the Usuta Forest, Swaziland[J]. *Commonwealth Forestry Review*, 1996, 75(3): 234-239.
- [6] ERIKSSON H, JOHANSSON U L F. Yields of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in two consecutive rotations in southwestern Sweden[J]. *Plant & Soil*, 1993, 154(2): 239-247.
- [7] 罗云建, 张小全. 杉木连栽地力退化和杉阔混交林的土壤改良作用[J]. *生态学报*, 2007, 27(2): 715-724.
- [8] 方奇. 杉木连栽对土壤肥力及其林木生长的影响[J]. *林业科学*, 1987, 23(4): 389-397.
- [9] ZHANG X Q, KIRSCHBAUM M U F, HOU Z H, *et al.* Carbon stock changes in successive rotations of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb) Hook) plantations[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 202(1-3): 131-147.
- [10] 杨超. 杉木人工林生态系统长期生产力的定位研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2011.
- [11] TIAN D L, XIANG W H, CHEN X Y, *et al.* A long-term evaluation of biomass production in first and second rotations of Chinese fir plantations at the same site[J]. *Forestry*, 2011, 84(4): 411-418.
- [12] BI J, BLANCO J A, SEELY B, *et al.* Yield decline in Chinese-fir plantations: a simulation investigation with implications for model complexity[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2007, 37(9): 1615-1630.
- [13] 张彩云, 朱丽华, 谈家金, 等. 抗松针褐斑病湿地松细胞胚胎发生与植株再生[J]. *东北林业大学学报*, 2016, 44(6): 17-22.
- [14] 曾伟生, 姚顺彬, 肖前辉. 中国湿地松立木生物量方程的研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2015, 35(1): 8-13.
- [15] 方晓东, 罗坤水, 孙洪刚, 等. 湿地松生长、产脂量和松脂成分变化的林分密度效应研究[J]. *南方林业科学*, 2018, 46(5): 1-4, 23.
- [16] 赵均嵘. 杉木林生态系统转换对土壤磷形态的影响及其机制[D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
- [17] FARRELL P W, FLINN D W, SQUIRE R O, *et al.* Maintenance of productivity of radiata pine monocultures on sandy soils in Southeast Australia[M]. In: GESSEL SP, eds, *Forest site and productivity*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1986: pp127-136.

(下转第 22 页)

4 结论

本研究分别利用清水、 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{GA}_3$ 和 $600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{GA}_3$ 浸泡砂生槐种子 2 d、4 d 和 8 d, 结果发现随着清水浸种时间的延长, 砂生槐发芽率逐渐提高, 由浸种 2 d 的 22.33% 提高至 8 d 的 31.33%; 在 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{GA}_3$ 浸种砂生槐 4 d 和 8 d 后, 其发芽率达到 41%, 较浸种 2 d 的发芽率 24.67% 有明显提高; $600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{GA}_3$ 浸种 4 d 时发芽率达到高峰 40.67%, 较浸种 2 d 有明显提高, 但 8 d 浸种后其发芽率出现断崖式下跌至 16.33%。总体发芽趋势为随着浸泡时间的延长, 砂生槐种子的发芽率有所提高, 而且 4~8 d 的 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{GA}_3$ 浸种有助于显著提高砂生槐种子的发芽率。对于发芽势, 在浸泡 2 d 和 8 d 后只有一个发芽势高峰, 而浸泡 4 d 后有两个发芽势高峰。同时, 9 种处理方差分析结果表明, 发芽率在不同处理间呈极显著差异, 腐烂率呈显著差异, 但硬实率在不同处理间没有显著差异, 说明采用不同的处理对砂生槐的发芽率及腐烂率会产生一定的影响, 但对硬实率影响不大。

参 考 文 献

- [1] 王文娟, 贺达汉, 刘军各, 等. 砂生槐研究现状及其利用价值评价[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(33): 14513-1451.
- [2] 林少敏. 西藏砂生槐[J]. 草业科学, 2002, 19(3): 34.
- [3] 胥晓琦. 砂生槐是西藏高原的“金子”[N]. 中国中医药报, 2007, 09-19.
- [4] 彭跃明. 西藏雅鲁藏布江中部流域砂生槐固沙作用研究[J]. 林业科技, 1997, 2(6): 6-8.
- [5] 胡小文, 武艳培, 王彦荣, 等. 豆科种子休眠破除方法初探[J]. 西北植物学报, 2009, 29(3): 568-573.

- [6] 赵文智, 刘志民. 西藏特有灌木砂生槐繁殖生长对海拔和沙埋的响应[J]. 生态学报, 2002, 22(1): 134-138.
- [7] 赵玉文, 郑雨, 段少荣, 等. 不同催芽方法对西藏砂生槐种子发芽的影响[J]. 高原农业, 2018, 2(1): 66-71.
- [8] 索朗德吉. 不同处理方法对西藏砂生槐种子发芽的影响[J]. 绿色科技, 2012, 1(2): 69-70.
- [9] 安毅鹏, 侯潇斐, 黄一凡, 等. 西藏砂生槐种子休眠及解除方法研究[J]. 高原农业, 2020, 4(3): 244-248.
- [10] 夏含嫣, 杜红梅, 黄丹枫. GA_3 处理对仙客来种子萌发的影响[J]. 种子, 2006, 25(4): 15-17.
- [11] 赵美华. 低温与 GA_3 对萝卜种子发芽的影响[J]. 山西农业科学, 1998, 26(3): 74-76.
- [12] 曾丽, 赵梁军. 赤霉素与脱落酸对一串红种子休眠及发芽的影响[J]. 上海交通大学学报, 2001, 19(4): 276-279.
- [13] 王荣青. 赤霉素浸种处理对茄种子萌发的影响[J]. 上海农业学报, 2001, 17(3): 61-63.
- [14] 张华, 蒋运生, 唐辉, 等. 赤霉素和低温处理对紫苏种子发芽率的影响[J]. 广西园艺, 2002(44): 3-5.
- [15] 陈士林, 卫秀英, 赵新亮. 赤霉素和钙对玉米种子萌发的效应[J]. 种子, 2004, 23(4): 47-49.
- [16] 王甜, 李永欣, 陈亮明, 等. GA_3 处理对紫薇种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 绿色科技, 2022, 24(5): 100-103.
- [17] 刘林, 张良英, 牛歆雨, 等. GA_3 对 2 种杜鹃种子萌发特性的影响[J]. 种子, 2015, 34(7): 5-7.
- [18] 李开祥, 梁晓静, 梁文汇, 等. 不同浓度 GA_3 浸种及不同贮藏方式对肉桂种子萌发的影响[J]. 南方农业学报, 2014, 45(12): 2148-2152.
- [19] 幸福梅, 杨小林, 赵垦田. 不同种源砂生槐种子萌发特性的比较研究[J]. 种子, 2015, 34(7): 1-5.
- [20] 王文娟, 贺达汉, 刘一岑, 等. 植物生长调节剂对砂生槐种子发芽特性的影响[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(9): 2158-2160.

(编校: 唐 岚)

(上接第 17 页)

- [18] MURPHY MT, MOORE TR. Linking root production to aboveground plant characteristics and water table in a temperate bog[J]. Plant and Soil, 2010, 336(1-2): 219-231.
- [19] 陈龙池, 汪思龙, 陈楚莹. 杉木人工林衰退机理探讨[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1953-1957.
- [20] 吴则焰, 赵紫檀, 林文雄, 等. 基于 T-RFLP 方法的连栽杉木根际土壤细菌群落变化研究[J]. 生态学报, 2019,

39(19): 7134-7143.

- [21] 陈元品, 吴木花. 福建柏湿地松混交造林对林木生长及土壤养分的影响[J]. 福建林业科技, 2013, 40(1): 40-42+62.
- [22] 肖文娅, 周琦, 董务闯, 等. 苏州太湖流域 2 种针阔混交林林分空间结构特征比较[J]. 西南林业大学学报, 2014, 34(4): 8-13.

(编校: 唐 岚)