

华北落叶松人工林生长对抚育间伐的响应及其与土壤因子的关系

商添雄, 韩海荣*, 程小琴, 蔡锰柯, 李斌, 张雯雯

(北京林业大学森林资源生态系统过程北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: [目的] 探讨不同间伐强度对林木生长的影响并找出影响林分生长的关键土壤因子。 [方法] 在山西省沁源县好地方林场华北落叶松人工林设置 12 块抚育间伐试验样地, 开展轻度(间伐强度 15%)、中度(间伐强度 35%)、重度(间伐强度 50%) 抚育间伐并设置对照样地, 以树木平均胸径、平均树高、平均枝下高、平均冠幅、乔木层生物量与生产力为林木生长指标, 利用方差分析与多重比较分析不同间伐强度林分生长特征, 结合土壤因子运用相关性分析研究林木生长量与土壤因子的关系。 [结果] 表明: 华北落叶松人工林经中度、重度间伐 2 年与 4 年后, 各树木生长指标与对照样地相比均显著增加; 间伐在减少林分内乔木层生物量的同时能显著提高乔木层生产力, 各时间段及间伐强度下乔木层生产力均表现为重度 > 中度 > 轻度 > 对照; 间伐可提高土壤有机碳(SOC)、土壤全氮(TN)、土壤全磷(TP)含量, 减缓土壤养分的流失; 华北落叶松人工林平均胸径生长量与 SOC、TN 呈显著正相关, 平均冠幅生长量与土壤含水率(MC)、SOC、TN、TP 显著正相关。 [结论] 间伐可促进华北落叶松人工林单株林木胸径和冠幅生长, 增大林木单株冠径比与生产力, 在本研究的 3 个间伐强度中, 50% 的重度间伐是最适间伐强度。华北落叶松人工林内土壤有机碳与土壤全氮含量较为丰富, 土壤全磷含量较少, 土壤 pH 为弱酸性, SOC、TN、TP 是影响华北落叶松人工林生长的重要土壤因子。

关键词: 抚育间伐; 华北落叶松人工林; 土壤养分特征; 林木生长; 生产力

中图分类号: S753

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2019)06-0040-08

华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii* Mayr) 是我国重要的造林树种^[1], 但在造林过程中面临着造林密度过高、成材率低、生产力下降、人工林地力衰退等问题^[2-3]。因此, 有必要通过合理的营林措施调整林分密度促进林木生长并提高人工林生产力^[4]。抚育间伐可通过改善林冠层空间和减少树木间的竞争对林内资源进行再分配, 促进林木单株生长, 提升林木单株生产力^[5]。但针对于间伐能否提高林分生产力这一问题, 前人研究结果并不一致, Marshall 和 Curtis 等认为林分生产力随间伐强度的增加而减少^[6], 但 Pitt 和 Lanteigne 等人通过研究香脂冷杉林 (*Abies balsamea* Mill) 发现间伐后的林分生产力高于未间伐的林分^[7]。因此研究间伐能否提高华北落叶松人工林生产力并确定最适间伐强度对进一步发展森林可持续性经营有指

导意义。

近年来, 已有大量关于抚育间伐对林木生长的研究, 多数集中探讨间伐对各林木生长指标的影响及不同间伐强度下林分各径级株数分布^[5,8], 但涉及土壤因子对林木各生长指标及林分生产力影响的研究较少, 且绝大多数研究存在研究周期短、缺乏间伐后连年时间对比的问题^[4,8-9]。为此, 本研究选取 4 种不同间伐强度的华北落叶松人工林为研究对象, 分别通过间伐后第 2 年与间伐后第 4 年两个时间点研究不同间伐强度对林分生长状况的影响及其与土壤因子的关系, 并找出影响华北落叶松人工林生长的关键土壤因子, 提出适合华北落叶松人工林生长的林分密度, 为加速林木生长、增强林分生产力、维持森林生态系统固有功能、实现华北落叶松林可持续的高效经营提供依据。

收稿日期: 2019-03-05 修回日期: 2019-05-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0600205)、国家自然科学基金项目(No. 31700372)资助

* 通讯作者: 韩海荣, 博士, 教授, 研究方向: 生态管理与规划、生态系统全球变化, E-mail: hanhr@bjfu.edu.cn

1 研究区概况

研究区位于山西省长治市沁源县好地方林场(111°59'~122°01' E, 36°44'~36°47' N),属暖温带半干旱大陆性季风气候,春秋季节相对较短,降水多集中在夏季。年平均降水量 650~700 mm,年平均气温 6.3℃,1月平均温最低为-11.0℃,7月平均气温最高为 14.2℃。土壤以棕土和褐土为主。海拔高度在 1 749~2 431 m 之间。森林植被类型为华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr)人工林。林下灌木主要有土庄绣线菊(*Spiraea pubescens* Turcz)、黄刺玫(*Rosa xanthine* Lindl)、忍冬(*Lonicera altamanni* Thunb)等,林下草本主要有细叶苔草

表 1 调查样地华北落叶松人工林基本特征

Table 1 Characteristics of *Larix principis-rupprechtii* plantation in the survey plot

处理 Treatment	采伐强度 Intensity/%	平均胸径 DBH/cm	平均高度 Height/m	平均密度 Density/(trees·hm ⁻²)	坡度 Slope/°	坡向 Slope aspect	坡位 Slope position
CK	0	14.61	13.80	2 032	27	北	上坡
LT	15	14.57	13.78	1 712	25	北	上坡
MT	35	15.03	14.00	1 376	23	北	上坡
HT	50	14.98	13.92	895	22	北	上坡

注:CK:未采伐 no thinning;LT:轻度采伐 light thinning;MT:中度采伐 medium thinning;HT:重度采伐 heavy thinning

2.2 样地调查及取样

2.2.1 样地调查 本研究分别于间伐后第 2 年(2014)和第 4 年(2016)对样地内的乔木(*DBH* > 2 cm)进行每木检尺,记录不同间伐强度下树木胸径、树高、活枝下高、冠幅、高径比和冠径比。

2.2.2 土壤取样 于 2014 年和 2016 年华北落叶松人工林生长季阶段(4 月、6 月、8 月、10 月),运用 5 点采样法在每块样地内 0~20 cm 土层取样,每个样地土样进行混合放入自封袋中用于土壤化学性质的测定。同时,在每块样地边界选取具有代表性的位点挖 3 个 20 cm 深的土壤剖面,用环刀取样后放入铝盒用于土壤物理性质的测定。

2.2.3 标准木年轮条取样 2018 年 8 月对样地内乔木(*DBH* ≥ 2 cm)进行每木检尺,乔木胸径以 4 cm 为一个径阶,将每个样地内乔木整合,每个径阶选取 1~2 株标准木用生长锥在胸高处分别沿山坡等高线和垂直山坡等高线两个方向钻取两个树芯(钻至树木髓心处),并固定在合适的直径木质凹槽中。

2.3 土壤物理化学性质指标测定

采用环刀法测定土壤密度与含水率^[10];采用悬浊液 pH 计法测定土壤 pH;高温外加热重铬酸钾氧化—容量法测定土壤有机碳;土壤全氮与全磷分别

(*Carex rigescens*)、蛇莓(*Duchesnea indica* Focke)、小红菊(*Dendranthema chanelii*)等^[1,10,13]。

2 研究方法

2.1 样地选择与设置

本研究选用的华北落叶松人工林种植于 1981 年,苗木全部选自于长势良好,苗高在 25 cm 以上,地径在 0.6 cm 以上的 2 年生一级苗。2007 年对研究地进行第一次打枝、疏伐、集材归楞等抚林措施。2012 年 4 月进行第 2 次人工抚育后,选择 12 块 25 m × 25 m 规格的固定样地,对其进行不同间伐强度处理,共设置 4 种不同处理,每种处理 3 个重复,基本情况见表 1。

采用浓 H₂SO₄-混合加速剂消化法与 H₂SO₄-HClO₄ 消化法通过 AA3-连续流动分析仪进行测定。

2.4 林木生长指标与生产力计算

2.4.1 林木高径比、冠径比计算 林木高径比为样地内树木树高与胸径的比值,林木冠径比为样地内树木树冠直径与胸径的比值^[11]。

2.4.2 乔木层生物量与生产力计算 年轮条通过 Lintab 树木年轮分析仪测量年轮宽度后,采用分级标准木法以及异速生长模型计算历年乔木层生物量^[12-13],相邻年份样地乔木层生物量之差即为样地乔木层生产力,乔木层生物量与生产力计算公式如下^[14-15]

$$Y_a = 0.989 \exp(-2.202 + 2.442 \ln DBH_a)$$

$$W_a = \sum_{i=4,9,12_n} n_i \times Y_a$$

$$NPP_a = W_a - W_{a-1}$$

式中:*Y* 为标准木乔木层生物量;*a* 为林龄;*DBH* 为标准木胸径;*i* 为径阶;*W* 为乔木层生物量;*n* 为株数;*NPP* 为地上净生产力。

2.5 数据分析

使用 Microsoft Office Excel 2018 对数据进行初步整理;采用 SPSS25.0 软件对不同间伐时间下各间伐强度的林分生长因子进行单因素方差分析和 LSD

多重比较,检验树木生长与间伐强度的显著性,其中显著水平设为 $\alpha = 0.05$;对林木生长与土壤物理化学性质等指标采用 Pearson 相关性分析进行研究,分析树木生长与土壤因子的相关性;用 OriginPro2018 软件作不同间伐强度林分平均乔木层生物量、生产力和胸径分布图。

3 结果与分析

3.1 抚育间伐对树木生长特征的影响

由单因素方差分析及 LSD 多重比较得出,林木各生长因子因不同间伐强度与间伐时间而差异显著(表2),其中,间伐后第2年,MT与HT单株胸径显著大于CK,分别比CK增加了1.09和1.55 cm,LT林木单株胸径小于CK但差异不显著;各间伐强度下林木树高与枝下高表现相同,皆为MT最大;林木单株冠幅随间伐强度增加而增大,分别比CK增加

了0.35、0.39、0.67 m;林木高径比与冠径比分别维持在0.93~0.97与0.18~0.20之间;间伐后第4年,林木单株胸径随间伐强度的增加而增大且各样地差异性显著,其中MT、HT较CK分别增加了1.33和2.16 cm;林木树高表现为:MT>HT>LT>CK,间伐后第4年枝下高与冠幅生长状况与间伐后第2年相同,其中,随间伐强度增强,林分平均冠幅较CK分别增加0.36、0.64、0.93 m;MT、HT样地中林分平均枝下高较CK分别增加了1.23和1.06 m;LT与CK样地内林木枝下高由第2年显著性差异变为非显著性差异;LT与MT样地内林木平均冠幅由非显著性差异变为显著性差异。间伐后第4年高径比与林木冠径比分别处于0.91~0.98与0.19~0.22之间,其中各间伐强度下林木冠径比皆大于CK且差异显著。

表2 不同间伐强度林分生长状况

Table 2 Growth status of *Larix principis-rupprechtii* plantations with different thinning intensities

伐后时间 Time	间伐强度 Intensity	平均胸径 DBH /cm	平均树高 Height /m	平均枝下高 Branch height /m	平均冠幅 Canopy width /m	高径比 Ratio of height to diameter	冠径比 Crown diameter ratio
间伐后第2年 The 2 nd year after thinning	CK	14.97 ± 0.51c	14.13 ± 2.30c	7.13 ± 0.16b	2.53 ± 0.04c	0.97 ± 0.06a	0.18 ± 0.003b
	LT	14.95 ± 0.69c	14.06 ± 2.02c	6.53 ± 0.09c	2.88 ± 0.05b	0.95 ± 0.01c	0.20 ± 0.004a
	MT	16.06 ± 0.37b	15.78 ± 0.96a	8.66 ± 0.19a	2.92 ± 0.05b	0.97 ± 0.03a	0.19 ± 0.004ab
	HT	16.52 ± 1.23a	15.45 ± 2.22b	8.46 ± 0.38a	3.20 ± 0.06a	0.93 ± 0.01c	0.20 ± 0.004a
间伐后第4年 The 4 th year after thinning	CK	15.11 ± 0.25d	14.59 ± 0.12c	7.59 ± 0.14b	2.85 ± 0.07d	0.98 ± 0.02a	0.19 ± 0.009c
	LT	15.21 ± 0.20c	14.65 ± 0.10c	7.43 ± 0.21b	3.21 ± 0.05c	0.96 ± 0.01b	0.21 ± 0.005a
	MT	16.44 ± 0.24b	16.17 ± 0.97a	8.82 ± 0.27a	3.49 ± 0.07b	0.96 ± 0.03b	0.21 ± 0.003a
	HT	17.27 ± 0.23a	15.88 ± 0.49b	8.65 ± 0.31a	3.78 ± 0.06a	0.91 ± 0.01c	0.22 ± 0.003a

间伐后2年至4年中,林分各个指标有不同程度的增长(表3)。其中平均胸径增长幅度随间伐强度增强而增大,树高增长量与枝下高增长量在各间伐强度样地中表现一致,均表现为LT>CK>HT>MT,冠幅平均增长量表现为HT>MT>LT>CK。总体上看,不同间伐时期各间伐强度样地中径阶为16 cm株数最多,其次是径阶为12 cm与径阶为20 cm的华北落叶松,再次是径阶为8 cm与24 cm的华北落叶松,径阶为4 cm与28 cm的林木株数所占比重最小(图1)。间伐4年后,径阶为8 cm与径阶为12 cm的株数减少,径阶为20 cm的株数增加,各样地径阶为24 cm的株数也有增加但增幅不大(图1);2年间,在各个间伐强度样地中,CK株数变化在径阶为16 cm中最明显,由间伐第2年的60株变为间伐第4年后的46株。

表3 间伐第2年至第4年林木单株指标生长状况

Table 3 Growth of single-plant indicators in the second and fourth years after thinning

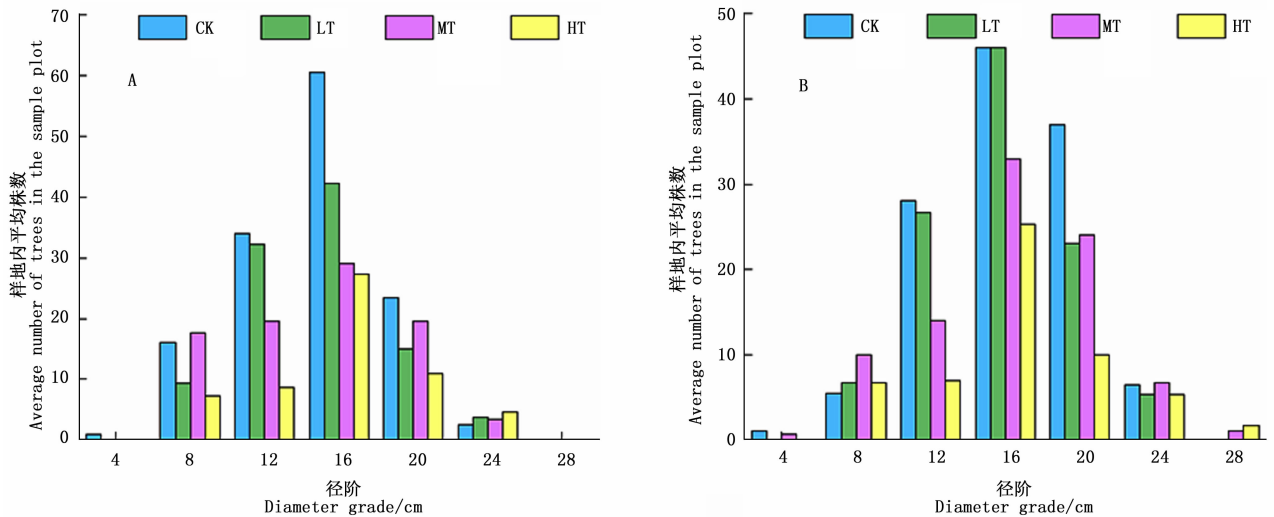
间伐强度 Intensity	胸径 DBH /cm	树高 Height /m	枝下高 Branch height /m	冠幅 Canopy width/m
CK	0.14	0.46	0.46	0.32
LT	0.26	0.59	0.90	0.33
MT	0.38	0.39	0.16	0.57
HT	0.75	0.43	0.19	0.58

3.2 抚育间伐对乔木层和生产力的影响

对4种不同间伐强度下华北落叶松人工林平均乔木层生物量和生产力的分析可知,在间伐后第2年以及间伐后第4年,各乔木层生物量均随着间伐强度增大而减少,而平均乔木层生产力随间伐强度增大而增加。不同间伐强度华北落叶松人工林在间伐后第2年时平均乔木层生产力全部大于各自在间

伐后第4年时的生产力(表4)。各间伐强度下华北落叶松人工林乔木层生产力主要集中在径阶为16 cm与径阶为20 cm林木中;在径阶为24 cm的林木中,各间伐强度华北落叶松人工林在间伐后第4年

的生产力相比于间伐后第二年均有所上升;各间伐强度下径阶为8 cm与28 cm的林木其乔木层生产力最少(图2)。



注:左图(A)为间伐后2年华北落叶松人工林径阶分布;右图(B)为间伐后4年华北落叶松人工林径阶分布

Note: The left (A) is the diameter grade distribution of *Larix principis-rupprechtii* plantation in the 2 years after thinning; the right (B) is the diameter grade distribution of *Larix principis-rupprechtii* plantation in the 4 years after thinning.

图1 不同间伐强度华北落叶松人工林胸径分布

Fig 1 DBH distribution of *Larix principis-rupprechtii* plantations with different thinning intensity

表4 不同间伐强度林分平均乔木层生物量、生产力

Table 4 Average biomass and productivity of arbor layer in different thinning intensity stands

伐后时间 Time	间伐强度 Intensity	平均乔木层生 物量 Biomass/ (t · hm ⁻²)	平均乔木层生 产力 NPP/ (t · hm ⁻² · a ⁻¹)
间伐后第2年 The 2 nd year after thinning	CK	205.09	4.10
	LT	180.38	4.26
	MT	171.77	4.35
	HT	154.49	4.69
间伐后第4年 The 4 nd year after thinning	CK	218.06	4.07
	LT	191.54	4.17
	MT	178.49	4.29
	HT	163.81	4.45

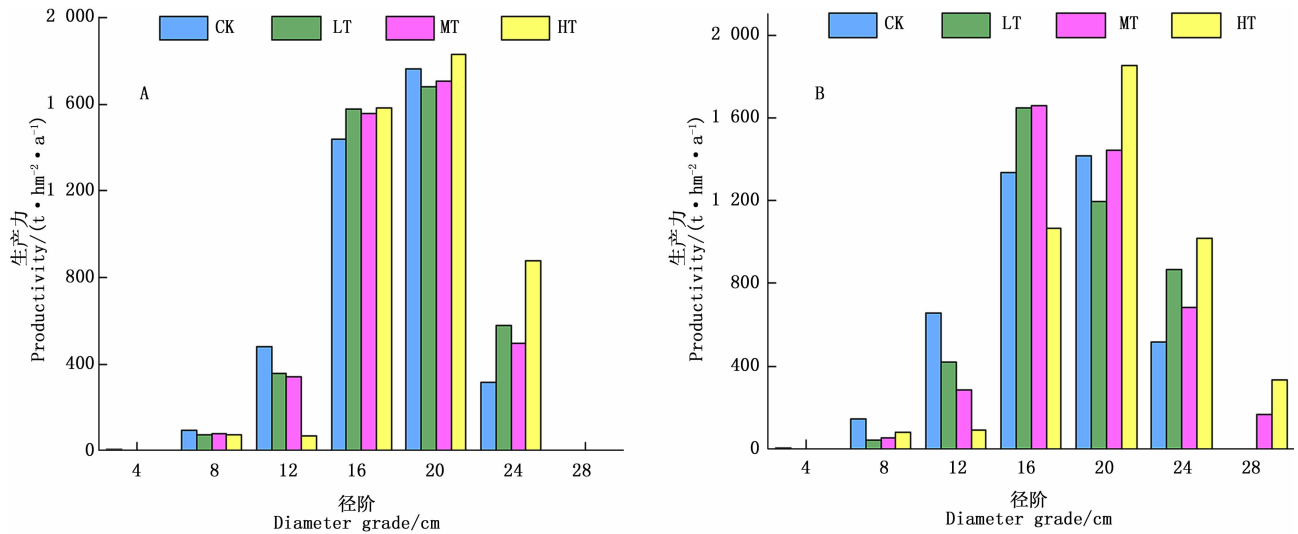
3.3 土壤物理化学因子特征

相同年份内 MC、SOC、TN 间伐组均高于对照组,其中间伐2年后,MC、SOC、TN 间伐组比对照组分别增加了11.19%、10.92%与6.74%;间伐4年后,间伐组 MC、SOC、TN 比对照组分别增加了22.07%、15.57%和13.99%;间伐组中 TP 含量高于其同年对照组含量但涨幅不明显;间伐后第4年与间

伐后第2年相比,MC 含量增加,在间伐组与对照组中分别增加了6.88%与17.33%;pH、SOC、TN、TP 含量减小,其中在对照组中分别减少5.25%、51.06%、38.34%、40.54%,在间伐组中分别减少了4.28%、44.98%、29.55%与27.91%(表5)。参考全国第二次土壤普查养分分级标准,在2年中,TN 在对照组中由一级水平下降到二级水平,在间伐组仍保持在一级水平不变;TP 在对照组中由四级下降到五级,在间伐组维持在四级不变。

3.4 华北落叶松人工林林木生长特性与土壤物理化学因子的关系

相关性分析表明(表6),华北落叶松人工林平均胸径生长量与土壤有机碳、土壤全氮呈极显著正相关,与土壤密度、土壤 pH 呈负相关;平均树高生长量与土壤全磷呈极显著正相关,与土壤全氮呈显著正相关,与土壤有机碳呈正相关但不显著;林木平均冠幅生长量与土壤全氮、全磷呈极显著正相关,与土壤有机碳、土壤含水率呈显著正相关,土壤养分对树木生长有积极影响。



注:左图(A)为间伐后2年华北落叶松人工林各径阶生产力分布;右图(B)为间伐后4年华北落叶松人工林各径阶生产力分布

Note: The left (A) shows the productivity distribution on different diameter grades of *Larix principis-rupprechtii* plantations in two years after thinning; the right (B) shows the productivity distribution on different diameter grades of *Larix principis-rupprechtii* plantations in four years after thinning.

图2 不同间伐强度华北落叶松人工林各径阶生产力

Fig 2 The productivity of different diameters of *Larix principis-rupprechtii* plantations with different thinning intensity

表5 不同间伐时间华北落叶松人工林土壤物理化学因子特征

Table 5 Characteristics of soil physical and chemical properties of *Larix principis-rupprechtii* plantation in different thinning periods

土壤因子	间伐后第2年 2 years after thinning			间伐后第4年 4 years after thinning			
	间伐分组	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV
SBD/(g·cm ⁻³)	对照组	0.88	0.15	0.17	0.82	0.10	0.12
	间伐组	0.88	0.11	0.13	0.83	0.12	0.14
MC/%	对照组	27.34	5.37	0.19	29.22	3.08	0.10
	间伐组	30.40	5.02	0.16	35.67	5.16	0.14
pH	对照组	6.62	0.16	0.02	6.29	0.11	0.01
	间伐组	6.58	0.30	0.04	6.31	0.15	0.02
SOC/(g·kg ⁻¹)	对照组	34.35	4.47	0.13	22.74	3.21	0.14
	间伐组	38.10	5.43	0.14	26.28	3.65	0.14
TN/(g·kg ⁻¹)	对照组	2.67	0.28	0.11	1.93	0.37	0.19
	间伐组	2.85	0.49	0.09	2.20	0.42	0.19
TP/(g·kg ⁻¹)	对照组	0.52	0.04	0.09	0.37	0.03	0.08
	间伐组	0.55	0.05	0.09	0.43	0.04	0.09

注:表中 SBD、MC、pH、SOC、TN、TP 分别表示土壤密度、土壤含水率、土壤 pH 值、土壤有机碳、土壤全氮、土壤全磷。

Note: SBD, MC, PH, SOC, TN, and TP in the table indicate soil bulk density, soil moisture content, soil pH, soil organic carbon, soil total nitrogen, and soil total phosphorus, respectively.

表6 华北落叶松人工林林木生长特性与土壤物理化学因子的相关系数

Table 6 Correlation coefficient between growth characteristics and soil physical and chemical properties of *Larix principis-rupprechtii* plantation

项目 Items	pH	SBD	MC	SOC	TN	TP
胸径生长量 DBH growth	-0.314 *	-0.427 *	0.202	0.723 **	0.740 **	0.231
树高生长量 Tree height growth	-0.145	-0.194	0.263	0.288	0.512 *	0.626 **
冠幅生长量 Crown growth	-0.173	-0.281	0.322 *	0.583 *	0.674 **	0.785 **
乔木层生物量 Tree layer biomass	-0.112	-0.082	0.181	-0.019	0.079	0.094
乔木层生产力 Tree layer productivity	0.199	-0.04	0.042	0.115	-0.195	0.218

注: * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

4 讨论

4.1 抚育间伐对林木生长特性的影响

研究表明,不同抚育间伐强度对林分生长特性产生不同影响,总的来说,随间伐强度的增加,林木平均胸径与冠幅增大。由此得出,间伐显著提升了林木生长特性,这与 Bardford 等在针叶林中的研究结果一致^[16]。其原因在于间伐后的林分对光照、水分等资源的竞争减少,同时,光照强度的增加提高了林分内温度,导致凋落物的分解速率以及土壤有机碳分解速率加快,提升林地土壤肥力,林木通过进行充分的光合作用并吸收更多的资源使胸径以及冠幅增加^[17]。然而,本研究结果与 Powers 等人的研究结果中高强度间伐对树木生长有负面影响的结论不一致^[18],这可能因为 Powers 实验中所设置高强度间伐的林分密度为 $330 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$,是本实验所设置的高强度间伐林分密度 ($895 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的 2.71 倍,林分密度过低、间伐强度过高会破坏林分结构,导致林分内水土流失严重,除此之外,过高间伐强度也会改变林分内风速使树木对风害的敏感性增加,进而影响林木生物量的积累。通过间伐后 2 年与 4 年林木单株生长特性的比较发现,间伐强度越大,林分平均胸径定期生长量越大,抚育间伐对平均胸径生长量有促进作用,这与尤文忠等人研究结果不一致^[8],其认为轻度间伐和重度间伐的蒙古次生林中林分平均胸径增长量显著高于中度间伐林分平均胸径增长量。可能原因与林龄大小、树种组成、研究区气候等因素有关。

目前,对林木形质指标选定及等级划分没有统一标准,本研究通过引入胸径平均生长量、树高平均生长量、冠幅平均生长量、林木高径比和冠径比 5 个形质指标并参考尤健健^[19]和陈晓阳^[20]划分针叶树形质指标等级的标准,研究间伐强度对华北落叶松人工林林木形质的影响,结果表明重度间伐(50%)处理下除树高增长量和高径比以外其余指标均出现最大值且树高增长量也处于较高水平上(表 2、表 3),说明林木形质质量在重度间伐下最高,抚育间伐能使林木保持良好干形。这与于世川等人^[11]的研究结果一致,可能原因是林木通过抚育间伐存优去劣提升林分内总体形质质量,同时,间伐减少林木竞争,提升林内光照与温度,有利于林木生长。

4.2 抚育间伐对林分乔木层生物量及生产力的影响

本研究中,林分乔木层生物量随抚育间伐强度

增加而减小,林分乔木层生产力随抚育间伐强度增加而增大,且间伐后第 2 年生产力普遍小于间伐后第 4 年生产力,这与前人研究结果一致^[21-22]。这表明间伐通过改变林分密度调整林分结构,改善林分内小气候并促进林木生长进而提高林分生产力。但 Zeide 等研究认为抚育间伐不能同时促进林分内单株林木生长与提升林分总生物量^[23]。所以,若想最大化林分生产力,必须要权衡二者之间的关系。间伐后林内充足的光照及养分使单株林木发育状况改善,林分乔木层生产力增大,同时,间伐减少了林分乔木层生物量进而减少林分蓄积量,因此,权衡间伐后林分内生物量减少量与生产力增加量之间的关系尤为重要。本实验中,LT 与 MT 不仅没有可观的乔木层生产力,但损耗了相对多的乔木层生物量;间伐后 2 年 HT 损耗生物量分别是 LT、MT 的 2.05 与 1.52 倍,但增加的生产力分别是 LT 与 MT 的 3.69、2.36 倍。因此本研究中认为 HT 可以作为较好的间伐强度,在保留乔木层生物量的同时有效提高了林分生产力,因此间伐强度为 50% (HT) 是最适间伐强度,为保留乔木层生物量的同时有效提高了林分生产力,应将华北落叶松人工林林分密度控制在 $895 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 附近。Gu 等在研究不同间伐强度对落叶松人工林生长影响中发现落叶松人工林林分密度控制在 $850 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 上下(间伐强度为 40%)可有效提高林分生产力^[24],为间伐最适的强度,与本研究建议保留的林分最佳密度 $895 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 一致。有鉴于此,在华北落叶松人工林的后续经营中,管理人员可根据研究区域的实际情况采取适宜的间伐强度,以促进当地华北落叶松人工林生产力提高。

4.3 林木生长与土壤物理化学因子的关系

本研究结果表明,林木生长与土壤理化性质存在一定相关性。其中,土壤全氮与林木平均胸径生长量、平均树高生长量和平均冠幅生长量呈显著正相关;土壤全磷与林木平均树高生长量和平均冠幅生长量呈显著正相关,这与 Paoli GD 和 Curran LM 等研究结果一致^[25],土壤全氮和土壤全磷对林木生长有重要的作用。同时,研究发现土壤密度与林木生长负相关,本研究结果与 Wang 等人一致,这是因为土壤密度是反映土壤内水分传导、气体渗透率的重要指标,土壤密度越小的土壤其孔隙度越大,对林木根系的呼吸、水分的获取及土壤微生物的活动更有利^[26]。除此之外,本研究发现土壤有机碳与林木平均胸径生长量与平均冠幅生长量呈显著正相

关,土壤有机碳促进林木生长,这与 Luyssaert 和 Springteen 等人研究结果一致,其认为土壤有机碳通过微生物分解转化为土壤养分,进而提升土壤肥力促进树木生长,同时,土壤有机碳含量在一定程度上反映有机质的含量,有机质是影响林木生长发育的关键土壤养分因子^[27-28]。因此认为土壤有机碳对林木生长有重要影响。土壤各理化性质与林分生长指标关系复杂^[29],Paoli GD 研究发现,土壤全钾、矿化氮、全氮影响婆罗洲南部森林的生长^[25];Curtin D 研究发现在哥伦比亚白云杉林中,土壤有效磷与硫含量同样影响林木生长^[30]。出现影响林木生长土壤指标差异的原因可能与研究区的气候、不同树种以及不同土壤类型有关。在未来的研究中,需进一步考虑气候因子与立地因子对华北落叶松人工林林木生长和生产力的影响,综合土壤因子找到影响华北落叶松人工林生长和生产力的关键限制性因子,为华北落叶松人工林的经营管理提供依据和数据支撑。

5 结论

本研究通过研究不同抚育间伐强度下华北落叶松人工林生长状况、乔木层生物量与生产力的大小并结合样地内土壤物理与化学性质,得出间伐可促进华北落叶松人工林单株林木胸径和冠幅生长,减缓土壤有机碳及土壤养分的流失、增大林分生产力的结论,并发现土壤有机碳(SOC)、土壤全氮(TN)土壤全磷(TP)是促进华北落叶松人工林林木生长的重要土壤因子;由抚育间伐综合效应得出重度间伐(50%,保留密度 $895 \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$)是提高华北落叶松生长生产力,优化树木生长、保持树木良好干形的最佳间伐强度。

参考文献:

- [1] Ma J Y, Kang F F, Cheng X Q, *et al.* Moderate thinning increases soil organic carbon in *Larix principis-rupprechtii* (Pinaceae) plantations [J]. *Geoderma*, 2018, 329: 118 - 128.
- [2] 刘占锋,傅伯杰,刘国华,等. 土壤质量与土壤质量指标及其评价[J]. *生态学报*, 2006, 26(3): 901 - 913.
- [3] Wang Q, Wang S, Yu X. Decline of soil fertility during forest conversion of secondary forest to Chinese fir plantations in subtropical China [J]. *Land Degradation & Development*, 2011, 22(4): 444 - 452.
- [4] 段 劫,马履一,贾黎明,等. 抚育间伐对侧柏人工林及林下植被生长的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(6): 1431 - 1441.
- [5] Waters C M, Gonsalves L, Law B, *et al.* The effect of thinning on structural attributes of a low rainfall forest in eastern Australia [J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 409: 571 - 583.
- [6] Marshall D D, Curtis R O. Levels-of-growing-stock cooperative study in Douglas-fir: Report No. 15-Hoskins: 1963 - 1998 [J]. USDA Forest Service Research Papers RMRS, 2002, 16(537): 45 - 46.
- [7] Pitt D, Lanteigne L. Long-term outcome of precommercial thinning in northwestern New Brunswick: growth and yield of balsam fir and red spruce [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2008, 38(3): 592 - 610.
- [8] 徐金良,毛玉明,郑成忠,等. 抚育间伐对杉木人工林生长及出材量的影响[J]. *林业科学研究*, 2014, 27(1): 99 - 107.
- [9] 尤文忠,赵 刚,张慧东,等. 抚育间伐对蒙古栎次生林生长的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(1): 56 - 64.
- [10] 朱 江. 林分密度调控对太岳山华北落叶松人工林碳分配的影响[D]. 北京:北京林业大学, 2017.
- [11] 于世川,张文辉,尤健健,等. 抚育间伐对黄龙山辽东栎林木质质的影响[J]. *林业科学*, 2017, 53(11): 104 - 113.
- [12] Dorman M, Perevolotsky A, Sarris D, *et al.* Amount vs. temporal pattern: On the importance of intra-annual climatic conditions on tree growth in a dry environment [J]. *Journal of Arid Environments*, 2015, 118: 65 - 68.
- [13] 朱 江,韩海荣,康峰峰,等. 山西太岳山华北落叶松生物量分配格局与异速生长模型[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(11): 2918 - 2925.
- [14] 程瑞梅,封晓辉,肖文发,等. 北亚热带马尾松净生产力对气候变化的响应[J]. *生态学报*, 2011, 31(8): 2086 - 2095.
- [15] 张远东,刘彦春,刘世荣,等. 基于年轮分析的不同恢复途径下森林乔木层生物量和蓄积量的动态变化[J]. *植物生态学报*, 2012, 36(2): 117 - 125.
- [16] Bradford J B, Palik B J. A comparison of thinning methods in red pine: consequences for stand-level growth and tree diameter [J]. *Revue Canadienne De Recherche Forestière*, 2009, 39(3): 489 - 496.
- [17] D'Amato A W, Bradford J B, Fraver S. Forest management for mitigation and adaptation to climate change: Insights from long-term silviculture experiments [J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(5): 803 - 816.
- [18] Powers M D, Palik B J, Bradford J B, *et al.* Thinning method and intensity influence long-term mortality trends in a red pine forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(7): 1138 - 1148.
- [19] 尤健健,张文辉,邓 磊. 黄龙山不同郁闭度油松中龄林林木品质评价[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(7): 1945 - 1953.
- [20] 陈晓阳,沈熙环. 林木育种学[M]. 北京:高等教育出版, 2005
- [21] Tun T N, Guo J, Fang S, *et al.* Planting spacing affects canopy structure, biomass production and stem roundness in poplar plantations [J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2018, 33(5): 464 - 474.
- [22] Magruder M, Chhin S, Palik B, *et al.* Thinning increases climatic resilience of red pine [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2013, 43(9): 878 - 889.
- [23] Zeide. Thinning and growth: a full turnaround [J]. *Journal of Forestry*, 2001, 99(1): 20 - 25.
- [24] Gu L, Zheng X X, Liu D L, *et al.* Diameter distribution of larch for-

- ests based on different thinning intensity in Changbai Mountain, Northeast China [C]// International Conference on Computer Application & System Modeling. IEEE, 2010.
- [25] Paoli G D, Curran L M, Slik J W F. Soil nutrients affect spatial patterns of aboveground biomass and emergent tree density in southwestern Borneo [J]. *Oecologia*, 2008, 155(2): 287–299.
- [26] Wang W J, Qiu L, Zu Y G, *et al.* Changes in soil organic carbon, nitrogen, pH and bulk density with the development of larch (*Larix gmelinii*) plantations in China [J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(8): 2657–2676.
- [27] Luyssaert S, Schulze E D. Old-growth forests as global carbon sinks [J]. *Nature*, 2008, 455(7210): 213–215.
- [28] Springsteen A, Loya W, Liebig M, *et al.* Soil carbon and nitrogen across a chronosequence of woody plant expansion in North Dakota [J]. *Plant and Soil*, 2010, 328(1–2): 369–379.
- [29] 唐 诚, 王春胜, 庞圣江, 等. 广西大青山西南桦人工林土壤养分特征及其与立地生产力的关系 [J]. *林业科学研究*, 2018, 31(2): 164–169.
- [30] Curtin D, Peterson M E, Anderson C R. pH-dependence of organic matter solubility: Base type effects on dissolved organic C, N, P, and S in soils with contrasting mineralogy [J]. *Geoderma*, 2016, 271: 161–172.

Response of *Larix principis-rupprechtii* Plantation Growth to Thinning and Its Relationship with Soil Factors

SHANG Tian-xiong, HAN Hai-rong, CHENG Xiao-qin, CAI Meng-ke, LI Bin, ZHANG Wen-wen

(Beijing Key Laboratory of Forest Resources Ecosystem Process, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China)

Abstract: [Objective] To explore the effects of different thinning intensity on tree growth and identify the key soil factors affecting forest growth. [Method] Twelve thinning test plots and control plots were set up in the *Larix principis-rupprechtii* plantation with mild (thinning intensity 15%), moderate (thinning intensity 35%), severe (thinning intensity 50%) thinning in Haodifang Forest Farm in Qinyuan County, Shanxi Province, and take the average DBH, average tree height, average branch height, average crown width, tree layer biomass and productivity as the tree growth indicators. Variance analysis and multiple comparisons were used to analyze the growth characteristics in the stands with different thinning intensities, and were combined with soil factor to study the relationship between forest growth and soil factors by utilizing correlation analysis. [Result] The tree-growth index of the *L. principis-rupprechtii* plantation significantly increased compared with the control after two and four years of moderate and severe thinning. Thinning significantly increased the productivity of the arbor layer while reduced the biomass of the arbor layer in the stand. The productivity of arbor layer in all the period and thinning intensities followed the pattern of severe thinning > moderate thinning > mild thinning > the control. Thinning increased the content of soil organic carbon (SOC), soil total nitrogen (TN) and soil total phosphorus (TP), and reduced the loss of soil nutrients. The average DBH growth of *L. principis-rupprechtii* plantation was significantly positively correlated with SOC and TN. The average crown growth was significantly positively correlated with soil water content, SOC, TN and TP. [Conclusion] Thinning can promote the growth of DBH and crown width of individual trees in *L. principis-rupprechtii* plantation and increase the ratio of crown to diameter and productivity of individual trees. Among the three thinning intensities, the severe thinning intensity is the optimal. Soil organic carbon and soil total nitrogen content in *L. principis-rupprechtii* plantations are abundant, the soil total phosphorus content is less, and the soil pH is weakly acidic. SOC, TN, TP are crucial factors affecting the growth of *L. principis-rupprechtii* plantation.

Keywords: thinning; *Larix principis-rupprechtii* plantation; soil nutrient characteristics; forest growth; productivity