

樟子松幼苗对接种外生菌根真菌与指数施肥的响应

王嘉月¹, 郝龙飞¹, 白淑兰^{1*}, 包会嘎²

(1. 内蒙古农业大学林学院, 内蒙古 呼和浩特 010019;

2. 乌海市湿地管理局, 内蒙古 乌海 016000)

摘要:以普通苗圃培育的2年生樟子松幼苗为研究对象,通过接种外生菌根真菌和指数施肥双因素处理,探讨不同接菌处理与施肥处理对幼苗的生长效应,旨在为樟子松菌根化育苗中苗木精准施肥提供理论依据。试验采用8种外生菌根真菌混合接种处理,同时设不接种菌剂作为对照。设置指数施肥(EF)、2倍指数施肥(DEF)、常规施肥(CF)、接菌+指数施肥(JEF)、接菌+2倍指数施肥(JDEF)、接菌+常规施肥(JCF),共计6个处理组合。为防止接菌和施肥后不同处理间相互干扰,各处理之间用PVC隔板隔开。结果表明,指数施肥的幼苗生长指标、养分积累量(N、P)、菌根侵染率等均显著大于CF处理,其中,以JEF处理幼苗各指标最大,其苗高、地径、生物量分别是JCF处理的1.30、1.42、1.34倍,分别是CF处理的1.44、1.55、2.01倍,N积累量较JCF处理提高了32.7%,较CF处理提高了96.4%,P积累量较JCF处理提高了48.6%,较CF处理提高了100.7%。以上结果表明接菌处理后通过指数施肥对培育优质樟子松幼苗更有利。

关键词:指数施肥;樟子松;外生菌根真菌;生长响应;养分

苗木质量是影响苗木造林与生长的重要因素,在苗木培育中,施肥是提高苗木质量的有效手段之一。有研究发现施用肥料有助于提高农、林业产量^[1-2],但不同施肥方式对苗木的促生作用存在较大差异。目前,苗木培育常采用的施肥方法有常规施肥(CF)和指数施肥(EF)。常规施肥是指在生长季内重复施用等量的肥料或集中一次施用大量肥料。指数施肥则是指基于“养分承载理论”的一种按指数递增供给苗木养分的施肥方式,其符合苗木生长阶段的需肥规律,并能诱导苗木奢侈耗养,从而提高养分承载^[3-5]。有研究发现,指数施肥的苗木能更好地适应造林地环境,与常规施肥相比苗木具有更高的成活率^[6]。自20世纪80年代瑞典农业科技大学的Ingestad等^[3,7]通过试验研究创立“指数养分承载理论”(exponential nutrient loading theory)以来,指数施肥技术在国外得到推

广应用。如今,指数施肥技术培育出的苗木对维护当地生态平衡、改善土壤养分结构、废弃地植被恢复均有较大贡献^[8]。我国关于指数施肥研究开始于20世纪80年代,目前已开展了对沉香(*Aquilaria agallocha*)、楸树(*Catalpa bungei*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、白桦(*Betula platyphylla*)等多个重要树种的指数施肥研究,取得了一定的成果^[9-14]。

菌根是自然界中一种普遍存在的植物共生现象^[15],它可以扩大宿主植物根系的吸收面积,增加宿主植物对养分的吸收,同时,菌根真菌还能产生植物生长调节物质,例如生长素(Auxin)、细胞分裂素(Cytodinin)、赤霉素(Gibberelins)、脱落酸(Abscisic acid)等,促进宿主植物的生长和提高其抗逆性^[16-18]。近些年,我国对菌根真菌的研究逐步深入,从菌根真菌资源多样性研究到对共生植物促进机制研究,均取得了一定成果^[19-22]。

樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)是我国半干旱风沙地区植树造林的先锋树种,研究发现,能与樟子松形成外生菌根的菌根真菌种类较多,如彩色豆马勃(*Pisolithus tinctorius*)、粘盖牛肝菌(*Suillus bovinus*)、浅黄根须腹菌(*Rhizopogon luteolus*)等^[20,23]。目前,樟子松菌根化育苗技术的研究与推广应用较为广泛,但在菌根化育苗生产

收稿日期:2020-11-26;录用日期:2021-03-24

基金项目:内蒙古自治区研究生教育创新计划研究生科研创新资助项目(S20191160Z);内蒙古农业大学林学院青年教师科研基金项目(203170004);内蒙古自治区大学生创新创业训练计划项目(20171012917)。

作者简介:王嘉月(1995-),硕士研究生,研究方向为菌根生物技术。E-mail:2481348418@qq.com。

通讯作者:白淑兰,E-mail:baishulan2004@163.com。

中, 仍然广泛采用的是常规施肥方法, 这不仅造成严重的肥料浪费和土壤的富养化, 同时也不符合苗木的养分需求规律, 在林木菌根化育苗过程中如何运用指数施肥技术国内也鲜见报道。本研究以 2 年生樟子松苗圃苗为试验材料, 设置接种外生菌根真菌与指数施肥处理, 探讨在两种因素影响下苗木的生长情况, 以提高苗木质量, 为培育高质量樟子松菌根化育苗提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况与试验材料

试验地设在内蒙古农业大学林学院试验苗圃,

该地属于中温带大陆性季风气候, 四季气候变化明显且差异较大, 年平均气温为 6.7℃, 年平均降水量为 400 mm 左右, 土壤类型为潮土, 无霜期为 113 ~ 134 d。

试验材料为 2 年生樟子松苗圃苗, 幼苗购买于呼和浩特市托克托县城关苗圃。2018 年秋季移栽幼苗并接种菌剂。选用的菌种原种采集于内蒙古大青山地区, 后于实验室鉴定分离。选用生长健壮的平板菌种制作固体菌剂^[20], 供试菌种见表 1, 试验用地土壤 pH 值为 7.63, 土壤水解氮、速效钾、有效磷分别为 30.15、117.42、7.82 mg · kg⁻¹。

表 1 供试菌种名录

菌种名称	菌株编号	菌种名称	菌株编号
黄褐口蘑 <i>Tricholoma fulvum</i>	T.f 2004-1	粘盖牛肝菌 <i>Suillus bovinus</i>	S.b 2012-1
浅黄根须腹菌 <i>Rhizopogon luteolus</i>	R.l 2004-2	浅灰小牛肝菌 <i>Boletinus grisellus</i>	B.g 2012-2
球根白丝膜菌 <i>Leucocortinarius bulbiger</i>	L.b 2004-3	厚环粘盖牛肝菌 <i>Suillus grevillei</i>	S.g2012-3
彩色豆马勃 <i>Pisolithus tinctorius</i>	P.t 2015-1	褐环粘盖牛肝菌 <i>Suillus luteus</i>	S.l 2012-4

1.2 试验设计

1.2.1 试验区划分

将 40 m² 的试验用地平整后设置为 18 个 1 m × 1 m 的样地, 为防止试验处理后不同处理的相互干扰, 将相邻的两个地块之间用 PVC 隔板隔开。PVC 隔板地下埋藏深度为 40 cm, 地上露出 10 cm。每个样地选用长势一致的 2 年生樟子松幼苗 25 株, 其株行距为 20 cm, 共计 450 株。试验采用完全区组设计, 每 6 个样地为一个区组, 每个区组在接菌与不接菌的基础上设置 3 种施肥处理, 即接菌设置: 指数施肥 (JEF)、2 倍指数施肥 (JDEF)、常规施肥 (JCF); 不接菌设置: 指数施肥 (EF)、2 倍指数施肥 (DEF)、常规施肥 (CF), 共计 6 个处理, 每个处理均重复 3 次。

1.2.2 试验处理

接菌处理: 试验共选用 8 个菌种, 在移栽幼苗的同时进行接菌处理。将制备好的菌剂等量混合搅拌均匀后放入接菌处理幼苗坑穴底部, 使其与幼苗根系紧密接触, 每株幼苗接种量为 30 g。在接菌约 8 个月后每个处理随机选取 1 株幼苗测定菌根感染率^[21]。

施肥处理: 施肥从 2019 年 5 月初 (接菌 9 个

月后) 开始到 8 月中旬结束, 施肥间隔为 2 周, 共计 8 次施肥。具体施肥时间见表 2。试验采用 Timmer^[4] 提出的指数施肥模型计算每次相应的施肥量, 公式如下:

$$N_T = N_S (e^r - 1) \quad (1)$$

$$N_t = N_S (e^r - 1) - N_{(t-1)} \quad (2)$$

式中, N_T 表示生长结束时苗木体内的养分; N_S 表示苗木初期养分含量; r 表示养分相对添加速率; t 表示施肥次数; N_t 表示第 t 次的施肥量; N_{t-1} 表示第 $t-1$ 次的总施肥量。

试验开始前测定生长季初期苗木体内氮含量为 68.28 mg · 株⁻¹, 利用公式 (1)、(2) 计算出指数施肥 (EF) 和 2 倍指数施肥 (DEF) 每次的施肥量 (表 2)。常规施肥 (CF) 是根据植物营养生长规律在第 1 次和第 5 次 (营养生长和生殖生长) 分两次集中施入。肥料选用尿素 [CO (NH₂)₂ 含 N 46%], 为保证苗木养分平衡, 加入 KH₂PO₄ 以补充 P、K 肥, 施入量为 10 mg · 株⁻¹, 随尿素一同施入, 共计 80 mg · 株⁻¹。施肥方法为: 用小铲在距离幼苗根部 5 cm 左右挖 1 ~ 2 cm 深的环沟, 将事先称量好的肥料溶于水中, 用量筒对各处理的幼苗沿环沟等量浇灌, 然后将环沟覆平^[24]。

表 2 樟子松不同施肥处理的施肥时间和施肥量

(mg · 株⁻¹)

施肥次数	施肥时间 (月-日)	EF	CF	DEF	JEF	JCF	JDEF
1	05-05	7.84	47.33	15.68	7.84	47.33	15.68
2	05-19	8.74	0.00	17.48	8.74	0.00	17.48
3	06-02	9.75	0.00	19.49	9.75	0.00	19.49
4	06-16	10.87	0.00	21.73	10.87	0.00	21.73
5	06-30	12.11	47.33	24.23	12.11	47.33	24.23
6	07-14	13.50	0.00	27.01	13.50	0.00	27.01
7	07-28	15.05	0.00	30.11	15.05	0.00	30.11
8	08-11	16.78	0.00	33.57	16.78	0.00	33.57
总量		94.65	94.65	189.30	94.65	94.65	189.30

1.3 指标测定

生长指标测定：施肥结束一周后取样，每个处理随机取 3 株幼苗，分别用卷尺和游标卡尺测量苗高、地径。将幼苗带回实验室用蒸馏水清洗，按根、茎、叶分开并装入信封放入烘箱内，在 105℃ 下杀青 30 min，在 80℃ 下烘干至恒重。烘干后称取幼苗根、茎、叶生物量，总生物量 = 根生物量 + 茎生物量 + 叶生物量。根据生物量计算苗木质量指数^[25]。

植物 N、P 测定：将烘干后的植株按地上、地下部分混合，研磨后分别采用凯氏定氮法测定全 N，钼锑抗比色法测定全 P。N (P) 积累量 (g · 株⁻¹) = 幼苗 N (P) 质量分数 (g · kg⁻¹) × 不同器官相应生物量 (g · 株⁻¹)，总 N (P) 积累量 = 地上部分 N (P) 积累量 + 地下部分 N (P) 积累量。

菌根侵染率测定：外生菌根侵染率采用统计计算法。将根样剪成 1 cm 左右等长的根段，随机选取根样，每个处理 100 个根段，在体视镜下观察外生菌根侵染率^[21]。菌根侵染率 (%) = (有菌根根段数 / 总根段数) × 100。

1.4 数据分析

采用 Excel 2016 和 SPSS 18.0 进行数据处理，使用 SigmaPlot 14.0 进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 不同处理对菌根侵染率的影响

在苗圃条件下，接菌处理与不接菌处理的幼苗均与外生菌根真菌形成了菌根，但接菌处理的

幼苗菌根侵染率显著大于不接菌处理 (表 3)。在施肥结束后，JEF 与 JDEF 处理幼苗的菌根侵染率与 JCF 相比均增加了 21.1% ($P < 0.05$)，但 JEF 与 JDEF 处理之间差异不显著 ($P > 0.05$)。而 DEF 处理幼苗菌根侵染率较 CF 处理增加了 17.0% ($P < 0.05$)，DEF 与 EF 处理则差异不显著 ($P > 0.05$) (表 3)。对菌根侵染率进行双因素方差分析，施肥处理和接菌处理对菌根侵染率有极显著影响，但二者的交互作用不显著。

表 3 菌根侵染率 (%)

不接菌 + 施肥	菌根侵染率	接菌 + 施肥	菌根侵染率
EF	64 ± 0.03ab	JEF	86 ± 0.01a
DEF	69 ± 0.00a	JDEF	86 ± 0.01a
CF	59 ± 0.00b	JCF	71 ± 0.01b
施肥处理		**	
接菌处理		***	
肥 × 菌		NS	

注：表中数据为平均值 ± 标准误，不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)；* 表示 $P < 0.05$ ，** 表示 $P < 0.01$ ，*** 表示 $P < 0.001$ ；NS 表示差异不显著；下同。

2.2 不同处理对幼苗苗高、地径的影响

在施肥结束后，JEF 处理的苗高最大 (表 4)，为 30.73 cm，显著高于其他施肥处理 ($P < 0.05$)，分别是 JDEF、JCF 处理的 1.13 和 1.30 倍。EF 与 DEF 处理差异不显著 ($P > 0.05$) (表 4)，但均与 CF 处理差异显著。不同施肥处理对幼苗地径的影响与对苗高

的影响规律一致。其中, JEF 与 JDEF 地径无显著差异, 而与其他施肥处理均存在显著差异 ($P<0.05$)。由表 4 可以看出, JEF 处理地径较 JCF 处理增加了 32.3%, 达显著差异 ($P<0.05$)。在不接菌处理中, EF 和 DEF 处理地径较 CF 处理分别增加了 22.3%、18.8%, 均存在显著差异 ($P<0.05$), 而 EF 与 DEF 处理无显著差异 ($P>0.05$)。这表明与常规施肥相

比, 指数施肥对幼苗苗高、地径生长更有利。从表 4 还可以看出, JEF 效果更佳, 一方面对生长促进效果好, 另一方面也可以减少肥料的浪费。对幼苗苗高、地径进行双因素方差分析 (表 4) 表明, 施肥处理、接菌处理对幼苗苗高、地径影响均达显著水平 ($P<0.01$), 施肥和接菌处理的交互作用对苗高影响显著 ($P<0.05$), 对地径影响则不显著 ($P>0.05$)。

表 4 不同施肥处理对各指标的影响

施肥处理	苗高 (cm)	地径 (mm)	生物量 (g)				质量指数
			根	茎	叶	全株	
EF	25.63 ± 0.13bc	10.19 ± 0.33b	6.11 ± 0.40c	7.22 ± 0.76bc	12.19 ± 0.60c	26.49 ± 1.35c	6.66 ± 0.28cd
DEF	25.93 ± 0.51bc	9.90 ± 0.05bc	6.89 ± 0.78bc	7.07 ± 0.30bc	11.08 ± 0.30c	25.09 ± 1.78c	6.19 ± 0.22d
CF	21.94 ± 0.30d	8.33 ± 0.24c	5.53 ± 0.26cd	5.93 ± 0.53c	8.61 ± 0.17d	19.85 ± 0.59d	5.26 ± 0.07e
JEF	30.73 ± 0.78a	13.11 ± 0.32a	11.66 ± 0.37a	11.33 ± 0.39a	16.39 ± 0.28a	40.22 ± 1.23a	11.51 ± 0.32a
JDEF	27.28 ± 0.62b	12.09 ± 0.57a	8.28 ± 0.23b	9.07 ± 0.30ab	14.47 ± 0.48b	34.09 ± 1.06b	9.98 ± 0.02b
JCF	22.98 ± 1.08cd	9.91 ± 0.48b	6.64 ± 0.05c	8.24 ± 0.40bc	12.21 ± 0.33c	29.38 ± 0.59c	7.51 ± 0.15c
施肥处理	***	***	**	*	**	***	
接菌处理	***	**	***	**	***	***	
肥 × 菌	*	NS	**	NS	***	*	

2.3 不同处理对幼苗生物量的影响

不同施肥处理均促进了樟子松幼苗生物量积累。施肥结束后, 不同处理的幼苗生物量大小依次为 JEF>JDEF>JCF>EF>DEF>CF (表 4)。JEF 处理幼苗生物量较 EF、JDEF、DEF、JCF、CF 处理分别增加了 51.8%、18.0%、60.3%、36.9%、102.6%, 均达显著差异 ($P<0.05$); 对不接菌苗来说, EF 处理与 DEF 处理差异不显著 ($P>0.05$), 但二者均与 CF 处理差异显著 ($P<0.05$), 生物量分别增加了 33.5%、26.4%, 说明指数施肥对苗木生长有利。同时, 对幼苗生物量进行双因素方差分析 (表 4), 发现施肥和接菌处理对幼苗生物量大小影响极显著 ($P<0.001$), 施肥和接菌处理的交互作用对生物量影响显著 ($P<0.05$), 表明接种菌根真菌后采用指数施肥对樟子松幼苗生物量的积累有积极作用。除 JEF 处理外, 不同施肥处理幼苗各器官生物量大小依次为叶>茎>根 (表 4)。JEF 处理根生物量最大, 且显著高于其他施肥处理, 最小的则是 CF 处理, 为 5.53 g; 叶生

物量与根生物量规律一致, JEF 处理茎生物量最大, 除 JDEF 外显著高于其他处理。对幼苗根、茎、叶生物量进行双因素方差分析 (表 4) 表明, 施肥、接菌处理及二者交互作用对幼苗根、叶生物量影响均达显著差异 ($P<0.01$), 而施肥、接菌处理对茎生物量有显著影响 ($P<0.05$), 而二者交互作用对其无显著影响 ($P>0.05$)。

2.4 不同处理对幼苗 N、P 积累的影响

研究发现在相同的施肥处理下, 接菌处理幼苗总 N、P 积累量均显著大于不接菌处理 ($P<0.05$)。多重比较结果表明, 在接菌与不接菌处理下, EF、DEF 处理幼苗总 N 积累量均与 CF 处理有显著差异 ($P<0.05$), 而 EF、DEF 之间差异不显著 ($P>0.05$) (图 1)。JEF、JDEF、JCF 处理幼苗总 P 积累量均差异显著 (图 2), 而不接菌幼苗 EF 与 CF 处理间差异显著。试验结束后, JEF 与 EF 处理幼苗 N 积累量较 CF 处理分别增加了 96.4%、38.0%, P 积累量较 CF 处理分别增加了 100.7%、21.4%, 表明指数施肥与外生菌根真菌二者的双重作用更能

促进苗木 N、P 养分积累。JEF 处理地上、地下部分 N 积累量最大, 分别为 0.51、0.11 g, 均显著大于其他处理; JEF 处理地上、地下部分 P 积累量最大, 分别为 41.12、16.03 mg, 均显著大于其他处理。

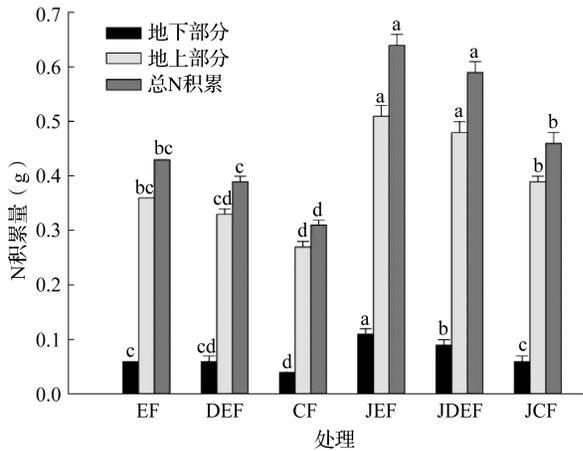


图 1 不同施肥处理的幼苗 N 积累量

注: 相同图例中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

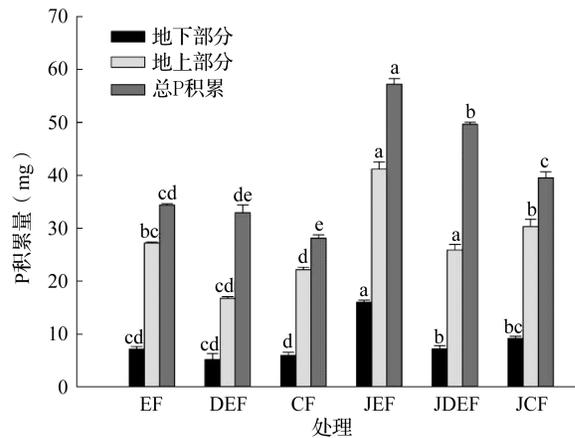


图 2 不同施肥处理的幼苗 P 积累量

2.5 不同处理对幼苗地上、地下部分 N、P 积累分配的影响

不同施肥处理下, 地上部分 N 积累分配比例为 $JDEF > EF > CF > DEF > JCF > JEF$ (图 3), 地下部分 N 积累分配比例为 $JEF > JCF > DEF > CF > EF > JDEF$; 幼苗地上、地下部分 P 积累分配比例与 N 积累分配规律一致 (图 4)。显然, 幼苗地上部分养分所占比例远大于地下部分, 其中, JDEF 处理地上部分 N、P 积累所占比例均最大, JEF 处理地下部分 N、P 积累所占比例也最大, 表明接种菌根真菌和指数施肥处理的幼苗对养分分配有积极影响, 从而促进幼苗吸收养分。

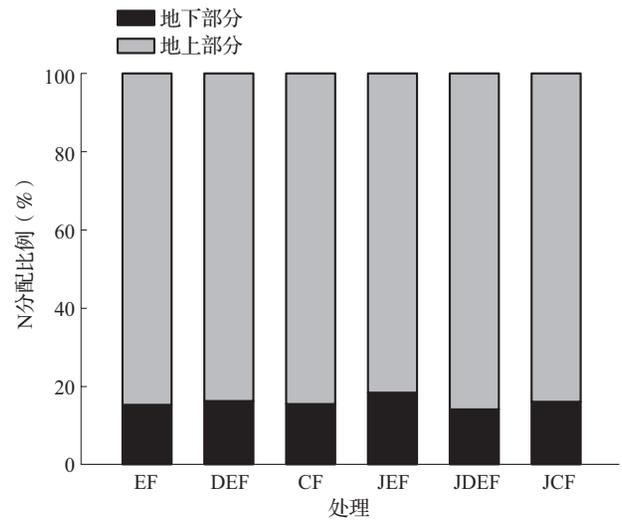


图 3 不同施肥处理的 N 分配比例

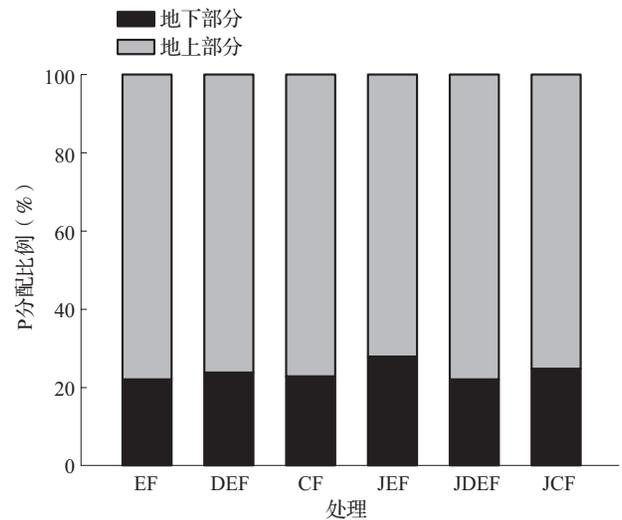


图 4 不同施肥处理的 P 分配比例

3 讨论

3.1 不同施肥处理对幼苗菌根侵染率的影响

本研究中接菌与不接菌处理的幼苗均被外生菌根真菌侵染, 这可能是因为原来苗圃土壤中存在大量土著外生菌根真菌, 在幼苗移栽前就已经侵染了苗木, 但这些土著菌根真菌的作用如何本研究尚未涉及, 在今后的研究中有待于进一步探索。对菌根侵染率进行双因素方差分析, 施肥处理和接菌处理对菌根侵染率均有极显著影响, 但二者的交互作用影响不显著。这可能是因为不接菌处理的幼苗实际上也被菌根真菌侵染, 与接菌处理的幼苗相比, 施肥和接菌处理的交互作用相差不大, 不能明确判断 2 种处理的交互作用对菌根侵染率的影响; 此外,

指数施肥在苗木生长后期供肥量较大时是否会对菌根有制约作用,也还需要后续试验来进一步探讨。

3.2 不同施肥处理对幼苗生长的影响

苗高、地径、生物量是评价苗木质量好坏的重要指标。刘欢等^[24]报道了指数施肥提高1年生杉木苗高、地径; Iverson^[26]认为,苗木生物量越大,竞争能力越强,其在困难立地条件下的存活率越高,而适量的施肥可以提高植物幼苗N、P养分含量,从而影响幼苗生物量积累。通过双因素方差分析发现,施肥处理和接菌处理对苗木苗高、地径、生物量的影响均达显著水平($P<0.05$),而二者交互作用仅对幼苗苗高、生物量影响显著($P<0.05$),与指数施肥能促进美国山核桃幼苗^[27]、紫椴幼苗^[25]、油松容器苗^[28]苗木生长的报道相类似。随着施肥量的增加,苗高、地径、生物量等指标不增反降(表4),施肥结束后,在接菌处理下,指数施肥处理幼苗苗高、地径、生物量均大于二倍指数施肥,同时,二者又都大于常规施肥,其中,JEF处理幼苗各指标均达最大,这表明指数施肥和接菌处理的交互作用更能促进幼苗生长。接菌苗和不接菌苗苗木质量指数的大小均为EF>DEF>CF,原因为幼苗在生长初期根系还未发育完全,常规施肥处理供给幼苗的养分不能被充分利用,甚至会在一定程度上制约幼苗根系的生长,这既造成养分的浪费,也影响幼苗苗高、地径、生物量。幼苗生长至速生期时,常规施肥处理不能供给幼苗足够的养分,进而制约幼苗的生长。指数施肥由于符合苗木生长规律,在幼苗生长初期,养分供给较少,却已基本满足了幼苗的养分需求,此时养分充足的幼苗不需要将更多的光合产物分配到根系,而是用于地上部分的生长,而幼苗地上部分越健壮则对光合作用越有利,继而提高生物量积累。且较少的肥量在一定程度上可以诱导根系的生长,从而增加地下部分生物量,同时,也避免养分的浪费。在本试验中,幼苗根、叶对指数施肥和接菌处理更敏感也与此规律符合。Hodge^[29]的研究也表明,少量氮肥对早期根系发育至关重要,它能更有效地促进根系的生长,从而获取更多的养分。随着生长幼苗对养分的需求逐渐递增,指数施肥提供的肥量也随之增大,满足了幼苗生长所需的养分,从而加速幼苗生长。指数施肥按照指数递增的方式供给苗木养分,符合苗木在各个生长阶段的需肥规律,并诱导苗木奢侈耗养,与常规施肥相比更有利于苗木

生长。

3.3 不同施肥处理对幼苗N、P养分积累的影响

祝燕等^[30]认为苗木施肥能显著提高幼苗各器官的氮积累量。朱小楼等^[31]研究表明氮素指数施肥有利于落羽杉幼苗养分的积累。在本试验中,接菌或不接菌处理幼苗总N、P养分积累量均为EF>DEF>CF,表明指数施肥好于常规施肥,但也要适量,不能设置过大的浓度。Salifu等^[32]研究发现,当幼苗养分供不应求或充足时,苗木养分积累量随氮素的增加而增加;当氮素供给超过苗木的最佳需求时,养分积累量不会继续增加,甚至会下降。在本试验中JDEF与DEF处理幼苗N、P养分积累量分别小于JEF与EF处理,可能是因为DEF处理提供的肥量超过了幼苗的最佳需求,以致对幼苗产生了轻微毒害,但还未过于制约幼苗生长,但同时也明显看出造成了养分浪费。这也与王益明等^[33]、王晓等^[34]研究相似。此外,与刘欢等^[24]研究发现杉木无性系幼苗根中氮所占比例为对照>常规施肥>指数施肥的结果不同。本试验中,不接菌CF处理地下部分N分配比例大于EF处理,而接菌处理则与此相反,为JEF>JCF。幼苗地下部分P分配规律与N相同,这一方面表明常规施肥在幼苗生长后期养分供应量不能满足其生长需求,幼苗将养分由地上部分转移至地下部分,从而促进根系生长进而获得更多养分;另一方面表明菌根真菌与幼苗根系形成菌根后,提高了养分吸收效率,而指数施肥与常规施肥相比更符合幼苗的生长规律,因此,接种菌根真菌与指数施肥二者的交互作用对幼苗产生了更积极的影响。

4 结论

幼苗形成菌根后增强了养分的吸收;与常规施肥相比指数施肥更能促进幼苗生长;另外,接菌与施肥处理二者交互作用均显著提高幼苗的生长和生物体内更多N、P养分积累。

接菌与不接菌处理下,二倍指数施肥处理对幼苗各指标的促进作用低于指数施肥,为了避免造成肥料的浪费,建议在樟子松菌根化育苗过程中采用指数施肥更为合理。

参考文献:

- [1] 杜为研,唐杉,汪洪.我国有机肥资源及产业发展现状[J].中国土壤与肥料,2020(3):210-219.

- [2] 亢亚超. 氮磷钾配比施肥对观光木幼苗生长生理及光合特性的影响 [D]. 南宁: 广西大学, 2020.
- [3] Ingestad T, Lund A B. Theory and techniques for steady state mineral nutrition and growth of plants [J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1986, 1 (1-4): 439-453.
- [4] Timmer V R. Exponential nutrient loading: a new fertilization technique to improve seedling performance on competitive sites [J]. *New Forests*, 1997, 13 (1): 279-299.
- [5] Oliet J A, Planelles R, Artero F, et al. Field performance of *Pinus halepensis* planted in Mediterranean arid conditions: relative influence of seeding morphology and mineral nutrition [J]. *New Forests*, 2009, 37 (3): 313-331.
- [6] 魏红旭, 徐程扬, 马履一, 等. 苗木指数施肥技术研究进展 [J]. *林业科学*, 2010, 46 (7): 140-146.
- [7] Ingestad T. New concepts in soil fertility and plant nutrition as illustrated by research on forest trees and stands [J]. *Geoderma*, 1987, 40 (3-4): 237-252.
- [8] Pokharel P, Chang S X. Exponential fertilization promotes seedling growth by increasing nitrogen retranslocation in trembling aspen planted for oil sands reclamation [J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 372: 35-43.
- [9] 王冉, 何茜, 丁晓纲, 等. N素指数施肥对沉香苗期光合生理特性的影响 [J]. *北京林业大学学报*, 2011, 33 (6): 58-64.
- [10] 王力朋, 李吉跃, 王军辉, 等. 指数施肥对楸树无性系幼苗生长和氮素吸收利用效率的影响 [J]. *北京林业大学学报*, 2012, 34 (6): 55-62.
- [11] 王力朋, 晏紫伊, 李吉跃, 等. 氮素指数施肥对3个楸树无性系光合特性的影响 [J]. *林业科学研究*, 2013, 26 (1): 46-51.
- [12] 李国雷, 祝燕, 蒋乐, 等. 指数施肥对栓皮栎容器苗生长和氮积累的影响 [J]. *东北林业大学学报*, 2012, 40 (11): 6-9.
- [13] 林平, 邹尚庆, 李国雷, 等. 油松容器苗生长和氮吸收对指数施肥的响应 [J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2013, 37 (3): 23-28.
- [14] 丁钊冉, 郝龙飞, 张静娴, 等. 指数施肥对白桦容器苗生物量及形态特征的影响 [J]. *东北林业大学学报*, 2013, 41 (10): 31-34.
- [15] 刘文科. 菌根 [J]. *植物杂志*, 2003 (4): 36-37.
- [16] 白淑兰. 菌根研究及内蒙古大青山外生菌根资源 [M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 2011.
- [17] 赵志鹏, 郭秀珍. 外生菌根真菌纯培养的生态学研究 [J]. *林业科学研究*, 1989, 2 (2): 136-141.
- [18] 李玉萍, 王蕤, 周银莲. 树木菌根真菌美味红菇内源激素的提取及鉴定 [J]. *菌物学报*, 1988, 7 (4): 239-244.
- [19] 白淑兰. 内蒙古大青山外生菌根真菌分布与筛选的研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [20] 赵敏. 红花尔基樟子松林下外生菌根真菌资源调查及优良菌树组合的筛选 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- [21] 祁金玉, 尹大川, 宋瑞清. 褐环乳牛肝菌 (*Suillus luteus*) 对樟子松耐盐性的影响 [J]. *沈阳农业大学学报*, 2019, 50 (1): 108-113.
- [22] 桑钰, 高文礼, 再努尔·吐尔逊, 等. 干旱胁迫下 AMF 对多枝桧柳幼苗和疏叶骆驼刺根系生长和氮素吸收分配的影响 [J]. *干旱区研究*, 2021, 38 (1): 247-256.
- [23] 贾磊, 铁英, 周梅, 等. 菌根生物制剂对樟子松苗木生长和根际土壤养分的影响 [J]. *内蒙古农业大学学报 (自然科学版)*, 2018, 39 (4): 29-33.
- [24] 刘欢, 王超琦, 吴家森, 等. 氮素指数施肥对1年生杉木苗生长及氮素积累的影响 [J]. *浙江农林大学学报*, 2017, 34 (3): 459-464.
- [25] 杨阳, 施皓然, 及利, 等. 指数施肥对紫椴实生苗生长和根系形态的影响 [J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2020, 44 (2): 91-97.
- [26] Iverson R D. Planting-stock selection: meeting biological needs and operational realities [J]. *Forestry Nursery Manual: Production of Bareroot Seedlings*, 1984, 11: 261-266.
- [27] 王益明, 万福绪, 胡菲, 等. 指数施肥对美国山核桃苗期生长动态的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2018, 46 (12): 110-113.
- [28] 邹尚庆. 两种施肥方式对油松容器苗苗木质量的影响 [D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [29] Hodge A. The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients [J]. *New Phytologist*, 2004, 162 (1): 9-24.
- [30] 祝燕, 刘勇, 李国雷, 等. 氮素营养对长白落叶松移植苗生长及养分状况的影响 [J]. *林业科学*, 2011, 47 (9): 168-172.
- [31] 朱小楼, 曹嵘, 朱旻华, 等. 氮素指数施肥对落羽杉苗木生长及养分积累的影响 [J]. *浙江林业科技*, 2018, 38 (6): 59-64.
- [32] Salifu K F, Timmer V R. Nitrogen retranslocation response of young *Picea mariana* to nitrogen-15 supply [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67: 309-318.
- [33] 王益明, 卢艺, 张慧, 等. 指数施肥对美国山核桃幼苗生长及叶片养分含量的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2018 (6): 136-140.
- [34] 王晓, 王樱琳, 韦小丽, 等. 不同指数施氮量对闽楠幼苗生长生理及养分积累的影响 [J]. *浙江农林大学学报*, 2020, 37 (3): 514-521.

Responses of *Pinus sylvestris* seedlings to inoculation with ectomycorrhizal fungi and exponential fertilization

WANG Jia-yue¹, HAO Long-fei¹, BAI Shu-lan^{1*}, BAO Hui-ga² (1. Forestry College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot Inner Mongolia 010019; 2. Wuhai City Wetland Administration, Wuhai Inner Mongolia 016000)

Abstract: In order to explore the effects of inoculation and fertilization on the growth of seedlings, the 2-year-old *Pinus sylvestris* seedlings were studied under different inoculation treatments and fertilization regimes to provide a theoretical basis for precise fertilization of *P. sylvestris* seedlings. The 8 kinds of ectomycorrhizal fungi were mixed inoculated in the process of seedling transplanting, and no inoculation seedlings was used as the control. Treatments including exponential fertilization (EF), double exponential fertilization (DEF), conventional fertilization (CF), inoculation+exponential fertilization (JEF), inoculation+double exponential fertilization (JDEF), inoculation+conventional fertilization (JCF) were set up. To prevent the migration of fungi and the interplay of fertilization, the treatments are separated by PVC partitions. The results showed that the seedling growth index, nutrient accumulation (N, P) and mycorrhizal infection rate of exponential fertilization were significantly higher than those of CF treatment, with the largest for seedlings indexes under JEF treatment. The height, ground diameter and biomass of seedlings under JEF treatment were 1.30, 1.42 and 1.34 times that of the mycorrhizal seedlings under JCF treatment, and 1.44, 1.55 and 2.01 times that of the non-mycorrhizal seedlings under CF treatment. Compared with JCF treatment, N accumulation increased by 32.7%. Compared with CF treatment by 96.4%, P accumulation increased by 48.6% compared with JCF treatment, and increased by 100.7% compared with CF treatment. Thus, the combinations of inoculation and exponential fertilization treatment were more beneficial to cultivate high-quality *P. sylvestris* seedlings.

Key words: exponential fertilization; *Pinus sylvestris*; ectomycorrhizal fungi; growth response; nutrient