

施肥方式及接种菌根真菌对 1 年生油松苗木根系构型的影响

郝龙飞,李星月,武晓倩,刘婷岩*,王续富

(内蒙古农业大学 林学院,内蒙古 呼和浩特 010019)

摘 要:为探究施肥方式和接种外生菌根真菌处理对油松苗木根系构型的影响,在大田条件下,以 1 年生油松菌根苗(混合接菌,HJ)和非菌根苗(未接菌,WJ)为研究对象,设置 4 种施肥处理:不施肥(CK)、常规施肥(CF)、指数施肥(EF)、2 倍指数施肥(DEF),对比分析苗木根系的形态(总根长、总表面积、总体积、根尖数)、根系功能(比根长、比表面积、根组织密度)及生物量等指标。结果表明:1)接种菌根真菌处理显著影响 1 年生油松苗木菌根侵染率;各施肥处理下,菌根侵染率均为 HJ 高于 WJ 处理。2)施肥处理显著影响苗木直径 0~0.5 mm 根系的形态指标;2 种接菌处理下,EF 处理的总根长、总表面积、总体积、根尖数均最高。3)各施肥处理下,油松苗木比根长、比表面积均为 HJ 低于 WJ 处理,而根组织密度及根系总生物量为 HJ 高于 WJ 处理。接种菌根真菌处理下,苗木根系生物量变化规律均为 EF>DEF>CF>CK。综上所述,指数施肥结合接种菌根真菌处理有利于促进油松苗木根系形态构建。

关键词:油松;指数施肥;外生菌根真菌;根系构型

中图分类号:S723.1 文献标志码:A 文章编号:1001-7461(2021)03-0168-07

Responses of the Root System Architecture of One-Year-Old *Pinus tabulaeformis* Seedlings to Fertilization and Ectomycorrhizal Fungus Inoculation

HAO Long-fei, LI Xing-yue, WU Xiao-qian, LIU Ting-yan*, WANG Xu-fu

(College of Forestry, Inner Mongolia Agriculture University, Hohhot 010019, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to investigate the responses of the root morphology of one-year-old *Pinus tabulaeformis* seedlings to fertilization and inoculation treatments, the indicators of root morphology (including total root length, surface area, volume and tips) and function (including specific root length, specific root surface area and root biomass density) and root biomass were measured under field condition. Different inoculated seedlings of *P. tabulaeformis* were selected, including no inoculation (WJ) and inoculated with 8 ectomycorrhizal fungi (HJ) treatments. Four fertilization treatments were set, including no fertilization (CK), conventional fertilization (CF), exponential fertilization (EF) and double exponential fertilization (DEF). The results indicated that 1) the mycorrhizal colonization rate of the seedlings were significantly affected by inoculation treatments. Among different treatments, the rate of mycorrhizal colonization in HJ treatment was higher than that in WJ treatment. 2) The morphology of roots with diameter of 0—0.5 mm was significantly affected by fertilization treatment. The total root length, surface area, volume and number and root tips of EF treatment were the highest among different the inoculation treatments. 3) The specific root length and specific root surface area of *P. tabulaeformis* seedlings in WJ treatment were higher than those of HJ treatment, and the change rules of root biomass and root biomass density were opposite under the

收稿日期:2020-03-29 修回日期:2020-12-29

基金项目:内蒙古自治区科技计划项目(2020GG0075;2020GG0029);中国博士后科学基金项目(2018M643778XB);内蒙古自治区大学生创新创业训练计划项目(20171012917);内蒙古农业大学林学院青年教师科研基金项目。

作者简介:郝龙飞,博士。研究方向:菌根生物技术及养分循环。E-mail:haolongfei_00@126.com

*通信作者:刘婷岩,博士。研究方向:菌根生物技术。E-mail:lty20052103@163.com

fertilization treatment. The root biomass of the seedlings under different inoculation treatments was in the order of EF>DEF>CF>CK. It was concluded that the root system architecture of *P. tabuliformis* seedlings could be promoted effectively by exponential fertilization combined with the inoculation of ectomycorrhizal fungi.

Key words: *Pinus tabuliformis*; exponential fertilization; ectomycorrhizal fungi; root architecture

植物根系形态决定着植物吸收养分的速率,是衡量植物生产力的重要指标^[1]。以往研究发现,细根形态既影响苗木养分吸收、运输,同时对根际养分活化也有显著作用^[2-3]。菌根是植物与真菌长期进化中形成的互利共生体。菌根共生体可扩大植物养分吸收范围,提高植物养分吸收效率,在油松(*Pinus tabuliformis*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、落叶松(*Larix gmelinii*)、桃叶杜鹃(*Rhododendron annae*)等树种对外界逆境的抵抗能力及养分吸收方面作用明显^[4-7]。油松为典型的菌根依赖型树种,其苗木在生长初期对养分需求量较大,而该阶段苗木根系不发达,通常导致根系养分吸收量无法满足苗木生长需求。研究中采用接种菌根真菌处理,可改善油松根系形态,提高根系养分吸收功能,拓宽植株获取营养的渠道^[8]。同时,菌根共生体形成后,植物根系为菌丝的生长提供碳水化合物,进而延长被菌根真菌侵染的细根寿命^[7]。

苗木生长期各阶段对营养元素的需求存在差异,基于 Timmer(1996)稳态养分理论,施肥量按照指数形式添加,可最大程度满足各阶段苗木养分需求^[9-10]。研究表明,在一定范围内,增加 N 供应,可促进植物光合效率,增加根系光合产物的分配量,进而根系分枝数增加、总根长增长、根系表面积及体积增大,从而拓宽根系吸收范围,提高苗木养分和水分的吸收效率^[11]。根系直径加粗可促进苗木地上部分光合产物的积累,增强苗木对胁迫环境的抵抗能力^[11]。研究发现,土壤 N 有效性提高导致树木细根直径增加,比根长下降,延长根系吸收功能的维持时间^[12]。目前,指数施肥技术在国内外林业上已取得一些研究成果,已在斑叶稠李(*Padus maackii*)、油松、白桦(*Betula platyphylla*)和紫椴(*Tilia amurensis*)等树种开展了相关研究^[13-16],以往研究大多以容器苗为主,关于裸根苗的研究报道尚少^[17]。由于受容器限制,容器苗根系生长会受到抑制或影响,从而导致观测数据与实际情况存在差异^[9]。

关于指数施肥技术与菌根技术作为单一因素对苗木根系形态的影响已开展了一些研究^[5-7,13-16],但是缺乏关于指数施肥和菌根技术互作效应对苗木根系形态影响的研究。油松作为北方主要造林树种之一^[18],培育其优良苗木具有重要的实践意义。因

此,本研究探讨大田条件下不同施肥方式结合接种菌根真菌处理对 1 年生油松苗木根系构型的影响,以期为油松高质量裸根苗培育提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究地点位于内蒙古自治区呼和浩特市赛罕区内蒙古农业大学实验苗圃(40°48'50"N;111°43'16"E)海拔 1 033.1 m,典型的蒙古高原大陆性气候,年平均降水量为 335.2~534.6 mm,≥10℃的活动积温 2 500℃,年平均日照时数 1 600 h,无霜期 85~150 d^[19],苗床土壤为潮土,pH 7.6,其中碱解 N、有效 P 及速效 K 含量分别为 3.01、0.28、45.91 mg·kg⁻¹。

1.2 试验材料

所用菌根真菌为:褐环粘盖牛肝菌(*Suillus luteus*)、厚环粘盖牛肝菌(*S. grevillei*)、黄褐口蘑(*Tricholoma fulvum*)、浅灰小牛肝菌(*Boletinus grisellus*)、粘盖牛肝菌(*S. bovinus*)、球根白丝膜菌(*Leucocortinarius bulbiger*)、浅黄根须腹菌(*Rhizopogon luteolus*)、彩色豆马勃(*Pisolithus tinctorius*)。

油松种子采集于赤峰市红山区。在大田环境中,采用高低床合并的整地方式,苗床规格为 8 m×2.5 m,苗床中间留一条 20 cm 宽、20 cm 深的排水沟。种子消毒浸种后播种,播种方式为条播,播幅 6~8 cm,条中心距离为 30 cm 左右,每亩播种量为 15 kg,播种覆土厚度为种子短径的 2~3 倍,覆土后进行镇压,使种子与土壤充分接触。在出苗 4 周后间苗,选取长势相近且健康状况良好的植株进行定苗,保留 480 株·m⁻² 幼苗用于试验研究。

1.3 研究方法

1.3.1 试验区划分 试验采用完全随机区组设计,2 种接种处理和 4 种施肥处理组成 8 种组合处理,3 次重复。苗床分成 1 m×0.5 m 的小区,共划分 24 个小区,每个小区之间设置 1 m 隔离带。每个小区保留 2 行平行苗床方向的苗木,每行 120 株。

1.3.2 接种菌根真菌处理 菌剂采用 MMN 液体培养基扩繁,高温高压灭菌 1 h,待冷却后分别接种上述 8 种菌根真菌的平板菌种,将不同菌种液体菌

剂放置摇床 (Thermo scietific, MAXQ400; 25℃, 150 r · min⁻¹) 震荡 9 d。制备的 8 种菌剂均匀混合,各菌种的菌丝浓度为 0.85 g · L⁻¹。于 2019 年 5 月 7 日接菌,接菌量为 400 mL · m⁻²,距油松苗的根部 5 cm 处开沟,将液体菌液均匀倒入浅沟内,待菌液渗入土中再用土覆盖。

1.3.3 施肥处理

1.3.3.1 施肥设计 当接种菌根真菌处理的幼苗根系菌根侵染率>30.0%后,开展施肥试验:包括不施肥(CK)、常规施肥(CF)、指数施肥(EF)和 2 倍指数施肥 (DEF) 处理。肥料选用易吸收的尿素 (CON₂H₄)和磷酸二氢钾 (KH₂PO₄),在保证 P、K 供应的前提下,探究苗木对 N 肥吸收情况。施肥间隔周期为 10 d,共施肥 8 次。施肥时在苗木行间开深约 5 cm 的浅沟,将每个小区的肥料溶于 400 mL 水中,均匀施入沟内,施肥后覆土踏实,以减少苗木根部土壤水分散失和肥料挥发。

表 1 不同施肥处理 1 年生油松苗木施肥量

Table 1 Application levels of N,P and K to *Pinus tabuliformis* seedlings (mg · 株⁻¹)

施肥次数	氮施肥量(CON ₂ H ₄)				磷施肥量 (KH ₂ PO ₄)
	不处理(CK)	常规处理(CF)	指数处理(EF)	2 倍指数处理(DEF)	
1	0.00	1.41	0.36	0.72	0.46
2	0.00	1.41	0.42	0.84	0.46
3	0.00	1.41	0.85	1.70	0.46
4	0.00	1.41	1.00	2.00	0.46
5	0.00	1.41	1.53	3.06	0.46
6	0.00	1.41	1.79	3.58	0.46
7	0.00	1.41	2.46	4.91	0.46
8	0.00	1.41	2.88	5.76	0.46

1.3.4 指标测定 试验结束时(最后施肥试验结束 15 d 后),从 24 块试验小区内分别随机选取长势较一致的油松苗 5 株,用去离子水清洗根系附着杂物后进行根系形态结构的测定。用 Epson 数字化扫描仪 Expression10000XL 进行根系形态扫描,并用 Win RHIZO 根系图像分析软件对各处理根系形态结构进行定量分析,测定根系总根长、总表面积、总体积和根尖等形态指标,同时将苗木根系烘干至质量恒定,测定其生物量。

采用统计计算法测定外生菌根侵染率。在生长季结束后,各处理随机选取苗木,将根系洗净后剪成 1 cm 长的根段,将 50 个根段放入盛有少量去离子水的培养皿(*d* = 90 cm)中为 1 次重复,重复 3 次,在体式显微镜下观察菌根侵染率。

1.4 数据处理

根系各指标计算公式如下:
比根长/(cm · g⁻¹) = 根系总长度/根系生物量 (3)

1.3.3.2 施肥量确定 试验采用指数施肥模型来计算相应施肥量^[13],计算公式如下:

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

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

式中,*r* 为养分相对添加率;*N_S*、*N_T* 表示苗木在指数施肥处理初期和生长结束时养分含量;*N_t* 表示第 *t* 次施肥时施肥量;*N_(t-1)* 表示包含第 (*t* - 1) 次施肥的养分施入总量;*t* 为苗木生长期中指数施肥次数。

- 1)CK 处理,不施肥;
- 2)CF 处理,单次施肥量相等, *N_t* = *N_T* / *t*;
- 3)EF 处理,采用 EF 模型确定每次的施肥量;
- 4)DEF 处理,每次施肥量均为 EF 处理施肥量的 2 倍。

通过预试验获得苗木 *N* 添加速率 *r* = 0.16,磷 (P) 添加速率 *r* = 0.13。KH₂PO₄ 的施肥量根据苗木需求量设定,以保证 P、K 肥供应充足。各施肥处理的施肥量见表 1。

比根表面积/(cm² · g⁻¹) = 根系总表面积/根系生物量 (4)

根组织密度/(g · cm⁻³) = 根系生物量/根系总体积 (5)

菌根侵染率/% = (被侵染的根段数/总根段数) × 100 (6)

利用 SPSS 23.0 (SPSS for windows, chicago, USA),采用双因素方差分析和 LSD 多重比较法对施肥处理和接种菌根真菌处理的苗木根系形态进行显著性分析。采用 Sigmaplot10.0 (systat software Inc., san jose, CA, USA) 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 对油松苗木根系形态指标的影响

对 1 年生油松苗木根系形态进行施肥和接种菌根真菌处理双因素方差分析,施肥处理对苗木直径 0~0.5 mm 根系的总根长、总表面积、总体积、根尖数的影响均达到显著水平 (*P* < 0.05),而接种菌根

真菌处理及二者交互作用对苗木根系的形态指标无显著影响($P>0.05$)(表2)。2种接种菌根真菌处理下,EF处理的油松苗木直径0~0.5 mm根系的总根长、总表面积、总体积、根尖数均达到最大。在WJ处理下,EF处理的苗木根系总根长、总表面积、

总体积均显著高于CK、CF、DEF处理($P<0.05$);而HJ处理下,EF处理的总根长、总表面积与其他施肥处理间差异均不显著;EF处理较CK苗木的根系总体积和根尖数分别增加了57.1%($P<0.05$)和62.3%($P<0.05$)。

表2 对油松苗木0~0.5 mm直径根系形态指标的影响

Table 2 The morphology of roots with diameter of 0—0.5 mm of *P. tabuliiformis* seedlings under different fertilization and inoculation treatments

处理		总根长/cm	总表面积/cm ²	总体积/cm ³	根尖数
WJ	CK	73.65±10.09bc	7.85±1.07b	0.07±0.01d	327±33abc
	CF	61.53±9.49c	8.26±0.98b	0.07±0.00cd	290±33bcd
	EF	112.89±14.45a	12.31±1.50a	0.13±0.01a	398±38a
	DEF	74.74±4.89bc	8.47±0.58b	0.08±0.00cd	278±20bcd
HJ	CK	81.16±7.98abc	8.54±0.84b	0.07±0.01cd	220±33d
	CF	94.86±6.52abc	9.90±0.67ab	0.10±0.00bc	352±29ab
	EF	103.60±10.38ab	11.01±1.10ab	0.11±0.01ab	357±28ab
	DEF	91.92±14.70abc	10.02±1.26ab	0.09±0.01bcd	235±33cd
接种菌根真菌处理		0.105 ^{NS}	0.383 ^{NS}	0.314 ^{NS}	0.149 ^{NS}
施肥处理		0.017 [*]	0.015 [*]	0.000 ^{**}	0.002 ^{**}
菌根菌处理×施肥处理		0.236 ^{NS}	0.468 ^{NS}	0.081 ^{NS}	0.077 ^{NS}

注:WJ—未接菌;HJ—接种菌根真菌;CK—不施肥;CF—常规施肥;EF—指数施肥;DEF—2倍指数施肥。同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$);*表示差异显著性,*: $P<0.05$,**: $P<0.01$,NS:不显著。下同。

2.2 对苗木菌根侵染率的影响

对1年生油松苗木菌根侵染率进行施肥和接种菌根真菌处理双因素方差分析,接种菌根真菌处理显著影响苗木根系侵染率($P<0.05$);而施肥及二者交互作用对苗木菌根侵染率均无显著影响($P>0.05$)(表3)。各施肥处理下,1年生油松苗木菌根侵染率均为HJ高于WJ处理。2种接菌处理下,施肥处理对苗木菌根侵染率无显著影响($P>0.05$)(图1)。

真菌处理均显著影响苗木各根系指标($P<0.05$);施肥处理仅对苗木根生物量有显著影响($P<0.05$),而二者交互作用对苗木根系各指标均无显著影响($P>0.05$)(表3)。各施肥处理下,1年生油松苗木比根长、比表面积均为WJ高于HJ处理,而根组织密度及根系生物量则为HJ高于WJ处理(图2)。WJ处理下,CF、EF、DEF处理苗木比根长较CK分别降低了27.0%($P<0.05$)、15.1%($P>0.05$)、16.9%($P>0.05$);而HJ处理下,各施肥处理间苗木比根长无显著差异。WJ处理下,各施肥处理间苗木根组织密度无显著差异;而HJ处理下,EF处理苗木根组织密度较CK降低了23.3%($P<0.05$)。除EF处理外,其他施肥处理的苗木根组织密度均为HJ显著高于WJ处理($P<0.05$)。WJ处理下,EF处理苗木根生物量较CK增加了66.7%($P<0.05$);而HJ处理下,施肥对苗木根生物量无显著影响(图2)。

3 结论与讨论

3.1 对油松苗木根系形态指标的影响

菌根真菌和土壤有效养分的相互作用对植物根系的生理生态过程产生重要的影响^[8]。根系形态是衡量植物生产力的重要因素,在维持根系的功能中起重要作用;总根长、总根表面积、总体积等形态指标及根系生物量对根系水分和养分的吸收能力有重要作用^[20]。接种菌根真菌处理下,EF处理的油松

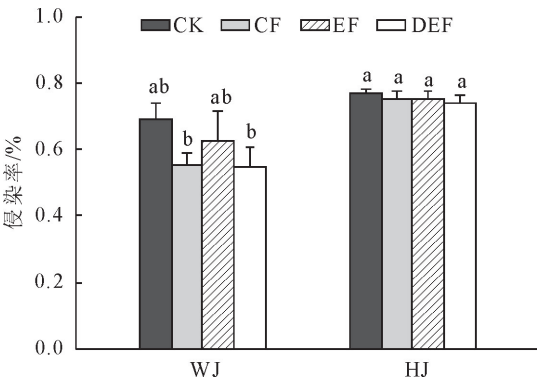


图1 施肥和接种菌根真菌处理对油松苗木菌根侵染率的影响

Fig. 1 The root mycorrhizal colonization of *P. tabuliiformis* seedlings under different fertilization and inoculation treatments

2.3 对油松苗木的比根长、根组织密度、比根表面积和根系生物量的影响

对1年生油松苗木比根长、根组织密度、比根表面积和根系生物量进行双因素方差分析,接种菌根

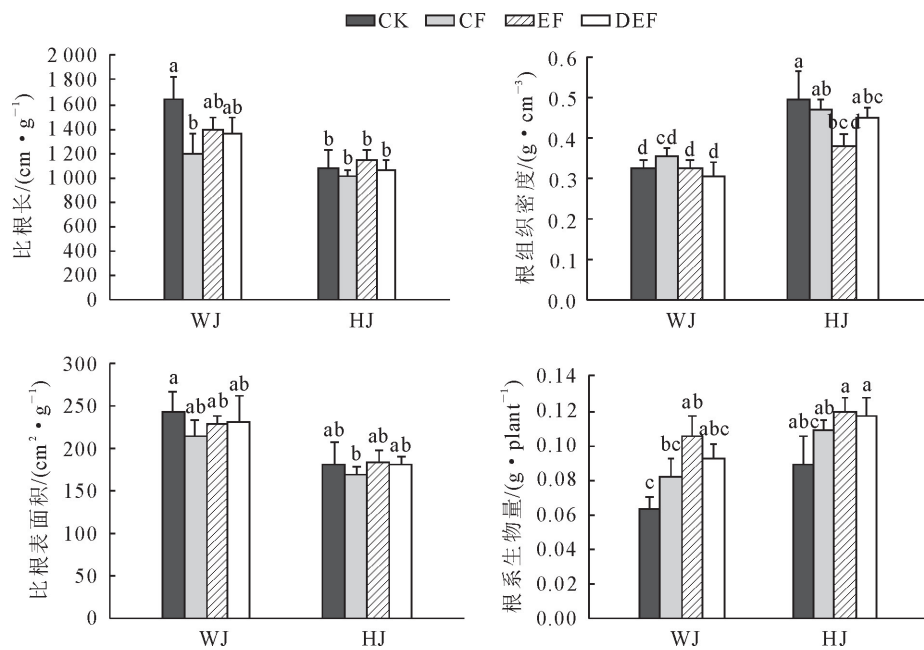


图2 施肥和接种菌根真菌处理对1年生油松苗比根长、根组织密度、比根表面积、根生物量的影响

Fig.2 The specific root length,root biomass density,specific root surface area and root biomass of *P. tabulaeformis* seedlings under different fertilization and inoculation treatments

表3 施肥和接种菌根真菌处理下油松苗木根系功能指标的显著性分析

Table 3 The significance analysis of function indicators of *P. tabulaeformis* seedlings under different fertilization and inoculation treatments

处理	侵染率/%	比根长 /(cm·g ⁻¹)	根组织密度 /(g·cm ⁻³)	比根表面积 /(cm ² ·g ⁻¹)	根系生物量 /(g·plant ⁻¹)
菌根菌处理	0.000**	0.001**	0.000**	0.001**	0.003**
施肥处理	0.234 ^{NS}	0.215 ^{NS}	0.278 ^{NS}	0.775 ^{NS}	0.006**
菌根菌处理×施肥处理	0.526 ^{NS}	0.457 ^{NS}	0.367 ^{NS}	0.975 ^{NS}	0.903 ^{NS}

苗木直径0~0.5 mm 根系的总根长、总表面积、总体积和根尖数均达到最大,表明 EF 施肥处理可以促进吸收根的形态构建,与王益明等^[21]对美国山核桃指数施肥的研究结果一致。研究发现,接种菌根真菌后,在各施肥处理下油松苗木根系仍保持较高的菌根侵染率(图 1)。同时,WJ 处理下,EF 处理的油松苗木根系总根长、总表面积、总体积和根尖数均显著高于 CF 处理;而 HJ 处理下,各根系指标在 EF 与 CF 处理间差异均不显著,表明接种菌根真菌可以弱化施肥处理对油松苗木根系形态的影响。其原因可能为,在苗木生长初期常规施肥处理较高的氮输入降低了苗木菌根侵染率,同时也限制幼苗根系发育,进而影响了根系在土壤中的分布^[22]。同时,常规施肥处理的苗木由于生长初期施氮过多也导致根系摄取额外的氮素边际收益小于根系边际成本,导致苗木未形成发达根系^[23];苗木生长速生期,常规施肥处理的氮施肥量不能满足苗木需求,进而限制了苗木光合产物积累^[13]。指数施肥处理符合苗木生长规律,在生长初期合理的氮素供应对菌根侵染率和根系形态的影响较小,也保证了苗木的养分

需求^[24],该结果也符合植物成本-效益生存策略^[25]。

3.2 对根系功能指标的影响

根系组织密度、比根长和比根表面积是衡量根系功能的重要指标,在反映根系功能方面可能比根系生物量更具有生物学意义。本研究中,接种菌根真菌处理可提高苗木的根组织密度,降低比根长和比根表面积(图 2),与以往研究中,林木根组织密度与比根长和比根表面积呈负相关关系结果一致^[26]。可能是因为接种菌根真菌后,菌根真菌的菌丝为植物提供养分,植物改变了原有的碳分配策略,增加了根系生物量^[27],且根系形成菌根结构后,使吸收根变短变粗^[18],降低了比根长和比根表面积。以上结果也可能因为 HJ 处理下,施肥对苗木菌根侵染率的影响程度高于 WJ 处理(图 1),油松根系形成菌根共生体后,在维持苗木对外界环境变化中有明显优势^[28]。进一步分析不同施肥处理对苗木根系功能指标的影响发现,EF 较 CF 处理优化了苗木根系比根长和比根表面积等,表明指数施肥处理在一定程度上改善了苗木根系的吸收功能。因为,指数施肥符合苗木生长过程中对养分的需求,苗木根系功

能指标优于常规施肥^[13,29-30]。因此,指数施肥对油松苗木根系形态构建有明显优势;指数施肥及接种菌根真菌处理在一定程度上改善了苗木根系功能,进而提高苗木对养分的吸收能力。

参考文献:

[1] LEUSCHNER C, HERTEL D, SCHMID I, *et al.* Stand fine root biomass and fine root morphology in old-growth beech forests as a function of precipitation and soil fertility[J]. *Plant and Soil*, 2004, 258(1): 43-56.

[2] PREGITZER K S, DEFORES J L, BURTON A J, *et al.* Fine root architecture of nine north American trees[J]. *Ecological Monographs*, 2002, 72(2): 293-309.

[3] 何茜, 丁晓纲, 王冉, 等. 指数施肥下黑木相思根系特征值的动态变化[J]. *广东林业科技*, 2011, 27(5): 1-6.

[4] 苗原, 吴会芳, 马承恩, 等. 菌根真菌与吸收根功能性状的关系: 研究进展与评述[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(11): 1035-1042. MIAO Y, WU H F, MA C E, *et al.* Relationship between mycorrhizal fungi and functional traits in absorption roots: research progress and synthesis[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(11): 1035-1042. (in Chinese)

[5] 王秀丽, 柳昱旻, 高润梅. 外生菌根真菌对干旱条件下油松幼苗生长的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17(2): 70-76. WANG X L, LIU Y M, GAO R M. Effects of ectomycorrhizal fungi on the growth of *Pinus tabulaeformis* seedlings under drought stress[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(2): 70-76. (in Chinese)

[6] 孙玥. 菌根和施肥对水曲柳和落叶松人工林一级细根形态的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2007.

[7] 陈荣建, 欧静, 王丽娟, 等. 桃叶杜鹃菌根苗对干旱胁迫的生理响应[J]. *湖南农业大学学报: 自然科学版*, 2017, 43(6): 635-639.

[8] 祁金玉, 邓继峰, 尹大川, 等. 外生菌根菌对油松幼苗抗氧化酶活性及根系构型的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(8): 2826-2832. QI J Y, DENG J F, YIN D C, *et al.* Effects of inoculation of exogenous mycorrhizal fungi on the antioxidant and root configuration enzyme activity of *Pinus tabulaeformis* seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(8): 2826-2832. (in Chinese)

[9] TIMMER V R. Exponential nutrient loading: a new fertilization technique to improve seedling performance on competitive sites[J]. *New Forest*, 1996, 13(4): 275-295.

[10] 丁晓纲, 刘喻娟, 张应中, 等. 不同氮素浓度指数施肥对银桦、蓝花楹幼苗生长及其根系和叶片的影响[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(19): 39-45. DING X G, LIU Y J, ZHANG Y Z, *et al.* Effects of different n concentration exponential fertilization on the growth, root and blade of *Grevillea robusta* and *Jacarand mimosifolia* [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*. 2013, 29(19): 39-45. (in Chinese)

[11] 王冉, 李吉跃, 张方秋, 等. 不同施肥方法对马来沉香和土沉香苗期根系生长的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(1): 98-106.

[12] 王文娜. 施氮肥对六个温带树种细根解剖结构、形态、养分和

菌根侵染特征的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.

[13] 郝龙飞, 王庆成, 刘婷岩, 等. 指数施肥对斑叶稠李苗木生物量分配、光合作用及根系形态的影响[J]. *林业科学*, 2014, 50(11): 175-181. HAO L F, WANG Q C, LIU T Y, *et al.* Effect of exponential fertilization on biomass allocation, photosynthesis and root morphology of *Padus maackii* seedlings[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(11): 175-181. (in Chinese)

[14] 汪力, 郭素娟, 刘正民. 基于指数施肥法的一年生油松菌根化容器苗的供 N 研究[J]. *生物学杂志*, 2013, 30(5): 27-32. WANG L, GUO S J, LIU Z M. The reasonable N supply for 1a *Pinus tabulaeformis* container seedlings with the mycorrhizal in response to different exponential regimes[J]. *Journal of Biology*, 2013, 30(5): 27-32. (in Chinese)

[15] 李雯, 张程, 王庆成, 等. 指数施肥对白桦裸根苗生长动态、生物量分配及光合作用的影响[J]. *植物研究*, 2015, 35(3): 391-396, 405. LI W, ZHANG C, WANG Q C, *et al.* Effect of exponential fertilization on growth dynamic, biomass allocation and photosynthesis of *Betula platyphylla* bare-rooted seedlings[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2015, 35(3): 391-396, 405. (in Chinese)

[16] 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. YANG Y, SHI H R, JI L, *et al.* Effects of exponential fertilization on growth and root morphology of *Tilia amurensis* seedlings[J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2020, 44(2): 91-97. (in Chinese)

[17] 张程, 郝龙飞, 刘婷岩, 等. 指数施肥对白桦裸根苗养分动态的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2019, 47(10): 24-29. ZHANG C, HAO L F, LIU T Y, *et al.* Effect of exponential fertilization on nutrient dynamic of *Betula platyphylla* bare-rooted seedlings[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2019, 47(10): 24-29. (in Chinese)

[18] 邵东华, 杨喜平, 张晓东, 等. 浅黄根须腹菌侵染油松形成外生菌根[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(1): 78-81. SHAO D H, YANG X P, ZHANG X D, *et al.* Ectomycorrhiza formation on *Pinus tabulaeformis* through *Rhizopogon luteolus* infection[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(1): 78-81. (in Chinese)

[19] 李璐. 呼和浩特玉米种植的气候条件分析[J]. *农民致富之友*, 2018(18): 247.

[20] 高成杰, 崔凯, 张春华, 等. 干旱胁迫对不同种源云南松幼苗生物量与根系形态的影响[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(3): 9-16. GAO C J, CUI K, ZHANG C H, *et al.* Effects of drought stress on biomass and root morphology of *Pinus yunnanensis* seedlings from different provenances[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(3): 9-16. (in Chinese)

[21] 王益明, 万福绪, 胡菲, 等. 指数施肥对美国山核桃幼苗根系形态的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2018, 46(3): 29-32. WANG Y M, WAN F X, HU F, *et al.* Effects of exponential fertilization on root morphology of pecan seedlings[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2018, 46(3): 29-32. (in

Chinese)

[22] WANG G L, FAHEY T J, XUE S, *et al.* Root morphology and architecture respond to N addition in *Pinus tabulaeformis*, west China[J]. *Oecologia*, 2013, 171(2): 583-590.

[23] 刘瑞雪, 吴泓瑾, 黄国柱, 等. 氮添加对树木根系特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(5): 1735-1742.

LIU R X, WU H J, HUANG G Z, *et al.* Effects of nitrogen addition on tree root traits[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(5): 1735-1742. (in Chinese)

[24] HODGE A. The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients[J]. *New Phytologist*, 2004, 162(1): 9-24.

[25] 陈冠陶, 郑军, 彭天驰, 等. 扁刺栲不同根序细根形态和化学特征及其对短期氮添加的响应[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(11): 3461-3468.

[26] 梅莉, 王政权, 韩有志, 等. 水曲柳根系生物量、比根长和根长密度的分布格局[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(1): 1-4.

[27] 陈伟立, 李娟, 朱红惠, 等. 根际微生物调控植物根系构型研究进展[J]. *生态学报*, 2016, 36(17): 5285-5297.

[28] 蔚晓燕, 李静, 唐明. 施氮与接种外生菌根真菌对油松幼苗生物量和光合特性的影响[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2013, 41(10): 42-48, 58.

WEI X Y, LI J, TANG M. Effects of nitrogen application and inoculating ectomycorrhizal fungi on biomass and photosynthetic characteristics of *Pinus tabulaeformis* seedlings[J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2013, 41(10): 42-48, 58. (in Chinese)

[29] 王燕, 晏紫依, 苏艳, 等. 不同施肥方法对欧洲云杉生长生理和根系形态的影响[J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(6): 15-21.

WANG Y, YAN Z Y, SUN Y, *et al.* Effects of different fertilizing methods on growth, physiological characteristics and root morphological traits of *Picea abies*[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2015, 30(6): 15-21. (in Chinese)

[30] 祁鲁玉, 吴峰, 吴瑞雪, 等. 遮阴和不同形态氮素施肥对红松幼苗生长的影响[J]. *森林工程*, 2019, 35(4): 1-5.

QI L Y, WU F, WU R X, *et al.* Effects of shading and different forms of nitrogen fertilization on the growth of *Pinus koraiensis* seedlings[J]. *Forest Engineering*, 2019, 35(4): 1-5. (in Chinese)

(上接第 143 页)

[7] 张筠筠, 王竞, 孙权, 等. 化肥减施对贺兰山东麓土壤肥力及酿酒葡萄品质的影响[J]. *西南农业学报*, 2019, 32(7): 1601-1606.

ZHANG J J, WANG J, SUN Q, *et al.* Grape quality in east piedmont area of Helan Mountain, Ningxia, effect of chemical fertilizer reduction on soil fertility and wine[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32(7): 1601-1606. (in Chinese)

[8] 韩科峰, 陈余平, 胡铁军, 等. 硅钙钾镁肥对浙江省酸性水稻土壤的改良效果[J]. *浙江农业学报*, 2018, 30(1): 117-122.

HAN K F, CHEN Y P, HU T J, *et al.* Effects of silicon, calcium, potassium and magnesium fertilizer on acid paddy soil improvement in Zhejiang Province[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2018, 30(1): 117-122. (in Chinese)

[9] 郭洁, 张晓娟, 孙权, 等. BGA 土壤调理剂在贺兰山东麓酿酒葡萄上的应用效果[J]. *北方园艺*, 2012(23): 178-181.

GUO J, ZHANG X J, SUN Q, *et al.* Application effect BGA soil conditioner on wine grape in eastern foot of Helan Mountain[J]. *Northern Horticulture*, 2012(23): 178-181. (in Chinese)

[10] 秦旭, 张柏松. 土壤调理剂在葡萄上应用效果初探[J]. *北方园艺*, 2014(15): 179-182.

QIN X, ZHANG B S. Study on the application of soil conditioner in grape[J]. *Northern Horticulture*, 2014(15): 179-182. (in Chinese)

[11] 张玉凤, 林海涛, 王江涛, 等. 盐碱土壤调理剂对玉米生长及土壤的改良效果[J]. *中国土壤与肥料*, 2017(1): 134-138.

ZHANG Y F, LIN H T, WANG J T, *et al.* Effects of saline-alkaline soil conditioner on growth of maize and improvement of soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(1): 134-138. (in Chinese)

[12] 杨珍. 陕西省葡萄主产区土壤养分状况分析[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2016.

[13] 王厚臣, 史作安, 梁美霞, 等. 果园土壤健康状态与苹果健康栽培[J]. *落叶果树*, 2019, 51(2): 63-64.

[14] 尹万伟, 黄本波, 汪凤玲, 等. 土壤调理剂的研究现状与进展[J]. *磷肥与复肥*, 2019, 34(2): 19-23.

YIN W W, HUANG B B, WANG F L, *et al.* Research status and progress of soil conditioner[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2019, 34(2): 19-23. (in Chinese)

[15] 张宗勤, 李满良, 唐爱东, 等. 葡萄健康栽培及实用技术[J], 中外葡萄与葡萄酒, 2018(4): 90-94.

ZHANG Z Q, LI M L, TANG A D, *et al.* Discussion of practical technology and healthy cultivation of grapevine[J]. *Sino-overseas Grapevine & Wine*, 2018(4): 90-94. (in Chinese)