

不同施肥方法对欧洲云杉生长生理和根系形态的影响

王 燕¹, 晏紫依², 苏 艳¹, 何 茜¹, 李吉跃^{1*}, 王军辉³, 王力朋¹

(1. 华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642; 2. 九江市建设规划局 庐山区规划分局, 江西 九江 332005;
3. 中国林业科学研究院 林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘 要:为研究不同施肥方法对欧洲云杉(*Picea abies*)无性系生长生理特性和根系形态的影响。2012年3—8月,在甘肃省天水市小陇山林业科学研究所,以2年生欧洲云杉无性系 pab08ts0263 组培苗为试材,通过盆栽试验对不同施肥方法下植株根系生长发育各项指标进行测定分析。结果表明,不同施肥方法(等量施肥、指数施肥和反指数施肥)均有效促进欧洲云杉无性系生长、生物量分配、叶绿素含量、光合特性和根系特征值,但不同施肥方法下其效应有所差异。指数施肥剂量对欧洲云杉根系生长发育的促进效果最明显($p<0.05$),其处理植株根系形态指标均是对照的1.7倍以上(1.73~3.83倍),而根系生物量、根冠比、叶绿素含量、净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率和气孔导度也显著高于对照;此外,根、茎、叶的含N量分别是对照的1.29倍、1.60倍和1.46倍。可见,3种施肥方法均能有效促进欧洲云杉无性系的生长,其中指数施肥的效果最佳。

关键词:施肥方法;欧洲云杉;生长;生理;根系形态

中图分类号:S791.18 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2015)06-0015-07

Effects of Different Fertilizing Methods on Growth, Physiological Characteristics and Root Morphological Traits of *Picea abies*

WANG Yan¹, YAN Zi-yi², SU Yan¹, HE Qian¹, LI Ji-yue^{1*}, WANG Jun-hui³, WANG Li-peng¹

(1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China;
2. Planning Branch Bureau of Lushan District, Construction and Planning Bureau of Jiujiang City 332005, China;
3. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: In order to study the responses of different fertilizing methods on the growth, physiological characteristics and root morphological traits of *Picea abies* clone, we conducted the experiment in Xiaolongshan Forestry Science and Technology Research Institute, from March to August of 2012. A set of growth and development traits of two-year *P. abies* roots(clone pab08ts0263) were evaluated in pots under different fertilization methods. The obtained results indicated that different fertilization methods (the same amount of fertilizer/D, index fertilization/Z and anti index fertilization/F) all had positive effects on the growth and development of the growth, biomass allocation, chlorophyll content, photosynthetic characters and root characteristic values, while the degrees of the effects were different. The positive effect of index fertilization appeared to be the most impressive, a significant change of roots morphology over 1.7 times(1.73—3.83 fold) to the control, and the biomass of roots, root to shoot ratio, chlorophyll content, net photosynthetic rate, water use efficiency and stomatal conductance were higher than those of the control at a significant level; moreover, the nitrogen content of roots, stems, leaves were 1.29, 1.60 and 1.46 times to

收稿日期:2015-01-06 修回日期:2015-04-05

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划课题(2012BAD01B01)。

作者简介:王 燕,女,硕士,研究方向:风景园林学。E-mail:372738878@qq.com。

* 通信作者:李吉跃,男,教授,博士生导师,研究方向:森林培育。E-mail:ljiyymy@vip.sina.com

the control. Three fertilization methods all had a positive effect on the growth of *P. abies* clone and the index fertilization was the best.

Key words:fertilizing method; *Picea abies*; growth; physiology; root morphology

欧洲云杉(*Picea abies*)自然分布于欧洲中部和北部,对气温和土壤的适应范围广,20 世纪 80 年代由中国林科院引种到中国试种,是目前我国从国外引进的云杉中表现最好的树种^[1-2],表现出较强的适应性,比我国乡土的粗枝云杉(*Picea asperata*)生长迅速,也是中国引种较为成功的优良针叶树种之一^[3-5]。国内对于欧洲云杉的研究工作主要在引种、扦插育苗繁殖、无性系嫁接繁育、补光育苗和种群研究等方面^[6-8],取得了许多进展^[9-10],为欧洲云杉无性系利用奠定了基础。

施肥作为苗木培育的关键技术之一,在调控苗木生长过程和品质方面发挥着重要的作用^[11]。在苗木培育过程中,不同施肥方法通常会产生不同的肥效^[12]。指数施肥以其适应幼苗生长和需肥规律,避免养分毒害和促进稳定积累等优点,逐渐成为国外苗木培育的首选施肥技术^[13]。氮(N)元素作为植物代谢的参与者,直接对苗木的光合作用和水分利用效率产生影响。同时,在一定范围内,苗木的叶绿素含量与净光合强度、叶片含氮量和苗木的生长量呈正相关关系,能一定程度上反映苗木的 N 素营养状况^[14]。施肥可以促进苗木苗高地径的生长,增加叶面积,促进叶片的光合速率和提高水分利用效率^[15]。施 N 能够促进根系分枝数的增加和总根长增长^[15],从而提高养分和水分的吸收效率,促进苗木生长。

目前,在指数施肥研究方面,已经对马尾松(*Pinus massoniana*)、长白落叶松(*Larix olgensis*)、西南桦(*Betula alnoides*)、台湾相思(*Acacia confusa*)、黑木相思(*Acacia melanoxylon*)、马来沉香(*Aquilaria malaccensis*)、土沉香(*Aquilaria sinensis*)、楸树(*Catalpa bungei*)^[12,16-19]等幼苗进行指数施肥研究,均发现该施肥方法能够有效促进苗木根系生物量的积累,提高苗木的营养吸收效率。本研究以欧洲云杉优良无性系 pab08ts0263 为试材,将指数施肥与等量施肥和反指数施肥进行对比,测定

并分析 3 种施肥方法对欧洲云杉幼苗的生长生理指标和根系形态特征的影响规律,进一步验证指数施肥的优势,为该树种苗木的施肥实践提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于甘肃省天水市小陇山林业科学研究所的温室大棚(34°28'N、105°54'E),海拔 1 160 m。属温带半湿润季风气候,年均降水量约 600~800 mm,年均蒸发量约 1 290 mm,年均气温 10.7℃,无霜期 190 d。

1.2 试验材料

材料由国家林木种质资源平台—云杉种质资源保存库提供,2012 年 3 月初选取生长情况相对一致的 2 年生欧洲云杉 pab08ts0263 组培苗 40 株,每处理 10 株。采用 30 cm×30 cm 的花盆进行盆栽,每盆栽植 1 株。基质为森林土和泥炭(体积比为 6:4,pH 7.43±0.04,有机质(109.99±0.79)g·kg⁻¹,全氮(4.25±0.25)g·kg⁻¹,全磷(1.54±0.07)g·kg⁻¹,全钾(20.05±0.27)g·kg⁻¹,碱解氮(729.91±36.54)mg·kg⁻¹,有效磷(202.98±11.50)mg·kg⁻¹,速效钾(354.70±9.35)mg·kg⁻¹,容重(0.85±0.08)g·cm⁻³,毛管持水量(738.69±133.79)g·kg⁻¹,总孔隙度 68.09%±2.85%。盆栽后立即灌水充足,根据天气和土壤状况对苗木进行正常浇水管理,待苗木生长至 5 月上旬进行施肥试验。

1.3 研究方法

1.3.1 施肥方法 5 月上旬,将过磷酸钙 10 g·株⁻¹、硫酸钾 5 g·株⁻¹,均作底肥在第 1 次施肥时一次性施入。尿素(10 g)按照 3 种施肥方法(等量施肥/D、指数施肥/Z 和反指数施肥/F)施入(表 1),并设置不施尿素处理作为对照。开始施肥后每天 20:00~24:00 进行补光处理直到试验结束。

表 1 欧洲云杉无性系不同施肥方法的氮素施用量

Table 1 Nitrogen fertilizer of different fertilization methods of *P. abies* clone

处理	1 周	2 周	3 周	4 周	5 周	6 周	7 周	8 周	9 周	10 周	总量
CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D		2		2		2		2		2	10
Z	0.121	0.174	0.25	0.358	0.513	0.736	1.055	1.513	2.169	3.111	10
F	3.111	2.169	1.513	1.055	0.736	0.513	0.358	0.25	0.174	0.121	10

注:CK、D、Z、F 分别代表对照、等量施肥、指数施肥和反指数施肥,下同。

1.3.2 指标测定 1)基质的测定:施肥前用布袋取 3 份基质样品,进行化学元素的测定。施肥结束后,每个无性系选择 4 盆,对盆栽土壤用环刀、铝盒取样,进行土壤物理化学性质测定^[20]。

2)生长指标的测定:施肥前以及施肥后第 10 周、15 周各测量 1 次苗高和地径。

3)叶绿素含量的测定:施肥后第 10 周、15 周测定 1 次。测定时每种处理选择 3 株苗,分别取其朝南向的中上部位健康、成熟的 1 个枝条进行离体测定。采用丙酮-乙醇法^[20]测定叶片叶绿素含量。

4)生物量和根系形态的测定:于第 0 周、第 10 周、第 15 周,对根系进行扫描、分级。根、茎、叶分别置于烘箱内,85℃ 烘干至恒重后,用电子天平(±0.01 g)称重测定根、茎、叶的生物量。根系部分用万深 LA-S 植物根系分析系统扫描后,再用 WinRHIZO 软件测得整株根系的根长、根平均直径、根表面积和根体积。

5)瞬时光合的测定:于第 0 周(施肥前)、第 10 周、第 15 周选择典型晴天用 Li-6400 便携式光合作用分析系统(美国)进行瞬时光合指标的测定。测定参数主要有净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度等,每种欧洲云杉每个处理选择 3 株。

试验数据表示为平均值±标准误差,用 Excel 2007 和 SPSS13.0 对试验数据进行统计分析,并用

Duncan 检验法进行多重比较。

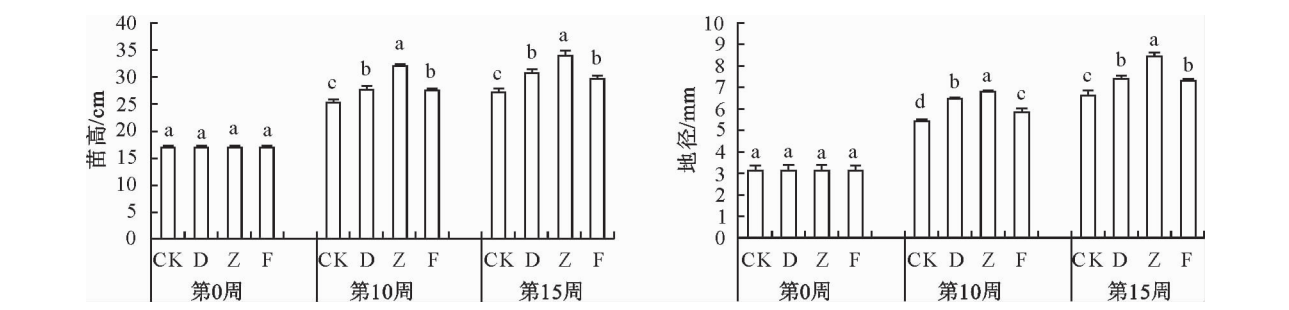
2 结果与分析

2.1 不同施肥方法对生长的影响

欧洲云杉无性系 pab08ts0263 第 10 周各处理的苗高均遵循指数施肥>等量施肥>反指数施肥>CK,指数施肥的苗高为 32.00 cm,是 CK 的 1.26 倍;第 15 周的变化趋势也与第 10 周一致,指数施肥的苗高是 34.00 cm,是 CK 的 1.25 倍。多重比较发现:第 10 周、第 15 周都是等量施肥和反指数施肥间无显著差异,而其他处理间差异显著。第 10 周各处理的地径均为指数施肥>等量施肥>反指数施肥>CK,指数施肥的地径是 6.81 mm,是 CK 的 1.25 倍;第 15 周各处理的地径的变化趋势均与第 10 周一致指数施肥的地径为 8.47 mm,为 CK 的 1.28 倍。第 10 周各处理的地径均差异显著,第 15 周除了等量施肥和反指数施肥间无显著差异外,其他处理间均有差异显著(图 1)。说明指数施肥对欧洲云杉的苗高和地径的增长起到了显著的促进作用。

2.2 不同施肥方法对生物量分配的影响

欧洲云杉无性系 pab08ts0263 在第 10 周的根生物量、茎生物量、叶生物量均遵循指数施肥>等量施肥>反指数施肥>CK,指数施肥的根、茎、叶生物量分别为 2.27 g、4.75 g、4.04 g,分别是 CK 的



注:图中不同小写字母表示差异显著($p<0.05$),下同。

图 1 不同施肥方法对欧洲云杉无性系苗高和地径的影响

Fig. 1 Effects of different fertilization methods on height and diameter of *P. abies* clone

表 2 不同施肥方法对欧洲云杉无性系生物量分配的影响

Table 2 Effects of different fertilization methods on biomass allocation of *P. abies* clone

时间	处理	根	茎	叶	根冠比
第 0 周	CK、D、Z、F	0.78±0.04e	0.81±0.05f	0.76±0.04e	0.50±0.05a
第 10 周	CK	1.32±0.03de	1.83±0.06e	1.95±0.18d	0.35±0.02bc
	D	1.81±0.04cd	2.94±0.20d	2.97±0.17c	0.31±0.02bc
	Z	2.27±0.20bc	4.75±0.25b	4.04±0.23b	0.26±0.02c
	F	1.45±0.04de	2.19±0.10de	2.54±0.11cd	0.31±0.01bc
第 15 周	CK	1.81±0.12cd	2.46±0.10de	2.54±0.11cd	0.36±0.02bc
	D	2.56±0.07b	4.45±0.21bc	3.85±0.05b	0.31±0.02bc
	Z	4.25±0.62a	5.72±0.36a	4.80±0.16a	0.41±0.07ab
	F	2.87±0.09b	3.94±0.50c	4.15±0.58ab	0.37±0.06bc

注:不同小写字母表示不同时间和不同处理间差异显著($p<0.05$),下表同。

1.72、2.60、2.07 倍。第 10 周的根冠比的变化范围为 0.26~0.35,其中 CK 的根冠比最大。第 15 周的根生物量、茎生物量和叶生物量整体上为指数施肥>等量施肥、反指数施肥>CK,均值分别为 4.25 g、5.72 g、4.80 g,分别是 CK 的 2.35、2.33、1.89 倍。根冠比的变化范围为 0.31~0.41,其中指数施肥的根冠比最大。同一时期不同处理的根生物量、茎生物量、叶生物量和根冠比都差异显著(表 2)。

2.3 不同施肥方法对叶绿素含量的影响

欧洲云杉无性系 pab08ts0263 的叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量和总叶绿素含量在第 10 周、第 15 周均遵循指数施肥>等量施肥、反指数施肥>CK。欧洲云杉无性系在第 10 周指数施肥下的叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量和总叶绿素含量分别是 0.104、0.029 mg·g⁻¹与 0.133 mg·g⁻¹,分别比 CK 提高了 173.68%、222.22%、182.98%。在第 15 周指数施肥处理下,其叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量和总叶绿素含量分别是 0.121、0.038 mg·g⁻¹与 0.158 mg·g⁻¹,分别比 CK 提高了 77.94%、100.00%、81.61%。除第 10 周、第 15 周等量施肥的叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、总叶绿素含量和反指数施肥无显著差异外,其他处理间都分别差异显著(图 2)。

2.4 不同施肥方法对瞬时光合特性的影响

欧洲云杉无性系 pab08ts0263 除在第 10 周时的水分利用效率为指数施肥>等量施肥>CK>反指数施肥,在第 10 周和 15 周时的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度均遵循指数施肥>等量施肥>反指数施肥>CK。第 10 周指数施肥的净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率和气孔导度分别为 4.52 μmol·m⁻²·s⁻¹、1.59 mmol·m⁻²·s⁻¹、2.84 μmol·mmol⁻¹、0.06 μmol·m⁻²·s⁻¹,分别是 CK 的 9.22、7.57、1.17、6.00 倍。第 15 周指数施肥的净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率和气孔导度分别为 9.51 μmol·m⁻²·s⁻¹、1.52 mmol·m⁻²·s⁻¹、7.19 μmol·mmol⁻¹、0.10 μmol·m⁻²·s⁻¹,分别是 CK 的 2.25、2.14、1.20、3.33 倍。同一时期不同施肥处理下的净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率和气孔导度有差异显著(图 3)。

2.5 不同施肥方法对根系特征值的影响

欧洲云杉无性系 pab08ts0263 在第 10 周的根长、根表面积、根体积和根平均直径整体上遵循指数施肥>等量施肥>反指数施肥、CK,指数施肥的根长、根表面积、根体积和根平均直径分别为 1 051 cm、290 cm²、11.00 cm³、1.64 mm,分别是 CK 的 1.95、1.96、1.83、1.73 倍。第 15 周的根长、根表面积、根体积和根平均直径均遵循指数施肥>等量施

肥>反指数施肥>CK,均值分别为 1 400 cm、398 cm²、17.00 cm³、3.33 mm,分别是 CK 的 2.65、2.99、3.40、3.83 倍。同一时期指数施肥的根长、根表面积、根体积和根平均直径都同其他处理差异显著(表 3)。

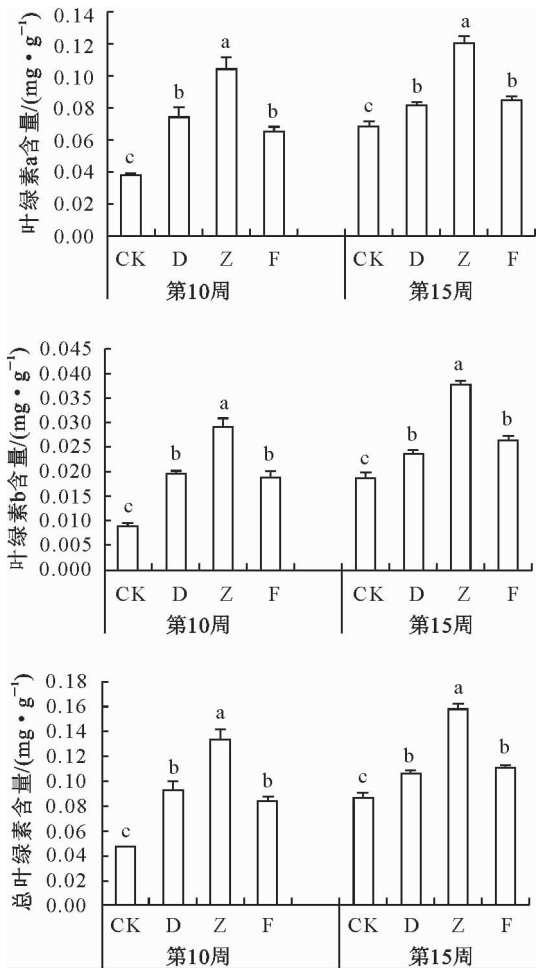


图 2 不同施肥方法对欧洲云杉无性系叶绿素含量的影响
Fig. 2 Effects of different fertilization methods on chlorophyll content of *P. abies* clone

3 结论与讨论

叶绿素是反映光合作用强弱的重要指标^[21]。施肥可以促进苗高地径的生长和生理代谢,增加苗木生物量,提高合格苗总产量,是培育优质苗木的关键技术之一^[22]。本试验中,在第 15 周生长季结束的时候,3 种不同施肥方式下的欧洲云杉苗木苗高和地径与 CK 相比均有显著提高,说明各施肥处理均能够促进苗木生长。而指数施肥处理下的苗木最高,地径最大,表明指数施肥对苗木的苗高和地径的促进作用最为明显。施肥能提高根茎叶的 N 含量^[23],适量增加 N 素供应,能够促进植物根茎叶的生长^[24]。本试验中,在欧洲云杉苗木生长结束时(施肥第 15 周),不同处理苗木根茎叶生物量整体上

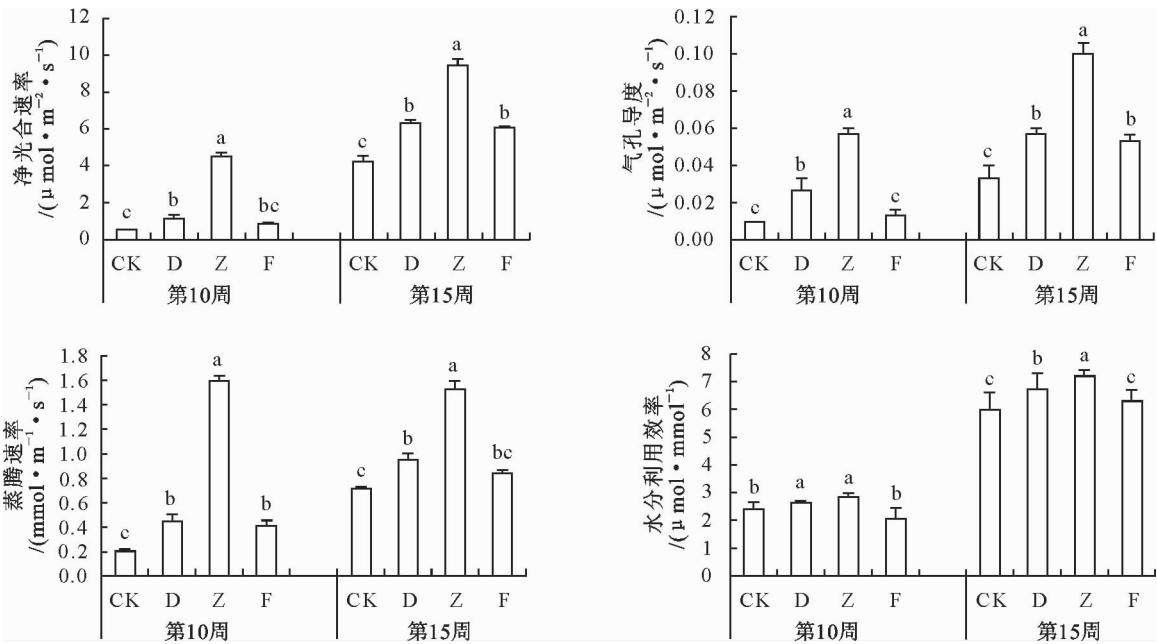


图 3 不同施肥方法对欧洲云杉无性系瞬时光合参数的影响

Fig. 3 Effects of different fertilization methods on photosynthetic parameters of *P. abies* clone

表 3 不同施肥方法对欧洲云杉无性系根系特征值的影响

Table 3 Effects of different fertilization methods on root Characteristics of *P. abies* clone

时间	处理	根长/cm	根表面积/(cm2)	根体积/(cm3)	根平均直径/mm
第 0 周	CK、D、Z、F	358±15a	94±12a	3.33±0.67a	0.86±0.10a
第 10 周	CK	539±92c	148±42b	6.00±2.52b	0.95±0.16b
	D	839±87b	222±20ab	8.00±0.58b	1.00±0.04b
	Z	1 051±102a	290±35a	11.00±2.00a	1.64±0.67a
	F	479±53c	144±19b	6.00±0.58b	1.05±0.10b
第 15 周	CK	528±26c	133±4c	5.00±0.00c	0.87±0.01b
	D	778±68b	198±26b	8.33±2.33c	1.26±0.35b
	Z	1 400±96a	398±29a	17.00±2.31a	3.33±0.26a
	F	724±29b	182±17b	6.67±1.45c	1.23±0.33b

遵循指数施肥>等量施肥、反指数施肥>CK。说明在指数施肥方式能够提高苗木的根茎叶生物量积累,这与 V,Malik^[23]等的研究认为指数施肥技术可以显著增加苗木生物量相一致。不同施肥处理下的 N 素肥料的施入量会明显影响苗木生物量的积累^[24],同时,在苗木的各生长阶段,其对养分的需求也不同^[25],指数施肥是根据苗木的需肥规律进行施肥,不仅可以显著提高苗木生物量的积累,同时更有利于苗木各方面的生长。

王力朋^[26]等的研究表明,施 N 能够提高植物的气孔导度,进而提高净光合速率和蒸腾速率,从而增强其光合能力,本研究中也发现类似结论,欧洲云杉在指数施肥下,第 15 周苗木生长结束时的净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率和气孔导度分别达到了 CK 的 2.25、2.14、1.20 倍与 3.33 倍。同时,叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量和总叶绿素含量比 CK 提

高了 77.94%、100.00%与 81.61%。指数施肥处理下的欧洲云杉苗木光合作用与水分利用效率都显著高于等量施肥和反指数施肥,说明指数施肥能有效促进欧洲云杉苗木叶片光合速率,提高叶片蒸腾速率,增大叶片气孔导度,增强苗木的光合作用,且随着施肥量的增加,水分利用效率也会相应提高。根系形态对于土壤养分变化反应敏感,施肥能促进根系分枝数增加及总根长增长^[15,27]。本研究中,欧洲云杉苗木在指数施肥处理下,其根表面积、根体积和根平均直径都显著高于其他 3 种处理,说明指数施肥能够有效提高欧洲云杉的根长、增加根表面积、根体积和根直径,从而提高养分和水分的吸收效率,促进苗木生长。

综合分析,指数施肥方法更能有效提高欧洲云杉苗木的生物量积累,促进根长、根表面积、根平均直径与根体积的生长,提高光合作用和水分利用效

率。相对于传统施肥,指数施肥更能满足植物不同生长时期所需要的养分,更有利于培育健康完整的根系^[28]。由于指数施肥可以实现包括稳态奢侈消耗在内的养分积累,避免由于大量养分施入而造成的养分毒害^[29],进而有效提高苗木体内养分含量以增加自身竞争水平,进而适应造林地的立地条件^[23]。因此,在今后进行欧洲云杉育苗时,优选指数施肥方法。

参考文献:

[1] 董健,于世河,陆爱君,等. 云杉引种及优良种一种源选择的研究[J]. 辽宁林业科技, 2007(5):1-3.

[2] 安三平,王丽芳,王美琴,等. 欧洲云杉无性系苗期选育[J]. 东北林业大学学报, 2012, 39(12):16-19.

AN S P, WANG L F, WANG M Q, *et al.* Selection and breeding of butting clones of *Picea abies* during seedling stage [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2012, 39(12): 16-19. (in Chinese)

[3] 祁万宜,应中华,王军辉,等. 几种针叶树种引种试验研究[J]. 河南农业大学学报, 2006, 40(1):38-44.

QI W Y, YING Z H, WANG J H, *et al.* A study on introduction of good instrustry conifers [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2006, 40(1):38-44. (in Chinese)

[4] 赵秋玲,杨海裕,负慧玲,等. 小陇山林区欧洲云杉引种试验初报[J]. 甘肃农业科技, 2006(5):17-19.

[5] 胡勤鸿,欧阳芳群,贾子瑞,等. 欧洲云杉扦插生根影响因子研究与生根力优良单株选择[J]. 林业科学, 2014, 50(2):42-49.

HU M L, OU Y Q F, JIA Z R, *et al.* Factors affecting rooting of *Picea abies* shoot cuttings and individual selection with high rooting ability [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(2): 42-49. (in Chinese)

[6] 董健,黄国学,吴月亮,等. 欧洲云杉嫩枝扦插育苗技术[J]. 东北林业大学学报, 2001, 29(4):57-59.

DONG J, HUANG G X, WU Y L, *et al.* Vegetative propagation technique of norway spruce by softwood cuttage [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2001, 29(4): 57-59. (in Chinese)

[7] 马建伟,安三平,王丽芳,等. 不同生长调节剂对欧洲云杉插穗生根的影响[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(6):80-84.

MA J W, AN S P, WANG L F, *et al.* Effect of different growth regulators on cutting and rooting abilities of *Picea abies* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(6): 80-84. (in Chinese)

[8] 王军辉,张建国,张守攻,等. 川西云杉硬枝扦插生根特性的研究[J]. 浙江林学院学报, 2006,23(3):351-356

WANG J H, ZHANG J G, ZHANG S G, *et al.* Rooting ability of hardwood cutting of *Picea balfouriana* [J]. Journal of Zhejiang Forestry Collage, , 2006,23(3) :351-356. (in Chinese)

[9] 欧阳芳群. 不同云杉种及种源补光育苗技术研究[D]. 北京:北京林业大学, 2008.

OUYANG Q F. Techniques of supplemental light seedling of different species and provenances of *Picea abies* [D]. Beijing Forestry University, 2008. (in Chinese)

[10] 王军辉,张守攻,马常耕,等. 云杉强化育苗技术的研究现状和展望[J]. 浙江林学院学报, 2005,22(3):350-354.

WANG J H, ZHANG S G, MA C G, *et al.* Actualities and expectation of techniques for accelerating *Picea* seedling growth [J]. Journal of Zhejiang Forestry Collage, 2005,22 (3):350-354. (in Chinese)

[11] 黄复兴,范川,李晓清,等. 施肥对盆栽香樟幼苗细根生长的影响[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(5):103-108.

HUANG F X, FAN C, LI X Q, *et al.* Effects of fertilization on the fine root growing of *Cinnamomun camphora* seedlings [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28 (5):103-108. (in Chinese)

[12] 魏红旭,徐程扬,马履一,等. 不同指数施肥方法下长白落叶松播种苗的需肥规律[J]. 生态学报, 2010, 30(3):685 - 690.

WEI H X, XU C Y, MA L Y, *et al.* Nutrient upkate of *Larix olgensis* seedlings in response to different exponential regines [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(3):685 -690. (in Chinese)

[13] 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.

WEI H X, XU C Y, MA L Y, *et al.* Advances in study on seedling exponential fertilization regime [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(7):140-146. (in Chinese)

[14] 钟安良. 苗木营养与施肥问题刍议[J]. 湖北林业科技, 1989 (2):12.

[15] KING J S, THOMAS R B, STRAIN B R. Morphology and tissue quality of seedling root systems of *Pinus taeda* and *Pinus ponderosa* as affected by varying CO₂, temperature, and nitrogen[J]. Plant and Soil, 1997, 195(1):107-119.

[16] 滕汉书. 马尾松容器育苗轻型基质筛选及指数施肥研究[D]. 福州:福建农林大学, 2004.

[17] 陈琳,曾杰,徐大平,等. 氮素营养对西南桦幼苗生长及叶片养分状况的影响[J]. 林业科学, 2010, 46(5):35-40.

CHEN L, ZEMG J, XU D P, *et al.* Effects of exponential nitrogen loading on growth and foliar nutrient status of *Betula alnoides* seedlings [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46 (5):35-40. (in Chinese)

[18] 朱存福,李福秀,丁长秀. 不同施肥方法对台湾相思苗木生长的影响[J]. 山东林业科技, 2010, 40(1):28-30.

[19] 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.

WANG R, LI J Y, ZHANG F Q, *et al.* Growing dynamic root system of *Aquilaria malaccensis* and *Aquilaria sinensis* seedlings in response to different fertilizing methods [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011,27(5):1-6. (in Chinese)

[20] 李合生. 植物生理生化实验原理和测定技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2001.

[21] 胡冬南,游美红,袁生贵,等. 不同配方施肥对幼龄油茶的影响 [J]. 西北林学院学报, 2005, 20(1):94-97.

HU D N, YOU M H, YUAN S G, *et al.* The effects on young *Camellia oleifera* of different formula fertilization[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2005, 20(1):94-97. (in Chinese)

[22]

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. ZHU Y, LIU Y, LI G L, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on the growth and nutrient status in *Larix olgensis* seedlings [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(9):168-172. (in Chinese)

[23]

MALIK V, TIMMER V R. Biomass partitioning and nitrogen retranslocation in black spruce seedlings on competitive mixedwood sites: a bioassay study[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1998, 28(2):206-215.

[24]

FARRAR J F, JONES D L. The control of carbon acquisition by roots[J]. New Phytologist, 2000, 147(1):43-53.

[25]

郝龙飞, 王庆成, 张彦东, 等. 指数施肥对山桃稠李播种苗生物量及养分动态的影响[J]. 林业科学, 2012, 48(6):33-39. HAO L F, WANG Q C, ZHANG Y D, *et al.* Effect of exponential fertilization on biomass and nutrient dynamics of *Padus maackii* seedlings [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(6):33-39. (in Chinese)

[26]

王力朋, 晏紫伊, 李吉跃, 等. 指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(23): 7452-7462. WANG L P, YAN Z Y, LI J Y, *et al.* Effects of exponential fertilization on biomass allocation and root morphology of *Catalpa bungei* clones [J]. Acta Econogica Sinica, 2012, 32(23):7452-7462.. (in Chinese)

[27]

WAN R K, AHMAD Z Y. Effects of macronutrient deficiencies on the growth and vigour of *Khaya ivorensis* seedlings [J]. Journal of Tropical Forest Science, 2009, 21(2) :73-80.

[28]

TIMMER V R. Exponential nutrient loading: a new fertilization technique to improve seedling performance on competitive sites[J]. New Forests, 1997, 13(1/3):279-299.

[29]

HODGE A, ROBINSON D, GRIFFITHS B S, *et al.* Why plants bother: root proliferation results in increased nitrogen capture from an organic patch when two grasses compete[J]. Plant, Cell & Environment, 1999, 22(7):811-820.

(上接第 14 页)

[13]

王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 534-543. WANG S Q, ZHOU C H, LI K R, *et al.* Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China[J]. Acta Geographia Sinica, 2000, 55(5): 534-543. (in Chinese)

[14]

吴建国, 张小全, 徐得应. 六盘山林区几种土地利用方式下土壤活性有机碳的比较[J]. 植物生态学报, 2004, 28(5): 657-664 WU J G, ZHOU C H, LI K R, *et al.* Changes in soil labile organic carbon under different land use in the Liupan Mountain forest zone[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2004, 28(5): 657-664. (in Chinese)

[15]

章明奎, 郑顺安, 王丽萍. 利用方式对沙质土壤有机碳、氮和磷的形态及其在不同大小团聚体中分布的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(8): 1703-1711. ZHANG M K, ZHENG S A, WANG L P, Chemical forms and distributions of organic carbon, nitrogen and phosphorus in sandy soil aggregate fractions as affected by land uses [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(8): 1703-1711. (in Chinese)

[16]

刘延惠, 王彦辉, 于澎涛, 等. 六盘山南部华山落叶松人工林土壤有机碳含量[J]. 林业科学, 2012, 48(12): 1-9. LIU Y H, WANG Y H, YU P T, *et al.* Soil organic carbon of *Larix principis-rupprechtii* plantations in the sourthern part of Liupan Mountains [J]. Scientia Silvae Sincae, 2012, 48(12): 1-9. (in Chinese)

[17]

张履勤, 章明奎. 林地与农地转换过程中红壤有机碳、氮和磷库的演变[J]. 浙江林学院学报, 2006, 23(1): 75-79.

[18]

秦瑞杰, 郑粉莉, 卢嘉. 草本植物生长发育对土壤团聚体稳定性影响的试验研究 [J]. 水土保持研究, 2011, 18(3): 141-144.

[19]

文倩, 李培培, 林启美, 等. 半干旱地区不同土地利用方式下土壤团聚体的微生物量属性[J]. 生态学报, 2014, 34(24): 7403-7410. WEN Q, LI P P, LIN Q M, *et al.* Characteristics of microbial biomass attributes in soil dry aggregates form land of different uses in the semi-arid area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(24): 7403-7410. (in Chinese)

[20]

张德刚, 刘艳红, 全舒舟, 等. 云南蒙自石榴园土壤养分及其在根区的分布状况[J]. 安徽农业科学, 2010 (13): 6833-6834.

[21]

陈波, 鲁绍伟, 李少宁, 等. 北京山地 7 种人工纯林土壤养分研究[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2014, 35(4): 46-52. CHEN B, LU S W, LI S N, *et al.* Study on soil nutrient of seven artificial forests in mountain of Beijing [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition, 2014, 35(4): 46-52. (in Chinese)

[22]

郑子成, 何淑勤, 王永东, 等. 不同土地利用方式下土壤团聚体中养分的分布特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 170-174. ZHENG Z C, HE S Q, WANG Y D, *et al.* Distribution feature of soil nutrients in aggregate under different land use [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(3): 170-174. (in Chinese)

[23]

刘中良, 宇万太, 周桦, 等. 长期施肥对土壤团聚体分布和养分含量的影响[J]. 土壤, 2011, 43(5): 720-728.

[24]

肖庆礼, 黄明斌, 邵明安, 等. 黑河中游绿洲不同质地土壤水分的入参与再分布[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 124-131. XIAO Q L, HUANG M B, SHAO M A, *et al.* Infiltration and drainage processes of different textural soil moisture in middle reaches of Heihe River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(2): 124-131. (in Chinese)