

DOI:10.12171/j.1000-1522.20190235

磷肥施用方式对蓝莓苗木生长及养分吸收的影响

王爱斌¹ 张流洋^{1,2} 宋慧芳¹ 张明¹ 苗雅慧¹ 郭雨潇¹ 张凌云¹

(1. 北京林业大学林学院森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 湖北省林业调查规划院, 湖北 武汉 430079)

摘要:【目的】通过研究磷肥施用方式对蓝莓苗木生长及养分吸收的影响, 确定蓝莓苗木培育的最佳施肥方式, 为蓝莓的科学施肥提供理论依据和实践基础。【方法】以两年生蓝莓‘密斯提’苗木为试材, 采用完全随机区组试验设计, 设置一次性施肥(DF)、线性施肥(LF)、平均施肥(AF)和指数施肥(EF)4种施肥方式, 以不施肥(CK)为对照, 测定苗木形态、生理指标和土壤理化性质, 筛选出磷肥最佳的施肥方式。【结果】4种施肥方式均能显著提高蓝莓基生枝条长度、百叶干质量、叶面积、基生枝条数量和冠幅, 同时有利于叶片磷、钾、可溶性糖、可溶性蛋白、总酚和叶绿素含量的积累; 土壤全氮、全钾、铵态氮、硝态氮、速效钾和 pH 值均低于对照, 而全磷、有效磷、有机质和 EC 值均高于对照。指数施肥在促进基生枝条长度、粗度、数量、百叶干质量、叶面积、冠幅、叶片钾和可溶性糖、可溶性蛋白、总酚及叶绿素含量等生理方面和增加土壤有机质、有效磷及降低 pH 值等土壤养分方面均优于其他 3 种施肥方式。线性施肥在促进叶片氮含量积累方面优于指数施肥。主成分分析发现 4 种磷肥施用方式对蓝莓生长及养分吸收影响效果依次是 EF > AF > DF > LF > CK。【结论】4 种施肥方式均能改善土壤环境和促进蓝莓苗木生长, 而指数施肥效果最佳。

关键词: 蓝莓; 磷肥; 主成分分析; 土壤理化性质

中图分类号: S663.9 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2020)02-0114-10

引文格式: 王爱斌, 张流洋, 宋慧芳, 等. 磷肥施用方式对蓝莓苗木生长及养分吸收的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(2): 114-123. Wang Aibin, Zhang Liuyang, Song Huifang, et al. Effects of P fertilization methods on growth and nutrient uptake of *Vaccinium* spp. seedlings [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(2): 114-123.

Effects of P fertilization methods on growth and nutrient uptake of *Vaccinium* spp. seedlings

Wang Aibin¹ Zhang Liuyang^{1,2} Song Huifang¹ Zhang Ming¹
Miao Yahui¹ Guo Yuxiao¹ Zhang Lingyun¹

(1. State Key Laboratory of Forest Cultivation and Protection of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Hubei Provincial Forestry Investigation and Planning Institute, Wuhan 430079, Hubei, China)

Abstract: [Objective] By exploring the effects of phosphate fertilization methods on growth and nutrient uptake of *Vaccinium* spp., this study found out the suitable fertilization method for blueberry seedling cultivation, and provided theoretical and practical basis for scientific fertilization of *Vaccinium* spp. [Method] Two-year-old ‘Misty’ was taken as test object. By means of completely randomized design, we set up four fertilization methods, including single fertilization (DF), linear fertilization (LF), average fertilization (AF) and exponential fertilization (EF), whereas no fertilization provided as control (CK). Employing principal component analysis, the best P fertilization method was comprehensively evaluated on the basis of morphological indexes, physiological indexes of leaves and soil physicochemical properties

收稿日期: 2019-05-28 修回日期: 2019-10-24

基金项目: 北京市自然科学基金项目(6172026)。

第一作者: 王爱斌。主要研究方向: 经济林(果树)培育与利用。Email: wangaibin126@126.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。

责任作者: 张凌云, 教授。主要研究方向: 经济林(蓝莓、枣)栽培生理及林木逆境生理与分子生物学。Email: lyzhang@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

compared with the control. [Result] The results showed that the length growth of basal branches, dry mass of 100 leaves, leaf areas, the number of basal branches and crown width could be enhanced remarkably under all the fertilization methods; the content of P, K, soluble sugar, soluble protein, phenols and chlorophyll in leaves were also increased. The total nitrogen, total potassium, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, available potassium and pH were lower than CK in the soil, whereas the total phosphorus, available phosphorus, organic matters and EC were higher than CK. The effects of exponential fertilization were the most obvious on the length of *Vaccinium* spp. basal branches, diameter of basal branches, dry mass of 100 leaves, leaf areas, number of basal branches, crown width, leaf K content, soluble protein content, phenols content, chlorophyll content of leaves, and available potassium, organic matters and pH in the soil. Straight fertilization was proved to be the best method for N content in the leaves than other treatments. Meanwhile, the leaf phosphorus contents of exponential fertilization and average fertilization were more stable than other treatments. [Conclusion] Altogether, the effects of different P fertilization methods on the growth of *Vaccinium* spp. are as follows: EF > AF > DF > LF > CK. These data indicate that the fertilization treatments can promote the growth of *Vaccinium* spp. and the most effective fertilization method is exponential fertilization.

Key words: *Vaccinium* spp.; P fertilizer; principal component analysis; soil physicochemical property

蓝莓(*Vaccinium* spp.)属于杜鹃花科(Ericaceae)越橘属(*Vaccinum*)植物,灌木类小浆果果树^[1]。果实中含有多种功能活性物质,如花青素、果胶和Vc等,具有极高的保健价值。蓝莓作为我国新兴发展树种^[2],苗木需求量高。合理的施肥是培育优质蓝莓苗木的前提,目前蓝莓苗木培育中,不科学的施肥方式导致肥料利用效率低,如何提高肥料利用效率是蓝莓苗木培育研究的热点之一^[3]。

磷(Phosphorus, P)参与植物体内重要有机化合物合成和生理生化过程,对植物生长发育具有重要作用^[4]。磷元素与作物生长及周边环境均密切相关,土壤中磷元素缺乏或过量时均会影响作物的生长和发育;同时,磷元素过量也会导致环境污染^[5]。前人研究认为,施用磷肥可增强苗木对氮素的吸收^[6]。蓝莓喜酸性,生产中常用硫磺来降低土壤pH值,前人研究发现磷肥能有效促进硫磺有效氧化,加速土壤pH值降低^[7]。因此,磷肥合理施用对培育高质量蓝莓苗木尤为重要。

施肥是苗木促进生长和提高质量的重要手段,不同施肥方式的养分利用效率具有差异,合理的施肥方式是苗木能否及时有效利用肥料和避免肥害的关键^[8]。目前我国经济林苗木培育中主要采用的无机肥施用方式有:一次性施肥、线性施肥和平均施肥等,其中一次性施肥前期养分释放较快后期养分不足,既不能有效的提高苗木质量,又在一定程度上造成了肥料浪费和土壤污染^[9];苗木生长年周期内对养分的需求差异大,采用线性施肥和平均施肥(常规施肥)这两种施肥方式均不能满足苗木的需肥规律^[10]。20世纪80年代Ingestad等^[11]研究认为,指数施肥

能有效地促进植物的生长,形成了“指数养分承载理论”。指数施肥是结合养分的指数供给和苗木指数生长的养分需求,采用相似于相对生长率的养分增加率,设置不同施肥时间和施肥量,诱导植株最大限度利用供给的营养,遵循指数增长方式,适时给予植物适量肥料,进而满足植物不同生长时期的养分需求。该方式可以诱导苗木达到养分奢侈消耗状态,能够有效地增加苗木体内的养分载荷,形成自身养分库,提高苗木移栽早期的生长竞争力,进而能够更好地适应各种立地条件^[12]。与其他施肥方式相比,指数施肥能有效提高肥料利用率和减少环境污染^[13]。近年来,用材林苗木培育中指数施肥应用效果显著^[12-15],而在经济林苗木培育中未见报道。

由于蓝莓具有极高的保健和经济价值,从20世纪初至今已有30多个国家开展了有关蓝莓施肥的研究,但多集中在氮肥施用或肥料配比等领域^[13]。目前蓝莓苗木培育中尚未有关于磷肥施用方式对其苗木生长特性影响的研究报道。本试验以两年生‘米斯提’蓝莓苗木为试材,探究4种磷肥施用方式对蓝莓苗木生长及养分吸收的影响,旨在找到蓝莓苗木培育的最佳磷肥施用方式,为蓝莓的科学施肥提供理论依据和实践基础。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验于2016年3—11月在秦皇岛天硕农业科技开发有限公司进行,试验地位于河北省秦皇岛市卢龙县大横河村(39°58'N、118°53'E),属暖温带大陆性季风气候区,年均温10.7℃,降水725mm,无霜

期 196 d, 年日照 2 278.6 h。试验地土壤理化性质: 全氮含量为 2.93 g/kg, 全磷含量为 1.81 g/kg, 全钾含量为 5.55 g/kg, 铵态氮含量为 10.05 mg/kg, 硝态氮含量为 160.25 mg/kg, 有效磷含量为 31.22 mg/kg, 速效钾含量为 419.07 mg/kg, 有机质含量为 11.56 g/kg, pH 为 6.32。

蓝莓试材为长势基本一致, 无病虫害的 2 年生‘米斯提’苗木。供试肥料为 $\geq 18\%$ 的过磷酸钙 (P_2O_5) (河北省矾山磷矿有限公司), 每袋净质量 50 kg。

1.2 试验设计

试验苗床为高垄, 株行距为 0.5 m \times 1.0 m, 栽植土壤为园土与硫磺粉体积比为 1:0.15 混配而成。设置 4 种施肥方式: 一次性施肥 (DF)、线性施肥 (LF)、平均施肥 (AF) 和指数施肥 (EF), 同时设置不施肥为对照 (CK), 共 5 个处理, 完全随机区组设计, 3 个重复, 每个重复 10 株。在苗木根系东西两侧 15 cm、深度 10 cm 处进行穴施磷肥, 总施肥量为 30 g, 施肥时间共计 5 次 (表 1)。同时, 6 月 15 日施入硫酸铵 (磊鑫-硫酸铵, 含氮量 $\geq 21\%$) 30 g/株, 8 月 30 日施入硫酸钾 (罗布泊-硫酸钾, 含硫量 $\geq 17.5\%$) 30 g/株, 其他农事操作为常规管理。

表 1 不同施肥处理

Tab. 1 Different fertilization treatments

施肥时间 Fertilizing time	施肥方式/(g·株 ⁻¹) Fertilizing mode/(g·tree ⁻¹)				
	CK	DF	LF	AF	EF
06-15	0	30	2	6	3.83
07-10	0	0	4	6	4.69
08-05	0	0	6	6	5.76
08-30	0	0	8	6	7.05
09-25	0	0	10	6	8.67
总施肥量 Total fertilizing amount	0	30	30	30	30

注: DF, 一次性施肥; LF, 线性施肥; AF, 平均施肥; EF, 指数施肥; CK, 不施肥。下同。Notes: DF, single fertilization; LF, linear fertilization; AF, average fertilization; EF, exponential fertilization; CK, no fertilization provided. The same below.

指数施肥模式^[14-15]:

$$N_t = N_s(e^{rt} - 1) - N_{(t-1)} \quad (1)$$

$$N_T = N_s(e^{rT} - 1) \quad (2)$$

$$r = \ln(N_T/N_s + 1)/T \quad (3)$$

式中: r 为相对添加速率; N_t 为在 r 下的第 t 次施肥时的施肥量; N_T (此处 T 下标) 为生长结束时苗木体内某元素的含量, T 为总施肥次数; N_s 为施肥前苗木体内某元素的含量; $N_{(t-1)}$ 为前 $(t-1)$ 次施入的施肥量之和。 N_s 参考王力朋^[14] 设定, 经指数施肥处理前一年苗木样品的测定结果, 计算得到 $N_s = 0.77$ mg/株,

$N_T = 97$ mg/株。

1.3 取样和指标测定

6 月 15 日开始取树冠外围中部枝条自上而下第 5 至 9 片生理成熟叶片, 每隔 25 d 取样一次, 取样时间分别为 6 月 15 日 (06-15)、7 月 10 日 (07-10)、8 月 5 日 (08-05)、8 月 30 日 (08-30) 和 9 月 25 日 (09-25), 最后一次为 10 月 25 日 (10-25)。取样时分别测定苗木的基生枝条长度、基生枝条粗度、基生枝条数量、冠幅、百叶干质量和叶面积。采取叶片后迅速用冰盒带回实验室并测定叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白、总酚、全磷、全氮及全钾含量。10 月 25 日各处理随机取 5 株苗木, 将其根系外围 15 cm 处 0~20 cm 深的土样混均带 1 kg 回实验室测定土壤理化性质。

枝条长度和冠幅用米尺测定, 粗度用游标卡尺测定距地面 5 cm 处。百叶干质量用 20 片鲜叶烘干称质量换算得到。叶面积选用 20 片叶用 Epson-700 扫描, 然后用 WinRHIZO 分析测得。叶片全氮和全磷含量用 AA3 连续流动分析仪测定^[16], 叶片全钾含量用火焰光度计法测定^[17]。叶片叶绿素含量用浸提法测定, 叶片可溶性蛋白含量用考马斯亮蓝法测定, 叶片可溶性糖含量用蒽酮乙酸乙酯法测定^[18], 叶片总酚含量用 Folin-Ciocalteu 法测定, 以没食子酸为标准品^[19]。

土壤理化性质测定: pH 值用 pH 计 (雷磁 pHS-2F 型) 测定, EC 值用 DDS-307 雷磁电导率仪测定, 处理基质样水土质量比为 5:1。有机质含量用重铬酸钾-外加热法测定, 铵态氮含量用靛酚蓝比色法测定, 硝态氮含量用紫外分光光度法测定, 有效磷含量用盐酸-氟化铵浸提-钼锑抗比色法测定, 速效钾含量用乙酸铵浸提-火焰原子吸收法测定。经 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮后, 土壤全氮全磷含量用 AA3 连续流动分析仪测定, 土壤全钾含量用火焰光度计法测定^[20]。

1.4 数据处理

利用 Excel 2016 软件进行数据处理, 采用 SPSS version 19.0 统计软件进行方差分析, 平均值间的比较采用单因素方差分析 (One-Way-ANOVA), 多重比较采用邓肯多重范围检验 (Duncan's Multiple Range Test), 使用 SigmaPlot 12.0 软件绘制图形, 运用 DPS3.0 软件进行主成分分析。

2 结果与分析

2.1 磷肥施用方式对蓝莓苗木生长量的影响

2.1.1 磷肥施用方式对蓝莓苗木基生枝条长度和粗度的影响

由表 2 可以看出, 整个施肥期间磷肥不同施用

表 2 磷肥施用方式对蓝莓基生枝条长度和粗度的影响

Tab. 2 Effect of P fertilization methods on length and diameter growth of *Vaccinium* spp. basal branches

处理 Treatment	枝条长度增长量 Branch length growth/cm					总增长量 Total growth
	06-15至07-10 From June 15 to July 10	07-10至08-05 From July 10 to August 5	08-05至08-30 From August 5 to August 30	08-30至09-25 From August 30 to September 25	09-25至10-25 From September 25 to October 25	
CK	3.07 ± 0.34a	5.39 ± 0.46b	1.51 ± 0.18c	1.37 ± 0.15b	0.35 ± 0.08a	11.69 ± 1.22c
DF	3.43 ± 0.24a	7.96 ± 0.48a	1.72 ± 0.16c	1.45 ± 0.28b	0.38 ± 0.06a	14.93 ± 1.21b
LF	3.26 ± 0.23a	6.70 ± 0.68b	4.66 ± 0.32b	1.61 ± 0.19ab	0.49 ± 0.06a	16.72 ± 1.48b
AF	3.38 ± 0.51a	8.04 ± 0.73a	7.84 ± 0.28a	1.63 ± 0.12ab	0.45 ± 0.03a	21.34 ± 1.67a
EF	3.35 ± 0.63a	8.18 ± 0.69a	7.98 ± 0.18a	2.10 ± 0.27a	0.46 ± 0.04a	22.06 ± 1.81a

处理 Treatment	枝条粗度增长量 Branch diameter growth/mm					总增长量 Total growth
	06-15至07-10 From June 15 to July 10	07-10至08-05 From July 10 to August 5	08-05至08-30 From August 5 to August 30	08-30至09-25 From August 30 to September 25	09-25至10-25 From September 25 to October 25	
CK	0.74 ± 0.03a	1.25 ± 0.04a	0.60 ± 0.02a	0.18 ± 0.05b	0.15 ± 0.01b	2.91 ± 0.15b
DF	0.72 ± 0.02a	1.26 ± 0.06a	0.59 ± 0.01a	0.24 ± 0.02ab	0.20 ± 0.06ab	3.01 ± 0.17ab
LF	0.68 ± 0.03a	1.20 ± 0.07a	0.51 ± 0.01a	0.25 ± 0.04ab	0.21 ± 0.02ab	2.85 ± 0.15b
AF	0.74 ± 0.03a	1.26 ± 0.04a	0.60 ± 0.03a	0.33 ± 0.03a	0.25 ± 0.01a	3.19 ± 0.14a
EF	0.76 ± 0.02a	1.25 ± 0.05a	0.62 ± 0.02a	0.37 ± 0.03a	0.26 ± 0.01a	3.27 ± 0.13a

注: 表中数据为平均值 ± 标准误, 同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Notes: the data is average value ± standard error, and values within a column followed by different lowercase letters are significantly different ($P < 0.05$). The same below.

方式对蓝莓基生枝条长度和粗度增量的影响趋势基本一致, 均表现为先上升后下降的变化规律, 07-10 至 08-05 阶段增量最大, 08-05 后增量逐渐下降, 09-25 至 10-25 阶段增量最小, 10-25 枝条生长接近停滞。06-15 至 07-10 和 09-25 至 10-25 2 阶段各处理枝条长度增量差异均不显著 ($P > 0.05$), 5 个阶段 EF 和 AF 均处于较高水平且二者差异不显著 ($P > 0.05$)。06-15 至 10-25 期间 EF、AF、LF 和 DF 枝条长度总增量分别高出 CK 88.7%、82.6%、43.1% 和 27.8%, 均与 CK 差异显著 ($P < 0.05$), EF 总增量最大为 22.06 cm。磷肥施用方式对蓝莓枝条长度总增量影响明显, 增效顺序为 EF > AF > LF > DF > CK。

06-15 至 07-10、07-10 至 08-05 和 08-05 至 08-30 阶段各处理枝条粗度增量差异均不显著 ($P > 0.05$), 08-30 至 09-25 和 09-25 至 10-25 2 阶段 EF、AF、LF 和 DF 差异均不显著 ($P > 0.05$)。06-15 至 10-25 期间 EF 和 AF 枝条粗度总增量显著大于 LF 和 CK ($P < 0.05$), EF 总增量最大为 3.27 mm, LF 最小为 2.85 mm, 总增量大小顺序为 EF > AF > DF > CK > LF (表 2)。蓝莓基生枝条长度和粗度增量均以 EF 处理最佳。

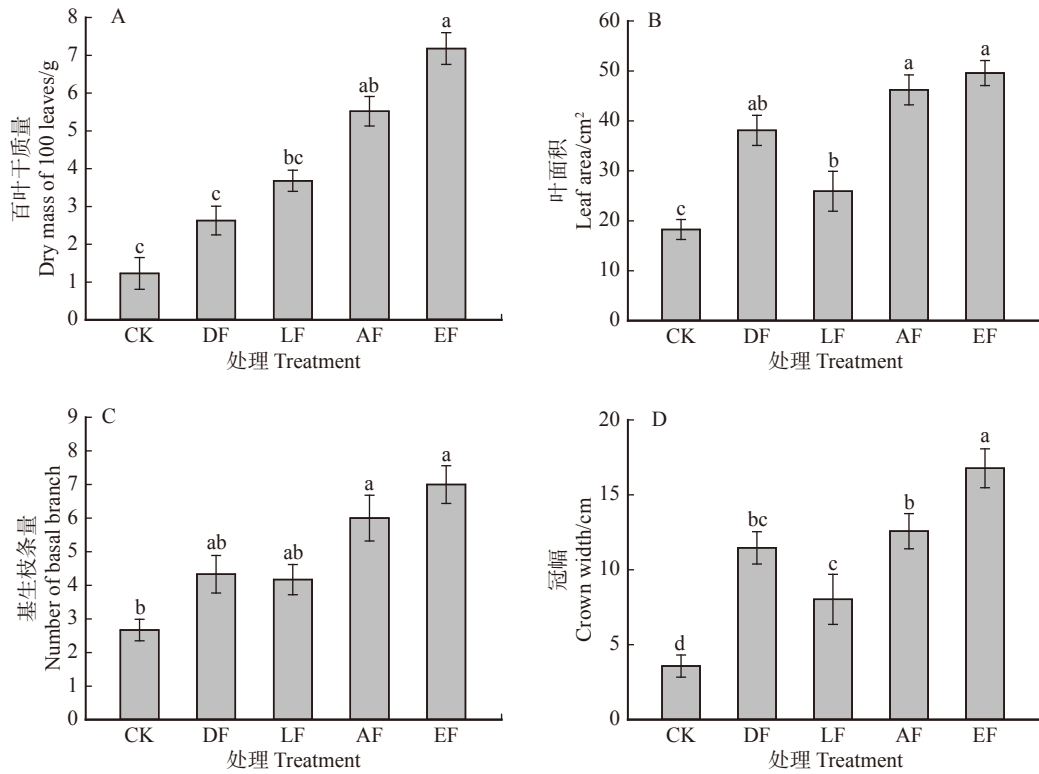
2.1.2 磷肥施用方式对蓝莓苗木百叶干质量、叶面积、冠幅及基生枝条量的影响

如图 1 所示, 06-15 至 10-25 磷肥不同施用方

式均促进了蓝莓百叶干质量、叶面积、基生枝条量和冠幅增加。10-25 各处理百叶干质量较 06-15 增幅 24.3% ~ 105.8%, EF 增幅最大, CK 增幅最小; 10-25 EF、AF、LF、DF 和 CK 百叶干质量增量分别为 7.21、5.50、3.72、2.60 和 1.21 g, EF 与 AF 差异不显著 ($P > 0.05$), 两者与 CK 差异均显著 ($P < 0.05$) (图 1A)。10-25 各处理叶面积较 06-15 增幅为 13.2% ~ 46.5%, EF 增幅最大, CK 增幅最小; 10-25 EF、AF、DF 和 LF 叶面积增量分别为 CK 的 2.7、2.5、2.1 和 1.4 倍, 各处理与 CK 差异均显著 ($P < 0.05$) (图 1B)。10-25 各处理基生枝条量较 06-15 增幅 35.6% ~ 123.5%, EF 增幅最大, CK 增幅最小; 10-25 EF、AF、DF 和 LF 枝条增量分别为 CK 的 2.6、2.3、1.6 和 1.5 倍, EF 和 AF 与 CK 差异均显著 ($P < 0.05$) (图 1C)。10-25 各处理冠幅较 06-15 增幅 10.4% ~ 49.6%, 增幅最大的处理仍是 EF, 最小为 CK; 10-25 EF 增量为 16.86 cm, AF、DF、LF 和 CK 冠幅增量分别为 12.62、11.50、8.03 和 3.64 cm, EF 显著大于 AF ($P < 0.05$), 各处理与 CK 差异均显著 ($P < 0.05$) (图 1D)。百叶干质量、叶面积、基生枝条量和冠幅增量以 EF 处理最佳, AF 次之。

2.2 磷肥施用方式对蓝莓苗木叶片氮、磷和钾含量的影响

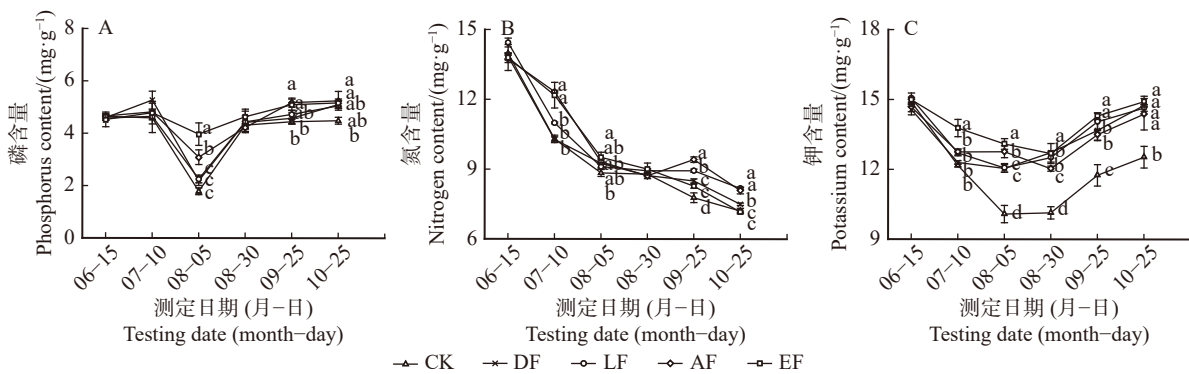
由图 2 可以看出, 磷肥不同施用方式对蓝莓叶片氮、磷和钾含量的影响。各处理叶片磷含量总体



同一项目不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Values within a item followed by different lowercase letters are significantly different ($P < 0.05$). The same below.

图1 磷肥施用方式对蓝莓百叶干质量、叶面积、冠幅及基生枝条量的影响

Fig. 1 Effect of P fertilization methods on dry mass of 100 leaves, leaf area, crown width of *Vaccinium* spp. and the number of *Vaccinium* spp. basal branch



同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Values within a column followed by different lowercase letters are significantly different ($P < 0.05$). The same below.

图2 磷肥施用方式对蓝莓叶片氮、磷和钾含量的影响

Fig. 2 Effects of P fertilization methods on N, P and K content of *Vaccinium* spp. leaf

呈现先下降后上升的趋势。06-15 和 07-10 各处理叶片磷含量差异均不显著 ($P > 0.05$), 08-05 各处理均达到最低值, 其中 EF 最高为 4.00 mg/g; 08-30 至 10-25 各处理磷含量均呈上升趋势, 09-25 AF 最高为 5.18 mg/g, CK 最低为 4.45 mg/g; 10-25 磷含量顺序为 AF > EF > DF > LF > CK, 分别高出 CK 16.9%、15.1%、13.8% 和 12.7%, AF 与 EF 差异不显著 ($P > 0.05$), 但与 CK 差异均显著 ($P < 0.05$) (图 2A)。各处理叶片氮含量总体呈现下降的趋势。06-15

LF 叶片氮含量最高为 14.40 mg/g; 10-25 各处理氮含量均达到最低值, 含量顺序为 LF > AF > DF > CK > EF, EF 最低为 7.17 mg/g, CK 与 EF 差异不显著 ($P > 0.05$) (图 2B)。各处理叶片钾含量总体呈现先下降后上升的趋势。06-15 LF 叶片钾含量最高为 15.10 mg/g, 08-05 以后 EF、AF、LF 和 DF 均显著高于 CK ($P < 0.05$); 10-25 EF 钾含量最高为 15.02 mg/g, EF、DF、LF 和 AF 分别高出 CK 19.1%、17.8%、16.9% 和 14.8%, 除 CK 外其他处理差异均不显著 ($P > 0.05$)

(图 2C)。

2.3 磷肥施用方式对蓝莓苗木叶片可溶性蛋白、可溶性糖、叶绿素及总酚含量的影响

磷肥不同施用方式对蓝莓叶片可溶性蛋白、可溶性糖、叶绿素及总酚含量的影响(图 3)。由图 3A 可知,各处理叶片可溶性蛋白含量总体呈现先上升后下降的趋势,CK 整个试验阶段均低于其他处理。06-15 各处理可溶性蛋白含量差异均不显著($P > 0.05$),07-10 各处理含量顺序为 LF > DF > EF > AF > CK,08-30 后 EF 均最高,且保持 EF > AF > LF > DF > CK 的趋势;10-25 EF、AF、LF 和 DF 可溶性蛋白含量分别高出 CK 51.2%、49.1%、20.1% 和 15.6%,EF 为 12.83 mg/g,EF 与 AF 差异不显著($P > 0.05$)。由图 3B 可知,各处理叶片可溶性糖含量总体呈现上升的趋势,CK 整个试验阶段均低于其他处理。06-15 各处理可溶性糖含量差异均不显著($P > 0.05$),07-10 后各处理含量均呈现 EF > AF > LF > DF > CK 的趋势;10-25 EF 可溶性糖含量最高为 11.64 mg/g,EF 与 AF 差异不显著($P > 0.05$),二者与其他处理差异均显著($P < 0.05$),EF 和 AF 分别高出 CK 21.3% 和 10.7%。由图 3C 可知,各处理叶片叶绿素含量总体呈现先上升后下降的趋势。06-15、07-10、08-05 和 09-25 4 时期各处理叶绿素含量差异均不

显著($P > 0.05$),08-30 和 10-25 EF 含量最高分别为 2.82 mg/g 和 1.29 mg/g,10-25 各处理含量顺序为 EF > AF > LF > DF > CK,除 CK 外其他处理差异均不显著($P > 0.05$)。由图 3D 可知,各处理叶片总酚含量总体呈现先下降后上升再下降的趋势。06-15、07-10、08-05 和 08-30 4 时期各处理总酚含量差异均不显著($P > 0.05$),09-25 和 10-25 各处理含量均呈现 EF > AF > DF > LF > CK,EF 含量最高分别为 49.48 mg/g 和 48.22 mg/g,09-25 EF、AF 和 DF 差异均不显著($P > 0.05$),但 EF 和 AF 与 CK 差异均显著($P < 0.05$),10-25 EF 与其他处理差异均显著($P < 0.05$),LF 与 CK 差异显著($P < 0.05$)。

2.4 磷肥施用方式对蓝莓苗木生长的主成分分析

为了研究磷肥不同施用方式对蓝莓生长和生理指标的影响,将苗木基生枝条长度、粗度、数量和冠幅、百叶干质量、叶面积、叶片磷含量、氮含量、钾含量、可溶性糖、可溶性蛋白、叶绿素及总酚含量作为因子分析的变量,采用主成分分析进行综合评价。第一主成分中荷载系数较大的指标为叶面积和叶绿素含量,第二主成分荷载系数较大的指标为冠幅和叶片磷含量,方差贡献率分别为 61.6% 和 26.7%,累计贡献率达 88.3%。结合蓝莓苗木各指标与磷肥施用方式之间的联系,通过主成分分析计算磷肥施用

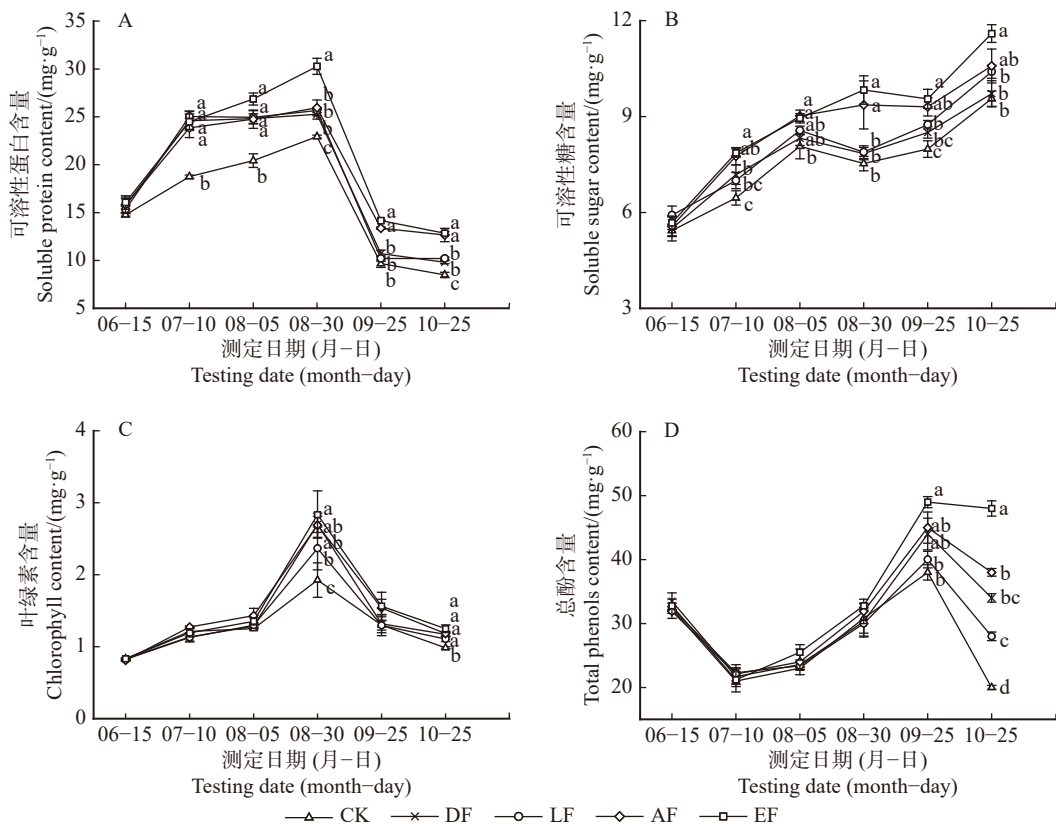


图 3 磷肥施用方式对蓝莓叶片可溶性糖、可溶性蛋白、叶绿素及总酚含量的影响

Fig. 3 Effects of P fertilization methods on soluble sugar, soluble protein, chlorophyll and total phenol content of *Vaccinium* spp. leaf

方式的综合得分(表3)。由表3可知,磷肥不同施用方式对蓝莓苗木生长增效顺序为EF > AF > DF > LF > CK,说明4种磷肥施用方式均可促进苗木生长,其中EF处理最优。

2.5 磷肥施用方式对蓝莓苗木土壤理化性质的影响

磷肥施用方式对蓝莓土壤理化性质的影响(表4)。10-25 CK 土壤中全氮、全钾、铵态氮和速效钾含量均显著高于其他处理($P < 0.05$);EF 有机质含量(14.44 g/kg)显著高于其他处理($P < 0.05$),有效磷含量高于其他处理,但与 LF 和 AF 差异不显著($P > 0.05$),EC 值高于其他处理,与 AF 差异不显著($P > 0.05$);DF 全磷含量最高且全氮含量最低,与其他处理差异均显著($P < 0.05$);LF 铵态氮含量最低,与 DF 和 AF 差异不显著($P > 0.05$);AF 硝态氮含量最低,与其他处理差异均显著($P < 0.05$)。各处理土壤中全钾、速效钾含量和 pH 值以 CK、DF、LF、AF 和 EF 顺序依次降低,有效磷含量和 EC 值趋势相反。试验结束时各处理土壤有机质含量顺序为 EF > DF > AF > LF > CK。

3 讨 论

3.1 磷肥施用方式与蓝莓苗木生长量的关系

苗木吸收矿质元素最直观反映是其生长状况,

苗高和地径是评价苗木质量的重要形态指标^[18,21]。李国雷^[19]、孙一^[22]和王力朋^[23]等人研究栓皮栎(*Quercus variabilis*)、欧美107杨(*Populus × canadensis* Moench)和楸树(*Catalpa bungei*)等结果表明,指数施肥在促进苗木高度和地径方面效果更佳。与本研究结果一致。在磷肥施用方式试验中 EF 促进蓝莓基生枝条生长效果最佳,AF 次之。本研究相关性分析还发现,基生枝条长度和粗度相关系数 r 为 0.804,与李亚东^[1]等人研究结果相似。基生枝条数量、冠幅、叶面积和叶片生物量反映了树体和叶片接收光照的能力。在本研究中,蓝莓基生枝条数量、冠幅、百叶干质量和叶面积在 06-15 至 10-25 期间增量受不同施用方式的影响表现为 EF 最优。张华林^[24]等人研究发现,指数施肥能够有效的促进尾巨桉(*Eucalyptus urophylla × E. grandis*)叶面积、叶长和叶宽等指标的增长;魏红旭^[25]和魏莎^[26]等研究表明指数施肥可提高长白落叶松(*Larix olgensis*)和切花菊(*Dendranthema morifolium*)叶、枝条量及冠幅等生物量。因此,本研究认为指数施肥相比其他施肥方式可以较大程度的满足蓝莓苗木在不同生长时期的养分需求,进而有利于苗木地上部分生长。

表3 磷肥施用方式对蓝莓生长的各主成分、综合得分及排序

Tab. 3 Composite scores and ranking of various principal components on the growth of *Vaccinium* spp. of P fertilization methods

处理 Treatment	第一主成分 The primary principal component (F1)		第二主成分 The secondary principal component (F2)		综合 Composite (F)	
	得分 Score	排名 Rank	得分 Score	排名 Rank	得分 Score	排名 Rank
CK	-1.086	5	-1.245	4	-1.119	5
DF	-0.208	3	-0.143	3	-0.194	3
LF	-0.734	4	1.542	1	-0.263	4
AF	0.700	2	0.064	2	0.569	2
EF	1.328	1	0.064	2	1.007	1

表4 磷肥施用方式对蓝莓土壤理化性质的影响

Tab. 4 Effects of P fertilization methods on soil physical and chemical characters of *Vaccinium* spp.

处理 Treatment	测定项目 Test item									
	全氮 Total N/(g·kg ⁻¹)	全磷 Total P/(g·kg ⁻¹)	全钾 Total K/(g·kg ⁻¹)	铵态氮 Ammonium- N/(mg·kg ⁻¹)	硝态氮 Nitrate- N/(mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/(mg·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	pH	电导率 EC/ (mS·cm ⁻¹)
CK	2.87±0.23a	1.66±1.56d	6.56±0.41a	11.85±1.32a	176.20±6.33a	36.12±3.85b	436.80±10.22a	10.26±0.66d	6.43±0.22a	73.17±4.87d
DF	2.22±0.18c	10.47±1.03a	6.40±0.52ab	9.03±1.06c	176.11±5.23a	40.10±4.36b	343.33±8.65b	13.06±1.74b	6.27±0.11a	87.83±5.82c
LF	2.55±0.10b	7.85±0.86b	6.17±0.63bc	9.02±1.08c	156.42±8.96b	53.42±4.11a	326.27±7.77b	11.60±1.21c	5.93±0.31b	124.83±6.78b
AF	2.52±0.29b	6.07±0.55c	6.10±0.33c	9.71±0.85bc	135.04±8.36c	55.71±4.21a	325.48±12.23b	11.63±1.12c	5.79±0.27b	134.53±5.11a
EF	2.50±0.25b	6.03±0.74c	5.80±0.56d	10.88±0.65ab	158.45±9.38b	56.50±3.55a	323.15±10.54b	14.44±1.19a	5.72±0.19b	136.83±4.41a

3.2 磷肥施用方式与蓝莓苗木叶片养分含量的关系

叶片养分含量增加能有效促进苗木生长和抗逆性增强^[27]。在苗木生长发育阶段,叶片是苗木进行光合作用和制造营养物质的主要组织,已往的研究发现施肥可促进叶片养分含量的积累,叶片养分含量变化规律在一定程度上反映了苗木的营养特性^[28]。刘洲鸿^[29]等对侧柏(*Platycladus orientalis*)幼苗研究表明,指数施肥可提高幼苗生长量和叶片养分含量。Pokharel等^[30]研究表明,指数施肥显著提高了北美短叶松(*Pinus banksiana*)所施元素的积累量。本研究发现,10-25 EF 叶片磷含量较高,而 DF 长效性较差,说明 EF 可以很好的满足植物生长所需磷元素规律,有利于肥料及时有效的被利用,进而保证了蓝莓苗木的磷需求。同时,研究还发现 10-25 EF 叶片氮含量最低,与王燕^[31]等研究氮肥指数施肥较其他施肥方式更能有效提高叶片氮含量结果不一致,这可能与本研究中施肥类型为磷肥有关。由于指数施磷肥可以形成稳态营养加载^[19],有利于苗木生长,进而消耗氮素增多,叶片内剩余氮素减少,这与袁新民等^[6]研究认为营养元素间可以相互影响,且施用磷肥有助于作物对氮素消耗的结果一致。研究还发现 10-25 EF 叶片钾含量最高,说明指数施肥较其他施肥方式对叶片钾含量积累促进效果明显,这与魏莎^[26]等研究结果一致,可能是因为稳态的磷肥供给有利于蓝莓苗木对土壤中钾元素的吸收。

3.3 磷肥施用方式与蓝莓苗木叶片可溶性糖、可溶性蛋白、总酚和叶绿素含量的关系

叶片中可溶性糖、可溶性蛋白和总酚是反映苗木抗性的重要指标^[29]。可溶性糖和总酚在苗木体内是一种抗性渗透调节物质,同时可溶性糖也是一种碳源;可溶性蛋白是苗木重要的渗透调节物质和营养物质。叶绿素是植物光合反应中的光敏催化剂,是叶片进行光合作用的重要参与者^[24]。叶片中可溶性糖、可溶性蛋白和总酚含量越高说明苗木质量越好,抗性越强^[29]。本研究发现,EF 处理促进蓝莓叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量效果最佳,AF 次之,10-25 EF 两指标含量均最高;总酚含量在 10-25 EF 处理最高;叶绿素含量在 06-15、07-10、08-05 和 09-25 4 个时期各处理差异均不明显,08-30 和 10-25 EF 处理含量高于其他处理,与王燕^[31]等研究指数施肥可有效提高欧洲云杉(*Picea abies*)叶绿素含量的结果一致。指数施肥是一种稳态营养加载技术,苗木培育过程中通过不断施入符合苗木生长规律的肥量,使肥料以养分库的形式维持营养稳定吸收或贮备在体内^[19],以此来提高苗木叶片的养分含量、抗性和光合能力,进而有效增加蓝莓在栽培初期

硫磺未能很好发挥作用前的抵抗力,最终保证蓝莓定植的成活率和生长势。

3.4 磷肥施用方式与蓝莓育苗土壤的关系

蓝莓生产中的土壤通常是使用园土与硫磺粉体积比为 1:0.15 混配而成,硫磺氧化需要土壤中硫氧化微生物来发挥作用,尹云锋等^[7]人研究表明施用磷肥情况下硫磺的氧化速率比不施磷肥高 2 倍,磷肥的这种促进作用是因为磷元素有效的增加了氧化硫杆菌数量。磷肥和硫磺同时施用是互利的,尤其在石灰性土壤上,在磷肥促进硫磺氧化的同时,硫磺氧化产生的酸也可提高磷元素的有效性;二者相互作用的能动性 with 4 种施肥方式下磷肥的稳态性和有效性密切相关。李贻铨等^[32]研究表明,火炬松(*Pinus taeda*)和湿地松(*Pinus elliotii*)幼林土壤中有效磷差异会影响土壤理化性质。本研究结果表明,10-25 4 种施肥方式的土壤全氮、全钾、铵态氮、硝态氮、速效钾和 pH 值均低于 CK,而全磷、有效磷、有机质和 EC 值均高于 CK,其中全氮和速效钾含量与魏莎等^[26]指数施肥对切花菊土壤性质影响的研究结果不一致,而有效磷和有机质含量与魏莎等^[26]的研究结果一致,可能由于本研究中各处理的苗木生长量大于 CK,消耗了土壤中较多其他养分,即植物生长和土壤中养分残留量具有负相关关系^[33]。施肥各处理中磷肥的施入使有效磷含量均高于 CK,有效磷含量和 EC 值大小依次是 EF > AF > LF > DF > CK; EF 处理的 pH 值最小为 5.72, AF、LF、DF 和 CK 中的 pH 值分别为 5.79、5.93、6.27 和 6.43,正常适宜蓝莓生长的土壤 pH 值范围为 4.50 ~ 5.75,EF 处理的 pH 值属于适宜范围以内,有利于蓝莓正常生长。本研究发现有效磷与 pH 值呈极显著负相关关系($r = -0.902$),与尹云锋^[7]等人研究结果一致。通过相关性分析发现,各处理 EC 值与 pH 值呈极显著负相关关系($r = -0.924$),与 Kim^[34]和刘贺永^[35]等研究结果一致,即土壤中水溶性盐总量随 pH 值的降低而不断升高。本研究还发现,有效磷与有机质含量呈显著正相关关系($r = 0.618$),指数施肥土壤中有有效磷和有机质含量最高,属于蓝莓苗木生长较为适宜的土壤环境^[26]。本小结有利地支持了前文中指数施肥较其他施肥方式能更有效的促进蓝莓苗木生长、养分积累、抗性和光合能力增强的结果。

4 结 论

在苗木生长方面,4 种磷肥施用方式均可促进蓝莓苗木生长和养分积累,促进效果依次为指数施肥(EF) > 平均施肥(AF) > 线性施肥(LF) > 一次性施肥(DF)。在土壤改良方面,4 种磷肥施用方式均可

有效地提高土壤有效磷和有机质含量,并降低土壤pH值,其中指数施肥效果最好。综合苗木生长和土壤改良指标,蓝莓苗木培育的最佳磷肥施用方式为指数施肥。

参 考 文 献

- [1] 李亚东, 刘海广, 张志东, 等. 蓝莓优质丰产栽培技术[M]. 北京: 中国三峡出版社, 2007.
Li Y D, Liu H G, Zhang Z D, et al. *Vaccinium* spp. cultivation techniques for high yield and quality[M]. Beijing: China Three Gorges Press, 2007.
- [2] 马艳萍. 蓝莓的生物学特性、栽培技术与营养保健功能[J]. *中国水土保持*, 2006(2): 47-49.
Ma Y P. Biological characteristics, cultivation techniques and functions of nutrition and health care of *Vaccinium* spp.[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2006(2): 47-49.
- [3] 李亚东, 吴林, 刘洪章, 等. 越桔果树的矿质营养与施肥[J]. *吉林农业大学学报*, 1994, 16(增刊1): 190-195.
Li Y D, Wu L, Liu H Z, et al. A review of mineral nutrition characteristics and fertilization of blueberry[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 1994, 16(Suppl.1): 190-195.
- [4] Khosravi A, Zarei M, Ronaghi A. Influence of biofertilizers and phosphate sources on the phosphorus uptake of lettuce and chemical forms of phosphorus in soil[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2017, 48(22): 2701-2714.
- [5] Vand W C C M, Gerard V D L C, Scholten O E. Improving phosphorus use efficiency in agriculture: opportunities for breeding[J]. *Euphytica*, 2016, 207(1): 1-22.
- [6] 袁新民, 同延安, 杨学云, 等. 施用磷肥对土壤 NO_3^- -N累积的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6(4): 397-403.
Yuan X M, Tong Y A, Yang X Y, et al. Effect of phosphate application on soil nitrate nitrogen accumulation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2000, 6(4): 397-403.
- [7] 尹云锋. 硫磺与磷矿粉配合施用的肥效研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2002.
Yin Y F. Study on effect of application of elemental sulfur and phosphate rock on fertilizer efficiency[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2002.
- [8] 夏春龙. 浅析稻谷生产现状对大米加工质量的影响[J]. *中国市场*, 2010, 18(4): 52-53.
Xia C L. Effect of paddy cultivation on rice quality[J]. *China Market*, 2010, 18(4): 52-53.
- [9] 张美微, 乔江方, 谷利敏, 等. 不同土层氮肥配施方式对夏玉米生长发育及氮肥利用的影响[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(20): 66-70.
Zhang M W, Qiao J F, Gu L M, et al. Influence of nitrogen fertilizer combined application in different soil layers on growth development and nitrogen use of summer maize[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(20): 66-70.
- [10] 魏新燕, 刘毅. 施肥方式对河北省干旱盐碱地区夏玉米性状和产量的影响[J]. *河北农业科学*, 2017, 21(3): 51-53, 62.
Wei X Y, Liu Y. Effects of different fertilization methods on properties and yields of summer maize saline region of Hebei Province[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2017, 21(3): 51-53, 62.
- [11] 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.
- [12] 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.
Liu H, Wang C Q, Wu J S, et al. Growth and N accumulation in seedlings of *Cunninghamia lanceolata* clones with N exponential fertilization[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2017, 34(3): 459-464.
- [13] Mendoza R, Bailleres M, Garcia I, et al. Phosphorus fertilization of a grass-legume mixture: effect on plant growth, nutrients acquisition and symbiotic associations with soil microorganisms[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2016, 39(5): 691-701.
- [14] 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.
- [15] 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.
Wang L P, Li J Y, Wang J H, et al. Effects of exponential fertilization on seedling growth and nitrogen uptake and utilization efficiency of *Catalpa bungei* clones[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2012, 34(6): 55-62.
- [16] 贝美容, 罗雪华, 杨红竹. AA3型连续流动分析仪(CFA)同时测定橡胶叶全氮、全磷、全钾的方法研究[J]. *热带作物学报*, 2011, 32(7): 1258-1264.
Bei M R, Luo X H, Yang H Z. Simultaneous determination of nitrogen, phosphorus and potassium in rubber leaf samples by AA3 continuous flow analyzer (CFA)[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2011, 32(7): 1258-1264.
- [17] Jagmohan S N. Evaluation of trace element contents in *Swertia paniculata* Wall.[J]. *Natural Product Research*, 2012, 26(1): 72-76.
- [18] 王益明, 万福绪, 李瑞瑞, 等. 指数施肥对美国山核桃幼苗生长及养分积累的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2018, 46(9): 21-25.
Wang Y M, Wan F X, Li R R, et al. Effects of exponential fertilization on growth and nutrient accumulation of *Carya illinoensis* seedlings[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2018, 46(9): 21-25.
- [19] 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.
Li G L, Zhu Y, Jiang L, et al. Effect of exponential fertilization on growth and nitrogen storage of containerized *Quercus variabilis* seedlings[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2012, 40(11): 6-9.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版,

- 2000.
- Lu R K. Methods of soil agricultural chemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [21] Veneklaas E J, Lambers H, Bragg J, et al. Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants[J]. *New Phytologist*, 2012, 195(2): 306–320.
- [22] 孙一, 马履一, 贾忠奎, 等. 欧美 107 杨砂培扦插苗对指数施肥的响应[J]. *浙江林业科技*, 2010, 30(6): 18–22.
- Sun Y, Ma L Y, Jia Z K, et al. Nutrient uptake of *Populus × euramericana* cv. ‘74/76’ cuttage in response to different exponential regimes under sand culture[J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2010, 30(6): 18–22.
- [23] 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 Ecologica Sinica*, 2012, 32(23): 7452–7462.
- [24] 张华林, 彭彦, 谢耀坚, 等. 两种氮肥施用方法对尾巨桉轻基质容器苗生长的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(1): 53–58.
- Zhang H L, Peng Y, Xie Y J, et al. Effects of two nitrogen application methods on growth of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* container seedlings cultivated with light media[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2014, 38(1): 53–58.
- [25] 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 uptake of *Larix olgensis* seedling in response to different exponential regime[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(3): 685–690.
- [26] 魏莎, 李素艳, 孙向阳, 等. 指数施肥方式对切花菊生长及其土壤性质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2011(4): 54–58, 89.
- Wei S, Li S Y, Sun X Y, et al. Effects of exponential fertilization on the growth and soil properties of cut chrysanthemum[J]. *Soil and Fertilizer Science*, 2011(4): 54–58, 89.
- [27] 李国雷, 刘勇, 祝燕. 秋季施肥调控苗木质量研究评述[J]. *林业科学*, 2011, 47(11): 166–171.
- Li G L, Liu Y, Zhu Y. Review on advance in study of fall fertilization regulating seedling quality[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(11): 166–171.
- [28] 张晨光, 赵德英, 袁继存, 等. ‘富士’苹果幼树叶片内源激素与矿质营养年动态变化分析[J]. *果树学报*, 2017, 34(3): 303–311.
- Zhang C G, Zhao D Y, Yuan J C, et al. Annual dynamic analysis of leaf endogenous hormones and mineral nutrition on young ‘Fuji’ apple trees[J]. *Journal of Fruit Science*, 2017, 34(3): 303–311.
- [29] 刘洲鸿, 刘勇, 段树生. 不同水分条件下施肥对侧柏苗木生长及抗旱性的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2002, 24(5/6): 56–60.
- Liu Z H, Liu Y, Duan S S. Effects of fertilization methods on seedling growth and drought tolerance of *Platycladus orientalis* under different water conditions[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(5/6): 56–60.
- [30] Pokharel P, Kwak J H, Chang S X. Growth and nitrogen uptake of jack pine seedlings in response to exponential fertilization and weed control in reclaimed soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53(6): 701–713.
- [31] 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, Su 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.
- [32] 李贻铨, 陈宏峻, 陈道东, 等. 火炬松和湿地松幼林施肥对土壤性质和叶片养分影响[J]. *林业科学*, 1999, 35(增刊1): 95–100.
- Li Y Q, Chen H J, Chen D D, et al. Effects of fertilization on soil properties and foliar nutrients of young stands of *Pinus taeda* and *P. elliotii*[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1999, 35(Suppl.1): 95–100.
- [33] 王芬, 田歌, 于波, 等. 富士苹果果实膨大期肥料氮去向及土壤氮素平衡的研究[J]. *园艺学报*, 2017, 44(8): 1569–1578.
- Wang F, Tian G, Yu B, et al. Fate of fertilizer nitrogen and total balance of soil nitrogen in Fuji apple during fruit rapid-swelling stage[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2017, 44(8): 1569–1578.
- [34] Kim Y, Kang K H. pH dependence on EC in soils amended with fertilizer and organic materials and in soil of plastic film house[J]. *Korean Journal of Soil Science & Fertilizer*, 2005, 38(5): 247–252.
- [35] 刘贺永, 何鹏, 蔡江平, 等. 模拟氮沉降对内蒙古典型草地土壤 pH 和电导率的影响[J]. *土壤通报*, 2016, 47(1): 85–91.
- Liu H Y, He P, Cai J P, et al. Nitrogen deposition on soil and electric conductivity in a typical grassland of Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(1): 85–91.

(责任编辑 范娟 崔艳红
责任编辑委 孟平)