

杨 浩, 吴文龙, 闫连飞, 等. 土壤 pH 值对蓝莓生长和生理特性的影响及其调节方法综述[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(6): 1–8.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.06.001

# 土壤 pH 值对蓝莓生长和生理特性的影响 及其调节方法综述

杨 浩<sup>1</sup>, 吴文龙<sup>2</sup>, 闫连飞<sup>2</sup>, 李维林<sup>1</sup>, 吴雅琼<sup>2</sup>

(1. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心/南京林业大学林学院, 江苏南京 210037;

2. 江苏省中国科学院植物研究所果树研究中心, 江苏南京 210014)

**摘要:**我国作为全球蓝莓栽培和生产主要阵地之一, 蓝莓产业发展潜力巨大。蓝莓为喜酸性植物, 对土壤环境要求苛刻, 土壤 pH 值是影响蓝莓栽培的关键因素。本文介绍了蓝莓对土壤 pH 值的适应特性, 并对相关蓝莓品种适宜的土壤 pH 值范围进行了归纳; 同时, 概述了土壤 pH 值对蓝莓生长发育、果实产量、品质与生理代谢特性(光合作用、细胞膜透性、渗透调节物质及相关抗氧化酶活性)的影响。基于此, 通过文献查阅对蓝莓栽培中土壤 pH 值调节的相关方法进行了总结, 重点论述了施用石灰、硫磺与硫肥、木醋液、糠醛渣、高  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  肥使用比率等方法在蓝莓栽培中调节土壤 pH 值的应用和研究现状, 并分析其优缺点; 最后, 本文对蓝莓栽培土壤 pH 值调节技术及其应用前景进行了展望, 并提出了一些建议, 以期对蓝莓栽培和学术研究提供科学指导和理论参考。

**关键词:** 蓝莓; 土壤 pH 值; 生长; 生理特性; 调节方法

**中图分类号:** S663.901

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-1302(2022)06-0001-07

蓝莓(blueberry)原产于北美, 是杜鹃花科(Ericaceae)越橘属(*Vaccinium*)多年生落叶或常绿灌木, 果实风味丰富且富含果胶、糖类、氨基酸、有机酸等多种营养物质和花色苷、黄酮等酚类物质<sup>[1]</sup>, 其化学成分具有抗氧化<sup>[2]</sup>、抗炎<sup>[3]</sup>、抗肿瘤<sup>[4]</sup>活性, 并对肥胖<sup>[5]</sup>、心血管疾病<sup>[6]</sup>、糖尿病<sup>[7]</sup>、肠道菌群<sup>[8]</sup>和免疫能力<sup>[9]</sup>具有预防和调节作用, 是一种营养与保健价值极高的小浆果, 被誉为“浆果之王”<sup>[10]</sup>。随着经济的发展以及人们对食品健康与保健的重视, 我国蓝莓市场发展备受青睐, 蓝莓栽培面积和范围也得到不断扩展。目前, 我国蓝莓产业已经成为亚太地区的龙头, 2016 年全球蓝莓种植面

积约 11.09 万  $\text{hm}^2$ <sup>[11]</sup>, 而我国蓝莓种植面积占 20% 以上, 鲜果产量 2 万  $\text{t}$ <sup>[12]</sup>; 截至 2020 年底, 我国蓝莓栽培面积达 6.64 万  $\text{hm}^2$ , 总产量为 34.72 万  $\text{t}$ , 鲜果产量为 23.47 万  $\text{t}$ <sup>[13]</sup>。

蓝莓人工栽培研究始于 20 世纪初, 经过 1 个多世纪的发展, 目前栽培蓝莓(根据植株生长大小)主要分为高丛(*V. corymbosum*)、兔眼(*V. virgatum*)和矮丛(*V. angustifolium*)三大类型<sup>[14]</sup>, 高丛蓝莓又包括南高丛(低于 7.0  $^{\circ}\text{C}$  冷温需要量 200~400 h)、北高丛(低于 7.2  $^{\circ}\text{C}$  冷温需要量 800~1 200 h)和半高丛(高丛与矮丛蓝莓的杂交型, 低于 7.2  $^{\circ}\text{C}$  冷温需要量 1 000 h 以上)<sup>[15]</sup>。不同蓝莓品种对土壤的偏好性不一, 但均在轻质酸性土壤中生活力最高, 其适宜 pH 值范围在 4.0~5.5 之间<sup>[16]</sup>, 超出这个范围蓝莓植株会出现营养缺乏、生长发育迟缓和果实产量、品质下降。我国幅员辽阔, 但大部分地区土壤 pH 值均高于 5.5<sup>[17]</sup>, 故土壤 pH 值就成了限制蓝莓生长的一个重要的非生物胁迫因素。因此, 有效的土壤 pH 值调节措施和改良方法是蓝莓人工栽培必须解决的重点问题之一。同时, 比较不同蓝莓品种对土壤 pH 值的适应性, 探究土壤 pH 值对蓝莓生长发育及相关生理变化规律对指导蓝莓人工栽培具有重要的实际意义, 并对开展蓝莓嗜酸机制等相关

收稿日期: 2021-07-06

基金项目: 江苏省科技项目(编号: BE2019399); 江苏现代农业产业技术体系建设项目(编号: JATS[2021]511); 中央财政林业科技推广示范资金项目(编号: 苏[2021]TG08)。

作者简介: 杨 浩(1994—), 男, 四川南充人, 博士研究生, 主要从事蓝莓高效栽培和生物技术等研究。E-mail: 2863125965@qq.com。

通信作者: 李维林, 博士, 研究员, 主要从事黑莓、蓝莓等小浆果栽培及生理生化和分子等研究, E-mail: wlli@njfu.edu.cn; 吴雅琼, 博士, 助理研究员, 主要从事小浆果遗传育种、生物技术和基因组学等研究, E-mail: 347470439@qq.com。

基础研究具有一定的参考价值。

综上,本文将近年来在蓝莓对土壤 pH 值适应性、土壤 pH 值对蓝莓生长发育、生理代谢特性影响以及蓝莓栽培土壤 pH 值调节方法等领域的研究进行归纳、总结和讨论,并提出了相关建议,希望为蓝莓栽培研究和产业化发展提供理论指导和参考。

1 蓝莓生长适宜的土壤 pH 值范围

蓝莓原生于酸性的森林土壤,对土壤 pH 值较

为敏感,其过高或过低都会影响蓝莓生长和果实质量。相关研究表明,土壤 pH 值为 3.8~5.5 是蓝莓能够生长的耐受范围<sup>[18]</sup>,土壤 pH 值为 4.0~5.0 是适宜蓝莓生长的最佳范围<sup>[19]</sup>。此外,不同类型蓝莓之间适宜生长的土壤 pH 值也不尽相同,其中高丛蓝莓适宜的土壤 pH 值范围为 4.0~5.5,矮丛蓝莓为 4.3~4.8<sup>[20]</sup>,兔眼蓝莓为 4.2~5.0<sup>[21]</sup>。查阅相关文献,对一些蓝莓品种生长的适宜土壤 pH 值范围进行了归纳总结,结果见表 1。

表 1 不同蓝莓品种适宜的土壤 pH 值范围

蓝莓种类	品种名称	亲本关系	适宜 pH 值/范围	参考文献
南高丛蓝莓	薄雾(Misty)	FL67-1×Avonblue	4.5~5.5	[22]
	奥尼尔(O'Neal)	Wolcott×Florida 64-15	4.5~4.8	[23]
	夏普蓝(Sharpblue)	Florida 61-5×Florida 62-4	4.5	[24]
北高丛蓝莓	斯巴坦(Spartan)	Earlilue×US11-93	4.3~4.7	[25]
	蓝丰(Bluecrop)	(Jersey×Pioneer)×(Stanley×June)	3.0~5.5	[26]
矮丛蓝莓	美登(Blomidon)	Augusta×451	4.0~4.5	[27]
兔眼蓝莓	灿烂(Brightwell)	(Ethel×Claraway)×Menditoo	4.2	[28]
	梯芙蓝(Tifblue)	Ethel×Claraway	4.3~4.4	[29]
	巨丰(Dellite)	T-15×Britewell	4.7~4.8	[29]
半高丛蓝莓	北村(Northcountry)	B-6×R2P4	4.5~5.0	[27]
	圣云(St. Cloud)	-	4.5~6.0	[26]
	北陆(Northland)	Berkeley×(Lowbush×Pioneer)	4.3~5.5	[25]

2 土壤 pH 值对蓝莓的影响

2.1 土壤 pH 值对蓝莓生长发育的影响

当土壤 pH 值较高时,土壤中的铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)在微生物的作用下会加速转化为硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N),而蓝莓生长主要通过吸收 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 来作为氮(N)源,此状态下容易造成蓝莓 N 素缺乏,营养失调。Jiang 等研究发现,随着蓝莓根际土壤 pH 值的升高,其植株生长(株高、基径、生枝数)和生物量的积累都会下降<sup>[30]</sup>。此外,当土壤 pH 值在 5.5~8.0 时,土壤中游离的铁(Fe)容易与有机物发生络合反应而被固定,有效 Fe 含量处于最低状态<sup>[31]</sup>,不容易被植物根系吸收。在 pH 值高于 5.2 的土壤环境中,蓝莓叶片容易出现缺铁性失绿的症状<sup>[32]</sup>。同时还有研究发现,土壤 pH 值较高会使蓝莓植株钙(Ca)、钠(Na)、钾(K)等元素<sup>[33-34]</sup>含量升高,导致其生长发育不良。Tamir 等研究发现,在中性或碱性土壤条件下,蓝莓根系生长受到抑制,导致地上生物量减少<sup>[35]</sup>。

当土壤 pH 值<5 时,土壤中铝(Al)以可溶态

的 Al<sup>3+</sup> 存在,其对大多数陆地植物有毒,它会抑制蓝莓根系生长<sup>[36]</sup>,天然富含锰(Mn)的酸性土壤中,Mn 对植物也有毒性;重金属镉(Cd)、铜(Cu)、汞(Hg)、铅(Pb)和锌(Zn)易溶于强酸性土壤,被植物吸收会危害植株的生长。董珊珊等研究发现,兔眼蓝莓 Gardenblue 和 Tifblue 对土壤 Mn 胁迫具有一定的耐受性,其耐受临界值为 2.5 mmol/L<sup>[37]</sup>。蓝莓组培苗在含 Cd 的培养基生长,植株 Cd 的富集会增加<sup>[38]</sup>,而在 Pb<sup>2+</sup> 含量过多的土壤中蓝莓生长会受到抑制,且 Pb 会在果实中富集。林丽等研究发现,随着土壤中重金属 Pd、Cd 浓度的升高,越橘幼苗的生物量逐渐下降,且同浓度处理条件下,Pd 胁迫对应的幼苗下降幅度大于 Cd<sup>[39]</sup>。

此外,土壤 pH 值也会影响蓝莓的花芽分化过程和开花物候期<sup>[40]</sup>。Jiang 等研究发现,随着土壤 pH 值增加,Climax 和 Chaoyue NO.1 这 2 种蓝莓的开花和果实成熟期会被延迟,且在高土壤 pH 值(pH 值>6)环境下,单株的花芽数显著减少<sup>[41]</sup>。Togano 等评估了土壤 pH 值对蓝莓开花和收获期的影响,发现其变化趋势随处理和品种而不同<sup>[42]</sup>。

## 2.2 土壤 pH 值对蓝莓果实产量和品质的影响

土壤 pH 值不仅影响蓝莓植株营养器官的生长,还能影响蓝莓果实的产量和品质。当土壤环境 pH 值从 4.5 上升到 7.0 时, Tifblue 的产量逐渐降低<sup>[43]</sup>; Delite 在土壤 pH 值为 5.9 时, 单果质量和总产量都会显著下降<sup>[44]</sup>, 在高土壤 pH 值条件下 Climax 和 Chaoyue NO. 1 也有相似的表现<sup>[41]</sup>。同时, 高土壤 pH 值也会降低蓝莓的可溶性固形物含量(TSS)和可溶性固形物与可滴定酸(TSS:TA)比值, 提高 TA 值, 导致果实品质发生变化, 影响鲜果食用口感<sup>[41]</sup>。此外, 土壤 pH 值还能够影响蓝莓果实中花色苷的形成和积累<sup>[45]</sup>, 王斌等研究发现, 蓝莓果实中花色苷在土壤 pH 值为 4.0 ~ 5.0 时含量最多, 且花色苷积累量最大值在土壤 pH 值为 4.5 时出现; 土壤 pH 值 < 4 或 pH 值 > 6 时, 蓝莓花色苷的积累会受到抑制<sup>[46]</sup>。

## 2.3 土壤 pH 值对蓝莓生理代谢的影响

### 2.3.1 土壤 pH 值对蓝莓光合作用的影响

光合作用是植物自身合成有机物和储存能量的主要过程, 其作用强弱与果树产量息息相关。相关研究表明, 土壤 pH 值对北陆、都克、伯克利、喜来 4 个蓝莓品种叶片的叶绿素含量、荧光参数与光合作用均有显著影响; 当土壤 pH 值超过临界值 4.75 时, 叶绿素含量和净光合速率( $P_n$ )均下降; 土壤 pH 值过低(pH 值 < 3.42)或过高(pH 值 > 6.83), 其叶片会受到较大的光抑制<sup>[47]</sup>。宋雷等研究发现, 蓝莓叶片叶绿素含量、最大净光合速率( $P_{max}$ )、表观量子效率(AQY)、光饱和点(LSP)和光补偿点(LCP)均随着土壤 pH 值升高而呈现逐渐降低的变化规律<sup>[22]</sup>。乌凤章在北高丛蓝莓品种耐受土壤 pH 值筛选试验中发现, 当土壤 pH 值为 6.0 时, 蓝莓叶片叶绿素含量和最大光化学效率( $F_v/F_m$ )均显著降低, 多数蓝莓的  $P_n$ 、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )、电子传递速率(ETR)和光化学猝灭系数( $q_p$ )也显著降低<sup>[48]</sup>, 兔眼蓝莓 Climax 和南高丛蓝莓 Chaoyue NO. 1 的光合特性在土壤高 pH 值环境下也出现类似的变化规律<sup>[41]</sup>。此外, 使用不同 pH 值溶液浇灌盆栽蓝莓时, 蓝莓叶绿素含量以及光合作用指标均随浇灌液 pH 值升高而呈不同程度的下降趋势<sup>[49]</sup>。

### 2.3.2 土壤 pH 值对蓝莓细胞膜透性的影响

蓝莓属喜酸性土壤植物, 当处在较高土壤 pH 值环境时, 其生长会受到胁迫。通常植物处于不利生长环境时, 膜脂会通过过氧化途径代谢产生丙二醛

(MDA), MDA 是检验植物抗逆强弱的重要指标。相关研究表明, 随土壤 pH 值的升高, 蓝莓叶片的细胞膜受到破坏, 抗氧化系统酶失活, 使膜脂的氧化程度加深, 最终导致 MDA 含量增加。李晴晴等研究发现, 当土壤 pH 值超过蓝莓的适宜生长范围, 其叶片和根的 MDA 含量也会明显升高<sup>[28]</sup>。MDA 可作为蓝莓耐土壤高 pH 值的检测指标。

### 2.3.3 土壤 pH 值对蓝莓渗透调节物质的影响

当植物处于逆境环境下, 为了防止细胞失水, 维持自身生长, 会通过合成渗透调节物质来维持细胞渗透压的平衡和正常生理代谢过程的进行。张宇等研究表明, 当土壤 pH 值 < 4.27 或 pH 值 > 5.84 时, 蓝莓叶片的可溶性糖(SS)、可溶性蛋白(SP)和脯氨酸(Pro)含量会显著增加<sup>[50]</sup>; 当土壤 pH 值为 6.8 时, 北陆、伯克利和都克 3 个蓝莓的 SS、SP 和 Pro 含量也出现相同的变化特征<sup>[51]</sup>。

### 2.3.4 土壤 pH 值对蓝莓抗氧化酶活性的影响

植物生长受到胁迫, 其抗氧化酶系统会通过清除自由基来减速细胞的氧化衰老, 从而适应逆境。北陆、喜来、伯克利和都克 4 个蓝莓品种在不同土壤 pH 值处理下抗氧化酶活性(SOD、POD、CAT)存在显著差异<sup>[52]</sup>。当土壤 pH 值从 3.42 增加到 6.83 时, 蓝莓叶片的 SOD 和 CAT 活性呈先升后降的变化特征, 而 POD 活性则呈降—升—降—升的变化趋势; 土壤 pH 值 < 4.27 或 pH 值 > 4.75 会导致蓝莓叶片 SOD 和 CAT 活性的降低<sup>[51]</sup>。李欣怡等使用植物组织培养技术将蓝丰、北陆和园蓝 3 个蓝莓品种在 pH 值为 5 ~ 9 的条件下进行胁迫处理, 结果发现 3 个品种的 CAT 活性均随 pH 值的增高而降低<sup>[53]</sup>。李晴晴等研究发现, 当土壤 pH 值为 6.2 时, 灿烂根系活力下降, 其叶片和根的 POD 和 CAT 活性显著升高<sup>[28]</sup>。

## 3 土壤 pH 值的调节方法

### 3.1 低土壤 pH 值的调节方法

钙质和白云质石灰常用于提高土壤基质 pH 值, 其碳酸盐成分起到缓冲作用, 但修正效率和作用效果因作物而异<sup>[54]</sup>。石灰虽常用于喜酸性植物土壤 pH 值的修正, 但在蓝莓栽培中的应用研究还较少, 因为石灰频繁施用会过度升高土壤 pH 值, 而胁迫蓝莓生长。石灰只有在土壤 pH 值非常低的情况下施用, 以输送 Ca 和 Mg。因此, 石灰改良剂必须小心使用, 以避免对蓝莓植物的伤害。Schreiber 等

研究表明,低  $\text{CaCO}_3$  施用量可以有效提高椰壳蓝莓栽培基质 pH 值缓冲能力<sup>[55]</sup>。

3.2 高土壤 pH 值的调节方法

3.2.1 硫磺和硫肥调节 目前,蓝莓栽培主要使用硫磺来降低土壤 pH 值,同时通过向土壤中施入硫酸铵等酸性肥料或者在水肥滴灌系统中施用硫酸亚铁等酸性肥料来维持土壤 pH 值。硫磺能够降低土壤 pH 值主要是因为硫元素进入土壤后,会被硫杆菌等土壤细菌氧化,最后转化成硫酸,进而使土壤 pH 值降低<sup>[56]</sup>。施用硫磺调节土壤 pH 值具有一定的稳定性,且硫磺施用量对蓝莓果实单粒质量、单株产量和果实品质呈现低浓度促进、高浓度抑制的变化趋势<sup>[57]</sup>。张悦等采用随机区组试验,建议大兴安岭地区栽培蓝莓美登用地的硫磺施用量以  $70 \sim 80 \text{ g/m}^2$  为宜<sup>[58]</sup>。除在向土壤中施入硫磺调节土壤 pH 值外,Almutairi 等使用含微粒硫磺的化学

灌溉法调节土壤 pH 值也取得了良好的效果,滴灌施用量为  $100 \text{ kg/hm}^2$  或  $150 \text{ kg/hm}^2$  时,土壤 pH 值可以在 1 个月内迅速从 6.6 降至 5.8,但其长期效果还是不如在种植前向土壤中施入颗粒硫磺<sup>[59]</sup>。表 2 对硫磺调节不同土壤 pH 值的施用量进行了总结。

施用硫磺和硫肥虽然是目前蓝莓生产上降低土壤 pH 值最常用的方法,但在实际生产实践中也存在一些需要注意的问题:(1)施用硫磺降低土壤 pH 所需周期较长,一般需要在种植前半年或 1 年提前施入土壤;(2)通过水肥一体化措施施用硫酸亚铁等酸性肥料虽然也能一定程度地降低和保持土壤 pH 值,但成本较高且作用有限,另外施用过酸性肥料对植株的根系有一定的毒害作用;(3)硫磺的过度施用会影响土壤微生物数量,提高土壤含盐量,造成土壤板结,不利于环境生态;(4)硫磺施入土壤后要及时浇水,否则会对蓝莓根系造成伤害。

表 2 硫磺调节不同类型土壤 pH 值施用量

土壤类型	土壤质地	有机质含量 (%)	硫磺施用量	原始 pH 值	调节后 pH 值	所需时间 (d)	参考文献
紫色土	中壤	1.15	$3.0 \text{ t/hm}^2$	8.10	5.46	270	[60]
新积土	轻壤	0.98	$4.5 \text{ t/hm}^2$	7.88	4.97	180	[60]
黄壤	重壤	1.45	$4.5 \text{ t/hm}^2$	7.20	5.15	180	[60]
黑土		5.00	$1.5 \sim 2.0 \text{ kg/m}^3$	$\approx 7.00$	$4.00 \sim 5.00$	$30 \sim 60$	[26]
草甸沼泽土		10.43	$1.3 \text{ t/hm}^2$	5.90	$< 5.00$	365	[61]
暗棕色森林土		9.85	$1.3 \text{ t/hm}^2$	5.60	$< 5.00$	365	[61]
棕壤	较黏重		$1.0 \text{ kg/m}^3$ 以下	6.50	$4.00 \sim 5.00$	$75 \sim 81$	[62]

3.2.2 木醋液调节 木醋液是将木材或竹材加工干馏后的蒸汽气体混合物,经冷凝分离而获得的有机混合物,其主要组分是乙酸。木醋液能促进植物生长、改良土壤,帮助作物吸收土壤中的微量元素,改善植物的营养代谢<sup>[63]</sup>。木醋液的施用可以满足蓝莓对土壤低 pH 值及高有机质含量的需求,还能在一定程度上改善土壤理化性质,提高土壤微生物数量<sup>[64]</sup>。于志民等发现木醋液可以有效降低蓝莓栽培基质的 pH 值,改善土壤的理化环境,并促进植株生长及果实品质的提升<sup>[65]</sup>。稀释 100 倍的硬杂木木醋液喷施蓝莓扦插苗,可以有效降低土壤 pH 值,缩短蓝莓插穗的生根时间,调节幼苗的生长<sup>[66]</sup>。此外,木醋液能有效降低无土基质(椰糠)的 pH 值,且稀释适宜浓度施用也可以达到蓝莓对酸性土壤环境的需求,其中 50 倍稀释处理的蓝莓色素和可溶性糖含量最多<sup>[67]</sup>。杨芩等研究表明,硫磺粉和木醋均能降低土壤 pH 值,木醋处理 3 个月后即能将土

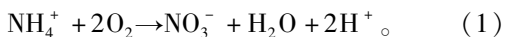
壤 pH 值降到 4.9 左右,而硫磺作用时间较长,需要 9 个月<sup>[68]</sup>。木醋处理还能显著影响蓝莓土壤中有效 N、P、K 和有机质含量,Zhang 等的田间试验表明, $0.2\%$  木醋液可以降低土壤 pH 值,虽然对蓝莓生长没有显著改善,但土壤养分有效性得到提高,果实的产量和营养品质有增加的趋势<sup>[69]</sup>。

木醋液应用于蓝莓土壤 pH 值调节和改良,要注意结合实际情况和针对不同蓝莓品种科学施用,施用过程中应定期检查土壤 pH 值变化情况,并相应调整其用量来维持适宜蓝莓生长的土壤 pH 值环境。

3.2.3 糠醛渣调节 糠醛渣是从玉米芯、稻壳等材料提取糠醛的残留废物,呈酸性(含硫酸),可降低土壤 pH 值,改善土壤环境<sup>[70]</sup>。纪前羽等开展了施用糠醛渣代替硫磺调节土壤 pH 值的试验,研究表明糠醛渣可使土壤 pH 值从 6.8 降低到 4.5,作用效果较好<sup>[71]</sup>。王瑞琦等通过盆栽试验表明,在配施定

量的硫磺条件下,糠醛渣可代替草炭降低土壤 pH 值,并改良土壤肥力<sup>[72]</sup>。目前,相关糠醛渣在蓝莓生产上的研究还较少,而其作为一种生物质材料,在实际使用过程中应当注意其盐分和金属残留对蓝莓生长和土壤环境的影响。

**3.2.4 高  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  肥使用比率** 提高水肥一体化系统中  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  肥料的使用比率,是农业中降低植物根际土壤 pH 值的一种常用的有效技术<sup>[73]</sup>,其主要通过 2 种不同的方式影响土壤 pH 值:(1)植物通过根系吸收  $\text{NH}_4^+$  并向周围环境释放  $\text{H}^+$  来降低土壤溶液的 pH 值,以维持根系内部的电平衡。相反,根系吸收  $\text{NO}_3^-$  后会释放  $\text{OH}^-$  或  $\text{HCO}_3^-$  进入土壤,从而增加土壤 pH 值<sup>[74]</sup>;(2)土壤微生物通过每氧化 1 mol  $\text{NH}_4^+$  释放 2 mol  $\text{H}^+$  来降低 pH 值<sup>[75]</sup>(式 1)。Tamir 等通过在滴灌系统中提高无机氮肥  $\text{N}-\text{NH}_4^+$  的施用比例(50% 和 100%),可以将土壤 pH 值降低到蓝莓生产所需的水平,且此方法与原先直接使用硫酸滴灌处理相比更加安全和环保<sup>[76]</sup>。



### 3.3 其他

近年来,科研人员在蓝莓土壤 pH 值调节措施研究方面也进行了一些新的尝试。李根柱等将封装 3% 或 6% 稀  $\text{H}_2\text{SO}_4$  和营养液的生态功能复合材料缓释膜(涂层纤维膜)施入土壤,结果发现缓释膜对降低土壤 pH 值效果明显,能满足蓝莓的生长需要<sup>[77]</sup>。付燕等研究食用醋对土壤 pH 值的调节作用,结果发现相较于硫磺改土,食用醋能迅速降低土壤 pH 值至其最适生长范围;在生产实践中,为考虑成本,可以使用醋酸来进行土壤 pH 值调节<sup>[78]</sup>。此外,醋糟也具有降低土壤 pH 值的作用,向基质中添加体积分数为 50% 醋糟能够改善基质理化性质并显著促进兔眼蓝莓灿烂根系生长<sup>[79]</sup>。付燕等研究发现,与施用木醋相比,淘米水降低土壤 pH 值更加快速有效,且绿色环保;施用淘米水 1 200 mL,90 d 后土壤 pH 值即能降至蓝莓生长最适范围,同时土壤中有效 N、P、K 含量增加,有机质利用也得到提高<sup>[80]</sup>。

## 4 问题与展望

随着蓝莓产业的迅速发展,其研究关注度也不断提升。虽然国内外科研人员在蓝莓品种选育和高效栽培等领域已经做了大量研究,但土壤问题一直是制约我国蓝莓产业发展的重要因素之一。蓝

莓的生长发育对土壤 pH 值极为敏感,土壤 pH 值调节和改良一直是蓝莓栽培的关键问题。目前,为改善蓝莓土壤环境,促进其生长,土壤 pH 值对蓝莓生长生理的影响机理和土壤 pH 值调节改良措施是当前需要研究解决的问题。

现阶段关于土壤 pH 值环境对蓝莓生长及其理化性质的研究主要还停留在植株生长、光合生理以及叶片、土壤、根系酶活性等基础层面,整体来看相关研究还不够深入。随着代谢组、转录组、蛋白组和基因组等生物组学和高通量测序等技术的出现,可以将土壤环境与植株生长结合起来研究,从分子水平来阐释蓝莓对土壤 pH 值的耐受和适应机制,可以为今后优质蓝莓栽培适宜土壤的选择提供理论指导。

在蓝莓土壤 pH 值调节措施方面,目前生产上可供使用和选择的土壤 pH 值调节和改良物质屈指可数。在发展绿色农业的趋势下,需要研究一些见效快、稳定性好、易于施用和环境友好型的土壤改良物质。因此寻找绿色、有机、高效的土壤 pH 值调节物质是今后研究的一个重要方向。此外,目前对蓝莓土壤 pH 值调节物质相关的研究主要是在其降低 pH 值效果和土壤理化性质方面,而对其果实品质和相关作用机制等微观方向的研究较少,这也是今后需要关注的一个方向。

在生产中,常通过施用酸化土壤改良剂来降低土壤 pH 值。研究蓝莓对高土壤 pH 值的耐受能力,筛选和培育能够在较高 pH 值土壤中生长的蓝莓品种,也是有效解决降低土壤 pH 值改良成本、提高蓝莓栽培经济效益的有效途径。虽然目前一些研究通过杂交、嫁接或驯化<sup>[81-84]</sup>等方法筛选和发现了一些具有耐高土壤 pH 值的蓝莓优质种质资源,但尚无耐土壤 pH 值新品种的发布。此外,关于耐较高土壤 pH 值蓝莓的生产试验和推广应用可行性还要进一步的研究和讨论。同时,随着表型组学、分子标记辅助育种、CRISPR 基因编辑等技术的发展,可以加快耐高 pH 值蓝莓品种的选育进程。此外,对于一些不适宜改土或改土成本过高的地区,进行蓝莓的基质容器栽培也是未来蓝莓人工规模高效栽培的发展趋势。

### 参考文献:

- [1] Silva S, Costa E M, Veiga M, et al. Health promoting properties of blueberries: a review [J]. Critical Reviews in Food Science and

- Nutrition, 2020, 60(2): 181–200.
- [2] Diaconeasa Z, Iuhas C I, Ayzaz H, et al. Phytochemical characterization of commercial processed blueberry, blackberry, blackcurrant, cranberry, and raspberry and their antioxidant activity [J]. Antioxidants (Basel, Switzerland), 2019, 8(11): 540.
  - [3] Figueira M E, Oliveira M, Direito R, et al. Protective effects of a blueberry extract in acute inflammation and collagen – induced arthritis in the rat [J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2016, 83: 1191–1202.
  - [4] Vuong T, Mallet J F, Ouzounova M, et al. Role of a polyphenol – enriched preparation on chemoprevention of mammary carcinoma through cancer stem cells and inflammatory pathways modulation [J]. Journal of Translational Medicine, 2016, 14(1): 13.
  - [5] 矫馨瑶. 蓝莓多酚的稳定性及对高脂膳食小鼠的辅助抗肥胖作用机制研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
  - [6] Cassidy A, Bertoia M, Chiuve S, et al. Habitual intake of anthocyanins and flavanones and risk of cardiovascular disease in men [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2016, 104(3): 587–594.
  - [7] Tsuda T. Possible abilities of dietary factors to prevent and treat diabetes via the stimulation of glucagon – like peptide – 1 secretion [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2015, 59(7): 1264–1273.
  - [8] Zhou L, Xie M H, Yang F, et al. Antioxidant activity of high purity blueberry anthocyanins and the effects on human intestinal microbiota [J]. LWT, 2020, 117: 108621.
  - [9] 刘龙龙, 陈致羽, 仇宏图, 等. 蓝莓提取物对小鼠免疫作用的研究 [J]. 食品科技, 2020, 45(10): 213–219.
  - [10] 赵丽娜, 王贺新, 徐国辉, 等. 美国最新公布的越橘属品种及特征 [J]. 中国南方果树, 2016, 45(5): 174–180.
  - [11] Gallegos – Cedillo V M, Álvaro J E, Capatos T, et al. Effect of pH and silicon in the fertigation solution on vegetative growth of blueberry plants in organic agriculture [J]. HortScience, 2018, 53(10): 1423–1428.
  - [12] Yu Y Y, Xu J D, Huang T X, et al. Combination of beneficial bacteria improves blueberry production and soil quality [J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(11): 5776–5784.
  - [13] 李亚东, 裴嘉博, 陈 丽, 等. 2020 中国蓝莓产业年度报告 [J]. 吉林农业大学学报, 2021, 43(1): 1–8.
  - [14] Ghosh A, Igamberdiev A U, Debnath S C. Thidiazuron – induced somatic embryogenesis and changes of antioxidant properties in tissue cultures of half – high blueberry plants [J]. Scientific Reports, 2018, 8: 16978.
  - [15] Montecchiarini M L, Bello F, Rivadeneira M F, et al. Metabolic and physiologic profile during the fruit ripening of three blueberries highbush (*Vaccinium corymbosum*) cultivars [J]. Journal of Berry Research, 2018, 8(3): 177–192.
  - [16] Caspersen S, Svensson B, Håkansson T, et al. Blueberry – Soil interactions from an organic perspective [J]. Scientia Horticulturae, 2016, 208: 78–91.
  - [17] Chen S C, Liang Z Z, Webster R, et al. A high – resolution map of soil pH in China made by hybrid modelling of sparse soil data and environmental covariates and its implications for pollution [J]. Science of the Total Environment, 2019, 655(10): 273–283.
  - [18] 丰 震, 许景伟, 范广武, 等. 蓝莓引种可行性浅析 [J]. 山东林业科技, 2001(2): 34–36.
  - [19] Eck P, Childers N F. Botany [M]. New Brunswick: Rutgers University Press, 1966: 14–44.
  - [20] Lafond J. Fertilisation azotée, phosphatée et potassique dans la production du bleuet nain sauvage [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2020, 100(2): 99–108.
  - [21] Retamales J B, Hancock J F. Blueberries [M]. 2nd ed. Boston, MA: CABI, 2018.
  - [22] 宋 雷, 柏文富, 梁文斌, 等. 土壤 pH 对蓝莓生长及光合作用的影响 [J]. 湖南林业科技, 2015, 42(1): 6–11, 26.
  - [23] 王兴东, 魏永祥, 魏 鑫, 等. 南高丛蓝莓品种‘奥尼尔’在辽宁日光温室引种栽培试验 [J]. 中国果树, 2016(1): 31–35.
  - [24] 黄 科, 孙向成, 何光明, 等. 施硫调节基质 pH 值对蓝莓幼苗生长、养分含量的影响 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2016, 33(2): 166–169.
  - [25] 张 舵, 杨艳敏, 魏永祥, 等. 激素配比和 pH 值对蓝莓试管苗增殖生长的影响 [J]. 北方果树, 2015(3): 13–14.
  - [26] 唐雪东, 李亚东, 臧俊华, 等. 土壤施硫对越橘生长发育的影响 [J]. 东北农业大学学报, 2004, 35(5): 553–560.
  - [27] 周 琳, 徐海军, 李 静, 等. 土壤 pH 值对蓝莓幼苗生长发育的影响 [J]. 国土与自然资源研究, 2010(1): 91, 94.
  - [28] 李晴鲁, 鲁珊珊, 张 红, 等. 乌饭树和蓝莓对不同土壤 pH 值的生理反应 [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2017, 43(4): 469–475.
  - [29] Austin M E, Bondari K. Response of ‘Tifblue’ and ‘Delite’ rabbiteye blueberry plants to varying soil pH [J]. Journal of Small Fruit & Viticulture, 1995, 3(1): 25–37.
  - [30] Jiang Y, Li Y, Zeng Q, et al. The effect of soil pH on plant growth, leaf chlorophyll fluorescence and mineral element content of two blueberries [J]. Acta Horticulturae, 2017(1180): 269–276.
  - [31] Das P, Samantaray S, Rout G R. Studies on cadmium toxicity in plants: a review [J]. Environmental Pollution, 1997, 98(1): 29–36.
  - [32] 沐 婵, 钱荣青, 吕艳玲, 等. 蓝莓“灿烂”叶片黄化症的相关营养元素分析 [J]. 中国南方果树, 2019, 48(3): 121–123, 127.
  - [33] 李亚东, 陈 伟, 张志东, 等. 土壤 pH 值对越橘幼苗生长及元素吸收的影响 [J]. 吉林农业大学学报, 1994, 16(3): 51–54.
  - [34] Tamir G, Zilkah S, Dai N, et al. Combined effects of CaCO<sub>3</sub> and the proportion of N – NH<sub>4</sub><sup>+</sup> among the total applied inorganic N on the growth and mineral uptake of rabbiteye blueberry [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 21(1): 35–48.
  - [35] Tamir G, Bar – Tal A, Zilkha S, et al. The effects of pH level and calcium carbonate on biomass and mineral uptake of blueberry grown in tissue – culture medium [J]. Acta Horticulturae, 2019(1265): 203–210.
  - [36] Alarcon – Poblete E, Gonzalez – Villagra J, Silva F M D, et al. Metabolic responses of *Vaccinium corymbosum* L. cultivars to Al<sup>3+</sup> toxicity and gypsum amendment [J]. Environmental and

- Experimental Botany, 2020, 176: 104119.
- [37] 董珊珊, 李宁冉, 杨海燕, 等. 蓝莓根系对土壤锰胁迫的生理响应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(3): 169–174.
- [38] Manquian – Cerda K, Escudey M, Zuniga G, et al. Effect of cadmium on phenolic compounds, antioxidant enzyme activity and oxidative stress in blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) plantlets grown *in vitro* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, 133: 316–326.
- [39] 林 丽, 乔建磊, 李亚东, 等. 越橘幼苗对铅、镉胁迫的响应分析[J]. 吉林农业大学学报, 2012, 34(4): 428–432.
- [40] Kovalski A P, Williamson J G, Olmstead J W, et al. Inflorescence bud initiation, development, and bloom in two southern highbush blueberry cultivars [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2015, 140(1): 38–44.
- [41] Jiang Y Q, Zeng Q L, Wei J G, et al. Growth, fruit yield, photosynthetic characteristics, and leaf microelement concentration of two blueberry cultivars under different long-term soil pH treatments [J]. Agronomy, 2019, 9(7): 357.
- [42] Togano Y, Fujimoto J, Azukizawa H. Effect of different soils on young tree growth and fruit quality of blueberry cultivars [J]. Japan Society Agriculture Technology Management, 2004, 11(2): 69–73.
- [43] Cummings G A, Mainland C M, Lilly J P. Influence of soil pH, sulfur, and sawdust on rabbiteye blueberry survival, growth, and yield [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1981, 106: 783–785.
- [44] Austin M E, Bondari K. Soil pH effects on yield and fruit size of two rabbiteye blueberry cultivars [J]. Journal of Horticultural Science, 1992, 67(6): 779–785.
- [45] 徐 璐, 郑建仙. 欧洲越橘花色苷的研究概况[J]. 中国食品添加剂, 2005(4): 43–46, 64.
- [46] 王 斌, 徐守霞, 赵志东. 土壤酸碱环境对蓝莓花色苷积累的影响研究[J]. 广东农业科学, 2010, 37(1): 45–47.
- [47] 皇甫诗男, 高庆玉, 张丙秀, 等. 不同土壤 pH 对蓝莓光合作用的影响[J]. 北方园艺, 2017(13): 31–37.
- [48] 乌凤章. 北高丛蓝莓品种耐较高土壤 pH 值胁迫能力综合评价和指标筛选[J]. 果树学报, 2020, 37(11): 1711–1722.
- [49] 宋 雷. 施用不同 pH 值溶液对蓝莓生长及果实品质的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.
- [50] 张 宇, 张丙秀, 魏媛媛, 等. 土壤 pH 值对蓝莓叶片生理生化影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(13): 107–109.
- [51] 袁 月, 代志国, 张丙秀, 等. 土壤 pH 对蓝莓生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2019, 39(8): 1434–1443.
- [52] 魏媛媛. 土壤 pH 值对蓝莓部分生理生化指标的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
- [53] 李欣怡, 李加好, 韩占江. pH 胁迫下三种越橘组培苗的生理反应[J]. 北方园艺, 2015(15): 107–111.
- [54] Altland J E, Jeong K Y. Dolomitic lime amendment affects pine bark substrate pH, nutrient availability, and plant growth: a review [J]. HortTechnology, 2016, 26(5): 565–573.
- [55] Schreiber M J, Nunez G H. Calcium carbonate can be used to manage soilless substrate pH for blueberry production [J]. Horticulturae, 2021, 7(4): 74.
- [56] Germida J J, Janzen H H. Factors affecting the oxidation of elemental sulfur in soils [J]. Fertilizer Research, 1993, 35(1/2): 101–114.
- [57] 李性苑, 罗开源, 杨 芩, 等. 施硫磺粉对土壤养分及蓝莓产量品质的影响[J]. 中国南方果树, 2015, 44(5): 101–105.
- [58] 张 悦, 张会慧, 周 琳, 等. 基于正交设计的施用硫磺、控水灌溉和施肥对蓝莓生长的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(1): 57–63.
- [59] Almutairi K F, Machado R M A, Bryla D R, et al. Chemigation with micronized sulfur rapidly reduces soil pH in a new planting of northern highbush blueberry [J]. HortScience, 2017, 52(10): 1413–1418.
- [60] 宁道儒, 邓先才, 向 敏, 等. 不同硫磺施肥量对土壤 pH 值的影响研究[J]. 四川农业与农机, 2015(6): 41–42.
- [61] 李亚东, 吴 林, 孙晓秋, 等. 施硫对土壤 pH、越橘树体生长营养的影响[J]. 吉林农业大学学报, 1995, 17(2): 49–53.
- [62] 乌凤章, 王贺新, 王民强. 几种越橘栽培基质的酸缓冲性及 pH 值调节技术研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(5): 2631–2632.
- [63] Grewal A, Abbey L, Gunupuru L R. Production, prospects and potential application of pyroigneous acid in agriculture [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2018, 135: 152–159.
- [64] 申 健, 杨国亭, 刘德江. 木醋及松针对越橘栽培土壤改良的影响[J]. 土壤, 2014, 46(2): 325–329.
- [65] 于志民, 吕 品, 周 琳. 木醋营养基质在盆栽蓝莓中的应用研究[J]. 国土与自然资源研究, 2012(5): 82–84.
- [66] 申 健, 刘德江, 谭 博, 等. 木醋在蓝莓扦插繁殖与栽培中的应用[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(21): 77–78, 163.
- [67] 董丽君, 李树和, 张子帆, 等. 不同浓度木醋液对蓝莓生长发育的影响[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(6): 87–89, 115.
- [68] 杨 芩, 曹锡波, 张婷婷, 等. 木醋对蓝莓土壤 pH 值和主要营养成分的影响[J]. 中国南方果树, 2018, 47(4): 88–91.
- [69] Zhang Y C, Wang X A, Liu B J, et al. Comparative study of individual and co-application of biochar and wood vinegar on blueberry fruit yield and nutritional quality [J]. Chemosphere, 2020, 246: 125699.
- [70] Zhao Y C, Yan Z B, Qin J H, et al. The potential of residues of furfural and biogas as calcareous soil amendments for corn seed production [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2016, 23(7): 6217–6226.
- [71] 纪前羽, 刘星剑, 刘爱兵, 等. 糠醛渣替代硫磺调节土壤 pH 值及其对蓝莓生长发育的影响[J]. 中国南方果树, 2013, 42(2): 15–17, 21.
- [72] 王瑞琦, 井大炜. 糠醛渣在蓝莓土壤理化性质调节中的应用研究[J]. 山东农业科学, 2017, 49(1): 98–102.
- [73] Silber A, Bar – Tal A. Nutrition of substrate-grown plants [M]// Raviv M, Lieth J H. Soilless culture: theory and practice. Amsterdam: Elsevier, 2019: 197–257.
- [74] Hawkesford M, Horst W, Kichey T, et al. Functions of macronutrients [M]// Marschner P. Marschner's mineral nutrition of higher plants. Amsterdam: Elsevier, 2012: 135–189.

程 佳,王发啟,李小双,等. 酚酸类化感物质种类、提取、分离和检测研究进展[J]. 江苏农业科学,2022,50(6):8-15.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.06.002

# 酚酸类化感物质种类、提取、分离和检测研究进展

程 佳,王发啟,李小双,杜亚东,谢 越

(安徽科技学院资源与环境学院,安徽凤阳 233100)

**摘要:**酚酸类物质是导致作物产生连作障碍问题的重要原因之一。对连作土壤中酚酸类物质进行有效提取和快速检测,是酚酸类物质研究的重要前提,也是农业行业和技术的需求。对酚酸类化感物质的种类结构、提取工艺、分离纯化和检测手段 4 个方面进行梳理总结,并对酚酸类物质的研究进行展望,以期土壤中酚酸类物质的科学研究提供理论和技术参考,为缓解因酚酸类化感物质产生的土壤连作障碍问题提供新的思路。

**关键词:**化感作用;酚酸类物质;提取;分离纯化;定性定量分析

**中图分类号:** S184;S344.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2022)06-0008-08

化感作用是由 Molish 在 1937 年首次提出<sup>[1]</sup>,后来国际化感作用学会将其定义为植物在生长发育过程中,将自身次生代谢的化学物质释放到周围环境,改变周围微生态环境,影响自身或周围其他植物的生长发育,导致植物间相互排斥或促进的现象<sup>[2-3]</sup>。众多研究表明,酚酸类物质为植物微生态环境中被鉴定最多、活性最强的一类化感物质<sup>[4-5]</sup>。国内外研究发现酚酸类化感物质释放到环境中有 4

种途径,即植物被雨水淋洗、植物残体分解(如凋落物)、根系渗出和挥发<sup>[6-7]</sup>。研究发现,这类化感物质是导致植物连作障碍的一个重要原因,在连作土壤中检测出的酚酸类物质含量明显增加。例如:在连作绥阳小米辣根际土壤中发现酚酸类物质数量从最初的 1 种增长到 10 种,其质量分数增加 44.8%<sup>[8]</sup>。连作 3 年的甜瓜土壤与未连作的土壤比较,土壤中 7 种酚酸总含量显著增加,连作 3 年后干土中 7 种酚酸的总量较未连作土壤增加了 96.80%<sup>[9]</sup>。

目前,酚酸类物质能够通过多种检测手段进行定性定量研究<sup>[10-13]</sup>,但是这些方法均较为繁琐且检测条件有限,检测灵敏度较低,不适合连作田间土壤中酚酸物质的快速分析,因此,探究土壤样品中酚酸的前处理和酚酸类物质高灵敏、简便、快捷的检测方法已成为农业行业和产业普遍亟待解决的问题。本文综合国内外相关文献,从酚酸类物质的

收稿日期:2021-05-14

基金项目:安徽省自然科学基金(编号:2008085MC81);安徽省重点研发计划面上项目(编号:201904a06020042);企业横向委托项目(编号:2020QX001)。

作者简介:程 佳(1997—),女,安徽歙县人,硕士研究生,主要从事农业资源高效利用研究。E-mail:chengj8067@163.com。

通信作者:谢 越,博士,教授,硕士生导师,主要从事环境污染控制研究。E-mail:yorke@126.com。

[75] Bloom P R, Skyllberg U L, Sumner M E. Chemical processes in soils [M]. Madison: SSSA, 2005: 411-460.

[76] Tamir G, Afik G, Zilkah S, et al. The use of increasing proportions of N - NH<sub>4</sub><sup>+</sup> among the total applied inorganic N to improve acidification and the nutritional status and performance of blueberry plants in soilless culture [J]. Scientia Horticulturae, 2021, 276: 109754.

[77] 李根柱, 张自川, 娄 鑫, 等. 缓释膜调酸改良土壤对蓝莓生长的影响[J]. 中国南方果树, 2017, 46(2): 127-131.

[78] 付 燕, 杨 芩, 张 杰, 等. 几种物质对蓝莓土壤 pH 及有效 N、P、K 的影响[J]. 北方园艺, 2016(12): 179-182.

[79] 李 琪, 於 虹, 王支虎, 等. 醋糟对土壤改良及兔眼蓝浆果幼苗生长的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2017, 26(4): 25-31.

[80] 付 燕, 杨 芩, 姚许思民. 淘米水对蓝莓土壤 pH 和主要营养

物质含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(20): 165-168.

[81] Tsuda H, Kunitake H, Aoki Y, et al. Efficient *in vitro* screening for higher soil pH adaptability of intersectional hybrids in blueberry [J]. HortScience, 2014, 49(2): 141-144.

[82] Yang W Q, Andrews H E, Basey A. Blueberry rootstock: selection, evaluation, and field performance of grafted blueberry plants [J]. Acta Horticulturae, 2016(1117): 119-124.

[83] Darnell R L, Williamson J G, Bayo D C, et al. Impacts of *Vaccinium arboreum* rootstocks on vegetative growth and yield in two southern highbush blueberry cultivars [J]. HortScience, 2020, 55(1): 40-45.

[84] Li Q S, Yu P, Lai J R, et al. Micropropagation of the potential blueberry rootstock - *Vaccinium arboreum* through axillary shoot proliferation [J]. Scientia Horticulturae, 2021, 280(2): 109908.