

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.01.011

董丽, 史学正, 杨曙方, 等. 蓝莓对土壤酸碱敏感性的量化表征研究. 土壤, 2022, 54(1): 80–87.

蓝莓对土壤酸碱敏感性的量化表征研究^①

董 丽^{1,3}, 史学正^{1,3*}, 杨曙方², 孙维侠^{1,3}, 王美艳^{1,3}, 徐胜祥^{1,3}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 浙江蓝美技术股份有限公司, 浙江绍兴 312000;

3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 土壤酸碱度是影响蓝莓树体正常生长的重要环境因子之一, 量化表征土壤酸碱度变化对保持蓝莓正常生长、提高经济效益的影响幅度至关重要。本文利用 Meta 分析方法系统地集成国内外 87 篇文献, 共筛选 12 个蓝莓品种, 利用文献中已提取数据组定量拟合土壤 pH 变化对不同品种蓝莓树体生长的影响差异。结果表明: 根据土壤 pH 变化对蓝莓树体生长的影响幅度判断, 蓝莓各品种的最适土壤 pH 分布在 4.4 ~ 5.0 之间; 利用量化拟合关系式的 $|k|$ 值, 将蓝莓生长对土壤 pH 变化的敏感性分为高敏感型、低敏感型和迟缓型 3 个类型, 不同敏感型蓝莓的最适土壤 pH 范围分别为 4.2 ~ 5.6、3.5 ~ 5.5 和 3.2 ~ 5.7; 利用土壤 pH 对蓝莓树体生长的影响幅度为评价依据, 将土壤 pH 适宜性划分为最适、适宜、有碍和不适 4 个等级。蓝莓种植户可依据土壤 pH 对蓝莓树体生长的影响幅度来调节蓝莓土壤 pH, 并依据蓝莓对土壤 pH 变化的敏感性来适当放宽或严格调整蓝莓土壤酸碱环境。

关键词: 蓝莓; 土壤酸碱度; 敏感度; 土壤适宜性等级

中图分类号: S156; S156.3 **文献标志码:** A

Quantitative Characterization of Blueberry Sensitivity to Soil pH

DONG Li^{1,3}, SHI Xuezheng^{1,3*}, YANG Shufang², SUN Weixia^{1,3}, WANG Meiyang^{1,3}, XU Shengxiang^{1,3}

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 Zhejiang Lanmei Technology Co., Ltd., Shaoxing, Zhejiang 312000, China; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Soil pH is one of the significant factors affecting the normal growth of blueberry. It is very important to quantify the change of soil pH in order to maintain the healthy growth of blueberry and improve its economic efficiency. In this study, 87 literatures were systematically collected from home and abroad, including 12 kinds of blueberry varieties. Meta-analysis was used to quantitatively simulate the effect of soil pH change on the growth of different blueberry varieties by using the data set extracted from the literatures. The results showed as follows: according to the impact of soil pH on blueberry growth, it is concluded that the optimal pH is 4.4–5.0. The absolute value of curve slope ($|k|$) was used to define blueberry sensitivity to soil pH change and blueberries was divided into three types, namely high, low and slow sensitive types, and the suitable soil pH were 4.2–5.6 for the high sensitivity type, 3.5–5.5 for the low sensitivity type, and 3.2–5.7 for the slow sensitivity type. Based on the quantitative effect of soil pH change on blueberry plant height, soil pH suitability was divided into four grades (optimum, appropriate, obstructive and improper). Thus, blueberry growers could adjust soil pH according to the divided pH ranges for blueberry growth, and relax or shrink soil pH requirement according to its sensitivity.

Key words: Blueberry; Soil pH; Sensitivity; Soil suitability grades

蓝莓是杜鹃花科(Ericaceae)越橘属(*Vaccinium*)多年生落叶或常绿灌木,成熟的蓝莓果实为深蓝色至紫罗兰色。蓝莓果实具有独特的防止脑神经衰弱、抗氧化及改善视力、增强人体自身免疫力等保健功能^[1-2],

含有丰富的矿质微量元素,被联合国粮农组织列为五大健康食品之一,堪称世界第三代水果之王^[3]。蓝莓不仅是我国重要的经济作物,还是我国南方贫困地区的重要扶持产业。目前我国蓝莓种植区域分布广泛,

①基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA13020601)和浙江蓝美技术股份有限公司项目资助。

* 通讯作者(xzshi@issas.ac.cn)

作者简介: 董丽(1993—),女,山东日照人,硕士研究生,主要从事土壤资源利用。E-mail: dongli@issas.ac.cn

根据气候特点及种植品种差异将产区划分为长白山、辽东半岛、胶东半岛、长江流域和西南产区^[4]。截至2020年底,我国蓝莓种植面积已达664 km²,总产量34.72×10⁴ t,鲜果产量23.47×10⁴ t,目前国内蓝莓市场批发价约100元/kg,利润可达2.6×10⁸元/km²^[5],但其对生长环境要求严格,尤其在气候因子、土壤酸碱度等方面。在温带寒冷地区适宜栽种半高丛和矮丛蓝莓,暖温带地区适宜种植北高丛和部分半高丛蓝莓,亚热带地区适宜栽培南高丛和兔眼蓝莓^[4]。

土壤酸碱度是影响蓝莓正常生长发育的重要土壤因子之一^[6],土壤pH过高或过低都会影响蓝莓健康生长^[7]。蓝莓生长环境过酸时,蓝莓根系会因过度吸收游离态重金属元素中毒,导致蓝莓生长衰弱甚至死亡^[8];土壤环境过碱时,土壤中的铁、镁等矿质元素由自由态随土壤pH提高转化为植物难吸收利用的结合态^[9],不仅会引起蓝莓树体缺素症,严重时会影响蓝莓生长发育甚至死亡。前人从不同角度研究土壤酸碱度对蓝莓生长发育的影响,主要包括对蓝莓树体长势或其生长量的影响等。对蓝莓长势的影响研究如周琳等^[10]通过比较不同土壤pH对蓝莓株高、基生枝长及百叶重等生长指标影响的结果表明,不同品种蓝莓长势最适的土壤pH不同,美登和北村蓝莓的适宜土壤pH分别为4.0~4.5和4.5~5.0,土壤pH<3.2会导致植株叶片枯黄和枯萎。袁月等^[11]利用硫磺粉调节盆栽基质pH的结果表明,伯克利、都克、喜来和北陆蓝莓的株高、地茎、基生枝长和叶面积均在土壤pH 4.8的土壤环境中植株生长状态最适,而土壤pH为3.4和5.8时蓝莓树体生长受到抑制。Jiang等^[9]通过比较蓝莓株高、地茎、叶片干重和根干重等生长状态,认为南高丛蓝莓品种超越1号对土壤高pH环境的耐受性高于兔眼蓝莓Climax的耐酸性。对蓝莓生长量的研究如李亚东等^[12]利用硫酸调节基质pH,通过比较蓝莓株高、百叶重、根重等植株生长量及叶片矿物元素的吸收量,表明北空蓝莓的适宜土壤pH为4.0~5.0,而艾朗和美登蓝莓在pH 4.0~4.5环境下生长最适。Gallegos-Cedillo等^[13]采用硝酸和柠檬酸调节基质pH,指出pH 4.0~5.5环境下蓝莓状态最适,且pH 6.3基质下蓝莓茎干重和叶片干重分别下降了约21%和18%。Chen等^[14]认为高丛蓝莓根际土壤的最适pH高于半高丛蓝莓。

综上所述,现有研究多集中于讨论土壤pH对蓝莓生长的影响,并未针对单一蓝莓品种准确量化土壤pH变化对蓝莓生长的影响以及蓝莓生长对土壤酸碱

变化的敏感性差异。Meta分析方法是一种对单个研究进行汇总、整合,并得出普遍结论及差异的定量综合的研究方法,目前已广泛应用于经济学、医学领域等多个方面^[15]。本研究针对前人研究存在的问题,采用Meta分析法收集国内外已发表关于土壤酸碱度影响蓝莓生长的文献,共筛选我国种植面积较广的12个蓝莓品种,利用Meta分析方法整合、定量分析土壤酸碱度对蓝莓生长的影响,根据蓝莓农艺生长指标对土壤酸碱度变化的敏感性进行分级,以为农户种植生产提供技术指导。

1 材料与方法

1.1 数据收集

本研究数据来源于CNKI和Web of Science两大文献数据库,设定检索时间为“1980—2019年”,以“蓝莓”“盆栽试验”“土壤酸碱度”“土壤pH”等为关键词进行检索。为减少随机误差,文献筛选标准如下:①蓝莓树龄为3年生盆栽苗;②试验中pH梯度划分清楚;③文中表述pH变化对蓝莓株高、地茎和冠幅等农艺生长指标的影响数据记录清晰。经过筛选,最终获得可用文献87篇,其中外文文献32篇、中文文献55篇,共涉及5大类蓝莓品系,即北高丛、南高丛、半高丛、矮丛和兔眼蓝莓。北高丛蓝莓包括伯克利(Berkeley)、喜来(Sierra)、蓝丰(Blue crop)和都克(Duke);南高丛蓝莓包括夏普蓝(Sharpblue)、薄雾(Misty)和莱格西(Legacy);半高丛蓝莓包括北陆(Northland)、圣云(Stcloud)和北村(North country);矮丛蓝莓包括美登(Blomidon);兔眼蓝莓包括灿烂(Britewell)。

1.2 数据分析

本文采用Meta分析法提取已筛选文献中土壤pH变化对蓝莓生长影响的数据组(pH,指标值),并确定本文土壤pH的研究区间为3.5~6.5。采用R程序中的meta包对数据组进行Meta分析,利用已提取数据组作土壤pH变化对不同品种蓝莓树体生长影响幅度的均值差异,并计算其95%的置信区间(即95%CI),若95%CI不与0重叠,说明pH变化对蓝莓生长的影响达到显著水平($P<0.05$)。

利用IBM Statistics SPSS 19.0对已处理的数据组作土壤pH变化对蓝莓生长影响的量化关系式,该公式用于表达pH变化对不同品种蓝莓生长的影响、判断不同品种蓝莓土壤pH变化的敏感性。若文献采用图的形式表达土壤pH影响蓝莓生长的数据,则利用Get Data Graph Digitizer 2.2.4提取数据。

为明确不同品种蓝莓生长对土壤 pH 变化的敏感性差异及 pH 适宜范围,以土壤 pH 变化对蓝莓生长量的影响幅度为评价标准,将蓝莓土壤 pH 适宜性划分为最适、适宜、有碍、不适 4 个等级。

2 结果

2.1 土壤酸碱度对蓝莓株高的影响

利用文献中土壤 pH 对蓝莓株高影响的数据组作拟合量化关系式,关系式中 x 和 y 分别表示土壤 pH 和蓝莓株高值。由关系曲线可求得蓝莓株高生长的最适 pH(表 1),曲线顶点 x 和 y 值表示最适土壤 pH 环

境下的蓝莓株高值,且不同品种间最适土壤 pH 有所差别,主要区间为 4.4~5.0,其中,美登蓝莓最低,最适 pH 4.4,北陆蓝莓最高,最适 pH 5.0,其他品种介于两者之间。表 1 中 y'_1 和 y'_2 值分别表示最适 pH 分别与 pH 3.5、6.5 环境中蓝莓株高的差值。不同品种蓝莓的 y'_1 值存在明显差异(1.5~29.8 cm),其中伯克利蓝莓的 y'_1 值最大,为 29.8 cm,美登蓝莓的 y'_1 值最小,为 1.5 cm;不同品种蓝莓的 y'_2 值集中在 7.7~47.4 cm,其中都克和伯克利高丛蓝莓变化最大,分别为 47.4、36.5 cm;且同一品种蓝莓的 y'_1 值和 y'_2 值同样存在差异。

表 1 土壤 pH 对蓝莓株高影响的拟合量化关系式
Table 1 Fitting quantitative relationship of effect of soil pH on blueberry plant height

蓝莓品种	公式	R^2	$ k $	顶点(x, y)	y'_1	y'_2
美登	$y = -1.795x^2 + 15.9x + 20.089$	1	3.6	(4.4, 55.3)	1.5	7.7
北陆	$y = -10.044x^2 + 100.94x - 171.03$	1	20.1	(5.0, 82.6)	23.3	21.8
圣云	$y = -3.8955x^2 + 36.651x - 2.969$	1	7.8	(4.7, 83.2)	5.6	12.6
北村	$y = -4.93x^2 + 47.316x - 39.545$	1	9.9	(4.8, 74.0)	8.3	14.3
夏普蓝	$y = -4.7167x^2 + 45.148x - 23.502$	0.95	9.4	(4.8, 84.5)	7.8	13.9
莱格西	$y = -6.1318x^2 + 60.288x - 55.754$	0.94	12.3	(4.9, 92.4)	12.3	15.4
薄雾	$y = -7.9382x^2 + 73.027x - 72.158$	0.96	15.9	(4.6, 95.8)	9.6	28.7
蓝丰	$y = -4.3194x^2 + 38.645x + 16.255$	1	8.6	(4.5, 102.7)	4.1	17.7
喜来	$y = -8.7646x^2 + 84.679x - 83.514$	1	17.5	(4.8, 121.1)	15.5	24.4
都克	$y = -10.925x^2 + 96.53x - 84.089$	1	21.9	(4.4, 129.1)	9.2	47.4
伯克利	$y = -14.691x^2 + 144.7x - 247.72$	1	29.4	(4.9, 108.6)	29.8	36.5
灿烂	$y = -11.106x^2 + 106.71x - 144.09$	0.94	22.2	(4.8, 112.2)	18.9	31.9

注: R^2 、 $|k|$ 分别表示曲线相关系数、斜率绝对值; y'_1 、 y'_2 分别表示最适土壤 pH 下株高值与 pH 3.5、6.5 下株高值的差值。

为了更直观地体现土壤 pH 变化对蓝莓株高的影响,本文利用图的形式直观表达拟合关系式(图 1),其中,土壤 pH 变化对不同品系蓝莓株高的影响差异表现为北高丛>兔眼>南高丛>半高丛>矮丛蓝莓,说明高丛蓝莓对土壤酸碱度变化敏感性大于其他蓝莓品系。不同品种蓝莓在最适 pH 环境下的株高值基本分布在 55.3~129.1 cm,说明最适土壤 pH 环境下,不同品种蓝莓间株高长势的差异较大。

2.2 土壤酸碱度对蓝莓地茎的影响

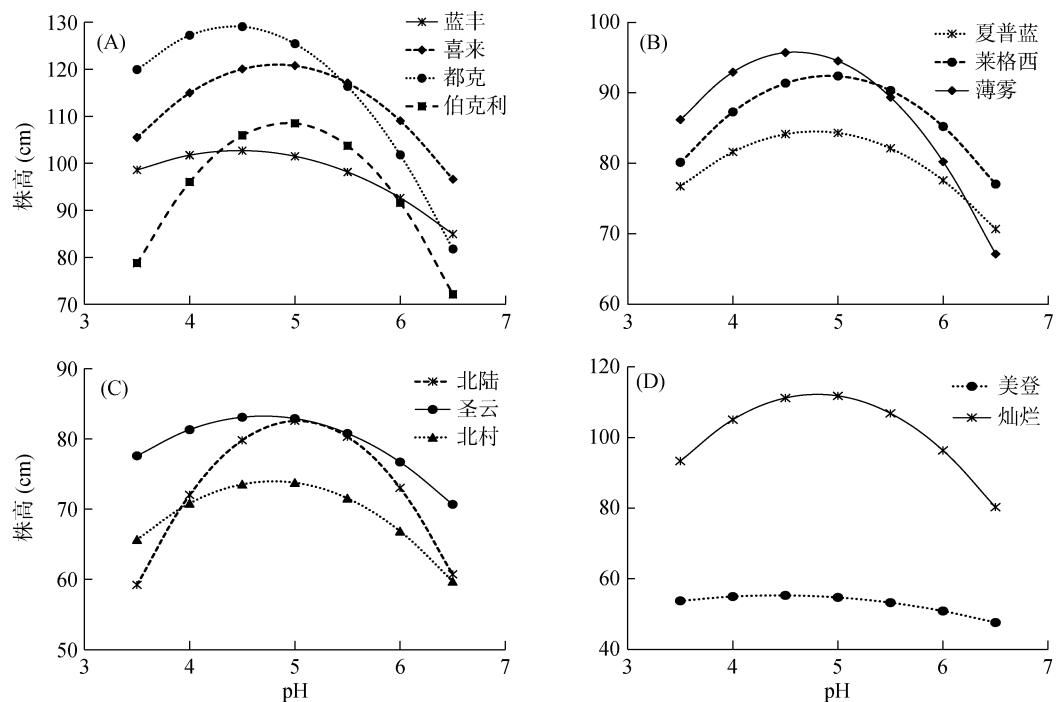
土壤 pH 对蓝莓地茎生长影响的文献仅筛选出 58 篇,为保证数据的精确度,故仅筛选 8 个品种表征土壤 pH 变化对蓝莓地茎的影响。表 2 中拟合量化关系式的 x 值和 y 值分别代表土壤 pH 和蓝莓地茎值,关系式均存在顶点且表示在最适 pH 环境下的蓝莓地茎值。不同品种蓝莓的最适土壤 pH 略有差异,主要集中在 4.6~5.0,与依据蓝莓株高确定的最适 pH 范围相近。表 2 中的 y'_1 和 y'_2 值分别表示最适 pH 中蓝

莓地茎与 pH 3.5、6.5 环境中蓝莓地茎的差值,分别集中于 0.4~1.4、0.5~2.1 cm,且不同品种蓝莓的 y'_2 值大于 y'_1 值,说明高 pH 环境对蓝莓地茎生长的影响更大。

图 2 表示土壤 pH 变化对不同品系蓝莓地茎的影响差异,土壤 pH 变化对不同品系蓝莓地茎的影响趋势差异较小,整体表现为北高丛>南高丛>兔眼>半高丛,说明北高丛蓝莓地茎对土壤 pH 变化更敏感,南高丛和兔眼蓝莓其次,半高丛蓝莓最小。图 2 中蓝莓地茎随土壤 pH 变化的曲线趋势显示,土壤 pH 变化对都克、伯克利、灿烂蓝莓的地茎影响明显,且表 2 中该类蓝莓 y'_1 值明显大于其他品种蓝莓。

2.3 土壤酸碱度变化对蓝莓冠幅的影响

土壤酸碱度对蓝莓冠幅影响的数据比较少,共收集文献 32 篇、6 个蓝莓品种。表 3 中拟合量化关系式的 x 值和 y 值分别代表土壤 pH 和蓝莓冠幅值,关系式顶点中的 x 、 y 值表示在最适土壤 pH 环境下的



(图 A~D 分别表示北高丛、南高丛、半高丛及矮丛和兔眼蓝莓品系)

图 1 土壤酸碱度对蓝莓株高生长的影响

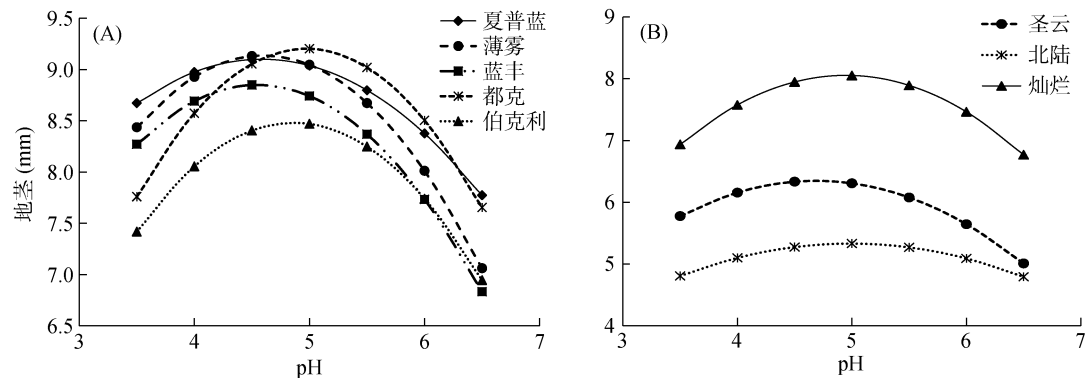
Fig.1 Effect of soil pH on blueberry plant height

表 2 土壤 pH 对蓝莓地茎影响的拟量化关系式

Table 2 Fitting quantitative relationship of effect of soil pH on blueberry stem

蓝莓品种	公式	R^2	$ k $	顶点(x, y)	y'_1	y'_2
圣云	$y = -0.4062x^2 + 3.8065x - 2.5698$	0.90	-0.8	(4.7, 6.4)	0.6	1.3
北陆	$y = -0.2359x^2 + 2.3546x - 0.5436$	0.99	-0.5	(5.0, 5.3)	0.5	0.5
夏普蓝	$y = -0.3621x^2 + 3.3213x + 1.4838$	0.85	-0.7	(4.6, 9.1)	0.4	1.3
薄雾	$y = -0.5764x^2 + 5.3056x - 3.0715$	0.88	-1.2	(4.6, 9.1)	0.7	2.1
蓝丰	$y = -0.5288x^2 + 4.8086x - 2.0812$	0.93	-1.1	(4.6, 8.9)	0.6	2.0
都克	$y = -0.665x^2 + 6.6151x - 7.247$	0.83	-1.3	(5.0, 9.2)	1.4	1.5
伯克利	$y = -0.5725x^2 + 5.5671x - 5.0525$	0.96	-1.2	(4.9, 8.5)	1.1	1.5
灿烂	$y = -0.5327x^2 + 5.2715x - 4.9873$	0.90	-1.1	(4.9, 8.1)	1.1	1.3

注： R^2 、 $|k|$ 分别表示曲线相关系数、斜率绝对值； y'_1 、 y'_2 分别表示最适土壤 pH 下地茎值与 pH 3.5、6.5 下地茎值的差值。



(图 A 表示北高丛、南高丛蓝莓；图 B 表示半高丛、兔眼蓝莓)

图 2 土壤 pH 变化对蓝莓地茎的影响

Fig. 2 Effect of soil pH on blueberry stem

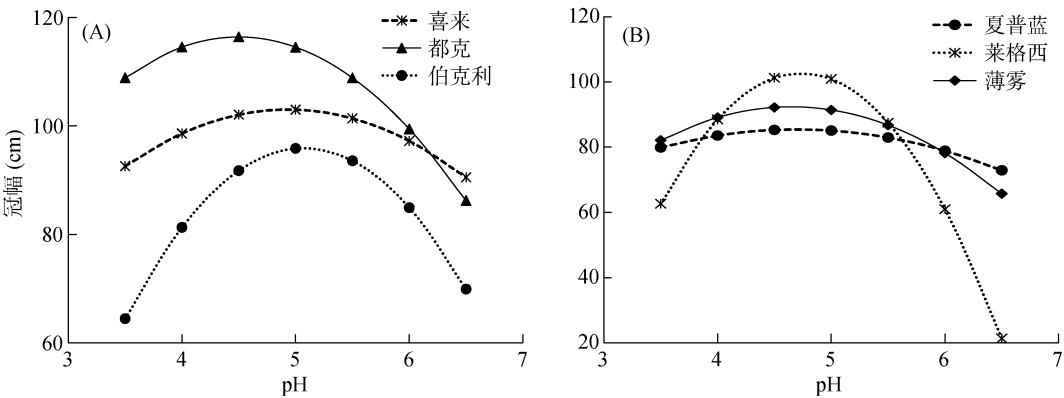
表 3 土壤 pH 对蓝莓冠幅影响的拟合量化关系式
Table 3 Fitting quantitative relationship of effect of soil pH on blueberry canopy width

蓝莓品种	公式	R^2	$ k $	顶点(x, y)	y'_1	y'_2
夏普蓝	$y = -3.8531x^2 + 36.194x + 0.4512$	0.83	7.7	(4.7, 85.5)	5.5	12.5
莱格西	$y = -26.191x^2 + 248.13x - 484.94$	0.94	52.4	(4.7, 102.8)	40.1	81.4
薄雾	$y = -7.7664x^2 + 72.203x - 75.441$	0.93	15.5	(4.6, 92.5)	10.2	26.6
喜来	$y = -5.086x^2 + 50.17x - 20.688$	0.88	10.2	(4.9, 103.0)	10.4	12.5
都克	$y = -7.5347x^2 + 67.797x - 36.097$	0.96	15.1	(4.5, 116.4)	7.5	30.2
伯克利	$y = -12.744x^2 + 129.26x - 231.84$	1.00	25.5	(5.1, 95.9)	31.5	26.0

注： R^2 、 $|k|$ 分别表示曲线相关系数、斜率绝对值； y'_1 、 y'_2 分别表示最适土壤 pH 下冠幅值与 pH 3.5、6.5 下冠幅值的差值。

蓝莓冠幅值。表 3 中 y'_1 和 y'_2 值分别表示最适 pH 环境下的蓝莓冠幅与 pH 3.5、6.5 环境中冠幅的差值， y'_1 值基本分布在 5.5 ~ 81.4 cm，其中，莱格西蓝莓最大， y'_1 、 y'_2 值分别为 40.1、81.4 cm；研究中蓝莓的 y'_1 值小于 y'_2 值，说明 pH 大于最适 pH 的土壤环境对蓝莓冠幅的影响大于 pH 小于最适 pH 土壤环境的影响。

图 3 表示土壤 pH 变化对不同品种蓝莓冠幅的影响趋势，不同品种蓝莓的最适 pH 主要集中在 pH 4.5 ~ 5.1，与依据蓝莓株高确定的最适 pH 范围相近。依据曲线趋势判断，莱格西和伯克利蓝莓冠幅受土壤酸碱度变化影响最大，土壤 pH 变化对薄雾和夏普蓝蓝莓冠幅的影响最小。



(图 A、B 分别表示北高丛、南高丛蓝莓)

图 3 土壤 pH 对蓝莓冠幅的影响

Fig. 3 Effect of soil pH on blueberry canopy width

3 讨论

3.1 蓝莓对土壤酸碱度变化的敏感性差异

倪子鑫等^[7]研究表明，土壤酸碱度变化对不同品种蓝莓影响程度存在明显差异。本文利用最适土壤 pH 与 pH 3.5 环境下蓝莓生长指标的差值表征蓝莓对土壤强酸环境的耐受性，即 $y'_1 = y_{(pH)} - y_{(pH3.5)}$ ；最适 pH 环境蓝莓生长指标与 pH 6.5 环境生长指标的差值表征蓝莓对弱酸性环境的耐受性，即 $y'_2 = y_{(pH)} - y_{(pH6.5)}$ ；差值越大，表明耐受性越小。根据表 1 中蓝莓株高差值的比较结果可知，莱格西和北陆蓝莓株高对强酸和弱酸性环境的耐受性相近；圣云、北村、夏普蓝、伯克利、喜来和美登蓝莓株高对弱酸性土壤的耐受性小于强酸环境，说明其适宜生长在偏弱酸性土壤中；灿烂、都克、蓝丰和薄雾蓝莓株高对弱酸性土

壤的耐受性远远小于强酸环境。

表 2 中蓝莓地茎差值结果表明，都克、伯克利、灿烂和北村蓝莓的地茎对土壤强酸和弱酸性环境的耐受性相近；圣云、夏普蓝、薄雾和蓝丰蓝莓的地茎对弱酸性土壤的耐受性小于强酸环境。表 3 中蓝莓冠幅差值分析结果表明，伯克利蓝莓冠幅对强酸环境的耐受性大于弱酸性环境；夏普蓝、莱格西、薄雾、喜来和都克蓝莓冠幅对弱酸性土壤的耐受性小于强酸环境。综合各指标的比较结果可知，北陆和灿烂蓝莓对土壤强酸性和弱酸性环境的耐受性相近，剩余 10 种蓝莓对弱酸性环境的耐受性大于强酸性环境。

本研究利用关系式曲线斜率的绝对值($|k|$)表示蓝莓生长指标对土壤 pH 变化的敏感性， $|k|$ 值越大，表示蓝莓生长指标对土壤 pH 变化的敏感性越大。利用表 1 ~ 表 3 中蓝莓农艺指标差值(y')求得蓝莓农艺

生长指标的平均差值,简称均差(v),即 $v=(y_1+y_2)/2$ 。不同品种蓝莓株高、地茎、冠幅的 v 值差异明显,分别集中在 4.6~33.1、0.5~1.5 cm 和 9.0~60.7 cm。本研究综合比较蓝莓农艺生长指标的 v 及 $|v|$ 值来判断蓝莓对土壤酸碱环境的敏感性,将其敏感性分为 3 类,即高敏感型、低敏感型和迟缓型。高敏感型蓝莓包括北陆、灿烂、莱格西、伯克利,该类蓝莓对土壤酸碱度变化最敏感、耐受性差且土壤 pH 适宜范围小,蓝莓种植户应精准调节该类蓝莓土壤环境的酸碱度;低敏感型蓝莓包括都克、薄雾、喜来、北村,土壤酸碱度变化对该类蓝莓的影响次之;迟缓型蓝莓包括蓝丰、圣云、夏普蓝、美登,该类蓝莓对土壤酸碱度变化敏感性最低、对土壤酸碱度的适宜范围较大。

3.2 蓝莓土壤 pH 适宜性的量化表征

蓝莓对土壤 pH 变化极为敏感,故土壤 pH 过高或过低对蓝莓生长发育都存在环境胁迫;土壤 pH 变化会影响根际土壤营养元素的生物有效性,从而影响植物的生长发育和生理代谢过程,阻碍蓝莓树体的生长^[16]。强酸环境($\text{pH}<5.0$)一方面会增加土壤中锰和铝等金属元素的溶解度,导致植株过量吸收重金属而对根系产生毒害作用,造成蓝莓生长不良,甚至死亡^[17-18];另一方面,土壤过酸易伤害蓝莓根系,使其对水分的吸收能力降低,引起水分胁迫甚至根系脱水死亡^[19]。Haynes 和 Swift^[20]研究表明,土壤 pH 过高,钾、钙等元素含量升高,蓝莓具有钙不耐受特征,易导致钙毒害,影响蓝莓正常生长发育^[12]。土壤碱性过高,一些元素特别是微量金属元素如铁等的溶解度降低,导致植物体中这些元素的缺乏,引起植株发生缺铁失绿等病症,影响其生长发育^[21-22]。

不同品种蓝莓的最佳土壤 pH 范围略有不同^[23],在一定范围内,土壤 pH 降低,蓝莓株高、地茎、冠幅等生长指标明显提高^[24],其中,株高是衡量蓝莓生长发育的重要生长指标,本研究将蓝莓株高曲线变化趋势作为评价标准将土壤酸碱度适宜性划分为 4 个等级,即最适、适宜、有碍、不适。最适土壤 pH 环境中,蓝莓生长状态最佳;适宜土壤为蓝莓株高峰值降低量为 3% 或 5% 的土壤环境,适宜蓝莓正常生长发育,且能为农户带来经济效益;有碍土壤为蓝莓株高峰值降低量为 3%~10% 或 5%~15% 的环境,该类环境下蓝莓生长缓慢,且经济效益差;不适土壤蓝莓株高峰值降低量大于 10% 或 15% 的土壤环境,此时蓝莓表现为长势不均甚至死亡,不能为农户带来经济效益。不同蓝莓品种对土壤酸碱度的敏感性存在明显差异,故不能按照统一标准判断其土壤适

宜性范围,其划分标准参考表 4。

表 4 土壤酸碱度适宜性分级标准(株高降低量, %)
Table 4 Grade standard of soil pH suitability for blueberries

酸碱敏感性	pH 适宜性分级			
	最适	适宜	有碍	不适
高敏感型	0	<3	3~10	≥10
低敏感型	0	<3	3~10	≥10
迟缓型	0	<5	5~15	≥15

不同品种蓝莓对土壤 pH 变化的敏感性不同,故蓝莓适宜生长区间略有不同。表 5 中高敏感型蓝莓(伯克利、莱格西、灿烂、北陆)的最适土壤 pH 主要集中在 4.8~5.0,适宜土壤 pH 范围分布在 4.2~5.5,此范围较前人研究^[16, 25]中蓝莓适宜土壤酸碱度范围更为狭窄,应严格控制该类蓝莓土壤环境酸碱度。低敏感型蓝莓(薄雾、都克、喜来、北村)的最适土壤 pH 集中在 4.4~4.8,适宜土壤 pH 范围集中在 3.5~5.6,此范围与前人研究^[10, 26]更为相近。迟缓型蓝莓(夏普蓝、蓝丰、圣云、美登)的 pH 适宜范围为 3.2~5.7,表明其对土壤 pH 变化的敏感度小,对土壤酸碱度环境要求较低,对土壤 pH 耐受力明显大于其他蓝莓品种,这与前人研究^[10, 27]的蓝莓适宜土壤 pH 范围相较更为宽泛,种植时可适当放宽此类蓝莓土壤酸碱度要求;有碍土壤会导致农户利润大幅降低,故 $\text{pH}<2.7$ 和 $\text{pH}>6.2$ 的土壤不宜种植蓝莓。

表 5 蓝莓土壤 pH 适宜性分级
Table 5 Grades of soil pH suitability for different blueberry varieties

蓝莓品种	pH 适宜性分级			
	最适	适宜	有碍	不适
美登	4.4	3.2~5.7	2.7~3.2, 5.7~6.2	<2.7, >6.2
北陆	5.0	4.5~5.5	4.4~4.5, 5.5~5.7	<4.4, >5.7
圣云	4.7	3.7~5.7	3.2~3.7, 5.7~6.2	<3.2, >6.2
北村	4.8	4.1~5.5	3.9~4.1, 5.5~5.7	<3.9, >5.7
夏普蓝	4.8	3.8~5.7	3.4~3.8, 5.7~6.1	<3.4, >6.1
莱格西	4.9	4.2~5.6	4.0~4.2, 5.6~5.8	<4.0, >5.8
薄雾	4.6	4.0~5.2	3.8~4.0, 5.2~5.4	<3.8, >5.4
蓝丰	4.5	3.4~5.6	2.9~3.4, 5.6~6.0	<2.9, >6.0
喜来	4.8	4.2~5.5	4.0~4.2, 5.5~5.7	<4.0, >5.7
都克	4.4	3.5~5.0	3.5~3.6, 5.0~5.2	<3.5, >5.2
伯克利	4.9	4.5~5.4	4.4~4.5, 5.4~5.5	<4.4, >5.5
灿烂	4.8	4.3~5.4	4.1~4.3, 5.4~5.5	<4.1, >5.5

3.3 蓝莓土壤酸碱度适宜区间比较

不同蓝莓品种的土壤 pH 适宜区间存在明显差异,这说明前人依据统一标准划分所有品种蓝莓的做

法存在局限性。本研究根据蓝莓株高曲线顶点降低 5%的标准比较土壤酸碱度适宜区域大小(表 6), 结果表明美登、蓝丰、圣云蓝莓的适宜土壤范围最为宽泛; 夏普蓝、北村、莱格西、喜来、都克、薄雾蓝莓的适宜土壤范围次之; 北陆、伯克利、灿烂蓝莓的适宜土壤范围最小, 对土壤酸碱环境变化最为敏感, 这与 3.1 中划分的蓝莓敏感性种类基本一致。上述结论证明, 针对不同品种蓝莓对土壤 pH 的敏感度差异, 农户可以适当放宽土壤适宜范围宽泛的蓝莓品种

的土壤酸碱度条件, 而针对适宜土壤范围窄小的蓝莓品种, 需严格控制其土壤酸碱度条件。本研究综合蓝莓农艺生长指标(株高、地茎和冠幅)下最适土壤 pH 及蓝莓生长对酸碱度变化的耐受性差异将蓝莓喜酸性分为两类, 即偏强酸性(最适 $\text{pH} \leq 4.5$)和喜弱酸性(最适 $\text{pH} \geq 4.6$)。偏强酸性蓝莓包括都克、蓝丰、美登; 喜弱酸性蓝莓包括喜来、薄雾、夏普蓝、莱格西、北村、圣云、灿烂、伯克利、北陆。上述结果说明现有蓝莓分类依据与土壤酸碱度的适宜性无关。

表 6 不同品种蓝莓土壤酸碱度适宜范围
Table 6 Suitable ranges of soil pH for different blueberry varieties

蓝莓品种	美登	北陆	圣云	北村	夏普蓝	莱格西	薄雾	蓝丰	喜来	都克	伯克利	灿烂
适宜 pH	3.2~5.7	4.4~5.7	3.7~5.7	3.9~5.7	3.8~5.7	4.0~5.8	3.8~5.4	3.4~5.6	4.0~5.7	3.6~5.2	4.3~5.5	4.1~5.5

4 结论

本研究结果表明, 蓝莓树体生长最适土壤 pH 基本介于 pH 4.4 ~ 5.0, 对 pH 的敏感度可以为高敏感型、低敏感型和迟缓型。高敏感型蓝莓(北陆、伯克利、莱格西、灿烂)最适和适宜土壤 pH 分别介于为 4.8 ~ 5.0、4.2 ~ 5.6, 低敏感型蓝莓(北村、喜来、都克、薄雾)分别介于 4.4 ~ 4.8、3.5 ~ 5.5; 迟缓型蓝莓(夏普蓝、美登、蓝丰、圣云)分别介于 4.4 ~ 4.8 和 3.2 ~ 5.7。弱酸性土壤对蓝莓生长的影响明显大于强酸性土壤。蓝莓种植前应依据其对土壤 pH 变化的敏感性适当调整土壤 pH 环境, 高敏感型蓝莓应着重控制土壤酸碱环境, 迟缓型蓝莓可适当放宽对土壤酸碱环境的要求。

参考文献:

[1] Caspersen S, Svensson B, Håkansson T, et al. Blueberry—Soil interactions from an organic perspective[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 208: 78–91.

[2] Messiga A J, Haak D, Dorais M. Blueberry yield and soil properties response to long-term fertigation and broadcast nitrogen[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 230: 92–101.

[3] 聂飞, 韦吉梅, 文光琴, 等. 蓝莓的生物学特性与栽培管理技术[J]. *中国果菜*, 2007, 27(3): 25–27.

[4] 李昭萱. 基于土壤和气候数据的中国蓝莓区域化研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2018.

[5] 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.

[6] Ochmian I, Kozos K, Jaroszewska A, et al. Chemical and enzymatic changes of different soils during their acidification to adapt them to the cultivation of highbush blueberry[J]. *Agronomy*, 2020, 11(1): 44.

[7] 倪子鑫, 孙月婷, 葛诗瑶, 等. 土壤 pH 对蓝莓生长的影响机理及应对措施研究进展[J]. *亚热带农业研究*, 2018, 14(2): 138–143.

[8] 郑培源. 不同酸碱度对蓝莓重金属吸收的影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 李亚东, 陈伟, 张志东, 等. 土壤 pH 值对越桔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.

[13] 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.

[14] Chen S J, Zhu Y, Shao T Y, et al. Relationship between rhizosphere soil properties and disease severity in highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum*)[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 137: 187–194.

[15] 雷相东, 彭长辉, 田大伦, 等. 整合分析(Meta-analysis)方法及其在全球变化中的应用研究[J]. *科学通报*, 2006, 51(22): 2587–2597.

[16] 李晴晴, 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.

[17] 张广杰, 刘炎赫, 谭秀山, 等. 蓝莓栽培中的土壤改良方式研究[J]. *河北农业科学*, 2016, 20(2): 40–42.

- [18] 林丽仙, 张庆美, 黄飏, 等. 土壤 pH 测定影响因素探讨及蓝莓种植园土壤 pH 值的测定[J]. 福建热作科技, 2013, 38(4): 22–26.
- [19] 刘兵, 周晓梅, 刘强, 等. 土壤条件对蓝莓栽培的影响研究进展[J]. 广东农业科学, 2012, 39(15): 56–59.
- [20] Haynes R J, Swift R S. Growth and nutrient uptake by highbush blueberry plants in a peat medium as influenced by pH, applied micronutrients and mycorrhizal inoculation[J]. *Scientia Horticulturae*, 1985, 27(3/4): 285–294.
- [21] 曹增强, 徐莹莹, 张宁, 等. 不同 pH 对蓝莓组培苗生长和元素吸收的影响[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(2): 50–57.
- [22] 谭钺, 王茂生, 吕勐, 等. 土壤环境对蓝莓生长的影响及改善措施[J]. 山东农业科学, 2015, 47(3): 80–84.
- [23] 李亚东, 吴林, 张志东, 等. 土壤 pH 值对越桔的生理作用及其调控[J]. 吉林农业大学学报, 1997, 19(1): 112–118.
- [24] 刘毅, 李红娟. 陕西蓝莓栽培土壤改良技术研究[J]. 陕西林业科技, 2019, 47(4): 48–51.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.