

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

乌凤章

(大连大学现代农业研究院, 辽宁大连 116622)

摘要:【目的】研究较高土壤pH值胁迫对北高丛蓝莓幼苗生长和生理特性的影响,筛选出耐较高土壤pH值胁迫能力强的品种和评价指标,为蓝莓抗性育种和合理栽培提供理论依据和技术支持。【方法】以11个北高丛蓝莓品种一年生扦插苗为试材,测定对照(pH为5.0)和较高土壤pH值(pH为6.0)处理下生长和生理指标的变化情况,评价不同品种耐较高土壤pH值能力,并筛选关键的鉴定指标。【结果】与对照相比,在具较高土壤pH值胁迫条件下,参试品种丙二醛(MDA)含量、过氧化氢酶(CAT)活性基本上显著升高,胞间CO₂浓度(C_i)基本保持稳定,而叶绿素(Chl)含量和最大光化学效率(F_v/F_m)均显著降低;多数蓝莓品种株高相对生长量、光合速率(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)显著降低;耐较高土壤pH值胁迫能力强的品种非光化学猝灭系数(NPQ)明显升高。【结论】11个北高丛蓝莓品种中‘双迪’‘甜心’‘伊丽莎白’‘埃利奥特’‘钱德勒’耐较高土壤pH值胁迫能力较强。T_r、G_s、株高相对生长量、ETR、CAT活性和叶绿素含量可作为鉴定北高丛蓝莓品种耐较高土壤pH值胁迫能力的关键指标。

关键词:北高丛蓝莓;土壤pH胁迫;综合评价;生理响应;光合作用

中图分类号:S663.2 文献标识码:A 文章编号:1009-9980(2020)11-1711-12

Comprehensive valuation and indicators of the tolerance to higher soil pH stress of 11 northern highbush blueberry varieties

WU Fengzhang

(Institute of Modern Agricultural Research, Dalian University, Dalian 116622, Liaoning, China)

Abstract: 【Objective】 In this study, we investigated the effects of higher soil pH stress on the growth and the physiological characteristics of northern highbush blueberry (*Vaccinium* Spp.) cutting seedlings of 11 varieties, to screen the varieties with strong tolerance to higher soil pH stress and the indicators of the tolerance to provide a theoretical basis and technical support for breeding new variety with resistance to higher pH and rational cultivation of blueberries. 【Methods】 Changes of the relative height growth, malonaldehyde (MDA) content, superoxide dismutase (SOD) activity, peroxidase (POD) activity, catalase (CAT) activity, Chlorophyll content, gas exchange parameters, and chlorophyll fluorescence parameters of Eleven Northern highbush blueberries (including ‘Bluecrop’ ‘Reka’ ‘D- II MSU54’ ‘Spartan’ ‘Cara’s Choice’ ‘Elizabeth’ ‘Chandler’ ‘Brigitta’ ‘Duke’ ‘Sweetheart’ and ‘Elliott’) were determined to evaluate the tolerance of different blueberry varieties to the higher soil pH stress, and to select the indicators of the tolerance, using their one-year-old cutting seedlings under the higher soil pH (6.0) treatment and the control (pH 5.0). 【Results】 The relative growth of height of the cutting seedlings of ‘D- II MSU54’ and ‘Elizabeth’ treated with higher pH was not significantly lower than that of the seedlings of the control, the relative growth of height of the seedlings under higher soil pH stress of the other varieties were significantly lower than those of the seedlings of the control. ‘D- II MSU54’ and ‘Sweetheart’ were mildly injured with an injury index of 2.00% and 6.67% respectively; ‘Spartan’ and ‘Duke’ were seriously injured with an injury index of 73.33% and 53.33% respectively;

收稿日期:2019-12-18

接受日期:2020-07-16

基金项目:大连市科技计划(2015B11NC084);辽宁省自然科学基金(2015020785)

作者简介:乌凤章,副教授,博士,主要从事果树栽培及育种研究。E-mail:wfz1965@126.com

the damage degree of the other varieties sat in the mid under the higher soil pH stress. Compared with the control, the MDA content and CAT activity of all tested varieties significantly increased, intercellular carbon dioxide (C_i) mainly kept stable, the chlorophyll (Chl) content and maximal quantum efficiency of photosystem II (F_v/F_m) significantly decreased. In addition, net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r), stomatal conductance (G_s), electron transport rate (ETR) and photochemical quenching coefficient (q_p) of the majority of the blueberry varieties were significantly decreased, the non-photochemical quenching coefficient (NPQ) of the varieties with strong tolerance to the higher soil pH stress significantly increased under higher soil pH stress for 90 days. The principal component analysis showed that the relative values of those indices were classified into two independent comprehensive indices (principal component). The principal component 1 mainly reflected the information of the plant height growth characteristics, the CAT activity, the main leaf physiological characteristics and the fluorescence parameters; the principal component 2 mainly reflected the information of the SOD activity. Comprehensive evaluation of the higher soil pH stress-tolerance (D value) showed that the ability of tolerance to the higher soil pH stress decreased in order of 'D- II MSU54' > 'Sweetheart' > 'Elizabeth' > 'Elliott' > 'Chandler' > 'Bluecrop' > Reka' > 'Cara's Choice' > 'Brigitta' > 'Duke' > 'Spartan'. Eleven blueberry varieties were divided into three categories by clustering analysis: the higher soil pH tolerant type, the middle type, and the higher soil pH intolerant type. The correlation degree between the relative values of fifteen indexes and the D value decreased in order of T_r > G_s > height relative growth > ETR > CAT activity > Chl content > q_p > P_n > NPQ > POD activity > SOD activity > C_i > F_v/F_m > MDA content by grey correlation analysis.【Conclusion】The higher soil pH stress had significant influence on each index during growth stage of the cutting seedlings of blueberry. Compared with the blueberry variety with intolerance to the higher soil pH stress, the CAT activity of the tolerant varieties maintained a in a relatively high level, the photosynthetic structure was slightly damaged, the photosynthesis was less affected, as a result, the high relative growth was less affected and the damage was less. Eleven Northern highbush varieties were divided into three categories by clustering analysis: the higher soil pH stress-tolerant type (including 'D- II MSU54' 'Sweetheart' 'Elizabeth' 'Elliott' 'Chandler'), the intermediate type (including 'Bluecrop' 'Reka' and 'Cara's Choice') and the higher soil pH stress-intolerant type (including 'Brigitta' 'Duke' and 'Spartan'). Among the fourteen higher soil pH tolerance related indexes of the Northern highbush blueberry under higher soil pH stress, T_r , G_s , the relative growth of height, the ETR, the CAT activity and the Chl content could be used as key indexes to identify the tolerance of the Northern highbush blueberry to the higher soil pH.

Key words: Northern highbush blueberry; Soil pH stress; Comprehensive evaluation; Physiological responses; Photosynthesis

蓝莓 (Blueberry) 又名越橘, 属杜鹃花科 (Ericaceae) 越橘属 (*Vaccinium* spp.) 植物。蓝莓果实富含花青素等物质, 具有清除自由基、延缓衰老、抗癌等作用, 被认为是 21 世纪新兴保健果品^[1]。北高丛蓝莓是最早的栽培蓝莓品种和蓝莓中经济价值最高的栽培种, 近年来其产品在世界范围内快速增加, 我国栽培面积不断扩大^[2]。蓝莓生长对土壤要求苛刻, 目前普遍认为正常生长需要 pH 4.5~5.5 的酸性根际

环境, 而不适宜的土壤酸度对蓝莓则是一种环境胁迫^[3]。当蓝莓生长在高 pH 值土壤中时, 常表现为营养缺乏、生长迟缓和产量下降, 生理代谢过程也受到一定影响^[4-7]。因此具有较高 pH 值的土壤成为影响蓝莓生长并限制产业发展的重要因素。生产中对于 pH 值过高的土壤, 需要进行改良, 以满足蓝莓正常生长发育的需要。土壤改良不仅花费昂贵, 而且也不能作为较高 pH 值土壤上生产蓝莓的长期解

决方案^[8]。因此挖掘蓝莓本身耐较高土壤pH值胁迫的能力,筛选和培育耐较高pH值土壤胁迫的蓝莓品种是解决这一问题的有效途径。

目前多数研究集中在不同土壤pH值体系对蓝莓生长、营养及生理代谢的影响,而有关耐较高土壤pH值品种资源评价的研究较少。尽管一些研究涉及到矮丛蓝莓耐较高土壤pH值胁迫能力评价^[8],或体外耐较高pH值蓝莓种质筛选^[9-10],但所用指标仅为单一的生长指标,而利用生长和生理指标进行北高丛蓝莓耐较高土壤pH值胁迫能力综合评价的研究尚未见报道。

植物的抗逆性是一个受多基因和胁迫因子双重控制的复杂性状,不同植物种类或品种抗逆机制差异较大,利用单一性状指标鉴定其抗逆性有较大的局限性,容易造成片面性和不稳定性。笔者通过对较高土壤pH值胁迫下11个北高丛蓝莓品种14项生长及生理生化指标的测定,对其耐较高土壤pH值胁迫能力进行评价,筛选出耐较高土壤pH胁迫能力蓝莓品种,并揭示北高丛蓝莓品种响应较高土壤pH值胁迫的生理机制,为选育适应较高土壤pH值环境的蓝莓品种及适宜地区蓝莓生产栽培提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试材料为1 a(年)生北高丛蓝莓扦插苗,原产地为美国。供试材料为‘蓝丰’‘瑞卡’‘双迪’‘斯巴坦’‘卡拉’‘伊丽莎白’‘钱德勒’‘布里吉塔’‘公爵’‘甜心’和‘埃利奥特’。

1.2 试验设计

试验在大连大学现代农业试验基地温室内进行。环境温度为25~35℃,相对湿度为40%~70%。2018年5月,选取高度一致且长势良好的各品种生根苗栽植于容器中(上口径25 cm,下口径20 cm,高30 cm)。提前一年进行土壤改良,将园土和草炭土按体积比1:1混合,再按1.2 kg·m⁻³的比例添加硫磺粉,混匀备用。6月1日开始布设试验,对于每个蓝莓品种,设置2个pH值梯度:对照土壤pH值为5.0,胁迫处理土壤pH值为6.0。每个处理3次重复,每个处理4盆,每盆栽植1株苗木,即每个处理12株苗木。用硫酸在pH检测仪下调配2个pH值水平的处理溶液。每隔2 d用处理溶液浇灌苗木1次,每次每

盆浇300 mL,每次浇灌前用自来水冲洗土壤,洗盐。处理开始第1个月内每隔2 d测定1次土壤pH值,若pH值不在设置误差范围(±0.2)内时,及时调节浇灌液浓度;以后每隔6 d测定1次土壤pH值,确保处理期间土壤pH值稳定在误差范围内。不同水平pH值处理90 d后进行生长指标、生理指标、气体交换参数和叶绿素荧光参数测定。选取枝条中部成熟叶片,测定生理指标,每项指标5次重复。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生长指标测定 分别测定pH值胁迫处理前的苗木株高 H_1 和pH值胁迫处理后株高 H_2 ,并计算株高绝对生长量 $H_0(H_2 - H_1)$ 和株高相对生长量 $(H_0 / H_1) \times 100\%$ 。植株受害分级标准参照叶乃好等^[11]的方法进行统计。受害指数/%= $\sum(\text{受害级数} \times \text{相应受害级植株数}) / (\text{总株数} \times \text{受害最高级数}) \times 100$ 。

1.3.2 生理指标测定 参考高俊凤^[12]的方法,采用硫代巴比妥酸法测定MDA含量;氮蓝四唑光化还原法测定SOD活性;愈创木酚法测定POD活性,双氧水法测定CAT活性,分光光度法测定Chl含量。

1.3.3 气体交换参数和叶绿素荧光参数测定 使用Li 6400XT便携式光合仪(美国Li-Cor公司)于2018年9月8:00—11:00测定气体交换参数,包括 P_n 、 C_i 、 G_s 和 T_r 。光强设定为1 000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,温度控制在(26±1)℃,相对湿度控制在38.7%±6.0%,气体流速设置为500 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ 。选择树冠中部外侧向阳成熟叶作为测定叶,每株测定10枚叶片。先对叶片进行20 min光诱导,然后进行测定。测定叶绿素荧光参数时选取中部同向成熟叶片,每株测定10枚叶片。测定前一天傍晚用锡箔纸包裹测定叶,经充分暗适应后,于第二天清晨测定初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m),计算 $F_v/F_m = (F_m - F_0) / F_m$ 。随后,将植物置于自然光下活化20 min,再测定NPQ、 q_p 和ETR。ETR=活化光强度×PS II光量子产量×0.5×0.84;NPQ= $F_m/F_m' - 1$ 。其余参数由仪器自动给出,取平均值。

1.4 数据处理

为消除品种间基础性状的差异,采用指标的相对值进行耐较高土壤pH值胁迫能力综合分析。

指标相对值=土壤pH值胁迫后指标值/对照指标值。 (1)

综合指标值(Z_i)计算公式为:

$$Z_i = \sum_{i=1}^n a_i X_i \quad (i=1, 2, \dots, n). \quad (2)$$

式中 a_i 为单一指标的特征值对应的特征向量, X_i 为指标相对值。

采用模糊隶属函数法将综合指标值标准化, 并进行综合评价。隶属函数值计算公式为:

$$\mu(Z_i) = (Z_i - Z_{i\min}) / (Z_{i\max} - Z_{i\min}) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中, $\mu(Z_i)$ 为各综合指标的隶属函数值, Z_i 表示为各品种第 i 个综合指标值; $Z_{i\max}$ 和 $Z_{i\min}$ 分别为所有品种中第 i 个综合指标值中的最大值和最小值, 各综合指标权重的计算公式为:

$$W_i = P_i / \sum_{i=1}^n P_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中, W_i 值表示第 i 个综合指标在所有综合指标中的重要程度; P_i 为各品种第 i 个综合指标的贡献率。各品种耐较高土壤 pH 值胁迫能力综合评价 (D 值) 的计算公式为:

$$D = \sum_{i=1}^n [\mu(Z_i) \times W_i] \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

根据灰色系统理论, 将 D 值和其他 14 个主要性状视为一个整体, 即灰色关联系统。并将 D 值设定为参考数列 X_0 , 对株高生长量、丙二醛等相对值分别设定为比较数列 X_i ($i=1\sim 14$), 通过各个比较数列

X_i 与参考数列 X_0 的相似程度来判断关联系数和关联度。参考伏兵哲等^[13]使用的方法计算关联系数和关联度。

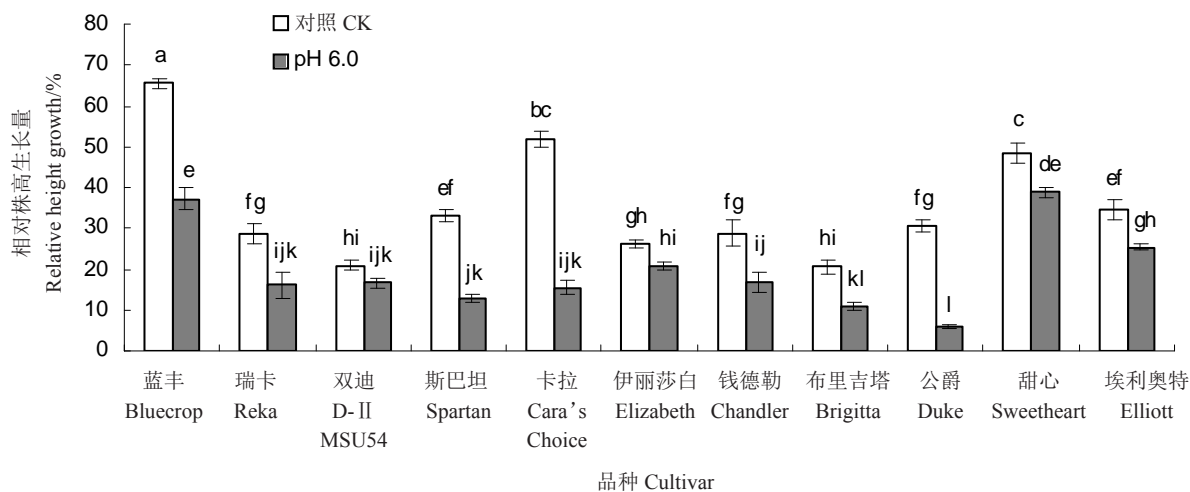
1.5 数据分析

文中数据采用 Excel 2010 软件进行处理; 用 SPSS 22.0 软件进行方差分析、主成分分析和聚类分析, 采用新复极差法 (Duncan) 比较不同数据组间的差异 ($p = 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 较高土壤 pH 值胁迫对北高丛蓝莓相对株高生长量的影响

在对照土壤条件下, 不同北高丛蓝莓品种相对株高生长量存在明显差异, 表明其具有不同的生长速率。然而在较高土壤 pH 值胁迫下, 除‘双迪’和‘伊丽莎白’外, 其余品种的株高相对生长量均明显低于对照, 其中‘公爵’‘卡拉’和‘斯巴坦’降幅较大, 分别为 80.40%、70.18% 和 61.16%, 而‘甜心’降幅较小, 仅为 19.87% (图 1)。说明较高土壤 pH 值已经影响了多数参试的北高丛蓝莓株高生长, 且对不同北高丛蓝莓品种影响程度差异较大。



不同小写字母表示在 $p < 0.05$ 水平上差异显著。

Different small letters indicate significant difference at $p < 0.05$.

图 1 土壤 pH 值胁迫对北高丛蓝莓幼苗相对株高生长量的影响

Fig. 1 Effect of soil pH stress on relative height growth of northern highbush blueberry seedlings

2.2 较高土壤 pH 值胁迫对北高丛蓝莓叶片的伤害程度比较

如图 2 所示, 11 个蓝莓品种经过 90 d 的较高土壤 pH 值处理, 与对照 (未受害) 相比, 叶片表现出不同程度的受害症状, 受害较轻的为‘双迪’和‘甜心’,

受害指数分别为 2.00% 和 6.67%, 受害较重的为‘斯巴坦’和‘公爵’, 受害指数分别是 73.33% 和 53.33%, 其余品种受害程度居中。根据叶片受害指数, 将蓝莓品种耐较高土壤 pH 值胁迫能力由强到弱排序为: ‘双迪’>‘甜心’>‘伊丽莎白’>‘埃利奥特’>‘钱德

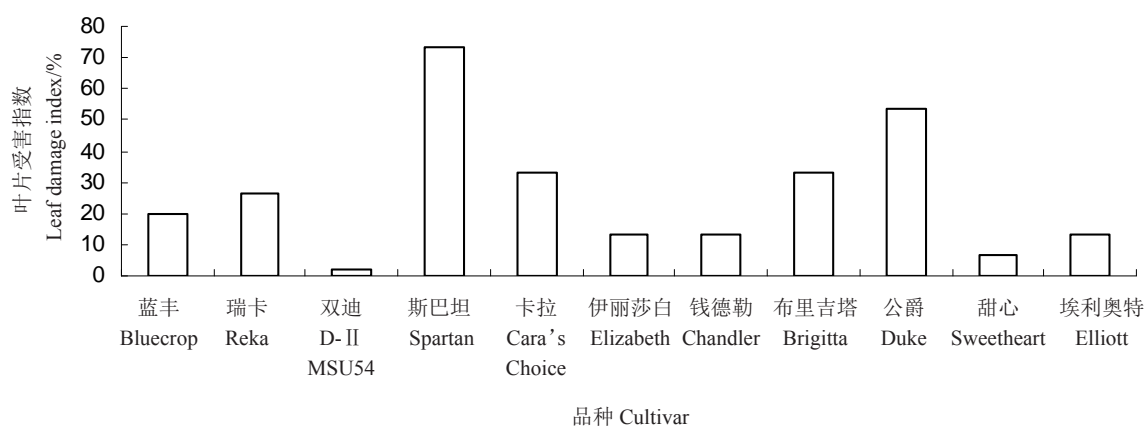


图 2 土壤 pH 值胁迫下不同北高丛蓝莓品种的叶片受害指数

Fig. 2 Leaf damage index of different northern highbush blueberry cultivar under soil pH stress

勒’>‘蓝丰’>‘瑞卡’>‘卡拉’>‘布里吉塔’>‘公爵’>‘斯巴坦’。

2.3 较高土壤 pH 值胁迫对北高丛蓝莓逆境生理生化指标的影响

MDA 是植物细胞膜脂过氧化的产物,通过影响细胞膜蛋白来调节活性氧代谢的平衡。抗逆性强的植物在逆境胁迫后 MDA 增幅较低。本试验中,在较高土壤 pH 值胁迫下,蓝莓品种‘甜心’MDA 含量与对照相比差异不显著,其他品种明显高于对照,其

中‘双迪’和‘伊丽莎白’MDA 含量增幅较小,分别为 64.18%和 71.43%,而‘斯巴坦’和‘公爵’增幅较大,分别为 257.75%和 172.09%,其他品种居中(表 1)。
‘甜心’的相对值最低,‘斯巴坦’的相对值最高(表 2)。说明不同蓝莓品种其膜脂受害程度明显不同,从而引起叶片不同程度的伤害症状。

从表 1 可知,与对照相比,除‘布里吉塔’外,较高土壤 pH 值胁迫下各蓝莓品种幼苗叶片 CAT 活性明显增大,增幅较大的为‘双迪’‘甜心’,分别增加了

表 1 土壤 pH 值胁迫对北高丛蓝莓丙二醛含量以及抗氧化酶活性的影响

Table 1 Effect of soil pH stress on MDA content and antioxidase activity of northern highbush blueberry

品种 Cultivar	处理 Treatment	b(丙二醛) MDA content/($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$)	过氧化氢酶活性 CAT activity/($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$)	超氧化物歧化酶活性 SOD activity/($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$)	过氧化物酶活性 POD activity/($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$)
蓝丰 Bluecrop	对照 CK	0.070±0.006 d	405.17±18.52 i	4 165.88±8.56 e	954.39±17.06 cd
	pH 6.0	0.150±0.005 ab	877.66±30.67 a	3 122.26±27.36 m	797.32±13.32 f
瑞卡 Reka	对照 CK	0.043±0.004 g	297.88±8.21 k	4 435.38±8.12 d	993.14±16.45 c
	pH 6.0	0.097±0.009 c	539.77±16.31 de	3 238.30±5.85 l	797.82±21.27 f
双迪 D-II MSU54	对照 CK	0.067±0.005 d	174.33±5.91 m	3 710.94±19.48 gh	692.88±14.59 g
	pH 6.0	0.110±0.015 bc	574.31±4.93 cd	2 866.72±44.28 n	893.35±16.14 e
斯巴坦 Spartan	对照 CK	0.059±0.005 de	385.03±8.04 i	4 879.67±34.54 b	1 297.55±23.25 a
	pH 6.0	0.210±0.02 a	576.82±7.36 cd	3 422.23±24.25 j	891.90±17.03 e
卡拉 Cara's Choice	对照 CK	0.051±0.003 ef	344.44±17.85 j	4 617.68±3.14 c	915.07±14.63 de
	pH 6.0	0.110±0.006 bc	594.30±15.49 c	3 347.67±53.42 k	694.30±13.56 g
伊丽莎白 Elizabeth	对照 CK	0.070±0.008 d	185.24±6.34 m	3 464.15±5.52 ij	796.72±16.53 f
	pH 6.0	0.120±0.015 bc	448.26±5.15 gh	3 463.15±5.51 ij	697.62±16.50 g
钱德勒 Chandler	对照 CK	0.054±0.003 e	227.44±22.20 l	4 384.01±8.34 d	797.27±16.37 f
	pH 6.0	0.123±0.015 bc	484.91±26.83 fg	3 287.11±6.92 kl	695.72±14.44 g
布里吉塔 Brigitta	对照 CK	0.057±0.003 de	647.59±5.82 b	5 856.56±17.66 a	1 048.19±10.66 b
	pH 6.0	0.133±0.009 abc	647.59±5.82 b	3 667.87±34.53 h	789.56±21.81 f
公爵 Duke	对照 CK	0.043±0.002 fg	321.28±7.14 jk	4 411.83±12.02 d	968.39±12.72 c
	pH 6.0	0.117±0.009 bc	511.75±10.11 ef	3 134.43±9.20 m	698.81±15.12 g
甜心 Sweet heart	对照 CK	0.060±0.006 de	167.95±12.53 m	3 947.75±8.44 f	697.43±15.04 g
	pH 6.0	0.070±0.006 d	492.49±10.11 f	3 081.21±7.18 m	761.00±22.85 f
埃利奥特 Elliott	对照 CK	0.053±0.005 e	172.16±5.66 m	3 737.53±14.53 g	797.37±13.19 f
	pH 6.0	0.10±0.006 bc	410.67±5.98 hi	2 791.66±13.32 o	698.24±15.13 g

注:同列不同小写字母者表示在 $p < 0.05$ 水平上差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at $p < 0.05$. The same below.

229.44%、193.24%，增幅较小的为‘斯巴坦’和‘公爵’，分别增加了49.81%和59.28%，其余品种居中；除‘伊丽莎白’SOD活性与对照无明显差异外，其余品种均明显低于对照，其中‘甜心’‘双迪’降幅较小，分别为21.95%和22.75%；‘布里吉塔’和‘斯巴坦’降幅较大，分别为37.37%和29.87%；11个品种中除‘双迪’和‘甜心’POD活性明显高于对照外，其余品种均明显低于对照，其中降幅较大的是‘斯巴坦’和‘公爵’，分别为31.27%和27.84%。此外‘双迪’和‘甜心’POD和CAT的相对值也明显高于其他品种(表2)。上述结果表明这3种抗氧化酶参与了蓝莓对较高土壤pH值的适应反应，其中‘双迪’和‘甜心’在较高土壤pH值环境中仍可保持相对较高的CAT和POD活性，较低的SOD降幅，具有一定的清除活性氧的能力，从而表现出对较高土壤pH值较强的适应性。

2.4 较高土壤pH值胁迫对不同北高丛蓝莓品种叶绿素含量和气体交换参数的影响

由表3可知，与对照相比，在较高土壤pH值胁迫下11个北高丛蓝莓品种叶绿素含量明显降低，其中‘伊丽莎白’和‘双迪’降幅较小，分别比对照降低了24.47%和39.80%；其相对值分别为0.757和0.602，明显高于其他品种。‘公爵’和‘斯巴坦’叶绿素含量降幅较大，分别比对照降低了63.61%和60.13%，其相对值也最低。说明‘伊丽莎白’和‘双迪’光合结构对较高土壤pH值胁迫有一定忍耐能力，而‘公爵’和‘斯巴坦’光合结构对较高土壤pH值胁迫较为敏感。

由表3可知，在较高土壤pH值胁迫下11个北高丛蓝莓品种中除‘埃利奥特’和‘双迪’的 P_n 与对照无明显差异外，其余品种均显著低于对照，其中降幅较大的为‘斯巴坦’和‘公爵’，分别降低了66.04%、58.75%；除‘甜心’ G_s 与对照无明显差异外，绝大多数品种 G_s 显著降低，其中降幅较小的为‘双迪’‘埃利奥特’，分别降低了17.95%和26.90%，降幅较大的为‘斯巴坦’和‘公爵’，分别降低了73.73%和70.31%，其余品种居中；11个品种 C_i 均与对照无明显差异；‘甜心’‘伊丽莎白’‘双迪’和‘埃利奥特’ T_r 与对照无明显差异，其余品种 T_r 明显低于对照，其中‘斯巴坦’和‘布里吉塔’降幅较大，分别为72.55%和56.51%。从表2可知，‘埃利奥特’和‘双迪’ P_n 的相对值明显高于其他品种；11个蓝莓品种中，‘甜

表2 干旱胁迫下11个北高丛蓝莓品种14个指标的相对值
Table 2 Relative values of fourteen indices of eleven northern highbush blueberry varieties under soil pH stress

指标 Index	蓝丰 Blucrop	瑞卡 Reka	双迪 D- II MSU54	斯巴坦 Spartan	卡拉 Cara's Choice	伊丽莎白 Elizabeth	钱德勒 Chandler	布里吉塔 Brigitta	公爵 Duke	甜心 Sweetheart	埃利奥特 Elliott
HRG	0.567±0.040 bc	0.565±0.091 bc	0.794±0.010 a	0.388±0.045 cd	0.298±0.042 d	0.794±0.049 a	0.581±0.007 bc	0.524±0.080 c	0.196±0.032 d	0.801±0.055 a	0.736±0.066 ab
MDA	2.143±0.154 bc	2.249±0.079 bc	1.642±0.237 cd	3.578±0.147 a	2.170±0.249 bc	1.714±0.224 cd	2.278±0.220 bc	2.293±0.259 bc	2.721±0.101 b	1.167±0.200 d	1.887±0.182 bcd
SOD	0.749±0.007 c	0.730±0.003 d	0.773±0.004 b	0.701±0.003 f	0.725±0.008 de	1.000±0.006 a	0.750±0.003 c	0.626±0.007 g	0.710±0.003 ef	0.780±0.004 b	0.747±0.002 c
POD	0.835±0.002 d	0.803±0.005 e	1.289±0.006 a	0.687±0.004 h	0.759±0.006 f	0.876±0.005 c	0.873±0.006 c	0.753±0.007 f	0.722±0.004 g	1.091±0.008 b	0.876±0.005 c
CAT	2.166±0.023 d	1.812±0.021 e	3.294±0.028 a	1.498±0.012 f	1.725±0.034 e	2.420±0.047 c	2.132±0.038 d	1.001±0.025 g	1.593±0.036 f	2.932±0.040 b	2.385±0.044 c
Chl	0.526±0.023 c	0.421±0.019 de	0.602±0.020 b	0.398±0.032 de	0.442±0.010 d	0.756±0.024 a	0.550±0.014 bc	0.419±0.012 de	0.365±0.033 e	0.528±0.011 c	0.571±0.025 bc
P_n	0.459±0.025 c	0.477±0.038 c	0.903±0.039 a	0.340±0.019 c	0.440±0.056 c	0.505±0.043 bc	0.490±0.041 bc	0.474±0.029 c	0.412±0.025 c	0.643±0.033 b	1.038±0.052 a
G_s	0.383±0.017 efg	0.421±0.038 ef	0.819±0.011 ab	0.261±0.021 g	0.365±0.056 efg	0.608±0.036 cd	0.578±0.019 d	0.451±0.009 de	0.297±0.021 fg	0.949±0.048 a	0.734±0.036 bc
C_i	1.020±0.031 a	0.985±0.020 a	1.097±0.054 a	0.972±0.062 a	0.982±0.054 a	1.044±0.084 a	1.069±0.065 a	0.812±0.057 a	0.919±0.053 a	1.127±0.062 a	1.010±0.043 a
T_r	0.546±0.023 e	0.511±0.033 e	0.854±0.062 bc	0.274±0.032 g	0.451±0.025 ef	0.992±0.066 b	0.715±0.063 cd	0.435±0.041 efg	0.604±0.046 de	1.171±0.068 a	0.771±0.053 cd
F_v/F_m	0.924±0.014 de	0.939±0.006 cd	0.976±0.011 ab	0.892±0.006 f	0.935±0.007 cd	0.976±0.012 ab	0.958±0.007 bc	0.911±0.006 ef	0.922±0.007 de	0.981±0.008 a	0.938±0.009 cd
ETR	0.536±0.015 cd	0.602±0.032 c	1.011±0.029 a	0.401±0.026 ef	0.475±0.041 de	0.540±0.066 cd	0.729±0.019 b	0.445±0.041 de	0.299±0.021 f	0.936±0.051 a	0.642±0.036 bc
q_p	0.755±0.075 abcd	0.729±0.023 bcd	0.964±0.016 a	0.691±0.081 cd	0.468±0.067 e	0.835±0.025 abcd	0.947±0.069 ab	0.694±0.042 cde	0.619±0.084 de	0.940±0.078 a	0.892±0.082 abc
NPQ	1.244±0.103 ab	1.072±0.099 bcd	1.447±0.034 a	0.826±0.095 d	1.180±0.112 abc	1.269±0.012 ab	1.237±0.043 ab	0.983±0.032 bcd	0.864±0.085 cd	1.300±0.121 ab	1.449±0.091 a

注：HRG, 株高相对生长量；MDA, 丙二醛；SOD, 超氧化物歧化酶；POD, 过氧化物酶；CAT, 过氧化氢酶；Chl, 叶绿素； P_n , 净光合速率； G_s , 气孔导度； C_i , 胞间CO₂浓度； T_r , 蒸腾速率； F_v/F_m , 最大光化学效率II；ETR, 电子传递速率；NPQ, 非光化学猝灭系数。同行不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同。
 Note: HRG, Height relative growth; MDA, Malonaldehyde; SOD, Superoxide dismutase; POD, Peroxidase; CAT, Catalase; Chl, Chlorophyll; P_n , Net photosynthetic rate; G_s , Stomatal conductance; C_i , Intercellular CO₂ content; T_r , Transpiration rate; F_v/F_m , Maximal quantum efficiency of photosystem II; ETR, Electron transport rate; q_p , Photochemical quenching. Different small letters in the same row indicated significant difference at 0.05 level. The same below.

表 3 土壤 pH 值胁迫对北高丛蓝莓叶绿素含量和光合特性的影响

Table 3 Effect of soil pH stress on chlorophyll content and photosynthetic characteristics of northern highbush blueberry

品种 Cultivar	处理 Treatment	w(叶绿素) Chlorophyll content/(mg·g ⁻¹)	净光合速率 P _n /(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	气孔导度 G _s /(mol·m ⁻² ·s ⁻¹)	胞间二氧化碳浓度 C _i /(μmol·mmol ⁻¹)	蒸腾速率 T _r /(mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)
蓝丰	对照 CK	0.520±0.009 e	10.728±0.283 cd	0.143±0.002 def	305.940±7.288 a	1.757±0.070 c
Bluecrop	pH 6.0	0.273±0.012 kl	4.926±0.139 kl	0.055±0.003 lm	311.933±1.924 a	0.959±0.065 ghij
瑞卡	对照 CK	0.486±0.012 f	13.544±0.611 a	0.210±0.017 ab	302.543±2.953 a	1.565±0.077 cd
Reka	pH 6.0	0.205±0.012 no	6.466±0.463 jk	0.088±0.012 ijk	298.079±8.784 a	0.800±0.074 ijk
双迪	对照 CK	0.686±0.013 b	12.263±0.608 ab	0.195±0.023 bc	286.814±32.498 a	1.302±0.096 def
D- II MSU54	pH 6.0	0.413±0.015 gh	11.071±0.363 bc	0.160±0.015 de	314.564±23.114 a	1.111±0.125 fgh
斯巴坦	对照 CK	0.785±0.017 a	9.397±0.503 defg	0.118±0.004 fghi	308.650±13.166 a	2.077±0.145 b
Spartan	pH 6.0	0.313±0.008 j	3.191±0.509 m	0.031±0.005 m	300.085±49.667 a	0.570±0.089 kl
卡拉	对照 CK	0.614±0.009 c	9.709±0.595 def	0.133±0.007 efg	307.871±21.730 a	1.543±0.090 cde
Cara's Choice	pH 6.0	0.271±0.008 kl	4.274±0.520 klm	0.049±0.019 lm	302.263±12.271 a	0.696±0.043 jkl
伊丽莎白	对照 CK	0.523±0.009 e	7.300±0.150 hi	0.062±0.004 kl	282.892±2.330 a	1.064±0.032 fghi
Elizabeth	pH 6.0	0.395±0.006 hi	3.686±0.689 lm	0.038±0.007 lm	295.325±53.803 a	1.056±0.221 fghi
钱德勒	对照 CK	0.548±0.007 de	8.457±0.364 efgh	0.094±0.005 hij	297.854±18.426 a	2.316±0.193 b
Chandler	pH 6.0	0.302±0.011 jk	4.145±0.420 klm	0.054±0.007 lm	318.483±33.193 a	1.656±0.019 c
布里吉塔	对照 CK	0.565±0.013 d	9.749±0.351 cde	0.146±0.016 de	321.255±6.375 a	2.920±0.160 a
Brigitta	pH 6.0	0.236±0.010 mn	4.620±0.154 kl	0.066±0.006 jkl	260.982±23.127 a	1.270±0.118 ef
公爵	对照 CK	0.621±0.012 c	7.224±0.349 hi	0.229±0.010 a	353.005±4.483 a	0.832±0.056 hij
Duke	pH 6.0	0.226±0.017 mno	2.980±0.228 m	0.068±0.005 hi	324.380±22.377 a	0.503±0.028 l
甜心	对照 CK	0.374±0.013 i	8.425±0.517 efgh	0.105±0.004 ghi	319.073±23.131 a	0.947±0.072 ghij
Swee heart	pH 6.0	0.197±0.008 o	5.415±0.555 ij	0.100±0.005 hi	359.522±3.015 a	1.109±0.058 fgh
埃利奥特	对照 CK	0.436±0.010 g	8.075±0.599 gh	0.171±0.011 cd	326.576±17.586 a	1.158±0.014 fg
Elliott	pH 6.0	0.249±0.005 lm	8.385±0.491 fgh	0.125±0.012 fgh	329.750±12.241 a	0.893±0.057 ghij

心’‘伊丽莎白’和‘双迪’的 G_s 和 T_r 的相对值较高,而‘斯巴坦’的最低。表明较高土壤 pH 值胁迫对不同蓝莓品种光合作用的影响程度明显不同。

2.5 较高土壤 pH 值胁迫对不同北高丛蓝莓品种叶绿素荧光参数的影响

最大光化学效率 (F_v/F_m) 降低表明植物体内光合作用原初反应受到抑制,由表 4 可知,与对照相比,较高土壤 pH 值胁迫下各参试品种幼苗叶片 F_v/F_m 显著降低,其中降幅较小的品种是‘甜心’和‘双迪’,分别为 1.92% 和 2.40%,降幅较大的是‘布里吉塔’和‘斯巴坦’,分别为 8.79% 和 10.76%; 蓝莓品种‘双迪’和‘甜心’ETR 变化不明显,其余品种明显降低,其中‘公爵’和‘斯巴坦’降幅较大,分别为 70.10% 和 59.94%; ‘双迪’‘钱德勒’‘甜心’和‘埃利奥特’的 q_p 降低不明显,其他品种明显低于对照,其中‘卡拉’和‘公爵’的降幅较大,降低了 53.18% 和 38.07% (表 4),说明这些品种 Q_A 重新氧化能力明显减弱,土壤 pH 值胁迫伤害了 PS II 受体侧电子传递。NPQ 是衡量过剩光能耗散的指标,较高土壤 pH 值胁迫下,‘埃利奥特’‘双迪’‘甜心’‘伊丽莎白’和‘蓝丰’的 NPQ 明显高于对照,增幅较大,表明它们具有较强的光能

调节能力,从而保护光合机构免受破坏,其余品种的 NPQ 与对照相比差异不大,光能调节能力较低,导致光合机构受到破坏。从叶绿素荧光参数的相对值来看,不同蓝莓品种间也存在明显差异(表 2),表明较高土壤 pH 值胁迫对不同品种蓝莓的光合结构造成不同程度地伤害,从而影响光合作用效率。

2.6 不同北高丛蓝莓品种耐较高土壤 pH 值能力的综合评价

2.6.1 不同指标的主成分分析及其载荷系数

主成分分析法是一种可在损失较少信息量的前提下利用指标间的相互关系,将多个变量经高度概括后转化为少量综合指标的降维分析方法。利用 SPSS 软件对 14 个筛选指标的相对值进行主成分分析,结果显示(表 5),前 2 个综合指标的方差贡献率分别为 72.37% 和 10.05%,累计贡献率达 82.42%,其余可忽略不计。这样将原有的 14 个单项指标转化为 2 个相互独立的综合指标(主成分),即这 2 个主成分可涵盖原始数据所提供的大部分信息,可作为数据分析的有效成分。在第 1 主成分中,相对株高生长量、CAT 活性、 G_s 、 T_r 以及 F_v/F_m 的载荷系数绝对值较大,说明该主成分主要反映的是植株高生长特性、抗氧

表 4 土壤 pH 值胁迫对北高丛蓝莓荧光参数的影响

Table 4 Effect of soil pH stress on chlorophyll fluorescence parameters of northern highbush blueberry

品种 Cultivar	处理 Treatment	F_v/F_m	ETR	q_p	NPQ
蓝丰	对照 CK	0.818±0.001 a	91.761±3.204 cd	0.473±0.045 abc	2.823±0.361 efghij
Bluecrop	pH 6.0	0.756±0.002 hi	49.204±2.821 g	0.357±0.016 efg	3.512±0.180 bc
瑞卡	对照 CK	0.816±0.005 a	73.535±2.870 e	0.439±0.026 cd	3.085±0.205 cdefgh
Reka	pH 6.0	0.766±0.005 gh	44.240±2.547 gh	0.320±0.026 fgh	3.307±0.151 bcdefg
双迪	对照 CK	0.790±0.008 ed	103.863±2.080 ab	0.550±0.029 a	3.181±0.162 bcdefgh
D-II MSU54	pH 6.0	0.771±0.003 fg	105.000±3.522 a	0.530±0.026 ab	4.602±0.275 a
斯巴坦	对照 CK	0.799±0.002 bcd	93.215±3.128 cd	0.388±0.036 def	2.783±0.157 fghij
Spartan	pH 6.0	0.713±0.001 l	37.344±2.517 hi	0.268±0.029 hijk	2.299±0.142 j
卡拉	对照 CK	0.810±0.005 ab	101.521±2.389 ab	0.534±0.017 ab	2.426±0.266 ij
Cara's Choice	pH 6.0	0.757±0.002 hi	48.239±3.123 g	0.250±0.038 ijk	2.862±0.064 efghij
伊丽莎白	对照 CK	0.803±0.002 bc	56.734±5.160 f	0.242±0.017 ijk	2.755±0.195 ghij
Elizabeth	pH 6.0	0.783±0.005 e	30.660±1.831 i	0.202±0.015 k	3.496±0.299 bc
钱德勒	对照 CK	0.799±0.001 cd	96.230±3.644 bc	0.471±0.034 bc	2.309±0.077 ij
Chandler	pH 6.0	0.765±0.002 gh	70.157±1.189 e	0.446±0.008 cd	2.857±0.048 efghij
布里吉塔	对照 CK	0.808±0.002 abc	86.979±3.874 d	0.409±0.022 cde	3.401±0.094 bcde
Brigitta	pH 6.0	0.737±0.005 k	38.690±1.786 hi	0.284±0.012 ghij	3.344±0.097 bcdef
公爵	对照 CK	0.808±0.001 abc	106.669±2.243 a	0.541±0.021 ab	2.690±0.140 hij
Duke	pH 6.0	0.745±0.004 jk	31.926±2.760 i	0.335±0.045 efgh	2.325±0.153 ij
甜心	对照 CK	0.780±0.003 ef	72.556±3.515 e	0.474±0.006 abc	2.889±0.093 defghi
Sweet heart	pH 6.0	0.765±0.004 gh	67.911±2.348 3 e	0.445±0.035 cd	3.755±0.360 b
埃利奥特	对照 CK	0.804±0.004 bc	58.043±3.947 f	0.333±0.020 efgh	2.390±0.144 ij
Elliott	pH 6.0	0.754±0.004 ij	37.282±0.820 hi	0.297±0.033 ghi	3.462±0.349 bcd

表 5 各主成分载荷系数及累计贡献率

Table 5 Coefficient and cumulative contribute rate of principal components (PC)

指标	主成分 1	主成分 2
Index	PC1	PC2
相对株高生长量 Relative height growth	0.895	0.008
丙二醛含量 MDA content	-0.853	0.000
超氧化物歧化酶活性 SOD activity	0.592	0.786
过氧化物酶活性 POD activity	0.889	-0.278
过氧化氢酶活性 CAT activity	0.938	-0.034
叶绿素含量 Chlorophyll content	0.795	0.479
净光合速率 Net photosynthetic rate (P_n)	0.712	-0.445
气孔导度 Stomatal conductance (G_s)	0.936	-0.217
胞间 CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ content (C_i)	0.818	0.119
蒸腾速率 Transpiration rate (T_r)	0.895	0.187
最大光化学效率 Maximal quantum efficiency of photosystem II (F_v/F_m)	0.912	0.203
电子传递速率 Electron transport rate (ETR)	0.890	-0.339
光化学猝灭系数 Photochemical quenching (q_p)	0.828	-0.150
非光化学猝灭系数 Non-photochemical quenching (NPQ)	0.887	-0.089
特征值 Eigenvalue	10.132	1.407
方差贡献率 Variance contribution rate/%	72.373	10.050
累计方差贡献率 Accumulated variance contribution rate/%	72.373	82.423

化酶CAT活性及主要的叶片光合作用和荧光参数等信息;在第2主成分中,SOD的载荷系数绝对值较大,说明该主成分主要反映的是叶片抗氧化酶SOD活性信息。

2.6.2 不同北高丛蓝莓品种的综合指标值、权重、D值及综合评价 通过主成分分析计算出每个蓝莓品种2个主成分的综合指标值(分别用 Z_1 、 Z_2 表示)(表6),通过隶属函数法,获得耐较高土壤pH值胁迫综合能力值(D值),用D值作为标准来进行各参试品种耐较高土壤pH值胁迫能力的排序,结果为‘双迪’>‘甜心’>‘伊丽莎白’>‘埃利奥特’>‘钱德勒’>‘蓝丰’>‘瑞卡’>‘卡拉’>‘布里吉塔’>‘公爵’>‘斯巴坦’(表7)。其中,‘双迪’D最高,说明其耐高土壤pH值胁迫能力最强,‘斯巴坦’D最低,说明其耐高土壤pH值胁迫能力最弱。

2.6.3 不同北高丛蓝莓品种的聚类分析 本试验采用欧氏距离法及系统聚类法对D值进行系统聚类(图3)。在欧氏距离5处可将11个蓝莓品种聚成3个类型:耐较高土壤pH值胁迫类型(包括‘双迪’‘甜心’‘伊丽莎白’‘埃利奥特’和‘钱德勒’)、中间类型(包括‘蓝丰’‘瑞卡’和‘卡拉’)和不耐较高土壤pH值胁迫类型(包括‘布里吉塔’‘公爵’和‘斯

表 6 不同北高丛蓝莓品种的 2 个综合指标值

Table 6 Two aggregative indicators of different northern highbush blueberry cultivar

指标 Index	蓝丰 Bluecrop	瑞卡 Reka	双迪 D-II MSU54	斯巴坦 Spartan	卡拉 Cara's Choice	伊丽莎白 Elizabeth	钱德勒 Chandler	布里吉塔 Brigitta	公爵 Duke	甜心 Sweetheart	埃利奥特 Elliott
Z ₁	-0.549	-1.184	4.733	-4.180	-2.262	2.708	1.017	-3.124	-3.615	4.368	2.087
Z ₂	0.299	-0.193	-1.308	-0.006	0.288	3.130	0.083	-1.017	0.221	-0.477	-1.020

表 7 不同北高丛蓝莓品种综合指标值的权重、隶属函数值、D 值及耐较高土壤 pH 值胁迫能力排序

Table 7 Weight (W_i), membership function value, D values and tolerance to higher soil pH stress ranking of different northern highbush blueberry cultivars

品种 Cultivar	$\mu(Z_1)$	$\mu(Z_2)$	D 值 D value	排序 Rank
蓝丰 Bluecrop	0.366	0.362	0.366	6
瑞卡 Reka	0.302	0.251	0.296	7
双迪 D-II MSU54	0.899	0.000	0.789	1
斯巴坦 Spartan	0.000	0.293	0.036	11
卡拉 Cara's Choice	0.193	0.360	0.214	8
伊丽莎白 Elizabeth	0.695	1.000	0.732	3
钱德勒 Chandler	0.524	0.313	0.499	5
布里吉塔 Brigitta	0.106	0.066	0.102	9
公爵 Duke	0.057	0.344	0.092	10
甜心 Sweetheart	0.862	0.187	0.780	2
埃利奥特 Elliott	0.632	0.065	0.563	4
权重 W _i	0.878	0.122		

注: $\mu(Z_i)$ 为隶属函数值。

Note: $\mu(Z_i)$ is membership function value.

巴坦')。

2.6.4 测定指标相对值与 D 值的灰色关联分析 通过灰色关联度分析, 获得各指标相对值与 D 值间的关联度, 结果显示 T_r 、 G_s 、株高相对生长量、ETR、CAT 活性和叶绿素含量的相对值与 D 值的密切程度较高 (表 8)。

3 讨论

3.1 北高丛蓝莓品种在较高土壤 pH 值胁迫下生长及生理特性的差异

土壤 pH 值对植物生长、土壤微生物活动、养分转化以及土壤肥力等均有明显的影响^[14-15]。不同植物种类或品种对土壤 pH 值一般有一定的适应范围, 在此范围内均能正常生长, 而超过范围则植物将处于一种胁迫状态, 影响生长和生理代谢。Harmers^[16] 研究提出, 适合蓝莓生长的土壤 pH 值范围为 4.0~5.2, 最适 pH 值为 4.5~4.8。而在较高土壤 pH 胁迫

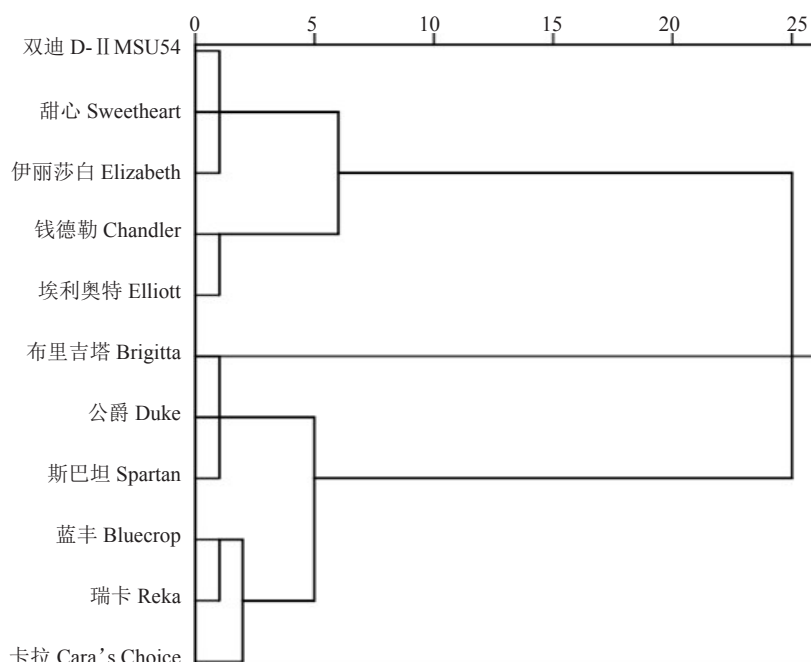


图 3 11 个北高丛蓝莓品种耐较高土壤 pH 胁迫能力的系统聚类分析

Fig. 3 System clustering of tolerance to higher soil pH stress of 11 northern highbush blueberry cultivar

表8 供试蓝莓品种各指标相对值与D值的关联度和序位
Table 8 Correlation degree and sequence between relative values of indices and D value

指标 Index	关联度 Correlation degree	位次 Rank
相对株高生长量 Relative height growth	0.764	3
丙二醛含量 MDA content	0.569	14
超氧化物歧化酶活性 SOD activity	0.645	11
过氧化物酶活性 POD activity	0.677	10
过氧化氢酶活性 CAT activity	0.733	5
叶绿素含量 Chlorophyll content	0.704	6
净光合速率 Net photosynthetic rate (P_n)	0.686	8
气孔导度 Stomatal conductance (G_s)	0.785	2
胞间CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ content (C_i)	0.642	12
蒸腾速率 Transpiration rate (T_r)	0.804	1
最大光化学效率 Maximal quantum efficiency of photosystem II (F_v/F_m)	0.626	13
电子传递速率 Electron transport rate (ETR)	0.742	4
光化学猝灭系数 Photochemical quenching (q_p)	0.690	7
非光化学猝灭系数 Non-photochemical quenching (NPQ)	0.680	9

下,蓝莓就会出现生长停滞、叶片缺素、根系发黑等现象^[17]。许多研究表明,不同蓝莓种或品种对土壤(或基质)高pH值有不同的耐受性,而且这种耐受性可通过后代遗传^[8-10,18]。一些蓝莓种类对高pH值土壤具有较强适应性,其分子机制是通过改变其营养、解毒和细胞壁相关基因网络来实现转录产物的调控,最终可能影响多种生理生化代谢途径^[19]。在本试验中,在较高pH值胁迫下,11个北高丛蓝莓中的多数品种相对株高生长量受到了显著影响,受害指数存在较大差异,表明不同北高丛蓝莓品种对较高土壤pH值的耐受性存在显著差异。

本试验通过对各项单一指标及其相对值的分析得出,除 C_i 外,其余13个指标在不同蓝莓品种间存在显著差异。在较高土壤pH值胁迫下,多数品种CAT活性明显提高,其中耐较高土壤pH值胁迫的品种CAT活性提高幅度明显大于不耐较高土壤pH值胁迫的品种,其CAT活性相对值也明显高于后者,这与乌饭树(*Vaccinium bracteatum* Thunb.)和兔眼蓝莓(*V. ashei* Reade)品种‘灿烂’在高土壤pH值下CAT活性变化规律一致^[5],表明CAT可能参与了蓝莓耐较高土壤pH值胁迫反应,通过快速清除有害成分,缓减膜脂过氧化作用,有效减轻MDA对植物体

的伤害,从而更好的适应具有较高pH值的土壤环境;耐较高土壤pH值胁迫品种在较高土壤pH值胁迫下ETR和 q_p 维持稳定或降幅显著小于不耐较高土壤pH值胁迫的品种,表明耐较高土壤pH值胁迫品种光系统II电子传递速率和光化学活性受影响较小,光合结构受损较轻,从而使其叶绿素含量、 P_n 、 G_s 和 T_r 保持稳定或降幅均明显小于不耐较高土壤pH值胁迫的品种。这些生理活动的改变最终表现为与不耐较高土壤pH值胁迫的蓝莓品种相比,耐较高土壤pH值胁迫的品种在较高pH值胁迫下,株高相对生长量受pH值胁迫影响较小,受害较轻。

3.2 北高丛蓝莓品种耐较高土壤pH值能力综合评价

植物抗逆性鉴定是对其抗逆能力进行筛选、评价和归类的过程,但使用单一指标很难全面、精准地反映各品种的抗逆性强弱,所以,用多个指标去评价植物的抗逆性才比较可靠。近年来,综合隶属函数法、主成分分析法和聚类分析法进行植物抗逆性鉴定已在绣球(*Hydrangea macrophylla*)、胡麻(*Linum usitatissimum* L.)等植物中得到了应用,较好地揭示了植物抗逆性的相关性状与其抗逆性的关系^[20-21]。但未见利用综合指标进行植物耐较高土壤pH值胁迫能力鉴定的报道。本试验采用主成分分析法、隶属函数法和聚类分析法,将参试品种划分为3个不同耐较高土壤pH值胁迫等级,耐较高土壤pH值胁迫类型、中间类型和不耐较高土壤pH值胁迫类型;根据耐较高土壤pH值胁迫能力综合评价将11个北高丛蓝莓品种耐较高土壤pH值胁迫能力排序为‘双迪’>‘甜心’>‘伊丽莎白’>‘埃利奥特’>‘钱德勒’>‘蓝丰’>‘瑞卡’>‘卡拉’>‘布里吉塔’>‘公爵’>‘斯巴坦’,这与按叶片受害情况排序结果完全一致。

3.3 北高丛蓝莓品种耐较高土壤pH值能力鉴定指标的筛选

植物抗逆性是一种由多因素、多机制共同作用的复杂数量性状,选择合理且有效的测定指标是鉴定植物抗逆性的关键。Finn等^[8]仅将植株活力指数、植株面积、植株体积、地上部分干重等生长指标作为鉴定蓝莓耐较高土壤pH值胁迫能力的指标,而缺乏对多种类型指标的综合筛选。关联度反映的是构成该系统的各性状组成的比较数列和参考数列间的密切程度,能够反映抗逆指标与抗逆能力之间关系的密切程度^[22]。杨升等^[23]通过灰色关联度分析,

筛选出与3种树木耐盐性相关的5个重要指标,分别为相对株高生长量、膜透性、脯氨酸、根茎叶中的 Na^+ 和 K^+ 含量。本研究选取与北高丛蓝莓耐较高土壤pH值胁迫相关的14个生长及生理生化指标,将其结合起来,从宏观和微观层面认识和分析蓝莓耐较高土壤pH值胁迫的内在机制,结果显示,与蓝莓耐较高土壤pH值能力综合评价值(D值)的关联程度较高的6个指标依次为 T_1 、 G_3 、株高相对生长量、ETR、CAT活性和叶绿素含量。从耐较高土壤pH值胁迫能力主成分分析的结果可以看出,株高相对高生长量、CAT活性、 G_3 、 T_1 等信息占据了首要位置,表明在具有较高pH值土壤胁迫下生长指标是不同品种间耐较高土壤pH值胁迫能力的重要体现。Tsuda等^[10]研究认为生根率可以作为鉴定蓝莓幼苗耐高pH值能力的指标;Xu等^[24]认为扦插苗株高与基质的pH值显著相关,这与本研究结果相近。在较高pH值胁迫条件下叶片光合作用和抗氧化能力与其耐较高土壤pH值胁迫能力密切相关。Jiang等^[18]认为具有较强的光合作用能力是蓝莓品种‘Chaoyue No. 1’耐高土壤pH值能力较强的原因之一,本研究结果与之相近。

4 结 论

通过试验分析,确定北高丛蓝莓品种‘双迪’‘甜心’‘伊丽莎白’‘埃利奥特’和‘钱德勒’耐较高土壤pH值胁迫能力较强。筛选出鉴定北高丛蓝莓苗期耐较高土壤pH值胁迫能力的关键指标为 T_1 、 G_3 、相对株高生长量、ETR、CAT活性和叶绿素含量。

致谢:大连大学生命科学与技术学院2019届毕业生朱心慰和胡锐锋同学参与了部分测定工作,特此感谢!

参考文献 References:

- [1] JOHNSON S A, FIGUEROA, NAVAELI N, WONG A, KALFON R, FERESIN R G, ELAM M L, PAYTON M E, ARJMANDI B H. Daily Blueberry Consumption Improves blood pressure and arterial stiffness in postmenopausal women with pre-and stage 1-hypertension: a randomized, double-blind, placebo-controlled clinical trial[J]. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 2015, 115(3): 369-377.
- [2] 李亚东, 裴嘉博, 孙海悦. 全球蓝莓产业发展现状及展望[J]. *吉林农业大学学报*, 2008, 40(4): 47-58.
- [3] LI Yadong, PEI Jiabo, SUN Haiyue. Status and prospect of global blueberry industry[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2008, 40(4): 47-58.
- [4] KORCAK R F. Nutrition of blueberry and other calcifuges[M]// *Horticultural Reviews*. Volume 10. John Wiley & Sons, Inc., 2011: 183-227.
- [5] TREHANE J. Blueberries, cranberries, and other vacciniiums [M]. Portland: Timber Press, 2004.
- [6] 李晴晴, 鲁珊珊, 张红, 杨艳, 肖家欣. 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.
- [7] LI Qingqing, LU Shanshan, ZHANG Hong, YANG Yan, XIAO Jiaxin. Physiological response to different soil pH values between *Vaccinium bracteatum* and *Vaccinium ashei*[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 2017, 43(4): 469-475.
- [8] 张宇, 张丙秀, 魏媛媛, 闫超, 皇甫诗男, 李征, 高庆玉. 土壤pH值对蓝莓叶片生理生化的影响[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(13): 107-109.
- [9] ZHANG Yu, ZHANG Bingxiu, WEI Yuanyuan, YAN Chao, HUANG Pushinan, LI Zheng, GAO Qingyu. Effects of soil pH value on physiology and biochemistry of blueberry leaves[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2017, 45(13): 107-109.
- [10] 皇甫诗男, 高庆玉, 张丙秀, 魏媛媛, 张宇, 张昭. 不同土壤pH对蓝莓光合作用的影响[J]. *北方园艺*, 2017(13): 31-37.
- [11] HUANGPU Shinan, GAO Qingyu, ZHANG Bingxiu, WEI Yuanyuan, ZHANG Yu, ZHANG Zhao. Effects of different soil pH on photosynthesis of blueberries[J]. *Northern Horticulture*, 2017(13): 31-37.
- [12] FINN C E, LUBY J, ROSEN C J, ASCHER P D. Blueberry germplasm screening at severals soil pH regimes. I. plant survival and growth[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1993, 118(3): 377-382.
- [13] FINN C E, LUBY J, ROSEN C J, ASCHER P D. Evaluation in vitro of blueberry germplasm for higher pH tolerance[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1991, 116(2): 312-316.
- [14] TSUDA H, KUNITAKE H, AOKI Y, OYAMA A. Efficient *in vitro* screening for higher soil pH adaptability of intersectional hybrids in blueberry[J]. *HortScience*, 2014, 49(2): 141-144.
- [15] 叶乃好, 翟衡, 杜中军, 许宏. 水分胁迫条件下10种苹果砧木抗旱性评价[J]. *果树学报*, 2004, 21(5): 395-398.
- [16] YE Naihao, QU Heng, DU Zhongjun, XU Hong. Evaluation of drought resistance of ten apple rootstocks[J]. *Journal of Fruit Science*, 2004, 21(5): 395-398.
- [17] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [18] GAO Junfeng. Plant physiology experiment instruction[M]. Beijing: High Education Press, 2006.
- [19] 伏兵哲, 高雪芹, 高永发, 李东宁, 张龙, 张蓉. 21个苜蓿品种主要农艺性状关联分析与综合评价[J]. *草业学报*, 2015, 24(11): 174-182.

- FU Bingzhe, GAO Xueqin, GAO Yongfa, LI Dongning, ZHANG Long, ZHANG Rong. Correlation analysis of the main agronomic traits and performance of 21 alfalfa varieties[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(11): 174-182.
- [14] 唐琨,朱伟文,周文新,易镇邪,屠乃美. 土壤 pH 对植物生长发育影响的研究进展[J]. *作物研究*, 2013, 27(2): 207-212.
- TANG Kun, ZHU Weiwen, ZHOU Wenxin, YI Zhenxie, TU Naimei. Research progress on the effect of soil pH on plant growth and development[J]. *Crop Research*, 2013, 27(2): 207-212.
- [15] SOTI P G, JAYACHANDRAN K, KOPTUR S, VOLIN J C. Effect of soil pH on growth, nutrient uptake, and mycorrhizal colonization in exotic invasive *Lygodium microphyllum*[J]. *Plant Ecology*, 2015, 216(7): 989-998.
- [16] HARMERS P M. The effect of varying the reaction of organic soil on the growth and production of the domesticated blueberry [J]. *Soil Science*, 1945, 9: 133-144.
- [17] TOWNSEND L. Effect of acidity on growth and nutrient composition of the highbush blueberry[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 1971, 51(5): 385-390.
- [18] JIANG Y Q, ZENG Q L, WEI J G, JIANG J F, LI Y J, CHEN J B, YU H. Growth, fruit yield, photosynthetic characteristics, and leaf microelement concentration of two blueberry cultivars under different long-term soil pH treatments[J]. *Agronomy*, 2019, 9: 357.
- [19] PAYÁ-MILANS M, NUNEZ G H, OLMSTEAD J W, RINEHART T A, STATON M. Regulation of gene expression in roots of the pH-sensitive *Vaccinium corymbosum* and the pH-tolerant *Vaccinium arboreum* in response to near neutral pH stress using RNA-Seq[J]. *BMC Genomics*, 2017, 18(1): 580-596.
- [20] 蔡建国,章毅,孙欧文,杨倩倩. 绣球抗旱性综合评价及指标体系构建[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(10): 19-26.
- CAI Jianguo, ZHANG Yi, SUN Ouwen, YANG Qianqian. Comprehensive evaluation and construction of drought resistance index system in *Hydrangea macrophylla*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(10): 19-26.
- [21] 罗俊杰,欧巧明,叶春雷,王方,王埔臻,陈玉梁. 重要胡麻栽培品种的抗旱性综合评价及指标筛选[J]. *作物学报*, 2014, 40(7): 1259-1273.
- LUO Junjie, OU Qiaoming, YE Chunlei, WANG Fang, WANG Yongzhen, CHEN Yuliang. Comprehensive valuation of drought resistance and screening of indices of important flax cultivars[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(7): 1259-1273.
- [22] 张江涛,杨淑红,朱镛,朱延林,刘友全. 美洲黑杨 2025 及其 2 个芽变品种苗对持续干旱的生理响应及抗旱性评价[J]. *林业科学*, 2018, 54(6): 33-43.
- ZHANG Jiangtao, YANG Shuhong, ZHU Di, ZHU Yanlin, LIU Youquan. Physiological response of annual grafted seedlings of poplar 2025 and its two bud mutation varieties to drought stress and evaluation of drought resistance[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, 54(6): 33-43.
- [23] 杨升,刘正祥,张华新,杨秀艳,刘涛,姚宗国. 3 个树种苗期耐盐性综合评价及指标筛选[J]. *林业科学*, 2013, 49(1): 91-98.
- YANG Sheng, LIU Zhengxiang, ZHANG Huaxin, YANG Xiuyan, LIU Tao, YAO Zongguo. Comprehensive evaluation of salt tolerance and screening identification indexes for three tree species[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(1): 91-98.
- [24] XU C X, MAI Y P, GUO F. Effect of soil pH on the growth, photosynthesis and mineral element content in own-rooted saplings and grafted saplings of blueberry[J]. *Asian Agricultural Research*, 2017, 9(11): 75-81.