

不同蓝莓品种幼苗氮素利用效率和适宜施氮水平分析

宋佳蓉¹, 刘梦溪¹, 葛春峰¹, 张鹏程², 赵刚², 於虹¹, 曾其龙^{1,①}

[1. 江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园) 江苏省植物资源研究与利用重点实验室, 江苏 南京 210014;

2. 地球化学勘查与海洋地质调查研究院, 江苏 南京 210007]

摘要: 为筛选蓝莓(*Vaccinium* spp.)氮高效品种及探究不同蓝莓品种幼苗的适宜施氮水平,本研究以长江流域4个蓝莓主栽品种‘莱格西’(‘Legacy’)、‘绿宝石’(‘Emerald’)、‘优瑞卡’(‘Eureka’)和‘蓝美1号’(‘Lanmei 1’)为实验材料,通过盆栽实验,设置不施氮(0.000 g·kg⁻¹)、低氮(0.214 g·kg⁻¹)、中氮(0.429 g·kg⁻¹)和高氮(0.857 g·kg⁻¹)4个处理,分析不同施氮水平下不同蓝莓品种幼苗农艺性状及氮素利用效率的差异。结果显示:‘莱格西’和‘绿宝石’属于低氮高效型,‘优瑞卡’属于中氮高效型,‘蓝美1号’属于氮高效型。随着施氮水平的提高,4个蓝莓品种幼苗的单株干质量增加量,株高,冠幅,基径,叶片叶绿素相对含量,根、茎、叶和单株氮素增加量,以及单株磷素增加量总体呈上升趋势;单株分枝数和单株钾素增加量呈先上升后趋于稳定的变化趋势;氮素效率、氮素吸收效率和氮素生理利用效率总体呈先上升后下降的变化趋势;根冠比则总体呈下降趋势。相关性分析结果显示:在不施氮和3个施氮水平下,蓝莓幼苗的氮素效率与单株干质量增加量、茎氮素增加量、单株氮素增加量、单株磷素增加量、单株钾素增加量、氮素吸收效率均呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)正相关。综合分析结果表明:‘蓝美1号’为氮高效品种,可作为氮高效遗传改良种质资源;单株干质量增加量可作为蓝莓氮素利用效率评价的重要指标;氮高效品种‘蓝美1号’和中氮高效品种‘优瑞卡’幼苗的推荐施氮水平为0.429 g·kg⁻¹,低氮高效品种‘莱格西’和‘绿宝石’幼苗的推荐施氮水平为0.214 g·kg⁻¹。

关键词: 蓝莓; 施氮水平; 氮素利用效率; 氮高效品种

中图分类号: Q945.3; S663.9 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2024)03-0058-11

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2024.03.06

Analyses on nitrogen use efficiency and appropriate nitrogen application level for seedlings of

different blueberry (*Vaccinium* spp.) cultivars SONG Jiarong¹, LIU Mengxi¹, GE Chunfeng¹,

ZHANG Pengcheng², ZHAO Gang², YU Hong¹, ZENG Qilong^{1,①} [1. Jiangsu Key Laboratory for the

Research and Utilization of Plant Resources, Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy

of Sciences (Nanjing Botanical Garden Mem. Sun Yat-Sen), Nanjing 210014, China; 2. Institute of

Geochemical Exploration and Marine Geological Survey, Nanjing 210007, China], *J. Plant Resour. &*

Environ., 2024, 33(3): 58-68

Abstract: To screen nitrogen high efficient cultivars of blueberry (*Vaccinium* spp.) and explore the appropriate nitrogen application level for seedlings of different blueberry cultivars, four major cultivated blueberry cultivars in the Yangtze River Basin, namely ‘Legacy’, ‘Emerald’, ‘Eureka’, and ‘Lanmei 1’ were taken as experimental materials in this study, and by setting four treatments namely no nitrogen application (0.000 g·kg⁻¹), low nitrogen (0.214 g·kg⁻¹), medium nitrogen (0.429 g·kg⁻¹), and high nitrogen (0.857 g·kg⁻¹), the differences in agronomic characters and nitrogen use efficiency of seedlings of different blueberry cultivars under different nitrogen application levels were analyzed through the pot experiment. The results show that ‘Legacy’ and ‘Emerald’ belong to the low-nitrogen high

收稿日期: 2023-12-16

基金项目: 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20200284; BK20220750); 基于地质环境的栽培技术特色农产品推广种植实验研究项目
作者简介: 宋佳蓉(2000—),女,湖南娄底人,硕士研究生,主要从事蓝莓氮素营养方面的研究。

①通信作者 E-mail: zengqilong@jib.ac.cn

引用格式: 宋佳蓉, 刘梦溪, 葛春峰, 等. 不同蓝莓品种幼苗氮素利用效率和适宜施氮水平分析[J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(3): 58-68.

efficient type, 'Eureka' belongs to the medium-nitrogen high efficient type, and 'Lanmei 1' belongs to the nitrogen high efficient type. With the increase of nitrogen application level, the increment of dry mass per plant, height, crown width, basal diameter, relative chlorophyll content in leaf, nitrogen increments in root, stem, leaf, and individual, and phosphorus increment per plant of seedlings of four blueberry cultivars show a tendency to increase in general; the branch number per plant and potassium increment per plant show a variation tendency to first increase and then tend to be stable; the nitrogen efficiency, nitrogen uptake efficiency, and nitrogen physiological utilization efficiency show a variation tendency to first increase and then decrease in general; the root/shoot ratio shows a tendency to decrease in general. The correlation analysis result shows that under the conditions of no nitrogen application and three nitrogen application levels, the nitrogen efficiency of blueberry seedlings shows significant ($P < 0.05$) or extremely significant ($P < 0.01$) positive correlations with increment of dry mass per plant, nitrogen increment in stem, nitrogen increment per plant, phosphorus increment per plant, potassium increment per plant, and nitrogen uptake efficiency. The comprehensive analysis result indicates that 'Lanmei 1' is a nitrogen high efficient cultivar, and can be used as a nitrogen high efficient germplasm resource for genetic improvement; the increment of dry mass per plant can be used as an important index for evaluating nitrogen use efficiency in blueberry; the recommended nitrogen application level for seedlings of nitrogen high efficient cultivar 'Lanmei 1' and medium-nitrogen high efficient cultivar 'Eureka' is $0.429 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, and that for seedlings of low-nitrogen high efficient cultivars 'Legacy' and 'Emerald' is $0.214 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Key words: blueberry (*Vaccinium* spp.); nitrogen application level; nitrogen use efficiency; nitrogen high efficient cultivar

氮素是作物生长所需的关键营养元素之一,氮肥的施用是作物增产的重要因子。近年来,随着氮肥施用量不断增加,作物产量增加缓慢甚至减产,造成氮素利用效率不断下降,生产成本增加,环境问题日益严重,提高作物氮素利用效率已成为当前的研究热点。蓝莓(*Vaccinium* spp.)属于寡营养植物,对土壤氮素含量反应较为敏感,长期大量施氮会提高土壤电导率并显著降低蓝莓产量^[1]。因此,如何提高蓝莓氮素吸收、转运及利用率,减少环境污染,降低生产成本,实现减肥增效,以及探明其生理响应机制具有重要意义。有学者指出提高作物氮素利用效率主要包括2条途径:一是农艺途径,即根据不同作物特性合理施肥^[2];二是生物途径,即选育新的氮高效品种用于生产^[3-4]。

大量研究结果表明:同一作物不同品种氮素利用效率存在明显差异,且氮素利用效率与品种生理特性密切相关。烟草(*Nicotiana tabacum* Linn.)氮高效品种的干质量、各器官氮素积累量和氮素利用效率均显著高于氮低效品种,叶片光合速率与氮素利用效率呈显著相关^[5]。水稻(*Oryza sativa* Linn.)氮高效品种的总干质量、产量、叶绿素含量和叶片氮素含量均显著高于氮低效品种^[6],产量与氮素效率、氮素吸收效率、器官氮素含量均呈显著正相关^[7]。玉米(*Zea mays* Linn.)氮高效品种的产量、籽粒数、氮素吸收和

氮素生理利用效率显著高于氮低效品种^[8],选育根系吸收面积大和光合能力强的品种有利于玉米氮素效率的提高^[9]。马铃薯(*Solanum tuberosum* Linn.)的株高、块茎数、产量、成熟时间与氮素效率呈显著或极显著相关^[10]。上述研究结果为从生物途径提高植物氮素利用效率提供了理论依据。

李亚静等^[11]认为,相同施氮量下不同蓝莓品种根和茎叶氮素含量均存在显著差异,不同品种适宜的施氮量不同,但没有比较品种间氮素利用效率差异。Pescie等^[12]和Vargas等^[13]认为蓝莓施氮量以及氮素吸收、利用效率受土壤类型、品种等方面的影响,但没有进一步筛选氮高效品种。蓝莓栽培品种众多,但生产中未充分考虑不同品种氮素吸收、利用差异这一特性,氮素管理较为粗放,导致蓝莓氮素吸收、利用效率低,生产成本增加,因此针对不同氮素效率类型蓝莓品种提出不同氮素管理方案极为重要。目前对于蓝莓品种间的氮素利用效率差异和氮高效品种选育尚缺乏相关研究。鉴于此,本研究以长江流域4个主栽蓝莓品种'莱格西'('Legacy')、'绿宝石'('Emerald')、'优瑞卡'('Eureka')和'蓝美1号'('Lanmei 1')为研究材料,研究不同施氮水平对其幼苗生长及氮素吸收、累积的影响,并探讨不同施氮水平下蓝莓氮素利用效率与其生长差异的关系,以期在蓝莓栽培过程中合理施用氮肥及培育氮高效新品

种提供理论基础。

1 材料和方法

1.1 实验地概况

实验于2022年4月至10月在江苏省中国科学院植物研究所蓝莓实验苗圃(地理坐标为东经118°50'15"、北纬32°03'11",海拔34 m)内进行。该地属亚热带季风气候,四季分明,年平均气温15.7℃,雨量充沛,年平均降水量1 021 mm,年平均日照时数1 628.8 h,无霜期237 d。

1.2 材料

供试材料为大连森茂现代农业有限公司提供的蓝莓品种‘莱格西’、‘绿宝石’、‘优瑞卡’和‘蓝美1号’,选取长势基本一致的株龄1 a的幼苗。栽培基质为红沙土和草炭(体积比6:4)混合基质,红沙土和草炭购自浙江蓝美农业有限公司。每盆(上口径20.0 cm、下口径14.5 cm、高19.0 cm)装入3.5 kg栽培基质,基质的酸碱度为pH 5.31,电导率为1.77 mS·cm⁻¹,有机质含量为9.72 g·kg⁻¹,全氮含量为0.39 g·kg⁻¹、速效磷含量为14.53 mg·kg⁻¹、速效钾含量为29.16 mg·kg⁻¹。栽培基质自然风干后过筛(孔径2 mm),备用。

1.3 方法

1.3.1 实验设计 以硫酸铵[(NH₄)₂SO₄]为氮源,参考吴立仁等^[14]和Tsai等^[15]的方法,共设置不施氮(0.000 g·kg⁻¹)、低氮(0.214 g·kg⁻¹)、中氮(0.429 g·kg⁻¹)和高氮(0.857 g·kg⁻¹) 4个处理,每盆基质的可供氮量分别为1.365、2.115、2.865和4.365 g。于4月21日,每盆栽植1株经过修剪且留桩高度为15 cm的幼苗,每个处理5盆,作为5个重复。同时,各品种分别另取3株,做相同修剪处理作为原始植株进行后续指标测定。于5月5日(栽植2周后),每盆分别施入0.104 g·mL⁻¹磷酸二氢钾(KH₂PO₄)和0.025 g·mL⁻¹磷酸二氢钙一水合物[Ca(H₂PO₄)₂·H₂O]混合溶液50 mL。自5月5日起,每月5日低氮、中氮和高氮处理每盆分别施入0.018、0.036和0.072 g·mL⁻¹硫酸铵溶液50 mL,连续施4个月,不施氮处理每次施入50 mL自来水,10月1日结束实验。施肥时无溶液渗出。本实验采用露天栽培的方式,实验期间进行正常病虫害防治并利用滴灌系统统一进行水分管理。

1.3.2 指标测定 实验结束时,每个处理选择长势基本一致的3株,使用卷尺(精度0.1 cm)测定株高和冠幅;使用电子游标卡尺(精度0.01 cm)测定茎径;统计单株分枝数;使用手持式SPAD-502叶绿素仪(日本柯尼卡美能达公司)测定幼苗枝条从上至下第4枚至第10枚成熟叶片的叶绿素相对含量(SPAD),每枚叶片测定3次,结果取平均值。

将上述处理植株及原始植株按根、茎、叶分开后洗净,先于105℃杀青30 min,再于75℃烘干至恒质量,用百分之一电子天平分别称量其干质量。单株干质量为同一植株根、茎、叶干质量之和。单株干质量增加量为实验结束时处理植株的单株干质量减去原始植株的单株干质量。根冠比根据公式“根冠比=根干质量/(茎干质量+叶干质量)”计算。植株样品称量后粉碎过筛(孔径0.15 mm),经硫酸-过氧化氢法^{[16]310}消煮后,测定植株中氮、磷、钾含量(分别以全氮、全磷、全钾含量计)。采用靛酚蓝比色法^{[16]311-312}测定全氮含量,采用钼锑抗比色法^{[16]314}测定全磷含量,采用火焰光度计法^{[16]315-316}测定全钾含量。根、茎、叶氮素(磷素、钾素)增加量分别为实验结束时处理植株的根、茎、叶氮素(磷素、钾素)累积量减去原始植株的根、茎、叶氮素(磷素、钾素)累积量,其中,氮素、磷素、钾素累积量根据公式“某元素累积量=该元素含量×植株干质量”计算。单株氮素(磷素、钾素)增加量为同一植株根、茎、叶氮素(磷素、钾素)增加量之和。

1.3.3 氮素利用效率相关指标计算 根据蓝莓为多年生作物的特点,参考文献[17-18]计算氮素效率、氮素吸收效率和氮素生理利用效率,计算公式分别为氮素效率=单株干质量增加量/土壤可供氮量,氮素吸收效率=单株氮素增加量/土壤可供氮量,氮素生理利用效率=单株干质量增加量/单株氮素增加量。

1.4 数据处理分析

利用EXCEL 2016软件对实验数据进行处理,并利用SPSS 26.0统计分析软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)、Duncan's新复极差分析和Pearson相关性分析。

2 结果和分析

2.1 不同施氮水平下4个蓝莓品种幼苗的农艺性状及叶片叶绿素相对含量分析

不同施氮水平下4个蓝莓品种幼苗的农艺性状

及叶片叶绿素相对含量见表1。

2.1.1 单株干质量增加量的比较 由表1可见:随着施氮水平的提高,4个蓝莓品种幼苗的单株干质量增加量总体呈逐渐上升趋势,且在3个施氮水平下,4个蓝莓品种幼苗的单株干质量增加量均显著($P < 0.05$)高于不施氮($0.000 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)水平。在高氮($0.857 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)水平下,‘莱格西’、‘绿宝石’和‘蓝美1号’幼苗的单株干质量增加量分别为146.64、152.30和212.02 g,均显著高于低氮($0.214 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和中氮($0.429 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)水平;在中氮和高氮水平下,‘优瑞卡’幼苗的单株干质量增加量(分别为145.50和143.73 g)显著高于低氮水平,但2个施氮水平间无显著差异。在低氮、中氮和高氮水平下,‘蓝美

1号’幼苗的单株干质量增加量分别为118.96、170.80和212.02 g,均高于相应施氮水平下其他3个蓝莓品种,其中,在高氮水平下,‘蓝美1号’与其他3个蓝莓品种间的差异达到显著水平。

2.1.2 根冠比的比较 由表1可见:随着施氮水平的提高,4个蓝莓品种幼苗的根冠比总体呈下降趋势,且在3个施氮水平下,这4个蓝莓品种幼苗的根冠比显著低于不施氮水平。在3个施氮水平下,‘绿宝石’和‘蓝美1号’幼苗的根冠比无显著变化;在高氮水平下,‘莱格西’和‘优瑞卡’幼苗的根冠比显著低于低氮水平。在低氮、中氮和高氮水平下,‘优瑞卡’幼苗的根冠比分别为0.44、0.42和0.32,总体上高于其他3个蓝莓品种。

表1 不同施氮水平下4个蓝莓品种幼苗的农艺性状和叶片叶绿素相对含量($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 1 The agronomic characters and relative chlorophyll content in leaves of seedlings of four blueberry (*Vaccinium* spp.) cultivars at different nitrogen application levels ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

施氮水平/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) Nitrogen application level	单株干质量增加量/g Increment of dry mass per plant	根冠比 Root/shoot ratio	株高/cm Height	冠幅/cm Crown width	基径/mm Basal diameter	单株分枝数 Branch number per plant	叶片叶绿素相对含量 Relative chlorophyll content in leaf
莱格西 Legacy							
0.000	46.12±8.06cA	0.55±0.11aA	52.67±7.51bB	30.17±5.30dA	8.96±1.46bA	31.3±5.1bA	44.87±2.16aB
0.214	104.77±2.79bAB	0.32±0.02bC	72.00±6.24aA	46.17±2.08cB	8.74±0.55bB	57.3±17.9aB	45.65±2.00aB
0.429	113.67±19.24bC	0.28±0.03bcB	66.67±7.23aB	56.33±5.80bA	9.84±0.68bB	75.0±4.4aB	46.46±1.15aBC
0.857	146.64±17.06aB	0.20±0.01cB	80.33±7.51aA	67.83±6.79aA	15.13±2.38aAB	66.3±0.6aB	48.96±0.36aB
绿宝石 Emerald							
0.000	34.95±5.33dAB	0.40±0.17aA	50.33±2.08bB	36.83±4.54bA	9.86±1.37aA	21.3±5.5bA	39.19±0.31cC
0.214	102.20±5.32cB	0.29±0.02bC	63.00±2.65aA	60.33±2.75aA	15.37±3.36aA	60.0±5.2aB	41.31±1.17bcC
0.429	128.17±10.80bBC	0.29±0.08bB	62.33±6.66aB	69.17±11.72aA	13.82±1.10aA	67.0±16.1aB	43.55±1.10bC
0.857	152.30±6.41aB	0.26±0.02bAB	67.00±7.55aB	72.00±2.78aA	13.18±2.36aB	54.0±16.8aB	50.27±2.61aB
优瑞卡 Eureka							
0.000	27.76±1.67cB	0.68±0.05aA	45.33±2.52cB	29.67±12.79bA	7.75±0.90bA	31.0±6.1bA	46.50±2.43aAB
0.214	76.56±6.96bC	0.44±0.02bA	59.00±11.53bA	45.83±9.00aB	9.53±1.42abB	41.0±14.0abB	48.90±0.91aA
0.429	145.50±16.56aAB	0.42±0.04bA	66.00±6.56abB	59.00±15.10aA	11.07±1.00aB	41.0±6.9abC	49.35±3.99aAB
0.857	143.73±11.47aB	0.32±0.06cA	73.00±3.00aAB	59.83±13.38aA	11.18±0.51aB	56.3±1.2aB	51.94±2.29aAB
蓝美1号 Lanmei 1							
0.000	43.26±8.47dA	0.67±0.07aA	64.33±1.15bA	28.67±4.25cA	8.01±0.84dA	34.0±3.6bA	48.89±0.79bA
0.214	118.96±13.15cA	0.37±0.03bB	74.00±6.08abA	58.50±5.00bA	11.54±1.86cAB	92.3±7.2aA	48.97±2.29bA
0.429	170.80±10.47bA	0.31±0.04bB	81.88±8.08aA	65.50±1.32abA	14.73±0.70bA	105.0±5.0aA	51.71±2.05bA
0.857	212.02±6.65aA	0.32±0.03bA	81.60±1.73aA	69.17±6.45aA	18.69±2.25aA	110.7±18.7aA	55.42±1.41aA

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示同一品种在不同施氮水平间差异显著($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) differences between different nitrogen application levels of the same cultivar; 同列中不同的大写字母表示同一施氮水平在不同品种间差异显著($P < 0.05$) Different uppercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) differences between different cultivars at the same nitrogen application level.

2.1.3 株高的比较 由表1可见:随着施氮水平的提高,4个蓝莓品种幼苗的株高总体呈上升趋势,且在3个施氮水平下,4个蓝莓品种幼苗的株高总体显著高于不施氮水平。在高氮水平下,‘优瑞卡’幼苗的

株高显著高于低氮水平;其他3个蓝莓品种幼苗的株高在3个施氮水平间无显著差异。在低氮、中氮和高氮水平下,‘蓝美1号’幼苗的株高分别为74.00、81.88和81.60 cm,均高于相应施氮水平下其他3个

蓝莓品种。

2.1.4 冠幅的比较 由表1可见:随着施氮水平的提高,4个蓝莓品种幼苗的冠幅呈上升趋势,且在3个施氮水平下,4个蓝莓品种幼苗的冠幅显著高于不施氮水平。‘莱格西’幼苗的冠幅在3个施氮水平间存在显著差异;‘绿宝石’和‘优瑞卡’幼苗的冠幅在3个施氮水平间均无显著差异;在高氮水平下,‘蓝美1号’幼苗的冠幅显著高于低氮水平。在低氮、中氮和高氮水平下,‘绿宝石’幼苗的冠幅分别为60.33、69.17和72.00 cm,均高于相应施氮水平下其他3个蓝莓品种,但除低氮水平下‘绿宝石’和‘蓝美1号’幼苗的冠幅显著高于‘莱格西’和‘优瑞卡’外,在其他施氮水平下,4个蓝莓品种幼苗的冠幅无显著差异。

2.1.5 基径的比较 由表1可见:随着施氮水平的提高,蓝莓品种‘莱格西’、‘优瑞卡’和‘蓝美1号’幼苗的基径总体呈上升趋势,‘绿宝石’幼苗的基径则呈先上升后下降的变化趋势。在高氮水平下,‘莱格西’幼苗的基径显著高于低氮和中氮水平;‘绿宝石’和‘优瑞卡’幼苗的基径在3个施氮水平下无显著差异;‘蓝美1号’幼苗的基径在3个施氮水平间差异显著。在低氮水平下,‘绿宝石’幼苗的基径(15.37 mm)高于其他3个蓝莓品种;在中氮和高氮水平下,‘蓝美1号’幼苗的基径分别为14.37和18.69 mm,高于其他3个蓝莓品种。

2.1.6 单株分枝数的比较 由表1可见:随着施氮水平的提高,蓝莓品种‘莱格西’、‘绿宝石’和‘蓝美1号’幼苗的单株分枝数总体呈先上升后趋于稳定的变化趋势,且在3个施氮水平下,4个蓝莓品种幼苗的单株分枝数总体上显著高于不施氮水平。4个蓝莓品种幼苗的单株分枝数在3个施氮水平间无显著差异。在低氮、中氮和高氮水平下,‘蓝美1号’幼苗的单株分枝数分别为92.3、105.0和110.7,均显著高于相应施氮水平下其他3个蓝莓品种。

2.1.7 叶片叶绿素相对含量的比较 由表1可见:随着施氮水平的提高,4个蓝莓品种幼苗叶片的叶绿素相对含量呈上升趋势,‘莱格西’和‘优瑞卡’幼苗叶片的叶绿素相对含量在3个施氮水平间无显著差异;在高氮水平下,‘绿宝石’和‘蓝美1号’幼苗叶片的叶绿素相对含量显著高于低氮和中氮水平。在低氮、中氮和高氮水平下,‘蓝美1号’幼苗叶片的叶绿素相对含量分别为48.97、51.71和55.42,均高于相应施

氮水平下其他3个蓝莓品种。

2.2 不同施氮水平下4个蓝莓品种幼苗的氮素增加量及氮素利用效率分析

不同施氮水平下4个蓝莓品种幼苗的氮素增加量及氮素利用效率相关指标见表2。

2.2.1 氮素增加量的比较 由表2可见:随着施氮水平的提高,4个蓝莓品种幼苗的根、茎、叶氮素增加量总体呈上升趋势,且在3个施氮水平下,4个蓝莓品种幼苗的根、茎、叶氮素增加量总体上显著($P < 0.05$)高于不施氮($0.000 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)水平。在高氮($0.857 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)水平下,‘莱格西’幼苗的根、茎、叶氮素增加量显著高于低氮($0.214 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和中氮($0.429 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)水平。在高氮水平下,‘绿宝石’和‘蓝美1号’幼苗的根氮素增加量显著高于低氮和中氮水平;二者的茎、叶氮素增加量在3个施氮水平间存在显著差异。在中氮水平下,‘优瑞卡’幼苗的根氮素增加量显著高于低氮水平;在中氮和高氮水平下,‘优瑞卡’幼苗的茎氮素增加量显著高于低氮水平;‘优瑞卡’幼苗的叶氮素增加量在3个施氮水平间存在显著差异。在同一施氮水平下,4个蓝莓品种幼苗的根氮素增加量无显著差异;在低氮、中氮和高氮水平下,‘蓝美1号’幼苗的茎氮素增加量显著高于相应施氮水平下其他3个蓝莓品种;在中氮水平下,‘蓝美1号’幼苗的叶氮素增加量显著高于其他3个蓝莓品种,而在低氮和高氮水平下,4个蓝莓品种幼苗的叶氮素增加量无显著差异。除低氮水平下‘莱格西’幼苗的根氮素增加量最高(0.211 g)和中氮水平下‘优瑞卡’幼苗的根氮素增加量最高(0.360 g)外,在低氮、中氮和高氮水平下,‘蓝美1号’幼苗的根、茎、叶氮素增加量总体上高于相应施氮水平下其他3个蓝莓品种,其中,高氮水平下‘蓝美1号’幼苗的根、茎、叶氮素增加量分别为0.392、0.345和0.789 g。

由表2还可见:随着施氮水平的提高,4个蓝莓品种幼苗的单株氮素增加量呈上升趋势,且在3个施氮水平下,4个蓝莓品种幼苗的单株氮素增加量均显著高于不施氮水平。在高氮水平下,‘莱格西’幼苗的单株氮素增加量显著高于低氮和中氮水平;‘绿宝石’和‘蓝美1号’幼苗的单株氮素增加量在3个施氮水平间存在显著差异;中氮和高氮水平下,‘优瑞卡’幼苗的单株氮素增加量显著高于低氮水平,但中氮和高氮水平间无显著差异。在低氮、中氮和高氮水平下,‘蓝美1号’幼苗的单株氮素增加量分别为

表2 不同施氮水平下4个蓝莓品种幼苗的氮素增加量及氮素利用效率相关指标($\bar{X}\pm SD$)¹⁾Table 2 The nitrogen increment and nitrogen use efficiency-related indexes of seedlings of four blueberry (*Vaccinium* spp.) cultivars at different nitrogen application levels ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

NAL	氮素增加量/g Nitrogen increment				NE/(g·g ⁻¹)	NUE/(g·g ⁻¹)	NPUE/(g·g ⁻¹)
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	单株 Individual			
莱格西 Legacy							
0.000	0.149±0.039cA	0.074±0.011cA	0.146±0.005cA	0.368±0.052cA	33.785±5.908bA	0.270±0.038aA	124.824±4.058bcB
0.214	0.211±0.009bA	0.127±0.004bB	0.354±0.063bA	0.692±0.061bA	49.537±1.319aAB	0.327±0.029aA	152.151±13.085aA
0.429	0.240±0.028bA	0.143±0.021bB	0.458±0.056bB	0.842±0.102bB	39.675±6.716bC	0.294±0.036aB	134.671±10.882bA
0.857	0.309±0.027aA	0.244±0.019aB	0.768±0.070aA	1.321±0.111aB	33.595±3.908bB	0.303±0.026aB	110.904±5.364cC
绿宝石 Emerald							
0.000	0.078±0.036cA	0.049±0.009dB	0.090±0.021dB	0.217±0.025dB	25.604±3.908cAB	0.159±0.018bB	160.453±6.291aA
0.214	0.184±0.012bA	0.134±0.008cB	0.338±0.023cA	0.656±0.031cA	48.322±2.517aB	0.310±0.015aA	155.886±2.217aA
0.429	0.224±0.048bA	0.179±0.029bB	0.476±0.016bB	0.880±0.054bB	44.736±3.770aBC	0.307±0.019aB	145.594±4.041bA
0.857	0.298±0.034aA	0.237±0.013aB	0.699±0.095aA	1.234±0.113aBC	34.892±1.469bB	0.283±0.026aBC	123.825±6.356cB
优瑞卡 Eureka							
0.000	0.097±0.007cA	0.028±0.005cC	0.098±0.017dB	0.224±0.024cB	20.335±1.225cC	0.164±0.018cB	124.722±11.788aB
0.214	0.192±0.021bcA	0.075±0.009bC	0.288±0.004cA	0.555±0.019bB	36.199±3.289bC	0.262±0.009bB	137.734±8.092aA
0.429	0.360±0.078aA	0.147±0.029aB	0.506±0.023bB	1.012±0.126aAB	50.787±5.779aAB	0.353±0.044aAB	144.031±8.389aA
0.857	0.273±0.116abA	0.169±0.026aC	0.635±0.110aA	1.077±0.095aC	32.927±2.627bB	0.247±0.022bC	133.516±2.706aA
蓝美1号 Lanmei 1							
0.000	0.144±0.031cA	0.065±0.014dAB	0.125±0.009dA	0.333±0.053dA	31.690±6.206cA	0.244±0.039bA	129.344±4.624cB
0.214	0.201±0.026bcA	0.182±0.020cA	0.364±0.047cA	0.747±0.074cA	56.247±6.220abA	0.353±0.035aA	159.427±12.846aA
0.429	0.286±0.055bA	0.249±0.044bA	0.630±0.062bA	1.165±0.102bA	59.616±3.656aA	0.407±0.036aA	146.910±5.165abA
0.857	0.392±0.064aA	0.345±0.028aA	0.789±0.027aA	1.526±0.060aA	48.574±1.523bA	0.350±0.014aA	138.998±3.163bC

¹⁾ NAL: 施氮水平 Nitrogen application level (g·kg⁻¹); NE: 氮素效率 Nitrogen efficiency; NUE: 氮素吸收效率 Nitrogen uptake efficiency; NPUE: 氮素生理利用效率 Nitrogen physiological utilization efficiency. 同列中不同的小写字母表示同一品种在不同施氮水平间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) differences between different nitrogen application levels of the same cultivar; 同列中不同的大写字母表示同一施氮水平在不同品种间差异显著 ($P<0.05$) Different uppercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) differences between different cultivars at the same nitrogen application level.

0.747、1.165 和 1.526 g,均高于相应施氮水平下其他3个蓝莓品种。

2.2.2 氮素效率的比较 由表2可见:随着施氮水平的提高,4个蓝莓品种幼苗的氮素效率均呈先上升后下降的变化趋势,其中,‘莱格西’和‘绿宝石’幼苗的氮素效率在低氮水平下最高,分别为49.537和48.322 g·g⁻¹,‘优瑞卡’和‘蓝美1号’幼苗的氮素效率在中氮水平下最高,分别为50.787和59.616 g·g⁻¹。除‘莱格西’幼苗的氮素效率仅在低氮水平下显著高于不施氮水平外,其他3个蓝莓品种幼苗的氮素效率在3个施氮水平下均显著高于不施氮水平。在低氮、中氮和高氮水平下,‘蓝美1号’幼苗的氮素效率分别为56.247、59.616和48.514 g·g⁻¹,均高于相应施氮水平下其他3个蓝莓品种,其中,高氮水平下‘蓝美1号’与其他3个蓝莓品种间的差异达到显著水平。

在低氮、中氮和高氮水平下,4个蓝莓品种幼苗氮素效率的平均值分别为47.576、48.704和37.497

g·g⁻¹。在低氮水平下,‘莱格西’和‘绿宝石’幼苗的氮素效率高于该施氮水平下4个蓝莓品种幼苗氮素效率的平均值;在中氮水平下,‘优瑞卡’幼苗的氮素效率高于该施氮水平下4个蓝莓品种幼苗氮素效率的平均值;在低氮、中氮和高氮水平下,‘蓝美1号’幼苗的氮素效率均高于相应施氮水平下4个蓝莓品种幼苗氮素效率的平均值。

2.2.3 氮素吸收效率的比较 由表2可见:随着施氮水平的提高,4个蓝莓品种幼苗的氮素吸收效率总体呈先上升后下降的变化趋势,且在3个施氮水平下,‘莱格西’幼苗的氮素吸收效率高于不施氮水平,但差异不显著;‘绿宝石’、‘优瑞卡’和‘蓝美1号’幼苗的氮素吸收效率显著高于不施氮水平。‘莱格西’、‘绿宝石’和‘蓝美1号’幼苗的氮素吸收效率在3个施氮水平间差异不显著;在中氮水平下,‘优瑞卡’幼苗的氮素吸收效率显著高于低氮和高氮水平。在低氮水平下,‘莱格西’、‘绿宝石’和‘蓝美1号’幼苗的氮素吸收效率显著高于‘优瑞卡’,但前三者间差异

不显著;在中氮和高氮水平下,‘蓝美1号’幼苗的氮素吸收效率总体显著高于其他3个蓝莓品种。

2.2.4 氮素生理利用效率的比较 由表2可见:随着施氮水平的提高,蓝莓品种‘莱格西’、‘优瑞卡’和‘蓝美1号’幼苗的氮素生理利用效率呈先上升后下降的变化趋势,而‘绿宝石’幼苗的氮素生理利用效率呈下降趋势。在低氮水平下,‘莱格西’和‘蓝美1号’幼苗的氮素生理利用效率总体上显著高于中氮、高氮和不施氮水平;在不施氮和低氮水平下,‘绿宝石’幼苗的氮素生理利用效率较高,二者间无显著差异,但显著高于中氮和高氮水平;‘优瑞卡’幼苗的氮素生理利用效率在不施氮及3个施氮水平间差异不显著。在低氮和中氮水平下,4个蓝莓品种幼苗间的氮素生理利用效率在相应施氮水平下差异不显著;在高氮水平下,‘优瑞卡’和‘蓝美1号’幼苗的氮素生理利用效率显著高于‘莱格西’和‘绿宝石’。

2.3 不同施氮水平下4个蓝莓品种幼苗的单株磷素、钾素增加量分析

不同施氮水平下4个蓝莓品种幼苗的单株磷素、钾素增加量见表3。

2.3.1 单株磷素增加量的比较 由表3可见:随着施氮水平的提高,4个蓝莓品种幼苗的单株磷素增加量总体呈上升趋势,且在3个施氮水平下,4个蓝莓品种幼苗的单株磷素增加量均显著($P<0.05$)高于不施氮($0.000\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)水平。在高氮($0.857\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)水平下,‘莱格西’幼苗的单株磷素增加量显著高于低氮($0.214\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和中氮($0.429\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)水平,但后二者间差异不显著;‘绿宝石’和‘蓝美1号’幼苗的单株磷素增加量在3个施氮水平间差异显著;‘优瑞卡’幼苗的单株磷素增加量在中氮和高氮水平间差异不显著,但显著高于低氮水平。在低氮、中氮和高氮水平下,‘蓝美1号’幼苗的单株磷素增加量分别为101.111、133.756和161.243 mg,均高于相应施氮水平下其他3个蓝莓品种。

2.3.2 单株钾素增加量的比较 由表3可见:随着施氮水平的提高,4个蓝莓品种幼苗的单株钾素增加量呈先显著上升后趋于稳定的变化趋势,且在3个施氮水平下,4个蓝莓品种幼苗的单株钾素增加量显著高于不施氮水平。‘莱格西’幼苗的单株钾素增加量在3个施氮水平间无显著差异;‘绿宝石’、‘优瑞卡’和‘蓝美1号’幼苗的单株钾素增加量在中氮和高氮水平间均无显著差异,但显著高于低氮水平。在低氮、

表3 不同施氮水平下4个蓝莓品种幼苗的单株磷素、钾素增加量($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 3 The phosphorus and potassium increment per plant of seedlings of four blueberry (*Vaccinium* spp.) cultivars at different nitrogen application levels ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

施氮水平/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Nitrogen application level	单株磷素增加量/mg Phosphorus increment per plant	单株钾素增加量/g Potassium increment per plant
莱格西 Legacy		
0.000	38.395±6.144cA	0.278±0.040bA
0.214	90.145±4.686bA	0.601±0.031aB
0.429	110.003±25.880bA	0.631±0.103aA
0.857	151.003±10.090aA	0.732±0.078aB
绿宝石 Emerald		
0.000	21.090±3.461dC	0.208±0.010cB
0.214	75.467±4.859cB	0.620±0.066bB
0.429	107.488±15.347bA	0.752±0.099aA
0.857	128.738±8.263aB	0.809±0.025aB
优瑞卡 Eureka		
0.000	27.291±3.654cBC	0.140±0.015cC
0.214	60.399±3.244bC	0.396±0.028bC
0.429	122.950±16.521aA	0.776±0.081aA
0.857	117.414±7.678aB	0.734±0.098aB
蓝美1号 Lanmei 1		
0.000	35.805±5.952dAB	0.252±0.047cAB
0.214	101.111±9.012cA	0.739±0.090bA
0.429	133.756±3.954bA	0.882±0.084aA
0.857	161.243±8.223aA	0.952±0.042aA

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示同一品种在不同施氮水平间差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) differences between different nitrogen application levels of the same cultivar; 同列中不同的大写字母表示同一施氮水平在不同品种间差异显著($P<0.05$) Different uppercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) differences between different cultivars at the same nitrogen application level.

中氮和高氮水平下,‘蓝美1号’幼苗的单株钾素增加量分别为0.739、0.882和0.952 g,均高于相应施氮水平下其他3个蓝莓品种。

2.4 不同施氮水平下蓝莓幼苗氮素效率与其他指标的相关性分析

不同施氮水平下蓝莓幼苗氮素效率与其他指标的相关系数见表4。由表4可见:在4个施氮水平下,蓝莓幼苗氮素效率与单株干质量增加量、茎氮素增加量、单株氮素增加量、氮素吸收效率、单株钾素增加量均呈极显著($P<0.01$)正相关;氮素效率与单株磷素增加量在不施氮($0.000\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、低氮($0.214\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和中氮($0.429\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)水平下呈极显著正相关,在高氮($0.857\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)水平下呈显著($P<0.05$)正相关;氮素效率与株高在不施氮和中氮水平下呈显著相关;氮素效率与基径的相关系数随着施氮

水平的提高而增加,其中,在中氮和高氮水平下分别呈显著和极显著正相关;氮素效率与单株分枝数在低氮水平下呈极显著正相关;氮素效率与叶绿素相对含量在高氮水平下呈显著正相关;氮素效率与根氮素增加量在不施氮和高氮水平下呈极显著正相关;氮素效

率与叶氮素增加量在不施氮水平下呈显著正相关,在低氮和中氮水平下呈极显著正相关;氮素效率与氮素生理利用效率在低氮和高氮水平下分别呈极显著和显著正相关;氮素效率与根冠比、冠幅在4个施氮水平下均无显著相关性。

表4 不同施氮水平下蓝莓幼苗氮素效率与其他指标的相关系数¹⁾

Table 4 Correlation coefficients between nitrogen efficiency and other indexes of blueberry (*Vaccinium* spp.) seedlings at different nitrogen application levels¹⁾

施氮水平/(g·kg ⁻¹) Nitrogen application level	氮素效率与其他指标的相关系数 Correlation coefficient between nitrogen efficiency and other indexes							
	单株干质量增加量 Increment of dry mass per plant	根冠比 Root/shoot ratio	株高 Height	冠幅 Crown width	基径 Basal diameter	单株分枝数 Branch number per plant	叶片叶绿素相对含量 Relative chlorophyll content in leaf	根氮素增加量 Nitrogen increment in root
0.000	1.000 **	0.151	-0.704 *	-0.060	0.106	-0.151	0.069	0.874 **
0.214	1.000 **	-0.416	0.557	0.502	0.253	0.730 **	-0.042	0.252
0.429	1.000 **	0.338	0.661 *	0.173	0.654 *	0.243	0.509	0.564
0.857	1.000 **	0.404	0.444	0.317	0.766 **	-0.056	0.677 *	0.715 **

施氮水平/(g·kg ⁻¹) Nitrogen application level	氮素效率与其他指标的相关系数 Correlation coefficient between nitrogen efficiency and other indexes						
	茎氮素增加量 Nitrogen increment in stem	叶氮素增加量 Nitrogen increment in leaf	单株氮素增加量 Nitrogen increment per plant	氮素吸收效率 Nitrogen uptake efficiency	氮素生理利用效率 Nitrogen physiological utilization efficiency	单株磷素增加量 Phosphorus increment per plant	单株钾素增加量 Potassium increment per plant
0.000	0.948 **	0.672 *	0.920 **	0.920 **	-0.027	0.820 **	0.948 **
0.214	0.935 **	0.768 **	0.913 **	0.914 **	0.747 **	0.910 **	0.981 **
0.429	0.743 **	0.910 **	0.964 **	0.963 **	0.544	0.867 **	0.928 **
0.857	0.881 **	0.510	0.860 **	0.862 **	0.579 *	0.697 *	0.899 **

¹⁾ * : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$.

3 讨 论

3.1 4个蓝莓品种幼苗氮素效率类型划分

农业生产过程中滥用氮肥的问题日益严峻,不仅导致氮素利用效率下降,同时造成了生产成本不断增加以及环境污染。通过挖掘作物自身氮素利用潜力及选育氮高效品种是提高氮素利用效率、促进绿色农业协调发展的重要途径。不同品种氮素效率存在的基因型差异是氮高效基因筛选以及氮素吸收、利用遗传改良的基础^[19]。有关水稻^[20]和马铃薯^[21]等粮食作物氮素效率的研究结果表明:相同施氮水平下,同一植物不同品种的生理指标以及氮素效率等指标均存在显著差异。但由于研究人员对于氮素效率的定义不同,氮高效评价指标也各不相同,因而结论存在很大差异^[22]。有关马铃薯^[23]、水稻^[24]和玉米^[25]等粮食作物以及花生(*Arachis hypogaea* Linn.)等^[26]油料作物的氮素效率差异研究大多依赖生物量、产量、

氮素吸收效率、氮素生理利用效率、氮素增加量等指标中某一项或几项评价品种的氮素吸收、利用能力,而这些指标是否适用于蓝莓尚不清楚。王新超等^[27]依据 Moll 等^[28]提出的氮素效率定义即介质中每单位供氮量所产生的经济产量,同时考虑到茶树 [*Camellia sinensis* (Linn.) Kuntze] 经济产量难以准确评估,将氮素效率定义为每单位土壤供氮量所产生的干质量增加量。蓝莓幼苗期单株干质量增加量是其生长发育能力的综合体现,同时土壤供氮量是影响蓝莓氮素吸收、利用的重要因子,因此该定义同样适宜作为蓝莓幼苗氮素吸收、利用能力评价指标。本研究中,在同一施氮水平下,4个蓝莓品种幼苗的氮素效率存在明显差异,同时在3个施氮水平下不同蓝莓品种幼苗对氮素的响应各不相同,因此在不同施氮水平下划分各蓝莓品种幼苗的氮素效率更为准确。‘莱格西’和‘绿宝石’幼苗的氮素效率在低氮(0.214 g·kg⁻¹)水平下高于该施氮水平下4个蓝莓品种幼苗氮素效率的平均值,因此划分为低氮高效型;‘优

瑞卡’幼苗的氮素效率在中氮($0.429 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)水平下高于该施氮水平下4个蓝莓品种幼苗氮素效率的平均值,因此划分为中氮高效型;在低氮、中氮和高氮($0.857 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)水平下,‘蓝美1号’幼苗的氮素效率均高于相应施氮水平下4个蓝莓品种幼苗氮素效率的平均值,因此划分为氮高效型。蓝莓属于喜铵植物^[29],在生产上通常用铵态氮作为蓝莓氮素供应主要来源,近年来有研究表明铵硝配比施肥对于蓝莓生长促进作用更明显^[30]。本研究中除‘蓝美1号’外其他3个品种未表现出氮高效特性,关于铵硝配比施肥对不同蓝莓品种氮素吸收、利用的影响有待今后进一步研究。

3.2 施氮对不同蓝莓品种幼苗生长及养分吸收的影响

单株干质量增加量、株高、冠幅和基径等农艺性状是蓝莓外在形态表现,是衡量不同蓝莓品种长势的重要依据。李亚静等^[11]的研究结果表明:在水培条件下增施氮肥能显著提高蓝莓的单株干质量,且不同品种的单株干质量存在显著差异。有关马铃薯^[31]、油茶(*Camellia oleifera* Abel)^[32]和茄(*Solanum melongena* Linn.)^[33]等植物的研究表明:在相同施氮水平下氮高效品种的株高、茎粗、单株分枝数、产量和氮素积累量等指标显著高于氮低效品种。本研究中,4个蓝莓品种幼苗的农艺性状总体上随着施氮水平的提高呈上升趋势,但对氮素水平变化的响应各有不同,表明施氮能明显促进蓝莓幼苗的生长发育,而不同蓝莓品种幼苗在干质量累积和生长形态等方面存在差异。氮高效品种‘蓝美1号’幼苗的氮素效率,单株干质量增加量,株高,单株分枝数,叶绿素相对含量,茎、叶氮素增加量,以及单株磷素、钾素增加量等指标优于其他3个蓝莓品种,说明蓝莓氮高效品种在相同施氮水平下较其他类型品种能更高效吸收和利用环境中的氮素,与前人的研究结果^[34-35]一致。

另外,由于元素间存在互作效应,土壤氮水平不仅直接影响植物体内氮素含量,还会影响植物对其他营养元素的吸收与积累^[36]。植株生长过程中的氮代谢通常与磷、钾代谢相互影响,在一定范围内施用氮肥可协同促进植株对磷素和钾素的吸收^[37],这一结论已在油茶^[38]和水稻^[39]等作物上得到证实。本研究中,随着施氮水平的提高,4个蓝莓品种幼苗的单株磷素增加量总体上呈显著上升趋势;在低氮($0.214 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)水平下,4个蓝莓品种幼苗的单株钾素增加

量显著高于不施氮($0.000 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)水平,但当施氮水平高于中氮($0.429 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)水平时,4个蓝莓品种幼苗对钾素的吸收趋于稳定,单株钾素增加量不再显著变化,其中高氮($0.857 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)水平下‘优瑞卡’幼苗的单株钾素增加量低于中氮水平,说明高氮水平下蓝莓幼苗氮素吸收与钾素吸收的协同作用减弱,甚至抑制对钾素的吸收,而对磷素的吸收仍有较强的促进作用,该结论与 Muñoz 等^[40]探究不同施氮量对蓝莓叶片磷素和钾素含量影响的结果较一致,原因可能是蓝莓是喜铵植物,铵态氮通常会增加对阴离子的吸收,削弱对钾离子的吸收^[41]。

合理施用氮肥能显著促进蓝莓的生长^[42],氮肥施用过量可能会抑制蓝莓生长发育并且降低果实品质和氮素利用效率^[43]。本研究中,随着施氮水平的提高,4个蓝莓品种幼苗的单株干质量增加量呈逐渐上升的趋势,但氮素效率呈先上升后下降的变化趋势,说明过量施氮会降低蓝莓幼苗对氮素的吸收和利用效率。从3个施氮水平看,‘莱格西’和‘绿宝石’幼苗的氮素效率在低氮水平下最高,‘优瑞卡’和‘蓝美1号’幼苗的氮素效率在中氮水平下最高。从氮素效率角度分析,氮高效品种‘蓝美1号’和中氮高效品种‘优瑞卡’幼苗的推荐施氮水平为 $0.429 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,低氮高效品种‘莱格西’和‘绿宝石’幼苗的推荐施氮水平为 $0.214 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

3.3 蓝莓氮高效品种筛选指标

氮高效品种的筛选指标应根据作物特性以及施氮水平综合分析^[44]。张鹏钰等^[45]认为芝麻(*Sesamum indicum* Linn.)茎、叶的鲜质量和干质量可作为芝麻苗期氮高效品种筛选的重要指标。陈二影等^[46]的研究结果表明:低氮($0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)和高氮($6 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)水平下谷子[*Setaria italica* var. *germanica* (Mill.) Schred.]苗期品种间的茎叶干质量、氮素效率、氮素吸收量和氮素吸收效率差异较大,因此茎叶干质量和氮素吸收量可以作为谷子苗期氮素效率评价的首选指标。本研究中,在同一施氮水平下,4个蓝莓品种幼苗的氮素效率差异即单株干质量增加量差异,因此在同一施氮水平下筛选氮高效品种时,单株干质量增加量可作为蓝莓幼苗氮素效率评价的重要指标;此外,蓝莓幼苗氮素效率与茎氮素增加量,氮素吸收效率以及单株氮素、磷素、钾素增加量相关性较强,可以作为蓝莓幼苗氮素效率类型划分的辅助指标。

4 结 论

综上所述,供试4个蓝莓品种幼苗的氮素利用效率存在明显差异,通过选择和培育现有蓝莓种质中的氮高效品种来提高蓝莓的氮素效率是可行的。其中,‘蓝美1号’相较于其他3个蓝莓品种幼苗的氮素效率较高,属于氮高效品种,可作为氮高效遗传改良种质资源。氮高效品种‘蓝美1号’和中氮高效品种‘优瑞卡’幼苗的推荐施氮水平为 $0.429\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,低氮高效品种‘莱格西’和‘绿宝石’幼苗的推荐施氮水平为 $0.214\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] SHAO G, CHENG H, DAI H, et al. Nitrogen uptake and utilization of two maize hybrids with contrasting nitrogen use efficiencies depending on fertilization amount [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2023, 69(11): 2202-2217.
- [3] CLARK R B, DUNCAN R R. Improvement of plant mineral nutrition through breeding [J]. *Field Crops Research*, 1991, 27: 219-240.
- [4] COHAN J P, HANNON C, HOUILLEZ B, et al. Effects of potato cultivar on the components of nitrogen use efficiency [J]. *Potato Research*, 2018, 61: 231-246.
- [5] LI S, AHMED W, ZHANG T, et al. Different morphologies and functional nitrogen accumulation results in the different nitrogen use efficiency of tobacco plants [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2023, 42: 5895-5908.
- [6] 赵首萍, 赵学强, 施卫明. 不同氮效率水稻品种苗期吸氮效率差异及其机理研究 [J]. *土壤*, 2006, 38(4): 400-409.
- [7] SAMONTE S O PB, WILSON L T, MEDLEY J C, et al. Nitrogen utilization efficiency: relationships with grain yield, grain protein, and yield-related traits in rice [J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(1): 168-176.
- [8] 李文娟, 何萍, 高强, 等. 不同氮效率玉米干物质形成及氮素营养特性差异研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(1): 51-57.
- [9] SU W, KAMRAN M, XIE J, et al. Shoot and root traits of summer maize hybrid varieties with higher grain yields and higher nitrogen use efficiency at low nitrogen application rates [J]. *PeerJ*, 2019, 7: e7294.
- [10] OSPINA C A, LAMMERTS VAN BUEREN E T, ALLEFS J J H M, et al. Diversity of crop development traits and nitrogen use efficiency among potato cultivars grown under contrasting nitrogen regimes [J]. *Euphytica*, 2014, 199: 13-29.
- [11] 李亚静, 姜燕琴, 韦继光, 等. 不同氮浓度对兔眼蓝莓果不同品种幼苗生长和光合生理的影响 [J]. *植物资源与环境学报*, 2016, 25(2): 65-71.
- [12] PESCIÉ M A, BORDA M P, ORTIZ D P, et al. Absorption, distribution and accumulation of nitrogen applied at different phenological stages in southern highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* interspecific hybrid) [J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 230(7): 11-17.
- [13] VARGAS O L, BRYLA D R. Growth and fruit production of highbush blueberry fertilized with ammonium sulfate and urea applied by fertigation or as granular fertilizer [J]. *HortScience*, 2015, 50(3): 479-485.
- [14] 吴立仁, 王明洁, 梁文卫, 等. 不同施肥措施对蓝莓植株生长及果实品质的影响 [J]. *落叶果树*, 2021, 53(1): 23-25.
- [15] TSAI C Y, HUBER D M, GLOVER D V, et al. Relationship of N deposition to grain yield and N response of three maize hybrids [J]. *Crop Science*, 1984, 24(2): 277-281.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [17] 任伯朝, 范霞, 董树亭, 等. 种植密度和施氮量对不同株高夏玉米产量和氮素利用的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2): 269-277.
- [18] 何丹丹, 贾立国, 秦永林, 等. 不同马铃薯品种的氮利用效率及其分类研究 [J]. *作物学报*, 2019, 45(1): 153-159.
- [19] 刘强, 宋海星, 荣湘民, 等. 不同品种油菜子粒产量及氮效率差异研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(4): 898-903.
- [20] DING C, XU C, LU B, et al. Comprehensive evaluation of rice qualities under different nitrogen levels in South China [J]. *Foods*, 2023, 12(4): 697.
- [21] GETAHUN B B, KASSIE M M, VISSER R G F, et al. Genetic diversity of potato cultivars for nitrogen use efficiency under contrasting nitrogen regimes [J]. *Potato Research*, 2020, 63: 267-290.
- [22] APARNA V, NARENDER REDDY S, SUBRAHMANYAM D. Study on genotypic differences in photosynthetic nitrogen use efficiency, nitrogen use efficiency, yield and yield related traits in different rice genotypes under different nitrogen levels [J]. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2019, 8(4): 2484-2493.
- [23] 张婷婷, 孟丽丽, 陈有君, 等. 不同马铃薯品种的氮效率差异研究 [J]. *中国土壤与肥料*, 2021(1): 63-69.
- [24] 张亚丽. 水稻氮效率基因型差异评价与氮高效机理研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2006: 20-22.
- [25] LI X, JI P, ZHOU B, et al. Nitrogen partitioning traits and expression patterns of N metabolism-associated genes in maize hybrids with contrasting N utilization efficiencies [J]. *Agronomy Journal*, 2021, 113(2): 1439-1456.
- [26] 王春晓, 凌飞, 鹿泽启, 等. 不同氮效率花生品种氮素累积与利用特征 [J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(11): 1706-1713.

- [27] 王新超, 杨亚军, 陈亮, 等. 茶树氮素利用效率相关生理生化指标初探[J]. 作物学报, 2005, 31(7): 926-931.
- [28] MOLL R H, KAMPRATH E J, JACKSON W A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization[J]. *Agronomy Journal*, 1982, 74(3): 562-564.
- [29] SUGIYAMA N, HIROOKA M. Uptake of ammonium-nitrogen by blueberry plants[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1993, 16(10): 1975-1981.
- [30] 潘霞. 蓝莓氮形态偏好性及其相关机理研究[D]. 金华: 浙江师范大学, 2019: 14-15.
- [31] ZHANG H L, LIU Y C, QIN Y L, et al. Establishing dynamic thresholds for potato nitrogen status diagnosis with the SPAD chlorophyll meter[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(1): 190-195.
- [32] 李科, 邹小红, 李凤娇, 等. 不同氮浓度下油茶幼苗生长和氮平衡响应[J]. 南方林业科学, 2020, 48(5): 1-6.
- [33] 赵付江, 鄯丽娟, 张巍巍, 等. 不同氮效率类型茄子苗期生理特性差异的研究[J]. 华北农学报, 2014(增刊): 318-321.
- [34] 金欣欣, 姚艳荣, 贾秀领, 等. 基因型和环境对小麦产量、品质和氮素效率的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(4): 635-644.
- [35] 葛礼姣, 方馨妍, 张云月, 等. 菊花苗期氮高效品种资源筛选及氮效率评价体系建立[J]. 南京农业大学学报, 2021, 44(6): 1054-1026.
- [36] DUNCAN E G, O'SULLIVAN C A, ROPER M M, et al. Yield and nitrogen use efficiency of wheat increased with root length and biomass due to nitrogen, phosphorus, and potassium interactions[J]. *Journal of Plant Nutrition Soil Science*, 2018, 181(3): 364-373.
- [37] 赵俊晔, 于振文, 李延奇, 等. 施氮量对小麦氮磷钾养分吸收利用和产量的影响[J]. 西北植物学报, 2006, 26(1): 98-103.
- [38] 喻苏琴, 李凤娇, 胡冬南, 等. 不同氮水平条件下油茶苗养分积累及化学计量特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(4): 1-9.
- [39] 侯云鹏, 韩立国, 孔丽丽, 等. 不同施氮水平下水稻的养分吸收、转运及土壤氮素平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 836-845.
- [40] MUÑOZ V, FRANCE A, URIBE H, et al. Nitrogen and irrigation rates affected leaf phosphorus and potassium concentrations in different cultivars of pot-grown blueberry [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023, 23: 965-973.
- [41] FERNANDES M S, ROSSIELLO R O P. Mineral nitrogen in plant physiology and plant nutrition [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 1995, 14(2): 111-148.
- [42] 庞薇, 侯智霞, 李国雷, 等. 氮肥对蓝莓树体生长及果实品质的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(13): 225-229.
- [43] 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): 190-195.
- [44] 梁悦. 供氮水平和氮肥形态对棉花生长发育及养分吸收的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021: 18-20.
- [45] 张鹏钰, 高桐梅, 苏小雨, 等. 芝麻苗期氮高效品种筛选及氮效率评价体系建立[J]. 河南农业科学, 2022, 51(6): 54-66.
- [46] 陈二影, 杨延兵, 秦岭, 等. 谷子苗期氮高效品种筛选及相关特性分析[J]. 中国农业科学, 2016, 49(17): 3287-3297.

(责任编辑: 张明霞)

《植物资源与环境学报》启事

为了扩大科技期刊的信息交流、充分实现信息资源共享,《植物资源与环境学报》已先后加入“中国学术期刊(光盘版)”、“万方数据——数字化期刊群”和“中文科技期刊数据库”等网络文献资源数据库,凡在本刊发表的论文将编入数据库供上网交流、查阅及检索,作者的著作权使用费与本刊稿酬一次性给付,不再另付。如作者不同意将文章收编入数据库,请在来稿时声明,本刊将做适当处理。

《植物资源与环境学报》的投稿网址为 <http://zwzy.cnbg.net>; 联系电话: 025-84347014; E-mail: zwzybjb@163.com; QQ: 2219161478。

《植物资源与环境学报》编辑部

2024-05