

不同类型制干辣椒氮效率的筛选与评价

甄珊珊¹, 戚梅丽¹, 罗茂林¹, 孟德凯¹, 吉雪花¹, 宋文胜²

(1. 石河子大学农学院·特色果蔬栽培生理与种质资源利用兵团重点实验室 新疆石河子 832003;

2. 新疆天椒红安种业科技股份有限公司 新疆石河子 832003)

摘要: 制干辣椒是新疆重要的经济作物, 筛选氮高效的品种, 可为减少氮肥用量和辣椒产业可持续发展奠定品种基础。本研究分析了 13 个制干辣椒品种分别在高氮(3.750 g·盆⁻¹, HN)、低氮(0.939 g·盆⁻¹, LN)、无氮(CK)处理下植株地上、地下生长指标的变化, 通过相关性分析和主成分分析法确定氮效率关键的生长指标, 并利用聚类分析、模糊隶属函数分析以及生物量分类三种方法对参试的制干辣椒品种进行了氮效率分级和评价。结果表明, LN 处理的株高、茎粗、根长、根表面积、根干质量、单株干质量、根平均直径、根体积均最高, 较 HN 处理分别增加了 3.85%、1.57%、5.71%、2.10%、4.55%、2.22%、2.50%、7.24%; LN 处理的氮肥利用率(NUE)、氮肥生理利用率(NPE)、氮肥农学效率(NAE)、氮肥偏生产力(NFPP)分别是 HN 处理的 2.74、1.48、2.41、2.49 倍; LN 处理制干辣椒地上部氮积累量(ANA)和氮积累量(NA)较 HN 分别降低了 8.29%和 8.03%。各生长指标相对值与氮效率综合评价(D 值)的相关性分析以及主成分分析结果表明, 株高、根干质量、单株干质量、根长、根表面积是鉴定各品种氮效率的关键生长指标。综合生物量分类和模糊隶属函数分析可将供试品种分为 4 种氮效率类型, 即 12 号为高氮高效型, 2、4、6、9 号为双高效型, 7、8、10、11、13 号为双低效型, 5 号为低氮高效型。由此得出, 2、4、5、6、9 号可作为氮高效候选品种, 在实际生产中可适当减少氮肥投入, 以更好地践行“减肥”的施肥方针。

关键词: 辣椒; 氮效率; 主成分分析; 模糊隶属函数分析; 聚类分析

中图分类号: S641.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2026)09-177-10

Screening and evaluation of nitrogen efficient of different dried chili pepper varieties

Zhen Shanshan¹, Qi Meili¹, Luo Maolin¹, Meng Dekai¹, Ji Xuehua¹, Song Wensheng²

(1. Agriculture College of Shihezi University/Key Laboratory of Special Fruits and Vegetables Cultivation Physiology and Germplasm Resources Utilization of Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi 832003, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Tianjiao Hong' an Seed Technology Co., Ltd., Shihezi 832003, Xinjiang, China)

Abstract: Dried chili pepper is an important economic crop in Xinjiang. Selecting high nitrogen-efficient dried varieties can support the foundation for reducing nitrogen fertilizer usage and the sustainable development of the chili industry. This study analyzed the changes in aboveground and underground growth indicators of 13 dried chili pepper cultivars under high nitrogen(3.750 g·pot⁻¹, HN) and low nitrogen(0.939 g·pot⁻¹, LN) and no nitrogen(CK) conditions. Correlation analysis and principal component analysis(PCA) were applied to screen for key growth indicators reflecting nitrogen efficiency. Furthermore, hierarchical clustering analysis, fuzzy membership function analysis, and biomass classification were jointly employed to rank and comprehensively evaluate the nitrogen efficiency of the tested varieties. The results demonstrated that plants under the LN treatment exhibited the highest value in plant height, stem diameter, root length, root surface area, dry mass of root, dry mass of plant, root average diameter, and root volume, which were 3.85%, 1.57%, 5.71%, 2.10%, 4.55%, 2.22%, 2.50%, and 7.24% higher than those of HN treatment, respectively. Furthermore, compared with the HN treatment, the LN treatment significantly enhanced nitrogen use efficiency(NUE), nitrogen physiological efficiency(NPE), nitrogen agronomic efficiency(NAE), and nitrogen partial factor productivity(NFPP) by 2.74, 1.48, 2.41, and 2.49 times, respectively, whereas the aboveground nitrogen accumulation(ANA) and total nitrogen accumulation(NA) were 8.29% and 8.03% lower than those of LN treatment. Correlation analysis between the relative value

收稿日期: 2026-02-05; 修回日期: 2026-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(32060676, 31860548); 石河子大学育种专项(KX0301)

作者简介: 甄珊珊, 女, 在读硕士研究生, 研究方向为园艺。E-mail: 896514831@qq.com

通信作者: 吉雪花, 女, 教授, 研究方向为蔬菜栽培及种质创新。E-mail: lilysnowjxh@163.com

of each growth indicator and the comprehensive evaluation value of nitrogen efficiency (D), together with principal component analysis indicated that plant height, dry mass of root, and dry mass of plant, root length, root surface area could effectively reflect the nitrogen efficiency of different dried chili pepper varieties. According to the comprehensive evaluation combining biomass classification and fuzzy membership function analysis, the tested varieties could be grouped into four nitrogen efficiency types: Variety 12 was high efficiency under high nitrogen amount; varieties 2, 4, 6, and 9 were high efficiency under low and high nitrogen amount; varieties 7, 8, 10, 11, and 13 were low efficiency under low and high nitrogen amount; variety 5 was high efficiency under low nitrogen amount. Therefore, varieties 2, 4, 5, 6 and 9 can be considered as high nitrogen-efficient type, in practical production, nitrogen fertilizer can be appropriately reduced for these five varieties to better implement the fertilization policy of reducing fertilizer and pesticide use.

Key words: Chili pepper; Nitrogen efficiency; Principal component analysis; Fuzzy membership function analysis; Hierarchical clustering

辣椒(*Capsicum annuum* L.)在我国已有400多年的栽培历史。2022年,我国辣椒种植面积223万 hm^2 ^[1],已成为种植面积最大的蔬菜^[2]。辣椒是连续开花坐果的蔬菜,其营养生长和生殖生长并进的时期较长。因此,整个生育期需肥量大,且对氮肥的需求贯穿全生育期,所以氮肥对辣椒生长发育影响较大,对作物产量的形成发挥着至关重要的作用^[3-4]。Chen等^[5]研究表明,我国农作物氮肥吸收利用率为30%~35%,显著低于世界平均水平。目前,提高氮肥利用效率的途径主要有两种:一是改进栽培措施;二是选育氮高效品种。Tian等^[6]研究表明,合理施氮可显著提升辣椒的产量与品质,且不同品种对氮肥响应存在差异。Saqib等^[7]研究也表明,不同甜椒品种对氮肥的响应存在差异,甜椒Ganga和Savio在氮肥用量为75~150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时生物量表现为二次响应曲线;Winner对氮肥的响应接近线性,在150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的氮肥水平下其生长最好、生物量和产量均最高。此外,筛选和培育氮高效的辣椒品种,是提高氮素利用效率、减少氮肥使用量、降低环境污染的有效途径之一^[8]。

目前,关于辣椒氮效率的研究较少,对制干辣椒氮利用差异的研究更少。因此,本研究以13份制干辣椒品种为材料,分析了高、低氮条件下辣椒苗地上部和根系等生长指标的变化,筛选出与氮效率相关性较高的生长指标;并利用模糊隶属函数分析和生物量分类法进行氮效率类型划分,以期筛选出氮肥利用效率较高的制干辣椒品种,为减少氮肥用量和可持续生产奠定品种基础。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于2025年5月在石河子大学农学院试验

站进行。供试的13个制干辣椒品种均来自本课题组选育的自交系,其中1、2号为高辣圆锥椒,3~13号均为色素板椒。

1.2 试验设计

将13个辣椒品种的种子浸种催芽后分别播在穴盘中(基质草炭、蛭石、珍珠岩体积比为2:1:1),长至6叶1心后,将幼苗分别移栽至花盆(18 $\text{cm}\times$ 15.5 $\text{cm}\times$ 19 cm ,每盆装基质2.5 kg)中,每盆定植2株辣椒,每处理16盆,3次重复。缓苗1周后进行氮肥处理。共设置2个施氮[氮肥为尿素,N含量(w ,后同) $\geq 46\%$]水平:低氮(LN,施用量0.939 $\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$)和高氮(HN,施用量3.750 $\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$)处理,并以不施氮肥为对照(CK),氮肥均分3次施用,每次将氮肥溶解到200 mL 清水中浇灌根部,对照施等量清水。每7 d 施用1次氮肥,第3次处理结束后第7天取样测定株高、茎粗、根长(根系总长度)、根平均直径、根表面积、根体积等生长指标以及地上部、根氮含量。本试验氮浓度参照新疆大田滴灌尿素用量,结合基质缓冲特性设置高氮处理,再以其25%作为低氮处理,通过较大氮素梯度使不同基因型辣椒幼苗生长差异充分显现,便于不同氮效率种质鉴别^[8-9]。

1.3 指标测定

第3次处理结束后第7天,每处理选取生长状况一致的辣椒苗5棵,用清水洗净根部,采用根系扫描仪(WinRHIZO STD4800, Regent Instruments Inc., Canada)测定根长、根平均直径、根表面积、根体积。将根系与地上部分别在105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青10 min ,随后置于70 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中48 h 至恒质量。用分析天平分别测定地上部、根系干质量以及单株干质量,并计算根冠比。每处理3次重复。文中生物量指的是单株干质量。

氮含量:用凯氏定氮法^[10]测定地上部以及根的氮含量。

参照张杏雨^[11]的方法稍作修改计算氮积累量(NA)、地上部氮积累量(ANA)、氮肥利用率(NUE)、氮肥生理利用率(NPE)、氮肥农学效率(NAE)、氮肥偏生产力(NFPP)。

1.4 数据处理

采用 SPSS 26.0 对各指标数据进行方差分析(ANOVA)、相关性分析、主成分分析(PCA)和模糊隶属函数分析,并制作主成分散点图。采用 origin9.0 软件作图。参照段松江^[10]的方法建立多元逐步回归分析模型,并计算各品种不同指标的隶属函数值、权重以及氮效率综合评价值(D)。参考郝凤^[12]的方法进行聚类分析。

2 结果与分析

2.1 不同施氮水平下制干辣椒苗生长指标的比较

由表 1 可知,除地上部干质量和根冠比外,LN 处理的株高、茎粗、根长、根表面积、根干质量、单株干质量、根平均直径、根体积均最高,较 HN 处理分别增加了 3.85%、1.57%、5.71%、2.10%、4.55%、2.22%、2.50%、7.24%。LN 处理辣椒苗各生长指标的变异系数为 5.80%~30.34%,HN 处理辣椒苗各生长指标的变异系数为 7.11%~22.66%,说明 LN 处理各品种辣椒苗生长指标的差异较大,尤其是地上部干质量,其变异系数较 HN 处理增加了 11.81 百分点。LN、HN、CK 处理制干辣椒苗根表面积、根干质量、地上部干质量、根平均直径、根冠比均无显著差异。

2.2 不同施氮水平下制干辣椒苗氮利用参数的比较

由表 2 可知,LN 处理辣椒苗的 NUE、NPE、NAE、NFPP 均显著高于 HN,分别是 HN 的 2.74、1.48、2.41、2.49 倍;而 LN 处理辣椒苗的 ANA 和 NA 均低于 HN,分别较 HN 降低 8.29%、8.03%,但两者与 HN 差异均不显著。LN 处理 6 个氮利用指标的变异系数为 11.81%~41.31%,HN 处理为 12.35%~126.65%,说明 HN 处理各品种制干辣椒苗的氮利用参数的差异较大,尤其是 NAE,HN 处理的 NAE 变异系数较 LN 提高了 85.34 百分点,ANA、NA 对氮肥用量变化不敏感。

2.3 不同施氮水平下制干辣椒苗生长指标与氮利用参数的相关性分析

对不同施氮水平下制干辣椒苗生长指标与氮利用参数进行相关性分析,结果如图 1 所示,LN 处理制干辣椒苗茎粗、根干质量、地上部干质量、单株

干质量均与氮积累量呈极显著正相关,根平均直径与氮积累量呈显著正相关;根干质量与氮肥利用率呈显著正相关;根冠比与地上部氮积累量呈显著正相关;地上部干质量、单株干质量均与氮肥偏生产力呈显著正相关。HN 处理制干辣椒苗根干质量、地上部干质量、单株干质量与氮积累量均呈极显著正相关,其中根干质量与氮积累量的相关性最强;株高、根长、根干质量、地上部干质量、单株干质量均与氮肥偏生产力呈极显著正相关,其中株高与氮肥偏生产力的相关性最强。

2.4 不同施氮水平下制干辣椒苗各生长指标的主成分分析

对不同施氮水平下制干辣椒苗的 10 个生长指标进行主成分分析,结果如表 3 所示。LN 处理前 3 个主成分的累计贡献率为 86.598%,HN 处理前 3 个主成分的累计贡献率为 81.479%,表明 LN 处理和 HN 处理的前 3 个主成分具备较强的信息代表性,代表了 10 个指标所携带的绝大部分信息。由表 4 可知,LN 和 HN 处理的 PC1 中,根长的载荷系数分别为 0.98 和 0.30,根干质量的载荷系数分别为 0.64 和 1.00,株高的载荷系数分别为 0.80 和 0.64,根平均直径的载荷系数分别为 0.85 和 0.40,茎粗的载荷系数分别为 0.61 和 0.44,根表面积的载荷系数分别为 0.78 和 0.34。综上可知,上述指标对制干辣椒苗生长有较大的正向影响。LN 和 HN 处理的 PC2 中,地上部干质量的载荷系数分别为 0.93、0.29,单株干质量的载荷系数分别为 0.86、0.23,株高的载荷系数分别为 0.44、0.71,根长的载荷系数分别为 0.10、0.89,根冠比的载荷系数分别为 -0.10、-0.74。由图 2 可知,LN 处理地上部干质量、单株干质量、根体积、根干质量、茎粗、株高、根长、根表面积、根平均直径对施氮量响应敏感。高氮处理地上部干质量、株高、根长、根表面积、根平均直径对施氮量响应敏感。

2.5 不同制干辣椒苗的氮效率综合评价分析

以主成分累计贡献率值为权重,用隶属函数法将评价指标的绝对值标准化,通过复合运算得到不同辣椒的氮效率综合评价值(D)如表 5 所示。LN 处理 13 个品种的平均 D 值为 0.62;品种 9(D=0.90)、4(D=0.82)、3(D=0.79)、6(D=0.78)、1(D=0.74)、2(D=0.70)的 D 值均 ≥ 0.70 ;品种 11(D=0.19)、13(D=0.32)的 D 值均 < 0.4 。HN 处理 13 个品种的平均 D 值为 0.45,品种 9(D=0.78)、6(D=0.74)、1(D=0.60)的 D 值均 ≥ 0.6 ;品种 10(D=0.22)、

表 1 不同施氮处理对制干辣椒苗生长指标的影响

Table 1 Effects of different nitrogen treatments on growth indicators of dried chili pepper seedlings

生长指标 Growth index	CK			低氮 LN			高氮 HN			低氮/高氮 LN/HN
	范围 Range	均值 mean	变异系数 CV/%	范围 Range	均值 Mean	变异系数 CV/%	范围 Range	均值 Mean	变异系数 CV/%	
株高 Plant height/cm	17.80~26.72	22.00±2.82 b	12.81	19.00~29.30	24.54±3.31 a	13.50	19.6~28.40	23.63±2.78 ab	11.76	1.04
茎粗 Stem diameter/mm	2.42~3.14	2.86±0.20 b	7.06	2.70~3.79	3.23±0.31 a	9.65	2.84~3.57	3.18±0.24 a	7.57	1.02
根长 Root length/mm	1 038.97~2 022.05	1 649.86±294.86 b	17.87	1 075.01~2 245.99	1 880.68±382.38 a	20.33	1 174.94~2 436.10	1 779.06±342.55 a	19.25	1.06
根表面积 Root surface area/cm ²	119.81~234.61	173.84±31.10 a	17.89	124.30~248.66	186.04±33.66 a	18.09	133.67~225.03	182.22±28.17 a	15.46	1.02
根干质量 Dry mass of root/g	0.14~0.29	0.20±0.04 a	20.03	0.14~0.30	0.23±0.04 a	19.37	0.15~0.30	0.22±0.04 a	18.70	1.05
地上部干质量 Aboveground dry mass/g	0.39~0.92	0.59±0.14 a	23.07	0.45~1.03	0.67±0.20 a	30.34	0.47~0.99	0.68±0.13 a	18.53	0.99
单株干质量 Dry mass of plant/g	0.54~1.21	0.80±0.18 b	22.09	0.66~1.33	0.92±0.20 a	21.95	0.62~1.29	0.90±0.16 a	17.77	1.02
根平均直径 Root average diameter/mm	0.31~0.43	0.38±0.04 a	9.53	0.32~0.47	0.41±0.04 a	9.83	0.34~0.44	0.40±0.03 a	7.79	1.03
根体积 Root volume/cm ³	1.02~2.12	1.37±0.33 b	23.82	1.17~2.58	1.63±0.40 a	24.61	1.11~2.21	1.52±0.35 a	22.66	1.07
根冠比 Root-shoot ratio	0.31~0.38	0.34±0.02 a	6.45	0.29~0.35	0.32±0.02 a	5.80	0.27~0.36	0.32±0.02 a	7.11	1.01

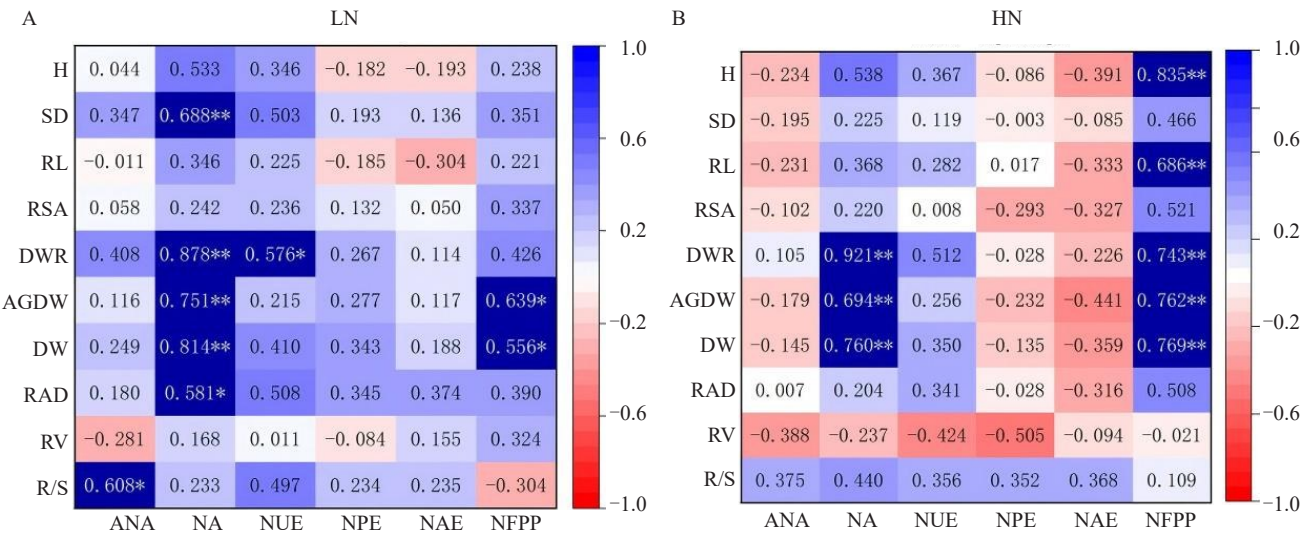
注：不同小写字母表示不同处理同一指标在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference among different treatments for the same indicator at 0.05 level. The same below.

表 2 不同施氮处理对制干辣椒苗氮利用指标的影响

Table 2 Effects of different nitrogen treatments on nitrogen utilization indices of dried chili pepper seedlings

氮利用指标 Nitrogen efficient parameter	低氮 LN			高氮 HN			低氮/高氮 LN/HN
	范围 Range	均值 Mean	变异系数 CV/%	范围 Range	均值 Mean	变异系数 CV/%	
地上部氮积累量 ANA	1.41~2.12	1.77±0.21 a	11.81	1.58~2.33	1.93±0.24 a	12.35	0.92
氮积累量 NA	0.70~1.83	1.26±0.32 a	25.36	0.82~2.00	1.37±0.31 a	23.02	0.92
氮肥利用率 NUE	0.29~1.24	0.75±0.24 a	32.05	0.17~0.35	0.27±0.06 b	20.15	2.74
氮肥生理利用率 NPE	0.26~0.61	0.43±0.11 a	26.75	0.17~0.59	0.29±0.13 b	43.52	1.48
氮肥农学效率 NAE	0.14~0.44	0.28±0.11 a	41.31	0.04~0.57	0.12±0.15 b	126.65	2.41
氮肥偏生产力 NFPP	0.54~3.30	1.97±0.76 a	38.34	0.38~2.26	0.79±0.61 b	76.93	2.49



注:H.株高;SD.茎粗;RL.根长;RSA.根表面积;DWR.根干质量;AGDW.地上部干质量;DW.单株干质量;RAD.根平均直径;RV.根体积;R/S.根冠比;ANA.地上部氮积累量;NA.氮积累量;NUE.氮肥利用率;NPE.氮肥生理利用率;NAE.氮肥农学效率;NFPP.氮肥偏生产力。*表示在0.05水平显著相关,**表示在0.01水平极显著相关。

Note: H. Plant height; SD. Stem diameter; RL: Root length; RSA. Root surface area; DWR. Dry mass of root; AGDW. Aboveground dry mass; DW. Dry mass of plant; RAD. Root average diameter; RV. Root volume; R/S. Root-shoot ratio; ANA. Above ground nitrogen accumulation; NA. Nitrogen accumulation; NUE. Nitrogen utilization efficiency; NPE. Nitrogen physiological efficiency; NAE. Nitrogen agronomic efficiency; NFPP. Nitrogen partial factor productivity. * indicates significant correlation at 0.05 level, ** indicates extremely significant correlation at 0.01 level.

图 1 不同施氮处理制干辣椒苗生长指标与氮利用参数相关性分析热图

Fig. 1 Correlation heatmap of growth indicators and nitrogen use efficiency parameters in dried chili pepper seedlings under different nitrogen treatments

低氮 LN				高氮 HN			
成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalue	贡献率 Contribution rate/%	累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalue	贡献率 Contribution rate/%	累计贡献率 Cumulative contribution rate/%
1	6.228	62.285	62.285	1	5.146	51.461	51.461
2	1.408	14.082	76.367	2	1.680	16.797	68.257
3	1.023	10.231	86.598	3	1.322	13.222	81.479
4	0.633	6.327	92.925	4	0.926	9.261	90.740
5	0.297	2.969	95.894	5	0.609	6.088	96.827
6	0.169	1.693	97.587	6	0.252	2.523	99.350
7	0.160	1.598	99.184	7	0.050	0.499	99.850
8	0.068	0.684	99.868	8	0.014	0.141	99.991
9	0.013	0.131	99.999	9	0.001	0.008	99.999
10	0.000	0.001	100.000	10	0.000	0.001	100.000

11($D=0.12$)、13($D=0.28$)的 D 值均 <0.30 。

供试辣椒各生长指标相对值与氮效率综合评价(D)的相关性分析如图 3 所示。LN 处理制干辣椒苗株高、根干质量、根长、茎粗、根平均直径、根表面积、单株干质量与 D 值均呈极显著正相关(图 3-A)。HN 处理制干辣椒苗地上部干质量、单株干质量、根干质量、根长、根表面积、株高与 D 值均呈极显著正相关(图 3-B)。因此,认为株高、根干质量、单株干质量、根长、根表面积是评价辣椒苗氮效率的主要生长指标。

为筛选氮效率核心鉴定指标,以 D 值为因变量,株高(X_1)、根干质量(X_2)、单株干质量(X_3)、根长(X_4)、根表面积(X_5)为自变量建立多元逐步回归分析模型。

表 4 不同施氮处理制干辣椒苗各生长指标载荷系数及累计贡献率

生长指标 Growth index	低氮 LN			高氮 HN		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
株高 Plant height	0.80	0.44	0.03	0.64	0.71	0.03
茎粗 Stem diameter	0.61	0.57	0.46	0.44	0.32	0.39
地上部干质量 Aboveground dry mass	0.20	0.93	-0.04	0.90	0.29	0.08
根干质量 Dry mass of root	0.64	0.70	0.12	1.00	0.04	0.04
单株干质 Dry mass of plant	0.46	0.86	-0.06	0.94	0.23	0.07
根长 Root length	0.98	0.10	-0.05	0.30	0.89	-0.18
根平均直径 Root average diameter	0.85	0.34	0.10	0.40	0.72	-0.22
根表面积 Root surface area	0.78	0.25	0.10	0.34	0.67	0.27
根体积 Root volume	0.17	0.81	-0.05	0.08	-0.05	0.98
根冠比 Root-shoot ratio	0.05	-0.10	0.99	0.28	-0.74	-0.29
贡献率 Contribution rate/%	39.81	34.56	12.24	37.36	30.48	13.64
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	39.81	74.36	86.60	37.36	67.84	81.48

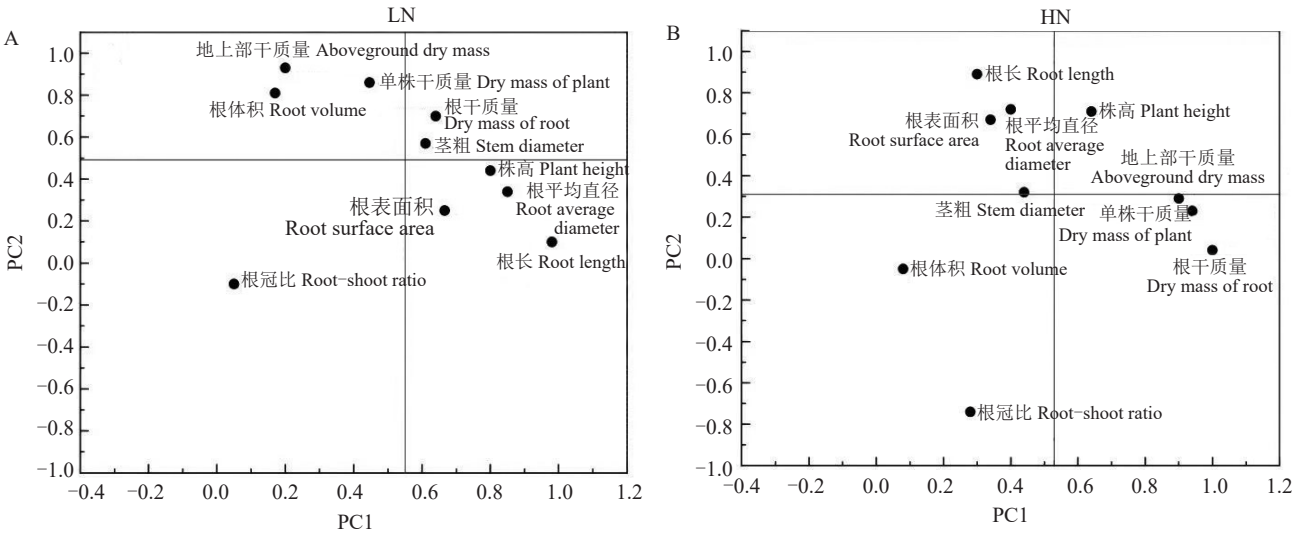
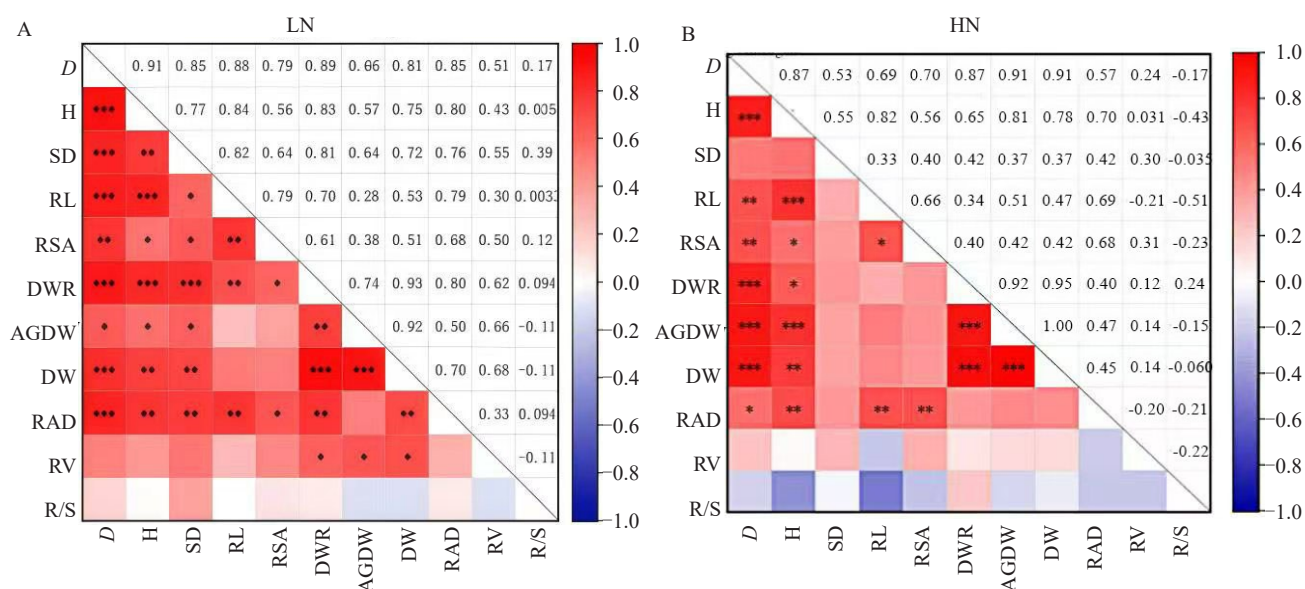


图 2 LN(A)和 HN(B)处理下辣椒苗生长指标主成分散点图

Fig 2 Principal component scatter plot of growth indicators of pepper seedlings under low-nitrogen (A) and high-nitrogen (B) treatments

表 5 不同施氮处理下不同制干辣椒品种隶属函数综合得分

Table 5 Comprehensive score of dried chili pepper cultivars under different nitrogen treatments based on membership function method					
品种编号 Cultivar No.	D 值 D value		品种编号 Cultivar No.	D 值 D value	
	低氮 LN	高氮 HN		低氮 LN	高氮 HN
1	0.74	0.60	8	0.51	0.31
2	0.70	0.48	9	0.90	0.78
3	0.79	0.45	10	0.56	0.22
4	0.82	0.55	11	0.19	0.12
5	0.65	0.43	12	0.62	0.46
6	0.78	0.74	13	0.32	0.28
7	0.52	0.41	平均 Average	0.62	0.45



注: D . 氮效率综合评价; H . 株高; SD . 茎粗; RL . 根长; RSA . 根表面积; DWR . 根干质量; $AGDW$. 地上部干质量; DW . 单株干质量; RAD . 根平均直径; RV . 根体积; R/S . 根冠比。*表示在 0.05 水平显著相关; **, ***分别表示在 0.01 和 0.001 水平极显著相关。

Note: D . Comprehensive nitrogen efficiency score; H . Plant height; SD . Stem diameter; RL . Root length; RSA . Root surface area; DWR . Dry mass of root; $AGDW$. Aboveground dry mass; DW . Dry mass of plant; RAD . Root average diameter; RV . Root volume; R/S . Root-shoot ratio. * represents significant correlation at 0.05 level; ** and *** represent extremely significant correlation at 0.01 and 0.001 level.

图3 LN(A)和HN(B)处理制干辣椒苗各生长指标与 D 值的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis between different growth indices and D value of dried chili pepper seedlings under low-nitrogen (A) and high-nitrogen (B) treatments

LN 处理因变量 D 值和株高(X_1)、根干质量(X_2)、单株干质量(X_3)、根长(X_4)、根表面积(X_5)5 个自变量的多元回归方程为: $D = -0.774 + 0.029X_1 + 0.729X_2 + 0.110X_3 + 1.970 \times 10^{-5}X_4 + 0.002X_5$, $r^2 = 0.939$ ($P < 0.001$)。

HN 处理因变量 D 值和株高(X_1)、根干质量(X_2)、单株干质量(X_3)、根长(X_4)、根表面积(X_5)5 个自变量的多元回归方程为: $D = -1.145 + 0.034X_1 + 0.491X_2 + 0.234X_3 + 0.443 \times 10^{-4}X_4 + 0.003X_5$, $r^2 = 0.935$ ($P < 0.001$)。

0.001)。

对 13 个辣椒品种在 2 个施氮水平下的氮效率综合评价(D)进行系统聚类,结果如图 4 所示。LN 处理 13 个品种可分为三类:第一类为双低效型,包括 1、11 号;第二类为低氮高效型,包括 7、8、10、12、13 号;第三类为高氮高效型,包括 2、3、4、5、6、9 号。HN 处理 13 个品种可分为三类:第一类为双低效型,包括 1、2、3、11、12、13 号;第二类为低氮高效型,包括 7、8、10 号;第三类为高氮高效型,包

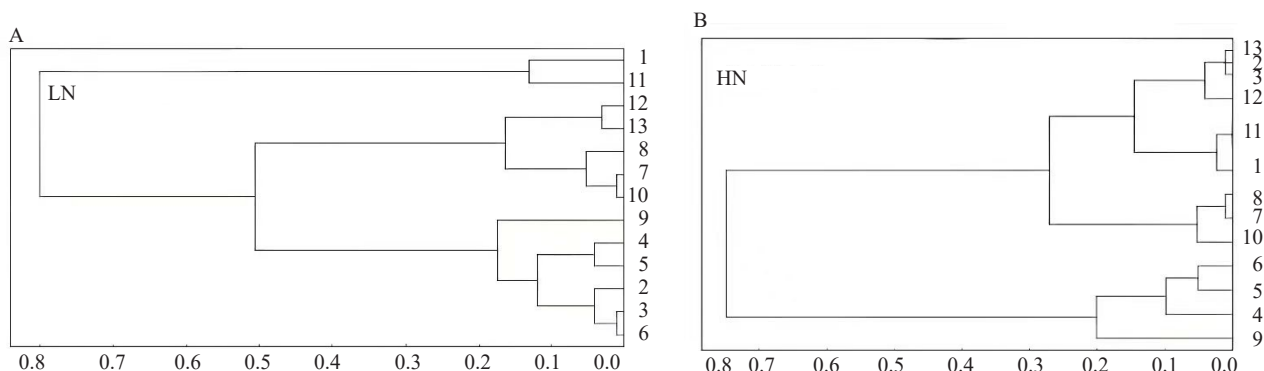


图4 LN(A)和HN(B)处理制干辣椒苗 D 值的系统聚类

Fig. 4 Dendrogram of hierarchical clustering of D value of dried chili pepper seedlings under low-nitrogen (A) and high-nitrogen (B) treatments

括4、5、6、9号。

2.6 不同品种制干辣椒氮效率类型划分

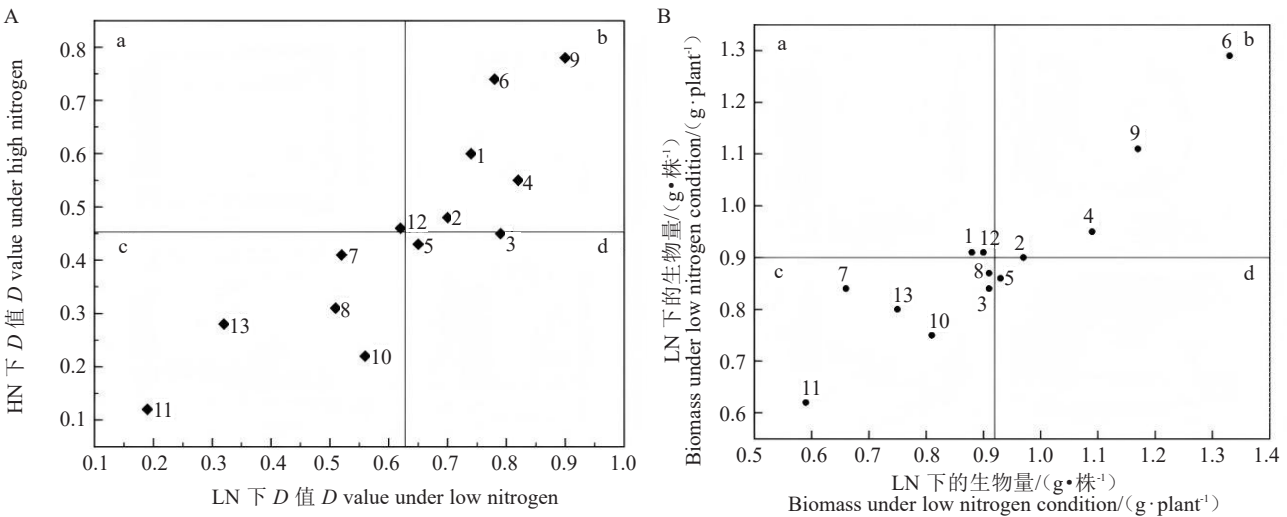
根据氮效率综合评价值(*D*)可将13个辣椒品种划分为4种氮效率类型(图5-A):(1)高氮高效型,即LN处理的*D*值低于平均值,HN处理的*D*值高于平均值,包括12号。(2)双高效型,即LN和HN处理的*D*值均高于平均值,包括1、2、4、6、9号。(3)双低效型,即LN和HN处理的*D*值均低于平均值,包括7、8、10、11、13号。(4)低氮高效型,即LN处理的*D*高于平均值,HN处理的*D*值低于平均值,包括3号和5号。

以生物量均值为划分标准可将13个辣椒品种划分为4种氮效率类型(图5-B):(1)高氮高效型:

包括1和12号。(2)双高效型:包括2、4、6、9号。(3)双低效型:包括3、7、8、10、11、13号。(4)低氮高效型:包括5号。

利用聚类分析、模糊隶属函数分析和生物量分类3种分类方式对13个品种进行分类,结果见表6。聚类分析与模糊隶属函数分析、生物量分类的结果差别较大;模糊隶属函数分析与生物量分类的结果一致性较高,可达84.6%。

综合模糊隶属函数分析和生物量分类结果,最终确定12号为高氮高效型,2、4、6、9号为双高效型,7、8、10、11、13号为双低效型,5号为低氮高效型。



注:a. 高氮高效型;b. 双高效型;c. 双低效型;d. 低氮高效型。
Note: a. High efficiency under high nitrogen amount; b. High efficiency under low and high nitrogen amount; c. Low efficiency under low and high nitrogen amount; d. High efficiency under low nitrogen amount.

图5 基于氮效率综合评价值(A)和生物量(B)的不同制干辣椒品种的氮效率类型散点图
Fig. 5 Scatter plot depicting the nitrogen efficiency types of different dried chili pepper varieties based on the comprehensive nitrogen efficiency score(A) and biomass(B)

表6 利用不同方法对参试辣椒氮利用效率的分类

氮利用类型 Nitrogen use type	系统聚类分析 Hierarchical cluster analysis		模糊隶属函数分析 Fuzzy membership function analysis	生物量分类 Biomass classification
	LN	HN		
双低效型 Low efficiency under both high nitrogen and low nitrogen	1、11	1、2、3、11、12、13	7、8、10、11、13	3、7、8、10、11、13
低氮高效型 High efficiency under low nitrogen	7、8、10、13、12	7、8、10	3、5	5
高氮高效型 High efficiency under high nitrogen	2、3、4、5、6、9	4、5、6、9	12	1、12
双高效型 High efficiency under both high nitrogen and low nitrogen			1、2、4、6、9	2、4、6、9

3 讨论与结论

施氮水平可影响制干辣椒幼苗生长与氮素利用。本研究中LN处理的株高、茎粗、根长、根表面

积、根干质量、单株干质量、根平均直径、根体积均最高,较HN处理分别增加了3.85%、1.57%、5.71%、2.10%、4.55%、2.22%、2.50%、7.24%;LN处理辣椒苗的NUE、NPE、NAE、NFPP均显著高于HN,分别

是HN的2.74、1.48、2.41、2.49倍。这与王春萍等^[8]的结论相似,表明适度低氮条件可诱导辣椒幼苗根系发育,提升氮素利用能力。

氮效率属于复杂的综合性状,单一指标难以客观评价种质的氮素利用能力,筛选简易可靠的评价指标是开展氮高效种质鉴定的前提。小麦、大葱等作物已建立起以苗期干物质质量、产量、根冠比等性状为核心的氮效率种质筛选评价体系^[13-20]。辣椒中有研究认为根干质量、地上部干质量、单株干质量等生物量指标可作为苗期耐低氮评价核心指标^[8,21-22]。本研究通过相关性分析、主成分分析综合表明,株高、根干质量、单株干质量、根长、根表面积对施氮水平响应敏感,可作为制干辣椒苗期氮效率评价的关键生长指标。本研究也表明,株高、根干质量、单株干质量、根长、根表面积5个自变量可构建氮效率综合评价(D)预测模型,低氮、高氮条件下决定系数分别达0.939、0.935,说明株高、根干质量、单株干质量、根长、根表面积可对制干辣椒苗期氮效率进行快速预判,为资源初步筛选提供便捷途径。本研究优先选用便于田间大批量测定的生长表型指标,避开操作繁琐的生理酶类指标,更适用于种质资源的高通量初步筛选^[23-25]。

氮效率分型结果受评价方法影响较大。目前作物氮效率评价常采用模糊隶属函数分析、生物量分类、聚类分析等多种手段,不同方法分型结果存在一定差异^[26-29]。本研究结果表明,模糊隶属函数分析与生物量分类一致性可达84.6%,而聚类分析结果与前两者偏差较大,不适合单独作为制干辣椒苗期氮效率分型依据。王春萍等^[21]研究也表明,隶属函数分析与聚类分析结果并不完全相同;朱佳荣等^[30]在油菜上结合变异分析、主成分分析、模糊隶属函数分析构建氮效率评价模型。本研究参试品种中双高效型与双低效型品种较多,低氮高效型、高氮高效型种质数量偏少,这可能与供试种质群体数量有限有关。双高效型2、4、6、9号品种在高氮、低氮环境中均保持较高的氮效率,与不同氮肥管理模式均适配;5号为低氮高效品种,适合减氮栽培;12号为高氮高效品种,高氮肥投入下优势明显;7、8、10、11、13号属于双低效型品种,无论高氮、低氮环境,苗期氮效率均较低。现阶段表型组学、光谱遥感技术也逐步应用于作物氮效率高通量鉴定^[31-33],可为后续辣椒氮效率大规模资源筛查提供新思路。

应当指出的是,本研究仅为苗期基质盆栽试

验。已有研究表明部分作物苗期氮效率与大田成熟期表现具有较好一致性^[24,34],但苗期筛选结果仍需大田多年多点试验进一步验证^[35]。本研究仅基于表型开展评价,尚未解析不同氮效率品种氮吸收、转运、再利用的生理与分子调控机制;后续可将苗期初筛获得的优异种质开展田间栽培验证,并结合生理、分子手段解析制干辣椒氮高效形成机制,为耐低氮新品种选育提供理论支撑。

综上所述,低氮水平(LN)能够提高制干辣椒幼苗株高、茎粗、根长、根表面积、根干质量、单株干质量、根平均直径、根体积等指标数值,显著提高NUE、NPE、NAE、NFPP等氮利用参数。株高、根干质量、单株干质量、根长、根表面积可作为制干辣椒苗期氮效率评价的核心生长指标。利用模糊隶属函数分析与生物量分类综合筛选出双高效型品种2、4、6、9号,低氮高效品种5号,高氮高效品种12号,双低效型品种7、8、10、11、13号。本研究建立了制干辣椒苗期氮效率评价体系,获得一批不同氮效率类型种质,可为制干辣椒耐低氮品种筛选、苗期氮肥科学管控提供参考。

参考文献

- [1] 乔立娟,赵帮宏,宗义湘,等.我国辣椒产业发展现状、趋势及对策[J].中国蔬菜,2023(11):9-15.
- [2] 邹学校,杨莎,朱凡,等.中国高口感品质鲜食辣椒产业发展与未来趋势[J].园艺学报,2024,51(1):27-38.
- [3] 宋毅,李静,谷贺贺,等.氮肥用量对冬油菜籽粒产量和品质的影响[J].作物学报,2023,49(7):2002-2011.
- [4] Lassaletta L, Billen G, Grizzetti B, et al. 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: The relationship between yield and nitrogen input to cropland[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(10):105011.
- [5] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514 (7523): 486-489.
- [6] Tian Z W, Li Y, Liang Z H, et al. Genetic improvement of nitrogen uptake and utilization of winter wheat in the Yangtze River Basin of China[J]. Field Crops Research, 2016(196):251-260.
- [7] Saqib M, Anjum M A, Hoogenboom G. The performance of sweet pepper cultivars under different nitrogen levels in a semi-arid environment[J]. Journal of Plant Nutrition, 2023, 46 (6):984-995.
- [8] 王春萍,张世才,雷开荣,等.辣椒苗期耐低氮指标与评价方法研究[J].园艺学报,2017,44(12):2318-2326.
- [9] 王春萍,张世才,吴红,等.不同氮素水平下加工型辣椒干物质积累和氮吸收特性[J].分子植物育种,2021,19(15):5107-5112.
- [10] 段松江,木丽迪尔·拜波拉提,彭增莹,等.海岛棉氮高效品种筛选与氮效率综合评价[J].作物杂志,2024(2):62-70.

- [11] 张杏雨. 作物秸秆还田与氮肥施用方法对水稻产量及氮肥利用率的影响[D]. 江苏扬州: 扬州大学, 2023.
- [12] 郝凤. 紫花苜蓿氮效率差异机制与氮营养阶段生育期划分的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2017.
- [13] 张恒, 陈艳琦, 任杰莹, 等. 西南麦区小麦苗期氮高效品种筛选及指标体系构建[J]. 四川农业大学学报, 2022, 40(1): 10-18.
- [14] 袁园园, 郭凯, 王国园, 等. 黄淮麦区小麦苗期氮高效品种(系)的筛选[J]. 中国种业, 2015, 247(10): 50-53.
- [15] 樊继伟, 王康君, 张广旭, 等. 黄淮麦区不同小麦品种氮素利用差异分析[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(4): 43-51.
- [16] 徐晴, 董建辉, 许甫超, 等. 湖北省小麦氮素高效利用种质的筛选及相关性分析[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(4): 21-25.
- [17] 赵瑞. 小麦种质资源氮效率评价筛选及相关性状的全基因组关联分析[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [18] 孟自力, 朱伟, 朱倩, 等. 小麦氮高效品种的筛选及评价[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(13): 52-57.
- [19] 张维军, 曹丽娜, 何进尚, 等. 小麦氮素利用效率研究进展与展望[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(21): 1-10.
- [20] 赵洪, 杨正芬, 严正炼. 不同种植密度对遵义大葱产量及效益的影响[J]. 耕作与栽培, 2025, 45(1): 76-79.
- [21] 王春萍, 张世才, 黄启中, 等. 辣椒苗期耐低氮基因型差异分析[J]. 分子植物育种, 2019, 17(14): 4631-4637.
- [22] 王春萍, 李怡斐, 张世才, 等. 102份辣椒种质资源苗期耐低氮性综合评价[J]. 分子植物育种, 2023, 21(4): 1330-1338.
- [23] 马晓诺, 侯星宇, 蔡红梅. 长江中下游主栽水稻氮高效品种筛选及其生理生化特征[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(5): 1-12.
- [24] 谢锐, 韩志刚, 张向前, 等. 阴山沿麓马铃薯氮效率综合评价及高产氮高效品种筛选[J]. 植物营养与肥料学报, 2025, 31(11): 2266-2279.
- [25] 刘星. 氮磷高效水稻品种筛选及其形态生理特征[D]. 江苏扬州: 扬州大学, 2024.
- [26] 刘洋. 花生区试品种苗期氮效率鉴定评价[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2022.
- [27] Mu X H, Chen Y L. The physiological response of photosynthesis to nitrogen deficiency[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021(158): 76-82.
- [28] 王淮. 棉花氮高效种质筛选及评价指标的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [29] 康利允, 李晓慧, 高宁宁, 等. 氮高效甜瓜种质资源的筛选与评价[J]. 西南农业学报, 2023, 36(6): 1271-1278.
- [30] 朱佳荣, 代文君, 李浩, 等. 甘蓝型油菜越冬期与成熟期氮效率的评价与鉴定[J]. 植物遗传资源学报, 2024, 25(12): 2094-2106.
- [31] 刘依柔, 宋明轩, 赵晓东, 等. 基于无人机多光谱影像的花生氮高效种质资源筛选[J]. 山西农业科学, 2024, 52(6): 37-46.
- [32] 燕浩奎. 南疆枣树生理生长特征遥感监测与精准灌溉施肥模式[D]. 西安: 西安理工大学, 2024.
- [33] 高越之. 基于无人机多光谱和地面高光谱遥感的小麦氮效率品种分类研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2025.
- [34] 张萍. 花生响应低氮胁迫的氮高效生理及分子机制研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2025.
- [35] Sharma N, Sinha V B, Gupta N, et al. Phenotyping for nitrogen use efficiency: Rice genotypes differ in N-responsive germination, oxygen consumption, seed urease activities, root growth, crop duration, and yield at low N[J]. Frontiers in Plant Science, 2018(9): 1452.