

中国南瓜幼苗低氮耐受性指标筛选及综合评价

廖青桂^{1,2}, 卢秋晨², 刘英³, 董佳美^{1,2}, 孙雅佩²,
何亚迪², 薄凯亮², 王文娇¹, 段颖², 王长林²

(1. 山西农业大学园艺学院 山西太谷 030801; 2. 中国农业科学院蔬菜花卉研究所·
蔬菜生物育种全国重点实验室 北京 100081; 3. 哈尔滨市农业科学院 哈尔滨 150030)

摘要: 氮肥过量施用是导致土壤退化及环境污染的重要原因之一, 选育低氮耐受性较强的品种对中国南瓜的减肥增效生产具有重要意义。以 8 个中国南瓜种质为试验材料, 采用水培法并设置适氮(7.0 mmol·L⁻¹)和低氮(0.7 mmol·L⁻¹)2 个处理, 测定苗期 18 个性状的低氮耐受系数, 采用主成分、隶属函数和回归分析方法建立中国南瓜低氮耐受性综合评价体系。结果表明, 不同种质各指标的低氮耐受系数存在显著差异; 主成分分析表明, 一些表征植株生物量和叶片光合作用能力的指标与低氮耐受能力密切相关, 其中根部干质量、根部鲜质量、根体积、壮苗指数等 4 个指标可作为低氮耐受性鉴定指标。利用回归分析建立中国南瓜幼苗低氮耐受性预测方程 $D' = 0.9509 - 0.1212X_1 - 0.2077X_2 + 0.1341X_3 - 0.0782X_4$ (平均估算精度 96.5%, $R^2 = 0.957$), 筛选获得 1 份苗期低氮耐受性较强的种质 Cmo19(柿饼南瓜), 初步实现中国南瓜幼苗期低氮耐受性种质资源的快速筛选鉴定, 为中国南瓜氮高效利用品种选育及相关机制研究提供了依据。

关键词: 中国南瓜; 低氮胁迫; 筛选; 综合评价

中图分类号: S642.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2024)09-074-07

Index screening and tolerance evaluation of low nitrogen stress in seedling stage of *Cucurbita moschata*

LIAO Qinggui^{1, 2}, LU Qiuchen², LIU Ying³, DONG Jiamei^{1, 2}, SUN Yapei², HE Yadi², BO Kailiang², WANG Wenjiao¹, DUAN Ying², WANG Changlin²

(1. College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi, China; 2. Institute of Vegetables and Flowers, Chinese Academy of Agricultural Sciences/State Key Laboratory of Vegetable Biobreeding, Beijing 100081, China; 3. Harbin Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150030, Heilongjiang, China)

Abstract: Excessive application of nitrogen fertilizer is one of the major causes of soil degradation and environmental pollution. The selection of high-yielding varieties with strong low-nitrogen tolerance is of great significance for the efficient production in *Cucurbita moschata*. In this study, eight germplasm were used as experimental materials, and two treatments of suitable nitrogen (7.0 mmol·L⁻¹) and low nitrogen (0.7 mmol·L⁻¹) were set up in hydroponics to determine the low nitrogen tolerance coefficients of 18 traits in the seedling stage. The comprehensive evaluation system was established by using the methods of principal component, subordinate function and regression analysis. The results showed that the low nitrogen tolerance coefficients of different germplasm indicators differed significantly. The principal component analysis showed that the index characterizing plant biomass and photosynthesis were closely related to the low nitrogen tolerance ability, and that the four index, including root dry mass, root fresh mass, root volume and seedling index, could be used as index of the tolerance identification. Regression analysis was used to establish a predictive equation for low nitrogen tolerance in seedlings $D' = 0.9509 - 0.1212X_1 - 0.2077X_2 + 0.1341X_3 - 0.0782X_4$ ($R^2 = 0.957$, average estimation accuracy 96.5%). One germplasm with strong low-nitrogen tolerance were finally obtained, namely Cmo19 (Shibing Nangua). This study initially realized the high-throughput screening and identification of low nitrogen tolerance germplasm

收稿日期: 2024-05-29; 修回日期: 2024-06-27

基金项目: 北京市设施蔬菜创新团队项目(BAIC01); 中国农业科学院科技创新工程(CAAS-ASTIP-IVFCAAS)

作者简介: 廖青桂, 女, 在读硕士研究生, 研究方向为南瓜遗传育种。E-mail: 18434766932@163.com

通信作者: 王文娇, 女, 副教授, 研究方向为蔬菜分子生物学。E-mail: sxndwj@sxau.edu.cn

段颖, 女, 助理研究员, 研究方向为南瓜遗传育种。E-mail: duanying@caas.cn

王长林, 男, 副研究员, 研究方向为南瓜遗传育种。E-mail: wangchanglin@caas.cn

resources in *Cucurbita moschata* during the seedling stage, which provided a theoretical basis for the selection and breeding of nitrogen-efficient varieties of *Cucurbita moschata* and the study related mechanisms.

Key words: *Cucurbita moschata*; Low nitrogen stress; Screening; Comprehensive evaluation

氮元素(nitrogen, N)是生命体重要有机分子的基本组成元素之一,也是决定植物生长发育、产量及品质形成的重要营养元素之一^[1]。氮元素缺乏会导致植物细胞生理生化活动受到抑制,降低作物产量和品质^[2]。尽管大量施加氮肥可以提高作物产量,但也会引起资源浪费、土壤污染和破坏农田生态系统等一系列问题^[3]。选育具有较高氮利用效率(nitrogen use efficiency, NUE)的耐低氮或氮高效利用作物品种,既可以降低氮肥施用量,也可以提高瘠薄土地的利用效率,是发展环境友好型农业的重要解决途径^[4]。

中国南瓜(*Cucurbita moschata*)是葫芦科南瓜属一年生草本植物,在我国广泛栽培。中国南瓜起源于中南美洲地区,具有较强的抗逆能力^[5-6]。中国南瓜也是黄瓜、甜瓜和西瓜等葫芦科作物的主要砧木之一。研究表明,采用中国南瓜为砧木嫁接甜瓜,氮利用效率提高 1.3%~4.2%,果实氮素积累量和产量均显著提高^[7]。中国南瓜嫁接黄瓜和西瓜也可明显促进盐胁迫下叶片和根系硝酸还原酶活性和氮素转化能力的提高,增强根际土壤酶活性,从而提高黄瓜和西瓜的耐盐性和产量^[8-9]。因此,筛选中国南瓜耐低氮种质资源,对中国南瓜肉用及砧用品种选育均具有实际应用意义。

已有研究表明,不同种质资源的低氮耐受能力与自身基因型关系密切^[10-12],同时氮利用效率受到多种生理生化和代谢途径共同调控,少数几个性状不能准确反映出不同品种的耐受能力^[13]。因此,有必要采用综合评价方法进行种质资源的评价与筛选。目前中国南瓜低氮耐受性研究主要集中于探讨不同生长指标在低氮处理前后的变化趋势,如南瓜根系长度、果实产量、植株氮利用效率等指标^[14],也有研究表明,氮肥施用量直接影响叶片总叶绿素含量、PSII 活性等叶绿素荧光参数^[15],但尚未见中国南瓜氮利用效率鉴定评价方法的报道,因此有必要建立一套相对稳定且高效的中国南瓜低氮耐受性指标筛选评价体系。

笔者以 8 份中国南瓜种质资源为试验材料,利用水培法设置正常氮(7.0 mmol·L⁻¹)和低氮胁迫(0.7 mmol·L⁻¹)处理,进行 18 个生长和光合作用指标测定,并采用主成分分析和隶属函数分析法对种质低氮耐受性进行综合评价,建立适用于中国南瓜

幼苗期低氮耐受性种质评价的实用性筛选鉴定体系,为中国南瓜耐低氮品种选育及氮高效利用基因的挖掘提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材 料

8 份中国南瓜种质均为中国农业科学院蔬菜花卉研究所南瓜育种课题组收集或育成的高代纯合自交系(表 1)。

表 1 供试中国南瓜种质资源信息

Table 1 The germplasm information of *C. moschata* used in this study

编号 No.	种质名称 Germplasm name	来源 Origin
Cmo8	18 号柱 No. 18 Zhu	中国山东 Shandong, China
Cmo19	柿饼南瓜 Shibing Nangua	中国陕西 Shaanxi, China
Cmo31	C05	中国山西 Shanxi, China
Cmo36	古县长南瓜 Guxian Changnangua	中国山西 Shanxi, China
Cmo114	5Bb643	中国陕西 Shaanxi, China
Cmo125	26 号 No. 26	中国山东 Shandong, China
Cmo144	黄狼 Huanglang	中国上海 Shanghai, China
Cmo171	火凤凰 Huofenghuang	泰国 Thailand

1.2 方 法

试验于 2022 年 8—9 月在中国农业科学院蔬菜花卉研究所人工气候室进行,培养温度为昼/夜=25 °C/15 °C(12 h/12 h)。选取颗粒饱满、种皮完整的种子播种于 32 孔穴盘,每份材料播种 60 粒,基质采用 20 目粗河砂,除正常浇水外,不添加其他措施,待其长至 2 叶 1 心时,挑选健壮且长势一致的幼苗移栽到水培盆中进行低氮胁迫。

试验采用 Hogland 营养液水培方式进行,低氮胁迫处理组的营养液氮浓度设置为 0.7 mmol·L⁻¹,对照组设置为 7.0 mmol·L⁻¹,其他条件保持一致。水培盆面积为 1500 cm²(50 cm × 30 cm),行间距为 10 cm,每个水培盆间隔 20 cm。使用小型通气泵对水培营养液进行加氧通气,每隔 3 d 通气 1 次,每次通气 4 h。处理第 0 天与第 9 天时测定植株生长指标和光合作用相关指标,设 3 次重复,每重复为 5 株幼苗。

1.2.1 水培营养液配制 对照组所施营养液为改良型 Hogland 营养液^[16]:Ca(NO₃)₂·4H₂O 2 mmol·L⁻¹、KNO₃ 3 mmol·L⁻¹、CaCl₂ 2 mmol·L⁻¹、KCl 3 mmol·L⁻¹、MgSO₄·7H₂O 2 mmol·L⁻¹、NH₄·H₂PO₄ 1 mmol·L⁻¹，并添加微量元素。低氮处理组所施营养液配方:Ca(NO₃)₂·4H₂O 0.2 mmol·L⁻¹、KNO₃ 0.3 mmol·L⁻¹、CaCl₂ 3.8 mmol·L⁻¹、KCl 4.7 mmol·L⁻¹、MgSO₄·7H₂O 2 mmol·L⁻¹、NH₄·H₂PO₄ 1 mmol·L⁻¹，并添加微量元素。

微量元素配方:EDTA-NaFe 80 μmol·L⁻¹、H₃BO₃ 46.3 μmol·L⁻¹、MnSO₄·4H₂O 9.5 μmol·L⁻¹、ZnSO₄·7H₂O 0.8 μmol·L⁻¹、CuSO₄·5H₂O 0.3 μmol·L⁻¹、(NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O 0.02 μmol·L⁻¹。配方中不同氮浓度处理只改变硝态氮浓度,不改变铵态氮。

1.2.2 生长指标测定 利用刻度尺和游标卡尺测量植株的株高、茎粗;使用千分之一天平分别测定植株的地上部鲜质量和根部鲜质量,转入 65 °C 烘箱烘 72 h 后测定地上部干质量及根部干质量;使用 WinRHIZO 根系扫描分析系统对植株根系进行扫描并测定根长、根直径、根尖数、根体积等根系指标。其他生长指标测定公式如下:

$$\text{根冠比} = \frac{\text{根部鲜质量}}{\text{地上部鲜质量}}; \quad (1)$$

$$\text{全株含水量}/\% = [1 - (\frac{\text{地上部干质量} + \text{根部干质量}}{\text{地上部鲜质量} + \text{根部鲜质量}})] \times 100; \quad (2)$$

$$\text{壮苗指数}/\% = \frac{\text{茎粗} \times (\text{地上部干质量} + \text{根部干质量})}{\text{株高}} \times 100; \quad (3)$$

$$\text{种质的低氮耐受系数 } \gamma = \frac{\text{低氮处理组测定值}}{\text{正常氮对照组测定值}}. \quad (4)$$

1.2.3 光合作用相关指标测定 参考邱喜岩等^[17]的方法,利用分光光度法测定南瓜叶绿素含量。使用美国 PP SYSTEMS CIRAS-3 便携式光合仪测定植物的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r),测定光照度 800 μmol·m⁻²·s⁻¹,CO₂ 浓度为 400 μmol·mol⁻¹,叶室温度为 25 °C,流速为 500 μmol·s⁻¹。

1.3 数据统计与分析

原始数据在 Microsoft Excel 2010 中计算,利用 Matlab 进行数据分析。采用皮尔逊相关系数进行相关性分析,主成分分析法进行主因子分析,最小二乘法估计线性回归参数。参考张蒙等^[6]的方法进行隶属函数分析和综合评价。

2 结果与分析

2.1 低氮耐受系数的变异幅度及相关性分析

测定胁迫处理及对照组的各生长和生理指标,

并计算每一单项指标的低氮耐受系数(表 2)。结果表明,同一指标的低氮耐受系数在各种质之间变异范围较大,特别是根部鲜质量和根体积 2 个指标的变异系数分别达 64%和 67%,全株含水量的变异系数最小,仅为 15%。

对各生长指标和光合指标的低氮耐受系数进行相关性分析,结果表明(表 3),株高与茎粗呈极显著正相关,相关系数为 0.92;根体积与地上部干质量(0.87)、根冠比(0.91)、壮苗指数(0.87)和根直径(0.86)均呈极显著正相关;气孔导度与蒸腾速率呈极显著正相关,相关系数为 0.96;此外,根部干质量与地上部鲜质量(0.90)、根部鲜质量与根长(0.95),地上部干质量与壮苗指数(0.97)也均呈极显著正相关,说明各指标之间存在信息冗余,需采用主成分分析法进一步发掘各指标的内在相关性。

表 2 中国南瓜种质各指标低氮耐受系数变异分析
Table 2 The diversity analysis of low nitrogen tolerance index in *C. moschata*

指标 Index	均值 Mean	标准差 SD	最小值 Min	最大值 Max	变异系数 CV/%
株高 Plant height	0.98	0.17	0.77	1.30	17
茎粗 Stem diameter	1.06	0.22	0.89	1.57	21
地上部鲜质量 Aboveground fresh mass	0.84	0.34	0.48	1.46	40
根部鲜质量 Root fresh mass	1.56	1.00	0.41	3.08	64
地上部干质量 Aboveground dry mass	1.03	0.50	0.40	2.02	49
根部干质量 Root dry mass	1.11	0.53	0.41	1.84	47
根冠比 Root-shoot ratio	1.48	0.51	0.82	2.52	35
壮苗指数 Seedling index	1.15	0.48	0.65	2.01	42
全株含水量 Whole-plant water content	1.14	0.17	0.85	1.33	15
根长 Root length	1.01	0.32	0.75	1.64	31
根直径 Root diameter	1.05	0.17	0.86	1.34	16
根体积 Root volume	1.23	0.82	0.30	2.89	67
根尖数 Root number	0.78	0.21	0.43	1.07	26
叶绿素含量 Chlorophyll content	0.83	0.15	0.57	1.05	19
净光合速率 Net photosynthetic rate	0.96	0.57	0.49	2.25	59
气孔导度 Stomatal conductance	0.77	0.45	0.34	1.66	59
蒸腾速率 Transpiration rate	0.90	0.56	0.36	2.01	62
胞间 CO ₂ 浓度 Concentration of intercellular CO ₂	0.80	0.19	0.55	1.06	24

表3 中国南瓜各指标低氮耐受系数的相关性分析
Table 3 Correlation matrix of single index of low nitrogen tolerance in *C. moschata*

指标 Index	株高 Plant height	茎粗 Stem diameter	地上部鲜质量 Above-ground fresh mass	根部鲜质量 Root fresh mass	地上部干质量 Above-ground dry mass	根部干质量 Root dry mass	根冠比 Root-shoot ratio	根冠比 Root-shoot ratio	壮苗指数 Seedling index	全株含水量 Whole-plant water content	根长 Root length	根直径 Root diameter	根体积 Root volume	根尖数 Root number	叶绿素含量 Chlorophyll content	净光合速率 Net photosynthetic rate	气孔导度 Stomatal conductance	蒸腾速率 Transpiration rate	胞间CO ₂ 浓度 Concentration of intercellular CO ₂	
株高 Plant height	1.00																			
茎粗 Stem diameter	0.92**	1.00																		
地上部鲜质量 Above-ground fresh mass	-0.31	-0.12	1.00																	
根部鲜质量 Root fresh mass	-0.15	-0.12	0.83*	1.00																
地上部干质量 Above-ground dry mass	0.19	0.18	0.63	0.76*	1.00															
根部干质量 Root dry mass	-0.30	-0.22	0.90**	0.83*	0.71*	1.00														
根冠比 Root-shoot ratio	0.13	-0.08	0.27	0.66	0.69	0.56	1.00													
壮苗指数 Seedling index	0.13	0.15	0.73*	0.83*	0.97**	0.83*	0.72*	1.00												
全株含水量 Whole-plant water content	0.47	0.36	-0.35	-0.36	0.32	-0.26	0.06	0.14	1.00											
根长 Root length	0.01	-0.02	0.67	0.95**	0.80*	0.67	0.71*	0.82*	-0.20	1.00										
根直径 Root diameter	0.15	-0.10	0.08	0.37	0.63	0.43	0.90**	0.61	0.40	0.43	1.00									
根体积 Root volume	-0.01	-0.16	0.47	0.74*	0.87**	0.72*	0.91**	0.87**	0.18	0.78*	0.86**	1.00								
根尖数 Root number	-0.22	-0.29	0.60	0.65	0.46	0.77*	0.69	0.59	-0.22	0.49	0.62	0.65	1.00							
叶绿素含量 Chlorophyll content	0.11	-0.14	-0.67	-0.56	-0.18	-0.55	0.00	-0.35	0.70	-0.42	0.34	-0.04	-0.16	1.00						
净光合速率 Net photosynthetic rate	-0.13	-0.31	-0.07	-0.07	0.03	0.17	0.39	0.06	0.25	-0.17	0.62	0.29	0.67	0.54	1.00					
气孔导度 Stomatal conductance	-0.75*	-0.63	0.49	0.33	-0.21	0.32	-0.13	-0.10	-0.69	0.13	-0.29	-0.12	0.44	-0.28	0.19	1.00				
蒸腾速率 Transpiration rate	-0.77*	-0.58	0.55	0.35	-0.12	0.34	-0.18	-0.02	-0.60	0.15	-0.32	-0.11	0.35	-0.33	0.08	0.96**	1.00			
胞间CO ₂ 浓度 Concentration of intercellular CO ₂	0.67	0.56	0.00	0.22	0.19	0.02	0.43	0.23	0.04	0.25	0.33	0.16	0.42	0.03	0.33	-0.11	-0.22	1.00		

注: *表示在 0.05 水平上显著相关, **表示在 0.01 水平上极显著相关。

Note: * means significant correlation at 0.05 level, ** means extremely significant correlation at 0.01 level.

2.2 主成分分析

对各指标的低氮耐受系数先进行标准化,再进行主成分分析,确定4个综合指标的贡献率分别为61.3%、19.1%、11.7%和3.4%,累积贡献率达95.5%,表明这4个主成分可以代表18个初始测定指标胁迫耐受系数的大部分信息(表4)。其中,主成分1中,根部鲜质量、根体积的载荷值分别为0.609和0.474,此外,根部干质量、壮苗指数、地上部干质量的载荷值也分别达到0.296、0.287和0.279,表明低氮耐受性与植株全株生物量有关,特别是与根部生物量相关性更为明显;主成分2中,气孔导度和蒸腾速率的载荷值分别为0.476和0.590,表明其与植株叶片的水分利用效率密切相关;主成分3中,净

表4 各指标耐受系数主成分分析及贡献率

Table 4 Principal component analysis and contribution rate of tolerance index

指标 Index	主成分1 PC1	主成分2 PC2	主成分3 PC3	主成分4 PC4
株高 Plant height	-0.010	-0.130	-0.088	-0.025
茎粗 Stem diameter	-0.018	-0.115	-0.172	0.101
地上部鲜质量 Aboveground fresh mass	0.165	0.189	-0.067	0.336
根部鲜质量 Root fresh mass	0.609	0.277	-0.231	-0.316
地上部干质量 Aboveground dry mass	0.279	-0.173	-0.128	0.327
根部干质量 Root dry mass	0.296	0.127	0.063	0.465
根冠比 Root-shoot ratio	0.264	-0.239	0.191	-0.444
壮苗指数 Seedling index	0.287	-0.107	-0.097	0.328
全株含水量 Whole-plant water content	-0.013	-0.144	0.025	0.181
根长 Root length	0.186	0.017	-0.129	-0.216
根直径 Root diameter	0.066	-0.116	0.115	-0.037
根体积 Root volume	0.474	-0.329	0.178	-0.051
根尖数 Root number	0.096	0.033	0.175	0.012
叶绿素含量 Chlorophyll content	-0.037	-0.088	0.123	-0.041
净光合速率 Net photosynthetic rate	0.047	-0.115	0.798	0.129
气孔导度 Stomatal conductance	0.047	0.476	0.231	-0.127
蒸腾速率 Transpiration rate	0.065	0.590	0.198	0.052
胞间CO ₂ 浓度 Concentration of intercellular CO ₂	0.026	-0.055	0.039	-0.165
特征值 Eigenvalue	2.446	0.763	0.466	0.136
方差贡献率 Variance contribution rate/%	61.3	19.1	11.7	3.4
累积方差贡献率 Cumulative contribution rate/%	61.3	80.4	92.1	95.5

光合速率的载荷值为0.798,表明其与植株叶片光合作用能力密切相关。以上结果表明,植株生物量和植株光合能力共同决定了中国南瓜苗期的低氮耐受性。

2.3 综合评价

2.3.1 隶属函数分析 为进一步明确4个综合指标对植株低氮耐受性的贡献率,采用隶属函数分析法进行综合评价。由表5可知,Cmo19隶属函数值 $U(X_1)=1.00$,说明该种质在综合指标1处表现的低氮耐受性最高,Cmo125隶属函数值 $U(X_1)=0.00$,说明该种质在综合指标1处表现的胁迫耐受性最低。计算各种质在4个综合指标处的综合评价价值 D (表5)。8个中国南瓜种质综合评价价值 D 的平均值为0.59,其中综合评价价值 D 较高的是Cmo19(0.84)、Cmo8(0.83),表明其低氮耐受性较高,综合评价价值 D 较低的是Cmo125(0.31)和Cmo171(0.30),表明这2份种质的低氮耐受性较低。

2.3.2 回归分析 以 D 值为因变量、各单项指标的胁迫耐受系数为自变量进行回归分析,从中筛选出根部鲜质量(X_1)、根体积(X_2)、根部干质量(X_3)、壮苗指数(X_4)等4个指标,建立低氮耐受性评价的回归方程: $D' = 0.9509 - 0.1212X_1 - 0.2077X_2 + 0.1341X_3 - 0.0782X_4$, $R^2 = 0.957$ 。利用该回归方程对8份种质进行回归预测综合评价价值 D' ,平均估算精度为96.5%,与实际计算综合评价价值 D 基本一致(表5)。该回归分析表明,根部鲜质量、根体积、根部干质量、壮苗指数等4个指标对中国南瓜幼苗低氮耐受性的影响更为显著。

3 讨论与结论

评价指标的选择对作物氮高效利用评价效率至关重要。笔者以低氮和正常氮栽培条件下的中国南瓜为试材,对18个生长和光合作用相关指标进行综合分析,发现根部鲜质量、根体积、根部干质量等根系生长指标在综合评价中起到更为重要的作用。前人研究结果表明,选择对氮素吸收和利用效率贡献较大的指标作为氮高效利用作物筛选的评价指标是可行的^[18-20]。相关学者已提出很多评价指标来证明作物的氮效率是通过吸收效率和利用效率两个方面来实现的,其中氮素相对积累量和氮素生理利用效率两个评价指标最为直接^[21]。由于氮素的测定需要专用仪器,且测定过程复杂,大多数学者认为形态指标作为氮高效基因型评价指标,最好的指标是生物量^[22-26]。笔者以根系生长指标作为

表5 中国南瓜种质低氮耐受系数隶属函数分析
Table 5 Subordinate function analysis of stress related index in *C. moschata*

种质编号 Germplasm No.	综合指标值 Comprehensive index value				综合指标隶属值 Membership function value				D 值 D value	回归 D' 值 Regression D' value
	CI_1	CI_2	CI_3	CI_4	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$	$U(X_4)$		
Cmo8	1.31	0.39	0.71	-0.09	0.90	0.75	1.00	0.47	0.83	0.81
Cmo36	0.89	-0.18	-0.33	0.59	0.80	0.57	0.53	1.00	0.70	0.67
Cmo31	-0.91	0.27	-0.14	-0.69	0.41	0.72	0.61	0.00	0.46	0.44
Cmo19	1.79	-0.04	0.27	-0.15	1.00	0.61	0.80	0.42	0.84	0.87
Cmo171	-1.40	-1.91	0.42	0.03	0.30	0.00	0.87	0.56	0.30	0.32
Cmo144	0.05	-0.05	-1.49	-0.06	0.62	0.61	0.00	0.50	0.51	0.60
Cmo125	-2.75	1.13	0.30	0.29	0.00	1.00	0.81	0.77	0.31	0.30
Cmo114	1.03	0.39	0.25	0.09	0.83	0.76	0.79	0.61	0.77	0.70

主要评价指标,通过隶属函数和逐层回归法建立的中国南瓜低氮耐受性预测方程,具有易操作、鉴定效率高等优点,适用于中国南瓜种质的田间高通量筛选工作,具有一定的实际应用价值。

光合作用参数也是评价氮利用效率的重要指标之一。石嘉琦等^[27]研究认为,黄瓜叶片叶绿素相对含量(SPAD)、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T)等光合作用参数,可以作为评价黄瓜施氮量的重要参考指标之一。西瓜幼苗叶片初始荧光(F_0)、PSII(F_v/F_0)、PSII 实际光化学量子产量(Φ_{PSII})均显著受到施氮浓度的影响,进而影响植株生长和光合效率^[28]。以中国南瓜为砧木嫁接西瓜,在低氮处理下,氮的吸收和利用效率以及接穗叶片栅栏和海绵状薄壁组织厚度、叶绿素含量相比于未嫁接品种均显著升高,表明中国南瓜氮吸收效率与光合作用之间存在密切的关系^[29]。笔者选用的光合作用相关指标主要关注了总叶绿素含量、 P_n 、 G_s 、 T 等指标,通过降维分析明确了气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T)这2个指标在中国南瓜低氮耐受性评价中贡献率相对较高,可以作为表征光合作用强度的重要参考。植物叶片的气孔导度和蒸腾速率与植株水分运输、代谢及水分利用效率密切相关,而近年来葫芦科作物设施栽培条件下的水氮耦合机制等相关研究已经引起了广泛关注,进一步说明中国南瓜低氮耐受性相关研究应综合考虑水分利用效率和氮利用效率的共同影响^[30-31],未来可关注中国南瓜水氮协同利用效率对植株生长、光合作用及产量影响方面的研究。

综上所述,不同中国南瓜种质生长和光合作用相关指标的低氮耐受系数存在显著差异,根部干质量、根部鲜质量、根体积、壮苗指数等4个指标可作为低氮耐受性鉴定指标,筛选出1份苗期低氮耐受

性较强的种质 Cmo19(柿饼南瓜)。笔者提出了一种基于 Hogland 营养液水培法的中国南瓜幼苗期低氮耐受性种质资源的快速筛选鉴定方法,其与田间实际生产中的中国南瓜耐氮能力鉴定评价的相关性尚有待进一步验证。今后可以继续深入挖掘水氮利用效率的动态平衡对中国南瓜植株光合作用及植株生长的调控机制,以期为指导中国南瓜耐低氮种质的选育和田间生产提供理论依据。

参考文献

- [1] VIDAL E A, ALVAREZ J M, ARAUS V, et al. Nitrate in 2020: Thirty years from transport to signaling networks[J]. *Plant Cell*, 2020, 32(7):2094-2119.
- [2] LIU Q, WU K, SONG W Z, et al. Improving crop nitrogen use efficiency toward sustainable green revolution[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2022, 73(1):523-551.
- [3] 符晶晶, 李娃娃, 徐翎清, 等. 作物耐低氮机制的研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(2):11-17.
- [4] 钟思荣, 龚丝雨, 张世川, 等. 作物不同基因型耐低氮性和氮效率研究进展[J]. *核农学报*, 2018, 32(8):1656-1663.
- [5] 李海真, 田佳星, 张国裕, 等. “十三五”我国南瓜遗传育种研究进展[J]. *中国蔬菜*, 2021(9):16-24.
- [6] 张蒙, 周经明, 马玮, 等. 砧用中国南瓜种子萌发期耐盐性鉴定评价[J]. *中国瓜菜*, 2023, 36(1):26-34.
- [7] 薛亮, 马忠明, 杜少平. 嫁接与施氮对甜瓜产量和氮素吸收、利用的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(6):1909-1916.
- [8] 王丽萍, 孙锦, 郭世荣, 等. 白籽南瓜嫁接对不同盐胁迫下黄瓜幼苗氮代谢和蛋白表达的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3):689-698.
- [9] 高玉红, 闫生辉, 许娟, 等. 嫁接对西瓜根际土壤酶和叶片氮代谢酶活性及产量的影响[J]. *中国瓜菜*, 2016, 29(6):10-13.
- [10] 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.
- [11] 康利允, 李晓慧, 高宁宁, 等. 不同甜瓜品种氮钾双高效评价指标筛选及鉴定[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(7):148-158.
- [12] TANG W J, YE J, YAO X M, et al. Genome-wide associated study identifies NAC42-activated nitrate transporter conferring

- high nitrogen use efficiency in rice[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1):5279.
- [13] 李佳佳,徐翎清,赵阳,等.氮代谢参与植物低氮胁迫研究进展[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(27):119-124.
- [14] 刘世全,曹红霞,张建青,等.不同水氮供应对小南瓜根系生长、产量和水氮利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(7):1362-1371.
- [15] 马新超,轩正英,闵昊哲,等.水氮耦合对沙培黄瓜光合日变化及叶绿素荧光参数的影响[J]. *新疆农业科学*, 2023, 60(8):1966-1974.
- [16] 郭世荣. *无土栽培学*[M]. 北京:中国农业出版社, 2003.
- [17] 邱喜岩,段颖,张硕,等.低温胁迫下不同耐低温性中国南瓜苗期生理差异分析[J]. *中国蔬菜*, 2022(10):74-80.
- [18] 顾焯明,韩配配,胡琼,等.甘蓝型油菜苗期氮效率评价[J]. *中国油料作物学报*, 2018, 40(6):851-860.
- [19] 刘颖,张佳蕾,李新国,等.豆科作物氮素高效利用机制研究进展[J]. *中国油料作物学报*, 2022, 44(3):476-482.
- [20] 徐晴,许甫超,董静,等.小麦氮素利用效率的基因型差异及相关特性分析[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(14):2647-2657.
- [21] 江立庚,戴廷波,韦善清,等.南方水稻氮素吸收与利用效率的基因型差异及评价[J]. *植物生态学报*, 2003, 27(4):466-471.
- [22] 裴雪霞,王姣爱,党建友,等.耐低氮小麦基因型筛选指标的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(1):93-98.
- [23] 李雪妮,盛建东,侯静,等.不同棉花品种苗期氮效率筛选的初步研究[J]. *新疆农业大学学报*, 2007, 30(3):44-48.
- [24] 程建峰,戴廷波,曹卫星,等.稻种资源苗期氮素营养效率的分类、鉴定与评价[J]. *作物学报*, 2005, 31(12):1640-1647.
- [25] 童汉华,余新桥,梅捍卫,等.水稻苗期氮素营养高效基因型的筛选[J]. *浙江农业科学*, 2007(5):537-541.
- [26] 钟代斌,陆雅海,郭龙彪,等.氮高效水稻种质资源筛选的初步研究[J]. *植物遗传资源科学*, 2001, 2(4):16-20.
- [27] 石嘉琦,刘宇庆,王艳玲,等.设施黄瓜产量及叶片光合特性对施氮量的响应[J]. *北方园艺*, 2022(6):51-59.
- [28] 陈钢,黄翔,张利红,等.不同氮素水平对西瓜幼苗生长及叶绿素荧光特性的影响[J]. *果树学报*, 2011, 28(4):657-661.
- [29] NAWAZ M A, WANG L M, JIAO Y Y, et al. Pumpkin rootstock improves nitrogen use efficiency of watermelon scion by enhancing nutrient uptake, cytokinin content, and expression of nitrate reductase genes[J]. *Plant Growth Regulation*, 2017, 82(2):233-246.
- [30] 王晨光,洪婷婷,张智. CO₂浓度加富下水氮耦合对西瓜生长养分吸收及产量的影响[J]. *西北农业学报*, 2022, 31(9):1121-1130.
- [31] 曹骏,张恒嘉,滕安国,等.南瓜对水氮耦合的响应研究进展[J]. *水利规划与设计*, 2024(5):97-100.