

包星星,陈泽昊,丁鑫,等. 低磷胁迫下不同砧木嫁接西瓜苗的生理响应与综合评价[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(6): 1251-1258.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2026.06.017

低磷胁迫下不同砧木嫁接西瓜苗的生理响应与综合评价

包星星¹, 陈泽昊¹, 丁鑫¹, 李再旭¹, 乔少伟¹, 丁明^{1,2}

(1.西北农林科技大学园艺学院,陕西 杨凌 712100; 2.农业农村部西北设施园艺工程重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘要: 本研究以早佳 8424 西瓜为接穗,选用 12 份不同品种(系)西瓜砧木进行嫁接,设置低磷(0.01 mmol/L)处理与正常磷(0.50 mmol/L)处理,系统探究了低磷胁迫下不同砧木嫁接苗的生理响应机制。研究结果表明,低磷胁迫抑制嫁接苗生长,嫁接苗通过各种策略响应低磷胁迫。在光合作用方面,低磷胁迫会不同程度抑制各嫁接苗的光合能力,而耐低磷能力较强的砧西 316 砧木嫁接苗凭借较高的净光合速率和 SPAD 值,维持正常光合能力。在根系形态方面,低磷胁迫下,低磷胁迫导致主根显著伸长,且根干重变异系数最大,表明根系形态对低磷胁迫响应最为敏感。在磷素利用方面,大多数砧木嫁接苗低磷胁迫下植株磷积累量显著下降,但大多数砧木嫁接苗磷利用效率显著提高,表明嫁接苗通过提升磷利用能力适应低磷胁迫。基于主成分分析与隶属函数法构建综合评价体系,得出耐低磷能力评价(D),其中京欣砧 1 号砧木嫁接苗 D 值最高(0.907),耐低磷能力最强;京欣砧 4 号砧木嫁接苗 D 值最低(0.212),耐低磷能力最弱。聚类分析进一步将供试材料划分为三类,第一类群可归为耐低磷型,其综合耐低磷能力最强;第二类群为中间型,耐低磷能力中等;第三类群则可归为低磷敏感型,其综合耐低磷能力最弱。综上,本研究建立了多指标综合评价方法,筛选出京欣砧 1 号砧木嫁接苗与亲抗水瓜砧木嫁接苗等耐低磷砧木嫁接苗,并从光合作用维持、根系可塑性及磷高效利用等方面阐明了其适应机制,为西瓜耐低磷砧木选育与砧木嫁接栽培应用提供了理论依据与方法参考。

关键词: 西瓜; 砧木; 耐低磷能力; 磷吸收利用; 综合评价

中图分类号: S651 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2026)06-1251-08

Physiological responses and comprehensive evaluation of watermelon seedlings grafted onto different rootstocks under low phosphorus stress

BAO Xingxing¹, CHEN Zehao¹, DING Xin¹, LI Zaixu¹, QIAO Shaowei¹, DING Ming^{1,2}

(1.College of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2.Key Laboratory of Protected Horticultural Engineering in Northwest, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling 712100, China)

Abstract: In this study, Zaojia 8424 watermelon was used as the scion, and 12 different varieties (lines) of watermelon rootstocks were selected for grafting. Two phosphorus levels were set, including low phosphorus (0.01 mmol/L) and normal phosphorus (0.50 mmol/L), to systematically explore the physiological response mechanisms of grafted seedlings with different rootstocks under low phosphorus stress. The results showed that low phosphorus stress inhibited the growth of grafted

收稿日期:2025-07-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFD2001003-02);陕西省农业关键核心技术攻关项目(2023NYGG008);陕西省创新能力支撑计划项目(2025ZC-WTXM-51)

作者简介:包星星(1999-),男,甘肃定西人,硕士研究生,研究方向为嫁接西瓜肥料利用。(E-mail)BXX063018@163.com

通讯作者:丁明,(E-mail)dingming@nwsuaf.edu.cn

seedlings, and the grafted seedlings responded to low phosphorus stress through various strategies. In terms of photosynthesis, low phosphorus stress inhibited the photosynthetic capacity of all grafted seedlings to varying degrees, while the grafted seedlings of rootstock Zhenxi 316 with strong low-phosphorus tolerance maintained normal photosynthetic capacity due to its higher net photosynthetic

rate and SPAD value. In terms of root morphology, low phosphorus stress significantly promoted the elongation of taproots, and the coefficient of variation of root dry weight was the largest, indicating that root morphology was the most sensitive to low phosphorus stress. In terms of phosphorus utilization, the phosphorus accumulation significantly decreased in most grafted seedlings under low phosphorus stress, but the phosphorus use efficiency increased significantly, indicating that grafted seedlings adapted to low phosphorus stress by improving phosphorus utilization capacity. A comprehensive evaluation system was constructed based on principal component analysis and membership function method, and the low-phosphorus tolerance evaluation value (D) was obtained. Among them, Jingxin Rootstock No.1 had the highest D value (0.907), indicating the strongest low-phosphorus tolerance, while Jingxin Rootstock No.4 had the lowest D value (0.212), indicating the weakest low-phosphorus tolerance. Cluster analysis further divided the tested materials into three categories: the first category could be classified as low-phosphorus tolerant varieties with the strongest comprehensive low-phosphorus tolerance; the second category was intermediate varieties with moderate low-phosphorus tolerance; the third category was low-phosphorus sensitive varieties with the weakest comprehensive low-phosphorus tolerance. In conclusion, this study established a multi-index comprehensive evaluation method, screened out low-phosphorus-tolerant rootstock-grafted seedlings such as Jingxin Rootstock No.1 and Qinkang Shuigua rootstock-grafted seedlings, and clarified their adaptation mechanisms from the aspects of photosynthetic maintenance, root plasticity and efficient phosphorus utilization, thereby providing a theoretical basis and methodological reference for the breeding of low-phosphorus tolerant watermelon rootstocks and the cultivation application of grafted seedlings.

Key words: watermelon; rootstock; low phosphorus tolerance; phosphorus absorption and utilization; comprehensive evaluation

磷是植物生长发育所必需的营养元素,在光合作用、能量代谢、生化反应调控及细胞信号转导等方面发挥重要作用^[1-2]。然而,土壤中可被植物直接吸收利用的有效磷含量极低,且其迁移速率缓慢^[3-4]。同时,磷酸根易与铁、铝、钙等金属离子形成稳定络合物,造成磷在土壤中高度固定,植物难以有效吸收利用^[5]。在中国农业生产中,磷肥当季利用率平均仅约 15%^[6],常常难以满足作物正常生长的磷需求^[7]。长期依赖过量磷肥投入以弥补磷素不足,不仅导致土壤养分负荷过重、水体富营养化等环境问题,也加剧了磷资源的浪费^[8]。因此,挖掘并利用植物自身磷高效吸收与利用的遗传潜力,对推动作物生产中磷肥可持续利用具有重要意义。不同作物种质在磷利用效率方面存在显著差异。Yuan 等^[9]研究结果表明,不同小麦品种的磷利用效率可相差 10 倍以上。解斌等^[10]研究发现,不同苹果砧木间的磷积累量差异可达 20 倍以上,磷利用效率可相差 2 倍多。西瓜(*Citrullus lanatus*)生长过程中需磷量较大^[11],采用适宜砧木进行嫁接可有效提高其对养分的吸收利用效率^[12-15]。目前,针对不同西瓜砧木种质资源,已在耐低温^[16]、抗病^[17]、耐涝^[18]、耐盐碱^[19]、耐低氮^[20]等方面开展了较多研究,但有关不同砧木嫁接西瓜耐低磷特性及其种质筛选的研究仍较缺乏,尤其缺乏对砧木耐低磷的系统评价体系。为此,本研究拟以不同砧木嫁接西瓜苗为材料,系统

分析低磷胁迫下嫁接西瓜苗生理特性、磷素吸收利用特征,构建耐低磷砧木综合评价体系,以期筛选具有耐低磷能力的西瓜砧木种质,为西瓜生产中磷肥减施与高效栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以西瓜早佳 84-24 为接穗,以表 1 中 12 份葫芦和南瓜品种(系)为砧木,以西瓜早佳 84-24 自嫁接苗为对照,试验于西北农林科技大学北校园艺场(N34°17'N, 108°04'E)日光温室中进行。

表 1 所用砧木品种(系)

Table 1 Rootstock varieties (lines) used in this study

砧木品种	种属类型	来源
黑籽南瓜	南瓜	宁波市甬苗种子有限公司
京欣砧 4 号	南瓜	北京京研益农种业科技有限公司
圣砧 4 号	南瓜	北京京研益农种业科技有限公司
砧西 316	南瓜	优禾园艺科技有限公司
京欣砧 2 号	南瓜	青岛金妈妈农业科技有限公司
RTWM2206	南瓜	青岛金妈妈农业科技有限公司
RTWM2208	南瓜	青岛金妈妈农业科技有限公司
京欣砧 1 号	葫芦	北京京研益农种业科技有限公司
安生	葫芦	安生种子有限责任公司
亲抗水瓜	葫芦	湖南雪峰种业有限公司
丰砧 1 号	葫芦	合肥丰乐种业股份有限公司
京欣砧王	葫芦	北京京研益农种业科技有限公司

1.2 试验方法

磷源为 KH_2PO_4 , 设置 0.01 mmol/L 磷浓度 (LP) 和 0.50 mmol/L 磷浓度 (NP) 2 个处理, 以 1/2 Hoagland 营养液调控磷浓度, 同时按照通用配方补充微量元素^[21]。所有嫁接苗成活 15 d 后, 移栽至装有蛭石基质的营养钵 (10 cm×10 cm×8 cm) 中, 用去离子水浇灌。缓苗 3 d 后, 用不同磷水平营养液浇灌处理嫁接苗, 每株每 2 d 浇灌 30 ml 营养液。处理 21 d 后进行各项指标测定。试验采用随机区组设计, 每个处理设置 3 次生物学重复, 每次重复包含 3 株幼苗。

1.3 生长势测定方法

利用直尺测定嫁接苗株高, 游标卡尺测定嫁接苗茎粗。取样后, 于 105 ℃ 杀青, 60 ℃ 烘干至恒重, 用电子天平分别称量茎叶干重、根干重。按照如下公式计算嫁接苗相对生长速率和壮苗指数:

$$\text{相对生长速率 (RGR)} = (\ln Q_2 - \ln Q_1) / (t_2 - t_1)$$

式中, Q_1 为第 1 次取样时 (t_1) 植株干重, Q_2 为第 2 次取样时 (t_2) 植株干重;

壮苗指数 = (茎粗/株高 + 根干重/茎叶干重) × 植株干重。

1.4 光合参数测定方法

于天气晴朗的上午 9:00–11:00, 选取植株顶端生长点下第 2 片功能叶, 利用 LI-6800 光合仪 (LI-COR) 测定其净光合速率 (P_n)。利用 SPAD-502 叶绿素仪 (Konica Minolta) 测定叶片叶绿素相对含量 (SPAD 值)。

1.5 全磷含量测定方法

采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮法^[22] 测定嫁接苗全磷含量。具体步骤如下: 研磨烘干样品, 过 0.5 mm 网筛, 称取 0.1 g 粉末于消煮管中, 加入 5 mL 浓 H_2SO_4 , 置于 370 ℃ 消煮炉中加热, 分次滴加 30% H_2O_2 至溶液呈无色透明, 冷却后加蒸馏水定容至 100 mL。利用 0.45 μm 滤膜过滤, 利用 AA3 型连续流动分析仪 (SEAL Analytical) 测定全磷含量。

植株磷积累量 (mg) = 植株磷含量 (mg/g) × 植株干重 (g)

植株磷利用效率 (g/mg) = 植株干重 (g) / 植株总磷积累量 (mg)

1.6 砧木综合耐低磷能力评价方法

参照卫乃翠等^[23] 的方法, 计算各指标的耐低磷

系数 (PRC), 公式如下:

$$\text{PRC}(X) = X_{\text{LP}} / X_{\text{NP}} \quad (1)$$

式中, X_{LP} 、 X_{NP} 分别为低磷处理和正常磷处理下指标 X 的测定值。

对各指标的 PRC 值进行主成分分析, 各主成分的隶属函数值 $U(X_i)$ 计算公式如下:

$$U(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

式中, X_i 为对应指标的测定值, $X_{\min}$ 、 $X_{\max}$ 分别为指标 X 的最小值和最大值。

各主成分权重 (W_j) 计算公式如下:

$$W_j = P_j / \sum_{j=1}^n P_j (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中, P_j 为第 j 个主成分的贡献率, n 为主成分总数。

综合耐低磷能力评价 (D) 计算公式如下:

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_j) W_j] (j = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

D 值越高, 表示该嫁接苗的耐低磷能力越大。

1.7 数据分析

采用 Microsoft Office Excel 2021 统计数据, 采用 IBM SPSS Statistics 26 进行数据显著性分析, 采用 Origin 2022 绘图。

2 结果与分析

2.1 低磷胁迫下各砧木嫁接苗的生长指标

如表 2 和表 3 所示, 低磷胁迫下, 嫁接苗株高、茎叶干重、相对生长速率、根干重、壮苗指数变异系数均增大, 表明低磷胁迫加剧了嫁接苗生长性状的分化。低磷胁迫下, 根干重的变异系数最大 (34.38%), 表明根干重可作为筛选耐低磷砧木的关键指标。

表 2 正常磷水平下嫁接苗生长指标

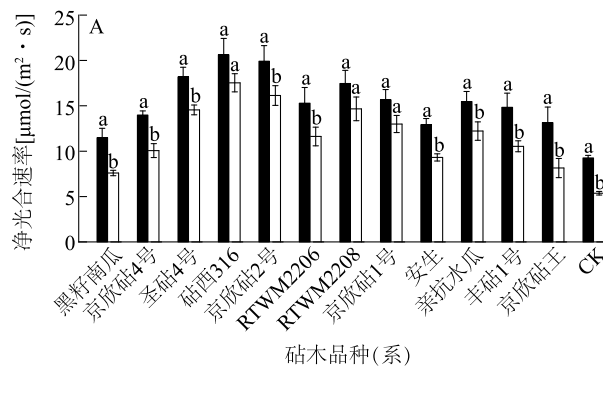
Table 2 Growth parameters of grafted seedlings under normal phosphorus conditions

指标	均值	指标	变异系数 (%)
株高 (cm)	13.501±1.510	株高	11.18
茎叶干重 (g)	0.504±0.101	茎叶干重	20.04
根干重 (g)	0.079±0.024	根干重	30.38
相对生长速率	0.045±0.008	相对生长速率	16.67
壮苗指数	0.241±0.048	壮苗指数	19.92
主根长 (cm)	25.479±3.961	主根长	15.55

表 3 低磷水平下嫁接苗生长指标

Table 3 Growth parameters of grafted seedlings under low-phosphorus stress

指标	均值	指标	变异系数 (%)
株高 (cm)	13.719±2.573	株高	18.76
茎叶干重 (g)	0.355±0.079	茎叶干重	22.25
根干重 (g)	0.064±0.022	根干重	34.38
相对生长速率	0.031±0.006	相对生长速率	19.35
壮苗指数	0.159±0.036	壮苗指数	22.64
主根长 (cm)	32.403±4.815	主根长	14.86

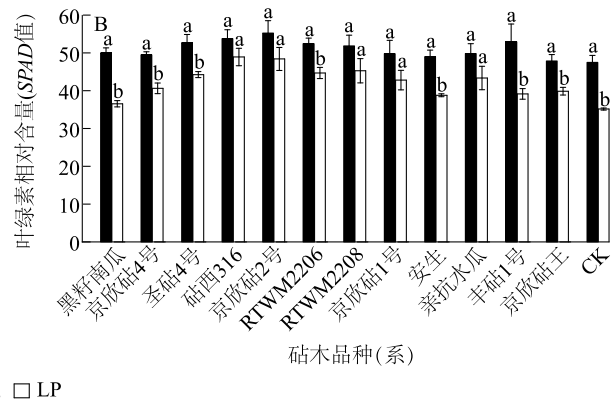


2.2 低磷胁迫下各砧木嫁接苗的光合特性

如图 1 所示,低磷胁迫对京欣砧 1 号砧木嫁接苗、RTWM2208 砧木嫁接苗、砧西 316 砧木嫁接苗净光合速率无显著影响 ($P>0.05$)。低磷胁迫对京欣砧 1 号砧木嫁接苗、RTWM2208 砧木嫁接苗、砧西 316 砧木嫁接苗、京欣 2 号砧木嫁接苗、亲抗水瓜砧木嫁接苗 SPAD 值无显著影响 ($P>0.05$)。

2.3 低磷胁迫下各嫁接苗的磷吸收利用特性

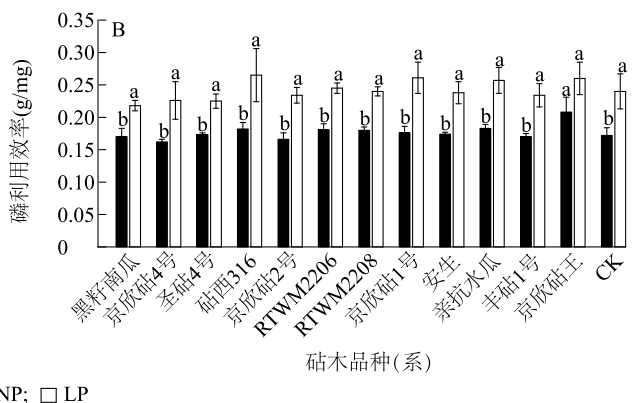
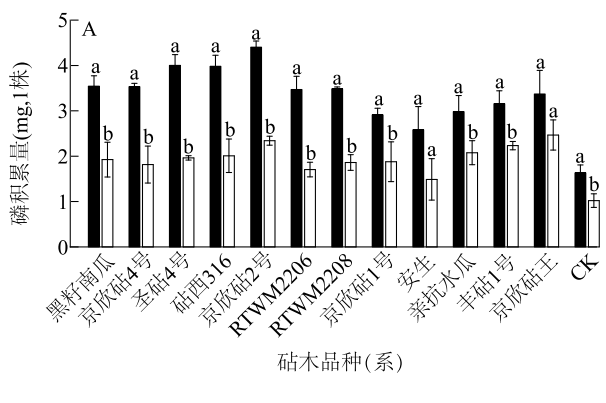
如图 2 所示,低磷胁迫对安生砧木嫁接苗、京欣砧王砧木嫁接苗磷积累量无显著影响 ($P>0.05$),低磷胁迫对京欣砧王砧木嫁接苗磷利用效率无显著影响 ($P>0.05$)。



LP: 0.01 mmol/L 磷浓度; NP: 0.5 mmol/L 磷浓度; CK: 早佳 84-24 自嫁接苗。同一砧木品种图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

图 1 不同磷水平下各砧木嫁接苗的光合特性

Fig.1 Photosynthetic characteristics of grafted seedlings with different rootstocks under varying phosphorus levels



LP: 0.01 mmol/L 磷浓度; NP: 0.5 mmol/L 磷浓度; CK: 早佳 84-24 自嫁接苗。同一砧木品种图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

图 2 不同磷水平下各砧木嫁接苗的磷吸收利用特性

Fig.2 Phosphorus uptake and utilization characteristics of grafted seedlings with different rootstocks under varying phosphorus levels

2.4 各砧木嫁接苗耐低磷能力综合评价

耐低磷系数可以反映嫁接苗的耐低磷性^[15,23]。如表 4 所示,嫁接苗茎叶干重、相对生长速率、壮苗

指数、净光合速率、SPAD 值和磷积累量的耐低磷系数均小于 1,表明低磷胁迫抑制了这些性状。嫁接苗主根长和磷利用效率耐低磷系数均大于 1,表明

低磷胁迫促进了嫁接苗根系生长,提升了其磷素利用效率,这可能是嫁接苗响应低磷胁迫的生理策略。其中京欣砧 1 号砧木嫁接苗根干重(1.086)、相对生长速率(0.716)和磷利用效率(1.487)等性状的耐低磷系数较高。

如表 5 所示,主成分分析提取的前 4 个主成分

表 4 各砧木嫁接苗不同性状的耐低磷系数

Table 4 Low-phosphorus tolerance coefficients of various traits for grafted seedlings with different rootstocks

砧木品种 (系)	耐低磷系数									
	PH	SLDW	RDW	RGR	SSI	PRL	P_n	SPAD 值	PA	PUE
黑籽南瓜	0.920	0.696	0.691	0.613	0.603	1.304	0.661	0.731	0.540	1.285
京欣砧 4 号	1.050	0.638	0.617	0.638	0.639	1.260	0.720	0.821	0.457	1.395
圣砧 4 号	1.030	0.781	0.733	0.671	0.678	1.172	0.800	0.840	0.594	1.307
砧西 316	1.070	0.719	0.769	0.690	0.724	1.265	0.850	0.910	0.502	1.454
京欣砧 2 号	1.130	0.720	0.754	0.711	0.728	1.242	0.810	0.876	0.513	1.415
RTWM2206	1.120	0.728	0.716	0.680	0.659	1.221	0.760	0.852	0.535	1.348
RTWM2208	0.958	0.598	0.673	0.701	0.702	1.273	0.840	0.873	0.455	1.335
京欣砧 1 号	1.100	0.828	1.086	0.716	0.711	1.237	0.830	0.860	0.589	1.487
安生	0.830	0.632	0.839	0.681	0.611	1.205	0.721	0.792	0.484	1.367
亲抗水瓜	1.160	0.758	1.046	0.709	0.660	1.254	0.790	0.870	0.573	1.407
丰砧 1 号	0.919	0.686	0.831	0.645	0.620	1.237	0.710	0.740	0.519	1.373
京欣砧王	0.840	0.677	0.889	0.706	0.632	1.294	0.620	0.833	0.562	1.249
CK	0.919	0.713	0.837	0.635	0.573	1.144	0.580	0.740	0.516	1.401

PH:株高;SLDW:茎叶干重;RDW:根干重;RGR:相对生长速率;SSI:壮苗指数;PRL:主根长; P_n :净光合速率;SPAD 值:叶绿素相对含量;PA:磷累积量;PUE:磷利用效率。CK:早佳 84-24 自嫁接苗。

表 5 嫁接苗各指标的主成分载荷、特征值及权重

Table 5 Principal component loadings, eigenvalues, and weights for each index of grafted seedlings

项目	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4
株高	0.802	0.003	-0.293	-0.342
茎叶干重	0.597	0.731	-0.055	-0.286
根干重	0.423	0.680	0.242	0.511
壮苗指数	0.887	-0.368	0.049	-0.111
相对生长速率	0.789	-0.083	0.369	0.366
主根长	0.061	-0.487	0.644	-0.068
净光合速率	0.840	-0.370	-0.103	-0.097
SPAD 值	0.861	-0.372	0.135	0.014
磷积累量	0.344	0.799	0.379	-0.303
磷利用效率	0.600	0.085	-0.615	0.362
特征值	4.927	1.836	1.037	0.956
方差解释率	49.273	18.361	10.372	9.561
累计贡献率	49.273	67.634	78.006	87.567
权重	0.563	0.210	0.118	0.109

累计方差贡献率为 87.567%。主成分 1 方差解释率为 49.273%, 主要与株高、壮苗指数、相对生长速率、净光合速率、SPAD 值、磷利用效率相关;主成分 2 主要与磷积累量相关;主成分 3、主成分 4 主要分别与主根长、根干重相关。

如表 6 所示,砧木京欣砧 1 号和亲抗水瓜砧木嫁接苗具有更好的综合耐低磷能力。京欣砧 4 号砧木嫁接苗 D 值最低,为 0.212,对低磷胁迫适应能力较差。

2.5 各砧木嫁接苗耐低磷能力聚类分析

聚类分析揭示材料间的亲疏关系与组间差异^[16,24]。如图 3 所示,基于综合耐低磷能力评价价值(D),可将所有砧木品种(系)嫁接苗划分为三个类群。第一类群可归为耐低磷型,其综合耐低磷能力最强;第二类群为中间型,耐低磷能力中等;第三类群则可归为低磷敏感型,其综合耐低磷能力最弱。

3 讨论

3.1 西瓜砧木对低磷胁迫的响应机制

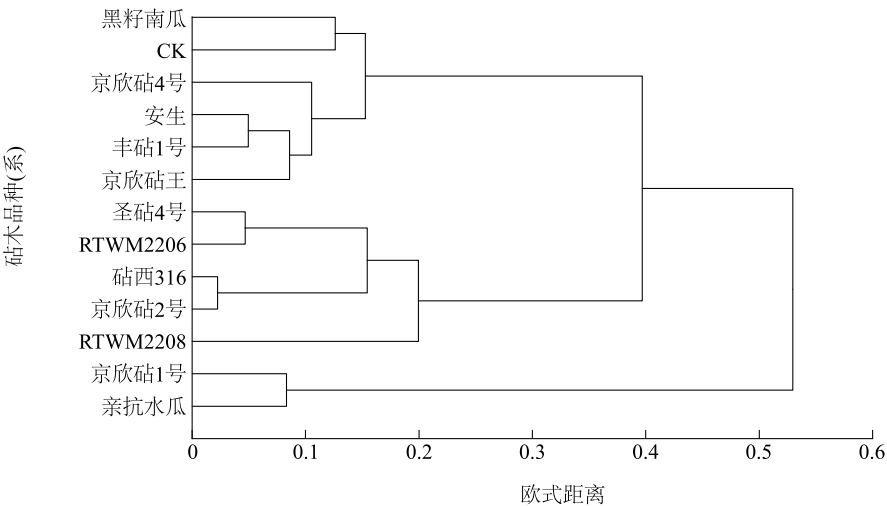
研究结果表明,低磷胁迫使各砧木嫁接西瓜苗的生长受到抑制,而嫁接西瓜苗通过各种策略响应低磷胁迫。在光合作用方面,植株全磷含量降低通

表 6 各砧木嫁接苗的主成分得分、隶属函数值及耐低磷性综合评价结果

Table 6 Principal component scores, membership function values, and comprehensive evaluation of low-phosphorus tolerance of grafted seedlings with different rootstocks

砧木品种	主成分得分				隶属函数值				D	排序
	CI ₁	CI ₂	CI ₃	CI ₄	U(X ₁)	U(X ₂)	U(X ₃)	U(X ₄)		
黑籽南瓜	1.037	0.042	0.326	0.185	-0.001	0.499	0.586	0.164	0.226	12
京欣砧 4 号	1.093	-0.044	0.196	0.189	0.263	0.164	0.137	0.178	0.212	13
圣砧 4 号	1.148	0.075	0.263	0.139	0.527	0.628	0.369	-0.002	0.481	5
砧西 316	1.199	-0.008	0.222	0.252	0.768	0.305	0.228	0.402	0.538	3
京欣砧 2 号	1.194	0.006	0.222	0.212	0.746	0.359	0.227	0.259	0.527	4
RTWM2206	1.150	0.031	0.234	0.156	0.536	0.457	0.271	0.061	0.433	7
RTWM2208	1.124	-0.086	0.283	0.253	0.412	0.001	0.437	0.407	0.308	11
京欣砧 1 号	1.248	0.171	0.271	0.394	1.001	1.000	0.397	0.910	0.907	1
安生	1.068	0.047	0.292	0.419	0.145	0.517	0.470	0.998	0.367	9
亲抗水瓜	1.218	0.138	0.295	0.348	0.857	0.872	0.481	0.746	0.797	2
丰砧 1 号	1.078	0.078	0.277	0.330	0.192	0.636	0.416	0.683	0.384	8
京欣砧王	1.069	0.085	0.446	0.364	0.152	0.667	1.001	0.803	0.465	6
CK	1.049	0.137	0.219	0.362	0.056	0.866	0.218	0.797	0.357	10

CI₁:第 1 主成分得分;CI₂:第 2 主成分得分;CI₃:第 3 主成分得分;CI₄:第 4 主成分得分;U(X₁):第 1 主成分隶属函数值;U(X₂):第 2 主成分隶属函数值;U(X₃):第 3 主成分隶属函数值;U(X₄):第 4 主成分隶属函数值;D:耐低磷综合评价。CK:早佳 84-24 自嫁接苗。



CK:早佳 84-24 自嫁接苗。

图 3 各砧木嫁接苗耐低磷能力聚类分析结果

Fig.3 Cluster analysis of low-phosphorus tolerance capacity among grafted seedlings with different rootstocks

常会导致叶片叶绿素合成受阻、光合产物运输效率下降,从而降低净光合速率,最终限制作物生长与干物质积累^[25-27]。本研究也发现,低磷胁迫会不同程度抑制各嫁接苗的光合作用,但耐低磷能力较强的砧西 316 砧木嫁接苗凭借较高的净光合速率和 SPAD 值,能够维持正常光合能力。在根系生长方

面,低磷胁迫下,各生长指标的变异系数普遍增大,其中根干重的变异系数最大。同时,低磷胁迫下,嫁接苗主根长显著增加,表明根系形态的变化是砧木耐低磷能力分化的重要因素。前人研究发现,植物通过根系构型调整增强磷素吸收^[14,28-29],与本研究结论一致。在磷素利用方面,本研究发现,低磷胁迫

下大多数嫁接苗的植株磷积累量显著下降,但大多数嫁接苗磷利用效率显著升高。表明其核心适应策略在于高效利用体内有限的磷资源,而非单纯大量吸收磷元素。

综上,西瓜砧木对低磷胁迫的响应机制在与调控其根系形态以扩大磷吸收范围,同时通过提高酸性磷酸酶等关键酶活性,促进根际有机磷的转化与吸收,进而在磷吸收量有限的条件下,转向依赖极高的内部磷循环与利用效率来维持生长与光合功能^[30]。

3.2 耐低磷综合评价体系的构建

由于植物对低磷胁迫的响应是多维度的生理过程,单一指标难以全面反映其耐低磷特性。为弥补这一局限,本研究从生长态势、光合能力及磷吸收利用能力三个层面综合选取了株高、茎叶干重、根干重、净光合速率、SPAD 值、壮苗指数、相对生长速率等多项指标,系统解析砧木响应低磷胁迫的机制。通过主成分分析,将 10 个相关指标降维转化为 4 个独立的综合指标,进而利用隶属函数法计算得出各砧木嫁接苗的耐低磷综合评价值(D)。结果显示,京欣砧 1 号砧木嫁接苗的 D 值最高(0.907),耐低磷能力最强;京欣砧 4 号砧木嫁接苗的 D 值最低(0.212),耐低磷能力最弱。在此基础上,进一步通过聚类分析将所有砧木嫁接苗划分为三个类群。第一类群可归为耐低磷型,其综合耐低磷能力最强;第二类群为中间型,耐低磷能力中等;第三类群则可归为低磷敏感型,其综合耐低磷能力最弱。这种多指标综合评价模式,不仅推动了砧木嫁接西瓜苗耐低磷研究的精细化与系统化,也可与其他作物逆境评价体系的构建提供方法参考。

参考文献:

- [1] LIU D. Root developmental responses to phosphorus nutrition[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2021, 63(6): 1065-1090.
- [2] PAZ-ARES J, PUGA M I, ROJAS-TRIANA M, et al. Plant adaptation to low phosphorus availability: core signaling, crosstalks, and applied implications[J]. *Molecular Plant*, 2022, 15(1): 104-124.
- [3] 黄 沅, 付崇允, 周德贵, 等. 植物磷吸收的分子机理研究进展[J]. *分子植物育种*, 2008, 6(1): 117-122.
- [4] YAN Z J, CHEN S, LI J L, et al. Manure and nitrogen application enhances soil phosphorus mobility in calcareous soil in greenhouses[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 181: 26-35.
- [5] HUANG Y M, ZHAI L M, CHAI X F, et al. *Bacillus* B2 promotes root growth and enhances phosphorus absorption in apple rootstocks by affecting MhMYB15[J]. *The Plant Journal*, 2024, 119(4): 1880-1899.
- [6] 栗振义, 张绮芯, 仝宗永, 等. 不同紫花苜蓿品种对低磷环境的形态与生理响应分析[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(20): 3898-3907.
- [7] BIELESKI R L. Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1973, 24(1): 225-252.
- [8] 赵 仓, 吴远航, 赵兴坤, 等. 桂花草根分泌物对缺磷胁迫的响应分析[J]. *草地学报*, 2023, 31(3): 733-740.
- [9] YUAN Y, GAO M G, ZHANG M X, et al. QTL mapping for phosphorus efficiency and morphological traits at seedling and maturity stages in wheat[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 614.
- [10] 解 斌, 安秀红, 陈艳辉, 等. 不同苹果砧木对持续低磷的响应及适应性评价[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(13): 2598-2612.
- [11] 包 蕾, 张赛峰, 秦济民, 等. 基于西瓜产量的推荐施肥量及化肥减施潜力分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(9): 1558-1568.
- [12] HUANG Y, JIAO Y Y, NAWAZ M A, et al. Improving magnesium uptake, photosynthesis and antioxidant enzyme activities of watermelon by grafting onto pumpkin rootstock under low magnesium[J]. *The Plant and Soil*, 2016, 409(1/2): 229-246.
- [13] 袁亭亭, 宋小艺, 王忠宾, 等. 嫁接与施肥对番茄产量及氮、磷、钾吸收利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(1): 131-136.
- [14] 张 莉, 孟祥祥, 刘 娜, 等. 低磷胁迫下嫁接对西瓜生长早期磷素吸收和利用的影响[J]. *果树学报*, 2012, 29(1): 120-124.
- [15] 高梓元, 胡京昂, 张蓓蓓, 等. 磷高效利用型嫁接番茄砧木筛选及综合评价[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(14): 2761-2775.
- [16] 王 冲, 齐红岩, 李 猛, 等. 西瓜嫁接砧木种子芽期耐低温评价指标和评价方法的研究[J]. *沈阳农业大学学报*, 2022, 53(1): 89-95.
- [17] MAHAPATRA S, RAO E S, HEBBAR S, et al. Evaluation of rootstocks resistant to gummy stem blight and their effect on the fruit yield and quality traits of grafted watermelon (*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. & Nakai)[J]. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2023, 98(5): 635-648.
- [18] 陈 杰, 高青海, 马横宇, 等. 西瓜砧木苗期耐涝性鉴定及指标选择[J]. *北方园艺*, 2018(8): 7-13.
- [19] YAN Y Y, WANG S S, WEI M, et al. Effect of different rootstocks on the salt stress tolerance in watermelon seedlings[J]. *Horticultural Plant Journal*, 2018, 4(6): 239-249.
- [20] NAWAZ M A, HAN X J, CHEN C, et al. Nitrogen use efficiency of watermelon grafted onto 10 wild watermelon rootstocks under low nitrogen conditions[J]. *Agronomy*, 2018, 8(11): 259.
- [21] 陈淑娜. 西瓜磷高效利用种质资源筛选及其低磷胁迫响应的分子机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

- [23] 卫乃翠,陶金博,苑名杨,等. 山西小麦苗期耐低磷特性及遗传分析[J]. 中国农业科学,2024,57(5):831-845.
- [24] 陈泽东,师焕婷,董殿琪,等. 不同小麦品种(系)耐低磷能力综合评价与代表性评价指标筛选[J]. 河南农业科学,2023,52(4):21-30.
- [25] LI P L, WENG J Y, ZHANG Q, et al. Physiological and biochemical responses of *Cucumis melo* L. chloroplasts to low phosphate stress[J]. *Frontiers in Plant Science*,2018,9(1):1525.
- [26] 舒雨. 低磷对小麦叶片生长和光合作用的影响及机理研究[D]. 武汉:华中农业大学,2021.
- [27] 王枫,王玉凤,许晓萱,等. 低磷胁迫下玉米幼苗生理响应及相关基因表达研究[J]. 玉米科学,2021,29(1):77-84.
- [28] VANDAMME E, ROSE T, SAITO K, et al. Integration of P acquisition efficiency, P utilization efficiency and low grain P concentrations into P-efficient rice genotypes for specific target environments[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*,2016,104(3):413-427.
- [29] DHARMATEJA P, YADAV R, KUMAR M, et al. Genome-wide association studies reveal putative QTLs for physiological traits under contrasting phosphorous conditions in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Frontiers in Genetics*,2022,13:984720.
- [30] WU Q, YANG L Y, CHEN Y L, et al. Acid phosphatase-driven advancements in peanut growth and microbial community dynamics in phosphorus-limited soils[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*,2025,25:83-101.

(责任编辑:成纾寒)