



苦瓜耐低钾性生理生化指标评估体系的构建

李婉豫^{1,2}, 田丽波^{1,3*}, 商桑^{1,4}, 李许真^{1,3}, 廖道龙⁵, 陈虹容¹

(¹海南大学三亚南繁研究院, 海南三亚 572000; ²辽宁省沙地治理与利用研究所, 辽宁阜新 123000; ³海南大学热带农林学院/海南省热带园艺作物品质调控重点实验室, 海南海口 570228; ⁴海南大学生命科学学院, 海南海口 570228; ⁵海南省农业科学院蔬菜研究所, 海南海口 571199)

摘要:【目的】探讨苦瓜种质资源耐低钾胁迫的鉴定方法,为培育耐低钾丰产优质苦瓜品种提供种质资源。【方法】以11份苦瓜种质为材料,设置低钾(K⁺浓度0.2 mmol/L)和正常钾(K⁺浓度4.0 mmol/L)处理,采用多元统计的方法综合分析低钾胁迫下的苦瓜种质的各项生长及生理指标。【结果】苦瓜种质的株高、茎粗、节间长、叶面积、地下部干重、地上部干重、根长、根表面积、根体积、叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素、总叶绿素、丙二醛和钾累积量等15个鉴定指标的变异幅度较大,变异系数均超过10.0%。利用主成分分析将15个鉴定指标的胁迫系数经过标准化(Z-score法)后进行降维处理,从所有的因子中聚焦为4个主成分,共解释总变异的83.690%。根据4个主成分得分计算隶属函数值最终确定综合指标(D值),采用聚类分析方法将11份种质分为4类,第I类的04-25、1717、KG01-2和03-8为耐低钾种质,第II类的1721、11-8、DD14-1、04-17-4和26-2为中等耐低钾种质,第III类的06-16为低钾弱敏感种质,第IV类的25-15为低钾敏感种质。通过多元回归分析法建立最优的综合评价数学模型:Y=0.768×株高+0.443×钾累积量+0.390×根表面积+0.595×叶绿素a-0.415。【结论】11份苦瓜种质中04-25为最耐低钾种质,株高、钾累积量、根表面积和叶绿素a可作为苦瓜种质耐低钾性评价指标,该评价体系可用于苦瓜种质耐低钾性的快速筛选。

关键词: 苦瓜; 耐低钾性; 主成分分析; 隶属函数; 生理生化指标

中图分类号: S642.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-1191(2023)04-1207-09

Evaluation system construction of physiological and biochemical indexes of low potassium tolerance of balsam pear

LI Wan-yu^{1,2}, TIAN Li-bo^{1,3*}, SHANG Sang^{1,4}, LI Xu-zhen^{1,3}, LIAO Dao-long⁵, CHEN Hong-rong¹

(¹Sanya Nanfan Research Institute, Hainan University, Sanya, Hainan 572000, China; ²Liaoning Institute of Sand Management and Utilization, Fuxin, Liaoning 123000, China; ³College of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University/Hainan Provincial Key Laboratory of Tropical Horticultural Crops Quality Control, Haikou, Hainan 570228, China; ⁴College of Life Sciences, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; ⁵Institute of Vegetables, Hainan Academy of Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571199, China)

Abstract: 【Objective】The purpose of the study was to explore the identification of balsam pear germplasm resources that were resistant to low potassium stress, and to provide germplasm resources for cultivating high-yield and high-quality balsam pear varieties with low potassium tolerance. 【Method】Eleven balsam pear germplasms were used as materials, and two treatments of low potassium (K⁺ concentration of 0.2 mmol/L) and normal potassium (K⁺ concentration of 4.0 mmol/L) were set up. The growth and physiological indexes of balsam pear germplasms under low potassium stress were comprehensively analyzed by multivariate statistical method. 【Result】The variation of 15 identification indexes of balsam pear germplasm, including plant height, stem diameter, internode length, leaf area, underground dry weight, above ground dry weight, root length, root surface area, root volume, chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoid, total chloro-

收稿日期: 2022-11-03

基金项目: 海南省重大科技计划项目(ZDKJ2021010); 海南省基础与应用基础研究计划(自然科学领域)高层次人才项目(2019RC150, 2019RC045)

通讯作者: 田丽波(1976-), <https://orcid.org/0000-0001-5995-1685>, 博士, 教授, 主要从事园艺植物分子育种研究工作, E-mail: faiy7play@163.com

第一作者: 李婉豫(1995-), <https://orcid.org/0009-0006-5316-0333>, 研究方向为园艺植物逆境生理, E-mail: 851962546@qq.com

phyll, malondialdehyde and potassium accumulation was large, with the coefficients of variation exceeding 10.0%. Principal component analysis was used to standardize the stress coefficients of 15 identification indexes (Z-score method) and reduce the dimensionality of the coefficients. From all the factors, the stress coefficients were focused into 4 principal components, which accounted for 83.690% of the total variation. According to the scores of the four principal components, the membership function values were calculated and comprehensive index (D value) was finally determined. The 11 germplasms were divided into four categories by cluster analysis method. The germplasms 04-25, 1717, KG01-2 and 03-8 in class I were low potassium tolerant, the germplasms 1721, 11-8, DD14-1, 04-17-4 and 26-2 in class II were medium low potassium tolerant, the germplasm 06-16 in class III were low potassium weakly sensitive, and the germplasm 25-15 in class III were low potassium sensitive. The optimal comprehensive evaluation mathematical model was established by multiple regression analysis: $Y=0.768 \times \text{plant height} + 0.443 \times \text{potassium accumulation} + 0.390 \times \text{root surface area} + 0.595 \times \text{chlorophyll a} - 0.415$. 【Conclusion】 Among the 11 balsam pear germplasms, 04-25 is the most low potassium tolerant germplasm. Plant height, potassium accumulation, root surface area and chlorophyll a can be used as the evaluation indexes for the low potassium tolerance of balsam pear germplasm. The evaluation system can be used for the rapid screening of the low potassium tolerance of balsam pear germplasm.

Key words: balsam pear; low potassium tolerance; principal component analysis; membership function; physiological and biochemical indexes

Foundation items: Hainan Major Science and Technology Plan Project (ZDKJ2021010); Hainan Basic and Applied Basic Research Project (Natural Science Field) High Level Talent Project (2019RC150, 2019RC045)

0 引言

【研究意义】 苦瓜是我国种植历史悠久的药食兼用型蔬菜,对钾肥的吸收比例高于氮肥和磷肥(张白鸽等,2016)。钾素被称为品质元素,在植株正常生理活动中起着不可替代的作用,其不仅能促进植物的光合反应速率,调节水分代谢,还能增强细胞对环境变化的调节作用,提高植物对低温、干旱等胁迫条件耐受性。钾在植物体内以离子态存在,具有较强的流动性,易被转运。相关研究证实,植物根系对钾营养的摄取途径主要分为2种,一种为钾离子(K^+)在根系表面快速移动;另一种为 K^+ 通过扩散作用从土层移动到根系表面,该种扩散作用是 K^+ 转移到根表面的重要途径(Ashley et al., 2006)。适量施用钾肥不仅可增强根系特性(根长、根体积、根平均直径),还可同时促进地上和地下部的干物质积累量(张舒涵等,2018;刘俊萍等,2019),当施钾量不足时,作物生长受到抑制,根系发育放缓,植株的抗逆性减弱,茎秆细弱常见倒伏状(盛晋华等,2003)。我国钾肥资源的短缺,无法满足国内需求,进口依赖度高达50%,施用成本的提高严重影响我国农作物增产增收等问题,成为制约我国农业发展的瓶颈(金城,2015)。因此,深入探讨钾素高效利用机制,筛选耐低钾基因型品种或种质是缓解我国钾资源匮乏问题的有效途径。【前人研究进展】国内外已经在多种作物上开展钾高效吸收利用和筛选耐低钾种质资源的研究。国外对芒麦草及甘薯等作物的耐低钾基因型筛选的研究较成熟(George et al., 2002; Zeng et al., 2015),国内虽起步晚,但在水稻、玉米、大豆和小麦等作物上已开展了大量研究(刘俊凤等,2010;孙

晶等,2011;李晓云等,2014),主要通过沙培、水培和大田试验法筛选钾高效基因型。其中,大田试验虽是鉴定植物生长特性最直观的方法,但其工作量大、外界因素影响多,难以保证试验条件一致,易造成误差;耐低钾胁迫性状亦是数量性状,易受环境影响(易九红等,2010),目前多采用苗期盆栽或水培法筛选植物耐低钾基因型(张国新等,2009)。郭焕茹等(2009)研究发现,钾敏感自交系的总根长、根表面积、根体积、干物质量及植株钾积累量均显著低于耐低钾玉米自交系,根系具有较强的钾吸收能力。为筛选耐低钾和低钾敏感型甘薯材料,黄隆堂等(2016)在水培条件下,初步确立甜瓜苗期耐低钾基因型的筛选指标为茎粗和地下部干质量;刘明等(2022)采用水培试验的方法,确定地上部干物质增加量、根系干物质增加量、总干物质增加量、地上部钾积累量、根钾积累量和总钾积累量6个指标可作为甘薯苗期耐低钾能力筛选的首选指标,并筛选出甘薯苗期耐低钾能力最强的6个品种;唐海浪等(2022)采用水培试验,设置不同 K^+ 浓度处理,筛选出优异的耐低钾型地方稻品种11份,并发现根长、株高、地上部鲜重和地上部干重4个性状指标在品种间差异显著。【本研究切入点】目前,相比农作物,国内对园艺作物耐低钾基因型的筛选和耐低钾品种的选育研究较少,针对苦瓜耐低钾种质的筛选与生理生化鉴定指标分析鲜有报道。【拟解决的关键问题】在水培条件下,采用多元统计方法对低钾胁迫下11份苦瓜种质的生长及生理生化指标进行研究,确定对胁迫反应最为敏感的筛选指标,发掘耐低钾的种质资源,以期生产推荐耐低钾品种或培育耐低钾丰产优质苦

瓜品种提供种质资源。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为11份苦瓜种质,其中,1721、04-25、11-8、1717、06-16、25-15、26-2、03-8和04-17-4来源于中国热带农业科学院作物品种资源研究所蔬菜研究中心,KG01-2来源于海南省农业科学院蔬菜研究所,DD14-1来源于海南大学。1721和1717为杂交种,其余均为多代自交的纯合自交系。

1.2 试验方法

试验时间为2020年12月—2021年2月。挑选籽粒饱满的苦瓜种子,浸种催芽后播于穴盘中沙培生根,待幼苗长至4叶1心期,筛选出长势整齐一致的11份苦瓜种质幼苗,将根系清洗干净,移栽至水培箱中,每处理15株,重复3次。试验共设2个处理:低钾营养处理(简称低钾处理), K^+ 浓度为0.2 mmol/L(徐顺莉等,2013;娄腾雪,2016);正常营养液处理(对照,CK), K^+ 浓度为4.0 mmol/L。营养液采用日本园试配方配制,钾源以 KNO_3 提供,低钾营养液用 NH_4NO_3 调整 NO_3^- 的差异。水培箱为长80 cm、宽60 cm、高23 cm,内装营养液60 L,箱上覆盖泡沫板,板上按等距离(10 cm×10 cm)打孔,用定植棉固定幼苗。营养液每5 d更换一次,氧气泵通气24 h/d。幼苗置于(25±1)°C/12 h光照、(18±1)°C/12 h黑暗环境中培养,20 d后取样进行指标测定。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 生物量 将植株从水培箱完整取出,用蒸馏水小心冲洗地上和地下部,用吸水纸吸干植株表面水分,分别用分析天平称量地上和地下部鲜重。将苦瓜苗分成地上部和根系,分别经105 °C杀青30 min后,80 °C烘干至恒重,用于测定地下部干重(Dry weight of root, RDW)、地上部干重(Dry weight of plant, PDW)。每个处理分别取样5株,3次重复(以下指标测定均采用此规格)。

1.3.2 生长发育指标 用卷尺测定苦瓜的株高(Plant height, PH)、节间长(Internode length, IL),游标卡尺测定茎粗(Stem diameter, SD),叶面积仪测定第一对真叶的叶面积(Leaf area, LA)。

1.3.3 幼苗根系形态指标 用根系扫描仪(WinRHIZO)测定苦瓜的根系总长(Root length, RL)、根表面积(Root surface area, RS)、根体积(Root volume, RV)等指标。

1.3.4 生物含钾量 样品烘干称重后,磨碎过60目

筛,称取0.0700 g,采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 法进行消煮,用火焰光度计测定钾的含量。钾累积量(K accumulation, KA)为植株生物量和植株含钾量的乘积。

1.3.5 叶绿素含量 取生长点以下第3~4片真叶。参照李合生(1999)的方法测定叶绿素a(Chlorophyll a, Chla)、叶绿素b(Chlorophyll b, Chlb)、总叶绿素(Total chlorophyll content, CT)和类胡萝卜素(Carotenoids, Car)的含量。

1.3.6 丙二醛(MDA)浓度及含量 参照李合生(2000)硫代巴比妥酸显色法,计算MDA的浓度(C)及含量(Y):

$$C(\mu\text{mol/L})=6.45 \times (D_{532}-D_{600})-0.56D_{450}$$

$$Y(\mu\text{mol/g})=C \cdot V/W$$

式中, V 代表提取液体积(mL), W 代表植物组织鲜重(g)。 D_{532} 、 D_{600} 和 D_{450} 分别表示显色反应物在532、600和450处的消光度值。

1.4 统计分析

采用Excel 2019进行数据初步统计,SPSS 19.0对数据进行单因素方差分析、邓肯氏差异显著性检验、主成分分析、相关分析、隶属函数及聚类分析。相关计算公式如下:

$$\text{胁迫系数}(\%)=(\text{CK值}-\text{低钾处理值})/(\text{CK值} \times 100) \quad (1)$$

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

$$U(X_j)=1-[(X_j-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})] \quad (3)$$

式中, X_j 代表第 j 个综合指标测定值; X_{\min} 和 X_{\max} 分别代表第 j 个综合指标测定值的最小值和最大值。MDA含量与胁迫系数呈负相关,代入公式(3),其他指标均代入公式(2)。

2 结果与分析

2.1 低钾胁迫后苦瓜生理生化指标方差分析及相关分析

由表1可知,各苦瓜品种在不同供钾水平下15个鉴定指标有明显差异。与CK相比,低钾处理下,株高、地下部干重、地上部干重、根长、根表面积、根体积、叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素、总叶绿素和钾累积量等11个指标均显著($P<0.05$,下同)或极显著($P<0.01$,下同)降低。各指标的胁迫系数在-20.0%~35.3%,株高对低钾胁迫响应最敏感,胁迫系数高达35.3%。从苦瓜种质的各性状多样性可发现,低钾处理下,茎粗、节间长、叶面积、地下部干重、地上部干重、叶绿素b、类胡萝卜素、总叶绿素和钾累积量等指标的变异系数均高于CK。表明低钾处理下苦瓜的单项指标间离散程度变大,种质间差异显著增加,这

有利于更好地筛选耐低钾种质。15个鉴定指标在CK和低钾处理条件下的变异幅度均较大,变异系数均超过10.0%,低钾胁迫下苦瓜生长发育受到明显抑制,说明苦瓜在这些指标中均表现出对低钾胁迫较高的敏感度,可作为苦瓜耐低钾的鉴定指标。

通过相关分析获得11份苦瓜种质的15个指标相关系数矩阵(表2),株高与节间长、地下部干重、叶绿素b和类胡萝卜素呈显著正相关,与地上干重呈极显著正相关;茎粗与地上部干重呈显著正相关;地下部干重与地上部干重呈极显著正相关;地上部干重与叶绿素b和钾累积量呈显著正相关,与根长、根表面积和根体积呈极显著正相关;根长与根表面积和根体积呈极显著正相关;根表面积与叶绿素b呈显著正相关,与根体积呈极显著正相关;根体积与叶绿素b呈显著正相关;叶绿素a与类胡萝卜素呈显著正相关,与叶绿素b和总叶绿素呈极显著正相关;叶绿素b与类胡萝卜素和总叶绿素呈显著正相关;类胡萝卜素与总叶绿素呈显著正相关;MDA与地下部干重呈

显著负相关。可见15个耐低钾鉴定指标间存在紧密的联系,但考虑到各指标间的相关性,以及数据间相互重叠,仅用单个指标不能反映不同品种间的耐低钾能力,需要通过多元统计分析方法进一步评价不同品种的耐低钾性。

2.2 苦瓜生理生化指标主成分分析

通过主成分分析综合得分法对鉴定指标进一步分析,以获得苦瓜耐低钾性评价的主要因子,更科学地评价不同苦瓜种质耐低钾能力的强弱。由表3可知,15个鉴定指标的胁迫系数经过标准化(Z-score法)后进行降维处理,各成分特征值的大小代表其对总遗传方差的贡献,按其特征值大于1的原则,从所有的因子中分为4个主成分,其主成分1~主成分4(PC1~PC4)对应的贡献率分别为50.026%、67.292%、76.019%和83.690%,累积贡献率为83.690%,即共解释了总变异的83.690%。理论上,累积贡献率大于80%即认为具有较强的信息代表性,因此可用这4个主因子对15个指标进行概括分析。

表 1 不同供钾水平下苦瓜生长发育的差异

Table1 Growth and development differences of 11 balsam pear varieties under low potassium stress

指标 Index	处理 Treatment	均值 Mean	标准差 SD	最大值 Maximum	最小值 Minimum	变异系数(%) CV	胁迫系数(%) Coefficient of stress	F
株高(cm)	CK	58.35	21.36	79.93	17.17	36.6	35.3	7.73*
PH	低钾	37.73	12.22	50.42	11.87	32.4		
茎粗(mm)	CK	3.03	0.36	3.62	2.43	12.0	7.3	1.99
SD	低钾	2.81	0.36	3.43	2.22	12.9		
节间长(cm)	CK	5.34	1.43	7.32	2.43	26.8	18.6	3.21
IL	低钾	4.34	1.17	5.82	2.13	27.0		
叶面积(cm ²)	CK	72.29	14.15	105.66	50.07	19.6	11.6	2.17
LA	低钾	63.90	12.51	94.00	48.98	19.6		
地下部干重(g)	CK	0.22	0.06	0.36	0.15	27.6	30.8	6.96**
RDW	低钾	0.15	0.07	0.25	0.11	47.7		
地上部干重(g)	CK	1.17	0.25	1.57	0.79	21.6	19.9	4.09*
PDW	低钾	0.95	0.27	1.49	0.56	28.9		
根长(cm)	CK	648.75	237.93	1138.35	334.55	36.7	32.7	4.48*
RL	低钾	468.05	153.61	828.89	241.58	32.8		
根表面积(cm ²)	CK	218.07	73.80	330.64	115.50	33.8	26.5	4.58*
RS	低钾	160.38	50.48	280.62	84.13	31.5		
根体积(cm ³)	CK	5.98	2.01	9.55	3.02	33.6	25.7	4.36*
RV	低钾	4.44	1.39	7.63	2.38	31.3		
Chla(mg/g)	CK	1.90	0.30	2.32	1.51	16.0	15.6	6.29*
	低钾	1.61	0.25	2.15	1.17	15.6		
Chlb(mg/g)	CK	0.66	0.08	0.76	0.51	11.6	16.0	10.51**
	低钾	0.55	0.08	0.71	0.41	13.7		
Car(mg/g)	CK	0.34	0.07	0.43	0.26	20.6	17.6	4.55*
	低钾	0.28	0.06	0.42	0.20	21.4		
总叶绿素(mg/g)	CK	2.59	0.34	3.09	2.12	13.1	16.6	8.59**
CT	低钾	2.16	0.35	2.94	1.58	16.2		
MDA(μmol/g)	CK	0.05	0.01	0.08	0.04	21.1	-20.0	3.80*
	低钾	0.06	0.01	0.08	0.05	17.0		
钾累积量(mg/株)	CK	140.86	33.09	171.21	64.15	23.5	33.8	15.34**
KA(mg/plant)	低钾	93.32	22.94	120.12	47.40	24.6		

*、**分别表示差异显著(P<0.05)或极显著(P<0.01)

* indicated significant difference (P<0.05), and ** indicated extremely significant difference (P<0.01)

表 2 不同供钾水平下苦瓜各指标相对值的相关系数矩阵

Table 2 Correlation coefficient matrix of relative value of each index of balsam pear under different potassium supply levels

指标 Index	株高 PH	茎粗 SD	节间长 IL	叶面积 LA	地下部干重 RDW	地上部干重 PDW	根长 RL	根表面积 RS	根体积 RV	Chla	Chlb	Car	总叶绿素 CT	MDA
茎粗 SD	0.448													
节间长 IL	0.613*	0.354												
叶面积 LA	0.472	0.129	0.440											
地下部干重 RDW	0.688*	0.358	0.053	0.523										
地上部干重 PDW	0.749**	0.686*	0.279	0.286	0.794**									
根长 RL	0.570	0.462	0.477	0.506	0.511	0.752**								
根表面积 RS	0.584	0.537	0.424	0.533	0.579	0.809**	0.965**							
根体积 RV	0.531	0.567	0.326	0.485	0.586	0.805**	0.876**	0.970**						
Chla	0.531	0.112	0.236	0.088	0.383	0.431	0.303	0.419	0.513					
Chlb	0.615*	0.309	0.107	-0.003	0.528	0.717*	0.501	0.607*	0.681*	0.867**				
Car	0.629*	-0.102	0.223	0.033	0.261	0.363	0.229	0.262	0.254	0.602*	0.683*			
总叶绿素 CT	0.281	-0.188	-0.143	0.046	0.305	0.196	0.063	0.192	0.304	0.872**	0.732*	0.614*		
MDA	-0.501	-0.302	-0.461	-0.540	-0.617*	-0.566	-0.390	-0.463	-0.472	-0.230	-0.202	-0.097	-0.034	
钾累积量 KA	0.563	0.340	0.134	-0.012	0.443	0.603*	0.119	0.187	0.212	0.309	0.479	0.488	0.265	-0.484

*、**分别表示显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)相关* indicated significant correlation($P<0.05$), and ** indicated extremely significant correlation($P<0.01$)

根据4个主成分系数得到PC1、PC2、PC3和PC4的线性组合:

$$PC1=0.845PH+0.556SD+0.462IL+0.486LA+0.768RDW+0.921PDW+0.795RL+0.872RS+0.875RV+0.648Chla+0.790Chlb+0.513Car+0.411CT-0.618MDA+0.758KA$$

$$PC2=0.016PH-0.428SD-0.365IL-0.434LA-0.056RDW-0.117PDW-0.315RL-0.24RS-0.139RV+0.636Chla+0.550Chlb+0.621Car+0.824CT+0.342MDA+0.059KA$$

$$PC3=0.243PH-0.492SD+0.529IL+0.571LA-0.062RDW-0.323PDW-0.004RL-0.057RS-0.323RV+0.128Chla-0.205Chlb+0.272Car+0.132CT-0.236MDA-0.259KA$$

$$PC4=-0.262PH-0.058SD+0.009IL+0.085LA-0.288RDW-0.12PDW+0.433RL+0.401RS-0.120RV+0.118Chla+0.109Chlb-0.108Car+0.107CT+0.433MDA-0.492KA$$

综合评价线性组合:

$$D=0.510PH+0.187SD+0.257IL+0.268LA+0.415RDW+0.482PDW+0.449RL+0.503RS+0.450RV+0.543Chla+0.574Chlb+0.453Car+0.439CT-0.284MDA+0.393KA$$

综上所述,PC1主要由株高、茎粗、地下部干重、地上部干重、根长、根表面积、根体积、叶绿素a、叶绿素b和钾累积量决定,PC2主要由类胡萝卜素和总叶绿素决定,PC3主要由叶面积和节间长决定,PC4主要由MDA决定。

2.3 苦瓜种质耐低钾能力综合评价

根据模糊数学中隶属函数综合评价法,将各种质的主因子得分值 $PC(X_j)$ (表4)进行转换,得到相应的隶属函数值 $U(X_j)$,代入综合评价公式,得出各种质的耐低钾综合评价值(表5),以此确定各苦瓜种质的耐低钾能力。综合评价值(D)描述胁迫系数大小,因此耐低钾能力与 D 值呈负相关关系,根据 D 值大小对11个苦瓜种质的耐低钾能力进行排序,依次为04-25>1717>KG01-2>03-8>1721>11-8>DD14-1>04-17-4>26-2>06-16>25-15。

2.4 苦瓜种质聚类分析

将11份苦瓜综合得分 D 值作为变量进行聚类分析,采用系统聚类中的组间连接法(Between groups),以欧氏距离(Euclidean distance)为遗传距离度量标准,得到聚类结果(图1),在欧式距离为4时将11份苦瓜种质分为4类,第I类包含04-25、1717、KG01-2和03-8,为耐低钾种质,第II类包含1721、11-8、DD14-1、04-17-4和26-2,为中耐低钾种质,第III类仅包含06-16,为低钾弱敏感种质,第IV类的25-15为低钾敏感种质。

2.5 苦瓜耐低钾鉴定指标回归模型建立

为筛选到可靠的苦瓜耐低钾鉴定指标,分析各指标与耐低钾的关系,构建用于苦瓜苗期耐低钾性综合评价的数学模型,将综合评价值 D 值作为因变量,各单项指标的耐低钾系数作为自变量进行逐步

表 3 不同供钾水平下苦瓜各综合指标的系数及贡献率

Table 3 Coefficients and contribution rates of comprehensive indexes of balsam pear under different potassium supply levels

指标 Index	主成分 Principle component			
	PC1	PC2	PC3	PC4
株高 PH	0.845	0.016	0.243	-0.262
茎粗 SD	0.556	-0.428	-0.492	-0.058
节间长 IL	0.462	-0.365	0.529	0.009
叶面积 LA	0.486	-0.434	0.571	0.085
地下部干重 RDW	0.768	-0.056	-0.062	-0.288
地上部干重 PDW	0.921	-0.117	-0.323	-0.120
根长 RL	0.795	-0.315	-0.004	0.433
根表面积 RS	0.872	-0.240	-0.057	0.401
根体积 RV	0.875	-0.139	-0.323	-0.120
Chla	0.648	0.636	0.128	0.118
Chlb	0.790	0.550	-0.205	0.109
Car	0.513	0.621	0.272	-0.108
总叶绿素 CT	0.411	0.824	0.132	0.107
MDA	-0.618	0.342	-0.236	0.433
钾累积量 KA	0.758	0.059	-0.259	-0.492
特征值 Eigenvalue	7.504	2.590	1.309	1.151
贡献率(%) Contribution rate	50.026	17.266	8.727	7.671
累积贡献率(%) Cumulative contribution rate	50.026	67.292	76.019	83.690

表 4 11份苦瓜种质的主成分得分值

Table 4 Principal component scores of 11 balsam pear germplasms

种质 Germplasm	主因子得分值 Main factor score value			
	PC1	PC2	PC3	PC4
1721	-2.27	-166.78	-1.20	-1.27
04-25	-9.37	281.29	-0.09	-0.50
11-8	-0.13	543.88	-0.22	0.15
1717	-6.29	-335.21	-0.42	0.09
KG01-2	-3.79	208.20	0.48	-0.43
DD14-1	1.32	-3.03	-0.27	-0.40
06-16	4.85	-280.84	-0.44	-0.76
25-15	18.88	-852.72	-2.27	1.68
26-2	0.85	684.20	2.29	0.88
03-8	-5.59	-28.56	-0.24	-0.37
04-17-4	1.52	-50.45	2.38	0.93

回归分析,建立最优回归方程:

$$Y=0.768PH+0.443KA+0.390RS+0.595Chla-0.415(R^2=0.987, P<0.001)$$

可知,15个鉴定指标中有4个指标对苦瓜耐低钾性密切相关,分别是株高、钾累积量、根表面积和叶绿素a,可用作苦瓜种质资源耐低钾性鉴定的评价指标。

3 讨论

植株在受胁迫时为适应逆境形成了自身特殊的生理生化过程。本研究发现,在低钾处理条件下,苦瓜幼苗呈生长缓慢、根系短小、叶缘发黄的症状,部分叶片上出现褐色斑点,不同苦瓜种质表现程度不同,与展曼曼等(2012)发现的不同作物间、同种作物不同基因型间的钾效率存在差异,当受到钾胁迫时耐钾能力不尽相同的研究结果一致;也与玉米(Yang et al., 2003)、水稻(杨铁钊等, 2009)、棉花(李

春红等, 2013)及烟草(肖水平等, 2014)的相关研究结果一致。其中原因在于K⁺在土壤中具有移动性, K⁺在土壤中的吸收主要与根表面吸收相关,根系营养遗传特性及根系分泌物制约根系吸收钾素的能力(李廷轩和马国瑞, 2004; Hodge, 2004),在不施钾处理条件下,钾高效品种的根组织中钾含量较高,其组织中皮层相对钾含量达到最高,增强向上运输钾的能力(彭克勤等, 2003)。在低钾胁迫下,与耐低钾玉米自交系相比,钾敏感玉米自交系的皮层结构大面积遭到严重破坏,内皮层结构不完整,导管形状不规则,大导管周围的小导管结构模糊,质膜透性高,导致养分和水分的吸收利用不充分。而耐低钾玉米在生育后期,仍保持较大的根系体积、维持较强的根系活力,以增强低钾胁迫条件下根系对外界钾素的吸收和运移能力,从而延缓根系衰老,保证作物产量(杜琪等, 2021)。在逆境条件下,钾在一定范围上可使硝酸还原酶的活性增强,促进植物进行氨的同化,进而提高叶绿素的合成能力,使叶片能更充分地捕获光能用于光合作用,提高光合速率(郭英等, 2006)。

钾利用指数、吸收量、地上部相对和绝对生物量可作为香蕉苗期耐低钾基因型筛选指标(吴宇佳等, 2015),将株高、茎粗、叶绿素、根系活力、过氧化物酶活性、MDA含量、可溶性蛋白质含量和可溶性糖含量等指标与钾利用指数进行相关分析和通径分析,最终确定根系活力可作为筛选番茄苗期耐低钾基因型的最适指标(杨佳丽等, 2015);小麦苗期耐低钾性鉴定水培试验中,苗期20个性状在基因型间正

表 5 11份苦瓜种质隶属函数 $U(X_j)$ 值和耐低钾能力排序Table 5 Membership function $U(X_j)$ value and low potassium tolerance ranking of 11 balsam pear germplasms

种质 Germplasm	隶属函数 Membership function				D值 D value	耐低钾能力排序 Ranking of low potassium tolerance
	U(1)	U(2)	U(3)	U(4)		
1721	0.251	0.446	0.230	0.000	0.272	5
04-25	0.000	0.738	0.469	0.261	0.000	1
11-8	0.327	0.909	0.441	0.481	0.331	6
1717	0.109	0.337	0.398	0.461	0.027	2
KG01-2	0.198	0.690	0.591	0.285	0.051	3
DD14-1	0.378	0.553	0.430	0.295	0.348	7
06-16	0.503	0.372	0.394	0.173	0.569	10
25-15	1.000	0.000	0.000	1.000	1.000	11
26-2	0.362	1.000	0.981	0.729	0.445	9
03-8	0.134	0.536	0.437	0.305	0.089	4
04-17-4	0.338	0.839	0.094	1.000	0.376	8

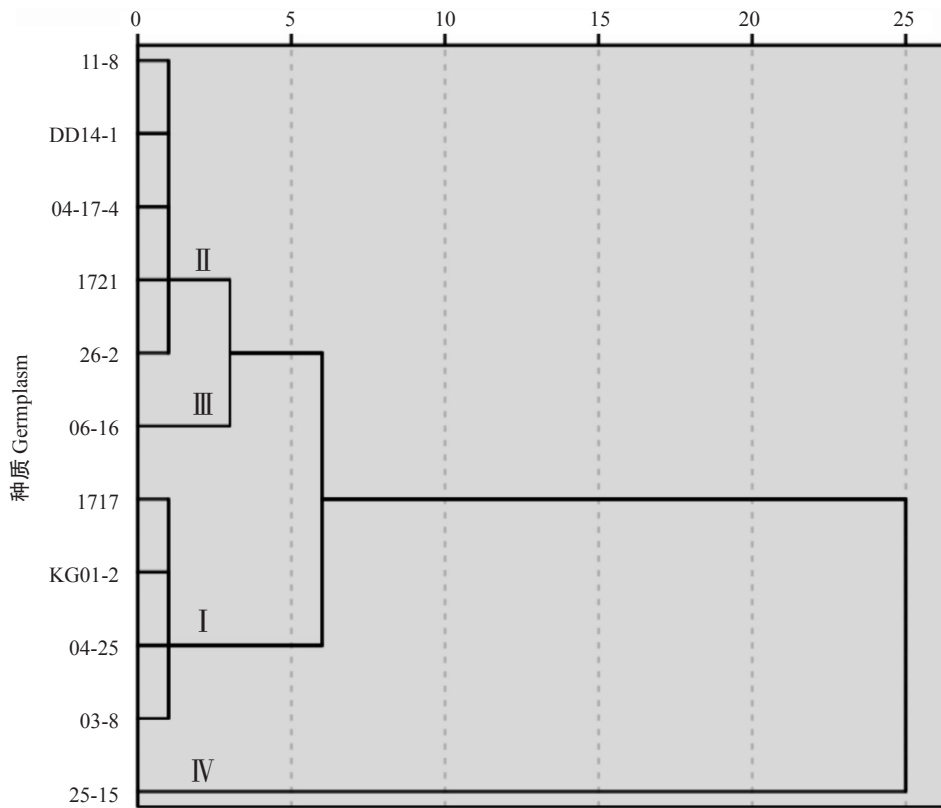


图 1 11份苦瓜种质耐低钾能力的聚类分析

Fig.1 Cluster analysis of low potassium tolerance of 11 balsam pear germplasms

常钾和低钾2个处理水平的差异均达极显著水平,钾累积量根冠比及耐低钾系数在基因型间均有较大的变异,与大部分性状均显著相关,故小麦苗期耐低钾能力的重要筛选指标为钾累积量根冠比的耐低钾系数(罗肖艳,2020)。但目前在对耐低钾作物的筛选工作中,鉴定指标不尽相同,仍缺乏统一的标准。因此,植物耐低钾能力受多种因素影响,筛选耐低钾种质需要对多种指标进行综合分析,更科学地评价不同苦瓜品种耐低钾能力的强弱。本研究通过主成分分析综合得分法,对鉴定指标进行降维,聚类分析法将其分类表明,第 I 类的04-25、1717、KG01-2和03-8

为耐低钾种质,第 II 类的1721、11-8、DD14-1、04-17-4和26-2为中耐低钾种质,第 III 类的06-16为低钾弱敏感种质,第 IV 类的25-15为低钾敏感种质,该结果为生产推荐耐低钾品种或培育耐低钾丰产优质苦瓜品种提供了参考。最后,通过多元回归分析法建立最优回归方程,筛选出株高、钾累积量、根表面积和叶绿素a作为苦瓜种质耐低钾性评价指标。

4 结论

参试材料中最耐低钾品系为04-25,对低钾最为敏感的品系为25-15,为后续耐低钾品种选育筛选了

育种材料。建立了评价苦瓜种质资源耐低钾能力的综合评价数学模型,株高、钾积累量、根表面积和叶绿素a可作为苦瓜种质耐低钾性评价指标,该评价体系可用于苦瓜种质耐低钾能力的快速筛选。

参考文献:

- 杜琪,赵跃,周东英,王晓光,蒋春姬,王婧,赵新华,于海秋. 2021. 低钾胁迫下不同耐低钾玉米品种(系)开花后根系生长和结构的变化[J]. 植物营养与肥料学报, 27(2): 301-311. [Du Q, Zhao Y, Zhou D Y, Wang X G, Jiang C J, Wang J, Zhao X H, Yu H Q. 2021. Response of root growth and structure of different potassium sensitive maize cultivars(lines) to low potassium stress after flowering stage[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 27(2): 301-311.] doi: 10.11674/zwyf.20235.
- 郭焕茹,于海秋,蒋春姬,夏乐,刘宇,曹敏建. 2009. 低钾下不同耐性玉米苗期根形态及钾效率的差异[J]. 作物杂志, (2): 62-65. [Guo H R, Yu H Q, Jiang C J, Xia L, Liu Y, Cao M J. 2009. Difference of root traits and potassium efficiency in different tolerant maize at seedling stage under potassium deficiency[J]. Crops, (2): 62-65.] doi: 10.16035/j.issn.1001-7283.2009.02.022.
- 郭英,孙学振,宋宪亮,王庆材,李玉静,陈淑义. 2006. 钾营养对棉花苗期生长和叶片生理特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 12(3): 363-368. [Guo Y, Sun X Z, Song X L, Wang Q C, Li Y J, Chen S Y. 2006. Effects of potassium nutrition on growth and leaf physiological characteristics at seedling stage of cotton[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 12(3): 363-368.]
- 黄隆堂,裴义玮,张屹东. 2018. 甜瓜苗期钾高效品种筛选体系研究[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 36(5): 60-66. [Huang L T, Pei Y W, Zhang Y D. 2018. Establishment of a rapid screening system for high-potassium efficiency cultivar in muskmelon(*Cucumis melo* L.) seedling [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University(Agricultural Science), 36(5): 60-66.] doi: 10.3969/j.issn.1671-9964.2018.05.009.
- 金城. 2015. 含钾矿物生物风化及钾溶出[J]. 微生物学通报, 42(7): 1409. [Jin C. 2015. Bioweathering and K release of K-bearing minerals[J]. Microbiology China, 42(7): 1409.] doi: 10.13344/j.microbiol.china.158007.
- 李春红,于海秋,赵新华,李兴涛,谢甫梯,曹敏建,王晓光. 2013. 低钾胁迫下不同低钾耐性大豆钾营养特性的差异[J]. 土壤通报, 44(5): 1173-1177. [Li C H, Yu H Q, Zhao X H, Li X T, Xie F T, Cao M J, Wang X G. 2013. Differences in nutrition characters of potassium in various soybean genotypes under low potassium stress[J]. Chinese Journal of Soil Science, 44(5): 1173-1177.] doi: 10.19336/j.cnki.trtb.2013.05.026.
- 李合生. 2000. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社. [Li H S. 2000. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments[M]. Beijing: Higher Education Press.]
- 李廷轩,马国瑞. 2004. 籽粒苋不同富钾基因型根际钾营养与根系特性研究[J]. 水土保持学报, (3): 90-93. [Li T X, Ma G R. 2004. Nutrition of potassium in rhizosphere and characteristics of roots in different grain amaranth genotypes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, (3): 90-93.] doi: 10.13870/j.cnki.stbxb.2004.03.023.
- 李晓云,赵勇,王杰,杨学芳,张树华,杨学举. 2014. 不同小麦品系耐低钾性的综合评价[J]. 麦类作物学报, 34(6): 842-846. [Li X Y, Zhao Y, Wang J, Yang X F, Zhang S H, Yang X J. 2014. Comprehensive evaluation of resistance to low potassium in different wheat varieties[J]. Journal of Triticeae Crops, 34(6): 842-846.]
- 刘俊风,鞠会艳,边鸣镝,高洁,王新,杨振明. 2010. 玉米苗期耐低钾基因型筛选方法研究[J]. 玉米科学, 18(5): 90-95. [Liu J F, Ju H Y, Bian M D, Gao J, Wang X, Yang Z M. 2010. Research on screening methods of low-K tolerance genotypes in maize seedling stage[J]. Journal of Maize Sciences, 18(5): 90-95.] doi: 10.13597/j.cnki.maize.science.2010.05.024.
- 刘俊萍,喻苏琴,游璐,连鲁楠,王翰琨,曾进,程离,秦健,刘小平,胡冬南. 2019. 油茶细根时空分布动态对施钾水平的响应[J]. 林业科学研究, 32(1): 31-38. [Liu J P, Yu S Q, You L, Lian L N, Wang H K, Zeng J, Cheng L, Qin J, Liu X P, Hu D N. 2019. Response of fine root growth of *Camellia oleifera* to potassium application level[J]. Forest Research, 32(1): 31-38.] doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2019.01.005.
- 刘明,范文静,赵鹏,靳容,张强强,朱晓亚,王静,李强. 2022. 甘薯耐低钾基因型苗期筛选及综合评价[J/OL]. 作物学报. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20220817.1618.004.html>. [Liu M, Fan W J, Zhao P, Jin R, Zhang Q Q, Zhu X Y, Wang J, Li Q. 2022. Genotypes screening and comprehensive evaluation of sweetpotato tolerant to low potassium stress at seedling stage[J/OL]. Acta Agronomica Sinica. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20220817.1618.004.html>.]
- 娄腾雪. 2016. 潘那利番茄渐渗系耐低钾品系筛选及低钾对不同耐性品系的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学. [Lou T X. 2016. Screening of low potassium tolerant lines of *Solanum pennellii* introgression lines and the effect of low potassium on different tolerant lines[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University.]
- 罗肖艳. 2020. 小麦苗期耐低钾性鉴定及耐低钾相关性状的关联分析[D]. 郑州: 河南农业大学. [Luo X Y. 2020. Wheat genotypes tolerance identification to low potassium stress at seeding stage and genome-wide association analysis of low potassium tolerance related traits[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University.] doi: 10.27117/d.cnki.ghenu.2020.000035.
- 彭克勤,彭志红,萧浪涛,胡家金. 2003. 水稻耐低钾变异后代的根系生理研究[J]. 中国农学通报, 19(5): 64-66. [Peng K Q, Peng Z H, Xiao L T, Hu J J. 2003. Physiological studies on root system of rice offspring tolerant to K deficiency[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 19(5): 64-66.]
- 盛晋华,刘克礼,高聚林,任珂,隋启君,姜波. 2003. 旱作马铃薯钾素的吸收、积累和分配规律[J]. 中国马铃薯, (6): 331-335. [Sheng J H, Liu K L, Gao J L, Ren K, Sui Q J, Jiang B. 2003. Potassium absorption, accumulation and distribution of potato under dry farming[J]. Chinese Potato Journal, (6): 331-335.]
- 孙晶,李春红,孙海鹰,曹敏建,王晓光. 2011. 低钾胁迫对不同基因型大豆生长发育的影响[J]. 土壤通报, 42(2):

- 431-434. [Sun J, Li C H, Sun H Y, Cao M J, Wang X G. 2011. The effect of low potassium stress on growth and development of different soybean genotypes[J]. Chinese Journal of Soil Science, 42(2): 431-434.] doi:10.19336/j.cnki.trtb.2011.02.035.
- 唐海浪, 程在全, 罗琼, 钟巧芳. 2022. 云南地方稻耐低钾种质资源的筛选和评价[J]. 江西农业学报, 34(1): 1-8. [Tang H L, Cheng Z Q, Luo Q, Zhong Q F. 2022. Screening and evaluation of low potassium tolerant germplasm resources in Yunnan rice landraces[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 34(1): 1-8.] doi:10.19386/j.cnki.jxnyxb.2022.01.001.
- 吴宇佳, 谢良商, 张文, 符传良, 刘国彪. 2015. 耐低钾香蕉基因型筛选指标的研究[J]. 广东农业科学, 42(4): 117-122. [Wu Y J, Xie L S, Zhang W, Fu C L, Liu G B. 2015. Research on screening indices of low-potassium tolerance genotypes in banana[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 42(4): 117-122.] doi:10.16768/j.issn.1004-874x.2015.04.025.
- 肖水平, 吴香华, 孙亮庆, 刘新稳, 曾小林, 杨绍群, 柯兴盛. 2014. 棉花苗期钾营养效率的基因型分类及钾营养特性差异分析[J]. 棉花学报, 26(6): 546-554. [Xiao S P, Wu X H, Sun L Q, Liu X W, Zeng X L, Yang S Q, Ke X S. 2014. Classification and analysis of potassium nutrition efficiency and characteristics in different cotton genotypes at seedling stage[J]. Cotton Science, 26(6): 546-554.]
- 徐顺莉, 房伟民, 管志勇, 蒋甲福, 陈素梅, 廖园, 陈发棣. 2013. 耐低钾切花菊品种筛选及其苗期耐性生理研究[J]. 园艺学报, 40(12): 2463-2471. [Xu S L, Fang W M, Guan Z Y, Jiang J F, Chen S M, Liao Y, Chen F D. 2013. Screening cut chrysanthemum varieties in low potassium tolerant and patience physiology in seedling[J]. Acta Horticulturae Sinica, 40(12): 2463-2471.] doi:10.16420/j.issn.0513-353x.2013.12.015.
- 杨佳丽, 许向阳, 李景富. 2015. 番茄苗期钾高效基因型筛选方法研究[J]. 北方园艺, (12): 40-42. [Yang J L, Xu X Y, Li J F. 2015. Research on screening methods of potassium high efficiency genotypes in tomato seedling stage[J]. Northern Horticulture, (12): 40-42.]
- 杨铁钊, 杨志晓, 聂红资, 张小全, 刘友杰, 尚晓颖, 任周营, 范进华. 2009. 富钾基因型烤烟的钾积累及根系生理特性[J]. 作物学报, 35(3): 535-540. [Yang T Z, Yang Z X, Nie H Z, Zhang X Q, Liu Y J, Shang X Y, Ren Z Y, Fan J H. 2009. Potassium accumulation and root physiological characteristics of potassium-enriched flue-cured tobacco genotypes[J]. Acta Agronomica Sinica, 35(3): 535-540.] doi:10.3724/SP.J.1006.2009.00535.
- 易九红, 刘爱玉, 李瑞莲, 冯正锐. 2010. 不同棉花品种苗期低钾胁迫响应研究[J]. 中国农学通报, 26(5): 101-106. [Yi J H, Liu A Y, Li R L, Feng Z R. 2010. Effect of low potassium stress on different cotton varieties in seeding stage[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 26(5): 101-106.]
- 展曼曼, 王宁, 田晓莉. 2012. 棉花钾营养效率的基因型差异研究进展[J]. 棉花学报, 24(2): 176-182. [Zhan M M, Wang N, Tian X L. 2012. Review of genotypic differences and underlying mechanisms in potassium efficiency of cotton (*Gossypium hirsutum*) [J]. Cotton Science, 24(2): 176-182.]
- 张白鸽, 曹健, 张长远, 宋钊, 张福锁, 陈新平. 2016. 苦瓜的干物质和养分累积与分配规律[J]. 广东农业科学, 43(2): 39-44. [Zhang B G, Cao J, Zhang C Y, Song Z, Zhang F S, Chen X P. 2016. Accumulation and distribution characteristics of biomass and nutrient in bitter gourd (*Momordica charantia* L.) [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 43(2): 39-44.] doi:10.16768/j.issn.1004-874x.2016.02.008.
- 张国新, 王省芬, 马峙英, 张桂寅, 李喜焕, 吴立强, 迟吉娜, 李志坤. 2009. 棉花抗枯、黄萎病品种苗期耐低钾种质筛选研究[J]. 植物遗传资源学报, 10(4): 583-588. [Zhang G X, Wang S F, Ma Z Y, Zhang G Y, Li X H, Wu L Q, Chi J N, Li Z K. 2009. Identification and screening of low potassium tolerant cottons with *Fusarium* and *Verticillium* wilts resistance at seedling stage[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 10(4): 583-588.] doi:10.13430/j.cnki.jpgr.2009.04.015.
- 张舒涵, 张俊莲, 王文, 李朝周. 2018. 氯化钾对干旱胁迫下马铃薯根系生理及形态的影响[J]. 中国土壤与肥料, (5): 77-84. [Zhang S H, Zhang J L, Wang W, Li C Z. 2018. Influence of potassium chloride on the root physiology and morphology of potato under drought stress[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, (5): 77-84.] doi:10.11838/sfsc.20180512.
- Ashley M K, Grant M, Grabov A. 2006. Plant responses to potassium deficiencies: A role for potassium transport proteins[J]. Journal of Experimental Botany, 57(2): 425-436. doi:10.1093/jxb/erj034.
- George M S, Lu G Q, Zhou W J. 2002. Genotypic variation for potassium uptake and utilization efficiency in sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) [J]. Field Crops Research, 77(1): 7-15. doi:10.1016/S0378-4290(02)00043-6.
- Hodge A. 2004. The plastic plant; Root responses to heterogeneous supplies of nutrients[J]. New Phytologist, 162(1): 9-24. doi:10.1111/j.1469-8137.2004.01015.x.
- Yang X E, Liu J X, Wang W M, Li H, Luo A C, Ye Z Q, Yang Y. 2003. Genotypic differences and some associated plant traits in potassium internal use efficiency of lowland rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Nutrient Cycling Agroecosystems, 67(3): 273-282. doi:10.1023/B:FRES.0000003665.90952.0c.
- Zeng J B, He X Y, Quan X Y, Cai S G, Han Y, Umme A N, Zhang G P. 2015. Identification of the proteins associated with low potassium tolerance in cultivated and Tibetan wild barley[J]. Journal of Proteomics, 126: 1-11. doi:10.1016/j.jprot.2015.05.025.

(责任编辑 邓慧灵)