

光合参数结合形态指标评价马铃薯响应 低磷胁迫的品种间差异

韩佳祺¹, 赵自仙¹, 郭华春^{1,2}

(¹云南农业大学薯类研究所, 昆明 650201; ²云南省薯类生物育种与良种繁育工程研究中心, 昆明 650201)

摘要: 磷是有限的自然资源, 磷肥当季利用率低, 而过量施磷则会加重农业面源污染风险。挖掘马铃薯自身磷高效遗传特性, 培育耐低磷品种是节约磷资源和保护生态环境的重要途径。建立基于光合表型参数的马铃薯品种(系)耐低磷能力评价体系, 可实现耐低磷马铃薯种质快速、无损、高效鉴定和选择。以20个马铃薯品种(系)为材料, 以膨胀珍珠岩为基质, 在正常磷营养液池(1.70 mmol/L NaH₂PO₄)和低磷营养液池(0.17 mmol/L NaH₂PO₄)中培养, 测定各品种生物量、产量和光合表型相关指标, 计算各指标耐低磷胁迫指数。利用综合隶属函数法, 进行主成分分析、回归分析, 对各马铃薯品种(系)进行耐低磷能力的划分, 综合评价各马铃薯品种耐低磷能力。与正常磷相比, 低磷胁迫下, 供试马铃薯品种(系)的单株产量、植株总干重、根干重等指标的均值降幅较大, 各指标变异系数范围为3.24%~132.99%; 光合参数中非光化学淬灭系数qN、PSII反应中心开放比率qL、非调节性能量耗散的量子产量 ϕ_{no} 等光合参数有所上升。对各项指标的耐低磷胁迫指数进行主成分分析, 前5个主成分的累计方差贡献率达86.32%, 利用隶属函数法计算耐低磷综合评价值(D), D值范围为0.3258~0.7702; 采用多元回归分析方法, 建立了马铃薯耐低磷预测模型, 确定了5个耐低磷鉴定指标并进行系统聚类, 将20个马铃薯品种(系)划分为耐低磷型、中间型、低磷敏感型3类, 并筛选出红玫瑰、6-1、滇薯1520、丽薯6号、27-1、滇薯1208为耐低磷型品种, 而86-2、滇薯1504的耐低磷能力较差, 为磷敏感型。

关键词: 马铃薯; 多光谱成像技术; 叶绿素荧光成像; 耐低磷型; 种质筛选

Evaluation of Differences among Potato Cultivars in Response to Low P Stress by Combining Photosynthetic Parameters with Morphological Indices

HAN Jiaqi¹, ZHAO Zixian¹, GUO Huachun^{1,2}

(¹Tuber and Root Crops Research Institute, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201; ²Yunnan Engineering Research Center of Tuber and Root Crop Bio-breeding and Healthy Seed Propagation, Kunming 650201)

Abstract: Phosphorus is a limited natural resource, but the utilization rate of phosphorus fertilizer in the current season is low, and excessive application of phosphorus increases the risk of agricultural non-point source pollution. It is an important way to save phosphorus resources and protect the ecological environment to excavate the genetic characteristics of phosphorus efficiency and cultivate low phosphorus tolerance varieties in potato. The establishment of an evaluation system of low phosphorus tolerance of potato varieties (lines) based on photosynthetic phenotypic parameters can achieve rapid, non-destructive and efficient identification and selection of low phosphorus tolerance potato germplasm. A total of 20 potato varieties (lines) were cultured in normal phosphorus nutrient solution pool (1.70 mmol/L NaH₂PO₄) and low phosphorus nutrient solution pool

收稿日期: 2024-01-31 网络出版日期: 2024-08-13

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20240131001>

第一作者研究方向为马铃薯遗传育种, E-mail: 1213071686@qq.com

通信作者: 郭华春, 研究方向为薯类作物学, E-mail: ynghc@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(32260543); 云南省科技计划项目重大科技专项(202402AE09001702)

Foundation projects: National Natural Science Foundation of China (32260543); Major Science and Technology Project of Yunnan Province (202402AE09001702)

($0.17 \text{ mmol/L NaH}_2\text{PO}_4$), and the biomass, yield and photosynthetic phenotype of each cultivar were measured. The low P stress tolerance index of each index was calculated. Using the comprehensive membership function method, principal component analysis and regression analysis, the low phosphorus tolerance of each potato variety (lines) was divided, and the low phosphorus tolerance of each potato variety (lines) was comprehensively evaluated. Compared with normal P stress, the average value of yield, plant dry weight and root dry weight of potato varieties under low P stress decreased greatly, with the coefficient of variation of each index ranging from 3.24% to 132.99%. The photosynthetic parameters, such as non-photochemical quenching coefficient (qN), open ratio of PSII reaction center (qL), and quantum yield of non-regulatory energy dissipation (ϕ_{no}), were increased. The cumulative variance contribution rate of five principal components was 86.32%. The membership function method was used to calculate the comprehensive evaluation value of low phosphorus tolerance (D), and the D value ranged from 0.3258 to 0.7702. Using multiple regression analysis method, the D value regression equation was established to predict potato low phosphorus tolerance. Five identification indexes of low phosphorus tolerance were determined by multiple regression analysis and systematic clustering was carried out. The 20 potato varieties (lines) were divided into three types: low phosphorus tolerance type, intermediate type, and low phosphorus sensitive type. Red rose, 6-1, Dianshu 1520, Lishu 6, 27-1 and Dianshu 1208 were selected as low P tolerant varieties, while 86-2 and 54-2 were poor in low P tolerance and were P sensitive varieties.

Key words: potato; multispectral imaging technology; chlorophyll fluorescence imaging; low phosphorus tolerant type; selection of germplasm

磷是一种有限的自然资源,对植物生长、农作物生产至关重要。全世界大约有45%的土地严重缺磷^[1],在中国西北、长江平原和华南地区缺磷土地仍占耕地总面积的50%以上,特别是在我国南方,90%以上耕地土壤的速效磷值低于作物生产推荐值(39 mg/kg)^[2]。这主要是因为磷素容易被土壤吸附固定、容易与土壤中的碳酸钙、铁铝矿物发生反应,形成作物难以利用的无效态磷^[3]。近年来,我国磷肥的投入量显著提高了作物产量,但磷肥的当季利用率仅为10%~25%,积累利用率不到50%^[4-5]。而磷是水体富营养化的因子^[6-7],大量施用磷肥来满足作物需求会使土壤中磷素积累量增加,当速效磷含量超过一定临界值时会增加磷淋溶的风险,加剧环境污染的风险。另一方面,磷矿是不可再生资源,预计到2050年,世界廉价磷资源可能会消耗殆尽^[8]。中国是世界上马铃薯最大的生产国,约占世界总产量的25%左右^[9],且马铃薯对磷素的需求与土地缺磷的矛盾,已成为影响中国马铃薯产业发展的主要矛盾之一^[10]。因此,挖掘马铃薯自身磷高效遗传特性,培育耐低磷品种是节约磷矿资源和保护生态环境的重要途径^[11]。

不同种类、不同基因型植物对低磷胁迫的响应存在显著差异。植物对于低磷胁迫的响应是复杂的过程^[12],因此应当运用多指标的评价方法全面反

映作物不同品种的耐低磷能力。耐低磷胁迫指数、主成分分析、隶属函数法等统计方法的综合利用显著提高磷高效利用品种的选择效率^[13-16]。陈泽东等^[17]对小麦苗期15个指标进行测定,通过主成分分析转化为4个综合指标,对11个小麦品种进行耐低磷品种筛选;米热扎提江·喀由木等^[18]将21个指标降维至6个综合指标,通过综合隶属函数法筛选出6个评价指标,综合评价了140份棉花种质资源。朱晓亚等^[19]通过主成分分析将12个指标化为4个综合指标,对64份红薯种质资源进行耐低磷筛选。在马铃薯中, Lee等^[20]采用水培法,利用磷吸收量、磷利用效率以及生物量对苗期马铃薯进行筛选。目前作物耐低磷品种评价体系建立及综合评价集中在水稻^[21-23]、玉米^[13, 24]、小麦^[15, 17, 25]、大豆^[26]、谷子^[27]等作物上,关于马铃薯耐低磷性评价研究较少。耐低磷筛选指标主要集中在磷含量、磷利用效率、根系表型等,筛选种质资源时工作量大,育种选择效率低下。近年来,植物表型组学发展迅速,基于多光谱成像技术、叶绿素荧光成像技术等光学技术和图像处理技术对植物进行形态指标、生理生化特征的分析成为新热点。光学技术能够无损、高通量、高精度、客观地对植株进行分析。Li等^[28]通过光学技术检测棉花苗期盐胁迫; Binaya等^[23]通过获取水稻形态指标来进行耐低磷性种质资源筛选。基于

高通量多光谱成像、叶绿素荧光成像技术建立耐低磷品种评价体系具有研究价值。

本研究以膨胀珍珠岩为基质,在正常磷和低磷2种条件下,研究20份马铃薯品种(系)光合特征参数、生物量以及单株产量对低磷胁迫的响应差异,通过主成分分析、系统聚类分析和回归分析等方法对不同马铃薯种质的磷效率类型进行综合评价,为

选育磷高效马铃薯品种提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

20份马铃薯材料均由云南农业大学薯类作物研究所提供(表1),试验材料为脱毒试管苗。

表1 供试马铃薯材料名称及来源

Table 1 Name and source of potato materials used in this study

编号 No.	品种(系) Variety (line)	来源 Source	编号 No.	品种(系) Variety (line)	来源 Source	编号 No.	品种(系) Variety (line)	来源 Source
1	滇薯23	自育品种	8	滇薯14023	自育品系	15	21-1	自育品系
2	滇薯1208	自育品种	9	滇彩薯101	自育品系	16	21-3	自育品系
3	滇薯1418	自育品种	10	滇彩薯103	自育品系	17	27-1	自育品系
4	滇薯1428	自育品种	11	丽薯6号	丽江市农业科学研究所	18	34-2	自育品系
5	滇薯1415	自育品系	12	合作88	云南师范大学	19	6-1	自育品系
6	滇薯1504	自育品系	13	红玫瑰	山东希森公司	20	86-2	自育品系
7	滇薯1520	自育品系	14	Q9	自育品系			

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 试验于2023年3-7月在云南农业大学薯类作物研究所种质资源圃进行,2023年3月进行试验材料准备工作,使用MS培养基对试验材料进行扩繁,将继代培养20 d的试管苗根系培养基洗去,进行1/2 MS营养液假植,每7 d更换营养液,假植苗生长30 d进行移栽。栽培容器采用无纺布美植袋35 cm×30 cm(口径×高度),基质为膨胀珍珠岩,挑选长势一致的马铃薯假植苗移栽,每个品种每个处理设3次生物学重复,共120盆,每盆移栽1株10 cm左右高度的马铃薯假植苗。分别放置在正常供磷营养液池(1.70 mmol/L NaH₂PO₄)和低磷营养液池(0.17 mmol/L NaH₂PO₄)中处理,大量元素营养液参照韩忠才等^[29]配方进行改良,每升营养液中加入718 mg Ca(NO₃)₂·4H₂O、244 mg (NH₄)₂SO₄、455 mg KNO₃、164 mg K₂SO₄、554 mg MgSO₄·7H₂O,最后定容至1 L,微量元素营养液浓度参照Corréa等^[30],pH控制在5.8~6.2。营养液池规格为10 m×1.5 m×0.2 m(长×宽×高)。每池每次加入300 L营养液,水位为2 cm,每10 d更换一次营养液。处理40 d后进行后续指标的测定。

1.2.2 光合表型相关指标测定 植株不同磷处理40 d后,采用Plant Explorer Pro(PhenoVation,荷兰)进行叶绿素荧光成像、多光谱成像以及可见光表型

测量。通过平台自带Data analysis软件(PhenoVation,荷兰)进行数据分析及图片处理,得到最大光合效率(Fv/Fm, maximum photosynthetic efficiency)、光合量子传递效率(rETR, photosynthetic quantum transfer efficiency)、非光化学淬灭(NPQ, non-photochemical quenching)、叶绿素荧光强度(Chl, chlorophyll fluorescence intensity)、非调节性能量耗散的量子产量(ϕ_{no} , quantum yield of regulatory energy dissipation)等15个指标参数(图1)。

1.2.3 植株形态指标测定 在开展植株光合特征参数测定的同时,对植株形态指标进行测定。株高(植株基部到顶端生长点的长度)采用直尺测量;茎粗(植株倒4叶与倒5叶间主茎的直径)采用游标卡尺测量;冠层面积采用光合表型成像系统Plant Explorer Pro(PhenoVation,荷兰)测量。

1.2.4 植株生物量及产量测定 在不同磷处理70 d后进行收获,将每株植株分为叶、茎、根、薯4部分,分别称量各部位鲜重,植株总鲜重为各部位鲜重之和,薯鲜重即为单株产量,在105℃下杀青30 min,然后在80℃烘干至恒重,测定马铃薯各部位干重,地上部干重为叶干重和茎干重之和,地下部干重为根干重及薯干重之和,各部位干重之和即为植株总干重,根冠比(%)=地下部干重/地上部干重×100%。

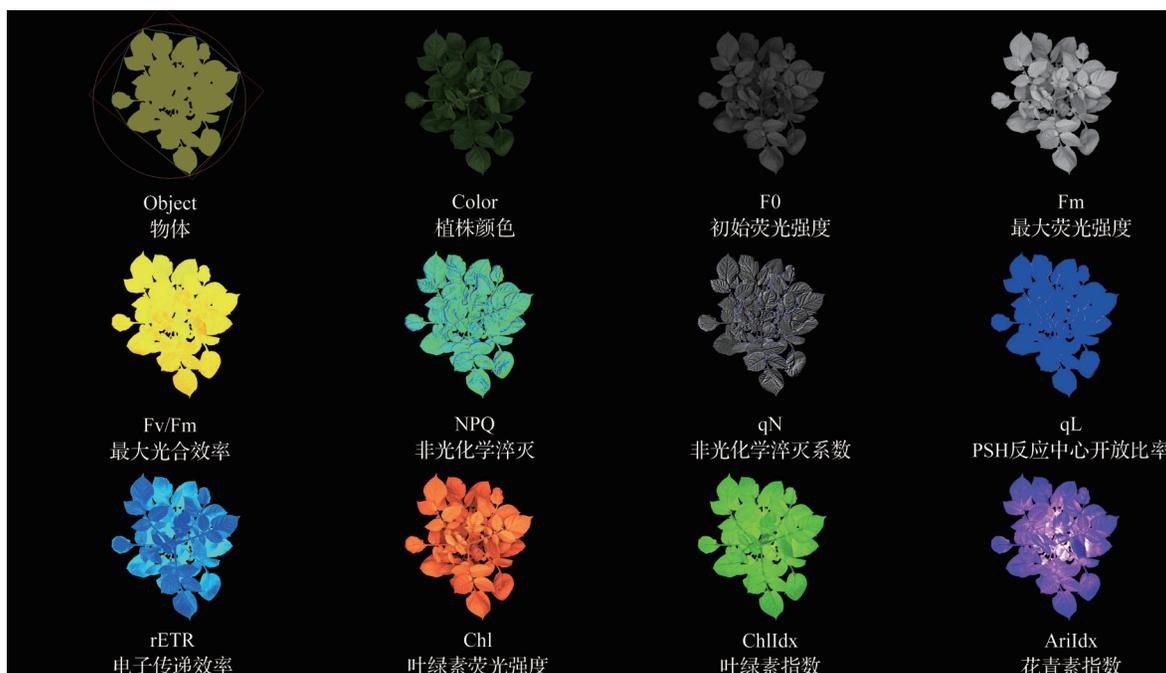


图1 低磷条件下的滇薯 1520 的部分 Plant Explorer Pro 光合特征参数

Fig.1 Partial plant Explorer Pro photosynthetic characteristic parameters of Dianshu 1520 under low P conditions

1.3 数据分析

使用 SPSS 27.0 对数据进行正态性检验、单因素方差分析和多重检验(检测样本间的差异显著性)。使用 Origin Pro 2021 对数据进行主成分分析、相关性分析和聚类分析,并绘图。通过 Microsoft Excel 采用隶属函数法对 20 个马铃薯品种(系)进行耐低磷综合评价。通过 SPSS 27.0 采用多元线性回归分析建立 D 值回归模型。

耐低磷胁迫指数:

$$R_{L_p} = \frac{Lp_i}{Np_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中, Lp_i 和 Np_i 分别为第 i 个指标在低磷和正常磷处理下的测定值。

隶属函数值:

$$F(X_{j,i}) = \frac{X_{j,i} - X_{j,\min}}{X_{j,\max} - X_{j,\min}} \quad (2)$$

式中, $F(X_{j,i})$ 表示第 i 个品种第 j 个隶属函数值, $X_{j,i}$ 表示第 i 个品种第 j 个主成分值, $X_{j,\min}$ 为第 j 个主成分的最小值, $X_{j,\max}$ 为第 j 个主成分的最大值。

主成分权重(W_j):

$$W_j = \frac{P_j}{\sum_{j=1}^n P_j} \quad (3)$$

式中, W_j 表示第 j 个综合指标在所有综合指标中的重要性及权重; P_j 为各品种第 j 个综合指标的贡献率。

耐低磷综合评价值(D):

$$D = \sum_{j=1}^n F(X_{j,i})W_j \quad (4)$$

根据因子权重(W_j)及隶属函数值 $F(X_{j,i})$, 计算各品种的耐低磷综合评价值 D 。

2 结果与分析

2.1 不同磷处理的马铃薯相关性状差异分析

不同马铃薯品种(系)各性状对不同磷处理的响应差异见表 2, 与正常磷处理相比, 低磷处理下植株形态指标、产量及生物量指标均降低, 其中降幅较大的是单株产量(81.08%), 其次是地下部干重(79.05%)、植株总干重(76.52%)、冠层面积(68.68%)、株高(43.73%)、茎粗(39.50%)。低磷处理下, PSII 反应中心开放比率、光化学淬灭系数、非光化学淬灭系数、初始荧光强度、非调节性能量耗散的量子产量等光合相关指标升高, 花青素指数、叶绿素指数、最大光合效率、光合量子传递效率等 9 个指标下降, 降幅范围为 0.06%~17.15%, 相对于产量及生物量指标, 降幅较小。

不同磷处理的马铃薯各性状指标表现出一定的变异性, 说明供试品种(系)有较广泛的遗传差异, 为耐低磷马铃薯品种(系)的筛选提供了可能。低磷处理的根冠比、单株产量、植株总干重等的变异系数较正常磷处理的均提高。非光化学淬灭系数、单株产量、地下部干重的耐低磷胁迫指数离散度较大, 即品种间差异较显著。

表 2 2 个磷水平下马铃薯各性状值及耐低磷胁迫指数

Table 2 Values of each trait and low phosphorus stress tolerance index of potato under two P levels

性状 Traits	低磷处理 Low phosphorus			正常磷处理 Normal phosphorus			耐低磷胁迫指数 Low phosphorus stress tolerance index		
	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 (%) CV	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 (%) CV	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 (%) CV
冠层面积 (mm ²) CAA	4464.30b	1865.87	41.80	14254.71a	5144.47	36.09	31.60	9.53	30.16
茎粗 (mm) SDR	3.31b	0.52	15.71	5.47a	0.73	13.41	61.48	9.83	15.98
株高 (cm) PHT	24.81b	4.95	19.94	44.09a	7.53	17.08	56.35	11.73	20.81
单株产量 (g) PFW	40.84b	36.83	90.18	215.87a	94.13	43.60	17.71	16.16	91.21
植株总鲜重 (g) TFW	144.75b	79.14	54.68	558.76a	198.97	35.61	28.42	13.65	48.03
植株总干重 (g) TDW	18.43b	10.25	55.64	78.48a	29.12	37.11	25.73	13.96	54.24
地上部干重 (g) ADW	8.85b	5.68	64.16	32.77a	15.22	46.44	31.76	17.71	55.77
地下部干重 (g) UDW	9.57b	7.53	78.71	45.71a	18.56	40.60	20.98	15.39	73.32
根冠比 (%) U/A	1.68a	2.24	132.99	1.79a	1.46	81.64	81.25	44.74	55.07
初始荧光强度 F0	3446.83a	641.59	18.61	3374.99a	529.72	15.70	98.48	19.93	20.24
最大荧光强度 Fm	7127.25b	1569.13	22.02	7554.07a	1292.14	17.11	93.54	25.72	27.50
最大光合效率 Fv/Fm	0.50b	0.04	8.56	0.55a	0.04	7.13	92.55	11.87	12.82
PSII 运行效率 Fq'/Fm'	0.66a	0.02	3.24	0.66a	0.04	5.48	100.66	8.54	8.49
光合量子传递效率 rETR	90879.66b	4168.33	4.59	92973.66a	9611.15	10.34	97.49	11.30	11.59
非光化学淬灭 NPQ	0.11a	0.06	52.57	0.12a	0.16	131.10	208.03	203.30	97.73
光化学淬灭系数 qP	1.26a	0.07	5.19	1.16b	0.10	8.48	108.30	13.36	12.33
非光化学淬灭系数 qN	0.10a	0.05	54.41	0.09a	0.09	92.04	221.41	230.42	104.07
PSII 反应中心开放比率 qL	1.63a	0.15	9.17	1.44b	0.18	12.73	111.00	19.64	17.69
非调节性能量耗散的量子产量 ϕ_{no}	0.35a	0.04	10.37	0.34a	0.04	11.14	103.18	15.32	14.85
调节性能量耗散的量子产量 ϕ_{npq}	0.03a	0.01	28.92	0.04a	0.05	146.31	159.22	86.93	54.60
叶绿素指数 ChlIdx	1.02b	0.08	7.66	1.11a	0.11	9.52	92.23	11.45	12.41
花青素指数 AriIdx	3.71b	0.45	12.22	4.48a	0.55	12.19	83.66	10.99	13.13
叶绿素荧光强度 Chl	21683.45b	1700.80	7.84	23970.92a	1516.94	6.33	89.20	4.92	5.51

不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); 下同

Different lowercase letters indicated significant difference between treatments ($P < 0.05$); CAA: Canopy area; SDR: Stem diameter; PHT: Plant height; PFW: Potato fresh weight; TFW: Total fresh weight of plant; TDW: Total dry weight of plant; ADW: Above ground dry weight; UDW: Underground dry weight; U/A: Root to shoot ratio; F0: Initial fluorescence intensity; Fm: Maximum fluorescence intensity; Fv/Fm: Maximum photosynthetic efficiency; Fq'/Fm': PS II operating efficiency; rETR: Photosynthetic quantum transfer efficiency; NPQ: Non-photochemical quenching; qP: Photochemical quenching coefficient; qN: Non-photochemical quenching coefficient; qL: PSII reaction center opening ratio; ϕ_{no} : Quantum yield of non-regulatory energy dissipation; ϕ_{npq} : Quantum yield of regulatory energy dissipation; ChlIdx: Chlorophyll index; AriIdx: Anthocyanin index; Chl: Chlorophyll fluorescence intensity; The same as below

2.2 主成分分析

对马铃薯 23 个性状的耐低磷胁迫指数进行主成分分析, 以累计贡献率达到 85% 为标准共提取到 5 个主成分 (表 3)。结果表明, 在第 1 主成分坐标轴中, 拥有较大正向投影的是植株总干重 (0.89)、地下

部干重 (0.85)、植株总鲜重 (0.81)、单株产量 (0.80)、地上部干重 (0.69) 耐低磷胁迫指数; 第 2 主成分坐标轴中最大荧光强度 (0.89)、初始荧光强度 (0.87)、非光化学淬灭系数 (0.65) 耐低磷胁迫指数有较大的正向影响, 非调节性能量耗散的量子产量 (-0.63)、

叶绿素指数(-0.46)耐低磷胁迫指数对第2主成分有较大负面影响。第3主成分坐标轴中PSII运行效率(0.73)、光合量子传递效率(0.71)耐低磷胁迫指数的正向投影远大于其他指标,叶绿素荧光强度(0.51)、株高(0.48)和光化学淬灭系数(0.43)耐低磷胁迫指数对第3主成分有一定的正向影响,调节

性能量耗散的量子产量(-0.50)和叶绿素指数(-0.37)耐低磷胁迫指数对第3主成分的负向影响较大(图2)。各主成分累计方差贡献率达86.32%。上述结果说明马铃薯耐低磷性与植株总干重、产量以及最大光合效率等指标密切相关。

表3 不同供磷条件下马铃薯各性状主成分的特征向量及贡献率

Table 3 Eigenvectors and contribution rates of principal components of potato traits under different P levels

性状 Traits	主成分 Principal component				
	1	2	3	4	5
茎粗 SDR	0.68	-0.39	0.07	0.17	-0.01
株高 PHT	0.36	-0.07	0.48	0.47	-0.41
单株产量 PFW	0.80	0.08	0.41	0.05	0.29
植株总鲜重 TFW	0.81	-0.22	0.40	-0.34	0.05
植株总干重 TDW	0.89	-0.14	0.36	-0.13	0.17
地上部干重 ADW	0.69	-0.38	0.35	-0.44	0.00
地下部干重 UDW	0.85	0.04	0.33	0.14	0.31
根冠比 U/A	0.18	0.44	-0.19	0.62	0.46
初始荧光强度 F0	-0.01	0.87	-0.03	0.22	-0.28
最大荧光强度 Fm	0.36	0.89	-0.07	0.03	-0.13
最大光合效率 Fv/Fm	0.64	0.60	0.08	-0.25	0.11
PSII运行效率 Fq'/Fm'	-0.37	0.34	0.73	-0.01	0.32
光合量子传递效率 rETR	-0.51	0.12	0.71	0.05	-0.16
非光化学淬灭 NPQ	0.64	0.61	-0.23	-0.12	0.01
光化学淬灭系数 qP	-0.62	0.48	0.43	0.27	0.16
非光化学淬灭系数 qN	0.60	0.65	-0.25	-0.10	0.11
PSII反应中心开放比率 qL	-0.59	0.55	0.28	0.37	0.21
非调节性能量耗散的量子产量 Φ_{no}	-0.50	-0.63	0.25	-0.01	0.02
调节性能量耗散的量子产量 Φ_{npq}	0.56	0.36	-0.50	-0.06	-0.30
叶绿素指数 ChlIdx	0.48	-0.46	-0.37	0.58	-0.01
花青素指数 ArlIdx	0.44	-0.46	-0.21	0.67	0.04
叶绿素荧光强度 Chl	0.22	0.39	0.51	0.06	-0.61
冠层面积 CAA	0.59	-0.31	0.37	0.46	-0.25
特征值 Characteristic value	7.72	5.12	3.28	2.31	1.43
贡献率(%) Contribution rate	33.57	22.25	14.25	10.05	6.2
累计贡献率(%) Cumulative contribution rate	33.57	55.82	70.07	80.12	86.32

2.3 马铃薯耐低磷指标筛选

将20个品种(系)所对应的特征向量进行归一化处理,转化为隶属函数值。经计算,5个主成分的权重分别为38.89%、25.77%、16.50%、11.64%及7.19%。根据耐低磷综合评价值D对20份马铃薯进行综合评价,得分越高,综合表现越好,D值范围为0.3258~0.7702。马铃薯各指标耐低磷胁迫指数与

耐低磷综合评价值(D)的相关性分析(图3)表明,单株产量、植株总干重、地下部干重、最大荧光强度、最大光合效率、非光化学淬灭、非光化学淬灭系数和非调节性能量耗散的量子产量的耐低磷胁迫指数与D值的相关性均达到极显著水平,植株总鲜重、根冠比、叶绿素荧光强度、冠层面积和初始荧光强度的耐低磷胁迫指数与D值达到显著水平。

为了建立马铃薯耐低磷模型,将与 D 值显著相关性状的耐低磷胁迫指数作为自变量, D 值为因变量,进行多元线性回归分析。与 D 值显著相关的生物学特性指标共5个,分别是地下部干重、单株产量、植株总干重、植株总鲜重和根冠比,建立回归分析模型得到 $D=0.254-0.111X_1+0.593X_2-0.402X_3+0.581X_4+0.150X_5$,决定系数 $R^2=0.787(P<0.01)$;运用光合表型数据建立回归分析模型得到 $D=-0.263+0.458X_1+0.204X_2+0.038X_3-0.031X_4+0.014X_5+0.008X_6+0.544X_7+0.450X_8$,决定系数 $R^2=0.858(P<0.01)$ 。与 D 值相关性达到极显著水平的指标中,地下部干重、单株产量和最大光合效率3项指标与其余指标相比

相关系数高,分别为0.83、0.82和0.78。将 D 值和与 D 值显著相关指标的耐低磷胁迫指数建立多元逐步回归分析模型,得到因变量 D 值和5个自变量的多元回归方程: $D=0.110+0.608X_1+0.095X_2+0.083X_3+0.237X_4-0.16X_5$,回归方程的决定系数为 $R^2=0.930(P<0.01)$,添加其他显著指标, R^2 变化在0.01范围,因此选择相关系数最高的5个指标建立的方程可用于综合评价马铃薯耐低磷性(表4)。根据多元回归分析和相关性分析,确定地下部干重、单株产量、最大光合效率、最大荧光强度、植株总干重可作为筛选马铃薯耐低磷性评价指标。

表4 马铃薯耐低磷模型预测

Table 4 Model prediction of low P tolerance in potato

多元回归方程 Multiple regression equation		决定系数 R^2	F值 F value	P值 P value
生物学特性模型 Biological characteristics model	$D=0.254-0.111X_1+0.593X_2-0.402X_3+0.581X_4+0.150X_5$	0.787	10.319	<0.001
光合表型模型 Photosynthetic phenotype model	$D=-0.263+0.458X_1+0.204X_2+0.038X_3-0.031X_4+0.014X_5+0.008X_6+0.544X_7+0.450X_8$	0.858	8.281	<0.001
综合指标模型 Comprehensive index model	$D=0.371+0.710X_1$	0.696	41.170	<0.001
	$D=0.377+0.532X_1+0.172X_2$	0.699	19.714	<0.001
	$D=-0.071+0.359X_1+0.129X_2+0.536X_3$	0.843	28.534	<0.001
	$D=0.133+0.511X_1+0.072X_2+0.003X_3+0.274X_4$	0.928	48.045	<0.001
	$D=0.110+0.608X_1+0.095X_2+0.083X_3+0.237X_4-0.16X_5$	0.930	37.474	<0.001

生物学特性模型中, X_1 :地下部干重; X_2 :单株产量; X_3 :植株总干重; X_4 :植株总鲜重; X_5 :根冠比;光合表型模型中, X_1 :最大光合效率; X_2 :最大荧光强度; X_3 :非光化学淬灭系数; X_4 :非光化学淬灭; X_5 :非调节性能量耗散的量子产量; X_6 :叶绿素荧光强度; X_7 :冠层面积; X_8 :初始荧光强度;综合指标模型中, X_1 :地下部干重; X_2 :单株产量; X_3 :最大光合效率; X_4 :最大荧光强度; X_5 :植株总干重

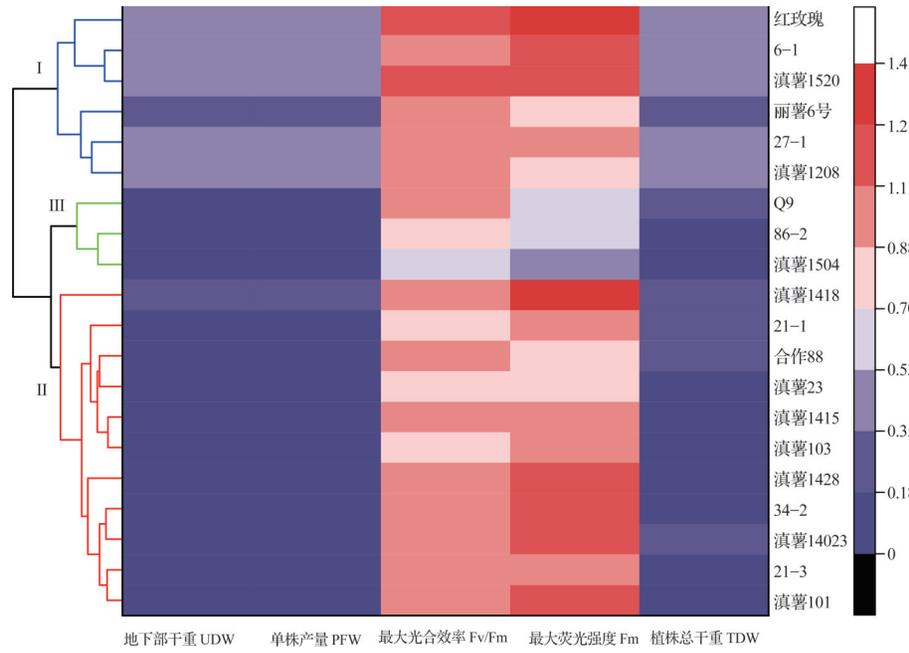
In the biological characteristics model, X_1 : Underground dry weight; X_2 : Potato fresh weight; X_3 : Total dry weight of plant; X_4 : Total fresh weight of plant; X_5 : Root to shoot ratio; In the photosynthetic phenotype model, X_1 : Maximum photosynthetic efficiency; X_2 : Maximum fluorescence intensity; X_3 : Non-photochemical quenching coefficient; X_4 : Non-photochemical quenching; X_5 : Quantum yield of non-regulatory energy dissipation; X_6 : Chlorophyll fluorescence intensity; X_7 : Canopy area; X_8 : Initial fluorescence intensity; In the comprehensive index model, X_1 : Underground dry weight; X_2 : Potato fresh weight; X_3 : Maximum photosynthetic efficiency; X_4 : Maximum fluorescence intensity; X_5 : Total dry weight of plant

2.4 马铃薯耐低磷品种(系)筛选

利用5个评价指标的耐低磷胁迫指数,对20个马铃薯品种(系)进行聚类分析(图4),20个品种(系)划分为3类。第I类为耐低磷型,包含6个品种(系),红玫瑰、6-1、滇薯1520、丽薯6号、27-1以及滇薯1208,综合评价 D 值范围在0.56~0.77,平均值为0.66。第II类中间型共11个品种(系), D 值变幅范围为0.36~0.61,平均值为0.48。第III类磷敏感型,共3个品种(系),滇薯1520、86-2以及Q9, D 值变幅范围为0.32~0.34,平均值为0.33。

2.5 不同耐低磷型马铃薯农艺性状评价

对马铃薯不同品种(系)的耐低磷评价指标的胁迫指数进行方差分析。耐低磷型(I)马铃薯品种(系)的地下部干重、单株产量、植株总干重耐低磷胁迫指数均极显著大于其他两种类型(II、III)。最大光合效率、最大荧光强度的耐低磷胁迫指数表现为耐低磷型I和中间型II显著高于低磷敏感型III,而耐低磷型I和中间型II差异不显著(图5)。结果表明,耐低磷型I的5个耐低磷评价指标耐低磷胁迫指数均值高于中间型II和低磷敏感型III,验证了聚类结果的正确性。



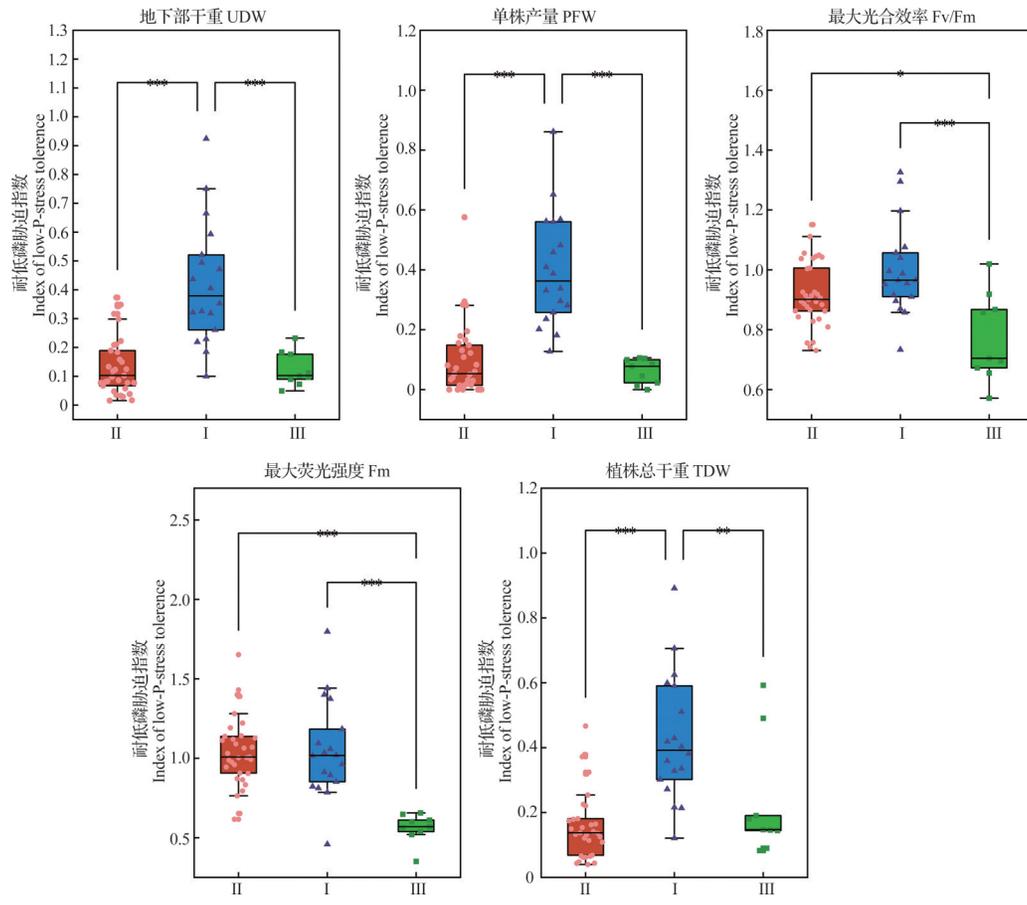
地下部干重 UDW 单株产量 PFW 最大光合效率 Fv/Fm 最大荧光强度 Fm 植株总干重 TDW

第I类:耐低磷型;第II类:中间型;第III类:低磷敏感型;品种名称同表1

Class I: Low phosphorus tolerance type; Class II: Intermediate type; Class III: Low phosphorus sensitive type; The varieties name are the same as table 1

图 4 不同马铃薯品种(系)耐低磷能力系统聚类

Fig.4 Systematic cluster of low P tolerance of different potato varieties (lines)



***: 在 0.001 水平显著差异

*** : Significant difference at the 0.001 level

图 5 不同耐低磷型马铃薯品种(系)农艺性状综合评价

Fig.5 Comprehensive evaluation of agronomic traits of different low phosphorus tolerance type potato varieties (lines)

3 讨论

本研究表明,与正常磷处理相比,低磷处理下马铃薯株高、茎粗、冠层面积均显著降低。有研究表明,低磷胁迫会抑制植物地上部的生长或通过改变株型来减少磷消耗^[12,31]。其次,磷参与多种代谢,在缺磷时会使蛋白质合成受阻,细胞质、细胞膜形成较少,植株矮小、生长缓慢^[1]。本研究在生物量、产量相关指标方面,单株产量在不同磷处理下变幅最大,说明产量指标对低磷条件敏感度高。陈娟等^[32]和程瑶^[33]也得出在不同磷条件下马铃薯产量存在差异的结论。光合作用是植物生长发育的物质基础,对含磷化合物的依赖性很强,因此低磷条件下,光合作用受到抑制也是植物生物量较低的原因之一。

Zheng等^[34]指出耐低磷品种在低磷条件下通过增强叶绿体Pi分配来持续电子转移,从而产生更多的ATP来激活核酮糖-1,5-二磷酸羧化加氧酶(Rubisco),最终表现出更强的光合能力。叶绿体无机磷分配的改善可能为提高耐低磷能力提供新的思路。Zheng等^[34]研究了两种小麦品种的耐磷特性,低磷抑制两个品种的生物量积累和净光合速率;在低磷条件下,耐低磷品种表现出更强的PSII功能,表现在潜在活性、最大光合效率、光合量子传递效率、光化学猝灭和非光化学猝灭指标上,从而产生更多的ATP来激活Rubisco。因此,叶绿素荧光成像技术分析得出的指标可用于筛选鉴定。本研究正常磷处理下的最大荧光强度、最大光合效率显著高于低磷处理,而非光化学猝灭系数和非调节性能量耗散的量子产量两指标则相反。Singh^[35]等研究了磷对棉花叶绿素荧光及光合作用的影响,研究表明缺磷条件下叶片光合量子传递效率、PSII量子产率降低,光化学猝灭增加,导致PSII反应中心能量传递效率降低,这与本研究结果相同。

不同指标的结果只能反映适应性的一个方面,评价和筛选作物耐低磷性尚无统一的标准。前人有通过磷利用效率^[36]、生物量^[37]、产量^[38]、根系表型^[18]等来进行筛选,但测定相关指标耗时费力。当前通过高通量叶绿素荧光成像、多光谱成像技术进行无损检测,能快速无损的获取光合及表型相关数据。目前已用于氮肥施用量与产量、叶绿素荧光参数的相关性^[39]、苗期盐胁迫鉴定^[28]等, Binaya等^[23]运用根系表型、冠层面积、SPAD值、叶鲜重、叶夹角等指标,通过主成分分析法、隶属函数法及广义遗

传力对18种基因型水稻进行磷利用效率评价。本研究基于23个指标,通过主成分分析和多元逐步回归分析,建立了马铃薯耐低磷综合评价D的回归方程,通过综合分析不同性状与耐低磷综合评价D的相关系数和回归系数,当仅用与D值显著相关的生物学特性相关指标进行模型预测时, R^2 为0.787,而运用与D值显著相关的光合表型相关指标时 R^2 为0.858,利用综合指标按相关性进行多元逐步回归时, R^2 为0.930。光合表型构建的D值回归方程的 R^2 已在0.85以上,说明该模型可以用于高通量耐低磷型种质资源鉴定,而综合指标构建的D值回归方程的 R^2 为0.93,准确性更高,因此本研究采用单株产量、植株总干重、地下部干重、最大荧光强度、最大光合效率作为马铃薯耐低磷能力评价体系的筛选指标。

聚类分析将20份马铃薯品种(系)划分为耐低磷型、中间型和低磷敏感型3种类型。其中红玫瑰品种在已有报道中为耐低磷型品种,滇薯1520在本课题组已有研究中评价为养分高效利用品种^[40],说明本研究评价方法的准确性。

根据聚类分析的结果,用单株产量、植株总干重、地下部干重、最大荧光强度、最大光合效率5个指标建立D值模型: $D=0.110+0.608X_1+0.095X_2+0.083X_3+0.237X_4-0.16X_5$,D值在0.60以上可确定为耐低磷种质,从而显著提高耐低磷品种的选择效率。

利用光合参数结合形态指标评价出红玫瑰、6-1、滇薯1520、丽薯6号、27-1、滇薯1208为耐低磷品种(系)。红玫瑰、6-1是彩色马铃薯,富含花色苷,受到市场青睐;丽薯6号为云南主栽品种,2023被列入国家农作物优良品种推荐名录;滇薯1208是2023年新通过国家登记的炸片品种;滇薯1520、27-1为新选育的优质高产红皮高代品系,受到喜爱红皮马铃薯的云南等市场的欢迎。6个品种(系)的耐低磷胁迫评价结果可为其在生产上的推广应用提供有益指导。

4 结论

通过综合分析,确定了单株产量、植株总干重、地下部干重、最大荧光强度、最大光合效率5个指标可用作不同马铃薯品种(系)耐低磷能力鉴定。以5个指标建立D值模型: $D=0.110+0.608X_1+0.095X_2+0.083X_3+0.237X_4-0.16X_5$,D值在0.6以上可确定为耐低磷种质。用该方法评价参试的20个品种(系),

筛选出红玫瑰、6-1、滇薯 1520、丽薯 6 号、27-1、滇薯 1208 为耐低磷型品种, 86-2、滇薯 1504 为低磷敏感品种。

参考文献

- [1] 吴平, 印莉萍, 张立平. 植物营养分子生理学. 北京: 科学出版社, 2001:103-104
Wu P, Yin L P, Zhang L P. Molecular physiology of plant nutrition. Beijing: Science Press, 2001:103-104
- [2] Li H, Liu J, Li G, Shen J, Zhang F. Past, present, and future use of phosphorus in Chinese agriculture and its influence on phosphorus losses. *AMBIO*, 2015, 44(Supplement 2):274-285
- [3] 安迪, 杨令, 王冠达, 蓝锐, 王亭杰, 金涌. 磷在土壤中的固定机制和磷肥的高效利用. *化工进展*, 2013, 32(8):1967-1973
An D, Yang L, Wang G D, Lan R, Wang T J, Jin Y. Mechanisms of phosphorus fixation in soils and efficient utilization of phosphate fertilizer. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2013, 32(8):1967-1973
- [4] 鲁如坤, 顾益初, 时正元. 土壤积累态磷研究 II. 磷肥的表观积累利用率. *土壤*, 1995(6):286-289
Lu R K, Gu Y C, Shi Z Y. Study on soil accumulated phosphorus II. Apparent accumulation and utilization rate of P fertilizer. *Soils*, 1995(6):286-289
- [5] Li H, Huang G, Meng Q, Ma L, Yuan L, Wang F, Zhang W, Cui Z, Shen J, Chen X, Jiang R, Zhang F. Erratum to: Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China. A review. *Plant and Soil*, 2011, 349(1-2):157-167
- [6] Li X, Yang L, Yan W. Model analysis of dissolved inorganic phosphorus exports from the Yangtze river to the estuary. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 90(1):157-170
- [7] Liu X, Sheng H, Jiang S Y, Yuan Z W, Zhang C S, Elser J J. Intensification of phosphorus cycling in China since the 1600s. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(10):2609-2614
- [8] Vance C P, Uhde-Stone C, Allan D L. Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*, 2003, 157(3):423-447
- [9] 徐宁, 张洪亮, 张荣华, 许亚坤. 中国马铃薯种植业现状与展望. *中国马铃薯*, 2021, 35(1):81-96
Xu N, Zhang H L, Zhang R H, Xu Y K. Current situation and prospect of potato planting in China. *Chinese Potato Journal*, 2021, 35(1):81-96
- [10] 赵玉阳, 秦永林, 樊明寿, 刘素军, 贾立国. 马铃薯基因型磷效率差异及其生理机制. *中国马铃薯*, 2023, 37(2):167-172
Zhao Y Y, Qin Y L, Fan M S, Liu S J, Jia L G. Phosphorus efficiency difference and physiological mechanism of potato genotype. *Chinese Potato Journal*, 2023, 37(2):167-172
- [11] Cong W, Suriyagoda L D B, Lambers H. Tightening the phosphorus cycle through phosphorus-efficient crop genotypes. *Trends in Plant Science*, 2020, 25(10):967-975
- [12] 张倩倩, 任剑豪, 张宇昕, 郭美娜, 易可可, 阮文渊. 植物磷饥饿信号分子调控网络及磷高效遗传改良. *中国科学: 生命科学*, 2024, 54(5):866-882
Zhang Q Q, Ren J H, Zhang Y X, Guo M N, Yi K K, Ruan W Y. Signal molecule regulatory network of phosphorus starvation in plants and genetic improvement of phosphorus efficiency. *Scientia Sinica(Vitae)*, 2024, 54(5):866-882
- [13] Shalim U M, Farzana A, Golam A M, Ara B S, Neelima H, Masum B, Lal B P, Md H A S, Mohammad K A B, Mohammed A A, Ahmed G, Akbar H. Evaluation of inbred maize (*Zea mays* L.) for tolerance to low phosphorus at the seedling stage. *Plants (Basel, Switzerland)*, 2023, 12(13):2520
- [14] 杨春婷, 张永清, 马星星, 陈伟, 董璐, 张楚, 路之娟. 苦荞耐低磷基因型筛选及评价指标的鉴定. *应用生态学报*, 2018, 29(9):2997-3007
Yang C T, Zhang Y Q, Ma X X, Chen W, Dong L, Zhang C, Lu Z J. Screening genotypes and identifying indicators of different *Fagopyrum tataricum* varieties with low phosphorus tolerance. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(9):2997-3007
- [15] 刘露露, 汪军成, 姚立蓉, 孟亚雄, 李葆春, 杨轲, 司二静, 王化俊, 马小乐, 尚勋武, 李兴茂. 不同春小麦品种耐低磷性评价及种质筛选. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(7):999-1009
Liu L L, Wang J C, Yao L R, Meng Y X, Li B C, Yang K, Si E J, Wang H J, Ma X L, Shang X W, Li X M. Evaluation of low phosphorus tolerance and germplasm screening of spring wheat. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(7):999-1009
- [16] 马建华, 王玉国, 孙毅, 尹美强, 牛常青, 杨艳君. 低磷胁迫对不同品种高粱苗期形态及生理指标的影响. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(5):1083-1091
Ma J H, Wang Y G, Sun Y, Yin M Q, Niu C Q, Yang Y J. Effects of low phosphorous stress on the morphologies and physiological indices of different sorghum cultivars at seedling stage. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(5):1083-1091
- [17] 陈泽东, 师焕婷, 董殿琪, 王亚鑫, 王金凤, 虞波, 王鹏飞, 康国章. 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. *河南农业科学*, 2023, 52(4):21-30
Chen Z D, Shi H T, Dong D Q, Wang Y X, Wang J F, Yu B, Wang P F, Kang G Z. Comprehensive evaluation of low phosphorus tolerance of different wheat varieties (Lines) and screening of representative evaluation indexes. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2023, 52(4):21-30
- [18] 米热扎提江·喀由木, 西尔艾力·吾麦尔江, 李晓瞳, 王香茹, 贵会平, 张恒恒, 张西岭, 董强, 宋美珍. 棉花苗期耐低磷种质筛选及耐低磷综合评价. *中国农业科学*, 2023, 56(21):4150-4162

- Keyoumu M, Wumaierjiang X, Li X T, Wang X R, Gui H P, Zhang H H, Zhang X L, Dong Q, Song M Z. Screening of low phosphorus tolerant germplasm in cotton at seedling stage and comprehensive evaluation of low phosphorus tolerance. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(21):4150-4162
- [19] 朱晓亚, 张强强, 于永超, 赵鹏, 刘明, 王静, 靳容, 唐忠厚. 甘薯苗期耐低磷基因型筛选及磷效率综合评价. *江苏师范大学学报:自然科学版*, 2023, 41(1):27-31
- Zhu X Y, Zhang Q Q, Yu Y C, Zhao P, Liu M, Wang J, Jin R, Tang Z H. Screening of low phosphorus tolerance genotypes and comprehensive evaluation of phosphorus efficiency in sweetpotato at seedling stage. *Journal of Jiangsu Normal University: Natural Science Edition*, 2023, 41(1):27-31
- [20] Lee W C, Zotarelli L R D, Liu G D. Evaluation of potato varieties grown in hydroponics for phosphorus use efficiency. *Agriculture*, 2021, 11(7):668
- [21] 周卫丰, 史春阳, 葛永胜, 丁艳, 胡训霞, 刘璟, 王泽港, 葛才林. 水稻耐低磷根系形态重塑基因挖掘及功能分析. *扬州大学学报:农业与生命科学版*, 2022, 43(3):1-11
- Zhou W F, Shi C Y, Ge Y S, Ding Y, Hu X X, Liu J, Wang Z G, Ge C L. Gene mining and functional analysis of root morphological remodeling tolerant to low phosphorus in rice. *Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Science Edition*, 2022, 43(3):1-11
- [22] 高方远, 陆贤军, 康海岐, 孙淑霞, 刘光春, 任光俊. 水稻耐低磷种质的苗期筛选与鉴定. *作物学报*, 2006, 32(8):1151-1155
- Gao F Y, Lu X J, Kang H Q, Sun S X, Liu G C, Ren G J. Screening and Identification for rice (*Oryza sativa* L.) tolerance to Pi deficiency at seedling stage. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(8):1151-1155
- [23] Binaya B B, Kumar P R, Annamalai A, Narayan P N S, Anumalla M, Karna R K, Chandra P B, Jauhar A. Improvement of phosphorus use efficiency in rice by adopting image-based phenotyping and tolerant indices. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12:717107
- [24] 周广威, 韩登旭, 朱琦, 张少民. 耐低磷新疆春玉米基因型筛选及其磷效率. *新疆农业科学*, 2023, 60(4):847-856
- Zhou G W, Han D X, Zhu Q, Zhang S M. Screening of spring maize genotypes tolerant to low-phosphorus and their phosphorus efficiency in Xinjiang. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2023, 60(4):847-856
- [25] 魏亚宵, 汪军成, 姚立蓉, 司二静, 杨轲, 孟亚雄, 李葆春, 王化俊, 尚勋武, 马小乐. 小麦耐低磷基因型的鉴定和筛选. *甘肃农业大学学报*, 2023, 58(2):51-57, 67
- Wei Y X, Wang J C, Yao L R, Si E J, Yang K, Meng Y X, Li B C, Wang H J, Shang X W, Ma X L. Identification and screening of low phosphorus tolerance genotypes in wheat. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2023, 58(2):51-57, 67
- [26] 梁腾月, 谷勇哲, 马英杰, 王辉, 杨光, 敖雪, 邱丽娟. 大豆耐低磷性全基因组关联分析. *植物遗传资源学报*, 2023, 24(1):237-251
- Liang T Y, Gu Y Z, Ma Y J, Wang H, Yang G, Ao X, Qiu L J. Genome wide association study of low phosphorus tolerance in soybean (*Glycine max* L.). *Journal of Plant Genetic Resources*, 2023, 24(1):237-251
- [27] 苑义川, 陈小雨, 李明明, 李萍, 贾亚涛, 韩渊怀, 邢国芳. 谷子苗期耐低磷种质筛选及其根系保护酶系统对低磷胁迫的响应. *作物学报*, 2019, 45(4):601-612
- Yuan Y C, Chen X Y, Li M M, Li P, Jia Y T, Han Y H, Xing G F. Screening of germplasm tolerant to low phosphorus of seedling stage and re-sponse of root protective enzymes to low phosphorus in foxtail millet. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(4):601-612
- [28] Li J, Zeng H, Huang C, Wu L, Ma J, Zhou B, Ye D, Weng H. Noninvasive detection of salt stress in cotton seedlings by combining multicolor fluorescence-multispectral reflectance imaging with efficientNet-OB2. *Plant Phenomics*, 2023, 5:125
- [29] 韩忠才, 张胜利, 孙静, 于翠香, 徐飞. 气雾栽培法生产脱毒马铃薯营养液配方的筛选. *中国马铃薯*, 2014, 28(6):328-330
- Han Z C, Zhang S L, Sun J, Yu C X, Xu F. Selecting nutrient solution formulation in aeroponics for seed potato production. *Chinese Potato Journal*, 2014, 28(6):328-330
- [30] Corrêa R M, Pinto J E B P, Pinto C A B P, Faquin V, Reis É S, Monteiro A B, Dyer W E. A comparison of potato seed tuber yields in beds, pots and hydroponic systems. *Scientia Horticulturae*, 2007, 116(1):17-20
- [31] Wang R, Zheng W, Wu Y, Liu D, Peng W. Effects of a range of phosphorus levels on yield, phosphorus efficiency, and canopy sunlight interception in direct-seeded winter rapeseed. *Agronomy Journal*, 2023, 115(4):2058-2070
- [32] 陈娟, 王平, 谢成俊, 孙振荣. 陇中旱作区氮磷钾肥施用量对马铃薯生长与产量的影响. *中国土壤与肥料*, 2023(9):128-135
- Chen J, Wang P, Xie C J, Sun Z R. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilization on potato growth and yield in dry farming areas in central Gansu. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2023(9):128-135
- [33] 程瑶. 不同磷用量对马铃薯产量和品质的影响. 哈尔滨:东北农业大学, 2021
- Cheng Y. Effects of different P amounts on potato yield and quality. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021
- [34] Zheng Q M, Hu J L, Tan Q W, Hu H, Sun C J, Lei K Q, Tian Z W, Dai T B. Improved chloroplast Pi allocation helps sustain electron transfer to enhance photosynthetic low-phosphorus tolerance of wheat. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2023, 201:107880
- [35] Singh K S, Reddy R V. Combined effects of phosphorus nutrition and elevated carbon dioxide concentration on chlorophyll fluorescence, photosynthesis, and nutrient efficiency of cotton. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*,

- 2014, 177(6):892-902
- [36] 阳显斌, 张锡洲, 李廷轩, 吴德勇. 小麦磷素利用效率的品种差异. 应用生态学报, 2012, 23(1):60-66
Yang X B, Zhang X Z, Li T X, Wu D Y. Differences in phosphorus utilization efficiency among wheat cultivars. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(1):60-66
- [37] 李春艳, 马龙, 张宏, 李诚. 新疆冬小麦苗期耐低磷指标的筛选. 麦类作物学报, 2013, 33(1):137-140
Li C Y, Ma L, Zhang H, Li C. Screening on indexes for tolerance to low phosphorus stress at seedling stage of winter wheat. Journal of Triticeae Crops, 2013, 33(1):137-140
- [38] 罗园, 李东梅, 雷森森, 冯宗云. 青稞苗期耐低磷能力评价. 麦类作物学报, 2019, 39(12):1450-1458
Luo Y, Li D M, Lei M M, Feng Z Y. Evaluation of low-phosphorus tolerance of hulless barley at seedling stage. Journal of Triticeae Crops, 2019, 39(12):1450-1458
- [39] Peng J F, Feng Y H, Wang X K, Li J, Xu G L, Somsana P, Luo Q X, Han Z L, Lu W. Effects of nitrogen application rate on the photosynthetic pigment, leaf fluorescence characteristics, and yield of indica hybrid rice and their interrelations. Scientific Reports, 2021, 11(1):7485
- [40] 胡明举, 董光美, 鲁晓健, 郭华春. 云南高产优质冬作马铃薯种质的筛选及其养分利用特性分析. 云南农业大学学报: 自然科学, 2022, 37(3):390-396
Hu M J, Dong G M, Lu X J, Guo H C. High yield and good quality germplasm selection of potato in Yunnan winter planting and analysis of nutrient utilization characteristics. Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science, 2022, 37(3):390-396