

· 研究报告 ·

## 耐亚磷酸盐马铃薯的筛选与评价

张锋, Richard Dormatey, 刘寅笃, 李成举, 王云姣, 张春利, 张莹, 范又方  
姚攀锋, 毕真真, 刘玉汇, 白江平\*, 孙超\*

甘肃农业大学农学院/干旱生境作物学国家重点实验室/甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室, 兰州 730070

**摘要** 磷是植物生长发育不可或缺的营养元素之一, 正磷酸盐(P)在土壤中含丰富, 但由于土壤的固定作用, 其中能被植物吸收利用的有效磷含量并不高, 提高植物对土壤磷的吸收利用能力, 或优化磷肥施用, 已成为亟待解决的问题。土壤中亚磷酸盐(PH)的含量仅次于正磷酸盐, 其具有更高的溶解度, 可在植物木质部与韧皮部之间进行双向运输, 不易被土壤固定, 但亚磷酸盐作为磷肥替代正磷酸盐和选育耐亚磷酸盐作物品种的研究鲜有报道。基于此, 该研究选取5份引进的马铃薯(*Solanum tuberosum*)品种和1个商业品种青薯9号(QS9)为实验材料, 经驯化炼苗后直接栽入试验田, 设置正常磷肥处理和亚磷酸盐替代处理, 测定不同品种的表型、光合作用效率和干物质等指标, 以各单项耐亚磷酸盐系数(PTC)为衡量依据, 利用主成分分析等方法对不同马铃薯品种的PH耐性进行综合评价。结果表明, 6个马铃薯品种可分为高度耐亚磷酸盐型(C115和D13)、弱耐亚磷酸盐型(C20、C31和QS9)和亚磷酸盐敏感型(C80) 3类。该研究评价了不同马铃薯品种对亚磷酸盐的耐受性, 旨在为马铃薯耐亚磷酸盐品种选育和亚磷酸盐新型肥料开发提供科学依据。

**关键词** 马铃薯, 耐亚磷酸盐系数, 主成分分析, 隶属函数分析, 聚类分析, 综合评价

张锋, Richard Dormatey, 刘寅笃, 李成举, 王云姣, 张春利, 张莹, 范又方, 姚攀锋, 毕真真, 刘玉汇, 白江平, 孙超 (2024). 耐亚磷酸盐马铃薯的筛选与评价. *植物学报* 59, 544–557.

磷是马铃薯(*Solanum tuberosum*)生长所需的主要营养元素(Schachtman et al., 1998)。缺磷会抑制植物体内新细胞的形成, 表现为根系发育不良, 植株生长受抑制或停滞(张汝等, 2017)。马铃薯是我国继水稻(*Oryza sativa*)、小麦(*Triticum aestivum*)和玉米(*Zea mays*)之后第四大粮食作物, 对保障国家粮食安全有重要意义(屈冬玉等, 2005)。但由于追求产量与品质, 过量施用磷肥已经成为常态(Grant et al., 2001; Achary et al., 2017)。在日常生产中, 长期过度施用磷肥引发诸多问题。首先, 因土壤的固定作用, 过量施肥使当季磷肥利用率仅有15%–25% (王宁等, 2016; 张邦喜等, 2016)。磷资源作为一种不可再生资源, 在全球的储备十分有限(Cordell and White, 2011; Dawson and Hilton, 2011)。其次, 由于磷资源的流失, 土壤中聚集了大量无效磷, 在淋失作用下,

随雨水进入河流湖泊使水体富营养化, 严重污染环境(陈磊等, 2012; López-Arredondo et al., 2014; Baker et al., 2015; 杨春婷等, 2018)。因此, 寻找高效的磷源已成为缓解磷肥利用率低及减少环境污染的重要措施之一(李宝玉等, 2017; 王吉祥等, 2021)。

在寻找磷源的过程中, 由于亚磷酸盐与正磷酸盐的结构相似, 常被认为是磷酸盐的同类物(Varadara-jan et al., 2002; Fang et al., 2009)。受限于对磷的分类和测定方法, 土壤中亚磷酸盐未能获得足够的关注(King et al., 2010)。与正磷酸盐相似, 亚磷酸盐也具有与多种金属络合和结合营养元素的能力, 被认为有良好的肥效(Rickard, 2000; McDonald et al., 2001; Broschat, 2006; Lovatt and Mikkelsen, 2006)。相比正磷酸盐, 亚磷酸盐的运输效率和溶解度更高、土壤固定性较低且可在土壤微生物的作用下转化为正磷

收稿日期: 2023-08-09; 接受日期: 2023-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(No.32060502)、甘肃省科技计划(No.21JR7RA804)、国家现代农业产业技术体系(No.CARS-09-P10)和省部共建干旱生境作物学国家重点实验室开放基金(No.GSCS-2022-Z01)

\* 通讯作者。E-mail: baijp@gsau.edu.cn; sunc@gsau.edu.cn

酸盐, 进而为小麦和玉米等作物提供磷营养(石瑶, 2002; Singh et al., 2003; Thao and Yamakawa, 2009)。有研究表明, 亚磷酸盐在植物中应用可产生一系列积极效果。以亚磷酸盐替代正磷酸盐后, 鳄梨(*Persea americana*)的产量显著增加(Lovatt and Mikkelsen, 2006); 同时也延长了作物的生育期, 提高了产量(Lobato et al., 2008)。在草莓(*Fragaria × ananassa*)的生长发育过程中, 亚磷酸盐的替代施用使茎叶数量和鲜重显著增加(Glinicki et al., 2010)。此外, 亚磷酸盐还对杂草具有抑制作用(McDonald et al., 2001), 因此被认为是一种多功能肥料的潜在替代磷源。但在一些植物中, 亚磷酸盐替代正磷酸盐也存在一定的负面效应。将亚磷酸盐作为盆栽玉米的唯一磷源, 其幼苗会发生畸变, 并出现生长停滞甚至死亡(Schroetter et al., 2006); 在缺磷培养基中加入亚磷酸盐, 或者在含有正磷酸盐的培养基中加入高浓度亚磷酸盐, 都会使拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)的生长发育受抑制(Ticconi et al., 2001); 在缺磷情况下, 亚磷酸盐会加速油菜(*Brassica napus*)悬浮细胞的程序性死亡(Singh et al., 2003)。值得注意的是, 亚磷酸盐主要通过叶面喷施用于辣椒(*Capsicum annuum*)、番茄(*S. lycopersicum*)和马铃薯等茄科作物的疫病防治, 而作为施土肥料在马铃薯中的研究尚未见报道(任士伟等, 2019; 雷菲等, 2021; 李宝玉等, 2021)。因此, 研究亚磷酸盐在马铃薯中的应用潜力对于丰富肥料选择具有重要意义。

我国约有一半土地缺磷, 需要施入大量磷肥来满足作物对磷的需求(李宝玉等, 2021)。为高效利用磷资源, 探索亚磷酸盐作为磷源替代磷肥具有深远的意义。探索不同品种马铃薯耐亚磷酸盐的遗传特性, 选育耐亚磷酸盐马铃薯品种, 是利用新型亚磷酸盐肥料的一种有效手段。本研究以前期从200份马铃薯试管苗耐亚磷酸盐初筛得到的4份耐性、1份敏感性和1份马铃薯商业种的试管苗(Dormatey et al., 2021)作为研究对象, 经扩繁6份材料的试管苗, 在炼苗棚中驯化1个月后直栽大田, 进行亚磷酸盐耐性试验。通过变异系数对指标进行筛选, 再结合多元分析方法对马铃薯耐亚磷酸盐特性进行综合评价, 以期对马铃薯耐亚磷酸盐品种选育提供种质资源, 并为亚磷酸盐新型肥料开发提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

6份马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)种质试管苗, 包括商业种青薯九号(QS9)以及5份从国际马铃薯中心引进的材料(表1)。

### 1.2 试验设计

于2022年5–12月在甘肃省定西市香泉镇马铃薯研究所进行试验。该区地理坐标为104°51'E, 35°43'N, 海拔2 084 m, 年均气温6.5°C, 年均降水量400 mm, 无霜期141天, 处于半干旱气候区。研究区土壤类型为黑炉土, pH9.01, 养分含量为有机质11.99 g·kg<sup>-1</sup>, 全氮0.69 g·kg<sup>-1</sup>, 全磷0.73 g·kg<sup>-1</sup>, 全钾22.97 g·kg<sup>-1</sup>, 碱解氮43.68 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效磷23.15 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效钾181.17 mg·kg<sup>-1</sup>。

试验采用随机区组设计, 设置亚磷酸盐替代磷肥处理(替代100%, T)和正常施肥处理(对照, CK), 氮钾的总施用量保持一致。每处理3次重复。采取起垄覆膜与膜下滴灌相结合的栽培管理方式, 单垄双行人工种植, 各处理间隔1 m。每品种每处理直栽30株, 共6 × 3 × 2=36个小区, 株距30 cm, 行距60 cm, 垄宽120 cm, 小区面积为5.4 m<sup>2</sup> (1.2 m × 4.5 m)。

于2022年5月7日进行试管苗直栽, 栽前田中均匀撒施CK与T相对应的基肥(表2)。6月10日与7月9日各施1次追肥(表2)。10月3日收获。磷肥为磷酸二铵(N≥18%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>≥46%); 钾肥为硝酸钾(N≥13.5%, K<sub>2</sub>O≥46%); 氮肥为CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O(N≥46%); 亚磷酸二氢钾纯度为98%, P<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为45% (折算成P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>为58%, K<sub>2</sub>O≥38%)。基肥和追肥中2个处理的氮钾用量均一致。

表1 6份马铃薯种质名称及来源

Table 1 Names and origins of 6 potato germplasms

No.	Name	Origin
QS9	Qingshu 9	China
C20	CIP398180.253	CIP
C31	CIP301029.18	CIP
C80	CIP397036.7	CIP
C115	CIP302476.108	CIP
D13	CIP301045.74	CIP

CIP: 国际马铃薯中心 CIP: The International Potato Center

表2 基肥与追肥的施用量

Table 2 Base fertilizer and top dressing application amount

Fertilization categories	Treatments	CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O	KNO <sub>3</sub>	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	KH <sub>2</sub> PO <sub>3</sub>
Base fertilizer (kg·hm <sup>-2</sup> )	CK	78.0	244.5	244.5	
	T	222.0	81.0		198.0
Top dressing (kg·hm <sup>-2</sup> )	CK	8.6	66.0	23.3	
	T	25.5	46.5		23.0

CK: 正常施肥处理; T: 亚磷酸盐替代磷肥处理

CK: Normal application of phosphorus fertilizer; T: Phosphite completely replaces phosphorus fertilizer

### 1.3 测定方法

#### 1.3.1 形态指标、叶面积指数、叶绿素含量及光合参数测定

试管苗直栽30天后每隔15天测定株高、茎粗和根长。用直尺测量从土壤表层到主茎第1个花序分支的高度即为株高;用游标卡尺测定贴近土壤部分最粗主茎的直径即为茎粗;用直尺测定根长。待测定的株高和茎粗与之前变化差异不大时,即用该数据作为最终的株高和茎粗。在盛花期使用SPAD-502plus测定叶片叶绿素含量;使用Li-6800 (LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska, USA)便携式光合作用测量系统测定不同处理马铃薯倒三叶的光合参数。设置光强为1 500 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, CO<sub>2</sub>浓度为400 μmol·mol<sup>-1</sup>, 空气流速为800 mol·s<sup>-1</sup>, 测定时间为上午9:00–12:00。设3次重复, 每个重复测定3次, 共测定9次。当每个点稳定后读数, 参数包括叶片净光合速率、蒸腾速率、胞间CO<sub>2</sub>浓度和气孔导度。使用SunScan冠层分析仪测定叶面积指数。

#### 1.3.2 干物质及各部位磷含量测定

在块茎膨大期, 每个品种每个重复取3株新鲜完整植株, 将根、茎、叶和块茎分离, 称鲜重, 在鼓风机烘干箱中105°C杀青30分钟, 恒温80°C烘干, 称重。将烘干后的根、茎、叶和块茎充分研磨, 采用钼锑抗比色法测定各部位磷含量(张韞, 2011)。

单株干重=根干重+茎干重+块茎干重;

磷积累量=干重×磷含量;

磷利用效率=(干重/磷积累量)×100%。

#### 1.3.3 产量测定

收获时每个品种每个重复取10株, 测定单株结薯数

及单株薯重。

### 1.4 数据统计分析

根据公式(1)计算各指标耐亚磷酸盐系数(phosphite tolerant coefficient, PTC), 用PTC值进行各指标间的相关性分析, 利用公式(4)将多个指标转化为更具代表性的少数综合指标 $F(X_j)$ , 依据公式(3)计算各综合指标的权重(index weight), 各综合指标的隶属函数值用公式(5)进行计算, 基于公式(3)和公式(5)的计算结果, 通过公式(6)得出各品种马铃薯耐亚磷酸盐的综合评价(D值)。

用Microsoft excel 2021软件进行数据整理与分析。使用SPSS 27.0软件进行Person相关性分析、主成分分析、聚类分析及隶属函数值计算。采用独立样本T检验对数据进行差异显著性分析。

测定指标耐亚磷酸盐系数(戴海芳等, 2014; 杨春婷等, 2018)计算公式如下:

$$PTC = \frac{\text{亚磷酸盐处理下的测定值}}{\text{对照测定值}} \quad (1)$$

测定指标亚磷酸盐胁迫指数(phosphite stress index, PSI) (李彩斌和郭华春, 2017)计算公式如下:

$$PSI = \frac{\text{对照测定值} - \text{亚磷酸盐胁迫测定值}}{\text{对照测定值}} \quad (2)$$

综合指标的权重(戴海芳等, 2014; 杨春婷等, 2018; 刘明等, 2023)计算公式如下:

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

式中,  $W_j$ 为第 $j$ 个综合指标在所有综合指标中的权重;  $P_j$ 代表经主成分分析所得各品种第 $j$ 个综合指标的贡献率(contribution rate)。

马铃薯品种综合指标评价(D值)(戴海芳等, 2014; 杨春婷等, 2018; 刘明等, 2023)计算公式如下:

$$F(X_j) = a_{1j} X_{1j} + a_{2j} X_{2j} + \dots + a_{ij} X_{ij} \quad i=1, 2, \dots, n; \quad j=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中,  $F(X_j)$ 为第 $j$ 个综合指标值;  $a_{ij}$ 为各单一指标的特征值所对应的特征向量;  $X_{ij}$ 为各单一指标的标准化处理值。

马铃薯品种综合指标的隶属函数值(戴海芳等, 2014; 杨春婷等, 2018; 刘明等, 2023)计算公式如下:

$$U(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad j=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中,  $X_j$ 为第 $j$ 个综合指标值;  $X_{\min}$ 为第 $j$ 个指标的最小值;  $X_{\max}$ 为第 $j$ 个指标的最大值。

各马铃薯品种耐亚磷酸盐综合评价价值(戴海芳等, 2014; 杨春婷等, 2018; 刘明等, 2023)计算公式如下:

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_j) \times W_j] \quad j=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中,  $D$ 为各品种马铃薯耐亚磷酸盐综合评价价值,  $U(X_j)$ 为不同马铃薯品种各综合指标的隶属函数值,  $W_j$ 为各综合指标的权重。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同马铃薯品种在亚磷酸盐处理下的产量性状

亚磷酸盐处理后, C20和C80的单株薯重下降17%和22% ( $P<0.01$ ), QS9的单株薯重下降6% ( $P<0.05$ ) (图1A), C80的单株结薯数下降17% ( $P<0.01$ ) (图1B); 而C115和D13的单株薯重与单株结薯数均显著增加 ( $P<0.01$ ) (图1A, B); C31的产量性状无显著变化。

### 2.2 亚磷酸盐处理对不同品种马铃薯形态指标、叶绿素含量及叶面积指数的影响

亚磷酸盐处理后, D13的株高增加8% ( $P<0.05$ ) (图2A), C20、C31、C80、C115及QS9的株高和根长较对照无显著差异(图2A, C); 大部分品种的茎粗(图2B)呈增大趋势, D13增大27% ( $P<0.01$ ), C80减小10%; C80的叶绿素含量显著增加( $P<0.01$ ) (图2D), 叶面积指数降低15% ( $P<0.05$ ); D13的叶面积指数增

高41% ( $P<0.01$ ), C115和QS9分别增高11%和10%, 其它品种叶面积指数均降低, 但差异不显著(图2E)。

### 2.3 亚磷酸盐处理对马铃薯光合参数的影响

磷参与光合磷酸化作用, 对光合作用有直接影响, 将光能贮藏在ATP中, 同时形成NADPH。亚磷酸盐处理下各品种马铃薯的净光合速率(图3A)和气孔导度(图3D)均显著下降, C80下降最显著( $P<0.01$ ), 为22%和54%。胞间 $CO_2$ 浓度除C20和C31外, 其它各品种均有不同程度的降低(图3B), C80降低23.5% ( $P<0.01$ )。C80、C115和QS9的蒸腾速率分别降低37%、21%和14% ( $P<0.01$ ) (图3C)。

### 2.4 亚磷酸盐处理对马铃薯干物质和磷积累量的影响

亚磷酸盐处理下, C115、D13和C31的根、茎、叶及块茎的干重均表现出不同程度的增加, C115的根和块茎干重分别增加131%和34.6% ( $P<0.05$ ); D13的根和茎干重分别增加174%和45.9% ( $P<0.05$ ); C31的茎、叶干重显著增加; QS9除茎干重外, 其余部位无显著变化(表3)。C20和C80的单株干重整体表现下降。综上, 各部位干重变化由高到低排序为C115>D13>C31>QS9>C20>C80。

亚磷酸盐处理后, 大多数品种的磷积累量在11.3%–129%范围内呈显著增加趋势; 相反, C80的磷积累量在20%–45%范围内显著减少。C20、C31

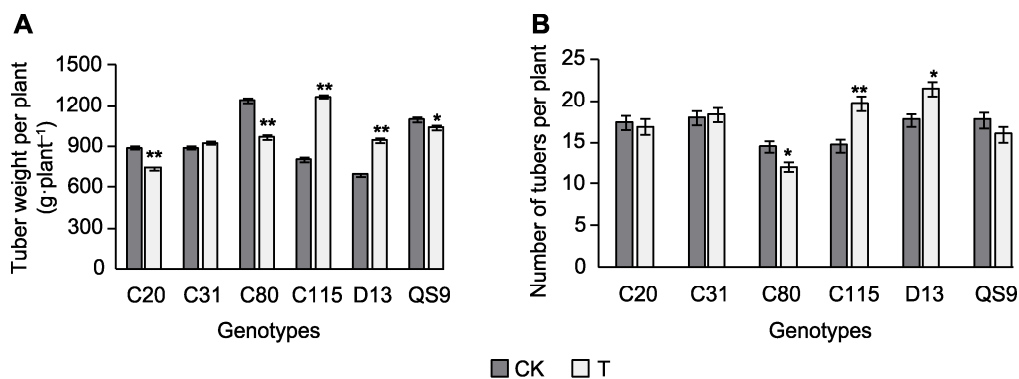
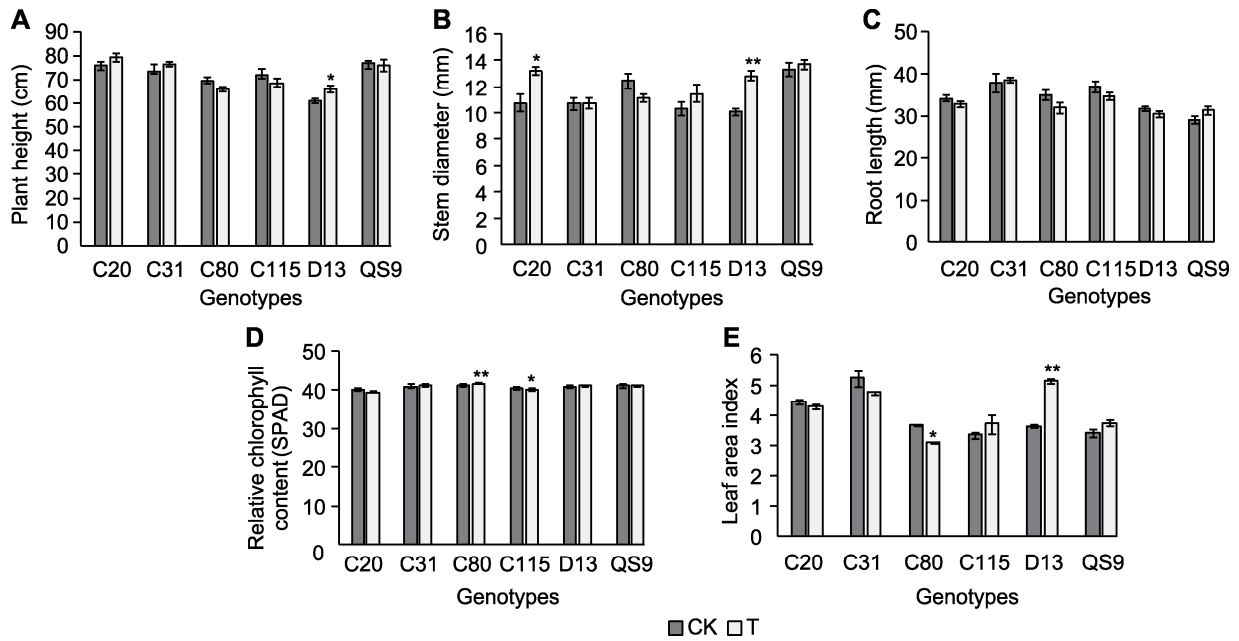


图1 亚磷酸盐处理和正常施肥条件下马铃薯的产量性状 (A) 单株薯重; (B) 单株结薯数。\*  $P<0.05$ ; \*\*  $P<0.01$  (Student's  $t$ 检验)。CK和T同表2。

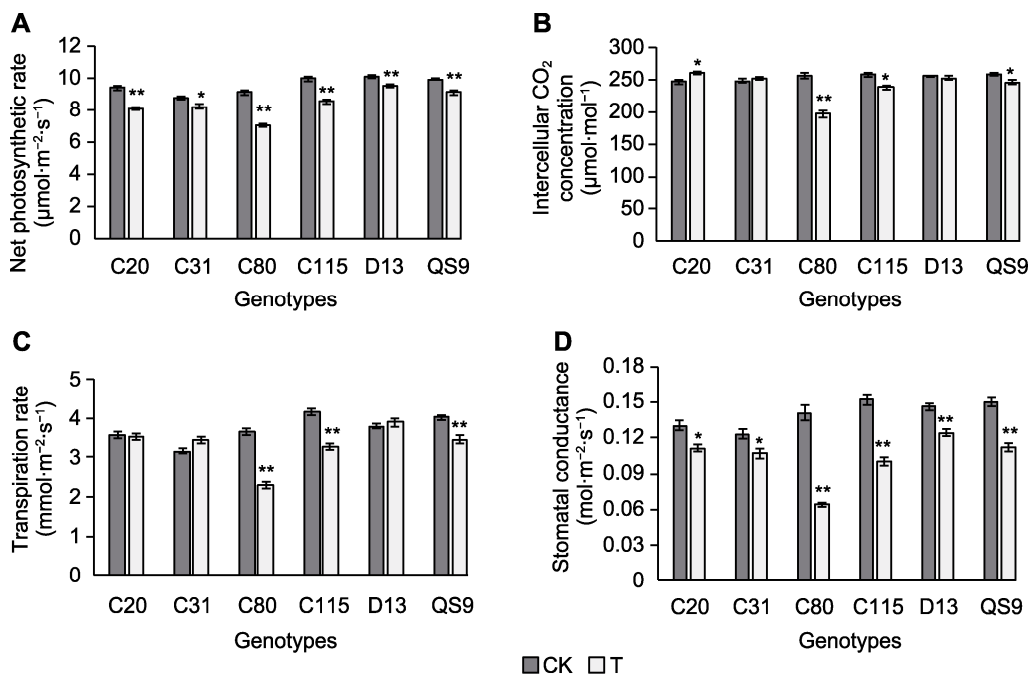
Figure 1 Potato yield traits under phosphite treatment and normal application of phosphorus fertilizer (A) Weight of tubers per plant; (B) Number of tubers per plant. \*  $P<0.05$ ; \*\*  $P<0.01$  (Student's  $t$ -test). CK and T are the same as shown in Table 2.



**图2** 亚磷酸盐处理对不同品种马铃薯形态指标、叶绿素含量及叶面积指数的影响  
**(A)** 株高; **(B)** 茎粗; **(C)** 根长; **(D)** 相对叶绿素含量; **(E)** 叶面积指数。\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$  (Student's *t*检验)。CK和T同表2。

**Figure 2** Effect of phosphite treatment on morphological parameters, chlorophyll content and leaf area index of different potato genotypes

**(A)** Plant height; **(B)** Stem diameter; **(C)** Root length; **(D)** Relative chlorophyll content; **(E)** Leaf area index. \*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$  (Student's *t*-test). CK and T are the same as shown in Table 2.



**图3** 亚磷酸盐处理对马铃薯光合参数的影响  
**(A)** 净光合速率; **(B)** 胞间 $\text{CO}_2$ 浓度; **(C)** 蒸腾速率; **(D)** 气孔导度。\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$  (Student's *t*检验)。CK和T同表2。

**Figure 3** Effect of phosphite treatment on photosynthetic parameters of potato  
**(A)** Net photosynthetic rate; **(B)** Intercellular  $\text{CO}_2$  concentration; **(C)** Transpiration rate; **(D)** Stomatal conductance. \*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$  (Student's *t*-test). CK and T are the same as shown in Table 2.

表3 亚磷酸盐处理下马铃薯各部位干物质积累

Table 3 Dry matter accumulation in various parts of potato under phosphite treatment

Indexes	Treatments	C20	C31	C80	C115	D13	QS9
RD (g)	CK	5.97±0.98 a	11.55±1.76 a	5.31±0.43 a	4.03±0.74 a	2.42±0.70 a	7.64±0.35 a
	T	5.56±0.83 a	11.15±1.83 a	4.12±0.40 a	9.32±1.97 b	6.65±1.01 b	8.12±1.37 a
	PSI	0.07	0.04	0.22	-1.31	-1.74	-0.06
SD (g)	CK	59.72±1.45 a	96.99±1.69 a	76.42±2.05 a	52.45±2.34 a	43.77±2.23 a	105.91±2.93 a
	T	72.94±1.81 b	119.61±0.78 b	52.99±2.40 b	54.78±1.11 a	63.88±2.19 b	117.87±2.61 b
	PSI	-0.221	-0.233	0.307	-0.044	-0.459	-0.113
LD (g)	CK	43.30±2.54 a	74.90±1.93 a	38.38±2.26 a	47.52±2.80 a	41.09±2.86 a	51.36±2.06 a
	T	49.23±1.64 a	90.08±1.18 b	31.63±2.49 a	60.22±2.67 b	50.99±3.44 a	54.67±1.45 a
	PSI	-0.14	-0.20	0.18	-0.27	-0.24	-0.06
TD (g)	CK	165.51±5.35 a	175.19±3.45 a	311.63±7.48 a	228.54±2.85 a	192.10±2.79 a	264.21±3.27 a
	T	122.89±2.45 b	176.88±7.17 a	218.88±4.45 b	307.70±2.11 b	204.84±4.21 b	263.15±4.66 a
	PSI	0.257	-0.010	0.298	-0.346	-0.066	0.004
DP (g)	CK	274.50±8.14 a	358.62±3.14 a	431.74±5.54 a	332.55±4.39 a	279.38±6.89 a	429.11±6.11 a
	T	250.63±4.06 b	397.72±6.93 b	307.62±6.77 b	432.02±4.94 b	326.37±8.43 b	443.81±6.46 a
	PSI	0.09	-0.11	0.29	-0.30	-0.17	-0.03

RD: 根干重; SD: 茎干重; LD: 叶干重; TD: 块茎干重; DP: 单株干重; CK: 正常施磷肥; T: 亚磷酸盐全替代磷肥; PSI: 亚磷酸盐胁迫指数。数据为平均值±标准误; 不同小写字母表示处理与对照间差异显著( $P<0.05$ )。

RD: Root dry weight; SD: Stem dry weight; LD: Leaf dry weight; TD: Tuber dry weight; DP: Dry weight per plant; CK: Normal application of phosphorus fertilizer; T: Phosphite completely replaces phosphate fertilizer; PSI: Phosphite stress index. Data are means±SE; different lowercase letters indicate significant differences between treatment and control ( $P<0.05$ ).

和QS9的块茎磷利用效率和单株磷利用效率均显著低于对照。C80、C115和D13的块茎磷利用率显著增高; C80和D13的单株磷利用效率显著增高(表4)。6个品种的单株磷利用效率的PSI从大到小依次为C31>QS9和C20>C115>C80>D13。

## 2.5 不同品种马铃薯耐亚磷酸盐指标筛选

选择有效指标对马铃薯耐亚磷酸盐品种的分类尤为关键, 而品种变异程度则是决定筛选指标是否有效的重要依据, 变异程度越大, 说明该指标越能体现不同品种之间的差异。本研究共测定26个指标, 通过变异系数分析, 筛选出15个PTC变异系数在15%以上的指标, 分别为叶面积指数、蒸腾速率、气孔导度、根干重、茎干重、块茎干重、单株干重、根磷积累量、茎磷积累量、叶磷积累量、块茎磷积累量、单株磷积累量、块茎磷利用效率、单株薯数和单株薯重(表5)。这些指标的最大值与最小值的倍数在1.2–5.5之间, 说明这15个指标对亚磷酸盐的灵敏度很高, 可用于

后续分析。

## 2.6 不同品种马铃薯各单项指标的耐亚磷酸盐系数(PTC)及相关性分析

根据公式(1)计算各测定指标的耐亚磷酸盐系数(PTC), 表明亚磷酸盐处理后, 所测的15个指标中气孔导度有所下降, 表现为 $PTC<1$ ; 其余指标在不同品种中的变化幅度有增有减(表5, 表6)。

进一步分析不同指标间的相关性(图4), 表明单株薯重与根干重、单株干重及根磷积累量存在相关性且各品种间差异显著, 相关系数为0.899、0.903和0.854, 与块茎干重和单株结薯数存在相关性且各品种间差异极显著, 相关系数为0.933和0.974。由此可知, 各单项指标在不同品种马铃薯耐亚磷酸盐特性中所起作用不同, 表明马铃薯耐亚磷酸盐特性是一个复杂的综合性状, 直接利用各单项指标不能准确和直观地评价不同马铃薯品种的耐亚磷酸盐特性。因此, 需要在此基础上利用多元分析方法对其进行综合评价。

表4 亚磷酸盐处理下马铃薯各部位的磷素积累

Table 4 Phosphorus accumulation in various parts of potatoes under phosphite treatment

Indexes	Treatments	C20	C31	C80	C115	D13	QS9
PR (mg)	CK	9.88±0.02 a	18.1±0.07 a	10.72±0.04 a	6.81±0.02 a	3.97±0.03 a	12.83±0.02 a
	T	11.95±0.03 b	20.92±0.10 b	5.87±0.04 b	15.62±0.20 b	12.12±0.03 b	15.27±0.08 b
	PSI	-0.21	-0.16	0.45	-1.29	-2.05	-0.19
PS (mg)	CK	66.55±0.38 a	113.53±1.57 a	74.15±0.63 a	44.55±0.17 a	49.90±0.17 a	73.09±0.47 a
	T	80.7±1.03 b	193.88±0.57 b	51.58±0.60 b	72.05±0.70 b	61.07±0.71 b	113.61±1.38 b
	PSI	-0.21	-0.71	0.30	-0.62	-0.22	-0.55
PL (mg)	CK	91.54±0.99 a	130.20±1.36 a	75.73±0.36 a	77.71±0.41 a	75.95±0.37 a	82.53±0.70 a
	T	106.58±1.51 b	183.15±0.97 b	60.85±0.37 b	112.06±1.21 b	88.3±0.40 b	104.38±0.36 b
	PSI	-0.16	-0.41	0.20	-0.44	-0.16	-0.26
PT (mg)	CK	322.66±1.09 a	265.50±0.85 a	665.54±1.63 a	497.46±2.16 a	430.84±1.44 a	433.26±1.01 a
	T	287.15±1.54 b	338.44±1.78 b	404.94±1.84 b	649.72±1.49 b	398.13±1.76 b	436.25±0.96 b
	PSI	0.11	-0.27	0.39	-0.31	0.08	-0.01
PP (mg)	CK	490.62±0.81 a	527.32±1.62 a	826.13±1.14 a	626.53±2.42 a	560.66±1.16 a	601.71±0.25 a
	T	486.37±1.46 b	736.38±1.71 b	523.25±2.38 b	849.45±2.21 b	559.61±2.20 b	669.51±2.41 b
	PSI	0.009	-0.396	0.367	-0.356	0.002	-0.113
PUT (%)	CK	0.51±0.002 a	0.66±0.002 a	0.47±0.001 a	0.46±0.002 a	0.45±0.001 a	0.61±0.001 a
	T	0.43±0.002 b	0.52±0.003 b	0.54±0.002 b	0.47±0.001 b	0.51±0.002 b	0.60±0.001 b
	PSI	0.17	0.21	-0.15	-0.03	-0.15	0.01
PUP (%)	CK	0.56±0.0009 a	0.68±0.0021 a	0.52±0.0007 a	0.53±0.0021 a	0.50±0.0010 a	0.71±0.0003 a
	T	0.52±0.0016 b	0.54±0.0013 b	0.59±0.0027 b	0.51±0.0013 b	0.58±0.0023 b	0.66±0.0024 b
	PSI	0.07	0.21	-0.13	0.04	-0.16	0.07

PR: 根磷积累量; PS: 茎磷积累量; PL: 叶磷积累量; PT: 块茎磷积累量; PP: 单株磷积累量; PUT: 块茎磷利用效率; PUP: 单株磷利用效率。CK、T和PSI同表3。数据为平均值±标准误; 不同小写字母表示处理与对照间差异显著( $P<0.05$ )。

PR: Phosphorus accumulation in roots; PS: Phosphorus accumulation in stems; PL: Phosphorus accumulation in leaves; PT: Phosphorus accumulation in tubers; PP: Phosphorus accumulation per plant; PUT: Phosphorus use efficiency of tubers; PUP: Phosphorus use efficiency per plant. CK, T and PSI are the same as shown in Table 3. Data are means±SE; different lowercase letters indicate significant differences between treatment and control ( $P<0.05$ ).

表5 马铃薯各指标耐亚磷酸盐系数(PTC)变异

Table 5 Variation of phosphite tolerant coefficient (PTC) of potato indexes

PTC	LI	EM	GSW	RD	SD	TD	DP	PR	PS	PL	PT	PP	PUT	NP	WP
Average	1.06	0.90	0.74	1.46	1.13	0.98	1.04	1.58	1.34	1.21	1.00	1.08	0.99	1.05	1.09
Maximum	1.41	1.09	0.87	2.74	1.46	1.35	1.30	3.05	1.71	1.44	1.31	1.40	1.15	1.35	1.58
Minimum	0.85	0.63	0.46	0.78	0.69	0.70	0.71	0.55	0.70	0.80	0.61	0.63	0.79	0.83	0.78
Range	0.56	0.46	0.42	1.97	0.77	0.64	0.59	2.51	1.01	0.64	0.70	0.76	0.36	0.52	0.81
Coefficient of variation (%)	18.97	19.27	21.76	57.29	22.64	24.05	19.80	58.29	28.08	19.07	26.05	25.87	15.54	18.88	29.09

LI: 叶面积指数; EM: 蒸腾速率; GSW: 气孔导度; RD: 根干重; SD: 茎干重; TD: 块茎干重; DP: 单株干重; NP: 单株薯数; WP: 单株薯重。PR、PS、PL、PT、PP和PUT同表4。

LI: Leaf area index; EM: Transpiration rate; GSW: Stomatal conductance; RD: Root dry weight; SD: Stem dry weight; TD: Tuber dry weight; DP: Dry weight per plant; NP: Number of potatoes per plant; WP: Potato weight per plant. PR, PS, PL, PT, PP and PUT are the same as shown in Table 4.

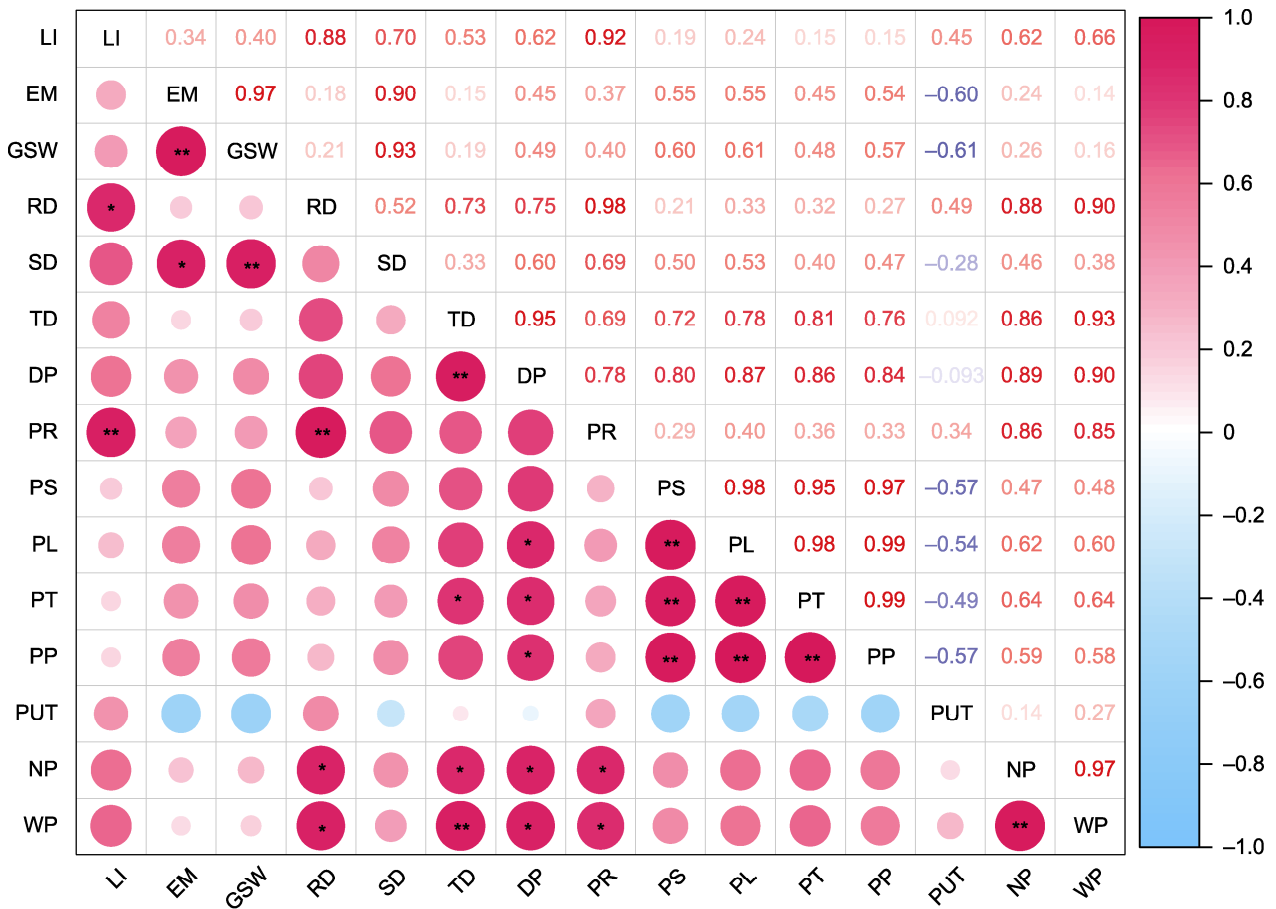
表6 不同品种马铃薯的耐亚磷酸盐系数(PTC)

Table 6 Phosphite tolerant coefficient (PTC) of different potato genotypes

Genotypes	LI	EM	GSW	RD	SD	TD	DP	PR	PS	PL	PT	PP	PUT	NP	WP
C20	0.97	0.99	0.85	0.93	1.22	0.74	0.91	1.21	1.21	1.16	0.89	0.99	0.83	0.97	0.83
C31	0.91	1.09	0.87	0.97	1.23	1.01	1.11	1.16	1.71	1.41	1.27	1.40	0.79	1.02	1.04
C80	0.85	0.63	0.46	0.78	0.69	0.70	0.71	0.55	0.70	0.80	0.61	0.63	1.15	0.83	0.78
C115	1.11	0.79	0.66	2.31	1.04	1.35	1.30	2.29	1.62	1.44	1.31	1.36	1.03	1.35	1.58
D13	1.41	1.03	0.85	2.74	1.46	1.07	1.17	3.05	1.22	1.16	0.92	1.00	1.15	1.21	1.36
QS9	1.10	0.86	0.75	1.06	1.11	1.00	1.03	1.19	1.55	1.26	1.01	1.11	0.99	0.90	0.94

PR、PS、PL、PT、PP和PUT同表4。LI、EM、GSW、RD、SD、TD、DP、NP和WP同表5。

PR, PS, PL, PT, PP and PUT are the same as shown in Table 4. LI, EM, GSW, RD, SD, TD, DP, NP and WP are the same as shown in Table 5.



\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$

图4 亚磷酸盐处理下马铃薯各指标相关系数矩阵

PR、PS、PL、PT、PP和PUT同表4。LI、EM、GSW、RD、SD、TD、DP、NP和WP同表5。

Figure 4 Correlation coefficient matrix of potato indicators under phosphite treatment

PR, PS, PL, PT, PP and PUT are the same as shown in Table 4. LI, EM, GSW, RD, SD, TD, DP, NP and WP are the same as shown in Table 5.

## 2.7 主成分分析

### 2.7.1 各综合指标的载荷系数和贡献率

通过主成分分析可在损失较少信息量的前提下, 将较

多的测试指标转化为少量综合指标, 有效地浓缩和简化数据, 以弥补用单项指标进行评价的不足。对6个马铃薯品种的15个单项指标(变异系数>15%)的PTC

进行主成分分析,显示综合评价指标的贡献率排名前3的分别为59.29%、24.26%和14.06%,累计贡献率达97.61% (表7)。决定第1个综合指标大小的是块茎干重、单株干重、茎磷积累量、叶磷积累量、块茎磷积累量、单株磷积累量、单株结薯数以及单株薯重,该综合指标主要反映各部位的干物质、磷素积累和产量性状等信息。决定第2个综合指标大小的是根干重、根磷积累量以及块茎磷利用效率,该综合指标主要反映根部干重以及磷素积累等信息。决定第3个综合指标大小的是叶面积指数、蒸腾速率、气孔导度及茎干重,该综合指标主要反映光合参数等信息。

### 2.7.2 隶属函数分析和综合性状评价

对于同一综合指标(表8)  $F(X_1)$ 而言,经亚磷酸盐处理后,C115的 $U(X_1)$ 值最大(为1.00),表明C115在 $F(X_1)$ 表现为高度耐亚磷酸盐,而C80的 $U(X_1)$ 值最小(为0.00),表明C80在此综合指标上的亚磷酸盐耐性最差。根据3个综合指标的贡献率大小,可用公式(3)计算其权重 $W_j$ ,得到3个综合指标的权重分别为0.607、0.249和0.144 (表8)。

通过公式(4)–(6)分别计算各品种马铃薯耐亚磷酸盐综合指标值 $F(X_j)$ 、隶属函数值 $U(X_j)$ 和综合评价值( $D$ 值)。以 $D$ 值为标准,对各马铃薯品种的耐亚磷酸盐特性进行排序(表8),其中D13和C115的 $D$ 值位列前2,表明二者具有较好的亚磷酸盐耐性;C80的 $D$ 值最小,表明其对亚磷酸盐的耐性最差。

### 2.7.3 不同品种马铃薯耐亚磷酸盐特性聚类分析

采用欧氏平方和算法对 $D$ 值进行聚类分析(孙璐等,2012),可将6个马铃薯品种划分为3类(图5)。第1类为

C80,属于亚磷酸盐敏感类型;第2类为C20、C31和QS9,属于弱耐亚磷酸盐类型;第3类为D13和C115,属于高度耐亚磷酸盐类型。

表7 各综合指标的系数及贡献率

Table 7 Coefficients and contribution rates of each comprehensive indicator

Indexes	PC1	PC2	PC3
LI	0.214	0.294	0.315
EM	0.200	-0.261	0.416
GSW	0.211	-0.260	0.410
RD	0.241	0.355	0.093
SD	0.245	-0.073	0.460
TD	0.292	0.127	-0.284
DP	0.330	0.049	-0.106
PR	0.263	0.287	0.196
PS	0.272	-0.251	-0.165
PL	0.296	-0.204	-0.170
PT	0.285	-0.187	-0.263
PP	0.282	-0.230	-0.211
PUT	-0.069	0.499	-0.007
NP	0.286	0.208	-0.105
WP	0.282	0.245	-0.166
Eigen values	8.893	3.638	2.110
Contribution rate (%)	59.287	24.255	14.064
Cumulative contribution rate (%)	59.287	83.542	97.606

PR、PS、PL、PT、PP和PUT同表4。LI、EM、GSW、RD、SD、TD、DP、NP和WP同表5。

PR, PS, PL, PT, PP and PUT are the same as shown in Table 4. LI, EM, GSW, RD, SD, TD, DP, NP and WP are the same as shown in Table 5.

表8 各品种马铃薯的综合指标值 $F(X_j)$ 、权重( $W_j$ )、隶属函数值 $U(X_j)$ 、 $D$ 值及综合评价

Table 8 Comprehensive index values  $F(X_j)$ , index weight ( $W_j$ ), membership function values  $U(X_j)$ ,  $D$  values and comprehensive evaluation of each potato genotype

Genotypes	$F(X_1)$	$F(X_2)$	$F(X_3)$	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$	$D$ value	Total ranking
C20	3.61	0.42	0.56	0.49	0.24	0.80	0.48	5
C31	4.27	0.11	0.14	0.80	0.00	0.46	0.55	3
C80	2.50	0.81	0.17	0.00	0.81	0.34	0.25	6
C115	5.16	1.51	0.02	1.00	0.79	0.00	0.80	2
D13	5.08	2.08	1.10	0.90	1.00	1.00	0.94	1
QS9	3.89	0.54	0.23	0.60	0.40	0.46	0.53	4
$W_j$				0.607	0.249	0.144		

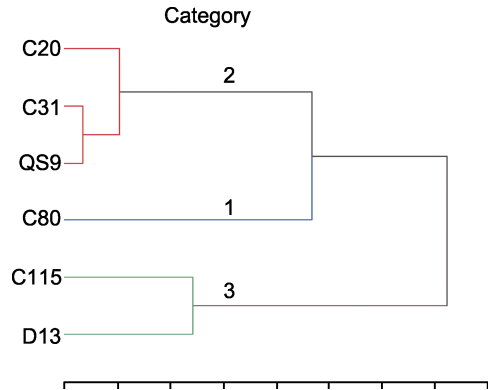


图5 6个马铃薯品种D值聚类

Figure 5 Clustering of D values of 6 potato genotypes

### 2.7.4 不同耐亚磷酸盐类型特征比较

第1类: 亚磷酸盐敏感型; 第2类: 弱耐亚磷酸盐型; 第3类: 高度耐亚磷酸盐型。亚磷酸盐处理后, 高度耐亚磷酸盐品种的叶面积指数、根干重、块茎干重、单株干重、根磷积累量、单株薯数及单株薯重均明显高于敏感型与弱耐性材料, 倍数关系在1.21–4.85之间(图6; 表9), 说明这7个指标在不同类型马铃薯品种中对亚磷酸盐的敏感性差异较大, 因此, 可将这7个指标作为筛选马铃薯耐亚磷酸盐的主要依据。

### 2.8 讨论与结论

马铃薯对亚磷酸盐的耐性受多种生理性状调控。植物

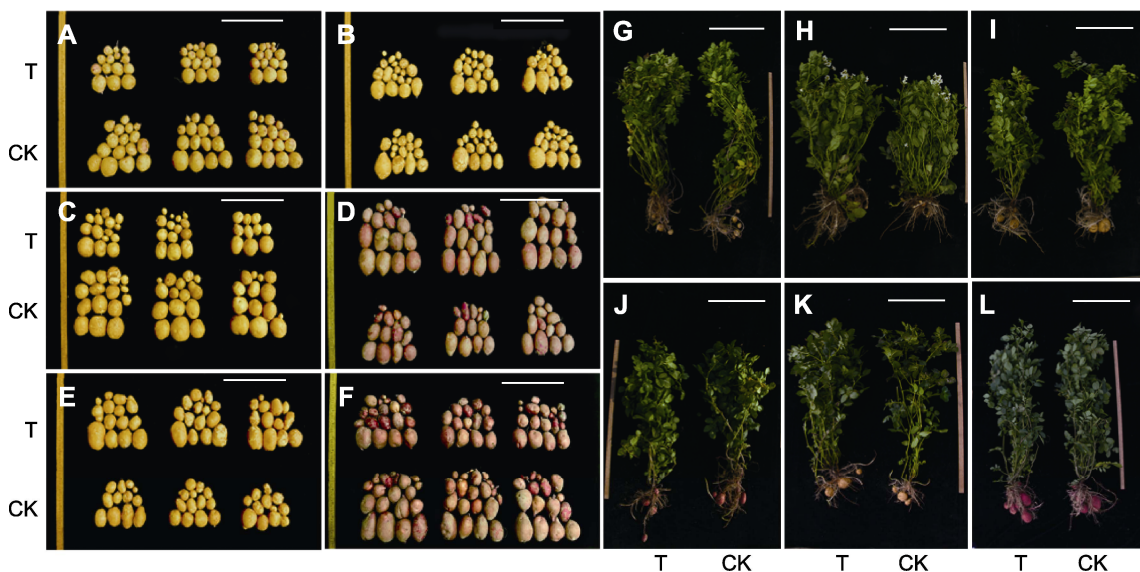


图6 不同马铃薯品种在亚磷酸盐处理和正常处理下的产量表现与生长状况

(A)–(F) C20、C31、C80、C115、D13和QS9收获时的产量表现(bars=24.5 cm); (G)–(L) C20、C31、C80、C115、D13和QS9栽后90天的生长状况(bars=31.3 cm)。CK和T同表2。

Figure 6 Yield and growth of different potato genotypes under phosphite treatment and normal treatment

(A)–(F) The yield performance of C20, C31, C80, C115, D13 and QS9 at harvest (bars=24.5 cm); (G)–(L) The growth status of C20, C31, C80, C115, D13 and QS9 90 days after planting (bars=31.3 cm). CK and T are the same as shown in Table 2.

表9 聚类结果中耐亚磷酸盐各类别的表现特征

Table 9 Performance characteristics of each phosphite-tolerant category in clustering results

Categories	The average value of the phosphite tolerant coefficient of each determination index														
	LI	EM	GSW	RD	SD	TD	DP	PR	PS	PL	PT	PP	PUT	NP	WP
First	0.85	0.63	0.46	0.78	0.69	0.70	0.71	0.55	0.70	0.80	0.61	0.63	1.15	0.83	0.78
Second	0.99	0.98	0.83	0.99	1.19	0.92	1.02	1.19	1.49	1.28	1.06	1.17	0.87	0.96	0.94
Third	1.26	0.91	0.75	2.53	1.25	1.21	1.23	2.67	1.42	1.30	1.12	1.18	1.09	1.28	1.47

PR、PS、PL、PT、PP和PUT同表4。LI、EM、GSW、RD、SD、TD、DP、NP和WP同表5。

PR, PS, PL, PT, PP and PUT are the same as shown in Table 4. LI, EM, GSW, RD, SD, TD, DP, NP and WP are the same as shown in Table 5.

在生长发育中通过调整外部形态和内部结构来适应环境(王吉祥等, 2021), 用单一性状无法准确反映马铃薯耐亚磷酸盐特性(李彩斌和郭华春, 2017)。前期本课题组对200份马铃薯材料的组培苗进行了亚磷酸盐耐性筛选, 得到不同耐性表现的材料, 但用组培苗无法评估产量。为进一步探明这些材料在田间的实际表现, 本研究以筛选出的5份不同耐性品种和商业种QS9为研究对象, 将其试管苗驯化后直栽大田, 对15个相关指标进行多元分析, 将不同品种马铃薯耐亚磷酸盐特性进行综合评价, 同时验证前期的结果。

通过将不同指标的测定值转化为耐亚磷酸盐系数, 消除了马铃薯品种自身的差异。变异系数的筛选保证了所选指标的有效性, 继而对所筛选指标的耐亚磷酸盐系数进行主成分分析, 将15个单项指标转化为3个独立的综合指标, 得到不同品种马铃薯生育中后期耐亚磷酸盐综合评价, 客观反映出各品种马铃薯的耐性。通过对各类型耐亚磷酸盐品种的特征比较, 得出7个代表性指标, 使得马铃薯耐亚磷酸盐耐性测定更加便捷, 同时为耐亚磷酸盐马铃薯品种的筛选提供依据。

本研究中, 高度耐性马铃薯的叶面积指数、根干重、块茎干重、单株干重、根磷积累量和产量在亚磷酸盐处理下比正常施肥处理均显著增加, 亚磷酸盐敏感和弱耐性马铃薯品种则无变化或显著降低。对拟南芥的研究表明, 在含正磷酸盐的培养基中, 添加低浓度亚磷酸盐不影响植物生长, 而添加高浓度(2.5 mmol·L<sup>-1</sup>)亚磷酸盐则会抑制植物生长, 且浓度越高, 抑制作用越明显。研究人员通过后续实验推测亚磷酸盐可能会干扰拟南芥对缺磷信号的感知能力, 进而影响对磷的吸收利用, 造成生长抑制效应(Ticconi et al., 2001)。这与马铃薯在土壤中种植时类似, 土壤本身含有一定量的正磷酸盐和亚磷酸盐, 在施加亚磷酸盐后, 亚磷酸盐敏感和弱耐性马铃薯品种表现不佳; 但是高度耐亚磷酸盐马铃薯品种则在产量、长势和磷积累量等方面表现出显著优势, 可能是由于这些品种通过某种机制抵御干扰或者具有转化和利用亚磷酸盐的能力, 具体分子机制有待深入研究。此外, 亚磷酸盐处理后, 6个马铃薯品种均表现为光合作用受抑制, 但高度耐亚磷酸盐马铃薯品种叶面积显著增大, 可为光合作用提供更多的叶绿素和光能, 抵消了亚磷酸盐对光合作用的不利影响。然而在分子层面, 亚磷酸

盐如何在这些高度耐性马铃薯品种中被有效利用, 进而影响叶面积和根长等形态指标还有待深入研究。值得注意的是, C80虽被划分为敏感型, 产量性状的变化幅度较大, 但在亚磷酸盐胁迫后其产量依旧不低于其它耐性品种, 后期可降低亚磷酸盐施用量再配施磷肥进一步探究其敏感性, 为开发新型磷肥提供依据。

综上所述, 亚磷酸盐处理后, 高度耐性马铃薯通过对根系、叶面积、磷转运蛋白等因素的调控及相互作用促进其生长和产量提高。目前有关亚磷酸盐在农业生产上的应用大多是作为叶面辅助肥料及农药杀菌剂等, 有关其耐性品种的筛选研究甚少。本研究对比不同马铃薯品种之间的亚磷酸盐耐受性差异, 为揭示马铃薯响应亚磷酸盐胁迫机制和选育高度耐亚磷酸盐品种提供参考。由于大部分杂草不耐受亚磷酸盐, 选育高度耐亚磷酸盐肥料的马铃薯新品种, 还可通过施加亚磷酸盐肥料减少除草剂的使用。在磷肥缺乏的地区, 施用亚磷酸盐肥料不易被土壤固定, 可避免正磷酸盐过度使用带来的问题, 同时保证马铃薯的产量与品质。

经筛选, 高度耐亚磷酸盐马铃薯有D13和C115; 弱耐亚磷酸盐有C20、C31和QS9; 亚磷酸盐敏感型为C80。

高度耐亚磷酸盐马铃薯对亚磷酸盐环境适应能力较强, 根表面积增大可增强植物对磷的吸收能力; 叶面积增大也增加了叶绿素含量及光合面积, 缓解光合抑制。在相同的亚磷酸盐处理下, 通过测定马铃薯的叶面积指数、根干重、块茎干重、单株干重、根磷积累量、单株薯数及单株薯重, 可快速鉴定和预测马铃薯耐亚磷酸盐耐性。研究结果为马铃薯耐亚磷酸盐品种选育和新型磷肥开发提供了科学依据。

## 作者贡献声明

张锋: 完成整体实验, 分析数据并撰写论文; 白江平, 孙超: 构思设计实验及修改论文; Richard Dormatey: 对大量组培苗种质进行耐亚磷酸盐特性初筛; 姚攀锋, 毕真真, 刘玉汇, 范又芳: 技术支持; 刘寅笃, 李成举, 王云姣, 张春利, 张莹: 指标测定。

## 参考文献

陈磊, 王盛锋, 刘荣乐, 汪洪 (2012). 不同磷供应水平下小麦

- 根系形态及根际过程的变化特征. 植物营养与肥科学报 **18**, 324–331.
- 戴海芳, 武辉, 阿曼古丽·买买提阿力, 王立红, 麦麦提·阿皮孜, 张巨松 (2014). 不同基因型棉花苗期耐盐性分析及其鉴定指标筛选. 中国农业科学 **47**, 1290–1300.
- 雷菲, 潘孝忠, 吴宇佳, 曾新宇, 曾建华, 张冬明 (2021). 基施亚磷酸钾对“琼辣3号”线椒养分吸收和土壤环境的影响. 分子植物育种 **19**, 8279–8286.
- 李宝玉, 高明杰, 高春雨, 余婧婧 (2017). 亚磷酸盐在农业上的应用及机制研究进展. 南京农业大学学报 **40**, 949–956.
- 李宝玉, 刘富强, 郭燕枝 (2021). 亚磷酸钾在马铃薯上的增产及抗病效果. 中国蔬菜 (9), 63–68.
- 李彩斌, 郭华春 (2017). 马铃薯品种耐弱光性评价及其指标的筛选. 中国农业科学 **50**, 3461–3472.
- 刘明, 范文静, 赵鹏, 靳容, 张强强, 朱晓亚, 王静, 李强 (2023). 甘薯耐低钾基因型苗期筛选及综合评价. 作物学报 **49**, 926–937.
- 屈冬玉, 谢开云, 金黎平, 庞万福, 卞春松, 段绍光 (2005). 中国马铃薯产业发展与食品安全. 中国农业科学 **38**, 358–362.
- 任士伟, 王亮亮, 张萍萍, 王娜 (2019). 喷施亚磷酸钾对番茄生长发育的影响. 黑龙江农业科学 (6), 50–53.
- 石瑶 (2002). 利用亚磷酸防治作物疫病. 中国农村科技 (5), 18.
- 孙璐, 周宇飞, 汪澈, 肖木辑, 陶冶, 许文娟, 黄瑞冬 (2012). 高粱品种萌发期耐盐性筛选与鉴定. 中国农业科学 **45**, 1714–1722.
- 王吉祥, 官焕宇, 屠祥建, 郭依沅, 赵嘉楠, 沈健, 栗振义, 孙娟 (2021). 耐亚磷酸盐紫花苜蓿品种筛选及评价指标的鉴定. 草业学报 **30**(5), 186–199.
- 王宁, 焦晓燕, 武爱莲, 王劲松, 董二伟, 郭珺, 丁玉川, 王立革 (2016). 生物炭对土壤磷、钾养分影响研究进展. 山西农业科学 **44**, 1402–1405, 1420.
- 杨春婷, 张永清, 马星星, 陈伟, 董璐, 张楚, 路之娟 (2018). 苦荞耐低磷基因型筛选及评价指标的鉴定. 应用生态学报 **29**, 2997–3007.
- 张邦喜, 李渝, 秦松, 李国学, 蒋太明 (2016). 长期施肥下黄壤无机磷组分空间分布特征. 华北农学报 **31**(3), 212–217.
- 张汝, 李晓荣, 张美俊, 乔治军, 陈凌 (2017). 苗期耐亚磷酸盐糜子品种的筛选. 山西农业科学 **45**, 1310–1314.
- 张韞 (2011). 土壤·水·植物理化分析教程. 北京: 中国林业出版社. pp. 229–232.
- Achary VMM, Ram B, Manna M, Datta D, Bhatt A, Reddy MK, Agrawal PK (2017). Phosphite: a novel P fertilizer for weed management and pathogen control. *Plant Biotechnol J* **15**, 1493–1508.
- Baker A, Ceasar SA, Palmer AJ, Paterson JB, Qi WJ, Muench SP, Baldwin SA (2015). Replace, reuse, recycle: improving the sustainable use of phosphorus by plants. *J Exp Bot* **66**, 3523–3540.
- Broschat TK (2006). Effects of phosphorous and phosphoric acids on growth and phosphorus concentrations in container-grown tropical ornamental plants. *HortTechnology* **16**, 105–108.
- Cordell D, White S (2011). Peak phosphorus: clarifying the key issues of a vigorous debate about long-term phosphorus security. *Sustainability* **3**, 2027–2049.
- Dawson CJ, Hilton J (2011). Fertiliser availability in a resource-limited world: production and recycling of nitrogen and phosphorus. *Food Policy* **36**, S14–S22.
- Dormatey R, Sun C, Ali K, Qin TY, Xu DR, Bi ZZ, Bai JP (2021). Influence of phosphite supply in the MS medium on root morphological characteristics, fresh biomass and enzymatic behavior in five genotypes of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Horticultrae* **7**, 265.
- Fang ZY, Shao C, Meng YJ, Wu P, Chen M (2009). Phosphate signaling in *Arabidopsis* and *Oryza sativa*. *Plant Sci* **176**, 170–180.
- Glinicki R, Sas-Paszt L, Jadczyk-Tobjasz E (2010). The effect of plant stimulant/fertilizer “Resistim” on growth and development of strawberry plants. *J Fruit Ornam Plant Res* **18**, 111–124.
- Grant CA, Flaten DN, Tomasiewicz DJ, Sheppard SC (2001). The importance of early season phosphorus nutrition. *Can J Plant Sci* **81**, 211–224.
- King M, Reeve W, Van der Hoek MB, Williams N, McComb J, O’Brien PA, Hardy GESJ (2010). Defining the phosphite-regulated transcriptome of the plant pathogen *Phytophthora cinnamomi*. *Mol Genet Genom* **284**, 425–435.
- Lobato MC, Olivieri FP, Altamiranda EAG, Wolski EA, Daleo GR, Caldiz DO, Andreu AB (2008). Phosphite compounds reduce disease severity in potato seed tubers and foliage. *Eur J Plant Pathol* **122**, 349–358.
- López-Arredondo DL, Leyva-González MA, González-Morales SI, López-Bucio J, Herrera-Estrella L (2014). Phosphate nutrition: improving low-phosphate tolerance in crops. *Annu Rev Plant Biol* **65**, 95–123.
- Lovatt CJ, Mikkelsen RL (2006). Phosphite fertilizers: what are they? Can you use them? What can they do? *Better*

*Crops* **90**, 11–13.

**McDonald AE, Grant BR, Plaxton WC** (2001). Phosphite (phosphorous acid): its relevance in the environment and agriculture and influence on plant phosphate starvation response. *J Plant Nutr* **24**, 1505–1519.

**Rickard DA** (2000). Review of phosphorus acid and its salts as fertilizer materials. *J Plant Nutr* **23**, 161–180.

**Schachtman DP, Reid RJ, Ayling SM** (1998). Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. *Plant Physiol* **116**, 447–453.

**Schroetter S, Angeles-Wedler D, Kreuzig R, Schnug E** (2006). Effects of phosphite on phosphorus supply and growth of corn (*Zea mays*). *Landbauforschung Volkenrode* **56**, 87–99.

**Singh VK, Wood SM, Knowles VL, Plaxton WC** (2003). Phosphite accelerates programmed cell death in phosphate-starved oilseed rape (*Brassica napus*) suspension cell culture. *Planta* **218**, 233–239.

**Thao HTB, Yamakawa T** (2009). Phosphite (phosphorous acid): fungicide, fertilizer or bio-stimulator? *Soil Sci Plant Nutr* **55**, 228–234.

**Ticconi CA, Delatorre CA, Abel S** (2001). Attenuation of phosphate starvation responses by phosphite in *Arabidopsis*. *Plant Physiol* **127**, 963–972.

**Varadarajan DK, Karthikeyan AS, Matilda PD, Raghouthama KG** (2002). Phosphite, an analog of phosphate, suppresses the coordinated expression of genes under phosphate starvation. *Plant Physiol* **129**, 1232–1240.

## Screening and Evaluation of Phosphite-tolerant Potatoes

Feng Zhang, Richard Dormatey, Yindu Liu, Chengju Li, Yunjiao Wang, Chunli Zhang, Ying Zhang  
Youfang Fan, Panfeng Yao, Zhenzhen Bi, Yuhui Liu, Jiangping Bai\*, Chao Sun\*

Gansu Key Lab of Crop Improvement & Germplasm Enhancement/State Key Laboratory of Aridland Crop Science/College of  
Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

**Abstract** Phosphorus is one of the indispensable nutrients for plant growth and development. Orthophosphate (P) content in the soil is particularly rich, but due to the fixation of the soil, the effective phosphorus content that can be absorbed and utilized by plants is not high. Therefore improving the absorption and utilization capacity of plants to soil phosphorus, or optimizing the application of phosphate fertilizer has become an urgent problem that needs to be solved. The content of phosphite (PH) in soil is second only after orthophosphate, which has the characteristics of higher solubility, two-way transport between plant xylem and phloem, but is not easy to be fixed by soil. Research on phosphite as phosphate fertilizer to replace orthophosphate fertilizer and phosphite-tolerant crop varieties breeding has rarely been reported. Therefore, in this study, five introduced potato (*Solanum tuberosum*) genotypes and one commercial variety Qingshu No.9 (QS9) were selected as research materials, and the seedlings were directly planted into the test field after domestication and refining, and normal phosphate fertilizer treatment and phosphite substitution treatment were set up to determine the phenotype, photosynthesis, dry matter and other indicators of different genotypes. Moreover, the phosphite tolerant coefficient (PTC) of each indicator was used as the measurement basis. Comprehensive evaluation of the PH resistance of different potato genotypes was conducted based on principal component analysis and other methods. The obtained results showed that the six potato varieties can be classified into three types: highly phosphite-tolerant (C115, and D13), weakly phosphite-tolerant (C20, C31, and QS9) and phosphite-sensitive (C80). This study evaluated the tolerance of different potato genotypes to phosphite, thus providing scientific basis for the selection of phosphite-tolerant varieties and the development of new phosphite fertilizers.

**Key words** potato, phosphite tolerant coefficient, principal component analysis, membership function analysis, cluster analysis, comprehensive evaluation

Zhang F, Dormatey R, Liu YD, Li CJ, Wang YJ, Zhang CL, Zhang Y, Fan YF, Yao PF, Bi ZZ, Liu YH, Bai JP, Sun C (2024). Screening and evaluation of phosphite-tolerant potatoes. *Chin Bull Bot* 59, 544–557.

\* Authors for correspondence. E-mail: baijp@gsau.edu.cn; sunc@gsau.edu.cn

(责任编辑: 白羽红)

### 通讯作者/团队简介

白江平, 甘肃农业大学农学院教授, 博士生导师, 中国作物学会常务理事, 全国农业生化与分子生物学学会常务理事, 中国欧美同学会第八届理事会理事。2020年受聘于农业农村部国家马铃薯产业体系岗位科学家。主要研究方向为马铃薯遗传育种、作物逆境生理及分子生物学。研究团队利用遗传学、基因组学、蛋白质组学以及计算机科学等手段, 选育优质马铃薯抗旱种质资源并解析其品种改良的基础遗传学规律, 精细定位重要农艺性状的遗传控制位点, 通过优化全基因组选择模型以及应用基因组编辑技术开发新一代植物育种体系。