

李春华,汪吉东,张 辉,等. 磷缺乏对不同甘薯品种根系生长及磷素吸收的影响[J].江苏农业学报,2019,35(1):91-95.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2019.01.013

## 磷缺乏对不同甘薯品种根系生长及磷素吸收的影响

李春华, 汪吉东, 张 辉, 张永春

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业部江苏耕地保育科学观测实验站,江苏 南京 210014)

**摘要:** 为研究不同甘薯品种生育前期对磷素(P)缺乏的生长响应特征,以苏薯 11(S11)和苏薯 17(S17)为试验材料,设置低磷和施磷 2 个处理,采用土柱培养法在移栽后 35 d 分析和测定甘薯根系形态、磷吸收量、土壤有效磷含量及磷酸酶活性。结果显示:(1)与施磷处理相比,低磷处理降低了甘薯的生物量,其中苏薯 11 单株生物量降幅达 19.5% ( $P<0.05$ );此外,苏薯 11 的比根长和比表面积在低磷处理下显著增加,增幅分别达到 41.8% ( $P<0.05$ ) 和 50.9% ( $P<0.05$ );虽然苏薯 17 单株生物量降幅不显著,但比根长在低磷处理下显著增加 49.6% ( $P<0.05$ )。(2)低磷处理降低了甘薯对磷的吸收,苏薯 11 体内磷积累量降幅大于苏薯 17;增施磷肥后促进了苏薯 11 对磷的吸收,导致其磷总积累量高于苏薯 17。(3)与苏薯 17 相比,低磷处理提高了苏薯 11 土壤中的磷酸酶活性;同一处理下种植 2 个品种甘薯的土壤中有有效磷含量基本持平。可见,磷素缺乏抑制了甘薯生育前期的生长及其对磷素的吸收,其中苏薯 11 对低磷胁迫的响应大于苏薯 17。

**关键词:** 甘薯; 低磷; 根系; 生物量; 磷吸收

**中图分类号:** S531.062

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4440(2019)01-0091-05

## Responses of root growth and phosphorus uptake for sweet potatoes under low phosphorus supply

LI Chun-hua, WANG Ji-dong, ZHANG Hui, ZHANG Yong-chun

(*Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Scientific Observing and Experimental Station for Farmland Conservation (Jiangsu), Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China*)

**Abstract:** To study the response characteristics of sweet potatoes exposed to the phosphorus (P) deficiency at the early growth period, a soil column experiment was conducted with two sweet potato varieties, Sushu11 (S11) and Sushu17 (S17), under P deficiency and P sufficiency. And the root morphology, P uptake, soil available P content and phosphatase activity of sweet potatoes were determined at 35 days after transplanting. The results showed that P deficiency inhibited the total dry matter (DM) of sweet potatoes, with significant ( $P<0.05$ ) reduction in S11 (19.5%) compared with that under P sufficiency. Besides, significant ( $P<0.05$ ) increments for the specific root length (41.8%) and specific root surface area of S11 (50.9%) were observed. The specific root length of S17 was also increased significantly ( $P<0.05$ ) with 49.6% induced by P deficiency although no significant reduction existed in the total DM. P uptake was decreased and larger reduction of P accumulation in S11 was detected than that in S17 treated by the P deficiency. Whereas, total P accumulation of S11 was higher than that of S17 when increasing the phosphorus fertilizer. For S11, the soil phosphatase activity was enhanced under the P deficiency when compared to S17. However, the

收稿日期:2018-09-26

基金项目:江苏省博士后科研资助计划项目(2018K033A);现代农业产业体系专项(CARS-10-B-9);江苏省农业科技自主创新基金项目[ CX (17)-1001 ]

作者简介:李春华(1986-),女,山东泰安人,博士,助理研究员,主要从事植物生理与营养研究,(E-mail)791508481@qq.com

通讯作者:张永春,(E-mail)yczhang66@sina.com

contents of available P in soil planted the S11 and S17 were similar under the same P treatment. In conclusion, P deficiency inhibited the growth and P uptake of sweet potatoes at the early period and S11 was more sensitive to P deficiency than S17.

**Key words:** sweet potato; phosphorus deficiency; root; dry matter; phosphorus uptake

甘薯 (*Ipomoea batatas* L.) 作为重要的粮食和能源作物<sup>[1-3]</sup>, 其产量的稳定和提高对于农业和工业的可持续发展具有重要意义<sup>[4]</sup>。在甘薯生长发育过程中, 由于根原基形成早晚及生长环境条件的差异, 一部分根发生木质化形成柴根, 另一部分则发育形成块根<sup>[5]</sup>, 因此甘薯生长前期的环境因素对根系发育和分化至关重要, 并影响甘薯对养分的吸收与利用。

磷是作物生长发育必需的大量营养元素之一, 尽管土壤中总磷含量很高, 但由于无机磷酸盐移动性差、溶解性低, 导致土壤中能够被作物直接吸收利用的有效磷浓度很低 (低于 10 mmol/L), 使作物处于低磷胁迫的亚健康状态<sup>[6]</sup>。因此磷营养缺乏已成为限制农业生产的主要环境因素之一<sup>[7]</sup>。作物缺磷时, 一般表现出叶面积减小、分支和分蘖减少、植株矮小、根冠比增加等特征<sup>[8-8]</sup>, 同时作物体内碳、氮代谢过程会受到抑制<sup>[10]</sup>, 从而影响作物体内糖类和蛋白质的合成与转运<sup>[11-12]</sup>。此外, 有研究结果表明, 缺磷还会影响作物根系对钙、镁、铁、锰、锌等矿质元素的吸收<sup>[13]</sup>。

磷对甘薯生长、发育都有显著的影响, 它能促进根系生长, 增强光合作用, 促进碳水化合物合成、运输和贮存, 增加薯块的淀粉含量, 提高产量等<sup>[14]</sup>。目前有关养分缺乏对甘薯生长影响的研究多集中在氮和钾<sup>[15-16]</sup>, 磷缺失对甘薯影响的相关报道较少, 且多为水培和砂培研究<sup>[17-18]</sup>。同时由于甘薯是喜钾作物, 生产中往往更重视钾肥的投入而忽视磷肥的施用<sup>[19]</sup>。

本课题组在前期水培研究中发现, 不同甘薯品种对缺磷的响应具有明显差异。在农业生产中, 甘薯多种植于肥力较贫瘠的土壤中, 缺磷现象较为常见。尤其在甘薯主产区, 由于长期种植甘薯, 土壤有效磷缺乏非常普遍。明确生育前期不同品种甘薯对缺磷的响应差异以及对土壤磷素有效性的反馈效应, 有助于合理指导甘薯后期的生长管理。因此, 本研究主要从甘薯生长、磷素吸收和磷素供应方面解析不同甘薯品种对磷素缺乏的响应特点。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于 2017 年 9 月-12 月在江苏省农业科学院试验大棚内进行, 供试甘薯品种为苏薯 11 和苏薯 17。土壤为滨海潮土, 其基本理化性状为 pH 8.10, 有机质 5.18 g/kg, 碱解氮 19.20 mg/kg, 有效磷 5.71 mg/kg, 速效钾 224.10 mg/kg。采用土柱培养

法, 将高 60 cm、直径 12 cm 的 PVC 管纵向分成两半后再用箍重新固定, 并用胶带将切缝密封, 每个土柱装 6.0 kg 风干土。

### 1.2 试验与设计

取生长一致的甘薯苗, 剪切茎尖以下约 25 cm 长的薯蔓, 移栽时薯苗倾斜埋入土内约 10 cm (含 2 个茎节), 每个土柱移栽 1 株。各处理氮、钾施用量相同, 均为 1 kg 风干土施氮 (N) 100 mg, 施钾 ( $K_2O$ ) 100 mg。磷素处理设置 2 个水平: 0 mg/kg (低磷处理) 和 100 mg/kg (施磷对照)。氮、钾、磷肥源分别为尿素 (46% N)、硫酸钾 (50%  $K_2O$ ) 和过磷酸钙 (12%  $P_2O_5$ )。甘薯移栽前 2 d 一次性浇足水, 甘薯生长过程中通过称重法使土壤含水量保持在田间最大持水量的 60% 左右。每一处理设置 8 个重复。

### 1.3 样品采集与分析

植物样品的采集: 移栽后 35 d, 将土柱纵向分开, 甘薯植株分成地上部和根系。地上部 105 °C 杀青 30 min 后, 80 °C 烘至恒质量。从土中小心取出根系, 洗净, 用根系扫描仪 (LA1600 + scanner, Canada) 扫描获得根系图像, 再用根系分析软件 (Winrhizo2012a, Canada) 进行根系指标分析。扫描结束后, 将根系杀青, 80 °C 烘至恒质量。称量地上部和根系质量, 粉碎过筛, 经  $H_2SO_4-H_2O_2$  消解后, 采用钼锑抗比色法测定磷含量。

土壤样品的采集: 培养土柱分开后, 分别收集不同处理的土壤样品, 风干, 分别过 10 目和 100 目筛后用于不同指标的测定。土壤有效磷含量的测定采用钼锑抗比色法, 土壤磷酸酶活性的测定采用磷酸苯二钠比色法。

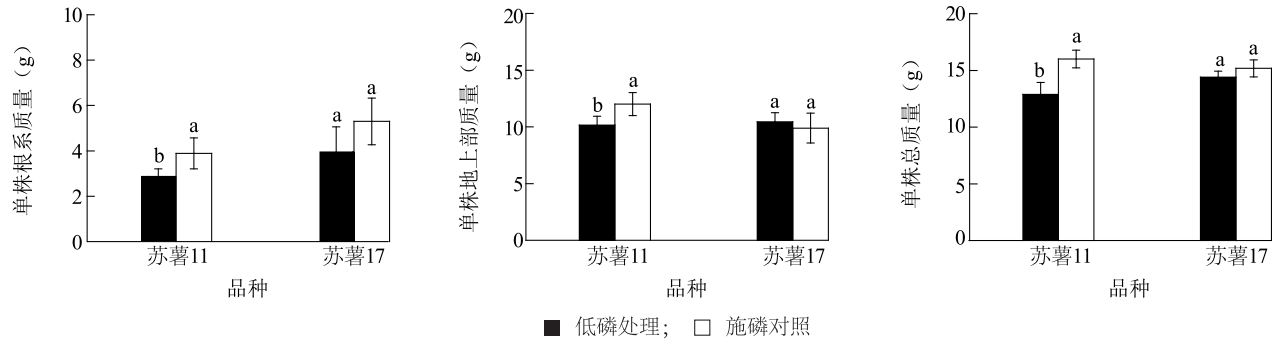
### 1.4 数据处理与分析

采用 SPSS22.0 软件进行统计分析, 用 One-way ANOVA 方法进行单因素方差分析, 方差分析的检验显著性概率临界值为 0.05。应用 Origin8.0 软件作图。

## 2 结果

### 2.1 磷素缺乏对不同品种甘薯根系形态的影响

与施磷对照相比, 低磷处理降低了甘薯的生物量, 其中苏薯 11 根系和地上部生物量降幅显著, 分别达到 26.7% ( $P<0.05$ ) 和 15.5% ( $P<0.05$ )。对于单株而言, 低磷处理显著降低了苏薯 11 的总生物量, 降幅达到 19.5% ( $P<0.05$ ), 苏薯 17 单株生物量虽有所下降, 但降幅并不显著 (图 1)。



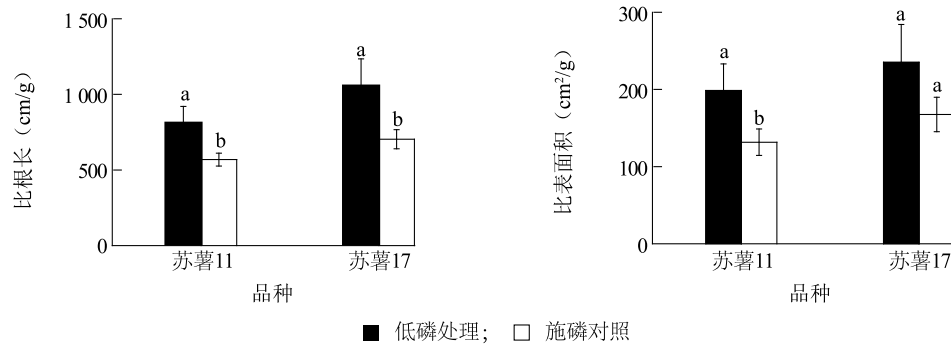
同一品种不同字母表示低磷处理与施磷对照之间生物量存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

图1 低磷处理对不同品种甘薯根系和地上部生物量的影响

Fig.1 Effects of low phosphorus treatment on root and aboveground dry matter (DM) of different sweet potatoes

虽然低磷处理降低了甘薯的生物量,但增加了甘薯的比根长和比表面积(图2)。与施磷对照相比,苏薯11的比根长和比表面积在低磷条件下显著

增加,增幅分别达到41.8% ( $P < 0.05$ )和50.9% ( $P < 0.05$ ),苏薯17的比根长也显著增加了49.6% ( $P < 0.05$ )。



同一品种不同字母表示低磷处理与施磷对照之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

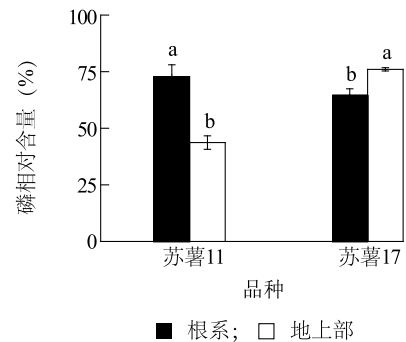
图2 低磷处理对不同品种甘薯比根长和比表面积的影响

Fig.2 Effects of low phosphorus treatment on specific root length and surface area of different sweet potatoes

## 2.2 磷素缺乏对不同品种甘薯磷素吸收的影响

在低磷处理下不同甘薯品种不同器官中磷的相对含量不同,其中苏薯11根系中磷的相对含量显著高于地上部,而苏薯17根系与地上部中磷的相对含量变化趋势与苏薯11相反(图3)。

低磷处理降低了甘薯体内磷的积累量,苏薯11的磷积累量降幅大于苏薯17。相同处理下,苏薯17根系中磷的积累量高于苏薯11,但差异不显著。低磷处理下苏薯11地上部磷的积累量显著低于苏薯17,但增施磷肥后促进了苏薯11对磷的吸收,导致总的磷素积累量高于苏薯17。此外,品种、磷处理以及它们的交互作用均显著影响甘薯体内磷的积累量(表1)。



P 相对含量 = 低磷处理的甘薯体内磷含量 / 施磷对照的甘薯体内磷含量。同一品种不同字母表示根系与地上部之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

图3 低磷处理对甘薯不同部位磷相对含量的影响

Fig.3 Effects of low phosphorus treatment on relative content of phosphorus in different parts of sweet potatoes

表1 低磷处理下不同品种甘薯体内磷积累量

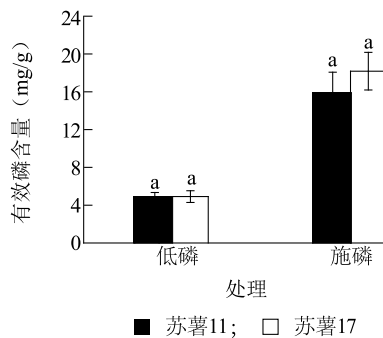
Table 1 Phosphorus accumulation in different sweet potatoes under low phosphorus treatment

品种	处理	单株磷积累量 (mg)		
		根系	地上部	总量
苏薯 11	低磷	2.26±0.31b	4.11±0.95b	6.49±1.05b
	施磷	4.91±1.16a	11.75±3.26a	16.66±3.81a
苏薯 17	低磷	2.85±0.46b	5.65±0.61a	8.63±0.53b
	施磷	5.77±1.10a	7.06±1.19a	12.44±2.01a
品种		**	**	*
磷		**	**	**
品种×磷		ns	**	*

\*、\*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著, ns 表示无显著差异。

### 2.3 磷素缺乏对土壤有效磷含量及磷酸酶活性的影响

总体而言,低磷条件下种植苏薯 11 与苏薯 17 的土壤中有有效磷含量基本持平。增施磷肥明显提高了土壤中有有效磷含量,种植苏薯 17 的土壤中有有效磷含量高于苏薯 11,但差异不显著(图 4)。



同一处理不同字母表示不同品种之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

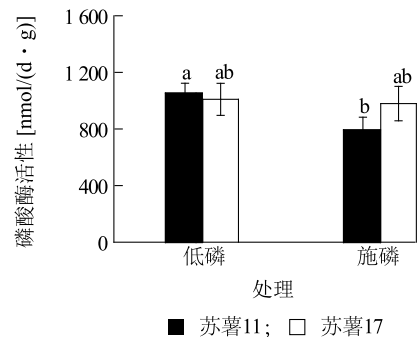
图4 低磷处理对种植不同品种甘薯的土壤中有有效磷含量的影响

Fig.4 Effects of low phosphorus treatment on available phosphorus content in soils planted different sweet potato varieties

低磷处理下种植苏薯 11 和苏薯 17 的土壤中磷酸酶活性没有明显差异,增施磷肥后种植苏薯 17 的土壤中磷酸酶活性略高于苏薯 11。对于苏薯 11 而言,低磷处理下土壤磷酸酶活性要高于施磷对照,增幅达 32.7% ( $P < 0.05$ ) (图 5)。

## 3 讨论

作物的生长受栽培措施、环境因子等影响,其中



不同字母表示差异达到 0.05 显著水平。

图5 低磷处理对种植不同品种甘薯的土壤磷酸酶活性的影响

Fig.5 Effects of low phosphorus treatment on phosphatase activity in soils planted different sweet potato varieties

土壤养分是影响作物生长的主要因素之一<sup>[20]</sup>。不同作物对养分胁迫的响应特征不同,根系最先感知胁迫而后通过信号转导调整自身形态变化和代谢反应<sup>[21]</sup>。养分缺乏会通过改变根系数量、长度、直径等改变作物的根系形态,而改变的程度取决于养分的缺乏程度<sup>[22]</sup>。本研究中发现低磷处理导致甘薯生物量的降低,其中苏薯 11 生物量降幅显著,说明苏薯 11 对磷素的需求量较大,生育前期磷素缺乏会抑制其前期生长。

作物生长受抑,会影响其对养分的吸收<sup>[23-24]</sup>。本研究低磷处理下甘薯体内磷素积累量显著减少,与施磷对照相比,苏薯 11 体内磷素积累量降幅大于苏薯 17。另一方面,低磷处理提高了苏薯 11 根系中磷的相对含量,综合各指标分析,我们推测由于苏薯 11 比根长和比表面积在低磷处理下显著增加,因而促进了对土壤中有有效磷的吸收,提高了其根系中磷的相对含量。Zhang 等<sup>[25]</sup>研究发现,在对植株总生物量无明显影响的前提下,增加根毛长度可以改善磷吸收效率,这与我们的研究结论基本吻合。尽管低磷处理提高了苏薯 17 根系对有效磷的吸收,但大部分转移至地上部,提高了磷素在甘薯地上部的分配,从而降低了根系中磷的相对含量。

目前相关研究多集中于甘薯的产量以及对养分的吸收利用,对土壤中磷素有效性的关注较少<sup>[26-28]</sup>。本研究中发现低磷处理提高了种植苏薯 11 的土壤中酸性磷酸酶的活性,促进了土壤中有有效磷的释放。由于苏薯 11 对磷素的吸收量大于苏薯 17,导致种植苏薯 11 和苏薯 17 的土壤中有有效磷含



量基本持平(约 4.91 mg/kg),但均低于甘薯种植前土壤有效磷含量(5.71 mg/kg),说明土壤中磷素的释放速率小于甘薯的吸收速率,导致土壤中有效磷含量下降。而增施磷肥后,与苏薯 17 相比,种植苏薯 11 的土壤中有有效磷含量较低,结合生物量与磷吸收量分析,说明增施磷肥促进了苏薯 11 的生长,并提高了其对磷素的吸收,这为后期薯块膨大和生长奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] 刘庆昌. 甘薯在我国粮食和能源安全中的重要作用[J]. 科技导报, 2004(9): 21-22.
- [2] 贾赵东,马佩勇,边小峰,等. 高淀粉多抗甘薯新品种苏薯 29 的选育[J]. 南方农业学报, 2018,49(5):848-856.
- [3] VINCENT L. Tropical root and tuber crops: Cassava, sweet potato, yams and aroids [M]. Oxford shire, UK: CABI Publishing, 2008: 97.
- [4] 马代夫,李 强,曹清河,等.中国甘薯产业及产业的发展与展望[J]. 江苏农业学报, 2012, 28 (5): 969-973.
- [5] KIM Y H, PARK S C, JI C Y. Diverse antioxidant enzyme levels in different sweet potato root types during storage root formation [J]. Plant Growth Regulation, 2015, 75(1):155-164.
- [6] RAGHOTHAMA K G, KARTHIKEYAN A S. Phosphate acquisition[J]. Plant and Soil, 2005, 274(1): 37-49.
- [7] LÓPEZ-ARREDONDO D L, LEYVA-GONZÁLEZ M A, GONZÁLEZ-MORALES S I, et al. Phosphate nutrition:improving low-phosphate tolerance in crops[J]. Annual Review of Plant Biology, 2014, 65(1): 95-123.
- [8] 张 森,赵书岗,耿丽平,等. 缺磷对不同作物根系形态及体内养分浓度的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 577-585.
- [9] 刘 灵,廖 红,王秀荣,等. 不同根构型大豆对低磷的适应性变化及其与磷效率的关系[J]. 中国农业科学, 2008, 41(4): 1089-1099.
- [10] 赵宪凤,刘卫群,王树会. 氮、磷、钾对烤烟碳氮代谢关键酶活性及其经济效益的影响[J]. 华北农学报, 2012, 27(4):181-185.
- [11] 王旭东,于振文,石 玉,等. 磷对小麦旗叶氮代谢有关酶活性和籽粒蛋白质含量的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(3):339-344.
- [12] FATIMA Z, AND M Z, CHAUDHARY M F. Effect of rhizobium strains and phosphorus on growth of soybean (*Glycine max*) and survival of rhizobium and P solubilizing bacteria [J]. Pakistan Journal of Botany, 2006, 38(2):459-464.
- [13] 朱美红,蔡妙珍,吴韶辉,等. 磷对铝胁迫下荞麦元素吸收与运输的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2):183-187.
- [14] 江苏省农业科学院,山东省农业科学院主编. 中国甘薯栽培学[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1984.
- [15] 汪吉东,王火焰,许仙菊,等. 低钾胁迫下不同钾效率甘薯的钾吸收利用规律研究[J]. 土壤, 2016,48(1):42-47.
- [16] 安 霞,董 月,吴建燕,等. 氮肥形态对甘薯产量和养分吸收的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(5):1049-1054.
- [17] 宁运旺,马洪波,许仙菊,等. 氮磷钾缺乏对甘薯前期生长和养分吸收的影响[J]. 中国农业科学, 2013,46(3):486-495.
- [18] 马若囡,刘 庆,李 欢,等.缺磷胁迫对甘薯前期根系发育及养分吸收的影响[J]. 华北农学报,2017,32(5):171-176.
- [19] 张爱君,李洪民,唐忠厚,等. 长期不施磷肥对甘薯产量与品质的影响[J]. 华北农学报, 2011, 26(增刊):104-108.
- [20] 平文超,张永江,刘连涛,等. 棉花根系生长分布及生理特性的研究进展[J].棉花学报, 2012, 24(2):183-190.
- [21] LYNCH J. Root architecture and plant productivity [J]. Plant Physiology, 1995, 109(1):7-13.
- [22] GRUBER B D, GIEHL R F H, FRIEDEL S, et al. Plasticity of the *Arabidopsis* root system under nutrient deficiencies [J]. Plant Physiology, 2013, 163(1):161-179.
- [23] 吴 楚,王政权,范志强,等. 氮胁迫对水曲柳幼苗养分吸收、利用和生物量分配的影响[J].应用生态学报, 2004, 15(11): 2034-2038.
- [24] 王 群,张学林,李全忠,等. 紧实胁迫对不同土壤类型玉米养分吸收、分配及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(21):4356-4366.
- [25] ZHANG C, SIMPSON R J, KIM C M, et al. Do longer root hairs improve phosphorus uptake? Testing the hypothesis with transgenic *Brachypodium distachyon* lines overexpressing endogenous RSL genes[J]. New Phytologist, 2018, 217(4):1654-1666.
- [26] 宁运旺,张永春,朱绿丹,等. 甘薯的氮磷钾养分吸收及分配特性[J].江苏农业学报, 2011, 27(1):71-74.
- [27] 宁运旺,曹炳阁,朱绿丹,等. 施钾水平对甘薯干物质积累与分配和钾效率的影响[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(2):320-325.
- [28] 董 月,安 霞,张 辉,等. 不同品种甘薯的生物量累积、养分吸收和分配规律[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(2):313-318.

(责任编辑:张震林)