

网络出版时间:2019-03-07 13:33 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2019.09.012
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20190307.1332.024.html

干旱条件下不同砧木对“蜜脆”苹果幼苗养分吸收利用的影响

赵 琪, 张志军, 李 超, 邹养军

(西北农林科技大学 园艺学院, 陕西 杨凌 712100)

【摘 要】【目的】用不同砧木苹果盆栽嫁接苗进行干旱试验,以筛选出干旱条件下矿质养分高效吸收利用的砧木。【方法】以不同砧木(G11、G30、Gx、G935、Pajam2、Pajam1、T337、M9、M26 和 G41)的 1 年生“蜜脆”苹果嫁接苗为材料,研究 2 种水分(正常供水和中度干旱)条件下,不同砧木对“蜜脆”生物量积累、叶片养分(N、K、P、Ca 和 Mg)含量、植株养分积累及利用的影响。【结果】(1)与正常供水(对照)相比,干旱胁迫后,以 T337 为砧木的“蜜脆”苹果嫁接苗净生物量和相对生长速率下降幅度最小,分别降低 64.26%和 50.12%;以 Pajam2 为砧木的“蜜脆”苹果嫁接苗下降幅度最大,分别降低 91.76%和 86.51%。(2)与对照相比,“蜜脆”苹果嫁接苗叶片 N、P、K、Ca、Mg 含量受干旱胁迫影响下降幅度较大的砧木依次为 G935(-9.33%)、M9(-35.70%)、G41(-27.59%)、G11(-29.63%)和 G30(-24.07%);而以 M26 为砧木的“蜜脆”苹果嫁接苗叶片养分含量变化幅度较小。(3)与对照相比,干旱胁迫后,以 Pajam2 为砧木的“蜜脆”苹果嫁接苗 N、P、K、Ca、Mg 吸收通量下降幅度均最大,分别降低 94.97%、95.97%、95.09%、94.62%和 95.04%;而以 M26 和 T337 为砧木的“蜜脆”苹果嫁接苗养分吸收通量下降幅度较小。(4)与对照相比,干旱降低了大多数“蜜脆”苹果嫁接苗的 N、Ca、Mg 利用效率,下降幅度最大的砧木依次是 Pajam1(-10.75%)、M9(-23.07%)和 M9(-23.43%),而提高了植株的 P、K 利用效率,上升幅度最大的砧木依次是 Gx(36.61%)和 G41(20.92%)。【结论】不同砧木“蜜脆”苹果嫁接苗对干旱胁迫的响应程度不同,并且在干旱条件下具有不同的养分吸收利用能力。干旱条件下,以 M26、Gx 和 T337 为砧木的“蜜脆”苹果苗养分吸收利用能力较强,而以 G11、G41 和 M9 为砧木的“蜜脆”苹果苗养分吸收利用能力较弱。

【关键词】 苹果砧木;干旱胁迫;果树营养;“蜜脆”苹果

【中图分类号】 S661.14

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2019)09-0103-09

Effects of different rootstocks on nutrient absorption and utilization of “Honey Crisp” apple seedlings under drought stress

ZHAO Qi, ZHANG Zhijun, LI Chao, ZOU Yangjun

(College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 “Honey Crisp” seedlings grafted on different apple rootstocks were tested under drought conditions to screen rootstocks for efficient absorption and utilization of mineral nutrients. 【Method】 One-year old “Honey Crisp” seedlings grafted on G11, G30, Gx, G935, Pajam2, Pajam1, T337, M9, M26 and G41 were used to investigate effects of rootstocks on biomass accumulation, leaf nutrients (N, K, P, Ca and Mg) contents, nutrient absorption and utilization. 【Result】 (1) Compared with the control, the net bio-

【收稿日期】 2018-07-19

【基金项目】 中央高校基本科研业务费专项“苹果酪氨酸脱羧酶基因 *MaTYDC* 在响应干旱中的功能研究”(2452017065);国家苹果产业技术体系项目“育种方法与抗性育种”(CARS-27);西北农林科技大学博士科研启动项目“多巴胺对苹果抗旱性的调控及作用机理研究”(2452016181)

【作者简介】 赵 琪(1993—),男,山西大同人,在读硕士,主要从事果树生理生态研究。E-mail: zhaوقي93@nwfufu.edu.cn

【通信作者】 邹养军(1969—),男,陕西乾县人,副教授,硕士生导师,主要从事果树生理生态及育种与生物技术研究。E-mail: yangjunzou@126.com

mass and relative growth rate of plants grafted on T337 decreased the least of 64.26% and 50.12% under the drought stress, respectively. The decreases of the Pajam2 were the largest of 91.76% and 86.51%, respectively. (2) Compared with the control, the plants with large decreases of N, P, K, Ca and Mg contents were G935 (−9.33%), M9 (−35.70%), G41 (−27.59%), G11 (−29.63%) and G30 (−24.07%). Plants on M26 had small changes in nutrients. (3) Under drought stress, the absorption fluxes of N, P, K, Ca and Mg of the plants grafted on Pajam2 decreased the most by 94.97%, 95.97%, 95.09%, 94.62% and 95.04%, respectively. The nutrient absorption fluxes of plants on M26 and T337 decreased less. (4) Compared with the control, drought reduced N, Ca and Mg utilization efficiency of most plants, and the largest declines were on plants grafted on Pajam1 (−10.75%), M9 (−23.07%) and M9 (−23.43%). The utilization efficiency of P and K increased with the largest increase on Gx (36.61%) and G41 (20.92%). 【Conclusion】 Under drought conditions, “Honey Crisp” seedlings grafted on different apple rootstocks had different drought resistance, and different mineral nutrient absorption and utilization ability. Seedlings grafted on M26, Gx and T337 had high ability of absorption and utilization of mineral nutrients, while those on G41, G11 and M9 had low ability.

Key words: apple rootstock; drought stress; fruit nutrition; “Honey Crisp” apple

在干旱和半干旱地区,水分是影响植物生长的主要因素之一。干旱胁迫会导致作物减产,威胁农业和畜牧业的可持续发展。干旱胁迫影响植物新陈代谢和蛋白质组学等过程,从而影响植物的生长^[1-2]。在干旱条件下,植物诸多生理指标通常会下降^[3],并且生理指标下降的程度取决于干旱程度及其持续时间^[4]。干旱胁迫对植物生长的影响可以用以下几种方式分析,如生物量积累、气体交换能力、光合系统活性、活性氧代谢、营养同化和运输过程等^[5-6]。在干旱条件下,植物通过关闭气孔来减少水分蒸发、降低 CO₂ 摄入量,从而削弱光合能力,而光合同化物的减少以及蒸腾拉力的下降会影响植物生物量的积累^[7]。尽管干旱胁迫会影响植物的生长,但是植物往往通过调节生理、形态、新陈代谢及其他机制来适应干旱胁迫,以实现蒸腾失水量和根系吸水量的平衡^[8]。

矿物质营养在植物的生长发育过程中发挥着至关重要的作用^[9]。矿质养分的运输极大程度上依赖于水分运输,木质部汁液中矿质阳离子的浓度又调节着水分的长距离运输^[10],这种相互关系称之为“离子效应”,对于植物养分和水分能够最优化分配到不同部位及抗旱性有重要作用^[11]。由于矿质元素参与众多生理生化过程,所以矿质元素含量不足会导致植物生长受抑制和产量受损。集流、扩散和接触交换是高等植物吸收矿物元素的三大机制^[12-14]。水分亏缺可以通过以下 3 种方式影响植物的养分状况:首先,土壤含水量减少会影响土壤养分矿化,从而减少土壤中可利用的养分^[12];其次,集

流、扩散不畅会抑制养分的吸收和转运^[13];最后,叶片气孔导度下降会影响光合作用和蒸腾速率^[14]。虽然目前关于干旱与水分利用效率的相关研究很多,但干旱条件下苹果养分吸收与利用的研究还较少。

苹果是世界主栽水果之一,种植范围广,在世界果品生产中占有重要地位,中国是世界苹果生产大国。中国苹果栽培主要集中在北方,而这些地区土壤干旱及贫瘠化严重,成为制约苹果优生栽培区域扩大的主要因素之一。在苹果生产上,其抗逆性主要取决于砧木。砧木抗旱性是由多种因素相互作用构成的一个复杂的综合性状。刘丙花^[15]研究了不同砧木对干旱胁迫的响应,但干旱胁迫下砧木对接穗矿质养分吸收差异的影响还不是很清楚。为此,本研究调查了干旱对嫁接在不同砧木上的“蜜脆”苹果苗生长量积累、叶片矿质养分含量、植株养分吸收通量及利用效率的影响,以期筛选出干旱条件下矿质养分高效吸收利用的苹果砧木。

1 材料与方法

1.1 植物材料与试验设计

2017 年 3 月,将苹果品种“蜜脆”的接穗嫁接在 10 种(G11、G30、Gx、G935、Pajam2、Pajam1、T337、M9、M26 和 G41)2 年生苹果砧木上,砧木均采用压条繁殖。所有材料移植在塑料盆(盆口直径 38 cm,盆底直径 23 cm,盆高 35 cm)中培养,盆中装混合土(V(土壤):V(沙)=1:1),均放置于大棚中。为了避免边缘效应,所有盆栽苗的位置每周随机轮换,使

每株材料完全随机摆放。

试验开始前所有材料正常供水,在充分浇水条件下生长 4 个月后,每个砧木选取 80 株生长良好且长势一致的苹果苗进行处理。试验设计 2 种水分处理:对照正常浇水,以保持盆土达到 75%~85% 田间最大持水量(CK);中度干旱胁迫处理(MD)保持盆土达到 45%~55% 田间最大持水量,每个处理各 40 株。采用称重法计算土壤含水量并记录每天水分散失量,隔天 18:00 补充损失水分。土壤表面均匀覆沙,尽量减少土壤表层水分蒸发。试验开始于 2017 年 7 月 1 日,结束于 2017 年 9 月 1 日,历时 62 d。

1.2 不同砧木苹果嫁接苗生长指标的测算

处理开始后 0 d 和 62 d 取样测定各处理苹果植株生长指标,每个处理 10 株重复。株高用米尺(精度 1 mm)测定(从嫁接口至主干顶芽),主干基部直径用电子游标卡尺(精度 0.001 mm)测定。收获每组处理的整株植株,并分为叶片、枝干和根系 3 部分,首先用自来水冲洗根部,然后分别用自来水、0.1 mol/L HCl 和蒸馏水洗涤所有样品,吸水纸擦干,记录植株的总鲜质量。之后在 105 ℃ 烘箱中杀青 15~20 min,然后 70 ℃ 烘干至恒质量,生物量的总干质量为根、茎、叶干质量的总和,净生物量和相对生长速率按下式计算:

$$\text{净生物量} = W_2 - W_1;$$

$$\text{相对生长速率} = (\ln W_2 - \ln W_1) / (t_2 - t_1)^{[16]}。$$

式中: W_1 是第 0 天(t_1)的植物干质量, W_2 是第 62 天(t_2)的植物干质量。

1.3 不同砧木苹果嫁接苗矿质元素含量的测定

处理 62 d 时取样测定苹果植株根、茎、叶的矿质元素含量,每个处理重复 5 次。将烘干的植物材料用普通研磨机粉碎后过孔径 0.300 mm(50 目)筛。称取 0.2 g 干物质粉末放入 100 mL 消煮管中,用浓硫酸(H_2SO_4 , AR, 98%) and 过氧化氢(H_2O_2 , GR, $\geq 30\%$)消化。消煮结束后,用去离子水定容至 100 mL,上下颠倒混匀。用 AA3 连续流动分析仪(SEAL Analytical, Norderstedt, Germany)测定 N 和 P 含量, K 含量通过火焰光度计(M410; Sherwood Scientific Ltd., Cambridge, United Kingdom)测定。取 0.1 g 样品,使用微波反应系统(Multiwave PRO; Anton Paar GmbH, Graz, Austria)将样品用硝酸(HNO_3 , AR, 65%)消化,采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(iCAP Q ICP-MS; Thermo Fisher Scientific Co., Waltham, MA, United

States)对 Ca 和 Mg 元素含量进行测定。

1.4 不同砧木苹果嫁接苗矿质养分吸收通量和养分利用效率的计算

采用 Kruse 等^[17]和 Sánchez-Rodríguez 等^[18]的方法,根据相对生长速率、干质量以及根、茎、叶中矿质元素的含量来计算养分吸收通量和养分利用效率,公式如下:

$$\text{养分吸收通量 } J \text{ (mg/(株} \cdot \text{d))} = \text{矿质元素含量(mg/g)} \times \text{干质量(g/株)} \times \text{相对生长速率(mg/(g} \cdot \text{d))};$$

$$J_{\text{总}} = J_{\text{根}} + J_{\text{茎}} + J_{\text{叶}};$$

$$\text{养分利用效率(g/g)} = \text{净生物量(g/株)} / \text{养分含量(g/株)}。$$

1.5 统计分析

在进行数据分析时,计算了各项指标的胁迫变化幅度,公式如下:

$$\text{指标胁迫变化幅度} = (\text{干旱处理植株测量值} - \text{对照植株测量值}) / \text{对照植株测量值} \times 100\%。$$

所有数据均使用 SPSS 20.0 软件进行分析,用 Excel 制图。单因素方差分析(ANOVA)用于比较处理间的差异,对差异显著者采用 Duncan's 法进行多重比较。运用 Two-way ANOVA 方法对每个变量进行 LDS 检验($P < 0.05$)。以矿质养分吸收通量和养分利用效率的原始值为依据,采用欧氏距离并运用离差平方和法,对不同砧木苹果幼苗的养分吸收利用效率进行聚类分析。文中数据均为 5 到 10 个重复样本的“平均值±标准偏差(SD)”。

2 结果与分析

2.1 干旱条件下不同砧木对“蜜脆”苹果幼苗生长的影响

由方差分析结果可知,砧木、水分及砧木×水分的交互作用均极显著($P < 0.001$)影响“蜜脆”苹果幼苗的净生物量和相对生长速率。由表 1 可知,与 CK 相比,干旱显著降低了“蜜脆”苹果幼苗的净生物量、相对生长速率、茎粗和株高;2 种供水条件下,“蜜脆”苹果幼苗的上述指标均因砧木不同而表现各异。干旱胁迫后,引起植株净生物量和相对生长速率下降幅度最大的砧木为 Pajam2 (−91.76%, −86.51%),最小的为 T337 (−64.26%, −50.12%);引起植株茎粗下降幅度最大的砧木为 G935 (−27.36%),最小的为 Pajam1 (−10.95%);引起植株株高下降幅度最大的砧木为 M9 (−43.79%),最小的为 G30 (−28.11%)。

表 1 干旱条件下不同砧木对“蜜脆”苹果幼苗净生物量和相对生长速率的影响
Table 1 Effects of different rootstocks on net biomass and relative growth rate of “Honey Crisp” apple trees under drought stress

砧木 Rootstock	水分处理 Moisture treatment	净生物量 Net biomass		相对生长速率 Relative growth rate		茎粗 Basal diameter		株高 Plant height	
		数值/ (g·株 ⁻¹) Value	变幅/% Percent change of drought to control	数值/(mg· d ⁻¹) Value	变幅/% Percent change of drought to control	数值/mm Value	变幅/% Percent change of drought to control	数值/cm Value	变幅/% Percent change of drought to control
G11	CK	14.38±0.98 d		16.73±0.75 cd		6.20±0.48 fg		101.38±8.45 bcd	
	MD	2.08±0.59 i	−85.54	3.49±0.90 k	−79.14	5.42±0.47 ijk	−12.56	70.88±7.43 g	−30.09
G30	CK	17.41±0.91 b		15.69±0.53 e		7.20±0.44 g		99.63±6.72 a	
	MD	4.65±1.10 fg	−73.29	5.62±0.91 j	−64.18	6.05±0.39 ij	−15.97	71.63±5.58 def	−28.11
G935	CK	19.85±1.06 a		19.94±0.68 b		6.55±0.67 de		108.63±5.90 bc	
	MD	4.17±0.62 fgh	−78.99	6.43±0.80 ij	−67.57	4.76±0.42 jkl	−27.36	65.38±5.93 h	−39.82
Pajam2	CK	19.65±1.09 a		14.83±0.68 f		7.39±0.47 a		124.75±3.96 a	
	MD	1.62±0.35 i	−91.79	2.00±0.41 l	−86.51	5.63±0.47 hi	−23.85	76.75±2.96 fg	−38.48
Gx	CK	18.03±0.76 b		16.28±0.40 de		6.53±0.24 bc		115.00±4.14 bc	
	MD	5.11±0.54 f	−71.66	6.50±0.52 ij	−60.07	5.68±0.36 ij	−13.04	72.38±6.65 efg	−37.07
T337	CK	19.08±1.17 a		20.67±0.77 ab		6.62±0.42 cd		113.00±5.42 b	
	MD	6.82±0.62 e	−64.26	10.31±0.69 g	−50.12	5.43±0.29 ij	−17.95	72.13±3.52 g	−36.17
Pajam1	CK	15.39±1.03 c		14.75±0.66 f		6.60±0.54 ef		105.75±2.55 bc	
	MD	3.21±0.41 h	−79.14	3.94±0.75 k	−73.29	5.88±0.35 i	−10.95	73.50±5.07 defg	−30.50
G41	CK	17.75±0.93 b		21.25±1.05 a		5.92±0.29 g		99.25±7.89 def	
	MD	3.73±0.82 gh	−78.99	6.81±0.53 ij	−67.95	4.92±0.42 jkl	−16.89	66.38±4.17 h	−33.12
M9	CK	17.40±0.72 b		19.99±0.63 b		6.53±0.31 cde		110.75±4.56 bc	
	MD	3.85±1.22 gh	−77.87	6.75±1.04 ij	−66.23	4.98±0.43 i	−23.70	62.25±6.27 h	−43.79
M26	CK	19.92±1.00 a		17.21±0.55 c		7.25±0.36 ab		119.63±5.53 a	
	MD	7.07±0.74 e	−64.51	7.87±0.92 h	−54.27	6.13±0.37 h	−15.46	81.75±2.76 cde	−31.66

注:同列数据后标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$). The same below.

2.2 干旱条件下不同砧木对“蜜脆”苹果幼苗叶片大量矿质元素含量的影响

由方差分析结果可知,砧木、水分和砧木×水分的交互作用极显著($P<0.001$)影响“蜜脆”苹果幼苗叶片中大量元素的含量。由表 2 可知,干旱条件下,植株叶片中 N、P、K、Ca、Mg 含量最高的砧木分别为 M26、M26、Gx、M9 和 G11,最低的分别为 G30、M9、G41、T337 和 T337。与 CK 相比,干旱降

低了大多数植株叶片中的大量元素含量。与 CK 相比,植株叶片中 N、P、K、Ca、Mg 含量受干旱胁迫影响,下降幅度最大的砧木分别为 G935(−9.33%)、M9(−35.70%)、G41(−27.59%)、G11(−29.63%)和 G30(−24.07%);上升幅度最大或下降幅度最小的分别为 M26(1.39%)、M26(5.99%)、Pajam2(−1.16%)、M9(38.98%)和 M9(18.56%)。

表 2 干旱条件下不同砧木对“蜜脆”苹果幼苗叶片大量矿质元素含量的影响
Table 2 Effects of different rootstocks on content of macronutrients of “Honey Crisp” apple trees leaves under drought stress

砧木 Rootstock	水分处理 Moisture treatment	N		P		K		Ca		Mg	
		数值/ (mg·g ⁻¹) Value	变幅/% Percent change of drought to control	数值/ (mg·g ⁻¹) Value	变幅/% Percent change of drought to control	数值/ (mg·g ⁻¹) Value	变幅/% Percent change of drought to control	数值/ (mg·g ⁻¹) Value	变幅/% Percent change of drought to control	数值/ (mg·g ⁻¹) Value	变幅/% Percent change of drought to control
G11	CK	24.63±0.71 b		3.06±0.11 a		20.07±0.84 cd		27.07±0.36 a		5.29±0.08 a	
	MD	24.70±0.42 b	0.24	2.27±0.13 de	−25.73	17.03±0.24 gh	−15.15	19.05±1.12 b	−29.63	5.20±0.30 a	−1.70
G30	CK	21.39±0.45 d		2.21±0.19 def		20.18±0.64 bcd		15.74±0.61 de		4.86±0.16 a	
	MD	19.85±0.84 e	−7.21	1.68±0.33 ijk	−23.95	16.10±0.30 hi	−20.22	14.01±0.35 fg	−10.99	3.69±0.32 a	−24.07
G935	CK	24.37±0.24 b		2.55±0.06 bc		20.10±0.46 bcd		15.08±0.24 def		4.07±0.27 bc	
	MD	22.09±0.50 cd	−9.33	2.04±0.20 efg	−20.19	15.88±0.88 i	−21.00	15.58±0.63 de	3.32	3.54±0.23 de	−13.02
Pajam2	CK	22.58±1.03 cd		2.21±0.11 def		19.82±0.71 cd		13.47±0.11 g		3.92±0.11 bcd	
	MD	22.29±0.98 cd	−1.29	1.75±0.15 hij	−20.74	19.59±1.32 de	−1.16	14.14±0.70 fg	4.97	3.67±0.30 cde	−6.38

表 2(续) Coniuned table 2

砧木 Rootstock	水分处理 Moisture treatment	N		P		K		Ca		Mg	
		数值/ (mg·g ⁻¹) Value	变幅/% Percent change of drought to control	数值/ (mg·g ⁻¹) Value	变幅/% Percent change of drought to control	数值/ (mg·g ⁻¹) Value	变幅/% Percent change of drought to control	数值/ (mg·g ⁻¹) Value	变幅/% Percent change of drought to control	数值/ (mg·g ⁻¹) Value	变幅/% Percent change of drought to control
Gx	CK	22.09±0.69 cd		2.10±0.14 defg		23.77±1.00 a		12.29±0.43 h		3.29±0.15 e	
	MD	22.36±1.40 cd	1.20	1.46±0.08 kl	-30.30	21.29±0.56 b	-10.43	14.67±1.01 ef	19.37	3.52±0.25 e	6.99
T337	CK	22.50±0.50 cd		2.06±0.03 efg		19.99±0.31 cd		13.36±0.65 g		3.70±0.39 cde	
	MD	21.83±1.41 cd	-2.97	1.38±0.03 l	-32.82	17.15±0.66 gh	-14.21	13.41±0.25 g	0.37	3.39±0.25 e	-8.38
Pajam1	CK	23.31±1.08 bc		1.97±0.10 fgh		18.68±0.39 ef		15.48±0.61 de		4.13±0.35 bc	
	MD	23.22±1.04 bc	-0.37	1.64±0.03 jk	-16.88	17.83±0.30 fg	-4.55	14.96±0.88 def	-3.36	3.95±0.41 bcd	-4.36
G41	CK	24.51±0.49 b		2.59±0.16 b		20.88±0.45 bcd		17.37±0.17 c		5.01±0.21 a	
	MD	24.35±0.83 b	-0.65	1.89±0.01 ghi	-26.93	15.12±0.09 i	-27.59	16.07±1.06 d	-7.48	3.91±0.28 bcd	-21.96
M9	CK	24.40±1.16 b		2.14±0.04 def		19.91±0.82 cd		14.06±0.19 fg		4.31±0.25 b	
	MD	23.33±1.78 bc	-4.40	1.38±0.11 l	-35.70	15.85±0.58 i	-20.39	19.54±0.67 b	38.98	5.11±0.16 a	18.56
M26	CK	26.58±0.86 a		2.21±0.04 def		20.40±0.28 bcd		13.53±0.36 g		4.85±0.23 a	
	MD	26.94±0.48 a	1.39	2.34±0.17 cd	5.99	17.53±0.83 g	-14.07	15.79±0.50 de	16.70	4.83±0.03 a	-0.41

2.3 干旱条件下不同砧木对“蜜脆”苹果幼苗大量矿质元素吸收通量的影响

方差分析结果表明,砧木、水分和砧木×水分的交互作用极显著($P<0.001$)影响“蜜脆”苹果植株的大量元素吸收通量。与 CK 相比,干旱显著降低了所有植株的元素吸收通量,不同砧木的降低程度不同(表 3)。正常供水(CK)条件下,植株 N、P、K、Ca、Mg 吸收通量最大的砧木分别为 G935、G935、G935、G11 和 M26,而以 Pajam1 为砧木的植株 N、P、K、Ca、Mg 吸收通量均最小。干旱条件下,植株

N、P、K、Ca、Mg 吸收通量最大的砧木分别为 M26、M26、T337、T337 和 M26;而以 Pajam2 为砧木的植株 N、P、K、Ca、Mg 的吸收通量均最小。干旱处理后,以 Pajam2 为砧木的植株 N、P、K、Ca、Mg 的吸收通量下降幅度最大,分别降低 94.97%,95.97%,95.09%,94.62%和 95.04%,以 T337 为砧木的植株 N、K、Ca、Mg 的吸收通量下降幅度最小,分别降低 71.46%,75.15%,71.06%和 71.17%,以 M26 为砧木的植株 P 吸收通量下降幅度最小,降低 74.28%。

表 3 干旱条件下不同砧木对“蜜脆”苹果幼苗大量矿质元素吸收通量的影响

Table 3 Effects of different rootstocks on absorption fluxes of macronutrients of “Honey Crisp” apple trees under drought stress

砧木 Rootstock	水分处理 Moisture treatment	N		P		K		Ca		Mg	
		数值/ (mg·株 ⁻¹ · d ⁻¹) Value	变幅/% Percent change of drought to control	数值/ (mg·株 ⁻¹ · d ⁻¹) Value	变幅/% Percent change of drought to control	数值/ (mg·株 ⁻¹ · d ⁻¹) Value	变幅/% Percent change of drought to control	数值/ (mg·株 ⁻¹ · d ⁻¹) Value	变幅/% Percent change of drought to control	数值/ (mg·株 ⁻¹ · d ⁻¹) Value	变幅/% Percent change of drought to control
G11	CK	7.79±0.09 e		1.03±0.03 c		5.83±0.17 f		8.36±0.17 a		1.46±0.02 cd	
	MD	1.04±0.00 j	-86.62	0.11±0.00 l	-89.64	0.64±0.01 l	-89.03	0.87±0.01 k	-89.56	0.19±0.01 j	-86.93
G30	CK	7.78±0.19 e		0.89±0.05 f		6.30±0.22 e		6.21±0.02 e		1.52±0.03 c	
	MD	1.39±0.01 i	-82.17	0.14±0.01 kl	-84.22	0.93±0.01 k	-85.25	1.06±0.02 jk	-82.93	0.24±0.01 hij	-84.51
G935	CK	10.59±0.18 a		1.30±0.04 a		7.92±0.08 a		8.25±0.10 a		1.67±0.11 b	
	MD	1.51±0.01 i	-85.76	0.15±0.01 k	-88.18	1.03±0.05 k	-86.99	1.18±0.03 ij	-85.67	0.24±0.01 hij	-85.91
Pajam2	CK	8.27±0.25 d		0.94±0.04 e		6.60±0.15 d		5.81±0.14 f		1.37±0.00 e	
	MD	0.42±0.01 k	-94.97	0.04±0.00 m	-95.97	0.32±0.01 m	-95.09	0.31±0.00 l	-94.62	0.07±0.00 k	-95.04
Gx	CK	7.75±0.14 e		0.87±0.04 f		7.83±0.14 a		5.44±0.02 g		1.22±0.05 f	
	MD	1.79±0.04 h	-76.97	0.14±0.00 kl	-84.12	1.55±0.00 j	-80.27	1.40±0.04 i	-74.21	0.29±0.02 hi	-76.31
T337	CK	9.42±0.08 c		0.99±0.01 d		7.92±0.12 a		7.09±0.33 c		1.53±0.10 c	
	MD	2.69±0.08 g	-71.46	0.21±0.00 j	-78.88	1.97±0.02 h	-75.15	2.05±0.12 h	-71.06	0.44±0.02 g	-71.17
Pajam1	CK	6.35±0.08 f		0.66±0.03 h		5.09±0.10 g		5.25±0.12 g		1.15±0.06 f	
	MD	1.34±0.04 i	-78.91	0.11±0.00 l	-83.26	0.95±0.01 k	-81.42	1.02±0.06 jk	-80.48	0.22±0.02 ij	-80.94
G41	CK	9.84±0.13 b		1.16±0.02 b		7.27±0.12 c		7.87±0.05 b		1.73±0.05 ab	
	MD	1.77±0.01 h	-81.99	0.16±0.00 k	-86.52	1.02±0.01 k	-85.95	1.35±0.05 i	-82.78	0.28±0.02 hi	-84.04
M9	CK	8.33±0.15 d		0.82±0.02 g		6.17±0.23 e		6.05±0.26 e		1.41±0.07 de	
	MD	1.48±0.05 i	-82.27	0.10±0.00 l	-87.39	0.99±0.02 k	-83.97	1.34±0.07 i	-77.90	0.31±0.01 h	-77.83
M26	CK	10.02±0.29 b		1.04±0.03 c		7.57±0.13 b		6.58±0.20 d		1.76±0.06 a	
	MD	2.72±0.03 g	-72.90	0.27±0.01 i	-74.28	1.74±0.03 i	-76.96	1.90±0.05 h	-71.15	0.46±0.01 g	-73.93

2.4 干旱条件下不同砧木对“蜜脆”苹果幼苗养分利用效率的影响

由方差分析结果可知,砧木、水分和砧木×水分的交互作用显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)影响“蜜脆”苹果植株的养分利用效率。表 4 表明,与 CK 相比,干旱处理降低了大多数植株的 N、Ca、Mg 利用效率,但提高了 K、P 的利用效率,不同砧木对“蜜脆”幼苗养分利用效率的影响不同。正常供水(CK)条件下,植株 N、P、K、Ca、Mg 养分利用效率最高的砧木分别为 Pajam1、Pajam1、Pajam1、Gx 和

Gx,最低的分别为 G11、G11、Gx、G11 和 G11。干旱条件下,植株 N、P、K、Ca、Mg 养分利用效率最高的砧木分别为 G30、M9、G30、G30 和 T337,最低的分别是 G11、G11、Gx、G11 和 M9。与 CK 相比,植株叶片 N、P、K、Ca、Mg 利用效率降幅最大的砧木分别为 Pajam1(−10.75%)、M26(−2.22%)、Pajam2(−0.64%)、M9(−23.07%)和 M9(−23.43%),上升幅度最大或下降幅度最小的分别为 G30(−0.40%)、Gx(36.61%)、G41(20.92%)、G11(19.83%)和 G30(14.91%)。

表 4 干旱条件下不同砧木对“蜜脆”苹果幼苗矿质养分利用效率的影响

Table 4 Effects of different rootstocks on nutrient use efficiency of “Honey Crisp” apple trees under drought stress

砧木 Rootstock	水分处理 Moisture treatment	N		P		K		Ca		Mg	
		数值/ (g·g ⁻¹)	变幅/% Percent change of drought to control	数值/ (g·g ⁻¹)	变幅/% Percent change of drought to control	数值/ (g·g ⁻¹)	变幅/% Percent change of drought to control	数值/ (g·g ⁻¹)	变幅/% Percent change of drought to control	数值/ (g·g ⁻¹)	变幅/% Percent change of drought to control
		Value		Value		Value		Value		Value	
G11	CK	51.98±0.57 ij		391.61±10.78 h		69.50±2.07 h		48.46±0.98 k		277.69±4.03 gh	
	MD	48.65±1.32 k	−6.41	473.45±9.04 j	20.90	79.26±0.65 bc	14.04	58.07±0.67 j	19.83	266.05±7.08 h	−4.19
G30	CK	58.29±1.42 bed		513.09±29.67 f		72.03±2.47 gh		73.00±0.27 defg		297.38±6.36 fg	
	MD	58.06±0.43 bed	−0.39	578.31±41.88 c	12.71	86.71±1.13 a	20.38	75.98±1.48 de	4.08	341.71±18.64 cd	14.91
G935	CK	55.29±0.91 efg		451.65±13.60 g		73.90±0.76 efg		71.00±0.89 fg		350.69±22.41 abcd	
	MD	54.03±0.47 fgh	−2.28	531.76±23.58 ef	17.74	79.12±3.48 bc	7.06	68.96±1.66 gh	−2.87	345.92±16.18 bcd	−1.36
Pajam2	CK	58.79±1.80 abc		518.94±20.48 f		73.61±1.62 efg		83.66±2.10 ab		354.17±0.88 abc	
	MD	56.89±0.82 cde	−3.23	626.89±23.93 b	20.80	73.14±2.88 fg	−0.64	75.68±0.23 de	−9.54	349.16±22.18 abcd	−1.41
Gx	CK	60.05±1.06 ab		537.03±26.85 def		59.44±1.10 j		85.50±0.33 a		380.72±15.32 a	
	MD	56.66±1.19 de	−5.65	733.63±24.65 a	36.61	65.45±0.07 i	10.11	72.08±2.25 efg	−15.70	349.57±19.82 abcd	−8.18
T337	CK	60.51±0.52 a		573.58±2.99 cd		72.01±1.12 gh		80.47±3.70 bc		374.89±25.87 ab	
	MD	57.32±1.69 cde	−5.27	733.78±7.75 a	27.93	78.27±0.88 bed	8.69	75.20±4.37 de	−6.55	350.84±17.88 abcd	−6.42
Pajam1	CK	60.67±0.74 a		582.95±26.29 c		75.66±1.53 def		73.42±1.68 def		335.61±16.69 cde	
	MD	54.15±1.81 fgh	−10.75	654.66±21.96 b	12.30	76.60±1.04 cde	1.24	70.89±3.91 fg	−3.45	333.20±35.76 cde	−0.72
G41	CK	52.46±0.69 hi		446.60±6.64 g		70.98±1.16 gh		65.63±0.44 hi		299.09±8.98 fg	
	MD	49.50±0.27 k	−5.64	562.98±18.21 cde	26.06	85.83±1.06 a	20.92	64.83±2.50 i	−1.22	318.85±17.15 def	6.61
M9	CK	55.88±1.04 ef		566.20±13.00 cde		75.45±2.90 def		77.06±3.20 cd		330.49±15.18 cde	
	MD	53.60±1.67 ghi	−4.08	763.39±30.65 a	34.83	79.93±1.91 b	5.94	59.28±2.86 j	−23.07	253.07±4.54 h	−23.43
M26	CK	54.23±1.57 fgh		521.33±13.12 f		71.76±1.27 gh		82.53±2.41 ab		308.10±9.86 efg	
	MD	50.30±0.59 jk	−7.25	509.77±13.52 f	−2.22	78.33±1.14 bed	9.16	71.93±1.83 efg	−12.84	297.18±7.52 fg	−3.54

2.5 干旱条件下不同砧木苹果幼苗基于养分吸收利用效率的聚类分析

以不同砧木“蜜脆”苹果幼苗干旱条件下的大量元素吸收通量和养分利用效率原始数据为依据,采用欧氏距离并运用离差平方和法,对 10 个砧木的养分吸收利用效率进行聚类分析,结果见图 1。由图 1 可以看出,根据欧氏距离可将嫁接在 10 个砧木上的“蜜脆”苹果幼苗在干旱条件下的养分吸收利用效率分为 3 组。其中第 I 组包括 M26、T337 和 Gx,属高养分吸收利用效率砧木;第 II 组包括 G11、G41 和 M9,属低养分吸收利用效率砧木;第 III 组包括 G935、Pajam1、Pajam2 和 G30,属中等养分吸收利用效率砧木。

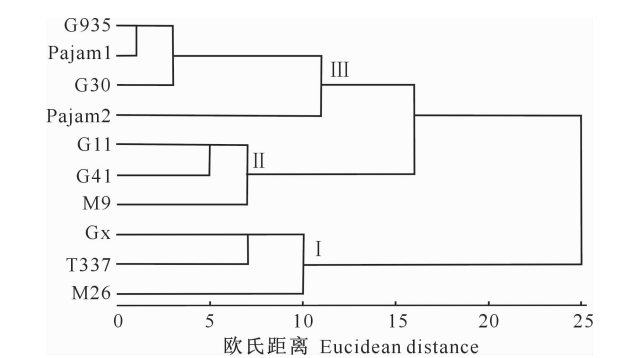


图 1 干旱条件下不同砧木“蜜脆”苹果幼苗基于大量元素吸收通量和养分利用效率的聚类结果

Fig. 1 Cluster analysis results of “Honey Crisp” based on absorption fluxes of macronutrients and nutrient use efficiency under drought conditions

3 讨论

干旱胁迫下,植物生长会在很多方面受到影响,如叶片水势降低、植物水势和营养关系发生变化^[19]等。本试验结果表明,干旱胁迫导致很多参数下降,但砧木的基因型会影响“蜜脆”苹果嫁接苗对干旱胁迫的响应。这是由于地上部的接穗都相同,所以植株生长上的差异主要归因于砧木基因型的不同^[20]。本试验结果显示,以 M26 和 T337 为砧木的植株生物量在干旱胁迫下较其他植株高,这与其有较快的相对生长速率有关。干旱胁迫降低了供试幼苗总的干物质积累量及其对营养物质的吸收,所以水分亏缺下植物组织中营养物质的最终含量,将取决于相对于干物质积累而减少的营养物质吸收量^[21]。本试验结果显示,中度干旱处理后,苹果叶片中 P、K、Ca、Mg 含量的变化幅度很大,而 N 含量变化幅度较小,这可能是由于每种元素对生物量积累的贡献不同。白泽晨^[22]研究表明,轻度水分胁迫在一定程度上有助于赤霞珠葡萄对 N 的吸收,但随胁迫程度增大会抑制 N 的吸收。水分是控制养分吸收的关键变量,干旱胁迫可通过减少元素的摄取、运输和再分配来抑制植物生长^[23]。例如,干旱会阻碍樱桃番茄吸收大量和微量营养元素^[24],而且这种胁迫会导致植物出现矿物质缺乏的症状^[25]。与前人研究结果类似^[26-27],本试验数据显示,干旱胁迫显著降低了苹果幼苗对 N、P、K、Ca、Mg 的吸收,这也是导致植株同化能力下降及生物量积累减少的原因。本课题组之前的研究也发现,在干旱条件下,苹果植株向叶和茎中的营养运输速率降低,而且叶片中的降低幅度高于茎或根^[28],这可能是由于叶片对干旱更加敏感。李明锦等^[29]研究表明,干旱处理下巨能草对 N、P 的利用效率均显著低于正常水分条件,与之不同的是,本研究发现,干旱处理后苹果幼苗对 N 的利用效率降低,而对 P 的利用效率基本都升高,这可能是由物种之间的差异造成的。

苹果嫁接苗的砧木为接穗提供水分和矿物质养分,而接穗也会提供碳水化合物供根系生长^[30]。Poling 等^[31]发现,砧木基因型对苹果叶片中的元素含量有显著影响。常聪^[32]的研究表明,砧木的基因型差异会影响苹果植株对 K 的吸收,以新疆野苹果和丽江山定子为砧木则植株 K^+ 浓度相对较高。季萌萌^[33]研究了不同苹果砧木的磷吸收利用效率后发现,富平楸子相对 P 效率和 P 吸收效率最高,P 的利用效率也较高。王海宁^[34]的研究表明,平邑甜茶

和八棱海棠对 N 的利用率属中低水平,楸子对 N 的利用率最高,新疆野苹果对 N 的利用率仅次于楸子,东北山荆子对 N 的利用率最低。本试验结果显示,以 M26 为砧木的苹果植株叶片 N、Mg 含量较高,以 Gx 为砧木的植株叶片 K 含量较高;而且 M26 对 N、P、K、Mg 的吸收较多,T337 对 K 和 Ca 的吸收较多。上述研究均表明,砧木基因型差异会影响树体对养分的吸收,这是由于不同砧木对营养物质的吸收及营养物质的向上运输速率有很大差异,同时地上部光合产物向下运输的速率也不同,砧穗组合影响着这一切^[30,35]。此外,周开兵等^[36]调查发现,不同砧木的橙树叶片矿质元素含量年变化趋势差异明显。Zarrouk 等^[37]研究表明,嫁接在砧木 Cadaman 和 GF677 上的桃树品种“Queen Giant”,其叶片中 N 含量最高,而嫁接在砧木 Adarcias 上的 N 含量最低。赵德英等^[38]研究发现,不同矮化中间砧也会影响植物矿质元素的含量。所以研究砧木对养分的吸收利用不仅需要研究砧木本身,更要结合接穗进行系统研究。

4 结论

本研究探讨了不同苹果砧木对干旱的响应,以及干旱胁迫下不同苹果砧木对苹果品种“蜜脆”养分吸收利用的影响,表明不同砧木对干旱胁迫的响应程度不同,并且在干旱下具有不同的养分吸收利用能力。干旱条件下,以 M26、Gx 和 T337 为砧木的“蜜脆”苹果幼苗养分吸收利用能力较高,而以 G11、G41 和 M9 为砧木的“蜜脆”苹果幼苗养分吸收利用能力较低。

【参考文献】

- [1] Tomlinson K W, Sterck F J, Bongers F, et al. Biomass partitioning and root morphology of savanna trees across a water gradient [J]. *Journal of Ecology*, 2012, 100(5): 1113-1121.
- [2] Alam S A, Huang J G, Stadt K J, et al. Effects of competition, drought stress and photosynthetic productivity on the radial growth of white spruce in western Canada [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8(1915): 15.
- [3] Blum A. Crop responses to drought and the interpretation of adaptation [J]. *Plant Growth Regulation*, 1996, 20(2): 135-148.
- [4] Vadell J. Effect of drought on subterranean clover: 2. Genetic variability of photosynthesis, transpiration and stomatal conductance [J]. *Photosynthetica*, 1992, 27: 433-440.
- [5] Ergo V V, Lascano R, Vega C R C, et al. Heat and water stressed field-grown soybean: a multivariate study on the rela-

- tionship between physiological-biochemical traits and yield [J]. Environmental & Experimental Botany, 2017, 148: 1-11.
- [6] Rahmati M, MirÃ J M, Valsesia P, et al. Disentangling the effects of water stress on carbon acquisition, vegetative growth, and fruit quality of peach trees by means of the quali tree model [J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9(3): 1-16.
 - [7] Verslues P E, Agarwal M, Katiyaragarwal S, et al. Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status [J]. Plant Journal, 2006, 45(4): 523-539.
 - [8] Thapa G, Dey M, Sahoo L, et al. An insight into the drought stress induced alterations in plants [J]. Biologia Plantarum, 2011, 55(4): 603.
 - [9] Goldstein G, Bucci S J, Scholz F G. Why do trees adjust water relations and hydraulic architecture in response to nutrient availability [J]. Tree Physiology, 2013, 33(3): 238.
 - [10] Nardini A, Salleo S, Jansen S. More than just a vulnerable pipeline: xylem physiology in the light of ion-mediated regulation of plant water transport [J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(14): 4701.
 - [11] Oddo E, Inzerillo S, La B F, et al. Short-term effects of potassium fertilization on the hydraulic conductance of *Laurus nobilis* L [J]. Tree Physiology, 2011, 31(2): 131.
 - [12] Sanaullah M, Rumpel C, Charrier X, et al. How does drought stress influence the decomposition of plant litter with contrasting quality in a grassland ecosystem [J]. Plant & Soil, 2012, 352(1/2): 277-288.
 - [13] Fageria N K, Baligar V C, Clark R B. Micronutrients in crop production [J]. Advances in Agronomy, 2002, 77(2): 185-268.
 - [14] He M, Dijkstra F A. Drought effect on plant nitrogen and phosphorus: a meta-analysis [J]. New Phytologist, 2014, 204(4): 924-931.
 - [15] 刘丙花. 苹果资源苗期水分利用效率的评价和高效用水的生理机制及其调控研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
 - Liu B H. Evaluation of water use efficiency and the physiological mechanism and regulation of efficient water use in apple genetic resources [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2012.
 - [16] Radford P J. Growth analysis formulae: their use and abuse [J]. Crop Science, 1967, 7(3): 171-175.
 - [17] Kruse J, Kopriva S, Hansch R, et al. Interaction of sulfur and nitrogen nutrition in tobacco (*Nicotiana tabacum*) plants: significance of nitrogen source and root nitrate reductase [J]. Plant Biology, 2007, 9(5): 638.
 - [18] Sánchez-Rodríguez E, Rubio-Wilhelmi M D M, Cervilla L M, et al. Study of the ionome and uptake fluxes in cherry tomato plants under moderate water stress conditions [J]. Plant & Soil, 2010, 335(1/2): 339-347.
 - [19] Christopherr B, Tonyj V. Maize drought tolerance: potential improvements through arbuscular mycorrhizal symbiosis [J]. Field Crops Research, 2008, 108(1): 14-31.
 - [20] Liu B H, Cheng L, Ma F W, et al. Influence of rootstock on drought response in young 'Gale Gala' apple (*Malus domestica* Borkh.) trees [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2012, 92(12): 2421-2427.
 - [21] Mullen R. Size distribution and mineral nutrients of soybean seeds in response to drought stress [J]. Journal of Plant Nutrition, 2004, 27(5): 815-835.
 - [22] 白泽晨. 不同程度水分胁迫对赤霞珠葡萄幼树氮素吸收代谢的影响 [D]. 新疆石河子: 石河子大学, 2015.
 - Bai Z C. Effects of different water stress intensity on nitrogen absorption and metabolism in the grape ('cabernet sauvignon') young plants [D]. Shihezi, Xinjiang: Shihezi University, 2015.
 - [23] Sardans J, Peñuelas J. The role of plants in the effects of global change on nutrient availability and stoichiometry in the plant-soil system [J]. Plant Physiology, 2012, 160(4): 1741-1761.
 - [24] Sanaullah M, Rumpel C, Charrier X, et al. How does drought stress influence the decomposition of plant litter with contrasting quality in a grassland ecosystem? [J]. Plant & Soil, 2012, 352(1/2): 277-288.
 - [25] Yasar F, Uzal O, Yasar O, et al. Root, stem, and leaf ion accumulation in drought-stressed green bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes treated with PEG-6000 [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2014, 23(10A): 2656-2662.
 - [26] Omirou M, Ioannides I M, Ehalotis C. Mycorrhizal inoculation affects arbuscular mycorrhizal diversity in watermelon roots, but leads to improved colonization and plant response under water stress only [J]. Applied Soil Ecology, 2013, 63(1): 112-119.
 - [27] Zhao R, Guo W, Bi N, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi affect the growth, nutrient uptake and water status of maize (*Zea mays* L.) grown in two types of coal mine spoils under drought stress [J]. Applied Soil Ecology, 2015, 88(88): 41-49.
 - [28] Liang B W, Gao T T, Zhao Q, et al. Effects of exogenous dopamine on the uptake, transport, and resorption of apple ionome under moderate drought [J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 755.
 - [29] 张明锦, 陈良华, 张 健, 等. 干旱胁迫和施肥对巨能草生物量及 C、N、P 积累与分配的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(9): 105-112.
 - Zhang M J, Chen L H, Zhang J, et al. Effect of drought stress and fertilization on accumulation and partitioning of biomass, C, N and P of *Puelia sinese* Roxb [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2016, 44(9): 105-112.
 - [30] 李天忠, 张志宏. 现代果树生物学 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
 - Li T Z, Zhang Z H. Modern fruit tree biology [M]. Beijing: Science Press, 2008.

- [31] Poling E B, Oberly G H. Effects of rootstock on mineral composition of apple leaves [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1979, 104: 799-801.
- [32] 常 聪. 五种不同基因型苹果砧木钾吸收利用效率差异研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
Chang C. Differences in the efficiency of potassium (K) uptake and use in five apple rootstock genotypes [D]. Yangling, Shaanxi, Northwest A&F University, 2014.
- [33] 季萌萌. 供磷水平对苹果砧木氮、磷吸收利用特性的研究 [D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2015.
Ji M M. Characteristics of the nitrogen and phosphorus absorption and utilization in apple rootstocks on different phosphorus level [D]. Tai'an, Shandong: Shandong Agricultural University, 2015.
- [34] 王海宁. 不同苹果砧木碳氮营养特性的研究 [D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2012.
Wang H N. A study on characteristics of carbon and nitrogen nutrition for different apple rootstocks [D]. Tai'an, Shandong: Shandong Agricultural University, 2012.
- [35] 王海宁, 葛顺峰, 姜远茂, 等. 苹果砧木生长及吸收利用硝态氮和铵态氮特性比较 [J]. 园艺学报, 2012, 39(2): 343-348.
Wang H N, Ge S F, Jiang Y M, et al. Growth characteristics and absorption, distribution and utilization of $^{15}\text{NO}_3^-$ -N and $^{15}\text{NH}_4^+$ -N application for five apple rootstocks [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2012, 39(2): 343-348.
- [36] 周开兵, 夏仁学, 王贵元, 等. 高接在不同基砧的锦橙上的华红脐橙的栽培表现及矿质营养含量年变化 [J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(2): 182-187.
Zhou K B, Xia R X, Wang G Y, et al. Study on performance of Huahong navel orange grafted to Jincheng with two kinds of rootstock and annual changes of mineral elements content [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2004, 10(2): 182-187.
- [37] Zarrouk O, Gogorcena Y, Gómez-Aparisi J, et al. Influence of almond $\times$ peach hybrids rootstocks on flower and leaf mineral concentration, yield and vigour of two peach cultivars [J]. Scientia Horticulturae, 2005, 106(4): 502-514.
- [38] 赵德英, 袁继存, 徐 锴, 等. 不同矮化中间砧嘎啦苹果幼树形态与不同径级根系养分累积分布特征 [J]. 华北农学报, 2016, 31(4): 184-191.
Zhao D Y, Yuan J C, Xu K, et al. Tree morphology, accumulation and distribution characteristics of mineral nutrient in root system of gala apple young tree with different dwarfing interstocks [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2016, 31(4): 184-191.

(上接第 102 页)

- [31] 于孝保, 朱继宏, 付德峰, 等. 4 种蔬菜中 SOD 活性测定研究 [J]. 现代农业科技, 2012(11): 82.
Yu X B, Zhu J H, Fu D F, et al. Effect of SOD activities determination in four vegetable [J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2012(11): 82.
- [32] 潘安中, 谢树莲, 秦雪梅. 不同年份柴胡种子 SOD、POD 活性与发芽率的测定 [J]. 天津中医药, 2008, 25(3): 243-245.
Pan A Z, Xie S L, Qin X M. A test to SOD, POD activities and germination percentage of seeds of bupleurum Chinense in different years [J]. Tianjin Journal of Traditional Chinese Medicine, 2008, 25(3): 243-245.
- [33] 彭 艳, 李 洋, 杨广笑, 等. 铝胁迫对不同小麦 SOD、CAT、POD 活性和 MDA 含量的影响 [J]. 生物技术, 2006, 16(3): 38-42.
Peng Y, Li Y, Yang G X, et al. Effects of aluminum stress on the activities of SOD, CAT, POD and the contents of MDA in the seedlings of different wheat cultivars [J]. Biotechnology, 2006, 16(3): 38-42.
- [34] Ray A A. SAS users guide: statistics [M]. Gary, NC: SAS Institute, 1985.
- [35] 林爱红, 饶 健, 秦彦珉, 等. 臭氧杀菌效果的影响因素分析 [J]. 公共卫生与预防医学, 2002, 13(6): 7-8.
Lin A H, Rao J, Qin Y M, et al. Effects of ozone sterilization [J]. Public Health and Preventive Medicine, 2002, 13(6): 7-8.
- [36] 阎世江, 刘 洁, 张继宁, 等. 低温对黄瓜若干生理指标的影响 [J]. 河北科技师范学院学报, 2013, 27(2): 12-17.
Yan S J, Liu J, Zhang J N, et al. Effects of low temperature on some physiological indexes of cucumber [J]. Journal of Hebei Normal University of Science and Technology, 2013, 27(2): 12-17.
- [37] 丁 明, 邹志荣, 黄丹枫, 等. 臭氧在温室黄瓜生产上的应用研究 [J]. 华中农业大学学报, 2004(2): 119-124.
Ding M, Zou Z R, Huang D F, et al. Application and research of ozone on greenhouse cucumber production [J]. Journal of Central China Agricultural University, 2004(2): 119-124.