应用生态学报 2015年10月 第26卷 第10期
Chinese Journal of Applied Ecology, Oct. 2015, **26**(10): 3045-3052

不同苹果砧木对缺锌胁迫的耐性评价*

范晓丹[1] 刘 飞[1] 王衍安[1**] 付春霞[1] 闫玉静[1] 沙广利[2] 束怀瑞[3]
([1]山东农业大学生命科学学院/作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018; [2]青岛市农业科学院, 山东青岛 266100; [3]山东农业大学园艺科学与工程学院/国家苹果工程技术研究中心, 山东泰安 271018)

摘 要 为筛选适应缺锌胁迫环境的砧木资源,以山定子、丽江山定子、小金海棠、锡金海棠、新疆野苹果、八棱海棠、平邑甜茶、火焰海棠8种苹果砧木资源为试材,对砧木株高、干物质量、根系构型及锌含量等指标进行测定,利用模糊隶属函数法进行耐缺锌能力综合评价.结果表明:缺锌处理下,丽江山定子、锡金海棠和新疆野苹果均先表现出新生叶小、簇生等缺锌症状,而小金海棠、火焰海棠缺锌症状不明显;缺锌显著降低了苹果砧木株高和地上部锌积累量,而小金海棠的降低幅度最小;缺锌胁迫下小金海棠和山定子叶片锌含量较高,分别为23.2和21.3 mg·kg^{-1}.采用模糊隶属函数法综合评价参试砧木耐缺锌能力:小金海棠最强,火焰海棠次之,山定子、锡金海棠、八棱海棠和平邑甜茶的耐缺锌能力较弱,丽江山定子和新疆野苹果的耐缺锌能力最弱.

关键词 苹果砧木; 缺锌胁迫; 模糊隶属函数; 聚类分析
文章编号 1001-9332(2015)10-3045-08 **中图分类号** S661.1 **文献标识码** A

Evaluation of zinc deficiency tolerance in different kinds of apple rootstocks. FAN Xiao-dan[1], LIU Fei[1], WANG Yan-an[1], FU Chun-xia[1], YAN Yu-jing[1], SHA Guang-li[2], SHU Huai-rui[3] ([1]*College of Life Science, Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an* 271018, *Shandong, China*; [2]*Qingdao Institute of Agricultural Science, Qingdao* 266100, *Shandong, China*; [3]*College of Horticulture Science and Technology, Shandong Agricultural University/National Research Center for Apple Engineering and Technology, Tai'an* 271018, *Shandong, China*). *-Chin. J. Appl. Ecol.*, 2015, **26**(10): 3045-3052.

Abstract: The objective of this study was to screen and evaluate the zinc deficiency tolerance among eight apple rootstocks, *i.e.*, *Malus baccata*, *M. rockii*, *M. xiaojinensis*, *M. sikkimensis*, *M. sieversii*, *M. robusta*, *M. hupehensis* and *Malus* 'Flame'. The experiment took these 8 kinds of rootstocks as the research materials to observe and analyze the index of the rootstock's height, dry biomass, root architecture and zinc concentration, and with help of the fuzzy membership function to work out a comprehensive evaluation on their zinc deficiency tolerance. The result showed that several obvious zinc deficiency symptoms were observed in three kinds of rootstocks (*M. rockii*, *M. sikkimensis* and *M. sieversii*), such as dwarfed plant and newborn small leaves, while such symptoms were not obvious in *M. xiaojinensis* and *M.* 'Flame'. The plant biomass, height and zinc accumulation of aerial part greatly decreased under zinc deficiency stress, while smaller reduction was observed in *M. xiaojinensis* than in other rootstocks. *M. xiaojinensis* and *M. baccata* had higher zinc concentrations in leaves than others. According to the fuzzy membership function and cluster analysis, the resistance of the eight apple rootstocks to zinc deficiency was ranked: *M. xiaojinensis* was the highest one; *M.* 'Flame' was the second; *M. baccata*, *M. sikkimensis*, *M. robusta* and *M. hupehensis* were rather weaker; *M. rockii* and *M. sieversii* demonstrated the highest sensitivity to zinc deficiency.

Key words: apple rootstock; zinc-deficiency stress; fuzzy administering function; cluster analysis.

* 国家自然科学基金项目(31372015)、山东省自然科学基金项目(ZR2013CM022)和现代苹果产业技术体系项目(CARS-28)资助.
** 通讯作者. E-mail: wyaapple@126.com
2014-12-25 收稿,2015-05-20 接受.

苹果是缺锌敏感植物[1],树体缺锌易发生小叶病,主要表现为叶小簇生,节间缩短.山东省 46.2% 的苹果园均不同程度地发生小叶病[2],缺锌已成为许多苹果产区苹果产量和品质提高的重要限制因子之一.土壤中只有少部分锌可被植物利用[3],称为土壤有效锌,土壤有效锌含量随 pH 的升高而降低[4],耐缺锌品种根系分泌低分子量有机酸增加土壤中难溶性锌的活化,从而促进根系对锌的吸收[5].

嫁接果树砧穗之间可以相互作用,其中砧木提供根系,对果树吸收水分、养分具有重要作用.不同苹果砧木对矿质元素的吸收和利用效率不同[6].有研究表明,不同苹果砧木 M9 和 MM106 通过影响接穗叶片的锌元素浓度改变果树生长状况和果实产量[7];对甜橙、柑橘研究也发现,不同砧木可以显著影响接穗的营养水平和果树对微量元素的吸收、利用[8-9].不同砧穗组合可以决定苹果缺锌的发病程度[10],如矮砧(M9 砧)红星果树吸收 Zn 能力较强,其 Zn 总积累量高于乔砧(山荆子砧)红星果树,不易发生小叶病[11].因此,比较不同苹果砧木对缺锌胁迫的耐性差异,对筛选适应锌胁迫环境的砧木资源、减轻苹果小叶病的发生具有重要意义.

目前,在抗缺铁黄化苹果砧木的选育和利用上,已建立了耐缺铁性苹果砧木的筛选程序,并筛选出耐缺铁性苹果砧木[12-14],但对于苹果耐缺锌砧木品种的筛选未见报道.缺锌胁迫对植物生长发育、生理生化过程的影响是多方面的,仅仅通过单项指标来评价砧木的耐缺锌能力具有一定的片面性,所以本试验以大田缺锌土壤栽培为基础,利用模糊隶属函数值法对反映砧木耐缺锌能力的多个指标进行综合评价,以期在常用的多种苹果砧木中筛选适应缺锌胁迫环境的砧木资源,为建立锌高效利用苹果砧穗组合和解决苹果树缺锌胁迫问题提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料及试验设计

试验于 2013 年 3—12 月于山东农业大学作物生物学国家重点实验室和肥城市潮泉镇进行.试验地潮泉镇土壤(0~40 cm)土质为壤土,试验面积为 700 m^2.对土壤统一使用基肥后,平均分为两部分:一部分只施用基肥,不添加锌肥;另一部分在施用基肥的同时在地表均匀撒施锌肥:将 1 kg $ZnSO_4 \cdot H_2O$ 与细沙混合均匀后撒至土壤表面.两部分土壤均用旋耕机深旋 0~40 cm 土层,使所施肥料充分混合在土壤中.调整后测定补锌土壤 0~40 cm 土层有效锌含量为 1.81 mg · kg^{-1},为对照土壤;未补施锌肥的土壤 0~40 cm 土层有效锌含量为 0.90 mg · kg^{-1},低于正常值范围 1.0~3.0 mg · kg^{-1},为缺锌土壤.两部分土壤起垄、覆膜、浇水等管理措施完全相同.试验地其他土壤参数为:pH(H_2O)6.21,有机质含量 1.6%、碱解氮 65.6 mg · kg^{-1}、速效磷 56.36 mg · kg^{-1}、速效钾 85.45 mg · kg^{-1}、有效铁 17.79 mg · kg^{-1}.以 8 个苹果砧木(表 1)为试材,种子在实验室经 4 ℃层积催芽(30~45 d)后,撒播于河砂中培养至 3 片幼叶时(2013 年 5 月),选取生长均匀一致的幼苗移栽定植到覆黑色薄膜的 15 cm 高土垄上,每处理每种砧木每小区定植 50 株,5 个重复,株、行距为 30 cm×50 cm,砧木种类和重复随机排列,常规田间管理.幼苗定植后每 15 d 观察一次幼苗的生长状况,8 月中旬砧木品种间生长出现明显差异,其中部分种类出现缺锌小叶症状,测定各苹果砧木的株高,每小区随机选取 9 株苹果砧木分别测定其根系构型、生物量及锌含量.

1.2 测定项目与方法

1.2.1 植株形态指标 株高用常规方法测定.根系构型参数用根系扫描仪测定:将砧木根系放到根系扫描仪托盘中,并用细毛笔轻轻将根系分散开,利用专业版 WinRHIZO(2007 版)根系分析软件对根系总长、平均直径、表面积、体积、根尖数进行扫描,记录数据.

1.2.2 锌含量测定 将各品种砧木植株用自来水冲洗干净,20 mmol · L^{-1} Na_2-EDTA 溶液浸泡 15 min 除去表面粘附的锌[15],最后用去离子水反复冲洗干净,吸水纸擦去表面水分,分解为根、茎、叶 3 部分,105 ℃下杀青、80 ℃下烘干,测定干物质量.植物组织锌元素含量测定参照 Zarcinas 等[16]的方法,采用 HNO_3-$HClO_4$ 消煮提取,原子吸收分光光度计(AES,英国 PYE 公司生产的 SP9-400 型)测定.

表 1 供试苹果砧木名称及来源
Table 1 Names and resources of eight apple rootstocks

砧木 Rootstock	种子来源 Seed origin
山定子 *Malus baccata*	辽宁果树所砧木资源圃
丽江山定子 *Malus rockii*	四川省盐源县野生群落
小金海棠 *Malus xiaojinensis*	青岛市农业科学院砧木资源圃
锡金海棠 *Malus sikkimensis*	青岛市农业科学院砧木资源圃
新疆野苹果 *Malus sieversii*	新疆巩留县野生群落
八棱海棠 *Malus robusta*	青岛市农业科学院砧木资源圃
平邑甜茶 *Malus hupehensis*	山东省蒙阴县野生群落
火焰海棠 *Malus* 'Flame'	青岛市农业科学院砧木资源圃

与锌分配、利用相关的参数及计算方法如下[13,17]：

锌转运系数=地上部锌平均含量/根系锌平均含量

锌利用效率=单株总干物质量/锌总积累量

1.2.3 耐缺锌胁迫能力综合评价　隶属函数值常用来评价植物的耐盐性[18-19]、耐湿性[20]等，从而筛选耐逆境胁迫的品种.本研究利用模糊数学隶属函数法对参试的 8 种苹果砧木进行耐缺锌性评价.求各单项指标的耐缺锌系数，然后根据隶属函数值计算公式对各单项指标的耐缺锌系数进行简单计算，根据综合隶属函数值的大小判定砧木的耐缺锌能力[21].

耐缺锌系数=缺锌处理各指标性状值/对照指标性状值

隶属函数值计算公式：

$$R(X_i)_{正}=\frac{X_i-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}} \quad (1)$$

$$R(X_i)_{负}=1-\frac{X_i-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}} \quad (2)$$

式中：$R(X_i)$为指标耐缺锌隶属函数值；X_i为指标测定值；$X_{\max}$、$X_{\min}$分别表示参试苹果砧木中某一指标的最大值和最小值.指标与耐缺锌呈正相关，用公式(1)计算，反之用公式(2)计算.累加各品种各指标的隶属函数值并求平均值，平均隶属函数值越大，砧木耐缺锌能力越强[21].

1.3 数据处理

砧木株高、干物质量、锌含量、锌积累量及转运系数、利用效率的相对值为缺锌处理的指标值与对照指标值之间的比值.采用 Excel 2007 和 SAS 9.0 软件对数据进行作图和统计分析.采用 Duncan 法进行差异显著性检验($\alpha=0.05$).图表中数据为平均值±标准差.

2　结果与分析

2.1 苹果砧木株高和干物质量对缺锌胁迫的响应

随着缺锌处理时间延长，在 8 月中旬，丽江山定子、锡金海棠和新疆野苹果相对于对照均逐渐表现出不同程度新生叶片小、植株矮小等缺锌症状，而小金海棠和火焰海棠缺锌症状不明显.表 2 显示，缺锌处理显著降低了各苹果砧木的株高，其中丽江山定子、锡金海棠和新疆野苹果的株高分别较对照降低 47.8%、50.5%和 50.7%，而小金海棠和火焰海棠的株高与对照差异不显著，表明其在缺锌土壤条件下仍保持较好的长势.

缺锌处理显著降低了各苹果砧木地上部的干物质量，且品种间差异显著，其中小金海棠地上部干物质量降低幅度最小，为对照的 86.9%，而新疆野苹果降低幅度最大，为对照的 28.5%.缺锌处理下各砧木根系干物质量除小金海棠、山定子和火焰海棠与对

表 2　缺锌胁迫对苹果砧木株高和干物质量的影响

Table 2　Effect of Zn-deficiency stress on plant height and dry biomass of apple rootstocks

砧木 Rootstock	株高 Plant height			干物质量 Dry biomass							
				地上部 Shoot			根系 Root			根冠比 Root/shoot	
	对照 Control (cm·plant^{-1})	缺锌 Zn-deficiency (cm·plant^{-1})	相对值 Relative value	对照 Control (g·plant^{-1})	缺锌 Zn-deficiency (g·plant^{-1})	相对值 Relative value	对照 Control (g·plant^{-1})	缺锌 Zn-deficiency (g·plant^{-1})	相对值 Relative value	对照 Control	缺锌 Zn-deficiency
山定子 *Malus baccata*	28.33± 5.5Ac	18.37± 2.38Ad	0.65	3.75 ± 0.59Ae	2.50 ± 0.79Ab	0.67	2.61± 0.72Abc	1.48± 0.39Abc	0.57	0.70	0.59
丽江山定子 *Malus rockii*	45.67± 1.50Aab	25.33± 3.25Bbc	0.55	4.77± 1.00Acde	1.57± 0.75Bb	0.33	2.5± 0.67Abc	0.94± 0.16Bbc	0.37	0.52	0.60
小金海棠 *Malus xiaojinensis*	53.00± 11.59Aa	47.25± 6.01Aa	0.9	6.24± 0.36Aab	5.42± 2.05Aa	0.87	3.24± 0.86Ab	3.88± 0.68Aa	1.05	0.52	0.71
锡金海棠 *Malus sikkimensis*	51.00± 3.61Aab	25.50± 3.04Bbc	0.5	5.11± 0.74Abcd	1.63± 0.32Bb	0.32	2.21± 0.59Abc	0.77± 0.16Bc	0.35	0.43	0.47
新疆野苹果 *Malus sieversii*	49.67± 6.51Aab	24.50± 5.77Bc	0.49	5.97± 0.65Aabc	1.70± 0.37Bb	0.29	2.13± 0.29Abc	0.96± 0.18Bbc	0.45	0.36	0.56
八棱海棠 *Malus robusta*	38.00± 2.65Ab	25.50± 2.54ABbc	0.67	4.01± 0.35Ade	1.90± 0.24Bb	0.47	1.45± 0.50Ac	0.76± 0.34Bc	0.52	0.36	0.40
平邑甜茶 *Malus hupehensis*	47.50± 4.82Aab	38.33± 1.32Aab	0.81	6.99± 0.26Aa	5.59± 0.56Aa	0.80	5.07± 0.91Aa	2.71± 0.77Bb	0.53	0.73	0.48
火焰海棠 *Malus* 'Flame'	37.50± 10.05Abc	32.33± 8.50Aabc	0.86	3.87± 1.52Ade	2.43± 1.37Ab	0.63	1.89± 0.65Ac	1.32± 0.52Abc	0.70	0.47	0.54

同行不同大写字母表示处理间差异显著，同列不同小写字母表示不同砧木间差异显著($P<0.05$) Different capital letters in the same row indicated significant difference between different treatments, and different small letters in the same column indicated significant difference among different rootstocks at 0.05 level. 下同 The same below.

照差异不显著外,其他品种均不同程度的降低.与对照相比,缺锌处理下各苹果砧木的根冠比显著增加,山定子和平邑甜茶分别降低为对照的 84.3% 和 65.8%.

2.2 苹果砧木幼苗根系构型参数对缺锌胁迫的响应

图 1 表明,缺锌处理显著抑制了苹果砧木根系总长、总表面积、总体积和根尖数,其中新疆野苹果、平邑甜茶和八棱海棠的下降幅度较大,而火焰海棠降低幅度最小;缺锌胁迫下小金海棠根系构型各参数均高于对照,尤其是根系总长、根系表面积和根尖数,较对照升高 30.0%~50.0%,表明小金海棠在缺锌条件下通过增加根系长度、细根数量和表面积等增加其对土壤中矿质营养的吸收,以维持地上部较好的长势.

2.3 苹果砧木幼苗锌含量和锌积累量对缺锌胁迫的响应

缺锌处理显著降低了各苹果砧木叶片锌含量(表 3).苹果叶片锌含量正常值为 15~20 mg · kg^{-1} (DM)[22].缺锌条件下,山定子、小金海棠叶片中锌含量均>20 mg · kg^{-1},火焰、锡金海棠叶片中锌含量接近临界值 15 mg · kg^{-1},其他砧木叶片的锌含量均明显低于缺锌临界值,其中新疆野苹果叶片中的锌含量较对照降低 77.8%.缺锌处理下小金海棠和火焰茎中锌含量分别较对海棠照升高 63.1% 和 82.2%,其他砧木均显著降低.苹果砧木根系中锌含量结果表明:除小金海棠、锡金海棠和平邑甜茶较对照差异不显著外,其他砧木均显著降低,其中火焰海棠比对照降低 72.4%,表明火焰海棠的锌主要积累在地上部,在根系中积累较少.

由表 4 看出,缺锌处理下,除小金海棠和火焰海棠的地上部锌积累量较对照降低幅度较小外,其他苹果砧木均显著降低,且品种间差异显著.缺锌胁迫下,根系中的锌积累量除小金海棠略高于对照外,其他品种均显著降低.锡金海棠、新疆野苹果、丽江山定子和八棱海棠的单株锌积累量分别较对照降低 80.2%、81.6%、83.4% 和 71.0%,小金海棠降低幅度最小.缺锌条件下,单株锌积累量和根系各参数以及干物质量呈显著正相关(表 5),表明单株锌积累量对维持植株地上部生长以及根系的发育起着重要作用.

2.4 苹果砧木幼苗锌转运系数及利用效率对缺锌胁迫的响应

缺锌胁迫下,各苹果砧木锌的转运系数除火焰海棠显著增加、新疆野苹果显著降低外,其他品种之间无显著差异(表 6),表明火焰海棠中的锌元素向地上部转运较多.锌利用效率的结果表明(表 6):各品种间锌的利用效率差异显著,其中平邑甜茶的利

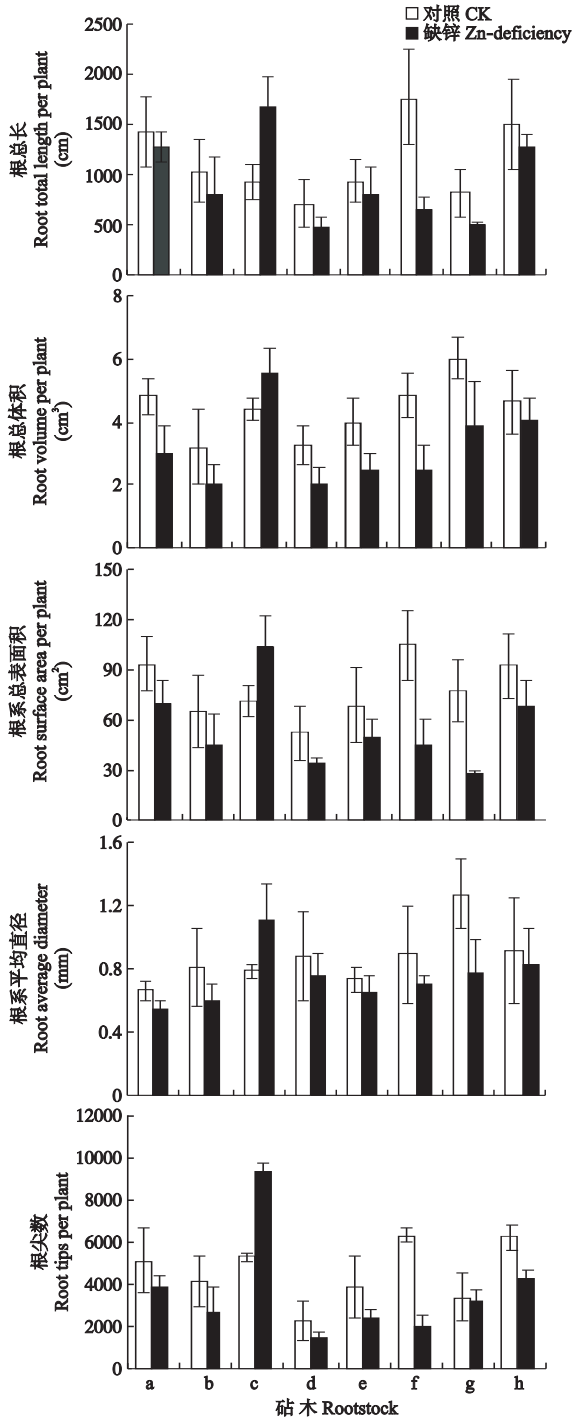


图 1 缺锌胁迫对苹果砧木根系构型参数的影响

Fig.1 Effects of Zn-deficiency stress on the root architecture of apple rootstocks.

a) 山定子 *Malus baccata*; b) 丽江山定子 *Malus rockii*; c) 小金海棠 *Malus xiaojinensis*; d) 锡金海棠 *Malus sikkimensis*; e) 新疆野苹果 *Malus sieversii*; f) 八棱海棠 *Malus robusta*; g) 平邑甜茶 *Malus hupehensis*; h) 火焰海棠 *Malus* 'Flame'. 下同 The same below.

表 3　缺锌胁迫对苹果砧木各器官锌含量的影响

Table 3　Effect of Zn-deficiency stress on zinc concentration of different organs in apple rootstocks

砧木 Rootstock	叶 Leaf			茎 Stem			根 Root		
	对照 Control (mg·kg^{-1})	缺锌 Zn-deficiency (mg·kg^{-1})	相对值 Relative value	对照 Control (mg·kg^{-1})	缺锌 Zn-deficiency (mg·kg^{-1})	相对值 Relative value	对照 Control (mg·kg^{-1})	缺锌 Zn-deficiency (mg·kg^{-1})	相对值 Relative value
山定子 *Malus baccata*	36.1±3.3Aab	21.3±5.8Ba	0.59	44.5±17.2Aa	38.5±19.6Aa	0.87	43.2±3.6Aa	22.5±3.5Ba	0.52
丽江山定子 *Malus rockii*	25.7±1.8Abc	6.3±2.8Bc	0.24	26.3±4.0Ab	19.8±2.8ABbc	0.75	12.9±0.2Ad	7.6±2.2Bc	0.59
小金海棠 *Malus xiaojinensis*	32.4±9.5Aab	23.2±0.4Aa	0.72	15.5±8.5Bbc	25.2±3.8Aab	1.63	19.5±2.8Acd	20.0±8.0Aa	1.03
锡金海棠 *Malus sikkimensis*	39.2±3.0Aa	16.7±4.0Bab	0.43	24.5±8.5Ab	19.4±2.1ABbc	0.78	19.0±4.9Acd	17.2±2.0Aab	0.91
新疆野苹果 *Malus sieversii*	36.2±9.0Aab	8.2±3.6Bbc	0.23	22.5±12.0Ab	17.7±4.5Bbc	0.79	33.1±6.6Ab	15.2±5.6Babc	0.46
八棱海棠 *Malus robusta*	35.8±8.5Aab	11.8±7.8Bbc	0.33	25.5±1.1Ab	17.8±3.4Bbc	0.70	28.0±4.8Ab	13.6±5.0Babc	0.48
平邑甜茶 *Malus hupehensis*	18.5±2.4Ac	9.9±2.4Bbc	0.53	10.9±2.5Ac	8.67±1.9Ac	0.78	13.1±4.4Ad	8.5±1.8Abc	0.65
火焰海棠 *Malus*‘Flame’	23.1±3.0Aabc	14.0±2.5ABbc	0.61	15.2±4.0Bbc	27.8±4.4Aab	1.82	26.3±2.5Abc	7.3±5.4Bc	0.28

表 4　缺锌胁迫对苹果砧木各器官锌积累量的影响

Table 4　Effect of Zn-deficiency stress on zinc accumulation of different organs in apple rootstocks

砧木 Rootstock	地上部 Shoot			根 Root			单株锌积累量 Zinc accumulation per plant		
	对照 Control (μg·plant^{-1})	缺锌 Zn-deficiency (μg·plant^{-1})	相对值 Relative value	对照 Control (μg·plant^{-1})	缺锌 Zn-deficiency (μg·plant^{-1})	相对值 Relative value	对照 Control (μg·plant^{-1})	缺锌 Zn-deficiency (μg·plant^{-1})	相对值 Relative value
山定子 *Malus baccata*	131.57±12.9Aabcd	78.02±2 8.24Bb	0.59	113.91±38.21Aa	32.42±3.51Bb	0.28	245.48±49.61Aa	110.44±31.72Bb	0.45
丽江山定子 *Malus rockii*	120.21±35.59Aabcd	19.10±11.71Bc	0.16	32.15±14.68Ac	7.34±3.21Bc	0.23	152.20±20.37Ab	26.44±4.75Bc	0.17
小金海棠 *Malus xiaojinensis*	150.68±28.17Aabc	129.73±39.63Aa	0.86	58.6±19.49Abc	61.56±16.79Ba	1.05	208.55±28.57Aab	195.52±11.51Aa	0.91
锡金海棠 *Malus sikkimensis*	163.37±12.55Aab	29.09±7.19Bc	0.18	39.78±11.98Abc	13.24±2.72Bc	0.33	203.16±57.59Aab	42.33±7.58Bc	0.21
新疆野苹果 *Malus sieversii*	173.94±58.83Aa	21.96±7.22Bc	0.13	70.20±15.92Ab	13.91±2.87Bc	0.20	244.15±24.47Aa	35.86±2.97Bc	0.15
八棱海棠 *Malus robusta*	108.35±26.21Abcd	37.50±15.86Bbc	0.35	40.67±15.81Abc	10.81±2.13Bc	0.27	149.02±40.87Ab	48.31±8.57Bc	0.32
平邑甜茶 *Malus hupehensis*	103.27±14.06Acd	51.94±6.79Bbc	0.50	64.32±12.74Abc	14.02±1.76Bc	0.22	167.59±41.73Aab	65.97±22.76Bbc	0.39
火焰海棠 *Malus*‘Flame’	91.06±42.41Ad	52.45±29.51Bbc	0.58	48.99±10.68Abc	5.78±1.57Bc	0.12	144.94±49.16Ab	75.62±43.72Bc	0.42

用效率最大;而且除小金海棠锌的利用效率和对照之间差异不显著外,其他砧木较对照均显著升高,这可能是由于小金海棠对缺锌胁迫不敏感所致.

2.5　苹果砧木幼苗各指标值间的相关系数

缺锌条件下,株高与单株生物量、根系平均直径、根系总体积、根系根尖数呈显著正相关(表 5),表明根系伸长及表面积增大是植株耐受逆境胁迫、维持正常生长的一种生理响应.单株锌含量与株高、单株生物量以及根系平均直径、总体积、平均直径、根尖数均呈显著正相关,说明在缺锌处理下,植株体内的锌含量对维持地上部及根系的正常生长及发育起着重要作用,表明植株体内的锌含量是评价植株健康生长的一个重要指标.

2.6　苹果砧木进行耐缺锌性评价和聚类分析

果树的抗逆性是一个复杂的综合性状,它受多种因素的影响.利用模糊数学隶属函数法对 8 个苹果砧木进行株高、生物量、根系构型参数、各器官锌含量和单株锌积累量进行隶属函数值计算,并求其总平均值,对参试材料进行耐缺锌性排名(表 7),从强到弱依次为:小金海棠、火焰海棠、山定子、平邑甜茶、八棱海棠、锡金海棠、丽江山定子、新疆野苹果.

以平均隶属度为指标,对各砧木的耐缺锌能力进行聚类分析(图 2).结果表明:第 1 类为小金海棠,第 2 类为火焰,第 3 类为山定子、锡金海棠、八棱

表 5 缺锌胁迫下苹果砧木各指标之间的相关系数

Table 5 Correlation coefficients among different physicochemical indices under Zn-deficiency stress

		株高 Plant height	单株生物量 Dry biomass per plant	根长度 Root length	根表面积 Root surface area	根平均直径 Root average diameter	根总体积 Root volume	根尖数 Root tips	锌含量 Zinc concentration 叶片 Leaf	锌含量 Zinc concentration 茎 Stem	锌含量 Zinc concentration 根 Root
单株生物量 Dry biomass per plant		0.763 *									
根长度 Root length		0.512	0.664								
根表面积 Root surface area		0.560	0.617	0.975 * *							
根平均直径 Root average diameter		0.890 * *	0.716 *	0.567	0.644						
根总体积 Root volume		0.852 * *	0.0916 * *	0.715 *	0.751 *	0.830 * *					
根尖数 Root tips		0.711 *	0.834 * *	0.952 * *	0.918 * *	0.715 *	0.842 * *				
锌含量 Zinc concentration	叶片 Leaf	0.191	0.517	0.726 *	0.714 *	0.431	0.503	0.655			
	茎 Stem	−0.246	−0.122	0.371	0.447	−0.128	0.083	0.137	0.507		
	根 Root	−0.191	0.209	0.607	0.557	0.138	0.148	0.455	0.832 * *	0.424	
单株锌积累量 Zinc accumulation per plant		0.573	0.828 * *	0.926 * *	0.907 * *	0.680 *	0.837 * *	0.938 * *	0.842 * *	0.325	0.622

* $P< 0.05$; * * $P<0.01$.

表 6 缺锌胁迫对苹果砧木锌转移系数及利用效率的影响

Table 6 Effects of Zn-deficiency stress on zinc transportation coefficient and utilization efficiency among apple rootstocks

砧木 Rootstock	锌转运系数 Zinc transportation coefficient 对照 Control	缺锌 Zn-deficiency	相对值 Relative value	锌利用效率 Zinc utilization efficiency 对照 Control	缺锌 Zn-deficiency	相对值 Relative value
山定子 *Malus baccata*	1.22±0.27Ac	2.36±0.61Ab	1.93	24.14±1.90Bd	40.85±3.56Ac	1.69
丽江山定子 *Malus rockii*	3.73±0.53Aab	2.60±0.62Ab	0.70	48.40±3.82Bb	92.51±7.52Aa	1.91
小金海棠 *Malus xiaojinensis*	2.57±0.23Abc	2.11±0.30Ab	0.82	45.27±7.00Ab	46.01±0.90Ac	1.02
锡金海棠 *Malus sikkimensis*	4.11±0.74Aa	2.34±0.90Ab	0.57	36.01±2.67Bbc	56.64±4.64Abc	1.57
新疆野苹果 *Malus sieversii*	2.56±0.76Abc	1.64±0.48Bc	0.64	37.50±6.79Bc	74.28±8.58Abc	1.98
八棱海棠 *Malus robusta*	2.76±0.44ABabc	3.90±0.96Ab	1.41	36.68±1.69ABbc	55.08±16.84Abc	1.50
平邑甜茶 *Malus hupehensis*	2.76±0.22ABc	4.08±1.09Ab	1.48	71.98±12.48Ba	93.61±23.20Aa	1.30
火焰海棠 *Malus* ‘Flame’	1.86±0.67Bc	9.08±1.50Aa	4.88	42.32±2.81Bbc	67.87±18.52Ab	1.60

表 7 参试苹果砧木对缺锌环境耐受性的模糊数学函数隶属法评价

Table 7 Zn-deficiency tolerance evaluation among 8 kinds of apple rootstocks using the method of fuzzy membership function

砧木 Rootstock	耐缺锌指标隶属函数值 Membership function value of Zn-deficiency tolerance 株高 Plant height	单株生物量 Dry Biomass per plant	根长 Root length	根表面积 Root surface area	根平均直径 Root average diameter	根体积 Root volume	根尖数 Root tips	锌含量 Zinc concentration 叶片 Leaf	锌含量 Zinc concentration 茎 Stem	锌含量 Zinc concentration 根 Root	单株锌积累量 Zinc accumulation per plant	平均隶属度 Average membership	耐缺锌性排序 Zn-deficiency resistance order
山定子 *Malus baccata*	0.305	0.535	0.261	0.287	0.263	0.145	0.173	0.735	0.174	0.301	0.395	0.325	3
丽江山定子 *Malus rockii*	0.232	0.201	0.201	0.250	0.163	0.171	0.130	0.020	0.000	0.386	0.026	0.162	7
小金海棠 *Malus xiaojinensis*	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1
锡金海棠 *Malus sikkimensis*	0.148	0.129	0.156	0.221	0.300	0.158	0.118	0.408	0.076	0.711	0.079	0.228	7
新疆野苹果 *Malus sieversii*	0.015	0.000	0.236	0.257	0.350	0.145	0.126	0.000	0.087	0.229	0.000	0.131	8
八棱海棠 *Malus robusta*	0.343	0.276	0.000	0.051	0.213	0.000	0.000	0.204	1.261	0.253	0.224	0.257	5
平邑甜茶 *Malus hupehensis*	0.518	0.309	0.126	0.000	0.000	0.184	0.248	0.612	0.098	0.458	0.316	0.261	4
火焰海棠 *Malus* ‘Flame’	0.839	0.587	0.045	0.199	0.375	0.474	0.004	0.347	1.424	0.000	0.355	0.423	2

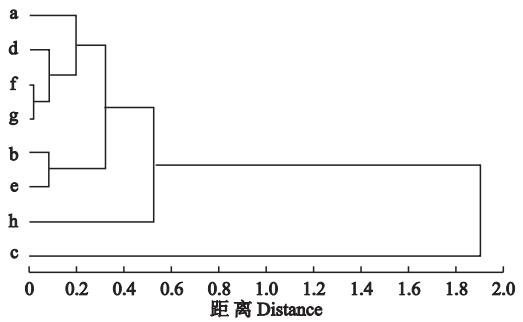


图 2　8 种苹果砧木的耐缺锌胁迫能力聚类分析(类平均数法)

Fig.2　Cluster analysis for zinc deficiency resistance of all rootstocks (method of average linkage cluster).

海棠、平邑甜茶,第 4 类为丽江山定子和新疆野苹果.即综合平均隶属度的大小可以把 8 个砧木分为 4 种耐缺锌胁迫类型,分别为耐缺锌能力最强的小金海棠,其次为火焰海棠,耐缺锌能力较弱的为山定子、锡金海棠、八棱海棠和平邑甜茶,耐缺锌能力最弱的为丽江山定子和新疆野苹果.

3　讨　　论

锌高效品种指植物在缺锌胁迫下仍能保持良好的长势及产量[23].缺锌胁迫初期,各苹果砧木均未表现出缺锌症状,而 8 月中旬,新疆野苹果、丽江山定子和锡金海棠相对于对照均逐渐表现出不同程度的新生叶片小和植株矮小等缺锌症状,表明不同砧木对缺锌胁迫表现出敏感性差异.本研究表明,缺锌处理显著抑制了丽江山定子、锡金海棠和新疆野苹果的正常生长,而对小金海棠、火焰海棠的影响较小.小金海棠在缺锌条件下通过增加根尖数、表面积等促进根系对土壤中矿质营养的吸收,维持地上部较好的长势,增加其对缺锌胁迫的抗性(图 1),这与 Cumbus[24] 对水稻的研究一致.Rengel 等[25] 报道,在养分缺乏环境下,敏感型作物品种为了获取营养以满足自身对养分的需求,会启动补偿机制,往往减少地上部生长以增加根的生长发育,但耐养分胁迫基因型的地上部分生长较强.本研究中,缺锌条件下,锡金海棠、新疆野苹果、丽江山定子和八棱海棠的根冠比显著高于对照,说明缺锌敏感型苹果砧木在逆境环境中通过增加根系生长以吸收更多养分和抑制地上部生长来适应缺锌胁迫,而山定子、平邑甜茶根冠比显著降低,说明耐养分胁迫品种地上部分长势较好,可产生更多干物质来增强抗逆能力.

不同品种对缺锌的敏感性差异在一定程度上取决于植株对锌的吸收利用能力[26-27].缺锌处理下各苹果砧木叶片、茎及根系中锌含量存在显著差异,小金海棠各器官的锌含量与对照相比差异不显著,表明其在缺锌条件下根系能够吸收土壤中较多的锌,以维持地上部较好的长势及较高的干物质量,从而增加对缺锌胁迫的抗性.丽江山定子和新疆野苹果叶片中锌含量显著低于对照,可能是导致其表现出明显缺锌症状的原因.相关性分析(表 5)显示,各砧木品种叶片及根系的锌含量与根系总长度和根系总表面积显著相关,这与 Graham[23] 对小麦的研究结果一致,即缺锌胁迫下,锌高效品种可以通过增加根系吸收面积促进对锌的吸收,增加其对缺锌胁迫的耐性.

缺锌条件下,8 个供试苹果砧木间的锌转运系数差异不显著,锌元素利用效率存在显著差异.与对照相比,缺锌胁迫下各砧木的锌元素利用效率显著上升,这与王金花等[28] 报道的锌缺乏条件下苹果砧木幼苗对锌的转运及利用能力较高一致.平邑甜茶、丽江山定子的锌元素利用效率较其他苹果砧木品种高,单位质量锌产生的干物质量较多;小金海棠的锌元素利用效率和对照之间差异不显著,这可能是由于大田缺锌条件下,小金海棠通过增加根系吸收面积(图 1)及调节根系内有机酸浓度促进根系对锌离子的吸收和转运[29-30],使其在缺锌环境中仍能维持地上部植株的正常生长,降低其对缺锌胁迫的敏感性.

植物对缺锌胁迫的响应是一个涉及多种代谢途径的复杂过程,采用单一指标评价其耐缺锌程度具有片面性,不能真实客观地反映植物在田间实际生长情况下的耐缺锌性表现.因此,进行植物耐缺锌资源评价鉴定时,应综合考虑各个指标对耐缺锌性的贡献.柴媛媛等[31] 采用模糊数学隶属函数法对盐胁迫下 10 种甜高粱种子各指标的隶属平均值进行综合评价,认为该种方法消除了若干指标间的差异,能够较为准确地评价甜高粱的耐缺锌性.本研究利用模糊数学隶属函数和聚类分析方法对参试的 8 个苹果砧木资源进行耐缺锌能力综合评价(表 7, 图 2),结果表明:耐缺锌能力最强的为小金海棠,其次为火焰海棠,山定子、锡金海棠、八棱海棠和平邑甜茶的耐缺锌能力较弱,丽江山定子和新疆野苹果的耐缺锌能力最弱.

参考文献

[1]　Alloway BJ. Zinc in Soil and Crop Nutrition. Paris, France: International Zinc Association, 2008

[2] Shu H-R (束怀瑞). Fruit Cultivation Theory and Practice. Beijing: China Agriculture Press, 2009 (in Chinese)
[3] Garcia G, Peñas JM, Manteca JI. Zn mobility and geochemistry in surface sulfide mining soils from SE Spain. *Environmental Research*, 2008, **106**: 333-339
[4] Sanders JR. The effect of pH on the total and free ionic concentrations of manganese, zinc and cobalt in soil solutions. *European Journal of Soil Science*, 1983, **34**: 315-323
[5] Hu X-Y (胡学玉), Li X-H (李学恒), Xie Z-C (谢振翅). Differences of Zn uptake in various pakchoi cultivars and relationship between Zn uptake and root exudates. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2002, **8**(2): 234-238 (in Chinese)
[6] Ji M-M (季萌萌), Xu H-G (许海港), Peng L (彭玲), *et al*. Characteristics of phosphorus absorption and utilization in five apple rootstocks under low phosphorus stress. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2014, **20**(4): 974-980 (in Chinese)
[7] Duarte L. The rootstock effect on some nutrient levels in leaves of apple trees. *Optimization of Plant Nutrition*, 1993, **53**: 133-136
[8] Zheng Y-Q (郑永强), Deng L (邓 烈), He S-L (何绍兰), *et al*. Effects of seven rootstocks on tree growth, yield and fruit quality of 'Hamlin' sweet orange in South China. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 2010, **37**(4): 532-538 (in Chinese)
[9] Han J (韩 佳), Zhou G-F (周高峰), Li Q-H (李峤虹), *et al*. Effects of magnesium, iron, boron deficiency on the growth and nutrition absorption of four major citrus rootstocks. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 2012, **39**(11): 2105-2112 (in Chinese)
[10] Schwarz D, Rouphael Y, Colla G, *et al*. Grafting as a tool to improve tolerance of vegetables to abiotic stresses: Thermal stress, water stress and organic pollutants. *Scientia Horticulturae*, 2010, **127**: 162-171
[11] Wang Z-Y (王中英), Gu R-Z (古润泽), Yang P-F (杨佩芳), *et al*. Studies on the mineral content of Zn on apple of different rootstocks. *Deciduous Fruits* (落叶果树), 1992(3): 9-12 (in Chinese)
[12] Han ZH, Shen T, Korak RF. Screening for iron-efficient species in the genus *Malus*. *Journal of Plant Nutrtion*, 1994, **17**: 579-592
[13] Camp WV. Enhancement or oxidative stress tolerance in transgenic tobacco plants overproducing Fe-superoxide dismutase in chloroplasts. *Plant Physiology*, 1996, **112**: 1703-1714
[14] Li Y-H (李英慧), Han Z-H (韩振海), Xu X-F (许雪峰). Fe-efficient traits and their relationships to chlorisis indexin genus *Malus*. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 2004, **31**(3): 350-352 (in Chinese)
[15] Cakmak I, Torun B, Erenoglu B, *et al*. Morphological and physiological differences in cereals in response to zinc deficiency. *Euphytica*, 1998, **100**: 349-357
[16] Zarcinas BA, Carwright B, Spouncer LR. Nitric acid digestion and multi-element analysis of plant material by inductively coupled plasma spectrometry. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1987, **18**: 131-146
[17] Mishra NP, Misha RK, Singlral CS. Changes in the activities of anti-oxidant enzymes during exposure on intact wheat leaves to strong visible light at different temperatures in the presence of protein synthesis inhibitors. *Plant Physiology*, 1993, **102**: 903-910
[18] Liu M-X (刘敏轩), Zhang Z-W (张宗文), Wu B (吴 斌), *et al*. Evaluation of mixed salt-tolerance at germination stage and seedling stage and the related physiological characteristics of *Panicum miliaceum* L. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2012, **45**(18): 3733-3743 (in Chinese)
[19] Wang L-P (王丽萍), Sun J (孙 锦), Guo S-R (郭世荣), *et al*. Salt stress tolerance of cucumber-grafted rootstocks. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(5): 1311-1318 (in Chinese)
[20] Li Z (李 真), Pu Y-Y (蒲圆圆), Gao C-B (高长斌), *et al*. Evaluation of waterlogging tolerance in rapeseed (*Brassica napus* L.) DH lines at seedling stage. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2010, **43**(2): 286-292 (in Chinese)
[21] Zhang Z-M (张智猛), Ci D-W (慈敦伟), Ding H (丁 红), *et al*. Indices selection and comprehensive evaluation of salinity tolerance for peanut varieties. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(12): 3487-3494 (in Chinese)
[22] Swietlik D. Zinc nutrition of fruit crops. *HortTechnology*, 2002, **12**: 45-50
[23] Graham RD. Breeding for nutritional characteristics in cereals. *Advances in Plant Nutrition*, 1984, **1**: 57-102
[24] Cumbus IP. Development of wheat roots under zinc deficiency. *Plant and Soil*, 1985, **83**: 313-316
[25] Rengel Z, Römheld V. Differential tolerance to Fe and Zn deficiencies in wheat germ plasma. *Euphytica*, 2000, **113**: 219-225
[26] Hacisalihoglu G, Ozturk L, Cakmak I, *et al*. Genotypic variation in common bean in response to zinc deficiency in calcareous soil. *Plant and Soil*, 2004, **259**: 71-83
[27] Gao XP, Zou CQ, Zhang FZ, *et al*. Tolerance to zinc deficiency in rice correlates with zinc uptake and translocation. *Plant and Soil*, 2005, **78**: 253-261
[28] Wang J-H (王金花), Liu F (刘 飞), Fu C-X (付春霞), *et al*. Effects of zinc deficiency stress on the root architecture and zinc accumulation of the different apple rootstocks. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 2012, **39**(4): 613-620 (in Chinese)
[29] Liu D (刘 娣), Liu A-H (刘爱红), Wang J-H (王金花), *et al*. Organic acids in apple trees and their effects on zinc uptake and distribution under zinc deficiency. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2010, **43**(16): 3381-3391 (in Chinese)
[30] Liu D, Liu AH, He C, *et al*. Response of organic acids to zinc homeostasis in zinc-deficient and zinc-toxic apple rootstock roots. *Pedosphere*, 2012, **22**: 803-814
[31] Chai Y-Y (柴媛媛), Shi T-S (史团省), Gu W-B (谷卫彬). Response to salt stresses and salt resistance evaluation of sweet sorghum during seed germination stage. *Seed* (种子), 2008, **27**(2): 43-46 (in Chinese)

作者简介 范晓丹,女,1989 年生,硕士研究生. 主要从事果树锌营养生理研究. E-mail: fxd889@163.com

责任编辑 孙 菊