

土壤中根皮苷和根皮素对桃幼苗的影响

张素素¹, 徐少卓¹, 孙申义², 王嘉艳³, 陈学森¹, 沈 向¹, 尹承苗^{1,*},
毛志泉^{1,*}

(¹ 山东农业大学园艺科学与工程学院, 作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018; ² 山东省招远市果业总站, 山东招远 265400; ³ 山东省荣成市果茶技术推广站, 山东荣成 264300)

摘 要: 以一年生桃嫁接苗为试材, 在盆栽条件下研究了苹果园土壤中特征酚酸类物质——根皮苷和根皮素对桃苗生物量、根系活力、根系保护性酶活性和 MDA 含量的影响。结果表明, 根皮苷对桃幼苗的伤害显著, 与对照相比, 鲜质量、干质量分别降低了 16.66% 和 21.58%, 根系活力降低了 33.04%, SOD、POD 活性分别降低了 40.80% 和 31.10%, MDA 含量提高了 116.34%。根皮素对桃苗的影响不大。高锰酸钾处理明显缓解了根皮苷对桃苗的伤害, 苹果园土壤中的根皮苷含量降低了 57.80%, 提高了桃苗的生物量、根系活力和保护性酶活性, 降低了 MDA 含量。综上, 老龄苹果园土壤实测含量的根皮苷 (0.343 mg·kg⁻¹) 可降低桃苗的生物量, 适量的高锰酸钾能缓解根皮苷的伤害作用。

关键词: 桃; 嫁接苗; 土壤; 酚酸; 根皮苷; 保护性酶; 高锰酸钾

中图分类号: S 662.1

文献标志码: A

文章编号: 0513-353X (2017) 06-1167-07

Effects of Phloridzin and Phloretin on *Prunus persica* Grafted Seedlings

ZHANG Susu¹, XU Shaozhuo¹, SUN Shenyi², WANG Jiayan³, CHEN Xuesen¹, SHEN Xiang¹,
YIN Chengmiao^{1,*}, and MAO Zhiquan^{1,*}

(¹College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an, Shandong 271018, China; ²Zhaoyuan Fruit Station, Zhaoyuan, Shandong 265400, China; ³Fruit Tea Technical Extension Station of Rongcheng City of Shandong Province, Rongcheng, Shandong 264300, China)

Abstract: The effects of phloridzin and phloretin (typical phenolic acids in the soil of apple orchard) on the plant biomass, root activity, protective enzyme activities and the content of malondialdehyde (MDA) of one year *Prunus persica* grafted seedlings were studied under pot condition. The results showed that phloridzin could significantly damage the *Prunus persica* grafted seedlings, compared with the control, the fresh and dry weight reduced by 16.66% and 21.58%, respectively. The root activity reduced by 33.04%, and the activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) reduced by 40.80% and 31.10%, while the content of MDA increased by 116.34%. Phloretin had little effect on the *Prunus persica* grafted seedlings. Potassium permanganate obviously alleviated the damage of phloridzin to *Prunus persica* grafted seedlings, significantly reduced the content of phloridzin in the apple orchard

收稿日期: 2017-01-20; **修回日期:** 2017-05-25

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项资金项目 (CARS-28); 国家自然科学基金项目 (31501720, 31672104); 国家重点研发计划项目 (2016YFD0201114); 山东省自然科学基金项目 (ZR2014CL024); 山东省水果创新团队项目 (SDAIT-06-07)

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: mzhiquan@sdaa.edu.cn; yinchengmiao@163.com)

soil by 57.80%, improved the biomass, root activity, protective enzyme activities of the peach seedlings and reduced the content of MDA. In conclusion, phloridzin($0.343 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) measured in old apple orchard soil could reduced the biomass of the peach seedlings, and moderate potassium permanganate could alleviate the damage of phloridzin on the peach seedlings.

Keywords: *Prunus persica*; grafted seedling; soil; phenolic acid; phloridzin; protective enzyme; potassium permanganate

植物或微生物的代谢分泌物对环境其他植物或微生物有利或不利的的作用, 称为化感作用。植物可以通过地上部分淋溶、根系分泌物和残茬分解等途径向土壤中释放一些化感物质, 酚酸作为重要的化感物质对次年作物生长具有破坏性的影响(Rice, 1984; Singh et al., 2001)。在自然界中, 植物分泌的化感物质影响其他植物生长的现象广泛存在。油蒿(*Artemisia ordosica*)中的化感物质使其周围缺少某些一年生植物(马茂华等, 1999); 小无花果树、朴树、红橡树和白橡树等林下植被生长不良或者会出现裸地, 而榆树林下植被生长良好(Lodhi, 1997)。草莓(甄文超等, 2004)、黄瓜(吕卫光等, 2002)、大豆(阎飞等, 2000)、豌豆(喻景权和松井佳久, 1999)等作物的化感物质会造成减产、病害加重等问题。杉木、桉树人工速生丰产林常常会引起地力衰退、生产力下降等现象, 往往归因于土壤中化感物质大量积累。酚酸类物质是重要的化感物质, 具有较强化感活性(谢星光等, 2014)。众多研究认为, 酚酸类物质是引起苹果连作障碍的重要因素(Wittenmayer & Szabó, 2000; Bai et al., 2009; Asaduzzaman & Asao, 2012)。张兆波等(2011)的研究表明, 酚酸类物质抑制了平邑甜茶植株的生长, 降低了根系 SOD、POD、CAT 活性, 使线粒体功能受到损伤。王青青等(2012)研究发现一定浓度的根皮苷使平邑甜茶根系呼吸速率下降, 降低了 TCA 循环的 7 种酶活性。植物间的化感作用不仅在同一物种, 在其他种类植物间也广泛存在。彭少麟和邵华(2001)的研究发现, 蕨类生长茂盛的地方没有其他草本植物, 主要原因是蕨类枯死枝叶中含有阿魏酸和咖啡酸等酚酸类物质, 渗入到土壤中抑制其他植物的生长。Hao 等(2007)的研究表明, 西瓜根系分泌物中含有大量阿魏酸, 对莴苣幼苗有显著的抑制作用。

生产中, 存在老龄苹果园改种植桃的现象, 老龄苹果园土壤中含有大量酚酸类物质, 特别是根皮苷和根皮素, 据报道这两种物质不利于新植平邑甜茶(苹果常用砧木)幼苗的生长(张江红, 2005; 王艳芳等, 2015; 尹承苗等, 2016), 但是它们对桃苗有无影响, 尚未见报道。

通过向麦田土中添加老龄苹果园土壤中特有的根皮苷、根皮素, 研究其对桃幼苗的影响, 探讨减轻伤害的措施, 以期为苹果园改植桃树提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2015—2016 年在山东农业大学南校区国家苹果工程技术研究中心试验基地进行。供试材料为一年生‘春雪’桃幼苗(毛桃砧木)。试验用土取自山东省泰安市满庄镇 25 年的老龄苹果园土和接壤的麦田土, 老龄苹果园土取自距树干 80 cm, 深 0~30 cm 的范围内, 多点随机取土, 混匀; 麦田土也采取多点取样法取土。试验用泥瓦盆上部内径 42 cm, 盆底内径 38 cm, 高 32 cm, 每盆装土 13.5 kg。根皮苷、根皮素和高锰酸钾均为分析纯。

1.2 试验设计

2015 年试验处理为: 麦田土(对照)、麦田土添加根皮苷、麦田土添加根皮素、苹果园土。2016 年试验处理为: 麦田土、苹果园土、苹果园土添加高锰酸钾。4 月底选取长势基本一致的一年生‘春雪’桃幼苗, 栽植于泥瓦盆中, 定干至 15 cm, 正常管理, 每盆定植 1 株幼苗, 每个处理设置 20 盆重复。8 月底进行取样测定。

2015 年 4 月份, 多点取样取老苹果园土, 混匀, 室温风干, 过 12 目筛, 用加速溶剂萃取法提取土壤中酚酸, 然后用高效液相色谱仪测定酚酸类物质含量, 3 个重复(尹承苗 等, 2013)。老苹果园土壤中的酚酸类物质的实测含量为根皮苷 $0.343 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 根皮素 $0.104 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。5 月底根据所测酚酸类物质含量, 称出每盆需用根皮苷、根皮素的量, 用无水乙醇溶解, 然后溶于 200 mL 水中, 均匀浇施于泥瓦盆土壤中, 使土壤中根皮苷、根皮素含量与老苹果园土壤中的一致。高锰酸钾用量为土壤质量的 1% (毛志泉 等, 2012), 与土拌匀, 浇透水, 1 周后种植桃苗。

1.3 测定指标

采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定根系活力(赵世杰 等, 2002), 用四氮唑的还原强度($\mu\text{g} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$)表示根系活力。

超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)光还原法测定(赵世杰 等, 2002); 过氧化物酶(POD)的活性测定按 Omran(1980)的方法测定; 过氧化氢酶(CAT)的活性和丙二醛(MDA)的含量按照赵世杰等(2002)的方法测定。

1.4 数据分析

用 Excel 2003 进行原始数据处理, 通过 SPSS19.0 软件进行方差分析, 采用邓肯氏新复极差法进行差异显著性检测。

2 结果与分析

2.1 酚酸类物质对桃幼苗的影响

2.1.1 生物量和根系活力

由表 1 可以看出, 麦田土对照生物量最高, 其次是根皮素和根皮苷处理, 苹果园土最低。与麦田土对照相比, 根皮苷和苹果园土显著降低了桃幼苗的生物量, 株高、地径、鲜质量、干质量分别降低了 11.18%、10.49%、16.66%、21.58%和 13.42%、17.63%、28.11%、35.66%; 添加根皮素处理与麦田土对照没有达到显著性差异。根皮苷、根皮素和苹果园土处理均显著降低了桃幼苗的根系活力, 根系活力分别降低了 33.04%、20.83%和 49.81%。

2.1.2 根系保护性酶活性及 MDA 含量

由表 2 可以看出, 与麦田土对照相比, 苹果园土处理的 SOD、POD 和 CAT 活性分别降低了 52.15%、46.01%和 27.95%; 根皮苷处理的根系 SOD 和 POD 活性分别降低了 40.80%和 31.10%; 根皮素处理与麦田土对照差异不显著。苹果园土和根皮苷处理使 MDA 含量显著升高, 分别为对照的 2.13 倍和 2.16 倍, 根皮素处理与对照差异不显著。

表 1 苹果园土壤中酚酸类物质对桃幼苗生物量及根系活力的影响
Table 1 Effects of phenolic acids on plant biomass and root activity of *Prunus persica* grafted seedlings

处理 Treatment	株高/cm Plant height	地径/mm Ground diameter	鲜质量/g Fresh weight	干质量/g Dry weight	根系活力/ ($\mu\text{g} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$) Root activity
麦田土 (对照) Wheat field soil (control)	104.33 \pm 5.17 a	13.44 \pm 0.53 a	207.08 \pm 12.41 a	108.66 \pm 6.28 a	104.86 \pm 3.51 a
麦田土添加根皮苷 Wheat field soil with phloridzin	92.67 \pm 2.19 b	12.03 \pm 0.51 ab	172.58 \pm 9.70 bc	85.21 \pm 6.08 bc	70.21 \pm 2.42 b
麦田土添加根皮素 Wheat field soil with phloretin	94.67 \pm 1.20 ab	13.18 \pm 0.57 a	197.25 \pm 5.42 ab	95.52 \pm 4.06 ab	83.02 \pm 2.25 b
苹果园土 Apple orchard soil	90.33 \pm 3.38 b	11.07 \pm 0.02 b	148.87 \pm 8.57 c	69.91 \pm 4.05 c	52.63 \pm 7.72 c

注：表中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。
Note: Different letters in the table stand for the significant difference at the 0.05 level. The same below.

表 2 2015 年不同处理对桃幼苗根系 SOD、POD、CAT 活性及 MDA 含量的影响
Table 2 Effects of different treatments on SOD, POD, CAT activities and MDA content in root of *Prunus persica* grafted seedlings in 2015

处理 Treatment	SOD 活性/ ($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$) SOD activity	POD 活性/ ($\text{U} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$) POD activity	CAT 活性/ ($\text{U} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$) CAT activity	MDA 含量/ ($\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$) MDA content
麦田土 (对照) Wheat field soil (control)	225.80 \pm 12.00 a	110.93 \pm 12.98 a	53.24 \pm 5.36 a	1.53 \pm 0.21 b
麦田土添加根皮苷 Wheat field soil with phloridzin	133.68 \pm 21.66 b	76.43 \pm 6.71 bc	42.48 \pm 2.50 ab	3.31 \pm 0.15 a
麦田土添加根皮素 Wheat field soil with phloretin	207.45 \pm 6.61 a	97.96 \pm 10.60 ab	47.25 \pm 3.44 ab	1.20 \pm 0.28 b
苹果园土 Apple orchard soil	108.05 \pm 12.04 b	59.89 \pm 4.71 c	38.36 \pm 1.06 b	3.26 \pm 0.21 a

2.2 高锰酸钾的缓解作用

2.2.1 对土壤中根皮苷和根皮素含量的影响

由表 3 可以看出，高锰酸钾处理土壤中根皮苷含量较苹果园土降低了 57.80%，根皮素含量与苹果园土处理差异不大。

表 3 2016 年不同处理土壤中根皮苷和根皮素含量
Table 3 The content of phloridzin and phloretin in soils treated with different treatments in 2016

处理 Treatment	根皮苷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Phloridzin	根皮素/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Phloretin
麦田土 Wheat field soil	0 c	0 b
苹果园土 Apple orchard soil	0.391 \pm 0.019 a	0.029 \pm 0.003 a
高锰酸钾处理苹果园土 The soil of apple orchard treated by KMnO_4	0.165 \pm 0.025 b	0.026 \pm 0.004 a

2.2.2 对桃幼苗生物量及根系活力的影响

由表 4 可以看出，与麦田土对照相比，苹果园土处理显著降低了桃幼苗的生物量。2015、2016 年趋势一致。与苹果园土处理相比，高锰酸钾处理则显著提高了桃幼苗的生物量，高锰酸钾处理的株高、地径、鲜质量、干质量分别提高了 27.02%、20.98%、62.10%、58.85%，高锰酸钾处理还显著提高了桃幼苗的根系活力，提高了 49.19%。

2.2.3 对桃幼苗根系保护性酶活性及MDA含量的影响

与麦田土对照相比，苹果园土处理显著降低了根系 SOD、POD、CAT 活性（表 5），2015、2016 年趋势一致。与苹果园土相比，加入高锰酸钾后，对由酚酸造成的上述酶活性的下降起到了一定的缓解作用，高锰酸钾处理的 SOD、POD、CAT 活性分别提高了 56.69%、102.40%、109.79%。与苹

果园土相比, 高锰酸钾处理还显著降低了根系 MDA 含量, 降低了 31.48%。

表 4 2016 年苹果园土中酚酸类物质对桃幼苗生物量和根系活力的影响及高锰酸钾的缓解作用

处理 Treatment	株高/cm Plant height	地径/mm Ground diameter	鲜质量/g Fresh weight	干质量/g Dry weight	根系活力/ ($\mu\text{g} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$) Root activity
麦田土 (对照) Wheat field soil (control)	138.67 ± 10.11 a	15.97 ± 0.50 a	411.14 ± 7.57 a	170.11 ± 0.77 a	71.24 ± 1.01 a
苹果园土 Apple orchard soil	107.33 ± 6.23 b	12.44 ± 0.60 b	206.88 ± 6.57 c	92.14 ± 4.26 c	31.98 ± 0.97 c
苹果园土添加高锰酸钾 The soil of apple orchard treated by KMnO_4	136.33 ± 4.26 a	15.05 ± 0.36 a	335.35 ± 16.91 b	146.36 ± 6.71 b	47.71 ± 2.84 b

表 5 2016 年不同处理对桃幼苗根系 SOD、POD、CAT 活性及 MDA 含量的影响

处理 Treatment	SOD 活性/ ($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$) SOD activity	POD 活性/ ($\text{U} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$) POD activity	CAT 活性/ ($\text{U} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$) CAT activity	MDA 含量/ ($\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$) MDA content
麦田土 (对照) Wheat field soil (control)	285.36 ± 4.60 a	281.37 ± 8.34 a	55.96 ± 6.50 a	2.84 ± 0.04 b
苹果园土 Apple orchard soil	146.80 ± 8.03 c	121.25 ± 12.12 b	19.92 ± 1.05 c	5.40 ± 0.70 a
苹果园土添加高锰酸钾 The soil of apple orchard treated by KMnO_4	230.02 ± 11.52 b	245.41 ± 10.80 a	41.79 ± 2.40 b	3.70 ± 0.18 b

3 讨论

本试验结果表明, 老龄苹果园土中存在的化感物质抑制了桃苗的生长, 在苹果园土中种植桃苗的干、鲜质量显著低于麦田土。酚酸类物质可以增加细胞膜透性, 导致细胞内溶物外流, 诱导脂质过氧化, 最终抑制植物生长或导致组织坏死 (Li et al., 2010)。吕卫光等 (2002) 的研究表明, 酚酸类物质也可以抑制植物对矿质营养元素的吸收, 如黄瓜根系分泌物中的苯丙烯酸、对羟基苯甲酸, 可以显著抑制黄瓜根系对 K^+ 、 NO_3^- 和 H_2PO_4^- 的吸收。根皮苷、根皮素是苹果属植物特征性酚酸类物质 (Gosch et al., 2010)。尹承苗等 (2016) 研究发现根皮苷和根皮素都对平邑甜茶幼苗有伤害作用, 抑制其生长。而本试验中发现, 在麦田土中添加实测含量的根皮苷 ($0.343 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和根皮素 ($0.104 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 只有根皮苷能显著抑制桃苗的生长, 与麦田土对照相比, 桃苗的干、鲜质量分别降低了 21.58% 和 16.66%。然而, 实测含量的根皮素对桃苗的生长没有显著影响。

土壤酚酸类物质积累到一定程度会对作物根系造成逆境胁迫 (张兆波 等, 2011; Han et al., 2012)。根系活力下降, 直接影响到矿质营养的吸收 (Abenavoli et al., 2001; Cesco et al., 2010, 2012), 进而影响植物生长。本试验结果表明, 实测含量的根皮苷显著降低了桃苗的根系活力, 根皮素对桃苗的根系活力没有显著影响。在正常条件下, 植物细胞中自由基的产生与清除在抗氧化系统的参与下保持着动态平衡。在逆境胁迫条件下, 抗氧化酶系统与自由基之间的动态平衡被打破, 就会对植物造成伤害 (尹永强 等, 2007)。生物体自身有 SOD、POD、CAT 等酶保护来清除产生的自由基, 以减轻伤害。本试验结果表明, 根皮苷显著降低了桃苗根系的 SOD 和 POD 活性, 自由基积累增多, 破坏了根系正常的生理功能。根皮苷还显著增加了根系 MDA 含量, 表明根皮苷作为导致苹果连作障碍的化感物质对下茬桃苗有毒害作用。酚酸类物质可被某些化学物质 (如 H_2O_2) 等氧化降解 (Kobayashi et al., 2004; Li et al., 2007) 而降低毒性。苹果土中添加适量的高锰酸钾, 显著降低了土壤中根皮苷的含量, 提高了桃苗根系 SOD、POD、CAT 活性, 提高了根系活力, 缓解了根皮苷对桃苗根系的伤害。

本文中仅探讨了根皮苷、根皮素对轮作桃幼苗的影响, 其他的化感物质以及主要有害微生物对桃幼苗有无影响, 仍需进一步研究。

References

- Abenavoli M R, De Santis C, Sidari M, Sorgonà A, Badiani M, Cacco G. 2001. Influence of coumarin on the net nitrate uptake in durum wheat. *New Phytologist*, 3: 619 - 627.
- Asaduzzaman M, Asao T. 2012. Autotoxicity in beans and their allelochemicals. *Scientia Horticulturae*, 134: 26 - 31.
- Bai R, Ma F, Liang D, Zhao X. 2009. Phthalic acid induces oxidative stress and alters the activity of some antioxidant enzymes in roots of *Malus prunifolia*. *Journal of Chemical Ecology*, 35 (4): 488 - 494.
- Cesco S, Mimmo T, Tonon G, Tomasi N, Pinton R, Terzano R, Neumann G, Weisskopf L, Renella G, Landi L, Nannipieri P. 2012. Plant-borne flavonoids released into the rhizosphere: impact on soil bio-activities related to plant nutrition. A review. *Biology and Fertility of Soils*, 48 (2): 123 - 149.
- Cesco S, Neumann G, Tomasi N, Pinton R, Weisskopf L. 2010. Release of plant-borne flavonoids into the rhizosphere and their role in plant nutrition. *Plant and Soil*, 329 (1 - 2): 1 - 25.
- Gosch C, Halbwirth H, Stich K. 2010. Phloridzin: biosynthesis, distribution and physiological relevance in plants. *Phytochemistry*, 71 (8): 838 - 843.
- Han C M, Li C L, Ye S P, Wang H, Pan K W, Wu N, Wang Y J, Li W, Zhang L. 2012. Autotoxic effects of aqueous extracts of ginger on growth of ginger seedlings and on antioxidant enzymes, membrane permeability and lipid peroxidation in leaves. *Allelopathy Journal*, 30 (2): 259 - 270.
- Hao Z P, Wang Q, Christie P, Li X L. 2007. Allelopathic potential of watermelon tissues and root exudates. *Scientia Horticulturae*, 112 (3): 315 - 320.
- Kobayashi K. 2004. Factors affecting phytotoxic activity of allelochemicals in soil. *Weed Biology and Management*, 4 (1): 1 - 7.
- Li Hai-hang, Gong Li-hong, Zhang Zong-yao, Wu Yi-liang, Li Ling. 2007. Degradation of phenolic allelochemicals in bamboo soil by Fenton's reagent. *Journal of Tropical and Subtrop Botany*, 15 (6): 513 - 520.
- Li Z H, Wang Q, Ruan X, Pan C D, Jiang D A. 2010. Phenolics and plant allelopathy. *Molecules*, 15 (12): 8933 - 8952.
- Lodhi M A K. 1977. The influence and comparison of individual forest trees on soil properties and possible inhibition of nitrification due to intact vegetation. *American Journal of Botany*, 64: 260 - 264.
- Lü Wei-guang, Zhang Chun-lan, Yuan Fei, Peng Yu. 2002. Mechanism of allelochemicals inhibiting continuous cropping cucumber growth. *Scientia Agricultura Sinica*, 35 (1): 106 - 109. (in Chinese)
- 吕卫光, 张春兰, 袁飞, 彭宇. 2002. 化感物质抑制连作黄瓜生长的作用机理. *中国农业科学*, 35 (1): 106 - 109.
- Ma Mao-hua, Yu Feng-lan, Kong Ling-shao. 1999. Allelopathy effects of *Artemisia ordosica*. *Acta Ecologica Sinica*, 19 (5): 670 - 676. (in Chinese)
- 马茂华, 于凤兰, 孔令韶. 1999. 油蒿 (*Artemisia ordosica*) 的化感作用研究. *生态学报*, 19 (5): 670 - 676.
- Mao Zhi-quan, Shen xiang, Liu En-tai, Wang Qing-qing. 2012. A method for the degradation of phloridzin. Chinese Patent: CN102726269A, 2012 - 10 - 17. (in Chinese)
- 毛志泉, 沈向, 刘恩太, 王青青. 2012. 一种降解根皮苷的方法. 中国专利: CN102726269A, 2012 - 10 - 17.
- Omran R G. 1980. Peroxide levels and the activities of catalase, peroxidase, and indoleacetic acid oxidase during and after chilling cucumber seedlings. *Plant Physiology*, 65 (2): 407 - 408.
- Peng Shao-lin, Shao Hua. 2001. Research significance and foreground of allelopathy. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 12 (5): 780 - 786. (in Chinese)
- 彭少麟, 邵华. 2001. 化感作用的研究意义及发展前景. *应用生态学报*, 12 (5): 780 - 786.
- Rice E L. 1984. Allelopathy. 2nd ed. New York: Academic Press: 1 - 5, 309 - 315.
- Singh H P, Batish D R, Kohli R K. 2001. Allelopathy in agroecosystems: an overview. *Journal of Crop Production*, 4 (2): 1 - 41.
- Wang Qing-qing, Hu Yan-li, Zhou Hui, Zhan Xing, Mao Zhi-quan, Zhu Shu-hua. 2012. Effects of phloridzin on the tricarboxylic acid cycle enzymes of roots of *Malus hupehensis* Rehd. *Scientia Agricultura Sinica*, 45 (15): 3108 - 3114. (in Chinese)

- 王青青, 胡艳丽, 周 慧, 展 星, 毛志泉, 朱树华. 2012. 根皮苷对平邑甜茶根系 TCA 循环酶的影响. 中国农业科学, 45 (15): 3108 - 3114.
- Wang Yan-fang, Pan Feng-bing, Zhan Xing, Wang Gong-shuai, Zhang Guo-dong, Hu Yan-li, Chen Xue-sen, Mao Zhi-quan. 2015. Effects of five kinds of phenolic acid on the function of mitochondria and antioxidant systems in roots of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings. Acta Ecologica Sinica, 35 (19): 6566 - 6573. (in Chinese)
- 王艳芳, 潘凤兵, 展 星, 王功帅, 张国栋, 胡艳丽, 陈学森, 毛志泉. 2015. 连作苹果土壤酚酸对平邑甜茶幼苗的影响. 生态学报, 35 (19): 6566 - 6573.
- Wittenmayer L, Szabó K. 2000. The role of root exudates in specific apple (*Malus × domestica* Borkh.) replant disease (SARD). Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 163 (4): 399 - 404.
- Xie Xing-guang, Chen Yan, Bu Yuan-qing, Dai Chuan-chao. 2014. A review of allelopathic researches on phenolic acids. Acta Ecologica Sinica, 34 (22): 6417 - 6428. (in Chinese)
- 谢星光, 陈 晏, 卜元卿, 戴传超. 2014. 酚酸类物质的化感作用研究进展. 生态学报, 34 (22): 6417 - 6428.
- Yan fei, Han Li-mei, Sun Yan, Liu Jin-ping. 2000. Bioassay with extraction of allelochemicals in soybean soil on continuous cropping. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 25 (1): 7 - 11. (in Chinese)
- 阎 飞, 韩丽梅, 孙 衍, 刘金萍. 2000. 大豆连作土壤中化感物质浸提剂的生物筛选. 吉林农业科学, 25 (1): 7 - 11.
- Yin Cheng-miao, Hu Yan-li, Wang Gong-shuai, Zhang Xian-fu, Zhou Hui, Shen Xiang, Chen Xue-sen, Mao Zhi-quan. 2016. Effect of main phenolic acids of the apple replanted soil on the roots of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings. Scientia Agricultura Sinica, 49 (5): 961 - 969. (in Chinese)
- 尹承苗, 胡艳丽, 王功帅, 张先富, 周 慧, 沈 向, 陈学森, 毛志泉. 2016. 苹果连作土壤中主要酚酸类物质对平邑甜茶幼苗根系的影响. 中国农业科学, 49 (5): 961 - 969.
- Yin Cheng-miao, Wang Gong-shuai, Li Yuan-yuan, Che Jin-shui, Shen Xiang, Chen Xue-sen, Mao Zhi-quan, Wu Shu-jing. 2013. A new method for analysis of phenolic acids in the soil - soil from replanted apple orchards was investigated. Scientia Agricultura Sinica, 46 (21): 4612 - 4619. (in Chinese)
- 尹承苗, 王功帅, 李园园, 车金水, 沈 向, 陈学森, 毛志泉, 吴树敬. 2013. 一种分析土壤中酚酸类物质含量的新方法——以连作苹果园土壤为试材. 中国农业科学, 46 (21): 4612 - 4619.
- Yin Yong-qiang, Hu Jian-bin, Deng Ming-jun. 2007. Latest development of antioxidant system and responses to stress in plant leaves. Chinese Agricultural Science Bulletin, 23 (1): 105 - 110. (in Chinese)
- 尹永强, 胡建斌, 邓明军. 2007. 植物叶片抗氧化系统及其对逆境胁迫的响应研究进展. 中国农学通报, 23 (1): 105 - 110.
- Yu Jing-song, Matsui Yoshihisa. 1999. Autointoxication of root exudates in *Riscum sativa*. Acta Horticulturae Sinica, 26 (3): 175 - 179. (in Chinese)
- 喻景权, 松井佳久. 1999. 豌豆根系分泌物自毒作用的研究. 园艺学报, 26 (3): 175 - 179.
- Zhang Jiang-hong. 2005. Allelopathic effect of phenolics and its role on apple replant disease mechanism [Ph. D. Dissertation]. Tai' an: Shandong Agricultural University. (in Chinese)
- 张江红. 2005. 酚类物质对苹果的化感作用及重茬障碍影响机理的研究 [博士论文]. 泰安: 山东农业大学.
- Zhang Zhao-bo, Mao Zhi-quan, Zhu Shu-hua. 2011. Effects of phenolic acids on mitochondria and the activity of antioxidant enzymes in roots of seedlings of *Malus hupehensis* Rehd. Scientia Agricultura Sinica, 44 (15): 3177 - 3184. (in Chinese)
- 张兆波, 毛志泉, 朱树华. 2011. 6 种酚酸类物质对平邑甜茶幼苗根系线粒体及抗氧化酶活性的影响. 中国农业科学, 44 (15): 3177 - 3184.
- Zhao Shi-jie, Shi Guo-an, Dong Xin-chun. 2002. Direction for plant physiology experiments. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. (in Chinese)
- 赵世杰, 史国安, 董新纯. 2002. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业科技出版社.
- Zhen Wen-chao, Cao Ke-qiang, Dai Li, Zhang Xue-ying. 2004. Simulation of autotoxicity of strawberry root exudates under continuous cropping. Acta Phytoecologica Sinica, 28 (6): 828 - 832. (in Chinese)
- 甄文超, 曹克强, 代 丽, 张雪英. 2004. 连作草莓根系分泌物自毒作用的模拟研究. 植物生态学报, 28 (6): 828 - 832.