

土壤 pH 对富士苹果生长及碳氮利用特性的影响

葛顺峰¹, 季萌萌¹, 许海港¹, 郝文强², 魏绍冲¹, 姜远茂^{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 栖霞市果业发展局, 山东栖霞 265300)

摘要: 以 2 年生富士 (*Malus × domestica* Borkh. 'Red Fuji') / 平邑甜茶 (*Malus hupehensis*) 为试材, 采用碳氮双标记技术, 研究了 6 个不同土壤 pH 处理 (pH 6.83、6.40、5.87、5.29、4.58 和 3.82) 对植株生长及碳氮利用特性的影响。研究表明: 苹果植株根系、地上部、植株总干质量、根冠比、叶片净光合速率和 ¹⁵N 利用率均随土壤 pH 的降低而降低, 且土壤 pH 越低降低幅度越大。各器官的 ¹⁵N 和 ¹³C 分配率在不同土壤 pH 处理间呈现相同的变化规律: 叶最多, 其次是 1 年生茎, 然后是根, 最少为 2 年生茎。同一器官不同土壤 pH 处理间 ¹⁵N 和 ¹³C 分配率存在差异, 以根和叶最为显著; 随土壤 pH 的降低, 叶中的 ¹⁵N 和 ¹³C 分配率逐渐升高, 而根中的 ¹⁵N 和 ¹³C 分配率则逐渐降低。

关键词: 苹果; 土壤 pH; 生长; ¹³C; ¹⁵N; 分配和利用

中图分类号: S 661.1

文献标志码: A

文章编号: 0513-353X (2013) 10-1969-07

Effects of Soil pH on Growth, Distribution and Utilization of Carbon and Nitrogen of *Malus × domestica* 'Red Fuji'

GE Shun-feng¹, JI Meng-meng¹, XU Hai-gang¹, HAO Wen-qiang², WEI Shao-chong¹, and JIANG Yuan-mao^{1,*}

(¹College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an, Shandong 271018, China; ²Bureau of Fruit Industry Development of Qixia City, Qixia, Shandong 265300, China)

Abstract: Two-year-old apple trees (*Malus × domestica* Borkh. 'Red Fuji') / *Malus hupehensis* were used to study the effects of six different soil pH treatments (soil pH 6.83, 6.40, 5.87, 5.29, 4.58 and 3.82, respectively) on growth and the characteristics of distribution and utilization of carbon and nitrogen using the track technology of ¹³C and ¹⁵N double mark. The results showed that the biomass of root, above ground, total dry weight, root-cap ratio, net photosynthesis and ¹⁵N utilization efficiency decreased with the decrease of soil pH value. The ¹⁵N and ¹³C distribution pattern were consistent in various organs among the different soil pH treatments: Mainly in the leaves, followed by the annual stems, then the roots, and the biennial stems were the least. Differences in the same organ (especially in roots and leaves) in ¹⁵N and ¹³C distribution ratio were found among the different soil pH treatments. With the decrease of soil pH value, the ¹⁵N and ¹³C distribution ratio in leaves increased, while those values in the roots decreased.

收稿日期: 2013-06-04; **修回日期:** 2013-09-29

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设资金项目 (CARS-28); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201103003); 山东省农业重大应用创新课题 (201009)

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: ymjiang@sdau.edu.cn)

Key words: apple; soil pH; growth; ^{13}C ; ^{15}N ; distribution and utilization

由于酸雨沉降和氮肥过度使用等原因, 中国农业土壤已出现大规模酸化现象 (Guo et al., 2010)。据报道, 目前我国酸化土壤面积已占国土面积的 20% 以上, 随着工农业生产的不断发展, 酸化面积和程度逐渐增加 (易杰祥 等, 2006)。近年来苹果园土壤酸化现象非常严重, 尤其以环渤海湾产区最为突出 (卢树昌, 2009)。关于酸雨对叶片生理的影响已有较多报道, 如酸雨改变叶片中酶活性 (倪寿清 等, 2008); 加剧植物叶片膜脂过氧化, 破坏抗氧化系统 (黄建昌和肖艳, 2004; 李志国等, 2011); 伤害假俭草、龙眼 PS II 反应中心, 改变叶绿素荧光参数, 使植物光合系统遭受破坏和光合速率下降 (邱栋梁 等, 2002; 马博英 等, 2006; Neves et al., 2009; 王利 等, 2011)。许多研究表明, 营养液酸化或者土壤酸化会影响玉米、小麦和早稻的生物量、产量和吸氮量 (何文寿 等, 1998; 司江英 等, 2007)。目前关于土壤酸化对苹果植株影响的研究主要集中在土壤养分的有效性和生理性病害上, 如苹果园土壤酸化导致钙、镁和钾等盐基离子的加速淋失以及锰离子溶解度的增加, 进而导致果实苦痘病、痘斑病、水心病和粗皮病的普遍发生 (Tom, 1999; 叶优良 等, 2002); 土壤 pH 下降也会影响土壤养分的有效性, 增加某些有害金属离子 (铜、锰和铅等) 数量 (谢志南 等, 1997; 章明奎 等, 2005; 许自成 等, 2008)。而氮素和光合产物在苹果生长发育、花芽分化及产量形成方面具有决定性作用 (束怀瑞, 1999; 李天忠和张志宏, 2008), 而关于土壤酸化对苹果植株氮素吸收、利用分配以及碳水化合物的运转方面的研究未见报道。本研究中以红富士/平邑甜茶为试材, 通过调节土壤 pH, 探讨土壤酸化对苹果植株生长及碳氮利用特性的影响, 为进一步揭示土壤酸化危害苹果生长发育的机制奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2011—2012 年在山东农业大学园艺试验站进行。选取长势基本一致、无病虫害的盆栽 2 年生富士/平邑甜茶植株 36 株。每盆装土约 10 kg, 土壤类型为壤土, 有机质 $10.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $80.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷 $26.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $125.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 6.82。设 6 个处理: 对照 (T0), 中性去离子水; T1, $0.03 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硫酸; T2, $0.06 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硫酸; T3, $0.09 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硫酸; T4, $0.12 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硫酸; T5, $0.15 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硫酸。4 月 5 日进行处理, 每盆喷淋 2 L 处理液, 7 d 后再喷淋 1 次, 5 d 后测定各处理土壤 pH, T0 ~ T5 分别为 6.83 ± 0.06 、 6.40 ± 0.09 、 5.87 ± 0.07 、 5.29 ± 0.11 、 4.58 ± 0.14 、 3.82 ± 0.17 。每个处理 6 盆, 每盆为 1 次重复。

每处理中的 6 株植株, 分为 2 组, 每组 3 株。第 1 组: 于 4 月 25 日进行 ^{15}N 标记处理, 每株施入 ^{15}N -尿素 2.5 g (^{15}N 丰度为 10.25%, 上海化工研究院生产), 同时每株另施入普通尿素 10.00 g。然后于 9 月 18 日对这 3 盆植株进行 ^{13}C 脉冲标记。第 2 组: 每株均施入普通尿素 12.50 g。所有处理每株均施入硫酸钾 4.20 g, 过磷酸钙 11.40 g, 栽培管理条件均保持一致。

1.2 测定项目和方法

1.2.1 植株各器官 ^{15}N 和 ^{13}C 丰度的测定

^{13}C 脉冲标记后 3 d (9 月 21 日) 将所有处理植株解析为根、1 年生茎、2 年生茎和叶等 4 部分, 依次用清水、洗涤剂、清水、1% 盐酸、3 次去离子水冲洗后, $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 下杀青 30 min, 在 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干, 粉碎后过 0.25 mm 筛, 混匀后装袋备测。 ^{13}C 丰度用 DELTA^{plus}XP 型质谱仪测定, ^{15}N 丰度用 ZHT-03 质谱仪测定, 全 N 用凯氏定氮法测定, 各器官干样质量用千分之一电子天平称量。

(1) ^{13}C 丰度: $F_i (\%) = (\delta^{13}\text{C} + 1\ 000) \times R_{\text{PBD}} / [(\delta^{13}\text{C} + 1\ 000) \times R_{\text{PBD}} + 1\ 000] \times 100$ 。 R_{PBD} (碳同位素的标准比值) = 0.0112372。

(2) 进入各组分的 ^{13}C 量: $^{13}\text{C}_i (\text{mg}) = C_i \times (F_i - F_{nl}) / 100 \times 1\ 000$ 。式中 C_i 为各组分所含的碳量 (g), nl 表示未标记。

(3) ^{13}C 在各器官的分配率: $^{13}\text{C}_i (\%) = ^{13}\text{C}_i / ^{13}\text{C}_{\text{净吸收}} \times 100$ (Lu et al., 2003)。

(4) 氮肥利用率 (%) = $[\text{Ndff} \times \text{器官全氮量} (\text{g})] / \text{施氮量} (\text{g}) \times 100$ 。式中 $\text{Ndff} (\%) = \text{植物样品中 } ^{15}\text{N} \text{ 原子百分超} / \text{肥料中 } ^{15}\text{N} \text{ 原子百分超} (\%) \times 100$; 原子百分超 (%) = 样品中 ^{15}N 丰度 - 自然丰度。

(5) 氮肥分配率 (%) = 各器官从氮肥中吸收的氮量 (g) / 总吸收氮量 (g) $\times 100$ (王海宁, 2012)。

1.2.2 净光合速率 (P_n) 的测定

于秋梢停长期(2012年9月12日)选择并标记植株新梢上的功能叶(第2~4片),利用 CIRAS-1 便携式光合仪测定系统 (PPSystems, 英国) 直接测定净光合速率, 参数设定参照梁芳等 (2010)。每次测定 3 次重复, 取平均值。测定时设定内源光强 $450 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, CO_2 浓度 $360 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$, 温度 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。测定时间为 9:00—11:00。

2 结果与分析

2.1 不同土壤 pH 处理苹果植株的生长量和根冠比

由表 1 可见, 不同土壤 pH 处理下苹果植株的生物量和根冠比存在差异。随着土壤 pH 的降低, 根系生物量逐渐降低, 并且 pH 越低减少的幅度越大, 除了 T0、T1 和 T2 间差异不显著外, 其它处理间均差异显著。地上部生物量和植株总干样质量也表现出与根系生物量相同的变化规律。T0、T1 和 T2 处理的根冠比处于较高水平, T4 和 T5 处理的根冠比分别只有 T0 处理的 72.53% 和 59.34%。

2.2 不同土壤 pH 对苹果植株叶片净光合速率的影响

由表 1 可见, 土壤 pH 显著影响了苹果植株叶片的净光合速率。T0 和 T1 处理叶片的净光合速率最高。随着土壤 pH 的进一步降低, 净光合速率显著降低。土壤 pH < 5.50 的 3 个处理 (T3、T4 和 T5) 的净光合速率, 仅为 T0 处理的 75.81%、64.45% 和 45.13%。

表 1 不同土壤 pH 处理苹果植株的生物量 (干样质量)、根冠比和叶片净光合速率
Table 1 Biomass (dry matter), root-cap ratio and net photosynthesis (P_n) of leaves under different soil pH treatments

处理代号 Treatment	pH	根/g Root	地上部/g Above ground	总重/g Total weight	根冠比 Root-cap ratio	P_n / ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
T0	6.83	25.89 a	28.32 a	54.21 a	0.91 a	6.78 a
T1	6.40	25.07 a	28.41 a	53.48 a	0.88 a	6.69 a
T2	5.87	24.06 a	27.99 a	52.05 ab	0.86 a	5.73 b
T3	5.29	20.14 b	25.57 ab	45.71 b	0.78 ab	5.14 c
T4	4.58	13.43 c	20.45 bc	33.88 c	0.66 b	4.37 d
T5	3.82	8.49 d	15.62 d	24.11 d	0.54 c	3.06 e

注: 同一列不同小写字母表示在 0.05 水平有显著差异。下同。

Note: Different letters in the same column stand for the significant difference at the 0.05 level. The same below.

2.3 不同土壤 pH 处理对苹果植株 ^{15}N 利用和分配的影响

由表 2 可知, 随着土壤 pH 的降低, 植株的 ^{15}N 利用率逐渐降低。T0、T1、T2 三者间差异不显

著; pH < 5.50, 植株的 ^{15}N 利用率降低幅度更大, T3、T4 和 T5 处理显著低于 T0 和 T1 处理, 且三者间差异显著。

不同土壤 pH 处理, 树木吸收的 ^{15}N 在各器官间呈现相同的分配规律: 叶最多, 其次是 1 年生茎, 再次是根和 2 年生茎。

同一器官不同土壤 pH 处理间 ^{15}N 分配率存在差异 (1 年生茎除外), 其中以叶和根最为显著。叶的 ^{15}N 分配率随土壤 pH 的降低而逐渐升高, T5、T4 和 T3 处理显著高于 T0 和 T1 处理, T0、T1 和 T2 处理间差异不显著; 1 年生茎, 各处理间差异不显著; 2 年生茎的 ^{15}N 分配率规律性不高, 以 T4 处理最高, T5 处理最低; 根中的 ^{15}N 分配率与叶的变化趋势相反, 随土壤 pH 的降低而逐渐降低, T0、T1 和 T2 处理间差异不显著, 但显著高于 T3、T4 和 T5 处理。

表 2 不同土壤 pH 下植株的 ^{15}N 利用率和各器官的 ^{15}N 分配率
Table 2 ^{15}N utilization and distribution ratio of different organs under different soil pH

处理代号 Treatment	pH	^{15}N 利用率/ %	^{15}N 分配率/ % ^{15}N distribution ratio			
		^{15}N utilization efficiency	叶 Leaves	1 年生茎 Annual stems	2 年生茎 Biennial stems	根 Roots
T0	6.83	14.96 a	45.60 d	26.41 a	6.58 c	21.40 a
T1	6.40	14.52 a	46.93 d	25.60 a	6.92 c	20.55 a
T2	5.87	13.04 ab	47.65 cd	25.43 a	7.85 b	19.07 a
T3	5.29	12.48 b	50.02 c	26.63 a	7.72 b	15.63 b
T4	4.58	10.25 c	53.57 b	26.39 a	8.77 a	11.27 c
T5	3.82	7.86 d	58.16 a	27.61 a	5.62 d	8.61 d

2.4 不同土壤 pH 处理对苹果植株 ^{13}C 分配的影响

不同土壤 pH 处理苹果幼树 ^{13}C 在器官间的分配规律一致: 叶最高 (31.68% ~ 51.82%), 其次是 1 年生茎 (33.18% ~ 36.56%), 再次是根 (11.26% ~ 28.62%), 2 年生茎最低 (3.74% ~ 5.05%) (表 3)。

同一器官不同土壤 pH 处理间 ^{13}C 的分配率存在差异 (1 年生茎除外), 以叶和根最为显著。其中, ^{13}C 在叶中的分配率表现为随土壤 pH 的降低而逐渐升高, T5 处理是 T0 处理的 1.64 倍; 而根中的 ^{13}C 分配率与叶片表现出相反的变化规律, 随土壤 pH 的降低而逐渐降低, T0 处理最高, T5 处理较低, T0 处理是 T1 处理的 2.54 倍, T0 和 T1 间差异不显著, 但显著高于其他处理; 1 年生茎的 ^{13}C 分配率, 各处理间差异不显著; 2 年生茎的 ^{13}C 分配率, T5 处理显著高于其他 5 个处理, 而 T0 ~ T4 处理间无显著差异。

表 3 不同土壤 pH 下植株各器官的 ^{13}C 分配率
Table 3 ^{13}C distribution ratio of different organs under different soil pH

处理代号 Treatment	pH	叶/ % Leaves	1 年生茎/ % Annual stems	2 年生茎/ % Biennial stems	根/ % Roots
T0	6.83	31.68 e	35.17 a	4.53 a	28.62 a
T1	6.40	32.82 e	34.51 a	4.92 a	27.75 a
T2	5.87	35.78 d	35.37 a	4.61 a	24.24 b
T3	5.29	39.53 c	36.56 a	4.38 a	19.53 c
T4	4.58	43.86 b	35.80 a	5.05 a	15.29 d
T5	3.82	51.82 a	33.18 a	3.74 b	11.26 e

3 讨论

由于环境条件和物种本身遗传特性不同, 每个物种生长对土壤 pH 的要求均有差异, 只有在最适 pH 条件下植株的各项生理机能才会处于最佳状态, 如水稻幼苗在 pH 6.0 的条件下生长最好 (刘

少华 等, 2003), 金银花在 pH 8.2 的条件下能保持较好的生长状况 (吴沿友 等, 2009)。本研究结果表明, 土壤酸化抑制了苹果植株根系的生长, 根系生物量随土壤 pH 的降低呈现下降的趋势, 且在 pH < 5.50 后各部分的生物量均显著减少。一方面, 低土壤 pH 环境下根系生长受到抑制, 且根系活力和硝酸还原酶活性下降, 根系吸收功能降低, 不利于根系对矿质元素的吸收, 进而影响地上部的生物合成 (唐莉娜 等, 1999; 童贯和 等, 2005); 另一方面, 低 pH 条件下体内机能受损, 营养物质消耗速度高于合成速度, 也是导致地上部生物量的降低的原因之一 (李剑峰 等, 2009)。

植物叶片直接处于过酸环境胁迫时会发生膜脂过氧化 (Yoshida et al., 2004; 李志国 等, 2011), 改变叶片叶绿素荧光参数, 破坏植物光合系统 (邱栋梁 等, 2002; 马博英 等, 2006)。而土壤酸化也会导致植物叶片光合活性降低, 光合速率下降 (童贯和 等, 2005; 时丽冉 等, 2007; Neves et al., 2009)。王利等 (2011) 发现土壤酸化导致平邑甜茶叶片光合速率下降的主要原因是 PS II 活性的下降。与前人研究相同, 本试验中, 土壤 pH 显著影响了苹果植株叶片的净光合速率, 随着土壤 pH 的降低, 叶片的净光合速率显著下降, 且在低 pH 条件下反应更敏感, 土壤 pH 3.82 时苹果植株叶片净光合速率仅为土壤 pH 6.83 时的 45.13%。

土壤 pH 一方面影响了土壤氮素的有效性 (许自成 等, 2008), 另一方面影响了根系的功能 (唐莉娜 等, 1999), 因此在不同土壤 pH 下苹果植株对肥料氮的吸收和分配特性不同。本试验中, 随着土壤 pH 的降低, 苹果植株的 ^{15}N 利用率也逐渐降低, 且随着土壤酸化越重, 利用率下降幅度也越大, 土壤 pH 3.82 时苹果植株的 ^{15}N 利用率仅为土壤 pH 6.83 时的一半左右。通过 ^{15}N 和 ^{13}C 双标记试验可见, 当土壤 pH 较高时根中的 ^{15}N 和 ^{13}C 分配率均为最高, 表明此时根系对氮的征调能力最强 (徐季娥 等, 1993), 且光合产物在植株地上部与地下部间的交换能力强, 叶片制造的光合产物更多的向下运输至根系, 为根系的生长发育提供了物质基础, 有利于根系的生长和氮素的吸收, 根系吸收氮素后为地上部营养生长提供养分支持, 因而促进了树体的生长发育 (李燕婷 等, 2001; 春亮 等, 2005; 王海宁 等, 2012)。而当土壤酸化严重时则相反, 此时光合产物向下运输缓慢, 滞留在地上部较多, 就会改变地上部碳水化合物与含氮物质间的比例, 加大碳氮比, 抑制地上部的营养生长 (李天忠和张志宏, 2008); 同时不能保证有大量碳素营养物质及时地往根系输送, 就会抑制根系的生长和吸收, 反过来根系又抑制地上部的营养生长, 这也正是土壤低 pH 条件下苹果植株根系质量和氮素利用率较低的原因所在。

因此, 土壤酸化影响了苹果植株生长, 尤其是根的生长, 降低了氮素利用效率, 减弱了光合产物在地下部和地上部之间的交换能力, 从而减少了根系生长发育所需的碳水化合物, 进而影响了根系对氮素的吸收。因此, 苹果生产上应注意采用合理的土壤管理措施来改良酸性土壤, 为根系的生长及功能的发挥提供最优的环境。

References

- Chun Liang, Chen Fan-jun, Zhang Fu-suo, Mi Guo-hua. 2005. Root growth, nitrogen uptake and yield form action of hybrid maize with different N efficiency. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 11 (5): 615 - 619. (in Chinese)
- 春亮, 陈范俊, 张福锁, 米国华. 2005. 不同氮效率玉米杂交种的根系生长、氮素吸收与产量形成. *植物营养与肥料学报*, 11 (5): 615 - 619.
- Guo J H, Liu X J, Zhang Y, Shen J L, Han W X, Zhang W F, Christie P, Goulding K W T, Vitousek P M, Zhang F S. 2010. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 327 (5968): 1008 - 1010.
- He Wen-shou, Li Sheng-xiu, Li Hui-tao. 1998. Effects of different pH levels on growth and absorption of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ of wheat seedling. *Soil*, 3: 143 - 146, 124. (in Chinese)
- 何文寿, 李生秀, 李辉桃. 1998. 营养液 pH 对小麦生长及吸收铵、硝态氮的影响. *土壤*, 3: 143 - 146, 124.

- Huang Jian-chang, Xiao Yan. 2004. Impact of simulated acid rain on permeability and fatty acid composition in leaves of papaya seedlings. *Acta Horticulturae Sinica*, 31 (5): 644 - 646. (in Chinese)
- 黄建昌, 肖 艳. 2004. 模拟酸雨对番木瓜叶片细胞膜透性和膜脂脂肪酸组分的影响. *园艺学报*, 31 (5): 644 - 646.
- Li Jian-feng, Zhang Shu-qing, Shi Shang-li, Huo Ping-hui, An Wei. 2009. Effect of Fe^{2+} on physiological characteristics of alfalfa seedling under two levels of acidity. *Acta Agrestia Sinica*, 17 (5): 570 - 574. (in Chinese)
- 李剑峰, 张淑卿, 师尚礼, 霍平慧, 安 玮. 2009. 2 酸度水平下亚铁离子对苜蓿幼苗生理特性的影响. *草地学报*, 17 (5): 570 - 574.
- Li Tian-zhong, Zhang Zhi-hong. 2008. *Modern fruit biology*. Beijing: Science Press: 130 - 133, 157 - 159. (in Chinese)
- 李天忠, 张志宏. 2008. *现代果树生物学*. 北京: 科学出版社: 130 - 133, 157 - 159.
- Li Yan-ting, Mi Guo-hua, Chen Fan-jun, Lao Xiu-rong, Zhang Fu-suo. 2001. Genotypic difference of nitrogen recycling between root and shoot of maize seedlings. *Acta Phytophysiological Sinica*, 27 (3): 226 - 230. (in Chinese)
- 李燕婷, 米国华, 陈范骏, 劳秀荣, 张福锁. 2001. 玉米幼苗地上部根/间氮的循环及其基因型差异. *植物生理学报*, 27 (3): 226 - 230.
- Li Zhi-guo, Jiang Wei-bing, Weng Mang-ling, Jiang Wu. 2011. Physiologic responses and sensitivity of six garden plants to simulated acid rain. *Acta Horticulturae Sinica*, 38 (3): 512 - 518. (in Chinese)
- 李志国, 姜卫兵, 翁忙玲, 姜 武. 2011. 常绿阔叶园林 6 树种 (品种) 对模拟酸雨的生理响应及敏感性. *园艺学报*, 38 (3): 512 - 518.
- Liang Fang, Zheng Cheng-shu, Sun Xian-zhi, Wang Wen-li. 2010. Effects of low temperature and weak light stress and its recovery on the photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of cut flower chrysanthemum. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21 (1): 29 - 35. (in Chinese)
- 梁 芳, 郑成淑, 孙宪芝, 王文莉. 2010. 低温弱光胁迫及恢复对切花菊光合作用和叶绿素荧光参数的影响. *应用生态学报*, 21 (1): 29 - 35.
- Liu Shao-hua, Chen Guo-xiang, Lü Chuan-gen, Yang Yan-hua, Shao Zhi-guang, Wang Na. 2003. Effect of pH in rhizosphere on the characteristic of light energy transformation in hybrid rice seedlings. *Chinese Journal Rice Science*, 17 (3): 244 - 248. (in Chinese)
- 刘少华, 陈国祥, 吕川根, 杨艳华, 邵志广, 王 娜. 2003. 根际 pH 值对杂交稻幼苗光能转化特性的影响. *中国水稻科学*, 17 (3): 244 - 248.
- Lu Shu-chang. 2009. Characteristics of nutrient input and the influences on soil quality intensive orchards of China [Ph. D. Dissertation]. Beijing: Chinese Agricultural University. (in Chinese)
- 卢树昌. 2009. 我国集约化果园养分投入特征及其对土壤质量的影响 [博士论文]. 北京: 中国农业大学.
- Ma Bo-ying, Xu Li-gen, Jiang De-an. 2006. Effects of simulated acid rain on chlorophyll fluorescence characteristics in *Eremochloa ophiuroides*. *Scientia Silvae Sinicae*, 42 (11): 8 - 11. (in Chinese)
- 马博英, 徐礼根, 蒋德安. 2006. 模拟酸雨对假俭草叶绿素荧光特性的影响. *林业科学*, 42 (11): 8 - 11.
- Neves N R, Oliva M A, da Cruze Centeno D, Costa A C, Ribas R F, Pereira E G. 2009. Photosynthesis and oxidative stress in the restinga plant species *Eugenia uniflora* L. exposed to simulated acid rain and iron ore dust deposition potential use in environmental risk assessment. *Science of the Total Environment*, 407: 3740 - 3745.
- Ni Shou-qing, Song Xiao-dong, Cui Qing-jie, Li Jian-guo, Yang Guo-dong. 2008. Physiological changes of northern wheat unedr stress effect of simulated acid rain in China. *Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science*, 39 (1): 19 - 22. (in Chinese)
- 倪寿清, 宋晓东, 崔清洁, 李建国, 杨国栋. 2008. 模拟酸雨胁迫下中国北方小麦生理特性研究. *山东农业大学学报: 自然科学版*, 39 (1): 19 - 22.
- Qiu Dong-liang, Liu Xing-hui, Guo Su-zhi. 2002. Effects of simulated acid rain stresson gas exchange and chlorophyll a fluorescence parameters in leaves of longan. *Acta Phytoecologica Sinica*, 26 (4): 441 - 446. (in Chinese)
- 邱栋梁, 刘星辉, 郭素枝. 2002. 模拟酸雨对龙眼叶片气体交换及叶绿素 a 荧光参数的影响. *植物生态学报*, 26 (4): 441 - 446.
- Shu Huai-rui. 1999. *Apple science*. Beijing: China Agriculture Press: 428 - 430. (in Chinese)
- 束怀瑞. 1999. *果树学*. 北京: 中国农业出版社: 428 - 430.
- Shi Li-ran, Liu Zhi-hua, Bai Li-rong. 2007. Effects of different pH values on growth of rice seedlings. *Crops*, (4): 28 - 30. (in Chinese)
- 时丽冉, 刘志华, 白丽荣. 2007. 不同 pH 值对旱稻幼苗生长的影响. *作物杂志*, (4): 28 - 30.
- Si Jiang-ying, Wang Xiao-li, Chen Dong-mei, Feng Ke. 2007. Effects of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ on crop seedling growth under different pH levels. *Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Science Edition*, 28 (3): 68 - 71. (in Chinese)

- 司江英, 汪晓丽, 陈冬梅, 封克. 2007. 不同 pH 和氮素形态对作物幼苗生长的影响. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 28 (3): 68 - 71.
- Tang Li-na, Xiong De-zhong, Liu Shu-xin. 1999. Effects of soil acidity adjustment on nutrient absorption and dry matter accumulation in tobacco. Journal of Fujian Agricultural University, 28 (3): 341 - 344. (in Chinese)
- 唐莉娜, 熊德中, 刘淑欣. 1999. 土壤酸度的调节对烤烟养分吸收、干物质积累的影响. 福建农业大学学报, 28 (3): 341 - 344.
- Tom R. 1999. Soil pH and bitter pit in apples. Good Fruit Grower, 5 (1): 15 - 16.
- Tong Guan-he, Cheng Bin, Hu Yun-hu. 2005. Effect of simulated acid rain and its acidified soil on the biomass and some physiological activities of wheat seedlings. Acta Agronomica Sinica, 31 (9): 1207 - 1214. (in Chinese)
- 童贯和, 程滨, 胡云虎. 2005. 模拟酸雨及其酸化土壤对小麦幼苗生物量和某些生理活动的影响. 作物学报, 31 (9): 1207 - 1214.
- Wang Hai-ning, Ge Shun-feng, Jiang Yuan-mao, Wei Shao-chong, Chen Qian, Sun Cong-wei. 2013. Effects of different rootstocks on distribution and utilization of ^{13}C and ^{15}N of *Malus × domestica* Borkh. 'Red Fuji'. Acta Horticulturae Sinica, 40 (4): 733 - 738. (in Chinese)
- 王海宁, 葛顺峰, 姜远茂, 魏绍冲, 陈倩, 孙聪伟. 2013. 不同砧木嫁接的富士苹果幼树 ^{13}C 和 ^{15}N 分配利用特性比较. 园艺学报, 40 (4): 733 - 738.
- Wang Hai-ning, Ge Shun-feng, Jiang Yuan-mao, Wei Shao-chong, Peng Fu-tian, Chen Qian. 2012. Growth characteristics and absorption, distribution and utilization of $^{15}\text{NO}_3^-$ -N and $^{15}\text{NH}_4^+$ -N application for five apple rootstocks. Acta Horticulturae Sinica, 39 (2): 343 - 348. (in Chinese)
- 王海宁, 葛顺峰, 姜远茂, 魏绍冲, 彭福田, 陈倩. 2012. 苹果砧木生长及吸收利用硝态氮和铵态氮特性比较. 园艺学报, 39 (2): 343 - 348.
- Wang Li, Yang Hng-qiang, Zhang Zhao, Fan Wei-guo, Jiang Qian-qian, Ran Kun. 2011. Effects of rhizosphere acidity on activity of photosystem II and photosynthetic rate in *Malus hupehensis* leaves. Scientia Silvae Sinicae, 47 (10): 167 - 171. (in Chinese)
- 王利, 杨洪强, 张召, 范伟国, 姜倩倩, 冉昆. 2011. 根区酸化对平邑甜茶叶片光系统 II 活性及光合速率的影响. 林业科学, 47 (10): 167 - 171.
- Wu Yan-you, Xing De-ke, Zhu Yong-li, Liang Zheng. 2009. Effects of pH on growth characters and chlorophyll fluorescence of three vine plants. Acta Bot Boreale-Occident Sin, 29 (2): 338 - 343. (in Chinese)
- 吴沿友, 邢德科, 朱咏莉, 梁铮. 2009. 营养液 pH 对 3 种藤本植物生长和叶绿素荧光的影响. 西北植物学报, 29 (2): 338 - 343.
- Xie Zhi-nan, Zhuang Yi-mei, Wang Ren-kai, Xu Wen-bao. 1997. Correlation between soil pH and the contents of available nutrients in selected soils from three kinds of orchards at subtropical zone in Fujian. Acta Horticulturae Sinica, 24 (3): 209 - 214. (in Chinese)
- 谢志南, 庄伊美, 王仁玠, 许文宝. 1997. 福建亚热带果园土壤 pH 与有效养分含量的相关性. 园艺学报, 24 (3): 209 - 214.
- Xu Ji-e, Lin Yu-yi, Lu Rui-jiang, Chen Liang, Gao Zhan-feng. 1993. Studies on the absorption and the distribution of ^{15}N -labelled urea to 'Yali' pear trees following autumn application. Acta Horticulturae Sinica, 20 (2): 145 - 149. (in Chinese)
- 徐季娥, 林裕益, 吕瑞江, 陈良, 高占峰. 1993. 鸭梨秋施 ^{15}N -尿素的吸收与分配. 园艺学报, 20 (2): 145 - 149.
- Xu Zi-cheng, Wang Lin, Xiao Han-qian. 2008. pH distribution and relationship to soil nutrient in Hunan tobacco lands. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 16 (4): 830 - 834. (in Chinese)
- 许自成, 王林, 肖汉乾. 2008. 湖南烟区土壤 pH 分布特点及其与土壤养分的关系. 中国生态农业学报, 16 (4): 830 - 834.
- Ye You-liang, Zhang Fu-suo, Yu Zhong-fan, Jiang Xue-ling. 2002. Study on the relationship between leaf content of manganese and internal bark necrosis disease of apple trees. Fruit Science, 19 (4): 219 - 222. (in Chinese)
- 叶优良, 张福锁, 于忠范, 姜学玲. 2002. 苹果粗皮病与锰含量的关系. 果树学报, 19 (4): 219 - 222.
- Yi Jie-xiang, Lü Liang-xue, Liu Guo-dao. 2006. Research on soil acidification and acidic soil's melioration. Journal of South China University of Tropical Agriculture, 12 (1): 23 - 28. (in Chinese)
- 易杰祥, 吕亮雪, 刘国道. 2006. 土壤酸化和酸性土壤改良研究. 华南农业大学学报, 12 (1): 23 - 28.
- Yoshida K, Shibasaki R, Takami C, Takenaka C, Yamamoto K, Tezuka T. 2004. Response of gas exchange rates in *Abies firma* seedlings to various additional stresses under acid fog stress. The Japanese Forestry Research, 9 (3): 195 - 203.
- Zhang Ming-kui, Fang Li-ping, Zhang Lü-qin. 2005. Effects of acidification and organic matter accumulation on lead bio-availability in tea garden soils. Journal of Tea Science, 25 (3): 159 - 164. (in Chinese)
- 章明奎, 方利平, 张履勤. 2005. 酸化和有机质积累对茶园土壤铅生物有效性的影响. 茶叶科学, 25 (3): 159 - 164.