

嘎啦苹果不同施肥深度对 ^{15}N -尿素的吸收、分配与利用特性

李红波, 葛顺峰, 姜远茂, 彭福田, 魏绍冲, 房祥吉

(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)

摘要: 【目的】为苹果生产中确定合理的施肥深度提供科学依据。【方法】以 8 年生嘎啦苹果/平邑甜茶为试材, 采用表层 (0 cm)、中层 (20 cm) 和深层 (40 cm) 3 个施肥深度处理进行同位素示踪试验。【结果】不同施肥深度处理, 嘎啦苹果各器官 Ndff 值存在差异, 深层施肥和表层施肥各器官 Ndff 值显著低于中层施肥, 各处理盛花期均以细根 Ndff 值最高, 粗根次之; 新梢旺长期和果实膨大期根部吸收的 ^{15}N 优先向新生营养器官运转; 果实成熟期均以果实中 Ndff 值最高; 果实采收后贮藏器官的 Ndff 值较高, 新生营养器官下降到较低水平。不同物候期各器官的 ^{15}N 分配率存在显著差异, 但不同深度施肥处理之间差异并不显著。随物候期的推移, 植株对 ^{15}N -尿素的利用率逐渐升高, 到采收后达到最大; 各物候期中层施肥处理均显著高于表层和深层处理。【结论】中层施肥处理能够增强植株对氮的吸收征调能力, 提高肥料利用率。

关键词: 苹果; 施肥深度; ^{15}N -尿素; 吸收; 分配; 利用

Characteristics of Absorption, Distribution and Utilization of ^{15}N -Urea Applied in Different Depths in Gala (*Malus hupehensis*)

LI Hong-bo, GE Shun-feng, JIANG Yuan-mao, PENG Fu-tian, WEI Shao-chong, FANG Xiang-ji

(College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology, Taian 271018, Shandong)

Abstract: 【Objective】The aim of the study is to provide a theoretical basis for the appropriate depth of fertilizer application for apple under field conditions. 【Method】The isotope ^{15}N -urea trials were carried out in field conditions with three different fertilizer application depth treatments. 【Result】The difference of Ndff was significant in different organs among different fertilizer application depth treatments, and the 0 cm and 40 cm treatments were obviously lower than 20 cm treatment. At the full-bloom stage, the Ndff was the highest in fine roots, and then in thick roots. During the shoot rapid-growing and fruit rapid-expanding stages, the Ndff of new organs was higher than that of the storage organs. The Ndff of fruit was the highest at fruit maturity stage. After harvest, the Ndff of storage organs was higher and the new organs were in low level. The distribution ratio of ^{15}N was different in various organs at different phenological stages, but there was no significant difference among three treatments. With the process of growth, the ratio of ^{15}N utilization of apple trees in different treatments increased gradually and reached the highest after harvest, and the treatment of fertilizer in 20 cm was generally higher than that in 0 cm and in 40 cm treatments. 【Conclusion】Fertilizer application in 20 cm can enhance the absorption and ability to transfer N to apple tree, and also can increase the nitrogen use efficiency.

Key words: apple; fertilization depth; ^{15}N -urea; absorption; distribution; utilization

0 引言

【研究意义】养分管理是苹果栽培的重要环节,

合理的施肥方法能提高土壤中各种养分的利用率, 提高苹果的产量及改善品质, 也能提高树体的抗逆能力。山东大部分果园分布于山丘地, 土壤瘠薄, 传统的施

收稿日期: 2010-09-09; 接受日期: 2010-12-28

基金项目: 现代苹果产业技术体系 (MATS)、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

联系方式: 李红波, Tel: 0538-8249778; E-mail: lihongbo699@163.com. 通信作者姜远茂, E-mail: ymjiang@sdau.edu.cn

肥方式是将肥料撒施于土壤表面或挖放射沟施入，但放射沟的深度取决于果农习惯，没有明确的标准，这种不合理的施肥方法不仅降低了肥料利用率，而且容易诱导根系向地表伸展，影响肥料的生物有效性。【前人研究进展】氮是果树必需矿质元素中的核心元素，为满足树体不同生长发育阶段对氮素的需求，应在适宜的时期追施氮肥，适量施用氮肥不仅能提高叶片的光合速率^[1-2]、增加光合叶面积^[3-4]，还能促进花芽分化、提高坐果率^[5-6]，增加产量^[7-8]。Ghonaime 等^[9]和 Raese 等^[10]研究表明施用氮肥能够显著增加作物植株干物质质量、产量、叶片氮含量以及叶绿素水平。Hoagland 等^[11]通过不同果园表层制度对土壤氮有效性及微生物活性表明，生草施氮肥处理苹果根区细根的生物有效性明显增高，氮肥施入此区可以有效提高肥料利用率，有利于根系吸收利用，同时土壤微生物活性也较高。Scandellari 等^[12]研究表明，单纯以根系的生物量来估算根系吸氮能力是不准确的，根际在土壤与树体根系氮素转化之间起着非常重要的作用。葡萄和玉米上的研究表明，将肥料施入根系集中分布层能够显著提高作物产量和品质^[13-14]。苹果养分的供给方法有很多选择，从树体本身对养分的吸收和利用途径来看，吸收总量与种类最多的途径以根系吸收为主。因此，合理施肥必须考虑苹果根系的分布特点。【本研究切入点】根系是吸收矿质元素的主要器官，也是初步同化矿质元素的主要场所，苹果根系 70%以上集中在 40 cm 土层内，60%—80%的吸收根集中在 20 cm 以上的土层^[15-16]。这决定了苹果施肥深度不宜太浅或太深，但生产中对施肥深度不够明确，从而影响了苹果根系对养分的吸收，降低了肥料的生物有效性，致使肥料利用率低下。【拟解决的关键问题】本研究利用同位素示踪技术进行了不同深度土施 ¹⁵N-尿素试验，通过分析植株对 ¹⁵N 的吸收、分配与利用情况，以期确定嘎啦苹果施肥的最适深度，为生产中制定合理施肥措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2009 年在山东烟台市莱山镇官庄村果园进行。试材为 8 年生嘎啦苹果/平邑甜茶，株行距为 3.00 m×4.00 m。试验地有机碳 8.10 g·kg⁻¹，硝态氮 23.52 mg·kg⁻¹，铵态氮 57.43 mg·kg⁻¹，速效磷 31.76 mg·kg⁻¹，速效钾 227.35 mg·kg⁻¹。

选取生长势基本一致，无病虫害的植株 45 株。于

2009 年 3 月 14 日进行施肥处理，分表层（0 cm）、中层（20 cm）、深层（40 cm）3 个处理，每个处理 15 株。施肥方法是距中心干 60 cm 处挖环状沟，在沟内每株均匀施 ¹⁵N-尿素（上海化工研究院生产，丰度 10.22%）15.00 g，同时施入普通尿素 277.50 g，硫酸钾 266.46 g，磷酸氢二铵 150.00 g，施肥后立即浇 4 L 水/株。分别于盛花期（4 月 26 日）、新梢旺长期（5 月 24 日）、果实膨大期（6 月 28 日）、果实成熟期（8 月 9 日）、采收后（10 月 7 日）进行整株采样分析，每次解析 3 株，每株为 1 次重复。

1.2 测定方法及计算公式

整株解析为细根（d≤0.2 cm）、粗根（d>0.2 cm）、中心干、多年生枝、二年生枝、中梢（长度≤20 cm）、中梢叶、短梢（长度<20 cm）、短梢叶、果（花），多年生枝与中心干分为木质部和皮部。样品按清水→洗涤剂→清水→1%盐酸→3 次去离子水顺序冲洗后，105℃杀青 30 min，随后在 80℃烘干至恒重，电磨粉碎后过 60 目筛，混匀后装袋备用。

样品全氮用凯氏定氮法测定。¹⁵N 丰度用 ZHT-03（北京分析仪器厂）质谱计（河北省农林科学院遗传生理研究所）测定。计算公式为： $Ndff\% = (\text{植物样品中 } ^{15}\text{N 丰度} - ^{15}\text{N 自然丰度}) / (\text{肥料中 } ^{15}\text{N 丰度} - ^{15}\text{N 自然丰度}) \times 100$ ；氮肥分配率=各器官从氮肥中吸收的氮量（g）/总吸收氮量（g）×100%；氮肥利用率=[Ndff×器官全氮量（g）]/施肥量（g）×100%。数据采用 SAS9.1 系统进行统计分析。

2 结果

2.1 不同施肥深度苹果各器官的 Ndff

器官的 Ndff^[17]指植株器官从肥料中吸收分配到的 ¹⁵N 量对该器官全氮量的贡献率，反映了植株器官对肥料 ¹⁵N 的吸收征调能力。

盛花期不同施肥深度处理均以细根 Ndff 值最高，其次为粗根、中心干等贮藏器官，而地上部新生器官 Ndff 值均较低，表明盛花期贮藏器官对 ¹⁵N 的征调能力较强，根系吸收的氮素首先向贮藏器官中运转，然后才向地上部新生器官中转移，此时期枝条、叶片、花等新生器官建造所需的氮素营养主要来源于上一年的贮藏。新梢旺长期各处理均以粗根 Ndff 值最高，与盛花期相比，地上部新生器官 Ndff 值增长明显，表明此期吸收的 ¹⁵N 主要分配供给新生器官形态建造。到果实膨大期各处理地上部新生营养器官的 Ndff 值均达到较高水平。果实采收期果实 Ndff 值最高并且是年

周期最高值, 表明春季土施 ^{15}N 尿素, 到果实采收期果实为生长中心对 ^{15}N 的竞争力最强。果实采收后各处理以粗根 Ndff 值最高, 其次为细根和地上部贮藏器官(二年生枝、多年生枝皮部、中心干皮部), 新生营养器官(新梢、新梢叶片)均下降到较低水平, 表明采收后养分开始回流, 营养物质逐渐向贮藏器官转移。

3 个不同施肥深度处理, 各测定时期各器官的 Ndff 值均以中层施肥处理最高, 显著高于深层和表层施肥处理 ($P < 0.05$), 深层施肥处理最低。这表明, 中层施肥处理苹果植株各器官对肥料 N 的吸收征调能力强于表层和深层施肥处理, 中层施肥更有利于发挥肥效, 满足树体各时期对养分的需求(表 1)。

表 1 不同施肥深度各器官 Ndff% 的变化动态

Table 1 Ndff% in different organs at different fertilizer application depths

器官 Organ	施肥深度 Fertilizer depth (cm)	盛花期 Full-bloom stage	新梢旺长期 New shoot growing stage	果实膨大期 Fruit rapid-swelling stage	果实成熟期 Fruit maturity stage	果实采收后 After harvest
果(花) Fruit (Flower)	0	0.24b	0.79b	0.88b	1.93b	
	20	0.29a	1.07a	1.32a	2.81a	
	40	0.13c	0.59c	0.67c	1.15c	
短梢(短枝) Short shoot (Spur)	0	0.22a	1.06b	1.68b	1.04b	0.41a
	20	0.24a	1.29a	2.39a	1.41a	0.42a
	40	0.12b	0.66c	0.99c	0.66c	0.23c
短梢叶 Short shoot leaves	0	0.14a	0.62b	0.87b	0.61b	0.51b
	20	0.17a	0.87a	1.27a	0.89a	0.61a
	40	0.09b	0.47c	0.65c	0.45c	0.42c
中长梢(长枝) Middle-long shoots	0	0.22a	1.17b	2.28b	0.89b	0.48b
	20	0.24a	1.57a	2.98a	1.36a	0.53a
	40	0.09b	0.81c	1.42c	0.44c	0.29c
中长梢叶 Leaf of middle-long shoots	0	0.13b	1.17b	1.90b	1.05b	0.41b
	20	0.18a	1.58a	2.46a	1.61a	0.53a
	40	0.09c	0.86c	1.05c	0.66c	0.30c
二年生枝 Biennial branch	0	0.26a	0.71b	1.30b	0.51b	0.73b
	20	0.29a	1.11a	1.73a	0.72a	1.03a
	40	0.14b	0.45c	0.87c	0.35c	0.69b
多年生枝木质部 Xylem of perennial branches	0	0.36b	0.46b	0.78b	0.48b	0.30a
	20	0.42a	0.52a	1.04a	0.66a	0.35a
	40	0.19c	0.35c	0.65c	0.35c	0.17b
多年生枝韧皮部 Cortex of perennial branches	0	0.21b	0.71b	0.91b	0.43b	0.66b
	20	0.27a	0.97a	1.29a	0.55a	0.86a
	40	0.13c	0.53c	0.71c	0.24c	0.59c
中心干木质部 Xylem of trunk	0	0.45b	0.16b	0.67b	0.46b	0.21b
	20	0.51a	0.28a	0.76a	0.65a	0.29a
	40	0.27c	0.14b	0.52c	0.29c	0.15c
中心干韧皮部 Cortex of trunk	0	0.34a	0.31b	2.07b	0.49b	0.61b
	20	0.38a	0.36a	2.68a	0.65a	0.71a
	40	0.24b	0.18c	1.10c	0.32c	0.47c
粗根 Large root	0	1.32b	1.45b	0.70b	0.51b	1.72b
	20	2.03a	1.88a	1.15a	0.73a	2.23a
	40	0.87c	0.94c	0.47c	0.34c	1.00c
细根 Fine root	0	1.85b	1.07b	1.64b	0.75b	1.58b
	20	2.53a	1.31a	2.08a	1.09a	2.07a
	40	1.19c	0.73c	0.95c	0.55c	0.94c

表中不同小写字母分别表示处理间差异显著 ($P=0.05$), 下同 Different small letters meant significant difference at 0.05. The same as below

2.2 不同施肥深度各器官的 ^{15}N 分配率

各器官中 ^{15}N 占全株 ^{15}N 总量的百分率反映了肥料氮在树体内的分布及在各器官迁移的规律^[18]。从表 2 可以看出, 不同施肥深度处理, 整个生育期植株各器官 ^{15}N 分配率表现出相同的趋势。生殖器官(花或果实)的 ^{15}N 分配率在果实成熟期最高; 营养器官(细根、短梢枝叶、长梢枝叶)的 ^{15}N 分配率在盛花期最低, 随着物候期的推移逐渐升高, 到果实膨大期达到最高, 果实成熟期营养器官分配率有所下降, 与此物候期植株生殖生长旺盛有关; 贮藏器官(二年生枝、

多年生枝、中心干、粗根)的 ^{15}N 分配率在盛花期最高, 随着物候期的推移逐渐降低, 到果实成熟期降到最低, 果实采收后贮藏器官 ^{15}N 分配率有所上升, 表明此期氮素营养开始向根部和主干、多年生枝等贮藏器官回流、积累。

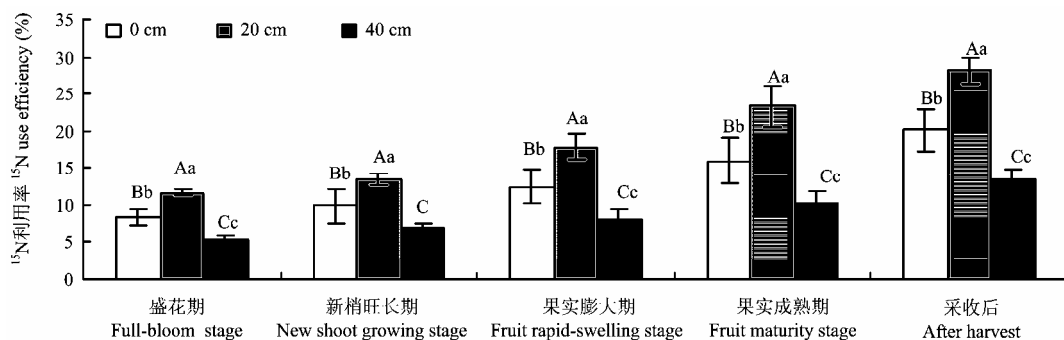
3 个不同施肥深度处理, 植株各器官在同一时期的 ^{15}N 分配率无显著差异, 可见不同的施肥深度对 ^{15}N 在各器官间的迁移和分配影响较小。

2.3 不同施肥深度处理苹果植株对 ^{15}N -尿素的利用率
由图可见, 各处理植株对 ^{15}N -尿素的利用率随物

表 2 不同施肥深度各器官的 ^{15}N 分配率

Table 2 Partition ratio of ^{15}N in different organs at different fertilizer application depths

测定时期 Determination time	施肥深度 Fertilizer depth (cm)	营养器官 Nutrition organs	贮藏器官 Storage organs	生殖器官 Reproduction organs
盛花期 Full-bloom stage	0	4.75	94.80	0.45
	20	4.39	95.24	0.37
	40	4.66	94.95	0.39
新梢旺长期 New shoot growing stage	0	19.99	73.56	6.45
	20	19.33	74.40	6.27
	40	20.39	72.66	6.95
果实膨大期 Fruit rapid-swelling stage	0	48.98	47.04	3.98
	20	47.36	48.71	3.93
	40	44.45	51.11	4.44
果实成熟期 Fruit maturity stage	0	20.95	21.54	57.51
	20	21.93	20.85	57.22
	40	21.03	22.43	56.54
果实采收后 After harvest	0	30.62	69.38	
	20	28.43	71.57	
	40	29.90	70.10	



不同大、小写字母分别表示处理间差异极显著 ($P < 0.01$) 或显著 ($P < 0.05$)
Different capital and small letters meant significant difference at 0.01 and 0.05 levels, respectively

图 不同物候期植株的 ^{15}N 利用率

Fig. ^{15}N utilization rate of different key phenological phases

候期的推移均呈升高的趋势, 盛花期最低, 到采收后达到最高。3 个处理间苹果植株对 ^{15}N -尿素的利用率存在显著差异, 中层施肥处理显著高于表层和深层施肥处理, 在各个物候期均达极显著水平, 深层施肥处理最低。

3 讨论

根系的分布深度通过影响地下营养空间和土壤营养及水分的利用, 直接影响到产量的高低^[19]。孙权等^[13]研究了施肥深度(20、40 和 60 cm)对葡萄的影响, 结果表明 40 cm 处理产量最高, 品质最优, 叶柄氮浓度最高。何华和康绍忠^[14]研究了不同灌溉施肥深度(表层、20 cm、30 cm 和 40 cm)对玉米的影响, 结果表明 30 cm 灌溉施肥有利于提高玉米同化物和经济产量。但这些研究对于不同深度施氮肥的利用效率和吸收分配特性均未涉及。本试验以苹果为试材研究了不同施肥深度对 ^{15}N 吸收分配和利用的影响, 结果表明 3 个施肥深度处理(表层、20 cm 和 40 cm)中, 中层施肥处理 ^{15}N 利用率最高, 原因与中层施肥处理年周期细根的 Ndff 均显著高于浅层和深层施肥, 增强了根系对氮的吸收能力有关; 并且中层施肥年周期其它器官的 Ndff 也显著高于浅层和深层施肥, 表明中层施肥处理增强了器官对氮的吸收征调能力, 满足不同生育期器官发育对养分的需求。不同作物体系最佳施肥深度结果存在差异^[13-14,20-21], 说明不同作物根系在土壤中集中分布层不同。根层施肥可以提高氮肥利用率不仅与根系密度有关, 还与肥料可以提高根系活力有关^[22], 苹果根层养分浓度与根系活力关系及最适浓度需要进一步研究。另外尽管深层土壤中根系比例较少, 但它们对水分吸收以及营养元素的运输却发挥着非常重要的作用^[23], 对于如何优化果树根系空间组成和确定合适的施肥量以增加果树产量还需要进一步研究。

施肥对果树的影响不仅与养分吸收量有关, 也在各个器官的分配有关, 有关不同施肥深度对养分分配的影响未见报道。从本文的试验结果来看, 3 个不同深度春季施肥处理 ^{15}N 在各个器官的分配趋势一致, 与赵凤霞等^[24]在甜樱桃上、张进等^[25]在冬枣上、赵林等^[26]在嘎啦苹果上春季施 ^{15}N 分配特性报道一致, 而张进等^[25]研究发现施肥时期不同冬枣各器官的 ^{15}N 分配率差异显著, 可见不同施肥深度只影响了各器官对氮的吸收征调能力, 并没有影响 ^{15}N 的分配, 施肥时期可能是影响各器官 ^{15}N 分配率的主要因子。

4 结论

中层施肥处理(20 cm)苹果植株各器官对肥料 N 的吸收征调能力显著高于表层和深层处理; ^{15}N 利用率随物候期的推移逐渐升高, 中层施肥处理各物候期的 ^{15}N 利用率均显著高于表层和深层施肥; 不同深度施肥处理对各器官的 ^{15}N 分配率影响较小。

References

- [1] Dejong T M, Day K R, Johnson R S. Partitioning of leaf nitrogen with respect to within canopy light exposure and nitrogen availability in peach. *Trees*, 1989(3): 89-95.
- [2] 勾玲, 刘日明, 肖华, 危常州. 新疆甜菜群体光合特性及与产量关系的研究. 石河子大学学报: 自然科学版, 2000, 4(1): 17-21.
Gou L, Liu R M, Xiao H, Wei C Z. Effects of nitrogen rates on photosynthetic characteristics and yield of high-yielding cotton in Xinjiang. *Journal of Shihezi University: Natural Science*, 2000, 4(1): 17-21. (in Chinese)
- [3] 来改英, 王贵荣, 王宏富. 不同氮肥水平对小麦后期叶片光合速率的影响. 山西农业大学学报, 2003(1): 32-35.
Lai G Y, Wang G R, Wang H F. The effect of nitrogenous fertilizer on the rate photosynthesis of later period of wheat leaves. *Journal of Shanxi Agricultural University*, 2003(1): 32-35. (in Chinese)
- [4] 李文庆, 张民, 束怀瑞. 氮素在果树上的生理作用. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2002, 33(1): 96-100.
Li W Q, Zhang M, Shu H R. The physiological effects of nitrogen on fruit trees. *Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science*, 2002, 33(1): 96-100. (in Chinese)
- [5] 崔振岭, 石立委, 徐久飞, 李俊良, 张福锁, 陈新平. 氮肥施用对冬小麦产量、品质和氮素表现损失的影响研究. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2071-2075.
Cui Z L, Shi L W, Xu J F, Li J L, Zhang F S, Chen X P. Effects of N fertilization on winter wheat grain yield and its crude protein content and apparent N losses. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11): 2071-2075. (in Chinese)
- [6] Saenz J L, Dejong T M, Weinbaum S A. Nitrogen stimulated increases in peach yield are associated with extended fruit development period and increased fruit sink capacity. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1997, 122(6): 772-777.
- [7] 彭福田. 氮素对苹果果实发育与产量、品质的调控[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2001.
Peng F T. Nitrogen regulation of fruit development, yield and fruit quality[D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2001.

- (in Chinese)
- [8] Vanangamudi K, Subramanian K S, Baskaran M. Influence of irrigation and nitrogen on the yield and quality of chili fruit and seed. *Seed Research*, 1990, 18(2): 114-116.
- [9] Ghoname A A, Dawood M G, Riad G S, El-Tohamy W A. Effect of nitrogen forms and biostimulants foliar application on the growth, yield and chemical composition of hot pepper grown under sandy soil conditions. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 2009, 5(5): 840-852.
- [10] Raese J T, Drake S R, Curry E A. Nitrogen fertilizer influences fruit quality, soil nutrients and cover crops, leaf color and nitrogen content, biennial bearing and cold hardiness of 'Golden Delicious'. *Journal of Plant Nutrition*, 2007, 30: 1585-1604.
- [11] Hoagland L, Carpenter-Boggs L, Granatstein D, Mazzola M, Smith J, Peryea F, Reganold J P. Orchard floor management effects on nitrogen fertility and soil biological activity in a newly established organic apple orchard. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, 45: 11-18.
- [12] Scandellari F, Tonon G, Thalheimer M, Ceccon C, Gioacchini P, Aber J D, Tagliavini M. Assessing nitrogen fluxes from roots to soil associated to rhizodeposition by apple (*Malus domestica*) trees. *Trees*, 2007, 21: 499-505.
- [13] 孙 权, 王静芳, 王素芳, 杨 琴, 王振平. 不同施肥深度对酿酒葡萄叶片养分和产量及品质的影响. *果树学报*, 2007, 24(4): 455-459.
- Sun Q, Wang J F, Wang S F, Yang Q, Wang Z P. Influence of fertilization depth on NPK content in leaves, yield and fruit quality of grapevine. *Journal of Fruit Science*, 2007, 24(4): 455-459. (in Chinese)
- [14] 何 华, 康绍忠. 灌溉施肥深度对玉米同化物分配和水分利用效率的影响. *植物生态学报*, 2002, 26(4): 454-458.
- He H, Kang S Z. Effect of fertigation depth on dry matter partition and water use efficiency of corn. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(4): 454-458. (in Chinese)
- [15] 王丽琴, 魏钦平, 唐 芳, 束怀瑞. 苹果新根生理生化特性研究. *园艺学报*, 1997, 24(3): 225-228.
- Wang L Q, Wei Q P, Tang F, Shu H R. Annual dynamics of physiological and biochemical characteristics of apple primary roots. *Acta Horticulturae Sinica*, 1997, 24(3): 225-228. (in Chinese)
- [16] 杨洪强. 苹果根系研究. 北京: 科学出版社, 2007.
- Yang H Q. *Studies on Apple Roots*. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [17] 顾曼如. ^{15}N 在苹果氮素营养研究中的应用. *中国果树*, 1990(2): 46-48.
- Gu M R. Application of ^{15}N on the nitrogen nutritional study in apple trees. *China fruits*, 1990(2): 46-48. (in Chinese)
- [18] 徐季娥, 林裕益, 吕瑞江, 陈 良, 高占峰. 鸭梨秋施 ^{15}N -尿素的吸收与分配. *园艺学报*, 1993, 20(2): 145-149.
- Xu J E, Lin Y Y, Lü R J, Chen L, Gao Z F. Study on the absorption and the distribution of ^{15}N -labelled urea to 'Yali' pear trees following autumn application. *Acta Horticulturae Sinica*, 1993, 20(2): 145-149. (in Chinese)
- [19] 鲁少波, 刘秀萍, 鲁绍伟, 王玉华, 白永福. 林木根系形态分布及其影响因素. *林业调查规划*, 2006, 31(3): 105-108.
- Lu S B, Liu X P, Lu S W, Wang Y H, Bai Y F. The form distribution and influential factors of woods root system. *Forest Inventory and Planning*, 2006, 31(3): 105-108. (in Chinese)
- [20] 石 岩, 位东斌, 于振文, 余松烈. 施肥深度对旱地小麦氮素利用及产量的影响. *核农学报*, 2001, 15(3): 180-183.
- Shi Y, Wei D B, Yu Z W, Yu S L. Effects of fertilizer application depth on nitrogen utilization and yield in dry land wheat. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2001, 15(3): 180-183. (in Chinese)
- [21] 李美善, 严一字, 朴 锦, 朴雪梅, 吴基日. 土壤耕层深度和施肥深度对桔梗根部主要农艺性状的影响. *安徽农业科学*, 2010, 38(8): 4146-4147.
- Li M S, Yan Y Z, Piao J, Piao X M, Wu J R. Effect of the soil topsoil depth and fertilization depth on root main agronomic characters of *Platycodon grandiflorum*. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2010, 38(8): 4146-4147. (in Chinese)
- [22] 张永清, 李 华, 苗果园. 施肥深度对春小麦根系分布及后期衰老的影响. *土壤*, 2006, 38(1): 110-112.
- Zhang Y Q, Li H, Miao G Y. Effect of fertilization depth on distribution and late senescence of root system of spring wheat. *Soils*, 2006, 38(1): 110-112. (in Chinese)
- [23] 刘胜群, 宋风斌. 玉米不同耐旱品种根系构型和动态建成研究. *扬州大学学报: 农业与生命科学版*, 2007, 28(1): 68-71.
- Liu S Q, Song F B. Comparative study on the characteristics of root system among maize genotypes with different tolerance to drought. *Journal of Yangzhou University: Agriculture and Life Sciences Edition*, 2007, 28(1): 68-71. (in Chinese)
- [24] 赵凤霞, 姜远茂, 彭福田, 高相彬, 刘丙花, 王海云, 赵 林. 甜樱桃对 ^{15}N 尿素的吸收、分配和利用特性. *应用生态学报*, 2008, 19(3): 686-690.
- Zhao F X, Jiang Y M, Peng F T, Gao X B, Liu B H, Wang H Y, Zhao L. Characteristics of urea ^{15}N absorption, allocation and utilization by sweet-cherry. *Chinese Journal of applied Ecology*, 2008, 19(3): 686-690. (in Chinese)

- [25] 张 进, 姜远茂, 束怀瑞, 赵登超, 张 序, 刘文娥, 吴良欢. 不同施肥期沾化冬枣对 ¹⁵N 的吸收、分配及利用特性. 园艺学报, 2005, 32(2): 288-291.
- Zhang J, Jiang Y M, Shu H R, Zhao D C, Zhang X, Liu W E, Wu L H. Characteristics of absorption, distribution and utilization of 'Zhanhuadongzao' Jujube to ¹⁵N in different fertilizer application stages. *Acta Horticulturae Sinica*, 2005, 32(2): 288-291. (in Chinese)
- [26] 赵 林, 姜远茂, 彭福田, 李盼盼, 王 磊, 李洪波. 嘎啦苹果对春施 ¹⁵N-尿素的吸收、利用与分配特性. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6): 1439-1443.
- Zhao L, Jiang Y M, Peng F T, Li P P, Wang L, Li H B. Characteristics of absorption, utilization and distribution of spring soil ¹⁵N-urea application for Gala/ *Malus hupehensis*. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(6): 1439-1443. (in Chinese)

(责任编辑 曲来娥)