'嘎啦'苹果不同饱满度芽嫁接幼苗 ^{13}C 、 ^{15}N 分配利用特性研究

孙聪伟¹, 冯建忠², 陈 倩¹, 王富林¹, 周恩达¹, 姜远茂^{1,*}

(1 作物生物学国家重点实验室,山东农业大学园艺科学与工程学院,山东泰安 271018; 2 石家庄果树研究所,石家 庄 000217)

摘 要: 以盆栽不饱满芽(春梢基部芽)、次饱满芽(秋梢芽)和饱满芽(春梢中部芽)'嘎啦'苹果(Malus × domestica 'Gala')/八棱海棠(Malus micromalus Makino)嫁接幼苗为试材,采用 ¹⁵N、 ¹³C 双标记法,研究了其碳、氮营养分配特性。结果表明,新梢开始旺长期叶片 ¹³C 分配率不饱满芽幼苗 > 次饱满芽幼苗 > 饱满芽幼苗,分别为 45.81%、42.49%、35.05%; 根部 ¹³C 分配率饱满芽幼苗 > 次饱满芽幼苗 > 不饱满芽幼苗,分别为 20.04%、15.88%、12.67%。新梢旺长期 3 种芽幼苗叶片、根部 ¹³C 分配率趋势与新梢开始旺长期相反。新梢缓长期各芽苗叶片碳同化物分配差异不显著,根部 ¹³C 分配率,次饱满芽幼苗和不饱满芽幼苗显著高于饱满芽幼苗。叶片 ¹⁵N 分配率逐渐升高,始终为饱满芽幼苗 > 次饱满芽幼苗 > 不饱满芽幼苗,至新梢缓长期分别达到 55.67%、52.45%和 51.54%。根部 ¹⁵N 分配率随生长发育而降低,新梢开始旺长期和新梢旺长期不饱满芽幼苗 > 次饱满芽幼苗 > 饱满芽幼苗。新梢缓长期各器官氮素分配率差异不显著。不同芽幼苗 ¹³C 固定量、 ¹⁵N 利用率均逐渐升高并趋于一致,表明芽有同等更新潜质。

关键词: 苹果; 饱满芽; 不饱满芽; 次饱满芽; ¹⁵N; ¹³C; 分配; 利用

中图分类号: S 661.1 文献标志码: A 文章编号: 0513-353X (2013) 02-0317-08

Effects of Different Plumpness Buds on the Distribution and Utilization of 13 C and 15 N in Gala ($Malus \times domestica/Malus \ micromalus \ Makino$)

SUN Cong-wei¹, FENG Jian-zhong², CHEN Qian¹, WANG Fu-lin¹, ZHOU En-da¹, and JIANG Yuan-mao^{1,*}

(¹State Key Laboratory of Crop Biology, College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; ²Shijiazhuang Pomology Institute, Shijiazhuang 000217, China)

Abstract: Different plumpness buds were used to study the distribution and utilization of ¹³C and ¹⁵N using two-year-old potted Gala apple trees (*Malus* × *domestica/Malus micromalus* Makino) as materials under high N-level conditions. The results showed that the distribution ratios of ¹³C in leaves during the shoots early vigorous growing period ranked in the following order: Plumpless bud tree > secondary bud tree > plump bud tree, but the rank was plumpless bud tree < secondary bud tree < plump bud tree in

收稿日期: 2012 - 09 - 19; **修回日期:** 2013 - 01 - 15

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项项目(CARS-28);公益性行业(农业)科研专项项目(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)

roots at the same period. The ranks were opposite in leaves and roots of the distribution ratios of ¹³C at the vigorous growing period. The ¹³C distribution ratio in roots of plump bud tree was lower than that of secondary bud tree and plumpless bud tree at the slow growth period. The distribution ratios of ¹⁵N in leaves of plump bud, secondary bud and plumpless bud increased, and reached the highest at the slow growth period, which were 55.67%, 52.45% and 51.54% respectively. The ¹⁵N distribution ratios in roots decreased significantly with the process of growth. However, the ¹⁵N distribution ratio in roots of plumpless bud tree was the highest, followed with secondary bud tree and plump bud tree at the early vigorous growing period and vigorous growing period. There was no significant difference at the slow growth period. The utilization ratio of the N fertilizer and ¹³C fixed capacity were improved gradually with the growth and development of the trees. Different plumpness buds tree can achieve results of renewal potential.

Key words: apple; plump bud; plumpless bud; secondary bud; ¹⁵N; ¹³C; distribution; utilization

芽的饱满度与其形成的新梢质量密切相关,一般优质芽形成的新梢亦较充实(束怀瑞,1993)。 芽萌发形成新梢分为两个阶段,第一阶段为芽内分化叶原基生长形成,第二阶段为芽外分化叶原基 形成。第一阶段与芽质量关系密切,饱满芽芽内叶原数可达 11 ~ 13 片,叶面积较大,比叶重高, 不饱满芽中仅 7 ~ 9 片;第二阶段除与芽质有关外还受外界条件影响(束怀瑞 等,1964)。增施氮 肥能提高叶片光合速率(Dejong et al., 1989;勾玲等,2000)和叶绿素含量(冯焕德等,2008), 促进新梢生长;过量施氮又会降低根冠比(胡艳丽等,2011),造成地上部徒长。有研究指出,适 量供氮有利于促进苹果光合产物的分配和运转(王磊等,2011),在甜椒上也有相似报道(隋方功等, 2004)。迄今关于苹果碳、氮分配利用的研究,多集中在不同水肥条件、植株类型、生长时期等方面 (Poul, 1967;张芳芳等,2009;房祥吉等,2010;李洪波等,2010),且多为对碳或氮的单独 研究,而对苹果不同饱满度芽中碳、氮分配利用情况的研究较少。本试验中对高氮条件下3种饱满 度芽幼苗新梢质量及碳、氮分配进行比较,以期为植株整形修剪留芽部位提供依据。

1 材料与方法

1.1 试材及取样方法

试验于 2011 年 3—7 月在山东省泰安市黄家庄试验站进行。试验地土壤碱解氮含量 102.08 $mg \cdot kg^{-1}$,速效磷含量 50.73 $mg \cdot kg^{-1}$,速效钾含量 98.37 $mg \cdot kg^{-1}$,有机质含量 10.39 $g \cdot kg^{-1}$ 。

试材为嫁接的 2 年生嘎啦(Malus × domestica)/八棱海棠(Malus micromalus Makino)幼苗(春梢基部不饱满芽、中部饱满芽和秋梢次饱满芽),2010年10月15日取3种饱满度的芽进行嫁接。

2011年3月20日将3种芽嫁接的幼苗栽植于陶瓷盆中,盆内径25cm,内高20cm,每盆装土壤至盆沿3cm处。待萌芽后选取生长基本一致,春梢中部饱满芽苗、秋梢次饱满芽苗和春梢基部不饱满芽苗各18株,于4月9日进行施肥处理:每盆均匀施入¹⁵N-尿素(丰度10.28%,上海化工研究院生产)0.3g,同时施入普通尿素3.2g,磷酸二氢钙6.25g,硫酸钾1.4g,施肥后立即浇透水。

分别于新梢开始旺长期(5月7日)、新梢旺长期(5月28日)和新梢缓长期(6月18日)进行 13 C 标记处理(沈其荣 等,2000; Lu et al.,2002; 何敏毅 等,2008),各处理幼苗每个时期选取 6株,其中 3 株进行 13 C 标记(新梢开始旺长期和旺长期因植株光合能力小,每株供给 13 C O₃,新梢缓长期叶片大量生成,加大 Ba 13 CO₃,供给量到每株 15 N, 15 C 测定。

1.2 取样与测定方法

整株解析为叶、新梢、根 3 部分。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 ℃下杀青 30 min,置于 80 ℃下烘干,粉碎后过 100 目筛,混匀后装袋备用。

样品全氮用凯氏定氮法测定(鲍士旦,2000), ¹⁵N 丰度用 ZHT-03 质谱计(北京分析仪器厂)测定(河北农林科学院遗传生理研究所), ¹³C 丰度在 DELTA V Advantage 同位素比率质谱仪中测定(中国林业科学院稳定同位素实验室)。

1.3 计算方法

1.3.1 各器官 ¹³C 分配率的计算

 13 C 丰度: F_i (%) = $(\delta^{13}$ C + 1 000) × 0.0112372/[$(\delta^{13}$ C + 1 000) × 0.0112372 + 1 000] × 100。 各器官含碳量: C_i = 器官总质量 (g) × 全碳含量 (%)。

进入各组分的 ¹³C 量 (mg): ${}^{13}C_i = C_i \times (F_i - F_{\text{less}}) \times 10$ 。

整株 ¹³C 固定量为进入各组分的 ¹³C 量之和。

 13 C 在各器官的分配率: 13 C_{*i*} (%) = 13 C_{*i*} / 13 C _{净吸收} × 100,式中: 13 C_{*i*} 为该器官的 13 C 量占苹果净吸收 13 C 量的百分比。

1.3.2 各器官 ¹⁵N 分配率的计算

Ndff (%) = 植物样品中 ¹⁵N 原子百分超/肥料中 ¹⁵N 原子百分超 × 100。

原子百分超 (%) = 样品中 15 N 丰度 (%) - 自然丰度 (%)。

从氮肥中吸收的氮量(g)=器官全氮量(g)×Ndff。

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。

本试验采用 DPS7.05 进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 不同饱满度芽嫁接幼苗的生长动态

从图 1 中可以看出,3 种不同饱满度芽嫁接苗的生长动态均呈单 "S"曲线。饱满芽、次饱满芽和不饱满芽嫁接幼苗的新梢长度与天数(以 5 月 7 日为第 1 天)的相关方程分别为: y = 6.3254 +

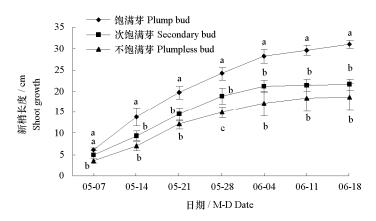


图 1 不同饱满度芽幼嫁接幼苗的生长动态

Fig. 1 Growth dynamic of Gala apple different plumpness buds tree P = 0.05.

 $1.1299x - 0.012x^2$, $R^2 = 0.99882$; $y = 4.3912 + 0.9163x - 0.012x^2$, $R^2 = 0.9908$; $y = 3.0936 + 0.7442x - 0.008x^2$, $R^2 = 0.99102$,表明嫁接芽的差异并未改变幼苗新梢的生长进程。新梢开始旺长期(5 月 7日)饱满芽幼苗新梢长度显著高于不饱满芽,而与次饱满芽差异不显著;在随后测定期内饱满芽幼苗新梢长度一直显著高于次饱满芽和不饱满芽,次饱满芽和不饱满芽嫁接苗间(5 月 28 日除外)差异不显著。

2.2 不同饱满度芽嫁接幼苗 ¹³C 固定量和分配的差异

2.2.1 ¹³C 固定量的差异

不同饱满度的芽嫁接的幼苗 ¹³C 固定量变化呈现出相似的规律,新梢开始旺长期最低,随叶片生长和光合作用增强,¹³C 固定量不断增加,至新梢缓长期达最高。新梢开始旺长和旺长期 3 种饱满度芽幼苗 ¹³C 固定量有差异,饱满芽苗固定量最高,其次为次饱满芽,最低为不饱满芽。至新梢缓长期三者间差异不显著,表明随叶片大量生成,饱满度芽的差异对幼苗光合能力影响减少,产生的同化营养量无显著差异。

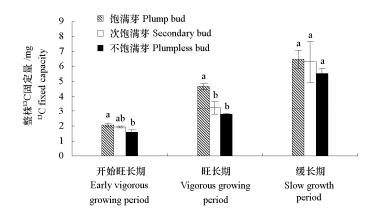


图 2 不同时期整株 ¹³C 固定量 Fig. 2 ¹³C fixed capacity of different periods

2.2.2 ¹³C 分配率的差异

由表 1 可见,新梢开始旺长期,幼苗叶片 ¹³C 分配率为不饱满芽幼苗 > 次饱满芽幼苗 > 饱满芽幼苗,新梢 ¹³C 分配率差异不显著,根部 ¹³C 分配率趋势与叶片相反。表明饱满芽幼苗根系对碳同化物的征调能力较强,有助于根系的生长和吸收。

新梢旺长期,不同饱满度的芽嫁接的幼苗叶片、根系 ¹³C 分配状况表现出与上一时期相反的趋势。饱满芽幼苗 ¹³C 固定量最多,同时叶片 ¹³C 分配率最高(45.46%),其次是次饱满芽,不饱满芽最低,这与嘎啦幼苗新梢生长量大小等习性有关。根部 ¹³C 分配率饱满芽、次饱满芽幼苗均显著低于不饱满芽幼苗,饱满芽幼苗略小于次饱满芽幼苗,但二者间差异不显著。不同饱满度的芽嫁接的幼苗新梢碳同化物分配规律差异不明显。

新梢缓长期,新梢大量叶片产生同化物质供应整株生长,3 种饱满度的芽嫁接的幼苗叶片 ¹³C 分配率较新梢旺长期下降,根部 ¹³C 分配率上升。此时期不同芽幼苗各器官间碳同化物分配趋向平衡,除不饱满芽和次饱满芽幼苗根部 ¹³C 分配率显著高于饱满芽幼苗根部外,其他各器官间无显著差异。

+ 1	不同饱滞度芽嫁接幼苗各器官 ¹³ C 4	マヤロモン
表 1	不同饱满度车碟接切品各类官"()4	ᄽᄣᄱ

Table 1	Proportion of ¹³ C in	organs to total ¹³ C uptake	e of Gala apple different plun	npness buds tree /%	
	器官	饱满芽幼苗	次饱满芽幼苗	不饱满芽幼苗	_
	0	DI 1 1	0 1 1 1	DI 1 1 1	

时期	器官	饱满芽幼苗	次饱满芽幼苗	不饱满芽幼苗
Period	Organ	Plump bud tree	Secondary bud tree	Plumpless bud tree
开始旺长期	叶 Leaf	35.05 ± 0.19 b	42.49 ± 1.16 ab	45.81 ± 2.31 a
Early vigorous growing period	新梢 Shoot	44.91 ± 0.89 a	41.63 ± 0.69 a	41.52 ± 1.78 a
	根 Root	20.04 ± 0.71 a	$15.88 \pm 0.47 \ b$	12.67 ± 0.53 c
旺长期	叶 Leaf	$45.46 \pm 1.29 a$	41.06 ± 2.07 ab	$36.95 \pm 0.37 \text{ b}$
Vigorous growing period	新梢 Shoot	$36.40 \pm 1.79 a$	$38.80 \pm 1.16 a$	38.63 ± 0.63 a
	根 Root	$18.13 \pm 0.50 \text{ b}$	$20.14 \pm 0.91 \text{ b}$	24.42 ± 0.25 a
缓长期	叶 Leaf	27.43 ± 1.44 a	27.45 ± 1.44 a	29.14 ± 0.61 a
Slow growth period	新梢 Shoot	$39.49 \pm 0.95 a$	36.56 ± 1.95 a	34.11 ± 1.06 a
	根 Root	$33.08 \pm 0.49 \text{ b}$	35.99 ± 0.52 a	36.75 ± 0.45 a

2.3 不同饱满度芽嫁接幼苗 ¹⁵N 吸收分配和利用的差异

2.3.1 ¹⁵N 利用率的差异

不同饱满度的芽嫁接的幼苗整株 ¹⁵N 利用率变化趋势一致,均随生长发育逐渐升高。饱满芽幼苗 ¹⁵N 利用率显著高于不饱满芽和次饱满芽,至新梢缓长期三者间净增长量差异减小,表明新梢缓长期不同饱满度芽幼苗对氮肥的利用能力开始趋近。

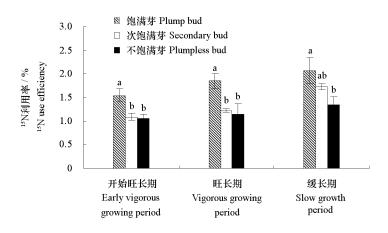


图 3 不同时期整株 ¹⁵N 利用率 Fig. 3 ¹⁵N utilization rate of different periods

2.3.2 ¹⁵N 分配率的差异

由表 2 可知,新梢开始旺长期,饱满芽、次饱满芽幼苗 ¹⁵N 分配率叶片和新梢中较高,根部最低;不饱满芽幼苗分配趋势相反。不同饱满度芽对幼苗 ¹⁵N 分配的影响主要体现在根部,根部 ¹⁵N 分配率饱满芽幼苗 < 次饱满芽幼苗 < 不饱满芽幼苗。表明不饱满芽幼苗上极对新吸收氮素的竞争力弱。3 种芽幼苗新梢的分配规律与叶片相似,差异不显著。

新梢旺长期为幼苗各器官 ¹⁵N 分配率差异显著的时期。新梢及叶片为这一时期的生长中心,幼苗叶片 ¹⁵N 分配率最高,根部氮素分配较新梢开始旺长期变化不大,新梢氮素分配较上一时期明显减少,可见氮素营养不断向叶片转移供给新生器官生长。不同饱满度的芽嫁接的幼苗叶片 ¹⁵N 分配率呈现为饱满芽幼苗 > 次饱满芽幼苗 > 不饱满芽幼苗。3 种芽幼苗各器官氮素分配趋势与上一时

期相同,但差异显著。

新梢缓长期,幼苗叶片 ¹⁵N 分配率达到最高水平,同时是根系 ¹⁵N 分配率最低的时期。其中饱满芽幼苗叶片氮素增加主要来自于新梢,不饱满芽幼苗叶片氮素增加来自于根部,次饱满芽幼苗新梢、根部氮素均向叶片积累。3 种芽幼苗各器官 ¹⁵N 分配率差异均不显著。

表 2 不同饱满度芽嫁接幼苗各器官 ¹⁵N 分配率

Table 2 Proportion of ¹⁵N in organs to total ¹⁵N uptake of Gala apple different plumpness buds tree

/%

时期	器官	饱满芽	次饱满芽	不饱满芽
Period	Organ	Plump bud	Secondary bud	Plumpless bud
开始旺长期	叶 Leaf	$37.76 \pm 1.13 a$	$36.22 \pm 1.20 a$	30.75 ± 2.22 a
Early vigorous growing period	新梢 Shoot	$37.79 \pm 2.07 a$	35.54 ± 0.67 a	33.19 ± 0.73 a
	根 Root	$24.45 \pm 3.20 b$	$28.24 \pm 0.53 \text{ ab}$	$36.06 \pm 1.49 a$
旺长期	叶 Leaf	$48.53 \pm 0.82 a$	$46.02 \pm 1.41 \text{ b}$	$44.10 \pm 1.42 \text{ c}$
Vigorous growing period	新梢 Shoot	27.65 ± 1.62 a	$25.29 \pm 0.63 \text{ b}$	21.41 ± 0.86 c
	根 Root	23.82 ± 0.81 c	$28.69 \pm 0.78 \ b$	34.49 ± 0.56 a
缓长期	叶 Leaf	55.67 ± 1.84 a	52.45 ± 1.87 a	51.54 ± 0.87 a
Slow growth period	新梢 Shoot	$20.98 \pm 2.30 a$	23.08 ± 1.36 a	23.60 ± 0.32 a
	根 Root	$23.36 \pm 4.13 a$	24.47 ± 0.51 a	24.85 ± 0.55 a

3 讨论

3 种因着生部位和饱满程度不同的芽嫁接形成的幼苗在新梢开始旺长期已显现出差异。新梢开始旺长期幼苗新梢长度、¹³C 固定量及 ¹⁵N 利用率表现为饱满芽幼苗 > 次饱满芽幼苗 > 不饱满芽幼苗,且饱满芽幼苗显著高于其他芽苗。饱满芽、次饱满芽、不饱满芽幼苗根系 ¹³C 分配率依次为 20.04%、15.88%和 12.67%,叶片 ¹⁵N 分配率依次为 37.76%、36.22%和 30.75%,表明饱满程度较高时植株两极竞争优势明显。新梢旺长期芽饱满度的差异对新梢生长的影响进一步加大,不同饱满度芽幼苗叶片 ¹³C 分配率与上一时期相比出现不同变化:饱满芽显著升高(10.41%),次饱满芽基本持平,不饱满芽明显下降(8.86%),可见饱满程度高的芽幼苗上极对同化营养的竞争大于下极。幼苗新梢氮素营养向叶片转移,其各器官 ¹⁵N 分配率的差异较新梢开始旺长期显著。新梢缓长期不同芽幼苗新梢长度、¹³C 固定量及 ¹⁵N 利用率顺序为饱满芽幼苗 > 次饱满芽幼苗 > 不饱满芽幼苗,但三者间 ¹⁵N 利用率净增长量差值减小,¹³C 同化营养水平无显著差异。随着嘎啦幼苗新吸收的氮肥在各器官间不断运转,不同芽幼苗 ¹⁵N 分配状况趋于一致,¹³C 同化物除部分用于新生枝叶的生长发育外,在植株各个器官间的分配比较均匀。不同饱满度的芽嫁接在发育质量相同的实生砧上,新梢缓长期各器官碳、氮营养的分配率(除不饱满芽、次饱满芽幼苗根部 ¹³C 分配率显著高于饱满芽幼苗根部外)基本无显著差异,说明芽有同等更新潜质。这与丁平海和王中英(1997)的研究结果一致。

本试验中新梢缓长期各处理芽幼苗叶片 ¹³C 分配率较新梢旺长期均下降,碳同化物输出量增加,饱满芽幼苗叶片自留量比前期减少 18.03%,次饱满芽、不饱满芽幼苗分别减少 13.61%和 7.81%;根部 ¹³C 分配率均上升,验证了束怀瑞(1980)关于春季萌芽长叶后,叶片合成的同化产物首先供应自身生长,其次向外部运输的结论。不同芽幼苗贮藏营养量从高到低为饱满芽、次饱满芽、不饱满芽。

贮藏氮有再分配、再利用的特性(顾曼如 等,1986)。王承琴等(2005)的研究表明,新梢生长后,中、长枝上第10~12个叶片生长是营养转换期开始的标志,即多年生果树春季生长发育所需的营养来源,从以利用树体贮藏营养为主过渡到以利用当年同化养分为主。本试验中新梢旺长期

不同饱满度芽幼苗 ¹³C 同化物固定及分配、¹⁵N 利用及分配差异显著,新梢缓长期 ¹³C 固定量无显著差异,¹⁵N 利用率净增长量差值减小,¹³C、¹⁵N 分配状况趋于一致,可能与此时已过渡到利用当年同化养分为主的阶段有关。

前人研究表明,从萌芽到成枝,起调节作用的主导因素是内源激素的作用(Lockard & Chneider, 1981)。IAA 高峰期与新梢旺长期相一致,到新梢停止时,IAA 含量降至最低(程炳嵩,1995;付蕾等,2000)。进入新梢缓长期,3种芽幼苗¹³C固定量、整株¹⁵N利用率趋于一致,可能与激素调节有关。不同处理芽幼苗激素运转机理有待进一步研究。

References

- Bao Shi-dan. 2000. Analysis of soil agrochemical. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press: 263 268. (in Chinese) 鲍士旦. 2000. 土壤农化分析. 第 3 版. 北京:农业出版社: 263 - 268.
- Cheng Bing-song. 1995. Plant physiology and agricultural reaserch. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press: 86 90. (in Chinese) 程炳嵩. 1995. 植物生理与农业研究. 北京: 中国农业科技出版社: 86 90.
- Dejong T M, Day K R, Johnson R S. 1989. Partitioning of leaf nitrogen with respect to within canopy light exposure and nitrogen availability in peach. Trees, (3): 89 95.
- Ding Ping-hai, Wang Zhong-ying. 1997. The allocation patterns of carbon assimilates in apple tree of different phonological period. Journal of Agricultural University of Hebei, (3): 52 57. (in Chinese)
 - 丁平海, 王中英. 1997. 不同物候期苹果体内碳同化物的分配规律. 河北农业大学学报, (3): 52-57.
- Fang Xiang-ji, Jiang Yuan-mao, Peng Fu-tian, Ge Shun-feng, Ding Ning, Liu Jian-cai, Wang Hai-ning. 2010. Effect of irrigation amout on growth and ¹⁵N absorption utilization and loss of potted *Malus hupenhensis*. Journal of Soil and Water Conservation, 24 (6): 76 78, 122. (in Chinese)
 - 房祥吉,姜远茂,彭福田,葛顺峰,丁 宁,刘建才,王海宁. 2010. 灌水量对盆栽平邑甜茶生长与 ^{15}N 吸收、利用和损失的影响. 水 土保持学报,24 (6): 76 78, 122.
- Feng Huan-de, Li Bing-zhi, Zhang Lin-sen, Jin Hui-cui, Li Huan-bo, Han Ming-yu. 2008. Influences of different rates of nitrogen on fruit quality, photosynthesis and element contents in leaves of Red Fuji apples. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 17 (1): 229 232. (in Chinese)
 - 冯焕德,李丙智,张林森,金会翠,李焕波,韩明玉. 2008. 不同施氮量对红富士苹果品质、光合作用和叶片元素含量的影响. 西北农业学报,17(1): 229-232.
- Fu Lei, Wang Ming-lin, Gao Ji-gang, Sheng Feng, Su Xiu-rong. 2000. Annual dynamic pattern of four endogenous hormones in young apple trees.

 Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science, 31 (2): 180 182. (in Chinese)
 - 付 蕾,王明林,高吉刚,盛 峰,苏秀荣. 2000. 苹果幼树 4 种内源激素周年发生动态研究. 山东农业大学学报:自然科学版,31 (2):180-182.
- Gou Ling, Liu Ri-ming, Xiao Hua, Wei Chang-zhou. 2000. Effects of nitrogen rates on photosynthetic characteristics and yield of high-yielding cotton in Xinjiang. Journal of Shihezi University: Natural Science, 4 (1): 17 21. (in Chinese)
 - 勾 玲,刘日明,肖 华,危常州. 2000. 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, 4 (1): 17-21
- Gu Man-ru, Shu Huai-rui, Zhou Hong-wei. 1986. A study on the nitrogen nutrition of apple trees IV The characters of translocation and distribution of the reserved ¹⁵N. Acta Horticulturae Sinica, 13 (1): 25 30. (in Chinese)
 - 顾曼如,束怀瑞,周宏伟. 1986. 苹果氮素营养研究 \mathbb{N} . 贮藏 $^{15}\mathbb{N}$ 的运转、分配特性. 园艺学报,13 (1): 25 30.
- He Min-yi, Meng Fan-qiao, Shi Ya-juan, Wu Wen-liang. 2008. Estimating photosynthesezed carbon distribution and inputs into belowground in a maize soil following ¹³C pulse-labeling. Environmental Science, (2): 446 453. (in Chinese)
 - 何敏毅,孟凡乔,史雅娟,吴文良. 2008. 用 ¹³C 脉冲标记法研究玉米光合碳分配及其向地下的输入. 环境科学,(2): 446-453.
- Hu Yan-li, Mao Zhi-quan, Li Xiao-lei, Shen Xiang, Shu Huai-rui. 2011. Function differences between root and crown of three apple rootstocks with

different fertility levels. Scientia Agricultura Sinica, 44 (9): 1863 - 1870. (in Chinese)

胡艳丽,毛志泉,李晓磊,沈 向,束怀瑞. 2011. 三种苹果砧木不同肥力条件下根冠功能差异. 中国农业科学,44(9): 1863-1870

Li Hong-bo, Jiang Yuan-mao, Peng Fu-tian, Zhao Lin, Wang Lei, Fang Xiang-ji, Ge Shun-feng. 2010. Characteristics of absorption, distribution and utilization of spring soil ¹⁵N-urea application for different types of Fuji (*Malus domestica/M. hupehensis*). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 16 (4): 986 - 991. (in Chinese)

李洪波,姜远茂,彭福田,赵 林,王 磊,房祥吉,葛顺峰. 2010. 不同类型红富士苹果对春季土施 ¹⁵N - 尿素的吸收、分配和利用特性研究. 植物营养与肥料学报,16 (4): 986 - 991.

- Lockard R G, Chneider G W S. 1981. Stock and scion growth relationships and mechanism in apple. Hort Rev, 3: 315 375.
- Lu Y H, Watanabe A, Kimura M. 2002. Input and distribution of photosyn-thesized carbon in a flooded soil. Global Biogeochem Cycles, 16: 321 328
- Poul Hansen. 1967. ¹⁴C studies on apple trees III. The influence of season on storage and mobilization of labelled compounds. Physiologia Plantarum, 20: 1103 1111.
- Shen Qi-rong, Yin Shi-xue, Yang Chao-guang, Chen Wei. 2000. Aplication of ¹³C labeling technique to soil science and plant nutrition. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 6 (1): 98 105. (in Chinese)

沈其荣,殷士学,杨超光,陈 巍. 2000. ¹³C 标记技术在土壤和植物营养研究中的应用. 植物营养与肥料学报, 6(1): 98-105.

Shu Huai-rui. 1980. Studies on carbon translocation and distribution of apple trees - The characters of period, correlation, balance. Journal of Shandong Agricultural University, (1): 39 - 53. (in Chinese)

束怀瑞. 1980. 苹果 ¹⁴C 同化物运输分配特性研究——周期、相关、平衡特性研究. 山东农学院学报,(1): 39-53.

Shu Huai-rui. 1993. Pomiculture physiology. Beijing: China Agriculture Press: 154. (in Chinese)

束怀瑞. 1993. 果树栽培生理学. 北京: 农业出版社: 154.

Shu Huai-rui, Gu Man-ru, Li Ya-zhi. 1964. Studies on organogenesis and functions of leaves of apple trees. Journal of Shandong Agricultural University, (9): 23 - 36. (in Chinese)

束怀瑞,顾曼如,李雅志. 1964. 苹果叶器官形成及其功能研究. 山东农学院学报,(9): 23-36.

Sui Fang-gong, Lü Yin-yan, Wang Yun-hua, Zhou Guang-sheng, Chishaki Naoya. 2004. Effect of different nitrogen applied on the distribution of carbon and nitrogen in sweet pepper. Acta Horticulturae Sinica, 31 (4): 472 - 476. (in Chinese)

隋方功,吕银燕,王运华,周广胜,樗木直也. 2004. 不同施氮量对甜椒碳、氮营养分配的影响. 园艺学报, 31 (4): 472-476.

Wang Cheng-qin, Dong Yu-cai, Chen Tie-hu. 2005. The relation between leaf area at different leaf position of new shoots and nutrient-transforming period in apple trees. Shanxi Fruits, (1): 6 - 7. (in Chinese)

王承琴,董育才,陈铁虎. 2005. 苹果新梢不同节位叶面积大小与营养转换期的关系. 山西果树, (1): 6-7.

Wang Lei, Jiang Yuan-mao, Peng Fu-tian, Wei Shao-chong, Ge Shun-feng, Zhang Da-peng, Cui Tong-li. 2011. Effects of main branch bending on characteristics of distribution and utilization of ¹³C and ¹⁵N for Red Fuji. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 17 (2): 433 – 437. (in Chinese)

王 磊,姜远茂,彭福田,魏绍冲,葛顺峰,张大鹏,崔同丽. 2011. 主枝开张角度对盆栽红富士苹果 13 C 和 15 N 分配、利用的影响. 植物营养与肥料学报,17 (2): 433 - 437.

Zhang Fang-fang, Han Ming-yu, Zhang Li-xin, Liu Chang-hong, Zhao Cai-ping. 2009. Studies on the property of absorption and partition of ¹⁵N in Fuji apple trees using ¹⁵N-labelled urea in early summer. Journal of Fruit Science, 26 (2): 135 – 139. (in Chinese)

张芳芳,韩明玉,张立新,刘长虹,赵彩平. 2009. 红富士苹果对初夏土施 ¹⁵N - 尿素的吸收、分配和利用特性. 果树学报, 26 (2): 135 - 139.