植物营养与肥料学报 2015,21(3): 702 - 708 doi: 10.11674/zwyf.2015.0317
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

不同负载量对苹果^{13}C和^{15}N分配、利用的影响

门永阁, 安 欣, 许海港, 姜 翰, 魏绍冲, 姜远茂*
(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】利用稳定性同位素^{13}C和^{15}N示踪技术,研究了不同负载量对苹果^{13}C和^{15}N分配、利用的影响,从营养吸收的角度阐明负载量对苹果生长发育影响的机理,为疏果及提高氮肥利用率提供依据。**【方法】**以5年生垄栽王林/SH_{38}/八棱海棠苹果为试材,于3月27日挖环状沟施肥,每株施入^{15}N-尿素10 g,同时施N 110.33 g、P_2O_5 143.15 g、K_2O 151.26 g。在坐果后,立即进行疏果处理,试验设3个处理为对照(不疏果)、2/3负载量(疏掉其中1/3的果实)和1/3负载量(疏掉其中2/3的果实);于果实成熟期(9月6日)对已处理的植株进行整株^{13}C标记处理。标记72 h后破坏性采样,测定^{13}C和^{15}N丰度。^{13}C丰度用DELTA V Advantage同位素比率质谱仪测定,^{15}N丰度用ZHT-03质谱计测定。**【结果】**与对照(不疏果)相比,2/3负载量和1/3负载量处理,果实平均单果重分别增加了17.68%和48.57%,根冠比分别增加了7.69%和15.38%,而其平均单株产量却显著降低,分别为对照的50.18%和78.60%;3处理单位干截面积平均产量分别为0.83 kg/cm^2、0.54 kg/cm^{2}和0.33 kg/cm^2,三者之间差异显著;负载量增加促进叶片制造的^{13}C同化物向果实中转移,减少了向根系的运输,对照、2/3负载量和1/3负载量处理的果实^{13}C分配率分别为39.81%、29.25%和16.46%,根系^{13}C分配率则分别为16.79%、19.98%和24.64%;负载量增加显著降低了植株^{15}N的利用率,对照、2/3负载量和1/3负载量3个处理的植株^{15}N利用率分别为8.51%、10.11%和13.23%。3个处理各器官的氮原子百分超(Ndff)值均表现为果实 > 当年生枝 > 根系 > 叶片 > 多年生枝 > 中心干,不同处理间Ndff值的差异主要表现在果实和根系,果实的Ndff值随着负载量的增加而增大,对照的Ndff值达到2.76%,分别为2/3负载量和1/3负载量处理的1.17倍和1.31倍,而根系则表现出相反的趋势;^{15}N分配率与^{13}C分配率表现出相同的趋势,^{15}N分配率较高的器官,^{13}C分配率也处于较高水平。**【结论】**负载量增加可促进叶片制造的^{13}C同化物向果实中转移,减少向根系的运输,对^{15}N的吸收利用降低。当单位干截面积产量为0.54 kg/cm^{2}时,能有效协调树体的碳、氮营养分配,对王林苹果的生产效果最佳。

关键词: 苹果; 不同负载量; ^{13}C; ^{15}N; 吸收; 利用; 分配
中图分类号: S661.1.601 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)03-0702-07

Effects of different fruit load on distribution and utilization characteristics of ^{13}C and ^{15}N of apple

MEN Yong-ge, AN Xin, XU Hai-gang, JIANG Han, WEI Shao-chong, JIANG Yuan-mao*
(*College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an, Shandong 271018, China*)

Abstract:【Objectives】 Stable isotope ^{13}C and ^{15}N tracer technology was used to study effects of different fruit load on characteristics of distribution and utilization of ^{13}C and ^{15}N of apple. Based on the nutrient absorption, theory of the effects of fruit load on growth and development of apple was illustrated to provide evidence for fruit thinning and increasing N fertilizer utilization. **【Methods】** The materials were 5-year-old apple tree (Wanglin/SH_{38}/*Malus robusta* Rehd.), and the fertilizer was applied on March 27, 2013. The method was annular groove fertilization: ^{15}N-urea 10 g, N 110.33 g, P_2O_5 143.15 g and K_2O 151.26 g each plant. After the fruiting, the fruits were thinned: control, 2/3 fruit load and 1/3 fruit load. The trees were labeled with ^{13}C at the fruit maturity (September

收稿日期: 2014-01-20 **接受日期:** 2014-06-09 **网络出版日期:** 2015-02-13
基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-28);公益性行业(农业)科研专项资金(201103003)资助。
作者简介: 门永阁(1987—),男,山东即墨人,硕士研究生,主要从事果树碳、氮素营养方面的研究。E-mail: menyongge@163.com
* 通信作者 E-mail: ymjiang@sdau.edu.cn

6). 72 hours after labeled, the trees were sampled to determine ^{13}C and ^{15}N abundance. ^{13}C abundance was determined by DELTA V Advantage isotope ratio mass spectrometer, ^{15}N abundance was determined by ZHT-03 mass spectrograph. 【**Results**】Compared with the control, the average single fruit weights of the 2/3 fruit load and 1/3 fruit load are increased by 17.68% and 48.57% respectively, root-shoot ratios are increased by 7.69% and 15.38% respectively, however, the average yields per plant are significantly decreased to 50.18% and 78.60% of control, respectively. The unit area average dry yields of the three treatments are significantly different, 0.83 kg/cm^2, 0.54 kg/cm^2 and 0.33 kg/cm^2, respectively. When the fruit load increases, more ^{13}C-assimilate transports to fruit and results in the decrease of the ^{13}C-assimilation in roots. The ^{13}C partitioning rates in fruits of the three treatments (control, 2/3 fruit load and 1/3 fruit load) are 39.81%, 29.25% and 16.46%, and the rates of roots are 16.79%, 19.98% and 24.64%. The ^{15}N use efficiencies of the three treatments are 8.51%, 10.11% and 13.23%. The Ndff values of the three treatments are consistent, and in order: fruit > biennial > root > leaves > branch of perennial > trunk. With fruit load increasing, the Ndff values of the fruits are increased, and the values of the control is 2.76%, which is 1.17 and 1.31 times of that of the 2/3 fruit load and 1/3 fruit load, respectively. The ^{15}N partitioning rate is consistent with that of ^{13}C, and when the ^{15}N partitioning rates are high, the ^{13}C partitioning rates are also high in organ. 【**Conclusions**】With fruit load increasing, more ^{13}C-assimilate is transported to fruits and results in the decrease of the ^{13}C-assimilate in roots, and the ^{15}N utilization is decreased. It is good for apple production that the unit area average dry yield is 0.54 kg/cm^2.

Key words: apple; different fruit load; ^{13}C; ^{15}N; absorption; utilization; distribution

果实是果树的主要库器官[1],疏果是通过调控“库(果实)—源(叶片)”关系来提高果实品质的一项重要的栽培技术[2]。研究表明适当的疏果能够提高果实的平均单果质量[3],改善果实品质及商品果率[4-5],同时适当的负载量有利于提高叶片的光合作用[6-8];而随着负载量的增大,树体促进生长的激素减少,抑制生长的激素则增加[9],叶片的膜质过氧化程度加深,从而加剧了叶绿体的解体[10],影响树体的营养生长,导致树体衰老,进而影响翌年植株生长及花芽分化[9]。因此合理的负载量是保证树体长势及获得高产、稳产、优质的重要措施,而树体长势及产量与碳、氮营养的分配密切相关,迄今为止,有关不同负载量对树体碳、氮营养分配利用的报道较少,本试验利用^{13}C、^{15}N双标记技术,研究了不同负载量对苹果光合产物分配以及氮素营养的分配和利用特性的影响,从营养吸收和分配的角度解释负载量对苹果生长发育影响的机理,为果树疏果提供依据。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验在山东烟台市莱山镇官庄村果园进行。试验材料为垄栽5年生的王林/SH_{38}/八棱海棠苹果,株行距为2×3 m。试验地有机碳含量8.00 g/kg、硝态氮24.12 mg/kg、铵态氮55.28 mg/kg、速效磷32.48 mg/kg、速效钾218.40 mg/kg。

选取生长势基本一致、无病虫害的植株9株。于2013年3月27日进行施肥处理,施肥方法为距中心干40 cm处挖一深和宽均为20 cm左右的环状沟,在沟内每株均匀施^{15}N-尿素(上海化工研究院生产,丰度10.14%)10 g,同时施N 110.33 g、P_2O_5 143.15 g、K_2O 151.26 g,施肥后每株立即浇水4 L,并于坐果后,进行疏果处理。试验设对照(不疏果)、2/3负载量(疏掉其中1/3的果实)、1/3负载量(疏掉其中2/3的果实)3个处理,单株为一重复,重复3次;于果实成熟期(9月6日)对已处理的植株进行整株^{13}C标记处理[11-12],同时测量植株离地20 cm处的干周周长,以计算干截面积[干截面积(S)(cm^2)=0.08 C^2(C为干周周长)]。

标记从早晨9:00点开始,用支架组装与树体大小相当的四方体,外部包裹上塑料薄膜,底部用土将其掩埋以保证密封性,将烧杯(内装5g $Ba^{13}CO_3$)用硬质铁丝固定在树体上,用注射器向装有$Ba^{13}CO_3$的烧杯中注入一定量的1 mol/L的HCl溶液。此后每隔0.5 h,向烧杯中注入1次盐酸,以维持CO_2浓度,标记时间持续4 h。同时另选远距离未受^{13}C污染的3株作为空白对照(^{13}C自然丰度)。

1.2　取样与测定

^{13}C标记72 h后破坏性取样,整株解析为叶片、当年生枝、多年生枝、中心干、根系、果实,分别称量

各部分的鲜重,以计算平均单株产量、果实平均单果重以及根冠比。样品经清水—洗涤剂—清水—1%盐酸—3次去离子水冲洗后,于80℃下烘干,粉碎后过0.25 mm筛,混匀后装袋备用。

上述样品的^{15}N丰度用ZHT-03质谱计(北京分析仪器厂)测定(中国农业科学院农产品加工研究所);^{13}C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 数据分析

1)^{13}C的计算 一般自然土壤或植物(未标记)中的^{13}C自然丰度用$\delta^{13}C$表示,

$$\delta^{13}C(‰) = (R_{样品}/R_{PDB} - 1) \times 1000$$

式中:$R_{样品} = {}^{13}C/{}^{12}C_{样品}$; R_{PDB}为碳同位素的标准比值($R_{PDB} = {}^{13}C/{}^{12}C_{PDB}$,为0.0112372)。

标记植物采用Atom%表示,

$$Atom\%\ {}^{13}C = (\delta^{13}C + 1\ 000) \times R_{PBD}/[(\delta^{13}C + 1000) \times R_{PBD} + 1\ 000] \times 100$$[13-14]

式中:Atom%为^{13}C丰度。

$$C_i(g) = 干物质量(g) \times C\%$$

式中:C_i为各器官所含的碳量(g)。

$$^{13}C_i(mg) = C_i \times [(Atom^{13}C\%)标记丰度 - (Atom^{13}C\%)自然丰度] \times 1\ 000$$

式中:C_i为各器官所含的碳量(g);$^{13}C_i$为各器官^{13}C量[11]。

$$^{13}C_i(\%) = {}^{13}C_i/{}^{13}C\ 净吸收 \times 100$$

式中:$^{13}C_i\%$为该器官的^{13}C量占树体净吸收^{13}C量的百分比(%)[12,15]。

2)^{15}N的计算 Ndff% = (植物样品中^{15}N丰度% - ^{15}N自然丰度%)/(肥料中^{15}N丰度% - ^{15}N自然丰度%) × 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%

试验数据均采用DPS 7.05软件进行单因素方差法分析,LSD法进行差异显著性比较,应用Microsoft Excel 2003进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 不同负载量对果实平均单果重及根冠比的影响

不同负载量处理的植株其果实平均单果重、单株产量、单位干截面积平均产量及根冠比均有显著差异。由表1可以看出,随着负载量的增加,果实平均单果重显著降低,1/3负载量和2/3负载量处理的植株其果实平均单果重比对照分别提高48.57%和17.68%;而平均单株产量却显著增加,疏果两处理(1/3负载量和2/3负载量)的平均单株产量分别为对照的50.18%和78.60%;对照、2/3负载量和1/3负载量处理的植株单位干截面积平均产量分别为0.83、0.54和0.33 kg/cm^2,三者差异显著;植株的根冠比随负载量的增加而显著降低,依次为对照0.26、2/3负载量0.28和1/3负载量0.32。

表1 不同负载量对植株产量及根冠比的影响

Table 1 Effects of different fruit load on yield and root-shoot ratio of apple plants

处理 Treatment	平均单株产量 Aver. yield per plant (kg)	单位干截面积平均产量 Aver. yield per sectional area (kg/cm^2)	平均单果重 Aver. fruit weight (g)	根冠比 Root-shoot ratio
对照 CK	8.13 a	0.83 a	137.61 c	0.26 c
2/3负载量 2/3 fruit load	6.39 b	0.54 b	161.94 b	0.28 b
1/3负载量 1/3 fruit load	4.08 c	0.33 c	204.45 a	0.32 a

注(Note):表中数据为3次重复的平均值 Each value is the mean of three replication;同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

2.2 不同负载量对^{13}C分配率的影响

^{13}C同化产物分配到各个器官的比率与其竞争能力有关。竞争能力指代谢及生长旺盛部位从标记叶片中吸取^{13}C的能力[12]。表2显示,对照、2/3负载量和1/3负载量3个处理的叶片^{13}C分配率分别为18.26%、23.91%和26.53%,三者之间差异显著;2/3负载量和1/3负载量处理的植株果实的^{13}C分配率分别为29.25%、16.46%,显著低于对照的

39.81%;根部、叶片以及当年生枝等营养器官^{13}C 的分配率均表现为 1/3 负载量 > 2/3 负载量 > 对照,且三者差异显著;多年生枝及中心干均表现为对照最低,但 3 处理间差异并不显著。结果表明,随着负载量的增加,叶片制造的碳水化合物输出量增加;输出的部分主要分配到果实中,而减少了向根系及当年生枝等营养器官的分配。

表 2　不同负载量对植株各器官^{13}C 分配率的影响(%)

Table 2　Effects of different fruit load on^{13}C partitioning rate

器官 Organ	对照 Control	2/3 负载量 2/3 fruit load	1/3 负载量 1/3 fruit load
叶片 Leaf	18.26 ± 0.21 c	23.91 ± 0.76 b	26.53 ± 0.07 a
一年生枝 Biennial branch	7.35 ± 0.54 c	8.75 ± 0.17 b	12.09 ± 0.31 a
多年生枝 Branch of perennial	10.01 ± 0.58 a	9.55 ± 0.80 a	11.34 ± 1.03 a
主干 Trunk	7.77 ± 0.54 a	8.90 ± 0.75 a	8.94 ± 0.93 a
根部 Root	16.79 ± 0.22 c	19.98 ± 0.41 b	24.64 ± 0.91 a
果实 Fruit	39.81 ± 0.15 a	29.25 ± 0.64 b	16.46 ± 0.78 c

注(Note):表中数据为 3 次重复的平均值 ± 标准误差 Each value is the mean of three replication ± S. E.;同行数值后不同小写字母分别表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters in the same row are significantly different among treatments at the 5% level.

2.3　不同负载量对各器官 Ndff 值的影响

Ndff 指植株器官从肥料中吸收分配到的^{15}N 量对该器官全氮量的贡献率,反映了植株器官对肥料^{15}N 的吸收征调能力[16]。从表 3 可以看出,各处理的 Ndff 值均表现为果实 > 当年生枝 > 根系 > 叶片 > 多年生枝 > 中心干,各处理间差异显著,以果实、根系、当年生枝以及叶片表现最为显著。果实的 Ndff 值为对照(2.76%) > 2/3 负载量(2.36%) > 1/3负载量(2.10%),而根系则表现出与果实相反的趋势。一年生枝及叶片的 Ndff 值均以 1/3 负载量最大(2.08%、1.19%),2/3 负载量次之(1.46%、1.01%),对照最小(1.15%、0.95%),而对照与 2/3 负载量两处理之间并无显著差异。三个处理多年生枝及中心干的 Ndff 值无显著性差异。结果表明,在果实成熟期,以果实为生长中心,果实对^{15}N 的吸收征调能力最强,植株吸收的^{15}N 主要分配给果实,新梢营养器官也有较强的竞争力。而随着负载量的增加以果实对^{15}N的吸收征调能力增强,而营养器官对^{15}N 的吸收征调能力则减弱。

表 3　不同负载量对各器官 Ndff 值的影响(%)

Table 3　Effects of different fruit load on Ndff

器官 Organ	对照 Control	2/3 负载量 2/3 fruit load	1/3 负载量 1/3 fruit load
叶片 Leaf	0.95 ± 0.05 b	1.01 ± 0.05 b	1.19 ± 0.07 a
一年生枝 Biennial branch	1.15 ± 0.04 b	1.46 ± 0.21 b	2.08 ± 0.13 a
多年生枝 Branch of perennial	0.89 ± 0.11 b	1.01 ± 0.08 ab	1.10 ± 0.10 a
主干 Trunk	0.76 ± 0.13 a	0.82 ± 0.08 a	0.93 ± 0.16 a
根部 Root	1.10 ± 0.04 c	1.38 ± 0.01 b	1.85 ± 0.15 a
果实 Fruit	2.76 ± 0.16 a	2.36 ± 0.06 b	2.10 ± 0.04 c

注(Note):表中数据为 3 次重复的平均值 ± 标准误差 Each value is the mean of three replication ± S. E.;同行数值后不同小写字母分别表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters in the same row are significantly different among treatments at the 5% level.

2.4 不同负载量对^{15}N利用率的影响

图1显示,^{15}N利用率3个处理之间差异显著,以1/3负载量处理最大,达到13.23%,2/3负载量次之为10.11%,对照最小为8.51%。由此看出随着负载量的增加,植株对^{15}N的吸收利用降低。

2.5 不同负载量对各器官^{15}N分配率的影响

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之间迁移的规律[17]。由表4可知,三个处理的^{15}N分配规律表现一致,均主要分配在果实、叶片、根部、一年生枝等器官。随着负载量的增加,果实中的^{15}N分配率增加,且3个处理之间差异显著。对照处理的果实^{15}N分配率达到43.46%,2/3负载量为27.13%,1/3负载量则为11.93%。叶片、当年生枝以及根部等营养器官的^{15}N分配率则表现出相反的趋势,随着负载量的增加其分配率减少,处理间差异显著。结果表明,随着负载量的增加,植株将吸收的氮素更多地分配到果实中,而减少向其它营养器官的分配,从而降低树体的营养生长。

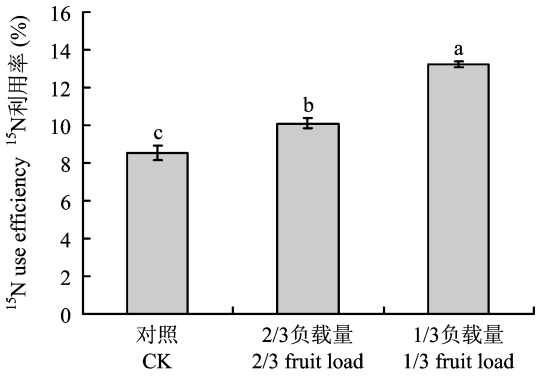

图1 各处理^{15}N利用率

Fig. 1 ^{15}N utilization of the three treatments

[注(Note):柱上不同字母表示处理间差异达5% Different letters above the bars mean significant among treatments at the 5% level.]

表4 不同负载量对植株各器官^{15}N分配率的影响(%)

Table 4 Effects of different fruit load on ^{15}N partitioning rate

器官 Organ	对照 Control	2/3负载量 2/3 fruit load	1/3负载量 1/3 fruit load
叶片 Leaf	20.79±0.80 c	26.22±0.80 b	30.27±0.27 a
一年生枝 Biennial branch	7.52±0.53 c	9.17±0.35 b	14.74±0.84 a
多年生枝 Branch of perennial	5.84±0.51 b	7.66±0.58 ab	7.95±0.71 a
主干 Trunk	5.86±0.30 a	5.85±0.65 a	5.30±0.47 a
根部 Root	16.52±0.58 c	23.97±0.63 b	29.81±1.13 a
果实 Fruit	43.46±0.50 a	27.13±0.39 b	11.93±0.40 c

注(Note):表中数据为3次重复的平均值±标准误差 Each value is the mean of three replication ± S. E.;同行数值后不同小写字母分别表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different small letters in the same row are significantly different among treatments at the 5% level.

3 讨论与结论

叶片制造的碳水化合物遵循着优先分配给生长中心的原则[18]。在果实成熟期果实成为生长中心,对于多年生的果树而言,由于地上部与地下部对果实发育后期的光合养分存在竞争[19],此时期的源-库矛盾最为突出[5]。^{13}C示踪的结果表明,植株负载量增加,叶片制造的^{13}C同化物输出量增加,而输出的部分则主要分配到果实,当年生枝及根系等营养器官的分配率显著降低。

Goffinet等[20]认为,疏果能促进果实的膨大,果实体积的增大与其同时促进细胞分裂膨大、细胞数量增加以及细胞增大有关。而果实的平均单果重的大小取决于光合同化物分配的多少[21]。疏果固然能够增加果实平均单果重,然而却降低了单株平均产量。本试验中2/3负载量和1/3负载量处理植株的果实平均单果重比对照分别提高了17.68%和48.57%,而其单株平均产量则分别降低了21.40%和49.82%。生产中应提倡生产优质产品,综合上述结果,2/3负载量即单位干截面积产量在0.54 kg/cm^{2}时既可以保证平均单果重又不至于大幅度降低植株产量。

隋方功等[22]在甜椒上的试验表明,氮素水平制约着碳的运转和再分配。从^{13}C和^{15}N双标记的试验结果可以看出,^{15}N分配率高的器官^{13}C分配率也处于较高的水平,表明适当的氮素水平能够促进碳素同化物的分配与运转。负载量增加导致^{13}C同化物向根系的分配减少,而根系对氮素营养的吸收利

用又依赖于两个方面,即根系的有效吸收面积[23-24]和地上部持续不断地为其提供碳水化合物[25]。^{15}N示踪的结果也表明,对照处理的^{15}N吸收利用率显著低于疏果(2/3 负载量和 1/3 负载量)两处理,说明高负载量不利于植株对氮素的吸收利用,同时负载量增加,植株将吸收的^{15}N大量分配到果实中,而减少向根系的分配,影响根系的生长。植株根冠比的降低也证明了负载量增加抑制了植株根系的生长。果树营养与施肥状况对产量有重要影响[26],在高产果园中生产者往往多施重施氮肥以保证高产。而本试验结果表明,高负载量并没有促进植株对氮素的吸收利用,相反其利用率降低,主要是因为地上部对根系碳水化合物供应的减少限制了对氮素的吸收利用,这可能也是当前我国苹果园氮肥施用量高而利用率低的一个重要原因。因此对于高产果园,要提高氮素利用率并保证产量,可以通过根外追肥等方式并结合合理的修剪措施,协调树体源库关系,保证树体丰产、稳产。

研究表明,负载量增加会加剧果实对碳水化合物的竞争,损耗树体营养、减少贮藏营养[7],不利于树体抗寒性的提高和翌年新生器官的建造以及果实产量和品质的提高[5,27]。本研究中,经疏果后(2/3 负载量和 1/3 负载量)营养器官(根系、主干、多年生枝)的^{13}C和^{15}N分配率均有所增加,有利于增加营养器官的碳、氮营养贮备,保证植株翌年春的生长,为丰产奠定基础。

综上,在植株 2/3 负载量即单位干截面积产量在 0.54 kg/cm^2 时不仅可保证苹果产量和果实单果重,而且能够促进树体碳、氮营养的合理分配,树体中庸健壮且能贮藏足够的营养供给植株次年的生长。因此建议在进行王林苹果幼树疏果时保留自然生长 2/3 的果实量,另外还要配合合理的施肥管理措施以提高肥料的利用率。

参 考 文 献:

[1] Pavel E W, DeJong T M. Source and sink-limited growth periods of developing peach fruits indicated by relative growth rate analysis [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1993, 118: 820-824.

[2] Dennis F G. The history of fruit thinning [J]. Plant Growth Regulation, 2000, 31: 1-16.

[3] Njoroge S M C, Reighard G L. Thinning time during stage I and fruit spacing influences fruit size of 'Contender' peach [J]. Scientia Horticulturae, 2008, 115: 352-359.

[4] 池田隆政, 田村文男, 吉田亮. 'ゴ-ルド二十世紀'果実の糖蓄積に及ぼす葉果比の影響[J]. 園芸学研究, 2008. 7: 215-221.
Ikeda T, Tamura F, Yoshida A. Effect of leaf-fruits ratio on sugar accumulation of Japanese pear 'Gold Nijisseiki' fruits [J]. Horticultural Research, 2008, 7: 215-221.

[5] 刘传和, 陈杰忠, 刘运春, 等. 疏果对黄皮果实发育着色及树体器官碳水化合物含量的影响[J]. 园艺学报, 2008, 35(6): 869-872.
Liu C H, Chen J Z, Liu Y C *et al*. Effects of fruit-thinning on fruits development, pigmentation and carbohydrate content in plant organs of wampee[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2008, 35(6): 869-872.

[6] 刘平, 温陟良, 彭士琪, 等. 库-源关系对枣树^{14}C光合产物分配的影响[J]. 林业科学, 2003, 39(4): 37-42.
Liu P, Wen Z L, Peng S Q *et al*. Effect of sink-source relationships on partitioning of ^{14}C photosynthates in Chinese date (Zizyphus jujuba)[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(4): 37-42.

[7] 冉辛拓, 张新生, 王学军. 负载量对苹果光合速率及干物质生产的影响[J]. 园艺学报, 2003, 30(3): 351.
Ran X T, Zhang X S, Wang X J. Effect of crop load on photosynthetic rate and dry matter production of apple[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2003, 30(3): 351.

[8] 黄永敬, 唐小浪, 马培恰, 等. 库-源调节对沙糖桔源叶光合特性的影响[J]. 广东农业科学, 2009,(8): 93-95.
Huang Y J, Tang X L, Ma P Q *et al*. Effects of source-sink manipulation on leaf photosynthetic characteristics in Shatangju tangerine[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2009,(8): 93-95.

[9] 刘悦萍, 郭金丽, 张玉兰, 等. 负载量与金红苹果树生长结果、叶片衰老的关系[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2003, 24(1): 39-45.
Liu Y P, Guo J L, Zhang Y L *et al*. The relation between fruit load and growth and foliage senescence of Jinhong apple trees[J]. Journal of Inner Mongolia University of Agriculture and Animal Husbandry(Natural Science Edition), 2003, 24(1): 39-45.

[10] 伍涛, 陶书田, 张虎平, 等. 疏果对梨果实糖积累及叶片光合特性的影响[J]. 园艺学报, 2011, 38(11): 2041-2048.
Wu T, Tao S T, Zhang H P *et al*. Effects of fruit thinning on fruit sugar accumulation and leaf photosynthetic characteristics of pear[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2011, 38(11): 2041-2048.

[11] Lu Y H, Watanabe A, Kimura M. Input and distribution of photosynthesized carbon in a flooded soil [J]. Global Biogeochem Cycles, 2002, 16: 321-328.

[12] 齐鑫, 王敬国. 应用^{13}C脉冲标记方法研究不同施氮量对冬小麦净光合碳分配及其向地下输入的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2524-2530.
Qi X, Wang J G. Distribution and translocation of assimilated C pulse-labeled with ^{13}C for winter wheat[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(6): 2524-2530.

[13] 尹云锋, 杨玉盛, 高人, 等. 植物富集^{13}C标记技术的初步研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 790-793.

Yin Y F, Yang Y S, Gao R *et al*. A preliminary study on phyto-enrichment ^{13}C labeling technique[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010,47(4): 790-793.

[14] 李晶, 姜远茂, 魏绍冲, 等. 富士苹果秋梢连续摘心对^{13}C和^{15}N利用、分配的影响[J]. 园艺学报, 2012, 39(10): 2238-2244.
Li J, Jiang Y M, Wei S C *et al*. Effects of continued pinching on characteristics of utilization and distribution of ^{13}C and ^{15}N for Red Fuji/SH1/*Malus robusta* Rehd [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2012, 39(10): 2238-2244.

[15] Kunihisa M, Shunji I, Hiroshi Y *et al*. Effects of fruit load on partitioning of ^{15}N and ^{13}C, respiration and growth of grapevine roots at different fruit stages[J]. Scientia Horticulturae, 2003, 97: 239-253.

[16] 顾曼如. ^{15}N在苹果氮素营养研究中的应用[J]. 中国果树, 1990,(2): 46-48.
Gu M R. The application of ^{15}N in the study of nitrogen nutrition on apples[J]. China Fruits, 1990,(2): 46-48.

[17] 顾曼如, 束怀瑞, 周宏伟. 苹果氮素营养研究Ⅳ. 贮藏^{15}N的运转、分配特性[J]. 园艺学报, 1986, 13(1): 25-30.
Gu M R, Shu H R, Zhou H W. A study on the nitrogen nutrition of apple trees IV. The characters of translocation and distribution of the reserved ^{15}N[J]. Acta Horticulturae Sinica, 1986, 13(1): 25-30.

[18] 刘颖慧, 贾海坤, 高琼. 植物同化物分配及其模型研究综述[J]. 生态学报, 2006, 26(6): 1981-1992.
Liu Y H, Jia H K, Gao Q. Review on researches of photoassimilates partitioning and its models[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(6): 1981-1992.

[19] 毕彦勇, 高东升, 王晓英, 等. 设施油桃根系生长及与地上部生长的相关性[J]. 果树学报, 2003, 20(6): 455-458.
Bi Y Y, Gao D S, Wang X Y *et al*. The relationship between root growth and top growth of nectarine under protected cultivation conditions[J]. Journal of Fruit Science, 2003, 20(6): 455-458.

[20] Goffinet M C, Robinson T L, Lakso A N. A comparison of 'Empire' apple fruit size and anatomy in unthinned and handthinned trees[J]. Journal of Horticultural Science, 1995, 70(3): 375-387.

[21] 蔡宇良, 赵桂仿, 傅润民. 疏花对富士苹果光合同化物分配的外部调节和生理表现[J]. 西北植物学报, 1999, 19(6): 132-138.
Cai Y L, Zhao G F, Fu R M. Adjustment of photoassimilate partitioning of *Malus pumila* M. by flower thinning and its physiological performance[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 1999, 19(6): 132-138.

[22] 隋方功, 吕银燕, 王运华, 等. 不同施氮量对甜椒碳、氮营养分配的影响[J]. 园艺学报, 2004, 31(4): 472-476.
Sui F G, Lü Y Y, Wang Y H *et al*. Effect of different nitrogen rates on the distribution of carbon and nitrogen in sweet pepper [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2004, 31(4): 472-476.

[23] 李玉英, 胡汉升, 程序, 等. 种间互作和施氮对蚕豆/玉米间作生态系统地上部和地下部生长的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(6): 1617-1630.
Li Y Y, Hu H S, Chen X *et al*. Effects of interspecific interactions and nitrogen fertilization rates on above-and below growth in faba bean/mazie intercropping system [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(6): 1617-1630.

[24] 霍常富. 根系氮吸收过程及其主要调节因子[J]. 应用生态学报, 2007, 18(6): 1356-1364.
Huo C F. Physiological processes and major regulating factors of nitrogen uptake by plant roots[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007,18(6): 1356-1364.

[25] Jordan M O, Habib R, Bonafous M. Uptake and allocation of nitrogen in young peach trees as affected by the amount of photosynthates available in roots[J]. Journal of Plant Nutrition, 1998, 21(11): 2441-2454.

[26] 彭福田, 姜远茂. 不同产量水平苹果园氮磷钾营养特点研究[J]. 中国农业科学, 2006, 39(2): 361-367.
Peng F T, Jiang Y M. Characteristics of N, P, and K nutrition in diferent yield level apple orchards [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(2): 361-367.

[27] Tagliavini M, Millard Q M. Storage of foliar-absorbed nitrogen and remobilization for spring growth in young nectarine (*Prunus persica* var. *nectarina*) trees[J]. Tree Physiology, 1998, 18: 203-207.