

分次追施N肥对苹果砧木—平邑甜茶吸收¹⁵N-尿素以及叶片衰老的影响

丁宁 姜远茂* 魏绍冲 陈倩 葛顺峰

山东农业大学园艺科学与工程学院, 山东农业大学作物生物学国家重点实验室, 山东泰安, 271018

摘要 以盆栽平邑甜茶(*Malus hupehensis*)为实验材料, 研究等氮(N)量分次追施N肥(一次、二次和三次)对平邑甜茶叶片衰老及¹⁵N-尿素吸收、利用的影响。采用¹⁵N示踪技术, 研究不同施肥处理下植株的生长、酶活性和¹⁵N吸收利用等参数。研究表明: 植株的株高、茎粗、叶面积和叶绿素含量(SPAD)在生长前期均以一次性追肥处理最高, 三次追肥处理最低, 且与一次追肥处理差异显著; 在生长中期均以二次追肥处理最高, 一次追肥处理最低; 在生长后期均以三次追肥处理最高, 一次追肥处理最低, 且与三次追肥处理差异显著; 叶片的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性在生长前期均以一次追肥处理最高, 三次追肥处理最低, 且与一次追肥处理差异显著; 在生长中期均以二次追肥处理最高, 一次追肥处理最低; 在生长后期均以三次追肥处理最高, 一次追肥处理最低, 且与三次追肥处理差异显著; 生长后期植株各器官从肥料中吸收分配到的¹⁵N量对该器官全N量的贡献率差异显著, 三次追肥处理显著高于一次和二次追肥处理; 生长后期三次追肥处理植株的总N量、吸收的¹⁵N量及¹⁵N肥料利用率均为最大。三次追肥处理能提高叶片全N量, 延缓生长后期叶片衰老, 提高N肥利用率。

关键词 吸收, 分次追肥, 叶片衰老, 平邑甜茶, ¹⁵N标记的尿素, 利用

Effects of fractionated nitrogen application on leaf senescence and ¹⁵N-urea uptake and utilization of apple rootstock—*Malus hupehensis*

DING Ning, JIANG Yuan-Mao*, WEI Shao-Chong, CHEN Qian, and GE Shun-Feng

State Key Laboratory of Crop Biology, College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China

Abstract

Aims The effects of fractionated nitrogen (N) fertilization (once, twice and thrice) on leaf senescence and nitrogen uptake and utilization of potted *Malus hupehensis* were explored using the ¹⁵N labeling technique.

Methods We measured growth parameters such as plant height, stem diameter, leaf area and chlorophyll content (SPAD), enzyme parameters such as superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) in leaves and ¹⁵N parameters such as uptake and utilization for potted *M. hupehensis* under different fractionated N applications.

Important findings Plant height, stem diameter, leaf area and SPAD were highest at early growth stage for once fractionated application and lower for twice fractionated application, and lowest for thrice fractionated application. At middle growth stage, twice fractionated application showed the highest values, while once fractionated application exhibited the lowest values. At the late growth stage, thrice fractionated application was the highest, while once fractionated application was the lowest. The leaf SOD, POD and CAT activities were highest for once fractionated application at early growth stage and lowest for thrice fractionated application. At the middle growth stage, twice fractionated application was the highest, whereas once fractionated application was lowest. At the late growth stage, thrice fractionated application showed the highest values, while once fractionated application had the lowest values. The ¹⁵N derived from fertilizer (N_{diff}) value in different organs was significantly different. Thrice fractionated application demonstrated higher values than either of once and twice fractionated application at the late growth stage. Plant total N, ¹⁵N uptake and N-usage efficiency were highest for thrice fractionated application at late growth stage. This indicates that thrice fractionated application not only can enhance the total N content of leaves and delay leaf senescence, but also can increase the N-usage efficiency.

Key words absorption, fractionated application, leaf senescence, *Malus hupehensis*, ¹⁵N-labeled urea, utilization

苹果(*Malus sieversii*)生育后期叶片衰老与果实的成熟是同步进行的, 延长苹果叶片功能期, 促进叶片制造更多的光合产物, 延缓叶片衰老脱落, 从而提高产量与品质是苹果科研工作者关注的热点问题。目前, 我国苹果园土壤有机质含量较低, 土壤保肥能力较差(姜远茂等, 2001), 加上农民习惯于春季一次性施肥, 结果造成雨季后果园土壤脱肥现象严重, 氮(N)在果树体内移动性较强, 土壤脱肥导致老叶中N向新生器官转移, 引起老叶衰老加快而造成早期落叶病, 因此, 研究后期N肥供应与叶片衰老关系对制定合理施肥策略有重要意义。N是果树生长发育过程所必需的重要营养元素(Khemira, 1991), 它影响果树的营养生长(株高、茎粗)和生殖生长, 影响果树内各种生理生化过程, 叶绿素是主要的含N化合物, 其含量下降是叶片衰老的主要标志(Stassen *et al.*, 1981), 因此, 适量施用N肥不仅能提高叶片的光合速率, 延缓叶片衰老(de *et al.*, 1989; 勾玲等, 2004), 增加光合叶面积(李文庆等, 2002), 还能促进花芽分化, 提高坐果率、增加产量(韩振海等, 1992; 彭福田等, 2006)。

N还具有延缓作物衰老的作用, 施N量和施N方法直接决定着作物产量高低和N肥利用率。在水稻(*Oryza sativa*)、夏玉米(*Zea mays*)等作物上的研究表明, 分次施肥较一次性施肥不仅可提高肥料利用率, 而且可增加产量和改善品质(徐艳霞等, 2009; 史沉鱼等, 2010)。施用N肥能够显著增加作物植株干物质量、产量、叶片N含量以及叶绿素水平(Raese *et al.*, 2007)。在棉花上的研究表明, 适量追施N肥提高了后期活性氧清除酶类(超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT))的活性, 降低膜脂过氧化程度, 延缓了衰老进程(勾玲等, 2004), 因此, 很多研究将SOD、POD和CAT的含量作为研究衰老的重要指标(高小丽等, 2008)。

迄今对果树N营养的研究主要集中在吸收、运输、分配等方面, 而关于苹果叶片衰老与N供应的关系尚缺乏系统研究。平邑甜茶(*Malus hupehensis*)为蔷薇科苹果属木本植物, 具有无融合生殖的特点, 个体差异小, 适应能力强, 是苹果生产中应用最广泛的一种砧木, 易于检测处理间的差异(房祥吉等, 2011)。为此, 本实验以平邑甜茶为实验材料, 利用 ^{15}N 示踪技术研究在相同施N水平下, 分次追施N肥对盆栽平邑甜茶叶片衰老及对 ^{15}N 的吸收、利用

特性的影响, 验证叶片衰老与N供应不足之间的相关性, 进而为苹果园合理追肥提供依据。

1 材料和方法

1.1 实验设计

实验于2011年在山东农业大学园艺实验站进行(117°02' E、35°78' N, 海拔153 m), 供试土壤采自实验站内, 质地为黏壤土, 土壤含水量控制在20%左右(每隔一周测定一次土壤含水量, 然后补充水分), 土壤最大田间持水量为28%。土壤有机质含量为10.23 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效P含量为24.48 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效K含量为136.57 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全N含量为1.35 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 硝态N 21.12 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 铵态N 41.28 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH值为7.07。

于2011年3月20日将平邑甜茶种子播入准备好的盆中, 每盆10粒种子, 每盆装风干土2.5 kg, 待植株生长至三叶一心时选取长势基本一致、健壮、无病虫害的植株, 每盆中留取实生苗3株。实验设3个处理, 每盆为一次重复, 重复10次。处理一(一次追肥): 于2011年5月15日一次性每盆土施 ^{15}N -尿素(上海化工研究院生产, 丰度为10.25%) 0.3 g和普通尿素0.6 g (在平邑甜茶的合理施肥范围内选择的施肥量); 处理二(二次追肥): 分别于5月15日和6月15日施肥, 每次每盆土施 ^{15}N -尿素0.15 g和普通尿素0.3 g; 处理三(三次追肥): 分别于5月15日、6月15日和7月15日施肥, 每次每盆土施 ^{15}N -尿素0.1 g和普通尿素0.2 g。同时, 于5月15日, 3个处理每盆一次性施入 K_2SO_4 0.75 g、 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 0.3 g, 追肥后立即浇水。

1.2 测定方法和计算

1.2.1 植株指标(株高、茎粗、叶面积、叶绿素含量及保护酶活性)测定方法

于2011年6月10日(生长前期)、7月10日(生长中期)和9月10日(生长后期) 3个时期分别测量植株的株高、茎粗(游标卡尺测定)和叶面积(YMJ-B叶面积仪(Konica Minolta, Tokyo, Japan)测定), 同时, 进行叶片采样, 每盆植株采5–10片叶, 用于测定叶绿素含量(SPAD-502叶绿素计(Konica Minolta, Tokyo, Japan)测定)、SOD、POD和CAT活性(王爱国等, 1983; 林植芳等, 1984)。SOD酶活性用 $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}\text{FW}$ 表示, POD和CAT活性用 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$ 表示, 其中1个U表示1 min能转化1 mmol底物的酶量。

1.2.2 植株解析样品的测定方法

于2011年9月15日,进行破坏性取样,整株解析分为根、茎、叶3个部分。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,随后在80℃下烘干至恒重,电磨粉碎后过0.3 mm筛,混匀后装袋备用。

样品全N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)在中国农业科学院原子能研究所测定。

N_{dff} 指植株器官从肥料中吸收分配到的¹⁵N量对该器官全N量的贡献率,反映了植株器官对肥料¹⁵N的吸收征调能力, $N_{\text{dff}}\% = \text{植物样品中}^{15}\text{N原子百分超}\% / \text{肥料中}^{15}\text{N原子百分超}\% \times 100$; 原子百分超% = 样品中¹⁵N丰度% - 自然丰度%; N肥利用率(%) = $(N_{\text{dff}}\% \times \text{器官全N量(g)} / \text{施肥量(g)}) \times 100$ (顾曼如,1990)。

1.3 数据统计

应用Microsoft Excel 2003软件进行图表绘制,应用DPS 7.05软件进行数据的统计分析,采用单因素方差分析中的LSD法进行差异性分析。

2 结果和分析

2.1 不同追肥处理对植株生长的影响

在植株生长前期,3种追肥处理植株的株高、茎粗以一次性追肥处理的最高,三次追肥处理值最低(表1)。到生长中期,植株的株高、茎粗以二次性追肥处理的最高,三次追肥处理次之,一次性追肥处理的最小;到生长后期,植株的株高、茎粗以三次追肥处理的值最大,二次处理次之,一次性追肥处理最小,且与分三次追肥差异显著(表1)。由此可见,二次、三次追肥都能促进植株营养生长,尤其是三次追肥处理效果最好。

在植株生长前期,3种追肥处理叶片的叶面积和叶绿素以一次性追肥处理的最高,三次追肥处理值最低。到生长中期,叶片的叶面积和叶绿素均以二次性追肥处理的最高,一次性追肥处理的最小;生长后期,叶片的叶面积和叶绿素均以三次追肥处理的值最大,二次处理次之,一次性追肥处理最小,且与三次追肥差异显著(表1)。叶片是进行光合作用生产干物质的主要器官,叶绿素含量下降是叶片衰老的显著特征之一,从生长后期测定结果来看,二次、三次追肥都能增大叶片面积,降低后期叶绿素

降解,在一定程度上延缓了衰老。由此可见,二次、三次追肥都能促进植株营养生长,尤其是三次追肥处理效果最好。

在生长前期和生长中期,3个追肥处理叶片的全N量差异不显著,到生长后期,叶片的全N量以三次追肥处理的值最大,二次施肥处理次之,一次性追肥处理最小,且3个处理间差异显著(表1)。这表明在等量施肥的条件下,分三次追肥能显著提高后期叶片的全N量,从而提高叶绿素含量,增强后期光合作用,进而延缓叶片衰老。

2.2 不同追肥处理对植株叶片保护酶(SOD、POD及CAT)的影响

SOD是植物体内清除活性氧自由基的关键酶,其活性是植株衰老和抗性的良好指标。POD是植物体内抗氧化系统的组成部分,可以清除过氧化氢(H_2O_2),具有抵御组织细胞发生膜质过氧化的作用。CAT是植物体内 H_2O_2 等活性氧的清除酶,它与SOD、POD等协同作用维持体内活性氧代谢平衡(魏海燕等,2010)。3种追肥处理平邑甜茶叶片的SOD、POD及CAT活性,在生长前期均以一次性追肥处理的最高,三次追肥处理值最低,且与一次追肥差异显著;在生长中期均以二次性追肥处理的最高,一次性追肥处理的最小;在生长后期以三次追肥处理的值最大,二次追肥处理次之,一次性追肥处理最小,且与分三次追肥差异显著(表2)。由此可见,二次、三次追肥都能提高后期清除 H_2O_2 的能力,从而延缓叶片衰老,并且三次追肥效果明显大于二次追肥处理。

2.3 不同追肥处理下植株不同器官(根、茎、叶)的 N_{dff}

随着生长期的推移,3种追肥处理叶片的 N_{dff} 值均呈逐渐上升的趋势,叶片的 N_{dff} 值在生长前期以一次性追肥处理的最高,三次追肥处理值最低,且与一次追肥差异显著;在生长中期以二次性追肥处理的最高,一次性追肥处理的最小;在生长后期,叶片的 N_{dff} 值以三次追肥处理的值最大,二次追肥处理次之,一次性追肥处理最小,且分三次追肥与分一次、二次追肥处理差异显著(图1)。由此可见,二次、三次追肥都能提高对N的吸收征调能力,且分三次追肥处理效果最好。

在生长后期,3种追肥处理均以根的 N_{dff} 值最高,其次为茎、叶。3种追肥处理间植株各器官 N_{dff} 值差

表1 分次追肥处理下植株的株高、茎粗、叶面积、叶绿素含量及叶片全N量(平均值±标准偏差)
Table 1 The plant height, stem diameter, leaf area, chlorophyll content (SPAD) and total N content of leaves under fractionated fertilization application (mean ± SD)

项目 Item	生长前期 Early growth stage			生长中期 Medium growth stage			生长后期 Late growth stage		
	一次追肥 Once fractionated application	二次追肥 Twice fractionated application	三次追肥 Thrice fractionated application	一次追肥 Once fractionated application	二次追肥 Twice fractionated application	三次追肥 Thrice fractionated application	一次追肥 Once fractionated application	二次追肥 Twice fractionated application	三次追肥 Thrice fractionated application
株高 Plant height (cm)	11.98 ± 0.66 ^a	10.80 ± 0.45 ^b	10.05 ± 0.29 ^b	19.58 ± 0.49 ^b	22.04 ± 0.44 ^a	20.58 ± 0.69 ^b	26.49 ± 0.73 ^b	27.62 ± 0.69 ^{ab}	28.37 ± 0.76 ^a
茎粗 Stem diameter (mm)	2.57 ± 0.01 ^a	2.54 ± 0.01 ^b	2.53 ± 0.01 ^b	2.79 ± 0.04 ^b	2.91 ± 0.03 ^a	2.87 ± 0.03 ^a	3.14 ± 0.05 ^c	3.28 ± 0.03 ^b	3.52 ± 0.08 ^a
叶面积 Leaf area (cm ²)	8.94 ± 0.29 ^a	8.33 ± 0.04 ^b	8.19 ± 0.06 ^b	12.58 ± 0.31 ^c	13.97 ± 0.25 ^a	13.42 ± 0.23 ^b	16.22 ± 0.57 ^b	17.54 ± 0.69 ^b	19.73 ± 0.96 ^a
叶绿素含量 Chlorophyll content (SPAD)	51.70 ± 1.61 ^a	46.43 ± 1.08 ^b	43.63 ± 0.95 ^c	53.23 ± 1.01 ^b	57.03 ± 1.04 ^a	54.20 ± 1.55 ^{ab}	44.57 ± 1.51 ^c	48.81 ± 1.18 ^b	53.57 ± 1.27 ^a
叶片全N量 Total N content of leaves (g/plant ⁻¹)	0.06 ± 0.03 ^a	0.05 ± 0.02 ^a	0.05 ± 0.03 ^a	0.08 ± 0.01 ^a	0.09 ± 0.01 ^a	0.09 ± 0.01 ^a	0.06 ± 0.00 ^b	0.07 ± 0.01 ^b	0.09 ± 0.00 ^a

表中统计分析是针对各施肥处理之间。同一行中数据后不同字母表示显著差异($p = 0.05$).
 Statistion analysis of the table is on behalf of different fertilization treatments. Values within the same row with different letters indicates significant difference ($p = 0.05$).

表2 分次追肥处理叶片的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性 (平均值±标准偏差)
Table 2 Superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) activity under fractionated fertilization application (mean ± SD)

项目 Items	生长初期 Early growth stage			生长中期 Medium growth stage			生长后期 Late growth stage		
	一次追肥 Once fractionated application	二次追肥 Twice fractionated application	三次追肥 Thrice fractionated application	一次追肥 Once fractionated application	二次追肥 Twice fractionated application	三次追肥 Thrice fractionated application	一次追肥 Once fractionated application	二次追肥 Twice fractionated application	三次追肥 Thrice fractionated application
SOD (U·mg ⁻¹ FW)	5.15 ± 0.07 ^a	4.88 ± 0.06 ^b	4.59 ± 0.15 ^c	4.38 ± 0.06 ^b	4.58 ± 0.05 ^a	4.29 ± 0.06 ^b	2.56 ± 0.42 ^c	3.13 ± 0.14 ^b	3.77 ± 0.16 ^b
POD (U·mg ⁻¹ FW)	56.48 ± 5.63 ^a	51.49 ± 5.44 ^a	42.56 ± 4.02 ^b	35.32 ± 2.13 ^c	44.45 ± 1.41 ^b	38.93 ± 1.74 ^b	12.75 ± 1.43 ^b	15.76 ± 1.70 ^{ab}	18.69 ± 1.63 ^a
CAT (U·mg ⁻¹ FW)	23.89 ± 1.87 ^a	18.35 ± 0.76 ^b	16.73 ± 1.08 ^b	4.73 ± 0.21 ^c	6.69 ± 0.28 ^a	5.73 ± 0.75 ^b	3.63 ± 0.22 ^b	3.85 ± 0.03 ^b	4.56 ± 0.39 ^a

表中统计分析是针对各施肥处理之间。同一行中数据后不同字母表示显著差异($p = 0.05$).
 Statistion analysis of the table is on behalf of different fertilization treatments. Values within the same row with different letters indicates significant difference ($p = 0.05$).

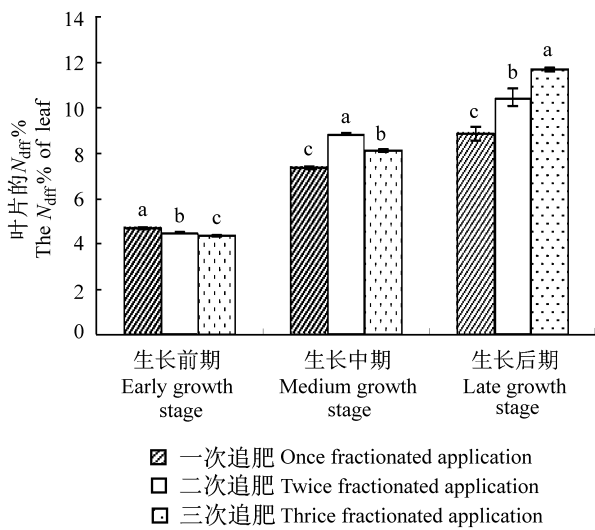


图1 分次追肥处理下叶片从肥料中吸收分配到的¹⁵N量对该器官全N量的贡献率($N_{diff}\%$) (平均值±标准偏差)。不同小写字母表示差异显著($p = 0.05$)。

Fig. 1 The ¹⁵N derived from fertilizer ($N_{diff}\%$) value of leaf under fractionated fertilization application (mean ± SD). Different small letters indicate significant difference ($p = 0.05$).

异显著, 三次追肥处理各器官 N_{diff} 值均最大, 二次追肥处理次之, 一次性追肥处理最小, 而且差异显著或极显著(表3)。由此可见, 在植株生长后期, 二、三次追肥处理都提高了植株各器官对N的征调能

表3 分次追肥处理对植株各器官从肥料中吸收分配到的¹⁵N量对该器官全N量的贡献率($N_{diff}\%$)的影响(平均值±标准偏差, $n = 3$)

器官 Organs	追肥方式 Fertilization mode		
	一次追肥 Once fractionated application	二次追肥 Twice fractionated application	三次追肥 Thrice fractionated application
根 Root	11.79 ± 0.31 ^b	12.31 ± 0.38 ^{ab}	13.86 ± 1.38 ^a
茎 Stem	10.79 ± 0.40 ^b	11.29 ± 0.41 ^{ab}	11.96 ± 0.17 ^a
叶 Leaf	8.85 ± 0.53 ^c	10.48 ± 0.67 ^b	11.69 ± 0.14 ^a

同一行不同小写字母表示差异显著($p = 0.05$)。

Different small letters within the same row indicate significant difference ($p = 0.05$).

表4 分次追肥处理对植株¹⁵N-尿素吸收的影响及¹⁵N利用率 (平均值±标准偏差)

Table 4 ¹⁵N utilization rate of fruit maturity stage (%) under fractionated fertilization application (mean ± SD)

追肥方式 Fertilization mode	植株总N量 Total N content of plant (g)	吸收的 ¹⁵ N量 ¹⁵ N absorbed from ¹⁵ N-urea (g)	¹⁵ N肥料利用率(%) ¹⁵ N-urea utilization rate
一次追肥 Once fractionated application	0.12 ± 0.006 5 ^b	0.012 ± 0.000 4 ^b	4.12 ± 0.14 ^c
二次追肥 Twice fractionated application	0.13 ± 0.008 5 ^{ab}	0.015 ± 0.000 7 ^a	5.13 ± 0.23 ^b
三次追肥 Thrice fractionated application	0.14 ± 0.007 9 ^a	0.017 ± 0.001 7 ^a	6.01 ± 0.29 ^a

同一列不同小写字母表示显著差异($p = 0.05$)。

Different small letters within the same column indicates significant difference ($p = 0.05$).

力, 促进了植株对¹⁵N的吸收, 从而提高了N肥利用率, 且三次追肥处理效果最好。

2.4 不同追肥处理对植株¹⁵N-尿素吸收和¹⁵N利用率的影响

三次追肥处理的植株总N量、吸收的¹⁵N量和¹⁵N利用率均为最大, 分别为0.14 g、0.017 g和6.01%; 一次追肥处理最小, 分别为0.12 g、0.012 g和4.12%, 二次追肥处理介于二者之间。由此看出, 分三次追肥处理高于二次追肥处理, 显著高于一次追肥处理(表4)。这表明二次、三次追肥能提高植株的N肥利用率, 并且以三次追肥效果最明显。

3 讨论和结论

不同时期施N肥可以促进新生器官的生长和发育(顾曼如等, 1981), 本实验在等量N肥情况下, 两次和三次追肥植株的株高、茎粗高于一次追肥, 且三次追肥处理效果更显著, 说明N肥后移促进了植株的营养生长。叶片是进行光合作用生产干物质的主要器官, 生长后期叶面积的增大有利于提高光合作用, 从而制造更多的干物质, 进而延缓叶片衰老(彭福田等, 2003)。生长后期叶绿素含量降低是叶片衰老的主要标志, 从本实验测定的结果来看也验证了这一点, 二次和三次追肥处理叶片的叶面积和叶

绿素含量在平邑甜茶生长中后期显著高于一次追肥, 表明N肥后移在增大叶片叶面积的同时有效地防止了生长后期叶绿素的降解, 从而延缓了叶片衰老进程。这也与中后期供N常被认为是延缓叶片衰老, 提高叶绿素含量, 从而提高产量的结果一致 (Oaks *et al.*, 1997)。另外, 从后期叶片养分含量来看, 三次追肥处理叶片的全N量最大, 且与一次性施肥和两次追肥差异极显著, 说明分次追肥补充了N的后移, 从而延缓了后期叶片衰老。

在植物生长发育过程中, 细胞间的活性氧产生与清除之间的平衡受到破坏, 积累起来的活性氧对细胞造成伤害, 是造成植物衰老与死亡的重要原因 (Hobbie & Estelle, 1994)。在花生 (*Arachis hypogaea*) 上的研究表明, 追施N肥提高了活性氧清除酶类的活性, 降低了膜脂过氧化程度, 延缓了衰老进程 (王晓云等, 2001)。在春小麦上研究N施用方式对花后叶片衰老与产量的研究表明, 适当加大生育中后期追N比例可明显延缓春小麦叶片的衰老进程 (郭改玲等, 2006)。本研究表明, 在叶片生长后期, N肥后移两个处理叶片的SOD、POD和CAT活性均大于一次性追肥处理, 且三次追肥处理效果更显著, 表明N肥后移能提高后期SOD、POD和CAT酶的活性, 增强了清除 H_2O_2 的能力, 起到延缓叶片后期衰老的作用。

利用 ^{15}N 示踪结果表明, N肥后移两个处理叶片的 N_{dff} 值显著高于一次性追肥处理, 这充分证明N肥后移能增加生长后期叶片叶绿素含量和保护酶的活性是N的直接作用。N肥后移不仅防止叶片早衰, 而且提高了N肥利用率。在生长后期测定三次追肥处理 ^{15}N -尿素的利用率最高为6.01%, 是一次性追肥处理(4.02%)的1.5倍。上述结果一方面说明N肥后移可显著减缓叶片衰老, 另一方面说明叶片衰老脱落与后期供N不足有关, 这也与苹果树在落叶以前促进衰老叶中的N向树体转移, 促使老叶脱落死亡的实验结果一致。本实验不同处理N利用率较低: 一个原因是盆栽处理下土壤容量小, N损失相比大田条件下数值较大; 二是因为实验处理时间较短, N可能还未充分吸收利用。沙土和黏土是我国果园最常见的土壤质地类型, 本实验以黏壤土为材料, 对黏土果园生产有一定的指导意义, 而对沙土果园的生产没有直接关系, 因此, 土壤质地类型对分期施N的影响有待进一步研究。

综合等N量分次追施条件下苹果砧木——平邑甜茶植株的生长, 叶片衰老及对N的吸收利用情况来看, N肥后施可以延缓平邑甜茶叶片叶绿素降解的速度, 显著提高后期叶片中SOD、POD和CAT活性, 从而延缓叶片早衰; N肥后移还提高了叶片的 N_{dff} 值, 植株对 ^{15}N -尿素的利用率也显著提高, 并且三次追肥效果优于二次追肥。平邑甜茶常被用作苹果砧木, 因此, 在土壤比较贫瘠的果园中, 生产上应根据果树需肥关键物候期合理制定施肥次数, 既能够满足树体不同生长发育阶段的需求, 通过N肥后移来延缓叶片衰老, 保证丰产稳产; 而且还能够尽量减少因灌溉和降雨等造成的地表径流和地下淋溶损失, 提高N肥利用效率。

致谢 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) 和山东省农业重大应用创新课题 (201009) 资助。

参考文献

- Bao SD (鲍士旦) (2000). *Soil Agricultural-Chemical Analysis* (土壤农化分析) 3rd edn. China Agriculture Press, Beijing. (in Chinese)
- de Jong TM, Day KR, Johnson RS (1989). Partitioning of leaf nitrogen with respect to within canopy light exposure and nitrogen availability in peach. *Trees*, 3, 89–95.
- Fang XJ (房祥吉), Jiang YM (姜远茂), Peng FT (彭福田) (2011). Effects of different sand/soil ratio on growth and ^{15}N absorption, utilization and loss of potted *Malus hupehensis*. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 25(4), 131–134. (in Chinese with English abstract)
- Gao XL (高小丽), Sun JM (孙健敏), Gao JF (高金峰), Feng BL (冯佰利), Chai Y (柴岩), Jia ZK (贾志宽) (2008). Leaf aging and reactive oxygen metabolism in different genotypes of mung bean. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 41, 2873–2880. (in Chinese with English abstract)
- Gou L (勾玲), Yan J (闫洁), Han CL (韩春丽) (2004). Effects of nitrogen rates on photosynthetic characteristics and yield of high-yielding cotton in Xinjiang. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 10, 488–493. (in Chinese with English abstract)
- Gu MR (顾曼如) (1990). The application of ^{15}N in the study of nitrogen nutrition on apples. *China Fruits* (中国果树), (2), 46–48. (in Chinese with English abstract)
- Gu MR (顾曼如), Zhang RZ (张若杼), Shu HR (束怀瑞), Li WW (黎文文), Huang HC (黄花成) (1981). A study on

- the nitrogen nutrition of apple trees—the variation of nitrogen nutrition within the plant in a year's cycle. *Acta Horticulture Sinica* (园艺学报), 8(4), 21–28. (in Chinese with English abstract)
- Guo G L (郭改玲), Liu KL (刘克礼), Gao JL (高聚林) (2006). Effect of nitrogen application on flag leaf senescence and yield of spring wheat. *Journal of Triticeae Crops* (麦类作物学报), 26(5), 126–129. (in Chinese with English abstract)
- Han ZH (韩振海), Zeng X (曾骧), Wang FJ (王福钧) (1992). Effects of autumn foliar application of ^{15}N -urea and several PGR on N storage and reuse in apple. *Acta Horticulture Sinica* (园艺学报), 19, 15–21. (in Chinese with English abstract)
- Hobbie L, Estelle M (1994). Genetic approaches to auxin action. *Plant, Cell & Environment*, 17, 525–540.
- Jiang YM (姜远茂), Peng FT (彭福田), Zhang HY (张宏彦), Li XL (李晓林), Zhang FS (张福锁) (2001). Status of organic matter and nutrients in Shandong orchard soil. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 32(4), 167–169. (in Chinese with English abstract)
- Khemira H (1991). *Influence of Canopy Orientation on Fruiting of 'Anjou' Pears and Post Harvest Urea Spray on Ovule Longevity and Fruit Set of 'Comice' Pears*. Master degree dissertation, Oregon State University, Corvallis.
- Li WQ (李文庆), Zhang M (张民), Shu HR (束怀瑞) (2002). The physiological effects of nitrogen on fruit trees. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)* (山东农业大学学报(自然科学版)), 33, 96–100. (in Chinese with English abstract)
- Lin ZF (林植芳), Li SS (李双顺), Lin GZ (林桂珠), Sun GC (孙谷畴), Guo JY (郭俊彦) (1984). Superoxide dismutase activity and lipid peroxidation in relation to senescence of rice leaves. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 26, 605–615. (in Chinese with English abstract)
- Oaks A, Aslam M, Boesel Z (1997). Ammonium and amino acid as regulators of nitrate reductase in corn roots. *Plant Physiology*, 59, 391–394.
- Peng FT (彭福田), Jiang YM (姜远茂), Gu MR (顾曼如), Shu HR (束怀瑞) (2003). Effect of nitrogen on apple fruit hormone changing trends and development. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 9, 208–213. (in Chinese with English abstract)
- Peng FT (彭福田), Zhang Q (张青), Jiang YM (姜远茂), Peng Y (彭勇), Zhou P (周鹏) (2006). Effect of nitrogen application on nitrogen absorption, distribution and yield of strawberry. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 12, 400–405. (in Chinese with English abstract)
- Raese JT, Drake SR, Curry EA (2007). 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*, 30, 1585–1604.
- Shi CY (史沉鱼), Li XM (李向民), Li XD (李晓东), Zhang R (张蓉) (2010). Two fertilizer treatments on the aroma components in Fuji apples. *Northern Horticulture* (北方园艺), (3), 1–3. (in Chinese with English abstract)
- Stassen PJC, Terblanche JH, Strydom DK (1981). The effect of time and rate of nitrogen application on development and composition of peach trees. *Agoplantae*, 13, 55–61.
- Wang AG (王爱国), Luo GH (罗广华), Shao CB (邵从本), Wu SJ (吴淑君), Guo JY (郭俊彦) (1983). A study on the superoxide dismutase of soybean seeds. *Acta Photophysiological Sinica* (植物生理学报), 9, 77–84. (in Chinese with English abstract)
- Wang XY (王晓云), Li XD (李向东), Zou Q (邹琦) (2001). Regulation effects of nitrogen application on the polyamine metabolism and senescence of peanut leaves. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 27, 442–446. (in Chinese with English abstract)
- Wei HY (魏海燕), Zhang HC (张洪程), Ma Q (马群) (2010). Characteristics of leaf senescence in rice genotypes with different nitrogen use efficiencies. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 36, 645–654. (in Chinese with English abstract)
- Xu YX (徐艳霞), Wei ZB (魏占彬), Wang TL (王天亮) (2009). Effect of different fertilization methods on growth and grain yield of summer maize. *Anhui Agricultural Science Bulletin* (安徽农学通报), 15(18), 54–55. (in Chinese with English abstract)

特邀编委: 汪思龙 责任编辑: 李敏