

不同施氮方式对嘎啦苹果碳氮利用和产量品质的影响

彭玲^{1,2}, 李慧峰³, 崔倩¹, 冯璐¹, 葛顺峰², 姜远茂²

(1.滨州学院山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 山东 滨州 256603;

2.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; 3.山东省果树研究所, 山东 泰安 271018)

摘要:以15年生嘎啦苹果/平邑甜茶为试材,采用C、N双标记技术,研究果实发育期不同施氮方式(传统一次性施氮、分次施氮和渗灌施氮,分别用ON、TN和IN表示)对苹果植株碳氮营养吸收、利用、分配、损失及果实产量和品质的影响。结果表明:至果实成熟期,苹果各器官Ndff值均为IN>TN>ON,新生器官间(果实、叶片和1年生枝)差异显著。植株全氮量和¹⁵N吸收量均以IN处理最大,ON处理最低。与ON处理相比,TN和IN处理¹⁵N利用率分别提高了41.63%和68.60%,而¹⁵N损失率分别降低了10.60%和18.63%。各处理不同土层¹⁵N残留量差异显著,0—40 cm土层¹⁵N残留量为IN>TN>ON,60—120 cm土层趋势相反。TN和IN处理果实和贮藏器官(多年生枝、中心干和粗根)的¹³C分配率均显著高于ON处理,而营养器官(叶片和1年生枝)的¹³C分配率则以ON处理最高,IN处理最低。同时,在IN处理下,苹果产量、硬度、可溶性糖和糖酸比等品质指标均达到最高水平。综上,渗灌施氮通过降低氮素损失,显著促进植株对氮素的吸收利用,并优化光合产物在各器官间分配,从而最有利于苹果产量和品质的提高。

关键词:施氮方式; 嘎啦苹果; ¹⁵N; ¹³C; 吸收; 利用; 分配

中图分类号:S147.2

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)01-0249-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2020.01.036

Effects of Different Nitrogen Application Methods on Carbon and Nitrogen Utilization, Yield and Quality in Gala Apple Tree

PENG Ling^{1,2}, LI Huifeng³, CUI Qian¹, FENG Lu¹, GE Shunfeng², JIANG Yuanmao²

(1.Shandong Key Laboratory of Eco-Environmental Science for the Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou, Shandong 256603; 2.State Key Laboratory of Crop Biology, College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018; 3.Shandong Institute of Pomology, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: A field experiment was carried out in Fifteen-year-old 'Gala'/*M. hupehensis* Rehd. trees with ¹⁵N and ¹³C labeled tracers, to understand the characteristics of absorption, utilization, distribution, loss of carbon and nitrogen nutrition and fruit yield and quality under different nitrogen application methods (ON, TN and IN represented traditional one-time nitrogen, topdressing nitrogen and infiltrating irrigation nitrogen application, respectively) during fruit developmental periods. The results showed that the ¹⁵N derived from fertilizer (Ndff) in each organ displayed an order of IN > TN > ON at the fruit maturity stage, and significant difference was observed in Ndff values among the newborn organs (fruit, leaf and biennial branches). The total N contents and ¹⁵N absorption amount were highest in IN and lowest in ON. Compared with ON, the ¹⁵N utilization rates in TN and IN were increased by 41.63% and 68.60% respectively, and the ¹⁵N loss rates were decreased by 10.60% and 18.63% respectively. The residue amount of ¹⁵N-urea varied across different treatments and soil layers, showing an order of IN > TN > ON in 0—40 cm soil layer, and an opposite pattern in 60—120 cm soil layer. The ratio of ¹³C partition in fruit and storage organs (perennial branch, trunk and coarse root) under TN and IN was significantly higher than ON, and the highest value in the vegetative organs (leaf and biennial branches) occurred in ON, and lowest in IN. In addition, the yield, fruit hardness, soluble sugar and sugar-acid ratio quality index reached the highest value in IN. Our findings indicated that infiltrating irrigation nitrogen application could decrease nitrogen loss, thus increasing the absorption and utilization of nitrogen significantly by trees, and then optimizing the distribution of photosyn-

收稿日期:2019-07-25

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0201100);山东省重点研发计划项目(2017CXGC0211);山东省重大科技创新工程项目(2018CXGC0208);国家现代农业产业技术体系建设项目(CARS-27);山东省泰山学者工程专项和滨州学院博士基金项目(2018Y24)

第一作者:彭玲(1988—),女,讲师,主要从事苹果营养生理和土壤肥力研究。E-mail:zhushipink@163.com

通信作者:姜远茂(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事果树营养生理和土壤肥力研究。E-mail:ymjiang@sdau.edu.cn

葛顺峰(1985—),男,副教授,主要从事果树营养生理与氮、磷循环研究。E-mail:geshunfeng210@126.com

thetic products, which was the preferred form to the yield and quality of apple tree.

Keywords: nitrogen application methods; Gala apple; ^{15}N ; ^{13}C ; absorption; utilization; distribution

氮素作为调控苹果生长发育的三大营养元素之一,在苹果树体的结构、产量、品质及经济效益等方面都发挥着显著的调控作用^[1]。合理的氮肥施用不仅能维持健壮树体、提高产量,而且能改善果实品质。然而,目前我国苹果生产上氮肥施用标准不明确,施氮方式不合理,施氮时期和树体氮素需求不同步,不仅导致树体贮藏营养不足、氮素利用率偏低,造成产量不稳和果品质量降低,还带来了土壤质量下降和环境风险增大等问题,严重制约了苹果产业的可持续发展。

碳氮代谢是作物体内最主要的两大生理代谢过程,直接影响碳、氮物质的合成、转化、累积及分配^[2]。碳氮代谢过程相互偶联、相互制约,氮素供应水平的高低对作物碳氮代谢强度及协调程度起重要调节作用,并最终影响作物的生长及产量、品质的形成。氮素供应不足,作物光合性能下降^[3],导致光合产物形成减少、运输受阻^[4-5],从而降低植株根系活力而影响对氮素的吸收利用,不利于作物产量和品质的提高;氮素供应过量不仅致使树体营养生长过旺,还会对光合系统产生抑制作用,破坏树体正常的库源关系^[6],并影响钙和硼等中、微量元素的吸收^[7],降低果实品质。适宜施氮可改善小麦、棉花和烤烟等作物光合性能,促进光合产物的分配和运转,并有利于碳氮代谢的调节^[8]。果实坐果至成熟这段时间树体的氮素营养状况与果实产量和品质的形成密切相关,而此期又恰逢夏季多雨期,氮肥损失风险高,土壤中盈余的氮素易随地表径流或被深层淋洗而损失^[9],致使果树生长后期根层氮素供应不足,从而不能满足树体生长和果实发育对氮素的需求,并会加剧环境污染和生态环境的恶化。因此,寻求合理、有效的氮肥运筹方式保证此期土壤氮素供应水平的稳定、充足而不过量既是保障高产、稳产和优质苹果生产的关键,又是实现氮肥高效利用,降低生态环境风险的核心。

近年来,氮肥总量控制、分期调控、测土配方施肥、新型肥料使用以及水肥一体化技术被广泛应用于农作物及果园生产中,有效降低了土壤氮素的损失,提高了氮素利用率^[10-11],减少了 N_2O 、 CH_4 等温室气体的排放^[12-13],减轻了对环境的潜在压力^[14],并在促进果树幼苗及新生枝条的生长、提高果树产量和改善果实品质等方面效果显著^[15-16]。不同于以往的传统施氮方式,这些施氮方式通过调控根层氮素浓度使果树在生长季内土壤中速效态氮素浓度的变化幅度较小,从而使氮素养分供应得到控制,直接或间接实现了氮素养分的稳定供应,但这种氮素养分相对稳定的

供应方式对果树生长发育及氮素养分吸收特性的效用机制还需细致系统的研究。为此,本试验以嘎拉苹果为试材,利用 ^{15}N 和 ^{13}C 同位素双示踪技术和生理生化分析方法,在果实膨大期至成熟期探究了传统施氮、分次施氮和水肥一体化3种施氮方式对苹果植株碳氮营养的吸收、运输、分配、储藏和利用规律,旨在从碳氮营养特性的角度阐明不同氮肥施用方式对苹果植株生长发育及养分吸收、运输、利用及分配间的差异,从而为苹果果实发育期氮肥的合理施用、产量和品质的提高提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料和试验设计

试验于2018年6—8月在山东省烟台市莱山镇官庄村果园进行。供试材料为15年生嘎拉苹果/平邑甜茶(‘Gala’/*M. hupehensis* Rehd.),株行距为4 m×5 m。供试土壤为壤土,土壤有机碳含量为8.02 g/kg,硝态氮含量为28.12 mg/kg,铵态氮含量为19.96 mg/kg,速效磷含量为34.38 mg/kg,速效钾含量为231.32 mg/kg;0—20,20—40,40—60,60—80,80—100,100—120 cm土层的土壤容重分别为1.14,1.26,1.39,1.43,1.45,1.46 g/cm³。

选取长势基本一致、无病虫害的苹果植株18株。试验设3个处理,单株为1个处理,每个处理重复6次。处理1(传统一次性施氮,ON):于2018年6月10日(果实膨大期)一次性每株土施 ^{15}N -尿素(上海化工研究院生产,丰度10.22%)20 g和普通尿素148.20 g;处理2(分次施氮,TN):分别于6月10日、6月25日、7月10日和7月25日每次每株土施 ^{15}N -尿素5 g和普通尿素37.05 g;处理3(渗灌施氮,IN):距中心干60 cm处挖环状沟,将渗灌管路铺设于环状沟内,埋管深度为20 cm,于6月10日每株施入绿乐水溶肥1.29 kg(以纯氮计148.20 g)和 ^{15}N -尿素20 g。处理1和处理2施肥时距树体中心干60 cm处挖深和宽均为20 cm的环状沟,将 ^{15}N -尿素和普通尿素用水溶解后均匀浇灌于环状沟内。本试验动态监测了果园6—8月果农习惯灌水量,并将渗灌水量和传统施肥处理的灌水量保持一致,处理1未进行施肥处理时同样和处理2浇灌等量去离子水。3个处理均在6月10日每株土施钾肥(K_2O)150 kg/hm²,磷肥(P_2O_5)300 kg/hm²,各处理常规管理相同。 ^{13}C 脉冲标记于8月28日进行,每个处理选3株,标记室由与树体大小相当的支架和透明农用地膜制成,支架底部用土进行掩埋以保证密封性。标记前先检查标

记室的密封性,将还原铁粉、风扇和 6 g ^{13}C 丰度为 98% 的 $\text{Ba}^{13}\text{CO}_3$ 一并放入标记室内,然后将整个标记室密封。于 9:00 点开始进行标记,用注射器向装有 $\text{Ba}^{13}\text{CO}_3$ 的烧杯中注入一定量的 1 mol/L 的 HCl 溶液(HCl 溶液过量以保证 $\text{Ba}^{13}\text{CO}_3$ 完全反应),开启风扇,使得标记室内新产生的 $^{13}\text{CO}_2$ 分布均匀。为提高标记室内 ^{13}C 固定率,减少 $^{13}\text{CO}_3$ 的损失,此后每隔 30 min,向烧杯中注入 1 次盐酸,以维持 CO_2 浓度,以此持续标记 4 h。为防止标记 $^{13}\text{CO}_2$ 污染,另选取距离标记植株至少 5 m 以上的 3 株苹果树体作为空白对照(^{13}C 自然丰度),72 h 后(8 月 31 日,果实成熟期)整株进行破坏性采样,整株解析为根系、中心干、多年生枝、1 年生枝、叶片和果实。另外,避开施肥沟,在单株所占树冠投影面积内均匀布置 12 个采样点,以 20 cm 为 1 个土层取样,直至取至 120 cm,随后将每层 12 点土样均匀混合,按四分法取样,带回实验室待测。

1.2 测定指标与方法

1.2.1 植株解析样品和土壤样品的测定 植株样品按清水→洗涤剂→清水→1%盐酸→3 次去离子水顺序冲洗后,105 °C 下杀青 30 min,随后在 80 °C 下烘干至恒量,称重并计算植株各器官生物量。烘干的样品用电磨粉碎后过 60 目筛,混匀后装袋备用。土壤自然风干后过 100 目筛待测。土壤和植株全氮用凯氏定氮法测定, ^{15}N 和 ^{13}C 丰度在 DELTA V Advantage 同位素比率质谱仪中测定,采用环刀法测定土壤容重。

1.2.2 果实产量和品质的测定 于果实成熟期在 4 个不同方位随机选取树体中部外围生长正常的果实 6 个,每个处理 36 个果实,用于平均单果质量和果实品质的测定。整株果实采摘完毕后测定单株产量。可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定,采用指示剂滴定法测定可滴定酸含量^[17],硬度采用 HP-230 型硬度仪测定,并用糖量计测定可溶性固形物含量。

1.3 结果计算与数据处理

1.3.1 ^{15}N 的计算 Ndff (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) = (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) $\times 100\%$; 器官全氮量(g) = 干物重(g) \times 氮含量(%); 氮素利用率 = ($\text{Ndff} \times$ 全氮量(g)) / 施氮量(g) $\times 100\%$; 氮肥残留率 = ($\text{Ndff} \times$ 土层厚度(cm) \times 土壤容重(g/cm^3) \times 土层全氮量(g)) / 施氮量(g) $\times 100\%$; 土壤损失率 = $100\% -$ 氮肥利用率 - 氮肥残留率。

1.3.2 ^{13}C 的计算 $\delta^{13}\text{C} = (R_{\text{样品}} / R_{\text{PDB}} - 1) \times 1000$; $R_{\text{未标记样品}} = {}^{13}\text{C}_{\text{未标记样品}} / {}^{12}\text{C}_{\text{未标记样品}}$; $\text{Atom}^{13}\text{C} = (\delta^{13}\text{C} + 1000) \times R_{\text{PDB}} / ((\delta^{13}\text{C} + 1000) \times R_{\text{PDB}} + 1000) \times 100$; $C_i =$

干物重(g) $\times C_i\%$; ${}^{13}\text{C}_i$ (mg) = $C_i \times ((\text{Atom}^{13}\text{C})_{\text{标记丰度}} - (\text{Atom}^{13}\text{C})_{\text{自然丰度}}) \times 1000$; ${}^{13}\text{C}_i\%$ = ${}^{13}\text{C}_i / {}^{13}\text{C}_{\text{净吸收}} \times 100$ 。
式中: $\delta^{13}\text{C}$ 表示一般自然土壤或植物(未标记) ^{13}C 自然丰度(‰); Atom 为标记植物 ^{13}C 丰度(‰); R_{PDB} 为碳同位素的标准比值,为 0.011 237 2; C_i 表示植株各器官所含的碳量(g); ${}^{13}\text{C}_i$ 为各器官中 ^{13}C 的量(mg); ${}^{13}\text{C}_i$ 为该器官的 ^{13}C 量占植株净吸收 ^{13}C 量的百分比(%)。

1.4 数据处理

本试验所有数据均采用 Microsoft Excel 2003 进行数据计算,利用 DPS 7.05 统计软件进行单因素方差分析方差分析,LSD 法进行差异显著性比较分析。

2 结果与分析

2.1 不同施氮方式对嘎啦苹果各器官 Ndff 的影响

Ndff 指植株各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,反映了植株对肥料 ^{15}N 的吸收征调能力^[18]。由表 1 可知,3 种施氮方式对苹果各器官 Ndff 值的影响规律一致,均以果实的 Ndff 值最高,其次依次为叶片、1 年生枝、细根、粗根和多年生枝,中心干的 Ndff 值最低,表明果实成熟期以果实对氮素的吸收征调能力最强,中心干最弱。不同施氮方式对苹果各器官的 Ndff 值影响显著。与 ON 处理相比,在各器官中 Ndff 增长,TN 和 IN 处理苹果果实的 Ndff 值增幅最大,分别为 24.63% 和 37.44%,其次为叶片,分别提高了 20.66% 和 33.88%,再次为细根,其 Ndff 值增幅分别为 14.61% 和 29.21%,增幅最小的为中心干,分别为 11.86% 和 18.64%。由此可见,果实膨大期分次施氮和渗灌施氮均可显著提高苹果各器官尤其是新生器官对氮素的吸收和征调能力,根层氮素被较快地吸收并运输到各新生器官中去,从而用于新生器官的形态建造,反过来又可促进苹果根系对 ^{15}N 的吸收,提高氮素利用率,且以渗灌施氮方式效果最好。

2.2 不同施氮方式对嘎啦苹果氮素吸收利用的影响

由表 2 可知,不同施氮处理间多年生枝和中心干总氮量差异不显著,而苹果果实、叶片、1 年生枝和根系(细根和粗根)的总氮量均为 $\text{IN} > \text{TN} > \text{ON}$,且各处理间差异达显著水平($P < 0.05$)。从植株总氮量来看,IN 处理苹果植株总氮量达 416.02 g,显著高于 TN(359.59 g) 和 ON(291.88 g) 处理。说明果实膨大期施氮,树体新吸收的氮素主要向果实、根系及新生器官进行分配,且以渗氮施肥处理最有利于促进苹果各器官对氮素的吸收和累积。

不同施氮方式对苹果 ^{15}N 利用率影响显著,与 ON 处理相比,TN 和 IN 处理下苹果植株 ^{15}N 利用率

分别提高了 41.63% 和 68.60%，说明分次施氮和渗灌施氮均能显著提高苹果植株¹⁵N 肥料利用率，增强苹

果植株对氮素的吸收、利用能力，且以渗灌施氮的效果更为显著。

表 1 不同施氮方式对嘎啦苹果各器官 Ndff 值的影响

处理	果实	叶片	1 年生枝	多年生枝	中心干	细根	粗根
ON	2.03±0.12c	1.21±0.06c	1.02±0.07c	0.69±0.03b	0.59±0.02a	0.89±0.06c	0.76±0.03b
TN	2.53±0.16b	1.46±0.08b	1.23±0.06b	0.78±0.04a	0.66±0.04a	1.02±0.08b	0.85±0.06ab
IN	2.79±0.20a	1.62±0.10a	1.35±0.09a	0.82±0.05a	0.70±0.03a	1.15±0.09a	0.92±0.04a

注：表中数据为平均值±标准差；同列不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

表 2 不同施氮方式对嘎啦苹果总氮量和¹⁵N 利用率的影响

处理	各器官总氮量/g							植株总氮量/g	¹⁵ N 利用率/%
	果实	叶片	1 年生枝	多年生枝	中心干	细根	粗根		
ON	39.19±2.06c	53.04±3.36c	12.39±0.83c	43.73±2.29b	43.34±2.16a	7.13±0.36c	93.06±4.09c	291.88±19.06c	17.39±1.12c
TN	64.23±3.36b	79.86±5.43b	18.23±1.16b	46.43±3.16a	41.13±3.36ab	9.69±0.49b	100.02±6.63b	359.59±21.38b	24.63±1.34b
IN	86.53±5.33a	99.02±7.16a	26.64±1.66a	45.39±3.96ab	40.03±3.46b	12.29±0.73a	106.12±8.06a	416.02±32.33a	29.32±2.56a

2.3 不同施氮方式对嘎啦苹果各器官¹³C 分配率的影响

植株各器官对¹³C 同化产物的竞争能力是指代谢及生长旺盛部位从标记的叶片中吸取¹³C 的能力，¹³C 同化产物分配到各个器官的比率受其竞争能力的影响^[19]。由表 3 可以看出，不同施氮方式对苹果植株光合产物的分配产生显著影响。至果实成熟期，IN 处理果实¹³C 分配率分别比 ON 和 TN 处理高 15.30% 和 9.47%，且各处理间差异显著。与果实¹³C 分配规律趋势

相同，苹果植株根系、中心干和多年生枝的¹³C 分配率均以 IN 处理最高，TN 处理次之，ON 处理最低。而与果实¹³C 分配规律趋势相反，与 ON 处理相比，TN 和 IN 处理下苹果叶片¹³C 分配率分别降低了 20.77% 和 57.37%，1 年生枝¹³C 分配率分别降低了 37.19% 和 57.67%。由此表明，果实膨大期与传统一次性施氮相比，渗灌施氮和分次施氮处理提高了苹果叶片¹³C 同化物的输出量，且主要运输至果实，并增加了向贮藏器官的输出，而减少了向当年生营养器官的分配。

表 3 不同施氮方式对嘎啦苹果各器官¹³C 分配率的影响

处理	果实	叶片	1 年生枝	多年生枝	中心干	细根	粗根
ON	35.68±2.88c	18.90±1.16a	11.51±0.83a	9.70±0.73b	7.04±0.54c	9.92±0.83b	7.24±0.36c
TN	39.06±2.36b	15.65±1.03b	8.39±0.66b	11.06±0.86a	8.02±0.56b	10.29±0.76ab	7.53±0.43b
IN	41.14±3.34a	12.01±0.96c	7.30±0.54c	11.86±0.66a	8.98±0.63a	10.50±0.73a	8.22±0.32a

2.4 不同施氮方式对土壤¹⁵N 残留和损失的影响

由表 4 可知，不同施氮方式下 0—120 cm 各土层¹⁵N 残留量差异显著。0—20, 20—40 cm 土层¹⁵N 残留量均以 IN 处理最高，TN 处理次之，ON 处理最低。40—60 cm 土层¹⁵N 残留量为 TN>IN>ON，而 80—100, 100—120 cm 土层则为 ON>TN>IN。ON 处理¹⁵N 残留量最大值出现在 60—80 cm 土层 (0.79 g)，而 TN 和 IN 处理则分别出现在 40—60 cm (0.66 g) 和 20—40 cm 土层 (0.74 g)。0—120 cm 土

层¹⁵N 残留总量为 ON>TN>IN，各处理间差异达显著水平。与¹⁵N 残留总量趋势相同，TN 和 IN 处理下¹⁵N 残留率分别比 ON 低 10.00% 和 15.73%，¹⁵N 损失率则分别降低了 10.60% 和 18.63%。结合不同施氮处理苹果植株氮素吸收利用情况可发现，与传统一次性施氮相比，果实膨大期分次施氮和渗灌施氮在促进苹果植株对氮素吸收利用的同时，降低了氮素向深层土壤的淋溶损失，从而起到较好的保肥作用，且以渗灌施氮的保肥效果最好。

表 4 不同施氮方式对土壤¹⁵N 残留和损失的影响

处理	不同土层 ¹⁵ N 残留量/g						¹⁵ N 总残留量/g	¹⁵ N 残留率/%	¹⁵ N 损失率/%
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	80—100 cm	100—120 cm			
ON	0.21±0.01c	0.32±0.02c	0.49±0.03b	0.79±0.05a	0.39±0.02a	0.10±0.01a	2.30±0.11a	24.92±1.32a	57.69±3.21a
TN	0.38±0.02b	0.59±0.03b	0.66±0.04a	0.26±0.01b	0.20±0.01b	0.06±0.003b	2.16±0.09b	23.21±1.41b	52.16±3.89b
IN	0.54±0.04a	0.74±0.04a	0.42±0.02b	0.21±0.01b	0.12±0.01c	0.03±0.001c	2.05±0.12c	22.06±1.22c	48.63±3.43c

2.5 不同施氮方式对嘎啦苹果产量和品质的影响

由表 5 可知，不同施氮方式对苹果产量和品质均有显著影响。IN 处理下苹果单株产量和单果质量均达到最高水平，其次为 TN 处理，ON 处理最低。适当增加果实硬度，可延长其耐储藏性，与 ON 处理相比，

TN 和 IN 处理果实硬度分别提高了 6.66% 和 10.34%。可溶性糖含量是决定苹果甜度与风味品质的关键因素^[20]，苹果果实可溶性固形物含量为 IN>TN>ON，但各处理间差异不显著，而 IN 处理下可溶性糖含量分别是 ON 和 TN 处理的 1.17 和 1.10 倍，且各

处理间差异显著。提高果实中可溶性糖含量,降低可滴定酸含量,糖酸比升高可改善果实口感和风味。不同施氮方式果实可滴定酸含量无显著差异,而糖酸比含量则差异显著,IN 处理最高,TN 处理次之,最低

表 5 不同施氮方式对嘎啦苹果产量和品质的影响

处理	单果 质量/g	单株 产量/kg	硬度/ (kg·cm ⁻²)	可溶性 固形物/%	可溶性糖/%	可滴定酸/%	糖酸比
ON	140.23±11.06c	66.26±5.33c	7.06±5.32c	13.82±0.83b	10.45±0.93c	0.22±0.01a	47.50±2.06c
TN	156.33±12.23b	77.39±4.86b	7.53±4.36b	14.10±1.06ab	11.13±1.06b	0.22±0.01a	50.59±3.29b
IN	166.83±13.32a	83.20±7.34a	7.79±4.14a	14.43±1.23a	12.20±0.83a	0.23±0.01a	53.04±4.36a

3 讨论

氮素营养状况直接影响植株生长发育的全过程。作为果树营养需求的关键时期,果实膨大至成熟这段时期也是营养器官和生殖器官竞争养分最激烈的时期,更需要保证稳定、充足而不过量的氮素供应来维持树体各器官正常功能及果实的发育^[19]。霍昭光等^[21]研究指出,水肥一体化能促进植株根系和地上部的生长发育,为各自功能的发挥奠定基础,从而增强植株对氮素的吸收、同化能力,提高氮素利用效率。本试验通过¹⁵N 示踪也发现,渗灌施氮处理苹果新生器官的分配势(Ndff 值)显著高于其他处理。Ndff 值越高,越有利于增强根系和地上部新生器官对肥料氮的吸收征调能力。氮素被根系吸收后优先转运至地上部各器官,可直接用于树体的营养生长和果实发育,从而进一步促进苹果植株对氮素的吸收、利用和累积。这不仅缓解了果实发育期生殖生长和营养生长对氮素养分激烈的竞争,从而可在保证树体当年生长、增强树势的同时,也可促进贮藏氮的积累,提高氮素的再利用能力^[19,22]。因而,与其他 2 种施氮方式相比,渗灌处理下苹果植株的¹⁵N 利用率最高,植株各器官总氮量也呈相同趋势。

Agrawal 等^[23]研究发现,水肥一体化技术可以明显提高养分和水分的利用效率,并降低果园的养分流失量;黄丽华等^[24]也报道,较常规施肥,采用水肥一体化技术使梨单位产量的总氮流失量减少了 45.20%~56.40%。本研究中,0—60 cm 土层的总¹⁵N 残留量以渗灌施氮处理最多,传统一次性施氮处理最低,而 60—120 cm 土层趋势相反。说明渗灌施氮处理显著降低了氮素向深层土壤的淋溶损失,表现出较好的保肥效用。这也是渗灌施氮能够提高苹果植株氮素利用率、增加器官氮素积累量的重要原因。因而与传统一次性施氮处理相比,渗灌施氮处理下其¹⁵N 损失率显著降低,体现出与前人^[23-24]一致的研究结果。从果实膨大到成熟这段时期是当年施氮肥发挥作用的有效期和最大效率期,但此期恰逢夏季高温多雨,加剧了氮肥的损失。地表以下 40 cm 土层内为苹果根系的集中分布区,该土层根系吸收养分的能力最强。渗灌施

为 ON 处理。综上所述,果实膨大期分次施氮和渗灌施氮均可提高嘎啦果实产量,在一定程度上改善果实品质,且以渗灌施氮处理对果实产量和品质的提高效果最为明显。

氮技术残留的¹⁵N 多累积在 0—40 cm 土层,从而较好地维持了苹果根系集中分布区相对稳定、充足的氮素浓度。另外,渗灌施氮技术达到了水分和养分在时间上的同步和空间上的耦合,也有助于提高氮素利用率和土壤供氮能力^[25]。因此,渗灌施氮处理下氮素供应更符合果实发育期苹果植株的需氮特性,满足了苹果生长和果实发育对氮素的需求,又减少了盈余氮素向环境的损失,从而降低了一系列生态环境风险。而传统一次性施氮初期土壤有效氮浓度超出果实发育所需,后期¹⁵N 多累积在 60—80 cm 土层,致使根层氮素营养供应不足,造成养分供应与树体生长发育需求的不同步,因而其氮素利用率最低,氮素损失率最高。分次施氮后期氮素多累积在 40—60 cm 土层,其保肥效果次于渗灌施氮,被根系有效吸收的氮素也较少,因而其氮素利用率次于渗灌施氮处理。

果树产量和品质的提高与碳素同化物的运输、分配情况密切相关。果实发育后期地上部与根系对光合养分存在竞争,此时期的源—库矛盾尤为突出^[26],碳素营养状况的充足与否将直接影响果实产量和质量的提高。本试验通过¹³C 示踪发现,不同施氮处理各器官间¹³C 分配率差异显著。苹果果实¹³C 分配率以渗灌施氮处理最高,传统一次性施氮处理最低,多年生枝和中心干等贮藏器官也呈相同规律,而其当年生枝及根系等营养器官的¹³C 分配率趋势相反。这表明渗灌施氮这种相对稳定的供氮方式最有利于提高碳素同化物的运转能力并优化其分配模式。渗灌施氮方式下,水分和养分被稳定、及时、充足的供应给苹果根际周围,且在根层土壤内的损失量减低,从而增强了根系对养分和水分的吸收能力,进一步可改善苹果树体的营养状况,提高叶片光合能力,制造更多的同化产物。一方面,果实积累较多的碳素同化物,可缓解果实对光合养分的竞争,保证碳水化合物对果实发育的供给,为生产丰产优质果品奠定基础;另一方面,贮藏器官积累较多的碳素同化物,可提高苹果树体碳氮营养的储备量,从而有利于提高树体的抗寒性及翌年新生器官的建造。因而,这在一定程度

上很好地解释了渗灌施氮处理在提高果实产量上所起到积极作用的原因,研究结果与路永莉等^[27]在苹果、张鹏等^[28]在芒果上的研究结论基本一致。

赵佐平等^[11]研究发现,果实品质和土壤水分、养分的协调供应有关,苹果园水肥一体化技术能显著改善苹果品质,但其效果存在明显差异;彭良志等^[29]通过连续 6 年的研究则发现,采用水肥一体化技术对柑橘品质影响不显著。本研究条件下,与传统一次性施氮处理相比,渗灌施氮下苹果果实硬度、可溶性糖和糖酸比显著提高,但其他品质指标均无明显变化。在苹果上研究发现,水肥施肥技术对苹果光合速率、蒸腾速率和气孔导度等光合特性均有一定影响,从而可改善果实的外观品质和内在品质^[11]。在葡萄上的研究^[30]显示,水肥一体化施肥技术能够改善土壤理化性状,改良土壤团粒结构,提高土壤的保肥保水能力,并可降低土壤盐胁迫,因而可有效提高葡萄产量和品质。本试验中渗灌施氮处理促进了苹果植株对氮素养分的高效吸收利用,从而提高了碳素同化物生产能力,并优化了碳素同化物的运输和分配,这可能是其在一定程度上改善果实品质的原因之一,而本试验条件下不同施氮方式影响苹果品质的内在机理尚需进一步的研究。

4 结论

(1)与传统一次性施氮处理相比,果实膨大期分次施氮和渗灌施氮处理苹果各器官特别新生器官的 Ndff 值均显著增大,植株总氮量分别提高了 23.20% 和 42.53%,¹⁵N 利用率分别提高了 41.63% 和 68.60%。表明分次施氮和渗灌施氮均可提高苹果树体对氮素的吸收利用能力,且以渗灌施氮效果最好。

(2)果实成熟期,苹果果实和贮藏器官¹³C 分配率以渗灌施氮处理最高,分次施氮处理次之,传统一次性施氮处理最低,而苹果当年生营养器官¹³C 分配率趋势相反,表明渗灌施氮最有助于促进光合产物向果实和贮藏器官进行运输、分配和贮藏。

(3)随着果实发育期的推移,传统一次性施氮、分次施氮和渗灌施氮处理土壤¹⁵N 残留的最大值分别出现在 60—80,40—60,20—40 cm 土层。分次施氮和渗灌施氮处理¹⁵N 损失率分别比传统一次性施氮处理降低了 10.60% 和 18.63%。说明分次施氮和渗灌施氮均可降低氮素向深层土壤的淋溶和其他损失,且以渗灌施氮起到的保肥效果最好。

(4)3 种施氮方式中,渗灌施氮处理下苹果单果质量和单株产量最大,苹果果实硬度、可溶性糖和糖酸比也显著高于其他处理,表明渗灌处理在一定程度上提高了果实产量且改善了果实品质。

参考文献:

- [1] 彭玲,王芬,田歌,等.果实膨大期分次施氮对苹果氮素吸收利用及土壤累积动态的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):287-297.
- [2] 孙永健,孙园园,严奉君,等.氮肥后移对不同氮效率水稻花后碳氮代谢的影响[J].作物学报,2017,43(3):407-419.
- [3] 谷艳芳,丁圣彦,高志英,等.干旱胁迫下冬小麦光合产物分配格局及其与产量的关系[J].生态学报,2010,30(5):1167-1173.
- [4] Reddy K R, Koti S, Davidonis G H, et al. Interactive effects of carbon dioxide and nitrogen nutrition on cotton growth, development, yield and fiber quality [J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96(4):1148-1157.
- [5] 李强,罗延宏,余东海,等.低氮胁迫对耐低氮玉米品种苗期光合及叶绿素荧光特性的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(5):1132-1141.
- [6] 陆奇杰,巢建国,谷巍,等.不同氮素水平对茅苍术光合特性及生理指标的影响[J].植物生理学报,2017,53(9):1673-1679.
- [7] 王芬,田歌,于波,等.富士苹果果实膨大期肥料氮去向及土壤氮素平衡的研究[J].园艺学报,2017,44(8):1569-1578.
- [8] 刘敬然,赵文青,周治国,等.施氮量与播种期对棉花产量和品质及棉铃对位叶光合产物的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(4):951-961.
- [9] Raese J T, Drake S, 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' [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2007, 30(10):1585-1604.
- [10] Hu H Y, Ning T Y, Li Z J, et al. Coupling effects of urea types and sub soiling on nitrogen-water use and yield of different varieties of maize in northern China [J]. *Field Crop Research*, 2013, 142:85-94.
- [11] 赵佐平,段敏,同延安.不同施肥技术对不同生态区苹果产量及品质的影响[J].干旱地区农业研究,2016,34(5):158-165.
- [12] Wang B, Li Y E, Wan Y F, et al. Modifying nitrogen fertilizer practices can reduce greenhouse gas emissions from a Chinese double rice cropping system [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2016, 215:100-109.
- [13] Yang J, Liu G, Ma J, et al. Effects of urea and controlled release urea fertilizers on methane emission from paddy fields: A multi-year field study [J]. *Pedosphere*, 2014, 24:662-673.
- [14] Sharma S, Patra S K, Ray R. Effect of drip fertigation on growth and yield of Guava cv. Khaja [J]. *Environment and Ecology*, 2011, 29(1):34-38.

参考文献:

- [1] 彭少兵,黄见良,钟旭华,等.提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J].中国农业科学,2002,35(9):1095-1103.
- [2] 刘建涛,张会永,王雪,等.氮肥调控剂施用对小麦生长、氮素利用及氮素表现平衡的影响[J].水土保持学报,2014,28(1):209-214.
- [3] Gao W, Howarth R W, Swaney D P, et al. Enhanced N input to Lake Dianchi Basin from 1980 to 2010: Drivers and consequences [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 505: 376-384.
- [4] 周伟,吕腾飞,杨志平,等.氮肥种类及运筹技术调控土壤氮素损失的研究进展[J].应用生态学报,2016,27(9):3051-3058.
- [5] 朱兆良.中国土壤氮素研究[J].土壤学报,2008,45(5):778-783.
- [6] 张志剑,董亮,朱荫涓.水稻田面水氮素的动态特征、模式表征及排水流失研究[J].环境科学学报,2001,21(4):475-480.
- [7] Wopereis-Pura M M, Watanabe H, Moreira J, et al. Effect of late nitrogen application on rice yield, grain quality and profitability in the Senegal River valley [J]. *European Journal of Agronomy* 2002, 17: 191-198.
- [8] 鲁艳红,聂军,廖育林,等.不同控释氮肥减量施用对双季水稻产量和氮素利用的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):155-161,174.
- [9] 刘红江,肖敏,张丽萍,等.前氮后移对水稻氮素吸收和利用效率的影响[J].江苏农业学报,2017,33(3):550-554.
- [10] 汪华,杨京平,金洁,等.不同氮素用量对高肥力稻田水水稻—土壤—水体氮素变化及环境影响分析[J].水土保持学报,2006,20(1):50-54.
- [11] 潘圣刚,黄胜奇,曹湊贵,等.氮肥运筹对稻田田面水氮素动态变化及氮素吸收利用效率影响[J].农业环境科学学报,2010,29(5):1000-1005.
- [12] 施泽升,续勇波,雷宝坤,等.洱海北部地区不同氮、磷处理对稻田田面水氮磷动态变化的影响[J].农业环境科学学报,2013,32(4):838-846.
- [13] 吴俊,樊剑波,何园球,等.茗溪流域不同施肥条件下稻田田面水氮磷动态特征及产量研究[J].土壤,2013,45(2):207-213.
- [14] 朱利群,田一丹,李慧,等.不同农艺措施条件下稻田田面水总氮动态变化特征研究[J].水土保持学报,2009,23(6):85-89.
- [15] 汪丽婷,马友华,储茵,等.巢湖流域不同施肥措施下稻田氮磷流失特征与产量研究[J].水土保持学报,2011,25(10):40-44.
- [16] 董世杰,鲁屹,唐婉莹,等.聚天门冬氨酸钙盐对水稻田面水中三氮动态变化的影响[J].水土保持学报,2018,32(6):208-213.
- [17] 张富林,吴茂前,夏颖,等.江汉平原稻田田面水氮、磷变化特征研究[J].土壤学报,2019,56(5):1190-1200.
- [18] 王强,杨京平,沈建国,等.稻田田面水中三氮浓度的动态变化特征研究[J].水土保持学报,2003,17(3):51-54.
- [19] 侯朋福,薛利祥,俞映惊,等.缓控释肥侧深施对稻田氮挥发排放的控制效果[J].环境科学,2017,38(12):5326-5332.
- [20] Ma B Q, Chen J, Zheng H Y, et al. Comparative assessment of sugar and malic acid composition in cultivated and wild apples [J]. *Food Chemistry*, 2015, 172: 86-91.
- [21] 霍昭光,孙志浩,邢雪霞,等.北方烟区水肥一体化对烤烟生长、根系形态、生理及光合特性的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(9):1317-1325.
- [22] 门永阁,安欣,许海港,等.不同负载量对苹果¹³C和¹⁵N分配、利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(3):702-708.
- [23] Agrawal N, Agrawal S. Effect of different levels of drip irrigation on the growth and yield of pomegranate under Chhattisgarh region [J]. *Orissa Journal of Horticulture*, 2007, 35: 38-46.
- [24] 黄丽华,沈根祥,钱晓雍,等.滴灌施肥对农田土壤氮素利用和流失的影响[J].农业工程学报,2008,24(7):49-53.
- [25] 李伏生,陆申年.滴灌施肥的研究和应用[J].植物营养与肥料学报,2000,6(2):233-240.
- [26] 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.
- [27] 路永莉,白风华,杨宪龙,等.水肥一体化技术对不同生态区果园苹果生产的影响[J].中国生态农业学报,2014,22(11):1281-1288.
- [28] 张鹏,范家慧,程宁宁,等.水肥一体化减量施肥对芒果产量、品质及肥耗的影响[J].中国土壤与肥料,2019(2):114-118.
- [29] 彭良志,淳长品,江才伦,等.滴灌施肥对‘特罗维它’甜橙生长结果的影响[J].园艺学报,2011,38(1):1-6.
- [30] 孙晓硕,谢同俊,蔡新华,等.水肥一体化管理对葡萄产量和品质的影响[J].农村科技,2017(6):22-25.

(上接第254页)