应用生态学报 2020年6月 第31卷 第6期 http://www.cjae.net
Chinese Journal of Applied Ecology, Jun. 2020, 31(6): 1867-1874 DOI: 10.13287/j.1001-9332.202006.030

不同水肥一体化方式对苹果氮素吸收利用特性及产量和品质的影响

田 歌[1] 李慧峰[2] 田 蒙[1] 刘晓霞[1] 陈 倩[1] 朱占玲[1] 姜远茂[1] 葛顺峰[1*]
([1]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; [2]山东省果树研究所, 山东泰安 271000)

摘 要 以'嘎啦/八棱海棠'为试材,借助^{15}N同位素示踪技术,研究了撒施(T_1)、滴灌施氮(T_2)和渗灌施氮(T_3)对嘎啦苹果氮素吸收利用、分配特性和产量品质的影响,以期进一步完善苹果园水肥一体化技术,挖掘提高氮素利用率的途径。结果表明: T_3处理苹果叶片的叶面积、叶绿素和氮含量显著高于T_1和T_2处理。各时期土壤矿化氮(N_{min})含量在20~40 cm土层表现为$T_3>T_2>T_1$处理,在0~20 cm土层表现为$T_2>T_3>T_1$处理。同一器官的Ndff值(树体各器官从肥料中吸收到的^{15}N占该器官全氮量的比例)在各时期均以T_3处理最高,T_2其次,T_1处理最低。果实成熟期的树体^{15}N利用率表现为$T_3>T_2>T_1$处理,其中T_3处理的树体^{15}N利用率为24.2%,分别是T_2和T_1处理的1.19和1.65倍。果实成熟期T_1处理的^{15}N分配率在营养器官最高,T_2处理在贮藏器官最高,T_3处理在生殖器官最高。各处理的单果重、产量、可溶性固形物、硬度、可溶性糖及糖酸比均以T_3处理最高,T_2其次,T_1处理最低。渗灌施氮处理显著促进了嘎啦苹果树体叶片生长和氮素利用,并提高了果实产量和品质。

关键词 渗灌施氮; 滴灌施氮; 撒施; ^{15}N利用率; ^{15}N分配率; 产量; 品质

Effects of different integration of water and fertilizer modes on the absorption and utilization of nitrogen fertilizer and fruit yield and quality of apple trees.

TIAN Ge[1], LI Hui-feng[2], TIAN Meng[1], LIU Xiao-xia[1], CHEN Qian[1], ZHU Zhan-ling[1], JIANG Yuan-mao[1], GE Shun-feng[1*]
([1]*College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an* 271018, *Shandong, China*; [2]*Shandong Fruit Research Institute, Tai'an* 271000, *Shandong, China*).

Abstract: We examined nitrogen use efficiency of ^{15}N-urea of 15-year-old 'Gala' apple trees by broadcast fertilization (T_1), nitrogen fertilization with drip irrigation (T_2) and nitrogen fertilization with subsurface irrigation (T_3), to further improve the water and fertilizer integration technology for apple orchard and to improve nitrogen utilization efficiency. The results showed that leaf area, chlorophyll, and leaf nitrogen content of leaves were significantly higher in T_3 treatment than those in T_1 and T_2 treatments. Soil mineral nitrogen content (20-40 cm) in each period followed the order of $T_3>T_2>T_1$, while that in 0-20 cm followed an order of $T_2>T_3>T_1$. The Ndff value at organ level (the contribution rate of the ^{15}N amount absorbed by various organs of the tree to the total nitrogen content of the organ) was the highest in T_3 treatment in each period, followed by T_2 and T_1 treatments. The utilization rate of ^{15}N in the fruit ripening period followed an order of $T_3>T_2>T_1$. The ^{15}N utilization rate of T_3 reached 24.2%, being 1.19 and 1.65 times of T_2 and T_1, respectively. The ^{15}N distribution rate in the fruits during the fruit maturity stage was the highest in T_1 treatment, while that in the storage organs was the highest in T_2 treatment and that in the reproduction organs was the

本文由国家重点研发计划项目(2016YFD0201100)、山东省重大科技创新工程项目(2018CXGC0208)、国家自然科学基金项目(31501713)、国家现代农业产业技术体系建设项目(CARS-27)和山东省泰山学者工程专项资助 This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFD0201100), the Major Scientific and Technological Innovation Project in Shandong Province (2018CXGC0208), the National Natural Science Foundation of China (31501713), the National Modern Agricultural Industrial Technology System Construction Fund Project (CARS-27), and Special Fund of Shandong Taishan Scholars Project.
2019-09-29 Received, 2020-04-15 Accepted.
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: geshunfeng210@126.com

highest in T_3 treatment. The single fruit weight, yield, soluble solids, hardness, soluble sugar and sugar-acid ratio were the highest in T_3 treatment, followed by T_2 and T_1 treatments. In summary, nitrogen application by percolation irrigation (subsurface application) significantly promoted leaf growth and nitrogen utilization of apple tree, and improved fruit yield and quality.

Key words: nitrogen fertilization with subsurface irrigation; nitrogen fertilization with drip irrigation; broadcast fertilization; utilization rate of ^{15}N; partition rate of ^{15}N; yield; quality.

氮是植物体的重要组成成分。植物对氮的需求量比其他任何一种营养元素都高[1-2]。氮的合理使用不但可以提高果树叶片的光合效能[3-4],增加光合产物积累,还能促进花芽分化,提高坐果率,增加平均单果重[5]。当前,我国苹果生产上氮肥使用不合理。据统计,我国苹果园氮肥的单位面积施用量是美国的 2.5 倍,而产量仅为美国的一半左右[6]。过量施氮不仅导致氮素利用率过低,还带来了氮沉降增加[7]、温室效应加剧[8]、土壤酸化[9]等生态环境问题。因此,如何通过科学施氮来促进氮素高效利用是目前我国苹果生产中面临的关键问题之一。

果树水肥一体化技术是指在有水压的条件下,通过施肥装置和注水器将水分和肥料混合输送至果树根系附近的一种技术。肥料撒施属于农民传统的施肥方法,即将肥料施于土壤表层。这种施肥方法易挥发,难以被果树根系吸收。滴灌施肥是最常见的水肥一体化方式之一,可以实现水分和养分在时空上的高效匹配,满足作物对水分和养分的实时需求。渗灌技术是将渗灌管埋设在地下,将灌溉水直接输送至果树根层土壤,具有灌水量少、土壤湿度变幅小、蒸发、渗漏损失小等优点。滴灌施肥可以有效减少苹果[10]和梨树[11]的氮肥用量和氮素流失,提高黄瓜[12]和富士苹果幼树[13]的氮素利用率,有利于西瓜产量的增加和品质的提高[14]。与滴灌技术相比,渗灌的保墒效果更好,能为油葵生长发育提供更稳定的土壤环境,有利于增产增收[15],还可以降低日光温室内空气相对湿度,延缓番茄植株早衰[16]。当前,苹果生产上以地表滴灌施肥为主,相关研究也大多集中在地表滴灌施肥技术方面,关于地下渗灌施肥技术的研究相对较少。近年来,随着苹果园化肥用量的不断加大,土壤板结问题越来越严重,影响了水分和养分的运移,同时抑制了植株根系的生长发育。因此,本试验借助^{15}N 同位素示踪技术,研究撒施、滴灌施氮和渗灌施氮 3 种模式对苹果氮素吸收利用特性及果实产量和品质的影响,以期为进一步完善苹果园水肥一体化技术提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2018 年 3 月 10 日—8 月 30 日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‘嘎啦/八棱海棠’,株行距为 4.5 m×5 m。试验地土壤有机碳 7.74 g·kg^{-1}、硝态氮 24.14 mg·kg^{-1}、铵态氮 15.65 mg·kg^{-1}、有效磷 27.94 mg·kg^{-1}、速效钾 188.24 mg·kg^{-1},土壤 pH 为 6.35。选取无病虫害、生长势基本一致的树体 27 株,设撒施(T_1,以树干底部 20 cm 为半径,将肥料呈环状均匀撒入)、滴灌施氮(T_2,距树干底部 20 cm 为半径铺设环状管道,管道间隔 15 cm 设一个滴灌口)、渗灌施氮(T_3,以树干底部 20 cm 为半径,在深 20 cm 处挖环状沟铺设渗灌管道)3 个处理,3 株为 1 个重复,每处理 3 个重复。

分别于 3 月 10 日、4 月 10 日、5 月 31 日每次每株施入水溶肥($N:P_2O_5:K_2O=10:5:10$)1.5 kg 即纯氮 150 g,同时,每株施入 3.33 g ^{15}N-尿素(上海化工研究院生产,丰度 10.16%),每株共计施入 460 g 纯氮,包括 10 g ^{15}N-尿素。T_2 和 T_3 处理铺设管道型号一致,灌溉流速为 8 L·h^{-1},各处理供水量保持一致。分别于 4 月 9 日(盛花期)、5 月 30 日(新梢旺长期)、6 月 30 日(果实膨大期)进行局部取样(新梢、叶片、果实)。于果实成熟期(8 月 30 日)对 3 个处理进行整株树体破坏性取样。整株样品解析为营养器官(叶片和一年生枝)、贮藏器官(多年生枝、中心干和根)和生殖器官(果实)。

1.2 测定方法和计算公式

1.2.1 各器官氮含量和^{15}N 丰度的测定 将上述解析的植株样品按照去离子水→洗涤剂→去离子水→1%盐酸→3 次去离子水的顺序冲洗后,用烘箱于 105 ℃下杀青 30 min,然后在 80 ℃恒温下烘干至恒重,用 JFSO-100 植物粉碎机粉碎后过 60 目筛,混匀装入自封袋备用。用 KN680 全自动凯氏定氮仪(凯氏定氮法)测定[17]样品全氮含量,用 ZHT-03 质谱计(北京分析仪器厂)测定^{15}N 丰度。质谱仪的基本原

理是：首先将样品高温煅烧转化成气体，在离子源中将气体分子进行离子化，接着将离子化气体打入飞行管射入一个固定的磁场，经过磁场分离偏转，不同荷质比的同位素离子彻底分离后转化为电信号，从而定量测出各同位素之间的比值，通过一系列公式最终转化为^{15}N丰度，所采用的标准物质为 IAEA 600 cafeine。

1.2.2 叶片叶面积指数和叶绿素含量的测定　于果实成熟期（8 月 30 日），在每棵树的树冠外围东南西北 4 个方位随机选取新梢中部叶片 10 片，用 Taxin-1241 叶面积仪测定叶面积，并计算叶面积指数，用 SPAD-502P LUS 叶绿素测定仪测定叶绿素含量。

1.2.3 土壤矿化氮（N_{min}）的测定　分别于 4 月 9 日、5 月 30 日、6 月 30 日、8 月 30 日采集土样。土样采集位置距施肥的环状沟内外两侧 5 cm，采集 0~20、20~40 cm 两个土层样品。用百分之一天平称取 5.0 g 新鲜土样于三角瓶中，用 2 mol·L^{-1}的 KCl 溶液（100 mL）浸提土壤，振荡 1 h 后过滤，使用 AA3 流动注射分析仪测定，N_{min}为铵态氮和硝态氮之和。

1.2.4 果实产量和品质检测　于果实成熟期（8 月 30 日），在每棵树 4 个不同方位随机采取 30 个果实，用于平均单果重、可溶性固形物含量、可滴定酸含量、硬度等指标的测量。单果重用百分之一电子天平称量，使用手持折光仪测定可溶性固形物含量，采用酸碱中和滴定法[18]测定可滴定酸的质量分数，用 GY-1 型手持硬度计测定果实硬度，使用电子秤计算产量。

1.3　计算公式

植株器官从肥料中吸收的^{15}N量占该器官全氮量的比例（$Ndff_p$，%）=（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%

^{15}N利用率=[各器官 $Ndff_p$（%）×各器官全氮量（g）]/^{15}N施用量（g）×100%

^{15}N分配率=各器官^{15}N吸收量（g）/总^{15}N吸收量（g）×100%

^{15}N残留率=[$Ndff_s$（%）×土层体积×土壤容重×土层全氮量]/^{15}N施入量（g）×100%

^{15}N损失率=100%−^{15}N利用率−^{15}N残留率

1.4　数据处理

用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据处理，用 SPSS 软件进行单因素方差分析（one-way ANOVA），用 LSD 法进行差异显著性检验，显著性水平设定为 $\alpha=0.05$。

2　结果与分析

2.1　不同水肥一体化方式对苹果叶片叶面积、叶绿素和叶片氮含量的影响

由表 1 可知，不同处理嘎啦苹果叶片的叶绿素含量、叶面积指数和氮含量均有显著差异，且各指标均表现为渗灌施氮>滴灌施氮>撒施。其中，撒施处理的叶面积、叶绿素和氮含量较低，分别为 45.16、25.13 cm^2和 1.8%；滴灌施氮处理的叶面积、叶绿素和氮含量显著高于撒施处理，分别为 48.34、28.04 cm^2和 2.2%；渗灌施氮处理的叶面积、叶绿素和氮含量最高，其叶面积、叶绿素、氮含量分别是撒施和滴灌施氮处理的 1.24 和 1.12 倍、1.19 和 1.11 倍、1.28 和 1.07 倍。表明水肥一体化技术有效促进了苹果树体的叶片生长发育和氮含量的提升，其中渗灌施氮效果较好。

2.2　不同水肥一体化方式对苹果果实产量和品质的影响

由表 2 可知，撒施、滴灌施氮和渗灌施氮处理的苹果产量和品质显著不同。渗灌施氮处理的平均单果重和单株产量显著高于滴灌施氮和撒施处理，分别为 159.46 g 和 66.13 kg，平均单果重是撒施和滴灌施氮处理的 1.22 和 1.12 倍，单株产量比撒施和滴灌施氮处理分别增加了 23.8%和 8.4%。撒施、滴灌施氮和渗灌施氮处理果实的可溶性固形物、硬度和可溶性糖含量存在显著差异，且均以渗灌施氮处理最大，滴灌施氮处理次之，撒施处理最小。不同处理的可滴定酸含量无显著差异，而可溶性糖含量表现为渗灌施氮>滴灌施氮>撒施。因此，渗灌施氮处理的果实糖酸比较高，为 30.73，滴灌施氮处理其次，为 28.92，撒施处理最低，仅为 27.43。

表 1　不同水肥一体化方式对苹果叶片叶面积、叶绿素（SPAD）、氮含量的影响

Table 1　Effects of different integration of water and fertilizer modes on leaf area, SPAD and nitrogen content of apple

处理 Treatment	叶面积 Leaf area（cm^2）	叶绿素 SPAD	氮含量 Nitrogen content（%）
T_1	25.13c	45.16c	1.8c
T_2	28.04b	48.34b	2.2b
T_3	31.24a	53.57a	2.4a

T_1：撒施 Broadcast nitrogen fertilization；T_2：滴灌施氮 Nitrogen fertilization with drip irrigation；T_3：渗灌施氮 Nitrogen fertilization with subsurface irrigation. 表格中不同的小写字母表示各处理差异显著（$P<0.05$）Different lowercase letters meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

表 2 不同水肥一体化方式对苹果果实产量和品质的影响

Table 2 Effects of different integration of water and fertilizer modes on fruit yield and quality of apple

处理 Treatment	平均单果重 Average single fruit weight (g)	平均单株产量 Average yield per plant (kg)	可溶性固形物含量 Soluble solid content (%)	硬度 Firmness ($kg \cdot cm^{-2}$)	可溶性糖含量 Soluble sugar content (%)	可滴定酸含量 Titratable acids content (%)	糖酸比 Sugar acid ratio
T_1	159.46c	66.13c	14.6c	7.22c	12.9c	0.5a	27.43c
T_2	174.43b	75.47b	15.7b	7.66b	13.6b	0.5a	28.92b
T_3	194.72a	81.84a	16.4a	8.12a	14.1a	0.5a	30.73a

2.3 不同水肥一体化方式对苹果成熟期各器官 $Ndff_p$ 的影响

由表 3 可知,树体各器官的 $Ndff_p$ 值随着物候期的推移均呈上升趋势,并在果实成熟期达到最高值。在盛花期,花器官和叶片的 $Ndff_p$ 值为全年最低水平,仅为 0.1%~0.3%,此时新生器官的生长发育主要依赖果树上一年贮藏的营养;在新梢旺长期,相同处理下的 $Ndff_p$ 值表现为新梢>叶片>果实,说明新梢作为生长中心增强了对养分的竞争;在果实膨大期和果实成熟期,滴灌施氮和渗灌施氮处理的 $Ndff_p$ 值呈现出果实>新梢>叶片的特性,而撒施处理的果实 $Ndff_p$ 值要低于营养器官,说明不同处理对树体发育后期氮素分配有显著影响。同一器官的 $Ndff_p$ 值在所有时期均以渗灌施氮处理最高,撒施处理最低,滴灌施氮处理处于二者之间。

表 3 不同生长时期苹果植株各器官的 $Ndff_p$ 值

Table 3 $Ndff_p$ values in different organs of apple plant at different growth stages (%)

器官 Organ	处理 Treatment	盛花期 Full-bloom stage	新梢旺长期 Shoot growing stage	果实膨大期 Fruit rapid-swelling stage	果实成熟期 Fruit maturity stage
果(花)	T_1	0.2b	0.5c	1.1c	1.4c
Fruit	T_2	0.2b	0.8b	1.5a	1.8b
(flower)	T_3	0.3a	1.1a	1.9b	2.9a
叶片	T_1	0.1b	0.7c	1.4b	1.9c
Leaf	T_2	0.1b	0.8b	1.5a	1.1b
	T_3	0.2a	1.3a	1.0c	1.6a
一年生枝	T_1	–	0.9c	1.5a	1.6c
One-year-old branch	T_2	–	1.0b	1.4a	1.3b
	T_3	–	1.4a	1.1b	1.6a
多年生枝	T_1	–	–	–	0.4c
Perennial	T_2	–	–	–	0.9a
branch	T_3	–	–	–	0.6b
中心干	T_1	–	–	–	0.7b
Trunk	T_2	–	–	–	1.0a
	T_3	–	–	–	0.7b
根	T_1	–	–	–	0.5c
Root	T_2	–	–	–	0.7b
	T_3	–	–	–	0.8a

– 无数据 No data.

2.4 不同水肥一体化方式对苹果果实成熟期各器官 ^{15}N 分配率的影响

如图 1 所示,在果实成熟期,撒施、滴灌施氮和渗灌施氮处理的树体各器官 ^{15}N 分配率存在显著差异。撒施处理的 ^{15}N 分配率相对其他两处理在各器官分配较为均衡。其中,营养器官(新梢和叶片)的 ^{15}N 分配率最大,为 36%,贮藏器官和生殖器官的 ^{15}N 分配率差异不显著;滴灌施氮处理贮藏器官(多年生枝、中心干和根系)的 ^{15}N 分配率最大,为 40%;而渗灌施氮处理以生殖器官(果实)的 ^{15}N 分配率最大,为 39%。说明撒施、滴灌施氮和渗灌施氮处理下树体有不同的 ^{15}N 分配特性。

2.5 不同水肥一体化方式对苹果树体 ^{15}N 利用率、残留率和损失率的影响

由表 4 可知,不同水肥一体化方式对苹果植株的 ^{15}N 利用率、残留率和损失率影响显著,撒施处理的树体 ^{15}N 利用率最低,仅为14.7%,渗灌施氮处理

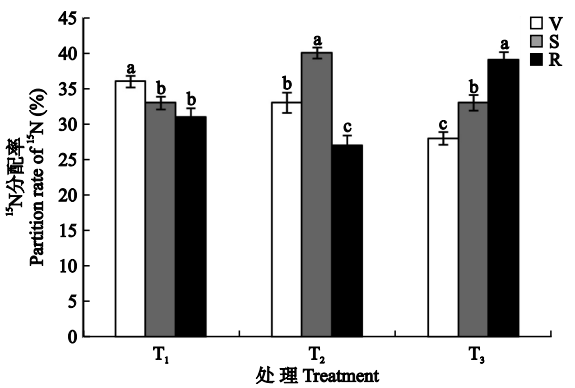


图 1 不同水肥一体化方式下果实成熟期各器官的 ^{15}N 分配率

Fig.1 Partition rate of ^{15}N in different organs at fruit maturity stage under different integration of water and fertilizer modes (mean±SE).

V: 营养器官 Vegetative organ; S: 贮藏器官 Storage organ; R: 生殖器官 Reproductive organ. T_1: 撒施 Broadcast nitrogen fertilization; T_2: 滴灌施氮 Nitrogen fertilization with drip irrigation; T_3: 渗灌施氮 Nitrogen fertilization with subsurface irrigation.不同小写字母表示各处理的差异显著($P<0.05$) Different lowercase letters meant significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

表 4　不同水肥一体化方式对苹果树体^{15}N 吸收、利用、残留和损失的影响

Table 4　Effects of different integration of water and fertilizer modes on ^{15}N absorption, utilization, residual and loss rate of apple tree

处理 Treatment	^{15}N 吸收量 ^{15}N absorption (g)	^{15}N 利用率 ^{15}N utilization rate (%)	^{15}N 残留量 ^{15}N residual (g)	^{15}N 残留率 ^{15}N residual rate (%)	^{15}N 损失率 ^{15}N loss rate (%)
T_1	0.71c	14.7c	1.11c	23.1c	62.2a
T_2	0.98b	20.3b	1.49b	31.1b	48.5b
T_3	1.17a	24.2a	1.61a	33.6a	42.1c

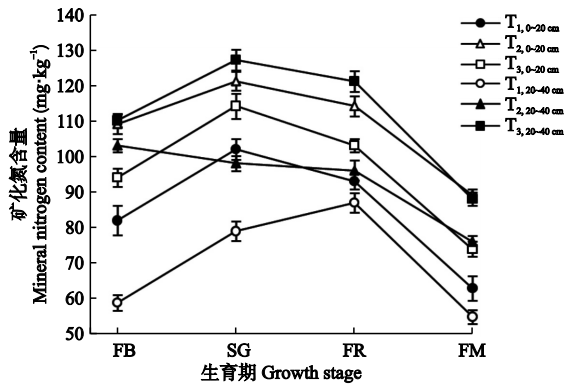


图 2　不同水肥一体化方式对不同生长时期各土层土壤矿化氮含量的影响

Fig.2　Different integration of water and fertilizer modes on soil mineral nitrogen content in different depths at different growth stages (mean±SE).

FB: 盛花期 Full-bloom stage; SG: 新梢旺长期 Shoot growing stage; FR: 果实膨大期 Fruit rapid-swelling stage; FM: 果实成熟期 Fruit maturity stage.

的^{15}N 利用率最高,分别是撒施和滴灌施氮处理的 1.65 和 1.19 倍。^{15}N 残留率也表现为撒施<滴灌施氮<渗灌施氮的趋势,且差异达到显著水平。撒施处理的^{15}N 损失率显著高于滴灌施氮和渗灌施氮处理,为 62.2%,分别是滴灌施氮和渗灌施氮处理的 1.28和 1.48 倍。

2.6　不同水肥一体化方式对苹果不同时期不同土层土壤 N_{min} 含量的影响

如图 2 所示,不同土层土壤的矿化氮(铵态氮+硝态氮,N_{min})含量在不同处理下有所不同。其中,0~20 cm土层的 N_{min} 含量表现为滴灌施氮>渗灌施氮>撒施,20~40 cm 土层的 N_{min} 含量表现为渗灌施氮>滴灌施氮>撒施。随着土层的下降,撒施处理的 N_{min} 含量下降幅度较大,滴灌施氮处理的 N_{min} 含量在 0~20 cm 土层较高,而渗灌施氮处理的 N_{min} 含量在 20~40 cm 土层较高。

3　讨　　论

营养器官的优良生长是果树生长发育的关键,其中叶片的生长状况尤为重要。叶片的叶绿素含量和叶面积指数可以反映叶片的生长状况。前人研究表明,滴灌施肥能有效提高苹果叶片的叶绿素含量[10,19],促进苹果砧木幼苗的生长[20]。渗灌施肥可显著提高葡萄叶片叶绿素含量[21]。目前相关的研究大多集中在对滴灌或渗灌的单独试验上。本试验将撒施、滴灌和渗灌 3 种施氮方式加以比较,发现嘎啦苹果叶片的叶面积、叶绿素和叶片氮含量差异显著,且均以渗灌施氮水平最高,滴灌其次,撒施最低。说明苹果滴灌与渗灌施氮均可显著促进果树叶片的生长与叶绿素合成,从而改善叶片质量,有利于光合作用,各处理中以渗灌施氮效果最好。

滴灌施肥下柑橘的氮素利用率为 53%,而土施氮素的利用率仅为 12%~15%;磷肥利用率也由土施的 12%~15%提高到了滴灌的 29%[22]。郭新正等[23]认为,棉花应用膜下滴灌技术可以显著提高水肥利用率。Coston 等[24]发现,桃树滴灌施肥比土施可节约 25%~50%的氮肥。本试验中,渗灌施氮的树体^{15}N 利用率最高,为 24.2%,滴灌次之,为 20.3%,而撒施仅为 14.7%。说明水肥一体化技术能显著提高果树对氮素的利用,其中以渗灌施氮的效果较好。于波等[25]在 6 年生'烟富 3/SH6/平邑甜茶'上的研究结果显示,其^{15}N 利用率为 12.2%,略低于本试验结果。这是因为其试验处理为 3 月初到 5 月底,试验周期较短,且早春土壤温度较低,根系活力较差,树体对氮素的吸收有限。陈倩等[26]研究表明,15 年生嘎啦苹果上的^{15}N 利用率为 14.6%~28.4%,最高值略高于本试验结果。这是因为其试验处理为无机肥分次配施,有机肥的施用改善了土壤微生物环境,促进了根系生长,提高了根系的有效吸收面积,从而增强了对氮素的吸收。

何永梅[27]认为,如果将肥料撒施在土壤表层,其易挥发的特性导致肥料很难进入果树根层,不仅雨水或灌溉水会造成其产生一定的流失,地表生长的杂草也容易造成养分竞争。葛顺峰等[28]也认为,施氮过浅导致暴露在地表的氮肥易挥发,从而难以被果树根系吸收,导致氮素利用率较低。本试验中,撒施处理在 20~40 cm 土层的土壤 N_{min} 含量显著低于 0~20 cm 土层,且撒施处理的树体^{15}N 利用率最低,进一步支持了上述研究结论。前人在葡萄[29]、甜樱桃[30]和苹果[31]上的研究发现,在树体根层施氮可增强树体对氮的利用率,满足树体在各个时期对氮素的需要。根系分布的差异导致了不同植株的适宜施肥位置存在差异。前人对苹果根系的分布进

行了研究,发现土壤表层下 15~40 cm 是苹果根系集中分布层[32]。李宏等[33]也认为,苹果吸收根的根长密度和根表面积最大值出现在 30~40 cm 土层;秦玲等[34]在红富士上的研究也发现,直径小于 2 mm 的吸收根密集分布于 20~40 cm 土层。本试验中,渗灌处理在 20~40 cm 土层的 N_{min} 含量显著高于 0~20 cm 土层,其他处理在同一土层中也表现为最高水平,因此,渗灌施氮处理增加了树体根层的土壤氮素浓度,增加了根系与氮素的接触面积,使更多的氮素作用于苹果树体根层,有利于根系的吸收。根层氮素浓度的增加也可以提高树体的根系密度和根系活力,进一步提高其氮素利用率[35]。

不同水肥一体化施氮方式不仅影响了树体的氮素利用,还影响了氮素分配。本试验中,撒施处理的树体营养器官的 ^{15}N 分配率最高,说明撒施处理的氮素主要用于树体的营养生长。这与赵林等[36]的研究结论一致。滴灌施氮处理树体在果实成熟期贮藏器官的 ^{15}N 分配率最高,且生殖器官的 ^{15}N 分配率也处于较高的水平,说明滴灌施氮在保障果树生殖器官生长发育的同时,有利于树体提高贮藏器官营养水平和第二年树体新生器官的建造。而渗灌施氮处理的树体在果实成熟期生殖器官的 ^{15}N 分配率最高,说明渗灌施氮有利于果实的生长发育和氮素积累。这可能是因为渗灌施氮增加了根层土壤 N_{min} 含量,促进了根系的生长发育,提高了细根密度。这不仅促进了氮素吸收,细根合成的细胞分裂素也能进一步促进地上部生殖器官的生长与氮素分配[37]。

前人研究表明,滴灌施氮可以提高石榴[38]等果树的产量,渗灌施氮能提升樱桃产量和品质[39-40]。本试验中,撒施、滴灌和渗灌施氮处理下,树体的产量和品质有显著差异。其中,渗灌施氮处理的树体产量最高,比滴灌施氮和撒施处理分别增产 8.4% 和 23.8%。各处理的果实可溶性固形物、硬度和可溶性糖含量差异显著,均表现为渗灌施氮>滴灌施氮>撒施。可见,3 种施氮处理造成了不同的土壤氮素分布,影响了树体对氮素的吸收利用,也进一步影响了果实的产量和品质。其中,渗灌施氮处理的树体氮素利用效率最高,树体生长及果实产量和品质效果最好。而不同深度的渗灌施氮处理对树体氮素吸收利用及生长发育的影响还有待于进一步的研究。

参考文献

[1] Wang YY, Hsu PK, Tsay YF. Uptake, allocation and signaling of nitrate. *Trends in Plant Science*, 2012, **17**: 458-467

[2] 张合琼, 张汉马, 梁永书, 等. 植物硝酸盐转运蛋白研究进展. 植物生理学报, 2016, **52**(2): 141-149 [Zhang H-Q, Zhang H-M, Liang Y-S, *et al*. Research progress of nitrate in plant transport mechanism. *Plant Physiology Journal*, 2016, **52**(2): 141-149]

[3] 宋航, 杨艳, 周卫霞, 等. 光、氮及其互作对玉米光合特性与物质生产的影响. 玉米科学, 2017, **25**(1): 121-126 [Song H, Yang Y, Zhou W-X, *et al*. Effect of light, nitrogen and their interaction on photosynthetic traits and matter accumulation of maize. *Journal of Maize Sciences*, 2017, **25**(1): 121-126]

[4] 丁宁, 姜远茂, 魏绍冲, 等. 分次追施 N 肥对苹果砧木-平邑甜茶吸收 ^{15}N-尿素以及叶片衰老的影响. 植物生态学报, 2012, **36**(12): 1286-1292 [Ding N, Jiang Y-M, Wei S-C, *et al*. Effects of fractionated nitrogen application on leaf senescence and ^{15}N-urea uptake and utilization of apple rootstock-*Malus hupenhensis*. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, **36**(12): 1286-1292]

[5] 吴海华, 盛建东, 陈波浪, 等. 不同水氮组合对全立架栽培伽师瓜产量与品质的影响. 植物营养与肥料学报, 2013, **19**(4): 885-892 [Wu H-H, Sheng J-D, Chen B-L, *et al*. Effect of different irrigation and nitrogen levels on the yield and quality of trellis-cultivated custard apple (*Cucumis melo* var. *saccharenus* Naud). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, **19**(4): 885-892]

[6] 葛顺峰, 姜远茂. 苹果化肥农药减施增效技术途径与研究展望. 植物生理学报, 2016, **52**(12): 1768-1770 [Ge S-F, Jiang Y-M. Technical approach and research prospect of saving and improving efficiency of chemical fertilizers and pesticides for apple. *Plant Physiology Journal*, 2016, **52**(12): 1768-1770]

[7] Liu X, Zhang Y, Han W, *et al*. Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature*, 2013, **494**: 459-462

[8] Zhang XF, Dou ZX, He P, *et al*. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, **110**: 8375-8380

[9] Guo JH, Liu XJ, Zhang Y, *et al*. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, **327**: 1008-1010

[10] 路永莉, 高义民, 同延安, 等. 滴灌施肥对渭北旱源红富士苹果产量与品质的影响. 中国土壤与肥料, 2013(1): 48-52 [Lu Y-L, Gao Y-M, Tong Y-A, *et al*. Effects of fertigation on yield and quality of Fuji apple in Weibei dry-land region. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2013(1): 48-52]

[11] 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. 农业工程学报, 2008, **24**(7): 49-53 [Huang L-H, Shen G-X, Qian X-Y, *et al*. Impacts of drip fertilizer irrigation on nitrogen use efficiency and total nitrogen loss load. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, **24**(7): 49-53]

[12] 李生平，武雪萍，龙怀玉，等.负压水肥一体化灌溉对黄瓜产量和水、氮利用效率的影响. 植物营养与肥料学报，2017，**23**(2)：416-426［Li S-P，Wu X-P，Long H-Y，*et al*. Water and nitrogen use efficiencies of cucumber under negatively pressurized fertigation. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*，2017，**23**(2)：416-426］

[13] 任饴华，丰艳广，陈建明，等. 水氮耦合对苹果幼树生长及^{15}N 吸收利用的影响. 山东农业科学，2015，**47**(5)：49-53［Ren Y-H，Feng Y-G，Chen J-M，*et al*. Influence of water-nitrogen coupling on growth and ^{15}N absorption and utilization of apple saplings. *Shandong Agricultural Sciences*，2015，**47**(5)：49-53］

[14] 赵伟杰，姜晓燕，刘建伟. 设施西瓜水肥一体化技术研究. 现代农业科学，2013(17)：115-117［Zhao W-J，Jiang X-Y，Liu J-W. Study on integrated technology of watermelon and water fertilizer in facility. *Modern Agricultural Science and Technology*，2013(17)：115-117］

[15] 李积铭，李和平，李爱国，等. 膜下滴灌和膜下渗灌对油葵生长发育影响比较. 分子植物育种，2018，**16**(12)：4119-4123［Li J-M，Li H-P，Li A-G，*et al*. Influence of drop irrigation under film and seepage irrigation under film methods on growth of oil sunflower. *Molecular Plant Breeding*，2018，**16**(12)：4119-4123］

[16] 秦勇，王惠林，杨安，等. 渗灌与滴灌在日光温室早春番茄上的比较试验. 农业科技通讯，2011(8)：71-73［Qin Y，Wang H-L，Yang A，*et al*. Comparative experiment of subsurface irrigation and drip irrigation on early spring stubble tomatoes in solar greenhouse. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*，2011(8)：71-73］

[17] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第 3 版. 北京：中国农业出版社，2000：263-268［Bao S-D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis. 3rd Ed. Beijing：China Agriculture Press，2000：263-268］

[18] 丁宁，沙建川，丰艳广，等. 晚秋叶施尿素提高矮化苹果翌春生长及果实品质的效果. 植物营养与肥料学报，2016，**22**(6)：1665-1671［Ding N，Sha J-C，Feng Y-G，*et al*. Foliage application of urea in late autumn will improve growth in the following spring and fruit quality of dwarfed apple. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*，2016，**22**(6)：1665-1671］

[19] 孙霞，柴仲平，蒋平安，等. 水氮耦合对苹果光合特性和果实品质的影响. 水土保持研究，2010，**17**(6)：271-274［Sun X，Chai Z-P，Jiang P-A，*et al*. Effects on the photosynthetic characteristics and the quality of the apple under the water and nitrogen coupling. *Research of Soil and Water Conservation*，2010，**17**(6)：271-274］

[20] 王进鑫，张晓鹏，高保山. 水肥耦合对矮化富士苹果幼树的促长促花作用研究. 干旱地区农业研究，2004，**22**(3)：47-50［Wang J-X，Zhang X-P，Gao B-S. Accelerating function of fertilizer and irrigation on shoot growth and flowering of young dwarfing apple tree. *Agricultural Research in the Arid Areas*，2004，**22**(3)：47-50］

[21] 李涛，张建丰，张江辉，等. 极端干旱区深层坑渗灌灌水量对葡萄代表性生理性状影响研究. 节水灌溉，2011(2)：19-23［Li T，Zhang J-F，Zhang J-H，*et al*. Preliminary study on effect of irrigation amount on representative physiological traits of grapes during different phenol-phases under deep pit infiltration irrigation in extremely arid areas. *Water Saving Irrigation*，2011(2)：19-23］

[22] Bar-Yosef B. Advances in fertigation. *Advances in Agronomy*，1999，**65**：1-77

[23] 郭新正，阿曼古丽，赖波，等. 棉花膜下滴灌酸性液体肥的试验效果. 土壤肥料，2004(1)：19-21［Guo X-Z，A M-G，Lai B，*et al*. Effect of drip irrigation under plastic film using acid liquid fertilizer on field planted cotton. *Soils and Fertilizers*，2004(1)：19-21］

[24] Coston DC，Ponder HG，Kenworthy AL. Fertilizing peach trees through a trickle irrigation system. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*，1978，**9**：187-191

[25] 于波，何流，葛顺峰，等. 苹果摘叶及枝干喷施尿素对春季土施^{15}N-尿素吸收利用的影响. 山东农业大学学报：自然科学版，2019，**50**(3)：377-381［Yu B，He L，Ge S-F，*et al*. Effects of apple leaf picking and spraying urea over branches on absorption and utilization of ^{15}N-urea fertilized in soil in spring. *Journal of Shandong Agricultural University*：*Natural Science*，2019，**50**(3)：377-381］

[26] 陈倩，刘照霞，邢玥，等. 有机无机肥分次配施对嘎啦苹果生长、^{15}N-尿素吸收利用及损失的影响. 应用生态学报，2019，**30**(4)：1367-1372［Chen Q，Liu Z-X，Xing Y，*et al*. Effects of split combined application of organic-inorganic fertilizers on plant growth，^{15}N absorption，utilization and loss of Gala apple tree. *Chinese Journal of Applied Ecology*，2019，**30**(4)：1367-1372］

[27] 何永梅. 如何把握好作物的施肥深度. 四川农业科技，2013(11)：50-55［He Y-M. How to grasp the depth of fertilization of crops. *Science and Technology of Sichuan Agriculture*，2013(11)：50-55］

[28] 葛顺峰，姜远茂，魏绍冲，等. 不同供氮水平下幼龄苹果园氮素去向初探. 植物营养与肥料学报，2011，**17**(4)：949-955［Ge S-F，Jiang Y-M，Wei S-C，*et al*. Nitrogen balance under different nitrogen application rates in young apple orchards. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*，2011，**17**(4)：949-955］

[29] 汪新颖，周志霞，王玉莲. 等. 不同施肥深度红地球葡萄对^{15}N 的吸收、分配与利用特性. 植物营养与肥料学报，2016，**22**(3)：776-785［Wang X-Y，Zhou Z-X，Wang Y-L，*et al*. Characteristics of absorption，distribution and utilization of ^{15}N in red global grape under fertilizer application in different depths. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*，2016，**22**(3)：776-785］

[30] 赵凤霞，姜远茂，彭福田，等. 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，*et*

al. Characteristics of urea ^{15}N absorption, allocation, and utilization by sweet-cherry. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, **19**(3): 686-690]

[31] 李红波, 葛顺峰, 姜远茂, 等. 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. 中国农业科学, 2011, **44**(7): 1408-1414 [Li H-B, Ge S-F, Jiang Y-M, *et al*. Characteristics of absorption, distribution and utilization of ^{15}N-urea applied in different depths in Gala (*Malus hupehensis*). *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, **44**(7): 1408-1414]

[32] 李慧峰, 吕德国, 李林光, 等. 苹果根系构型的演化. 华北农学报, 2009, **24**(S1): 323-326 [Li H-F, Lyu D-G, Li L-G, *et al*. Evolvement of root system architecture in apple. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2009, **24**(S1): 323-326]

[33] 李宏, 董华, 郭光华, 等. 阿克苏红富士苹果盛果期根系空间分布规律. 经济林研究, 2013, **31**(2): 78-85 [Li H, Dong H, Guo G-H, *et al*. Spatial distribution rule of root system of Red Fuji apple trees at full bearing period in Akesu. *Nonwood Forest Research*, 2013, **31**(2): 78-85]

[34] 秦玲, 魏钦平, 李嘉瑞, 等. 成龄苹果树形改造对根系生长分布的影响. 果树学报, 2006, **23**(1): 105-107 [Qin L, Wei Q-P, Li J-R, *et al*. Effects of reformation of the apple tree canopy on root distribution. *Journal of Fruit Science*, 2006, **23**(1): 105-107]

[35] 李佳, 闫田力, 赵新节. 三种无核葡萄根系分布特点及与早期丰产性能关系的研究. 中外葡萄与葡萄酒, 2004(6): 15-17 [Li J, Yan T-L, Zhao X-J. Study on distribution characteristics of root systems of three seedless grapes and the relation with early fertile capability. *Sino-Overseas Grapevine & Wine*, 2004 (6): 15-17]

[36] 赵林, 姜远茂, 彭福田, 等. 苹果园春季土施尿素的利用及其在土壤中的累积. 园艺学报, 2009, **36**(12): 1805-1809 [Zhao L, Jiang Y-M, Peng F-T, *et al*. Studies on utilization and accumulation dynamics of spring soil ^{15}N-urea application in apple orchard. *Acta Horticulturae Sinica*, 2009, **36**(12): 1805-1809]

[37] Hoagland L, Carpenter-Boggs L, Granatstein D, *et al*. 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

[38] Sharma S, Patra SK, Ray R. Effect of drip fertigation on growth and yield of Guava cv. Khaja. *Environment and Ecology*, 2011, **29**: 34-38

[39] 高鹏, 耿广坡, 王华伟. 等. 鲁中南山区樱桃渗灌补水效应与节水增产机理. 水土保持学报, 2010, **24**(1): 239-248 [Gao P, Geng G-P, Wang H-W, *et al*. Effects of subsurface irrigation on cherry orchard and its water saving mechanism in hilly area of middle southern part of Shandong Province. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, **24**(1): 239-248]

[40] 高慧敏, 梁玉芹, 宋炳彦. 等. 渗灌在日光温室樱桃番茄上的应用效果研究. 河北农业科学, 2007(5): 17-20 [Gao H-M, Liang Y-Q, Song B-Y, *et al*. Application effects of percolation irrigation on cherry tomato in greenhouse. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2007(5): 17-20]

作者简介 田 歌, 男, 1992 年生, 博士研究生。主要从事果树营养与生理研究。E-mail:1083098081@qq.com

责任编辑 张凤丽

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



田歌, 李慧峰, 田蒙, 等. 不同水肥一体化方式对苹果氮素吸收利用特性及产量和品质的影响. 应用生态学报, 2020, **31**(6): 1867-1874

Tian G, Li H-F, Tian M, *et al*. Effects of different integration of water and fertilizer modes on the absorption and utilization of nitrogen fertilizer and fruit yield and quality of apple trees. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(6): 1867-1874