植物营养与肥料学报 2015,21(2): 421 -430 doi: 10.11674/zwyf.2015.0217
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

根际注射施肥对黄土高原苹果氮素吸收利用及产量和品质的影响

张林森[1], 李雪薇[1], 王晓琳[1], 张立新[2], 吕殿青[3], 王朝辉[3], 韩明玉[1]
(1 西北农林科技大学园艺学院, 陕西杨凌 712100; 2 西北农林科技大学生命科学学院, 陕西杨凌 712100;
3 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要:【目的】在西北黄土高原地区,春季干旱少雨和肥料利用率低限制着生产优质苹果。国外通常应用水肥一体化技术来克服水肥利用率低的问题,但由于其硬件设施要求高,投资大,短期内在我国难以推广。近年来我国采用的根际注射施肥可利用施肥枪将肥料溶液直接注入根际土壤中,施肥成本低且技术简单。本研究利用同位素^{15}N示踪技术,研究根际注射施肥对苹果氮素吸收利用及产量品质的影响,可为黄土高原果园水肥高效利用提供依据。**【方法】**以 9 年生富士/M26/新疆野苹果为试验材料,利用^{15}N尿素标记肥料去向,最后通过 MAT -251 质谱计测^{15}N丰度,得出果树各器官和土壤的肥料利用率。同时利用叶绿素仪(SPAD -502)测定标记叶片的 SPAD 值,用浸以磷酸甘油溶液的海绵进行田间原位测定,得到土壤氨挥发的量,用静态箱—气相色谱法测定土壤的 N_2O 逸失量。综合对比分析黄土高原传统环状开沟撒施肥与根际注射施肥对苹果吸收利用氮素、肥料氮在土壤中残留及果实产量和品质的影响。**【结果】**黄土高原苹果园根际注射施肥的优越性体现在: 1)施肥后一个月内,果园土壤的气态氮素损失发生变化,根际注射施肥比传统环状开沟施肥的氨挥发总量低 54.9%,同时 N_2O 的排放通量低 5.0%。2)根际注射施肥后,促进了肥料在土壤中的扩散范围,扩大了根系肥水吸收容积,叶片和果实吸收的肥料氮比例(Ndff%)在整个生长季始终处于较高水平。生长季末期,根际注射施肥的整株氮素当季吸收率为 53.04%, 比环状开沟施肥提高 12.25 个百分点,表明根际注射施肥有利于氮素更快地被吸收利用,显著提高苹果树的氮素当季利用率。3)生长季末,在 0—60 cm 土层内,根际注射施肥的土壤氮素残留率为 36.55%,而环状开沟施肥为 43.13%,前者显著低于后者。4)在整个生长季内,根际注射施肥处理下的树体新梢叶片内叶绿素含量(SPAD)值一直高于环状开沟施肥。根际注射施肥能提高苹果单株产量和单果重,其单果重和单株产量分别比环状开沟施肥处理提高了 3.8% 和 19.7%。**【结论】**黄土高原地区推广的果树根际注射施肥技术可以有效提高苹果树体氮素的利用率,降低了土壤中的氮素残留。此外注射施肥的深度、注射量、密度和时间均可根据不同时期的养分需要随时调整,使水肥在土壤中均匀分布,达到节水节肥的目的。同时可避免传统施肥时挖坑作业对浅土层吸收根的损伤,降低劳动力成本。综合来看,根际注射施肥是提高黄土高原区旱地苹果树肥水利用率、产量和品质的有效方式之一。

关键词: 苹果; 注射施肥; ^{15}N -示踪; 氮素吸收率; 产量品质
中图分类号: S661.1601; S147.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)02-0421-10

Effects of fertilization with injection to the rhizosphere on nitrogen absorption and utilization, fruit yield and quality of apple in the Loess Plateau

ZHANG Lin-sen[1], LI Xue-wei[1], WANG Xiao-lin[1], ZHANG Li-xin[2], LÜ Dian-qing[3], WANG Zhao-hui[3], HAN Ming-yu[1]
(*1 College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;*
2 College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
3 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

收稿日期: 2014-01-15 **接受日期:** 2014-10-21
基金项目: 国家苹果产业技术体系课题(CARS -28);陕西省科技厅重大攻关项目(2011KTZB02 -02 -05); 农业部公益性行业科研专项(201303104)资助。
作者简介: 张林森(1964—),男,江苏镇江人,博士,副教授,主要从事苹果营养水分生理、水肥高效利用研究。E-mail: Linsenzhang@163.com

Abstract:【**Objectives**】The drought in spring and low fertilizer utilization efficiency limit the high quality apple production in the Loess Plateau in northwest region of China. Fertigation is usually used in abroad to overcome the problem of low fertilizer utilization efficiency. But this technology is difficult to spread in China for its strict requirements of irrigation system and investment at the level of farmer household in the short run. In recent years, fertilization with injection to the rhizosphere is used broadly in many places of China. This technology needs low cost and is simple. ^{15}N urea was used in this experiment as tracer to study the effects of fertilization with injection to the rhizosphere on nitrogen absorption and utilization, fruit yield and quality of apple in the Loess Plateau.【**Methods**】The 9-year-old Fuji trees[*Malus pumila* Mill cv. Red Fuji/M26/*Malus Sieversii* (*Ledeb*) Roem] and ^{15}N tracer element which was measured by MAT-251 mass spectrometer were used to calculate the fertilizer utilization efficiency of various tree organs and soil. SPAD-502 was used to determine the SPAD value of marked leaves. Sponge soaked in a solution of glycerol phosphate was used to measure the amount of field soil ammonia volatilization. Static chambers-gas chromatography was used to determine the soil N_2O fluxes. These methods were used to explore the effect of fertilization either with injection or traditional ring ditch on nitrogen absorption, distribution and utilization, fruit yield and quality of apple in the Loess Plateau.【**Results**】The results show that the advantages of apple orchard fertilization with injection to the rhizosphere in the Loess Plateau are as follows: 1) Within one month after fertilization, the gaseous nitrogen loss in apple orchard changed. The amount of soil ammonia volatilization of fertilization with injection to the rhizosphere was significantly less than the traditional ring ditch fertilization by 54.9%, and the N_2O flux was 5.0%. 2) After fertilization with injection to the rhizosphere, the distribution range of water and fertilizer increased at the same time, the volume of fertilizer absorbed by apple tree roots was expanded eventually, the percentage nitrogen derived from fertilizer (Ndff%) of new shoot leaves and fruits was always at a high level throughout the whole growing season. After the fruits were harvested, the absorption rate of the whole tree was 53.04%, and 12.25 percentage points higher than the control. This result indicated nitrogen was absorbed more quickly following fertilization with injection to the rhizosphere, and nitrogen utilization efficiency was significantly improved. 3) In the end of growth season, the 0-60 cm soil nitrogen residual rates of treatment of fertilization with injection and the control were 36.55% and 43.13%, respectively. And the former was significantly lower than the latter. 4) The chlorophyll content (SPAD value) of new shoot leaves was maintained in higher level than the treatment of traditional ring ditch fertilization in the whole growing season. Compared with traditional ring ditch fertilization, fruit weight and yield of per tree in treatment of fertilization with injection were higher than the control by 3.8% and 19.7%, respectively.【**Conclusions**】The technology of fertilization with injection in the Loess Plateau region can increase tree nitrogen absorption, utilization and decrease soil nitrogen residual significantly. So the water and fertilizer distributed evenly in soil and the purpose to save water and fertilizer can be achieved eventually. Fertilization with injection also avoided the root damage caused by traditional digging and reduced labor costs at the same time. On the whole, fertilization with injection is an effective way to improve the fertilizer and water use efficiency in dryland apple production in the Loess Plateau.

Key words: Fuji apple; fertilization with injection; ^{15}N tracer; nitrogen utilization efficiency; fruit yield and quality

黄土高原是我国苹果的主产区之一,富士品种的栽培面积达到该区苹果总面积的65%以上,但该区干旱少雨和肥料利用率低一直是限制苹果产业发展的瓶颈[1-2]。在美国、意大利、以色列等国,均以发展"水肥一体化技术"为依托来克服水肥利用率偏低的问题。在国外,水肥一体化又称"灌溉施肥"或"肥水灌溉"技术,主要是通过滴灌、微喷灌系统等来施肥。Klein等[3]研究表明,与其他施肥方式相比,苹果园中应用滴灌施肥技术不仅获得了良好的节水节肥效果,也对控制根层土壤中硝酸盐的淋溶发挥显著作用。此外,杨素苗等[4]的研究表明,微灌溉能使树体维持较高的根系活力,同时保持较高的产量和品质。但是这些技术的硬件设施要求高,投资较大,短期内在我国难以普遍推广[5-9]。而在

我国采用的根际注射施肥可利用施肥枪将浓度适宜的肥料溶液直接注入根际土壤中,施肥时无需在树干周围开沟或挖坑。吴小斌等[10]利用设备简单、成本低的施肥枪给桃树施^{15}N标记的尿素,发现注射施肥能够显著提高植株氮素当季利用率,同时提高土壤中其他有效态养分含量和桃树产量。这种施肥方式能够显著减轻劳动强度、提高工作效率,适宜在果园中推广应用。吕丽霞等[11]研究发现,在渭北苹果园根际注射施肥的注射液浓度以10%为最佳,这种施肥方式有益于维持土壤适宜pH和电导率,有效提高土壤酶活性和速效养分含量,可显著提高苹果产量和品质及肥料利用率,且不造成果树根系上浮。这种方法不仅可避免损伤树体根系,同时施肥点分布均匀,可促进土壤中肥料的入渗,提高水肥利用效率。根际注射施肥在生产上的应用已初见成效,但在黄土高原施肥枪施肥后肥料在苹果树的吸收利用未见报道[10-11]。因此,本研究利用同位素^{15}N示踪技术研究根际注射施肥对苹果吸收利用氮素、土壤氨挥发、N_2O逸失、肥料氮在土壤中残留及对果实产量和品质的影响,为黄土高原果园水肥高效利用提供依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地位于陕西省洛川县旧县镇王家村千亩苹果试验园内,东经109°29′,北纬35°16′,海拔1072 m,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温9.2℃、降水量600 mm、日照2552 h、无霜期167 d。

试验区果园为9年生富士树(*Malus pumila* Mill),基砧为新疆野苹果(*Malus sieversii*),中间砧为M26,株行距为2.5 m × 4.0 m。试验前0—40 cm土层土壤有机质含量15.21 g/kg、碱解氮76.83 mg/kg、速效磷24.37 mg/kg、速效钾212.1 mg/kg、土壤pH 8.2,土壤类型为黏黑垆土,质地为中壤土。试验园保持清耕状态,旱作,除降水外无水分补给。试验前一年秋季每株树施10 kg羊粪。

1.2　试验设计

试验于2012年4月10日～10月10日进行,设2个处理:1)根际注射施肥　每株树均用8 L水溶解肥料,沿着树冠外围把肥料溶液注射到根际土壤中,再用2 L水清洗一遍,并注入土壤,每株树均用水10 L,施肥枪注射的土壤深度为20 cm,在树冠外围的环状带上均匀布置20个施肥点,点与点距离为40～50 cm;2)环状开沟施肥　沿着树冠外围挖一条20 cm深、15 cm宽的环状沟,将肥料与少量土壤混匀后均匀撒到环状沟底部,再将挖出的土壤填埋到环状沟里。在生长期,为保持试验的一致性,试验树不追施其他肥料。每个处理选取生长势基本一致,无病虫害的苹果树4株,即4次重复,随机排列,两个处理间设置隔离行。每株施肥种类和施肥量为^{15}N标记尿素12.0 g(上海化工研究院生产,丰度10.35%)和普通尿素258.62 g,重过磷酸钙141.30 g,硫酸钾260.0 g。

1.3　测定项目和方法

1.3.1 土壤氨挥发和N_2O的测定　2012年4月11日开始,应用内径15 cm、高10 cm的PVC管和浸以磷酸甘油溶液的海绵进行氨挥发田间原位测定[12]。每个处理放置6个捕获装置,每日上午8:00取样,第1周每天取样1次,第2～3周视测到的挥发氨数量多少,每1～3天取样1次,以后取样间隔可延长到7天,直至监测不到氨挥发时为止。取样带回来的海绵按照葛顺峰等[13]的方法测定其中氨挥发的量。采用静态箱—气相色谱法测定果园N_2O排放通量[14],采样时间与氨挥发一致。应用同样的方法,在当年没有施肥的苹果树,且远离施肥处理区域的果园内定时随机测定氨挥发和N_2O排放通量。

1.3.2 树体叶片SPAD值的测定　于2012年4月10日在每株试验树上选取10个当年生新梢,并标记中部叶片,每隔30天用叶绿素仪(SPAD-502)测定标记叶片的SPAD值。

1.3.3 果树产量和品质以及氮素吸收分配的测定　2012年5月10日～12月10日,每隔30天采取果树新梢中部叶片;6月10日起至10月10日,每隔30天采取10个果实,测定单果重、果实硬度和可溶性固形物含量。10月10日果实采收时,统计单株产量,并测定果实可滴定酸、可溶性固形物、硬度等品质指标,用渔网将树体整个包住,收集树体全部叶片。12月10日,果树落叶时,统计树体的全部叶片干重,并将树体整体解析为秋梢木质部、秋梢韧皮部、背上枝木质部、背上枝韧皮部、春梢木质部、春梢韧皮部、两年生枝木质部、两年生枝韧皮部、多年生枝木质部、多年生枝韧皮部、主干木质部、主干韧皮部、根茎木质部、根茎韧皮部、粗根(直径>0.2 cm)木质部、粗根(直径>0.2 cm)韧皮部、细根(直径<0.2 cm)、叶片、花芽、叶芽。采集的所有样品称鲜重后,随机取样,按清水—洗涤剂—清水—1%盐酸—3次去离子水顺序冲洗,于105℃杀青30 min,

80℃烘干至恒重,测定所有样品干重,并将其粉碎后过0.25 mm筛,混匀后装袋,用以测定氮素含量。

1.3.4 土壤氮素的测定　2012年5月10日至10月10日,每隔30 d采取土壤样品,取样深度为0—60 cm,每隔20 cm取一个样,每个处理随机均匀选择6个取样点,所采土样按每层均匀混合,按四分法取样。土样取回后自然风干、研磨、过筛,混匀后测定氮素含量。

样品全氮用凯氏定氮法测定;用MAT-251质谱计(德国产)测^{15}N丰度,计算氮肥利用率;用HP6890N型色谱仪测定N_2O浓度,计算排放通量;用1/100天平测单果重;果实纵、横径用电子数显游标卡尺测定;水果硬度用GY-1硬度计测定;果实可溶性固形物用TZ-62手持糖量计测定;可滴定酸用酸碱滴定法测定。

计算公式为:

1)作物从肥料中吸收氮(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;

2)作物从肥料中吸收的氮(Ndff,g)=器官干重(g)×器官全氮量(%)×Ndff%;

3)当季氮肥利用率(%)=植株Ndff(g)/施肥量(g)×100;

4)土壤质量(kg)=土壤体积(m^3)×土壤容重(kg/m^3);

5)土层全氮量(g)=土壤质量(g)×全氮(%);

6)氮肥残留率(%)=Ndff%×土层全氮量(g)/施肥量(g)×100。

1.3.5 注射后水分分布范围和含量的测定　注射后待水分分布稳定1.5 h后,打开剖面,测定水分上下和左右的分布范围,并取样测定土壤含水量。

1.4 数据处理

试验数据经Excel整理后,采用SPSS 17.0软件包进行统计方差分析,用SigmaPlot 10.0软件完成绘图。

2 结果与分析

2.1 根际注射施肥和环状开沟施肥对气态氮损失的影响

不同施肥方式氨挥发速率变化存在明显差异,施肥后一个月内,液体注射施肥和传统环状开沟施肥氨挥发速率变化较大,变异量在0～0.25 kg/(hm^2·d)之间,且注射施肥氨挥发速率的峰值出现时间早于传统环状开沟施肥(图1)。在施肥后第5天和第6天,两个处理分别出现峰值,之后逐渐下降,注射施肥在第9天接近果园中随机样品值,而传统沟状施肥在第15天接近果园随机样品值。两个处理均呈现先升高后降低的单峰趋势。但总体来看,施肥后30天内传统环状开沟施肥的氨挥发总量为0.84 kg/hm^2,注射施肥为0.54 kg/hm^2,前者比后者高54.9%。

从图1可以看出,果园的N_2O通量也因不同的施肥方式而存在显著的差异。在施肥后的30 d里,注射施肥和环状开沟施肥的N_2O排放通量均有两次峰值出现。第一次出现在施肥后的第1天,注射施肥处理高出环状沟施肥处理26 μg/(m^2·h);第二次峰值出现在施肥后的第4天,环状沟施肥高出注射施肥14 μg/(m^2·h)。土壤产生N_2O的过程主要受水分和温度的影响,注射施肥后由于土壤水分含量的增加,在短时间内N_2O排放通量高于环状开沟施肥。随后由于温度的提高,土壤水分逐渐降

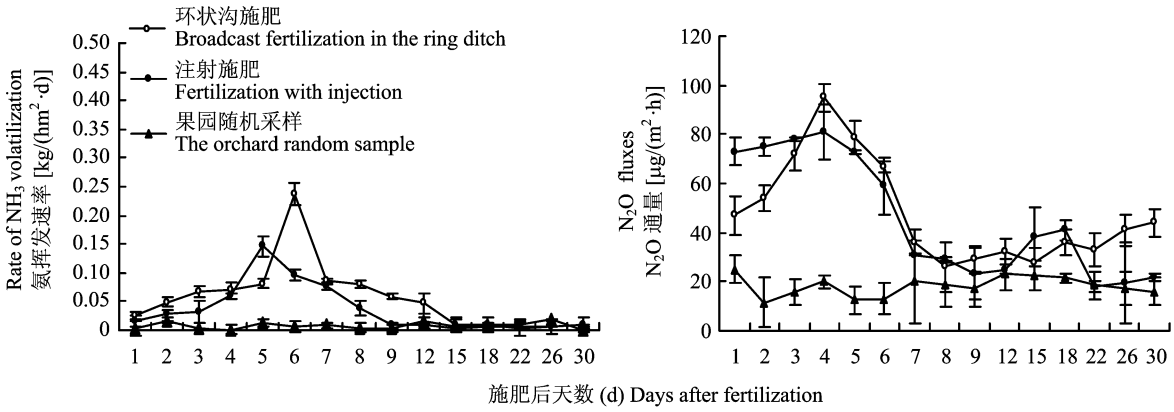

图1 不同施肥方式下土壤氨挥发速率和N_2O通量的动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of ammonia volatilization and N_2O fluxes under different fertilizer application mode

低,土壤温度升高,环状沟施肥处理的 N_2O 排放通量很快增大,直至超过注射施肥。施肥第 4 天后,各处理的 N_2O 排放通量均开始慢慢降低,从第 7 天开始,两个处理与果园中随机采样的 N_2O 排放通量接近,变化幅度趋于稳定。总体来看,施肥后 30 天内传统环状开沟施肥的 N_2O 通量总量为 719.0 μg/hm^2,注射施肥为 685.4 μg/hm^2,前者比后者高 5.0%。

2.2　根际注射施肥和环状开沟施肥对氮素当季吸收率的影响

由图 2 看出,在整个生长季内,注射施肥处理下的新梢叶片 Ndff% 和果实 Ndff% 均明显高于环状开沟施肥处理。注射施肥处理下的新梢叶片和果实的 Ndff% 均随时间的延长而增加,在 10 月 10 日达到峰值 0.22% 和 0.40%;环状开沟施肥处理表现出相同的趋势,但新梢叶片的 Ndff% 一直较低,均在 0.078% 以下,表明注射施肥能促进氮素被快速吸收、同化,并运输至各新生器官。随时间的增长,运输至叶片和果实的^{15}N 显著增加,氮素吸收率显著提高。

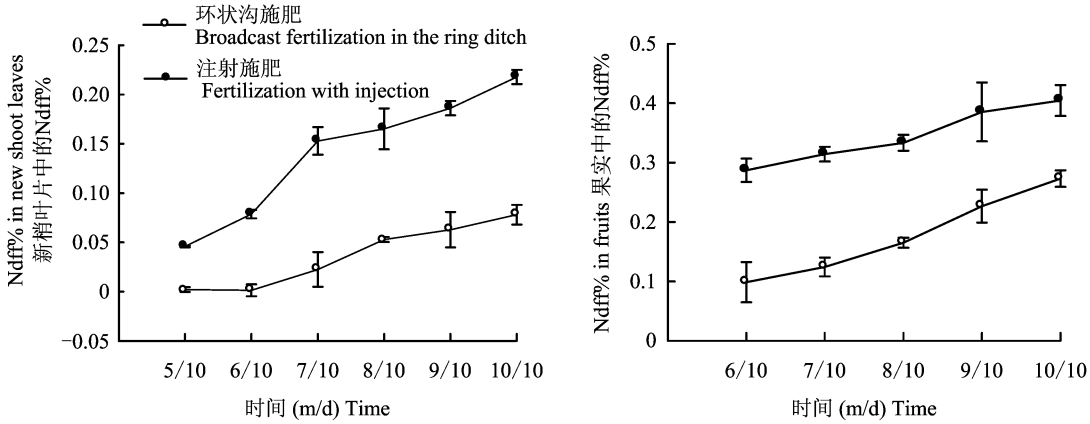

图 2　不同施肥方式下新梢叶片和果实中 Ndff% 的动态变化

Fig. 2　Dynamic changes of Ndff% in new shoot leaves and fruits under different fertilizer application mode

2.3　当季从肥料中吸收的氮在树体内的分布规律

表 1 表明,在生长季末,根际注射施肥处理的苹果树大部分器官的氮素当季吸收率均高于环状开沟施肥处理,且整体植株的氮素当季吸收率超过环状沟施肥 12.25 个百分点,差异达到显著水平。在生长季末,两个处理的新生营养器官,如春梢、秋梢、背上枝的氮素当季吸收率处于较低水平,而多年生的营养贮藏器官氮素当季吸收率较高。根际注射施肥处理中的粗根木质部氮素吸收率为最高,达到 7.019%,其次是主干韧皮部,氮素当季吸收率为 6.523%,再次为主干木质部为 5.427%。环状沟施肥处理下两年生枝木质部的氮素当季吸收率最高,为 4.451%,其次是多年生枝韧皮部 3.922%,再次为多年生枝木质部 3.832%。总体来看,在生长季末,植株地上部新生器官的氮素向地下部分、多年生枝和主干等器官回流,促使植株中的营养积累,为下一年的生长做好准备。

2.4　根际注射施肥和环状沟施肥对氮素在土壤中分布的影响

苹果树的根系一般集中分布于 0—60 cm 土层,从图 3 中可以看出,生长季末,在 0—60 cm 土层内,根际注射施肥的氮肥残留率为 36.55%,低于环状沟施肥的 43.13%。根际注射施肥处理一个月后,土壤的^{15}N 残留量开始逐渐降低,在果实采收时,残留量降到最低值。同样,环状沟施肥处理的^{15}N 残留量也表现出相同的趋势,在生长季末 10 月 10 日降到最低。果实采收时,0—20 cm 的土层内,环状沟施肥处理的氮肥残留量为 0.082 g/kg,高于根际注射施肥处理 0.071 g/kg;同样,在 20—40 cm 的土层中,也表现出相同的趋势,环状沟施肥处理的氮肥残留量高于根际注射施肥处理 23.27%,在 40—60 cm 土层内,根际注射施肥处理的氮肥残留量略低于环状沟施肥处理 0.009 g/kg。这种情况可能是由于根际注射施肥将肥料溶于水中,应用时肥水均匀渗入土壤中,在表层的残留较少,而在 20—40 cm 处均匀分布,植株根系与肥料的接触面广泛,利于肥料吸

表1 不同施肥方式对落叶后苹果树各器官氮素吸收率的影响

Table 1 Effects of different fertilizer application mode on Nitrogen absorption efficiency after defoliation

器官 Organs	根际注射施肥 Fertilization with injection					环状开沟施肥 Broadcast fertilization in the ring ditch				
	干物重 Dry mass (g/plant)	全氮 Total N (g)	Ndff (%)	Ndff (g)	氮吸收率 NAE (%)	干物重 Dry mass (g/plant)	全氮 Total N (g)	Ndff (%)	Ndff (g)	氮吸收率 NAE (%)
秋梢木质部 ASX	257.2	2.381	0.222	0.005	0.917 a	209.5	2.308	0.234	0.005	0.939 b
秋梢韧皮部 ASP	145.1	1.657	0.207	0.003	0.596 a	147.3	3.351	0.120	0.004	0.696 b
背上枝木质部 BBX	519.7	2.307	0.252	0.006	1.008 a	484.9	3.671	0.185	0.007	1.179 b
背上枝韧皮部 BBP	291.0	2.823	0.257	0.007	1.259 a	232.3	2.937	0.171	0.005	0.872 b
春梢木质部 SSX	640.0	6.022	0.253	0.015	2.639 a	490.0	2.873	0.149	0.004	0.745 b
春梢韧皮部 SSP	363.6	4.891	0.251	0.012	2.128 a	264.8	2.675	0.204	0.005	0.946 b
两年生枝木质部 BiBX	1522.0	11.700	0.172	0.020	3.500 a	1921.0	16.600	0.154	0.026	4.451 b
两年生枝韧皮部 BiBP	878.7	11.050	0.178	0.020	3.412 a	1111.0	14.070	0.126	0.018	3.070 b
多年生枝木质部 PBX	1861.0	9.277	0.197	0.018	3.174 a	2031.0	8.854	0.249	0.022	3.832 b
多年生枝韧皮部 PBP	915.0	11.870	0.161	0.019	3.310 a	1179.0	14.590	0.155	0.023	3.922 b
根茎木质部 RX	550.0	1.657	0.259	0.004	0.743 a	655.7	2.452	0.260	0.006	1.106 b
根茎韧皮部 RP	266.3	1.600	0.149	0.002	0.415 a	324.7	3.448	0.142	0.005	0.847 b
粗根木质部 CRX	2605.0	15.650	0.258	0.040	7.019 a	2548.0	12.460	0.168	0.021	3.629 b
粗根韧皮部 CRP	1254	10.53	0.171	0.018	3.127 a	1179	6.863	0.244	0.017	2.904 a
细根 Fine roots	198.0	1.617	0.600	0.010	1.684 a	211.2	2.185	0.192	0.004	0.726 b
花芽 Flower buds	42.1	0.604	0.254	0.002	0.267 a	42.44	0.354	0.218	0.001	0.134 b
叶芽 Leaf buds	124.5	1.707	0.217	0.004	0.641 a	115.3	0.985	0.029	0.000	0.050 b
主干木质部 TX	9032.0	24.100	0.130	0.031	5.427 a	11613.0	22.410	0.078	0.017	3.027 b
主干韧皮部 TP	3636.0	29.230	0.129	0.038	6.523 a	3032.0	20.980	0.077	0.016	2.817 b
叶 Leaves	656.0	10.120	0.162	0.016	2.840 a	787.2	17.700	0.114	0.020	3.503 b
果实 Fruits	2035.0	6.067	0.229	0.014	2.414 a	1839.0	6.585	0.122	0.008	1.396 b
植株 Plant					53.040 a					40.790 b

注(Note): ASX—Autumn shoots xylem; ASP—Autumn shoots phloem; BBX— Back branch xylem; BBP—Back branch phloem; SSX—Spring shoots xylem; SSP—Spring shoots phloem; BiBX—Biennial branch xylem; BiBP—Biennial branch phloem; PBX—Perennial branch xylem; PBP—Perennial branch phloem; RX—Rhizome xylem; RP—Rhizome phloem; CRX—Coarse root xylem; CRP—Coarse root phloem; TX—Trunk xylem; TP—Trunk phloem. NAE—Nitrogen absorption efficiency. 同行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 row are significant among treatment at the 5% level.

收和根系生长。而环状沟施肥中肥料直接与土壤接触,在没有水分的情况下分解较慢,集中于表层土壤,向下入渗的速度也受到抑制。

2.5 根际注射施肥和环状沟施肥对苹果叶片SPAD值的影响

SPAD代表植物叶片的叶绿素相对含量,SPAD值的变化受植株氮含量的影响,植株中氮素的增加促进了叶片SPAD值的提高,保证叶片能够更好地进行光合作用,进而积累光合产物。从图4可以看出,施肥前,所有处理的叶片SPAD值不存在明显差异,随时间的推进,各处理的SPAD值不断增大,并在9月10日达到峰值。在此过程中,根际注射施肥

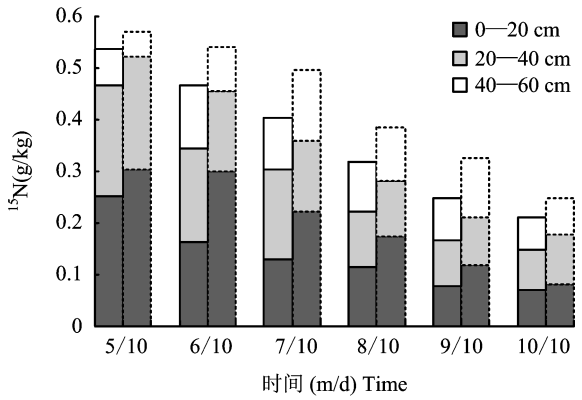

图 3　不同施肥方式下土壤剖面不同层次的^{15}N 残留动态

Fig. 3　^{15}N transference in different soil depth under different fertilizer application mode

[注(Note):实线框表示根际注射施肥 Boxes with solid lines represent fertilization with injection;虚线框表示环状沟施肥 Boxes with dotted line represent broadcast fertilization in the ring ditch.]

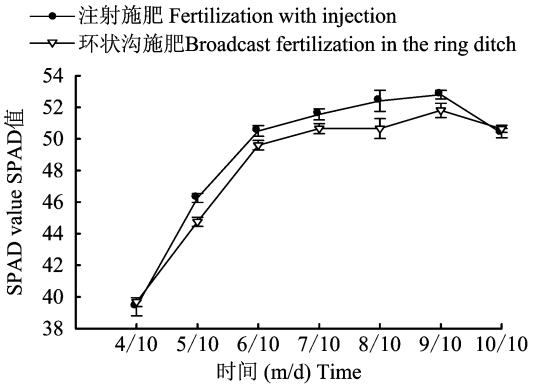

图 4　不同施肥方式对新梢叶片 SPAD 值的影响

Fig. 4　Effects of different fertilizer application mode on the SPAD value of new shoot leaves

的叶片 SPAD 值一直高于环状沟施肥处理,这可能是由于根际注射施肥中,溶于水分的氮素能够被土层根系更快地吸收并运输至叶片,加快了叶绿素合成速度。从 9 月 10 日开始,两个处理的叶片 SPAD 值均出现了下降趋势,此时植株的营养物质开始从地上部往地下部转移,氮素的回流可能促使了叶片叶绿素相对含量的减少。

2.6　根际注射施肥和环状沟施肥对苹果产量和品质的影响

根际注射施肥处理的苹果整体植株的氮肥利用效率高于环状沟施肥,氮肥利用率的提高促进了植株产量的提高和果实品质的优化。表 2 表明,根际注射施肥的单果重、纵径和横径分别比环状沟施肥提高了 3.80%、3.76% 和 2.24%。果实硬度也有类似的变化趋势,根际注射施肥使果实硬度降低了 7.59%,而可溶性固形物和可滴定酸含量的变化微弱。氮素利用率的提高显著促进了苹果产量的增加,根际注射施肥处理比环状开沟施肥处理的单株产量提高 19.70%。

2.7　注液后水分在土壤中的扩散范围和土壤含水量

在同一果园其他树下注液后挖土壤剖面进行观察,其水分在土壤中的分布范围和土壤含水量的结果见表 3。可以看出,注液越多,水肥扩散的范围越大,含水量也越高。但一次注液不宜太多,否则会冒出地表,造成水分损失,因此每点每次注液 500 mL 是最合适的。以每点注液 500 mL 计,水平扩散范围平均为 22.5 cm,纵向为 35 cm 左右,这为作物根系创造了良好的水肥吸收条件。

表 2　不同施肥方式对果实品质和产量的影响

Table 2　Effects of different fertilizer application mode on fruit quality and yield

处理 Treatments	单果重 Fruit weight (g/fruit)	纵径 LD (mm)	横径 TD (mm)	硬度 Firmness (kg/cm^2)	可溶性固形物 SS (%)	可滴定酸 TA (%)	单株产量 Yield (kg/tree)
注射施肥 IF	166.5 ± 3.1 a	64.1 ± 1.0 a	72.9 ± 0.6 a	10.4 ± 0.2 a	13.7 ± 0.2 a	0.5 ± 0.2 a	37.7 ± 1.8 a
环状沟施肥 BF	160.4 ± 2.8 b	61.8 ± 0.7 b	71.3 ± 0.7 a	11.3 ± 0.2 b	12.9 ± 0.2 a	0.4 ± 0.1 b	31.5 ± 0.7 b

注(Note):　IF—Fertilization with injection;FB—Broadcast fertilization in the ring ditch. LD—Longitudinal diameter; TD —Transverse diameter; SS—Soluble solids; TA—Titratable acid. 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.

表3 注液后水分扩散范围

Table 3 Range of water movement after injection

注液量(mL) Water injection volume	渗水情况 Water seepage situation	水分分布范围(cm) Water distribution range		土壤含水量 Soil water content (%)
		横向 Transverse	纵向 Longitudinal	
1500	地面冒水 Ground to take water	30～35	35～38	22.4
500	地面不冒水 Ground not to take water	20～25	33～35	21.1
0				14.5

3 讨论与结论

3.1 根际注射施肥提高了果树的肥水吸收容积

黄土高原旱地苹果根际注射施肥与传统的环状开沟施肥相比,肥料利用率及产量和品质均显著提高,主要原因可能是根际注射施肥增加了局部根区的土壤含水量,土壤局部含水量由原来的14.5%增加到21.1%,促进了肥料在土壤中的扩散范围,因而扩大了根系肥水的吸收容积。在环状开沟施肥处理中,沟长为800 cm,沟底宽为15 cm,施肥层厚约1 cm(混合土壤),根系开始吸收容积为12000 cm^3,而注射施肥处理中,湿润土层为长25 cm、宽20 cm、厚35 cm,共20个点,根系吸收容积为350000 cm^3,比环状开沟施肥的肥水吸收容积扩大了29.17倍。根系吸收容积的扩大增加了果树对氮、水的吸收,从而促进了对磷、钾的吸收,提高了氮、磷、钾之间的交互作用和肥水之间的耦合效应,达到协同平衡供应肥水的要求。因此,水肥吸收量的提高,增强了光合作用,促进了叶绿素等有机物质的合成,为苹果高产优质创造了物质条件。

3.2 根际注射施肥减少了果园气态氮的损失

尿素施入土壤后,在脲酶的作用下进行水解,产生NH_3。NH_3在石灰性土壤中极易挥发损失,是氮肥损失的主要途径之一[15-17]。NH_3在硝化细菌的作用下迅速转化为硝酸盐,在反硝化细菌的作用下产生各种氮氧化物,引起环境污染。其中N_2O产物形成的量最多,一般认为测定N_2O含量可代表反硝化势的大小。因注射施肥几乎不存在NO_3^-淋失的问题,本试验只测定NH_3的挥发和N_2O的逸失就可反映氮肥在土壤中转化损失的状况。由测定结果看出,环状开沟施肥处理的NH_3挥发量显著高于注射施肥处理54.9%,且NH_3的挥发高峰后者早于前者。这可能与环状开沟施肥处理比注射施肥的尿素水解产生的NH_3较多有关。据研究,土壤中的NH_3的产量取决于土壤脲酶活性的强弱,而脲酶活性的强弱又受土壤有关条件的影响[18-19]。朱铭莪[20]的研究结果表明,风干土壤的脲酶活性比湿润土壤高;温度高的土壤比温度低的土壤高;底物尿素浓度高的比底物尿素低的高;土壤pH值7.5～8比<7.5或>8的略有不同[21]。本试验的环状开沟施肥处理只施肥不加水,土壤干燥度明显高于注射施肥处理;由于湿度不同,环状开沟施肥温度显著高于注射施肥处理;环状沟施肥的土壤尿素(底物)浓度显著高于注射施肥;以上条件导致了环状开沟施肥处理的土壤pH值高于注射施肥处理。这或许是环状开沟施肥处理中的尿素水解产生NH_3的强度和容量大于注射施肥的原因所在。最终导致注射施肥减少了NH_3的挥发损失。

尿素水解后的NH_3经过硝化作用迅速转化为硝酸盐,成为反硝化作用的底物。反硝化作用的强弱取决于土壤含水饱和度和底物的大小[22]。施肥后3天之内,注射施肥处理的土壤含水量显著高于环状沟施肥,故N_2O的逸失量前者明显高于后者。但从第4天开始,环状沟施肥的N_2O逸失量却明显高于注射施肥,表明注射施肥土壤含水量开始降低,NO_3^-含量较低,由反硝化作用转化而来的N_2O逐渐降低;相反,环状开沟施肥条件下,因尿素浓度大,产生的NH_3浓度高,转化为NO_3^-的浓度大,在20 cm深的还原条件下,反硝化作用的生化产物N_2O自然就比注射施肥多。但两种施肥处理中,N_2O的含量都在第4天达到高峰,此后逐渐降低,直至第7天达到平衡,并接近对照水平。可以看出,施肥后前3天注射施肥的N_2O的产生量高于环状开沟施肥,这取决于土壤含水量的高低;3天以后,环状开沟施肥高于注射施肥,这取决于NO_3^--N含量的高低。所以含水量和底物是反硝化损失的决定因素。总体来看,两种施肥的N_2O损失量接近,差异不显著。如果进

一步合理调控,注射施肥的 N_2O 损失量还可以进一步减少。

3.3　根际注射施肥适应我国的国情

水肥一体化技术是高效施肥发展的趋势,世界苹果产业发展中,先进国家普遍采用包括滴灌施肥在内的水肥一体化技术。但是滴灌和喷灌的投资大,技术要求高,我国的果农采用这种技术比较困难。黄土高原地区推广的果树根际注射施肥技术,果农可以利用农用三轮车机动喷雾器和百元一把的注射施肥枪,将水和肥同时注射到果树根部,供果树吸收水分和养分,达到水肥一体化功效。同时,注射施肥的注射深度、注射量、注射密度、注射时间可根据果树不同时期养分需要随时进行调整,进而使水肥在土壤中分布均匀,避免水肥深层流失和地面蒸发,达到与地下滴灌施肥相似的节水节肥目的。注射施肥不需在树干周围开沟或刨坑,不仅避免对浅土层吸收根的损伤,也降低了劳动力成本。在我国,根际注射施肥技术有更广阔的应用前景,可以成为另一个地下注灌施肥新技术。

在黄土高原苹果产区,由于干旱少雨的气候环境,目前生产上正在推广微垄覆盖集雨保墒技术,同时结合在膜边缘进行土壤注射追肥,确保旱地苹果园养分与水分的同时高效利用。因此,需要进一步评价覆膜与注射施肥、注射施肥频率、注肥量等对苹果产量和品质提高效果最佳的果园管理方式。

参 考 文 献:

[1] 翟衡, 史大川, 束怀瑞. 我国苹果产业发展现状与趋势[J]. 果树学报, 2007, 24(3): 355-360.
Zhai H, Shi D C, Shu H R. Current status and developing trend of apple industry in China[J]. Journal of Fruit Science, 2007, 24(3): 355-360.

[2] 朱德兰, 王文娥, 楚杰. 黄土高原丘陵区红富士苹果水肥耦合效应研究[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(1): 152-155.
Zhu D L, Wang W E, Chu J. Study on the coupling effect of water and fertilizer on apple in hilly area of Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2004, 22(1): 152-155

[3] Klein I, Levin I, Bar-Yosef B *et al*. Drip nitrogen fertigation of 'Starking delicious' apple trees[J]. Plant and Soil, 1989, 119(2): 305-314.

[4] 杨素苗, 李保国, 齐国辉, 等. 灌溉方式对红富士苹果根系活力和新梢生长及果实产量质量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(5): 181-184.
Yang S M, Li B G, Qi G H *et al*. Effects of different irrigation patterns on root activity, new shoot growth, fruit yield and quality of red Fuji apple[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(5): 181-184.

[5] 李伏生, 陆申年. 灌溉施肥的研究和应用[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(2): 233-240.
Li F S, Lu S N. Study on the fertigation and its application[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(2): 233-240.

[6] 周建斌, 陈竹君, 李生秀. Fertigation—水肥调控的有效措施[J]. 干旱地区农业研究, 2001, 19(4): 16-21.
Zhou J B, Chen Z J, Li S X. Fertigation-efficient way to apply water and fertilizer[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2001, 19(4): 16-21.

[7] Ng Kee Kwong K F, Deville J. Application of ^{15}N-labelled urea to sugar cane through a drip-irrigation system in Mauritius[J]. Fertilizer Research, 1994, 39(3): 223-228.

[8] Neilsen D, Parchomchuk P, Neilsen G H *et al*. Using soil solution monitoring to determine the effects of irrigation management and fertigation on nitrogen availability in high-density apple orchards[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1998, 123(4): 706-713.

[9] Neilsen G H, Parchomchuk P, Wolk W D *et al*. Growth and mineral composition of newly planted apple trees following fertigation with N and P[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1993, 118(1): 50-53.

[10] 吴小宾, 彭福田, 崔秀敏, 等. 施肥枪施肥对桃树氮素吸收分配及产量品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 680-687.
Wu X B, Peng F T, Cui X M *et al*. Effects of fertilization with a fertilizer applicator on nitrogen absorption and distribution, and fruit yield and quality of peach[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science. 2011, 17(3): 680-687.

[11] 吕丽霞, 张立新, 高梅, 等. 根际注射施肥对渭北苹果园土壤理化特性、土壤酶、果实产量及品质的影响[J]. 果树学报, 2012, 29(5): 782-788.
Lü L X, Zhang L X, Gao M *et al*. Effect of fertilization with injection to the rhizosphere on soil physical and chemical properties, soil enzyme activities and yield and quality of apple in Weibei highland[J]. Journal of Fruit Science, 2012, 29(5): 782-788.

[12] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定-通气法[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 205-209.
Wang Z H, Liu X J, Ju X T *et al*. Field in situ determination of ammonia volatilization from soil: Venting method[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science. 2002, 8(2): 205-209.

[13] 葛顺峰, 姜远茂, 彭福田, 等. 春季有机肥和化肥配施对苹果园土壤氨挥发的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 199-203.
Ge S F, Jiang Y M, Peng F T *et al*. Effect of chemical fertilizers application combined with organic manure on ammonia volatilization in spring in apple orchard[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5): 199-203.

[14] 黄光辉, 张明园, 陈阜, 张海林. 耕作措施对华北地区冬小麦田 N_2O 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 167-173.

Huang G H, Zhang M Y, Chen Fu, Zhang H L. Influences of tillage methods on N_2O emission from winter wheat field in North China Plain [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(2): 167-173.

[15] 周细红, 曾清如, 蒋朝辉, 等. 尿素施用对土壤pH值和模拟温室箱内 NH_3 和 NO_2 浓度的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 374-376.

Zhou X H, Zeng Q R, Jiang Z H *et al*. Effects of urea on soil pH and the accumulation of NH_3 and NO_2 in a simulative greenhouse [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(3): 374-376.

[16] 董文旭, 胡春胜, 张玉铭. 不同施肥土壤对尿素 NH_3 挥发的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 76-79.

Dong W X, Hu C S, Zhang Y M. Effects of different soil fertilizations on NH_3 volatilization of urea [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(2): 76-79.

[17] Reynolds C M, Wolf D C. Influence of urease activity and soil properties on ammonia volatilization from urea[J]. Soil Science, 1987, 143: 418-425

[18] 陈利军, 史奕, 李荣华, 等. 脲酶抑制剂和硝化抑制剂的协同作用对尿素氮转化和 N_2O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 1995, 6(4): 368-372.

Chen L J, Shi Y, Li R H *et al*. Synergistic effect of urease inhibitor and nitrification inhibitor on urea-N transformation and N_2O emission[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1995, 6(4): 368-372.

[19] Boaretto R M, Mattos D, Quaggio J A *et al*. Absorption of $^{15}NH_3$ volatilized from urea by citrus trees[J]. Plant and Soil, 2013, 365(1-2): 283-290.

[20] 朱铭莪. 土壤酶动力学及热力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

Zhu M E. Soil enzyme kinetics and thermodynamics [M]. Beijing: Science Press, 2011.

[21] Laidler K J, Bunting P S. The chemical kinetics of enzyme action [M]. Oxford: Clarendon Press, 1958.

[22] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1992.

Zhu Z L, Wen Q X. Nitrogen in Chinese Soils[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992.