

网络出版时间:2018-01-26 10:32

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2018.05.009

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20180126.0953.018.html>

# 根区注射平衡追肥对旱塬苹果产量及品质的影响

章 伟, 师江澜, 陈艳龙, 李秀双, 李有兵, 田霄鸿

(西北农林科技大学 资源环境学院, 农业部 西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**【摘 要】**【目的】研究根区注射平衡追肥处理对渭北旱塬苹果品质、产量及养分利用的影响,为渭北旱塬苹果水肥管理提供参考。【方法】在陕西渭北旱塬苹果园,于施用 6 000 kg/hm<sup>2</sup> 基肥(NPK 总养分为 1 350 kg/hm<sup>2</sup>)的基础上,以当地常用追肥处理(沟施追肥 1 次+根区注射追肥 2 次,果树全生长周期 NPK 养分投入为 2 557 kg/hm<sup>2</sup>,其中追施的 NPK 总养分为 1 207 kg/hm<sup>2</sup>,追施的 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 用量分别为 374,145,688 kg/hm<sup>2</sup>)为对照(CK),探讨根区注射平衡追肥处理(根区注射追肥 4 次,果树全生长周期 NPK 养分总投入为 2 000 kg/hm<sup>2</sup>,其中追施的 NPK 总养分为 650.2 kg/hm<sup>2</sup>,追施的 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 用量分别为 179.8,105.0,365.4 kg/hm<sup>2</sup>)苹果品质、产量、养分利用效果的变化,并分析苹果果实中 N、P、K、Zn、Fe、Se 等 6 种营养元素与其品质的相关性。【结果】与常用追肥处理相比,根区注射平衡追肥处理的 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 用量分别减少了 52%,28%和 47%,追施的 NPK 总养分用量减少了 46%,但产量可达到与常用追肥处理同样的高产水平。根区注射平衡追肥处理大果率(果径≥75 mm)提高 17.5%,苹果硬度、可溶性糖、糖酸比、Vc 含量分别增加 7%,27%,30%和 112%,果实中 Zn、Fe、Se 含量分别增加 122%,174%和 41%。果实营养元素与品质的相关性分析表明,根区注射平衡追肥处理果实 Zn、Fe 含量大幅度提升与其 Vc 含量明显增加之间具有内在一致性。【结论】根区注射平衡追肥方法发挥了高效水肥耦合作用,提高了苹果树体对氮磷钾等养分的吸收利用效率,达到节肥、稳产与提质的效果,值得在渭北旱区苹果园中积极推广应用。

**【关键词】** 苹果;根区注射平衡追肥;产量与品质;水肥耦合;渭北旱塬

**【中图分类号】** S661.106<sup>+</sup>.2

**【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1671-9387(2018)05-0059-10

## Effects of balanced dressing of N,P and K fertilizers by injecting fertilizer solution into root zone on apple yield and quality in Weibei Dryland

ZHANG Wei,SHI Jianglan,CHEN Yanlong,LI Xiushuang,LI Youbing,TIAN Xiaohong

(Key Laboratory of Plant Nutrient and the Agri-environment in Northwest China,Ministry of Agriculture,

College of Natural Resources and Environment,Northwest A&F University,Yangling,Shaanxi 712100,China)

**Abstract:**【Objective】The study investigated the effects of balanced dressing of N,P and K fertilizers by injecting fertilizer solution into root zone on apple yield,quality and nutrient utilization to provide basis for water and fertilizer management in Weibei Dryland.【Method】The experiment with two treatments was conducted in an apple field in Weibei Dryland,Shaanxi. The new balanced dressing method injecting fertilizer solution into root zone (SF) was the treatment and local commonly used dressing method (fertilization with large fertilizers and high level fertilizer solution together) was taken as control (CK). The two dressing treatments had same basal fertilizers (1 350 kg/hm<sup>2</sup> total nutrient of N,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O). The amounts

**【收稿日期】** 2017-03-10

**【基金项目】** 国家科技支撑计划项目(2012BAD14B11);国家自然科学基金项目(41371288)

**【作者简介】** 章 伟(1990—),男,江西浮梁人,硕士,主要从事果树营养水肥调控研究。E-mail:zhangweijayzhou@163.com.

**【通信作者】** 田霄鸿(1967—),男,甘肃天水人,教授,博士,博士生导师,主要从事水肥资源高效利用与循环农业研究。

E-mail:txhong@hotmail.com

of N,  $P_2O_5$  and  $K_2O$  were 374, 145 and 688 kg/hm<sup>2</sup> for CK and 179.8, 105.0, 365.4 kg/hm<sup>2</sup> for SF. Then, the changes in yield, quality of apple and nutrient utilization were investigated and the relationships between six nutrient elements (N, P, K, Zn, Fe, Se) in fruit and quality were analyzed. **【Result】** Compared to CK, SF could maintain the same high yield while the dressing amounts of N,  $P_2O_5$ , and  $K_2O$  fertilizers were decreased by 52%, 28% and 47%, and total fertilizers amount was decreased by 46%. SF increased big fruit ratio (fruit diameter  $\geq 75$  mm), hardness, soluble sugar, sugar to acid ratio and vitamin C by 17.5%, 7%, 27%, 30% and 112%, respectively. SF increased Zn, Fe, and Se concentrations in apple fruits by 122%, 174%, and 41%, respectively. The correlation analysis showed that there was inherent consistency between high concentrations of Zn, Fe and vitamin C. **【Conclusion】** The balanced dressing method by injection into the roots zone (SF treatment) enhanced the coupling effectiveness of water and fertilizer nutrients, promoted absorption of N, P and K nutrients, and improved fertilizer-saving, yield and quality improvement. This, it is suggested to be widely used in apple orchards of Weibei Dryland.

**Key words:** apple; balanced dressing method by injection into root zone; yield and quality; water and fertilizer coupling; Weibei Dryland

陕西渭北旱塬地区由于具有较为优越的自然条件而成为中国苹果的优生区,该地区红富士苹果栽培面积占 65% 以上<sup>[1-2]</sup>。然而,在当地苹果生产中,水分不足成为最大制约因素<sup>[3]</sup>,过量施肥及肥料养分比例失衡也成为苹果高产优质生产的瓶颈<sup>[4-6]</sup>。在苹果生育期内尤其是果实膨大期供给过量养分及氮磷钾养分比例不协调,不仅使果树营养生长和生殖生长关系失衡,严重影响当年苹果产量品质及树体枝条的合理建构<sup>[7-9]</sup>,而且使肥料利用率低下<sup>[10-11]</sup>,果农施肥成本增加,同时加剧果园土壤  $NH_3$  挥发损失、土壤剖面深层硝酸盐大量累积及淋溶,对生态环境造成潜在不良影响<sup>[12-13]</sup>。改善施肥方式是提高肥料利用率的重要途径,水肥一体化技术(灌溉施肥技术)是当今世界上提高作物生产水肥耦合效应的高效施肥技术,能够极大提高水分和肥料的利用效率<sup>[14-16]</sup>。然而,在渭北旱塬地区水资源严重不足,滴灌设施很难大面积建设使用,因而难以推广应用滴灌式水肥一体化。但是根区注射施肥技术可将所需肥料溶于少量水中,兑成质量浓度适宜的肥液,利用施肥枪按果树养分需求多次将肥液注入根区土壤中,不会造成土壤次生盐渍化<sup>[2]</sup>,非常适用于当地果园且已逐渐被采用<sup>[17]</sup>。

研究表明,应用根区注射施肥技术可以大幅度节约水资源,充分发挥水肥耦合效应从而提高水肥利用率<sup>[18]</sup>,有效保障苹果高产优质<sup>[1-2]</sup>,并降低过量施用化肥所带来的环境风险<sup>[1]</sup>。前人采用根区注射技术深入研究了苹果树施肥所涉及到的氮肥施用与注射液质量浓度等环节<sup>[1-2]</sup>,然而对于该技术应用中苹果不同生育阶段氮磷钾养分需求特点及肥料平衡

施用尚鲜见报道。另外,该区在苹果实际生产中,盛行常规土施追肥与果实膨大期根区注射水溶性肥料的追肥方法,既增加了施肥成本,又未做到平衡施肥。为此,本研究以常用追肥方法为对照,研究根区注射平衡追肥处理对苹果果实品质、产量、养分利用状况等的影响,旨在优化施肥方案并揭示根区注射平衡施肥技术在节肥、增产、提质及增效方面的潜力与实际效果,为该区苹果生产中水肥资源的高效利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况与试验设计

试验苹果园位于渭北旱塬彬县北极镇(E108°00′57″, N35°11′13″),海拔 1 200 m,在当地属于典型的以投入大量化肥达到高产的果园,果园管理水平较高,无明显病虫害现象,产量稳定,多年维持在 55 t/hm<sup>2</sup> 左右。试验区属暖温带大陆性季风气候,年均气温 9.7 °C,年均降水量 450 mm,无霜期 180 d;供试材料为 21 年生红富士苹果树,乔化栽培,株行距为 3.0 m × 3.7 m,栽植密度 900 株/hm<sup>2</sup>,以‘秦冠’为授粉树。供试果园面积 0.27 hm<sup>2</sup>。该区土壤类型为黑垆土,质地为壤土, pH 为 7.9,电导率(EC)为 118  $\mu$ S/cm,土壤有机质含量 17 g/kg,碱解氮 35.6 mg/kg,速效磷 23.7 mg/kg,速效钾 182.5 mg/kg。试验果园保持清耕状态,旱作,试验前一年以沟施商品肥的方式在秋季施用基肥,基施的 NPK 总养分为 1 350 kg/hm<sup>2</sup>,基施的 N、 $P_2O_5$ 、 $K_2O$  用量分别为 450, 540, 360 kg/hm<sup>2</sup>,具体情况见表 1。

表 1 供试果园基肥投入状况

Table 1 Levels of basal fertilizer inputs in the tested orchard

| 基肥种类<br>Basal fertilizers type                   | 施用量/(kg·hm <sup>-2</sup> )<br>Fertilization rate | 养分比例/% |                               |                  | 有机质含量/<br>(g·kg <sup>-1</sup> )<br>OM | 黄腐酸含量/<br>(g·kg <sup>-1</sup> )<br>Fulvic acid |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------|-------------------------------|------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------|
|                                                  |                                                  | N      | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O |                                       |                                                |
| 有机无机复混肥<br>Organic-inorganic compound fertilizer | 3 000                                            | 14     | 16                            | 10               | 150                                   | 100                                            |
| 生物有机肥<br>Bio-organic fertilizer                  | 3 000                                            | 1      | 2                             | 2                | 450                                   | 50                                             |

试验于 2016 年苹果生长季(4—10 月)进行,试验设计主要针对追肥进行,设置了根区注射平衡追肥处理(根区注射追肥 4 次,SF)与常用追肥处理(沟施追肥 1 次+根区注射追肥 2 次,CK)2 个处理,6 次重复,每重复 1 个小区,小区面积 200 m<sup>2</sup>,20 株果树。2 种方法的肥料养分和水分投入情况分别见表 2 和表 3。

表 2 常用追肥处理中不同时期养分和水分的投入量

Table 2 Nutrients and water inputs of conventional fertilizer dressing method at different stages

| 追肥方式<br>Fertilization method     | 时期<br>Stage                                    | 养分投入量/(kg·hm <sup>-2</sup> )<br>Nutrients rate |                               |                  | $m(\text{N}):m(\text{P}_2\text{O}_5):m(\text{K}_2\text{O})$ | 灌水量/<br>(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )<br>Irrigation rate | 注射液质量浓度/<br>(g·L <sup>-1</sup> )<br>Concentration of fertilizer solution |
|----------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
|                                  |                                                | N                                              | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O |                                                             |                                                                |                                                                          |
| 沟施<br>Soil application in furrow | 萌芽期(04-15)<br>Germination (04-15)              | 270                                            | 75                            | 330              | 1.00:0.28:1.22                                              | —                                                              | —                                                                        |
| 根区注射<br>Gun injection            | 果实膨大初期(06-10)<br>Early fruit expansion (06-10) | 104                                            | 35                            | 127              | 1.00:0.33:1.22                                              | 20.25                                                          | 19                                                                       |
| 根区注射<br>Gun injection            | 果实膨大后期(07-20)<br>Late fruit expansion (07-20)  | 0                                              | 35                            | 231              | 0:0.15:1.00                                                 | 20.25                                                          | 19                                                                       |
| 合计 Total                         |                                                | 374                                            | 145                           | 688              | —                                                           | 40.50                                                          | —                                                                        |

注:萌芽期以 NPK 复混肥(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O=18-5-22)沟施,果实膨大初期与后期分别根区注射总养分 68% 的微量元素水溶肥,其中果实膨大初期施用的水溶肥为高氮高钾型,后期为无氮高钾型。该处理下果树全生育期 NPK 总养分投入量为 2 557 kg/hm<sup>2</sup>,其中基施的 NPK 总养分为 1 350 kg/hm<sup>2</sup>,追施的 NPK 总养分为 1 207 kg/hm<sup>2</sup>,追施 NPK 养分量占 47%, $m(\text{N}):m(\text{P}_2\text{O}_5):m(\text{K}_2\text{O})$  为 1.00:0.37:1.70。

Note:Furrowing fertilization of NPK (N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O=18-5-22) compound fertilizer at germination stage. Soluble fertilizer containing trace elements (68% of total nutrients) were applied at fruit expansion and late stages. Fertilizer with high nitrogen and potassium was applied in June,while fertilizer with nitrogen-potassium was applied in July. The total nutrient input of NPK was 2 557 kg/hm<sup>2</sup> within the whole growth period of apple trees. NPK inputs accounted for 47% (1 207 kg/hm<sup>2</sup>) with  $m(\text{N}):m(\text{P}_2\text{O}_5):m(\text{K}_2\text{O})$  ratio of 1.00:0.37:1.70.

表 3 根区注射平衡追肥处理中的养分与水分投入量

Table 3 Nutrients and water inputs of injection into root zone

| 追肥时期<br>Dressing stage                                | 养分投入量/(kg·hm <sup>-2</sup> )<br>Nutrient rate |                               |                  |     | $m(\text{N}):m(\text{P}_2\text{O}_5):m(\text{K}_2\text{O})$ | 灌水量/<br>(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )<br>Irrigation rate | 注射液质量浓度/<br>(g·L <sup>-1</sup> )<br>Concentration of fertilizer solution |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------|------------------|-----|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
|                                                       | N                                             | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | Zn  |                                                             |                                                                |                                                                          |
| 花后(05-14)<br>After anthesis (May 14)                  | 120.0                                         | 24.0                          | 42.0             | 3.3 | 1:0.20:0.35                                                 | 20.25                                                          | 24                                                                       |
| 幼果膨大期(06-17)<br>Young fruit expansion (June 17)       | 59.8                                          | 27.0                          | 107.8            | 0.0 | 1:0.45:1.80                                                 | 20.25                                                          | 24                                                                       |
| 大果膨大期初期(07-18)<br>Early big fruit expansion(July 18)  | 0.0                                           | 27.0                          | 107.8            | 0.0 | 0:0.25:1.00                                                 | 9.00                                                           | 40                                                                       |
| 大果膨大期后期(08-17)<br>Late big fruit expansion(August 17) | 0.0                                           | 27.0                          | 107.8            | 0.0 | 0:0.25:1.00                                                 | 20.25                                                          | 18                                                                       |
| 合计 Total                                              | 179.8                                         | 105.0                         | 365.4            | 3.3 | —                                                           | 69.75                                                          | —                                                                        |

注:施用氮磷钾养分分别为含 N 46% 的尿素、含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 18% 的过磷酸钙,含 K<sub>2</sub>O 51% 的硫酸钾,锌肥为含锌 23% 的 7H<sub>2</sub>O·ZnSO<sub>4</sub>;该处理下果树全生育期 NPK 养分总投入量为 2 000 kg/hm<sup>2</sup>,其中基施的 NPK 总养分为 1 350 kg/hm<sup>2</sup>,追施的 NPK 总养分为 650.2 kg/hm<sup>2</sup>,追施 NPK 养分量占 33%, $m(\text{N}):m(\text{P}_2\text{O}_5):m(\text{K}_2\text{O})$  为 1.00:0.58:2.00;相对于常用追肥方法,NPK 总养分量减少 46%。大果膨大期初期(07-18)灌水量降低的原因是雨后根区注射,果园土壤水分含量较高。

Note:Nutrients of N,P,K,and Zn were applied by the forms of urea (46% of N),calcium superphosphate (18% of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>),potassium sulfate (51% of K<sub>2</sub>O),and 7H<sub>2</sub>O·ZnSO<sub>4</sub>(23% of Zn) respectively. Within the whole growth period of apple trees,the total nutrient input amount of NPK was 2 000 kg/hm<sup>2</sup>,and the dressing amount of NPK accounted for 33% (650.2 kg/hm<sup>2</sup>) with  $m(\text{N}):m(\text{P}_2\text{O}_5):m(\text{K}_2\text{O})$  of 1.00:0.58:2.00. Because of rainfall,orchard soil moisture content was higher on July 18.

根区注射追肥方法如图 1 所示,先将肥料溶于有水的肥料罐中,运至田间后,通过动力泵增压,经过管带将液体输送至施肥枪中,选择施肥区域在果树树冠垂直投影外延附近区域,离树干周围半径

1.3~1.5 m 位置。施肥深度 20 cm,每棵树周围打 10 个追肥孔,孔间距离约 50 cm,每个孔施肥 15~20 s,注入肥液 2.25 kg/孔。

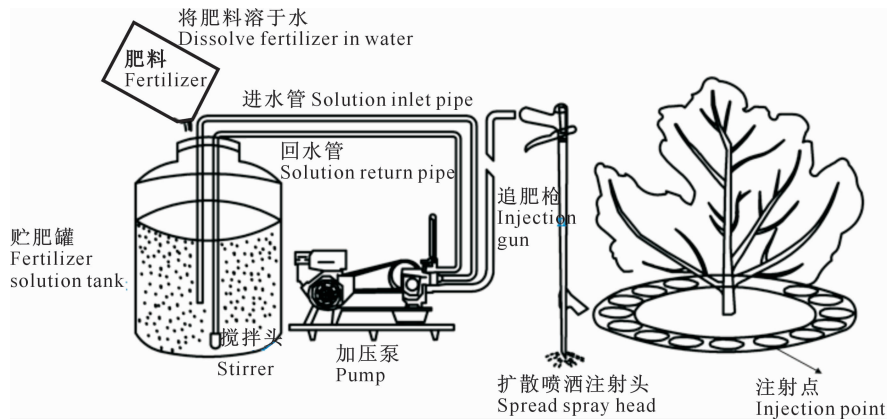


图 1 苹果树根区注射追肥方法示意图

Fig. 1 Sketch of apple fertilization by injection into root zone

常用追肥处理中,沟施方式采用放射状施肥法,在距树干 1 m 远处,挖 6~8 条放射状土沟,沟宽 30 cm,深 20 cm,长度达树干外缘,将肥料施入沟中并覆土。各处理小区田间日常管理措施均保持一致。花落后 10~14 d 进行蔬果,30 d 后套袋。

1.2 样品采集

首先于果实膨大期(07-18)采集各处理小区土壤样品;之后于果实成熟期(09-28),分别对各处理小区果园土壤、叶片、果实样品进行采集。

(1)土壤样品。在每个小区任意选 3 棵果树,分别在每棵果树施肥点或注射点上随机取 4 点的表层土(0~30 cm),混合为一份均匀样,每处理小区 3 个混合土样,带回实验室风干,磨碎过筛(孔径 0.25 和 1 mm)备用。

(2)叶片样品。在每个小区,手持叶绿素仪 SPAD-502 现场测定果树新梢顶端以下第 4~6 片成熟叶片的叶绿素 SPAD 值,并采摘果树中部功能叶片 120 片左右,混合均匀带回,冲洗干净后称质量,105℃下杀青 15 min,随后在 75℃烘至质量恒定,称质量后计算含水率,然后粉碎机磨碎后过孔径 1 mm 筛,备用。

(3)果实样品。在每个小区,从果树东西南北四个方向随机采集苹果 30 个以上组成混合样,带回实验室进行果径分级,测定单果质量、果型指数及果实内在品质。果实鲜样切片后在烘箱中 75℃烘至质量恒定,以烘前和烘后果实质量之差计算含水率(可知含水率),之后粉碎过孔径 0.25 mm 筛,备用。

1.3 测定项目与方法

(1)果实品质。随机取新鲜果实 30 个测定着色指数,着色指数 =  $\sum(\text{各级果数} \times \text{级数}) / \text{总果数}$ 。果实着色指数的分级标准为 5 级<sup>[19]</sup>:0 级,果面不着色;1 级,果面着色 1%~≤30%;2 级,果面着色 30%~≤60%;3 级,果面着色 60%~≤90%;4 级,果面着色 >90%。用百分之一电子天平称量单果质量;用游标卡尺测量果实纵、横径,按“果形指数 = 纵径/横径”计算果形指数;用手持糖度仪(WYT-4 型)测定可溶性固形物含量;用硬度计(GY-1 型)测量单个果实阴阳面硬度,结果取平均值;用标准碱滴定法测定可滴定酸含量;用 2,4-二硝基苯肼比色法测定 Vc 含量;用费林试剂法测定可溶性糖含量,计算糖酸比:糖酸比 = 可溶性糖含量/可滴定酸含量。

(2)土壤养分与植物营养元素含量。土壤主要养分含量测定用风干土样,植物营养元素含量测定用烘干样。土壤有机质含量用重铬酸钾外加热法测定;碱解氮含量用碱解扩散法测定;速效磷含量用 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾含量用 1 mol/L NH<sub>4</sub>OAc 浸提-火焰光度法测定;有效铜、锌、铁、锰含量采用 DTPA 溶液提取,原子吸收分光光度计测定。果实与叶片氮、磷、钾含量分别用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮-凯氏定氮法(K12 型全自动凯氏定氮仪测量)、钼锑抗比色法、火焰光度计法测定;果实铁、锌含量以及叶片铜、锌、铁、锰含量采用 1 mol/L HCL 浸提-AAS 法测定;果实硒含量采用氢化物-原子荧光法<sup>[20]</sup>,用 AFS-9130 原子荧光光谱

仪测定。

(3)土壤 pH 和电导率(EC)。土壤 pH 和 EC 分别用酸度计、电导率仪测定。

(4)产量。以 6 个小区平均单果质量进行理论产量估算,忽略各个果树间结果数的差异。具体估算过程为:试验期间统计 0.27 hm<sup>2</sup> 试验地果实套袋总数,每小区果实数=套袋总数/12,则产量为 6 小区平均单果质量与每小区果实数的乘积。另外,收获期分别测定常用追肥处理与根区注射平衡追肥处理的苹果产量,作为各个处理的实际产量。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同追肥方法对苹果产量与品质的影响

由表 4 知,CK 处理的商品果(果径≥70 mm)比例较高,达 90%,而 SF 处理商品果所占比例与 CK 处理相比提高了 5%,主要表现在一级果(果径≥80 mm)比例较 CK 增加 66%,达到了 50%。相对 CK 处理,SF 处理苹果果实含水率较高,单果质量有增加趋势,两个处理理论产量之间无显著差异,均达该区红富士苹果生产的高产水平。此外,SF 处理果实果形指数、着色指数也均显著高于 CK 处理。

表 4 不同追肥方法对苹果果实外观品质及产量的影响

| 处理<br>Treatment | 果径分级/%Grading fruit |            |            |        | 单果质量/g<br>Fruit weight | 果形指数<br>Index of shape | 着色指数<br>Color index | 果实含水率/%<br>Content of moisture | 产量/(t·hm <sup>-2</sup> ) Yield |            |
|-----------------|---------------------|------------|------------|--------|------------------------|------------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------|
|                 | ≥80 mm              | ≥75~<80 mm | ≥70~<75 mm | <70 mm |                        |                        |                     |                                | 理论<br>Theory                   | 实际<br>Fact |
| SF              | 50                  | 27.5       | 17.5       | 5      | 223.6 a                | 0.876 a                | 3.88 a              | 86.3 a                         | 60.37 a                        | 52.30      |
| CK              | 30                  | 30         | 30         | 10     | 215.7 a                | 0.833 b                | 3.62 b              | 82.2 b                         | 58.24 a                        | 52.50      |

注:同列数据后标不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ),表 5,7,8 同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences at  $P<0.05$  level. The same as Table 5,7,8.

果实可溶性固形物、糖酸比和 Vc 等是评价果实内在品质的重要指标,其中糖酸比是衡量果实糖、酸含量的综合指标,直接影响果实的口感风味。由表 5 知,SF 处理果实可溶性固形物显著低于 CK 处理,表明 SF 处理果实成熟度较 CK 处理低,可能是

因为 CK 处理施肥时间早于 SF 处理,且 SF 处理果实采收时间过早所致。尽管如此,SF 处理果实硬度、可溶性糖、糖酸比、Vc 含量均显著高于 CK,提升幅度分别为 7%,27%,30%,112%。

表 5 不同追肥方法对苹果果实内在品质的影响

| 处理<br>Treatment | 硬度/<br>(kg·cm <sup>-1</sup> )<br>Firmness | 可溶性固形物/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> )<br>Soluble solids | 可滴定酸/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> )<br>Titratable acid | 可溶性糖/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> )<br>Soluble sugar | 糖酸比<br>Sugar-acid ratio | Vc/(mg·kg <sup>-1</sup> ) |
|-----------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| SF              | 9.93 a                                    | 1 090 b                                             | 44 a                                               | 1 164 a                                          | 26 a                    | 15.40 a                   |
| CK              | 9.25 b                                    | 1 250 a                                             | 45 a                                               | 919 b                                            | 20 b                    | 7.25 b                    |

### 2.2 不同追肥方法对苹果养分利用状况的影响

矿质营养元素影响果实产量及其形态建成与品质组成。了解不同施肥方法下矿质营养元素的吸收利用状况与转运趋势,对合理阐释产量与品质效应具有指导意义。

2.2.1 果实膨大期与成熟期土壤理化性质及主要营养元素含量状况 果实膨大期至成熟期是产量与品质形成的关键时期。表 6 反映了苹果膨大期与成熟期不同追肥方法下表层土壤 pH、电导率及主要营养元素含量的变化情况。由表 6 可知,与表层土壤初始 pH 值(7.9)相比,SF、CK 处理土壤 pH 值均未发生强烈变化,其中与 CK 处理相比,SF 处理土壤 pH 值变化幅度较小,但均显著高于 CK,且不同时期二者之间的差异均达显著水平。SF 处理土壤 pH 在膨大期至成熟期变化不显著,而 CK 处理土壤 pH 在膨大期至成熟期变化显著。在同一生育期,SF 处理土壤 EC 值显著低于 CK 处理;成熟期 SF 和 CK 处理土壤 EC 值均显著高于膨大期。在膨大期至成熟期,SF 和 CK 处理土壤有机质含量均显著下降,其中 SF 处理的下降幅度较大,膨大期 SF 和 CK 处理无显著差异,而成熟期 SF 处理显著低于 CK 处理。无论在膨大期还是成熟期,SF 处理土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量等均低于 CK 处理。这是因为不同生育时期土壤速效养分含量变化受外源养分投入、植株吸收、土壤固定、挥发损失与微生物利用等的综合影响。本研究中,SF 处理 NPK 养分

投入远低于 CK 处理,施肥后,SF 处理土壤养分低于 CK 是正常的。

表 6 苹果膨大期与成熟期不同追肥处理表层土壤理化性质及主要营养元素含量的变化

| Table 6 Changes of soil physical and chemical properties and main nutrient contents at expansion and harvest stages |                 |         |                                                      |                                                   |                                                            |                                                             |                                                             |                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 生育期<br>stage                                                                                                        | 处理<br>Treatment | pH      | 电导率/<br>( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )<br>EC | 有机质/<br>( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )<br>OM | 碱解氮/<br>( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )<br>Alkaline N | 速效磷/<br>( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )<br>Available P | 速效钾/<br>( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )<br>Available K | 有效锌/<br>( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )<br>Available Zn |
| 膨大期(07-18)<br>Enlargement                                                                                           | SF              | 7.81 Aa | 125 Bb                                               | 19.8 Aa                                           | 107.0 Ba                                                   | 71.5 Ab                                                     | 357 Ba                                                      | 3.4 Aa                                                       |
|                                                                                                                     | CK              | 7.62 Ba | 258 Ab                                               | 19.6 Aa                                           | 137.0 Aa                                                   | 72.4 Ab                                                     | 497 Aa                                                      | 3.2 Aa                                                       |
| 成熟期(09-28)<br>Mature                                                                                                | SF              | 7.75 Aa | 181 Ba                                               | 16.1 Bb                                           | 69.3 Bb                                                    | 130.0 Ba                                                    | 370 Aa                                                      | 1.7 Ab                                                       |
|                                                                                                                     | CK              | 7.49 Bb | 331 Aa                                               | 17.2 Ab                                           | 78.9 Ab                                                    | 161.0 Aa                                                    | 372 Ab                                                      | 2.5 Ab                                                       |

注:同列数据后标不同大写字母表示同一生育期不同处理间差异显著( $P<0.05$ ),标不同小写字母表示同一处理不同生育期间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different capital letters indicate that significant difference among treatments in same growth stage, and different lowercase letters indicate significant difference among stages ( $P<0.05$ ).

2.2.2 膨大期至成熟期间叶片叶绿素与果实营养元素含量 表 7,8 反映了成熟期间(09-28)叶片与果实营养元素含量及叶绿素相对值的表现状况。由表 7 可知,除 Fe、Mn 含量的差异未达到显著性水平外,SF 处理苹果叶片的营养元素 N、P、K、Cu 含量均显著高于 CK,而 Zn 含量低于 CK,但二者之间差

异不显著。SF 处理叶片叶绿素含量相对值显著高于 CK 处理。由表 8 可知,CK 处理果实营养元素 N、P、K 含量高于 SF,但二者间差异不显著;SF 处理果实微量元素 Se、Zn、Fe 含量均显著高于 CK 处理。

表 7 成熟期不同追肥处理苹果叶片营养元素含量及叶绿素相对值的比较

| Table 7 Comparison of chlorophyll and nutrients in leaf at harvest stage |                                           |                                           |                                           |                                             |                                             |                                             |                                             |                             |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------|
| 处理<br>Treatment                                                          | N/<br>( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | P/<br>( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | K/<br>( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | Cu/<br>( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | Zn/<br>( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | Fe/<br>( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | Mn/<br>( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 叶绿素相对值<br>Chlorophyll(SPAD) |
| SF                                                                       | 26.2 a                                    | 16.3 a                                    | 11.5 a                                    | 5.9 a                                       | 54.1 a                                      | 49.0 a                                      | 170 a                                       | 59 a                        |
| CK                                                                       | 24.6 b                                    | 14.7 b                                    | 10.0 b                                    | 2.4 b                                       | 55.4 a                                      | 47.4 a                                      | 161 a                                       | 57 b                        |

表 8 成熟期不同追肥处理苹果果实营养元素含量的比较

| Table 8 Comparison of nutrients in fruit at harvest stage |                                       |                                       |                                       |                                           |                                         |                                         |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| 处理<br>Treatment                                           | N/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | P/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | K/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | Se/( $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | Zn/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | Fe/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) |
| SF                                                        | 4.4 a                                 | 10 a                                  | 5.5 a                                 | 13.3 a                                    | 37 a                                    | 22.5 a                                  |
| CK                                                        | 4.6 a                                 | 11 a                                  | 5.8 a                                 | 9.4 b                                     | 16.7 b                                  | 8.2 b                                   |

结合表 6~8 可知,与 CK 相比,SF 处理对表层(0~30 cm)土壤理化性质无不良影响,且可以促进果树根系对 N、P、K、Zn 等养分的吸收,从而供给叶片充足营养,提高叶绿素含量,增强光合作用;此外,SF 处理促进了 Zn、Fe、Se 等微量元素向果实内的转运,使果实微量营养元素含量得到提高。因此,综合以上研究表明,在渭北旱塬地区盛产期果园中,采用根区注射平衡追肥,不仅可以提高养分利用效率,还可获得与常用追肥方法同等的产量水平,且有利于形成较好的果实品质。

### 2.3 根区注射平衡追肥处理果实矿质营养元素含量与其品质的相关性

本研究中,苹果果实 Zn、Fe 与 Se 含量均较高,且均处于正常范围内<sup>[21-22]</sup>。矿质营养构成了果实的主要组成成分,与果实中有机酸、可溶性糖、Vc、蛋白质等品质密切相关<sup>[22]</sup>。本研究分析了根区注射

平衡追肥处理果实 N、P、K、Zn、Fe、Se 含量与其 8 种重要品质指标的相关关系,结果见表 9。由表 9 可知,可溶性固形物、可滴定酸分别与果实 N、P、K 呈正相关,与 Zn、Fe、Se 呈负相关,其中果实 P 与可滴定酸呈显著正相关;可溶性糖、Vc 分别与果实 Zn、Fe、Se 呈正相关,其中果实 Se 与可溶性糖呈显著正相关,果实 Fe、Se 与 Vc 分别呈极显著或显著正相关,N、K 与可溶性糖呈负相关。果实 P 与果形指数呈显著正相关,果实 Se 与着色指数呈显著正相关,果实 Fe、Se 与硬度呈显著或极显著正相关。以上结果与 Wang 等<sup>[19]</sup>、张强等<sup>[23]</sup>的研究结果具有一定类似性。可见,果实品质的优劣程度除受主要矿质营养 N、P、K 的影响外,Zn、Fe、Se 微量营养对果实品质的影响也较大,其中 Zn、Fe、Se 微量营养与果实 Vc、硬度之间的正相关性较高。因此,根区注射平衡追肥处理果实 Zn、Fe 含量的大幅度提升与

Vc 含量的明显增加之间具有内在一致性。

表 9 根区注射平衡追肥处理苹果果实 6 种营养元素含量与其品质性状的相关关系

Table 9 Correlation relationships between 6 nutrients and quality in SF fruit

| 营养元素<br>Nutrient element | 可溶性固形物<br>Soluble solids | 可滴定酸<br>Titratable acid | 可溶性糖<br>Soluble sugar | Vc       | 单果质量<br>Fruit weight | 果形指数<br>Index of shape | 着色指数<br>Color index | 硬度<br>Firmness |
|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|----------|----------------------|------------------------|---------------------|----------------|
| N                        | 0.42                     | 0.29                    | −0.47                 | −0.14    | 0.30                 | 0.52                   | −0.42               | −0.40          |
| P                        | 0.72                     | 0.76 *                  | 0.13                  | −0.22    | −0.40                | 0.78 *                 | −0.41               | −0.39          |
| K                        | 0.33                     | 0.14                    | −0.52                 | 0.04     | 0.41                 | 0.29                   | −0.39               | −0.31          |
| Zn                       | −0.34                    | −0.19                   | 0.52                  | 0.72     | −0.17                | −0.66                  | 0.52                | 0.63           |
| Fe                       | −0.58                    | −0.11                   | 0.47                  | 0.97 * * | 0.40                 | −0.65                  | 0.74                | 0.82 *         |
| Se                       | −0.69                    | −0.04                   | 0.85 *                | 0.79 *   | 0.09                 | −0.69                  | 0.87 *              | 0.91 * *       |

注: \* 表示显著相关( $P<0.05$ ), \* \* 表示极显著相关( $P<0.01$ ),  $n=6$ 。  
Note: \* Indicates significant at  $P<0.05$ , \* \* indicates significant at  $P<0.01$ ,  $n=6$ .

3 讨 论

3.1 根区注射平衡追肥法对苹果产量品质的影响

本试验基于苹果基肥用量约占果树全生育期肥料用量 60%、根区注射追肥用量约占肥料用量 40% 的肥料投入配比模式,其中根区注射平衡追肥处理按果树需肥规律分 4 次进行,分别为花后期30%,幼果期 30%,大果膨大初期 20%,大果膨大后期 20%,共追施 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 各 179.8, 105.0, 365.4 kg/hm<sup>2</sup>。另外,花后期注射施用 Zn 3.3 kg/hm<sup>2</sup>,4 次追肥时灌水量共计 69.75 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,每次质量浓度控制在 40 g/L 以内。与常用追肥处理(土施+根区注射)相比,根区注射平衡追肥处理中的 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 用量分别减少了 52%,28% 和 47%,追施的 NPK 总养分用量减少了 46%,而其产量却亦达到了高产水平,且果实品质中可溶性糖、Vc 含量、硬度、微量营养等均得到明显提升。

本研究认为,根区注射平衡追肥方法可以稳产提质,主要有以下 3 个原因:

第一,根区注射追肥肥液浓度合理,未对土壤微环境造成不良影响。合理施肥方式与良好土壤微环境可以促进根系对土壤养分的吸收和利用<sup>[24-25]</sup>。一般而言,根区注射液质量浓度会影响土壤微环境的理化性质,随注射液质量浓度增加,0~60 cm 土层土壤 pH 值减小,电导率(EC)增加<sup>[2]</sup>,尤其土壤 EC 值过高易导致次生盐渍化而影响植物的生长发育<sup>[26]</sup>。本试验在果树追肥期所进行的 4 次根区注射,注射液质量浓度均在合理范围内;根区注射平衡追肥法在施肥后表层土壤 pH 与 EC 值变化浮动较小,这与前人试验结果<sup>[2]</sup>具有一致性。

第二,氮磷钾养分投入完全满足苹果的营养特性与数量需求,这是稳产提质的重要保证。根区注射追肥可以按果树需肥规律合理施肥,即达到平衡

施肥,平衡施肥可改善土壤理化性质,增强微生物活性和根系活力,提高果树对水分养分的吸收与利用效率<sup>[3,27-28]</sup>。采用根区注射平衡追肥方法,可使肥料养分在水介质的作用下被输送至根际与根表,在时空上增加了养分被根系吸收的机率,因此符合合理施肥方式中选择最佳施肥位置的原则<sup>[29]</sup>。若养分已被最大化地输送至根际与根表,那么根系的吸收能力成为关键。果树根系生长发育规律决定根系的养分吸收能力<sup>[30]</sup>。本研究中,根区注射平衡追肥在 5—8 月各月中旬进行,追肥时间与全生育期内果树根系最佳吸收能力时期相吻合<sup>[31-32]</sup>。另外,本试验中根区注射平衡追肥是针对花后坐果进行的优化施肥,该追肥方案中氮磷钾养分的设计特点是:每个时期均配施钾肥,且随着果实膨大钾肥用量增加,前期施氮肥至大果膨大期(7—8 月)后,不再施氮肥而以钾肥为主。可见,根区注射平衡追肥方案与旱地苹果生长发育对养分的需求特点具有内在一致性<sup>[32-34]</sup>。再者,根区注射的氮磷钾总养分用量综合参考目标产量<sup>[35-36]</sup>及该区土壤总体肥力状况来确定<sup>[37-38]</sup>,使氮磷钾用量及比例符合渭北旱塬红富士苹果各个生育期的养分需求<sup>[3,7-8,11,38-39]</sup>。

第三,水肥发挥了高效耦合作用。质流与扩散是土壤养分迁移至根系表面进而被吸收的主要方式<sup>[40]</sup>,土壤环境中水分起着不可替代的介质作用<sup>[41]</sup>。根区注射施肥方式通过增加局部根区的土壤含水量,促进了肥料在土壤中的扩散,扩大了根系对肥水的吸收容积,从而增加果树对氮磷钾养分和水分的吸收,增强氮磷钾之间的互作和肥水之间的耦合效应<sup>[1]</sup>。首先,水分是限制渭北旱塬地区果树春季正常生长发育的最大因子,是影响产量的最关键因素<sup>[42]</sup>。果园土壤经历冬季的连续水分亏缺,次年春季通过根区注射追肥补充的少量水分对生长发育会发挥较大作用,前一年秋季施用基肥后土壤养



分得到及时补充,供水的促生效果也会随之更为明显<sup>[43]</sup>,且水肥耦合效应在灌水量较少时会随施肥量的增加而增大,因而多次根区注射水肥溶液,其增产效果更为显著<sup>[43]</sup>。其次,肥料是影响品质的重要因素,水肥互作促进增产提质<sup>[44]</sup>。N 通过质流作用被根系吸收,若供水过多则易产生硝态氮淋洗、脱氮损失,合理供水不仅促进根系对氮与水分的同时吸收,同时可促进土壤中磷钾元素的扩散<sup>[45]</sup>,从而促进磷钾的吸收与利用。与此同时,适当供水能活化土壤微量元素<sup>[46]</sup>,加速基肥中有机质的矿化<sup>[47]</sup>。第三,7—8 月是果实产量与品质建成的关键时期,养分需求量非常大,若这一时期果园土壤中养分出现累积高峰(前期输入后土壤残留养分+基肥中有机肥矿化养分+新输入养分),随当地这一时期降水量的增多,水肥耦合效应逐渐增强,水钾互作效应表现更为明显,进而有效促进果实膨大与品质提升<sup>[48]</sup>。

以上 3 个主要原因并非是独立的,而是相辅相成与相互作用的。总之,本试验根区注射平衡追肥方法不仅对土壤微环境无不良影响,并且能够适时、适量且较为精准地供给能够满足苹果目标产量要求的氮磷钾等营养,并使水肥在果树生长期充分发发挥高效耦合作用,从而促进苹果增产提质。可以说,根区注射追肥技术与平衡施肥理念的结合是合理施肥“4R”技术<sup>[29]</sup>的完美体现与创新。

### 3.2 根区注射平衡追肥方法的节本增效作用

与常用追肥方法相比,根区注射平衡追肥方法在减少追肥用量的同时能使产量达到较高水平,肥料成本下降 30%,净产值达 28.55 万元/hm<sup>2</sup>,增收 7.1%(按全生育期施肥计,据 2016 年市场苹果、肥料价格计算各处理果园经济效益。苹果收购价 5 元/kg;基肥中,占总量 40%的复混肥价格为 3.2 元/kg,生物有机肥为 0.7 元/kg;常规追肥中,占总量 45%的复混肥价格为 4 元/kg,微量水溶性肥料 10 元/kg;平衡枪注射中,尿素、过磷酸钙、硫酸钾分别为 2.0,1.4,4.4 元/kg)。由此可见,根区注射平衡追肥法具有节肥、增产、提质、高效的优势。但本研究也存在一定的不足之处,若试验设计中增加与常用追肥法相同养分量的根区注射平衡追肥的处理,以及根区注射平衡追肥方法中相同养分量而追肥时间提前处理,则研究结果可能会更具说服力。

## 4 结 论

在渭北旱塬盛果期果园,采用根区注射与平衡施肥相结合的追肥方法,能够有效增强水肥耦合效

应,增加果树对氮磷钾的吸收,活化土壤中的微量营养元素,从而促进养分的高效利用。与当地常用追肥方法相比,根区注射平衡追肥可使追施的 NPK 总养分用量减少了 46%,但其产量仍可达较高水平,并可有效改善果实品质,使肥料成本降低 30%,净产值增加 7.1%。因此,根区注射平衡追肥法具有节肥、稳产、提质与高效的特点,本研究结果为渭北旱塬苹果园根区注射施肥技术模式的建立及水肥的高效利用提供了科学依据。

### [参考文献]

- [1] 张林森,李雪薇,王晓琳,等.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[J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):421-430.  
Zhang L S, Li X W, Wang X L, et al. Effects of fertilization with injection to the rhizosphere on nitrogen absorption and utilization, fruit yield and quality of apple in the Loess Plateau [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2015, 21 (2): 421-430.
- [2] 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(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(5): 782-788.
- [3] 闫明灏,翟丙年,于昕阳,等.水肥优化管理对渭北旱塬红富士苹果水分利用的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(1):81-90.  
Yan M H, Zhai B N, Yu X Y, et al. Effect of optimized water and fertilizer management on water use of Fuji apple in Weibei Dryland [J]. Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2016, 44(1): 81-90.
- [4] 王小英,同延安,刘芬,等.陕西省苹果施肥状况评价[J].植物营养与肥料学报,2013,19(1):206-213.  
Wang X Y, Tong Y A, Liu F, et al. Evaluation of the situation of fertilization in apple fields in Shaanxi province [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(1): 206-213.
- [5] 赵佐平,同延安,刘芬,等.渭北旱塬苹果园施肥现状分析评估[J].中国生态农业学报,2012,20(8):1003-1009.  
Zhao Z P, Tong Y A, Liu F, et al. Assessment of current conditions of household fertilization of apples in Weibei Plateau [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(8): 1003-1009.
- [6] 杨玥,同延安,路永莉,等.陕西省苹果园土壤肥力与施肥现状评估[J].干旱地区农业研究,2016,34(5):166-171.  
Yang Y, Tong Y A, Lu Y L, et al. Evaluation on the situation of fertilization and soil fertility in apple fields in Shaanxi Province [J]. Journal of Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(5): 166-171.
- [7] 杜志辉,樊红科,吕周锋,等.渭北旱塬不同施肥方案对富士苹



- 果生长、产量及品质的影响[J]. 西北农业学报, 2011, 20(5): 121-125.
- Du Z H, Fan H K, Lü Z F, et al. Effects of fertilization regime on growth, yield and quality of Fuji apple in Weibei Highland [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2011, 20(5): 121-125.
- [8] 李涛涛, 翟丙年, 李永刚, 等. 有机无机肥配施对渭北旱塬红富士苹果树生长发育及产量的影响[J]. 果树学报, 2013(4): 591-596.
- Li T T, Zhai B N, Li Y G, et al. Effect of fertilizer type on growth and yield of Fuji apple in Weibei dry region of Shaanxi [J]. *Journal of Fruit Science*, 2013(4): 591-596.
- [9] 席瑞卿, 赵晓进, 张考学, 等. 不同施肥水平对苹果产量、品质及养分平衡的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(2): 141-145.
- Xi R Q, Zhao X J, Zhang K X, et al. Effect of different fertilizing level on yield and quality and nutrient equilibrium of apple [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2010, 19(2): 141-145.
- [10] Fan Z, Lin S, Zhang X, et al. Conventional flooding irrigation causes an overuse of nitrogen fertilizer and low nitrogen use efficiency in intensively used solar greenhouse vegetable production [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 144(2): 11-19.
- [11] 路永莉, 高义民, 同延安, 等. 滴灌施肥对渭北旱塬红富士苹果产量与品质的影响[J]. 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 [J]. *Chinese Soils and Fertilizers*, 2013(1): 48-52.
- [12] Yang X M, Zhang X P, Fang H J, et al. Long-term effects of fertilization on soil organic carbon changes in continuous corn of northeast China: Roth C model simulations [J]. *Environmental Management*, 2003, 32(4): 459-465.
- [13] Tagliavini M, Scudellazi D, Marangoni B, et al. Nitrogen fertilization management in orchards to reconcile productivity and environmental aspects [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1995, 43(1): 93-102.
- [14] Ma Q, Yu W T, Shen S M, et al. Effects of fertilization on nutrient budget and nitrogen use efficiency of farmland soil under different precipitations in northeastern China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 88(3): 315-327.
- [15] 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.
- [16] Sneh M. The history of fertigation in Israel [C]//Dahlia Greidinger International Symposium on Fertigation Proceeding, Haifa, Israel; [s. n.] 1995: 1-10.
- [17] 曹亚丽, 庄变芳, 晨曦. 一种简易施肥方法: 枪冲施法[J]. 西北园艺: 果树专刊, 2015(4): 49-50.
- Cao Y L, Zhuang B F, Chen X. A simple method of fertilization: gun punching [J]. *Northwest Horticulture: Fruit special issue*, 2015(4): 49-50.
- [18] 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. Effects of fertilization with a fertilizer applicator on nitrogen absorption and distribution, and fruit yield and quality of peach [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3): 680-687.
- [19] Wang G Y, Zhang X Z, Wang X F, et al. Key minerals influencing apple quality in Chinese orchard identified by nutritional diagnosis of leaf and soil analysis [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(5): 864-874.
- [20] 叶海辉, 谢德芳, 谢轶, 等. 氢化物-原子荧光法测定热带水果蔬菜中硒含量[J]. 园艺与种苗, 2012(10): 23-26.
- Ye H H, Xie D F, Xie Y, et al. Selenium determination of tropical fruits and vegetables by hydride generation atomic fluorescence spectrometry [J]. *Horticulture & Seed*, 2012(10): 23-26.
- [21] 冯娟, 任小林, 田建文, 等. 不同产地富士苹果品质分析与比较[J]. 食品工业科技, 2013, 34(14): 108-112.
- Feng J, Ren X L, Tian J W, et al. Analysis and comparison of Fuji apple quality from different regions [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 34(14): 108-112.
- [22] 白沙沙, 毕金峰, 王沛, 等. 不同品种苹果果实品质分析[J]. 食品科学, 2012(17): 68-72.
- Bai S S, Bi J F, Wang P, et al. Fruit quality analysis of different apple varieties [J]. *Food Science*, 2012(17): 68-72.
- [23] 张强, 李兴亮, 李民吉, 等. '富士'苹果品质与果实矿质元素含量的关联性分析[J]. 果树学报, 2016(11): 1388-1395.
- Zhang Q, Li X L, Li M J, et al. Analysis on the correlation between the quality of Fuji apple and the content of mineral elements in fruit [J]. *Journal of Fruit Science*, 2016(11): 1388-1395.
- [24] Vogeler I, Rogasik J, Funder U, et al. Effect of tillage systems and P-fertilization on soil physical and chemical properties, crop yield and nutrient uptake [J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 103(1): 137-143.
- [25] Kovac K. The effect of different soil cultivation and fertilization on yield, quality and uptake of nutrients in sugar beet [J]. *Rostlinna Vyroba*, 1998, 44(2): 59-64.
- [26] 余海英, 李廷轩. 辽宁设施栽培土壤盐分累积变化规律研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 80-83.
- Yu H Y, Li T X. Evolution of salt accumulation in greenhouse soil in Liaoning [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(4): 80-83.
- [27] 刘汝亮, 同延安, 高义民, 等. 渭北旱塬苹果园土壤养分状况分析与平衡施肥研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(3): 135-140.
- Liu R L, Tong Y A, Gao Y M, et al. Study on soil nutrients in apple orchard and balanced fertilization in Shaanxi Weibei dryland [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2008, 36(3): 135-140.
- [28] Komosa A, Pacholak E, Stafiecka A, et al. Changes in nutrient distribution in apple orchard soil as the effect of fertigation

- and irrigation; Pt. 2. Phosphorus, potassium and magnesium [J]. *Journal of Fruit & Ornamental Plant Research*, 1999, 31 (2): 119-125.
- [29] 熊海忠. 合理施肥的基本原则及其技术 [J]. *现代农业科技*, 2011(7): 310.
- Xiong H Z. Basic principles and techniques of rational fertilization [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2011 (7): 310.
- [30] Rogers W S, Booth G A. The roots of fruit trees [J]. *Scientific Horticulture*, 1960, 14(72): 27-34.
- [31] 杨成明. 苹果平衡施肥技术 [J]. *北方果树*, 2007(5): 43-44.
- Yang C M. Application of balanced fertilization technique in apple [J]. *Northern Fruit*, 2007(5): 43-44.
- [32] 屈军涛. 旱地红富士苹果高产的生物学原理及精准化栽培技术体系研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- Qu J T. Biological principle in high yield and technical system of extensive cultivation of red Fuji apple in dryland [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2008.
- [33] 樊红柱. 苹果树体生长发育、养分吸收利用与累积规律 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
- Fan H Z. The discipline of apple tree growth and development, nutrient uptake and utilization and accumulation [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2006.
- [34] Neilsen G H, Neilsen D. Effect of K-fertilization on apple fruit Ca concentration and quality [J]. *Acta Horticulturae*, 2006, 721: 177-184.
- [35] 许 娥. 果园水肥一体化高效节水灌溉技术试验 [J]. *中国果树*, 2011(4): 34-37.
- Xu E. Experimental study on high efficiency water-saving irrigation technique for integrated water and fertilizer in orchard (Part II) [J]. *Chinese Fruit & Vegetable*, 2011(4): 34-37.
- [36] 陈 清. 建立科学灌溉施肥制度: 西北苹果园水肥一体化(下) [N]. *中国农资*, 2014-08-15(22).
- Chen Q. Establishment of scientific irrigation and fertilization system: integration of water and fertilizer in northwest apple orchard(II) [N]. *China Agri-Production News*, 2014-08-15(22).
- [37] 赵佐平, 同延安, 刘 芬, 等. 长期不同施肥处理对苹果产量、品质及土壤肥力的影响 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(11): 3091-3098.
- Zhao Z P, Tong Y A, Liu F, et al. Effects of different long-term fertilization patterns on Fuji apple yield, quality, and soil fertility on Weibei Dryland, Shaanxi Province of Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(11): 3091-3098.
- [38] 居玛汗, 卡斯木, 张丽娜, 等. 黄土高原不同生态类型区果园地土壤肥力特征综合评价及其区域差异特征研究 [J]. *水土保持研究*, 2015, 22(1): 316-323.
- Juma H, Kasi M, Zhang L N, et al. Regional differences in soil nutrient contents of the typical apple garden of the Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(1): 316-323.
- [39] 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.
- Lu Y L, Bai F H, Yang X L, et al. Effect of fertigation on apple production in different ecological-regions orchards [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(11): 1281-1288.
- [40] 穆兴民. 农田水肥耦合效应与协同管理 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1999.
- Mu X M. Coupling effects of water and fertilizer and management in farmland [M]. Beijing: China Forestry Press, 1999.
- [41] 梁运江, 依艳丽, 许广波, 等. 水肥耦合效应的研究进展与展望 [J]. *湖北农业科学*, 2006, 45(3): 385-388.
- Liang Y J, Yi Y L, Xu G B, et al. Research on progress and prospect of water and fertilizer coupling effects [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2006, 45(3): 385-388.
- [42] Faci J M, Medina E T, Martínez C A, et al. Fruit yield and quality response of a late season peach orchard to different irrigation regimes in a semi-arid environment [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 143(9): 102-112.
- [43] 路 超. 苹果水肥耦合效应及树体生理响应研究 [D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2014.
- Lu C. Effect of coupling water and fertilizer and physiological response of Apple trees [D]. Tai'an, Shandong: Shandong Agricultural University, 2014.
- [44] 张漱茗, 闫 华, 孙顶国, 等. 平衡施肥与改善作物品质 [J]. *中国农学通报*, 1999, 15(2): 27-34.
- Zhang S M, Yan H, Sun D G, et al. Balanced fertilization and improvement of crop quality [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 1999, 15(2): 27-34.
- [45] 王海艺, 韩烈保, 黄明勇, 等. 干旱条件下水肥耦合作用机理和效应 [J]. *中国农学通报*, 2006, 22(6): 124-128.
- Wang H Y, Han L B, Huang M Y. Mechanism and effect of water and fertilizer coupling under drought stresses [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(6): 124-128.
- [46] 谢伯承, 张春霞, 薛绪掌. 土壤中微量元素的环境化学特性 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(3): 132-135.
- Xie B C, Zhang C X, Xue X Z. Characteristics of environmental chemistry for trace elements in soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3): 132-135.
- [47] 王 娇, 张玉龙, 张玉玲, 等. 不同灌溉方式对有机肥矿化及土壤活性有机质含量影响 [J]. *沈阳农业大学学报*, 2010, 41 (1): 37-41.
- Wang J, Zhang Y L, Zhang Y L, et al. Effects of different irrigation patterns on mineralization of organic manure carbon and contents of soil labile organic matter [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2010, 41(1): 37-41.
- [48] 耿增超, 张立新, 张朝阳, 等. 旱地果园水肥管理模式研究进展 [J]. *水土保持研究*, 2004, 11(1): 101-105.
- Geng Z C, Zhang L X, Zhang C Y, et al. Advance in study of management patterns of water and fertilizer in apple orchard in dryland [J]. *Research of Soil & Water Conservation*, 2004, 11(1): 101-105.