

水肥一体化技术对不同生态区果园苹果生产的影响*

路永莉^{1,2} 白凤华³ 杨宪龙^{1,2} 李 茹⁴ 高义民^{1,2} 同延安^{1,2**}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院 杨凌 712100; 2. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室 杨凌 712100;
3. 河北省丰宁满族自治县林业局 丰宁 068350; 4. 陕西省土壤肥料工作站 西安 710003)

摘 要 为探究水肥一体化技术对陕西省不同生态区苹果生产的影响,分别选取渭北旱塬区和关中平原区典型‘红富士’苹果园,研究了相同肥料用量的 NPK 传统施肥[NPK(C)], NPK 水肥[NPK(F)]和肥料用量减半的 NPK 水肥[1/2NPK(F)]对苹果产量、品质、肥料利用效率、果实养分吸收和果园经济效益的影响。结果表明,因不同生态区环境条件和果园自身土壤和肥力等存在差异,水肥一体化技术对苹果生产的影响也不同。渭北旱塬区果园,与 NPK(C)相比,NPK(F)处理苹果增产 13.0%,果实硬度增加 10.6%,糖酸比提高 19.1%,化肥偏生产力(PFP)由 18.2 kg·kg⁻¹提高至 36.3 kg·kg⁻¹,果实 N、P 和 K 养分吸收量分别增加 36.0%、75.3%和 44.8%;1/2NPK(F)处理对苹果生产的影响基本不显著。关中平原区果园,与 NPK(C)相比,1/2NPK(F)使苹果增产 26.2%,糖酸比提高 16.9%,PFP 从 27.2 kg·kg⁻¹提高至 68.7 kg·kg⁻¹,果实 N、P 和 K 养分吸收量分别增加 41.8%、98.9%和 58.9%;然而,NPK(F)处理苹果仅增产 14.1%,果实养分吸收无显著增加,品质亦无明显改善。经济效益方面,在相同肥料用量下,采用水肥一体化技术可使渭北旱塬区和关中平原区果园分别增收 1.55 万元·hm⁻²和 3.65 万元·hm⁻²;当肥料用量减半时,收益增加分别为 0.21 万元·hm⁻²和 7.28 万元·hm⁻²。总体而言,在陕西渭北旱塬区和关中平原区果园采用水肥一体化技术均能显著提高苹果产量和改善品质,但其效果存在明显差异,实践中需因地制宜,根据果园实际情况,采用适宜的水肥用量以求达到高产、高效和优质的目标。

关键词 陕西省 生态区 水肥一体化 水果产量品质 养分吸收 经济效益

中图分类号: S275.6; S661.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2014)11-1281-08

Effect of fertigation on apple production in different ecological-regions orchards

LU Yongli^{1,2}, BAI Fenghua³, YANG Xianlong^{1,2}, LI Ru⁴, GAO Yimin^{1,2}, TONG Yan'an^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;
2. Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China;
3. Fengning Forest Bureau of Manchu Autonomous County, Hebei Province, Fengning 068350, China; 4. Soil and Fertilizer Station of Shaanxi Province, Xi'an 710003, China)

Abstract In order to explore the effects of fertigation on ‘Fuji’ apple production in different ecological regions of Shaanxi Province, two field experiments (each with three treatments) were conducted simultaneously in Weibei Dry-land and Guanzhong Plain. The treatments consisted of conventional fertilization treatment [NPK(C)] and fertigation treatment [NPK(F)] using the same fertilizer rates as the conventional treatment, and half-dose fertigation treatment [1/2NPK(F)] using 50% of fertilizer rates of the conventional treatment. The yield, fruit quality, fruit nutrient uptake, fertilizer utilization and economic benefits of apple were then determined and evaluated. The results showed that due to the differences in ecological conditions, soil types and fertility levels of orchards in different ecological regions, the fertigation effects on apple production were obviously distinct. In contrast with NPK(C) treatment, NPK(F) treatment increased apple yield by 13.0%, fruit firmness by 10.6%, sugar acid ratio by 19.1%, and apple fruit uptake of N, P and K nutrients respectively by 36.0%, 75.3% and 44.8% in apple orchards in Weibei dry-land. In addition, partial factor productivity (PFP) increased from 18.2 kg·kg⁻¹ to 36.3 kg·kg⁻¹ under NPK(F). However, no significant increases were noted in apple yield, fruit quality and fruit nutrient uptake under 1/2NPK(F) treatment in Weibei Dry-land. In orchards in Guanzhong Plain, apple yield under

* 国际植物营养研究所(IPNI)项目资助

** 通讯作者: 同延安, 主要从事施肥与环境相关研究。E-mail: tongyanan@nwsuaf.edu.cn
路永莉, 主要从事果园优化施肥及养分综合管理研究。E-mail: yongli1210@126.com

收稿日期: 2014-03-13 接受日期: 2014-06-05

1/2NPK(F) treatment increased by 26.2% and apple fruit uptake of N, P and K nutrients increased respectively by 41.8%, 98.9% and 58.9%, compared those under NPK(C) treatment. Meanwhile, PFP increased from 27.2 kg·kg⁻¹ to 68.7 kg·kg⁻¹. However, the increment in apple yield under NPK(F) treatment was merely 14.1%, the changes in fruit nutrients uptake were insignificant. As for the economic benefits, in comparison with NPK(C) treatment, NPK(F) treatment enhanced economic benefits by 15 500 Yuan·hm⁻² for orchards in Weibei Dry-land and 36 500 Yuan·hm⁻² for orchards in Guanzhong Plain. Economic benefits under 1/2NPK(F) treatment were increased by 2 100 Yuan·hm⁻² for orchards in Weibei Dry-land and 72 800 Yuan·hm⁻² for orchards in Guanzhong Plain, compared with those under NPK(C) treatment. In conclusion, fertigation management significantly increased yield and fruit quality of apple orchards in different ecological regions in Shaanxi Province. However, the effectiveness of fertigation management differed apparently due to differences in ecological conditions in different regions. Therefore, the use of optimal fertilizer application rates in fertigation management was strongly recommended. The specific conditions of orchards formed the basis of optimal fertilizer application rates for high yields, fruit qualities, fertilizer use efficiencies and economic benefits.

Keywords Shaanxi Province; Ecological region; Fertigation; Fruit yield and quality; Nutrient uptake; Economic benefit

(Received Mar. 13, 2014; accepted Jun. 5, 2014)

黄土高原地区是我国苹果四大主产区之一, 其栽培面积已连续 4 年稳居全国首位^[1], 对于我国苹果产业发展意义重大。然而, 本地区年蒸发量大, 降雨偏少且年内分配不均^[2], 且部分地区果园灌溉受限。可见, 在黄土高原果园生产实践中提高有限水资源的利用效率是亟待解决的重大问题。同时, 该地区地形地貌复杂, 不同生态区苹果生产水、肥、光、温等资源差异较大, 果园养分管理粗放, 水肥耦合效应差, 肥料利用率低, 不利于苹果增产和品质的改善, 限制了苹果产业的高效发展。

水肥一体化是基于滴灌系统发展而成的节水、节肥、高产、高效的农业工程技术^[3-5], 可以实现水分和养分在时间上同步, 空间上耦合^[4-5], 在一定程度上改善了苹果生产中水肥供应不协调和耦合效应差的弊端, 大大提高了水和肥的利用效率^[6-7], 在作物增产增效和节水节肥等方面效果显著^[7-10]。例如, 有研究显示, 应用水肥一体化技术可使水分利用效率高达 88%~90%^[3,5,7], 节肥幅度达 30%~50%^[3,5,10], 甚至 80%^[11]。另有报道称, 水肥一体化可以使香蕉增产 15.6%^[12], 甘蔗增产 35%^[13], 亦可明显降低果园的 N 素淋溶, 减轻对环境的潜在压力^[14-16]。另外, 水肥一体化技术在改善果树光合特性、提高果实品质^[17]和促进果树幼苗及新生枝条生长^[18]等方面也具有重要作用。

然而, 近年来, 有关水肥一体化技术的研究主要集中在提高作物水肥利用效率^[4,8-9]和增产增效^[3-7]等方面。陕西省作为我国苹果生产规模最大的地区, 针对不同生态区苹果生产开展的水肥一体化应用效果的差异性研究偏少, 尚未确定该技术在不同区域的最佳应用条件。鉴于此, 本研究特选取渭北旱塬和关中平原两个主产区典型‘红富士’苹果园, 初步研究了水肥一体化技术对苹果产量、品质、肥料利用效率及果实养分吸收等方面的影响, 旨在为该技

术推广和应用提供一定的实践基础。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

渭北旱塬区试验园位于陕西省蒲城县罕井镇中山村(109.55°E, 35.14°N), 海拔 850 m, 年均气温 10.5 °C, 年均降水量 540 mm, 全年 10 °C 有效积温为 2 800~4 050 °C, 昼夜温差大, 光照充足。果园面积 0.3 hm², 主栽品种为矮化‘红富士’, 砧木为八棱海棠(*Malus micromalus*. Makino), 树龄 8 a, 株行距 3.5 m × 2.5 m。供试土壤为塬土, 基本性状为: 有机质 8.0 g·kg⁻¹, 碱解氮 40 mg·kg⁻¹, 速效磷 19 mg·kg⁻¹, 速效钾 112 mg·kg⁻¹。

关中平原区试验园位于陕西省凤翔县萧史宫村(107.42°E, 34.64°N), 海拔 815 m, 年均气温 12.5 °C, 年均降水 650 mm, 全年 10 °C 有效积温为 4 100~4 300 °C, 属暖温带半湿润大陆性季风气候。果园面积 0.8 hm², 主栽品种为矮化‘红富士’, 砧木为八棱海棠, 树龄 10 a, 株行距 3 m × 2 m。供试土壤为褐土, 基本性状为: 有机质 12.5 g·kg⁻¹, 碱解氮 65 mg·kg⁻¹, 速效磷 38 mg·kg⁻¹, 速效钾 187 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验于 2010 年 9 月—2011 年 11 月在陕西省渭北旱塬和关中平原同时进行。

试验开始前, 挑选长势基本一致且无明显病虫害的‘红富士’苹果树为试验材料。为了体现不同生态区苹果生产对水肥一体化响应的异同, 结合果园养分管理的实际水平, 试验采用统一的施肥方案在两个生态区果园同时进行(表 1)。试验共设 3 个处理, 每个处理选 6 棵树, 田间重复 3 次, 完全随机排列。处理分别为: NPK 传统施肥、NPK 水肥和 1/2NPK 水肥处理, 为了方便描述将其分别简化为 NPK(C)、NPK(F)和 1/2NPK(F), 其中“C”为 convention 的缩写,

“F”为 fertigation 的缩写。NPK 传统施肥和 NPK 水肥处理的肥料用量相同, 1/2NPK 水肥处理的肥料用量是传统施肥处理的一半。水肥操作处理 NPK(F) 和 1/2NPK(F)均采用简易的水肥一体化施肥技术, 即每次施肥前先将肥料溶于一定体积的纯水中, 搅拌均匀, 使其完全溶解, 然后以相同流速缓慢滴入根冠下四周土壤(流速由相同大小的滴孔控制, 滴孔的位置设置在冠幅下距树体基部约 0.5 m 处)。本试验动态监测了两个生态区果园传统施肥处理(农民习惯)的灌水量, 并且将水肥一体化处理(NPK 水肥和 1/2NPK 水肥)的用水量与传统施肥处理的灌水量保持一致, 具体的体积数是根据每次传统灌溉时单株果树根系主要分布区(以主干为中心向外 1 m 的辐射区)的平均用水量确定, 渭北旱塬和关中平原每次

灌水量分别约为 58~75 L·株⁻¹ 和 100~130 L·株⁻¹, 除此之外不再进行其他方式的灌溉补充。水肥一体化处理所用氮肥均由尿素(含 N 46%)提供, 磷、钾肥采用高水溶性的磷酸二氢钾(含 P₂O₅ 52%, K₂O 34%), 其中, 钾肥不足的部分由水溶性氯化钾(含 K₂O 60%)补充。传统施肥处理中, 氮、磷和钾肥分别采用尿素(含 N 46%)、普通过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%)和水溶性氯化钾(含 K₂O 60%), 施肥方式为沟施后覆土。为了实现试验结果在处理间的可比性, 所有处理肥料均分 4 次同期施入: 基施(10 月 15 日, 20%)、萌芽期施(翌年 4 月 15 日, 30%)和果实膨大期施(6 月 10 日, 30%和 7 月 20 日, 20%)。另外, 果园剪枝、病虫害防治和疏花疏果等田间管理措施均与当地农民习惯保持一致。

表 1 不同处理肥料用量
Table 1 Fertilizer rates of different treatments

处理 Treatment	处理代码 Code	施肥量 Fertilizer rate (kg·tree ⁻¹)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
NPK 传统施肥 NPK conventional fertilization	NPK(C)	0.6	0.24	0.30
NPK 水肥 NPK fertigation	NPK(F)	0.6	0.24	0.30
1/2 NPK 水肥 1/2NPK fertigation	1/2 NPK(F)	0.3	0.12	0.15

1.3 测定项目及方法

果实成熟期(10 月下旬)按处理分别对每株果树进行采摘、分级和称重, 并统计单株果数、单株产量、单果重和商品果的比率。

果实样品的采集与测定: 按处理从树体东、西、南、北 4 个方向随机采集苹果 20 个以上, 组成混合样带回实验室。采回的样品, 一部分用于果实养分含量的测定, 另一部分储于保鲜柜中供品质分析。养分含量测定时, 先将果实样品切片, 烘干至恒重, 计算含水量; 然后将烘干后的果实样品粉碎过 0.25 mm 筛。采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 全自动间断化学分析仪(Cleverchem 200)测定果实 N、P 含量, 火焰光度计测定果实 K 含量; 苹果的品质分析应采用鲜果在一周内进行^[19-20]。采用蒽铜比色法测定可溶性糖含量, WYT-4 型糖量计测定可溶性固性物含量, GY-1 型硬度仪测定果实硬度, 2, 6-二氯酚靛酚滴定法测定 Vc 含量, 氢氧化钠滴定法测定果实可滴定酸含量。同时, 采用游标卡尺分别测量果实的横径(cm)和纵径(cm), 然后通过果实纵、横径的比值计算果形指数(V/H)^[20]。

1.4 数据分析及计算

本文试验数据的整理和统计分析采用 Microsoft Excel 2007 和 SAS 8.1 软件进行, 结果与分析部分所用计算公式如下:

化肥偏生产力 PFP(kg·kg⁻¹)=施肥后作物产量(kg·hm⁻²)/化肥纯养分投入量(kg·hm⁻²)^[21]

果实养分吸收量(kg·hm⁻²)=果实产量(kg·hm⁻²)×果实中养分含量(g·kg⁻¹)/1 000

果形指数(V/H)=果实纵径(cm)/果实横径(cm)

2 结果与分析

2.1 水肥一体化对不同生态区果园苹果产量的影响

总体来讲, 不同生态区苹果生产采用水肥一体化技术均表现出显著的增产效果, 但因不同生态区水、热条件和果园土壤和肥力等因素的不同, 其应用效果也存在较大差异(图 1)。渭北旱塬区果园, NPK(F)处理较 NPK(C)处理苹果产量增加 13.0%, 差异显著。而当肥料用量减少 50%时[1/2NPK(F)], 苹果产量没有提高, 且表现为下降趋势, 但差异未达到显著性水平。关中平原区果园, 与 NPK 传统施肥相比, NPK(F)处理使苹果增产 14.1%, 而当肥料用量减少 50%时, 苹果产量不但没有降低, 反而增产效果更为显著, 增幅高达 26.2%, 产量为 65.2 t·hm⁻²。

2.2 水肥一体化对不同生态区果园苹果外观品质的影响

苹果外观品质(果形指数、单果重和果实大小等)是影响市场价格的重要因素, 受到广大果农的普遍

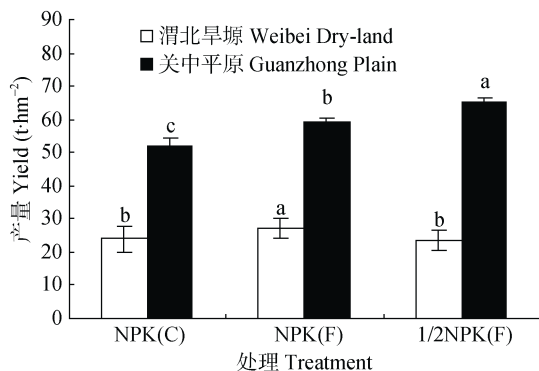


图 1 水肥一体化对渭北旱塬区和关中平原区果园苹果产量的影响

Fig. 1 Effect of fertigation on apple yield in the orchards in Weibei Dry-land and Guanzhong Plain

图中误差柱上的不同字母表示同一生态区不同处理间的差异达到 0.05 显著水平, 下同。Different letters above the bars indicate significant difference among different treatments in the same ecological region ($P < 0.05$). The same below.

重视。水肥一体化对不同生态区苹果单果重和果形指数的影响如表 2 所示。结果表明, 采用水肥一体化技术有增加苹果单果重和改善果形指数的趋势, 但差异均未达到显著性水平。关中平原区果园, 苹果单果重为 397.1~419.9 g, 明显高于渭北旱塬区果园(175.2~189.1 g), 这可能与不同生态区水、热条件和果园管理、土壤肥力水平及树龄等差异有关。二

表 2 水肥一体化对不同生态区苹果果形指数和单果重的影响

Table 2 Effect of fertigation on fruit shape index and single fruit weight of apple in different ecological regions

处理 Treatment	渭北旱塬 Weibei Dry-land		关中平原 Guanzhong Plain	
	果形指数 Fruit shape index	单果重 Mean fruit weight (g)	果形指数 Fruit shape index	单果重 Mean fruit weight (g)
NPK(C)	0.84a	175.2a	0.81a	405.7a
NPK(F)	0.89a	189.1a	0.88a	397.1a
1/2NPK(F)	0.87a	180.8a	0.78a	419.9a

各处理定级用 100 个样品; 果形指数=果实纵径/果实横径(V/H); 表中同列不同字母表示 0.05 水平差异显著, 下同。Fruit grading is based on 100 apple sample. Fruit shape index = vertical diameter/horizontal diameter; Different letters in the same line mean significant difference at $P < 0.05$.

者果形指数相差不明显。

然而, 与果形指数和单果重不同, 水肥一体化技术对果实分级影响较为明显(图 2)。渭北旱塬区果园, 与 NPK(C)处理相比, NPK(F)处理商品果(果径>70 mm)的比例显著提高了 9.3%, 达到 89.8%; 而 1/2NPK(F)处理商品果的比例为 83.5%, 仅提高 3.0%, 差异不显著。关中平原区果园, 与 NPK(C)处理相比, NPK(F)处理一级果(>80 mm)的比例略有降低, 但差异不显著; 而当肥料用量减少 50%时, 1/2NPK(F)处理一级果的比例却提高了 4.8%。

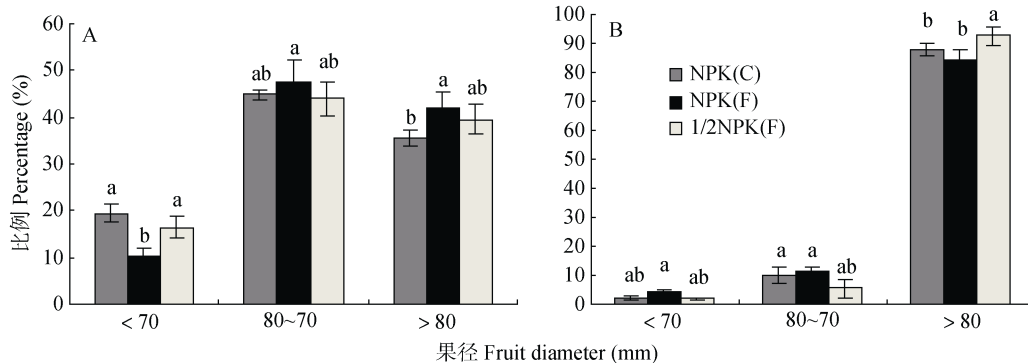


图 2 水肥一体化对渭北旱塬区(A)和关中平原区(B)果园苹果果实分级影响

Fig. 2 Effect of fertigation on fruit grading of apple in the orchards in Weibei Dry-land (A) and Guanzhong Plain (B)

2.3 水肥一体化对不同生态区果园苹果内在品质的影响

采用水肥一体化技术对不同生态区果园苹果内在品质的影响如表 3 所示。结果表明, 与关中平原区相比, 水肥一体化对渭北旱塬区果园苹果品质的影响更大。渭北旱塬区果园, NPK(F)处理较 NPK(C)处理果实硬度显著增加 10.6%, 糖酸比提高 19.1%, 可溶性固形物和 Vc 含量也表现出增加趋势, 但差异未达到显著性水平; 1/2NPK(F)处理较 NPK(C)处理果实 Vc 含量显著提高 3.3%, 而果实硬度、可溶性糖和可溶性固形物含量均未表现出显著差异。关

中平原区果园, 与 NPK(C)相比, NPK(F)对各品质指标均无显著影响, 当施肥用量减少 50%时, 1/2NPK(F)处理苹果可滴定酸含量显著降低, 使得果实糖酸比显著提高 4.7%, 其他指标变化不明显。

2.4 水肥一体化对不同生态区果园果实养分吸收和肥料偏生产力的影响

水肥一体化对不同生态区果园苹果 N、P 和 K 养分吸收具有显著性影响(图 3)。结果表明, 渭北旱塬区果园, 与 NPK(C)处理相比, NPK(F)处理果实 N、P 和 K 养分吸收量分别增加 36.0%、75.3%和 44.8%, 除 N 素吸收量外, P 和 K 养分吸收量均达到显著性

表 3 水肥一体化对不同生态区果园苹果品质的影响
Table 3 Effect of fertigation on fruit quality of apple in the orchards in different ecological regions

生态区 Ecological region	处理 Treatment	果实硬度 Hardness ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	可滴定酸 Titratable acids (%)	可溶性糖 Soluble sugar (%)	糖酸比 Sugar acid ratio (S/A)	可溶性固物 Soluble solid (%)	维生素 C Vc ($\text{mg}\cdot 100\text{g}^{-1}$)
渭北旱塬 Weibei Dry-land	NPK(C)	11.3b	0.36a	13.74a	38.21b	14.47a	10.53b
	NPK(F)	12.5a	0.30ab	13.50a	45.52a	14.60a	10.96b
	1/2NPK(F)	11.8ab	0.28b	12.92ab	46.82a	14.87a	13.86a
关中平原 Guanzhong Plain	NPK(C)	10.1a	0.39a	10.81a	27.51b	12.67a	12.40a
	NPK(F)	11.2a	0.43a	10.62a	24.50b	12.10a	12.74a
	1/2NPK(F)	10.5a	0.33b	10.60a	32.16a	12.73a	11.82a

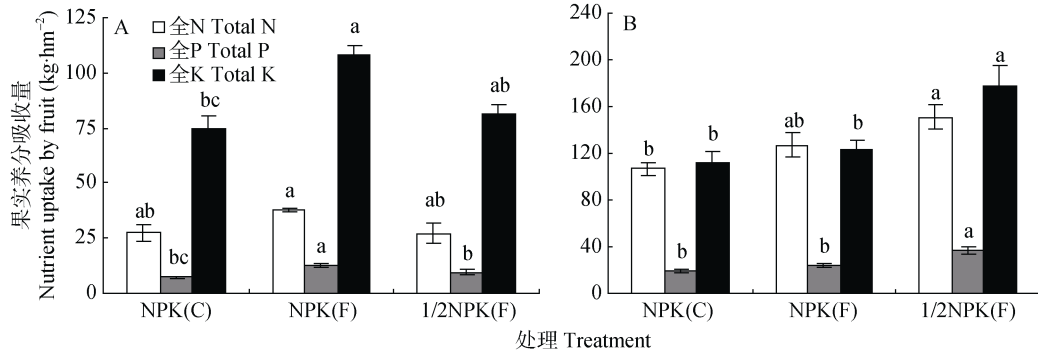


图 3 水肥一体化对渭北旱塬区(A)和关中平原区(B)果园果实 N、P 和 K 养分吸收的影响

Fig. 3 Effect of fertigation on N, P and K nutrient uptake by apple fruits in WeiBei Dry-land (A) and Guanzhong Plain (B)

水平; 当肥料用量减少 50% 时, 1/2NPK(F) 处理果实 N、P、K 养分吸收量与 NPK(C) 处理无显著差异。关中平原区果园, NPK(F) 处理果实 N、P、K 养分吸收量较 NPK(C) 处理相比均呈增加趋势, 但差异不显著; 然而, 当肥料用量减少 50% 时, 果实 N、P 和 K 养分吸收量却分别增加 41.8%、98.9% 和 58.9%, 差异显著。

肥料偏生产力(PFP)是在某一特定肥料下作物产量与施肥量的比值, 是反映土壤基础养分水平和化肥施用综合效应的重要指标^[21]。本研究显示(图 4), 在不同生态区果园, 与 NPK(C) 处理相比, NPK(F) 处理的 PFP 均有显著提高, 渭北旱塬区果园和关中平原区果园的增幅依次为 14.2% 和 14.3%, 差异显著。当肥料用量减少 50% 时, 1/2NPK(F) 处理对 PFP 的提高效果更为显著, 尤其在土壤肥力水平较高的关中平原区果园, 其 PFP 高达 $68.7 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 较对照显著增加 152.6%。

2.5 水肥一体化对不同生态区果园苹果生产经济效益的影响

果园经济效益的高低直接关系到果农的切身利益, 一直以来是广大果农最感兴趣和最关注的问题。我们根据已掌握的信息分别对渭北旱塬区和关中平原区果园的经济效益进行了大致估算(表 4)。由表可知, 在本试验中, 果园经济效益的增加可通过减少肥料投入和苹果增产两方面获得, 其中, 因苹

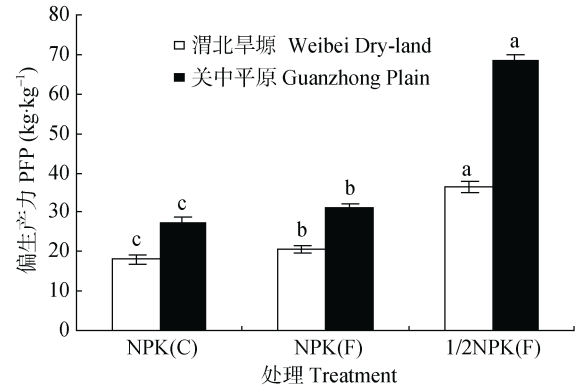


图 4 水肥一体化对渭北旱塬区和关中平原区果园化肥偏生产力的影响

Fig. 4 Effect of fertigation on partial factor productivity (PFP) of orchards in WeiBei Dry-land and Guanzhong plain

果增产而增加的收益对总收益的贡献更大。总体而言, 水肥一体化技术的应用可以使两个生态区果园的经济效益明显提高, 但不同生态区果园的增效幅度差异较大。与 NPK(C) 处理相比, NPK(F) 处理在渭北旱塬区果园和关中平原区果园的收益分别增加了 $1.55 \text{ 万元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $3.65 \text{ 万元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。当肥料用量减低 50% 时, 1/2NPK(F) 处理在渭北旱塬区果园仅增收 $0.21 \text{ 万元}\cdot\text{hm}^{-2}$, 而在关中平原区果园增收可高达 $7.28 \text{ 万元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

3 讨论与结论

大量研究结果表明, 水肥一体化技术可以实现

表 4 水肥一体化对不同生态区苹果生产经济效益的影响
Table 4 Effect of fertigation on economic benefits of apple production in different ecological regions

项目 Item		渭北旱塬 Weibei Dry-land		关中平原 Guanzhong Plain	
		NPK(F)	1/2NPK(F)	NPK(F)	1/2NPK(F)
相对于 NPK 传统施肥处理的节肥量 Fertilizer reduction compared with NPK(C) (kg·hm ⁻²)	N	0	342.0	0	495.0
	P ₂ O ₅	0	136.8	0	198.0
	K ₂ O	0	171.0	0	47.5
因节肥而增加的收益 Increment of economic benefits caused by fertilizers reduction (10 ⁴ Yuan·hm ⁻²)		0	0.36	0	0.53
相对于 NPK 传统施肥处理的增产 Increment of apple production compared with NPK(C) (t·hm ⁻²)		3.10	-0.30	7.30	13.50
因增产而增加的收益 Increment of economic benefits caused by production increment (10 ⁴ Yuan·hm ⁻²)		1.55	-0.15	3.65	6.75
相对于 NPK 传统施肥处理的总收益 Total increment of economic benefits compared with NPK(C) (10 ⁴ Yuan·hm ⁻²)		1.55	0.21	3.65	7.28

本试验中渭北旱塬区果园和关中平原区果园苹果栽培密度不同,故表中计算的单位面积节肥量亦有差异。计算节肥所增加的收益时,N、P₂O₅和K₂O纯养分的价格分别按5.2元·kg⁻¹、4.1元·kg⁻¹和7.6元·kg⁻¹计。计算苹果增产所增加的收益时,苹果价格统一按5.0元·kg⁻¹计。Due to different cultivating density of apple in the orchards of Weibei Dry-land and Guanzhong Plain, the saved fertilizer amount is also different. The prices of 5.2 Yuan·kg⁻¹ for N, 4.1 Yuan·kg⁻¹ for P₂O₅ and 7.6 Yuan·kg⁻¹ for K₂O were used to calculate the economical benefits enhancement caused by fertilizer reduction. The apple price of 5.0 Yuan·kg⁻¹ was used to calculate the economical benefits enhancement caused by production increase.

水分和养分在时间上的同步和空间上的耦合,有效地解决传统施肥方式下水肥供应不协调和耦合效应差的弊端,可以明显提高养分和水分的利用效率,同时也有助于降低果园的养分流失量^[5-6,15]。例如,Klein等^[10]报道,果园采用水肥一体化技术可以节省氮肥约30%。又如黄丽华等^[22]指出,应用水肥一体化技术可以使梨单位产量的总氮流失量较常规施肥减少45.2%~56.4%。本研究在陕西省渭北旱塬区和关中平原区果园获得的试验结论与上述研究一致,结果表明,与传统施肥处理相比,采用水肥一体技术后明显提高了化肥的偏生产力 PFP,在渭北旱塬区果园和关中平原区果园的增幅分别为14.2%和14.3%。如果将肥料用量降低50%,PFP的增加更为显著,如关中平原区果园,PFP可较对照增加152.6%,达68.7 kg·kg⁻¹。另外,有研究表明,水肥一体化技术可在提高养分利用效率的同时明显提高作物产量^[3,6-7]。本研究中,在相同肥料用量的前提下,采用水肥一体化技术能显著增加苹果产量,渭北旱塬区果园和关中平原区果园增幅分别为14.1%和13.0%。如果将肥料用量减半后采用水肥一体化技术,关中平原区果园苹果的增产效果更显著,幅度高达26.2%。

目前,关于水肥一体化技术对水果品质影响的研究结论尚不统一。Alva和Paramasivam^[23]研究表明,采用水肥一体化技术可以改善柑橘品质。另外,亦有文献报道应用该技术可以提高苹果果实中矿质养分的含量^[24]。然而,彭良志等^[25]在连续6年的研究中指出,采用水肥一体化技术对柑橘品质没有显著性影响。本研究条件下,在渭北旱塬区果园,采用水肥一体化技术可使苹果硬度和糖酸比显著提高

10.6%和19.1%。但在关中平原区果园,除糖酸比含量显著升高外,其他品质指标均无明显变化。可见,苹果品质不仅与土壤中水分和养分的协调供应有关,还可能与产地微气候特征、土壤类型和果园管理水平等因素有关,其内在影响机理尚需进一步研究。

本试验条件下,与传统施肥处理相比,当肥料用量减少50%时,1/2NPK水肥处理在渭北旱塬区果园并未表现出显著的增产效果,甚至存在减产风险。然而,在关中平原区果园,该处理苹果产量却显著增加了26.2%。这种在相同肥料用量下进行水肥一体化操作后产生截然不同的增产效果,一方面很可能与两个生态区果园土壤的供肥能力差异有关,渭北旱塬区果园土壤有机质含量为8.0 g·kg⁻¹,相对较为贫瘠,供肥能力弱,苹果生产对外源化肥投入的依赖性强,所以肥料用量的大幅下降很可能会影响苹果产量。然而,关中平原区果园土壤肥力较高,加之试验开始前果园养分投入较大(调查发现前期氮肥投入高达900 kg·hm⁻²),造成果园土体中大量氮素累积,增强了土壤的供肥能力,当肥料用量降低50%时,短时间内并未影响到果园的养分供应和苹果的生产。另一方面,这也可能与不同生态区果园水分投入状况存在差异有关。除了降雨自身差异造成的影响外,在本试验中,为了使水肥一体化处理的试验结果与传统施肥处理所得结果具有可比性,以便体现水肥操作的优劣,我们在不同生态区果园动态监测了传统施肥处理的灌溉时间和灌水量,并尽量保持水肥一体化处理的灌溉时间和灌水量与传统方式一致。因此,不同生态区果园传统灌溉投入量的差异也很可能会造成相同肥料用量下水肥一体化处理的不同增产效果。另有研究表明,水肥一体

化的增产效应存在一个阈值, 低于阈值, 增加水肥投入增产效果明显; 高于阈值, 增加水肥互作增产效应不明显, 且造成水肥投入的浪费^[26-27]。本研究在渭北旱塬区果园和关中平原区果园的试验结果正好验证了这一现象。另外, 邓兰生等^[28]在甘蔗上的研究发现, 在水肥一体化条件下, 氮肥用量降低至常规氮肥用量的一半时, 甘蔗的产量和品质均处于最佳状态, 继续增加肥料投入反而影响甘蔗的生产。可见, 实践中应结合果园自身的供肥能力, 采用适宜肥料用量进行水肥一体化操作才能获得最佳效果。

经济效益方面, 在本试验条件下, 应用水肥一体化技术可使两个生态区果园的经济效益明显提高。与 NPK 传统施肥相比, 水肥一体化模式下, 在同等肥料用量和肥料用量减半时, 渭北旱塬区果园可分别增收 1.55 万元·hm⁻² 和 0.21 万元·hm⁻², 关中平原区果园可分别增收 3.65 万元·hm⁻² 和 7.28 万元·hm⁻²。不难发现, 两生态区果园经济效益增幅之间的较大差异主要是由他们的产量水平决定的。然而, 如果该技术在果园中进行大规模推广应用, 前期设备投入和后续维护都需要资金保障, 本文在估算经济收益时暂未涉及。另外, 需要说明的是, 为了便于处理间相互比较, 本试验中特将水肥一体化处理的施肥时期与传统施肥处理保持一致。但是, 实践中, 需结合果树的需肥规律和土壤的供肥能力, 采用少量多次的施肥原则, 以求达到更为显著的增产、增效和环境友好的生产目的。

参考文献

- [1] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013
Editorial Board of China Agriculture Year Book. China Agriculture Year Book[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013
- [2] 王麒麟, 范晓辉, 王孟本. 近 50 年黄土高原地区降水时空变化特征[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5512-5523
Wang Q X, Fan X H, Wang M B. Precipitation trends during 1961-2010 in the Loess Plateau Region of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5512-5523
- [3] Mohammad M J, Zuraiqi S. Enhancement of yield and nitrogen and water use efficiencies by nitrogen drip-fertigation of Garlic[J]. Journal of Plant Nutrition, 2002, 26(9): 1749-1766
- [4] Kipp J A. Thirty years fertilization and irrigation in Dutch apple orchards: A review[J]. Fertilizer Research, 1992, 32(2): 149-156
- [5] 李伏生, 陆申年. 滴灌施肥的研究和应用[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(2): 233-240
Li F S, Lu S N. Study on the fertigation and its application[J]. Plant Nutrition Fertilizer Science, 2000, 6(2): 233-240
- [6] Agrawal N, Agrawal S. Effect of different levels of drip irrigation on the growth and yield of pomegranate under Chhatisgarh region[J]. Orissa Journal of Horticulture, 2007, 35: 38-46
- [7] 刘虎成, 徐坤, 张永征, 等. 滴灌施肥技术对生姜产量及水肥利用率的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(S1): 106-111
Liu H C, Xu K, Zhang Y Z, et al. Effect of drip fertigation on yield, water and fertilizer utilization in ginger[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(S1): 106-111
- [8] Sharma S, Patra S K, Ray R. Effect of drip fertigation on growth and yield of *Guava* cv. Khaja[J]. Environment and Ecology, 2011, 29(1): 34-38
- [9] Mohammad M J. Utilization of applied fertilizer nitrogen and irrigation water by drip-fertigated squash as determined by nuclear and traditional techniques[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2004, 68(1): 1-11
- [10] 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
- [11] 樊兆博, 刘美菊, 张晓曼, 等. 滴灌施肥对设施番茄产量和氮素表现平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 970-976
Fan Z B, Liu M J, Zhang X M, et al. Effect of dripper fertigation on tomato yield and apparent N balance in a greenhouse[J]. Plant Nutrition Fertilizer Science, 2011, 17(4): 970-976
- [12] 臧小平, 邓兰生, 郑良永, 等. 不同灌溉施肥方式对香蕉生长和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 484-487
Zang X P, Deng L S, Zheng L Y, et al. Effect of different fertigation methods on growth and yield of banana[J]. Plant Nutrition Fertilizer Science, 2009, 15(2): 484-487
- [13] 陆树华, 张承林, 邓兰生, 等. 滴灌施肥条件下氮钾分配时期对甘蔗产量和品质的影响[J]. 节水灌溉, 2009(4): 22-25
Lu S H, Zhang C L, Deng L S, et al. Influence of time distribution of N & K fertilizer on yield and quality of sugarcane under drip fertilization[J]. Water Saving Irrigation, 2009(4): 22-25
- [14] 张大鹏, 姜远茂, 彭福田, 等. 常规施肥和滴灌施肥对苹果园土壤硝态氮分布的影响[J]. 山东农业科学, 2011(10): 54-56
Zhang D P, Jiang Y M, Peng F T, et al. Effect of convention fertilization and fertigation on distribution of nitrate in apple orchard[J]. Shandong Agriculture Sciences, 2011(10): 54-56
- [15] Hagin J, Lowengart A. Fertigation for minimizing environmental pollution by fertilizers[J]. Fertilizer Research, 1995, 43(1/3): 5-7
- [16] Quiñones A, Martínez-Alcántara B, Legaz F. Influence of irrigation system and fertilization management on seasonal distribution of N in the soil profile and on N-uptake by citrus trees[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2007, 122(3): 399-409
- [17] 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[J]. 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[J]. Research of Soil and Water

- Conservation, 2010, 17(6): 271–274
- [18] 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[J]. 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[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2004, 22(3): 47–50
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
Bao S D. Soil Agricultural Chemistry Analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [20] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007
Cao J K, Jiang W B, Zhao Y M. The Test Guide of Physiological and Biochemical for Fruits and Vegetables Post Harvest[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007
- [21] 刘润梅, 范茂攀, 汤利, 等. 云南省水稻生产中的肥料偏生产力分析[J]. 云南农业大学学报, 2012, 27(1): 117–122
Liu R M, Fan M P, Tang L, et al. Analysis of partial factor productivity (FPF) of rice production in Yunnan Province[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2012, 27(1): 117–122
- [22] 黄丽华, 沈根祥, 钱晓雍, 等. 滴灌施肥对农田土壤氮素利用和流失的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 49–53
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[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(7): 49–53
- [23] Alva A K, Paramasivam S. Nitrogen management for high yield and quality of citrus in sandy soils[J]. Soil Science Society of American Journal, 1998, 62(5): 1335–1342
- [24] 孙霞, 郑春霞, 柴仲平, 等. 水氮耦合对南疆地区红富士苹果矿质元素含量的影响[J]. 水土保持通报, 2011, 25(5): 1042–1046
Sun X, Zheng C X, Chai Z P, et al. Influence of irrigation and nitrogen combination on trace elements of ‘Fuji’ apple in South Xinjiang Region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5): 1042–1046
- [25] 彭良志, 淳长品, 江才伦, 等. 滴灌施肥对‘特罗维它’甜橙生长结果的影响[J]. 园艺学报, 2011, 38(1): 1–6
Peng L Z, Chun Z P, Jiang C L, et al. The effects of drip fertigation on tree growth and fruiting of Trovita sweet orange (*Citrus sinensis* Osbeck) in calcareous purple soil in Chongqing of China[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2011, 38(1): 1–6
- [26] 沈荣开, 王康, 张瑜芳, 等. 水肥耦合条件下作物产量、水分利用和根系吸氮的试验研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(5): 35–38
Shen R K, Wang K, Zhang Y F, et al. Field test and study on yield, water use and N uptake under varied irrigation and fertilizer in crops[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2001, 17(5): 35–38
- [27] 梁运江, 依艳丽, 许广波, 等. 水肥耦合效应对保护地辣椒肥料氮、磷经济利用效率的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(6): 1141–1144
Liang Y J, Yi Y L, Xu G B, et al. Effects of water and fertilizers on rate of N and P₂O₅ utilization under the condition of capsicum cultivation in protected ground[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(6): 1141–1144
- [28] 邓兰生, 陆树华, 沈宏, 等. 滴灌施氮肥对甘蔗产量与品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(2): 119–123
Deng L S, Lu S H, Shen H, et al. Effects of N application rate on growth of sugarcane under drip fertigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(2): 119–123