

基于产量和品质的陕北苹果滴灌水量 和追施氮量优化研究

张建锴¹, 曹红霞¹, 潘小燕¹, 南学平²

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 陕西果业科技集团有限公司, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:通过 2 a 田间试验, 研究陕北黄土高原沟壑区滴灌水量和追施氮量对苹果生长指标、产量和品质的影响, 优化苹果灌水量和追施氮量, 以达到节水、节肥和高产优质的目的。试验设置 4 个灌溉水平: 高水 (W_1 : 100%I, I 为计算灌水量)、中水 (W_2 : 80%I)、低水 (W_3 : 60%I) 和不灌水 W_4 , 各处理追施氮量均为 $230 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_2), 探究最优灌水量; 设置 4 个追施氮水平: 高氮 (N_1 : 施纯氮 $0.69 \text{ kg} \cdot \text{棵}^{-1}$, 约合 $345 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、中氮 (N_2 : 施纯氮 $0.46 \text{ kg} \cdot \text{棵}^{-1}$, 约合 $230 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、低氮 (N_3 : 施纯氮 $0.23 \text{ kg} \cdot \text{棵}^{-1}$, 约合 $115 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和不施氮 N_4 , 各处理灌水量均为 80%I (W_2), 探究最优追施氮量。试验结果表明, 灌水量和追施氮量对苹果生长、产量和品质影响显著。 W_1N_2 、 W_2N_2 和 W_3N_2 处理 2 a 平均叶片相对含水率比 W_4N_2 分别增加了 7.5%、6.3% 和 2.5%, 各追施氮处理的追施氮量对叶片相对含水率影响不显著。叶片 SPAD 值随生育期的变化呈现出先增加后减小的趋势, 2 a 的 SPAD 值均在 W_1N_2 处理取得最大值, 平均为 61.30。 W_2N_2 处理能显著增加横径 70~80 mm 和 >80 mm 的苹果产量和苹果总产量, 提高优果率。 W_1N_2 处理 2 a 的单果重均最大, 平均为 212.86 g, W_2N_2 处理的单果重为 210.20 g, 与 W_1N_2 无显著差异。 W_2N_2 处理维生素 C 含量在 2 a 间均取得最大值, 平均为 $5.6 \text{ mg} \cdot (100\text{g})^{-1}$, 比 W_1N_2 增加 2.7%, 比 W_2N_1 增加 11.6%。 W_1N_2 、 W_2N_2 和 W_3N_2 处理 2 a 平均可溶性固形物分别比 W_4N_2 处理减少 11.3%、4.9% 和 2.5%, W_2N_1 、 W_2N_2 、 W_2N_3 处理 2 a 平均可溶性固形物分别比 W_2N_4 处理减少 11.7%、9.7% 和 4.8%。 W_1N_2 处理平均可溶性糖含量为 11.53%, 仅比 W_2N_2 增加 2.4%。2 年 W_1N_2 处理的可滴定酸均为最小, 平均为 0.35%, 与 W_2N_2 处理不存在显著差异。全面考虑果树生长、产量、品质及节水节肥等因素, W_2N_2 处理为该研究区较优的苹果灌水和追施氮策略。

关键词: 苹果; 滴灌; 灌水量; 追施氮量; 产量; 品质

中图分类号: S275.6; S661.1 文献标志码: A

Optimization of drip irrigation and topdressing nitrogen based on apple yield and quality in Northern Shaanxi

ZHANG Jiankai¹, CAO Hongxia¹, PAN Xiaoyan¹, NAN Xueping²

(1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Shaanxi Fruit Technology Group Co. Ltd., Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to explore the optimal scheme of drip irrigation (W) and nitrogen (N) application for apple, A two-year (2017 and 2018) field experiment was conducted to evaluate the effects of different irrigation and N fertilization on growth, yield, and quality of apple. There were four irrigation levels (W_1 : 100%I; W_2 : 80%I; W_3 : 60%I; and W_4 : 0) and four N levels (N_1 : $345 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; N_2 : $230 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; N_3 : $115 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; and N_4 : 0). The results showed that the irrigation and the topdressing nitrogen had significant effects on the growth, yield and quality of apple. Compared with W_4N_2 , the average leaf relative moisture content of W_1N_2 , W_2N_2 , and W_3N_2 treatments increased by 7.5%, 6.3%, and 2.5%, respectively, and the effect of the amount of applied nitrogen on the relative moisture content of leaves in each treatment was not significant. SPAD value showed a trend of increasing firstly and then decreasing with the growth stages, the SPAD value of 2 years reached the maximum value in W_1N_2 treatment, with an average of 61.30. The W_2N_2 treatment significantly increased apple yield in transverse

收稿日期: 2019-10-29

修回日期: 2020-03-04

基金项目: “十三五”国家重点研发计划 (2016YFC0400204); 陕西省水利科技计划项目 (2013slkj-48); 陕西省果业发展项目 (tg2015-075)

作者简介: 张建锴 (1993-), 男, 山东东营人, 硕士, 研究方向为农业高效用水。E-mail: zjkdbd123@163.com

通信作者: 曹红霞 (1971-), 女, 新疆五家渠人, 博士, 教授, 主要从事农业高效用水研究。E-mail: chx662002@163.com

diameter of 70~80 mm and > 80 mm, total apple yield, and fruit quality. The average weight of single fruit was 212.86 g for 2 years by W₁N₂ treatment while that was 210.20 g by W₂N₂ treatment, showing no significant difference between the 2 treatments. In 2 years, vitamin C content reached the maximum value of 5.6 mg · 100g⁻¹ in W₂N₂ treatment, which was 2.7% higher than that with W₁N₂ and by 11.6% than that with W₂N₁. Compared with W₄N₂ treatment, the average soluble solids of W₁N₂, W₂N₂, and W₃N₂ treatments decreased by 11.3%, 4.9%, and 2.5%, respectively, while that of W₂N₁, W₂N₂, and W₂N₃ treatments decreased by 11.7%, 9.7%, and 4.8%, respectively. In 2 years, the average of soluble sugar content of W₁N₂ treatment was 11.53%, only 2.4% higher than that of W₂N₂ treatment. The titratable acids in the treatment with W₁N₂ in 2 years were the smallest, with an average value of 0.35%, which was not significantly different from that treated with W₂N₂. Considering the factors of fruit growth, yield, quality, water saving, and fertilizer, the W₂N₂ treatment was the best combination for apple irrigation and N application in the study area.

Keywords: drip irrigation; apple; irrigation amount; topdressing nitrogen; yield; quality

陕西黄土高原地区是中国最大的苹果生产区, 由于独特的气候和土壤条件, 被认为是世界上最佳的苹果优生区之一^[1-2]。苹果作为近 20 a 来效益稳定的经济作物, 在推进农业结构调整、转变农业经济增长方式、促进农民增收过程中作用巨大^[3]。水分是果树进行正常生命活动的先决条件, 是维持光合作用和果实产量的关键, 对果实品质也很重要, 但传统的漫灌方式导致水分利用率低和水资源的浪费^[4], 氮素是果树最重要的营养元素, 是与苹果生长发育及产量、品质密切相关的元素^[5-6]。随着人们生活水平的日益提高, 在增加产量的基础上对品质的要求也越来越高。近年来由于苹果生产效益较好, 果农普遍重视化肥的施用, 因果农施肥的盲目性和随意性, 施肥过量情况严重, 而苹果产量和品质没有得到相应程度的改善, 影响经济效益^[7]。果园土壤营养诊断比一般大田作物困难和复杂^[8], 苹果施肥没有按照阶段性需肥规律施肥, 造成肥料的浪费和利用率的下降^[9]。

通过合理的灌溉和施氮促进水氮协同效应, 对提高产量和品质有重要意义。荣传胜等^[10]研究表明, 与果农漫灌施肥相比, 水肥一体化模式下滴灌减量施肥能显著提高果实产量和品质。张芳芳等^[11]研究指出, 初夏施氮既满足苹果氮素“断奶期”的需要, 又为果实膨大、成熟和花芽分化提供足够的矿质营养, 而且这一时期根系正处于活跃生长和更新期, 有利于对矿质养分的吸收, 可提高肥料利用率。Parvizi 等^[12]研究表明, 在水肥一体化模式下亏缺灌溉可显著提高石榴可溶性固形物含量, 追施尿素可显著提高石榴的单果质量。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^[13]。刘贤赵等^[14]研究发现, 深沟施肥可明显改善果树生长的土壤环境, 促进新梢生长, 提高单株产量。通过合理施肥提高氮肥利用率是果树

氮素管理和果实增产的重要措施, 是节约肥料资源、增加收益和保护环境的主要途径^[15]。目前, 国内外学者主要对石榴树^[16]、枣树^[17]、桃树^[18]等果树在水肥一体化模式下进行了大量的水氮调控效应研究, 将滴灌和深沟施肥结合, 针对滴灌水量和初夏追施氮量, 对苹果生长指标、产量和品质影响的研究鲜有报道。

本文基于 2 a 田间试验, 将滴灌与深沟施肥结合组成新的灌水施肥方式, 利用 Penman - Monteith 公式计算作物需水量, 通过分析比较不同滴灌水量和初夏追施氮量对苹果生长指标、产量及品质的影响, 以期确定苹果较优的灌水和追施氮水平, 为实现苹果高产优质栽培提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2017—2018 年在黄土高原沟壑区的洛川县苹果园 (109°20'E, 35°45'N) 进行, 该区属暖温带半湿润大陆性季风气候, 年均降水量 592.6 mm, 年均蒸发量 1 560 mm, 年均气温 9.2℃, 年均风速 2.0 m · s⁻¹, 无霜期 167 d。供试果园地势平坦, 可灌溉, 土壤为黄绵土, 平均干容重为 1.38 g · cm⁻³, 田间持水率 21.7% (质量分数, 下同), 凋萎含水率 8.2%。2 a 供试果园试验布置前土壤肥力状况如表 1 所示。

表 1 果园土壤养分状况								
Table 1 Soil nutrient status in the test orchard								
土层 Soil layer /cm	速效氮		速效磷		速效钾		有机质	
	Available N		Available P		Available K		Organic matter	
	/(mg · kg ⁻¹)		/(mg · kg ⁻¹)		/(mg · kg ⁻¹)		/(g · kg ⁻¹)	
	2017	2018	2017	2018	2017	2018	2017	2018
0~20	20.7	31.3	15.1	12.7	174.6	165.7	14.1	15.2
20~40	22.9	42.5	17.5	15.9	112.3	142.4	8.2	11.7
40~60	23.2	27.6	11.8	9.6	57.9	113.1	6.4	10.2
平均值 Average	22.3	33.8	14.8	12.7	114.9	140.4	9.6	12.4

注: 2017 年 2 月和 2018 年 3 月采样。
Note: Sampling was conducted in February 2017 and March 2018.

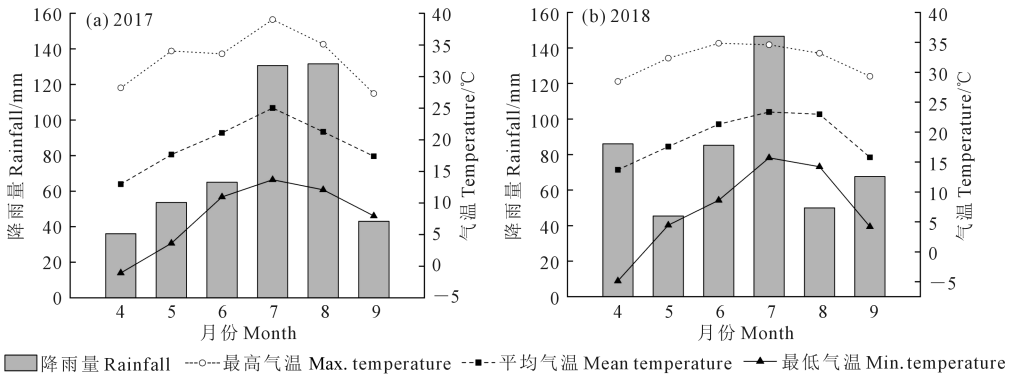


图 1 2017—2018 年苹果生育期各月降雨量和气温分布

Fig.1 Distribution of monthly rainfall and temperature during the apple growing season from 2017 to 2018

2 a 苹果生育期内各月的降雨量和气温分布如图 1 所示。2 a 各月的温度和降雨略有差异,2017 年和 2018 年 7 月最高温度分别是 39.1℃ 和 34.6℃, 2017 年和 2018 年 4 月最低温度分别是 -1.07℃ 和 -4.87℃。2017 年和 2018 年苹果生育期内的总降雨量分别为 459.8 mm 和 480.8 mm。

1.2 试验材料与设计

选用长势一致、生长健壮的 19 a 生富士(长富 2 号)为试验材料,果树南北向种植,行、株距 5 m×4 m。供试基肥为复合肥料(N:P:K=14:16:15),供试追肥为尿素(N≥46%),农业用硫酸钾(K₂O≥51%)。

试验设灌水量和追施氮量 2 个因素,根据相关研究^[19-20]并结合当地施肥现状,追施氮处理设 4 个水平:高氮(N₁:施纯氮 0.69 kg·棵⁻¹,约合 345 kg·hm⁻²)、中氮(N₂:施纯氮 0.46 kg·棵⁻¹,约合 230 kg·hm⁻²)、低氮(N₃:施纯氮 0.23 kg·棵⁻¹,约合 115 kg·hm⁻²)和不施氮 N₄,各处理灌水量均为 80%I(W₂,I 为计算灌水量),探究最优追施氮量;在 Penman-Monteith 公式计算的作物需水量基础上设 4 个灌溉水平:高水(W₁:100%I)、中水(W₂:80%I)、低水(W₃:60%I)和不灌水 W₄,各处理追施氮量均为 230 kg·hm⁻²(N₂),探究最优灌水量。施肥方式采用条状深沟施肥,沿树冠投影边缘开挖长 50~60 cm、宽 20~30 cm、深 40~60 cm 的条状沟。2017 年 3 月 15 日和 2018 年 3 月 20 日果园进行基施肥,每棵树施纯氮 0.7 kg(约合 350 kg·hm⁻²),纯磷 0.8 kg(约合 400 kg·hm⁻²),纯钾 0.75 kg(约合 375 kg·hm⁻²)。2017 年 6 月 10 日和 2018 年 6 月 13 日果园进行追施肥,除追施氮肥外,每棵树追施纯钾 0.51 kg(约合 255 kg·hm⁻²)。灌溉方式采用环绕式滴

灌,滴灌区支管(Φ16 mm)沿种植行布置,在每棵树附近支管上安装滴灌管(Φ12 mm),滴灌管环绕树中心形成直径约为 1.5 m 的圆环,在滴灌管上均匀布置 10 个滴头,滴头间距 50 cm。每个灌水小区采用独立水表和水阀控制灌水量。自 2017 年 4 月 6 日和 2018 年 4 月 1 日起,每隔 15 d 对作物蒸发蒸腾量进行计算并根据 15 d 内的降雨量决定是否需要灌溉,直至 2017 年 10 月 2 日和 2018 年 9 月 27 日。2017 年 10 月 19 日和 2018 年 10 月 15 日收获。试验共 7 个处理小区(表 2),完全随机排列,每处理设 3 次重复,试验树四周设置保护行,划为 1 个小区,每小区 15 棵树。供试果园剪枝、病虫害防治、疏花疏果等管理措施与当地果园一致。灌水量计算公式为:

$$I = \sum_{i=1}^n (K_c \times ET_0 - \alpha P) \quad (1)$$

式中,I 为计算灌水量(mm),n 为天数,K_c 为作物系数,ET₀ 为日参考作物蒸发蒸腾量(mm),α 为经验系数,P 为日降水量(mm)。灌水期间 K_c 按如下取值:4 月 K_c = 0.43,5 月 K_c = 0.59,6 月 K_c = 0.88,7 月 K_c = 1.06,8 月 K_c = 1.06,9 月 K_c = 1.01^[21-22];日 ET₀ 依据 FAO56 推荐的 Penman-Monteith 公式计算;α 按如下取值:P < 5 mm,α = 0;5 mm ≤ P < 50 mm,α = 1.0;P ≥ 50 mm,α = 0.7 ~ 0.8^[23]。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 气象数据 试验果园附近设置 1 台微型气象站(HOBO, Onset Computer Corporation, USA),每隔 15 min 自动记录 1 次环境参数,包括降雨、大气压强、太阳辐射、风速、温度和相对湿度等。

1.3.2 叶片相对含水率 2017 年 8 月 27 日和 2018 年 8 月 30 日(果实膨大后期)选取各处理试验树东南西北 4 个方向的长势均匀、大小适中、无病虫害的

成熟叶片,每棵试验树摘取 10 片,取下后测其鲜质量 $W_f(g)$,然后放入装有 1 000 mL 蒸馏水的烧杯内浸泡,至其质量不再增加,得到其饱和鲜质量 $W_l(g)$,然后放入 105℃ 干燥箱内杀青 30 min,最后将温度调至 75℃ 干燥至恒质量,即干质量 $W_d(g)$ 。

叶片相对含水率 $RWC(g \cdot g^{-1})$ 计算式为:

$$RWC = \frac{W_f - W_d}{W_l - W_d} \times 100\%$$

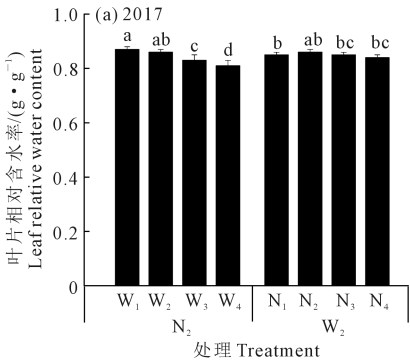
(2)

1.3.3 叶片 SPAD 值 叶绿素仪通过测量叶片对两个波长段的吸收率计算出 SPAD 值,用数字表示叶绿素的相对含量。本研究所用仪器为叶绿素仪 SPAD-502 Plus(Knioca Minolta,日本)。生育期内在各处理试验树东、南、西、北 4 个方向选取上、中、下部位的成熟叶片,每处理共 36 片叶,在叶缘和叶脉中间部位测定 SPAD 值。分别自 2017 年 4 月 20 日和 2018 年 4 月 16 日起,每隔 15 d 测定一次,于 2017 年 9 月 17 日和 2018 年 9 月 26 日止。

表 2 各处理小区的灌水量和施氮量

Table 2 The application amount of irrigation and nitrogen of the experimental treatments

处理 Treatment	总灌水量 Total irrigation amount /(m ³ ·hm ⁻²)		施纯氮量/(kg·hm ⁻²) Nitrogen application amount				
			基施氮 Basal N		追施氮 Topdressing N		
			2017	2018	2017	2018	
N ₂	W ₁	1715.0	1721.6	375	375	230	230
	W ₂	1372.0	1378.6	375	375	230	230
	W ₃	1029.0	1033.0	375	375	230	230
	W ₄	0	0	375	375	230	230
W ₂	N ₁	1372.0	1378.6	375	375	345	345
	N ₂	1372.0	1378.6	375	375	230	230
	N ₃	1372.0	1378.6	375	375	115	115
	N ₄	1372.0	1378.6	375	375	0	0



1.3.4 产量 分别于 2017 年 10 月 19 日和 2018 年 10 月 15 日果实成熟时将各处理试验树苹果全部采收,用分级板对苹果进行手工分级。分级板上有 80、75、70 mm 等不同直径的圆孔,可将果实按横径大小分成若干等级。本研究将每棵试验树果实横径分为>80 mm、70~80 mm、<70 mm 3 级。分级后称量各级苹果质量并计算产量。

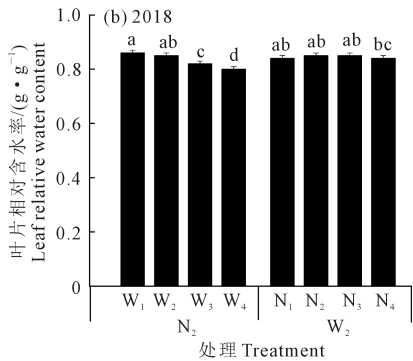
1.3.5 品质 果实采收后,每棵试验树随机选取 10 个苹果进行品质测定。用称量法测定单果重;用游标卡尺测定果实的纵径和横径,并计算果形指数(果实纵径与横径的比值);用钼蓝比色法测定果实维生素 C;用 GY-4-J 型硬度计测定果实硬度;用 RHBO-90 型手持折射仪测定可溶性固形物;用蒽酮比色法测定可溶性糖;用酸碱滴定法测定果实可滴定酸;用可溶性糖与可滴定酸的比值表示糖酸比;用 WSC-2B 便携式精密色差仪测定果实色泽。

1.4 数据处理与分析

用 Excel 2010 软件对不同处理间各指标进行基础整理;用 SPSS Statistics 18.0 统计软件对数据进行方差分析;用 Origin 2019 软件制图。

2 结果与分析

2.1 灌水量和追施氮量对叶片相对含水率的影响 灌水量和追施氮量对叶片相对含水率的影响如图 2 所示。灌水量对叶片相对含水率影响显著(2017 年: $P<0.05$, $F=18.559$;2018 年: $P<0.05$, $F=22.750$);追施氮量对叶片相对含水率影响不显著(2017 年: $P=0.373$, $F=1.123$;2018 年: $P=0.434$, $F=0.972$)。在 N₂追施氮量下,叶片相对含水率随灌水量的增加而增加,具体表现为:W₁、W₂和 W₃处理的叶片相对含水率均显著大于 W₄处理,W₁和 W₂处



注:柱上不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference among treatments within a season ($P<0.05$). The same below.

图 2 2017—2018 年灌水和追施氮处理下苹果叶片的相对含水率

Fig.2 Leaf relative water content of apple tree under different irrigation and nitrogen treatments

理差异不显著。 W_1 、 W_2 和 W_3 处理 2 a 平均叶片相对含水率比 W_4 处理分别增加 7.5%、6.3%、2.5%。2 年 W_1N_2 处理的叶片相对含水率均为最大,平均为 0.87; W_4N_2 处理最小,平均为 0.81。 W_1N_2 、 W_2N_2 和 W_2N_1 处理叶片相对含水率不存在显著差异,说明适量的灌水或追施氮能有效增加苹果叶片相对含水率,过量灌水或追施氮不能大幅增加叶片相对含水率,造成资源浪费。

2.2 灌水量和追施氮量对叶片 SPAD 值的影响

灌水处理和追施氮处理下苹果叶片 SPAD 值随生育进程的变化趋势如图 3 所示。生育前期(4 月 15 日—6 月 20 日)由于叶片萌发和初期生长,SPAD 值迅速增加,生育中期(6 月 21 日—8 月 20 日)追施氮后,除 N_4 外,各追施氮处理的 SPAD 值均迅速增加,处理间差异逐渐显现。生育后期(8 月 21 日—9 月 30 日)叶片基本停止生长,逐渐枯萎和凋落,SPAD 值呈现出逐渐减小的趋势。 N_2 追施氮量的 SPAD 值在 2 a 间均为 W_1 处理取得最大值,平均为 61.30,SPAD 值随灌水量的增加而增加,总体表现为 $W_1>W_2>W_3>W_4$; W_2 滴灌水量下的 2 a SPAD 值均为 N_1 处理取得最大值,平均为 61.16,SPAD 值随追施氮量的增加而增加,追施氮后表现为 $N_1>N_2>N_3>N_4$ 。可见,增加灌水量和追施氮量均能有效增加叶片 SPAD 值。

2.3 灌水量和追施氮量对产量的影响

灌水量和追施氮量对苹果产量影响极显著(表 3)。进行灌水和追施氮处理的苹果产量均显著大于不灌水(W_4)和不追施氮(N_4)处理,2 a 间 W_1N_2 处理的苹果总产量均为最大,平均为 $53.15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$; W_2N_4 处理最小,平均为 $33.89\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。 N_2 追施氮量下, W_1 、 W_2 和 W_3 处理 $<70\text{ mm}$ 的苹果产量均显著小于 W_4 处理,2017 年 W_1 和 W_2 差异不显著,2018 年 W_1 显著小于 W_2 ; $70\sim80\text{ mm}$ 的苹果产量除 W_1 和 W_2 差异不显著外,各处理均随灌水量的增加显著增加; $>80\text{ mm}$ 的苹果产量随灌水量的增加显著增加,2018 年 W_1 和 W_2 处理差异不显著;2017 年苹果总产量随灌水量的增加显著增加,2018 年当灌水量由 W_2 提高到 W_1 时,总产量不再显著增加,2 年 W_1 比 W_2 处理平均仅增加 3.4%,2017 年和 2018 年进行灌水处理的苹果总产量分别比 W_4 处理增产 10.0%~24.1%和 9.4%~32.3%。

W_2 灌水量下, $<70\text{ mm}$ 的苹果产量除 N_1 和 N_2 处理间差异不显著外,2017 年随追施氮量的增加显著

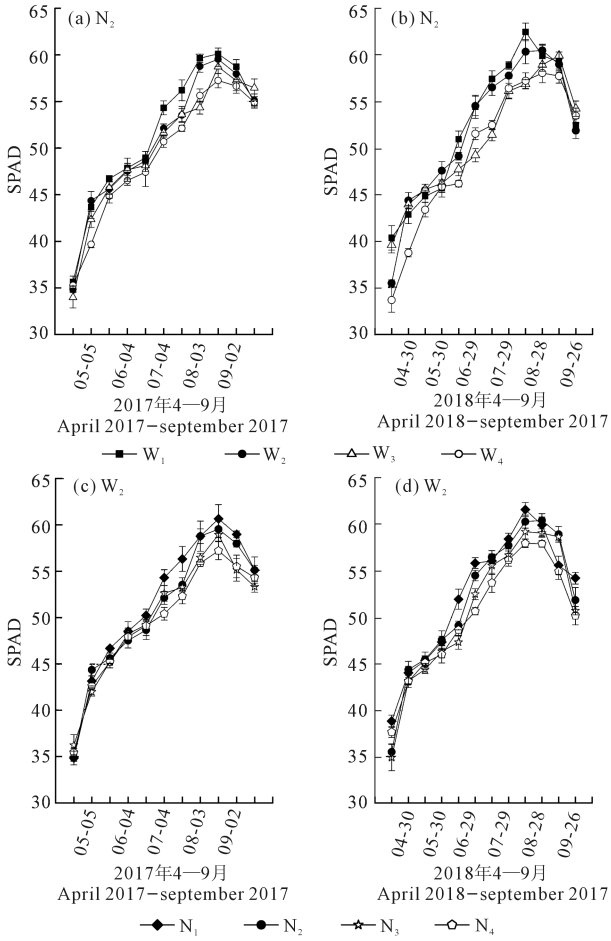


图 3 2017—2018 年生长季灌水和追施氮处理下苹果叶片的 SPAD 值

Fig.3 Leaf SPAD of apple tree under different irrigation and nitrogen treatments in the growing season of 2017–2018

降低,2018 年随追施氮量的增加先显著增加后显著降低; $70\sim80\text{ mm}$ 的苹果产量随追施氮量的增加先增加后降低, N_1 和 N_2 处理差异不显著; $>80\text{ mm}$ 的苹果产量除 2018 年 N_1 和 N_2 处理差异不显著外,各处理均随追施氮量的增加先显著增加后显著降低;苹果总产量随追施氮量的增加先增加后降低, N_1 和 N_2 处理差异不显著, N_1 、 N_2 和 N_3 处理 2 a 平均总产量比 N_4 处理分别增加 50.4%、54.2%和 26.6%。增加灌水量和追施氮量可以提高果实产量,追施氮量对产量的影响明显高于灌水量的影响,但过量追施氮会对果实产量产生一定的抑制作用。综合分析各处理的产量, W_2N_2 处理能在不浪费资源的前提下显著提高苹果产量。

年份对各横径区间产量及总产量影响极显著,2017 年 $<70\text{ mm}$ 的苹果产量比 2018 年减少 11.5%,2017 年 $70\sim80\text{ mm}$ 产量、 $>80\text{ mm}$ 产量和苹果总产量比 2018 年分别增加 71.7%、77.9%和 52.9%。2017 年优果率和总产量显著高于 2018 年。

表 3 不同灌水处理和追施氮处理的苹果产量
Table 3 Yield of apple tree under different irrigation and nitrogen treatments

年份 Year	处理 Treatment	各横径区间产量 Yield of each interval/(t·hm ⁻²)			总产量 Total yield/(t·hm ⁻²)	
		<70 mm	70~80 mm	>80 mm		
2017	N ₂	W ₁	5.85±0.46d	30.00±0.31ab	27.62±0.56a	63.46±1.09a
		W ₂	6.06±0.44d	30.36±0.62a	24.69±0.41b	61.10±1.28b
		W ₃	7.93±0.32c	28.89±0.18bc	19.47±0.43d	56.29±0.83c
		W ₄	9.82±0.22b	26.99±0.11d	16.35±0.48e	51.15±0.52d
	W ₂	N ₁	5.93±0.28d	30.34±0.35a	23.50±0.46c	59.77±0.61b
		N ₂	6.06±0.44d	30.36±0.62a	24.69±0.41b	61.10±1.28b
		N ₃	6.82±0.36d	27.62±0.53cd	16.33±0.59e	50.77±0.92c
		N ₄	10.90±0.29a	21.70±0.51e	9.89±0.12f	42.49±0.21e
	显著性检验 Significance test (<i>F</i>)					
	滴灌水量 Irrigation	32.338 **	14.908 **	142.679 **	29.756 **	
	追施氮量 Nitrogen	49.385 **	101.926 **	296.042 **	115.013 **	
2018	N ₂	W ₁	7.76±0.43e	19.60±0.35a	15.46±0.18a	42.83±0.56a
		W ₂	8.43±0.37d	18.75±0.22ab	14.43±0.18ab	41.61±0.29ab
		W ₃	8.58±0.15cd	16.47±0.42c	10.39±0.54c	35.43±0.95c
		W ₄	9.04±0.18ab	15.49±0.22cd	7.86±0.33d	32.38±0.36d
	W ₂	N ₁	8.22±0.19d	18.42±0.20b	13.84±0.16b	40.48±0.47b
		N ₂	8.43±0.37d	18.75±0.22ab	14.43±0.18ab	41.61±0.29ab
		N ₃	9.37±0.18a	14.55±0.43d	9.89±0.59c	33.81±0.78d
		N ₄	8.86±0.27bc	10.79±0.38e	5.63±0.42e	25.28±0.61e
	显著性检验 Significance test (<i>F</i>)					
	滴灌水量 Irrigation	10.786 **	42.603 **	113.227 **	88.298 **	
	追施氮量 Nitrogen	10.961 **	174.255 **	159.711 **	210.014 **	
年份 Year	31.646 **	1233.653 **	536.653 **	840.534 **		

注: * 表示差异显著($P<0.05$), ** 表示差异极显著($P<0.01$); 同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: * means significant difference at the 0.05 probability level, ** means significant difference at the 0.01 probability level. Different lowercase letters in the same column mean significant difference among treatments ($P<0.05$). The same below.

2.4 灌水量和追施氮量对苹果品质的影响

2.4.1 灌水量和追施氮量对苹果商品品质指标的影响

(1)单果重。2 a 不灌水(W₄)和不追施氮(N₄)处理的单果重显著小于灌水和追施氮处理(表 4)。W₁N₂处理的单果重 2 a 均为最大,平均为 212.86 g, W₂N₄处理最小,平均为 158.29 g。在 N₂追施氮量下,单果重除 W₁和 W₂处理差异不显著外,各处理均随灌水量的增加显著增加,W₁、W₂和 W₃处理 2 a 平均单果重比 W₄分别增加 21.7%、20.4%和 12.3%。在 W₂灌水量下,单果重随追施氮量的增加先增加后降低,2017 年单果重表现为 N₂显著大于 N₁,N₁显著大于 N₃和 N₄;2018 年 N₁和 N₂的单果重差异不显著,但均显著大于 N₃和 N₄,N₁、N₂和 N₃处理 2 a 平均单果重比 N₄分别增加 29.6%、32.9%和 12.2%。这说明中水中氮处理有利于提高单果重。年份对单果重影响极显著,2017 年单果重显著大于 2018 年。

(2)硬度。灌水量和追施氮量对苹果硬度影响极显著(表 4)。由表 4 可知,不同水氮处理苹果硬度差异明显,其硬度变化范围为 6.32~8.13 kg·cm⁻²。硬度随灌水量和追施氮量的增加而减小。在 N₂追施氮量下,W₁和 W₂处理 2017 年差异不显著,

2018 年差异显著,W₁、W₂和 W₃处理 2 a 平均硬度分别比 W₄处理减少 16.7%、11.5%和 7.7%。在 W₂滴灌水量下,2017 年 N₁、N₂和 N₃处理间差异不显著,2018 年 N₁和 N₂处理差异不显著,但显著小于 N₃, N₁、N₂和 N₃处理 2 a 平均硬度分别比 N₄处理减少 15.4%、13.2%和 7.8%。2017 年和 2018 年硬度 W₂N₄处理硬度最大,分别为 7.62 kg·cm⁻²和 8.13 kg·cm⁻²,W₂N₂与其相比,硬度平均降低 13.2%。

(3)果形指数。2 a 追施氮量对果形指数有显著影响,2017 年滴灌水量对果形指数影响显著,2018 年滴灌水量对果形指数影响不显著(表 4)。在 N₂追施氮量下,2017 年 W₄处理显著大于 W₁,2018 年各处理间无显著差异;在 W₂滴灌水量下,果形指数除 N₁和 N₂处理相等外,随追施氮量的增加而降低。

(4)色泽。2 a 追施氮量和 2018 年滴灌水量显著影响色泽明亮度 *L*(表 4)。色泽明亮度 *L* 随灌水量和追施氮量的增加先增加后降低,各处理间差异不显著。2018 年滴灌水量对色泽指数 *a* 影响显著,色泽指数 *a* 随滴灌水量的增加先增加后降低,追施氮量对色泽指数 *b* 影响显著,色泽指数 *b* 随追施氮量的增加先降低后增加。

表 4 灌水处理和追施氮处理下的苹果商品品质指标

Table 4 Commodity qualities of apple under different irrigation and nitrogen treatments								
年份 Year	处理 Treatment	单果重 Weight /(g · fruit ⁻¹)	硬度 Hardness /(kg · cm ⁻²)	果形指数 Fruit shape index	色泽 Colour			
					明亮度 <i>L</i> Brightness <i>L</i>	色泽指数 <i>a</i> Colour index <i>a</i>	色泽指数 <i>b</i> Colour index <i>b</i>	
2017	N ₂	W ₁	215.57±2.06a	6.32±0.02e	0.83±0.01c	54.04±1.67ab	32.34±1.47ab	12.54±0.39c
		W ₂	212.98±3.89a	6.80±0.15cde	0.85±0.01bc	55.70±0.88a	33.82±0.96a	12.92±0.34bc
		W ₃	198.33±1.57b	7.07±0.14bc	0.85±0.02bc	53.10±0.10abc	30.08±1.35abc	13.35±1.00abc
		W ₄	178.05±2.46c	7.50±0.10ab	0.87±0.01ab	50.33±1.49bc	28.55±1.67bc	15.83±1.89a
	W ₂	N ₁	210.77±2.34ab	6.51±0.23de	0.85±0.01bc	53.49±1.10abc	32.30±1.53ab	13.57±0.50abc
		N ₂	212.98±3.89a	6.80±0.15cde	0.85±0.01bc	55.70±0.88a	33.82±0.96a	12.92±0.34bc
		N ₃	179.71±3.26c	6.93±0.16cd	0.86±0.02ab	52.41±1.31abc	29.23±2.20bc	14.15±0.36abc
		N ₄	162.50±9.31d	7.62±0.23a	0.88±0.01a	49.61±1.92c	27.64±1.75c	15.50±0.31ab
	显著性检验 Significance test(<i>F</i>)							
	滴灌水量 Irrigation	15.395 * *	9.183 * *	3.967 *	2.848	2.140	2.899	
追施氮量 Nitrogen	33.288 * *	8.323 * *	4.414 *	3.602 *	3.103	1.595		
2018	N ₂	W ₁	210.14±1.65a	6.55±0.05e	0.85±0.02bc	53.28±0.82abc	32.36±0.67ab	14.59±1.06ab
		W ₂	207.41±1.86a	6.87±0.16d	0.84±0.01bc	55.69±1.43a	33.33±0.93a	11.74±0.46b
		W ₃	193.60±2.51b	7.18±0.06c	0.86±0.01abc	53.24±0.89abc	30.14±0.37abc	17.50±0.25a
		W ₄	171.14±8.02d	7.95±0.09a	0.87±0.04ab	49.64±0.64c	28.51±0.70c	14.02±1.87ab
	W ₂	N ₁	199.62±2.56b	6.81±0.04de	0.84±0.01c	54.04±1.15ab	32.83±0.74ab	17.32±1.36a
		N ₂	207.41±1.86a	6.87±0.16d	0.84±0.01c	55.69±1.43a	33.33±0.93a	11.74±0.46b
		N ₃	175.38±1.60c	7.61±0.06b	0.85±0.01bc	55.05±2.36a	30.09±1.34abc	11.45±1.94b
		N ₄	154.08±4.75e	8.13±0.08a	0.89±0.01a	50.27±0.84bc	29.75±2.06bc	13.16±0.87b
	显著性检验 Significance test(<i>F</i>)							
	滴灌水量 Irrigation	65.297 * *	48.522 * *	1.853	3.788 *	3.894 *	2.804	
追施氮量 Nitrogen	105.823 * *	53.382 * *	4.289 *	3.578 *	2.791	4.570 *		
年份 Year	39.244 * *	6.250	0.500	0.089	0.435	0.806		

2.4.2 灌水量和追施氮量对苹果食用品质指标的影响

(1) 维生素 C。灌水量和追施氮量对维生素 C 影响极显著(表 5)。进行灌水和追施氮处理的维生素 C 均显著大于不灌水(W₄)和不追施氮(N₄)处理。W₂N₂处理的维生素 C 在 2 a 间均为最大,W₁N₂处理次之。在 N₂追施氮量下,维生素 C 随灌水量的增加而增加,但 W₁和 W₂处理差异不显著,W₁、W₂和 W₃处理的维生素 C 与 W₄相比,2017 年分别增加 36.5%、41.2%和 15.9%,2018 年分别增加 66.1%、69.5%和 41.2%。在 W₂灌水量下,维生素 C 除 N₁和 N₂处理差异不显著外,各处理均随追施氮量的增加显著增加,N₁、N₂和 N₃处理苹果的维生素 C 与 N₄相比,2017 年分别增加了 33.4%、46.1%和 18.7%,2018 年分别增加了 58.6%、80.1%和 47.0%。由表 5 分析可知,W₁N₂、W₂N₂和 W₂N₁处理的维生素 C 不存在显著差异,说明适量灌溉或追施氮能有效增加维生素 C,过量灌溉或追施氮不能大幅促进维生素 C 的增加。年份对维生素 C 影响显著,2018 年维生素 C 显著大于 2017 年,2018 年比 2017 增加 14.3%。

(2) 可溶性固形物。灌水量和追施氮量对可溶性固形物影响极显著(表 5)。2 a 不灌水(W₄)处理的可溶性固形物均显著大于灌水处理,不追施氮(N₄)处理的可溶性固形物显著小于追施氮处理。

在 N₂追施氮量下,可溶性固形物随灌水量的增加显著降低,W₁、W₂和 W₃处理 2 a 平均可溶性固形物分别比 W₄处理减少 11.3%、4.9%和 2.5%。在 W₂滴灌水量下,可溶性固形物随追施氮量的增加显著增加,N₁、N₂和 N₃处理 2 a 平均可溶性固形物分别比 N₄处理增加 11.7%、9.7%和 4.8%。这说明减少灌水量和增加施氮量有利于增加可溶性固形物含量。

(3) 可溶性糖。2017 年灌水量显著影响可溶性糖,追施氮量对可溶性糖影响极显著,2018 年灌水量对可溶性糖影响不显著,追施氮量对可溶性糖影响极显著。2 a W₁N₂处理的可溶性糖均为最大,平均为 11.5%,W₂N₂次之,平均为 11.3%。在 N₂追施氮量下,除 W₁和 W₂处理差异不显著外,可溶性糖随灌水量的增加显著增加,W₁、W₂和 W₃处理 2 a 平均可溶性糖分别比 W₄处理增加 14.3%、11.6%和 5.0%。在 W₂灌水量下,可溶性糖随追施氮量的增加先增加后降低,N₁和 N₂处理差异不显著,N₁、N₂和 N₃处理 2 a 平均可溶性糖分别比 N₄处理增加 14.3%、16.7%和 6.8%。年份对可溶性糖影响极显著,2017 年可溶性糖显著大于 2018 年,2017 年比 2018 年增加 7.2%。

(4) 可滴定酸。2 a 灌水量对可滴定酸影响极显著,追施氮量 2017 年对可滴定酸影响极显著,2018 年影响不显著。W₂N₄处理 2 a 的可滴定酸均

最大, W_1N_2 均最小, 处理间可滴定酸的变化范围为 0.35% ~ 0.45% (2017 年) 和 0.35% ~ 0.47% (2018 年)。在 N_2 追施氮量下, W_1 和 W_2 处理的可滴定酸均显著小于 W_4 处理, 且 W_1 和 W_2 无显著差异。 W_1 和 W_2 处理 2 a 平均可滴定酸与 W_4 相比分别减少 24.7% 和 16.9%。在 W_2 灌水量下, 2017 年可滴定酸随追施氮量的增加而降低, 2018 年随追施氮量的增加先降低后增加。与 N_4 处理相比, N_1 和 N_2 处理 2 a 平均可滴定酸减少均为 19.6%。年份对可滴定酸影响显著, 2018 年可滴定酸显著大于 2017 年, 2018 年比 2017 年增加 3.6%。

(5) 糖酸比。灌水量对糖酸比影响极显著, 2017 年追施氮量对糖酸比影响极显著, 2018 年影响显著。在 N_2 追施氮量下, 2017 年糖酸比随灌水量的增加先增加后降低, 2018 年随灌水量的增加而增加, W_1 、 W_2 和 W_3 处理 2 a 平均糖酸比分别比 W_4 处理增加 40.9%、34.2% 和 7.7%。在 W_2 灌水量下, 糖酸比随追施氮量的增加先增加后降低, N_1 、 N_2 和 N_3 处理 2 a 平均糖酸比分别比 N_4 处理增加 39.0%、45.6% 和 20.1%。糖酸比是营养品质的重要指标, 适当的糖酸比才能产生最佳的口感^[24]。增加灌水量和追施氮量有利于提高糖酸比。年份对糖酸比影响显著, 2017 年糖酸比显著大于 2018 年, 2017 年比 2018 年增加 12.5%。

3 讨 论

叶片是植物的光合器官, 对水肥处理较为敏感, 叶片相对含水率对净光合作用影响显著, 能较好地反映植物的水分状况和土壤含水量, 直接影响植物的抗旱性^[25]。El Jaouhari 等^[26] 在不同程度亏缺灌溉对苹果树影响的研究中发现重度亏缺灌溉得到最高的叶片相对含水率, 与本研究结果不一致, 可能是由于果树耗水特性和生育期内降雨分布不同造成的。朱再标等^[27] 研究表明, 高氮处理显著降低柴胡叶片相对含水率, 造成细胞膜相对透性上升, 明显降低细胞膜稳定性。但目前关于滴灌条件下深沟追施氮对苹果叶片相对含水率的影响未见报道。本研究中, 当追施氮量由 N_2 提升到 N_1 , 2 a 叶片相对含水率平均降低 1.2%, 说明过量追施氮降低叶片相对含水率。中水中氮处理 (W_2N_2) 已能有效增加苹果生殖生长阶段的叶片相对含水率, 叶片相对含水率与光合特性密切相关, 通过其来改变产量^[28], W_2N_2 比 W_1N_2 处理产量降低 3.3%, 比 W_2N_1 处理增加 2.5%, 过量灌溉或追施氮再不能大幅促进叶片相对含水率, 产量也不能显著提高。

叶绿素是植物进行光合作用的主要色素, 水肥处理对植物叶绿素形成影响, 进而影响植物的光合

表 5 灌水处理和追施氮处理下的苹果食用品质指标

Table 5 Edible qualities of apple under different irrigation and nitrogen treatments							
年份 Year	处理 Treatment	维生素 C Vitamin C /(mg · (100g) ⁻¹)	可溶性固形物 Soluble solid/%	可溶性糖 Soluble sugar/%	可滴定酸 Titratable acids/%	糖酸比 Sugar-acid ratio	
2017	N ₂	W ₁	4.90±0.13a	13.87±0.15cd	11.83±0.33a	0.35±0.01bc	32.76±0.43b
		W ₂	5.07±0.07a	14.75±0.05b	11.72±0.35a	0.36±0.01c	34.79±0.17a
		W ₃	4.16±0.28b	15.37±0.11ab	10.96±0.23cd	0.42±0.02ab	26.66±0.21c
		W ₄	3.59±0.18c	15.52±0.18a	10.23±0.28bc	0.44±0.02a	24.47±1.49cd
	W ₂	N ₁	4.63±0.20ab	14.94±0.15b	11.45±0.20ab	0.35±0.01bc	32.09±0.88b
		N ₂	5.07±0.07a	14.75±0.05a	11.72±0.35a	0.36±0.01c	34.79±0.17a
		N ₃	4.12±0.12b	14.04±0.18c	10.84±0.13bc	0.41±0.03a	26.83±0.73c
		N ₄	3.47±0.14c	13.56±0.09d	10.08±0.17d	0.45±0.03a	22.07±1.39d
	显著性检验 Significance test (<i>F</i>)						
	滴灌水量 Irrigation	15.813 * *	29.362 * *	5.634 *	5.962 * *	27.064 * *	
追施氮量 Nitrogen	22.254 * *	25.125 * *	9.039 * *	8.274 * *	39.043 * *		
2018	N ₂	W ₁	5.93±0.07a	13.37±0.08d	11.22±0.50a	0.35±0.02d	32.33±2.53a
		W ₂	6.05±0.11a	14.05±0.07c	10.78±0.44ab	0.38±0.02bcd	27.58±1.79bc
		W ₃	5.04±0.21b	14.59±0.10b	10.23±0.06abc	0.44±0.03ab	23.28±1.56cd
		W ₄	3.57±0.56c	15.19±0.07a	9.94±0.05bc	0.45±0.02a	21.87±1.09d
	W ₂	N ₁	5.33±0.21ab	14.39±0.07c	10.67±0.33ab	0.39±0.02cd	27.36±0.45ab
		N ₂	6.05±0.11a	14.05±0.07ab	10.78±0.44ab	0.38±0.02bcd	27.58±1.79bc
		N ₃	4.94±0.18b	13.49±0.21d	9.85±0.25bc	0.40±0.01abcd	24.47±0.80bcd
		N ₄	3.36±0.08c	12.72±0.09e	9.29±0.31c	0.47±0.01abc	20.64±0.88d
	显著性检验 Significance test (<i>F</i>)						
	滴灌水量 Irrigation	20.114 * *	49.759 * *	3.213	6.140 * *	10.482 * *	
追施氮量 Nitrogen	26.709 * *	41.162 * *	3.477 *	1.321	3.697 *		
年份 Year	10.770 *	4.971	37.965 * *	8.000 *	11.038 *		

作用^[29],最终影响果实产量和品质。王连君等^[30]在研究膜下滴灌水肥耦合对葡萄的生长发育影响中得到相似的结论。本研究中,在 N_2 追施氮量下,各处理生育期内的平均 SPAD 值随灌水量的增加而增加,这可能是因为土壤水分胁迫会影响叶绿素的生物合成,促进已合成的叶绿素分解,使其含量降低^[31];在 W_2 滴灌水量下,各处理追施氮后的 SPAD 值随追施氮量的增加而增加,这与王春枝等^[32]对南果梨的研究结果相似。

灌水量和施肥量是农业生产中影响作物产量非常重要的因素。李建明等^[33]研究表明,番茄的产量随灌水量和施肥量的增加显著增加,超过一定范围后产量逐渐降低。本研究中, $<70\text{ mm}$ 的苹果产量随灌水量的增加显著降低, $70\sim 80\text{ mm}$ 、 $>80\text{ mm}$ 的苹果产量和苹果总产量均随灌水量的增加显著增加,但当灌水量由 W_2 提升到 W_1 ,各横径区间产量及总产量均不再大幅提升,这与周罕觅等^[34]的研究结果相似。杜少平等^[35]研究表明,在一定范围内甜瓜产量随氮肥用量的增加而增加,达到一定值时,继续增加氮肥用量产量呈下降趋势。Pascual 等^[36]研究表明,施氮量为 $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时桃产量显著增加,而当施氮量为 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时桃产量略有下降。本研究中,当追施氮量由 N_4 提升到 N_2 ,除 $<70\text{ mm}$ 的苹果产量外,各横径区间产量和总产量均随追施氮量的增加显著增加,当追施氮量由 N_2 提升到 N_1 ,各横径区间产量和总产量均不再大幅提升。2018 年苹果产量显著低于 2017 年,原因可能是 2018 年 4 月 7 日遭遇最低温度 -4.87°C ,此时试验地苹果正值花期,气温骤降造成严重低温冻害。

提高果实产量和品质有利于农业资源的合理化应用,土壤水分和氮素是影响果实品质的重要因素。本研究中,单果重、维生素 C、可溶性糖和糖酸比均随着灌水量的增加显著增加,在充分灌溉(W_1)下,单果重、维生素 C、可溶性糖和糖酸比不再大幅提升,说明过量灌水不利于提高果实品质,这与前人的研究结果基本一致^[37-39]。硬度、果形指数、可溶性固形物和可滴定酸含量随灌水量的增加而降低,这与邢英英等^[40]、De Oliveira 等^[41]和 Leib 等^[42]的研究结果一致。高氮处理(N_1)不能再显著提高单果重、维生素 C、可溶性固形物和可溶性糖。硬度、果形指数和可滴定酸随追施氮量的增加显著降低,这与 Lipan 等^[43]的研究结果相似。可见,中水中氮处理(W_2N_2)有利于提高果实品质,过量灌溉

和追施氮不能再大幅提升果实品质,浪费水肥资源,增加生产成本。

4 结 论

中水(W_2)和中氮(N_2)处理能显著促进苹果叶片相对含水率和叶片 SPAD 值,显著提高果实的产量和品质,而高水(W_1)和高氮(N_1)处理的促进作用不显著。2 a 间 W_1N_2 处理的叶片相对含水率和产量均最大, W_2N_2 处理苹果的叶片相对含水率和产量仅比 W_1N_2 降低 1.1%和 3.4%,但 W_2N_2 处理的灌水量显著小于 W_1N_2 处理,叶片 SPAD 值随灌水量和追施氮量的增加而增加。 W_2N_2 处理能显著增加苹果的单果重、维生素 C 和可溶性糖含量,提高果实品质。综合考虑果树生长、产量、品质及节水节肥等多种因素,在滴灌和深沟施肥的田间栽培模式下, W_2N_2 处理是试验区苹果生产中适宜的灌水和追施氮组合,能够为当地苹果高产优质提供理论依据。

参 考 文 献:

- [1] 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.
- [2] 张雪阳,朱海霞,张会新. 陕西苹果产业发展现状与发展思路[J]. 西北大学学报(哲学社会科学版),2005, 35(1): 36-41.
- [3] 葛顺峰,朱占玲,魏绍冲,等. 中国苹果化肥减量增效技术途径与展望[J]. 园艺学报,2017, 44(9): 1681-1692.
- [4] Du S Q, Kang S Z, Li F S, et al. Water use efficiency is improved by alternate partial root-zone irrigation of apple in arid Northwest China [J]. Agricultural Water Management, 2017, 179:184-192.
- [5] Paula B V D, Marques A C R, Rodrigues L A T, et al. Morphological and kinetic parameters of the uptake of nitrogen forms in clonal peach rootstocks[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 239:205-209.
- [6] Falguera V, Lordan J, Gatiús F, et al. Influence of nitrogen fertilization on polyphenol oxidase activity in peach fruits[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 142:155-157.
- [7] 王卓. 根区滴灌对山地苹果树氮肥利用率的影响[D]. 咸阳:西北农林科技大学, 2017.
- [8] 李辉桃,周建斌,郑险峰,等. 旱地红富士果园土壤营养诊断和施肥[J]. 干旱地区农业研究, 1996, 14(2): 45-50.
- [9] 刘长虹,韩明玉,张立新. 初夏施肥对渭北旱塬红富士苹果生长、产量及品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 62-66.
- [10] 荣传胜,刘秀春,周朝辉,等. 滴灌减量施肥对果树产量、品质的影响[J]. 北方果树, 2019, 210(2): 5-7,10.
- [11] 张芳芳,韩明玉,张立新,等. 红富士苹果对初夏土施-(15)N-尿素的吸收、分配和利用特性[J]. 果树学报, 2009, 26(2): 135-139.
- [12] Parvizi H, Sepaskhah A R. Effect of drip irrigation and fertilizer regimes on fruit quality of a pomegranate (*Punica granatum* (L.) cv. Rabab) orchard [J]. Agricultural Water Management, 2015, 156: 70-78.

[13] 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.

[14] 刘贤赵,王庆,衣华鹏. 旱地苹果园环状深沟施肥综合效应初报[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(5):77-82.

[15] 白茹,李丙智,张林森,等. 陕西渭北苹果园土壤 NO₃-N 累积的影响因素研究[J]. 果树学报, 2007, 24(4): 411-414.

[16] Ayars J E, Phene C J, Phene R C, et al. Determining pomegranate water and nitrogen requirements with drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2017, 187:11-23.

[17] Dai Z G, Fei L J, Huang D L, et al. Coupling effects of irrigation and nitrogen levels on yield, water and nitrogen use efficiency of surge-root irrigated jujube in a semiarid region[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213:146-154.

[18] Bussi C, Huguet J G, Besset J, et al. Effects of nitrogen fertilization applied during trickle irrigation on the growth and fruit yield of peach[J]. European Journal of Agronomy, 1994, 3(3):243-248.

[19] 杨秀山,赵鲁邦,张东,等. 洛川县苹果果园施肥现状与对策[J]. 陕西农业科学, 2017, 63(1): 61-63.

[20] 刘侯俊,巨晓荣,同延安,等. 陕西省主要果树的施肥现状及存在问题[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(1): 38-44.

[21] 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.

[22] 王进鑫,张晓鹏,高保山,等. 渭北旱塬红富士苹果需水量与限水灌溉效应研究[J]. 水土保持研究, 2000, 7(1): 69-72.

[23] 徐凤琴. 有效降水量浅析[J]. 气象水文海洋仪器, 2009, 26(1): 96-100.

[24] 杨小振,张显,张宁,等. 嫁接砧木对西瓜品质影响的研究进展[J]. 中国瓜菜, 2013, 26(2): 1-5.

[25] Surendar K. Effect of water deficit on relationship between yield and physiological attributes of banana cultivars and hybrids[J]. African Journal of Plant Science, 2013, 7(8):374-383.

[26] El Jaouhari N, Abouabdillah A, Bouabid R, et al. Assessment of sustainable deficit irrigation in a Moroccan apple orchard as a climate change adaptation strategy[J]. Science of the Total Environment, 2018, 642:574-581.

[27] 朱再标,梁宗锁,王渭玲,等. 氮磷营养对柴胡抗旱性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 95-99.

[28] 周罕觅,张富仓, Roger Kjelgren, 等. 苹果幼树生理特性和水分生产率对水肥的响应研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 77-87.

[29] 孔宪辉,韩焕勇,宁新柱,等. 不同水分处理对棉花叶片叶绿素含量、光合速率及产量的影响研究[J]. 现代农业科技, 2008, 2(5): 131-132.

[30] 王连君,王程翰,乔建磊,等. 膜下滴灌水肥耦合对葡萄生长发育、产量和品质的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 113-119, 92.

[31] 耿东梅,单立山,李毅,等. 土壤水分胁迫对红砂幼苗叶绿素荧光和抗氧化酶活性的影响[J]. 植物学报, 2014, 49(3): 282-291.

[32] 王春枝,于小静,齐宝利,等. 施肥对南果梨叶片叶绿素含量及光合特性的影响[J]. 北方园艺, 2012, 28(14): 150-153.

[33] 李建明,潘铜华,王玲慧,等. 水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 82-90.

[34] 周罕觅,张富仓, Roger Kjelgren, 等. 水肥耦合对苹果幼树产量、品质和水肥利用的效应[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 173-183.

[35] 杜少平,马忠明,薛亮. 适宜施氮量提高温室砂田滴灌甜瓜产量品质及水氮利用率[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 112-119.

[36] Pascual M, Villar J M, Rufat J. Water use efficiency in peach trees over a four-year experiment on the effects of irrigation and nitrogen application[J]. Agricultural Water Management, 2016, 164:253-266.

[37] 李恩峰,谭煌,王嘉航,等. 滴灌水肥条件对樱桃产量、品质和土壤理化性质的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 236-246.

[38] 王振华,扁青永,李文昊,等. 南疆沙区成龄红枣水肥一体化滴灌的水肥适宜用量[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 96-104.

[39] Ucar Y, Kadayıfci A, Askin M A, et al. Yield and quality response of young ‘Gala, Galaxy’ trees under different irrigation regimes[J]. Erwerbs-Obstbau, 2016, 58(3):159-167.

[40] 邢英英,张富仓,张燕,等. 滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(4): 713-726.

[41] De Oliveira C M, Simões W L, Lopes P R C, et al. Flowering, fruiting and physiology of apple tree under different irrigation levels in the Brazilian semiarid region[J]. Comunicata Scientiae, 2017, 8(1): 99-108.

[42] Leib B G, Caspari H W, Redulla C A, et al. Partial rootzone drying and deficit irrigation of ‘Fuji’ apples in a semi-arid climate[J]. Irrigation Science, 2006, 24(2):85-99.

[43] Lipan L, Martín-Palomo M J, Sánchez-Rodríguez L, et al. Almond fruit quality can be improved by means of deficit irrigation strategies[J]. Agricultural Water Management, 2019, 217:236-242.