

不同灌水技术下水氮耦合对山地苹果 产量和品质及水氮利用的影响

杨震^{1,2}, 费良军^{1,2}, 李哲³, 彭有亮^{1,2}, 郝琨^{1,2}, 刘腾⁴

(1.西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,西安 710048;2.西安理工大学水利水电学院,西安 710048;3.邵阳市水利水电勘测设计院,湖南 邵阳 422099;4.榆林市乡村振兴规划发展指导中心,陕西 榆林 719000)

摘要:为探究不同灌水技术下水氮耦合对山地苹果产量、品质及水氮利用的影响,采用三因素三水平正交试验,共设 3 种灌水技术(涌泉根灌(S)、陶瓷渗灌(P)和地表滴灌(D))、3 个灌水量(高水(H₁)、中水(H₂)和低水(H₃))、3 个施氮量(高氮(N₁)、中氮(N₂)和低氮(N₃)),共 9 处理,每个处理重复 3 次。分析山地苹果产量及水氮利用效率对不同灌水技术下水氮调控的响应规律。结果表明:灌水技术对单果重、维生素 C 和果实色泽有显著影响($p < 0.05$),灌水量和施氮量对苹果的产量、单果重、硬度、色泽、可溶性固形物、可滴定酸、可溶性糖、维生素 C、糖酸比、氮肥偏生产力和灌溉水利用效率影响显著($p < 0.05$)。T₂处理(SH₂N₂)山地苹果产量(30 490.02 kg/hm²)最大,T₅处理(PH₂N₃)氮肥偏生产力(104.66 kg/kg)最大,T₉处理(DH₃N₂)灌溉水分利用效率(70.81 kg/m³)最高。主成分分析表明,不同灌水技术下水氮耦合的最优模式为涌泉根灌、中等灌水量(65%~80% θ_f)、中等施氮量(400 kg/hm²)组合(T₂)。研究结果可为陕北山地苹果的水氮管理提供科学的理论依据及技术支持。

关键词:山地苹果;水氮耦合;施肥;产量;正交试验;综合评价

中图分类号:S275.4

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)03-0267-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.03.034

Effects of Water-nitrogen Coupling Under Different Irrigation Techniques on Yield and Quality of Mountain Apples and Water and Fertilizer Utilization

YANG Zhen^{1,2}, FEI Liangjun^{1,2}, LI Zhe³, PENG Youliang^{1,2}, HAO Kun^{1,2}, LIU Teng⁴

(1.State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Aegion, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2.Institute of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 3.Shaoyang Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute, Shaoyang, Hunan 422099; 4.Yulin Rural Revitalization Planning and Development Guidance Center, Yulin, Shaanxi 719000)

Abstract: In order to explore the effects of water and nitrogen coupling on the yield, quality and water and nitrogen utilization of mountain apples under different irrigation technologies, a three-factor three-level orthogonal experiment was used with a total of 9 treatments, and each treatment was repeated 3 times. The three irrigation technologies were surge-root irrigation (S), ceramic infiltration irrigation (P) and surface drip irrigation (D), the three irrigation volumes were high water (H₁), medium water (H₂) and low water (H₃), and the three nitrogen application rates were high nitrogen (N₁), medium nitrogen (N₂) and low nitrogen (N₃). The response of mountain apple yield and water nitrogen use efficiency to water nitrogen regulation under different irrigation technologies was analyzed. The results showed that irrigation technology had a significant effect on fruit weight, vitamin C and fruit color ($p < 0.05$), and irrigation water volume and nitrogen application rate had significant effects on apple yield, fruit weight, fruit hardness, color, soluble solids, titratable acid, soluble sugar, vitamin C, sugar-acid ratio, nitrogen fertilizer partial productivity and irrigation water use efficiency ($p < 0.05$). Mountain apples treated with T₂ (SH₂N₂) had the highest yield

收稿日期:2022-11-02

资助项目:国家自然科学基金项目(52079105,51779205)

第一作者:杨震(1997—),男,在读硕士研究生,主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail:15738009723@163.com

通信作者:费良军(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论和农业水资源利用研究。E-mail:feiliangjun2008@163.com

(30 490.02 kg/hm²), T₅ treatment (PH₂N₃) had the highest nitrogen fertilizer productivity (104.66 kg/kg), and T₉ treatment (DH₃N₂) had the highest irrigation water use efficiency (70.81 kg/m³). The principal component analysis method showed that the optimal mode of water nitrogen coupling under different irrigation technologies was the combination of surge-root irrigation, medium irrigation volume (65%~80% θ_f), and medium nitrogen application rate (400 kg/hm²) (T₂). The results of this study can provide scientific theoretical basis and technical support for the water and nitrogen management of apples in mountainous areas of northern Shaanxi.

Keywords: mountain apple; water-nitrogen coupling; fertilization; yield; orthogonal experiments; comprehensive evaluation

陕北特殊的地理环境条件,使得苹果栽培成为我国优质果业生产基地,也是实现乡村振兴、果农脱贫致富的主导产业,苹果栽植面积得到迅速扩大^[1]。但是干旱缺水且水氮管理不佳限制苹果产业的高效发展,因此,研究陕北山地苹果适宜的灌水技术、灌水量和施氮量是当前山地苹果生产中急需解决的实际问题。

适宜的灌水技术有节水节肥、省时省工的优点,同时,可以提高作物的产量和品质。钟韵等^[2]研究表明,涌泉根灌条件下,在苹果树开花坐果期间进行适度的水分亏缺,苹果硬度、单果质量、产量和水分利用效率有显著性提高;刘星等^[3]通过研究发现,分根交替滴灌条件下减量灌水,苹果的产量、果实硬度和单果重均有所提高。

合理的水氮耦合模式能够提高作物产量、品质和水氮利用效率^[4]。有研究^[5]表明,在果树生长发育阶段进行轻度或中度缺水,苹果的产量和品质均能得到显著提高;于会丽等^[6]研究表明,减量施氮可以促进苹果树的生长发育,稳定苹果产量和提升果实品质。适量给果树施加氮肥不仅有利于增加产量,而且有利于增强作物的光合,改善果实品质^[7]。张建锴等^[8]研究表明,适当减少施氮量,单果重和可溶性糖含量有显著性提高;也有研究^[9]表明,不同水肥条件对作物的生理特性影响显著;王吉伟等^[10]研究表明,交替灌水均匀施氮较均匀灌水均匀施氮显著提高苹果的可溶性固形物含量和产量。

目前,关于陕北山地苹果的研究,大多是研究单一灌水因素、施氮因素或灌水技术因素对苹果生长的影响,对 3 种不同灌水技术下水氮耦合的比较研究鲜见报道,且并未给出适宜于陕北山地苹果最优灌水技术下的水氮组合模式。通过对 3 种灌水技术、3 种灌水量和 3 种施氮量条件下水氮耦合效果进行试验研究,研究结果对苹果生产管理有一定指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为陕西省榆林市子洲县清水现代生态农业示范园区(37°27'N,110°02'E),海拔 1 020 m,该地区为温带半干旱性气候,1981—2021 年年均降水量

为 459.60 mm,2021 年总降水量为 386.8 mm,主要集中在 7—9 月,年均气温为 9.2 °C,年均日照时间 2 632.9 h,无霜期 170 天。基本气象资料见图 1。试验周期为 2021 年 4—10 月,选择长势相同的苹果树(寒富),株高 270~300 cm,茎粗 8.90~11.00 cm,间距为 3 m×2 m。示范区 0—120 cm 土壤质地为砂壤土,田间持水量为 21.74%,容重为 1.421 g/cm³,pH 为 8.4,有效 N、P、K 质量分数分别为 22.60,11.10,62.30 mg/kg,有机质含量为 0.81%。

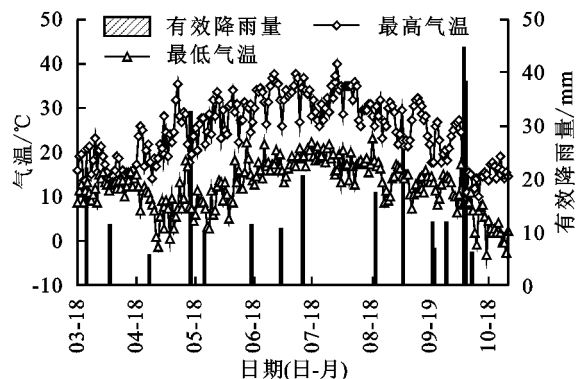


图 1 试验区 2021 年气温与有效降雨量

有效降雨量计算公式为:

$$P_0 = \alpha P \quad (1)$$

式中: P_0 为有效降雨量(mm); P 为降雨量(mm); α 为降雨有效利用系数,当 $P < 5$ mm 时, $\alpha = 0$;当 $5 \leq P \leq 30$ mm 时, $\alpha = 1$;当 $P > 30$ mm 时, $\alpha = 0.75$ 。

1.2 田间试验布置

涌泉根灌:把 2 个涌泉根灌灌水器(大流道迷宫灌水器)布设于每棵苹果树下,灌水器埋深 40 cm,距离苹果树主干 40 cm,设计流量为 5 L/h,同时,将水头高度保持在 0.4~0.9 m 范围内。微孔陶瓷:把 2 个陶瓷灌水器布设于每棵苹果树下,距树干 40 cm,埋深 40 cm,支管($\varphi 25$ mm),毛管($\varphi 20$ mm),设计流量为 0.72~0.98 L/h。地表滴灌:滴灌带距苹果树主干 40 cm,每棵苹果树下设 4 个滴头,滴头直径约 10 mm,工作压力为 0.5~1 m,设计流量为 3 L/h。

1.3 试验设计

正交试验设计(L₉(3³),表 1)。3 种灌水技术分别为涌泉根灌(S)、微孔陶瓷渗灌(P)和地表滴灌(D);3 个灌水水平分别为高水 H₁(80%~95% θ_f , θ_f 为田间持水

量)、中水 H_2 (65%~80% θ_f) 和低水 H_3 (50%~65% θ_f);3 个施氮水平分别为高氮 N_1 (550 kg/hm²)、中氮 N_2 (400 kg/hm²) 和低氮 N_3 (250 kg/hm²)。

根据皮尔逊Ⅲ型分布设计水文年,通过降水资料表可得,保证率为 50% 水平年的降雨量为 394.36 mm,2021 年总降雨量为 386.8 mm,试验区 2021 年为平水年。当试验区土壤含水率达到所设下限时,即

进行灌水。灌水定额公式为:

$$M=0.1\gamma ZPS(\theta_{\max}-\theta_{\min})/\eta \tag{2}$$

式中: M 为灌水定额(mm); γ 为土壤容重(g/cm³); Z 为计划湿润层深度(m),取 0.8 m; P 为计划湿润层湿润比(体积比),取 0.3; S 为单棵苹果树的计算面积(m²); $\theta_{\max}$ 、 $\theta_{\min}$ 分别为土壤含水量的上限和下限(质量含水率); η 为灌溉水利用系数,取 0.95。

表 1 试验方案正交设计

处理	灌水技术	灌水量/(% θ_f)	施氮量/(kg·hm ⁻²)	灌溉定额/mm
T ₁ (SH ₁ N ₁)	涌泉根灌(1)	80~95(1)	550(1)	157.87(15 次)
T ₂ (SH ₂ N ₂)	涌泉根灌(1)	65~80(2)	400(2)	74.58(8 次)
T ₃ (SH ₃ N ₃)	涌泉根灌(1)	50~65(3)	250(3)	34.46(5 次)
T ₄ (PH ₁ N ₂)	陶瓷渗灌(2)	80~95(1)	400(2)	155.9(15 次)
T ₅ (PH ₂ N ₃)	陶瓷渗灌(2)	65~80(2)	250(3)	73.96(8 次)
T ₆ (PH ₃ N ₁)	陶瓷渗灌(2)	50~65(3)	550(1)	34.28(5 次)
T ₇ (DH ₁ N ₃)	地表滴灌(3)	80~95(1)	250(3)	160.31(15 次)
T ₈ (DH ₂ N ₁)	地表滴灌(3)	65~80(2)	550(1)	75.27(8 次)
T ₉ (DH ₃ N ₂)	地表滴灌(3)	50~65(3)	400(2)	34.82(5 次)

1.4 测定项目与方法

产量:待果实成熟后,于 2021 年 10 月 27—28 日分批采摘苹果,采用称重法测定每个处理组的产量。

品质:每棵果树上采摘 3 个具有代表性的果实,测定果实品质。采用果实硬度计测定苹果硬度;采用手持式折射计测定可溶性固性物;采用碱式滴定法^[8]测定可滴定酸;采用色差仪测定色泽;采用 2,6—二氯靛酚滴定法^[8]测定维生素 C;采用蒽酮测试法^[8]测定可溶性糖。

灌溉水分利用效率(IWUE)和氮肥偏生产力(NPFP)分别用公式(3)和(4)计算。

$$IWUE=Y/I \tag{3}$$

式中:IWUE 为灌溉水分利用效率(kg/m³); Y 为产量(kg/hm²); I 为总灌水量(mm)。

$$NPFP=Y/N \tag{4}$$

式中:NPFP 为氮肥偏生产力(kg/kg); N 为施氮量(kg/hm²)。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据处理和制图,采用 IBM SPSS Statistics 25 软件进行回归分析、相关性分析、主成分分析以及正交试验的方差分析,采用 Duncan 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同灌水技术下水氮耦合对苹果产量和水氮利用的影响

不同灌水技术下灌水量与施氮量对单果质量、产量、氮肥偏生产力(NPFP)和灌溉水分利用效率(IWUE)影响显著($p<0.05$)。由表 2 可知,与涌泉根灌相比,陶瓷渗灌的产量和单果质量分别减少 4.68%,15.31%,地表滴灌的产量和单果质量分别减少 8.42%,22.61%;与 H_1 (高水)水平相比, H_2 (中

水)水平的产量、NPFP 和 IWUE 分别增加 8.98%,11.80% 和 130.95%,而单果质量减少 10.05%, H_3 (低水)水平的产量、单果质量、NPFP 和 IWUE 分别减少 8.95%,25.31%,8.84% 和 314.75%;与 N_1 (高氮)水平相比, N_2 (中氮)水平的单果质量和 NPFP 分别增加 11.85%,41.13%, N_3 (低氮)水平的产量、单果质量和 IWUE 分别减少 13.08%,8.41%,13.21%,而 NPFP 增加 92.24%。

水氮调控下 T_2 处理的产量(30 490.02 kg/hm²) 最高, T_2 处理的单果质量(402.79 g)最大, T_5 处理的氮肥偏生产力(104.66 kg/kg)最大, T_9 处理的灌溉水分利用效率(70.81 kg/m³)最高。

表 2 不同灌水技术下水氮耦合对苹果产量和水氮利用效率的影响

处理	产量/ (kg·hm ⁻²)	单果 质量/g	氮肥偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)	灌溉水分利用效率/ (kg·m ⁻³)
T ₁ (SH ₁ N ₁)	28586.90b	387.28a	51.97e	18.11e
T ₂ (SH ₂ N ₂)	30490.02a	402.79a	76.22c	40.88c
T ₃ (SH ₃ N ₃)	19978.30h	265.02c	79.91c	57.98b
T ₄ (PH ₁ N ₂)	24951.31e	361.23ab	62.38d	16.00f
T ₅ (PH ₂ N ₃)	26164.81c	272.84c	104.66a	35.38d
T ₆ (PH ₃ N ₁)	24169.66f	259.63c	43.94g	70.50a
T ₇ (DH ₁ N ₃)	22042.31g	296.44bc	88.16b	13.75g
T ₈ (DH ₂ N ₁)	25721.51d	264.32c	46.76f	34.17d
T ₉ (DH ₃ N ₂)	24653.45ef	255.32c	61.63d	70.81a
显著性检验(F 值)				
灌水技术	2.221	5.675*	1.714	0.199
灌水水平	8.971**	11.956**	13.233**	185.164**
施氮量	8.169**	3.605*	124.960**	3.699*

注:不同小写字母表示不同处理间差异性显著;* 表示 $p<0.05$;
* * 表示 $p<0.01$ 。下同。

2.2 不同灌水技术下水氮耦合对苹果品质的影响

由表 3 可知,灌水技术对苹果维生素 C 有显著影响($p<0.05$),与地表滴灌相比,陶瓷渗灌的维生素 C 含量减少 7.64%。灌水量对苹果硬度、色泽、可滴定酸、维生素 C 和糖酸比均有显著影响($p<0.05$),与 H_1 水平相比, H_2 水平的维生素 C 和糖酸比分别增加 10.23%,21.76%,而色泽和可滴定酸含量分别减少 6.84%,12.50%, H_3 水平的硬度、维生素 C 含量和糖酸比分别增加 11.11%,14.20%,24.77%,而色泽和可滴定酸含量分别减少 10.57%,16.07%;施氮量对苹果硬度、可溶性固形物、可滴定酸、可溶性糖、维

生素 C 和糖酸比均有显著影响($p<0.05$),与 N_1 水平相比, N_2 水平的可溶性糖和维生素 C 分别减少 5.71%,8.55%, N_3 水平的硬度、可溶性固形物、可滴定酸、可溶性糖、维生素 C 和糖酸比分别减少 11.50%,6.66%,5.77%,13.93%,20.42%和 9.37%。

水氮调控下 T_6 处理的硬度(2.13 kg/cm^2)最大, T_1 处理的色泽(68.79)最高, T_8 处理的可溶性固形物含量(12.41%)最高, T_1 处理的可滴定酸含量(0.58%)最高, T_2 处理的可溶性糖含量(32.43%)最高, T_9 处理的维生素 C 含量(5.97 mg/100g)最高, T_2 处理的糖酸比(67.28)最大。

表 3 不同灌水技术下水氮耦合对苹果品质的影响

处理	硬度/ ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	色泽	可溶性 固形物/%	可滴 定酸/%	可溶 性糖/%	VC/ ($\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$)	糖酸比
$T_1(\text{SH}_1\text{N}_1)$	1.91ab	68.79a	11.84bc	0.58a	31.77a	5.39ab	54.86a
$T_2(\text{SH}_2\text{N}_2)$	1.84ab	61.99cde	11.78ab	0.48cd	32.43ab	5.27b	67.28bc
$T_3(\text{SH}_3\text{N}_3)$	1.82ab	59.90e	11.71cd	0.46d	27.81bc	4.52c	60.59c
$T_4(\text{PH}_1\text{N}_2)$	1.81ab	67.24ab	11.17e	0.55b	27.50bc	4.48c	49.90bc
$T_5(\text{PH}_2\text{N}_3)$	1.82ab	64.08bcd	11.25de	0.48cd	27.71bc	4.68c	57.36c
$T_6(\text{PH}_3\text{N}_1)$	2.13a	60.40e	12.26a	0.48cd	32.08ab	5.93a	66.69b
$T_7(\text{DH}_1\text{N}_3)$	1.69b	65.15bc	11.15e	0.54b	26.79c	4.48c	49.51bc
$T_8(\text{DH}_2\text{N}_1)$	1.99ab	61.31de	12.41a	0.50c	31.79a	5.89a	63.21a
$T_9(\text{DH}_3\text{N}_2)$	2.09a	59.97e	12.17abc	0.47d	30.26ab	5.97a	65.22a
显著性检验(F 值)							
灌水技术	0.488	3.522*	1.886	0.287	0.549	3.540*	1.913
灌水量	4.033*	33.466**	16.006**	84.832**	6.535**	9.930**	0.740
施氮量	4.851*	0.292	17.273**	7.102**	12.905**	26.386**	1.838

2.3 不同灌水技术下水氮耦合对苹果产量、品质和水氮利用的综合评价

可滴定酸为低优指标,把可滴定酸做倒数变换为高优指标。以产量、单果重、NPFP、IWUE、硬度、色泽、可溶性固形物、可滴定酸、可溶性糖、维生素 C 和糖酸比 11 个变量为评价指标,运用主成分分析法找出最优的试验处理组合。

指标进行标准化处理后与特征向量计算,公式为:

$$F_1 = 0.036X_1 - 0.173X_2 - 0.233X_3 + 0.343X_4 + 0.367X_5 - 0.313X_6 + 0.379X_7 + 0.253X_8 + 0.295X_9 + 0.359X_{10} + 0.374X_{11} \quad (5)$$

$$F_2 = 0.455X_1 + 0.421X_2 + 0.320X_3 - 0.242X_4 + 0.098X_5 + 0.327X_6 + 0.126X_7 - 0.378X_8 + 0.367X_9 + 0.214X_{10} - 0.018X_{11} \quad (6)$$

$$F_3 = 0.493X_1 + 0.361X_2 + 0.477X_3 + 0.078X_4 - 0.234X_5 - 0.149X_6 - 0.150X_7 + 0.368X_8 + 0.156X_9 + 0.374X_{10} + 0.346X_{11} \quad (7)$$

$$F = \left(\frac{6.042}{10.319}\right)F_1 + \left(\frac{3.057}{10.319}\right)F_2 + \left(\frac{1.22}{10.319}\right)F_3 \quad (8)$$

得出第 1 主成分 F_1 主要解释的指标包括:灌溉水利用效率(X_4)、硬度(X_5)、可溶性固形物(X_7)和

维生素 C(X_{10}),解释了总体信息量的 54.926%。第 2 主成分 F_2 主要解释的指标包括:色泽(X_6)和可溶性糖(X_9),解释了总体信息量的 27.794%。第 3 主成分 F_3 主要解释了产量(X_1)、单果重(X_2)、氮肥偏生产力(X_3)、可滴定酸(X_8)和糖酸比(X_{11}),解释总体信息量的 11.094%。

由表 4 可知,不同评价对象综合得分依次是 $T_2 > T_8 > T_1 > T_6 > T_9 > T_5 > T_3 > T_4 > T_7$ 。结合主成分分析法得出的最优处理组合,以及对灌水技术成本和节水节氮的考虑,最终优选出陕北山地苹果灌水技术、灌水量和施氮量的最优组合模式为 $T_2(\text{SH}_2\text{N}_2)$ 。

表 4 综合评价结果

处理	F_1	F_2	F_3	F	排序
T_1	-0.44	1.82	-0.47	0.22	5
T_2	0.27	0.78	2.26	0.66	1
T_3	0.01	-1.59	0.02	-0.46	6
T_4	-1.22	0.42	-0.63	-0.67	8
T_5	-0.64	-0.81	0.98	-0.50	7
T_6	0.88	-0.02	-0.67	0.43	4
T_7	-1.37	-0.58	-0.59	-1.04	9
T_8	0.85	0.42	-0.69	0.54	2
T_9	1.16	-0.44	-0.22	0.53	3

3 讨论

本研究选取涌泉根灌、陶瓷渗灌和地表滴灌3项灌水技术,当灌水量和施氮量一定时,涌泉根灌对应山地苹果的产量和单果质量最高,陶瓷渗灌色泽最高,而地表滴灌的产量、单果质量和色泽最低。主要原因是,陕北地区全年降水量少,蒸发量大,储水能力太差,果树耗水量大,地表滴灌水分流失严重^[11]。陶瓷渗灌灌水更持续、更均匀,提供更为适合的水分条件,有利于提高果实光合能力,促进乙烯、果实花青苷和色素的形成^[12]。涌泉根灌与其他微灌技术相比,是一种节水、省工且水肥利用效率高的灌溉技术,在果树节水灌溉领域具有广阔的发展前景^[13-14]。

研究^[15]表明,适度缺水有利于作物产量、品质和NPFP的提高。本研究表明,不同灌水量对苹果产量影响显著($p < 0.05$),与相关研究^[16]结果一致,即中等灌水量条件下,山地苹果的产量和NPFP最大,苹果品质相对较好。可能由于适度缺水会促进根系吸收营养物质,加快营养物质的转化和吸收,提高苹果产量进而增加NPFP^[17-18]。适度的水分亏缺可以适当减少坐果率,促进果实对营养物质的吸收,提高苹果的可溶性固形物、可溶性糖、糖酸比和维生素C,提升果实品质。

在我国的农业施肥中每年要大量地施用氮肥,氮是农作物生长必需的物质条件^[19]。本研究发现,中氮水平下苹果产量和IWUE最大,可能由于适当施加氮肥可增加作物叶面积和叶绿素含量,加快净光合速率和蒸腾速率,保证其作物生长旺盛,提高作物产量^[20-21]。中氮可提高维生素C含量和糖酸比,可能由于适量施加氮肥,有助于根系的生长,增加水分吸收量,促进作物根系对营养物质的吸收与转化,氮肥可以提高土壤微生物活性,促进苹果树对养分的吸收,提高苹果品质^[22]。

灌水和施氮是影响作物生长发育和提高果实产量和品质的重要因素。合理地灌水和施氮既可促进作物的生长,提高果实的产量和品质^[8]。本研究发现,山地苹果在涌泉根灌、中水和中氮耦合条件下的产量和品质的综合效益最优。合理地分配灌水量和施氮量是实现水氮关系协调的重要基础,适当减少水氮投入量有利于提高山地苹果的氮肥偏生产力和灌溉水分利用效率,提高山地苹果的产量和品质。

提高水氮利用效率进而追求作物产量的最大化,是指导农业科学发展的有效途径。本研究以综合提高山地苹果的产量、品质、水氮利用效率为目标,运用主成分分析法得到试验最优处理组合为SH₂N₂,即灌水技术为涌泉根灌、灌水量为65%~80%、施氮量为400 kg/hm²组合。表明在陕北地区该组合不但能够改善山地苹果的品质,而且能够实现产量和水氮利用率综合效益的最佳水平。研究结果对于陕北山地

苹果高效生产具有一定的实践参考意义。

4 结论

苹果产量随灌水量和施氮量的增加呈先增大后减小趋势;果实硬度随着施氮量的增大而增大,随着灌水量的增大而减小;同一灌水量下,陶瓷根灌技术下的苹果色泽高于其余2种灌水技术;在相同灌水技术条件下,可溶性固形物、可溶性糖和维生素C含量随灌水量的增大而减小,随施氮量的增大而增大;可滴定酸随灌水量和施氮量的增大而增大。

不同灌水技术下水氮耦合,T₂处理的产量、单果质量和可溶性糖含量最大,T₅处理NPFP最大,T₆处理IWUE和果实硬度最高,T₁处理的色泽和可滴定酸含量最高,T₉处理的维生素C含量最高。适当减少水氮投入量有利于提高山地苹果的产量、NPFP和IWUE。

运用主成分分析法得到T₂处理为最优组合,综合分析得出,陕北山地苹果节水保氮肥的最优模式为灌水技术为涌泉根灌,灌水量为65%~80% θ_f ,施氮量为400 kg/hm²。

参考文献:

- [1] 梁烁.神州山地苹果还看今日子洲:榆林山地苹果试验示范站暨子洲苹果产业协会揭牌成立[J].食品安全导刊,2016(32):28-29.
- [2] 钟韵,费良军,曾健,等.根域水分亏缺对涌泉灌苹果幼树产量品质和节水的影响[J].农业工程学报,2019,35(21):78-87.
- [3] 刘星,曹红霞,廖阳,等.滴灌模式对苹果光合特性、产量及灌溉水利用的影响[J].中国农业科学,2021,54(15):3264-3278.
- [4] Hao K, Fei L J, Liu L H, et al. Comprehensive evaluation on yield, quality and water- nitrogen use efficiency of mountain apple under surge-root irrigation in the Loess Plateau based on the improved TOPSIS method[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: e853546.
- [5] Zhong Y, Fei L J, Li Y B, et al. Response of fruit yield, fruit quality, and water use efficiency to water deficits for apple trees under surge-root irrigation in the Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2019, 222: 221-230.
- [6] 于会丽,邵微,徐国益,等.含海藻酸水溶肥减施对苹果生长/品质和根域土壤养分的影响[J].果树学报,2022,40(2):242-251.
- [7] Pascual M, Villar J M, Rufat J. Water use efficiency in peach trees over a four-years experiment on the effects of irrigation and nitrogen application [J]. Agricultural Water Management, 2016, 164: 253-266.
- [8] 张建锴,曹红霞,潘小燕,等.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[J].干旱地区农业研究,2020,38(5):143-152.

- [9] 李兴强,孙兆军.水氮配置对地下渗灌枣树光合特性及产量的影响[J].中国土壤与肥料,2022(1):25-32.
- [10] 王吉伟,漆栋良.不同灌水施氮方式对玉米叶片生理特性和产量的影响[J].中国农学通报,2020,36(26):1-8.
- [11] 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.
- [12] Efremov G I, Dzhos E A, Ashikhmin A A, et al. Erratum to: Effect of the carotenoid content and activity of the carotene cis-trans isomerase CRTISO on tomato fruit color[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2022,69(5):e106.
- [13] 何振嘉,范王涛,杜宜春,等.涌泉根灌节水灌溉技术特点/应用及展望[J].农业工程学报,2020,36(8):287-298.
- [14] Gonzalez-Dugo V, Ruz C, Testi L, et al. The impact of deficit irrigation on transpiration and yield of mandarin and late oranges[J]. Irrigation Science, 2018,36(4):227-239.
- [15] Wei J Y, Liu G Y, Liu D B, et al. Influence of irrigation during the growth stage on yield and quality in mango (*Mangifera indica* L.)[J]. PLoS one, 2017,12(4):1-14.
- [16] 李中杰,费良军,郝琨,等.涌泉根灌下水氮耦合对陕北山地苹果光合特性/产量和水氮利用的影响[J].应用生态学报,2021,32(3):967-975.
- [17] 刘小刚,孙光照,彭有亮,等.水肥耦合对芒果光合特性和产量及水肥利用的影响[J].农业工程学报,2019,35(16):125-133.
- [18] 张鹏飞,张翼飞,王玉凤,等.膜下滴灌氮肥分期追施量对玉米氮效率及土壤氮素平衡的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(4):915-926.
- [19] Liu Z X, Gao F, Liu Y, et al. Timing and splitting of nitrogen fertilizer supply to increase crop yield and efficiency of nitrogen utilization in a wheat-peanut relay intercropping system in China[J]. The Crop Journal, 2019,7(1):101-112.
- [20] Peng Y L, Fei L J, Liu X G, et al. Coupling of regulated deficit irrigation at maturity stage and moderate fertilization to improve soil quality, mango yield and water-fertilizer use efficiency[J]. Scientia Horticulturae, 2023,307:e111492.
- [21] 孙光照,刘小刚,彭有亮,等.微润管布设方式和施肥水平对蓝莓生长及光合特性的影响[J].生态学杂志,2019,38(2):604-611.
- [22] 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.
- (上接第 266 页)
- [14] Li W H, Liu Q Z. Changes in fungal community and diversity in strawberry rhizosphere soil after 12 years in the greenhouse [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019,18(3):677-687.
- [15] Liu J G, Wang X X, Zhang T L, et al. Assessment of active bacteria metabolizing phenolic acids in the peanut (*Arachis hypogaea* L.) rhizosphere[J]. Microbiological Research, 2017,20(5):118-124.
- [16] Bu R F, Xiao X M, Liao W B, et al. Exogenous Si alleviation of autotoxicity in cucumber (*Cucumis sativus* L.) seed germination is correlated with changes in carbohydrate metabolism [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2018,37(3):784-793.
- [17] Liu J K, Xie M, Li X Z, et al. Main allelochemicals from the rhizosphere soil of *Saussurea lappa* (Decne.) Sch. Bip. and their effects on plants' antioxidase systems[J]. Molecules, 2018,23(10):2506-2520.
- [18] Bu R F, Xie J M, Yu J H, et al. Autotoxicity in cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings is alleviated by silicon through an increase in the activity of antioxidant enzymes and by mitigating lipid peroxidation[J]. Plant Biology, 2016,59(3):247-259.
- [19] 丁晓雪,赵成义,曾勇,等.地下水埋深和土壤质地对胡杨实生幼苗根系生长及构型的影响[J].水土保持学报,2021,35(5):235-241,248.
- [20] 赵映雪,张凤兰,郝丽珍,等.NaCl 胁迫对沙葱苗期根系特征及无机离子含量的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(3):115-121.
- [21] 张永平.硝普钠对肉桂酸处理黄瓜和黑籽南瓜根生理特性的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47(2):97-102,111.
- [22] Gao Z Y, Han M K, Hu Y Y, et al. Effects of continuous cropping of sweet potato on the fungal community structure in rhizospheric soil[J]. Frontiers in Microbiology, 2019,10(2):2269-2280.
- [23] 李婧.连作障碍对栝楼生理活性的影响及其根际土壤环境的动态探究[D].浙江 金华:浙江师范大学,2018.
- [24] 李妮,宋付朋,杨岩,等.轮作年限对大蒜根际土壤微生物群落的影响[J].水土保持学报,2013,27(5):209-213,218.
- [25] Fall D, Bakhoun N, Nourou S S, et al. Rhizobial inoculation increases soil microbial functioning and gum arabic production of 13-year-old *Senegalia senegal* (L.) Britton, trees in the north part of Senegal[J]. Frontiers in Plant Science, 2016,7(7):1355-1364.
- [26] Li Q K, Liu P, Tang Z H, et al. Effects of two phenolic acids on root zone soil nutrients, soil enzyme activities and pod yield of peanut[J]. The Journal of Applied Ecology, 2016,27(4):1189-1195.