

滴灌施肥下氮肥类型对苹果树生长 及产量品质的影响

孙建喜¹, 赵璐¹, 叶蕊蕊¹, 李瑞², 刘杰¹, 胡田田¹

(1.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 72100;

2.神木市农业技术推广中心,陕西 神木 719399)

摘要:黄土高原是我国苹果重要产区,灌溉和施肥管理不当会导致苹果产量不稳、品质下降、土壤质量降低等一系列问题。基于此,于2020—2022年以矮化密植苹果树为研究对象,采用尿素(U)、尿素硝酸铵液肥(UAN)、尿素+硝酸铵钙(UCAN)三种不同类型氮肥开展滴灌施肥试验,探究不同氮肥类型对苹果生长、产量、品质和土壤硝态氮残留量的影响。结果表明:滴灌施肥方式下UCAN和U处理苹果新梢生长量、叶面积指数整体大于UAN处理;相较于U处理,2021和2022年UCAN处理的苹果产量分别提高12.64%和37.92%,2022年UAN处理的苹果产量提高22.44%;与U处理相比,UCAN处理能够显著提高苹果果实可溶性固形物含量、可滴定酸含量、硝酸盐含量,降低果肉硬度和糖酸比,而UAN处理能够提高果实可溶性糖含量和糖酸比,降低VC含量和果肉硬度,氮肥类型对单果重和果形指数无显著影响;除2021年0~80 cm土层土壤,氮肥类型对土壤硝态氮残留的影响不显著。基于产量、品质和环境效益的TOPSIS综合评价结果,UCAN处理综合效益最优、其次为UAN和U处理,该结果可为苹果园氮肥管理提供理论依据与数据支撑。

关键词:苹果树;氮肥类型;产量品质;土壤硝态氮残留;TOPSIS综合评价

中图分类号:S275.6; S661.1 **文献标志码:**A

Effects of nitrogen fertilizer types on apple tree growth, fruit yield and quality under drip fertigation

SUN Jianxi¹, ZHAO Lu¹, YE Ruirui¹, LI Rui², LIU Jie¹, HU Tiantian¹

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Shenmu Agricultural Technology Promotion Center, Shenmu, Shaanxi 719399, China)

Abstract: The Loess Plateau is a key apple-producing region in China, where improper irrigation and nitrogen fertilizer management can cause issues like unstable apple yields, reduced fruit quality, and soil degradation. In this study, three different types of nitrogen fertilizers, urea (U), urea ammonium nitrate liquid fertilizer (UAN), and urea + calcium ammonium nitrate (UCAN), were used in a two-year drip fertigation trial with densely planted dwarf apple trees as the research object to investigate the effects of different nitrogen fertilizer types on the apple growth, yield, quality and soil nitrate nitrogen residue. The results showed that the new shoot growth and leaf area index of UCAN and U treatments under drip fertigation were generally higher than those of UAN treatment. Compared with the U treatment, the apple yield of UCAN treatment increased by 12.64% and 37.92% in 2021 and 2022, respectively, and the apple yield of UAN treatment increased by 22.44% in 2022. Compared with U treatment, UCAN treatment significantly increased the soluble solids, titratable acid content, and nitrate content of apple fruit, while reducing flesh hardness and sugar acid ratio. However, UAN treatment could increase the soluble sugar content and sugar acid ratio of fruits and reduce the VC content and fruit flesh hardness. Nitrogen fertilizer types had no significant effect on single fruit weight and fruit shape index. Except for the 0~80 cm soil layer in

2021, the effect of nitrogen fertilizer types on soil nitrate nitrogen residue was not significant. The comprehensive evaluation of TOPSIS, based on apple yield, quality, and environmental benefits, showed that the UCAN treatment had the highest overall benefit, followed by the UAN treatment, and finally the U treatment. This provides a theoretical basis and data support for nitrogen fertilizer management in apple orchards.

Keywords: apple tree; nitrogen fertilizer type; yield and quality; soil nitrate nitrogen residue; TOPSIS comprehensive evaluation

陕西北部黄土高原地区海拔高、昼夜温差大、日照强度高,是苹果的优势种植区域^[1]。在该地区苹果生产中,施肥方式主要以沟施尿素为主,当地果农为了提高苹果产量,普遍会过量施用氮肥^[2]。过量氮肥易通过挥发、淋溶和径流等途径大量损失,从而降低苹果园的氮肥利用效率。以往研究表明,以增产为主要目的农产品种植不仅对环境造成危害(如土壤硝酸盐残留、氮氧化物排放、土壤酸化),而且果实品质也难以保证^[3]。因此,如何通过优化养分管理支撑苹果的优质、高效和绿色生产是现代果业发展中亟需解决的问题。

苹果树生长所需的氮素主要来源于施用氮肥,合理的氮肥施用可以平衡营养生长与产量形成,提高新梢生长量、增加有效光合面积和叶面积指数,改善相关生理活动的强度^[4],为苹果的产量和品质优化提供保证。不同形态的氮肥会直接影响作物对氮肥的吸收利用,从而影响植物的生长发育,最终影响果实产量^[5]。硝态氮是多数植物吸收氮素的主要形式,但易随水分流失;铵态氮容易被土壤吸附,但其需要通过硝化作用转化为硝态氮才能被植物吸收利用。仅有少量酰胺态氮能直接被作物吸收利用,其大多则需要先经脲酶转化为铵态氮,再经硝化作用后被植物吸收利用^[6]。尿素硝铵溶液是由尿素、硝酸铵和水配制而成,含有酰胺态氮、硝态氮和铵态氮具有 100% 全水溶等特性,是优良的水溶肥之一^[7],有研究表明施用尿素硝铵液肥(UAN)可以提高玉米产量^[8]。硝酸铵钙是一种含硝态氮、铵态氮和速效钙的新型多功能复合肥料,氮和钙双补能够有效提升农作物品质,所含养分更加全面,植物可直接吸收^[9],有研究表明施用硝酸铵钙可以提高酥梨的 VC 含量、可溶固形物含量和硬度^[10]。

与传统的沟灌和漫灌等灌水方式相比,滴灌施肥是一种先进的水肥一体化技术,可以通过“少量多次”的供肥方式将水分和养分及时且精准地输送到根区,有效减少深层渗漏和养分淋失^[11]。有研究表明,滴灌施肥可有效缓解香梨和苹果生产中硝态氮的深层淋溶^[12-13];此外,滴灌还能使作物保持较

强的根系活性,提高果树吸收水分和养分的能力,帮助果农投入较少的水和氮而获得较高的产量和质量^[14]。目前,滴灌施肥技术已被普遍接受,滴灌施肥条件下有关苹果树生长、产量品质、土壤氮残留的研究多数集中于滴灌方法^[15]、氮肥用量^[16]、灌水量^[17]等方面,其中氮肥大多施用尿素,而硝酸铵钙和尿素硝铵液肥在国内农田中的应用较少,且已有研究主要集中于玉米^[8]、冬小麦^[18]和马铃薯^[19]等粮食作物,针对苹果生产的研究鲜有报道^[20];同时,滴灌施肥下有关不同氮肥类型对苹果树生长、产量品质、土壤氮残留的研究尚未见报道。因此,本研究旨在探究不同氮肥类型对苹果生长、产量、品质和土壤硝态氮残留量的影响,并基于产量、品质和环境效益对不同氮肥类型的响应进行综合评价,以为苹果园优质高效生产的氮肥管理提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2020—2022 年在洛川苹果试验站(35°47'4"N,109°21'44"E,海拔 1 080 m)进行。试验站位于陕西省延安市洛川县,地处陕北黄土高原沟壑区,暖温带半湿润大陆性季风气候,年均气温 9.2℃,年均降水量 622 mm,无霜期 167 d,日照 2 552 h,昼夜温差 15.7℃,雨热同季。

供试果树于 2014 年栽植,品种为‘延长红’(传统富士;中间砧:M26;基砧:新疆野苹果)。栽培模式为矮化密植,果树株行距为 2 m×4 m。果园土壤类型为黑垆土,试验开始前 0~40 cm 土层含有机质 7.33 g·kg⁻¹、硝态氮 8.96 mg·kg⁻¹、铵态氮 1.58 mg·kg⁻¹、速效磷 17.40 mg·kg⁻¹、速效钾 179.70 mg·kg⁻¹。常规田间管理(修剪、拉枝、疏花疏果及病虫害防治等)与当地果园保持一致。试验年气象资料如图 1 所示。

1.2 试验方案

试验设置尿素(U,100%酰胺态氮)、尿素硝铵液肥(UAN,酰胺态氮 50%、硝态氮 25%、铵态氮 25%)和尿素+硝酸铵钙(UCAN,酰胺态氮 50%、硝态

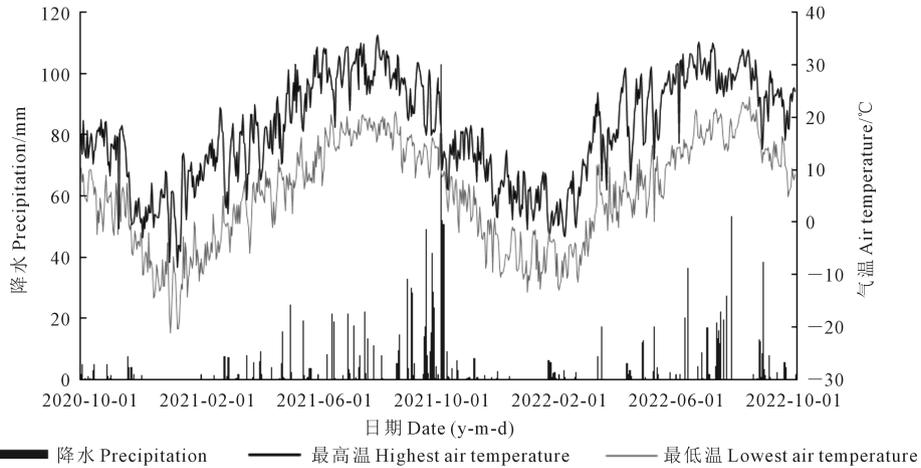


图 1 试验期间气象资料

Fig.1 Meteorological data during the experiments

氮 47%、铵态氮 3%) 3 个处理,共布设 3 个试验小区,各小区面积约为 80 m^2 ,在每个小区内设 3 次重复。2020 年 10 月苹果采收后开始进行试验。氮、磷、钾肥用量(纯量)分别为 240 、 150 、 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,试验所用磷、钾肥为磷酸二氢钾,钾肥不足部分采用氯化钾补充。各处理灌水定额、灌溉定额以及总施肥量一致,氮、磷、钾肥均通过滴灌系统施入,施肥周期 30 d。依据目前比较公认的苹果水分与养分需求规律^[21],结合当地降水规律与土壤供肥特征,并考虑滴灌施肥方式的特点,确定苹果树各生育时期水肥分配比例,具体计划见表 1。为了保持果园土壤有机质含量,于每年 10 月底沟施有机肥(羊粪) $15 \text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$,其有机质含量为 23.12%。

由于试验年份苹果树生育期内降雨量较大,同时试验区采用地布覆盖保水措施,能够有效抑制土壤水分蒸发, $0 \sim 80 \text{ cm}$ 土层土壤含水率始终维持在 75%~85% 田间持水量水平,没有明显的灌溉需求,故灌水量依据施肥量设定,以满足滴头处液体电导率不超过 $3 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ ^[22]。每行树布置一根滴灌管,用于滴灌施肥。滴灌管为内嵌圆柱式滴灌管(管径为 16 mm,滴头间距为 0.3 m,滴头流量为 $2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$),为便于农事操作,滴灌管沿树行方向悬挂于树上(离地约 50 cm)。施肥系统采用水力驱动比例施肥泵,灌水量采用精度为 0.01 L 的水表计量。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 新梢生长量 每个处理选取 3 株长势相近、无病虫害的苹果树进行标记,在每株树东、南、西、北四个方向各选择 1 根主枝标记并测定其所有新梢长度,以分析果树的长势。在 2021 年和 2022 年分别于开花坐果期、新梢旺长期、幼果期、膨大初期各测定 4 次。

表 1 灌水与施肥计划

Table 1 Schedule irrigation and fertilization

生育期 Growth period	施肥比例/% Fertilization ratio			灌水量/mm Irrigation volume
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
萌芽期 Germination stage	20	15	5	12
开花坐果期 Flowering and fruiting stage	15	15	10	12
新梢旺长期 Perennial expansion of new shoots	15	15	10	12
幼果期 Young fruit stage	10	17	20	12
膨大初期 Early expansion period	5	5	20	12
膨大中后期 Late expansion period	5	5	20	12
成熟期(基施) Harvest stage(base fertilizer)	30	28	15	12

1.3.2 叶面积指数 使用 LAI-2200 测定标记果树的叶面积指数,在 2021 年和 2022 年分别于开花坐果期、新梢旺长期、幼果期、膨大初期各测定 4 次。

1.3.3 产量 分别于 2021 年 10 月 22 日和 2022 年 10 月 24 日采收苹果,每个处理选取 20 棵果树统计单株果数和单株产量。

1.3.4 果实品质 于果实成熟期测定果实品质,首先在每个处理选择能代表整体生长和坐果情况的果树 3 株,在每棵树不同方向摘取中间部位上大小和颜色均具代表性的苹果 8 个,组成混合样带回实验室供品质分析。

采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量,手持折射仪测定可溶性固形物含量^[23],GY-4 型硬度计测定果实硬度^[24],2,6-二氯靛酚滴定法测定 VC 含量,氢氧化钠滴定法测定可滴定酸含量。

1.3.5 土壤硝态氮残留 果实采收后,于 2021 年 10 月 23 日和 2022 年 10 月 25 日采集土壤样本。取样点设置在随机选取的两棵果树连线的中线方向,分别距树行 0、30、60 cm 处^[13]。采样深度为 200 cm,每 20 cm 土层为一层。将土壤样品避光自然风干,磨细后过 1 mm 孔径土筛,称取 5 g 土,用 2 mol · L⁻¹ KCl 溶液振荡 30 min 后浸提,浸提液采用连续流动分析仪 (AutoAnalyzer3, SEAL 公司,德国) 测定硝态氮含量。

土壤硝态氮累积量 (kg · hm⁻²) = 土层厚度 × 土壤容重 × 土壤硝态氮含量

1.4 综合评价方法

1.4.1 关系分析法 借助关系分析法 (G1 法)^[25]

建立苹果生产的综合评价模型。模型包括目标层、因素层和子因素层,有一个包含 Z 个评价指标的指标集合 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_Z\}$ 。通过问卷形式咨询专家,将同一层次的指标按重要性由高到低排列。同时确定相邻指标之间的重要性水平,用公式 (1) 计算。

$$r_k = \frac{W_{k-1}}{W_k} \quad (k = z, z-1, \dots, 2) \quad (1)$$

式中, r_k 为相邻指标 X_{k-1} 和 X_k 之间的相对重要程度; W_k 、 W_{k-1} 分别为第 k 个指标 X_k 、第 $k-1$ 个指标 X_{k-1} 的权重。

通过公式 (2) 和 (3) 计算每个指标的权重。

$$W_z = \left(1 + \sum_{k=2}^z \prod_{i=k}^z r_i\right)^{-1} \quad (2)$$

$$W_{k-1} = r_k W_k \quad (k = z, z-1, \dots, 2) \quad (3)$$

1.4.2 熵权法-CRITIC 法 熵权法采用熵的概念来表示指标的离散程度。CRITIC 法是通过指标数据的标准差和相关系数来衡量指标之间的对比度和冲突程度的一种客观加权方法。因此,将熵权法和 CRITIC 法相结合的方法 (熵权法-CRITIC 法^[26]) 综合考虑了指标的对比度、相关性和离散度。

熵权法-CRITIC 法组合权重计算方法如下:

$$w_j = \frac{(s_j + e_j) \sum_{j=1}^m (1 - x_{jk})}{\sum_{j=1}^m (s_j + e_j) \sum_{j=1}^m (1 - x_{jk})} \quad (4)$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{j=1}^n Q_{ij} \times \ln Q_{ij} \quad (5)$$

$$Q_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (6)$$

式中, W_j 为熵权法-CRITIC 法对第 j 个评价指标的

权重值, e_j 为第 j 个评价指标的熵; s_j 为第 j 个评价指标的标准差; x_{ij} 为指标 i 与指标 j 的相关系数; Q_{ij} 为第 i 个方案在第 j 个评价指标中的比例。

1.4.3 组合赋权法 采用关系分析法 (G1 法) 进行主观赋权,可以反映决策者的意图,但容易产生主观随意性;采用熵权法-CRITIC 进行客观赋权,可以反映数据的特点,但不考虑主观意见,计算出的权重可能与实际情况不符,因此利用组合赋权法将这两种方法所赋权重进行融合,以获得两种方法的优点,既能反映决策者的偏好,又能反映数据的客观特点^[27]。

组合权重的计算方法如下:

$$W_{j*} = \frac{\sqrt{W_j W_j}}{\sum_{j=1}^z \sqrt{W_j W_j}} \quad (7)$$

式中, W_{j*} 为指标 j 的优化组合权重; W_j 为指标 j 的 G1 法权重; w_j 为指标 j 的 CRITIC-熵权法权重。

1.4.4 基于组合赋权的 TOPSIS 综合评价 TOPSIS

是一种对多目标进行决策,获取接近最优解而远离最坏解的综合评价方法。将原始 ($X = [x_{ij}]_{m \times n}$) 矩阵归一化 (式 8), 乘以主客观组合权重值构造加权评价矩阵 Z_{ij} , 用 $Z = (Z_{ij})_{m \times n}$ 表示加权评价矩阵 (式 9)。公式如下:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}}, \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

$$Z_{ij} = y_{ij} W_{j*} \quad (9)$$

将全部样本中各指标的最大值组成理想样本集合,用 Z^+ 表示;将全部样本中各指标的最小值组成负理想样本集合,用 Z^- 表示。公式如下:

$$Z_j^+ = \max(Z_{ij}), \quad Z_j^- = \min(Z_{ij}) \quad (10)$$

式中, Z_j^+ 表示第 j 个指标的最大值, Z_j^- 表示第 j 个指标的最小值, $j = 1, 2, \dots, n$ 。

确定理想样本 Z^+ 和负理想样本 Z^- , 并计算每个样本与理想样本和负理想样本之间的距离 D_i^+ 和 D_i^- , 公式如下:

$$D_i^+ = \sqrt{(Z_{ij} - Z_j^+)^2} \quad (11)$$

$$D_i^- = \sqrt{(Z_{ij} - Z_j^-)^2} \quad (12)$$

最后采用公式 (13) 计算样本到理想样本的相对接近度 (H_i) 作为评价依据^[28]。

$$H_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}, \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (13)$$

1.5 统计分析

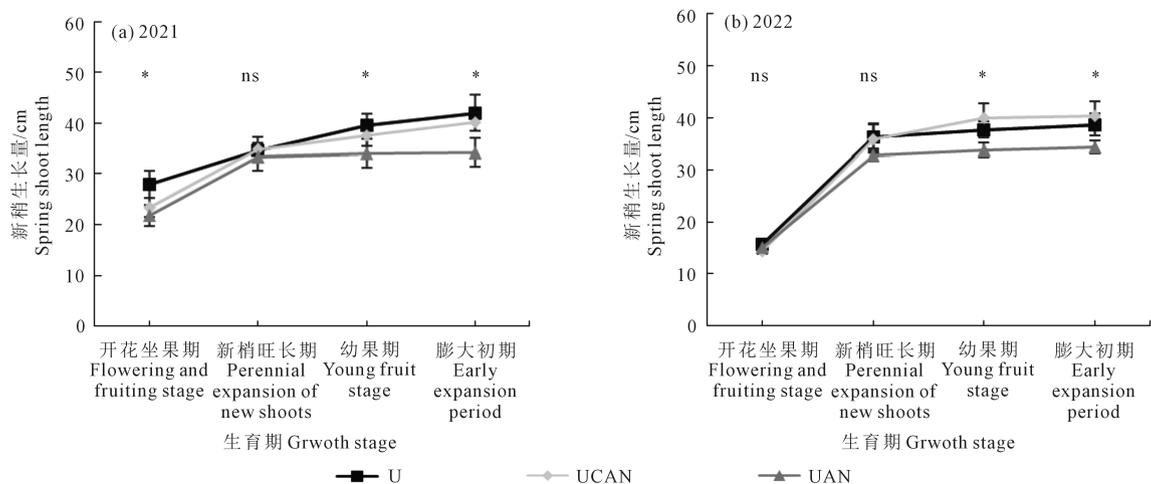
利用 Excel 2020 软件进行基础数据整理,在 SPSS 25.0 软件中进行 t 检验 ($P < 0.05$)、单因素方差

分析($P<0.05$)和单变量分析($P<0.05$),使用 Origin 2020 绘图。

2 结果与分析

2.1 氮肥类型对苹果树新梢生长的影响

2021—2022年不同氮肥类型处理下苹果树的新梢生长量均表现出先快增后缓增的趋势(图2)。在2021年,不同氮肥类型在开花坐果期、幼果期和膨大初期对新梢生长量有显著影响,新梢生长量均表现为 $U>UCAN>UAN$ 。开花坐果期UCAN和UAN处理的新梢生长量比U处理分别减少16.69%和22.10%,幼果期UCAN和UAN处理的新梢生长量比U处理分别减少5.23%和14.07%,膨大初期UCAN和UAN处理的新梢生长量比U处理分别减少4.37%和18.57%。



注: *表示差异显著($P<0.05$), ns表示差异不显著,下同。

Note: * means significant difference ($P<0.05$), and ns means insignificant difference. The same below.

图2 氮肥类型对苹果树新梢生长的影响

Fig.2 Effects of nitrogen fertilizer types on the growth of apple trees shoots

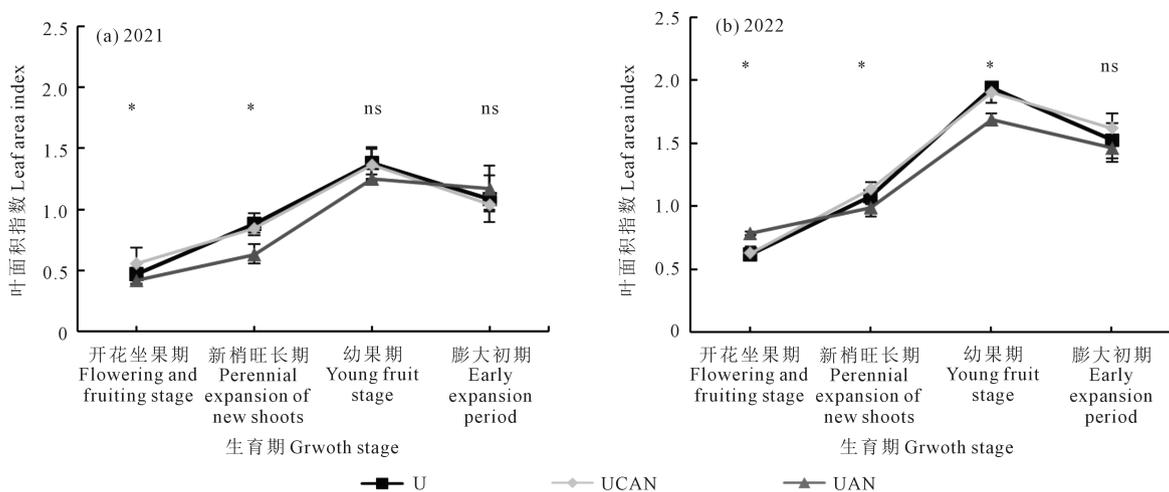


图3 氮肥类型对叶面积指数的影响

Fig.3 Effects of nitrogen fertilizer types on leaf area index

2022年氮肥类型在幼果期和膨大初期对新梢生长量有显著影响,新梢生长量表现为 $UCAN>U>UAN$ 。幼果期UCAN处理比U处理的新梢生长量增加6.19%,UAN处理的新梢生长量比U处理减少10.32%;膨大初期UCAN处理比U处理的新梢生长量增加4.60%,UAN处理的新梢生长量比U处理减少11.15%。

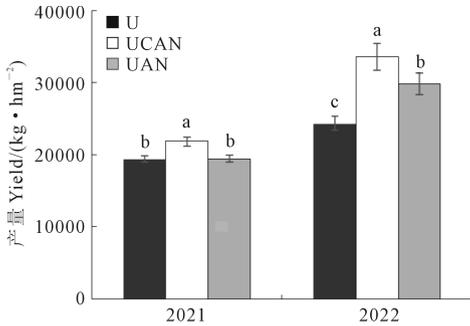
2.2 氮肥类型对苹果树叶面积指数的影响

2021—2022年中随着苹果生育期的推进,不同氮肥类型处理下果树的叶面积指数呈现出先增加后降低的趋势(图3)。在2021年,不同氮肥类型在开花坐果期和新梢旺长期对叶面积指数有显著影响。开花坐果期UCAN处理比U处理的叶面积指数增加17.44%,而UAN处理的叶面积指数较U处理减少10.52%;新梢旺长期UCAN和UAN处理比U处理的叶面积指数分别减少4.45%和28.07%。

2022 年氮肥类型在开花坐果期、新梢旺长期和幼果期对叶面积指数有显著影响。开花坐果期 UCAN 和 UAN 处理比 U 处理的叶面积指数分别增加 2.24% 和 28.15%; 新梢旺长期 UCAN 处理较 U 处理的叶面积指数增加 5.58%, 而 UAN 处理比 U 处理的叶面积指数减少 7.74%; 幼果期 UCAN 和 UAN 处理较 U 处理的叶面积指数分别减少 1.80% 和 13.02%。

2.3 氮肥类型对苹果产量的影响

2021—2022 年不同氮肥类型对苹果产量的影响如图 4 所示。不同氮肥类型对产量有显著影响, 两年均表现为 UCAN 处理下的苹果产量最高。2021 年 UCAN 处理的苹果产量较 U 处理显著提高 12.64%。UAN 处理与 U 处理的苹果产量基本持平 ($P>0.05$); 2022 年 UCAN 和 UAN 处理的产量较 U 处理的苹果产量分别提高 37.92% 和 22.44%。



注: 同一年中不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different letters in the same year indicate significant differences between treatments ($P<0.05$).

图 4 氮肥类型对苹果产量的影响

Fig.4 Effects of nitrogen fertilizer types on apple yield

2.4 氮肥类型对苹果品质的影响

不同氮肥类型对苹果品质的影响存在差异 (表 2)。2021 年, 不同氮肥类型对 VC、可溶性糖、硝酸盐和糖酸比有显著影响; 2022 年氮肥类型对硬度、VC、可溶性糖、可滴定酸、硝酸盐和糖酸比有显著影响。不同氮肥类型对两年单果重、果形指数均没有显著影响。

2021 年, 与 U 处理相比, UCAN 处理使苹果果实可溶性糖、硝酸盐含量分别显著增加 17.33%、14.73%, 使 VC、糖酸比分别降低 10.87%、9.23%; UAN 处理使可溶性糖、硝酸盐含量、糖酸比分别增加 15.47%、4.73%、13.20%, 使 VC 含量显著降低 34.54%。2022 年, 与 U 处理相比, UCAN 处理使 VC、可溶性糖、可滴定酸、硝酸盐含量分别增加 11.51%、15.21%、28.57%、7.55%, 使果肉硬度、糖酸比分别降低 1.69%、11.56%; UAN 处理使可溶性糖、可滴定酸、糖酸比分别增加 27.52%、7.14%、16.93%, 使果肉硬度、VC、硝酸盐分别降低 8.77%、22.51%、7.94%。

2.5 氮肥类型对土壤硝态氮残留的影响

试验开始前 (2020 年 10 月) 0~200 cm 土层硝态氮累积量如图 5a 所示。通过分析主要根系分布层 (0~80 cm) 和根层 (80~200 cm) 土壤硝态氮残留情况 (图 5) 发现, 80~200 cm 土层土壤的硝态氮残留量远高于 0~80 cm 土层。

2021 年, 氮肥类型对 0~80 cm 土层硝态氮残留量有显著影响, UCAN 处理下的 0~80 cm 土层硝态氮残留量比 U 处理显著减少 21.63%, UAN 处理比 U 处理减少 10.50%; 氮肥类型对 80~200 cm 土层硝

表 2 氮肥类型对苹果品质的影响

Table 2 Effects of nitrogen fertilizer types on apple quality

年份 Year	处理 Treatment	单果重 Single fruit weight/g	果形指数 Fruit shape index	硬度 Hardness / (kg·cm ⁻²)	VC /(mg·100g ⁻¹)	可溶性糖 Total soluble solids/%	可溶性糖 Soluble sugar/%	可滴定酸 Titratable acid/%	硝酸盐 Nitrate / (mg·kg ⁻¹)	糖酸比 Sugar-acid ratio
2021	U	231.52±10.45	0.87±0.03	6.65±0.07	4.14±0.17a	11.31±0.12b	8.92±0.33	0.22±0.03	61.7±1.23b	40.3±4.63ab
	UCAN	233.11±12.45	0.83±0.02	6.79±0.08	3.69±0.29a	13.27±0.46a	9.19±0.09	0.25±0.02	70.79±2.94a	36.58±0.37b
	UAN	226.68±9.43	0.84±0.01	6.75±0.11	2.71±0.44b	13.06±0.40a	9.75±0.62	0.22±0.03	64.62±1.37b	45.62±5.72a
	显著性 Significance	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	*	*
2022	U	280.40±5.51	0.90±0.03	6.50±0.15a	3.91±0.23a	11.71±0.67	5.85±0.28b	0.14±0.01b	56.16±4.15ab	43.59±5.01ab
	UCAN	280.54±8.88	0.90±0.02	6.39±0.22a	4.36±0.36a	11.92±0.82	6.74±0.64ab	0.18±0.02a	60.40±4.05a	38.55±4.32b
	UAN	275.56±5.85	0.91±0.02	5.93±0.22b	3.03±0.12b	11.90±0.82	7.46±0.20a	0.15±0.01b	51.70±4.31b	50.97±6.09a
	显著性 Significance	ns	ns	*	*	ns	*	*	*	*

注: 表中数据为“平均值±标准差”; 同一年中标注不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$), 未标注小写字母说明处理间差异不显著; * 表示差异显著 ($P<0.05$), ns 表示差异不显著。

Note: The data in the table is “mean ± standard deviation”. Labeling different lowercase letters within the same year indicates significant difference between treatments ($P<0.05$), while not labeling lowercase letters indicates insignificant differences between treatments. * means significant difference ($P<0.05$), and ns means insignificant difference.

态氮残留量影响不显著,但仍可以看到 UCAN 处理下的土壤硝态氮残留量处于最低水平。2022 年,氮肥类型对 0~80 cm 和 80~200 cm 土层硝态氮残留量的影响均不显著。

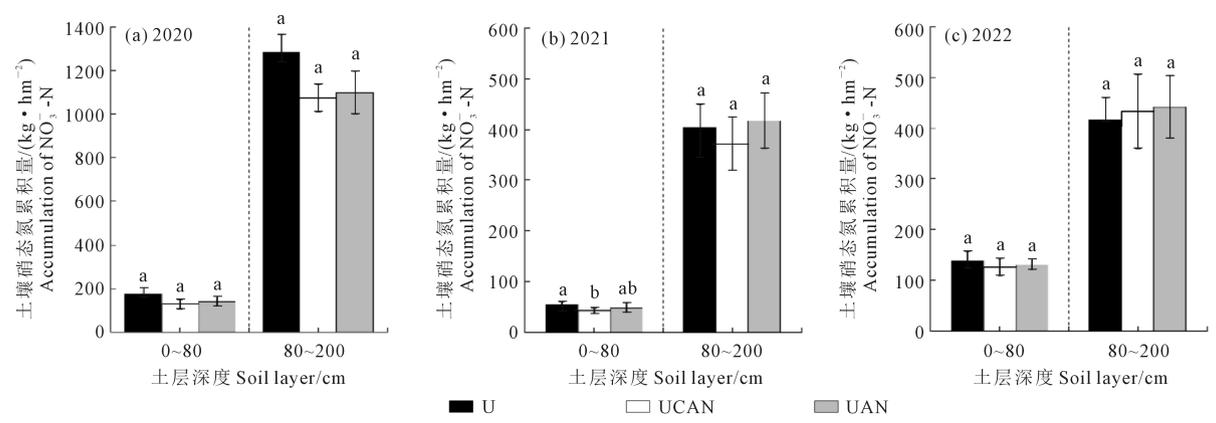
2.6 基于组合赋权的 TOPSIS 综合评价

采用 TOPSIS 法评估 3 种氮肥处理 (U、UCAN、UAN) 对苹果生产的综合影响。良好的水果品质更能受到消费者的青睐,而品质又分为风味品质和营养品质,产量是农户追求的目标,土壤硝态氮残留是造成农业面源污染的主要因素。利用维生素 C、可溶固形物、硬度、硝酸盐、单果重、糖酸比、果形指数、可溶性糖、可滴定酸、产量和土壤硝态氮残留作为评价因素进行苹果生产综合评价 TOPSIS 分析 (图 6)。

采用 G1 法确定的主观权重发现 (表 3),产量占比最高 (0.35),其次是土壤硝态氮残留 (0.18),占比

最低的是可溶性糖和可滴定酸 (0.03)。客观权重采用熵权法-CRITIC 法确定 (表 4),2021 年占比最高的是产量 (0.181),最低的是可滴定酸 (0.068);2022 年占比最高的是产量 (0.183),最低的是可溶固形物和单果重,均占比 0.076。基于主客观组合赋权法确定组合权重发现 (表 5),2021 年和 2022 年占比最高的均为产量,分别为 0.260、0.263,占比最低的均为可滴定酸,分别为 0.049、0.052。

采用 TOPSIS 法权衡品质、产量和土壤硝态氮残留的结果表明 (表 6),2021 年 U、UCAN、UAN 处理的相对接近度分别为 0.43、0.60、0.41,UCAN 处理高于其他处理,U 和 UAN 处理基本一致;2022 年 U、UCAN、UAN 处理的相对接近度分别为 0.46、0.60、0.51,其中 UCAN 处理最高、其次是 UAN 处理、最后是 U 处理。综合来看,2 a 试验中 UCAN 处理综合效益最优、其次是 UAN 处理、最后是 U 处理。



注:同一土层深度下不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters in the same soil depth indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

图 5 不同氮肥类型处理下 0~200 cm 土层土壤硝态氮残留量

Fig.5 Nitrate nitrogen residue in 0~200 cm soil layer under different nitrogen fertilizer types

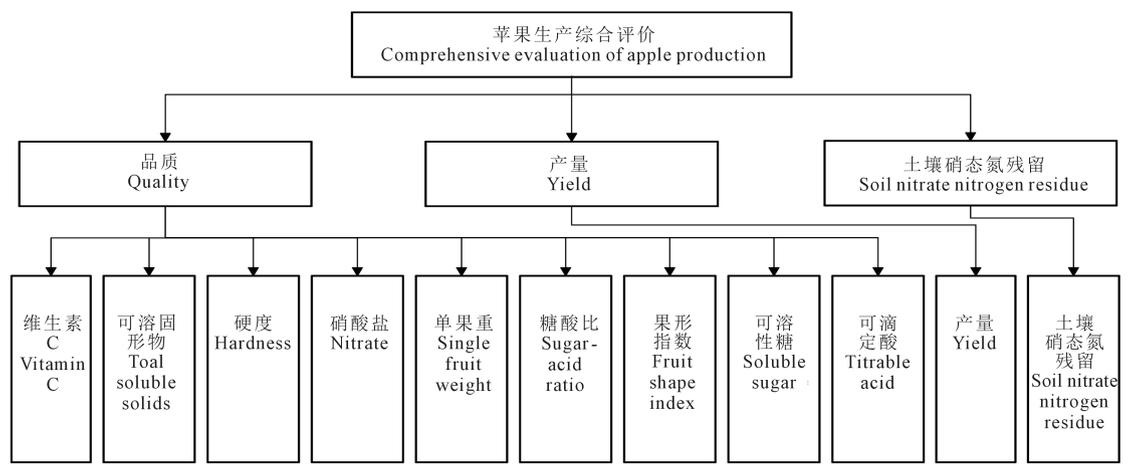


图 6 苹果生产综合评价指标体系

Fig.6 Comprehensive evaluation index system for apple production

表6 基于TOPSIS的苹果产量、品质、土壤氮残留的综合权衡

Table 6 Trading off apple yield, quality, soil nitrogen residue based on TOPSIS

处理 Treatment	2021				2022				平均值 Mean value	
	D^+	D^-	H_i	排名 Rank	D^+	D^-	H_i	排名 Rank	H_i	排名 Rank
U	0.76	0.57	0.43	2	0.71	0.61	0.46	3	0.44	3
UCAN	0.53	0.81	0.60	1	0.53	0.79	0.60	1	0.60	1
UAN	0.77	0.55	0.41	3	0.63	0.67	0.51	2	0.46	2

注: D^+ 表示到正理想样本间的距离, D^- 表示到负理想样本间的距离, H_i 表示到理想样本的相对接近度。

Note: D^+ denotes the distance to the positive ideal sample, D^- denotes the distance to the negative ideal sample, and H_i denotes the relative closeness to the ideal sample.

3 讨论

3.1 不同氮肥类型对果树生长的影响

果树新梢生长总体呈现出前期快增后长期缓增的趋势(图2),开花坐果期到新梢旺长期这一阶段新梢迅速生长,累积增长量约占总增量的50%以上,可能是由于在此阶段果树利用上一年冬季吸收的基肥养分迅速生长。新梢旺长期后新梢生长进入缓增阶段,可能是这一阶段果树进行花芽分化、膨大果实,与新梢生长竞争养分,养分供应不足限制新梢生长等原因致使生长速度放缓^[29]。不同氮肥处理下的果树叶面积指数总体呈现先增加后降低的趋势,于幼果期达到峰值(图3)。这可能与幼果期之前肥料的养分主要用于果树自身生长,幼果期之后,果树吸收养分主要用于花芽分化和果子膨大有关。对比图2和图3发现,新梢生长量始终保持增长趋势,而叶面积指数在后期有所下降,这是因为果树受到修剪,标记的新梢因试验要求保留并未受到影响。

本研究发现UCAN处理下果树的新梢生长量和叶面积指数整体高于UAN处理,这可能与氮肥形态有关,UCAN中硝态氮含量占比高达47%,铵态氮仅有3%,UAN中硝态氮和铵态氮各占25%,果树生长过程中主要吸收硝态氮和铵态氮,硝态氮主要存在于土壤溶液中,容易到达根部被果树直接吸收;而铵态氮易被土壤吸附,需要果树先从土壤中汲取出来再吸收用于生长^[30],以硝态氮为氮源的果树生长优于以铵态氮为氮源的果树^[31]。同时施用硝酸铵钙可以通过改善果树根系生长的微环境使得根系活力加强,促使根系对养分的吸收利用,进而促进地上部分生长^[10]。

3.2 不同氮肥类型对苹果产量和品质的影响

果园实际生产中,合理的施氮能够补给果树营

养,促进光合产物的合成,提高果实产量^[32]。本研究发现施用UCAN更有利于提高苹果产量(图4),这可能是因为苹果是喜硝植物,旱地条件下以吸收硝态氮为主^[33],UCAN中含量更高的硝态氮可直接被果树快速吸收利用^[6]。

在本研究中,UAN处理的苹果可溶性糖含量最高,这可能与其铵态氮含量占比较高有关,铵态氮较硝态氮更有利于可溶性糖的形成^[34]。UAN处理下可滴定酸含量显著低于UCAN处理,这与UCAN肥施入土壤后能够迅速提高土壤硝态氮含量有关。有研究表明,可滴定酸含量与土壤硝态氮含量呈显著正相关关系,土壤硝态氮含量较高时果实酸度增加^[35],这也印证了本研究中UAN处理的糖酸比最高的结果。UCAN处理硝酸盐含量最大而UAN处理最小,这可能因为硝酸盐含量随肥料配比中铵态氮比例的升高而逐渐减少,当铵态氮多时农作物的硝酸盐含量就低^[6,33]。

与U处理相比,UCAN处理能够显著提高苹果产量和可溶性固形物、可滴定酸含量、硝酸盐含量,而UAN处理能够提高果实可溶性糖含量和糖酸比,综合来看,UCAN处理的品质指标值较高,这可能还与硝酸铵钙含有钙元素有关,钙是影响果实品质的重要元素之一^[36],具体原因仍需进一步深入研究。

3.3 不同氮肥类型对土壤硝态氮残留的影响

2021年土壤硝态氮累积量与2020年相差较大,可能与2021年苹果收获期该地区出现强降雨有关(图1)。2021年3—10月降水量为906.8 mm,收获期降水量高达280.7 mm(2021年10月1日—10月22日)。

2021年UCAN处理0~80cm土层的硝态氮残留量显著低于U处理。一方面是因为UCAN肥施入土壤后,能够迅速分解释放 NO_3^- -N被果树直接吸收利用;另一方面,尿素需要先经脲酶的水解作用转化为铵态氮,再通过硝化作用转化为硝态氮,肥效产生的周期较长,所以易在土壤表层累积^[37]。

2022年0~80cm土层土壤硝态氮累积量大于2021年。这可能是由于2021年未被吸收利用的氮肥通过降雨和灌溉向深层淋溶,最终在土层中积累,这也说明了随着种植年限的增加,施用氮肥会提高土层的硝酸盐累积量。两年0~80cm土层硝态氮残留远小于80~200cm土层,这种现象可能是由于雨水的淋溶引起的。果园土壤强烈的硝化作用使氮素主要以硝态氮形式存在,硝态氮易随土壤水分运移至无法被果树吸收利用的土层深度,造成硝态氮淋溶^[38]。

本研究发现,不同氮肥类型对 0~200 cm 土层的硝态氮累积量影响不显著,这是因为氮肥形态并不是影响尿素转化快慢的决定因素,尿素转化与脲酶的活性密切相关,与土壤肥沃程度、含水率、地温等因素也有关^[27]。

4 结 论

1)滴灌施肥方式下氮肥类型对果树幼果期和果实膨大期的新梢生长量以及开花坐果期和新梢旺长期的叶面积指数有显著影响。尿素+硝酸铵钙处理和尿素处理间的新梢生长量和叶面积指数差异不显著,但均显著大于尿素硝酸液肥处理下的新梢生长量和叶面积指数。

2)与尿素处理相比,2021 和 2022 年尿素+硝酸铵钙处理的苹果产量分别提高 12.64% 和 37.92%,2022 年尿素硝酸液肥处理的苹果产量较尿素处理提高 22.44%。两年整体上看,相较于尿素处理,尿素+硝酸铵钙处理能够提高苹果果实可溶性固形物、硝酸盐含量、可滴定酸含量,降低果肉硬度和糖酸比,而尿素硝酸液肥处理能够提高果实可溶性糖含量、可溶固形物、糖酸比,降低 VC 含量和果肉硬度。氮肥类型对单果重和果形指数没有显著影响。

3)除 2021 年 0~80 cm 土层土壤,氮肥类型对土壤硝态氮累积量的影响不显著。两年苹果品质各项指标、产量和土壤硝态氮残留进行 TOPSIS 综合评价结果表明,尿素+硝酸铵钙处理(UCAN,酰胺态氮 50%、硝态氮 47%、铵态氮 3%)综合效益最优,其次是尿素硝酸液肥处理(UAN,酰胺态氮 50%、硝态氮 25%、铵态氮 25%),最后是尿素处理(U,100%酰胺态氮)。

参 考 文 献:

- [1] 白志礼,穆养民,赵政阳. 陕西苹果产业发展的新思考与新探索[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(4): 172-175.
BAI Z L, MU Y M, ZHAO Z Y. Consideration on development of apple industry in Shaanxi Province [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 21(4): 172-175.
- [2] ZHU X Q, FU W H, KONG X J, et al. Nitrate accumulation in the soil profile is the main fate of surplus nitrogen after land-use change from cereal cultivation to apple orchards on the Loess Plateau [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 319: 107574.
- [3] LI H H, LIU H, GONG X W, et al. Optimizing irrigation and nitrogen management strategy to trade off yield, crop water productivity, nitrogen use efficiency and fruit quality of greenhouse grown tomato [J]. Agricultural Water Management, 2021, 245: 106570.
- [4] DEJONG T M, DAY K R, JOHNSON R S. Partitioning of leaf nitrogen with respect to within canopy light exposure and nitrogen availability in peach (*Prunus persica*) [J]. Trees, 1989, 3(2): 89-95.
- [5] 刘朝巍,张恩和,王琦,等. 留茬对小麦/玉米间作氮素吸收和硝态氮分布、淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 72-76.
LIU C W, ZHANG E H, WANG Q, et al. Effects of wheat-maize inter-

- cropping and stubble treatment on nitrogen uptake and nitrate nitrogen distribution and leaching [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(1): 72-76.
- [6] 马道承,庞艳萍,田湘,等. 植物不同氮素形态配比施肥及其分子机制研究进展[J]. 西部林业科学, 2022, 51(5): 164-170.
MA D C, PANG Y P, TIAN X, et al. The molecular mechanism of nitrogen absorption and fertilization with different nitrogen form ratio in plants: a review [J]. Journal of West China Forestry Science, 2022, 51(5): 164-170.
- [7] 刘欢,陈苗苗,孙志梅,等. 氮肥调控对小麦/玉米产量、氮素利用及农田氮素平衡的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(1): 232-238.
LIU H, CHEN M M, SUN Z M, et al. Effects of different nitrogen management practice on crop yield, N utilization and N apparent balance in wheat/maize rotation system [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2016, 31(1): 232-238.
- [8] 王寅,徐卓,李博凝,等. 尿素硝酸液肥对黑土区春玉米产量和氮素吸收利用的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(4): 718-727.
WANG Y, XU Z, LI B N, et al. Effects of urea ammonium nitrate solution on grain yield and nitrogen uptake of spring maize in black soil region [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(4): 718-727.
- [9] 郭然,吕丙航,王新梅. 硝酸铵钙产品生产技术及市场前景分析[J]. 氮肥技术, 2020, 41(4): 29-32.
GUO R, LV B H, WANG X M. Analysis on production technology and market prospect of calcium ammonium nitrate products [J]. DANFEI JISHU, 2020, 41(4): 29-32.
- [10] 张平,洪坚平,李娜. 不同氮肥对酥梨品质及土壤养分的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2016, 36(2): 120-127.
ZHANG P, HONG J P, LI N. The effects of different nitrogen on pear quality and soil nutrients [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2016, 36(2): 120-127.
- [11] 李丙智,冯煥德,张黎,等. 渭北苹果园滴灌施氮肥对土壤氮迁移的影响[J]. 林业科学, 2013, 49(10): 35-39.
LI B Z, FENG H D, ZHANG L, et al. Effects of dripping fertigation on soil nitrogen metabolism in apple orchard of Weibei plateau [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(10): 35-39.
- [12] 何新林,王佳鑫,龚萍,等. 南疆矮化密植高产优质香梨节水灌溉模式筛选[J]. 农业工程学报, 2024, 40(2): 249-262.
HE X L, WANG J X, GONG P, et al. Irrigation modes screening for water saving, high yield and quality of dwarfed and densely planted fragrant pears in South Xinjiang of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(2): 249-262.
- [13] ZHANG S W, CHEN S H, HU T T, et al. Optimization of irrigation and nitrogen levels for a trade-off: yield, quality, water use efficiency and environment effect in a drip-fertigated apple orchard based on TOPSIS method [J]. Scientia Horticulturae, 2023, 309: 111700.
- [14] 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]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2013, (1): 48-52.
- [15] 刘威宏,王延平,韩明玉,等. 根区滴灌对干旱山地苹果树生长发育和结实的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(7): 40-45, 77.
LIU W H, WANG Y P, HAN M Y, et al. Effect of root-area trickle-irrigation on growth and development of apple trees at arid hilly region [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(7): 40-45, 77.
- [16] 张东东,李琪,储宝华,等. 不同时期施氮水平对苹果生长、产量和品质的影响[J]. 北方园艺, 2022, (17): 42-50.
ZHANG D D, LI Q, CHU B H, et al. Effects of nitrogen application levels on apple growth, yield and quality in different periods [J].

- Northern Horticulture, 2022, (17): 42-50.
- [17] 张楠, 龚珂宁, 黄炳川, 等. 水分调控对南疆地区不同熟性苹果农艺特性的影响[J]. 生态学杂志, 2023, 42(2): 313-323.
ZHANG N, GONG K N, HUANG B C, et al. Effects of moisture regulation on agronomic characteristics of apples with different ripeness in southern Xinjiang [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(2): 313-323.
- [18] 刘学彤, 杨军芳, 黄少辉, 等. 尿素硝酸铵溶液对冬小麦产量及土壤无机氮含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (4): 116-120, 126.
LIU X T, YANG J F, HUANG S H, et al. Effects of urea ammonium nitrogen on the yield of winter wheat and the concentration of soil mineral nitrogen [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2019, (4): 116-120, 126.
- [19] 段海燕, 段玉, 张君, 等. 尿素硝酸铵溶液在马铃薯上的施用效果研究[J]. 北方农业学报, 2017, 45(5): 28-32.
DUAN H Y, DUAN Y, ZHANG J, et al. Fertilization effect of urea ammonium nitrate solution (UAN) on potato [J]. Journal of Northern Agriculture, 2017, 45(5): 28-32.
- [20] 豆秀英, 刘剑, 任铭. 新型肥料硝酸铵钙在苹果上的施用技术[J]. 西北园艺(果树), 2019, (4): 47-48.
DOU X Y, LIU J, REN M. Application technology of new fertiliser calcium ammonium nitrate on apple [J]. Northwest Horticulture, 2019, (4): 47-48.
- [21] CHENG L L, RABA R. Accumulation of macro-and micronutrients and nitrogen demand-supply relationship of 'Gala'/'Malling 26' apple trees grown in sand culture [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2009, 134(1): 3-13.
- [22] 陈静航, 叶蕊蕊, 孙建喜, 等. 滴灌施肥周期和毛管布设方式对苹果树细根直径时空分布的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(1): 101-110.
CHEN J H, YE R R, SUN J X, et al. Effects of drip irrigation and fertilization cycle and capillary layout on spatio-temporal distribution of fine root diameters in apple trees [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(1): 101-110.
- [23] 王光明. 金冠苹果食用品质的测定方法——法国核准的标准项目 [J]. 国外农学(果树), 1981, (2): 13-14.
WANG G M. Method for measuring the edible quality of golden delicious apples: standard items approved by France [J]. Foreign Agriculture: Orchard, 1981, (2): 13-14.
- [24] 位杰, 蒋媛, 林彩霞. 库尔勒香梨及其芽变和杂交品种(系)果实品质评价因子的选择[J]. 食品科学, 2018, 39(11): 69-74.
WEI J, JIANG Y, LIN C X. Selection of quality evaluation factors for korla fragrant pear, bud mutants and hybrid varieties (strains) [J]. Food Science, 2018, 39(11): 69-74.
- [25] GU Y, XIE J, LIU H, et al. Evaluation and analysis of comprehensive performance of a brake pedal based on an improved analytic hierarchy process [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Automobile Engineering, 2021, 235(9): 2636-2648.
- [26] 叶霜, 李承茨, 邱霞, 等. 基于组合赋权的 TOPSIS 模型在果实品质评价中的应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(10): 111-121.
YE S, LI C Y, QIU X, et al. Application of combination weighting based TOPSIS model in fruit quality evaluation [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2017, 45(10): 111-121.
- [27] 李灿. 滴灌施肥技术参数对苹果产量品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
LI C. Effects of technical parameters of drip fertigation on apple yield and quality [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.
- [28] DUTTA B, SINGHA T, GOH M, et al. Post factum analysis in TOPSIS based decision making method [J]. Expert Systems with Applications, 2019, 138: 112806.
- [29] 王睿哲, 崔慧敏, 郭铁群, 等. 5个梨品种枝叶生长与开花结果特性比较[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(11): 2652-2660.
WANG R Z, CUI H M, GUO T Q, et al. Comparative study on biological characteristics, shoot growth characteristics and fruit quality characteristics of different pear varieties during flowering period [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2022, 59(11): 2652-2660.
- [30] MENGEL K, ROBIN P, SALSAC L. Nitrate reductase activity in shoots and roots of maize seedlings as affected by the form of nitrogen nutrition and the pH of the nutrient solution [J]. Plant Physiology, 1983, 71(3): 618-622.
- [31] 顾曼如, 束怀瑞, 周宏伟. 苹果氮素营养研究 V. 不同形态¹⁵N 的吸收、运转特性 [J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 1987, 18(4): 17-24.
GU M R, SHU H R, ZHOU H W. A study on the nitrogen nutrition of apple trees V. The characteristics of absorption and transportation for various of ¹⁵N fertilizers [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 1987, 18(4): 17-24.
- [32] 郝琨, 刘小刚, 张岩, 等. 干旱胁迫-复水与氮肥耦合对小粒咖啡生长和水氮生产力的影响 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(12): 4034-4042.
HAO K, LIU X G, ZHANG Y, et al. Coupling effects of periodic rewatering after drought stress and nitrogen fertilizer on growth and water and nitrogen productivity of *Coffea Arabica* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(12): 4034-4042.
- [33] 禹婷. 果树硝态氮和铵态氮营养研究综述 [J]. 安徽农学通报, 2008, 14(21): 144-146.
YU T. A review of research on nitrate and ammonium nitrogen nutrition in fruit trees [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2008, 14(21): 144-146.
- [34] 张文斌, 魏百弘, 铁建中, 等. 氮素形态对基质栽培娃娃菜品质的影响 [J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(6): 97-104.
ZHANG W B, WEI B H, TIE J Z, et al. Effect of nitrogen forms on the quality of mini Chinese cabbage cultivated on substrate [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2022, 57(6): 97-104.
- [35] 李跃森, 吴水金, 张帅, 等. 有机肥氮投入比例对香蕉生长及主要品质影响 [J]. 土壤, 2022, 54(2): 247-254.
LI Y S, WU S J, ZHANG S, et al. Effects of ratio of organic fertilizer nitrogen input on banana growth and main quality [J]. Soils, 2022, 54(2): 247-254.
- [36] 王晓佳, 贾永华, 王春良. 不同钙肥处理对金冠苹果品质的影响 [J]. 安徽农业科学, 2015, 43(35): 62-64.
WANG X J, JIA Y H, WANG C L. Effect of different calcium fertilizer treatment on the quality of golden delicious apples [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(35): 62-64.
- [37] 任艳林. 降水变化对樟子松人工林土壤无机氮和净氮矿化速率的影响 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012, 48(6): 925-932.
REN Y L. Effects of precipitation change on inorganic nitrogen and net nitrogen mineralization rate at a plantation of Mongolian pine [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012, 48(6): 925-932.
- [38] 陶梦, 苏德荣, 吕世海, 等. 氮肥对库布齐沙地柳枝稷产量、氮肥利用率及土壤硝态氮残留的影响 [J]. 草业科学, 2018, 35(2): 415-422.
TAO M, SU D R, LV S H, et al. Effect of nitrogen fertilizer on switchgrass yield, N-use efficiency and residual nitrate nitrogen in Kubuqi sandland soil [J]. Pratacultural Science, 2018, 35(2): 415-422.