

不同肥水处理对‘瑞香红’苹果 果实糖代谢与品质的影响

胡宇¹,王元基¹,贺颖¹,冯郁晨¹,
贾荣俭¹,宁瑞渊¹,史涛²,赵政阳^{1,2}

(1.西北农林科技大学园艺学院/陕西省苹果工程技术研究中心,陕西杨凌 712100; 2.庆城县苹果试验示范站,甘肃庆城 745199)

摘要:以5年生‘瑞香红’苹果为试材,以只施基肥为对照(CK),T1为施基肥+3、6、9月分3次共追施N 0.34 kg·株⁻¹、P₂O₅ 0.20 kg·株⁻¹、K₂O 0.32 kg·株⁻¹;T2为T1处理的施肥基础上,每次施肥时补充灌水0.03 m³·株⁻¹;T3为施基肥+生育期7次灌水,每次灌水量为0.03 m³·株⁻¹;T4为施基肥+3月(萌芽前)、4月(开花前)、5月(落花后)、6月(花芽分化期)、8月(果实膨大期)分5次共追施N 0.34 kg·株⁻¹、P₂O₅ 0.20 kg·株⁻¹、K₂O 0.32 kg·株⁻¹;T5为T4的施肥基础上,每次施肥时补充灌水0.03 m³·株⁻¹,共设置6个处理,分析不同肥水处理对土壤养分和苹果果实糖代谢与品质的影响。结果表明:同种施肥条件下,生育期灌水会增加单果质量和产量,降低果实硬度,其中T2的单果质量(235.93 g)和产量(45 037.11 kg·hm⁻²)最大;相较于CK,只增加灌水(T3)会降低果实可滴定酸及果实氮元素含量,降幅分别为14.85%和21.29%;施肥与灌水均会增加果皮挥发性物质的总含量,与CK相比,T2~T5处理提高显著,且T3处理表现最优;T1和T2处理提高了果实中果糖与葡萄糖含量,增加了果实的甜度值,这与果实中的酸性转化酶、蔗糖合成酶分解方向活性增加有关;此外施肥与灌水均会降低果实中山梨醇脱氢酶活性。隶属函数综合评价结果表明:6种肥水处理对‘瑞香红’苹果果实品质指标影响的综合评价指数表现为T2>T1>T5>T3>T4>CK。综上,在干旱地区,多次施加少量肥水在增加‘瑞香红’苹果产量的同时能提高果实品质;适度的肥水处理能提高果实蔗糖和葡萄糖含量;T2处理苹果产量和果实品质均为最优,可作为干旱地区苹果生产的推荐施肥方案。

关键词:苹果;肥水处理;果实品质;糖代谢

中图分类号:S661.1; S147.34 **文献标志码:**A

Effects of different fertilizer and water treatments on sugar metabolism and quality of Ruixianghong apple fruits

HU Yu¹, WANG Yuanji¹, HE Ying¹, FENG Yuchen¹,
JIA Rongjian¹, NING Ruiyuan¹, SHI Tao², ZHAO Zhengyang^{1,2}

(1. College of Horticulture, Northwest A&F University/Shaanxi Engineering Research Center of Apple, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Qingcheng Station of Apple Experiment and Demonstration, Qingcheng, Gansu 745199, China)

Abstract: A five-year-old Ruixianghong apple was employed as the test object. The control treatment (CK) included only basic fertilizer, T1 treatment received three applications of N 0.34 kg·plant⁻¹, P₂O₅ 0.20 kg·plant⁻¹, and K₂O 0.32 kg·plant⁻¹ in the months of March, June, and September based on the baseline fertilizer, T2 was based on the fertilization of T1 treatment with 0.03 m³ per plant per fertilizing time, and T3 was irrigated seven times at a rate of 0.03 m³·plant⁻¹ on the assumption that only basal fertilizer was used during growth period. N 0.34 kg·plant⁻¹, P₂O₅ 0.20 kg·plant⁻¹, and K₂O 0.32 kg·plant⁻¹ were applied five times to T4 based on basal fertilizer in March (before germination), April (before flowering), May (after falling flower), June (flower bud differentiation), and August (fruit expansion). Based on T4, T5 treatment increased irrigation by 0.03 m³·

收稿日期:2023-08-27

修回日期:2024-01-03

基金项目:国家苹果产业技术体系(CARS-27);陕西省自然科学基金项目(2023-JC-QN-0193);西北农林科技大学科研启动基金项目(2452022027);陇东地区主推苹果新品种肥水管理技术研究(QY-STK-2022A-043)

作者简介:胡宇(1998-),女,陕西渭南人,硕士研究生,研究方向为果树栽培生理。E-mail:huyu5405@163.com

通信作者:赵政阳(1964-),男,陕西富平人,教授,主要从事苹果优质高效生产实践技术研究。E-mail:zhaozy@nwsuaf.edu.cn

plant⁻¹ per fertilization. To investigate the effects of various fertilizer and water treatments on soil nutrients, sugar metabolism, and apple fruit quality, a total of six treatments were set up. The findings demonstrated that irrigation throughout the growth phase improved single fruit mass and productivity while reducing fruit hardness under the same fertilization conditions, and the single fruit weight and yield of T2 were the highest (235.93 g, 45 037.11 kg · hm⁻²). As irrigation increased, the amount of titratable acid and nitrogen in fruit dropped in comparison to CK (T3), the decline was 14.85% and 21.29%, respectively. Fertilizer and irrigation applications raised the pericarp's overall volatile matter concentration. When compared with CK, the total level of volatile matter in the pericarp was considerably higher in T2, T3, T4, and T5. T3 treatment had the greatest total content of volatile compounds. Fruit sweetness rose in response to T1 and T2 treatments, which were correlated with increased fructose and glucose levels and sucrose synthase and acid invertase activity. Furthermore, fruits' sorbitol dehydrogenase activity was reduced by irrigation and fertilization. The fruit quality indicators of Ruixianghong were found to be affected by six different fertilizer and water treatments, as shown by the comprehensive assessment indexes of subordinate function, which were as follows: T2>T1>T5>T3>T4>CK. In summary, the Ruixianghong apple generated more fruit and had higher-quality fruit in arid places if a small amount of fertilizer and water was applied more frequently. Fruits with moderate levels of fertilizer and water treatment contained more sugar and glucose. The T2 treatment had the highest yield and fruit quality, making it an ideal option for fertilization when growing apples in arid regions.

Keywords: apple; fertilizer and water treatment; fruit quality; sugar metabolism

苹果 (*Malus × domestica* Borkh.) 是世界四大水果之一, 2022 年联合国粮食及农业组织发布的统计数据显示, 2021 年中国苹果种植面积为 209.25 万 hm², 占世界苹果总种植面积的 43.39%; 产量为 4 598.49 万 t, 占世界总产量的 49.37%, 我国苹果种植面积和产量均为世界第一。近年来, 随着苹果产业发展的“西移北扩”, 干旱缺水和土壤贫瘠成为限制黄土高原地区苹果产业发展的瓶颈, 土壤肥水调控成为苹果产业健康高效发展的关键。果园施肥状况是决定果园生产力的关键要素, 不仅影响树体的健康生长, 还影响苹果产量和品质^[1]。甜度作为水果风味的重要组成部分, 其主要由可溶性糖含量、类型和糖酸比决定, 其中可溶性糖含量和比例会影响果实风味和营养成分, 是决定果实品质和商品价值的重要因素^[2-3]。

黄土高原是我国优质苹果主产区, 该区土壤有机质中等偏上, 但缺氮、贫磷^[4], 果园土壤母质为富钾黄土, 土壤钾素含量普遍偏高, 土壤全钾没有表层累积现象^[5]。施用化肥可以及时为作物提供速效养分, 氮磷肥配合施用能增强苹果叶片对氮的吸收调节能力, 但长期单施化肥会增加土壤容重、降低田间持水量, 造成土壤酸化和养分不均衡, 导致土壤理化性质趋劣^[6-7]。有机无机肥配施可以结合化肥的速效性和有机肥的长效性优势, 既能显著保证土壤肥力、水分和养分的供应, 也可以提高苹果树体生长发育和产量、果实维生素 C 含量、果形指数、可溶性固形物含量以及糖酸比, 降低果实可滴

定酸含量^[8-11]。水与肥是联因互补、相互作用的因子, 土壤水分一定程度上决定着肥料的利用率, 适宜的土壤含水量是作物吸收养分的基础, 适当增加灌水量可以改善果实产量和品质^[12-14]。蒋静静等^[15]研究表明, 同一施肥条件下, 增加灌水量有利于提高黄瓜产量、品质和肥料偏生产力。苹果中可溶性糖主要包含果糖、葡萄糖、蔗糖和山梨醇, 通常果糖含量最高, 占 40% 以上, 其次是蔗糖, 葡萄糖和山梨醇含量最低^[16]。果实中的糖积累、种类与糖代谢酶的活性变化密切相关, 其中起主要调控作用的有蔗糖合成酶 (SS)、酸性转化酶 (AI)、中性转化酶 (NI)、蔗糖磷酸合成酶 (SPS) 和山梨醇脱氢酶 (SDH)^[17-18]。山梨醇是苹果光合同化物的主要运输形式, 其在果实中被 SDH 和山梨醇氧化酶 (SOX) 迅速转化成果糖和葡萄糖, 此外山梨醇的含量也与蔗糖含量密切相关^[19-21]。适量喷施氮肥可提高苹果果实 AI、蔗糖合成酶分解方向 (SS-I) 和 SDH 的活性, 有助于果实中果糖、蔗糖和葡萄糖的合成^[22]; 成熟期施氮则会改变果实可溶性糖的组成, 导致果实甜度和品质降低^[23]。目前我国苹果的栽培品种比较单一, 且主栽品种多为国外品种, 已育成品种中缺少世界性品种^[24]。‘瑞香红’是由西北农林科技大学研发并通过国审的优质晚熟红色苹果新品种, 其果实高桩、易着色、品质佳, 极耐贮藏^[25]。‘瑞香红’在陇东地区具有极佳的内在品质和优良的着色效果, 由于其有喜肥水的特点, 在干旱地区存在果实体积较小的问题, 所以如何通过调控肥水来提

高果实产量和品质是‘瑞香红’生产中面临的关键问题;另外不同肥水处理对苹果糖代谢的影响情况尚需探究。因此,本试验通过研究不同肥水处理对‘瑞香红’苹果的品质与糖代谢的影响,以期为该品种高效优质生产提供理论依据,为推广优质新品种提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2022年3—11月在甘肃省庆阳市庆城县西北农林科技大学苹果试验站(107°16′32″~108°05′49″E,35°42′29″~36°17′22″N)进行,地处甘肃陇东黄土高原中部地带,海拔高度1380 m,庆城县多年平均气温为7.8~9.6℃,极端最低气温-14℃,年日照总时数2444.8 h,平均年降水量537.4 mm,平均全年无霜期169 d,是苹果的优生区和主产区。2022年全年总降水量416.6 mm,降水主要集中在7~9月,其中7月降水量达到315.8 mm。土壤类型为黄绵土,土壤容重为1.13 g·cm⁻³,田间持水量为23.37%。

1.2 试验设计

本研究以5 a生‘瑞香红’为试验材料,2018年种植,砧木为M26,树体均为自由纺锤形,株距1.5 m,

行距3 m。试验共设6个处理,CK:常规水肥管理,即秋季施基肥(有机肥15.00 kg·株⁻¹+复合肥1.5 kg·株⁻¹),生育期不追肥水;T1:秋季施基肥+3、6、9月分3次施入N 0.34 kg·株⁻¹、P₂O₅ 0.20 kg·株⁻¹、K₂O 0.32 kg·株⁻¹,生育期不灌水;T2:秋季施基肥+3、6、9月分3次施入N 0.34 kg·株⁻¹、P₂O₅ 0.20 kg·株⁻¹、K₂O 0.32 kg·株⁻¹,每次施肥同时灌水0.03 m³·株⁻¹,总灌水量为0.09 m³·株⁻¹;T3:秋季施基肥+生育期不追肥,3~9月每月分别灌水0.03 m³·株⁻¹,总灌水量为0.21 m³·株⁻¹;T4:秋季施基肥+3月(萌芽前)、4月(开花前)、5月(落花后)、6月(花芽分化期)、8月(果实膨大期)分5次施入N 0.34 kg·株⁻¹、P₂O₅ 0.20 kg·株⁻¹、K₂O 0.32 kg·株⁻¹,生育期不灌水;T5:秋季施基肥+3月(萌芽前)、4月(开花前)、5月(落花后)、6月(花芽分化期)、8月(果实膨大期)分5次施入N 0.34 kg·株⁻¹、P₂O₅ 0.20 kg·株⁻¹、K₂O 0.32 kg·株⁻¹,每次施肥同时灌水0.03 m³·株⁻¹,总灌水量为0.15 m³·株⁻¹。具体试验设置见表1、2、3。每个处理3次重复,共18个小区,每个小区4棵苹果树,选取树势一致、无病虫害的果树,每棵树在定果时留果100个。

表1 T1、T2处理试验设置

Table 1 Test settings of T1 and T2 treatments

施肥时期 Fertilization period	T1					T2				
	养分投入量(kg·株 ⁻¹) Nutrient application amount				灌溉量 Irrigation /(m ³ ·株 ⁻¹)	养分投入量/(kg·株 ⁻¹) Nutrient application amount				灌溉量 Irrigation /(m ³ ·株 ⁻¹)
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	有机肥 Organic fertilizer		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	有机肥 Organic fertilizer	
10月 October	0.30	0.30	0.30	15.00	0.00	0.30	0.30	0.30	15.00	0.00
3月 March	0.10	0.05	0.05	0.00	0.00	0.10	0.05	0.05	0.00	0.03
6月 June	0.07	0.05	0.11	0.00	0.00	0.07	0.05	0.11	0.00	0.03
9月 September	0.17	0.10	0.16	0.00	0.00	0.17	0.10	0.16	0.00	0.03
总计 Total	0.64	0.50	0.62	15.00	0.00	0.64	0.50	0.62	15.00	0.09

表2 CK、T3处理试验设置

Table 2 Test settings of CK and T3 treatments

施肥时期 Fertilization period	CK					T3				
	养分投入量(kg·株 ⁻¹) Nutrient application amount				灌溉量 Irrigation /(m ³ ·株 ⁻¹)	养分投入量/(kg·株 ⁻¹) Nutrient application amount				灌溉量 Irrigation /(m ³ ·株 ⁻¹)
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	有机肥 Organic fertilizer		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	有机肥 Organic fertilizer	
10月 October	0.30	0.30	0.30	15.00	0.00	0.30	0.30	0.30	15.00	0.00
3月下旬 Late March	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
4月下旬 Late April	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
5月下旬 Late May	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
6月中旬 Mid-June	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
7月上旬 Early July	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
8月中旬 Mid-August	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
9月中旬 Mid-September	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
总计 Total	0.30	0.30	0.30	15.00	0.00	0.30	0.30	0.30	15.00	0.21

表 3 T4、T5 处理试验设置
Table 3 Test settings of T4 and T5 treatments

施肥时期 Fertilization period	T4					T5				
	养分投入量(kg·株 ⁻¹) Nutrient application amount				灌溉量 Irrigation /(m ³ ·株 ⁻¹)	养分投入量/(kg·株 ⁻¹) Nutrient application amount				灌溉量 Irrigation /(m ³ ·株 ⁻¹)
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	有机肥 Organic fertilizer		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	有机肥 Organic fertilizer	
10月 October 3月(萌芽前) March (before germination)	0.300	0.300	0.300	15.000	0.000	0.300	0.300	0.300	15.000	0.000
4月(开花前) April (before flowering)	0.134	0.040	0.032	0.000	0.000	0.134	0.040	0.032	0.000	0.030
5月(落花后) May (after falling flowers)	0.034	0.040	0.032	0.000	0.000	0.034	0.040	0.032	0.000	0.030
6月(花芽分化) June (flower bud differentiation)	0.102	0.040	0.032	0.000	0.000	0.102	0.040	0.032	0.000	0.030
8月(果实膨大期) August (fruit bulging)	0.034	0.040	0.096	0.000	0.000	0.034	0.040	0.096	0.000	0.030
总计 Total	0.640	0.500	0.620	15.000	0.000	0.640	0.500	0.620	15.000	0.150

所有处理管理水平相同,行内 1 m 以内区域用黑色园艺地布覆盖,行间自然生草。采用条沟状施基肥和追肥,沟开于果树两侧,距主干 50 cm,沟长 1.0 m,宽 0.3 m,施肥深度为 40 cm,肥料与耕作层土壤混匀后覆底土,采用根域施肥枪注水灌溉。基肥用量为当地适宜肥料用量,各处理追肥的氮、磷、钾的配比是根据施肥时期苹果的需求量确定的。灌水量为灌溉水的最大量,灌溉水的最大量=灌溉面积×灌溉深度×土壤容重×(田间持水量-凋萎系数)。果实于 10 月 31 日(盛花后 199 d)统一采收,采收后各处理随机选取 8 个果实,削皮切块后迅速放入液氮中进行速冻,并置于-80℃冰箱保存,用于后期相关品质指标的测定,每个指标做 3 次生物学重复。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤养分含量 分别在 3 月份施肥前、果实膨大后期及采收后测定土壤基本理化性质,分别取 0~20、20~40、40~60 cm 共 3 个土层的土壤样本,每层样品取同一试验果树 4 个点混合均匀,取样时避开施肥点。参照 Wang 等^[26]方法,采用重铬酸钾-硫酸消化法测定土壤有机质含量;用连续流动分析仪(Flowsys)测定土壤全氮和全磷含量;用碱熔-火焰光度计测定土壤全钾含量。

1.3.2 果实产量 于果实成熟期,各处理选取具有代表性的 3 棵果树,用电子秤测定其全部果实质量,得到单株产量后换算为公顷产量。

1.3.3 果实品质 于果实成熟期,各处理随机选取 10 个苹果进行品质参数的测定,参照王子盾等^[27]方法,使用电子天平称量果实单果质量,用游标卡

尺测量果实最大纵径及赤道部位的最大横径,计算果形指数(果形指数=纵径/横径);用 Minolta CR-400 型色差计测量果面的 L^* (代表明度值)、 a^* (代表红绿值)、 b^* 值(代表黄蓝值);果实硬度使用水果质地分析仪(GÜSS Manufacturing Pty Ltd),果实赤道位置的阳面和阴面各测定一次;可溶性固形物含量用 ATAGO PAL-1 型糖度计(ATAGO)测定,可滴定酸含量采用 GMK-835F 型苹果酸度计(G-WON Korea)测定。

果实矿质元素含量参照郭志刚等^[28]方法测定,用 H₂SO₄-H₂O₂法进行消煮,连续流动分析仪(Flow-sys)测定果实中 N、P 含量,火焰分光光度计测定 K 含量。参照孟智鹏等^[29]方法,采用顶空固相微萃取(HS-SPME),选取 3-壬酮为内标,使用 Trace DSQ GC/MS 气相色谱-质谱联用仪测定果皮的挥发性香气物质含量。

果肉可溶性糖组分测定参照李娅楠等^[30]方法,采用高效液相色谱法(HPLC)进行测定,甜度值=果糖×1.75+蔗糖×1+葡萄糖×0.7+山梨醇×0.4^[31]。果肉山梨醇脱氢酶(SDH)及蔗糖合成酶分解方向(SS-I)活性采用西安热默尔生物科技有限公司试剂盒测定;酸性转化酶(AI)、中性转化酶(NI)、山梨醇氧化酶(SOX)的酶液制备参照 Keller 等^[32]方法,酶液测定参考 Wang 等^[33]方法,所用仪器为全波长多功能酶标仪(Infinite M200pro)以及紫外分光光度计。

1.4 数据分析

用 Microsoft Office Excel 2016 软件进行数据整理、隶属函数分析以及绘制图表,数据以平均值±标

准误差表示;运用 SPSS 26.0 软件对数据进行方差分析,采用 Duncan 法进行多重比较($P<0.05$)。

利用公式(1)计算不同处理果实各品质指标的隶属函数值^[34]:

$$u(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad j=1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中, X_j 表示第 j 个综合指标; X_{\max} 和 X_{\min} 分别表示第 j 个综合指标的最大值和最小值。

2 结果与分析

2.1 不同肥水处理对土壤养分含量的影响

各处理 3 个采样时期的土壤有机质、全氮、全磷、全钾含量均随土层深度的增加呈递减趋势(表

4)。果实膨大后期(9月),相较于 CK, T1 处理 0~40 cm 土层土壤全氮含量、20~40 cm 土层土壤全钾含量显著增加;T2 处理 0~20 cm 土层土壤有机质含量和全氮含量显著增加;T1、T2、T4 处理 40~60 cm 土层土壤全钾含量显著增加。果实采收后(11月),与 CK 相比,T1、T2、T5 处理 0~20 cm 土层土壤有机质含量显著增加,T1、T2 处理 0~20 cm 土层土壤全氮含量显著增加,T4 处理 20~40 cm 土层土壤全氮含量、T5 处理 20~40 cm 土层土壤全钾含量显著减少;T1 处理 40~60 cm 土层土壤全钾含量较 T3 显著增加。由表 4 可知,各处理间 40~60 cm 土层土壤有机质、全氮、全磷含量无显著差异,各处理土壤全钾含量在 3 个时期也较稳定,无明显变化。

表 4 不同肥水处理对土壤养分含量的影响

Table 4 Effects of different fertilizer and water treatments on soil nutrient content

采样时期 Sampling period	土层 Depth/cm	处理 Treatment	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N /(g·kg ⁻¹)	全磷 Total P /(g·kg ⁻¹)	全钾 Total K /(g·kg ⁻¹)
处理前 Before processing	0~20		31.41±2.01	1.71±0.36	1.18±0.02	18.95±0.02
	20~40		19.85±0.58	1.05±0.13	0.95±0.25	18.54±1.22
	40~60		9.92±0.48	0.54±0.10	0.81±0.18	18.39±0.89
果实膨大后期(9月) Late fruit enlargement (September)	0~20	CK	19.65±3.13bc	1.24±0.12bc	0.92±0.05ab	18.91±0.14a
		T1	26.40±0.81ab	1.65±0.09a	1.26±0.10a	19.16±0.33a
		T2	28.39±3.97a	1.82±0.06a	1.22±0.13ab	19.77±0.53a
		T3	17.21±0.81c	1.55±0.13ab	1.05±0.08ab	18.86±0.93a
		T4	23.06±0.09abc	1.68±0.03a	1.19±0.04ab	20.11±0.08a
		T5	17.38±0.60c	1.21±0.01c	0.90±0.10b	19.59±0.59a
	20~40	CK	9.09±0.04a	0.63±0.03bc	0.70±0.01b	18.46±0.01a
		T1	9.07±0.88a	1.63±0.10a	3.37±0.29a	18.89±0.09a
		T2	9.95±0.69a	0.93±0.19b	0.73±0.03b	19.69±0.31a
		T3	7.84±0.81a	0.52±0.05c	0.65±0.01b	18.35±0.94a
		T4	7.85±0.49a	0.57±0.04c	0.68±0.01b	19.98±0.23a
	40~60	T5	8.13±0.61a	0.56±0.05c	0.67±0.01b	19.50±0.41a
		CK	7.09±1.06a	0.46±0.04a	0.66±0.01a	17.94±0.22b
		T1	7.99±0.55a	0.71±0.21a	0.71±0.06a	19.51±0.47a
		T2	8.27±0.34a	0.53±0.06a	0.65±0.01a	19.66±0.22a
T3		6.35±0.02a	0.47±0.02a	0.63±0.01a	18.41±0.67ab	
果实采收后 (11月) Fruit after harvest (November)	0~20	T4	6.60±1.40a	0.48±0.09a	0.65±0.01a	19.36±0.01a
		T5	5.87±0.34a	0.41±0.03a	0.64±0.02a	19.13±0.08ab
		CK	19.00±1.73cd	0.84±0.05b	0.87±0.03a	19.57±0.14a
		T1	27.29±1.48ab	1.76±0.21a	1.08±0.01a	19.29±0.65ab
		T2	30.03±1.05a	1.84±0.08a	0.94±0.01a	19.26±0.23ab
		T3	15.35±0.58d	1.03±0.21b	0.91±0.18a	19.32±0.23ab
	20~40	T4	23.27±2.53bc	1.53±0.19ab	1.25±0.32a	18.53±0.22ab
		T5	24.81±1.24ab	1.33±0.29ab	1.05±0.17a	18.07±0.25b
		CK	11.05±0.56ab	0.77±0.03a	0.74±0.02a	19.51±0.03a
		T1	11.42±0.42a	0.76±0.01ab	0.81±0.12a	19.09±0.35ab
		T2	9.85±0.61ab	0.64±0.05ab	0.71±0.05a	19.21±0.30ab
	40~60	T3	8.73±1.50ab	0.57±0.12ab	0.66±0.03a	19.21±0.55ab
		T4	8.13±1.08b	0.55±0.04b	0.67±0.01a	18.46±0.08ab
		T5	8.82±0.07ab	0.65±0.02ab	0.68±0.01a	18.19±0.18b
		CK	6.57±0.52a	0.45±0.04a	0.65±0.03a	18.88±0.26ab
T1		7.26±0.67a	0.49±0.02a	0.64±0.01a	19.38±0.43a	
40~60	T2	7.25±0.55a	0.49±0.03a	0.64±0.01a	18.74±0.05ab	
	T3	7.17±1.00a	0.46±0.07a	0.65±0.04a	17.87±0.36b	
	T4	7.12±0.98a	0.50±0.11a	0.66±0.05a	18.25±0.41ab	
	T5	6.65±0.51a	0.47±0.01a	0.65±0.01a	18.31±0.10ab	

注:同列不同小写字母表示同一土层处理间显著差异($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments in the same soil layer ($P<0.05$). The same below.

2.2 不同肥水处理对‘瑞香红’果实产量和外在品质的影响

由表 5 可知, T2 与 T5 处理较 CK 及 T1 单果质量显著增加, 较 CK 增幅分别为 29.24%、14.31%, 较 T1 增幅分别为 28.62%、13.76%, T2 的单果质量最大(235.93 g); T2 处理产量显著高于其他处理, 较 CK 显著增加 29.60%。果形指数是指果实纵径与横径的比值, 其值越大果质量越高, 不同肥水处理间果形指数无显著差异, 说明本试验肥水处理对果实果形指数无显著影响。T5 处理 L^* 值显著高于 CK 与 T2 处理, 增幅分别为 13.70%、22.31%; T5 处理 a^* 值显著低于 T1 与 T4 处理, 降幅分别为 5.86%、5.10%; 各处理间 b^* 值无显著差异。可见, 同种施肥条件下, 追肥时增加灌水可增加果实单果质量和产量, 降低 a^* 值。各处理的果实光洁度、果点指数、果点大小均无明显差异, 果实皆为全红, 颜色均较鲜艳(图 1)。

2.3 不同肥水处理对‘瑞香红’果实内在品质的影响

由表 6 可知, 所有处理中 T1 的果实硬度最大($8.78 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$), 较 CK 显著增加 6.42%; T2 处理的果实硬度最小, 为 $7.95 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。T1、T3、T4、T5 处理可溶性固形物含量均较 CK 显著增加, 增幅为

1.54%~4.88%。T3 处理可滴定酸含量较 CK 显著降低, 其余处理间无显著差异。T1、T3 和 T5 处理的果实全氮含量较 CK 显著降低, 降幅为 18.11%~34.55%。与 CK 相比, 各处理果实全磷含量显著降低, 降幅为 29.63%~56.79%; 各肥水处理间差异不显著。各处理间果实全钾无显著差异。综上所述, 在相同施肥条件下, 增加灌水会降低果实硬度, T2 较 T1 果实硬度降低 9.45%; 与 CK 相比, 只进行灌水处理(T3)果实的可滴定酸含量及果实全氮含量显著降低, 降幅分别为 14.85%和 21.29%。

2.4 不同肥水处理对‘瑞香红’果实果皮香气物质含量的影响

酯类、醛类、醇类、酮类等挥发性化合物是果实主要的香气物质。T3 处理果皮的酯类和醇类物质均高于其他处理, 增幅分别为 56.62%~203.35%、33.72~226.06%(图 2A、C); CK 果皮的醛类物质含量为 $1983.82 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于其他处理, 增幅为 25.12%~474.33%(图 2B); T1 处理果皮的酮类物质含量最高, 显著高于其他处理, 增幅为 906.18%~1402.25%(图 2D)。各处理果皮的酯类、醛类、醇类、酮类这 4 类物质的总含量表现为 $T3 > T4 > T5 > T2 > CK > T1$, 其中 T3 处理显著高于其他处理, 平均增幅为 99.16%(图 2E)。综上所述, 相较于 CK, T2、T3、

表 5 不同肥水处理对‘瑞香红’果实产量和外在品质的影响

Table 5 Effect of different fertilizer and water treatments on yield and external quality of Ruixianghong fruits

处理 Treatment	单果质量/g Single fruit mass	产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Yield	果形指数/% Fruit shape index	L^*	a^*	b^*
CK	182.55±11.91c	34750.40±312.75d	0.99±0.03a	45.33±5.14bc	78.23±2.39ab	52.80±7.49a
T1	183.43±16.67c	37162.23±430.23c	0.99±0.06a	48.07±6.00ab	80.00±3.53a	54.02±4.38a
T2	235.93±15.72a	45037.11±451.70a	1.01±0.02a	42.14±2.72c	78.81±3.80ab	53.83±3.90a
T3	192.23±15.34bc	35931.85±607.37cd	1.01±0.01a	49.68±5.35ab	78.97±3.72ab	51.99±6.11a
T4	184.44±16.49c	37488.37±494.08c	0.99±0.03a	47.53±2.95abc	79.36±2.20a	52.59±6.27a
T5	208.67±23.83b	41309.31±509.66b	1.00±0.03a	51.54±5.28a	75.31±4.20b	48.80±9.45a

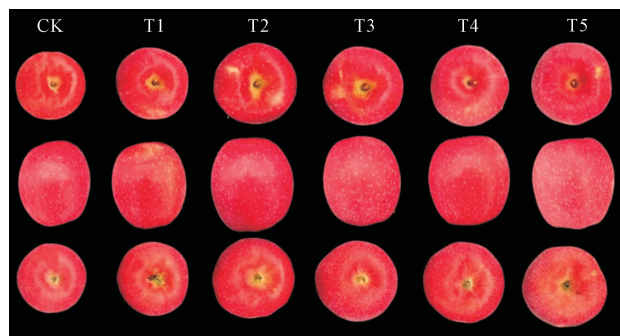


图 1 成熟期不同肥水处理的‘瑞香红’果实

Fig.1 Ruixianghong fruit treated with different fertilizer and water at ripening stage

T4、T5 处理均显著提高了果皮挥发性物质的总含量, T1 显著降低了果皮挥发性物质的总含量; 但 T1 较 CK 显著提高了果皮的酮类物质含量, 其含量达到 $3915.21 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.5 不同肥水处理对‘瑞香红’果实糖组分的影响

由图 3A 可知, T1 处理下果实 4 种可溶性糖含量皆为最高, 山梨醇、葡萄糖、果糖和蔗糖含量分别较 CK 增加 28.44%、18.98%、21.64%、10.04%。T1 和 T2 两个处理较 CK 提高‘瑞香红’果实可溶性糖总含量, T2 较 T1 处理果实山梨醇含量显著降低, 其他 3 种可溶性糖含量与 T1 无显著差异。与 CK 相比, T3、T4 和 T5 处理果实 4 种可溶性糖含量均不同

程度降低。蔗糖、果糖和葡萄糖3种糖的组成与比例是决定果实甜度的重要因素,如图3B所示,各处理的果实甜度值表现为:T1>T2>CK>T4>T5>T3,T1和T2处理分别较CK显著增加19.40%和8.86%。

2.6 不同肥水处理对‘瑞香红’成熟期果实糖代谢相关酶活性的影响

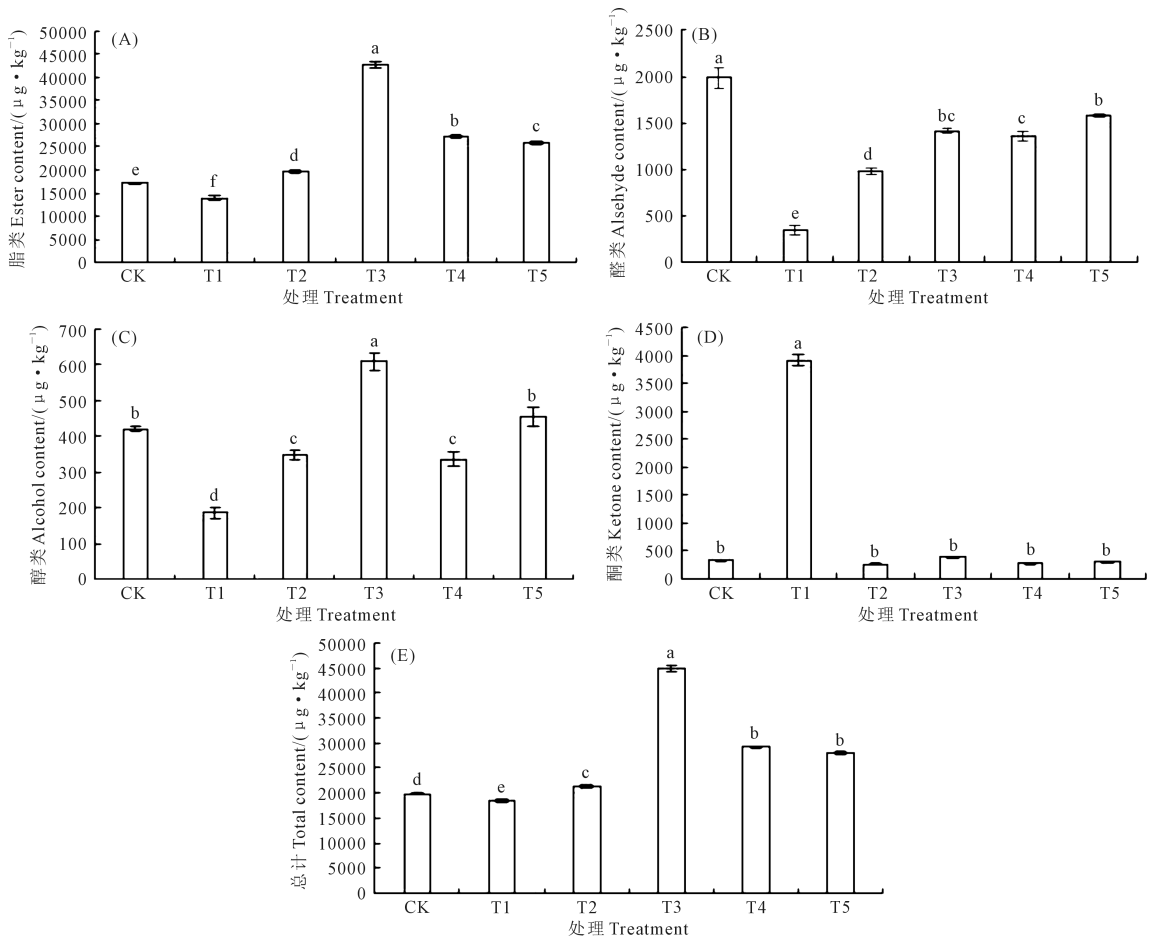
由图4A可知,相较于CK,各处理均显著降低了SDH活性,降幅为35.73%~78.13%,其中T5处理的SDH活性最低,T2处理的SDH活性仅次于CK。T1、T2、T4处理的果实AI活性显著高于CK,

增幅分别为175.82%、288.41%、266.12%,T2的AI活性最高,达到 $85.25 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (图4B)。T1处理NI活性显著高于其他处理,较CK增加64.12%,T2、T3、T4和T5处理间与CK间无显著差异(图4C)。与CK相比,T4、T5处理显著提高了果实SOX活性,增幅分别为34.66%、24.30%;T2处理显著降低了SOX活性,T1、T3处理与CK无显著差异(图4D)。除T5处理外,其余处理均较CK显著提高了SS-I活性,增幅为32.46%~66.18%;其中以T3的SS-I活性最高,达到 $1\ 618.53 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (图4E)。

表6 不同肥水处理对‘瑞香红’果实内在品质的影响

Table 6 Effects of different fertilizer and water treatments on the intrinsic quality of Ruixianghong fruit

处理 Treatment	硬度 Hardness /($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	可溶性固形物 Soluble solid content/%	可滴定酸 Titratable acidity content/%	全氮 Total N /($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	全磷 Total P /($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	全钾 Total K /($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
CK	8.25±0.57bc	14.96±0.50b	0.330±0.058a	1.259±0.049a	0.081±0.009a	4.125±1.108a
T1	8.78±0.76a	15.69±0.56a	0.232±0.070ab	0.824±0.050d	0.044±0.017b	3.550±1.144a
T2	7.95±0.62c	15.66±0.60ab	0.281±0.033a	1.213±0.050a	0.056±0.005b	3.960±0.532a
T3	8.19±0.45bc	15.19±0.55a	0.309±0.084b	0.991±0.049c	0.057±0.004b	5.193±0.201a
T4	8.37±0.45b	15.69±0.40a	0.317±0.039a	1.184±0.118ab	0.035±0.009b	5.275±1.626a
T5	7.98±0.38bc	15.65±0.52a	0.308±0.049a	1.031±0.023bc	0.044±0.005b	4.946±0.604a



注:小写字母表示处理间显著差异($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below.

图2 不同肥水处理下‘瑞香红’苹果果皮主要香气物质含量

Fig.2 Contents of main aroma components in Ruixianghong apple peel treated with different fertilizer and water

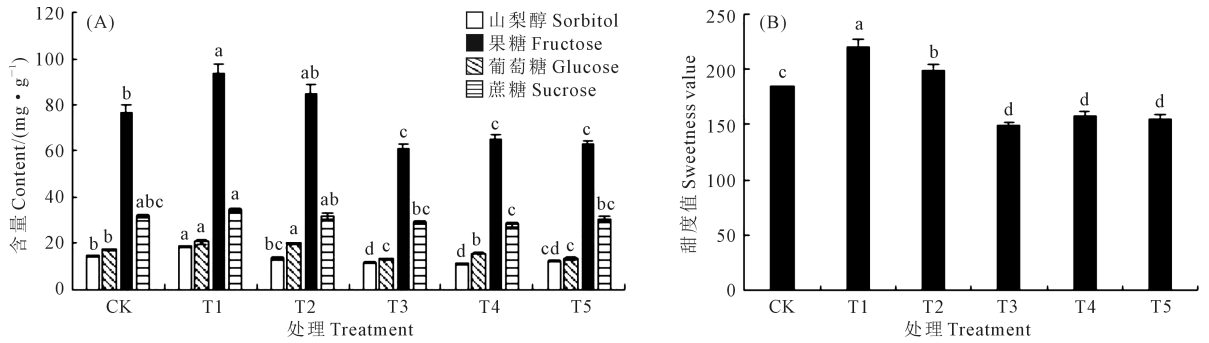


图 3 不同肥水处理下‘瑞香红’苹果果实可溶性糖组分含量及甜度

Fig.3 Ruixianghong apple fruit's soluble sugar concentration and sweetness of various fertilizer and water treatments

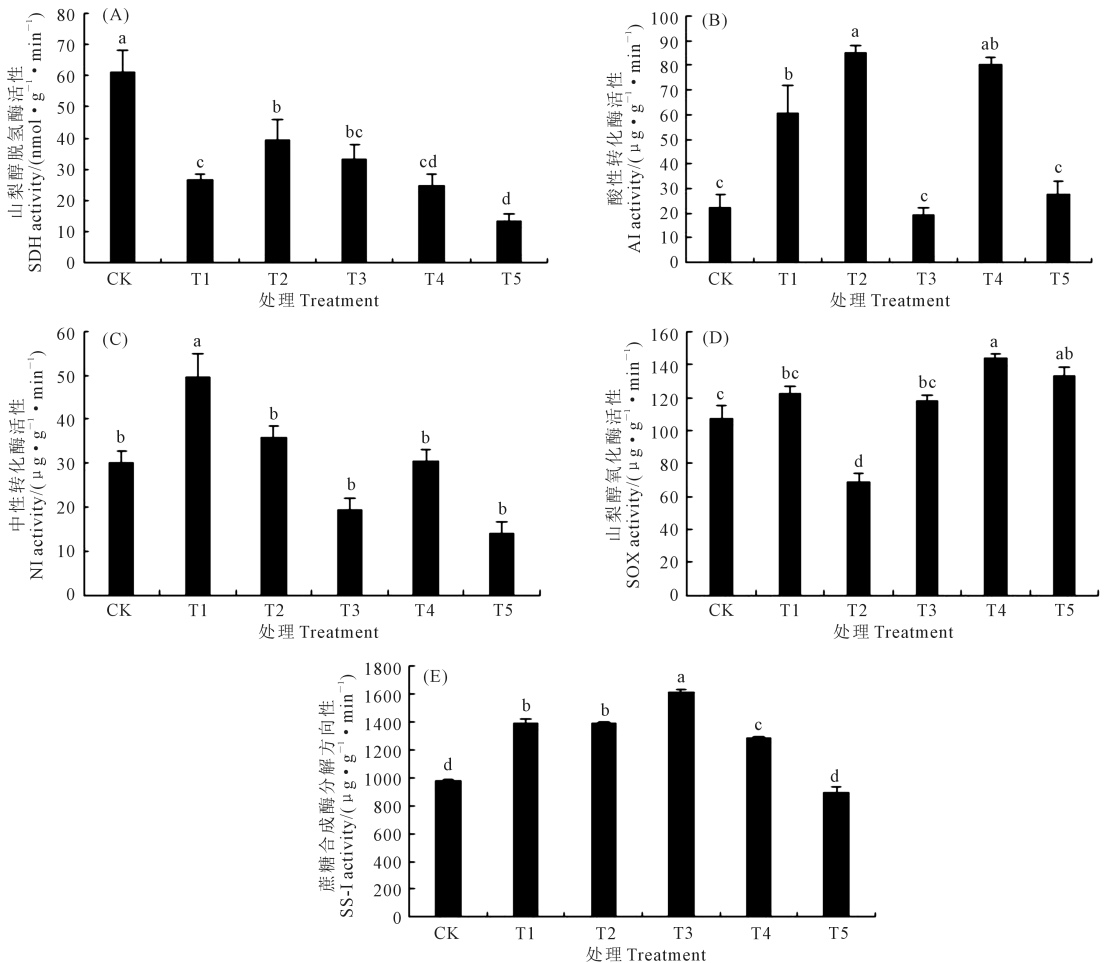


图 4 不同肥水处理下‘瑞香红’苹果果实糖代谢相关酶活性

Fig.4 Enzyme activities related to sugar metabolism in Ruixianghong apple fruits treated with different fertilizer and water

2.7 肥水处理综合评价

选取具有代表性的果实品质指标,以果实单果质量、果形指数、硬度、可溶性固形物含量、可滴定酸含量、香气物质总含量、甜度值作为评价指标,采用隶属函数法对肥水处理进行综合评价。如表 7 所示,果实品质指标的综合评价指数表现为 T2>T1>T5>T3>T4>CK,表明 T2 处理在提升‘瑞香红’果实品质方面的综合效果最优。

3 讨论

3.1 不同肥水处理对‘瑞香红’苹果果实品质的影响

本研究发现,肥水处理会影响‘瑞香红’苹果单果质量、硬度、可滴定酸、可溶性糖和香气物质含量等果实品质。同种施肥条件下,生育期灌水会增加‘瑞香红’苹果果实单果质量和产量,T2 较 T1 处理、

表7 不同肥水处理各果实品质指标隶属函数值及综合评价结果

Table 7 Membership function value and comprehensive evaluation result of fruit quality indexes of different fertilizer and water treatments

处理 Treatment	隶属函数值 Membership function value							综合指数 Comprehensive index	排序 Order
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7		
CK	0.00	0.31	0.36	0.00	0.00	0.05	0.49	0.17	6
T1	0.02	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.57	2
T2	1.00	1.00	0.00	0.95	0.50	0.10	0.72	0.61	1
T3	0.18	0.89	0.29	0.32	0.22	1.00	0.00	0.41	4
T4	0.04	0.08	0.51	1.00	0.14	0.40	0.11	0.33	5
T5	0.49	0.61	0.33	0.95	0.23	0.36	0.08	0.44	3

注: X1: 单果质量; X2: 果形指数; X3: 硬度; X4: 可溶性固形物; X5: 可滴定酸; X6: 香气物质总含量; X7: 甜度值。

Note: X1: Single fruit mass; X2: Fruit shape index; X3: Hardness; X4: Soluble solid content; X5: Titratable acidity content; X6: Total aroma substances content; X7: Sweetness value.

T5 较 T4 处理提升显著。水与肥是联因互补、相互作用的因子,水分提高肥料的利用率,适当增加灌水量可以改善果实产量和品质^[12-14]。与 CK 相比, T3 处理果实果糖、山梨醇和葡萄糖含量显著降低,且 T2 处理果实山梨醇含量及 T5 处理果实葡萄糖含量分别较 T1、T4 处理显著降低,这一结果与 Wang 等^[33]的研究结果一致,即适度干旱能显著提高苹果中果糖、葡萄糖和山梨醇含量。本研究中,增加施肥提高了果实品质,以 T2 处理的综合品质最佳,与 CK 相比, T1 处理果实果糖、山梨醇和葡萄糖含量显著增加, T1、T2 处理果实甜度值增大, T2、T3、T4、T5 果皮香气物质总含量显著增加, T1 降低了果皮的香气物质总含量。温志静等^[22]研究表明,叶面喷施适量氮肥能提高果实单果质量、硬度、可溶性固形物和可滴定酸含量,促进果实中果糖和葡萄糖的积累,适量的钾肥可提高苹果果实单果质量、硬度和可溶性固形物含量^[28],适量氮肥有利于葡萄果实中糖分的积累^[35-37]。姚改芳等^[31]研究发现施钾肥可以增加‘新梨7号’果实挥发性香气物质种类和含量,唐岩等^[38]研究表明叶面喷施一定浓度的磷酸二氢钾可以增加‘红将军’苹果果实香气种类和含量。综合分析, T1 和 T2 处理提高了‘瑞香红’果实品质,但和 T1、T2 相同施肥量的 T4 和 T5 却降低了果实品质,这可能是由于随着施肥次数的增加,每次的施肥量减少,施肥间隔时间较短,沟施过程中导致养分损耗所致。

3.2 不同肥水处理对‘瑞香红’苹果果实糖代谢的影响

苹果光合同化产物以蔗糖和山梨醇的形式运输到果实中,其中山梨醇占韧皮部汁液中运转的同化物的 60%~80%^[39],当光合同化物在果实中卸载后,几乎所有的山梨醇和一半的蔗糖在酶的催化下转化为果糖,故成熟苹果果实中果糖含量最高,蔗糖、葡萄糖次之,山梨醇含量最少^[40-41]。本研究中

所有处理的‘瑞香红’果实中各可溶性糖中均为果糖含量最高,约占可溶性糖的 53%~57%,蔗糖约占 21%~26%,葡萄糖约占 11%~13%,山梨醇最低,约占 8%~11%。山梨醇在果实中会被 SDH 与 SOX 转化, SDH 是植物降解山梨醇的主要酶,可将山梨醇氧化生成果糖,但其催化过程为可逆反应^[42]; SOX 可将山梨醇氧化为葡萄糖,苹果果实中 SOX 活性较低,且 80%以上为束缚型,总活性仅为 SDH 的 1/5。果实中蔗糖会在 SS、AI、NI 催化作用下生成果糖和葡萄糖, SS 的催化为可逆反应,但是通常认为 SS 主要起分解蔗糖的作用, AI 与 NI 的催化不可逆^[43-44]。糖代谢和运输系统的变化具有灵活性,当山梨醇代谢下调时,蔗糖分解会上调,以补偿山梨醇代谢下调导致的果糖含量的减少,以维持苹果中果糖的稳态^[2]。有研究表明^[33],土壤水分胁迫可显著提高苹果中果糖、葡萄糖和山梨醇含量,干旱条件能显著提高 SOX、SS、AI 活性,促进苹果果实中果糖和葡萄糖积累。叶面喷施适量的氮肥能提高嘎啦苹果果实的 SDH、AI 及 SS-I 酶的活性^[22]。本研究中,与 CK 相比,生育期灌水处理(T3)的果实果糖、葡萄糖和山梨醇含量显著降低,生育期 5 次施肥处理(T4 和 T5)的果实 SOX 酶活性提高, SDH 活性及果糖、山梨醇含量降低,且 T4 提高了果实 AI、SS-I 酶活性,与前人研究结论基本一致。本研究还发现,与 CK 相比,生育期 3 次施肥处理(T1 和 T2)的果实果糖含量和 AI、SS-I 酶活性均有所提高,且 T1 提高了 NI 酶活性,导致 T1、T2 果实的葡萄糖含量较高,说明 T1 和 T2 处理可通过降低果实山梨醇代谢,使蔗糖分解上调,从而促进果实果糖和葡萄糖含量积累。

4 结论

施肥同时增加灌水会降低苹果果实中山梨醇脱氢酶(SDH)活性, T1 与 T2 处理较 CK 显著增加了果实中果糖和葡萄糖含量,这得益于酸性转化酶

(AI)和蔗糖合成酶分解方向(SS-I)酶活性的提高;不同施肥处理对‘瑞香红’苹果果实产量和品质有显著影响,与只施基肥处理相比,T2处理不仅果实产量增加了29.60%,在提高‘瑞香红’苹果果实品质方面的综合效果也为最优。因此,在‘瑞香红’苹果生产上推荐使用T2施肥方案,即秋季施基肥+3、6、9月分3次施入 $N\ 0.34\ \text{kg}\cdot\text{株}^{-1}$ 、 $P_2O_5\ 0.20\ \text{kg}\cdot\text{株}^{-1}$ 、 $K_2O\ 0.32\ \text{kg}\cdot\text{株}^{-1}$,每次施肥同时灌水 $0.03\ \text{m}^3\cdot\text{株}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] 邵发琦,李改民,柯斧,等.肥水蚓坑措施下不同施肥对土壤养分和山地苹果生产的影响[J].水土保持研究,2023,30(1):197-203,208. SHAO F Q, LI G M, KE F, et al. The effect of different fertilization on soil nutrient and mountain apple production under the fertilizer water earthworm pit measures[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 197-203, 208.
- [2] LI M J, LI P M, MA F W, et al. Sugar metabolism and accumulation in the fruit of transgenic apple trees with decreased sorbitol synthesis[J]. Horticulture Research, 2018, 5: 60.
- [3] 苏静,祝令成,刘茜,等.果实糖代谢与含量调控的研究进展[J].果树学报,2022,39(2):266-279. SU J, ZHU L C, LIU Q, et al. Research progress on sugar metabolism and concentration regulation in fruit[J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(2): 266-279.
- [4] 王富林,门永阁,葛峰,等.两大优势产区‘红富士’苹果园土壤和叶片营养诊断研究[J].中国农业科学,2013,46(14):2970-2978. WANG F L, MEN Y G, GE S F, et al. Research on soil and leaf nutrient diagnosis of red Fuji[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(14): 2970-2978.
- [5] 张丽娜,李军,范鹏,等.黄土高原典型苹果园地深层土壤氮磷钾养分含量与分布特征[J].生态学报,2013,33(6):1907-1915. ZHANG L N, LI J, FAN P, et al. Distribution of soil NPK nutrient content in deep soil profile of typical apple orchards on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(6): 1907-1915.
- [6] ZHANG S L, YANG X Y, WISS M, et al. Changes in physical properties of a loess soil in China following two long-term fertilization regimes[J]. Geoderma, 2006, 136(3/4): 579-587.
- [7] 孙霞,柴仲平,蒋平安.不同氮磷钾肥配比对南疆红富士苹果光合特性的影响[J].西南农业学报,2012,25(4):1352-1357. SUN X, CHAI Z P, JIANG P A. Effect of different ratio of N, P and K fertilizers on photosynthetic characteristics of Fuji Apple in south of Xinjiang[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2012, 25(4): 1352-1357.
- [8] 于昕阳,翟丙年,金忠宇,等.有机无机肥配施对旱地冬小麦产量、水肥利用效率及土壤肥力的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):320-324. YU X Y, ZHAI B N, JIN Z Y, et al. Effect of combined application of organic and inorganic fertilizers on winter wheat yield, water and fertilizer use efficiency and soil fertility in dryland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(5): 320-324.
- [9] 李涛涛,翟丙年,李永刚,等.有机无机肥配施对渭北旱塬红富士苹果树生长发育及产量的影响[J].果树学报,2013,30(4):591-596. LI T T, ZHAI B N, LI Y G, et al. Effect of fertilizer type on growth and yield of Fuji Apple in Weibei dry region of Shaanxi[J]. Journal of Fruit Science, 2013, 30(4): 591-596.
- [10] 杨莉莉,王永合,韩稳社,等.氮肥减量配施有机肥对苹果产量品

质及土壤生物学特性的影响[J].农业环境科学学报,2021,40(3):631-639.

YANG L L, WANG Y H, HAN W S, et al. Effects of reducing nitrogen fertilizer and applying organic fertilizer on apple yield and quality and soil biological characteristics[J]. Journal of Agro-environment Science, 2021, 40(3): 631-639.

- [11] 赵佐平,同延安,刘芬,等.长期不同施肥处理对苹果产量、品质及土壤肥力的影响[J].应用生态学报,2013,24(11):3091-3098. ZHAO Z P, TONG Y A, LIU F, et al. Effects of different long-term fertilization patterns on Fuji Apple yield, quality, and soil fertility on Weibei Dryland, Shaanxi Province of Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(11): 3091-3098.
- [12] DAI Z G, FEI L J, ZENG J, et al. Optimization of water and nitrogen management for surge-root irrigated apple trees in the Loess Plateau of China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021, 20(1): 260-273.
- [13] 刘思汝,石伟琦,马海洋,等.果树水肥一体化高效利用技术研究进展[J].果树学报,2019,36(3):366-384. LIU S R, SHI W Q, MA H Y, et al. Advances in research on efficient utilization of fertigation in fruit trees[J]. Journal of Fruit Science, 2019, 36(3): 366-384.
- [14] 孙云云,刘方明,高玉山,等.吉林西部膜下滴灌水氮调控对玉米生长及水肥利用的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(11):76-82. SUN Y Y, LIU F M, GAO Y S, et al. Regulating water and fertilizer application in film-mulched drip irrigation to improve growth and water-fertilizer utilization of maize in western Jilin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(11): 76-82.
- [15] 蒋静静,屈锋,苏春杰,等.不同肥水耦合对黄瓜产量品质及肥料偏生产力的影响[J].中国农业科学,2019,52(1):86-97. JIANG J J, QU F, SU C J, et al. Effects of different water and fertilizer coupling on yield and quality of cucumber and partial factor productivity of fertilizer[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(1): 86-97.
- [16] 梁俊,郭燕,刘玉莲,等.不同品种苹果果实中糖酸组成与含量分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(10):163-170. LIANG J, GUO Y, LIU Y L, et al. Analysis of contents and constituents of sugar and organic acid in different apple cultivars[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2011, 39(10): 163-170.
- [17] 李洁,姚宝花,宋宇琴,等.枣不同品种和果实不同部位糖积累及相关酶活性[J].林业科学,2017,53(12):30-40. LI J, YAO B H, SONG Y Q, et al. Sugar accumulation and the relevant enzymes activities in different parts of fruit of three jujube cultivars[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2017, 53(12): 30-40.
- [18] 杨文渊,谢红江,陶炼,等.‘金冠’苹果及优系(SGP-1)果实糖积累与其代谢相关酶活性研究[J].西北农业学报,2022,31(9):1112-1120. YANG W Y, XIE H J, TAO L, et al. Study on sugar accumulation and metabolism related enzyme activities in fruit of ‘golden delicious’ apple and its excellent variation(SGP-1)[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2022, 31(9): 1112-1120.
- [19] 田晓成,祝令成,邹晖,等.果实可溶性糖的积累模式及其调控研究进展[J].园艺学报,2023,50(4):885-895. TIAN X C, ZHU L C, ZOU H, et al. Research progress on accumulation pattern and regulation of soluble sugar in fruit[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2023, 50(4): 885-895.
- [20] 韩佳欣,郑浩,张琼,等.果树中糖类代谢和调控研究[J].植物科学学报,2020,38(1):143-149. HAN J X, ZHENG H, ZHANG Q, et al. Research advances in the me-

- tabolism and regulation of carbohydrate in fruit trees[J]. *Plant Science Journal*, 2020, 38(1): 143-149.
- [21] 魏建梅, 齐秀东, 朱向秋, 等. 苹果果实糖积累特性与品质形成的关系[J]. *西北植物学报*, 2009, 29(6): 1193-1199.
WEI J M, QI X D, ZHU X Q, et al. Relationship between the characteristics of sugar accumulation and fruit quality in apple (*Malus domestica* Borkh.) fruit[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, 29(6): 1193-1199.
- [22] 温志静, 郭延平, 张雯, 等. 叶喷不同水平氮肥对苹果果实淀粉和糖及代谢相关酶活性的影响[J]. *西北农业学报*, 2018, 27(6): 846-853.
WEN Z J, GUO Y P, ZHANG W, et al. Effect of different levels of nitrogen spraying on dynamic changes of starch, sugar and activities of related enzymes in apple fruits[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2018, 27(6): 846-853.
- [23] 李凡, 魏桦, 戚建国, 等. 成熟期施氮对富士苹果糖含量及相关基因表达的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(8): 111-119.
LI F, WEI H, QI J G, et al. Effects of nitrogen application at mature stage on sugar contents and related gene expression of Fuji Apple[J]. *Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition)*, 2021, 49(8): 111-119.
- [24] 丛佩华, 张彩霞, 韩晓蕾, 等. 我国苹果育种研究现状及展望[J]. *中国果树*, 2018, (6): 1-5.
CONG P H, ZHANG C X, HAN X L, et al. Current research situation and prospect of apple breeding in China[J]. *Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition)*, 2018, (6): 1-5.
- [25] 杨亚州, 赵政阳, 高华, 等. 晚熟苹果新品种“瑞香红”[J]. *园艺学报*, 2021, 48(3): 609-610.
YANG Y Z, ZHAO Z Y, GAO H, et al. A new late ripening apple cultivar ‘Ruixianghong’ [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2021, 48(3): 609-610.
- [26] WANG Y J, LIU L, HU Y, et al. The spatio-temporal change in soil P and P-solubilizing bacteria under clover mulching in apple orchards of Loess Plateau[J]. *Chemosphere*, 2022, 304: 135334.
- [27] 王子盾, 王辉, 冯郁晨, 等. 不同颜色育果袋对“瑞雪”苹果果实品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(4): 729-740.
WANG ZI D, WANG H, FENG Y C, et al. Effects of different color fruit bags on quality of Ruixue apple fruits[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(4): 729-740.
- [28] 郭志刚, 李文芳, 毛娟, 等. 钾肥施用对元帅苹果果实内源激素含量及酸代谢的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(10): 281-290.
GUO Z G, LI W F, MAO J, et al. Effects of potassium fertilizer on endogenous hormone content and acid metabolism in fruit of apple cv. ‘Red Delicious’ [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(10): 281-290.
- [29] 孟智鹏, 陈荣鑫, 杨舜博, 等. 苹果新品种“瑞雪”、“瑞香红”及其亲本香气物质差异分析[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(21): 50-56.
MENG Z P, CHEN R X, YANG S B, et al. Analysis on the difference of aroma volatile compounds in new apple cultivars ‘Ruixue’, ‘Ruixianghong’ and their parents[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(21): 50-56.
- [30] 李娅楠, 闫雷玉, 张波, 等. 不同苹果品种果实糖酸组分特征研究[J]. *果树学报*, 2021, 38(11): 1877-1889.
LI Y N, YAN L Y, ZHANG B, et al. A study on sugar and organic acid components in different apple cultivars [J]. *Journal of Fruit Science*, 2021, 38(11): 1877-1889.
- [31] 姚改芳, 张绍铃, 曹玉芬, 等. 不同栽培种梨果实中可溶性糖组分及含量特征[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(20): 4229-4237.
YAO G F, ZHANG S L, CAO Y F, et al. Characteristics of components and contents of soluble sugars in pear fruits from different species[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(20): 4229-4237.
- [32] KELLER F, LUDLOW M M. Carbohydrate metabolism in drought-stressed leaves of pigeonpea (*Cajanus cajan*) [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1993, 44(8): 1351-1359.
- [33] WANG Y J, LIU L, WANG Y, et al. Effects of soil water stress on fruit yield, quality and their relationship with sugar metabolism in ‘Gala’ Apple[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 258: 108753.
- [34] 肖继兵, 刘志, 辛宗绪, 等. 基于主成分分析和隶属函数的谷子全生育期耐旱性鉴定[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(6): 34-44.
XIAO J B, LIU Z, XIN Z X, et al. Identification of drought tolerance in foxtail millet during its entire growth period based on principal component analysis and membership function[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(6): 34-44.
- [35] 郑丽静, 聂继云, 闫震, 等. 苹果可溶性糖组分及其含量特性的研究[J]. *园艺学报*, 2015, 42(5): 950-960.
ZHENG L J, NIE J Y, YAN Z, et al. Studies on the characteristics of the composition and content of soluble sugars in apple fruit [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2015, 42(5): 950-960.
- [36] KOBAYASHI Y, YAMAMOTO T, IKEDA H, et al. Effects of constantly high soil water content on vegetative growth and grape quality in Japan with high rainfall during grapevine growing season[J]. *Folia Horticulturae*, 2020, 32(2): 135-145.
- [37] 马宗恒, 陈佰鸿, 胡紫璟, 等. 施氮时期对干旱荒漠区“蛇龙珠”葡萄叶片糖代谢及果实品质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(6): 145-152, 167.
MA Z H, CHEN B H, HU Z J, et al. Effects of nitrogen application on leaf sugar metabolism and fruit quality of ‘Cabernet Gemischt’ grape in arid desert region [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(6): 145-152, 167.
- [38] 唐岩, 宋来庆, 孙燕霞, 等. 叶面喷施磷酸二氢钾对红将军苹果叶片性状、果实品质和香气成分的影响[J]. *山东农业科学*, 2017, 49(5): 82-85.
TANG Y, SONG L Q, SUN Y X, et al. Effects of foliage application of potassium dihydrogen phosphate on blade, fruit quality and aroma components of red general Fuji Apple [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2017, 49(5): 82-85.
- [39] CHENG L L, ZHOU R, REIDEL E J, et al. Antisense inhibition of sorbitol synthesis leads to up-regulation of starch synthesis without altering CO₂ assimilation in apple leaves[J]. *Planta*, 2005, 220(5): 767-776.
- [40] LI M J, FENG F J, CHENG L L. Expression patterns of genes involved in sugar metabolism and accumulation during apple fruit development [J]. *PLoS One*, 2012, 7(3): e33055.
- [41] WU J H, GAO H Y, ZHAO L, et al. Chemical compositional characterization of some apple cultivars [J]. *Food Chemistry*, 2007, 103(1): 88-93.
- [42] YANG J J, ZHANG J, LI C, et al. Response of sugar metabolism in apple leaves subjected to short-term drought stress [J]. *Plant Physiology and Biochemistry: PPP*, 2019, 141: 164-171.
- [43] RUAN Y L. Sucrose metabolism: gateway to diverse carbon use and sugar signaling[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2014, 65: 33-67.
- [44] TONG X L, WANG Z Y, MA B Q, et al. Structure and expression analysis of the sucrose synthase gene family in apple [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(4): 847-856.