

叶面喷施硒、锌、钙肥对林芝地区响富苹果 光合特性与果实品质的调控效应

周玉柳,荆澳航,韩艳英*,刘 爽,王 秀,仝令臣,黄文强,叶彦辉*

(西藏农牧学院资源与环境学院,西藏林芝 860000)

摘要:【目的】明确西藏林芝高海拔产区喷施不同叶面肥对响富苹果树光合特性与果实品质的影响。【方法】选取12年生响富苹果树,设置叶面喷施硒 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (A1)、 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (A2)、 $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (A3),叶面喷施锌 $0.17\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (B1)、 $0.34\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (B2)、 $0.51\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (B3),叶面喷施钙 $0.18\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (C1)、 $0.36\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (C2)、 $0.54\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (C3)共9个处理,以喷施清水作为对照(CK)。于幼果期、果实迅速膨大期和果实成熟期,分别对试验树进行叶面喷施处理,并测定不同处理下的叶片光合指标和果实品质指标。【结果】叶面肥喷施硒、锌、钙肥处理可以显著提高叶片的叶绿素相对含量(SPAD值)、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)。不同施肥处理下,光合参数的总得分排名为 $B3>A1>A3>C1>C2>A2>B2>B1>CK>C3$ 。因此,B3、A1、A3叶面肥喷施处理能有效促进响富苹果树生长。同时,叶面肥处理显著提高单果质量、固酸比、维生素C含量和可溶性糖含量,并降低果实硬度和果实可滴定酸含量。主成分分析结果显示,各处理按综合评分从高到低依次为 $A3>B1>C2>A2>A1>C1>C3>B3>B2>CK$ 。【结论】在高海拔贫瘠土壤条件下,中微量元素叶面肥可显著提升当地响富苹果叶片的光合作用效率,改善果实品质,且以 $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 硒肥处理效果最优,建议在生产中推广使用。

关键词:苹果;响富;林芝;叶面肥;光合特性;果实品质

中图分类号:S661.1

文献标志码:A

文章编号:1009-9980(2026)01-0026-13

Effects of foliar fertilizer on photosynthetic characteristics and fruit quality of Xiangfu in Linzhi, Xizang

ZHOU Yuliu, JING Aohang, HAN Yanying*, LIU Shuang, WANG Xiu, TONG Lingchen, HUANG Wenqiang, YE Yanhui*

(College of Resources and Environment, Xizang Agriculture and Animal Husbandry University, Linzhi 860000, Xizang, China)

Abstract: 【Objective】Apple production is very important economically in Linzhi region. This study aimed to elucidate the effects of different foliar fertilizers on photosynthetic characteristics and fruit quality of 12-year-old Xiangfu apple trees in Linzhi, Xizang, in order to increase productivity and improve fruit quality. 【Methods】To meet the study's objectives, a precise experimental design was adopted. Twelve-year-old Xiangfu apple (*Malus domestica*) trees with consistent growth and health were chosen as materials. Nine foliar fertilizer treatments were devised, each targeting a specific nutrient: selenium at $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (A1), $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (A2), and $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (A3); zinc at $0.17\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (B1), $0.34\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (B2), and $0.51\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (B3); and calcium at $0.18\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (C1), $0.36\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (C2), and $0.54\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (C3). Spray of water was used as control (CK). Fertilizers were applied during critical growth stages-young fruit stage, rapid fruit enlargement, and fruit maturity-using calibrated sprayers to ensure uniform application and mini-

收稿日期:2025-05-12

接受日期:2025-07-14

基金项目:林芝市科技计划项目(2023-XYQ-006);西藏农牧学院研究生教育创新计划项目(YJS2022-07,YJS2023-11);西藏巴宜区苹果科
技小院(YJSXY2025-05);西藏自治区科技计划重点研发计划(XZ202401ZY0032);西藏自治区科技计划重大专项(XZ202101ZD003N);2024、
2025年中央财政支持地方高校发展改革专项资金-高原特色农牧科技小院建设及综合服务能力提升(XK2024-04,XK2024-01,YJSXK2025-
22);西藏农牧学院林学博士点(一期)(533325001)

作者简介:周玉柳,女,在读硕士研究生,研究方向为经济林。E-mail:1767808497@qq.com

*通信作者 Author for correspondence. E-mail:1064336015@qq.com;E-mail:260383872@qq.com

mize variability. After treatment, photosynthetic indicators were measured, including relative chlorophyll content (SPAD value), indicating leaf greenness and photosynthetic potential, and net photosynthetic rate (P_n), quantifying light energy conversion. Stomatal conductance (G_s) and transpiration rate (T_r) were also assessed to understand water use efficiency and gas exchange. Fruit quality parameters were evaluated alongside photosynthetic assessments, including single fruit mass, solid-acid ratio, vitamin C content, soluble sugar content, fruit firmness, and titratable acid content. 【Results】 The application of foliar fertilizers yielded significant improvements in the photosynthetic characteristics of the apple leaves compared with the control. Specifically, the SPAD value, P_n , G_s , and T_r were all markedly increased. A ranking of the total scores of photosynthetic indicators for the different fertilization treatments revealed that B3 (zinc spraying at $0.51 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) was the most effective, followed by A1 (selenium spraying at $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) and A3 (selenium spraying at $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). This indicated that treatments B3, A1, and A3 were particularly adept at promoting the physiological growth and photosynthetic efficiency of Xiangfu apple. Furthermore, the foliar fertilizer treatments had a pronounced impact on fruit quality. The single fruit mass, solid-acid ratio, vitamin C content, and soluble sugar content were all significantly enhanced, while fruit firmness and titratable acid content were reduced. To comprehensively evaluate the fruit quality under different treatments, principal component analysis (PCA) was conducted. The results of the PCA indicated that the treatments could be ranked according to their comprehensive scores as follows: $A3 > B1 > C2 > A2 > A1 > C1 > C3 > B3 > B2 > CK$. This suggested that while B3 was superior in promoting photosynthetic characteristics, A3 (selenium spraying at $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) demonstrated the most optimal overall effects on fruit quality. 【Conclusion】 The findings would highlight the strategic use of foliar fertilizers to enhance photosynthetic efficiency and fruit quality in Xiangfu apple. Improvements in SPAD, P_n , G_s , and T_r underscored the potential of foliar fertilization to optimize light capture, carbon fixation, and water use efficiency. Enhanced fruit quality parameters underscored the nutritional and commercial benefits of these fertilizers. A3 (selenium at $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) emerged as the most effective treatment, suggesting that selenium would be pivotal at optimal concentrations. Future research could explore the physiological and molecular mechanisms underlying foliar fertilizer effects, including nutrient uptake, assimilation, and interactions with endogenous hormones. Research could also investigate synergistic effects of combining different foliar fertilizers or integrating them with other agricultural management practices. Economic feasibility and cost-effectiveness evaluations would provide farmers with practical information on investment returns and guide technology adoption in practice.

Key words: Apple; Xiangfu; Linzhi; Foliar fertilizer; Photosynthetic characteristics; Fruit quality

苹果(*Malus domestica*)作为蔷薇科(Rosaceae)苹果属(*Malus* Mill.)的落叶果树^[1],是中国第二大种植水果,其种植面积和产量均位居前列^[2]。西藏林芝地区果树资源丰富,生态环境优越,是生产优质苹果的理想之处^[3]。苹果在当地经济林中占据重要地位,已成为林芝地区农民的主要经济来源之一^[4]。该地区生产的苹果具有产量高、品质好、果香味浓郁、酸甜可口等优点,深受人们喜爱。其中,响富以着色艳丽、晚熟耐贮及强适应性等特性^[5],已成为该地区栽培面积较大的优质品种。然而,由于地域差异、社会经济、劳动力素质和农业生产力等因素的影

响,本地区的苹果产业与区外相比仍较为滞后,各地区发展也不平衡^[6]。因此,为进一步提升响富苹果的果实品质,急需研发针对性的施肥技术。

现代果园施肥技术正从传统土壤施肥向精准调控转型,尽管当前生产中仍以土壤施肥为主,但叶面肥凭借养分利用率高、用量少、肥效快、环境相容性强等优点,在高海拔土壤贫瘠区展现出独特价值,对提高果树产量与改善果实品质具有显著效果^[7],因此叶面肥已被广泛应用于现代农林业生产中。叶面肥直接喷施于果树叶片,能显著改善果实品质,如增加单果质量、可溶性固形物含量、可溶性糖含量以及

维生素C含量,显著降低可滴定酸含量^[8],同时促进苹果果实的生长发育,从而更好地保持苹果品质^[9]。在贮藏过程中,叶面肥能够有效抑制苹果腐烂,较好地维持果实口感和硬度,延长贮藏期^[10],并提高葡萄糖和山梨醇含量,降低可滴定酸和蔗糖含量^[11]。众多研究表明,不同叶面肥对苹果品质有积极影响。史光玲等^[12]的研究表明,喷施叶面肥能够增加苹果果实的单果质量、果实纵径和果形指数。汪亮^[13]研究发现,叶面喷施镁肥可提升果实的外观品质和内在品质,同时增强红富士果树的光合特性,提高当年苹果叶片的叶绿素含量^[14]。王乐幸^[15]的研究表明,钙肥处理可在不同程度上提高苹果单果质量、果实硬度、可溶性固形物含量和固酸比,降低可滴定酸含量,提升果皮红色度和果面光洁度,减少果锈发生。

长期以来,氮、磷、钾等大量元素肥的叶面喷施研究已较为系统,其技术在生产实践中也已形成较为成熟的应用模式^[16]。然而,随着对优质果品生产需求的提升及矿质营养研究的深入,单一大量元素的叶面补充已难以满足果实品质精细化调控的需求。硒元素可通过增强谷胱甘肽过氧化物酶活性,缓解紫外线胁迫,促进光合作用,并改善果实品质^[17-18];锌元素对果树的生理代谢、激素调节具有重要作用,可调节酶活性,参与生长素合成并调控果实发育,从而提高作物产量和品质^[19];钙元素作为植物生长发育必须的中量营养元素,可维持果皮细胞结构稳定性^[20]。硒、锌、钙等中微量元素虽在植株体内含量较低,却在生理代谢、抗逆性调控及果实品质形成中具有不可替代的作用,其在高海拔苹果产区的应用潜力尚未被充分探索。目前,林芝地区苹果园基本以土壤施肥为主^[21],关于叶面肥对林芝地区苹果品质影响的研究报道较少。因此,以响富红富士苹果为研究对象,聚焦于中微量元素的叶面调控效应,旨在探讨不同叶面肥对苹果果实品质以及光合特性的影响,筛选适宜林芝苹果生长的最佳叶面肥种类和浓度,从而为西藏苹果生产提质增效提供新的技术路径和科学依据,推动林芝苹果产业的可持续发展。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验地位于西藏自治区林芝市巴宜区布久乡杰麦村藏汉情园苹果基地(N 29°57', E 94°43'),海拔

3000 m。该地区属于高原温带湿润季风气候,气候温和;降水丰沛,年降雨量约为650 mm;年平均温度8.7 °C,夏季白天温度21 °C,夏季平均最低气温15.6 °C;年均日照时长超过2022 h,年太阳总辐射为5460~7530 MJ·m⁻²,紫外辐射剂量达344.2 mW·m⁻²,无霜期长达180 d,具有日照时间长、太阳辐射强、昼夜温差大以及夜雨较多的气候特征。试验地土壤类型为黄棕壤土^[22],0~40 cm土层基础理化性质为pH=5.57、有机碳含量(w,后同)0.72 g·100 g⁻¹、全氮含量0.09 g·100 g⁻¹、全磷含量0.09 g·100 g⁻¹、全钾含量0.27 g·100 g⁻¹、碱解氮含量84.07 mg·kg⁻¹、有效磷含量66.97 mg·kg⁻¹、速效钾含量130.00 mg·kg⁻¹。

1.2 试验材料

供试果树:选取藏汉情园苹果园中长势一致的12年生响富(富士系列)苹果树为试材,基砧为山荆子[*Malus baccata*(L.)Borkh.],中间砧为GM256。定植株行距为3 m×4 m,南北行向,树形为疏散分层形。每年在采收后果农统一进行秋季基肥施用,每666.7 m²混合施入完全腐熟的生物有机肥[有机质含量≥45%,(N+P₂O₅+K₂O)含量≥5%]4 t与45%硫酸钾型复合肥(N-P₂O₅-K₂O=10-20-15)50 kg。开沟施肥(沟深30~40 cm,树冠滴水线外沿),施肥后覆土并灌水,其余时间段内无其他施肥措施。

供试叶面肥:硒肥(Se含量≥1000 mg·L⁻¹)、锌肥(Zn含量≥170 g·L⁻¹)、钙肥(Ca含量≥170 g·L⁻¹)均由南京恒宝田功能农业产业研究院研发。其中,液态硒肥呈深褐色状,流动性良好;液态锌肥为澄清透明状均匀液体,流动性良好,无沉淀分层现象;液态钙肥为深绿色透明状。

1.3 试验设计

试验共设置9个处理组,每个处理组选取3株长势一致且无病虫害的响富苹果树作为试验对象,以喷施清水作为对照(CK),各处理组的管理水平一致。分别在幼果期(6月25日)、果实迅速膨大期(8月15日)和果实成熟期(9月10日)对苹果树开展叶面喷施肥料试验。具体的喷施量详见表1。喷施时间均选择晴朗无风的下午,对叶片的正反两面均匀喷施,以叶面完全覆盖水滴但无滴水现象为宜。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 叶绿素含量测定 为探究不同叶面肥处理对苹果叶片叶绿素含量的影响,在田间从各处理中选

表 1 叶面肥喷施详细用量
Table 1 Detailed dosage of foliar fertilizer spraying

标记 Markings	处理 Treatment	喷施质量浓度 Spray concentration
CK	清水 Water	—
A1	叶面喷硒 Foliar selenium spray	1 mg·L ⁻¹
A2	叶面喷硒 Foliar selenium spray	2 mg·L ⁻¹
A3	叶面喷硒 Foliar selenium spray	3 mg·L ⁻¹
B1	叶面喷锌 Foliar zinc spray	0.17 g·L ⁻¹
B2	叶面喷锌 Foliar zinc spray	0.34 g·L ⁻¹
B3	叶面喷锌 Foliar zinc spray	0.51 g·L ⁻¹
C1	叶面喷钙 Foliar calcium spray	0.18 g·L ⁻¹
C2	叶面喷钙 Foliar calcium spray	0.36 g·L ⁻¹
C3	叶面喷钙 Foliar calcium spray	0.54 g·L ⁻¹

取距地面 1.5 m 处的东南西北各方向无果短枝或中枝上的 10 枚成熟叶片,使用手持式叶绿素仪测定叶片叶绿素含量(SPAD 值)。每枚叶片重复测定 3 次,取其平均值作为单株的测定结果。

1.4.2 光合参数测定 在明确叶片叶绿素含量后,进一步测定叶片光合参数。于 2024 年 9 月上旬选择晴朗天气,使用 Li-6800 光合仪测定叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)。在每个处理中,选取当年生新枝中部成熟、长势一致、完整、无病害的 5 枚功能叶片,每枚叶片重复测定 3 次,取其平均值作为该处理的测定结果。

1.4.3 果实品质测定 果实成熟后,在每株苹果树的上、中、下三个高度的内膛和外围选取 6 个果实测定果实品质。测定指标包括单果质量、果实横纵径、果实硬度、可溶性固形物含量、可滴定酸含量、固酸

比、维生素 C 含量、可溶性糖含量等共计 13 项果实品质指标。

具体测定方法如下:通过数数法,确定结果个数,并通过结果个数×单果质量,计算产量;使用电子天平称量单果质量;使用游标卡尺测量果实横径、纵径以及果心横径,并计算果形指数(果实纵径/果实横径)和果心比(果心横径/果实横径);使用 GY-4 型硬度计测定果实硬度,每个果实测 3 面;使用手持高精度数显糖度计测定果实可溶性固形物含量;采用 NaOH 滴定法测定果实可滴定酸含量,并计算固酸比(可溶性固形物含量/可滴定酸含量);采用 2,6-二氯靛酚滴定法测定维生素 C 含量^[23];采用蒽酮硫酸法测定可溶性糖含量^[24]。每个指标重复测定 3 次,以确保测定结果的准确性。

1.5 数据分析

利用 SPSS 27 软件进行数据处理与分析,利用 Excel 2021 和 Origin 21 软件作图。文中不同小写字母表示样品间差异显著($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 叶面肥对响富叶片光合特性的影响

2.1.1 叶面肥对叶绿素含量和光合特性的影响 由表 2 可知,叶面肥可以提高叶片的叶绿素相对含量(SPAD 值)、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)。与喷施清水相比,喷施叶面肥提高了叶片 SPAD 值,最高可达到 40.61(A2 处理),较 CK 提高了 20.15%,且 SPAD 值随着各叶面肥浓度的升高呈现先

表 2 叶面施肥对响富叶片光合特性的影响
Table 2 Effect of spraying foliar fertilizer on photosynthetic characteristics of Xiangfu apple leaves

处理 Treatment	SPAD	净光合速率 Net photosynthetic rate/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度 Stomatal conductance/($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间 CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration/($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	蒸腾速率 Rate of transpiration/($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
CK	33.80±0.36 c	10.25±0.92 c	181.07±16.44 d	313.20±2.7 ab	3.25±0.30 e
A1	37.74±1.22 bc	11.68±0.51 abc	206.93±15.89 cd	277.42±7.93 d	4.87±0.42 cd
A2	40.61±0.77 a	13.20±0.26 ab	251.21±6.97 bc	303.17±2.32 abc	4.89±0.19 cd
A3	38.74±1.09 ab	13.82±1.11 ab	259.70±27.47 bc	276.64±9.28 d	4.28±0.26 de
B1	35.70±1.56 bc	13.45±0.71 ab	263.20±12.26 bc	302.16±6.33 abc	5.07±0.09 cd
B2	37.90±0.97 b	14.31±0.92 a	237.10±22.85 bcd	281.28±3.56 cd	5.20±0.41 cd
B3	38.62±0.97 ab	11.23±1.27 bc	229.20±21.66 bcd	307.00±12.22 ab	4.90±0.43 cd
C1	35.11±0.84 c	13.33±1.23 ab	361.11±29.12 a	322.16±6.08 a	7.93±0.66 a
C2	39.79±0.81 ab	12.68±0.86 abc	279.77±13.57 b	294.12±3.59 bcd	6.62±0.28 b
C3	37.70±0.79 bc	12.31±0.98 abc	242.10±11.39 bcd	310.29±7.36 ab	5.78±0.29 bc

注:同列数据不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level. The same below.

升高后降低的趋势。叶面肥的施用提升了叶片的净光合速率,B2处理显著提升 P_n 至 $14.31 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,较CK提高39.6%。硒肥(A处理)的 P_n 随着叶面肥浓度的升高逐渐升高、锌肥(B处理)的 P_n 随着浓度的升高呈现先升高后降低的趋势,钙肥(C处理)的 P_n 随着浓度的升高逐渐降低。叶面肥可以提升叶片的气孔导度,C1处理下 G_s 虽最高($361.11 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),但因蒸腾过强,蒸腾速率达到了 $7.93 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,导致水分利用效率下降。硒肥(A处理)的 G_s 随着叶面肥浓度的升高逐渐升高,锌肥(B处理)和钙肥(C处理)的 G_s 均随着浓度的升高逐渐降低。胞间 CO_2 浓度最低为A1处理($277.42 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)和A3处理($276.64 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$),均显著低于CK($313.2 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$),表明中浓度硒肥处理可能提高 CO_2 同化效率。叶面肥显著提升了 T_r ,以C1处理效果最佳,达到了 $7.93 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,较CK提高了59.02%,与其他处理存在显著差异;CK处理效果最差,仅为 $3.25 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。中浓度产生的抑制效应主要归因于气孔限制,而在高浓度下,水分利用效率的下降则成为主要的限制因素。合理喷施叶面肥可通过增加叶绿素含量、提高气孔导度等途径,提高净光合速率,优化光合性能,为苹果增产提质及科学施肥提供理论依据和实践指导。

2.1.2 响富光合指标的相关性分析 相关性分析可用于衡量两个变量间线性关系的强度和方向,有助

于揭示两个变量间的线性关系程度^[25]。由不同叶面肥处理下响富光合指标的相关性分析矩阵图可知,响富光合指标间存在复杂的相关性(图1)。

SPAD与 P_n 呈显著正相关,即叶绿素含量越高,光合速率越高。叶绿素作为光合作用的关键色素,其含量提升可增强光能捕获和转化能力。 P_n 与 G_s 、SPAD、 T_r 分别呈显著或极显著正相关,即增大气孔导度、提高叶绿素含量、适当提高蒸腾速率均能促进净光合速率的提升。气孔导度影响 CO_2 供应,充足的 CO_2 可促进光合作用的暗反应;叶绿素含量高则光反应能力强;适当的蒸腾速率利于叶片散热和气体交换,均能促进净光合速率的提升。 G_s 与 T_r 呈极显著正相关,即气孔导度越大,水分扩散通道越通畅,蒸腾作用越强,同时利于 CO_2 进入叶片,为光合作用提供原料,进而提高净光合速率。 T_r 与 G_s 、 P_n 分别呈极显著或显著正相关,表明气孔导度是影响蒸腾速率的关键因素,其与气体交换、光合作用密切相关。适当的蒸腾速率可维持叶片适宜温度和气体交换平衡,利于进行光合作用; T_r 与 P_n 的显著正相关反映了植物水分利用与碳同化之间的协同关系。然而,当 G_s 超过 $300 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (C1处理)时, T_r 急剧升高($7.93 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)会导致水分利用效率(WUE)下降34.2%,这表明存在1个最优的气孔开闭调节阈值。

2.1.3 响富光合指标主成分分析 对不同施肥处理下响富光合指标进行主成分分析,根据累计贡献率>

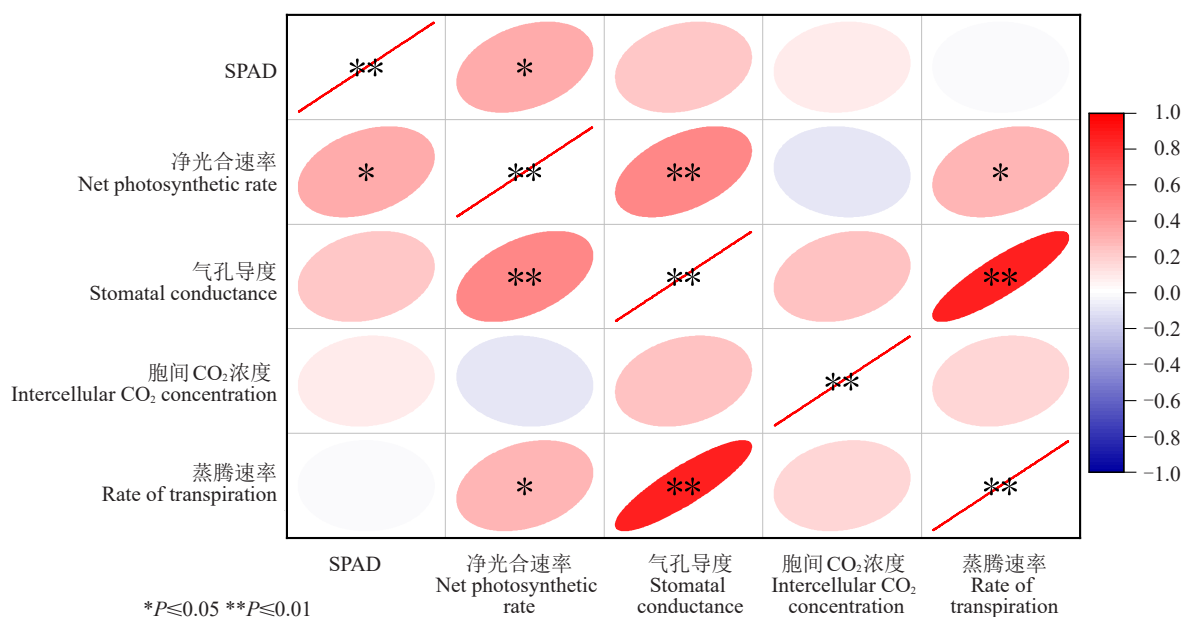


图1 不同叶面肥处理下苹果树光合指标相关性热图

Fig. 1 Heat map of correlation of photosynthetic indexes of apple trees under different foliar fertilizers treatments

85%共提取了3个主成分。3个主成分的方差贡献率分别为45.114%、23.399%、20.038%,累计贡献率为88.551%。由表3可知,主成分1主要由 G_s 、 T_r 共2个因子组成;主成分2主要由叶绿素相对含量(SPAD值)、 P_n 共2个因子组成;主成分3主要由 C_i 组成。

表3 不同叶面肥处理下响富光合指标的规格化特征向量
Table 3 Characteristic vectors of the speciation of photosynthetic indexes of Xiangfu apple under different foliar fertilizers treatments

光合指标 Photosynthetic indicators	成分 Constituents		
	1	2	3
SPAD	-0.032	0.927	0.155
净光合速率 Net photosynthetic rate	0.479	0.623	-0.369
气孔导度 Stomatal conductance	0.937	0.215	0.133
胞间CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration	0.155	0.057	0.945
蒸腾速率 Rate of transpiration	0.957	-0.064	0.087

利用SPSS主成分分析,计算不同因子的权重,即计算前3个主成分的得分,以各主成分贡献率为权重,计算综合得分并进行排序。由表4可知,不同施肥处理下响富苹果树光合指标的总得分排名为B3>A1>A3>C1>C2>A2>B2>B1>CK>C3,B3、A1、A3叶面肥处理均能促进响富生理生长。

2.2 叶面肥对响富果实品质的影响

2.2.1 叶面肥对果实外在品质的影响 不同叶面肥处理对果实外在品质的影响不同。由表5可知,除A1、C2处理外,其余处理均提高了果实产量,且以B1处理(30.11 kg·株⁻¹)最高,较CK提高了63.37%。

表4 不同叶面肥处理下响富苹果光合指标综合得分及排序结果

Table 4 Comprehensive scores and ranking results of photosynthesis indexes of Xiangfu apple in different foliar fertilizer treatments

处理 Treatment	F1	F2	F3	综合得分 Comprehensive score	排序 Rank
CK	-0.384	-0.959	-1.064	-0.718	9
A1	-0.288	1.205	0.346	0.306	2
A2	-0.342	1.208	-0.798	0.003	6
A3	-0.024	0.824	0.182	0.275	3
B1	0.227	-0.395	-1.083	-0.275	8
B2	-0.301	-0.348	0.510	-0.117	7
B3	1.753	-0.168	0.893	0.979	1
C1	0.755	-0.386	-0.190	0.189	4
C2	0.146	-0.186	0.491	0.133	5
C3	-1.543	-0.795	0.712	-0.774	10

A3处理在增加单果质量、果实横纵径方面效果突出,单果质量达到196.78 g,较CK提高了32.43%;果实横径达到74.58 mm、纵径达到69.59 mm,表现较优。硒肥(A处理)和钙肥(C处理)处理下,随着浓度的升高单果质量也逐渐升高,而锌肥(B)处理下单果质量呈现先上升后下降的趋势。多数施肥处理组的横纵径大于CK,表明喷施叶面肥利于果实膨大。果形指数为0.8~0.9的果实端正,更容易赢得人们青睐^[26]。由试验结果可知,响富的果形指数均良好,且以A3处理果形指数(0.93)最优,与其他处理组存在显著差异。果心横径在不同叶面肥处理下存在显著差异,除B1和C2处理外,其他叶面肥处理均降低了果心横径,C1处理的果心横径(29.36 mm)最

表5 叶面施肥对果实外在品质的影响

Table 5 Effect of foliar fertilizer spraying on the external quality of fruits

处理 Treatment	产量 Yield/ (kg·plant ⁻¹)	单果质量 Single fruit mass/g	果实横径 Fruit transverse diameter/mm	果实纵径 Fruit longitudinal diameter/mm	果形指数 Fruit shape index	果心横径 Core transverse diameter/mm	果心比率 Core ratio	果实硬度 Hardness/ (kg·cm ⁻²)
CK	18.43±0.57 b	148.14±4.30 cd	68.16±0.53 bc	61.53±0.61 c	0.90±0.01 b	34.45±0.74 b	0.51±0.01 b	11.50±0.48 a
A1	18.18±0.91 b	157.48±5.05 c	70.00±0.70 b	61.03±0.62 c	0.87±0.01 c	32.42±0.86 bc	0.46±0.01 c	10.68±0.24 a
A2	19.08±1.85 b	171.41±3.63 bc	72.02±0.53 ab	64.20±0.89 bc	0.89±0.01 bc	32.69±0.69 bc	0.45±0.01 c	9.58±0.25 b
A3	19.57±2.82 b	196.78±9.01 a	74.58±0.59 a	69.59±0.91 a	0.93±0.01 a	32.13±0.56 c	0.43±0.01 cd	8.41±0.13 c
B1	30.11±4.19 a	178.75±4.24 b	73.51±0.32 ab	63.53±0.57 bc	0.86±0.01 c	40.95±0.84 a	0.56±0.01 a	9.06±0.38 bc
B2	23.86±2.00 ab	186.36±4.50 ab	74.32±0.50 a	65.53±0.59 b	0.88±0.01 bc	31.45±1.07 c	0.42±0.01 cd	9.04±0.21 bc
B3	26.25±0.78 ab	183.00±10.94 ab	73.66±0.96 ab	62.98±0.93 bc	0.86±0.01 c	30.27±1.23 c	0.41±0.02 d	8.68±0.17 c
C1	27.07±1.26 a	167.09±4.45 bc	71.56±1.10 ab	63.46±1.25 bc	0.80±0.01 d	29.36±0.55 c	0.41±0.01 d	8.75±0.21 c
C2	18.05±0.10 b	171.99±6.21 bc	70.42±0.66 b	64.24±0.60 bc	0.91±0.01 ab	34.50±0.32 b	0.49±0.01 bc	10.58±0.33 a
C3	29.43±2.13 a	177.51±6.38 b	66.44±3.16 c	59.23±2.73 c	0.89±0.01 bc	31.70±0.79 c	0.50±0.03 bc	9.53±0.14 b

小。降低果心比率,可提高食用部分相对占比,提升消费者的食用体验和经济价值,除B1处理外,其他叶面肥处理均降低了果心比率,A3、B2、B3和C1处理的果心比率较小,且无显著差异。叶面肥处理可降低果实硬度,CK与A1、C2处理之间无显著差异。

2.2.2 叶面肥对果实内在品质的影响 可溶性固形物含量是果实内部品质的重要指标之一,包括可溶性糖、可滴定酸、维生素C含量等^[27]。由表6可知,叶面肥可以显著降低果实可滴定酸含量,提高固酸比、维生素C含量和可溶性糖含量。参照国家关于优等鲜苹果的规定,由试验结果可知,除C3处理外,其余处理果实的内在品质均符合优质果的标准。硒肥可以提高响富果实可溶性固形物含量,而钙肥处理下可溶性固形物含量均低于CK。A3处理下可溶性固形物含量(15.46%)最高,除A1、B1处理外,与其他处

理均存在显著差异;C3处理下可溶性固形物含量显著减少,仅为12.96%。可滴定酸含量以CK(0.79%)最高,A3、C3处理下可滴定酸含量(0.22%)最低,喷施叶面肥能有效降低果实酸度。固酸比作为衡量水果成熟程度的生理指标,多数叶面肥处理可改善果实风味,提高固酸比。A3处理下固酸比(70.81)最大,较CK(18.80)提高了73.45%。叶面肥处理下维生素C含量差异显著($P<0.05$),C1处理下维生素C含量($4.12\text{ mg}\cdot 100\text{ g}^{-1}$)最高,A3处理($4.03\text{ mg}\cdot 100\text{ g}^{-1}$)次之。可溶性糖含量是评价果实风味品质的重要指标。硒肥处理(A处理)下可溶性糖含量均处于较优水平;锌肥处理(B处理)下随着浓度的升高,可溶性糖含量逐渐下降;钙肥处理(C处理)下随着浓度的升高,可溶性糖含量呈现先升高后下降的趋势。叶面肥处理有助于提高果实含糖量,改善果实品质。

表 6 喷施叶面肥对果实内在品质的影响
Table 6 Effect of foliar fertilizer application on fruit internal quality

处理 Treatment	w(可溶性固形物) Soluble solids content/%	w(可滴定酸) Titratable acid content/%	固酸比 Solid acid ratio	w(维生素C) Vitamin C content/(mg·100 g ⁻¹)	w(可溶性糖) Soluble sugar content/%
CK	14.70±0.11 bc	0.79±0.03 a	18.80±0.74 d	2.26±0.03 b	2.77±0.25 c
A1	14.94±0.09 ab	0.38±0.01 b	39.25±0.69 c	2.40±0.05 b	10.26±0.10 ab
A2	14.84±0.39 b	0.28±0.01 d	53.79±2.56 bc	3.09±0.19 ab	10.42±0.15 a
A3	15.46±0.16 a	0.22±0.01 e	70.81±2.61 a	4.03±1.07 a	10.36±0.20 a
B1	14.87±0.13 ab	0.24±0.01 de	69.28±3.62 ab	3.27±0.20 ab	10.10±0.21 ab
B2	14.78±0.17 b	0.33±0.02 c	47.66±2.84 c	3.88±0.11 a	9.67±0.45 b
B3	13.34±0.34 cd	0.25±0.01 de	56.93±3.50 b	3.86±0.09 a	9.64±0.05 b
C1	13.91±0.13 c	0.26±0.01 d	54.31±3.97 bc	4.12±0.11 a	9.68±0.14 b
C2	14.43±0.19 bc	0.25±0.01 de	59.08±3.96 b	3.68±0.06 a	10.40±0.24 a
C3	12.96±0.14 d	0.22±0.01 e	60.71±2.94 b	3.49±0.17 a	9.47±0.24 b

2.2.3 响富果实品质指标相关性分析 果实品质是果树栽培关注的重要方面,受多种因素影响,其中叶面肥喷施可改善果实外在和内在品质。了解果实品质指标间相关性,对调控果实品质意义重大。由图2可知,响富果实各品质指标间存在复杂的相关性。

单果质量与果实横径、纵径呈显著正相关,与固酸比呈极显著正相关,与可滴定酸含量呈显著负相关,与果实硬度呈极显著负相关,即单果质量越大,果实横径、果实纵径和固酸比越高,且可滴定酸含量与果实硬度越小;果实横径与果实纵径呈极显著正相关,与果实硬度呈显著负相关,即果实横径越大,果实纵径越大,果实硬度越小;果心横径与果心比率呈极显著正相关,即果心横径越大,果实比率越大;

果实硬度与可滴定酸含量呈显著正相关,与固酸比呈显著负相关,即果实硬度越大,可滴定酸含量越高,固酸比越小;可滴定酸含量与固酸比、可溶性糖含量呈极显著负相关,即可滴定酸含量越高,固酸比和可溶性糖含量越低;固酸比与可溶性糖含量呈极显著正相关,即固酸比越大,可溶性糖含量越高。

2.2.4 响富果实品质指标主成分分析 对不同施肥处理下苹果果实品质指标进行主成分分析,根据累计贡献率>85%共提取出6个主成分。6个主成分的方差贡献率分别为35.05%、18.04%、12.24%、10.91%、7.75%、5.38%,累计贡献率为89.37%,可代表原始数据的大部分信息,从而对不同叶面肥喷施处理下苹果果实品质指标进行评价。

如表7所示,主成分1主要由单果质量、可滴定

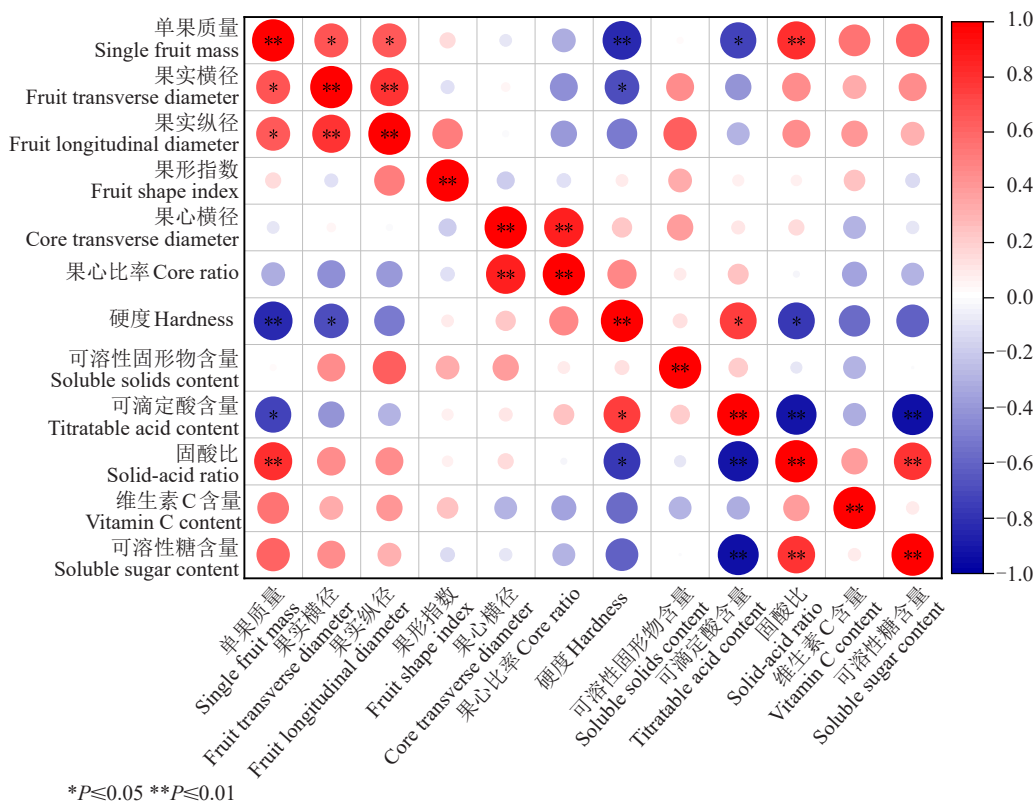


图 2 不同叶面肥处理下响富苹果果实品质相关性热图

Fig. 2 Heat map of the correlation of Xiangfu apple fruits quality under different foliar fertilizers treatments

表 7 不同叶面肥处理下苹果果实品质指标规格化特征向量

Table 7 Characteristic vectors of the specification of quality indicators of apple fruits under different foliar fertilizers treatments

果实品质指标 Fruit quality indicators	公因子 Common divisor					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
产量 Yield	0.328	0.044	-0.087	-0.793	0.083	-0.151
单果质量 Single fruit mass	0.565	-0.148	0.536	-0.158	-0.018	-0.284
果实横径 Fruit transverse diameter	0.471	-0.322	0.280	-0.204	0.663	-0.191
果实纵径 Fruit longitudinal diameter	0.235	-0.178	0.849	0.128	0.358	-0.097
果形指数 Fruit shape index	0.214	0.112	0.815	0.391	-0.238	0.079
果心横径 Core transverse diameter	0.077	0.976	-0.006	-0.002	0.119	0.032
果心比率 Core ratio	0.238	0.946	-0.093	0.073	-0.130	0.117
硬度 Hardness	0.071	0.107	-0.058	0.044	-0.133	0.969
可溶性固形物含量 Soluble solids content	0.111	0.097	0.179	0.864	0.162	-0.064
可滴定酸含量 Titratable acid content	0.949	0.155	-0.015	0.177	0.071	0.044
固酸比 Solid-acid ratio	0.840	-0.145	0.200	-0.196	0.087	-0.013
维生素C含量 Vitamin C content	0.427	-0.248	0.080	-0.298	-0.715	0.137
可溶性糖含量 Soluble sugar content	0.905	-0.069	-0.099	0.158	-0.016	-0.048

酸含量、固酸比和可溶性糖含量组成;主成分2主要由果心横径、果心比率组成;主成分3主要由果实纵径、果形指数组成;主成分4主要由产量、可溶性固形物含量组成;主成分5主要由果实横径、维生素C含量组成;主成分6主要由果实硬度组成。

利用 SPSS 主成分分析,计算各叶面肥综合得分并进行排序。由表 8 可知,不同施肥处理下响富果实品质指标的排序为 A3>B1>C2>A2>A1>C1>C3>B3>B2>CK, A3、B1 叶面肥喷施处理能显著改善响富果实品质。

表8 不同叶面肥处理下苹果果实品质指标综合得分及排序结果

Table 8 Comprehensive scores and ranking results of quality indexes of apple fruits in different foliar fertilizer treatments

处理 Treatment	F1	F2	F3	F4	F5	F6	综合得分 Comprehensive score	排名 Rank
CK	-2.716	0.334	0.297	-0.029	0.364	0.274	-0.557	10
A1	-0.121	0.257	-1.007	1.049	0.403	0.303	0.086	5
A2	0.211	-0.055	-0.412	1.504	-0.112	-0.967	0.113	4
A3	0.699	-0.328	1.666	0.643	1.059	0.035	0.628	1
B1	0.803	1.569	-0.259	-0.600	1.228	-0.245	0.500	2
B2	-0.145	-1.459	0.301	-0.054	-0.240	-0.801	-0.377	9
B3	0.446	-0.517	-0.408	-1.031	-0.408	-0.238	-0.256	8
C1	0.096	-0.637	-0.145	-0.533	-0.391	0.782	-0.161	6
C2	0.475	0.653	-0.045	0.526	-1.451	1.028	0.282	3
C3	0.253	0.182	0.012	-1.476	-0.454	-0.171	-0.183	7

3 讨 论

叶面肥施用作作为一种快速且高效的植物营养补充方式,已广泛运用于果树生产^[28]。不同种类、浓度的叶面肥对果树的生长发育和果实品质有着不同的影响。笔者研究了叶面喷施不同浓度的硒、锌、钙肥对林芝响富光合特性和果实品质的影响,研究结果表明,不同处理均可有效改善其光合特性和果实品质。

3.1 叶绿素含量与光合特性

光合作用是果树生长发育的基础,提高其光合能力有利于促进果实品质的形成^[29]。光合作用的强弱可用于判断果树对生长环境的适应能力^[30],通过探究不同叶面肥种类、喷施浓度对西藏响富苹果光合特性的影响,可为当地苹果栽培提供科学依据。前人研究表明,喷施氨基酸叶面肥能够显著提高苹果叶片的叶绿素含量^[31-32]。本研究结果表明,喷施叶面肥可提高响富叶片的叶绿素相对含量(SPAD),A2处理(40.61)较CK提高了20.15%,且SPAD值随着各浓度的升高均呈现先升高后降低的趋势。同时提升了净光合速率、气孔导度和蒸腾速率,该结果与汪亮^[13]关于喷施叶面肥可提升红富士果树光合效率的研究、慈琰雨^[33]在红将军苹果上的研究结果一致,表明喷施适宜叶面肥可促进苹果的光合作用。在高原低氧环境下,叶面肥可能通过上调叶绿素合成关键基因*HEMA1*的表达,促进*ALA*的合成,提升植物光合能力,从而增强植物对低氧环境的适应能力^[34]。

在本研究中,叶绿素相对含量(SPAD)与 P_n 呈显著正相关,这与稀土复合叶面肥在富士苹果上的研

究结果相符,即叶面肥能提高PS II光化学效率,缓解光合午休现象^[35],该发现补充了叶绿素含量与净光合速率呈正相关的传统解释,揭示了叶面肥在酶活性层面的调控作用。然而,高浓度叶面肥(如C1处理)导致 G_s 过高,引发过度蒸腾反而降低了水分利用率。这是由于在高原低湿度环境下,过度蒸腾引发了叶片水势的快速下降,进而激活了ABA信号介导的气孔关闭机制^[36]。因此,在西藏林芝的高原强光照环境下,需谨慎控制喷施浓度,避免引发水分胁迫^[37]。通过对不同叶面肥处理下响富的光合指标进行主成分分析并计算综合得分,推荐在今后的果树管理中优先选择B3、A1、A3叶面肥喷施处理。锌作为碳酸酐酶的辅因子,能够增强Rubisco酶活性,间接促进叶绿素结合蛋白的合成,使 CO_2 固定速率提升,以促进响富的生理生长,提高其光合性能。

3.2 果实品质

除了对光合特性的影响外,叶面肥处理对果实品质也产生了显著影响。叶面肥处理可显著提高单果质量、固酸比、维生素C和可溶性糖含量,并降低果实可滴定酸含量,与杨喜盟等^[38]、张媛等^[39]的研究结果一致。施用叶面肥能提高苹果果实品质,这与王乐幸^[15]关于不同种类钙、硅肥处理可不同程度提高单果质量、固酸比,降低可滴定酸含量的结果一致,但与其能提高果实硬度的结果不相同,原因可能在于钙元素能够与果胶分子中的羧基结合,形成交联结构,从而稳定果胶网络,增强细胞壁的稳定性,进而提高果实硬度^[40]。而在本研究中,叶面肥处理大幅度提高了可溶性糖含量,影响了果实内的糖代

谢过程,对果实硬度产生了相反的作用。这可能与糖代谢和细胞壁代谢竞争碳源有关。可溶性糖的积累激活了己糖激酶(HXK)的反馈抑制机制,使流向苯丙氨酸解氨酶(PAL)的碳通量减少,导致木质素合成前体供应不足,进而降低果实硬度。固酸比在叶面肥处理后得到进一步提高。硒肥通过激活柠檬酸裂解酶(CL)基因的表达,降低了柠檬酸含量^[41];锌肥则通过增强山梨醇脱氢酶(SDH)活性,促进山梨醇向果糖转化^[42];钙肥可以促进果实中有机酸代谢,钙离子能够与有机酸结合形成不溶性钙盐,从而降低果实中可滴定酸含量,提高固酸比^[43],这种降酸升糖的协同效应,在高原昼夜温差的驱动下,形成了独特的风味品质。

通过相关性分析,探讨了果实品质之间的相关性。结果表明,部分性状间存在显著相关性,为果实品质改良提供了理论依据。在果实品质指标中,单果质量与果实横径、纵径呈显著正相关,与固酸比呈极显著正相关,与可滴定酸含量呈显著负相关,与果实硬度呈极显著负相关;果实硬度与可滴定酸含量呈显著正相关,与固酸比呈显著负相关等,但产量与其他影响因子之间不存在明显关系。未来的研究可以进一步探讨这些性状之间的因果关系,以指导果树的育种和栽培。对不同叶面肥处理下的13项果实品质指标进行主成分分析,其综合得分从大到小的排序依次为A3、B1、C2、A2、A1、C1、C3、B3、B2、CK。适度喷施硒肥能够提高果实品质,其原因在于硒是谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性中心的重要成分。而GSH-Px作为抗氧化剂可以有效清除自由基,保护细胞膜结构及功能免受过氧化物的损害,从而改善果实品质^[44]。

本研究结果表明,叶面肥喷施对西藏林芝响富的光合特性及果实品质具有显著影响。在林芝响富生产技术中,采用叶面喷施 $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 硒肥处理,能够显著提升果树的光合作用效率,促进果实膨大,降低果心比率和果实硬度,提高果实可溶性固形物含量、固酸比、维生素C含量和可溶性糖含量,同时降低可滴定酸含量,改善果实风味。这为林芝地区响富苹果的优质栽培提供了具体的技术参考,在今后的果树生产中可优先考虑。未来研究可进一步深入探究在高原环境下叶面肥调控响富苹果果实品质的分子机制,以及与其他栽培管理措施的协同效应,以实现响富苹果产量和品质的进一步提升。

4 结 论

通过多浓度的梯度田间试验,系统评估了叶面硒、锌、钙肥对林芝响富苹果光合特性与果实品质的调控效应。结果表明,合理喷施叶面硒、锌、钙肥能够有效增强叶片光合能力,促进光合产物的积累,并改善果实的外在和内在品质。其中,硒肥在促进光合作用与改善果实品质方面表现尤为突出。基于光合参数及果实品质指标的主成分分析综合评价结果,确定 $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 硒肥为最优施用浓度,在林芝响富栽培生产中具有应用潜力。

参考文献 References:

- [1] 黄松,李明,焦健,宋春晖,王苗苗,白团辉,王昊,冯建灿,郑先波. 埋干幼化结合 IBA 处理对苹果扦插生根的影响[J]. 河南农业科学, 2020, 49(6): 132-136.
HUANG Song, LI Ming, JIAO Jian, SONG Chunhui, WANG Miaomiao, BAI Tuanhui, WANG Hao, FENG Jiancan, ZHENG Xianbo. Effect of rejuvenating trunk buried combined with IBA treatment on apple cuttings rooting[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2020, 49(6): 132-136.
- [2] 陈学森,韩明玉,苏桂林,刘凤之,过国南,姜远茂,毛志泉,彭福田,束怀瑞. 当今世界苹果产业发展趋势及我国苹果产业优质高效发展意见[J]. 果树学报, 2010, 27(4): 598-604.
CHEN Xuesen, HAN Mingyu, SU Guilin, LIU Fengzhi, GUO Guonan, JIANG Yuanmao, MAO Zhiquan, PENG Futian, SHU Huairui. Discussion on today's world apple industry trends and the suggestions on sustainable and efficient development of apple industry in China[J]. Journal of Fruit Science, 2010, 27(4): 598-604.
- [3] 邹雨婷,索朗曲珍,黄鹏程,刘海金,谢红江,席永士,苟玉枚,李通,夏小龙,白玛普加,桑琼拉姆,吴昊,陶炼,杨文渊,徐平. 西藏地区苹果产业发展的SWOT分析[J]. 西藏农业科技, 2020, 42(2): 69-72.
ZOU Yuting, Suolangquzhen, HUANG Pengcheng, LIU Haijin, XIE Hongjiang, XI Yongshi, GOU Yumei, LI Tong, XIA Xiaolong, BAI Mapujia, SANG Qionglamu, WU Hao, TAO Lian, YANG Wenyuan, XU Ping. SWOT analysis on development of apple industry in Tibet[J]. Tibet Journal of Agricultural Sciences, 2020, 42(2): 69-72.
- [4] 路贵龙. 西藏苹果研究进展[J]. 农学学报, 2019, 9(1): 30-34.
LU Guilong. Research progress of apple in Tibet[J]. Journal of Agriculture, 2019, 9(1): 30-34.
- [5] 林成欣,姜召涛,吕亮晓. 响富苹果新品种简介[J]. 烟台果树, 2016(4): 18-19.
LIN Chengxin, JIANG Zhaotao, LÜ Liangxiao. Introduction of the new apple variety 'Xiangfu' [J]. Yantai Fruits, 2016(4): 18-19.

- [6] 郑惠章. 西藏果树种质资源志[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004: 125-136.
ZHENG Huizhang. Tibetan fruit tree germplasm resources[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004: 125-136.
- [7] 孙得芳, 王娜, 庞世花, 任士伟. 叶面肥发展现状与展望[J]. 山东化工, 2017, 46(7): 89-90.
SUN Defang, WANG Na, PANG Shihua, REN Shiwei. The foliar fertilizer development status and prospect[J]. Shandong Chemical Industry, 2017, 46(7): 89-90.
- [8] 王斌. 4 种叶面肥对六月李产量和品质的影响[J]. 现代农业科技, 2025(6): 70-72.
WANG Bin. Effects of four foliar fertilizers on yield and quality of June plum[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2025(6): 70-72.
- [9] 许瑛, 李娟, 包东东, 杨俊翔, 谭慧林. 喷施虾肽氨基酸叶面肥对阿克苏苹果品质的影响[J]. 果树资源学报, 2024, 5(4): 15-17.
XU Ying, LI Juan, BAO Dongdong, YANG Junxiang, TAN Huilin. Effect of spraying shrimp peptide amino acid foliar fertilizer on quality of Aksu apple[J]. Journal of Fruit Resources, 2024, 5(4): 15-17.
- [10] 李娟, 徐学里, 杨婧, 谭慧林, 陈海元. 喷施虾肽氨基酸叶面肥对阿克苏苹果贮藏性能的影响[J]. 果树资源学报, 2024, 5(5): 1-5.
LI Juan, XU Xueli, YANG Jing, TAN Huilin, CHEN Haiyuan. Effect of spraying shrimp peptide amino acid foliar fertilizer on storage performance of Aksu Red Fuji apple[J]. Journal of Fruit Resources, 2024, 5(5): 1-5.
- [11] 周小魏, 姜中武. 硼、钙叶面肥对阿克苏苹果“糖心”形成及内在品质比较[J]. 烟台果树, 2020(2): 19-24.
ZHOU Xiaowei, JIANG Zhongwu. Comparison of boron and calcium foliar fertilizers on the formation of “candy heart” and inner quality of Aksu apples[J]. Yantai Fruits, 2020(2): 19-24.
- [12] 史光玲, 董媛媛, 李诗美, 曾宝珍, 卢世雄, 梁国平, 陈佰鸿, 毛娟. 叶面肥对黄土高原苹果‘烟富3号’果实品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2025, 43(1): 103-116.
SHI Guangling, DONG Yuanyuan, LI Shimei, ZENG Baozhen, LU Shixiong, LIANG Guoping, CHEN Baihong, MAO Juan. Effects of foliar fertilizers on fruit quality of ‘Yanfu 3’ apple on the Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2025, 43(1): 103-116.
- [13] 汪亮. 喷施叶面镁肥对‘富士’苹果树的生长和果实品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
WANG Liang. Effects of spraying foliar magnesium fertilizer on the growth and fruit quality of ‘Fuji’ apple trees[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2024.
- [14] 郭健健. 天水市苹果叶面肥对叶片光合特性及叶片生长影响的试验研究[J]. 农家参谋, 2021(11): 75-76.
GUO Jianjian. Experimental study on the effect of foliar fertilizer on leaf photosynthetic characteristics and leaf growth of apple in Tianshui city[J]. The Farmers Consultant, 2021(11): 75-76.
- [15] 王乐幸. 不同叶面肥对免套袋‘瑞阳’苹果果实品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
WANG Lexing. Effect of different leaf fertilizer on fruit quality of ‘Ruiyang’ apple without bagging[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2023.
- [16] 王贵芳, 姚元涛, 李素红, 董亚茹, 高晓兰, 王红, 郜怀峰, 梁家慧, 张勇, 魏树伟. 氮磷钾叶面肥配施不同碳源对桃树新梢生长及果实品质的影响[J]. 山东农业科学, 2021, 53(1): 69-76.
WANG Guifang, YAO Yuantao, LI Suhong, DONG Yaru, GAO Xiaolan, WANG Hong, GAO Huaifeng, LIANG Jiahui, ZHANG Yong, WEI Shuwei. Effects of nitrogen, phosphorous and potassium foliar fertilizer combined with different carbon sources on new shoot growth and fruit quality of peach trees[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2021, 53(1): 69-76.
- [17] 王刀, 张少媛, 杨伟, 薛岩晟, 杜豪, 薛佳, 许锋, 王启剑. 不同外源硒处理对番茄果实硒含量和营养品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(6): 162-168.
WANG Dao, ZHANG Shaonuan, YANG Wei, XUE Yansheng, DU Hao, XUE Jia, XU Feng, WANG Qijian. Influences of different exogenous selenium treatments on selenium content and nutritional quality of tomato[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2025, 53(6): 162-168.
- [18] 姜伟, 李梦媛, 柳嘉程, 彭龙, 张油兵, 肖亚卿, 刘涛, 严翔, 牛王翠. 不同硒肥叶面喷施对脐橙产量、品质及硒含量的影响[J]. 中国南方果树, 2025, 54(1): 25-30.
LOU Wei, LI Mengyuan, LIU Jiacheng, PENG Long, ZHANG Youbing, XIAO Yaqing, LIU Tao, YAN Xiang, NIU Wangcui. Effects of foliar application of different selenium fertilizers on yield, quality and selenium content of navel orange[J]. South China Fruits, 2025, 54(1): 25-30.
- [19] 马红友, 玉素甫江·玉素音, 李炳浩, 史转辉, 张佑银, 陆嫦玉. 叶面喷施锌肥对库尔勒香梨果实糖酸积累及产量品质的影响[J]. 山东农业科学, 2025, 57(2): 121-126.
MA Hongyou, Yusufujiang · Yusuyin, LI Binghao, SHI Zhuanhui, ZHANG Youyin, LU Changyu. Effects of foliar application of zinc fertilizer on sugar and acid accumulation, yield and quality of Korla fragrant pear fruits[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2025, 57(2): 121-126.
- [20] 黄艳, 文露, 庞亚卓, 黄本义, 王进, 吕秀兰. 喷施钙肥对‘夏黑’葡萄果实糖酸积累的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(2): 166-172.
HUANG Yan, WEN Lu, PANG Yazhuo, HUANG Benyi, WANG Jin, LÜ Xiulan. Effect of spraying calcium on sugar and acid accumulation in ‘Summer Black’ grape[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(2): 166-172.
- [21] 曾秀丽, 扎西, 王玉霞, 邓岚, 崔惠军, 次仁卓嘎. 西藏桃生产的现状和问题[J]. 西藏科技, 2012(6): 14-15.
ZENG Xiuli, ZHA Xi, WANG Yuxia, DENG Lan, CUI Huijun, Ciren Zhuoga. Current situation and problems of peach produc-

- tion in Tibet[J]. Tibet's Science & Technology, 2012(6): 14-15.
- [22] 陶江,王宇桃,柳羽,王秀,叶彦辉,李巍,顾方玉,韩艳英. 行间生草对苹果园土壤养分与果实产量及品质的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2025, 56(1): 133-140.
- TAO Jiang, WANG Yutao, LIU Yu, WANG Xiu, YE Yanhui, LI Wei, GU Fangyu, HAN Yanying. Inter-row grass sowing on soil nutrients, fruit yield and quality in apple orchards[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2025, 56(1): 133-140.
- [23] 曹玉芬,刘凤之,胡红菊,张冰冰. 梨种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京:中国农业出版社, 2006.
- CAO Yufen, LIU Fengzhi, HU Hongju, ZHANG Bingbing. Descriptors and data standard for pear (*Pyrus* spp.) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006.
- [24] 位杰,吴翠云,蒋媛,王合理. 蒽酮法测定红枣可溶性糖含量条件的优化[J]. 食品科学, 2014, 35(24): 136-140.
- WEI Jie, WU Cuiyun, JIANG Yuan, WANG Heli. Sample preparation optimization for determination of soluble sugar in red jujube fruits by anthrone method[J]. Food Science, 2014, 35(24): 136-140.
- [25] 刘玲. 稳健加权主成分及因子聚类方法的研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2022.
- LIU Ling. Research on robust weighted principal components and factor clustering methods[D]. Guiyang: Guizhou University, 2022.
- [26] 李涛涛. 生草覆盖条件下长期不同施肥对苹果园土壤肥力及果树生长发育的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2013.
- LI Taotao. Effects of long term different fertilization on soil fertility, growth fruit and development of fruit tree in apple orchard under grass covering[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2013.
- [27] 孙通,应义斌,刘魁武,胡雷秀. 梨可溶性固形物含量的在线近红外光谱检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(11): 2536-2539.
- SUN Tong, YING Yibin, LIU Kuiwu, HU Leixiu. Online detection of soluble solids content of pear by near infrared transmission spectrum[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(11): 2536-2539.
- [28] 胡晨曦,张永吉,李子恒,张云虹,祁建波,张瑛,周如美,张永泰. 不同叶面肥喷施时期对樱桃番茄生长和产量的影响[J]. 长江蔬菜, 2020(10): 66-69.
- HU Chenxi, ZHANG Yongji, LI Ziheng, ZHANG Yunhong, QI Jianbo, ZHANG Ying, ZHOU Rumei, ZHANG Yongtai. Effects of different foliar fertilizer spraying periods on growth and yield of tomato[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2020(10): 66-69.
- [29] 马仲炼,马磊,马永翠,田虹,黄先敏,邱彩玲. 果园生草对苹果叶片光合特性及果实品质的影响[J]. 西南农业学报, 2024, 37(7): 1480-1487.
- MA Zhonglian, MA Lei, MA Yongcui, TIAN Hong, HUANG Xianmin, QIU Cailing. Effects of grass planting in apple orchard on photosynthetic characteristics of apple leaves and apple quality[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2024, 37(7): 1480-1487.
- [30] 付小猛,杨虹霞,刘红明,杜玉霞,周先艳,魏舒娅,彭忠良,毛加梅,郭莉娜,龙春瑞. 土壤 pH 值对两种砧木柠檬幼树光合特性的影响[J]. 中国果树, 2024(12): 79-86.
- FU Xiaomeng, YANG Hongxia, LIU Hongming, DU Yuxia, ZHOU Xianyan, WEI Shuya, PENG Zhongliang, MAO Jiamei, GUO Lina, LONG Chunrui. Effects of soil pH value on photosynthetic characteristics of lemon saplings grafted with two rootstocks[J]. China Fruits, 2024(12): 79-86.
- [31] 魏智博,周高兴,谢晓东,王新建. 谷氨酸肥对阿拉尔地区主干型苹果树体生长的影响[J]. 绿色科技, 2023, 25(1): 108-112.
- WEI Zhibo, ZHOU Gaoxing, XIE Xiaodong, WANG Xinjian. Effect of glutamic acid granule fertilizer on the growth of two-year-old main apple trees in alar area[J]. Journal of Green Science and Technology, 2023, 25(1): 108-112.
- [32] 杨威,张梦婷,宋书洁,汪亮,任行,刘佩佩,邵淳轩,马锋旺,李明军,马百全. 喷施叶面镁肥及复配镁肥对‘富士’苹果光合特性和果实品质的影响[J]. 植物科学学报, 2025, 43(4): 541-549.
- YANG Wei, ZHANG Mengting, SONG Shujie, WANG Liang, REN Hang, LIU Peipei, SHAO Chunxuan, MA Fengwang, LI Mingjun, MA Baiquan. Effects of spraying foliar magnesium fertilizer on photosynthetic properties and fruit quality of *Malus domestica* Borkh. cv. 'Fuji' [J]. Plant Science Journal, 2025, 43(4): 541-549.
- [33] 慈琰雨. 不同硒处理对红将军苹果品质及贮藏特性影响的研究[D]. 烟台:烟台大学, 2019.
- CI Yanyu. Study on effects of different selenium treatments on the quality and storage characteristics of 'Red General' apple[D]. Yantai: Yantai University, 2019.
- [34] 申明. 5-氨基乙酰丙酸调节梨树叶片光合特性的研究[D]. 南京:南京农业大学, 2011.
- SHEN Ming. Regulation of 5-aminolevulinic acid (ALA) on leaf photosynthesis of pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai)[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.
- [35] 阮方毅,李运涛,邱硕,韩振斌,蒋子豪. 稀土复合叶面肥对苹果叶片光合作用和果实品质的影响[J]. 北方园艺, 2019(2): 65-70.
- RUAN Fangyi, LI Yuntao, QIU Shuo, HAN Zhenbin, JIANG Zihao. Effect of rare earth composite fertilizer on leaf photosynthesis and fruit quality of apple[J]. Northern Horticulture, 2019(2): 65-70.
- [36] SUSSMILCH F C, MCADAM S A M. Surviving a dry future: Abscissic acid (ABA)-mediated plant mechanisms for conserving water under low humidity[J]. Plants, 2017, 6(4): 54.
- [37] 王娜. 套袋和喷施叶面肥对阿克苏红富士苹果品质及光合特性的影响[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2012.
- WANG Na. Effects of bagging and foliar fertilization on the fruit

- qualities and photosynthetic characteristics of Red Fuji apple in Aksu[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2012.
- [38] 杨喜盟, 张彪, 曹亚凤, 梁建勇, 程小林. 叶面喷硒对烟富3号苹果树体生长、叶片光合特性与果实品质的影响[J]. 中国果树, 2023(4): 31-36.
- YANG Ximeng, ZHANG Biao, CAO Yafeng, LIANG Jianyong, CHENG Xiaolin. Effects of foliar selenium spraying on tree growth, leaf photosynthetic characteristics and fruit quality of 'Yanfu 3' apple[J]. China Fruits, 2023(4): 31-36.
- [39] 张媛, 冯天宇, 蒋皓, 杨娜, 师海斌, 吴晓政, 郑伟, 翟丙年. 锌肥施用方式对苹果光合特性、品质及经济效益的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 97-103.
- ZHANG Ai, FENG Tianyu, JIANG Hao, YANG Na, SHI Haibin, WU Xiaozheng, ZHENG Wei, ZHAI Bingnian. Effects of zinc fertilizer application on quality, photosynthetic characteristics and economic benefits of apple[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2024, 52(2): 97-103.
- [40] 张群, 舒楠, 宁密密, 李绍华. 不同施肥处理对'东红'猕猴桃贮藏期间果实硬度及细胞壁降解的影响[J]. 保鲜与加工, 2022, 22(9): 28-37.
- ZHANG Qun, SHU Nan, NING Mimi, LI Shaohua. Effects on hardness and cell wall degradation of 'Donghong' kiwifruit during storage by different fertilization methods[J]. Storage and Process, 2022, 22(9): 28-37.
- [41] 肖雪梅, 高程斐, 武玥, 唐中祺, 钟源, 张丹, 魏晋梅, 郁继华. 不同类型叶面肥对日光温室越冬番茄风味品质的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(10): 218-226.
- XIAO Xuemei, GAO Chengfei, WU Yue, TANG Zhongqi, ZHONG Yuan, ZHANG Dan, WEI Jinmei, YU Jihua. Effects of different types of foliar fertilizer on the flavor quality of overwintering tomato in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(10): 218-226.
- [42] 于波, 秦嗣军, 吕德国. 硫酸锌对苹果叶片光合产物的合成及其向果实运输的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2022, 53(1): 9-15.
- YU Bo, QIN Sijun, LÜ Deguo. Effects of $ZnSO_4$ levels on the photosynthate synthesis and its translocation to fruit in apple[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2022, 53(1): 9-15.
- [43] 王朝, 张朋朋, 管增辉, 吴倩, 陈新宝, 邹养军. 喷施不同钙肥对'蜜脆'苹果生理生化特性及果实品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(7): 73-80.
- WANG Zhao, ZHANG Pengpeng, GUAN Zenghui, WU Qian, CHEN Xinbao, ZOU Yangjun. Effects of spraying different calcium fertilizers on physiological and biochemical characteristics and fruit quality of 'Honeycrisp' apple[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2024, 52(7): 73-80.
- [44] 邓小芳, 刘新伟, 叶志娟, 吕臣浩, 张海清, 黄立强, 赵竹青. 不同时期喷施不同硒源对葡萄硒吸收分配的影响[J]. 中国南方果树, 2018, 47(5): 82-86.
- DENG Xiaofang, LIU Xinwei, YE Zhijuan, LÜ Chenhao, ZHANG Haiqing, HUANG Liqiang, ZHAO Zhuqing. Effects of foliar application of selenium from different sources on the absorption and distribution of selenium in grape at different stages[J]. South China Fruits, 2018, 47(5): 82-86.