网络出版时间:2026-05-11 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.11.009

滴灌配方施肥对‘秦脆’苹果矿质元素与产量的影响

刘媛[1],英洁[1],李安华[2],秦伟[1,3]

(1 新疆农业大学 园艺学院,新疆 乌鲁木齐 830052;2 伊犁郎云间旅游开发管理有限公司,新疆 伊宁 835100;
3 新疆和田学院 农学院,新疆 和田 848000)

[摘 要] 【目的】探讨滴灌水肥一体化条件下,不同配方施肥处理对‘秦脆’苹果叶片与果实中氮(N)、磷(P)、钾(K)、钙(Ca)、镁(Mg)5种矿质元素含量动态变化及产量的影响,为‘秦脆’苹果优质施肥方案的确定提供参考。【方法】以新疆伊犁4年生‘秦脆’苹果为试材,采用五因素四水平正交设计,设置16个配方施肥处理(T1~T16)和1个常规施肥对照(CK),测定不同生育期叶片和果实的矿质元素含量及成熟期产量指标,分析各处理对‘秦脆’苹果矿质元素与产量的影响。【结果】不同配方施肥处理对苹果叶片和果实矿质营养水平的调控效果存在显著差异。叶片中N、P含量总体随生育期推进呈下降趋势,而K、Ca、Mg含量的变化趋势因元素和处理而异。果实中N、Mg含量呈下降趋势,P含量呈先下降后上升趋势,K、Ca含量总体呈上升趋势。相关性分析表明,叶片、果实矿质元素含量及产量间存在显著关联,叶片K含量与果实P、K含量呈极显著正相关($P<0.01$);叶片P含量与叶片K含量和果实P含量呈极显著正相关($P<0.01$),与单株产量呈显著负相关;果实纵径与果实横径、单果质量呈极显著正相关,果实横径、单果质量、单株产量间两两呈极显著正相关。不同配方施肥处理对‘秦脆’果实产量指标具有显著影响,其中T13处理(N 360 kg/hm^2,P_2O_5 0 kg/hm^2,K_2O 360 kg/hm^2,CaO 49 kg/hm^2,MgO 15 kg/hm^2)的单株产量最高,达27.11 kg。主成分分析共筛选出5个主成分,累计方差贡献率为85.754%;各施肥处理的综合得分为-1.95~1.18,其中T13处理排序第一。【结论】综合矿质元素含量与产量表现,在‘秦脆’苹果园滴灌水肥一体化管理中,T13处理的综合效果较优,有助于协调树体营养,促进果实矿质元素积累,从而实现增产提质目标。

[关键词] ‘秦脆’苹果;配方施肥;施肥方案;水肥一体化;新疆伊犁

[中图分类号] S661.106$^+$.2 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)11-0084-14

Effects of drip-irrigation with formula fertilization on mineral element contents and yield of ‘Qincui’ apple

LIU Ai[1], YING Jie[1], LI Anhua[2], QIN Wei[1,3]

(1 *College of Horticulture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang* 830052, *China*;
2 *Yili Langyunjian Tourism Development and Management Co., Ltd., Yining, Xinjiang* 835100, *China*;
3 *College of Agronomy, Xinjiang Hetian College, Hetian, Xinjiang* 848000, *China*)

Abstract: 【Objective】 This study aims to investigate the effects of different formula fertilization treatments on the dynamic changes of nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), and magnesium (Mg) contents in leaves and fruits, as well as on the yield of ‘Qincui’ apple under drip irrigation conditions, thereby providing a reference for establishing an optimal fertilization strategy for ‘Qincui’ apple. 【Method】 Using four-year-old ‘Qincui’ apple trees grown in Yili, Xinjiang as materials, a five-factor, four-level orthogonal design

[收稿日期] 2025-09-26 [修回日期] 2025-10-25
[基金项目] 新疆林果产业技术体系项目(XJLGCYJSTX04-2024)
[作者简介] 刘媛(1999—),女,新疆阿勒泰人,在读硕士,主要从事果树栽培与生理研究。E-mail:liuai111213@163.com
[通信作者] 秦伟(1977—),男,四川安岳人,教授,博士生导师,主要从事果树栽培与生理研究。E-mail:xjqinwei@163.com

was employed, comprising 16 formula fertilization treatments (T1－T16) and one conventional fertilization control (CK). Mineral element contents in leaves and fruits at different growth stages, along with yield indices at maturity, were determined to analyze the effects of each treatment on mineral nutrition and yield of 'Qincui' apple.【Result】Significant differences were observed in the regulatory effects of different formula fertilization treatments on mineral nutrient levels in apple leaves and fruits. In leaves, N and P concentrations generally decreased with advancing growth stages, whereas trends for K, Ca and Mg varied depending on elements and treatments. In fruits, N and Mg contents showed a decreasing trend, while P content decreased first and then increased, and K and Ca contents generally increased. Correlation analysis revealed significant associations between yield and mineral element contents in leaves and fruits. Leaf K content was positively correlated with fruit P and K contents, with extremely high significance ($P<0.01$). Leaf P content showed a highly positive correlations with leaf K content and fruit P content ($P<0.01$), whereas their correlations with yield per plant were significantly negative. Fruit longitudinal diameter exhibited a highly significant positive correlation with fruit transverse diameter and single fruit weight. Moreover, pairwise correlations among fruit transverse diameter, single fruit weight, and yield per plant were all extremely significant and positive. Different formula fertilization treatments had significant effects on the fruit yield indices of 'Qincui' apple. Among them, T13 treatment (N 360 kg/hm^2, P_2O_5 0 kg/hm^2, K_2O 360 kg/hm^2, CaO 49 kg/hm^2, MgO 15 kg/hm^2) achieved the highest yield per plant, rea-ching 27.11 kg. Principal component analysis extracted five principal components, with a cumulative contribution rate of 85.754%. The comprehensive scores of all fertilization treatments ranged from －1.95 to 1.18 with the T13 treatment ranking first.【Conclusion】Considering both mineral element contents and yield performance, the T13 treatment demonstrated superior comprehensive effects in the integrated management of drip fertigation in 'Qincui' apple orchards. This treatment helped balance tree nutrition, promote fruit mineral accumulation, and achieve the goals of yield increase and quality improvement.

Key words: 'Qincui' apple; formula fertilization; fertilization scheme; fertigation; Yili, Xinjiang

苹果作为全球四大水果之一，不仅富含维生素、矿物质及膳食纤维等营养物质，且具有栽培管理便捷、经济收益稳定的优势，已在我国很多地区形成规模化种植格局，成为当地乡村振兴、农民致富的支柱产业[1]。据统计，2024年我国苹果栽培面积超 1.97×10^6 hm^2，总产量突破 4.96×10^7 t，在保障国内果品市场供给及促进农民增收中发挥着不可替代的关键作用[2]。水分与肥料是苹果生长发育中的核心调控因子，随着农业绿色发展理念的推进，化肥减量增效与水资源高效利用成为苹果生产的核心需求，而滴灌水肥一体化技术因其节水、节肥、增产等优势，已成为新疆苹果产业主要推广的技术之一[3-4]。值得注意的是，当前苹果园在滴灌水肥一体化技术应用中仍存在诸多不足，如不同地区、不同品种苹果的施肥量与养分配比尚缺乏科学依据，导致部分果园出现施肥过量、化肥施用比例失衡等问题，不仅造成资源浪费与环境压力，还制约了苹果产量与品质的进一步提升[5-6]。因此，针对滴灌水肥一体化系统，筛选适宜苹果生长的配方施肥组合，明确其对树体矿质元素吸收规律的影响，对优化苹果园水肥管理方案、推动苹果产业高质量发展具有重要的现实意义。

滴灌水肥一体化技术通过将肥料溶解于水中，借助灌溉系统精准输送至果树根部，既能有效满足果树对水分与养分的同步需求[7]，又能显著提升果树产量[8-9]，是当前水肥高效管理的重要技术手段。近年来，该技术已在葡萄[10]、枣[11]、柑橘[12]等多种果树栽培中广泛应用。张建锴等[13]研究了水氮耦合对苹果产量的影响，结果表明不同灌水量与施肥量组合对苹果产量存在极显著影响。另有研究指出，不同肥料配施会显著改变树体矿质元素的累积[14-15]；通过优化施肥处理，苹果叶片矿质元素含量不仅存在显著差异，且其累积量也有明显提升[16]。配方施肥技术基于土壤供肥能力与作物营养需求，通过科学调控肥料的配比及施用方式，可实现养分高效利用。然而，前人研究多聚焦于大量元素肥料[17-18]或钙、镁、锌等单一中微量元素肥料[19-21]，针对大、中量元素肥料的配合施用，并结合果树不同生育期系统探究其对矿质元素吸收规律影响的研究仍相对较少。鉴于此，本研究以‘秦脆’苹果为试

验对象,在滴灌水肥一体化条件下开展配方施肥试验,系统探究多元素配方施肥处理对苹果不同生育期叶片和果实中氮、磷、钾、钙、镁5种矿质元素吸收及产量的影响,以期为优化滴灌水肥一体化条件下苹果的水肥管理方案、推动苹果产业绿色高质量发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2024年4—10月在新疆维吾尔自治区伊犁哈萨克自治州伊宁县萨地克于孜村进行。伊宁县属温带大陆性干旱气候,冬春温暖,夏秋干燥,昼夜温差大,年平均气温10.1 ℃,年平均降水量257 mm,无霜期163 d。试验期间,灌水量与灌溉时间与当地管理保持一致。试验地土壤理化性质见表1。

1.2 试验材料

试验以4年生'秦脆'苹果为研究材料,砧木为M9T337,株行距1.1 m×3.5 m,授粉树为'粉红女士'。选取植株长势一致、无病虫害、挂果正常且主干直径、分枝条数及其粗度相对一致的苹果树进行挂牌标记。配制N、P、K、Ca、Mg 5种元素水溶肥,具体肥料名称及含量见表2。

表1 试验地土壤理化性质

Table 1 Physicochemical properties of the soil in the experimental site

土层/cm Soil depth	pH	电导率/(μS·cm^{-1}) Electrical conductivity	有机质/(g·kg^{-1}) Organic matter	碱解氮/(mg·kg^{-1}) Alkaline-hydrolyzable N	全氮/(g·kg^{-1}) Total nitrogen	全磷/(g·kg^{-1}) Total phosphorus	全钾/(g·kg^{-1}) Total potassium	速效磷/(mg·kg^{-1}) Available phosphorus	速效钾/(mg·kg^{-1}) Available potassium	水溶性钙/(g·kg^{-1}) Soluble calcium	水溶性镁/(g·kg^{-1}) Soluble magnesium
0～20	8.10	210.60	25.22	23.86	0.59	2.37	13.42	11.90	280.00	13.79	88.11
20～40	8.23	181.43	30.51	12.85	0.89	1.85	9.12	7.99	153.33	11.61	93.07
40～60	8.08	289.87	23.44	9.18	0.73	1.26	10.34	3.70	86.67	15.31	92.75

表2 试验所用肥料及其来源

Table 2 Fertilizers used and their sources

纯量元素名称 Pure element	肥料名称 Fertilizer element	含量/% Content	来源 Source
N	水溶性尿素 Water-soluble urea	46	中国石油天然气股份有限公司 PetroChina Company Limited
P_2O_5	磷酸一铵 Monoammonium phosphate	49	湖北省黄麦岭磷化工有限责任公司 Hubei Provincial Huangmailing Phosphorus Chemical Co.,Ltd.
K_2O	硫酸钾 Potassium sulfate	52	国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司 SDIC Xinjiang Luobupo Potash Salt Co.,Ltd.
CaO	水溶性钙肥 Water-soluble calcium fertilizer	20	成都华宏生物科技有限公司 Chengdu Huahong Biotechnology Co.,Ltd.
MgO	水溶性硫酸镁 Water-soluble magnesium sulfate	9.5	成都华宏生物科技有限公司 Chengdu Huahong Biotechnology Co.,Ltd.

1.3 试验设计

试验按照五因素四水平正交试验进行组合设计,五因素指N、P、K、Ca、Mg 5个施肥因子,每个因子设4个施用水平(各肥料用量按照每公顷N 240 kg、P_2O_5 195 kg、K_2O 240 kg、CaO 98 kg、MgO 15 kg的0,0.5,1.0,1.5倍设置),共16个处理组合(表3),并以试验地常规施肥处理作为对照(CK,各肥料施用量分别为N 166.0 kg/hm^2、P_2O_5 210.0 kg/hm^2、K_2O 184.0 kg/hm^2、CaO 90.0 kg/hm^2、MgO 36.0 kg/hm^2)。基础施用量依据60 000.0 kg/hm^{2}的果实产量目标确定,其中N、P、K肥的基础施用量采用文献[3,22]的方法计算土壤供肥力后得出,Ca和Mg肥的基础施用量参照文献[23-24]设定。每个处理重复3次,以3株为1次重复。

N在萌芽期、开花期、幼果期、膨大期、着色期、成熟期和基施时的施用比例为20.0∶20.0∶20.0∶10.0∶0.0∶0.0∶30.0;P、K、Ca、Mg在上述各生育期的施用比例分别为15.0∶15.0∶15.0∶17.0∶5.0∶5.0∶28.0,8.0∶8.0∶9.0∶20.0∶20.0∶20.0∶15.0,0.0∶8.0∶42.0∶30.0∶12.5∶7.5∶0.0和13.0∶13.0∶24.0∶21.0∶17.0∶12.0∶0.0。施肥均沿苹果种植方向(东西行向)采用滴灌方式施入,滴头流速4 L/h。施肥时,将肥料用水溶解后灌入施肥袋中,将施肥袋上的插头插入距离树干30 cm处,以保证肥料能

滴到苹果根部位置,并被果树吸收和利用。

表 3　不同施肥处理的肥料施用量

Table 3　Fertilizer application rates under different fertilization treatments　kg/hm²

处理 Treatment	N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO	处理 Treatment	N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO
T1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	T9	240.0	0.0	240.0	147.0	7.5
T2	0.0	97.5	120.0	49.0	7.5	T10	240.0	97.5	360.0	98.0	0.0
T3	0.0	195.0	240.0	98.0	15.0	T11	240.0	195.0	0.0	49.0	22.5
T4	0.0	292.5	360.0	147.0	22.5	T12	240.0	292.5	120.0	0.0	15.0
T5	120.0	0.0	120.0	98.0	22.5	T13	360.0	0.0	360.0	49.0	15.0
T6	120.0	97.5	0.0	147.0	15.0	T14	360.0	97.5	240.0	0.0	22.5
T7	120.0	195.0	360.0	0.0	7.5	T15	360.0	195.0	120.0	147.0	0.0
T8	120.0	292.5	240.0	49.0	0.0	T16	360.0	292.5	0.0	98.0	7.5

1.4　样品采集及指标测定

1.4.1　*矿质元素含量测定*　于每次施肥前进行样品采集,其中叶片和果实分别从开花期、幼果期开始采集。在树干外围中部的东、南、西、北4个方向,采集新梢中部健康叶片及树冠外围健康果实,每树采集30片叶片和3颗果实。采集样品后带回实验室先用自来水洗净,再用去离子水冲洗后,在烘箱中于105 ℃杀青30 min,80 ℃下烘干至恒质量。将烘干后的样品使用粉碎机磨碎,过孔径0.20 mm(80目)筛后存放待测。

N、P、K含量采用H_2SO_4-H_2O_2消煮,分别用奈氏比色法、钼锑抗比色法和火焰光度计法测定;Ca、Mg含量采用HNO_3-$HClO_4$混酸(4∶1)消煮,利用原子吸收光度计(TAS-990,北京普析通用仪器有限公司)测定。

1.4.2　*产量测定*　果实成熟期对各处理苹果进行采摘,在东、南、西、北4个方向的上、中、下3层,每层采摘3~5个称质量,结果取平均值记为单果质量;使用游标卡尺测量果实纵径、果实横径;统计单株果数,计算单株产量。

1.5　数据分析

采用SPSSAU在线分析软件设计正交试验,采用Microsoft Excel 2021软件对原始数据进行统计与分析,使用SPSS 25.0对数据进行显著性分析。

2　结果与分析

2.1　不同生育期配方施肥对苹果叶片矿质元素含量的影响

2.1.1　*氮*　由表4可见,不同配方施肥处理叶片氮(N)含量随生育期的变化而有所不同,但总体均呈下降趋势。T5、T8处理叶片N含量在幼果期达最大值,T10、T12、T14、T16处理叶片N含量在膨大期达最大值,其余处理叶片N含量均以开花期最高,且各处理叶片N含量均在果实成熟期达最低值。开花期叶片N含量最高的为CK处理(39.69 g/kg),最低的为T8处理(31.62 g/kg)。由于叶片快速伸展,幼果期叶片N含量均有所下降,最大降幅为22.98%(T12处理)。除T2、T9~T16和CK处理叶片N含量在膨大期有所上升外,其余处理叶片N含量则持续下降。成熟期叶片N含量较高的为T11、T10、T3和T14处理,较CK处理分别增长18.46%,18.03%,16.44%和16.29%。

表 4　不同配方施肥各生育期苹果叶片N含量的变化

Table 4　Changes in leaf N content at different growth stages of apple under different formula fertilization treatments　g/kg

处理 Treatment	开花期 Flowering stage	幼果期 Young fruit stage	膨大期 Expansion stage	着色期 Coloring stage	成熟期 Maturity stage
T1	32.87±0.66 cde	31.43±0.14 abcde	28.56±0.45 g	25.14±0.84 efg	19.44±0.44 de
T2	37.95±0.23 ab	35.82±0.19 a	35.93±0.81 abc	32.44±0.84 ab	19.70±0.59 de
T3	37.24±0.49 ab	34.77±0.73 abc	31.73±0.48 ef	34.74±0.56 a	23.57±0.71 ab
T4	38.27±0.52 ab	35.07±0.69 ab	31.36±0.19 ef	34.09±0.67 a	21.65±0.86 de
T5	32.06±0.22 de	33.65±0.30 abc	29.66±0.65 fg	24.50±0.64 fg	22.65±0.60 abc
T6	36.25±0.54 abc	33.12±0.44 abcd	32.36±0.32 def	28.73±0.33 bcde	21.01±0.53 bcd
T7	36.20±0.75 abc	33.81±0.71 abc	31.63±0.44 ef	24.47±0.16 fg	19.20±0.48 de
T8	31.62±0.70 e	32.28±0.26 abcd	31.42±0.57 ef	26.35±0.76 cdefg	19.95±0.85 cde
T9	36.10±0.86 abc	31.61±0.87 abcde	32.82±0.48 de	25.91±0.41 defg	19.22±0.15 de

表4(续) Table 4(continued) g/kg

处理 Treatment	开花期 Flowering stage	幼果期 Young fruit stage	膨大期 Expansion stage	着色期 Coloring stage	成熟期 Maturity stage
T10	31.66±0.51 e	30.95±0.41 abcde	31.69±0.82 ef	27.32±0.40 cdef	23.89±0.15 a
T11	36.48±0.76 ab	32.09±0.18 abcd	32.84±0.76 de	29.65±0.91 bc	23.98±0.47 a
T12	35.29±0.56 bcd	27.18±0.57 e	35.92±0.57 abc	29.24±0.49 bcd	19.07±0.73 de
T13	36.50±0.80 ab	32.08±0.36 abcd	33.20±0.43 cde	30.06±0.76 bc	17.77±0.40 e
T14	32.32±0.32 de	28.80±0.57 de	36.84±0.75 ab	25.77±0.53 defg	23.54±0.29 ab
T15	38.62±0.52 ab	30.10±0.53 cde	35.07±0.48 bcd	23.19±0.19 g	20.49±0.47 cde
T16	36.83±0.33 ab	30.06±0.59 cde	37.97±0.30 a	31.50±0.74 ab	20.98±0.17 bcd
CK	39.69±0.51 a	30.57±0.59 bcde	31.64±0.56 ef	25.85±0.34 defg	20.24±0.38 cde

注:表中同列数据后标不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

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

2.1.2 磷 不同配方施肥处理苹果各生育期叶片磷(P)含量的测定结果见表5。表5表明,除T16处理外,其余各施肥处理苹果各生育期叶片P含量总体呈逐渐下降趋势。其中T16处理苹果叶片P含量随生育期延续总体呈先增大后减少趋势,于膨大期达到最大值;其余各处理叶片P含量均在开花期达最大值,其中T10处理叶片P含量最高,为2.83 g/kg,显著高于T1、T4、T14、T15、T16和CK处理。幼果期叶片P含量最小为1.86 g/kg(T14处理),最高为2.59 g/kg(T3处理);除T16处理叶片P含量较开花期有所上升外,其余处理均有所下降,下降幅度最大的为T14处理(25.33%)。T9、T10、T12、T14和T16处理叶片P含量在膨大期有所上升,其余处理叶片P含量则持续下降。至成熟期,各处理叶片P含量均达最低值,除T2处理显著高于T7处理外,其余处理之间均无显著差异。

表5 不同配方施肥各生育期苹果叶片P含量的变化

Table 5 Changes in leaf P content at different growth stages of apple under different formula fertilization treatments g/kg

处理 Treatment	开花期 Flowering stage	幼果期 Young fruit stage	膨大期 Expansion stage	着色期 Coloring stage	成熟期 Maturity stage
T1	2.21±0.09 d	2.15±0.03 bcd	2.07±0.21 bcd	1.52±0.23 c	1.49±0.01 ab
T2	2.68±0.13 abc	2.25±0.17 bc	2.15±0.06 bcd	2.08±0.40 a	1.50±0.14 a
T3	2.65±0.09 abc	2.59±0.32 a	1.97±0.10 d	1.77±0.25 abc	1.48±0.07 ab
T4	2.38±0.20 cd	2.29±0.05 abc	2.06±0.03 bcd	1.66±0.19 bc	1.43±0.05 ab
T5	2.57±0.29 abc	2.24±0.07 bc	2.13±0.25 bcd	1.63±0.08 c	1.44±0.07 ab
T6	2.60±0.22 abc	2.06±0.03 cd	1.91±0.10 d	1.51±0.12 c	1.44±0.11 ab
T7	2.55±0.15 abc	2.22±0.12 bc	1.91±0.16 d	1.67±0.29 bc	1.30±0.11 b
T8	2.55±0.15 abc	2.12±0.15 cd	1.92±0.10 d	1.60±0.03 c	1.40±0.08 ab
T9	2.75±0.08 ab	2.25±0.22 bc	2.31±0.07 abc	1.81±0.05 abc	1.50±0.14 a
T10	2.83±0.10 a	2.31±0.11 abc	2.51±0.08 a	1.73±0.18 abc	1.51±0.09 a
T11	2.65±0.21 abc	2.25±0.08 bc	2.14±0.33 bcd	1.69±0.12 bc	1.57±0.04 a
T12	2.57±0.08 abc	2.11±0.10 cd	2.32±0.16 ab	1.66±0.19 bc	1.51±0.03 a
T13	2.51±0.09 abcd	2.32±0.14 abc	2.05±0.07 bcd	1.50±0.08 c	1.50±0.13 a
T14	2.49±0.17 bcd	1.86±0.26 d	2.07±0.10 bcd	1.83±0.28 abc	1.54±0.18 a
T15	2.34±0.26 cd	2.32±0.29 abc	2.07±0.26 bcd	2.03±0.14 ab	1.60±0.18 a
T16	2.37±0.24 cd	2.43±0.05 ab	2.48±0.22 a	1.80±0.11 abc	1.50±0.04 a
CK	2.42±0.15 bcd	2.31±0.07 abc	1.99±0.17 cd	1.59±0.29 c	1.50±0.03 a

2.1.3 钾 由表6可见,不同配方施肥处理苹果各生育期叶片钾(K)含量存在一定差异。T1、T3、T8、T14和T16处理叶片K含量在开花期时达最大值,T15处理叶片K含量在幼果期达最大值,其余处理叶片K含量在膨大期达最大值;T2、T3、T7、T8、T10和T11处理叶片K含量在成熟期达最低值,其余处理在着色期达最低值。成熟期叶片K含量为8.45~14.15 g/kg,其中以T6处理最低,T10处理最高。

2.1.4 钙 由表7可知,不同配方施肥处理苹果各生育期叶片钙(Ca)含量总体呈M型变化。除T9、T10、T11和CK处理叶片Ca含量在膨大期达最低值外,其余处理叶片Ca含量均在开花期达最低值;T5处理叶片Ca含量在膨大期达最大值,T16、CK处理叶片Ca含量在着色期达最大值,其余处理叶片Ca含量均在幼果期达最大值。着色期各处理差异均不显著,成熟期各处理叶片Ca含量为15.69 g/kg(T16处理)~16.93 g/kg(T13处理),其中T13、

T15、T14、T6、T5和T7处理均显著高于CK处理，分别较CK处理增长6.76%，5.46%，4.93%，4.79%，3.28%和3.21%。

表6　不同配方施肥各生育期苹果叶片K含量的变化

Table 6　Changes in leaf K content at different growth stages of apple under different formula fertilization treatments　g/kg

处理 Treatment	开花期 Flowering stage	幼果期 Young fruit stage	膨大期 Expansion stage	着色期 Coloring stage	成熟期 Maturity stage
T1	13.31±0.81 de	9.48±0.69 h	12.81±0.56 fg	9.49±0.28 ef	10.87±0.27 cde
T2	13.21±0.33 de	13.70±0.13 ef	14.14±0.56 efg	10.10±0.41 de	10.05±0.94 def
T3	18.00±0.19 a	17.72±0.33 a	15.01±0.49 bcde	11.78±0.62 bcd	11.35±0.34 bcd
T4	16.23±0.71 b	16.89±0.57 abc	17.72±0.70 a	11.08±0.75 cde	11.55±0.40 bcd
T5	14.00±0.90 cde	15.59±0.37 cd	16.40±0.93 abcd	10.99±0.82 cde	11.59±0.68 bcd
T6	10.56±0.65 f	9.19±0.55 h	12.40±0.41 g	7.99±0.50 f	8.45±0.52 f
T7	13.26±0.35 de	10.71±0.35 gh	13.72±0.80 efg	10.18±0.51 de	9.22±0.73 ef
T8	17.00±0.28 ab	13.40±0.94 ef	15.31±0.69 bcde	11.58±0.26 bcde	10.97±0.72 cde
T9	14.83±0.75 c	14.69±0.52 de	16.95±0.16 ab	13.15±0.21 abc	13.76±0.51 ab
T10	17.25±0.26 ab	15.95±0.30 abcd	17.73±0.29 a	14.83±0.73 a	14.15±0.30 a
T11	16.64±0.57 ab	15.71±0.34 cd	17.82±0.24 a	14.19±0.28 a	12.75±0.17 abc
T12	13.25±0.65 de	12.06±0.88 fg	17.71±0.87 a	11.80±0.57 bcd	12.48±0.29 abc
T13	13.61±0.82 cde	12.45±0.79 fg	14.57±0.13 def	10.05±0.22 de	12.99±0.52 ab
T14	16.68±0.76 ab	12.18±0.76 fg	14.88±0.80 cde	11.49±0.34 bcde	12.63±0.67 abc
T15	12.53±0.93 e	17.59±0.27 ab	16.75±0.27 abc	13.68±0.23 ab	14.09±0.55 a
T16	17.38±0.62 ab	15.82±0.29 bcd	14.85±0.74 cde	11.11±0.42 cde	13.13±0.94 ab
CK	14.44±0.29 cd	12.63±0.49 f	15.03±0.85 bcde	11.81±0.69 bcd	12.59±0.55 abc

表7　不同配方施肥各生育期苹果叶片Ca含量的变化

Table 7　Changes in leaf Ca content at different growth stages of apple under different formula fertilization treatments　g/kg

处理 Treatment	开花期 Flowering stage	幼果期 Young fruit stage	膨大期 Expansion stage	着色期 Coloring stage	成熟期 Maturity stage
T1	14.78±0.31 bc	17.13±0.46 abc	16.26±0.73 abcd	16.66±0.23 a	15.98±0.28 cde
T2	15.65±0.53 ab	18.36±0.25 ab	16.27±0.72 abcd	16.76±0.68 a	16.15±0.25 cde
T3	15.14±0.52 abc	17.50±0.65 ab	16.85±0.97 ab	16.90±0.50 a	16.11±0.06 cde
T4	15.82±0.45 ab	18.31±0.95 ab	16.51±0.29 abc	17.13±0.18 a	16.33±0.22 bcd
T5	15.72±0.40 ab	16.55±0.48 bc	17.49±0.31 a	17.20±0.16 a	16.38±0.16 bc
T6	15.29±0.21 abc	17.95±0.33 ab	17.54±0.61 a	17.14±0.28 a	16.62±0.16 ab
T7	16.31±0.05 a	17.99±0.60 ab	17.65±0.49 a	17.16±0.11 a	16.37±0.14 bc
T8	15.58±0.60 abc	17.34±0.71 abc	17.17±0.93 a	17.16±0.05 a	16.10±0.35 cde
T9	15.37±0.99 abc	17.15±0.56 abc	14.29±0.28 e	16.64±0.31 a	15.97±0.49 cde
T10	15.21±0.57 abc	17.58±0.48 ab	14.86±0.33 cde	16.69±0.14 a	16.07±0.25 cde
T11	15.18±0.46 abc	17.30±0.45 abc	14.54±0.34 de	16.66±0.21 a	15.70±0.41 e
T12	14.81±0.78 bc	17.75±0.53 ab	15.07±0.55 bcde	17.07±0.20 a	15.71±0.25 e
T13	15.49±0.28 abc	18.46±0.22 a	17.13±0.44 a	17.21±0.10 a	16.93±0.09 a
T14	14.72±0.78 bc	17.87±0.36 ab	15.10±0.44 bcde	17.08±0.25 a	16.64±0.11 ab
T15	14.79±0.17 bc	17.27±0.40 abc	16.42±0.15 abc	16.65±0.43 a	16.72±0.16 ab
T16	14.34±0.17 c	16.62±0.53 bc	15.28±0.19 bcde	16.78±0.34 a	15.69±0.10 e
CK	15.47±0.30 abc	15.66±0.62 c	13.72±0.72 e	16.96±0.13 a	15.86±0.35 de

2.1.5　镁　表8显示,不同配方施肥处理苹果各生育期叶片镁(Mg)含量总体均呈先上升后下降趋势,且均以开花期叶片Mg含量最低,除T16处理叶片Mg含量呈持续上升趋势并在成熟期达最大值外,其余处理叶片Mg含量均在着色期达最大值,而其成熟期Mg含量均有所下降,与着色期相比,T8、T7和T11处理叶片Mg含量下降幅度较大,降幅分别为15.42%,15.21%和14.65%。

2.2　不同生育期配方施肥对苹果果实矿质元素含量的影响

2.2.1　氮　由表9可见,不同配方施肥处理苹果各生育期果实N含量总体呈"下降－上升－下降"趋势。其中T1～T6处理果实N含量在幼果期达峰值,T7～T16及CK处理果实N含量均于着色期达峰值;T13、T14、T15和CK处理果实N含量在膨大期达最低值,其余处理果实N含量均在成熟期达最

低值。成熟期T13、T9、T15、T3、T5、T4、T14、T12和T8处理果实N含量显著高于CK处理,其N含量分别为7.45,6.91,6.84,6.70,6.70,6.64,6.32,6.29,6.21 g/kg。

表8 不同配方施肥各时期苹果叶片Mg含量的变化

Table 8 Changes in leaf Mg content at different growth stages of apple under different formula fertilization treatments g/kg

处理 Treatment	开花期 Flowering stage	幼果期 Young fruit stage	膨大期 Expansion stage	着色期 Coloring stage	成熟期 Maturity stage
T1	6.61±0.14 bc	7.47±0.10 bcd	8.16±0.11 bc	9.12±0.19 d	8.04±0.29 c
T2	7.15±0.17 a	7.75±0.10 a	8.76±0.13 a	9.26±0.47 cd	8.21±0.47 abc
T3	6.96±0.25 ab	7.60±0.16 abc	8.47±0.10 abc	9.46±0.17 abc	8.26±0.03 abc
T4	7.07±0.10 a	7.65±0.10 ab	8.34±0.34 bc	9.64±0.10 ab	8.45±0.06 abc
T5	7.04±0.42 a	7.38±0.33 cd	8.48±0.04 ab	9.59±0.09 ab	8.37±0.11 abc
T6	7.03±0.08 a	7.76±0.02 a	8.40±0.20 bc	9.71±0.06 a	8.52±0.09 ab
T7	7.27±0.11 a	7.63±0.16 abc	8.37±0.09 bc	9.50±0.07 abc	8.06±0.26 c
T8	6.33±0.29 cde	7.59±0.13 abc	8.36±0.23 bc	9.66±0.11 a	8.17±0.23 abc
T9	6.43±0.29 cd	7.67±0.10 ab	8.27±0.32 bc	9.57±0.13 ab	8.30±0.13 abc
T10	6.42±0.13 cd	7.68±0.15 ab	8.25±0.19 bc	9.33±0.18 bcd	8.14±0.21 abc
T11	6.31±0.14 cde	7.70±0.11 ab	8.22±0.09 bc	9.57±0.09 ab	8.17±0.13 abc
T12	5.97±0.28 fg	7.65±0.03 ab	8.17±0.20 bc	8.51±0.12 e	8.11±0.28 bc
T13	6.32±0.14 cde	7.65±0.10 ab	8.41±0.10 bc	8.57±0.06 e	8.35±0.05 abc
T14	6.05±0.20 efg	7.68±0.08 ab	8.11±0.29 c	8.49±0.04 e	8.25±0.12 abc
T15	6.13±0.03 efg	7.80±0.03 a	8.49±0.05 ab	8.58±0.24 e	8.39±0.31 abc
T16	5.87±0.32 g	7.57±0.20 abc	8.29±0.14 bc	8.54±0.03 e	8.56±0.24 a
CK	6.09±0.14 efg	7.29±0.12 d	7.56±0.07 d	8.66±0.01 e	8.27±0.19 abc

表9 不同配方施肥各生育期苹果果实N含量的变化

Table 9 Changes in fruit N content at different growth stages of apple under different formula fertilization treatments g/kg

处理 Treatment	幼果期 Young fruit stage	膨大期 Expansion stage	着色期 Coloring stage	成熟期 Maturity stage
T1	8.04±0.15 abcde	6.83±0.73 bc	7.15±0.56 ef	5.05±0.82 def
T2	8.12±0.45 abcd	6.51±0.34 bc	7.06±0.51 ef	4.90±0.62 ef
T3	8.77±0.61 a	8.16±0.27 a	8.32±0.31 bcd	6.70±0.48 abc
T4	8.69±0.37 ab	6.87±0.29 bc	7.52±0.85 def	6.64±0.48 abc
T5	8.24±0.61 abcd	7.39±0.65 ab	7.46±0.08 def	6.70±0.68 abc
T6	8.32±0.93 abcd	6.32±0.64 bc	6.79±0.73 f	6.12±0.34 bcd
T7	8.35±0.35 abcd	5.93±0.58 c	9.89±0.58 a	4.62±0.76 f
T8	7.03±0.25 ef	6.25±0.25 bc	7.67±0.57 def	6.21±0.78 bc
T9	7.66±0.31 bcdef	7.40±0.57 ab	9.05±0.89 ab	6.91±0.78 ab
T10	7.43±0.59 def	6.83±0.27 bc	8.46±0.31 bcd	5.50±0.28 cdef
T11	6.91±0.45 f	6.57±0.79 bc	8.84±0.17 abc	5.52±0.68 cdef
T12	6.92±0.34 f	6.48±0.41 bc	8.14±0.59 bcde	6.29±0.87 abc
T13	7.57±0.44 cdef	6.60±0.65 bc	7.98±0.95 bcde	7.45±0.45 a
T14	7.67±0.44 bcdef	5.86±0.34 c	7.75±0.61 cdef	6.32±0.52 abc
T15	7.31±0.41 def	6.26±0.76 bc	7.56±0.75 def	6.84±0.26 ab
T16	8.50±0.89 abc	7.18±0.98 ab	8.90±0.21 ab	5.83±0.70 bcde
CK	7.88±0.80 abcdef	6.32±0.74 bc	8.16±0.47 bcde	4.97±0.60 def

2.2.2 磷 表10表明,不同配方施肥处理苹果果实P含量随生育期的推进总体上呈先下降后上升趋势。T3处理果实P含量在幼果期达最低值,T5、T11、T13、T14、T15和T16处理在着色期达最低值,其余处理果实P含量在膨大期达最低值;T4、T7处理果实P含量在幼果期达最大值,其余处理果实P含量均在成熟期达最大值。成熟期果实P含量为1.28 g/kg(T7处理)~1.62 g/kg(T15处理),其中T15、T14、T11处理果实P含量较高,分别较CK处理增加8.59%,3.43%和3.07%,但相互间均无显著差异。

2.2.3 钾 由表11可见,不同配方施肥处理苹果果实K含量随生育期的推进总体呈上升趋势。各处理果实K含量均以幼果期最低,T12、T16处理果实K含量在着色期达最大值,T13处理果实K含量在膨大期达最大值,其余处理果实K含量均在成熟期达最大值。成熟期时T15、T10、T9处理果实K含量

显著高于CK处理,分别较CK处理增长9.35%,　　9.10%和5.38%。

表10　不同配方施肥各生育期苹果果实P含量的变化

Table 10　Changes in fruit P content at different growth stages of apple under different formula fertilization treatments　g/kg

处理 Treatment	幼果期 Young fruit stage	膨大期 Expansion stage	着色期 Coloring stage	成熟期 Maturity stage
T1	1.29±0.14 abcd	0.95±0.03 bc	1.08±0.04 abcd	1.47±0.03 abc
T2	1.35±0.07 abcd	0.85±0.11 c	1.26±0.11 ab	1.50±0.20 ab
T3	1.19±0.11 d	1.24±0.18 ab	1.30±0.03 a	1.51±0.08 ab
T4	1.45±0.21 ab	1.08±0.26 bc	1.10±0.30 abcd	1.43±0.05 abc
T5	1.35±0.10 abcd	1.01±0.05 bc	0.81±0.05 cde	1.44±0.07 abc
T6	1.23±0.14 cd	0.92±0.04 c	1.08±0.19 abcd	1.43±0.14 abc
T7	1.39±0.08 abc	0.80±0.02 c	0.88±0.07 cde	1.28±0.09 c
T8	1.32±0.07 abcd	0.88±0.16 c	0.92±0.04 cde	1.39±0.09 bc
T9	1.25±0.08 bcd	0.81±0.09 c	0.95±0.11 bcde	1.51±0.19 ab
T10	1.40±0.06 abc	0.95±0.21 bc	1.05±0.10 abcd	1.50±0.10 ab
T11	1.38±0.07 abcd	1.08±0.11 bc	1.00±0.09 abcd	1.53±0.07 ab
T12	1.43±0.08 ab	0.98±0.14 bc	1.12±0.43 abcd	1.52±0.04 ab
T13	1.36±0.04 abcd	0.87±0.25 c	0.81±0.09 de	1.51±0.09 ab
T14	1.45±0.08 a	0.95±0.28 bc	0.65±0.03 e	1.54±0.19 ab
T15	1.45±0.06 a	1.01±0.16 bc	0.85±0.03 cde	1.62±0.17 a
T16	1.35±0.10 abcd	1.37±0.18 a	1.14±0.27 abc	1.51±0.02 ab
CK	1.41±0.06 abc	0.85±0.06 c	1.01±0.11 abcd	1.49±0.02 abc

表11　不同配方施肥各生育期苹果果实K含量的变化

Table 11　Changes in fruit K content at different growth stages of apple under different formula fertilization treatments　g/kg

处理 Treatment	幼果期 Young fruit stage	膨大期 Expansion stage	着色期 Coloring stage	成熟期 Maturity stage
T1	7.98±0.73 g	11.82±0.27 gh	13.20±0.42 f	14.34±0.09 fg
T2	9.73±0.13 ef	12.33±0.64 defgh	13.09±0.31 f	13.76±0.38 gh
T3	9.29±0.09 f	13.64±0.40 abc	14.85±0.46 bcd	16.35±0.10 bc
T4	10.26±0.10 de	12.25±0.36 efgh	14.48±0.57 cd	15.61±0.36 de
T5	10.27±0.45 de	12.84±0.98 cdefg	14.40±0.16 cd	16.45±0.35 bc
T6	8.35±0.05 g	11.68±0.47 h	12.35±0.13 g	13.26±0.29 h
T7	9.83±0.78 ef	12.02±0.26 fgh	14.21±0.13 de	14.31±0.17 fg
T8	10.16±0.36 de	12.71±0.87 cdefgh	13.48±0.47 f	15.55±0.06 de
T9	10.76±0.62 cd	13.27±0.43 bcde	15.61±0.67 ab	16.99±0.27 ab
T10	11.64±0.36 ab	12.94±0.40 cdef	15.73±0.63 a	17.59±0.35 a
T11	12.39±0.32 a	14.31±0.10 ab	15.02±0.55 abc	15.96±0.60 cde
T12	10.68±0.34 cd	13.69±0.85 abc	14.63±0.06 cd	14.46±0.22 f
T13	10.75±0.04 cd	14.71±0.20 a	13.33±0.20 f	13.68±0.90 gh
T14	11.40±0.13 bc	13.36±0.37 bcd	13.54±0.30 ef	15.39±0.21 e
T15	11.97±0.37 ab	14.33±0.58 ab	14.97±0.18 bcd	17.63±0.52 a
T16	12.19±0.30 a	14.11±0.79 ab	14.87±0.64 bcd	14.57±0.13 f
CK	11.78±0.63 ab	13.77±0.82 abc	13.35±0.36 f	16.13±0.31 cd

2.2.4　钙　表12显示,不同配方施肥处理苹果果实Ca含量随生育期的推进总体呈上升趋势。其中T13、T15和CK处理果实Ca含量在膨大期达最低值,T16处理果实Ca含量在着色期达最低值,其余处理果实Ca含量均在幼果期达最低值;T4处理果实Ca含量在膨大期达最大值,其余处理果实Ca含量均在成熟期达最大值。成熟期T11处理果实的Ca含量显著高于T4、T5和T9处理,其余处理之间及其与T4、T5和T9处理差异均不显著,其中T4、T9、T5、T3、T8和T13处理果实Ca含量均低于CK处理,分别较CK处理降低6.43%,3.93%,2.93%、1.79%,1.28%和0.63%。

2.2.5　镁　由表13可知,不同配方施肥处理苹果果实的Mg含量随生育期的推进总体呈下降趋势。各处理果实Mg含量均在成熟期达最低值;T2、T3、T4处理果实Mg含量在膨大期达最大值,其余处理果实Mg含量均在幼果期达最大值。成熟期时,果实Mg含量较高的为T11、T10、T2和T3处理,分别

为5.01,4.84,4.82和4.79 g/kg,较CK处理分别增加5.16%,1.58%,1.12%和0.45%。

表12 不同配方施肥各生育期苹果果实Ca含量变化

Table 12 Changes in fruit Ca content at different growth stages of apple under different formula fertilization treatments g/kg

处理 Treatment	幼果期 Young fruit stage	膨大期 Expansion stage	着色期 Coloring stage	成熟期 Maturity stage
T1	2.21±0.04 b	2.40±0.34 c	2.75±0.14 abcd	3.12±0.16 ab
T2	2.14±0.05 b	2.54±0.24 bc	2.64±0.26 abcd	3.32±0.13 ab
T3	2.33±0.09 b	2.80±0.23 ab	2.59±0.08 bcd	3.06±0.15 ab
T4	2.17±0.06 b	2.95±0.10 a	2.47±0.19 cd	2.92±0.05 b
T5	2.12±0.07 b	2.61±0.22 bc	2.70±0.23 abcd	3.03±0.05 b
T6	2.24±0.17 b	2.32±0.07 c	2.50±0.06 cd	3.30±0.22 ab
T7	2.26±0.06 b	2.56±0.24 bc	2.45±0.12 d	3.37±0.51 ab
T8	2.23±0.02 b	2.60±0.15 bc	2.95±0.29 ab	3.08±0.29 ab
T9	2.13±0.09 b	2.44±0.05 bc	2.67±0.27 abcd	2.99±0.09 b
T10	2.13±0.06 b	2.38±0.17 c	2.64±0.20 abcd	3.28±0.26 ab
T11	2.11±0.05 b	2.44±0.18 bc	2.87±0.08 abcd	3.54±0.19 a
T12	2.29±0.26 b	2.45±0.10 bc	3.03±0.44 a	3.12±0.21 ab
T13	2.66±0.11 a	2.46±0.17 bc	2.75±0.14 abcd	3.10±0.22 ab
T14	2.60±0.05 a	2.67±0.15 abc	2.84±0.11 abcd	3.15±0.24 ab
T15	2.54±0.12 a	2.43±0.10 c	2.89±0.28 abc	3.15±0.51 ab
T16	2.68±0.20 a	2.61±0.22 bc	2.54±0.09 bcd	3.35±0.09 ab
CK	2.57±0.19 a	2.53±0.18 bc	2.72±0.31 abcd	3.12±0.20 ab

表13 不同配方施肥各生育期苹果果实Mg含量变化

Table 13 Changes in fruit Mg content at different growth stages of apple under different formula fertilization treatments g/kg

处理 Treatment	幼果期 Young fruit stage	膨大期 Expansion stage	着色期 Coloring stage	成熟期 Maturity stage
T1	7.00±0.26 e	6.37±0.13 e	5.53±0.03 ab	4.74±0.10 abc
T2	7.00±0.09 e	7.11±0.25 bc	5.74±0.49 ab	4.82±0.06 ab
T3	7.37±0.17 abcde	7.47±0.13 a	5.87±0.04 ab	4.79±0.18 ab
T4	7.21±0.26 cde	7.40±0.04 ab	4.87±1.33 abc	4.18±0.13 bc
T5	7.06±0.16 e	6.65±0.24 de	6.02±0.11 a	4.34±0.39 abc
T6	7.10±0.14 e	5.96±0.27 f	5.59±0.23 ab	4.72±0.26 abc
T7	7.24±0.29 bcde	6.52±0.25 e	4.37±0.30 c	4.21±0.68 bc
T8	7.37±0.02 abcde	6.55±0.21 e	5.85±0.25 ab	4.46±0.56 abc
T9	7.17±0.15 de	6.45±0.06 e	4.74±0.85 bc	4.37±0.26 abc
T10	7.37±0.08 abcde	6.32±0.13 e	5.10±1.42 abc	4.84±0.45 ab
T11	7.27±0.12 abcde	6.53±0.21 e	5.89±0.02 ab	5.01±0.14 a
T12	7.22±0.47 cde	6.52±0.14 e	5.83±0.26 ab	4.34±0.26 abc
T13	7.61±0.08 ab	6.41±0.13 e	5.48±0.06 ab	4.26±0.26 bc
T14	7.53±0.07 abcd	6.66±0.17 de	5.60±0.28 ab	4.03±0.60 c
T15	7.56±0.10 abc	6.47±0.08 e	5.58±0.31 ab	4.32±0.65 abc
T16	7.64±0.16 a	6.89±0.07 cd	4.88±0.82 abc	4.65±0.06 abc
CK	7.64±0.18 a	6.46±0.25 e	5.74±0.17 ab	4.76±0.06 ab

2.3 不同配方施肥处理对苹果产量的影响

对不同配方施肥处理'秦脆'果实的外形参数及单果质量和单株产量进行测定与分析,结果(表14)表明,各处理果实纵径、果实横径、平均单果质量和平均单株产量间存在一定差异。其中T8、T7和T13果实纵径较大,分别为68.90,68.38和68.34 mm;T12、T7和T6处理的果实横径较大,分别为84.14,83.00和82.64 mm;T1处理的果实纵径和果实横径均为最小,分别为62.41和77.48 mm。T13处理的平均单果质量最大,为255.80 g,显著高于T1、T2、T3、T4和CK处理,其中T1处理平均单果质量最小,为199.50 g;T13、T7和T6处理的平均单株产量较高,且均显著高于CK处理,较CK分别增产69.34%,59.43%和49.13%。

2.4 不同配方施肥处理苹果叶片和果实大、中量元素含量及产量指标的相关性分析

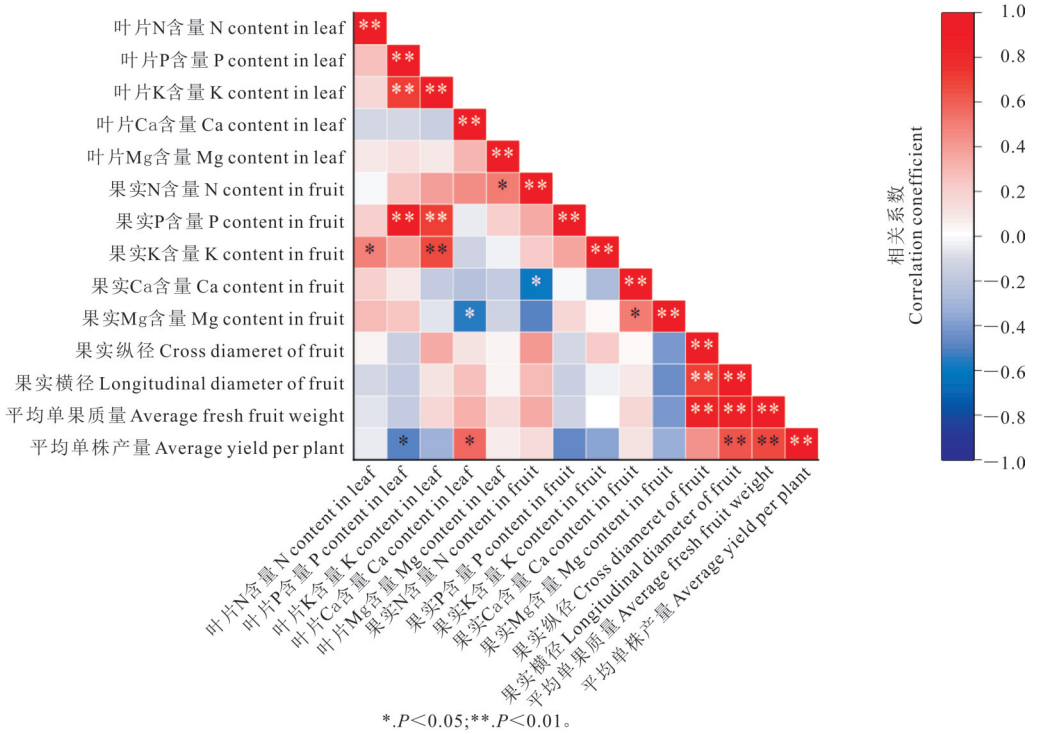
对不同配方施肥处理'秦脆'苹果叶片和果实的大、中量元素含量进行相关性分析,结果(图1)表

明，叶片N含量与果实K含量呈显著正相关（$P<0.05$）。叶片P含量与叶片K含量、果实P含量呈极显著正相关（$P<0.01$），与平均单株产量呈显著负相关。叶片K含量与果实P含量和果实K含量呈极显著正相关。叶片Ca含量与果实Mg含量呈显著负相关，与平均单株产量呈显著正相关。叶片Mg含量与果实N含量呈显著正相关。果实N含量与果实Ca含量呈显著负相关。果实Ca含量与果实Mg含量呈显著正相关。果实纵径与果实横径、平均单果质量呈极显著正相关，果实横径、平均单果质量、单株产量间两两呈极显著正相关。

表 14　不同配方施肥处理苹果果实及产量比较

Table 14　Comparison of apple fruit quality and yield under different formula fertilization treatments

处理 Treatment	果实纵径/mm Longitudinal diameter of fruit	果实横径/mm Transverse diameter of fruit	平均单果质量/g Average single fruit weight	平均单株产量/kg Average yield per plant
T1	62.41±4.02 d	77.48±4.06 e	199.50±29.57 f	12.70±0.58 g
T2	63.21±4.60 cd	78.33±4.24 de	206.17±28.69 ef	16.91±1.83 defg
T3	66.50±4.46 abc	78.86±4.31 cde	229.21±25.42 bcde	18.57±1.83 cdef
T4	64.67±4.50 bcd	79.06±3.07 cde	216.41±22.45 def	16.95±1.44 defg
T5	67.78±4.06 ab	82.34±3.82 abc	236.42±29.89 abcd	21.28±2.26 bcde
T6	64.37±3.83 bcd	82.64±3.82 abc	241.20±24.95 abcd	23.88±1.93 abc
T7	68.38±3.10 ab	83.00±2.62 ab	255.27±27.70 ab	25.53±1.59 ab
T8	68.90±4.61 a	82.03±3.94 abcd	239.77±27.21 abcd	18.46±2.54 cdef
T9	67.04±3.73 abc	81.13±3.05 abcde	232.49±29.07 abcd	15.34±1.23 fg
T10	66.92±2.20 abc	82.50±3.80 abc	240.06±20.08 abcd	21.85±1.87 abcd
T11	66.87±2.46 abc	80.30±3.71 bcde	232.39±25.62 abcde	15.26±0.82 fg
T12	67.15±1.95 abc	84.14±2.90 a	245.17±21.79 abc	17.98±2.86 defg
T13	68.34±3.98 ab	82.58±3.92 abc	255.80±26.43 a	27.11±2.22 a
T14	67.09±4.48 abc	81.97±3.37 abcd	239.34±26.41 abcd	21.62±1.93 bcd
T15	66.88±3.63 abc	81.50±4.84 abcd	241.51±25.19 abcd	13.44±0.37 fg
T16	68.15±3.18 ab	80.95±2.83 abcde	241.53±25.81 abcd	16.75±2.44 defg
CK	64.36±5.26 bcd	79.51±3.34 bcde	224.45±28.31 cdef	16.01±2.34 efg



*.$P<0.05$;**.$P<0.01$。

图 1　苹果叶片和果实大、中量元素含量间的相关性分析

Fig. 1　Correlation analysis between macronutrient and micronutrient contents in apple leaves and fruits

2.5 不同配方施肥处理对苹果叶片和果实大、中量元素及产量影响的评价

对不同配方施肥处理'秦脆'苹果成熟期叶片和果实的大、中量元素及产量指标进行主成分分析,结果(表15)共筛选出5个特征值大于1的主成分(PC1~PC5),其特征值分别为4.125,3.491,2.002,1.306和1.080,方差贡献率分别为29.467%,24.937%,14.302%,9.330%和7.718%,累计方差贡献率为85.754%,表明这5个主成分基本能反映原始因子85.754%的信息。

第1主成分包括平均单果质量、平均单株产量,第2主成分包括叶片K含量、果实P含量,第3主成分包括果实Ca含量、果实纵径,第4主成分包括叶片Mg含量、果实Ca含量,第5主成分包括叶片N含量、果实K含量。以各个主成分对应的方差贡献率为权重,得到综合评价函数:$F=29.467\%\times F1+24.937\%\times F2+14.302\%\times F3+9.330\%\times F4+7.718\%\times F5$,式中$F1$~$F5$分别表示5个主成分的得分,$F$为不同施肥处理的综合得分值。计算各样本的综合得分值并排序如表16所示,其中综合得分排序前3的为T13、T14和T15处理。

表15 苹果叶片和果实大、中量元素含量及产量指标的主成分载荷矩阵

Table 15 Principal component loading matrix of macronutrient and micronutrient contents in apple leaves and fruits and yield indices

性状 Trait	主成分 Principal component				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
叶片N含量 N content in leaf	−0.260	0.287	0.379	0.124	0.776
叶片P含量 P content in leaf	−0.516	0.725	0.091	0.315	−0.248
叶片K含量 K content in leaf	−0.165	0.871	0.197	−0.191	−0.194
叶片Ca含量 Ca content in leaf	0.586	0.124	−0.429	0.367	0.144
叶片Mg含量 Mg content in leaf	0.179	0.347	−0.353	0.549	0.241
果实N含量 N content in fruit	0.414	0.706	−0.411	0.077	0.063
果实P含量 P content in fruit	−0.450	0.770	−0.003	0.315	−0.253
果实K含量 K content in fruit	−0.228	0.667	0.174	−0.455	0.388
果实Ca含量 Ca content in fruit	−0.141	−0.310	0.762	0.457	−0.109
果实Mg含量 Mg content in fruit	−0.690	−0.222	0.409	0.272	0.098
果实纵径 Longitudinal diameter of fruit	0.685	0.386	0.441	−0.232	−0.007
果实横径 Transverse diameter of fruit	0.798	0.201	0.390	−0.005	−0.159
平均单果质量 Average single fruit weight	0.829	0.267	0.433	0.076	−0.100
平均单株产量 Average yield per plant	0.822	−0.218	0.145	0.254	0.158
特征值 Eigen value	4.125	3.491	2.002	1.306	1.080
方差贡献率/% Contribution rate	29.467	24.937	14.302	9.330	7.718
累计方差贡献率/% Cumulative contribution rate	29.467	54.404	68.706	78.036	85.754

表16 不同配方施肥苹果叶片和果实大、中量元素含量及产量指标的综合得分及排序

Table 16 Comprehensive scores and ranking of macronutrient and micronutrient contents in apple leaves and fruits and yield indices under different formula fertilization treatments

处理 Treatment	$F1$	$F2$	$F3$	$F4$	$F5$	F	排序 Rank	处理 Treatment	$F1$	$F2$	$F3$	$F4$	$F5$	F	排序 Rank
T1	−3.50	−2.31	−1.48	−0.65	−0.85	−1.95	17	T10	−0.54	1.17	2.49	−0.43	1.00	0.52	5
T2	−2.66	−2.42	−0.68	1.16	−0.72	−1.43	16	T11	−2.54	0.46	2.92	0.75	0.23	−0.13	13
T3	−1.06	0.56	−0.29	−0.14	1.62	−0.10	12	T12	0.79	0.48	0.69	−0.89	−2.05	0.21	7
T4	−0.18	−0.11	−2.78	−0.61	1.38	−0.43	14	T13	3.52	1.16	−1.06	1.29	−1.48	1.18	1
T5	1.53	0.75	−0.46	−0.47	1.51	0.65	4	T14	1.13	1.56	−0.11	0.52	0.52	0.79	2
T6	1.54	−2.12	−0.51	2.73	0.71	0.16	8	T15	−0.32	3.59	−0.60	0.42	−0.57	0.71	3
T7	3.56	−4.00	1.52	−1.18	−0.01	0.16	9	T16	−0.38	0.64	1.15	1.05	−0.49	0.27	6
T8	1.47	−0.81	0.15	−1.59	0.08	0.11	10	CK	−2.13	−0.45	−0.09	−0.51	−0.23	−0.82	15
T9	−0.20	1.87	−0.86	−1.45	−0.64	0.10	11								

3 讨 论

N、P、K、Ca、Mg元素是苹果生长发育过程中的必需元素,在不同生育期,叶片和果实矿质元素的累积变化规律各不相同,这与苹果不同生育期的生理需求及养分吸收特性密切相关。叶片和果实矿

质元素不仅受到土壤供给量和树体贮存量的影响，还受到各器官生长发育消耗的影响[25-26]。本研究发现，滴灌条件下不同配方施肥处理‘秦脆’苹果叶片N、P、K含量的变化在苹果生长发育过程中表现出一定的差异，但总体呈下降趋势，这与樊红柱等[27]的研究结论相似，可能是苹果生长发育后期果实需要消耗较多的养分，而根系未及时将养分输送给叶片，使叶片N、P、K含量出现下降。叶片Ca元素总体呈M型变化，Ca元素在叶片内不易移动，因此变化幅度略微平缓，这与青柚叶片矿质元素变化的研究结论[28]相似。Mg元素是叶片叶绿素的重要组成部分，在果树光合作用中有重要作用[29]。本研究中，‘秦脆’苹果叶片的Mg元素含量总体呈先上升后下降趋势，前期Mg含量有所增加可能与叶片快速伸展有关。

果实生长发育期是矿质元素被大量吸收利用的关键时期，通过各生育期元素含量变化可以直接反映果实在各生长发育阶段对矿质元素的需求[30-31]。对滴灌条件下不同配方施肥‘秦脆’果实矿质元素含量变化的研究发现，果实N含量总体呈“下降－上升－下降”趋势，因幼果期细胞分裂旺盛需合成大量含氮物质[32]，所以该时期果实N含量较高；在果实膨大期，为避免抑制其他矿质元素的吸收，果实N含量降低，但在着色期有所回升；成熟期是果实品质形成的关键时期，此时果实着色期积累的N含量开始供给品质形成，导致果实N含量下降。果实P含量在各生育期变化差异较大，可能与维持营养平衡而进行不同代谢途径有关[33]。K对果实糖分积累、酸度调节和营养物质含量的提高具有重要影响，而许多果树的生理失调症与Ca密切相关[34]。整个生育期中，不同配方施肥处理苹果果实的K、Ca含量不断累积且总体呈上升趋势，表明二者在果实发育过程中具有持续积累的特性，反映了果实对K、Ca的旺盛需求。在果实膨大期，果实中的K含量逐渐高于叶片，说明果实生长发育过程中K元素的需求量较大，这是因为K元素对果实膨大、着色、成熟等具有决定性作用[35-36]。Mg元素有助于调节韧皮部中同化产物的合成与转化，对果实发育和成熟具有关键影响[37]。果实发育过程中，Mg元素不断向果实转运以满足品质形成的需求，导致果实Mg含量在整个生育期均呈下降趋势。

相关性研究揭示了元素间存在的拮抗与协同作用。本研究中，叶片K含量与果实P、K含量呈极显著正相关，说明钾营养的改善有助于促进P、K向果实的转运与积累。叶片Ca含量与果实Mg含量呈显著负相关，暗示了Ca^{2+}与Mg^{2+}在吸收位点上可能存在竞争性抑制；而叶片Ca含量与平均单株产量呈显著正相关，说明钙营养对产量提升具有积极作用。果实N含量的增高会导致果实Ca含量的降低，又通过促进钾向果实运输使K含量高于Ca含量，加剧果实Ca含量的缺乏，增加果实患病风险。果实内部Ca含量与Mg含量呈显著正相关，进一步说明二者在果实中的积累具有一定协同性，但Ca与N之间则表现为显著负相关，反映出果实内矿质元素的积累存在复杂的平衡关系。因此，在水肥管理时应注意控制N、P、K的施入量，避免因N、P过量而抑制Ca、Mg的吸收与转运，同时及时补充Ca、Mg肥，协调各元素间的平衡，使果实优质高产并有效防控苦痘病。

施肥量和灌溉方式影响果树对养分的吸收利用，从而影响果实的产量[38]。本研究结果表明，合理的配方施肥可以提高果实单果质量和果实纵横径，达到提高果实产量的效果。本研究中T13处理的产量最高，但果实Ca含量低于CK处理，而T11处理的果实Ca含量最高，表明施肥配方需平衡元素间的关系，避免单一元素过高或缺失造成营养失衡。对叶片、果实元素和产量指标进行主成分分析并计算综合得分，结果表明综合得分最高的为T13处理（N 360 kg/hm^2，P_2O_5 0 kg/hm^2，K_2O 360 kg/hm^2，CaO 49 kg/hm^2，MgO 15 kg/hm^2），说明T13处理为本试验条件下提高‘秦脆’苹果叶片、果实矿质元素含量和产量的最佳施肥处理。

4　结　论

滴灌水肥一体化条件下，在新疆伊宁‘秦脆’苹果产区，配方施肥能显著调控‘秦脆’苹果叶片和果实中的N、P、K、Ca、Mg含量及其动态积累过程。各元素间存在显著的交互作用，钾营养的改善有助于促进P、K向果实的转运；而Ca、Mg之间及N、Ca之间则存在拮抗作用。在本试验条件下，T13处理（N 360，P_2O_5 0，K_2O 360，CaO 49，MgO 15 kg/hm^2）可获得最高产量，并促进苹果叶片Ca含量和果实N含量的累积。

[参考文献]

[1]　陈学森，韩明玉，苏桂林，等．当今世界苹果产业发展趋势及我国苹果高效发展意见[J]．果树学报，2010，27(4)：598-604.

CHEN X S, HAN M Y, SU G L, et al. 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.

[2] 张攀. 苹果苗木冷库贮藏技术优化及其生理响应机制研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2025.
ZHANG P. Study on the optimization of cold storage technology of apple seedlings and its physiological response mechanism[D]. Yangling, Shanxi: Northwest A&F University, 2025.

[3] 秦伟,郭艺鹏,陈波浪,等. 同NPK配比施肥处理对新疆红富士苹果糖分积累的影响[J]. 经济林研究, 2012, 30(4): 41-46.
QIN W, GUO Y P, CHEN B L, et al. Effects of different proportions of N, P and K fertilizers on sugar accumulation in Xinjiang Fuji apple[J]. Non-wood Forest Research, 2012, 30(4): 41-46.

[4] 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.

[5] 张天皓,陶茹,樊森淼,等. 基于水肥一体化的苹果减肥施肥技术优化[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(12): 97-106.
ZHANG T H, TAO R, FAN M M, et al. Optimization of integrated fertilization of water and fertilizer based on increasing production and efficiency of apple[J]. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed), 2021, 49(12): 97-106.

[6] 张青,栗方亮,孔庆波,等. 不同减量施肥模式对蜜柚产量、品质及经济效益的影响[J]. 果树学报, 2021, 38(3): 361-371.
ZHANG Q, LI F L, KONG Q B, et al. Effect of different reduced fertigation modes on the yield, quality and economic benefits of honey pomelo[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(3): 361-371.

[7] YAN S C, WU Y, FAN J L, et al. Effects of water and fertilizer management on grain filling characteristics, grain weight and productivity of drip-fertigated winter wheat[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 983-995.

[8] 张杰,韩建,孙卓玲,等. 滴灌施肥对红地球葡萄产量、品质及土体氮磷钾分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(3): 470-480.
ZHANG J, HAN J, SUN Z L, et al. Effects of drip fertigation on yield, quality of red globe grape and distribution of soil NPK[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(3): 470-480.

[9] 周小杰,吕廷波,邢猛,等. 水肥耦合对南疆滴灌骏枣生长生理及产量的影响[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(5): 195-205.
ZHOU X J, LÜ T B, XING M, et al. Effects of water and fertilizer coupling on growth physiology and yield of Jun jujube under drip irrigation in Southern Xinjiang[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(5): 195-205.

[10] 王连君,王程翰,乔建磊,等. 膜下滴灌水肥耦合对葡萄生长发育、产量和品质的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 113-119.
WANG L J, WANG C H, QIAO J L, et al. Effects of water and fertilizer coupling on growth, yield and quality of grape under drip irrigation with film mulching[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 113-119.

[11] 张计峰,耿庆龙,曹文超,等. 氮肥品种与施氮量对滴灌红枣光合特性和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(7): 92-98.
ZHANG J F, GENG Q L, CAO W C, et al. Effects of type and amount of nitrogen fertilizer on photosynthetic characteristics and yield of jujube under drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 47(6): 113-1192020, 36(7): 92-98.

[12] 陈昱辛,贾悦,崔宁博,等. 滴灌水肥一体化对柑橘叶片光合、产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(S2): 50-58.
CHEN Y X, JIA Y, CUI N B, et al. Effects of integrated management of water and fertilizer on citrus photosynthesis, yield and water use efficiency[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(S2): 50-58.

[13] 张建锴,曹红霞,潘小燕,等. 基于产量和品质的陕北苹果滴灌水量和追施氮量优化研究[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 143-152.
ZHANG J K, CAO H X, PAN X Y, et al. Optimization of drip irrigation and topdressing nitrogen based on apple yield and quality in Northern Shaanxi[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 143-152.

[14] 刘迎雪,范书田,杨义明,等. 不同施肥量对"北冰红"葡萄营养元素积累及产量、品质的影响[J]. 北方园艺, 2023(7): 46-51.
LIU Y X, FAN S T, YANG Y M, et al. Effects of different fertilization amounts on nutrient elements accumulation, yield and quality of 'Beibinghong' grape[J]. Northern Horticulture, 2023(7): 46-51.

[15] 罗利华,胡田田,陈绍民,等. 水肥一体化模式对苹果叶片矿质元素含量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(8): 101-110, 119.
LUO L H, HU T T, CHEN S M, et al. Effects of fertigation mode on contents of mineral elements in apple leaves[J]. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed), 2021, 49(8): 101-110, 119.

[16] LJAVIĆ D, RADOVIĆ M, KULINA M, et al. Influence of cultivar and fertilization treatment on the yield and leaf nutrients content of apple (*Malus domestica* Borkh.)[J]. Heliyon, 2023, 6(9): e16321.

[17] 刘艳武,郭向红,杨凯,等. 滴灌条件下不同磷钾肥配比对苹果品质的影响及综合评价[J]. 节水灌溉, 2020(6): 33-37.
LIU Y W, GUO X H, YANG K, et al. Effects of different ratios of phosphorus and potassium fertilizers on apple quality under drip irrigation and comprehensive evaluation[J]. Water Saving Irrigation, 2020(6): 33-37.

[18] 张东东，李琪，储宝华，等. 追施钾肥对苹果叶片光合作用、矿质营养及果实品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报（自然科学版），2023，51(4)：102-109.
ZHANG D D，LI Q，CHU B H，et al. Effects of topdressing potassium fertilizer on photosynthesis，mineral nutrition of apple leaves and fruit quality[J]. Journal of Northwest A&F University（Nat Sci Ed），2023，51(4)：102-109.

[19] 王乐幸，刘世红，魏静，等. 外源钙和硅对‘瑞阳’苹果钙含量和果实品质的影响[J]. 西北农业学报，2024，33(2)：235-244.
WANG L X，LIU S H，WEI J，et al. Effects of exogenous calcium and silicon on calcium content and fruit quality of ‘Ruiyang’ apple[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica，2024，33(2)：235-244.

[20] 王朝，张朋朋，管增辉，等. 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 C，ZHANG P P，GUAN Z H，et al. Effects of spraying different calcium fertilizers on physiological and biochemical characteristics and fruit quality of ‘Honeycrisp’ apple[J]. Journal of Northwest A&F University（Nat Sci Ed），2024，52(7)：73-80.

[21] 张媛，冯天宇，蒋皓，等. 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 A，FENG T Y，JIANG H，et al. Effects of zinc fertilizer application on quality，photosynthetic characteristics and economic benefits of apple[J]. Journal of Northwest A&F University（Nat Sci Ed），2024，52(2)：97-103.

[22] 中华人民共和国农业农村部. 测土配方施肥技术规程：NY/T 2911—2025[S]. 北京：中国农业出版社，2025：14-16.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Technical specification for soil testing and formula fertilization：NY/T 2911—2025[S]. Beijing：China Agriculture Press，2025：14-16.

[23] 张力飞，陈杏禹，杨云洪，等. 镁肥在红富士苹果上的应用[J]. 果树资源学报，2022，3(5)：38-40.
ZHANG L F，CHEN X Y，YANG Y H，et al. Study on the role of magnesium fertilizer in Fuji apple production[J]. Journal of Fruit Resources，2022，3(5)：38-40.

[24] 杨兰兰，卢凯政，齐国辉，等. 提高苹果品质并抑制苦痘病发生的钙肥最佳施用量和次数[J]. 植物营养与肥料学报，2020，26(4)：765-772.
YANG L L，LU K Z，QI G H，et al. Optimum application amount and times of calcium nitrate for better fruit quality and lower incidence of apple bitter pit[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2020，26(4)：765-772.

[25] 王小龙，邵学东，张正文，等. 酿酒葡萄‘梅乐’植株和土壤营养水平与果实品质的关联性分析[J]. 园艺学报，2024，51(11)：2575-2593.
WANG X L，SHAO X D，ZHANG Z W，et al. Correlation analysis of fruit quality and the nutrient level in plant and soil of wine grape ‘Merlot’[J]. Acta Horticulturae Sinica，2024，51(11)：2575-2593.

[26] 张伟清，林媚，平新亮，等. 柑橘果实矿质元素、活性物质含量特征及综合评价[J]. 果树学报，2024，41(8)：1592-1603.
ZHANG W Q，LIN M，PING X L，et al. A comprehensive evaluation of mineral elements and active substances in *Citrus* fruits[J]. Journal of Fruit Science，2024，41(8)：1592-1603.

[27] 樊红柱，同延安，吕世华. 苹果树体不同器官元素含量与累积量季节性变化研究[J]. 西南农业学报，2007，20(6)：1202-1206.
FAN H Z，TONG Y A，LÜ S H. Study on seasonal variation of nutrient elements concentration and accumulation in different organs of apple tree[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences，2007，20(6)：1202-1206.

[28] 陈鸿洁，张建春. 青柚叶片营养元素含量季节变化及其相关性研究[J]. 中国农学通报，2024，40(34)：83-88.
CHEN H J，ZHANG J C. Study on seasonal variation and nutrient elements correlations in green pomelo leaves[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2024，40(34)：83-88.

[29] 韩艳婷，杨国顺，石雪晖，等. 不同镁营养水平对红地球葡萄叶绿体结构及光合响应的影响[J]. 果树学报，2011，28(4)：603-609.
HAN Y T，YANG G S，SHI X H，et al. Effects of different Magnesium concentrations on chloroplast ultrastructure and photosynthetic response of *Vitis vinifera* cv. Red Globe[J]. Journal of Fruit Science，2011，28(4)：603-609.

[30] 王小玲，刘卓荣，幸学俊，等. 赣南脐橙生长发育期果实和叶片矿质营养与重金属元素的动态变化及相关性分析[J]. 西北农林科技大学学报（自然科学版），2019，47(11)：77-86.
WANG X L，LIU Z R，XING X J，et al. Dynamics changes and correlation of mineral nutrition and heavy metal elements in fruits and leaves of navel orange during growth and development in Southern Jiangxi[J]. Journal of Northwest A&F University（Nat Sci Ed），2019，47(11)：77-86.

[31] 彭玲，宋爱云，董林水，等. 冬枣园主要矿质元素含量变化及其与果实品质的关系[J]. 云南农业大学学报（自然科学），2022，37(3)：515-522.
PENG L，SONG A Y，DONG L S，et al. Changes of major mineral element contents and its relationship with fruit quality in *Zizyphus jujuba* ‘Dongzao’ orchard[J]. Journal of Yunnan Agricultural University（Natural Science），2022，37(3)：515-522.

[32] 马晓丽，向苹苇，袁项成，等. 青脆李不同枝类在幼果期和成熟期的矿质元素含量比较[J]. 江苏农业科学，2021，49(1)：126-130.
MA X L，XIANG P W，YUAN X C，et al. Contents in different branches of green crispy plum in young fruit stage and mature stage[J]. Jiangsu Agricultural Sciences，2021，49(1)：126-130.

（下转第 112 页）