磷酸二氢钾与硼酸配施对番茄生长、果实品质与转色的影响

黄鑫燕[1,2] 匡家灵[3] 陈月舞[3] 徐 若[3] 杨紫绚[2] 吴圣楠[2] 张一晨[1] 赵伟丽[4]

（[1]云南云天化股份有限公司，650118，云南昆明；[2]云南大学农学院，650500，云南昆明；
[3]云南云天化以化磷业研究技术有限公司，650228，云南昆明；[4]云南云天化农资连锁有限公司，650217，云南昆明）

摘 要 以“红矮生番茄”为试验材料，设置磷酸二氢钾（CK）、磷酸二氢钾+0.5%硼酸（T1）、磷酸二氢钾+1.0%硼酸（T2）、磷酸二氢钾+1.5%硼酸（T3）4 个处理，研究磷酸二氢钾与硼酸配施对番茄幼果期、绿熟期、转色期和红熟期 4 个时期的农艺性状、果实品质（可溶性糖、可滴定酸、维生素 C 和果实硬度）和转色指标（类胡萝卜素、番茄红素、叶绿素）的营养协同调控效应的影响。结果表明，磷酸二氢钾与硼酸配施对促进番茄植株生长、改善果实品质、促进果实转色的作用效果显著。番茄在各个生长阶段对硼酸的需求存在显著差异，不同硼酸浓度对番茄的生长效果有不同的影响。幼果期和转色期，T2 处理效果最好，主要提升了茎粗、维生素 C、叶绿素及可溶性糖等指标；而绿熟期和红熟期，T3 处理效果最佳，有助于改善果实硬度、可滴定酸、类胡萝卜素和番茄红素等指标。研究证实，动态调整硼酸浓度与磷酸二氢钾配施策略，可精准匹配番茄阶段生理需求，优化品质，促进转色。

关键词 磷酸二氢钾；硼酸；番茄；生长；品质与转色；营养协同

番茄（*Solanum lycopersicum* L.）作为全球重要的经济作物之一，其外观、风味、营养成分和产量直接关系农业经济效益和消费者健康需求[1]。近年来，随着设施栽培的普及与集约化生产的发展，番茄果实品质不稳定和转色不均等问题日益凸显，成为制约产业升级的关键因素。植物营养调控作为改善作物生理代谢的重要途径之一，磷、钾与硼元素的协同作用备受关注。磷酸二氢钾（KH_2PO_4）作为优质的磷钾复合水溶肥，在促进植物生长发育[2]、改善品质[3]以及增强抗逆性[4-5]等方面均表现出显著效果，特别是在花果期的施用，能显著促进果实着色，并有效提升作物的整体品质[6]；而硼元素则参与细胞壁形成、花粉管伸长及糖代谢等过程，对果实发育与着色具有潜在调控作用[7]。然而，现有研究多聚焦于单一元素的作用效应，关于磷钾与硼配施对番茄植株整体生长、果实品质形成及转色过程的协同增效效应尚未完全明确，特别是其在番茄不同生育时期（幼果期、绿熟期、转色期、红熟期）的作用缺乏系统性的研究。考虑到番茄各生长阶段对硼的需求存在差异，本文旨在通过研究 KH_2PO_4 与硼酸配施对番茄各生长阶段的影响，探究其在促进植株生长、果实发育、营养积累、色素合成及转色过程中的作用。运用方差分析和主成分分析，对不同硼酸添加量处理下番茄幼果期、绿熟期、转色期和红熟期的果实品质进行综合评价，以期筛选出适合番茄不同生长阶段的硼酸添加量，揭示营养协同调控的生理机制，为番茄优质高效栽培及精准施肥技术提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试番茄品种为“红矮生番茄”；供试土壤为云南红壤；试验所用肥料均由云南云天化以化磷业研究技术有限公司提供。

1.2 试验设计

试验于 2024 年 7-12 月在云南省昆明市云天化绿色农业科创中心的温室内进行。采用单因素随机区组试验设计，设 4 个处理：对照组为磷酸二氢钾（CK），处理组包括磷酸二氢钾+0.5%硼酸（T1）、磷酸二氢钾+1.0%硼酸（T2）、磷酸二氢钾+1.5%硼酸（T3），每个处理 6 次重复。

采用盆栽法移栽种植，挑选颗粒饱满、大小一致的番茄种子播于 50 穴苗盘中，常规栽培管理。4 叶 1 心期选取长势、生长状态一致的幼苗，用流动

作者简介：黄鑫燕，主要从事磷酸二氢钾肥料增值创制研究，E-mail：754606325@qq.com
陈月舞为通信作者，主要从事农作物营养及品质研究，E-mail：yuewu.chen@yprtec.com
基金项目：国家重点研发计划（2023YFD1700203）
收稿日期：2025-06-12；修回日期：2025-08-08；网络出版日期：2025-08-13

水清洗根系，定植到花盆中，红壤∶椰糠=1∶1。当番茄幼苗成活且稳定生长后，进行施肥处理，所有处理幼苗期至开花坐果期均统一根部浇施 19-19-19 大量元素水溶平衡肥，幼果期至成熟期根部浇施尿素+各组处理肥料，种植密度 37 500 株/hm^2，番茄施肥量为平衡肥 37.5 kg/hm^2、尿素 19.5 kg/hm^2、磷酸二氢钾 88.2 kg/hm^2，7 d 施肥 1 次，2 d 浇水 1 次，每株番茄浇灌 500 mL，直到采收为止。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植株指标 用钢卷尺测量从植株基部至顶端叶尖的距离，即株高；用游标卡尺测量地上部分第 1 节的直径，即茎粗；采用 SPAD-502Plus 叶绿素含量测定仪（便携式）测定相对叶绿素含量（SPAD 值）。

1.3.2 果实指标 采用蒽酮－浓硫酸比色法[8]测定果实可溶性糖含量；采用北京索莱宝科技有限公司生产的检测试剂盒分别测定果实可滴定酸、类胡萝卜素和叶绿素含量；采用 2,6-二氯靛酚滴定法测定维生素 C（V_c）含量；采用紫外可见分光光度计法[9]测定番茄红素含量；采用 GY-4 型果实硬度计测定果实硬度。

1.4 数据处理

用 Excel 整理试验数据，用 IBM SPSS Statistics 26 进行数据统计、单因素方差分析和主成分分析，用 Origin 2024 作图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对番茄植株农艺性状的影响

分析不同处理下各时期番茄株高、茎粗和叶片 SPAD 值的变化（表 1），发现幼果期、绿熟期、转色期和红熟期不同施肥处理间的叶片 SPAD 值差异均不显著。幼果期，茎粗和株高各处理间差异不显著，但随着果实成熟，番茄植株的茎粗和株高逐渐增大，T2 处理显著增加了茎粗，与 CK 相比，幼果期、绿熟期、转色期和红熟期 T2 处理下的茎粗分别增加了 8.37%、13.36%、13.71%和 9.88%。T3 处理显著增加了株高，绿熟期和红熟期 T3 处理显著高于 CK，高于 T1 和 T2 处理但不显著，转色期，T3 处理显著高于 CK 和 T1 处理，高于 T2 但不显著。

2.2 不同处理对番茄果实品质的影响

随着果实成熟，番茄的可溶性糖含量不断积累，呈上升趋势（图 1a）。幼果期，各处理与 CK 的可溶性糖含量均无显著性差异。绿熟期和转色期，各处理与 CK 间差异显著，但各处理间差异不显著。红熟期，T1 和 T3 处理显著高于 CK，T2 与 CK、T1 和 T3 处理均没有显著差异，但高于 CK，对比 CK，T1、T2 和 T3 处理的可溶性糖含量分别增加了 30.57%、13.24%和 20.10%。

表 1 不同处理下各时期番茄株高、茎粗和叶片 SPAD 值的变化

Table 1 Changes in plant height, stem diameter and leaf SPAD values of tomatoes at different stages under different treatments

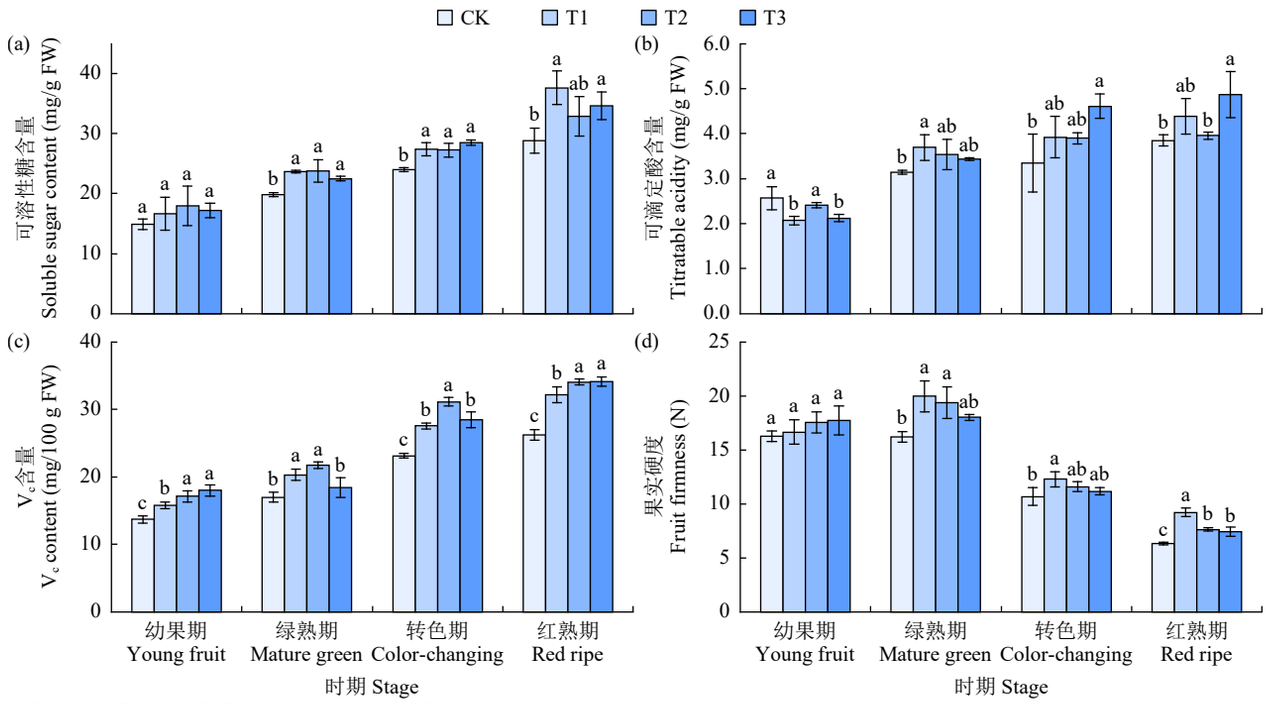
时期 Stage	处理 Treatment	SPAD 值 SPAD value	茎粗 Stem diameter (mm)	株高 Plant height (cm)
幼果期 Young fruit	CK	50.37±1.04a	7.17±0.25a	21.00±0.87a
	T1	49.18±0.03a	7.97±0.45a	20.17±1.53a
	T2	50.37±1.64a	7.77±0.64a	21.83±1.76a
	T3	50.07±0.96a	7.08±0.71a	22.33±0.76a
绿熟期 Mature green	CK	47.43±1.87a	7.71±0.39b	24.17±0.29b
	T1	48.07±1.41a	8.05±0.40ab	25.17±1.04ab
	T2	48.57±0.15a	8.74±0.59a	24.67±1.53ab
	T3	48.48±2.34a	7.83±0.56ab	27.33±2.25a
转色期 Color-changing	CK	49.02±3.02a	7.95±0.05b	24.67±0.76b
	T1	49.40±1.74a	8.48±0.53ab	25.33±0.76b
	T2	48.83±0.51a	9.04±0.43a	26.33±1.44ab
	T3	47.50±0.53a	8.60±0.22ab	28.50±2.60a
红熟期 Red ripe	CK	48.67±1.83a	8.40±0.41b	25.50±1.32b
	T1	48.50±1.13a	8.62±0.09ab	26.83±1.76ab
	T2	48.62±2.58a	9.23±0.55a	27.83±1.89ab
	T3	46.83±2.64a	9.02±0.17ab	30.17±2.57a

各时期同列数值后不同小写字母表示不同处理间差异显著（$P < 0.05$）。

Different lowercase letters after the values within the same columns at each stage indicate significant differences among different treatments at the $P < 0.05$ level.

各处理可滴定酸含量随着番茄果实的成熟均逐渐增加（图 1b）。CK 处理的可滴定酸含量在幼果期显著高于 T1 和 T3 处理，高于 T2 处理但不显著，与 CK 相比，在不同硼酸添加量处理下，绿熟期、转色期和红熟期番茄可滴定酸含量均有不同程度的提高。绿熟期，T1 处理可滴定酸含量最高，为 3.69 mg/g FW，与 CK 差异显著，T3 处理显著提高了番茄果实转色期和红熟期的可滴定酸含量。

各处理 V_c 含量随着番茄果实的成熟均逐渐增加（图 1c）。与 CK 相比，除绿熟期的 T3 处理外，其他不同硼酸添加量处理均显著增加了番茄各时期的 V_c 含量，幼果期，T3 处理下的 V_c 含量最高，较 CK 提高了 21.20%，其次是 T2。绿熟期，T1 和 T2 处理显著高于 CK 和 T3 处理。转色期，T2 处理显著高于 CK、T1 和 T3，且 CK 与 T1 和 T3 处理差异显著，红熟期，各处理对 V_c 的影响为 T3＞T2



不同小写字母表示差异显著（$P < 0.05$）。下同。

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

图 1　不同处理对番茄各时期果实可溶性糖、可滴定酸、V_c 含量及果实硬度的影响

Fig.1　Effects of different treatments on soluble sugar, titratable acid, V_c content and fruit firmness of tomato at various stages

＞T1＞CK。

果实成熟过程中，果实硬度呈先上升后下降趋势（图 1d）。幼果期，各处理与 CK 的果实硬度均没有显著性差异，但对比 CK，T1、T2 和 T3 处理的果实硬度分别增加了 2.21%、7.86%和 8.79%。绿熟期、转色期和红熟期各处理对果实硬度的影响相同，均表现为 T1＞T2＞T3＞CK。

2.3　不同处理对番茄果实转色指标的影响

2.3.1　*类胡萝卜素和番茄红素*　各处理的番茄果实中类胡萝卜素含量随着番茄果实的成熟均逐渐增加（图 2a）。绿熟期，果实类胡萝卜素含量在 6.40~8.69 μg/g FW，T1 处理的类胡萝卜素含量显著高于 CK 处理，T2 和 T3 高于 CK 但差异不显著。转色期，类胡萝卜素含量与绿熟期相比有明显的提高，在 18.98~30.16 μg/g FW，T1 和 T2 处理显著高于 CK。红熟期，所有处理的番茄红素含量均达到最大值，在 32.93~66.24 μg/g FW，T1 显著高于其他处理，T2 显著高于 T3 和 CK，CK 和 T3 之间差异不显著，但 T3 处理的类胡萝卜素含量高于 CK。

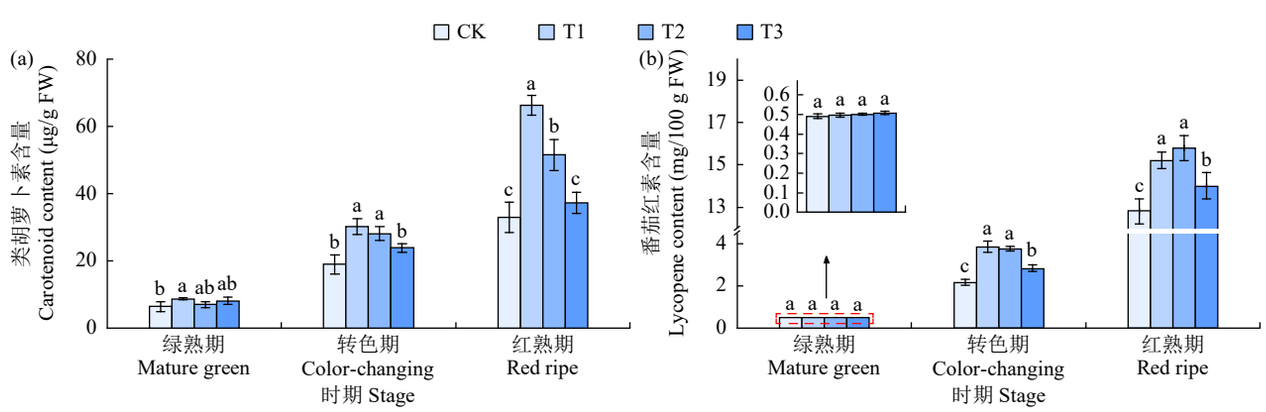


图 2　不同处理对番茄各时期果实类胡萝卜素和番茄红素的影响

Fig.2　Effects of different treatments on carotenoids and lycopene in tomato fruit at various stages

随着番茄果实成熟，番茄红素含量不断积累，呈上升趋势（图 2b）。不同硼酸添加量处理和 CK

处理在绿熟期的番茄红素含量均没有显著性差异，而且绿熟期番茄果实中番茄红素含量很低，在 0.00~0.50 mg/100g FW。转色期和红熟期，T1 和 T2 处理显著高于 T3 和 CK，T3 处理显著高于 CK，T1 和 T2 处理之间差异不显著，但转色期 T1＞T2，而红熟期 T2＞T1。转色期，与 CK 相比，T1、T2 和 T3 处理的番茄红素含量分别增加了 78.60%、72.09%和 30.23%。红熟期，所有处理的番茄红素含量达到最高值，T2 处理最高，为 15.76 mg/100 g FW。

2.3.2 果实叶绿素 如图 3 所示，随着果实的成熟，果实叶绿素呈下降趋势。幼果期是番茄果实叶绿素含量最高的时期。

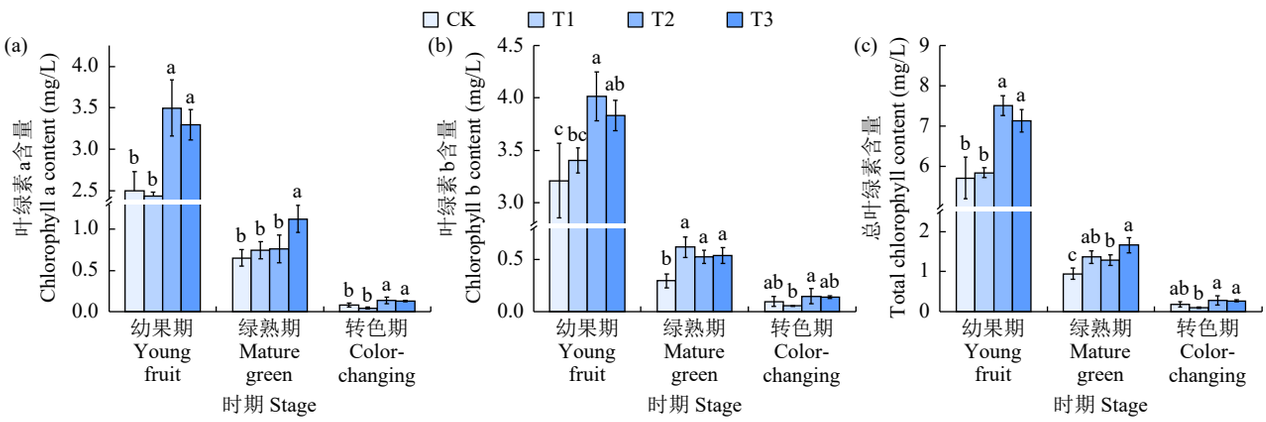


图 3 不同处理对番茄各时期果实叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量的影响

Fig.3 Effects of different treatments on chlorophyll a, chlorophyll b and total chlorophyll contents of tomato fruits at various stages

幼果期，T2、T3 处理的叶绿素 a 和总叶绿素均显著高于 CK 处理。T2、T3 处理的叶绿素 a 分别高于 CK 处理 40.00%和 32.00%，T2、T3 处理的总叶绿素分别高于 CK 处理 31.52%和 24.87%。T2 处理的叶绿素 b 显著高于 T1 和 CK 处理，T3 处理显著高于 CK 处理，T1 处理高于 CK 处理但不显著。

绿熟期，叶绿素含量与幼果期相比有明显下降，T3 处理的叶绿素 a 显著高于其他处理，其他处理间差异不显著。所有处理的叶绿素 b 均显著高于 CK 处理，各处理对叶绿素 b 的影响为 T1＞T3＞T2＞CK。T3 处理的总叶绿素显著高于 T2 和 CK 处理，T1 处理与 T2 和 T3 处理差异不显著，T1、T2 和 T3 处理显著高于 CK 处理 30.15%、35.79%和 74.74%。

转色期，所有处理的叶绿素含量都很低，叶绿素 a 含量在 0.046~0.140 mg/L，叶绿素 b 含量在 0.06~0.15 mg/L，总叶绿素含量在 0.10~0.29 mg/L，处理对果实叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素的影响为 T2＞T3＞CK＞T1。

2.4 各个时期番茄生长、品质与转色指标的协同影响分析

2.4.1 幼果期 为了准确评估不同硼酸添加量对番茄幼果期质量的影响，并避免单一指标评价带来的偏差，采用 SPSS 对 10 个幼果期质量评价指标进行主成分分析（表 2），得到特征值大于 1 的 3 个主成分，累积方差贡献率 79.18%，可以反映指标的大部分信息。第 1 主成分主要综合了 V_c、果实叶绿素 a、果实叶绿素 b 和总叶绿素等，反映了番茄幼果期的营养积累和光合作用能力；第 2 主成分主要是可滴定酸，反映了番茄幼果期风味的酸味特征；第 3 主成分主要综合了茎粗和可溶性糖，反映了番茄幼果期的生长活力与风味甜味特征。

将主成分荷载矩阵中各项数据除以对应主成分特征值的平方根（表 2），得到 3 个主成分各指标对应的特征向量，以特征向量为权重和各指标原始数据标准化以后的数值相乘后相加，得到 3 个主成分的得分公式：

Y_1=0.096X_1–0.040X_2+0.233X_3+0.285X_4+0.095X_5+0.429X_6+0.267X_7+0.433X_8+0.435X_9+0.461X_{10}；

Y_2=−0.494X_1+0.354X_2–0.477X_3+0.078X_4+0.617X_5+0.090X_6+0.064X_7+0.002X_8+0.054X_9+0.026X_{10}；

Y_3=0.309X_1+0.563X_2+0.087X_3+0.584X_4–0.064X_5+0.087X_6–0.332X_7–0.294X_8+0.114X_9–0.128X_{10}。

以 3 个主成分所对应的相对贡献率为权重，构建综合评价模型：

Y=0.546Y_1+0.286Y_2+0.167Y_3。

表 2　幼果期 3 个主成分的成分载荷矩阵、特征值、方差贡献率及累积方差贡献率

Table 2　Component loading matrix, eigenvalues, variance contributions and cumulative variance contribution rate of the three principal components at the young fruit stage

项目 Item	载荷系数 Load coefficient		
	主成分 1 PC1	主成分 2 PC2	主成分 3 PC3
X_1	0.199	−0.743	0.356
X_2	−0.083	0.533	0.648
X_3	0.485	−0.719	0.100
X_4	0.594	0.117	0.673
X_5	0.198	0.929	−0.074
X_6	0.892	0.135	0.100
X_7	0.556	0.096	−0.382
X_8	0.902	0.003	−0.339
X_9	0.905	0.081	0.131
X_{10}	0.958	0.039	−0.147
初始特征值 Initial eigenvalue	4.327	2.266	1.325
方差贡献率 Variance contribution rate (%)	43.27	22.66	13.25
累积方差贡献率 Cumulative variance contribution rate (%)	43.27	65.93	79.18

X_1：SPAD 值，X_2：茎粗，X_3：株高，X_4：可溶性糖，X_5：可滴定酸，X_6：维生素 C，X_7：硬度，X_8：叶绿素 a，X_9：叶绿素 b，X_{10}：总叶绿素。下同。

X_1: SPAD value, X_2: stem thickness, X_3: plant height, X_4: soluble sugar, X_5: titratable acid, X_6: vitamin C, X_7: hardness, X_8: chlorophyll a, X_9: chlorophyll b, X_{10}: total chlorophyll. The same below.

根据得分公式和评价模型得到幼果期不同施肥处理综合得分排序（表 3），通过计算综合得分，4 个处理得分排名依次是 T2＞T3＞T1＞CK。

表 3　幼果期不同施肥处理综合得分排序

Table 3　Ranking of the composite scores of different fertilizer treatments at the young fruit stage

处理 Treatment	主成分 1 PC1		主成分 2 PC2	
	得分 Score	排序 Ranking	得分 Score	排序 Ranking
CK	−2.36	4	−1.23	4
T1	−1.43	3	1.49	1
T2	2.07	1	0.21	2
T3	1.72	2	−0.47	3
处理 Treatment	主成分 3 PC3		综合 Comprehensive	
	得分 Score	排序 Ranking	得分 Score	排序 Ranking
CK	−0.24	3	−1.68	4
T1	0.49	1	−0.27	3
T2	0.25	2	1.23	1
T3	−0.50	4	0.72	2

2.4.2　绿熟期　为了准确评估不同硼酸添加量对番茄绿熟期质量的影响，并避免单一指标评价带来的偏差，对 12 个绿熟期质量评价指标进行主成分分析（表 4），得到特征值大于 1 的 4 个主成分，累积方差贡献率 84.60%，可以反映全部指标中足够的信息。第 1 主成分主要综合了果实硬度、可溶性糖、可滴定酸、V_c、果实叶绿素 b 和果实总叶绿素，反映了番茄绿熟期的果实发育情况和营养品质；第 2 主成分主要综合了株高和果实叶绿素 a，反映了番茄绿熟期的植株生长状况和光合作用能力；第 3 主成分主要是茎粗；第 4 主成分主要综合了 V_c 和果实叶绿素 b，反映了番茄绿熟期的抗氧化能力。

表 4　绿熟期 3 个主成分的成分载荷矩阵、特征值、方差贡献率及累积方差贡献率

Table 4　Component loading matrices, eigenvalues, variance contributions and cumulative variance contribution rate for the three principal components at green ripening stage

项目 Item	载荷系数 Load coefficient			
	主成分 1 PC1	主成分 2 PC2	主成分 3 PC3	主成分 4 PC4
X_1	0.504	0.356	0.160	−0.244
X_2	0.245	−0.661	0.628	0.177
X_3	0.504	0.769	0.328	−0.136
X_4	0.802	−0.424	0.240	−0.033
X_5	0.719	−0.238	−0.581	0.076
X_6	0.744	−0.285	0.011	0.392
X_7	0.731	−0.419	−0.080	0.157
X_8	0.376	0.849	0.138	0.323
X_9	0.924	−0.120	0.149	−0.118
X_{10}	0.765	0.496	0.115	0.076
X_{11}	0.586	−0.160	−0.127	−0.774
X_{12}	0.559	0.235	−0.586	0.172
初始特征值 Initial eigenvalue	5.052	2.711	1.342	1.047
方差贡献率 Variance contribution rate (%)	42.10	22.59	11.18	8.73
累积方差贡献率 Cumulative variance contribution rate (%)	42.10	64.69	75.87	84.60

X_{11}：类胡萝卜素，X_{12}：番茄红素。下同。

X_{11}: carotenoids, X_{12}: lycopene. The same below.

将主成分荷载矩阵中各项数据除以对应主成分特征值的平方根（表 4），得到 4 个主成分各指标对应的特征向量，以特征向量为权重和各指标原始数据标准化以后的数值相乘后相加，得到 4 个主成分的得分公式：

Y_1=0.224X_1+0.109X_2+0.224X_3+0.331X_4+0.357X_5+0.32X_6+0.325X_7+0.167X_8+0.411X_9+0.340X_{10}+0.261X_{11}+0.249X_{12}；

Y_2=0.216X_1–0.402X_2+0.467X_3–0.173X_4–0.258X_5–

$0.145X_6$–$0.255X_7$+$0.516X_8$–$0.073X_9$+$0.301X_{10}$–$0.097X_{11}$+$0.143X_{12}$；

Y_3=$0.138X_1$+$0.542X_2$+$0.283X_3$–$0.009X_4$+$0.207X_5$–$0.501X_6$+$0.069X_7$+$0.119X_8$+$0.129X_9$+$0.099X_{10}$–$0.109X_{11}$–$0.506X_{12}$；

Y_4=−$0.238X_1$+$0.173X_2$–$0.133X_3$+$0.383X_4$–$0.033X_5$+$0.075X_6$+$0.154X_7$+$0.315X_8$–$0.115X_9$+$0.074X_{10}$–$0.757X_{11}$+$0.168X_{12}$。

以 4 个主成分所对应的相对贡献率为权重，构建综合评价模型：

Y=$0.498Y_1$+$0.267Y_2$+$0.132Y_3$+$0.103Y_4$。

根据得分公式和评价模型得到绿熟期不同施肥处理综合得分排序（表 5），依次为 T3＞T2＞T1＞CK。

表 5 绿熟期不同施肥处理综合得分排序

Table 5 Ranking of composite scores of different fertilizer treatments at green ripening stage

处理 Treatment	主成分 1 PC1		主成分 2 PC2		主成分 3 PC3	
	得分 Score	排序 Ranking	得分 Score	排序 Ranking	得分 Score	排序 Ranking
CK	−3.49	4	0.35	2	−0.03	3
T1	1.50	1	−0.95	3	−0.44	4
T2	1.04	2	−1.11	4	0.41	2
T3	0.95	3	1.71	1	0.07	1

处理 Treatment	主成分 4 PC4		综合 Comprehensive	
	得分 Score	排序 Ranking	得分 Score	排序 Ranking
CK	−0.12	2	−1.66	4
T1	−0.55	4	0.38	3
T2	1.05	1	0.39	2
T3	−0.38	3	0.90	1

2.4.3 转色期 为了准确评估不同硼酸添加量对番茄转色期质量的影响，并避免单一指标评价带来的偏差，对 12 个转色期质量评价指标进行主成分分析（表 6），得到特征值大于 1 的 3 个主成分，累积方差贡献率 80.02%，可以反映指标的大部分信息。第 1 主成分主要综合了茎粗、可溶性糖和 V_c，反映了番茄转色期的生长状态、营养积累和品质提升变化；第 2 主成分主要综合了果实硬度和番茄红素，反映了番茄转色期的的成熟进程、质地变化和色素积累情况；第 3 主成分主要是果实叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素，主要反映了番茄转色期果实的绿色转化过程。

将主成分荷载矩阵中各项数据除以对应主成分特征值的平方根（表 6），得到 3 个主成分各指标对应的特征向量，以特征向量为权重和各指标原始数据标准化以后的数值相乘后相加，得到 3 个主成分的得分公式：

表 6 转色期 3 个主成分的成分载荷矩阵、特征值、方差贡献率及累积方差贡献率

Table 6 Component loading matrices, eigenvalues, variance contributions and cumulative variance contribution rate of the three principal components at the color-changing stage

项目 Item	载荷系数 Load coefficient		
	主成分 1 PC1	主成分 2 PC2	主成分 3 PC3
X_1	−0.296	0.366	0.098
X_2	0.739	0.225	0.004
X_3	0.490	−0.306	−0.718
X_4	0.844	0.176	−0.167
X_5	0.585	−0.205	−0.593
X_6	0.927	0.182	0.056
X_7	0.344	0.812	0.095
X_8	0.629	−0.691	0.286
X_9	0.554	−0.726	0.337
X_{10}	0.600	−0.725	0.320
X_{11}	0.648	0.675	0.221
X_{12}	0.634	0.707	0.126
初始特征值 Initial eigenvalue	4.793	3.53	1.28
方差贡献率 Variance contribution rate (%)	39.94	29.41	10.66
累积方差贡献率 Cumulative variance contribution rate (%)	39.94	69.36	80.02

Y_1=−$0.135X_1$+$0.338X_2$+$0.224X_3$+$0.386X_4$+$0.267X_5$+$0.424X_6$+$0.157X_7$+$0.288X_8$+$0.253X_9$+$0.274X_{10}$+$0.296X_{11}$+$0.290X_{12}$；

Y_2=$0.195X_1$+$0.120X_2$–$0.163X_3$+$0.094X_4$–$0.109X_5$+$0.097X_6$+$0.432X_7$–$0.368X_8$–$0.386X_9$–$0.386X_{10}$+$0.359X_{11}$+$0.377X_{12}$；

Y_3=$0.087X_1$+$0.003X_2$–$0.635X_3$–$0.148X_4$–$0.524X_5$+$0.049X_6$+$0.084X_7$+$0.253X_8$+$0.298X_9$+$0.283X_{10}$+$0.196X_{11}$+$0.112X_{12}$。

以 3 个主成分所对应的相对贡献率为权重，构建综合评价模型：

Y=$0.499Y_1$+$0.368Y_2$+$0.133Y_3$。

根据得分公式和评价模型得到转色期不同施肥处理综合得分排序（表 7），依次为 T2＞T1＞T3＞CK。

2.4.4 红熟期 为了准确评估不同硼酸添加量对番茄红熟期质量的影响，并避免单一指标评价带来的偏差，对 9 个红熟期质量评价指标进行主成分分

表 7　转色期不同施肥处理综合得分排序

Table 7　Ranking of composite scores of different fertilizer treatments at color-changing stage

处理 Treatment	主成分 1 PC1		主成分 2 PC2		主成分 3 PC3		综合 Comprehensive	
	得分 Score	排序 Ranking	得分 Score	排序 Ranking	得分 Score	排序 Ranking	得分 Score	排序 Ranking
CK	−3.16	4	−1.21	3	0.48	2	−1.96	4
T1	−0.25	3	2.64	1	−0.27	3	0.81	2
T2	1.97	1	0.03	2	0.88	1	1.11	1
T3	1.44	2	−1.46	4	−1.08	4	0.04	3

析（表 8），得到特征值大于 1 的 3 个主成分，累积方差贡献率 80.30%，可以反映指标的大部分信息。第 1 主成分主要综合了 V_c、果实硬度、类胡萝卜素和番茄红素，反映了番茄红熟期的成熟状态；第 2 主成分主要综合了茎粗和株高，反映了番茄红熟期的生长发育状况；第 3 主成分主要是可滴定酸，反映了番茄红熟期风味的酸度特征。

表 8　红熟期 3 个主成分的成分载荷矩阵、特征值、方差贡献率及累积方差贡献率

Table 8　Component loading matrices, eigenvalues, variance contributions and cumulative variance contribution rate of the three principal components at red ripening stage

项目 Item	载荷系数 Load coefficient		
	主成分 1 PC1	主成分 2 PC2	主成分 3 PC3
X_1	−0.092	−0.529	0.440
X_2	0.422	0.684	−0.416
X_3	0.456	0.657	0.416
X_4	0.840	−0.440	0.042
X_5	0.810	−0.209	0.136
X_6	0.478	0.367	0.713
X_7	0.828	0.316	−0.108
X_{11}	0.768	−0.599	−0.046
X_{12}	0.841	−0.090	−0.398
初始特征值 Initial eigenvalue	3.967	2.019	1.240
方差贡献率 Variance contribution rate (%)	44.08	22.44	13.78
累积方差贡献率 Cumulative variance contribution rate (%)	44.08	66.52	80.30

将主成分荷载矩阵中各项数据除以对应主成分特征值的平方根（表 8），得到 3 个主成分各指标对应的特征向量，以特征向量为权重和各指标原始数据标准化以后的数值相乘后相加，得到 3 个主成分的得分公式：

Y_1=−0.046X_1+0.212X_2+0.229X_3+0.422X_4+0.406X_5+0.240X_6+0.416X_7+0.386X_{11}+0.422X_{12}；

Y_2=−0.373X_1+0.482X_2+0.463X_3–0.309X_4–0.147X_5+0.259X_6+0.222X_7–0.422X_{11}–0.063X_{12}；

Y_3=0.395X_1–0.373X_2+0.374X_3+0.038X_4+0.122X_5+0.640X_6–0.097X_7–0.041X_{11}–0.358X_{12}。

以 3 个主成分所对应的相对贡献率为权重，构建综合评价模型：

Y=0.549Y_1+0.279Y_2+0.172Y_3。

根据得分公式和评价模型得到红熟期不同施肥处理综合得分排序（表 9），为 T3＞T1＞T2＞CK。

表 9　红熟期不同施肥处理综合得分排序

Table 9　Ranking of composite scores of different fertilizer treatments at red ripening stage

处理 Treatment	主成分 1 PC1		主成分 2 PC2		主成分 3 PC3		综合 Comprehensive	
	得分 Score	排序 Ranking	得分 Score	排序 Ranking	得分 Score	排序 Ranking	得分 Score	排序 Ranking
CK	−9.46	4	−1.36	3	0.20	3	−5.54	4
T1	5.23	1	−4.59	4	0.48	2	1.67	2
T2	2.51	2	0.66	2	−3.18	4	1.02	3
T3	1.72	3	5.29	1	2.51	1	2.85	1

3　讨论

3.1　磷酸二氢钾与硼酸配施对番茄生长、品质和转色进程的影响

硼是植物生长中必不可少的微量元素，参与细胞分裂、伸长及植物形态发育[10-11]。本研究发现，磷酸二氢钾与硼酸配施对番茄的生长、果实品质及转色产生了显著且多方面的积极影响，体现了二者的协同增效效应。促进植株生长方面，T2 和 T3 处理在番茄的各个生长阶段均显著增加了茎粗和株高。硼作为关键微量元素，尤其在细胞分裂和伸长旺盛的幼嫩组织中需求量大，其充足供应是基础。磷、钾元素的配合施用可能通过增强植株对生长调节物质的响应能力、优化能量代谢和物质运输，进一步放大了硼在促进细胞分裂与扩展方面的效应，从而共同加速了茎部增粗和株高生长。这与徐炜南[12]研究发现的施硼可以提高番茄植株的茎粗、株高和生物积累量，效果随浓度水平提高而提高的结果一致。然而，不同处理对各生长阶段番茄叶片 SPAD 值均未产生显著影响，这可能表明硼的施用在光合作用中的作用有限，或者施用的硼浓度未达到显著影响植物光合作用的阈值。因此，SPAD 值无显著变化是合理的，并符合万宇婷等[13]在灯盏花上增施硼酸对 SPAD 值影响较小的结论。

提升果实品质方面，磷钾硼配施显著优化了果

实的糖酸代谢与相关特性，绿熟期至红熟期，T1 处理可溶性糖含量最高，而从转色期开始，T3 处理可滴定酸含量最高，这与马路婷等[14]的研究一致。这一效果的产生可能与硼的生化作用有关，它通过优化植物内部的养分平衡，改善了果实的糖酸代谢。V_c 在果实中作为抗氧化剂，对果实的成熟过程有重要影响。低水平的 V_c 含量会延缓番茄果实的成熟。本研究中发现，V_c 含量较低的 T1 处理组果实硬度显著偏高，这一现象可能与 H_2O_2 信号缺失导致的细胞壁修饰延迟有关，这与 Steelheart 等[15]的研究结果相似。与此同时，Zhang 等[16]的研究也证明了施硼可以通过改变草莓果实中硼的形式和分布来增加果实的硬度，延长其保鲜期。

促进果实转色进程方面，本研究发现，磷钾硼配施显著影响了番茄果实转色进程，且 T1 处理表现突出。T1 处理不仅加速了叶绿素的降解，更显著促进了类胡萝卜素和番茄红素的积累，从而加快了果实由绿转红的进程。这与缪迪季等[17]研究发现适宜的硼肥能明显增加番茄红素含量结论一致。梁和等[18]研究表明，在胡柚上喷施适宜硼可以降低收获期果实果皮的叶绿素 a 和叶绿素 b 含量，增加了类胡萝卜素含量，与本试验结果相同。

3.2 各个时期番茄生长、品质与转色指标的协同调控效应

为了更加科学地评价番茄各生长阶段对磷酸二氢钾与硼酸的需求，本研究对幼果期、绿熟期、转色期和红熟期多个指标进行主成分分析和综合评价，结果表明，幼果期和转色期 T2 处理表现最佳，而绿熟期和红熟期则是 T3 处理效果最优，这一现象与硼在植物不同生理阶段的功能作用密切相关。硼是植物生长过程中不可缺少的微量元素，参与细胞壁合成、糖运输和植物生殖发育等过程。在幼果期，磷钾与硼配施有助于细胞分裂和果实膨大，因此适量的硼酸与磷钾配施可能更有利于促进果实的生长。在转色期，果实的糖分积累和色素合成变得尤为重要，此时适量的硼酸与磷钾配施可促进上述过程，但过量的硼酸与磷钾配施可能会抑制其他重要的代谢路径。因此，T2 处理可能在幼果期和转色期最为合适。而在绿熟期和红熟期，细胞壁的结构稳定性和抗氧化物质的合成变得更加关键，充足的硼酸与磷钾配施有助于该过程的顺利进行，因此 T3 处理可能更为适宜。综上所述，硼酸浓度的变化与番茄在不同生长阶段的生理需求密切相关，研究结果为动态施肥策略的制定提供了理论依据，合理调节硼酸浓度与磷钾配施可优化番茄的生长和发育，提高产量和品质。

4 结论

磷酸二氢钾与硼酸配施通过协同增效显著促进番茄生长及果实品质，且硼浓度需求因生育阶段而异。幼果期和转色期，T2 处理表现最佳，促进茎粗增大及 V_c、叶绿素及可溶性糖积累；绿熟期和红熟期，T3 处理更为适宜，提升果实硬度及可滴定酸、类胡萝卜素和番茄红素含量。磷酸二氢钾促进硼的吸收与运输，二者协同优化了番茄生长。

参考文献

[1] 李俊杰. 油菜素内酯调控番茄果实成熟的机理研究. 杭州：浙江大学，2021.
[2] Li J P，Li Z W，Li X Y，et al. Effects of spraying KH_2PO_4 on flag leaf physiological characteristics and grain yield and quality under heat stress during the filling period in winter wheat. Plants，2023，12(9)：1801.
[3] 赵蓉，袁梦，刘佳影，等. 不同磷酸二氢钾喷施量对水稻淀粉合成及相关基因的影响. 四川农业大学学报，2024，42(3)：506-514.
[4] Akram M S， Ashraf M. Exogenous application of potassium dihydrogen phosphate can alleviate the adverse effects of salt stress on sunflower. Journal of Plant Nutrition，2011，34(7)：1041-1057.
[5] Zafar F，Noreen Z，Shah A A，et al. Co-application of humic acid, potassium dihydrogen phosphate, and melatonin to ameliorate the effects of drought stress on barley (*Hordeum vulgare* L.). Journal of Soil Science and Plant Nutrition，2024，24(1)：618-634.
[6] Zhao T，Xie S，Zhang Z W. Effects of foliar-sprayed potassium dihydrogen phosphate on accumulation of flavonoids in cabernet sauvignon (*Vitis vinifera* L.). Journal of the Science of Food and Agriculture，2023，103(10)：4838-4849.
[7] Day S， Aasim M. Role of boron in growth and development of plant: deficiency and toxicity perspective//Aftab T, Hakeem K R. Plant micronutrients: deficiency and toxicity management. Cham：Springer International Publishing，2020：435-453.
[8] Buysse J，Merckx R. An improved colorimetric method to quantify sugar content of plant tissue. Journal of Experimental Botany，1993，44(267)：1627-1629.
[9] 许瑞瑞. 不同番茄品种中番茄红素的提取及含量测定. 潍坊学院学报，2014(2)：77-79，63.
[10] Shireen F，Nawaz M A，Chen C，et al. Boron: functions and approaches to enhance its availability in plants for sustainable agriculture. International Journal of Molecular Sciences，2018，19(7)：1856.
[11] Srivastava A，Thakur M，Pandey S，et al. Functions of boron in plant roots: current insights. South African Journal of Botany，2025，177：201-210.
[12] 徐炜南. 硼对番茄生长及果实风味品质的影响. 杨凌：西北农林科技大学，2018.
[13] 万宇婷，陈宇，鲁泽刚，等. 中微肥施用对灯盏花产量和品质的影响. 中药材，2020(3)：536-540.
[14] 马路婷，杨智鹏，魏喜喜，等. 叶面喷硼对灰枣不同形态硼含

量及枣果品质的影响. 经济林研究，2022，40(4)：1-11.
[15] Steelheart C，Alegre M L，Baldet P，et al. The effect of low ascorbic acid content on tomato fruit ripening. Planta，2020，252 (3)：36.
[16] Zhang L，Sun C G，Tian H Q，et al. Foliar spraying of boron prolongs preservation period of strawberry fruits by altering boron form and boron distribution in cell. Frontiers in Plant Science，2024，15：1457694.
[17] 缪迪季，徐龙水，徐卫红. 硼诱导下番茄红素代谢关键基因表达特征. 西南大学学报（自然科学版），2024，46(1)：31-46.
[18] 梁和，马国瑞，石伟勇，等. 硼钙营养对胡柚果实品质的影响. 广东微量元素科学，2001(7)：21-26.

Effects of Combined Application of Monopotassium Phosphate and Boric Acid on Growth, Fruit Quality, and Fruit Coloration of Tomato

Huang Xinyan[1,2], Kuang Jialing[3], Chen Yuewu[3], Xu Ruo[3], Yang Zixuan[2], Wu Shengnan[2], Zhang Yichen[1], Zhao Weili[4]

([1]Yunnan Yuntianhua Co., Ltd., Kunming 650118, Yunnan, China; [2] School of Agriculture, Yunnan University, Kunming 650500, Yunnan, China; [3]Yunnan Yuntianhua Yihua Phosphorus Industry Research and Technology Co., Ltd., Kunming 650228, Yunnan, China; [4]Yunnan Yuntianhua Agricultural Chain Co., Ltd., Kunming 650217, Yunnan, China)

Abstract　'Red Dwarf Tomato' was used as the test material, and four treatments were set up: monopotassium phosphate (CK), monopotassium phosphate + 0.5% boric acid (T1), monopotassium phosphate + 1.0% boric acid (T2), and monopotassium phosphate + 1.5% boric acid (T3). The effects of monopotassium phosphate and boric acid on agronomic traits, fruit quality (soluble sugars, titratable acidity, vitamin C, and fruit firmness), and the nutritional synergistic regulation mechanisms of color change (carotenoids, lycopene, chlorophyll) in tomato at the young fruit, green mature, color-changing, and red mature stages were studied. The results showed that the combined application of monopotassium phosphate and boric acid significantly promoted tomato plant growth, improved fruit quality, and facilitated fruit color development. There were significant differences in boron requirements across different growth stages of tomato, with varying effects of different boric acid concentrations on tomato growth. T2 treatment had the most optimal effect at the young fruit and color-changing stages, which increased stem diameter, vitamin C, chlorophyll and soluble sugar contents, while T3 treatment was most effective at the green mature and red mature stages, which improved fruit hardness, titratable acid, carotenoids, and lycopene. The study indicate that dynamically adjusting the boric acid concentration and monopotassium phosphate application strategy can precisely meet the physiological needs of tomatoes at different stages, optimize fruit quality, and enhance color change.

Key words　Monopotassium phosphate; Boric acid; Tomato; Growth; Quality and color-changing; Nutritional synergy