DOI: 10. 11686/cyxb2025426
http://cyxb. magtech. com. cn
刘新颖, 鉴晶晶, 赵琬璐, 等. 水杨酸和复合甲壳素对留兰香生长与营养品质的影响. 草业学报, 2026, 35(10): 180－191.
LIU Xin-ying, JIAN Jing-jing, ZHAO Wan-lu, *et al*. Effects of salicylic acid and complex chitin on the growth and nutritional quality of spearmint. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(10): 180－191.

水杨酸和复合甲壳素对留兰香生长与营养品质的影响

刘新颖[1], 鉴晶晶[1], 赵琬璐[1], 崔灿[1], 杨帆[1], 严俊鑫[1*], 何睦[2*]
(1. 东北林业大学园林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 山东大学威海校区, 山东 威海 264209)

摘要: 为探究水杨酸与复合甲壳素单独及联合施用对留兰香生长和营养品质的影响, 采用叶面喷施方式设置5个处理(对照组、乙醇溶剂组、300 mg·L^{-1}水杨酸、0.4%复合甲壳素、联合处理组), 处理60 d后测定植株生长、光合特性及营养品质相关指标。结果表明: 与对照组相比, 水杨酸和复合甲壳素单独处理均能显著促进留兰香的生长并改善营养品质, 而联合处理组的促进作用最为突出, 显著提高了留兰香生物量、根系指标和光合参数, 增强了氮、磷、钾养分的吸收效率, 同时提升了总糖、粗蛋白、粗脂肪、粗纤维基础营养成分以及总酚、总黄酮、抗坏血酸抗氧化物质的含量, 其中总糖、粗蛋白、粗脂肪和粗纤维含量较对照组分别提高了56.78%、26.77%、26.58%和38.24%。隶属函数分析显示, 各处理营养品质的综合评价排序为联合处理组＞复合甲壳素处理组＞水杨酸处理组＞对照组＞乙醇溶剂组。本研究可为利用水杨酸与复合甲壳素协同提升留兰香营养品质提供参考。

关键词: 留兰香; 水杨酸; 复合甲壳素; 联合处理; 营养品质

Effects of salicylic acid and complex chitin on the growth and nutritional quality of spearmint

LIU Xin-ying[1], JIAN Jing-jing[1], ZHAO Wan-lu[1], CUI Can[1], YANG Fan[1], YAN Jun-xin[1*], HE Mu[2*]
1. *College of Landscape Architecture, Northeast Forestry University, Harbin* 150040, *China*; 2. *Shandong University (weihai), Weihai* 264209, *China*

Abstract: In this study, we investigated the effects of salicylic acid and complex chitin as single and combined treatments on the growth and nutritional quality of spearmint (*Mentha spicata*). The experiment consisted of a control and four treatments: Ethanol, 300 mg·L^{-1} salicylic acid, 0.4% w/v complex chitin, and the combined treatment (300 mg·L^{-1} salicylic acid + 0.4% complex chitin). At 60 days after treatment, plant growth, photosynthetic characteristics, and nutritional quality indexes were determined. The results show that, compared with the control plants, the plants treated with salicylic acid and complex chitin showed significantly increased growth and nutritional quality. The combined treatment had the most significant effect, resulting in significantly increased biomass, root system indexes, and photosynthetic parameters; increased absorption efficiency of nitrogen, phosphorus, and potassium; and increased contents of basic nutritional components (total sugars, crude protein, crude fat, and crude fiber) and antioxidant substances (total phenols, total flavonoids, and ascorbic acid). Specifically, the contents of total sugars, crude protein, crude fat, and crude fiber were 56.78%, 26.77%, 26.58%, and 38.24% higher, respectively, in the combined treatment compared with the control. A membership

收稿日期: 2025-10-18; 改回日期: 2025-12-01
基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2024YFD150140204)资助。
作者简介: 刘新颖(2000－), 女, 山东烟台人, 在读硕士。E-mail: 853384540@nefu. edu. cn
*通信作者 Corresponding author. E-mail: yanjunxin@163. com; hemu@sdu. edu. cn

function analysis of multiple traits ranked the treatments, from highest nutritional quality of spearmint plants to lowest, as follows: combined treatment > complex chitin treatment > salicylic acid treatment > control > ethanol treatment. The results of this study provide a reference for synergistically improving the nutritional quality of spearmint using salicylic acid and complex chitin.

Key words: spearmint; salicylic acid; complex chitin; combined treatment; nutritional quality

留兰香(*Mentha spicata*)隶属唇形科薄荷属,是一种多年生草本植物,因其独特的清凉口感和香气而成为一种重要的食用资源[1],在全球广泛种植。其应用历史在中国民间由来已久,既可作为蔬菜直接食用也可作为天然调味剂广泛应用于食品工业[2]。留兰香的食用价值主要源于叶片中独特的化学物质[3]和丰富的营养成分,包括多种基础营养物质及酚类、黄酮类等次生代谢产物。因此通过栽培技术协同提升其产量与营养品质对于挖掘这一草类资源的高值化应用潜力具有重要意义。然而留兰香的种植产业正面临严峻挑战,一方面耕地资源的稀缺严重制约了其规模化生产[4],另一方面随着市场对天然绿色产品需求的激增留兰香的产量与品质亟需提升[5]。传统栽培技术已难以满足现代产业对留兰香高营养、高抗氧化绿色食用价值开发的需求,因此探索高效且可持续的栽培管理策略迫在眉睫。

近年来,外源植物生长调节剂的应用为植物生长性能改善与代谢产物积累提供了新方向。水杨酸(salicylic acid,SA)作为重要的内源信号分子在植物生长发育、逆境响应及次生代谢调控中发挥着关键作用。研究发现水杨酸不仅能够促进植株株高增长、生物量积累和提升叶绿素含量[6],还能通过激活苯丙烷代谢途径关键酶,诱导酚类抗氧化剂的合成[7]。此外水杨酸还可通过调控根系形态发育[8]和氮代谢效率[9]显著增强植物对养分的吸收与利用能力。甲壳素及其衍生物作为天然的多糖类生物刺激剂在农业领域的应用潜力日益受到关注[10],其中复合甲壳素(complex chitin,CC)相较于传统单一甲壳素类衍生物,通过结构优化与功能搭配突破了后者单独使用时针对性有限、效果稳定性不足的局限,更易被作物吸收利用且能实现功能互补,在促生等方面的综合表现更贴合实际生产需求。其降解产物能够通过促进根系生长、优化光合色素浓度推动植物生长[11],同时还可增强抗氧化酶系统活性[12],减少活性氧积累。有研究人员发现甲壳素类衍生物能够显著提升作物对氮、磷、钾的吸收效率[13],并通过激活防御基因表达[14],强化次生代谢物合成。水杨酸与甲壳素类衍生物的联合施用已成为研究热点,其深层次的协同机制在基因层面得以揭示:甲壳素类衍生物可激活水杨酸信号通路[15],二者联合施用可显著上调防御[16]及次生代谢相关基因[17]的表达,从而强化植物的抗逆能力并促进目标代谢产物的积累,此外甲壳素类衍生物作为载体可延长水杨酸的作用时效[16],为实现基因表达的高效与持续激活提供保障。正因如此联合施用被视为一种能充分发挥其生理调控潜力的有效策略。

尽管水杨酸与甲壳素单独处理对留兰香挥发性成分的调控已有报道,但其对营养品质的影响及二者联合施用的综合效应仍缺乏系统研究。基于此本研究以留兰香为对象,系统探究水杨酸与复合甲壳素单独及联合处理对其生长指标、光合特性、抗氧化物质及养分吸收与基础营养成分的影响。旨在阐明水杨酸与复合甲壳素单独施用和协同处理对留兰香生长与营养品质的作用效果,对提升留兰香栽培效益及食用品质具有实践意义,同时为水杨酸与甲壳素协同增效的生理效应提供了新证据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

本试验选取东北林业大学园林学院保存的生长健壮、无病虫害的留兰香植株作为繁殖母株。试验于2024年6－10月在东北林业大学园林学院开展,试验温室环境温度控制在(25±3) ℃、湿度65%±5%、光照时长12 h。试验所用复合甲壳素溶液购自济南阿波罗甲壳素肥液有限公司,农业部登记号:农肥(2015)准字4486号,主要成分为甲壳多糖、甲壳低聚糖、寡糖等甲壳素类衍生物,成分含量为60～80 g·L^{-1};水杨酸(SA,纯度≥99%,上海麦克林生化技术有限公司)配制成浓度300 mg·L^{-1}的溶液,溶剂为含0.1%乙醇的蒸馏水。通过前期预试验筛选出

水杨酸和复合甲壳素的最佳浓度，试验共设5个处理组：对照组(control)喷施蒸馏水；乙醇溶剂组(ethanol，ETH)喷施含0.1%乙醇的水溶液，以排除乙醇对试验结果的影响；水杨酸处理组喷施300 mg·L^{-1}水杨酸溶液；复合甲壳素处理组喷施0.4%复合甲壳素溶液；水杨酸复合甲壳素联合处理组(combined salicylic acid and complex chitin，SACC)同时喷施300 mg·L^{-1}水杨酸与0.4%复合甲壳素溶液的复配剂。采用小型喷雾器(农家园3WBD18L，中国)对留兰香幼苗进行叶面喷施，以叶片布满均匀雾滴且不滴水为准，处理60 d后，测定留兰香的各项指标。

1.2 生物量、根系形态和株高

将植株分为根、茎、叶3个部分，分别用电子天平(Mettler Toledo ME104E/02，中国)称取鲜重，然后置于烘箱中，在105 ℃杀青30 min，75 ℃烘干至恒重，称取干重；用根系扫描仪(Epson Expression 11000XL，日本)扫描测定地下部的根系总长、根系总面积、根系总体积、根系平均直径和根系分叉数；采用直尺测量地上部的株高。

1.3 气体交换参数和光合色素

气体交换参数由Li-6400便携式光合作用系统(美国)记录，测定时环境条件为：光合有效辐射1000 μmol·m^{-2}·s^{-1}，叶室温度25 ℃，相对湿度70%。测定参数包括净光合速率(net photosynthetic rate，P_n)、气孔导度(stomatal conductance，G_s)、胞间二氧化碳浓度(intercellular carbon dioxide concentration，C_i)和蒸腾速率(transpiration rate，T_r)。通过丙酮法提取光合色素并使用分光光度计(Agilent Technologies G6860A，马来西亚)测量叶绿素a(chlorophyll a，Chl a)、叶绿素b(chlorophyll b，Chl b)的含量及叶绿素a/b(chlorophyll a/b，Chl a/b)[18]。

1.4 抗氧化物

以留兰香叶片为材料进行各项指标测定。总酚含量采用Folin-Ciocalteu法测定[19]；总黄酮含量采用氯化铝比色法测定[20]；抗坏血酸含量采用联吡啶比色法测定[21]。

1.5 营养物质

以叶片为材料，分别使用凯氏定氮法、钒钼酸盐分光光度法、火焰分光光度计法测定氮(nitrogen，N)、磷(phosphorus，P)和钾(potassium，K)含量[22]。总糖含量采用3，5-2硝基水杨酸法[23]测定；粗蛋白含量的测定运用凯氏定氮法[24]；粗脂肪含量的测定采用索氏提取法[25]；采用酸碱洗涤法测定粗纤维含量[26]。

1.6 数据分析

通过Microsoft Excel 2011软件进行数据录入、整理与计算，使用SPSS 29.0统计软件进行单因素方差分析，并采用邓肯新复极差法(Duncan test)进行数据的多重比较($P<0.05$)。为综合评价不同处理对留兰香营养品质的影响，本研究基于总酚、总黄酮、抗坏血酸、氮、磷、钾、粗蛋白、总糖、粗脂肪和粗纤维共10项指标，分别进行主成分与隶属函数分析。其中，主成分分析在Origin Pro 2025中完成，用于提取数据结构并绘制载荷图，以可视化不同处理在多元空间中的分布；利用隶属函数法[27]计算各指标隶属值并以平均值作为综合品质评价依据。采用GraphPad Prism 10软件进行图表绘制。当指标值(X)与水杨酸、复合甲壳素施用效果(μ)呈正相关时，计算公式为：

$$\mu(X_j)=(X_j-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$$

当指标值(X)与水杨酸、复合甲壳素施用效果(μ)呈负相关时，计算公式为：

$$\mu(X_j)=1-(X_j-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$$

式中：$\mu(X_j)$代表第j个指标的隶属函数值；X_j代表第j个指标值；X_{min}代表第j个指标的最小值；X_{max}代表第j个指标的最大值。

2 结果与分析

2.1 水杨酸和复合甲壳素对留兰香生物量、根系形态和株高的影响

SA与CC的单独及联合处理对留兰香生长性状的影响均达到显著水平($P<0.05$)。生物量分析结果显示(表1)，ETH的各项生物量指标均与对照组无显著差异，且整体水平略低于对照组($P>0.05$)；SACC处理在各项

生物量指标上均表现出高于其他处理组的趋势，其中叶干重、根鲜重和根干重显著高于其他处理组（$P<0.05$）。在单独处理中，SA 的茎鲜重略高于 CC 处理，但二者叶鲜重、叶干重无显著差异；CC 处理在根系生物量方面表现出显著优势，其根鲜重与根干重分别较 SA 处理显著提高 16.00% 和 15.12%。在根系形态方面（表 2），SACC 联合处理对根系构型的促进作用最为显著，其根系总长、总面积、总体积和分叉数分别较对照组增加 73.76%、58.93%、45.83% 和 73.62%，根系平均直径亦显著大于其他处理。CC 单独处理在根系总长和总面积方面也显著优于 SA 处理，增幅分别为 9.86% 和 9.57%。株高测定结果表明（表 2），各处理株高均较对照组有所提高：SACC 联合处理组的促进作用最显著，株高较对照组增加 27.00%；在单独处理中，SA 对株高的提升效果优于 CC。

表 1　水杨酸和复合甲壳素对留兰香生物量的影响

Table 1　Effects of salicylic acid and complex chitin on the biomass of *M. spicata* (g·株 plant^{-1})

处理 Treatment	叶鲜重 Leaf fresh weight	叶干重 Leaf dry weight	茎鲜重 Stem fresh weight	茎干重 Stem dry weight	根鲜重 Root fresh weight	根干重 Root dry weight
对照 Control	11.29±1.85b	1.87±0.34c	8.49±1.09c	2.17±0.32b	4.72±0.37d	1.56±0.18d
ETH	10.60±1.69b	1.73±0.31c	8.53±1.60c	2.15±0.42b	4.43±0.35d	1.43±0.17d
SA	15.40±0.71a	3.18±0.22b	13.96±1.02ab	3.36±0.29a	6.50±0.63c	2.05±0.22c
CC	15.60±1.77a	3.13±0.38b	12.31±0.57b	3.05±0.19a	7.54±0.45b	2.36±0.09b
SACC	17.69±2.00a	3.85±0.43a	14.18±0.79a	3.54±0.16a	10.17±0.78a	3.04±0.16a

对照 Control：蒸馏水 Distilled water；ETH：0.1% 乙醇水溶液 0.1% ethanol aqueous solution；SA：300 mg·L^{-1}水杨酸溶液 300 mg·L^{-1} salicylic acid solution；CC：0.4% 复合甲壳素溶液 0.4% complex chitin solution；SACC：300 mg·L^{-1}水杨酸与 0.4% 复合甲壳素复配溶液 Combined solution of 300 mg·L^{-1} salicylic acid and 0.4% complex chitin. 不同小写字母表示各处理间差异显著（$P<0.05$）。下同。The different lowercase letters indicate significant differences among treatments at $P<0.05$. The same below.

表 2　水杨酸和复合甲壳素对留兰香根系形态和株高的影响

Table 2　Effects of salicylic acid and complex chitin on the root morphology and plant height of *M. spicata*

处理 Treatment	根系总长 Total length of root system (cm)	根系总面积 Total area of root system (cm^2)	根系总体积 Total volume of root system (cm^3)	根系分叉数 Number of root forks	根系平均直径 Roots average diameter (mm)	株高 Plant height (cm)
对照 Control	327.17±11.32d	90.50±3.62d	6.00±0.30c	161.17±14.50c	0.43±0.03d	44.23±3.96c
ETH	308.17±10.50d	83.17±3.19e	5.35±0.39d	211.50±22.72b	0.51±0.05c	46.90±3.22c
SA	466.33±18.14c	111.34±4.72c	7.52±0.37b	258.00±12.76a	0.60±0.05b	53.70±0.84ab
CC	512.33±22.22b	122.00±3.85b	8.03±0.31b	248.67±18.89a	0.66±0.02b	49.47±5.08bc
SACC	568.50±15.63a	143.83±4.67a	8.75±0.33a	279.83±21.50a	0.73±0.02a	56.13±4.98a

2.2　水杨酸和复合甲壳素对留兰香气体交换参数和光合色素的影响

与对照组相比，ETH、SA、CC 及 SACC 处理对留兰香气体交换参数存在不同程度的影响（表 3）。其中，SACC 联合处理提升效果相对突出，其 P_n、G_s 和 T_r 较对照组分别显著提升 44.87%、31.25% 和 20.49%（$P<0.05$）；C_i 在不同处理下虽有波动，但与对照组相比均未达显著水平（$P>0.05$）。

ETH 对叶片光合色素含量无显著影响，而 SA 和 CC 单独处理对叶片的光合色素含量有一定提升作用；SACC 联合处理组的 Chl a 和 Chl b 含量较对照组分别提高 41.59% 和 17.82%，且提升幅度高于 SA 与 CC 处理组。此外，SACC 联合处理组 Chl a/b 显著高于对照组（$P<0.05$，图 1）。

2.3　水杨酸和复合甲壳素对留兰香抗氧化物的影响

与对照组相比，SA 和 CC 单独及联合处理均能促进留兰香抗氧化物质的合成，而 ETH 组各指标无明显差异（图 2）。其中，SACC 联合处理组的促进效果最为显著，其总酚、总黄酮和抗坏血酸含量较对照组分别提高 71.05%、61.08% 和 28.14%（$P<0.05$）。SA 对上述指标的提升幅度高于 CC，但二者差异未达显著水平（$P>0.05$）。

表3 水杨酸与复合甲壳素对留兰香气体交换参数的影响

Table 3 Effects of salicylic acid and complex chitin on gas exchange parameters of *M. spicata*

处理 Treatment	净光合速率 Net photosynthetic rate ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	胞间二氧化碳浓度 Intercellular carbon dioxide concentration ($\mu mol \cdot mol^{-1}$)	气孔导度 Stomatal conductance ($mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	蒸腾速率 Transpiration rate ($mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)
对照 Control	10.03±1.72c	276.00±10.68ab	0.32±0.04b	2.83±0.07d
ETH	10.79±1.33bc	274.67±8.40ab	0.33±0.02b	2.99±0.18cd
SA	12.80±1.55ab	289.33±5.01a	0.28±0.02b	3.12±0.23bc
CC	11.61±1.50bc	262.83±8.13b	0.39±0.01a	3.32±0.11ab
SACC	14.53±0.99a	290.50±13.28a	0.42±0.02a	3.41±0.16a

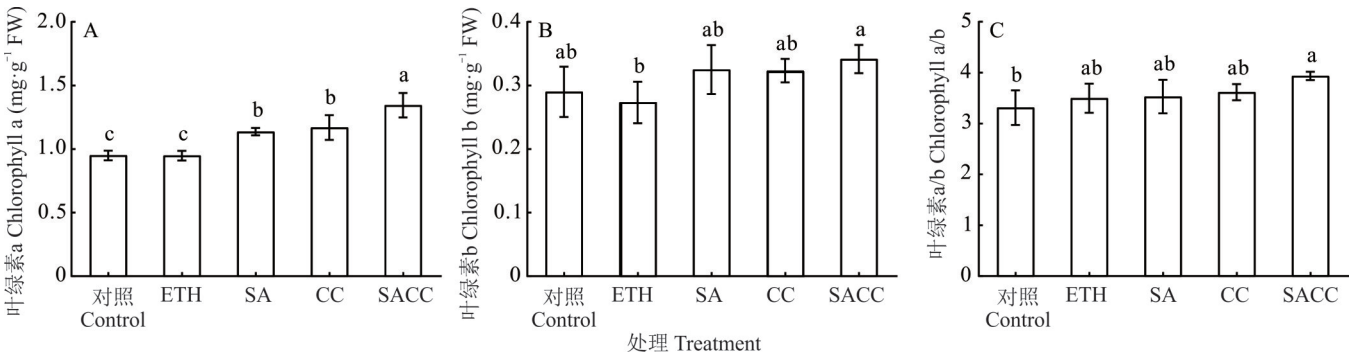


图1 水杨酸与复合甲壳素对留兰香叶绿素a、叶绿素b含量及叶绿素a/b的影响

Fig. 1 Effects of salicylic acid and complex chitin on chlorophyll a, chlorophyll b contents, and chlorophyll a/b in *M. spicata*

对照Control：蒸馏水 Distilled water；ETH：0.1% 乙醇水溶液 0.1% ethanol aqueous solution；SA：300 mg·L⁻¹水杨酸溶液 300 mg·L⁻¹ salicylic acid solution；CC：0.4% 复合甲壳素溶液 0.4% complex chitin solution；SACC：300 mg·L⁻¹水杨酸与0.4% 复合甲壳素复配溶液 Combined solution of 300 mg·L⁻¹ salicylic acid and 0.4% complex chitin；FW：鲜重 Fresh weight. 不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。下同。The different lowercase letters indicate significant differences among treatments at $P<0.05$. The same below.

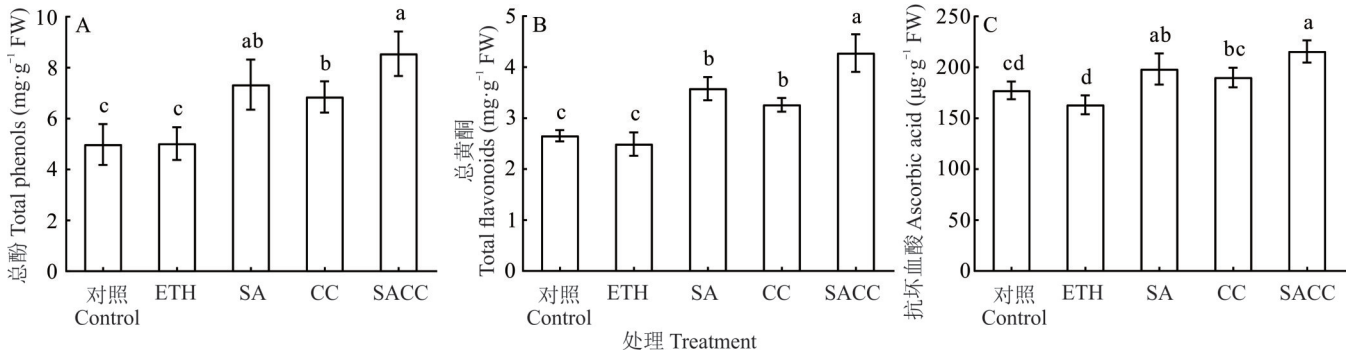


图2 水杨酸与复合甲壳素对留兰香总酚、总黄酮、抗坏血酸含量的影响

Fig. 2 Effects of salicylic acid and complex chitin on the contents of total phenols, total flavonoids, and ascorbic acid in *M. spicata*

2.4 水杨酸和复合甲壳素对留兰香营养成分的影响

SA、CC单独及联合处理均有效促进留兰香对矿质元素的吸收及营养物质积累，而ETH相关指标与对照组无明显差异。其中，SACC联合处理组提升效果最为显著，其叶片N、P、K含量较对照组分别增加26.55%、44.94% 和32.11%($P<0.05$，图3)；总糖、粗蛋白、粗脂肪和粗纤维含量较对照组分别提高56.78%、26.77%、26.58% 和38.24%($P<0.05$，图4)。CC处理组在矿质元素吸收(N、P、K含量)及总糖、粗蛋白、粗脂肪和粗纤维营养物质积累方面，提升幅度整体高于SA处理组(图3和图4)。

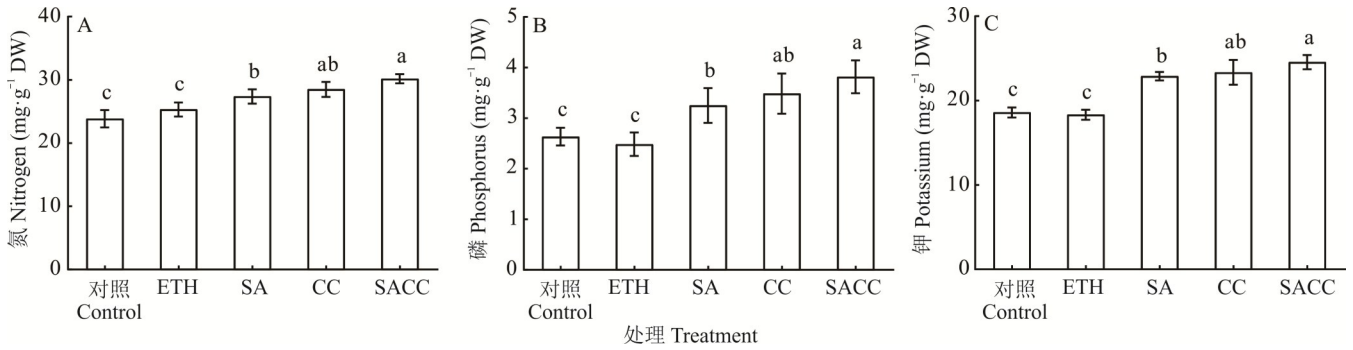


图 3　水杨酸与复合甲壳素对留兰香氮、磷、钾含量的影响

Fig. 3　Effects of salicylic acid and complex chitin on the contents of nitrogen, phosphorus, and potassium in *M. spicata*

DW：干重 Dry weight. 下同 The same below.

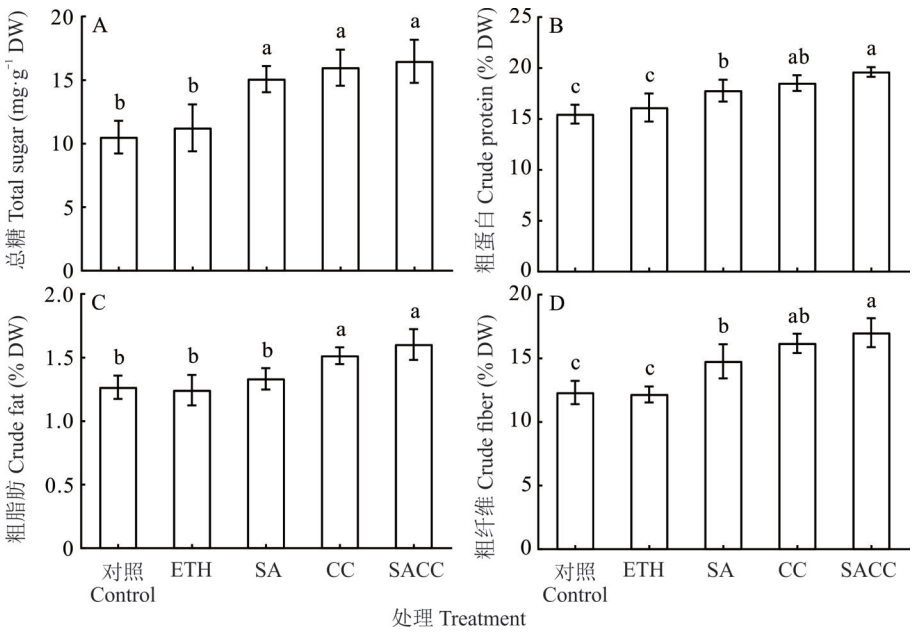


图 4　水杨酸与复合甲壳素对留兰香营养成分的影响

Fig. 4　Effects of salicylic acid and complex chitin on nutrition components of *M. spicata*

2.5　水杨酸和复合甲壳素对留兰香营养品质的隶属函数和主成分分析

为综合评价不同处理对留兰香营养品质的影响，本研究以抗氧化物质含量和营养成分指标为核心，分别采用主成分分析法与隶属函数法进行多维度解析。首先，为客观区分不同处理组的综合效应差异，对上述核心指标进行主成分分析，结果显示前 3 个主成分的累计方差贡献率达 76.1%（图 5），表明这 3 个主成分可有效保留原始指标的大部分信息，为后续分析结论的可靠性提供了重要支撑。本研究通过主成分分析载荷图（图 5）展示了各处理在多元营养指标空间中的分布。结果显示，SACC 的矢量长度明显大于其他处理，且其空间位置介于 SA 与 CC 之间，表明联合处理在整合二者调控路径的基础上实现了协同增效。CC 与 SA 的矢量长度相近（CC 略高），但二者空间距离远、夹角大，说明其调控路径存在明显差异。对照组与 ETH 的矢量长度均较短且数值接近，反映两者对营养品质的综合调控作用均较弱；尽管空间分布存在差异，表明 0.1% 乙醇与对照组的作用路径有所不同，但结合矢量长度特征可判断，该差异并未引起营养品质指标的实质性变化，从而排除了溶剂干扰。在上述载荷图分析的基础上，为进一步量化综合品质差异，采用隶属函数法进行评价。由表 4 可知，对照组、ETH、SA、CC、SACC 处理组的隶属函数平均值存在差异，排序为 SACC＞CC＞SA＞对照组＞ETH 。其中，SACC 联合处理组在提升留兰香营养品质上最为突出，CC 处理组次之，SA 处理组位列第 3。ETH 处理组作为溶剂对照，其相关指标略

低于对照组但并无明显差异。

3 讨论

植物生长调节剂的科学施用是调控经济作物产量形成与品质提升的关键农艺策略。本研究通过系统分析水杨酸与复合甲壳素对留兰香的单独及协同效应,发现联合处理在生物量积累、根系构型、光合性能、抗氧化物质及营养物质等方面均展现出显著的协同增效作用。

3.1 水杨酸和复合甲壳素对留兰香生长与光合性能的影响

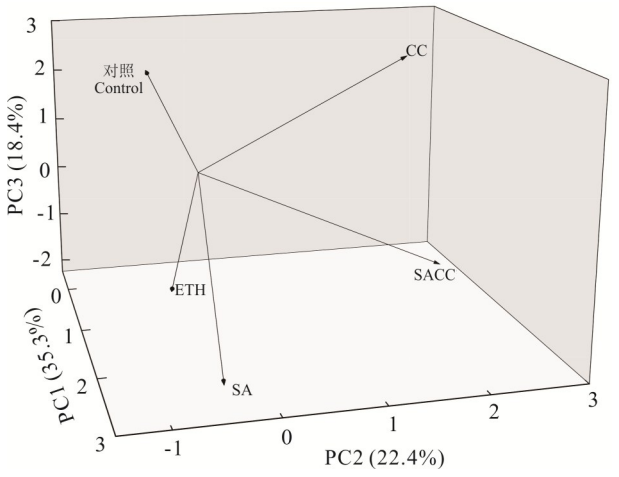


图5 留兰香主成分分析三维载荷结果

Fig. 5 Three-dimensional loading result of principal component analysis of *M. spicata*

植物生长量变化在一定程度上被认为是反映植物生长的重要依据,同时也能间接反映植物对环境的适应性。本试验结果表明,SACC联合处理能最大程度地提升留兰香的地上与地下部生物量。从器官分配模式来看,SA单独处理更利于地上部分生物量的形成,而CC单独处理则对根系生物量的促进效果更为显著。这一生物量积累的整体趋势与Abadi等[28]在柠檬香蜂草(*Melissa officinalis*)上的研究结果相呼应,该研究同样报道了SA与壳聚糖(CC的重要组分)联合处理对植株生物量的积极效应。这一协同效应可能源于二者对根系发育和光合碳同化能力的双重调控。根系作为植物固定与吸收水肥的核心器官,其发育状况直接决定植株营养获取效率与生物量积累。在根系形态建成方面,联合处理实现了对多项根系形态参数的全面优化。其中CC处理在整体根系构型的改善上效果显著,而SA处理则在增加根系分叉数方面表现突出。Methela等[29]的研究表明,壳聚糖能有效促进大豆(*Glycine max*)根系的长度、体积、表面积及根瘤数量,本研究中CC的作用特征与其相符。从作用机制解析,CC中的甲壳素组分可能通过激活几丁质受体并介导氮素供应从而诱导根系分枝发育,而SA则被证实能促进不定根形成[30],有效增加根系吸收位点。联合处理通过上述机制的协同显著扩大根系的吸收表面积,为留兰香地上部器官的健康生长和高效生产奠定了坚实基础。

表4 留兰香营养品质综合评价(隶属函数值)

Table 4 Comprehensive evaluation of nutritional quality of *M. spicata* (membership function value)

处理 Treatment	总酚 Total phenols	总黄酮 Total flavonoids	抗坏血酸 Ascorbic acid	氮 Nitrogen	磷 Phosphorus	钾 Potassium	总糖 Total sugars	粗蛋白 Crude protein	粗脂肪 Crude fat	粗纤维 Crude fiber	隶属函数值 Membership function value	排序 Sort
对照 Control	0.000	0.092	0.270	0.000	0.043	0.113	0.000	0.000	0.065	0.029	0.065	4
ETH	0.009	0.000	0.000	0.232	0.000	0.000	0.123	0.157	0.000	0.000	0.058	5
SA	0.659	0.610	0.670	0.556	0.734	0.575	0.765	0.559	0.250	0.536	0.598	3
CC	0.523	0.432	0.511	0.734	0.807	0.750	0.916	0.736	0.755	0.827	0.685	2
SACC	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1

光合作用对于留兰香的生长发育至关重要,光合性能的强弱直接决定了有机物质的合成能力,是其进行物质积累和能量转换的关键生理过程。本研究中,SA或CC单独处理均能提升留兰香叶片的气体交换参数,但两者之间无显著差异;而SACC联合处理则使P_n、G_s、C_i、T_r均达到峰值。这一现象与多项研究结论高度吻合:Li等[31]发现甲壳素衍生物能显著提高小麦(*Triticum aestivum*)幼苗的C_i、T_r、G_s、P_n;Feng等[32]也证实SA可有效提升烟草(*Nicotiana tabacum*)叶片的P_n、G_s和T_r。从机制上推断,CC可能通过诱导气孔开放(表现为G_s增大)促进CO_2向

叶肉细胞的扩散；而SA则可能通过增强卡尔文循环酶活性[33]，直接提升碳同化效率。两者的协同作用使得C_i与P_n同步提升，表明卡尔文循环的代谢通量得到显著增强。在光合色素方面，联合处理组的Chl a和Chl b含量均达到最高，这与Sofy等[14]、Roshdy等[34]及Zhang等[35]分别在壳聚糖处理黄瓜（*Cucumis sativus*）、SA处理草莓（*Fragaria ananassa*）以及二者联合处理黄瓜中观察到的叶绿素含量提升效应相一致。作用机理可能涉及：SA通过促进PsbA转录[33]以稳定光系统Ⅱ；而壳聚糖则可能通过促进类囊体膜结构形成[36]来优化光反应效率。SACC联合处理推测通过上述途径的协同，全面优化了留兰香的光合性能。光合作用的增强为留兰香抗氧化物质和营养物质的合成提供了充足的能量与物质，进而促进了留兰香的生长发育。

3.2　SA与CC处理对留兰香抗氧化物质及营养物质的影响

抗氧化物质对于留兰香的品质和生理功能具有重要意义。留兰香中的总酚、总黄酮和抗坏血酸作为重要的抗氧化物质，不仅影响着留兰香自身的抗氧化能力，更是其食用价值的重要基础。本研究显示SA与CC单独处理均能增加留兰香叶片中总酚、总黄酮和抗坏血酸的含量且SA的促进作用强于CC，联合处理则使这些抗氧化物质的积累达到峰值。这一协同积累规律与Kumari等[37]在荔枝（*Litchi chinensis*）果实采后的联合处理研究结论相吻合，Sofy等[14]与Roshdy等[34]也分别报道了壳聚糖与SA对植物抗坏血酸等抗氧化物质含量的积极影响。这种协同效应可能源于多条代谢通路的共同激活。SA可启动苯丙烷代谢途径[38]，促进总酚合成前体物质的生成，甲壳素衍生物则能调控茉莉酸信号网络[39]推动次生代谢，二者共同促进了总酚积累。对于总黄酮，甲壳素处理可上调类黄酮合成途径的基因表达[40]以加速其合成，SA则通过维持氧化还原稳态[41]来延长黄酮稳定性。抗坏血酸的积累则与SA介导的氧化还原平衡调控[41]及甲壳素增强的抗氧化活性[42]密切相关。同时SA与CC可能通过双重机制强化抗氧化防御——SA能清除自由基[43]，壳聚糖则可通过激活抗氧化酶[12]减少活性氧积累。二者协同维持细胞氧化还原稳态，直接促进总酚、总黄酮及抗坏血酸的合成并提升了留兰香品质与环境适应能力，通过稳定细胞代谢环境为植株旺盛生长及养分吸收提供保障。

营养物质积累是衡量留兰香生长状况与经济价值的关键指标。本研究结果显示SACC联合处理对留兰香营养物质的积累产生了显著的积极影响，其效果全面优于单一处理并体现出明确的协同效应。矿质养分的高效吸收与同化是构建营养品质的物质基础，在矿质元素方面联合处理显著提升了叶片中N、P、K的含量。这一发现与Ahmad等[39]和Talaat等[9]的研究结论相呼应，他们分别在辣薄荷（*Mentha piperita*）和椰枣（*Phoenix dactylifera*）中证实了壳聚糖与水杨酸在促进矿质元素吸收方面的作用。从作用机制上推断，CC中的甲壳素作为天然含氮聚合物[44]，其降解产物可为根系氮代谢提供额外的底物；SA则被证实能激活硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶等关键酶的活性[45]，从而协同强化了植株的氮素同化能力。对于磷和钾的吸收，CC可能通过改善根际环境或螯合作用提高了磷的有效性，而SA与CC对钾含量的协同提升则可能与其共同调控根系H^+-ATPase泵活性[46]与K^+通道蛋白表达有关。矿质元素的充分供应直接推动了蛋白质、糖类等基础营养物质的合成。在碳氮代谢产物方面联合处理同样表现出最强的促进效应。对于总糖的积累，其提升效应与Zhang等[35]及Sinha等[47]的研究结果一致，前者发现该联合处理可使黄瓜保持较高的总可溶性固形物，后者则证实其在梨（*Pyrus communis*×*P. pyrifolia*）果实中能维持总糖的稳定性。该协同效应的生理基础可能在于：SA通过上调蔗糖磷酸合酶的活性[48]，促进了光合产物向蔗糖的转化与运输；与此同时CC则通过激活蔗糖合酶等关键酶活性[49]直接驱动了糖类的分解与再合成代谢。对于粗蛋白的积累，本研究观察到的促进效应与Mustafa等[50]在紫花苜蓿（*Medicago sativa*）上的发现相符。其内在机理可能是一个互补的过程：CC为氮同化提供了物质基础并通过激活谷氨酰胺合成酶－谷氨酸合成酶系统的循环关键酶促进氨基酸合成[51]并增加植物的蛋白组分[52]；而SA可通过提高氮素吸收效率促进蛋白质合成[53]，二者共同保障了粗蛋白的净积累。此外联合处理亦显著提高了粗脂肪与粗纤维含量。粗脂肪的积累可能归因于SA对脂肪降解关键酶活性的抑制[54]以及CC对膜脂过氧化作用的缓解[55]，这与Coyotl-Pérez等[56]在鳄梨（*Persea americana*）中采用壳聚糖处理能有效保留果实脂肪含量的结论相吻合。粗纤维含量的增加则可能与SA上调纤维素合酶基因表达以促进细胞壁合成[57]以及CC对纤维结构的保护作用密切相关[56]，Talaat等[9]的研究也为SA能增加植物粗纤维含量提供了佐证。SACC联合处理通过促进矿质元素吸收、提高糖类与蛋白质合成、调

控脂肪与粗纤维积累等多维度营养成分调控显著提升留兰香的营养物质积累水平,为留兰香的优质高产提供了有力保障。

综上,本研究表明,SACC联合处理通过优化留兰香的根系形态与光合性能,协同促进了其养分吸收及营养物质与抗氧化物质的积累,最终实现了生物量与营养品质的同步提升。

4 结论

本研究表明,叶面喷施水杨酸或复合甲壳素均可有效促进留兰香生长并改善其营养品质。水杨酸与复合甲壳素联合处理在生物量、根系构型、光合作用、抗氧化物质、养分吸收、基础营养成分上均表现出显著的协同增效作用,是同步提升留兰香生物量与营养品质的最优策略。综合产量与品质效益,推荐生产上采用300 mg·L^{-1}水杨酸与0.4%复合甲壳素联合叶面喷施作为留兰香优质栽培的技术方案。

参考文献 References:

[1] Wang C C, Li M Y, Yan C A, *et al*. Refining health risk assessment of heavy metals in vegetables from high geochemical background areas: role of bioaccessibility and cytotoxicity. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 159(3): 345-353.

[2] Gai X, Li R, Jiang Z T. Research progress on spice flavor, essential oil of *Mentha spicata* L. China Condiment, 2012, 37(1): 80-83, 107.
盖旭, 李荣, 姜子涛. 调味香料留兰香精油的研究进展. 中国调味品, 2012, 37(1): 80-83, 107.

[3] Wang M Q, Wang F, Zhao W L, *et al*. Effects of different concentrations of silicon and calcium on the growth and physiological characteristics of *Mentha spicata* seedlings. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(3): 154-163.
王梦琦, 王菲, 赵琬璐, 等. 不同浓度硅、钙对留兰香幼苗生长和生理特性的影响. 草业学报, 2025, 34(3): 154-163.

[4] Li X S, Jiang D M, Bian Z F. The surplus and deficit measurement of the cultivated land in China in the view of food security. Resources Science, 2014, 36(10): 2057-2065.
李效顺, 蒋冬梅, 卞正富. 基于粮食安全视角的中国耕地资源盈亏测算. 资源科学, 2014, 36(10): 2057-2065.

[5] Li X L, Yin Y, Yu H C, *et al*. Robust extraction of hyperspectral feature wavelengths and development of a model for geographical origin identification of spearmint. Food Science, 2024, 45(22): 262-268.
李晓龙, 殷勇, 于慧春, 等. 留兰香高光谱特征波长稳健提取及产地鉴别模型构建. 食品科学, 2024, 45(22): 262-268.

[6] Hua Z R. Effect of exogenous salicylic acid on growth and physiological characteristics of *Scutellaria baicalensis* seedlings under NaCl stress. Acta Agriculturae Jiangxi, 2021, 33(9): 27-32.
华智锐. 外源水杨酸对NaCl胁迫下黄芩幼苗生长生理特性的影响. 江西农业学报, 2021, 33(9): 27-32.

[7] Dong B Y, Tang H M, Yao Q P, *et al*. Effects of salicylic acid treatment on reactive oxygen species metabolism and phenylpropanoid pathway in *Rosa sterilis*. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(17): 308-315.
董柏余, 汤洪敏, 姚秋萍, 等. 采后水杨酸处理对金刺梨果实活性氧和苯丙烷代谢的影响. 食品工业科技, 2021, 42(17): 308-315.

[8] Bagautdinova Z Z, Omelyanchuk N, Tyapkin A V, *et al*. Salicylic acid in root growth and development. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(4): 2228.

[9] Talaat N B, Nesiem M R, Gadalla E G, *et al*. Putrescine, in combination with gibberellic acid and salicylic acid, improves date palm fruit quality via triggering protein and carbohydrate accumulation and enhancing mineral, amino acid, sugar, and phytohormone acquisition. Journal of Plant Growth Regulation, 2025, 44(3): 1249-1265.

[10] Zhang Y, Li Y Y, Zhu K J, *et al*. Progress in the extraction and applied research of chitin. Guangzhou Chemical Industry, 2015, 43(22): 19-20, 23.
张源, 李燕燕, 朱孔杰, 等. 甲壳素的提取及其在农业上的应用. 广州化工, 2015, 43(22): 19-20, 23.

[11] Zhang J J, Jiao Q J, Xu Z Y, *et al*. Effect of exogenous chitosan on physiological properties, antioxidant activity, and cadmium uptake of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings under cadmium stress. Environmental Science, 2024, 45(6): 3649-3660.
张静静, 焦秋娟, 徐正阳, 等. 镉胁迫下外源壳聚糖对小麦幼苗生理特性、抗氧化能力及镉吸收的影响. 环境科学, 2024, 45(6): 3649-3660.

[12] Chen F F, Li Q J, Su Y, *et al*. Chitosan spraying enhances the growth, photosynthesis, and resistance of continuous *Pinellia*

ternata and promotes its yield and quality. Molecules, 2023, 28(5): 2053.

[13] Qaisi A M, Al Tawaha A R, Imran, *et al*. Effects of chitosan and biochar-mended soil on growth, yield and yield components and mineral composition of fenugreek. Gesunde Pflanzen, 2023, 75(3): 625-636.

[14] Sofy A R, Dawoud R A, Sofy M R, *et al*. Improving regulation of enzymatic and non-enzymatic antioxidants and stress-related gene stimulation in *Cucumber mosaic* cucumovirus-infected cucumber plants treated with glycine betaine, chitosan and combination. Molecules, 2020, 25(10): 2341.

[15] Zamora R O, Hernández T E M, Flores B E M, *et al*. Chitin oligomers from *Alternaria alternata* induce activation of signal transduction pathways by ethylene, jasmonic acid, and salicylic acid in *Solanum lycopersicum* fruits. Horticulturae, 2025, 11(6): 565.

[16] Rao C Q. Effects of chitosan oligosaccharide and salicylic acid on induced resistance and quality of Jiaohe dark-cured tobacco. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2020.
饶超奇. 壳寡糖与水杨酸对蛟河晒烟诱导抗性及品质的影响. 郑州: 河南农业大学, 2020.

[17] Cessur A, Albayrak İ, Demirci T, *et al*. Silver and salicylic acid-chitosan nanoparticles alter indole alkaloid production and gene expression in root and shoot cultures of *Isatis tinctoria* and *Isatis ermenekensis*. Plant Physiology and Biochemistry, 2023, 202(9): 107977.

[18] Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. Plant Physiology, 1949, 24(1): 1-15.

[19] Singleton V L, Rossi J A. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. American Journal of Enology and Viticulture, 1965, 16(3): 144-158.

[20] Chang C C, Yang M H, Wen H M, *et al*. Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colometric methods. Journal of Food and Drug Analysis, 2002, 10(3): 178-182.

[21] Law M Y, Charles S A, Halliwell B. Glutathione and ascorbic acid in spinach (*Spinacia oleracea*) chloroplasts. The effect of hydrogen peroxide and of paraquat. Biochemical Journal, 1983, 210(3): 899-903.

[22] Chrysargyris A, Evangelides E, Tzortzakis N. Seasonal variation of antioxidant capacity, phenols, minerals and essential oil components of sage, spearmint and sideritis plants grown at different altitudes. Agronomy, 2021, 11(9): 1766.

[23] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Determination of total sugars in red ginseng—Spectrophotometry: NY/T 2332-2013. Beijing: China Agricultural Press, 2013.
中华人民共和国农业部. 红参中总糖含量的测定-分光光度法: NY/T 2332-2013. 北京: 中国农业出版社, 2013.

[24] State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of crude protein in feeds-Kjeldahl method: GB/T 6432-2018. Beijing: China Standards Press, 2018.
国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 饲料中粗蛋白的测定—凯氏定氮法: GB/T 6432-2018. 北京: 中国标准出版社, 2018.

[25] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of crude fat in feeds: GB/T 6433-2006. Beijing: China Standards Press, 2006.
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 饲料中粗脂肪的测定: GB/T 6433-2006. 北京: 中国标准出版社, 2006.

[26] Ministry of Health of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of crude fiber in plant-derived food: GB/T 5009.10-2003. Beijing: China Standards Press, 2003.
中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. 植物类食品中粗纤维的测定: GB/T 5009.10-2003. 北京: 中国标准出版社, 2003.

[27] Zhang Y J, Shang Y S, Wang P C, *et al*. Effects of super absorbent polymers on growth and physiological characteristics of *Sophora davidii* vs. Panjiang seedlings under drought stress. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(7): 90-98.
张宇君, 尚以顺, 王普昶, 等. 干旱胁迫下保水剂对盘江白刺花幼苗生长和生理特性的影响. 草业学报, 2020, 29(7): 90-98.

[28] Abadi N S K, Mohebalipour N, Oraei M, *et al*. Foliar application of salicylic acid and chitosan on the growth and quantity and quality of the essential oil from lemon balm (*Melissa officinalis* L.). Journal of Essential Oil Bearing Plants, 2023, 26(3): 802-813.

[29] Methela N J, Pande A, Islam M S, *et al*. Chitosan-GSNO nanoparticles: a positive modulator of drought stress tolerance in

soybean. BMC Plant Biology, 2023, 23(1): 639.

[30] Koramutla M K, Tuan P A, Ayele B T. Salicylic acid enhances adventitious root and aerenchyma formation in wheat under waterlogged conditions. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(3): 1243.

[31] Li K C, Zhang X Q, Yu Y, *et al*. Effect of chitin and chitosan hexamers on growth and photosynthetic characteristics of wheat seedlings. Photosynthetica, 2020, 58(3): 819－826.

[32] Feng Y Q, Zhao Y Y, Li Y F, *et al*. Improving photosynthesis and drought tolerance in *Nicotiana tabacum* L. by foliar application of salicylic acid. All Life, 2023, 16(1): 2224936.

[33] Xin L F, Wang J J, Yang Q H. Exogenous salicylic acid alleviates water deficit stress by protecting photosynthetic system in maize seedlings. Agronomy, 2023, 13(9): 2443.

[34] Roshdy A E D, Alebidi A, Almutairi K, *et al*. The effect of salicylic acid on the performances of salt stressed strawberry plants, enzymes activity, and salt tolerance index. Agronomy, 2021, 11(4): 775.

[35] Zhang Y Z, Zhang M L, Yang H Q. Postharvest chitosan-g-salicylic acid application alleviates chilling injury and preserves cucumber fruit quality during cold storage. Food Chemistry, 2015, 174(9): 558－563.

[36] Li S, Sun H Y, Zhang R L, *et al*. Chitosan induced cold tolerance in *Kobresia pygmaea* by regulating photosynthesis, antioxidant performance, and chloroplast ultrastructure. Frontiers in Plant Science, 2024, 15(11): 1441564.

[37] Kumari P, Barman K, Patel V B, *et al*. Reducing postharvest pericarp browning and preserving health promoting compounds of litchi fruit by combination treatment of salicylic acid and chitosan. Scientia Horticulturae, 2015, 197(17): 555－563.

[38] Niu Y X, Ye L X, Wang Y, *et al*. Improvement of storage quality of 'Hayward' kiwifruit by MeJA combined with SA treatment through activation of phenylpropane metabolism. Scientia Horticulturae, 2023, 321(15): 112354.

[39] Ahmad B, Khan M M A, Jaleel H, *et al*. Exogenously sourced γ-irradiated chitosan-mediated regulation of growth, physiology, quality attributes and yield in *Mentha piperita* L. Turkish Journal of Biology, 2017, 41(2): 388－401.

[40] Li L L, Kaufmann M, Makechemu M, *et al*. Assessment of transcriptional reprogramming of lettuce roots in response to chitin soil amendment. Frontiers in Plant Science, 2023, 14(4): 1158068.

[41] Kaur G, Tak Y, Asthir B. Salicylic acid: a key signal molecule ameliorating plant stresses. Cereal Research Communications, 2022, 50(4): 617－626.

[42] Luan F, Xu Z H, Wang K, *et al*. Synthesis of water-soluble sulfonated chitin derivatives for potential antioxidant and antifungal activity. Marine Drugs, 2022, 20(11): 668.

[43] Sobczak-Samburska A, Pióro-Jabrucka E, Przybył J L, *et al*. Effect of foliar application of calcium and salicylic acid on fruit quality and antioxidant capacity of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) in hydroponic cultivation. Agriculture, 2025, 15(1): 26.

[44] Ji X L, Lu Y C, Chen X. Catalytic conversion of chitin biomass into key platform chemicals. Chemical Communications, 2025, 61(7): 1303－1321.

[45] Didani B S, Dumlupinar R. Common bean seedlings show increased tolerance to cool temperatures when treated with progesterone, β-oestradiol, abscisic acid, and salicylic acid. Zemdirbyste-Agriculture, 2022, 109(1): 43－48.

[46] Ghassemi-Golezani K, Abdoli S. Improving ATPase and PPase activities, nutrient uptake and growth of salt stressed ajowan plants by salicylic acid and iron-oxide nanoparticles. Plant Cell Reports, 2021, 40(3): 559－573.

[47] Sinha A, Gill P P S, Jawandha S K, *et al*. Chitosan coatings incorporated with salicylic acid enhanced postharvest quality of pear under different storage conditions. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 16(3): 1920－1929.

[48] Savani K R, Gajera H P, Hirpara D G, *et al*. Salicylic acid-functionalised chitosan nanoparticles restore impaired sucrose metabolism in the developing anther of cotton (*Gossypium hirsutum*) under heat stress. Functional Plant Biology, 2023, 50(9): 736－751.

[49] Geng W, Li Z, Hassan M J, *et al*. Chitosan regulates metabolic balance, polyamine accumulation, and Na^+ transport contributing to salt tolerance in creeping bentgrass. BMC Plant Biology, 2020, 20(1): 506.

[50] Mustafa G, Shehzad M A, Tahir M H N, *et al*. Pretreatment with chitosan arbitrates physiological processes and antioxidant defense system to increase drought tolerance in alfalfa (*Medicago sativa* L.). Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2022, 22(2): 2169－2186.

[51] Zhang X Q, Li K C, Xing R E, *et al*. Metabolite profiling of wheat seedlings induced by chitosan: Revelation of the enhanced carbon and nitrogen metabolism. Frontiers in Plant Science, 2017, 8(11): 2017.

[52] Guo X, Wu S, Zheng M Y, *et al*. Effects of addition of *Neolamarckia cadamba* leaves and chitosan oligosaccharides on fermentation quality and aerobic stability of sugarcane top silage. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(6): 202－210.

郭香，吴硕，郑明扬，等. 添加黄粱木叶和壳寡糖对甘蔗梢青贮饲料发酵品质及有氧稳定性的影响. 草业学报，2022，31(6)：202－210.

[53] Mehrasa H，Farnia A，Kenarsari M J，*et al*. Endophytic bacteria and SA application improve growth，biochemical properties，and nutrient uptake in white beans under drought stress. Journal of Soil Science and Plant Nutrition，2022，22(3)：3268－3279.

[54] Talaat N B，Shawky B T. Synergistic effects of salicylic acid and melatonin on modulating ion homeostasis in salt-stressed wheat (*Triticum aestivum* L.) plants by enhancing root H^+-pump activity. Plants，2022，11(3)：416.

[55] Adiletta G，Pasquariello M S，Zampella L，*et al*. Chitosan coating：A postharvest treatment to delay oxidative stress in loquat fruits during cold storage. Agronomy，2018，8(4)：54.

[56] Coyotl-Pérez W A，Rubio-Rosas E，Morales-Rabanales Q N，*et al*. Improving the shelf life of avocado fruit against *Clonostachys rosea* with chitosan hybrid films containing thyme essential oil. Polymers，2022，14(10)：2050.

[57] Jia H L，Wang X H，Wei T，*et al*. Exogenous salicylic acid regulates cell wall polysaccharides synthesis and pectin methylation to reduce Cd accumulation of tomato. Ecotoxicology and Environmental Safety，2021，207(1)：111550.