

不同浓度腐植酸接枝松土剂液体肥对生菜生长及土壤理化性质的影响

朱洪润, 张梦君, 李子洪, 张 晓, 余凯凯, 裴海荣, 郭景丽, 刘锐杰, 王亮亮

(河南心连心化学工业集团股份有限公司 河南新乡 453731)

摘 要:为探究腐植酸接枝松土剂(HA-PAM)对生菜生长的综合调控效应及适宜施用浓度,以基础液体肥为对照(CK),并以该基础液体肥为母液,设置4个不同浓度HA-PAM的液体肥处理(T1:基础液体肥+100 g·L⁻¹ HA-PAM、T2:基础液体肥+150 g·L⁻¹ HA-PAM、T3:基础液体肥+200 g·L⁻¹ HA-PAM、T4:基础液体肥+250 g·L⁻¹ HA-PAM)及市售同类功能型液体肥处理(T5),测定生菜农艺性状、营养品质及土壤理化性质等指标。结果表明,HA-PAM可协同腐植酸与松土剂功能。T1处理促生改土效果最优,与CK相比,生菜地上部鲜质量、总根长分别显著提高了28.03%、37.37%,土壤容重降低了3.33%,孔隙度提高了4.60个百分点,>2 mm大粒径、0.25~2 mm中粒径团聚体占比分别提高2.60、1.36个百分点;T3处理地上部鲜质量较CK提高18.32%,在维持较高生物量的同时,硝酸盐含量较CK显著降低了46.53%。经济效益分析表明,与CK相比,T1处理净增收305.4元·667 m⁻²,投入产出比达1:11.75;T3处理显著降低硝酸盐的同时仍可实现较高效益。综上,含100 g·L⁻¹的HA-PAM的液体肥促生效果突出,经济效益最优,含200 g·L⁻¹的HA-PAM的液体肥在兼顾产量、降低硝酸盐方面优势明显,可为叶菜类腐植酸接枝松土剂功能型液体肥的应用浓度选择提供参考。

关键词:生菜;腐植酸接枝松土剂;液体肥;根系发育;土壤改良;品质调控

中图分类号:S636.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)09-211-08

Effects of liquid fertilizer with different concentrations of humic acid-grafted loosening agent on lettuce growth and soil physicochemical property

Zhu Hongrun, Zhang Mengjun, Li Zihong, Zhang Xiao, Yu Kaikai, Pei Hairong, Guo Jingli, Liu Ruijie, Wang Liangliang

(Henan Xinlianxin Chemical Group Co., Ltd., Xinxiang 453731, Henan, China)

Abstract: To explore the comprehensive regulatory effects of humic acid-grafted soil loosening agent (HA-PAM) on lettuce and its optimal application concentration, a basic liquid fertilizer was used as the control (CK), and based on this basic liquid fertilizer, four liquid fertilizer treatments with different HA-PAM concentrations were set up (T1: Basic liquid fertilizer + 100 g·L⁻¹ HA-PAM, T2: Basic liquid fertilizer + 150 g·L⁻¹ HA-PAM, T3: Basic liquid fertilizer + 200 g·L⁻¹ HA-PAM, T4: Basic liquid fertilizer + 250 g·L⁻¹ HA-PAM), along with a commercial functional liquid fertilizer treatment (T5). The agronomic traits, nutritional quality of lettuce, and soil physicochemical property were measured. The results showed that HA-PAM can combine the functions of humic acid and soil loosening agents. The T1 treatment showed the best growth promotion and soil improvement effects. Compared with CK, the fresh aerial biomass and total root length of lettuce increased significantly by 28.03% and 37.37%, respectively; soil bulk density and porosity showed certain changes, with bulk density decreasing by 3.33% and porosity increasing by 4.60 percentage points; the proportion of large aggregates (>2 mm) and medium aggregates (0.25-2 mm) increased by 2.60 and 1.36 percentage points, respectively. The T3 treatment increased fresh aerial biomass by 18.32% compared with CK, while maintaining high biomass and significantly reducing nitrate content in lettuce by 46.53%. Economic benefit analysis showed that the T1 treatment resulted in a net increase in income of 305.4 yuan per 667 m², with a benefit-cost ratio of 1:11.75; the T3 treatment could still achieve some

收稿日期:2026-04-17;修回日期:2026-06-24

基金项目:农业农村部农田智慧施肥项目(NK2022180503)

作者简介:朱洪润,男,硕士,研究方向为液体肥开发及其应用。E-mail:728714401@qq.com

通信作者:王亮亮,男,高级工程师,研究方向为新型液体肥开发。E-mail:linxungreat@163.com

income increase while reducing nitrate content. In summary, liquid fertilizer with 100 g·L⁻¹ HA-PAM has an outstanding growth-promoting effect, and liquid fertilizer with 200 g·L⁻¹ HA-PAM is better at reducing nitrate content, providing a reference for selecting the application concentration of humic acid-grafted soil loosening functional liquid fertilizer for leafy vegetables.

Key words: Lettuce; HA-PAM; Liquid fertilizer; Root development; Soil improvement; Quality regulation

随着农业绿色转型与可持续发展的深入推进,农业生产对协同实现作物增产与土壤改良提出了更高要求。液体肥因养分释放快、吸收效率高、适配水肥一体化等优势,已成为精准施肥领域的重要投入品,在现代农业生产中应用日益广泛。传统液体肥多以养分高效供给为核心目标,通过优化氮、磷、钾及中微量元素的配比,满足作物不同生育期的养分需求。虽有效的提升了作物产量,但在土壤结构改良与根系生长调控的协同赋能上存在明显局限^[1]。当前土壤板结、孔隙度下降等耕地质量问题日益突出,直接制约了养分的迁移转化效率与作物根系的伸展活力,形成“土壤环境受限-根系发育不足-养分利用低效”的恶性循环,大幅降低了液体肥的施用效益^[2-3]。

为破解这一难题,需筛选兼具改土与促根功能的材料,开发新型液体肥,实现液体肥养分供给与根区环境调控的协同。腐植酸(HA)可通过调控根际激素水平促进根系发育、增强养分吸收;松土剂(PAM)则通过絮凝架桥作用改善土壤团聚结构、降低容重、提高孔隙度,二者功能高度互补^[4-7]。然而,简单物理混合因极性差异易发生分层团聚、功能拮抗,难以在液体肥体系中实现协同增效。

HA-PAM(腐植酸接枝松土剂)通过分子接枝聚合技术,将 HA 的羧基、酚羟基等活性位点与 PAM

长链骨架化学键合,形成类似“章鱼”的多孔网络结构,该结构使功能基团密度与活性显著提升,从根本上解决了腐植酸与松土剂简单物理混合存在的兼容性问题^[8-11]。该产物融合天然 HA 的生化活性与合成聚合物的结构稳定性,兼具三大核心优势:一是形成“分子海绵”结构,保水保肥能力远超单一成分;二是通过絮凝架桥与黏结胶结作用协同,促进土壤大粒径团聚体形成,降低容重、提高孔隙度;三是借助 HA 的 pH 缓冲功能与聚合物的包埋作用,增强环境稳定性,延缓 HA 降解并缓慢释放活性小分子,持续刺激根系生长^[12-14]。当前 HA-PAM 在液体肥中的应用研究较少,而生菜作为根系浅、对土壤条件敏感的叶菜类作物,是理想的评价模式作物^[15]。基于此,本试验通过盆栽试验系统评估含不同浓度的 HA-PAM 液体肥对生菜生长、品质、根系形态及土壤结构的影响,明确最适施用浓度,以期为其在叶菜生产中的精准应用提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2025 年 10—12 月在河南心连心化学工业集团股份有限公司智能温室大棚内进行。生菜栽培土壤为壤土(风干土),土壤理化性质如表 1 所示。

表 1 作物移栽前供试土壤的理化性质

Table 1 Physicochemical properties of the test soil before crop transplantation

指标 Index	土壤类型 Soil type	pH	w(碱解氮) Alkali hydrolyzed nitrogen content/(mg·kg ⁻¹)	w(有效磷) Available phosphorus content/(mg·kg ⁻¹)	w(速效钾) Available K content/ (mg·kg ⁻¹)	w(有机质) Organic matter content/%
参数 Parameter	壤土 Loam	8.67±0.03	56.97±0.92	17.78±0.24	195.94±1.23	0.97±0.04

1.2 材料

供试作物:意大利生菜,由瑞农蔬菜苗公司选育。供试幼苗为从瑞农蔬菜苗公司购得的苗龄为 40 d 的穴盘苗。

供试肥料:HA-PAM 由实验室自主制备,采用一步聚合法^[16]:通过引发剂作用激活腐植酸结构中的活性位点,使其与乙烯基单体发生链式引发及聚合反应,最终制得目标产物。液体肥均由实验室自行配制,包括基础平衡型液体肥[N、P₂O₅、K₂O、HA

含量(ρ,后同)均为 70 g·L⁻¹],并以该基础液体肥为母液,分别添加不同浓度的自制 HA-PAM,配制成分别含 100、150、200、250 g·L⁻¹ HA-PAM 的液体肥;同类功能型液体肥(N、P₂O₅、K₂O、HA 含量均为 70 g·L⁻¹),购自当地农资市场。

1.3 方法

试验共设 6 个处理:CK(基础液体肥)、T1(基础液体肥+100 g·L⁻¹ HA-PAM)、T2(基础液体肥+150 g·L⁻¹ HA-PAM)、T3(基础液体肥+200 g·L⁻¹

HA-PAM)、T4(基础配方+250 g·L⁻¹ HA-PAM)和 T5(同类功能型液体肥)。采用上口直径 20 cm、高 14 cm 的塑料盆栽钵,每钵装填风干土 3 kg,选取长势均匀、健康的幼苗移栽到塑料盆栽钵中,每盆定植 1 株幼苗,每个处理 5 盆,3 次重复。追肥时,先将各处理的 HA-PAM 液体肥原液按 1:500(肥:水,体积比)稀释,再以冲施方式施入,每次每钵施用稀释液 500 mL。全生育期共追施 3 次,缓苗 1 周后开始追肥,每次施肥间隔 10 d。每次追肥后第 5 天测定生菜农艺性状指标及 SPAD 值。盆栽管理参照大田栽培措施,定期进行除草、灌溉和病虫害防控。

1.4 测定项目与方法

每次追肥后第 5 天测定生菜农艺性状及 SPAD 值。株高:采用标准卷尺测定茎基部土壤表面至植株最高生长点的垂直距离;叶片数:统计叶柄明显、具备完整光合功能的完全展开功能叶,不计心叶及未完全展开幼叶;SPAD 值:采用 SPAD-502 型叶绿素测定仪(日本柯尼卡美能达公司),选取植株生长点下第 2 片完全展开功能叶,避开主脉于叶片中部三点测定,取平均值。

收获后,测定地上部与地下部鲜质量:从茎基部剪断植株并分样,根系经去离子水清洗、吸干表面水分。采用电子天平(精度 0.01 g)分别称量地上部与地下部鲜质量,并测定单株产量。将洗净后的根系置于台式根系扫描仪(WinRHIZO STD4800, Regent Instruments Inc.)上进行扫描,利用配套 WinRHIZO 软件测定总根长、根表面积、根体积。

收获后,采用 2,6-二氯酚酚滴定法^[17]测定生菜维生素 C 含量;采用紫外分光光度法^[17]测定生菜硝酸盐含量;采用 TTC 法^[18]测定生菜根系活力。

于生菜收获后采用环刀法^[19]测量土壤容重,依据实测土壤容重与土壤比重(2.65 g·cm⁻³,经验通用参考值)测定土壤孔隙度,土壤孔隙度/%=(1-土壤容重/土壤比重)×100;采用干筛法^[17]测定>2 mm、0.25~2 mm、<0.25 mm 粒径土壤团聚体占比;采用电位法^[20](土水比为 1:2.5)测定土壤 pH^[20];采用重铬酸钾容量法-外加热法测定土壤有机质含量;采用碱解扩散法^[20]测定土壤碱解氮含量;采用钼锑抗比色法^[20]测定土壤有效磷含量;采用火焰光度法^[20]测定土壤速效钾含量。

经济效益计算:基于盆栽试验单株产量,换算为每 667 m²产量;结合当年当地生菜收购价格、肥料增量成本,计算各处理的增产量、收益增加、肥料成本增加、净增收及投入产出比。其中,设定

667 m²栽植 10 000 株,生菜收购价 2 元·kg⁻¹,肥料成本依据各处理液体肥用量核算。

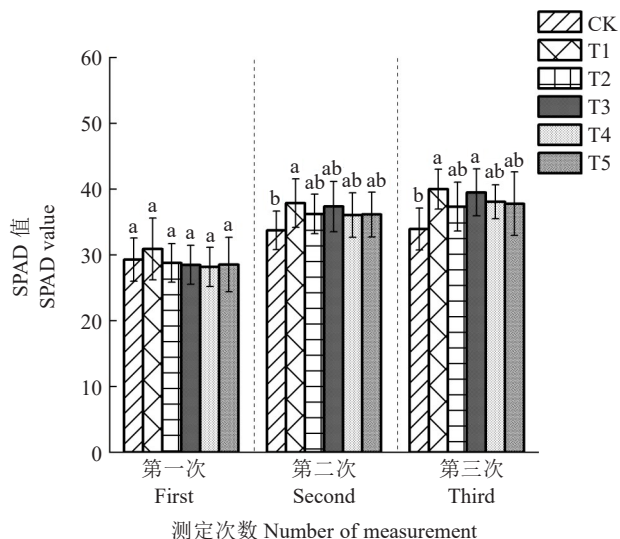
1.5 数据分析

采用 Excel 2010 整理试验数据,采用 SPSS 20.0 进行数据统计分析,采用 Duncan's 新复极差法进行差异显著性分析($P<0.05$),采用 Origin 2024 绘制图表。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对生菜 SPAD 值及农艺性状指标的影响

2.1.1 不同施肥处理对生菜 SPAD 值的影响 由图 1 可知,3 次测定中 T1 处理生菜 SPAD 值均最高,第 1 次测定时各处理间 SPAD 值均无显著差异,但除 T1 处理高于 CK 外,其他 HA-PAM 处理均低于 CK;第 2 次和第 3 次测定时 T1 处理生菜 SPAD 值均显著高于 CK,且 T1~T4 处理 SPAD 值均高于 CK,表明低浓度 HA-PAM 液体肥对生菜叶绿素合成具有持续促进作用,随着植株生长和施肥次数增加,高浓度 HA-PAM 液体肥对生菜的促进效应逐渐显现,但仍均低于 T1 处理。整体上,100 g·L⁻¹ 的 HA-PAM 液体肥对促进生菜叶绿素合成效果最好。



注:不同小写字母表示同一测定时间不同处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference among different treatments at 0.05 level at the same time. The same below.

图 1 不同施肥处理对生菜 SPAD 值的影响

Fig. 1 Effects of different fertilization treatments on lettuce SPAD value

2.1.2 不同施肥处理对生菜株高的影响 由图 2 可知,第 1 次测定时,除 T2 处理株高较低,与 CK

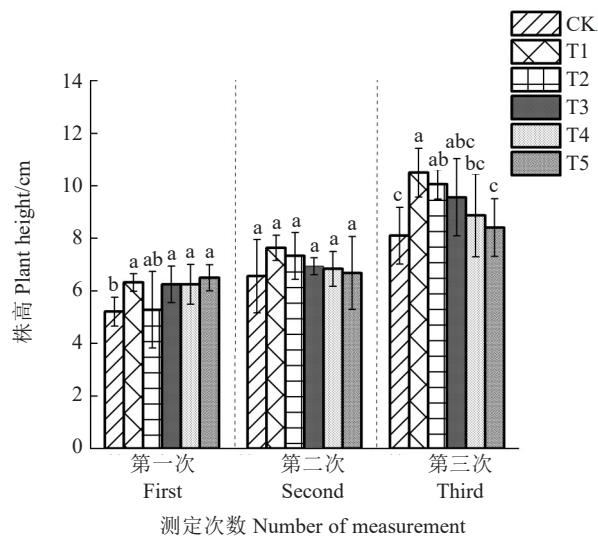


图 2 不同施肥处理对生菜株高的影响
Fig. 2 Effects of different fertilization treatments on lettuce plant height

无显著性差异外,其他处理株高均显著高于 CK,且 T5 处理株高最高,表明第 1 次施肥时市售同类功能型液体肥效果较好,具有较强的早期促长作用。随着施肥次数增加,第 2 和第 3 次测定时,T1 处理的株高均最高,且随着 HA-PAM 浓度的增加,株高均呈降低趋势,HA-PAM 处理株高均高于 T5 和 CK。综上,含 100 g·L⁻¹ HA-PAM 的液体肥对促进生菜株高生长效果最好。

2.1.3 不同施肥处理对生菜叶片数的影响 由图 3 可知,3 次测定时,T1~T5 处理生菜叶片数均高于 CK,且 T1 处理生菜叶片数均最高,T1~T4 处理生菜叶片数均随 HA-PAM 浓度升高呈降低趋势,但均

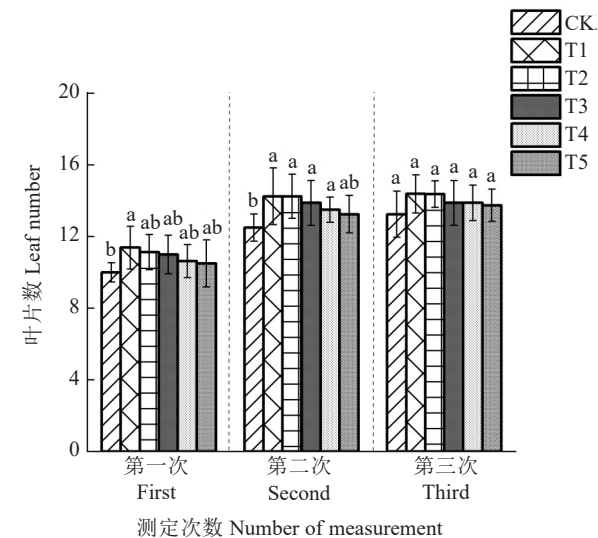


图 3 不同施肥处理对生菜叶片数的影响
Fig. 3 Effects of different fertilization treatments on the leaf number of lettuce

高于 T5。综上,100 g·L⁻¹ HA-PAM 的液体肥对促进生菜叶片数增加效果最好。

2.2 不同施肥处理对生菜地上部鲜质量和品质的影响

由表 2 可知,T1~T5 处理地上部鲜质量和维生素 C 含量均高于 CK,T1 处理地上部鲜质量和维生素 C 含量均最高,分别较 CK 提高了 28.03%、23.02%,但该处理硝酸盐含量相对较高(2 346.79 mg·kg⁻¹)。而 T3 处理地上部鲜质量较高,为 69.95 g,较 CK 提高了 18.32%;硝酸盐含量最低,为 1 474.93 mg·kg⁻¹,较 CK 显著降低 46.53%,为品质和产量的协同点。上述结果表明,添加适宜浓度的 HA-PAM 液体肥在促进生菜生长与改善营养品质方面具有积极作用,其中 200 g·L⁻¹ HA-PAM 的液体肥在协调产量形成与降低硝酸盐积累方面效果较佳。

表 2 不同施肥处理对生菜地上部鲜质量和品质的影响
Table 2 Effects of different fertilization treatments on lettuce aboveground fresh mass and quality

处理 Treatment	地上部鲜质量 Aboveground fresh mass/g	w(维生素 C) Vitamin C content/ (μg·g ⁻¹)	w(硝酸盐) Nitrate content/ (mg·kg ⁻¹)
CK	59.12±5.63 b	31.88±5.21 a	2 758.09±38.93 a
T1	75.69±3.31 a	39.22±3.82 a	2 346.79±25.56 b
T2	73.44±9.18 ab	38.56±4.57 a	2 178.47±25.30 c
T3	69.95±2.33 ab	32.17±2.18 a	1 474.93±42.07 e
T4	64.95±2.64 b	33.39±8.81 a	1 742.94±10.38 d
T5	65.32±3.52 b	32.48±2.10 a	1 540.78±11.35 e

注:不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。下同。
Note: Different small letters indicate significant difference among different treatments at 0.05 level. The same below.

2.3 不同施肥处理对生菜根系的影响

2.3.1 不同施肥处理对生菜根系鲜质量和根系生长指标的影响 由表 3 可知,T1~T5 处理生菜根鲜质量、总根长、根表面积、根体积均高于 CK,且 T1 处理均最高。虽各处理间根系鲜质量差异均不显著,但形态指标差异显著,T1 处理总根长、根表面积和根体积分别较 CK 显著增加 37.37%、44.56%和 31.64%。T1~T4 处理随着 HA-PAM 浓度增加,总根长、根表面积和根体积均呈下降趋势。此外,T5 处理的总根长和根表面积也均显著高于 CK。综上,添加适宜浓度 HA-PAM 的液体肥可通过优化根系结构增强其生理功能,其中添加 100 g·L⁻¹ HA-PAM 的液体肥对根系形态的改善效果最为显著。

2.3.2 不同施肥处理对生菜根系活力的影响 由图 4 可知,T1~T4 处理生菜根系活力均显著高于

表3 不同施肥处理对生菜根系鲜质量和根系生长指标的影响

处理 Treatment	根鲜质量 Fresh root mass/g	总根长 Total root length/cm	根表面积 Root surface area/cm ²	根体积 Root volume/cm ³
CK	5.51±0.59 a	518.65±17.46 e	104.14±14.65 d	1.77±0.30 b
T1	6.91±1.12 a	712.48±24.97 a	150.49±16.81 a	2.33±0.33 a
T2	6.64±0.68 a	697.07±22.45 a	141.55±11.75 ab	2.02±0.20 ab
T3	6.45±0.64 a	675.13±18.90 b	134.06±9.33 ab	1.97±0.27 ab
T4	5.96±1.06 a	548.68±12.37 d	111.25±8.46 cd	1.81±0.27 b
T5	5.98±0.66 a	615.71±21.00 c	125.07±1.04 bc	1.81±0.30 b

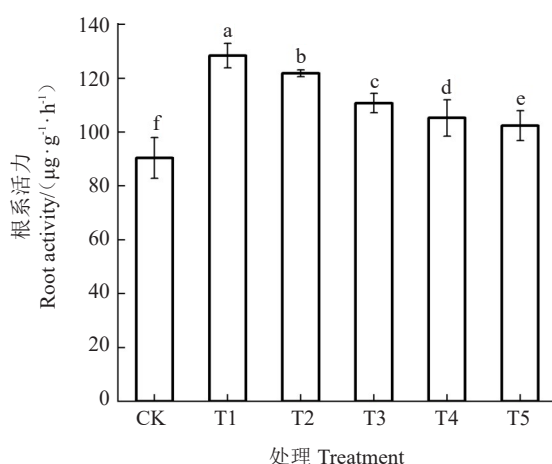


图4 不同施肥处理对生菜根系活力的影响

Fig. 4 Effects of different fertilization treatments on the root activity of lettuce

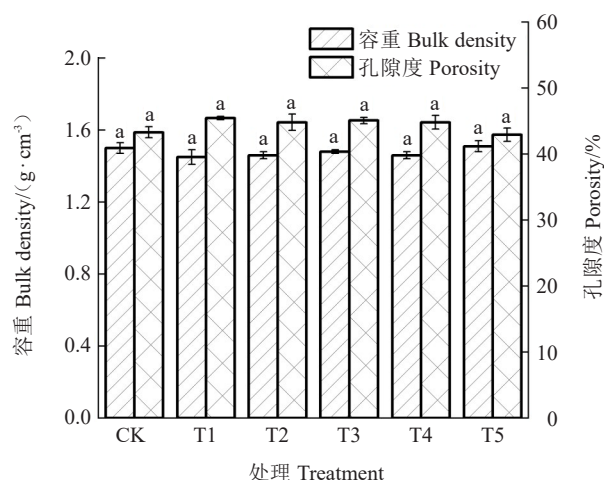


图5 不同施肥处理对土壤容重和孔隙度的影响

Fig. 5 Effects of different fertilization treatments on soil bulk density and porosity

CK、T5,且随着 HA-PAM 浓度增加,根系活力逐渐降低,呈现明显的浓度效应,与根系形态指标的变化趋势一致,其中 T1 处理根系活力达 $128 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,较 CK 显著提高 42.22%,为各处理最优。

2.4 不同施肥处理对土壤理化性质的影响

2.4.1 不同施肥处理对土壤容重和孔隙度的影响 由图 5 可知,各处理土壤的容重与孔隙度差异均不显著。HA-PAM 处理土壤容重均较 CK 降低,孔隙度均较 CK 增加,其中 T1 处理效果最佳,土壤容重较 CK 下降 3.33%,孔隙度较 CK 提高 4.60 百分点。相比之下,T5 处理容重略高于 CK,孔隙度降低 0.83 百分点,改良效果不明显。综上,适宜浓度的 HA-PAM 液体肥可有效改善土壤结构,增强其通气性与持水能力,添加 $100 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ HA-PAM 的液体肥处理对土壤容重和孔隙度的改善效果最佳。

2.4.2 不同施肥处理对土壤团聚结构的影响 由图 6 可知,不同施肥处理对土壤团聚结构的调控效应存在差异,T1~T5 处理 $<0.25 \text{ mm}$ 微粒径团聚体占比均低于 CK; $>2 \text{ mm}$ 大粒径团聚体、 $0.25 \sim 2 \text{ mm}$ 中粒径团聚体占比均高于 CK。且随着 HA-PAM

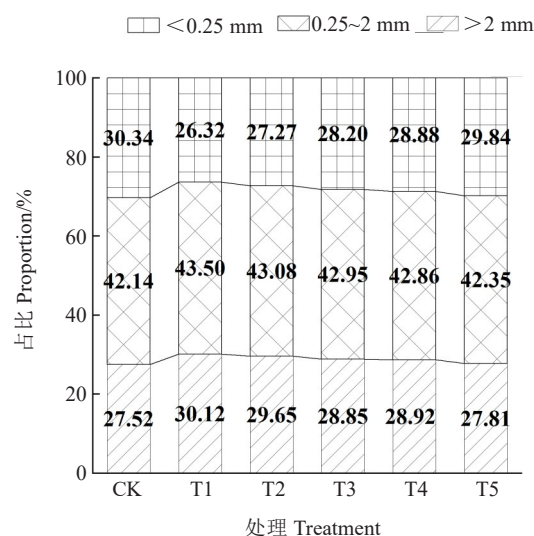


图6 不同施肥处理对土壤团聚体粒径分布的影响

Fig. 6 Effects of different fertilization treatments on soil aggregate size distribution

浓度升高,T1~T4 处理 $>2 \text{ mm}$ 大粒径团聚体、 $0.25 \sim 2 \text{ mm}$ 中粒径团聚体占比均呈降低的趋势,对土壤团聚结构的改良效应持续减弱。其中 T1 处理的改良效果最佳,其 $>2 \text{ mm}$ 大粒径团聚体占比较 CK 提

升 2.60 百分点,0.25~2 mm 中粒径团聚体占比较 CK 提高 1.42 百分点;而 T5 处理各粒径团聚体占比与 CK 接近,对土壤团聚结构改良效果较弱。综上,添加 100 g·L⁻¹ HA-PAM 的液体肥对土壤团聚结构的改良效果最优。

2.4.3 不同施肥处理对土壤理化性质的影响

由表 4 可知,HA-PAM 处理碱解氮、有效磷、速效钾和有机质含量均显著高于 CK,pH 均低于 CK,其中 T1 处理均最优,pH 较 CK 降低 0.08,碱解氮、有效磷、速效钾和有机质含量分别较 CK 显著提高了 14.48%、12.32%、6.61%和 0.13 百分点,T5 处理对土壤理化指标的改善效果均弱于 HA-PAM 处理。综

表 4 不同施肥处理对生菜收获后土壤理化性质的影响

Table 4 Effects of different fertilization treatments on soil physical and chemical properties after harvesting lettuce

处理 Treatment	pH	w(碱解氮) Alkali hydrolyzed nitrogen content/(mg·kg ⁻¹)	w(有效磷) Available phosphorus content/(mg·kg ⁻¹)	w(速效钾) Available K content/ (mg·kg ⁻¹)	w(有机质) Organic matter content/%
CK	8.65±0.04 a	54.84±1.08 d	17.45±0.24 e	192.75±1.23 f	0.94±0.01 e
T1	8.57±0.03 c	62.78±0.59 a	19.60±0.17 a	205.50±0.77 a	1.07±0.02 a
T2	8.59±0.03 bc	59.98±0.34 b	18.94±0.18 b	202.07±0.86 b	1.03±0.02 b
T3	8.61±0.06 abc	59.77±0.50 b	18.74±0.33 b	200.43±0.56 c	1.01±0.03 bc
T4	8.62±0.07 abc	58.88±0.53 b	18.33±0.21 c	198.58±0.62 d	0.99±0.01 cd
T5	8.64±0.02 ab	56.31±0.55 c	17.86±0.09 d	195.51±0.58 e	0.96±0.04 de

上,添加 100 g·L⁻¹ HA-PAM 的液体肥处理对土壤各理化指标的改良效果均最优。

2.5 不同施肥处理的经济效益分析

由表 5 可知,各处理中 T1 处理产量、净增收与投入产出比均最高,分别为 591.2 kg·667 m⁻²、305.40 元·667 m⁻²、1:11.75;T3 处理产量为

699.5 kg·667 m⁻²,净增收 164.60 元·667 m⁻²,投入产出比为 1:3.17,该处理在保持较高产量的同时可显著降低生菜硝酸盐含量,兼顾高产与优质特性,可实现优质优价附加收益,推广价值突出;市售同类功能型液体肥(T5 处理)净增收 24.00 元·667 m⁻²、投入产出比仅为 1:0.24。

表 5 不同施肥处理的经济效益分析

Table 5 Economic benefit analysis of different fertilization treatments

处理 Treatment	单株地上部鲜质量 Aboveground fresh mass per plant/g	产量 Yield/ (kg·667 m ⁻²)	增产量 Yield increase/ (kg·667 m ⁻²)	收益增加 Income increase/ (Yuan·667 m ⁻²)	肥料成本增加 Increase in fertilizer costs/(Yuan·667 m ⁻²)	净增收 Net revenue increase/ (Yuan·667 m ⁻²)	投入产出比 Input-output ratio
CK	59.12	591.2					
T1	75.69	756.9	165.7	331.40	26	305.40	1:11.75
T2	73.44	734.4	143.2	286.40	39	247.40	1:6.34
T3	69.95	699.5	108.3	216.60	52	164.60	1:3.17
T4	64.95	649.5	58.3	116.60	65	51.60	1:0.79
T5	65.32	653.2	62.0	124.00	100	24.00	1:0.24

3 讨论与结论

本研究结果表明,适宜浓度 HA-PAM 的液体肥能够通过改善根区土壤环境、优化根系形态与功能、调控养分吸收与代谢等多重机制,协同促进生菜生长发育并提升其品质。

本研究表明,低浓度 HA-PAM(T1,100 g·L⁻¹)液体肥对生菜叶绿素合成具有持续促进作用;随着植株生长和施肥次数增加,高浓度 HA-PAM 液体肥对

生菜的促进效应逐渐显现,但仍均低于 T1 处理,说明适宜浓度 HA-PAM 的液体肥有利于提高生菜叶片叶绿素相对含量,利于植株光合物质积累;但高浓度 HA-PAM 对 SPAD 值的提升效果有所下降,与地上生物量变化趋势基本吻合。就植株生长及根系响应而言,添加 100 g·L⁻¹ HA-PAM 的液体肥生菜地上部鲜质量、总根长较 CK 分别显著提高 28.03%、37.37%,根系活力较 CK 提高 42.22%;随 HA-PAM 添加浓度的升高,促生促根效果逐步下

降,表现出明显的浓度效应。周丽平等^[21]、张水勤等^[22]研究均表明腐植酸可调控根际激素水平,促进根系发生;陈方鑫等^[23]、邵社刚等^[24]研究表明PAM改良剂能够优化土壤环境,利于根系伸展。本结果与上述研究一致,HA-PAM通过化学键合实现腐植酸与松土剂功能协同,克服二者简单物理混合的配伍缺陷。但本试验高浓度下促生效果减弱,区别于部分文献中改良剂用量提升效果持续增加的结论,推测可能是盆栽有限根域下高浓度HA-PAM会带来短暂根区胁迫,抵消部分促生作用。

在生菜营养品质调控方面,本试验中添加 $100\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ HA-PAM的液体肥处理维生素C含量达 $39.22\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$;添加 $200\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ HA-PAM的液体肥处理在维持较高地上部鲜质量(69.95 g)的同时,硝酸盐含量较CK显著降低46.53%。孙海燕等^[25-26]也发现腐植酸可增强植株抗氧化能力,利于维生素C积累;刘敏等^[27]、Xue等^[28]研究表明腐植酸能够调控氮代谢关键酶活性,促进氮素同化转化,减少蔬菜硝酸盐累积。

在土壤理化性质与团聚结构改良方面,添加 $100\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ HA-PAM的液体肥处理土壤容重较CK下降3.33%,孔隙度较CK提高4.60个百分点, $>2\text{ mm}$ 、 $0.25\sim 2\text{ mm}$ 团聚体占比分别较CK提升2.60、1.36个百分点,土壤碱解氮、有机质含量较CK分别显著提高14.48%、0.13个百分点;随HA-PAM添加浓度升高,改土效果减弱。谭文峰等^[29]指出胶结物质是土壤团聚体形成的关键;He等^[30]证实腐植酸-高分子复合体系依靠絮凝、桥接作用促进团聚体稳定。腐植酸与PAM简单复配易分层失效,而接枝改性HA-PAM在液体肥中稳定性更强,可同步改良土壤物理性状,活化养分。本试验中各处理土壤容重、孔隙度差异均不显著,可能是短期盆栽条件下土壤物理结构改良效果有限。

经济效益方面,基于本试验盆栽折算得到的理论经济效益,添加 $100\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ HA-PAM的液体肥处理净增收 $305.40\text{ 元}\cdot 667\text{ m}^2$ 、投入产出比达1:11.75,经济效益表现最优;添加 $200\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ HA-PAM的液体肥处理净增收 $164.60\text{ 元}\cdot 667\text{ m}^2$,投入产出比1:3.17。虽然其经济收益低于添加 $100\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ HA-PAM的液体肥处理,但可显著降低生菜中的硝酸盐含量,提升蔬菜商品品质。

综上所述,HA-PAM液体肥通过改良土壤物理结构、优化根系形态、调控植株生理代谢,实现土

壤-根系-植株系统的协同调控。综合来看,添加 $100\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ HA-PAM的液体肥促生改土效果突出,经济效益最高;添加 $200\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ HA-PAM的液体肥在兼顾产量、降低硝酸盐含量方面优势明显。本研究可为叶菜类作物精准施肥与土壤培肥提供理论依据和技术参考。

参考文献

- [1] 涂攀峰,胡克伟,胡义熬,等.液体肥料配肥站介绍及发展趋势[J].磷肥与复肥,2021,36(4):49-52.
- [2] 张方博,侯玉雪,敖园园,等.土壤紧实胁迫下根系-土壤的相互作用[J].植物营养与肥料学报,2021,27(3):531-543.
- [3] 陈禹合,闫轶博,胡宏志,等.液态肥稳定剂的研究进展及展望[J].中国土壤与肥料,2024(9):219-227.
- [4] 王元奇,王建超,王烁荣,等.腐植酸功能调控及其在农业绿色增效中的作用[J].植物营养与肥料学报,2025,31(12):2370-2382.
- [5] 李贺男,李锦朝,付浩川,等.土壤改良措施对玉米-大豆间作体系土壤结构、养分及作物产量的影响[J].干旱地区农业研究,2026,44(1):232-239.
- [6] Xie L, Lu Q Y, Mao X H, et al. Probing the intermolecular interaction mechanisms between humic acid and different substrates with implications for its adsorption and removal in water treatment[J]. Water Research, 2020(176):115766.
- [7] Yang C J, Zeng Q R, Yang Y, et al. The synthesis of humic acids graft copolymer and its adsorption for organic pesticides[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2014, 20(3):1133-1139.
- [8] 杨会国,马丽萍,张彦彬,等.腐植酸接枝共聚物的研究进展及应用前景[J].应用化工,2024,53(4):873-876.
- [9] 刘小培,李中贤,王俊伟,等.黄腐酸钾接枝共聚物的合成及其在盐碱土调理的应用[J].应用化工,2025,54(1):126-130.
- [10] 尼萌.丙烯酸/丙烯酰胺共聚合成聚丙烯酰胺的研究[J].炼油与化工,2022,33(3):26-29.
- [11] 李柯,甄卫军,孙明广,等.低密度聚乙烯/改性腐植酸钠复合材料的制备与性能研究[J].塑料科技,2018,46(6):60-65.
- [12] 王惟帅,杨正礼,张爱平,等.玉米秸秆纤维素保水缓释肥制备及应用[J].农业工程学报,2020,36(2):236-244.
- [13] 龙明杰,张宏伟,曾繁森.高聚物土壤结构改良剂的研究I.淀粉接枝共聚物改良赤红壤的研究[J].土壤学报,2001,38(4):584-589.
- [14] 周丽平,袁亮,赵秉强,等.腐植酸的组成结构及其对作物根系调控的研究进展[J].植物营养与肥料学报,2022,28(2):334-343.
- [15] 杨攀,杨诗雯,李磊,等.生菜研究进展综述[J].现代园艺,2020,43(15):34-36.
- [16] 朱瑞,丹媛媛,蔡星伟,等.聚硝基苯乙烯的一步合成I.聚合工艺、溶剂极性、浓硫酸用量的影响[J].合成树脂及塑料,2014,31(4):9-12.

- [17] 钱成宇,郭景丽,任荣奎,等.腐植酸尿素对土壤矿质氮含量及生菜品质的影响[J].中国瓜菜,2024,37(1):110-116.
- [18] 王亮亮,宋伟杰,高志山,等.土壤渗透剂对番茄生长发育的影响[J].中国土壤与肥料,2018(6):198-201.
- [19] Tian S Y, Zhu B J, Yin R, et al. Organic fertilization promotes crop productivity through changes in soil aggregation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2022(165):108533.
- [20] 胡家钰,高兵阳,高怡帆,等.氮肥与腐植酸配施对砂质中低产田土壤质量和作物产量的影响[J].应用生态学报,2025,36(9):2639-2648.
- [21] 周丽平,袁亮,赵秉强,等.不同用量风化煤腐殖酸对玉米根系的影响[J].中国农业科学,2019,52(2):285-292.
- [22] 张水勤,袁亮,林治安,等.腐植酸促进植物生长的机理研究进展[J].植物营养与肥料学报,2017,23(15):1065-1076.
- [23] 陈方鑫,卢少勇,冯传平.农业秸秆复合 PAM 对湖滨带土壤改良效果的研究[J].农业环境科学学报,2016,35(4):711-718.
- [24] 邵社刚,李婷,朱立安,等.土壤改良剂 PAM 在生土改良中的应用及效果[J].西南师范大学学报(自然科学版),2023,48(6):97-103.
- [25] 孙海燕,孔德庸,胡慧影,等.腐植酸浸种对低温胁迫下玉米幼苗抗氧化系统的影响[J].生态学报,2021,41(13):5385-5397.
- [26] 孙海燕,牡丹凤,郭伟.腐植酸浸种对低温胁迫下菜豆幼苗抗氧化系统的影响[J].植物生理学报,2020,56(11):2408-2416.
- [27] 刘敏,李絮花,刘文博,等.腐植酸对番茄苗期氮素代谢的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):327-331.
- [28] Xue S D, Yi X Y, Peng J J, et al. Fulvic acid enhances nitrogen fixation and retention in paddy soils through microbial-coupled carbon and nitrogen cycling[J]. Environmental Science & Technology, 2024:7616.
- [29] 谭文峰,许运,史志华,等.胶结物质驱动的土壤团聚体形成过程与稳定机制[J].土壤学报,2023,60(5):1297-1308.
- [30] He W P, Luo J C, Wu Y J, et al. Differently charged polyacrylamides (PAMs) significantly affect adsorption affinity and associated floc growth behaviors during ballasted flocculation: Performance and mechanism[J]. Separation and Purification Technology, 2024(329):125279.