

腐植酸对水培生菜生长及矿质元素吸收特性的影响

李兴杰, 胡笑涛, 杨鑫, 苏苑君, 王瑞

(西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:以香港玻璃脆生菜为试材,在日本山崎配方中添加6种不同浓度的腐植酸,处理后每10 d测定生菜的产量、水分消耗量及营养液中主要矿质元素含量,以研究腐植酸对水培生菜生长及矿质元素吸收的影响。结果表明:腐植酸浓度在 $0\sim 1.41\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 内随着腐植酸浓度的增加,生菜地上部和地下部鲜干质量随之增加,腐植酸浓度为 $1.41\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 时,上述指标同时达到最大。腐植酸对营养液的酸碱度有缓冲作用。腐植酸浓度在 $0\sim 1.41\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 内,随着其浓度的增加,生菜水分利用效率逐渐增大,对矿质元素的利用效率逐渐提高。腐植酸对生菜吸收矿质元素的影响不显著,不同的腐植酸处理,生菜吸收无机养分的能力不同。综合产量和矿质元素利用等因素,添加 $1.41\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 的腐植酸可达到高产、节水、省肥的生产效应。

关键词:腐植酸;水培生菜;产量;水分利用效率;矿质元素吸收

中图分类号:S 636.204⁺.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2016)20-0009-06

腐植酸(humic acid, HA)是由芳香族及多种官能团构成的天然有机高分子化合物,广泛存在于煤炭和土壤中,它发挥增氮解磷促钾作用,能够促进作物对矿质元素的吸收,提高肥料利用率,提高作物产量^[1-3]。生菜(*Lactuca sativa*)含有丰富的维生素和矿物质,已成为植物工厂水培系统中栽培面积最大的绿叶蔬菜^[4]。营养液的配制是无土栽培的核心技术之一,营养液的组成和浓度直接影响作物生长发育的速率^[5]。在无机营养液的基础上添加适宜浓度的腐植酸,在保证植株正常生长的前提下,提高生菜的养分利用效率,科学动态地管理营养液,对实现高级的无机-有机复合营养液发展和优质、高产、低耗的新型农业生产具有重要意义。已有大量研究表明,腐植酸凭借其独特的络合、吸附、刺激微生物生长等生化特性,能够使土壤中速效氮和速效钾的含量有所提高,减少土壤对速效磷的固定,形成易于作物吸收的腐植酸微量元素螯合物^[6-8]。腐植酸有效促进了作物(甘薯、小白菜、番茄等)对氮、磷、钾等元素的吸收利用,提高了矿质元素生产效率与作物产量^[9-12]。周崇峻等^[13]在3种无机配方中添加不同浓度的腐植酸水培生

菜,发现在山崎配方的基础上添加低浓度的腐植酸可以显著提高收获时的生菜产量。CIMRIN等^[14]研究表明,添加腐植酸提高了磷肥利用率和肥效,提高了生菜吸磷量,但单施腐植酸对生菜的增产效果不明显。总体上,前人对腐植酸的研究多集中在土壤领域,用营养液水培来探讨腐植酸的作用效应也集中在对生菜产量和品质的影响,对主要营养元素利用效率的影响研究很少。迄今为止,尚鲜见对腐植酸在无土栽培营养液特性和矿质元素吸收的动态变化方面的报道。因此,以腐植酸为试验材料,探讨不同浓度的腐植酸处理对生菜生长、营养液特性、矿质元素吸收利用的影响,旨在为实现生菜营养液的动态管理提供量化指标,为腐植酸在水培领域的研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2015年4—5月在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室人工光植物工厂里进行,试验过程中温度控制为 $19\sim 23\text{ }^{\circ}\text{C}$,光照强度为 $2\ 500\text{ lx}$,光照时间为 $12\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

供试品种为香港玻璃脆散叶生菜。腐植酸钠,化学纯,黑色粉末,易溶于水,上海阿拉丁化工公司生产。其重要参数如下:水溶 HAd%:56.4%,干燥失重:23.2%,灰分:21.5%,pH 9.9,电导率: $1.63\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$,总氮: $0.14\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,钾: $0.63\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,钙: $0.08\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,镁: $0.41\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

1.2 试验方法

1.2.1 营养液处理 试验无机营养液采用日本山崎

第一作者简介:李兴杰(1991-),女,硕士研究生,研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail:lxj33843356@163.com.

责任作者:胡笑涛(1972-),男,博士,教授,现主要从事节水灌溉理论与技术研究等工作。E-mail:huxiaotao11@nwsuaf.edu.cn.

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA103004)。

收稿日期:2016-07-21

配方营养液^[15],大量元素含量为 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$: $236 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, KNO_3 : $404 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$: $123 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$: $57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,微量元素采用通用配方^[15],其中 EDTA-NaFe 含量为 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。以日本山崎配方营养液为对照(CK),在此基础上添加不同浓度的腐植酸(将腐植酸钠浓度折合成纯腐植酸),共设置 6 个试验处理,A:对照,山崎全营养液;B:山崎 + $0.28 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 腐植酸;C:山崎 + $0.56 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 腐植酸;D:山崎 + $0.84 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 腐植酸;E:山崎 + $1.13 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 腐植酸;F:山崎 + $1.41 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 腐植酸。

1.2.2 育苗与管理 采用育苗移栽方式,2015 年 4 月 16 日生菜长出 4~5 叶时,清水洗净根部后用海绵包裹定植于水箱上,每箱 3 株,每处理设置 6 只培养箱,开始试验处理,并用 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 H_2SO_4 或者 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaOH 调节营养液的 pH 5.5~6.5(适宜生菜生长的 pH 范围),此后不再调节营养液的 pH,生长中后期利用充气泵供氧,处理后 40 d 收获生菜。水箱内径规格为 $28.5 \text{ cm} \times 23 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$,试验开始时每个水箱中营养液为 7 L。从定植日起,每 2 d 测定 1 次营养液中 pH 和电导率值(EC);每 5 d 从其中 3 只水箱中取 1 次营养液,每次取营养液 50 mL,测定营养液中氮、磷、钾、钙和镁浓度,并称量这 3 只培养箱的质量;每 10 d 分别从 3 只水箱中各取 1 株共 3 株长势相近的生菜,测量生菜的根及叶片鲜质量和干质量;5 月 26 日,即收获时从另外 3 只水箱中取 3 株长势相近的生菜,重复 2 次,分别用于称量生菜产量和品质指标。该试验采用的营养液浓度较低,营养液全部用盖板遮住,每次取样用营养液较少,故蒸发和取样造成的营养液减少可忽略不计。因而,测定营养液质量的减少量即可认为是生菜的消耗水量,营养液中矿质元素的减少量即可认为是生菜的吸收元素量。

1.3 项目测定

生菜收获时测定产量,将地上部分和地下部分分开取样,采用精确度为 0.01 g 的电子天平称量各自鲜质量,采用精确度为 0.001 g 的电子天平测得生菜各部分干质量。

在营养液监测方面,pH 采用 IS126pH 计测定,电导率值(EC)采用 FE30K PLUS 测定;使用精度为 1 g 的电子天平称取培养箱质量;总氮浓度采用过硫酸钾消煮法^[16]测定,总磷浓度采用钼酸铵分光光度法^[16]测定,金属元素钾、钙、镁浓度用原子吸收分光光度法^[16]测定。

水分利用效率($\text{WUE}, \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) = 生菜干物质质量(Y, g)/耗水量(TET, L)^[17],植株矿质元素吸收量($\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$) = 矿质元素浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) × 水深(cm) × 水箱底面积(cm^2)/1 000/3(株)。植株矿质元素利用效率($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) = 植株干物质质量(g)/矿质元素吸收量(g)^[18]。

1.4 数据分析

数据处理采用 Excel 软件进行一般计算和作图,统计分析采用 SPSS 17.0 软件,LSD 法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同腐植酸浓度下的营养液环境 pH 和电导率的变化

pH 反映了溶液中的酸碱度,它不仅影响营养元素的存在状态,也对植物的生长状况和抗逆性产生影响,适宜大多数作物生长的营养液的 pH 在 5.5~6.5^[5,19]。随着作物对水分和养分的不断吸收,根系分泌酸性物质,营养液中的 pH 会不断发生变化。由图 1 可知,在生菜的整个生育期,所有处理的营养液中 pH 总体呈现先升后降,而后又升高的趋势。生长前期营养液的 pH 逐渐升高,最高达 6.45,生长中期各处理营养液的 pH 出现了不同程度的降低,最低达 4.23,酸性较强,而后又不断升高至 6.0~6.4。腐植酸处理下的营养液均在 5 月 16 日出现了各自最低的 pH,又缓慢上升至适宜的生长范围,而对照组营养液中的 pH 在 5 月 11 日达到最低,之后又骤然升高。腐植酸对 pH 有调节和缓冲作用的机理可能为腐植酸的结构是弱酸-碱体系,包括羧酸-羧酸盐、酚酸-酚酸盐缓冲体系,所以在很宽的 pH 范围内具有很高的缓冲能力;腐植酸可以同金属阳离子(如铝离子、三价铁离子)形成稳定的络合物,减少了氢离子的生成几率,起到了提高并缓冲 pH 的效果^[20]。

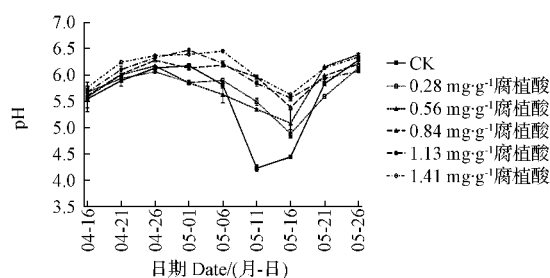


图 1 营养液中 pH 的动态变化

Fig.1 Dynamic change of pH in nutrient solutions

电导率反映了营养液浓度,它直接影响到作物的产量和品质。由图 2 可知,随着腐植酸添加浓度的增加,营养液中的电导率值逐渐升高,整个生育期中, $1.14 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 腐植酸处理的电导率最高,这是由于腐植酸中含有很多矿质元素,增加了营养液中的离子浓度。营养液中的电导率值随着生菜生长时间的延长,在 $1.74 \sim 2.09 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 小幅度浮动,各处理的电导率值均在采收前 5 d 达到最大,可能是营养液中积累了大量根系分泌物,作物的耗水速度大于吸收矿质元素速度的原因,随后耗水速度减小,电导率值降低。

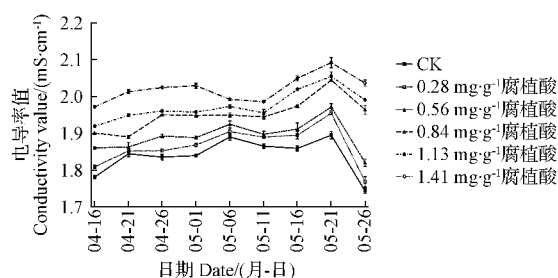


图2 营养液中电导率值的动态变化

Fig. 2 Dynamic change of EC value in nutrient solutions

2.2 不同腐植酸浓度对生菜产量的影响

由表1可以看出,生菜地上部分和根干鲜质量随着腐植酸添加浓度的增加逐渐增大,均在腐植酸浓度为 $1.41 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时达最大。在腐植酸浓度为 $1.41 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时,生菜的地上鲜质量显著高于对照组和 $0.84 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 腐植酸处理,分别高出 52.33% 和 13.70% 。生菜在 $1.13 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 腐植酸处理下,地上鲜质量和根鲜质量分别比 $1.41 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 处理下降 3.58% 和 5.37% 。增加腐植酸浓度,生菜地上干质量和根干质量逐渐增加,在腐植酸浓度为 $1.41 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时,生菜地上干质量和根干质量分别比对照组明显增加 87.24% 和 43.65% ,促进了生菜的生长。这4个指标在 $0.28 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 腐植酸处理和对照组之间差异均不显著,这可能是腐植酸添加浓度小,尚未充分发挥其增产效应的原因。

表1 腐植酸对水培生菜产量的影响

Table 1 Effect of humic acid on the output of hydroponic lettuce

腐植酸浓度 Humic acid concentration /($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	地上鲜质量 Shoot fresh mass /($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	根鲜质量 Root fresh mass /($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	地上干质量 Shoot dry mass /($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	根干质量 Root dry mass /($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)
CK	$31.32 \pm 0.73\text{a}$	$3.85 \pm 0.03\text{a}$	$0.870 \pm 0.03\text{a}$	$0.126 \pm 0.05\text{a}$
0.28	$32.03 \pm 0.88\text{a}$	$3.87 \pm 0.15\text{a}$	$0.902 \pm 0.08\text{a}$	$0.135 \pm 0.06\text{a}$
0.56	$34.41 \pm 0.09\text{a}$	$4.45 \pm 0.11\text{b}$	$1.312 \pm 0.09\text{b}$	$0.140 \pm 0.05\text{a}$
0.84	$41.96 \pm 1.15\text{b}$	$5.35 \pm 0.01\text{c}$	$1.388 \pm 0.07\text{b}$	$0.169 \pm 0.03\text{b}$
1.13	$46.00 \pm 0.04\text{c}$	$5.46 \pm 0.04\text{c}$	$1.469 \pm 0.13\text{b}$	$0.177 \pm 0.02\text{b}$
1.41	$47.71 \pm 0.24\text{c}$	$5.77 \pm 0.02\text{c}$	$1.629 \pm 0.10\text{c}$	$0.181 \pm 0.01\text{b}$

2.3 不同腐植酸浓度对生菜水分利用效率的影响

在水培生菜的整个生育期中,不同腐植酸浓度处理对生菜干物质积累和水分的消耗产生不同的影响,各生育阶段每消耗 1 L 水积累的干物质质量(即水分利用效率)如图3所示。可以看出,不同腐植酸浓度处理的生菜,其不同生长期对水分消耗的变化规律基本相同,均随着水培天数的延长,水分利用效率逐渐增大,采收前 10 d ,生菜的水分利用效率最高。对照组和 $0.28 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 腐植酸处理下的水分利用效率变化基本相同,在 $0.56 \sim 1.41 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 腐植酸浓度下,随着腐植酸浓度的增加,生菜各生长阶段水分利用效率都逐渐增大, $1.41 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 腐植酸处理的水分利用效率最大。添加腐植酸能够提高

生菜的水分利用效率,这可能是由于腐植酸能够提高作物光合作用,同时能够缩小叶面气孔张开度、有效减少水分蒸腾,这也是腐植酸类物质能作为抗旱剂的机理所在^[21]。

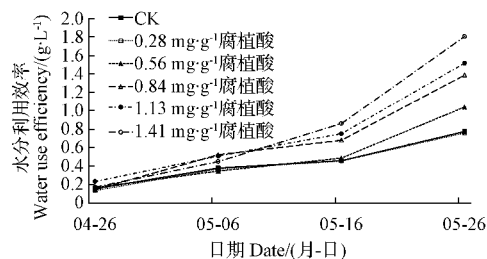


图3 不同腐植酸浓度处理的生菜水分利用效率的变化

Fig. 3 Variation of WUE of lettuce when treated with different humic acid concentration

2.4 不同腐植酸浓度对生菜矿质元素利用效率的影响

腐植酸培养 40 d 后,由营养液中矿质元素的含量和干物质含量计算出全生育阶段5种主要矿质元素利用效率。从表2可知,随着腐植酸添加浓度的增加,生菜对氮、磷、钾、钙、镁元素的利用效率提高,当腐植酸添加浓度为 $1.41 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时,各元素的矿质元素利用效率均达到最大。生菜对磷和钙的利用效率较高,对氮和钾元素的利用效率较低。

表2 不同腐植酸浓度下水培生菜矿质元素利用效率

Table 2 Use efficiencies of mineral elements of hydroponic lettuce under different humic acid concentration $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

腐植酸浓度 Humic acid concentration/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	氮 N	磷 P	钾 K	钙 Ca	镁 Mg
CK	24.01	157.51	18.07	216.96	-74.58
0.28	23.71	185.39	26.01	267.00	-82.86
0.56	29.24	391.29	31.12	303.58	-113.20
0.84	53.84	424.45	48.71	298.78	-182.93
1.13	51.62	459.24	68.55	422.74	-215.87
1.41	54.37	520.04	69.72	444.05	-256.56

2.5 不同腐植酸浓度对生菜矿质元素动态吸收的影响

从图4a可以看出,生菜对氮元素动态吸收趋势来看,腐植酸浓度对生菜氮元素吸收量的影响不显著,各腐植酸浓度处理对营养液氮元素吸收的规律相似,各阶段的吸收量差别不大,营养液中总氮量在生菜定植后 $10 \sim 20 \text{ d}$ 和采收前 10 d 剧烈下降,该时段吸收氮元素量较多,这2个时段生菜总氮吸收量占全生育期氮吸收量的 66% ,平均每天生菜吸收为 $11.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,这2个阶段是生菜需氮量最大的时期。

从图4b可以看出,腐植酸对生菜磷元素吸收量的影响显著,定植初期,随着腐植酸浓度的增大,营养液中磷元素的含量减少,这可能是由于腐植酸和磷肥进行络合的原因。在整个生育期内,定植后 10 d 和第 $20 \sim$

30 天磷元素的降幅最小,这 2 个阶段吸收磷元素的量仅占全生育期吸磷量的 11.36%,平均每天生菜吸收为 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。随着腐植酸浓度的增大,生菜全生育期营养液中磷元素含量逐渐减少,对照组磷含量变化最大,为 $7.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

从图 4c 可以看出,不同生育阶段不同腐植酸浓度下生菜吸钾量有一定的差异。定植初期吸钾量最少,除了 $1.41 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 腐植酸处理在采收前 10 d 吸钾量达到最大外,其它处理都在 5 月 6—16 日这一时间段的吸收量最大,对照组、0.28、0.56、0.84、1.13、 $1.41 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 腐植酸处理的吸钾量分别达到总钾吸收量的 39.97%、33.87%、45.02%、41.04%、42.03%和 39.01%。生菜在后 2 个生育阶段吸收量最大,占总吸钾量的 69.21%。

从图 4d 可以看出,腐植酸浓度处理营养液中钙的变化很显著,整个生育阶段,随着腐植酸浓度的升高,营养液中钙元素含量逐渐减少。随着生菜生长日期的延长,营养液中钙含量呈现先减小后增加的趋势,在 5 月 6 日营养液中钙量最少。这可能与腐植酸的络合作用以及根系分泌物有关。

从图 4e 可以看出,腐植酸浓度处理下的营养液中镁含量的变化很显著,整个生育阶段,随着腐植酸浓度的升高,营养液中镁含量逐渐减少。且随着生菜生长日期的延长,营养液中镁元素含量不断增加,在收获时营养液中镁含量最高,这说明各生育阶段生菜吸收的钙都比根系释放的多。

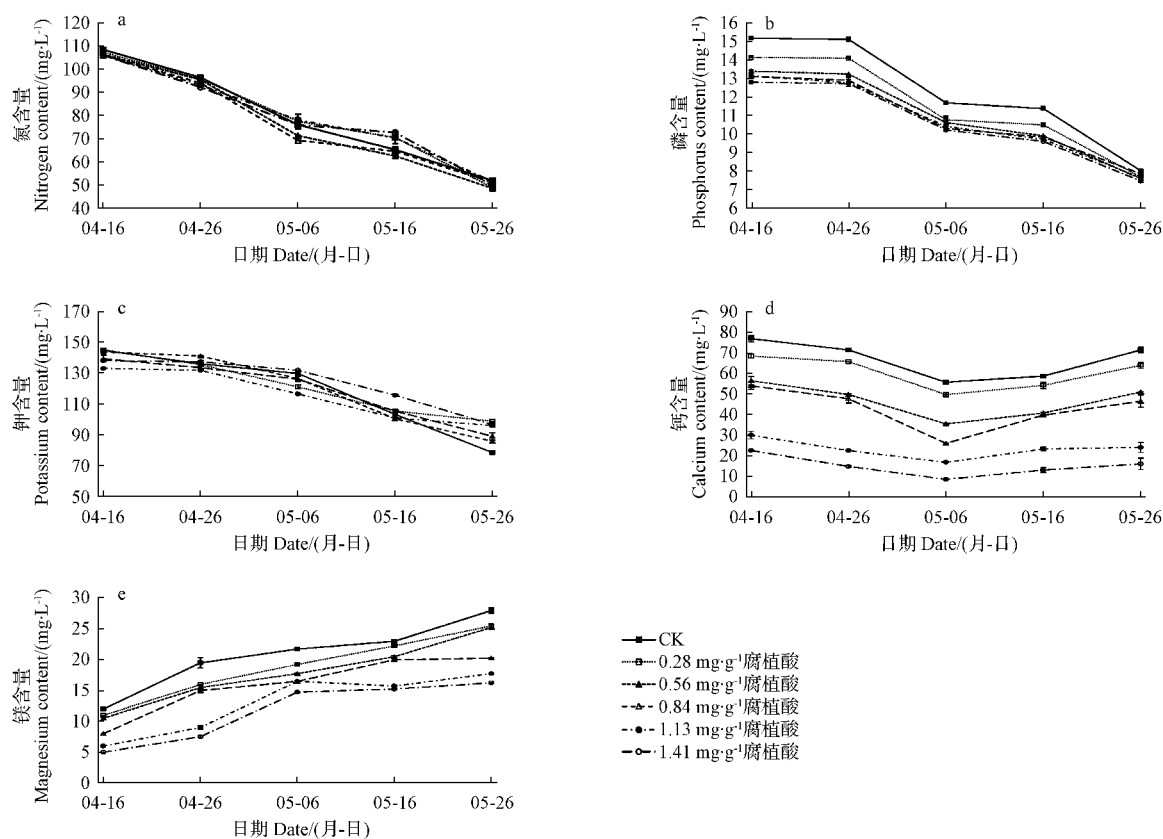


图 4 不同腐植酸浓度处理的营养液的氮、磷、钾、钙、镁浓度的动态变化

Fig. 4 Dynamics of N,P,K,Ca,Mg concentration of nutrient solution under different humic acid concentration

3 讨论与结论

地上部和地下部的鲜质量反映了生菜产量,生菜生长与腐植酸生理活性是密切相关的,其作用机理比较复杂^[22-23]。该试验表明,随着腐植酸浓度的增加,生菜地上和地下部分干鲜质量逐渐增大,腐植酸浓度为 $1.41 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时,腐植酸获得最大产量。这与高家合^[24]、赵日明等^[25]、周崇峻等^[13]在烤烟、水稻和丹参试验得出的“高抑低促”现象不同,这可能是该试验中所施

用的腐植酸钠中的腐植酸含量不高和试验设置的腐植酸浓度未达到抑制生长的程度,施用的时间也比较短的原因。

腐植酸由于其特有的物化性质,可以对作物生长的环境有缓冲作用,同时也增加了营养液中的营养元素含量。该试验结果表明,腐植酸作为一种有机添加剂,能够对营养液的酸碱度进行缓冲,不至于因为根系释放的大量的有机分泌物产生营养液 pH 的大幅度地变化,避免了根系长时间在酸性环境中生长,提高了养分的生物

有效性。

在整个生育期中,随着水培天数地增加,生菜水分利用效率不断增大,随着腐植酸添加浓度的增加,生菜的水分利用效率逐渐增大,对无机养分的元素利用效率逐渐增大,每消耗 1 L 水积累的干物质量以 $1.41 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 腐植酸处理最多,且该处理的各元素利用效率最大。

腐植酸对矿质元素动态吸收趋势的影响不显著,生菜对 N 和 P 的吸收能力比吸收 Ca 和 Mg 的能力强,且不同营养液处理,其吸收无机养分的能力不同。在整个生育期,营养液中的 Ca 和 Mg 含量有上升的趋势,这可能是根系分泌的有机物中这二者的含量大于根系吸收养分含量的原因。

参考文献

- [1] 马丙尧,邢尚军,马海林,等. 腐植酸类肥料特性及其应用展望[J]. 山东林业科技,2008,38(1):82-84.
- [2] 王日鑫. 腐植酸对化学肥料的增效作用研究[J]. 腐植酸,2007(2):22-27.
- [3] 杜会英,薛世川,孙忠富,等. 腐植酸复混肥对葡萄养分吸收利用的影响[J]. 土壤通报,2006,37(3):546-549.
- [4] DREWS M, SCHONHOF I, KRUMBELN A. Nitrate, vitamin C and sugar content of *Lactuca sativa* depending on cultivar and head development[J]. Gartenbauwissenschaft, 1996, 61(3):122-129.
- [5] 杨其长,魏灵玲,刘文科,等. 植物工厂系统与实践[M]. 北京:化学工业出版社,2012.
- [6] 成邵鑫,武丽萍,李丽. 腐植酸与速效磷肥的作用及 HA-P 的农化效应[J]. 腐植酸,2002(3):32-35.
- [7] 赵凤亮,李虹,曹彦圣,等. 施用腐植酸肥对氮素淋失及油菜菜生长的影响[J]. 热带作物学报,2015,36(7):1197-1200.
- [8] 周霞萍. 腐植酸应用中的化学基础[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- [9] 柳洪鹏,张立明,史春余,等. 腐植酸对甘薯吸收利用矿质元素的影响[J]. 中国农学通报,2011,27(9):171-175.
- [10] 王汝娟,王振林,梁太波,等. 腐植酸钾对食用甘薯品种钾吸收、利用和块根产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(3):520-526.
- [11] 李冉,封朝晖. 不同产地的腐植酸对小白菜养分利用的影响[J]. 中国土壤与肥料,2011(1):59-63.
- [12] OLIVARES F L, AGUIAR N O, ROSA R, et al. Substrate biofortification in combination with foliar sprays of plant growth promoting bacteria and humic substances boosts production of organic tomatoes[J]. Scientia Horticulturae, 2015, 183:100-108.
- [13] 周崇峻,张广才. 不同浓度腐植酸对水培生菜生长的影响[J]. 现代农业科技,2011(7):107-109.
- [14] CIMRIN K M, YILMAZ I. Humic acid applications to lettuce do not improve yield but do improve phosphorus availability[J]. Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant, 2005, 55:58-63.
- [15] 郭世荣. 无土栽培学[M]. 北京:中国农业出版社,2011.
- [16] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [17] 王会肖,刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展[J]. 水科学进展,2000,11(1):99-104.
- [18] 邢雪荣,韩兴国,陈灵芝. 植物养分利用效率研究综述[J]. 应用生态学报,2000,11(5):785-790.
- [19] 黄海波. 对无土栽培营养液平衡理论的提出和探讨[J]. 吉林农业,2010(5):60,42.
- [20] 成绍鑫. 腐植酸类物质概论[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- [21] 刘伟. 腐植酸水溶肥料对燕麦抗旱生理特性的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2014.
- [22] TREVISAN S, BOTTON A, VACCARO S. Humic substances affect *Arabidopsis* physiology by altering the expression of genes involved in primary metabolism, growth and development[J]. Environmental and Experimental Botany, 2011, 74:45-55.
- [23] MORA V, BACAICOA E, ZAMARRÑO A M, et al. Action of humic acid on promotion of cucumber shoot growth involves nitrate-related changes associated with the root-to-shoot distribution of cytokinins, polyamines and mineral nutrients[J]. Journal of Plant Physiology, 2010, 167:633-642.
- [24] 高家合. 腐植酸对烤烟生长的影响研究[J]. 土壤肥料科学, 2006, 22(8):328-330.
- [25] 赵日明,苏益,蔺万煌. 腐植酸对水稻生长及相关生理指标的影响[J]. 安徽农业科学,2013,41(36):14163-14165.

Effect of Humic Acid Application on Growth and Metal Elements Absorption of Nutrients by Lettuce in Hydroponic Culture

LI Xingjie, HU Xiaotao, YANG Xin, SU Yuanjun, WANG Rui

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: To study the influence of humic acid application on growth and nutrient absorption of lettuce in hydroponic culture, six different mass concentration of humic acid were added in the famous Yamazaki formula, the yield and water consumption of lettuce were measured per ten days after treatments, so main mineral element content in hydroponic culture as. The results showed that the fresh weight and dry weight of hydroponic lettuce increased with the humic acid concentration raising with $0-1.41 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. The $1.41 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ concentration humic acid, which was the concentration of the highest volume for each aforementioned index. Humic acid was cushion for the nutrient solution pH value. At the condition of $0-1.41 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ concentration humic acid, water use efficiency (WUE) and use efficiencies of mineral

DOI:10.11937/bfyy.201620004

不同薄壳山核桃单株种子果实品质与发芽特性比较

邓秋菊^{1,2}, 王克春¹, 曹凡^{1,2}, 彭方仁¹, 梁有旺^{1,2}, 吴斌¹

(1. 南京林业大学 林学院, 江苏 南京 210037; 2. 南京林业大学 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037)

摘 要:以南京地区 7 株薄壳山核桃单株果实为研究对象,通过测定果实大小、出仁率、粗蛋白、可溶性糖、水分、灰分、粗脂肪和淀粉含量等指标,研究其果实品质并进行发芽试验比较发芽特性,以期对薄壳山核桃的良种选育、品种改良及良种推广提供基础参考依据。结果表明:不同单株的果实品质存在显著差异;果实出仁率是影响种子发芽率的重要指标;淀粉与幼苗长势呈显著正相关;分析选育出 5 号单株为培育砧木苗的最优单株,适宜作为南京地区优良单株进行培育和推广。

关键词:薄壳山核桃;果实形态;发芽特性;优良单株;幼苗长势

中图分类号:S 664.104⁺.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2016)20-0014-04

薄壳山核桃(*Carya illinoensis* (Wangenh.) C. Koch)属胡桃科山核桃属植物,原产于美国,又名长山核桃、美国山核桃等。它是集果用、材用、油用为一体的优良树种^[1-2]。美国薄壳山核桃的繁殖主要以嫁接为主^[3]。在原产地美国,对于嫁接所需的砧木品种选育已有大量研究,如 Elliott、Kanza 等,适应性广,抗病性强,在美国苗圃被广泛用作砧木^[4-6]。而目前国内的砧木则主要依赖于进口野生种子,其适应性还有待进一步探讨^[7]。已有部分研究者^[8-12]对南京地区薄壳山核桃单株的果实特性进行了研究,筛选出了评价果实品质的主要指标。该试验以南京地区 7 个薄壳山核桃单株的果实为试材,对其果实品质进行测定分析,并观测其发芽过程的表现,探究果实品质对发芽率及早期幼苗生长的影响,为选育适合南京地区的优良砧木品种提供研究基础。

第一作者简介:邓秋菊(1992-),女,硕士研究生,研究方向为经济林栽培。E-mail:1906307731@qq.com.

责任作者:彭方仁(1963-),男,教授,博士生导师,现主要从事经济林栽培等研究工作。E-mail:frpeng@njfu.edu.cn.

基金项目:江苏省林业三新工程资助项目(Lysx2014(047));国家林业局 948 资助项目(2015-4-16);国家林业公益性行业科研专项资助项目(201304711)。

收稿日期:2016-07-21

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试的 7 个薄壳山核桃单株选自南京林业大学校园内,其各项生长指标如表 1 所示。试验区位于北纬 31°13'~32°36',东经 118°19'~119°24',年平均温度为 15.7℃,年平均降雨量为 1 005.9 mm,年平均相对湿度为 76%,霜期 232 d。

表 1 不同薄壳山核桃单株的生长状况

Table 1 Growth condition of 7 *Carya illinoensis* individual trees

单株编号 Individual plant number	树高 Tree height /m	胸径 Diameter at breast height /cm	树龄 Tree-age /年	生长环境 Growing environment
1	20.1	38.7	40	路边,草坪中
2	14.5	30.5	35	路边草坪中,下生高约 1.3 m 的小灌木
3	13.3	29.5	35	水池旁,空旷地上
4	25.6	38.5	43	旧公园内,东 15 m 处和西 20 m 处均有水塘
5	28.3	40.7	45	路边,下生高约 1.5 m 的竹类植物和小灌木
6	21.6	42.5	40	马路旁,约 1 m ² 的花坛中
7	13.2	44.8	35	小区内楼下,向阳处

1.2 试验方法

2014 年 11 月上旬各单株果实外 70% 的青皮开裂,用竹竿敲落,地面捡拾;对尚未脱皮的果实人工去除青皮,同时筛除破损、空瘪及不能剥去青皮的果实。将果实平铺于通风干燥处,晾晒 7 d 直至恒重。分别对 7 个

elements increased with the humic acid concentration rising. The effect of humic acid application on nutrient absorption of lettuce was not significant. The ability to absorb inorganic nutrients was different with different humic acid concentration treatments. Synthesize the yield and nutrient absorption factor, effect of high yield, water saving, fertilizer production would achieve when humic acid with 1.41 mg · g⁻¹ concentration were added in Yamazaki formula.

Keywords: humic acid; hydroponic lettuce; yield; WUE; metal elements absorption