

刘宇锋, 罗佳, 卢信, 等. 外源腐殖酸对栽培基质性状和辣椒生长发育的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(3): 647-655.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2016.03.025

## 外源腐殖酸对栽培基质性状和辣椒生长发育的影响

刘宇锋<sup>1,2</sup>, 罗佳<sup>1</sup>, 苏天明<sup>2</sup>, 范如芹<sup>1</sup>, 卢信<sup>1</sup>, 严少华<sup>1</sup>, 张振华<sup>1</sup>

(1.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014; 2.广西农业科学院农业资源与环境研究所, 广西 南宁 530007)

**摘要:** 为研究添加外源腐殖酸对基于发酵床垫料蔬菜栽培基质的腐殖酸及其他理化性质的变化和辣椒生长发育的影响, 本试验通过盆栽试验研究了添加 5 种水平(0 mg/kg、0.5 mg/kg、1.0 mg/kg、1.5 mg/kg、2.0 mg/kg) 外源腐殖酸对辣椒栽培基质在定植期、苗期、开花坐果期和成熟期腐殖酸含量和理化性状的变化以及对辣椒在苗期、开花坐果期和成熟期的生长发育情况及产量的影响。结果表明, 与对照相比, 各外源腐殖酸添加量处理在定植期、苗期和开花坐果期能显著提高基质腐殖酸含量, 并随外源腐殖酸施入量的增加而增加; 各外源腐殖酸添加量处理在开花坐果期和成熟期, 基质 pH 值有所增加, 而在定植期、苗期、开花坐果期和成熟期, 基质电导率均有不同程度下降, 对基质的有机质和粗灰分含量影响不显著, 在 4 个生育期基质的全氮、全磷、钾含量随外源腐殖酸添加量的增加而略有增加, 而基质容重、总孔隙度和通气孔隙度有所降低。添加外源腐殖酸均能不同程度地增加辣椒植株在苗期、开花坐果期和成熟期的植株鲜质量、干质量、株高、根长和茎粗, 其中添加量为 2.0 mg/kg 和 1.5 mg/kg 时增加效果较为显著, 并提高开花结果期和成熟期辣椒 SPAD 值, 提高光合能力, 而且随外源腐殖酸添加量的增加辣椒单株产量显著增加。说明, 添加外源腐殖酸在一定范围内可以增加基质中腐殖酸含量, 提高基质总孔隙度和通气孔隙度, 促进辣椒生长发育和提高单株产量。

**关键词:** 腐殖酸; 基质理化性状; 辣椒生长发育

**中图分类号:** S641.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2016)03-0647-04

## Physico-chemical properties of a soilless substrate and growth of pepper influenced by exogenous humic acid

LIU Yu-feng<sup>1,2</sup>, LUO Jia<sup>1</sup>, SU Tian-ming<sup>2</sup>, FAN Ru-qin<sup>1</sup>, LU Xin<sup>1</sup>, YAN Shao-hua<sup>1</sup>, ZHANG Zhen-hua<sup>1</sup>

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment Research, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

收稿日期: 2015-10-20

**基金项目:** 公益性行业(农业)科研专项(201203050-6); 江苏省科技支撑计划(农业部分)(BE2013436); 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(15)1003]; 广西农业科学院科技发展基金项目(桂农科 2013JZ14)

**作者简介:** 刘宇锋(1980-), 男, 湖南湘阴人, 博士, 助理研究员, 主要从事生态发酵床秸秆垫料基质化研究。(Tel) 025-84390581; (E-mail) liuyufeng@jaas.ac.cn。罗佳为共同第一作者。

**通讯作者:** 张振华, (Tel) 025-84391207; (E-mail) zhenhuaz70@hotmail.com

**Abstract:** A pot experiment was conducted to investigate the effect of exogenous humic acid on the contents of humic acid and physico-chemical properties of soil less substrate as well as the growth of pepper planted in the substrate. Five exogenous humic acid levels [0 (CK), 0.5 mg/kg, 1.0 mg/kg, 1.5 mg/kg, 2.0 mg/kg] were set. Compared to CK, the contents of humic acid in the substrate increased significantly with the additions of exogenous humic acid at planting, seedling, flowering and fruiting stages. The pH values in the substrate were enhanced with the addition of exogenous humic acid at flow-

ering and fruiting stage, and maturation, while EC dropped at planting, seedling, flowering and fruiting, and maturation stages. The contents of organic matter and crude ash in the substrate stayed stable throughout the experiment. During the growth and development of pepper, the contents of total N, P and K in the substrate were slightly increased with the increase of exogenous humic acid, but the bulk density, total porosity, aeration porosity declined in some treatments. Exogenous humic acid additions improved fresh and dry weight, height, root length and stem diameter of pepper which were significantly ( $P < 0.05$ ) different from those of control in 1.5 mg/kg and 2.0 mg/kg exogenous humic acid treatment. The SPAD of pepper leaves was increased at flowering and fruiting, and maturation stages, resulting in an improved photosynthetic capacity, and subsequently a boost in fresh fruit weight of pepper. In summary, applications of exogenous humic acid in a certain range could increase the contents of humic acid in the substrate, improve total porosity and aeration porosity of the substrate, promote the growth and development of pepper, and increase pepper yield.

**Key words:** humic acid; physico-chemical property of substrate; growth and development of pepper

腐殖酸(Humic acid, HA)是一种主要由动植物残体通过各种生物和非生物的降解、缩合等作用形成的一种天然有机高分子聚合物<sup>[1-2]</sup>。它既是构成土壤有机质的重要组成部分,也是一种重要的有机肥料<sup>[3-4]</sup>,具有改良土壤,增效化肥,刺激作物生长,增强抗逆,改善品质等诸多功能<sup>[5-10]</sup>。同时因其分子结构具有芳香族及其多种官能团构成的高分子结构和呈微细球形分子结构颗粒特点<sup>[11]</sup>,使其具有良好的离子交换、催化作用、螯合能力和缓冲能力,能参与碳循环、矿物迁移积累、生态调控,对自然环境影响显著<sup>[12-13]</sup>,腐殖酸功能和作用的相关研究一直是农业资源环境领域研究的热点之一。

基质栽培技术是使用固体介质固定作物根系,并通过基质吸收营养和水分的一种无土栽培方式<sup>[14-15]</sup>。与传统的土壤栽培相比,基质栽培方法可以有效地克服传统土壤栽培中存在土传病害重、土壤次生盐渍化等连作障碍等问题<sup>[16-17]</sup>,减少农药、化肥使用,提高单位面积产量与作物品质<sup>[18]</sup>;同时可以在不宜种植作物的地方(如盐碱地、沙漠、矿区、楼顶等)周年种植,充分利用空间,是实现作物生产工厂化、现代化、高效化的重要途径,是设施农业的主要方向之一。

基质栽培已在经济作物中得到广泛应用<sup>[19-20]</sup>,但目前基质在使用过程中,关于基质自身养分等理化性质连续变化的相关报道较少,特别涉及外源腐殖酸以肥料形式加入基质中,基质自身理化性状动态变化和对作物生长发育的影响研究不多。本试验以本课题组研制的蔬菜专用栽培基质为研究对象,研究不同腐殖酸添加量对栽培基质腐殖酸含量及其他理化性质和辣椒生长发育的影响,为栽培基质进一步推广应用提供数据支

持和理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于2015年3月至6月在江苏省农业科学院温室大棚(高度12 m)内进行。本试验所使用的栽培基质为江苏省农业科技自主创新项目产品:发酵床垫料蔬菜专用栽培基质(以下简称基质)。其基本理化性状为:pH6.5,电导率(EC)3.6  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,有机质198.0 g/kg,粗灰分508.6 g/kg,含水率29.3%,全氮15.2 g/kg,全磷32.4 g/kg,全钾6.5 g/kg,腐殖酸含量31.6 g/kg。供试辣椒品种为江苏省农业科学院蔬菜研究所选育的早熟长灯笼形辣椒:苏椒17号(审定编号:苏审椒201201)。添加外源腐殖酸为分析纯腐殖酸试剂,其基本理化性状为pH4.7,电导率(EC)0.9  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,有机质417.8 g/kg,粗灰分439.3 g/kg,含水率13.6%,全氮12.8 g/kg,全磷38.4 g/kg,全钾5.7 g/kg,腐殖酸含量672.6 g/kg。

### 1.2 试验设计

以外源腐殖酸添加为试验处理,共设5个水平,单位质量基质中腐殖酸施入量分别为0 g/kg、0.5 g/kg、1.0 g/kg、1.5 g/kg、2.0 g/kg,依次用 $H_0$ 、 $H_{0.5}$ 、 $H_{1.0}$ 、 $H_{1.5}$ 、 $H_{2.0}$ 表示。设置20个重复,共100盆,完全随机排列。腐殖酸施入基质后,充分混合均匀。试验所用盆钵为白色塑料盆钵,上部直径30 cm,下部直径18 cm,高21 cm,每盆装基质3.0 kg。供试基质经混合去杂后装盆。苏椒17号2015年1月5日播种,2015年3月31日定植,2015年6月25日采收完毕。辣椒按正常水分管理,试验周期内不施入其他肥料。

### 1.3 样品采集与测定

**1.3.1 样品采集** 分别于辣椒定植期(3月31日)、幼苗期(4月22日)、开花坐果期(5月15日)、成熟期(6月11日)分别对栽培基质进行采样,并对幼苗期、开花坐果期和成熟期各处理辣椒植株进行采样分析。基质充分混合后,用塑料封口袋密封保存,部分基质风干7 d后,供养分含量分析,其余鲜样用于腐殖酸含量等测定。

**1.3.2 基质腐殖酸含量测定** 基质腐殖酸含量参照《有机肥料中腐殖酸含量的测定》<sup>[21]</sup>;

**1.3.3 基质氮、磷、钾含量及其他理化指标测定** 基质全氮、全磷、全钾含量分析均采取  $H_2SO_4-H_2O_2$  法消煮,采用凯氏定氮法测定全氮含量,钒钼黄比色法测定全磷含量,火焰光度法测定全钾含量<sup>[22]</sup>;

**1.3.4 基质 pH 值、电导率、有机质含量、粗灰分含量测定** 按1:5(质量体积比)比例混合取风干基质与去离子水,过滤静置后,分别使用 pH 计(PHS-3C 型,上海大普仪器有限公司生产)和电导率仪(HI993310, Italy)测定 pH 值和电导率。有机质与粗灰分含量测定采用灼烧法<sup>[23]</sup>。使用环刀法<sup>[24]</sup>测定基质容重、总孔隙度和通气孔隙度。

**1.3.5 辣椒生长、发育及产量变化** 将辣椒植株连同根基部栽培基质与盆钵分离,再将辣椒植株根系与基质分离。辣椒植株清洗后,吸干表面水分,测定辣椒植株鲜质量,株高,根长;使用游标卡尺在辣椒茎基部离地面 2 cm 处测量茎粗;并将各处理辣椒植株于 105 °C 杀青 30 min 后,75 °C 烘干至恒质量,称质量并计算植株干质量。采收后对各处理辣椒植株果实进行称质量,测产。

样品采集前,使用叶绿素含量测定仪(SPAD 502-C, Japan)测定叶片相对叶绿素含量(SPAD 值),测定时间为上午9:00~11:00,测定部位为辣椒顶部全展叶片,重复3次。

### 1.4 数据处理与分析

方差分析用 SPSS 21.0 统计分析软件 LSD 显著性差异检验进行方差分析,检测各组合试验结果的差异显著性。使用 Origin 9.2 进行统计作图。

## 2 结果与分析

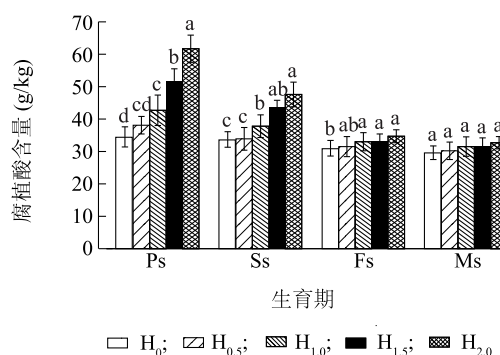
### 2.1 外源腐殖酸添加对基质中腐殖酸含量的影响

外源腐殖酸对不同生育期栽培基质腐殖酸含量的影响分析结果(图1)表明:外源腐殖酸添加对基

质中腐殖酸含量影响明显。各生育期基质中腐殖酸含量均随外源腐殖酸添加量的增加而不同程度地增加。在定植期与苗期,各外源腐殖酸添加处理对基质腐殖酸含量变化影响最为明显,各处理间差异达到显著水平( $P<0.05$ )。

就各外源腐殖酸添加处理对不同生育期基质中腐殖酸含量影响而言,在定植期,外源腐殖酸添加,  $H_{2.0}$ 、 $H_{1.5}$ 、 $H_{1.0}$  处理基质腐殖酸含量均显著高于对照  $H_0$  的基质腐殖酸含量( $P<0.05$ ),  $H_{2.0}$ 、 $H_{1.5}$ 、 $H_{1.0}$ 、 $H_{0.5}$  处理较对照  $H_0$  增加 78.8%、50.1%、23.8% 和 10.4%。在苗期,  $H_{2.0}$ 、 $H_{1.5}$ 、 $H_{1.0}$  各处理基质腐殖酸含量均显著高于对照  $H_0$  ( $P<0.05$ )。在开花坐果期,  $H_{2.0}$ 、 $H_{1.5}$ 、 $H_{1.0}$  各处理基质腐殖酸含量显著高于对照  $H_0$  ( $P<0.05$ ),但在成熟期各处理基质腐殖酸含量差异不显著( $P>0.05$ )。

就外源腐殖酸不同添加水平对基质腐殖酸含量影响而言,不添加外源腐殖酸的对照  $H_0$ , 苗期、开花结果期和成熟期基质腐殖酸含量较定植期下降 2.3%~18.3%,而  $H_{0.5}$ 、 $H_{1.0}$ 、 $H_{1.5}$  和  $H_{2.0}$  处理,在苗期、开花结果期和成熟期基质腐殖酸含量较定植期分别下降 11.1%~22.7%、11.5%~26.2%、15.6%~39.2%和 22.9%~47.0%,添加外源腐殖酸在辣椒生长发育早期对基质腐殖酸含量影响较大,而随着生育期延长,外源腐殖酸对基质中腐殖酸含量的影响不明显。



$H_0$ 、 $H_{0.5}$ 、 $H_{1.0}$ 、 $H_{1.5}$ 、 $H_{2.0}$  分别表示基质中腐殖酸施入量为 0 g/kg、0.5 g/kg、1.0 g/kg、1.5 g/kg、2.0 g/kg。Ps: 定植期; Ss: 苗期; Fs: 开花坐果期; Ms: 成熟期。同一生育期不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

图1 添加外源腐殖酸对不同生育期栽培基质腐殖酸含量的影响

Fig.1 Effect of exogenous humic acid on the contents of total humic acid in the substrate



## 2.2 外源腐殖酸添加对基质理化性状与养分含量的影响

2.2.1 外源腐殖酸添加对基质容重、总孔隙度和通气孔隙的影响 不同生育期内,随着外源腐殖酸添加量的增加,基质容重均有一定程度增加(表 1),但处理间差异不显著。随着外源腐殖酸添加量的增加,总孔隙度有不同程度增加,其中,在定植期和开花坐果期,  $H_{2.0}$ 、 $H_{1.5}$  处理总孔隙度显著高于对照  $H_0$  ( $P<0.05$ ); 苗期,  $H_{2.0}$  处理总孔隙度较对照  $H_0$  增加了 16.7%, 达到显著水平 ( $P<0.05$ )。随着栽培时间的延长,添加外源腐殖酸的各处理中,基质总孔隙度均有不同程度的降低,  $H_{2.0}$ 、 $H_{1.5}$ 、 $H_{1.0}$ 、 $H_{0.5}$ 、 $H_0$  处理,成熟期、开花坐果期、苗期较定植期分别下降 3.2%~12.5%、7.6%~12.4%、7.6%~10.3%、10.6%~12.8%

和 11.7%~13.9%。添加外源腐殖酸能延缓基质腐殖酸总孔隙度的降低,有利于水气在基质中流动,对辣椒根系生长有利。

就辣椒不同生育期而言,从基质通气孔隙度变化来看,外源腐殖酸添加处理在定植期、苗期、开花坐果期对基质通气孔隙度影响不显著;而在成熟期,  $H_{2.0}$ 、 $H_{1.5}$  处理较对照  $H_0$  分别增加 4.8%、3.3%,增幅显著 ( $P<0.05$ )。随外源腐殖酸添加量增加,在辣椒生育后期,基质通气孔隙度有一定程度的增加。成熟期、开花坐果期、苗期  $H_{2.0}$ 、 $H_{1.5}$ 、 $H_{1.0}$ 、 $H_{0.5}$ 、 $H_0$  各处理较定植期分别下降 21.7%~22.6%、19.2%~22.6%、17.8%~22.7%、18.5%~21.2% 和 17.2%~20.3%。基质通气孔隙度下降可能是由于随栽培时间延长,辣椒根系活动,基质自然沉降结果。

表 1 外源腐殖酸添加对基质容重、总孔隙度和通气孔隙度的影响

Table 1 Effect of exogenous humic acid on bulk density, total porosity and aeration porosity of the substrate

处理	容重 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )				总孔隙度 (%)				通气孔隙度 (%)			
	定植期	苗期	开花坐果期	成熟期	定植期	苗期	开花坐果期	成熟期	定植期	苗期	开花坐果期	成熟期
$H_0$	0.47±0.04a	0.45±0.03a	0.45±0.04a	0.45±0.04a	51.5±3.1b	45.5±2.0b	44.8±2.2c	44.3±3.1b	5.49±0.48a	4.30±0.32ab	4.25±0.26ab	4.21±0.34b
$H_{0.5}$	0.47±0.03a	0.45±0.03a	0.44±0.02a	0.44±0.04a	51.7±2.7b	46.2±3.4b	45.0±0.4bc	45.1±2.4ab	5.49±0.48a	4.44±0.33ab	4.26±0.20ab	4.25±0.32ab
$H_{1.0}$	0.47±0.04a	0.45±0.06a	0.45±0.03a	0.45±0.02a	52.1±2.4ab	48.5±3.2b	46.7±3.7bc	45.6±2.2ab	5.51±0.48a	4.53±0.45a	4.26±0.42ab	4.26±0.45ab
$H_{1.5}$	0.48±0.05a	0.46±0.04a	0.45±0.03a	0.44±0.03a	52.5±3.0a	48.5±3.1b	50.4±2.5a	46.0±3.1ab	5.52±0.41a	4.51±0.27a	4.36±0.22a	4.35±0.53a
$H_{2.0}$	0.48±0.03a	0.46±0.05a	0.45±0.04a	0.45±0.04a	52.8±2.1a	51.1±3.3a	50.9±5.2ab	46.2±5.4a	5.52±0.43a	4.57±0.57a	4.40±0.35a	4.41±0.37a

$H_0$ 、 $H_{0.5}$ 、 $H_{1.0}$ 、 $H_{1.5}$ 、 $H_{2.0}$  分别表示基质中腐殖酸施入量为 0 g/kg、0.5 g/kg、1.0 g/kg、1.5 g/kg、2.0 g/kg; 同一列不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

## 2.2.2 外源腐殖酸添加对基质 pH 和电导率的影响

从表 2 可以看出,基质 pH 值在定植期和成熟期不同处理基质间差异不显著 ( $P>0.05$ )。而在苗期、开花坐果期,  $H_{2.0}$ 、 $H_{1.5}$ 、 $H_{1.0}$ 、 $H_{0.5}$  处理的基质 pH 值均显著高于对照  $H_0$ 。这表明,外源腐殖酸的添加能延缓基质 pH 值的下降,而随着辣椒生长发育的进行和基质使用的延长,外源腐殖酸可能逐步降解,其作用逐步降低,而基质 pH 值均出现下降。

从表 2 还可以看出,随着外源腐殖酸添加量的增加,基质电导率呈逐步下降的趋势。除定植期  $H_{1.0}$  处理外,定植期、苗期、开花结果期和成熟期的  $H_{2.0}$ 、 $H_{1.5}$ 、 $H_{1.0}$  处理的基质电导率较对照  $H_0$  显著降低,这表明在一定范围内,基质电导率水平随外源腐殖酸添加量增加逐步降低。随辣椒生长发育的进

行,电导率逐步降低,  $H_{2.0}$ 、 $H_{1.5}$ 、 $H_{1.0}$ 、 $H_{0.5}$  和  $H_0$  处理,成熟期基质电导率分别较定植期电导率下降 38.7%、30.4%、41.4%、37.2% 和 25.8%,这表明无论外源腐殖酸添加与否,基质电导率均有不同程度的下降,这可能与基质在辣椒生长发育过程中,自身矿物营养被作物吸收有关。

2.2.3 外源腐殖酸添加对基质有机质和粗灰分的影响 由表 3 可知,在定植期,  $H_{2.0}$ 、 $H_{1.5}$ 、 $H_{1.0}$ 、 $H_{0.5}$  处理有机质含量与对照  $H_0$  差异不显著,在苗期,各处理有机质含量较定植期均有不同程度的下降,  $H_{2.0}$  处理基质有机质含量显著高于对照  $H_0$  ( $P<0.05$ ),而在开花坐果期和成熟期,各处理间基质有机质含量差异不显著。  $H_{2.0}$ 、 $H_{1.5}$ 、 $H_{1.0}$ 、 $H_{0.5}$ 、 $H_0$  处理,在苗期、开花坐果期和成熟期有机质含量较定植期分别

表2 外源腐殖酸添加对基质 pH 和电导率的影响

Table 2 Effect of exogenous humic acid on pH and EC of the substrate

处理	pH				电导率(μS/cm)			
	定植期	苗期	开花坐果期	成熟期	定植期	苗期	开花坐果期	成熟期
H <sub>0</sub>	6.53±0.06a	6.47±0.22c	6.43±0.30b	6.44±0.07ab	3.56±0.44a	2.65±0.31a	2.69±0.73a	2.64±0.57a
H <sub>0.5</sub>	6.49±0.10a	6.61±0.09ab	6.78±0.05a	6.63±0.15ab	3.47±0.85a	2.51±0.11bc	2.28±0.38ab	2.18±0.21b
H <sub>1.0</sub>	6.38±0.07ab	6.72±0.02a	6.83±0.09a	6.86±0.11a	3.26±0.57ab	2.27±0.05b	1.94±0.15b	1.91±0.20bc
H <sub>1.5</sub>	6.39±0.02ab	6.62±0.05ab	6.92±0.04a	6.83±0.27a	3.09±0.73b	2.53±0.23bc	2.07±0.29b	2.15±0.31b
H <sub>2.0</sub>	6.41±0.07ab	6.58±0.08b	6.89±0.11a	6.64±0.04ab	2.97±0.61bc	2.40±0.46bc	1.87±0.52b	1.82±0.46bc

H<sub>0</sub>、H<sub>0.5</sub>、H<sub>1.0</sub>、H<sub>1.5</sub>、H<sub>2.0</sub>分别表示基质中腐殖酸施入量为 0 g/kg、0.5 g/kg、1.0 g/kg、1.5 g/kg、2.0 g/kg;同一列不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

下降了 24.1%~40.8%、24.9%~47.8%、26.6%~47.4%、30.0%~50.6%、30.6%~51.7%。在本试验过程中未添加任何肥料,辣椒生长所需的全部养分由栽培基质提供,同时添加腐殖酸具有促进微生物代谢活动的作用,基质有机质的下降与基质有机质分解与转化密切相关。

在苗期和开花坐果期,H<sub>2.0</sub>、H<sub>1.5</sub>、H<sub>1.0</sub>、H<sub>0.5</sub>处理粗

灰分含量显著高于对照 H<sub>0</sub>( $P<0.05$ ),在定植期和成熟期,H<sub>2.0</sub>、H<sub>1.5</sub>、H<sub>1.0</sub>、H<sub>0.5</sub>处理粗灰分含量与对照 H<sub>0</sub>差异不显著。H<sub>2.0</sub>、H<sub>1.5</sub>、H<sub>1.0</sub>、H<sub>0.5</sub>、H<sub>0</sub>处理,在苗期、开花坐果期和成熟期粗灰分含量较定植期分别下降了 39.0%~45.1%、38.6%~46.7%、38.9%~46.5%、39.1%~47.7%、40.9%~48.1%。

表3 外源腐殖酸添加对基质有机质和粗灰分含量的影响

Table 3 Effect of exogenous humic acid on the contents of organic matter and crude ash in the substrate

处理	有机质含量(g/kg)				粗灰分含量(g/kg)			
	定植期	苗期	开花坐果期	成熟期	定植期	苗期	开花坐果期	成熟期
H <sub>0</sub>	198.00±5.7a	137.5±7.4b	114.91±4.99a	95.58±2.52ab	508.56±10.38a	300.63±20.99b	293.77±7.99b	263.99±8.86a
H <sub>0.5</sub>	198.02±3.7a	138.6±7.3ab	115.65±8.75a	97.74±6.42ab	508.90±9.61a	309.87±21.56a	309.55±6.99a	266.15±3.84a
H <sub>1.0</sub>	198.03±4.7a	145.4±7.2ab	115.30±6.83a	104.13±7.32a	509.05±7.34a	311.04±9.06a	307.49±9.72a	272.33±5.24a
H <sub>1.5</sub>	198.05±3.1a	148.7±8.8ab	116.40±6.29a	103.34±11.37a	509.49±11.48a	312.71±11.79a	307.98±6.35a	271.35±6.17a
H <sub>2.0</sub>	198.06±4.2a	150.3±22.1a	121.56±5.80a	107.17±9.99a	510.27±7.82a	311.35±7.60a	308.78±7.45a	279.90±8.48a

H<sub>0</sub>、H<sub>0.5</sub>、H<sub>1.0</sub>、H<sub>1.5</sub>、H<sub>2.0</sub>分别表示基质中腐殖酸施入量为 0 g/kg、0.5 g/kg、1.0 g/kg、1.5 g/kg、2.0 g/kg;同一列不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

#### 2.2.4 外源腐殖酸添加对基质养分含量的影响

由表 4 可知,定植期、苗期和开花坐果期 H<sub>2.0</sub>和 H<sub>1.5</sub>处理基质中全氮含量较对照 H<sub>0</sub>显著增加( $P<0.05$ ),成熟期各处理基质全氮含量差异不显著。这表明外源腐殖酸添加在辣椒生长发育前期能增加基质全氮含量。H<sub>2.0</sub>、H<sub>1.5</sub>、H<sub>1.0</sub>、H<sub>0.5</sub>、H<sub>0</sub>处理基质全氮含量随辣椒的生长发育逐渐降低,苗期、开花坐果期、成熟期基质全氮含量较定植期分别降低了 12.2%~54.1%、6.0%~51.5%、7.4%~50.3%、6.4%~50.0%和 4.6%~50.7%,这可能与外源腐殖酸逐步降解和辣椒对基质养分吸收有关。

由表 4 可知,开花坐果期和成熟期,H<sub>2.0</sub>处理基

质中全磷含量较对照 H<sub>0</sub>显著增加( $P<0.05$ )。基质中全磷含量随辣椒的生长发育逐步下降,其中,H<sub>2.0</sub>、H<sub>1.5</sub>、H<sub>1.0</sub>、H<sub>0.5</sub>、H<sub>0</sub>处理在成熟期,开花坐果期和苗期全磷含量较定植期分别下降 6.8%~22.4%、4.1%~24.6%、4.8%~26.9%、6.3%~29.3%和 6.5%~33.6%。

由表 4 可知,仅定植期 H<sub>2.0</sub>、H<sub>1.5</sub>、H<sub>1.0</sub>处理基质中全钾含量较对照 H<sub>0</sub>显著提高( $P<0.05$ ),成熟期、开花坐果期、苗期各处理间全钾含量差异不显著。H<sub>2.0</sub>、H<sub>1.5</sub>、H<sub>1.0</sub>、H<sub>0.5</sub>、H<sub>0</sub>处理,在成熟期、开花坐果期、苗期全钾含量较定植期,分别下降 2.8%~42.8%、3.2%~43.3%、4.0%~43.8%、2.4%~43.3%和

3.5%~44.2%,基质中全钾含量随辣椒生育期的延长,均有不同程度的下降,随腐殖酸添加量的增加,

基质中全钾含量下降幅度变小,这表明外源腐殖酸具有维持基质全钾含量的作用。

表4 外源腐殖酸添加对基质养分含量的影响

Table 4 Effect of exogenous humic acid on the contents of nutrients in the substrate

处理	氮 (g/kg)				磷 (g/kg)				钾 (g/kg)			
	定植期	苗期	开花坐果期	成熟期	定植期	苗期	开花坐果期	成熟期	定植期	苗期	开花坐果期	成熟期
H <sub>0</sub>	15.2±2.7b	14.5±1.3b	9.8±2.4b	7.5±1.9ab	32.4±3.3ab	30.3±2.7ab	24.4±2.7b	21.5±3.1bc	6.5±0.4b	6.4±0.3ab	4.5±0.5ab	3.7±0.5a
H <sub>0.5</sub>	15.7±2.0b	14.7±2.4ab	10.1±1.3ab	7.7±2.1ab	33.1±2.1ab	31.0±3.4ab	26.5±3.5b	23.4±3.1b	6.6±0.5ab	6.4±0.3ab	4.5±0.4a	3.8±0.3a
H <sub>1.0</sub>	16.3±2.4ab	15.1±2.5ab	10.3±2.5a	8.1±1.3a	33.5±2.8ab	31.9±4.5ab	27.1±3.0ab	24.5±3.1ab	6.7±0.4a	6.4±0.5ab	4.5±0.3a	3.8±0.3a
H <sub>1.5</sub>	16.7±1.7a	15.7±2.2a	10.5±2.2a	8.1±2.0a	34.1±3.7a	32.7±1.7ab	29.4±2.1a	25.7±2.8ab	6.7±0.5a	6.5±0.2ab	4.6±0.3a	3.8±0.4a
H <sub>2.0</sub>	18.1±2.3a	15.9±2.5a	10.6±2.0a	8.3±1.3a	35.3±2.9a	32.9±2.3a	30.7±4.6a	27.4±4.2a	6.8±0.5a	6.5±0.2a	4.6±0.4a	3.8±0.3a

H<sub>0</sub>、H<sub>0.5</sub>、H<sub>1.0</sub>、H<sub>1.5</sub>、H<sub>2.0</sub>分别表示基质中腐殖酸施入量为0 g/kg、0.5 g/kg、1.0 g/kg、1.5 g/kg、2.0 g/kg;同一列不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

## 2.3 外源腐殖酸添加对辣椒生长发育和产量的影响

2.3.1 外源腐殖酸添加对辣椒鲜质量、干质量和株高的影响 表5显示,外源腐殖酸添加对苗期辣椒植株鲜质量影响明显,辣椒植株鲜质量随外源腐殖酸添加量的增加而增加,苗期H<sub>2.0</sub>、H<sub>1.5</sub>处理辣椒植株鲜质量显著高于对照H<sub>0</sub>( $P<0.05$ ),开花结果期H<sub>2.0</sub>处理辣椒植株鲜质量显著性高于对照H<sub>0</sub>( $P<0.05$ ),而在成熟期外源腐殖酸添加处理对植株鲜质量的影响不显著( $P>0.05$ )。外源腐殖酸

添加对辣椒植株干质量增加明显。苗期、开花坐果期和成熟期,H<sub>2.0</sub>处理的辣椒植株干质量显著高于对照H<sub>0</sub>( $P<0.05$ )。外源腐殖酸添加对辣椒植株株高有显著影响,苗期、开花坐果期和成熟期,H<sub>2.0</sub>、H<sub>1.5</sub>、H<sub>1.0</sub>、H<sub>0.5</sub>处理植株株高较对照H<sub>0</sub>分别增加17.4%~26.1%、3.4%~7.1%、1.2%~16.0%,其中,苗期和开花坐果期H<sub>2.0</sub>、H<sub>1.5</sub>、H<sub>1.0</sub>、H<sub>0</sub>处理,成熟期H<sub>2.0</sub>处理,辣椒植株株高均显著高于对照H<sub>0</sub>( $P<0.05$ )。

表5 外源腐殖酸对辣椒鲜质量、干质量和株高的影响

Table 5 Effect of exogenous humic acid on fresh weight, dry weight and plant height of pepper

处理	鲜质量 (g)			干质量 (g)			株高 (cm)		
	苗期	开花坐果期	成熟期	苗期	开花坐果期	成熟期	苗期	开花坐果期	成熟期
H <sub>0</sub>	14.26±3.78b	59.65±1.78b	105.76±1.83a	1.74±0.49b	6.41±0.20c	11.90±0.41b	15.73±2.03b	33.43±1.48b	56.10±7.10b
H <sub>0.5</sub>	15.47±6.78b	61.02±3.40ab	109.40±14.64a	1.86±0.80b	7.08±0.22b	12.26±0.42b	18.47±0.85a	34.57±0.65a	56.77±3.79ab
H <sub>1.0</sub>	18.56±4.00ab	60.46±1.07ab	110.84±8.74a	2.61±0.31ab	7.21±0.29ab	12.43±0.39b	18.27±3.10a	35.33±1.21a	57.83±4.86ab
H <sub>1.5</sub>	21.10±2.65a	62.54±0.95ab	113.63±3.63a	2.33±0.35ab	7.26±0.25ab	12.59±0.63b	19.27±1.96a	35.67±0.95a	59.07±1.15ab
H <sub>2.0</sub>	24.25±4.18a	63.51±0.50a	117.54±10.68a	2.88±0.21a	7.74±0.49a	13.46±0.49a	19.83±2.25a	35.83±0.31a	65.07±1.59a

H<sub>0</sub>、H<sub>0.5</sub>、H<sub>1.0</sub>、H<sub>1.5</sub>、H<sub>2.0</sub>分别表示基质中腐殖酸施入量为0 g/kg、0.5 g/kg、1.0 g/kg、1.5 g/kg、2.0 g/kg;同一列不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

2.3.2 外源腐殖酸添加对辣椒根长、茎粗和SPAD值的影响 表6表明,苗期H<sub>2.0</sub>、H<sub>1.5</sub>、H<sub>1.0</sub>、H<sub>0.5</sub>处理,开花坐果期H<sub>2.0</sub>、H<sub>1.5</sub>、H<sub>1.0</sub>处理和成熟期H<sub>2.0</sub>处理植株根长显著高于对照H<sub>0</sub>( $P<0.05$ )。这表明,外源腐殖酸添加对辣椒根长生长具有促进作用,并随外

源腐殖酸添加量的增加而增加,外源腐殖酸在苗期和开花坐果期对辣椒根长影响明显,在成熟期,腐殖酸添加处理的辣椒根长虽高于对照,但不同处理间差异小,这可能与外源腐殖酸逐步降解有关。

外源腐殖酸添加对辣椒植株茎粗的影响(表

6), 苗期, 开花坐果期和成熟期,  $H_{2.0}$ 、 $H_{1.5}$ 、 $H_{1.0}$ 、 $H_{0.5}$  处理辣椒茎粗较对照  $H_0$  分别增加 5.2%~21.5%、0.2%~2.9%、9.6%~13.2%, 其中, 苗期  $H_{2.0}$ 、 $H_{1.5}$ 、 $H_{1.0}$  处理辣椒植株茎粗显著高于对照  $H_0$  ( $P<0.05$ )。这表明外源腐殖酸添加能促进辣椒茎粗的增加, 并

随腐殖酸添加量的增加促进作用增大。

在苗期,  $H_{2.0}$ 、 $H_{1.5}$ 、 $H_{1.0}$ 、 $H_{0.5}$  处理辣椒叶片 SPAD 与对照  $H_0$  差异不显著, 而在开花坐果期和成熟期,  $H_{2.0}$  和  $H_{1.0}$  处理辣椒叶片 SPAD 显著高于对照  $H_0$  (表 6)。

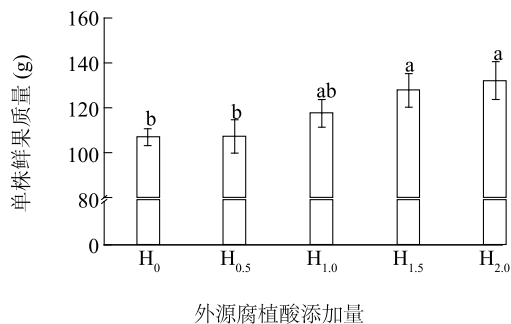
表 6 外源腐殖酸添加对辣椒根长、茎粗和 SPAD 值的影响

Table 6 Effect of exogenous humic acid on root length, stem diameter and SPAD of pepper

处理	根长 (cm)			茎粗 (mm)			SPAD 值		
	苗期	开花坐果期	成熟期	苗期	开花坐果期	成熟期	苗期	开花坐果期	成熟期
$H_0$	17.37±2.43c	26.70±0.36d	30.27±1.15b	3.62±0.59b	6.14±0.24ab	8.19±0.08a	46.80±4.76a	55.63±3.81b	52.89±1.08d
$H_{0.5}$	18.57±1.21b	27.33±0.59cd	32.20±0.70b	3.81±0.40b	6.15±0.07ab	8.98±0.57a	46.81±7.15a	55.87±2.89b	53.84±1.12cd
$H_{1.0}$	18.13±3.03bc	28.53±1.02bc	30.93±2.30bc	4.27±0.45a	6.17±0.05ab	9.12±0.51a	46.89±5.60a	60.36±3.32a	54.40±1.34bc
$H_{1.5}$	19.30±3.72b	28.80±0.79b	32.30±0.60bc	4.32±0.60a	6.24±0.15a	9.22±0.68a	46.54±3.98a	58.11±3.89ab	55.40±1.08b
$H_{2.0}$	24.40±2.85a	31.77±0.31a	34.43±1.30a	4.40±0.24a	6.32±0.08a	9.27±0.10a	51.81±6.71a	61.72±6.80a	56.97±0.72a

$H_0$ 、 $H_{0.5}$ 、 $H_{1.0}$ 、 $H_{1.5}$ 、 $H_{2.0}$  分别表示基质中腐殖酸施入量为 0 g/kg、0.5 g/kg、1.0 g/kg、1.5 g/kg、2.0 g/kg; 同一列不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

2.3.3 外源腐殖酸添加对基质栽培辣椒单株鲜果质量的影响 由图 2 可知,  $H_{2.0}$ 、 $H_{1.5}$ 、 $H_{1.0}$ 、 $H_{0.5}$  处理辣椒单株鲜果质量较对照  $H_0$  处理分别增加 23.6%、19.5%、9.9% 和 0.3%, 其中  $H_{2.0}$  和  $H_{1.5}$  处理辣椒单株鲜果质量显著高于对照  $H_0$  ( $P<0.05$ )。这表明外源腐殖酸添加处理能明显增加辣椒单株鲜果质量, 辣椒单株鲜果质量随外源腐殖酸添加量的增加而增加。



$H_0$ 、 $H_{0.5}$ 、 $H_{1.0}$ 、 $H_{1.5}$ 、 $H_{2.0}$  分别表示基质中腐殖酸施入量为 0 g/kg、0.5 g/kg、1.0 g/kg、1.5 g/kg、2.0 g/kg; 不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

图 2 外源腐殖酸添加对基质栽培辣椒单株鲜果质量的影响

Fig.2 Effect of exogenous humic acid on fresh fruit weight per plant of pepper

### 3 讨论

曹均等<sup>[25]</sup>对风化煤和秸秆发酵中腐殖酸含量

变化研究认为, 微生物生长繁殖利用腐殖酸作为碳源降低了腐殖酸含量。在本试验中发现, 在定植期各处理基质腐殖酸含量差异显著, 随外源腐殖酸添加量的增加而增加, 这与外源腐殖酸的加入直接相关; 这种差异维持到苗期,  $H_{2.0}$ 、 $H_{1.5}$  和  $H_{1.0}$  处理基质腐殖酸均显著高于对照, 这表明外源腐殖酸在苗期虽然有部分降解, 但仍高于对照, 在开花坐果期和成熟期, 不同外源腐殖酸添加量处理基质腐殖酸含量均不同程度下降, 处理间基质腐殖酸含量差异不显著, 这表明外源腐殖酸基本分解殆尽, 这与前人研究结果相同, 由于微生物繁殖将腐殖酸作为碳源, 导致在开花结果期和成熟期腐殖酸含量迅速下降。

基质容重是干燥栽培基质的质量指标<sup>[26]</sup>, 反映了基质的疏松程度。容重过大, 总孔隙度小, 基质紧实, 基质透水性、透气性较差, 影响作物根系生长。容重过小, 总孔隙度大, 基质疏松, 通气性好, 但基质保水效果不理想, 同时基质易漂浮, 影响根系固定。优良的基质在物理性质上, 固液气三相比例适当, 容重为 0.1~0.8 g/cm<sup>3</sup>, 总孔隙度在 75% 以上, 大小孔隙比在 0.5 左右; 在化学性质上, 阳离子交换量大, 基质保肥性好, pH 值为 6.5~7.0, 并具有一定的缓冲能力, 具有一定碳氮比以维持栽培过程中基质的生物稳定性<sup>[27-28]</sup>。在本研究中, 外源腐殖酸添加处理对基质容重的影响不显著。总孔隙度和空气孔隙度随外源腐殖酸添加量增加, 下降幅度减弱, 这说明, 外源腐殖酸添加能降低总孔隙度和空气孔隙度。



基质 pH 值过高或过低都会使某些元素沉淀,造成缺素症<sup>[29]</sup>。不同植物对基质 pH 值的要求不同,当 pH 值超过 7 时,Fe<sup>2+</sup>、Mn<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>和 Cu<sup>2+</sup>等将生成氢氧化物沉淀无法被幼苗根系吸收,因此陆生植物育苗基质的 pH 值以 5.5~6.5 为宜<sup>[30]</sup>。电导率是反映基质可溶性盐浓度的指标,其大小反映基质中原来的可溶性盐的多少,将直接影响基质平衡和作物生长状况,基质中含有一定的盐分可为植物提供一定的营养,但是电导率过高会影响营养液的平衡,且造成盐害<sup>[31]</sup>,一般作物适宜生长的电导率为 0.5~1.3 mS/cm<sup>[32]</sup>。在本研究中,外源腐殖酸添加增加了基质 pH,更有利于辣椒在合适的 pH 范围内生长;外源腐殖酸对基质电导率调节效果更为明显,均不同程度降低了基质电导率。

陆欣等<sup>[33]</sup>研究结果表明,腐殖酸对土壤脲酶的活性有抑制作用。腐殖酸在作物生长前期,能抑制尿酸的水解,减少氮素的挥发及淋溶损失;在作物生长的中后期,随着腐殖酸的消耗降解,又能逐步减弱其抑制作用,以适应作物生长发育旺盛期对氮素的需求<sup>[34-35]</sup>。腐殖酸中的阴离子在土壤矿物极性吸附中与磷酸根离子有竞争作用,可以减少磷酸根离子被土壤矿物吸附。腐殖酸通过其负电性发生同晶替代作用,将被吸附的磷酸根离子从土壤矿物中取代出来,在这些过程中还伴有腐殖酸与磷酸根离子形成可溶性螯合物,减少土壤对磷的固定从而提高磷的利用率。腐殖酸中的酸性功能团能吸收和贮存钾离子,既可以防止土壤中的有效钾随水流失,又可以避免土壤黏土矿物对钾的固定。本研究中,基质全氮、全磷、全钾含量均随辣椒生长发育逐步下降。开花坐果期 H<sub>2.0</sub>、H<sub>1.5</sub>处理中全氮、全磷含量均显著高于对照,这表明腐殖酸添加能延缓氮的挥发和磷的固定,更有利于作物生长。

腐殖酸通过提高作物对养分吸收和激素效应来实现增产<sup>[35]</sup>。同时,大量腐殖酸在各种作物上应用的相关报道也说明这一点。孙志梅等<sup>[36]</sup>研究不同组分腐殖酸复合肥对辣椒生长与生理特征的影响发现,腐殖酸复合肥较具有相同养分的无机复合肥增产 8.1%~195.1%,提高辣椒体内硝酸还原酶、超氧化物歧化酶和过氧化物酶的活性,促进叶绿素的合成代谢。高觅等<sup>[37]</sup>施用腐殖酸复合微生物肥,辣椒产量较普通复合肥增加 11.1%,经济效益增加 27.27%,同时明显增加辣椒植株株高、茎粗和单果

质量。郭玉荣等<sup>[38]</sup>施用腐殖酸复合肥种植番茄和黄瓜发现,番茄和黄瓜分别较施用普通复合肥平均增产 16.4%和 10.9%。Sangeetha 等<sup>[39]</sup>混合施用褐腐酸与无机肥对洋葱进行试验发现,与单纯施用化学肥料相比,洋葱球茎增产 11.3%,同时显著增加洋葱球茎中可溶性固溶物、抗坏血酸、总糖含量。本研究结果表明,栽培基质中施用腐殖酸能促进辣椒在苗期的鲜质量和干质量,增加株高和茎粗,增加单株鲜果质量。在设置的 4 个外源腐殖酸添加量中, H<sub>2.0</sub>(基质中施外源腐殖酸 2.0 g/kg)和 H<sub>1.5</sub>(基质中施外源腐殖酸 1.5 g/kg)处理对辣椒生长发育的促进作用更为明显,腐殖酸添加量是否越高越能促进辣椒生长和最终产量,还需要进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] PANETTIERIA M, KNICKERA H, MURILLO J M, et al. Soil organic matter degradation in an agricultural chronosequence under different tillage regimes evaluated by organic matter pools, enzymatic activities and CPMAS 13C NMR [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 78:170-181.
- [2] 周爽,其力莫格,谭钧,等. 腐植酸提高土壤氮磷钾养分利用效率的机制[J]. *腐植酸*, 2015(2):1-8.
- [3] GHABBOUR E A, DAVIES G, DAGGETT J J, et al. Measuring the humic acids content of commercial lignites and agricultural top soils in the national soil project [J]. *Annals of Environmental Science*, 2012, 6:1-12.
- [4] 曾宪成,李双. 让腐植酸在补充和提升土壤肥力中发挥重要作用[J]. *腐植酸*, 2014(2):1-8.
- [5] 曾维爱,曾敏,周航,等. 腐植酸和硫酸铁配施改良偏碱烟田土壤的研究[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3):170-173.
- [6] 刘增兵,赵秉强,林治安. 腐植酸尿素挥发特性及影响因素研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(1):208-213.
- [7] 陈振德,何金明,李祥云,等. 施用腐植酸对提高玉米氮肥利用率的研究[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(1):52-54.
- [8] 王曰鑫. 腐植酸保水肥与液膜覆盖对黄土区旱作玉米的肥效试验[J]. *腐植酸*, 2010(1):25.
- [9] 谭蓉,王静,高文,等. 腐植酸可溶性有机肥影响茶叶品质的研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2015, 6(4):1329-1332.
- [10] 罗晓辉,唐旺全,邱孟斌. 添加不同组合生物菌、γ-聚谷氨酸、腐殖酸的新型肥料在小麦生产上的应用[J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(12):96-98.
- [11] 王亚军,朱琨,王进喜,等. 腐植酸对铬在砂质土壤中吸附行为的影响研究[J]. *安全与环境学报*, 2007, 7(5):42-47.
- [12] 王振振,张超,史春余,等. 腐植酸缓释钾肥对土壤钾素含量和甘薯吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(1):249-255.



- [13] PARK S, KIM K S, KIM J T, et al. Effects of humic acid on phytodegradation of petroleum hydrocarbons in soil simultaneously contaminated with heavy metals [J]. *Environ Sci (China)*, 2011, 23(11): 2034-2041.
- [14] 刘 伟,余宏军,蒋卫杰. 我国蔬菜无土栽培基质研究与应用进展[J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(3): 4-7.
- [15] AGUNG P P, HENRY Y. Soilless culture system to support water use efficiency and product quality: a review [J]. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2015, 3: 283-288.
- [16] WANG Z Q, GAN D X, LONG Y L. Advances in soilless culture research [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2013, 14(2): 269 - 278, 323.
- [17] 郭世荣. 固体栽培基质研究、开发现状及发展趋势[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(增刊): 1-4.
- [18] 刘志刚,费素娥,刘冬梅,等. 育苗基质中氮磷比及其含量对番茄穴盘苗生长及营养状况的影响[J]. *西南农业学报*, 2007, 20(1): 84-86.
- [19] DANIEL R, JUAN R, JUAN M, et al. Effect of controlling the leaching fraction on the fertigation and production of a tomato crop under soilless culture [J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 179: 153-157.
- [20] 周艺敏,程 奕,孟昭芳. 不同营养液及基质对黄瓜产量和品质的影响[J]. *华北农学报*, 2002, 17(1): 82-87.
- [21] DB21/T 1322-2004 有机肥料中腐植酸含量的测定[S].
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [24] 尹宝重,甄文超,郭丽果. 海河低平原不同耕作方式下麦田土壤生态环境特征[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(1): 186-194.
- [25] 曹 均,林启美,李 旭,等. 风化煤与玉米秸秆发酵过程中腐植酸及氮磷的变化[J]. *腐植酸*, 2009(3): 18-23.
- [26] 张金云,束 冰,潘海发,等. 不同基质配比对百合切花品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(4): 188-191.
- [27] 张莹莹,孙周平,刘广品,等. 根区通气方式对番茄根际气体环境及基质理化性质的影响[J]. *西北农业学报*, 2011, 20(4): 106-110.
- [28] 范如芹,罗 佳,刘海琴,等. 淀粉基高吸水性树脂对基质理化性质及小青菜生长的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2015, 38(4): 617-623.
- [29] 龚小强,孙向阳,李 燕,等. 组配改良剂对园林废弃物堆肥基质理化性质及鸟巢蕨生长影响[J]. *西北林业学报*, 2015, 30(5): 126-132.
- [30] WANG Z Q, GAN D X, LONG Y L. Advances in soilless culture research [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2013, 14(2): 269-278, 323.
- [31] 李谦让,郭世荣,李式军. 利用工农业有机废弃物生产优质无土栽培基质[J]. *自然资源学报*, 2002, 17(4): 51-55.
- [32] 谢小玉,邹志荣,江雪飞,等. 中国蔬菜无土栽培基质研究进展[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(6): 280-283.
- [33] 陆 欣,王申贵. 煤炭腐植酸酶抑制剂应用效果的研究 [J]. *腐植酸*, 1994(4): 10-14.
- [34] 范晓娟. 浅议腐植酸肥料在改良土壤及提高肥料利用率中的作用[J]. *中国农业信息*, 2014(1): 105.
- [35] NIKBAKHT A, KAFI M, BABALAR M, et al. Effect of humic acid on plant growth, nutrient uptake, and postharvest life of gerbera [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2008, 31(12): 2155-2167.
- [36] 孙志梅,薛世川,刘淑萍. 不同组分的腐植酸复合肥在辣椒上的施用效应及其生理机制研究[J]. *土壤通报*, 2003, 34(5): 440-443.
- [37] 高 冕,章学梅,任 鹏,等. 腐植酸复合微生物肥在蔬菜上的应用研究[J]. *腐植酸*, 2014(6): 20-23.
- [38] 郭玉荣,姜剑平. 腐植酸复混肥在蔬菜上的应用效果研究[J]. *腐植酸*, 2010(4): 22-26.
- [39] SANGEETHA M, SINGARAM P, GANDHI M S, et al. Quality characteristics of onion as influenced by lignite humic acid and inorganic fertilizers [J]. *Research on Crops*, 2008, 9(1): 106-109.

(责任编辑:陈海霞)