

张文妍,高常卉,吴冠男. 稻壳炭钝化污泥对萝卜种子发芽和幼苗生长的影响[J]. 江苏农业科学,2015,43(1):158-162.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.01.055

# 稻壳炭钝化污泥对萝卜种子发芽和幼苗生长的影响

张文妍, 高常卉, 吴冠男  
(南京林业大学材料科学与工程学院,江苏南京 210037)

**摘要:**以稻壳炭钝化后的城市污泥为对象,研究对萝卜种子发芽和幼苗生长的影响。结果表明,与单独施加污泥相比,稻壳炭钝化污泥促进了萝卜种子的发芽,减轻了污泥对种子根伸长的抑制,提高了发芽指数;与对照土壤相比,稻壳炭钝化污泥的施用显著促进了萝卜幼苗生物量的提高,增加了幼苗对钾的吸收,且幼苗钾含量与基质中稻壳炭含量呈显著正相关,但对幼苗氮磷含量无显著影响;稻壳炭钝化污泥的施用使萝卜幼苗中 Zn、Pb 和 Cu 含量显著上升,而对 Cd 含量没有显著影响,回归分析结果,萝卜幼苗中的 Zn、Pb、Cu 含量与基质中污泥含量呈显著正相关,Zn、Pb 含量与稻壳炭含量呈显著负相关,表明稻壳炭抑制了萝卜幼苗对污泥中重金属的吸收。

**关键词:**稻壳炭;污泥;钝化;种子发芽;幼苗

**中图分类号:** X703;S631.104      **文献标志码:** A      **文章编号:**1002-1302(2015)01-0158-04

城市污泥农用在世界范围内已经比较普遍,2002 年,美国城市污泥堆肥及土地利用占其污泥产量的 60%,欧洲也有超过 40% 的污泥用于农业土地<sup>[1-2]</sup>,城市污泥对作物产量、品质促进和对土壤改良效果已经得到公认<sup>[3-6]</sup>。但污泥中的高浓度盐分、重金属和其他有害物质也可能对植物的生长产生生态毒性,尤其是对于植物种子发芽和幼苗生长<sup>[7-8]</sup>。

生物炭(biochar)是生物质发电或产能的副产物<sup>[9]</sup>,是生物质在完全或部分缺氧情况下,经热解炭化产生的一类高度芳香化、难熔性的固态物质<sup>[10]</sup>,属于广义概念上的黑碳(black carbon)的一种。近年来,生物炭的农作价值越来越受到关注,生物炭被证明不仅可以改善土壤理化性质、增加土壤肥力、促进作物生长,还可以显著降低土壤中重金属和有毒有害物质的生物有效性<sup>[11-13]</sup>。生物炭在土壤中极为稳定,可长期将碳固存于土壤,有助于减少温室气体的排放<sup>[14-15]</sup>。

虽然污泥和生物炭的农作潜力作为近年来的热点已经被广泛研究,但大多报道仅局限于污泥或生物炭单独作用于土壤的效应,两者联合施用于土壤的相关报道较少。事实上,污泥丰富的有机质和氮磷含量正是生物炭所缺乏的,而生物炭发达的空隙结构和所含微量元素可以降低污泥中有害物质的有效性、减少污泥施用中养分淋失,而且生物炭含丰富的钾,可以弥补污泥钾素的缺乏,两者在农学效应和环境效应上优势互补。鉴于此,本研究采用生物炭的一种——稻壳炭作为稳定剂对城市污泥中的重金属和有毒物质进行钝化,然后将钝化后的污泥(稻壳炭钝化污泥)以不同配比施入土壤,通过萝卜种子发芽和幼苗生长试验,研究稻壳炭钝化污泥对植物的生态毒性和生长发育的影响,以期明确污泥和稻壳炭共同用于改良土壤的可行性,为城市污泥的安全农作和生物炭气

化发电副产物的高效利用提供新途径。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

土壤取自南京林业大学校园内风景区 0~15 cm 的表层未扰动土壤。该土壤为南京地区的典型黄棕壤,属于粉沙壤土。供试污泥取自南京江心洲污水处理厂,该厂是目前南京市最大的污水处理厂,日污水处理量为 64 万 t,污水主要来源于城市居民的生活污水,经过 A/O 工艺处理。剩余污泥经离心脱水,含水率约为 75%~80%。供试稻壳炭来自于本课题组的“农林生物质同时制取气、炭、液产品”项目的产物之一——生物炭。炭化温度为 600~700℃。稻壳炭除了具有一般生物炭的特点外,还具有粒径大小适中且均匀、不需要额外粉碎,容易与土壤和污泥掺混的特点。供试土壤、污泥和稻壳炭的基本理化性质见表 1。

表 1 土壤、污泥和稻壳炭的理化性质

理化性质指标	土壤	污泥	稻壳炭
pH 值	6.75 ± 0.03	7.30 ± 0.12	9.49 ± 0.14 *
电导率(mS/cm)	0.06 ± 0.01	1.69 ± 0.03	0.56 ± 0.04
有机质(%)	8.18 ± 1.36	38.25 ± 1.45	56.78 ± 2.88
比重(g/cm <sup>3</sup> )	2.51 ± 0.02	1.95 ± 0.01	3.59 ± 0.03
容重(g/cm <sup>3</sup> )	1.02 ± 0.02	0.56 ± 0.01	0.15 ± 0.01
阳离子交换量(cmol/kg)	10.11 ± 1.49	17.48 ± 1.29	
碱解氮(mg/kg)	50.68 ± 6.46	2 454.00 ± 90.40	15.15 ± 5.67
有效磷(mg/kg)	7.74 ± 2.00	271.00 ± 4.52	288 ± 2.51
速效钾(mg/kg)	56.04 ± 2.38	223.00 ± 0.55	1 481.00 ± 54.22
Zn(mg/kg)	66.93 ± 2.63	980.38 ± 108.91	73.59 ± 7.49
Cd(mg/kg)		2.24 ± 0.18	
Pb(mg/kg)	28.83 ± 1.39	118.67 ± 2.84	6.12 ± 1.10
Cu(mg/kg)	64.91 ± 1.98	226.12 ± 37.35	15.10 ± 2.38
沙粒(%)	6.88		
粉粒(%)	77.17		
黏粒(%)	15.95		
比表面积(m <sup>2</sup> /g)			188.12

注:数据为“平均值 ± 标准差”。“\*”表示稻壳炭 pH 值的测定采用 1:10 的土水比。

收稿日期:2014-02-25

基金项目:江苏高校优势学科建设工程项目(编号:PAPD);南京林业大学科技创新基金(编号:163020090);大学生实践创新训练计划。  
作者简介:张文妍(1978—),女,安徽芜湖人,讲师,主要从事生物质炭材料、固废资源化研究。E-mail:627389011@qq.com。

供试作物种子为萝卜 (*Raphanus sativus* L.), 购于安徽华新种业有限公司。

1.2 方法

1.2.1 钝化污泥培养 脱水污泥取来后, 在室温下风干至含水率 60% 左右并过 10 目筛, 然后分别加入其鲜重的 0.5%、10%、20%、40% 的稻壳炭, 充分混匀后, 在室温中用恒重法维持 50% ~ 60% 的含水率培养 35 d, 其间每天添加去离子水维持处理组的重量不变, 使污泥中重金属和有毒物质充分钝化, 成为含稻壳炭 0.5%、10%、20%、40% 的稻壳炭钝化污泥, 简

表 2 各处理组稻壳炭、污泥和土壤含量

基质	基质干质量配比 (%)										
	CK	1 : 1B0	1 : 1B5	1 : 1B10	1 : 1B20	1 : 1B40	1 : 4B0	1 : 4B5	1 : 4B10	1 : 4B20	1 : 4B40
稻壳炭	0	0	6	10	17	25	0	2	4	7	10
污泥	0	50	44	40	33	25	20	18	16	13	10
土壤	100	50	50	50	50	50	80	80	80	80	80

1.2.3 种子发芽和根伸长抑制 (1) 种子消毒: 将种子铺在白纸上, 剔除杂质和有缺陷的种子后, 放入 2% 的双氧水中浸泡 10 min 消毒。再用自来水和去离子水充分冲洗后, 将种子放在滤纸上吸干水分。(2) 发芽床准备: 每个处理组分别准确称取 1 g 土样, 置于内径为 15 cm 的培养皿中, 加入 10 mL 去离子水, 摇匀, 再将大小适中的滤纸铺在溶液表面上, 使其湿润。(3) 发芽试验: 选择光鲜饱满的萝卜种子, 按每个发芽床 25 粒, 分别置于各发芽床上使之均匀分布, 放入培养箱中于 (25 ± 0.5) °C 条件下培养, 每隔 12 h 观察 1 次发芽率, 按胚芽长度达到种子的 50% 为标准, 计算发芽率。连续 48 h 发芽率不再变化, 试验停止, 测量平均根长 (根和芽接点处到最长根尖的长度), 每个处理重复 3 次。

1.2.4 幼苗生长 采用室内盆栽的方法培育萝卜幼苗。将每个处理组的混合基质装入高 13 cm、口径 15 cm 的塑料花盆中 (每盆装填高度约为 10 cm), 均匀播撒 50 粒饱满的萝卜种子, 生长过程中以去离子水浇灌, 苗期生长至 10 d 取样, 洗净晾干后, 测各处理组鲜质量 (地上和地下部分总和), 再置于恒温箱中于 70 °C 烘 72 h, 取出剪碎后测植株氮、磷、钾和重金属含量。

1.3 分析与测定

种子发芽和根伸长的各项指标计算公式如下<sup>[16~18]</sup>: 发芽率 = (正常发芽种子数/供试种子数) × 100%; 发芽指数 = (处理组发芽率/对照组发芽率) × (处理组根伸长/对照组根伸长) × 100%。植株中氮、磷、钾和重金属测定方法参照 NY/T 2017—2011《植物中氮、磷、钾的测定》。

1.4 数据处理

所有数据用 SPSS 21.0 处理, 方差分析采用 One - way ANOVA 检验, 回归分析采用线性回归, 多重比较采用 LSD 检验。图表处理在 Origin75 中完成。

2 结果与分析

2.1 稻壳炭钝化污泥对萝卜种子发芽的影响

不同处理组萝卜种子发芽率、根伸长和发芽指数见表 3。所有处理萝卜种子发芽率均高于对照, 说明钝化污泥的添加对萝卜种子发芽有促进作用。其中 1 : 1B20、1 : 1B40、1 : 4B5 处理发芽率显著高于其他组, 达 70% 以上, 而 1 : 4B0

称钝化污泥, 分别以 B0、B5、B10、B20、B40 表示。

1.2.2 混合基质配制 将钝化污泥 (B0、B5、B10、B20、B40) 分别按 1 : 1 和 1 : 4 (钝化污泥、土壤干重比) 与土壤均匀混合, 分别设 1 : 1B0、1 : 1B5、1 : 1B10、1 : 1B20、1 : 1B40、1 : 4B0、1 : 4B5、1 : 4B10、1 : 4B20、1 : 4B40 处理组, 另设 1 组土壤作为对照 (CK), 试验共设 11 个处理组。按鲜污泥含水率 60% 计, 稻壳炭和土壤含水率忽略不计, 各处理组稻壳炭、污泥和土壤干质量的配比见表 2。

表 3 稻壳炭钝化污泥对萝卜种子发芽相关指数的影响

处理	发芽率 (%)	根伸长 (mm)	发芽指数 (GI)
CK	56b	31ab	100ab
1 : 1B0	64ab	19b	73b
1 : 1B5	64ab	23b	93ab
1 : 1B10	69ab	23b	94ab
1 : 1B20	79a	23b	110ab
1 : 1B40	76a	29ab	129ab
1 : 4B0	57b	21b	70b
1 : 4B5	76a	29ab	136a
1 : 4B10	64ab	27ab	106ab
1 : 4B20	63ab	32a	126ab
1 : 4B40	68ab	24b	104ab

注: 表中数据为平均值, 同列数据后不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。表 4、表 6 同。

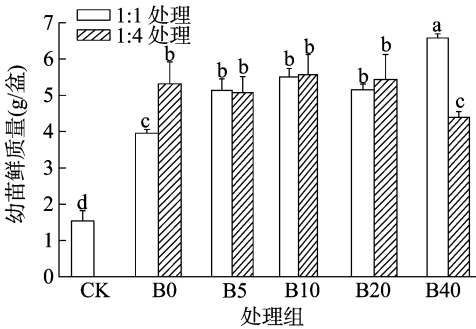
处理发芽率最低, 仅 57%, 与对照组差异不显著。根伸长仅有 1 : 4B20 处理的根长为 32 mm, 高于对照, 其他处理根长均受到显著抑制, 其中 1 : 1B0、1 : 4B0 处理根长最短, 只有对照组的 61% 和 68%。

发芽指数包含了土壤对于植物种子发芽率和根伸长抑制的综合结果, 可以用来综合评判土壤对种子胚芽的毒性<sup>[8]</sup>。从表 3 可以看出, 多数处理的发芽指数大于 100, 说明钝化污泥在多数情况下, 对萝卜种子萌发起到促进作用, 这主要是钝化污泥对发芽率的促进作用掩盖了其对根伸长的抑制作用。1 : 4B5 处理发芽指数最高, 达到 136, 表明该处理污泥和稻壳炭的含量对于种子发芽最为适宜。1 : 1B0、1 : 4B0 处理的发芽指数显著比其他组低, 发芽指数分别为 73、70。

2.2 稻壳炭钝化污泥对萝卜幼苗生长的影响

2.2.1 对幼苗生物量的影响 由图 1 可见, 不同处理组萝卜幼苗鲜质量均显著大于对照, 没有出现抑制情况, 不同处理每盆萝卜幼苗鲜质量比对照组的增幅达 157% ~ 327%。1 : 1B40 处理萝卜幼苗鲜质量显著高于其他处理, 1 : 1B0、1 : 4B40 处理萝卜幼苗鲜质量显著低于其他处理。

2.2.2 对幼苗养分含量的影响 从表 4 可以看出, 钝化污泥并没有显著提高萝卜幼苗氮含量, 不同处理氮含量差异不显



图中数据为平均值，图中不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）

图1 各处理组萝卜幼苗鲜重

著,与对照差异不显著,仅1:4B0处理氮含量略高。不同处理萝卜幼苗磷含量略高于对照,但差异不显著。不同处理钾含量有显著差异,显著高于对照。为了进一步分析稻壳炭钝化污泥对萝卜幼苗钾含量的影响,将污泥和稻壳炭含量作为因素,与萝卜幼苗钾含量进行线性回归分析,结果(表5)表明,萝卜幼苗钾含量与稻壳炭含量呈显著线性正相关,而污泥含量被排除,即污泥含量与幼苗钾含量无显著相关关系。

表4 不同处理萝卜幼苗氮、磷、钾含量比较

处理	养分含量(g/kg)		
	氮	磷	钾
CK	22.5ab	8.83a	12.37e
1:1B0	20.7b	10.65a	47.96cd
1:1B5	22.5ab	10.93a	60.15c
1:1B10	18.7b	10.96a	62.55bc
1:1B20	22.5ab	11.50a	66.29bc
1:1B40	19.6b	11.18a	86.74a
1:4B0	32.3a	10.73a	20.93e
1:4B5	26.3ab	10.75a	34.52d
1:4B10	24.4ab	11.11a	42.05d
1:4B20	21.6ab	10.51a	59.28c
1:4B40	19.4b	9.16a	72.94b

表5 污泥/稻壳炭含量与萝卜幼苗钾含量线性回归分析

方程	$r$	显著性	已排除的变量
$y = 2.405x + 33.726$	0.684	0.001	污泥含量

注:表中 $y$ 为萝卜幼苗钾含量(g/kg), $x$ 为稻壳炭含量(%)。

表7 污泥/稻壳炭含量与萝卜幼苗重金属含量线性回归分析

重金属	方程	$R^2$	显著性	已排除的变量
Zn	$y = 1.594x_1 - 1.525x_2 + 49.037$	0.930	<0.001	污泥含量、稻壳炭含量
Cd				
Pb	$y = 0.001x_1 - 0.001x_2 + 0.014$	0.789	0.001	稻壳炭含量
Cu	$y = 0.070x_1 + 3.412$	0.434	0.016	

注:表中 $y$ 为相应萝卜幼苗重金属含量(mg/kg), $x_1$ 为污泥含量(%), $x_2$ 为稻壳炭含量(%)。

从表7可以看出,Zn含量回归方程的显著性小于0.001,相关系数高达0.930,且与污泥、稻壳炭含量均有关系,与污泥含量呈线性正相关,与稻壳炭含量呈线性负相关。Cd含量与污泥和稻壳炭含量均无关。Pb含量的回归公式也有统计意义,显著性达0.001,相关系数达0.789,与污泥含量和稻壳炭含量分别呈线性正相关和负相关。Cu含量的回归方程排除了稻壳炭含量,只与污泥含量呈线性正相关,显著性和相关系数也比Zn和Pb有所下降。

2.2.3 对幼苗重金属含量的影响 污泥中含有较多重金属,本试验考察了不同处理萝卜幼苗主要重金属含量,结果见表6。由表6可以看出,不同处理萝卜幼苗Zn含量比对照组显著增加,1:1B0处理Zn含量最高,达134.49 mg/kg,是对照的3倍,表明钝化污泥中的Zn能较容易被植物吸收。随着污泥含量的减少,不同处理萝卜幼苗Zn含量也逐渐降低,1:4B40处理Zn含量已与对照相差不大。钝化污泥并没有显著增加萝卜幼苗的Cd含量,不同处理间没有显著差异,且Cd含量很低。不同处理萝卜幼苗Pb含量虽然均较低,但处理间有显著差异,钝化污泥含量较多的处理,萝卜幼苗Pb含量显著比对照升高。钝化污泥的施用也使萝卜幼苗中Cu含量显著增加,不同处理中随污泥含量的增加Cu含量有上升的趋势。目前,我国已经取消了食品中Zn和Cu的限量标准,参照澳大利亚新西兰食品标准(2002)中关于Zn和Cu的规定,食品中Zn和Cu的最大限度分别为150 mg/kg和10 mg/kg,本试验中所有处理Zn和Cu含量均达标。我国《食品中污染物限量》(GB 2762—2005)中,对叶类蔬菜Cd和Pb的限值分别为0.2 mg/kg和0.3 mg/kg,试验所有处理也均达标。

表6 不同处理萝卜幼苗重金属含量比较

处理	重金属含量(mg/kg)			
	Zn	Cd	Pb	Cu
CK	45.55e	0.02a	0.01c	2.56f
1:1B0	134.49a	0.03a	0.05a	8.30a
1:1B5	115.74b	0.02a	0.04a	6.33b
1:1B10	86.53c	0.01a	0.04ab	4.32d
1:1B20	65.44d	0.02a	0.03b	4.65d
1:1B40	58.19de	0.01a	0.02c	4.60d
1:4B0	78.12cd	0.02a	0.04ab	6.15bc
1:4B5	77.32cd	0.01a	0.03b	5.56c
1:4B10	67.32d	0.01a	0.03b	5.76bc
1:4B20	61.58d	0.02a	0.01c	4.45d
1:4B40	54.29de	0.01a	0.01c	3.55e

为了进一步分析稻壳炭钝化污泥对于萝卜幼苗重金属含量的影响,将污泥和稻壳炭含量作为因素,与萝卜幼苗重金属含量分别进行线性回归,分析结果见表7。

3 结论与讨论

为了充分利用城市污泥所含丰富的有机质和氮磷,避免其所含盐分、重金属等有毒物质对植物的生态毒性,本研究用稻壳炭将污泥钝化后农用,通过测定稻壳炭钝化污泥对萝卜种子发芽和幼苗生长的影响,明确了城市污泥和稻壳炭共同施用于土壤的效果。

从发芽率数据来看,钝化污泥促进了萝卜种子的发芽。

发芽率较高处理有两个特点:污泥含量适中(污泥在基质中干重比为 18% ~ 33%)且含有稻壳炭处理,因一定含量的污泥可以给种子发芽提供充足营养,一定比例稻壳炭可以减轻污泥中的毒性物质对种子的毒害。基质中污泥含量过高,或不含稻壳炭的处理,就会因污泥中有毒物质过高而影响种子发芽<sup>[19-20]</sup>。从根伸长的数据看,钝化污泥对种子根长有抑制作用,萝卜根伸长比种子发芽率更容易受到有毒物质的影响。因种子发芽过程主要受胚内养分供应影响,即使土壤污染也不会间断胚内养分供应;而根从一开始就完全暴露于土壤中,其生长发育很大程度上受到土壤条件的控制<sup>[21]</sup>,相关研究也发现了发芽率对污染土壤的敏感性不及根伸长<sup>[22-24]</sup>。从发芽指数来看,不含稻壳炭的 1:1B0 和 1:4B0 处理的发芽指数最低,表明没有经稻壳炭钝化的污泥对作物有一定的生态毒性。但经过稻壳炭的钝化,其毒性大为降低,所有含稻壳炭的处理发芽指数均显著上升,甚至出现了发芽指数大于 100,体现了稻壳炭对污泥中有毒物质的钝化作用和对种子发芽的促进作用。

钝化污泥显著促进了萝卜幼苗生物量的增加,这一方面是萝卜幼苗在生长的过程中适应了环境,另一方面也是因为钝化污泥所含营养元素,有效促进了萝卜幼苗的生长。1:1B40 处理污泥和稻壳炭的比例合适,既能提供萝卜生长所需的营养元素,又能提供疏松透气的土壤环境,能最大程度促进幼苗生长,所以生物量最高。1:1B0 处理污泥含量较高,又没有稻壳炭的钝化,所含有害成分影响了萝卜幼苗正常生长,萝卜幼苗生物量降低,而 1:4B40 处理污泥含量最少,稻壳炭含量相对较多,可能是营养不足或土壤碳氮比过高导致萝卜幼苗生长受阻。

尽管钝化污泥含有极丰富的碱解氮和有效磷,但萝卜幼苗并没有能从污泥中吸收大量的氮和磷,可能是幼苗时期萝卜对氮磷的吸收有限。但不同处理萝卜幼苗钾含量却差别很大,因为钾是萝卜生长过程中需求最大的矿物质元素,幼苗时期吸收量比其他元素都多<sup>[25]</sup>。通过线性回归分析,萝卜幼苗钾含量主要是因为处理中的稻壳炭引起,与污泥含量无关,表明稻壳炭所含丰富的钾素可以被萝卜幼苗吸收利用,因稻壳炭添加对于萝卜钾素的吸收有重要意义。

稻壳炭钝化污泥的添加,使萝卜幼苗 Zn、Pb 和 Cu 含量显著上升,而对 Cd 含量没有显著影响。主要是因植物从土壤中吸收的重金属量往往与土壤重金属含量有线性关系<sup>[26-27]</sup>,城市污泥中 Zn、Pb 和 Cu 含量相对较高,萝卜幼苗对其吸收量也高,而污泥中 Cd 含量相对较低,因此萝卜幼苗吸收量也少。经线性回归分析可知,萝卜幼苗 Zn、Pb 含量与处理组中污泥含量呈显著正相关,与稻壳炭含量呈显著负相关,表明萝卜幼苗中的 Zn 和 Pb 来源于污泥,由于稻壳炭存在而显著减少,体现了稻壳炭抑制了植物对重金属的吸收。Cd 含量与污泥和稻壳炭含量均无显著关系,可能是处理中 Cd 含量很少,被植物吸收量也不显著。萝卜幼苗的 Cu 含量与污泥呈正相关,而与稻壳炭含量无关,说明污泥增加了萝卜苗的 Cu 含量,但稻壳炭并未能阻止其对 Cu 的吸收,可能因为 Cu 也是植物生长所需元素<sup>[28]</sup>,萝卜苗会主动吸收一定量的 Cu。参照目前国内外对食品中 Zn、Cd、Pb、Cu 的规定,本研究所有处理萝卜幼苗均达标,但萝卜的生长期较长,在后期的生长

中萝卜中的重金属是否会继续富集,还有待进一步研究。

稻壳炭钝化污泥能显著促进萝卜种子发芽和幼苗生长,由于稻壳炭的钝化作用,降低了单独污泥施加对作物的生物毒性,降低了作物对重金属的吸收。污泥和稻壳炭优势互补,联合施用于土壤既能为植物提供丰富的营养和合适的土壤环境,又能降低污泥中的毒性物质对植物的生态毒性。

#### 参考文献:

- [1] 李 琼,华 璐,徐兴华,等. 城市污泥农用的环境效应及控制标准的发展现状[J]. 中国生态农业学报,2011,19(2):468-476.
- [2] 余 杰,田宁宁,王凯军. 城市污水厂污泥处理与处置技术的新思路[J]. 中国给水排水,2008,24(6):11-14.
- [3] 闫 逊,习祥春,王 娜. 寒冷干旱地区施用污泥有机肥对紫花苜蓿草生长和土壤理化性质的影响[J]. 中国农机化,2012(4):78-83.
- [4] 李梦红,黄现民,诸葛玉平. 污泥农用于土壤理化性质及作物产量的影响[J]. 水土保持通报,2009,29(6):95-98.
- [5] Wei Y J, Liu Y S. Effects of sewage sludge compost application on crops and cropland in a 3-year field study[J]. Chemosphere, 2005, 59(9):1257-1265.
- [6] Mantovi P, Baldoni G, Toderi G. Reuse of liquid, dewatered, and composted sewage sludge on agricultural land: effects of long-term application on soil and crop[J]. Water Research, 2005, 39(2/3):289-296.
- [7] Walter I, Martinez F, Cala V. Heavy metal speciation and phytotoxic effects of three representative sewage sludges for agricultural uses[J]. Environmental Pollution, 2006, 139:507-514.
- [8] Fuentes A, Llorens M, Saez M J, et al. Ecotoxicity, phytotoxicity and extractability of heavy metals from different stabilised sewage sludges[J]. Environmental Pollution, 2006, 143(2):355-360.
- [9] Ma Z Q, Zhang Y M, Zhang Q S, et al. Design and experimental investigation of a 190kW biomass fixed bed gasification and polygeneration pilot plant using a double air stage downdraft approach[J]. Energy, 2012, 46:140-147.
- [10] Antal M J, Gronli M. The art, science and technology of charcoal production[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 2003, 42:1619-1640.
- [11] Beesley L, Marmiroli M. The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(2):474-480.
- [12] Wang T T, Cheng J, Liu X J, et al. Effect of biochar amendment on the bioavailability of pesticide chlorantraniliprole in soil to earthworm[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2012, 83:96-101.
- [13] Oleszczuk P, Hale S E, Lehmann J A. Activated carbon and biochar amendments decrease pore-water concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sewage sludge[J]. Bioresource Technology, 2012, 111:84-91.
- [14] Kuzyakov Y, Subbotina I, Chen H, et al. Black Carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by <sup>14</sup>C labelling[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41:210-219.
- [15] Mchenry M P. Agricultural bio-char production, renewable energy generation and farm carbon sequestration in Western Australia: certainty, uncertainty and risk[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2009, 129:1-7.

谢 荔,成学慧,陈禹平,等. 采前喷施低浓度 5-氨基乙酰丙酸促进苹果着色与改善品质的效应[J]. 江苏农业科学,2015,43(1):162-165.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.01.056

# 采前喷施低浓度 5-氨基乙酰丙酸促进苹果着色与改善品质的效应

谢 荔<sup>1</sup>, 成学慧<sup>1</sup>, 陈禹平<sup>2</sup>, 张林森<sup>3</sup>, 张永旺<sup>3</sup>, 王志龙<sup>4</sup>, 汪良驹<sup>1</sup>

(1. 南京农业大学园艺学院, 江苏南京 210095; 2. 94789 部队后勤部军需处, 江苏南京 210018;

3. 西北农林科技大学园艺学院, 陕西杨凌 712100; 4. 陕西省乾县园艺试验站, 陕西咸阳 713300)

**摘要:**以富士苹果为材料,研究了采前 10 d 用 10 mg/L 外源 5-氨基乙酰丙酸(ALA)处理对果皮花青素合成与果实品质的影响。结果表明,虽然 7 个种植户之间数据存在一定差异,但外源 ALA 处理均能不同程度改善果实着色程度,在一定范围内提高果肉可溶性固形物和可溶性糖含量,并降低可滴定酸含量。与清水对照相比,ALA 处理果实花青素平均值提高 163.22%,固酸比、糖酸比平均值均提高 1/3 左右;但是,ALA 处理对果实大小及硬度无明显影响。

**关键词:**5-氨基乙酰丙酸(ALA);苹果;花青苷;着色;果实品质

**中图分类号:**S661.104 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2015)01-0162-04

果实外观品质,特别是红色果实着色程度一直是国内外果树工作者普遍关心的重要问题。果实颜色既是一个物种或品种的典型特征,又是果实品质与成熟度的重要指标,还是消费者选购时的重要依据。近年研究表明,果皮花青素可以提高植物抗光氧化性和抗病性,经常食用花青素,对于人体健康具有良好的抗氧化、抗衰老甚至抗癌等功效<sup>[1]</sup>。由于花青素有利于人体健康,着色好的果品更受消费者欢迎。在果树生

产实践中,套袋、铺反光膜等促进果实花青素合成的生产措施已经在许多地区推广使用;但是,喷布植物生长调节物质更加简便易行。有人提出,赤霉素、脱落酸、乙烯利、茉莉酸等<sup>[2-4]</sup>植物生长物质可以促进果实着色,甚至喷施乙醇也能促进葡萄着色;但也有报道认为,GA<sub>3</sub>抑制果实花青素合成<sup>[5]</sup>,而其他植物生长调节物质往往导致果实提早完熟,增加采前落果率,影响果品货架期<sup>[4]</sup>,不利于果品长期贮藏。王中华等研究发现,外源 5-氨基乙酰丙酸(ALA)可以促进苹果果皮着色<sup>[6-8]</sup>,适宜浓度为 150~200 mg/L。这个浓度虽然能够很好诱导与果皮花青素合成有关的基因表达,促进苹果着色,但由于果树喷施用水量,如果 1 hm<sup>2</sup> 果园需要喷水 6 000 kg,那么 1 hm<sup>2</sup> 果园需要 ALA 纯品 900~1 200 g。按照目前国内 ALA 纯品最低价 20 元/g 计算,1 hm<sup>2</sup> 果园使用的最低成本为 18 000~24 000 元,这是绝大多数果农难以承受的。为此,需要进一步调整

收稿日期:2014-07-02

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(10)111]。

作者简介:谢 荔(1984—),女,山东济南人,硕士,从事果树栽培生理研究。E-mail: litchixie@163.com。

通信作者:汪良驹,博士,教授,从事果树生长发育调节研究。Tel: (025)84395265;E-mail: wlj@njau.edu.cn。

[16] Fuentes A, Llorens M, Saez J, et al. Phytotoxicity and heavy metals speciation of stabilised sewage sludges[J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, 108(3): 161-169.

[17] Hoekstra N J, Bosker T, Lantinga E A. Effects of cattle dung from farms with different feeding strategies on germination and initial root growth of cress (*Lepidium sativum* L.)[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2002, 93(1/2/3): 189-196.

[18] 侯晓龙,刘爱琴,蔡丽平,等. Pb 胁迫对富集植物金丝草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 西南林业大学学报,2013,33(5): 54-58.

[19] 何九军,王 瀚,杨小录. 重金属 Zn<sup>2+</sup> 胁迫对萝卜种子萌发及幼苗生长和叶绿素合成的影响[J]. 安徽农业科学,2011,39(33): 20348-20350.

[20] 莫测辉,吴启堂,周友平,等. 城市污泥对作物种子发芽及幼苗生长影响的初步研究[J]. 应用生态学报,1997,8(6): 645-649.

[21] 宋玉芳,许华夏,任丽萍,等. 重金属对土壤中萝卜种子发芽与根伸长抑制的生态毒性[J]. 生态学杂志,2001,20(3): 4-8.

[22] 申荣艳,郑 正,赵兴青,等. 长三角地区城市污泥施入土壤对白菜种子发芽和根伸长的影响[J]. 广东农业科学,2012(18): 43-45.

[23] 王 瀚,何九军,杨小录. 重金属铅 Pb(Ⅱ)胁迫对萝卜种子萌发及幼苗叶绿素合成影响的研究[J]. 种子,2012,31(1): 42-44.

[24] Rogovska N, Laird D, Cruse R M, et al. Germination tests for assessing biochar quality[J]. Journal of Environmental Quality, 2012, 41(4): 1014-1022.

[25] 卢必威. 萝卜的合理施肥[J]. 中国蔬菜,1982(3): 39-42.

[26] McBride M B. Toxic metals in sewage sludge-amended soils: has promotion of beneficial use discounted the risks[J]. Advances in Environmental Research, 2003, 8(1): 5-19.

[27] Su D C, Wong J C. Chemical speciation and phytoavailability of Zn, Cu, Ni, and Cd in soil amended with fly ash-stabilized sewage sludge[J]. Environment International, 2003, 29: 895-900.

[28] 李 涛,蒲韵婷,王全华,等. Mn、Cu 和 Zn 在植物生长发育中的生理作用[J]. 河北农业科学,2008,12(6): 12-15.