

污泥堆肥用作香樟树基质的配方优化及其综合评价

王守红¹, 徐 荣², 朱凌宇¹, 张家宏^{1*}, 寇祥明², 王桂良², 韩光明², 毕建花², 唐鹤军²

(1. 江苏里下河地区农业科学研究所, 江苏 扬州 225007;

2. 江苏省生态农业工程技术研究中心, 江苏 扬州 225007)

摘 要: 采用变异系数评价法, 赋予生长指标权重, 并计算不同基质配方中香樟树生长综合指数; 通过田口方法及基质环境安全性评价, 优化香樟树基质配方。结果表明, 生长指标中, 新生根须鲜重的权重最高; 除 1、7、18、29 号基质配方中生长综合指数均低于对照组 (30 号处理) 外, 其他配方均高于对照组, 其中 2、8、13、16、20~25、27、28 号与对照组差异性达到显著水平 ($P < 0.05$); 污泥堆肥、蛭石及污泥堆肥与杀菌剂二者的交互作用对于生长综合指数的影响均达到显著水平, 除聚天冬氨酸之外, 其余基质组分对于香樟树生长均有一定促进作用, 但均未达到显著水平; 当污泥堆肥用量水平为 3.0、4.5 kg 时, 土壤存在 Cd 污染风险。综上所述, 确定最佳基质配方由污泥堆肥、杀菌剂、复合肥及蛭石组成, 用量水平分别为 1.5 kg、0.3 g、20 g、100 g。通过 Minitab 软件中的田口方法预测分析系统, 基质配方筛选试验模型的准确性和可靠性得到了验证。

关键词: 权重; 田口方法; 污泥堆肥; 香樟; 安全性评价

中图分类号: X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6257 (2018) 03-0136-08

城市生活污水通过填埋、焚烧等方式处理, 会形成二次污染; 而通过生物处理, 可实现其“资源化、减量化、无害化”处理, 堆肥化处理是生物处理的主要方式^[1]。当前城市生活污水农用的争议点在于其中污染物的存在, 特别是重金属。分析认为城市生活污水中的重金属等污染物的存在主要由于工业污水与生活污水未分类排放所致^[2]。

众所周知, 行道树在城市生态建设中起着骨架作用; 而苗木由于移植过程中的修剪工作^[3], 使其抗逆性减弱; 此外, 行道树成活后, 也承受城市生活造成的负面影响。基质作为行道树移植后的养分源, 在其成活及生长过程中起着重要作用。将城市生活污水基质化利用与香樟树移栽相结合, 并添加各种调节剂, 可改善香樟树移栽后的生长环境, 促进其成活和生长。此外, 利用香樟树对重金属的累积作用, 吸收基质中可能存在的重金属, 并储存于

根系等部位^[4-6], 降低其可利用性^[7], 提升基质的环境安全性。既实现资源的再利用, 又降低城市生态建设成本, 促进城市环境健康发展。

关于香樟树基质配方的客观综合评价, 需基于各生长指标的相对重要程度 (即权重) 进行; 同时, 指标权重的计算中, 应避免主观赋权重的偏好性, 削弱极值指标对评价结果的影响^[8]。

为减少试验工作量, 需借助精确、高效的数理模型对于各配方组分进行优化。而田口方法以正交设计为基础, 引入信噪比降低噪声因子 (即不可控制因素) 对试验数据变异产生的影响; 信噪比越大, 产品的质量特性波动越小、越稳定, 噪声因子的效应越小; 同时该方法用最少数量的试验, 尽可能地获取准确的试验结果^[9-11]。

鉴于此, 本文通过变异系数权重法与田口方法相结合的苗木综合评价方法, 进行基质配方的筛选试验; 并结合基质环境安全性评价结果, 最终确定基质配方。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤取自江都区宜陵镇, 属高沙土^[12]; 污泥堆肥原料主要包括城市生活污水、猪粪及菌菇渣, 将混合堆体含水率调至 58% 左右, 碳氮比为

收稿日期: 2017-06-28; 最后修订日期: 2017-07-31

基金项目: 江苏省科技支撑计划 (社会发展) 项目 (BE2014680); 江苏里下河地区农业科学研究所基金项目 (2016); 扬州市现代农业-农业高技术及产业关键技术创新 (YZ2016036)。

作者简介: 王守红 (1970-), 男, 江苏兴化人, 副研究员, 硕士研究生, 主要从事生态农业工程技术研发工作。E-mail: yzwish@126.com。

通讯作者: 张家宏, E-mail: yzzhangjh@163.com。

22:1, 在扬州某公司有机肥生产车间进行堆置, 定期翻堆, 35 d 后堆温降至室温左右, 进入后腐阶段, 最后通过锤式粉碎机进行粉碎, 过 5 mm 筛, 装袋备用; 土壤、污泥堆肥理化性质见表 1、表 2; 复合肥 $N-P_2O_5-K_2O$ 含量为 15-10-15; 萘乙酸生根粉、敌磺钠杀菌剂及微量元素 B、Zn 分别为国光根灵 (70%, 粉剂)、国光生根 (20%, 粉剂)、国光硼 (98%)、国光锌 (98%); 聚天冬氨酸分子量为 8 000; 蛭石规格为直径 1 cm 左右; 试验用花盆盆口直径 30 cm, 高 35 cm, 装土 30 kg。香樟树选取标准为米径 2 cm 左右 (二年生)。

表 1 土壤、污泥堆肥的理化性质

项目	有机质 (%)	TN ($g \cdot kg^{-1}$)	TP ($g \cdot kg^{-1}$)	TK ($g \cdot kg^{-1}$)
土壤	2.49	0.82	1.23×10^{-3}	0.06
污泥堆肥	48.21	9.46	0.12	5.41

表 2 土壤、污泥堆肥中重金属含量 ($mg \cdot kg^{-1}$)

项目	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr
土壤	47.71	134.80	28.16	0.65	29.39
污泥堆肥	303.82	216.52	31.75	2.76	68.54
农用污泥中污染物控制标准 (GB 4284—1984)					
	500	1 000	1 000	20	1 000

1.2 试验设计

1.2.1 基质配方的优化

选用田口方法 (Taguchi method) 作为试验设计方法, 设置 8 个因素, 3 个水平 (表 3), 采用 L_{27} 表进行试验设计; 此外, 还包括 2 个预测组 (28、29 号) 和对照组 (30 号) (表 4), 共 30 个处理, 每个处理设置 10 个重复。

表 3 因子及水平

污泥堆肥 (kg)	复合肥 (g)	生根粉 (g)	杀菌剂 (g)	微量元素 B (g)	微量元素 Zn (g)	聚天冬氨酸 (g)	蛭石 (g)
1.5	20	0.000	0.0	0.00	0.0	0.00	0
3.0	40	0.003	0.3	0.03	0.3	0.06	100
4.5	80	0.006	0.6	0.06	0.6	0.12	200

表 4 预测组及对照组的基质配方

处理	污泥堆肥 (kg)	复合肥 (g)	生根粉 (g)	杀菌剂 (g)	微量元素 B (g)	微量元素 Zn (g)	聚天冬氨酸 (g)	蛭石 (g)
28	4.5	40	0.006	0.3	0.03	0.3	0	0
29	3.0	40	0.003	0.6	0.03	0.3	0.06	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0

1.2.2 基质使用安全性评价

香樟树基质中重金属主要来源于污泥堆肥, 因此, 根据基质配方优化结果, 固定其他组分含量, 通过改变污泥堆肥使用量, 研究基质使用的环境安全性。

1.3 试验过程

试验开始于 2015 年 4 月, 地点位于扬州满春园生物科技有限公司有机肥生产基地。2015 年主要进行污泥堆肥为主的香樟树移栽基质配方的筛选; 2016 年 4~12 月主要进行污泥堆肥使用安全性评价。

盆栽试验过程: 土壤过筛 (建筑工程用黄沙筛, 直径 1 cm) 后, 按照田口设计 L_{27} 表的要求与原料进行混拌, 装盆, 再将枝、叶及半侧根须全部修除的香樟树植入盆栽 (1 株/盆) 中, 覆土; 选取无遮挡、平整地面放置盆栽; 每盆保持 1 m 距

离。日常管理主要包括浇水、除草及治虫等。试验结束后, 测定并记录相关指标。

1.4 测定项目及方法

生长指标主要包括叶片数、叶面积、分枝数、冠径、地径、根体积、主根长、地上与地下部鲜重、须根数及树高, 其中, 地径测定位置位于土痕处; 主根长测定为自土痕处至根部底端的距离; 地上、地下部鲜重的测定方法为将香樟树自土痕处一分为二, 分别称取其重量; 根体积采用排水称重法; 树高为自土痕处至枝杈顶端的距离。

土壤及植株样重金属含量: Cu、Zn、Pb、Cd 采用常压消解后原子吸收分光光度法进行测定, Cr 采用常压消解后电感耦合等离子体发射光谱法。

1.5 数据分析

采用 Minitab17、Excel 2010 处理试验数据, 采

用 sigmaplot 15 制图。试验中的单因素方差分析均采用 Fisher 检验方法。

2 结果与分析

2.1 不同香樟树基质配方的综合评价

由图 1 可知，香樟树生长指标中，新生根须鲜重的权重最高，叶面积和地径增长量最低。由图 2 可知，除 1、7、18、29 号 4 个处理低于对照组（30 号处理）外，其他处理组均高于对照组，其中 2、8、13、16、20~25、27、28 号处理与对照组差异性达到显著水平（ $P<0.05$ ）。

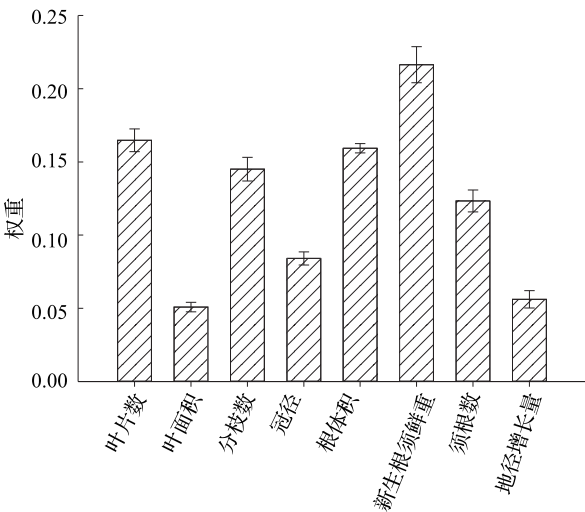


图 1 香樟树生长指标的权重

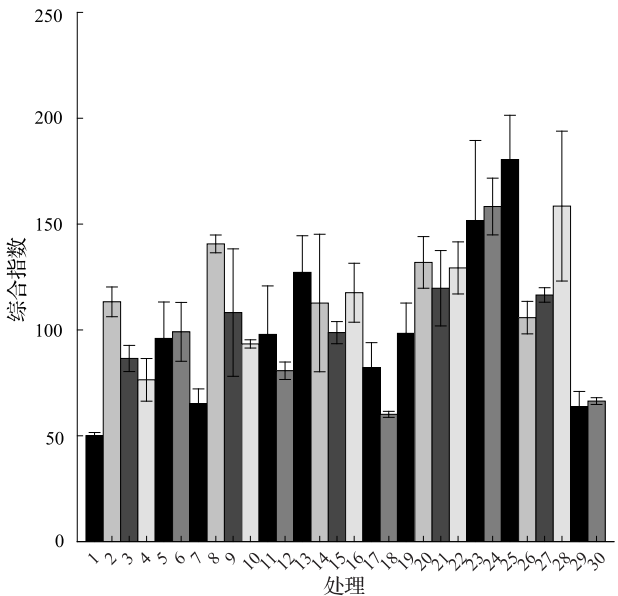


图 2 不同处理组的生长综合指数

2.2 香樟树基质配方优化

采用田口方法进行分析各处理生长综合指数，筛选最佳基质配方。

由表 5 可知，对于信噪比而言，污泥堆肥、蛭石及污泥堆肥与杀菌剂的互作效应对于生长综合指数的影响达到显著水平，其中污泥堆肥达到极显著水平（ $P<0.01$ ）。由表 6 可知，对于均值而言，污泥堆肥对于生长综合指数的影响达到显著水平（ $P<0.05$ ）。

表 5 信噪比方差分析表

来源	自由度	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
污泥堆肥	2	61.86	61.86	30.93	12.24	0.008
复合肥	2	0.77	0.77	0.39	0.15	0.861
生根粉	2	4.54	4.54	2.27	0.90	0.456
杀菌剂	2	1.59	1.59	0.80	0.32	0.741
微量元素 B	2	0.09	0.09	0.05	0.02	0.982
微量元素 Zn	2	5.66	5.66	2.83	1.12	0.386
聚天冬氨酸	2	0.49	0.49	0.24	0.10	0.909
蛭石	2	20.85	20.85	10.42	4.12	0.075
污泥堆肥 × 杀菌剂	4	57.68	57.68	14.42	5.71	0.030
残差误差	6	15.16	15.16	2.53		
合计	26	168.69				

注：SS 代表变量中每个数据点与变量均值差的平方和；MS 是平均后的偏差平方和，其值等于对应的 SS 除以自由度（DF）；Seq SS 代表连续偏差平方和；Adj SS 代表调整后的偏差平方和；Adj MS 代表调整后的平均后的偏差平方和。

表 6 均值方差分析表

来源	自由度	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
污泥堆肥	2	8 589. 10	8 589. 10	4 294. 60	7. 34	0. 024
复合肥	2	224. 20	224. 20	112. 10	0. 19	0. 831
生根粉	2	1 259. 20	1 259. 20	629. 60	1. 08	0. 399
杀菌剂	2	733. 20	733. 20	366. 60	0. 63	0. 566
微量元素 B	2	397. 10	397. 10	198. 50	0. 34	0. 725
微量元素 Zn	2	947. 80	947. 80	473. 90	0. 81	0. 488
聚天冬氨酸	2	905. 00	905. 00	452. 50	0. 77	0. 503
蛭石	2	1 759. 40	1 759. 40	879. 70	1. 50	0. 296
污泥堆肥 × 杀菌剂	4	5 245. 70	5 245. 70	1 311. 40	2. 24	0. 180
残差误差	6	3 511. 40	3 511. 40	585. 20		
合计	26	23 572. 20				

根据信噪比响应 (表 7) 分析可知, 基质配方各组分对生长综合指数影响强弱为污泥堆肥 > 蛭石 > 微量元素 Zn > 生根粉 > 杀菌剂 > 复合肥 > 聚天冬氨酸 > 微量元素 B; 根据均值响应 (表 8) 分析可知, 基质配方各组分对生长综合指数影响强弱为污泥堆肥 > 蛭石 > 生根粉 > 微量元素 Zn > 聚天冬氨酸 > 杀菌剂 > 微量元素 B > 复合肥。

表 7 信噪比响应表

水平	污泥堆肥	复合肥	生根粉	杀菌剂	微量元素 B	微量元素 Zn	聚天冬氨酸	蛭石
1	38. 54	39. 52	39. 88	39. 47	39. 62	39. 80	39. 88	38. 52
2	38. 73	39. 66	39. 14	40. 04	39. 73	40. 21	39. 68	40. 63
3	41. 84	39. 93	40. 09	39. 61	39. 76	39. 10	39. 56	39. 96
Delta	3. 30	0. 41	0. 95	0. 57	0. 13	1. 11	0. 33	2. 11
排序	1	6	4	5	8	3	7	2

注: Delta 是各因子水平中的最大和最小均值响应之间的差异; 排序是按照各因子对响应特征的影响程度 (基于 Delta 值) 从大到小排列顺序, 下同。

表 8 均值响应表

水平	污泥堆肥	复合肥	生根粉	杀菌剂	微量元素 B	微量元素 Zn	聚天冬氨酸	蛭石
1	92. 82	105. 45	110. 16	104. 23	102. 95	108. 72	114. 10	98. 57
2	96. 72	105. 14	97. 92	114. 67	106. 75	113. 79	107. 94	118. 05
3	132. 46	111. 40	113. 91	103. 10	112. 29	99. 48	99. 96	105. 38
Delta	39. 63	6. 26	15. 99	11. 58	9. 34	14. 31	14. 14	19. 48
排序	1	8	3	6	7	4	5	2

根据前述基质配方使用效果的方差分析, 选择对香樟树生长综合指数具有显著影响的指标, 采用其信噪比、均值较大的用量水平, 效果越好。因此, 结合响应分析结果对于达到显著性差异的配方组分而言, 污泥堆肥用量水平定为 4.5 kg, 蛭石定为 100 g。

由图 3 可知, 当污泥堆肥用量较低时, 随着杀菌剂用量的增加, 两者互作效应表现为先促进后拮抗; 当污泥堆肥用量较高时, 随着杀菌剂用量的增加, 两者互作效应表现为拮抗。鉴于污泥堆肥用量为最高水平, 因此, 杀菌剂用量暂定为最低水平。

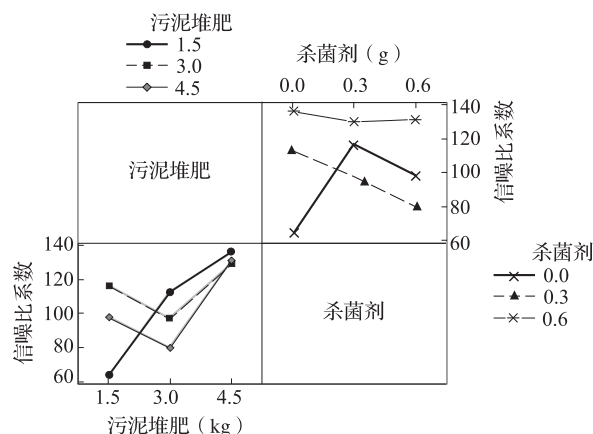


图 3 均值交互作用 (污泥堆肥 × 杀菌剂)

其他配方组分对于香樟树的生长也具有一定的促进作用（表 7、8），但均未达到显著水平，因此，从成本的角度考虑，用量水平选择最低即可。

2.3 基质使用的环境安全性评价

表 9 基质安全性评价试验设计

处理	污泥堆肥 (kg)	复合肥 (g)	蛭石 (g)
CK	0.0	20	100
A	1.5	20	100
B	3.0	20	100
C	4.5	20	100

2.3.1 污泥堆肥用量对香樟树根部重金属变化的影响

由图 4 可知，香樟树收获时，随着污泥堆肥用量增加，根部 5 种重金属浓度总体变化趋势为增加，其中 Zn ($P < 0.05$)、Cd ($P < 0.10$) 浓度与污泥堆肥用量呈显著相关；不同污泥堆肥用量条件下，5 种重金属中，Cu、Zn 浓度最高。由图 5 可知，香樟树收获时，香樟树根部均出现不同程度的重金属积累现象，5 种重金属累积量均随着污泥堆肥用量增加而增加，其中 Cu ($P < 0.05$)、Zn ($P < 0.10$) 累积量与污泥堆肥用量呈显著相关；不同污泥堆肥用量条件下，香樟树根部重金属的累积量均以 Cu、Zn 最高。由图 6 可知，除 Pb、Cd、Cr 之外，随着污泥堆肥用量的增加，香樟树根部对于其他重金属的富集能力呈总体增强的趋势，其中对 Zn 的富集能力与污泥堆肥用量呈正相关 ($P < 0.05$)；从重金属种类角度分析，香樟树根部在不同污泥堆肥用量条件下，对 Cu、Pb、Cd 的富集能力最强。

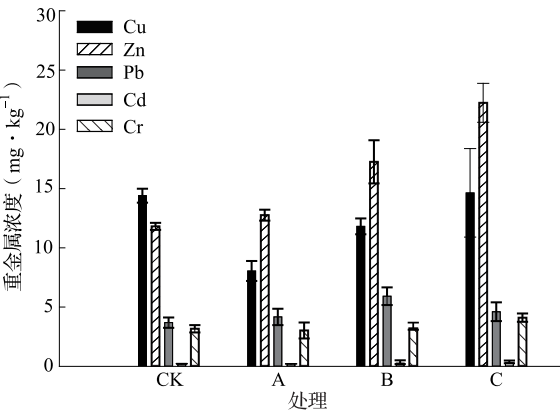


图 4 收获时根系重金属浓度

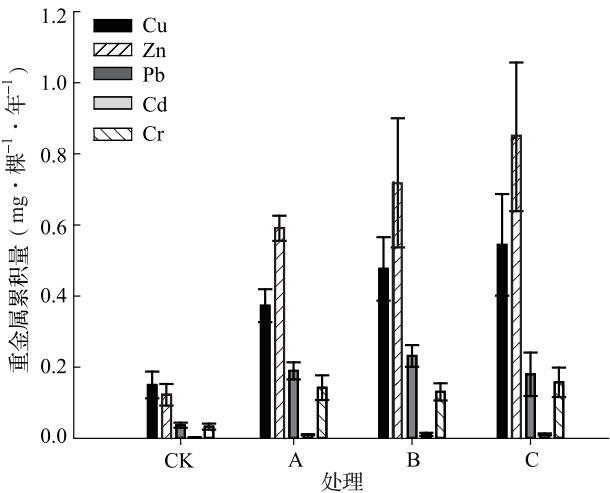


图 5 收获时根系重金属累积量

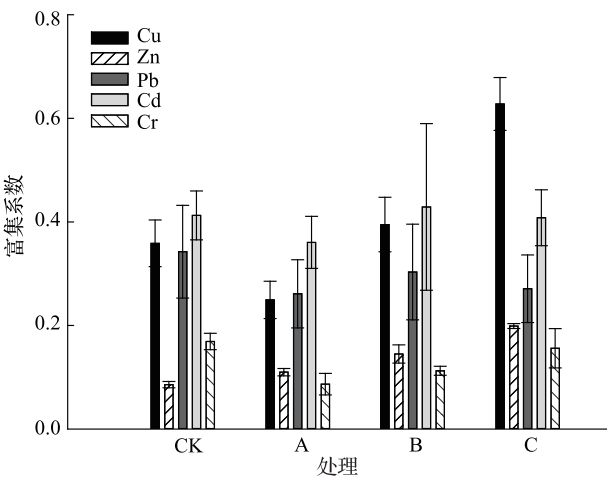


图 6 根系重金属富集系数

2.3.2 污泥堆肥用量对土壤重金属浓度变化的影响

由表 10 可知，香樟树收获时，土壤中各种重金属浓度随着污泥堆肥用量改变呈不同的变化趋势，其中 Cu 浓度与污泥堆肥用量呈显著负相关 ($P < 0.10$)；而 Zn 浓度则先降后升，但总体呈降低趋势；Pb、Cd、Cr 浓度则呈先升后降，但总体呈升高的趋势，其中 Cd 浓度与污泥堆肥用量的相关性达到显著水平 ($P < 0.10$)；参照国家土壤环境安全二级标准 (GB 15618 - 1995) [13] 要求，仅 Cd 浓度在污泥堆肥用量水平为 3.0、4.5 kg 时超过安全限。

由表 11 可知，土壤重金属浓度降低量与污泥堆肥用量变化也存在一定相关性，其中，Cu、Cd 浓度的降低量随着污泥堆肥用量增加而不断增加，Cu ($P < 0.01$)、Cd ($P < 0.05$) 浓度降低量与污泥堆肥用量的相关性达到显著水平；Zn 浓度降低量变化趋势为先急剧升高后维持稳定；Pb、Cr 浓度降低量的变化为先降后升，总体呈下降趋势。

表 10 收获时土壤重金属浓度

(mg · kg⁻¹)

处理	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr
CK	41.12 ± 3.83a	138.83 ± 8.07a	12.42 ± 3.28a	0.539 6 ± 0.037 5a	19.40 ± 3.60b
A	32.80 ± 3.20ab	116.68 ± 3.91b	16.92 ± 2.12a	0.586 1 ± 0.031 3a	35.67 ± 3.12a
B	30.63 ± 2.73b	119.73 ± 3.06b	21.96 ± 4.85a	0.654 7 ± 0.085 2a	28.93 ± 2.77ab
C	28.98 ± 1.79b	121.99 ± 4.82ab	16.47 ± 1.06a	0.646 6 ± 0.023 2a	26.76 ± 3.85ab
GB 15618—1995 二级标准 (pH = 6.5 ~ 7.5, 旱地)	100	250	300	0.6	300

注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

表 11 收获时土壤重金属浓度降低量

(mg · kg⁻¹)

处理	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr
CK	6.58 ± 3.83d	-4.03 ± 8.07b	15.74 ± 3.28a	0.110 2 ± 0.037 5b	10.00 ± 3.60a
A	27.10 ± 3.20c	22.01 ± 3.91a	11.41 ± 2.12a	0.164 3 ± 0.031 3ab	-4.41 ± 3.12b
B	40.36 ± 2.73b	22.50 ± 3.06a	6.53 ± 4.85a	0.187 2 ± 0.085 2ab	4.02 ± 2.77ab
C	52.13 ± 1.79a	23.47 ± 4.82a	12.16 ± 1.06a	0.278 8 ± 0.023 2a	7.74 ± 3.85a

3 讨论

3.1 基质组分对香樟树生长作用效果的分析

污泥堆肥、蛭石及污泥堆肥与杀菌剂的交互效应对于香樟树生长综合指数的影响均达到显著水平, 其中污泥堆肥为最大影响因子。相关研究表明^[14-15], 施用废弃物堆肥可有效改善土壤特性, 提升土壤中有益微生物的数量, 提高移栽后苗木的抗逆性; 利于植物吸收养分, 促进根系乃至地上部的生长发育。蛭石作为土壤调节剂, 不仅具有吸水性和保水性能, 且可促进土壤有益微生物数量和活力的增加, 此外, 其对于土壤氮素具有一定的吸附作用, 可减少速效氮素的流失^[16-17]; 鉴于盆栽用土为高沙土, 本身通透性较好, 若蛭石添加量过高, 则不利于早期移栽香樟树的固定。

污泥堆肥本身含有较多有益微生物, 而香樟树移栽后的土壤环境中存在致病菌, 不利于香樟树生长乃至成活; 同时, 堆肥的使用也促进了土壤致病菌的繁殖。因此, 适量添加杀菌剂有利于香樟树生长。田口方法分析结果表明, 本试验中杀菌剂单个组分对于香樟树生长的促进作用并不显著 (表 5), 可能原因在于盆栽用土养分含量较低 (表 1), 在这种营养环境压力较大的情况下, 原始土壤中的细菌较真菌的耐性更强^[18], 易成为优势种群, 而试验所选杀菌剂—敌磺钠作用对象种类属于真菌, 对细菌类病菌抑制或杀灭效果有限。

交互作用分析结果表明, 杀菌剂与污泥堆肥配合使用对于香樟树生长综合指数的影响达到显著水

平 (表 5), 但其交互效应随着二者用量的不同而变化。基质复配过程中, 杀菌剂先与污泥堆肥进行混拌, 抑制其中真菌致病菌生长, 促进有益菌群的形成, 当二者混合物施入土壤后, 可有效增加有益菌群的数量和活力, 间接协助香樟树适应移栽后的土壤环境; 但当杀菌剂用量过高, 可能会抑制有益真菌菌群的生长, 同时, 也间接促进细菌类致病菌群的繁殖。

基质组分中, 复合肥作为移植苗木主要养分供应来源, 对其生长起着重要作用, 表 8 关于复合肥用量水平与香樟树生长综合指标的响应关系也证明该观点; 由于香樟树移植过程中根部经过修剪, 因而复合肥的用量不宜过高; 再者, 基于降低使用成本角度的考虑, 本试验将复合肥混入基质中, 作为基肥一次性使用, 后期并未进行追肥, 但试验结果 (表 6) 表明, 复合肥使用后对香樟树生长的影响并未达到显著水平, 可能试验中设定的复合肥用量并不能满足 8 个月生长周期的香樟树。鉴于此, 一方面, 该基质组分中速效养分部分不应以三元复合肥固定比例进行添加, 而应增加磷、钾肥的比例; 另一方面, 在综合考虑生产成本的基础上, 优选相对较为安全、易于吸收利用的氮、磷、钾肥料进行添加, 例如硫酸铵、过磷酸钙等。

作为肥料增效剂, 聚天冬氨酸对速效氮素利用率的提升比例为钾的 4 倍、磷的 12 倍^[19-21], 使得聚天冬氨酸缓释复合肥使用后的土壤中, 钾、磷相对于氮更容易流失, 造成复合肥三元养分间形成供应不平衡现象, 因而, 其对于香樟树生长产生间接

负面作用(表8)。

基质其他组分中,包括微量元素B、Zn及生根粉对于香樟树生长具有一定的促进效果,但均未达到显著水平。本试验考虑到移栽香樟树经过大规模修剪后处于恢复阶段,因此,本试验在选择上述3种调节剂的用量时,均低于正常水平,例如微量元素用量主要参考非木本植物制定^[22-24];生根粉用量也低于木本植物标准^[25-26],但未取得显著效果,该3种调节剂的用量有待进一步研究。

3.2 香樟树基质使用安全性评价

相关研究表明,香樟树对于Cu、Zn、Cd等重金属均有较好的耐受能力和富集能力(与本试验研究结果相同),且地下部富集能力要强于地上部^[27-29],因此,本试验以香樟树根部作为重金属富集部位,进行基质重金属安全性研究。

由前述分析可知,仅污泥堆肥用量水平为3.0、4.5 kg时,香樟树收获后的盆栽土壤Cd浓度高于国家土壤环境质量二级标准(GB 15618—1995, pH=6.5~7.5,旱地)。由于香樟树全部枝叶及半边根须被修除,导致其对于重金属的吸收弱于正常状态下;同时,作为速生木本植物,香樟树蒸腾速率快、生长迅速、生物量大、根系发达,即便各器官Cd的累积量较低,但鉴于其具有较大的生物量积累,因而可使香樟树积累大量的Cd^[30],经过香樟树根部一定时间的吸收,土壤重金属Cd浓度可达到标准要求;但为保证基质使用的环境安全性,应将香樟树生长综合指数分析得到的最佳基质配方中,污泥堆肥用量水平调整为1.5 kg;同时结合污泥堆肥与杀菌剂交互作用分析结果,杀菌剂的水平相应调整为0.3 g。

3.3 田口方法稳健性的验证

基于各基质配方香樟树生长综合指数(图2),采用Minitab软件根据28、29号验证组中的基质配方,对香樟树生长综合指数进行预测。结果显示预测值为138.06、65.96,与自然条件下试验得到的测定值(158.50、63.80)相比,相近率分别达到87.10%、96.73%,一定程度上证明田口方法设计模型的精确性^[31-33]。

4 结论

香樟树生长指标中,新生根须鲜重的权重最高,叶面积和地径增长量最低。不同基质配方条件下,香樟树综合指数各不相同;除1、7、18、29

号4个处理低于对照组(30号处理)外,其他处理组均高于对照组,其中2、8、13、16、20~25、27、28号处理与对照组差异性达到显著水平($P < 0.05$)。

污泥堆肥、蛭石及污泥堆肥与杀菌剂的交互作用对于香樟树生长综合指数的影响均达到显著水平,其中污泥堆肥为最大影响因子。除聚天冬氨酸之外,微量元素B、Zn、生根粉、杀菌剂对于香樟树生长具有一定促进作用,但均未达到显著水平。因此,依据香樟树生长综合指标分析结果,香樟树基质最佳配方为污泥堆肥、复合肥、蛭石,其水平分别为4.5 kg、20 g、100 g。

基于基质使用的环境安全性分析结果,并结合污泥堆肥与杀菌剂的交互作用分析结果,安全性最佳基质中的污泥堆肥、杀菌剂用量水平分别应为1.5 kg、0.3 g。通过Minitab软件的田口方法预测分析系统验证了基质配方筛选试验模型的准确性和可靠性。

参考文献:

- [1] 葛骁,卞新智,王艳,等.城市生活污泥堆肥过程中重金属钝化规律及影响因素的研究[J].农业环境科学学报,2014,32(3):502-507.
- [2] 何培松,张继荣,陈玲,等.城市污泥的特性研究与再利用前景分析[J].生态学杂志,2004,23(3):131-133.
- [3] 唐宇力,章银柯,包志毅.影响园林苗木移栽成活率的因素及对策[J].北方园艺,2006,(2):94-96.
- [4] 潘雨齐,黄仁志,雷鸣,等.镉在桑树体内的迁移与分布特征研究[J].农业环境科学学报,2016,35(8):1480-1487.
- [5] 张会敏,袁艺,焦慧,等.相思谷尾矿8种定居植物对重金属吸收及富集特性[J].生态环境学报,2015,24(5):886-891.
- [6] 刘维涛,张银龙,陈喆敏,等.矿区绿化树木对镉和锌的吸收与分布[J].应用生态学报,2008,19(4):752-756.
- [7] 韦月越,蒙敏,黄雪芬,等.桉树对矿区污染土壤中Cu和Cd的耐受机制[J].基因组学与应用生物学,2016,35(1):227-234.
- [8] 赵微,林健,王树芳,等.变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响[J].环境科学,2013,34(4):1277-1283.
- [9] Fratila D, Caizar C. Application of Taguchi method to selection of optimal lubrication and cutting conditions in face milling of AlMg3[J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(6-7):640-645.
- [10] 曲芬霞,韩彦良.应用田口方法对西藏核桃苗期氮磷钾适宜用量的研究[J].中国土壤与肥料,2011,(4):35-37.
- [11] 沈学会,张建华,邢栋梁,等.超声振动辅助微细铣削加工尺寸精度实验[J].农业机械学报,2011,42(3):

- 229–233.
- [12] 王丹, 王海玫. 江苏省耕地质量等级成果补充完善研究—以扬州市江都区为例 [J]. 中国农业资源与区划, 2014, 35 (4): 6–12.
- [13] GB 15618–1995, 国家土壤环境安全二级标准 [S].
- [14] 刘艳, 高遐虹, 姚允聪. 不同植物源有机肥对沙质土壤黄金梨幼树营养效应的研究 [J]. 中国农业科学, 2008, 41 (8): 2546–2553.
- [15] 张丽娟, 王淑珍, 李鑫, 等. 生态活性有机肥在蔬菜及果树上的施用效果 [J]. 中国农学通报, 2006, 22 (10): 221–224.
- [16] 徐晓敏, 吴淑芳, 康倍铭, 等. 五种天然土壤改良剂的养分与保水性研究及评价 [J]. 干旱区资源与环境, 2014, (9): 85–89.
- [17] 阳春, 郑向勇, 严立, 等. 几种土壤改良材料磷氮吸附和硝化作用特性的研究 [J]. 农业环境科学学报, 2008, 27 (5): 2013–2017.
- [18] 吴昊. 长白山区不同森林群落中土壤微生物群落组成及其与土壤养分的关系 [D]. 长春: 东北师范大学, 2012.
- [19] 谢方森, 李东坡, 李健强, 等. 聚天冬氨酸尿素对土壤微生物量碳、氮的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2011, (4): 8–12.
- [20] 刘红卫. 聚天冬氨酸和多肽肥料应用展望 [J]. 黑龙江农业科学, 2010, (7): 162–164.
- [21] 姜雯, 周登博, 张洪生, 等. 不同施肥水平下聚天冬氨酸对玉米幼苗生长的影响 [J]. 玉米科学, 2007, 15 (5): 121–124.
- [22] 汪爱芬, 姚华源, 黄卫民, 等. 油菜田施用中微量元素硼肥肥料效应研究 [J]. 园艺与种苗, 2015, (7): 9–10.
- [23] 王丽红, 陈惠茹, 周青. 铜与锌对香樟、广玉兰及榉树生理生化特性的复合影响 [J]. 生态环境学报, 2013, 22 (11): 1819–1824.
- [24] 田种存, 张洋. 微量元素硼、锌对马铃薯产量和品质的影响 [J]. 广东农业科学, 2013, 40 (7): 12–13.
- [25] 韩静, 吴秋菊, 崔文山. 不同浓度 α -萘乙酸处理对二球悬铃木插穗生根的影响 [J]. 北方园艺, 2008, (8): 130–131.
- [26] 李志丹, 陈平, 高桂娟, 等. 萘乙酸浓度对水土保持植物蟛蜞菊扦插育苗的影响 [J]. 水土保持研究, 2012, 19 (5): 285–288.
- [27] Ho J R, Ma H W, Wang Y C, et al. Extraction of heavy metals from contaminated soil by *Cinnamomum camphora* [J]. *Ecotoxicology*, 2014, 23 (10SI): 1987–1995.
- [28] 陈良华, 徐睿, 杨万勤, 等. 镉污染条件下香樟和油樟对镉的吸收能力和耐性差异 [J]. 生态环境学报, 2015, 24 (02): 316–322.
- [29] 王江, 张崇邦, 柯世省, 等. 添加污泥对尾矿砂理化性质及香樟生理特性的影响 [J]. 生态学报, 2010, 30 (10): 2593–2602.
- [30] Wu F Z, Yang W Q, Zhang J, et al. Cadmium accumulation and growth responses of a poplar (*Populus deltoids* x *Populus nigra*) in cadmium contaminated purple soil and alluvial soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 177 (1–3): 268–273.
- [31] 张凤宝, 杨明义, 李占斌. 微小区土壤侵蚀试验中田口方法代替全因子设计的可行性分析 [J]. 农业工程学报, 2015, 31 (13): 1–9.
- [32] 缴锡云, 王维汉, 王志涛, 等. 基于田口方法的畦灌稳健设计 [J]. 水利学报, 2013, 44 (3): 349–354.
- [33] 沈学会, 张建华, 邢栋梁, 等. 超声振动辅助微细铣削加工尺寸精度实验 [J]. 农业机械学报, 2011, 42 (3): 229–233.

Screening and synthetic evaluation of sludge compost-based mixed substrates formulation for camphor

WANG Shou-hong¹, XU Rong², ZHU Ling-yu¹, ZHANG Jia-hong^{1*}, KOU Xiang-ming², WANG Gui-liang², HAN Guang-ming², BI Jian-hua², TANG He-jun² (1. Jiangsu Institute of Agriculture Science in the Lixiahe District, Yangzhou 225007; 2. Jiangsu Eco agriculture Engineering and Research Center, Yangzhou 225007)

Abstract: In this test, the weight of growth index for camphor was evaluated by using the coefficient of variation, and the composite growth index of camphor in different matrix formulations was calculated, and the Taguchi method and matrix environmental safety evaluation were used to optimize the camphor base formula. The results showed that, among the growth index for camphor, fresh weight of new roots was the highest; except for matrixes of No. 1, 7, 18, 29, the composite growth index of camphor from different matrix formulation was higher than that of the control group, furthermore, the difference between the matrix of No. 2, 8, 13, 16, 20~25, 27, 28 and control group was significantly ($P < 0.05$). The effect of sewage sludge compost, vermiculite and the interaction between sewage sludge compost and fungicide on composite growth index for camphor reached significantly level. In addition to polyaspartic acid, the remaining components of matrix also facilitated the growth of camphor, but none of them was significant. Cd contamination in soil might be caused by the using of sewage sludge compost when the level was 3.0 kg and 4.5 kg. In conclusion, the best matrix formulation was composed of sewage sludge compost, fungicide, compound fertilize and vermiculite with the level of 1.5 kg, 0.3 g, 20 g, 100 g respectively. The accuracy and reliability of the screening test model for matrix formulation was verified by the predictive analysis system of Taguchi method in Minitab software.

Key words: weight; taguchi method; sewage sludge compost; camphor; safety evaluation