



储双双, 王 婧, 童 馨, 等. 有机无机肥配施对黄梁木幼林生长的影响[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(2): 92-98.

有机、无机肥配施对黄梁木幼林生长的影响

储双双, 王 婧, 童 馨, 陈晓阳, 邓小梅, 林家怡, 曾曙才

(华南农业大学 林学与风景园林学院/广东省普通高校木本饲料工程技术研究中心, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】探究有机、无机肥配施对黄梁木 *Neolamarckia cadamba* 幼林生长的影响。【方法】采用林地现场小区试验法,对黄梁木幼林进行猪粪、鸡粪、过磷酸钙和氯化钾配施正交试验。【结果】有机、无机肥配施能显著促进黄梁木幼林树高和地径生长,造林半年后,与未施肥相比,施肥处理树高和地径分别增加 23.53% ~ 109.41% 和 37.99% ~ 149.06%;多因素方差分析显示,猪粪和过磷酸钙对黄梁木树高和地径生长有显著影响,其不同水平间差异显著,而鸡粪和氯化钾主效应不显著;综合考虑黄梁木生长状况和肥料成本,选择猪粪 14 kg · 株⁻¹ + 过磷酸钙 1.5 kg · 株⁻¹作为黄梁木幼林施肥方案;回归分析得出,猪粪(x_1)和过磷酸钙(x_2)施用量与黄梁木树高(y_H)和地径(y_D)之间的回归方程分别为: $y_H = 1.016 + 0.031x_1 + 0.221x_2$ ($R^2 = 0.835$, $P = 0.000$), $y_D = 26.193 + 0.991x_1 + 6.052x_2$ ($R^2 = 0.83$, $P = 0.000$)。【结论】有机、无机肥配施能显著促进黄梁木幼林树高和地径生长,当黄梁木施用猪粪 14 kg · 株⁻¹ + 过磷酸钙 1.5 kg · 株⁻¹时,促进作用最为明显。

关键词:黄梁木; 幼林; 施肥; 树高; 地径; 正交试验

中图分类号:S723.7;S794.4

文献标志码:A

文章编号:1001-411X(2017)02-0092-07

Effects of combined application of organic and chemical fertilizers on growth of young *Neolamarckia cadamba* plantation

CHU Shuangshuang, WANG Jing, TONG Xin, CHEN Xiaoyang, DENG Xiaomei, LIN Jiayi, ZENG Shucai
(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University/Woody Feed Engineering Technology Research Center Affiliated to Universities in Guangdong, Guangzhou 510642, China)

Abstract:【Objective】To explore effects of combined application of organic and chemical fertilizers on growth of young *Neolamarckia cadamba* plantation (YNCP). 【Method】Impacts of combined application of pig manure, chicken manure, calcium superphosphate and potassium chloride on YNCP growth were studied by using orthogonal test. 【Result】Combined application of organic and inorganic fertilizers had significant promoting effects on YNCP growth, with height and ground diameter growth of fertilized treatments being 23.53% - 109.41% and 37.99% - 149.06% greater than those of control treatment, respectively. Multivariate analysis indicated that pig manure and calcium superphosphate had significant effects on height and ground diameter growth, and differences among different fertilization levels were significant, but chicken manure and potassium chloride exhibited no significant effect. According to YNCP growth and fertilizer cost, the best fertilization solution was 14 kg pig manure + 1.5 kg calcium superphosphate per tree. The regression equation between pig manure (x_1), calcium superphosphate (x_2) and tree height (y_H) was $y_H = 1.016 + 0.031x_1 + 0.221x_2$ ($R^2 = 0.835$, $P = 0.000$), and the regression

收稿日期:2016-05-06 优先出版时间:2017-01-10

优先出版网址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20170110.1424.032.html>

作者简介:储双双(1987—),女,博士研究生,E-mail:hbchushuangshuang@163.com;通信作者:曾曙才(1971—),男,教授,博士,E-mail:sczeng@scau.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金(31270675);国家林业局林业公益性行业科研专项(201004020);广东省科技计划项目(2014A020216032,2015B020207002)

equation between pig manure, calcium superphosphate and ground diameter (y_D) was $y_D = 26.193 + 0.991x_1 + 6.052x_2$ ($R^2 = 0.832$, $P = 0.000$). 【Conclusion】Combined application of organic and inorganic fertilizers can significantly promote YNCP growth, and 14 kg pig manure + 1.5 kg calcium superphosphate per tree have the best promoting effect.

Key words: *Neolamarckia cadamba*; young stand; fertilization application; tree height; ground diameter; orthogonal test

施肥是促进人工林速生丰产的主要技术措施^[1]。长期以来,我国在林地施肥方面存在有机肥利用不足而化肥施用过量等不合理现象^[2]。近年来,随着化肥过量施用导致土壤性状变差、肥力下降以及有机肥尤其是畜便量激增等问题越来越突出,一些学者提出应重新树立有机肥在农、林业生产中的主体地位^[3],强调采用有机、无机肥相结合的施肥模式^[4],在有机肥的基础上,配合施用化肥,同时实现作物(林木)增产、品质改善、环境友好等多重目的。

黄梁木 *Neolamarckia cadamba* 为茜草科团花属植物,常绿大乔木,生长迅速,材质良好,是热带亚热带地区一种极具发展前景的阔叶树种^[5],被称为“奇迹树”。目前,黄梁木在广东云浮、新兴、信宜等地以及海南的造林面积很大^[6],且近年来在广东省造林面积逐年扩大,逐渐成为退耕还林和天然林保护工程的主要造林树种之一^[7-8],黄梁木作为速生树种,对水分、养分的需求较大,因此,为保证速生丰产,施肥在黄梁木的育苗生产以及造林上逐渐普及。研究发现,合理施肥能明显提高黄梁木的苗高、地径和生物量,且复合肥的施用效果更佳^[9-11]。但盲目、大量的施肥不仅造成资源浪费,增加经济成本,且对林木的生长有一定程度的毒害^[12]。

广东是畜禽生产大省,随着畜禽养殖业集约化、规模化发展,广东省每年的畜禽粪便排放量接近0.74亿t^[13],而大部分直接排放进入环境^[14-15],粪污无序排放不仅对环境有害,而且对人类和动物也会产生不利的影响^[16]。因此,找到合适可行的畜禽粪便处置和利用措施是当前亟待解决的问题。充分借鉴国内外一些成功经验可知,畜禽粪便资源化利用应成为畜禽养殖业污染物总量减排的首选,而最主要的方式是作为肥料还田还林。然而,由于饲料添加剂滥用造成许多畜禽粪便重金属含量超标,农存在很大风险,所以林用逐渐成为首选。基于此,本研究在林地现场条件下,通过正交施肥试验,探究猪粪、鸡粪与无机肥配合施用对黄梁木幼林的生长效

应,以期为黄梁木人工幼林营养管理及养殖场有机肥的林地利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于广东省雷州市白沙镇,北纬21°15′~21°20′,东经109°22′~110°27′。属台地地貌类型,海拔35~50 m。年均气温28℃,年均日照1 165 h,年均无霜期365 d,年均降水量1 787.5 mm,属热带海洋季风湿润气候区。试验地土壤为浅海沉积物发育的砖红壤,土层厚度在100 cm以上,土壤有机质19.45 g·kg⁻¹、全氮0.23 g·kg⁻¹、全磷0.53 g·kg⁻¹、全钾2.8 g·kg⁻¹。

1.2 试验材料

试验所用黄梁木苗木为组培苗,种植前长势一致,树高25 cm左右,地径5.6 mm左右。供试化肥过磷酸钙(P₂O₅质量分数为12%)、氯化钾(K₂O质量分数为60%)为市购化肥,有机肥用堆沤发酵腐熟的猪粪、鸡粪。猪粪中养分:w(N)为9.32 g·kg⁻¹、w(P₂O₅)为7.54 g·kg⁻¹、w(有机质)为463.1 g·kg⁻¹,鸡粪中养分:w(N)为18.13 g·kg⁻¹、w(P₂O₅)为12.41 g·kg⁻¹、w(有机质)为370.10 g·kg⁻¹,有机肥含水量600 g·kg⁻¹。

1.3 试验设计

采用正交试验设计。试验因子为猪粪、鸡粪、过磷酸钙、氯化钾,各因子均设4个水平,具体见表1。采用L₁₆(4⁵)正交表^[17](表2),其中,以不施肥的试验组1号作为对照(CK)。

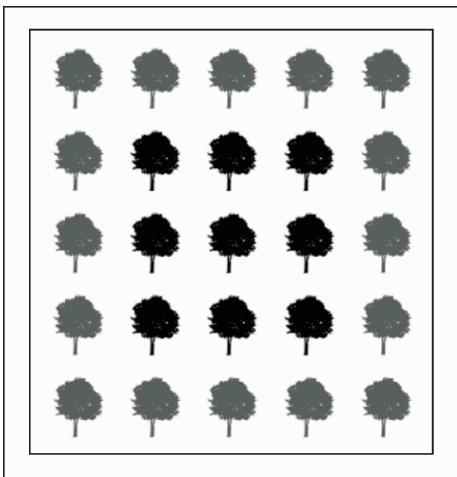
表1 试验因子及水平

Tab. 1 Experimental factors and levels				
水平	猪粪 (A)	鸡粪 (B)	过磷酸钙 (C)	氯化钾 (D)
1	0	0	0	0
2	4	2	0.5	0.25
3	10	4	1.0	0.50
4	14	6	1.5	0.75

表2 $L_{16}(4^5)$ 正交表Tab.2 Orthogonal table $L_{16}(4^5)$

试验组号	水平			
	A	B	C	D
1(对照)	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	2	1	2	3
6	2	2	1	4
7	2	3	4	1
8	2	4	3	2
9	3	1	3	4
10	3	2	4	3
11	3	3	1	2
12	3	4	2	1
13	4	1	4	2
14	4	2	3	1
15	4	3	2	4
16	4	4	1	3

试验布置:造林地上除草清杂、堆烧残留物,全面整地,按 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ 株行距挖 $60\text{ cm} \times 60\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ 明穴。按照完全随机区组布置试验,25株小区(每个小区5行,每行5株),造林前按表2将肥料均匀施入各相应的植树穴,然后覆土,15 d后用相同规格的黄梁木苗木造林。每个小区最外围一圈为保护行,即每个小区有效调查株数为9株(图1),每个处理设置4次重复。2012年6月造林,当年12月调查黄梁木成活率,测定树高、地径。



中间的9株(深色)为有效调查株。

图1 小区内植株分布图

Fig.1 Layout of the experimental trees in each plot

<http://xuebao.scau.edu.cn>

2.4 数据处理方法

试验数据用 Excel 整理后,用 SPSS17.0 软件进行数据分析。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和 Duncan's 多重比较法分析不同处理间差异,多因素方差分析进行最佳组合的筛选,分别采用 Pearson 相关系数和 Linear Regression 进行相关分析和回归分析。

3 结果与分析

3.1 肥料配施对黄梁木幼林生长的影响

造林半年后调查发现,黄梁木成活率为 100%,其树高和地径生长情况见表3。就黄梁木的树高生长而言,与对照(处理1)相比,除处理2以外,其他不同比例有机、无机肥配施条件下黄梁木树高均显著高于对照,其中,最为显著的是处理13(猪粪 $14\text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$ + 鸡粪 $0\text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$ + 过磷酸钙 $1.5\text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$ + 氯化钾 $0.25\text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$),施肥6个月后,其黄梁木树高为 1.78 m ,比对照高出 109.41%,处理2(猪粪 $4\text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$ + 鸡粪 $2\text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$ + 过磷酸钙 $0.5\text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$ + 氯化钾 $0.25\text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$)的树高为 1.05 m ,虽比对照高出 23.53%,但差异未达到统计学显著水平。

表3 不同处理条件下黄梁木幼林生长状况¹⁾Tab.3 The growth of young *Neolamarckia cadamba* plantation under different treatments

处理编号	树高/m	地径/mm
1(CK)	$0.85 \pm 0.05\text{g}$	$19.69 \pm 0.60\text{f}$
2	$1.05 \pm 0.06\text{fg}$	$27.17 \pm 0.40\text{e}$
3	$1.17 \pm 0.15\text{ef}$	$30.42 \pm 5.47\text{de}$
4	$1.38 \pm 0.11\text{bcde}$	$35.89 \pm 0.61\text{bcd}$
5	$1.35 \pm 0.14\text{cde}$	$36.66 \pm 3.52\text{bcd}$
6	$1.27 \pm 0.10\text{def}$	$33.13 \pm 1.17\text{cde}$
7	$1.61 \pm 0.05\text{abc}$	$41.78 \pm 3.67\text{ab}$
8	$1.45 \pm 0.04\text{bcde}$	$40.49 \pm 3.09\text{bc}$
9	$1.37 \pm 0.05\text{bcde}$	$40.01 \pm 1.50\text{bc}$
10	$1.65 \pm 0.07\text{ab}$	$43.58 \pm 1.65\text{ab}$
11	$1.36 \pm 0.08\text{bcde}$	$38.98 \pm 0.79\text{bc}$
12	$1.46 \pm 0.07\text{bcde}$	$40.93 \pm 1.47\text{a}$
13	$1.78 \pm 0.17\text{a}$	$49.04 \pm 3.24\text{a}$
14	$1.60 \pm 0.06\text{abc}$	$42.42 \pm 2.30\text{ab}$
15	$1.54 \pm 0.05\text{abcd}$	$42.20 \pm 2.48\text{ab}$
16	$1.53 \pm 0.06\text{abcd}$	$40.28 \pm 1.13\text{bc}$

1) 表内数据为4次重复平均值 \pm 标准误; 同列数据后凡具有一个相同字母者,表示处理间差异不显著(Duncan's 法, $P > 0.05$)。

同样, 不同比例的有机、无机肥配施对黄梁木的地径生长也具有显著的促进作用, 施肥条件下的地径为 27.17 ~ 49.04 mm, 比对照 (19.69 mm) 增加了 37.99% ~ 149.06%, 促进作用最弱的是处理 2, 而促进作用最为显著的仍然是处理 13。除对照外, 其他不同处理间的树高、地径因有机、无机肥比例不同而差异各异, 仅从数值来看, 处理 7、10、13 较为突出, 这与该处理猪粪、过磷酸钙的施用量较大可能有关。但由于树木生长周期长, 肥效反应短时间难以测定, 此次结果仅为造林半年后的黄梁木幼树的生长状况, 因此施肥是否对此后的黄梁木生长有持续的促进作用, 还有待继续观测分析。

3.2 最佳施肥处理组合筛选

正交试验结果的直观分析虽反映了不同处理的差异性, 但不能区分该结果的差异是由各因素的水平变化导致还是由试验的随机波动引起。因此, 在直观分析的基础上, 有必要对试验数据进行方差分析^[18], 从而明确各个因素对试验指标的影响程度, 确定各因素的主次顺序, 进而找出较好的试验条件或最优参数组合。本研究同时考察了黄梁木树高、地径 2 个试验指标, 将分别以这 2 个指标作为分析单元, 进行最佳施肥处理组合筛选。

表 4 反映了黄梁木幼林的树高和地径方差分析情况, F 检验结果显示, 对黄梁木树高、地径生长而言, 各因素施肥效应的主次顺序均为 $A > C > B > D$, 即猪粪 > 过磷酸钙 > 鸡粪 > 氯化钾, 4 个因素中, 因素 A 与因素 C 对黄梁木的生长具有显著影响 ($P < 0.05$), 而另外 2 个因素的主效应则不显著 ($P > 0.05$)。各因素水平间的多重比较 (表 5) 发现, 因素 A、C 各水平间具有显著性差异, 而因素 B、D 不同水平间虽有差异, 但未达到统计学显著水平。因素 A、B、C 不同水平对黄梁木树高、地径生长影响的强弱顺序均为 $4 > 3 > 2 > 1$, 而因素 D 对黄梁木树高和地径生长最好的促进水平分别为水平 2 和 3, 因此, 仅从方差检验结果来看, $A_4B_4C_4D_2$ 和 $A_4B_4C_4D_3$ 分别是对黄梁木树高和地径生长最为有利的组合。但在施肥方案的选优问题上, 最佳施肥量 and 经济效益也是重点考虑因素, 即实际生产中一般以符合统计学要求、施肥量少 (投资风险低) 而经济效应大的作为最优施肥模型。因此, 综合考虑经济成本和黄梁木生长状况, 最终选择 $A_4B_1C_4D_1$, 即猪粪 14 kg · 株⁻¹ + 过磷酸钙 1.5 kg · 株⁻¹ 作为黄梁木幼林施肥方案。

表 4 黄梁木幼林的树高、地径方差分析¹⁾

Tab. 4 Variance analysis of height and ground diameter of young *Neolamarckia cadamba* plantation

方差来源	树高					地径				
	离均差平方和	自由度	均方	F	P	离均差平方和	自由度	均方	F	P
修正模型	0.834	12	0.070	31.878	0.008	757.274	12	63.106	17.602	0.190
截距	31.437	1	31.437	14 411.504	0.000	22 702.360	1	22 702.360	6 332.359	0.000
猪粪 (A)	0.535	3	0.178	81.772	0.002	528.799	3	176.266	49.166	0.005
鸡粪 (B)	0.030	3	0.010	4.564	0.122	25.497	3	8.499	2.371	0.248
过磷酸钙 (C)	0.265	3	0.088	40.453	0.006	188.005	3	62.668	17.480	0.021
氯化钾 (D)	0.005	3	0.002	0.722	0.603	14.973	3	4.991	1.392	0.396
误差	0.007	3	0.002			10.755	3	3.585		
平方和 ²⁾	32.278	16				23 470.39	16			
总平方和 ³⁾	0.841	15				768.030	15			

1) 树高 $R^2 = 0.991$ (校正 $R^2 = 0.961$), 地径 $R^2 = 0.986$ (校正 $R^2 = 0.930$); 2) 指所有观测值平方和; 3) 指修正模型总平方和。

表 5 各肥料不同水平之间黄梁木生长状况的多重比较¹⁾

Tab. 5 Multiple comparisons of growth of *Neolamarckia cadamba* at different fertilization levels

水平	树高/m				地径/mm			
	猪粪 (A)	鸡粪 (B)	过磷酸钙 (C)	氯化钾 (D)	猪粪 (A)	鸡粪 (B)	过磷酸钙 (C)	氯化钾 (D)
1	1.11 ± 0.02c	1.34 ± 0.02a	1.25 ± 0.02c	1.38 ± 0.02a	28.29 ± 0.95c	36.35 ± 0.95a	33.02 ± 0.95c	36.20 ± 0.95a
2	1.42 ± 0.02b	1.40 ± 0.02a	1.35 ± 0.02bc	1.41 ± 0.02a	38.02 ± 0.95b	36.58 ± 0.95a	36.74 ± 0.95bc	38.92 ± 0.95a
3	1.46 ± 0.02b	1.42 ± 0.02a	1.40 ± 0.02b	1.43 ± 0.02a	40.88 ± 0.95ab	38.35 ± 0.95a	38.33 ± 0.95ab	37.74 ± 0.95a
4	1.62 ± 0.02a	1.46 ± 0.02a	1.61 ± 0.02a	1.39 ± 0.02a	43.49 ± 0.95a	39.40 ± 0.95a	42.58 ± 0.95a	37.81 ± 0.95a

1) 表内数据为平均值 ± 标准误; 同列数据后凡具有一个相同字母者, 表示不同水平间差异不显著 (Duncan's 法, $P > 0.05$)。

3.3 有机、无机肥施用量与黄梁木生长的关系

对有机、无机肥施用量与黄梁木树高和地径间的关系进行统计分析,从简单相关分析结果看,各类肥料施用量与黄梁木生长呈正相关关系(表6),其中,猪粪、过磷酸钙施用量与黄梁木树高、地径相关性均达到极显著,这与前面方差分析结果一致。但从标准回归系数来看,对于黄梁木树高生长而言,猪粪、过磷酸钙贡献要大于其他两者,即回归系数较

高,而在地径生长方面,猪粪的贡献略低于氯化钾。采用逐步回归方法对各类型肥料施用量与黄梁木树高和地径的生长关系进行了分析,得到黄梁木地径和树高与各类型肥料施用量间的逐步回归方程:树高(y_H), $y_H = 1.016 + 0.031x_1 + 0.221x_2$ ($R^2 = 0.835$, $P = 0.000$); 地径(y_D), $y_D = 26.193 + 0.991x_1 + 6.052x_2$ ($R^2 = 0.832$, $P = 0.000$)。式中: x_1 和 x_2 分别代表猪粪和过磷酸钙施用量。

表6 施肥量与黄梁木生长间的相关分析¹⁾

Tab.6 Correlation analysis between fertilization levels and *Neolamarckia cadamba* growth

肥料种类	树高		地径	
	简单相关系数	标准回归系数	简单相关系数	标准回归系数
猪粪	0.737 **	0.031	0.770 **	0.991
鸡粪	0.185	0.019	0.176	0.545
过磷酸钙	0.540 **	0.221	0.488 **	6.052
氯化钾	0.018	0.015	0.059	1.453

1) 相关分析采用 Pearson 法, ** 表示极显著相关; 逐步回归分析采用 Linear Regression 法。

4 讨论与结论

4.1 有机、无机肥配施在林业上的发展前景

我国有机肥资源种类丰富,数量庞大,但利用方式落后且利用率低,有近70%直接排放进入环境中,不仅造成资源浪费,而且会形成新的面源污染^[19-20]。我国农林业生产主要依靠化肥,其增产依赖率达40%^[21]。化肥作为速效肥料,长期大量施用会引起土壤性状变差及肥力下降^[22]。因此,探索利用当地丰富的有机物料资源,结合科学的堆肥技术,生产出优质的有机-无机复合肥产品,成为我国实现农林业可持续发展的重要措施。

有机肥营养均衡,养分全面,可提高土壤生物多样性和土壤生物学活性,改善土壤理化性质、土壤环境及营养循环,提高土壤肥力^[23-24]。近年来,有机肥在农田、菜地、果园等得到广泛应用并取得了一定的成果。然而,在畜牧业生产中,越来越多的金属元素添加剂在规模化禽畜养殖过程中被广泛使用,使得畜禽粪便中重金属大量增加,造成以畜禽粪便为原料的有机-无机复混肥农用后重金属累积,引起农田土壤重金属含量超标,进而通过植物和农产品最终危害动物和人体健康。

相对于有机肥农用而言,有机肥林地利用因具有远离人类食物链、面积广阔、环境容纳量大等多重优势也逐渐被人青睐^[25-26]。当前我国人工林分布广

泛,巨大的人工林面积将为畜便利用提供广阔的空间;同时,由于传统粗放的营林方式,已经引起我国林地土壤结构恶化,肥力和生产力下降,亟需采取科学的方法对现有林进行合理经营,维持和提高土壤肥力。因此,从经济、环境、资源角度出发,将有机肥合理利用用于林地,可达到畜便总量减排、林地土壤维持和林木增产的目的。

本研究因地制宜,将研究区附近养殖场猪粪、鸡粪等有机肥料与无机肥料配合施用于林地,结果发现,有机、无机肥配施可以显著促进黄梁木幼树的树高和地径生长。基于以往研究发现,有机、无机肥配合施用对于林木生长的促进作用并非偶然,具有广泛性,如有机肥的施用对茶树、橡胶树、杨树^[26-29]等果树或林木生长均具有显著的促进作用。因此,有机肥用于林业生产具有广阔前景。

4.2 黄梁木最佳施肥处理组合筛选

施肥作为提高林地生产力的有效管理手段之一,合理施肥能促进林木生长和提高作物产量,但过量施肥不仅抑制林木生长,还会对环境造成负面影响^[30]。因此,在保证高产的前提下减少生产投入和环境污染是当前农林经营管理所关注的热点问题^[24]。在众多施肥的方法中,设计较为复杂而高效的田间正交施肥试验,通过较少试验得出各因素的主次关系和最优搭配条件,是最常见的方法^[31]。但由于该方法是采取部分试验来代替全面试验的方

法,由此可能会产生预想不到的误差^[32]。另外,在多指标正交试验中,不同试验因素及其水平对各试验指标的影响并非同步,某项指标的改善可能使另一项指标恶化^[33]。这可能是本研究中无论是试验还是SPSS理论分析上,未曾出现同时对黄梁木幼林树高、地径生长均有最佳施肥效应组合的一个重要原因。在施肥方案的选优问题上,要同时遵循符合统计学要求、施肥量少而经济效应大等原则。因此,综合考虑黄梁木生长状况(统计结果)和经济成本,最终选用A₄C₄作为黄梁木幼林施肥方案。对于是否还有更好的配方能在林木长势良好的同时继续降低肥料成本,还需进一步的优化试验。

4.3 有机、无机肥施用量与黄梁木生长的关系

肥料效应函数是目前被广泛应用的一类施肥模型^[34],反映了肥料用量与作物产量之间的统计关系,其方法是通过肥料的单因素、二因素或多因素多水平田间回归试验设计,运用统计学的方法,得出单元肥料效应函数、二元或多元肥料效应函数回归方程,可以在一定程度上预测施肥后作物的生长状况^[35]。本研究分别以黄梁木的树高和地径为目标函数,选取猪粪(x_1)、过磷酸钙(x_2)的施肥水平为调控因子,通过逐步回归模拟黄梁木树高和地径与2个调控因子之间的回归关系,得到树高(y_H)、地径(y_D)与二者的回归方程,分别为: $y_H = 1.016 + 0.031x_1 + 0.221x_2$ ($R^2 = 0.835$), $y_D = 26.193 + 0.991x_1 + 6.052x_2$ ($R^2 = 0.832$),由此可推测,当最终选用A₄C₄作为黄梁木幼林施肥方案时,造林半年后其树高和地径可达到1.78 m和49.15 mm,同时,由该回归方程中过磷酸钙和猪粪2个因子的系数大小可发现,前者对黄梁木树高和地径生长的贡献远大于后者,由此推断,磷肥可能是黄梁木生长需要重点控制的因子,鉴于本试验中过磷酸钙和猪粪两因素在大试验水平时正效应最大,今后可适当增加磷肥和猪粪的施用。

参考文献:

- [1] 王志华. 林木施肥研究历程及施肥效应分析[J]. 林业科技, 2015(3):27-28.
- [2] YU W T, JIANG Z S, ZHOU H, et al. Effects of nutrient cycling on grain yields and potassium balance [J]. Nutr Cycl Agroecosys, 2009, 84(3):203-213.
- [3] 吴巍. 有机无机肥配施对旱地作物产量、肥料利用率及土壤肥力的影响[D]. 长沙:湖南农业大学, 2011.
- [4] FENG K, LU H M, SHENG H J, et al. Effect of organic ligands on biological availability of inorganic phosphorus in soils of [J]. Pedosphere, 2004, 14(1):85-92.
- [5] PANDEY A, NEGI P S. Traditional uses, phytochemistry and pharmacological properties of *Neolamarckia cadamba*: A review [J]. J Ethnopharmacol, 2016, 181:118-135.
- [6] 黄浩. 黄梁木地理变异和再生体系的建立[D]. 广州:华南农业大学, 2014.
- [7] 郑万钧. 中国树木志:第4卷[M]. 北京:中国林业出版社, 2004:4594-4595.
- [8] 朱先成,陶永强,杨军. 团花育苗与造林[J]. 林业实用技术, 2005(2):19-20.
- [9] 蒋云东,王达明,邱琼,等. 7种热带阔叶树种的苗木施肥试验[J]. 云南林业科技, 2003(2):11-15.
- [10] 杨德军,邱琼,王达明,等. 团花育苗技术研究[J]. 广西林业科学, 2004, 33(2):93-95.
- [11] 聂艳丽,周跃华,李娅,等. 甘蔗渣堆肥化处理及用作团花育苗基质的研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(2):380-387.
- [12] RAFIPUL HOQUE A T M, HOSSAIN M K, MOHIUDDIN M, et al. Effect of inorganic fertilizers on the initial growth performance of *Anthocephalus chinensis* (Lam.). Rich. Ex. Walp. seedlings in the nursery[J]. J Appl Sci, 2004, 4(3):477-485.
- [13] 仇焕广,廖绍攀,井月,等. 我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析[J]. 环境科学, 2013, 34(7):2766-2774.
- [14] 景栋林,严有福,陈希萍,等. 番禺区畜禽粪便产生量估算及其环境效应分析[J]. 广东农业科学, 2011, 38(23):141-144.
- [15] 龚俊勇,彭小珍,廖新梯. 广东省梅州市农地畜禽粪便环境风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(3):25-28.
- [16] CAO Y, CHANG Z Z, WANG J D, et al. The fate of antagonistic microorganisms and antimicrobial substances during anaerobic digestion of pig and dairy manure [J]. Bioresour Technol, 2013, 136:664-671.
- [17] 《正交试验法》编写组. 正交试验法[M]. 北京:国防工业出版社, 1976:202.
- [18] 腾海英,祝国强,黄平,等. 设计实例分析[J]. 药学服务与研究, 2008, 8(1):75-76.
- [19] KO H J, KIM K Y, KIM H T, et al. Evaluation of maturity parameters and heavy metal contents in composts made from animal manure [J]. Waste Manage, 2008, 28(5):813-820.
- [20] HUANG Y, DONG H, SHANG B, et al. Characterization of animal manure and cornstalk ashes as affected by incin-

- eration temperature[J]. Appl Energy, 2011, 88(3):947-952.
- [21] 刘云开,青先国,罗先富,等. 肥料运筹对优质稻湘晚籼13号整精米率的影响[J]. 湖南农业大学学报, 2004, 30(4):322-324.
- [22] 张北赢,陈天林,王兵. 长期施用化肥对土壤质量的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(11):182-187.
- [23] 李江涛,钟晓兰,赵其国. 畜禽粪便施用对稻麦轮作土壤质量的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(10):2837-2845.
- [24] 许小伟,樊剑波,陈晏,等. 不同有机无机肥配施比例对红壤旱地花生生产量、土壤速效养分和生物学性质的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(18):5182-5190.
- [25] 刘林,张良英. 有机肥在果树栽培中的施用技术[J]. 吉林农业, 2010(9):90.
- [26] 褚长彬,吴淑杭,张学英,等. 有机肥施用方式对柑橘园土壤肥力和柑橘养分、品质的影响[J]. 上海农业学报, 2012, 28(1):65-68.
- [27] 胡绍德,朱仲海,陈刚,等. 茶树施用生物有机肥效果初报[J]. 茶叶科学技术, 2002(3):11-12.
- [28] 景谷兴永桥油茶种植有限责任公司技术顾问组. 云南橡胶园肥力变化特点与有机肥施用[J]. 热带农业科技, 2010, 33(2):5-9.
- [29] 徐莉. 猪粪沼液对杨树林地土壤性质及林分生长的影响[D]. 南京:南京林业大学, 2014.
- [30] 王树会,耿素祥. 过量施肥对烤烟生长发育和产质的影响[J]. 中国农业科技导报, 2010, 12(5):116-122.
- [31] 樊丽娜,何慧怡,陈月桂,等. 甘蔗健康种苗繁殖培养基正交试验分析[J]. 甘蔗糖业, 2011(6):6-10.
- [32] 王小东,曾伟,余能富. 脐橙果树正交施肥试验研究[J]. 南方林业科学, 2015, 43(1):22-24, 27.
- [33] 胡建军,周冀衡,柴家荣,等. 多指标正交试验数据的优化分析及应用[J]. 中国烟草学报, 2008, 14(2):9-14.
- [34] 郑宏艳,刘书田,侯彦林,等. 生态平衡施肥模型与肥料效应函数模型关系研究[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(6):500-505.
- [35] 刘刚. 平衡施肥对桑树产量与品质的影响及其施肥模型的建立[D]. 重庆:西南大学, 2012.

【责任编辑 李晓卉】