

配方施肥对印楝人工林产量和生长性状的影响

郑益兴, 彭兴民, 张燕平*

(中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 云南 昆明 650224)

摘要: 对元谋干热河谷印楝人工林经 3 a 施肥试验表明, 配方施肥对印楝林分的生长和结实产量均产生显著影响: (1) 施肥当年对林分生长未显明显肥效, 施肥效应主要表现在施肥后第 1 年, 到施肥后第 2 年肥效总体呈下降趋势; 各生长性状对施肥配方反应的敏感性排序为: 冠幅 > 株高 > 地径 > 胸径; 以株高和冠幅生长为评价依据, 第 14 处理 (300 g 氮肥 + 300 g 磷肥 + 200 g 钾肥) 为最优施肥组合方案。 (2) 不同施肥配方处理间以及不同年份之间, 印楝的结实产量均存在显著差异; 有机肥与 P、K 肥的组合配方对印楝结实量产生明显增益, 其中第 1 处理 (8 kg 有机肥 + 200 g 磷肥 + 200 g 钾肥) 为增加印楝结实产量的最佳施肥方案; 各年份施肥处理间结实产量的排序为: 施肥后第 1 年 > 施肥后第 2 年 > 施肥当年。此外, 施肥前的林分本底值对林木生长产生极显著影响, 在一定程度上干扰了施肥效应。

关键词: 配方施肥; 产量; 生长性状; 印楝人工林

中图分类号: S792.33

文献标识码: A

Effect of Formulated Fertilization on Yield and Growth Characteristics of *Azadirachta indica* Plantation

ZHENG Yi-xing, PENG Xing-min, ZHANG Yan-ping

(Research Institute of Resource Insects, CAF, Kunming 650224 Yunnan, China)

Abstract 3 years' test in Yuanmou dry-hot valley showed formulated fertilization had significant effect on the yield and growth of *Azadirachta indica* plantation. The first year didn't show distinct fertilization effectiveness on increment of stand and the 2nd year's fertilization effectiveness were the most significant, while there was a downward trend in the 3rd year. The sensitivity rank order of the growth response to fertilization are as follows: crown breadth > plant height > ground diameter > DBH. According to the evaluation standard of increment of plant height and crown breadth, the most effective treatment was the 14th (N₂P₂K₁). There were significant differences in fruit yield between the different fertilization treatments and different years. Through addition of P and K and organic fertilizers, there was high significant increase effect on fruit yield. Among the treatments, the first treatment (8 kg organic fertilizer + P₂₀₀K₂₀₀) was the optimum formula which may increase obviously the fruit yield of *Azadirachta indica*. The rank order of fruit yield among all the fertilization treatments of 3 years are as follows: the 2nd year > the 3rd year > the 1st year. In addition, the background value of the trees had a significant effect on the late growth, and disturbed the fertilization efficiency of the stand to some extent.

Key words formulated fertilization; yield; growth characteristics; *Azadirachta indica* plantation

收稿日期: 2008-12-22

基金项目: 国家科技支撑 (2006BAD18B03) 及农业科技成果转化 (2007GB24320428) 部分研究内容

作者简介: 郑益兴 (1972-), 男, 四川射洪人, 主要从事森林培育方面研究。

* 通讯作者

印楝 (*Azadirachta indica* A. Jussl) 为楝科常绿乔木树种, 是国际上公认的最具潜力的杀虫植物品种和最佳生物农药原料^[1]。自 20 世纪 90 年代引入云南干热河谷地区后对其生物学特性、引种适应性、苗木生长节律以及毒理机制与效果等方面开展了较为系统的研究^[2-8], 但与生物农药原料供应密切相关的林分生产力和配方施肥之间的关系尚无报道。印度是世界上主要的印楝种子原料出口国, 其林分生产力约为 $10 \sim 100 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[9], 而我国的印楝林分产量低下, 其中肥力不足是制约因素之一。大量研究表明, 人工施肥是维持林地肥力的科学手段之一, 合理施肥能促进林分生长, 增加结实产量^[10-11]。本文以元谋干热河谷盆地 1998 年营造的印楝纯林为研究对象, 设计多个肥种的不同组合配方, 研究各施肥处理对印楝生长性状和结实产量的影响, 初步摸清促进印楝林分高产的优化配方施肥因子, 为干热河谷地区印楝人工林合理施肥及制定

营林措施提供科学依据, 同时对提高适生区印楝农药原料林地的生产力, 建立可持续经营技术体系, 逐步缓解印楝产业化的原料供需矛盾具一定指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于元谋干热河谷盆地元谋县元马镇老凹塘 ($25^{\circ}40'N$, $101^{\circ}52'E$), 平均海拔 1 050 m。年平均气温 $21.9^{\circ}C$, 极端最高气温 $42^{\circ}C$, 极端最低气温 $-2^{\circ}C$, 年降水量 613.8 mm, 集中于 5—10 月, 约占全年降水量的 92%; 年蒸发量 3 911.2 mm, 日照率 62%, 年干燥度 4.4 (以 Penman 公式计算^[12])。试验地土壤母岩为河湖相沉积岩, 土壤以冲积和堆积而成, 以燥红土为主, 因长期淋溶风化, 缺 P 少 N 是其土壤养分状况的一大特点。表 1 显示了试验地本底土壤理化性质状况。

表 1 试验地本底土壤理化性质

土层 / cm	土壤质地	土壤密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最大持 水量 %	有机质 / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全 N / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全 P / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全 K / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速 N / ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速 P / ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速 K / ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	pH 值
0~20	壤质砂土	1.43	17.36	2.3	0.33	0.07	6.01	12.04	痕迹	56.27	5.99
20~40	砂质壤土	11.80	463.50	6.3	0.36	0.19	15.67	20.67	0.19	41.02	6.58
40~70	砂质黏土	16.80	208.10	5.4	0.55	0.22	14.88	20.02	痕迹	122.10	5.64
70~200	砂质黏壤土	18.00	172.50	1.6	0.43	0.15	14.87	12.18	痕迹	93.28	5.78

注: 含水量用常压干燥法; 比重用比重瓶法; 土壤密度测定采用封蜡法; 全氮为开氏定 N 法; 全磷为 NaOH 碱熔法; 全钾用酸溶-火焰法; 速磷用 Olsen 法; 速氮用扩散皿法; 速钾用火焰光度法; pH 用电位法测定; 有机质含量测定采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 法。

印楝造林地原属缓坡地带, 采用完整地作业方式成为规则带状平台。2005 年进行试验时, 林龄 7 a 林分保存完好, 林相整齐, 株行距 $3 \text{ m} \times 4 \text{ m}$, 初植密度 $840 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。定植时每株施入 NPK 复合基肥约 0.5 kg 此后无任何抚育措施, 为雨养型人工纯林。

1.2 试验设计

采用随机区组设计, 4 因素 4 水平, 安排了 16 个施肥处理 (配方), 3 次重复, 共计 48 个试验小区。每小区 8 株, 呈双行等株排列, 中间 4 株为测定样株。小区之间设保护行, 以 CK 不施肥为对照。4 个施肥因子分别为有机肥 (M) - 经腐熟的羊粪; 氮肥 (N) - 尿素, 含有效 N 46%; 磷肥 (P) - 钙镁磷肥, 含 P_2O_5 18%; 钾肥 (K) - 氯化钾, 含 K_2O 60%。试验设计见表 2 所示。因本底土壤缺磷少氮, 而含钾相对较足, 故本文针对钾肥因子设计了施钾肥和不施钾肥予以对比研究。16 个施肥处理如下: (1) $M_1 P_3 K_1$; (2) $M_2 P_3 K_1$; (3) $M_3 P_3 K_1$; (4) $M_4 P_3 K_1$; (5)

$N_1 K_1$; (6) $N_2 K_1$; (7) $N_3 K_1$; (8) $N_4 K_1$; (9) $P_1 K_1$; (10) $P_2 K_1$; (11) $P_3 K_1$; (12) $P_4 K_1$; (13) $N_1 P_1 K_1$; (14) $N_2 P_2 K_1$; (15) $N_3 P_3 K_1$; (16) $N_4 P_4 K_1$ 。

施肥时间为 2005 年 6 月雨季初。施肥面积约 $1 800 \sim 2 000 \text{ m}^2$, 在树冠垂直投影处采用环状沟施, 一次性全量施入, 沟深 20~30 cm, 沟宽 20~25 cm, 肥料搅拌均匀入沟后覆土。

表 2 试验因子及施肥水平

施肥水平	施肥因子 /g			
	M	N	P	K
1	8 000	400	400	200
2	4 000	300	300	0
3	2 000	200	200	0
4	1 000	100	100	0

1.3 调查指标与数据处理

本试验以植株的树高、地径、胸径和冠幅 (东西向、南北向) 的生长量、净生长量以及结实量作为肥效的主要考核指标。施肥前, 对各生长性状进行本

底数据调查,之后于 2005—2007 年的年底及果实成熟期间分别进行生长量和结实量调查。

本试验所有数据分析均在 SPSS 13.0 统计软件^[13]和 Microsoft Office excel 2003 下进行。

2 结果与分析

2.1 不同配方施肥对印楝生长性状的影响

2.1.1 施肥当年的肥效分析 不同的施肥配方处理以及试验前的本底值等因子对印楝生长量的影响,可以运用协方差统计原理来进行检验,协方差是建立在方差分析与回归分析基础之上、利用线性回

归的方法消除混杂因素的影响后进行方差分析的一种统计分析方法^[14]。由施肥小区平均生长量的协方差分析(表 3)可以看出:施肥当年,印楝林分本底值对其株高、胸径、地径和冠幅的生长影响极显著;不同施肥配方对株高、地径和胸径没有显著肥力效应,但对东西、南北向冠幅生长量的影响均达到显著差异水平。进一步从试验开始到当年末约 6 个月时间所形成的净生长量方差分析看(表 4),除东西和南北冠幅为处理间极显著差异外,其余生长性状对于不同施肥配方均未产生显著施肥效应。

表 3 施肥当年印楝各调查指标的生长量协方差分析

变异来源	株高			地径			胸径		
	SS	s^2	F	SS	s^2	F	SS	s^2	F
区组	948.88	474.44	2.77	0.07	0.04	0.26	0.96	0.48	5.37
处理	2558.36	170.56	0.99	3.23	0.22	1.53	0.75	0.05	0.56
本底	56793.40	56793.40	330.95*	33.33	33.33	237.52*	25.66	25.66	286.76*
截距	16.72	16.72	0.01	0.63	0.63	4.47	0.32	0.32	3.61

变异来源	东西冠幅			南北冠幅			F_{α}
	SS	s^2	F	SS	s^2	F	
区组	419.16	209.58	0.45	1038.45	519.22	1.21	$F_{0.05}(2, 29) = 3.33$ $F_{0.01}(2, 29) = 5.42$
处理	18224.12	1214.94	2.58	17348.60	1156.57	2.69	$F_{0.05}(15, 29) = 2.03$ $F_{0.01}(15, 29) = 2.73$
本底	58008.43	58008.43	123.23*	60183.99	60183.99	139.98*	$F_{0.05}(1, 29) = 4.18$ $F_{0.01}(1, 29) = 7.60$
截距	3152.36	3152.36	6.70	1275.12	1275.12	2.97	$F_{0.05}(1, 29) = 4.18$ $F_{0.01}(1, 29) = 7.60$

注:协方差分析中,株高 $R^2 = 0.950$;地径 $R^2 = 0.947$;胸径 $R^2 = 0.923$;冠幅东西向 $R^2 = 0.924$;冠幅南北向 $R^2 = 0.907$ 。

表 4 施肥当年印楝各调查指标的净生长量方差分析

变异来源	株高			地径			胸径		
	SS	s^2	F	SS	s^2	F	SS	s^2	F
组间	2406.92	160.46	0.87	3.12	0.21	1.56	1.25	0.08	1.20
组内	5926.83	185.21		4.26	0.13		2.24	0.07	

变异来源	东西冠幅			南北冠幅			F_{α}
	SS	s^2	F	SS	s^2	F	
组间	8053.33	536.89	3.24*	10898.83	726.59	3.62*	$F_{0.05}(15, 32) = 1.99$
组内	13855.00	165.71		10212.33	200.72		$F_{0.01}(15, 32) = 2.66$

注:各调查指标的净增加值 = 当年底调查值 - 施肥前调查的本底值。

不同配方处理间各生长性状的施肥效应值可通过表 5 的 Duncan 多重比较得到进一步展示(因篇幅所限,本文仅列出可能与结实产量较为密切的株高和冠幅的施肥效应值,下同)。表 5 表明:印楝林分当年的施肥效应较小,株高的不同施肥处理之间均无显著差异,只有冠幅的净生长量对不同施肥配方反应敏感,即冠幅的净增加值因不同施肥处理而出现显著差异水平,这种差异对于东西向冠幅而言主要表现在第 14、7、15 处理与第 3、4、10 等处理间,对于南北向冠幅主要体现在第 11、14 与第 12、4 等处理间。与不施肥相比,株高以第 14 处理的净值相对增长率最大,而东西、南北向冠幅则分别以第 14、11

处理的相对增长率最大。

2.1.2 施肥后第 1 年的肥效分析 表 6 的协方差分析表明:当试验进行到第 2 年末后,除胸径以外的其余 4 个生长量指标对于不同的施肥配方均表现出极为明显的施肥效应,其中地径生长量达到显著差异水平,而不同施肥处理的株高和冠幅生长量则达到极显著差异水平;此外,林分本底值对株高、地径、胸径和冠幅生长量的影响仍然处于极显著水平,这说明,对于各生长性状指标而言,由林地养分补充所产生的施肥效应,在很大程度上与其施肥前的生长量积累状况密切相关。

表 5 施肥当年各考察指标施肥处理间的多重比较与效应值分析

株高			冠幅东西向			冠幅南北向		
处理	净生长量 /cm	增长率 /%	处理	净生长量 /cm	增长率 /%	处理	净生长量 /cm	增长率 /%
CK	20.46	100	CK	15.56	100	CK	9.67	100
12	16.89 a	82.6	3	14.13 c	90.8	12	4.17 c	43.1
9	17.83 a	87.1	4	14.25 c	91.6	4	18.33 bc	189.6
15	20.23 a	98.9	10	16.44 bc	105.7	3	20.83 b	215.4
6	21.17 a	103.5	12	16.67 bc	107.1	1	22.98 b	237.2
7	22.50 a	110.0	1	20.81 b	133.7	10	23.67 b	244.8
4	23.00 a	112.4	9	20.83 b	133.9	15	24.17 b	249.9
11	24.50 a	119.7	5	23.00 b	147.8	6	27.50 b	284.4
2	28.67 a	140.1	2	26.67 b	171.4	5	32.00 b	330.9
3	30.67 a	149.9	13	27.33 b	175.6	13	32.17 ab	332.7
13	31.00 a	151.5	8	28.83 b	185.3	9	33.33 ab	344.7
1	31.67 a	154.8	11	35.00 ab	224.9	2	35.50 ab	367.1
10	33.67 a	164.6	16	40.00 ab	257.1	7	41.50 ab	429.2
8	34.17 a	167.0	6	45.83 ab	294.5	8	46.67 ab	482.6
16	34.66 a	169.4	15	49.67 a	319.2	16	47.50 ab	491.2
5	35.20 a	172.0	7	54.17 a	348.1	14	55.83 a	577.4
14	38.83 a	189.8	14	65.83 a	423.1	11	67.50 a	698.0

注: ①增长率 = 施肥处理该指标净增加值 / 对照小区该指标净增加值 × 100% (下同); ② a, b, c 等字母为 0.05 水平 Duncan 多重比较标记 (下同)。

表 6 施肥后第 1 年印楝各调查指标的生长量协方差分析

变异来源	株高			地径			胸径		
	SS	s ²	F	SS	s ²	F	SS	s ²	F
区组	4 629.90	2 314.95	8.46*	1.04	0.52	1.11	2.78	1.39	7.66**
处理	12 037.18	802.48	2.93*	16.39	1.09	2.34*	1.44	0.10	0.53
本底	55 843.72	55 843.72	204.00*	34.85	34.85	74.73*	25.29	25.29	139.54**
截距	355.87	355.87	1.30	1.76	1.76	3.78	1.69	1.69	9.31**

变异来源	东西冠幅			南北冠幅			F _a
	SS	s ²	F	SS	s ²	F	
区组	3 244.87	1 622.43	2.53	2 276.41	1 138.20	2.16	F _{0.05} (2, 29) = 3.33; F _{0.01} (2, 29) = 5.42
处理	62 834.20	4 188.95	6.53*	46 220.15	3 081.34	5.84*	F _{0.05} (15, 29) = 2.03; F _{0.01} (15, 29) = 2.73
本底	55 577.28	55 577.28	86.68*	56 774.09	56 774.09	107.62*	F _{0.05} (1, 29) = 4.18; F _{0.01} (1, 29) = 7.60
截距	8 553.38	8 553.38	13.34*	5 454.63	5 454.63	10.34*	F _{0.05} (1, 29) = 4.18; F _{0.01} (1, 29) = 7.60

注: 协方差分析中, 株高 R² = 0.945; 地径 R² = 0.977; 胸径 R² = 0.937; 冠幅东西向 R² = 0.932; 冠幅南北向 R² = 0.913。

从施肥处理间净生长量的方差分析 (表 7) 来看, 与生长量测值相比, 地径、胸径和冠幅在统计意义上的差异性未发生变化, 而株高的肥效反应变化较大, 从 0.01 水平降至 0.05 水平。进一步从 Duncan 多重检验 (表 8) 看, 很显然, 对株高而言, 施肥处理第 14、1 和 2 的施肥效果非常显著; 对冠幅而言, 第 1 和第 14 处理为较优的施肥配方组合。总体而

言, 施肥后第 1 年的施肥效果或者肥效的规律性都较明显, 所有施肥处理均呈现正效应 (表 8), 其中株高、冠幅东西、冠幅南北的净生长量分别高于对照 0.33 ~ 42.33 cm、1.10 ~ 76.77 cm 和 1.83 ~ 84.87 cm, 其相对增长率分别达到 0.3% ~ 155.8%、5.0% ~ 350.5% 和 7.3% ~ 342.2%。

表 7 施肥后第 1 年印楝各调查指标的净生长量方差分析

变异来源	株高			地径			胸径		
	SS	s ²	F	SS	s ²	F	SS	s ²	F
组间	12 145.33	809.69	2.13 [‡]	48.86	1.42	2.15 [‡]	1.42	0.09	0.37
组内	12 164.48	380.14		21.25	0.66		8.21	0.26	

变异来源	东西冠幅			南北冠幅			F _a
	SS	s ²	F	SS	s ²	F	
组间	30 280.04	2 018.67	3.03**	23 814.45	1 587.63	3.88*	F _{0.05} (15, 32) = 1.99
组内	21 342.83	666.96		13 104.17	409.51		F _{0.01} (15, 32) = 2.66

注: 各调查指标的净增加值 = 施肥后第 1 年底调查值 - 施肥前调查的本底值。

表 8 施肥后第 1 年各考察指标施肥处理间的多重比较与效应值分析

处理	株高		冠幅东西向			冠幅南北向		
	净生长量 /cm	增长率 /%	处理	净生长量 /cm	增长率 /%	处理	净生长量 /cm	增长率 /%
CK	27.17	100	CK	21.90	100	CK	24.80	100
12	27.75 c	100.3	12	23.00 d	105.0	12	26.63 d	107.3
4	27.50 c	101.2	10	33.33 d	152.2	4	49.32 c	198.9
8	35.67 bc	131.3	5	56.65 c	258.7	8	56.67 c	228.5
3	35.74 bc	131.5	11	58.33 bc	266.3	9	56.81 c	229.1
7	35.89 bc	132.1	9	60.83 bc	277.8	10	60.00 c	241.9
11	36.07 bc	132.8	16	61.67 bc	281.6	6	64.84 bc	261.5
15	36.29 bc	133.6	13	61.67 bc	281.6	16	65.00 bc	262.1
13	37.12 bc	136.6	7	70.00 bc	319.6	7	71.67 b	289.0
5	37.17 bc	136.8	8	73.33 bc	334.8	5	75.00 b	302.4
16	37.33 bc	137.4	3	76.17 bc	347.8	11	78.33 b	315.8
6	39.18 b	144.2	2	78.15 b	356.9	3	83.17 b	335.4
9	40.84 b	150.3	6	80.49 b	367.5	13	88.33 b	356.2
10	43.34 ab	159.5	4	81.67 b	372.9	15	90.00 b	362.9
2	57.49 a	211.6	15	88.00 b	401.8	2	94.67 ab	381.7
1	59.99 a	220.8	14	89.00 ab	406.4	1	95.00 a	383.1
14	69.50 a	255.8	1	98.67 a	450.5	14	109.67 a	442.2

2.1.3 施肥后第 2 年的肥效分析 从表 9 来看, 到施肥后第 2 年底, 不同施肥处理间对于各调查指标平均生长量的影响, 除地径和冠幅仍然保持显著和极显著差异外, 对于株高和地径的肥效影响力已经分化, 前者从上一年末的 0.01 差异水平降至 0.05 水平, 而后者分别从前 2 年的差异不显著上升到差异显著水平, 处理间胸径的施肥效应开始显现。由此可以推断, 植株内环境中, 不同配方处理间促进株高和胸径生长的营养分配策略正在发生变化, 正是这种变化促成了处理间胸径生长差异的扩大和株高生长差异的缩小。此外, 该表也说明, 针对所有生长指标而言, 林分自身的本底值在很大程度上对不同施肥处理间所形成的差异水平产生了显著影响。

进一步从各生长性状净生长量方差分析来看 (表 10), 施肥处理间在施肥后第 2 年虽然仍保持显著或极显著的差异水平, 但从对净生长量影响的 F 值变化趋势可以看出, 除胸径外, 其余各生长指标的

F 值均在减小, 这表明处理间施肥效应的显著性水平相对于上一年已经有所减弱。这一点可以从表 11 得到证实, 如果从 16 个处理与对照值的平均相对增长率来看, 不难发现, 与施肥后第 1 年比, 株高、东西和南北冠幅分别降低了 5.4%、157.0% 和 130.8%。这说明处理间显著性水平的减弱是由配方处理间施肥效应的变化引起的, 由此可以进一步推断, 干热河谷地区施肥效应的稳定性较差, 即不可能通过某一两次的肥力补充而实现林分的稳定增益, 这可能与干热河谷特殊生态气候条件下其土壤类型及其理化性质的特殊性密切相关。尽管施肥后第 2 年的肥效有所下降, 但从株高和冠幅的效应值来看 (表 11), 第 14 和第 1 处理依然是比较优越的施肥配方, 这说明一定量的有机肥以及合理的化肥配方组合均能够促进印楝林分的快速生长, 但与上一年相比, 有机肥的效力相对更为持久。

表 9 施肥后第 2 年印楝各调查指标的生长量协方差分析

变异来源	株高			地径			胸径		
	SS	s^2	F	SS	s^2	F	SS	s^2	F
区组	7 072.88	3 536.44	7.35**	4.26	2.13	4.34	4.52	2.26	5.72**
处理	19 359.38	1 290.63	2.68*	15.50	1.03	2.11†	12.32	0.82	2.08*
本底	46 560.33	46 560.33	96.72**	27.03	27.03	55.14*	20.59	20.59	52.17**
截距	3 382.91	3 382.91	7.03*	8.24	8.24	16.80**	7.80	7.80	19.76**

变异来源	东西冠幅			南北冠幅			F_{α}
	SS	s^2	F	SS	s^2	F	
区组	4 354.36	2 177.18	1.82	820.04	410.02	0.40	$F_{0.05}(2, 29) = 3.33; F_{0.01}(2, 29) = 5.42$
处理	100 624.31	6 708.29	5.92*	74 941.57	4 996.10	4.89**	$F_{0.05}(15, 29) = 2.03; F_{0.01}(15, 29) = 2.73$
本底	45 222.33	45 222.33	37.72**	31 437.31	31 437.31	30.74**	$F_{0.05}(1, 29) = 4.18; F_{0.01}(1, 29) = 7.60$
截距	43 490.01	43 490.01	36.27**	49 389.77	49 389.77	48.29**	$F_{0.05}(1, 29) = 4.18; F_{0.01}(1, 29) = 7.60$

注: 协方差分析中, 株高 $R^2 = 0.931$; 地径 $R^2 = 0.970$; 胸径 $R^2 = 0.974$ 冠幅东西向 $R^2 = 0.925$ 冠幅南北向 $R^2 = 0.916$ 。

表 10 施肥后第 2 年印楝各调查指标的净生长量方差分析

变异来源	株高			地径			胸径		
	SS	s^2	F	SS	s^2	F	SS	s^2	F
组间	18 933 56	1 262 24	2 02 [*]	21 97	1. 47	2 09 [*]	13 23	0 88	2 13 [*]
组内	19 995 67	624. 87		22 49	0. 70		13 23	0 41	

变异来源	东西冠幅			南北冠幅			F_{α}
	SS	s^2	F	SS	s^2	F	
组间	54 949 25	3 663 28	2 88 [*]	62 366 98	4 157 80	3 14 [*]	$F_{0.05}(15, 32) = 1.99$
组内	40 710 00	1 272 19		42 354 00	1 323 56		$F_{0.01}(15, 32) = 2.66$

注: 各调查指标的净增加值 = 施肥后第 2 年底调查值 - 施肥前调查的本底值。

表 11 施肥后第 2 年各考察指标施肥处理间的多重比较与效应值分析

处理	株高		处理	冠幅东西向		处理	冠幅南北向	
	净生长量 / cm	增长率 / %		净生长量 / cm	增长率 / %		净生长量 / cm	增长率 / %
CK	48. 70	100	CK	87. 00	100	CK	89. 20	100
12	50. 00 b	102. 7	12	95. 00 c	109. 2	12	86. 67 c	97. 2
8	56. 67 b	116. 4	9	111. 67 c	128. 4	4	93. 33 bc	104. 6
10	58. 33 b	119. 8	8	115. 00 bc	132. 2	16	121. 82 bc	136. 6
11	59. 17 b	121. 5	4	118. 33 bc	136. 0	8	131. 35 ab	147. 3
4	60. 00 b	123. 2	10	118. 33 bc	136. 0	9	135. 10 ab	151. 5
7	64. 28 b	132. 0	15	121. 67 abc	139. 9	3	136. 67 ab	153. 2
3	65. 00 b	133. 5	16	122. 18 abc	140. 4	11	140. 00 ab	157. 0
9	67. 50 b	138. 6	5	128. 33 abc	147. 5	7	148. 33 ab	166. 3
16	70. 00 b	143. 7	11	130. 00 abc	149. 4	5	150. 00 ab	168. 2
13	70. 33 b	144. 4	2	136. 67 ab	157. 1	10	151. 83 ab	170. 2
6	72. 50 b	148. 9	6	141. 67 ab	162. 8	15	156. 45 a	175. 4
15	76. 67 b	157. 4	13	141. 95 ab	163. 2	6	165. 00 a	185. 0
5	77. 50 b	159. 1	3	145. 29 ab	167. 0	13	169. 74 a	190. 3
2	85. 00 ab	174. 5	7	146. 67 ab	168. 6	2	173. 33 a	194. 3
14	93. 33 a	191. 6	1	185. 00 a	212. 6	1	178. 33 a	199. 9
1	108. 33 a	222. 4	14	190. 00 a	218. 4	14	186. 25 a	208. 8

2.2 不同配方施肥对印楝结实产量的影响

表 12 列出了施肥 3 年来各施肥处理及年份效应的产量方差分析, 从该表来看, 不同的施肥配方处理间印楝的结实产量存在显著差异, 但未能到极显著水平; 年份之间的结实量存在极显著差异, 这意味

着印楝的产量性状同大多数经济林树种一样, 具有结实的大小年特征; 此外, 年份、施肥处理及重复区组的互作之间也对印楝的生产力造成了极显著的影响。

表 12 各施肥处理及年份效应的产量方差分析

变异来源	df	SS	s^2	F	F_{α}
处理	15	341 504. 81	22 766. 99	1. 91 [*]	$F_{0.05}(15, 124) = 1.75; F_{0.01}(15, 124) = 2.19$
年份	2	291 737. 07	145 868. 54	12. 21 [*]	$F_{0.05}(2, 124) = 3.07; F_{0.01}(2, 124) = 4.78$
区组	2	2 315. 39	1 157. 70	0. 10	$F_{0.05}(2, 124) = 3.07; F_{0.01}(2, 124) = 4.78$
互作	1	1 503 852. 57	1 503 852. 57	125. 92 [*]	$F_{0.05}(1, 124) = 3.92; F_{0.01}(1, 124) = 6.84$

各年份施肥处理间对印楝结实产量的肥力效应可以从表 13 得到反映, 该表表明, 试验当年, 各施肥处理平均结实量为 11. 9 g 因施肥时印楝林分已发生花芽分化, 少数单株甚至已经开花座果, 导致施肥处理间的结实产量未能达到显著差异水平。到施肥后第 1 年, 各施肥处理平均结实量达到 3 年之中的最佳水平, 为 52. 1 g 施肥配方间的果实产量开始出

现显著差异, 与不施肥相比, 除第 11、12 处理外, 施肥植株产量的相对增长率高于对照的 6. 6% ~ 313. 7%, 施肥平均增产高于对照的 145. 6%, 其中以第 13 处理的肥效最佳, 第 1 和第 5 处理其次; 到施肥后第 2 年, 各处理间平均产量为 48. 2 g 配方施肥间仍然保持产量显著差异水平, 但总体结实量有所下降, 与上一年比, 16 个处理的产量相对增长率平

均下降 51.9%, 其中比较优越的施肥配方为第 1 处理, 第 14 和第 15 处理次之, 而最差的第 12 处理, 其产量不足对照的 1/3。有关该处理的解释尚未清楚。结合 3 年施肥的结实总产量而言 (表 13), 除第 12

配方外, 其余施肥处理与对照相比均产生明显施肥效应, 产量高于对照 7.5~123.7 g, 相对增长率为 12.6%~207.2%, 其中以第 1 施肥处理对结实产量的反应最为敏感, 其次为第 14 和第 2 处理。

表 13 各年份施肥配方处理间的产量多重比较及效应值分析

当年			第 1 年			第 2 年			总和		
处理	平均结实量 /g	增长率 /%	处理	平均结实量 /g	增长率 /%	处理	平均结实量 /g	增长率 /%	处理	平均结实量 /g	增长率 /%
CK	13.6	100	CK	21.2	100	CK	24.9	100	CK	59.7	100
7	19.5 a	143.4	13	87.7 a	413.7	1	87.8 a	352.6	1	183.4 a	307.2
10	19.4 a	142.6	1	83.2 a	392.5	14	81.5 a	327.3	14	160.8 a	269.3
16	17.2 a	126.5	5	70.4 ab	332.1	15	76.8 a	308.4	2	143.8 a	240.9
12	13.6 a	100.0	14	69.2 ab	326.4	2	76.5 a	307.2	6	143.6 a	240.5
6	13.1 a	96.3	6	65.4 b	308.5	6	65.1 ab	261.4	15	142.9 a	239.4
13	12.7 a	93.4	15	61.9 b	292.0	11	54.1 b	217.3	13	131.5 a	220.3
1	12.4 a	91.2	10	61.6 b	290.6	16	52.5 b	210.8	16	129.0 a	216.1
8	10.9 a	80.1	16	59.3 b	279.7	8	49.7 b	199.6	5	126.4 a	211.7
5	10.8 a	79.4	9	58.7 b	276.9	5	45.2 bc	181.5	10	101.2 ab	169.5
14	10.1 a	74.3	2	57.9 b	273.1	4	44.2 bc	177.5	9	93.3 b	156.3
4	9.9 a	72.8	3	42.8 bc	201.9	3	34.8 c	139.8	3	85.9 b	143.9
9	9.5 a	69.9	7	27.5 c	129.7	13	31.1 c	124.9	8	83.2 b	139.4
2	9.4 a	69.1	4	23.5 c	110.8	9	25.1 c	100.8	11	83.1 b	139.2
11	8.6 a	63.2	8	22.6 c	106.6	10	20.2 c	81.1	4	77.6 bc	130.0
3	8.3 a	61.0	12	20.9 c	98.6	7	20.2 c	81.1	7	67.2 bc	112.6
15	4.2 a	30.9	11	20.4 c	96.2	12	6.7 d	26.9	12	41.2 c	69.0

3 结语与讨论

(1) 配方施肥能显著影响印楝人工林的生长, 施肥当年肥效较小, 施肥效应主要体现在施肥后第 1 年, 到施肥后第 2 年肥效总体呈下降趋势, 并且林分本底值对施肥效果均产生极显著影响; 各生长性状对肥效的反应不同, 依据各年份施肥配方处理间的显著性水平所排列的敏感性顺序为: 冠幅 > 株高 > 地径 > 胸径; 以施肥后第 1 年和第 2 年不同处理对株高和冠幅生长量的施肥效果为评价依据, 第 14 处理 (N₂P₂K₁) 为最优施肥组合方案, 第 1 处理 (M₁P₃K₁) 次之。

(2) 不同施肥配方处理间以及不同年份之间, 印楝的结实产量存在显著差异。施肥处理年份间的平均产量排序为: 施肥后第 1 年 > 施肥后第 2 年 > 施肥当年; 有机肥与 P、K 肥的配方组合对印楝结实量产生明显增益, 结合 3 年施肥各处理间的总产量统计来看, 16 个施肥配方中, 第 1 处理 (8 kg 有机肥 + 200 g 磷肥 + 200 g 钾肥) 为增加印楝结实产量的最佳施肥方案, 第 14 和第 2 处理其次。

在人工林施肥研究中, 林分本底值对林木生长的影响是不可回避的问题。李贻铨等^[15]对杉木中

龄林进行施肥试验后研究认为, 本底值对每年末胸径和株高生长量的影响随年份推迟而增大, 对其净生长量的影响则随年份增加而呈逐渐增大趋势, 但对于林木大小相近的同种杉木幼林而言, 林分本底值对株高和胸径生长量的影响则不显著^[16]。对此, Auchmoody^[17]归纳指出, 当施肥处理设置于径阶分布不同的林分时, 林木大小引起的间接效应将对施肥结果的检测产生重要影响。所以在对印楝成熟林进行施肥效应研究时, 由于施肥前林木大小差异形成的本底值差别会对林分生长量产生极显著影响, 从而对施肥追加干扰效应, 若施肥前运用合理的营林技术手段, 将本底值调整到同一水平进行分析检验, 将获得更为准确、真实的科学结论。此外, 本试验表明, 在干热河谷特殊的生态环境下, 有机肥的足量施入对于维持林分地力、促进林木生长与结实均具有显著效果, 而单施化学肥料因受限于特殊的土壤性质则容易造成肥效流失。因此, 为保证干热河谷区印楝人工林持续的生产力, 有机肥和化肥的组合施肥以及周期性的肥力补充尤为重要。

参考文献:

- [1] National R. C. N eem-A Tree for Solving Global Problems [M]. Washington: National Academy Press, 1992

- [2] 彭兴民, 张燕平, 赖永祺, 等. 印楝生物学特性及引种栽培 [J]. 林业科学研究, 2003, 16(1): 75-80
- [3] 吴疆翀, 彭兴民, 郑益兴, 等. 印楝异交率和基因流的分析 [J]. 林业科学研究, 2008, 21(5): 593-598
- [4] 郑益兴, 彭兴民, 赵保荣, 等. 印楝实生苗木年生长规律研究 [J]. 林业科学研究, 2006, 19(2): 182-187
- [5] 郑益兴, 彭兴民, 张燕平. 印楝不同种源对温度变化的光合生理生态响应 [J]. 林业科学研究, 2008, 21(2): 131-138
- [6] 张燕平, 赵粉侠, 刘秀贤, 等. 干热河谷印楝生长与立地条件关系 [J]. 林业科学研究, 2005, 18(1): 74-79
- [7] 谭卫红, 宋湛谦. 天然植物杀虫剂印楝素的研究进展 [J]. 华南热带农业大学学报, 2004, 10(1): 23-28
- [8] Zhang Yan-ping, Peng Xing-min, Zheng Yi-xing. Effort on planting and product development of *Azadirachta indica* in Southwest China [J]. Journal of Forestry Research, 2008(3): 252-256
- [9] Jain R C, Tripathi S P, Mahendra S, et al. Volume table for *Azadirachta indica* for Gujarat region [J]. Indian Forester, 1998, 123(2): 123-133
- [10] Balkand R. Fertilization of plantations. In "Nutrition of Plantation Forests" [M]. Academic Press, 1984, 328-349
- [11] 黄益宗, 冯宗炜, 黎向东, 等. 应用“416-A”最优混合设计研究尾叶桉肥效与营养诊断 [J]. 林业科学, 1999, 35(6): 10-18
- [12] 何毓蓉, 徐建忠, 黄成敏, 等. 金沙江干热河谷区变性土的特征及系统分类 [J]. 土壤学报, 1995, 32(增刊): 102-103
- [13] 余建英, 何旭宏. 数据统计分析与 SPSS 应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003
- [14] 李春喜, 王志和, 王文林, 等. 生物统计学 [M]. 北京: 科学出版社, 2000
- [15] 李贻铨, 陈道东, 纪建书, 等. 杉木中龄林施肥效应探讨 [J]. 林业科学研究, 1993, 6(4): 390-396
- [16] 谢国阳, 林思祖, 张文富, 等. 连栽地 4 年生杉木幼林施肥效应研究 [J]. 福建林学院学报, 1999, 19(3): 256-260
- [17] Auchmoody L R. Evaluating growth responses to fertilization [J]. Can J For Res, 1985, 15: 877-880