

黄竹叶片营养与土壤肥力 及产量的相关研究

涂淑萍¹, 叶长娣³, 王 蕾¹, 张文元^{1,2}, 胡小康⁴, 郭晓敏^{1,2*}

(1. 江西农业大学 园林与艺术学院, 江西 南昌 330045; 2. 江西省竹子种质资源与利用重点实验室, 江西 南昌 330045; 3. 江西省赣县林业局, 江西 赣县 565200; 4. 江西省赣州市林业科学研究所, 江西 赣州 341008)

摘要: 为科学合理施肥及集约经营管理黄竹林提供参考, 对赣县大田乡不同配方施肥黄竹林的叶片养分含量与土壤肥力及产量的相关性进行研究。结果表明: 施肥可明显提高竹林土壤的供肥能力, 快速补充竹叶养分, 增加竹林产量, 而不同配方肥中又以矿渣肥 2 效果最好。影响竹叶 N 素含量的主要肥力因子及其影响顺序为: 全 N > 速效 N > 有机质 > 全 P。影响竹叶 P 素含量的肥力因子及其影响顺序为: 速效 K > 全 N > 速效 P > 全 K。影响竹叶中 K 含量的肥力因子及其影响顺序为: 全 N > 全 P > 全 K > 速效 N。黄竹竹叶 N 元素含量与产量呈显著正相关, 黄竹竹叶中 N 元素含量的临界值为 20.46 g/kg, 最适值为 22.94 g/kg, 可用于黄竹营养诊断。

关键词: 黄竹; 配方施肥; 叶养分含量; 土壤肥力; 产量; 相关性

中图分类号: S714.5; S714.8 文献标志码: A 文章编号: 1000-2286(2011)05-0918-06

A Study on Correlation between Leaf Nutrition and Soil Fertility and Output of *Bambusa rigida*

TU Shu-ping¹, YE Zhang-di³, WANG Lei¹,
ZHANG Wen-yuan^{1,2}, HU Xiao-kang⁴, GUO Xiao-min^{1,2*}

(1. College of Landscape Architecture and Art, JAU, Nanchang 330045, China; 2. Jiangxi Bamboo Germplasm Resources and Use Key Laboratories, Nanchang 330045, China; 3. Kan-Hsien Forestry Bureau, Jiangxi Province Kan-Hsien 565200, China; 4. Forestry Science Institute of Ganzhou City, Jiangxi Province, Ganzhou 341008, China)

Abstract: In order to provide reference for scientific and rational fertilization and management of *Bambusa rigida* forest, the correlation of leaf nutrition to soil fertility and output of *B. rigida* in Datianxiang of Kan-Hsien was studied through prescription fertilization. The results showed that fertilizer could improve the fertilizer-supplying capacity of bamboo soil and promote supplement of nutrition to leaf and add bamboo production. The slag fertilizer 2 had the best effect in the different formulations of fertilizers. The major factors influencing nitrogen content in *Bambusa rigida* leaf were in the order: total N > available N > organic matter > total P in soil. The major factors influencing phosphorus content in *Bambusa rigida* leaf were in the order available K >

收稿日期: 2011-06-13 修回日期: 2011-09-03

基金项目: 国家“十一五”科技支撑项目(2008BADA9B0802)、国际植物营养研究所 IPNI 项目(Jiangxi-18)、国家自然科学基金项目(30860226)、科技部农业科技成果转化资金项目(2008GB2C500149)和江西省科技厅学科带头人项目(030008)

作者简介: 涂淑萍(1963—), 女, 副教授, 主要从事园林植物栽培方面研究, E-mail: jxtsping@163.com; * 通讯作者, 郭晓敏, 教授, 博士生导师, E-mail: gxmjxau@163.com。

total N > available P > total K in soil. The major factors influencing potassium content in *Bambusa rigida* leaf were in the order: total N > total P > total K > available N in soil. The N element content in bamboo leaf and the production were significantly positively correlated. critical value of N content in *Bambusa rigida* leaf was 20.46 g/kg, the optimum value was 22.94 g/kg, the critical value of N content in *Bambusa rigida* leaf can be applied in nutrient diagnosis.

Key words: *Bambusa rigida* forest; prescription fertilization; leaf nutrition; soil fertility; output; correlation

黄竹(*Bambusa rigida* Keng et Keng f.) 又称硬头黄竹, 属禾本科竹亚科箬竹属, 是江西赣南地区栽培历史悠久、分布广泛的优良丛生竹^[1]。其株型紧凑, 秀雅翠绿, 姿态潇洒, 是庭园绿化、美化的优良材料。黄竹竹秆通直, 节平而疏, 纤维长, 材质坚厚强韧, 篾性良好, 可用于编缆、打索、搭棚、围篱、造纸和编织工艺品及日常用品等。此外, 其地下茎纵横盘结, 具有很强的固土、保水、护坡作用。可见, 黄竹是集用材、观赏、防风、固堤于一身的的首选竹种^[2]。

竹叶是竹的同化器官, 在黄竹所有的器官中其营养元素的含量最高。竹叶中营养元素的含量既能反映竹林养分状况, 又能反映林地土壤营养状况, 是竹林养分管理的重要依据。国内有关毛竹施肥的研究报道较多^[3-9], 有部分学者对毛竹叶片养分与土壤肥力的相关关系作过报道^[10-12], 但有关黄竹的施肥, 以及施肥后对黄竹林叶片养分变化的影响和施肥后土壤肥力与叶片养分的相关关系的研究还未见报道。本研究选择江西赣县黄竹不同配方施肥试验林, 研究施肥后黄竹林叶片营养元素含量变化及土壤供肥能力, 建立竹叶的主要营养元素与土壤肥力的回归模型, 以及竹叶的主要营养元素与新竹生物量的相关性, 为科学合理地施肥及集约经营管理黄竹林提供有益参考。

1 试验方法

1.1 不同配方施肥试验

试验地设在江西赣县大田乡, 土壤为花岗岩母质发育而成的红黄壤, 黄竹纯林林相良好, 林分结构基本一致。自2009年6月开始进行不同配方施肥试验, 采用随机区组设计, 设置6个处理, 3次重复, 每个处理取黄竹6丛。各处理施用肥料种类、各元素用量及配比如表1所示。

表1 试验林地肥料种类、各元素含量及配比

Tab. 1 The type and application quantity of fertilizer of the different fertilizations in experimental forest

处理号 Number	处理 Treatment	N/ (kg · 丛 ⁻¹)	P ₂ O ₅ / (kg · 丛 ⁻¹)	K ₂ O / (kg · 丛 ⁻¹)	肥料配比 Ratio of fertilizer
1	矿渣肥 1 Slag fertilizer 1	0.729	0.223	0.208	24.5:7.5:7
2	矿渣肥 2 Slag fertilizer 2	0.541	0.361	0.258	21:14:10
3	毛竹专用肥 1 Bamboo fertilizer 1	0.48	0.28	0.40	12:7:10
4	毛竹专用肥 2 Bamboo fertilizer 2	0.504	0.375	0.294	12:8.5:7
5	复合肥 Complex fertilizer	0.387	0.387	0.387	15:15:15
6	对照 ck	0	0	0	0

施肥方法: 在每丛黄竹树体周围挖深10 cm左右的环形沟, 施入肥料后立即覆土。第1次施肥在2009年6月黄竹发笋期前进行, 第2次施肥在2010年2月新竹成长期进行。

1.2 土壤样品采集与分析

于2010年3月, 分别在各处理林地按条状三点随机布点, 多点取样, 用直径2 cm取土器钻取0~40 cm的土样, 混合后贴上标签。取回的土样进行室内晾晒、粉碎、过筛、混匀、装袋待测。土壤样品养分状况分析, 采用土壤养分状况系统研究法(ASI法)分析, 测定指标为: 有机质、全N、全P、全K、速效N、速效P、速效K等, 同时用常规国标方法测定有机质及pH值^[13]。

1.3 叶片样品的采集与分析

于2010年3月, 选择每个处理样地中2009年出笋成竹的新竹每丛1株, 分别采集竹冠中上部竹叶

混合鲜样 400 ~ 500 g 装入干净的塑料袋中密封好。竹叶样品采集后,立即进行“杀青”处理,抑制竹叶中各种酶的活性。

叶片样品的养分含量测定方法:采用凯氏定氮法测定 N 元素含量;采用钒钼黄比色法测定 P 元素含量;采用原子吸收分光光度法测定 K 元素含量^[14]。

1.4 黄竹生物量的测定

2010 年 3 月通过黄竹营养生长期各施肥处理黄竹的胸径和竹高,计算出黄竹的单株生物量。计算公式如下:

$$w = c \times D_a \times H_b \tag{1}$$

其中 w : 单株总生物量; D : 胸径 (cm); H : 竹高 (m); $c = 462.53$; $a = 0.9124$; $b = 0.4242$ ^[15]。

然后依据每丛竹子新竹与母株的根数,计算出每丛竹的新竹相对生物量。每丛新竹相对生物量的计算:

$$W = w \times n / N \tag{2}$$

其中 W : 每丛新竹相对生物量; w : 单株总生物量; n : 新竹根数; N : 母竹根数。计算出每丛竹子的新竹相对生物量,然后计算出每个处理的平均值,并进行方差分析。

1.5 数据分析方法

运用多元回归分析法,建立黄竹叶片 N、P、K 等主要营养元素与土壤养分的回归预测模型。采用一元二次抛物线回归方程: $Y = a + bx + cx^2$ 分析竹叶 N、P、K 养分含量与新竹相对生物量的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同配方施肥竹林土壤养分含量

由表 2 数据并经方差分析得知,不同配方施肥与对照土壤有机质含量差异不显著,可能是由于本试验历时较短的缘故。不同配方施肥土壤速效 N、速效 P、速效 K、全 N、全 K、全 P 的含量差异均达显著水平,施矿渣肥与施毛竹专用肥以及普通复合肥相比,可明显提高土壤中速效 N、速效 P、速效 K、全 N、全 P 和全 K 的含量,提高土壤的供肥能力。

表 2 不同配方施肥竹林土壤养分含量

Tab. 2 Average value of soil nutrient in different fertilizer *Bambusa rigida*

处理 Treatment	有机质 /(g · kg ⁻¹) O - M	速效氮 /(mg · kg ⁻¹) Available N	速效磷 /(mg · kg ⁻¹) Available - P	速效钾/ (mg · kg ⁻¹) Available - K	全 N /(g · kg ⁻¹) Total - N	全 P /(g · kg ⁻¹) Total - P	全 K /(g · kg ⁻¹) Total - K
矿渣肥 1 Slag fertilizer 1	1.483	227.25a	29.0a	30.85b	2.132ab	0.7945	23.85
矿渣肥 2 Slag fertilizer 2	1.445	229.50a	24.5b	35.15a	2.351a	0.7263	21.60
毛竹专用肥 1 Bamboo fertilizer 1	1.434	182.00c	21.0c	28.15cd	1.867bc	0.6900	19.62
毛竹专用肥 2 Bamboo fertilizer 2	1.410	192.50b	19.5d	27.80d	1.961b	0.6335	18.80
复合肥 Complex fertilizer	1.499	175.00d	16.5e	28.85c	1.783c	0.6022	17.60
对照 ck	1.399	152.25e	15.0f	25.50e	1.633d	0.5877	15.80

表中数据后标注的相同小写字母表示 $P > 0.05$ 时差异不显著,不同小写字母表示 $P < 0.05$ 时差异显著。

Values with the same small letter superscripts meant on significant difference ($P > 0.05$), with different small letter superscripts meant significant difference ($P < 0.05$).

2.2 黄竹叶养分含量与新竹相对生物量的测定结果

通过对施肥后一年生新竹成竹后的叶片进行养分分析和新竹相对生物量测定,结果如表 3 所示。由表 3 可知,竹叶中的 N 含量是最高的,且以施用矿渣肥 2 后,黄竹林竹叶 N 素含量最高;P 素与 K 素含量以施用矿渣肥 1 后含量最高,但与施用矿渣肥 2 相比,差异不明显。不同配方施肥与对照相比,新竹相对生物量差异均达极显著水平,以施用矿渣肥 2 的生物量最高,与施用毛竹专用肥 2 相比差异达显著水平,与施用毛竹专用肥 1 和普通复合肥相比差异达极显著水平,而与施用矿渣肥 1 相比生物量的差

异不显著。通过分析各配方肥的肥料配比可以得知,在保证一定量 N 素供应的前提下,适当提高 P 肥的配比,可促进黄竹生长,提高经济效益。

表 3 黄竹新竹叶养分含量
Tab. 3 New leaf nutrient content of *Bambusa rigida*

处理 Treatment	黄竹新竹叶养分含量 New leaf nutrient content			新竹相对生物量/g Relative biomass
	N/(g · kg ⁻¹)	P/(g · kg ⁻¹)	K/(g · kg ⁻¹)	
矿渣肥 1 Slag fertilizer 1	21.5a	1.18a	5.65a	1 344.70aA
矿渣肥 2 Slag fertilizer 2	23.7a	1.15a	5.36a	1 371.29aA
毛竹专用肥 1 Bamboo fertilizer 1	20.8b	1.09	5.32	1 277.76bB
毛竹专用肥 2 Bamboo fertilizer 2	21.3ab	1.04	5.21	1 302.66bA
复合肥 Complex fertilizer	20.4b	1.06	5.19	1 261.51bB
不施肥 Non - fertilization	19.7c	1.01	5.14	1 137.49cC

不同小写字母表示 $P < 0.05$ 时差异显著,不同大写字母表示 $P < 0.01$ 时差异显著。

Values with the different letter meant significant difference ($P > 0.05$), with different big letter meant significant difference ($P < 0.01$).

2.3 黄竹竹叶养分含量与土壤养分含量的相关模型

2.3.1 黄竹竹叶中 N 元素与土壤养分含量的相关模型 根据竹叶营养分析结果,竹叶中的 N 含量是最高的,设 Y_1 为竹叶中 N 元素的含量(%), X_1 为有机质含量, X_2 为速效 N 含量, X_3 为速效 P 含量, X_4 为速效 K 含量, X_5 为全 N 含量, X_6 为全 P 含量, X_7 为全 K 含量。应用 DPS 软件进行逐步回归分析和模型筛选,得出较为理想的回归模型为:

$$Y_1 = 7.4554 + 1.7374X_1 - 0.0468X_2 + 10.6202X_5 - 0.6656X_6 \quad (3)$$

其中,统计量 $d = 1.2755$, 确定系数 = 0.99998, p -值 = 0.0063 < 0.01, 回归达到极显著水平。偏相关系数 $r(y, X_1) = 0.9938$, $r(y, X_2) = -0.9995$, $r(y, X_3) = 0.9999$, $r(y, X_4) = -0.9587$; 可见土壤中的全 N、速效 N、有机质、全 P 含量与黄竹竹叶中 N 元素含量关系较密切。土壤中的全 N 和速效 N 含量对竹叶 N 素含量的影响达到极显著的水平,土壤有机质含量对竹叶 N 素含量的影响也达到显著水平,而土壤全 P 含量对竹叶 N 素含量的影响相对较小。土壤中全 N 的含量与竹叶中 N 元素的含量呈正相关,土壤中全 N 含量越高,相应的竹叶中 N 元素的含量也就越大。一般来说,竹叶中 N 元素的含量在一定程度上反映了土壤中营养元素的供应量。土壤中 N 素的缺乏会不同程度地影响到黄竹的生长,所以, N 素是影响黄竹生长量的一个非常重要的因子。这一研究结果与毛竹林基本一致^[1-3]。但本研究中速效 N 与竹叶中 N 元素含量的偏相系数为负数,即土壤速效 N 含量越高,竹叶中 N 元素含量越低,其原因有待进一步探讨。此外,土壤全 P 含量与竹叶中 N 元素含量偏相系数亦为负数,其原因可能与竹林施肥后土壤速磷的快速积累和增加有关^[2]。有研究表明,当竹林土壤有效 P 含量达到一定量后将限制 N 素的吸收并使竹林产量下降,同时还可能会造成养分间新的不平衡。

2.3.2 黄竹竹叶中 P 元素与土壤养分含量的相关模型 南方红壤普遍缺 P,而 P 又是竹林生长不可缺少的营养元素。设 Y_2 为竹叶中 P 元素的含量(%),其它变量同 2.3.1。应用 DPS 系统回归分析软件进行多重线性逐步回归分析和模型筛选,得出较理想回归模型:

$$Y_2 = 0.6866 + 0.0104X_3 + 0.0176X_4 - 0.2213X_5 + 0.0052X_7 \quad (4)$$

其中,统计量 $d = 1.85033458$, 确定系数 = 0.99954, p -值 = 0.0323 < 0.05, 回归达到显著水平。偏相关系数 $r(y, X_3) = 0.9646$, $r(y, X_4) = 0.9965$, $r(y, X_5) = -0.9950$, $r(y, X_7) = 0.7032$; 由此可见,土壤中速效 K 的含量对黄竹吸收土壤中的 P 影响最大,呈极显著的正相关关系。全 N 和速效 P 的含量对其影响也较大,全 K 的影响相对较小。提高土壤中速效 K、速效 P 和全 K 的含量,对黄竹吸收 P 有很大的促进作用。但土壤全 N 含量增加不利于黄竹对 P 元素的吸收。

2.3.3 黄竹竹叶中 K 元素与土壤养分含量的相关模型 K 素是黄竹生长必不可少的品质营养元素, K 素含量的高低往往反映黄竹的材质,竹叶中 K 元素的含量相对 P 元素来说比较高,其含量属中等偏上。

设 Y_3 为竹叶中 K 元素的含量(%) ,其它变量同 2.3.1。应用 DPS 系统回归分析软件进行多重线性逐步回归分析和模型筛选 ,得出较理想回归模型:

$$Y_3 = 4.2376 + 0.0138X_2 - 1.2170X_5 + 3.4681X_6 - 0.0793X_7 \tag{5}$$

其中: 统计量 $d=3.06860090$ 确定系数 $=0.99889$ p 值 $=0.0499 < 0.05$,表明回归达到显著水平。偏相关系数 $r(y, X_2) = 0.9713$ $r(y, X_5) = -0.9837$ $r(y, X_6) = 0.9789$ $r(y, X_7) = -0.9108$; 由此可见 ,土壤全 N、全 P、全 K、速效 N 与竹叶中 K 元素的含量关系较密切 ,土壤速效 N 和全 P 含量的增大能促进黄竹对 K 素的吸收 ,而土壤全 N、全 K 含量的增大不利于黄竹对 K 元素的吸收。

因此 ,通过人为控制土壤供肥条件可调节黄竹对各种元素(N、P、K) 的吸收。

2.3.4 黄竹林叶片养分含量与新竹相对生物量的相关性 以不同配方施肥竹叶养分含量作为自变量 ,新竹的相对生物量作为因变量 ,采用一元二次抛物线方程: $Y = a + bx + cx^2$ 进行回归分析。若方程中的 b 值为正值 , F 值达显著水平的为有效方程。通过 DPS 统计软件分析求得抛物线方程(表 4)。

表 4 竹叶中 N、P、K 元素含量与新竹相对生物量的抛物线回归关系

Tab. 4 Relationship of parabola regression between bamboo yield and leaf N , P , K content

回归方程 Regression equation	相关系数 Related coefficient	p
$Y = -10435.87110 + 1030.3221285N - 22.454577454N^2$	0.9832	0.0061
$Y = -10476.92667 + 20477.012950P - 8860.306322P^2$	0.8848	0.1011
$Y = -47360.27613 + 17745.883681K - 1615.2156844K^2$	0.8610	0.1316

从表 4 可知 ,只有 N 元素含量与新竹相对生物量的抛物线回归方程的 F 值达显著水平 ,因此 ,只有该回归方程可以用来求最高理论产量相应的最适养分含量和临界值养分含量。方程的极值相应的养分含量即为最适值 ,最高理论产量的 90% 相应的养分含量为临界值。由此求得竹叶中 N 元素含量的临界值为 20.46 g/kg ,最适值为 22.94 g/kg。而 P 和 K 的抛物线回归方程未达显著水平 ,方程无效 ,因此不能诊断出 P 和 K 的临界值。

当黄竹竹叶中 N 元素含量低于临界值时 ,增加施肥量 ,新竹相对生物量在一定程度上能够迅速增加 ,施肥的经济效益明显。当竹叶中的 N 元素含量超过临界值时 ,施肥的经济效益增幅变小 ,此时 ,应相应减少施肥量和施肥次数。

3 结 论

(1) 合理施肥对黄竹的生长有较大的促进作用 ,从本试验所使用的 5 种配方肥来看 ,以矿渣肥 2 施用效果最好 ,其他依次为矿渣肥 1、毛竹专用肥 2、毛竹专用肥 1、复合肥。这是因为矿渣肥的施用明显提高了土壤中速效 N 的含量 ,由于矿渣肥的缓释效果 ,使土壤中速效 N 的含量始终保持较高的水平 ,保证了黄竹在生长过程中对 N 的需求 ,同时也减少了 N 素资源的浪费。

(2) 影响竹叶 N 素含量的主要肥力因子是全 N、速效 N、有机质和全 P 含量;影响竹叶 P 素含量的肥力因子是速效 K、全 N、速效 P 和全 K 含量;影响竹叶中 K 含量的肥力因子是全 N、全 P、全 K 和速效 N 含量。

(3) 通过 DPS 系统分析软件进行多重线性逐步回归 ,筛选出 3 个最优模型。

竹叶 N 素含量与土壤肥力的相关模型为:

$$Y_1 = 7.4554 + 1.7374X_1 - 0.0468X_2 + 10.6202X_5 - 0.6656X_6 \tag{6}$$

竹叶 P 素含量与土壤肥力的相关模型为:

$$Y_2 = 0.6866 + 0.0104X_3 + 0.0176X_4 - 0.2213X_5 + 0.0052X_7 \tag{7}$$

竹叶 K 素含量与土壤肥力的相关模型为:

$$Y_3 = 4.2376 + 0.0138X_2 - 1.2170X_5 + 3.4681X_6 - 0.0793X_7 \tag{8}$$

(4) 黄竹竹叶 N 素营养与竹林相对生物量呈显著正相关 ,黄竹竹叶中 N 素营养的临界值为 20.46 g/kg ,最适值为 22.94 g/kg ,可用于黄竹营养诊断。当竹叶中 N 素营养低于临界值时 ,可以通过施肥来增加竹林产量;当竹叶中 N 素营养明显高于临界值并接近最适值时 ,一般可少施或不宜施肥。养分临界值的高低实际上也反映了竹林集约经营和管理水平的高低。

参考文献:

- [1] 邝先松, 谢再成. 黄竹丰产栽培技术[J]. 中国林副特产, 2007, 87(2): 43-44.
- [2] 陈国腾. 黄竹栽培技术[J]. 中国林业, 2001(4): 42.
- [3] 陈金林, 张献义, 叶长青, 等. 毛竹林高产施肥技术探讨[J]. 林业科学研究, 1996, 9(3): 323-327.
- [4] 郭晓敏, 牛德奎, 杜天真, 等. 毛竹林平衡施肥持续效应研究初报[J]. 江西农业大学学报, 2002, 24(6): 786-790.
- [5] 郭晓敏, 陈广生, 牛德奎, 等. 平衡施肥对毛竹笋产量的效应研究[J]. 江西农业大学学报, 2003, 25(1): 48-53.
- [6] 胡冬南, 陈立新, 李发凯, 等. 配方施肥对毛竹笋竹的影响[J]. 江西农业大学学报, 2004, 26(2): 196-199.
- [7] 傅懋毅, 谢锦忠, 方敏瑜, 等. 不同用途毛竹林的施肥 I. 毛竹材用林的施肥[J]. 林业科学研究, 1988, 1(5): 541-546.
- [8] 郭晓敏, 牛德奎, 杜天真, 等. 毛竹笋用两用林施肥研究初报[J]. 经济林研究, 1999, 7(3): 56-61.
- [9] 陈卫文, 罗治建, 陈防, 等. 鄂南毛竹林的养分状况与营养诊断标准[J]. 东北林业大学学报, 2004, 32(2): 41-44.
- [10] 郑郁善, 洪伟, 陈礼光, 等. 竹林生长及竹叶养分和土壤肥力相关研究[J]. 林业科学, 1998, 34(1): 65-68.
- [11] 郭晓敏, 牛德奎, 范方礼, 等. 平衡施肥毛竹林叶片营养与土壤肥力及产量的回归分析[J]. 林业科学, 2007, 43SPP: 53-57.
- [12] 陈志阳, 姚先铭, 田小梅. 毛竹叶片营养与土壤肥力及产量模型的建立[J]. 经济林研究, 2009, 27(3): 53-56.
- [13] 金继运. 土壤养分状况系统研究法及其在我国的初步应用[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1992: 1-14.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [15] 黎曦. 赣南毛竹、硬头黄竹、泥竹等竹林生物量的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2007: 1-41.

(上接第888页)

- [7] 唐艺荣. 城市污泥堆肥用于非洲菊无土栽培的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2002.
- [8] 马达, 高定, 刘洪涛, 等. 城市污泥堆肥用作花卉栽培基质的效果评价[J]. 中国给水排水, 2009, 25(15): 115-116.
- [9] 李晓强. 有机基质菇渣在现代化大型温室蔬菜无土栽培中的应用研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
- [10] 王介元, 王昌全. 土壤肥料学[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1997: 91-93, 429-431.
- [11] 江胜德. 现代园艺栽培介质[M]. 北京: 中国林业出版社, 2006: 8.
- [12] 郭世荣. 栽培基质研究现状及今后的发展趋势[J]. 农村实用工程技术, 2005(10): 16-17.
- [13] 高丽红. 无土栽培固体基质的种类与理化特性[J]. 农村实用工程技术, 2004(2): 28-30.
- [14] 张增强. 污泥堆肥化处理对重金属形态的影响[J]. 农业环境保护, 1996, 15(4): 188-190.
- [15] Smith S R. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge[J]. Environment International, 2009, 35(1): 142-156.
- [16] 李国学, 孟凡乔, 姜华, 等. 添加钝化剂对污泥堆肥处理中重金属(Cu, Zn, Mn)形态影响[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(1): 105-111.
- [17] 生骏, 陆文静, 王洪涛. 粉煤灰对污泥堆肥过程和土地施用后交换态重金属(Cu, Zn, Pb)的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(6): 1367-1371.
- [18] 姜华, 吴波, 李国学. 添加不同钝化剂降低污泥堆肥的植物毒性研究[J]. 环境工程学报, 2008, 2(10): 1413-1415.
- [19] 冯春, 杨光, 杜俊, 等. 污水污泥堆肥重金属总量及形态变化[J]. 环境科学研究, 2008, 21(1): 97-102.
- [20] Wang X J, Chen L, Xia S Q, et al. Changes of Cu, Zn, and Ni chemical speciation in sewage sludge co-composted with sodium sulfide and lime[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(2): 156-160.