

氮、磷、钾对毛白杨无性系苗木生物量的影响

赵 燕¹, 王 辉², 李吉跃^{3*}, 董雯怡⁴

(1. 河南科技大学 林学院, 河南 洛阳 471003; 2. 河南科技大学 化工与制药学院, 河南 洛阳 471003; 3. 华南农业大学 林学院, 广东 广州 510642; 4. 中国科学院 地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘 要:以毛白杨杂种无性系 S86 号嫁接苗为试验材料, 采用(311-A)最优混合设计, 研究了氮、磷、钾不同配比对毛白杨苗木生物量的影响, 建立了回归模型。结果表明:氮是影响毛白杨生物量的主要因素, 其次为磷和钾。在一定范围内, 毛白杨生物量随氮、磷、钾肥投入量的增加而增加, 过多投入时, 生物量将下降。氮肥与磷肥的交互作用显著, 有较好的正效应; 而氮肥与钾肥、磷肥与钾肥的交互作用不明显。经模型寻优, 氮、磷、钾肥的最佳施用量分别为 305.550、178.125 kg·hm⁻² 和 47.700 kg·hm⁻², 毛白杨苗木生物量可达 383.874 g。

关键词:毛白杨; 生物量; 氮; 磷; 钾

中图分类号:S792.117

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2014)03-0129-07

Effects of Nitrogen, Phosphorus and Potassium on the Biomass of *Populus tomentosa* Seedlings

ZHAO Yan¹, WANG Hui², LI Ji-yue^{3*}, DONG Wen-yi⁴

(1. Forestry College, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China;

2. College of Chemistry and Pharmaceutics, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China;

3. College of Forestry, South China Agriculture University, Guangzhou, Guangdong 510642, China;

4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Taking the *Populus tomentosa* clone S86 seedlings as test materials, a field experiment with optimal regression design (311-A) was conducted to study the effects of nitrogen, phosphorus and potassium on the biomass of *P. tomentosa* seedlings and a regression model was established. The results showed that nitrogen was the main factor affecting the biomass of *P. tomentosa* seedlings, followed by phosphorus and potassium. With the increasing input of the three factors, the biomass of the seedlings increased, but when the input was beyond a certain level, the biomass began to decrease. There was a significant positive interactive effect between nitrogen and phosphorus, but a less interactive effect between nitrogen and potassium and between phosphorus and potassium. In our case, the optimal application of nitrogen, phosphorus and potassium was 305.550, 178.125 and 47.700 kg·hm⁻², under which, the biomass of *P. tomentosa* seedlings achieved 383.874 g.

Key words: *Populus tomentosa*; biomass; nitrogen; phosphorus; potassium

毛白杨(*Populus tomentosa*)属于杨柳科(Salicaceae)杨树属(*Populus*)白杨派, 雌雄异株, 结籽率低, 是我国北方特有的优良速生树种, 具有生长快、材质优良、抗逆性强和适应性广等特点^[1-2], 也是我

国近年来发展最快的工业用材林和生态林的重要树种。国内外的实践表明, 以人造板工业及造纸工业为龙头, 以短轮伐期工业原料林为基地的林板一体、林纸一体化经营是实现林业可持续发展的优势

收稿日期: 2013-11-29 修回日期: 2014-01-21

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划课题(2006BAD24B04); 国家自然科学基金(41201224); 河南省教育厅项目(12B180021); 河南科技大学博士科研基金(09001520)。

作者简介: 赵燕, 女, 讲师, 研究方向: 树木栽培生理生态。E-mail: zhaoyanvip2008@163.com

* 通信作者: 李吉跃, 男, 教授, 研究方向: 树木栽培生理生态, E-mail: ljyymy@vip.sina.com

产业之一^[3]。近年我国杨树的工业、生态造林业发展迅猛,对毛白杨生产的数量和质量都提出了新的要求。施肥是促进速生丰产林高效生产的关键技术^[4],适量施肥可促进苗高、地径的生长,增加苗木生物量,提高产量^[5-10];而过量施肥,特别是氮肥的过量施用则会导致土壤酸化,已成为国际农业和生态环境领域所共同面临的重大科学问题^[11],因此,研究毛白杨生物量形成的合理氮、磷、钾肥的施用量具有十分重要的意义。目前,已有施肥对苗木生物量影响的研究报道^[12-15],但运用数学模型对毛白杨生物量的研究还很少。研究氮、磷、钾肥对毛白杨生物量形成的影响,建立氮、磷、钾施用量与毛白杨生物量之间的数学模型,为毛白杨苗木的施肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

河北威县苗圃(36°50′—37°47′N, 113°52′—115°49′E)地处华北平原南部,属冀南低平原区,自然环境优越。境内地势平坦,土壤肥沃,地下水资源充裕,水质优良。气候四季分明,为暖温带大陆性半干旱季风气候,年平均降水量 584 mm,集中在夏末秋初;无霜期 198 d;年平均温度 13℃;全年日照 2 574.8 h。

1.2 供试材料

2008 年 3 月 12 日,将毛白杨杂种无性系 S86 号嫁接苗移栽到河北威县苗圃,株行距为 100 cm×30 cm,试验地土壤为沙壤质潮土,全氮 0.576 g·kg⁻¹,速效磷 9.96 mg·kg⁻¹,速效钾 81.75 mg·kg⁻¹,田间持水量 24.21%,容重 1.27 g·cm⁻³,土壤 pH 8.36,有机质含量 8.36 g·kg⁻¹。2008 年 12 月 10 日对苗木进行截干。2009 年 5 月开始进行施肥试验。

1.3 试验设计

采用 311-A 最优混合设计^[16],设置氮、磷、钾 3 因素,3 重复,3 个区组,每区组 12 个小区,共 36 个小区,小区面积为 6 m×3 m=18 m²,每小区 77 株,小区间设隔离行,随机区组排列。试验设计如表 1。

氮肥为 46% 的尿素(H₂NCONH₂)、磷肥为 14% 的过磷酸钙[CaSO₄·Ca(H₂PO₄)₂]、钾肥为 50% 的硫酸钾(K₂SO₄)。据毛白杨的需肥规律及肥料特性,于 2009 年 5 月初和 7 月初对毛白杨进行施肥,5 月 5 日施肥时氮肥和钾肥分别施入全量的 1/3,磷肥施入全量的 1/2,其余的量 7 月 3 日施入。

施肥采用沟施,在苗木两侧各开一条浅沟,施肥,覆土,及时灌水。

1.4 试验方法

2009 年 10 月 20 日,待苗木高生长停止后,每个试验小区取样 40 株,用烘干法测量其生物量。烘干时,将待测植株分成根、茎、叶 3 部分,置于烘箱 90℃ 杀青 1 h,然后于 65℃~70℃ 烘干至恒重,3 部分相加即为植株的生物量。

1.5 数据处理

采用 Excel 和 SPSS 软件对数据进行常规统计分析和作图;采用 Statistica 软件进行因素间互作三维图的制作;采用 Lingo 软件对回归方程模型探求最优解。

表 1 试验方案

Table 1 Design of experiment

处 理	X ₁ (N)		X ₂ (P ₂ O ₅)		X ₃ (K ₂ O)	
	编码	N 施入量 /(kg·hm ⁻²)	编码	P 施入量 /(kg·hm ⁻²)	编码	K 施入量 /(kg·hm ⁻²)
1	0	262.5	0	150.0	2	75.00
2	0	262.5	0	150.0	-2	0
3	-1.414	75.0	-1.414	45.0	1	56.25
4	1.414	450.0	-1.414	45.0	1	56.25
5	-1.414	75.0	1.414	232.5	1	56.25
6	1.414	450.0	1.414	232.5	1	56.25
7	2	525.0	0	150.0	-1	18.75
8	-2	0	0	150.0	-1	18.75
9	0	262.5	2	300.0	-1	18.75
10	0	262.5	-2	0	-1	18.75
11	0	262.5	0	150.0	0	37.5
对照	-2	0	-2	0	-2	0

2 结果与分析

2.1 毛白杨生物量回归模型的建立

各施肥处理生物量差异极显著($p=0.000$),可以进行回归分析。

以毛白杨无性系 S86 号的生物量(Y)为目标函数,以编码值 X₁(N)、X₂(P₂O₅)、X₃(K₂O)为决策变量,利用 SPSS 统计软件,建立生物量与氮、磷、钾 3 因子的回归方程为:

$$Y=378.732+9.270X_1+8.952X_2+7.126X_3-16.159X_1^2-19.414X_2^2-7.243X_3^2+8.672X_1X_2-3.480X_1X_3-5.069X_2X_3 \quad (1)$$

经方差检验,该回归模型的 $F=37.245>F_{0.01}$,复相关系数 $R=0.967$,说明该回归数学模型的回归关系达到显著水平,在回归区间中心拟合较好,可以用来决策和预报。

为提高数学模型方程的拟合性和可靠性,对各偏回归系数进行了显著性检验,其中 $t_1=3.359$, $t_2=3.243$, $t_3=2.582$, $t_{11}=5.975$, $t_{22}=7.179$, $t_{33}=2.140$, $t_{12}=3.142$, $t_{13}=1.261$, $t_{23}=1.837$, $t_{0.05}(23)=2.069$, $t_{0.01}(23)=2.807$ 。据 t 检验结果, X_1X_3

和 X_2X_3 未达显著水平,说明氮钾、磷钾之间的交互作用对生物量的影响较小,未产生本质作用。

2.2 生物量回归模型的解析

2.2.1 因素主效应 由于试验中各因素水平已经过无量纲线性编码代换,偏回归系数已经标准化,故直接比较其系数绝对值的大小,可以判断各因素对生物量的影响效应,正负号表示各因素对生物量的影响方向^[17-18]。由式(1)可以看出,本试验中氮(X_1)、磷(X_2)、钾(X_3)肥3个因子的一次项回归系数分别为9.270、8.952和7.126,表明在试验设计范围内,各因素对毛白杨苗木生物量都有明显的正效应,其影响次序为:氮肥>磷肥>钾肥。两因素间交互作用的影响为:氮肥与磷肥的交互作用显著;而氮肥与钾肥、磷肥与钾肥的交互作用不明显。

2.2.2 单因素效应分析 为了更直观的找出各因素(氮、磷、钾)对生物量指标的影响效应,用降维法固定3个因素中的2个因素,分析剩余单因素对生物量的影响。

2.2.2.1 氮肥对毛白杨生物量的影响

令 $X_2 = -1.414, X_3 = -1; X_2 = X_3 = 0; X_2 = 1.414, X_3 = 1$,代入方程(1),可得

$$Y = 305.721 + 0.488X_1 - 16.159X_1^2 \quad (2)$$

$$Y = 378.732 + 9.270X_1 - 16.159X_1^2 \quad (3)$$

$$Y = 345.289 + 18.052X_1 - 16.159X_1^2 \quad (4)$$

式(2)、(3)、(4)分别表示施磷量 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,施钾量 $18.75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;施磷量 $150.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,施钾量 $37.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和施磷量 $232.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,施钾量 $56.25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时的氮肥与生物量的定量关系。

将方程(2)、(3)、(4)所表示的曲线绘制于图1,可以看出,不论磷肥和钾肥固定在高值还是低值,氮肥对毛白杨生物量的影响均呈抛物线状,即氮肥过多或过少都不利于生物量的积累,只有氮肥适宜时(施氮量分别为 $264.48 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $300.15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $335.81 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),毛白杨生物量才达到最高(分别为 305.73 g 、 380.06 g 、 350.33 g)。在相同的氮水平上,磷肥和钾肥用量适宜时,生物量较高,磷、钾肥过多或者过少也不利于毛白杨生物量的积累。

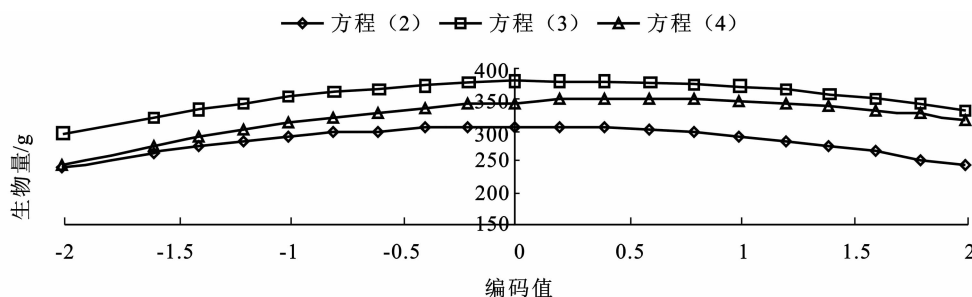


图1 氮肥对生物量的效应曲线

Fig. 1 Response curve of N at different levels on biomass in *P. tomentosa*

2.2.2.2 磷肥对毛白杨生物量的影响

令 $X_1 = -1.414, X_3 = -1; X_1 = X_3 = 0; X_1 = 1.414, X_3 = 1$,代入方程(1),可得

$$Y = 314.026 + 1.759X_2 - 19.414X_2^2 \quad (5)$$

$$Y = 378.732 + 8.952X_2 - 19.414X_2^2 \quad (6)$$

$$Y = 354.494 + 16.145X_2 - 19.414X_2^2 \quad (7)$$

式(5)、(6)、(7)分别表示施氮量 $75.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,施钾量 $18.75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;施氮量 $262.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,施钾量 $37.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和施氮量 $450.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,施钾量 $56.25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时的磷肥与生物量的定量关系。

将方程(5)、(6)、(7)所表示的曲线(图2)可知,不论氮肥和钾肥固定在高值还是低值,磷肥对毛白杨生物量的影响均呈抛物线状,即磷肥过多或过少都不利于生物量的积累,只有磷肥适宜时(施磷量分别为 $153.40 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $167.29 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $181.19 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),毛白杨生物量才达到最高(分

别为 314.07 g 、 379.76 g 、 357.85 g)。在相同的磷水平上,生物量随着氮钾量的增多先增加后减少,说明氮肥和钾肥用量适宜时,生物量较高,氮钾肥过多或者过少不利于毛白杨生物量的积累。

2.2.2.3 钾肥对毛白杨生物量的影响

令 $X_1 = -1.414, X_2 = -1.414; X_1 = X_2 = 0; X_1 = 1.414, X_2 = 1.414$,代入方程(1),可得

$$Y = 299.170 + 19.214X_3 - 7.243X_3^2 \quad (8)$$

$$Y = 378.732 + 7.126X_3 - 7.243X_3^2 \quad (9)$$

$$Y = 350.712 - 4.962X_3 - 7.243X_3^2 \quad (10)$$

式(8)、(9)、(10)分别表示施氮量 $75.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,施磷量 $45.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;施氮量 $262.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,施磷量 $150.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和施氮量 $450.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,施磷量 $232.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时的钾肥与生物量的定量关系。

绘制方程(8)、(9)、(10)的曲线(图3)可以看出,适当增施钾肥有利于生物量的提高,3条曲线

都有最大值(分别为 311.91 g、380.48 g 和 351.56 g),呈抛物线状,说明钾肥过多或过少都不利于生物量的积累,只有钾肥适宜时(施钾量分别为 $62.37 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $46.72 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $31.08 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)毛白杨生物量才达到最高。在同一钾肥水平上,生物

量随着氮磷量的增加先增后减,说明适宜的氮、磷量有助于生物量的积累。在氮、磷量较低时,生物量随钾肥增加变化较快,说明在氮、磷量均较低时,钾肥对毛白杨生物量影响较大。

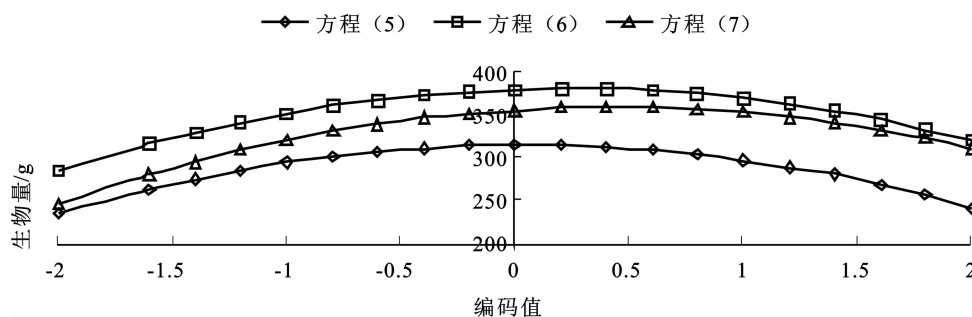


图 2 磷肥对生物量的效应曲线

Fig. 2 Response curve of P at different levels on biomass in *P. tomentosa*

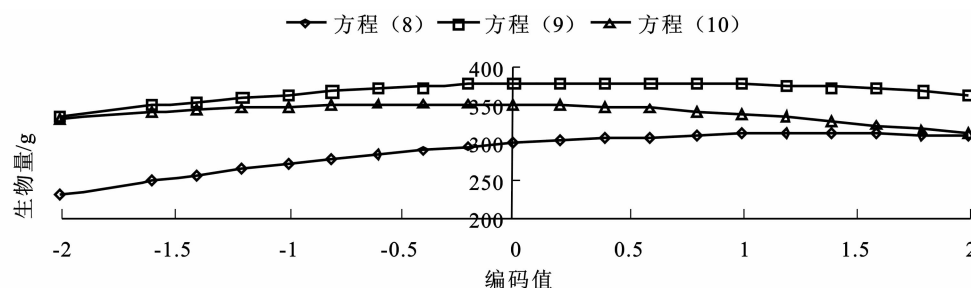


图 3 钾肥对生物量的效应曲线

Fig. 3 Response curve of K at different levels on biomass in *P. tomentosa*

2.2.2.4 边际生物量效应

边际生物量可以反应各因素的最适施用量和单位施用量变化对生物量增减速率的影响。对回归模型方程(1)中的施氮量(X_1)、施磷量(X_2)和施钾量(X_3)求偏导,可得:

$$\begin{aligned} dY/dX_1 = & 9.27 - 32.318X_1 + 8.672X_2 \\ & - 3.48X_3 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} dY/dX_2 = & 8.952 - 38.828X_2 + 8.672X_1 \\ & - 5.069X_3 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} dY/dX_3 = & 7.126 - 14.486X_3 - 3.48X_1 \\ & - 5.069X_2 \end{aligned} \quad (13)$$

若将方程(11)、(12)、(13)的 3 个因素都固定在同一水平,可得到 3 个因素固定在某一水平时的边际生物量效应(图 4)。

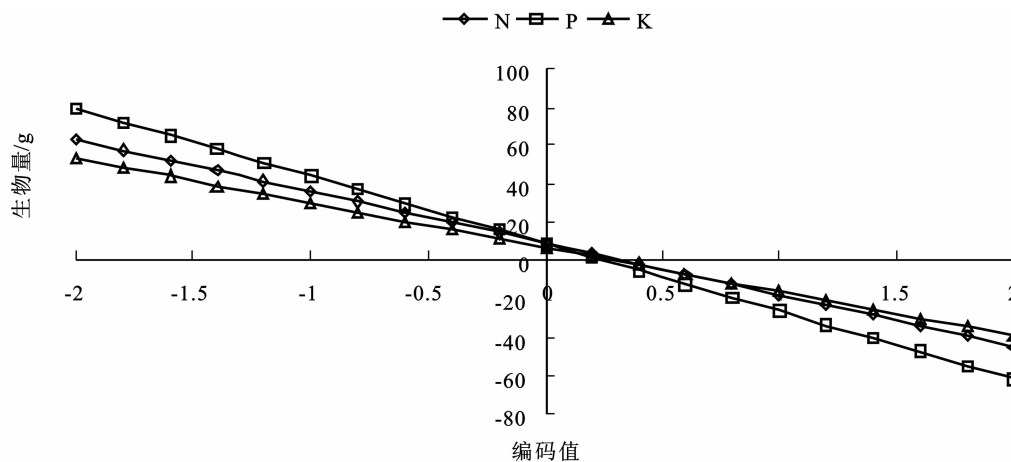


图 4 各因素在不同水平下的边际生物量效应

Fig. 4 Marginal biomass effect of three factors under the different levels

N肥、P肥和K肥所表示的直线向下,说明此3因子对毛白杨生物量的增减效益较为敏感,其中P肥代表的直线斜率较大,N肥其次,因此,P肥对毛白杨生物量的增减效益较N肥和K肥更加敏感。当N肥、P肥和K肥取较低值水平时,生物量增产效益较大,取较高水平时,增产效益较低;当超过最适投入量时,效益出现负值。当N、P、K均为最低水平,即 $X_1 = X_2 = X_3 = -2$ 时,氮肥、磷肥和钾肥在该编码值的增产效应分别为63.52 g、79.40 g和53.20 g。以磷肥增产效应最大,这可能与磷肥能够影响到植株一系列的生理生化反应,如细胞生长、细胞壁的合成、N素和叶绿素的代谢等过程,从而影响生物量的累积有关。当各变量在0水平时,氮肥的增产效应最大(9.27 g),磷肥次之(8.95 g),钾肥最小(7.13 g)。当各变量水平为0.5时,氮、磷、钾肥出现负效应,其值分别为-4.29 g、-8.66 g和-4.39 g。表明供应氮、磷、钾肥后,毛白杨植株体内有机物的积累提高,生物量增加。而随着氮、磷、钾肥供应量的增大,远远超过植株本身养分的需求时,对植株生物量产生负效应,说明合理配施氮、磷、钾肥可提高毛白杨生物量。

2.2.3 双因素效应分析 由于回归模型 t 检验,氮和钾、磷和钾肥对毛白杨生物量无显著影响,因此,仅对氮和磷的交互作用予以分析。将毛白杨生物量回归模型中的 K 因子固定为0,可以得到氮和磷交互对毛白杨生物量的效应方程如下:

$$Y = 378.732 + 9.270X_1 + 8.952X_2 - 16.159X_1^2 - 19.414X_2^2 + 8.672X_1X_2 \quad (14)$$

据式(14)作氮磷互作效应的三维图(图5),三维图呈凸面状,图上各点的高度表示相对应的氮、磷在一定水平组合时的毛白杨生物量;曲线表示氮、磷任一因子固定在一定水平时,生物量随另一个因子投入量的变化趋势。可以看出,氮、磷对毛白杨生物量效应均呈抛物线型,从抛物线开口的角度看,氮、磷对生物量的效应接近。随着氮、磷水平的增加,生物量增加明显,当氮、磷处于较高水平时,生物量达到最大值,说明氮、磷的交互作用对生物量影响较大。

2.3 模型寻优

当试验中各个因素取 $-2 \leq X \leq 2$ 时,应用优化大师Lingo软件,通过计算机寻找模型的最优解,得到在供试条件下,毛白杨无性系S86号生物量效应的各因素编码值的最佳组合方案为: $X_1 = 0.328$, $X_2 = 0.375$, $X_3 = 0.544$,将编码值换算得到氮、磷、钾肥用量最佳组合为: $Z(N) = 305.55 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, Z

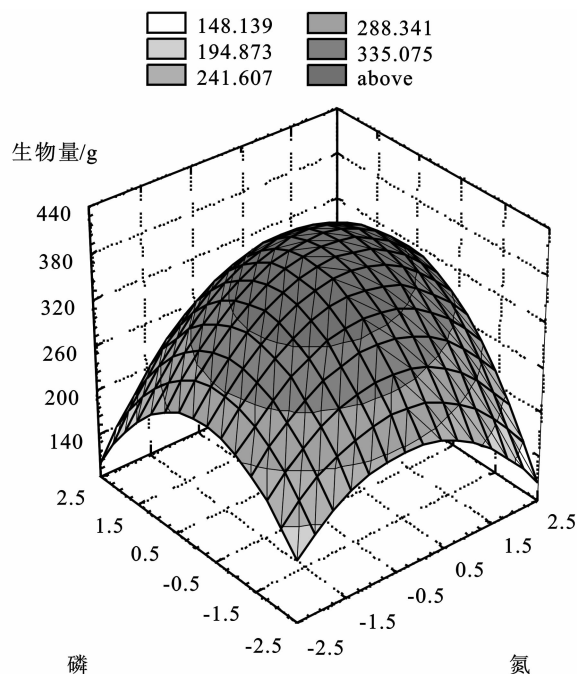


图5 N、P对毛白杨生物量的互作效应三维图

Fig. 5 Three-dimensional diagram of interaction effect of N,P on biomass in *P. tomentosa*

(P_2O_5) = 178.13 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $Z(K_2O) = 47.70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,此时,最大生物量值应为383.87 g。

3 结论与讨论

311-A最优混合设计不仅具有对回归系数理论值估计效果好的优点,其处理数相对较少,在试验研究中应用广泛^[12,19-20]。林木施肥的意义在于发掘土地、气候、良种的生产潜力,维持土壤养分平衡,改进林产品质量,提高林业生产力。氮、磷、钾是植物生长发育最主要的营养元素^[21],也是可以调控的重要技术措施之一。毛白杨生物量与氮、磷、钾的关系均符合二次抛物线,存在一个峰值。峰值以前,生物量随着氮、磷、钾肥用量的增大而提高;峰值以后,生物量随着氮、磷、钾肥用量的增大而下降。因此,氮、磷、钾肥对毛白杨生物量均有最适投入量,过多肥料的投入既不利于苗木的生长,又增加了生产成本,造成肥料资源的浪费,并导致环境污染^[22-26]。本试验结果表明:氮、磷、钾肥对毛白杨苗木生物量都有显著影响,它们对生物量的影响效果依次为氮>磷>钾,与严合章^[12]等的研究结果一致。氮肥和磷肥交互作用对毛白杨苗木生物量的影响显著,毛白杨苗木生物量最大值出现在高氮肥和高磷肥施用量的条件下,氮肥与磷肥的交互作用对生物量有显著正效应;而氮和钾、磷和钾肥对毛白杨生物量无显著影响,这可能由于钾肥施入量较少,未达到与氮肥或磷肥的交互作用有显著影响的水平。在以后的试验中

应适当加大钾肥施入量,进一步探讨钾肥与氮肥、钾肥与磷肥对毛白杨生物量的影响。

毛白杨苗木生物量的最佳施肥方案是:施氮量为 $305.55 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (施尿素 $664.24 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、施磷量为 $178.13 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (施过磷酸钙 $1272.32 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、施钾量为 $47.70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (施硫酸钾 $664.24 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),此时,毛白杨苗木生物量可达到 383.87 g 。此结果为模型寻优,需进一步试验的验证。

在本试验条件下,应用计算机模型求得的数学模型比较真实的反映了各个肥料因素间的内在联系,为毛白杨施肥技术提供了科学依据。由于不同土壤类型之间的基础土壤速效养分含量各不相同,所以,最佳施肥量可能有一定的差异。毛白杨适宜施肥量要做到因土而异,将基础土壤测试结果与肥料回归方程结合起来推荐适宜施肥量会更切合实际。

参考文献:

- [1] ZHANG A P, LIU C F, SUN R C. Fractional isolation and characterization of lignin and hemicelluloses from triploid of *Populus tomentosa* Carr. [J]. Industrial Crops and Products, 2010, 31(2): 357-362.
- [2] ZHOU M, TONG C F, SHI J S. Analysis of codon usage between different poplar species[J]. Journal of Genetics and Genomics, 2007, 34(6): 555-561.
- [3] 程庆荣. 蔗渣和木屑作尾叶桉容器育苗基质的研究[J]. 华南农业大学学报: 自然科学版, 2002, 23(2): 11-14.
CHENG Q R. Study on container medium of *Eucalyptus urophylla* with bagasse and sawdust[J]. Journal of South China Agricultural University: Natural Science Edition, 2002, 23(2): 11-14. (in Chinese)
- [4] 孙时轩, 张振江, 孙小丽, 等. 毛白杨在沙地造林的施肥量及其配比(II) [J]. 北京林业大学学报, 1995, 17(1): 31-36.
SUN S X, ZHANG Z J, SUN X L, et al. Fertilization amounts applied to the artificial young forest of *Populus tomentosa* Carr. on sandy soil and their ratios[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1995, 17(1): 31-36. (in Chinese)
- [5] 黄复兴, 范川, 李晓清, 等. 施肥对盆栽香樟幼苗细根生长的影响[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(5): 103-108.
HUANG F X, FAN C, LI X Q, et al. Effects of fertilization on the fine root growing of *Cinnamomum camphora* seedlings[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(5): 103-108. (in Chinese)
- [6] 刘璇, 王渭玲, 徐福利, 等. 黄土丘陵区梨枣树氮、磷、钾施肥效应与施肥模式[J]. 林业科学, 2013, 49(2): 21-26.
LIU X, WANG W L, XU F L, et al. Effects and models of N, P, K fertilization for *Ziziphus jujuba* cv. lizao trees in Loess Hilly Region[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(2): 21-26. (in Chinese)
- [7] 金国庆, 余启国, 焦月玲, 等. 配比施肥对南方红豆杉幼林生长的影响[J]. 林业科学研究, 2007, 20(2): 251-256.
- [8] 张晓鹏, 赵忠, 张博勇, 等. 氮磷钾对俄罗斯大果沙棘扦插苗生长效应的影响[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(3): 96-99.
ZHANG X P, ZHAO Z, ZHANG B Y, et al. Effect of N, P and K on the growth of nursery seedlings of *Hippophae rhamnoides* from Russia[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(3): 96-99. (in Chinese)
- [9] ALBAUGH T J, ALLEN H L, DOUGHERTY P M, et al. Long term growth responses of loblolly pine to optimal nutrient and water resource availability[J]. Forest Ecology and Management, 2004, 192: 3-19.
- [10] JEYANNY V, RASIP A G AB, RASIDAH K W, et al. Effects of macronutrient deficiencies on the growth and vigour of *Khaya ivorensis* seedlings[J]. Journal of Tropical Forest Science, 2009, 21(2): 73-80.
- [11] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(10): 1008-1010.
- [12] 严合章, 陈录平, 陈翠玲, 等. 氮、磷、钾营养对直杆蓝桉幼苗生物量的效应研究[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2007, 29(4): 74-77.
YAN H Z, CHEN L P, CHEN C L, et al. Study on the effect of nitrogen, phosphorus and potassium on the growth of *Eucalyptus maideni* F. Muel seedlings[J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2007, 29(4): 74-77. (in Chinese)
- [13] 林晓明, 徐程扬, 王奇峰, 等. 氮、磷对 107 杨苗木生物量的影响[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(2): 13-16.
LIN X M, XU C Y, WANG Q F, et al. Effects of nitrogen and phosphorus on biomass accumulation of *Populus euramerlana* cv. "74/76" cuttings[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(2): 13-16. (in Chinese)
- [14] 顾小平, 吴晓丽, 汪阳东. 毛竹材用林高产优化施肥与结构模型的建立[J]. 林业科学, 2004, 40(3): 96-101.
GU X P, WU X L, WANG Y D. The optimal models of high-yields with fertilization and the structure of moso bamboo stands for culm-producing[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(3): 96-101. (in Chinese)
- [15] 李海霞, 李正华, 郭树平, 等. 不同氮磷水平对红松幼苗碳氮积累与分配的影响[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(5): 24-29.
LI H X, LI Z H, GUO S P, et al. Effects of different nitrogen and phosphorus supply levels on C, N accumulation and partitioning in *Pinus koraiensis* seedlings[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(5): 24-29. (in Chinese)
- [16] 白厚义, 肖俊璋. 试验研究及统计分析[M]. 西安: 世界图书出版公司, 1998.
- [17] 薛亮, 周春菊, 雷杨莉, 等. 夏玉米交替灌溉施肥的水氮耦合效应研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 91-94.
XUE L, ZHOU C J, LEI Y L, et al. Effect of water and nitrogen coupling under alternate furrow irrigation and fertilizer placement on summer maize[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 91-94. (in Chinese)
- [18] 梁运江, 依艳丽, 许广波, 等. 水肥耦合效应对保护地辣椒肥料氮、磷经济利用效率的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(6): 1141-1144.
- [19] 王进鑫, 张晓鹏, 高保山, 等. 渭北旱塬矮化富士苹果幼树 N,

- K 营养状况分析[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2004, 32(10): 20-24.
- WANG J X, ZHANG X P, GAO B S, *et al.* N and K nutrient status of dwarfing red fuji apple young tree under different fertilizer and irrigation conditions[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Nat. Sci. Ed., 2004, 32(10): 20-24. (in Chinese)
- [20] 周再知, 梁坤南, 徐大平, 等. 钙与硼、氮配施对酸性土壤上柚木无性系苗期生长的影响[J]. 林业科学, 2010, 46(5): 102-108.
- ZHOU Z Z, LIANG K N, XU D P, *et al.* Growth response of teak clone seedlings to calcium, boron and nitrogen supply in acid soil[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(5): 102-108. (in Chinese)
- [21] 张平平, 苗果园. 生土条件下冬小麦对氮、磷、钾的原始响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(2): 156-161.
- ZHANG P P, MIAO G Y. Triggering response of winter wheat to nitrogen, phosphorus, and potassium nutrition in raw soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(2): 156-161. (in Chinese)
- [22] 蔡泽江, 孙楠, 王伯仁, 等. 长期施肥对红壤 pH、作物产量及氮、磷、钾养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 71-78.
- CAI Z J, SUN N, WANG B R, *et al.* Effects of long-term fertilization on pH of red soil, crop yields and uptakes of nitrogen, phosphorous and potassium[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(1): 71-78. (in Chinese)
- [23] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, *et al.* Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915-924. (in Chinese)
- [24] ZENG S C, SU Z Y, CHEN B G, *et al.* Nitrogen and phosphorus runoff losses from orchard soils in south China as affected by fertilization depths and rates[J]. Pedosphere, 2008, 18(1): 45-53.
- [25] CUI Z L, CHEN X P, LI J L, *et al.* Effect of N fertilization on grain yield of winter wheat and apparent N losses[J]. Pedosphere, 2006, 16(6): 806-812.
- [26] ZHANG W F, DOU Z X, HE P, *et al.* New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(21): 8375-8380.
- (上接第 128 页)
- [7] BURKES E C, WILL R E, BARRON-GAFFORD G A, *et al.* Biomass partitioning and growth efficiency of intensively managed *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* stands of different planting densities[J]. Forest Science, 2003, 49(2): 224-234.
- [8] RUDNICKI M, SILINS U, LIEFFERS V J. Crown cover is correlated with relative density, tree slenderness, and tree height in Lodgepole pine[J]. Forest Science, 2004, 50(3): 356-363.
- [9] YU S F, CHAMBERS J L, TANG Z M, *et al.* Crown characteristics of juvenile loblolly pine 6 years after application of thinning and fertilization[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 180(1): 345-352.
- [10] 章志都, 徐程扬, 蔡宝军, 等. 林分密度对山桃树冠结构的影响研究[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(6): 187-192.
- ZHANG Z D, XU C Y, CAI B J, *et al.* Influence of stock density on crown structure of *Prunus davidiana* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(6): 187-192. (in Chinese)
- [11] 孟宪宇. 测树学[M]. 3 版. 北京: 中国林业出版社, 2006: 49.
- [12] 公宁宁, 马履一, 贾黎明, 等. 不同密度和立地条件对北京山区油松人工林树冠的影响[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(5): 9-12.
- GONG N N, MA L Y, JIA L M, *et al.* Effects of different stand densities and site conditions on crown of *Pinus tabulaeformis* plantations in Beijing mountain area[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(5): 9-12. (in Chinese)
- [13] 吴际友, 龙应忠, 童方平, 等. 湿地松人工林间伐效果初评研究[J]. 林业科学研究, 1995, 8(6): 630-633.
- [14] 毛斌, 徐程扬, 李翠翠, 等. 不同修枝强度对侧柏、油松人工林内景观美景度的影响[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(3): 123-125.
- MAO B, XU C Y, LI C C, *et al.* Effects of pruning intensity on in-forest landscape of *Platycladus orientalis* and *Pinus tabulaeformis* plantations [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(3): 123-125. (in Chinese)
- [15] 马永春. 杨树人工林修枝机理及修枝技术体系的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.
- [16] VAUGHN N, RITCHIE M W. Estimation of crown cover in interior Ponderosa pine stand: effects of thinning and prescribed fire[J]. Western Journal of Applied Forestry, 2005, 20(7): 240-246.
- [17] 土晓宁, 刘广全. 秦岭主要林区锐齿栎林营养积累和分布的特点[J]. 西北林学院学报, 2000, 15(1): 1-8.
- TU X N, LIU G Q. The properties of nutrient accumulation and distribution of sharp tooth oak stands in main forest regions of Qinling Mts. [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2000, 15(1): 1-8. (in Chinese)