浙 江 农 林 大 学 学 报，2015，**32**(1)：92 – 97
Journal of Zhejiang A & F University
doi:10.11833/j.issn.2095-0756.2015.01.013

福建闽楠人工幼林氮磷钾施肥效应与施肥模式

欧建德

（福建省明县溪林业局，福建 明溪 365200）

摘要：采用 3 因素 2 次 *D*-饱和最优设计，在福建明溪进行田间试验，分析了氮、磷、钾及其配比对闽楠 *Phoebe bournei* 幼树生长的影响。结果表明：氮、磷、钾肥对闽楠的树高和冠幅生长作用大小依次为氮肥＞磷肥＞钾肥，对粗(地径)生长作用大小依次为磷肥＞氮肥＞钾肥，且作用效果均为正效应。采用频率分析法对各效应函数进行寻优，结果认为：当目标树高 y_1≥120%试验对照(ck)，目标地径 y_2≥120%试验对照(ck)，目标冠幅 y_3≥110%试验对照(ck)时，在 95%置信区间内，试验地闽楠人工幼林的优化施肥量为氮(N)16.81~21.61 g·株$^{-1}$、磷(P_2O_5) 5.76~9.64 g·株$^{-1}$、钾(K_2O) 3.31~6.44 g·株$^{-1}$，*m*(氮):*m*(磷):*m*(钾)的最佳比例为 3.94:1.57:1.00。表 3 参 15

关键词：森林培育学；闽楠；生长；最优施肥模式；氮磷钾施肥

中图分类号：S792.24　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：2095-0756(2015)01-0092-06

N, P, K formulas for fertilization with young *Phoebe bournei* plantations in Fujian Province

OU Jiande

(Forest Enterprise of Mingxi County, Mingxi 365200, Fujian, China)

Abstract: In order to improve the fertilization effect iveness of young *Phoebe bournei* plantations. A field experiment was conducted in Mingxi County of Fujian Province based on a D-saturated optimal design with three factors: N, P, and K. The growth effects for young *P. bournei* plantations were then examined with a frequency analysis and RCB. Results showed that N, P, and K fertilizer efficiency was positive for growth of tree height and crown width (with N＞P＞K) and for increasing diameter at ground-level (with P＞N＞K). The frequency analysis showed that compared to ck, the expected tree height was ≥ 120%, the expected diameter at ground-level was ≥ 120% and the expected crown width was ≥ 110%. In these experimental plots, optimum fertilization rates (in g·tree^{-1}) for young *P. bournei* plantations were 16.81–21.61 for N, 5.76–9.64 for P_2O_5, and 3.31–6.44 for K_2O with a 95% confidence interval with a frequency analysis method; the best ratio of *m*(N):*m*(P_2O_5):*m*(K_2O) was 3.94:1.57:1.00. Then providing the basis for scientific fertilization of *P. bournei* plantations. [Ch, 3 tab. 15 ref.]

Key words: silviculture; *Phoebe bournei*; growth; optimal fertilization model; N, P, and K application

闽楠 *Phoebe bournei* 是中国特有Ⅱ级珍稀濒危保护植物，为珍贵阔叶树种，具涵养水源、培肥土壤功能，且是经济价值高的上等用材树种[1]。闽楠前期生长缓慢，进行科学施肥，促进幼林生长和提前郁闭是培育的主要技术措施[2]。关于闽楠施肥的研究已有很多[3-6]，如不同肥种 、缓释肥、氮素营养对闽楠幼苗生长的影响，但有关闽楠人工林施肥研究较少。分析氮磷钾肥对闽楠幼林生长的影响，从而优化施肥方案，成为当前亟待解决的科技难题。2 次 *D*-饱和最优设计以其试验处理较少，并能够通过模型分

收稿日期：2014-05-24；修回日期：2014-08-31

项目基金：中央财政林业科技推广示范项目([2012]7 号)

作者简介：欧建德，高级工程师，从事林木育种、资源培育、森林经营与保护等研究。E-mail：smmxojd@163.com

析得到最优的试验结果，因而在氮磷钾施肥效应与施肥模式研究方面被广泛使用[8-12]。为此，在福建省明溪县采用 2 次 *D*-饱和最优设计，进行闽楠人工幼林氮磷钾施肥试验，分析施用氮磷钾肥对闽楠生长影响，进行施肥量与比例寻优，进而为该地区闽楠人工林的科学施肥提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验区位于福建省西北部，武夷山东南侧的明溪县，是闽楠中心分布区之一。该区属中亚热带季风气候区，年平均气温为 15.7~18.6 ℃，年降水量 1 700~2 000 mm，大于 10 ℃的积温 4 525.8~5 472.9 ℃，年均无霜期 261 d,。试验地设在福建省明溪县下山洞的马尾松 *Pinus massoniana* 林下套种闽楠基地。海拔高度为 350 m，地形隐蔽，坡向东，坡度 10°~15°，林内透光度为 50%左右。土壤为砂岩发育的山地红壤，土层厚度 100 cm。土壤容重为 1.32 g·cm^{-3}，土壤全氮为 1.52 g·kg^{-1}，速效磷为 3.9 mg·kg^{-1}，速效钾为 44.17 mg·kg^{-1}，有机质为 3.18 g·kg^{-1}，pH 4.5。

1.2　试验材料

供试树种为 2 年生闽楠幼树。施肥前 2 年生人工林生长良好且一致，株行距为 2.5 m × 2.5 m。肥料种类分别为尿素、过磷酸钙和硫酸钾。尿素的氮为 460 g·kg^{-1}，过磷酸钙的五氧化二磷(P_2O_5)为 120 g·kg^{-1}，硫酸钾的氧化钾(K_2O)为 500 g·kg^{-1}。

1.3　试验设计

试验采用 3 因素 2 次 *D*-饱和最优设计，设 10 个处理，3 次重复，具体设计(表 1)。有 2 年生闽楠幼树 30 株·小区$^{-1}$，试验重复内的土壤水分、肥力条件相对一致。于 2013 年 2 月下旬在幼树树冠下开沟，沟深 15 cm，一次性施入，施肥后覆土。期间的抚育管理措施一致。

表 1　氮磷钾 3 因素 2 次 *D*-饱和最优设计方案

Table 1　Optimal design of N, P and K at three-factor *D*-saturation

处理	氮(N)		磷(P_2O_5)		钾(K_2O)	
	水平编码值	施肥量/(g·株$^{-1}$)	编码值	施肥量/(g·株$^{-1}$)	编码值	施肥量/(g·株$^{-1}$)
1	−1	0	−1	0	−1	0
2	1	23.000 0	−1	0	−1	0
3	−1	0	1	12.000 0	−1	0
4	−1	0	−1	0	1	10.000 0
5	−1	0	0.192 5	7.155 0	0.192 5	5.962 5
6	0.192 5	13.714 0	−1	0	0.192 5	5.962 5
7	0.192 5	13.714 0	0.192 5	7.155 0	−1	0
8	−0.291 2	8.151 0	1	12.000 0	1	10.000 0
9	1	23.000 0	−0.291 2	4.252 8	1	10.000 0
10	1	23.000 0	1	12.000 0	−0.291 2	3.544 0

1.4　数据调查与处理

于 2013 年 12 月分别利用钢卷尺和游标卡尺，逐株测量幼树的冠幅、 树高、地径。数据统计分析采用 Microsoft Excel 2003 计算软件，经方差分析差异显著后，用最小显著差法(LSD)进行多重比较[13-14]。

2　结果与分析

2.1　氮磷钾施肥对闽楠幼林生长的影响

现将氮磷钾施肥对闽楠的生长影响的试验结果，统计分析列表 2。由试验结果(表 2)可知：各施肥处理中闽楠的树高、 地径和冠幅均显著性优于试验对照(ck)，表明施肥措施能够显著性促进闽楠人工幼树生长。施肥处理对闽楠的树高、地径和冠幅的影响程度不尽相同，以处理 10 效果最为理想。单施氮磷钾肥时，对闽楠人工幼树的树高、地径和冠幅的影响依次为单施氮＞单施磷＞单施钾。氮磷钾配合施肥时，对闽楠的树高、冠幅影响程度依次为氮磷配施＞氮钾配施＞磷钾配施；对闽楠的地径影响程度

表 2 闽楠氮磷钾肥效试验结果分析表

Table 2 Results of objective function on N, P and K fertilizer experiment

处理	树高/cm	地径/cm	冠幅/cm
1	98.33 ± 4.62 g	1.39 ± 0.02 f	60.53 ± 1.40 g
2	125.50 ± 3.95 c	1.81 ± 0.06 b	72.57 ± 1.08 c
3	117.00 ± 5.05 d	1.61 ± 0.04 d	69.57 ± 0.76 d
4	109.07 ± 4.83 e	1.52 ± 0.02 e	65.87 ± 0.50 e
5	104.33 ± 3.55 f	1.73 ± 0.02 c	64.63 ± 0.46 f
6	111.30 ± 3.65 e	1.51 ± 0.09 e	66.67 ± 0.32 e
7	117.37 ± 5.15 d	1.88 ± 0.06 b	69.00 ± 0.46 d
8	121.63 ± 4.00 cd	2.00 ± 0.08 a	66.33 ± 0.81 ef
9	136.37 ± 3.60 b	2.04 ± 0.02 a	76.33 ± 1.98 b
10	143.53 ± 4.15 a	2.06 ± 0.04 a	80.10 ± 2.86 a
F 值	79.34**	89.34**	97.61**

说明：** 表示差异极显著, 英文小写字母代表 0.05 水平差异情况，字母相同差异不显著。

依次为氮磷配施＞磷钾配施＞氮钾配施。

2.2 闽楠幼林氮磷钾施肥效应函数模型建立

以氮磷钾的编码值为自变量，以闽楠的树高、地径和冠幅的性状数值为因变量，通过数学模拟得到闽楠的树高(y_1)，地径(y_2)，冠幅(y_3)与氮(x_1)，磷(x_2)，钾(x_3)的编码效应函数为：

$y_1=111.34+14.47x_1+7.22x_2+2.77x_3+6.20x_1^2+3.77x_2^2+3.41x_3^2+0.61x_1x_2+0.06x_1x_3-2.59x_2x_3$；

$y_2=1.795\ 0+0.173\ 4x_1+0.177\ 7x_2+0.068\ 0x_3+0.051\ 6x_1^2-0.140\ 6x_2^2+0.086\ 2x_3^2+0.014\ 1x_1x_2-0.047\ 3x_1x_3+0.053\ 6x_2x_3$；

$y_3=66.46+5.94x_1+2.33x_2+0.10x_3+3.67x_1^2+0.81x_2^2+0.38x_3^2+0.15x_1x_2-0.23x_1x_3-2.34x_2x_3$。

分别经过方差分析 $F_{树高}=27.77$，$F_{地径}=66.09$，$F_{冠幅}=58.58$，均达到极显著性($P<0.01$)以上水平，说明方程拟合良好。方程可以用于闽楠施肥优化过程，具有很高的可靠性。

2.3 因子主效应分析

由于氮磷钾施肥效应函数已采用无量纲编码代换，进行因子主效应分析可直接比较各偏回归系数绝对值的大小。从氮磷钾肥与闽楠树高的效应函数的一次项可以看出，氮磷钾的系数分别为 14.470 0, 7.220 0 和 2.770 0，说明氮肥对闽楠幼林树高的影响最大，磷肥其次，钾肥最小, 作用效果均为正效应; 从氮磷钾肥与闽楠地径的效应函数的一次项可以看出，氮磷钾的系数分别为 0.173 4, 0.177 7 和 0.068 0，说明磷肥对闽楠地径的影响最大，氮肥其次，钾肥最小, 作用效果均为正效应; 从氮磷钾肥与闽楠冠幅的效应函数的一次项可以看出，氮磷钾的系数分别为 5.940 0, 2.330 0 和 0.100 0，说明氮肥对闽楠冠幅的影响最大，磷肥其次，钾肥最小, 作用效果均为正效应。

2.4 单因子效应分析

对方程采用降维法[15]，研究氮、磷和钾对闽楠生长性状影响的单因素效应，将模型中 3 个自变量中的任意 2 个固定在零水平，得到单因素效应方程。

2.4.1 *对闽楠幼林树高生长效应分析* 氮肥对闽楠树高生长的效应方程：$y_1=111.34+14.47x_1+6.20x_1^2$；磷肥对闽楠树高生长的效应方程：$y_1=111.34+7.22x_2+3.77x_2^2$；钾肥对闽楠树高生长的效应方程：$y_1=111.34+2.77x_3+3.41x_3^2$。氮磷钾肥对闽楠幼林树高的生长均呈现出开口向上的抛物线关系。氮肥对闽楠树高生长的效应方程的极值点为 $x_1=-1.166\ 9$，表明在本试验范围内氮肥对树高的影响呈现出随着施肥量的增加而增加；磷肥对闽楠树高生长的效应方程的极值点为 $x_2=-0.957\ 6$，表明当 $-1\leqslant x_2\leqslant -0.957\ 6$ 时，树高生长随着磷施肥量增加而减少，当 $-0.957\ 6\leqslant x_2\leqslant 1$ 时，树高生长随着磷施肥量的增加而增加；钾肥对闽楠树高生长的效应方程的极值点为 $x_3=-0.957\ 6$，表明当 $-1\leqslant x_3\leqslant -0.406\ 2$ 时，树高生长随着钾施肥量增加而减少，当 $-0.406\ 2\leqslant x_3\leqslant 1$ 时，树高生长随着钾施肥量的增加而增加。

2.4.2 *对闽楠幼林地径生长效应分析* 氮肥对闽楠地径生长的效应方程如下：$y_2=1.795\ 0+0.173\ 4x_1+0.051\ 6x_1^2$；磷肥对闽楠地径生长的效应方程：$y_2=1.795\ 0+0.177\ 7x_2-0.140\ 6x_2^2$；钾肥对闽楠地径生长的

效应方程：y_2=1.795 0+0.068 0x_3+0.086 2x_3^2。氮钾肥对闽楠地径的生长均呈现出开口向上的抛物线关系。氮肥对闽楠地径生长的效应方程的极值点为 x_1=−1.680 2，表明在本试验范围内氮肥对树高的影响呈现出随着施肥量的增加而增加；钾肥对闽楠地径生长的效应方程的极值点为 x_3=−0.394 4，表明当−1≤x_3≤−0.394 4 时，地径生长随着钾施肥量增加而减少，当−0.394 4≤x_3≤1 时，地径生长随着钾施肥量的增加而增加。磷肥对闽楠地径生长呈现出开口向下的抛物线关系上。磷肥对闽楠地径生长的效应方程的极值点为 x_2=0.631 9，表明当−1≤x_2≤0.631 9 时，地径生长随着磷施肥量增加而增加，当 0.631 9≤x_2≤1 时，地径生长随着磷施肥量的增加而减少。

2.4.3　*对闽楠幼林冠幅生长效应分析*　氮肥对闽楠冠幅生长的效应方程：y_3=66.46+5.94x_1+3.67x_1^2；磷肥对闽楠冠幅生长的效应方程：y_3=66.46+2.33x_2+0.81x_2^2；钾肥对闽楠冠幅生长的效应方程：y_3=66.46+0.10x_3+0.38 x_3^2。氮磷钾肥对闽楠冠幅的生长均呈现出开口向上的抛物线关系。氮肥对闽楠树高生长的效应方程的极值点为 x_1=−0.809 3，表明当−1≤x_1≤−0.809 3 时，冠幅生长随着氮施肥量增加而减少，当−0.809 3≤x_1≤1 时，冠幅生长随着氮施肥量的增加而增加；磷肥对闽楠冠幅生长的效应方程的极值点为 x_2=−1.438 3，表明在本试验范围内磷肥对冠幅的影响呈现出随着施肥量的增加而增加；钾肥对闽楠冠幅生长的效应方程的极值点为 x_3=−0.131 6，表明当−1≤x_3≤−0.131 6 时，冠幅生长随着钾施肥量增加而减少，当−0.131 6≤x_3≤1 时，冠幅生长随着钾施肥量的增加而增加。总之，氮磷钾对闽楠生长性状影响的单因素效应均呈现出抛物线关系。氮肥对闽楠树高生长、氮肥对闽楠地径生长、磷肥对闽楠冠幅生长，在本试验范围内呈现出一致性影响；其他性状与肥种单因素效应均呈现复杂的变化，以极值点作为分界线，施肥量与生长性状呈现出完成相反的效应结果，说明科学合理确定氮磷钾肥的施肥量对于闽楠生长有着现实意义。

2.5　闽楠人工幼林施肥量与比例寻优

2.5.1　*约束性指标的确定*　选定树高、地径和冠幅等 3 个性状作为闽楠人工幼林培育目标的评价指标。为保证肥料配方的有效性，对不同性状确定的合理的约束性指标十分必要。本研究对闽楠树高与地径的约束性指标确定为 120%×试验对照，冠幅的约束性指标确定为 110%×试验对照。经计算，树高、地径和冠幅的约束性指标分别为 118，1.67 和 66.59 cm。要求施肥组合必须同时满足其树高、地径和冠幅的约束性指标要求。

2.5.2　*人工幼林施肥量与比例寻优*　采用频率分析法[15]进行施肥量与比例寻优，将码值在试验设计范围内划分出(−1，−0.291 2，0.192 5，1)4 个水平，构成 4^3=64 个施肥组合，依据施肥效应函数，进行施肥组合相应性状计算，结果中有 24 个施肥组合能同时满足树高、地径与冠幅的约束性指标条件。对入选的 24 施肥组合进行频数分析，具体分析情况见表 3。由表 3 可知：闽楠人工幼林培育的优化施肥量为氮(N)16.81~21.61 g·株$^{-1}$、磷(P_2O_5)5.76~9.64 g·株$^{-1}$、钾(K_2O)3.31~6.44 g·株$^{-1}$，合理的配方为 m(氮 N)：m(磷P_2O_5)：m(钾K_2O)=3.94∶1.57∶1.00。

表 3　闽楠人工幼林的氮磷钾优化施肥方案

Table 3　N, P, K, the optimum fertilization scheme for *Phoebe bournei* young plantations

水平编码值	N(x_1)		P_2O_5(x_2)		K_2O(x_3)	
	次数	频率/%	次数	频率/%	次数	频率/%
−1	0	0	4	16.67	6	25
−0.291 2	3	12.50	4	16.67	6	25
0.192 5	5	20.83	5	20.83	6	25
1	16	66.67	11	45.83	6	25
平均值	0.670 371		0.283 238		−0.024 680	
标准差	0.495 815		0.768 938		0.743 567	
标准误	0.101 208		0.156 959		0.151 780	
95%置信区间	0.461 5~0.879 3		0.040 7~0.607 2		−0.338 0~0.288 6	
最佳施肥量/(g·株$^{-1}$)	16.81~21.61		5.76~9.64		3.31~6.44	

3 讨论与结论

在闽楠施肥方面，本研究首次应用 3 因素 2 次 *D*-饱和最优设计，并通过模型分析，进行闽楠人工幼林氮磷钾施肥效应与施肥模式研究，实现了闽楠幼林施肥优化，效果理想。本研究的施肥效应数学模型，以及由此优化的施肥配方及施肥量可以在与本研究试验相似的条件下应用。但由于闽楠的生长还受到如土壤、品种、气候、密度和光环境以及管理措施等条件的影响，在实际应用中，应依据实际情况和培育目标加以调整，以达到优质高效的目的。

本研究结论认为，在合理的施肥量前提下，氮、磷和钾肥对闽楠的生长均有显著性影响，且作用效果均为正效应，这与前人研究结论一致[3-7]。在促进高生长(树高)和冠幅生长的效果主次顺序依次均为为氮肥＞磷肥＞钾肥。本研究结论认为，在促进闽楠粗(地径)生长的效果主次顺序依次为磷肥＞氮肥＞钾肥，且作用效果均为正效应。这与董立军等[4]的研究结论一致。

闽楠人工幼林的优化肥料配方为 m(氮 N)：m(磷P_2O_5)：m(钾K_2O)= 3.94:1.57:1.00。在本研究试验条件下树高和地径分别大于 118 cm 和 1.67 cm，且冠幅大于 66.59 cm 时，优化施肥量为氮(N)16.81~21.61 g·株$^{-1}$、磷(P_2O_5)5.76~9.64 g·株$^{-1}$、钾(K_2O)3.31~6.44 g·株$^{-1}$。

4 参考文献

[1] 彭龙福. 35 年生楠木人工林生物量及生产力的研究[J]. 福建林学院学报，2003，**23**(2)：128 – 131.
PENG Longfu. Biomass and productivity in a 35 year old *Phoebe bournei* Yang plantation [J]. *J Fujian Coll For*, 2003, **23**(2): 128 – 131.

[2] 陈伟，薛立. 人工林施肥研究进展综述[J]. 广东林业科技，2004，**20**(1)：61 – 66.
CHEN Wei, XUE Li. Summary of research on tree fertilization [J]. *J Guangdong For Sci Technol*, 2004, **20**(1): 61 – 66.

[3] 张群英. 密度和施肥对楠木播种苗生长的影响[J]. 福建林业科技，2011，**38**(2)：81 – 83.
ZHANG Qunying. Effects of density and fertilization on *Phoebe bournei* seedling growth [J]. *J Fujian For Sci Technol*, 2011, **38**(2): 81 – 83.

[4] 董立军，朱晓婷，林夏珍，等. 施肥对 3 种樟科植物容器苗生长的影响[J]. 北方园艺，2011(13): 73 – 77.
DONG Lijun, ZHU Xiaoting, LIN Xiazhen, *et al*. Effects of fertilization on the growth of three Lauraceae seedlings in containers [J]. *Northern Hortic*, 2011(13): 73 – 77.

[5] 王艺，王秀花，吴小林，等. 缓释肥加载对浙江楠和闽楠容器苗生长和养分库构建的影响[J]. 林业科学，2013，**49**(12)：57 – 63.
WANG Yi, WANG Xiuhua, WU Xiaolin, *et al*. Effects of slow-release fertilizer loading on growth and construction of nutrients reserves of *Phoebe chekiangensis* and *Phoebe bournei* container seedlings [J]. *Sci Silv Sin*, 2013, **49**(12): 57 – 63.

[6] 周成敏，张东北，吴小林，等. 不同基质和缓释肥对 3 种珍贵树种网袋容器育苗苗木生长的影响[J]. 湖南农业科学，2013(5)：105 – 107.
ZHOU Chengmin, ZHANG Dongbei, WU Xiaolin, *et al*. Effects of different substrates and slow-release fertilizers on growth of three precious species of tree seedlings raised in plastic mesh-bag [J]. *Hunan Agric Sci*, 2013(5): 105 – 107.

[7] 王东光，尹光天，邹文涛，等. 氮素营养对闽楠幼苗生长及光合特性的影响[J]. 林业科学研究，2013，**26**(1)：70 – 75.
WANG Dongguang, YIN Guangtian, ZOU Wentao, *et al*. Effects of nitrogen loading on growth and photosynthetic characteristics of *Phoebe bournei* seedlings [J]. *For Res*, 2013, **26**(1): 70 – 75.

[8] 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 Xuan, WANG Weiling, XU Fuli, *et al*. Effects and models of N, P, K fertilization for *Ziziphus jujuba* 'Lizao' trees in loess hilly region [J]. *Sci Silv Sin*, 2013, **49**(2): 21 – 26.

[9] 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 Xiaoming, XU Chengyang, WANG Qifeng, *et al*. Effects of nitrogen and phosphorus on biomass accumulation of *Populus* × *euramericana* '74/76' cuttings [J]. *J Northeast For Univ*, 2011, **39**(2): 13 – 16.

[10] 王渭玲，王振，徐福利，等. 氮磷钾对膜荚黄芪生长发育及有效成分的影响[J]. 中国中药杂志，2008，**33**(15)：1802 – 1806.

WANG Weiling, WANG Zhen, XU Fuli, *et al*. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium application on growth and active ingredient of *Astragalus membranaceus* [J]. *China J Chin Mat Medi*, 2008, **33**(15): 1802 – 1806.

[11] 赵锴，李瑾，徐宁，等. 氮磷钾配施对洋葱产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2008，**14**(3)：558 – 563.

ZHAO Kai, LI Jin, XU Ning, *et al*. The effects of combined application of N, P and K on the yield and quality of onion [J]. *Plant Nutr Feft Sci*, 2008, **14**(3): 558 – 563.

[12] 王占红，王瑾，朱伍凤，等. 杨凌地区黄精氮磷钾优化施肥模式研究[J]. 干旱地区农业研究，2012，**30**(3)：143 – 148.

WANG Zhanhong, WANG Jin, ZHU Wufeng, *et al*. Study on the optimization models of nitrogen, phosphorus and potassium application for *Polygonatum sibiricum* Red. production in Yangling [J]. *Agric Res Arid Area*, 2012, **30**(3): 143 – 148.

[13] 高洪泽. 运用 Excel 建立二次饱和 *D*-最优设计回归模型[J]. 现代农业科技，2010(22)：20 – 21.

GAO Hongze. Establishing second saturating *D*-optimal design regression model by Excel [J]. *Xiandai Nongye Keji*, 2010(22): 20 – 21.

[14] 龚江，石培春，李春燕. 巧用 Excel 解决多元非线性回归分析[J]. 农业网络信息，2011(1)：46 – 48.

GONG Jiang, SHI Peichun, LI Chunyan. Application of Excel software in multi-nonlinear regress analysis [J]. *Agric Network Inf*, 2011(1): 46 – 48.

[15] 徐中儒. 回归分析与试验设计[M]. 北京：中国农业出版社，1997.