

糜子氮、磷、钾肥的效应及优化研究

张美俊¹, 乔治军^{2*}, 杨武德¹, 陈凌², 冯美臣¹

(1 山西农业大学, 山西太谷 030801; 2 山西省农业科学院农作物品种资源研究所, 山西太原 030031)

摘要: 为揭示糜子氮、磷、钾肥效应, 并提出最优推荐施肥量组合, 本试验采用“3414”不完全正交回归设计, 对糜子氮、磷、钾肥合理配比施肥效应进行研究, 同时对糜子产量进行肥效模型拟合, 得出最优经济效益氮、磷、钾推荐施肥量。结果表明, 施用氮、磷、钾肥, 糜子增产效果显著, 最高增产率可达 52.31%, 缺氮和高氮处理增产率最低, 说明适宜的氮肥施用量是影响糜子产量的关键因子。氮、磷、钾肥间存在明显的交互作用, 配合施用能提高肥效, 三因素对糜子产量的影响大小顺序为氮 > 磷 > 钾, 任一因素过量施用均会导致产量显著降低。根据一元二次肥效模型得出糜子氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)的最优推荐施肥量分别为 121.61、78.09、24.23 kg/hm², 适宜的氮、磷、钾施肥比例为 1:0.64:0.20。

关键词: “3414”肥料试验; 肥料效应; 施肥模型; 最优施肥量

中图分类号: S516.062

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2013)02-0347-07

Effect of N, P and K fertilizer application and optimum rate for yield of millet

ZHANG Mei-jun¹, QIAO Zhi-jun^{2*}, YANG Wu-de¹, CHEN Ling², Feng Mei-chen¹

(1 College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China;

2 Institute of Crop Germplasm Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan, Shanxi 030031, China)

Abstract: The “3414” fertilizer experiment for high fertilizer efficiency was designed to investigate N, P and K fertilizer effects on millet yield, and to simulate the optimum fertilizer recommendation rates by the established models for scientific fertilization. The results show that the application of fertilizer significantly increases the yield of millet, with a highest yield increment rate of 52.31% and with a lowest one in the case of no and excessive N which indicates a suitable application rate of N fertilizer is an important factor to influence millet yield. The combined applications of N, P and K have interactions with each other and promote millet yield with the order of N > P > K respectively. Any excessive application of the three factors could result in reducing the yield significantly. Through establishing the fertilizer efficiency models based on the yield, the recommended optimum fertilizer amounts of N, P₂O₅ and K₂O are 121.61, 78.09, 24.23 kg/ha respectively. The suitable ratio of N:P₂O₅:K₂O is 1:0.64:0.20.

Key words: “3414” fertilizer experiment; fertilizer response function; fertilization mode; optimum fertilizer rate

施肥是与作物产量和品质、成本、土壤培肥、面源污染等问题密切相关的复合生态系统物质循环调控的重要措施^[1]。化肥在中国粮食增产、保障粮食安全方面发挥着重要的作用。大量研究结果表明, 化肥在粮食增产中的贡献率高达 40% ~

50%^[2]。但是化肥不合理施用不仅会限制作物产量的提高, 而且增加了肥料投入成本, 使肥料资源大量浪费, 施肥效果下降, 影响经济效益, 也会造成环境污染^[3-6]。因此, 确定合理肥料用量和施肥比例对提高作物产量、增加施肥效益、减少面源污染具

收稿日期: 2012-08-17

接受日期: 2012-10-17

基金项目: 国家现代农业产业技术体系糜子栽培岗位项目(CARS-07-12.5-A12)资助。

作者简介: 张美俊(1970—), 女, 山西河曲人, 博士, 副教授, 主要从事作物生态与旱作农业研究。

Tel: 0354-6286398, E-mail: meijunz@126.com。 * 通信作者 Tel: 0351-7967015, E-mail: nkyzps@yahoo.com.cn

有重要作用。“3414”施肥试验设计方案被认为是目前国内应用较为广泛的肥料效应田间试验方案^[7],已有学者通过“3414”试验建立肥料效应函数,确定施肥指标、推荐施肥量^[8-14]。糜子(*Panicum miliaceum* L.)是北方冷凉地区的主要抗逆渡荒作物,其生育期短,抗逆性强,营养价值较高,在山西省,尤其是晋中和晋北黄土丘陵区,具有明显的地区优势和生产优势,是当地主要栽培的小杂粮作物之一,也是新开垦荒地上种植面积较大的先锋作物。糜子作为一种耐胁迫性极强的特殊作物已被很多学者所关注,对其的研究范围多集中在种质资源利用^[15-16]、营养价值分析^[17-18]和抗旱基因^[19]等方面,但关于糜子推荐施肥的系统研究报道较少,因此对糜子科学推荐施肥指标进行系统的研究很有必要。本试验采用“3414”肥料效应田间设计方案,研究糜子产区施用氮、磷、钾肥的效应和探寻最优经济效益施肥量,以期逐步建立适合该区土壤和糜子特性的施肥模型,为糜子生产的科学施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

田间试验在山西农业大学试验农场田进行。供试土壤为黄土母质上发育而成的石灰性褐土,其

0—20 cm 耕层土壤有机质含量 15.68 g/kg、全氮 0.82 g/kg、速效磷 6.9 mg/kg、速效钾 112 mg/kg。其中土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法,全氮含量采用开氏定氮法,速效磷含量采用 NaHCO_3 浸提—钼锑抗比色法,速效钾含量采用 NH_4OAc 浸提—火焰光度法测定^[20]。

供试糜子品种为晋黍 7 号。氮肥用尿素(含纯 N 46.0%),磷肥用过磷酸钙(含 P_2O_5 12.0%),钾肥用氯化钾(含 K_2O 60.0%)。

1.2 试验设计

采用“3414”施肥试验设计方案,氮、磷、钾 3 个因素,4 个肥料水平为:0 水平指不施肥,2 水平为按照本地区近年来开展的肥效试验和施肥调查数据进行统计分析,总结出本地区的最佳施肥量,1 水平为 2 水平 $\times 0.5$ 倍,3 水平为 2 水平 $\times 1.5$ 倍(该水平为过量施肥水平),共 14 个处理。2 水平施肥量为施 N 150 kg/hm², P_2O_5 90 kg/hm², K_2O 30 kg/hm²。各处理施肥水平和施肥量见表 1。氮肥的 70% 和全部磷、钾肥作基肥一次性施入,氮肥的 30% 作拔节期追肥。试验小区面积为 15 m²,重复 3 次,田间随机排列,小区间筑田埂,四周设保护行。其他栽培管理措施按常规进行。收获时,全小区收获,各小区单收、单晒核产。

表 1 “3414”试验方案和施肥量(kg/hm²)
Table 1 Experiment design and fertilizer amounts

编号 No.	处理 Treatment	N	P_2O_5	K_2O	编号 No.	处理 Treatment	N	P_2O_5	K_2O
1	$\text{N}_0\text{P}_0\text{K}_0$	0	0	0	8	$\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_0$	150	90	0
2	$\text{N}_0\text{P}_2\text{K}_2$	0	90	30	9	$\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_1$	150	90	15
3	$\text{N}_1\text{P}_2\text{K}_2$	75	90	30	10	$\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_3$	150	90	45
4	$\text{N}_2\text{P}_0\text{K}_2$	150	0	30	11	$\text{N}_3\text{P}_2\text{K}_2$	225	90	30
5	$\text{N}_2\text{P}_1\text{K}_2$	150	45	30	12	$\text{N}_1\text{P}_1\text{K}_2$	75	45	30
6	$\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_2$	150	90	30	13	$\text{N}_1\text{P}_2\text{K}_1$	75	90	15
7	$\text{N}_2\text{P}_3\text{K}_2$	150	135	30	14	$\text{N}_2\text{P}_1\text{K}_1$	150	45	15

1.3 推荐施肥量计算与统计分析

计算推荐施肥量时,设定糜子的目标产量为 Y,各肥料因素用量为自变量 X,分别采用三元二次和一元二次肥料效应函数进行拟合,综合考虑各肥料效应模型的典型性、F 值检验、决定系数选择最适模型,根据肥料效应模型计算氮、磷、钾肥最优经

济效益时的施用量,肥料价格为 N 4 Yuan/kg, P_2O_5 4.8 Yuan/kg, K_2O 5.2 Yuan/kg,糜子价格为 3.4 Yuan/kg,最终确定糜子的推荐施肥量。

显著性比较、所有方程的拟合、最优施肥量的计算以及图表制作均采用 DPS 和 Excel 软件。

2 结果与分析

2.1 氮、磷、钾肥用量对糜子产量的影响

表2 试验结果表明,施用氮、磷、钾肥后各处理与不施肥处理($N_0P_0K_0$)的产量均达到显著差异水平,说明施肥的增产效果显著,其中以 $N_2P_2K_2$ 处理产量最高,比不施肥处理增产 1660.55 kg/hm²,增产率达 52.31%。高氮处理($N_3P_2K_2$)和缺氮处理($N_0P_2K_2$)与不施肥处理产量差异虽达到显著水平,但增产量和增产率与其他处理相比为最低,如

$N_3P_2K_2$ 处理的增产率为 20.58%, $N_0P_2K_2$ 的增产率仅为 7.97%,表明氮肥施用与否及施用量多少是影响糜子产量的关键因子。

由表2 结果还可以看出,缺氮($N_0P_2K_2$)、缺磷($N_2P_0K_2$)和缺钾($N_2P_2K_0$)的 3 个处理平均产量为 3951.2 kg/hm²,与不施肥处理相比平均增产 776.48 kg/hm²,而其他 10 个氮、磷、钾全施的处理平均产量为 4284.44 kg/hm²,与不施肥处理相比平均增产 1109.72 kg/hm²,说明氮、磷、钾肥的平衡施用对糜子产量有明显影响。

表 2 氮、磷、钾肥配施对糜子产量的影响

Table 2 Effects of combined application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on yield of millet

试验编号 No.	处理 Treatment	产量 Yield (kg/hm ²)	产量排序 Yield order	增产量 Increased yield (kg/hm ²)	增产率 Increased rate (%)
1	$N_0P_0K_0$	3174.72 ± 46.67 i	14		
2	$N_0P_2K_2$	3427.87 ± 50.65 h	13	253.15	7.97
3	$N_1P_2K_2$	4119.35 ± 62.11 def	8	944.63	29.75
4	$N_2P_0K_2$	3927.00 ± 73.33 fg	11	752.28	23.70
5	$N_2P_1K_2$	4318.33 ± 24.28 cd	6	1143.61	36.02
6	$N_2P_2K_2$	4835.27 ± 13.86 a	1	1660.55	52.31
7	$N_2P_3K_2$	4320.67 ± 21.69 cd	5	1145.95	36.10
8	$N_2P_2K_0$	4498.73 ± 69.42 bc	4	1324.01	41.70
9	$N_2P_2K_1$	4594.28 ± 53.81 b	2	1419.56	44.71
10	$N_2P_2K_3$	4573.56 ± 60.37 b	3	1398.84	44.06
11	$N_3P_2K_2$	3827.94 ± 60.18 g	12	653.22	20.58
12	$N_1P_1K_2$	3849.27 ± 65.24 g	10	674.55	21.25
13	$N_1P_2K_1$	4100.28 ± 53.65 ef	9	925.56	29.15
14	$N_2P_1K_1$	4305.48 ± 49.12 cde	7	1130.76	35.62

注(Note): 同列数值后不同小写字母表示 $P < 0.05$ 水平差异显著 Values followed by different small letters mean significant difference at the 0.05 level.

氮、磷、钾肥不同用量配施其产量分别与缺氮处理($N_0P_2K_2$)、缺磷处理($N_2P_0K_2$)、缺钾处理($N_2P_2K_0$)进行比较,分别得出氮、磷、钾肥在糜子上的增产效应(表3)。

表3 结果显示,当固定任意两种肥料的施用量,糜子增产量和增产率均随施氮量、施磷量和施钾量的增加呈先增加后降低的趋势,如施用磷肥 45 kg/hm²(处理 $N_2P_1K_2$)时,比不施磷肥(处理 $N_2P_0K_2$)增产量达 391.33 kg/hm²,施用 90 kg/hm²

(处理 $N_2P_2K_2$)增产最高,增产量可达 908.27 kg/hm²,而施用 135 kg/hm²(处理 $N_2P_3K_2$)时,产量反而开始显著降低,增产量为 393.67 kg/hm²,表明过量施用氮、磷、钾肥反而会降低糜子产量。说明氮、磷、钾肥在一定范围内适量配合施用可显著提高糜子产量,但应控制最高用量,否则会出现报酬递减,导致减产。

表3 结果还表明,相比缺素处理,以糜子施氮的增产效果最明显,施用氮肥平均增产率最高,可达

表 3 糜子氮、磷、钾肥的产量效应

Table 3 Effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer application on yield of millet

因素 Factor	处理 Treatment	施肥量 Fertilizer rate (kg/hm ²)	产量 Yield (kg/hm ²)	增产量 Increased yield (kg/hm ²)	增产率 Increased rate (%)
N	N ₀ P ₂ K ₂	0	3427.87 ± 50.65 h		
	N ₁ P ₂ K ₂	75	4119.35 ± 62.11 def	691.48	20.17
	N ₂ P ₂ K ₂	150	4835.27 ± 13.86 a	1407.40	41.06
	N ₃ P ₂ K ₂	225	3827.94 ± 60.18 g	400.07	11.67
P	N ₂ P ₀ K ₂	0	3927.00 ± 73.33 fg		
	N ₂ P ₁ K ₂	45	4318.33 ± 24.28 cd	391.33	9.97
	N ₂ P ₂ K ₂	90	4835.27 ± 13.86 a	908.27	23.13
	N ₂ P ₃ K ₂	135	4320.67 ± 21.69 cd	393.67	10.02
K	N ₂ P ₂ K ₀	0	4498.73 ± 69.42 bc		
	N ₂ P ₂ K ₁	15	4594.28 ± 53.81 b	95.55	2.12
	N ₂ P ₂ K ₂	30	4835.27 ± 13.86 a	336.54	7.48
	N ₂ P ₂ K ₃	45	4573.56 ± 60.37 b	74.83	1.66

注 (Note): 不同小写字母表示 $P < 0.05$ 水平差异显著 Different small letters mean significant difference at the 0.05 level.

24.30%, 磷肥次之, 为 14.37%, 钾肥最低, 仅为 3.75%, 这一结果显示氮、磷、钾肥施用对糜子产量影响的大小顺序为氮 > 磷 > 钾。

2.2 氮、磷、钾肥的交互作用分析

根据试验结果, 对氮磷、氮钾、磷钾两因素间的交互作用进行了分析。结果如图 1 所示。由图 1 中氮肥与磷、钾肥间的关系可以看出, 当施用一定量钾肥 (30 kg/hm²) 时, 氮肥用量从 75 kg/hm² 增加到 150 kg/hm², 在低磷和中磷水平下, 糜子增产量分别为 469.06 kg/hm² 和 715.92 kg/hm², 增长率为 12.19% 和 17.38%, 表明磷肥用量的提高有利于氮肥肥效的发挥。当磷肥用量相同时 (90 kg/hm²), 随氮肥用量的增加, 在低钾和中钾水平下, 糜子增产量分别为 494.00 kg/hm² 和 715.92 kg/hm², 增产率分别为 12.05% 和 17.38%, 说明在较高的钾肥水平下施用氮肥效果更佳。

由磷肥与氮、钾肥的关系分析可知, 当施用相同量的钾肥 (30 kg/hm²) 时, 提高氮肥用量有利于磷肥肥效的发挥, 如磷肥用量从 45 kg/hm² 增加到 90 kg/hm², 在低、中氮水平下, 糜子增产量分别为 270.08 kg/hm² 和 516.94 kg/hm², 增长率为 7.02% 和 11.97%。当施用一定量氮肥 (150 kg/hm²) 时, 随磷肥用量的增加, 低、中钾水平下的糜子增产量

分别为 288.80 kg/hm² 和 516.94 kg/hm², 增长率为 6.71% 和 11.97%, 表明增加钾肥用量对磷肥肥效的发挥也有促进作用。

钾肥与氮、磷肥间的相互关系表明, 当施用一定量磷肥 (90 kg/hm²) 时, 钾肥用量从 15 kg/hm² 增加到 30 kg/hm², 在低、中氮水平下, 糜子增产量分别为 19.07 kg/hm² 和 240.99 kg/hm², 增长率为 0.47% 和 5.25%, 显示氮肥用量的提高有利于钾肥肥效的发挥。当氮肥用量相同时 (150 kg/hm²), 随钾肥用量增加, 在低、中磷水平下, 糜子增产量分别为 12.85 kg/hm² 和 240.99 kg/hm², 增长率分别为 0.30% 和 12.50%, 说明低磷水平不利于钾肥的发挥, 提高磷肥用量对钾肥的施用效果可起到促进作用。

2.3 肥料效应函数拟合及施肥量分析

2.3.1 三元二次肥料效应分析 选择三元二次肥料效应模型进行拟合, 所采用的方程为:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_1^2 + b_3x_2 + b_4x_2^2 + b_5x_3 + b_6x_3^2 + b_7x_1x_2 + b_8x_1x_3 + b_9x_2x_3 \quad (1)$$

式中: y 为籽粒产量; x_1 、 x_2 和 x_3 分别为 N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量。上述方程拟合成功的条件是二次项前系数为负值, 一次项前系数为正值, 即为典型施肥模型, 且 F 值检验显著^[10]。如拟合成功, 根据边际

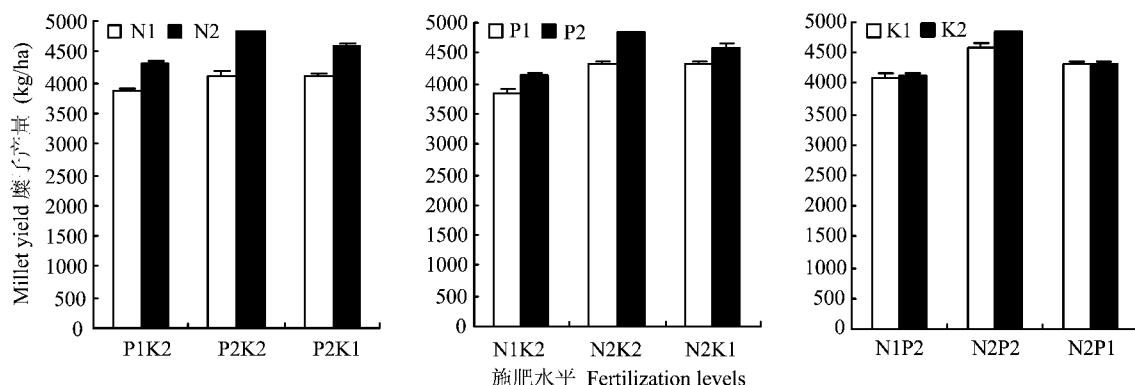


图1 氮、磷、钾肥交互作用分析

Fig.1 Analysis of the interactions among the nitrogen, phosphorus and potassium fertilization

收益等于边际成本,即 $dy \cdot py = dx \cdot px$ 的原则计算推荐最优经济效益的氮、磷、钾肥施用量,分别以 x_1 、 x_2 和 x_3 为变量,对方程两边求导,得到方程组:

$$b_1 + 2b_2x_1 + b_7x_2 + b_8x_3 = P_{x_1}/P_y \quad (2)$$

$$b_3 + 2b_4x_2 + b_7x_1 + b_9x_3 = P_{x_2}/P_y \quad (3)$$

$$b_5 + 2b_6x_3 + b_8x_1 + b_9x_2 = P_{x_3}/P_y \quad (4)$$

(2)~(4)式中: P_{x_1} 、 P_{x_2} 、 P_{x_3} 和 P_y 分别为 N、 P_2O_5 、 K_2O 和糜子价格。把三元二次方程系数 b_i 值、肥料和粮食价格代入上述方程组,解方程组即可得到最优经济效益的氮、磷、钾肥施用量。

对本试验结果数据进行回归分析,建立三元二次施肥模型,得到氮、磷、钾肥料效应方程为:

$$y = 3155.172 + 12.355x_1 - 0.069x_1^2 + 0.505x_2 + 1.336x_2^2 + 11.661x_3 - 0.297x_3^2 + 2.533x_1x_2 + 9.159x_1x_3 - 3.791x_2x_3$$

对回归方程进行方差分析和 F 检验, $F = 7.2992$, $P_{0.05} = 0.0356$, $R^2 = 0.9205$ 。从上述效应方程的系数可以看出此模型为非典型施肥模型,且 F 值不显著,所以本试验结果数据建立的三元二次施肥模型拟合不成功。

2.3.2 一元二次肥料效应分析 王圣瑞^[9]等研究表明,三元二次施肥模型进行拟合试验成功率仅为 56%。孙义祥^[10]等认为拟合成功率仅为 9%。本试验三元二次肥料效应模型拟合不成功,故选择用一元二次肥料效应模型进行拟合,所采用的方程为:

$$y = a + bx + cx^2 \quad (5)$$

式中: y 为籽粒产量, x 为肥料用量, a 为截距, b 为一次回归系数, c 为二次回归系数,选用编号为 2、3、6、11 处理的产量结果模拟氮肥的推荐用量,选用 4、5、6、7 处理的产量结果模拟磷肥的推荐用量,选用 6、8、9、10 处理的产量结果模拟钾肥的推

荐用量。如果上述方程拟合成功,对 x 求偏导数,根据边际收益等于边际成本,即 $dy \cdot py = dx \cdot px$ 计算推荐最优经济效益氮、磷、钾肥施用量,以 x 为变量,对方程两边求导,得到方程:

$$b + 2cx = P_x/P_y \quad (6)$$

式中: P_x 为 N、 P_2O_5 或 K_2O 的价格, P_y 为糜子价格。把一次回归系数 b 值、二次回归系数 c 值、肥料和糜子价格代入上述方程,解方程即可得到最优经济效益氮、磷、钾肥施用量。

对本试验数据结果进行回归分析,建立一元二次肥料效应模型,结果如表 4,一元模型 R 检验氮、磷、钾均达显著水平。

由表 4 氮、磷、钾肥料效应回归方程可以看出,二次项系数均小于 0,抛物线向下,符合生物学规律。根据氮的一元二次肥效方程计算糜子最优经济效益为施 N 121.61 kg/hm²,最优经济产量可达 4600.55 kg/hm²。根据磷的一元二次肥效方程可知,糜子的最优经济效益为施 P_2O_5 78.09 kg/hm²,最优经济产量达 4661.05 kg/hm²。根据钾的一元二次肥效方程得出糜子的最优经济效益为施 K_2O 24.23 kg/hm²,最优经济产量可达 4741.23 kg/hm², N: P_2O_5 : K_2O = 1:0.64:0.20。

3 讨论与结论

有关作物氮、磷、钾营养施肥的研究,国内外已有不计其数的报道,但受耕作土壤基础肥力和栽培措施差异的影响,结果不尽相同。本试验结果表明,糜子施肥增产效果显著,以试验所设最适氮、磷、钾肥用量组合 $N_2P_2K_2$ 处理产量最高,增产率高达 52.31%。缺氮和高氮处理增产率最低,说明适

表 4 一元肥料效应模型拟合结果

Table 4 The results simulated by one-factor fertilization models

肥料 Fertilizer	肥料效应方程 Fertilizer response equation	R^2	最优施肥量 (kg/hm ²) Optimum fertilizer amount
氮肥 N	$y = 3340.50 + 19.543x - 0.076x^2$	0.8556 *	121.61
磷肥 P ₂ O ₅	$y = 3869.10 + 18.872x - 0.112x^2$	0.8392 *	78.09
钾肥 K ₂ O	$y = 4466.30 + 20.966x - 0.397x^2$	0.6705 *	24.23

注 (Note): * 表示达 5% 显著水平 Significant at the 5% level.

宜的氮肥施用量是影响糜子产量的关键因子。抽穗期黍子对不同施肥处理的生理响应的研究表明,凡是含有氮的处理组合,其叶绿素及可溶性糖含量都比较高,光合速率也比较大,且能延缓黍子的衰老^[21]。本研究结果还表明,氮、磷、钾肥配合施用有利于糜子产量的提高。生土施肥对黍子产量影响的研究也表明,氮、磷、钾肥配合施用,不仅有较多的成穗数和穗粒数,而且有较高的千粒重,因此增产效果最好^[21]。在本试验研究范围内,氮、磷、钾肥任一因素过量施用均会导致产量显著降低,一种养分的过量投入往往可导致多种元素的不协调,可使肥效失灵,投入的营养元素无增产效果,甚至会造成减产^[3]。综合氮、磷、钾肥三因素对糜子产量的影响,其大小顺序为氮 > 磷 > 钾。

养分间的交互作用是植物营养与土壤肥料学研究的重点内容,许多研究已表明各营养元素之间的关系是复杂的,只有明确不同养分间的交互作用的方向(正交互作用还是负交互作用),才能制订适宜的养分配比,以充分发挥肥料的作用^[3,22]。本试验的研究结果表明,氮、磷、钾肥间存在不同程度的交互作用,能够相互促进肥效的发挥。张永清等^[21]对黍子生长生理的研究表明,氮与磷之间表现出明显的协同作用,在施用氮、磷的基础上施钾,具有明显的加合效应,如根重、总根长、总根数、根系总吸收面积与活性吸收面积分别增加,而且在抽穗期的增加幅度更大。张文君等^[11]通过“3414”试验发现,氮、磷、钾肥间存在明显的交互作用,配合施用能提高肥效和促进矮牵牛的生长。苏伟等^[22]对紫云英氮、磷、钾肥“3414”试验的产量效应研究也表明,氮、磷、钾肥之间存在一定的正交互作用,互相影响肥效的发挥。本研究结果与上述研究结果一致。

总体肥料效应不能按三元二次肥料效应回归模型拟合,与多数研究报道一致^[9-11]。当三元二次模

型不能对“3414”试验结果进行拟合时,可采用一元二次肥料效应模型,此效应模型拟合“3414”试验结果,虽然作为单因素试验处理,但在考虑一个因素时,另外两个因素是完全满足需要的,隐含了养分间的交互作用,所以使用一元二次肥料效应模型也可以获得一些施肥决策的有价值的信息。本试验结果表明,糜子施氮、磷、钾肥的“3414”试验,产量效应符合一元二次函数方程,根据一元二次肥料效应模型计算出氮、磷、钾肥推荐最优施肥量,分别为 N 121.61 kg/hm²、P₂O₅ 78.09 kg/hm²、K₂O 24.23 kg/hm²,最优经济产量可达 4600.55 ~ 4741.23 kg/hm²,N:P₂O₅:K₂O = 1:0.64:0.20。氮、磷、钾肥的一元二次肥效模型推荐的施肥量与试验实际设计采用的最适施用量相比,N 低 28.39 kg/hm²,P₂O₅ 低 11.91 kg/hm²,K₂O 低 5.77 kg/hm²,较接近本地区的氮、磷、钾肥实际最佳施肥量,可用于生产实践指导施肥,为本地区糜子生产中氮、磷、钾肥的合理施用提供科学依据。

参 考 文 献:

- [1] 郭熙, 赖锦春, 赵小敏, 等. 基于 GIS 丘陵土壤分区的水稻施肥配方研究[J]. 中国农业科学, 2011, 44(2): 307-315.
Guo X, Lai J C, Zhao X M *et al.* Fertilizer recommendations on rice of soil distribution at hilly area by GIS[J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2011, 44(2): 307-315.
- [2] 张福锁. 测土配方施肥技术要览[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006.
Zhang F S. Soil testing and fertilizer recommendations maintenance [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2006.
- [3] 李生秀. 植物营养与肥料学科的现状与展望[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(3): 193-205.
Li S X. The current state and prospect of plant nutrition and fertilizer science[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 1999, 5(3): 193-205.
- [4] White J G, Welch R M, Norvell W A. Soil Zn map of the USA using geostatistics and geographic information systems[J]. *Soil Sci.*, 1997, 162(4): 291-298.

- [5] 赵其国. 现代土壤学与农业持续发展[J]. 土壤学报, 1996, 33(1): 1-12.
Zhao Q G. Modern soil science and sustainable development of agriculture[J]. Acta Pedol. Sin., 1996, 33(1): 1-12.
- [6] 张福锁, 马文奇. 肥料投入水平与养分资源高效利用的关系[J]. 土壤与环境, 2000, 9(2): 154-157.
Zhang F S, Ma W Q. The relationship between fertilizer input level and nutrient use efficiency[J]. Soil Environ. Sci., 2000, 9(2): 154-157.
- [7] 申建波, 毛达如. 植物营养研究方法[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2011.
Shen J B, Mao D R. Research methods of plant nutrition[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2011.
- [8] 杨俐苹, 白由路, 王贺, 等. 测土配方施肥指标体系建立中“3414”试验方案应用探讨[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 1018-1023.
Yang L P, Bai Y L, Wang H *et al.* Application of “3414” field trial design for establishing soil testing and fertilizer recommendation index[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(4): 1018-1023.
- [9] 王圣瑞, 陈新平, 高祥照, 等. “3414”肥料试验模型拟合的探讨[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 409-413.
Wang S R, Chen X P, Gao X Z *et al.* Study on simulation of “3414” fertilizer experiments[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2002, 8(4): 409-413.
- [10] 孙义祥, 郭跃升, 于舜章, 等. 应用“3414”试验建立冬小麦测土配方施肥指标体系[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 15(1): 197-203.
Sun Y X, Guo Y S, Yu S Z *et al.* Establishing phosphorus and potassium fertilization recommendation index based on the “3414” field experiments[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2005, 15(1): 197-203.
- [11] 张文君, 鲁剑巍, 蒋志平, 等. 盆栽矮牵牛氮、磷、钾肥效应及推荐用量研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1147-1153.
Zhang W J, Lu J W, Jiang Z P *et al.* Effects of N, P, K fertilizer application and recommendation for *petunia hybrida* Vilm. in pot experiments[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(5): 1147-1153.
- [12] 李文彪, 郑海春, 郜翻身, 等. 内蒙古河套灌区春小麦推荐施肥指标体系研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(6): 1327-1334.
Li W B, Zheng H C, Gao F S *et al.* Study on index of fertilizer recommendation for spring wheat in Hetao irrigated area[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(6): 1327-1334.
- [13] 李文彪, 刘荣乐, 郑海春, 等. 内蒙古河套灌区春玉米推荐施肥指标体系研究[J]. 中国农业科学, 2012, 45(1): 93-101.
Li W B, Liu R L, Zheng H C *et al.* Study on index system of optimal fertilizer recommendation for spring corn in Hetao irrigation area of Inner Mongolia[J]. Sci. Agric. Sin., 2012, 45(1): 93-101.
- [14] 戢林, 张锡洲, 李廷轩. 基于“3414”试验的川中丘陵区水稻测土配方施肥指标体系构建[J]. 中国农业科学, 2011, 44(1): 84-92.
Ji L, Zhang X Z, Li T X. Establishing fertilization recommendation index of paddy soil based on the “3414” field experiments in the middle of sichuan hilly regions[J]. Sci. Agric. Sin., 2011, 44(1): 84-92.
- [15] 王纶, 王星玉, 温琪汾, 等. 中国黍稷种质资源研究与利用[J]. 植物遗传资源学报, 2005, 6(4): 474-477.
Wang L, Wang X Y, Wen Q F *et al.* Research and utilization of proso millet germplasm resource in China[J]. J. Plant Genet. Resour., 2005, 6(4): 474-477.
- [16] Hu X Y, Wang J F, Lu P *et al.* Assessment of genetic diversity in broomcorn millet (*Panicum miliaceum* L.) using SSR markers[J]. J. Genet. Gen., 2009, 36(8): 491-500.
- [17] 王纶, 王星玉, 温琪汾, 等. 中国黍稷种质资源蛋白质和脂肪含量的鉴定分析[J]. 植物遗传资源学报, 2007, 8(2): 165-169.
Wang L, Wang X Y, Wen Q F *et al.* Identification on protein & fat content for Chinese proso millet germplasm resources[J]. J. Plant Genet. Resour., 2007, 8(2): 165-169.
- [18] 冯伯利, 曾盛名, 蒋纪芸, 等. 品种、播期与肥力对糜子籽粒蛋白质及其组分的影响[J]. 陕西农业科学, 1996, (5): 3-5.
Feng B L, Ceng S M, Jiang J Y *et al.* Effects of varieties, sowing date and fertility on grain protein and its components of millet[J]. Shaanxi J. Agric. Sci., 1996, (5): 3-5.
- [19] 林凡云, 胡银岗, 宋国琦, 等. 糜子抗旱及复水相关基因的cDNA-AFLP差异显示[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(3): 95-99.
Lin F Y, Hu Y G, Song G Q *et al.* Analysis on the responsive genes during drought and rehydration in Broomcorn millet (*Panicum miliaceum* L.) by means of cDNA-AFLP[J]. Agric. Res. Arid Areas, 2006, 24(3): 95-99.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2010.
- [21] 张永清, 苗果园. 生土施肥对黍子根系生长及生理生态效应的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 158-161.
Zhang Y Q, Miao G Y. Effects of fertilizing in immature soil to broomcorn millet root growing and its physiological ecology[J]. J. Soil Water Conserv., 2006, 20(3): 158-161.
- [22] 苏伟, 鲁剑巍, 刘威, 等. 氮磷钾肥用量对紫云英产量效应的研究[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(6): 1094-1098.
Su W, Lu J W, Liu W *et al.* Effect of N, P and K fertilizer combination and application rate on yield of *Astragalus sinicus* L. [J]. Chin. J. Eco-Agric., 2009, 17(6): 1094-1098.