

氮磷钾配施对油莎豆产量及肥料利用效率的影响

曹穉琦¹, 任永峰^{1,2*}, 路战远^{1,2*}, 张向前², 赵小庆², 董琦¹

(1. 内蒙古大学生命科学学院, 内蒙古 呼和浩特, 010018;

2. 内蒙古农牧业科学院, 内蒙古 呼和浩特, 010018)

摘要: 为明确油莎豆合理配施, 提高油莎豆产量及肥料利用效率, 以油莎豆为研究对象, 利用“3414”肥料田间试验于2020–2021年在巴彦淖尔市磴口县乌兰布和农场分析了14个氮磷钾肥料配比处理对油莎豆生物产量、块茎产量、肥料偏生产力及农学效率的影响。结果表明: 在 $N_3P_2K_2$ 处理下油莎豆地上生物量最高, $N_2P_2K_3$ 处理下油莎豆地下生物量最高, 且两年生物量较空白区分别提高45.75%、31.39%和53.96%、32.27%。在 $N_2P_2K_3$ 处理下油莎豆块茎鲜产最高, 较空白区分别提高101.86%、77.24%, 且油莎豆对磷肥依赖较大。N、P、K肥偏生产力分别在 $N_1P_1K_2$ 、 $N_2P_1K_1$ 、 $N_2P_2K_1$ 处理下达最高; 农学利用率分别在 $N_1P_2K_2$ 、 $N_2P_1K_2$ 、 $N_2P_2K_3$ 处理下达最高。氮磷钾肥对油莎豆产量存在明显的互作效应, 两年数据均表现为在中磷中钾、中氮中钾、中氮中磷水平时最利于氮、磷、钾肥效的发挥。两年最高产量的氮磷钾施肥用量分别为N 151.7~174.0 kg/hm²; P_2O_5 192.0~195.3 kg/hm²; K_2O 95.9~102.4 kg/hm²。两年的理论产量分别达到9454.5 kg/hm²和9674.8 kg/hm²。

关键词: 油莎豆; 肥料配施; 产量; 肥料利用效率; 互作效应

中图分类号: S565.9

文献标识码: A

文章编号: 1007-9084(2023)02-0368-10

Effects of combined application of nitrogen, phosphorus and potassium on yield and fertilizer use efficiency of *Cyperus esculentus* L.

CAO Zi-qi¹, REN Yong-feng^{1,2*}, LU Zhan-yuan^{1,2*}, ZHANG Xiang-qian², ZHAO Xiao-qing², DONG Qi¹

(1. School of Life Sciences, Inner Mongolia University, Hohhot 010018, China; 2. Inner Mongolia Academy of Agriculture and Animal Husbandry, Hohhot 010018, China)

Abstract: To improve yield and fertilizer use efficiency of *Cyperus esculentus* L., '3414' fertilizer field experiment was conducted in Wulanbuhe Farm (Dengkou County, Bayannaoer City) from 2020 to 2021. The aim was to analyze the effects of 14 NPK fertilizer ratios on biological yield, tuber yield, partial factor productivity and agronomy efficiency of *C. esculentus*. Results showed that the aboveground biomass reached the highest under $N_3P_2K_2$ treatment, and the underground biomass reached the highest under $N_2P_2K_3$ treatment, and the biomass in two years increased by 45.75 %, 31.39 % and 53.96 %, 32.27% compared with the blank area. Under $N_2P_2K_3$ treatment, the tuber fresh yield reached the highest, which were 101.86 % and 77.24 % higher than those in blank area in the 2 years respectively. N, P and K fertilizer partial factor productivity reached the highest under $N_1P_1K_2$, $N_2P_1K_1$ and $N_2P_2K_1$ treatments, respectively. The agronomic efficiency reached the highest under $N_1P_2K_2$, $N_2P_1K_2$, and $N_2P_2K_3$ treatments, respectively. An obvious interaction effect was found between N, P and K fertilizers on yield. Two-year data showed that fertilizers effects were the best at medium phosphorus and potassium, medium nitrogen and potassium, medium nitrogen and phosphorus levels. The fertilization rates of NPK with the highest yield in two years were N at 151.7–174.0 kg/hm², P_2O_5 at 192.0–195.3 kg/hm², K_2O at 95.9–102.4 kg/hm². The theoretical yield in the 2 years reached 9454.5 kg/hm² and 9674.8 kg/hm² respectively.

收稿日期: 2022-03-17

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC0507602)

作者简介: 曹穉琦(1995–), 男, 硕士研究生, 研究方向为植物学, E-mail: 1477665901@qq.com

* 通讯作者: 任永峰(1984–), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为作物栽培理论与技术, E-mail: renyongfeng_1984@163.com

路战远(1964–), 男, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事保护性耕作和田间生态研究, E-mail: lzhy281@163.com

Key words: *Cyperus esculentus* L.; fertilizer application; yield; fertilizer use efficiency; interaction effect

油莎豆(*Cyperus esculentus* L.)又称油莎草,铁荸荠、虎坚果等,是被子植物门、单子叶植物纲莎草目、莎草科、莎草属的多年生C₄草本植物^[1]。油莎豆是新型经济作物,集粮油、食品、医药、饲料、绿化于一体,也是防风固沙、提高土壤肥力及边际土地利用率的理想绿色植物^[2]。原产于非洲东北部及地中海沿岸,在国外油莎豆被称作是上帝的零食(snack food of the God)^[3],并可作为主粮优秀的补充来源^[4]。我国最早于上世纪五十年代将油莎豆作为解决我国粮油短缺问题的油料作物从前苏联引进,并进行小范围试种^[5]。现在西北地区、东北地区、黄淮地区等土壤沙化较严重地区均有种植,近几年我国的种植面积都维持在17 000 hm²左右。实际单产4.5~6 t/hm²^[6]。油莎豆块茎含油量最高可达40%,每公顷产油量1200~1500 kg,是大豆的3倍,油菜的1.5倍^[7]。

国内外油莎豆栽培相关研究已有不少报道,内容主要集中在不同滴灌量的研究^[8]、不同种植密度^[9]、盐分胁迫的研究^[10]、有机肥配施^[11]、旱地栽培模式的研究^[12]等。但鲜有油莎豆氮磷钾肥配施方面的研究,现主要依靠经验或参照生长发育类似的作物进行施肥,导致油莎豆产量、品质不稳定。合理氮磷钾配施问题一直是油莎豆高产亟待解决的问题之一。因此研究不同氮磷钾配施下油莎豆产量、肥料利用率具有重要的意义。

“3414”试验设计吸收了回归最优设计处理少、效率高的优点。能够依据土壤肥力、作物需肥规律和肥料效应函数,确定合理的氮磷钾施用量^[13,14]。因此“3414”试验被认为是目前国内应用较为广泛的田间试验方案^[15]。为此,本研究利用“3414”试验方案,研究不同氮磷钾配比下油莎豆生物量、块茎产量、肥料利用率、氮磷钾互作效应及肥料效应模式,以明确氮磷钾肥配施对油莎豆的产量的影响,提出合理的氮磷钾配比,为科学合理指导油莎豆施肥提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2020–2021年在内蒙古自治区巴彦淖尔市磴口县乌兰布和农场进行,该区地处106°56'E, 40°32'N。属温带大陆性季风气候,年平均气温为7.6℃,植物生长期的积温约为3100℃,年平均降雨

量144.5 mm,年均蒸发量2397.6 mm。土壤类型为风沙土,有机质含量:8.86 g/kg、pH 8.96、全氮0.72 g/kg、全磷1.02 g/kg、全钾8.96 g/kg。油莎豆品种为中油莎1号。

1.2 试验设计

按照“3414”试验方案设计,基于氮磷钾3因素,分别设置4个水平,其中1水平=2水平×0.5;3水平=2水平×1.5。小区采用随机区组排列,每个处理3次重复。小区面积24 m²(4 m×6 m)。播种方式为穴播,行距50 cm,穴距15 cm,种植密度:133 335穴/hm²。每年于5月下旬进行播种,9月下旬收获。两年及各处理的整个生育过程中耕、灌水、除草等田间管理保持一致。

其中施肥2水平设置为:N 150 kg/hm²(折合尿素326.1 kg/hm²),P₂O₅ 240 kg/hm²(折合过磷酸钙521.7 kg/hm²),K₂O 120 kg/hm²(折合硫酸钾200.0 kg/hm²)。实验方案和各处理见表1。氮磷钾肥均采用常用的尿素(纯N≥46%)、过磷酸钙(P₂O₅≥16%)、硫酸钾(K₂O≥50%),肥料作为基肥一次性施入。

表1 油莎豆“3414”实验方案

Table 1 Experimental designs of 3414 fertilizer program on *Cyperus esculentus*

编号 Code	处理 Treatment	水平 Level			肥料用量 Fertilizer rate/(kg/hm ²)		
		N	P	K	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1	N ₀ P ₀ K ₀	0	0	0	0	0	0
2	N ₀ P ₂ K ₂	0	2	2	0	240	120
3	N ₁ P ₂ K ₂	1	2	2	75	240	120
4	N ₂ P ₀ K ₂	2	0	2	150	0	120
5	N ₂ P ₁ K ₂	2	1	2	150	120	120
6	N ₂ P ₂ K ₂	2	2	2	150	240	120
7	N ₂ P ₃ K ₂	2	3	2	150	360	120
8	N ₂ P ₂ K ₀	2	2	0	150	240	0
9	N ₂ P ₂ K ₁	2	2	1	150	240	60
10	N ₂ P ₂ K ₃	2	2	3	150	240	180
11	N ₃ P ₂ K ₂	3	2	2	225	240	120
12	N ₁ P ₁ K ₂	1	1	2	75	120	120
13	N ₁ P ₂ K ₁	1	2	1	75	240	60
14	N ₂ P ₁ K ₁	2	1	1	150	120	60

1.3 测定内容与方法

1.3.1 产量及生物量 由于油莎豆分蘖能力较强,且分蘖株在其周围的空间具有一定拓展能力,因此为保证样方数据的代表性本试验选取小区的

中间带(0.5 m × 0.5 m)的小面积多点测定的方法。采取刈割的方法将油莎豆以地面为界分为上下部,下部将泥土抖干净取下块茎后并分别计算生物量。并进行单株产量和小区产量测产,记录产量数据。进行三元二次方程回归分析,得出最高产量和经济最佳及其施肥量,并根据如下公式计算相关指标:

空区相对产量 = $N_0P_0K_0$ 产量 / $N_2P_2K_2$ 产量 × 100%;

缺氮区相对产量 = $N_0P_2K_2$ 产量 / $N_2P_2K_2$ 产量 × 100%;

缺磷区相对产量 = $N_2P_0K_2$ 产量 / $N_2P_2K_2$ 产量 × 100%;

缺钾区相对产量 = $N_2P_2K_0$ 产量 / $N_2P_2K_2$ 产量 × 100%;

施肥依存度 = 100% - 相对产量;

全肥区的施肥依存度 = 100% - 空白区相对产量。

1.3.2 肥料利用率 计算公式如下。

氮(磷钾)肥偏生产力 kg/kg = 施氮(磷钾)处理产量/施氮(磷钾)量;

氮(磷钾)肥农学利用率 (kg/kg) = (施氮(磷钾)处理产量 - 不施氮(磷钾)处理产量) / 施氮(磷钾)量。

1.4 数据分析与处理

利用 Excel 2010 和 SPSS 26.0 软件进行数据整理及分析,使用 Origin2018 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 氮磷钾配施下油莎豆生物量

如表2所示,2020年和2021年油莎豆地上、地下部生物量最低的处理水平均为空白区($N_0P_0K_0$),地上部鲜产分别为352.7 kg/hm²、411.9 kg/hm²,地下部鲜产分别为332.1 kg/hm²、399.5 kg/hm²。地上部生物量最高均为 $N_3P_2K_2$ 处理,鲜产分别为514.0 kg/hm²、541.2 kg/hm²,地下部生物量最高均 $N_2P_2K_3$ 处理,鲜产分别为511.3 kg/hm²、528.4 kg/hm²。

施肥区油莎豆地上部生物量总体比空白区($N_0P_0K_0$)有不同程度增加,且部分施肥处理与空白处理呈显著性差异。当P、K肥水平为中等(P_2 、 K_2)时,与不施N肥处理($N_0P_2K_2$)相比,施N显著增加了地上部生物量,且在高氮(N_3)水平时油莎豆地上部生物量达到最高,分别为514.0 kg/hm²、541.2 kg/hm²。当N、K或N、P施用水平为中等水平(N_2 、 K_2 或 N_2 、 P_2)时,与不施P肥($N_2P_0K_2$)或不施K肥($N_2P_2K_0$)

相比,增施P肥或K肥亦能够增加油莎豆地上部生物量,并分别在 P_0 - P_2 、 K_0 - K_2 水平呈上升趋势,之后增加P或K肥油莎豆地上部生物量呈下降趋势。

与不施肥($N_0P_0K_0$)相比,施肥总体提高油莎豆等地下部生物量。当氮钾、氮磷或磷钾肥施用水平为中等水平(N_2K_2 、 N_2P_2 和 P_2K_2)时,分别与不施氮肥处理($N_0P_2K_2$)、不施磷肥($N_2P_0K_2$)、不施钾肥($N_2P_2K_0$)处理相比,其地下部生物量随氮、磷、钾量的增加而增加,分别至 N_3 、 P_2 、 K_2 水平达到最高,之后呈下降的趋势。

2.2 氮磷钾配施下油莎豆块茎产量及其构成

如表3所示,2020年和2021年油莎豆单穴粒数、总粒数、千粒重及块茎产量最低的处理均为空白区($N_0P_0K_0$),单穴粒数分别为135.7粒、164.9粒;总粒数分别为 5.43×10^6 /hm²、 6.60×10^6 /hm²;千粒重分别为970.6g、1014.0g;鲜产分别为5340.7 kg/hm²、6493.5 kg/hm²,千粒重、块茎产量最高的均为处理 $10(N_2P_2K_3)$,千粒重分别为1274.5 g、1294.0 g;块茎鲜产分别为10780.8 kg/hm²、11508.8 kg/hm²。相比缺氮区($N_0P_2K_2$)2020年和2021年油莎豆产量分别增产54.66%、29.68%;相比缺磷区($N_2P_0K_2$)分别增产67.57%、42.65%;相比缺钾区($N_2P_2K_0$)分别增产11.20%、17.47%;相比空白区($N_0P_0K_0$)分别增产101.86%、77.24%。

2020年和2021年油莎豆空白区相对产量分别为53.32%、62.82%,缺氮区油莎豆的相对产量分别为69.60%、85.86%,缺磷区油莎豆的相对产量分别为64.24%、78.06%,缺钾试验区油莎豆的相对产量为96.80%、94.79%,表现为空白区产量<缺磷区产量<缺氮区产量<缺钾区产量。表明该试验地土壤肥力较低,特别是速效磷含量相对较低,限制了油莎豆的产量。油莎豆对磷的依赖性相对较氮和钾肥强,2020年和2021年缺磷区施肥依存度分别为27.11%、21.94%,说明磷肥在油莎豆产量中起着重要的作用。2020年和2021年全肥区施肥依存度分别为46.68%、38.18%,说明氮磷钾肥合理配施下可提高油莎豆块茎产量。

2.3 氮磷钾配施下肥料利用率

2.3.1 氮磷钾配施对偏生产力的影响 由表4可知,2020年和2021年偏氮肥偏生产力分别为39.76~124.54 kg/kg、43.22~129.46 kg/kg;偏磷肥生产力分别为23.63~81.08 kg/kg、24.93~81.01 kg/kg,偏钾肥生产力分别为52.50~164.01 kg/kg、67.23~164.60 kg/kg。

表2 氮磷钾配施处理下油莎豆生物量

Table 2 Biomass of *C. esculentus* under combined application of nitrogen, phosphorus and potassium

编号 Code	处理 Treatment	地上部生物量 Aerial biomass /(kg/hm ²)		地下部生物量 Ground biomass /(kg/hm ²)	
		2020	2021	2020	2021
1	N ₀ P ₀ K ₀	352.7±9.7f	411.9±16.2g	332.1±16.1g	399.5±15.0e
2	N ₀ P ₂ K ₂	372.5±15.0ef	495.4±15.0cd	369.3±17.4efg	417.6±10.4ed
3	N ₁ P ₂ K ₂	435.1±23.1cd	503.44±15.3bc	461.3±21.9b	472.3±6.1bc
4	N ₂ P ₀ K ₂	369.4±16.3ef	434.9±21.1fg	361.8±10.7fg	404.8±14.7e
5	N ₂ P ₁ K ₂	420.9±29.4cd	480.3±30.3cde	404.6±16.2cdef	467.7±21.9bc
6	N ₂ P ₂ K ₂	489.4±18.9ab	530.8±19.0ab	462.6±19.6b	475.7±15.8b
7	N ₂ P ₃ K ₂	441.8±21.6cd	476.0±9.3cde	438.0±12.3bc	448.7±11.9bcd
8	N ₂ P ₂ K ₀	421.8±34.5cd	454.2±8.9ef	400.0±24.8cdef	432.5±21.7cdef
9	N ₂ P ₂ K ₁	422.8±23.4cd	459.6±9.3def	421.8±25.1bcd	432.8±28.5cde
10	N ₂ P ₂ K ₃	462.3±13.4bc	467.6±23.2cdef	511.3±24.5a	528.4±13.3a
11	N ₃ P ₂ K ₂	514.0±19.7a	541.2±18.8a	409.4±30.3cde	419.2±23.0de
12	N ₁ P ₁ K ₂	400.2±25.9de	434.0±31.2fg	372.7±26.6efg	405.7±28.6e
13	N ₁ P ₂ K ₁	402.9±32.3de	444.4±16.1efg	382.4±18.7def	436.3±32.6bcde
14	N ₂ P ₁ K ₁	424.3±30.6cd	468.4±14.3cdef	407.1±44.6cde	437.5±32.6bcde

注:同列数据后不同小写字母表示差异达0.05显著水平

Note: Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different at 0.05 level

表3 氮磷钾配施处理下油莎豆块茎产量及其构成

Table 3 Effects of combined application of nitrogen, phosphorus and potassium on yield and its components of *C. esculentus*

编号 Code	处理 Treatment	单穴粒数 Grain number of single point		总粒数 Total grains/(10 ⁵ /hm ²)		千粒重 Thousand-grain weigh /g		籽粒产量 Seed yield /(kg/hm ²)	
		2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021
1	N ₀ P ₀ K ₀	135.7±1.2h	164.9±24.0d	54.3±0.5h	66.0±9.6d	970.6±28.3h	1014.0±30.9h	5340.7±10.7m	6493.5±30.0k
2	N ₀ P ₂ K ₂	152.3±6.1gh	203.0±20.1bcd	60.9±2.4gh	81.2±8.0bc	1092.3±32.3defg	1085.6±20.2fg	6970.5±36.9k	8874.8±46.0h
3	N ₁ P ₂ K ₂	159.0±14.2fgh	214.0±8.3ab	63.6±5.7fgh	85.6±3.3ab	1273.2±33.0a	1222.0±34.8bc	9105.2±42.9f	9658.9±37.7f
4	N ₂ P ₀ K ₂	171.7±17.2defg	175.6±22.2bcd	68.7±6.9defg	70.2±8.9cd	1100.8±30.7cdef	1159.2±33.4de	6433.6±32.8j	8068.0±37.1j
5	N ₂ P ₁ K ₂	181.0±19.3cdef	193.3±19.3bcd	72.4±2.4cde	77.3±7.7bcd	1176.7±21.5b	1173.1±21.2cde	8790.6±31.0h	9107.9±32.7g
6	N ₂ P ₂ K ₂	209.7±20.6b	204.5±11.5bc	83.9±8.3b	81.8±4.6bc	1274.3±18.5a	1262.7±33.8ab	10 015.2±39.7b	10 336.1±28.3b
7	N ₂ P ₃ K ₂	164.0±9.5efg	173.5±6.2cd	65.6±3.8efg	69.4±2.5cd	1142.9±35.1bcd	1019.2±36.1h	8505.1±45i	8643.3±27.8i
8	N ₂ P ₂ K ₀	188.0±6.9bcde	194.9±6.9bcd	75.2±2.8bcde	77.9±2.8bcd	1063.5±33.4efg	1215.3±27.3bc	9695.1±14.5d	9797.6±43.9d
9	N ₂ P ₂ K ₁	197.3±5.0bcd	200.7±3.6bcd	78.9±1.4bcd	80.3±1.4bc	1117.9±37.0cde	1269.9±34.6ab	9840.4±37.6c	9864.3±31.8c
10	N ₂ P ₂ K ₃	211.0±13.1b	245.2±35.3a	84.1±2.8b	98.1±14.1a	1274.5±21.0a	1294.0±31.2a	10 780.8±49.9a	115 08.8±23.1a
11	N ₃ P ₂ K ₂	168.7±8.6efg	186.0±15.7bcd	67.5±3.4efg	74.4±6.3bcd	1050.2±25.2fg	1038.6±31.1gh	8946.6±49.6g	9723.7±25.6e
12	N ₁ P ₁ K ₂	186.0±6.6bcdef	203.5±15.0bcd	74.1±2.0bcdef	81.4±6.0bc	1066.1±36.6efg	1127.2±21.8ef	9340.6±32.9e	9709.7±37.8ef
13	N ₁ P ₂ K ₁	205.7±33.6bc	172.4±30.3cd	82.3±13.4bc	73.0±2.4bcd	1036.3±34.9g	1065.2±32.6gh	6670.2±36.9l	8117.5±21.9j
14	N ₂ P ₁ K ₁	243.7±20.6a	244.8±28.9a	97.5±8.3a	97.9±11.5a	1149.0±32.5bc	1198.0±26.0cd	9729.5±35.6d	9721.3±31.2e

注:同列数据后不同小写字母表示差异达0.05显著水平;千粒重和籽粒产量均为鲜重

Note: Different lowercase letters in the same column show the significance at 0.05 level; Thousand-grain weigh and yield are both fresh weights

两年数据均表明在N₁P₁K₂处理下,偏氮肥生产力最高分别为124.54 kg/kg、129.46 kg·kg⁻¹,分别较全肥区(N₂P₂K₂)提高86.52%、87.87%,在N₃P₂K₂处理下,偏氮肥生产力最低分别为39.76 kg/kg、43.22 kg/kg;在N₂P₁K₁处理下,偏磷肥生产力最高为81.08 kg/kg、81.01 kg/kg,分别较全肥区(N₂P₂K₂)提高

94.30%、88.09%,在N₂P₃K₂处理下,偏磷肥生产力最低分别为23.63 kg/kg、24.93 kg/kg;在N₂P₂K₁处理下,偏钾肥生产力最高分别为164.01 kg/kg、164.40 kg/kg,分别较全肥区(N₂P₂K₂)高96.51%和90.87%,2020和2021年分别在N₂P₀K₂和N₂P₂K₃处理下,偏钾肥生产力最低,分别为53.61和63.94 kg/kg。

2.3.2 氮磷钾配施对农学利用率的影响 由表5可知,两年氮肥农学利用效率均在 $N_1P_2K_2$ 处理下最高且与其它各处理有显著差异,分别为28.46 kg/kg、10.46 kg/kg,在 $N_3P_2K_2$ 处理下最低,分别为8.78 kg/kg、3.77 kg/kg;2020年磷肥农学利用效率在 $N_2P_1K_2$ 处理下最高,为19.64 kg/kg,2021年在 $N_2P_2K_2$ 处理下最高,为8.67 kg/kg,两年均在 $N_3P_2K_2$ 处理下最低,分别为5.75 kg/kg、1.60 kg/kg。两年钾肥农学利用效率均在 $N_2P_2K_3$ 处理下最高,分别为6.03 kg/kg、9.51 kg/kg,均 $N_2P_2K_1$ 处理下最低,分别为2.42 kg/kg、1.11 kg/kg。

2.4 氮磷钾肥的互作效应

2.4.1 磷钾肥施用对氮水平的响应 如图1所示,当钾肥为 K_2 水平时,在低氮(N_1)水平下,两年数据均表现为油莎豆产量随着施磷量的增加而降低,分别减产235.4 kg/hm²、50.8 kg/hm²,减产率分别为3.00%、0.52%;在中氮(N_2)水平下油莎豆产量随施磷量的增加而增加,分别增产1224.6kg/hm²、1228.2 kg/hm²,增产率分别为14.00%、13.48%。

当磷肥为 P_2 水平时,在低氮(N_1)、中氮(N_2)水平下,两年数据均表现为油莎豆产量随施钾量的增加而增加,2020分别增产2435.0 kg/hm²(N_1)、174.8 kg/hm²(N_2),增产率分别为37.00% (N_1)、2.00%

表4 不同施肥对偏生产力的影响

Table 4 Effects of different fertilization on partial factor productivity

编号 Code	处理 Treatment	偏生产力 Partial factor productivity /(kg/kg)					
		N		P_2O_5		K_2O	
		2020	2021	2020	2021	2020	2021
1	$N_0P_0K_0$	/	/	/	/	/	/
2	$N_0P_2K_2$	/	/	29.04±0.15j	36.98±0.19g	58.09±0.31k	73.96±0.38h
3	$N_1P_1K_2$	121.40±0.57b	128.79±0.50b	37.94±0.18h	40.25±0.16f	75.88±0.36f	80.49±0.31e
4	$N_2P_0K_2$	42.89±0.22j	53.79±0.25k	/	/	53.61±0.21l	67.23±0.31i
5	$N_2P_1K_2$	58.60±0.21h	60.72±0.22i	73.26±0.26c	75.90±0.27b	73.26±0.26h	75.89±0.27f
6	$N_2P_2K_2$	66.77±0.26e	68.91±0.19e	41.73±0.17e	43.07±0.12	83.46±0.33d	86.13±0.24d
7	$N_2P_3K_2$	56.70±0.30i	59.84±0.07j	23.63±0.13l	24.93±0.03i	70.88±0.38i	74.80±0.08g
8	$N_2P_2K_0$	64.63±0.10g	65.32±0.29g	40.40±0.06g	40.82±0.18e	/	/
9	$N_2P_2K_1$	65.60±0.25f	65.76±0.21f	41.00±0.16f	41.10±0.13e	164.01±0.63a	164.40±0.53a
10	$N_2P_2K_3$	71.87±0.33d	76.73±0.15d	44.92±0.21d	47.95±0.10c	59.89±0.28j	63.94±0.13j
11	$N_3P_2K_2$	39.76±0.22k	43.22±0.11l	37.28±0.21i	40.51±0.11f	74.55±0.41g	81.03±0.21e
12	$N_1P_1K_2$	124.54±0.44a	129.46±0.50a	77.84±0.27b	80.91±0.31a	77.84±0.27e	80.91±0.31e
13	$N_1P_2K_1$	88.94±0.49c	108.23±0.29c	27.79±0.15k	33.82±0.09h	111.17±0.09c	135.29±0.36c
14	$N_2P_1K_1$	64.86±0.24g	64.80±0.21h	81.08±0.30a	81.01±0.26a	162.16±0.26b	162.02±0.52b

注:同列数据后不同小写字母表示差异达0.05显著水平

Note: Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different at 0.05level

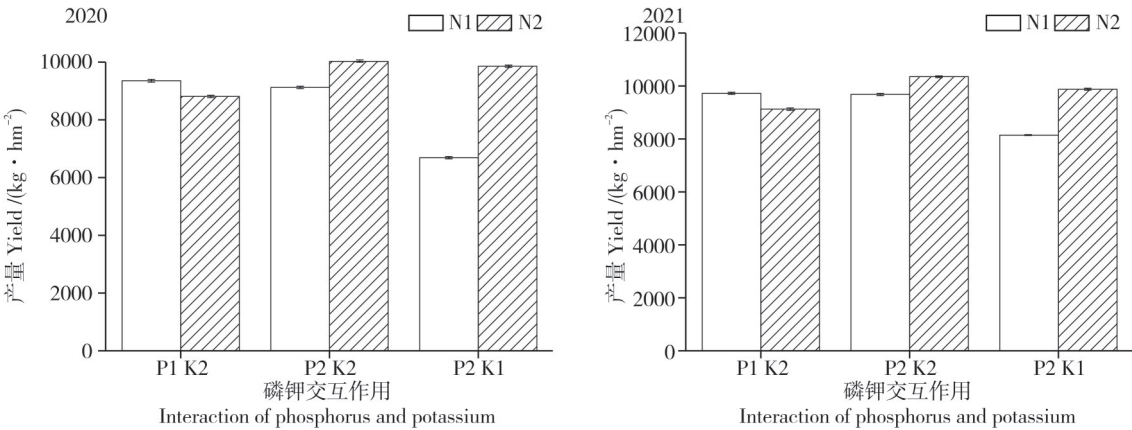


图1 不同磷钾肥用量对氮肥效果的影响

Fig. 1 Effect of different P and K on N fertilizer

表 5 不同施肥对农学利用效率的影响
Table 5 Effects of different fertilization on agronomic efficiency

编号 Code	处理 Treatment	农学利用率 Agronomic efficiency / (kg/kg)					
		N		P ₂ O ₅		K ₂ O	
		2020	2021	2020	2021	2020	2021
1	N ₀ P ₀ K ₀	/	/	/	/	/	/
2	N ₀ P ₂ K ₂	/	/	/	/	/	/
3	N ₁ P ₂ K ₂	28.46±0.92a	10.46±1.11a	/	/	/	/
4	N ₂ P ₀ K ₂	/	/	/	/	/	/
5	N ₂ P ₂ K ₂	/	/	19.64±0.46a	8.67±0.37b	/	/
6	N ₂ P ₂ K ₂	20.30±0.50b	9.74±0.16b	14.92±0.27b	9.45±0.11a	2.67±0.21b	4.49±0.38b
7	N ₂ P ₃ K ₂	/	/	5.75±0.18c	1.60±0.03c	/	/
8	N ₂ P ₂ K ₀	/	/	/	/	/	/
9	N ₂ P ₂ K ₁	/	/	/	/	2.42±0.44b	1.11±1.26c
10	N ₂ P ₂ K ₃	/	/	/	/	6.03±0.36c	9.51±0.36a
11	N ₃ P ₂ K ₂	8.78±0.36c	3.77±0.36c	/	/	/	/
12	N ₁ P ₁ K ₂	/	/	/	/	/	/
13	N ₁ P ₂ K ₁	/	/	/	/	/	/
14	N ₂ P ₁ K ₁	/	/	/	/	/	/

注:同列数据后不同小写字母表示差异达0.05显著水平

Note: Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different at 0.05 level

(N₂); 2021 分别增产 1541.4 kg/hm²(N₁)、471.8 kg/hm²(N₂), 增产率分别为 18.99%(N₁)、4.78%(N₂)。

由此可见,在低磷和中钾水平下,有利于低氮肥效果的发挥,在中磷和中钾水平下,高氮肥效果的发挥。综合考虑,在中磷、中钾和中氮水平下产量最高,因此在中磷和中钾水平下,有利于氮肥效果的发挥。

2.4.2 氮钾肥施用对磷水平的响应 如图2所示,当钾肥施用为 K₂ 水平时,两年数据均显示在低磷(P₁)水平下油莎豆产量随着施氮量的增加而降低,分别减产 550.0 kg/hm²、601.9 kg/hm²,减产率分别

为 6.00%、6.20%;两年数据均显示在中磷(P₂)水平下,油莎豆产量随着施氮量的增加而增加,分别增产 910.0 kg/hm²、677.1 kg/hm²,增产率分别为 10.00%、7.01%。

当氮肥施用为 N₂ 水平时,在低磷(P₁)水平下油莎豆产量随着施钾量的增加而降低,分别减产 938.9 kg/hm²、613.4 kg/hm²,减产率分别为 9.65%、6.31%;在中磷(P₂)水平下,油莎豆产量随着施钾量的增加而增加,增产 174.8 kg/hm²、471.8 kg/hm²,增产率为 1.78%、4.78%。

由此可见,在中氮和低钾水平下,低磷肥效果

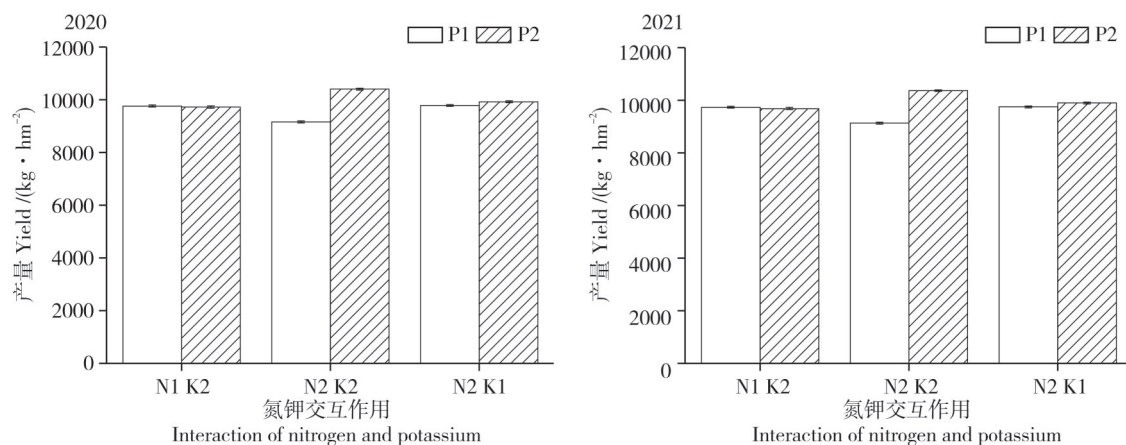


图 2 不同氮钾肥用量对磷肥效果的影响

Fig. 2 Effect of different N and K on P fertilizer

的发挥。在中氮和中钾水平下,有利于高磷肥效果的发挥。综合考虑,在中氮、中钾和中磷水平下产量最高,因此在中氮、中钾水平下,有利于磷肥效果的发挥。

2.4.3 氮磷肥施用对钾水平的响应 如图3所示,当磷肥施用为 P_2 水平时,油莎豆产量在低钾(K_1)、中钾(K_2)水平时,两年数据均显示油莎豆产量随施氮量的增加而增加,2020年分别增产3170.3 kg/hm²、910.0 kg/hm²,增产率分别为47.53%、10.00%;2021年分别增产1746.7 kg/hm²、677.1 kg/hm²,增产率分别为21.52%、7.01%。当氮肥施用为 N_2 水平时,油莎豆产量在低钾(K_1)、中钾(K_2)水平时,两年数据均显示油莎豆产量随施磷量的增加而增加,2020年分别增产110.9 kg/hm²、1224.6 kg/hm²,增产率分别为1.14%、13.93%;2021年分别增产143.0 kg/hm²、1228.2 kg/hm²,增产率分别为1.47%、13.49%。在中氮、中磷和水平下沙豆的产量显著高于其它水平,说明在中氮和中磷水平下有利于钾肥效果的发挥。

2.5 肥料效应模式与推荐施肥

对N、P、K三因素进行产量的三元二次数学模型回归统计分析,建立肥料效应函数模型,其结果如表6所示。从表中可看出,两年的N、P、K三元二次肥料函数均通过回归方程显著性检验,结合肥料价格和油莎豆售价(4.50元/kg N, 7.30元/kg P_2O_5 , 8.80元/kg K_2O , 鲜油莎豆块茎8.00元/kg)。两年的试验结果回归分析可看出,2020年在该试验地当最高产量施肥配比N: P_2O_5 : K_2O = 151.7:195.3:102.4产量达到9454.5 kg/hm²;当经济最佳产量施肥配比N: P_2O_5 : K_2O = 142.8:179.7:101.8,产量达到9444.6 kg/hm²。2021年在该试验地当最高产量施肥配比N: P_2O_5 : K_2O = 174.0:192.0:95.9 kg/hm²,产量达到

9674.8 kg/hm²;当经济最佳产量施肥配比N: P_2O_5 : K_2O = 164.1:178.5:95.5 kg/hm²,产量达到9659.1 kg/hm²。

3 讨论

3.1 氮磷钾配施对油莎豆生物量的影响

施肥可以改善植株营养状况,促进其生长发育,且通过合理配施,可达到作物高产优质的目的,从而获得良好的经济效益。本研究发现在高氮处理下($N_3P_2K_2$)油莎豆地上部生物量显著高于其它处理,而块茎产量显著低于 $N_2P_2K_2$ 处理;而高钾处理下($N_2P_2K_3$)地下部生物量及块茎产量显著高于其它处理,一方面表明合理的氮磷钾配施均有助于提高油莎豆地上及地下部生物量。Kang等人研究表明P能够在一定程度上提高作物的抗逆性,良好的磷素条件可以提高植物的根系的总长度、根的体积和表面积^[16,17]。陆欣等人研究表明K对经济作物的品质影响尤为明显,被称之为“品质元素”^[18],植物缺钾则生长缓慢,根系发育差,茎秆细弱易倒,分枝小,千粒重低^[19]。另一方面则表明过高的氮添加会导致养分向地上部转移,导致油莎豆地上部徒长。李志玉等研究表明N能促进植物生长,分蘖期过量的氮施入会导致作物地上部分徒长,无效分蘖数增加,从而使作物减产^[20],何昌福等有研究指出,块茎类作物受氮素的影响较大,氮素施入过高时块茎质量有所下降^[21]。

较高的N、P均有助于提高油莎豆地上部生物量,而较高的K含量有助于提高地下部生物量及块茎产量。因此应根据相应的生产需要选择合适的肥料配比,以产生更高的经济效益。

3.2 氮磷钾配施对油莎豆产量及其构成的影响

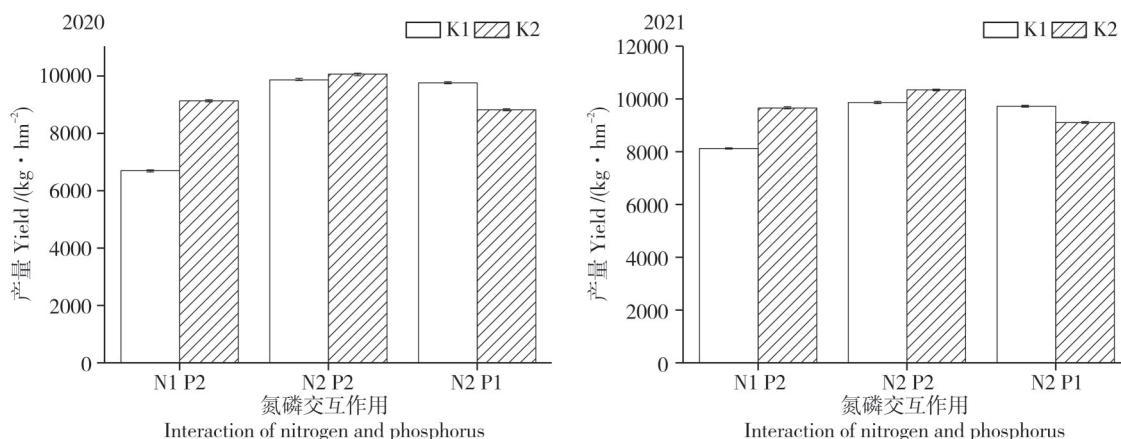


图3 不同氮磷肥用量对钾肥效果的影响

Fig. 3 Effect of different N and P on K fertilizer

表6 肥料效应函数拟合方程
Table 6 Fitting equation of fertilizer effect function

年份 Year	拟合方程 Fitting equation	R ²	方案 Scheme	N/ (kg)	P ₂ O ₅ / (kg)	K ₂ O/ (kg)	籽粒产量 Seed yield/(kg/hm ²)
2020	$y=5306.32+58.08x_1-9.79x_2+13.63x_3-0.13x_1^2-0.07x_2^2+0.09x_3^2+0.13x_1x_2-0.43x_1x_3+0.17x_2x_3$	0.99	最高产量施肥配比 Fertilization ratio of production peak	151.7	195.3	102.4	9454.5
			经济最佳产量施肥配比 Optimum fertilization ratio for economic yield	142.8	179.7	101.8	9444.6
2021	$y=6483.70+31.79x_1+4.56x_2-0.27x_3-0.05x_1^2-0.05x_2^2+0.13x_3^2+0.04x_1x_2-0.23x_1x_3+0.08x_2x_3$	0.96	最高产量施肥配比 Fertilization ratio of production peak	174.0	192.0	95.9	9674.8
			经济最佳产量施肥配比 Optimum fertilization ratio for economic yield	164.1	178.5	95.5	9659.1

氮、磷、钾是植物生长发育所必需的三大营养元素^[22,23],其可以通过影响植物的群体结构及其生产性能等多种因素,最终影响和制约作物的产量,其中氮素对作物的最终产量贡献可达40%~50%^[24~26]。而油莎豆块茎产量取决于单穴粒数、总粒数和千粒重之间的均衡,其中千粒重是产量的重要决定因子,由籽粒灌浆物质累积大小决定^[27]。本研究两年数量显示N₂P₂K₃处理下油莎豆千粒重显著高于其它处理;2021年N₂P₂K₃处理下单穴粒数、总粒数均显著高于其它处理,最终导致N₂P₂K₃处理下油莎豆产量显著高于其它处理。可能由于较高钾施入有助于提高油莎豆块茎中油脂及、淀粉等营养物质的积累从而增加油莎豆千粒重,提高产量;而过多的氮施入又会导致地上部徒长,从而使油莎豆块茎产量降低,这与孙佳尧,李晓兰等人研究的施肥规律一致^[28,29],但在肥料用量上有差异,可能是由于油莎豆品种、土壤条件及气候条件不同造成的。且油莎豆对磷肥的依赖度更高。总体而言,当施肥超过一定范围时,油莎豆产量将不再增加,甚至下降,这也符合杨敏等人得出的肥料报酬递减规律^[30,31]。

3.3 氮磷钾配施对肥料利用率的影响

肥料利用率是衡量肥料施用是否合理的一项重要指标。我国化肥利用效率低,化肥品种结构不合理,养分投入比例不平衡,肥料利用率徘徊不前。主要谷物产地的氮肥利用率只有30%~50%,其余的氮养分都因流失和脱氮而损失了。磷则因为容易与土壤中的铝和铁结合成磷酸铝和磷酸铁等难溶性化合物而被固定在土壤里,所以磷肥的利用率更低,只有3%~25%。钾可以离子状态被土壤胶体吸附,不易流失,长期停留在土壤里,所以钾肥利用率可高达50%^[32]。据测算,我国每年光氮肥浪费造成损失就高达300多亿元人民币^[33]。Dobermann^[34]

曾就粮食作物的养分利用效率做过详尽的综述,认为粮食作物氮肥效率目标值为氮肥利用率为30%~50%。

本研究表明在较低的氮、磷、钾水平下,氮、磷、钾肥的偏生产力,最高分别能达到129.46 kg/kg、81.08 kg/kg、164.40 kg/kg;而在较高水平下氮、磷、钾肥的偏生产力却有所下降。而农学利用效率中氮、磷在较低水平下农学利用效率较高,最高可达到28.46 kg/kg、19.64 kg/kg而钾在高水平下农学利用效率较高,可达9.51 kg/kg。说明本实验中油莎豆块茎对钾的需求量较高。氮、磷、钾肥的过量施用使得部分肥料流失浪费,虽然产量得到提升但偏生产力与农学效率均显著降低,表明肥料过量的施入会导致经济效益下降。因此,要在保证作物产量不明显下降的条件下,适量减少化肥施入,以提高肥料利用率^[35]。这与王道中等^[36]提出适量的化肥减施能有效提高肥料的农业生产效率,减少肥量浪费的结论一致。在我国粮食生产中具有一定的应用前景和指导意义。

3.4 氮磷钾配施氮磷钾肥的互作效应的影响

植物的营养状况由多因子共同决定,其中营养元素在土壤—植物系统内的交互作用对改善植物营养元素的吸收、指导合理施肥提高肥效等具有实际指导意义。人们早就发现,在一定条件下,两个或多个养分元素的结合生理效应小于或超过它们各自效应和,即植物养分离子之间存在交互作用关系。本研究发现氮磷钾肥对油莎豆产量存在明显的互作效应,两年数据均表现为在中磷中钾、中氮中钾、中氮中磷水平时最利于氮、磷、钾肥效的发挥。这与Cooke研究表明,增加K不仅消除提高产量的障碍因素,而且提高了氮肥增产效果,在较低的N、K水平下就可达到较高的稳定阶段一致^[37]。也有研究表明NO₃⁻、PO₄³⁻与K⁺所带电荷相反,NO₃⁻、PO₄³⁻

的主动吸收能促进 K^+ 的吸收,氮磷钾间存在协同调控机制,以实现植物不同营养的平衡^[38,39]。 K 对 N 、 P 的吸收的促进作用,不仅表现在 K 促进 N 、 P 吸收和积累,还表现在供应 K 也会提高 N 、 P 的利用效率。

因此 N 、 P 、 K 协调和足量有利于植物营养体的发育和延长,植物中不同营养元素间并不是独立调控的。研究发现,氮磷钾间存在协同调控机制,以实现植物不同营养的平衡^[40]。本研究与周龙等人结果一致^[41-43]。

4 结论

本研究结果显示,氮磷钾肥的不同配施对油莎豆生物量及产量有较大的影响, $N_3P_2K_2$ 处理下油莎豆地上部生物量显著高于其它处理, $N_2P_2K_3$ 处理下油莎豆地下生物量及块茎产量显著高于其它处理,两年块茎总粒数均高于大部分处理,且油莎豆对于磷肥依赖较大。在较低水平的配施下可提高氮磷钾肥偏生产力;并在较低水平的配施下可提高氮磷钾肥农学利用效率,而高水平下可提高钾肥利用效率,更有利于氮磷钾肥发挥作用。根据三元二次回归方程对油莎豆产量计算得出两年最高产量的施肥配比分别为 $N:P_2O_5:K_2O = 151.7:195.3:102.4$ 、 $N:P_2O_5:K_2O = 174.0:192.0:95.9 \text{ kg/hm}^2$,达到最高产量。

本研究以油莎豆为研究对象,采用“3414”试验方案结果,结果符合油莎豆的生产实际,得出较合理的施肥配比,符合油莎豆对养分的需求规律,该结果对油莎豆的种植中实现养分平衡供应,提高油莎豆产量,提高肥料利用率,减少土壤污染等方面具有重要意义。

参考文献:

- [1] 李佳婷. 油莎豆的组织培养及多倍体诱导[D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2019.
- [2] 张学昆. 我国油莎豆产业研发进展报告[J]. 中国农村科技, 2019(4): 67-69. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9768.2019.04.022.
- [3] Defelice M S. Yellow nutsedge *Cyperus esculentus* L. - snack food of the Gods [J]. Weed Technol, 2002, 16(4): 901-907. DOI: 10.1614/0890-037x(2002)016[0901: yncels]2.0.co;2.
- [4] Arafat S M, Gaafar A M, Basuny A M, et al. Chufa tubers (*Cyperus esculentus* L.): as a new source of food[J]. World Appl Sci J, 2009, 7(2): 151-156.
- [5] 沈庆雷. 油莎豆高产优质栽培初步研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2010.
- [6] 曹稀琦, 任永峰, 路战远, 等. 油莎豆的特性及其开发利用研究进展[J]. 北方农业学报, 2022, 50(1): 66-74.
- [7] 阳振乐. 油莎豆的特性及其研究进展[J]. 北方园艺, 2017(17): 192-201. DOI: 10.11937/bfyy.20170541.
- [8] Pascual-Seva N, Pascual B. Determination of crop coefficient for chufa crop (*Cyperus esculentus* L. var. *sativus* Boeck.) for sustainable irrigation scheduling[J]. Sci Total Environ, 2021, 768: 144975. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.144975.
- [9] 刘亚兰, 赵月, 徐梦琦, 等. 极端干旱区种植行距对油莎豆生长及土壤特性的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(11): 2486-2493. DOI: 10.11733/j.issn.1007-0435.2021.11.014.
- [10] 杨鹭生, 李国平. NaCl胁迫对油莎豆块茎萌发与幼苗生长的影响[J]. 资源开发与市场, 2014, 30(7): 771-774. DOI: 10.3969/j.issn.1005-8141.2014.07.002.
- [11] Adekiya A O, Olaniran A F, Adenusi T T, et al. Effects of cow dung and wood biochars and green manure on soil fertility and tiger nut (*Cyperus esculentus* L.) performance on a savanna Alfisol[J]. Sci Rep, 2020, 10(1): 21021. DOI: 10.1038/s41598-020-78194-5.
- [12] 张调明. 旱地油莎豆栽培模式试验报告[J]. 江西农业, 2020(4): 34-35. DOI: 10.19394/j.cnki.issn1674-4179.2020.04.023.
- [13] 吴志勇, 闫静, 施维新, 等. “3414”肥料效应试验的设计与统计分析[J]. 新疆农业科学, 2008, 45(1): 135-141.
- [14] 陈伦寿, 李仁岗. 农田施肥原理与实践[M]. 北京: 农业出版社, 1984.
- [15] 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. DOI: 10.3321/j.issn:1008-505X.2002.04.006.
- [16] 郑亚萍, 信彩云, 王才斌, 等. 磷肥对花生根系形态、生理特性及产量的影响[J]. 植物生态学报, 2013, 37(8): 777-785. DOI: 10.3724/SP.J.1258.2013.00081.
- [17] 康利允, 沈玉芳, 岳善超, 等. 不同水分条件下分层施磷对冬小麦根系分布及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 140-147.
- [18] 陆欣, 谢英荷. 土壤肥科学[M]. 2版. 北京: 中国农业大学出版社, 2011.
- [19] 武际, 张立平, 朱宏斌, 等. 油菜的钾肥效应研究[J]. 安徽农业科学, 2001, 29(6): 768-769. DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2001.06.035.
- [20] 李志玉, 郭庆元, 廖星, 等. 不同氮水平对双低油菜中双9号产量和品质的影响[J]. 中国油料作物学报, 2007, 29(2): 184-188. DOI: 10.3321/j.issn:1007-9084.2007.02.016.

- [21] 何昌福. 连续施氮对旱地覆膜马铃薯干物质积累与分配以及对根系生长的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
- [22] Biagiotti G, Valeri S V, da Cruz M C P, et al. Fertilização potássica na implantação de *Corymbia citriodora* (hook.) K.D. hill & L.A.S. jonhson[J]. Sci For, 2017, 45(113). DOI:10.18671/scifor.v45n113.12.
- [23] Dias L P R, Gatiboni L, Brunetto G, et al. Relative efficiency of rock phosphates in fertilization of planting seedlings *Eucalyptus dunnii* Maiden and *Eucalyptus benthamii* Maiden et cambage in soil with and without liming [J]. Ciencia Florestal, 2015, 25: 37–48. DOI:10.1590/1980–509820152505037.
- [24] da Silva P H M, Poggiani F, Libardi P L, et al. Fertilizer management of eucalypt plantations on sandy soil in Brazil: initial growth and nutrient cycling [J]. For Ecol Manag, 2013, 301: 67–78. DOI:10.1016/j.foreco.2012.10.033.
- [25] Kindred D R, Verhoeven T M O, Weightman R M, et al. Effects of variety and fertiliser nitrogen on alcohol yield, grain yield, starch and protein content, and protein composition of winter wheat[J]. J Cereal Sci, 2008, 48(1): 46–57. DOI:10.1016/j.jcs.2007.07.010.
- [26] Sylvester-Bradley R, Kindred D R. Analysing nitrogen responses of cereals to prioritize routes to the improvement of nitrogen use efficiency[J]. J Exp Bot, 2009, 60(7): 1939–1951. DOI:10.1093/jxb/erp116.
- [27] 赵亚南, 宿敏敏, 吕阳, 等. 减量施肥下小麦产量、肥料利用率和土壤养分平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 864–873. DOI:10.11674/zwyf.16417.
- [28] 孙佳尧, 李志刚, 孟祥军, 等. 氮肥处理下油莎豆叶片生理特性和籽粒品质与产量相关研究[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2020, 35(4): 327–332. DOI:10.14045/j.cnki.15–1220.2020.04.009.
- [29] 李晓兰, 李瑞辉, 尹慧来, 等. 氮磷钾配施对半干旱风沙区油莎豆产量构成因素的影响[J]. 农业与技术, 2021, 41(21): 13–17. DOI:10.19754/j.nyyjs.20211115005.
- [30] 杨敏. 新疆干旱气候区油莎豆对不同氮磷钾配施响应的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2013.
- [31] 董素钦. 应用“3414”设计研究氮磷钾肥料不同配比对水稻产量的效应[J]. 中国农村小康科技, 2006(12): 60–62.
- [32] 张玉树, 丁洪, 卢春生, 等. 控释肥料对花生产量、品质以及养分利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 700–706. DOI: 10.3321/j. issn: 1008–505X.2007.04.026.
- [33] 张树清. 中国农业肥料利用现状、问题及对策[J]. 中国农业信息, 2006(7): 11–14. DOI: 10.3969/j. issn.1672–0423.2006.07.003.
- [34] Dobermann A. Nitrogen use efficiency–state of the art. Paper of the IFA International Workshop on Enhanced–Efficiency Fertilizers[R]. Frankfurt, Germany. 2005.
- [35] 王伟妮, 鲁剑巍, 何予卿, 等. 氮、磷、钾肥对水稻产量、品质及养分吸收利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(6): 645–653. DOI: 10.3969/j. issn. 1001–7216.2011.06.012.
- [36] 王道中, 张成军, 郭熙盛. 减量施肥对水稻生长及氮素利用率的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 161–165. DOI:10.19336/j.cnki.trtb.2012.01.031.
- [37] Cooke G W, Gething P A. Changing concepts on the use of potash. potassium research – review and trends [J]. 1978.
- [38] 曹志洪, 周秀如, 李仲林, 等. 我国烟叶含钾状况及其与植烟土壤环境条件的关系[J]. 中国烟草, 1990, 11(3): 6–13, 20. DOI: 10.13496/j. issn. 1007–5119.1990.03.002.
- [39] 储成才, 王毅, 王二涛. 植物氮磷钾养分高效利用研究现状与展望[J]. 中国科学: 生命科学, 2021, 51(10): 1415–1423. DOI:10.1360/SSV–2021–0163.
- [40] 祖艳群, 林克惠. 氮钾营养的交互作用及其对作物产量和品质的影响[J]. 土壤肥料, 2000(2): 3–7. DOI: 10.3969/j.issn.1673–6257.2000.02.001.
- [41] 鲁泽刚, 周龙, 杨丽梅. 不同施肥水平对大麦产量的影响及肥料效应[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2018, 49(5): 744–749. DOI: 10.3969/j. issn.1000–2324.2018.05.003.
- [42] 周龙, 曾志伟, 杨德荣. 不同施肥水平对玉米产量的影响及肥料效应[J]. 贵州农业科学, 2019, 47(1): 36–42. DOI:10.3969/j.issn.1001–3601.2019.01.009.
- [43] 李浩, 徐瑞, 施辉能, 等. 氮磷钾配施对玛咖产量和品质的影响及肥料效应[J]. 核农学报, 2021, 35(10): 2404–2412. DOI: 10.11869/j. issn. 100–8551.2021.10.2404.

(责任编辑:郭学兰)