



密度及氮磷钾肥用量对绿豆产量质量的影响

代顺冬¹, 曾华兰^{1, 2}, 张骞方¹, 华丽霞^{1, 2}, 韦树谷¹, 何炼¹,
孙小芳^{1, 2}, 况再银¹, 蒋秋平¹, 叶鹏盛^{1*}

(1. 四川省农业科学院经济作物研究所, 四川 成都 610300;
2. 农业农村部西南作物有害生物综合治理重点实验室, 四川 成都 610300)

摘要: 研究不同种植密度及氮、磷、钾肥用量对绿豆产量单一指标及产量质量综合评价指标的影响, 为绿豆高产优质生产提供理论依据和技术支撑。以密度及氮、磷、钾肥用量为试验因素, 采用四元二次正交旋转组合设计, 开展田间试验, 测定干籽粒重、纯粮率、蛋白质、脂肪、淀粉 5 项产量质量指标, 采用基于博弈论的组合赋权法综合层次分析法和熵权法权重, 确定各单一指标权重, 并运用逼近理想解的排序方法构建绿豆产量质量综合评价指标。建立密度及氮、磷、钾肥用量与产量单一指标及产量质量综合评价指标的二次回归数学模型, 开展主因素、单因素、交互效应及优化方案分析。干籽粒重、纯粮率、蛋白质、脂肪、淀粉权重分别为 0.4070、0.2112、0.1246、0.0949、0.1623。当其他因素为中间水平时, 绿豆产量单一指标及产量质量综合评价指标分别随密度、施氮量、施磷量、施钾量增加呈开口向下的抛物线型变化。各因素对绿豆产量单一指标、产量质量综合评价指标的主效应表现为密度 > 施钾量 > 施磷量 > 施氮量。密度、施氮量、施磷量、施钾量之间存在正交互作用。密度为 173004 ~ 194590 株/hm², 氮、磷、钾肥用量分别为 N 67.33 ~ 77.84 kg/hm²、P₂O₅ 107.26 ~ 116.75 kg/hm²、K₂O 86.90 ~ 90.81 kg/hm², 绿豆产量、产量质量综合均较优。

关键词: 绿豆; 密度; 氮、磷、钾肥用量; 产量; 质量; 综合评价

绿豆 (*Vigna radiata* L.) 是广受欢迎的医食两用作物, 营养丰富, 在我国广泛种植^[1-3]。在绿豆生产中, 密度及氮、磷、钾肥用量或搭配不当常导致绿豆产量减少、质量下降、肥料利用率降低、硝酸盐污染等问题^[1, 4-7]。产量、质量指标对密度、氮、磷、钾因素的响应并不完全一致^[8-11]。这就需要构建绿豆产量质量综合评价体系, 探讨密度及氮、磷、钾肥多因子对绿豆产量质量综合评价指标的影响, 使各因素及指标发挥出协同作用, 以达到提质增产、减少污染的目的, 实现绿豆产业可持续发展。

目前, 关于密度、施肥对绿豆产量的影响, 前人已做了较为深入的研究。邓昆鹏等^[1]研究表明,

N、P₂O₅、K₂O 用量分别为 55.6 ~ 65.8、81.9 ~ 96.0、71.75 ~ 90.65 kg/hm², 株距为 9.62 ~ 10.62 cm, 绿豆产量大于 1332.05 kg/hm²。纪祥龙等^[4]研究表明, 中氮处理 (N 38 kg/hm²) 的产量和籽粒氮磷钾积累量表现最高。王乐政等^[12]研究表明, 施氮量为 53.73 kg/hm², 密度为 141700 株/hm², 绿豆最高产量可达到 1664.45 kg/hm²。邢宝龙等^[13]研究表明, 密度与施氮量互作时, 种植密度为 150000 株/hm²、施氮量为 150 kg/hm² 最适宜。Yin 等^[7]研究表明, 优化配施氮、磷、钾肥, 绿豆产量较传统施肥提高 19.6%。Abd 等^[14]研究表明, 合理的磷、钾搭配可显著提高绿豆产量。Buriro 等^[15]研究表明, 不同施钾水平对绿豆生长及产量有显著影响。郝曦煜等^[16]研究表明, 当 N、P₂O₅、K₂O 分别为 81.2 ~ 89.3、124.8 ~ 133.5、82.6 ~ 90.7 kg/hm² 时, 绿豆目标产量为 2104.6 ~ 2215.2 kg/hm²。王桂梅等^[17]研究表明, 少施或缺施肥料对绿豆的长势和产量有不同程度的影响, 合理的氮、磷、钾配比可明显促进绿豆生长, 在中等肥力情况下, 最佳施用量为 N 66.6 kg/hm²、P₂O₅ 127.2 kg/hm²、K₂O 121.0 kg/hm²。

收稿日期: 2023-12-20; 录用日期: 2024-02-06

基金项目: 四川省财政自主创新专项 (2022ZZCX081); 四川省财政专项 (1+1KJGG); 国家现代农业产业技术体系四川杂粮创新团队 (SCCXTD-2024-20); 2024 年数字农业川渝重点实验室-火花计划。

作者简介: 代顺冬 (1985-), 助理研究员, 硕士, 主要从事绿豆栽培育种工作。E-mail: dai_shun_dong@126.com。

通讯作者: 叶鹏盛, E-mail: yeps18@163.com。

李莉等^[18]研究表明,合理施用磷肥可以提高磷肥利用率和绿豆产量,施用过量则出现报酬递减现象;前人关于施肥对绿豆质量的影响研究也有报道^[6]。然而,前人对绿豆的研究大多集中在密度、肥料单因素或不同肥料用量和对比对产量或质量单一指标的效应上,难以协调多因子及多指标间的关系,获得产量质量综合优化的密度、施肥方案。

综合评价是一个多属性、多层次的决策问题^[19],关键在于准确确定各单一指标的权重。以层次分析法(AHP)为代表的主观赋权法和以熵权法(EWM)为代表的客观赋权法为目前常见确定权重方法^[20]。AHP法具有灵活、简洁、系统、定性与定量相结合的特点,但没有反映观测值的变异程度^[21-22],难以得到对实际案例有针对性的具体结论^[23]。EWM法赋权不受人为设定量化指标的主观性影响,评价过程的再现性较强^[24-25],但指标的重要性不一定与EWM法确定的权值成正比^[26]。基于博弈论的组合赋权法可在不同权重之间找到一致或妥协,得到更加合理的权重^[27-28]。应用基于博弈论的组合赋权法综合AHP法和EWM法权重,已应用在番茄^[20]、黄瓜^[21]等作物评价上。逼近理想解的排序方法(DTOPSIS)有效解决了各指标间无统一的度量标准及最优解不统一的难题^[22, 29-30],其与权重结合被应用于大豆^[31]、玉米^[32]、油菜^[33]、烟草^[34]等作物综合评价。纯粮率被《绿豆》(GB/T 10462—2008)列为质量判定重要指标,蛋白质、脂肪、淀粉为绿豆基本营养成分^[35-36]。在构建绿豆产量质量综合评价体系的基础上,全面系统地研究密度和氮、磷、钾多因素及其互作对绿豆产量质量的综合影响尚鲜见报道。

本研究运用基于博弈论的组合赋权法综合AHP法和EWM法权重得到更为合理的权重,结合DTOPSIS法构建产量质量综合评价体系。在此基础上,建立密度及氮、磷、钾肥用量与产量单一指标、产量质量综合评价指标的二次回归数学模型,通过单因素及交互效应分析与模型预测,定量研究绿豆产量单一指标、产量质量综合指标对密度及氮、磷、钾肥因子的响应关系,以期对绿豆优质高产生提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试绿豆品种为四川省农业科学院经济作物研究所选育的‘川渝绿2号’。供试肥料为尿素(N 46.4%)、过磷酸钙(P₂O₅ 12%)和硫酸钾(K₂O 52%)。供试土壤为水稻土,pH值6.67,有机质22.31 g/kg,全氮0.84 g/kg,碱解氮78.37 mg/kg,有效磷10.36 mg/kg,速效钾88.31 mg/kg。

1.2 试验设计

研究试验于2020年5月在四川省农业科学院经济作物研究所青白江试验基地进行。试验设种植密度(X_1)、施氮量(X_2)、施磷量(X_3)和施钾量(X_4)4个因素(表1),采用四元二次正交旋转组合设计的1/2实施方案,共23个处理(表2),3次重复,69个小区。小区面积20 m²(8 m×2.5 m)。采用条播方式播种,行距0.4 m。小区的播种量按留苗数的1.5倍播种。2020年5月21日播种,5月31日定苗。成熟后分2次采收,分别为7月26第1次采收,8月7日第2次采收。氮、磷、钾肥全部作为基肥一次性施入。试验方案见表2。

表1 试验因素水平及编码

因素	变化间距	变量设计及水平编码				
		-1.682	-1	0	1	1.682
密度(株/hm ²) X_1	44590	75000	105410	150000	194590	225000
氮肥用量(N kg/hm ²) X_2	17.84	30.00	42.16	60.00	77.84	90.00
磷肥用量(P ₂ O ₅ kg/hm ²) X_3	26.75	45.00	63.25	90.00	116.75	135.00
钾肥用量(K ₂ O kg/hm ²) X_4	20.81	35.00	49.19	70.00	90.81	105.00



表 2 试验处理

处理号	密度	施氮量	施磷量	施钾量
1	1 (194590)	1 (77.84)	1 (116.75)	1 (90.81)
2	1 (194590)	1 (77.84)	-1 (63.25)	-1 (49.19)
3	1 (194590)	-1 (42.16)	1 (116.75)	-1 (49.19)
4	1 (194590)	-1 (42.16)	-1 (63.25)	1 (90.81)
5	-1 (105410)	1 (77.84)	1 (116.75)	-1 (49.19)
6	-1 (105410)	1 (77.84)	-1 (63.25)	1 (90.81)
7	-1 (105410)	-1 (42.16)	1 (116.75)	1 (90.81)
8	-1 (105410)	-1 (42.16)	-1 (63.25)	-1 (49.19)
9	-1.682 (75000)	0 (60.00)	0 (90.00)	0 (70.00)
10	1.682 (225000)	0 (60.00)	0 (90.00)	0 (70.00)
11	0 (150000)	-1.682 (30.00)	0 (90.00)	0 (70.00)
12	0 (150000)	1.682 (90.00)	0 (90.00)	0 (70.00)
13	0 (150000)	0 (60.00)	-1.682 (45.00)	0 (70.00)
14	0 (150000)	0 (60.00)	1.682 (135.00)	0 (70.00)
15	0 (150000)	0 (60.00)	0 (90.00)	-1.682 (35.00)
16	0 (150000)	0 (60.00)	0 (90.00)	1.682 (105.00)
17	0 (150000)	0 (60.00)	0 (90.00)	0 (70.00)
18	0 (150000)	0 (60.00)	0 (90.00)	0 (70.00)
19	0 (150000)	0 (60.00)	0 (90.00)	0 (70.00)
20	0 (150000)	0 (60.00)	0 (90.00)	0 (70.00)
21	0 (150000)	0 (60.00)	0 (90.00)	0 (70.00)
22	0 (150000)	0 (60.00)	0 (90.00)	0 (70.00)
23	0 (150000)	0 (60.00)	0 (90.00)	0 (70.00)

注：括号前面的数值为编码值，括号里的数值为编码值对应的实际用量。密度单位为株/hm²，氮、磷、钾肥用量单位均为 kg/hm²。

1.3 测定项目和方法

采收后测定绿豆干籽粒重、纯粮率、蛋白质含量、脂肪含量、淀粉含量。蛋白质含量测定方法参照《食品中蛋白质的测定》(GB 5009.5—2016)，脂肪含量测定方法参照《食品中脂肪的测定》(GB 5009.6—2016)，淀粉含量测定方法参照《谷物制品中的淀粉(总量)测定》(AOAC 996.11)。

1.4 数据处理

采用 Yaahp 12.9 构建 AHP 法层次模型，采用 Excel 2021 进行 AHP 法、EWM 法、基于博弈论的组合赋权法和 DTOPSIS 法相关计算，采用 DPS 9.01 拟合二次多项式，采用 MATLAB R2017b 绘制耦合效应图及模型预测，采用 SPSS 26.0 进行 Spearman

相关性分析。

2 结果与分析

2.1 绿豆产量质量单一指标权重的确定

2.1.1 AHP 法确定单一指标权重

根据各指标性质，构建绿豆产量质量层次模型(图 1)。邀请 10 位相关专家对指标重要程度进行两两比较打分，按照 1 ~ 9 标度法给出判断值。将各专家给出的判断值平均后，构建各层次的判断矩阵，计算各指标的权重，并进行一致性检验(表 3、4，具体计算方法参见文献[37–39])。AHP 法分析结果表明，各单一指标权重排序为干籽粒重 > 纯粮率 > 淀粉 > 蛋白质 > 脂肪。

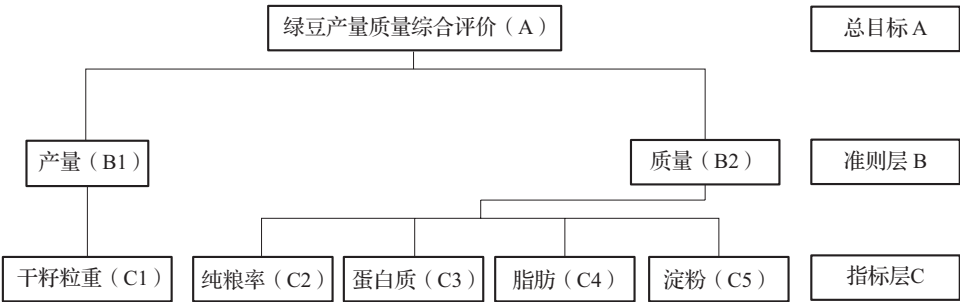


图 1 绿豆产量质量层次模型

表 3 总目标层 A ~ 准则层 B 判断矩阵及权重

总目标层 A ~ 准则层 B	产量 (B1)	质量 (B2)	局部权重 (W1)	最终权重 (W2)
产量 (B1)	1.0000	0.8200	0.4505	0.4505
质量 (B2)	1.2195	1.0000	0.5495	0.5495

注：一致性检验参数 CR=0<0.1，具有整体的满意一致性。

表 4 准则层 B2 ~ 指标层 C 判断矩阵及权重

准则层 B2 ~ 指标层 C	纯粮率 (C2)	蛋白质 (C3)	脂肪 (C4)	淀粉 (C5)	局部权重 (W3)	最终权重 (W4)
纯粮率 (C2)	1.0000	2.0000	2.6000	1.4000	0.3871	0.2127
蛋白质 (C3)	0.5000	1.0000	1.4000	0.8333	0.2059	0.1131
脂肪 (C4)	0.3846	0.7143	1.0000	0.6167	0.1512	0.0831
淀粉 (C5)	0.7143	1.2000	1.6216	1.0000	0.2559	0.1406

注：一致性检验参数 CR=0.0013<0.1，具有整体的满意一致性。

2.1.2 EWM 法确定单一指标权重

用密度肥料田间试验各指标的实测值构建评价矩阵，采用 EWM 法计算各指标的客观权重（表 5，

具体计算方法参见文献 [40]）。EWM 法分析结果表明，各单一指标权重排序为淀粉 > 纯粮率 > 蛋白质 > 干籽粒重 > 脂肪。

表 5 不同方法确定的单一指标权重

指标	干籽粒重 (C1)	纯粮率 (C2)	蛋白质 (C3)	脂肪 (C4)	淀粉 (C5)
层次分析法权重 (ω_1)	0.4505	0.2127	0.1131	0.0831	0.1406
熵权法权重 (ω_2)	0.1769	0.2032	0.1855	0.1576	0.2769
基于博弈论的组合权重 (ω^*)	0.4070	0.2112	0.1246	0.0949	0.1623

2.1.3 基于博弈论的组合赋权法确定单一指标权重

AHP 法为主观权重法，容易受专家知识及偏见的影响，EWM 法为客观权重法，容易忽略决策者的主观信息和实践经验。通过基于博弈论的组合赋权法综合主观权重和客观权重，可以获得更合理的权重^[41]。详细计算方法参见文献 [41–44]，计算出最终结果见表 5。基于博弈论的组合赋权法分析结果表明，各单一指标权重排序为干籽粒重

(0.4070) > 纯 粮 率 (0.2112) > 淀 粉 (0.1623) > 蛋 白 质 (0.1246) > 脂肪 (0.0949)。

2.2 DTOPSIS 法综合评价绿豆产量质量

根据田间试验产量质量数据构建原始数据矩阵，按正向指标无量纲化各评价指标，结合基于博弈论的组合赋权法确定的单一指标权重计算决策矩阵，最终得到各处理对理想解的相对接近度 (C_i 值)（表 6，具体计算方法参见文献 [30, 34]）。

表 6 DTOPSIS 法确定的绿豆产量质量综合指标

编号	干籽粒重 (C1)	纯粮率 (C2)	蛋白质 (C3)	脂肪 (C4)	淀粉 (C5)	S^-	S^+	C_i 值	排序
1	2140	97.32	25.39	1.42	51.45	0.2455	0.0137	0.9471	1
2	1435	96.31	25.01	1.51	50.47	0.1115	0.1347	0.4530	15
3	1275	95.32	25.15	1.46	51.18	0.0811	0.1651	0.3293	20
4	1455	96.67	24.91	1.57	51.46	0.1157	0.1306	0.4697	12
5	1140	96.88	25.28	1.51	51.06	0.0559	0.1905	0.2270	22
6	1285	97.12	25.17	1.46	51.34	0.0832	0.1631	0.3378	19
7	1345	98.36	25.82	1.55	52.25	0.0954	0.1513	0.3866	18
8	1240	96.34	25.6	1.49	49.68	0.0745	0.1718	0.3026	21
9	850	97.16	25.93	1.55	50.28	0.0116	0.2456	0.0451	23
10	1445	94.41	25.08	1.57	51.30	0.1137	0.1327	0.4613	13
11	1535	96.72	25.51	1.56	52.13	0.1310	0.1153	0.5318	11
12	1365	94.64	25.05	1.53	49.51	0.0982	0.1482	0.3984	16
13	1435	97.48	25.06	1.55	50.46	0.1118	0.1345	0.4539	14
14	1600	96.82	25.09	1.59	51.15	0.1432	0.1031	0.5815	10
15	1355	95.16	24.66	1.52	49.61	0.0962	0.1501	0.3906	17
16	1620	98.23	25.82	1.58	52.98	0.1475	0.0990	0.5984	9
17	1980	97.80	25.48	1.59	52.87	0.2156	0.0307	0.8754	4
18	1840	98.31	25.44	1.6	52.52	0.1890	0.0572	0.7678	7
19	1995	97.44	25.32	1.58	52.41	0.2183	0.0281	0.8860	3
20	1975	98.81	25.54	1.61	52.86	0.2148	0.0315	0.8722	5
21	1890	98.01	25.74	1.54	52.51	0.1984	0.0479	0.8055	6
22	1995	98.32	25.63	1.56	52.37	0.2183	0.0280	0.8863	2
23	1820	97.18	25.65	1.63	52.49	0.1853	0.0610	0.7523	8

运用 SPSS 26.0 将各单一产量质量指标实测值和 DTOPSIS 法确定的 C_i 值进行 Spearman 相关性分析可知, C_i 值与各单一指标实测值均呈正相关, 其中与干籽粒重、纯粮率、脂肪、淀粉呈极显著正相关, 说明 C_i 值可作为产量质量综合评价指标, 用于分析密度、施肥对绿豆产量质量的综合影响。

根据 DTOPSIS 法分析原理, $0 < C_i < 1$, C_i 值越大, 产量质量综合评价越优^[30]。由表 6 可知, 处理 1 产量质量综合评价指标 (C_i 值) 最大, 说明其产量质量综合最优; 处理 9 产量质量综合评价指标最小, 表明其产量质量综合最差。中间水平处理 (处理 17 ~ 23) 产量质量综合评价指标大小排序均在前 10, 可见, 其产量质量综合较优。

2.3 密度、施肥对绿豆产量及产量质量综合评价指标的影响

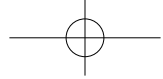
运用 DPS 9.01 将密度及氮、磷、钾肥用量

4 个因素的水平编码值与产量指标、产量质量综合评价 C_i 值分别进行二次多项拟合, 得到模型如下:

$$Y=1893.47+168.10X_1+29.22X_2+55.83X_3+115.74X_4-227.43X_1^2-120.48X_2^2-96.61X_3^2-107.22X_4^2+62.81X_1X_2+35.31X_1X_3+39.69X_1X_4+39.69X_2X_3+35.31X_2X_4+62.81X_3X_4 \quad (1)$$

$$Y'=0.8105+0.1205X_1+0.0185X_2+0.0397X_3+0.0863X_4-0.1711X_1^2-0.0962X_2^2-0.0776X_3^2-0.0858X_4^2+0.0453X_1X_2+0.0238X_1X_3+0.0275X_1X_4+0.0275X_2X_3+0.0238X_2X_4+0.0453X_3X_4 \quad (2)$$

Y 表示产量指标、 Y' 表示产量质量综合评价指标, X_1 、 X_2 、 X_3 和 X_4 分别为密度、施氮量、施磷量和施钾量的编码值。方差分析结果表明, 模型 (1) $P=0.0039 < 0.01$, 模型 (2) $P'=0.0027 < 0.01$,



说明 2 个模型回归极显著,能分别反映产量指标、产量质量综合评价指标随各试验因子的变化情况,可以用模型进行分析和预测。

2.3.1 主因素效应分析

经过无量纲线性编码代换后,偏回归系数已标准化,直接比较一次项回归系数绝对值的大小就可以判断各试验因素对于绿豆产量及产量质量综合评价指标的影响大小^[1, 21, 44]。模型(1)密度、施氮量、施磷量、施钾量一次项回归系数分别为 168.10、29.22、55.83、115.74,模型(2)密度、施氮量、施磷量、施钾量一次项回归系数分别为 0.1205、0.0185、0.0397、0.0863。因此,4 个因素对于绿豆产量单一指标以及产量质量综合评价指标的影响大小顺序为密度(X_1)>施钾量(X_4)>施磷量(X_3)>施氮量(X_2)。

2.3.2 单因素对产量及产量质量综合评价指标的影响

由于采用正交试验设计,且二次回归模型中各项偏回归系数彼此独立^[44],因此可固定其他因素为 0 水平,对二次回归模型(1)进行降维处理,得到各因素对于绿豆产量指标的一元二次偏回归子模型(3)~(6),对二次回归模型(2)进行降维处理,得到各因素对于绿豆产量质量综合评价指标的一元二次偏回归子模型(7)~(10),如下:

$$\text{密度: } Y_1 = 1893.47 + 168.10X_1 - 227.43X_1^2 \quad (3)$$

$$\text{施氮量: } Y_2 = 1893.47 + 29.22X_2 - 120.48X_2^2 \quad (4)$$

$$\text{施磷量: } Y_3 = 1893.47 + 55.83X_3 - 96.61X_3^2 \quad (5)$$

$$\text{施钾量: } Y_4 = 1893.47 + 115.74X_4 - 107.22X_4^2 \quad (6)$$

$$\text{密度: } Y_1' = 0.8105 + 0.1205X_1 - 0.1711X_1^2 \quad (7)$$

$$\text{施氮量: } Y_2' = 0.8105 + 0.0185X_2 - 0.0962X_2^2 \quad (8)$$

$$\text{施磷量: } Y_3' = 0.8105 + 0.0397X_3 - 0.0776X_3^2 \quad (9)$$

$$\text{施钾量: } Y_4' = 0.8105 + 0.0863X_4 - 0.0858X_4^2 \quad (10)$$

由模型(3)~(10)可知,当其他因素为中间水平时,绿豆产量及产量质量综合评价指标分别随密度、施氮量、施磷量、施钾量增加呈开口向下的抛物线型变化。可见,当其他因素为中间水平时,密度、施氮量、施磷量、施钾量过高或过低均不利于产量及产量质量综合评价指标的提升。

2.3.3 两因素交互效应对产量及产量质量综合评价指标的影响

在多因素试验中,单因素效应不是孤立存在的,要揭示因素间的耦合效应,需对因素间的交互

作用进行分析^[45]。对模型(1)降维处理后可以得到子模型(11)~(16),对模型(2)降维处理后可以得到子模型(17)~(22),如下:

$$Y_{12} = 1893.47 + 168.10X_1 + 29.22X_2 - 227.43X_1^2 - 120.48X_2^2 + 62.81X_1X_2 \quad (11)$$

$$Y_{13} = 1893.47 + 168.10X_1 + 55.83X_3 - 227.43X_1^2 - 96.61X_3^2 + 35.31X_1X_3 \quad (12)$$

$$Y_{14} = 1893.47 + 168.10X_1 + 115.74X_4 - 227.43X_1^2 - 107.22X_4^2 + 39.69X_1X_4 \quad (13)$$

$$Y_{23} = 1893.47 + 29.22X_2 + 55.83X_3 - 120.48X_2^2 - 96.61X_3^2 + 39.69X_2X_3 \quad (14)$$

$$Y_{24} = 1893.47 + 29.22X_2 + 115.74X_4 - 120.48X_2^2 - 107.22X_4^2 + 35.31X_2X_4 \quad (15)$$

$$Y_{34} = 1893.47 + 55.83X_3 + 115.74X_4 - 96.61X_3^2 - 107.22X_4^2 + 62.81X_3X_4 \quad (16)$$

$$Y_{12}' = 0.8105 + 0.1205X_1 + 0.0185X_2 - 0.1711X_1^2 - 0.0962X_2^2 + 0.0453X_1X_2 \quad (17)$$

$$Y_{13}' = 0.8105 + 0.1205X_1 + 0.0397X_3 - 0.1711X_1^2 - 0.0776X_3^2 + 0.0238X_1X_3 \quad (18)$$

$$Y_{14}' = 0.8105 + 0.1205X_1 + 0.0863X_4 - 0.1711X_1^2 - 0.0858X_4^2 + 0.0275X_1X_4 \quad (19)$$

$$Y_{23}' = 0.8105 + 0.0185X_2 + 0.0397X_3 - 0.0962X_2^2 - 0.0776X_3^2 + 0.0275X_2X_3 \quad (20)$$

$$Y_{24}' = 0.8105 + 0.0185X_2 + 0.0863X_4 - 0.0962X_2^2 - 0.0858X_4^2 + 0.0238X_2X_4 \quad (21)$$

$$Y_{34}' = 0.8105 + 0.0397X_3 + 0.0863X_4 - 0.0776X_3^2 - 0.0858X_4^2 + 0.0453X_3X_4 \quad (22)$$

密度与施氮量、密度与施磷量、密度与施钾量、施氮量与施磷量、施氮量与施钾量、施磷量与施钾量之间交互项系数均为正数,表明他们之间存在正交互作用,其相互作用能促进绿豆产量及产量质量综合评价指标提升^[45-46]。

2.3.4 优化方案分析

运用 MATLAB R2017b 在试验因素水平范围内($[-1.682, 1.682]$),由预测模型(1)可知,当 $X_1=0.5975$ (密度: 176643 株/hm²), $X_2=0.5589$ (N: 69.97 kg/hm²), $X_3=0.8336$ (P₂O₅: 112.30 kg/hm²), $X_4=0.9865$ (K₂O: 90.53 kg/hm²)时,模型产量取得最大值,其值为 2032 kg/hm²;由预测模型(2)可知,当 $X_1=0.5159$ (密度: 173004 株/hm²), $X_2=0.4108$ (N: 67.33 kg/hm²), $X_3=0.6452$ (P₂O₅: 107.26 kg/hm²), $X_4=0.8121$ (K₂O: 86.90 kg/hm²)时,模型产量质量综合评价指标最大,其值为 0.8933,此时绿豆产量



质量综合最优,产量为 2027 kg/hm^2 。在 23 个试验处理中,处理 1 ($X_1=1, X_2=1, X_3=1, X_4=1$) 产量单一指标、产量质量综合评价指标都最高。将模型 (2) 产量质量综合评价指标最优与试验处理最优对应的编码值作为上下限 ($X_1: 0.5159 \sim 1, X_2: 0.4108 \sim 1, X_3: 0.6452 \sim 1, X_4: 0.8121 \sim 1$), 用 MATLAB R2017b 分析可知,模型 (2) 产量质量综合评价指标的取值范围为 $0.8328 \sim 0.8933$, 处于高综合评价区间;模型 (1) 产量范围为 $1967 \sim 2032 \text{ kg/hm}^2$, 也处于高产量区间。由此可见,密度 $173004 \sim 194590 \text{ 株/hm}^2$ (编码值 $0.5159 \sim 1$)、氮肥 $67.33 \sim 77.84 \text{ kg/hm}^2$ (编码值 $0.4108 \sim 1$)、磷肥 $107.26 \sim 116.75 \text{ kg/hm}^2$ (编码值 $0.6452 \sim 1$)、钾肥 $86.90 \sim 90.81 \text{ kg/hm}^2$ (编码值 $0.8121 \sim 1$), 绿豆产量、产量质量综合均较优。

3 讨论

目前关于密度、施肥对绿豆的影响方面,大多集中在密度单因素或不同肥料用量和对比对产量、质量单一指标的效果上,由于所选评价指标不同,各试验因素存在耦合效应等原因,所得试验结果不尽相同。研究密度、肥料多因素耦合效应对产量质量的综合影响,可为绿豆高产优质生产提供理论依据和技术支撑。本研究表明,基于博弈论的组合赋权法确定的单一指标权重排序为干籽粒重 (0.4070) > 纯粮率 (0.2112) > 淀粉 (0.1623) > 蛋白质 (0.1246) > 脂肪 (0.0949)。干籽粒重权重最大,脂肪权重最小。其原因可能在于干籽粒重直接影响到绿豆产量,专家评分较高,AHP 法权重较大,且 EWM 法获得的权重与其他指标权重差距不大。同理,脂肪含量较低,对质量影响相对较小,专家评分较低,AHP 法权重较小,且 EWM 法获得的权重最小。

前人的研究结果表明,随着密度^[13]及氮^[13, 16-17]、磷^[16-18]、钾^[16-17]肥用量的增加,产量呈先上升后下降的趋势。齐义杰等^[47]研究表明,随外源氮素浓度的逐步升高,可溶性蛋白质、可溶性糖含量呈先增加后递减的趋势。本研究表明,随着密度及氮、磷、钾肥用量的增加,产量质量综合评价指标呈先上升后下降的趋势,变化趋势与前人研究结果一致。其原因可能在于,在一定范围内增加密度,可截获更多的太阳辐射,使群体生产力较高而增产^[48-49],但超过适宜密度后,群体竞争加剧,叶片光合生产能力下降,个体生长率、光合物质向

籽粒分配率降低^[50],单株有效荚数、单荚粒数、单株粒重和百粒重减少^[51-52],导致产量下降;同时,过高的密度,也会对品质产生不利影响^[53],故而导致绿豆产量质量综合下降。适宜的氮肥用量可提高植株体内活性氧清除酶的合成量^[54],促进光合产物的生产、积累和运转^[13],而过量氮可能导致根瘤菌减少^[55],营养生长过旺^[56],生殖生长受抑制^[57]。缺磷不仅对磷酸甘油酸的还原和核酮糖-1,5-二磷酸的再生产生不利影响,而且使核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶、磷酸核酮糖激酶等多种光合作用相关酶活性降低,导致叶片的光合速率降低;另一方面,磷过量会因抑制核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶活性使光合作用降低^[58]。充足的钾肥有利于叶面积的快速扩展及延缓叶片衰老,提高叶片光合速率^[59]。钾肥过量可能会导致奢侈吸收钾^[60],植株 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的吸收比例^[61]及细胞渗透压失调^[62]、叶片光合性能下降^[63]。

目前关于密度及氮、磷、钾肥用量 4 个因素对绿豆产量质量的综合影响研究还鲜见报道。本研究表明,各因素对绿豆产量质量的综合影响大小排序为密度 > 施钾量 > 施磷量 > 施氮量。邓昆鹏等^[1]研究表明各因素对绿豆产量的影响大小排序为钾肥 > 株距 > 磷肥 > 氮肥。金路路等^[64]研究表明各因素对棉花产量的影响大小排序为密度 > 磷 > 钾 > 氮。杨胜先等^[65]研究表明各因素对马铃薯产量的影响大小排序为种植密度 > 钾肥施用量 > 磷肥施用量 > 氮肥施用量。王艳秋等^[66]研究表明各因素对甜高粱产量的影响大小排序为氮 > 密度 > 钾 > 磷,对甜高粱含糖锤度的影响大小排序为氮 > 钾 > 磷 > 密度。可见,不同评价体系下肥料、密度响应的主次顺序并不一致,原因可能与各因素对作物代谢和光合作用影响不同,以及不同肥料当季利用率差异较大相关^[67]。同时,本研究表明,各因素之间存在正交交互作用,其交互作用能促进绿豆产量质量综合提升。其原因可能与交互作用增强根系活力、根平均直径、硝酸还原酶活性、蔗糖磷酸合成酶活性、腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶活性^[68],促进生殖生长^[69]有关。由于密度及氮、磷、钾用量对于绿豆产量质量的综合协同调控较为复杂,且国内外相关研究报道尚少,具体原因还有待进一步深入研究。

4 结论

(1) 采用基于博弈论的组合赋权法综合 AHP



法和 EWM 法权重, 确定了干籽粒重、纯粮率、蛋白质、脂肪、淀粉权重分别为 0.4070、0.2112、0.1246、0.0949、0.1623, 并结合 DTOPSIS 法构建起绿豆产量质量综合评价体系。 C_i 值与各单一指标实测值均呈正相关, 可作为绿豆产量质量综合评价的依据。

(2) 各因素对绿豆产量单一指标及产量质量综合评价指标的主效应表现为密度 > 施钾量 > 施磷量 > 施氮量; 各因素之间存在正交互作用, 交互作用能促进绿豆产量及产量质量的综合提升。

(3) 当其他因素为中间水平时, 绿豆产量指标及产量质量综合评价指标分别随密度、施氮量、施磷量、施钾量的增加呈开口向下的抛物线型变化, 表明密度、施氮量、施磷量、施钾量过高或过低均不利于产量及产量质量的综合提升。

(4) 密度为 176643 株/hm², 氮、磷、钾肥用量分别为 69.97、112.30、90.53 kg/hm², 绿豆产量最大, 其值为 2032 kg/hm²。

(5) 密度为 173004 株/hm², 氮、磷、钾肥用量分别为 67.33、107.26、86.90 kg/hm², 绿豆产量质量综合最优, 此时产量为 2027 kg/hm²。

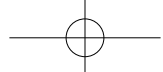
(6) 密度为 173004 ~ 194590 株/hm², 氮、磷、钾肥用量分别为 67.33 ~ 77.84、107.26 ~ 116.75、86.90 ~ 90.81 kg/hm², 绿豆产量、产量质量综合均较优。

参考文献:

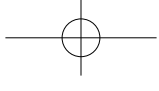
- [1] 邓昆鹏, 郭中校, 王明海, 等. 施肥量及密度对直立型绿豆品种产量效应的影响 [J]. 东北农业科学, 2020, 45 (6): 32-36.
- [2] 王丽侠, 程须珍, 王素华. 绿豆种质资源、育种及遗传研究进展 [J]. 中国农业科学, 2009, 42 (5): 1519-1527.
- [3] Squeros T, Schreinemachers P, Depenbusch L, et al. Impact and returns on investment of mungbean research and development in Myanmar [J]. Agric & Food Secur, 2020, 9 (1): 5.
- [4] 纪祥龙, 张吉立, 蒋雨洲, 等. 施氮量对绿豆光合特性、磷钾素吸收利用及产量的影响 [J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2022, 34 (2): 1-9, 31.
- [5] 叶卫军, 杨勇, 张丽亚, 等. 氮肥用量对绿豆品种皖科绿 3 号农艺性状及氮肥利用率的影响 [J]. 作物杂志, 2019 (3): 137-141.
- [6] 赵存虎, 孔庆全, 贺小勇, 等. 绿豆田氮、磷、钾最佳用量及平衡施肥技术研究 [J]. 北方农业学报, 2013 (5): 60, 87.
- [7] Yin Z C, Guo W Y, Xiao H Y, et al. Nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization to achieve expected yield and improve

yield components of mung bean [J]. Plos One, 2018, 13 (10): e0206285.

- [8] 谢亚萍, 吕忠诚, 王利民, 等. 密氮互作对灌区胡麻籽粒产量及品质的影响 [J]. 中国油料作物学报, 2021, 43 (2): 277-285.
- [9] 邵镔钊, 李丹, 蒋攀, 等. 氮、磷、钾配施对川明参产量和品质的影响 [J]. 中草药, 2018, 49 (16): 3926-3932.
- [10] 多田琦, 冀国旭, 吴雨珊, 等. 施磷钾肥和密度对秣食豆种子产量和质量的影响 [J]. 中国草地学报, 2018, 40 (1): 62-67.
- [11] 王颀, 吴春涛, 李丹丹, 等. 水肥一体化模式下日光温室黄瓜氮磷钾优化施肥方案的研究 [J]. 园艺学报, 2018, 45 (4): 764-774.
- [12] 王乐政, 高凤菊, 曹鹏鹏, 等. 夏直播绿豆规范化栽培密度与氮肥优化配置研究 [J]. 山东农业科学, 2017, 49 (1): 69-72.
- [13] 邢宝龙, 王桂梅. 不同密度与施氮水平对绿豆的产量效应 [J]. 山西农业科学, 2017, 45 (8): 1276-1278, 1320.
- [14] Abd E L, Lateef E M, Wali A M, et al. Synergistic effect of P and K interaction on yield and yield components of mungbean (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) varieties [J]. Bull Natl Res Cent, 2021, 45: 161.
- [15] Buriro M, Hussain F, Talpur G H, et al. Growth and yield response of mungbean varieties to various potassium levels [J]. Pak J Agric Eng Vet Sci, 2015, 31 (2): 203-210.
- [16] 郝曦煜, 肖焕玉, 梁杰, 等. 绿豆氮磷钾施肥效应与最优施肥量研究 [J]. 作物杂志, 2020 (5): 127-132.
- [17] 王桂梅, 邢宝龙, 张旭丽, 等. 绿豆“3414”肥效试验及平衡施肥技术 [J]. 湖北农业科学, 2018, 57 (10): 36-38, 44.
- [18] 李莉, 展铭, 陈宏伟, 等. 磷肥对绿豆氮、磷、钾积累分配及产量构成因子的影响 [J]. 湖北农业科学, 2015, 54 (23): 5835-5839.
- [19] 张泽宇, 曹红霞, 何子建, 等. 基于 AHP-EWM-TOPSIS 的温室辣椒最佳调亏灌溉方案优化研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41 (1): 111-120.
- [20] 吴雪, 王坤元, 牛晓丽, 等. 番茄综合营养品质指标构建及其对水肥供应的响应 [J]. 农业工程学报, 2014, 30 (7): 119-127.
- [21] 朱常安, 和志豪, 蔡泽林, 等. 融合镁元素的水肥多因子耦合对黄瓜综合营养品质的调控 [J]. 中国农业科学, 2019, 52 (18): 3258-3270.
- [22] 郭强, 马文清, 秦昌鲜, 等. 基于 DTOPSIS 法的广西崇左市引进甘蔗新品种 (系) 综合评价及优良品 (系) 筛选 [J]. 南方农业学报, 2021, 52 (2): 341-347.
- [23] 向欣, 罗煜, 程红胜, 等. 基于层次分析法和模糊综合评价的沼气工程技术筛选 [J]. 农业工程学报, 2014, 30 (18): 205-212.
- [24] 韩云凤, 唐茜, 石懿, 等. 基于熵权法-层次分析法结合响应面法优化养阴润目颗粒的提取工艺 [J]. 中国现代应用药学, 2022, 39 (7): 896-903.



- [25] 贾德强, 贺成柱, 丁立利. AHP-熵权法结合 Box-Behnken 响应面法优化当归微波真空干燥工艺研究 [J]. 中国农机化学报, 2023, 44 (2): 60-68.
- [26] Zou Z H, Yun Y, Sun J N. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment [J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, 18 (5): 1021-1023.
- [27] 赵奎, 刘维发, 曾鹏, 等. 基于博弈论组合赋权 TOPSIS 法的深部进路参数优选 [J]. 有色金属科学与工程, 2018, 9 (2): 70-74.
- [28] 迟道才, 马涛, 李松. 基于博弈论的可拓评价方法在灌区运行状况评价中的应用 [J]. 农业工程学报, 2008, 24 (8): 36-39.
- [29] 桑婷, 赵云霞, 杨冬艳, 等. 基于 AHP 和 DTOPSIS 法的设施鲜食草莓品种品质综合评价 [J/OL]. 分子植物育种, 1-24 [2023-03-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20221102.1502.004.html>.
- [30] 吴志会, 白玉龙, 董玉武, 等. DTOPSIS 法综合评价冀中北冬小麦新品种的初步研究 [J]. 麦类作物学报, 2005, 25 (6): 108-111.
- [31] 咎凯, 周青, 张志民, 等. 灰色关联度和 DTOPSIS 法综合分析河南区域试验中大豆新品种 (系) 的农艺性状表现 [J]. 大豆科学, 2018, 37 (5): 664-671.
- [32] 宋秀丽, 吴玥, 杨锡朗, 等. 基于熵值赋权的 DTOPSIS 法与灰色关联度分析在玉米品种综合评价中的比较 [J]. 玉米科学, 2020, 28 (2): 41-46.
- [33] Du Y D, Cui B J, Zhang Q, et al. Utilizing comprehensive decision analysis methods to determine an optimal planting pattern and nitrogen application for winter oilseed rape [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19 (9): 2229-2238.
- [34] 代顺冬, 韦树谷, 黄玲, 等. DTOPSIS、AHP 及隶属函数法综合评价四川烤烟区试品种 [J]. 西南师范大学学报 (自然科学版), 2021, 46 (6): 57-64.
- [35] 黄梦迪, 吴会琴, 王娜, 等. 不同品种绿豆理化特性和抗氧化性研究 [J]. 食品研究与开发, 2020, 41 (6): 32-37.
- [36] 林伟静, 曾志红, 钟葵, 等. 不同品种绿豆的品质及饮料加工特性研究 [J]. 核农学报, 2012, 26 (4): 685-691.
- [37] Wang Z C, Ran Y, Yu H, et al. Precision analysis for five-axis CNC milling machine based on meta-action units and integrated weights with Shannon entropy and AHP [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107: 2767-2782.
- [38] Singh J, Sharma S K, Srivastava R. AHP-Entropy based priority assessment of factors to reduce aviation fuel consumption [J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2019, 10: 212-227.
- [39] 阮永芬, 张虔, 闫明, 等. 基于 AHP-信息熵权-模糊集的岩溶塌陷风险评价 [J]. 安全与环境学报, 2022, 22 (6): 2986-2993.
- [40] He Y H, Guo H W, Jin M Z. A linguistic entropy weight method and its application in linguistic multi-attribute group decision making [J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 84: 399-404.
- [41] Lai C G, Chen X H, Chen X Y, et al. A fuzzy comprehensive evaluation model for flood risk based on the combination weight of game theory [J]. Natural Hazards, 2015, 77: 1243-1259.
- [42] Liu T Y, Deng Y, Chan F. Evidential supplier selection based on DEMATEL and game theory [J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2018, 20: 1321-1333.
- [43] 陈家良. 基于博弈论的组合赋权评价方法研究 [J]. 福建电脑, 2003 (9): 15-16.
- [44] 牛晓丽, 周振江, 李瑞, 等. 根系分区交替灌溉条件下水肥供应对番茄可溶性固形物含量的影响 [J]. 中国农业科学, 2012, 45 (5): 893-901.
- [45] 周振江, 牛晓丽, 李瑞, 等. 根系分区交替灌溉条件下水肥供应对番茄果实硝酸盐含量的影响 [J]. 生态学报, 2013, 33 (7): 2139-2146.
- [46] 冯璞玉, 陈思, 周振江, 等. 基于旋转设计的番茄果实可滴定酸含量对土壤水分的响应 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2017, 45 (11): 67-75, 84.
- [47] 齐义杰, 刘禹伯, 刘莉莉, 等. 外源氮素对绿豆萌芽期氮素代谢与品质的影响 [J]. 北方园艺, 2013 (21): 36-38.
- [48] 侯云鹏, 孔丽丽, 尹彩侠, 等. 覆膜滴灌下氮肥与种植密度互作对东北春玉米产量、群体养分吸收与转运的调控效应 [J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27 (1): 54-65.
- [49] 王楷, 王克如, 王永宏, 等. 密度对玉米产量 (>15000 kg/hm²) 及其产量构成因子的影响 [J]. 中国农业科学, 2012, 45 (16): 3437-3445.
- [50] Xu W J, Liu C W, Wang K R, et al. Adjusting maize plant density to different climatic conditions across a large longitudinal distance in China [J]. Field Crops Research, 2017, 212: 126-134.
- [51] 任小俊, 吕新云, 马俊奎. 种植密度与施肥水平对山西早熟夏大豆产量与主要农艺性状的影响 [J]. 大豆科学, 2019, 38 (6): 921-927.
- [52] 田艺心, 高凤菊, 曹鹏鹏, 等. 黄淮海高蛋白夏大豆新品种适宜种植密度研究 [J]. 大豆科学, 2021, 40 (3): 362-369.
- [53] 李超, 任海红, 谢梦真, 等. 播期与密度对大豆影响的研究进展 [J]. 中国种业, 2022 (3): 30-34.
- [54] 魏廷邦, 胡发龙, 赵财, 等. 氮肥后移对绿洲灌区玉米干物质积累和产量构成的调控效应 [J]. 中国农业科学, 2017, 50 (15): 2916-2927.
- [55] 郑浩宇, 黄炳林, 王孟雪, 等. 氮肥减施与接种根瘤菌对大豆光合与产量的影响 [J]. 大豆科学, 2019, 38 (3): 413-420.
- [56] 李鹏程, 董合林, 刘爱忠, 等. 施氮量对棉花功能叶片生理特性、氮素利用效率及产量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (1): 81-91.
- [57] 纪鸿飞, 廖思寒, 袁荣, 等. 施氮量对绿豆产量及生育期性状氮利用效率的影响 [J]. 农业与技术, 2022, 42 (23): 12-15.
- [58] Sharkey T D. O₂-insensitive photosynthesis in C₃ plants: its



- occurrence and a possible explanation [J]. *Plant Physiology*, 1985, 78 (1): 71-75.
- [59] 宋杰, 王少祥, 李亮, 等. 施钾量对夏玉米氮、磷、钾吸收利用和籽粒产量的影响 [J]. *作物学报*, 2023, 49 (2): 539-551.
- [60] 代顺冬, 韦树谷, 赖佳, 等. 水、氮、磷、钾耦合效应对大白菜产量的影响 [J]. *四川农业大学学报*, 2020, 38 (3): 299-304.
- [61] 廖育林. 长期施用化肥和稻草下红壤性水稻土钾素肥力演变规律的研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2010.
- [62] Ahmad Z, Anjum S, Waraich E A, et al. Growth, physiology, and biochemical activities of plant responses with foliar potassium application under drought stress—a review [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2018, 41 (13): 1734-1743.
- [63] 王帅, 杨劲峰, 韩晓日, 等. 不同施肥处理对旱作春玉米光合特性的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2008 (6): 23-27.
- [64] 金路路, 徐敏, 王子胜. 棉花最适播种密度及氮、磷、钾施肥量的关系 [J]. *江苏农业科学*, 2017, 45 (17): 81-84.
- [65] 杨胜先, 龙国, 张绍荣, 等. 喀斯特冷凉山区不同种植密度及氮、磷、钾配施对马铃薯产量的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2015, 43 (7): 85-88.
- [66] 王艳秋, 邹剑秋, 张志鹏, 等. 密度及氮、磷、钾配比对甜高粱生物产量和茎秆含糖锤度的影响 [J]. *中国农业大学学报*, 2012, 17 (6): 103-110.
- [67] 吴远帆, 钟建中, 高雅洁, 等. 湖南省3种粮油作物当季化肥利用率现状研究 [J]. *湖南农业科学*, 2022 (3): 33-37.
- [68] 林婉奇, 蔡金桓, 薛立. 氮磷添加与不同栽植密度交互对樟树幼苗土壤化学性质的短期影响 [J]. *生态学报*, 2019, 39 (24): 9162-9170.
- [69] 汪顺义, 李欢, 刘庆, 等. 氮钾互作对甘薯根系发育及碳氮代谢酶活性的影响 [J]. *华北农学报*, 2015, 30 (5): 167-173.

Effects of density and application rates of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on the yield and quality of mungbean

DAI Shun-dong¹, ZENG Hua-lan^{1, 2}, ZHANG Qian-fang¹, HUA Li-xia^{1, 2}, WEI Shu-gu¹, HE Lian¹, SUN Xiao-fang^{1, 2}, KUANG Zai-yin¹, JIANG Qiu-ping¹, YE Peng-sheng^{1*} (1. Industrial Crops Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu Sichuan 610300; 2. Key Laboratory of Integrated Pest Management in Southwest Agriculture Crops of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu Sichuan 610300)

Abstract: To provide theoretical basis and technical support for high yield and quality production of mungbean, this research aimed to study the effects of different planting densities and application rates of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on single index of yield, and comprehensive evaluation index of yield and quality of mungbean. A composite quadratic orthogonal regressive rotation design of four factors and five levels was used in the field experiment, with density and application rates of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers as experimental factors. Dry grain weight, pure grain rate, protein, fat, and starch were determined, and these five yield and quality indexes were weighted by combining the analytic hierarchy process and entropy weight method, using a combination weighting method based on game theory, and then the comprehensive evaluation index for yield and quality of mungbean was constructed based on dynamic technique for order preference by similarity to ideal solution. The quadratic regression mathematical models were established between single index of yield, the comprehensive evaluation index of mungbean yield and quality, and density and application rates of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers. Main factor, single factor, interaction effects and optimization schemes were analyzed. The weights of dry grain weight, pure grain rate, protein, fat and starch were 0.4070, 0.2112, 0.1246, 0.0949 and 0.1623, respectively. Single yield index and comprehensive evaluation index of yield and quality showed a downward quadratic parabola in response to the increase of density, nitrogen application rate, phosphorus application rate and potassium application rate, respectively, if codes of other three factors were zero. The main effects of various factors on the single yield index and comprehensive evaluation index of yield and quality were as follows: density>potassium application rate>phosphorus application rate>nitrogen application rate, and there was a positive interaction between density, nitrogen application rate, phosphorus application rate and potassium application rate. When the density was 173004–194590 plant/hm², and application rates of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers were N 67.33–77.84 kg/hm², P₂O₅ 107.26–116.75 kg/hm², and K₂O 86.90–90.81 kg/hm², respectively, the yield and comprehensive yield and quality were superior.

Key words: mungbean; density; application rates of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers; yield; quality; comprehensive evaluation