

李婷婷, 沈彦辉, 常朋举, 等. 不同土壤肥力下控释尿素掺混比例对大豆生长和产量的影响[J]. 山西农业科学, 2026, 54(2): 129-138.

LI T T, SHEN Y H, CHANG P J, et al. Effects of blending ratio of controlled-release urea and normal urea on soybean growth and yield under different soil fertility[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2026, 54(2): 129-138.

doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2026.02.16

不同土壤肥力下控释尿素掺混比例对大豆生长和产量的影响

李婷婷¹, 沈彦辉¹, 常朋举¹, 石玉龙², 郭武松¹, 肖晨星¹,
贾瑞峰¹, 高璐阳¹, 陈宏坤¹

(1. 新洋丰农业科技股份有限公司/养分资源高效利用湖北省工程研究中心, 湖北 荆门 448000;

2. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要:为提高大豆产量和经济效益,探究不同土壤肥力下控释尿素与普通尿素的最佳掺混比例,以许豆1号为供试材料,设置0%、30%、50%、70%、100%不同比例控释尿素与普通尿素掺混施肥,测定高肥力和低肥力农田大豆农艺性状、产量和经济效益。结果表明,与普通尿素单施相比,控释尿素掺混显著改善了不同土壤肥力农田大豆农艺性状,其中,单株荚数、单株粒数和百粒质量是产量的主导因素。在高肥力农田中,控释尿素占比50%和70%时,产量较高,分别较普通尿素单施增产29.47%和29.80%;经济效益分别较普通尿素单施增加3 219.20、3 237.14元/hm²。在低肥力农田中,控释尿素占比50%时,产量和经济效益较高,分别较普通尿素单施增加44.44%和4 246.87元/hm²。高肥力农田和低肥力农田中,控释尿素占比分别为61.50%和61.04%时,产量较高,分别为3 103.76、2 856.37 kg/hm²,经济效益分别为15 564.37、14 393.90元/hm²。综上,控释尿素与普通尿素掺混施用可改善大豆农艺性状,增加产量和经济效益,建议高、低肥力农田控释尿素占比分别为61.50%和61.04%。

关键词:大豆;肥力;控释尿素;产量;经济效益

中图分类号:S565.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-2481(2026)02-0129-10

Effects of Blending Ratio of Controlled-Release Urea and Normal Urea on Soybean Growth and Yield under Different Soil Fertility

LI Tingting¹, SHEN Yanhui¹, CHANG Pengju¹, SHI Yulong², GUO Wusong¹,
XIAO Chenxing¹, JIA Ruifeng¹, GAO Luyang¹, CHEN Hongkun¹

(1. Xinyangfeng Agricultural Technology Co., Ltd./Hubei Provincial Engineering Research Center for Efficient

Utilization of Nutrient Resources, Jingmen 448000, China; 2. Institute of Environment and Sustainable

Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: To improve soybean yield and economic benefits, determine the optimal blending ratio of controlled-release urea(CRU) and normal urea under different soil fertility, in this study, using Xudou 1 as the test material, different blending ratios of CRU(0%, 30%, 50%, 70%, and 100%) with normal urea were set, and soybean agronomic traits, yield, and economic benefits were determined in both high-fertility and low-fertility fields. The results showed that, compared to normal urea alone, CRU blending treatment significantly improved soybean agronomic traits in different soil fertility fields, among which, pods per plant, seeds per plant, and 100-seed weight were the main factors determining yields. In high-fertility fields, the highest yields were observed at CRU ratios of 50% and 70%, with increases of 29.47% and 29.80% compared to normal

收稿日期: 2025-03-27

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFD1700603); 湖北省重点研发计划(2023BBB147)

作者简介: 李婷婷, 博士, 主要从事新型肥料与作物栽培技术研究及推广, E-mail: litt_df@163.com

通信作者: 陈宏坤, 研究员, 博士, 主要从事新型肥料和施肥技术研究及推广, E-mail: chenhk99@163.com

urea alone, respectively, and economic profits increased by 3 219.20 yuan/ha and 3 237.14 yuan/ha. In low-fertility fields, a 50% CRU ratio achieved the highest yield and economic profit, with increases of 44.44%, 4 246.87 yuan/ha compared to normal urea alone, respectively. In both high-fertility and low-fertility fields, the theoretical maximum yields occurred at CRU ratios of 61.50% and 61.04%, yielding 3 103.76 kg/ha and 2 856.37 kg/ha, respectively, with corresponding economic profits of 15 564.37 yuan/ha, 14 393.90 yuan/ha. In conclusion, blending CRU with normal urea improved soybean agronomic traits, increased yield and economic benefits. The CRU ratio recommended in high-fertility fields and low-fertility fields was 61.50% and 61.04%, respectively.

Keywords: soybean; fertility; controlled-release urea; yield; economic benefit

大豆是我国重要的粮油饲作物,在保障粮食安全、推动畜牧业发展以及医疗保健行业中发挥着重要作用。近年来,我国人民消费结构不断升级,大豆需求也随之持续攀升。然而,国内大豆供应却深陷严重不足的困境^[1],进口依存度已然超过 80%^[2],这无疑为大豆产业和粮食安全带来了极为严峻的挑战。为缓解进口压力,我国提出大豆振兴计划^[3-4],旨在通过扩大种植面积、提升产量和质量,提高国内大豆供给能力。但由于耕地资源有限,提高大豆单位面积产量成为解决问题的关键途径。氮肥是大豆生产中不可或缺的营养源,其根瘤固氮作用仅能满足 1/3 的氮需求^[5],剩余部分需要通过外源氮肥补充。然而,近年来氮肥过量施用导致的增产效果下降、肥料利用率低下以及环境污染等问题日益凸显^[6-7]。因此,优化氮肥施用策略,以提高氮肥利用效率并减轻环境压力,成为提升大豆产量和推动绿色发展的重要举措。

当前,大豆生产中常用的氮肥以普通尿素为主^[7],虽然其成本较低,但肥效期较短,易导致作物生长后期养分供应不足^[8]。尽管在花荚期适当追肥能够弥补这一不足,但会增加劳动成本,降低经济效益。控释尿素作为一种新型肥料,能够延缓养分释放^[9],缓解作物生长后期养分不足的问题,但其成本较高且存在滞后释放的问题^[10-12]。因此,将普通尿素与控释尿素结合使用成为一种有效策略,既能发挥普通尿素的速效性,又能延续控释尿素后期效能,从而实现增产增收并降低成本的目的^[13]。已有研究表明,控释尿素掺混可显著提高作物氮肥利用率、产量和经济效益^[14-16]。例如,张建军^[17]等研究表明,在陇东春玉米种植体系中,控释尿素与普通尿素的混合施用可以提高整个生育期土壤中的硝态氮含量,从而提升玉米的产量、品质、氮肥利用率和经济效益。其中,控释尿素的最佳掺混比例为 70%。杨金宇等^[18]研究表明,70%

的控释尿素比例是小麦的最佳配比,可显著增加小麦的有效穗数和产量。严田蓉等^[19]在水稻上的研究也表明,控释尿素与普通尿素掺混有助于协调群体与个体生长,调节叶片的碳氮比,从而改善叶片质量并防止早衰。当控释尿素占比 40% 时,水稻产量最高。此外,不同土壤肥力条件由于供应养分能力不同,也会影响控释尿素和普通尿素的最佳配比^[20]。目前,控释尿素掺混的研究主要集中在小麦^[21-22]、玉米^[23]、水稻^[24]等作物上,针对夏大豆的相关研究较为匮乏,且多局限于同一基础地力条件下开展。而在不同土壤肥力条件下控释尿素与普通尿素不同掺混比例对大豆产量和经济效益的影响仍不明确。

河南省是我国夏大豆重要产区之一,其种植面积在黄淮海地区排名第二,仅次于安徽省,该地区夏大豆稳产增收对我国大豆振兴计划具有重要意义^[25-26]。因此,本研究通过大田试验,探讨控释尿素和普通尿素掺混比例对河南省高、低肥力农田大豆农艺性状、产量和经济效益的影响,旨在进一步明确该区域不同肥力农田的最佳掺混比例,为当地大豆增产增收提供理论依据和技术支撑。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验于 2024 年 6—10 月在河南省许昌市建安区金营村(113°47'E, 33°34'N)进行。该区域属暖温带大陆季风气候,年平均气温 14.7~15.2℃,年降水量 671.1~736.0 mm,平均无霜期 216.3~219.5 d。根据农业农村部“耕地质量等级”(GB/T 33469—2016)划分标准,试验地分为高肥力农田和低肥力农田。土壤类型为潮土,试验开始前高肥力农田和低肥力农田 0~20 cm 土层基本理化性质见表 1。大豆于 2024 年 6 月 17 日播种,10 月 6 日收获,种植密度 23 万株/hm²,前茬作物为冬小麦。

表1 试验区土壤基础理化性质

Tab.1 Basic physicochemical properties of soil in the experimental area

肥力水平 Fertility level	pH	有机质含量/(g/kg) Organic matter	碱解氮含量/(mg/kg) Alkaline hydrolyzable nitrogen	速效磷含量/(mg/kg) Available phosphorus	速效钾含量/(mg/kg) Available potassium
高肥力 High fertility	8.01	24.02	86.84	25.32	122.11
低肥力 Low fertility	8.02	19.80	64.03	11.11	108.73

1.2 试验材料

供试大豆品种为许豆1号。

1.3 试验设计

试验设普通尿素100%(CK)、70%普通尿素+30%控释尿素(CRU30)、50%普通尿素+50%控释尿素(CRU50)、30%普通尿素+70%控释尿素(CRU70)、100%控释尿素(CRU100)共5个处理。每个处理3次重复,随机区组排列,小区面积6 m×10 m。采用机械播种,行距40 cm。氮磷钾肥料用量分别为N 58.5 kg/hm²、P₂O₅ 76.5 kg/hm²、K₂O 67.5 kg/hm²。供试肥料品种分别为普通尿素(46% N)、控释尿素(43% N)、磷酸一铵(50% P₂O₅)和硫酸钾(52% K₂O)。控释尿素为聚氨酯包膜尿素(新洋丰公司生产,释放期约为60 d)。氮、磷、钾肥均随大豆播种一次性施入。

1.4 样品采集与分析

收获时,分别在各小区连续选取具有代表性的10株大豆完整植株进行室内考种。统计植株株高(X1)、茎粗(X2)、主茎节数(X3)、有效分枝

(X4)、单株荚数(X5)、单株粒数(X6)和百粒质量(X7)等性状。各小区取中间5行实收计产(计产面积4 m²),脱粒后自然晒干,称量小区籽粒产量,折合成公顷产量。

按照大豆市场价4.77元/kg、普通尿素1.8元/kg、控释尿素2.6元/kg,其他成本费用3 773.63元/hm²(包括磷肥、钾肥、灭茬、播种、种子、浇水、除草、杀虫、收获),计算大豆经济收益。

$$\text{经济效益} = \text{产出} - \text{氮肥成本} - \text{其他成本} \quad (1)$$

1.5 数据分析

采用单因素(One-way ANOVA)和Duncan法进行方差分析和多重比较($P < 0.05$),所有统计分析均采用SPSS 22.0软件进行,图表采用Origin 2018和R-4.3.2软件制作。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对大豆农艺性状的影响

不同施肥处理对大豆农艺性状的影响结果如表2所示。

表2 不同施肥处理对大豆农艺性状的影响

Tab.2 Effects of different fertilization treatments on soybean agronomic traits

肥力水平 Fertility level	处理 Treatment	株高/cm Plant height	茎粗/mm Stem diameter	主茎节数 Main stem node	有效分枝数/个 Effective branches	单株荚数/个 Pods per plant	单株粒数 Seeds per plant	百粒质量/g 100-seed weight
高肥力 High fertility	CK	62.97±1.24a	6.62±0.25a	15.35±0.25a	2.20±0.27a	38.22±1.30b	71.93±1.93c	19.68±0.15c
	CRU30	64.85±1.65a	7.51±0.26a	16.40±0.34a	2.30±0.54a	42.53±1.51ab	75.86±1.55bc	20.05±0.17bc
	CRU50	66.18±1.12a	7.83±0.26a	16.50±0.34a	2.10±0.50a	47.15±1.61a	82.43±1.91a	20.26±0.15b
	CRU70	65.10±1.06a	7.18±0.22a	16.20±0.36a	2.00±0.45a	45.15±1.20a	80.75±1.57ab	21.46±0.13a
	CRU100	63.32±0.88a	7.15±0.39a	16.40±0.27a	1.70±0.60a	41.58±1.62ab	77.18±1.36abc	20.12±0.27bc
低肥力 Low fertility	CK	58.40±1.25b	6.54±0.08b	14.10±0.38a	2.20±0.25a	35.20±0.57c	65.80±1.41c	17.70±0.25c
	CRU30	60.39±0.87ab	7.05±0.03a	15.30±0.30a	2.50±0.43a	40.00±0.88ab	73.80±1.60ab	18.05±0.14bc
	CRU50	63.61±0.79a	7.23±0.04a	15.50±0.40a	2.30±0.33a	42.80±1.13a	79.20±1.06a	18.91±0.13a
	CRU70	59.95±0.60b	7.15±0.04a	15.60±0.43a	2.40±0.27a	41.20±1.24ab	71.90±1.88bc	18.54±0.21ab
	CRU100	60.47±0.58ab	7.18±0.05a	15.10±0.38a	2.10±0.38a	37.30±0.99bc	73.30±2.06ab	18.47±0.13ab

注:不同小写字母表示同一肥力水平农田不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下表同。

Note: Different lowercase letters indicated significant differences among the different treatments within the same fertility level ($P < 0.05$). The same as below.

由表 2 可知,施用不同比例的控释尿素后,无论高肥力或低肥力农田,大豆的农艺性状均随着控释尿素比例的增加呈现先增加后降低的趋势。在高肥力农田中,施用控释尿素增加了大豆的单株荚数、单株粒数和百粒质量。与 CK 相比,单株荚数、单株粒数和百粒质量分别增加了 8.79%~23.35%、5.47%~14.60%和 2.96%~9.05%。CRU50 处理的单株荚数、单株粒数最大,均显著高于 CK ($P < 0.05$),CRU70 处理的百粒质量最大且显著高于 CK ($P < 0.05$)。在低肥力农田中,施用控释尿素增加了大豆的株高、茎粗、单株荚数、单株粒数和百粒质量。与 CK 相比,株高、茎粗、单株荚数、单株粒数和百粒质量分别增加了 2.65%~8.92%、7.81%~10.47%、5.97%~21.59%、9.27%~20.37和 1.97%~6.85%。CRU50 处理大豆的株高、茎粗、单株荚数、单株粒数和百粒质量均最高,且显著高于 CK ($P <$

0.05)。总之,控释尿素和普通尿素配施可显著改善不同肥力农田大豆的农艺性状,在高肥力农田主要促进大豆的繁殖生长,而在低肥力农田,则对营养生长和繁殖生长均有显著改善。

2.2 不同施肥处理对大豆产量的影响

大豆产量结果表明(表 3),在高肥力和、低肥力农田中,控释尿素和普通尿素配施均增加大豆产量,且随着控释比例的增加呈先增加后降低的趋势。在高肥力农田中,CRU50、CRU70 处理的大豆产量最高且相近,均显著高于 CK ($P < 0.05$),分别增产 29.47% 和 29.80%。而在低肥力农田中,CRU50 处理的大豆产量最高,增产 44.44%。此外,高肥力、低肥力农田的平均增产率分别为 22.88% 和 31.52%。可见,高肥力农田 CRU50、CRU70 处理增产效果较好,低肥力农田 CRU50 处理增产效果较好,且低肥力农田较高肥力农田增产效果更好。

表 3 不同施肥处理对大豆产量的影响

Tab.3 Effects of different fertilization treatments on soybean yield

处理 Treatment	高肥力农田 High fertility field		低肥力农田 Low fertility field	
	产量/(kg/hm ²) Yield	较 CK 增加 % Yield increase companed to CK	产量/(kg/hm ²) Yield	较 CK 增加 % Yield increase companed to CK
CK	2 322.84±47.40b		2 025.01±124.47c	
CRU30	2 739.37±131.20ab	17.93	2 520.01±96.04ab	24.44
CRU50	3 007.39±99.53a	29.47	2 925.00±80.80a	44.44
CRU70	3 015.02±118.64a	29.80	2 774.68±73.82ab	37.02
CRU100	2 655.01±67.61ab	14.30	2 433.34±139.94bc	20.16

对控释尿素比例与产量进行回归分析,结果表明(图 1),在高肥力、低肥力农田中,控释尿素比例与大豆产量显著相关 ($P < 0.05$)。在高肥力农田中,当控释尿素与普通尿素的掺混比例为 61.50% 时,大豆产量最高,为 3 103.76 kg/hm²。而在低肥力农田中,当控释尿素与普通尿素的掺混比例为

61.04% 时,大豆产量最高,为 2 856.37 kg/hm²。尽管本研究中,高肥力农田在 CRU50、CRU70 处理中产量最高,而低肥力农田中 CRU50 处理产量最高,但 2 块农田理论最适宜的控释尿素与普通尿素的掺混比例相近。

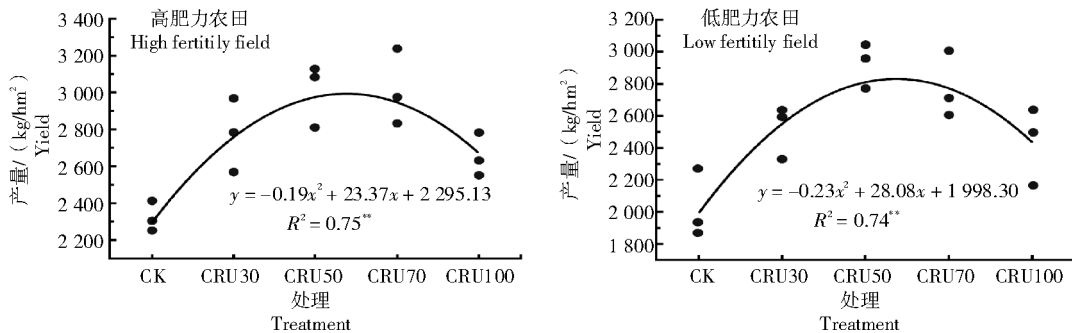


图 1 控释尿素与普通尿素掺混比例与大豆产量的关系

Fig.1 Correlation between CRU and RU blending ratio and soybean yield

2.3 大豆产量与农艺性状的相关性分析

对玉米产量和农艺性状及产量构成因素进行相关性分析,结果表明(图2),在高肥力农田中,大豆产量与主茎节数、单株荚数、单株粒数和百粒质量均呈极显著正相关($P < 0.001$)。主茎节数与单株荚数、单株粒数均呈极显著正相关($P < 0.01$),单株荚数与单株粒数呈极显著正相关($P < 0.001$),而百粒质量则与茎粗呈极显著负相关($P < 0.01$)。表明在高肥力农田中,控释尿素与普通尿素的掺混处理下,应注重单株荚数、单株粒数和百

粒质量所产生的效应,适当考虑主茎节数。而在低肥力农田中,大豆产量与株高、茎粗、单株荚数、单株粒数和百粒质量均呈极显著正相关($P < 0.001$)。株高与单株荚数、单株粒数和百粒质量均呈极显著正相关($P < 0.01$)。茎粗与主茎节数、单株荚数、单株粒数均呈极显著正相关($P < 0.01$),与百粒质量呈显著正相关($P < 0.05$)。表明在低肥力农田中,控释尿素与普通尿素的掺混在关注植株单株荚数、单株粒数和百粒质量的同时,应兼顾株高和茎粗。

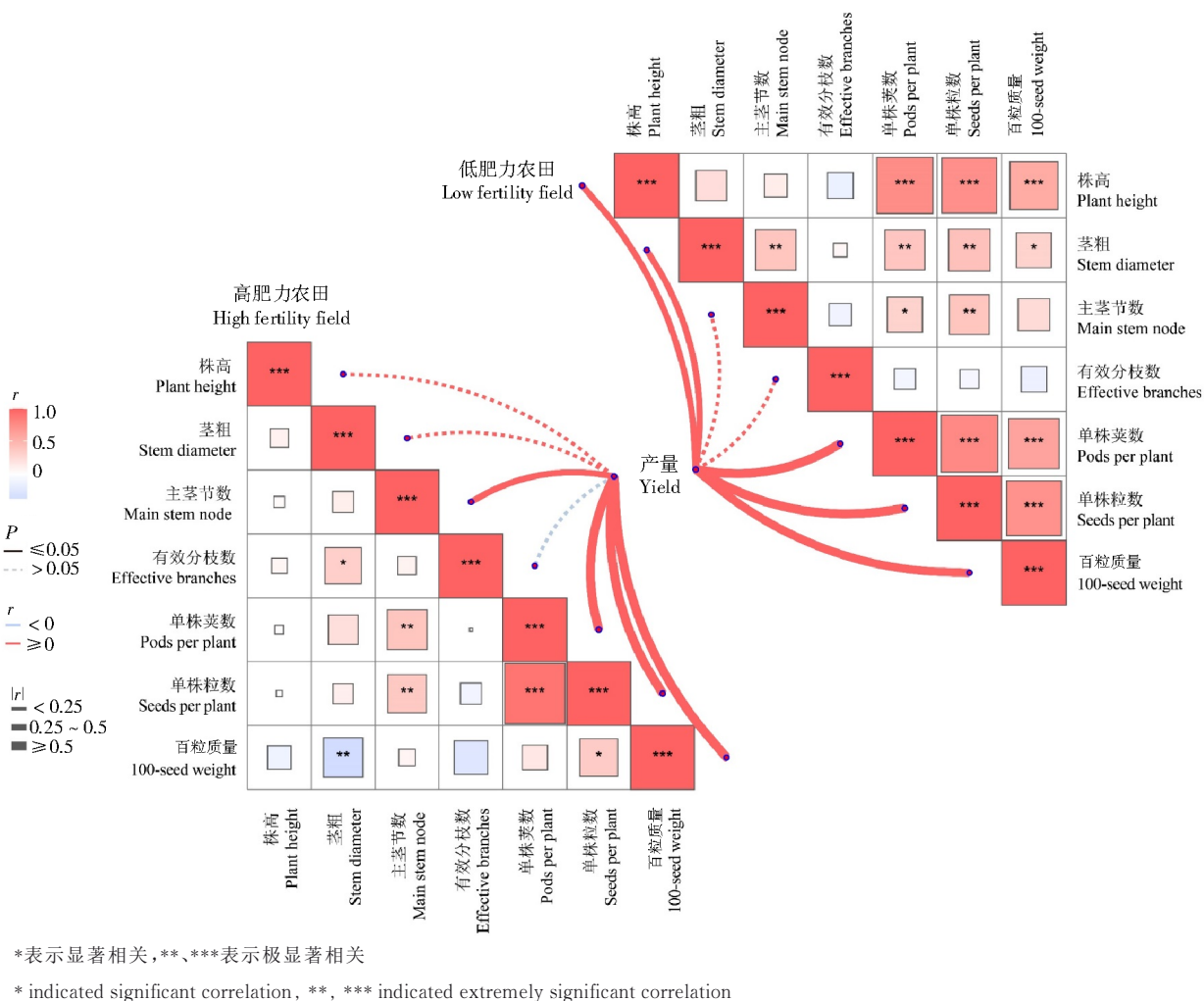


图2 不同肥力农田大豆农艺性状与产量的相关关系

Fig.2 Correlation between agronomic traits and yield of soybean in fields with different fertility levels

2.4 大豆产量与农艺性状的通径分析

为明确不同肥力农田各农艺性状对大豆产量影响的相对重要性,进一步进行通径分析。首先对不同肥力农田分别进行逐步回归分析,在高肥力农田得到回归方程 $Y = -2216.51 + 50.48X_2 +$

$9.70X_5 + 16.28X_6 + 143.61X_7$ (相关系数 $r = 0.93$, $P < 0.001$, 决定系数 $R^2 = 0.87$), 表明该方程可靠有效,可进一步进行通径分析。由表4可知,高肥力农田中,大豆主要性状对产量的直接通径效应均为正效应,其大小顺序为百粒质量 > 单株粒数 >

单株荚数>茎粗。高肥力农田中,百粒质量对大豆产量的直接影响最大,且通过单株荚数和单株粒数对产量产生较大间接正效应。单株粒数对大豆产量的直接正效应也较大,同时通过单株荚数和百粒质量对产量产生间接正效应。单株荚数对

产量的直接正效应较小,其主要通过单株粒数和百粒质量间接对大豆产量产生正效应。说明在高肥力农田,控释尿素配施处理下,百粒质量、单株粒数和单株荚数是产量的决定性因素,百粒质量、单株粒数和单株荚数越高,产量越高。

表 4 高肥力农田大豆产量与农艺性状的通径分析

Tab.4 Path analysis of soybean yield and agronomic traits in high fertility field

变量 Variable	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient			
			茎粗 Stem diameter	单株荚数 Pods per plant	单株粒数 Seeds per plant	百粒质量 100-seed weight
茎粗 Stem diameter	0.23	0.16		0.05	0.03	-0.02
单株荚数 Pods per plant	0.86	0.17	0.05		0.29	0.34
单株粒数 Seeds per plant	0.87	0.34	0.02	0.15		0.36
百粒质量 100-seed weight	0.85	0.46	-0.01	0.13	0.27	

在低肥力农田,逐步回归分析得到的最优回归方程 $Y = -971.93 - 34.19X_1 + 46.00X_5 + 38.35X_6 + 53.04X_7$ (相关系数 $r = 0.92$, $P < 0.001$, 决定系数 $R^2 = 0.84$)。通径分析结果表明(表 5),在低肥力农田中,大豆主要农艺性状对产量的直接效应大小顺序为单株粒数>单株荚数>株高>百粒质量。单株粒数的直接正效应最大,单株荚数和百粒质量次之,3个性状通过其他性状的间接效应总和均为正,但通过株高对产量的间接效应为负,说明单株粒数、单株荚数和百粒质量越大,产量越高,同时协调好单株粒数、单株荚数、百粒质量与株高的

关系,可以提高3个性状对产量的贡献。株高对产量的直接作用为负,但其通过单株粒数、单株荚数和百粒质量对产量的间接作用之和为正,远大于其直接作用,因此,株高增加,产量不一定增加,但协调好株高与其他性状的关系可以促进产量提高。百粒质量对产量的直接影响较小,主要通过单株荚数和单株粒数对产量产生间接正效应。表明在低肥力农田中,控释尿素与普通尿素掺混处理下,单株荚数、单株粒数和百粒质量为产量的决定性因素,但应注意协调好株高与单株荚数、单株粒数和百粒质量的关系。

表 5 低肥力农田大豆产量与农艺性状的通径分析

Tab.5 Path analysis of soybean yield and agronomic traits in low fertility fields

变量 Variable	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient			
			株高 Plant height	单株荚数 Pods per plant	单株粒数 Seeds per plant	百粒质量 100-seed weight
株高 Plant height	0.49	-0.26		0.34	0.33	0.08
单株荚数 Pods per plant	0.77	0.45	-0.19		0.42	0.09
单株粒数 Seeds per plant	0.87	0.61	-0.14	0.31		0.09
百粒质量 100-seed weight	0.73	0.12	-0.17	0.33	0.45	

2.5 不同施肥处理对经济效益的影响

大豆种植经济效益主要受大豆单价、产量和前期投入的影响。控释尿素与普通尿素配施可有效提高高肥力和低肥力农田大豆生产的经济效益(表 6)。在高肥力农田中,与 CK 相比,控释尿素掺混经济效益增加了 1 492.28~3 237.14 元/hm²,增幅为 21.61%~45.90%,产投比增幅为 11.69%~

27.97%,其中,CRU50、CRU70 处理的经济效益相近且无显著差异,分别为 10 356.5、10 374.4 元/hm²,但 CRU50 处理的产投比较高。在低肥力农田中,控释尿素掺混较 CK 经济效益增加了 1 855.58~4 246.87 元/hm²,增幅为 20.11%~52.76%,产投比增幅为 17.42%~42.77%,其中,CRU50 处理的经济效益和产投比最高,分别为 9 963.5 元/hm²和

3.5。依产量与控释尿素比例拟合得到的理论最佳投比分别为 15 564.37、14 393.90 元/hm² 和 3.87:1、配比 61.50% 和 61.04%, 其对应的经济效益和产 3.58:1。

表 6 不同施肥处理对大豆经济效益的影响

Tab.6 Effects of different fertilization treatments on the economic benefits of soybean

肥力水平 Fertility level	处理 Treatment	产出/(元/hm ²) Output	氮肥成本/(元/hm ²) Nitrogen fertilizer cost	其他成本/(元/hm ²) Other costs	经济效益/(元/hm ²) Net income	产投比 Output to input
高肥力农田 High fertility field	CK	11 079.95	169.04	3 773.63	7 137.27±226.08b	2.81:1
	CRU30	13 066.79	196.69	3 773.63	9 096.47±625.85ab	3.29:1
	CRU50	14 345.25	215.13	3 773.63	10 356.49±474.75a	3.60:1
	CRU70	14 381.65	233.56	3 773.63	10 374.45±565.89a	3.59:1
	CRU100	12 664.40	261.21	3 773.63	8 629.56±322.48ab	3.14:1
低肥力农田 Low fertility field	CK	9 659.30	169.04	3 773.63	5 716.62±593.73c	2.45:1
	CRU30	12 020.45	196.69	3 773.63	8 050.12±458.11abc	3.03:1
	CRU50	13 952.25	215.13	3 773.63	9 963.49±385.41a	3.50:1
	CRU70	13 235.22	233.56	3 773.63	9 228.03±352.13ab	3.30:1
	CRU100	11 607.03	261.21	3 773.63	7 572.19±667.53bc	2.88:1

3 结论与讨论

3.1 控释尿素与普通尿素配施对大豆产量和农艺性状的影响

控释尿素和普通尿素配施兼具 2 种肥料的优点,在降低成本的同时,可以实现增产的效果。有研究表明,与单施普通尿素相比,控释尿素和普通尿素配施可显著增加小麦^[10,21]、水稻^[19]、玉米^[17,20]、花生^[26]等作物的产量并改善其农艺性状、提高其氮肥利用率。本研究中,与单施普通尿素相比,控释尿素与普通尿素配施显著改善高肥力和低肥力农田大豆的农艺性状,并提高产量和经济效益。且随着控释尿素比例的增加,大豆单株荚数、单株粒数及百粒质量等农艺性状呈先增加后降低的趋势,而产量也呈相似的趋势。这与本研究结果一致,刘忠新等^[27]研究表明,控释尿素与普通尿素配施显著增加大豆的株高、单株粒质量和产量,且均呈先增加后降低的趋势。王朝伟等^[5]研究也表明,控释尿素与普通尿素配施显著提高黄淮海地区大豆叶片叶绿素含量和冠层光能截获率,产量和经济效益也随控释尿素比例呈先增加后降低的趋势。其原因可能是由于普通尿素肥效快,易挥发流失,单独施用普通尿素,易造成大豆生长前期氮供应量高于其实际需求,但后期氮素供应不足,造成植株脱肥,不利于产量提升^[28]。而控释尿素能缓慢释放养分,具有肥效后移的特征,配施控释尿

素可为作物开花期至成熟期提供充足的养分供给^[29],使作物在生育后期维持较高的叶绿素含量和光合速率^[5],提高作物氮代谢活性^[30],促进其光合产物形成和籽粒灌浆^[5,31],进而提高产量。但当控释尿素比例过高时,养分延迟释放会造成大豆生育前期养分供应不足,影响其植株构建,而生育后期大量的营养元素也会造成大豆贪青晚熟,进而影响产量^[7]。因此,适宜的控释尿素和普通尿素比例才能实现肥料间养分供应持续接力,达到缓急兼济,平衡供肥的目的。

控释尿素和普通尿素的最佳配比受土壤肥力、气候条件、控释尿素种类等影响。已有研究表明,大豆种植中控释尿素适宜的掺混比例存在差异,从 50%~70% 不等^[5,27,32]。本研究中,高肥力农田中,控释尿素占比 50% 和 70% 处理的增产效果最好,与单施普通尿素相比,增产 29.47% 和 29.80%;而在低肥力农田,控释尿素占比 50% 处理的增产效果最好,与单施普通尿素相比,增产 44.44%。2 块农田的控释尿素理论最佳配比分别为 61.50% 和 61.04%。尽管不同肥力农田中控释尿素占比 50% 均可获得最高产量,且理论最佳配比相近,但在高肥力农田中,70% 控释尿素也能获得最高产量。这可能是由于高肥力农田中较高的基础地力,在增加控释尿素比例后,仍然能为大豆的生育前期提供充足的氮素供应。而且更高比例的控释尿素更有助于籽粒灌浆^[31],提高籽粒的百粒

质量。我们也发现,控释尿素占比70%的处理中,大豆的百粒质量最大。在黑龙江,土壤肥力较高情况下,控释尿素占比70%情况下,大豆单株粒质量、百粒质量和产量最高,而在土壤肥力较低的情况下,控释尿素占比50%处理土壤碱解氮含量在需氮量最大的结荚期到鼓粒期最高,整个生育期叶面积指数最大,实现了大豆产量和经济效益最大化^[27-28]。姬景红等^[33]研究也表明,土壤肥力高的土壤产量最高也需要较高的控释尿素比例。除了土壤肥力外,种植体系、控释尿素种类等也会影响控释尿素的最佳比例。如孙子钦等^[32]研究表明,在山东玉米和大豆的间作体系中,植物包膜油控释尿素占比60%为最佳配比,该配比下大豆的氮素利用效率、氮肥偏生产力、产量和经济效益最高。因此,在确定控释尿素的最佳配比时,应充分考虑土壤的肥力、气候、控释尿素种类以及种植体系等因素。

3.2 土壤肥力对控释尿素与普通尿素配施增产效果的影响

土壤肥力影响控释尿素与普通尿素掺混对大豆的增产效果。本研究中,与普通尿素相比,普通尿素配施控释尿素后,高肥力农田增产14.3%~29.8%,而低肥力农田增产20.16%~44.44%,且相同配施比例下,低肥力农田的增产效果比高肥力农田增加5.86%~14.97%,表明控释尿素与普通尿素配施在低肥力农田的增产效果优于高肥力农田。与本研究结果一致,姬景红等^[33]研究结果表明,控释尿素配施普通尿素在肥力较低的农田具有更好的增产效果^[33]。这可能是由于不同肥力农田的增产机制不同。在高肥力农田,控释尿素和普通尿素配施显著增加了大豆的单株荚数、单株粒数和百粒质量。相关性分析和通径分析也表明单株荚数、单株粒数和百粒质量是高肥力农田大豆产量的决定性因子,且与产量正相关。而在低肥力农田,控释尿素和普通尿素配施除了显著增加单株荚数、单株粒数和百粒质量之外,还显著增加了大豆株高和茎粗。相关性和通径分析也表明,单株荚数、单株粒数和百粒质量是低肥力农田大豆产量的决定性因子,同时株高也是影响大豆产量的重要因素之一。这说明在高肥力农田中,控释尿素与普通尿素配施主要通过影响大豆的繁殖生长影响产量,而在低肥力农田,控释尿素和普通尿素配施影响大豆的整个生育期。在高肥力和

低肥力农田,控释尿素与普通尿素配施通过增加大豆生育后期的土壤碱解氮含量^[30],促进大豆生殖生长期大豆豆荚和籽粒的发育,进而提高产量。此外,由于低肥力农田的基础地力较低,控释尿素和普通尿素配施促进了大豆营养生长时期的生长发育,使其株型配置更合理,通过协调株高与单株荚数、单株粒数和百粒质量的关系,进一步提高产量,因而增产效果更佳。

与普通尿素单施相比,控释尿素和普通尿素掺混在不同肥力农田均显著改善了大豆的农艺性状,并提高产量和经济效益。同时,随着控释尿素比例的增加,大豆产量和经济效益呈先增加后降低的趋势。土壤肥力对控释尿素与普通尿素配施的最佳比例及增产效果具有重要影响。在高肥力农田中,控释尿素占比50%和70%时,产量和经济效益最高,而在低肥力农田中,控释尿素占比50%能够获得最高的产量和经济效益。高肥力农田和低肥力农田中,控释尿素分别占比61.50%和61.04%,可获得最高产量和收益,可作为当前生产条件下河南大豆生产的推荐施肥方式。

参考文献:

- [1] 王辽卫. 我国大豆供需结构分析及长期预测[J]. 大豆科技, 2021(4):11-14.
WANG L W. Analysis and long-term forecast of soybean supply and demand structure in China[J]. Soybean Science & Technology, 2021(4):11-14.
- [2] 左武荣. 我国大豆进口贸易的影响及对策研究[J]. 分子植物育种, 2022, 20(2):601-606.
ZUO W R. Research on the influence and countermeasures of my country's soybean import trade[J]. Molecular Plant Breeding, 2022, 20(2):601-606.
- [3] 曾小艳, 祁华清, 邓义, 等. 农业农村部《大豆振兴计划实施方案》解读[J]. 农村经济与科技, 2020, 31(18):36-37.
ZENG X Y, QI H Q, DENG Y, et al. Interpretation of the implementation plan of soybean revitalization plan of the ministry of agriculture and rural affairs[J]. Rural Economy and Science-Technology, 2020, 31(18):36-37.
- [4] 李奕聪, 杨钰莹, 李佳璇, 等. 2024年大豆产业发展趋势与政策建议[J]. 大豆科技, 2024(1):1-5.
LI Y C, YANG Y Y, LI J X, et al. Development trends and policy suggestions of soybean industry in 2024[J]. Soybean Science & Technology, 2024(1):1-5.
- [5] 王朝伟, 杜祥备, 韦志, 等. 控释肥施用方式对黄淮海大豆产量形成和经济效益的影响[J]. 大豆科学, 2020, 39(5):775-780.
WANG C W, DU X B, WEI Z, et al. Effects of controlled release fertilizer application mode on soybean yield formation and economic benefits in Huanghuaihai region[J]. Soybean Science, 2020, 39(5):775-780.

- [6] 刘楚华,张旭东,张花平,等. 生物炭配施氮肥对大豆生物量积累及产量的影响[J]. 山西农业科学, 2026, 54(1):143-153.
LIU C H, ZHANG X D, ZHANG H P, et al. Effect of biochar with nitrogen fertilizer on biomass accumulation and yield of soybean[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2026, 54(1):143-153.
- [7] 田艺心,高凤菊,曹鹏鹏,等. 不同施肥方式对高蛋白夏大豆生理特性、产量及品质的影响[J]. 山西农业科学, 2022, 50(12):1674-1679.
TIAN Y X, GAO F J, CAO P P, et al. Effects of different fertilization methods on physiological characteristics, yield, and quality of high protein summer soybean[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2022, 50(12):1674-1679.
- [8] 田艺心,高凤菊,朱冠雄,等. 不同施肥方式对夏大豆农艺性状、产量及肥料农学效率的影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(11):50-56.
TIAN Y X, GAO F J, ZHU G X, et al. Effects of different fertilization modes on agronomic traits, yield and fertilizer agronomic efficiency of summer soybean[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(11):50-56.
- [9] 翟彩娇,崔士友,张蛟,等. 缓/控释肥发展现状及在农业生产中的应用前景[J]. 农学学报, 2022, 12(1):22-27.
ZHAI C J, CUI S Y, ZHANG J, et al. Development status of slow/controlled release fertilizers and their application prospects in agricultural production[J]. Journal of Agriculture, 2022, 12(1):22-27.
- [10] 顾睿. 缓控释肥与尿素配施对淮北稻茬小麦产量、品质和氮肥利用的影响[D]. 扬州:扬州大学, 2020.
GU R. Effects of slow and controlled release fertilizer and urea combined application on yield, quality and nitrogen utilization of winter wheat in Huaibei[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020.
- [11] 姜宝雷. 控释肥对茄果类蔬菜养分动态变化及品质的影响[D]. 泰安:山东农业大学, 2005.
JIANG B L. Effects of controlled-release fertilizers on dynamic changes of nutrient and fruit quality of vegetable of nightshade[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2005.
- [12] 谢婷婷,赵欢,肖厚军,等. 缓效和速效氮配施对春玉米产量、养分积累及氮肥利用的影响[J]. 玉米科学, 2022, 30(1):130-137.
XIE T T, ZHAO H, XIAO H J, et al. Effects of slow-release and readily available nitrogen application on yield, nutrient accumulation and nitrogen utilization of spring maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2022, 30(1):130-137.
- [13] GARCIA P L, SERMARINI R A, DE SANT ANA FILHO C R, et al. 15N-fertilizer recovery in maize as an additional strategy for understanding nitrogen fertilization management with blends of controlled-release and conventional urea[J]. Agronomy, 2020, 10(12):1932.
- [14] 韩锐锋,牛增锡,王鑫悦,等. 控释尿素和普通尿素混合基施对冬小麦氮素吸收利用和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(11):2042-2058.
HAN R F, NIU Y X, WANG X Y, et al. Effect of mixed basal application of controlled release urea and common urea on the nitrogen uptake, utilization and yield of winter wheat[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(11):2042-2058.
- [15] 王云翔,咸云宇,赵灿,等. 缓控释氮肥施用技术在水稻上应用研究进展与展望[J]. 中国稻米, 2023, 29(4):20-26.
WANG Y X, XIAN Y Y, ZHAO C, et al. Research progress and prospect of slow and controlled release fertilizer application technology in rice[J]. China Rice, 2023, 29(4):20-26.
- [16] 高捷,李思宇,成大宇,等. 缓控释肥对水稻产量与品质影响的研究进展[J]. 作物杂志, 2022(3):20-26.
GAO J, LI S Y, CHENG D Y, et al. Research progress on the effects of slow/controlled release fertilizers on rice yield and quality[J]. Crops, 2022(3):20-26.
- [17] 张建军,党翼,赵刚,等. 控释尿素掺混比例对旱地玉米产量、无机氮含量及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(6):1025-1047.
ZHANG J J, DANG Y, ZHAO G, et al. Effects of blend ratio of controlled-release urea and normal urea on yield, inorganic nitrogen content and nitrogen use efficiency of spring maize in the dryland area of Eastern Gansu province[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(6):1025-1047.
- [18] 杨金宇,李援农,王凯瑜,等. 控释氮肥与普通尿素配施比例和方法对冬小麦灌浆特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(3):442-452.
YANG J Y, LI Y N, WANG K Y, et al. Effects of blending ratio and application method of controlled-release nitrogen fertilizer and common urea on grain-filling properties of winter wheat[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(3):442-452.
- [19] 严田蓉,何艳,唐源,等. 缓释尿素与普通尿素配施对直播杂交籼稻叶片生长及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(5):729-740.
YAN T R, HE Y, TANG Y, et al. Effects of slow-release urea combined with conventional urea on leaf growth and yield formation of indica hybrid rice under direct seeding cultivation [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2019, 25(5):729-740.
- [20] 蒋丽萍,李国芳,苗中芹,等. 控释尿素与普通尿素不同掺混比例对夏玉米产量和氮素利用效率的影响[J]. 山东农业科学, 2021, 53(2):64-70.
JIANG L P, LI G F, MIAO Z Q, et al. Effects of different blending ratios of controlled-release urea and common urea on grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2021, 53(2):64-70.
- [21] 王义凡,任宁,董向阳,等. 控释尿素与普通尿素配施对小麦产量、氮素吸收及经济效益的影响[J]. 作物杂志, 2023(5):117-123.
WANG Y F, REN N, DONG X Y, et al. Effects of controlled-release and ordinary urea on wheat yield, nitrogen absorption and economic benefit[J]. Crops, 2023(5):117-123.
- [22] 张明伟,马泉,陈京都,等. 缓控释肥在冬小麦上的应用研究进展及展望[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(2):15-21.
ZHANG M W, MA Q, CHEN J D, et al. Research progress and prospect of slow and controlled release fertilizer application in winter wheat[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(2):15-21.

- [23] 张杰,徐芳蕾,薄其飞,等. 常规尿素掺混控释尿素一次施用对旱作春玉米产量及氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(6):969-979.
ZHANG J, XU F L, BO Q F, et al. Effects of one-time application of controlled-release urea combined with solid granular urea on grain yield and nitrogen utilization of spring maize in dryland[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2021, 27(6):969-979.
- [24] 张木,唐拴虎,黄巧义,等. 缓释尿素配施普通尿素对双季稻养分的供应特征[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20):3985-3995.
ZHANG M, TANG S H, HUANG Q Y, et al. The nutrient supply characteristics of co-application of slow-release urea and common urea in double-cropping rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(20):3985-3995.
- [25] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.
- [26] 杨偲升,李九颖,薛飞,等. 大豆田杂草群落调查及高效除草剂筛选[J]. 河南农业科学, 2025, 54(12):110-120.
YANG R S, LI J Y, XUE F, et al. Investigation of weed community in soybean field and screening of highly effective herbicides [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2025, 54(12):110-120.
- [27] 薛惠云,李倩,郭东炜,等. 不同氮肥组合对花生后期生长及产量的影响[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2024, 52(3):19-27.
XUE H Y, LI Q, GUO D W, et al. Effects of different nitrogen fertilizer combinations on the growth status and yield of peanuts in the late growth stage[J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(3):19-27.
- [28] 刘忠新,孙磊,吴英. 控释肥对大豆产量影响的研究[J]. 大豆科技, 2009(5):32-33.
LIU Z X, SUN L, WU Y. Effects of controlled-release fertilizers on the yield of soybean[J]. Soybean Science & Technology, 2009(5):32-33.
- [29] 朱宝国,张春峰,于忠和,等. 控释尿素与普通尿素混施对大豆农艺性状及产量和品质的影响[J]. 大豆科学, 2012, 31(2):281-283.
ZHU B G, ZHANG C F, YU Z H, et al. Effect of controlled release urea and common urea blending application on agronomic characters, yield and quality of soybean[J]. Soybean Science, 2012, 31(2):281-283.
- [30] 朱宝国,张春峰,于忠和,等. 控释尿素和普通尿素配施对土壤氮含量及大豆产量和品质影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(18):140-143.
ZHU B G, ZHANG C F, YU Z H, et al. Effect of combined application of controlled release urea and common urea on soil nitrogen content and yield and quality of soybean[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(18):140-143.
- [31] 金容,李兰,郭萍,等. 控释氮肥比例对土壤氮含量和玉米氮素吸收利用的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6):214-221.
JIN R, LI L, GUO P, et al. Effects of the mixed ratios of controlled-release nitrogen fertilizer on soil nitrogen content and its uptake and utilization of maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(6):214-221.
- [32] 于浩东,初振宇,汪顺源,等. 不同控释氮素比例对夏玉米叶片衰老和籽粒灌浆特性的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(18):3511-3529.
YU H D, CHU Z Y, WANG S Y, et al. Effects of different controlled nitrogen ratios on leaf senescence and grain filling characteristics of summer maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(18):3511-3529.
- [33] 孙子钦,陈舟,李雪,等. 植物油包膜控释氮肥在间作玉米-大豆上的施用效果研究[J]. 肥料与健康, 2024, 51(1):23-28.
SUN Z Q, CHEN Z, LI X, et al. Study on the application effects of vegetable oil coated controlled-release nitrogen fertilizer on intercropping maize-soybean[J]. Fertilizer & Health, 2024, 51(1):23-28.
- [34] 姬景红,李玉影,刘双全,等. 控释掺混肥对春玉米产量、光合特性及氮肥利用率的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(3):669-675.
JI J H, LI Y Y, LIU S Q, et al. Effects of different mixing rates of controlled-release urea and common urea on grain yield and nitrogen use efficiency of spring maize[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(3):669-675.