



种植密度和氮施用时期对不同大豆品种农艺性状和产量的影响

周新雨¹, 王天舒¹, 任利东¹, 王 丽¹, 于淑婷¹, 王 晶¹, 宋爱英², 尧水红^{1*}

(1. 北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 汶上县农业农村局, 山东 汶上 272509)

摘 要: 合理密植和延后施氮是提高大豆产量的重要手段, 为阐明不同大豆品种对种植密度和施氮时期的响应, 于 2020 年在河南省新乡县开展试验, 试验以大豆品种齐黄 34 和郑 1307 为试验材料, 采用裂区设计, 主处理为大豆品种, 副处理为种植密度和氮施用时期, 分析其农艺性状、生物量积累及产量要素构成的差异。研究结果表明: 齐黄 34 和郑 1307 在 18 万 ~ 27 万株/hm² 密度范围内苗期、盛花期、盛荚期施氮时产量分别为 4027.55 ~ 4748.20 和 4783.65 ~ 5113.60 kg/hm², 郑 1307 产量比齐黄 34 高 12.2% ~ 21.8%。随种植密度增加, 两个品种产量均无显著变化, 其中齐黄 34 茎粗降低、分枝减少、有效荚数、有效粒数和百粒重均降低, 但其茎秆伸长、地上部和根系生物量增加; 郑 1307 茎粗和有效分枝降低, 但单位面积生物量增加。氮施用时期对齐黄 34 产量影响显著, 盛荚期施氮产量最高, 与苗期和盛花期施氮相比分别提高 5% ~ 8% 和 8% ~ 17%; 对郑 1307 产量无显著影响, 但在 27 万株/hm² 下盛荚期施氮有一定增产效应, 且影响其有效荚数和百粒重。综上所述, 在 18 万 ~ 27 万株/hm² 种植密度区间内, 种植密度通过调整大豆株型、改变地上部和根系的干物质积累, 维持其群体产量; 延后施氮对齐黄 34 有一定的增产效应, 但对郑 1307 的增产效应未达到显著水平。研究结果为稳定提高黄淮海地区大豆单产, 保障我国大豆产量及落实“大豆振兴”战略提供了理论基础及科学依据。

关键词: 大豆品种; 种植密度; 氮施用时期; 农艺性状; 产量

大豆原产于中国, 是我国重要的油料、蛋白及经济作物^[1-2]。据国家统计局统计数据显示, 2020 年我国大豆总产量 1960 万 t, 但进口量仍较 2019 年增加 13%^[3], 供需矛盾突出。世界大豆主产国美国、巴西和阿根廷的大豆平均单产已达 2945.7 kg/hm², 而我国平均单产仅为 1787.4 kg/hm²^[4], 大豆单产仍有较大的上升空间。因此, 农业农村部在制定《大豆振兴计划》时提出: 在稳定种植面积 933 万 hm² 的基础上, 重点提高大豆单产水平, 以增加大豆有效供给, 提高我国大豆产业质量效益和竞争力^[5]。

大豆是一种群体产量作物, 合理密植能够平衡荚数、粒数和粒重等产量构成要素, 使大豆群体最大限度地利用环境资源, 从而获得高产。吕继龙

等^[2]对 1998—2017 年我国不同产区大豆的种植密度试验数据分析, 得出我国夏大豆、春大豆高产的最适密度分别为 27 万和 34 万株/hm²。陈应志等^[6]分析 2020 年不同生态区大豆区试与大田生产密度、单产数据时发现, 黄淮海夏大豆区试密度与大田实际密度相当, 黄淮海北片、中片、南片区试密度分别为 22.4 万、18.7 万和 18.7 万株/hm²。当种植密度过小时, 单株产量虽有所提高, 但不利于单位面积上群体产量构成; 而种植密度过高则易造成倒伏、早衰或成熟期推迟等问题^[1, 7]。因此, 在适宜密度范围内提高种植密度, 并配合适当的栽培措施, 对提高大豆单产水平尤为重要。

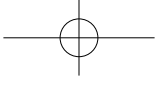
大豆是高需氮作物, 有研究表明, 大豆生物固氮能满足其 40% ~ 60% 的自身氮需求, 而剩余近一半的氮需求则来源于土壤和肥料中的氮供给^[8]。由于生长环境(如季节天气条件、土壤类型等)和非氮肥相关管理(如灌溉、排水、杂草管理等)的差异, 导致很多区域试验中施肥尤其是添加氮对大豆产量影响差异很大。Mourtzinis 等^[9]综合分析美国各地试验数据时发现: 施氮对整个研究区域大豆产量影响很小, 但是在相同的施氮量下, 氮肥效益

收稿日期: 2022-03-30; 录用日期: 2022-06-16

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程重大科研任务课题(CAAS-ZDRW202003-7); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1610132021012); 国家大豆产业技术体系项目(CARS-04); 黄淮海冬养地作物多样性对轮作休耕土壤微生物群落演替的调控作用及机制(42077099)。

作者简介: 周新雨(1997-), 硕士研究生, 主要研究方向为土壤培肥与改良。E-mail:zhouxinyu199709@163.com。

通讯作者: 尧水红, E-mail: yaoshuihong@caas.cn。



与施氮时机、灌溉量和种植密度(播量)显著相关。在适当的时期施肥(尤其是施氮肥),是大豆群体产量建成的关键栽培措施之一。传统的种肥同播可能会导致基肥施用过多氮肥,而影响大豆根瘤的形成,抑制生物固氮^[10],最终影响产量。郭泰等^[11]研究结果指出,氮肥总量不变,氮肥后移分期施用相对于一次性施用基肥显著提高大豆产量,且始花期追施氮肥增产效果优于始花期或鼓粒期喷施。Gan等^[12]研究发现在大豆初花期或鼓粒期追施氮肥可以显著提高其生物量及籽粒产量。Mccoy等^[13]研究发现在砂质/粉砂壤土上,在四叶期生长阶段施用氮肥比初花期施用时效生物量高6%。因此,在密植条件下选择适宜阶段施用氮肥,不仅能提高氮肥利用率,还可以增加大豆产量,实现节本增效。

黄淮海是我国大豆主产区之一,大豆种植面积约占全国种植总面积的三分之一^[14],稳定提高黄淮海地区大豆单产对保障我国大豆产量及落实“大豆振兴”战略都有极其重大的意义。在黄淮海地区大豆区试和大田生产实际的基础上适度密植并延后氮施用时间,既能有效利用小麦季残留养分保障大豆生长前期的氮素供应,又能及时补氮,起到大豆生长后期不脱肥的作用,但目前对于不同品种密植条件下的大豆生长情况相关报道尚未深入,尤其是针对密植条件下不同生育期等量(肥灌)施氮对大豆农艺性状和产量影响的相应研究更少。因此,本文研究采用大豆品种齐黄34和郑1307为试验材料,通过种植密度调控,分析两个品种在不同氮施用时期的农艺性状、生物量积累及产量要素构成,明确密植条件下延后氮施用时期对不同品种的产量影响效应,以期为黄淮海地区夏大豆的高产高效生产提供理论基础及科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2020年在河南省新乡县七里营镇中国农业科学院灌溉所基地(38°19'N, 113°53'E)进行,试验区属于暖温带大陆性气候,年均降水量约550 mm,多集中在7—8月,年均气温14.1℃,年均日照2400 h,为典型的旱作一年两熟制区。

试验开始前该试验地种植制度为麦玉轮作,种植时间已超过5年。2020年开始采用麦豆轮作,麦茬播种量为150 kg/hm²,品种为百农307,种肥同播。麦茬氮、磷、钾施入量分别为N 110 kg/hm²、P₂O₅ 120 kg/hm²、K₂O 120 kg/hm²,为商用复合肥,

其余灌溉、除草、防虫等田间管理同一般高产田。

1.2 试验设计

试验供试土壤为典型潮土,豆茬播种前测定0~20 cm土层基础性状:土壤有机质为14.71 g/kg,全氮1.35 g/kg,碱解氮58.3 mg/kg,有效磷28.58 mg/kg,速效钾142.42 mg/kg, pH为8.96。

豆茬试验采用裂区设计,以品种(齐黄34和郑1307)为主区,密度(18.0万、22.5万和27.0万株/hm²)和氮肥施用期(苗期、盛花期和盛荚期)为副区,共18个处理,每个处理设置4次重复,共72个小区。小区行长18 m,行距0.4 m,小区面积162 m²。

大豆于6月23日播种,10月9日收获。两个品种的播种量均为33万株/hm²,在出苗一周后补苗、定苗,控制密度梯度。豆茬氮、磷、钾施入量分别为N 45 kg/hm²、P₂O₅ 60 kg/hm²、K₂O 34.5 kg/hm²;其中磷肥72个小区同步,种肥同播;钾肥在全区定苗后,随缓苗水滴灌,灌溉量为300 m³/hm²;氮肥分区肥灌,不施肥的小区同期滴灌补水,滴灌量均为300 m³/hm²。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 农艺性状

于大豆鼓粒期,在每个小区内各选取5株长势均匀且具有代表性的植株,整株挖出并系好标签带回实验室,测定其株高、底荚高度、茎粗、有效分枝、主茎节数等农艺性状指标。

1.3.2 产量构成因子

大豆产量的构成因子包括生物量和收获指标两大类,生物量是经济学产量的基础,收获指标决定着籽粒产量。

(1) 生物量 在测定农艺性状后,将大豆植株以子叶痕为界用剪刀一分为二,子叶痕以上为地上部,以下为地下部。地上部摘除豆荚,于烘箱内105℃杀青30 min,75℃烘干至恒重后称重并记录数据,记为地上部干重;地下部同样杀青、烘干至恒重后称重,记为根干重;然后根据种植密度计算出单位面积上(地上部和根)生物量。根冠比为根与地上部生物量的比值,计算公式为:根冠比=根干重/地上部干重×100%。

(2) 收获指标 将上一步骤中摘除的豆荚按标签记录好单株有效荚数和有效粒数,并计算出各小区和处理每荚平均粒数;然后在大豆成熟期全小区收获,测定百粒重和产量,具体过程为:人工割除边行及两端各0.25 m的大豆,保留中间20行,用收割机(型号:雷沃谷神PG50)全部收获,籽粒按小



区装袋、挂标签并称重,然后用便携式谷物水分仪(型号:Wile 55)测定收获时籽粒含水量,折算出单位面积的产量,最后从每个小区的籽粒中随机取3份,去除瘪粒和破损粒后,烘干称重计算百粒重。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2019 进行数据整理,在 R 语言 4.1.2 和 SPSS 20.0 中进行统计分析,采用双因素方差分析对农艺性状和产量性状以及生物量进行方差分析,并利用 LSD 法进行多重比较。使用 Vegan 包进行冗余分析(RDA),并采用 Pearson 相关系数计算指标间的相关性。

2 结果与分析

2.1 密度和氮施用时期对大豆农艺性状的影响

由表1可知,郑1307和齐黄34农艺性状差异显著,具体表现为:郑1307株高、有效分枝、主茎节数均显著高于齐黄34,但底荚高度却较齐黄34低12.6%~64.7%,茎粗两品种间差异不显著($P>0.1$)。此外,两个品种的农艺性状对密植条件下氮肥延后肥灌表现不一致(表1)。在苗期施氮齐黄34的株高随密度增加而显著增加,但盛花期施氮齐黄34底荚高度随密度增加而增加。齐黄34茎粗和有效分枝在苗期和盛花期施氮的条件下,均表现为低密度处理(18.0万株/hm²)显著高于两个密植处理(22.5万和27.0万株/hm²);而盛荚期施氮齐黄34的5个农艺性状指标(株高、底荚高度、茎粗、有效分枝和主茎节数)在3个种植密度间均无显著差异。

表1 种植密度和氮施用时期处理下齐黄34和郑1307两个品种大豆的农艺性状

施氮 时期	种植 密度 (万株/ hm ²)	株高 (cm)		底荚高度 (cm)		茎粗 (mm)		有效分枝 (个)		主茎节数 (个)	
		齐黄34	郑1307	齐黄34	郑1307	齐黄34	郑1307	齐黄34	郑1307	齐黄34	郑1307
苗期	18.0	71.0c	75.5bc#	14.80d#	12.94ab	7.62a	7.10ed	1.1ab	2.4a#	14.6ab	15.6c#
	22.5	73.8bc	75.8bc	22.90a#	10.38b	6.75ab	6.79cd	0.3c	1.7ab#	14.5ab	16.7abc#
	27.0	77.4a	86.2a#	20.80ab#	14.49a	6.61b	6.50d	0.2c	1.5b#	14.7ab	16.0bc#
盛花期	18.0	67.4d	71.8c#	15.32c#	12.62ab	7.60a	8.26a#	1.5a	2.6a#	14.3b	17.5a#
	22.5	70.7cd	84.6a#	18.14bc#	14.57a	6.56b	7.50bc#	0.5bc	2.0ab#	14.4ab	16.8ab#
	27.0	70.5cd	75.1bc#	19.72ab#	13.51ab	6.88ab	6.68d	0.7bc	1.3b#	14.1b	15.7bc#
盛荚期	18.0	76.8ab	79.0ab#	20.68ab#	12.51ab	7.36ab	7.48bc	0.4bc	2.4a#	15.2a	16.0bc
	22.5	74.1b	84.3a#	21.28ab#	14.02a	6.89ab	8.07ab#	0.5bc	2.6a#	14.4ab	16.6abc#
	27.0	76.4ab	78.8b#	19.97ab#	14.78a	7.28ab	7.00cd	0.5bc	1.3b#	14.8ab	16.9ab#
密度		***	NS	**	NS	**	****	**	***	NS	NS
施肥期		*	***	*	NS	NS	***	NS	NS	*	NS
密度 × 施肥期		NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	**

注: NS 表示不显著, $P>0.1$; * 表示 $P<0.1$; ** 表示 $P<0.05$; *** 表示 $P<0.01$; **** 表示 $P<0.001$; # 表示两品种相同处理下同一指标间比较显著高; 数字后面的小写字母表示不同处理在 0.05 水平上的差异显著性。下同。

种植密度显著影响齐黄34的株高、底荚高度、茎粗和有效分枝($P<0.05$),但对郑1307的影响仅表现在茎粗和有效分枝上($P<0.01$,表1)。在苗期和盛花期施氮条件下,郑1307的茎粗和有效分枝随种植密度增加而降低,但在盛荚期施氮条件下,郑1307除有效分枝表现为27.0万株/hm²的密植处理显著低于18.0万和22.5万株/hm²两个种植密度外,其余4个农艺性状指标均与种植密度无显著关系。此外,郑1307在苗期施氮条件下,高密植处理(27.0万株/hm²)的株高显著高于较低密度的

两个处理(18.0万和22.5万株/hm²)。

2.2 密度和氮施用时期对大豆生物量的影响

地上部干重、根干重和根冠比是表征作物生物量的3个常见指标。在不同种植密度条件下分生育期施氮的齐黄34和郑1307地上部干重、根干重和根冠比变化见图1。郑1307地上部干重为8230~11832 kg/hm²,显著高于齐黄34(6892~9702 kg/hm²)(图1上)。在相同施氮时期,齐黄34地上部干重均随密度增加而增加,且在27.0万株/hm²时显著高于18.0万和22.5万株/hm²密度的地上部干

重 ($P<0.05$)；而郑 1307 除苗期表现为种植密度为 18.0 万和 22.5 万株 / hm^2 处理的地上部干重显著高于 27.0 万株 / hm^2 外，在盛花期和盛荚期施氮后，均表现在种植密度最高 (27.0 万株 / hm^2) 时，其地上部干重最大。

就根干重而言 (图 1 中)，除种植密度为 22.5 万株 / hm^2 的郑 1307 在苗期和盛荚期高于同密度同生育期施氮的齐黄 34 外，其他处理在同密度同生育期施氮条件下两个品种间无显著差异 (齐黄 34 根干重 484 ~ 720 kg/hm^2 ；郑 1307 根干重 481 ~ 748 kg/hm^2)。在盛花期及盛荚期施氮条件下，齐黄 34 根干重随密度增加而增加，尤其是盛花期种植密度为 27.0 万株 / hm^2 的根干重均显著高于另两个密度处理；除苗期施氮外，郑 1307 在同生育期施氮条件下根干重有随密度增加而增加的趋势，在 3

个生育期 (苗期、盛花期和盛荚期) 施用氮肥种植密度为 22.5 万和 27.0 万株 / hm^2 处理下的根干重均显著高于 18.0 万株 / hm^2 的处理。

齐黄 34 和郑 1307 在不同种植密度和氮施用时期作用下根冠比的变化见图 1 下。两个品种在同密度同生育期施氮条件下，种植密度为 18.0 万株 / hm^2 的齐黄 34 根冠比显著高于郑 1307 ($P<0.05$)，其他处理两个品种间无显著差异 (齐黄 34 根冠比 6.8 ~ 7.9，郑 1307 根冠比 5.1 ~ 7.7)。而就单个品种而言，齐黄 34 在苗期施氮后种植密度为 18.0 万株 / hm^2 处理根冠比最高，而在盛花期和盛荚期施氮 3 个种植密度间无显著差异；但郑 1307 在 3 个生育期施氮后根冠比均呈随种植密度增加而增加趋势，尤其是苗期施氮后其根冠比 27.0 万株 / hm^2 (7.1) > 22.5 万株 / hm^2 (6.7) > 18.0 万株 / hm^2 (5.6)。

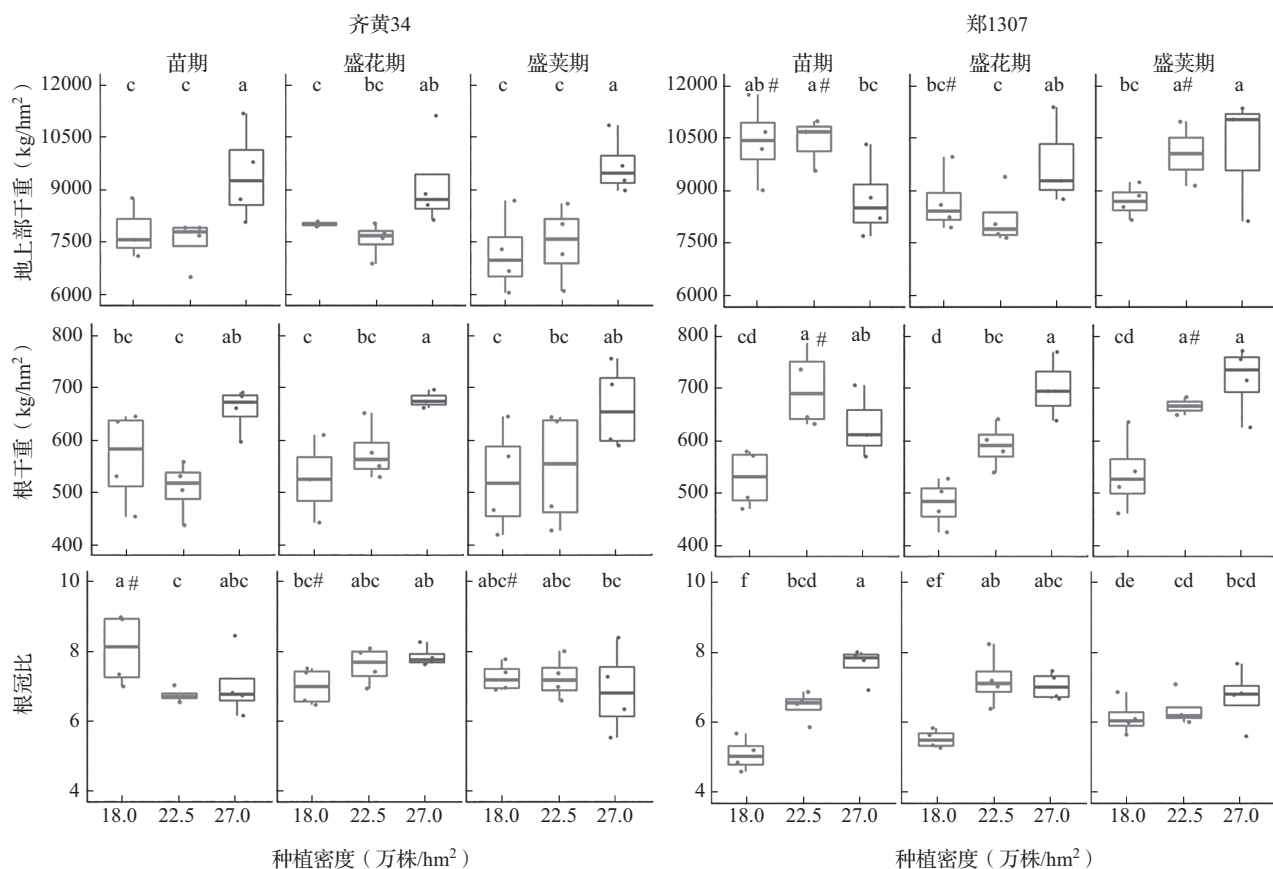


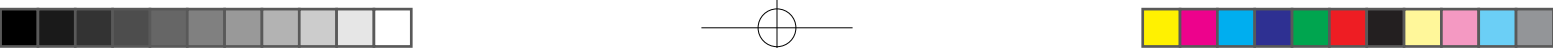
图 1 不同种植密度和氮施用时期处理下大豆单位面积生物量及根冠比

注：箱图上小写字母表示不同处理在 0.05 水平上的差异显著性。# 表示两品种相同处理下同一指标间比较显著高。

2.3 密度和氮施用时期对大豆收获指标的影响

相同种植密度相同氮施用时期的两个供试品种产量性状之间比较表明，郑 1307 单株有效荚

数和有效粒数显著高于齐黄 34，但荚粒数和百粒重却显著低于齐黄 34；除盛荚期施氮且种植密度为 18.0 万株 / hm^2 处理外，其他同种植密度同施氮



时期的大豆产量郑 1307 均显著高于齐黄 34, 产量增幅为 12.2% ~ 21.8% (表 2)。此外, 本研究对同生育期施氮不同种植密度条件下大豆产量性状的方差分析发现, 供试品种单株有效荚数和有效粒数随种植密度增加而降低的趋势, 且这一趋势郑 1307 ($P<0.001$) 强于齐黄 34 ($P<0.05$); 但供试品种百粒重呈随种植密度增加而降低的趋势, 且这一趋势郑 1307 ($P<0.05$) 弱于齐黄 34 ($P<0.001$)。

对相同种植密度不同氮施用时期之间比较发现 (表 2), 延后施氮对齐黄 34 产量有一定的增产效应。在相同密度下, 盛荚期施氮时齐

黄 34 产量显著高于苗期和盛花期施氮, 分别高出 5% ~ 8% 和 8% ~ 17%。而种植密度为 18.0 万株 /hm² 时, 郑 1307 表现为: 苗期施氮显著增加单株有效荚数, 降低百粒重; 在 22.5 万株 /hm² 时, 盛花期施氮的郑 1307 单株有效荚数显著低于苗期和盛荚期施氮, 但盛花期施氮的百粒重却高于苗期和盛荚期施氮处理; 在 27.0 万株 /hm² 条件下, 氮肥施用时期对郑 1307 单株有效荚数和百粒重均无显著影响。因此, 忽略种植密度, 氮施用时期对齐黄 34 产量的影响极显著 ($P<0.001$), 而对郑 1307 则显著影响有效荚数和百粒重 ($P<0.05$)。

表 2 种植密度和氮施用时期处理下齐黄 34 和郑 1307 两个品种大豆的产量构成及产量

施氮 时期	种植 密度 (万株 / hm ²)	有效荚数 (个)		有效粒数 (个)		荚粒数 (个)		百粒重 (g)		产量 (kg/hm ²)	
		齐黄 34	郑 1307	齐黄 34	郑 1307	齐黄 34	郑 1307	齐黄 34	郑 1307	齐黄 34	郑 1307
		齐黄 34	郑 1307	齐黄 34	郑 1307	齐黄 34	郑 1307	齐黄 34	郑 1307	齐黄 34	郑 1307
苗期	18.0	27.4ab	81.8a#	72.6ab	175.4a#	2.6a#	2.2b	27.37ab#	15.81b	4389.8bc	4982.7a#
	22.5	22.9bc	64.4b#	61.4ab	144.5b#	2.7a#	2.3ab	26.94abc#	15.86b	4269.8bcd	5080.9a#
	27.0	23.8bc	44.1c#	64.2ab	98.0c#	2.7a#	2.2ab	21.29e#	16.57b	4175.5bcd	4826.5a#
盛花期	18.0	28.9a	62.8b#	75.0a	145.2b#	2.6a#	2.4ab	27.17abc#	18.92a	4058.8d	4944.2a#
	22.5	24.5abc	50.0c#	66.9ab	113.0c#	2.7a#	2.3ab	23.40cde#	19.03a	4027.6d	4801.6a#
	27.0	24.8abc	49.3c#	66.5ab	115.2c#	2.7a#	2.3ab	22.10de#	16.66b	4124.4cd	4783.7a#
盛荚期	18.0	26.4abc	63.5b#	74.5a	141.9b#	2.8a#	2.2ab	29.39a#	19.05a	4748.2a	4864.8a
	22.5	21.5c	62.0b#	58.9b	152.2ab#	2.8a#	2.5a	25.40bcd#	15.58b	4480.4ab	5029.0a#
	27.0	23.9abc	50.5c#	64.7ab	114.8c#	2.7a#	2.3ab	22.22de#	16.61b	4441.0abc	5113.6a#
密度		***	****	**	****	NS	NS	****	**	NS	NS
施肥期		NS	**	NS	NS	NS	NS	NS	***	****	NS
密度 × 施肥期		NS	***	NS	***	NS	NS	NS	***	NS	NS

2.4 大豆农艺性状、生物量和收获指标的相互关系
供试大豆农艺性状、生物量和产量等 13 个指标的主成分分析见图 2, PC1 和 PC2 的累计解释度为 68.06%, 其中 PC1 占 52.28% 为主要决定轴。通过主成分分析发现: 齐黄 34 和郑 1307 分列于 PC1 (纵) 轴左右两侧, 品种间差异显著 ($R^2=0.994$, $P<0.001$, 图 2A); 而单个品种对密度和氮施用时期的反应差异则主要表现在 PC2 轴上, 齐黄 34 处理间差异由百粒重、荚粒数、底荚高度及根冠比主导, 郑 1307 处理间差异则由有效分枝、茎粗、有效荚数、有效粒数及主茎节数、地上部干重造成 (图 2B)。

此外, 本研究对供试大豆农艺性状、生物量和产量指标间相互关系分析发现 (表 3), 齐黄 34 产量与茎粗、主茎节数呈显著正相关 ($P<0.05$), 相关系数分别为 0.387 和 0.352, 与此同时, 其有效荚数、有效粒数也与茎粗、有效分枝、主茎节数等农艺性状呈显著正相关 ($P<0.05$ 或 $P<0.01$); 郑 1307 产量与有效分枝呈显著正相关 ($P<0.05$), 相关系数为 0.373, 而其有效荚数和有效粒数却与茎粗、有效分枝这两个农艺性状指标及地上部干重呈显著正相关, 与底荚高度和根冠比呈显著负相关 ($P<0.05$ 或 $P<0.01$); 两个品种的百粒重均与地上部和根干重呈显著负相关 ($P<0.01$)。

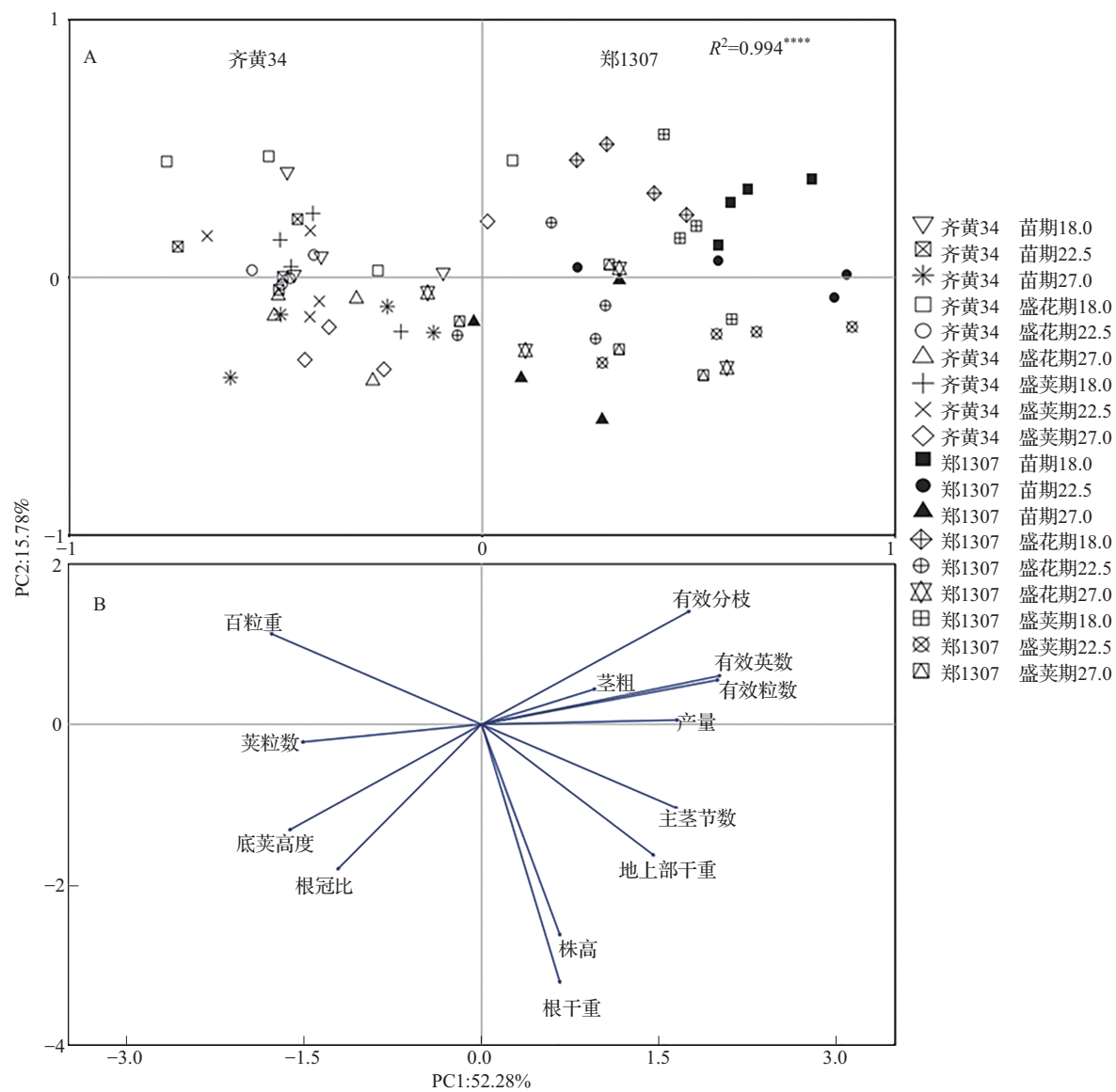


图 2 不同种植密度及氮施用时期与大豆相关性状及产量的主成分分析 (PCA)

注: 图 A 为区分不同处理间的分布, 图 B 为载荷图。18.0、22.5、27.0 分别表示种植密度为 18.0、22.5、27.0 万株 /hm²。

表 3 大豆农艺、地上和根生物量与产量构成指标间相关关系的显著性

产量构成	齐黄 34								郑 1307							
	农艺性状				生物量				农艺性状				生物量			
	株高	底荚高度	茎粗	有效分枝	主茎节数	地上部干重	根干重	根冠比	株高	底荚高度	茎粗	有效分枝	主茎节数	地上部干重	根干重	根冠比
有效荚数	-0.204	-0.469**	0.680**	0.635**	0.389*	0.283	0.210	-0.082	-0.274	-0.422*	0.580**	0.598**	-0.007	0.406*	-0.214	-0.784**
有效粒数	-0.080	-0.308	0.642**	0.459**	0.460**	0.352*	0.240	-0.166	-0.325	-0.410*	0.606**	0.682**	-0.039	0.526**	-0.080	-0.760**
荚粒数	0.244	0.319	0.012	-0.315	0.246	0.200	0.068	-0.269	-0.168	0.044	0.065	0.240	-0.118	0.291	0.311	0.037
百粒重	-0.106	-0.048	0.006	-0.060	-0.076	-0.737**	-0.635**	0.110	-0.060	0.184	-0.218	-0.066	-0.073	-0.639**	-0.564**	0.020
产量	0.004	-0.055	0.387*	0.041	0.352*	0.042	-0.105	-0.173	-0.077	-0.307	0.322	0.373*	0.081	0.293	0.202	-0.082

注: * 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$; $N=36$ 。



3 讨论

种植密度是优化大豆群体结构的重要措施,其通过影响大豆叶面积指数、冠层光合有效速率等指标来改变大豆群体的光合作用,进而影响光合产物积累^[15]。齐黄 34 和郑 1307 是黄淮海近年育成的品种之一,其中齐黄 34 已连续 8 年在该地区大面积生产,单产稳定在 3750 kg/hm^2 ^[16],而郑 1307 在 2019—2020 年河南区域试验中单产超过 4500 kg/hm^2 ^[17],但两个品种高产稳产的合理种植密度范围尚未明确。王路路等^[18]研究发现郑 1307 在 22.5 万株/hm^2 密度下产量为 3759 kg/hm^2 。蔡文秀等^[19]研究中齐黄 34 在 $12 \text{ 万} \sim 24 \text{ 万株/hm}^2$ 密度下产量为 $2700 \sim 3750 \text{ kg/hm}^2$,且随密度增加呈先增后降的趋势。吕继龙等^[2]的研究认为我国夏大豆生长最适密度为 27 万株/hm^2 ,而陈应志等^[6]的研究将黄淮海中、南片区试密度确定为 18.7 万株/hm^2 。本研究将种植密度处理设置为 18.0 万 、 22.5 万 和 27 万株/hm^2 ,齐黄 34 和郑 1307 分别获 $4027.55 \sim 4748.20$ 和 $4783.65 \sim 5113.60 \text{ kg/hm}^2$ 的产量,接近甚至超过这两个品种在该地区大面积生产或区试试验的产量水平,在黄淮海地区均达到高产水平,说明本研究中种植密度设置在 $18 \text{ 万} \sim 27 \text{ 万株/hm}^2$ 区间内合理,有利于大豆生产的高产稳产,但这一密度区间内高产是否可以延续,还需多年的重复试验进一步研究。

在合理密植范围内,大豆不仅可以充分发挥个体潜力,还能协调个体与群体间的矛盾,最大限度提高对环境资源的利用,从而保障作物的群体产量^[20-22]。本研究发现随种植密度增加,齐黄 34 和郑 1307 的茎粗和有效分枝减少,株高、底荚高度均呈增加趋势。这一结果表明密度增加会改变大豆植株构型,促使大豆茎秆伸长、茎粗降低、分枝减少,趋于纵向生长,与前人研究一致^[23-28]。张明聪等^[28]研究中红小豆单位面积地上部干重随密度增加先增后降,在 21 万株/hm^2 时最高,而本研究中除郑 1307 苗期施氮处理外,其他施氮期处理下齐黄 34 与郑 1307 单位面积地上部干重及根干重随密度增加而增加,究其原因可能是由于不同品种的耐密程度不同,作物生长情况也不同。前人研究发现大豆有效荚数、有效粒数、百粒重等产量构成指标均随种植密度增加而减少^[7, 29-30],本研究中两个供试品种这 3 个产量指标随密度变化趋势与前人

结果一致。吕继龙等^[2]研究表明我国春、夏大豆的产量均有随密度增加先增加后降低的趋势,但在一定的范围内密度对产量的影响并不显著。这一方面可能因大豆品种及种植地域不同,导致对密度增加的调节能力不同有关;另一方面大豆群体产量由单株产量和群体密度共同构成,种植密度过低时,单株产量较大但群体产量不高,种植密度过高时,单株产量又下降严重,因此不同处理间群体产量无显著差异^[31-32]。本研究中两个供试品种种植密度范围已在该片区的高产密度范围内,单位面积株数的增加足以弥补单株产量指标的下降,其产量随密度变化不显著。

高籽粒蛋白质含量使大豆对氮需求更高,合理的施肥制度不仅可以提高氮肥利用率,还能提高大豆光合作用进而提高产量,在不合理的阶段施用氮肥不仅会降低大豆共生固氮,而且达不到增产效果^[10, 33]。有研究表明,生殖生长期施用氮肥能延缓植株衰老,加强植株的光合作用,施肥期越迟生殖生长期越长,大豆籽粒重量越高,其影响越大^[11, 34-36]。因此本研究在种植密度处理基础上设置了延后施氮处理,不仅可以使大豆在生长前期充分利用前茬土壤中残留氮以促进大豆根瘤形成,避免施用底肥过多带来的氮阻遏现象,还可以满足生长后期实现高产的氮需求,延缓植株衰老。本研究发现,齐黄 34 在 18 万株/hm^2 种植密度下均表现为盛荚期施氮后的产量高于苗期及盛花期施氮,另两个密度下也有此趋势,说明延后施氮可以显著提高齐黄 34 的产量,这与 Gan 等^[12]、刘志远等^[37]、吴琼等^[38]、郭泰等^[11]的研究结果相似。相同种植密度下延后施氮对郑 1307 有效荚数及百粒重影响显著,在 27 万株/hm^2 密度下,盛荚期施氮时产量高于苗期和盛花期施氮,但差异不显著,另两个密度下郑 1307 产量无明显变化趋势。这些结果表明不同品种大豆对密植条件下延后施氮的反应不一致。不同种植密度下延后施氮具体如何影响大豆根系和根瘤生长及籽粒产量仍需进一步研究。

4 结论

本研究设置密度范围合理,利于大豆生产的高产稳产。齐黄 34 和郑 1307 在 $18 \text{ 万} \sim 27 \text{ 万株/hm}^2$ 密度范围内,产量均接近甚至超过这两个品种在该地区大面积生产或区试试验的产量水平,但两个品种产量随密度变化并不显著。

合理种植密度区间内, 种植密度通过调整大豆株型、改变地上部和根系的干物质积累, 维持其群体产量, 但不同品种对种植密度的响应有所差异。随种植密度增加, 两个品种茎粗降低、分枝减少, 但其茎秆伸长、地上部和根系生物量增加, 从而保障了大豆群体产量。但不同品种大豆对密植条件下延后施氮响应有所差异。3个种植密度下, 延后施氮对齐黄34有一定的增产效应; 在18万株/hm²密度下, 盛荚期施氮齐黄34产量显著高于苗期和盛花期, 而其他两个密度条件下盛荚期施氮的增产效应有所降低。就郑1307而言, 在27万株/hm²密度下, 延后施氮使其产量有所增加, 但增产效应未达到显著水平; 其他两个密度氮肥施用时期对产量无显著影响。齐黄34在后续种植中可在18万~27万株/hm²密度下在盛荚期施氮, 以提高产量; 郑1307在27万株/hm²密度下可适当延后施氮以提高大豆产量。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 吕继龙, 何萍, 徐新朋, 等. 我国大豆最佳施肥量和种植密度评价[J]. 中国土壤与肥料, 2020(6): 174-180.
- [3] 杨京. 2020年中国大豆市场分析[N]. 粮油市场报, 2021-02-20(B04).
- [4] Food and Agriculture Organization of the United Nations/[Z/OL]. <https://www.fao.org/home/en>.
- [5] 农业农村部. 农业农村部办公厅关于印发《大豆振兴计划实施方案》的通知[EB/OL]. (2019-03-20)[2022-03-30]. https://www.moa.gov.cn/nybg/2019/0201903/201905/t20190525_6315395.htm.
- [6] 陈应志, 武婷婷, 邱强, 等. 浅析大豆种植密度对单产的影响[J]. 大豆科技, 2021, 40(5): 14-17.
- [7] 刘卫国. 黄淮地区夏大豆不同密度对品种产量性状的影响[J]. 农业科技通讯, 2010(11): 38-40.
- [8] Salvadioti F, Cassman K G, Specht J E, et al. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: a review[J]. Field Crops Research, 2008, 108(1): 1-13.
- [9] Mourtzinis S, Kaur G, Orlowski J M, et al. Soybean response to nitrogen application across the United States: a synthesis-analysis[J]. Field Crops Research, 2018, 215: 74-82.
- [10] 田艳洪, 刘元英, 张文钊, 等. 不同时期施用氮肥对大豆根瘤固氮酶活性及产量的影响[J]. 东北农业大学学报, 2008, 39(5): 15-19.
- [11] 郭泰, 刘秀芝, 郑殿峰, 等. 氮素后移施肥对大豆产量及品质的影响[J]. 大豆科学, 2015, 34(1): 168-171.
- [12] Gan Y B, Stulen I, Posthumus F, et al. Effects of N management on growth, N₂ fixation and yield of soybean[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 62(2): 163-174.
- [13] McCoy J M, Kaur G, Golden B R, et al. Nitrogen fertilization of soybean in Mississippi increases seed yield but not profitability[J]. Agronomy Journal, 2018, 110(4): 1505-1512.
- [14] 赵俊卿, 任建军, 卢为国, 等. 免耕覆秸精量播种对大豆生长发育和产量构成因素的影响[J]. 大豆科学, 2012, 31(5): 734-768.
- [15] 王甜, 庞婷, 杜青, 等. 田间配置对间作大豆光合特性、干物质积累及产量的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(2): 107-116.
- [16] 纵瑞收, 徐冉. 大豆新品种齐黄34及其配套栽培技术[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(20): 89, 98.
- [17] 杨秋萍. 良种良法配套助力河南大豆逆境夺高产——河南省大豆新品种郑1307受热捧[J]. 大豆科技, 2021, 40(6): 54-56.
- [18] 王路路, 姜磊, 沈维良. 黄淮地区夏播大豆新品系比较试验[J]. 广东农业科学, 2020, 47(1): 16-22.
- [19] 蔡文秀, 赵云, 杨旭. 夏大豆新品种齐黄34栽培技术研究[J]. 山东农业工程学院学报, 2020, 37(10): 39-42.
- [20] 张明聪, 何松榆, 侯宇佳, 等. 增加密度减量施氮和接种根瘤菌对红小豆氮素吸收及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(2): 133-139, 165.
- [21] 孙国伟, 付连舜, 张凤路, 等. 播期及密度对不同大豆品种农艺性状及产量的影响[J]. 大豆科学, 2016, 35(3): 423-427.
- [22] 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.
- [23] 杨加银, 徐海风. 播期、密度对菜用大豆鲜荚产量及性状的影响[J]. 大豆科学, 2006, 25(2): 185-187, 191.
- [24] Coulter J A, Sheaffer C C, Haar M J, et al. Soybean cultivar response to planting date and seeding rate under organic management[J]. Agronomy Journal, 2011, 103(4): 1223-1229.
- [25] 程彬, 刘卫国, 王莉, 等. 种植密度对玉米-大豆带状间作下大豆光合、产量及茎秆抗倒的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(19): 4084-4096.
- [26] 梁建秋, 安建刚, 王嘉, 等. 不同种植密度对四川大豆农艺性状及产量的影响[J]. 大豆科学, 2021, 40(5): 653-661.
- [27] 于德彬, 张鸣浩, 孟凡钢, 等. 密度对分枝型大豆品种主要农艺性状及产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(24): 20-21.
- [28] 张明聪, 战英策, 何松榆. 氮密交互对红小豆干物质积累规律及产量的影响[J]. 作物杂志, 2018(1): 141-146.
- [29] Randelovic P, Dordevic V, Milic S, et al. Prediction of soybean plant density using a machine learning model and vegetation indices extracted from RGB images taken with a UAV[J]. Agronomy, 2020, 10(8): 1108.



- [30] 曾新宇, 宗洪霞, 张莉, 等. 施肥·密度与播期对鲜食大豆主要农艺性状及倒伏性的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(13): 23-26.
- [31] 梁建秋, 于晓波, 张明荣, 等. 化控和密度对套作大豆南黑豆20农艺性状和产量的影响[J]. 大豆科学, 2018, 37(6): 876-882.
- [32] 尹阳阳, 徐彩龙, 宋雯雯, 等. 密植是挖掘大豆产量潜力的重要栽培途径[J]. 土壤与作物, 2019, 8(4): 361-367.
- [33] Gutierrez-Boem F H, Scheiner J D, Rimski-Korsakov H, et al. Late season nitrogen fertilization of soybeans: effects on leaf senescence, yield and environment[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2004, 68(2): 109-115.
- [34] Donahue J M, Bai H, Almtarfi H, et al. The quantity of nitrogen derived from symbiotic N fixation but not the relative contribution of N fixation to total N uptake increased with breeding for greater soybean yields[J]. Field Crops Research, 2020, 259: 107945.
- [35] 甘银波, 陈静. 大豆不同生长阶段施用氮肥对生长、结瘤及产量的影响[J]. 大豆科学, 1997, 16(2): 34-39.
- [36] 邢永锋, 章建新, 李金霞, 等. 前氮后移对春大豆农艺性状及产量的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2008, 31(6): 31-34.
- [37] 刘志远, 董彦明, 罗翔宇. 启动氮加追氮对大豆干物质积累及叶生产力的影响[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(10): 6-10.
- [38] 吴琼, 孙磊, 刘元英, 等. 氮密交互对大豆干物质在冠层中分布的影响[J]. 大豆科学, 2015, 34(1): 46-51.

Effects of planting density and nitrogen application period on agronomic traits and yield of different soybean cultivars

ZHOU Xin-yu¹, WANG Tian-shu¹, REN Li-dong¹, WANG Li¹, YU Shu-ting¹, WANG Jing¹, SONG Ai-ying², YAO Shui-hong^{1*} (1. State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arid and Semi-arid Arable Land in Northern China, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 2. Agriculture and Rural Bureau of Wenshang County, Wenshang Shandong 272509)

Abstract: Reasonable planting density and delayed nitrogen application are important for improving soybean yield. In order to demonstrate the responses of different soybean cultivars to planting density and nitrogen application period, this study used soybean cultivars Qihuang 34 and Zheng 1307 as experimental materials, and adopted a split plot design with soybean cultivars as main plots and planting density and nitrogen application period as subplots. The experiment was conducted at Xinxiang, Henan province in 2020. The differences in agronomic traits, biomass accumulation and production components were analyzed. The results showed that the yields of Qihuang 34 and Zheng 1307 were 4027.55-4748.20 and 4783.65-5113.60 kg/hm² in the density range of 180000-270000 plants/hm², respectively. The yield of Zheng 1307 was 12.2%-21.8% higher than that of Qihuang 34. The yield of the two cultivars did not change significantly under different planting densities. With the increase of density, the stem diameter, branches, effective pod number, effective grain number and 100-grain weight decreased, but stem elongation, shoot and root biomass increased in Qihuang 34; the stem diameter and effective branching decreased, but biomass per hectare increased in Zheng 1307. The application period of nitrogen fertilizer had a significant effect on the yield of Qihuang 34, with the highest yield under pod-filling stage application, increased by 5%-8% and 8%-17% compared to the seedling and full bloom stages, respectively. For Zheng 1307, the yield was not significantly affected by the application period, but it was higher under pod-filling stage application than the other treatments when planted at 270000 plants/hm², with the effective pod number and 100-grain weight responded to nitrogen application period significantly. In conclusion, soybean plants can maintain its population yield by adjusting agronomic characters and the dry matter accumulation in the shoot and root within the reasonable planting density range of 180000-270000 plants/hm². Delayed nitrogen application had a yield-increasing effect on Qihuang 34 but not Zheng 1307. These results can provide theoretical and scientific basis for stably increasing the soybean yield in the Huang-Huai-Hai region and implementing the "soybean revitalization" strategy.

Key words: soybean cultivar; planting density; nitrogen application period; agronomic traits; yield