



大豆根瘤豆血红蛋白含量与产量关系研究

王 田,王志杰,张云鹤,叶 岩,郭明旻,陈展宇,张治安

(吉林农业大学 农学院,吉林 长春 130118)

摘 要:为明确大豆血红蛋白与产量的关系,以 12 个吉林省审定推广的吉农系列大豆品种为材料,在盛花期(R₂)、结荚期(R₄)、鼓粒期(R₆)和成熟期(R₈)测定根结瘤特性和根瘤中豆血红蛋白的含量测量产量,并分析不同品种根瘤数量、干重和豆血红蛋白含量变化规律及其与产量的相关关系。结果表明:吉农 51、吉农 39 和吉农 41 产量处于较高水平,显著高于吉农 38、吉农 43 和吉农 45,并且在 R₆ 和 R₈ 期吉农 51、吉农 41 和吉农 39 根瘤豆血红蛋白含量比其它品种高 12.4%~95.7% 和 14.6%~88.1%。R₆ 和 R₈ 期根瘤豆血红蛋白的含量与根瘤数量和干重呈显著正相关,且 R₆ 期相关性更大。R₆ 和 R₈ 期根瘤干重和根瘤数量与产量均呈显著正相关,大豆根瘤豆血红蛋白含量与产量呈极显著正相关。结果说明豆血红蛋白与产量的关系密切,豆血红蛋白含量可以作为筛选高固氮结瘤能力大豆品种

关键词:大豆;根瘤;豆血红蛋白;产量

Study on Relationship Between Soybean Leghemoglobin Content and Yield

WANG Tian, WANG Zhi-jie, ZHANG Yun-he, YE Yan, GUO Ming-yang, CHEN Zhan-yu, ZHANG Zhi-an
(College of Agronomy, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: In order to determine the relationship between soybean leghemoglobin content and yield, 12 Jinong varieties approved and popularized by Jilin province were taken as testing samples to determine characteristics of root nodules and leghemoglobin content in root nodules of R₂, R₄, R₆ and R₈ stages and yield. The changes of nodule number, nodule dry weight and leghemoglobin content and their relationship with yield were analyzed. The results showed that the yield of Jinong 51, Jinong 39 and Jinong 41 remained significantly higher than that of Jinong 38, Jinong 43 and Jinong 45. Also leghemoglobin content of Jinong 51, Jinong 39 and Jinong 41 in R₆ and R₈ periods were respectively 12.4% - 95.7% and 14.6% - 88.1% higher than other varieties. The leghemoglobin content in R₆ and R₈ periods has a significant positive correlation with the number and dry weight of nodule, and the correlation is closer in R₆ period. Both the nodule dry weight and nodule number have a significant positive correlation with yield, and leghemoglobin content have an extremely significant positive correlation in R₆ and R₈ periods. It indicates that leghemoglobin content is closely related to yield. This research provides a basis for studying feasibility of using leghemoglobin content as an index to screen out soybeans of strong nitrogen fixation ability.

Keywords: Soybean; Root nodule; Leghemoglobin; Yield

大豆(*Glycine max*)是我国重要的粮食、油料和饲料作物之一,我国是世界最大的大豆进口国而美国是世界最大的大豆出口国^[1],中美贸易战导致大豆进口价格上涨,并且随着现代农业的发展,化肥过度使用对农业生产,土壤环境质量和生态环境造成了巨大的负面影响,同时也造成了巨大的经济损失^[2],人类保护环境意识正在提高,可持续发展已经成为农业发展的主要趋势,而生物固氮在其中具有重要的作用^[3]。因此,提高大豆单产和选育高固氮结瘤能力的大豆品种已成为我国发展大豆产业的重要课题。关大伟等^[4]针对我国大豆生物固氮潜力的研究表明大豆籽粒中生物固氮量占总固氮量的 65%~81%。Gabriel 等^[5]指出大豆产量取决

于全氮吸收、氮素利用效率和收获指数,氮的吸收依赖于生物固氮(BNF)和土壤吸收,所以 BNF 被认为是一个与产量相关的过程。研究表明,编码豆血红蛋白的 *Lb* 基因的表达能够显著提高大豆根瘤的固氮酶活性^[6],根瘤中固氮酶活性与大豆血红蛋白的含量呈正相关^[7]。前人对豆血红蛋白的研究主要为以下几个方面:逆境胁迫对豆血红蛋白的影响、豆血红蛋白有关的自由基的产生、*Lb* 基因和根瘤素及其基因的研究^[8]。这些研究进一步揭示豆科植物的共生固氮作用,也为生物固氮的实际应用提供理论依据和创造条件,但对于豆血红蛋白与产量之间关系的研究还有欠缺。

本研究以吉农 38、吉农 39 和吉农 40 等 12 个吉

收稿日期:2019-07-25

基金项目:吉林省教育厅“十三五”科学技术项目(JJKH20180662KJ);国家自然科学基金(31171459)。

第一作者简介:王田(1997-)男,硕士,主要从事大豆栽培生理研究。E-mail:734180363@qq.com。

通讯作者:张治安(1964-)男,博士,教授,博导,主要从事作物生理生态研究。E-mail:zhangzhan6412@163.com。

林省审定推广的吉农系列大豆品种为试验材料,在不同生育时期测定根结瘤特性和根瘤中豆血红蛋白含量并测产,旨在明确豆血红蛋白与产量的关系,有助于揭示生物固氮对大豆产量的贡献作用原理,同时研究以豆血红蛋白含量为参考指标筛选高固氮结瘤能力大豆品种的可行性。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料由吉林农业大学大豆育种研究室提供,为近年育成的12个大豆品种:吉农38、吉农39、吉农40、吉农41、吉农42、吉农43、吉农44、吉农45、吉农46、吉农47、吉农48、吉农51。

1.2 试验设计

试验于2017–2018年在吉林农业大学试验田和植物生理实验室进行,田间试验采用随机区组试验设计,3次重复,共计12个参试大豆品种,36个试验小区,每个小区为5行区,行长5 m,行距0.65 m,小区面积16.25 m²,种植密度为20万株·hm⁻²,试验区四周设保护行,正常田间管理。

1.3 测定项目与方法

根瘤数量和根瘤干重的测定:于开花期(R2)、结荚期(R4)、鼓粒期(R6)和成熟期(R8),每个小区随机选取6株长势相近的大豆,样品用自来水冲洗干净,将根瘤取下,采用常规计数方法计数,将根

瘤105℃杀青、80℃烘干至恒重,采用常规称量方法测定干重。

豆血红蛋白含量的测定:参照王树起等^[9]和左元梅等^[10]的方法并略作修改,取一定量的新鲜根瘤,在4℃的磷酸缓冲溶液(0.1 mol·L⁻¹, pH6.8)中研磨成匀浆,磷酸缓冲溶液的量 of 根瘤体积的4倍左右,4℃离心15 min,取上层清液离心20 min,再取上清液,在波长540 nm条件下用分光光度计比色测定吸光值。

产量的测定:成熟期取小区中间3行进行测产。

1.4 数据分析

采用Excel 2016和SPSS 22.0软件进行数据的统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同大豆品种根结瘤特性变化

2.1.1 各生育时期根瘤数分析 由表1可知,在同一生育时期不同大豆品种的根瘤数量之间存在显著差异,以R2期为例,吉农42根瘤数量最多为66.00个,比数量最少的吉农44和吉农51多160.1%。但不同大豆品种结瘤数量在R2~R8期整体变化趋势相似,呈现为先快速上升再缓慢下降的单峰曲线,在R2期根瘤数量最少,平均为41.11个,在R6期均达到最大值,平均为220.39个。

表1 不同生育时期不同品种大豆根瘤数量

Table 1 The root nodule number of different soybean varieties in different growth stages

品种 Variety	生育时期 Growth stage			
	R2	R4	R6	R8
吉农38 Jinong 38	39.00 ± 4.08 e	128.00 ± 5.10 d	209.33 ± 0.47 cd	97.33 ± 7.59 cde
吉农39 Jinong 39	43.33 ± 4.03 de	146.33 ± 4.78 c	237.00 ± 7.12 ab	130.67 ± 2.49 a
吉农40 Jinong 40	52.00 ± 0.82 bc	169.67 ± 4.03 a	238.00 ± 7.48 ab	105.67 ± 2.87 bcd
吉农41 Jinong 41	46.00 ± 2.16 cde	126.33 ± 11.67 d	232.00 ± 3.27 ab	125.67 ± 4.19 a
吉农42 Jinong 42	66.00 ± 7.12 a	105.33 ± 2.49 e	208.33 ± 5.91 cd	107.67 ± 4.71 bc
吉农43 Jinong 43	49.00 ± 1.63 bcd	152.67 ± 1.70 bc	202.00 ± 2.45 d	109.33 ± 8.96 b
吉农44 Jinong 44	25.33 ± 3.30 f	106.00 ± 4.97 e	233.33 ± 1.89 ab	111.00 ± 4.32 b
吉农45 Jinong 45	54.00 ± 2.94 b	161.00 ± 2.83 ab	200.33 ± 3.86 d	94.33 ± 3.30 e

续表 1

品种 Variety	生育时期 Growth stage			
	R2	R4	R6	R8
吉农 46 Jinong 46	41.33 ±1.89 e	146.00 ±5.72 c	214.67 ±3.68 c	98.67 ±4.50 cde
吉农 47 Jinong 47	52.00 ±3.56 bc	161.00 ±3.56 ab	227.67 ±6.13 b	96.33 ±2.87 de
吉农 48 Jinong 48	64.33 ±2.49 a	134.00 ±1.41 d	201.00 ±1.41 d	124.67 ±4.03 a
吉农 51 Jinong 51	25.33 ±1.70 f	103.67 ±8.22 e	241.00 ±5.10 a	122.00 ±1.63 a

不同小写字母表示同一时期不同品种间差异显著($P < 0.05$)。下同。
Different lowercase mean significant difference among varieties in the same stage at $P < 0.05$ level. The same below.

2.1.2 各生育时期根瘤干重分析 由表 2 可知,在大豆品种根瘤干重在 R2 ~ R8 期整体变化趋势相似,呈现为先快速上升再缓慢下降的单峰曲线,在同一生育时期不同大豆品种的根瘤干重之间存在显著差异,以 R2 期为例,吉农 42 单株根瘤干重最高为 0.550 g,比最低的吉农 51 重 319.8%,但不同 R2 期单株根瘤干重最小,平均 0.347 g,在 R6 期均达到最大值,平均 2.333 g。

表 2 不同生育时期不同品种大豆单株根瘤干重
Table 2 The root nodule dry weight of different soybean varieties in different growth stages (g)

品种 Variety	生育时期 Growth stage			
	R2	R4	R6	R8
吉农 38 Jinong 38	0.274 ±0.042 f	1.313 ±0.058 d	2.129 ±0.027 d	0.860 ±0.076 cde
吉农 39 Jinong 39	0.318 ±0.041 ef	1.520 ±0.054 c	2.517 ±0.079 ab	1.193 ±0.025 a
吉农 40 Jinong 40	0.407 ±0.008 cd	1.784 ±0.046 a	2.118 ±0.016 d	0.943 ±0.029 bcd
吉农 41 Jinong 41	0.346 ±0.022 def	1.294 ±0.132 d	2.528 ±0.083 ab	1.143 ±0.042 a
吉农 42 Jinong 42	0.550 ±0.073 a	1.057 ±0.028 e	2.414 ±0.068 b	0.963 ±0.047 bc
吉农 43 Jinong 43	0.376 ±0.017 cde	1.591 ±0.019 bc	2.110 ±0.043 d	0.980 ±0.090 b
吉农 44 Jinong 44	0.135 ±0.034 g	1.064 ±0.056 e	2.476 ±0.021 ab	0.996 ±0.043 b
吉农 45 Jinong 45	0.427 ±0.030 bc	1.686 ±0.032 ab	2.199 ±0.066 cd	0.830 ±0.033 e
吉农 46 Jinong 46	0.298 ±0.019 ef	1.516 ±0.065 c	2.210 ±0.005 cd	0.873 ±0.045 cde
吉农 47 Jinong 47	0.407 ±0.036 cd	1.686 ±0.040 ab	2.462 ±0.036 ab	0.850 ±0.029 de
吉农 48 Jinong 48	0.498 ±0.034 ab	1.381 ±0.016 d	2.269 ±0.041 c	1.133 ±0.040 a
吉农 51 Jinong 51	0.131 ±0.022 g	1.038 ±0.093 e	2.562 ±0.057 a	1.106 ±0.016 a

2.2 不同大豆品种各生育时期豆血红蛋白含量分析

在不同生育时期,不同大豆品种根瘤豆血红蛋白含量存在明显差异。在 R2 期,吉农 40 根瘤豆血红蛋白含量最高,吉农 45 和吉农 46 次之,吉农 40 根瘤豆血红蛋白含量比其余品种高 14.9% ~ 63.6% 且存在显著差异($P<0.05$)。在 R4 期,吉农 45 根瘤豆血红蛋白含量最高,吉农 40 和吉农 51 次之,吉农 45 根瘤豆血红蛋白含量比吉农 40、吉农 51、吉农 46 和吉农 39 高 2.2% ~ 10.0%,差异不显著,但比其余品种高 13.4% ~ 39.5% 且存在显著差异($P<0.05$)。在 R6 期,吉农 51 根瘤豆血红蛋白含量最高,吉农 41 和吉农 39 次之,吉农 51 根瘤豆

血红蛋白比其余品种高 12.4% ~ 95.7% 且差异显著,吉农 41 和吉农 39 比吉农 44 和吉农 42 高 3.0% ~ 5.6%,差异不显著,但比其余品种高 13.5% ~ 74.2% ($P<0.05$)。在 R8 期,吉农 51 根瘤豆血红蛋白含量最高,吉农 41 和吉农 39 次之,吉农 51 根瘤豆血红蛋白含量比吉农 41 高 5.6%,差异不显著,但比其余品种高 14.6% ~ 88.1%,差异显著。吉农 41 根瘤豆血红蛋白含量比吉农 39 高 8.6%,差异不显著,但比其余品种高 16.7% ~ 78.1% 且差异显著。不同大豆品种根瘤豆血红蛋白含量开花期到成熟期的变化趋势相似,都呈现逐渐递减的趋势(表 3)。

表 3 不同生育时期不同大豆品种根瘤豆血红蛋白含量

Table 3 The leghemoglobin content of different soybean varieties in different growth stages (mg·g ⁻¹)				
品种 Variety	生育时期 Growth stage			
	R2	R4	R6	R8
吉农 38 Jinong 38	19.92 ± 0.45 de	17.86 ± 0.55 bc	12.00 ± 0.65 f	7.30 ± 0.52 e
吉农 39 Jinong 39	23.51 ± 1.50 bc	18.42 ± 0.75 abc	16.59 ± 0.34 b	11.68 ± 0.44 bc
吉农 40 Jinong 40	27.93 ± 1.08 a	19.83 ± 0.39 a	13.26 ± 1.38 def	7.95 ± 0.57 e
吉农 41 Jinong 41	21.41 ± 0.48 cd	17.53 ± 0.64 cd	16.91 ± 0.76 b	12.68 ± 0.62 ab
吉农 42 Jinong 42	18.02 ± 0.70 ef	16.69 ± 0.43 cd	16.01 ± 1.09 bc	10.22 ± 1.28 cd
吉农 43 Jinong 43	19.26 ± 0.79 def	14.52 ± 0.90 e	9.71 ± 0.38 g	7.12 ± 0.35 e
吉农 44 Jinong 44	17.07 ± 0.77 f	16.89 ± 0.54 cd	16.10 ± 0.43 bc	10.87 ± 0.94 cd
吉农 45 Jinong 45	24.31 ± 1.57 b	20.26 ± 1.09 a	11.73 ± 0.75 f	7.15 ± 1.02 e
吉农 46 Jinong 46	23.97 ± 1.31 bc	19.50 ± 1.07 ab	12.53 ± 0.76 ef	7.60 ± 0.87 e
吉农 47 Jinong 47	22.90 ± 2.48 bc	15.73 ± 0.95 de	14.62 ± 1.19 cd	9.88 ± 0.60 d
吉农 48 Jinong 48	18.83 ± 0.46 def	15.99 ± 1.28 de	14.02 ± 0.44 de	8.21 ± 0.69 e
吉农 51 Jinong 51	20.01 ± 0.59 de	19.74 ± 0.70 a	19.00 ± 1.43 a	13.39 ± 0.77 a

2.3 不同大豆品种产量表现

在 12 个品种中, 吉农 51 品种产量最高, 为 3 502.8 kg·hm⁻², 吉农 41 和吉农 39 次之, 分别为 3 455.5 和 3 382.5 kg·hm⁻², 吉农 43、吉农 45 和吉农 38 品种产量表现最低。吉农 51 产量分别比吉农 48、吉农 46、吉农 45、吉农 43、吉农 40 和吉农 38 高 6.3%、6.5%、13.1%、14.2%、6.6% 和 12.5%, 差

异显著($P < 0.05$)。吉农 41 产量分别比吉农 48、吉农 46、吉农 40 高 4.9%、5.1% 和 5.2%, 差异不显著($P > 0.05$); 吉农 41 产量分别比吉农吉农 45、吉农 43 和吉农 38 高 11.6%、12.6% 和 11.0%, 差异显著($P < 0.05$); 吉农 39 分别比吉农吉农 45、吉农 43 和吉农 38 增产 9.2%、10.2% 和 8.7%, 差异显著($P < 0.05$)(图 1)。

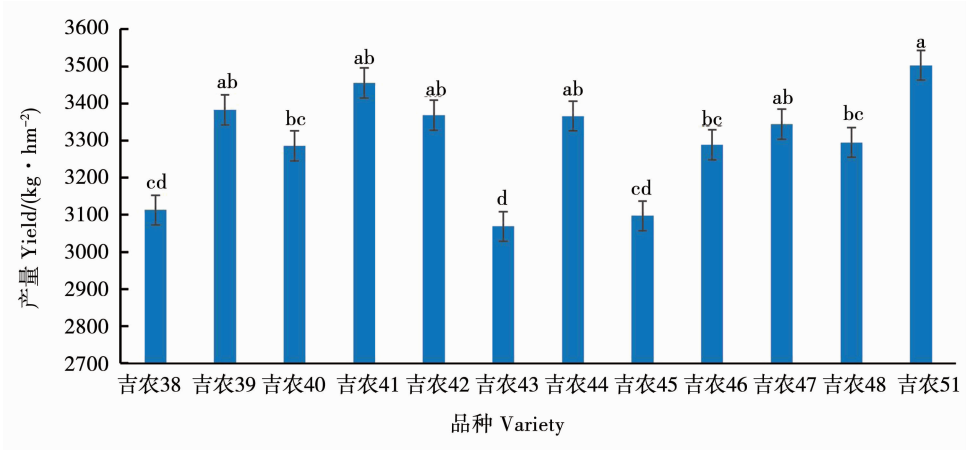


图 1 不同大豆品种产量
Fig. 1 The yield of different soybean varieties

2.4 性状间的相关性分析

2.4.1 大豆根结瘤特性与豆血红蛋白含量的关系
大豆根瘤数量、根瘤干重与豆血红蛋白含量的相关性分析表明(表 4): 在 R2 和 R4 期, 豆血红蛋白

含量与根瘤数量及根瘤干重呈正相关, 但未达到显著水平; 在 R6 期呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.653 和 0.865, 在 R8 期呈显著正相关, 相关系数均为 0.608。

表 4 不同生育时期大豆根瘤数量及根瘤干重与豆血红蛋白的相关性

测定指标 Item	生育时期 Growth stage			
	R2	R4	R6	R8
根瘤数量 Root nodule number	0.129	0.106	0.653 **	0.608 *
根瘤干重 Root nodule dry weight	0.149	0.106	0.865 **	0.608 *

* 表示 $P < 0.05$ 水平下显著相关; ** 表示 $P < 0.01$ 水平下极显著相关。下同。
* indicates significant correation at $P < 0.05$; ** indicates very significant correation at $P < 0.01$. The same below.

2.4.2 大豆根结瘤特性和豆血红蛋白含量与产量的关系
在 R2 和 R4 时期大豆根瘤数量、根瘤干重和豆血红蛋白含量与产量均呈负相关, 但未达到显著水平; 在 R6 和 R8 时期根瘤数量和根瘤干重与产量都呈显著正相关, 而大豆豆血红蛋白含量与产量呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.686 和 0.744

(表 5)。R6 期籽粒开始形成, 根瘤大量生长可以提高大豆根系对于氮素吸收的效率, 有利于促进大豆根系固氮能力的提高, 可以为荚中的籽粒提供更多的氮素和营养进而提高产量, 这可能是造成不同生育期相关性由负变为正的原因之一。

表 5 不同时期大豆产量与根瘤数量、根瘤干重和豆血红蛋白含量的相关性
Table 5 Correlation between the yield root nodule number, root nodule dry weight and the leghemoglobin content of different soybean varieties in different growth stage

生育时期 Growth stage	豆血红蛋白含量 Leghemoglobin content	根瘤数量 Root nodule number	根瘤干重 Root nodule dry weight
R2	-0.057	-0.254	-0.265
R4	-0.016	-0.370	-0.370
R6	0.686 **	0.532 *	0.605 *
R8	0.744 **	0.516 *	0.516 *

3 讨 论

豆科作物的结瘤特性存在明显特点,并且不同施氮量、施氮方式、水分和干旱程度都会对大豆的根瘤数量、根瘤干重产生明显影响^[11-12]。白子裕等^[13]对不同类型大豆结瘤特性的研究表明,半野生、半栽培以及栽培大豆的根瘤数量及根瘤干重在 R2 ~ R8 期呈先上升后下降的变化,在 R6 达到最大值,与本研究不同生育时期的大豆根瘤数量及干重变化趋势相吻合,均在 R6 达到最大值,呈现先快速上升后下降的单峰曲线。在 R2 ~ R8 期不同品种之间根瘤数量差距可达 5.9% ~ 160.1%,根瘤干重差距可达 6.1% ~ 319.8%,均达到显著水平。说明不同大豆品种根瘤干重和根瘤数量存在显著差异,结瘤能力存在显著的遗传变异性,通过育种方法改良品种可能培育出新的拥有高结瘤特性的大豆。

豆血红蛋白在调控根瘤固氮等方面具有重要功能,根瘤固氮中亚铁血红蛋白(Lb²⁺)对于氮素固定来说是必要条件,其含量与根瘤共生固氮量密切相关^[14],所以根瘤豆血红蛋白的含量是反应其固氮功能的重要指标^[15]。杨美英等^[16]对不同类型大豆各生育时期豆血红蛋白含量的试验表明,栽培大豆的豆血红蛋白含量从 R2 期开始降低,本研究中不同大豆品种的根瘤豆血红蛋白含量变化趋势总体一致,自 R2 期开始逐渐降低,该结果与其研究一致。并且在 R2 ~ R8 期不同品种之间根瘤豆血红蛋白含量差距可达 12.4% ~ 95.7%,达到显著水平。说明不同大豆品种根瘤豆血红蛋白存在显著差异,根瘤固氮能力存在显著的遗传变异性,通过育种方法改良品种可能培育出新的固氮能力强的大豆。

对大豆根瘤数量、根瘤干重与豆血红蛋白含量进行相关性分析,相关系数为 0.106 ~ 0.865。在 R2 和 R4 期豆血红蛋白含量与根瘤数量和干重均呈正相关但未达到显著水平;在 R6 和 R8 期呈显著正相关;在 R6 期相关更密切。固氮能力的差异性主要来源于豆血红蛋白等根瘤内含物含量的差异,而大

豆根瘤豆血红蛋白含量的高低与根结瘤特性相关性显著,所以可以根据豆血红蛋白含量的高低来判断大豆的结瘤特性和固氮能力。

豆科作物代谢是一个复杂的过程,对大豆的研究认为,大豆的固氮酶活性越高,固氮能力越强,植株地上部分积累的干物质量越多,籽粒产量越高,即固氮能力直接影响大豆的产量^[17]。姚琳等^[18]认为,在 R2 和 R4 时期,产量与根瘤数量和根瘤鲜重等均呈显著正相关,在 R6 期根瘤数量和根瘤鲜重等均呈负相关但不显著,与本研究结果相反。可能是因为姚琳等研究选择 1923 - 2005 年育成的 20 个品种在育成年份和产量等方面与本试验选用的品种有较大差异,并且育种工作者对产量性状的改良可能导致了在不同时期大豆根结瘤特性的变化,进而导致相关性存在差异。郑永美等^[19]的研究表明,根瘤数量和根瘤鲜重分别与豆血红蛋白含量和产量呈正相关和极显著正相关;豆血红蛋白含量与产量呈极显著正相关,与本研究基本一致。本研究分析了 4 个不同时期根结瘤特性和豆血红蛋白含量与产量的关系,结果表明,在 R2 和 R4 时期产量与根结瘤特性和豆血红蛋白含量均呈负相关但都达不到显著水平,而 R6 和 R8 时期根结瘤特性与产量都呈显著正相关,而大豆豆血红蛋白含量与产量呈极显著正相关。

4 结 论

本研究通过分析 12 个不同大豆品种的结瘤特性和产量发现,吉农 51、吉农 39 和吉农 41 产量处于较高水平,且显著高于吉农 38、吉农 43 和吉农 45。R2 和 R4 期吉农 51、吉农 39 和吉农 41 根瘤豆血红蛋白含量处于较高水平,R6 和 R8 期吉农 51、吉农 41 和吉农 39 根瘤豆血红蛋白含量显著高于大多数品种。因此,豆血红蛋白的含量可以作为筛选高固氮结瘤能力大豆品种的指标,并且通过提高大豆豆血红蛋白含量,可促进大豆根瘤固氮能力的提高,有利于全氮的积累和产量的提高。

参考文献

- [1] 陈伟,朱俊峰,田国强.中美贸易摩擦对中国大豆的影响及对策分析[J].大豆科学,2019,38(1):118-123. (Cheng W, Zhu J F, Tian G Q. The impact and countermeasures analysis of Sino-US trade friction on China's soybean[J]. Soybean Science, 2019, 38(1): 118-123.)
- [2] 唐海龙.有机肥与化肥配施对土壤环境质量影响的研究[D].泰安:山东农业大学,2012. (Tang H L. Research on the efficiency of organic and chemical fertilizers to soil environmental quality[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2012.)
- [3] 张武,杨琳,王紫娟.生物固氮的研究进展及发展趋势[J].云南农业大学学报(自然科学),2015,30(5):810-821. (Zhang W, Yang L, Wang Z J. Advance and development trend of biological nitrogen fixation research[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2015, 30 (5): 810-821.)
- [4] 关大伟,李力,岳现录,等.我国大豆的生物固氮潜力研究[J].植物营养与肥料学报,2014,20(6):1497-1504. (Guan D W, Li L, Yue X L, et al. Study on potential of biological nitrogen fixation of soybean in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2014,20(6):1497-1504.)
- [5] Gabriel S, Lucas B, Fernando S, et al. Relative importance of biological nitrogen fixation and mineral uptake in high yielding soybean cultivars[J]. Plant and Soil, 2017, 418: 191-203.
- [6] 喻定文,任晓伟,高凡,等. *StNHXI* 基因过表达对盐胁迫下菜用大豆结瘤固氮的影响[J].河北农业大学学报,2019,42(1):22-27. (Yu D W, Ren X W, Gao F, et al. Effects of over-expression of *StNHXI* gene on nodulation and nitrogen fixation in vegetable soybean under salt stress[J]. Journal of Hebei Agricultural University,2019,42(1):22-27.)
- [7] 柯丹霞,彭鲲鹏.利用酵母双杂交系统筛选大豆结瘤因子受体 NFR1 α 的互作蛋白[J].作物学报,2020,46(1):31-39. (Ke D X, Peng K P. Screening of NFR1 α -interactive proteins in soybean using yeast two hybrid system[J]. Acta Agronomica Sinica, 2020,46(1):31-39.)
- [8] 赵亚兰,尉亚辉.豆血红蛋白的研究进展[J].西北植物学报,2000,30(4):684-689. (Zhao Y L, Wei Y H. Progress in the study of leghemoglobin [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2000,30(4):684-689.)
- [9] 王树起,韩晓增,乔云发,等.缺磷条件下低分子量有机酸对大豆氮积累和结瘤固氮的影响[J].应用生态学报,2009,20(5):1079-1084. (Wang S Q, Han X Z, Qiao Y F, et al. Effects of low molecular organic acids on nitrogen accumulation, nodulation, and nitrogen fixation of soybean (*Glycine max* L.) under phosphorus deficiency stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009,20(5):1079-1084.)
- [10] 左元梅,刘永秀,张福锁.与玉米混作改善花生铁营养对其根瘤形态结构及豆血红蛋白含量的影响[J].植物生理与分子生物学报,2003,29(1):33-38. (Zuo Y M, Liu Y X, Zhang F S. Effects of improvement of iron nutrition by mixed cropping with maize on nodule microstructure and leghaemoglobin content of peanut[J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2003, 29(1):33-38.)
- [11] Ji Y M, Luo R P, Zhao Z G, et al. Effects of different nitrogen application rates and methods on root nodule growth and yield of soybean[J]. Agricultural Science and Technology,2018,19(2):67-72.)
- [12] 赵宏伟,李秋祝,魏永霞.不同生育时期干旱对大豆主要生理参数及产量的影响[J].大豆科学,2006,25(3):329-332. (Zhao H W, Li Q Z, Wei Y X. Effect of drought at different growth stages on main physiological parameters and yield in soybean[J]. Soybean Science, 2006, 25(3): 329-332.)
- [13] 白子裕,刘冰,徐晨,等.不同类型大豆根瘤氮同化关键酶活性比较[J].分子植物育种,2019,17(18):6097-6103. (Bai Z Y, Liu B, Xu C, et al. Comparison of key enzyme activities of ammonia assimilation in different types of soybean root nodules [J]. Molecular Plant Breeding,2019,17(18):6097-6103.)
- [14] 郭荫杰.大豆豆血红蛋白还原酶(*GmFLbR*)基因的图位克隆和功能初步分析[D].哈尔滨:中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所),2018. (Guo Y J. The ferric hemoglobin reductase (*GmFLbR*) gene of soybean mapping and preliminary function analysis[D]. Harbin: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2018.)
- [15] 严君,韩晓增,王守宇,等.不同施氮量及供氮方式对大豆根瘤生长及固氮的影响[J].江苏农业学报,2010,26(1):75-79. (Yan J, Han X Z, Wang S Y, et al. Effects of different n supply levels and methods on nodule growth and nitrogen fixation in soybean (*Glycine max* L.) [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences,2010,26(1):75-79.)
- [16] 杨美英,王乾乾,赵洪锬,等.不同蛋白质含量大豆结瘤特性与根瘤氮代谢物含量的比较分析[J].中国油料作物学报,2011,33(5):492-498. (Yang M Y, Wang Q Q, Zhao H K, et al. Comparison and analysis of nodular growth characteristics and nitrogenous compounds in nodule among soybean species with different protein content [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2011,33(5):492-498.)
- [17] 姜妍,王清泉,李远明,等.施氮水平对7S亚基缺失大豆根系形态和结瘤固氮的影响[J].大豆科学,2017,36(2):267-273. (Jiang Y, Wang Q Q, Li Y M, et al. Effect of different nitrogen application levels on the root morphology, nodulation and nitrogen fixation in 7S subunit lacked soybean[J]. Soybean Science,2017,36(2):267-273.)
- [18] 姚琳,徐克章,张治安,等.吉林省不同年代育成大豆品种根瘤数量、鲜重和体积的变化[J].中国油料作物学报,2009,31(2):196-201. (Yao L, Xu K Z, Zhang Z A, et al. Nodule number fresh weight and volume of soybean cultivars over the years in Jilin province[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences,2009,31(2):196-201.)
- [19] 郑永美,杜连涛,王春晓,等.不同花生品种根瘤固氮特点及其与产量的关系[J].应用生态学报,2019,30(3):961-968. (Zheng Y M, Du L T, Wang C X, et al. Nitrogen fixation characteristics of root nodules in different peanut varieties and their relationship with yield[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2019,30(3):961-968.)