



种子根瘤菌包衣对黑龙江省大豆生长及结瘤的影响

刘国辉¹, 孙志玲², 蔡姗姗², 孙磊², 高中超², 李玉梅², 董彦明³, 王伟^{2*}

(1. 黑龙江省农业环境与耕地保护站, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 黑龙江省黑土保护利用研究院, 黑龙江 哈尔滨 150086; 3. 黑龙江众元农业发展有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150028)

摘要:为探究大豆种子根瘤菌包衣技术在黑龙江省的应用效果,本研究在三江平原区、松嫩平原北部、松嫩平原西部、松嫩平原中部、松嫩平原南部和丘陵半山区进行田间试验,设置常规施肥和根瘤菌包衣2个处理,调查分析73户农户大豆产量及大豆根瘤生长状况。结果表明:根瘤菌能促进大豆根瘤生长,0~30 cm土层中大豆根瘤数增加,单株根瘤数和鲜重分别增加9.34%~39.84%和13.16%~44.90%,结瘤率和有效根瘤占比分别提高0.70%~16.79%和1.25%~43.63%;促进大豆生长,使根系伸长3.32%~8.55%,株高增加0.42%~16.02%,地上部干重增加6.24%~19.98%;提高大豆产量,使单株荚数增加0.57%~10.81%,百粒重增加1.87%~4.34%,产量提高6.44%~10.81%。根瘤鲜重与土壤有效磷含量呈显著正相关,单株荚数与单株根瘤数量呈显著正相关,产量与结瘤率呈正相关。研究显示大豆种子根瘤菌包衣技术在黑龙江省具有良好的生态适应性,能显著提高大豆根瘤数和有效根瘤占比,提高大豆生物固氮效应,促进大豆生长,百粒重增加。在氮肥减施30%的同时实现稳产增产,适宜在生产中推广应用。

关键词:大豆;根瘤菌;种子包衣;根瘤;生长;产量

Effects of Seed Rhizobia Coating on Soybean Growth and Nodulation in Heilongjiang Province

LIU Guohui¹, SUN Zhiling², CAI Shanshan², SUN Lei², GAO Zhongchao², LI Yumei², DONG Yanming³, WANG Wei^{2*}

(1. Heilongjiang Black Soil Protection and Utilization Research Institute, Harbin 150086, Heilongjiang, China; 2. Heilongjiang Province Agricultural Environment and Farmland Protection Station, Harbin 150090, Heilongjiang, China; 3. Heilongjiang Zhongyuan Agricultural Development Co., Ltd, Harbin 150028, Heilongjiang, China)

Abstract: To explore the application effect of soybean seed rhizobium coating technology in Heilongjiang Province, Field experiments were conducted in the Sanjiang Plain, northern Songnen Plain, western Songnen Plain, central Songnen Plain, southern Songnen Plain, and hilly areas. Two treatments, conventional fertilization and rhizobial coating, were set up to investigate and analyze the soybean yield and soybean nodule growth status of 73 households. Rhizobia can promote the growth of soybean root nodules. The results showed that rhizobia could promote the growth of soybean root nodules. In the 0-30 cm soil layer, the number of soybean root nodules increased, with the number and fresh weight of root nodules per plant increasing by 9.34%-39.84% and 13.16%-44.90% respectively; the nodulation rate and the proportion of effective root nodules were increased by 0.70%-16.79% and 1.25%-43.63% respectively. Rhizobia also promoted soybean growth, elongating the root system by 3.32%-8.55%, increasing plant height by 0.42%-16.02%, and increasing the dry weight of above-ground parts by 6.24%-19.98%. In addition, they improved soybean yield, with the number of pods per plant increasing by 0.57%-10.81%, 100-seed weight increasing by 1.87%-4.34%, and yield increasing by 6.44%-10.81%. The fresh weight of root nodules was significantly positively correlated with soil available phosphorus content, the number of pods per plant was significantly positively correlated with the number of root nodules per plant, and the yield was positively correlated with nodulation rate. The technology of rhizobium coating on soybean seeds has good ecological adaptability in Heilongjiang Province. It can significantly increase the number of soybean root nodules and the proportion of effective root nodules, enhance the biological nitrogen fixation effect of soybeans, promote soybean growth, and increase the 100-seed weight. It can achieve stable or increased yield while reducing nitrogen fertilizer application by 30%, and is suitable for popularization and application in production.

Keywords: soybean; rhizobia; seed coating; root nodules; growth; yield

大豆是我国重要的粮食和经济作物,黑龙江省是我国大豆主产区,大豆面积和总产量约占全国的40%~50%,作为典型的大豆商品粮基地和出口基

地,在我国大豆产业领域占据重要地位^[1-3]。

根瘤菌是一类能够与豆科植物共生结瘤固氮的革兰氏阴性菌^[4],其固定的氮量占自然界总固氮

收稿日期:2025-05-26

基金项目:国家重点研发计划(2022YFD1500903);国家大豆产业技术体系(CARS04)。

第一作者:刘国辉,男,硕士,高级农艺师,主要从事土壤肥料和黑土保护研究。E-mail:liuguohui0451@126.com。

通讯作者:王伟,男,硕士,副研究员,主要从事植物营养学研究。E-mail:wangwei123873@163.com。

量的65%以上^[5]。提供豆科作物所需氮素营养的50%~90%^[6]。根瘤菌能促进大豆根部根瘤形成,将氮素持续地输送给大豆,提升大豆共生固氮能力^[7],改善大豆氮素营养状况,提高大豆产量,减少氮肥用量,提高氮肥利用率^[8]。Singh等^[9]指出,接种有效根瘤菌可以显著增加大豆根瘤数量、豆荚数及大豆产量。我国大豆根瘤菌多样性丰富^[10-11],但应用进展缓慢,全国接种面积不足3%^[12]。

氮素是作物生长必不可少的营养物质,大豆产量对氮的依赖性较高^[13],适量施氮能显著促进根瘤生长,提高大豆产量^[14]。Olsen等^[15]发现12℃时苜蓿根瘤菌的侵染率为38%,7℃时侵染率上升到66%,侵染率与根系温度呈反比。苗期是大豆生物固氮能力形成的关键时期,对温度变化敏感^[16]。“倒春寒”常发生在3—5月份,正处于黑龙江省大豆播种期或幼苗期,幼苗易受低温冷害,生长发育延缓,根瘤的形成和生长受抑制^[17-18]。水分对大豆和土壤微生物正常生长发育具有重要作用,充足的水分是大豆结瘤和固氮的必要条件^[19],干旱胁迫会降低根瘤菌的沾附和存活率^[20],减少大豆根瘤数量,降低固氮活性^[21]。

接种方式是根瘤菌应用的关键技术,直接影响根瘤菌在土壤中的定殖、侵染和结瘤效率^[22],不同地区和生产模式下,选择适宜的接种方式能获得稳

定的接种效果^[23]。目前,拌种、土施菌肥和喷施菌液是田间生产中根瘤菌的主要接种方式^[24-25],接种效果因接种方式不同而异。根瘤菌拌种对促进大豆根系结瘤和生长发育效果最好^[26],可显著提高大豆结瘤数和产量^[27];土壤接种能有效降低大豆底荚高度,增加荚粒数和籽粒蛋白含量^[28],喷施菌液能够显著提高根瘤数和根瘤干重^[29]。种子包衣技术将根瘤菌直接作用于种子表面,一方面操作简单,成本低,另一方面能保障菌剂早期侵染和存活。本研究首次在黑龙江省农业生态区开展多点田间试验,系统评价种子根瘤菌包衣技术的应用效果,旨在为黑龙江省大豆绿色生产提供技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 材 料

大豆品种:东升2号(三江平原)、绥农37(松嫩平原北)、东升22(松嫩平原西、中)、绥农53(松嫩平原南)和绥农29(丘陵半山区)。

供试土壤:在黑龙江省三江平原、松嫩平原(北、西、中、南)和丘陵半山区进行大田试验,供试农田土壤基本理化性状详见表1。

供试肥料:尿素(N 46%)、磷酸二铵(N 18%, P₂O₅ 46%)、氯化钾(K₂O 60%)和大豆根瘤菌剂(有效活菌数≥50亿·mL⁻¹)。

表1 供试土壤基本理化性状

Table 1 Basic soil nutrient status of the experimental sites

试验地点 Experimental site	有机质 Organic matter content/(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline N content/ (g·kg ⁻¹)	有效磷 Available P content/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K content/ (mg·kg ⁻¹)	pH	样本数 Sample number
三江平原区 Sanjiang Plain	38.1 ± 10.46	167.9 ± 48.03	36.7 ± 24.44	180.3 ± 89.03	6.0 ± 0.46	20
松嫩平原北部 Northern Songnen Plain	43.5 ± 5.54	191.3 ± 44.56	42.2 ± 18.11	205.5 ± 63.43	5.9 ± 0.27	7
松嫩平原西部 Western Songnen Plain	34.7 ± 13.57	167.6 ± 49.42	24.3 ± 10.83	202.2 ± 75.46	6.7 ± 0.93	13
松嫩平原中部 Central Songnen Plain	36.4 ± 11.46	173.6 ± 56.56	41.8 ± 18.78	200.9 ± 60.93	7.2 ± 0.87	10
松嫩平原南部 Southern Songnen Plain	35.4 ± 4.02	162.3 ± 33.27	45.2 ± 10.67	131.3 ± 39.78	6.1 ± 0.36	8
丘陵半山区 Hilly areas	46.4 ± 16.40	207.5 ± 80.53	44.6 ± 13.35	167.5 ± 45.66	6.2 ± 0.44	15

1.2 试验设计

在黑龙江省三江平原、松嫩平原(北、西、中、南)和丘陵半山区共设置73个试验点,共设2个处

理:常规施肥(CK)和根瘤菌包衣处理(RB)。150 mL根瘤菌剂拌75 kg大豆种子,将菌剂喷洒在种子表面,混拌均匀,阴干后播种。常规施肥处理的氮

(N)、磷(P_2O_5)和钾(K_2O)肥用量根据黑龙江省实际生产情况确定为 45, 60 和 75 $kg \cdot hm^{-2}$, 根瘤菌包衣处理的氮肥减施 30%, 播种前肥料按底肥方式一次性条施。

1.3 测试项目与方法

土壤养分含量: 采用重铬酸钾容量法—外加热法测定有机质含量; 采用 $1 \text{ mol} \cdot L^{-1} NaOH$ 扩散法测定碱解氮含量; 采用 $0.5 \text{ mol} \cdot L^{-1} NaHCO_3$ 浸提—钼锑抗比色法测定有效磷含量; 采用 $1 \text{ mol} \cdot L^{-1} NH_4OAc$ 浸提—火焰光度法测定速效钾含量^[30]。

根瘤指标: 大豆盛花期每个处理进行 3 点取样, 每点连续取 5 株长势一致且具代表性植株, 测定其株高、根长、根瘤数、地上干重和根瘤鲜重^[31]。

结瘤率(%) = 结瘤植株数量/调查植株数量 $\times 100$ 。

有效根瘤占比(%) = 单株有效根瘤数量/单株根瘤数量 $\times 100$ 。

产量: 大豆成熟期取样与盛花期一致, 取样后测定大豆单株荚数和百粒重, 测产。

增产率(%) = (根瘤菌包衣处理产量 - 对照处理产量)/对照处理产量 $\times 100$ 。

1.4 数据处理

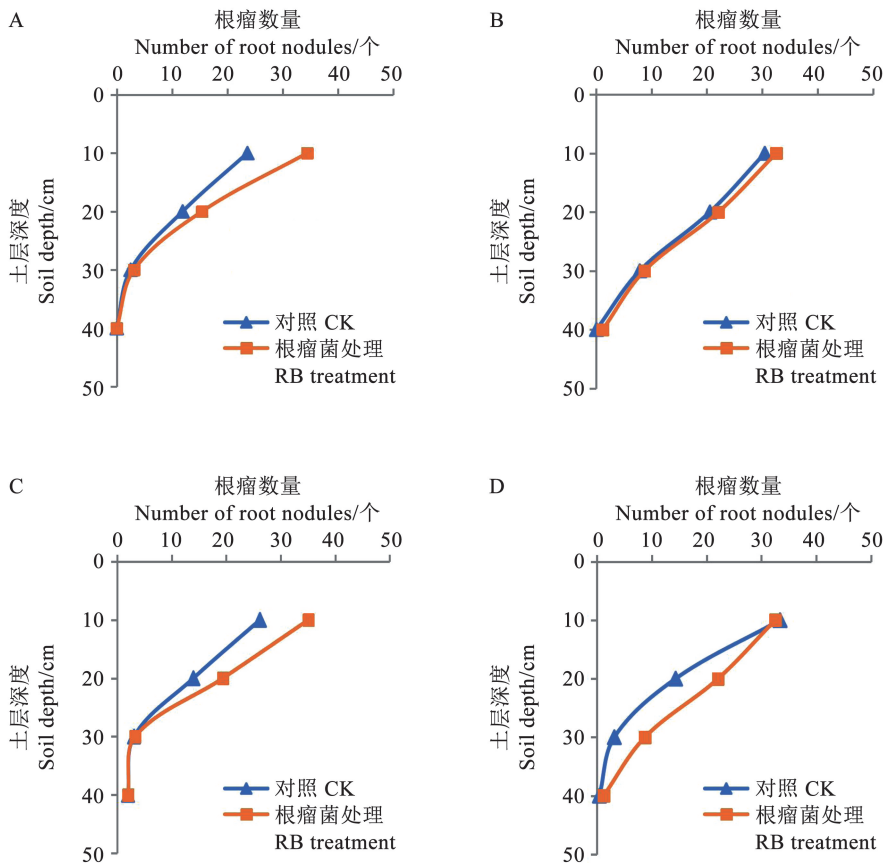
使用 Excel 2016 和 SPSS 18.0 软件进行数据统计与分析。

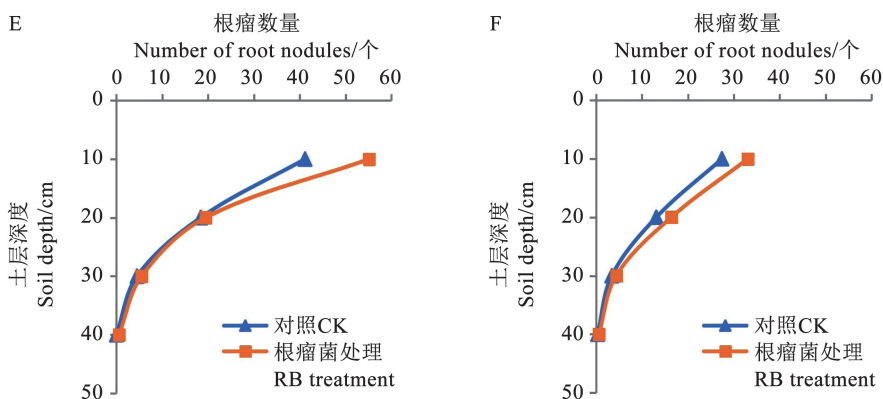
2 结果与分析

2.1 根瘤菌剂对大豆根瘤的影响

2.1.1 不同土层深度的大豆根瘤分布 如图 1 所示, 随着土层的深入, 大豆根瘤数量呈递减趋势, 根瘤主要集中在 0~20 cm 和 30 cm 以下土层中大豆根瘤数量极少。接种根瘤菌剂, 0~30 cm 土层大豆根瘤数量增加。

与对照相比, 0~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm 土层, 三江平原大豆根瘤数量分别提高 45.72%、29.50% 和 22.28%, 松嫩平原北部分别提高 33.59%、38.42% 和 4.73%, 松嫩平原西部分别提高 6.74%、7.45% 和 10.72%, 松嫩平原中部分别提高 29.63%、18.38% 和 67.90%, 松嫩平原南部分别提高 34.03%、5.86% 和 22.30%, 丘陵半山区分别提高 20.64%、25.05% 和 28.14%。30 cm 以下土层, 松嫩平原西部、松嫩平原南部和丘陵半山区大豆根瘤数量增加。





注:A. 三江平原;B. 松嫩平原西;C. 松嫩平原北;D. 松嫩平原中;E. 松嫩平原南;F. 丘陵半山区。

Note: A. Sanjiang Plain; B. Western Songnen Plain; C. Northern Songnen Plain; D. Central Songnen Plain; E. Southern Songnen Plain; F. Hilly areas.

图1 根瘤菌剂对大豆根瘤分布的影响

Fig. 1 Effects of rhizobial agents on the distribution of soybean nodules

2.1.2 结瘤情况 如表2所示,根瘤菌剂处理的大豆根瘤结瘤率为83.88%~100.00%,均值为96.66%;单株根瘤数为48~76个,均值为62个;单株根瘤鲜重为0.60~1.40 kg,均值为0.88 kg;有效根瘤占比80.42%~92.20%,均值为85.39%。常规施肥处理的大豆根瘤结瘤率为91.86%~99.35%,均值为90.80%;单株根瘤数为37~61个,均值为49个;单株根瘤鲜重为0.40~1.00 kg,均值为0.67 kg;有效根瘤占比80.93%~91.06%,均值为80.89%。

与对照相比,三江平原、松嫩平原北部、松嫩平

原西部、松嫩平原中部、松嫩平原南部和丘陵半山区大豆结瘤率分别提高9.08%、10.06%、0.70%、5.12%、16.79%和3.24%,有效根瘤占比分别提高1.30%、3.72%、5.06%、4.08%、43.63%和1.25%,单株根瘤数分别增加39.84%、35.81%、9.34%、21.09%、26.90%和26.06%,单株根瘤鲜重分别增加33.19%、36.58%、13.16%、24.36%、33.97%和44.90%。综上所述,黑龙江省农业生态区采用大豆根瘤菌包衣技术,对大豆根瘤生长均有促进作用,能有效增加单株根瘤数量和根瘤鲜重,提高结瘤率和有效根瘤占比。

表2 根瘤菌剂对大豆根瘤的影响

Table 2 Effects of rhizobia on soybean nodules

区域 Area	处理 Treatment	结瘤率 Tumor formation rate/%	单株根瘤数 Number of root nodules per plant/个	单株根瘤鲜重 Fresh weight of root nodules per plant/g	有效根瘤占比 Proportion of effective root nodules/%
三江平原区 Sanjiang Plain	CK	89.66	37.3	0.5	80.93
	RB	97.80	52.2	0.6	81.98
松嫩平原北部 Northern Songnen Plain	CK	90.25	42.6	1.0	86.84
	RB	99.32	57.9	1.3	90.07
松嫩平原西部 Western Songnen Plain	CK	99.31	56.9	0.6	82.26
	RB	100.00	62.2	0.7	86.42
松嫩平原中部 Central Songnen Plain	CK	84.10	53.0	0.5	82.32
	RB	83.88	64.1	0.7	85.68
松嫩平原南部 Southern Songnen Plain	CK	85.63	60.5	1.0	58.48
	RB	100.00	76.8	1.4	84.00
丘陵半山区 Hilly areas	CK	95.88	44.1	0.4	91.06
	RB	98.99	55.6	0.5	92.20

2.2 根瘤菌剂对大豆花期植株生长的影响

如表 3 所示,接种根瘤菌剂处理,与对照相比,三江平原、松嫩平原北部、松嫩平原西部、松嫩平原中部、松嫩平原南部和丘陵半山区大豆根长分别增加 8.55%、4.87%、6.94%、5.06%、6.58% 和

3.32%;株高分别增加 12.20%、14.82%、14.29%、16.02%、0.42% 和 9.13%;地上部干重分别增加 16.80%、19.98%、8.76%、15.78%、6.24% 和 13.04%。由此可见,黑龙江省大豆接种根瘤菌剂对大豆根系和株高均有促进作用,地上部干重增加。

表 3 根瘤菌剂对大豆主要生物性状的影响

Table 3 Effects of rhizobium agents on the main biological characteristics of soybeans

区域 Area	处理 Treatment	根长 Root length/cm	株高 Plant height/cm	地上部干重 Above ground dry weight/g
三江平原区 Sanjiang Plain Area	CK	23.3	49.2	8.57
	RB	25.3	55.2	10.01
松嫩平原北部 Northern Songnen Plain	CK	20.9	47.9	16.71
	RB	22.0	55.0	20.05
松嫩平原西部 Westen Songnen Plain	CK	24.4	66.5	9.32
	RB	26.0	76.0	10.14
松嫩平原中部 Central Songnen Plain	CK	22.8	46.2	12.67
	RB	23.9	53.6	14.66
松嫩平原南部 Southern Songnen Plain	CK	19.7	71.3	12.49
	RB	21.0	71.6	13.27
丘陵半山区 Hilly areas	CK	21.4	46.0	9.76
	RB	22.1	50.2	11.04

2.3 根瘤菌剂对大豆产量及产量构成的影响

如表 4 所示,接种根瘤菌剂处理与对照相比,三江平原、松嫩平原北部、松嫩平原西部、松嫩平原中部、松嫩平原南部和丘陵半山区大豆株荚数分别增

加 1.98%、0.57%、10.81%、6.11%、4.34% 和 5.05%,百粒重分别增加 1.87%、2.59%、1.94%、2.73%、2.00% 和 4.34%,产量分别提高 8.38%、7.42%、10.81%、5.68%、7.44% 和 8.86%。

表 4 根瘤菌剂对大豆产量及产量构成的影响

Table 4 Effects of rhizobia on soybean yield and yield composition

区域 Area	处理 Treatment	株荚数 Pods number per plant/个	百粒重 100-seed weight/g	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	增产率 Yield increase rate/%
三江平原区 Sanjiang Plain Area	CK	32.9	18.8	2975.44	8.38
	RB	33.5	19.1	3224.76	
松嫩平原北部 Northern Songnen Plain	CK	32.7	18.6	2757.71	7.42
	RB	32.9	19.1	2962.21	
松嫩平原西部 Westen Songnen Plain	CK	33.0	18.7	2854.93	10.81
	RB	36.6	19.0	3163.53	
松嫩平原中部 Central Songnen Plain	CK	32.0	19.1	2770.77	6.44
	RB	34.0	19.6	2949.29	
松嫩平原南部 Southern Songnen Plain	CK	34.9	20.4	2609.50	7.20
	RB	36.4	20.8	2797.26	
丘陵半山区 Hilly areas	CK	27.5	17.2	2276.49	8.86
	RB	28.9	17.9	2478.08	

2.4 根瘤与土壤肥力的相关性分析

由表5可以看出,结瘤率、单株根瘤数量、单株根瘤鲜重和有效根瘤占比与土壤pH均呈负相关,与土壤有机质含量呈正相关。结瘤率和有效根瘤占比与土壤碱解氮含量呈正相关,单株根瘤数及鲜重与土壤碱解氮含量呈负相关。结瘤率、有效根瘤占比与土壤有效磷含量呈负相关,单株

根瘤数、根瘤鲜重与土壤有效磷含量呈正相关,其中与根瘤鲜重达显著正相关($P \leq 0.05$)。结瘤率、根瘤鲜重与土壤速效钾含量呈正相关,单株根瘤数、有效根瘤占比与土壤速效钾含量呈负相关。结瘤率与有效根瘤占比呈极显著正相关($P \leq 0.01$),单株根瘤数与单株根瘤鲜重均呈显著正相关($P \leq 0.05$)。

表5 根瘤与土壤肥力的相关性分析

Table 5 Correlation analysis between root nodules and soil fertility

项目 Item	pH	有机质 含量 Organic matter content	碱解氮含量 Alkali- hydrolyzable nitrogen content	有效磷含量 Available phosphorus content	速效钾含量 Available potassium content	结瘤率 Tumor Formation rate	单株根瘤数 Root nodules number per plant	单株根瘤鲜重 Fresh weight of root nodules per plant	有效根瘤占比 Proportion of effective root nodules
pH	1								
有机质含量 Organic matter content	-0.050	1							
碱解氮含量 Alkali-hydrolyzable nitrogen content	-0.018	0.641 *	1						
有效磷含量 Available phosphorus content	-0.241	0.294 *	0.221	1					
速效钾含量 Available potassium content	0.261 *	0.209	0.173	0.031	1				
结瘤率 Tumor formation rate	-0.109	0.040	0.162	-0.167	0.051	1			
单株根瘤数 Root nodules number per plant	-0.089	0.104	-0.007	0.097	-0.074	0.218	1		
单株根瘤鲜重 Fresh weight of root nodules per plant	-0.079	0.059	-0.057	0.336 *	0.228	0.157	0.322 *	1	
有效根瘤占比 Proportion of effective root nodules	-0.212	0.173	0.093	-0.040	-0.149	0.350 **	-0.049	0.004	1

注: * 代表 $P \leq 0.05$; ** 代表 $P \leq 0.01$ 。

Note: * represents $P \leq 0.05$; ** represents $P \leq 0.01$.

2.5 根瘤与产量的相关性分析

由表6可以看出,单株荚数与结瘤率、单株根瘤数和单株根瘤鲜重呈正相关,与有效根瘤占比呈负相关,与单株根瘤数的正相关性达显著水平($P \leq$

0.05)。百粒重与结瘤率和有效根瘤占比呈负相关,与单株根瘤数和单株根瘤鲜重呈正相关。产量与结瘤率、单株根瘤数和单株根瘤鲜重呈正相关,与有效根瘤占比呈负相关。

表 6 根瘤与产量的相关性分析

Table 6 Correlation analysis between root nodules and yield

项目 Item	结瘤率 Tumor formation rate	单株根瘤数 Root nodules number per plant	单株根瘤鲜重 Fresh weight of root nodules per plant	有效根瘤占比 Proportion of effective root nodules	单株荚数 Pods number per plant	百粒重 100-seed weight	产量 Yield
结瘤率 Tumor Formation rate	1						
单株根瘤数 Root nodules number per plant	0.165	1					
单株根瘤鲜重 Fresh weight of root nodules per plant	0.130	0.284 *	1				
有效根瘤占比 Proportion of effective root nodules	0.295 *	0.108	0.067	1			
单株荚数 Pods number per plant	0.077	0.257 *	0.050	-0.137	1		
百粒重 100-seed weight	-0.070	0.010	0.190	-0.044	0.118	1	
产量 Yield	0.149	0.024	0.015	-0.022	0.297 *	0.119	1

注: * 代表 $P \leq 0.05$ 。

Note: * represents $P \leq 0.05$.

3 讨论

前人研究表明,接种根瘤菌与减施氮肥结合对大豆产量具有影响。郑浩宇等^[32]研究表明,在接种根瘤菌的条件下,适当进行减氮处理可以提高大豆的光合作用与干物质积累,根瘤菌除了能刺激根瘤形成外,还对产量的提高有积极作用。在实践生产中可通过在接种合适根瘤菌的同时进行适当的氮肥减施,以达到高效、高产的生产目的。本研究通过减施氮肥与种子根瘤菌包衣,使黑龙江省农业生态区大豆产量提高 6.44% ~ 10.81%。

种子根瘤菌包衣技术能促进大豆结瘤,增加百粒重,提高产量,与胥雅馨等^[33]等研究接种不同根瘤菌能促进大豆根系结瘤,通过增加百粒重提高产量结果一致。本研究中根瘤集中在 0 ~ 20 cm 土层中,与唐颖等^[34]研究液体菌剂拌种根瘤多集中在土表 0 ~ 30 cm 结果一致;大豆根瘤菌包衣,单株根瘤数和单株根瘤鲜重明显增加,结瘤率提高 0.70% ~ 16.79%,有效根瘤占比提高 1.25% ~ 43.63%。

黑龙江省大豆总产量高,但区域差异大,本研究大豆产量区域差异大,可能由于不同区域种植大豆品种不同,也与环境因素有关。Thurston 等^[35]指出,环境温度降至 10 °C 以下,大豆结瘤能力下降。

环境因素对大豆产量的影响在不同区域表现明显,本研究中三江平原大豆产量高于其他区域。原因在于三江平原,土壤肥沃、光照充足,水资源丰富,适合大豆生长。本研究中,松嫩平原北部大豆单株根瘤数量少于松嫩平原其他区域,而松嫩平原西部单株根瘤数增幅较低,可能是由于土壤持水量低,阻碍了根瘤菌侵染,存活率降低,根瘤数量减少。也可能与松嫩平原西部土壤 pH 较高和土壤有效磷含量相对较低有关,根瘤对土壤磷的需求较高,根瘤菌与磷肥具有协同效应^[36]。在实际生产中,土壤有效磷含量低于 20 mg · kg⁻¹的地块应适量增施磷肥,依据土壤酸碱性选择合适的磷肥类型,提高磷肥有效性。

本研究表明,产量与有效根瘤数占比呈负相关,高产田的土壤氮素含量充足,可能抑制固氮酶活性,有效根瘤减少;产量与结瘤率呈正相关,结瘤率高,有助于提高大豆生物固氮能力,为大豆生长提供更多氮素营养,产量提高。根瘤菌与大豆的共生关系因生态环境的差异而具有多样性^[37],三江平原重点推广减氮 + 根瘤菌包衣技术;松嫩平原北部需注重低温期根瘤菌活性保护(如采用耐低温菌株);松嫩平原西部应结合磷肥增施与根瘤菌包衣”,提升实践指导价值。

4 结论

大豆种子根瘤菌包衣技术在黑龙江省具有良好的生态适应性,能显著提高大豆根瘤数和有效根瘤占比,提高大豆生物固氮效应,促进大豆生长,百粒重增加。在氮肥减施 30% 的同时实现稳产增产,适宜在生产中推广应用。

参考文献

- [1] 刘光武. 黑龙江省大豆产业发展研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
LIU G W. Study on the development of soybean industry in Heilongjiang Province[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [2] 于欢. 黑龙江省大豆加工业发展质量评价及提升路径研究[D]. 哈尔滨: 中共黑龙江省委党校, 2024.
YU H. Research on quality evaluation and improvement path of soybean processing industry development in Heilongjiang Province [D]. Harbin: Party School of the Heilongjiang Provincial Committee of the Communist Party of China, 2024.
- [3] 孙磊, 郝佩佩, 王吴彬, 等. 我国大豆产能现状分析与提升路径探讨[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(10): 889-894.
SUN L, HAO P P, WANG W B, et al. Analysis of the current situation of soybean production capacity in China and exploration of improvement paths [J]. Journal of Cold and Drought Agriculture Science, 2023, 2(10): 889-894.
- [4] 孟捷. 接种不同根瘤菌对苜蓿生长和种子产量的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021.
MENG J. Effects of inoculating different rhizobia on alfalfa growth and seed yield [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2021.
- [5] HUNGRIA M, MENDES I C. Nitrogen fixation with soybean: The perfect symbiosis? Biological nitrogen fixation [M]. New York: John Wiley & Sons, 2015: 1009-1024.
- [6] 柏宇, 关大伟, 李力, 等. 耐高氮优良大豆根瘤菌株的筛选与鉴定[J]. 大豆科学, 2014, 33(6): 861-864.
BAI Y, GUAN D W, LI L, et al. Screening and characterization of superior nitrogen-tolerance soybean rhizobia [J]. Soybean Science, 2014, 33(6): 861-864.
- [7] 孙庆圣, 原程, 张玉先. 减施氮肥和接种根瘤菌对黑大豆光合特性及产量的影响[J]. 作物杂志, 2022(4): 132-137.
SUN Q S, YUAN C, ZHANG Y X. Effect of reduced nitrogen fertilizer application and rhizobia inoculation on the photosynthetic characteristics and yield of black soybean [J]. Crop Magazine, 2022(4): 132-137.
- [8] 刘庆莉, 王金生, 刘丽君, 等. 大豆根瘤菌剂载体的选择及最佳施用浓度筛选[J]. 大豆科学, 2014, 33(2): 207-210.
LIU Q L, WANG J S, LIU L J, et al. Chosen of soybean rhizobia carrier and screening of the best concentration [J]. Soybean Science, 2014, 33(2): 207-210.
- [9] SINGH A, BAOULE A L, AHMED H G, et al. Influence of phosphorous on the performance of cowpea (*Vigna unguiculata* (L) Walp.) varieties in the Sudan savanna of Nigeria[J]. Agricultural Sciences, 2015, 2(3): 313-317.
- [10] TIAN C F, ZHOU Y J, ZHANG Y M, et al. Comparative genomics of rhizobia nodulating soybean suggests extensive recruitment of lineage-specific genes in adaptations [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(22): 8629-8634.
- [11] 陈文新, 汪恩涛. 中国根瘤菌[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 477.
CHEN W X, WANG E T. Rhizobia in China [M]. Beijing: Science Press, 2011: 477.
- [12] 田艺心, 高凤菊, 曹鹏鹏, 等. 减氮接种根瘤菌剂对黄淮海地区高蛋白夏大豆生长发育、产量和经济效益的影响. 河北农业科学, 2022, 26(6): 72-77, 82.
TIAN Y X, GAO F J, CAO P P, et al. Effects of nitrogen-reduced inoculation with rhizobia on growth, yield and economic benefits of high-protein summer soybean in the Huang-Huai-Hai region. Hebei Agricultural Science, 2022, 26(6): 72-77, 82.
- [13] WANG X, LI D, JIANG J, et al. Soybean NAC gene family: Sequence analysis and expression under low nitrogen supply[J]. Biologia Plantarum, 2017, 61(3): 473-482.
- [14] 王树起, 韩晓增, 乔云发, 等. 施氮对大豆根瘤生长和结瘤固氮的影响[J]. 华北农学报, 2009, 24(2): 176-179.
WANG S Q, HAN X Z, QIAO Y F, et al. Nodule growth, nodulation and nitrogen fixation in soybean (*Glycine max* L.) as affected by nitrogen application [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2009, 24(2): 176-179.
- [15] Olsen K M, Ungerer M C. 2008. Freezing tolerance and cyanogenesis in white clover (*Trifolium repens* L. Fabaceae). International Journal of Plant Sciences, 169(9): 1141-1147.
- [16] 方海燕, 寸植贤, 陈建斌, 等. 大豆生长发育与根瘤形成的关系[J]. 农学学报, 2014, 4(6): 1-4, 23.
FANG H Y, CUN Z X, CHEN J B, et al. Relationship between plant development and root nodule formation of soybean [J]. Journal of Agriculture, 2014, 4(6): 1-4, 23.
- [17] 王秋京, 李秀芬, 闫平, 等. 黑龙江省主要农业气象灾害时序特征及其对大豆产量影响的灰色关联分析[J]. 中国农学通报, 2020, 36(3): 81-87.
WANG Q J, LI X F, YAN P, et al. Main agro-meteorological disasters Heilongjiang: Sequential characteristics and grey correlation analysis of their effects on soybean yield [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(3): 81-87.
- [18] 李天, 余洁, 乔云发, 等. 短期低温对大豆苗期生长和结瘤固氮的影响[J]. 中国农业气象, 2024, 45(2): 159-169.
LI T, YU J, QIAO Y F, et al. Effect of short-term low temperature on seedling growth and nodule nitrogen fixation in soybean [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2024, 45(2): 159-169.
- [19] 袁剑刚, 杨中艺. 氮肥和水分条件对长喙田菁生长、结瘤和固氮的影响[J]. 植物生态学报, 2003, 27(4): 472-476.
YUAN J G, YANG Z Y. Effect of nitrogen fertilizer and water conditions on long-beak cyanine growth, nodules, and nitrogen fixation [J]. Journal of Plant Ecology, 2003, 27(4): 472-476.
- [20] 李仲元, 关桂兰, 王卫卫, 等. 新疆干旱条件下根瘤菌应用中的几个问题[J]. 干旱区研究, 1988, 5(1): 9-18.
LI Z Y, GUAN G L, WANG W W, et al. Several problems in

- rhizobia application under drought conditions in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 1988,5(1): 9-18.
- [21] 刘晓丽. 黄土丘陵区枣林深层细根分布与土壤水分特征研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- LIU X L. Study on distribution of deep fine roots and soil moisture characteristics of jujube forest in Loess Hilly Region [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2013.
- [22] 马霞, 王丽丽, 李卫军, 等. 不同施氮水平下接种根瘤菌对苜蓿固氮效能及种子生产的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(1): 95-102.
- MA X, WANG L L, LI W J, et al. Effect of rhizobia inoculation on alfalfa nitrogen fixation efficiency and seed production at different nitrogen application levels [J]. Journal of Grass Industry, 2013, 22(1): 95-102.
- [23] BOGINO P, BANCHIO E, BONFIGLIO C, et al. Competitiveness of a *Bradyrhizobium* sp. strain in soils containing indigenous rhizobia[J]. Current Microbiology, 2008, 56(1): 66-72.
- [24] 索炎炎, 张翔, 司贤宗, 等. 氮肥管理与根瘤菌接种模式对花生生长、氮吸收利用及产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(6): 866-871.
- SUO Y Y, ZHANG X, SI X Z, et al. Effects of nitrogen fertilizer management and *Rhizobium* inoculation methods on growth, nitrogen uptake and yield of peanut[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(6): 866-871.
- [25] 石茂玲, 邓波, 刘忠宽, 等. 5 株根瘤菌接种紫花苜蓿的效果[J]. 草业科学, 2015, 32(1): 101-106.
- SHI M L, DENG B, LIU Z K, et al. Inoculation effects of five rhizobial stains to alfalfa [J]. Pratacultural Science, 2015, 32(1): 101-106.
- [26] 徐玥, 李玲, 胥雅馨, 等. 根瘤菌接种方式对复播大豆生长及结瘤的影响[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(4): 810-817.
- XU Y, LI L, XU Y X, et al. Effect of rhizobia inoculation method on growth and nodulation of reast soybean [J]. Xinjiang Agricultural Science, 2022, 59(4): 810-817.
- [27] 王金生, 丁宁, 吴俊江, 等. 大豆根瘤菌接种效应及竞争结瘤能力分析[J]. 大豆科学, 2017, 36(5): 761-767.
- WANG J S, DING N, WU J J, et al. Analysis of the inoculation effect of soybean rhizobia and the competitive nodulation ability [J]. Soybean Science, 2017, 36(5): 761-767.
- [28] 刘美洲. 大豆根瘤菌土壤接种对产量及品质的影响[J]. 基层农技推广, 2011(4): 48-50.
- LIU M Z. Effect of soybean rhizobium soil inoculation on yield and quality [J]. Primary Agricultural Technology Extension, 2011(4): 48-50.
- [29] 张红侠, 冯瑞华, 关大伟, 等. 黄土高原地区优良大豆根瘤菌的筛选与接种方式研究[J]. 大豆科学, 2010, 29(6): 996-1002.
- ZHANG H X, FENG R H, GUAN D W, et al. Screening of superior soybean rhizobial strains and analyzing of different inoculation methods in Loess Plateau Region of China [J]. Soybean Science, 2010, 29(6): 996-1002.
- [30] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [31] 邱丽娟, 常汝镇, 刘章雄. 大豆种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- QIU L J, CHANG R Z, LIU Z X. Descriptors and data standard for melon (*Glycine* spp.) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006.
- [32] 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.
- ZHENG H Y, HUANG B L, WANG M X, et al. The effect of nitrogen fertilizer reduction and *Rhizobium* inoculation on soybean photosynthesis and yield [J]. Soybean Science, 2019, 38(3): 413-420.
- [33] 胥雅馨, 徐玥, 李玲, 等. 接种根瘤菌对新疆春大豆结瘤和生长的影响[J]. 大豆科学, 2021, 40(1): 98-105.
- XU Y X, XU Y, LI L, et al. Effects of rhizobia inoculation on nodulation and growth of spring soybean in southern Xinjiang[J]. Soybean Science, 2021, 40(1): 98-105.
- [34] 唐颖, 卢林纲, 隋文志, 等. 根瘤菌不同接种方式对大豆根瘤分布及产量的影响[J]. 现代化农业, 2002(4): 13-14.
- TANG Y, LU L G, SUI W Z, et al. Effect of different methods of rhizobia inoculation on the distribution and yield of soybean nodules[J]. Modern Agriculture, 2002(4): 13-14.
- [35] THURSTON C L, GROSSMAN J M, FUDGE R, et al. Cold stress reduces nodulation and symbiotic nitrogen fixation in winter annual legume cover crops [J]. Plant and Soil, 2022, 481: 661-676.
- [36] ALMEIDA J P, HARTWIG U A, FREHNER M, et al. Evidence that P deficiency induces N feedback regulation of symbiotic N₂ fixation in white clover (*Trifolium repens* L.) [J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(348): 1289-1297.
- [37] 王晶, 许修宏. 根瘤菌与大豆在不同类型土壤中的生态适应性研究[J]. 中国土壤与肥料, 2009(5): 72-76.
- WANG J, XU X H. Studies on ecological adaptability of *Rhizobium* to soybean and soil [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2009(5): 72-76.