



1970—2020 年间黄淮海夏大豆部分育成品种(系)结瘤能力鉴定

史佳瑶^{1,2}, 刘智², 冯燕², 魏玉², 任洪雷³, 孙连军⁴, 闫龙², 辛大伟¹

(1. 东北农业大学 农学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 河北省农林科学院 粮油作物研究所, 河北 石家庄 050035; 3. 黑龙江省农业科学院 大豆研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086; 4. 中国农业大学 农学院, 北京 100193)

摘要: 为了确定黄淮海地区大豆育成品种(系)的结瘤能力差异, 本研究以 1970—2020 年黄淮海地区育成的 143 份大豆品种(系)为试验材料, 在盆栽条件下接种根瘤菌菌株 USDA110, 以单株根瘤数、单株根瘤干重作为结瘤能力鉴定指标, 筛选结瘤能力强和弱的大豆种质。同时比较黄淮海地区不同省市参试材料的结瘤差异, 分析结瘤差异与产量、育成年份、蛋白含量、油分含量和蛋油总含量的相关性。结果表明: 参试的不同大豆品种(系)间单株根瘤数最大值为 35 个, 最小值为 6 个, 均值为 17 个, 单株根瘤干重最大值为 124.89 mg, 最小值为 26.44 mg, 均值为 53.81 mg。筛选出结瘤能力前 5% 品种(系), 包括安豆 1311、灌云大四粒、沿大粒、太丰 6 号、商豆 7 号、黄豆 ZDD08405 和 08Y 观 205, 作为培育强结瘤能力品种的亲本。不同地域来源参试材料间结瘤能力也存在差异: 江苏省材料单株根瘤干重和单株根瘤数最大, 分别为 64.30 mg 和 20 个; 山东省材料单株根瘤干重最小, 为 48.50 mg; 山西省和安徽省材料单株根瘤数最小, 均为 15 个。单株根瘤干重与籽粒蛋白含量成正相关。研究结果可为黄淮海地区大豆育种提供强固氮亲本材料。

关键词: 结瘤鉴定; 根瘤数; 根瘤干重; 种质筛选

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Identification of Nodulation Ability in Partially Bred Soybean Cultivars (Lines) in the Huang-Huai-Hai Region During 1970—2020

SHI Jiayao^{1,2}, LIU Zhi², FENG Yan², WEI Yu², REN Honglei³, SUN Lianjun⁴, YAN Long², XIN Dawei¹

(1. College of Agronomy, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Institute of Grain and Oil Crops, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050035, China; 3. Institute of Soybean Research, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China; 4. College of Agronomy, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: In order to determine the difference in nodulation ability of soybean varieties (lines) bred in the Huang-Huai-Hai region, 143 soybean varieties (lines) were used as materials grown in the Huang-Huai-Hai region during 1970 – 2020, and inoculated with rhizobia strain USDA110 under pot conditions. Root nodule dry weight of a single plant was used as the identification index of nodulation ability to screen soybean germplasms with high or low nodulation ability. Meanwhile, the nodulation differences of the tested materials from different provinces and cities in the Huang-Huai-Hai region were compared. The correlation between the nodulation differences and yield, released year, protein content, oil content and total protein-oil content were analyzed. The results showed that the maximum number of nodules per plant among different soybean varieties (lines) tested was 35, the minimum was 6, and the average was 17. The maximum dry weight of root nodules per plant was 124.89 mg, and the minimum was 26.44 mg, with an average value of 53.81 mg. The top 5% varieties (lines) with the highest nodulation ability were selected as the parents for cultivating varieties with high nodulation ability, including Andou 1311, Guanyundasili, Yandali, Taifeng 6, Shangdou 7, Huangdou ZDD08405 and 08Yguan 205. The dry weight and number of root nodules per plant in Jiangsu province were the largest, 64.30 mg and 20, respectively. The dry weight of root nodules in Shandong province was the smallest, 48.50 mg. The number of root nodules in Shanxi and Anhui provinces was the smallest, the minimum number was 15, and the dry weight of nodules per plant was positively correlated with the seed protein content. The research results can provide useful nitrogen-fixing parent materials for soybean breeding in Huang-Huai-Hai region.

Keywords: nodulation identification; number of nodules; dry weight of nodules; germplasm screening

大豆是植食性蛋白和植物油的主要来源。2022 年我国消费大豆 11 136 万 t, 进口量达到 9 108 万 t, 占消费总量的 87%。对进口大豆的过度依赖, 严重威

胁着我国的粮食安全。黄淮海地区作为我国大豆第二大主产区, 也是最大的夏播大豆种植区, 大豆种植面积超过 230 万 hm², 占中国大豆种植总面积

收稿日期: 2023-04-03

基金项目: 国家大豆产业技术体系(CARS-04); 河北省第二期现代农业产业技术体系创新团队项目(HBCT2019190101); 特色作物育种联合攻关项目; 河北省博士后科研项目(B2022003046); 科技创新人才队伍建设(C22R0308)。

第一作者: 史佳瑶(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事大豆结瘤固氮研究。E-mail: sjy13080359953@163.com。

通讯作者: 辛大伟(1981—), 男, 博士, 教授, 主要从事大豆共生固氮分子机制与应用研究。E-mail: xdawei@163.com;

闫龙(1979—), 男, 博士, 研究员, 主要从事大豆遗传育种研究。E-mail: dragonyan1979@163.com。

的20%^[1-3],因此提高黄淮海大豆的产量,对缓解我国大豆严重依赖进口的问题具有意义。

全球每年施用氮肥超过1.08亿t,成本超过280亿美元,而高达50%的氮肥会转化为有害温室气体释放到大气中,或者渗入地下水导致水体富营养化。大豆共生固氮是一种高效固氮形式,可以缓解氮肥带来的环境污染和降低经济投入^[4]。同时氮素是大豆形成新器官和生成籽粒蛋白的原料,是影响高产的重要因素。Chibeba等^[5]在进行慢生型根瘤菌和固氮螺菌共接种试验时发现,大豆单独接种慢生型根瘤菌可提高产量22%,约356 kg·hm⁻²;窦新田^[6]进行了多环境、多点、多品种根瘤菌拌种试验,根据9个县45个点次统计分析,发现大豆接种根瘤菌在黑龙江省的不同地区、不同土壤和不同品种的分析中均有增产效果,平均增产11.6%。张欣^[7]在黑龙江接种大豆根瘤菌菌株HLJN1001和HLJN1003,使栽培大豆提早结瘤,促进植株生长,大豆增产10.2%~12.45%。另有研究表明适量施氮肥会促进根瘤的发育并提高大豆籽粒的品质^[8-9]。Silva等^[10]发现大豆接种根瘤菌*B. japonicum*可以提高产量,同时发现未接种的大豆种子中甾醇、三萜、挥发性化合物和酚类化合物含量较高,而接种的种子中有机物和脂肪酸含量较高。因此研究大豆结瘤固氮能力对缓解氮肥造成的环境压力和促进大豆增产、优化大豆品质具有重要意义。

研究表明,不同大豆种质固氮能力有较大的差异。在一个生长季内大豆固定氮45.0~163.5 kg·hm⁻²,折合氮肥97.8~355.0 kg·hm⁻²^[11],大豆结瘤能力鉴定对于筛选大豆固氮能力优异亲本材料具有重要价值。Zhang等^[12]利用USDA110对来自全国的496份材料进行根瘤菌接种试验,发现各品种单株结瘤数为0.83~240.00,品种间结瘤能力差异显著。伍惠等^[13]利用6个优良快生型大豆根瘤菌株和2个慢生型大豆根瘤菌株,在砂培盆栽条件下与不同地区的27个大豆主栽品种进行匹配试验,筛选出最佳匹配组合HN01-辽豆14、HN01-徐豆14和HN01-BD2,分析各品种间结瘤差异,发现大豆结瘤能力主要受宿主本身调控,因此大豆种质是大豆根瘤菌共生固氮能力的主要影响因素。徐巧珍等^[14]以我国22个省590份主要栽培大豆品种为材料,发现大豆固氮性能表现为夏大豆>秋大豆>春大豆,并评选出一批优良种质,春大豆有湖北的大粒早,夏大豆有湖北的荆589-1、江苏的宝应粉皮青、广东

的清远大青豆,秋大豆有浙江的秋71等。王宏光等^[15]利用根瘤菌HD001对218份东北材料进行接种,筛选了高效结瘤材料10份,低效结瘤材料11份。高效结瘤材料有绥农10号、N66、东农44、吉育67等,低效结瘤材料有薄地高和牛毛黄等。

黄淮海地区各省份的光温环境和土壤条件不同,已培育出适应各地区的高产大豆品种(系),其结瘤能力不尽相同。而前人对大豆主产区黄淮海地区夏大豆育成品种(系)结瘤能力鉴定鲜有报道。本研究选取1970—2020年间黄淮海地区的143份育成品种(系),对其结瘤能力进行鉴定,并分析黄淮海各省市大豆结瘤能力的差异,以及结瘤能力对大豆产量和品质的影响,以期筛选出结瘤固氮能力强的大豆品种(系),作为黄淮海地区大豆育种的候选亲本材料。研究对培育出适应黄淮海地区、高产、优质的大豆新品种具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 材料

参试143份大豆育成品种(系)来自于北京、河北、河南、山西、山东、江苏和安徽等7个黄淮海地区不同省市,其中河北省选择大豆品系51份,其他各省市平均选择大豆品系11~17份(附表1,见OSID),种质保存于河北省农林科学院粮油作物研究所。

以模式菌株(慢生型根瘤菌USDA 110)对大豆进行接种,USDA110是温室条件下广泛应用的大豆高效根瘤菌菌株,由中国科学院遗传与发育生物学研究所田志喜研究员课题组提供。

1.2 鉴定方法

试验于2022年6—10月在河北省农林科学院粮油作物研究所堤上试验站(37°6′25″N,114°42′47″E)进行。采用室外人工接种鉴定方法,设置2批试验,每批3个重复,每个重复每个参试材料定苗3株。具体试验操作为:首先挑选饱满且均匀一致、无裂痕外观好的大豆种子。取适量蛭石置于规格为10 cm×10 cm×8.5 cm的育苗花盆中,将其放置于盛满水的托盘中自然吸水至完全膨胀,将种子播种于蛭石中,室外培养,直到种子萌发,真叶展开。用TY培养基将菌株培养至OD₆₀₀值为0.8~1.0,加水稀释到OD₆₀₀为0.08~0.10,采用直接浇注在植株根部的方式进行接菌,每株浇灌菌液30 mL。完成接菌后用B&D植物无氮营养液和自来水交替浇灌,每次浇灌2 L,接菌21 d后统计有效根瘤表型。以≥2 mm根瘤作为有效根瘤的评定标准,可用

2 mm 标准筛进行过滤筛选^[16-17]。统计的大豆结瘤表型包括植株结瘤数量(Node Number, NN)和植株根瘤干重(Node Weight, NW); 育成年份(Released Year, RY)、产量(Yeild, Y)、蛋白含量(Protein Content, PC)和油分含量(Oil Content, OC)^[18]。

B & D 植物无氮营养液: Solution A: 2 mol·L⁻¹ CaCl₂·2H₂O; Solution B: 1 mol·L⁻¹ KH₂PO₄; Solution C: 20 mmol·L⁻¹ Fe-citrate·5H₂O; Solution D: 0.5 mol·L⁻¹ MgSO₄·7H₂O、0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄·7H₂O、2 mmol·L⁻¹ MnSO₄·H₂O、4 mmol·L⁻¹ H₃BO₃、1 mmol·L⁻¹ ZnSO₄·7H₂O、0.4 mmol·L⁻¹ CuSO₄·5H₂O、0.2 mmol·L⁻¹ CoSO₄·7H₂O、0.2 mmol·L⁻¹ Na₂MoO₄·2H₂O, Solution A、B、C、D 均需灭菌, 使用时各取 500 μL, 加入到 1 L 的 ddH₂O 中, 配成 1 × B & D 营养液。

1.3 数据分析

利用 SPSS statistics 26 对数据进行描述性统计和 K-S 正态性检验, 根据一年多点试验模型, 利用 R 语言软件“Lme4”程序包中的“lmer”函数对根瘤数和根瘤干重进行 BLUP 值估计^[19]。利用 SPSS statistics 26 皮尔逊线性相关性分析和双尾显著性检验对根瘤数、根瘤干重与产量、育成年份、蛋白含量和油分含量的相关性进行分析^[20]。利用 GraphPad Prism 8 和 Arc GIS 8.0 对安徽、北京、河北、河南、江

苏、山东和山西不同省市根瘤数和根瘤干重进行结瘤地区性差异分析。

BLUP 值数学统计模型为: $y_{ij} = \mu + t_i + u_j + e_{ij}$, y_{ij} 是品种 j 在 i 年中的表型观测值, μ 为平均值, t_i 为年份效应(固定效应), u_j 为品种效应(随机效应), e_{ij} 为随机误差^[21]。

2 结果与分析

2.1 参试大豆种质根瘤数量和根瘤干重的描述性统计

为了探究参试大豆种质结瘤能力大小, 进行了根瘤数和根瘤干重的数据统计分析, 结果如表 1 所示, 黄淮海参试大豆单株根瘤数为 6 ~ 35 个, 平均根瘤数为 17 个·株⁻¹, 单株根瘤干重为 26.44 ~ 124.89 mg, 平均根瘤干重为 53.81 mg·株⁻¹, 根瘤数量和根瘤干重的变异系数分别为 32.18% 和 29.51%。K-S 正态性检验结果表明, 根瘤数和根瘤干重显著性 P 值均大于 0.05, 符合正态分布。对其频率分布类型进行分析表明: 大豆根瘤数量主要集中于 12 ~ 21 个·株⁻¹, 共 94 份, 占 65%; 根瘤干重主要集中于 41 ~ 60 mg·株⁻¹, 共 85 份, 占 59%。综上所述, 143 份黄淮海夏大豆种质的结瘤能力差异显著, 可能受自身遗传背景和选育环境的影响(图 1)。

表 1 参试大豆种质根瘤数量和根瘤干重分布特征

Table 1 The characteristics of nodule number and nodules dry weight of the tested materials

性状 Trait	平均值 Mean	最大值 Max.	最小值 Min.	标准差 SD	变异系数 CV/%	峰度 KURT	偏度 SKEW	正态性检验 K-S 检验
根瘤数量 NN	17.00	35.00	6.00	5.47	32.18	0.69	0.63	0.077
根瘤干重 NW	53.81	124.89	26.44	15.88	29.51	0.11	0.51	0.073

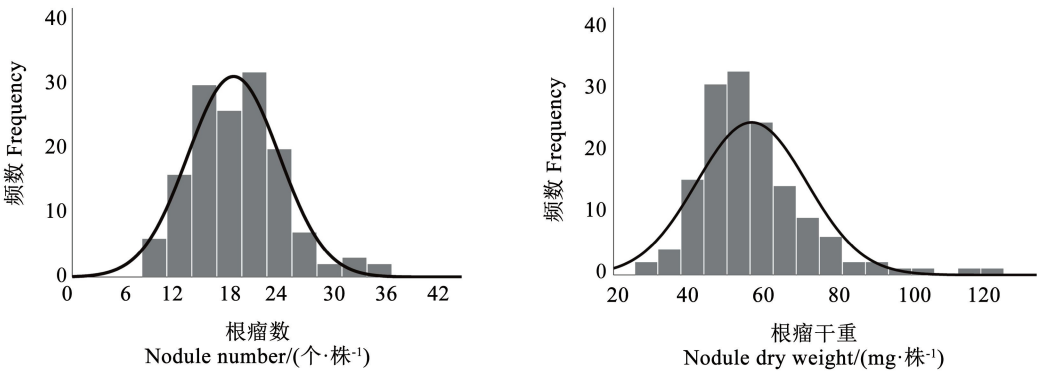


图 1 参试大豆结瘤数和根瘤干重正态分布图

Fig. 1 Normal distribution of nodule number and dry weight of tested soybeans

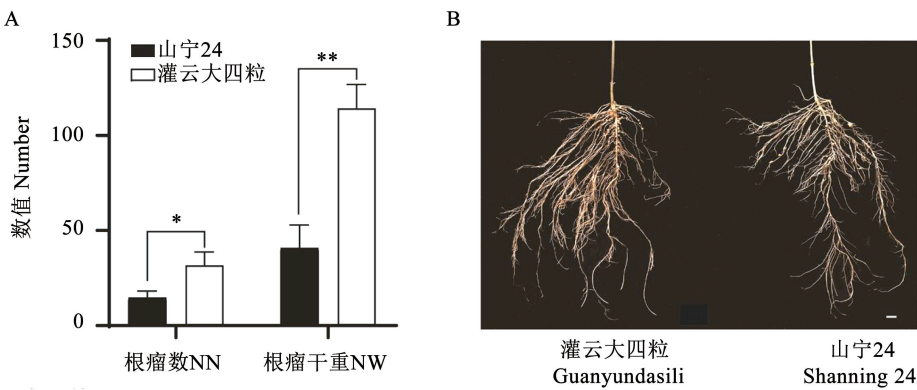
2.2 结瘤能力差异大豆种质筛选

为了在黄淮海地区筛选出结瘤能力强且高产优质的大豆,以根瘤干重 BLUP 值为比较值,筛选结瘤能力较强(前 5%)品种(系),作为培育强结瘤能力品种的亲本。强结瘤能力的材料有安豆 1311、灌云大四粒、沿大粒、太丰 6 号、商豆 7 号、黄豆 ZDD08405 和 08Y 观 205。同时筛选结瘤能力较差(后 5%)品

种(系)记录入库,为后续研究作参考。弱结瘤能力的材料有黄豆 ZDD08404、远育 6 号、冀 nf58、抗旱 185、山宁 24、中黄 20 和徐豆 1 号(表 2)。选择结瘤能力强的灌云大四粒和结瘤能力弱的山宁 24 进行根瘤的差异性统计,发现根瘤数和根瘤干重均达到显著性差异水平(图 2)。

表 2 结瘤差异种质筛选
Table 2 Screening of soybean germplasm with different nodulation ability

分类 Category	种质 Germplasm	最小二乘无偏差估计 BLUP		第一批次 Batch 1		第二批次 Batch 2	
		根瘤数 NN	根瘤干重 NW	根瘤数 NN/ (个·株 ⁻¹)	根瘤干重 NW/ (mg·株 ⁻¹)	根瘤数 NN/ (个·株 ⁻¹)	根瘤干重 NW/ (mg·株 ⁻¹)
结瘤能力强 High nodulation ability	安豆 1311	0.057	1.868	12	33.7	38	201.9
	灌云大四粒	0.071	1.727	31	114.3	24	111.2
	沿大粒	0.057	0.960	35	124.9	15	45.5
	太丰 6 号	0.025	0.875	19	78.2	20	86.1
	商豆 7 号	0.051	0.819	19	56.7	29	103.6
	黄豆 ZDD08405	0.054	0.792	34	106.1	15	52.2
	08Y 观 205	0.019	0.767	24	94.4	13	62.1
结瘤能力弱 Low nodulation ability	黄豆 ZDD08404	-0.044	-0.498	9	41.8	6	23.9
	远育 6 号	-0.035	-0.545	11	41.4	7	20.9
	冀 nf58	-0.006	-0.556	17	30.9	11	30.6
	抗旱 185	-0.047	-0.556	7	26.4	7	35.1
	山宁 24	-0.029	-0.577	15	40.9	5	19.1
	中黄 20	-0.021	-0.637	15	31.1	8	24.6
	徐豆 1 号	-0.038	-0.674	13	38.4	4	14.6



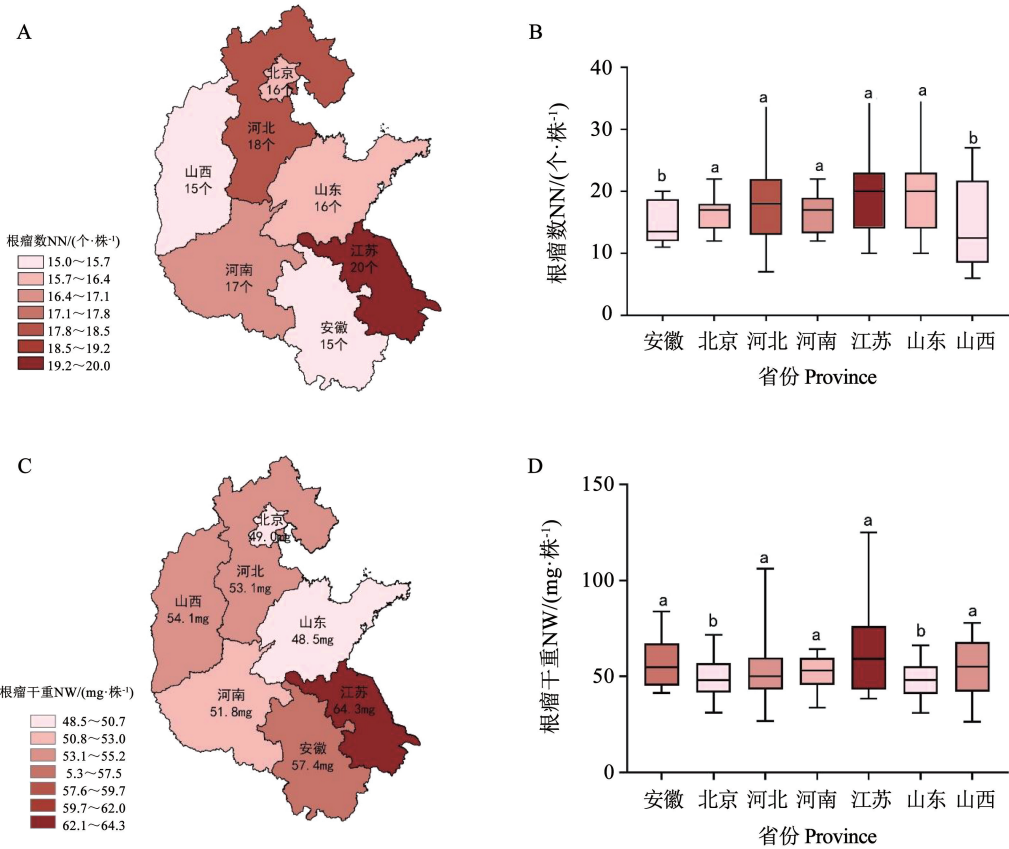
注:A. 灌云大四粒和山宁 24 结瘤数、根瘤干重柱形图;B. 灌云大四粒和山宁 24 表型对比图。* 表示存在显著差异($P<0.05$); ** 表示存在极显著差异($P<0.01$)。
Note: A. Nodule number and nodule dry weight column chart of Guanyundasili and Shanning 24; B. Phenotype comparison chart of Guanyundasili and Shanning 24. * indicates significant difference ($P<0.05$); ** indicates extremely significant difference ($P<0.01$).

图 2 灌云大四粒和山宁 24 结瘤数和根瘤干重柱形图及表型对比图
Fig. 2 Nodule number and nodule dry weight column chart and phenotype comparison chart of Guanyundasili and Shanning 24

2.3 不同省市大豆结瘤能力差异性分析

本研究中,不同省市大豆种质结瘤数量依次为江苏>河北>河南>北京=山东>山西=安徽,其中安徽、山西材料结瘤数较少,为15个·株⁻¹,与其他地区存在显著性差异,江苏的结瘤数最多,为20个·株⁻¹。

结瘤干重依次为江苏>安徽>山西>河北>河南>北京>山东,北京、山东的根瘤干重较小,分别为48.5和49.0mg,而江苏单株根瘤干重最大,为64.3mg。江苏的大豆品种(系)结瘤能力较好,结瘤数和根瘤干重都优于其它省市材料(图3)。



注:图 A 和 C 利用 Arc GIS 8.0 对参试材料按照选育的不同省市进行分类整理。大豆原始数据为来自黄淮海 7 个省份 143 份参试大豆种质 2 个批次共 6 个重复下根瘤数和根瘤干重的统计数据。将各个重复的根瘤数和根瘤干重归纳到其所在的省市,并求取平均数作为各省市结瘤能力的数据依据。A~B. 不同省市的结瘤数分布图;C~D. 不同省市的结瘤干重分布图;颜色的深浅代表结瘤能力的大小,不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平差异显著。

Note: A and C. The Arc GIS 8.0 was used to classify the materials according to different provinces and cities. The original data of soybean were number and dry weight of nodules derived from a total of 6 repetitions of 143 tested soybean germplasms from 7 provinces in Huang-Huai-Hai region. The number and dry weight of nodules were summarized into the provinces and cities where they were located, and the average was obtained as the data basis of nodulation ability of each province and city. A-B. Distribution map of the nodule number in different provinces and cities; C-D. Distribution map of nodulation dry weight in different provinces and cities. The depth of color represents the nodulation ability, and different lowercase indicate significant difference in $P<0.05$ level.

图3 不同省市材料结瘤数和根瘤干重差异分析

Fig. 3 Difference analysis of nodule number and dry weight of materials in different provinces (municipalities)

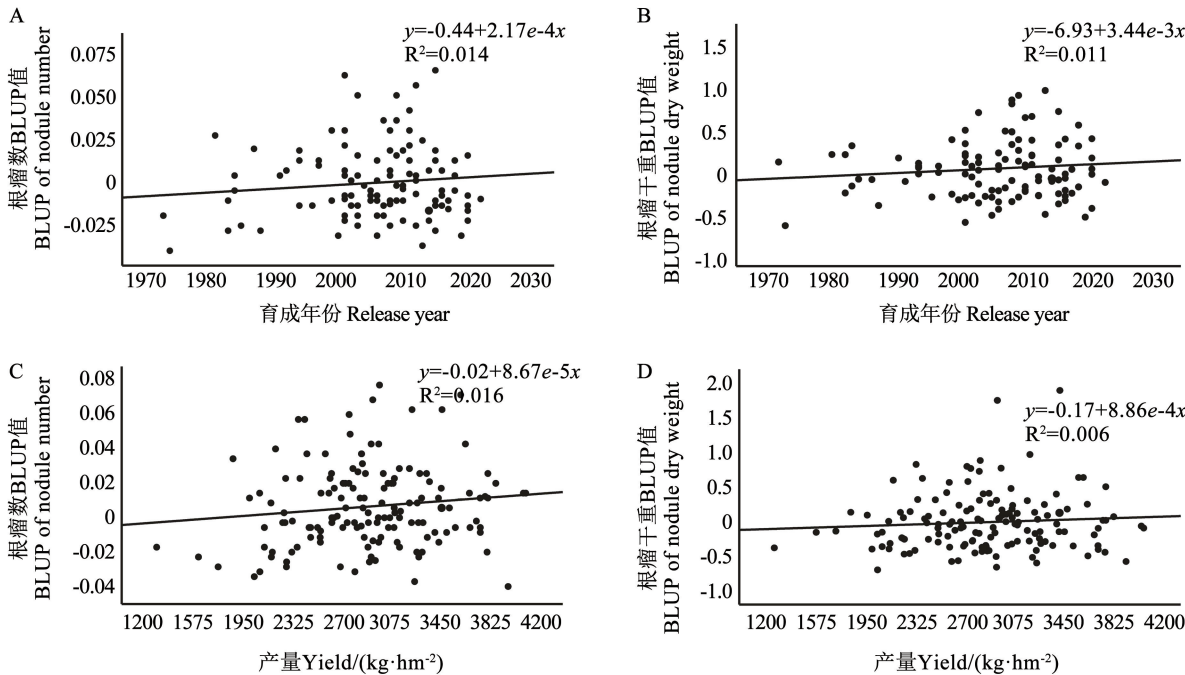
2.4 大豆育成年份、产量与结瘤能力的相关性分析

大豆不同种质育成年份、产量与结瘤数和根瘤干重的相关分析表明,在1970—2020年50年间黄

淮海大豆育成品种随育成年份增加,根瘤数和根瘤干重无显著变化趋势。从2000年起,种质间结瘤能力的差异性变大,出现了结瘤能力强的种质,同时

结瘤能力弱的种质数量也在增加, $R^2 = 0.014$ 和 0.011 拟合度低,相关性弱(图4A和B)。通过分析产量与结瘤数和根瘤干重的关系,发现随着产量的增加,根瘤数有增长的趋势,但 $R^2 = 0.016$ 拟合优度较

低,相关性弱。同时发现大豆产量小于 $1\,950\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的品种根瘤数和根瘤干重均处于拟合线以下,结瘤能力差;而根瘤干重与产量线性关系 $R^2 = 0.006$,无显著相关性(图4C和D)。



注: A. 根瘤数与育成年份的关系; B. 根瘤干重与育成年份的关系; C. 根瘤数与产量的关系; D. 根瘤干重与产量的关系。

Note: A. The relationship between the nodule number and the release year; B. The relationship between nodule dry weight and release year; C. The relationship between the nodule number and yield; D. The relationship between nodule dry weight of nodules and yield.

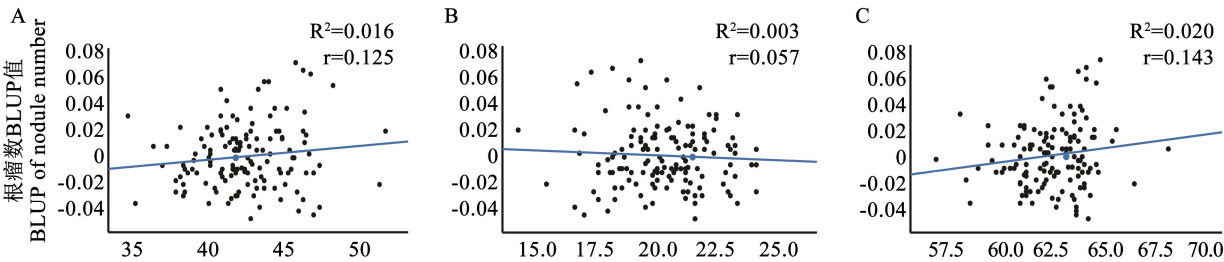
图4 结瘤数和根瘤干重与育成年份、产量关系图

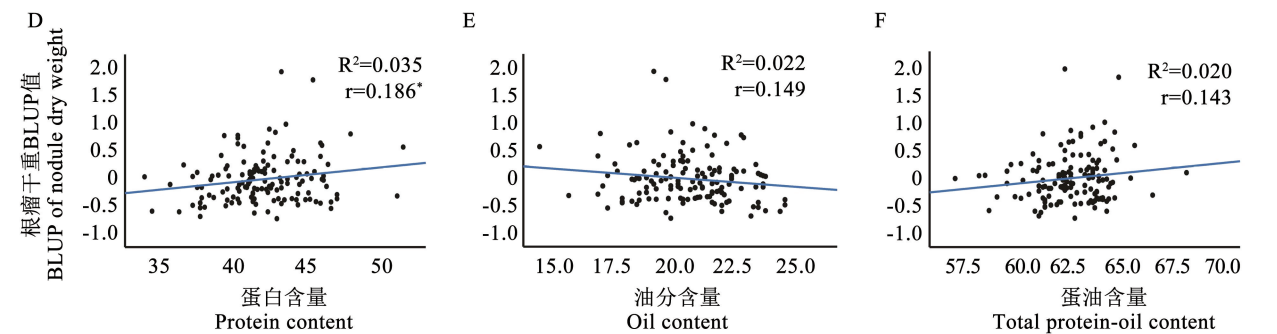
Fig. 4 Relationship between nodule number, nodule dry weight with release years and yield

2.5 大豆籽粒蛋白、油分含量与结瘤能力相关性分析

从大豆蛋白、油分含量与根瘤干重的相关性分析中得出,参试大豆种质蛋白含量与根瘤干重成正相关,相关性系数 $r = 0.186$,显著性 $P < 0.05$;油分含量与根瘤干重的相关性 $r = -0.149$,蛋脂总含量与根瘤干重的相关性 $r = 0.143$,但两者均未达到显著相关性(图5D和F)。从大豆蛋白、油分含量与

根瘤数的相关性分析中得出,根瘤数与蛋白含量和油分含量及蛋油总量均无显著相关性(图5A和C)。分析发现,蛋白含量与根瘤数、根瘤干重的相关性大于油分含量与根瘤数、根瘤干重的相关性,根瘤干重与蛋白含量、油分含量的相关性大于根瘤数与蛋白含量、油分含量的相关性。





注:A. 根瘤数与蛋白含量的关系;B. 根瘤数与油分含量的关系;C. 根瘤数与蛋脂总量的关系;D. 根瘤干重与蛋白含量的关系;E. 根瘤干重与油分含量的关系;F. 根瘤干重与蛋脂总量的关系;r表示相关性系数,*表示在0.05水平上差异显著。

Note: A. The relationship between the nodule number and the protein content; B. The relationship between the nodule number and the oil content; C. The relationship between the nodule number and protein-oil total content; D. Relationship between dry weight of nodules and protein content; E. The relationship between the dry weight of nodules and the oil content; F. The relationship between the dry weight of nodules and protein-oil total content; r stands for correlation coefficient, * indicates significant at 0.05 probability level.

图5 蛋白、油分含量与结瘤数和根瘤干重的关系图

Fig.5 Relationship between soybean seed protein, oil content and the number of nodules and dry weight of root nodules

3 讨论

大豆根瘤菌的共生效应在很大程度上受宿主大豆品种的影响。本研究得出在同等环境条件下接种根瘤菌 USDA110,灌云大四粒单株结瘤数 24 ~ 31 个,单株根瘤干重 111 ~ 114 mg,而徐豆 1 号单株结瘤数为 4 ~ 13 个,单株根瘤干重 14.8 ~ 38.4 mg,不同种质间结瘤差异显著。前人已多次证明此观点,并熟练利用结瘤鉴定结果选择结瘤差异较大的双亲来构建 RLL 群体,对调控大豆共生固氮性状遗传位点进行挖掘^[22]。大豆结瘤差异主要受基因和环境两个因素影响:一是参与不同根瘤菌的结瘤因子几丁质链修饰的基因具有差异,导致不同根瘤菌产生的结瘤因子不同^[23],不同的大豆材料对结瘤因子的应答有差异^[24],这会进一步影响大豆和根瘤菌的共生固氮效率;二是土壤理化性质、地理因素和气候因子对大豆根瘤菌群落结构分布有影响^[25],而大豆与根瘤菌的配合是大豆与根瘤菌在长期进化中协调统一的结果,因此不同地理来源的大豆种质在结瘤固氮的进化方向上存在差异,结瘤固氮效率也存在差异。

基于上述原因,本研究对不同地理来源的大豆种质进行结瘤能力分析,发现江苏省育成品种(系)平均根瘤数和平均根瘤干重最大,且在所选结瘤能力强的 7 个品种中,江苏省的灌云大四粒和沿大粒位列其中。前人针对包括江苏省在内的不同省市大豆结瘤差异研究时也有同样发现。万德利等^[26]

在对南方省市广东、云南、湖南、江苏部分大豆种质进行结瘤鉴定时,发现固氮性状较好的品种多分布在江苏省和广东省。徐巧珍等^[14]在对比各省区品种间结瘤固氮能力时同样发现,春夏大豆以湖北、江苏省品种最佳,秋大豆以浙江省品种较优。可能的原因:一是江苏省地处沿海地区,同时跨长江、淮河两大水系,土壤含水量 >90%,夏季温度 18 ~ 27 ℃,气候条件影响大豆根瘤的形成和固氮;二是黄淮海地区土壤有机质含量呈现北高南低、西高东低的趋势,江苏省土壤有机质含量较低,黏粒含量较高,土壤含氮量较少,而低氮环境会促进大豆共生固氮^[27]。

过量施用氮肥会带来环境污染和种植成本增高的问题,因此,减少氮肥用量是实现农业可持续发展的重要举措。为了在尽可能减少氮肥用量的同时不影响大豆产量和品质,了解不同大豆材料的结瘤能力是必要的。本研究通过调查各种质生产试验测产数据,分析根瘤干重和产量之间相关性,未发现两者之间存在显著性关联。原因分析,首先前人研究是在低氮或无氮栽培条件下设置接菌和未接菌对照进行大豆产量的对比试验,适量施氮或少量施氮条件下大豆共生固氮是提高产量的主要原因,而在实际的农业生产过程中氮肥施用过量,大豆材料与根瘤菌共生固氮的固氮量非大豆氮素是否充足的限制因素,因此大豆共生固氮能力强弱未对产量造成影响。大豆与根瘤菌共生固氮可以为大豆提供氮素,氮素是植物体内核酸、氨基酸、叶

绿素、维生素等合成的必要元素,而氨基酸是蛋白质的主要组成成分。本研究发现参试大豆材料的根瘤干重与蛋白含量成正相关,与油分含量无显著相关性,该结果说明根瘤固氮主要影响籽粒蛋白含量,与前人研究结果一致。综上所述,农业生产中要充分发挥大豆的共生固氮效率,实现大豆生产生态效益和经济效益的共同发展。

4 结论

为了在黄淮海地区筛选出强结瘤大豆亲本材料,以参试材料结瘤能力的强弱为依据,筛选出安豆1311、灌云大四粒、沿大粒、太丰6号、商豆7号、黄豆ZDD08405、08Y观205等7份结瘤能力较强大豆种质,同时筛选出黄豆ZDD08404、远育6号、冀nf58、抗旱185、山宁24、中黄20、徐豆1号等7份结瘤能力较弱的大豆种质。黄淮海不同省(市)区育成大豆的结瘤能力存在差异,本研究得出江苏省的育成品种(系)结瘤能力较好,根瘤数和根瘤干重总体都优于其他地区品种。大豆产量和品质与结瘤能力的相关性分析表明,参试大豆种质根瘤干重与蛋白含量成正相关,根瘤数、根瘤干重与育成年份、产量及油分含量无显著相关性。

参考文献

[1] 崔艳华,邱丽娟,常汝镇,等. 黄淮夏大豆遗传多样性分析[J]. 中国农业科学, 2004(1): 15-22. (CUI Y H, QIU L J, CHANG R Z, et al. Analysis of genetic diversity of Huang-Huai summer soybean [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004(1): 15-22.)

[2] LIU J, XIE H, LIN T, et al. Putative variants, genetic diversity and population structure among soybean cultivars bred at different ages in Huang-Huai-Hai region[J]. Science Reports, 2022, 12(1): 23-72.

[3] 李颖,谢骥泽,刘兵强,等. 华北平原典型县大豆生产全生命周期分析[J/OL]. 中国生态农业学报(中英文): 1-13[2023-03-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1432.S.20230216.1516.003.html>. (LI Y, XIE Q Z, LIU B Q, et al. Analysis of soybean production life cycle in typical counties of North China Plain[J/OL]. Chinese Journal of Eco-Agriculture: 1-13[2023-03-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1432.S.20230216.1516.003.html>.)

[4] FERGUSON B J, MENS C, HASTWELL A H, et al. Legume nodulation: The host controls the party [J]. Plant Cell Environment, 2019, 42(1): 41-51.

[5] CHIBEBA A M, KYEI-BOAHEN S, DE FÁTIMA GUIMARÃES M, et al. Towards sustainable yield improvement: Field inoculation of soybean with *Bradyrhizobium* and co-inoculation with

Azospirillum in Mozambique[J]. Archives of Microbiology, 2020, 202(9): 2579-2590.

[6] 窦新田. 黑龙江省大豆接种根瘤菌效果初报[J]. 黑龙江农业科学, 1984(3): 31-34. (DOU X T. Preliminary report on inoculation effect of soybean with rhizobium in Heilongjiang Province [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 1984(3): 31-34.)

[7] 张欣. 大豆根瘤菌及生物固氮的研究与应用[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2011. (ZHANG X. Research and application of soybean rhizobium and biological nitrogen fixation [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011.)

[8] 邹狮,严君,韩晓增,等. 氮肥对大豆结瘤固氮、籽粒产量和蛋白质含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(8): 1457-1465. (ZOU S, YAN J, HAN X Z, et al. Effects of nitrogen fertilizer on nodulation, nitrogen fixation, grain yield and protein content of soybean [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2022, 28(8): 1457-1465.)

[9] 李永一,丁洪玲,黄初女,等. 不同含油量大豆的结瘤特性与农艺性状比较分析[J]. 现代农业科技, 2014(2): 26-27. (LI Y Y, DING H L, HUANG C N, et al. Comparative analysis of nodulation characteristics and agronomic characters of soybean with different oil content [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2014(2): 26-27.)

[10] SILVA L R, PEREIRA M J, AZEVEDO J, et al. Inoculation with *Bradyrhizobium japonicum* enhances the organic and fatty acids content of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) seeds[J]. Food Chemistry, 2013, 141(4): 3636-3648.

[11] 董钻. 大豆产量生理[M]. 北京:中国农业出版社, 2012: 105-106. (DONG Z. Soybean yield physiology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2012: 105-106.)

[12] ZHANG B, WANG M, SUN Y, et al. *Glycine max* NNL1 restricts symbiotic compatibility with widely distributed bradyrhizobia via root hair infection[J]. Nature Plants, 2021, 7(1): 73-86.

[13] 伍惠,钟喆栋,樊伟,等. 8株优良大豆根瘤菌与不同地区27个大豆主栽品种的匹配性研究[J]. 大豆科学, 2017, 36(3): 405-418. (WU H, ZHONG Z D, FAN W, et al. Matching between 8 strains of soybean rhizobium and 27 soybean cultivars in different regions [J]. Soybean Science, 2017, 36(3): 405-418.)

[14] 徐巧珍,张学江,李志玉,等. 大豆种质资源共生固氮特性评价及遗传初步研究[J]. 中国油料作物学报, 2000(1): 20-24. (XU Q Z, ZHANG X J, LI Z Y, et al. Evaluation and genetic preliminary study on symbiotic nitrogen fixation characteristics of soybean germplasm resources [J]. Chinese Journal of Oil Crops, 2000(1): 20-24.)

[15] 王宏光,孙殿君,马忠强,等. 大豆根瘤菌HD001的分离鉴定及结瘤能力检测[J]. 大豆科学, 2014, 33(3): 379-384. (WANG H G, SUN D J, MA Z Q, et al. Isolation, identification and nodulation ability detection of soybean rhizobium HD001 [J]. Soybean Science, 2014, 33(3): 379-384.)

[16] 周相娟. 根瘤菌,铵态氮,光照强度对大豆固氮和光合作用影响的研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(植物研究所),

2006. (ZHOU X J. Effects of rhizobium, ammonium nitrogen and light intensity on nitrogen fixation and photosynthesis of soybean [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Botany), 2006.)

[17] ZHOU Z, LAKHSSASSI N, CULLEN M A, et al. Assessment of phenotypic variations and correlation among seed composition traits in mutagenized soybean populations[J]. GENES-BASEL, 2019, 10(12): 975.

[18] 张孟臣, 张磊, 刘学义. 黄淮海大豆改良种质[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014. (ZHANG M C, ZHANG L, LIU X Y. Improved germplasm of Huang-Huai-Hai soybean [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014.)

[19] 常世豪, 耿臻, 杨青春, 等. 基于 BLUP 值的夏大豆产量与农艺性状的相关分析[J/OL]. 作物杂志; 1-6 [2023-01-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1808.S.20221220.1800.001.html>. (CHANG S H, GENG Z, YANG Q C, et al. Correlation analysis of summer soybean yield and agronomic traits based on BLUP value [J/OL]. Crops: 1-6 [2023-01-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1808.S.20221220.1800.001.html>.)

[20] YAN Z, HOSSAIN M S, ARIKIT S, et al. Identification of microRNAs and their mRNA targets during soybean nodule development: Functional analysis of the role of miR393j-3p in soybean nodulation [J]. New Phytologist, 2015, 207 (3): 748-759.

[21] 翟虎渠, 王建康. 应用数量遗传[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 185-186. (ZHAI H Q, WANG J K. Applied quantitative genetics [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007: 185-186.)

[22] YANG Q, YANG Y, XU R, et al. Genetic analysis and mapping of QTLs for soybean biological nitrogen fixation traits under varied field conditions[J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 75.

[23] WAIS R J, KEATING D H, LONG S R. Structure-function analysis of nod factor-induced root hair calcium spiking in Rhizobium-legume symbiosis[J]. Plant Physiology, 2002, 129 (1): 211-224.

[24] D'HAEEZE W, HOLSTERS M. Nod factor structures, responses, and perception during initiation of nodule development [J]. Glycobiology, 2002, 12: 79R-105R.

[25] 万德利, 沈秀荣. 南方大豆品种结瘤固氮的初步鉴定[J]. 湖北农学院学报, 1993(2): 81-88. (WAN D L, SHEN X R. Preliminary identification of nodulation and nitrogen fixation of soybean varieties in southern China [J]. Journal of Hubei Agricultural College, 1993(2): 81-88.)

[26] 杨升辉. 地理环境, 大豆品种和培养条件影响大豆根瘤菌生态分布与结瘤固氮功能研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018. (YANG S H. Effects of geographical environment, soybean varieties and culture conditions on ecological distribution and nodule and nitrogen fixation function of soybean rhizobium [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.)

[27] 任频频, 黄峰, 李保国. 黄淮海平原旱作农田土壤有机质含量的空间分异特征[J]. 土壤学报, 2022, 59(2): 440-450. (REN P P, HUANG F, LI B G. Spatial differentiation of soil organic matter content in dryland farmland in Huang-Huai-Hai plain [J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(2): 440-450.

欢迎订阅 2024 年《大豆科学》

《大豆科学》是由黑龙江省农业科学院主管、主办的大豆专业性学术期刊,被国内外多家重要数据库收录的核心期刊。主要刊登有关大豆遗传育种、品种资源、生理生态、耕作栽培、植物保护、营养肥料、生物技术、食品加工、药用功能及工业用途等方面的学术论文、科研报告、研究简报、国内外研究述评、学术活动简讯和新品种介绍等。

《大豆科学》为双月刊,16 开本,国内外公开发行。国内每期定价:40.00 元,全年 240.00 元,邮发代号:14-95。国外每期定价:40.00 美元(含邮资),全年 240.00 美元,国外邮发代号:Q5587。全国各地邮局均可订阅。

地址: 哈尔滨市松北区创新三路 800 号
邮编: 150023
电话: 0451-51522862
网址: <http://ddkx.haasep.cn>
E-mail: soybeanscience@vip.163.com

