



黄淮海耐压实大豆品种的初步筛选及根系特征分析

刘 晓¹,王 丽¹,王天舒¹,于淑婷¹,吴会军¹,李玉明²,尧水红¹

(1. 中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所,北京 100081; 2. 黑龙江北大荒农业股份有限公司 291 分公司农业技术推广中心,黑龙江佳木斯 150090)

摘 要:黄淮海地区加大机械化耕种收力度的同时也造成了更严重的土壤压实,为给耐压大豆品种的选育提供参考,利用华北地区自 1920 年以来的 25 个大豆品种,从根系的调控机制出发,对机械压实条件下大豆的地上部生物性状以及根系特征进行分析。研究表明:供试品种中有 10 个(上蔡二糙平顶式、益都平顶黄、文丰 7 号、豫豆 8 号、鲁豆 11、晋豆 25、冀豆 12、郑 92116、荷豆 13 和冀豆 17)具有较好的抗压实性能。这些耐压实品种地上部生物性状表现为植株矮化,茎粗加大,主茎节数和地上部生物量不减。地下部根系表现为根系最大宽度、根面积、水平生长空间增加,或侧根数、根尖数增加。说明根系通过针对性的自我调控来适应压实环境,满足逆境下对土壤水肥气的有效吸收,从而维持地下和地上部的生物量,保障作物的稳产。本研究能够为新时代机械化耕种收条件下大豆育种提供数据支撑及理论依据,具有一定的生产指导意义。

关键词:土壤压实;大豆;耐压实品种;农艺性状;根系形态特征

Preliminary Screening and Root Characteristics Analysis of Compaction Resistance Soybean Varieties in Huanghuaihai

LIU Xiao¹, WANG Li¹, WANG Tian-shu¹, YU Shu-ting¹, WU Hui-jun¹, LI Yu-ming², YAO Shui-hong¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Heilongjiang Beidahuang Agricultural Co., Ltd. 291 Branch Agricultural Technology Promotion Center, Jiamusi 150090, China)

Abstract: The increase of mechanized cultivation has resulted in serious soil compaction in the Huanghuaihai Plain. In order to provide reference for the selection of pressure resistant soybean varieties in terms of root regulation mechanisms, plant biological properties and root characteristics of soybean under mechanical compaction were analyzed and 25 soybean varieties since 1920 in North China were used. The result showed that there were 10 of the tested varieties (Shangcaiercaopingdingshi, Yidupingdinghuang, Wenfeng 7, Yudou 8, Ludou 11, Jindou 25, Jidou 12, Zheng 92116, Hedou 13 and Jidou 17) showed good compaction resistance. The plant biological properties of these compaction resistant varieties showed dwarfing of plants, increased stem diameter and main stem nod number, and maintained plant biomass. The root system showed the increased maximum root width, root area, horizontal growth space, or the increase in the number of lateral roots and root tips. The root system adapts to the compaction environment through self-regulation to effectively absorb soil water, fertilizer and gas from soil under the adverse environment, so as to maintain the biomass of aerial part and root, ensure the yield of crops. This study provides data support and theoretical basis for soybean breeding under the mechanized cultivation conditions in the new era, and has certain guiding significance for production.

Keywords: Soil compaction; Soybean; Compaction resistant varieties; Agronomic traits; Root morphology characteristics

农业机械化程度代表着农业现代化水平的高低^[1-2],据黄淮海各省办公厅发布,2020 年主要粮食作物耕种收综合机械化率将达到 80% 以上^[3-4],但农业机械化程度的日渐高涨也伴随着土壤压实的愈发严重。据统计全球机械压实造成的土壤退化面积近 $7 \times 10^8 \text{ hm}^2$,其中亚洲占比 14.4%^[5]。土壤压实是外界对地压力大于土壤承受力,致使土壤孔隙减低,容重增加的一种土壤退化现象^[6]。随着农作物机械化耕种收程度的提高,土壤压实的风险也越来越大^[7],对主要农作物产量的威胁也到了不可

忽视的程度。随着近几年中国种植结构的调整,大豆的播种面积日益增加,然而据统计目前河南大豆品种产量呈现下降的态势,这与耕种收割模式,以及更新换代有一定的关系^[8]。而黄淮海是中国夏大豆的主产区之一,过去由于地理条件和种植制度的限制,大豆生产的机械化程度较差^[9-10],目前大豆机械化耕种收的需求也日益迫切^[11-12],这种情况下筛选耐压实的大豆品种就显得尤为重要,成为现代育种的新需求。

土壤压实对农作物根系的生长造成直接影响,

收稿日期:2019-11-19

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201503119);现代农业产业技术体系建设专项(CARS-04-PS13);中国农业科学院重大科研专项(CAAS-ZDRW202003);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1610132019016,1610132019034)。

第一作者简介:刘晓(1992-),男,硕士,主要从事土壤物理与土壤环境研究。E-mail:1061609499@qq.com。

通讯作者:尧水红(1978-),女,博士,副研究员,硕导,主要从事土壤生物物理与微生物生态研究。E-mail: yaoshuihong@caas.cn。

随机械强度上升,土壤水分含量减少,土壤内氧气浓度降低,导致根系下扎困难或生长受阻,这些负面效果可能限制根系生长,影响产量^[13-14]。但根系同时具有可塑性,且不同品种间根系特性具有一定差异,部分品种的根系结构能够随土壤环境变化而改变,以保证最大限度地吸收土壤中水分与养分,保障产量。因此,从根系特性出发,探究大豆品种耐压实的具体调节机制对大豆的生产和耐压实品种选育均具有一定的研究价值。

本研究在河南新乡设置田间试验,选择大豆各组织生命活动最活跃,地上部、地下部生物量最大,株高和主茎节数也基本趋于稳定的盛花期^[15-17]采样,分析大豆地上部和根系的生物性状,比较压实和未压实条件下不同大豆品种盛花期地上生物性状,初步筛选出具有耐压实而不减产潜力的大豆品种,具体分析其地下部根系性状和构型的变化,试图探明其耐压实的具体原因,为新时代机械化生产条件下大豆育种提供数据支撑及理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于河南新乡中国农业科学院灌溉所

基地(38°19′N,113°53′E),该区域属暖温带大陆性气候,年均降水量 548 mm,多集中在 7~8 月,年均气温 14.1℃,年均日照 2 407 h,年均无霜期 200 d。试验地块为黄淮海平原旱作耕地,土壤类型为典型潮土,该区域常规种植制度为一年两熟轮作制。试验开始前该区域 0~20 cm 土壤的理化性质为:pH7.82、有机碳 17.99 g·kg⁻¹、全氮 1.36 g·kg⁻¹、速效氮 50.6 mg·kg⁻¹、速效磷 42.5 mg·kg⁻¹、速效钾 150 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验于 2017 年 6 月和 2018 年 6 月麦收后的豆季进行,设压实和未压实 2 个处理,3 次重复。压实处理采用 90 马力东方红中型四轮驱动式拖拉机 LX904(整车重量达 4 t,对地压强 80 kPa),整区压实 6 次(模拟一年两熟全程机械化的碾压次数),未压实处理(对照)除播种时的浅旋外(12 cm),全程无机械压实。单个处理区域:长 3 m、宽 22.5 m,区域内种植 25 个品种。供试材料均是黄淮海地区自 1920 年以来种植面积达 6×10⁵ hm² 以上的品种^[18-19],具体品种名称见表 1。每个品种 0.45 m 宽(3 行:行距 0.15 m,株距 0.2 m),区域种植密度为 33.3 万株·hm⁻²。

表 1 参试品种及育成年代
Table 1 Test varieties and breeding years

品种 Variety	年代 Years	品种 Variety	年代 Years	品种 Variety	年代 Years
海阳爬蔓青 Haiyangpamanqing	1920s	诱变 30 Youbian 30	1980s	徐豆 9 号 Xudou 9	1990s
上蔡二糙平顶式 Shangcaiercaopingdingshi	1940s	鲁豆 4 号 Ludou 4	1980s	中黄 13 Zhonghuang 13	2000s
菏泽牛毛黄 Hezeniumaohuang	1950s	豫豆 8 号 Yudou 8	1980s	郑 92116 Zheng 92116	2000s
益都平顶黄 Yidupingdinghuang	1950s	科丰 6 号 Kefeng 6	1980s	皖豆 24 Wandou 24	2000s
齐黄 10 号 Qihuang 10	1960s	晋豆 21 Jindou 21	1990s	菏豆 13 Hedou 13	2000s
河南早丰 1 号 Henanhanfeng 1	1970s	鲁豆 11 Ludou 11	1990s	冀豆 17 Jidou 17	2000s
文丰 7 号 Wenfeng 7	1970s	晋豆 25 Jindou 25	1990s	中黄 37 Zhonghuang 37	2000s
兗黄 1 号 Yanhuang 1	1970s	冀豆 12 Jidou 12	1990s		
丰收黄 Fengshouhuang	1970s	豫豆 22 Yudou 22	1990s		

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤容重和紧实度 在整地后大豆种植前,于试验区域随机选取 10 个点用容积 100 cm³ 环刀分别取 0~10、10~20、20~30 和 30~40 cm 的剖面土,测定土壤容重。同时用 Eijkelkamp 6.0 型贯入阻力仪测定土壤的紧实度。

1.3.2 地上部生物性状 于大豆盛花期(R2 期),每个品种选取 5 株长势比较均匀的植株,用枝剪在贴近地面处剪断,系好标签放入尼龙网袋在实验室测量株高、主茎节数、地上部生物量。

1.3.3 地下部根系性状 大豆根系采用 Shovelomics 方法^[20-21]分析,具体操作为:于大豆盛花期(R2 期)用长度为 40 cm 的铁锹,先将根周围 40 cm×40 cm 土方疏松后,整块取出,保证根的完整性。将根冲洗干净后吊挂在根系拍照框内,采用尼康 D3200 像素设置为 6 016×4 000 pix 单反相机拍摄。

根系图片采用 DIRT 法数据化(数据化步骤 <http://dirt.iplantcollaborative.org/?q=welcome> 网站)。shovelomics 系统能分析根系的侧根角度、根密度、根尖数、最大根宽度、根面积等指标,在拍照后测量主根长并烘干记录根系干重。

1.3.4 产量 于 2018 年大豆收获期(R8 期),按品种将各小区内大豆植株全收获,于室内风干脱粒后,75℃烘至恒重、称量记录并按种植密度折合成公顷产量。

1.4 数据分析

采用 Excel 2013 进行数据整理,采用 Duncan 法

($P<0.05$)进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和多因素方差分析(Two-way ANOVA),主成分分析采用 SPSS 19.0 软件,制图采用 Origin 9.0 完成。

2 结果与分析

2.1 压实后土壤贯入阻力和土壤容重的变化

2.1.1 土壤贯入阻力 土壤贯入阻力和容重是表征土壤紧实度的重要指标。土壤紧实度越大,植物根系生长障碍就越大^[22]。由图 1A 可知,压实和未压实处理的土壤贯入阻力,在 0~15 cm 土层内并无显著差异;但随着土壤深度增加,机械压实的效应逐渐显现。在 20~40 cm 处,压实处理出现 1 个显著的紧实层,其土壤贯入阻力大于 2 MPa,在此区间内压实和未压实处理土壤贯入阻力均出现最大值,分别为 5.3 和 3.2 MPa,土壤紧实度达到最大。40~50 cm 压实和未压实 2 个处理土壤贯入阻力均有下降趋势且压实减幅明显大于未压实,50 cm 以下两者间已差异不显著并稳定于 3 MPa 左右。

2.1.2 土壤容重 由于大豆播种前的浅旋,压实和未压实处理 0~10 cm 处的土壤容重均最小,约为 1.1 g·cm⁻³(图 1B)。在未压实情况下,其土壤容重在 10~20 cm 土层达到最大值,为 1.55 g·cm⁻³。而经过压实处理后,其土壤容重在 30~40 cm 处达到最大,为 1.64 g·cm⁻³。20~40 cm 土层内,压实和未压实处理的土壤容重有显著差异($P<0.05$),进一步说明反复的机械碾压会在 20~40 cm 土层内形成致密紧实层,影响根系下扎和作物生长。

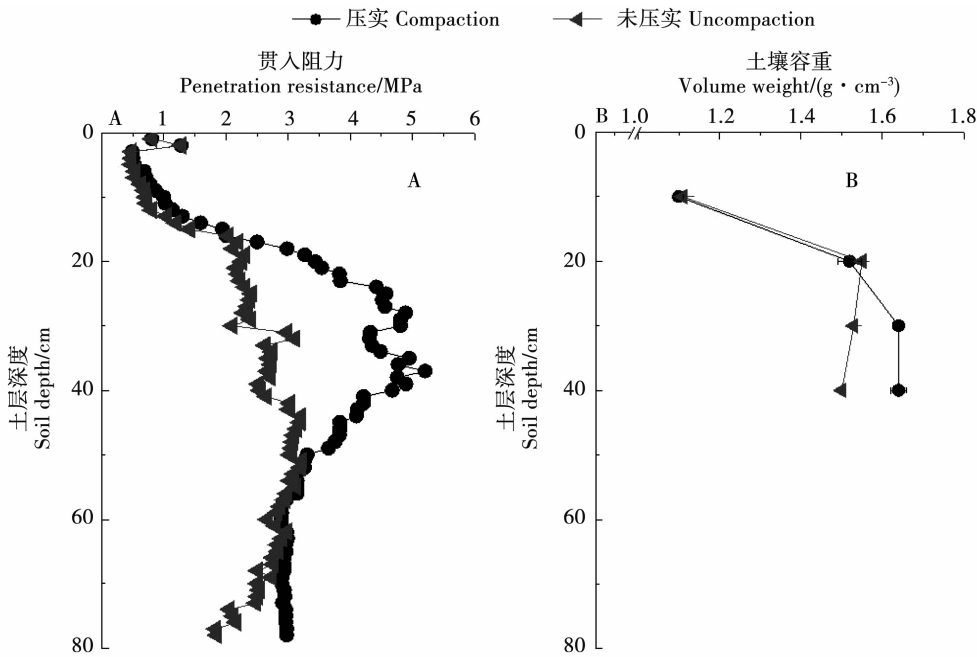


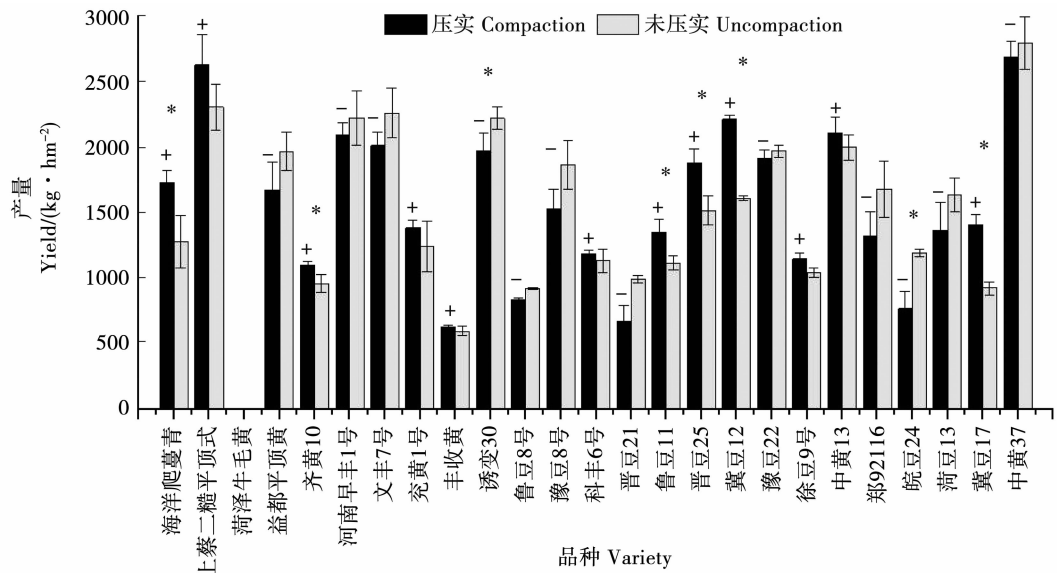
图 1 压实与未压实条件下剖面土壤贯入阻力(A)和容重(B)的变化

Fig. 1 Changes in penetration resistance(A) and volume weight(B) of profile soil under compacted and uncompacted conditions

2.2 压实对大豆地上部生物性状的影响

2.2.1 产量 2018 年菏泽牛毛黄因种子及虫害原因无收获,未列入统计。相较于未压实处理,产量在压实条件下显著增加的有 5 个品种,而无显著差异的有 17 个品种,显著降低的仅有 2 个品种。仅从产量的差异性而言,除了诱变 30 和晋豆 25 显著降低,其余 22 个品种受压实的影响均不大。这些压实条件下不减产的品种中,上蔡二糙平顶式、中黄 37

均达到2 500 kg·hm⁻²以上,属于高产品种;益都平顶黄、河南早丰 1 号、文丰 7 号、豫豆 8 号、晋豆 25、冀豆 12、豫豆 22、中黄 13 产量达到2 000 kg·hm⁻²;海阳爬蔓青、兗黄 1 号、鲁豆 11、郑 92116、荷豆 13、冀豆 17 产量均在1 500 kg·hm⁻²左右。产量较低品种有齐黄 10、丰收黄、鲁豆 4 号、科丰 6 号、徐豆 9 号,达到1 000 kg·hm⁻²(图 2)。



+ :同一品种压实处理高于未压实处理($P < 0.05$) ; - :同一品种压实处理低于未压实处 ; * :同一品种压实与未压实处理产量有显著差异($P < 0.05$)。

+ : The yield of the same variety under compaction is higher than that under uncompacted treatment ; - : The yield of the same variety under compaction is lower than that under uncompacted treatment ; * : The yield of the same variety under compaction is significantly different from that under uncompacted treatment($P < 0.05$).

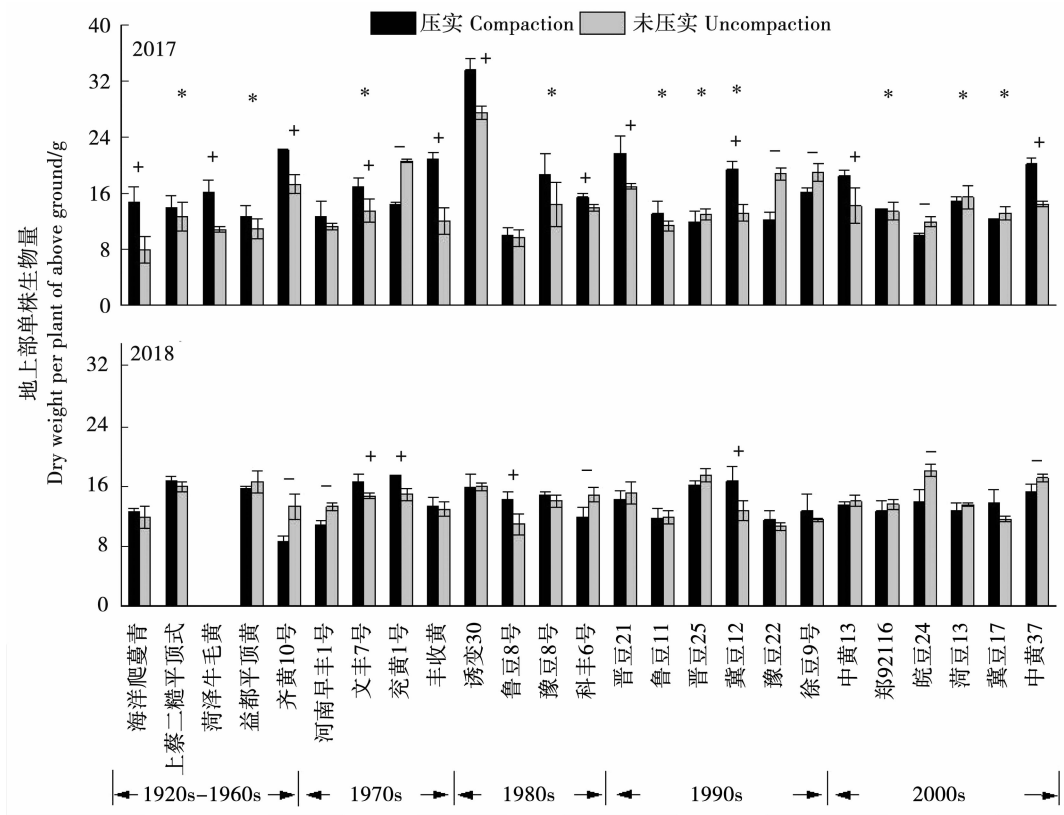
图2 2018 年压实与未压实条件下不同大豆品种产量的田间表现

Fig.2 Field yield of different soybean varieties under compacted and uncompacted conditions in 2018

2.2.2 地上部生物量 相较于未压实处理,2017 年地上部生物量在压实条件下显著增加的有 10 个品种,无显著差异的有 11 个品种,显著降低的仅有 4 个品种。2018 年除菏泽牛毛黄外,剩下的 24 个品种中仅有 3 个品种地上部生物量在压实条件下显著高于未压实处理,16 个品种地上部生物量在压实与未压实处理间无显著差异,仍有 5 个品种压实后其地上部生物量显著地低于未压实处理(图 3)。

2.2.3 耐压实大豆品种的筛选 22 个品种在压实条件下相对于自然情况下均不减产(图 2),理论上均有一定的耐压实能力。然而 2017 年“症青”没产

量的情况下,仅 1 年的产量代表性不足。总结前人经验发现,产量和地上部生物量成正比。因此,本研究通过结合产量和地上部生物量的分析,选择两年地上部生物量具有重现性的大豆品种,来筛选耐压实大豆品种。2017 和 2018 年两个田间生产季,地上部生物量表现一致的品种有 11 个(图 3)。其中皖豆 24 在压实条件下地上部生物量显著低于未压实处理,而本研究以筛选出耐压实潜力的大豆品种为目的,因此挑选在压实条件下地上生物量未减少,且两个生产季表现一致的 10 个品种(表 2),进一步分析其耐压实的原因及根系特征。



+ :同一品种压实地上部生物量显著高于未压实处理($P < 0.05$) ; - :同一品种压实地上部生物量显著低于未压实处理 ; * :地上部生物量在压实条件下不减少,且 2017 和 2018 年表现一致的品种。

+ : The plant biomass of the compacted is significantly higher than that of the uncompact treatment of the same variety ($P < 0.05$) ; - : The plant biomass of the compacted is significantly lower than that of the uncompact treatment of the same variety ; * : The plant biomass doesn't decrease under the compacted condition , and the varieties in 2017 and 2018 are the same.

图 3 压实与未压实条件下不同大豆品种地上部生物量的田间表现

Fig. 3 Aboveground biomass of different soybean varieties under compacted and uncompact conditions in field

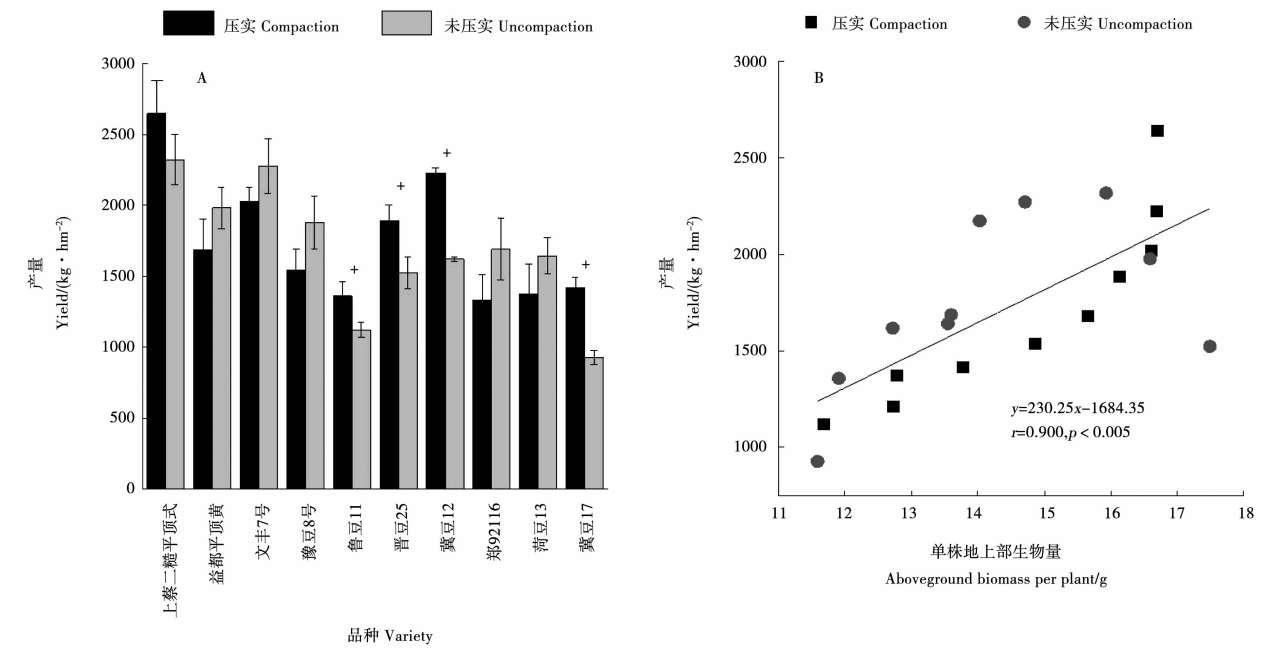
表 2 具有耐压实潜力大豆品种初步筛选			
Table 2 Selected preliminarily of soybean varieties with soil compaction resistant potential			
品种	年代	品种	年代
Variety	Years	Variety	Years
上蔡二糙平顶式	1940s	晋豆 25	1990s
Shangcaiercaopingdingshi		Jindou 25	
益都平顶黄	1950s	冀豆 12	1990s
Yidupingdinghuang		Jidou 12	
文丰 7 号	1970s	郑 92116	2000s
Wenfeng 7		Zheng 92116	
豫豆 8 号	1980s	菏豆 13	2000s
Yudou 8		Hedou 13	
鲁豆 11	1990s	冀豆 17	2000s
Ludou 11		Jidou 17	

初步筛选出 10 个具有耐压实潜力的大豆品种, 2018 年在压实条件下其产量均高于或不低于未压实处理(图 4A), 且其产量与地上部的生物量呈显

著正相关(图 4B)。因此,盛花期的地上部生物量可以作为一个重要参数来反应大豆在不同土壤环境内的生长状况,并预测其产量潜力。

2. 2. 4 耐压实品种株高 压实处理会在一定程度上降低大豆的株高,2017 年,未压实处理株高为 30. 73 ~ 90. 86 cm,平均为 61. 64 cm;而压实处理株高为 32. 48 ~ 77. 47 cm,平均为 51. 59 cm。2018 年上蔡二糙平顶式大豆品种在压实条件下株高显著低于未压实处理,其余 9 个品种压实与未压实处理间差异未达到显著水平(图 5)。

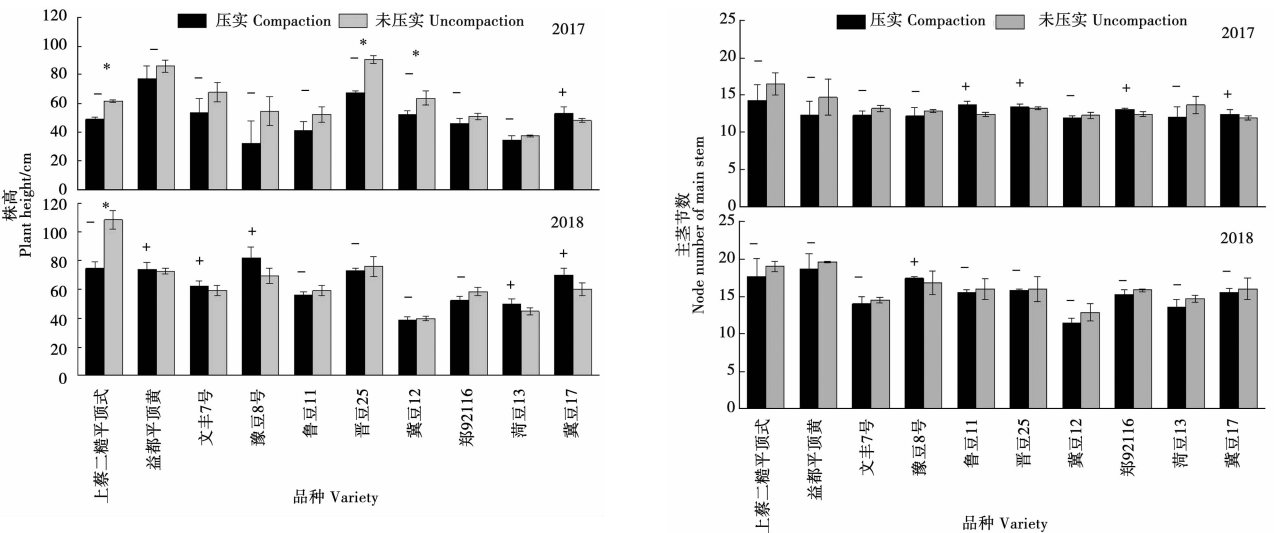
2. 2. 5 耐压实品种主茎节数 压实处理对不同品种大豆主茎节数没有显著的影响,2017 年,未压实处理的主茎节数为 12 ~ 17 节,平均为 13 节;压实处理的主茎节数为 12 ~ 14 节,平均为 13 节。2018 年压实与未压实处理的平均主茎节数为 16 节,多于 2017 年。但两年的主茎节数在两种处理下均没有显著性差异(图 6)。



+ :同一品种压实处理产量显著高于未压实处理($P<0.05$)。
+ : The yield of the same variety under compaction is significantly higher than that of uncompacted treatment($P<0.05$)。

图4 2018年初筛耐压实大豆品种产量(A)及其与地上部生物量的相关性(B)

Fig.4 Yield of selected varieties (A) and the correlation of yield and aboveground biomass (B) in 2018



+ :同一品种压实处理高于未压实处理($P<0.05$) ; - :同一品种压实处理低于未压实处 ; * :同一品种压实与未压实处理产量有显著差异($P<0.05$)。下同。

+ : The yield of the same variety under compaction is higher than that under uncompacted treatment ; - : The yield of the same variety under compaction is lower than that under uncompacted treatment ; * : The yield of the same variety under compaction is significantly different from that under uncompacted treatment($P<0.05$)。The same below.

图5 压实与未压实条件下耐压实大豆品种的株高

Fig.5 Plant height of soybean varieties with compaction resistance under compacted and uncompacted conditions

图6 压实与未压实条件下耐压实大豆的主茎节数

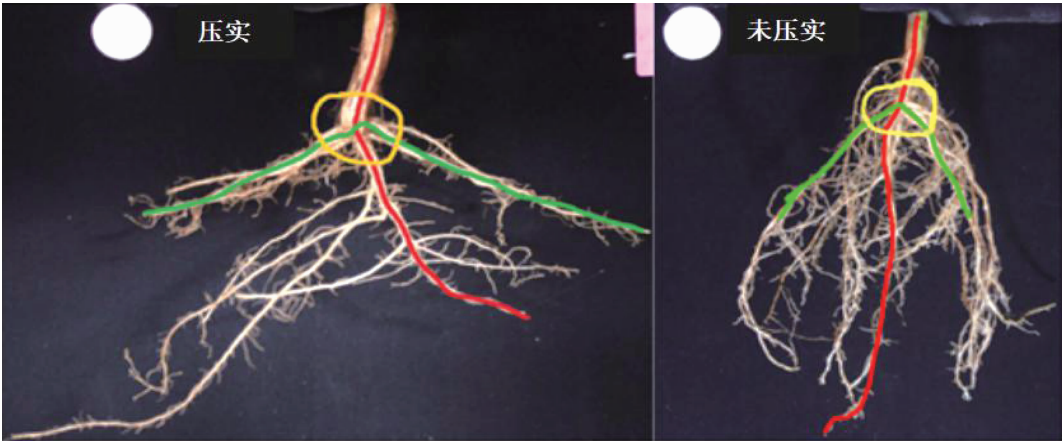
Fig.6 Node number of main stem of soybean varieties with compaction resistance under compacted and uncompacted conditions

综合筛选出的耐压实品种地上部各项指标,发现压实与未压实处理的4项指标存在如下规律:产量(压实 \geq 未压实);地上部生物量(压实 \geq 未压实);株高(压实 \geq 未压实);主茎节数(压实 \approx 未压实)。说明耐压实品种的地上部生物性状在压实条件下表现出差异,具体表现为:产量和地上部生物量不减,植株矮化,主茎节数不变。

2.3 压实对大豆根系性状的影响

2.3.1 根系构型实物图 根系构型是指同一根系中不同类型的根(直根系)或不定根(须根系)在生长介质中的空间造型和分布^[23],包括立体几何构型和平面几何构型。以文丰7号为例,盛花期同一大豆品种根系在压实和未压实条件下平面几何构型如图7所示:压实处理植株主根上有明显的弯曲节

点,这是因为胚芽生长受较大阻力,胚轴发生弯曲;压实处理侧根角度明显大于未压实,这可能是压实处理内有显著的紧实层,侧根纵向生长受阻,改向横向阻力较小的耕层土壤生长所致。植物根系构型的变化能够清晰的反映土壤环境对植物根的生长胁迫程度,压实条件下大豆根系构型发生了显著变化。



黄色曲线:胚根和胚轴节点;绿色曲线:统一水平面两个侧根的张角;红色曲线:主根长度。
Yellow curve: Radicle and hypocotyl node; Green curve: Angle of two lateral roots in the same horizontal plane; Red curve: Length of main root.

图7 压实与未压实条件下文丰7号盛花期的根系构型

Fig. 7 Root structure of Wenfeng 7 under compacted and uncompacted conditions in R2

2.3.2 根系构型参数 为进一步分析压实后大豆根系性状的变化,本研究将初筛的10个大豆品种根系照片数据化,并统计主根长、根系最大宽度、根面积、根尖数、侧根数和侧根角度等参数,结果表明:压实处理对主根长具有显著降低作用,但其根系最大宽度、侧根角度和根面积却显著增加。根系的主根长、最大宽度、侧根角度和根面积在2017和2018年两个生产季表现基本一致。2017年各品种主根长均表现为:压实处理<未压实处理,2018年有6个品种在压实条件下主根长小于未压实处理。2017和2018年两个生产季内,80%品种在压实条件下,其根系最大宽度较未压实处理出现不同程度增加,90%的品种具有侧根角度压实较未压实处理呈现增大且其根面积较未压实处理显增加的现象。根系的根尖数和侧根数在2017和2018年两个生产季内

表现差异较大,而侧根角度在两个生产季表现基本一致。2017年有8个品种压实条件下根尖数降低,而2018年仅有4个品种根尖数在压实条件下降低。2017年各品种未压实处理平均侧根数是41,压实处理平均侧根数是35,有80%的品种压实后侧根数略有降低;但2018年70%的品种侧根数压实与未压实处理间无显著差异(表3)。

2.3.3 地下部根系生物量 2017和2018年两个生产季内,有70%的品种压实较未压实处理根干重略有增加或无显著差异(图8)。2017年未压实的根干重为0.85~2.17 g,平均为1.49 g;压实的根干重是1.37~2.25 g,平均为1.73 g。2018年根干重未压实处理为1.98~3.69 g,压实处理为1.92~3.57 g;压实处理与未压实处理间平均根干重无显著差异。

表 3 初筛耐压实大豆品种的根系构型参数
Table 3 Root configuration parameters of soybean varieties with compaction resistance

品种 Variety	主根长 Main root length/cm				最大宽度 Maximum width/mm			
	2017		2018		2017		2018	
	压实	未压实	压实	未压实	压实	未压实	压实	未压实
	Compaction	Uncompaction	Compaction	Uncompaction	Compaction	Uncompaction	Compaction	Uncompaction
上蔡二糙平顶式 Shangcaiercaopingdingshi	14.8 *	24.3	17.3 *	23.1	144 *	119	142	145
益都平顶黄 Yidupingdinghuang	19.1 *	23.5	18.5 *	22.1	109 *	100	177 *	161
文丰7号 Wenfeng 7	18.0 *	21.0	18.8 *	21.2	106	114	147 *	139
豫豆8号 Yudou 8	14.6 *	21.8	20.1	21.3	140 *	95	180 *	158
鲁豆11 Ludou 11	9.9 *	22.1	20.5	19.0	144	137	183 *	127
晋豆25 Jindou 25	19.5 *	24.9	24.5	23.1	133	158	165 *	127
冀豆12 Jidou 12	11.4 *	23.6	21.3	21.7	140 *	108	186 *	139
郑92116 Zheng 92116	12.2 *	26.6	21.1 *	23.9	121	130	135	128
菏豆13 Hedou 13	18.5 *	24.1	22.6 *	25.0	148 *	99	172 *	129
冀豆17 Jidou 17	18.8 *	21.0	20.0 *	22.5	151 *	90	202 *	144
平均值 Average	15.7 *	23.3	20.5 *	22.3	134 *	115	169 *	140

续表 3

品种 Variety	根面积 Root area/mm ²				根尖数 Apical number			
	2017		2018		2017		2018	
	压实	未压实	压实	未压实	压实	未压实	压实	未压实
	Compaction	Uncompaction	Compaction	Uncompaction	Compaction	Uncompaction	Compaction	Uncompaction
上蔡二糙平顶式 Shangcaiercaopingdingshi	3835 *	3187	4249	4405	397 *	505	442 *	464
益都平顶黄 Yidupingdinghuang	2893 *	2436	4363 *	3652	300 *	356	423	381
文丰7号 Wenfeng 7	3720 *	2156	5143 *	4353	365 *	456	461 *	533
豫豆8号 Yudou 8	3910 *	1973	5747 *	5292	329 *	474	586 *	752
鲁豆11 Ludou 11	3901 *	3620	6806 *	4515	465	425	693	550
晋豆25 Jindou 25	3207	3513	4848	4822	270 *	417	401 *	425
冀豆12 Jidou 12	3878 *	2626	5967 *	4313	347 *	388	543	407
郑92116 Zheng 92116	2594	3195	3994	4364	304 *	417	427	404
菏豆13 Hedou 13	3643 *	2613	5888 *	3862	301 *	370	514	408
冀豆17 Jidou 17	3506 *	2306	6439 *	3849	313	291	712	510
平均值 Average	3509 *	2762	5344 *	4343	339 *	410	520 *	483

续表 3

品种 Variety	侧根数 Lateral root number				侧根角度 Lateral root angle/°			
	2017		2018		2017		2018	
	压实	未压实	压实	未压实	压实	未压实	压实	未压实
	Compaction	Uncompaction	Compaction	Uncompaction	Compaction	Uncompaction	Compaction	Uncompaction
上蔡二糙平顶式 Shangcaiercaopingdingshi	36 *	41	37	35	45.7 *	37.7	45.2	44.1
益都平顶黄 Yidupingdinghuang	32 *	41	39	37	45.7	47.7	45.6 *	39.5
文丰 7 号 Wenfeng 7	32 *	55	44	43	51.6 *	42.1	36.6	39.4
豫豆 8 号 Yudou 8	40 *	44	49	47	61.3 *	42.7	47.1 *	44.7
鲁豆 11 Ludou 11	38 *	42	52	41	50.3 *	41.9	43.0 *	41.0
晋豆 25 Jindou 25	34 *	41	35	37	42.5 *	37.5	36.4 *	30.4
冀豆 12 Jidou 12	36 *	40	42	36	50.7 *	43.3	39.9 *	36.3
郑 92116 Zheng 92116	34 *	44	42	44	48.6 *	46.4	35.1 *	30.8
菏豆 13 Hedou 13	34	34	39	27	43.5 *	40.5	41.3	40.2
冀豆 17 Jidou 17	35	32	60	59	45.7 *	43.7	47.1 *	40.6
平均值 Average	35 *	41	44	41	48.5 *	42.3	41.7 *	38.7

加粗表示同一品种在压实条件下最大宽度、根面积、侧根角度高于未压实处理,主根长、根尖数、侧根数低于未压实处理;* :同一品种在压实条件下最大宽度、根面积、侧根角度、主根长、根尖数、侧根数与未压实处理间有显著差异($P<0.05$)。

Bold indicates that the maximum width, root area and lateral root angle of the same variety under compaction are higher than those underuncompacted treatment, and the main root length, root tip number and lateral root number under compaction are lower than those under uncompacted treatment; * indicates that there are significant differences between the maximum width, root area, lateral root angle, main root length, root tip number, lateral root number of compacted and uncompacted treatments of the same variety($P<0.05$).

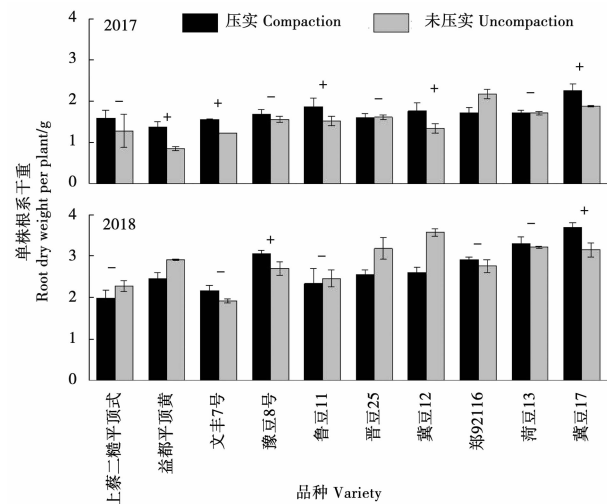


图 8 压实与未压实条件下初筛耐压实大豆品种的根系干重

Fig. 8 Dry weight of root system of soybean varieties with compaction resistance under compacted and uncompacted conditions

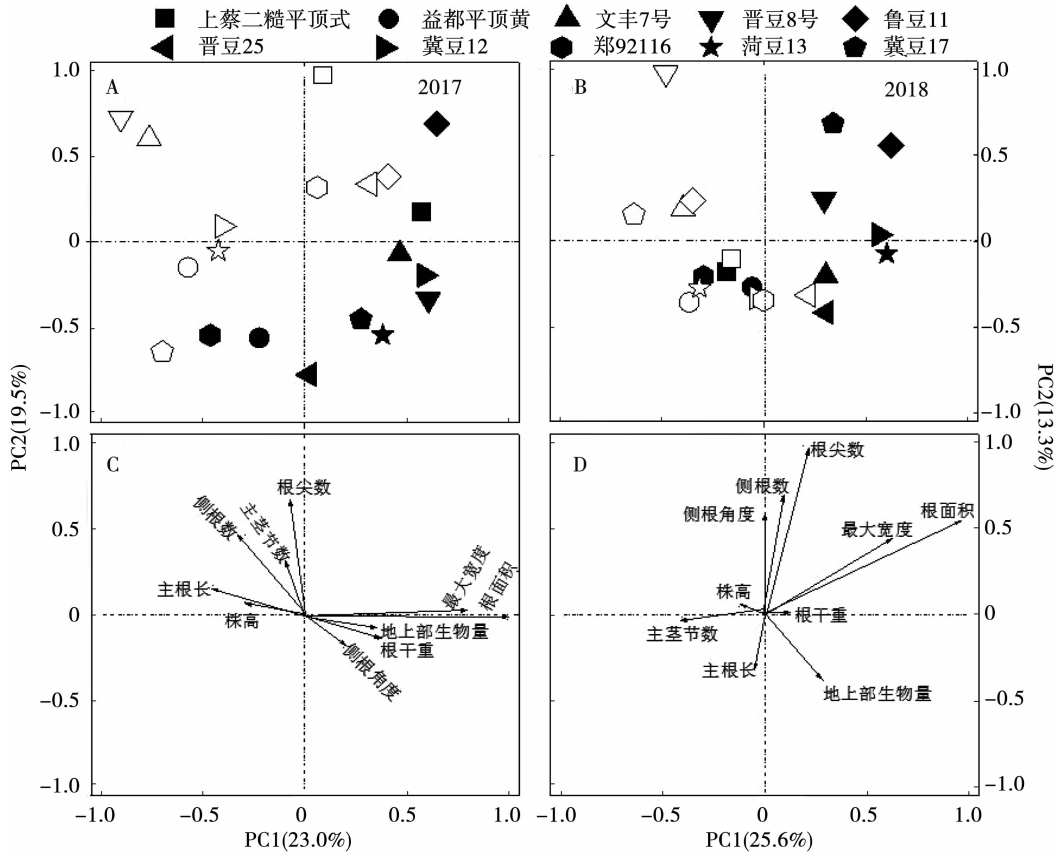
2.4 初筛耐压实大豆品种生物性状的分异特征

大豆耐压实能力是一个受多因素影响的、复杂的数量性状,且不同大豆品种的耐压实机制也不尽相同。2017 年在 PC1 (X 轴) 方向上差异显著的品种有冀豆 12、菏豆 13 和冀豆 17,在 PC2 (Y 轴) 方向上差异显著的品种有上蔡二糙平顶式、益都平顶黄、鲁豆 11、晋豆 25 和郑 92116,在 PC1 和 PC2 方向上均差异显著的品种有文丰 7 号和冀豆 8 号(图 9A)。2017 年度 PC1 方向上差异形成的因子主要有:根的最大宽度、根面积和主根长;PC2 方向上差异形成的因子主要有根尖数和侧根数(图 9B)。

2018 年在 PC1 方向上差异显著的品种仍是冀豆 12、菏豆 13 和冀豆 17,在 PC2 (Y 轴) 方向上差异显著的品种有文丰 7 号和鲁豆 11,在 PC1 和 PC2 方向上均差异显著的品种仅有冀豆 8 号(图 9C)。2018 年度 PC1 方向上差异形成的因子主要有:根的最大宽度、根面积和主茎节数;PC2 方向上差异形成的因子主要有根尖数、侧根数和侧根角度(图 9D)。

综合 2017 和 2018 年的数据,耐压实品种适应土壤机械压实环境而不减产的机制主要分为 2 类:(1)通过增加根系最大宽度、根面积,扩大根系水平生长空间,维持地下和地上部的生物量,这一类型

主要包括:冀豆 12、菏豆 13 和冀豆 17;(2)通过增加侧根的数量和根尖数,保障活性根系对土壤养分的吸收,维持地下部和地上部的生物量,这一类型主要包括:文丰 7 号、鲁豆 11 和冀豆 8 号。



空心图例为压实条件; 实心图例为未压实条件。
The hollow legend is the compaction condition; The solid legend is the uncompacted condition.

图 9 压实与未压实条件下各品种大豆生物性状主成分分析
Fig. 9 Principal component analysis of biological characteristics of soybean varieties under compaction and uncompacted conditions

3 讨论

3.1 耐压实品种对土壤压实的适应性

机械在大豆全程生产中发挥着重要作用^[1],随着黄淮海大豆全程机械化生产进程的推进,机械作业带来的土壤压实问题已逐步成为耕作、栽培和育种领域的新关注点。Botta 等^[24]研究发现,土壤压实是植物生长的胁迫因素之一,它会降低豆科植物的产量。在压实条件下土壤容重与豆科植物根、茎干重及种子产量均呈显著负相关^[25];但也有研究表明:在适度的机械压实条件下大豆基本无减产^[26-27]、甚至增产^[28]。本研究 2 年压实试验发现:模拟全程机械化生产的条件下,每年约有 80% 的品种地上部生物量不减少,并且这些品种中有 10 个品种连续 2 年对压实处理的反应一致,这一结果说明部分大豆品种对土壤机械压实具有一定的调节和适应性,这与张兴义等^[26]、Calonego 等^[27] 和 Sivara-

jan 等^[28] 研究结论一致。此外本研究还发现在这 10 个初步筛选的耐压实品种中有 60% 的品种是 1990 年以后育成的品种,这进一步说明近几十年育成的品种耐土壤机械压实的潜力较强。

3.2 耐压实品种的农艺性状

大豆的正常生长发育是地上部冠层的光合作用与地下部根系对水分、养分吸收能力相互协调的结果。土壤机械压实带来的水分和养分胁迫,改变大豆地上部和地下部的生物性状。Sivarajan 等^[28]发现在适度的机械压实条件下增产的大豆,发芽率增加、株高无显著变化。王彩洁等^[29]研究发现在不同生育期的干旱胁迫对大豆产生影响的部位不一样,苗期主要影响根长和根面积等地下部根系性状,而花期则影响茎粗及主茎节数等地上部生物性状。本研究中初步筛选的耐压实品种一致表现出植株矮化、茎粗加大、主茎节数不减的特征,由此保障了在压实条件下其地上部生物量和产量不减少。

3.3 耐压实品种根系的调节机制

作物在受到土壤环境胁迫时将通过调节根系生长量、构型以及生理活性来最大程度地利用土壤中的营养以保障其正常生长,大豆也不例外^[30-33],不同型号深耩机与传统翻耕的对比试验发现局部土壤紧实造成的根系生物量减少是大豆减产的主要原因。Calonego 等^[27]研究表明在免耕覆秸的条件下,适度的深耩及压实有利于大豆根系下扎和产量的稳定。本研究发现,初步筛选耐压实品种稳产的根系调节机制有:(1)通过增加根系最大宽度、根面积,扩大根系水平生长空间,维持地下和地上部的生物量;(2)通过增加侧根的数量和根尖数,保障活性根系对土壤养分的吸收,维持地下部和地上部的生物量。

综上所述,大豆的耐土壤机械压实能力是一个受诸多因素影响、复杂的数量性状,且不同大豆品种的耐压实机制也不尽相同。大豆育种的主要目标是实现高产、稳产,本研究模拟全程机械化生产的压实条件,初步筛选的 10 个品种不一定都具有较好的丰产性,但其在连续 2 年的试验中产量不减,说明其可能蕴藏着耐压的遗传因素,可为黄淮海大豆全程机械化生产提供种质参考。

4 结 论

本研究以稳产为目标,从黄淮海 20 世纪 30 年代以来种植面积较大的 25 个品种中,初步筛选出 10 个耐压的品种:上蔡二糙平顶式、益都平顶黄、文丰 7 号、豫豆 8 号、鲁豆 11、晋豆 25、冀豆 12、郑 92116、荷豆 13 和冀豆 17。这些耐压实品种在连续 2 年的压实试验中,表现出植株矮化,茎粗加大,主茎节数、地上部生物量和产量不减的特征。并且这些品种稳产的根系调节机制是通过增加根系最大宽度、根面积、扩大根系水平生长空间,或通过增加侧根的数量和根尖数,保障活性根系对土壤养分的吸收、维持地下部和地上部的生物量实现的。本研究系统地了解了压实条件下稳产大豆品种的地上部生物学特征及根系调控机制,为新时代机械化生产条件下的大豆育种提供数据支撑及理论依据。

参考文献

[1] 刘爱杰. 推进农业机械化发展农业现代化[J]. 北京农业, 2013(24): 185. (Liu A J. Advancing agricultural mechanization and developing agricultural modernization[J]. Beijing Agriculture, 2013(24): 185.)

[2] 于新诚. 农业机械化在农业现代化中的作用[J]. 时代农机, 2016(3):15,17. (Yu X C. The function of agricultural mechanization in the agricultural modernization[J]. Times Agricultural

Machinery, 2016 (3): 15,17.)

[3] 佚名. 2015 年河南省粮食生产机械化率将达 80% [J]. 乡村科技, 2012(10): 5. (Anon. Mechanization rate of grain production of Henan province will reach 80% in 2015[J]. Village Science and Technology, 2012 (10): 5.)

[4] 农业农村部. 到 2020 年, 河北省农作物耕种收综合机械化水平将升至 83% 以上[EB/OL]. [2019-09-19]. http://www.moa.gov.cn/xw/qg/201909/t20190919_6328310.htm. (Ministry of Agriculture and Rural Areas. By 2020, the comprehensive mechanization level of crop cultivation and harvesting in Hebei province will rise to more than 83% [EB/OL]. [2019-09-19]. http://www.moa.gov.cn/xw/qg/201909/t20190919_6328310.htm.)

[5] 杨晓娟,李春俭. 机械压实对土壤质量,作物生长,土壤生物及环境的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(7): 2008-2015. (Yang X J, Li C J. Effect of mechanical compaction on soil quality, crop growth, soil biology and environment[J]. China Agricultural Science, 2008, 41(7): 2008-2015.)

[6] 张兴义,隋跃宇. 土壤压实对农作物影响概述[J]. 农业机械学报, 2005, 36(10):161-164. (Zhang X Y, Sui Y Y. Overview of the Impact of soil compaction on crops[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36 (10): 161-164.)

[7] Batey T. Soil compaction and soil management a review[J]. Soil Use and Management, 2009, 25: 335-345.

[8] 张艳丽. 分析河南大豆产业发展现状及对策[J]. 农民致富之友, 2018(12):19. (Zhang Y L. Analysis of the current situation and countermeasures of Henan soybean industry development[J]. Friends of Farmers to Get Rich, 2018(12): 19.)

[9] 梁苏宁,沐森林,金诚谦,等. 黄淮海地区大豆生产机械化现状与发展趋势[J]. 农机化研究, 2015, 37(1): 261-264, 268. (Liang S N, Mu S L, Jin C Q, et al. Current situation and development trend of soybean production mechanization in Huanghuaihai area[J]. Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(1): 261-264, 268.)

[10] 冯飞燕,侯俊杰. 大豆生产全程机械化技术研究[J]. 农机化研究, 2020, 42(1): 261-264. (Feng F Y, Hou J J. Research on the whole process mechanization technology of soybean production[J]. Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(1): 261-264.

[11] 王辽卫. 新年度我国大豆进口或现 15 年来首降[N]. 粮油市场报,2018-05-12(A3). (Wang L W. China's soybean import in the new year or the first drop in recent 15 years [N]. Grain and Oil Market Report, 2018-05-12(A3).)

[12] 钟钰. 打好政策组合拳实现大豆产业振兴[N]. 粮油市场报, 2019-05-11(B1). (Zhong Y. Make good policy combination to realize the revitalization of soybean industry [N]. Grain and Oil Market Report, 2019-05-11 (B1).)

[13] 李孟霞,文国松,李永忠. 作物对土壤压实胁迫响应研究进展[J]. 山东农业科学, 2019, 51(1): 154-160, 167. (Li M X, Wen G S, Li Y Z. Research progress of crop response to soil compaction stress[J]. Shandong Agricultural Science, 2019, 51(1): 154-160, 167.)

[14] 任海红,马俊奎,刘学义,等. 山西省审定大豆品种主要农艺性状、产量及品质的演变分析[J]. 中国油料作物报, 2018, 40(6): 762-768. (Ren H H, Ma J K, Liu X Y, et al. Analysis

on the evolution of main agronomic characters, yield and quality of approved soybean varieties in Shanxi province[J]. Chinese Journal of Oil Crops, 2018, 40(6): 762-768.)

[15] 龚振平, 沈昌蒲, 赵福华. 大豆肥田机制的研究——Ⅱ. 常规技术条件下大豆根系动态[J]. 大豆科学, 2000, 19(4): 351-355. (Gong Z P, Shen C P, Zhao F H. Study on the mechanism of soybean fertilizer field Ⅱ. Soybean root dynamics under conventional technical conditions[J]. Soybean Science, 2000, 19(4): 351-355.)

[16] 金剑, 刘晓冰, 王光华. 不同熟期大豆 R4-R5 期冠层某些生理生态性状与产量的关系[J]. 中国农业科学, 2004, 37(9): 1293-1300. (Jin J, Liu X B, Wang G H. The relationship between some physiological and ecological characters of soybean canopy and yield at different ripening stages[J]. China Agricultural Science, 2004, 37(9): 1293-1300.)

[17] 裴占江, 李淑芹, 佟玉新, 等. 大豆生育期农艺性状与产量相关性研究[J]. 东北农业大学学报, 2007, 38(3): 299-303. (Pei Z J, Li S Q, Tong Y X, et al. Study on correlation between agronomic characters and yield in soybean growth period[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2007, 38(3): 299-303.)

[18] 王彩洁, 孙石, 金素娟, 等. 中国大豆主产区不同年代大面积种植品种的遗传多样性分析[J]. 作物学报, 2013, 39(11): 1917-1926. (Wang C J, Sun S, Jin S J, et al. Analysis of genetic diversity of large-area varieties planted in different years in major soybean producing areas of China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(11): 1917-1926.)

[19] 李亮, 陈宗金, 王瑞东, 等. 山东东平种植大豆新品种的农艺性状与产量[J]. 中国农技推广, 2019, 35(6): 30-32. (Li L, Chen Z J, Wang R D, et al. Agronomic characters and yield of new soybean varieties planted in Dongping, Shandong[J]. China Agricultural Technology Promotion, 2019, 35(6): 30-32.)

[20] Chantal A, Marie, Larry M, et al. Shovelomics root traits assessed on the EURoot maize panel are highly heritable across environments but show low genotype-by-nitrogen interaction[J]. Euphytica, 2019, 215(10): 173.

[21] Arifuzzaman M, Oladzadabbasabadi A, McClean P, et al. Shovelomics for phenotyping root architectural traits of rapeseed/canola (*Brassica napus* L.) and genome-wide association mapping[J]. Molecular Genetics and Genomics, 2019, 294(4): 3.

[22] 王宪良, 王庆杰, 李洪文, 等. 免耕条件下轮胎压实对土壤物理特性和作物根系的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 168-175. (Wang X L, Wang Q J, Li H W, et al. Effect of tire compaction on soil physical properties and crop root system under no tillage condition[J]. Journal of agricultural machinery, 2017, 48(6): 168-175.)

[23] Lynch J P. Root architecture and plant productivity[J]. Plant Physiol, 1995, 109: 7-13.

[24] Botta G F, Tolon-Becerra A, Lastra-Bravo X, et al. Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max* L.) yields in Argentinean pampas[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 110: 167-174.

[25] 南志标, 赵红洋, 聂斌. 黄土高原土壤紧实度对蚕豆生长的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(8): 935-938. (Nan Z B, Zhao H Y, Nie B. Effect of soil compaction on broad bean growth in the Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(8): 935-938.)

[26] 张兴义, 孟凯, 隋跃宇. 黑土区机械对玉米和大豆地压实作用的研究[J]. 耕作栽培, 2001(5): 13-14. (Zhang X Y, Meng K, Sui Y Y. Study on the compaction effect of machinery on corn and soybean fields in black soil area[J]. Tillage and Cultivation, 2001(5): 13-14.)

[27] Calonego J C, Raphael J P A, Rigon J P G, et al. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling[J]. European Journal of Agronomy, 2017, 85: 31-37.

[28] Sivarajan S, Maharlooei M, Bajwa S G, et al. Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 175: 234-243.

[29] 王彩洁, 李伟, 徐冉, 等. 黄淮海地区主栽大豆品种抗旱性比较[J]. 山东农业科学, 2018, 50(1): 67-70. (Wang C J, Li W, Xu R, et al. Comparison of drought resistance of main soybean varieties in Huang Huai Hai area[J]. Shandong Agricultural Science, 2018, 50(1): 67-70.)

[30] Fernández F G, Brouder S M, Volenec J J, et al. Soybean shoot and root response to localized water and potassium in a split-pot study[J]. Plant and Soil, 2011, 344(1-2): 197-212.

[31] 孟凡钢, 李羽, 张伟, 等. 不同生育时期干旱胁迫对大豆根系分布和农艺性状的影响[J]. 大豆科学, 2016, 35(6): 943-946. (Meng F G, Li Y, Zhang W, et al. Effects of drought stress on root distribution and agronomic characters of soybean in different growth periods [J]. Soybean Science, 2016, 35(6): 943-946.)

[32] Wibowo F, Armaniar. Physiological performance of the soybean crosses in salinity stress[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 122(1): 012029.

[33] Botta G F, Tolon-Becerra A, Lastra-Bravo X, et al. Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max* L.) yields in Argentinean pampas[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 110(1): 167-174.