



黄土塬区施肥模式对大豆根系形态构建及产量形成的调控作用

王小林¹, 张盼盼¹, 张 静¹, 纪晓玲¹, 张 雄¹, 梁鸡保²

(1. 榆林学院 生命科学学院, 陕西 榆林 719000; 2. 神木市农业技术推广中心, 陕西 神木 719300)

摘 要:为通过黄土塬区大豆施肥模式革新, 探明旱地大豆根系形态构建、生物量分配与产量形成的关系, 以实现黄土丘陵旱区大豆优质、高产、高效栽培, 本研究以汾豆 78 为材料, 设置 CK(露地, $N-30\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、N(覆膜, $N-30\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、NPK(覆膜, $N-60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; $P_2O_5-30\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; $K_2O-30\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、2NPK(覆膜, $N-90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; $P_2O_5-45\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; $K_2O-30\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、NPK-O(覆膜, $N-90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; $P_2O_5-45\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; $K_2O-30\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 有机营养土 $-2.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)、NPK-B(覆膜, $N-60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; $P_2O_5-30\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; $K_2O-30\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 微生物菌肥 $-10\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)6 个处理, 采用随机区组试验设计, 分析不同肥料配比处理下大豆根冠发育和产量形成的关联机制。结果表明: (1) 化肥优化处理下大豆产量平均增加 27.4%, NPK-O 处理产量显著增加 53.3%, NPK-B 处理增产 11.1%, 连续化学肥料配施造成 2.1% 左右的产量损失; (2) NPK-O 和 NPK-B 处理收获指数显著提升 7.0% ~ 22.2%, 根冠比降低 3.3% ~ 14.1%, 有效预防根系冗余生长, 促进籽粒碳水化合物高效积累; (3) NPK-O 和 NPK-B 处理高效协调根系形态构建, 降低根系干物质无效积累, 根系表面积密度和根长密度分别显著增加 17.7% ~ 21.6% 和 30.7% ~ 36.7%, 优化根系空间布局, 激发根系功能, 为增产增效建立合理可靠的生物基础。总之, 配施生物菌肥和有机肥可以通过调控根系细化分化能力和延伸生长, 提高大豆环境适应性和根系水肥获取能力, 优化根冠生物量积累与分配, 实现大豆稳增产, 具有良好的农业生态经济效益。

关键词:黄土塬区; 旱地大豆; 施肥模式; 根系形态构建; 生物量分配

Regulating Effects of Fertilizing Models on Root Morphological Restructure and Yield Formation of Soybean in Loess Arid Region of China

WANG Xiao-lin¹, ZHANG Pan-pan¹, ZHANG Jing¹, JI Xiao-ling¹, ZHANG Xiong¹, LIANG Ji-bao²

(1. College of Life Sciences, Yulin University, Yulin 719000, China; 2. Agro-technical Extension and Service Center of Shenmu City, Yulin Shenmu 719300, China)

Abstract: In order to explore the relationship between root system construction, biomass distribution and yield formation of dry land soybean through the innovation of soybean fertilization mode in Loess Plateau, so as to realize high-quality, high-yield and high-efficiency cultivation of soybean in Loess Hilly and arid area, we took Fendou 78 as the research object, six treatments arranged as CK (bare land, $N-30\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), N (film mulched, $N-30\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), NPK (film mulched, $N-60\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; $P_2O_5-30\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; $K_2O-30\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), 2NPK (film mulched, $N-90\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; $P_2O_5-45\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; $K_2O-30\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), NPK-O (film mulched, $N-90\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; $P_2O_5-45\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; $K_2O-30\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; optimized organic soil $-2.5\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) and NPK-B (film mulched, $N-60\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; $P_2O_5-30\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; $K_2O-30\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; microbial fertilizer $-10\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), with randomized block design and repeated 3 times. The relationship between soybean root-shoot development and yield formation was analyzed under different fertilizer strategies. The results showed that: (1) Optimized chemical fertilizer strategies improved soybean yield to a significant increase level by 27.4%, but along with the 2.1% yield loss due to chemical fertilizer application amount increase. Inversely, NPK-O and NPK-B significantly promoted the soybean yield by 53.3% and 11.1%. (2) The harvest index (HI) of soybean increased by 7.0% - 22.2% and root to shoot rate (RSR) decreased by 3.3% - 14.1% under NPK-O and NPK-B, which provided an efficient way for preventing the root superfluous growth, and then motivated the carbohydrate simulating to soybean seeds. (3) Root dry weight was astricted but root length and surface area improved by 17.7% - 21.6% and 30.7% - 36.7% respectively under NPK-O and NPK-B, compared with that in only chemical NPK application, indicated that root spatial arrangement was optimized, and then stimulated root function and established a foundation for the seeds yield and water use efficiency increase in dryland soybean. Finally, additional organic and microbial fertilizer input improved root water-nutrients uptaking and soil environmental adaptation in soybean, based on the root thinner and longer in the vertial soil layers, all the regulations in root and shoot biomass stimulation were beneficial to soybean yield increase stably, and to a favourable in agricultural ecolotical-economical benefits on the Loess Plateau.

Keywords: Loess arid region; Dryland soybean cultivation; Fertilizer models; Root construction; Biomass distribution

收稿日期: 2021-05-22

基金项目: 陕西省榆林市科技计划 (2019-106-2); 陕西省科技厅重点项目 (2021JZ-55); 国家自然科学基金 (41967013); 榆林学院高层次人才科研启动金 (17GK20); 陕西省科技厅陕北旱地农业节水综合创新团队 (2013KCT-29)。

第一作者: 王小林 (1983—), 男, 博士, 副教授, 主要从事作物根土界面水肥高效利用研究。E-mail: wangxl8304@163.com。

通讯作者: 张雄 (1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事旱区农业节水工程与技术研究。E-mail: yulinzhang2007@126.com。

黄土塬区地貌沟壑交错分布,塬、峁地形构成相对平整的旱作农田基本格局,是我国优质大豆优势栽培区域之一,受到干旱缺水和土壤贫瘠退化的影响,始终难以获得稳定高产和资源高效利用,而科学的肥料配比在提高大豆产量的同时,可有效缓解水土流失和土壤退化,保障黄土旱区农业可持续发展^[1]。土壤水分和矿质营养吸收主要依靠作物根系系统,根系形态性状及空间分布对植物的生长和发育具有重要作用^[2]。作物生物量的积累和再分配是作物适应环境和产量形成的关键环节,根系功能和生物量分配对于作物产量提升存在显著的调控效应^[3]。大豆是根系分布灵活、抗性较强的具有代表性的豆科固氮作物,良好的土壤水肥状况是激发根系自我适应和强化根系生理功能的重要环境基础^[4]。农田土壤增施氮肥可显著增加大豆根系长度、根系表面积、根系干重和根系体积^[5-6],单施磷肥可增加根系干重,但对大豆根系长度和根系表面积有抑制作用,径向生长优势是纵向生长受限的适应性调控^[7];同时增施氮、磷肥通过调控土壤养分平衡和有效性,促进作物根系形态优化构建和分布^[8]。长期过量的化肥投入,打破了土壤生态平衡,导致土壤微生物多样性锐减,土壤功能性微生物群落丧失严重^[9],通过增施微生物菌肥改善土壤微生物多样性和活性,激活土壤矿化养分有效性,可降低化肥投入、改善土壤质量,激发旱地土壤可持续生产力^[10-11]。综上所述,增施化肥、配施有机肥和微生物有机肥可以弥补土壤自然肥力中养分有效性和全面性损失,但需要不同类型肥料合理配施才可以促进土壤养分的有效利用,从而实现作物高产和资源高效利用。

黄土塬区通过土壤肥力和环境动态调节,激发大豆形态发育和产量形成的正效应,综合调动大豆形态构建、根系分布和籽粒碳水化合物积累的互作机制^[12],可以实现大豆增产增效的双赢。作物根系构建和地上部发育密切关联又相互影响,二者与作物产量之间存在一定数量关系^[13]。适当增施氮肥可有效促进作物地上部快速发育,而充足的氮素养分对根系干物质积累无显著促进作用,进而引起根冠比降低;适当增施磷肥可以促进根系形态优化构建,调控根系生理功能,提升根冠生物量分配比例^[14]。有研究指出,随生育期延伸,大豆根系与冠层发育相关性逐渐增强,进入大豆盛花期根系发育迅速、根系功能

增强,满足地上部大量的养分和水分需求,形成坚固的根系、冠层互作关联^[15]。进入大豆鼓粒期,根系性状与地上部生物量积累、分配建立显著相关性^[16],长期的生物量动态积累与分配权衡建立起大豆营养生长与生殖生长的关联机制^[17]。总之,作物最终产量形成受到不同土壤环境下根系、冠层的生物学权衡机制的影响,根系通过增加根系长度和根表面积有效摄取土壤中的有效成分,将营养物质输送到地上部功能器官进行有效积累和再分配,为产量形成奠定物质基础^[18]。因此,通过优化施肥模式调节土壤养分环境,可以实现根系形态分布和功能的有效调控,从而优化作物生物量积累、分配,实现提质增效的目标^[19]。黄土塬区降雨量偏少且时空分布不均,季节性干旱常造成作物发育不良,根系功能和冠层发育受到干扰,产量形成过程受阻,造成年际间产量波动较大、水肥利用效率低的综合土壤资源问题^[19-20]。本研究结合区域气候环境特点,通过优化肥料配施模式,综合考虑土壤质量提升、大豆根系构型优化和产量形成、资源利用效率同步改善的可持续农业管理技术,以根系形态构建和生物量分配为切入点,明确施肥策略对于大豆根系形态发育、生物量分配和产量形成的关系,为大豆提质增效及土壤质量提升提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2018和2019年在陕西黄土高原丘陵沟壑区的榆林市横山区横山镇石窑则村典型旱地农田进行,位于108°56'E~110°02'E、37°22'N~38°14'N,播种时间为每年5月8—10日,收获时间为10月10—13日。海拔1232 m,平均气温9.6℃。无霜期约146 d,年降水量约446.8 mm,70%以上集中在7—9月,年蒸发量1211 mm,年日照时数2644 h。2018年总降雨量520.2 mm,较10年均值显著增加18.9%,2019年总降雨量421.2 mm,较10年均值降低3.7%,且2018年7—9月降雨量较10年均值增加40.1%,2019年度降雨量增加6.1%(图1)。试验田土壤为黄绵土,有机质含量3.2 g·kg⁻¹,全氮0.3 g·kg⁻¹,碱解氮18.9 mg·kg⁻¹,速效磷6.2 mg·kg⁻¹,速效钾66.0 mg·kg⁻¹,常规田间管理。

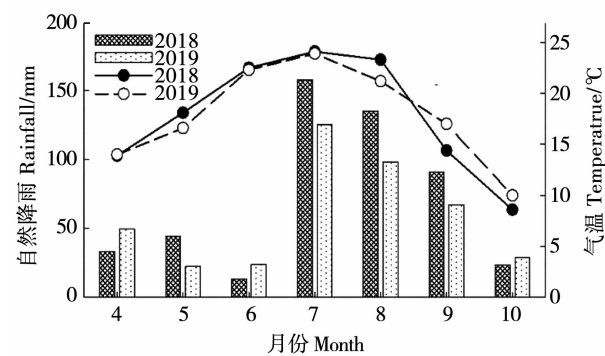


图1 大豆生育期降雨量及气温的动态变化
Fig. 1 The precipitation and temperature during the soybean growing stage

表1 肥料配施模式试验设计

Table 1 The experimental design of fertilizer combined models

处理 Treatment	覆膜 Film mulched	N/ (kg·hm ⁻²)	P ₂ O ₅ / (kg·hm ⁻²)	K ₂ O/ (kg·hm ⁻²)	有机肥 Organic manure/(t·hm ⁻²)	微生物菌肥 Bacterium fertilizer/(kg·hm ⁻²)
CK		30				
N	√	30				
NPK	√	60	30	30		
2NPK	√	90	45	30		
NPK-O	√	90	45	30	2	
NPK-B	√	60	30	30		10

1.3 测定项目与方法

1.3.1 根系指标 分别在大豆盛花期和成熟期采集大豆根系土样(长、宽、深度分别为12.5,12.5和30.0 cm),每个小区选择植株3棵,10 cm深度分层取样,用记号袋将采集到的根系按照编号装袋封存,4℃冰箱保存。测定时先用蒸馏水冲洗干净,然后将根系无重叠无交叉的放置在透明塑料片上,用根系扫描仪扫描根,用Win RHIZO软件分析获得根长、根系表面积、根系体积,最后在烘箱中将根系烘干,测定根系干重(RDW)。

1.3.2 地上部生物量 在大豆成熟期(10月13日)采集大豆整株,每个小区随机选择大豆植株3株,标记后带回实验室进行器官生物量分配测定,分别将营养器官(茎叶荚)和籽粒手工分离装袋,分别烘干,统计冠层生物量和籽粒干重,计算根冠比和收获指数:根冠比(RSR/%)=根系干重/冠层干重×100;收获指数(HI/%)=地上部干重/根系干重×100。

1.2 试验设计

施肥策略及试验设计方案详见表1,试验材料选用大豆品种汾豆78号,由山西省农业科学院利用晋豆23与晋豆29号杂交选育而成,2010年通过国家作物品种审定委员会审定(审定编号:2010012),抗性较强、稳定性较好,适宜我国北方旱地栽培种植。有机肥为山东太然生物工程有限公司的有机质土,有机质含量≥45%;微生物菌肥为山东绿陇生物科技有限公司的微生物菌剂,有效活菌≥200亿·g⁻¹,有机质含量70%。试验小区面积20 m²,4 m×5 m,株距25 cm,行距50 cm,大豆膜侧起低垄,垄底宽40 cm,垄高8~10 cm,地膜两侧5 cm处精确播种,每处理重复3次,共计18个小区。

1.3.3 大豆产量及其构成因素 在大豆成熟期,每个小区取2 m²大豆全部植株进行考种、测产,分别计算单株荚数、单荚粒数、百粒重,求其平均值,计算出小区产量,换算成单位面积产量。

1.4 数据分析

采用Excel 2010和SPSS 19.0软件进行单因素方差分析(P<0.05)和相关性分析,使用Sigma plot 12.5软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥模式对大豆根系形态构建的影响

2.1.1 对根系长度和根系表面积的差异性调节 大豆根系长度(RL)及根系表面积(RSA)对于施肥模式的响应差异较大,RL在化肥配施处理中较大,而RSA在增施有机肥和微生物菌肥处理提升明显,盛花期RSA与RL比值偏大,成熟期RL保持较高水平,明显满足生育期的水分吸收功能。盛花期,NPK-B中RL显著增加15.1%,根系体积增加15.1%;化肥处理NPK、

2NPK 中 RL 显著降低 18.1%;NPK-O 处理除 RL 降低 8.0%,RSA 显著增加 8.9%(图 2)。施用化肥 RL、RSA 明显降低,而配施生物菌肥和有机肥显著抵消化肥限制作用,促进根系细根分化和延长生长。

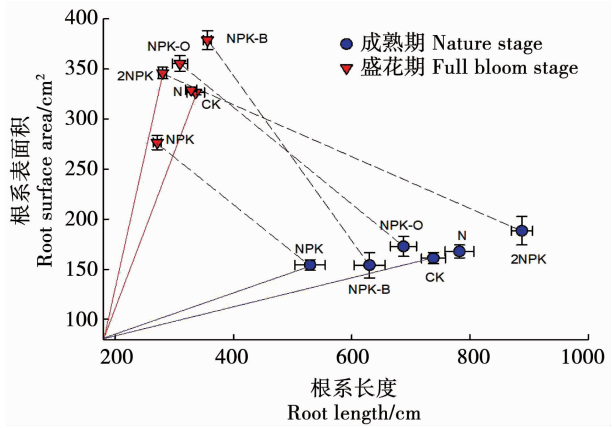


图 2 根系长度和根系表面对施肥模式的响应

Fig. 2 The responses of soybean root length and root surface area to the fertilizer models

2.1.2 对大豆盛花期根长密度的影响 施肥模式具有显著调控大豆根长密度(RLD)的效能,且施肥策略显著降低大豆 RLD,平均降低 17.8%,化肥配施处理 RLD 降低 36.9%,降幅度最大。对比 2NPK 配施模式,NPK 配施 RLD 增幅为 28.6%~55.3%,NPK-O 处理 RLD 增加 30.7%,NPK-B 处理 RLD 增加 36.7%(图 3)。化肥高浓度配施阻碍单位体积根系长的增加,增施有机肥和微生物菌肥可有效协调根系长度的空间分布,增强根系均匀性。

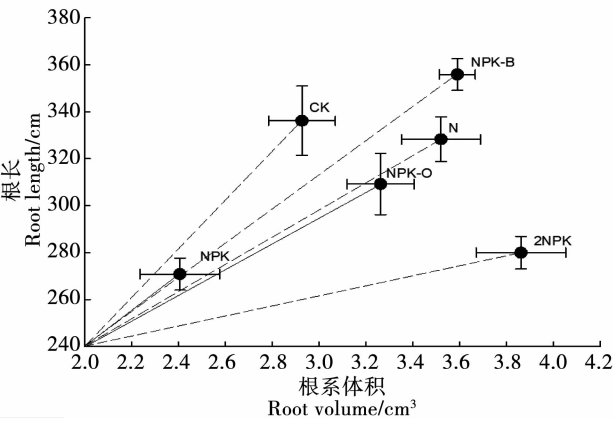


图 3 施肥模式对大豆盛花期根长密度的影响

Fig. 3 The effects of fertilizer models on the soybean RLD at full bloom stage

2.1.3 对大豆盛花期根系表面积密度的影响 大豆根系表面积密度(RSD)对于施肥模式具有明显的适应性和自我调节能力,配施微生物菌肥和有机

肥较化肥配施模式显著增加大豆 RSD 39.3%。较对照而言,2NPK 处理 RSD 显著降低 19.7%,其次为 N 处理 RSD 降低 16.2%;化肥配施微生物菌肥和有机肥有效缓解根系横向发育,提高了大豆 RSD,相对 2NPK 而言,增施有机肥和微生物菌肥 RSD 提升达 17.7%~21.6%,缓解化肥拮抗作用和资源浪费(图 4)。

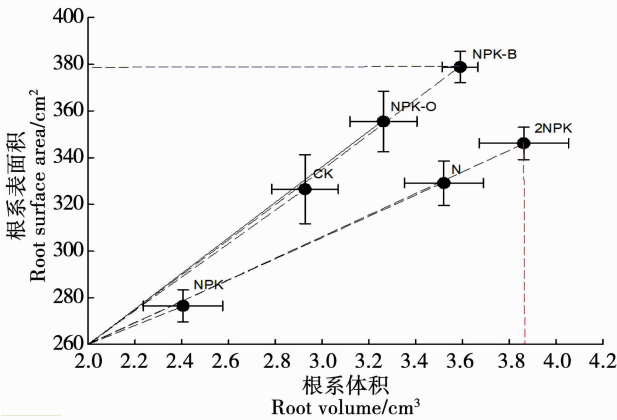


图 4 不同肥料对比对大豆盛花期根系表面积密度的影响

Fig. 4 The effects of fertilizer models on the soybean RSD at full bloom stage

2.1.4 对大豆成熟期根系干重的影响 根系干重(RDW)反应根系功能和物质积累能力,施肥模式具有明显的根系生物量调控作用(图 5)。NPK-O 处理 RDW 显著增加 10.7%,2NPK 处理 RDW 增加 7.8%;NPK 配施 RDW 降低 6.3%;微生物菌肥和有机肥配施可有效提升根系干物质在土壤空间的量化分布;化肥配施根系干物质空间分布较小,不利于根系发育和功能发挥。

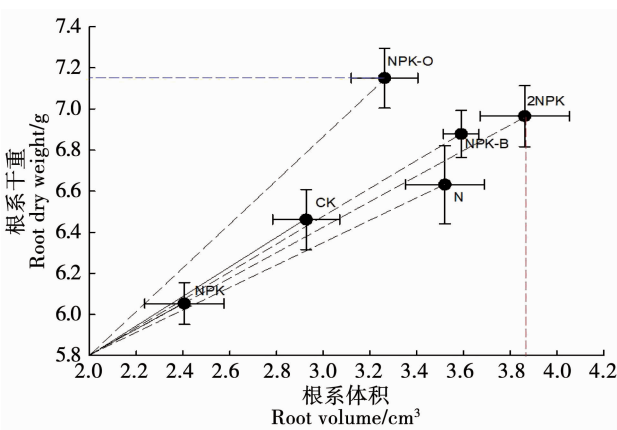


图 5 不同肥料对比对成熟期大豆根系干重空间分布的影响

Fig. 5 The effects of fertilizer models on the spatial distribution of soybean root dry weight at mature stage

2.2 不同施肥模式对大豆器官生物量分配的影响

2.2.1 对大豆成熟期根冠比的影响 大豆根系干重、冠层干重受到生育期降雨和施肥模式的双重影响,适当干旱激发大豆根系、冠层干物质积累能力,提升植株总体干物质的积累和分配。干旱年份根系干重显著增加,地上部干物质积累量较大,但根系干重增加幅度略低于地上部干物质,总体根冠比(RSR)呈下降趋势,N和NPK-B处理降低幅度较大,分别为14.1%和12.0%,配施有机肥NPK-O根冠比增加3.3%(图6)。湿润年份,根冠比较大,但根系、冠层生物总量偏低,根系干重相对增量高于地上部增量。总体表现为配施微生物菌肥和有机肥有利于根系生物量积累,为根系功能提供物质基础。

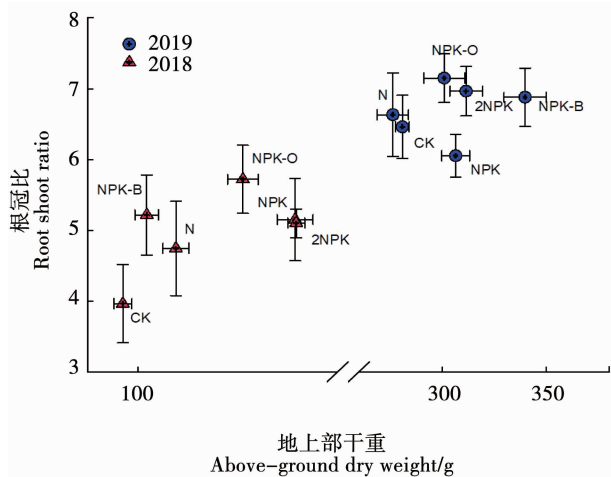
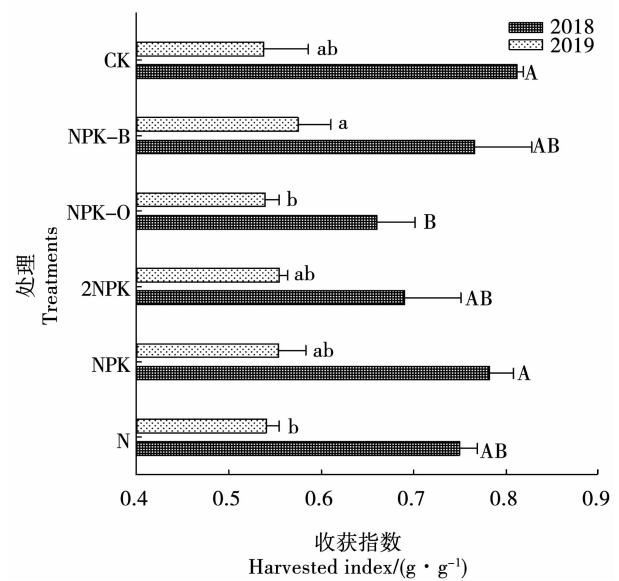


图6 肥料配比模式对大豆成熟期根冠比的影响

Fig.6 The effects of fertilizer models on the soybean root shoot ratio of mature stage

2.2.2 对大豆成熟期收获指数的影响 大豆收获指数(HI)受到年份降雨量的显著影响,丰水年(2018年)HI较欠水年(2019年)显著增加22.5%;施肥策略具有明显提升大豆HI的生物学潜力。干旱年份,2NPK、NPK-O处理HI增加不显著;N、NPK和NPK-B处理HI显著增加17.1%、22.2%和19.6%;丰水年HI增加不明显,但NPK-O处理的HI依然增加,幅度较高为6.9%,具有较好提升产量的潜力(图7)。



不同大写字母表示2018年度处理间差异显著;不同小写字母表示2019年度处理间差异显著。

Different capital indicate significant differences between treatments in 2018; Different lowercase indicate significant differences between treatments in 2019.

图7 不同肥料比对大豆成熟期收获指数的影响

Fig.7 The effects of different fertilizer model on the HI at soybean mature stage

2.3 不同施肥模式对大豆产量的影响

由表2可知,施肥模式对大豆产量形成具有不同程度的影响。不同施肥策略下大豆单株荚数NPK-O显著增加,N、NPK、2NPK次之,配施微生物菌肥单株荚数较小,N、NPK、2NPK、NPK-O和NPK-B单株荚数分别较CK增长41.8%、26.1%、21.0%、24.8%和9.8%。单荚粒数随施肥水平变化具有明显差异,化肥优化配施增加幅度较大,有机肥、微生物菌肥配施增幅明显,具有增产潜力。大豆百粒重随粒数增加而降低,其中NPK-O百粒重较CK增加0.3%,其他处理较CK分别减少7.7%、10.4%、12.5%和8.4%,粒数与百粒重之间存在明显的生物学权衡。化肥优化配施处理下大豆产量较CK平均增加27.4%,NPK-O处理产量显著增加53.3%,NPK-B处理增产11.1%,化肥配施比例对产量的贡献随配施量减小而减小,平均降低幅度约为2.1%,化肥优化配施增产潜力受限,提升土壤有机质和微生物活性具有增产增效的正效应。

表 2 施肥模式对大豆产量形成的影响

Table 2 The effects of fertilizer models on soybean yield formation

处理	单株荚数	单荚粒数	百粒重	产量
Treatment	Pods number per plant	Seeds number per pod	100-seed weight/g	Yield/(kg·hm ⁻²)
N	98.67 ± 7.17 ab	2.03 ± 0.01 a	21.58 ± 0.46 ab	3089.20 ± 280.33 ab
NPK	94.67 ± 9.39 ab	2.07 ± 0.08 a	20.97 ± 1.46 ab	2940.87 ± 386.23 ab
2NPK	97.67 ± 13.31 ab	2.06 ± 0.05 a	20.47 ± 0.46 b	2939.92 ± 409.06 ab
NPK-O	111.00 ± 12.77 a	2.02 ± 0.14 a	23.46 ± 1.77 a	3690.55 ± 324.65 a
NPK-B	86.00 ± 3.06 b	2.04 ± 0.04 a	21.43 ± 0.42 ab	2674.07 ± 94.27 b
CK	78.33 ± 6.33 b	1.86 ± 0.04 a	23.39 ± 2.52 a	2407.57 ± 227.93 b

不同字母表示不同处理在 $P < 0.05$ 水平上差异不显著。
The different letter indicate the significant differences among the six treatments ($P < 0.05$).

3 讨论

非生物胁迫常造成旱区作物发育不良和产量骤降等问题^[21-22]。生殖生长期是作物产量形成的关键时期,通过土壤环境调控激发作物增产增效潜力,而关键生育期的根系形态和产量构成因子是环境调控效果的综合反映^[23]。大豆是黄土地重要的环境友好型经济作物,其固氮作用和较好的抗旱性成为区域农业作物选择的重要依据^[24]。研究大豆根系性状特征、产量构成规律可以深入了解施肥模式对于土壤环境、作物根系构建、地上部和产量的调控作用,对于抗病及高产高效大豆栽培具有现实意义^[13, 25]。本研究通过化肥(NPK)与有机肥、微生物菌肥配施,调控根际土壤养分和微生物环境,激发大豆增产增效的生物学潜力和稳定性。优化化肥配比可实现大豆产量 27.4% 增幅,但存在增量减效问题;化肥有机肥配施产量显著增加 53.3%,增施微生物菌肥可增产 11.1%,通过提升土壤有机质和微生物活性具有增产增效的可持续正效应。

土壤调控手段具有显著的作物生长发育和生物量分配调控效应,收获指数(HI)和根冠比(RSR)常作为作物响应环境变化的关键指标。本研究表明,降雨充足时大豆 HI 显著增加 22.5%,化肥优化配施和微生物菌肥可显著增加 HI,配施有机肥 HI 增加不显著,充分说明土壤营养调控对大豆营养生长和生殖发育具有良好的调控作用,化肥和微生物菌肥促进籽粒干重增加幅度较大,有机肥对于籽粒和茎叶具有同等促进效应^[26]。根、茎、叶生物量分配是作物光合产物积累、转化的基础^[14, 25]。配施微生物菌肥可有效调控大豆根系形态发育,根系长度

和根系表面积较对照增加 8.9% ~ 15.1%。较低水平化肥 NPK 优化配施显著增加根长密度(RLD) 28.6% ~ 55.3%,增施有机肥和生物菌肥实现 RLD 30.7% ~ 36.7% 的显著增加,根系空间分布得到较好的调控,根系长度对于土壤养分环境变化更加敏感。根系表面积与土壤界面水肥有效性密切相关,增施有机肥和生物菌肥显著增加根系表面积密度(RSD) 17.7% ~ 21.6%;相对于 NPK 化肥处理,有机肥、微生物菌肥可提升 RSD,有效缓解土壤化学养分过剩产生的拮抗作用和资源浪费。化肥配施有机肥促进大豆根系生物量积累,使土壤微环境变化,具有显著的根系调控作用^[27-28]。施肥模式优化可以显著增强土壤养分活力,充分调动土壤水肥耦合效应,改善作物根系生长环境^[29]。施用微生物菌肥下大豆根系更发达,根系吸收水分和营养物质能力显著增强^[30-31]。化肥与有机肥长期配合使用,可显著增加土壤活性碳组分和总有机碳含量,有机肥中的碳源施入有利于增加土壤固碳能力,增强土壤微生物活性^[32],强化土壤环境敏感性、水分和养分有效性^[33-34]。综上所述,化肥、有机肥和生物菌肥合理配施可通过改善根系生长环境,协调根系空间布局和形态构建,优化碳水化合物合理积累、转运与分配,实现大豆产量稳定及高效提升,为旱地作物高产高效绿色发展建立良好的理论基础。

4 结论

化肥优化增施、配施有机质和生物菌肥可通过改善土壤养分有效性调控大豆根系形态发育,高效发挥根系功能,协调根冠生物量分配,实现良好的增产增效作用。化肥配施有机肥、生物菌肥通过优

化单株生殖器官物质转移、积累,平衡光合产物的合理分配,可显著增加大豆产量 11.1% ~ 53.3%。化肥与有机肥、生物菌肥配施具有良好的生物量分配协调作用,可实现收获指数 7.0% ~ 22.2% 的增量和根冠比 3.3% ~ 14.1% 的显著降低,预防根系冗余生长和促进籽粒碳水化合物高效积累。化肥、有机肥和生物菌肥合理配施,高效协调根系形态构建,通过降低根系碳水化合物无效积累,促进根系细化和延伸生长,根系表面积密度和根长密度显著增加 17.7% ~ 21.6% 和 30.7% ~ 36.7%,优化根系空间布局,激发根系功能,为增产增效建立合理可靠的生物基础。

参考文献

[1] 魏文良,刘路,仇恒浩. 有机无机肥配施对我国主要粮食作物产量和氮肥利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(8): 1384-1394. (Wei W L, Liu L, Qiu H H. Effects of different organic resources application combined with chemical fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of main grain crops in China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26 (8): 1384-1394.)

[2] 王聪,章建新. 滴水量对新大豆 27 号根系生长及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(5): 169-174,185. (Wang C, Zhang J X. Effects of drip irrigation amount on root growth and yield of soybean 27 [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(5): 169-174,185.)

[3] Haigler C H, Ivanova Datcheva M, Hogan P S, et al. Carbon partitioning to cellulose synthesis[J]. Plant Molecular Biology, 2001, 47(1/2): 29-51.)

[4] 李盛有,孙旭刚,王昌陵,等. 不同嫁接方式下大豆对干旱胁迫的响应[J]. 中国油料作物学报, 2020, 42(4): 632-639. (Li S Y, Sun X G, Wang C L, et al. Soybean response to drought stress under different grafting patterns[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2020, 42(4): 632-639.)

[5] 高阳,章建新,楚光红,等. 不同施氮量下春大豆根系生长与花荚形成的关系[J]. 吉林农业大学学报, 2018, 40(3): 258-263. (Gao Y, Zhang J X, Chu G H, et al. Relationship between spring soybean root growth and flower pod formation under different nitrogen application rates [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2018, 40(3): 258-263.)

[6] Hinson K. Nodulation responses from nitrogen applied to soybean half root system[J]. Agronomy Journal, 1975, 67: 799-804.

[7] Kuang R B, Liao H, Yan X L, et al. Phosphorus and nitrogen interactions in field grown soybean as related to genetic attributes of root morphological and nodular traits[J]. Journal of Integrative

Plant Biology, 2005, 47(5): 224-228.

[8] 李蕊,杨越,李彦生,等. 基于玉米-大豆轮作的不同施肥体系对大豆开花后根系形态及产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(1): 64-73. (Li R, Yang Y, Li Y S, et al. Effects of different fertilization systems on characteristics of roots after flowering and yield in soybean based on corn-soybean rotation[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(1): 64-73.)

[9] 朱宝国,于忠和,王囡囡,等. 有机肥和化肥不同比例配施对大豆产量和品质的影响[J]. 大豆科学, 2010, 29(1): 97-100. (Zhu B G, Yu Z H, Wang N N, et al. Effect of different proportion combined application of organic and chemical fertilizer on soybean yield and quality [J]. Soybean Science, 2010, 29 (1): 97-100.)

[10] 杨雪丽,吴吉英子,刘凡,等. 大豆品种对间作玉米苗期根系生长及抗氧化特性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2021, 39(1): 11-18. (Yang X L, Wu J Y Z, Liu F, et al. Effects of different soybean varieties on root growth and physiological characteristics of intercropping maize [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2021, 39(1): 11-18.)

[11] 倪丽,章建新,金加伟,等. 氮肥施用对高产大豆根系、干物质积累及产量的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2004(2): 36-39. (Ni L, Zhang J X, Jin J W, et al. Effect of nitrogen on root system dry matter accumulation and yield of high yield soybean [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2004(2): 36-39.)

[12] 杨光,张惠君,宋书宏,等. 超高产大豆根系相关性状的比较研究[J]. 大豆科学, 2013, 32(2): 176-181. (Yang G, Zhang H J, Song S H, et al. Comparison on some root related traits of super-high-yielding soybean [J]. Soybean Science, 2013, 32 (2): 176-181.)

[13] 李盛有,孙旭刚,王昌陵,等. 基于嫁接技术评价不同耐旱型大豆根系对叶片光合参数的影响[J]. 大豆科学, 2020, 39(5): 751-757. (Li S Y, Sun X G, Wang C L, et al. Effects of different drought tolerant soybean roots on photosynthesis of leaves based on grafting technology [J]. Soybean Science, 2020, 39 (5): 751-757.)

[14] 杨秀红,吴宗璞,张国栋. 大豆品种根系性状与地上部性状的相关性研究[J]. 作物学报, 2002, 28(1): 72-75. (Yang X H, Wu Z P, Zhang G D. Correlations between characteristics of roots and those of aerial parts of soybean varieties [J]. Acta Agronomica Sinica, 2002, 28(1): 72-75.)

[15] 龚岫. 不同大豆品种根系生长能力及时空分布特征[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2016. (Gong S. The spatial distribution characters and growing ability in different varieties of soybean [J]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2016.)

[16] Mehetre S S, Shinde R B, Borle U M, et al. Path analysis studies of partitioning in root growth and yield characters in soybean[J]. Crop Research, 1997, 13: 415-422.

[17] Lynch J. Root architecture and plant productivity[J]. Plant Phys-

iology, 1995, 109: 7-13.

[18] 刘秀红, 杜天庆, 苗果园. 不同施肥处理对大豆植株根系及产量的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2008(1): 7-10. (Liu X H, Du T Q, Miao G Y. Effects of different fertilizer treatments on the root system and the yield of soybean [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2008(1): 7-10.)

[19] 王敏, 杨万明, 杜俊维. 苗期大豆根系及地上部性状与耐旱性的关系[J]. 大豆科学, 2012, 31(3): 399-405. (Wang M, Yang W M, Du W J. Root and aboveground characteristics at seedling and their relationship with drought tolerance in soybean [J]. Soybean Science, 2012, 31(3): 399-405.)

[20] 孙海波. 大豆根系及其与地上部分关系的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2006. (Sun H B. study on soybean root systems along with its relations with upper ground characteristics [D]. Harbin: Northeast Agriculture University, 2006.)

[21] 王诗雅, 郑殿峰, 冯乃杰, 等. 植物生长调节剂 S₃₃₀₇ 对苗期淹水胁迫下大豆生理特性和显微结构的影响[J]. 作物学报, 2021, 47(10): 1-14. (Wang S Y, Zheng D F, Feng N J, et al. Effects of uniconazole on physiological characteristics and microstructure under water logging stress at seedling stage in soybean[J]. Acta Agronomica Sinica, 2021, 47(10): 1-14.)

[22] 安菁, 刘欢语, 郑艳, 等. 土壤微塑料残留对大豆幼苗生长及生理生化特征的影响[J]. 四川农业大学学报, 2021, 39(1): 41-46, 113. (An J, Liu H Y, Zheng Y, et al. Effects of soil micro-plastics residue on soybean seedlings growth and the physiological and biochemical characteristics [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2021, 39(1): 41-46, 113.)

[23] 朱倩, 姚兴东, 单玉姿, 等. 生物炭对 R₂ 期大豆根系生长和氮磷吸收利用的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50(4): 385-391. (Zhu Q, Yao X D, Shan Y Z, et al. Effects of biochar on root growth at R₂ stage, and nitrogen, phosphorus uptake and utilization of soybean [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2019, 50(4): 385-391.)

[24] 韩新华, 马淑梅, 付雪, 等. 东北春大豆抗旱品种根系特征的研究[J]. 中国农学通报, 2019, 35(12): 34-39. (Han X H, Ma S M, Fu X, et al. Root characteristics of drought-resistant cultivars of spring soybeans in northeast China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(12): 34-39.)

[25] 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. Effect of drought-stress on soybean root distribution and agronomic traits at different growth stages[J]. Soybean Science, 2016, 35(6): 943-946.)

[26] 王维, 吴景贵, 李蕴慧, 等. 有机物料对不同作物根系土壤腐殖质组成和结构的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 215-220. (Wang W, Wu J G, Li Y H, et al. Effects of organic materials on the composition and structure of humic substance in the rhizosphere soil of different crops [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(2): 215-220.)

[27] 闫春娟, 宋书宏, 王文斌, 等. 不同降雨条件对不同耐旱型大豆根系的影响[J]. 大豆科学, 2018, 37(2): 209-214. (Yan C J, Song S H, Wang W B, et al. Effect of different rainfall conditions on root system of different drought resistance soybean [J]. Soybean Science, 2018, 37(2): 209-214.)

[28] 殷大伟, 王佳博, 金梁, 等. 生物炭对白浆土水分渗透性能、养分含量及大豆产量的影响[J]. 大豆科学, 2019, 38(1): 72-76. (Yin D W, Wang J B, Jin L, et al. Effect of biochar on soil water permeability, nutrient content of albic soil and yield of soybean[J]. Soybean Science, 2019, 38(1): 72-76.)

[29] 高阳, 楚光红, 傅积海, 等. 施氮量对滴灌高产春大豆根系生长及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4): 46-52. (Gao Y, Chu G H, Fu J H, et al. Effect of nitrogen fertilizer amount on root growth and yield of spring soybean in drip irrigation [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(4): 46-52.)

[30] 周行, 龚岫, 郑殿峰, 等. 黑龙江省不同大豆品种根系分布特征及与产量的关系[J]. 大豆科学, 2020, 39(1): 52-61. (Zhou X, Gong S, Zheng D F, et al. Root distribution characteristics of different soybean varieties in Heilongjiang Province and the relationship with yield [J]. Soybean Science, 2020, 39(1): 52-61.)

[31] 赵占营, 楚光红, 李思忠, 等. 栽培密度对高产大豆根系生长及花荚形成的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(5): 62-69. (Zhao Z Y, Chu G H, Li S Z, et al. Effects of different densities on root growth and pod formation of high-yield soybean [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(5): 62-69.)

[32] 匡恩俊, 李梓瑄, 迟凤琴, 等. 耕地方式与有机肥配施对大豆产量及土壤养分特征的影响[J]. 大豆科学, 2020, 39(1): 108-115. (Kuang E J, Li Z X, Chi F Q, et al. Effect of different plough and organic fertilizer on characteristics of soybean yield and soil nutrients [J]. Soybean Science, 2020, 39(1): 108-115.)

[33] 李婧, 迟凤莲, 魏丹, 等. 不同有机物料还田对黑土活性有机碳组分含量的影响[J]. 大豆科学, 2018, 35(6): 975-980. (Li J, Chi F L, Wei D, et al. Effects of different organic materials returning to field on the content of active organic carbon in black soil [J]. Soybean Science, 2018, 35(6): 975-980.)

[34] 王士超. 典型黑土区有机物料提升土壤碳氮固持的协同效应机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019. (Wang S C. Synergistic effect and mechanisms of improving soil carbon and nitrogen sequestration with organic materials on black soil region of northeast China [D]. Beijing: Chinese Academy of Agriculture Sciences, 2019.)