



不同水氮处理对膜下滴灌春大豆根系生长及产量的影响

白盼盼¹, 任金涛¹, 章建新¹, 郭泰², 薛丽华³, 王志新², 孙诗仁³, 郑伟²

(1. 新疆农业大学 农学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 黑龙江省农业科学院 佳木斯分院, 黑龙江 佳木斯 154000; 3. 新疆农业科学院 粮食作物研究所, 新疆 乌鲁木齐 830091)

摘要:为探究不同水氮处理对膜下滴灌春大豆根系生长和产量的影响规律,以合农 71 为试验材料,进行水、氮两因素裂区田间试验。分别设主区总灌水量 $1\ 875\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ (W_1)、 $2\ 625\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ (W_2)、 $3\ 375\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ (W_3),副区总施氮量 $0\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_0)、 $120\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_1)、 $240\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_2),研究 9 种水氮处理组合对春大豆不同生长时期 0~100 cm 土层根干重、侧根长、侧根表面积和产量的影响。结果表明:增加灌水量与施氮量均可增加 0~100 cm 土层大豆根干重、总侧根长和总侧根表面积。7 月 15 日(荚期)和 8 月 15 日(鼓粒期),0~20 cm 土层根干重分别占总根干重的 75.37%~82.43% 和 71.97%~85.26%,7 月 15 日 W_3N_1 处理 0~20 cm 土层根干重密度最大,较 W_3N_2 和 W_3N_0 处理分别增加 9.84% 和 17.75%。总侧根长和总侧根表面积分别在 8 月 15 日和 7 月 15 日达到峰值,均以 W_3N_1 处理表现最好。同时增加灌水量与施氮量可显著提高产量和百粒重,而对单株荚数与单株粒数的影响较小。 W_3N_1 处理产量最高,较 W_3N_2 和 W_3N_0 处理分别增加 5.70% 和 14.80%,较 W_1N_1 处理高 49.76%。同一施氮水平下,灌溉水利用效率与氮肥偏生产力均随灌水量的增加而降低;同一灌水条件下,灌溉水利用效率与氮肥偏生产力均在 N_1 水平达到最高。鼓粒期根干重、侧根长度和侧根表面积与产量均呈显著正相关。综上,增加灌水量和施氮量主要提高了膜下滴灌春大豆 0~40 cm 土层根干重密度、侧根长密度和侧根表面积密度。根系发育良好是 W_3N_1 处理获得高产的关键,本研究条件下,膜下滴灌春大豆适宜的灌水量为 $3\ 375\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,施氮量为 $120\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,可实现最大总根干重 $119.80\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,总侧根长 $1\ 910.58\ \text{m} \cdot \text{m}^{-2}$,总侧根表面积 $2.64\ \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$,产量 $6\ 083.10\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

关键词:膜下滴灌;水氮处理;春大豆;根系;产量

Effects of Different Water and Nitrogen Treatments on Root Growth and Yield of Spring Soybean under Mulched Drip Irrigation

BAI Pan-pan¹, REN Jin-tao¹, ZHANG Jian-xin¹, GUO Tai², XUE Li-hua³, WANG Zhi-xin², SUN Shi-ren³, ZHENG Wei²

(1. College of Agronomy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Jiamusi Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Jiamusi 154000, China; 3. Institute of Food Crops, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China)

Abstract: In order to explore the effects of different water and nitrogen treatments on root growth and yield of spring soybean under mulched drip irrigation, we used Henong 71 as the test material and carried out water and nitrogen two-factor split-plot test in the field. We set up the total irrigation amount in the main area of $1\ 875\ \text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ (W_1), $2\ 625\ \text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ (W_2) and $3\ 375\ \text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ (W_3), the total nitrogen application rates in the secondary area of $0\ \text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (N_0), $120\ \text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (N_1) and $240\ \text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (N_2), and studied the effects of nine water and nitrogen treatment combinations on dry root weight, lateral root length, lateral root surface area and yield of 0-100 cm soil layer at different stages of spring soybean. The results showed that the dry root weight, total lateral root length and total lateral root surface area of spring soybean in 0-100 cm soil layer increased by increasing irrigation amount and nitrogen application amount. On July 15 (pod stage) and August 15 (seed filling stage), the dry root weight of 0-20 cm soil layer accounted for 75.37%-82.43% and 71.97%-85.26% of the total dry root weight, respectively. On July 15, the dry root weight density of W_3N_1 treatment was the highest in 0-20 cm soil layer, which was 9.84% and 17.75% higher respectively than those of W_3N_2 and W_3N_0 treatments. The total lateral root length and total lateral root surface area reached peak on August 15 and July 15, respectively, and W_3N_1 treatment performed the best. The yield and 100-seed weight could be significantly increased by increasing irrigation amount and nitrogen application rate at the same time, but the pods and seeds number per plant were affected less. The highest yield was obtained under W_3N_1 treatment, which was 5.70% and 14.80% higher than those under W_3N_2 and W_3N_0 treatments respectively, and 49.76% higher than that under W_1N_1 treatment. Under the same nitrogen application level, the irrigation water use efficiency and nitrogen fertilizer partial productivity decreased with the increase of irrigation water. Under the same irrigation conditions, the irrigation water use efficiency and nitrogen fertilizer partial productivity reached the highest in N_1 level. The dry root weight, lateral root length and lateral root surface area of seed-filling stage were positively correlated with yield. In summary, the

收稿日期:2022-11-16

基金项目:自治区科技支疆项目(2020E0218)。

第一作者:白盼盼(1997—),男,硕士研究生,主要从事大豆高产栽培研究。E-mail:2356177845@qq.com。

通讯作者:章建新(1962—),男,教授,博导,主要从事大豆高产栽培生理研究。E-mail:zjxin401@126.com。

increase of irrigation water and nitrogen application rate mainly increased the dry root density, lateral root length density and lateral root surface area density in 0-40 cm soil layer of spring soybean under mulched drip irrigation condition. Well developed root is the key factor of high yield of W_3N_1 . Under the conditions of this experiment, the suitable irrigation amount of spring soybean under mulched drip irrigation was $3\,375\text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$, and the nitrogen application rate was $120\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Under this condition, the maximum total dry root weight reached $119.80\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, the total lateral root length was $1\,910.58\text{ m}\cdot\text{m}^{-2}$, the total lateral root surface area was $2.64\text{ m}^2\cdot\text{m}^{-3}$, and the yield was $6\,083.10\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Keywords: mulched drip irrigation; water and nitrogen treatment; spring soybean; roots; yield

新疆是我国大豆高产区,具有发展大豆生产的独特优势。然而新疆地处干旱区,农作物生产完全依靠灌溉,灌溉水资源日益匮乏是制约新疆发展大豆生产的最重要因素。2019 和 2020 年,结合膜下滴灌技术在新疆石河子市分别种植合农 71 和吉育 86 创造了全国春大豆 $6\,712.05$ 和 $6\,803.10\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[1-2]的高产纪录。膜下滴灌技术将水肥“少量多次”精准供应与覆膜增温保墒效应巧妙结合,节水节肥效果突出^[3],广泛应用于新疆棉花、玉米等作物生产。膜下滴灌技术虽然已大面积应用于北疆春大豆生产^[4],但生产上常直接借鉴膜下滴灌棉花管理模式种植大豆,灌水和氮肥施用存在盲目性,因灌水量和施氮量过大,使大豆徒长和大面积倒伏,导致产量和肥水利用效率不高。因而春大豆膜下滴灌的节水增产潜力远未得到充分发挥。

大量研究表明,根系是作物植株养分吸收的重要器官,其生长发育受品种遗传特性和环境条件的影响^[5-6],水分和氮肥是限制大豆根系生长发育的重要因素。过度干旱会抑制大豆根系生长,增大根冠比^[7],而适当干旱胁迫会增加大豆根长、根表面积和根体积^[8]。因而适量灌水可促进大豆根干重和根长的增加,促进大豆叶片光合作用,增加干物质积累量和产量^[9]。适量供应氮肥可促进作物根系对氮素的吸收,促进根系茁壮生长,增加根冠比,提高产量^[10]。因此,在大豆生产过程中,适宜的水分与氮肥供应是促进大豆根系生长和增产的重要保证。李春艳等^[9]研究表明,滴灌条件下大豆根系快速增长期与花荚期同步,在花荚期增加灌水量可显著促进 0~40 cm 土层根系生长,适宜灌水量为 $2\,550\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 。高阳等^[11]在田间滴灌条件下采用挖掘取样法研究 0,75,150 和 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施氮量对

新大豆 27 号 0~80 cm 土层根系和产量的影响,结果表明施氮量为 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时 0~80 cm 土层根系干物质量、侧根长度、表面积、根系活性、伤流量、根瘤数、根瘤质量及产量均为最高。

膜下滴灌作为高效的节水高产种植栽培技术,具有改善农田土壤环境、促进光合和抑制杂草等作用^[12-14]。目前有关春大豆灌水施氮的相关研究多在未覆膜条件下进行。而在棉花膜下滴灌研究中存在根系分布浅、根体积小、地上部生物量过大的情况,导致其在生长后期早衰^[15]。目前,膜下滴灌春大豆根系生长规律研究尚不充分,其高产高效水氮运筹技术尚不完备。本研究在前人有关春大豆灌水^[9]和施氮^[11]试验的基础上,系统分析 9 种水氮处理组合对膜下滴灌春大豆根系生长和产量的影响规律,探讨其高产高效水氮运筹技术,为春大豆高产高效栽培提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试大豆品种为合农 71,由黑龙江省农业科学院佳木斯分院提供。该品种具有无限结荚习性,节间短,有分枝,适宜北方地区种植,且曾在新疆石河子创下高产纪录^[1]。

1.2 试验地概况

试验于 2021 年在新疆伊犁州伊宁县农业技术推广中心试验田($81^{\circ}31'33''\text{E}$, $43^{\circ}57'47''\text{N}$)进行。试验地为砂壤土,pH8.29,有机质含量 $14.67\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $101.10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $46.70\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $269.67\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。试验期间各旬降雨量如表 1 所示。

表 1 2021 年大豆生长期间各旬降雨量

Table 1 Rainfall during soybean growth in 2021

日期 (月. 日)	降雨量	日期 (月. 日)	降雨量	日期 (月. 日)	降雨量
Date(month-day)	Rainfall/mm	Date(month-day)	Rainfall/mm	Date(month-day)	Rainfall/mm
4.01-4.10	21.30	6.01-6.10	3.43	8.01-8.10	1.55
4.11-4.20	7.57	6.11-6.20	5.29	8.11-8.20	25.49
4.21-4.30	2.48	6.21-6.30	7.34	8.21-8.31	4.03
5.01-5.10	2.35	7.01-7.10	1.96	9.01-9.10	8.57
5.11-5.20	12.40	7.11-7.20	2.84	9.11-9.20	0.65
5.21-5.31	1.67	7.21-7.31	31.63	合计 Total	92.78

1.3 试验设计

试验采用两因素三水平裂区试验设计。主区设3种灌水量:1 875 m³·hm⁻²(W₁)、2 625 m³·hm⁻²(W₂)、3 375 m³·hm⁻²(W₃);副区设3种施纯氮量:

0 kg·hm⁻²(N₀)、120 kg·hm⁻²(N₁)、240 kg·hm⁻²(N₂)。共计9个处理组合。小区面积48 m²(4.8 m×10 m),重复3次。不同处理灌水施氮方案如表2所示。

表2 各处理灌水和施纯氮方案

Table 2 Irrigation and pure nitrogen treatment

处理 Treatment	灌水日期及灌水量(月-日) Irrigation period(month-day)/ (m ³ ·hm ⁻²)					总灌水量 Total irrigation/ (m ³ ·hm ⁻²)	施氮日期及施氮量(月-日) Nitrogen period(month-day)/ (m ³ ·hm ⁻²)		总施氮量 Total nitrogen /(kg·hm ⁻²)
	6-18	7-8	7-20	8-2	8-18		6-18	7-8	
W ₁ N ₀	375	375	375	375	375	1875	0	0	0
W ₁ N ₁	375	375	375	375	375	1875	60	60	120
W ₁ N ₂	375	375	375	375	375	1875	120	120	240
W ₂ N ₀	525	525	525	525	525	2625	0	0	0
W ₂ N ₁	525	525	525	525	525	2625	60	60	120
W ₂ N ₂	525	525	525	525	525	2625	120	120	240
W ₃ N ₀	675	675	675	675	675	3375	0	0	0
W ₃ N ₁	675	675	675	675	675	3375	60	60	120
W ₃ N ₂	675	675	675	675	675	3375	120	120	240

试验地前茬作物为玉米。翻地前施重过磷酸钙 375 kg·hm⁻²。精细整地后,4月7日人工铺设滴灌带和黑色地膜后,人工用点播器播种。行距按宽(50 cm)窄行(30 cm)配置。滴灌带置于窄行中间。理论保苗 32 万株·hm⁻²。各小区安装 1 个水表和施肥罐,分别控制灌水量和施氮量。试验期间其他田间管理同大田,9月11日收获。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 根系指标 于6月15日(花期)、7月15日(荚期)和8月15日(鼓粒期)采用挖掘法获取0~100 cm 土层根系,分5层取样,每层土体体积为0.016 m³[0.4 m(长)×0.20 m(宽)×0.20 m(高)],长为宽行中点至窄行中点的距离,宽为行长,高为土层深度],2次重复,将各土层体积内根系挑拣干净装进自封袋保存,用清水冲洗干净(清洗时放置于120目土筛中,以防止细小根系被冲走)。将主根与侧根分离,使用扫描仪(ScanMaker i800 plus,上海中晶科技有限公司)对侧根根系形态进行扫描,并使用数字化分析软件(万深 LA-S 根系分析系统,杭州万深检测科技有限公司)分析侧根长和侧根表面积。将扫描后的侧根及主根装入纸袋,于烘箱中105℃杀青30 min,80℃烘干至恒重,用万分之一天平称量。将各土层根干重、侧根长和侧根表面积分别除以相应土体体积,计算根干重密度、侧根长密度和侧根表面积密度。

1.4.2 产量及其构成因素 收获前连续选取15株大豆进行考种,测量单株荚数、粒数、百粒重、产量、

灌溉水利用效率和氮肥偏生产力。测产时去除边行,测产面积为6.4 m²(3.2 m×2 m),人工脱粒后晒干称重,同时测定百粒重,用谷物水分测量仪(PM-8188-A,日本 KETT)测定大豆种子含水量。折合计算各处理产量,即每公顷 13% 含水量籽粒的产量。

1.4.3 灌溉水利用效率和氮肥偏生产力 计算各处理灌溉水利用效率(IWUE)和氮肥偏生产力(NPFP),IWUE(kg·m⁻³)=籽粒产量÷总灌溉水量,NPFP(kg·kg⁻¹)=籽粒产量÷总施氮量。

1.4.4 产量与根系指标间的相关关系 为确定根系形成与最终产量间的相关关系,采用皮尔逊相关系数法^[16]对鼓粒期根系各指标与产量进行相关性分析。

1.5 数据分析

使用 Excel 2019 进行数据整理及作图,使用 SPSS 19.0 分析软件进行数据分析。

2 结果与分析

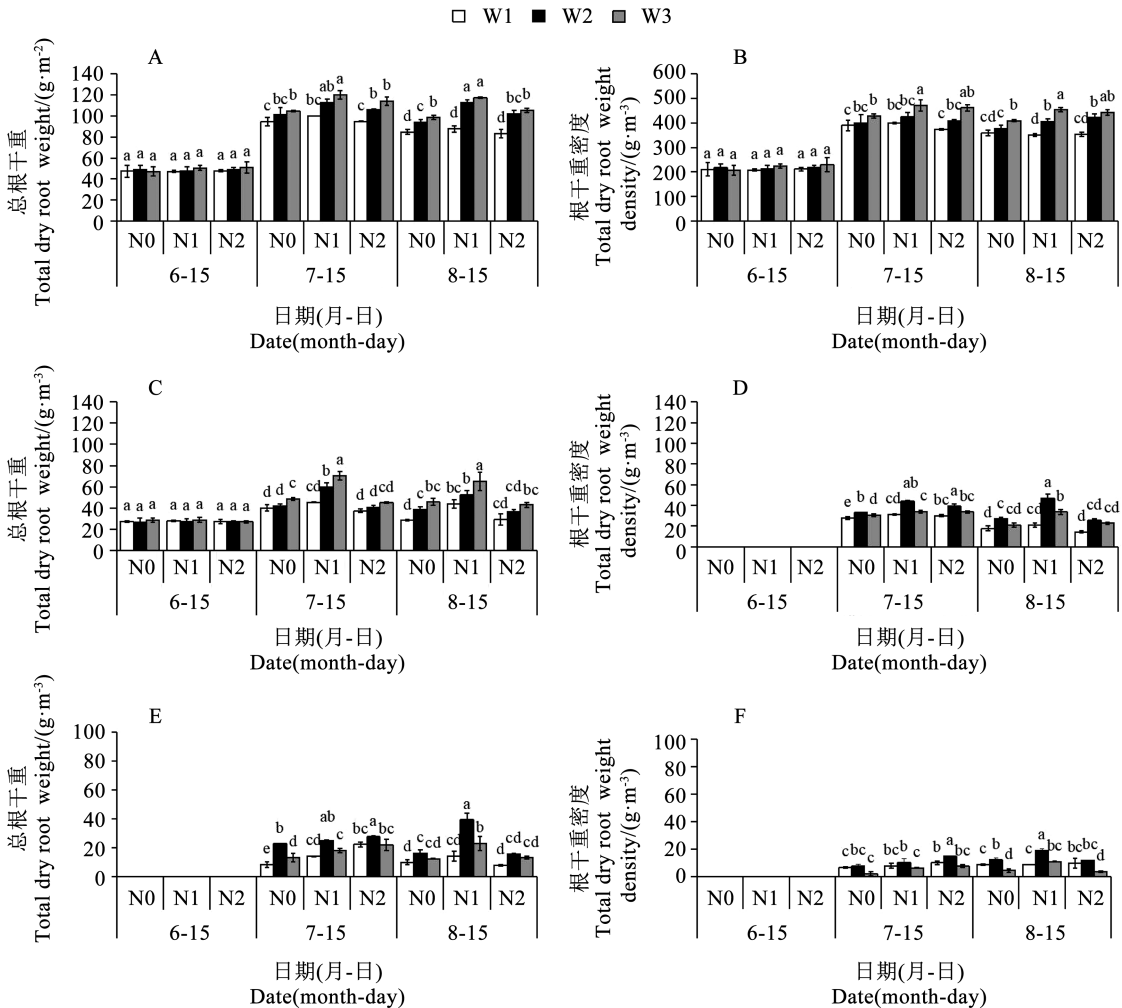
2.1 水氮处理对总根干重及各土层根干重密度的影响

由图1可知,各处理0~100 cm 土层总根干重在7月15日前后达到峰值,表现为W₃N₁>W₂N₁>W₃N₂>W₂N₂>W₃N₀>W₂N₀>W₁N₁>W₁N₂>W₁N₀,W₃N₁较W₃N₂和W₃N₀处理分别增加5.38%和14.72%。可见,同时增加花期至荚期的灌水量和施氮量,根干重增加幅度大于仅增加灌水量或施

氮量,与仅增加灌水量相比,仅增加施氮量使根干重的增加幅度更大。

根干重主要集中在0~20 cm土层,在7月15日和8月15日,0~20 cm土层根干重分别占总根干重的75.37%~82.43%和71.97%~85.26%。0~20 cm土层,各处理7月15日根干重密度最大,表现为 $W_3N_1 > W_3N_2 > W_3N_0 > W_2N_1 > W_2N_2 > W_1N_1$

$> W_2N_0 > W_1N_2 > W_1N_0$, W_3N_1 处理根干重密度较 W_3N_0 和 W_1N_1 处理分别增加9.84%和17.75%。20~40 cm土层根干重密度与0~20 cm土层变化基本一致。40 cm土层以下 W_3 灌水水平下根干重密度明显减少。可见,在一定量灌水和施氮条件下,增加灌水量与施氮量主要体现为0~20 cm土层根干重增加。



注:A、B、C、D、E、F 分别代表0~100 cm、0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm和80~100 cm土层;不同小写字母代表处理间存在显著性($P < 0.05$)差异,下同。
Note:A, B, C, D, E and F represent 0-100 cm, 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm and 80-100 cm soil layer, respectively; Different lowercase represent significant differences between treatments ($P < 0.05$), the same below.

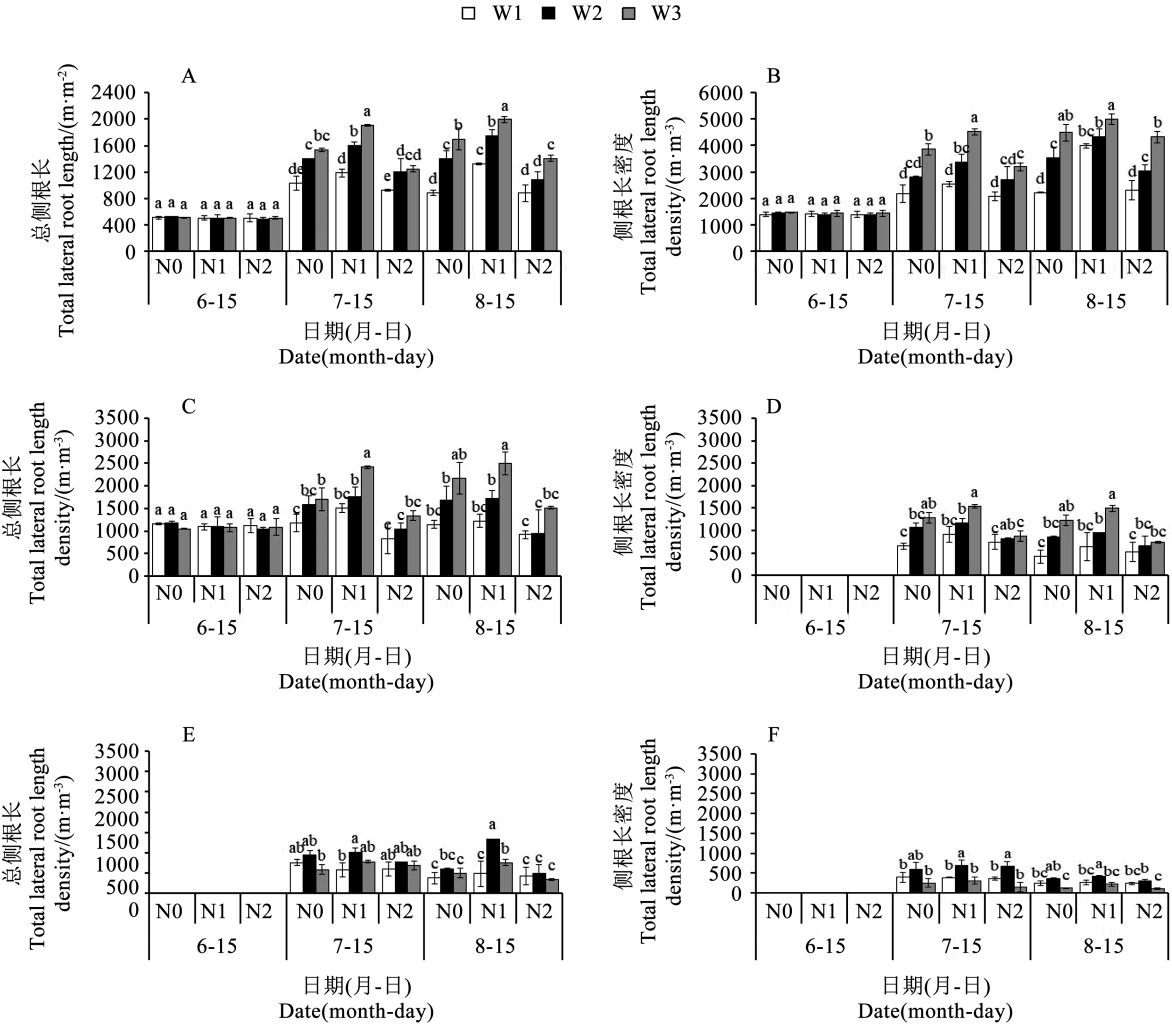
图1 各处理总根干重及不同土层根干重密度

Fig. 1 Total root dry weight and root dry weight density in different soil layers of each treatment

2.2 水氮处理对总侧根长及各土层侧根长密度的影响

由图2可知,各处理0~100 cm土层总侧根长峰值出现时间不一致,多数处理在8月15日前后达最大,此时各处理总侧根长表现为 $W_3N_1 > W_3N_0 > W_2N_1 > W_3N_2 > W_2N_0 > W_1N_1 > W_1N_2 > W_1N_0$, W_3N_1 较 W_3N_0 和 W_3N_2 处理分别增加24.72%和53.52%。

可见,同时增加花期至鼓粒期的灌水量和施氮量时侧根长增幅大于仅增加灌水量和施氮量,与仅增加灌水量相比,仅增加施氮量时侧根长增幅较小。0~60 cm土层侧根长密度与总侧根长变化趋势基本一致;60 cm土层以下 W_3 灌水条件下侧根长度明显减少,因此增加灌水量主要增加了浅层土壤的侧根长密度。



注:A、B、C、D、E、F 分别代表 0~100 cm、0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm 和 80~100 cm 土层。
Note:A, B, C, D, E and F represent 0-100 cm, 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm and 80-100 cm soil layer, respectively.

图2 各处理总侧根长及不同土层侧根长密度

Fig. 2 Total lateral root length and the lateral root length density in different soil layers of each treatment

2.3 水氮处理对总侧根表面积及各土层侧根表面积密度的影响

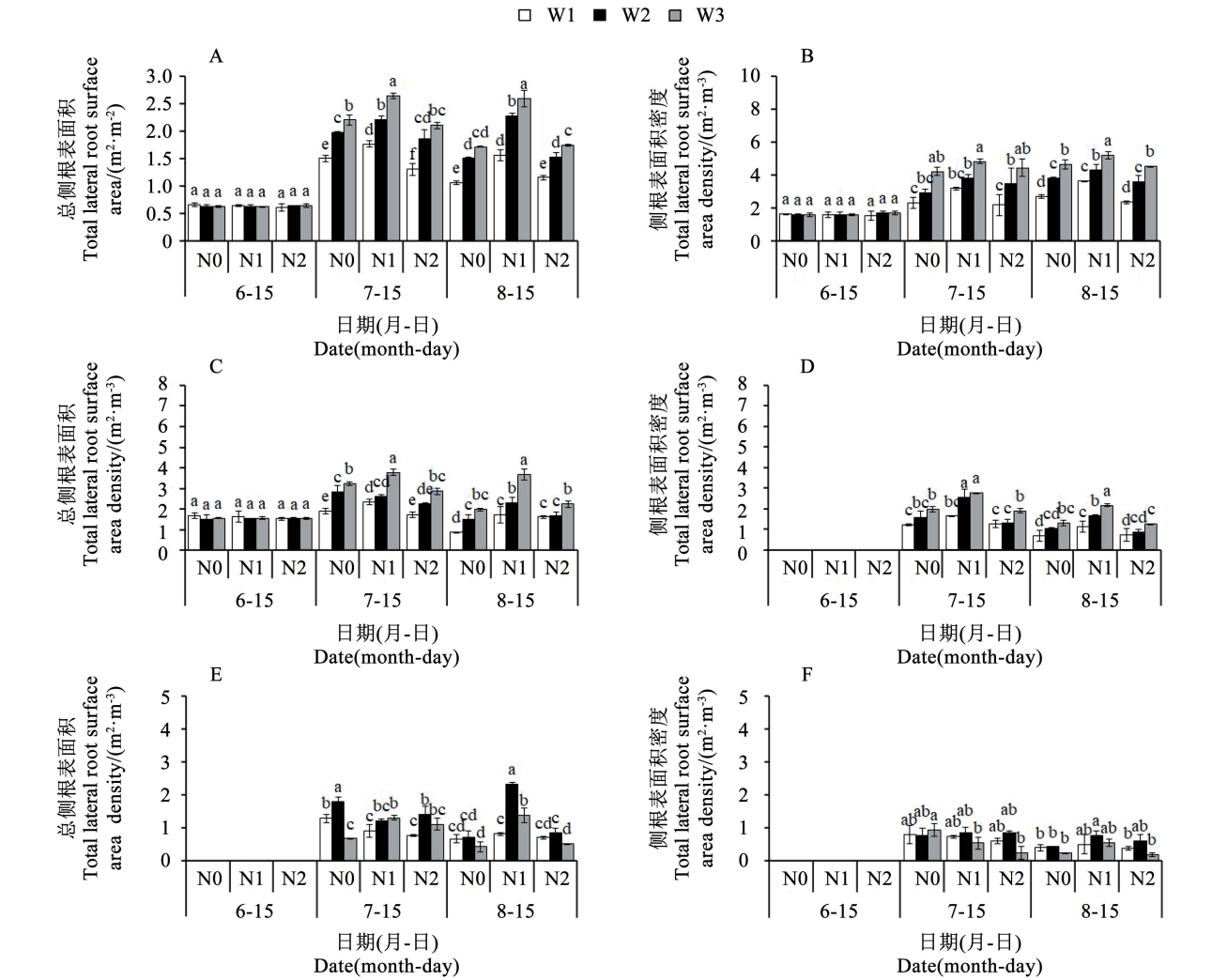
由图3可知,各处理总侧根表面积随生育期的推进呈先升后降的变化趋势,于7月15日前后达峰值,表现为 $W_3N_1 > W_2N_1 > W_3N_0 > W_3N_2 > W_2N_0 > W_2N_1 > W_1N_0 > W_1N_2$, W_3N_1 较 W_2N_1 处理和 W_2N_0 处理分别增加19.46%和33.33%。同时增加花期至荚期灌水量与施氮量,0~100 cm土层总侧根表面积增幅大于仅增加灌水量或施氮量,同仅增加灌水量相比,仅增加施氮量时总侧根表面积增幅相对较小。

0~60 cm土层侧根表面积密度变化趋势基本一致。在相同灌水水平下,均以 N_1 施氮水平侧根表面积密度最大;在相同施氮水平下,均以 W_3 灌水水平侧根表面积密度最大;各处理均以 W_3N_1 处理侧根表面积最大。60 cm土层以下,侧根表面积密度

值均较小, W_3 灌水水平侧根表面积密度低于其他灌水水平。

2.4 产量及其构成因素及水肥利用率分析

如表3所示,水氮处理对膜下滴灌春大豆百粒重和产量影响显著。各处理百粒重表现为 $W_3N_1 > W_3N_2 > W_2N_1 > W_2N_2 > W_2N_0 > W_3N_0 > W_1N_0 > W_1N_2 > W_1N_1$, W_3N_1 处理百粒重较 W_2N_2 和 W_1N_0 处理分别增加0.81和1.70 g,可见仅灌水与仅施氮均对百粒重产生极显著影响。方差分析表明灌水与施氮交互效应对百粒重产生显著影响。各处理产量表现为 $W_3N_1 > W_3N_2 > W_2N_2 > W_2N_1 > W_3N_0 > W_2N_0 > W_1N_1 > W_1N_2 > W_1N_0$, W_3N_1 处理较 W_3N_2 和 W_3N_0 处理分别增产5.70%和14.80%, W_1N_0 处理产量最低, W_3N_1 较 W_1N_0 处理增产49.76%。可见,同时增加灌水量与施氮量可显著增加百粒重和产量,而对单株荚数与单株粒数的影响较小。



注:A、B、C、D、E、F 分别代表 0 ~ 100 cm、0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm 和 80 ~ 100 cm 土层。
Note: A, B, C, D, E, F represent 0-100 cm, 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm and 80-100 cm soil layer, respectively.

图 3 各处理总侧根表面积及不同土层侧根表面积密度

Fig. 3 Total lateral root surface area and the lateral root surface area density in different soil layers of each treatment

如表 3 所示,在同一施氮水平下,灌溉水利用效率与氮肥偏生产力均随灌水量的增加而降低,单株荚数、单株粒数、百粒重和产量均随灌水量的增加而增加,以 W_3 灌水水平最大,分别较其它相同氮水平处理增加 6.8 ~ 9.4 个、0.2 ~ 22.9 个、0.79 ~ 1.70 g 和 9.48% ~ 43.19%。在同一灌水条件下,灌溉水利用效率与氮肥偏生产力均在 N_1 水平达到最高,其中 W_3N_1 处理产量、百粒重、单株粒数、单株荚数均最高,分别为 $6\,083.10\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、16.52 g、113.2 个和 52.2 个。

表 3 各处理产量、产量构成因素和水肥利用率及方差分析

处理		收获株数	单株荚数	单株粒数	百粒重	产量	灌溉水利用	氮肥偏
Treatment		Number of harvested plants/(株·m ⁻²)	Pods number per plant	Seeds number per plant	100-seed weight/g	Yield/(kg·hm ⁻²)	效率 IWUE/(kg·m ⁻³)	生产力 NPPF/(kg·kg ⁻¹)
W ₁	N ₀	31.80 a	38.4 c	86.2 cd	14.82 c	4062.00 e	2.17 bc	—
	N ₁	31.95 a	42.8 b	90.3 c	14.76 c	4248.30 e	2.27 a	35.40 c
	N ₂	33.15 a	37.4 c	85.1 d	14.80 c	4167.80 e	2.22 ab	17.36 e
W ₂	N ₀	32.10 a	43.6 b	95.2 b	15.42 bc	4683.15 d	1.80 d	—
	N ₁	32.25 a	45.4 b	110.5 a	15.73 ab	5556.60 bc	2.12 c	46.31 b
	N ₂	32.55 a	46.0 b	113.0 a	15.71 b	5639.40 b	2.15 bc	23.50 d

表 3 (续)

处理 Treatment	收获株数		单株荚数	单株粒数	百粒重	产量	灌溉水利用	氮肥偏
	Number of		Pods number	Seeds number	100-seed	Yield/	效率 IWUE/	生产力
	plants/(株·m ⁻²)		per plant	per plant	weight/g	(kg·hm ⁻²)	(kg·m ⁻³)	NPFP/ (kg·kg ⁻¹)
W ₃	N ₀	31.65 a	44.2 b	110.5 a	15.19 bc	5299.05 c	1.57 e	—
	N ₁	32.55 a	52.2 a	113.2 a	16.52 a	6083.10 a	1.80 d	50.69 a
	N ₂	33.15 a	47.8 ab	108.2 a	15.93 ab	5755.20 b	1.71 d	23.98 d
F	灌水(W)	0.067	14.05 **	63.07 **	33.62 **	247.14 **	198.03 **	181.12 **
	施氮(N)	1.677	4.34 *	5.69 **	7.55 **	39.63 **	38.27 **	2082.49 **
	W×N	0.199	1.08	4.38 **	4.59 *	7.30 **	6.29 **	25.82 **

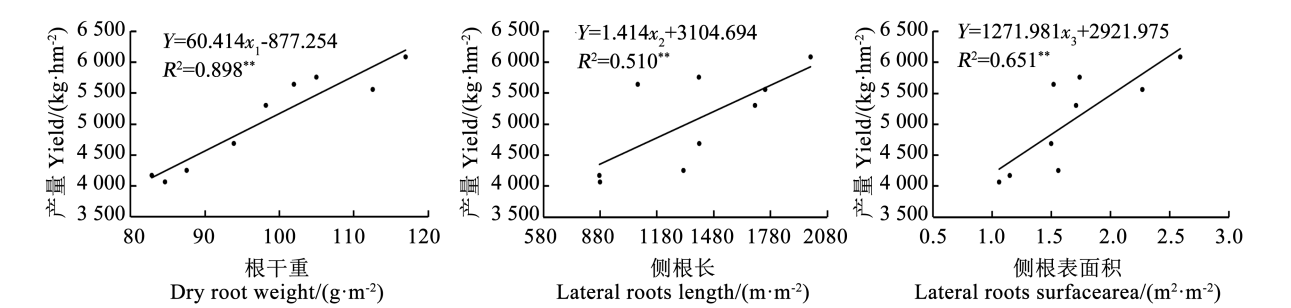
注:不同小写字母代表处理间存在显著性作用($P<0.05$),W×N代表灌水量与施氮量的交互效应,*和**分别代表存在显著影响($P<0.05$)和极显著极影响($P<0.01$)。

Note: Different lowercase represented significant effect ($P<0.05$), W×N represented the interaction effect between irrigation amount and nitrogen application amount, * and ** represented significant effect ($P<0.05$) and extremely significant effect ($P<0.01$), respectively.

2.5 鼓粒期根系指标与产量的相关性

由图 4 可知,鼓粒期根干重(x_1)、鼓粒期侧根长(x_2)和鼓粒期侧根表面积(x_3)与产量(Y)间均存在显著正相关关系,分别符合直线回归方程 $Y =$

$60.414x_1 - 877.254$ ($R^2 = 0.898$) 和 $Y = 1.414x_2 + 3\,104.694$ ($R^2 = 0.510$) 和 $Y = 1\,271.981x_3 + 2\,921.975$ ($R^2 = 0.651$)。可见,鼓粒期大豆总根干重与总根表面积与产量间存在极显著正相关性。



注: * 表示在 0.05 水平达显著相关水平; ** 表示在 0.01 水平达极显著相关水平。

Note: * indicates significant relation at 0.05 level; ** indicates significant relation at 0.01 level.

图 4 产量与鼓粒期根干重、侧根长和侧根表面积关系分析

Fig. 4 Analysis on relationship between yield and root dry weight, lateral root length and lateral root surface area at seed-filling stage

3 讨论

根系作为感知土壤环境状况的最初部位,可以通过构型、理化特性的改变来适应不良环境带来的不利影响。合理的水、氮调控可促进根干重和侧根长的增加^[17-18]。王聪等^[19]研究结果表明,增加灌水量可增加 0~40 cm 土层总根干重和总侧根长。适量的氮肥施用会促进作物根系的生长发育,氮肥亏缺或过量均会抑制根系生长^[11,20]。有研究表明,当花荚期施氮量为 150 kg·hm⁻²时,可促进 0~20 cm 土层根系生长,从而增加大豆产量^[10]。本研究结果与其相似,在膜下滴灌条件下,同时增加灌水量和施氮量均可显著增加总根干重、总侧根长度和总侧

根表面积,主要通过影响 0~40 cm 土层根干重密度、侧根长密度和侧根表面积密度实现,这可能是因为膜下滴灌条件下表层土壤墒情较好的原因^[21]。同时,本试验条件下并未出现明显的根系早衰现象。但籽粒出现明显的紫斑症状,本试验地块位于输水支渠旁,与高温高湿环境条件下易引发大豆紫斑病^[22]的情况相吻合。因此推测紫斑病发生是导致本试验百粒重(14.80~16.52 g)明显低于该品种正常值(18~20 g)的重要原因。

试验中获得最高产量的灌水施氮组合是 W₃N₁(灌水量为 3 375 m³·hm⁻²,施氮量为 120 kg·hm⁻²),明显高于李春艳等^[9]研究的 2 550 m³·hm⁻²。可能由于合农 71 的产量(6 083.10 kg·hm⁻²)高于新大豆 27

号(5 388.3 kg·hm⁻²)的原故。本试验条件下施氮量(120 kg·hm⁻²)低于高阳等^[11]试验(150 kg·hm⁻²),产量(6 083.10 kg·hm⁻²)却较高阳等^[11]试验(4 889.62 kg·hm⁻²)大幅度增加。可能是本试验土壤碱解氮含量(101.10 mg·kg⁻¹)远高于高阳等^[11]试验地土壤碱解氮含量(57.8 mg·kg⁻¹)的原故;并且可能是本试验所用合农71(分枝型品种,单株粒数多,百粒重小)与上述研究所用新大豆27号(主茎型品种,单株粒数较少,百粒重较大)的产量差异较大的原因。大豆根系生长与产量间存在显著正相关关系,表明水氮调控促进大豆根系健壮生长是导致产量增加的一个重要原因。滴灌春大豆的节水、节肥和增产潜力巨大。目前,有关膜下滴灌春大豆的研究仍较少,尚需进一步系统研究,挖掘其潜力。

4 结论

增加灌水量和施氮量主要提高了膜下滴灌春大豆0~40 cm土层根干重密度、侧根长密度和侧根表面积密度。在同一施氮水平下,灌溉水利用效率与氮肥偏生产力均随灌水量的增加而降低,单株荚数、单株粒数、百粒重和产量均随灌水量的增加而增加,以W₃灌水水平最大。在同一灌水条件下,灌溉水利用效率与氮肥偏生产力均在N₁水平达到最高。同时增加花期至鼓粒期的灌水量和施氮量,根干重、总侧根长和总侧根表面积增幅大于仅增加灌水量或施氮量。同时增加灌水量与施氮量可显著提高产量和百粒重。在本试验条件下,膜下滴灌春大豆适宜灌水量为3 375 m³·hm⁻²,施氮量为120 kg·hm⁻²,可获得产量6 083.10 kg·hm⁻²。

参考文献

[1] 郭美玲,郭泰,王志新,等. 创全国大豆高产纪录品种合农71及其超高产栽培技术[J]. 黑龙江农业科学, 2020(6): 139-141. (GUO M L, GUO T, WANG Z X, et al. A soybean variety Henong 71 with high yield record in China and its super high yield cultivation techniques [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2020(6): 139-141.)

[2] 曾凯,赵靓,张恒斌,等. 新疆春大豆膜下滴灌超高产栽培模式创建[J]. 大豆科学, 2021, 40(1): 28-38. (ZENG K, ZHAO L, ZHANG H B, et al. Establishment of super high yield cultivation mode of spring soybean under film drip irrigation in Xinjiang[J]. Soybean Science, 2021, 40(1): 28-38.)

[3] 张旺锋,王振林,余松烈,等. 膜下滴灌对新疆高产棉花群体光合作用冠层结构和产量形成的影响[J]. 中国农业科学, 2002, 35(6): 632-637. (ZHANG W F, WANG Z L, YU S L,

et al. Effects of drip irrigation under mulch on photosynthetic canopy structure and yield formation of cotton population with high yield in Xinjiang[J]. China Agricultural Science, 2002, 35(6): 632-637.)

[4] 翟超,张娜,肖杨,等. 新疆主要粮食作物滴灌条件下作物系数及水分生产率试验研究[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(3): 162-167. (ZHAI C, ZHANG N, XIAO Y, et al. Experimental study on crop coefficient and water productivity of main grain crops under drip irrigation in Xinjiang [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(3): 162-167.)

[5] 盖钧镒. 大豆育种应用基础和技术研究进展[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1990. (GAI J Y. Research progress of soybean breeding application foundation and technology [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1990.)

[6] 何志鸿,杨庆凯,刘忠堂. 大豆窄垄密植高产栽培[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 2000. (HE Z H, YANG Q K, LIU Z T. High yield cultivation of soybean with narrow ridge and close planting[M]. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press, 2000.)

[7] YANG G Y, LUO Y P, LI B G, et al. The response of winter wheat root to the period and the after-effect of soil water stress[J]. Agricultural Sciences in China, 2006(4): 284-290.

[8] 刘丽君,林浩,唐晓飞,等. 干旱胁迫对不同生育阶段大豆产量形态建成的影响[J]. 大豆科学, 2011, 30(3): 405-412. (LIU L J, LIN H, TANG X F, et al. Drought stress influence soybean yield morphogenesis in different growth stages [J]. Soybean Science, 2011, 30(3): 405-412.)

[9] 李春艳,李思忠,楚光红,等. 不同滴水量处理下大豆根系生长与花荚形成的关系[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(2): 198-204. (LI C Y, LI S Z, CHU G H, et al. Relationship of soybean root growth and flower-pod formation under different irrigation quantities [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2016, 39(2): 198-204.)

[10] 王树起,韩晓增,乔云发,等. 施氮对大豆根系形态和氮素吸收积累的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(6): 1069-1073. (WANG S Q, HAN X Z, QIAO Y F, et al. Root morphology and nitrogen accumulation in soybean under different nitrogen application levels [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(6): 1069-1073.)

[11] 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, 2016, 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, 2016, 36(4): 46-52.)

[12] TAO H B, BRUECK H, DITTERT K, et al. Growth and yield formation of rice (*Oryza sativa* L.) in the water-saving ground cover rice production system (GCRPS) [J]. Field Crops Research, 2005, 95(1): 1-12.

[13] 张友良,王凤新,聂唯,等. 滴灌条件下覆膜热效益及其对马铃薯生长的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 252-

261. (ZHANG Y L, WANG F X, NIE W, et al. Effects of film mulching on thermal conditions and potato growth under drip irrigation[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 252-261.)

[14] 郭彦芬, 霍轶珍, 韩翠莲, 等. 不同覆盖方式对玉米生长发育及土壤水分利用效率的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(6): 72-74. (GUO Y F, HUO Y Z, HAN C L, et al. Effects of different mulching methods on maize growth and soil water use efficiency[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(6): 72-74.)

[15] 杨荣, 田长彦, 买文选. 新疆膜下滴灌棉花早衰的根系生长发育特征[J]. 植物营养与肥科学报, 2016, 22(5): 1384-1392. (YANG R, TIAN C Y, MAI W X. Root growth and development characteristics of cotton premature senescence under mulch drip irrigation in Xinjiang[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2016, 22(5): 1384-1392.)

[16] 耿修林, 谢兆茹. 应用统计学[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (GENG X L, XIE Z R. Applied statistics[M]. Beijing: Science Press, 2002.)

[17] 邓忠, 翟国亮, 宗洁, 等. 干旱区水氮调控对棉花根、冠生长特性及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015(6): 57-64. (DENG Z, ZHAI G L, ZONG J, et al. Effects of water and nitrogen regulation on root and shoot growth characteristics and yield of cotton in arid area[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2015(6): 57-64.)

[18] 杜红霞, 冯浩, 吴普特, 等. 水、氮调控对夏玉米根系特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1): 89-94. (DU H X, FENG H, WU P T, et al. Influence of water and N fertilizer regulation on root growth characteristics of summer maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(1): 89-94.)

[19] 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. (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.)

[20] 张伟, 李鲁华, 吕新. 不同施氮量对滴灌春小麦根系时空分布、氮素利用率及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2016, 25(2): 195-202. (ZHANG W, LI L H, LYU X. Effects of nitrogen fertilizer at different levels on spatial and temporal distribution of wheat roots, nitrogen use efficiency and yield in spring wheat under drip irrigation[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2016, 25(2): 195-202.)

[21] 魏盛, 罗上轲, 程乙, 等. 不同覆膜方式对春玉米根系生长和土壤水热状况的影响[J]. 作物研究, 2022, 36(1): 14-22. (WEI S, LUO S K, CHENG Y, et al. Effects of different film mulching methods on root growth and soil hydrothermal environment of spring maize[J]. Crop Research, 2022, 36(1): 14-22.)

[22] 高凤菊, 曹鹏鹏, 王乐政, 等. 大豆紫斑病研究进展[J]. 大豆科技, 2011(6): 24-26. (GAO F J, CAO P P, WANG L Z, et al. The research advances on purple seed stain of soybean[J]. Soybean Science & Technology, 2011(6): 24-26.)

《大豆科学》正式加入 OSID 开放科学计划

《大豆科学》于 2019 年 8 月 1 日起正式加入 OSID(Open Science Identity)开放科学标识计划。将通过在文章上添加开放科学二维标识码(OSID 码),为读者和作者提供一个与业界同行和专家学术交流的平台,同时提供一系列增值服务,提升论文的科研诚信。

读者可以通过微信扫描论文的 OSID 码,在手机上听论文作者的语音介绍,可以看到论文的重点彩图和实验视频,也可直接与作者进行一对一的交流、关注作者的研究动向等。这些功能有助于读者深入了解该研究的实际状况与实现过程。

作者可以通过专属的 OSID 码对所著论文添加语音,介绍写作背景、动机、趣事以及研究灵感。添加无法在传统印刷出版展示的附加说明,以便更好地展现研究成果,拓展论文的传播方式。同时,通过 OSID 平台每位作者都能拥有所著论文的学术圈和问答,与读者进行交流互动。此外,作者还可以在学术圈发布感兴趣的话题、最新的研究观点、问题征集、学术推荐等,扩大作者自身的影响力,增强与读者的联系。