



陈展宇, 付良帅, 张玉姣, 等. 大豆生育后期根系伤流液中养分元素含量的研究[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(6): 44-50.

大豆生育后期根系伤流液中养分元素含量的研究

陈展宇, 付良帅, 张玉姣, 李大勇, 崔喜艳, 张治安
(吉林农业大学 农学院, 吉林 长春 130118)

摘要:【目的】研究不同产量水平的大豆 *Glycine max* (L.) Merr. 品种生育后期根系伤流液中氮素等养分元素含量的变化规律, 以期大豆育种和高产栽培提供生理依据。【方法】以 3 种不同产量水平 (低、中、高产) 的大豆品种为试验材料, 栽培管理条件相同, 测定开花期 (R2 期)、结荚期 (R4 期) 和鼓粒期 (R6 期) 大豆根系伤流强度及伤流液中氮素 (总氮、硝态氮、铵态氮和氨基酸) 以及磷、钾、钙和钠等养分含量。【结果】整个生育后期高产大豆品种根系伤流强度、总氮、氨基酸含量明显高于中、低产品种, 平均值分别高 13.4% 和 24.0%、31.9% 和 74.2%、46.3% 和 81.0%。根系伤流液中硝态氮含量高于低产品种, 平均值高 19.9%; 铵态氮含量低于低产品种, 平均值低 16.5%; 根系养分元素磷、钾、钙含量均高于中、低产品种。不同产量水平的大豆品种伤流强度的最高值均出现在 R4 期, R4 期籽粒产量与伤流强度呈极显著正相关 ($r=0.765^{**}$); 根系伤流液中总氮和氨基酸含量在 R2 期达最高值, 磷、钾在 R4 期含量最高。【结论】在开花期以后, 高产大豆品种根系代谢旺盛, 具有较强的吸收能力和活力, 这可能是大豆高产的关键因素。

关键词: 大豆; 生育后期; 伤流液; 氮素; 养分元素
中图分类号: S565.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-411X(2017)06-0044-07

Nutrient element contents of root bleeding sap of soybeans at late growth stages

CHEN Zhanyu, FU Liangshuai, ZHANG Yujiao, LI Dayong, CUI Xiyang, ZHANG Zhi'an
(College of Agronomy, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: 【Objective】To explore changes of nitrogen and nutrient element contents of root bleeding saps of soybeans [*Glycine max* (L.) Merr.] with different yield levels at late growth stages, and provide a physiological basis for soybean breeding and high-yielding cultivation. 【Method】Soybean cultivars with three different yield levels (low-, middle- and high-yielding) were planted under the same cultivation condition. Root bleeding intensity, the contents of nitrogen compounds (total nitrogen, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen and amino acids) and other nutrient elements (P, K, Ca and Na) in root bleeding saps of soybeans were measured at flowering (R2), podding (R4) and seed-filling (R6) stages respectively. 【Result】Root bleeding intensities, total nitrogen and amino acid contents of high-yielding cultivars were 13.4% and 24.0%, 31.9% and 74.2%, 46.3% and 81.0% higher than those of middle- and low-yielding cultivars at late growth stages. Nitrate nitrogen content of high-yielding cultivar was 19.9% higher than that of low-yielding cultivar, while ammonium nitrogen content of high-yielding cultivar was 16.5% lower than that of low-yielding cultivar. The P, K and Ca contents

收稿日期: 2017-03-06 优先出版时间: 2017-11-06
优先出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20171106.1412.016.html>
作者简介: 陈展宇 (1972—), 男, 副教授, 博士, E-mail: chenzhanyu2000@sina.com; 通信作者: 张治安 (1964—), 男, 教授, 博士, E-mail: zhangzhian6412@163.com
基金项目: 国家自然科学基金 (31171459); 吉林省自然科学基金 (201215178); 吉林农业大学国家级大学生创新创业训练计划 (201410193006)

of high-yielding cultivar were higher than those of low- and middle-yielding cultivars. The bleeding intensities of soybeans with different yield levels reached the maxinum values at R4 stage, and the grain yield was significantly positively correlated with bleeding intensity at R4 stage ($r = 0.765^{**}$). The contents of total nitrogen and amino acid in root bleeding saps reached the maximum values at R2 stage while the contents of P and K were the highest at R4 stage. 【Conclusion】 Root metabolism of high-yielding cultivar was vigorous and had stronger absorption capacity and vitality, which might be the key factors to increase soybean yield.

Key words: soybean; late growth stage; bleeding sap; nitrogen; nutrient element

根系是植物吸收水分、养分的重要器官, 植物根系的生长与地上部的生长紧密相关, 地上部生长所需的水分和矿物质主要由根系供应, 其对地上部生长发育和籽粒产量形成具有重要影响^[1-2]。由于根系生长在地下, 给研究工作带来不便, 根系伤流是根系活力的重要体现, 因此可以通过伤流液的数量和成分分析, 反映根系吸收、转运物质的基本情况^[3]。Morita 等^[4]认为根系伤流量是反映根系活动能力强弱的重要指标, 不同作物的伤流强度不同, 伤流液中的养分主要是根系吸收的结果。目前对水稻、小麦和马铃薯等研究表明, 伤流液质量与作物产量呈极显著正相关关系, 尤其生育后期根系活力对作物产量影响更显著^[5-7]。李国强等^[8]研究发现玉米在上午时的根系伤流量与作物产量呈显著正相关。Cui 等^[9]研究发现, 大豆叶片净光合速率的变化与根系生理活性密切相关, 与根系活力变化趋势相同。以上研究表明大豆的根系伤流和作物产量可能存在关联, 通过测量根系伤流情况来研究根系生理活动, 可以作为预测作物产量的重要指标。

大豆是喜磷且需氮量多的作物, 氮素运输需通过根系活动进行, 其所需氮素除了来自土壤和肥料, 还可以通过根瘤菌进行共生固氮, 后者能满足大豆氮素需求的 50%~60%^[10]。Osaki 等^[11]研究超高产大豆时提出根系比氮率(根系每天每克干物质中所含氮的毫克数) 是大豆超高产的重要生理指标。孙庆泉等^[12]研究玉米根系伤流液时发现, 随着品种更替, 根系对矿质元素的吸收速率逐渐增大。根系伤流液中的氮素及养分元素含量水平可以反映大豆根系吸收利用养分的情况, 氮素通过自身形态和对介质酸度的综合效应来影响作物对各养分元素的吸收^[13], 氨基酸含量可以间接反映根系的合成能力^[14]。本研究以不同产量水平大豆品种为材料, 比较生育后期根系伤流强度及伤流液中氮素及养分元素含量的差异, 分析大豆对氮素及养分元素的吸收和利用规律, 进一步探索大豆品种地下部与地上部的协同作用, 指导大豆合理施肥, 提高大豆产量

<http://xuebao.scau.edu.cn>

和改善作物品质, 为大豆高产品种选育及栽培提供一定的理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验于 2014 和 2015 年(5—10 月) 在吉林农业大学作物研究中心基地进行。土壤类型为黑壤土, 肥力中等, 土壤有机质 26.9 g·kg⁻¹、全氮 1.64 g·kg⁻¹、全磷 0.86 g·kg⁻¹、碱解氮 120 mg·kg⁻¹、速效磷 16.1 mg·kg⁻¹、速效钾 122 mg·kg⁻¹, pH 6.87。供试材料为 9 个不同产量水平的大豆 *Glycine max* (L.) Merr. 品种(表 1), 由吉林农业大学作物研究所和吉林省农业科学院大豆研究所提供。

表 1 不同产量水平的大豆品种

Tab. 1 The soybean cultivars with different yield levels

产量水平	品种	产量/(kg·hm ⁻²)
高产	长农16号	3 370
	吉农19号	3 251
	吉育95号	3 013
中产	吉林35号	2 445
	吉林36号	2 409
	吉林38号	2 535
低产	吉林5号	1 714
	吉林8号	1 840
	吉林16号	2 008

1.2 试验设计

试验采取单因素随机区组试验设计, 3 次重复。2 年均于 5 月 6 日播种, 人工点播, 每个品种种植 5 行作为 1 个小区, 行长 5 m, 行距 0.65 m, 小区面积 16.25 m², 总计 27 个小区, 密度 2×10⁵ 株·hm⁻²。各品种苗期进行间苗、定苗, 采取常规大田栽培技术及田间管理措施。9 月 28、29 日统一收获, 取中间 3 行, 去除每行两端各 0.5 m 的大豆籽粒产量为小区产量, 根据小区产量计算每公顷产量。

1.3 取样和样品测定

根系伤流液收集: 取样前将大豆子叶节附近用蒸馏水洗净擦干, 剪断地上部分, 套上已称质量(m_1) 装有脱脂棉的密封塑料套, 并将其扎紧, 收集 2 h (9:00—11:00) 后取下称质量(m_2), 将脱脂棉中的汁液离心收集, 用于测定每个品种根系伤流强度、伤流液中总氮、硝态氮、铵态氮、氨基酸以及磷、钾、钙和钠的含量。分别于开花期 (R2 期)、结荚期 (R4 期) 和 鼓粒期 (R6 期)^[15] 取样, 3 次重复。

伤流强度=(m_2-m_1) $\times$ 2。

总氮含量用凯氏定氮法^[16]测定, 硝态氮 (NO₃⁻-N) 含量用水杨酸法^[16]测定, 铵态氮 (NH₄⁺-N) 含量用靛酚蓝比色法^[17]测定, 氨基酸 (AA) 含量用水合茚三酮法^[16]测定, P 含量用钼酸铵比色法^[18]测定, K、Ca、Na 含量用原子吸收分光光度法^[16]测定。

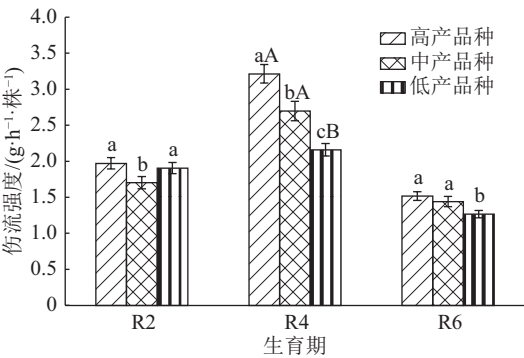
1.4 数据处理

利用 DPS7.05 统计软件和 Microsoft Excel 2007 进行数据处理及统计分析, 按 Duncan’s 法进行多重比较。对 2 年的试验数据统计分析发现, 同一品种各指标变化在年际间差异不显著, 因此, 将 2 年数据合并分析, 文中数据为 2014 和 2015 年的平均值。

2 结果与分析

2.1 不同生育时期根系伤流强度的变化

从图 1 可以看出, 不同产量水平的大豆品种根系伤流强度, 在 3 个生育时期内表现出相似的变化规律, 由 R2 期到 R4 期逐渐增大, R4 期达到最大值, R6 期降至最低。籽粒产量水平与伤流强度在 R4 期呈极显著正相关 ($r=0.765^{**}$), 在 R2 和 R6 期相关性不显著。R2 期各品种根系伤流强度表现为高产品种>低产品种>中产品种, 高产品种比低产品种



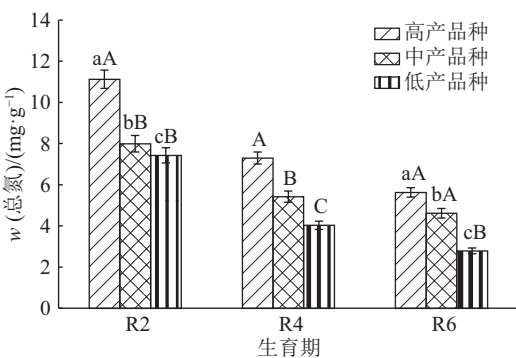
相同生育期、不同柱子上凡是有一个相同小、大写字母者, 分别表示在 0.05、0.01 水平差异不显著 (Duncan’s 法)。

图 1 不同产量水平大豆品种根伤流强度的比较
Fig. 1 Comparison of root bleeding intensities of soybeans with different yield levels

高 3.5%, 差异不显著, 比中产品种高 15.8%, 差异显著 ($P<0.05$); R4 期根系伤流强度以高产品种最大, 其次中产品种, 低产品种最小, 高产品种比中产品种高 19.1%, 差异显著 ($P<0.05$), 比低产品种高 48.7%, 差异极显著 ($P<0.01$); R6 期高产品种根系伤流强度比中产品种高 5.3%, 差异不显著, 比低产品种高 19.8%, 差异显著 ($P<0.05$)。高产大豆品种具有较高的伤流强度, 表明其生育后期根系代谢旺盛。

2.2 不同生育时期根系伤流液氮素含量变化

2.2.1 不同生育时期根系伤流液总氮含量比较
从不同产量水平大豆根系伤流液总氮含量的变化来看 (图 2), 植株开花后, 随着生育进程的推进, 伤流液总氮含量逐渐降低, R2 期最高, R6 期最低。高产品种根系伤流液总氮含量在 R2 和 R4 期极显著高于中、低产品种 ($P<0.01$), 在 R6 期显著高于中产品种 ($P<0.05$), 极显著高于低产品种 ($P<0.01$), 籽粒产量水平与伤流液中总氮含量在 R2 和 R4 期呈显著正相关 (r 分别为 0.482* 和 0.588*), 在 R6 期相关性不显著。在 R2 期, 高产品种根系伤流液总氮含量比中、低产品种分别高 39.2% 和 49.7%, 差异极显著 ($P<0.01$); 在 R4 期, 高产品种根系伤流液总氮含量比中、低产品种分别高 34.5% 和 81.1%, 差异极显著 ($P<0.01$); 在 R6 期, 高产品种根系伤流液总氮含量比中、低产品种分别高 21.9% ($P<0.05$) 和 91.8% ($P<0.01$)。高产大豆品种根系含氮化合物含量高于其他品种, 表明其在整个生育后期根系对氮素的有效吸收利用能力较强。



相同生育期、不同柱子上凡是有一个相同小、大写字母者, 分别表示在 0.05、0.01 水平差异不显著 (Duncan’s 法)。

图 2 不同产量水平大豆品种根系伤流液中总氮含量的比较
Fig. 2 Comparison of total nitrogen contents in root bleeding sap of soybeans with different yield levels

2.2.2 不同生育时期根系伤流液硝态氮 (NO₃⁻-N) 含量比较
图 3 表明, 根系伤流液 NO₃⁻-N 含量在不同生育时期的变化规律与总氮含量相似, 随着生

育进程的推进, 伤流液 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量逐渐降低。相同生育时期根系伤流液 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量中产品种>高产品种>低产品种, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量与籽粒产量水平在 R2 和 R4 期呈显著正相关 (r 分别为 0.480* 和 0.398*)。R2 期高产和中产品种 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量比低产品种分别高 21.9% 和 26.8%, 差异显著 ($P<0.05$); R4 期高产和中产品种 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量比低产品种分别高 18.4% 和 25.2%, 差异显著 ($P<0.05$); R6 期高产和中产品种 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量比低产品种分别高 19.3% 和 24.0%, 差异显著 ($P<0.05$)。高产和中产品种各时期 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量差异均不显著。

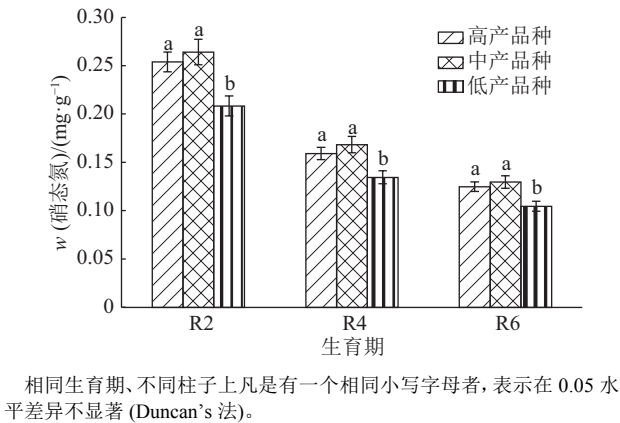


图 3 不同产量水平大豆品种根系伤流液中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量的比较

Fig. 3 Comparison of nitrate nitrogen content in root bleeding sap of soybeans with different yield levels

2.2.3 不同生育时期根系伤流液铵态氮 ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$) 含量比较

图 4 表明, 在整个生育后期根系伤流液

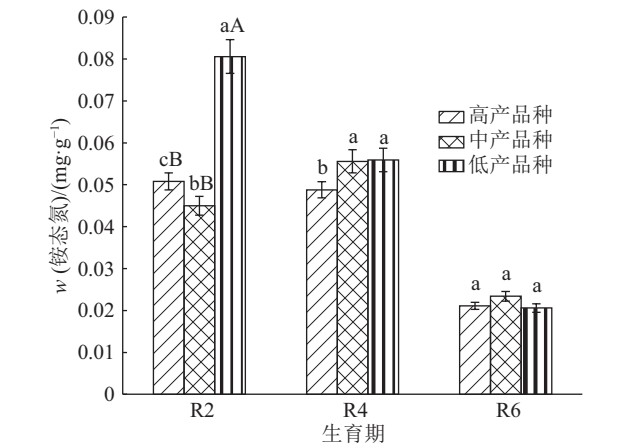


图 4 不同产量水平大豆品种根系伤流液中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量的比较

Fig. 4 Comparison of ammonium nitrogen contents in root bleeding sap of soybeans with different yield levels

$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量的变化规律与总氮和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 有差异, 随着生育进程的推进, 低产和高产品种根系伤流液 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量呈下降趋势, 而中产品种呈先升高后下降的趋势。 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量与籽粒产量水平呈负相关, 但相关性不显著。在 R2 和 R4 期, 根系伤流液 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量较高, R6 期 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量明显降低。不同产量水平大豆品种在不同生育期的根伤流液 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量变化规律不同, R2 期高产品种 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量比中产品种高 13.0% ($P<0.05$), 高产和中产品种 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量比低产品种分别低 36.9% 和 44.2%, 差异极显著 ($P<0.01$); R4 期高产品种 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量比中产和低产品种分别低 12.1% 和 12.5%, 差异显著 ($P<0.05$), 中产品种 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量比低产品种低 0.5%, 差异不显著; R6 期高产、中产和低产品种三者之间 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量差异不显著。

2.2.4 不同生育时期根系伤流液氨基酸 (AA) 含量比较

图 5 表明, 在整个生育后期, 随着生育进程推进, 根系伤流液 AA 含量呈逐渐降低的变化趋势。高产品种根系伤流液 AA 含量均高于中、低产品种, AA 含量与籽粒产量水平呈正相关, R2 期达到显著水平 ($r=0.640^*$), R4 期达到极显著水平 ($r=0.824^{**}$)。R2 期高产品种 AA 含量比中产和低产品种分别高 66.7% 和 81.9%, 差异极显著 ($P<0.01$); R4 期高产品种 AA 含量比中产和低产品种分别高 43.7% 和 135.7%, 差异极显著 ($P<0.01$); R6 期高产和中产品种 AA 含量比低产品种分别高 28.5% 和 25.5%, 差异显著 ($P<0.05$), 高产品种 AA 含量比中产品种高 2.4%, 差异不显著。高产大豆品种根系伤流液中 AA 含量较高, 可能是高产大豆根系对 AA 合成能力更强所致。

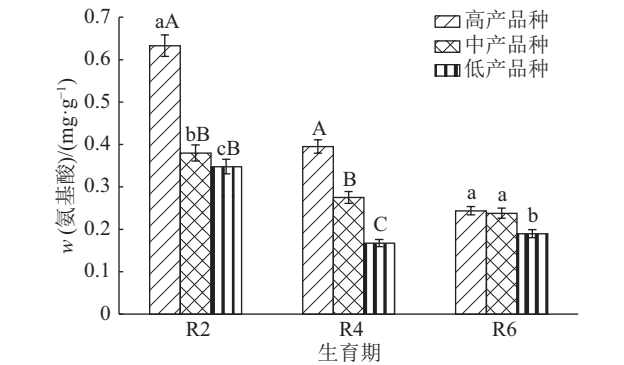


图 5 不同产量水平大豆品种根系伤流液中 AA 含量的比较

Fig. 5 Comparison of amino acid contents in root bleeding sap of soybeans with different yield levels

2.3 不同生育时期根系伤流液中养分元素含量的变化

由表 2 可见, 3 个产量水平大豆品种根系伤流液中 P、K 含量变化规律相同, 随生育期的推进均呈单峰曲线变化, 从 R2 期开始增加, 到 R4 期达到最大值, 之后又开始下降, 整个生育后期根系伤流液中 P、K 含量, 高产品种>中产品种>低产品种。P 含量与籽粒产量水平呈正相关, R2 期达到极显著水平 ($r=0.801^{**}$), R4 期达到显著水平 ($r=0.512^{*}$)。R4 期高产品种 P 含量比中产和低产品种分别高 10.3% 和 16.5%, 差异显著 ($P<0.05$); R6 期 3 个产量水平大豆品种间根系伤流液 P 含量差异显著 ($P<0.05$), 高产品种比中产和低产品种分别高 11.7% 和 16.3%。高产品种根系伤流液中 K 含量均高于中产和低产品种, 且在 R6 期三者间差异达到显著水平 ($P<0.05$), 高产品种 K 含量比中产和低产品种分别高 9.3% 和 15.6%; R4 期高产品种与中产和低产品种间 K 含量差异显著 ($P<0.05$), 高产品种比中产和低产品种分别高 10.3% 和 11.2%。K 含量与籽粒产量水平呈正相关, 且在 R2 和 R4 期达到显著水平 ($r=0.554^{*}$, $r=0.512^{*}$)。

3 个产量水平大豆品种在不同生育期的根系伤流液中 Ca 含量与 P、K 含量具有相似的变化趋势, 呈现先升高后下降的变化, R4 期最高, R6 期最低 (表 2)。高产品种整个生育后期根系伤流液中 Ca 含

表 2 不同产量水平大豆品种根系伤流液中养分元素含量的比较¹⁾

Tab. 2 Comparison of nutrient element contents in root bleeding sap of soybeans with different yield levels

养分元素	生育期	w/ (mg·g ⁻¹)		
		高产品种	中产品种	低产品种
P	R2	66.7±3.98a	54.5±2.46a	49.5±4.73a
	R4	121.1±10.90a	108.6±7.61b	101.5±8.61b
	R6	94.7±6.84a	83.6±7.97b	79.3±4.12c
K	R2	170.1±11.91a	163.2±5.19a	157.8±11.16a
	R4	363.1±19.98a	325.8±16.29b	322.4±22.6b
	R6	292.9±11.72a	265.8±21.3b	247.2±17.5c
Ca	R2	59.1±6.51a	58.5±5.27a	54.6±4.94b
	R4	72.3±7.95a	70.5±5.53b	63.3±5.26c
	R6	56.3±3.38a	49.5±3.96b	52.6±5.13c
Na	R2	15.4±1.39a	17.1±0.65b	19.9±8.45c
	R4	29.1±1.74a	38.4±4.11b	31.7±1.15c
	R6	66.7±3.98a	33.1±1.51b	32.2±2.42b

1) 同行数据后凡是有个相同小写字母者,表示差异不显著 ($P>0.05$, Duncan's 法)。

量均保持较高水平, 高于中、低产品种。Ca 含量与籽粒产量水平在 R2 期呈显著正相关 ($r=0.606^{*}$), 在 R4 和 R6 期相关性不显著。R4 和 R6 期 3 个产量水平大豆品种间 Ca 含量差异显著 ($P<0.05$), R4 期高产品种 Ca 含量比中产和低产品种分别高 2.5% 和 12.5%, R6 期高产品种 Ca 含量比中产和低产品种分别高 12.1% 和 6.6%。3 个产量水平大豆品种根系伤流液中 Na 含量随生育期变化的规律性不明显 (表 2), Na 含量与籽粒产量水平相关性不显著。R6 期高产品种根系伤流液中 Na 含量显著高于中产和低产品种, R2 和 R4 期高产品种根系伤流液中 Na 含量均比中产和低产品种低, 且 3 个产量水平大豆品种间差异显著。

3 讨论与结论

3.1 大豆产量与根系活力的关系

周蓉等^[19]认为, 根系的生长发育除受土壤环境、气候条件和栽培措施影响外, 自身遗传因素也进行着调控, 根系对产量的影响是复杂、间接的生理过程, 根系性状与产量性状密切相关, 大豆根系性状可以作为高产间接选择指标之一。孙彪等^[20]研究表明, 随着大豆品种的遗传改良, 植株地上部生物量增加明显, 同时根系伤流量也显著提高, 二者均衡增长协同进化。Guan 等^[21]认为, 适当的翻耕和旋耕措施能增加玉米根系生物量和伤流量, 显著提高植株生物产量和籽粒产量。Zhang 等^[22]的研究结果也表明, 水稻较高的根系活力能明显提高灌浆期籽粒的灌浆速率, 根系活力与灌浆速率具有显著正相关性。本研究表明, 随着生育进程推进, 3 个产量水平大豆品种的根系伤流强度在结荚期达到最大, 该时期产量与伤流强度呈极显著正相关, 而后伤流强度呈下降趋势, 说明大豆在生殖生长后期根系活力下降, 但高产大豆品种根系后期仍具有较高的伤流强度和较旺盛的根系生理活动。

3.2 不同产量水平大豆品种根系氮素累积的差异

植物利用的氮源主要是无机氮化物, 尤其又以 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 为主, 不同作物对二者的吸收利用能力有所差异。大豆根系伤流液中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量变化是其根系吸收氮素能力和氮代谢状况的直接反映, 根系伤流液中 $\text{AA}/\text{NO}_3^- \text{-N}$ 比值直接反映根部活性的高低和植株对 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的吸收和利用能力^[23]。Schjørring^[24]用水培试验证明大麦、油菜等作物对 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的吸收速率均大于 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, 本试验也得到相同结果。本研究发现, 整个生育后期, 不同产量水平大豆品种的根系伤流氮素成分含

量的峰值多出现在开花期, 说明此时期大豆氮代谢最为旺盛。氮素需求水平较高, 有利于植株干物质积累, 这不仅有助于降低脱花落荚, 也为鼓粒期提供了充足的养分, 这与杨光等^[25]的结果相一致。在开花期和结荚期根系伤流液中总氮、 $\text{NO}_3^- \text{--} \text{N}$ 和 AA 含量与大豆产量呈显著或极显著正相关, 高产品种生殖生长阶段根系活力较强, 具有较高的伤流强度和伤流组分含量, 氮素的形成速度及运输较快。从开花期到鼓粒期高产品种根系具有较强的吸收力和物质生产力, 其根系竞争力普遍高于中产和低产品种。AA 具有防止花荚脱落的生理功能, 高产大豆根系伤流液中 AA 含量较高, 可能是因为高产大豆根系中参与 AA 合成的酶活性更强, 根系吸收的 $\text{NO}_3^- \text{--} \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{--} \text{N}$ 被迅速同化为 AA。大豆生育后期根系供应 AA 等氮素给地上部, 促进地上部器官中蛋白质的合成, 具有至关重要的作用。因此应根据作物根系性状加强栽培管理和品种选育, 通过延缓根系衰老速度而获得高产。

3.3 不同产量水平的大豆品种根系养分元素含量的差异

为了保证大豆高产和稳产, 必须施用大量的矿质元素, 根系通过矿质元素的吸收来控制植株个体和群体的生长发育^[26]; 籽粒产量的提高是品种更替的核心, 高产品种需要合成和贮藏更多的生物产量, 其根系一定具有更强的吸收能力^[27]。矿质营养是植物生长发育所必需的, 矿质元素肥料的施用促进农业高产, 大多数作物产量与它们吸收肥料的数量呈线性关系^[28]。本研究发现, 大豆整个生育后期根系对 P、K 的吸收符合 S 型曲线, 其积累都呈现“慢-快-慢”的过程, 高产大豆品种根系对 P、K 的吸收、运输能力较强。在开花期和结荚期, 伤流液中 P、K 含量与大豆产量呈显著或极显著正相关。高产大豆品种整个生育后期根系伤流液中 P、K、Ca 含量较高, 表明其具有较强的根系活力且通过根系从土壤中摄取养分数量显著高于低产品种, 高产品种根系衰老进程显著落后于低产品种, 这与刘莹等^[29]研究一致。较高的根系活力能改善植株生长发育状况, 提高叶片光合性能, 增加干物质积累, 这是高产形成的重要原因之一。3 个产量水平大豆品种均在结荚期对养分元素需求量较大, 结荚期吸收 P、K、Ca 可能对籽粒形成效率的影响最大, P、K 吸收相互促进, P、K 能够促进作物根系对 $\text{NO}_3^- \text{--} \text{N}$ 的吸收转化及运输; Ca 可以提高根系硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶等活性, 增加氮素的积累, 植物在逆境胁迫下 Ca 能提高植物的抗逆性。高浓度的 Na 对

植物生长有害, 但植物的生长也需要一定量的 Na, Na 能提高根系渗透吸水能力, 此外低水平的 Na 对许多 C_3 植物生长是有益的。高产大豆品种开花期和结荚期根系伤流液中 Na 含量低, 成熟期 Na 含量较高, 说明根系生育后期还具有较强的 Na 元素吸收和运输能力, 这也从侧面反映了高产大豆生育后期对逆境的适应能力较强。

综上所述, 高产大豆的遗传改良显著提高了大豆品种根系伤流强度及伤流液中氮素和养分元素的含量, 高产大豆品种开花期根系氮素含量最高, 氮代谢最为旺盛, 结荚期、鼓粒期次之。与中、低产大豆品种相比, 高产大豆品种在整个生育后期一直具有较高的根系活力, 保持根系对土壤中 P、K 和 Ca 等养分元素的高效吸收和利用, 根系衰老进程延缓, 这可能是高产大豆品种产量高的主要原因。

参考文献:

[1] LIEDGENS M, SOLDATI M, STAMP P, et al. Root development of maize (*Zea mays* L.) as observed with minirhizotrons in lysimeters[J]. *Crop Sci*, 2000, 40(6): 1665-1672.

[2] 马兆慧, 车仁君, 王海英, 等. 种植密度和种植方式对超高产大豆根系形态和活力的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(6): 1084-1094.

[3] 刘胜群, 张天柱, 宋凤斌, 等. 不同耐旱基因型玉米伤流液中元素含量研究[J]. *土壤与作物*, 2012, 1(3): 175-180.

[4] MORITA S, OKAMOTO M, ABE J, et al. Bleeding rate of field-grown maize with reference to root system development[J]. *Jpn J Crop Sci*, 2000, 69(1): 80-85.

[5] 赵全志, 吕德彬, 程西永, 等. 杂种小麦群体光合速率及伤流强度优势研究[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(8): 925-928.

[6] 肖金川, 武志海, 徐克章, 等. 吉林省 47 年育成的水稻品种根系伤流液重量变化及其与剑叶光合速率的关系[J]. *植物生理学报*, 2012, 48(5): 499-504.

[7] 田丰, 张永成. 马铃薯根系吸收活力与产量相关性研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2004, 22(2): 105-107.

[8] 李国强, 周吉, 曹治彦, 等. 玉米根系伤流量与产量关系研究[J]. *华北农学报*, 2011, 26(6): 114-117.

[9] CUI X Y, DONG Y Z, GI P, et al. Relationship between root vigour, photosynthesis and biomass in soybean cultivars during 87 years of genetic improvement in the northern China[J]. *Photosynthetica*, 2016, 54(1): 81-86.

[10] OHWAKI Y, SUGAHAR A K. Active extrusion of protons and exudation of carboxylic acids in response to iron deficiency by roots of chickpea (*Cicer arietinum* L.)[J]. *Plant Soil*, 1997, 189(1): 49-55.

[11] OSAKI M, SHINANO T, MATSUMOTO M, et al. A root-shoot interaction hypothesis for high productivity of field crops[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 1997, 43(S1): 1079-

- 1084.
- [12] 孙庆泉, 胡昌浩, 董树亭, 等. 我国不同年代玉米品种生育全程根系特性演化的研究[J]. 作物学报, 2003, 29(5): 641-645.
- [13] 杨峰, 娄莹, 刘沁林, 等. 玉米行距配置对套作大豆生物量、根系伤流及养分的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 4056-4064.
- [14] LORENZ H. Nitrate, ammonium and amino acids in the bleeding sap of tomato plants in relation to form and concentration of nitrogen in the medium[J]. Plant Soil, 1976, 45(1): 169-175.
- [15] FEHR W R, CAVINESS C E, BURMOOD D T, et al. Stage of development descriptions for soybean, *Glycine max* (L.) Merrill[J]. Crop Sci, 1971, 34: 1143-1151.
- [16] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 121-195.
- [17] 梁剑光, 朱玲, 徐正军. 靛酚蓝-分光光度法测定发酵液中铵态氮含量研究[J]. 食品与发酵工业, 2006, 32(9): 134-137.
- [18] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 50-52.
- [19] 周蓉, 陈海峰, 王贤智, 等. 大豆幼苗根系性状的 QTL 分析[J]. 作物学报, 2011, 37(7): 1151-1158.
- [20] 孙彪, 孙苗苗, 徐克章, 等. 不同年代大豆品种根系伤流液重量变化及其与地上生物量的关系[J]. 大豆科学, 2012, 31(4): 579-583.
- [21] GUAN D, AI-KAISI M M, ZHANG Y, et al. Tillage practices affect biomass and grain yield through regulating root growth, root-bleeding sap and nutrients uptake in summer maize[J]. Field Crops Res, 2014, 157(2): 89-97.
- [22] ZHANG H, XUE Y, WANG Z, et al. Morphological and physiological traits of roots and their relationships with shoot growth in “super” rice[J]. Field Crops Res, 2009, 113(1): 31-40.
- [23] BARTHES L, DELEENS E, BOUSSER A J, et al. Nitrate use and xylem exudation in detopped wheat seedlings: An early diagnosis for predicting varietal differences in nitrogen utilization?[J]. Aust J Plant Physiol, 1996, 23(1): 33-44.
- [24] SCHJØRRING J K. Nitrate and ammonium absorption by plants growing at a sufficient or insufficient level of phosphorus in nutrient solutions[J]. Plant Soil, 1986, 91(3): 313-318.
- [25] 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.
- [26] COSTA C, DWYER L M, HAMILTON R I, et al. A sampling method for measurement of large rootsystems with scanner-based image analysis[J]. Agron J, 2000, 92(4): 621-627.
- [27] 郭小红, 王兴才, 孟田, 等. 中美大豆III熟期组代表品种根系形态和活力的比较研究[J]. 中国农业科学, 2015, 48(19): 3821-3833.
- [28] 王威, 张联合, 李华, 等. 水稻营养吸收和转运的分子机制研究进展[J]. 中国科学: 生命科学, 2015, 45(6): 569-590.
- [29] 刘莹, 肖付明, 张孟臣. 冀南地区不同产量类型夏大豆根系性状的研究[J]. 大豆科学, 2009, 28(4): 665-669.

【责任编辑 周志红】