

分类号：
学号：20232112021

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



叶面肥对滴灌大豆干物质积累与产量的影响

学位申请人	刘懂飞
指导教师	樊华 教授
	张恒斌 副研究员
申请学位类别	农业硕士
专业名称	农业
研究领域	农艺与种业
所在学院	农学院

中国·新疆·石河子
2026年5月

分类号：
学号：20232112021

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文

叶面肥对滴灌大豆干物质积累与产量的影响

学位申请人	刘懂飞
指导教师	樊华 教授
	张恒斌 副研究员
申请学位类别	农业硕士
专业名称	农业
研究领域	农艺与种业
所在学院	农学院

中国·新疆·石河子
2026年5月

**The influence of foliar fertilizers on dry matter accumulation and yield
of drip-irrigated soybeans.**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Agriculture

By

Liu Dongfei

(Agronomy and Seed Industry)

Dissertation Supervisor: Prof.Fan Hua

Associate researcher Zhang Hengbin

May, 2026

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：刘懂飞

时间：2026年5月30日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：刘懂飞

时间：2026年5月30日

导师签名：樊平

时间：2026年5月30日

摘要

【目的】

新疆连续多年创造我国大豆高产记录，但是在田间实际生产中，受大豆光合同化物供应不足导致花荚脱落的影响，使得实际产量与潜在产量存在差距，本研究以不同类型叶面肥为调控手段，探究其对大豆养分吸收转运，光合生理特征、干物质积累以及花荚脱落的影响，旨在明确叶面肥对大豆产量形成的调控效应，筛选适宜滴灌大豆的高产高效叶面肥类型。

【方法】

于 2024-2025 年在新疆维吾尔自治区石河子气象局乌兰乌苏农业气象试验站开展田间试验，采用两因素随机区组设计（品种×叶面肥类型），以大豆高蛋白品种龙垦 324（V1）和高油品种新振豆 1 号（V2）为试验对象，设置喷施清水（CK）、壳寡糖（T1）、EDTA-Fe（T2）、多聚磷（T3）、壳寡糖+EDTA-Fe（T4）、壳寡糖+多聚磷（T5）、EDTA-Fe+多聚磷（T6）、壳寡糖+EDTA-Fe+多聚磷（T7）8 个处理。于始花期、始荚期和始粒期进行叶面喷施。测定植株磷铁积累量、光合参数、叶绿素荧光特性及关键光合酶活性，花荚形成及脱落动态，通过结合β生长模型分析干物质积累和开花结荚特征，并基于 EW-TOPSIS、RSR、FCE 和 CEI 模型进行多目标综合评价筛选适宜新疆滴灌大豆叶面肥类型。

【结果】

（1）与 CK 相比，叶面肥处理显著提高了大豆植株地上部磷素积累量（16.31%-68.05%）与铁素积累量（17.13%-68.39%），并提高叶片磷素转移率（5.30%-15.83%）和铁素转移率（4.60%-37.51%），以 T7 处理增加最为显著。品种间表现为 V2 品种地上部磷素积累量、地上部铁素积累量、叶片磷素转移率和铁素转移率分别较 V1 品种提高了 7.18%、19.20%、38.61%和 2.39%，而籽粒中磷素与铁素积累量则以 V1 品种更高，分别较 V2 品种提高 4.54%和 8.00%。

（2）与 CK 相比，叶面肥处理显著提高了大豆总叶绿素含量（8.20%-22.63%）、净光合速率（9.66%-25.94%）、光系统II实际光合效率 YII（4.27%-13.08%）以及 Rubisco 酶活性（15.09%-40.68%）和 PEPC 酶活性（14.76%-51.99%）。品种间表现为 V2 品种的总叶绿素含量、净光合速率、光系统II实际光合效率 YII、Rubisco 酶活性和 PEPC 酶活性分别较 V1 品种提高了 5.30%、10.83%、0.68%、18.38%和 7.71%。

（3）与 CK 相比，叶面肥处理延迟大豆花荚发育进程，同时增加最大花荚发育速率，显著降低了大豆落花率（8.03%-32.84）与落荚率（11.26%-46.12%），以 T7 处理效果最为显著。T7 处理的最大开花速率、达到最大开花速率的时间、最大结荚速率以及达到最大结荚速率的时间分别较对照显著提高 12.40%、1.57d、22.6%和 1.97d。品种间表现为 V2 品种的落花率（7.29%）和落荚率（44.1

7%) 高于 V1 品种, 其中 V1 品种的最大开花速率、达到最大开花速率的天数、最大结荚速率以及达到最大结荚速率的时间分别较 V2 品种提高了 21.48%、0.39d、41.27%和 1.97d。

(4) 与 CK 相比, 叶面肥处理显著提高了大豆叶面积指数 (9.97%-31.26%), 地上部最大干物质积累量 (8.06%-24.16%) 和最大干物质积累速率 (6.90%-44.91%), 提高了花荚器官在地上部干物质中的比例 (4.02%-12.64%), 均以 T7 处理最显著。品种间表现为 V2 品种叶面积指数、地上部最大干物质积累量、地上部最大干物质积累速率以及花荚器官在地上部干物质中的比例均高于 V1 品种, 提高率分别为 17.85%、12.44%、10.16%和 23.38%。

(5) 与 CK 相比, 叶面肥处理显著提高了两品种大豆产量 (2.3%-12.03%)、蛋白质含量 (2.52%-7.96%)、脂肪含量 (5.21%-11.59%) 和经济效益 (11.03%-27.16%)。熵权-优劣解距离 (EW-TOPSIS)、秩和比 (RSR)、模糊综合评价 (FCE) 和综合评价指数 (CEI) 模型进行综合评价表明, T7 处理多目标综合排序最高。品种间表现为 V1 品种产量、蛋白质含量和净收益高于 V2 品种, 提高率分别为 11.55%、5.22%和 47.60%, V2 品种脂肪含量高于 V1 品种, 提高率为 4.64%。

【结论】

叶面肥处理显著提升大豆地上部磷、铁积累量及转移率, 改善光合生理指标, 优化花荚发育进程, 降低落花落荚率, 提高叶面积指数、干物质积累量及花荚干物质分配比例, 同时提升产量、蛋白质含量、脂肪含量及经济效益, 且均以 T7 处理效果最优。品种间差异显著, V2 品种在养分积累、光合指标、干物质积累等方面优于 V1 品种, 而 V1 品种在籽粒养分积累、花荚发育及产量、净收益上更具优势。壳寡糖+EDTA-Fe+多聚磷处理可作为新疆滴灌大豆高产高效的适宜叶面肥处理方案。

关键词: 叶面肥; 滴灌大豆; 花荚; 干物质积累; 产量

Abstract

【Objective】

Xinjiang has set national records for high soybean yields for many consecutive years. However, in actual field production, insufficient supply of photoassimilates leads to flower and pod abscission, resulting in a gap between actual and potential yields. This study used different types of foliar fertilizers as a regulatory measure to investigate their effects on nutrient uptake and translocation, photosynthetic physiological characteristics, dry matter accumulation, and flower/pod abscission in soybeans. The aim was to clarify the regulatory effects of foliar fertilizers on soybean yield formation and to identify high-yield and high-efficiency foliar fertilizer types suitable for drip-irrigated soybeans.

【Methods】

Field experiments were conducted from 2024 to 2025 at the Wulanwusu Agrometeorological Experiment Station of the Shihezi Meteorological Bureau in the Xinjiang Uygur Autonomous Region. A two-factor randomized block design (variety \times foliar fertilizer type) was adopted, using the high-protein soybean variety Longken 324 (V1) and the high-oil variety Xinzhendou 1 (V2). Eight treatments were established: spraying water (CK), chitosan oligosaccharide (T1), EDTA-Fe (T2), polyphosphate (T3), chitosan oligosaccharide + EDTA-Fe (T4), chitosan oligosaccharide + polyphosphate (T5), EDTA-Fe + polyphosphate (T6), and chitosan oligosaccharide + EDTA-Fe + polyphosphate (T7). Foliar spraying was performed at the initial flowering, initial podding, and initial seed filling stages. Measurements included plant phosphorus and iron accumulation, photosynthetic parameters, chlorophyll fluorescence characteristics, key photosynthetic enzyme activities, and flower/pod formation and abscission dynamics. Dry matter accumulation and flowering/podding characteristics were analyzed using a beta growth model. Multi-objective comprehensive evaluation was performed using EW-TOPSIS, RSR, FCE, and CEI models to select the suitable foliar fertilizer types for drip-irrigated soybeans in Xinjiang.

【Results】

(1) Compared to CK, foliar fertilizer treatments significantly increased shoot phosphorus accumulation (16.31%–68.05%) and iron accumulation (17.13%–68.39%), as well as leaf phosphorus translocation rate (5.30%–15.83%) and iron translocation rate (4.60%–37.51%), with the T7 treatment showing the most significant increases. Between varieties, V2 exhibited 7.18%, 19.20%, 38.61%, and 2.39% higher shoot phosphorus accumulation, shoot iron accumulation, leaf phosphorus translocation rate, and leaf iron translocation rate than V1, respectively. In contrast, grain phosphorus and iron accumulation were higher in V1, exceeding V2 by 4.54% and 8.00%, respectively.

(2) Compared to CK, foliar fertilizer treatments significantly increased total chlorophyll content (8.20%–22.63%), net photosynthetic rate (9.66%–25.94%), actual photosynthetic efficiency of photo system II (Y(II)) (4.27%–13.08%), Rubisco activity (15.09%–40.68%), and PEPC activity (14.76%–51.99%). Between varieties, V2 showed 5.30%, 10.83%, 0.68%, 18.38%, and 7.71% higher total chlorophyll content, net photosynthetic rate, Y(II), Rubisco activity, and PEPC activity compared to V1, respectively.

(3) Compared to CK, foliar fertilizer treatments delayed the progression of flower and pod development, increased the maximum flower/pod development rate, and significantly reduced flower abscission rate (8.03%–32.84%) and pod abscission rate (11.26%–46.12%), with T7 being the most effective. The T7 treatment significantly increased maximum flowering rate, time to maximum flowering rate, maximum podding rate, and time to maximum podding rate by 12.40%, 1.57 days, 22.60%, and 1.97 days, respectively, compared to CK. Between varieties, V2 exhibited higher flower abscission rate (7.29%) and pod abscission rate (44.17%) than V1. V1 showed 21.48%, 0.39 days, 41.27%, and 1.97 days higher maximum flowering rate, days to maximum flowering rate, maximum podding rate, and time to maximum podding rate than V2, respectively.

(4) Compared to CK, foliar fertilizer treatments significantly increased leaf area index (9.97%–31.26%), maximum shoot dry matter accumulation (8.06%–24.16%), maximum dry matter accumulation rate (6.90%–44.91%), and the proportion of flower/pod organs in shoot dry matter (4.02%–12.64%), with T7 being the most significant. Between varieties, V2 had higher leaf area index, maximum shoot dry matter accumulation, maximum dry matter accumulation rate, and proportion of flower/pod organs in shoot dry matter than V1, with increases of 17.85%, 12.44%, 10.16%, and 23.38%, respectively.

(5) Compared to CK, foliar fertilizer treatments significantly increased yield (2.3%–12.03%), protein content (2.52%–7.96%), fat content (5.21%–11.59%), and economic benefit (11.03%–27.16%) in both varieties. Comprehensive evaluation using EW-TOPSIS, RSR, FCE, and CEI models indicated that the T7 treatment achieved the highest multi-objective comprehensive ranking. Between varieties, V1 exhibited higher yield, protein content, and net profit than V2, with increases of 11.55%, 5.22%, and 47.60%, respectively, while V2 had a higher fat content than V1, with an increase of 4.64%.

【Conclusion】

Foliar fertilizer treatments significantly enhanced shoot phosphorus and iron accumulation and translocation rates, improved photosynthetic physiological indicators, optimized flower and pod development dynamics, reduced flower and pod abscission rates, increased leaf area index, dry matter accumulation, and the allocation of dry matter to flower/pod organs, and improved yield, protein content, fat

content, and economic benefits. The T7 treatment exhibited the most optimal overall effect. Significant differences existed between varieties: V2 was superior in nutrient accumulation, photosynthetic indicators, and dry matter accumulation, whereas V1 had advantages in grain nutrient accumulation, flower/pod development, yield, and net profit. The combination of chitosan oligosaccharide + EDTA-Fe + polyphosphate (T7) can be recommended as a suitable high-yield and high-efficiency foliar fertilizer treatment for drip-irrigated soybeans in Xinjiang.

Key words: Foliar fertilizer; Drip-irrigated soybean; Flower and pod; Dry matter accumulation; Yield

目录

摘要	I
Abstract	III
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 叶面肥的分类及利用	2
1.2.2 叶面肥对大豆养分吸收的影响	3
1.2.3 叶面肥对大豆光合生理特征的影响	4
1.2.4 叶面肥对大豆花荚生长的影响	4
1.2.5 叶面肥对大豆干物质积累与分配的影响	5
1.3 研究目标和内容	6
1.3.1 研究目标	6
1.3.2 研究内容	6
1.4 技术路线	7
第 2 章 材料与方法	8
2.1 试验区概况	8
2.2 试验设计	9
2.3 测定指标与方法	10
2.3.1 磷和铁积累量	10
2.3.2 光合色素含量	11
2.3.3 光合参数	11
2.3.4 叶绿素荧光参数	11
2.3.5 光合酶活性	12
2.3.6 开花结荚进程	12
2.3.7 花荚脱落参数	13
2.3.8 叶面积指数	14
2.3.9 干物质积累	14
2.3.10 产量及品质	15
2.3.11 净收益	15

2.3.12 多模型综合评价	15
2.4 数据统计	19
第3章 结果与分析	20
3.1 磷和铁积累量	20
3.1.1 叶片和豆荚磷素积累量	20
3.1.2 籽粒和地上部磷素积累量	21
3.1.3 营养器官和生殖器官磷素积累量占比	22
3.1.4 叶片和豆荚铁素积累量	23
3.1.5 籽粒和地上部铁素积累量	24
3.1.6 营养器官和生殖器官铁素积累量占比	25
3.1.7 叶片磷素和铁素转移率	26
3.2 叶片光合生理特征	26
3.2.1 光合色素含量	26
3.2.2 光合参数	29
3.2.3 叶绿素荧光参数	31
3.2.4 Rubisco 活性	32
3.2.5 PEPC 活性	33
3.3 花荚生长特征	33
3.3.1 花荚生长进程	33
3.3.2 花荚脱落率	37
3.4 干物质	41
3.4.1 叶面积指数	41
3.4.2 地上部干物质	41
3.4.3 营养器官和生殖器官干物质占比	44
3.4.4 茎秆干物质	44
3.4.5 叶片干物质	47
3.4.6 豆荚干物质	49
3.5 产量和品质	51
3.5.1 产量	51
3.5.2 品质	53
3.6 综合评价	53
3.7 结构方程模型	54
第4章 讨论	56
4.1 叶面肥对滴灌大豆磷铁养分积累与转运的影响	56

4.2 叶面肥对滴灌大豆叶片光合生理特征的影响	57
4.3 叶面肥对滴灌大豆花荚生长的影响	57
4.4 叶面肥对滴灌大豆干物质积累的影响	58
4.5 叶面肥对滴灌大豆产量、品质和经济效益的影响	59
第 5 章 结论与展望	61
5.1 结论	61
5.2 创新点	62
5.3 展望	63
参考文献	64
致谢	73
作者简介	74
石河子大学硕士研究生学位论文导师评阅表	75

第1章 绪论

1.1 研究背景和意义

大豆 (*Glycine max* L.) 是世界第四大粮食作物, 在保障全球粮食安全、支撑畜牧业发展及满足植物蛋白与食用植物油供给方面均具有不可替代的战略地位。2025 年我国大豆产量 2091 万吨, 进口量 11183.3 万吨, 对外依存度高达 84.25%。在我国耕地资源总量有限、粮食生产刚性约束持续增强的现实背景下, 单纯依靠扩大种植面积难以从根本上缓解大豆供应压力。因此, 提高大豆单产水平成为破解我国大豆供需矛盾、增强大豆产业自主可控能力、保障国家粮食与油料安全的关键路径与现实选择。

大豆产量构成因素包括单位面积收获株数、单株荚数、每荚粒数和百粒重^[1]。大豆产量构成因素中, 单株荚数对产量的影响最大^[2]。一般情况下, 大豆花荚脱落率为 32%-82%, 变异范围大成为制约大豆产量的关键因素之一^[3]。大豆从营养生长转向生殖生长期期间会分化出大量花芽, 其中大部分的花芽受环境因素的影响败育^[4]。花荚脱落与光合产物的不足和养分供应有关^[5,6]。在大豆生殖生长期, 干物质积累能力越弱, 花荚脱落的可能性越大。因此, 提高光合同化物供应的有效性减少花荚脱落, 是提高大豆产量的有效途径之一。

叶面肥具有针对性强、肥效快、养分利用率高、施入量小、环境污染小等特点, 已经成为现代农业肥料中重要的组成部分^[7]。叶面肥有较好的促进作物生长、提高产量及品质的作用^[8,9]。已有研究表明, 在大豆盛花期至结荚期喷施含有氮、磷、钾、硼、钼等元素的叶面肥, 能够显著延缓叶片衰老, 增强花荚发育期的光合产物供应能力, 从而提高单株荚数和粒重, 减少花荚脱落, 最终实现增产^[10-12]。不同种类叶面肥因其组成成分和作用机理存在差异, 在调控大豆生理和产量形成的效果也有所不同^[14]。

新疆充足的光热资源以及滴灌水肥一体化技术的应用, 为大豆产量形成创造了适宜的环境条件。自 1999 年以来, 新疆大豆多次创造全国大豆高产记录^[13], 然而新疆大豆平均单产 (2634 kg hm^{-2}) 距离该区大豆高产记录 ($7126.2 \text{ kg hm}^{-2}$) 存在一定差距。能否通过喷施不同种类的叶面肥改善滴灌大豆光合同化物供应提高滴灌大豆产量, 其在大豆品种类型的作用效果是否存在差异? 为此, 本研究通过分析不同种类叶面肥对滴灌大豆养分吸收、叶片光合生理特征、花荚生长规律、干物质积累、产量以及经济效益的影响, 明确叶面肥对大豆产量形成的调控效应, 筛选滴灌大豆增产增效的叶面肥类型, 为滴灌大豆高效种植管理提供技术支持。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 叶面肥的分类及利用

叶面肥是指喷施于植物叶片上且能被植物吸收利用的肥料。相关理论研究开始于 19 世纪 40 年代初，英国的 E·Gorie 用实验证明了营养物质可以通过植物的茎和叶片吸收^[15]。我国在清朝时期就有在农业生产中用河泥粪在水稻叶片上施用的记载，但叶面肥于二十世纪四五十年代才应用大面积农业生产^[7]。叶面喷施的营养物质可以通过角质层和气孔进入，而且将不同形态和类型的养分喷洒在植物的叶表面，作物对叶表面养分的吸收利用效果与根系施肥的利用效果相同^[16]。由于叶面肥便于被植物吸收利用，对环境无污染，可以促进植物生长，从而提高产量与品质，已被广泛应用于现代农林生产中^[17-21]。

根据叶面肥的组成和功能，可将其分为以下 6 类^[22]：

表 1-1 叶面肥的分类、组成和功能

Table 1-1 Classification, Composition and Functions of Foliar Fertilizers

类别	主要组成	功能特点
营养型	氮、磷、钾、钙、镁、硼、铁、锌等大中微量元素	补充作物所需的矿质养分
调节型	植物生长促进剂、抑制剂、延缓剂等生长调节剂	调控作物生长发育进程
生物型	共生或互生微生物、海藻及其发酵或代谢产物	通过生物活性物质发挥作用
肥药型	营养肥料+杀菌剂或植物抗病物质	兼具营养供给与病害防治功能
稀土型	稀土元素	稀土离子生理活性促进生长
复合型	大中微量元素、腐殖酸、氨基酸等多种成分复配	全面营养，促进与生长调控

在叶面肥广泛应用的背景下，不同种类叶面肥在促进作物养分吸收和生长发育方面表现出显著差异^[23]。在养分形态上，螯合态微量元素、缓释态养分、有机活性养分逐步替代传统无机养分，有效解决了叶面喷施易沉淀、易氧化、吸收利用率低等问题^[24, 25]。在原料选择上，天然生物刺激素、环境友好型助剂等高活性物质被广泛应用，显著提升了叶面肥的生物相容性与安全性^[26]。尤其是近年来，兼具营养供给与生理调控功能的新型叶面肥逐渐成为研究热点^[27]。通过将具有不同作用机制的功能性物质进行复配，不仅能够提高养分利用效率，还可在一定程度上缓解作物生长过程中可能出现的营养限制问题，从而实现作物产量与品质的协同提升^[28]。壳寡糖作为一种来源于天然生物材料的活性物质，具有良好的生物相容性和诱导抗性功能，可显著促进植物生长发育，提高作物对逆境的适应能力。同时，壳寡糖还能通过调节细胞膜通透性及酶活性，增强植物对矿质养分的吸收与转运能力^[27, 29]。EDTA-Fe 作为一种稳定性较高的螯合态铁肥，能够有效防止铁元素在叶面喷施过程中发生沉淀或失活，提高铁元素的有效性，从而缓解作物缺铁性黄化问题，促进光合作用的正常进行^[30]。多聚磷（Polyphosphate）则是一类具有

缓释特性的磷源，不仅能够为作物持续提供磷素营养，还可通过改善叶面营养环境，提高其他养分的协同吸收效果^[31]。在叶面肥由传统单一营养补充型向营养供给、生长调控、抗逆诱导及品质提升一体化的多功能复合方向转变的背景下^[32]。目前关于叶面肥复配后对作物生长及养分积累影响的研究仍相对有限，尤其是在不同组合模式下的作用效果及其机制尚不明确。因此，系统研究不同叶面肥处理对作物养分吸收、生长及产量形成的影响，可以为新型高效复合叶面肥的研发与应用提供理论依据和技术支撑。

1.2.2 叶面肥对大豆养分吸收的影响

养分与大豆产量形成密切相关。大豆植株氮磷钾含量在生育前期高于生育后期，吸收量以结荚到鼓粒期最多^[33]。在大豆鼓粒期，籽粒对养分需求较高，养分从植株营养器官转移到生殖器官，导致叶片衰老，最终造成减产^[34]。在大豆生产中，叶面肥可以增加大豆体内养分含量，提高物质生产水平^[35]。在大豆鼓粒期喷施壳寡糖+螯合铁可以提高叶片光合参数、干物质积累及产量和品质^[36]。在大豆叶面肥施用次数和时期的研究表明，在大豆始花期+始荚期喷施两次叶面肥效果最佳^[37]。

叶面肥配方中的营养元素和其他成分可能会刺激养分的吸收。叶面喷施壳寡糖和酵母提取物均显著提高了茴香中 N、P、K、Ca 和 Mg 含量^[38]。在增加苜蓿植株的磷含量上，叶面喷施含磷化合物比土壤施用更有效，且含磷化合物的喷洒也导致 K 和 Fe 含量的增加^[39]。在氮磷基肥施用量不足的情况下，叶面喷施尿素可满足马铃薯对氮素的需求，从而促进植物生长和土壤有效养分（特别是 N、P）的吸收和利用^[40]。叶面喷施某些微量元素也表现出同样的效果。叶面施铁显著影响辣椒地上部和根部的磷含量，以及地上部的钾、镁和钙的浓度^[41]。在藜麦上的研究也表明，喷施铁可以促进植株组织中铁的积累，导致光合色素和电子传输增加^[42]。叶片养分可以通过茎输送到根，改善根系活力，防止根的早衰，影响根系土壤微环境，从而增强根的吸收能力。利用 ¹⁵N 同位素示踪技术进行的试验表明，叶面施氮后，棉花通过根系吸收积累的氮素约为 11.35 mg，其吸收效率比对照提高了 28%^[40]。叶面喷施 50mg L⁻¹ 的 10%乙酰度壳寡糖可以显著增加马家柚实生幼苗的根长、根表面积和根干质量，对根系生长有着明显的促进作用^[43]。叶面喷施壳寡糖可以调节花生根区土壤不同固氮菌属的相对丰度，提高花生产量^[44]。叶面喷施铁螯合物使得大豆根生物量提高 32%，叶片铁蛋白基因表达量增加两倍，且磷、钾、锌和钴积累量增加^[45]。叶面喷施磷酸二氢钾可以缓解高温胁迫下根系活力的降低使根系内维持较高的抗氧化酶活性，延缓根系衰老，增加根系耐高温能力^[46]。

叶面喷施养分是一种快速、高效、定向的施肥方法。为最大限度地发挥叶面营养的效果，应根据作物对养分的吸收规律和叶面肥的特性，注意喷施时机和浓度，注重不同种类叶面肥的相互作用，使得叶面养分能够充分被吸收利用。

1.2.3 叶面肥对大豆光合生理特征的影响

在作物生物学产量中, 90%-95%的物质来自作物光合作用制造的有机物, 光合作用是决定产量的最重要因素^[47]。叶片是大豆进行光合生产的重要器官, 叶面肥通过诱导叶片生理生化过程提高叶片光合生产能力。叶面喷施壳寡糖可以通过诱导植物 NO 和 ABA 通路来促进叶片净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度的提高, 诱导气孔开度^[48, 49]。孟静静^[50]等发现叶面喷施壳寡糖可以提高花生成熟期叶片叶绿素含量。研究表明适当喷施尿素可以有效促进作物生长, 提高植物的氮素浓度, 为后期生长提供更多的氮储备^[51]。也能够提高叶片中氮含量、叶绿素含量、可溶性糖含量和淀粉含量, 能够有效提高果实品质, 降低败花率、提高产量^[52-54]。武晋涛^[55]等发现, 喷施 0.5% KH₂PO₄ 可以在抑制甘薯地上部茎叶生长的同时维持较高的叶绿素含量和适当的叶面积指数, 提高植株光合性能。叶面喷施 EDTA-Fe 可以提高马铃薯光合色素含量、气体交换参数、叶绿素荧光参数以及块茎产量和含铁量^[56]。高产大豆叶片净光合速率与产量呈显著正相关关系^[57], 提高大豆光合参数是大豆高产的重要途径和方法之一。1,5-二磷酸核酮糖羧化酶/加氧酶 (Rubisco) 和磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶 (PEPC) 是作物光合碳同化的关键酶^[58], 影响作物产量的高低。叶面施氮可以增加大豆叶片 Rubisco 活性和可溶性糖浓度^[59]。PEPC 在具有高产潜力的大豆品种中活性较高, 与大豆产量具有相关性^[60]。研究发现通过叶面喷施不同聚合度的壳寡糖, 壳五糖、壳六糖、壳七糖和壳八糖显著提高了初级碳氮代谢中的草酰乙酸、苹果酸和谷氨酸含量, 同时也发现壳寡糖抑制了小麦叶绿素分解代谢中的叶绿素酶的转录水平, 抑制了叶绿素的降解, 上调了与碳氮代谢有关的海藻糖磷酸酶、PEPC、MDH、乙醛脱氢酶和谷氨酸脱氢酶基因^[61]。研究表明叶面喷施 KHCO₃ 可以使黄瓜幼苗叶片 PEPC 含量及活性和 PEPC 比活力增加^[62]。叶面施铁可以可以提高间作条件下玉米 Rubisco 活性促进间作玉米生长和产量提高^[63]。因此, 在作物生长发育过程中, 喷施叶面肥可以提高大豆的光能效率和光合作用相关酶的活性, 增加大气中 CO₂ 的固定, 促进作物碳素积累进而提高产量。

1.2.4 叶面肥对大豆花荚生长的影响

前人于 20 世纪 80-90 年代, 对大豆的花荚形成进行了初步的研究并提出了花荚形成的一般规律即: 任何结荚习性的品种其开花顺序与始花有关, 始花越早, 则始花部位越低, 始花越晚, 则始花部位越高^[64, 65]。花荚脱落是大豆生殖生长过程中的一种自我调节现象^[66], 然而过量脱落严重影响产量。很多大豆品种的花荚脱落率可达 40%-70%^[67], 甚至有报道显示高达 80%以上^[3]。大豆花芽分化及随后花蕾、花和幼荚的形成与发育需要大量的有机养分 (如糖、蛋白质等) 和无机养分 (如大量的矿质营养元素等)。在花