分类号：Q819　　密　　级：公开
学　号：20222506003　　单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文

盐胁迫对黄芪活性成分含量影响的机理研究

学位申请人　程淋渊
指导教师　李鸿彬 教授
　　沈海涛 研究员

申请学位类别　专业硕士
专业名称　生物与医药
研究领域　生物技术与工程
所在学院　生命科学学院

中国·新疆·石河子
2025 年 6 月

分类号：Q819　　密　　级：公开
学　　号：20222506003　　单位代码：10759

石河子大学

硕 士 学 位 论 文

盐胁迫对黄芪活性成分含量影响的机理研究

学 位 申 请 人　程淋渊
指 导 教 师　李鸿彬 教授
　　沈海涛 研究员

申 请 学 位 类 别　专业硕士
专 业 名 称　生物与医药
研 究 领 域　生物技术与工程
所 在 学 院　生命科学学院

中国·新疆·石河子
2025 年 6 月

Study on the mechanism of the effect of salt stress on the content of active components in Astmgali Radix

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Professional Master's Degree

By

Cheng Lin-yuan

(Biology and Medicine)

Dissertation Supervisor: Prof. Li Hong-bin

Research Prof.Shen Hai-tao

China • Xinjiang • Shihezi

June,2025

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

本人所呈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：程淋渊　　时间：2015年5月19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：程淋渊　　时间：2015 年5 月19日

导师签名：　　时间：2015年5月19日

摘要

目的：黄芪是我国传统大宗中药材，其根部富含黄酮、皂苷及多糖等多种活性成分，具有补气固表、调节免疫等功效，广泛应用于医药、保健品及食品领域。目前，市场上供应的黄芪主要来源于人工栽培，但人工种植的黄芪存在栽培周期长、盐碱不耐受、品质不达标等问题。由于植物在遭受适度的非生物胁迫时（如盐胁迫），会通过提升次生代谢物的合成来抵御胁迫，这为在荒漠盐碱地上培育高产、高品质的优质黄芪提供了新思路。因此，本研究通过综合分析盐胁迫对不同种源黄芪发芽率和对根部主要活性成分含量的影响，结合转录组测序分析，探究黄芪响应盐胁迫调控品质形成的机理，筛选出可能提升黄芪品质的关键抗盐基因和转录因子。本研究为筛选优质耐盐碱的黄芪种质资源提供理论依据，为揭示盐胁迫提高黄芪品质的分子机制奠定了研究基础。

方法：通过测定不同种源黄芪在盐胁迫下的发芽率，确定耐盐性较强的种源，并对其进行了碱胁迫和盐碱混合胁迫，观察其在综合环境下的发芽率以及生长情况，筛选出抑制发芽的临界盐浓度（即抑制种子萌发）；在该盐浓度条件下，结合外源激素浸种处理，以筛选盐胁迫下能显著促进种子萌发和生长的激素种类及浓度。同时结合不同种源的黄芪在大田的初步种植情况（植株生长情况、农艺性状、产量以及活性成分含量等），确定后续盐胁迫实验的种源材料；不同浓度 NaCl（50、100、150、200 mmol/L）胁迫苗期黄芪不同时间（2、6、12、24 h）对其地下部分主要活性成分含量的影响，以及 4 种盐浓度长期胁迫下黄芪幼苗的生长情况，确定出适宜的 NaCl 胁迫浓度；利用转录组测序技术并结合适宜的 NaCl 胁迫浓度下黄芪根部活性成分的含量，综合分析盐胁迫对黄芪幼苗地下部分主要活性成分含量影响可能的分子机理与耐盐机制。

结果：

（1）盐胁迫下不同种源黄芪的筛选鉴定

3 种不同种源的黄芪（1 号：陇西县东浩药业黄芪籽，2 号：景熙种业安国中草药黄芪籽，3 号：陕西黄芪籽）的发芽率和发芽势随盐浓度增加下降，其中 3 号耐盐性最强，且 0.4% NaCl 为生长最大耐受盐浓度，发芽率达到 69.3%，故选其用于后续发芽率实验。碱胁迫相较于盐胁迫对 3 号种子萌发状况抑制更显著，随碱浓度的增加而显著下降；盐碱比例为 0.5%：0.5%浓度下，发芽率达到 77.33%，而高于该浓度时萌发被显著抑制。本研究发现，0.4% NaCl 胁迫下，使用 50 和 100 μg/mL 的赤霉素（GA3）处理种子后，发芽率分别提高 12%和 22.33%；50 和 100 μg/mL 的水杨酸（SA）处理后，发芽率分别提高 16%和 19.33%；而吲哚乙酸（IAA）无显著促进作用。将黄芪在大田种植，发现 3 号种子田间出苗情况较好；3 种黄芪根部农艺性状差异明显，产量为 3 号>2 号>1 号。活性成分含量测定发现，1 号和 3 号黄芪的毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量显著高于 2 号，分别是其 2.3 倍和 1.8 倍。综上所述，黄芪 3 号种子具有耐盐、高产、品质优良等优势，因此，作为后续探究 NaCl 胁迫对黄芪幼苗地下部分主要活性成分含量的影响的实验材料。

（2）NaCl 胁迫对苗期黄芪地下部分主要活性成分含量的影响分析

适度的盐胁迫显著增加了黄芪甲苷和毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量的积累。50 mmol/L NaCl 处理黄芪 6 h、12 h 和 24 h，其根部黄芪甲苷的含量显著高于同期对照，如 12 h 时黄芪甲苷含量增加 76.32%；4 种盐浓度（50、100、150、200 mmol/L）分别处理 2 h、12 h 和 24 h，实验组中毛蕊异黄酮葡萄糖苷的含量均显著高于对照组，且随着盐胁迫程度的增加，其含量均呈现上升趋势。在 50 mmol/L NaCl 长期盐胁迫下，黄芪幼苗能够良好生长。因此，该浓度为盐胁迫提升黄芪活性成分含量的最适浓度，并作为后续转录组测序实验的胁迫浓度。

（3）黄芪响应 NaCl 胁迫的比较转录组分析

通过转录组测序对盐胁迫（50 mmol/L NaCl）黄芪地下部分差异基因的表达水平进行分析。结果显示，KEGG 显著富集到苯丙烷生物合成、萜类骨架生物合成等通路与毛蕊异黄酮葡萄糖苷和黄芪甲苷合成相关，其中，*HMGCR*、*ACAT*、*PAL* 等基因与其合成相关，且在盐胁迫 24 h 时显著上调表达。WGCNA 分析筛选了在盐胁迫下可能调控活性成分合成的相关核心基因（*HMGCR*、*HSP20*、*LUP4*、*SUS*）及转录因子（WRKY33、ERF、HD-ZIP、MYB54）。推测这些相关核心基因及转录因子可能对盐胁迫下黄芪根部活性成分的积累产生影响，为进一步揭示盐胁迫提升黄芪品质的分子机制与调控机理奠定了研究基础。

结论：根据不同种源黄芪发芽率相关实验和大田种植情况，筛选出黄芪 3 号为优质种源，并作为苗期盐胁迫实验材料；适度的盐胁迫（50 mmol/L NaCl）显著增加黄芪幼苗地下部分黄芪甲苷和毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量的积累；对其进行转录组测序分析及 WGCNA 分析，初步筛选出在盐胁迫下可能调控活性成分合成的相关核心基因（*HMGCR*、*HSP20*、*LUP4*、*SUS*）及转录因子（WRKY33、ERF、HD-ZIP、MYB54）。

关键词：黄芪；盐胁迫；黄芪甲苷；毛蕊异黄酮葡萄糖苷；转录组数据分析

Abstract

Objective: *Astragali Radix* is a traditional Chinese herbal medicine. Its roots are rich in flavonoids, saponins, polysaccharides and other active ingredients. It has the effects of tonifying qi and consolidating the surface, regulating immunity and so on. It is widely used in medicine, health care products and food fields. At present, the *Astragali Radix* supplied on the market mainly comes from artificial cultivation, but the artificial cultivation of *Astragali Radix* has problems such as long cultivation period, saline-alkali intolerance, and substandard quality. When plants are subjected to moderate abiotic stress (such as salt stress), they will resist stress by increasing the synthesis of secondary metabolites, which provides a new idea for cultivating high-yield and high-quality *Astragali Radix* in desert saline-alkali land. Therefore, this study comprehensively analyzed the effects of salt stress on the germination rate of *Astragali Radix* from different provenances and the content of main active components in roots, combined with transcriptome sequencing analysis, to explore the mechanism of *Astragali Radix* in response to salt stress to regulate quality formation, and to screen out key salt-resistant genes and transcription factors that may improve the quality of *Astragali Radix*. This study provides a theoretical basis for screening high-quality salt-tolerant *Astragali Radix* germplasm resources, and lays a research foundation for revealing the molecular mechanism of salt stress to improve the quality of *Astragali Radix*.

Methods: By measuring the germination rate of *Astragali Radix* from different provenances under salt stress, the provenance with strong salt tolerance was determined, and the alkali stress and saline-alkali mixed stress were carried out. The germination rate and growth of *Astragali Radix* in the comprehensive environment were observed, and the critical salt concentration for inhibiting germination was screened out, that is, inhibiting seed germination . Under this salt concentration condition, combined with exogenous hormone soaking treatment, the types and concentrations of hormones that can significantly promote seed germination and growth under salt stress were screened. At the same time, combined with the preliminary planting of *Astragali Radix* from different provenances in the field (plant growth, agronomic traits, yield and active ingredient content, etc.), the provenances for subsequent salt stress experiments were determined ; the effects of different concentrations of NaCl (50, 100, 150, 200 mmol/L) on the content of main active components in the underground part of *Astragali Radix* seedlings at different times (2, 6, 12, 24 h) were studied. Combined with the growth of *Astragali Radix* seedlings under long-term stress of four salt concentrations, the suitable NaCl stress concentration was determined. The possible molecular mechanism and salt tolerance mechanism of the effect of salt stress on the content of main active components in the underground part of *Astragali Radix* seedlings were comprehensively analyzed by using transcriptome

sequencing technology combined with the content of active components in the roots of *Astragali Radix* under appropriate NaCl stress concentration.

Results:

(1) Screening and identification of *Astragali Radix* from different provenances under salt stress

The germination rate and germination potential of three different provenances of *Astragali Radix* (No.1: Longxi County Donghao Pharmaceutical Astragalus Seeds, No.2: XinJing Seed Industry Anguo Chinese herbal Astragalus Seeds, No.3: Shaanxi Astragalus Seeds) decreased significantly with the increase of salt concentration. Among them, No.3 had the strongest salt tolerance, and 0.4% NaCl was the maximum salt tolerance concentration for growth, and the germination rate reached 69.3%. Therefore, it was selected for subsequent germination rate experiments. Alkali stress inhibited the germination of No.3 seeds more significantly than salt stress, and decreased with the increase of alkali concentration. The germination rate reached 77.33% at the concentration of 0.5%: 0.5%, and the germination was significantly inhibited when the concentration was higher than this concentration. This study found that under 0.4% NaCl stress, the germination rate of seeds treated with 50 and 100 μg/mL gibberellin (GA3) increased by 12% and 22.33%, respectively. After treatment with 50 and 100 μg/mL salicylic acid (SA), the germination rate increased by 16% and 19.33%, respectively. However, indoleacetic acid (IAA) had no significant promoting effect. *Astragali Radix* was planted in the field, and it was found that No.3 seeds had better emergence in the field. The root agronomic traits of three kinds of Astragalus were significantly different, and the yield was No.3 > No.2 > No.1. The determination of active ingredient content showed that the content of calycosin-7-glucoside in No.1 and No.3 *Astragali Radix* was significantly higher than that in No.2, which was 2.3 times and 1.8 times respectively. In summary, the seeds of *Astragali Radix* No.3 have the advantages of salt tolerance, high yield and good quality, so they are used as experimental materials for the subsequent effects of NaCl stress on the main active components of the underground part of *Astragali Radix* seedlings.

(2) Analysis of the effect of NaCl stress on the content of main active components in the underground part of *Astragali Radix* at seedling stage

Moderate salt stress significantly increased the accumulation of astragaloside IV and calycosin-7-O-β-D-glucoside. The content of astragaloside IV in the roots of *Astragali Radix* treated with 50 mmol /L NaCl for 6 h, 12 h and 24 h was significantly higher than that of the control at the same time. For example, the content of astragaloside IV increased by 76.32% at 12 h. The content of calycosin-7-O-β-D-glucoside in the experimental group was significantly higher than that in the control group after treatment with four salt concentrations (50, 100, 150, 200 mmol/L) for 2 h, 12 h and 24 h, respectively, and the content showed an upward trend with the increase of salt stress. *Astragali Radix* seedlings could grow well under long-term salt stress of 50 mmol/L NaCl. Therefore, this concentration is

the optimal concentration for salt stress to increase the synthesis of active ingredients in *Astragali Radix*, and is used as a stress concentration for subsequent transcriptome sequencing experiments.

(3) Comparative transcriptome analysis of *Astragali Radix* response to NaCl stress

The expression levels of differential genes in the underground part of *Astragali Radix* under salt stress (50 mmol/L NaCl) were analyzed by transcriptome sequencing. The results showed that KEGG was significantly enriched in phenylpropanoid biosynthesis, terpenoid skeleton biosynthesis and other pathways related to the synthesis of calycosin-7-O-β-D-glucoside and astragaloside IV. Among them, *HMGCR*, *ACAT*, *PAL* and other genes were related to their synthesis, and were significantly up-regulated at 24 h of salt stress. WGCNA analysis screened the core genes (*HMGCR*, *HSP20*, *LUP4*, *SUS*) and transcription factors (WRKY33, ERF, HD-ZIP, MYB54) that may regulate the synthesis of active components under salt stress. It is speculated that these related core genes and transcription factors may affect the accumulation of active components in the roots of *Astragali Radix* under salt stress, which lays a research foundation for further revealing the molecular mechanism and regulation mechanism of salt stress to improve the quality of *Astragali Radix*.

Conclusion: According to the germination rate related experiments and field planting conditions of *Astragali Radix* from different provenances, *Astragali Radix* No.3 was selected as a high-quality provenance and used as an experimental material for salt stress at seedling stage. Moderate salt stress (50 mmol/L) significantly increased the accumulation of astragaloside IV and calycosin-7-O-β-D-glucoside in the underground part of *Astragali Radix* seedlings. The core genes (*HMGCR*, *HSP20*, *LUP4*, *SUS*) and transcription factors (WRKY33, ERF, HD-ZIP, MYB54) that may regulate the synthesis of active components under salt stress were preliminarily screened by transcriptome sequencing analysis and WGCNA analysis.

Key words: *Astragali Radix*; Salt stress; Astragaloside IV; Calycosin-7-O-β-D-glucoside; transcriptomic analysis

目录

摘要 I
Abstract III
中英文缩写对照表 X
引言 1
第 1 章 文献综述 2
1.1 黄芪的研究进展 2
1.1.1 黄芪的简介 2
1.1.2 黄芪的分布现状 2
1.1.3 黄芪的种质资源筛选 3
1.1.4 黄芪药用价值的研究 3
1.2 盐胁迫对植物生长发育的影响 3
1.2.1 植物响应盐胁迫的机理 4
1.2.2 盐胁迫提高次生代谢产物的研究现状 4
1.3 黄酮类化合物研究进展 5
1.4 三萜皂苷类化合物研究进展 5
1.5 植物中黄酮类和三萜皂苷类化合物耐盐性的分子机制研究进展 6
1.6 转录组研究进展 6
1.6.1 转录组测序基本介绍 6
1.6.2 转录组测序技术在植物非生物胁迫研究中的应用 7
1.7 选题背景和研究意义 7
1.8 技术路线 8
第 2 章 盐胁迫下不同种源黄芪的筛选鉴定 9
2.1 实验材料与设备 9
2.1.1 实验材料 9
2.1.2 实验试剂 9
2.1.3 实验设备 9
2.2 实验方法 10
2.2.1 种子预处理 10
2.2.2 发芽率实验方法 10
2.2.3 发芽率和发芽势测定 10

2.2.4 实验地概况 10
2.2.5 黄芪大田种植方法 11
2.2.6 不同种源黄芪产量的测定 11
2.2.7 药用活性成分提取 11
2.2.8 标准溶液制备 11
2.2.9 色谱条件 12
2.2.10 质谱条件 12
2.2.11 线性关系考察 13
2.2.12 数据分析 13
2.3 结果与分析 13
2.3.1 不同种源黄芪种子盐胁迫下发芽率的测定 13
2.3.2 黄芪种子碱胁迫下发芽率测定 14
2.3.3 黄芪种子盐碱胁迫下发芽率测定 15
2.3.4 盐胁迫下不同激素处理黄芪种子发芽率测定 16
2.3.5 生产种植模式下不同种源黄芪农艺性状的比较分析 19
2.3.6 不同种源黄芪产量的测定 22
2.3.7 不同种源黄芪根部主要活性成分含量的测定 22
2.4 讨论 23
2.5 小结 24
第 3 章 NaCl 胁迫对黄芪幼苗地下部分主要活性成分含量的影响 25
3.1 实验材料、试剂与设备 25
3.1.1 实验材料 25
3.1.2 实验试剂与设备 25
3.2 实验方法 25
3.2.1 种子预处理 25
3.2.2 黄芪盆栽种植方法 25
3.2.3 盐胁迫处理 26
3.2.4 药用活性成分提取 26
3.2.5 标准溶液制备 26
3.2.6 色谱条件与质谱条件 26
3.2.7 线性关系考察 26
3.2.8 数据分析 26
3.3 结果与分析 27
3.3.1 盐胁迫对黄芪形态特征的影响 27

3.3.2 盐胁迫对黄芪根部黄芪甲苷含量的影响 28
3.3.3 盐胁迫对黄芪根部毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量的影响 29
3.4 讨论 30
3.5 小结 31
第 4 章 黄芪响应 NaCl 胁迫的转录组学分析 32
4.1 实验材料与设备 32
4.1.1 实验材料 32
4.1.2 实验试剂与设备 32
4.2 实验方法 32
4.2.1 黄芪根部总 RNA 提取与 cDNA 文库构建及 RNA 测序流程 32
4.2.2 测序数据处理与分析 33
4.2.3 实时荧光定量 PCR（qRT-PCR） 33
4.2.4 数据分析 34
4.3 结果与分析 34
4.3.1 转录组测序数据质量分析与评价 34
4.3.2 转录组 Unigene 功能注释分析 36
4.3.3 样本间 PCA 分析 37
4.3.4 差异表达基因分析 37
4.3.5 差异基因聚类分析 38
4.3.6 差异基因注释分析 40
4.3.7 差异基因 GO 功能富集分析 42
4.3.8 差异基因 KEGG 功能富集分析 42
4.3.9 差异基因转录因子家族分析 44
4.3.10 盐胁迫下黄芪根部中参与黄芪甲苷合成途径的差异表达基因分析 44
4.3.11 盐胁迫下黄芪根部中参与毛蕊异黄酮葡萄糖苷合成途径的差异表达基因分析 46
4.3.12 WGCNA 分析 48
4.3.13 qRT-PCR 对转录组测序数据的验证 54
4.4 讨论 55
4.5 小结 58
第 5 章 结论与展望 59
5.1 结论 59
5.2 展望 59
参考文献 60

附录 71
致谢 72
作者简介 73

中英文缩写对照表

英文缩写 Abbreviation	英文名称 English Name	中文名称 Chinese Name
GA3	Gibberellin A3	赤霉素
IAA	Indole-3-acetic acid	吲哚乙酸
SA	Salicylic Acid	水杨酸
ACAT	acetoacetyl-co zyme A (CoA) thiolase	乙酰辅酶 A 乙酰基转移酶
HMGCS	HMG-CoA synthase	3-羟基-3-甲基戊二酰辅酶 A 合酶
HMGCR	3-hydroxy-3-methylglutaryl coenzyme A reductase	3-羟基-3-甲基戊二酰辅酶 A 还原酶
MVA	Mevalonate pathway	甲羟戊酸途径
MEP	Methylerythritol phosphate pathway	甲基赤藓醇磷酸途径
DXS	1-Deoxy-D-xylulose-5-phosphate synthase	1-脱氧-D-木酮糖-5-磷酸合酶
DXR	1-Deoxy-D-xylulose-5-phosphate reductoisomerase	1-脱氧-D-木酮糖-5-磷酸还原异构酶
FDPS	farnesyl diphosphate synthase	法尼基焦磷酸合酶
FDFT1(SS)	squalene synthase	鲨烯合酶
SQLE(SE)	squalene epoxidase	鲨烯环氧酶
CAS	cycloartenol synthase	环阿尔庭烷合酶
UGT	Glycosyltransferase	糖基转移酶
PAL	phenylalanine ammonia-lyase	苯丙氨酸解氨酶
4CL	4-coumarate-CoA ligase	4 -香豆酸 Co - A 连接酶
CYP73A	trans-cinnamate 4-monooxygenase	反式-肉桂酸 4-单加氧酶
CHS	chalcone synthase	查耳酮合成酶
CHI	chalcone isomerase	查耳酮异构酶
HI4OMT	isoflavone 4'-O-methyltransferase	4’-O- 甲基异黄酮酶
CYP81E9(I3'H)	isoflavone 3'-hydroxylase	异黄酮 3’-羟化酶
DGEs	Differentially expressed genes	差异基因
qRT-PCR	Real-time quantitative PCR	实时定量 PCR

引言

黄芪，来源于蒙古黄芪（*Astragalus membranaceus* （*Fisch.*）*Bge. Var. Mongholicus*（*Beg.*））或膜荚黄芪（*Astragalus membranaceus* （*Fisch.*） *Bge* .）的干燥根，是我国传统名贵中药材[1]。作为已使用超过 2000 年传统中草药，现代药理学研究表明，黄芪能提高免疫功能，具有护肝、利尿、抗肿瘤、抗氧化、抗疲劳等作用，并对心血管和脑血管系统有保护作用[2]。黄芪中有多种生物活性成分，如黄酮类、皂苷类和多糖类等。在 2020 版《中国药典》中，毛蕊异黄酮葡萄糖苷和黄芪甲苷作为中国评价黄芪质量的主要指标，并规定毛蕊异黄酮葡萄糖苷的含量不低于 0.020%，黄芪甲苷的含量不低于 0.080%，但实际生产生活中，它们的含量往往达不到药典标准[3]。毛蕊异黄酮葡萄糖苷属于黄酮类物质，具有保护神经、抗炎、抗癌和抗菌特性；黄芪甲苷是三萜皂苷类物质，具有免疫调节、抗疲劳和抗病毒特性[4, 5]。因此，黄芪的市场需求量很高，由于野生资源被过度采挖，现在已被列为中国珍稀濒危保护植物名录[6]，所以目前主要以人工种植为主。

截至 2023 年，中国黄芪栽培面积已有约 70 万亩，较十年前增长了近 40%，黄芪的主要产地集中在甘肃、内蒙古、山西和新疆等西北地区[7]。尽管这些地区幅员辽阔，但适宜耕种的土地资源稀缺，大部分土地为高原戈壁、荒漠草原或不宜耕作的盐碱地。特别是新疆，作为我国盐碱地分布最广、面积最大的省份，其盐碱地面积占全国总量的三分之一，其中，具有改良潜力的轻中度盐碱地面积达亿亩以上[8]。相较传统农作物，黄芪拥有更高的经济价值和更广泛的应用范围，更值得在新疆地区推广种植。然而需要注意的是，尽管黄芪具有耐旱忌水涝的特点，但在盐碱地中种植仍面临产量低、品质和药用价值不达标的问题，导致经济效益不明显，从而限制了黄芪在新疆地区的推广种植。所以，如何增加黄芪在盐碱地中的种植产量以及提升黄芪的品质是当下急需解决的问题。

因此，本研究通过综合分析盐胁迫对黄芪的发芽率、主要活性成分的影响，并结合转录组学测序分析，探索黄芪响应盐胁迫调控品质形成的机理，初步筛选响应盐胁迫提升黄芪的关键基因及转录因子，绘制可能的调控网络，为后期揭示盐胁迫提升黄芪品质分子机制奠定了研究基础，为抗盐优质种质选育和分子育种提供候选基因，为黄芪品质提升相关种植技术的建立提供科学依据，为盐碱地适种高产高品质黄芪提供可行性依据。

第 1 章 文献综述

1.1 黄芪的研究进展

1.1.1 黄芪的简介

黄芪（*Astragali Radix*）是豆科（*Astragalus L.*）黄芪属植物蒙古黄芪（*Astragalus membranaceus var. mongholicus*（*Bge*） *Hsiao*）或膜荚黄芪（*Astragalus membranaceus*（*Fisch.*） *Bge.*）的干燥根，又称北芪、绵芪。始载于《神农本草经》，在《本草纲目》中也有相关记载，主产于我国内蒙古、山西、甘肃等地[9]。作为一种大宗药材，在中国大部分地区以及蒙古和韩国等地被广泛用作药用材料[10]。2023 年黄芪已被列入中国国家卫生健康委员会的医药食品同源名单[11]。黄芪也兼有防风固沙和保持水土的生态功能。

1.1.2 黄芪的分布现状

黄芪种类繁多，全球约有 2500 多种，广泛分布于北半球、南美洲及非洲，特别是在中国、日本、朝鲜和俄罗斯等地区种类最为丰富，而北美洲和大洋洲分布稀少[12-14]。目前，在中国，野生黄芪已列入国家三级保护植物，主要集中分布于喜马拉雅山脉及华北、华中和西北地区，主产区包括甘肃、内蒙古、宁夏、山西和陕西等地，东北部分地区也有少量黄芪生长[15-17]。

野生膜荚黄芪主要分布在内蒙古、河北、宁夏、山西、新疆、甘肃、青海和山东等省份[18]，东北三省被视为膜荚黄芪的原生分布区[14]，它主要生长于草地、灌木丛或山地草原等环境[2]。人工栽培的膜荚黄芪，通常根系发达和枝条丰富，被称为“鸡爪芪”，主要在山东文登市、河北省以及陕西旬邑县等地有大量种植[14, 18, 19]。野生蒙古黄芪主要分布于内蒙古、山西和河北，通常生长在阳光充足的草地或山坡上[19, 20]。目前，蒙古黄芪多为人工种植，主要在内蒙古、山西、甘肃、河北和青海等地区[18, 20, 21]。黄芪适宜生长在土层深厚，富含腐殖质，排水良好，pH 值为 7-8 的沙壤土中。且在气候温暖干燥，阳光充足的地方生长旺盛，有利的气候条件有助于黄芪的生长和品质提升。