

不同树龄临泽小枣根系内源激素含量及代谢组学分析

陈 斌, 占玉芳*, 李 静, 田晓萍, 钱万建, 李玮涵

(张掖市林业科学研究院, 甘肃 张掖 734000)

摘要: 通过测定临泽小枣不同树龄(30 a、50 a、100 a、300 a)的水平根、单位根、细根不同根系类型内源激素含量, 开展不同根系类型内源激素含量差异分析和代谢组学分析, 探讨临泽小枣根蘖繁殖力与内源激素的关系, 提出促进临泽小枣种群繁殖潜力的措施, 为提高临泽小枣根蘖诱导率提供理论参考, 从而为临泽小枣种群保护恢复提供科学依据。结果表明, 在临泽小枣根系中共检测到21种植物内源激素, 包含17种生长素、1种脱落酸、3种赤霉素, 生长素L-色氨酸含量最高。不同树龄临泽小枣根系激素含量动态变化: ABA含量随树龄的增加基本呈降低趋势; IAA-Asp、Indole、TRP、IAA-Ala、IAA-Val均随树龄增大, 呈先增大后减小趋势; GA3含量很小, 随树龄增大而先减小后增大。代谢组学分析共筛选出9种差异代谢物, 包含7种生长素和2种赤霉素, 主要分布在氨基酸、酚酸和类黄酮等化合物中。KEGG通路主要富集在代谢途径、次生代谢物的生物合成、二萜生物合成、色氨酸代谢、氨酰生物合成、辅因子生物合成、2-氧羧酸代谢等生物途径上。由此推测, 内源激素中促生长物质IAA的含量远远大于ABA含量是临泽小枣根蘖形成的内源影响因子。

关键词: 临泽小枣; 根系; 内源激素; 代谢组学; 差异代谢物

中图分类号: S665.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2026)02-0063-07

Analysis of Endogenous Hormones and Metabolomics in *Ziziphus jujuba* 'Linze' Root of Different Ages

CHEN Bin, ZHAN Yufang*, LI Jing, TIAN Xiaoping, QIAN Wanjian, LI Weihuan

(Zhangye Academy of Forestry Sciences, Zhangye 734000, China)

Abstract: The endogenous hormone contents in three root types(horizontal roots, unit lateral roots, and fine roots) of *Ziziphus jujuba* 'Linze' at four tree ages(30 a, 50 a, 100 a, and 300 a) were determined. Comparative analysis of endogenous hormone contents among different root types and metabolomic analysis were carried out, to explore the relationship between root sprouting reproductive capacity and endogenous hormones in *Z. jujuba* 'Linze'. On this basis, measures to improve the population reproductive potential of *Z. jujuba* 'Linze' were proposed, aiming to provide a theoretical reference for increasing the induction rate of root sprouting, and a scientific basis for the protection and restoration of *Z. jujuba* 'Linze' populations. The results showed that, a total of 21 plant endogenous hormones were detected in the roots of *Z. jujuba* 'Linze', including 17 auxins, 1 abscisic acid (ABA), and 3 gibberellins(GAs), among which L-tryptophan(TRP, an auxin precursor) had the highest content. Dynamic changes of hormone contents in roots of *Z. jujuba* 'Linze' at different tree ages were observed: ABA content basically showed a decreasing trend with the increase of tree age; the contents of IAA-Asp, Indole, TRP, IAA-Ala, and IAA-Val all showed a trend of first increasing and then decreasing with the increase of tree age; GA3 content was extremely low, and a trend of first decreasing and then increasing with tree age was presented. A total of 9 differentially accumulated metabolites(DAMs) were screened out by metabolomic analysis, including 7 auxins and 2 gibberellins, which were mainly classified into amino acids, phenolic acids, and flavonoids. KEGG pathway enrichment analysis showed that these DAMs were mainly enriched in biological pathways including metabolic pathways, biosynthesis of secondary metabolites, diterpenoid biosynthesis, tryptophan metabolism,

收稿日期: 2025-03-01

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目(22JR5RG1028)

作者简介: 陈 斌(1977-), 男, 正高级工程师, 硕士, 主要从事林业生态、荒漠化综合治理和林果良种引育研究。

通信作者: 占玉芳, E-mail: 450309103@qq.com

aminoacyl-tRNA biosynthesis, biosynthesis of cofactors, and 2-oxocarboxylic acid metabolism. It is concluded that the significantly higher content of the growth-promoting hormone indole-3-acetic acid(IAA) than ABA in endogenous hormones is the key endogenous factor regulating root sprouting formation in *Z. jujuba* 'Linze'.

Key words: *Ziziphus jujuba* 'Linze'; Root; Endogenous hormones; Metabolomics; Differential metabolites

植物内源激素在植物生长发育过程中的调控作用至关重要^[1]。植物内源激素是由植物自身代谢产生的有机物,与植物的生理生长和抗逆性密切相关^[2]。植物内源激素对细胞的分裂、分化、器官建成以及植物的休眠和形态反应等均有直接或间接的调节控制作用^[3-7]。近年来,随着对植物内源激素深入广泛的研究,植物内源激素的合成机理以及作用机理已成为植物生理学研究的热点之一^[8]。很多研究结果表明,植物萌蘖能力与植物内源激素存在着紧密的关系^[9-11]。

临泽小枣(*Ziziphus jujuba* 'Linze')属于临泽县古老的乡土经济林树种,是河西走廊区域珍贵品种,以核小味甜、肉质细腻、营养丰富、耐久贮著称。临泽小枣受国家地理标志产品保护^[12-14],已成为当地的特色品牌^[15]。目前,受各类因素的影响,临泽小枣种群自然分布面积衰退严重。枣树根系具有产生不定芽的特性,容易发生根蘖。根蘖多发生在水平根上。当前有关临泽小枣的研究主要集中在栽培、制干、生物学特性及生理学、粗多糖的提取、药理作用的探究以及开花生物学、传粉生态学等方面^[16-18],而对临泽小枣根系内源激素方面的研究甚少。因此,本研究通过对不同树龄临泽小枣根系内源激素含量及代谢组学进行分析,明确临泽小枣不同根系类型内源激素的差

异,以期在理论上阐明不同树龄、不同根系类型植物激素在根系中的分配进而影响临泽小枣根蘖苗更新方式与能力,进一步掌握内源激素对临泽小枣根蘖性状发生的机制,为临泽小枣种质资源保护及促进临泽小枣种群恢复提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区在甘肃省临泽县(N 38°08'45", E 100°09'22"),位于河西走廊中部,属大陆性干旱气候,年均气温为7.6℃,最高气温为39.1℃,最低气温为-27.3℃。年均降水量117 mm左右,全年降水量的70%~80%主要集中在7—9月,年均蒸发量2 390 mm以上。年无霜期152 d,年日照时数3 045 h,年均风速为3.2 m/s,最大风速为21 m/s,盛行西北风。研究区主要景观类型有防护林带、荒漠-绿洲过渡带和荒漠。防护林以二白杨(*Populus gansuensis*)和新疆杨(*Populus bolleana Lauche*)为主;荒漠-绿洲过渡带以梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)和泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)为主;荒漠景观植物以沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)和小画眉草(*Eragrostis minor Host*)等为主。临泽小枣居群现状调查见表1。

表1 不同树龄临泽小枣林木结构与根蘖繁殖基本特征

Table 1 Basic characteristics of tree structure and root sprout reproduction of Linze *jujube* trees with different ages

项目 Item	树龄30 a Tree age 30 a	树龄50 a Tree age 50 a	树龄100 a Tree age 100 a	树龄300 a Tree age 300 a
林分郁闭度	0.76	0.61	0.53	0.34
临泽小枣平均高度/m	4.7±0.6	7.3±1.2	14.2±1.1	7.1±0.6
临泽小枣平均胸径/cm	5.1±0.6	13.7±0.9	31.1±1.3	23.5±0.3
临泽小枣平均冠幅/m	2.5±0.4	3.8±0.5	8.9±0.5	5.4±0.2
根蘖率/%	100.0	100.0	100.0	90.9

1.2 试验设计和样品采集

以树龄30 a、50 a、100 a、300 a的4个临泽小枣居群作为调查点,选择树高、胸径及根蘖苗分布相近的临泽小枣样株,单株区组,重复3次,选择距离母树1.5 m以外长势良好的根蘖苗为对象,用铁锹从其基部挖土至母根处,沿母根水平方向

两端延伸至上一级根系终点或下一级根系连接处,使母根与根蘖苗埋土部分露出^[19],再清除母根及根蘖苗基部的土壤,人工挖掘相对完整的根系^[20],按照根系生长特性分为水平根(枣树根系的骨架,其主要作用是扩大树体根系分布吸收范围,同时固定树体,运输养分)、单位根(由水平根

分枝面形成的根群,其主要作用是分生细根,吸收养分,并能形成根蘖,产生新的植株)和细根(由单位根分生面形成,主要作用是吸收水分养分),并收获表层0~10 cm土样。将根系洗净,按根系类型剪取,分别置于10 mL离心管中液氮保存,带回实验室,-80 °C保存。

1.3 样品测定方法

试验组处理(表2)采用高效液相色谱法(HPLC)测定临泽小枣根系内源激素(GA3, IAA 和 ABA)。在弱光下进行,设3个重复。将保存在-80 °C条件下的新鲜根系样本取出,用研磨仪研磨(30 Hz, 1 min)至粉末状;称取研磨后的样本50 mg^[21],分别加入浓度为100 ng/mL的内标混合溶液10 μL,甲醇:水:甲酸体积比15:4:1的提取剂1 mL,混匀;涡旋10 min,在4 °C、12 000 r/min条件下,离心5 min,取上清液加入新的离心管中进行浓缩;浓缩后用100 μL 80%甲醇/水溶液复溶,过0.22 μm滤膜,置于进样瓶中,用于LC-MS/MS分析。

表2 试验处理组别代表符号

Table 2 Representative symbols for experimental treatment groups

处理组 Treatment group	水平根 Horizontal root	单位根 Unit root	细根 Fine root
30 a	A ₁	A ₂	A ₃
50 a	B ₁	B ₂	B ₃
100 a	C ₁	C ₂	C ₃
300 a	D ₁	D ₂	D ₃

1.4 代谢组检测

选取30 a、50 a、100 a、300 a树龄临泽小枣的水平根、单位根、细根的样本,3次重复,共36个样本,由武汉迈维生物科技有限公司进行靶向内源激素代谢检测。参照Li^[22]和Floková^[23]等的方法进行处理。数据采集仪器系统主要包括超高效液相色谱(Ultra Performance Liquid Chromatography, UPLC),型号为ExionLC™ AD(<https://sciex.com.cn/>)和串联质谱(Tandem Mass Spectrometry, MS/MS),型号为QTRAP® 6500+ (<https://sciex.com.cn/>)^[24-26]。

液相条件为^[27],色谱柱:Waters ACQUITY UPLC HSS T3 C18柱(100 mm×2.1 mm, 1.8 μm)。流动相:A相,超纯水(加入0.04%的乙酸);B相,乙腈(加入0.04%的乙酸)。梯度洗脱程序:0 min A/B为95:5(V/V),1.0 min A/B为95:5(V/V),8.0 min为5:95(V/V),9.0 min为5:95(V/V),9.1 min为95:5(V/V),12.0 min为95:5(V/V);流速0.35 mL/min;柱温

40 °C;进样量2 μL。

质谱条件:电喷雾离子源(Electrospray Ionization, ESI)温度550 °C,正离子模式下质谱电压5 500 V,负离子模式下质谱电压-4 500 V,气帘气(Curtain Gas, CUR)35 psi。在Q-Trap 6500*中,每个离子对是根据优化的去簇电压(Declustering Potential, DP)和碰撞能(Collision Energy, CE)进行扫描检测。采用Analyst 1.6.3软件处理质谱数据。对质谱检测的数据进行定性分析。定量分析是利用三重四极杆质谱的多反应监测模式(Multiple Reaction Monitoring, MRM)分析完成。获得不同样本的质谱分析数据后,采用MultiQuant 3.0.3软件处理质谱数据,对所有目标物的色谱峰进行积分,通过标准曲线进行定量分析^[28]。

1.5 数据处理

结合单变量统计分析和多变量统计分析的方法,采用差异倍数(Fold Change, FC)分析、正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)模型,对于两组比较:根据fold change≥2或fold change≤0.5筛选差异代谢物。可视化分析采用Origin 2022、TBtools、Excel、SPSS、GraphPad Prism 8、迈维云平台(<https://cloud.metware.cn/>)、联川生物云平台(<https://www.omicstudio.cn/>)绘制相关图表进行;代谢通路富集分析采用KEGG进行。

2 结果与分析

2.1 不同树龄临泽小枣根系内源激素含量比较

根据样品总离子流及提取流色谱图,在临泽小枣根系中共检测到21种植物内源激素,包含17种生长素、1种脱落酸、3种赤霉素(表3),其中含量最高的生长素是TRP(L-色氨酸),其次是Indole(吲哚)。21种内源激素(30 a、50 a、100 a、300 a),12种激素含量表现为显著差异,9种激素差异不显著。

2.2 不同树龄临泽小枣根系激素含量动态变化分析

ABA含量随树龄的增加基本呈降低趋势,30 a最高,300 a最低;生长素中,IAA-Asp含量和Indole含量随树龄的增大呈先升高后降低趋势,50 a最高,30 a最低;TRP含量和IAA-Ala含量呈先升高后降低再升高趋势,300 a最高,30 a最低;IAA-Val含量随树龄的增加呈先降低后升高再降低趋势,100 a最高,50 a最低,检测到GA15、GA3、GA24共3种赤霉素,在30 a临泽小枣中检测到3种,50 a、100 a、300 a中只检测到1种或2种。

表3 临泽小枣根系内源激素种类及含量
Table 3 Types and contents of endogenous hormones in the root system of Linze *jujube*

ng/g

激素种类 Hormone category	激素名称 Name of hormone	不同树龄激素含量 Hormone content at different tree ages			
		30a	50a	100a	300a
ABA	ABA	56.72±6.07a	51.36±5.04a	47.85±2.32a	38.16±5.16a
IAA	IAA-Gly	<0.01b	<0.01b	69.83±3.49a	<0.01b
	IAA-Val-Me	<0.01a	0.02±0.01a	0.02±0.01a	<0.01a
	ILA	<0.01b	0.87±0.43a	0.66±0.03ab	0.09±0.04ab
	ICAla	2.93±1.01a	<0.01b	<0.01b	<0.01b
	IAA-Glc	1.56±0.45ab	<0.01b	1.733±0.84ab	6.47±0.33a
	IAA-Asp	4.36±0.70c	12.44±1.52a	8.96±0.13b	6.26±0.78bc
	Indole	272.88±26.22b	2 062.38±634.11a	1 714.06±512.82a	1 497.39±28.55a
	TRP	1 474.05±246.47d	5 255.78±582.23b	3 791.43±366.91c	8 710.07±691.52a
	IAA-Ala	13.27±1.48a	14.53±1.01a	13.96±1.02a	14.77±0.49a
	IAA-Val	3.69±0.73b	2.54±0.49b	6.02±1.13a	2.65±0.43b
	TRA	4.06±0.28a	2.66±0.23b	0.97±0.26c	3.02±0.34b
	IAA-Leu	1.24±0.32a	2.87±1.11a	2.48±0.82a	1.07±0.18a
	IBA	23.97±5.78a	30.49±8.87a	18.79±4.96a	17.61±4.57a
	ICA	6.46±2.37a	3.48±1.87a	7.07±2.22a	1.66±0.85a
	MEIAA	0.06±0.01a	<0.01b	0.03±0.001ab	0.03±0.001ab
	GA	OxIAA	26.67±8.35a	49.55±2.21a	17.61±4.49a
IAA		34.98±1.74a	35.19±9.35a	31.47±8.24a	52.48±2.68a
GA15		0.08±0.02a	<0.01b	<0.01b	<0.01b
GA3		2.21±0.21a	1.05±0.15a	1.38±0.44a	1.96±0.65a
	GA24	1.30±0.21a	<0.01b	0.18±0.09b	<0.01b

2.3 不同树龄不同类型临泽小枣根系激素含量动态变化分析

由图1可知,水平根的ABA含量随树龄的增加呈降低趋势,30 a最高,300 a最低;IAA-Asp含量和IAA-Ala含量随树龄的增加呈先升高后降低趋势,50 a最高;IAA-Val含量随树龄的增加呈先升高后降低趋势,100 a最高;Indole含量和TRP含量随树龄的增加呈增加趋势,300 a最高,30 a最低。单位根的ABA含量和IAA-Asp含量随树龄的增加均呈先增加后降低趋势,分别是100 a和50 a最高;Indole、TRP和IAA-Ala含量均呈先升高后降低再升高趋势,Indole含量和TRP含量300 a最高,IAA-Ala含量50 a最高;IAA-Val含量随树龄的增加呈先降低后升高再降低趋势,100 a最高。细根的ABA、IAA-Asp、Indole含量随树龄的增加均呈先增加后降低趋势,ABA含量100 a最高,IAA-Asp含量和Indole含量50 a最高;TRP含量随树龄的增加呈先增加后减少再增加趋势,300 a最高,30 a最低;IAA-Ala含量和IAA-Val含量随树龄的增加呈先降低后升高再降低趋势,分别是30 a和100 a最高。

2.4 内源激素差异代谢物筛选

对不同树龄临泽小枣根系的代谢物进行差异显著性分析,共筛选出9种差异代谢物。临泽小枣根系30 a和50 a之间,有9种差异代谢物,其中4种代谢物含量上调表达,5种下调表达;临泽小枣根系30 a和100 a之间,有7种差异代谢物,其中3种代谢物含量上调表达,4种下调表达;临泽小枣根系50 a和100 a之间,有4种差异代谢物,其中2种代谢物含量上调表达,2种下调表达;临泽小枣根系30 a和300 a之间,有7种差异代谢物,其中3种代谢物含量上调表达,4种下调表达;临泽小枣根系50 a和300 a之间,有1种差异代谢物,其含量下调表达;临泽小枣根系100 a和300 a之间,有5种差异代谢物,其中2种代谢物含量上调表达,3种下调表达。表明,随着临泽小枣树龄增大,为维持休眠期间的正常生命活动,根系的能量代谢活动减弱,次生代谢物积累。

2.5 内源激素差异代谢物KEGG富集分析

为了探究树龄对临泽小枣根系内源激素代谢影响的差异,采用KEGG通路富集分析代谢物差异显著,发现其富集在代谢途径(Metabolic path-

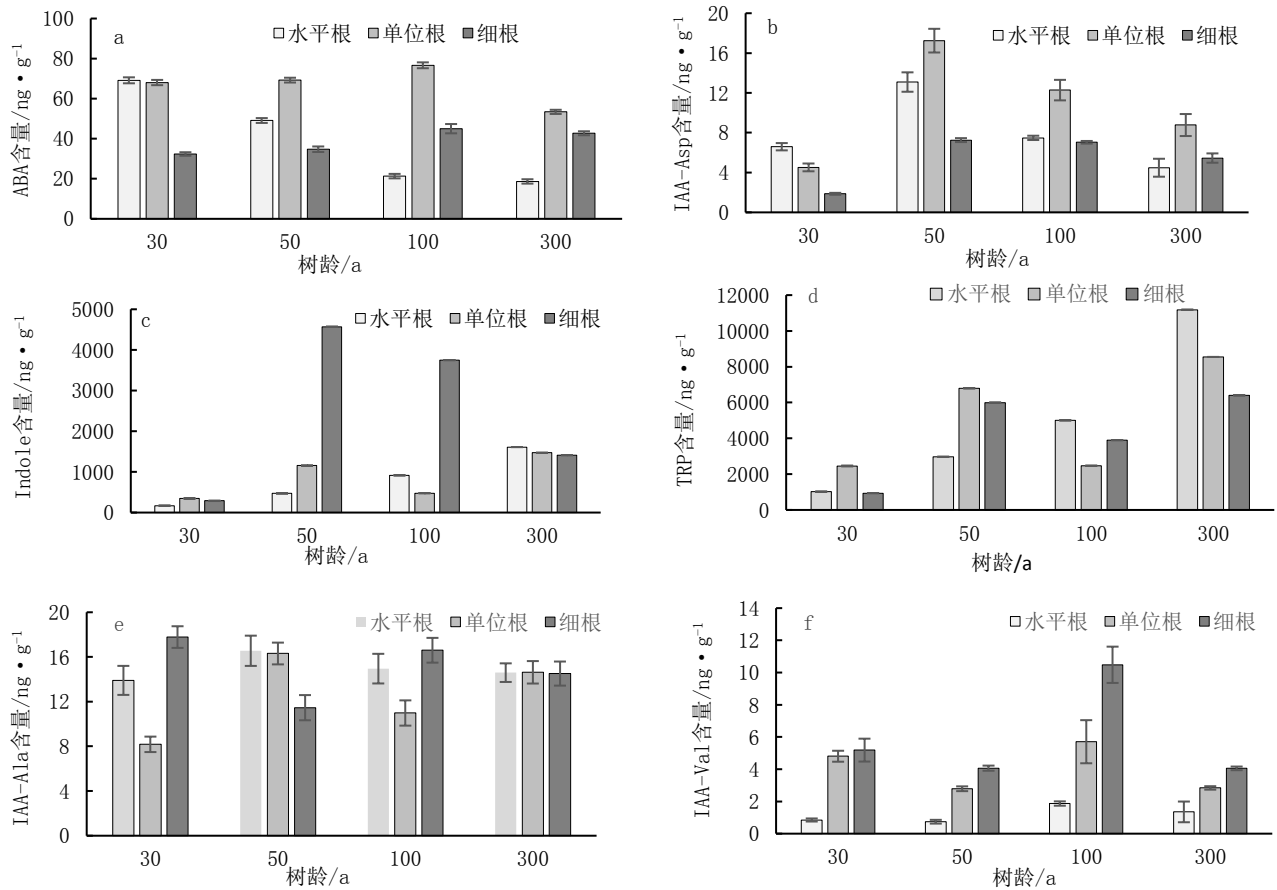


图1 不同树龄不同类型临泽小枣根激素含量动态变化

Fig.1 Dynamic changes of hormone content in different root types of *Ziziphus jujuba* 'Linze' at different tree ages

ways)、次生代谢物的生物合成(Biosynthesis of secondary metabolites)、二萜生物合成(Diterpene biosynthesis)、色氨酸代谢(Tryptophan metabolism)、氨酰生物合成(Aminoacyl-tRNA biosynthesis)、辅因子生物合成(Biosynthesis of cofactors)、2-氧羧酸代谢(2-oxycarboxylic acid metabolism)等多种代谢通路中。但临泽小枣不同树龄根系的差异显著代谢物显著富集通路不一致。临泽小枣根系 30 a 和 50 a 之间,有 9 种差异代谢物,共涉及 12 条通路上;临泽小枣根系 30 a 和 100 a 之间,有 7 种差异代谢物,共涉及 11 条通路上;临泽小枣根系 50 a 和 100 a 之间,有 4 种差异代谢物,共涉及 3 条通路上;临泽小枣根系 30 a 和 300 a 之间,有 7 种差异代谢物,共涉及 11 条通路上;临泽小枣根系 100 a 和 300 a 之间,有 5 种差异代谢物,其涉及 11 条通路上。说明代谢途径、次生代谢物的生物合成、二萜生物合成、色氨酸代谢、氨酰生物合成、辅因子生物合成、2-氧羧酸代谢等多种代谢通路与临泽小枣根系内源激素的形成密切相关。

3 讨论与结论

在植物根系发育过程中激素扮演着至关重要

的角色。其中,赤霉素与生长素尤为重要。赤霉素为植物内源合成,其核心功能在于促进植物细胞的分裂与伸长,进而助力根系的健壮发育。而生长素同样具备促进细胞分裂与伸长的能力,并且特别有助于根系毛发的生长。植物在侧根形成过程中内源激素发挥着重要作用,其中生长素是诱导侧根原基发生的根本因素^[29]。李召虎等^[30]在棉花幼苗侧根发生的化学诱导研究中发现,侧根发生前期生长素含量高可以刺激侧根原基形成,以后生长素含量降低则有利于侧根的伸长生长。脱落酸通常视为侧根发育的抑制物质,但适量脱落酸有利于侧根发生,脱落酸对侧根伸长有较大抑制作用,但主要取决于生长素类物质的含量水平。细胞分裂素和赤霉素对侧根发育有一定抑制作用,而其后期含量的增加有利于侧根原基形成后的伸长生长^[31]。植物内源激素之间往往相互平衡共同调节着植物的生长发育。侧根原基的形成和根组织生长素含量的增加与植物本身遗传因素有关,即生长素参与了侧根原基发生的调控。

本研究结果表明,在树龄 30 a、50 a、100 a、300 a 临泽小枣的水平根、单位根、细根中共检测到 21 种植物内源激素,包含 17 种生长素、1 种脱

落酸、3种赤霉素。IAA在根系代谢中起着重要的调节作用,促进根系生长,增加根系表面积,提高根系对水分和营养物质的运输和吸收能力,从而增强植物对干旱的适应^[32-34],植物根系中IAA含量有升高,也有降低,本研究中临泽小枣根系中IAA含量也处于波动状态;干旱胁迫下,植物根系能迅速合成ABA,增强植物对环境适应能力,本研究中ABA含量随树龄增大而呈减小趋势,不同树龄之间差异不显著;GA3通过促进细胞纵向伸长和细胞分裂来促进植物生长,在本研究中GA3含量很小,随树龄增大而先减小后增大,这可能与临泽小枣所处生境条件尤其是气候干旱的影响有关,此类激素水平降低,抑制生长,减少水分消耗。本研究中,代谢组学分析共筛选出9种差异代谢物,主要分布在氨基酸、酚酸和类黄酮等化合物中,KEGG通路主要富集在代谢途径、次生代谢物的生物合成、二萜生物合成、色氨酸代谢、氨酰生物合成、辅因子生物合成、2-氧羧酸代谢等生物途径上;关键差异代谢物主要包含7种生长素和2种赤霉素,IAA-Asp、Indole、TRP、IAA-Leu生长素类激素上调,而ICAlc、IAA-Glc生长素类激素和GA15、GA3赤霉素下调。由此推测内源激素中促生长物质IAA的含量远远大于ABA含量是临泽小枣根蘖形成的内源影响因子。临泽小枣根系的内源激素IAA含量明显高于ABA、GA含量,其易根蘖繁殖与根组织较高的生长素含量密切相关。

参考文献:

- [1] 余晨,别里扎特·努勒沙合提,沙爱华,等.红菜薹茎基部分枝性状的遗传及内源激素影响因素研究[J].东北农业科学,2022,47(1):127-131.
YU C, BELIZAT N, SHA A H, et al. Study on the heredity of stem basal branching and the influence factors of endogenous hormones in purple flowering stalks[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2022, 47(1): 127-131. (in Chinese)
- [2] 赵娜,吕建魁,李少宁,等.不同干旱处理刺槐、侧柏光合特性与内源脱落酸含量的相关关系[J].生态学报,2024,44(5):2100-2114.
ZHAO N, LYU J K, LI S N, et al. Relationship between photosynthetic characteristics and endogenous abscisic acid content of *Robinia pseudoacacia* and *Platyclus orientalis* under different drought treatments[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(5): 2100-2114. (in Chinese)
- [3] MORENO S, CANALES J, HONG L L, et al. Nitrate defines shoot size through compensatory roles for endoreplication and cell division in *Arabidopsis thaliana*[J]. Current Biology, 2020, 30(11): 1988-2000.
- [4] YANG H, CHANG F, YOU C, et al. Whole-genome DNA methylation patterns and complex associations with gene structure and expression during flower development in *Arabidopsis*[J]. The Plant Journal, 2015, 81(2): 268-281.
- [5] ZHANG X Y, GERMANN S, BLUS B J, et al. The Arabidopsis LHP1 protein colocalizes with histone H3 Lys27 trimethylation[J]. Nature Structural & Molecular Biology, 2007, 14(9): 869-871.
- [6] PLAZA-BONILLA D, NOLOT J M, RAFFAÏLLAC D, et al. Cover crops mitigate nitrate leaching in cropping systems including grain legumes: Field evidence and model simulations[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 212: 1-12.
- [7] CHEN D, DOU Q. Tea polyphenols and their roles in cancer prevention and chemotherapy[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2008, 9(7): 1196-1206.
- [8] 张吉玲,叶义全,黄樱,等.不同埋土深度杉木无性系萌蘖及内源激素含量的差异[J].西南林业大学学报(自然科学),2021,41(5):36-41.
ZHANG J L, YE Y Q, HUANG Y, et al. Differences of tillering and endogenous hormone content of *Cunninghamia lanceolata* Clones in Different Soil Depth[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2021, 41(5): 36-41. (in Chinese)
- [9] 白双成,姜准,张增悦,等.中国沙棘平茬萌蘖能力对内源激素的响应[J].西南林业大学学报(自然科学),2020,40(3):82-87.
BAI S C, JIANG Z, ZHANG Z Y, et al. Response of stump sprouting ability to endogenous hormones in *Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis*[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2020, 40(3): 82-87. (in Chinese)
- [10] 高庆玉,闫超,张丙秀,等.树莓果实与休眠芽生长过程中内源激素含量变化研究[J].东北农业大学学报,2015,46(1):19-25.
GAO Q Y, YAN C, ZHANG B X, et al. Study on the variation of endogenous hormone content during the growth of raspberry fruit and dormant bud[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2015, 46(1): 19-25. (in Chinese)
- [11] 魏常燕,张雪梅,齐国辉,等.不同时期拉枝刻芽对‘绿岭’核桃萌芽成枝和内源激素含量的影响[J].林业科学,2013,49(6):167-171.
WEI C Y, ZHANG X M, QI G H, et al. Effects of bending branch and notching buds in different periods on endogenous hormone concentrations and shoot growth of ‘Lüling’ walnut[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(6): 167-171. (in Chinese)
- [12] 鲁雅琼.临泽小枣生长气候生态条件分析[J].农业科技与信息,2019(13):71-72.
LU Y Q. Analysis of the climatic and ecological conditions for the growth of linze jujube[J]. Agricultural Science-Technology and Information, 2019(13): 71-72. (in Chinese)
- [13] 陆洋,成永娟,边志远,等.临泽县不同产区临泽小枣的果实品质评价[J].甘肃农业大学学报,2025,60(6):145-154,164.
LU Y, CHENG Y J, BIAN Z J, et al. Fruit quality evaluation of Linze jujube from different production areas in Linze County[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2025, 60(6): 145-154, 164. (in Chinese)
- [14] 陈鹏,田晓萍,夏丹,等.临泽小枣不同器官生长动态及多糖积累规律研究[J].现代园艺,2024,47(21):19-21,27.
CHEN P, TIAN X P, XIA D, et al. A Study on the growth dynamics of different organs and the patterns of polysaccharide accumulation in Linze Jujubes[J]. Contemporary Horticulture, 2024, 47(21): 19-21, 27. (in Chinese)
- [15] 杨瑚,高玉霞.临泽小枣区域品牌价值提升策略研究[J].山西农经,2021(23):41-43.

- YANG H, GAO Y X. A Study on strategies for enhancing the regional brand value of linze jujube[J]. Shanxi Agricultural Economy, 2021(23): 41-43. (in Chinese)
- [16] 孟宪巍, 韩露, 屈英月, 等. 枣不同品种花发育时间节律比较[J]. 经济林研究, 2021, 39(3): 92-98.
- MENG X W, HAN L, QU Y Y, et al. Comparative observation of flower development time rhythm among cultivars of Chinese jujube [J]. Non-wood Forest Research, 2021, 39(3): 92-98. (in Chinese)
- [17] 徐也, 刘晓风, 王永刚, 等. 临泽小枣粗多糖提取动力学模型建立及结构特征分析[J]. 食品科学, 2019, 40(3): 1-8.
- XU Y, LIU X F, WANG Y G, et al. Extraction kinetic modelling and structural characteristics of polysaccharides from Linze jujube fruit[J]. Food Science, 2019, 40(3): 1-8. (in Chinese)
- [18] 吴冬青, 安红钢, 徐新建, 等. 甘肃临泽小枣多糖提取及抗氧化性[J]. 光谱实验室, 2011, 28(3): 1066-1070.
- WU D Q, AN H G, XU X J. Extraction and Antioxidant Activity of Polysaccharide from Gansu Linze Jujube[J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2011, 28(3): 1066-1070. (in Chinese)
- [19] 邓雪, 刘立强, 孔维亨, 等. 新疆野苹果种群的根蘖繁殖特性[J]. 新疆农业大学学报, 2020, 43(1): 15-22.
- DENG X, LIU L Q, KONG W H, et al. Reproductive characteristics of root sucker of *Malus sieversii* population[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2020, 43(1): 15-22. (in Chinese)
- [20] 苏付荣, 占玉芳, 李玮涵, 等. 河西走廊临泽小枣根蘖繁殖特性[J]. 农业与技术, 2025, 45(3): 17-21.
- SU F R, ZHAN Y F, LI W H, et al. Propagation characteristics of Linze Jujube root sprouts in the Hexi Corridor[J]. Agriculture and Technology, 2025, 45(3): 17-21. (in Chinese)
- [21] 周紫晶, 范付华, 尚先文, 等. 外源 IAA 对马尾松幼苗茎干次生生长的影响[J]. 林业科学, 2021, 57(9): 42-51.
- ZHOU Z J, FAN F H, SAHNG X W, et al. Effects of exogenous IAA on stem secondary growth of *Pinus massoniana* seedlings[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(9): 42-51. (in Chinese)
- [22] LI Y, ZHOU C X, YAN X J, et al. Simultaneous analysis of ten phytohormones in *Sargassum horneri* by high-performance liquid chromatography with electrospray ionization tandem mass spectrometry[J]. Journal of Separation Science, 2016, 39(10): 1804-1813.
- [23] FLOKOVÁ K, TARKOWSKÁ D, MIERSCH O, et al. UHPLCMS/MS based target profiling of stress-induced phytohormones[J]. Phytochemistry, 2014, 105: 147-157.
- [24] 王荣荣, 谢冰莹, 王海琪, 等. 滴灌春小麦根系形态特征及内源激素含量对花期干旱及复水的响应[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(9): 1174-1186.
- WANG R R, XIE B Y, WANG H Q, et al. Response of root morphology and endogenous hormones of drip irrigated spring wheat to drought stress and rewatering at anthesis stage[J]. Journal of Triticeae Crops, 2023, 43(9): 1174-1186. (in Chinese)
- [25] 牛俊义, 闫志利, 林瑞敏, 等. 干旱胁迫及复水对豌豆叶片内源激素含量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(6): 154-159.
- NIU J Y, YAN Z L, LIN R M, et al. Effect of drought stress and water recovery on endogenous hormone content in leaves of pea [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(6): 154-159. (in Chinese)
- [26] 王魏沁澜, 林先玉, 晓林, 等. 外源脱落酸对干旱胁迫下云南山茶幼苗内源激素代谢的影响[J]. 福建农业学报, 2024, 39(8): 946-958.
- WANG W Q L, LIN X Y, XIAO L, et al. Effects of abscisic acid spray on hormone metabolism of *camellia reticulata* seedlings under drought stress[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2024, 39(8): 946-958. (in Chinese)
- [27] 黄润生, 张晖, 廖柏勇, 等. 油茶花芽分化后期内源激素与代谢组学差异分析[J]. 经济林研究, 2021, 39(3): 99-113, 155.
- HUANG R S, ZHANG H, LIAO B Y, et al. Difference analysis of endogenous hormones and metabolomics in the late stage of flower buds differentiation of *Camellia oleifera*[J]. Non-wood Forest Research, 2021, 39(3): 99-113, 155. (in Chinese)
- [28] 生弘杰, 卢素文, 郑暄昂, 等. 基于广泛靶向代谢组学的葡萄种子代谢物鉴定与比较分析[J]. 中国农业科学, 2023, 56(7): 1359-1376.
- SHENG H J, LU S W, ZHENG X A, et al. Identification and comparative analysis of metabolites in grape seed based on widely targeted metabolomics[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(7): 1359-1376. (in Chinese)
- [29] 马其东, 翟志强, 刘向新. 苜蓿侧根发生与内源激素的变化[J]. 草地学报, 2001, 9(1): 64-68.
- MA Q D, ZHAI Z Q, LIU X X. Relationship between changes of endogenous hormones and happening of secondary roots of alfalfa[J]. Acta Agrestia Sinica, 2001, 9(1): 64-68. (in Chinese)
- [30] 李召虎, 何钟佩, 李丕明. 棉花幼苗侧根发生的化学诱导研究 I. NAA 诱导棉花幼苗侧根发生的效应与机理研究[J]. 北京农业大学学报, 1991(S1): 6-12.
- LI Z H, HE Z P, LI P M. Studies on chemical inducing the lateral root initiation of cotton seedlings[J]. Journal of China Agricultural University, 1991(S1): 6-12. (in Chinese)
- [31] 宋兆锋, 张志民, 丁红, 等. 赤霉素促进低温胁迫下花生种子萌发的转录调控机制[J]. 东北农业科学, 2025, 50(5): 53-61.
- SONG Z F, ZHANG Z M, DING H, et al. Transcriptional regulation mechanism of gibberellin promoting peanut seed germination under low temperature stress[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2025, 50(5): 53-61. (in Chinese)
- [32] 王洪义, 王正文, 李凌浩, 等. 不同生境中克隆植物的繁殖倾向[J]. 生态学杂志, 2005, 24(6): 670-676.
- WANG H Y, WANG Z W, LI L H, et al. Reproductive tendency of clonal plants in various habitats[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(6): 670-676. (in Chinese)
- [33] ZHANG H, HAN W, DE S I, et al. ABA promotes quiescence of the quiescent centre and suppresses stem cell differentiation in the Arabidopsis primary root meristem[J]. Plant Journal, 2010, 64(5): 764-774.
- [34] 陈克利, 孟敏, 张鹏, 等. 黄土高原降雨梯度对刺槐不同器官内源激素分布格局及生长的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 298-304.
- CHEN K L, MENG M, ZHANG P, et al. Effects of rainfall gradient on the distribution pattern and growth of endogenous hormones in different organ of *Robinia pseudoacacia* on the Loess plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(1): 298-304. (in Chinese)

(责任编辑:穆楠)