

参赛学生姓名： 刘雨澄

中学： 清华大学附属中学

省份： 北京

国家/地区： 中国/北部赛区

指导老师姓名： 白鑫鑫、王仰真

指导老师单位： 清华大学附属中学、清华大学自
动化系

论文题目： 植物茎内产生超声波的机理研究及植
物自动化超声波实时检测系统研发

植物茎内产生超声波的机理研究及植物自动化超声波实时检测系统研发

刘雨澄

摘要

精准的作物生理监测对于农业现代化和智慧农业的发展是增加农业产量和食品安全的关键技术之一。近些年的研究发现植物在面对胁迫条件如干旱、盐胁迫及机械损伤等会产生频率为 20 - 150 kHz 的超声信号,但其产生机制及生物意义至今不清楚。本研究中,以豌豆、大豆等植物作为实验对象采集其机械损伤和盐胁迫超声信号并建立大规模数据集,并在构建的全自动实时植物超声检测系统下,开发并实现了植物超声信号的基于信号处理及深度学习算法的自学习自识别功能,建立实时监测植物超声信号的功能模块,从而实现了植物超声信号的在线识别与检测。利用本超声监测系统的在线识别模块,并基于植物显微成像技术及流体力学理论,系统分析了植物茎内超声信号的产生机制,发现植物超声波的生成与茎内的液体流动有关,并受植物周围的细胞组织及参与导水液流动的茎内部各器官等多因素控制。利用模拟生理调节对植物导管液流动进行的流体力学分析,建立了植物逆境条件下产生超声波的理论模型。本研究初步确定了植物逆境超声的生物生理机制,为植物生理异常的精准监测提供了新的视角,建立的基于超声信号的植物生理指标在线分析与识别系统能在农业生产过程中完成对各生理指标的实时监测预警,具有十分广泛的应用前景

关键词: 植物超声信号, 逆境响应, 产生机理, 实时生理监测

Abstract

With the development of modern agriculture and smart farming, the requirement of improved production quality and food safety is high. Recent studies have found that in response to stresses like drought, salt and mechanical damage the plants emit ultrasonic signals in the spectrum of 20-150 kHz. However, the generation mechanisms and the biological roles are still not well determined. In the present study, based on pea (*Pisum sativum*) and soybean (*Glycine max*) plants, we capture the ultrasound in response to mechanical damage and saline and alkali stress and established a huge database of ultrasound during plant damage. Then, an online detection system was established by combining the processing of ultrasound signal and the deep learning technique, which allows the detection and real-time monitoring of plants' ultrasound. Combining our ultrasound system and microscopic observation and simulation of the fluid dynamics, we analyzed the origin of the plant ultrasound. Here we find the generation of plant ultrasound is not from the direct mechanical vibration but from the convection in the stem caused by the surrounding cellular tissue and the organs for water transportation. In addition, by constructing fluid dynamics in the stem conduits with different conditions of physiological regulation,

we provide a predictive model for the production of ultrasound in the plants experiencing salt and alkali stress. The result here demonstrates the molecular-level mechanism and role of a plant's generation of ultrasound during the stress. It not only provides a better insight on plants' stress response by ultrasound as a new indicator for detecting the abnormalities in the biology physiology but also proposes a more sophisticated system to monitor the physiological situations online and ahead of time, which has a wider application prospect for modern agriculture.

- **Key words:** Plant-Generated Ultrasonic Signals, Abiotic Stress Response, Underlying Mechanism, Real-Time Physiological Monitoring

目录

一、研究背景	4
二、研究目的	4
三、主要创新点	5
3.1 破解植物“发声”的秘密	5
3.2 高精度实验环境构建与实验设计	5
3.3 用“智能小助手”代替人眼识别	5
四、豆芽发声机理探究	6
4.1 实验材料	6
4.2 实验仪器	6
4.3 实验设计	7
4.4 实验一：豌豆幼苗切片浸泡对比实验	7
4.5 实验二：植物汁液滴管及测密度实验	10
4.6 实验结果分析	11
五、超声波实时检测系统设计与开发	14
5.1 系统设计与开发	14
5.2 系统技术原理	15
5.2.1 数据预处理	15
5.2.2 频率对应振幅筛选	16
5.2.3 基于深度学习的模型筛选	18
5.2.4 系统代码流程图和真实效果展示	19
5.3 系统测试情况	25
六、实验理论验证	27
6.1 验证叶肉细胞水分交换调控植物超声波产生	27

6.2 植物产生超声波的多种成因验证	28
6.3 超声波产生的模型建立	30
七、总结与展望	33
八、参考文献	34
九、致谢	34

一、研究背景

随着全球人口持续增长，粮食安全问题日益严峻。如何通过科技创新提高农业生产效率，成为全世界共同关注的焦点。近年来，植物声学研究领域取得突破性进展，多项研究表明，植物在特定环境胁迫（如干旱、盐碱等）下会发出超声波，这种生物声学现象为实时监测植物生理状态提供了全新视角¹⁻⁴。

已有研究证实，番茄植株在遭受虫害侵袭后，可通过释放特定频率的超声波向邻近植株传递预警信息，触发其内部防御机制。此类发现为农业生产中病害早期预警系统的开发提供了理论依据⁵。此外，超声波特征与植物导管结构、细胞渗透压等生理参数密切相关，例如通过分析超声波频谱可快速评估木质部（植物水分运输的关键结构）导管半径，这对优化灌溉策略、提升作物抗逆性具有重要意义⁶。科学家还找到了一类植物发出的超声波是由于植物导管内气泡核化而使水柱断裂所产生超声波⁷。同时有诸多的科学家也在关注着用超声波的某些特征来代替相关传感器，但是对于植物哪些导管能够发出超声波？发出超声波的间接原因？植物整体协调机制与超声波产生的局部发声机制是否互相影响？以及植物发出超声波的具体意义是什么？都尚未知晓。

传统超声波检测技术依赖人工频谱分析，存在效率低、成本高、实时性差等局限。因此，开发基于人工智能的自动化检测系统，实现植物超声波的实时解析与分类，已成为农业生物技术领域的迫切需求。

本研究聚焦植物超声波的发生机理与检测技术创新，旨在通过跨学科方法（生物学、声学、计算机科学）构建高效检测系统，为精准农业的发展提供技术支持，同时深化对植物环境适应机制的认知。

二、研究目的

本研究旨在通过系统性探索植物超声波的产生机制及其在环境胁迫下的响应特征，构建一套高效、智能化的检测系统，为实现农业生产的精准化管理提供理论与技术支撑。目标如下：

1. 揭示植物超声波产生的生物学机制

结合显微观测与数学模型，探究导管内气泡动力学（如气泡形变、破裂）与超声波信号的关联性，阐明水分交换、机械损伤等不同因素对声波特征的影响规律，为利用声学指标反演植物生理状态提供理论依据。

2. 分析胁迫环境下植物超声波的动态特征，建立植物超声波实时检测系统

针对干旱、机械损伤等典型胁迫条件，量化分析植物超声波的频率范围、振幅特征及时域分布规律，开发基于深度学习的信号分类模型，实现从数据采集、预处理到特征识别的全流程自动化，系统响应时间控制在 50 ms 以内，显著提升检测效率与可靠性。

三、主要创新点

我们的研究在方法、原理和实际应用上都有独特突破，具体亮点如下：

3.1 破解植物“发声”的秘密

首次捕捉到导管内气泡动力学与超声波信号的时间关联性，建立数学模型，探究了植物导管内超声波发出的原因机理，揭示以下机制：

- 气泡破裂主因：发现气泡变长及破裂的根本原因是植物导管和叶肉细胞的水分交换，部分原因是导管在机械损伤处外部因素所导致，论证了超声波主要由于导管内膜破裂所产生的；
- 声学参数定性关系：推导细胞液动力粘度 η_1 与超声波主频振幅 $f_{p(axial)}$ 之间的关系，为超声波指标监测反演植物生理状态提供理论依据。

3.2 高精度实验环境构建与实验设计

创新性整合硬触发同步观测技术（0-1 ms 延迟控制），应用硬触发摄像头和光学显微镜同时对植物进行观察分析，将 amcap 和 Avisoft RECORD 程序通过连点器进行控制，结合已有论文分析和多株植物的超声波检测实验，发现多植株超声波叠加干扰难题，所以我们改进了实验设计，增加了隔离措施，保证普通实验室环境下的超声波录制实验达到精确高效。设计径向双面刀片超薄切片法（成功率 2%），获得导管破裂过程的动态显微影像数据集。

3.3 用“智能小助手”代替人眼识别

传统方法需要人盯着频谱图找超声波信号，费时费力。我们开发了一个“智能识别模型”，就像给电脑装上了“超声波探测器”——它能自动分析植物发出的声音片段（每段仅 0.0015 s），快速判断是否有超声波，处理速度比人工快 20 倍（仅需 35 ms），且准确率达到 73.6%。即使周围有杂音干扰，它也能高效工作，特别适合农田实时监测。该“智能识别模型”采用轻量化深度学习——全连接神经网络模型和多尺度深度可分离卷积神经网络模型。超声波监测数据进入模型前，通过 MATLAB 平台进行了高通滤波与短时文件切割（0.0015 s/段）预

处理以及分步并行数据处理，以实现音频信号的实时解析与特征提取。系统支持人机协同验证，可供用户随时调取不同时段数据及频谱图、波形图、频幅图，对自动发现发声时段的数据进行二次确认。这个智能小助手结合高精度生物实验，共同推动了我们对于植物发声秘密的破解。

四、豆芽发声机理探究

本研究选取市场需求高、产量高的豆科植物作为研究对象，这里以常见且具有代表性的豌豆和黄豆作为实验对象。通过显微镜实时观察植物导管内气泡的位置及状态变化，探究其与超声波发生之间的关联，重点考察导管与导管周围叶肉细胞的水分交换在不同胁迫环境下对超声波特征的影响。

4.1 实验材料

实验所用豌豆(*Pisum sativum* L.)和大豆(*Glycine max* (L.) Merr.)均为自然条件下生长的成熟植株。豌豆苗生长快、光响应明显，便于区辨不同环境下的超声差异；其细胞液与茎汁混合密度约为 1.006 g/ml，与清水接近，有利于后续实验控制。大豆与豌豆同属豆科，便于开展对比实验，验证超声现象的普遍性。材料如图 4-1 所示。



a. 豌豆幼苗；



b. 经过长时间保湿处理的成熟切根大豆幼苗

图 4-1 实验材料

4.2 实验仪器

主要仪器包括电子秤（帝衡，精度 0.01 g）、光学显微镜（物镜 4×/10×，目镜 50×）、双面刀片（Gillette）、超声波麦克风（UltraSoundGate 1216H）、液氮（玥曦医用，500 ml）以及滴管和针筒等辅助工具，用于称量、显微观察、切片制备、超声监测和样品处理。

表 4-1 实验仪器

工具	品牌	规格	实验用途
电子秤	帝衡珠宝	承重 300 g 精度 0.01 g	用于称量汁液质量
光学显微镜	——	物镜 x4 x10, 目镜 x50	观察导管内气泡变化
双面刀片	Gillette	——	制取切片
超声波麦克风	UltraSoundGate 1216H A/D converter	——	监测植物发出超声波
滴管、针筒等	——	最大 2.5 ml 容量	抽取汁液以测取密度
液氮	玥曦医用液氮	500ml 容量	冷冻植物

4.3 实验设计

实验分为两部分：

一、豌豆幼苗切片浸泡对比实验：通过设置不同溶液环境（无水、清水、饱和蔗糖溶液、饱和盐水及茎端封水），观察导管内气泡状态变化、叶肉萎缩状态与超声波发生的关系；

二、植物汁液性质测试：通过汁液滴管静置实验，排除气泡缩小是因气体溶解所导致，并测量汁液密度以辅助分析。

4.4 实验一：豌豆幼苗切片浸泡对比实验

首先，沿茎向中部切割制备豌豆幼苗切片，分别设置以下五种处理条件：无水状态、清水浸泡、茎两端滴加少量清水、饱和蔗糖溶液及饱和盐水溶液。每组切片制备完成后立即加盖盖玻片，置于显微镜载物台上，同步观察并录制显微镜下植物导管内部图像以及可能由气泡破裂所产生的超声波信号。每组实验持续录制 20 - 30 分钟，所选用的豌豆幼苗均满足导管直径相近、生长状态一致且处于正常生长条件。实验在一个尽可能隔离外界超声波干扰的房间内进行，仪器布置与实景如图 4-2 所示（注：隔离并未完全彻底，存在轻微环境误差）。



图 4-2 显微镜与超声波同时检测植物气泡状态和发声情况
实验各组结果汇总于表 4-2，具体观察现象如下：

1. 清水浸泡组中，茎内气泡逐渐缩短直至最终消失，该过程中未检测到超声波信号，气泡未发生明显位移，也未观察到叶肉细胞萎缩的现象（图 4-3）。

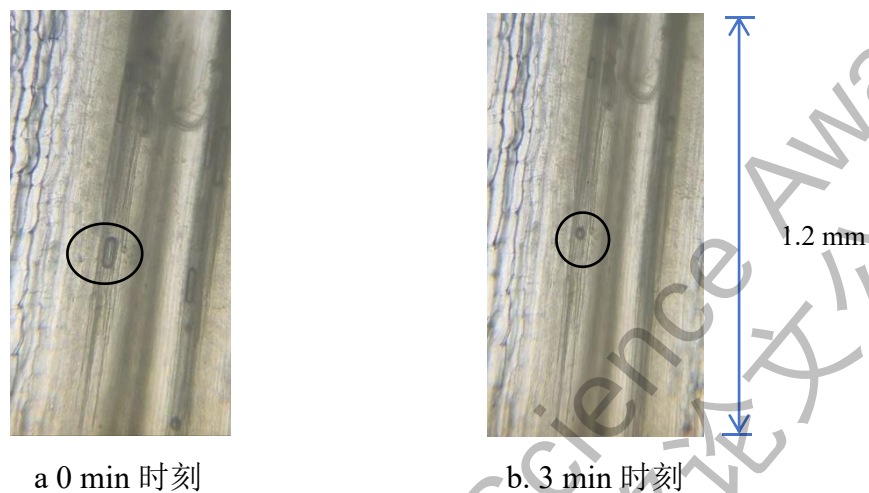


图 4-3 气泡逐渐消失

2. 无水处理组中，出现明显的叶肉细胞萎缩，同时茎内气泡逐渐变长，并伴随检测到超声波信号（图 4-4）。

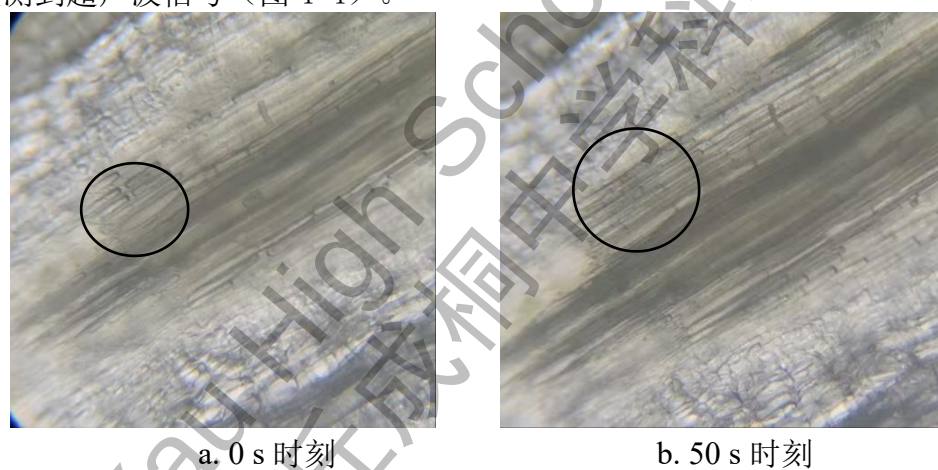


图 4-4 气泡变长

3. 饱和盐水组中，气泡表现出先缩短后延长的变化趋势。缩短阶段未监测到超声波，而在后期延长阶段则同时出现叶肉细胞萎缩和超声波信号（图 4-5）。



a. 0 时刻 b. 5 min 时刻 c. 15 min 时刻

图 4-5 气泡先变短后在下侧导管可以看到出现变长

4. 饱和蔗糖溶液组中，气泡长度初期基本不变，之后逐渐延长。该组未发现明显的叶肉细胞萎缩，但在气泡延长阶段持续检测到超声波，且在 30 分钟内间断性发出超声波信号（图 4-6、4-7 及 4-8）。

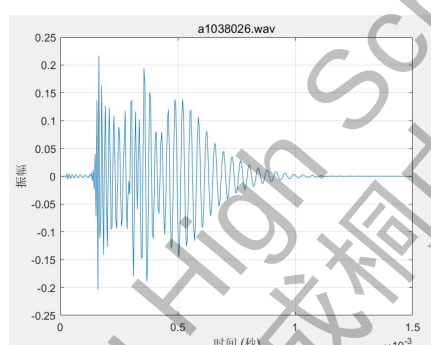


图 4-6 发出超声波的波形图

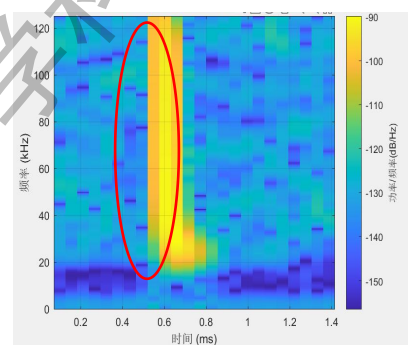
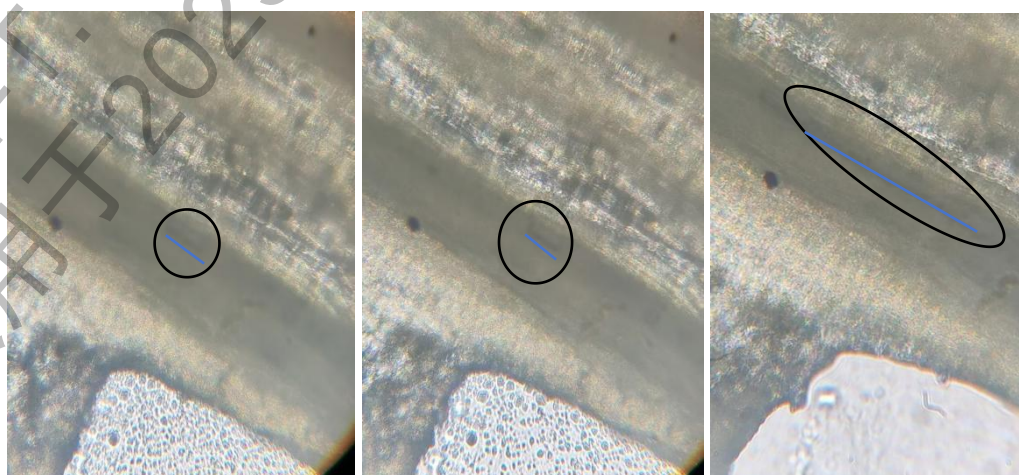


图 4-7 葡萄糖溶液下的切片中检测到超声波（以下超声波均类似于此类图像）



a. 0 min 时刻

b. 5 min 时刻

c. 13 min 时刻

图 4-8 气泡先不变后变长

5. 茎两端封水组中，茎两端滴加清水而叶肉细胞处于无水状态。该组中气泡先缩短，之后再度延长并伴随超声波产生，延长阶段开始出现叶肉细胞萎缩（图 4-9）。



a. 0 min 时刻 b. 20 min 时刻 c. 30 min 时刻 d. 33 min 时刻

图 4-9 气泡先变短后变长

表 4-2 不同溶液浸泡下豌豆幼苗切片实验观察结果

实验处理	处理 5 分钟			处理 15 分钟		
	气泡长度	叶肉萎缩	超声波	气泡长度	叶肉萎缩	超声波
清水	变短	无	无	变短	无	无
无水	变长	有	有	变长	有	有
盐水（饱和）	变短	无	无	变长	有	有
蔗糖（饱和）	不变	无	无	变长	无	有
茎两头封水	变短	有	无	变长	有	有

注：茎两端封水组因盖玻片压制及放置于载物台等操作，可能存在实验误差或现象不明显情况。

4.5 实验二：植物汁液滴管及测密度实验

为了进一步了解植物汁液对气泡的稳定性以及超声波产生的影响程度，我们开展了汁液性质测试实验。首先榨取豌豆幼苗细胞液与导管内液体的混合汁液，充分震荡以便于逸散出溶液中溶解的气体。随后，使用细径吸管分别注入两段植物汁液或两段清水，中间保留一段较短气柱。静置 1 小时后观察，发现无论是汁液还是清水中的气体柱均未出现长度缩小或位置移动，表明在正常状态下汁液并不溶解气体，气泡的缩小不是由于气体溶入汁液所导致。

在不间断的显微观察植物导管内部情况的过程中，我们发现气泡破裂并发出超声波的过程很难通过肉眼直接观察捕捉，并且其发声持续时间极短，仅在 0.2

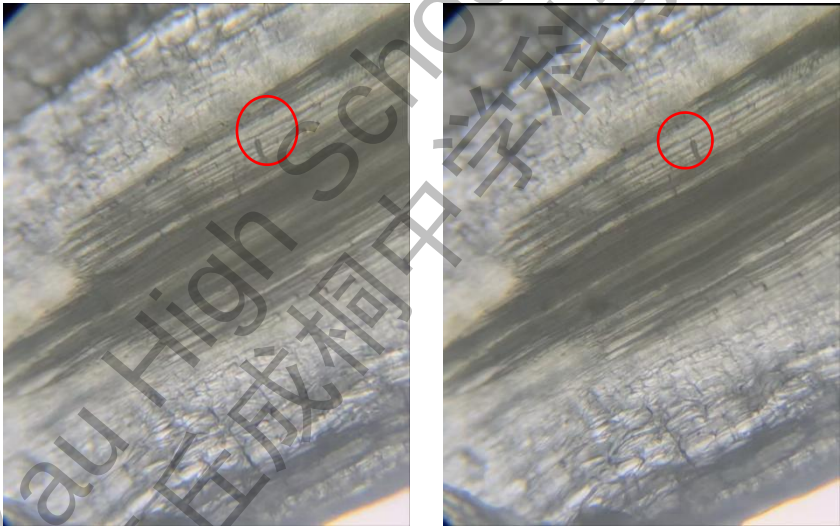
- 0.6 ms 之间完成。此外，我们对正常生长状态下的植株导管进行切片观察，发现内部存在气泡，说明气泡的产生并非仅由胁迫环境引发。

通过密度测量实验（表 4-3），我们重复三次测量 0.5 ml 汁液的质量，计算出汁液密度为 $1.06 \pm 0.06 \text{ g/cm}^3$ 。该结果略高于水的密度，结合植物渗透平衡机制和粘度粗测，推测出导管内液体密度稍大于水，且汁液在导管中具有较好的流动性。

表 4-3 植物汁液密度测量结果

实验次数	瓶子质量（g）	瓶子与汁液总质量（g）	汁液密度（g/cm ³ ）
1	0.74	1.27	1.06
2	0.74	1.30	1.12
3	0.74	1.24	1.00

在无水处理条件下，气泡逐渐变长并伴随超声波产生。显微图像显示（图 4-10），多数气泡延长后会发生交汇。我们推测，两气泡交汇形成液膜，其后在外部压力作用下发生破裂，由此引发的高频振动是超声波产生的直接机制。



a. 未交汇时刻 b. 交汇时刻

图 4-10 两气泡交汇示意图

在水分充足时，导管内水分增多，并未检测到超声波；而在干旱条件下，导管与周围叶肉细胞间水分交换加剧，气泡数量增多、长度增加，气泡间更易形成液膜。值得注意的是，在气泡形成的过程中并未监测到超声波信号，在检测到信号前 10s 内观察到汁液流动，且信号产生时刻未观察到明显的汁液流动。

4.6 实验结果分析

综合以上现象可知，超声波并非源于气泡的产生或单一气泡的破裂，而是由两气泡交汇形成的液膜破裂所引发。

如图 4-11 所示，干旱环境下植株产生的超声波数量显著多于机械损伤处理，

说明该信号与导管周围叶肉细胞吸收水分所引起的气泡数量增多密切相关。这一机制可能有助于植物在局部缺水时向外传递胁迫信号，从而提升其在干旱条件下的生存能力。

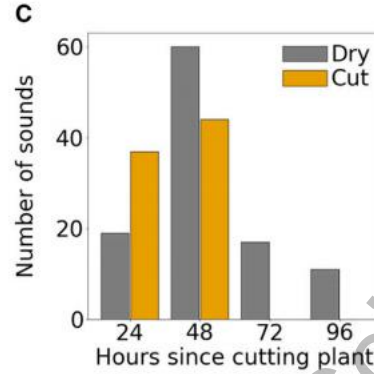


图 4-11 植物在切割和干旱胁迫环境下发出超声波数量⁹

在饱和蔗糖溶液处理中，5 - 30 分钟内气泡延长与叶肉细胞萎缩无直接关联。该条件下气泡的延长主要源于导管外蔗糖溶液较高渗透压所引发的水分流动；同时因蔗糖粘度较高，流体静压影响可忽略，其主要作用是提高导管内汁液的浓度和粘度。假设导管内溶液体积不变，根据

$$\zeta = \frac{R_a}{2} \sqrt{\frac{C_a}{L_a}} = \frac{4\eta_1 L}{\rho_1 v_1 R^2},$$

$$\tau_s = \frac{1}{\zeta f_L} = \left(\frac{\rho_1}{4\eta_1} \right) R^2,$$

$$f_d = f_L \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (1) \quad \frac{1}{L^2} = \frac{4f_L^2}{m^2 v_{eff}^2} = \frac{4f_L^2}{m^2} \left[\frac{1}{v_1^2} + \frac{2\rho_1 R}{h} \cdot \left(\frac{1}{E} \right) \right] \quad (2)$$

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(f_{p(axial)} \tau_s \right)^2}} \quad R = \sqrt{\frac{4\eta_1 \tau_s}{\rho_1}} \quad (3) \quad (4)^6$$

通过公式 (1) - (4) 可联立得：

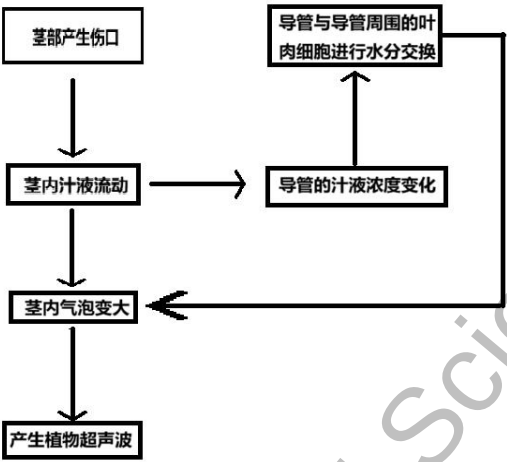
$$\left(\frac{m^2 v_1^2 - 4L^2 f_L^2}{4L^2 f_L^2 v_1^2} \right)^2 = \left(\frac{2P_1}{Eh} \right)^2 \frac{4\eta_1}{P_1} \frac{1}{\sqrt{f_L^2 - f_{p(axial)}^2}}$$

其中 f_L 为基础模态下的共振频率， m 为模态（本研究取一阶模态）， v_1 为汁液中声速（约 1440 - 1500 m/s，与水中声速 1400 - 1500 m/s 接近）， v_{eff} 为管内有效声速， P_1 是液体密度（接近水）， R 为木质部半径， h 为声学厚度， E 为杨氏模量， $f_{p(axial)}$ 为轴向记录的超声波振幅最大峰值频率。

分析表明，气泡破裂引起的超声波主频 $f_{p(axial)}$ 与汁液粘度 η_1 成反比。前 15 分钟与后 15 分钟的主频比值（32.1875 : 38）受声速误差影响较小，表明前期气泡破裂所处汁液粘度较低。因此推断，前期超声波主要源于植株茎内原有汁液中的气泡行为，而非仅由蔗糖渗透压差所导致。。

在饱和蔗糖处理的前 5 分钟，尽管导管内外浓度差最大、水分交换速率最高，

但并未检测到超声波，说明机械损伤引起的水分交换并非气泡延长的直接原因。真正机制应为水分交换导致导管内外浓度差异，进而通过渗透作用促使气泡扩大并最终破裂发声，该过程机理如图 4-12 所示。



4-12 植物在切割环境下发出超声波机理图

对于饱和盐水中气泡“先缩短后延长”的现象：豌豆汁液密度略高于清水但远低于饱和盐水，尽管盐水粘度仅为清水的 2-3 倍，汁液仍会受到流体静压作用而使气泡压缩缩短，该阶段无超声波产生；随后溶液浓度升高，促使导管与周围细胞发生水分交换，进而引发气泡延长和超声波产生。

结合实验二结果及实验一分析，可得出结论：清水中气泡缩小并非气体溶入汁液所致，而主要源于导管内外气体交换。上述干旱或失水胁迫下超声波产生的过程如图 4-13 所示。

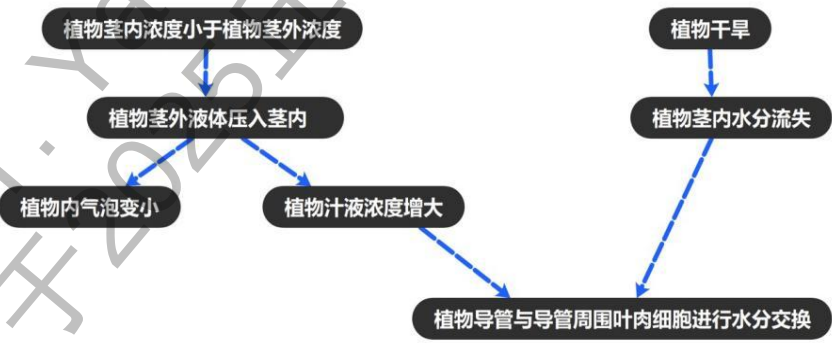


图 4-13 在干旱或使植物失水的胁迫环境下产生超声波机理图

此外，干旱与机械损伤条件下超声波发生特征的差异可解释为：干旱初期超声波数量较少，是由于导管周围叶肉细胞对水分流失的响应较慢，存在一定延迟；而机械损伤使导管内水分迅速从“伤口”蒸发，导致汁液流动加剧，气泡快速延

长，从而更早产生超声波。

五、超声波实时检测系统设计与开发

5.1 系统设计与开发

基于上述研究结果可以发现，植物在不同胁迫环境下会通过不同的水分调节机制产生阻尼系数，振幅最大主频率等特征不同的超声波信号。此外，不同植物种类的导管内环境（如结构特征、水分输导效率等）也会影响其超声波信号的产生模式。这些具有特异性环境响应的声学特征，为构建一套植物超声波自动化实时检测系统提供了理论依据。

超声波实时检测系统开发工作主要包括：植物超声波数据集准备、检测模型开发、及系统开发。

植物超声波数据集准备：我们进行了豆芽音频的录制。一株大豆幼苗一天发出 100 个左右超声波声音，为满足深度学习对大量训练数据的要求，每组幼苗我们至少需要 700 个数据，按照原始方法大约需要连续录制时间 34 天。为加快实验进程，我们决定进行四株同时录制。为了解决多株植物超声波叠加相互干扰的难点，我们在植物之间增加隔音棉，沿径向俯视进行超声波定向录制。录制大约需要 6 天时间可以达到单组原来的效果，大大缩短了实验所需时间，以及减少了植物之间的相互干扰。



图 5-1 加入隔音棉改进后实验示意图

对于模型训练的数据集，由于目前研究已知植物中发出超声波基本符合在 2 ms 内发出结束，并且主要频率在 40-120 khz 的特点，所以我们使用已有论文数据，及我们录制的幼苗超声波数据共同混合入数据集中进行训练。

检测模型采用轻量化深度学习——全连接神经网络模型，能够对输入模型的某个时间片段的音频信号进行实时分析，快速判断该时段是否有超声波。

为方便用户使用，我们开发了支持人机协同验证的用户界面系统，可供用户

随时调取不同时段数据及频谱图、波形图、频幅图，对自动发现发声时段的数据进行二次确认。

5.2 系统技术原理

植物超声波实时检测系统的底层原理图如图 5-2 所示，

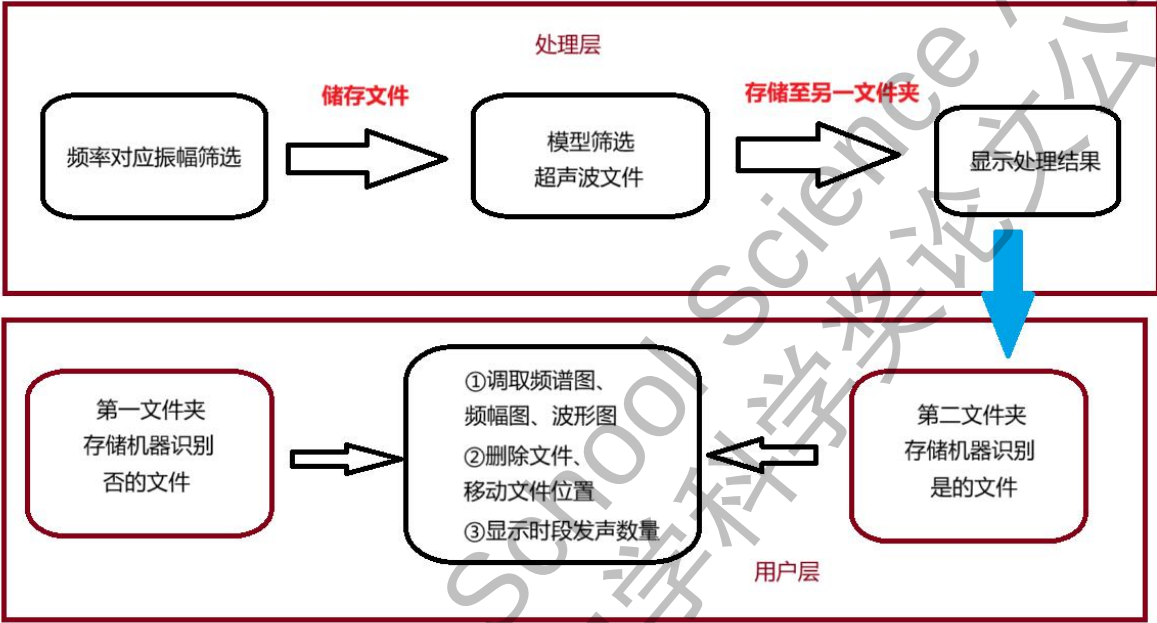


图 5-2 植物超声波实时监测系统原理示意图

首先我们先用超声波麦克风录制 1s 文件若干，边录制边切割成小文件，然后送入图中所示系统中进行处理。由于切割文件过多，所以我们先对 40 khz-120 khz（超声波频率范围）的频率振幅进行筛选并进行高通滤波，得到一些可能含有超声波信号的文件，储存在第一文件夹中。接着基于深度学习模型，自动识别超声波所在时刻的文件，存储至第二文件夹。用户可以从系统界面查询不同时段植物发出超声波的数量，并对识别出来的超声波时段进行人工二次判断。期间可以随需调取声音的频幅图、振幅图、波形图，方便后期观察分析。

5.2.1 数据预处理

图 5-3、5-4 为切割原始音频文件为 0.0015 s 时长小文件的代码样例及小文件截图。

```

name = textname + '.wav';
[x,fs] = audioread(name);
num = length(x);
a = num / 0.0015 / fs;
fprintf('1');
fprintf(num2str(floor(a)));
for i = 1:floor(a) - 1
    start_time = 0.001 + i * 0.0015;
    end_time = 0.001 + i * 0.0015 + 0.0015;
    Y_new = x((fs * start_time + 1) : fs * end_time, 1);

```

a117850.wav
a117852.wav
a117854.wav
a117855.wav
a117859.wav
a117862.wav
a117864.wav
a117865.wav
a117872.wav
a118832.wav
a128066.wav
a128260.wav
a128261.wav

图 5-3 切割文件代码部分图

图 5-4 初步筛选后文件名示意图

实验数据文件通过数字序列进行命名，因此可以通过数字 $\times 0.0015$ 精准计算出发出超声波所在时间，方便后期程序调取数据文件。

5.2.2 频率对应振幅筛选

对切割后的每个小文件，通过振幅及频谱图筛选出含有超声波的音频文件，进一步将这些文件进行高通滤波来绘制频谱图和波形图，以及提取振幅最高频率。通过高通滤波后，可以清晰看到声音的变化。从录制的声波图 5-5、图 5-6 的对比和图 5-7、图 5-8 的对比，可以观察到，图 5-5、图 5-6 中并不能看到植物存在明显发声现象，而在滤波后的图 5-6、图 5-8 文件中，可以看到在 0.3 ms 内超声波波形图。

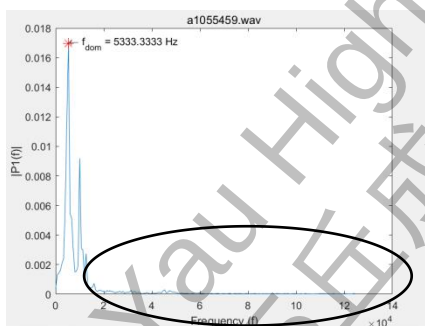


图 5-5 未经高通滤波处理的声音频段

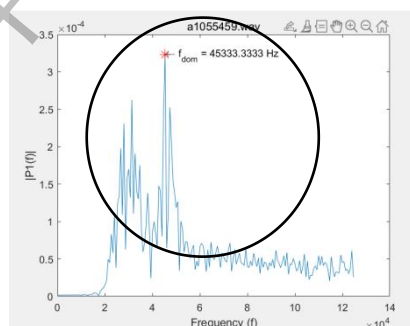


图 5-6 经过高通滤波处理后的声音频段

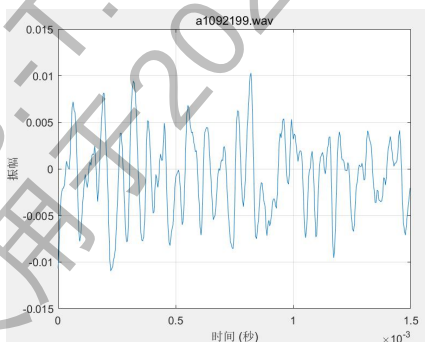


图 5-7 未经高通滤波处理的声音波形图

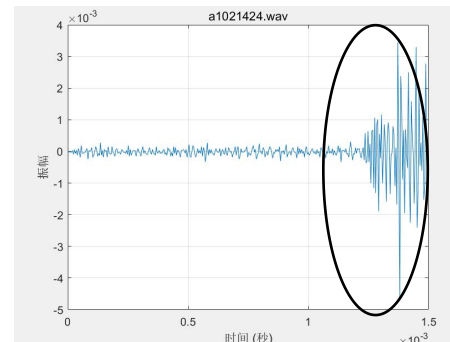


图 5-8 经过高通滤波处理的声音波形图

从图 5-9、图 5-10 对比可以看出产生超声波的图像在高频段区域产生明显的振幅，而噪音中没有此类现象产生。

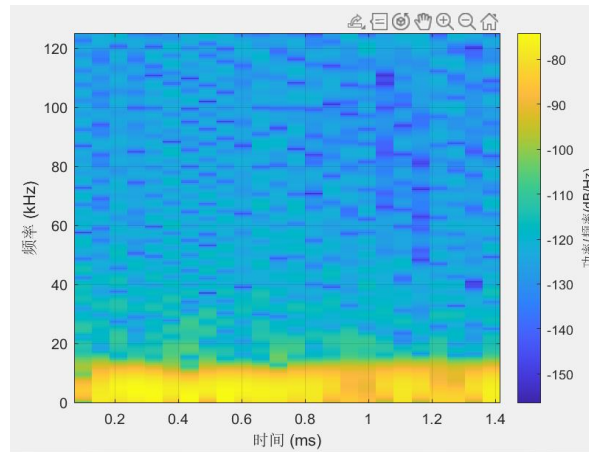


图 5-9 白噪音图像（未经高通滤波）

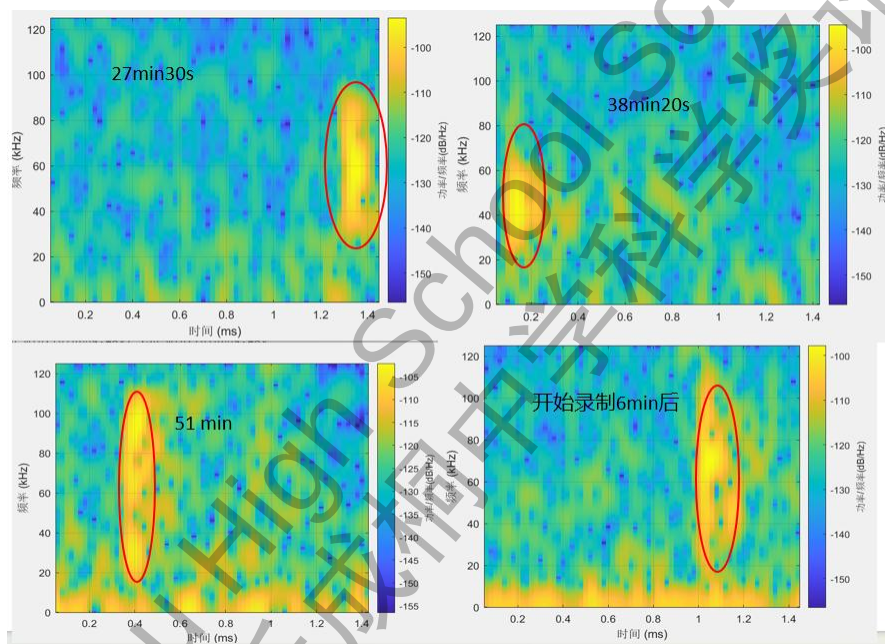


图 5-10 发出超声波的显示频谱图

下图为高通滤波相关代码片段。

```
% 尝试读取文件
fprintf(num2str(fileName{j}));
[signal, Fs] = audioread(num2str(fileName{j}));

Fcut = 25000; % 截止频率 (Hz)
Order = 10; % 滤波器阶数

% 设计高通滤波器
[b, a] = butter(Order, Fcut/(Fs/2), 'high');

% 应用高通滤波器
signal = filter(b, a, signal);
```


5.2.3 基于深度学习的模型筛选

我们开发了基于深度学习的超声波识别模型，用来实现对植物超声波的识别检测与分类。整个模型搭建过程包含两个部分：首先是基于 MFCC 特征的初步二分类模型，用于快速筛选可能含有超声波信号的声音片段；随后采用更复杂的深度可分离卷积神经网络进行精细识别。

在初筛模型阶段，我们使用 Keras 框架构建了一个 Sequential 顺序模型。该模型包含两个全连接层（Dense）和两个 Dropout 层，采用 adam 优化器和交叉熵损失函数进行编译，通过学习声音特征实现二分类预测。编译时使用 adam 优化器和交叉熵损失函数，通过训练学习声音特征，进行分类预测。训练结果显示，模型在训练集上的准确率保持在 96%-97%之间，而测试集准确率则稳定在 97%左右，表明这个经典的全连接模型具有良好的泛化能力。图 5-11 直观展示了训练过程中不同 epoch 的训练集和测试集准确率变化情况。

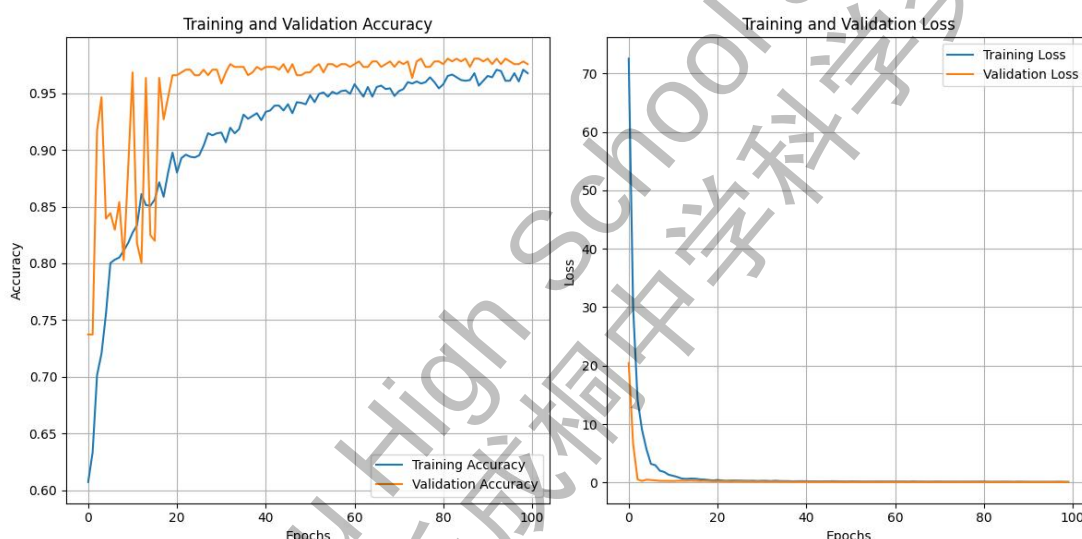


图 5-11 模型训练及测试准确率展示图（隔绝大部分噪音采集数据）

针对超声波分类的需求，我们进一步设计了深度可分离卷积神经网络模型。在数据预处理阶段，我们同时采集了时域（波形）和频域（扩展至 150kHz 的 Mel 频谱）的音频特征，并进行叠加处理分析。我们实施了多种数据增强策略以提高模型的鲁棒性：对采集到的 1.6ms 长度音频数据进行时域拉长，以便于更好地提取特征；引入音高偏移和随机振幅缩放，模拟真实物理环境中噪音和超声波随距离衰减等因素的影响。

在模型架构设计方面，由于现有研究中关于植物声音种类和胁迫环境对超声波特征影响的资料有限，我们采用了多尺度感知方法。如图 5-12 所示，该模型使用 3×1 和 5×1 的卷积核分别捕捉局部细节和全局特征，然后再通过 1×1 的卷积核生成注意力权重，从而提取重要特征进行训练。后续通过贝叶斯概率验算表明，人工与机器共同识别的概率约为 73.6%，具体分析详见 5.3 节。

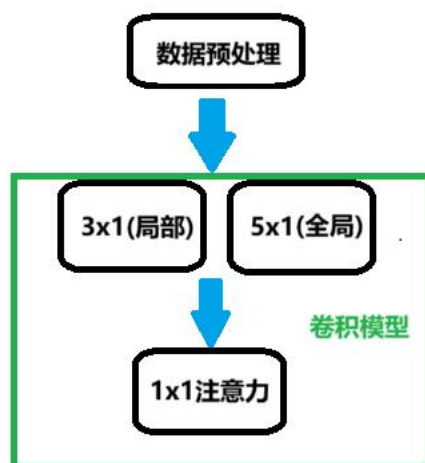
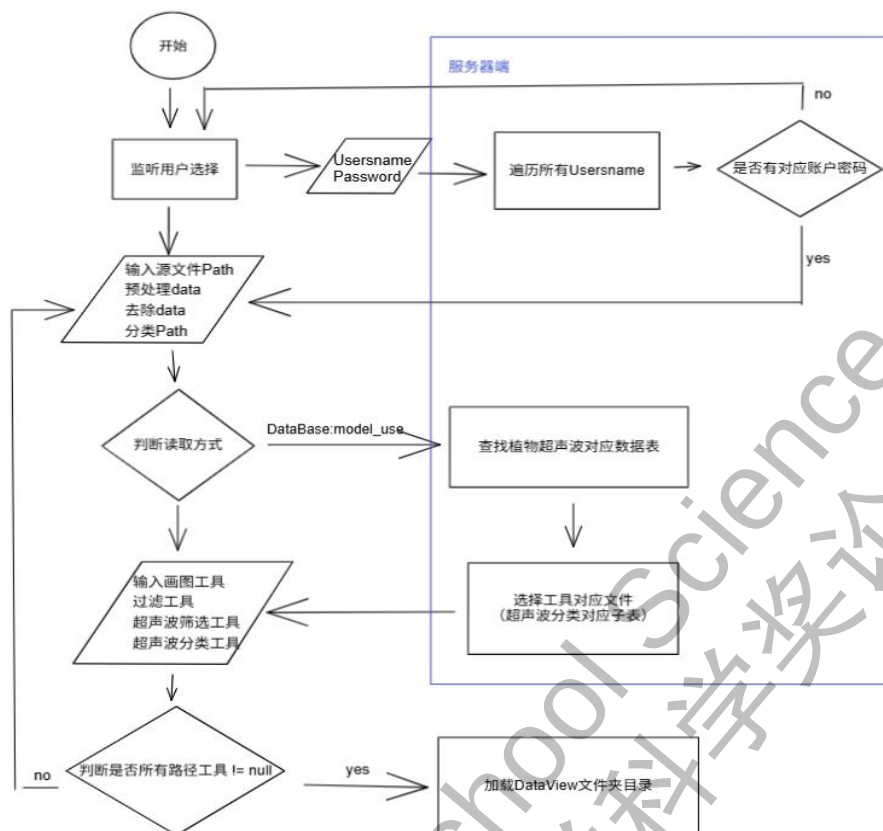


图 5-12 超声波分类模型架构图

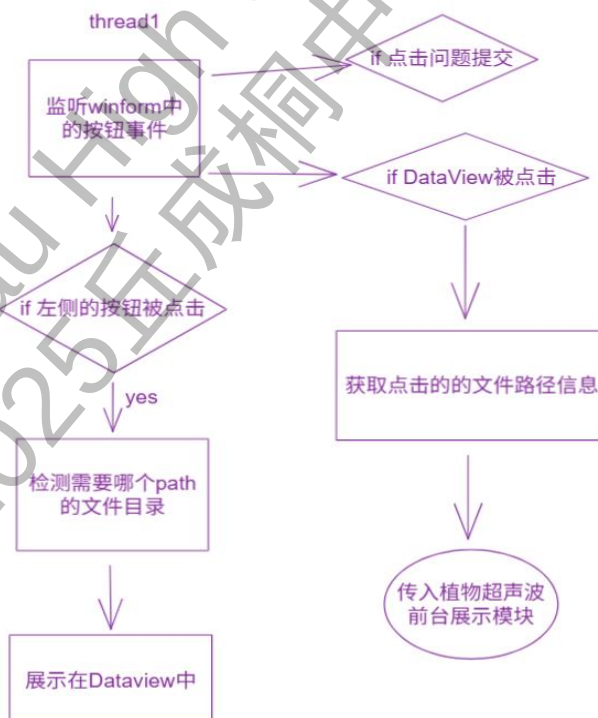
该检测系统在实际应用中的延迟约为 100 毫秒，完全满足生产和生活环境的实时性要求。值得注意的是，在检测超声波过程中，并不需要完整收录植物发出的所有超声波信号，这使得本系统能够显著提高植物状态检测的效率，为农业监测提供了一种便捷高效的解决方案。

5.2.4 系统代码流程图和真实效果展示

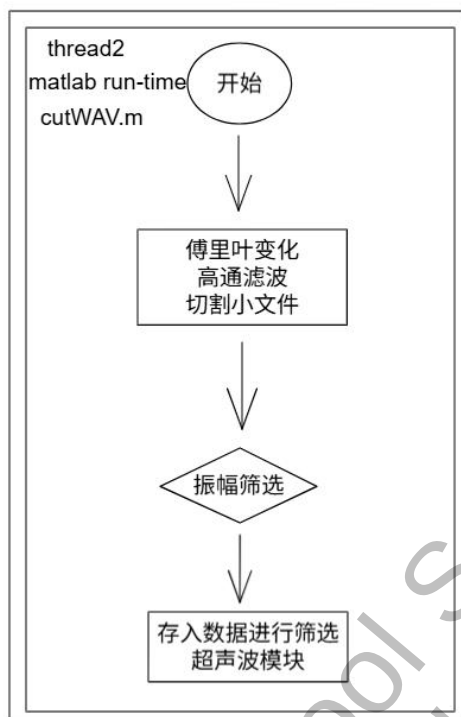
我们开发的植物超声波检测系统实现了实时检测、用户反馈、图像自动处理、开源代码工具、远程操控等功能。系统由八个协同工作的模块构成：用户登录与数据库交互（图 5-13）、总控调度（图 5-14）、基于 FFT 的去噪滤波预处理（图 5-15）、超声波检测（图 5-16）、超声波分类（图 5-17）、超声波状态展示（图 5-18）、超声波图像前台展示（图 5-19）以及用户二次反馈（图 5-20）。八个模块的总体运行流程图见图 5-21。其中，其中，去噪滤波、超声波检测与分类为系统的三大核心模块。系统后端采用 Matlab 与 Python 实现，前端基于 C# 开发，并使用 MySQL 进行数据管理。



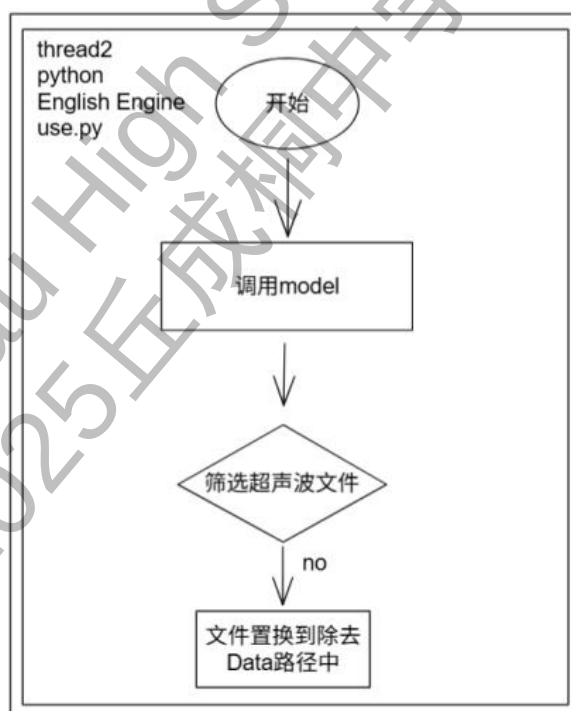
5-13 用户登录与数据库交互模块流程图



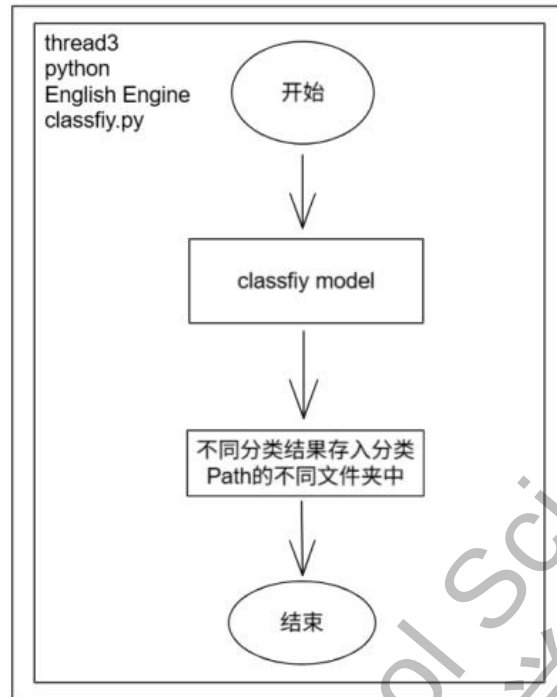
5-14 总控调度模块流程图



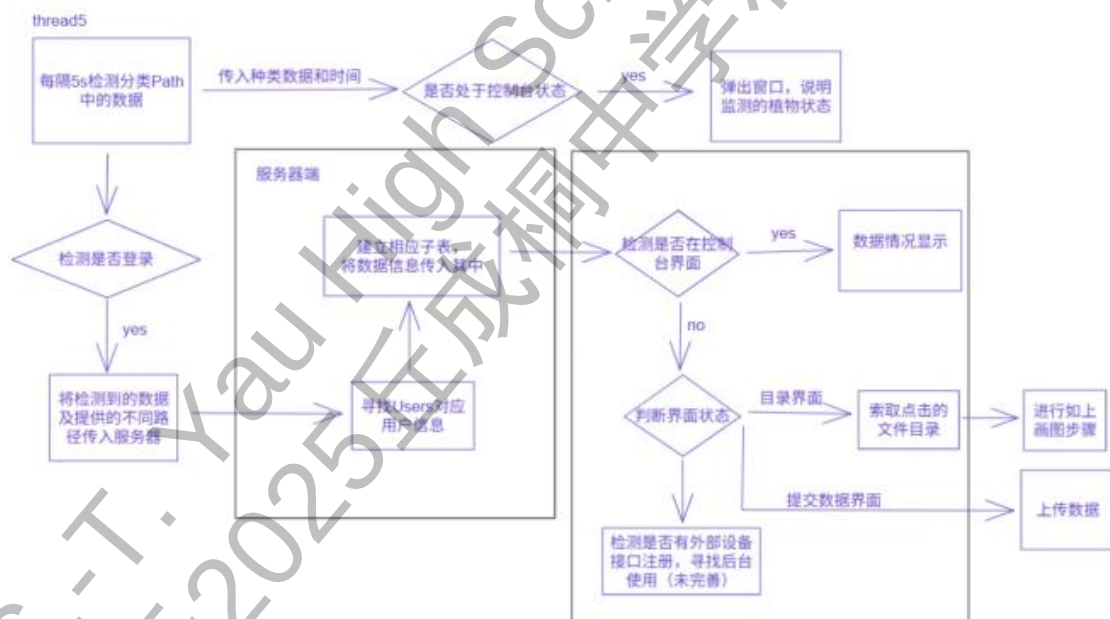
5-15 基于 FFT 的去噪滤波预处理模块流程图



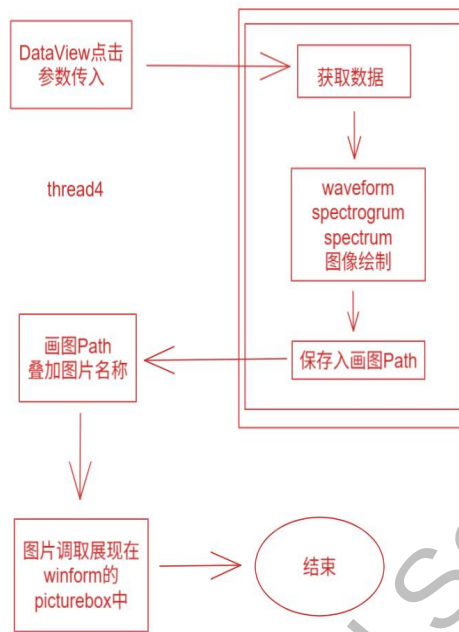
5-16 超声波检测模块流程图



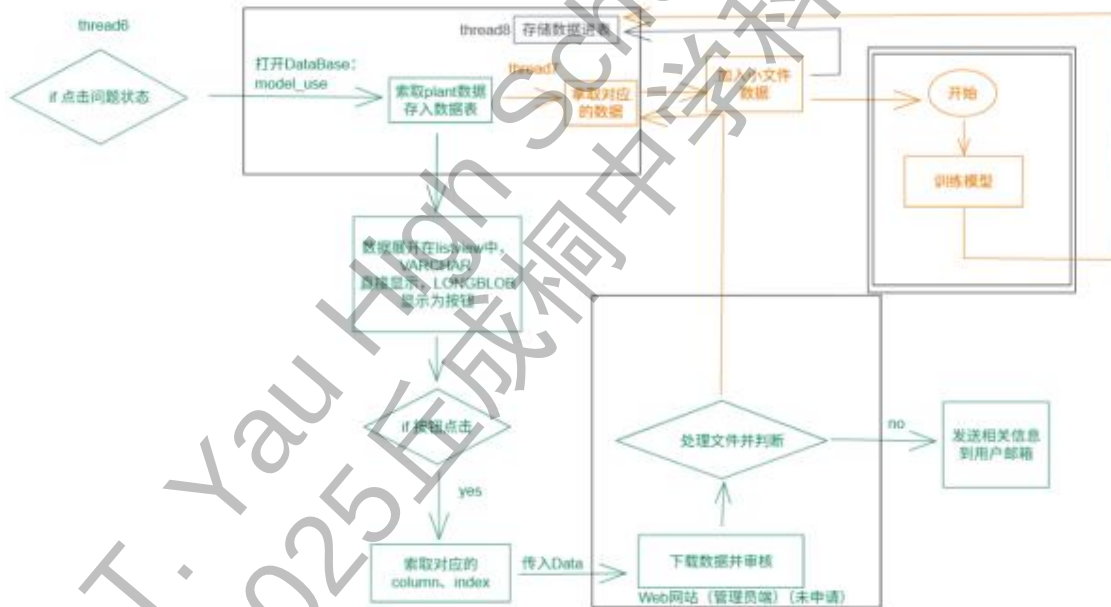
5-17 超声波分类模块流程图



5-18 超声波状态展示模块流程图



5-19 超声波图像前台展示模块流程图



5-20 用户二次反馈模块流程图

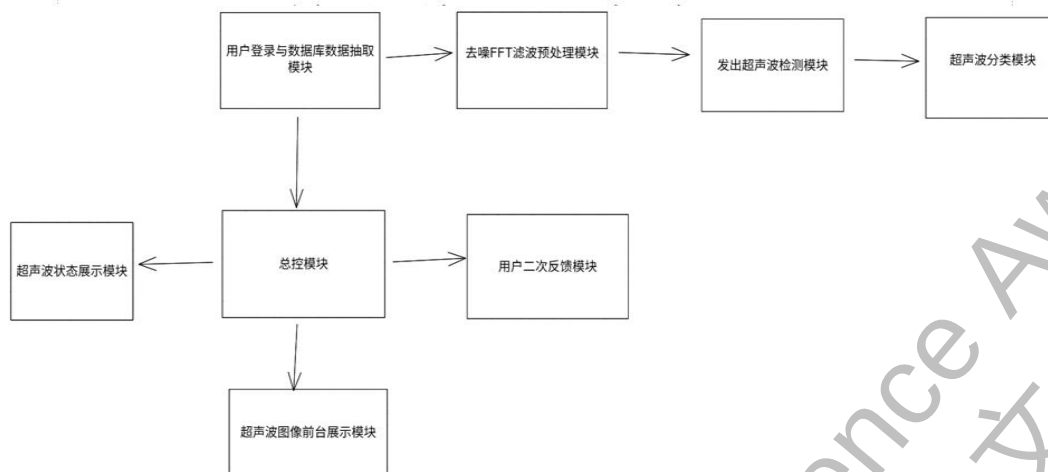


图 5-21 八个模块的总体运行流程图

各模块功能概述如下：

- 用户登录与数据库交互模块（图 5-13）基于 C# WinForm 开发，支持用户注册、登录及从数据库调用数据处理代码，并保存用户在处理、筛选、分类与检测中所需的参数和数据。
- 总控模块（图 5-14）负责协调其余七大模块，控制系统整体运行流程。
- 基于 FFT 的去噪滤波预处理模块（核心模块，图 5-15）使用 Matlab 实现，提供 20 kHz 以上的高通滤波及傅里叶变换，对音频文件进行处理并分割为 2 ms 片段以供后续分析。
- 超声波检测模块（核心模块，图 5-16）基于 Python 开发，采用经典全连接二分类模型。在未引入白噪声补偿且训练数据不足 1000 条的情况下，该模型识别准确率达到 83%，并能将非超声波文件自动归档供用户查验。
- 超声波分类模块（核心模块，图 5-17）同样基于 Python，使用卷积神经网络。在 3000 条数据上训练后准确率达 70%，结合专有的数据增强与超声波处理方法后，四分类准确率可稳定在 76%，能够区分不同植物在不同胁迫环境下产生的超声波。
- 状态展示模块（图 5-18）基于 C#和微信小程序开发，用户可通过手机端查看植物种类、信号类型、发生时间等信息，并预留硬件接口支持。
- 图像前台展示模块（图 5-19）通过 Matlab 实现，支持用户对分割后的音频文件进行检测，自动生成频谱图（超声波可视化）、波频图（滤波效果及振幅最大主频率分析）和波形图（声音特征变化），辅助人工判断。
- 用户二次反馈模块（图 5-20）整合 MySQL、C#和 JavaScript，用户可提交错误文件申请，后台据此优化模型与数据系统，实现持续改进。

系统整体运行流程如图 5-21 所示，系统界面如图 5-22 至 5-24 所示：。

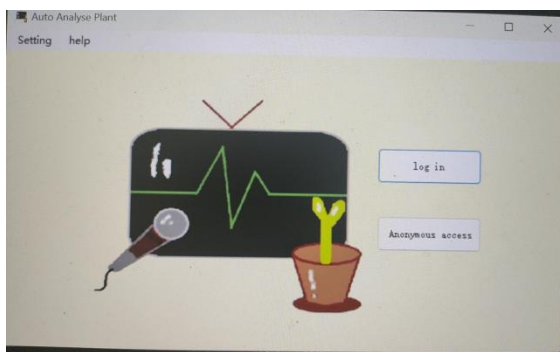


图 5-22 前台开始页面图

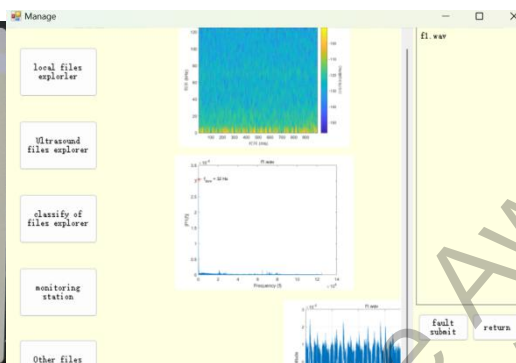


图 5-23 超声波图像显示图

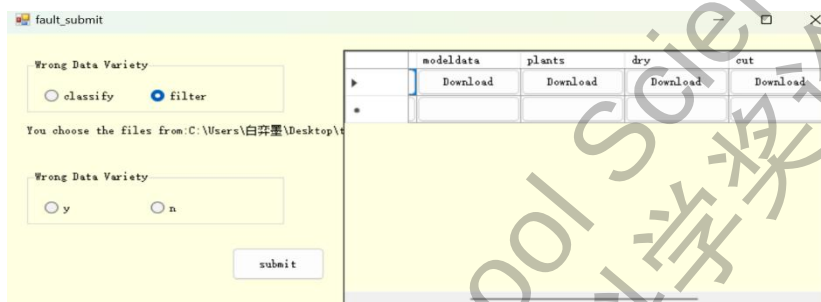


图 5-24 用户反馈页面图

该系统可作为实时检测平台与 Avisoft RECORDER USGH 等超声波录制软件对接，建议设置最大文件时长为 2 秒，系统延迟控制在 30 秒以内，适用于实际生产与研究环境。

5.3 系统测试情况

为验证系统区分植物超声波和环境噪音的能力，我们对切根黄豆芽（作为不同种植物代表）发出的音频文件进行了抽样测试。表 5-1 展示了经过切割处理后的超声波文件小样本示例。观察表明，植物发出的超声波信号在多种维度特征上与背景噪音存在显著差异。抽样测试结果如下：

1. **人工识别准确率：** 随机抽取的 42 个音频文件样本，经人工判断是否为有效植物超声波的正确率达到 **93%**。
2. **机器识别准确率：** 相同样本集，使用当前训练好的模型进行识别，正确率为 **80%**。

表 5-1 人工和机器识别结果抽样表 (样本量：42)

1	1	1	1	1*	0 [#]	0*	0 [#]	1*
1*	1	1	0*	1	1	1	1*	1
1	1*	1*	0 [#]	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0			

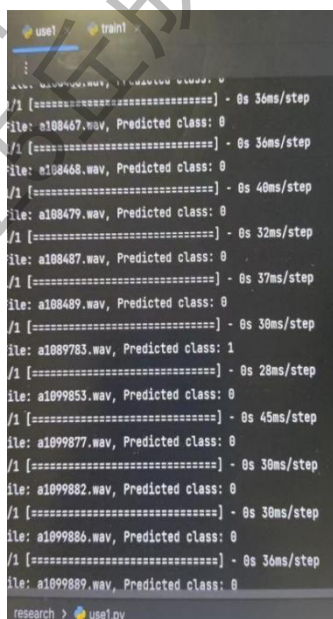
说明:

- 1: 判断为是植物超声波文件。
- 0: 判断为不是植物超声波文件（即噪音）。
- #: 人工判断失误（即人工判错）。
- *: 机器判断失误（即机器判错）。
- 样本为随机抽取，音频文件时长统一为 0.02 秒（采样率 400 kHz），未标注具体时间点

当前测试结果显示，人工识别植物超声波准确率达 93%，而深度学习模型准确率为 80%，表明模型在噪声环境下区分超声波的能力仍有提升空间。为量化人机识别的一致性，我们进行概率分析：设事件 A 为人工判断正确，事件 B 为机器判断正确。根据测试数据，人工正确率 $P(A) \approx 93\%$ ，在人工判断正确前提下机器也正确的条件概率 $P(B|A) \approx 80\%$ 。通过联合概率公式 $P(AB) = P(B|A) \times P(A)$ 计算，得出人机共同判断正确的概率约为 73.6%，这一结果客观反映了当前模型输出与人工判别结果的重合度。

关于模型训练数据需求，结合已有研究经验，训练特定植物在单一胁迫环境下达到 >70% 准确率的识别模型，通常需收集 600 个以上有效样本。此处“有效样本”定义为：在低噪声环境中录制、经振幅筛选确认含潜在超声波信号的植物音频文件。根据实验及文献验证，针对单一场景（如特定植物+缺水胁迫）需收集 820 个以上有效样本，预计耗时约 3 天。该数据采集强度在农业科研与生产实践中具备可行性，且经济成本可控。

根据系统实际运行数据（图 5-25），模型处理单个文件的平均延迟约为 30 ms。在无隔音干扰的环境下，系统每小时可检测约 600 个振幅超阈值的超声波信号文件，整小时数据的计算处理耗时仅 18 s。相比之下，人工分析相同数量的数据需对每张 2 ms 的频谱图进行单独处理，单张耗时 30 s，总处理时间高达 5 小时。由此可见，该系统显著优于传统超声波检测方法，能够实现植物超声波的实时监测，为植物生长状态分析提供高效的技术支持。



```
use1 train
...
/1 [=====] - 0s 36ms/step
file: a108467.wav, Predicted class: 0
/1 [=====] - 0s 36ms/step
file: a108468.wav, Predicted class: 0
/1 [=====] - 0s 40ms/step
file: a108479.wav, Predicted class: 0
/1 [=====] - 0s 32ms/step
file: a108487.wav, Predicted class: 0
/1 [=====] - 0s 37ms/step
file: a108489.wav, Predicted class: 0
/1 [=====] - 0s 30ms/step
file: a1089783.wav, Predicted class: 1
/1 [=====] - 0s 28ms/step
file: a1099853.wav, Predicted class: 0
/1 [=====] - 0s 45ms/step
file: a1099877.wav, Predicted class: 0
/1 [=====] - 0s 30ms/step
file: a1099882.wav, Predicted class: 0
/1 [=====] - 0s 30ms/step
file: a1099886.wav, Predicted class: 0
/1 [=====] - 0s 36ms/step
file: a1099889.wav, Predicted class: 0
research > use1.py
```

图 5-25 模型判断超声波示意图

六、实验理论验证

6.1 验证叶肉细胞水分交换调控植物超声波产生

上述研究我们得出了植物的叶肉细胞的水分交换是导管内气泡变化不稳定从而产生超声波的主要原因。可以看到在切片下植物的切口大约为厚度 $1.2 \times 10^{-5}\text{m}$ ，宽度为 $2 \times 10^{-3}\text{m}$ ，面积约为 $2.4 \times 10^{-8}\text{m}^2$ ，幼苗的面积约为 $1.256 \times 10^{-5}\text{m}^2$ 。切口面积与幼苗面积相差 400 倍，因此空气对植物导管切口的影响忽略不计。我们试想除去非液态类这种较强胁迫环境下对植物切片中导管伤口的影响之后，单独去研究叶肉细胞与导管是否具有直接相关性。在去除叶肉细胞的过程中我们放弃了原有的实验方法，因为切割中残留部分叶肉细胞附着在导管上，严重影响实验结果，因此我们采用了撕取导管的方法。为防止撕取时损伤导管壁从而影响气泡的形成，我们使用了低温软化的方法。

我们的设备采用硬触发摄像头连接显微镜，同时使用超声波麦克风和摄像头进行同时录制，使实验更加精确。设备如下图所示。



6-1 硬触发摄像头连接示意图

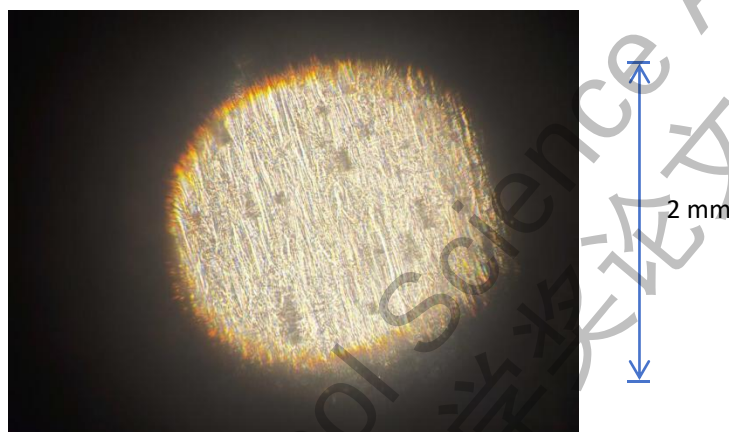
具体实验方案如下：

- 1) 分别准备三个容器，一组盛有饱和蔗糖溶液和两组盛有清水，选取豌豆幼苗和芹菜茎颜色较浅的部位（减少叶绿素对其的干扰）。
- 2) 喷入液氮至饱和蔗糖溶液中直至喷入处周围出现冰晶，立即喷洒液氮在幼苗上直至硬化，放入饱和蔗糖溶液中，用碾子撕取茎的导管。

3) 为防止植物的导管上存在蔗糖溶液的物质干扰实验, 采用 (2) 中对蔗糖溶液的处理方法处理清水组, 冷却至 0°C 后将撕取物浸入清水中, 5 s 后放入室温状态下的容器中进行二次浸洗。

4) 放在载玻片上并使用吸水纸吸取表面多余水分, 放在光学显微镜下观察实验。

观测实验结果如图所示



6-2 导管切片示意图

切割出的图像应满足基本没有叶肉细胞作为干扰, 我们可以得到植物在两小时内没有明显的气泡变化, 说明该切片组织在正常的没有叶肉细胞水分交换时并没有产生气泡, 验证了植物发出声音主要依靠叶肉细胞的水分交换来调控。

6.2 植物产生超声波的多种成因验证

我们尝试复现相关文献中提到的气泡核化现象并探究其与超声波的关系⁷。然而实验未能捕捉到预期气泡核化时刻的超声波信号; 同时, 在明确检测到超声波信号的时刻, 我们也未观察到植物导管内发生气泡核化。因此, 我们曾推测超声波产生可能是源于叶肉细胞破裂, 但在其破裂事件前后同样未能检测到对应的超声波信号。

值得注意的是, 在检测到的超声波事件发生前约 10 秒内, 我们多次观测到导管内液体 (水柱) 的快速流动。但**关键问题在于超声波产生的确切瞬间, 导管内并未观察到液体流动**。这一现象表明, 该超声波并非由于导管内水压不平衡导致的气泡破裂所产生。因为如果符合此类机制, 气泡破裂瞬间释放的巨大能量应当引发导管内液体因压力梯度失衡而产生的显著瞬态流动的现象, 而这与我们观察到的“瞬间无流动”相矛盾。

基于前述观察排除了水压不平衡导致空化的机制猜想, 我们转向去探究导管内气泡破裂产生超声波的可能性 (图 6-3, 6-4)。可以看到在整个植物导管切片内并没有明显的气泡破裂现象。对采集到的超声波信号进行频谱分析 (图 6-5, 6-6) 发现, 其振幅最大主频主要集中在 40 kHz 至 90 kHz 之间, 部分信号可达 100 kHz 及以上, 说明超声波的发声机理可能存在两种或两种以上。



图 6-3 发出超声波前导管状态



图 6-4 发出超声波后导管状态

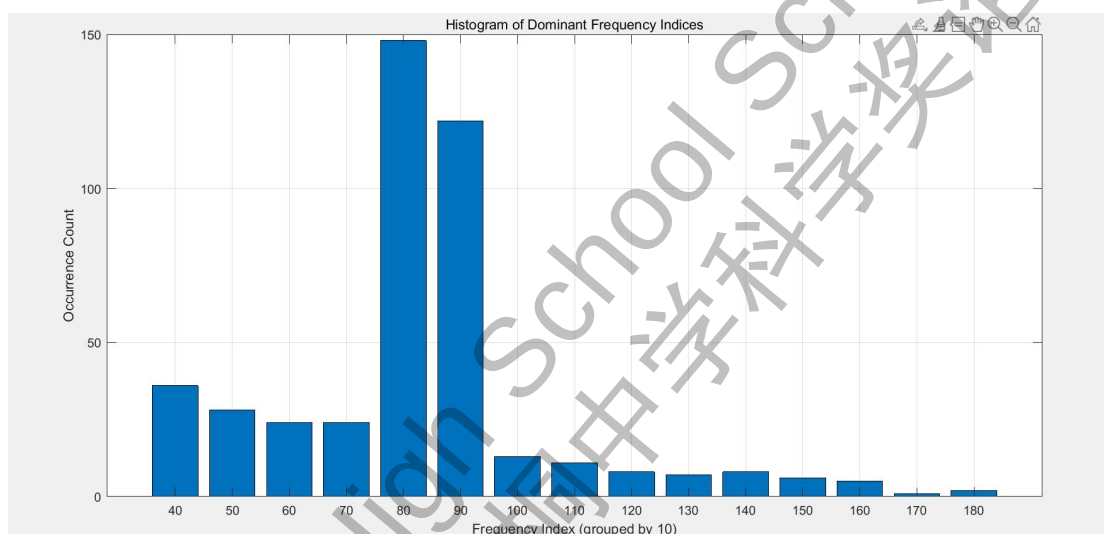


图 6-5 振幅最大主频率数量分布图

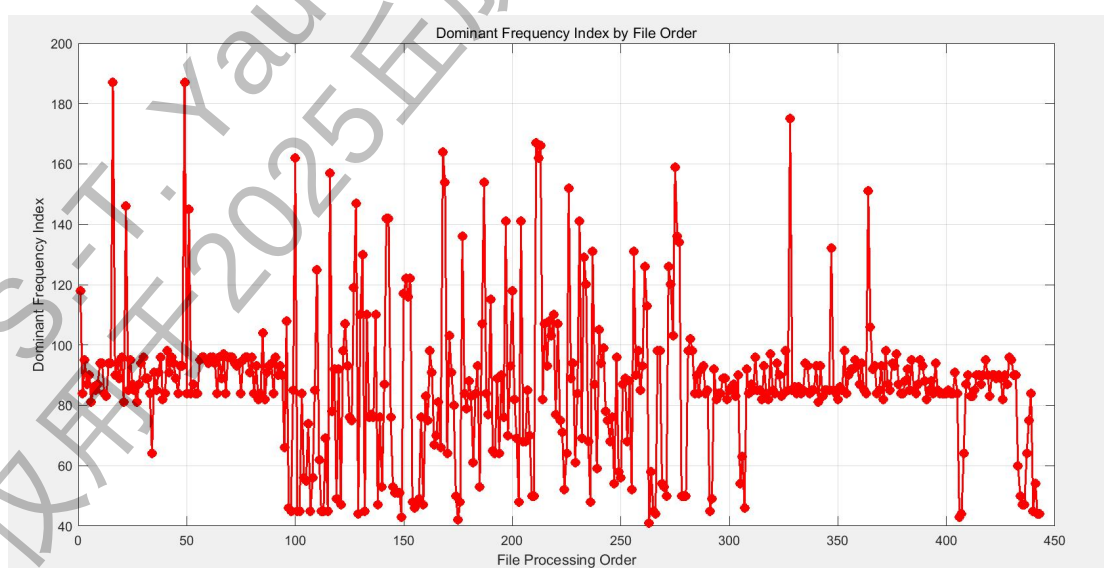


图 6-6 振幅最大主频率随时间变化分布图

为验证导管气泡破裂假说的合理性，我们利用气泡在液体中破裂时产生的共振频率公式进行估算

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{3\gamma P_0}{\rho}}$$

其中：

f_{res} ：气泡共振频率 (Hz)，此处取观测到的典型振幅最大主频率值 **90 kHz** 进行计算；

R ：气泡半径 (m)；

γ ：气体绝热指数（空气取 1.4）；

P_0 ：静水压力 (Pa，取标准大气压 $\approx 10^5$ Pa)；

ρ ：液体密度 (kg/m^3 ，取水密度 $\approx 1060 \text{ kg/m}^3$)。

我们把观察到的 90 kHz 这个典型高频值，以及公式里需要的其他数值（空气特性、水的密度、大气压）代入公式计算。结果算出，要发出大约 90 kHz 的声音，气泡的半径理论值应该是 **34.1 微米 (μm)** 左右。

这个计算出来的气泡大小 (34.1 μm)，和我们实验中实际测量到的植物导管平均半径 (大约 **31.25 μm**) 非常接近！这个结果说明：在导管如此细的空间里，如果形成气泡（近似球体）并破裂，理论上完全有可能发出我们实际检测到的那些高频超声波（特别是 **80-100 kHz** 的声音），但是光学显微镜是不足以观察到该现象的。

我们还仔细研究了超声波数据图（图 4-18 和 4-19）。一个有趣的发现是：当植物受到胁迫（比如缺水）后，在它发出超声波的间隔时间里，最主要的声音频率（主频）常常会**稳定地保持在 80 到 100 kHz 这个很高的范围内**。这种声音频率‘**保持稳定**’的特点，和我们猜想的是导管里气泡破裂产生声音的预期是吻合的。反过来想，如果超声波是像叶肉细胞破裂等其他原因产生的，就很难解释为什么植物会这么‘有规律’地反复发出集中在这么高频率的声音。

不过，我们也注意到，在声音频率变化的过程中（图 4-19），有些时间段频率不太稳定。我们猜测：这可能是那些没有产生气泡的导管里，快速流动的水流造成了某种**短暂的、不稳定的状态**（比如水流让水和空气的交界面剧烈晃动，或者瞬间产生又立刻破灭的微小气泡）。这种不稳定的状态，可能就发出了那些频率变化比较大的、不太“典型”的超声波。

6.3 超声波产生的模型建立

在前期使用显微镜观察中，我们虽未直接捕获气泡膜破裂的瞬时现象，但记录了液膜逐渐变薄至消失的全过程。若排除液柱核化产生超声波的假说，当前尚无其他机制能合理解释其声学信号的起源。这一现象恰为我们的理论提供了间接佐证。

为了搞清楚气泡膜破裂的原因，我们首先建立了一个理想的导管模型。在这个模型里：

- 导管各处吸收水分的速度都一样（导管粗细变化很小，周围的叶肉细胞也分布均匀）。

- 没有大的外力干扰水膜的稳定。

第一步：膜为什么会破？关键厚度是多少？

对于夹在两个气柱之间的水膜，如果不考虑分子间的吸引力（范德华力），理论计算给出一个临界厚度

$$h_c \approx \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}}$$

代入水的表面张力 (γ)，植物汁液浓度 (ρ)，重力加速度 (g) 数值，算出临界厚度 h_c 大约是 **258 纳米 (nm)**。这个厚度远大于通常认为水膜会自发破裂的厚度（约 50 nm）。这说明，**只靠重力等因素，膜可能没那么容易破。**

那么，考虑分子吸引力呢？我们用了另一个公式

$$h_c \approx \sqrt[3]{\frac{A}{\pi \rho g}}$$

其中 A 是衡量分子间吸引力的常数 (Hamaker 常数，对水-空气界面取约 $1 \times 10^{-23} \text{ J}$)。计算得到的临界厚度变得非常小，只有 **1.45 纳米 (nm)**！这个厚度小到连电子显微镜都很难看清楚，而且植物体内似乎也很难维持这么苛刻的条件。

我们得出如下**结论**：在植物导管里，水膜可能是在一个比 1.45 nm 大得多的厚度下破裂的。这意味着，**破裂的原因不能只靠分子吸引力或重力来解释，很可能需要外部干扰！**

第二步：引入外部干扰 - 水分交换

在较大临界厚度下，气泡膜破裂的真正原因是什么？关键的外部干扰可能来自导管周围的叶肉细胞，它们在和导管进行水分交换时，会改变导管内气柱的气压，导致相邻气柱间产生压力差 (ΔP)。

如何量化这种压力扰动？我们通过三个物理定律建立关联模型：

1. 理想气体状态方程：

$$PV = nRT$$

2. 气柱体积比公式：

$$\frac{v_M}{v_S} = \frac{L_M}{L_S}$$

3. 运动学体积公式：

$$V = S(L + vt)$$

推导得到压力差表达式：

$$\Delta P = P_0 (\Delta L_M - \Delta L_S)$$

其中：

P_0 ：一个标准大气压

ΔL_M ：与膜相邻的较长气柱的长度

ΔL_S ：与膜相邻的较短气柱的长度

实验中观测到微米级流体运动，测算出 ΔP 值约为标准大气压的千分之一 (100 Pa)。

破裂时间预测模型的建立

基于流体力学原理，得到液膜厚度变化速率方程：

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{2h^3}{3\mu r^2}(\Delta P + \Pi(h))$$

考虑到由于范德华力对膜的破裂成因影响不大，所以这里的 $\Pi(h)$ 忽略不计，则：

$$dh/dt \propto -h^3 \times \Delta P$$

该方程揭示重要规律：**膜厚越大，变薄速率越快。**

通过如下积分运算：

$$\int_{h_0}^{h(x)} \frac{dh}{h^3} = -\frac{2\Delta P}{3\mu r^2} \int_0^t dt$$

我们推算出：

$$h(t) = \left(\frac{1}{h_0^2} + \frac{2\Delta P}{3\mu r^2} t \right)^{-\frac{1}{2}}$$

考虑到临界厚度为 1.45 nm 可以看作趋于 0，最终获得破裂时间（从观察到的气泡膜厚度到达临界厚度所需的时间）预测表达式：

$$t_{rupture} \approx \frac{3\mu r^2}{4\Delta P h_0}$$

第三步：实验验证与发现

代入实测参数：

- **水的粘度 μ ：** 取 0.0015 Pa·s (常见范围 0.001-0.002 Pa·s)
- **气泡半径 r ：** 使用之前计算得出的理论气泡半径 **34.1 μm** (即 $34.1 \times 10^{-6} \text{ m}$)
- **初始膜厚度 h_0 ：** 取实验中观察到的厚度 **1.49 μm** (即 $1.49 \times 10^{-6} \text{ m}$)
- **气压差 ΔP ：** 根据实验观察到的微小水流速度估算，约为 10^{-3} 个大气压 (即 $\sim 100 \text{ Pa}$)

可以计算出：气泡模的**理论破裂时间为 247 秒**，这与我们观测到的最初气泡在**210 秒**时接收到破裂信号（已扣除 20 秒制样时间），**偏差仅 15%**，证明模型的可靠性。

我们发现公式 $t_{rupture} \approx (3\mu r^2) / (4\Delta P h_0)$ 告诉我们一个似乎反直觉的结论：**初始膜越厚 (h_0 越大)，破裂时间反而越短 ($t_{rupture}$ 越小)。**这

可以用流体力学解释（厚膜在相同压力差下流失体积更快），我们猜想这可能也与叶肉细胞发出水分交换信号到导管产生响应之间的延迟有关，这需要后续进一步研究。

在真实植物环境中，水分交换速率极低（流速小于微米级的流速，远小于制作切片时由外力震荡而加快的液体流速），导致正常缓慢的水分交换产生的 ΔP 会更小，导致破裂时间大大延长。这与我们观测到的液膜渐进消失现象（>10 分钟）吻合，揭示了实验室条件与自然状态差异的本质原因。

七、总结与展望

本次研究我们深入探究了豆科植物超声波的发声机理，我们通过对研究木质部导管半径与超声波的阻尼系数关系公式进行迁移，基于超声波的最大振幅所在频率来判断植物气泡发出超声波的所在位置，并且建立物理模型进行理论验证，首次揭示了关键发现：1）植物导管内气泡变长时会产生超声波；2）气泡产生及变长的根本原因是植物导管和叶肉细胞的水分交换；3）超声波产生的部分原因是气柱之间膜破裂产生的。

在理论认识的基础上，我们设计并构建了一套植物超声波实时检测系统。该系统的核心采用深度学习算法，能够在普通环境噪声背景下有效识别植物超声波，识别准确率达到 73.6%（对比人工判别的 93%），显著提升了检测效率并且降低了人工筛查的工作量。我们的系统建立了后台数据库进行规范化的数据管理，提高了算法效率，并配备了用户客户端，支持便捷的远程监测功能。

同时，我们优化了实验方案，成功实现了多株植物超声信号的同步采集，有效减少了环境干扰等因素的影响，为后续相关研究提供了可操作的实验方案。

本研究为理解植物应激发声机制及开发实用的植物健康无损监测技术奠定了基础。然而，本研究也存在一定的局限性。由于光学显微技术的分辨率较低，我们未能直接观测到超声波产生瞬间导管内部的微观动态变化。此外，当前深度学习模型的识别准确率与人工判别水平相比仍有提升空间，且模型训练数据的多样性和数量有待进一步扩充。对于植物超声波产生的所有潜在因素，我们的认识也尚未完全阐明。

展望未来，我们计划引入红外热成像等非侵入式传感技术进行间接观测，以更深入地验证物理模型。也计划采集更大规模、涵盖更多植物种类和胁迫状态的数据集上，以训练更鲁棒和精确的识别模型。我们将继续努力开展后续研究，不辜负老师和学校的期望。

八、参考文献

1. Hsiao T C. Plant responses to water stress [J]. Annual Review of Plant Physiology, 1973, 24: 519-570.
2. Jackson, R D. Remote sensing of biotic and abiotic plant stress[J].Annual Review of Phytopathology, 2003, 24(1):265-287.
3. Mahlein, Anne-Katrin. Plant disease detection by imaging sensors -parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping[J].Plant Disease, 2015, 100(2):241-251.
4. Potters G , Pasternak T P , Guisez Y ,et al. Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble?[J].Trends in Plant Science, 2007, 12(3):98-105.
5. Chao S , Jinbo W , Xinyun G ,et al. Different multicellular trichome types coordinate herbivore mechanosensing and defense in tomato[J].The Plant Cell, 2024(12):12.
6. Dutta S , Chen Z , Kaiser E ,et al.Ultrasound pulse emission spectroscopy method to characterize xylem conduits in plant stems[J]. Research,2023,1:139-152.
7. A. Ponomarenko, O. Vincent, A. Pietriga, H. Cochard, É. Badel and P. Marmottant J. R. Soc. Interface 2014 11, 20140480, published 23 July 2014
8. 顾静怡. 物有此理|听, 植物在“尖叫”[J/OL]. 知识窗杂志公众号, 2023.
9. Itzhak Khait, Ohad Lewin-Epstein, Raz Sharon, et al. Sounds emitted by plants under stress are airborne and informative,Cell,2023,186(7):1328-1336.

九、致谢

本研究的整体研究过程如下:

1. 研究背景与初步实验

我的研究灵感来源于微信公众号上看到的一篇关于番茄在胁迫环境下发射超声波的论文⁸。出于对这一现象的兴趣,我进行了预实验:通过种植番茄植株,利用超声波麦克风录制了三组不同胁迫条件(干旱、机械损伤,图9-1、图9-2)下的超声波数据。

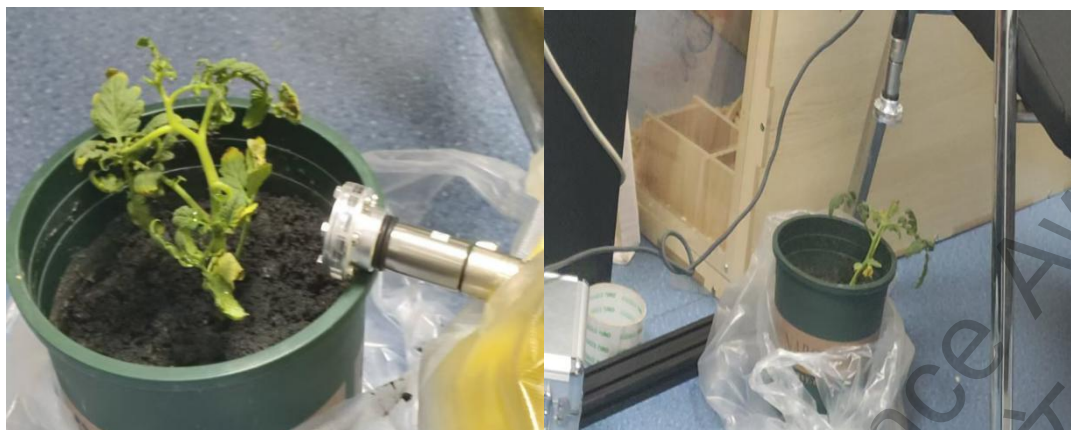


图 9-1 侧向录制番茄植株

图 9-2 径向录制番茄植株

2. 数据处理与频谱分析

难点：最初缺乏音频数据处理经验，对 MATLAB 编程不熟悉。

解决方案：

- 系统学习音频信号处理及 MATLAB 编程。
- 结合 AI 工具和导师指导，逐步优化代码，实现超声波频段筛选、频谱图生成及分析。
- 成功检测到与文献报道相符的超声波信号（图 9-3），验证了实验可行性。

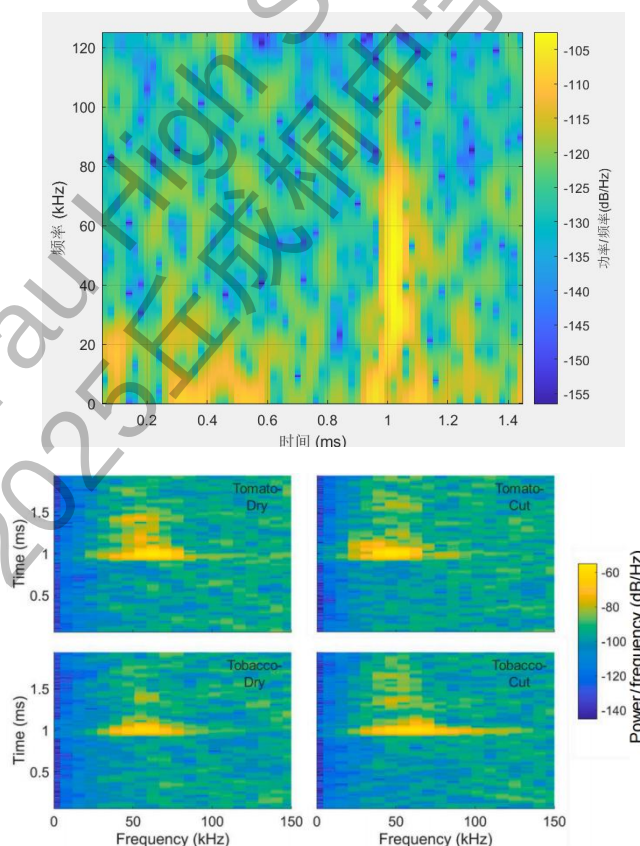


图 9-3 番茄干旱条件下发出的超声波频谱图及论文中检测图⁵

3. 实验拓展：幼苗超声波机理探究

在后续实验中，我尝试研究幼苗在不同胁迫下的超声波特征。最初计划通过横向切割观察气泡分布，但在一次偶然实验中，改用**径向切割+光学显微镜观测**，意外发现气泡拉伸现象，由此深入探究其超声波产生机制。

难点：植物切片过厚，影响观察精度。

解决方案：

- 采用双面刀片精细切割，反复优化手法（期间多次划伤手指）。
- 联合同学协作，筛选上百次样本，最终获得符合要求的薄切片。

4. 数据分类与自动化系统开发

实验积累的 2000+ 组超声波数据需人工核查频谱图进行筛选，效率极低。为提高分析效率，我设计了一套**超声波实时检测系统**，结合 AI 算法自动筛选有效信号，实现胁迫环境下植物超声波的动态监测。

难点：使用 cell 论文中的数据和代码，准确率不足 70%。

解决方案：

- 深入研究超声波特征提取算法，优化参数。
- 结合 AI 辅助调试，最终实现高准确率的核心代码模块。

5. 生物理论验证与实验优化

难点：实验设备精度不足，传统切片方法易损伤导管结构。

解决方案：

- 我和朋友在做实验时发现**捻子夹取法**可降低切片厚度，但易导致导管壁损伤。
- 受研读的相关论文中提到的液氮冷冻保存法的启发，筛选了一系列可以使导管降温变缓慢的溶液，改用**葡萄糖溶液预处理**，有效减少切割损伤，提升数据可靠性。

6. 实验环境优化与最终成果

后续实验需长期监测（>1 年）及海量数据存储，因此：

- 买来并引入**超声波隔音板**，进行多株植物超声波的并行检测，同时避免植物间的超声波信号干扰。
- 因板材过厚，找来几位同学帮助协作切割，完成实验环境搭建。
- 最终成功建立了一套完整的植物超声波检测与分析方法。

这次神奇的探索之旅离不开学校、老师、家长的支持。同学们之间的互帮互助、积极鼓励，老师给予的场所、理论支持、以及给出的诸多建议，都使我受益匪浅。在此对学校给予我们受教育、研究实验的场所，指导老师对我的悉心教导表示由衷的感谢！

白鑫鑫与刘雨澄是师生关系，分别为清华附中计算机高研实验室的教师与学生。王仰真为清华大学自动化系博士后，为生物实验部分指导教师。我由衷感谢两位老师无偿的辛苦指导和建议。

刘雨澄负责选题来源、数据获取、分析数据及计算、实验设计及实施，撰写论文的工作。白鑫鑫对系统设计部分和优化算法提出修改建议和指导方向，对最后撰写的论文，提出了宝贵的修改建议。王仰真为生物实验部分检查是否严谨，

共同讨论完成如何修改实验。

感谢刘成智、蔡子晴帮助制作隔音装置的付出，帅宁轩在制取幼苗切片时提出采用捻子撕取的宝贵建议，邹琪玥和张华华对幼苗实验探究的帮助与支持，最后由衷感谢清华附中生物王诗琦老师对植物部分实验材料的帮助！

2025 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2025丘成桐中学科学奖论文公示