

探究捕蝇草捕虫裂片的夹合机制

摘要

捕蝇草 (*Dionaea muscipula*) 拥有奇特的捕虫裂片, 裂片的上表面生长着几对感觉毛。当裂片受到刺激时 (如感觉毛被触动, 低温, 灼烧, 刺割等), 裂片会以迅雷不及掩耳之势闭合。我通过自己设计的实验, 初步探明了捕蝇草捕虫裂片的夹合机制。

主要试验方法有: 表面标记、电信号检测、冰冻切片、染色观察、浸泡实验等, 记录到了闭合瞬间的特殊电信号, 并观察到了裂片细胞在闭合前后的形态变化。总结如下: 受到外界刺激后 (比如虫子碰到感觉毛), 裂片中会产生一种特殊的电信号, 同时裂片的上表面细胞失水变短, 下表面细胞吸水变长, “一短一长” 作用下, 裂片便快速卷缩、闭合。此外, 我发现捕蝇草并不需要一些科普文章所说的 20-30s 内触碰两次感觉毛 (百度百科 2017, 维基百科 2017, 植物百科 2014) 才会闭合, 激光照射、零上低温处理、刀片轻割等刺激均可引起闭合。因此, 一向被认为在闭合过程中起比较重要作用的 “感觉毛” 可能只是将昆虫触碰这种轻微的刺激进行了放大。

此外, 在实验过程中还解决了一些技术上的问题:

1. 测电信号时, 为了触发裂片的闭合, 我采取了激光灼烧的方法, 可以在很大程度上避免机械触碰 “感觉毛” 引发闭合而产生的噪音。

2. 用 “晶体消融法” 测量裂片横切面细胞的渗透压, 可以反映出每一个细胞之间的渗透压差异。

3. 通过对裂片的上下表面施加不同浓度的溶液, 还原出闭合瞬间水分在裂片中可能的运动规律, 操作简单, 成本低。

关键词: 捕蝇草 捕虫裂片 闭合机制 电信号变化 胞间水分流动 晶体消融法

目 录

1. 研究背景	3
2. 研究目的	3
3. 仪器与试剂	3
3.1 实验仪器.....	3
3.2 实验试剂.....	3
3.3 实验材料.....	3
4. 实验步骤与结果	3
4.1 实验一：对捕虫裂片的外表面进行均匀的标记，观察闭合前后裂片表面尺寸的变化	3
4.2 实验二：制作测试生物电信号的电极.....	7
4.3 实验三：捕捉裂片受到刺激和闭合瞬间所产生的生物电信号	7
4.4 实验四：用浓盐水和清水浸泡裂片，观察水分在裂片中的运动规律	13
4.5 实验五：对裂片进行切片观察，并使用多种染色方法进行染色	16
4.6 实验六：计划实验——晶体消融法测裂片渗透压	20
5. 创新点	21
6. 心得与体会	22
7. 反思与展望	22

1. 研究背景:

捕蝇草 (*Dionaea muscipula*) 是一种非常有趣的食虫植物 (如图1)。小虫子被捕蝇草的艳丽外表和特殊气味所吸引, 落入捕蝇草的捕虫夹 (捕虫裂片) 内便会触发裂片在0.1s内迅速闭合, 被裂片夹住的小虫便只能乖乖地被裂片所分泌的酶液逐渐消化掉。目前国内尚未有有关捕蝇草裂片夹合机制的研究, 植物学教材中提到的相关内容仅仅限于引用国外的研究成果进行科普。我希望用自己设计的实验, 探明神奇的捕虫裂片如何快速闭合。



图1 捕蝇草

2. 研究目的:

研究捕蝇草的捕虫裂片的特征和闭合时引起的电压变化, 深入理解植物的感性运动。

3. 仪器与试剂:

3.1 实验仪器: Leica cm3050s 冰冻切片机, 麦克奥迪BA310-T型生物光学显微镜, 生物电检测装置 (A-M system System Model 3000放大器, CED Micro 1401数模转换器, spike2分析软件和电脑), 切片刀, 剪刀, 镊子, 滴管, 注射器, 水浴锅, 显微测微尺, 激光笔, 废弃干电池, 导线, 泡沫板, 烘箱, 昆虫针, 砂纸, 绝缘漆, 钳子和漆包线, 头戴式放大镜, 昆虫针, 透明坐标硫酸纸, 手喷漆, 定性滤纸。

3.2 实验试剂: 偶氮荧光桃红, 苯胺番红染液, 苯胺固绿染液, 20%NaCl溶液, 亚甲基蓝染液, 石蜡, 饱和 Na_2SiO_3 溶液。

3.3 实验材料: 捕蝇草 (*Dionaea muscipula*)。

4. 实验步骤与结果:

4.1 实验一: 对捕虫裂片的外表面进行均匀的标记, 观察闭合前后裂片表面尺寸的变化 (图2)。

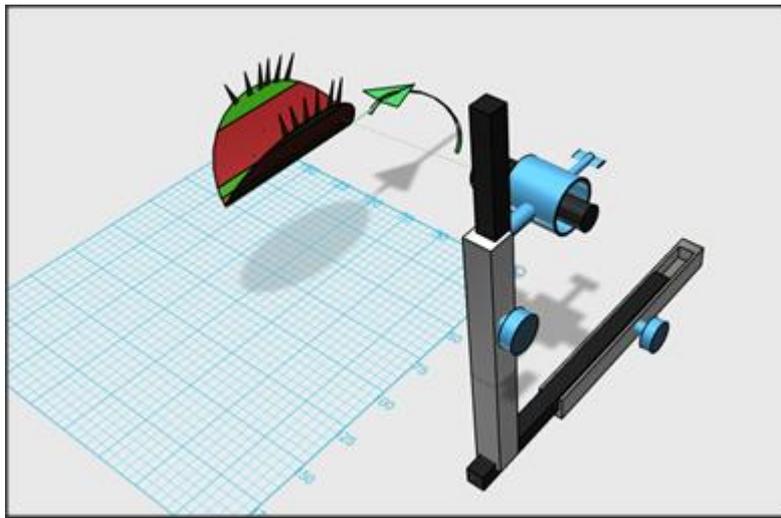


图2 用自制标记器对裂片外表面进行标记

第一代标记法：激光标记

- (1) 取少量饱和硅酸钠溶液，向其中加入少量偶氮荧光桃红粉末，搅拌直至溶液变成深红色。
- (2) 将废旧的光学显微镜载物台上的轨道标尺拆下，加上激光笔和小方格纸改造成一个简单的标记器。
- (3) 用热熔的石蜡小心地将捕虫裂片的两瓣撑住，不让之发生闭合和形变，然后将整个裂片完整的从植株上剪下。
- (4) 将剪下的裂片竖起来放在一个水平面上，打开标记器上的激光笔，让光点落在其中一瓣裂片靠左边缘2 mm的位置，然后用昆虫针蘸取一小滴第一步中配好的饱和硅酸钠溶液，小心地点在光点中间。
- (5) 旋动标记器上控制水平方向移动的旋钮，光点随之在裂片上水平移动。每向前旋进1 mm便停下，用步骤四中相同的方法在裂片上标记点，一直标到裂片右端。这样裂片便被从左到右标上了排列在一条水平线上、间距均为1 mm的标记点。
- (6) 旋动标记器上控制竖直方向移动的旋钮，使光点在裂片上竖直移动1 mm，用同样的方法做标记，然后使光点水平从裂片右端向左端移动，也是每隔1 mm做一个标记，这样裂片便被从右到左标上了第二排间距相等的标记点。标记到与第一排最左边的点对齐时，再向下移动1 mm向右标记，如此来回“S”型标记，裂片上便被标上了行、列间距均为1 mm的点阵。
- (7) 待深红色的硅酸钠标记点干了以后，小心地用刀片刮下并撤走撑在两瓣裂片之间的石蜡，这时裂片会闭合。将裁剪成比裂片略大的坐标方格纸铺在点阵上，尽量让每一个点都接触

到方格纸，然后用油性笔在方格纸上与每一个点接触的地方轻轻标记上。这样便在方格纸上留下了一个新的点阵。

(8) 将方格纸置于显微镜下(4倍物镜, 10倍目镜), 用显微测微尺测量各个点的间距, 将记录的数据与裂片闭合前各点之间的间距(均为1 mm)作对比, 分析差异。

经过数次实验后, 我不得不放弃这种方法: 一个点一个点往上标工作量太大, 而且张开状态下的裂片并不是标准的平面, 而是个稍微向内凸的曲面, 而我标记的点的间距1mm和是两点之间在水平方向上的距离, 与两点在曲面上的实际距离会略有偏差。

第二代标记法: 喷墨标记

(1) 将透明胶贴在方格纸上, 用极细的昆虫针从贴着透明胶的一面在每个格点上戳出小洞。戳的时候要戴上头戴式放大镜, 以尽量使每个洞都戳在格点上。这样在透明胶上便留下了排列均匀、横纵间隔均为1mm的小洞。

(2) 用热熔的石蜡小心地将捕虫裂片的两瓣撑住, 不让之发生闭合和形变, 然后将整个裂片完整的从植株上剪下。

(3) 小心地将透明胶从方格纸上撕下来, 再贴到捕虫裂片的下表面上。贴的时候注意一定要贴紧, 若透明胶和叶表面之间有空隙则会对实验结果产生影响。

(4) 用手喷漆对准贴着透明胶的裂片喷漆。喷完一次后, 在漆尚未完全干掉的时候轻擦去透明胶上多余的漆, 然后再喷一次。经过这样的操作, 唯有透过透明胶上的洞的漆雾颗粒可以留在裂片表面, 其余的漆均被透明胶挡住。

(5) 待漆干透, 小心地揭掉透明胶, 这时可发现裂片表面被均匀地喷上了间隔为1mm的墨点(图3)。



图3

第三代标记法:

(1) 用热熔的石蜡小心地将捕虫裂片的两瓣撑住, 不让之发生闭合和形变, 然后将整个裂片完整的从植株上剪下。

(2) 与第二代标记法一样, 在透明胶上戳出洞。但不必戳那么多, 只需戳两个纵向相距6mm的点即可, 分别记作A、B点。

(3) 将透明胶紧贴在裂片下表面, 并用两根昆虫针透过透明胶上的那两个点对裂片进行穿刺, 这样便在裂片的下表面上留下了两个相距6mm的伤口点, 分别记为1、2号点(分别与A、B点对应), 其中1号点靠近裂片上缘, 2号点靠近裂片基部。

(4) 轻轻拔出2号点上的昆虫针, 揭起透明胶, 卸除石蜡, 裂片闭合, 这时再将原先那张透明胶重新贴上去。再用拔出来的昆虫针透过一号点穿刺, 在透明胶上戳出新的C点。

(5) 对比A、B、C三点, 发现AC间距离大于AB间距离(图4)。



图4

【实验结论】:

闭合后, 整个裂片向内卷缩, 下表面向外凸出, 整个下表面(从裂片上缘到裂片底部)变长了(约1mm)。我推测, 闭合瞬间是下表皮细胞变长了, 伴随上表皮细胞的变短。

4.2 实验二: 制作测试生物电信号的电极

(1) 购买0#号昆虫针(直径0.3 mm), 用钳子夹住昆虫针带帽子一端(不需要镀绝缘漆), 放入绝缘漆中, 使昆虫针缓缓拔出, 然后倒置插在泡沫板上, 放入烘箱, 烘干绝缘漆。

- (2) 待绝缘漆被烘干后，将昆虫针尖端往砂纸（最细型号的砂纸）上轻轻一划，暴露尖端。
- (3) 用废弃的干电池作为电源，用两根导线，一条将做好的电极与电池正极相连，另一条与电池负极相连，将电极的尖端和连接电池负极的导线，放入盐水中，如有气泡产生，则证明电极可以使用，如果没有气泡产生，则再将电极在砂纸上划一下，直至有气泡产生。

【实验结果】:

成功制作了测试生物电信号的电极，如图5所示。

4.3实验三：捕捉裂片受到刺激和闭合瞬间所产生的生物电信号

- (1) 取适当长度直径为0.1 mm的铜制漆包线，用小刀或砂纸暴露漆包线两端约1 cm长，将漆包线一端与昆虫针连接，另一端与A-M system Model 3000放大器的记录端相连，作为记录电极，另一根漆包线与放大器的参考端相连，作为参考电极。
- (2) 放大器连接CED Micro 1401型数模转换器，转换器连到电脑上，可实时将电流数据传到分析软件spike 2上。
- (3) 选取张开的、健康的捕虫裂片，将参考电极的尖端插入捕蝇草下方的土中，将记录电极尖端小心地插到待测捕虫裂片与叶柄连接处（图5）。



图5 测试捕蝇草生物电信号操作图

- (4) 两电极插好后，运行Spike 2分析软件，观察电位波动情况。

我发现，在平静状态下，裂片无极化现象——生物电信号基本稳定在0 mV，只有一些极其微弱的波动。我称这种信号状态为“基线”，但时不时（隔10-20s不等）会发放一些小的反极化-极化-基线（上升-下降-平坦）的信号（图6），其上升相较陡峭，下降相较平缓。正锋电位与负锋电位在数值上的关系如图7。

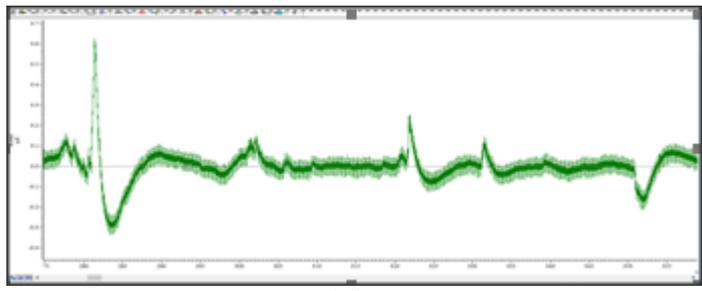


图6

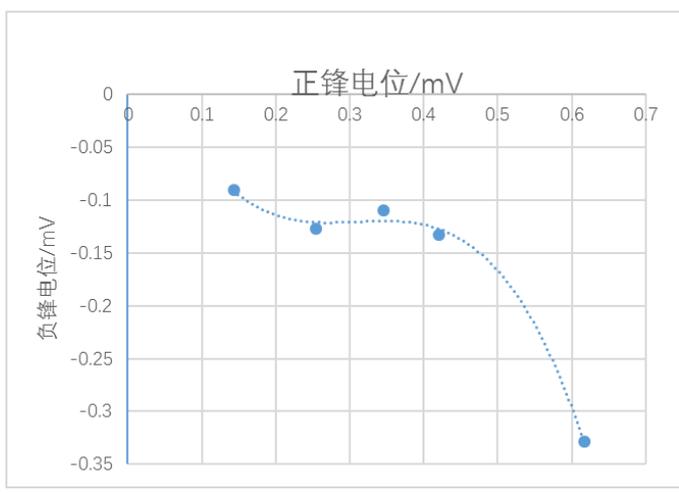


图7 裂片平静状态下的锋电位

(5) 机械触动捕虫裂片，不可取。

据报道，昆虫震动捕蝇草捕虫裂片时裂片就会闭从而捕获昆虫，因此，我采用细丝拨动捕虫裂片内侧的触毛，用以模拟昆虫的震动。但是只要手伸到捕蝇草附近，就会产生噪音（图8），故我放弃此种方案，改为用激光激发触毛（图9）。

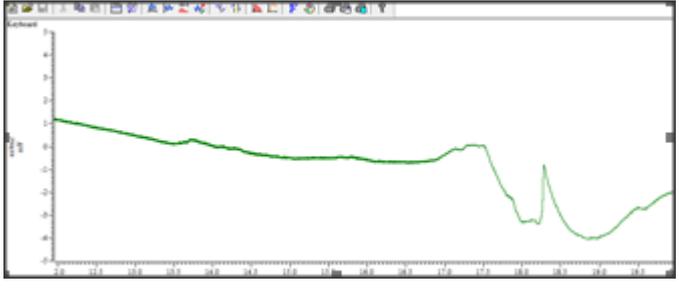


图8 人为引起的噪音

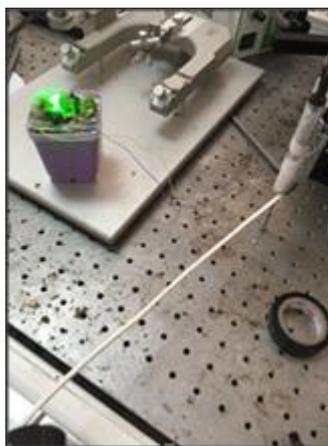


图9 用激光激发触毛

(6) 用2000 mw、波长532 nm的激光笔距离0.4 m照射裂片**外侧** (1135-1145 s) 10 s, 未引发任何动作电位。停止照射15 s, 再照射外表面30 s (1203-1233 s), 引起三个先正后负的电位, 其中正锋电位依次为0.282 mV、0.351 mV、0.229 mV, 而下降相十分平缓, 负电位最低只有-0.122 mV。在1230 s时停止照射, 过了约8.5 s后 (1238.5s) 有一个比前三个小电位大十倍的巨大动作电位产生, 其正锋电位为3.94 mV, 负锋电位为1.04 mV, 但这个电位仍未引发闭合 (图10)。

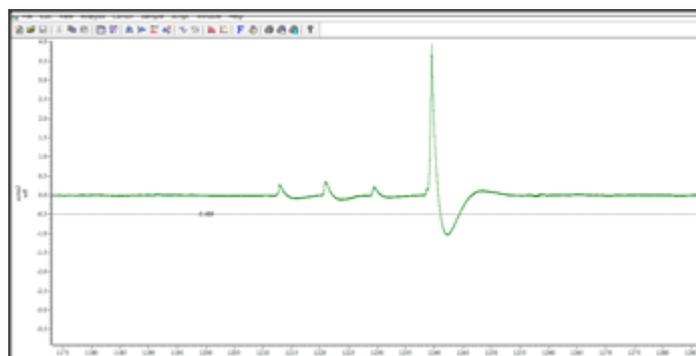


图10

用同样的激光笔连续照射同一裂片外表面40 s, 未检测到明显的电信号。停止照射数十秒再照射7 s (1405-1412 s), 7 s末检测到一个小动作电位, 其正锋电位1.072 mV, 负锋电位-0.228 mV (图11)。

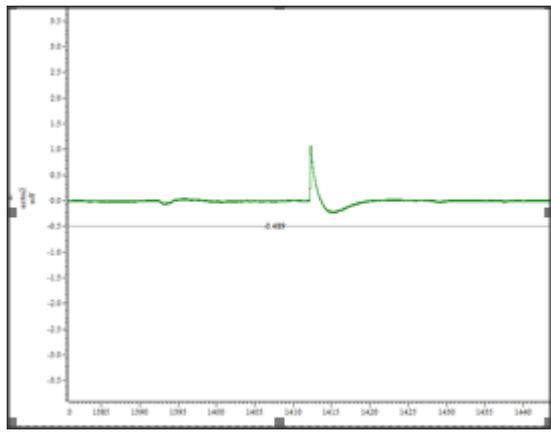


图11

停止照射数十秒对同一裂片进行10 s照射-10 s停止处理, 连续反复三次, 未检测到明显的电位变化。

停止数十秒后, 对同一裂片进行30s照射-30s停止处理, 连续反复三次, 未检测到明显的电位变化。

上一步终止数十秒后, 对同一裂片持续照射40 s (2279-2319 s), 在照射的最后5 s内 (2314-2319 s) 有一个微小的动作电位, 其正锋电位为0.235 mV, 下降相非常平缓 (图12)。

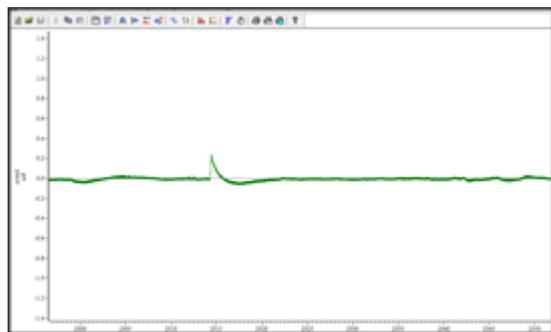


图 12

(7) 停止操作10分钟后, 将激光笔与同一裂片之间的距离减半至0.4 m, 照射裂片内侧10s (2366-2376 s), 检测到一个三峰的动作电位, 其极化锋电位: -1.500 mV, 反极化锋电位 1.339mV, 复极化锋电位-0.494 mV (图13)。停止操作数十秒后, 重复步骤八的操作, 同样检测到三峰动作电位: -1.804mV, 1.515 mV, -0.417 mV (图13)。

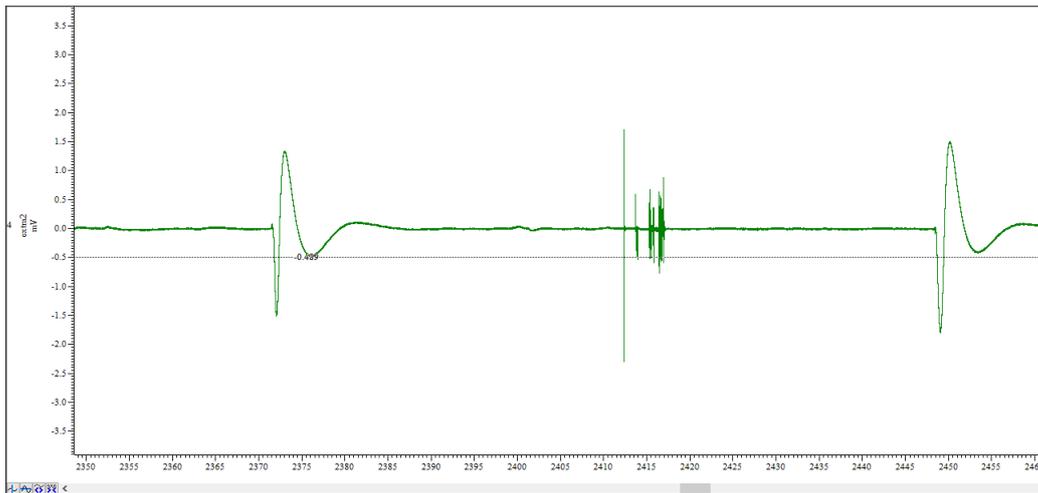


图13

停止操作数十秒后，持续照射裂片同样检测到三峰动作电位（图14）：-1.788 mV，1.579 mV，-0.489 mV。2809-2827s的动作电位为闭合瞬间的电位，可观察到这个电位和之前所有的电信号都不一样，有多个振幅不同的上升和下降相，类似多个单动作电位组合在一起（图15）。

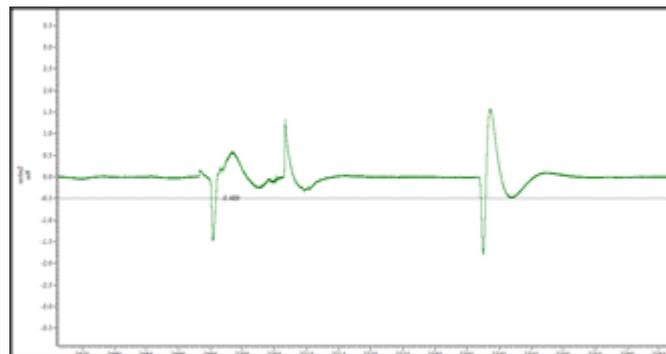


图 14

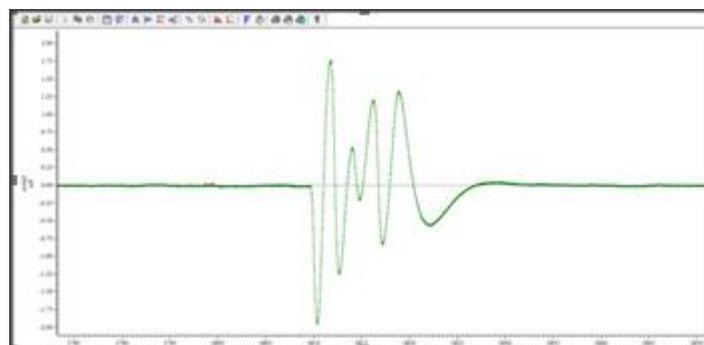


图15 闭合1

(8) 换一个新的张开的裂片 (尺寸约为第一个叶片的一半), 保持0.4 m的距离对裂片内侧进行持续照射, 先后引发两个动作电位, 其中第二个电位伴随着裂片的快速闭合 (图16)。

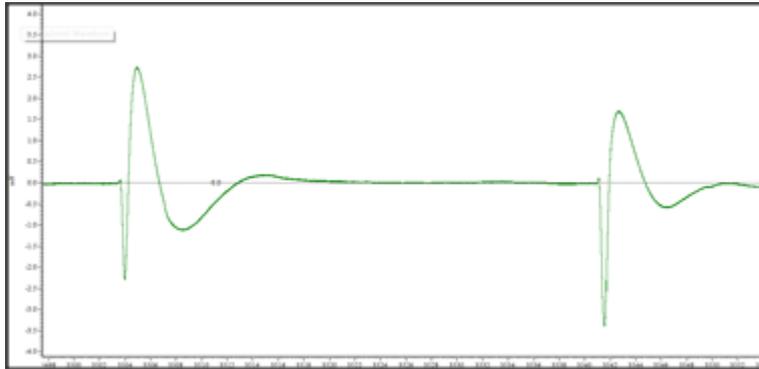


图16 闭合2

【实验结论】:

- (1) 未捕虫时, 捕蝇草也会产生微弱的自发生物电信号。
- (2) 捕蝇草捕虫时通过生物电信号传递相关刺激的信息, 并由电信号引发闭合反应。这种能引发闭合的电信号与裂片在静息状态下的自发动作电位和受到激光刺激但未闭合时产生的电信号都有很大不同。
- (3) 捕虫裂片的触感区主要分布在裂片内侧, 这与捕虫现象相一致, 激光照射裂片外侧所导致的生物电信号发放, 可能是因为激光所产生的热量传递到内侧所致, 这就是为什么激光在裂片外侧照射时, 更大的激光强度反而产生较弱的生物电信号; 而照射内侧, 反而是较小的激光强度引起较大的生物电信号甚至可以使裂片关闭。

4.4 实验四: 用浓盐水和清水浸泡裂片, 观察水分在裂片中的运动规律

- (1) 用水浴锅65 ℃加热半烧杯石蜡至完全融化配置20%的NaCl溶液并分成3份, 实际操作中还配置了1mg/ml的亚甲基蓝溶液并分成多份, 用以代替“清水”, 有助于看到“清水”被吸收后在胞间可能的流动。
- (2) 用手拿着花盆转动到合适的姿势至待处理的裂片中的一瓣内表面朝上 (即这一瓣是水平的), 这样可以防止后面要滴加的石蜡受重力作用顺着内表面流下沾到感觉毛引发闭合, 然后用注射器从烧杯中吸取足够的融化的石蜡, 小心地在其中一瓣裂片的整个上缘滴加石蜡。注意要轻轻地缓慢推进注射器, 否则会导致其中的石蜡快速射出到裂片内表面沾到感觉毛上引起闭合。待滴加的石蜡凝固了以后, 把整个植株反过来 (另一瓣没有滴加石蜡的裂片

- 水平放置), 以同样的方法在整个上缘滴加石蜡。操作过程中, 还要不时观察注射器中石蜡的状态, 若感觉石蜡快要凝固, 则将注射器的前端泡进水浴锅里约5~10s使石蜡重新融化。
- (3) 裂片两瓣的上缘都滴加上石蜡后, 用注射器小心地挤出较大滴的石蜡(悬而不滴)黏在其中一个上缘的一点, 待其凝固后再往上滴加石蜡直到两个上缘通过石蜡“桥”连在一起。
- (4) 重复步骤二中的操作直到整个裂片的两瓣通过连接两边上缘的石蜡而被撑住, 它便无法闭合了。但裂片两端还是开口的。
- (5) 待石蜡都完全凝固以后, 将裂片从植株上剪下, 然后从中部横切剪开。这时裂片虽受到巨大的机械伤害刺激, 但因为被石蜡撑着而无法闭合。(图17)



图17 用石蜡撑住裂片

- (6) 用石蜡粘法封住剪下来的两块裂片各自两端的开口, 这样便构筑出密闭的空间: 内表面被完全与外界隔离开。这样的处理可以达到一个目的: 将内表面和外表面完全隔开, 便于后续对内外表面做完全不同的处理。但粘的全程应注意: 必须确保内表面是被完全密闭的(保证液体无法进去), 但石蜡又不可太多粘住外表面太多, 否则会影响后面步骤中外表面与外界液体的接触。完成后标注为1、2号裂片。
- (7) 用同样的方法再处理1个张开的、健康的裂片, 标注为3、4号; 然后对第三个裂片只封住上缘而不封住两端开口, 从中部剪开, 标为5、6号裂片。这样一共得到六块裂片。(图18)



图18 六组不同的处理

- (8) 1、2号裂片分别作如下处理: 前者用注射器吸取配好的亚甲基蓝溶液并在连接裂片两上缘之间的石蜡上戳一小洞, 将溶液注射入密闭空间中至大半满, 然后抽出注射器, 再用之

前装熔融石蜡的注射器挤一点石蜡将洞封上，然后把整个裂片泡在一份浓盐水里；2号则不注射亚甲基蓝溶液而直接泡在浓盐水里。

(9) 3、4号裂片如下操作：3号与1号相反：注射入浓盐水而后泡在亚甲基蓝溶液中；4号则只注射浓盐水而不泡在亚甲基蓝溶液中。

(10) 5、6号裂片如下操作：5号投入浓盐水中，6号投入清水中。

(11) 对六个裂片计时30min,然后统一从溶液中取出，小心地用镊子和探针卸除全部石蜡，便卸除边用定性滤纸擦干裂片内外表面的溶液。观察裂片宏观上的变化，然后六个裂片各做横切片，用显微镜观察。

(12) 后来，我对此方法进行了改进：5、6号裂片的处理方法不变，但1、2、3、4号裂片进行完第五步操作后，不必将两端均用石蜡封上，只需封上一端（裂片此时看起来像一个无盖的容器），内表面依然用注射器慢慢灌注相应的溶液，而外表面上敷贴上被相应溶液沾湿的滤纸片，同样计时30min。滤纸上要时不时滴加相应的液体进行补充，保证滤纸保持完全沾湿且完全贴紧裂片外表面。

【实验结论】:

(1) 五号裂片卸除石蜡后无法闭合，而6号裂片可以闭合，这可以推断出：全裂片吸水可以导致闭合，但全裂片失水导致裂片失去闭合能力，因此水分在闭合机制中起非常关键的作用。

(2) 1、3、4号裂片卸除石蜡后仍能闭合，而2号和5号裂片卸除石蜡后均无法闭合，我推测是浓盐水导致裂片细胞脱水，外层细胞无法伸展，故无法闭合。

***根据以上结果分析，外层细胞充水边长是维持闭合这一动作的基础，而外层细胞很可能从内层细胞夺取水分，而导致水分瞬间流动的原因可能要设计测量渗透压的实验来分析。**

4.5 实验五：对裂片进行切片观察，并使用多种染色方法进行染色。（图19）

涉及的染色方法有：1.酸性品红法；2.亚甲基蓝法；3.苯胺番红-苯胺固绿染色法；4.卢戈尔试液染色法；5.碘-氯化锌法；6.碘-硫酸法。

切片方法有：徒手切片，徒手切片（戴头戴式放大镜），用自制切片机切片，用冰冻切片机切片（-20℃，50μm厚）。

实验结果如图20、21、22。

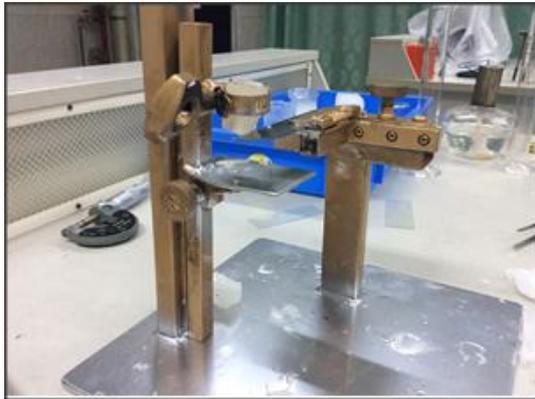
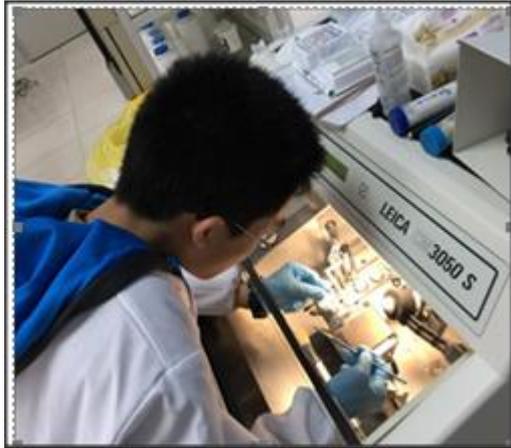
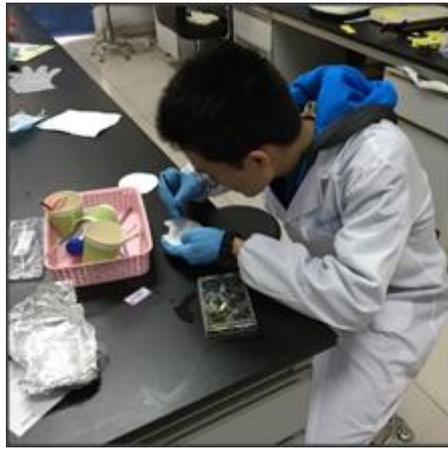
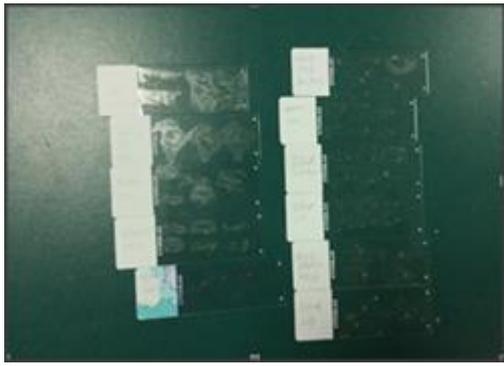


图19 切片和染色

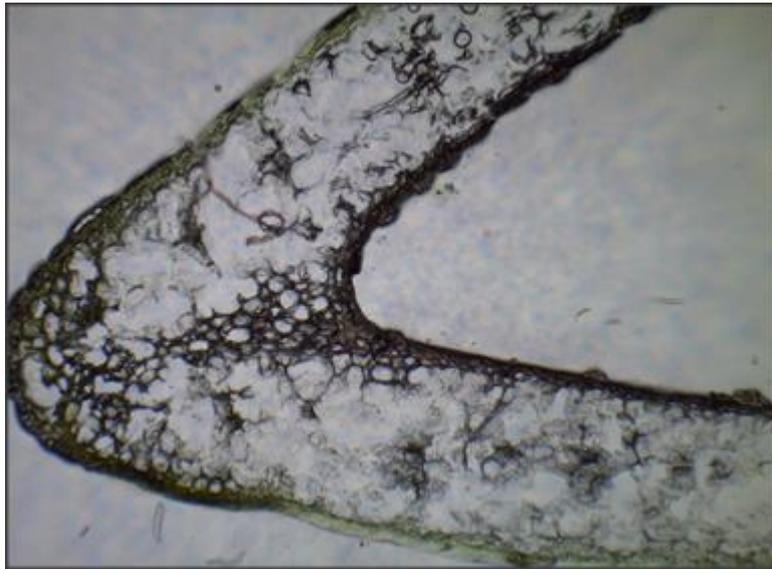


图20 失败的冰冻切片

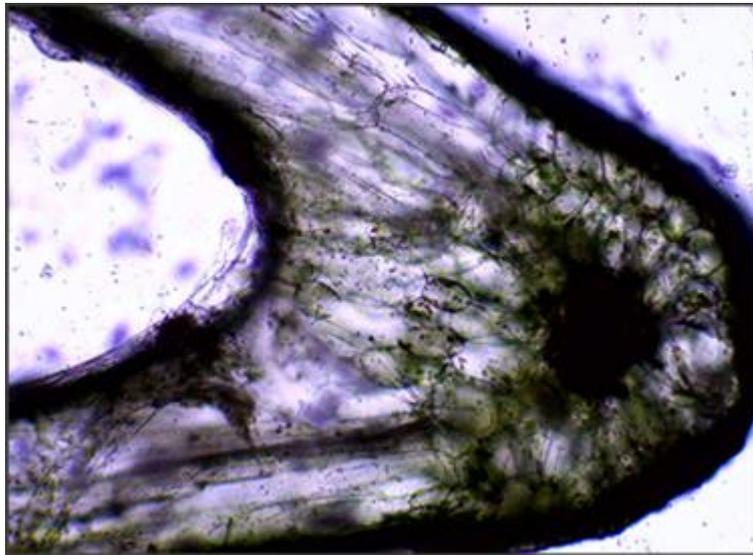


图21 未染色的横切片

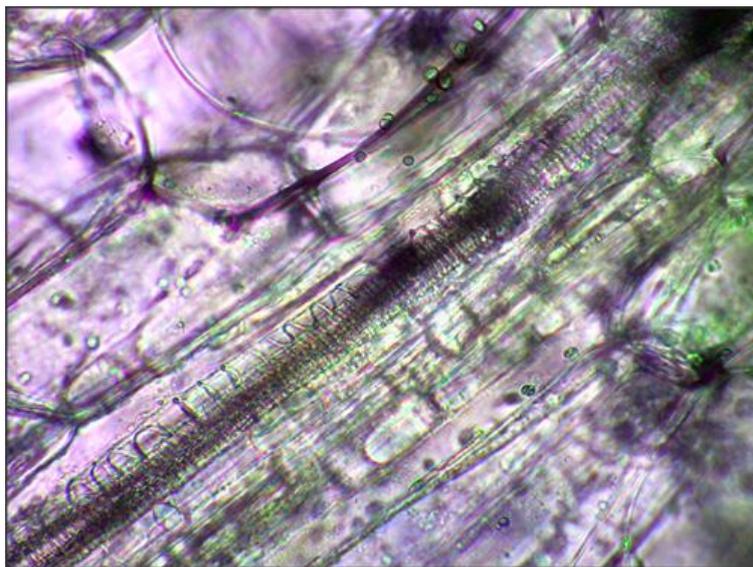
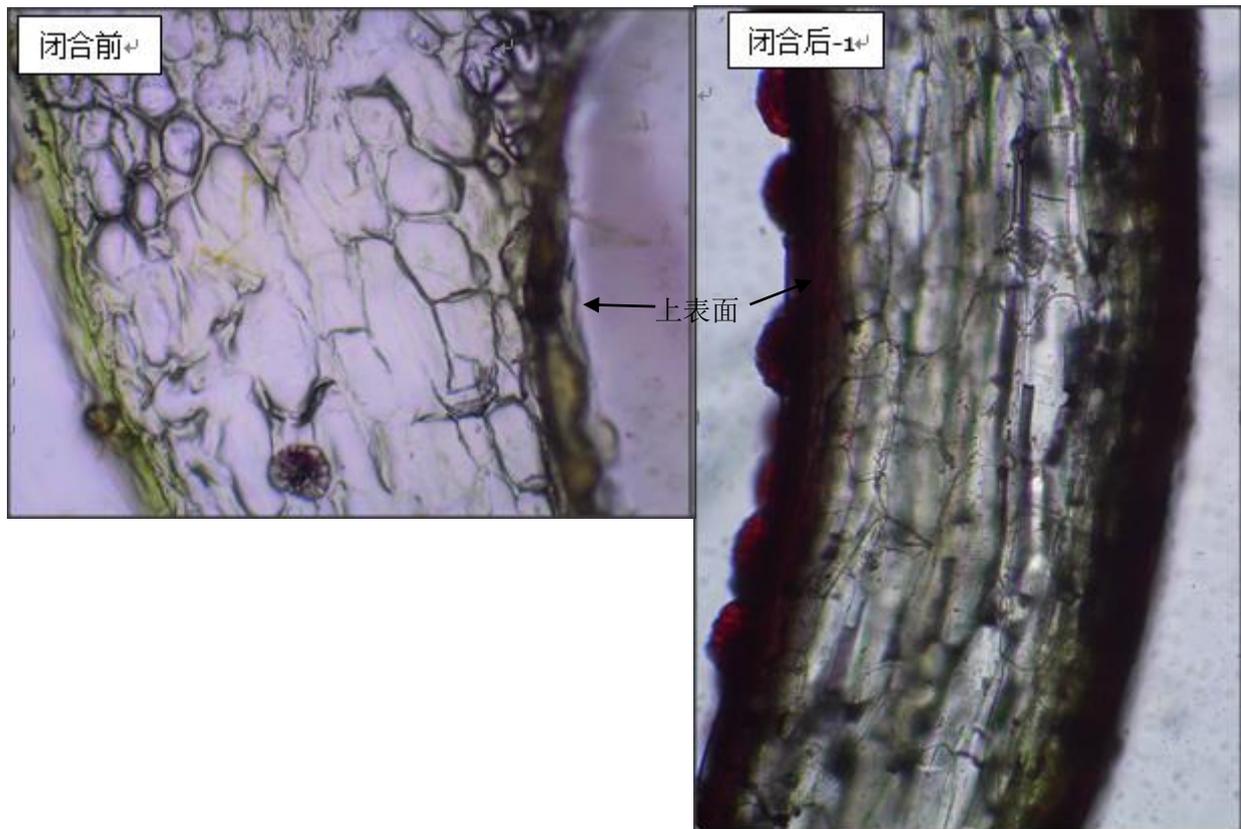


图22 导管分子及其周围的薄壁细胞

【实验结论】:

(1) 闭合前的切片中内细胞在形态上没有很大差别, 大多数呈卵圆形; 而对闭合后的裂片进行横切发现裂片的结构是: 由多层含丰富的叶绿体的杆状细胞构成的内外表皮夹着几层薄壁细胞, 有两束输水的导管纵贯裂片。外表皮的细胞层数比内表皮的多, 而且**最靠近内表皮的一层薄壁细胞呈卵圆形或椭圆形**, 而其他的**薄壁细胞均呈长方形**, 长度最长可达最内层薄壁细胞长度的两倍。(图23)



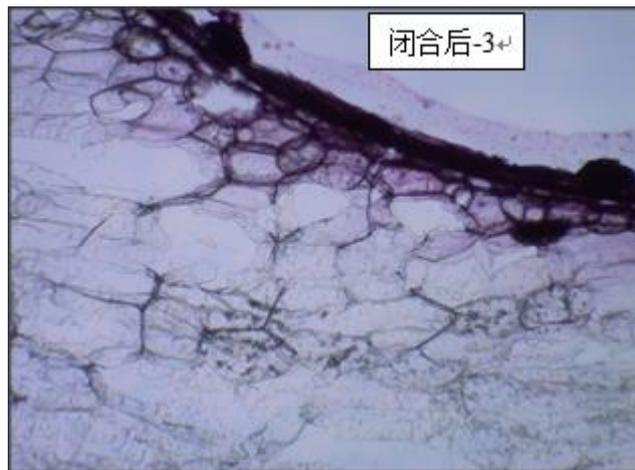
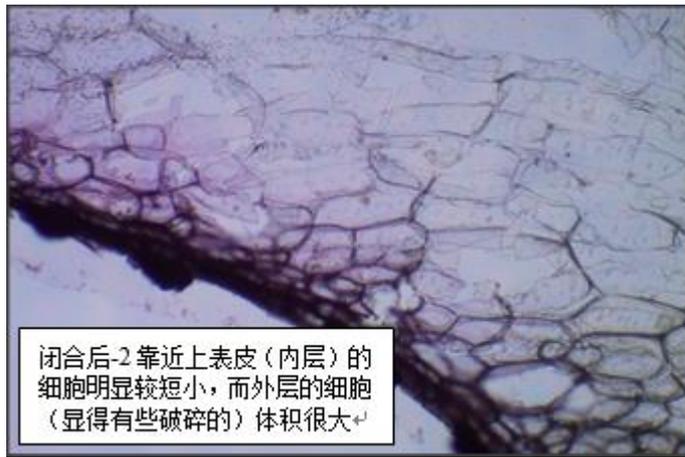


图23

(2) 酸性品红染色: 分辨出表皮细胞(图24)。

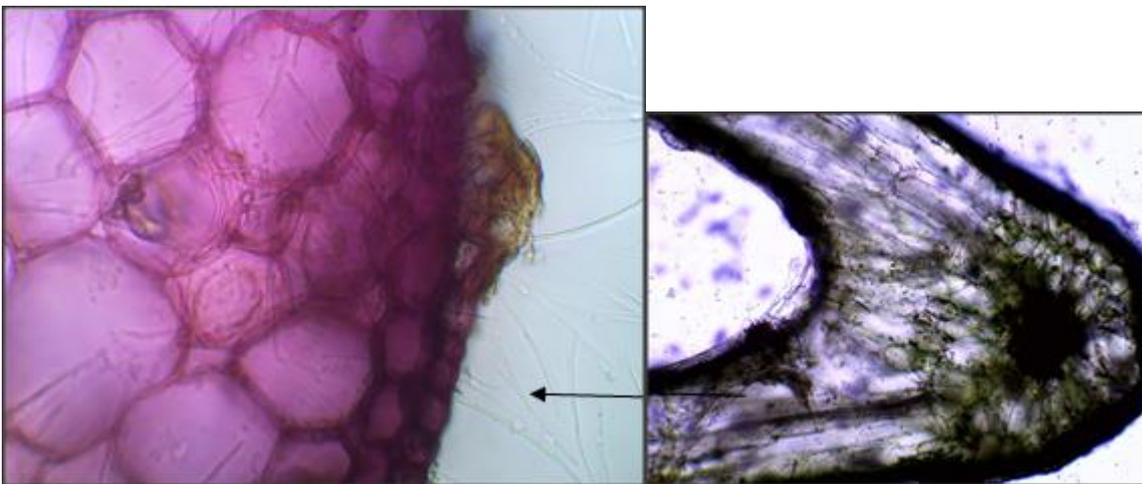


图24

(3) 亚甲基蓝染色: 显示角质化的内表皮(图25)。

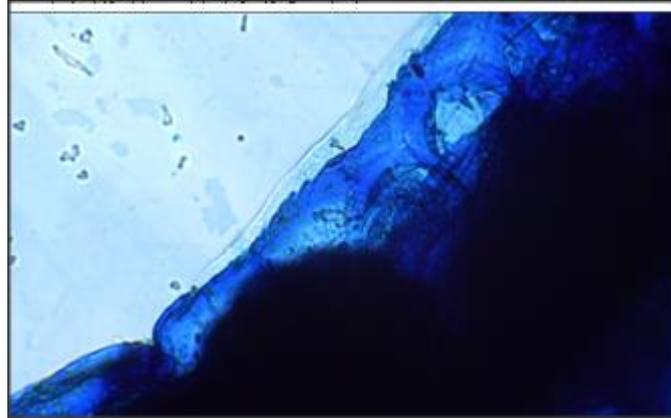


图25

(4) 碘-氯化锌法：显示纤维素性质的细胞初生壁（图26）。

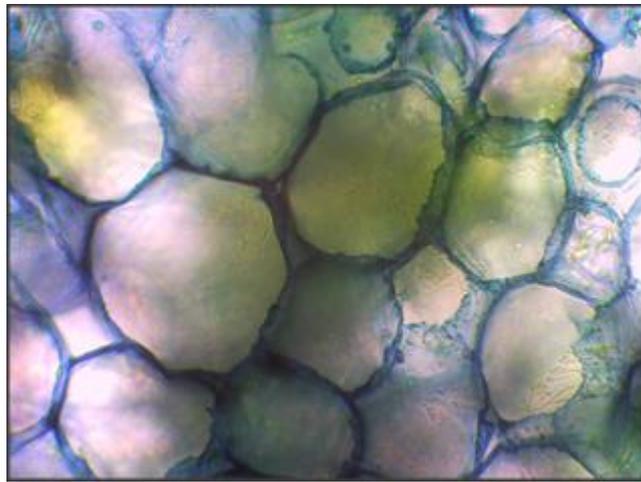


图26

(5) 番红-固绿染色：清晰地将木质化的导管（深蓝色的两束）和周围细胞壁为纤维素性质的薄壁细胞区分开来。导管一直延伸到裂片最顶端（图27）。

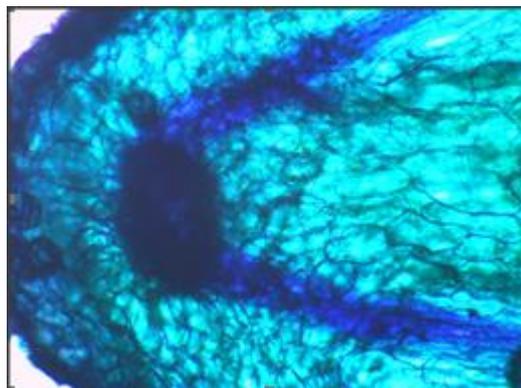


图27

4.6 实验六：计划实验----晶体消融法测裂片渗透压。

- (1) 将一个张开的裂片和一个闭合的裂片从裂片后方的叶柄处剪下，剪张开的裂片时要特别小心不要划伤裂片。用液氮或干冰快速冰冻住闭合前的裂片以使之维持闭合前的生理状态，所有细胞均完全结冰。严谨起见，对闭合后的裂片也做同样的冰冻处理。然后用红外测温枪监测两个裂片的温度。当温度上升至 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时做冰冻切片，做完后不及时观察的切片放到 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻箱保存。
- (2) 用干冰将切好的切片装于载玻片上再次冷冻 ($-100\text{ }^{\circ}\text{C}$)，消除做冰冻切片过程中有些细胞内的冰晶可能发生融化的情况。这样保证切片内所有细胞再次完全结冰。
- (3) 实验室中的环境湿度和温度都应控制在最低，防止切片表面雾化影响观察。将切片移至偏光显微镜下观察，显微镜连接到电脑上拍摄视频。通过偏光显微镜，可以较清晰地观察到细胞内的冰晶。
- (4) 切片的温度会逐渐慢慢升高，根据冰点-渗透压曲线，溶液的冰点与其渗透压成负相关，故当切片温度升高时，的细胞内的冰晶会最先融化，整个视野内各个细胞内冰晶融化的顺序应是高渗透压的细胞 \longrightarrow 低渗透压的细胞。根据观察结果，便可以推出整个切片中各个细胞的渗透压大小关系。

总结：根据各项实验结果，我初步总结出捕蝇草捕虫裂片的闭合机制：受到各种外界刺激后（比如虫子碰到感觉毛），裂片中会产生一种特殊的电信号，同时裂片的上表面细胞失水变短，下表面细胞吸水变长，“一短一长”作用下，裂片便快速卷缩、闭合。（图28）

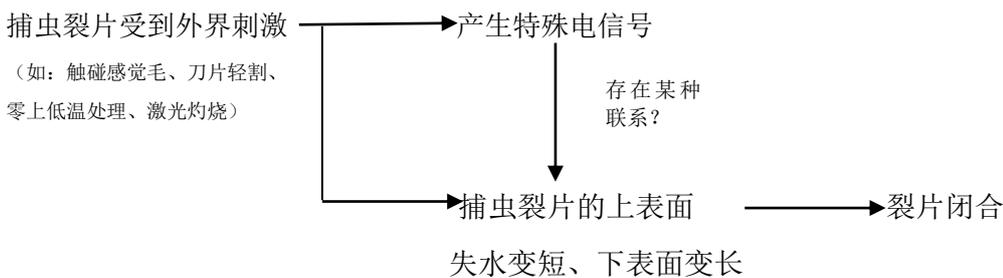


图28 捕蝇草捕虫机制概括

5. 创新点：

- (1) 经查新得知国内尚未有关于本课题的研究，因此我的成果算是在国内开辟了一个小小的新领域，将一个机制从仅仅被科普引入到科学研究这一更高层次。

(2) 发现了捕蝇草并不依赖于20-30s内触碰两次感觉毛（百度百科2017，维基百科2017，植物百科2014）才能闭合，各种外界刺激均可引发闭合。这是对传统科普观点的一次颠覆。

(3) 我在测电流实验中没有采取像国外研究者那样直接用硬物触碰感觉毛作为刺激的方式，而是用激光笔进行照射，这样可以极大程度上地避免机械触碰时产生的噪音信号对检测的影响；更重要地，可以通过改变激光笔与裂片之间的距离探究刺激强度对裂片产生的电信号的影响。

(4) 我通过自己设计的浸泡实验间接还原出水分在裂片中可能的运动规律，简单易行。

(5) 独创晶体消融法来反映植物组织水势：传统的小液流法测渗透压只能测出一块组织的整体渗透压，而晶体消融法可以反映植物组织切片中每一个细胞的渗透压。（计划实施）

6. 心得与体会：

(1) 课题研究过程中我初步探明了裂片闭合的机制，对植物中生物电的产生和特性、植物的“感觉”及感性运动都有了更深的认识。

(2) 我学到了：植物虽然没有神经系统，没有肌纤维，但它们也可以感知，可以运动，可以产生像动物肌肉收缩那样迅速而精准的快速运动，而且我意识到调节这种运动有一个复杂的机制，在尝试解开这个机制谜团、将好奇心付诸研究探索的过程中：

- 培养了科学研究的基本思路：我懂得了从现象出发，进行观察分析，然后进行进一步解剖、生理方面的分析，而不是实验之初就想着高大上的实验仪器和方法。
- 敢于质疑，敢于自己尝试：我一路尝试自己设计实验、改进方法，培养了独立思考问题、分析问题、解决问题、总结优化方案的能力。没有人会帮你思考实验方法，必须自己动脑筋。也许我设计的实验并不很严谨，但我感受到了自己解决问题的乐趣。
- 自己的思维更加缜密，逐渐懂得了在做实验前要先静下来设想可能遇到的困难甚至危险，然后事先去解决掉。我学会了考虑每一个细节，比如从哪个角度切片？怎样滴加石蜡？冰冻切片的时候的力度、速度如何调整？怎样在方格纸上戳出尽量小的点？测电信号的时候怎样减少机械噪音？怎样让捕虫裂片保持闭合前的状态？浸泡实验时怎样防止裂片上下表面所处的液体环境相通？甚至实验桌上的仪器药品该怎样摆放用起来最方便。
- 我尝试自制切片机、标记器，掌握了冰冻切片机的使用，动手能力也得到了锻炼。

7. 反思与展望：

(1) 实验存在不少不足之处：

实验一：

第三代标记法操作过程中，把揭下来的透明胶重新贴回去的时候难以保证完全贴回透明胶被揭下来之前所在的位置，这可能会造成误差（B、C点在横向上也产生了一点位置偏差）。

实验三：

①记录电信号时，应该记下开始对裂片进行照射的时间点和停止照射的时间点（事后无法从软件中读出），而不应记下引发的动作电位的产生和结束的时间点（可直接从软件中读出）。未合理地记录下时间导致我丢失了一部分数据。

②自始至终使用同一支激光笔，其电池消耗会导致发出的激光光强发生变化，因而也可能间接导致对裂片的刺激强度发生变化，这种变化导致的结果我无法分析。

③只使用两个裂片测电流，数据不充分，难以排除偶然性

④对同一裂片进行几个光照实验的间歇期不够长，难以排出前一次光照处理对后面实验的影响。

⑤未能严格的测出光照刺激强度，故目前测得的数据尚无法反映刺激强度与裂片产生的电信号之间的关系。

⑥用激光笔照射时是手持激光笔的，光点在裂片上摆动不定，难以分析这种摆动对裂片产生的信号有没有影响。

实验五：

冰冻切片切出来的薄片里很多细胞（尤其是闭合前含水量较大的薄壁细胞）被切碎了，轮廓有点难以辨认。

(2) 目前，我一路都在探索使捕虫裂片保持闭合前状态的方法，包括零上低温处理，低熔点（50° C）石蜡固定，固定液固定，液氮速冻等；前三者均以失败告终。液氮速冻可以永久固定下裂片闭合前的状态，然而速冻过后的叶片会遭到一定损伤，影响切片效果。我计划尝试新的方法（计划用CO₂麻醉法），以求在对叶片伤害最小的情况下进行固定。

(3) 我希望将“晶体消融法”付诸实践！而本方法要求有防雾的载玻片和对植物损伤较小的切片方法。

(4) 从设计实验，到实践操作，到改进实验方案、再度付诸实践，我费了不少脑筋。研究之初我希望能够比较全面地探究捕蝇草捕虫的机制、提出自己的假说，因而从各个角度、由浅到深地设计了不同的实验并力求使假说能有多方面的支持，但后来逐渐发现工作量太大，想

要逐个严谨地完成几乎是不可能的。因此，我认识到，“饼子”不能“摊”得太大，我计划将来选取“水分流动”这一研究角度进行更细致的研究，删减生物电方面的研究内容。

(5) 目前，仍有一系列的问题尚未解决，如：闭合瞬间那种特殊的电信号与闭合这一过程有什么联系？裂片的上、下表面是否存在角质层抑制上、下表面细胞的变长和变短？所谓细胞“变长”和“变短”是否有更严谨的指标来衡量？能否改进在冰冻切片时的操作方法以获得细胞结构更完整的切片？等等。无疑，我需要付出更多的努力来完善自己的假说！

致谢：感谢华南师范大学生命科学学院里老师对我的指导和帮助！

参考文献

- [1] 谷利源. 捕蝇草捕虫的奥秘究竟是什么 [J]. 植物杂志, 1983, (05): 47.
- [2] Jennifer Böhm, Sönke Scherzer, Elzbieta Krol, et al. The Venus flytrap *Dionaea muscipula* counts prey-induced action potentials to induce sodium uptake [J]. *Current Biology*, 2016, 26: 286-295.
- [3] Volkov Alexander G, Adesina Tejumade, Markin Vladislav S, et al. Kinetics and mechanism of *Dionaea muscipula* trap closing [J]. *Plant Physiology*, 2007, 146: 694-702.
- [4] Poppinga Simon, Kampowski Tim, Metzger Amélie, et al. Comparative kinematical analyses of Venus flytrap (*Dionaea muscipula*) snap traps [J]. 2016, 7: 664-674.
- [5] James O. Luken. Long-Term Outcomes of Venus Flytrap (*Dionaea muscipula*) Establishment [J]. *Restoration Ecology*, 2012, 20: 669-670.
- [6] Philip A. Rea. The dynamics of H⁺ efflux from the trap lobes of *Dionaea muscipula* Ellis (Venus's flytrap)[J]. *Plant Cell and Environment*, 1983, 6: 125-134.

备注：本文没有对参考文献的内容进行具体的引用，只在研究初期对参考文献进行了一定的学习。