

# 浙江大学实验报告

课程名称: 生态学基础及实验  
实验名称: 植物根形态性状的观测

指导老师: 胡亮亮  
成 绩:

专业: 生物科学  
姓名: 蒋贤迪  
学号: 3240105782  
日期: 2025.10.22  
地点: 生物实验中心-312

## 一、 实验目的和要求

### 实验目的:

- 了解根的基本性状
- 了解影响根性状的主要因素
- 掌握获取及分析根性状的方法

### 实验要求:

- 描述植物种类、生长状况（可用照片反应）和生境（采样地点描述）
- 统计描述不同植物各根性状指标并加以比较
- 分析不同根性状指标间的关系
- 利用 PCA 降维，判断植株样本之间是否形成某些聚类规律

## 二、 实验内容和原理

### 1. 植物体状 (Plant Trait)

植物从细胞到个体水平的任何可测量的形态、生理或物候特征，这些特征可能会影响其适应性或其环境。

- 植物的性状“套装”(a suite of traits)体现其生存策略
- 反映了在资源获取 (Resource acquisition) (如高光合速率、高比叶面积) 和资源保守 (Resource conservatism) (如叶片寿命长、组织密度高) 之间的权衡 (Trade-off) 策略

## 2. 根性状 (Root Trait)

- 植物根系性状是功能性状的重要组成部分，反映了植物如何投资生物量以获取地下资源。
- 不同植物的根千差万别
- 不同根性状之间存在许多关联
- 本实验主要讨论根性状中的“根系构型 (Root system architecture)”

双子叶和单子叶具有不同的根系构型

- 主根系 (Tap root system): 通常在双子叶植物 (Dicotyledon) 中发现。
- 须根系 (Fibrous root system): 通常在单子叶植物 (Monocotyledon) 中发现。

## 3. 根性状的分类

植物的根系是一个复杂的结构，为了系统地研究和比较不同植物的根系，生态学家建立了多种分类方案。这些方案从不同维度描述了根系的特征，主要可分为以下三类：

### (1) 基于发育与起源的分类

这种分类根据根的发育来源和解剖学起源进行划分，是理解根系基本构型的基础。

- **主根**: 由胚根直接发育而成，通常垂直向下生长，构成直根系的主轴
- **侧根**: 从主根或其他根内部中柱鞘细胞发育而成的分支
- **不定根**: 从茎、叶等非根器官发育而成的根

### (2) 基于根序的分类

这是一种功能导向的分类法，将根系视为一个网络，从最细的根尖开始定义等级。

### (3) 基于直径的分类

这是一种直观且功能意义明确的分类方法。

#### 4. 影响根性状的环境因子

- 土壤养分 Soil nutrients
- 水资源分布 Water distribution
- 邻体相互作用 Interaction with neighbors
- 病害和毒害 Disease and toxicity
- 共生微生物 Symbiotic microorganisms

根在响应环境的同时，也影响着环境

#### 5. 移动性养分与非移动性养分

前置知识：

- 养分耗竭区是指养分能够被植物的根充分吸收消耗完的区域

线  
订  
装

**非移动性养分：**

- 非移动性养分与土壤颗粒结合，根部很难获得。
- 养分耗竭区小。
- 更多根对于获取非移动性养分很有利，因为这扩大了吸收非移动性养分的范围

**移动性养分：**

- 移动性养分在水中移动，因此根部很容易获得。
- 养分耗竭区大。
- 更多根对于获取移动性养分不算有利，因为这难以扩大吸收移动性养分的范围

## 6. 常见根性状指标

### (1) 几何信息

描述根系在空间中的整体分布范围：

- **深度 (Depth)**: 根系垂直方向的最大距离
- **宽度 (Width)**: 根系水平方向的最大范围
- **凸包面积 (Convex hull area)**: 包含整个根系的最小凸多边形面积
- **长度分布 (Length Profile)**: 根系在不同深度或宽度上的长度分布

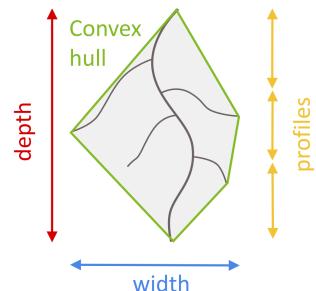


Figure 1: 几何信息示意图

### (2) 形态信息

描述单个根段的物理特性：

- **直径 (Diameter)**: 根段的粗细程度
- **长度 (Length)**: 单个根段的长度
- **方向 (Orientation)**: 根段生长的方向角度

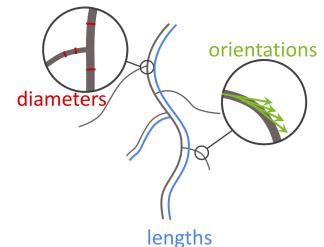


Figure 2: 形态信息示意图

### (3) 拓扑信息

描述根系的分支结构和连接方式：

- **侧根数量 (Lateral number)**: 父根上的分支数量
- **侧根间距 (Inter-lateral distance)**: 相邻分支之间的距离
- **分支角度 (Insertion angle)**: 侧根从父根长出的角度
- **未分支顶梢区长度 (Length of Unbranched Apical Zone, LAUZ)**: 根顶端未发生分支的长度

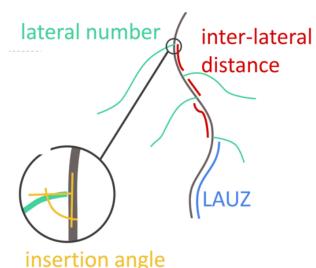


Figure 3: 拓扑信息示意图

此外，还有比较重要的拓补指标：

- **海拔 (Altitude,  $a$ )**: 从根基到最远根尖的连接数（最长路径长度）
- **量值 (Magnitude,  $\lambda$ )**: 根系中所有外部连接（根尖）的总和
- **拓扑指数 (Topological index, TI)**: 计算为  $\log a / \log \lambda$ ，用于衡量根系连接效率

其中，对于海拔和量值，有以下补充：

**根段海拔 (Altitude of Segment)** 描述根段在根系网络中的层级位置：

- 定义：从根系基部到该根段所需经过的连接数量
- 意义：衡量根段在分支结构中的“深度”，数值越大位置越末端
- 示例：如图示，从基部 (海拔 1) 到最远端根段 (海拔 4)

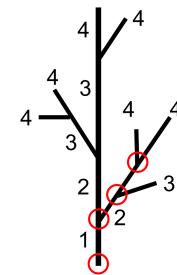


Figure 4: 根段海拔示意图

**根段量值 (Magnitude of Segment)** 描述根段所支撑的下游分支规模：

- 定义：从根尖开始向上游累积计算的数值
- 规则：根尖段量值为 1，父根段量值为子根段量值之和
- 意义：根基部根段的总量值等于整个根系的根尖总数
- 示例：如图示， $1+1=2$ ,  $2+2=4$ , 最终总量值 = 6

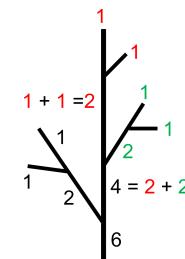


Figure 5: 根段量值计算示意图

## 7. 主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA)

**PCA 原理与应用** 主成分分析是一种常用的多元统计方法：

- **核心思想**：将样本的  $n$  维特征数据映射到  $l$  维空间 ( $n >> l$ )，去除数据之间的冗余性。
- **算法动机**：保证样本投影后方差最大
- **降维目的**：在保留大部分原始信息的同时，简化数据结构
- **根系分析**：在根系研究中，PCA 可用于识别影响根系构型的关键性状组合
- **结果解读**：
  - **PC1**: 通常代表影响最大的性状组合，解释数据中最多的变异
  - **PC2**: 代表次重要的性状组合，与 PC1 正交且不相关
  - **载荷**: 各原始变量对主成分的贡献程度
  - **得分**: 样本在主成分空间中的位置

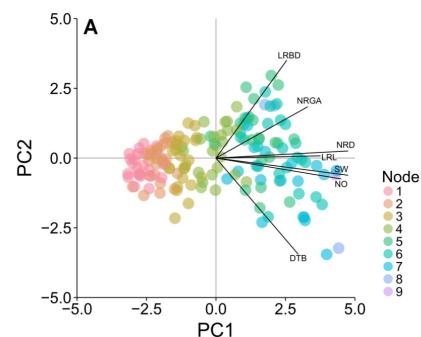


Figure 6: PCA 分析结果示意图  
展示样本在主成分空间中的分布

### 三、 实验材料与设备

- 铲子
- 扫描仪
- 塑封袋
- 根盘
- RhizoVision Explorer 软件
- 剪刀和镊子
- 烘箱 (设置 60°C)

### 四、 操作方法和实验步骤

#### (1) 植物样品采集

- 在同一生境中，组内每位同学各自选定 1 个植物物种（禾本科、菊科等）
- 采集 3 个个体
- 完整挖出根部，保持细根完整
- 单独放入样本袋（包括地上部分和地下部分）

#### (2) 根样清洗

- 用自来水冲洗根样
- 完全去除表面杂物

#### (3) 根系摆放

- 根盘中加蒸馏水
- 仔细摆放根系，减少交叉
- 根系舒展，不交错重叠
- 保证托盘内无泥土颗粒等杂质
- 根和托盘四周留出 1cm 空隙

#### (4) 根系扫描

- 擦干根盘外部
- 扫描获取 600 dpi 图像
  - 模式：照片模式
  - 文稿来源：透扫适配器部件
  - 文稿类型：彩色正片

线  
订  
装

- 图像类型：8 位灰度
- 扫描质量：标准
- 图像格式：JPEG

### (5) 数据分析

- 使用 RhizoVision Explorer 软件
- 分析图像获取性状指标

### (6) 样品处理

- 根样放入信封，写上上课时间、组号和植物名称
- 地上部分和地下部分放在同一信封中
- 60°C 烘干 48 小时

## 五、实验结果与分析

### 1. 植物生长状况

本次实验中，我们组采集了不少植物，我选择了其中的六种，并且为了客观获取并统计数据，我选择在“中国植物志”和“植物智”网站查询相关信息，这样能为后文的数据分析奠定基础。经过查询网站，得到如表1所示的数据

Table 1: 植物生长状况

植物名称	拉丁学名	属	科	生活型	生长状态
香附子	<i>Cyperus rotundus L.</i>	莎草属	莎草科	多年生草本	具细长匍匐根状茎和黑褐色块茎；秆高 15-95 厘米，锐三棱形；叶基生，短于秆
百日菊	<i>Zinnia elegans Jacq.</i>	百日菊属	菊科	一年生草本	茎直立，高 30-100 厘米，被糙毛或长硬毛；叶对生，宽卵形或长圆状椭圆形，长 5-10 厘米
合欢	<i>Albizia julibrissin Durazz.</i>	合欢属	豆科	落叶乔木	树冠开展，高达 16 米；二回羽状复叶，小叶昼开夜合；头状花序排成伞房状，花丝细长，粉红色
苎麻	<i>Boehmeria nivea (L.) Gaudich.</i>	苎麻属	荨麻科	亚灌木或灌木	茎直立，高 0.5-1.5 米，多分枝，密被长硬毛；叶互生，长 6-15 厘米，叶背密被白色绵毛
麦冬	<i>Ophiopogon japonicus (L. f.) Ker-Gawl.</i>	沿阶草属	天门冬科	多年生草本	根较粗，中部或近末端常膨大成椭圆形或纺锤形小块根；叶基生成丛，禾叶状，长 10-50 厘米
香堇菜	<i>Viola odorata L.</i>	堇菜属	堇菜科	多年生草本	具匍匐茎；根状茎较粗，淡褐色；叶基生，圆形或宽卵状心形，长 1.5-4.5 厘米；花深紫色，有香气

其中，采集这些植物的生境具体信息和其他相关信息如图7和表2所示：



Figure 7: 植物采样生境照片

Table 2: 采集植物的种类 + 生境

植物名称	纲	目	科	生境
香附子	木兰纲	禾本目	莎草科	生物实验中心西南侧草地
百日菊	木兰纲	菊目	菊科	生物实验中心南侧树林
合欢	木兰纲	豆目	豆科	生物实验中心南侧树林
芝麻	木兰纲	蔷薇目	蕁麻科	生物实验中心南侧树林
麦冬	木兰纲	天门冬目	天门冬科	生物实验中心南侧树林
香堇菜	木兰纲	金虎尾目	堇菜科	生物实验中心南侧树林

## 2. 根系扫描处理

- 由于根系较为破碎，故本次的”Analysis mode”选择”broken roots”模式来分析数据。
- 由于拍摄获得的图像分辨率为 600dpi，故在根系分析前勾选”Convet pixles to physical units”，并选择 600dpi，相当于每英寸打印出 600 个点，经软件自动转换可得到正确的数据。
- 由于存在些许杂质，故勾选”Filter non-root objects”，通过调整 Maximun size”，观察到当其值为 3 时效果最好。既可以剔除杂质，又不会剔除部分细根。

经 Rhizo Vision Explorer 软件分析根系图后，得到了以下根系扫描图：

其中，每张照片从左到右依次从 1 到 3，每张图片的每张根系图下方都有标号。颜色可以代表根的直径，从红色到蓝色再到绿色，直径依次递增

- 当根直径 <2.00mm 时，绘制成为红色
- 当 2.00mm< 根直径 <5.00mm 时，绘制成为蓝色
- 当根直径 >5.00mm 时，绘制成为绿色

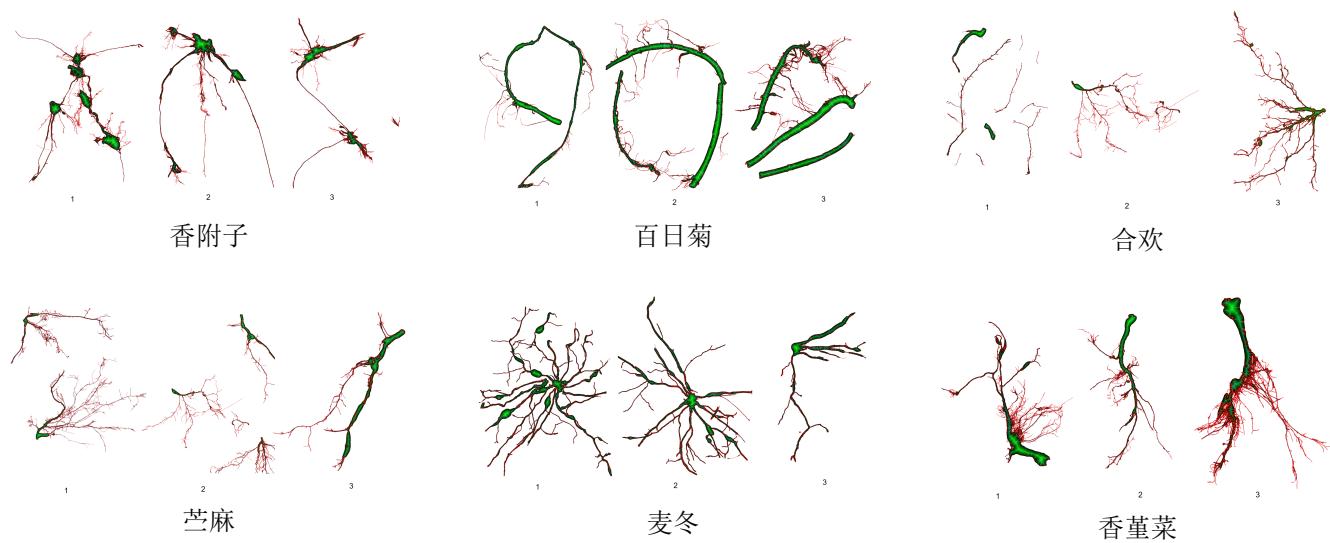


Figure 8: 六种代表性植物的根系扫描图

观察图像，可发现：

- (1) 香附子根系具明显块茎。样本 1 是密集的块茎和须根团，样本 2 和 3 则展示了连接块茎的细长根状茎。这种克隆生长结构使其根系形态与依赖主根的植物完全不同。香附子-3 的根直观感觉少于 1 号和 2 号，可能是挖断根导致的。
- (2) 百日菊的根都被挖断了，2、3 号很明显，1 号我判定挖断是因为在挖掘时真的挖断了，带来了一定误差。根系视觉上很特殊，样本均呈现出直径大、长度长的主根，形态弯曲。与其粗壮主根相比，侧根和须根数量显得稀少。
- (3) 合欢的样本直观反映了木本采样困难。样本 1 非常破碎，仅为片段。样本 2 和 3 相对完整，展示了清晰的主根分支。破碎的样本为后续数据偏低埋下了伏笔
- (4) 芒麻-2 的根系的破碎程度各不相同，其中 2 号最为破碎，3 号似乎完整但看上去并没有 1 号多，很有可能是挖断了根但未找到被挖断的根。其根系形态多变。其根系兼具粗壮的木质化特征和纤细须根，直观上体现了亚灌木介于草本和木本间的过渡形态。
- (5) 麦冬根系呈放射状，具典型块根，根中段明显膨大。样本 1 和 2 构型完整，形态相似。而 3 号根明显不完整，这说明在挖掘时挖断了许多根。这种膨大结构在视觉上与其他草本差异显著，反映了其不同的养分储存策略。
- (6) 香堇菜的根系具有膨大块根，用于水分和养分储存，且样本 1 和 2 的侧根稀疏且不完整，可能在挖掘时有较多断裂，而样本 3 相对更加完整

将所得数据整理后，得到如表3所示的数据

Table 3: 各项根性状数据

植物名称 科属	香附子 莎草科	百日菊 菊科	合欢 豆科	苎麻 荨麻科	麦冬 天门冬科	香堇菜 堇菜科
平均根尖数量	2273.33	3074.33	1002.00	2317.67	3226.00	955.67
平均总根长度 (mm)	3080.41	4858.96	1536.50	2685.35	4335.56	1664.91
平均网络面积 (mm <sup>2</sup> )	1069.82	2698.81	474.92	702.55	2385.02	585.01
平均直径 (mm)	0.91	1.70	0.52	0.56	1.40	0.68
平均周长 (mm)	3275.45	3825.93	2329.23	3719.83	3177.92	2057.62
平均体积 (mm <sup>3</sup> )	7616.38	28740.99	1157.50	1162.37	11194.81	2166.46
平均表面积 (mm <sup>2</sup> )	9636.81	28585.73	2574.48	3951.67	18779.79	3767.29
平均每毫米分支频率	1.23	0.82	0.94	1.15	0.79	1.17
分支点数量	3764.67	4153.67	1400.67	3347.33	3564	1946.33

在本次实验中，我选择了 6 种植物，其中包括四种草本植物，一种木本植物——合欢，和一种亚灌木——苎麻，其中亚灌木可以认为是草本向木本的过渡类型。

线  
订  
装

观察数据，可以发现：

- (1) 在草本植物中，除去香堇菜，其他三种的多数指标值有一定差距，但少数指标相差并不大，如“平均根尖数量”和“平均总根长度”。而香堇菜在各项指标中，都低于或远低于其他草本植物。我认为可能的原因有：
  - 每个植物所处的生长状态并不同，如百日菊在各项指标中都处高位，是因为其已经比其他草本植物更加成熟，根系更加发达。
  - 虽然都属于草本植物，但根与根之间亦有差距。从图中可直观感受到百日菊的根直径很大，而分析结果也体现了这点，其他指标亦是如此。
  - 在挖掘香堇菜时，挖断了不少根数，导致其诸多指标都远低于同属于草本植物的其他植物，因此该实验中香堇菜的数值对整个草本植物的数值影响很大。
- (2) 属于木本植物的合欢，在所有指标中，都远低于草本植物（除去香堇菜）。造成这样的原因，我认为可能是因为：
  - 我们所找到的合欢样本还处于幼年期，其根系不发达。
  - 在取样品时，由于木本植物根系的特殊性，我们在挖掘时弄断的根数明显多于其他植物。如合欢-1，和其他样本相比，算是最不完整的根了。实际上合欢-3 的很多项指标都是合欢-1 的数倍，如根数、总根长、最大宽度。
- (3) 在诸多指标中，属于亚灌木的苎麻的数值都介于草本（除香堇菜）和木本之间，这也体现出亚灌木可以认为是草本与木本的过渡形态。

### 3. 数据分析

#### (1) 主成分分析 (PCA) 聚类

将表3数据进行标准化后，再进行 PCA 聚类，得到该示意图：

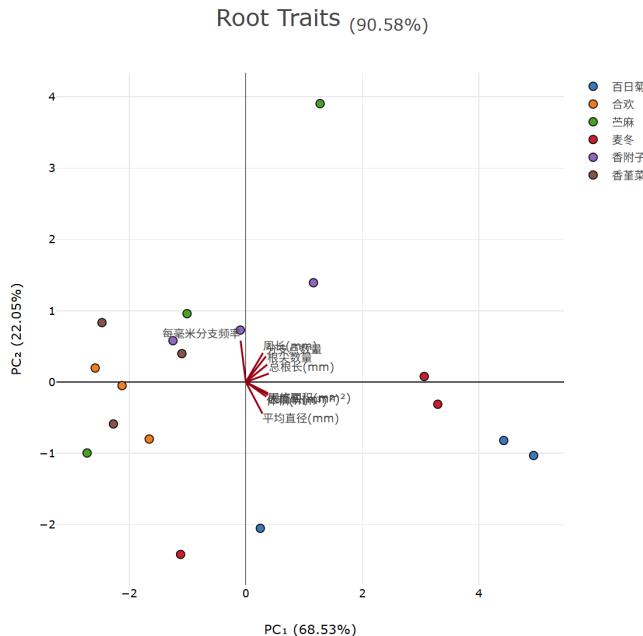


Figure 9: PCA 聚类示意图

观察该图，得知：

- (1) 第一主成分  $PC_1$  的解释度为 68.53%，第二主成分  $PC_2$  的解释度为 22.05%，二维总解释度已经到达了 90.58%，已经很好能够解释数据分布了。
- (2) 其中部分样本分布较为密集，如紫色的香附子、橙色的合欢、棕色的香堇菜；而其余样本，如绿色的苎麻、红色的麦冬和蓝色的百日菊分布较为分散。
- (3) 对于麦冬和百日菊，有两个样本间隔较短。第三个样本间隔较远，且偏远其他同类样本的方向和距离甚至都很相近。我个人认为：这可能是因为该两个样本的根系破损程度比较严重，因其根系的完整度和其他同类样本显著不同，故偏离方向和偏离距离都很相近。经过附录的得分表格可知，该异常的植株编号为百日菊-1，麦冬-3，且这两个样本的部分指标都明显低于其余两个样本，尤其是根数和根长，能够一定程度验证我的猜想。
- (4) 对于苎麻，PCA 聚类图呈现了很奇怪的分布特征，即三个点相隔较远且几乎在同一条直线上。对此，我认为：如果三个点距离远且无规律，那是采样问题；但如果在此基础上甚至可以回归到一条线上，那说明我们组所采的三个样本，很有可能处于不同的发育阶段，因此呈现出了很强的线性关系。并且，意识到这点后，我观察到其余多数样本也几乎落在同一直线上，也呈现了一定的线性关系，只有香堇菜为例外。当然，以上观点纯属个人想法，具体是否如此得等下次实验解封信封，并比对是否属于不同发育阶段后才能判断论点是否正确。
- (5) 对于  $PC_1$ ，它贡献了主要的解释度 (68.53%)。观察载荷箭头，绝大多数测量指标（如总根长、根尖数量、网络面积、平均直径、体积、表面积等）都与  $PC_1$  呈强正相关。这表明  $PC_1$  主要代表了根系的“整体规模”。

$PC_1$  值越大（越往右），代表根系越庞大、越粗壮（如百日菊和麦冬）；值越小（越往左），代表根系越小或越破碎（如合欢）。

(6) 对于  $PC_2$ ，它贡献了 22.05% 的解释度。其主要的正向载荷是“每毫米分支频率”。这表明  $PC_2$  主要反映了根系的“**分支策略**”。 $PC_2$  值越高（越往上），代表根系在单位长度上的分支越密集（如苎麻、香附子）； $PC_2$  值越低，则分支频率越低。

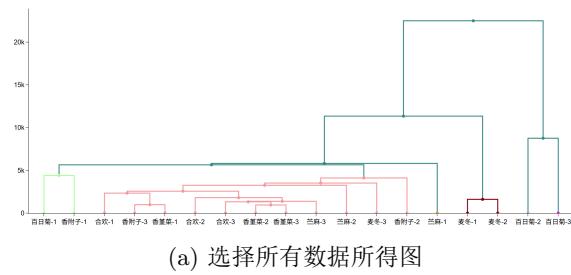
(7) 针对“是否可以通过筛选优化分析结果”这一问题，答案是肯定的，并且可以从两个主要方面入手：**筛选样本与筛选性状**。

- **通过筛选样本进行优化：**如前文第 2、3 点的分析，当前 PCA 结果（尤其是  $PC_1$ ）在很大程度上受到了**样本完整度**的干扰。这种“大小效应”掩盖了不同物种间真实的形态差异。因此，剔除那些明显破碎或不完整的样本（如麦冬-3 和百日菊-1），仅对高质量的样本进行重新分析，是一种直接有效的优化方法，能更好地揭示相似发育阶段下不同物种的真实聚类规律。

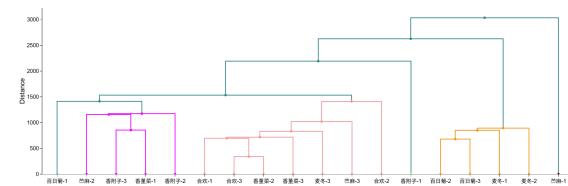
- **通过筛选性状进行优化：**另一种更深入的优化策略是筛选分析所用的性状。既然已知  $PC_1$  主要代表根系的“整体规模”，其贡献主要来自于总根长、网络面积、体积等强相关的“大小”指标。我们可以尝试进行一次新的 PCA 分析，在分析中有意排除有关“大小”的指标，采用有关分支模式、空间探索策略等内在形态特征上的性状指标。可惜的是，那些指标需要分析完整根时才能获得，故本实验难以优化 PCA。

## (2) 层次聚类分析 (Hierarchical cluster analysis)

通过层次聚类分析，选定所有性状，并指定簇数为 6，可得到如图10a结果：



(a) 选择所有数据所得图



(b) 剔除部分数据所得图

Figure 10: 层次聚类分析图

明显可见，该结果并不理想。我认为主要原因还是样本完整度的问题。例如：

- 百日菊-1 和百日菊-2、-3 相隔甚远，很大原因是由于百日菊-1 的根系并不完整。虽然百日菊-2、-3 有断裂情况，但完整程度还是显著优于百日菊-1。
- 麦冬-3 和麦冬-1、-2 也能很好体现。从图8可看出，麦冬-3 的完整度显著比另外两个样本差，因此麦冬-1、-2 能归为一类，而麦冬-3 则不行

而中间有很多植物被归为一类，我推测主要是“大小”中的“体积”与“表面积”因素影响较大，因为：

(1) 当我依次添加性状指标时，我发现当不勾选“体积”和“表面积”时，没有出现这种现象。如图10b。

- (2) 而当我添加任意其一后，均出现了一群植株被归为一类的情况，和10a很相似
- (3) 虽然分类效果并不理想，但至少没有出现那诡异的一大片粉色林。因此我认为粉色林中植株的根系，在“体积”和“表面积”方面呈现明显的相似性。
- (4) 并且，我个人也难以对层次聚类进行调整。该网站不像PCA的网站，会展现出关键步骤，因此我不清楚关键这些关键性状是否经过标准化，且该网站也不允许我设定切割高度等其他设置，因而有了这张效果极不理想的图。

## 六、思考题

### 采集样本形成不同根系特征的原因是什么

在演化进程中，不同植株选择不同的根系特征，是其祖先在不同环境中经受自然选择，从而形成独特生存策略的直接体现。例如，百日菊作为一年生草本，在演化中形成了粗壮的主根和稀疏的侧根，这是一种在养分水分移动性较强的环境中优先快速深扎以获取资源的策略。与之相反，香附子演化出块茎与须根的克隆生长结构，使其能在竞争激烈的草地生境中快速扩展并共享资源。合欢作为木本植物，其根系投资更倾向于构建深层稳定的锚固结构，以支持其高大的地上部分并实现长期生存，这与草本植物快速吸收的策略形成权衡，从图8中就可看出合欢与其他草本植物有很大的区分度。而麦冬根中部的膨大块根，则是演化出的高效储藏器官，用于应对季节性的干旱或养分短缺。即便是作为草本向木本过渡的苎麻，其根系兼具较高的分支频率和初步的木质化，也恰恰反映了演化过程中的一种中间适应状态，例如8中的苎麻-1与木本的合欢相似，而苎麻-3又和其他草本相似。虽然本次实验有一些的样本被挖了，但幸运的是我们组有草本、木本和介于两者之间的亚灌木，形成了一定的根系多样性。这些根系是植物在亿万年演化史上，为适应各自特定的水分、养分、竞争压力等环境条件，而在“资源快速获取”与“长期生存保障”之间做出的进化权衡结果，其独特的根系特征正是写入基因的适应性解决方案。

## 七、讨论、心得

该实验给我留下很深印象，我将从两方面讲述：

在做实验方面，我们组一开始就落后于其他组，根系结果也不是很好，因此我们组主动申请在运动会的第二天再次去挖植物、扫描根系，这也是我们组数据偏多的原因。同时这也是我第一次在室外采集样本，确实有一定的新鲜感，让我觉得生态学实验也有一些有趣的地方

在写实验报告方面，我分析数据运用到了之前都没用过的很多方法，比如用软件 RhizoVisionExplorer 来扫描根系得到数据，还有主成分分析、层状聚类分析等等。这些对我来说都是很新奇的经历，即使一开始真的有点痛苦，但也确实提升了我对数据的处理与分析的能力。

因此，我希望以后的实验也能像现在这样有趣又能让我学到不少新东西。

## 八、附录

### 1. 相关网址

- 中国植物志：<http://www.cn-flora.ac.cn/>
- 植物智：<https://www.iplant.cn/>
- PCA 网站：<https://www.statskingdom.com/pca-calculator.html>
- 层次聚类分析：<https://numiqo.com/statistics-calculator/cluster>

### 2. 根系分析

经 Rhizo Vision Explorer 处理，得到表4和表5性状的信息：

Table 4: 原始数据

文件名	根尖数量	分支点数量	总根长 (mm)	每毫米分支频率
百日菊-1	1305	1799	2769.26	0.650
百日菊-2	3857	5148	5711.89	0.901
百日菊-3	4061	5514	6095.72	0.905
合欢-1	1087	1448	1575.08	0.919
合欢-2	858	1453	1886.93	0.770
合欢-3	1061	1301	1147.50	1.134
苎麻-1	4440	6489	4617.33	1.405
苎麻-2	1973	2785	2657.10	1.048
苎麻-3	540	768	781.61	0.983
麦冬-1	4065	4407	5581.64	0.790
麦冬-2	4559	5137	5793.35	0.887
麦冬-3	1054	1148	1631.68	0.704
香附子-1	2988	4906	4033.70	1.216
香附子-2	2259	3601	3033.42	1.187
香附子-3	1573	2787	2174.13	1.282
香堇菜-1	1268	2670	2363.43	1.130
香堇菜-2	807	1239	1257.29	0.985
香堇菜-3	792	1930	1374.02	1.405

Table 5: 原始数据 (PCA 分析所用性状, 表二)

文件名	网络面积 (mm <sup>2</sup> )	平均直径 (mm)	周长 (mm)	体积 (mm <sup>3</sup> )	表面积 (mm <sup>2</sup> )
百日菊-1	1902.40	1.497	2824.23	10369.09	13576.38
百日菊-2	3186.53	1.759	4490.54	34400.64	33518.42
百日菊-3	3007.49	1.849	4163.03	41453.24	38662.38
合欢-1	803.97	0.911	2032.68	2984.37	4787.46
合欢-2	284.19	0.226	3284.06	205.97	1364.58
合欢-3	336.59	0.426	1670.95	282.15	1571.39
苎麻-1	1046.64	0.382	6466.17	1370.13	5712.92
苎麻-2	725.91	0.469	3780.57	1182.38	4038.07
苎麻-3	335.10	0.818	912.74	934.58	2104.01
麦冬-1	3472.64	1.318	4661.58	14120.79	23837.65
麦冬-2	2655.10	1.282	3727.41	13714.60	24117.43
麦冬-3	1027.33	1.591	1144.77	5749.04	8384.30
香附子-1	1381.87	0.946	4433.96	11842.96	13106.48
香附子-2	1125.49	0.923	3208.84	7145.24	9508.45
香附子-3	702.09	0.863	2183.56	3860.93	6295.49
香堇菜-1	873.20	0.764	2930.70	4175.55	5920.47
香堇菜-2	515.03	0.726	1611.58	1341.98	2946.04
香堇菜-3	366.79	0.548	1630.59	981.85	2435.36

### 3. 主成分分析

线  
订  
装

以下原始数据来自于 PCA 的网页，其中表头与网页一致，绘制成了紫色。

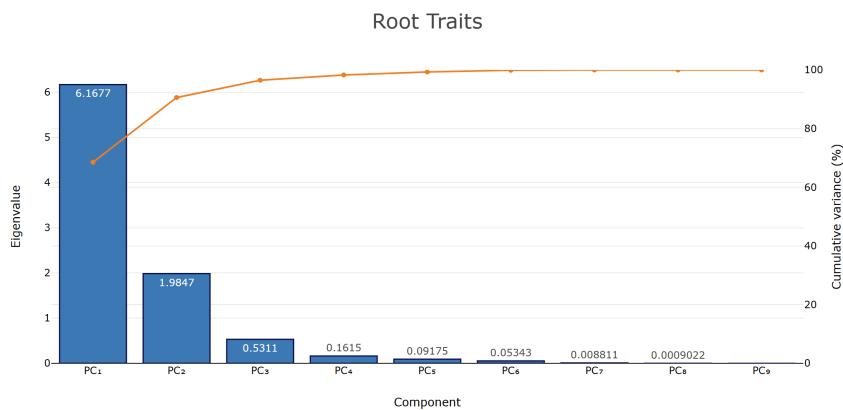


Figure 11: Scree Plot

#### (1) 特征值

参数	PC <sub>1</sub>	PC <sub>2</sub>	PC <sub>3</sub>	PC <sub>4</sub>	PC <sub>5</sub>	PC <sub>6</sub>	PC <sub>7</sub>	PC <sub>8</sub>	PC <sub>9</sub>
特征值	6.1677	1.9847	0.5311	0.1615	0.09175	0.05343	0.008811	0.0009022	0.00004939
方差百分比 (%)	68.5305	22.0524	5.9007	1.7947	1.0194	0.5937	0.0979	0.01002	0.0005487
累计百分比 (%)	68.5305	90.583	96.4837	98.2784	99.2978	99.8915	99.9894	99.9995	100

## (2) 得分

文件名	PC <sub>1</sub>	PC <sub>2</sub>	PC <sub>3</sub>	PC <sub>4</sub>	PC <sub>5</sub>	PC <sub>6</sub>	PC <sub>7</sub>	PC <sub>8</sub>	PC <sub>9</sub>
百日菊-1	0.2483	-2.0523	-0.6965	0.04933	0.4378	0.3246	-0.04917	-0.02228	0.01415
百日菊-2	4.4245	-0.8204	0.5142	-0.4013	0.03856	0.1623	0.09191	0.01549	-0.008513
百日菊-3	4.9377	-1.0309	0.9769	-0.6978	-0.06016	-0.2387	0.005761	-0.02077	0.00714
合欢-1	-1.6573	-0.7999	-0.1713	0.0364	0.07335	0.001436	0.09386	0.008384	0.003364
合欢-2	-2.1234	-0.0508	-1.5144	-0.8961	-0.184	-0.1401	-0.1125	0.009112	0.0007691
合欢-3	-2.5842	0.1963	0.2513	-0.112	-0.4552	-0.05479	0.1695	-0.001113	-0.00003818
苎麻-1	1.2739	3.9046	-0.5584	0.1418	0.4257	-0.138	0.1237	0.00145	0.007402
苎麻-2	-1.0086	0.9585	-0.6822	-0.2574	-0.01719	0.008721	0.02431	-0.0779	-0.01055
苎麻-3	-2.7237	-0.9957	0.2966	0.09151	-0.1107	-0.16	0.0724	0.03368	0.002204
麦冬-1	3.2932	-0.3119	-1.0358	0.5258	-0.3981	0.477	0.0643	0.01045	-0.002187
麦冬-2	3.0609	0.07791	-0.4449	0.7205	-0.4985	-0.4406	-0.1422	-0.004213	0.00141
麦冬-3	-1.1192	-2.4184	-0.0809	0.5146	0.5355	-0.3032	0.03037	-0.01948	-0.01112
香附子-1	1.1601	1.3927	0.2964	-0.0821	0.3192	-0.006875	-0.07794	0.0404	-0.007661
香附子-2	-0.09458	0.7283	0.4271	0.1468	0.1392	0.01648	-0.03889	0.01427	-0.002256
香附子-3	-1.25	0.5794	0.945	0.2738	0.03749	0.02985	-0.06678	-0.02293	0.009902
香堇菜-1	-1.0978	0.3979	0.1859	-0.1101	0.1195	0.2392	-0.1573	0.03163	-0.005178
香堇菜-2	-2.2719	-0.5882	0.02746	-0.0285	-0.1269	-0.05547	0.03431	0.04022	0.003135
香堇菜-3	-2.4678	0.8329	1.2637	0.08477	-0.2755	0.278	-0.06567	-0.03641	-0.001972

线  
订  
装

## (3) 计算步骤

## 1. 标准化每个维度的范围：

$$x_{\text{scaled}} = \frac{x - \text{mean}}{\text{sd}}$$

标准化后的表格：

文件名	根尖数量	分支点数量	总根长	每毫米分支频率	网络面积	平均直径	周长	体积	表面积
百日菊-1	-0.5807	-0.6802	-0.1426	-1.6244	0.5507	1.0991	-0.1636	0.1453	0.2079
百日菊-2	1.1909	1.1712	1.4858	-0.5106	1.7636	1.6363	0.972	2.2045	1.9647
百日菊-3	1.3325	1.3736	1.6982	-0.496	1.5944	1.8209	0.7488	2.8088	2.4179
合欢-1	-0.732	-0.8743	-0.8035	-0.4308	-0.4868	-0.1031	-0.7031	-0.4874	-0.5663
合欢-2	-0.891	-0.8715	-0.6309	-1.0915	-0.9777	-1.5079	0.1498	-0.7255	-0.8679
合欢-3	-0.7501	-0.9556	-1.0401	0.5184	-0.9282	-1.0967	-0.9496	-0.719	-0.8496
苎麻-1	1.5956	1.9126	0.8801	1.7204	-0.2576	-1.1872	2.3185	-0.6258	-0.4848
苎麻-2	-0.117	-0.1351	-0.2047	0.1394	-0.5605	-1.0086	0.4881	-0.6418	-0.6323
苎麻-3	-1.1118	-1.2502	-1.2426	-0.1507	-0.9296	-0.2933	-1.4664	-0.6631	-0.8027
麦冬-1	1.3353	0.7616	1.4137	-1.0051	2.0338	0.7313	1.0886	0.4668	1.1119
麦冬-2	1.6782	1.1652	1.5309	-0.5751	1.2616	0.6575	0.4519	0.432	1.1366
麦冬-3	-0.7549	-1.0401	-0.7721	-1.3856	-0.2758	1.293	-1.3082	-0.2505	-0.2495
香附子-1	0.5876	1.0374	0.5571	0.8835	0.05905	-0.02982	0.9334	0.2716	0.1665
香附子-2	0.08157	0.316	0.003579	0.7545	-0.1831	-0.07732	0.09848	-0.1309	-0.1504
香附子-3	-0.3947	-0.134	-0.4719	1.174	-0.583	-0.2018	-0.6003	-0.4123	-0.4335
香堇菜-1	-0.6064	-0.1987	-0.3672	0.5004	-0.4214	-0.4038	-0.09107	-0.3854	-0.4665
香堇菜-2	-0.9264	-0.9898	-0.9793	-0.1381	-0.7597	-0.4819	-0.9901	-0.6282	-0.7285
香堇菜-3	-0.9368	-0.6078	-0.9147	1.7172	-0.8997	-0.8469	-0.9771	-0.659	-0.7735

## 2. 计算协方差矩阵：

线  
订  
表

$$\text{Cov}_{x_1, x_2} = \frac{\sum (x_{1,i} - \bar{x}_1)(x_{2,i} - \bar{x}_2)}{n - 1}$$

协方差矩阵：

Group\Group	根尖数量	分支点数量	总根长	每毫米分支频率	网络面积	平均直径	周长	体积	表面积
根尖数量	1	0.9567	0.9645	0.03186	0.8006	0.4219	0.8528	0.6425	0.7634
分支点数量	0.9567	1	0.9167	0.2421	0.6801	0.3163	0.8976	0.607	0.6826
总根长	0.9645	0.9167	1	-0.1242	0.9009	0.5637	0.8177	0.7792	0.8809
每毫米分支 频率	0.03186	0.2421	-0.1242	1	-0.4106	-0.5504	0.1405	-0.3025	-0.3502
网络面积	0.8006	0.6801	0.9009	-0.4106	1	0.7923	0.5641	0.8396	0.9455
平均直径	0.4219	0.3163	0.5637	-0.5504	0.7923	1	0.0986	0.8119	0.8306
周长	0.8528	0.8976	0.8177	0.1405	0.5641	0.0986	1	0.4216	0.4986
体积	0.6425	0.607	0.7792	-0.3025	0.8396	0.8119	0.4216	1	0.9632
表面积	0.7634	0.6826	0.8809	-0.3502	0.9455	0.8306	0.4986	0.9632	1

特征向量：

Vector1	Vector2	Vector3	Vector4	Vector5	Vector6	Vector7	Vector8	Vector9
0.3677	0.2449	-0.1208	0.3519	-0.2036	-0.4777	0.6064	-0.1646	-0.0438
0.3442	0.3593	0.06217	0.07771	0.224	-0.2782	-0.3308	0.6903	0.1705
0.3941	0.1182	-0.1085	0.07041	-0.1971	-0.06875	-0.6112	-0.3908	-0.494
-0.09027	0.5796	0.7203	0.1339	-0.02617	0.2866	0.05246	-0.1818	-0.02294
0.3811	-0.1574	-0.09206	0.3018	-0.345	0.6816	0.1476	0.3439	-0.08233
0.2846	-0.4429	0.2878	0.4034	0.6668	0.01717	0.01676	-0.1756	-0.03494
0.2931	0.407	-0.4223	-0.3466	0.4673	0.3637	0.1624	-0.2392	0.1258
0.3527	-0.2048	0.3795	-0.6668	-0.02844	-0.09562	0.2631	0.1608	-0.3741
0.3826	-0.1804	0.1931	-0.1695	-0.2933	-0.03429	-0.1697	-0.2801	0.7487

#### 4. 层次聚类分析

该网页只给出了肘部法则图，如下：

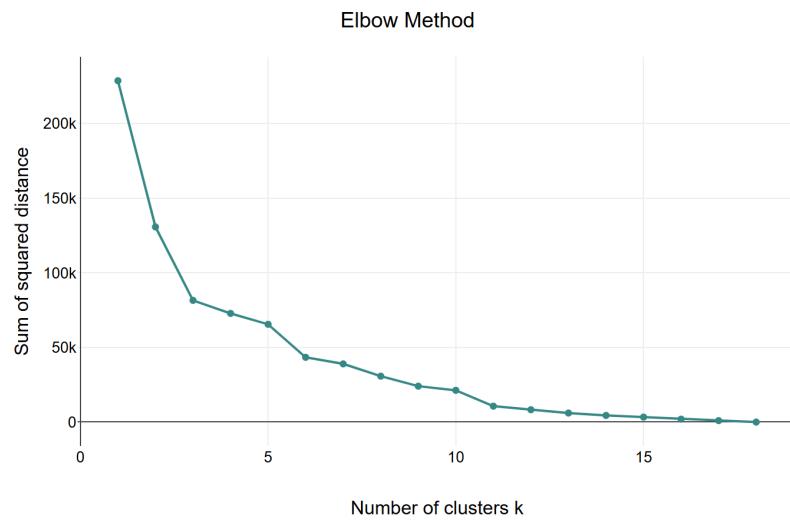


Figure 12: 肘部法则