



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109060886 B

(45) 授权公告日 2020. 11. 13

(21) 申请号 201810720188.5

G01N 27/22 (2006.01)

(22) 申请日 2018.07.03

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 103592343 B, 2015.07.29

申请公布号 CN 109060886 A

魏永胜 等. 小麦叶片电特性与外加电压和频率的关系研究.《农业工程学报》.2008,第24卷(第5期),166-169.

(43) 申请公布日 2018.12.21

(73) 专利权人 中国科学院地球化学研究所  
地址 550081 贵州省贵阳市观山湖区林城西路99号

刘东雪. 便携式植物叶片含水率检测仪的设计.《中国优秀硕士学位论文全文数据库 基础科学辑》.2015,(第02期),

(72) 发明人 吴沿友 吴沿胜 方蕾 吴明开  
王瑞 苏跃 王世杰 刘从强

审查员 王佳

(74) 专利代理机构 贵阳中新专利商标事务所  
52100

代理人 刘艳

(51) Int. Cl.

G01N 27/04 (2006.01)

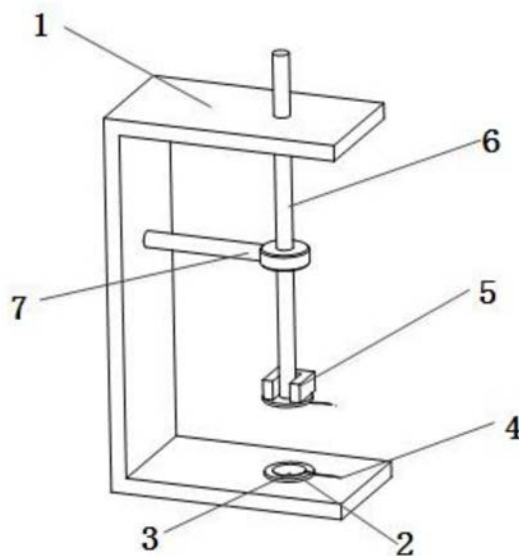
权利要求书3页 说明书14页 附图1页

## (54) 发明名称

一种测定植物叶片细胞代谢能的方法

## (57) 摘要

本发明公开了一种测定植物叶片细胞代谢能的方法,属于生物物理信息检测技术领域,测定装置包括支架、泡沫板、电极板、导线、铁块、塑料棒,镶嵌有电极板的泡沫板分别粘在支架底端和塑料棒上,使用时极板通过导线与LCR测试仪连接,两电极板将待测量植物叶片夹持住,并联模式同时测定不同夹持力下植物叶片生理电阻、生理阻抗和生理电容;依据吉布斯自由能方程和Nernst方程,进一步构建植物叶片的生理电容随夹持力变化、植物叶片的生理电阻随夹持力变化以及植物叶片的生理阻抗随夹持力变化模型,利用上述三个模型的各个参数联合计算植物叶片细胞代谢能。



1. 一种测定植物叶片细胞代谢能的方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤一,将测定装置与LCR测试仪连接;

步骤二,选取待测植物的新鲜枝条,并包住枝条基部,带到实验室;

步骤三,从新鲜枝条上采集待测叶片,放到蒸馏水中浸泡30分钟;

步骤四,吸干叶片表面水,立即将待测叶片夹在测定装置平行电极板之间,设置测定电压、频率,通过改变铁块的质量来设置不同的夹持力,并联模式同时测定不同夹持力下的植物叶片生理电容、生理电阻、生理阻抗;

步骤五,构建植物叶片的生理电容随夹持力变化模型,获得模型的各个参数;所述步骤五中,植物叶片的生理电容C随夹持力F变化方程为: $C = \frac{2\Delta H}{U^2} + \frac{2d}{U^2} F$ ,其中 $\Delta H$ 为系统的内能,U为测试电压,d为植物叶片的比有效厚度;令 $x_0 = \frac{2\Delta H}{U^2}$ , $h = \frac{2d}{U^2}$ ,所述变化方程可变形为 $C = x_0 + hF$ ;其中 $x_0$ 和 $h$ 为模型参数;

步骤六,构建植物叶片的生理电阻随夹持力变化模型,获得模型的各个参数;所述步骤六中,植物叶片的生理电阻随夹持力变化模型, $R = \frac{f_0}{C_T} + \frac{f_0}{C_T} e^{\frac{n_R F_0 E^0}{R_0 T}} e^{\left(-\frac{d n_R F_0 F}{a R_0 T}\right)}$ ,该模型是基于

能斯特方程 $E - E^0 = \frac{R_0 T}{n_R F_0} \ln \frac{C_i}{C_o}$ 推导出的,其中R为电阻,E为电动势, $E^0$ 为标准电动势, $R_0$ 是理想气体常数,T是温度, $C_i$ 为细胞膜内响应生理电阻的通透离子浓度, $C_o$ 为细胞膜外响应生理电阻的通透离子浓度, $f_0$ 是细胞膜内响应生理电阻的通透离子浓度 $C_i$ 与电阻之间转化的比例系数,膜内外响应生理电阻的通透离子总量 $C_T = C_i + C_o$ , $F_0$ 是法拉第常数, $n_R$ 是响应生理电阻的通透离子转移数;E可用来做功,与PV成正比 $PV = a E$ ,a是电动势转换成代谢能的系数,V为植物细胞体积,P是植物细胞受到的压强,压强P由压强公式 $P = \frac{F}{S}$ 求出,F为夹持力,S为极板作用下的有效面积,d为植物叶片的比有效厚度; $E - E^0 = \frac{R_0 T}{n_R F_0} \ln \frac{C_i}{C_o}$ 可变形为:

$\frac{V}{S} F = a E^0 - \frac{a R_0 T}{n_R F_0} \ln \frac{C_T R - f_0}{f_0}$ ,进而变形为 $R = \frac{f_0}{C_T} + \frac{f_0}{C_T} e^{\frac{n_R F_0 E^0}{R_0 T}} e^{\left(-\frac{V n_R F_0 F}{S a R_0 T}\right)}$ ,由于植物叶片的比有效

厚度 $d = \frac{V}{S}$ ,因此, $R = \frac{f_0}{C_T} + \frac{f_0}{C_T} e^{\frac{n_R F_0 E^0}{R_0 T}} e^{\left(-\frac{V n_R F_0 F}{S a R_0 T}\right)}$ 可变形为: $R = \frac{f_0}{C_T} + \frac{f_0}{C_T} e^{\frac{n_R F_0 E^0}{R_0 T}} e^{\left(-\frac{d n_R F_0 F}{a R_0 T}\right)}$ ,令

$y_0 = \frac{f_0}{C_T}$ 、 $k_1 = \frac{f_0}{C_T} e^{\frac{n_R F_0 E^0}{R_0 T}}$ 、 $b_1 = \frac{d n_R F_0}{a R_0 T}$ ,所述植物叶片的生理电阻随夹持力变化模型可变形为

$R = y_0 + k_1 e^{-b_1 F}$ ,其中 $y_0$ 、 $k_1$ 和 $b_1$ 为模型的参数;

步骤七,构建植物叶片的生理阻抗随夹持力变化模型,获得模型的各个参数;所述步骤

七中,植物叶片的生理阻抗随夹持力变化模型, $Z = \frac{I_0}{Q} + \frac{I_0}{Q} e^{\frac{n_Z F_0 E^0}{R_0 T}} e^{\left(-\frac{d n_Z F_0 F}{a R_0 T}\right)}$ ,该模型是基于能

斯特方程 $E - E^0 = \frac{R_0 T}{n_Z F_0} \ln \frac{Q_i}{Q_o}$ 推导出的,其中Z为阻抗,E为电动势, $E^0$ 为标准电动势, $R_0$ 是理想气体常数,T是温度, $Q_i$ 为细胞膜内响应生理阻抗的介电物质浓度, $Q_o$ 为细胞膜外响应生理阻抗的介电物质浓度, $J_0$ 是细胞膜内响应生理阻抗的介电物质浓度 $Q_i$ 与阻抗之间转化的比例系数,膜内外响应生理阻抗的介电物质总量 $Q = Q_i + Q_o$ , $F_0$ 是法拉第常数, $n_Z$ 是响应生理阻抗

的介电物质转移数;E可用来做功,与PV成正比 $PV=a E$ ,a是电动势转换成代谢能的系数,V为植物细胞体积,P是植物细胞受到的压强,压强P由压强公式 $P = \frac{F}{S}$ 求出,F为夹持力,S为极板作用下的有效面积,d为植物叶片的比有效厚度; $E - E^0 = \frac{R_0 T}{n_Z F_0} \ln \frac{Q_1}{Q_0}$ 可变形为:  
 $\frac{V}{S} F = a E^0 - \frac{a R_0 T}{n_Z F_0} \ln \frac{QZ - J_0}{J_0}$ ,进而变形为 $Z = \frac{J_0}{Q} + \frac{J_0}{Q} e^{\frac{n_Z F_0 E^0}{R_0 T}} e^{(-\frac{V n_Z F_0}{S a R_0 T} F)}$ ,由于植物叶片的比有效厚度 $d = \frac{V}{S}$ ,因此, $Z = \frac{J_0}{Q} + \frac{J_0}{Q} e^{\frac{n_Z F_0 E^0}{R_0 T}} e^{(-\frac{V n_Z F_0}{S a R_0 T} F)}$ 可变形为: $Z = \frac{J_0}{Q} + \frac{J_0}{Q} e^{\frac{n_Z F_0 E^0}{R_0 T}} e^{(-\frac{d n_Z F_0}{a R_0 T} F)}$ ,令 $p_0 = \frac{J_0}{Q}$ 、 $k_2 = \frac{J_0}{Q} e^{\frac{n_Z F_0 E^0}{R_0 T}}$ 、 $b_2 = \frac{d n_Z F_0}{a R_0 T}$ ,所述植物叶片的生理阻抗随夹持力变化模型可变形为 $Z = p_0 + k_2 e^{-b_2 F}$ ,其中 $p_0$ 、 $k_2$ 和 $b_2$ 为模型的参数;

步骤八,依据步骤五模型中的参数,获取植物叶片的比有效厚度d;

步骤九,依据步骤六模型中的参数,获取基于生理电阻的植物叶片细胞单位代谢能 $\Delta G_{R-E}$ ;

步骤十,依据步骤七模型中的参数,获取基于生理阻抗的植物叶片细胞单位代谢能 $\Delta G_{Z-E}$ ;

步骤十一,依据基于生理电阻的植物叶片细胞单位代谢能 $\Delta G_{R-E}$ 和植物叶片的比有效厚度d,获取基于生理电阻的植物叶片细胞代谢能 $\Delta G_R = \Delta G_{R-E} d$ ;

步骤十二,依据基于生理阻抗的植物叶片细胞单位代谢能 $\Delta G_{Z-E}$ 和植物叶片的比有效厚度d,获取基于生理阻抗的植物叶片细胞代谢能 $\Delta G_Z = \Delta G_{Z-E} d$ ;

步骤十三,依据基于生理电阻的植物叶片细胞代谢能 $\Delta G_R$ 和基于生理阻抗的植物叶片细胞代谢能 $\Delta G_Z$ ,获取植物叶片细胞代谢能 $\Delta G_B$ , $\Delta G_B$ 为基于生理电阻的植物叶片细胞代谢能 $\Delta G_R$ 和基于生理阻抗的植物叶片细胞代谢能 $\Delta G_Z$ 的平均值。

2. 根据权利要求1所述的一种测定植物叶片细胞代谢能的方法,其特征在于:所述测定装置包括支架(1)、泡沫板(2)、电极板(3)、导线(4)、铁块(5)、塑料棒(6)及固定夹(7),支架(1)为矩形框架结构、且一侧开放,支架(1)上端开有通孔,供塑料棒(6)伸入,支架(1)下端朝内一侧及塑料棒(6)底端分别粘有两个泡沫板(2),泡沫板(2)内镶嵌电极板(3),两个电极板(3)各自引出一根导线(4),塑料棒(6)的泡沫板(2)上可放置固定质量的铁块(5),塑料棒(6)位于支架内部的一端由固定夹(7)进行固定。

3. 根据权利要求2所述的一种测定植物叶片细胞代谢能的方法,其特征在于:所述电极板(3)为圆形极板,所述电极板(3)的材质为铜。

4. 根据权利要求1所述的一种测定植物叶片细胞代谢能的方法,其特征在于:所述步骤四中不同的夹持力的设置方法为:通过增加不同质量的铁块,依据重力学公式: $F = (M+m) g$ 计算出夹持力F,式中F为夹持力,单位N;M为铁块质量,m为塑料棒与电极片的质量,kg;g是重力加速度为9.8N/kg。

5. 根据权利要求1所述的一种测定植物叶片细胞代谢能的方法,其特征在于:所述步骤八中,依据步骤五模型中的参数获取植物叶片的比有效厚度d的方法为:将所述的 $h = \frac{2d}{U^2}$ 变形为 $d = \frac{U^2 h}{2}$ ,再依据h和测试电压U,计算植物叶片的比有效厚度d。

6. 根据权利要求1所述的一种测定植物叶片细胞代谢能的方法,其特征在于:所述步骤九中,依据步骤六模型中的参数获取基于生理电阻的植物叶片细胞单位代谢能  $\Delta G_{R-E}$  的方法为:将所述的  $y_0 = \frac{f_0}{C_T}$ 、 $k_1 = \frac{f_0}{C_T} e^{\frac{n_R F_0 E^0}{R_0 T}}$  和  $b_1 = \frac{d n_R F_0}{a R_0 T}$  进行变形运算,获取基于生理电阻的植物叶片细胞单位代谢能  $\Delta G_{R-E} = \frac{a E^0}{d} = \frac{\ln k_1 - \ln y_0}{b_1}$ 。

7. 根据权利要求1所述的一种测定植物叶片细胞代谢能的方法,其特征在于:所述步骤十中,依据步骤七模型中的参数获取基于生理阻抗的植物叶片细胞单位代谢能  $\Delta G_{Z-E}$  的方法为:将所述的  $p_0 = \frac{J_0}{Q}$ 、 $k_2 = \frac{J_0}{Q} e^{\frac{n_Z F_0 E^0}{R_0 T}}$  和  $b_2 = \frac{d n_Z F_0}{a R_0 T}$  进行变形运算,获取基于生理阻抗的植物叶片细胞单位代谢能  $\Delta G_{Z-E} = \frac{a E^0}{d} = \frac{\ln k_2 - \ln p_0}{b_2}$ 。

## 一种测定植物叶片细胞代谢能的方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于生物物理信息检测技术领域,具体涉及一种测定植物叶片细胞代谢能的方法,可以快速、无损地检测植物叶片细胞代谢能,判断水分和物质在植物叶片系统中的供给关系。

### 背景技术

[0002] “能量”经典地定义为物体做功的能力。能量是物质运动的一种度量,对应于物质的不同的运动形式,能量也有不同的形式。生命活动是导致体系高度有序状态的序列反应的总和,是耗能的。尽管不同的生物可以使用不同的能源;然而,实际上体内大量的生物化学反应和细胞过程只能接受代谢能,即可供细胞的新陈代谢直接利用的能量形式。“代谢能(metabolic energy)”是对应于生命运动的能量形式,是生物体直接用来建设自身或维持生命活动的能量形式。因此所有的生物体内都存在把其它形式的能量转化成的代谢能的过程,以及“代谢能支撑”的问题。

[0003] 植物生长和发育的过程是由植物的代谢能支撑着的物质代谢过程,是植物一系列同化和异化过程的综合体现,它包括水分代谢、无机物同化利用、有机物和能量的合成及转化以及植物体所有其他生理生化过程。植物进行生长和发育过程所需要的能量称为植物细胞代谢能。

[0004] 细胞代谢能主要是以分解三磷酸腺苷(ATP)的方式被生物利用。虽然,目前用细胞内能荷状态反映生物体内细胞代谢能,但实际上,很多物质的同化和异化对代谢能的需求和供给均不清楚,很多代谢过程对代谢能的需求和供给也不清楚,因此,仅仅测定细胞内能荷状态并不能真实地代表植物体细胞代谢能。

[0005] 此外,即使细胞内能荷状态能反映生物体内细胞代谢能,那也需要活体的细胞内能荷状态,这也是现有技术难以实现的。为此,必需开发一套能够活体在线测定植物细胞代谢能的技术方法,为解释复杂的生物现象提供科学依据。本发明以植物叶片为考察器官,依据吉布斯自由能方程和Nernst方程,联合推导出细胞代谢能表达式,通过将植物叶片的生理电容随夹持力变化、植物叶片的生理电阻随夹持力变化以及植物叶片的生理阻抗随夹持力变化模型的参数代入细胞代谢能表达式,首次获取植物叶片细胞代谢能。本发明不仅可以快速、无损、在线定量检测不同环境下不同植物叶片细胞的代谢能,测定的结果具有可比性,而且还可以用生物物理指标表征不同环境下不同植物叶片水分和物质在系统中的交流特征,为阐明复杂的生物学规律和植物器官的源库关系提供科学数据。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的在于提供一种测定植物叶片细胞代谢能的方法,填补了用生物物理指标来表征叶片细胞水分和物质运输能力的空白,为定量判别植物器官的源库关系提供一个模式。

[0007] 为了解决以上技术问题,本发明采用的具体技术方案如下:

[0008] 一种测定植物叶片细胞代谢能的方法,包括以下步骤:

[0009] 步骤一,将测定装置与LCR测试仪连接;

[0010] 步骤二,选取待测植物的新鲜枝条,并包住枝条基部,带到实验室;

[0011] 步骤三,从新鲜枝条上采集待测叶片,放到蒸馏水中浸泡30分钟;

[0012] 步骤四,吸干叶片表面水,立即将待测叶片夹在测定装置平行电极板之间,设置测定电压、频率,通过改变铁块的质量来设置不同的夹持力,并联模式同时测定不同夹持力下的植物叶片生理电容、生理电阻、生理阻抗;

[0013] 步骤五,构建植物叶片的生理电容随夹持力变化模型,获得模型的各个参数;

[0014] 步骤六,构建植物叶片的生理电阻随夹持力变化模型,获得模型的各个参数;

[0015] 步骤七,构建植物叶片的生理阻抗随夹持力变化模型,获得模型的各个参数;

[0016] 步骤八,依据步骤五模型中的参数,获取植物叶片的比有效厚度 $d$ ;

[0017] 步骤九,依据步骤六模型中的参数,获取基于生理电阻的植物叶片细胞单位代谢能  $\Delta G_{R-E}$ ;

[0018] 步骤十,依据步骤七模型中的参数,获取基于生理阻抗的植物叶片细胞单位代谢能  $\Delta G_{Z-E}$ ;

[0019] 步骤十一,依据基于生理电阻的植物叶片细胞单位代谢能  $\Delta G_{R-E}$ 和植物叶片的比有效厚度 $d$ ,获取基于生理电阻的植物叶片细胞代谢能  $\Delta G_R$ ;

[0020] 步骤十二,依据基于生理阻抗的植物叶片细胞单位代谢能  $\Delta G_{Z-E}$ 和植物叶片的比有效厚度 $d$ ,获取基于生理电阻的植物叶片细胞代谢能  $\Delta G_Z$ ;

[0021] 步骤十三,依据基于生理电阻的植物叶片细胞代谢能  $\Delta G_R$ 和基于生理阻抗的植物叶片细胞代谢能  $\Delta G_Z$ ,获取植物叶片细胞代谢能  $\Delta G_B$ ;

[0022] 进一步,所述步骤一中的测定装置包括支架(1)、泡沫板(2)、电极板(3)、导线(4)、铁块(5)、塑料棒(6)及固定夹(7),支架(1)为矩形框架结构、且一侧开放,支架(1)上端开有通孔,供塑料棒(6)伸入,支架(1)下端朝内一侧及塑料棒(6)底端分别粘有两个泡沫板(2),泡沫板(2)内镶嵌电极板(3),两个电极板(3)各自引出一根导线(4),塑料棒(6)的泡沫板(2)上可放置固定质量的铁块(5),塑料棒(6)位于支架内部的一端由固定夹(7)进行固定;所述电极板(3)为圆形极板,所述电极板(3)的材质为铜。

[0023] 进一步,所述步骤四中不同的夹持力的设置方法为:通过增加不同质量的铁块,依据重力学公式: $F = (M+m)g$ 计算出夹持力 $F$ ,式中 $F$ 为夹持力,单位N; $M$ 为铁块质量, $m$ 为塑料棒与电极片的质量,kg; $g$ 是重力加速度为 $9.8N/kg$ 。

[0024] 进一步,所述步骤五中,植物叶片的生理电容 $C$ 随夹持力 $F$ 变化方程为:

$C = \frac{2\Delta H}{U^2} + \frac{2d}{U^2}F$ ,其中 $\Delta H$ 为系统的内能, $U$ 为测试电压, $d$ 为植物叶片的比有效厚度;令 $x_0 = \frac{2\Delta H}{U^2}$ ,  $h = \frac{2d}{U^2}$ ,所述变化方程可变形为 $C = x_0 + hF$ ;其中 $x_0$ 和 $h$ 为模型参数。

[0025] 进一步,所述步骤六中,植物叶片的生理电阻随夹持力变化模型,  $R = \frac{f_0}{C_T} +$

$\frac{f_0}{C_T} e^{\frac{n_R F_0 E^0}{R_0 T}} e^{-\frac{dn_R F_0}{a R_0 T} F}$ ,该模型是基于能斯特方程 $E - E^0 = \frac{R_0 T}{n_R F_0} \ln \frac{C_i}{C_o}$ 推导出的,其中 $R$ 为电阻, $E$ 为电动势, $E^0$ 为标准电动势, $R_0$ 是理想气体常数, $T$ 是温度, $C_i$ 为细胞膜内响应生理电阻的通透离

子浓度,  $C_o$  为细胞膜外响应生理电阻的通透离子浓度,  $f_0$  是细胞膜内响应生理电阻的通透离子浓度  $C_i$  与电阻之间转化的比例系数, 膜内外响应生理电阻的通透离子总量  $C_T = C_i + C_o$ ,  $F_0$  是法拉第常数,  $n_R$  是响应生理电阻的通透离子转移数;  $E$  可用来做功, 与  $PV$  成正比  $PV = a E$ ,  $a$  是电动势转换成代谢能的系数,  $V$  为植物细胞体积,  $P$  是植物细胞受到的压强, 压强  $P$  由压强公式  $P = \frac{F}{S}$  求出,  $F$  为夹持力,  $S$  为极板作用下的有效面积,  $d$  为植物叶片的比有效厚度;

$$E - E^0 = \frac{R_0 T}{n_R F_0} \ln \frac{C_i}{C_o} \text{ 可变形为: } \frac{V}{S} F = a E^0 - \frac{a R_0 T}{n_R F_0} \ln \frac{C_T R - f_0}{f_0}, \text{ 进而变形为 } R = \frac{f_0}{C_T} + \frac{f_0}{C_T} e^{\frac{n_R F_0 E^0}{R_0 T}} e^{-\frac{V n_R F_0 F}{S a R_0 T}},$$

由于植物叶片的比有效厚度  $d = \frac{V}{S}$ , 因此,  $R = \frac{f_0}{C_T} + \frac{f_0}{C_T} e^{\frac{n_R F_0 E^0}{R_0 T}} e^{-\frac{V n_R F_0 F}{S a R_0 T}}$  可变形为:

$$R = \frac{f_0}{C_T} + \frac{f_0}{C_T} e^{\frac{n_R F_0 E^0}{R_0 T}} e^{-\frac{d n_R F_0 F}{a R_0 T}}, \text{ 令 } y_0 = \frac{f_0}{C_T}, k_1 = \frac{f_0}{C_T} e^{\frac{n_R F_0 E^0}{R_0 T}}, b_1 = \frac{d n_R F_0}{a R_0 T}, \text{ 所述植物叶片的生理电阻随夹持力变化模型可变形为 } R = y_0 + k_1 e^{-b_1 F}, \text{ 其中 } y_0, k_1 \text{ 和 } b_1 \text{ 为模型的参数。}$$

[0026] 进一步, 所述步骤七中, 植物叶片的生理阻抗随夹持力变化模型,  $Z = \frac{J_0}{Q} +$

$$\frac{J_0}{Q} e^{\frac{n_Z F_0 E^0}{R_0 T}} e^{-\frac{d n_Z F_0 F}{a R_0 T}}, \text{ 该模型是基于能斯特方程 } E - E^0 = \frac{R_0 T}{n_Z F_0} \ln \frac{Q_i}{Q_o} \text{ 推导出的, 其中 } Z \text{ 为阻抗, } E \text{ 为电}$$

动势,  $E^0$  为标准电动势,  $R_0$  是理想气体常数,  $T$  是温度,  $Q_i$  为细胞膜内响应生理阻抗的介电物质浓度,  $Q_o$  为细胞膜外响应生理阻抗的介电物质浓度,  $J_0$  是细胞膜内响应生理阻抗的介电物质浓度  $Q_i$  与阻抗之间转化的比例系数, 膜内外响应生理阻抗的介电物质总量  $Q = Q_i + Q_o$ ,  $F_0$  是法拉第常数,  $n_Z$  是响应生理阻抗的介电物质转移数;  $E$  可用来做功, 与  $PV$  成正比  $PV = a E$ ,  $a$  是电动势转换成代谢能的系数,  $V$  为植物细胞体积,  $P$  是植物细胞受到的压强, 压强  $P$  由压强公式  $P = \frac{F}{S}$  求出,  $F$  为夹持力,  $S$  为极板作用下的有效面积,  $d$  为植物叶片的比有效厚度;

$$E - E^0 = \frac{R_0 T}{n_Z F_0} \ln \frac{Q_i}{Q_o} \text{ 可变形为: } \frac{V}{S} F = a E^0 - \frac{a R_0 T}{n_Z F_0} \ln \frac{QZ - J_0}{J_0}, \text{ 进而变形为 } Z = \frac{J_0}{Q} + \frac{J_0}{Q} e^{\frac{n_Z F_0 E^0}{R_0 T}} e^{-\frac{V n_Z F_0 F}{S a R_0 T}}, \text{ 由}$$

于植物叶片的比有效厚度  $d = \frac{V}{S}$ , 因此,  $Z = \frac{J_0}{Q} + \frac{J_0}{Q} e^{\frac{n_Z F_0 E^0}{R_0 T}} e^{-\frac{V n_Z F_0 F}{S a R_0 T}}$  可变形为:

$$Z = \frac{J_0}{Q} + \frac{J_0}{Q} e^{\frac{n_Z F_0 E^0}{R_0 T}} e^{-\frac{d n_Z F_0 F}{a R_0 T}}, \text{ 令 } p_0 = \frac{J_0}{Q}, k_2 = \frac{J_0}{Q} e^{\frac{n_Z F_0 E^0}{R_0 T}}, b_2 = \frac{d n_Z F_0}{a R_0 T}, \text{ 所述植物叶片的生理阻抗随夹持力变化模型可变形为 } Z = p_0 + k_2 e^{-b_2 F}, \text{ 其中 } p_0, k_2 \text{ 和 } b_2 \text{ 为模型的参数。}$$

[0027] 进一步, 所述步骤八中, 依据步骤五模型中的参数获取植物叶片的比有效厚度  $d$  的方法为: 将前述的  $h = \frac{2d}{U^2}$  变形为  $d = \frac{U^2 h}{2}$ , 再依据  $h$  和测试电压  $U$ , 计算植物叶片的比有效厚度  $d$ 。

[0028] 进一步, 所述步骤九中, 依据步骤六模型中的参数获取基于生理电阻的植物叶片细胞单位代谢能  $\Delta G_{R-E}$  的方法为: 将前述的  $y_0 = \frac{f_0}{C_T}$ ,  $k_1 = \frac{f_0}{C_T} e^{\frac{n_R F_0 E^0}{R_0 T}}$  和  $b_1 = \frac{d n_R F_0}{a R_0 T}$  进行变形运算, 获取基于生理电阻的植物叶片细胞单位代谢能  $\Delta G_{R-E} = \frac{a E^0}{d} = \frac{\ln k_1 - \ln y_0}{b_1}$ 。

[0029] 进一步, 所述步骤十中, 依据步骤七模型中的参数获取基于生理阻抗的植物叶片

细胞单位代谢能  $\Delta G_{Z-E}$  的方法为:将前述的  $p_0 = \frac{J_0}{Q}$ 、 $k_2 = \frac{J_0}{Q} e^{\frac{n_2 F_0 E^0}{R_0 T}}$  和  $b_2 = \frac{d n_2 F_0}{a R_0 T}$  进行变形运算,获取基于生理阻抗的植物叶片细胞单位代谢能  $\Delta G_{Z-E} = \frac{a E^0}{d} = \frac{\ln k_2 - \ln p_0}{b_2}$ 。

[0030] 进一步,所述步骤十一中,依据  $\Delta G_{R-E}$  和  $d$ ,获取基于生理电阻的植物叶片细胞代谢能  $\Delta G_R$  的公式为:  $\Delta G_R = \Delta G_{R-E} d$ 。

[0031] 进一步,所述步骤十二中,依据  $\Delta G_{Z-E}$  和  $d$ ,获取基于生理阻抗的植物叶片细胞代谢能  $\Delta G_Z$  的公式为:  $\Delta G_Z = \Delta G_{Z-E} d$ 。

[0032] 进一步,所述步骤十三中,获取植物叶片细胞代谢能  $\Delta G$  的方法是:  $\Delta G_B$  为基于生理电阻的植物叶片细胞代谢能  $\Delta G_R$  和基于生理阻抗的植物叶片细胞代谢能  $\Delta G_Z$  的平均值。

[0033] 本发明具有有益效果:

[0034] 1. 本发明可以快速、在线定量检测不同环境下不同植物叶片细胞的代谢能和比有效厚度,测定的结果具有可比性。

[0035] 2. 本发明通过测定植物叶片细胞代谢能这一热力学参数,可以用生物物理指标表征叶片细胞水分和物质运输能力,能够表征不同环境下不同植物叶片水分和物质在系统中的交流特征。

[0036] 3. 本发明简便,适用性广,需要的仪器价格低廉。

## 附图说明

[0037] 图1为本发明的结构示意图;

[0038] 图中:1. 支架;2. 泡沫板;3. 电极板;4. 电导线;5. 铁块;6. 塑料棒;7. 固定夹。

## 具体实施方式

[0039] 下面结合附图与实施例对本发明作进一步说明。

[0040] 本发明的基本原理为:

[0041] 由重力学公式:

$$[0042] \quad F = (M+m)g \quad (1)$$

[0043] 式中  $F$  为重力(夹持力),  $N$ ;  $M$  为铁块质量,  $m$  为塑料棒与电极片的质量,  $kg$ ;  $g$  是重力加速度为  $9.8, N/kg$ 。

[0044] 以叶片中细胞液溶质作为电介质,将叶片夹在平行板电容器的两平行板电容器极板之间,构成平行板电容传感器。通过增加一定质量的铁块得到不同夹持力下植物叶片的生理电容,而不同的压力必定会导致叶片中细胞液溶质浓度的不同变化,从而改变叶片细胞的弹性及可塑性,引起两电容器极板间叶片组织细胞液溶质介电常数的变化,从而影响植物生理电容。

[0045] 植物细胞水分的多少关系着植物叶片细胞弹性的强弱,在不同夹持力下,不同植物生理电容是不同的。

[0046] 吉布斯自由能方程表达为  $\Delta G = \Delta H + PV$ , 电容器的能量公式表达为  $W = \frac{1}{2} U^2 C$ ,  $W$  为电容器的能量,等于吉布斯自由能  $\Delta G$  转化的功,即  $W = \Delta G$ ;  $\Delta H$  为系统(由细胞组成的植物叶片系统)的内能,  $P$  为植物细胞受到的压强,  $V$  为植物细胞体积,  $U$  为测试电压,  $C$  为植物叶片



的生理电容；

[0047] 植物细胞受到的压强 $P$ 可由压强公式求出,压强公式: $P = \frac{F}{S}$ ,其中 $F$ 为夹持力, $S$ 为极板作用下的有效面积;

[0048] 植物叶片的生理电容 $C$ 随夹持力 $F$ 变化模型:

$$[0049] \quad C = \frac{2\Delta H}{U^2} + \frac{2V}{SU^2}F \quad (2)$$

[0050] 假定以 $d$ 代表植物叶片的比有效厚度,则 $d = \frac{V}{S}$ ; (2) 式可变形为:

$$[0051] \quad C = \frac{2\Delta H}{U^2} + \frac{2d}{U^2}F \quad (3)$$

[0052] 令 $x_0 = \frac{2\Delta H}{U^2}$ ,  $h = \frac{2d}{U^2}$ , (3) 式可变形为:

$$[0053] \quad C = x_0 + hF \quad (4)$$

[0054] (4) 式是一个线性模型,其中 $x_0$ 和 $h$ 为模型参数。

[0055] 由于 $h = \frac{2d}{U^2}$ ,因此 $d = \frac{U^2 h}{2}$ 。

[0056] 由于电阻性电流是由离子传递引起的,所以它是由膜对各种离子通透性的大小和通透离子是否大量存在等因素决定的。外界激励改变离子的通透性,影响了内外离子的浓度,而内外离子浓度差服从Nernst方程,而生理电阻与电导率成反比,而电导率与细胞内离子浓度成正比,由此可推导出,细胞的生理电阻与外界激励的关系。

[0057] 植物细胞水分的多少关系着植物叶片细胞弹性的强弱,在不同夹持力下,不同植物细胞膜的通透性发生不同的改变,因此其生理电阻是不同的。

[0058] 能斯特方程的表达式如(5)式:

$$[0059] \quad E - E^0 = \frac{R_0 T}{n_R F_0} \ln \frac{C_i}{C_o} \quad (5)$$

[0060] 其中, $E$ 为电动势; $E^0$ 为标准电动势; $R_0$ 是理想气体常数,等于 $8.314570 \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ , $T$ 是温度,单位 $\text{K}$ ; $C_i$ 为细胞膜内响应生理电阻的通透离子浓度, $C_o$ 为细胞膜外响应生理电阻的通透离子浓度,膜内外响应生理电阻的通透离子总量 $C_T = C_i + C_o$ , $F_0$ 是法拉第常数,等于 $96485 \text{C} \cdot \text{mol}^{-1}$ ; $n_R$ 是响应生理电阻的通透离子转移数,单位 $\text{mol}$ 。

[0061] 电动势 $E$ 的内能可转化成压力做功,与 $PV$ 成正比 $PV = a E$ ,即:

$$[0062] \quad PV = aE = a E^0 + \frac{a R_0 T}{n_R F_0} \ln \frac{C_i}{C_o} \quad (6)$$

[0063] 其中: $P$ 为植物细胞受到的压强, $a$ 是电动势转换能量系数, $V$ 为植物细胞体积;

[0064] 植物细胞受到的压强 $P$ 可由压强公式求出,压强公式: $P = \frac{F}{S}$ ,其中 $F$ 为夹持力, $S$ 为极板作用下的有效面积;

[0065] 在叶肉细胞里,液泡和细胞质占据了细胞内绝大部分空间。对叶肉细胞而言, $C_o$ 与 $C_i$ 之和是一定的,等于膜内外响应生理电阻的通透离子总量 $C_T$ , $C_i$ 则与电导率成正比,而电

导率为电阻 $R$ 的倒数,因此, $\frac{C_i}{C_o}$ 可表达成 $\frac{C_i}{C_o} = \frac{\frac{f_0}{R}}{\frac{C_T - f_0}{R}} = \frac{f_0}{C_T R - f_0}$ ,其中 $R$ 为电阻, $f_0$ 是细胞膜内响应

生理电阻的通透离子浓度 $C_i$ 与电阻之间转化的比例系数,因此,(6)可变成:

$$[0066] \quad \frac{V}{S}F = a E^0 - \frac{a R_0 T}{n_R F_0} \ln \frac{C_T R - f_0}{f_0} \quad (7)$$

[0067] (7)式变形,得

$$[0068] \quad \frac{a R_0 T}{n_R F_0} \ln \frac{C_T R - f_0}{f_0} = a E^0 - \frac{V}{S}F \quad (8)$$

$$[0069] \quad \ln \frac{C_T R - f_0}{f_0} = \frac{n_R F_0 E^0}{R_0 T} - \frac{V n_R F_0}{S a R_0 T} F \quad (9)$$

[0070] (9)式两边取指数,可变成:

$$[0071] \quad \frac{C_T R - f_0}{f_0} = e^{\frac{n_R F_0 E^0}{R_0 T}} e^{\left(-\frac{V n_R F_0}{S a R_0 T} F\right)} \quad (10)$$

[0072] 进一步变形,可得:

$$[0073] \quad R = \frac{f_0}{C_T} + \frac{f_0}{C_T} e^{\frac{n_R F_0 E^0}{R_0 T}} e^{\left(-\frac{V n_R F_0}{S a R_0 T} F\right)} \quad (11)$$

[0074] 式(11)中 $R$ 为生理电阻,由于 $d = \frac{V}{S}$ , (11)式可变形为:

$$[0075] \quad R = \frac{f_0}{C_T} + \frac{f_0}{C_T} e^{\frac{n_R F_0 E^0}{R_0 T}} e^{\left(-\frac{d n_R F_0}{a R_0 T} F\right)} \quad (12)$$

[0076] 对于同一个待测叶片在同一环境下,式(12)中 $d$ 、 $a$ 、 $E^0$ 、 $R_0$ 、 $T$ 、 $n_R$ 、 $F_0$ 、 $C_T$ 、 $f_0$ 都为定值;

令 $y_0 = \frac{f_0}{C_T}$ 、 $k_1 = \frac{f_0}{C_T} e^{\frac{n_R F_0 E^0}{R_0 T}}$ 、 $b_1 = \frac{d n_R F_0}{a R_0 T}$ ,因此(12)式可变形为:

$$[0077] \quad R = y_0 + k_1 e^{-b_1 F} \quad (13)$$

[0078] (13)式中 $y_0$ 、 $k_1$ 和 $b_1$ 为模型的参数。因此,基于生理电阻的植物叶片细胞单位代谢能 $\Delta G_{R-E} = \frac{a E^0}{d} = \frac{\ln k_1 - \ln y_0}{b_1}$ 。基于生理电阻的植物叶片细胞代谢能 $\Delta G_R = \Delta G_{R-E} d$ 。

[0079] 同一对象在同一环境下的阻抗测定中,阻抗大小主要取决于膜内外响应生理阻抗的介电物质浓度,所以膜对各种响应生理阻抗的介电物质的通透性大小以及含水量决定了细胞阻抗大小,而对于叶片来说,阻抗则更是取决于膜内外响应生理阻抗的介电物质的浓度。外界激励改变介电物质的膜通透性,影响了膜内外响应生理阻抗的介电物质的浓度,而膜内外响应生理阻抗的介电物质的浓度差也服从能斯特(Nernst)方程,在膜外响应生理阻抗的介电物质的浓度一定时,生理阻抗则与细胞内响应生理阻抗的介电物质的浓度成反比,由此可推导出,细胞的生理阻抗也与外界激励的关系。

[0080] 植物细胞水分的多少关系着植物叶片细胞弹性的强弱,在不同的夹持力下,不同植物细胞膜的响应生理阻抗的介电物质的通透性发生不同的改变,因此其生理阻抗是不同的。

[0081] 能斯特方程的表达式如(14)式:

$$[0082] \quad E - E^0 = \frac{R_0 T}{n_z F_0} \ln \frac{Q_i}{Q_o} \quad (14)$$

[0083] 其中, $E$ 为电动势, $E^0$ 为标准电动势, $R_0$ 是理想气体常数,等于 $8.314570 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;

T是温度,单位K; $Q_i$ 为细胞膜内响应生理阻抗的介电物质浓度, $Q_o$ 为细胞膜外响应生理阻抗的介电物质浓度,膜内外响应生理阻抗的介电物质总量 $Q=Q_i+Q_o$ , $F_0$ 是法拉第常数,等于 $96485C \cdot mol^{-1}$ ;  $n_z$ 是响应生理阻抗的介电物质转移数,单位mol。

[0084] 电动势E的内能可转化成压力做功,与PV成正比 $PV=a E$ ,即:

$$[0085] \quad PV = aE = a E^0 + \frac{a R_0 T}{n_z F_0} \ln \frac{Q_i}{Q_o} \quad (15)$$

[0086] 其中:P同样是植物细胞受到的压强,a同样是电动势转换能量系数,V同样为植物细胞体积;

[0087] 植物细胞受到的压强P可由压强公式求出,压强公式: $P = \frac{F}{S}$ ,其中F同样为夹持力,S为极板作用下的有效面积;

[0088] 在叶肉细胞里,液泡和细胞质占据了细胞内绝大部分空间。对叶肉细胞而言, $Q_o$ 与 $Q_i$ 之和是一定的,等于膜内外响应生理阻抗的介电物质总量Q, $Q_i$ 则与响应生理阻抗的介电物质电导率成正比,而响应生理阻抗的介电物质电导率为阻抗Z的倒数,因此, $\frac{Q_i}{Q_o}$ 可表达成

$$\frac{Q_i}{Q_o} = \frac{\frac{J_0}{Z}}{Q - \frac{J_0}{Z}} = \frac{J_0}{QZ - J_0}, Z为阻抗, J_0是细胞膜内响应生理阻抗的介电物质浓度 $Q_i$ 与阻抗之间转化$$

的比例系数,因此,(15)可变成:

$$[0089] \quad \frac{V}{S} F = a E^0 - \frac{a R_0 T}{n_z F_0} \ln \frac{QZ - J_0}{J_0} \quad (16)$$

[0090] (16)式变形,得

$$[0091] \quad \frac{a R_0 T}{n_z F_0} \ln \frac{QZ - J_0}{J_0} = a E^0 - \frac{V}{S} F \quad (17)$$

[0092] (17)可变成:

$$[0093] \quad \ln \frac{QZ - J_0}{J_0} = \frac{n_z F_0 E^0}{RT} - \frac{V n_z F_0}{S a RT} F \quad (18)$$

[0094] (18)式两边取指数,可变成:

$$[0095] \quad \frac{QZ - J_0}{J_0} = e^{\frac{n_z F_0 E^0}{R_0 T}} e^{\left(-\frac{V n_z F_0}{S a R_0 T} F\right)} \quad (19)$$

[0096] 进一步变形,可得:

$$[0097] \quad Z = \frac{J_0}{Q} + \frac{J_0}{Q} e^{\frac{n_z F_0 E^0}{R_0 T}} e^{\left(-\frac{V n_z F_0}{S a R_0 T} F\right)} \quad (20)$$

[0098] 式(20)中Z为生理阻抗,由于 $d = \frac{V}{S}$ , (20)式可变形为:

$$[0099] \quad Z = \frac{J_0}{Q} + \frac{J_0}{Q} e^{\frac{n_z F_0 E^0}{R_0 T}} e^{\left(-\frac{d n_z F_0}{a R_0 T} F\right)} \quad (21)$$

[0100] 对于同一个待测叶片在同一环境下,(21)式中d、a、 $E^0$ 、 $R_0$ 、T、 $n_z$ 、 $F_0$ 、Q、 $J_0$ 都为定值,

令 $p_0 = \frac{J_0}{Q}$ 、 $k_2 = \frac{J_0}{Q} e^{\frac{n_z F_0 E^0}{R_0 T}}$ 、 $b_2 = \frac{d n_z F_0}{a R_0 T}$ ,因此(21)式可变形为:

$$[0101] \quad Z = p_0 + k_2 e^{-b_2 F} \quad (22)$$

[0102] (22)式中 $p_0$ 、 $k_2$ 和 $b_2$ 为模型的参数。因此,基于生理阻抗的植物叶片细胞单位代谢

能  $\Delta G_{Z-E} = \frac{a E^0}{d} = \frac{\ln k_2 - \ln p_0}{b_2}$ 。基于生理阻抗的植物叶片细胞代谢能  $\Delta G_Z = \Delta G_{Z-E} d$ 。

[0103] 一种测定植物叶片细胞代谢能的方法的测定装置,如图1所示,由支架1、泡沫板2、电极板3、电导线4、铁块5、塑料棒6、固定夹7组成;支架1为矩形框架结构、且一侧开放,支架1上端开有通孔,供塑料棒6伸入,支架1下端朝内一侧及塑料棒6底端分别粘有两个泡沫板2,泡沫板2内镶嵌电极板3,两个电极板3各自引出一根导线4,用于与LCR测试仪(HI0KI 3532-50型,日本日置)连接,塑料棒6的泡沫板2上可放置固定质量的铁块5,并联模式测定植物叶片的生理电阻、生理阻抗、生理电容;塑料棒6位于支架内部的一端由固定夹7进行固定,当塑料棒下端与支架端合在一起时,两个电极板3就完全对应在一起;电极板3为材质为铜的圆形极板,以减少电极的边缘效应。

[0104] 本发明的使用步骤如下:使用时先将本发明装置的两根导线4与LCR测试仪的9140四端子测试探头相连,再抬起塑料棒6,使两电极板3将待测量的植物叶片夹持住,电极板的直径10mm,设置测定电压1.5伏,测定频率为3000Hz,标定塑料棒与电极片的质量以及铁块5的质量,并联模式测定不同夹持力下植物叶片生理电阻、生理阻抗、生理电容。

[0105] 实施例

[0106] 以白及为例。在中科院贵州省普定喀斯特生态综合试验站的基地内采摘二年生白及植株,迅速返回实验室,清理所述新鲜枝条上叶片的表面灰尘后,从新鲜枝条上分别一一采集待测叶片,放到蒸馏水中浸泡30分钟;吸干叶片表面水,立即将待测叶片夹在测定装置平行电极板之间,设置测定电压、频率,通过改变铁块的质量来设置不同的夹持力,并联模式测定不同夹持力下的植物叶片生理电容、生理电阻、生理阻抗;不同夹持力下白及不同叶位叶片的生理电容如表1、生理电阻如表2、生理阻抗如表3。依据表1的数据构建植物叶片的生理电容随夹持力变化模型如表4,依据表2的数据构建植物叶片的生理电阻随夹持力变化模型如表5,依据表3的数据构建植物叶片的生理阻抗随夹持力变化模型如表6。依据表4各模型的参数,分别计算获取不同植物叶片的比有效厚度d如表7,依据表5各模型的参数,分别计算获取不同植物叶片基于生理电阻的植物叶片细胞单位代谢能  $\Delta G_{R-E}$  如表7,依据表6各模型的参数,分别计算获取不同植物叶片基于生理阻抗的植物叶片细胞单位代谢能  $\Delta G_{Z-E}$  如表7,接着再基于生理电阻的植物叶片细胞单位代谢能  $\Delta G_{R-E}$  和基于生理阻抗的植物叶片细胞单位代谢能  $\Delta G_{Z-E}$  计算基于生理电阻的植物叶片细胞代谢能  $\Delta G_R$  和基于生理电阻的植物叶片细胞代谢能  $\Delta G_Z$ ,最后依据基于生理电阻的植物叶片细胞代谢能  $\Delta G_R$  和基于生理电阻的植物叶片细胞代谢能  $\Delta G_Z$  计算植物叶片细胞代谢能  $\Delta G_B$  如表7。

[0107] 表1不同夹持力(F,单位N)下白及不同叶位叶片的生理电容(pF)

[0108]

F	第一叶位	第二叶位	第三叶位	第四叶位	第五叶位	F	第一叶位	第二叶位	第三叶位	第四叶位	第五叶位
1.139	28.0	27.9	34.0	35.3	106.0	4.212	82.2	98.1	113.0	140.0	361.0
1.139	28.0	28.1	34.2	35.5	106.0	4.212	82.4	98.3	113.0	141.0	362.0
1.139	28.3	28.2	34.4	35.8	106.0	4.212	82.6	98.5	113.0	141.0	364.0
1.139	28.4	28.4	34.6	36.1	107.0	4.212	82.9	98.7	113.0	141.0	365.0
1.139	28.7	28.5	34.7	36.3	107.0	4.212	83.3	98.8	114.0	142.0	366.0
1.139	29.0	28.7	34.9	36.6	108.0	5.245	93.8	111.0	127.0	159.0	464.0
1.139	28.9	28.8	35.1	36.8	108.0	5.245	94.1	111.0	128.0	159.0	467.0
1.139	29.0	28.9	35.2	37.0	108.0	5.245	94.4	112.0	128.0	160.0	470.0
1.139	29.1	29.0	35.4	37.2	109.0	5.245	94.6	112.0	129.0	160.0	472.0
1.139	29.4	29.2	35.5	37.5	109.0	5.245	94.8	112.0	129.0	162.0	474.0
1.139	29.4	29.3	35.7	37.7	110.0	5.245	95.2	112.0	129.0	164.0	476.0
2.149	48.5	56.1	65.9	68.0	184.0	5.245	95.5	112.0	129.0	165.0	478.0
2.149	48.8	56.4	66.2	68.4	185.0	5.245	95.8	113.0	130.0	165.0	480.0
2.149	49.1	56.7	66.5	68.9	186.0	5.245	96.0	113.0	130.0	166.0	483.0
2.149	49.4	56.9	66.8	69.4	186.0	5.245	96.3	113.0	130.0	166.0	485.0
2.149	49.7	57.2	67.0	69.8	187.0	5.245	96.5	113.0	131.0	167.0	487.0
2.149	49.9	57.4	67.3	70.2	187.0	6.262	107.0	124.0	145.0	193.0	608.0
2.149	50.1	57.4	67.6	70.6	188.0	6.262	107.0	124.0	145.0	194.0	611.0
2.149	50.4	57.7	67.8	71.0	189.0	6.262	108.0	124.0	145.0	195.0	614.0
2.149	50.6	58.0	68.0	71.4	189.0	6.262	108.0	125.0	146.0	196.0	616.0
2.149	50.8	58.3	68.3	71.7	190.0	6.262	108.0	125.0	146.0	197.0	619.0
2.149	51.0	58.5	68.5	72.1	190.0	6.262	108.0	125.0	146.0	197.0	621.0
3.178	65.0	78.0	91.9	100.0	259.0	6.262	109.0	125.0	147.0	198.0	623.0
3.178	65.3	78.3	92.2	101.0	260.0	6.262	109.0	126.0	147.0	198.0	626.0
3.178	65.6	78.5	92.4	101.0	261.0	6.262	109.0	126.0	147.0	199.0	628.0
3.178	65.8	78.7	92.6	102.0	262.0	6.262	110.0	126.0	147.0	200.0	631.0
3.178	66.1	78.9	92.9	102.0	263.0	6.262	110.0	126.0	148.0	201.0	633.0
3.178	66.4	79.1	93.1	103.0	264.0	7.311	123.0	137.0	160.0	233.0	868.0
3.178	66.6	79.3	93.3	103.0	265.0	7.311	123.0	137.0	160.0	234.0	870.0
3.178	66.9	79.5	93.5	104.0	266.0	7.311	123.0	137.0	161.0	234.0	872.0
3.178	67.1	79.7	93.7	104.0	267.0	7.311	124.0	138.0	161.0	235.0	874.0
3.178	67.4	79.9	93.8	105.0	268.0	7.311	124.0	138.0	161.0	236.0	876.0
3.178	67.6	80.1	94.1	105.0	268.0	7.311	124.0	138.0	162.0	236.0	878.0
4.212	80.7	96.6	111.0	138.0	352.0	7.311	125.0	139.0	162.0	237.0	880.0
4.212	81.0	96.7	112.0	138.0	353.0	7.311	125.0	139.0	162.0	238.0	882.0
4.212	81.3	97.0	112.0	138.0	355.0	7.311	125.0	139.0	163.0	238.0	884.0
4.212	81.5	97.4	112.0	139.0	357.0	7.311	126.0	140.0	163.0	239.0	886.0
4.212	81.8	97.6	112.0	139.0	358.0	7.311	126.0	140.0	163.0	240.0	888.0
4.212	82.0	97.9	112.0	140.0	360.0						

[0109] 表2不同夹持力(F,单位N)下白及不同叶位叶片的生理电阻(M $\Omega$ )

[0110]

F	第一叶位	第二叶位	第三叶位	第四叶位	第五叶位	F	第一叶位	第二叶位	第三叶位	第四叶位	第五叶位
1.139	9.870	15.100	6.890	6.640	1.100	4.212	2.630	2.140	1.870	1.300	0.317
1.139	10.500	15.000	6.920	6.550	1.100	4.212	2.620	2.130	1.870	1.290	0.315
1.139	10.200	14.900	6.970	6.470	1.100	4.212	2.620	2.130	1.880	1.300	0.313
1.139	10.300	14.800	7.060	6.390	1.100	4.212	2.610	2.120	1.880	1.300	0.312
1.139	10.900	14.600	7.140	6.310	1.090	4.212	2.570	2.120	1.880		0.311
1.139	9.170	14.500	7.230	6.240	1.090	5.245	2.140	1.840	1.740	1.150	0.251
1.139	10.700	14.400	7.320	6.170	1.090	5.245	2.130	1.840	1.720	1.150	0.247
1.139	11.200	14.400	7.390	6.100	1.090	5.245	2.120	1.840	1.720	1.150	0.245
1.139	10.600	14.200	7.480	6.040	1.080	5.245	2.120	1.830	1.720	1.140	0.244
1.139	10.300	14.200	7.530	5.970	1.080	5.245	2.110	1.830	1.710	1.130	0.242
1.139	10.500	14.000	7.560	5.920	1.080	5.245	2.110	1.820	1.710	1.120	0.241
2.149	4.840	4.690	3.410	2.920	0.631	5.245	2.110	1.820	1.710	1.120	0.240
2.149	4.770	4.550	3.390	2.910	0.629	5.245	2.110	1.810	1.710	1.120	0.239
2.149	4.700	4.490	3.400	2.890	0.627	5.245	2.100	1.810	1.710	1.110	0.238
2.149	4.620	4.450	3.400	2.870	0.625	5.245	2.100	1.810	1.700	1.110	0.237
2.149	4.550	4.410	3.400	2.850	0.623	5.245	2.090	1.800	1.700	1.110	0.236
2.149	4.510	4.370	3.390	2.830	0.621	6.262	1.930	1.590	1.530	0.937	0.194
2.149	4.480	4.330	3.390	2.820	0.620	6.262	1.930	1.590	1.530	0.934	0.193
2.149	4.470	4.290	3.390	2.800	0.619	6.262	1.920	1.590	1.520	0.935	0.192
2.149	4.460	4.280	3.390	2.790	0.617	6.262	1.920	1.580	1.520	0.933	0.192
2.149	4.430	4.240	3.370	2.780	0.616	6.262	1.910	1.580	1.520	0.932	0.190
2.149	4.410	4.170	3.350	2.760	0.614	6.262	1.910	1.570	1.520	0.930	0.189
3.178	3.550	2.850	2.220	1.940	0.431	6.262	1.900	1.570	1.510	0.929	0.188
3.178	3.530	2.840	2.210	1.940	0.430	6.262	1.900	1.570	1.510	0.927	0.188
3.178	3.510	2.830	2.210	1.920	0.429	6.262	1.890	1.560	1.510	0.926	0.188
3.178	3.470	2.830	2.210	1.900	0.428	6.262	1.890	1.560	1.500	0.924	0.187
3.178	3.450	2.820	2.210	1.890	0.427	6.262	1.890	1.560	1.500	0.925	0.186
3.178	3.440	2.820	2.210	1.880	0.426	7.311	1.770	1.470	1.400	0.851	0.140
3.178	3.430	2.810	2.210	1.870	0.424	7.311	1.760	1.470	1.400	0.850	0.140
3.178	3.410	2.800	2.210	1.870	0.423	7.311	1.750	1.460	1.390	0.849	0.139
3.178	3.390	2.790	2.210	1.860	0.421	7.311	1.750	1.460	1.390	0.847	0.139
3.178	3.380	2.780	2.210	1.850	0.420	7.311	1.750	1.460	1.390	0.846	0.139
3.178	3.360	2.770	2.210	1.840	0.419	7.311	1.740	1.450	1.380	0.845	0.138
4.212	2.690	2.200	1.870	1.340	0.324	7.311	1.740	1.450	1.380	0.844	0.138
4.212	2.680	2.190	1.870	1.330	0.323	7.311	1.740	1.450	1.380	0.843	0.138
4.212	2.670	2.160	1.870	1.330	0.322	7.311	1.730	1.440	1.380	0.841	0.138
4.212	2.660	2.140	1.870	1.330	0.321	7.311	1.730	1.440	1.370	0.839	0.138
4.212	2.650	2.140	1.870	1.320	0.319	7.311	1.730	1.440	1.370	0.837	0.137
4.212	2.640	2.140	1.870	1.320	0.318						

[0111] 表3不同夹持力(F,单位N)下白及不同叶位叶片的生理阻抗(M $\Omega$ )

[0112]

F	第一叶位	第二叶位	第三叶位	第四叶位	第五叶位	F	第一叶位	第二叶位	第三叶位	第四叶位	第五叶位
1.139	1.860	1.880	1.520	1.470	0.457	4.212	0.627	0.524	0.457	0.364	0.133
1.139	1.860	1.870	1.510	1.460	0.456	4.212	0.625	0.523	0.456	0.362	0.133
1.139	1.840	1.860	1.510	1.440	0.454	4.212	0.624	0.522	0.455	0.361	0.132
1.139	1.840	1.850	1.500	1.430	0.453	4.212	0.622	0.521	0.454	0.361	0.132
1.139	1.820	1.850	1.490	1.420	0.451	4.212	0.618	0.520	0.453	0.360	0.131
1.139	1.800	1.840	1.490	1.410	0.449	5.245	0.547	0.462	0.405	0.321	0.104
1.139	1.810	1.830	1.480	1.400	0.448	5.245	0.545	0.462	0.403	0.320	0.103
1.139	1.810	1.820	1.480	1.400	0.446	5.245	0.543	0.461	0.402	0.318	0.103
1.139	1.800	1.810	1.470	1.390	0.445	5.245	0.542	0.460	0.401	0.318	0.102
1.139	1.780	1.800	1.460	1.380	0.444	5.245	0.541	0.459	0.400	0.314	0.102
1.139	1.780	1.790	1.460	1.370	0.442	5.245	0.539	0.458	0.399	0.310	0.101
2.149	1.070	0.927	0.783	0.754	0.262	5.245	0.537	0.457	0.399	0.309	0.101
2.149	1.060	0.921	0.780	0.749	0.261	5.245	0.536	0.456	0.398	0.308	0.100
2.149	1.050	0.916	0.776	0.744	0.260	5.245	0.534	0.455	0.397	0.308	0.100
2.149	1.050	0.912	0.774	0.739	0.259	5.245	0.533	0.454	0.396	0.306	0.099
2.149	1.040	0.908	0.771	0.734	0.258	5.245	0.532	0.453	0.395	0.305	0.099
2.149	1.030	0.905	0.768	0.730	0.258	6.262	0.480	0.414	0.356	0.264	0.080
2.149	1.030	0.903	0.765	0.726	0.257	6.262	0.479	0.413	0.356	0.263	0.079
2.149	1.020	0.899	0.762	0.722	0.256	6.262	0.478	0.412	0.355	0.261	0.079
2.149	1.020	0.894	0.760	0.718	0.255	6.262	0.477	0.411	0.354	0.260	0.079
2.149	1.020	0.890	0.757	0.715	0.255	6.262	0.475	0.410	0.354	0.259	0.078
2.149	1.010	0.886	0.754	0.711	0.254	6.262	0.474	0.410	0.353	0.258	0.078
3.178	0.795	0.661	0.558	0.511	0.185	6.262	0.473	0.409	0.352	0.258	0.078
3.178	0.792	0.659	0.557	0.508	0.184	6.262	0.471	0.408	0.351	0.257	0.077
3.178	0.789	0.658	0.556	0.505	0.184	6.262	0.470	0.407	0.351	0.256	0.077
3.178	0.785	0.656	0.554	0.502	0.183	6.262	0.469	0.406	0.350	0.255	0.077
3.178	0.782	0.655	0.553	0.500	0.182	6.262	0.468	0.406	0.349	0.254	0.077
3.178	0.779	0.653	0.552	0.498	0.182	7.311	0.420	0.375	0.323	0.220	0.056
3.178	0.776	0.651	0.551	0.496	0.181	7.311	0.419	0.374	0.322	0.219	0.056
3.178	0.772	0.649	0.550	0.494	0.180	7.311	0.418	0.373	0.321	0.219	0.056
3.178	0.770	0.648	0.549	0.491	0.180	7.311	0.417	0.372	0.321	0.218	0.056
3.178	0.767	0.646	0.548	0.489	0.179	7.311	0.415	0.372	0.320	0.218	0.056
3.178	0.764	0.645	0.547	0.487	0.179	7.311	0.414	0.371	0.319	0.217	0.055
4.212	0.638	0.533	0.462	0.370	0.137	7.311	0.413	0.370	0.319	0.216	0.055
4.212	0.636	0.532	0.461	0.369	0.136	7.311	0.412	0.369	0.318	0.216	0.055
4.212	0.634	0.530	0.460	0.368	0.136	7.311	0.411	0.368	0.318	0.215	0.055
4.212	0.632	0.528	0.459	0.367	0.135	7.311	0.410	0.367	0.317	0.215	0.055
4.212	0.630	0.527	0.458	0.366	0.134	7.311	0.409	0.367	0.316	0.214	0.055
4.212	0.628	0.526	0.457	0.365	0.134						

[0113] 表4白及不同叶位叶片的生理电容(C)随夹持力(F)变化模型(C-F)及参数

[0114]

叶位	生理电容 (C) 随夹持力 (F) 变化模型 (C-F) 方程和参数		
	$x_0$	h	方程
第一	15.969	15.024	$C = 15.969 + 15.024 F$ $R^2 = 0.993, P < 0.0001, n = 76$
第二	18.435	17.271	$C = 18.435 + 17.271 F$ $R^2 = 0.975, P < 0.0001, n = 76$
第三	22.414	19.927	$C = 22.414 + 19.927 F$ $R^2 = 0.979, P < 0.0001, n = 76$
第四	1.445	31.715	$C = 1.445 + 31.715 F$ $R^2 = 0.997, P < 0.0001, n = 76$
第五	-82.834	117.747	$C = -82.834 + 117.747 F$ $R^2 = 0.950, P < 0.0001, n = 76$

[0115] 表5白及不同叶位叶片的生理电阻 (R) 随夹持力 (F) 变化模型 (R-F) 及参数

叶位	生理电阻 (R) 随夹持力 (F) 变化模型 (R-F) 方程和参数			
	$y_0$	$k_1$	$b_1$	方程
第一	1.994	26.679	1.023	$R = 1.994 + 26.679 e^{-1.023 F}$ $R^2 = 0.986, P < 0.0001, n = 76$
第二	1.766	69.316	1.486	$R = 1.766 + 69.316 e^{-1.486 F}$ $R^2 = 0.996, P < 0.0001, n = 76$
第三	1.537	19.187	1.070	$R = 1.537 + 19.187 e^{-1.070 F}$ $R^2 = 0.996, P < 0.0001, n = 76$
第四	0.925	15.449	0.939	$R = 0.925 + 15.449 e^{-0.939 F}$ $R^2 = 0.988, P < 0.0001, n = 75$
第五	0.145	1.853	0.601	$R = 0.145 + 1.853 e^{-0.601 F}$ $R^2 = 0.995, P < 0.0001, n = 76$

[0117] 表6白及不同叶位叶片的生理阻抗 (Z) 随夹持力 (F) 变化模型 (Z-F) 及参数

[0118]

叶位	生理阻抗 (Z) 随夹持力 (F) 变化模型 (Z-F) 方程和参数		
----	------------------------------------	--	--



	$p_0$	$k_2$	$b_2$	方程
第一	0.448	3.128	0.735	$Z=0.448+3.128 e^{-0.735 F}$ $R^2=0.993, P<0.0001, n=76$
第二	0.412	4.193	0.954	$Z=0.412+4.193 e^{-0.954 F}$ $R^2=0.995, P<0.0001, n=76$
[0119] 第三	0.353	3.170	0.909	$Z=0.353+3.170 e^{-0.909 F}$ $R^2=0.995, P<0.0001, n=76$
第四	0.243	2.858	0.789	$Z=0.243+2.858 e^{-0.789 F}$ $R^2=0.995, P<0.0001, n=76$
第五	0.056	0.742	0.571	$Z=0.056+0.742 e^{-0.571 F}$ $R^2=0.994, P<0.0001, n=76$

[0120] 表7不同植物叶片的比有效厚度 $d$  ( $10^{-12}m$ )、基于生理电阻的植物叶片细胞单位代谢能  $\Delta G_{R-E}$  ( $10^{12}J m^{-1}$ )、基于生理阻抗的植物叶片细胞单位代谢能  $\Delta G_{Z-E}$  ( $10^{12}J m^{-1}$ )、基于生理电阻的植物叶片细胞代谢能  $\Delta G_{R-E}$  (J)、基于生理阻抗的植物叶片细胞代谢能  $\Delta G_{Z-E}$  (J) 以及植物叶片细胞代谢能  $\Delta G_B$  (J)

叶位	$d$	$\Delta G_{R-E}$	$\Delta G_{Z-E}$	$\Delta G_R$	$\Delta G_Z$	$\Delta G_B$
第一	16.902	2.535	2.647	42.839	44.741	43.790
第二	19.430	2.470	2.431	47.984	47.228	47.606
[0121] 第三	22.418	2.359	2.415	52.885	54.130	53.508
第四	35.679	2.997	3.123	106.932	111.422	109.177
第五	132.645	4.245	4.515	562.287	598.036	580.162

[0122] 本发明的实施效果如下：

[0123] 从表7中可以看出，不同叶位的叶片比有效厚度明显不同，第五叶位的叶片比有效厚度最大，第一叶位的叶片比有效厚度最小，从第一展开叶（第一叶位）到第五展开叶（第五叶位），叶片比有效厚度逐渐增大，叶片比有效厚度越大，反映其叶片细胞越大，液泡越大，表明其越趋于成熟，其水分储存能力越强。这说明白及叶片基部叶为成熟叶，而顶部叶为新生叶，基部叶具有较强的储水能力。

[0124] 从表7中还可以看出，不同叶位白及叶片的基于生理电阻的植物叶片细胞单位代谢能  $\Delta G_{R-E}$  ( $10^{12}J m^{-1}$ )、基于生理阻抗的植物叶片细胞单位代谢能  $\Delta G_{Z-E}$  ( $10^{12}J m^{-1}$ )、基于生理电阻的植物叶片细胞代谢能  $\Delta G_{R-E}$  (J)、基于生理阻抗的植物叶片细胞代谢能  $\Delta G_{Z-E}$  (J) 以及植物叶片细胞代谢能  $\Delta G_B$  (J) 都不相同，而且同一叶片基于生理电阻的植物叶片细胞单位代谢能  $\Delta G_{R-E}$  ( $10^{12}J m^{-1}$ ) 和基于生理阻抗的植物叶片细胞单位代谢能  $\Delta G_{Z-E}$  ( $10^{12}J m^{-1}$ ) 相

差较小,差异不到5%,同时同一叶片基于生理电阻的植物叶片细胞代谢能  $\Delta G_{R-E}$  (J)、基于生理阻抗的植物叶片细胞代谢能  $\Delta G_{Z-E}$  (J) 以及植物叶片细胞代谢能  $\Delta G_B$  (J) 差异较小,差异不到3%,这说明本发明具有很好的可信性。

[0125] 从表7中还可以看出,叶位的不同对植物叶片细胞代谢能的影响不同,第一叶位叶片(第一展开叶)细胞代谢能最小,第五叶位叶片(基部叶)细胞代谢能最大,这说明新生叶需要从成熟叶中获取水分和营养,相比成熟叶来说,新生叶具有库的特征,而成熟叶则具有源的特征。从第一叶位至第五叶位(基部)叶片,细胞代谢能逐渐增大,也即对叶片的水分和营养来说,从基部到顶部发生了源库的转化,转折点在第三展开叶至第四展开叶之间。相比于“单头型”白及组培种茎来说,马鞍型白及组培种茎,因为两倍的源库比,加速了白及新生叶的生长发育,使之在生产上更具有优势。另外,高产白及都具有基部叶肥大、脱落晚的特征,这些都可以用本发明测得的基部叶比有效厚度和细胞代谢能大来解释。

[0126] 上述虽然结合附图对本发明的具体实施方式进行了描述,但并非对本发明保护范围的限制,所属领域技术人员应该明白,在本发明的技术方案的基础上,本领域技术人员不需要付出创造性劳动即可做出的各种修改或变形仍在本发明的保护范围以内。

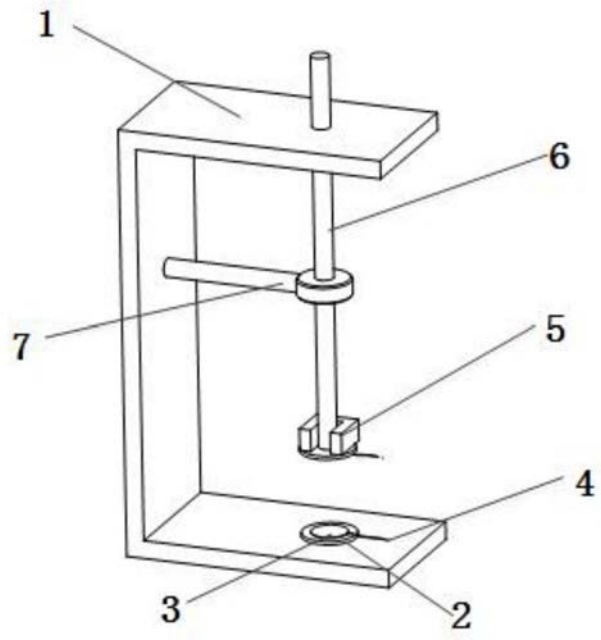


图1