

一种用 SigmaPlot 求 PV 曲线水分参数 ϕ_{tlp} 的方法^{*}

李洪建 狄晓艳 陈建文 王孟本^{**}

(山西大学黄土高原研究所, 太原 030006)

摘 要 以扶桑(*Hibiscus Rose-sinensis*)为例,用 SigmaPlot for Windows 软件分别绘制 PV 曲线双曲线和直线部分的散点图,同时拟合双曲线和直线方程。然后通过联立方程组求出质壁分离点的坐标值,计算出质壁分离时的渗透势(ϕ_{lp})、相对水含量(RWC_{lp})和相对渗透水含量($ROWC_{lp}$)。并与常用的直线回归法的结果进行了比较。该方法具有简单、准确、快速等特点,是获得 PV 曲线主要参数的一种新方法。

关键词 PV 曲线;质壁分离点;双曲线方程;直线方程;方程拟合

A method of calculating osmotic water potential (ϕ_{tlp}) at turgor loss point in PV curve

LI Hong-Jian DI Xiao-Yan CHEN Jian-Wen WANG Meng-Ben

(Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006)

Abstract Taking *Hibiscus Rose-sinensis* as an example and using SigmaPlot (Demo) for windows software, the authors introduce a method of precisely calculating the osmotic potential at turgor loss point (ϕ_{lp}) in PV curve, with which other water parameters, such as relative water content at turgor loss point (RWC_{lp}) and relative osmotic water content at turgor loss point ($ROWC_{lp}$), can be calculated exactly. Firstly, two scatter curves are plotted respectively with SigmaPlot Graph Wizard, then the two curves are fitted respectively with hyperbolic and linear patterns and regression coefficients are got. Finally, using the coefficients the authors calculate the ϕ_{lp} , RWC_{lp} and $ROWC_{lp}$ and make a comparison between the results and those of linear regression method. The method presented is simple and convenient to use.

Key words PV curve; turgor loss point; hyperbolic equation; linear equation; equation fitting

自王万里^[1]对 PV 技术的基本原理、曲线的绘制方法^[2]等报道以来, PV 技术在植物生理^[3, 4]、植物抗旱生理指标^[5, 6]、植物水分参数与环境 and 种源的关系^[7]以及在水分胁迫条件下植物水分参数的变化规律^[8~10]等方面的研究都取得了很大进展。在理论上, PV 曲线由双曲线、直线两部分组成, 二

者交点的纵坐标值的倒数即质壁分离点渗透势(ϕ_{lp}), 横坐标值即为质壁分离点时的累计出水量。但是传统的质壁分离点的渗透势 ϕ_{lp} 仅根据直线部分的最大水势倒数(即直线上距纵坐标轴最近一点的水势倒数)而推测, 由于它不是根据理论质壁分离点而求得, 从而影响了 ϕ_{lp} 值的准确

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(30170150); 山西省自然科学基金项目(20011079)

第一作者简介: 李洪建(1958-), 男, 副教授, 主要从事植物生理生态及土壤水分生态研究。

收稿日期: 2003-05-27

^{**} 通讯作者: mbwang@sxu.edu.cn

性。刘建伟等^[11]应用美国加州大学 Paul J. Schultze (1988) 编制的 PV 曲线软件包, 用切线法求解质壁分离点及其它参数, 但是该方法在国内应用较少。本文以观赏植物扶桑 (*Hibiscus Rose-sinensis*) 为例, 介绍一种用 SigmaPlot (Demo) for Windows 软件求解 PV 曲线质壁分离点渗透势 (ϕ_{dp})、相对含水量 (RWC_{dp}) 和相对渗透水含量 ($ROWC_{dp}$) 准确值的方法。

1 PV 曲线的制作原理和参数求解

1.1 PV 曲线绘标方法及其原理

PV 曲线的制作采用 H. T. Hammel 逐渐升压法^[12]。原始数据的获得方法见文献^[7,12]。PV 曲线的制作原理是: 植物细胞失水的初期, 组织的水势等于压力势与渗透势之和, 即 $\phi_t = \phi_o + \phi_p$, 水势的降低主要由于膨压的减少, PV 曲线中 PV 关系符合公式: $(\phi_t - \phi_p) \cdot V = \text{常量}$, 其中 ϕ_t 为平衡压的负值, ϕ_o 为渗透势, ϕ_p 为膨压, V 为渗透水含量。此时, 水势倒数 $1/\phi$ 与 V 呈双曲线关系。当植物组织因失水而达到质壁分离点时, $\phi_p = 0$, 水势就只有渗透势。之后, $\phi_t \cdot V$ 等于常量, 二者呈线性关系。同理, 在失水初期, $1/\phi$ 与饱和差 $(1 - R)$ 成双曲线关系 (R 为相对含水量; $R = (V_t - V)/V_t$; 式中: V_t 为饱和枝条的全含水量, $V_t = (\text{枝条饱和重} - \text{烘干重})$)。在失去膨压后, $1/\phi$ 与 $(1 - R)$ 亦为线性关系。因此, PV 曲线可用两种方法绘制, 以纵坐标表明水势的倒数 $1/\phi$, 横坐标表明出水积累量 V , 即被压出的渗透水量; 或者, 以纵坐标表明水势的倒数 $1/\phi$, 横坐标表明饱和差 $(1 - R)$ 。

1.2 PV 曲线参数的求解原理

由于整个 PV 曲线由双曲线和直线两部分构成, 二者交点的纵坐标为质壁分离时的渗透势的倒数, 即 $1/\phi_{dp}$; 而横坐标所代表的则取决于 PV 曲线横坐标, 或是质壁分离时植物受压后排出的总水量 V_e ^[12]; 或是质壁分离时植物的饱和差 $(1 - R)$ ^[11], 它是计算 RWC_{dp} 和 $ROWC_{dp}$ 的重要值。因此分别拟合双曲线和直线方程, 求解联立方程组, 即可得双曲线和直线的交点坐标值:

$$\begin{cases} y = y_0 + \frac{ab}{b+x} & (1) \text{ 或 } \begin{cases} y = \frac{ab}{b+x} \\ y = y_1 + a_1x \end{cases} & (2) \\ y = y_1 + a_1x \end{cases}$$

解(1)、(2)得: $x = \frac{y_0 - y_1 - a_1b \sqrt{a_1b - y_0 + y_1)^2 + 4a_1b(a + y_0 + y_1)}}{2a_1}$ (3)

将 x 值代入(2) 得: $y = y_1 + a_1x$ (4)
因此, 求出 y_0 , a , b 及 y_1 , a_1 值, 可得到 x , y 值。
 x 值为质壁分离时的累计出水量 (横坐标为 V 时), 或质壁分离时的饱和差 (横坐标为 $1 - R$ 时);
 y 为质壁分离时的水势倒数。

2 用 SigmaPlot 求解方程参数

2.1 数据输入格式

将 PV 曲线的原始数据输入 SigmaPlot, 其格式如下(表 1)。第 1 列为测定次数, 第 2 列 (Column 1) 为累计出水量 V 值 (或者用饱和差 $(1 - R)$ 值)。第 3 列 (Column 2) 为双曲线部分对应出水量的水势倒数 $1/\phi_1$ (MPa) 数据, 第 4 列 (Column 3) 为直线部分对应出水量的水势倒数 $1/\phi_2$ (MPa) 数据。第 3 列和第 4 列以使 PV 曲线的直线部分的回归系数不小于 0.99 的最后一对数据 (自后向前回归) 为分界点, 其余不能包括在直线内的点为拟合双曲线的数据。

2.2 PV 曲线散点图绘制及其方程参数求解

2.2.1 PV 曲线散点图绘制

PV 曲线散点图绘制步骤如下: (1) 选定 V (或 $1 - R$)、 $1/\phi_1$ 、 $1/\phi_2$ 3 列。(2) 在菜单栏中选择 Graph / Create Graph ..., 然后选择 Graph types 中的 Scatter Plot, 下一步, 单击 Multiple Scatter, 下一步, 在 Data format 中选 X Many Y, 下一步; 在 Selected columns 分别选 X: Column1, Y1: Column2, Y2: Column3, 单击完成, 即可得散点图 (图 1, 左图横坐标为累计出水量 V ; 右图横坐标为饱和差 $(1 - R)$), 图中直线部分为空心点, 双曲线部分为实心点。

2.2.2 方程拟合及参数求解

(1) 双曲线拟合

选定图形中的任意实心点, 单击右键, 选 Fit Curve, 在 Equation Category 下选 Hyperbola; 在 Equation Name 下选 Hyperbolic Decay, 3 Par (或 Hyperbolic Decay, Par, 视回归系数而定), 单击 Options, 在 Fit with Weight 下选 None, 单击 Next, 观看双曲线的各个参数值, 然后单击 Next 然后选 Report, 最后, 单击 Finish, 即可得拟合曲线。

(2) 直线拟合

选定图形中的任意空心点, 单击右键, 选 Fit Curve/ Polynomial/ Linear, 单击 Options, 在 Fit with weight 下选 None, 单击 Next, 看拟合参数值, 然后, 单击 Next 至 Do you want to, 标记 Add curve to 和 Extend fit to axes, 单击完成, 即可得拟合直线。

(3) 方程中的各参数值

在主界面中点击 View Notebook 工具, 然后分别单击双曲线和直线的拟合结果 Report, 即可得到双曲线和直线拟合参数 a , b , y_0 , a_1 和 y_1 值(表 2)

以及方程的相关系数。可以看出, 双曲线和直线方程的相关系数均大于 0. 99, 达极显著水平 ($p < 0. 01$)。

表 1 扶桑 (*Hibiscus Rose-sinensis*) 的累计出水量与水势倒数数据*

Table 1 Data of accumulated lost water under pressure and $1/\psi$

测定次数 Order	Column 1	Column 2	Column 3
	$V(\text{g})$ or $(1- R)$	$1/\psi_1(-\text{MPa})$	$1/\psi_2(-\text{MPa})$
1	0. 006 2 (0. 004 1)	1. 566 5	
2	0. 011 3 (0. 007 6)	1. 161 1	
3	0. 019 5 (0. 013 1)	0. 977 2	
4	0. 029 8 (0. 020 0)	0. 822 4	
5	0. 036 0 (0. 024 1)	0. 753 4	
6	0. 044 2 (0. 029 6)	0. 699 9	
7	0. 054 5 (0. 036 5)	0. 657 9	
8	0. 078 1 (0. 052 3)		0. 616 8
9	0. 106 9 (0. 071 6)		0. 577 1
10	0. 145 0 (0. 097 0)		0. 548 3
11	0. 197 4 (0. 132 1)		0. 519 4
12	0. 235 5 (0. 157 6)		0. 493 5
13	0. 264 3 (0. 176 9)		0. 472 2
14	0. 301 3 (0. 201 7)		0. 448 6

* V 为累计出水量 Accumulated lost water (g); $1- R$ 为饱和差 Saturation deficit; $1/\psi_i(-\text{MPa})$

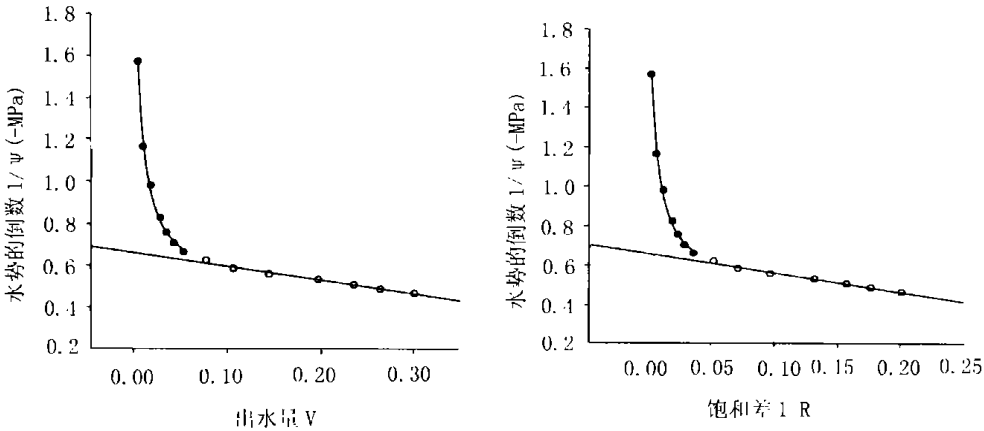


图 1 扶桑(*H. Rose-sinensis*)两种绘标方式的 PV 曲线, 左($1/\psi$ 与 V), 右 ($1/\psi$ 与 $1- R$)

Fig. 1 PV curves of *H. Rose-sinensis* in two methods. Left ($1/\psi$ against V); Right ($1/\psi$ against $1-R$)

表 2 两种绘标方式下回归方程中的系数

Table 2 Regression coefficients of hyperbolic and linear equations in two plotting methods

树种 Species	绘标方式 Plotting method	双曲线 Hyperbolic equation			直线 Linear equation		相关系数 r Correlation coefficient	
		a	b	γ_0	a_1	γ_1	Hyperbola	Linear
扶桑	(1/ ψ) 与 (V)	2. 815 0	0.003 8	0. 485 5	- 0. 712 3	0. 660 3	0. 998	0. 993
<i>H. Rose-sinensis</i>	(1/ ψ) 与 (1- R)	2. 666 1	0.002 8	0. 479 5	- 1. 064 3	0. 660 3	0. 998	0. 993

2. 2. 3 PV 曲线水分参数求解

将表 2 中的 a , b , γ_0 , a_1 和 γ_1 值代入方程 (3), (4), 可得 x 值(方程(3)中(取+))和 y 值。 x 为膨压为零时的累计出水量 V_e (横坐标为 V 时), 或膨压为零时的饱和差 $1- R$ (横坐标为 $1- R$ 时); y 为膨压为零时的水势倒数值。由 V_e 和 $1- R$ 可计算出

RWC_{tlp} 、 $ROWC_{tlp}$ 参数值(表 3)。以上计算可以在 SigmaPlot 主界面 Transforms 菜单下利用 Quick Transform ... 或在 User Defined ... 下适当编程进行计算, 非常简单。可以看出, 2 种坐标得到的 PV 曲线参数非接近。

表 3 两种绘标下的 x , y 及水分参数值

Table 3 Calculated x , y values and water parameters with two plotting methods

树种 Species	绘标方法 Plotting method	x	y	ϕ_{dp}	RWC_{dp}	$ROWC_{dp}$
扶桑	(1/ ψ) 与 (V)	0. 0983	0. 5903	1. 6940	0. 9342	0. 8940
<i>H. Rose-sinensis</i>	(1/ ψ) 与 (1- R)	0. 0622	0. 5941	1. 6833	0. 9378	0. 8997

RWC_{tlp} : 质壁分离点相对水含量[($V_i - x$) / V_i], 本例中 $V_i = 1.494$ g
 $ROWC_{dp}$: 质壁分离点相对渗透水含量[($V_0 - x$) / V_0]

2. 3 联立求解法与直线法结果的比较

为了比较两种方法计算 PV 曲线参数的结果, 我们用 $1/ \psi$ 与 V 坐标的 PV 曲线对 3 个受双曲线影响的参数(ϕ_{tlp} , RWC_{tlp} , $ROWC_{tlp}$) 用联立求解法与直线法计算的结果进行了比较(表 4)。结果表明, 两

种方法存在一定差异, ϕ_{tlp} 的差值在 - 0. 09 ~ 0. 223 (- MPa) 之间。 RWC_{tlp} 和 $ROWC_{tlp}$ 差值分别在 - 0. 043~ 0. 030 和 - 0. 067~ 0. 042 之间。而联立求解法所得结果与双曲线和直线的交点对应, 同质壁分离点理论值相符合, 所以更为准确。

表 4 两种方法 3 个 PV 曲线参数的比较结果

Table 4 Result comparison of the 3 parameters using two methods

树种 Species	方法 Method	x	y	ϕ_{dp}	RWC_{dp}	$ROWC_{dp}$
扶桑	联立法 Simultaneous	0. 098 3	0. 590 3	1. 694 0	0. 934 2	0. 894 0
<i>H. Rose-sinensis</i>	直线法 Linear	0. 078 1	0. 616 8	1. 621 3	0. 947 7	0. 916 5
白皮松	联立法 Simultaneous	0. 038 1	0. 393 7	2. 540 0	0. 930 0	0. 825 3
<i>Pinus bungeana</i>	直线法 Linear	0. 046 5	0. 379 6	2. 634 0	0. 914 5	0. 786 8
柠条	联立法 Simultaneous	0. 185 7	0. 405 4	2. 466 8	0. 863 6	0. 790 8
<i>Caragana . korshinskii</i>	直线法 Linear	0. 126 6	0. 446 6	2. 239 1	0. 907 0	0. 857 4

3 小结

ϕ_{tlp} 是表征植物耐旱性和水分状况的关键参数。分别对双曲线和直线部分的数据进行回归, 然后通过联立方程组求出精确的质壁分离点, 计算出

质壁分离时的相对水含量和相对渗透水含量。并与常用的直线回归法的结果进行了比较。该方法具有简单、准确、快速等特点, 是 PV 曲线中重要参数获得的一种新方法。

参 考 文 献

1. 王万里. 压力室(PRESSURE CHAMBER)在植物水分状况研究中的应用. 植物生理学通讯, 1984, (3): 52~ 57

2. Tyree M T, Hammel H T. The measurement of the turgor pressure and the water relation of plants by the pressure-bomb technique. J Exp Bot, 1972, 23(74): 267~ 282

3. 郭连生, 田有亮. 对几种针阔叶树种耐旱性生理指标的研究. 林业科学, 1989, 25(5): 389~ 394

4. 郭连生, 田有亮. 运用 PV 技术对华北常见造林树种耐旱性评价的研究. 内蒙古林学院学报(自然科学版), 1998, 20(3): 1~ 9

5. 李吉跃. PV 技术在油松侧柏苗木抗旱特性研究中的应用. 北京林业大学学报, 1989, 11(1): 3~ 11

6. 柴宝峰, 王孟本, 李洪建, 等. 晋西人工防护林乡土树种抗旱性研究. 水土保持学报, 2000, 14(1): 28~ 32

7. 李庆梅, 徐化成. 油松 PV 曲线主要水分参数随季节和种源的变化. 植物生态学与植物学学报. 1992, 16(4): 326~ 335

8. 谢寅峰, 沈惠娟, 罗爱珍. 水分胁迫下南方四种针叶树幼苗水分参数的测定. 南京林业大学学报, 1999, 23(1): 41~ 44

9. 李良厚, 贾志英, 付祥健. 土壤水分胁迫下苗木水分参数变化的研究. 河南农业大学学报, 1999, 33(3): 93~ 99

10. 李海涛, 陈灵芝. 暖温带森林生态系统主要树种若干水分参数的季节变化. 植物生态学报, 1998, 22(3): 202~ 213

11. 刘建伟, 刘雅荣, 王世绩. PV 技术的计算机处理及其在树木水分关系研究中的应用. 生态学杂志, 1994, 13(1): 60~ 63

12. 王孟本, 李洪建. 黄土高原人工林水分生态研究. 北京: 中国林业出版社, 2001