

关于植物细胞吸水的吸取力新公式的热力学理论

康 显 础

(华北农机学院物理组)

(一) 引 言

植物细胞吸水问题,是植物生理学中有争论的一个重要的基本问题。通常把细胞吸水的原因仅归结于细胞液渗透压的作用(假定细胞是一个半渗透性的系统),根据此种看法,把吸水的吸取力用以下公式表示:

$$Sp = op - Wp^{[1]} \quad (1)$$

其中 Sp 为细胞吸水的吸取力, op 为细胞液的渗透压, Wp 为胀压。单位均为大气压。1941年汤、王对此问题提出了一个普遍的热力学理论^[2]。1958年王又用热力学理论推导出吸取力公式(1)的形式^[3]。但不少实验指出,把植物细胞原生质简单看作是渗透膜是不全面的,还应当把它看作是生活物质,植物体内进行新陈代谢,植物细胞与水份代谢都是生活物质的一个重要特性。因此,植物细胞的吸水原因不仅与细胞液的渗透压有关,还同时应考虑原生质的作用,因原生质本身具有主动分泌水份进入细胞液的能力,此能力称为原生质的“活跃压力”。1939年, Bennet-Clark 等用质壁分离法测得细胞液的渗透压,往往显著高于用冰点降低法测得的细胞液的渗透压。他们指出:“在细胞液里可观察到水份从细胞的原生质中活跃的分泌出来,这种分泌作用也使植物细胞总的静压力(即吸取力)增高^[4]。1939年, Mason 和 Phillis 用高压榨出的胞液,最初获得低的渗透压,被认为是细胞液“液汁”的渗透压,然而“杀死”它们后获得了比它高几倍的压力,被认为是原生质中出来的“液汁”的压力^[4]。1944年, Van-Overleek 等^[6]根据新的观点,提出了植物细胞吸水的吸取力新公式,即

$$Sp = op + Ap - Wp \quad (2)$$

式中 Ap 为细胞原生质的“活跃压力”。虽然此公式尚需通过实验进一步充实,但它对解释植物细胞的生长现象有重要的意义^[1]。

(二) 用热力学理论论证植物细胞吸水的二个因素

植物细胞原生质主要成份是蛋白质和拟脂物质,其中含有大量的水份,但不同状态下的细胞含水量差别很大,幼嫩的植物细胞中含水量可高达90%以上。如果植物细胞处在溶液中则具有吸水能力。其吸取力取决于细胞液的渗透压和原生质的“活跃压力”。

下面用热力学的吉布斯自由能判据来论证植物细胞吸水的二个因素。把植物细胞吸水看作一个系统包括三个部分,即溶液、原生质、细胞液。它们分别由细胞壁(及相邻的原生质膜)、细胞液膜隔开。并假定只有水能通过膜进入细胞液中,其他物质不能进入细胞液(因吸水时,其他物质进入细胞液比起水少得多)。

令 $G' = G'(T, p_0, N'_1, N'_0)$ 为溶液的吉布斯自由能。

$G = G(T, p, N_1, n)$ 为细胞液的吉布斯自由能。

$G'' = G''(T, p'', N''_1 \cdots N''_i)$ 为原生质的吉布斯自由能。

其中 T 为绝对温度, p_0 、 p 、 p'' 分别为溶液、细胞液、原生质的压强。 N'_1 为溶液中水的克分子数, n'_0 为溶液中溶质的克分子数。 N_1 为细胞液中水的克分子数, n 为细胞液中溶质的克分子数。 N''_1 为原生质中水的克分子数, $N''_i (i > 1)$ 为原生质中其他化学成份的克分子数。在克

分子数中只有 N'_1 、 N_1 、 N''_1 是变量,其他均视为不变量(比起水来,可看作不变或改变极小)。

系统中总的吉布斯自由能为

$$G = G' + G + G''$$

在吸水过程中,其改变量为

$$\delta G = \delta G' + \delta G + \delta G'' \quad (3)$$

在常温常压下

$$\delta G' = \frac{\partial G'}{\partial N'_1} \delta N'_1 \quad \delta G = \frac{\partial G}{\partial N_1} \delta N_1$$

$$\delta G'' = \frac{\partial G''}{\partial N''_1} \delta N''_1 + \sum_{i>1} \frac{\partial G''}{\partial N''_i} \delta N''_i$$

代入(3)式

$$\delta G = \frac{\partial G'}{\partial N'_1} \delta N'_1 + \frac{\partial G}{\partial N_1} \delta N_1 + \frac{\partial G''}{\partial N''_1} \delta N''_1 + \sum_{i>1} \frac{\partial G''}{\partial N''_i} \delta N''_i \quad (4)$$

从热力学理论^[10]

$$\frac{\partial G'}{\partial N'_1} = \mu'(T, p_0, N'_1)$$

$$\frac{\partial G}{\partial N_1} = \mu(T, p, N_1)$$

$$\frac{\partial G''}{\partial N''_1} = \mu''(T, p'', N''_1)$$

其中 $\mu'(T, p_0, N'_1)$ 为水在溶液中的化学势。 $\mu(T, p, N_1)$ 为水在细胞液中的化学势。 $\mu''(T, p'', N''_1)$ 为水在原生质中的化学势。在植物细胞吸水过程中,原生质中只有水的克分子数在改变,原生质中其他化学成份的克分子数不改变,所以

$$\sum_{i>1} \frac{\partial G''}{\partial N''_i} \delta N''_i = 0,$$

故(4)式可简化为

$$\delta G = \mu' \delta N'_1 + \mu \delta N_1 + \mu'' \delta N''_1 \quad (5)$$

植物细胞吸水时,细胞液中水的克分子数增加,相应溶液中和原生质中水的克分子数减少,但系统中总的水量保持不变,即

$$\delta N'_1 + \delta N_1 + \delta N''_1 = 0$$

$$\text{或 } \delta N_1 = -(\delta N'_1 + \delta N''_1)$$

代入(5)式得

$$\delta G = (\mu' - \mu) \delta N'_1 + (\mu'' - \mu) \delta N''_1 \quad (6)$$

根据吉布斯自由能判据,任何过程的平衡

态的吉布斯自由能函数值极小,即 $\delta G = 0$,在非平衡态过程中吉布斯自由能是减少,即 $\delta G < 0$ 。关于植物细胞的吸水过程是由非平衡态趋向于平衡态的过程,所以,总的吉布斯自由能为 $\delta G = (\mu' - \mu) \delta N'_1 + (\mu'' - \mu) \delta N''_1 \leq 0$ (7)

因为植物细胞吸水的二个因素,都涉及到细胞原生质的机构,故二个因素是有联系的。如果令 $\delta N''_1 = \alpha \delta N'_1$ 其中 α 为一未定参量,那么,(7)式可变为

$$\delta G = \{(\mu' - \mu) + \alpha(\mu'' - \mu)\} \delta N'_1 \leq 0 \quad (8)$$

因在吸水过程, $\delta N'_1 \leq 0$, 所以必须满足

$$\{(\mu' - \mu) + \alpha(\mu'' - \mu)\} \geq 0$$

植物细胞是否吸水取决于上式中括号内的二个部分。第一部分相当于细胞液渗透压因素,第二部分相当于细胞原生质的“活跃压力”因素。

有的文献指出^[9],细胞吸水时,原生质有两种作用。一方面起着渗透膜的作用,即性质上与半渗透膜相近的原生质和呈简单膜的细胞壁执行着膜的作用。当细胞处于溶液中,这时膜(指原生质)的外面是溶液,里面是细胞液,所以细胞液的渗透压因素引起吸水,是细胞液中水的 μ 与溶液中水的 μ' 共同作用的结果。水是否能通过膜进入细胞液中,取决于 $(\mu' - \mu)$ 之差。原生质除执行膜的作用外,还有原生质本身的作用,因原生质是生活物质,原生质的新陈代谢所产生的“活跃压力”,使原生质具有主动分泌水份进入细胞液的能力,这个能力也对细胞吸水的吸取力有贡献。所以,它与原生质中水的 μ'' 与细胞液中水的 μ 直接有关,故原生质的“活跃压力”引起吸水应与 $\alpha(\mu'' - \mu)$ 有关。

(三) 用热力学理论推导细胞吸水的吸取力新公式

根据热力学理论,决定植物细胞吸水相应的二个因素是 $(\mu' - \mu)$ 和 $\alpha(\mu'' - \mu)$ 二个部分。

令 $\Phi_1 = (\mu' - \mu)$, 为细胞液的渗透压所引起的吸水趋势。此项相当于王发表的结果^[3]。

令 $\Phi_2 = \alpha(\mu'' - \mu)$, 为原生质的“活跃压力”所引起的吸水趋势。则植物细胞总的吸水

趋势为

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 = (\mu' - \mu) + \alpha(\mu'' - \mu) \quad (9)$$

从热力学理论^[9] 看在细胞液中水的化学势为

$$\mu = RT(\varphi_1 + \ln p_1)$$

在溶液中水的化学势为

$$\mu' = RT(\varphi_1 + \ln p_1')$$

在原生质中水的化学势为

$$\mu'' = RT(\varphi_1 + \ln p_1'')$$

上述三式中 R 为普适常数, φ_1 为已知温度的函数, 上面三部分的 R 和 Φ 是相同的。 p_1 是与细胞液达到平衡时蒸气中的水蒸气分压, p_1' 是与溶液达到平衡时蒸气中的水蒸气分压, p_1'' 是与原生质溶液达到平衡时蒸气中的水蒸气分压。把上述结果代入(9)式, 得到细胞总的吸水趋势为

$$\Phi = RT \ln \left(\frac{p_1'}{p_1} \right) + \alpha RT \ln \left(\frac{p_1''}{p_1} \right) \quad (10)$$

(10) 式为植物细胞总的吸水趋势的普遍热力学表示式。

(10) 式中第一项已由王应用热力学的渗透理论推导出吸取力公式(1)相应的结果^[1]。即

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= RT \ln \left(\frac{p_1'}{p_1} \right) \\ &= (P - P')\bar{v} - (p - p_0)\bar{v} \end{aligned} \quad (11)$$

其中 P, P' 分别为细胞液, 溶液的渗透压。 $\bar{v}$ 为一个克分子水的体积平均值。 p 为细胞液的压强, p_0 为溶液的压强, $(p - p_0)$ 为膜的胀压即 (Wp) 。如果细胞外面的溶液是水, 则 $P' = 0$, 则(11)式可简化为

$$\Phi_1/\bar{v} = P - (p - p_0) \quad (12)$$

(12) 式就是植物生理学中习惯用的吸水吸取力公式(1)相应的形式。把(12)式代入(10)式, 最后得到与植物细胞吸水总的吸取力新公式(2)相应的形式。

$$\frac{\Phi}{\bar{v}} = P + \alpha \frac{RT}{\bar{v}} \ln \left(\frac{p_1''}{p_1} \right) - (p - p_0) \quad (13)$$

此公式再与(2)式相比较, 得到细胞原生质的“活跃压力”的热力学表示式

$$Ap = \alpha \frac{RT}{\bar{v}} \ln \left(\frac{p_1''}{p_1} \right) \quad (14)$$

(四) 原生质的“活跃压力”的近似公式

下面根据溶液理论, 进一步求细胞原生质的“活跃压力”。如果把细胞原生质溶液和细胞液看作近似理想溶液(在分子化学中也有用理想溶液的喇乌耳定律来测定溶液中的高分子化合物的分子量, 故也可把细胞原生质看作理想溶液, 近似地反映它的客观规律性, 虽然将原生质看作理想溶液与实际情况稍有出入)。根据理想溶液中的喇乌耳(Raoult)定律。

$$p_1'' = p_{10}'x_1'' \quad p_1 = p_{10}x_1$$

上二式中 x_1'', x_1 分别为细胞原生质中水的克分子分数和细胞液中水的克分子分数。 p_{10}', p_{10} 是比例系数, 表示纯蒸气分压, 其值相等, 即 $p_{10}' = p_{10}$, 把上述二式代入(14)式, 最后可得到细胞原生质的“活跃压力”的近似公式为

$$Ap = \alpha \frac{RT}{\bar{v}} \ln \left(\frac{x_1''}{x_1} \right) \quad (15)$$

公式中, α 为一系数, 可由实验确定。 $\bar{v}$ 为一克分子水的体积的平均值, 水 $\bar{v}$ 的值等于水的分子量。

此公式表明, 植物细胞原生质的“活跃压力”在一定温度下与比值 $\ln(x_1''/x_1)$ 有关。细胞原生质中水的克分子分数大时, 原生质的“活跃压力”也大, 则细胞原生质主动分泌水分进入细胞液中就多(相应细胞原生质的浓度变大)。另外, 随着细胞液中水的克分子分数增大(相应细胞液的浓度降低), 原生质的“活跃压力”也随之减少。此结论与实际测得的细胞原生质中与细胞液中浓度不相等的结果是一致的^[1]。(公式(1)的形式仅考虑细胞液渗透压一个因素, 结论是原生质与细胞液的浓度相等, 这与事实不符。)

(五) 初步从实验数据估计系数 α 的数值

关于细胞原生质的“活跃压力”公式中系数 α 的数值, 可由实验确定。对于不同状态(如衰老、年青的细胞)、不同类型(如马铃薯、甘蓝等)

的细胞原生质的“活跃压力”公式中的系数 α ，需由实验来测定。这里只应用 Lyon, C. J. 在 1942 年的一组数据，对系数 α 的数值作初步估计。Lyon, C. J. 的实验是将马铃薯窄条浸在浓度不同的蔗糖溶液中，分别测得了在三种蔗糖浓度下马铃薯窄条的体积和相当的渗透压，经过数据处理后得到在蔗糖浓度为 0.32 M 状态下的原生质的“活跃压力”为 4.58 大气压，现将 Lyon, C. J. 的数据整理列表如下。

Lyon, C. J. (1942) 数据 $t = 20^\circ\text{C}$

	蔗糖浓度 (M)	马铃薯窄条体积 (mm ³)	相当渗透压 (大气压)	原生质的“活跃压力” (大气压)
开始质壁分离状况	0.70	2106	21.5	—
正常状况	0.32	2380	8.7	4.58
饱和状况	0	2860	0	—

Lyon, C. J. 的数据没有直接测定公式 (15) 中的 (x_1''/x_1) 之值，因 (x_1''/x_1) 值很难直接测定，但原生质中水的克分子分数 (x_1'') 和细胞液中水的克分子分数 (x_1) ，分别与所对应的体积有关，当体积增大时，相应的水的克分子分数也增大。令 V_1'' 为原生质中水的克分子分数所对应的体积， V_1 为细胞液中水的克分子分数所对应的体积，则有

$$\left(\frac{x_1''}{x_1}\right) = \left(\frac{V_1''}{V_1}\right)$$

直接测定 V_1'' 与 V_1 值也是困难的。但可假定细胞开始质壁分离时的体积为原生质中水的克分子分数所对应的体积，即 $V_1'' = 2106 \text{ mm}^3$ 。正常状况下细胞膨胀的体积减去细胞开始质壁分离时的体积为该状况下细胞液中水的克分子分数所对应的体积，即 $V_1 = (2380 -$

$2106) \text{ mm}^3$ 。尽管是假定，但估计系数 α 值还是可行的。再从已知值， $R = 0.082 [\text{升}] [\text{大气压}] [\text{克分子}]^{-1}, [\text{度}]^{-1}$ ， $\bar{v}$ (对于水) $= 18.016 [\text{升}] [\text{克分子}]^{-1}$ ， $T = 293^\circ\text{C}$ ，代入公式 (15) 得

$$\begin{aligned} Ap &= \alpha \frac{RT}{\bar{v}} \ln \left(\frac{x_1''}{x_1} \right) \\ &= \alpha \frac{RT}{\bar{v}} \ln \left(\frac{V_1''}{V_1} \right) \\ &= \alpha \times \frac{0.082 \times 293}{18.016} \ln \left(\frac{2106}{2380 - 2106} \right) \\ &= \alpha \times 2.72 \end{aligned}$$

根据 Lyon, C. J. 的数据， $Ap = 4.58 [\text{大气压}]$

$$\therefore 4.58 = \alpha \times 2.72$$

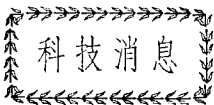
则得到 $\alpha = 1.68$

应用 Lyon, C. J. 的数据，得到 $\alpha > 1$ 。由于应用数据时采用近似值，再则 Lyon, C. J. 的实验也不可能很准确，所以系数 α 只是一个估计值。系数 α 可能大于 1 也可能小于 1，要视具体情况下原生质的“活跃压力”对吸水力的贡献程度。

参 考 文 献

- [1] H. A. 马克西莫夫：《植物生理学简明教程》。
- [2] Tang, P. S. and Wang, J. S.: *Journal Physical Chemistry* 443, 1941.
- [3] 王竹溪：《科学纪录》，1958 年，第 2 卷，第 3 期。
- [4] H. A. 马克西莫夫：《马克西莫夫院士论文选》，1959 年，上卷，第 129 页。
- [5] Lyon, C. J.: *Plant Physiol.*, **17**, 250—266, 1942.
- [6] Van-Overheck, J.: *Amer. Jour. Bot.*, **31**, 265, 1944.
- [7] 同 [1]，第 441 页。
- [8] 王竹溪：《热力学》，1955 年，第 224—226 页。
- [9] H. A. 古谢夫：《植物水份状况若干规律》，1962 年。

[本文于 1978 年 12 月 5 日收到]



科技消息

超速离心头破坏

实验国内首次成功

经过近两个月五十多次运转，克服种种技术困难后，于 1979 年 11 月 7 日成功地离心爆炸了一个 8×10

毫升铝合金超速离心头，离心破坏转速为 76000 转/分以上。这次破坏实验的成功为我国今后超速和高速离心头的合理设计及保证使用安全提供了重要的科学实验手段。

进行这一实验的空气驱动型超速离心头破坏实验装置是由中国科学院生物物理研究所超速离心头强度实验研究组设计，吉林省辽门市二轻机械厂加工，并由双方共同安装调试的。

(金绿松)