

教学园地 Teaching

水势概念的教学探讨

张秀芳*

山东理工大学生命科学学院, 山东淄博 255049

水势是“植物的水分代谢”一章最基本的概念,也是最难理解和弄清楚的内容。只有充分理解了水势的概念,这一章的其余内容和其他章节中的相关内容都可迎刃而解。理解这一概念涉及到许多物理化学的知识,而多数生命科学学院的学生没有这方面的基础,所以,如何能让学生充分理解这一概念成了教学中的重中之重。为解决这一问题,我们根据几本植物生理学教材(潘瑞炽等 2004;王宝山 2004;武维华 2003;王忠等 2000),结合自己的教学体会,整理出比较能为学生接受的内容。

植物细胞水分关系问题的理论基础是渗透原理,我国著名科学家汤佩松和王竹溪两人于 1940 年将用热力学处理渗透现象的原理和方法应用到植物细胞的水分关系,用势能来标志植物细胞的水分状态,首次提出了用水的化学势差 - 水势来判断水分运动的方向和限度(孙鸿乔 1985;叶绿 1985)。水势概念是由自由能和化学势引伸而来,我们先来看自由能的概念。

1 扩散现象与自由能

当把某种染料放入水中时,它们会自然地扩散开来,最终形成均匀的有色溶液,这种现象就是溶质的扩散现象。溶质的分子或离子之所以能在水中扩散,能够自发地从高浓度区域向低浓度区域运动,是因为溶质颗粒含有运动的潜能,即可以用来做功的能量,叫做自由能。这一概念是由美国科学家 Gibbs 提出的,所以又称 Gibbs 自由能。自由能是指一个体系的总能量中,在恒温恒压条件下能够做功的那一部分能量(朱文涛 1995)。其绝对值因无法计算而无实际意义,但其增量(即变化过程中两状态的差值 G)能指示一个变化过程的方向和限度。任何变化过程(等温等压下)总是自发地向着自由能减少的方向发展,达到平衡为止。在这个过程中有自由能放出而做功

(表现在多种能量形式,如化学能和热能等)。由于实际所遇到的体系中常常会有质量和组分上的变化,所以,热力学中又引入了化学势的概念。

2 化学势

物质所含自由能的多少一般用化学势表示,化学势是用来描述体系中各组分发生化学反应的能力及转移的潜在趋势的物理量(朱文涛 1995),用希腊字母 μ 表示。化学势是将 Gibbs 自由能限定为 1 mol 的物质所具有的自由能(贺继临等 2000)。某一组分的化学势是指每摩尔该组分的自由能(潘瑞炽等 2004)。

一个复杂体系中有许多组分(物质),若表示某一组分发生化学反应的能力或潜在的势能,则必须以等温等压及其它组分的摩尔数不变为前提。体系中某组分的化学势可以理解为等温等压条件下,在无限大的体系中加入 1 mol 该物质时引起体系自由能的改变量(朱文涛 1995)。怎样理解这一概念呢?如同自由能一样,化学势的绝对值无法计算,其相对值才有实际意义,可以指示变化的方向和限度。所以在物理化学中常以此定义化学势的概念。这里所说的无限大的体系是指 1 mol 某物质的加入不致使体系的浓度发生变化而言的。

在上面所讲的扩散现象中,溶质浓度高的区域,所含溶质分子多,则所含的自由能也多,其化学势高;相对而言,溶质浓度低的区域,则化学势低。物质运动总是向着使整个体系自由能降低的方向进行,溶质颗粒的运动也一样,即由化学势高的区域(自由能多的区域)向化学势低的区域(自由能少的区域)移动,直到溶液中的溶质达到均匀分布。

水分作为自然界的一种物质,它的运动方向

收稿 2006-10-16 修定 2007-01-15

* E-mail: zhangxiufang12@sohu.com; Tel: 0533-2634756

和限度同样遵循热力学规律,从水的化学势高的地方流向水的化学势低的地方(王宝山 2004)。水分运动的方向和限度用化学势差 $\Delta\mu$ 来判断。植物细胞与环境之间水分交换的物理量是外液的水的化学势 μ' 与细胞的水的化学势 μ 之差,用 $\Delta\mu$ 来表示。若 $\Delta\mu > 0$, 细胞吸水;若 $\Delta\mu < 0$, 细胞失水;若 $\Delta\mu = 0$, 水分处于平衡状态(孙鸿乔 1985)。水的化学势称为水势(潘瑞炽等 2004)。

3 水势

3.1 渗透作用与水势 实验时,取1个1 mL的移液管,去掉没有刻度的部分,将一短的乳胶管套在移液管的一端,乳胶管的另一端套在另一个的1 mL的移液管上(去掉第2个移液管的窄头),将一个滴管的胶头套在第2个移液管的另一端。然后取一鱼鳔的前室,倒入滴有红色染料的50%的蔗糖溶液,将其用棉线捆绑在连接好的移液管上。将这一装置放入盛有150 mL清水的烧杯中(图1)。

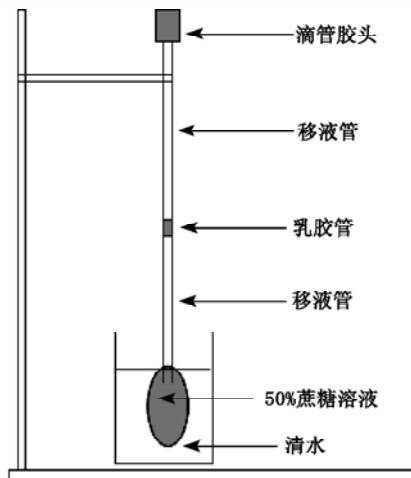


图1 渗透作用实验的装置

刚开始时鱼鳔内外液持平,随即鱼鳔内液面上升,上升速度约为 $0.015 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。去掉滴管的胶头,移液管内液面一下子上升 0.4 mL ,然后缓慢上升,上升速度约为 $0.02 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,而后逐渐减慢,上升速度约为 $0.01 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。然后定量并分次向烧杯中注入蔗糖,每次注入 10 g 蔗糖。注入过程中并不断用玻璃棒搅拌。当加入 80 g 蔗糖时,移液管内液面开始下降。下降速度约为

$0.01 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。我们知道,物质发生扩散时,总是从化学势高的区域向化学势低的区域移动,要了解水分子如何运动,就要分析鱼鳔内外液体各自的化学势。将鱼鳔放入烧杯之前,烧杯中的水为纯水,鱼鳔内为蔗糖溶液,蔗糖分子与水分子间有水合作用,即每个蔗糖分子周围都有一个水膜包围。溶质分子的水合作用要消耗自由能,从而更多地降低了化学势,所以溶液中水的化学势比纯水中的化学势低。这样,将盛有蔗糖溶液的鱼鳔放入盛有清水的烧杯中时,水分不断地进入鱼鳔,移液管内液面上升。当不断地向烧杯中加入蔗糖后,烧杯中的蔗糖溶液浓度升高,而水的化学势下降,接着就会出现移液管液面逐渐下降的现象。可以看出:水分总是从水的化学势高的地方流向水的化学势低的地方。水的化学势称为水势,所以水分总是从水势高的地方流向水势低的地方。为了能更好的理解水势这一概念,我们先来看一下偏摩尔量这一物理化学概念。

3.2 偏摩尔量 在一个组成变化的多组分体系中,某热力学总量并不等于纯态时各组分该热力学量之和,所以在讨论2种以上物质的均相体系时,必须引入偏摩尔量的概念(贺继临等 2002),如偏摩尔体积、偏摩尔自由能等。我们以偏摩尔体积和摩尔体积的差异来说明偏摩尔量。摩尔体积是指在恒温恒压下, 1 mol 纯态物质所占据的实际体积。如 1 mol 纯水在 1 个大气压和温度为 25°C 的条件下所具有的体积是 18.09 mL ,这 18.09 mL 就是纯水的摩尔体积。当2种以上的纯物质组成为混合状态时,各物质的性质与纯粹态时不同,并且它们之间可能发生反应,在这样一个体系中,各种纯态物质所占据的体积就和其独立存在时不同。例如: 1 mol 纯水的体积为 18.09 mL , 1 mol 纯乙醇的体积为 58.35 mL ,两者混合后总体积为 74.40 mL ,而不是两两相加为 76.44 mL 。总体积是偏摩尔体积的相加之和,而不是摩尔体积的相加之和。这时各种纯物质在这个体系中的体积就是偏摩尔体积。在定温定压下,如果向大量水和酒精的等摩尔混合物中加入 1 mol 水,则该混合体系体积的增加不是人们通常所认为的 18.09 mL ,而是 16.50 mL 。这是由于水和酒精分子之间发生相互作用的结果。这 16.50 mL 就是该混合

体系中水的偏摩尔体积。因此,某物质偏摩尔体积的定义可描述为:在定温、定压下,混合体系中1 mol某物质所占据的有效体积(罗红艺2004)。

在一般情况下,某物质的偏摩尔体积和其摩尔体积存在偏差,所以称之为偏摩尔体积。偏摩尔体积不是定值,它除了与温度和压力有关外,还与系统的组成有关(罗红艺2004)。如水的偏摩尔体积的大小随混合体系的组分以及体系中水的实际浓度的变化而变化。其它的偏摩尔量都具有如同偏摩尔体积一样的性质(贺继临等2002;王忠等2000)。

在植物生理学中计算水势时往往用纯水的摩尔体积代替偏摩尔体积,而忽略了这种差异(潘瑞炽等2004)。水势是在化学势概念的基础上,把研究对象限定在某体系中的组分水,同时将化学势的能量单位变成压力单位以适应植物生理学、气象学和土壤学等领域中的传统习惯(贺继临等2002)。

3.3 水势的概念 按“水势即水的化学势”这个定义,水势的单位就是“能量·质量⁻¹”,但科学家们认为用“能量·质量⁻¹”单位在讨论细胞水分关系问题时不方便,将其改为压力单位“能量·体积⁻¹”单位(孙鸿乔1985)。采用压力单位后测量就变得简便了(因测定压力变化比测定能量变化方便的多)。化学势是能量概念,其单位为J·mol⁻¹,1 J=1 N·m。压力单位是Pa,1 Pa=1 N·m⁻²。由此可推算出:1 Pa=1 J·m⁻³,压力=能量·体积⁻¹。可以将压力看作是单位体积中的能量。因此,就可以这样定义水势的概念:水势是指每偏摩尔体积水的化学势(潘瑞炽等2004)。水势表示体系的水分状态,是相对值。体系之间水流方向和限度则用水势差来判断(孙鸿乔1985)。如同计算海拔高度以海平面为起点一样,人们人为地定出一个标准,即以某一温度和1个大气压下的纯水的水势(称为标准化学势)为标准,因此,水溶液的水势即:水的偏摩尔体积去除水溶液的化学势(μ_w)与同温、同压和同一系统中的纯水的化学势(μ_w^0)之差(孙鸿乔1985;潘瑞炽等2004)。

植物细胞水势的组成为: $\Psi_w = \Psi_s + \Psi_m + \Psi_p$

其中, Ψ_w :细胞的水势。 Ψ_s :细胞的溶质

势,是由于液泡中溶质的存在产生的,是使 Ψ_w 下降的势能。 Ψ_m :衬质势是由于亲水性物质存在产生的,也是使 Ψ_w 下降的势能。 Ψ_p :细胞压力势,是由于细胞壁的存在产生的,一般是使 Ψ_w 上升的势能。直接测定细胞壁或细胞质的水势比较困难,通常都是测定液泡液和外界溶液进行水分交换所引起的细胞体积或外界溶液浓度的变化,因此,常以液泡水势代表细胞水势,这时衬质势 Ψ_m 可不计,细胞水势 Ψ_w 由 Ψ_s 和 Ψ_p 两部分组成(王沙生1985)。怎样来理解压力势这一概念呢?这也是我们植物生理教学中的一个难点。

3.4 压力势 我们注意到在前面的渗透作用实验中,刚开始鱼鳔内外液面持平,随即移液管内液面上升,而后达到平衡。这是为什么呢?烧杯是一个开放系统,它里面溶液的溶质势就是它的水势,因烧杯中的溶液为纯水,所以水势为最大。而鱼鳔内的蔗糖溶液由于溶质的存在,就产生溶质势,是使 Ψ_w 下降的势能,所以水势就小,水分就从鱼鳔外移向鱼鳔内。随着水分的进入,移液管内的空气被压缩,空气对水分必然存在压力,这种压力的存在就产生了压力势,增加了水分由鱼鳔内向鱼鳔外移动的潜势。由于溶质势的存在,水分进入鱼鳔,但又必须克服这种压力势,所以,水分移动会慢慢停止,直至平衡。

在实验中我们还注意到:当去掉滴管胶头,移液管内的液面会突然上升。为什么会出现这种现象呢?这是因为去掉滴管胶头后,鱼鳔内的溶液也成了一个开放系统,压力势解除,鱼鳔内的水势变小,水分又从烧杯进入鱼鳔。随着移液管内的液面上升,高出烧杯液面的液柱将会产生静水压,压强会不断增大;静水压越大,压迫水分从鱼鳔内向烧杯中移动的速度就越快,膜内外水分进出速度越来越接近,当达到动态平衡时,移液管管内的液面便停止下降(张卓鹏2006)。

根据压力势的定义,压力势是由于细胞壁压力的存在而增加的水势(潘瑞炽等2004)。但从这个定义出发无法知道压力势的方向(正值或负值),学生对压力势的方向感到难理解。我们可以这样来解释:细胞吸水时,原生质体吸水膨胀,但细胞壁弹性较小,细胞壁对原生质体必然存在一

种压力, 这时细胞有缩小的潜势, 即增加水分由胞内向胞外移动的潜势, 这种潜能就是压力势。我们知道, 由于溶质势的存在, 水分即由细胞外移向细胞内。而压力势存在时, 水分则由细胞内移向细胞外。不难看出: 压力势方向是与溶质势方向相反。一般情况下, 溶液的溶质势总是负值, 由此得知细胞的压力势一般为正值。当细胞发生质壁分离时, 压力势为零。剧烈蒸腾时, 细胞壁出现负压, 即细胞的压力势呈负值。这是为什么呢? 因为剧烈蒸腾时, 细胞壁蒸腾失水多于原生质体蒸腾失水而剧烈收缩, 向内挤压原生质体, 这时原生质体就有了膨大的潜势, 即增加水分由胞外向胞内移动的潜势, 此时压力势方向与溶质势方向相同, 故压力势为负值。

综上所述, 通过扩散现象导出了自由能、化学势的概念, 在此基础上引出了水势的概念, 并通过解释改进了的渗透作用试验来解释压力势。用这种方法讲解, 环环相扣, 学生对水势的概念较易掌握, 效果较好。

参考文献

- 贺继临, 邱军, 侯福林(2002). 植物水分生理中水势概念与植物水分代谢关系新探. 山东师范大学学报(自然科学版), 17 (1): 100~103
- 罗红艺(2004). 植物生理学教材中几个容易混淆的名词释义. 植物生理学通讯, 40 (2): 231~234
- 潘瑞炽, 王小箐, 李娘辉(2004). 植物生理学. 第5版. 北京: 高等教育出版社, 9~12
- 孙鸿乔(1985). 水势问题. 植物生理学通讯, (3): 48~52
- 王宝山主编(2004). 植物生理学. 第1版. 北京: 科学出版社, 9~11
- 王沙生(1985). 植物细胞水势的组成及其加合. 植物生理学通讯, (1): 59
- 王忠, 顾蕴洁, 杨龙寿(2000). 从化学势的组成引出水势概念. 植物生理学通讯, 36 (1): 53~56
- 武维华主编(2003). 植物生理学. 第1版. 北京: 科学出版社, 38~39
- 叶绿(1985). 再回顾——读汤佩松和王竹溪的一篇早期论文. 植物生理学通讯, (3): 39~42
- 张卓鹏(2006). “渗透作用”教学疑难三突破. 生物学教学, 31 (3): 43
- 朱文涛主编(1995). 物理化学(上册). 第1版. 北京: 清华大学出版社, 154~158