

## 教学园地 Teaching

# 小孔定律不能完美解释植物气孔蒸腾高速率之我见

董泽军\*

重庆工贸职业技术学院, 重庆 408000

在国内通用的植物生理学教材(曹宗巽和吴相钰 1979; 江苏农学院 1986; 潘瑞炽和董愚得 1995; 杨学荣 1981)中, 对植物通过蒸腾作用大量散失水分的现象, 即仅占叶面积 0.5%~1.0% 的气孔所散失的水分可达到与叶面积相同的自由水面蒸发量的 40%~50%, 都以小孔定律(小孔扩散原理、边缘效应)来解释, 即水蒸气经过小孔扩散的速率与小孔周长成比例, 而不和小孔面积成比例, 并由此得出结论认为在叶片上, 水蒸气通过气孔的蒸腾速率要比同面积的自由水面蒸发速率快得多, 因此气孔蒸腾的速率较高。对此国内已有多篇文献(曹小勇和徐皓 2000; 陈因 1997; 樊金娟和张立军 1999; 郝建军 2001; 王天铎 1996)做出了正反两方面的讨论, 但均没有作深入探讨。根据国内教材提供的数据, 经计算推理, 我们认为小孔定律并不能完美解释植物气孔蒸腾高速率问题, 其理由如下。

1. 从流体力学推导来说, 流体力学(丁祖荣 2003)推理表明, 在面积相同和其他条件不变的情况下, 大孔与小孔的扩散速率相同。如图 1 所示, 设水蒸气分子在 S 断面处的流速为 V, 在  $S_1$  (代表大孔)断面处的流速为  $V_1$ , 在  $S_2$  (代表小孔)断面处的流速为  $V_2$ ,  $S_1$  等于 100 倍  $S_2$ , 计算如下:

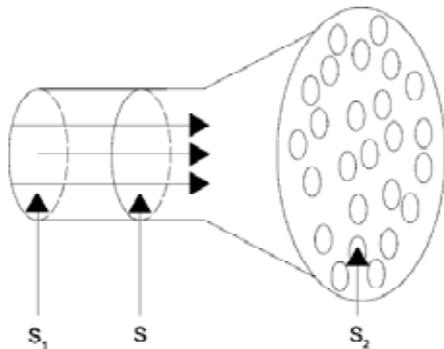


图 1 水蒸气分子流经不同管径示意图  
S: 断面;  $S_1$ : 大孔;  $S_2$ : 小孔。

$$S_1 \times V_1 = S \times V; S \times V = 100 \times S_2 \times V_2; S_1 = 100 \times S_2; S_1 \times V_1 = 100 \times S_2 \times V_2; S_1 \times V_1 = S_1 \times V_2; V_1 = V_2。$$

这里的速率不变, 说明在小孔总面积相同和其他条件不变的情况下, 水蒸气分子通过大孔和小孔是等效的, 与孔的周长无关, 也就是说, 100 个小孔( $S_2$ )的周长虽然是相同面积的大孔( $S_1$ )周长的 10 倍, 但水分子在二者之间的扩散速率却是相同的。

2. 从数学推导来说, 小孔边缘的分子数目与小孔所能容纳的分子数目相比所占比例太小, 可以忽略不计。一般来说, 水分子的直径约为 3.3 Å (陈佳荣 1996), 半径为 1.65 Å, 其投影抽象为一圆; 设参考孔(大孔)的直径为 1 cm, 之后的小孔直径依次为 0.1 倍关系等比递减, 最小的孔直径为 1 μm [气孔的长度为 7~30 μm, 宽度为 1~6 μm (江苏农学院 1986)], 分别计算各种直径的小孔之周长、面积、小孔能容纳的水分子数目(图 2)、分布在小孔边缘的水分子数目(图 3)、分布在小孔边缘的水分子数目占该小孔能容纳的水分子数目的百分比, 得到结果(表 1), 再根据表 1 计算得到表 2 的结果。

从表 2 可见, 当小孔直径由 1 cm 减小到 1 μm 时, 小孔的周长/面积比增加 10 000 倍(表 2 第 3 列), 等效小孔的周长和增加 10 000 倍(表 2 第 4 列), 分布于等效小孔周长上的水分子数目所占百分率也增加 10 000 倍(表 2 第 6 列)。

以前, 通常在阐述小孔定律时只注意到小孔直径变小和周长变大这一事实, 往往忽略了大孔中处在边缘的水分子数目占总的水分子数目的百分率, 也忽略了小孔周长增加到大孔周长 10 000 倍时所有处在边缘的水分子数目占总的水分子数目的百分率, 也就是说, 小孔定律只注意到 10 000 倍

收稿 2007-06-22 修定 2007-08-28

\* E-mail: flzydongzejun@126.com; Tel: 023-72806393

表1 小孔直径、小孔周长、小孔面积、水分子数目之间的关系

小孔直径	小孔周长/Å	小孔面积/Å <sup>2</sup>	小孔总水分子数	小孔边缘水分子数	边缘水分子数/总水分子数
1 cm	$3.14 \times 10^8$	$7.85 \times 10^{15}$	$9.18 \times 10^{14}$	$9.52 \times 10^7$	$1.04 \times 10^{-5}$
1 mm	$3.14 \times 10^7$	$7.85 \times 10^{13}$	$9.18 \times 10^{12}$	$9.52 \times 10^6$	$1.04 \times 10^{-4}$
100 μm	$3.14 \times 10^6$	$7.85 \times 10^{11}$	$9.18 \times 10^{10}$	$9.52 \times 10^5$	$1.04 \times 10^{-3}$
10 μm	$3.14 \times 10^5$	$7.85 \times 10^9$	$9.18 \times 10^8$	$9.52 \times 10^4$	$1.04 \times 10^{-2}$
1 μm	$3.14 \times 10^4$	$7.85 \times 10^7$	$9.18 \times 10^6$	$9.52 \times 10^3$	$1.04 \times 10^{-1}$

表格为 Excel 2003 表格自动计算, 四舍五入保留 2 位小数。表 2 同此。面积公式为  $3.1415926 \times D \times D/4$ ; 周长公式为  $3.1415926 \times D$ ; D 为小孔或水分子直径。

表2 小孔直径、等效面积小孔数目、周长/面积的增加倍数、等效面积小孔周长增加的倍数、等效面积边缘水分子数/总水分子数及其增加倍数

小孔直径	等效面积小孔个数	小孔周长/面积增加的倍数	等效面积小孔周长增加的倍数	等效面积边缘水分子数/总水分子数/%	等效面积边缘水分子数/总水分子数的百分比增加的倍数
1 cm	$1.00 \times 10^0$	1	1	$1.04 \times 10^{-5}$	1
1 mm	$1.00 \times 10^2$	10	10	$1.04 \times 10^{-4}$	10
100 μm	$1.00 \times 10^4$	100	100	$1.04 \times 10^{-3}$	100
10 μm	$1.00 \times 10^6$	1 000	1 000	$1.04 \times 10^{-2}$	1 000
1 μm	$1.00 \times 10^8$	10 000	10 000	$1.04 \times 10^{-1}$	10 000

这个数值而忽略了参考小孔中的处在小孔边缘上的水分子数目占总的水分子数目的百分率是多么的小这一事实, 因而就认为蒸腾速率也增加 10 000 倍。而实际计算结果表明, 虽然等效面积边缘水分子数/总水分子数的百分比增加 10 000 倍, 即通过等效面积小孔的边缘蒸腾出去的水分子增加 10 000 倍, 但仍然很小, 小到可以忽略不计的程度(1 μm 的小孔也只占 0.104%, 表 2)。因此我们认为, 用建立在占不到 0.1% 扩散率的小孔定律

来解释气孔蒸腾高速率是值得商榷与探讨的。

此外, 如果采用小孔直径成 0.5 的等比递减关系, 也会得到类似的 2 或 4 的幂指数倍数的增加关系。

3. 从逻辑推导来说, 在《植物生理学》(江苏农学院主编 1986)一书第 103 页中有如下阐述: “在孔的中央水蒸气分子彼此碰撞, 故扩散速率较慢, 在孔的边缘, 水蒸气分子相互碰撞的机会较少, 扩散速率就较快。以大孔而言, 其孔的

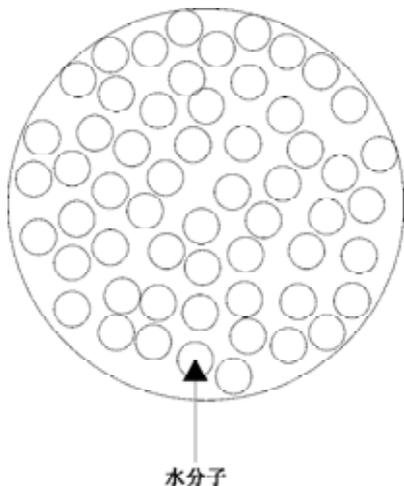


图2 小孔能容纳的水分子数目



图3 小孔内边缘能容纳的水分子数目

边缘所占比值较小, 故其扩散速率与孔的面积成正比, 但如将一大孔分成许多小孔, 这些小孔的总面积与大孔相等, 则其边缘总长度将比大孔大为增加, 如将孔分得越小, 则边缘所占比值越大, 而通过边缘的扩散的速度远较孔的中部为快, 所以如果有若干小孔, 其总面积与一大孔相等, 且小孔与小孔之间有一定距离, 水蒸气分子扩散出去又不会彼此碰撞, 则能充分发挥其边缘效应, 扩散速度就远远超过同面积的大孔。叶表皮上的气孔正是这样的小孔。所以在气孔张开

时, 通过气孔的蒸腾速率很快, 与同面积的自由水面接近。”

根据这个推理, 小孔边缘的水蒸气分子由于受到相互碰撞的机会较少, 易扩散, 这在蒸发刚开始时是正确的, 但随着时间的推移, 在叶表面小孔与小孔之间的微小空间中(看图4时, 最重要的是应想象出三维空间中的情形), 水蒸气分子越聚越多, 逐渐与小孔中央的水蒸气分子数目相当, 则水蒸气分子通过小孔边缘与通过小孔中央所发生的相互碰撞的机会就接近或相等, 因而通

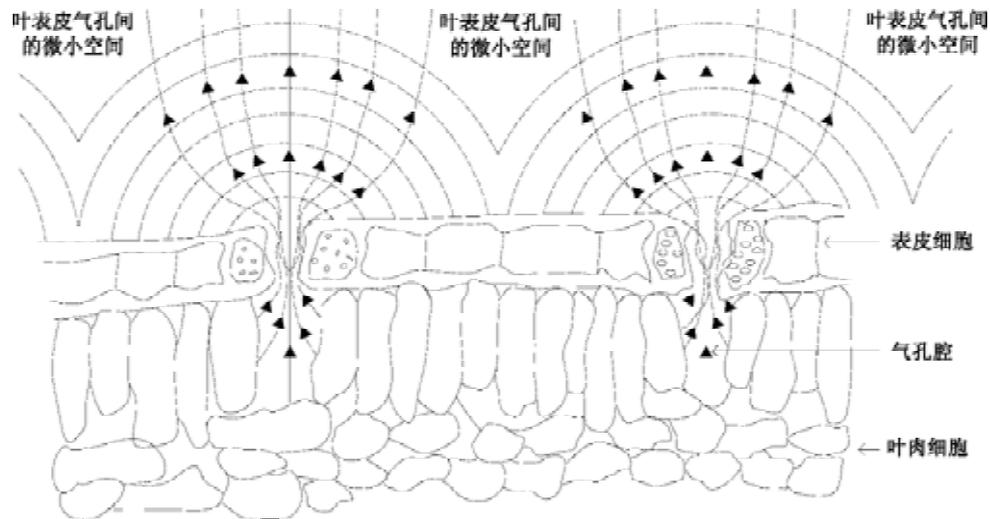


图4 小孔扩散示意图(华中农业大学植物生理学精品课程课件, 略有改动)

过小孔边缘扩散的水蒸气分子与通过小孔中央扩散的水蒸气分子具有相同的速率。这就是说, 小孔定律的解释是不完美的; 如果进一步推理便会认为, 有生命的植物每时每刻均在蒸腾, 也就是意味着每时每刻通过小孔边缘扩散的水蒸气分子与通过小孔中央扩散的水蒸气分子具有相近的速率。因此, 我们认为, 如果从这个角度推理, 小孔定律的解释则是不能自圆其说的。

总之, 不论从哪一个角度去计算、推理和分析, 其结果都表明, 沿用了几十年的小孔定律并不能完美解释植物气孔蒸腾高速率的原因。

#### 参考文献

曹小勇, 徐皓(2000). 对于小孔律解释气孔水分大量散失的商榷. 植物生理学通讯, 36 (6): 550

- 曹宗巽, 吴相钰(1979). 植物生理学. 北京: 人民教育出版社, 140  
 陈佳荣主编(1996). 水化学. 北京: 中国农业出版社, 17  
 陈因(1997). 季米里亚捷夫早就提出蒸腾作用是不可避免的祸害一说. 植物生理学通讯, 33 (3): 212  
 丁祖荣主编(2003). 流体力学. 北京: 高等教育出版社, 25  
 樊金娟, 张立军(1999). 小孔扩散的边缘效应. 植物生理学通讯, 35 (1): 42  
 郝建军(2001). 关于能否用小孔律解释气孔蒸腾具有高速率的问题. 植物生理学通讯, 37 (5): 435~436  
 华中农业大学植物生理学精品课程课件 <http://nhjy.hzau.edu.cn/kech/zws1/jxkj/index.asp?foldername=ppt/ch04&maxno=64&picno=37>  
 江苏农学院主编(1986). 植物生理学. 北京: 中国农业出版社, 103  
 潘瑞炽, 董愚得主编(1995). 植物生理学. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 17~18  
 王天铎(1996). 关于蒸腾作用生理意义的一封信. 植物生理学通讯, 32 (2): 159  
 杨学荣(1981). 植物生理学. 北京: 人民教育出版社, 156