

鳞片对维路提拉吸收大气污染物甲醛的影响*

刘再婕¹ 李鹏^{2**} 郑桂灵²

¹西南科技大学生命科学与工程学院 绵阳 621010

²青岛农业大学资源与环境学院 青岛 266000

摘要 人工去除空气凤梨维路提拉叶表鳞片, 通过比较鳞片的有无以及多少研究空气凤梨鳞片对吸收大气污染物甲醛的影响。结果发现, 人工去除鳞片后, 鳞片的翼状细胞几乎被完全去除, 环状细胞和碟状细胞也被部分破坏, 暴露出大量之前被覆盖的表皮细胞。所有植株均可有效吸收甲醛, 没有去除鳞片的植株净化甲醛的能力明显高于去除鳞片的植株, 但是鳞片的多少与净化甲醛能力并不成正比。本研究表明, 叶表鳞片对甲醛的吸收存在重要的影响, 但空气凤梨净化甲醛是一个复杂的过程, 表皮细胞等其他结构可能也会影响甲醛的吸收。图3 表3 参17

关键词 空气凤梨; 生物修复; 叶表结构; 甲醛污染

CLC X173 : X51

Effect of foliar trichomes of *Tillandsia velutina* on the absorption of air pollutant formaldehyde*

LIU Zaijie¹, LI Peng^{2**} & ZHENG Guiling²

¹ School of Life Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

² College of Resource and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China

Abstract In order to explore the effect of foliar trichomes of epiphyte *Tillandsia* on formaldehyde absorption, we investigated whether the trichomes influence formaldehyde purification through artificially removing trichomes of *T. velutina*. The results showed that the wing cells of trichomes were almost completely removed, while the ring cells and disc cells were destroyed partially. Epidermal cells which were covered before by trichomes were exposed after artificial treatment. All plants of *T. velutina* adsorbed formaldehyde efficiently, but the ability of purifying formaldehyde in plants with trichomes was apparently stronger than those without trichomes. However, the numbers of trichomes were not proportional to the ability of purifying formaldehyde. Therefore, epiphyte *Tillandsia* purifying formaldehyde is a complicated process in which foliar trichomes play an important role. Other structures, for example, epidermal cells, may also affect the absorption of formaldehyde.

Keywords *Tillandsia*; bioremediation; leave structure; formaldehyde pollution

甲醛污染治理问题一直是人们关注的焦点。近年来, 室内栽培植物因净化甲醛具经济环保特点和长期有效性, 为人们竞相采用。迄今为止, 已有多达几十种植物, 如香石竹、常春藤、吊兰等, 被证明对甲醛具有较好的吸收效果^[1-3]。

在众多的植物类群中, 空气凤梨因其特殊的生物学特征, 即可在空气中生活、叶表面覆盖密集的鳞片层, 新近被证实能更快速有效地净化甲醛^[4]。空气凤梨隶属于凤梨科 (Bromeliaceae) 铁兰属 (*Tillandsia*), 有200余种, 是一类不需要土壤、可以直接在空气中生长、所需的水分与养分可以都来自空气的特殊植物^[5]。它们有真正的根, 但不发达, 根没有吸收水分和养分的功能, 仅起到固定植株和进行少量空气交换的作用。真正吸收水分和养分的器官是植物的叶片, 因此叶片吸收能力强大, 也能够同时吸收空气中

的污染物^[6]。

空气凤梨叶表面的鳞片一直被认为是空气凤梨吸收水分和养分的主要结构^[7-9], 主要由3层细胞构成, 即最外层的翼状细胞 (Wing cell)、中间的环状细胞 (Ring cell) 以及最内层的碟状细胞 (Disc cell), 碟状细胞通过柄细胞与叶片内部的叶肉细胞相连。空气中的水分和养分通常先由长长的翼状细胞所捕获, 然后通过环状细胞、碟状细胞和柄细胞进入空气凤梨叶片内部^[5]。空气凤梨叶表鳞片在吸收大气污染物的过程中也发挥着重要作用。Filhoa等利用松萝空凤 (*Tillandsia usneoides*) 来监测大气重金属污染, 通过扫描电子显微镜和X-射线荧光技术分析汞的富集部位及含量, 结果发现汞元素高度富集于松萝茎和叶表面, 而表皮细胞上吸附很少, 在松萝内部则未发现汞元素^[10]。Li等在探讨空气凤梨吸附¹³³Cs的研究中, 通过对叶片进行能谱分析, 发现鳞片的蝶状细胞、环状细胞、翼状细胞都有检测到¹³³Cs的存在^[11]。李俊霖等在研究空气凤梨对大气污染物甲醛的净化作用中, 也提出空气凤梨净化甲醛的能力与叶表面覆盖的鳞片层相关^[4]。

收稿日期 Received: 2013-10-12 接受日期 Accepted: 2013-12-12

*国家自然科学基金项目 (41005084) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (41005084)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: pengleap@163.com)

但上述关于空气凤梨鳞片功能的论述都是一些推测性结论,即基于实验结果反推鳞片的功能,还没有直接的实验数据论证鳞片的功能.因此,本研究拟通过人工去除鳞片,比较鳞片的有无和多少对空气凤梨吸收甲醛的影响,进一步论证鳞片在吸收污染物过程的作用,旨在为空气凤梨吸收甲醛提供一定的理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究材料

选取一种常见、能净化甲醛,叶片相对较大利于去除鳞片的空气凤梨维路提拉(*Tillandsia velutina*)(图1A).维路提拉叶多列,丛生,质软、薄,基部宽,渐尖,黄绿色,周身被灰白色鳞片(图1B).选取的植株株高约为7-8cm,叶片数约为40-50枚,叶片长约5-6 cm,叶基部宽约0.5 cm.

植株置于人工气候箱中培养,培养条件为:白天/夜晚14 h/10 h,温度28 °C/25 °C,相对湿度40%/50%,光照强度14 400 lx.

1.2 实验方法

1.2.1 人工去除鳞片 选取15株维路提拉设置5个梯度,分别编号为ABCDE,称重记录.用胶带粘附植株去除鳞片的叶片的上表面和下表面,力度不宜过大,保证植株的完整,反复操作直至鳞片去除为止(图1B).A组植株为去除叶表全部鳞片,B组为去除植株3/4叶片上覆盖的鳞片,C组为去除植株1/2叶片上覆盖的鳞片,D组为去除植株1/4叶片上覆盖的鳞片,E组为叶片不去除鳞片的植株;每处理3个重复.

1.2.2 空气凤梨叶表面形态观察 通过扫描电子显微镜(SEM)法对维路提拉叶表面形态进行检测.选取鳞片未去除和已去除植物各1株,取成熟植株的相同部位、叶龄近似的叶片,用蒸馏水反复冲洗,使叶片上的灰尘和细菌尽可能被冲洗掉,再用滤纸吸走多余的水分,用4%的戊二醛固定48 h,蒸馏水洗涤,再分别用30%、50%、70%、80%、90%、100%(2次)的乙醇梯度脱水各10 min.脱水后立即将样品固定在载玻片上,略微施加压力使欲观察的叶表面平整,置35 °C干燥箱里干燥过夜.在 5×10^{-1} Pa下, KYKY SBC-12离子溅射仪镀膜,Leica S440 型扫描显微镜观察,拍照.

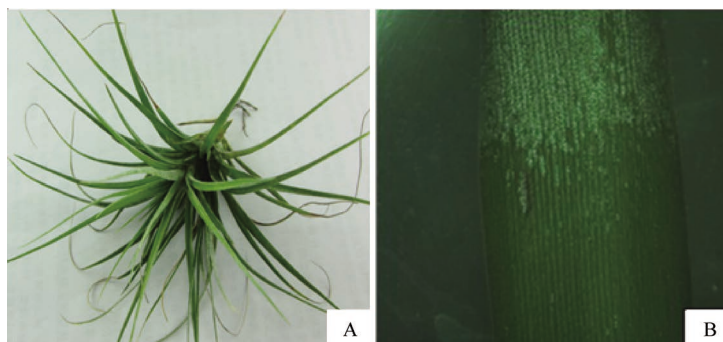


图1 维路提拉植株(A)及体式解剖镜下叶表面(B).B图上部覆盖有鳞片层,下部为鳞片去除后.

Fig. 1 *T. velutina* (A) and its leaf surface under dissecting microscope (B). The upper part with trichomes, the lower part with trichomes artificially removed.

1.2.3 甲醛胁迫处理与浓度测定 参照Wolverton 的封闭舱^[12],用标本瓶制成6个规格一致的密闭瓶,标本瓶的体积为1 L.瓶顶开一个直径1 cm的圆孔,用于甲醛溶液的滴入与仪器的采气管伸入.其中5个标本瓶用于植物熏气,1个做空白对照,不放入植物.

选择外部光线稳定的环境,将标本瓶置于水浴锅,使温度恒定25 °C.将实验材料挂在瓶顶,然后迅速用凡士林封盖,用移液枪通过瓶顶圆孔加入稀释100倍的40%甲醛溶液100 μL,采用XJ-F2(D2)型室内环境检测仪作为甲醛检测仪(仪器测量范围为0.01-1.20 mg/m³,测量精度≤5%),每熏蒸2 h后测定甲醛含量,持续12 h,实验重复3次,设置空白对照.植物净化甲醛的能力以单位时间内单位叶面积植物吸收甲醛的量表示,单位为mg m⁻² h⁻¹.被试植株叶面积采用WDY-500A型叶面积仪测定.

1.2.4 空气凤梨生理指标测定 处理结束后选择每株植株不同部分的成熟叶片(约取10-15叶片)进行生理指标的测定,去除鳞片的植株选取的是去除鳞片的叶片.

叶绿素含量采用紫外分光光度计比色法测定^[13],原生质膜透性采用电导仪法测定^[13].

1.2.5 数据分析与统计 实验数据用Excel和SPSS17.0软件包进行统计分析.

2 结果与分析

2.1 维路提拉鳞片去除前后叶表面结构

维路提拉叶表面覆盖有密集的鳞片层(图2A).每一鳞片均呈特殊的“葵花状”,由3层细胞构成,最内层有4个呈碟状的细胞,称为碟状细胞(Disc cell),碟状细胞之外环绕着8个细胞,称为环状细胞(Ring cell),最外层是长的不规则的翼状细胞(Wing cell),相互之间连接紧密,边缘有锯齿(图2C).

从图2B可以看出,利用胶带粘附叶表面后,鳞片的翼状细胞几乎被完全去除,只留下环状的痕迹,使得叶表面呈现大小不一、排列不规则的圆孔状结构.而鳞片的环状细胞和碟状细胞也被部分破坏,使其所在位置凹陷,已看不出明显的细胞结构(图2D).鳞片翼状细胞被去除后,原来被覆盖的表皮细胞露出,表皮细胞排列紧密,壁厚,与鳞片紧密相连(图2B).值得注意的是,人工去除鳞片后没有发现明显的气孔结构(图2B).

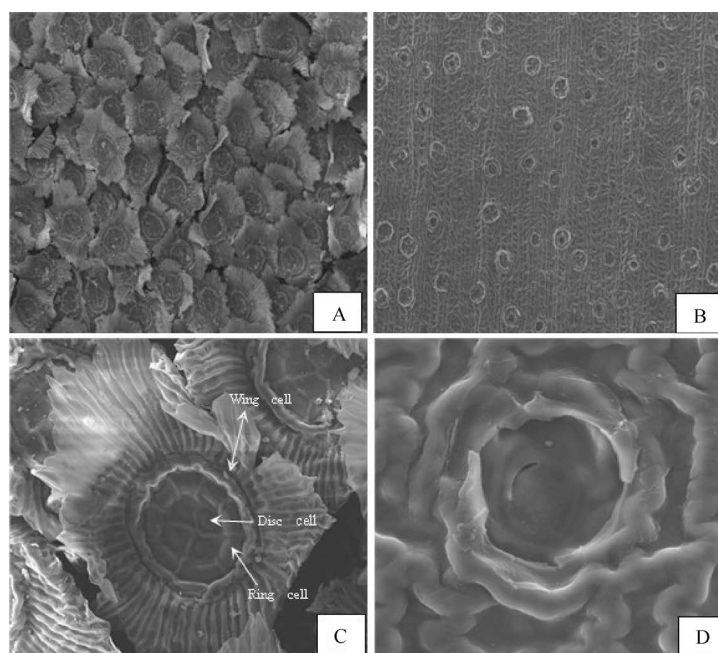


图2 扫描电镜下维路提拉叶表面结构. A: 鳞片去除前叶表面结构 ($\times 50$); B: 去除鳞片后叶表面结构 ($\times 50$); C: 鳞片结构 ($\times 400$), 箭头所示为3种细胞类型; D: 人工处理后的鳞片结构 ($\times 800$).

Fig. 2 Leaf surface of *T. velutina* with SEM. A. Before trichome removal ($\times 50$); B. After trichome removal ($\times 50$); C. One foliar trichome with the three types of cells shown by arrows ($\times 400$); D. Foliar trichome after artificial treatment ($\times 800$).

2.2 鳞片去除对空气凤梨吸收甲醛效果的影响

2.2.1 甲醛浓度变化 根据测定, 空白瓶内甲醛含量趋于 1 mg/m^3 . 放入不同处理的维路提拉后, 标本瓶内甲醛浓度均有下降. 其中下降最明显的是没有去除鳞片的E组植株, 每次测定均下降, 12 h后从起初测定值 1.07 mg/m^3 下降到 0.28 mg/m^3 . 其余去除不同程度鳞片的4组植株随着熏蒸时间增加, 前2 h下降比较明显, 从4 h后趋于稳定, 其中降低的浓度均低于E组 (图3).

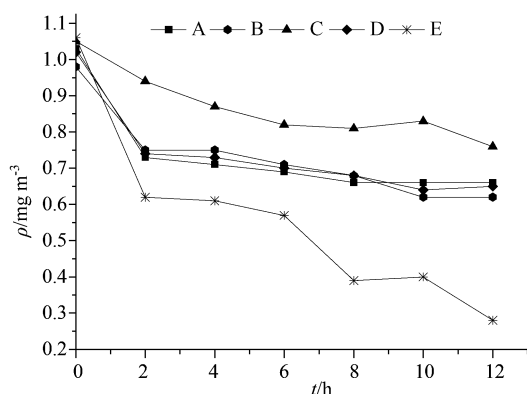


图3 放入不同处理的空气凤梨后甲醛浓度变化. A: 去除植株叶表全部鳞片; B: 去除3/4鳞片; C: 去除1/2鳞片; D: 去除1/4鳞片; E: 不去除鳞片植株.

Fig. 3 Variation of formaldehyde concentration after different *T. velutina* treatments. A: removal of all trichomes; B: removal of 3/4 trichomes; C: removal of 1/2 trichomes; D: removal of 1/4 trichomes; E: without removal of trichomes.

2.2.2 净化甲醛能力的测定 5组被试植株对甲醛均有一定净化能力, 但不同处理对甲醛的吸收效果不一样, 存在一定差异. 空气凤梨净吸收率E组最高, 为73.61%, 较其他组

差异极显著 ($P < 0.01$). 甲醛净化能力A、B、C、D四组都低于E组, 其中 $E > B > A > D > C$, 且E组相对于其他组差异极显著 ($P < 0.01$) (表1).

2.3 不同处理的空气凤梨对甲醛胁迫的生理响应

2.3.1 叶片原生质膜透性变化 植物在逆境或受到损伤时, 细胞膜的结构或功能受损, 使细胞质膜透性增加, 导致胞内的电解质外渗, 引起电导率的增加. 植物细胞膜对维持细胞的微环境和细胞的代谢都起着非常重要的作用, 相对电导率的变化是植物细胞结构和功能完整性的可靠指标.

不同处理的空气凤梨植株分别在密封瓶内处理12 h, E组植株电导率比其余4组所测值小, 并且随着鳞片去除程度的增大而增加, $A > B > C > D > E$ (表2). 与甲醛胁迫前相比, 相对电导率增加百分率依次为 $A > C > B > D > E$, 最小的为E组 (10.22%), 最大的为A组 (33.97%) (表2).

2.3.2 叶绿素含量的变化 叶绿素是高等植物进行光合作用的重要物质, 同时也是绿色植物的主要色素, 当植物衰老或在逆境中受到伤害, 最明显的一个变化就是叶绿素分解速度加快或合成受阻, 使其含量下降.

甲醛处理后, 叶绿素a含量在甲醛处理前后A组减少30.71%, 相对于其他组差异极显著 ($P < 0.01$) (表3). 甲醛处理后叶绿素b含量均降低, A组相对于其他组差异显著 ($P < 0.05$) (表3).

叶绿素总含量的减少百分率A组相对于其他组差异极显著 ($P < 0.01$), B、C、D三组略低于E组, 但并没有达到显著差异 (表3).

3 讨论

3.1 鳞片对空气凤梨净化甲醛的影响

空气凤梨的鳞片被公认为是吸收大气中水分与养分的

表1 鳞片去除后空气凤梨吸收甲醛的能力测定
Table 1 Formaldehyde absorbing ability of epiphyte *T. velutina* after removal of trichomes

处理组 Treatment	甲醛初始浓度 Initial concentration of formaldehyde ($\rho/\text{mg m}^{-3}$)	12 h后甲醛浓度 Concentration of formaldehyde after 12 h ($\rho/\text{mg m}^{-3}$)	净吸收率 Net absorption rate ($r/\%$)	叶面积 Leaf area (A/cm^2)	植物净化甲醛能力 Ability of plants purifying formaldehyde ($\rho/\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$)
空白 Blank	1.05a	0.94A	10.34	—	—
A	1.02a	0.66C	36.16A	833a	0.423A
B	0.98a	0.57C	36.61A	710a	0.443A
C	1.03a	0.72B	27.21A	615a	0.390A
D	1.04a	0.66C	36.73A	790a	0.397A
E	1.07a	0.24D	73.61B	853a	0.762B

A: 去除植株叶表全部鳞片; B: 去除3/4鳞片; C: 去除1/2鳞片; D: 去除1/4鳞片; E: 不去除鳞片植株. 不同大写字母表示不同处理间差异极显著 ($P < 0.01$), 相同字母表示差异不显著.
A: removal of all trichomes; B: removal of 3/4 trichomes; C: removal of 1/2 trichomes; D: removal of 1/4 trichomes; E: without removal of trichomes. Uppercase letters mean significant difference among treatments ($P < 0.01$); the lowercase letter indicates no significant difference.

表2 甲醛胁迫对维路提拉原生质膜透性的影响
Table 2 Changes of relative electric content of epiphyte *T. velutina* under formaldehyde stress

处理组 Treatment	相对电导率 Relative electrical conductivity ($\gamma/\%$)		
	甲醛处理前 Before formaldehyde treatment	甲醛处理后 After formaldehyde treatment	增加百分率 Increased percentage ($r/\%$)
A	44.05 $\pm$ 3.82a	66.86 $\pm$ 2.32a	33.97 $\pm$ 4.32a
B	46.88 $\pm$ 7.59a	64.73 $\pm$ 2.55a	27.35 $\pm$ 7.85a
C	42.44 $\pm$ 4.98a	63.06 $\pm$ 8.34a	32.00 $\pm$ 6.40a
D	46.87 $\pm$ 3.02a	58.98 $\pm$ 5.41a	19.87 $\pm$ 7.23a
E	48.66 $\pm$ 0.94a	56.05 $\pm$ 12.20a	10.22 $\pm$ 12.08a

A: 去除植株叶表全部鳞片; B: 去除3/4鳞片; C: 去除1/2鳞片; D: 去除1/4鳞片; E: 不去除鳞片植株. 数据为平均值 $\pm$ 标准误; 相同字母表示差异不显著.
A: removal of all trichomes; B: removal of 3/4 trichomes; C: removal of 1/2 trichomes; D: removal of 1/4 trichomes; E: without removal of trichomes. Values are means $\pm$ SD. The same letter indicates no significant difference.

表3 甲醛胁迫对维路提拉叶绿素含量的影响
Table 3 Changes of chlorophyll a, b and total chlorophyll content of *T. velutina* under formaldehyde stress

处理组 Treatment	叶绿素a Chlorophyll a			叶绿素b Chlorophyll b			叶绿素总含量 Total chlorophyll content		
	甲醛处理前 Before formaldehyde treatment ($w/\text{mg g}^{-1}$)	甲醛处理后 After formaldehyde treatment ($w/\text{mg g}^{-1}$)	减少百分率 Decreased percent ($r/\%$)	甲醛处理前 Before formaldehyde treatment ($w/\text{mg g}^{-1}$)	甲醛处理后 After formaldehyde treatment ($w/\text{mg g}^{-1}$)	减少百分率 Decreased percent ($r/\%$)	甲醛处理前 Before formaldehyde treatment ($w/\text{mg g}^{-1}$)	甲醛处理后 After formaldehyde treatment ($w/\text{mg g}^{-1}$)	减少百分率 Decreased percent ($r/\%$)
A	3.91 $\pm$ 0.48a	2.73 $\pm$ 0.65a	30.71A	1.93 $\pm$ 0.21a	1.06 $\pm$ 0.33a	45.77a	5.85 $\pm$ 0.40a	3.79 $\pm$ 0.56a	54.35A
B	4.87 $\pm$ 0.60a	4.81 $\pm$ 1.21b	1.23B	2.28 $\pm$ 0.33ab	1.87 $\pm$ 0.48b	17.13b	7.15 $\pm$ 0.53a	6.72 $\pm$ 0.97b	6.40B
C	4.96 $\pm$ 0.41ab	4.90 $\pm$ 0.48b	1.21B	2.28 $\pm$ 0.25ab	1.90 $\pm$ 0.26b	16.78b	7.19 $\pm$ 0.42a	6.87 $\pm$ 0.39b	4.66B
D	4.44 $\pm$ 1.22ab	4.35 $\pm$ 0.06ab	2.03B	2.28 $\pm$ 0.47ab	1.95 $\pm$ 0.17b	10.04b	6.73 $\pm$ 0.97a	6.27 $\pm$ 0.20b	7.34B
E	5.85 $\pm$ 0.54b	5.22 $\pm$ 0.75b	9.60B	2.65 $\pm$ 0.15b	2.44 $\pm$ 0.06b	8.45b	8.50 $\pm$ 0.40a	7.66 $\pm$ 0.81b	10.97B

A: 去除植株叶表全部鳞片; B: 去除3/4鳞片; C: 去除1/2鳞片; D: 去除1/4鳞片; E: 不去除鳞片植株. 数据为平均值 $\pm$ 标准误, 不同大写字母和小写字母分别表示不同处理间差异极显著 ($P < 0.01$) 和显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著.
A: removal of all trichomes; B: removal of 3/4 trichomes; C: removal of 1/2 trichomes; D: removal of 1/4 trichomes; E: without removal of trichomes. Values are means $\pm$ SD. Different uppercase and lowercase letters mean significant differences among treatments at 0.01 and 0.05 levels, respectively. The same letter indicates no significant difference.

重要结构, 因此也可同时有效吸收大气中的污染物^[5]. 甲醛是一种无色易溶于水的气体, 当大气中含有甲醛等有毒气体时, 空气凤梨吸收大气中水分的同时也吸收甲醛等有毒气体. Benzing提出空气凤梨鳞片的翼状细胞与外界直接接触, 捕获空气中的水分与养分, 然后利用“虹吸”原理, 经由环状细胞到达碟状细胞将其吸收, 再进一步通过柄状细胞, 最后到达叶肉细胞^[14]. Martin还提出空气凤梨叶表密集的鳞片大多可能由死细胞组成, 每一个都有相对较厚的壁细胞和大量的黏胶质物质, 使之更易吸收大气中的水分和养分^[15].

本研究通过人工去除鳞片验证鳞片对维路提拉吸收甲

醛的影响, 结果显示去除不同程度鳞片的4组植株净化甲醛的能力均低于没有去除鳞片的植株, 并且达到极显著差异, 说明鳞片去除后降低了维路提拉净化甲醛的能力, 鳞片在净化甲醛过程中发挥了重要作用. 这与Pereira等在巴西里约热内卢工业区用松萝凤梨检测持久性有机污染物在大气中的沉降时, 提出松萝凤梨叶片上的鳞片在吸收这些污染物时发挥了重要作用的研究^[16-17]一致. 此外, 李俊霖等在探讨空气凤梨对大气污染物甲醛净化中, 提出空气凤梨比吊兰更能快速有效地净化甲醛, 也与其叶表覆盖的鳞片层相关^[4]. 本研究直观地验证了鳞片促进了空气凤梨吸收甲醛.

按照理论依据, 未去除鳞片的空气凤梨植株净化甲醛

能力应为最高,而去除全部鳞片的空凤植株净化甲醛能力应为最低.本研究的结果显示未去除鳞片的空凤植株净化甲醛能力确为最高,但其余去除鳞片的植株对甲醛的净化能力之间并没有显著性差异,鳞片的去除程度与净化甲醛能力不成正比(表1).这一结果表明,空气凤梨叶表鳞片对甲醛的吸收确实存在一定的影响,但并不是唯一和决定性的因素,还有其他一些因素也会影响甲醛的吸收,如表皮细胞的暴露、气孔的吸收、叶肉细胞间隙大小等.

Filho等在研究松萝凤梨净化Hg时发现Hg被鳞片、茎和叶表面大量吸收,还有少部分被叶表皮细胞吸收^[10],说明茎、叶表皮细胞也能吸收大气污染物,但是鳞片吸收污染物的效果明显大于表皮细胞.本研究中去掉鳞片后,暴露叶表皮细胞(图2),但表皮细胞吸收甲醛的机制和效果还需进一步的实验研究.另外,对于大多数植物而言,气孔是叶片与外界环境进行气体交换的主要通道,是限制甲醛等有毒气体进入植物内部的主要因子.本研究中空气凤梨鳞片去除后,没有发现明显的气孔结构,关于气孔对其吸收甲醛的影响还需进一步的实验论证.

3.2 甲醛对去除鳞片的空气凤梨生理指标的影响

甲醛处理前,5组不同处理的维路提拉人工去除鳞片后,电导率变化不显著,说明鳞片的去除对维路提拉的细胞膜损伤不大.去除全部鳞片的植株叶绿素含量相对于没有去除鳞片的植株减少显著,而去除部分鳞片的植株叶绿素含量相对于没有去除鳞片的植株减少不显著,表明鳞片的全部去除对其光合作用有一定影响.

甲醛熏气处理后,被试植株电导率均升高,所有去除鳞片的植株所测值高于没有去除鳞片的植株,说明甲醛一定程度地破坏了植物的细胞膜,并且去除鳞片的植株的细胞膜受到的伤害比没有去除鳞片的植株更严重.这是因为鳞片的去除暴露了更多的叶表面积,甲醛进入叶片组织的面积增大.

通常情况,逆境胁迫作用下,叶绿素含量会下降,导致叶绿素下降的原因主要是叶绿体结构遭到破坏.本研究中不同处理的植株甲醛胁迫后,鳞片全部被去除的植株叶绿素含量明显降低,说明甲醛进入植物体内对叶绿体造成了一定的损伤.鳞片被部分去除和没有去除的植株叶绿素含量降低不显著,说明在维路提拉净化甲醛时鳞片发挥了重要作用.

参考文献 [References]

- 1 Wolverton BC. How to Grow Fresh Air: 50 House Plants That Purify Your Home or Office [M]. New York: Penguin Books, 1996
- 2 刘艳菊,葛红.室内观赏植物对苯和甲醛的净化研究及养护技术[M].北京:科学出版社,2010 [Liu JH, Ge H. The research and conservation technology of indoor ornamental plants for benzene and formaldehyde purification [M]. Beijing: Science Press, 2010]
- 3 安雪,李霞,潘会堂.16种室内观赏植物对甲醛净化效果及生理生化变化[J].生态环境学报,2010,19(2): 379-384 [An X, Li X, Pan HT. 16 kinds of indoor ornamental plants for effect of purifying formaldehyde and changes of physiological and biochemical [J]. J Ecol Environ, 2010, 19(2): 379-384]
- 4 李俊霖,李鹏,王恒蓉.特殊植物类群空气凤梨对大气污染物甲醛的净化[J].环境工程学报,2013,7(4): 1452-1458 [Li JL, Li P, Wang HR. Purification of air pollutant-formaldehyde with special plant group-epiphytic *Tillandsia* [J]. Chin J Environ Eng, 2013, 7(4): 1452-1458]
- 5 Benzing DH. Bromeliaceae profile of an adaptive radiation [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000
- 6 Brighigna L, Ravanelli M, Minelli A, Ercoli L. The use of an epiphyte (*Tillandsia caput-medusae* morren) as bioindicator of air pollution [J]. Sci Total Environ, 1997, 198(2): 175-180
- 7 Brighigna L, Palandri MR, Giuffrida M, Macchi C, Tani G. Ultrastructural features of *Tillandsia usneoides* L. absorbing trichome during conditions moisture and aridity [J]. Caryologia, 1988, 41(2): 111-129
- 8 Loeschchen VS, Martin CE, Smith M, Eder S. Leaf anatomy and CO₂ recycling during crassulacean acid metabolism in twelve epiphytic species of *Tillandsia* (Bromeliaceae) [J]. Intern J Plant Sci, 1993, 154(1): 100-106
- 9 Alves ES, Moura BB, Domingos M. Structural Analysis of *Tillandsia usneoides* L. exposed to air pollutants in São Paulo City-Brazil [J]. Water Air Soil Pollut, 2008, 189: 61-68
- 10 Filhoa GM, Andrade LR, Farina M. Hg localisation in *Tillandsia usneoides* L. (Bromeliaceae), an atmospheric biomonitor [J]. Atmos Environ, 2002, 36: 881-887
- 11 Peng L, Guiling Z. Potential of monitoring nuclides with the epiphyte *Tillandsia usneoides*: Uptake and localization of ¹³³Cs [J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2012, 35: 881-887
- 12 Wolverton BC, Donald RC, Watkins EA. Foliage plants for removing indoor air pollution from energy efficient homes [J]. Econ Bot, 1984, 38(2): 224-228
- 13 郝再彬,苍晶,徐仲.植物生理实验[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004 [Hao ZB, Cang J, Xu Z. Experimental Plant Physiology [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004]
- 14 Benzing DH, Henderson K, Kessel B, Sulak J. The absorptive capacities of bromeliad trichomes [J]. Am J Bot, 1976, 63: 330-348
- 15 Martin CE. Physiological ecology of the bromeliaceae [J]. Bot Rev, 1994, 1(60): 1-35
- 16 Márcia de SP, Ulrich W, Werner R, João Paulo MT, Olaf M, Wolfgang K. Persistent organic pollutants in atmospheric deposition and biomonitoring with *Tillandsia usneoides* (L.) in an industrialized area in Rio de Janeiro state, southeast Brazil-Part I: PCDD and PCDF [J]. Chemosphere, 2007, 67(9): 1728-1735
- 17 Márcia de SP, Dieter H, Werner R, Rodrigo OM, Luciana SS, João Paulo MT, Olaf M, Wolfgang K. Persistent organic pollutants in atmospheric deposition and biomonitoring with *Tillandsia usneoides* (L.) in an industrialized area in Rio de Janeiro state, southeast Brazil-Part II: PCB and PAH [J]. Chemosphere, 2007, 67(9): 1736-1745