

Dynamic Characteristics of the Absorption and Accumulation of DEHP in the Leaves of *Benincasa hispida*

Zunyi Wu, Hujun Xie, Qizhen Du

School of Food Science and Biotechnology, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou Zhejiang
Email: 04981wuzunyi@163.com

Received: Aug. 16th, 2018; accepted: Aug. 24th, 2018; published: Aug. 30th, 2018

Abstract

The absorption and accumulation characteristics of *B. hispida* leaves on DEHP were compared and analyzed by comparing the absorption and accumulation of DEHP between isolated *B. hispida* leaves and living *B. hispida* leaves. The results showed that the absorption and accumulation of DEHP in isolated *B. hispida* leaves was mainly the distribution mechanism, and the Lagergren two-stage reaction kinetics could be used to describe the process of DEHP *in vitro*. The absorption and accumulation of DEHP in the air melon leaf conformed to the characteristics of the two-compartment model and was well fitted with the actual results ($R^2 > 0.9$).

Keywords

B. hispida, DEHP, Two-Compartment Model, Dynamic Characteristics

冬瓜叶吸收积累DEHP的动力学特性

吴遵义, 谢湖均, 杜琪珍

浙江工商大学, 食品与生物工程学院, 浙江 杭州
Email: 04981wuzunyi@163.com

收稿日期: 2018年8月16日; 录用日期: 2018年8月24日; 发布日期: 2018年8月30日

摘要

通过离体冬瓜叶与活体冬瓜叶对DEHP吸收累积的对比分析, 描述了冬瓜叶对DEHP吸收累积的特性。结果表明: 离体冬瓜叶对DEHP的吸收累积主要是分配作用机制, 符合Lagergren二级反应动力学过程; 活

体冬瓜叶对大气中DEHP的吸收累积符合二室模型特征, 与实际结果拟合效果良好($R^2 > 0.9$)。

关键词

冬瓜, DEHP, 二室模型, 动力学特性

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(di-(2-ethylhexyl) phthalate, DEHP)是邻苯二甲酸酯(phthalic acid ester, PAE)中最常用的化合物, 被广泛用于塑料制品、纺织品、包装材料等, 进入环境的量巨大[1]。DEHP 从环境迁移到农作物, 通过食物链进入人体, 能引起睾丸和肝的损伤, 诱发肝癌, 对人的健康造成重大危害[2] [3]。由于其广泛应用和大量生产, DEHP 已成为各种环境中普遍存在的污染物。

前期的研究表明冬瓜对 DEHP 有很好的吸收作用[4], 植物吸收累积低极性有机污染物的途径已取得基本一致的认识, 即主要是地上部分从大气吸收[5], 但其吸收特性还缺乏系统的研究, 特别是有关蔬菜对 DEHP 吸收和累积的动力学特征等方面几乎还是空白。本文以冬瓜植株为研究对象, 通过离体冬瓜叶与活体冬瓜叶对 DEHP 吸收累积的对比分析, 描述了冬瓜叶对 DEHP 吸收累积的特性, 为从一个很低的极性层面描述植物吸收有机物的行为提供了科学依据, 丰富了选择性环境修复有机污染物的理论参考。

2. 材料和方法

2.1. 实验材料

将从浙江省农科院购得的黑皮冬瓜种子用 1%双氧水浸种 30 min, 然后用蒸馏水冲洗 3 次, 摊晾 5 h, 再将种子浸入 70℃左右的无菌热水中, 浸种 1 h 后置于有两层湿润滤纸的培养皿(Φ9 cm)中在 25℃~30℃条件下黑暗催芽。等瓜苗长至有 2~3 片真叶时将其定植在普通玻璃温室的包含 5 kg 土壤和没有 DEHP 污染的肥料的 30 cm 直径锅中。在冬瓜结果期之后, 三个含有 10 cm 长度果实的植物个体被转移到温室中。DEHP 标准品(GC 色谱纯, 购自 Sigma 公司), 三氯甲烷、二氯甲烷、甲醇、无水硫酸钠等购自华东医药股份有限公司。

2.2. 离体冬瓜叶吸附 DEHP

取适量的冬瓜叶, 洗净后用滤纸吸干样品表面水分, 再用剪刀剪开冬瓜叶, 放入真空冷冻干燥机, 干燥 48 h, 取出, 用高速粉碎机粉碎, 用 18 目的筛子过筛, 转入样品袋, 封口后放入真空干燥器中保存, 备用。用批量平衡法绘制冬瓜叶对 DEHP 的等温吸附曲线。将未被 DEHP 污染的冬瓜叶粉末于 105℃下烘干 24 h 后取出, 为防止空气中的水分进入植物粉末内影响吸附效果, 取出后尽快使用。配置 5 个浓度点(0.01, 0.02, 0.04, 0.05, 0.06 mg/L)的 DEHP 溶液, 准确称取一定质量的冬瓜叶样品, 倒入 25 mL 离心管中, 加入 DEHP 溶液, 其吸附固液比为 2:25, 用内垫锡箔纸的螺口塞拧紧, 让后将离心管放到 20 r/min 的旋转振荡器上振荡 72 h, 取下离心管在 25.4 ± 0.5℃和 4000 r/min 的转速下离心 15 min, 取其上清液,

用 GC/MC 方法测定有机污染物 DEHP 浓度。空白对比实验表明：挥发、光降解、生物降解和瓶子吸附造成的损失均可忽略不计。为此，冬瓜叶对 DEHP 的吸附量可用其起始浓度和吸附平衡浓度的差值来计算。根据冬瓜叶对 DEHP 的吸附量 Q_e (mg/kg) 和平衡时 DEHP 的浓度 C_e (mg/L)，采用批量的方法绘制其等温吸附曲线。

2.3. 活体冬瓜叶吸收 DEHP

设计一个长、宽、高均为 3 m 的温室(钢化玻璃材料)。墙墙上有三个孔($\Phi 5$ cm)，一个在从顶部中线往下 30 cm 处(出风口)，一个在其对立墙面从地面往上 30 cm 处(进风口)，一个是在强的中间(主要用于取样)，该口设计成可关闭的窗口)。为保持整个活体冬瓜植株在恒定的 DEHP 浓度中实验，设计了如图 1 的实验装置：空气发生器(1)，一个容积为 25 mL 的玻璃容器(2)，内装 20 mL DEHP，该容器被安置在一个水浴锅(3)中，玻璃容器通过一根毛细管和三通(4)连接并与载气管相衔接，进气口设在温室的下口，出气口设计在温室的上口并与排风扇(6)相连接。在容器和毛细管上部浓度的迫使 DEHP 通过毛细管扩散，其扩散速率主要依赖毛细管的尺寸和水浴锅的温度及鼓风机速度。在温室的顶部中心，安装有一个电风扇，以 1 rpm 的速度转动以获得速度非常低的气流。以这种方式，冬瓜植株是有可能暴露在一个恒定的 DEHP 浓度中的。例如，为获取一个温室中 DEHP 浓度为 $78.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的温室环境，使用参数为：鼓风机的转速为 2800 r/min，水浴锅温度为 32.6°C ，毛细管长 10 cm，直径为 0.75 mm。为检查所产生的 DEHP 浓度，采用 QCD-5000 智能空气取样器并进行 GC/MC 分析测定，分四次采样，取平均值。

2.4. 活体样品的前处理

称取适量磨碎后的冬瓜叶样品，用滤纸包好，置入索氏抽提管内，然后注入 90 mL 分析纯二氯甲烷，在 88°C 温度下抽提 20 h，再旋转蒸发浓缩至 5 mL。选用 10 mm \times 300 mm 的玻璃柱，用脱脂棉堵住其下端，在玻璃柱中依次装入约 100~120 mm 长的中性氧化铝，约 30~40 mm 长的硅胶和约 30~40 mm 长的无水硫酸钠。中性氧化铝使用前需进行 250°C 条件下在马弗炉内中烘 4 h 的处理，硅胶使用前需进行用二氯甲烷进行索式抽提 12 h，并在 130°C ~ 140°C 条件下烘干的处理，无水硫酸钠需进行 250°C 条件下马弗炉内中烘 4 h 的处理。上样前先用二氯甲烷对柱子进行充分湿润，再将浓缩好的样品转移至柱子过柱，最后用二氯甲烷定容至 10.0 mL，上机检测。

2.5. 样品中 DEHP 测定

按 Sablayrolles 等[6]的方法用 Agilent 6890 GC/5975 MS 气相色谱/质谱联用仪(Agilent Technologies, Palo Alto, CA, USA)测定 DEHP。GC 测定条件为：色谱柱用 HP-5MS 毛细管柱(长 30 m，直径 0.25 mm，孔径 $0.25 \mu\text{m}$)；升温程序： 100°C 保持 1 min，以 $15^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 280°C ，保持 8 min，以 $25^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 290°C ，保持 1 min；载气为 He，流速为 $1.0 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ；不分流进样，进样量为 $1 \mu\text{L}$ 。MS 测定条件为：

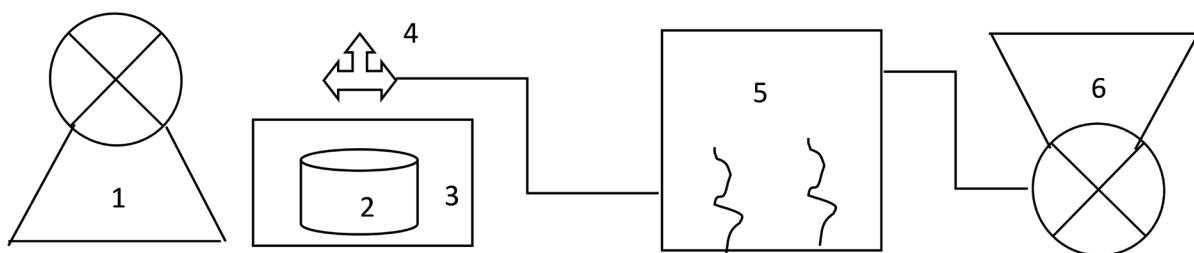


Figure 1. The device of DEHP uptake by the leaves of *Benincasa hispida*
图 1. 冬瓜叶吸收 DEHP 的实验装置图

电子轰击(EI)离子源; 电子能量 70 eV; 离子源温度 230℃; 四极杆温度 150℃, 扫描范围 50~500 amu, 全扫描方式。溶剂切除时间 3 min。DEHP 的含量按如下两个校准曲线计算 $y = 5 \times 10^{-6}x + 0.2638$ (浓度范围 1~50 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$, $R^2 = 0.9930$)及 $y = 4 \times 10^{-6}x + 3.4439$ (浓度范围 50~500 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$, $R^2 = 0.9973$)。所有实验均重复 3 次。

3. 结果与讨论

3.1. 冬瓜叶静态吸附 DEHP

通过吸附试验中 DEHP 的浓度变化来计算出其吸附总量和吸附速率。吸附总量和吸附效率的计算式如下:

$$Q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{W} \quad (1)$$

$$X = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中, Q_e 为单位质量冬瓜叶的吸附量(mg/g); C_e 为吸附后溶液中的 DEHP 浓度(mg/L); C_0 为溶液中 DEHP 的初始浓度(mg/L); V 为溶液体积(mL); W 为冬瓜叶的质量(g); X 则为吸附效率(%)。

由图 2 可知, 冬瓜叶对 DEHP 的吸附效率随冬瓜叶用量的增加而增加, 其单位冬瓜叶的吸附量呈下降趋势, 这表明在冬瓜叶样品用量较大时, DEHP 在冬瓜叶上的吸附达到平衡, 从而导致冬瓜叶上的 DEHP 量无明显增加。当冬瓜叶用量在 0.4~0.5 g 时, 其吸附量和吸附效率变化平缓, 此时, 溶液中 DEHP 的最高去除率可达到 86%左右, 故将 0.5 g 定位离体冬瓜叶的静态吸附试验中冬瓜叶样品添加量。

由图 3 可知, 在 10~20 h 范围内随着吸附时间的增加, 冬瓜叶吸附 DEHP 的效率变化幅度较大, 20 h 后冬瓜叶吸附 DEHP 的效率随时间增加变化的幅度变小, 这可能是因为吸附初期, 在冬瓜叶的表面有较多的吸附空位, 吸附效率较高, 然后随着吸附空位被占据, 吸附效率也逐渐下降; 在 50~60 h 范围内吸附变得非常平缓, 可能是因为冬瓜叶对 DEHP 的吸附与脱附逐渐达到动态平衡。

图 4 为冬瓜离体叶对 DEHP 的吸附等温线。其吸附等温线呈现良好的线性关系($R^2 > 0.99$), 表明冬瓜叶 DEHP 的作用机理主要是分配作用[6]。

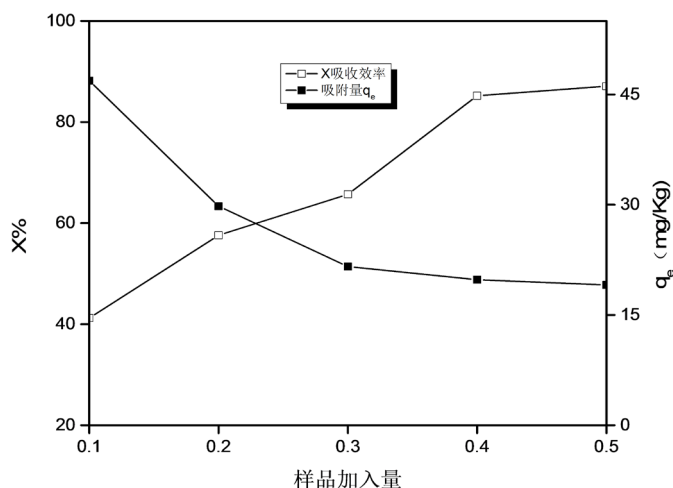


Figure 2. Chang curves of DEHP adsorption efficiency and adsorption amount with the addition of *Benincasa hispida* leaves
图 2. DEHP 的吸附量和吸附效率随冬瓜叶添加量的变化曲线

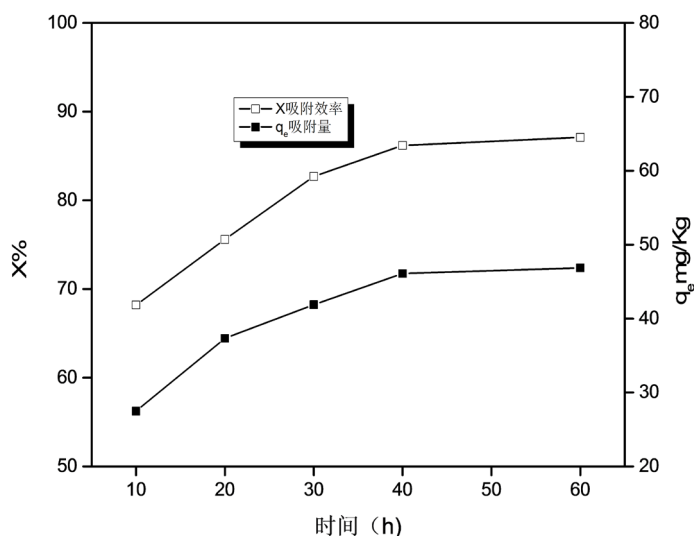


Figure 3. The change of DEHP adsorption efficiency and adsorption amount with the change of reaction time
图 3. DEHP 吸附效率和吸附量随反应时间的变化

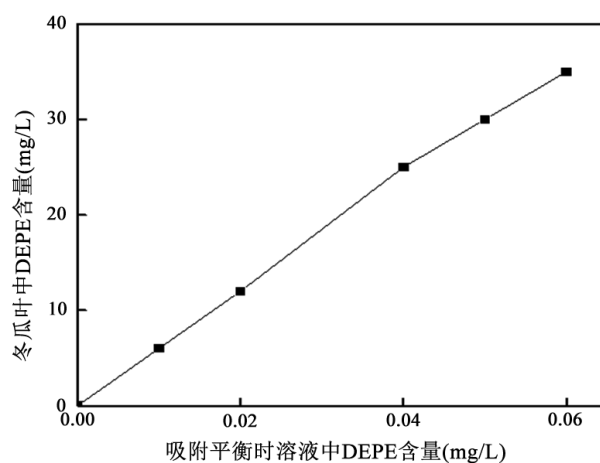


Figure 4. Adsorption isotherms of DEHP by *Benincasa hispida* leaves
图 4. 冬瓜叶对 DEHP 的吸附等温线

3.2. 温度对冬瓜叶吸附 DEHP 的影响

图 5 是 $T = 25^{\circ}\text{C}$ 时, $C_{0, \text{DEHP}} = 5 \mu\text{g/mL}$ 条件下, 冬瓜叶对 DEHP 等温吸附的动力学特征图。由图可知, 冬瓜叶对 DEHP 的吸附总量随着时间的延长而逐渐增加, 其增加幅度是先快后慢, 具体是在开始的 10 h 内吸附总量增加得较快, 之后增加趋势比较缓慢。在其吸附反应进行 40 h 之后基本处于吸附平衡状态。

为揭示冬瓜叶对 DEHP 吸附过程的动力学机制, 我们分别采用 Lagergren 二级反应动力学方程、Elovich 方程、双常数方程、准一级反应动力学方程和内部扩散方程对其吸附数据进行拟合。拟合参数如表 1:

一级反应动力学模型是建立在吸附量与非吸附量成比例的假设基础之上, Lagergren 二级反应动力学模型则是建立在其速率控制步骤是化学反应或通过电子共享或电子得失的化学吸附。从表 1 可以看出, Lagergren 二级反应动力学模型能够较好地描述离体冬瓜叶静态吸附 DEHP 的吸附动力学特征, 同时双常数方程和 Elovich 方程的拟合效果均较好 ($R^2 > 0.9$), 准一级反应动力学方程拟合效果较差。

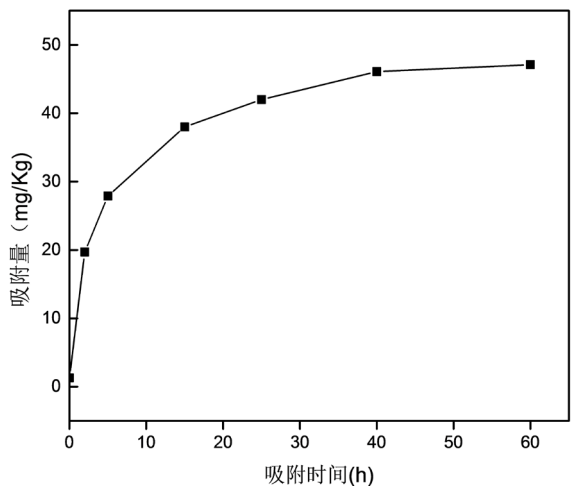


Figure 5. The kinetic parameters of the equations to describe the adsorbing DEHP of *Benincasa hispida* leaves (25 °C)
图 5. 描述冬瓜叶吸附 DEHP 方程的动力学参数(25°C)

Table 1. The kinetic parameters of the equations to describe the adsorbing DEHP of *B. hispida* leaves
表 1. 描述冬瓜叶吸附 DEHP 方程的动力学参数

动力学方程	A	B	K1	K2	Q_e	R^2
Lagergren 方程(一级模型) $n(Q_t - Q_e) = \ln Q_e - k_1 t$	—	—	0.2233	—	43.8515	0.9594
Mckay 方程(二级模型) $\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{K_2 Q_e^2} + \frac{1}{Q_e} t$	—	—	—	0.0074	48.7426	0.9948
颗粒内扩散模型方程 $Q_t = A + Bt^{\frac{1}{2}}$	5.8226	7.9681	—	—	—	0.9233
Elovich 方程 $Q_t = A + B \ln t$	14.473	8.3655	—	—	—	0.9901
双常数方程 $nQ_t = A + B \ln t$	2.8677	0.2599	—	—	—	0.9612

同理，用 Lagergren 二级反应动力学模型拟合冬瓜叶在 35°C 的动力学方程得到：35°C 的最大吸附量 $Q_{max} = 321.4 \text{ mg/kg}$ ，小于 25°C 时的最大吸附量，这表明高温不利于该吸附反应。

温度是最重要的环境参数之一，不同温度条件下，植物角质层吸附性能的差异对植物吸收积累有机污染物具有重要影响[7]。温度对吸附能力的影响可以用热动力学特征参数：标准热力学摩尔自由能变化 (ΔG_m^\ominus)，标准热力学焓变化 (ΔH_m^\ominus) 和标准熵变化 (ΔS_m^\ominus)。根据方程(3)、(4)、(5)和吸附常数可计算出它们的变化值。计算结果如表 2 所示。

$$\Delta G_m^\ominus = -RT \ln k \tag{3}$$

$$\text{Vant Hoff Equ } \ln \left(\frac{k_2}{k_1} \right) = \frac{\Delta H_m^\ominus}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \tag{4}$$

$$\text{Gibbs-Helmholtz Equ } \Delta G_m^\ominus = \Delta H_m^\ominus - T \Delta S_m^\ominus \tag{5}$$

其中 R 是气体常数， k_1 、 k_2 是在 T_1 、 T_2 温度情况下的吸附常数。

由表 2 可知，冬瓜叶吸附 DEHP 在两温度下吸附反应的 ΔS_m^\ominus 都是正值，说明冬瓜叶对 DEHP 的吸附

过程中混乱度增加,表明冬瓜叶对 DEHP 的吸附反应是自发进行的。另外,冬瓜叶吸附 DEHP 是自发进行也可从实验中标准热动力学自由能变化 ΔG_m^\ominus 为负值来判断。由于 35℃ 条件下的 ΔG_m^\ominus 小于 25℃ 条件下的 ΔG_m^\ominus ,说明较低的温度有利于冬瓜叶对 DEHP 的吸附反应,而是一个放热过程,这与该吸附反应的标准焓变 $\Delta H_m^\ominus < 0$ 相吻合。另外,从吸附热 ΔH_m^\ominus 绝对值不到 50 kJ/mol 可判断该吸附过程应介于物理吸附热与化学吸附热之间(通常认为 ΔH_m^\ominus 小于 40 kJ/mol 的过程为物理吸附,而化学吸附的 ΔH_m^\ominus 通常大于 40 kJ/mol) [8],由此可以推断冬瓜叶对 DEHP 的吸附机制为表面化学吸附与物理吸附共同控制,但以物理吸附为主。这与 Lagergren 二级反应动力学能很好描述冬瓜叶对 DEHP 的吸附情况相一致。

温度变化引起植物的吸附性能差异对有机污染物在植物体内分布和迁移影响明显,如由温度差异而引起的季节效应(由于低温,冬天植物有机污染物含量高于夏天,纬度效应(由于低温,高纬度地区植物吸收积累有机污染物的量比低纬度地区多),和山坡的南北面差异(由于低温,北面植物的浓度比南面高 2~6 倍)可见,低温有助于植物从环境中吸收积累有机污染物[7] [9]。

3.3. 活体冬瓜叶吸收累积大气中的 DEHP

图 6 为活体冬瓜叶吸收空气中 DEHP 的时间变化曲线。由图可知,随着时间的延长,冬瓜也中 DEHP 的浓度呈现先增加后减少,其后保持恒定的变化趋势,与冬瓜叶的静态吸附变化情况不一样。造成这种现象的原因可能 DEHP 在活体冬瓜叶的累积过程中还涉及到 DEHP 在冬瓜体内的运转和迁移。根据两厢模型[5]:冬瓜叶由一系列均匀的吸收舱组成,将叶子模拟成两个吸附室(A 室和 B 室),对于 A 室,主要与空气中的 DEHP 完成吸附-解吸平衡,对于 B 室,除与空气中的 DEHP 完成吸附平衡外,DEHP 还会从 B 室中迁移。用数学关系描述如下:

$$\text{对 A 室: } \frac{d\left(\frac{m_A}{V_A}\right)}{dt} = k_1^A C_{air} - k_2^A \left(\frac{m_A}{V_A}\right) \quad (\text{a})$$

$$\text{对 B 室: } \frac{d\left(\frac{m_B}{V_B}\right)}{dt} = k_1^B C_{air} - k_2^B \left(\frac{m_B}{V_B}\right) \quad (\text{b})$$

假设 B 室的消除符合方程 $\frac{dV_B}{dt} = -k_3 V_B$, 在此前提下降 A、B 两室污染物量对时间求导:

$$\frac{dm_A}{dt} = V_A k_1^A C_{air} - k_2^A m_A \quad (\text{c})$$

$$\frac{dm_B}{dt} = k_1^B C_{air} V_B(0) - m_B (K_2^B + k_3) \quad (\text{d})$$

$$\text{冬瓜叶中总的 DEHP 的浓度为: } C_L(t) = \frac{m_A(t) + m_B(t)}{V_A + V_B(t)} \quad (\text{e})$$

经解微分方程(c)和(d),并代入方程(e)得:

$$C_L(t) = \frac{1}{V_A + V_B(0)e^{-k_3 t}} m_A(0)e^{-k_2^A t} + m_B(0)e^{-(k_2^B + k_3)t} + V_A \frac{k_1^A}{k_2^A} C_{air} \left(1 - e^{-k_2^A t}\right) + V_B(0)e^{-k_3 t} \frac{k_1^B}{k_2^B} C_{air} \left(1 - e^{-k_2^B t}\right)$$

式中 k_1^A 、 k_2^A 、 k_1^B 、 k_2^B 、 m_A 、 m_B 、 V_A 、 V_B 是常数。对图 7,利用上述方程,通过 Origin 进行拟合(如图 6),其中各参数为: $V_A = 0.1317$, $V_{B(0)} = 4.059$, $m_{A(0)} = 3.04$, $m_{B(0)} = 2.38$, $k_1^B = 0.059$, $k_2^B = 0.0089$, $k_1^A = 0.0258$, $k_2^A = 0.0018$, $C_{air} = 0.304$, $k_3 = 0.0193$, $R^2 = 0.9823$ 。

Table 2. The thermodynamic parameters of the adsorption of DEHP on *Benincasa hispida* leaves
表 2. 冬瓜叶吸附 DEHP 的热力学参数

温度/K	ΔG_m^\ominus /(kJ/mol)	ΔH_m^\ominus /(kJ/mol)	ΔS_m^\ominus /(kJ ⁻¹ ·mol)
298.2	-14.62	-13.7	30.87
308.2	-14.97	-13.7	41.21

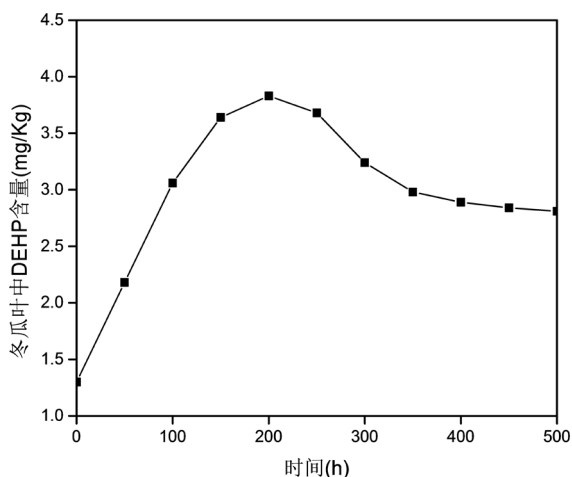


Figure 6. Change curves of DEHP adsorption amount with the increase of time
图 6. 冬瓜叶从空气中吸收的 DEHP 量随时间的变化曲线

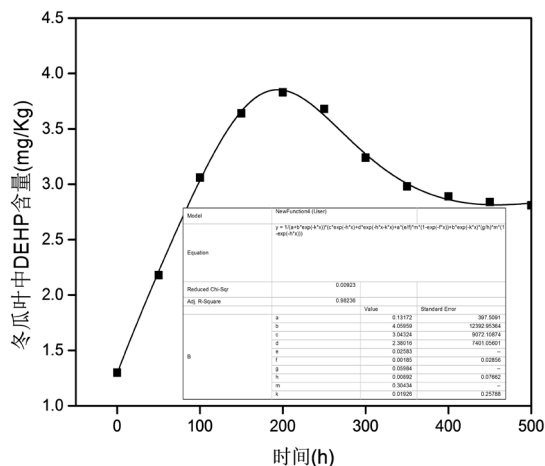


Figure 7. Fitting between the determined values and the calculate values by the two-compartment model equation
图 7. 二室模型方程的拟合

根据拟合情况($R^2 = 0.9823$)发现：冬瓜叶在空气中对 DEHP 的吸附机制可用二室来予以描述。另外，由拟合参数也可知，隔舱 A 和 B 不一定要相互对等。在第一隔舱的吸收归因于角质层，是由于分子从大气的扩散到角质层表面而发生。在第二隔舱的吸收归因于冬瓜叶内部的脂溶性成分，气态污染物可以通过两种途径到达：1) 通过角质层向内在植物细胞扩散；2) 通过气孔摄取，从而达到间隙，然后通过植物细胞扩散、迁移。

4. 结论

冬瓜叶对 DEHP 有较强的吸附能力，其作用机理主要是分配作用；离体冬瓜叶对 DEHP 的吸附动力

学符合 Lagergren 二级反应动力学, 吸附热力学证实其吸附过程属于自发进行过程, 该吸附过程是放热反应, 低温有利于吸附反应的进行; 二室模型能较好地描述活体冬瓜叶对空气中 DEHP 的吸收累积情况。

基金项目

浙江省科技厅项目资助(2017F82G2050025); 浙江工商大学校级项目资助(1110KU1017020)。

参考文献

- [1] Wang, M.J. and Jones, K.C. (1994) Uptake of Chlorobenzenes by Carrots from Spiked and Sewage Sludge-Amended Soil. *Environmental Science & Technology*, **28**, 1260-1267. <https://doi.org/10.1021/es00056a013>
- [2] Wild, E., Dent, J., Thomas, G.O. and Jones, K.C. (2006) Visualizing the Air-to-Leaf Transfer and Within-Leaf Movement and Distribution of Phenanthrene: Further Studies Utilizing Two-Photon Excitation Microscopy. *Environmental Science & Technology*, **40**, 907-916. <https://doi.org/10.1021/es0515046>
- [3] Wild, E., Dent, J., Thomas, G.O. and Jones, K.C. (2005) Real-Time Visualization and Quantification of PAH Photodegradation on and within Plant Leaves. *Environmental Science & Technology*, **39**, 268-273. <https://doi.org/10.1021/es0494196>
- [4] 方杰. 浙江蔬菜 DEHP 含量分析及冬瓜累积 DEHP 途径[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工商大学, 2008.
- [5] Keymeulen, R., Schamp, N. and Van Langenhove, H. (1995) Uptake of Gaseous Toluene in Plant Leaves: A Two Compartment Model. *Chemosphere*, **31**, 3961-3975. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(95\)00269-E](https://doi.org/10.1016/0045-6535(95)00269-E)
- [6] Sablayrolles, C., Montrejeud-Vignoles, M., Benanou, D., Patria, L. and Treilhou, M. (2005) Development and Validation of Methods for the Trace Determination of Phthalates in Sludge and Vegetables. *Journal of Chromatography A*, **1072**, 233-242.
- [7] Satchivi, N.M., Stoller, E.W., Wax, L.M., *et al.* (2000) A Nonlinear Dynamic Simulation Model for Xenobiotic Transport and Whole Plant Allocation Following Foliar Application. I. Conceptual Foundation for Model Development. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, **68**, 67-82. <https://doi.org/10.1006/pest.2000.2501>
- [8] Hung, H.W., Lin, T.F. and Chiou, C.T. (2010) Partition Coefficients of Organic Contaminants with Carbohydrates. *Environmental Science & Technology*, **44**, 5430-5436. <https://doi.org/10.1021/es1004413>
- [9] Riederer, M. and Schönherr, J. (1986) Thermodynamic Analysis of Nonelectrolyte Sorption in Plant Cuticles: The Effects of Concentration and Temperature on Sorption of 4-Nitrophenol. *Planta*, **169**, 69-80. <https://doi.org/10.1007/BF01369777>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2166-613X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjfs@hanspub.org