

# 三氯乙烯和三氯苯在水-玉米-空气系统中的传输过程研究

于开源<sup>1</sup>, 苏玉红<sup>1</sup>, 刘涛<sup>2</sup>, 梁永超<sup>2</sup>

(1.新疆大学化学化工学院, 乌鲁木齐 830046; 2.石河子大学绿洲生态重点实验室, 新疆 石河子 832003)

**摘要:**采用水培实验及光照培养箱培养方法,通过测量玉米木质部伤流液及露珠中三氯乙烯(TCE)和1,2,3-三氯苯(TCB)两种有机污染物的浓度,对比探讨了两种有机污染物在水-玉米-空气系统中的传输过程和机制。结果表明,露珠中TCE与TCB均主要来源于随水蒸气的叶面挥发过程;水培条件下TCB在玉米木质部伤流液中的浓度与根外部水溶液中TCB浓度呈正相关,而露珠中TCB浓度与外部水溶液浓度呈负相关,蒸腾流浓缩系数(TSCF)值由暴露时间决定。实验条件下,根外部溶液浓度较低时,露珠中TCB浓度远大于木质部伤流液中TCB浓度;而高浓度时,木质部伤流液中TCB浓度远大于露珠中浓度。露珠中TCE浓度远大于木质部伤流液中TCE浓度,且与根外部水溶液浓度呈正相关;而木质部伤流液中TCE浓度随营养液中TCE浓度增加而减小。

**关键词:**木质部伤流液;有机污染物;传输;水-玉米-空气体系

**中图分类号:**X171.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)09-1702-04

## Transport Processes of Trichloroethylene and Trichlorobenzene Across the Water-corn-air Interface

YU Kai-yuan<sup>1</sup>, SU Yu-hong<sup>1</sup>, LIU Tao<sup>2</sup>, LIANG Yong-chao<sup>2</sup>

(1.Chemistry Department, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2.Key Laboratory of Oasis Eco-agriculture, College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

**Abstract:** Corn seedlings were exposed separately to culture solutions of trichloroethylene (TCE) or 1,2,3-trichlorobenzene (TCB). Concentrations of TCE and TCB in xylem saps, dewdrops, and final culture solutions were determined to evaluate the transport processes of the two organic compounds in water-corn-air systems. The results indicated that TCE and TCB in dewdrops originated mainly from their volatilization with water vapor from the seedling leaves. The TCB concentrations in xylem saps were positively related to the respective concentrations in the external (culture) solution. In contrast, the TCB concentrations in dewdrops were negatively related to those in the external solution. The transpiration stream concentration factor (TSCF) was found to vary with the exposure time. The TCB concentrations were higher in dewdrops than in xylem saps when the seedlings were exposed to low TCB concentrations in the external solution; the reverse occurred when the seedlings were exposed to high TCB concentrations in the external solution. The TCE concentration in dewdrops increased with increasing TCE concentration in the external solution, and was generally much higher than that in the xylem sap; the TCE concentration in xylem saps decreased sharply with increasing TCE concentration in the external solution.

**Keywords:** xylem sap; organic pollutants; translocation; water-corn-air system

随着工农业生产的发展,大量有机污染物进入环境中,对生态环境造成不利影响,并通过植物吸收进入食物链,威胁人体健康<sup>[1-4]</sup>,因此,研究有机污染物的植物吸收和传输机制,对于有机污染物的生态环境及

人体健康风险评价具有重要的理论和现实意义。

以往的研究结果表明,有机污染物可以通过主动或被动吸收的方式进入植物根部<sup>[5]</sup>,其中根表皮对有机污染物的物理化学吸附在吸收机制中居主导地位<sup>[6-7]</sup>,在根部组织与水溶液间达到分配平衡后,再随蒸腾作用造成的上行传输过程沿木质部向茎叶迁移,累积于植物体内有机组分(主要是脂肪)中<sup>[8-12]</sup>,或挥发至空气中。有机污染物也可以通过植物地上部分吸收空气中的有机污染物<sup>[13-14]</sup>,累积于植物体内各种

收稿日期:2010-03-26

基金项目:国家自然科学基金(20667003);石河子大学绿洲生态重点实验室开放基金

作者简介:于开源(1977—),女,硕士研究生,主要研究方向为环境生物学。E-mail:zhaowt0518@yahoo.cn

通讯作者:梁永超 E-mail:yeliang@shzu.edu.cn

有机组分中,并通过韧皮部少量向地下部传输<sup>[5]</sup>。为了研究有机物从根部向茎部的输送过程,Shone 和 Wood<sup>[6]</sup>定义了蒸腾流浓缩系数 TSCF (Transpiration Stream Concentration Factor),即有机物在木质部溶液中的浓度与根外部溶液中浓度的比值。对于许多有机污染物而言,达到吸收平衡时,TSCF 值与有机物在培养液中的浓度无关,为常数,即有机物从植物根部到茎部的传输过程是一种平衡分配的结果<sup>[6,11]</sup>。文献中 TSCF 值通常根据有机污染物在茎部中的浓度与根外部水溶液中的浓度来估算<sup>[6-7]</sup>,蒸腾流中有机污染物浓度的直接测量数据较为缺乏,一些实验现象无法得到合理解释<sup>[7]</sup>。因此,本文以玉米为研究对象,通过测量木质部伤流液和露珠中两种有机污染物的浓度,探讨其在植物体中的传输过程,试图为正确理解有机污染物的植物吸收和传输过程提供一些直接的证据。

## 1 材料与方法

### 1.1 植物材料

实验用玉米种子(垦粘一号)购自石河子市种子公司,用 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$  浸泡 10 min,清洗干净后置于盛有  $5.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$  的溶液中催芽,每日 2 次更换溶液,种子出芽后移入育苗装置中,用 1/2 强度(即大量组份及微量组分浓度均减半)的 Hoagland 营养液进行通气水培<sup>[8]</sup>。选择 8~9 d 苗龄的玉米苗在光照培养箱中进行实验。整个实验过程中,选择光照处理为 14 h、25  $^{\circ}\text{C}$ ,夜间黑暗处理 10 h、20  $^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.2 实验过程

营养液预通气 1 h 后,加入一定量的有机污染物,用容量瓶定容后摇匀,定量加入外包铝箔纸的玻璃瓶中,迅速移入玉米苗,用海绵及铝箔纸封住瓶口与茎间空隙,放入光照培养箱中进行实验。TCE 实验每个处理设 3 个平行,TCB 实验每个处理设 4 个平行。

**吸收时间实验:**在进入日照条件 2 h 后开始植物吸收实验,24 h (TCE)或 48 h (TCB)后,在距离根部 1~1.5 cm 处用小刀整齐割去地上部分,用冰块预冷的玻璃瓶收集木质部伤流液 1 h 后,定量取出部分收集液及根外部水溶液,准确加入一定量的正己烷进行萃取,分离后测定正己烷中有机物浓度。

**浓度梯度实验:**营养液中 TCE 的起始浓度设为 10、20、30、40  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,TCB 的起始浓度设为 0、0.2、0.4、0.6、0.8  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在进入黑暗条件 2 h 后开始植物吸收实验,22 h 后收集露珠 2 h,然后如上收集伤流液

1 h,定量取出部分收集液及根外部水溶液,用正己烷萃取后测定有机物浓度。

### 1.3 测定方法

溶液中 TCE 和 TCB 浓度用带电子捕获检测器 (ECD)的气相色谱(安捷伦-7890)外标法进行定性定量测定,色谱柱选择 HP-5 型宽口径毛细管柱(0.25  $\mu\text{m} \times 0.32 \text{ mm} \times 30 \text{ m}$ )。相关仪器参数设置如下:进样口温度为 200  $^{\circ}\text{C}$ ;检测器温度为 250  $^{\circ}\text{C}$ ;起始柱温为 40  $^{\circ}\text{C}$ ,停留 0.5 min 后,以 15  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  的速率升至 160  $^{\circ}\text{C}$ ,保持 1 min;TCE 测定采用分流进样方式,分流比为 10:1,TCB 采用不分流进样方式。

### 1.4 统计分析方法

使用 SPSS 14.0 对实验数据进行单向方差分析 (One-way ANOVA)。

## 2 结果与分析

### 2.1 植物生物量

实验中所用玉米苗的生物量列于表 1。由表中数据可知,各实验所用植物生物量没有显著性差异。

表 1 植物生物量( $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ ,鲜重)

Table 1 Biomass of corn seedlings( $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$ , fresh weight)

| 有机物 | 吸收时间实验    |           | 浓度梯度实验    |           |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|
|     | TCE       | TCB       | TCE       | TCB       |
| 生物量 | 1.11±0.04 | 1.09±0.10 | 1.12±0.05 | 1.07±0.04 |
| 显著性 | NS*       |           |           |           |

注:\*Not significant,  $P>0.05$ 。

### 2.2 吸收时间实验

实验条件下,植物根部暴露于有机物污染的营养液中 1 h 即可从玉米木质部伤流液中检测出三氯乙烯(TCE)和 1,2,3-三氯苯(TCB)。对 TCE 而言,伤流液中有有机物浓度先随暴露时间(2 h 内)增加而增加,随后迅速减小,12 h 后伤流液中 TCE 浓度基本保持不变(图 1)。而 TCB 在玉米木质部伤流液中的浓度先随暴露时间增加而减少,6 h 后随暴露时间增加而增加,在 6~48 h 内,蒸腾流系数值与暴露时间呈正相关,但远小于 1(图 2),表明暴露 48 h 后,TCB 从植物地下部向地上部的传输量远未达到平衡分配的要求<sup>[9]</sup>(达到分配平衡时,TSCF 值应接近于 1)。

### 2.3 浓度梯度实验

两种有机污染物的物理化学性质列于表 2。

#### 2.3.1 TCE 在水-玉米-空气系统中的传输

实验结果表明,TCE 在露珠中的浓度远大于其在

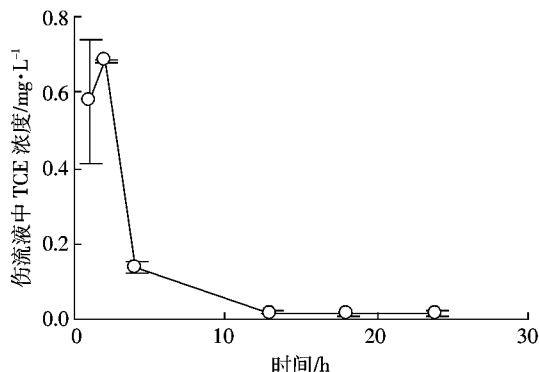


图1 木质部伤流液中 TCE 浓度随吸收时间变化曲线

Figure 1 Time-dependent concentration of TCE in xylem sap

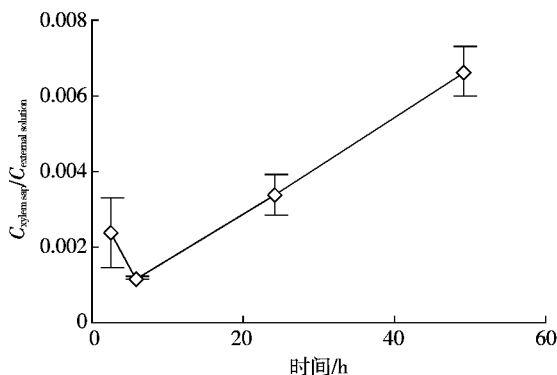


图2 TCB 蒸腾流浓缩系数(TSCF)随吸收时间变化曲线

Figure 2 Time-dependent transpirations stream concentration factor (TSCF) of TCB

表2 两种有机污染物的物理化学性质

Table 2 Physicochemical properties of two organic compounds used in experiments

| 有机物       | 分子量    | 水溶解度 $S_w/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | $\log K_{ow}$ | 亨利常数( $H_c$ )   |
|-----------|--------|----------------------------------------|---------------|-----------------|
| 三氯乙烯      | 131.39 | 1 100                                  | 2.42          | $9.1\text{E}-3$ |
| 1,2,3-三氯苯 | 181.45 | 16.3                                   | 4.04          | $2.3\text{E}-3$ |

木质部伤流液中的浓度(图3),且与根外营养液中 TCE 浓度呈正相关,表明根部吸收的 TCE 能够随木质部蒸腾流迁移至玉米叶片,并迅速挥发。考虑到 TCE 植物吸收浓度梯度实验的所有处理在同时、同空间内进行,且露珠每隔 10~15 min 收集 1 次,露珠中 TCE 主要来源于其随水蒸气从植物叶面上的蒸发,在实验期间内空气中 TCE 溶解于露珠中的量极少,可忽略不计。同期进行的空白水吸收实验也证明了这一点(即取少量水置于培养皿中,吸取露珠的同时,取水溶液进行萃取测定)。

### 2.3.2 TCB 在水-玉米-空气系统中的传输

空白水吸收实验表明,露珠中 TCB 同样主要来

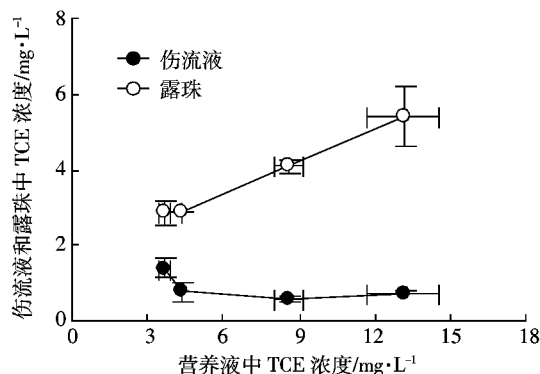


图3 木质部伤流液和露珠中 TCE 浓度随营养液中 TCE 浓度的变化曲线

Figure 3 Change curves of TCE concentrations in xylem sap and dewdrop with TCE concentration in nutrient solution increased

源于植物叶面挥发。当营养液中 TCB 初始浓度为 0 时,经过 24 h 植物根部营养液、木质部伤流液及露珠中均检出了一定量的 TCB(图4),表明类似于 TCE<sup>[15,17]</sup>,玉米地上部能够吸收空气中 TCB,并通过韧皮部向地下部分传输,再由根部释放进入营养液中。

## 3 结论与讨论

木质部伤流液中 TCE 和 TCB 的检测结果进一步证实了两种有机污染物从玉米地下部向地上部的迁移过程。实验结果表明,TCE 在木质部伤流液中的浓度随其在根外营养液中浓度的增加而减小(图3),TSCF 值随营养液中 TCE 浓度增加而迅速减小,单纯用平衡分配理论很难解释这一现象,或许源于玉米叶片具有较强的吸收空气中 TCE 的能力,并能高效向地下部及根际水溶液中运输<sup>[15]</sup>。

另一方面,玉米伤流液中 TCB 浓度与营养液中

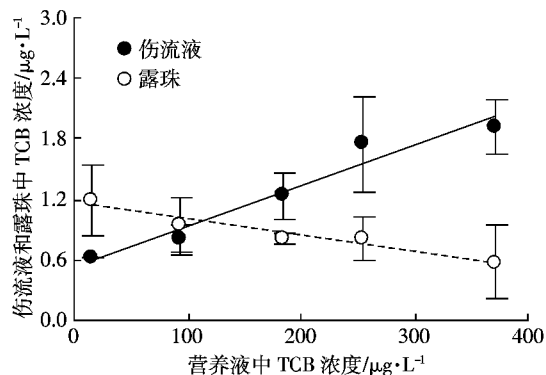


图4 木质部伤流液和露珠中 TCB 浓度随营养液中 TCB 浓度的变化曲线

Figure 4 Change curves of TCB concentrations in xylem sap and dewdrop with TCB concentration in nutrient solution increased

TCB 浓度呈正相关,而露珠中 TCB 浓度与营养液中 TCB 浓度呈负相关(图4)。露珠中 TCB 浓度与木质部伤流液中 TCB 浓度的比值随营养液中 TCB 浓度增加而减小(图5),当营养液中 TCB 浓度较低时(初始营养液中 TCB 浓度为0),露珠中 TCB 浓度大于其在伤流液中的浓度,而营养液中 TCB 浓度较高时,露珠中 TCB 浓度远小于其在伤流液中的浓度(图4),表明 TCB 在玉米叶片与空气界面间能够快速可逆迁移,迁移速率大小主要取决于不同相间化学势的高低。

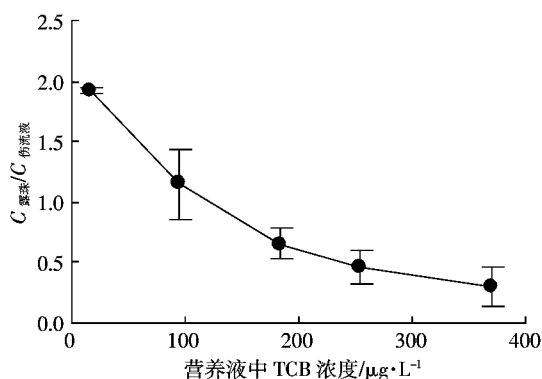


图5 木质部伤流液和露珠间 TCB 浓度的关系

Figure 5 Relationship of TCB concentration in xylem sap and in dewdrop

较低的分子量和辛醇-水分配系数以及较高的挥发性,使得 TCE 在水-玉米-空气系统中的迁移能力远大于 TCB。TCE 的亨利常数是 TCB 的约 4 倍(表2),TCE 随蒸腾水从植物叶面挥发的能力强于 TCB,同时,TCE 的分子量小于 TCB,辛醇-水分配系数( $K_{ow}$ )也远小于 TCB,使得 TCE 比 TCB 更易随水在植物体内迁移,从而导致在水-玉米-空气系统中,TCE 的传输能力强于 TCB;单位时间内,当营养液中有有机污染物浓度与其溶解度的比值相同时,TCE 的 TSCF 值远大于 TCB(图6)。

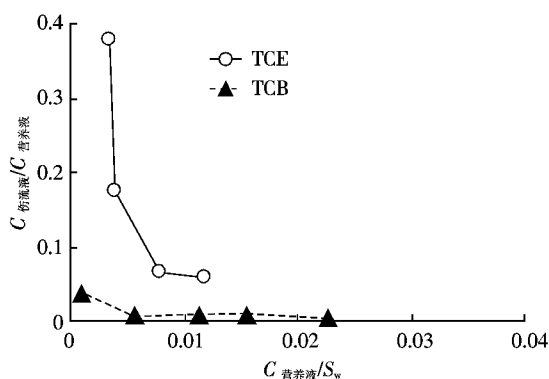


图6 TCE 和 TCB 在植物体内的传输能力

Figure 6 Translocation capacities of TCE and TCB in plant

#### 参考文献:

- [1] Tao S, Cui Y H, Xu F L, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in agricultural soil and vegetables from Tianjin[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 320:11-24.
- [2] Böhme F, Welsch-Pausch K, McLachlan M S. Uptake of airborne semivolatile organic compounds in agricultural plants:Field measurements of interspecies variability[J]. *Environ Toxicol Chem*, 1999, 33: 1805-1813.
- [3] Simonich S L, Hites R A. Organic pollution accumulation in vegetation[J]. *Environ Sci & Technol*, 1995, 29:2905-2913.
- [4] Gao Y Z, Zhu L Z. Plant uptake, accumulation and translocation of pheanthrene and pyrene in soils[J]. *Chemosphere*, 2004, 55(9):1169-1178.
- [5] 王晓蓉. 环境化学[M]. 南京:南京大学出版社, 1997:538-539.
- [6] Wang Xiao-rong. Environ Chemical[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1997:538-539.
- [7] Briggs G G, Bromilow R H, Evans A A. Relationship between lipophilicity and root uptake and translocation of non-ionised chemicals by barley [J]. *Pesticide Science*, 1982, 13:495-504.
- [8] Li H, Sheng G Y, Sheng W T, et al. Uptake of trifluralin and lindane from water by ryegrass[J]. *Chemosphere*, 2002, 48:335-341.
- [9] Li H, Sheng G Y, Chiou C T, et al. Relation of organic contaminant equilibrium sorption and kinetic uptake in plants [J]. *Environ Sci & Technol*, 2005, 39, 4864-4870.
- [10] Barbour J P, Smith J A, Chiou C T. Sorption of aromatic organic pollutants to grasses from water[J]. *Environ Sci & Technol*, 2005, 39:8368-8373.
- [11] McLachlan M S. Bioaccumulation of hydrophobic chemicals in agricultural food chains [J]. *Environ Sci & Technol*, 1996, 30:252-259.
- [12] Chiou C T, Sheng G Y, Manes M. A partition-limited model for the plant uptake of organic contaminants from soil and water[J]. *Environ Sci & Technol*, 2001, 35:1437-1444.
- [13] Su Y H, Zhu Y G. Transport mechanisms for the uptake of organic compounds by rice (*Oryza sativa*) roots[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 148:94-100.
- [14] Barber J L, Kurt P B, Thomas G O, et al. Investigation into the importance of the stomatal pathway in the exchange of PCBs between air and plants[J]. *Environ Sci & Technol*, 2002, 36:4282-4287.
- [15] Wild E, Dent J, Thomas G O, et al. Visualizing the air-to-leaf transfer and within-leaf movement and distribution of phenanthrene:Further studies utilizing two-photon excitation microscopy[J]. *Environ Sci & Technol*, 2006, 40:907-916.
- [16] Schroll R, Bierling B, Cao G, et al. Uptake pathways of organic chemicals from soil by agricultural plants[J]. *Chemosphere*, 1994, 28:297-303.
- [17] Shone M G T, Wood A V. Uptake and translocation of herbicides[J]. *Journal of Experiment Botany*, 1974, 25, 390-400.
- [18] Su Y H, Liang Y C, Zhu Y G. Interactions of mixed organic contaminants in uptake by rice seedlings[J]. *Chemosphere*, 2009, 74:890-895.
- [19] Su Y H, McGrath S P, Zhao F J. Rice is more efficient in arsenite uptake and translocation than wheat and barley[J]. *Plant and Soil*, 2009 (On line).