

# 蔬菜不同部位对 DDTs 的富集与分配作用

郜红建<sup>1,2</sup>, 蒋新<sup>2</sup>, 王芳<sup>2</sup>, 卞永荣<sup>2</sup>

(1.安徽农业大学资源与环境学院,安徽合肥 230036;2.中国科学院南京土壤研究所,江苏南京 210008)

**摘要:**在可控条件下研究了人为污染土壤中 DDT 类污染物在蔬菜(菠菜和胡萝卜)不同部位的富集与分配规律。结果表明,DDT 类污染物在菠菜和胡萝卜叶部和根部均有一定富集,其中菠菜叶面富集量占富集总量的 68.6%~92.2%之间,而胡萝卜叶部富集占富集总量的 34.9%~41.6%之间。不同 DDTs 在菠菜和胡萝卜体内的生物富集量呈  $p, p'-DDE > p, p'-DDT > p, p'-DDD > o, p'-DDE > o, p'-DDT$  的规律。DDTs 通过不同途径在菠菜和胡萝卜内的生物富集系数表现如下规律:  $BCF_{\text{大气-菠菜}} > BCF_{\text{大气-胡萝卜}} > BCF_{\text{土壤-胡萝卜}} > BCF_{\text{土壤-菠菜}}$ 。不同 DDTs 在蔬菜体内的生物富集系数表现为  $BCF_{p, p'-DDE} > BCF_{o, p'-DDE} > BCF_{p, p'-DDD} > BCF_{p, p'-DDT} > BCF_{o, p'-DDT}$ 。由于 DDTs 在蔬菜体内富集后,可沿食物链传递和放大,对农产品质量和人体健康构成直接威胁。

**关键词:** DDTs; 蔬菜; 不同部位; 富集与分配; 污染土壤

中图分类号: X503.231 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2009)06-1240-06

## Accumulation and Distribution of DDTs in Different Parts of Vegetables

GAO Hong-jian<sup>1,2</sup>, JIANG Xin<sup>2</sup>, WANG Fang<sup>2</sup>, BIAN Yong-rong<sup>2</sup>

(1.School of Resources and Environmental Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2.Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Accumulation by plants is an important step for transferring DDT and its metabolites DDE and DDD into the terrestrial food chains. A better understanding the process of DDT and its metabolites accumulation by plants is an essential approach to assess crop contamination and subsequent human exposure. Uptake and distribution of DDTs in different parts of the vegetables (spinach and carrot) from the artificially spiked soils were investigated under the controlled conditions. The results indicated that spinach and carrot can either accumulate DDTs from air through the aboveground parts (leaves) or from soil through the roots. About 68.6% to 92.2% of the DDTs accumulated in the spinach were mainly stored in the leaves. Approximately 58.4% to 65.1% of the DDTs were detected in the roots of carrot. The amounts of the DDTs accumulated in the spinach and carrot were in the same order  $p, p'-DDE > p, p'-DDT > p, p'-DDD > o, p'-DDE > o, p'-DDT$ . Furthermore, the contents of  $p, p'-DDT$  and  $o, p'-DDT$  accumulated in spinach and carrot were lower than their metabolites  $p, p'-DDE$ ,  $o, p'-DDE$ . The accumulative abilities, expressed as a bioconcentration factors (BCF), of DDTs in the spinach and carrot through different ways were in the following sequence  $BCF_{\text{air-spinach}} > BCF_{\text{air-carrot}} > BCF_{\text{soil-carrot}} > BCF_{\text{soil-spinach}}$ . Besides, the bioconcentration factor of DDT, DDE and DDD in vegetables showed the following order  $BCF_{p, p'-DDE} > BCF_{o, p'-DDE} > BCF_{p, p'-DDD} > BCF_{p, p'-DDT} > BCF_{o, p'-DDT}$ . Because of the high accumulative ability in the vegetables, DDT may produce potential risks to food quality and human health.

**Keywords:** DDTs; vegetables; different parts; accumulation and distribution; contaminated soil

DDT 是环境中典型性持久性有机污染物, 由于具有毒性大、难降解、易于在生物体内富集等特性, 被世界各国列为优先控制的污染物<sup>[1]</sup>。我国曾是世界上

DDT 施用量最多的国家之一, 同时又是《POPs 公约》保留生产和使用 DDT 的豁免国, 在一定时期内 DDT 仍可在某些领域继续生产和使用<sup>[2]</sup>。虽然 DDT 在农业上已被禁用 20 多年, 由于这类农药的高化学稳定性, 在土壤<sup>[3-4]</sup>和农产品<sup>[5-6]</sup>中仍然有较高的检出率。土壤中结合残留态 DDT 在一定条件可被活化而表现出一定的生物有效性, 在植物体内富集并沿食物链传递, 对农产品质量和人类健康构成威胁<sup>[7-8]</sup>。

有机污染物在植物体内的富集途径有: 根部吸收

收稿日期: 2008-10-03

基金项目: 国家杰出青年基金(40325001); 江苏省自然科学基金重点项目(BK2005220); 土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金项目(0812000037)

作者简介: 郜红建(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土壤污染与农产品质量方面的研究。E-mail: hjgao@ahau.edu.cn

土壤溶液中的污染物并向地上部分运输,地上部分吸收大气中的气态污染物,叶片吸收溶解在湿沉降颗粒中的污染物,茎叶直接受土壤颗粒与大气颗粒降尘污染等<sup>[9-12]</sup>。其中叶面吸收是有机污染物进入植物体内的主要途径之一,如 Wild 等利用双光子激发显微技术观测到有机污染物在植物叶部吸收和分布的直接证据<sup>[13]</sup>。DDT 在水中的溶解度低,这类物质如何进入植物体内并在农产品中富集至今还不清楚。植物根部和叶部累积 DDT 的比率如何?目前尚无法做出科学的回答。

本文以菠菜和胡萝卜为供试蔬菜,系统研究了人为污染土壤中 DDT 类物质在蔬菜体内的富集规律,菠菜和胡萝卜不同部位对这类物质富集的比率,以期对 DDT 类物质在食物链中的富集和传递提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试剂材料和仪器

p,p'-DDT、p,p'-DDE、p,p'-DDD、o,p'-DDT 和 o,p'-DDE 的标准物质购自德国 Dr. Ehrenstorfer 公司。正己烷、二氯甲烷、丙酮、石油醚等有机溶剂均为分析纯,并经二次蒸馏。浓硫酸和无水硫酸钠为分析纯,用前在 450℃ 的马弗炉中烘烤 6 h,干燥器中冷却。硅胶(80~100 目)在 550℃ 烘 4 h,冷却到室温后,再加入 3% 的去离子水使之失活,200℃ 烘 2 h 后储存在干燥器中。硅藻土载体 545(0.020~0.045 mm)在 550℃ 烘 4 h,用前在 200℃ 烘 2 h 后干燥器中冷却。

气相色谱仪(Agilent6890/ECD<sup>63</sup>Ni)配置 Agilent7683 系列自动进样器,加速溶剂提取仪(Accelerated Solvent Extractor, Dionex 200);日本三洋 MLR-350 植物培养箱;KC-6D 型大气采样器;旋转蒸发器(RE-3000);万能粉碎机(FW100)。所有的玻璃器皿均以洗涤剂洗涤,用自来水冲洗干净,再用重铬酸钾洗液浸泡约 12 h 后,依次用自来水、去离子水冲洗干净,烘干,使用前再用丙酮和石油醚淋洗两次。

### 1.2 土壤和蔬菜样品采集

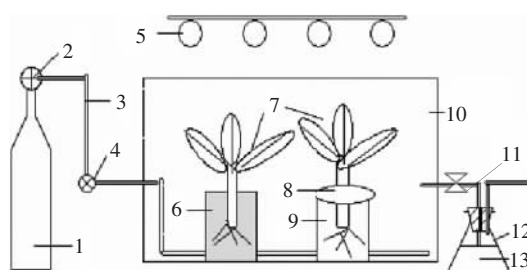
土壤样品采自江苏省常熟市谢桥镇(N31°42', E120°43'),属潴育型水稻土亚类,黄泥土土属,发育于黄土状的湖积母质。风干的土壤去除植物残枝和石块等杂物,研磨过 1 mm 孔径网筛。土壤理化性质为:颗粒组成砂粒(>0.02 mm)21.9%;粉粒(0.02~0.002 mm)41.1%;粘粒(<0.002)31.0%;有机质 21.7 g·kg<sup>-1</sup>;pH6.4(水土比 1:2.5);CEC16.4 cmol·kg<sup>-1</sup>。

春秋大叶菠菜(*Spinacia oleraceae* L)和五寸参胡

萝卜(*Daucus carota* var *sativa* DC)购于南京市蔬菜研究所。

### 1.3 蔬菜的培养

把 p,p'-DDT、p,p'-DDE、p,p'-DDD、o,p'-DDT 和 o,p'-DDE 的标准溶液与土壤充分混匀,使 DDT 各异构体在土壤中的初始浓度均为 400 ng·g<sup>-1</sup>。将 2 kg(干重) DDT 污染土壤转移到 3 L 聚四氟乙烯盆钵中(上下口径和高分别为 17.5、12.0 和 15.5 cm),加入适量自来水,保持 80% 的田间最大持水量。菠菜和胡萝卜种子用 3% 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消毒,恒温(25℃)催芽后,选取萌发整齐的种子播种在盆钵中。两周后间苗和定植,每盆保留 3 株,定量浇水以保持土壤水分的相对恒定。土壤表层覆盖 1 cm 厚的洁净珍珠岩以防止土壤对蔬菜地上部分的污染。蔬菜放置在植物培养装置中培养(图 1)。光照强度用镝灯光源控制为 2.5×10<sup>4</sup> 勒克斯(lx),温度为(25±1)℃,白天和晚上的光照时间分别为 12 h。



1.压缩空气(99.99%) 2.减压阀 3.连接管 4.可调流量计;  
5.镝灯光源(400 W) 6.污染土壤 7.培养蔬菜 8.农用地膜 9.未污染土壤;  
10.玻璃培养装置;11.气泵;12.废气收集瓶;13.石油醚溶剂

图 1 蔬菜模拟培养装置图

Figure 1 Simulative equipment for vegetable cultivation

试验共设 3 种处理:空白对照土壤上种植胡萝卜和菠菜(处理 I),没有 DDT 人为污染土壤上种植胡萝卜和菠菜,用农用地膜将蔬菜地上部分与土壤分开,用胶带封住蔬菜种植孔(处理 II);DDT 人为污染土壤上种植胡萝卜和菠菜(处理 III)。处理 I 和处理 II 放置在同一培养装置中生长(图 1),处理 III 在另一结构相同的培养装置中生长(图 1)。3 种试验处理的培养条件(温度、光照强度和光照时间等)相同。每种蔬菜处理设置 3 次重复。

蔬菜培养期间,每周 3 次用 KC-6D 型大气采样器采集培养箱内的气态 DDTs,流速为 0.5 L·min<sup>-1</sup>,连续收集 12 h,共收集 15 次,其平均值为大气中 DDTs 的质量。假设在实验过程中培养箱内的空气平均密度

保持不变,即为  $1.29 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。每次实验通过大气采样器采集到的空气总质量  $M_{\text{空气}}(\text{g})=12 \text{ h}\times 60 \text{ min}\cdot\text{h}^{-1}\times 0.5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\times 1.29 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 大气中 DDTs 的质量为实际测定的数据  $M_{\text{DDTs}}(\text{ng})$ , DDTs 在空气中的平均含量  $=M_{\text{DDTs}}/M_{\text{空气}}(\text{ng}\cdot\text{g}^{-1})$ 。菠菜和胡萝卜分别生长到 50 d 和 70 d 时把叶部和根部样品分别收获,用自来水和去离子水洗净后,用滤纸吸干表面的水分,称重后放在低温冰箱( $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ )中待测。

#### 1.4 土壤和蔬菜中 DDTs 的提取和净化

土壤和植物样品中的 DDTs 用加速溶剂萃取仪(Dionex 200)进行提取。取 5.0 g 风干土壤样品加入 22 mL 提取池中,用干净石英砂填充剩余体积后,用正己烷和丙酮的混合溶剂(4:1, V/V)提取。提取温度为  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 压强为 10.5 MPa, 静态提取 5 min。提取结束后用 13 mL 相同提取溶剂快速冲洗样品,氮气吹扫 90 s, 收集全部提取溶液。提取液旋转蒸发到 1.0 mL 后,柱层析法净化:6.0 mL 的 SPE 柱中用硅胶作纯化材料,用 10.0 mL 石油醚和二氯甲烷(9:1, V/V)做洗脱溶剂。洗脱液在旋转蒸发仪上浓缩至约 1.0 mL, 转移到 1.0 mL 进样瓶, 柔和  $\text{N}_2$  定容后,气相色谱法分析。

蔬菜样品的提取方法与土壤相同:菠菜和胡萝卜样品各 2.0 g 与 2.0 g 石英砂在研钵中充分研磨后,加入足量硅藻土载体,完全混合后转移到 22 mL 的提取池中提取。提取后的蔬菜样品用浓硫酸磺化法去除色素<sup>[15]</sup>。采用与土壤相同的方法对蔬菜样品进行净化。

#### 1.5 样品中 DDTs 的气相色谱分析方法

Agilent6890(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25  $\mu\text{m}$ )气相色谱柱,进样口温度  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;检测器温度  $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;程序升温:初始温度为  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,保持 1 min;以  $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  升到  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,保持 5 min;然后以  $12\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  升到  $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,

保持 4 min;不分流进样,载气为高纯氮气,流速为  $1.5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ;柱前压为 50 kPa,进样量为  $1.0 \mu\text{L}$ ,外标法定量计算。

#### 1.6 数据分析

所有处理均 3 次重复,土壤和蔬菜中 DDTs 的含量均为 3 次重复的算术平均值。DDTs 在土壤和蔬菜中的含量分别为单位干重和湿重土壤与蔬菜中所含有 DDTs 的 ng 数。DDTs 在大气和土壤到蔬菜中的生物富集系数为蔬菜中 DDTs 的平均含量与大气和土壤中实际测定 DDTs 平均含量的比值,即  $\text{BCF}_{\text{大气-蔬菜}}=W_{\text{DDTs(蔬菜)}}/W_{\text{DDTs(大气)}}$ ,  $\text{BCF}_{\text{土壤-蔬菜}}=W_{\text{DDTs(蔬菜)}}/W_{\text{DDTs(土壤)}}$ 。各处理间差异的显著性检验(ANOVA)采用 SPSS16.0 软件分析。

## 2 结果和分析

### 2.1 DDTs 在菠菜和胡萝卜体内的生物富集规律

本试验模拟 DDT 类物质在人为污染土壤中达到饱和蒸汽压后能够缓慢挥发出来。空白对照组(处理 )为未污染土壤和纯净空气(培养装置内检测不到气态 DDTs), 蔬菜体内 DDTs 的含量为土壤中残留 DDTs 在蔬菜体内的富集量。人为污染土壤中种植的蔬菜(处理 )可以通过蔬菜根部从土壤中富集 DDTs, 也可以通过叶部富集从污染土壤中挥发出来的气态 DDTs; 在相同培养装置内,未污染土壤中种植的蔬菜(处理 )主要通过叶片富集从污染土壤中挥发出来的气态 DDTs。处理 和处理 中菠菜和胡萝卜体内 DDTs 的净富集量为测量值与对照组含量之间的差值。

在处理 中,菠菜体内 DDTs 的富集量在  $2.2\sim 9.8 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  之间,平均为  $5.9 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (表 1)。在处理 中,菠菜通过叶片从生长环境中富集污染土壤中挥发出来

表 1 人为污染土壤中 DDTs 在菠菜和胡萝卜体内的富集量( $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )

Table 1 Quantity of DDTs accumulated in different parts of spinach and carrot from the spiked soil(mean $\pm$ SD,  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )

农药 Pesticides	菠菜 Spinach						胡萝卜 Carrot					
	处理	Treatment	处理	Treatment	处理	Treatment	处理	Treatment	处理	Treatment	处理	Treatment
p-p'-DDT	6.5 $\pm$ 2.3b	C**	18.4 $\pm$ 8.7b	B	20.9 $\pm$ 9.1b	A	5.3 $\pm$ 2.8b	C	6.4 $\pm$ 3.1b	C	17.1 $\pm$ 1.3b	B
p-p'-DDE	9.8 $\pm$ 3.4a	C	25.3 $\pm$ 10.8a	A	27.6 $\pm$ 10.7a	A	8.5 $\pm$ 2.4a	C	9.2 $\pm$ 2.2a	C	20.3 $\pm$ 2.5a	B
p-p'-DDD	2.5 $\pm$ 1.2c	C	9.5 $\pm$ 2.6d	A	10.3 $\pm$ 4.2d	A	3.7 $\pm$ 1.5c	BC	4.3 $\pm$ 3.2c	B	9.4 $\pm$ 3.9c	A
o-p'-DDT	2.2 $\pm$ 0.7c	C	5.9 $\pm$ 3.2e	B	8.6 $\pm$ 3.6d	A	2.8 $\pm$ 1.9c	C	3.2 $\pm$ 2.0cd	C	7.7 $\pm$ 4.3c	A
o-p'-DDE	8.7 $\pm$ 3.8a	C	15.6 $\pm$ 6.4c	B	17.9 $\pm$ 5.5c	A	5.4 $\pm$ 2.1b	D	5.8 $\pm$ 1.8bc	D	16.6 $\pm$ 8.6b	AB
$\Sigma$ DDT	29.7		74.7		85.3		26.7		29.9		71.1	

注:富集量指菠菜和胡萝卜体内的平均含量; $\Sigma$  DDT 为 DDTs 各种异构体含量的总和,\* 每列中的 a-c 表示不同 DDT 在菠菜和胡萝卜体内富集量的差异( $P=0.05$ );\*\* 每行中的 A-D 表示同种 DDT 不同处理条件下在菠菜和胡萝卜富集量的差异( $P=0.05$ )。

p,p'-DDT、p,p'-DDE、p,p'-DDD、o,p'-DDT 和 o,p'-DDE 的量在 5.9~25.3 ng·g<sup>-1</sup> 之间,显著高于对照处理 (P<0.05), 分别是对照处理的 2.8、2.6、3.8、2.7 和 1.8 倍。在处理中,菠菜通过根部和叶部分别从污染土壤和挥发到大气中富集上述 5 种 DDTs 的量在 8.6~27.6 ng·g<sup>-1</sup> 之间,也显著高于对照处理 (P<0.05), 分别是对照处理的 3.2、2.8、4.1、3.9 和 2.1 倍。菠菜在处理

中富集的 p,p'-DDT、p,p'-DDE、p,p'-DDD、o,p'-DDT 和 o,p'-DDE 分别比处理高 13.6%、9.1%、8.4%、45.7%和 14.7%。

胡萝卜在处理中富集的 DDTs 在 2.8~8.5 ng·g<sup>-1</sup> 之间,平均为 5.3 ng·g<sup>-1</sup>。通过胡萝卜叶片从生长环境中富集污染土壤中挥发出来 p,p'-DDT、p,p'-DDE、p,p'-DDD、o,p'-DDT 和 o,p'-DDE 的量在 3.2~9.2 ng·g<sup>-1</sup> 之间,分别是对照处理的 1.2、1.1、1.2、1.1 和 1.1 倍。胡萝卜在处理中分别通过根部从污染土壤和叶部从大气中富集上述 5 种 DDTs 的量在 7.27~20.3 ng·g<sup>-1</sup> 之间,分别是对照处理的 3.2、2.4、2.5、2.8 和 3.1 倍。胡萝卜在处理中富集的 p,p'-DDT、p,p'-DDE、p,p'-DDD、o,p'-DDT 和 o,p'-DDE 分别比处理高 2.7、2.2、2.2、2.4 和 2.9 倍。

不同 DDT 类物质在蔬菜体内的生物富集量不同。p,p'-DDT、p,p'-DDE、p,p'-DDD、o,p'-DDT 和 o,p'-DDE 在菠菜和胡萝卜体内的生物富集量表现为 p,p'-DDE>p,p'-DDT>p,p'-DDD>o,p'-DDE>o,p'-DDT。而且 p,p'-DDE 和 o,p'-DDE 在菠菜和胡萝卜体内的生物富集量显著高于其母体化合物 p,p'-DDT 和 o,p'-DDT (P<0.05)。在菠菜体内 p,p'-DDE 和 o,p'-DDE 在处理中的富集分别是 p,p'-DDT 和 o,p'-DDT 富集量的 1.4 和 2.6 倍,而在处理中分别为 1.3 和 2.1 倍。胡萝卜体内 p,p'-DDE 和 o,p'-DDE 在处理中的富集量分别是 p,p'-DDT 和 o,p'-DDT 富集量的 1.2 和 2.2 倍,在处理中分别是 1.4 和 1.8 倍。

### 2.2 DDTs 在菠菜和胡萝卜不同部位富集量的比率

如果以蔬菜通过根部从污染土壤中富集 DDTs 和通过叶部富集从污染土壤中挥发出来的气态 DDTs 的含量为富集总量(处理) ;在相同培养装置内,蔬菜通过叶片富集从污染土壤中挥发出来的气态 DDTs 的含量为叶部富集量(处理) ,则蔬菜通过根部从污染土壤中富集 DDTs 的含量近似为处理与处理之间的差值。p,p'-DDT、p,p'-DDE、p,p'-DDD、o,p'-DDT 和 o,p'-DDE 在菠菜(图 2)叶部的

富集含量分别占其富集总量的 87.2%、91.7%、92.2%、68.6%和 88.0% ,根部只占其富集总量的 7.8%~31.4%。这 5 种 DDT 类物质在胡萝卜(图 3)叶部的生物富集含量分别占其富集总量的 34.9%、45.3%、45.7%、41.6%和 37.4% ,根部占其富集总量的 65.1%、54.7%、54.3%、58.4%和 62.6% ,即胡萝卜叶部和根部均有一定的富集。

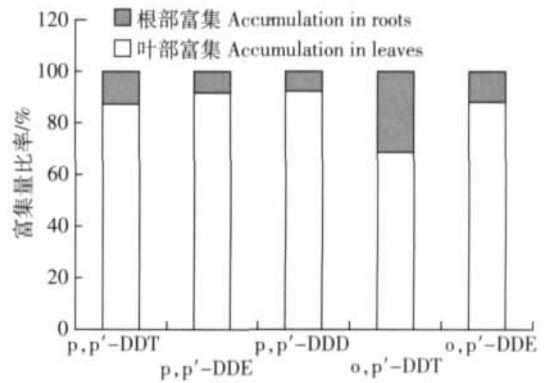


图 2 DDTs 在菠菜不同部位富集量的比率  
Figure 2 Percent of DDTs accumulated in different parts of spinach

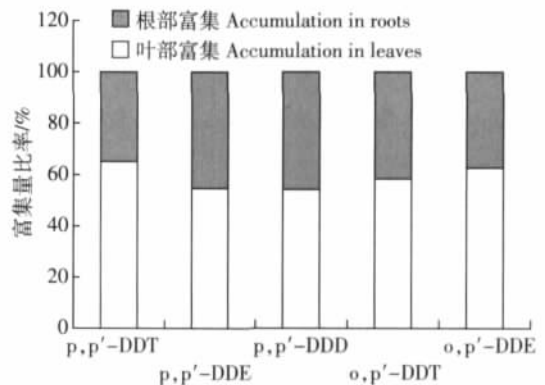


图 3 DDTs 在胡萝卜叶部和根部富集量的比率  
Figure 3 Percent of DDTs accumulated in different parts of carrot

### 2.3 DDTs 在菠菜和胡萝卜体内的生物富集系数

生物富集系数(bioconcentration factor, BCF)是衡量化合物在生物体内富集趋势的参数,定义为平衡时化合物在生物体中与在生长环境中浓度的比值 (C<sub>t</sub>/C<sub>w</sub>)<sup>[16]</sup>。在陆生生态系统中,化学物质在生物体内的生物富集能力也可以用生物富集系数来表示<sup>[17]</sup>。DDTs 在大气-蔬菜系统中的富集系数为蔬菜中 DDTs 的平均含量与大气中平均含量的比值,即 BCF<sub>大气-蔬菜</sub> = W<sub>DDTs(蔬菜)</sub>/W<sub>DDTs(大气)</sub>。DDTs 在土壤-蔬菜系统中的富集系数为蔬菜中 DDTs 的平均含量与收获时土壤中平均含量的比值,即 BCF<sub>土壤-蔬菜</sub> = W<sub>DDTs(蔬菜)</sub>/W<sub>DDTs(土壤)</sub>。

DDTs 通过根部从污染土壤中与通过叶片从培养

装置内的大气中在菠菜和胡萝卜体内的生物富集系数如图 4 所示。 $p, p'$ -DDT,  $p, p'$ -DDE,  $p, p'$ -DDD,  $o, p'$ -DDT 和  $o, p'$ -DDE 在菠菜和胡萝卜体内的生物富集系数呈  $BCF_{\text{大气-菠菜}} > BCF_{\text{大气-胡萝卜}} > BCF_{\text{土壤-胡萝卜}} > BCF_{\text{土壤-菠菜}}$  的规律。菠菜从大气中生物富集 DDTs 的能力要大于胡萝卜, 而其从土壤中生物富集 DDTs 的能力要小于胡萝卜。在菠菜和胡萝卜体内, 不同 DDTs 的生物富集能力也有差异, 表现为  $BCF_{p, p'-DDE} > BCF_{o, p'-DDE} > BCF_{p, p'-DDD} > BCF_{p, p'-DDT} > BCF_{o, p'-DDT}$ 。而且  $p, p'$ -DDT 和  $o, p'$ -DDT 在菠菜和胡萝卜体内的生物富集能力要高于其降解产物  $p, p'$ -DDE 和  $p, p'$ -DDD, 这和 DDTs 在它们体内的生物富集量相一致。

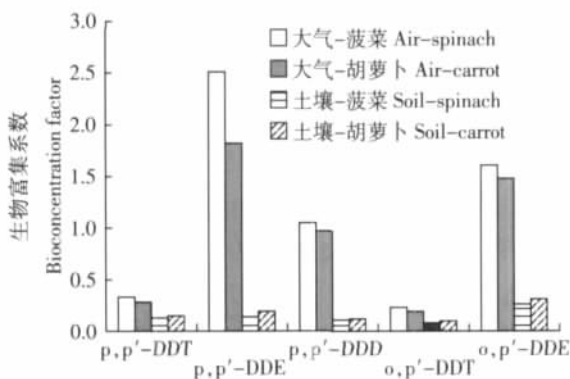


图 4 DDTs 菠菜和胡萝卜体内的生物富集系数

Figure 4 Bioconcentration factor of DDTs in spinach and carrot

### 3 讨论

由于 DDTs 的持久性、挥发性和生物蓄积性, 经作物吸收进入食物链而导致人体暴露是其危害人类健康的主要途径之一<sup>[6]</sup>。植物对有机污染物的吸收主要通过根部和叶面两条途径, 其中作物从土壤中吸收有机物质与该物质的正辛醇-水分配系数、土壤有机质的含量和作物种类有关<sup>[18]</sup>。经根部吸收的有机污染物一般较难向作物其他器官传输, 主要污染具有可食根部的作物, 而叶面吸收的危害则更加直接<sup>[19-20]</sup>。植物吸收大气中的半挥发性有机污染主要与植物和气相之间的平衡分配、动力学控制的干湿沉降和植物叶表面的颗粒结合态沉降等过程有关<sup>[21]</sup>。蒸汽压( $V_p$ )较大的有机污染物主要以气态存在, 以扩散迁移作用为动力的干沉降为其进入植物的主要途径;  $V_p$  较小的有机污染物主要以颗粒态存在, 它可通过干、湿沉降到达植物表面, 其富集程度取决于颗粒物粒径的大小及植物的表面特征<sup>[22]</sup>。不同的植物具有不同的比表面积、结构特征(粗糙度)、脂含量、化学组

成等, 对大气有机污染物的富集能力不同。植物的比表面积愈大、表面粗糙度和脂含量愈高时, 富集大气污染物的能力愈强<sup>[23]</sup>。植物叶片能够与大气接触的面积是其生长所覆盖陆地面积的 6~14 倍; 植物叶面蜡质层的超微结构也能够提高与大气接触有效面积的 1~2 倍。当大气中的半挥发性有机物质附着在植物疏水性叶表皮时, 通过扩散和分配作用使有机物质进入叶表皮, 空气中的有机物质还可通过气孔的气体交换进入叶片内部<sup>[13]</sup>。

本试验结果表明 DDTs 在菠菜和胡萝卜的根部和叶部均有富集, 且不同蔬菜的富集规律表现很大的差异。我们先前的试验结果也表明, 气态 DDT 在菠菜和胡萝卜体内的富集量和富集系数也表现明显差异<sup>[24]</sup>。Klffomd 等<sup>[25]</sup>和 Peters 等<sup>[26]</sup>也得到了相同的结论。这可能与不同蔬菜根和叶的形态结构不同有关(如叶表面积和表皮厚度等)。

本研究结果还表明在土壤对照处理中菠菜和胡萝卜体内仍有一定的 DDT 富集。这可能是土壤中老化态 DDT 在蔬菜根际被活化, 进而被植物吸收。有关植物根际老化态 DDT 的活化机制以及在植物根系的吸收与运输过程还需要进一步研究。

### 4 结论

(1) DDT 类物质可以在菠菜与胡萝卜叶部和根部富集, 其中菠菜以叶面富集为主, 占总富集量的 68.6%~92.2% 之间, 而胡萝卜在根部和叶面均有一定的富集量, 其中叶部占富集总量的 34.9%~41.6% 之间。

(2) 不同 DDT 类在菠菜和胡萝卜体内的生物富集量表现相同规律, 即  $p, p'$ -DDE  $>$   $p, p'$ -DDT  $>$   $p, p'$ -DDD  $>$   $o, p'$ -DDE  $>$   $o, p'$ -DDT。且母体化合物  $p, p'$ -DDT 和  $o, p'$ -DDT 的生物富集量要低于其降解产物  $p, p'$ -DDE,  $o, p'$ -DDE。

(3) DDTs 通过不同途径在菠菜和胡萝卜内的生物富集能力表现为:  $BCF_{\text{大气-菠菜}} > BCF_{\text{大气-胡萝卜}} > BCF_{\text{土壤-胡萝卜}} > BCF_{\text{土壤-菠菜}}$ 。

(4)  $p, p'$ -DDE 和  $p, p'$ -DDD 比其母体化合物  $p, p'$ -DDT 和  $o, p'$ -DDT 更容易被蔬菜吸收和富集。

参考文献:

- [1] 黄俊, 余刚, 钱易. 我国的持久性有机污染物问题与研究对策[J]. 环境保护, 2001, 11: 3-6.
- HUANG Jun, YU Gang, QIAN Yi. The problems of persistent organic pollutants in China and their research countermeasures[J]. *Environmen-*

- tal Protection, 2001, 11 :3-6.
- [2] 钱伯章. 加快削减持久性有机污染物农药污染[J]. 中国农药, 2007 (4) :37.  
QIAN Bo-zhang. Speeded up to cut down the pesticides contamination of persistent organic pollutants[J]. *China Pesticides*, 2007(4) :37.
- [3] Feng K, Yu B Y, Ge D M, et al. Organochlorine pesticide (DDT and HCH) residues in the Taihu Lake Region and its movement in soil-water system . field survey of DDT and HCH residues in ecosystem of the region[J]. *Chemosphere*, 2003, 50 :683-68.
- [4] Gao H J, Jiang X, Wang F, et al. Residual level of chlorinated POPs and estimation of their new input in agricultural soils of Taihu Lake Region[J]. *Pedosphere*, 2005, 15(3) :301-309.
- [5] 张 慧, 刘红玉, 张 利, 等. 湖南省东北部蔬菜土壤中有有机氯农药残留及其组成特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2) :555-559.  
ZHANG Hui, LIU Hong-yu, ZHANG Li, et al. Residues and distribution characters of organochlorine pesticides in vegetable soil in the northeast of Hunan[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2) :555-559.
- [6] Gao H J, Jiang X, Wang F, et al. Residual levels and bioaccumulation of chlorinated persistent organic pollutants (POPs) in vegetables from suburb of Nanjing, China[J]. *Bulltin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2005, 74(4), 673-680.
- [7] Yao F X, Yu G F, Bian Y R, et al. Bioavailability to grains of rice of aged and fresh DDD and DDE in soils[J]. *Chemosphere*, 2007, 68 :78-84.
- [8] 丘耀文, 郭玲利, 张 干. 深圳湾典型有机氯农药的生物累积及其人体健康风险[J]. 生态毒理学报, 2008, 3(1) :42-47.  
QIU Yao-wen, GUO Ling-li, ZHANG Gan. Levels of organochlorine pesticides in organisms from Deep Bay and human health risk assessment[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2008, 3(1) :42-47.
- [9] Trapp S, Mefarlane C. Plant contamination modeling and simulation of organic chemical processes[M]. Lewis Publisher :Chelsea, MI, 1995 :254.
- [10] Simonich S L, Hites R A. Organic pollutant accumulation in vegetation[J]. *Environmental Science and Technology*, 1995, 29 :2905-2915.
- [11] Tao S, Jiao X C, Chen S H, et al. Uptake of vapor and particulate polycyclic aromatic hydrocarbons by cabbage[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 140 :13-15.
- [12] Zuo Q, Lin H, Zhang X L, et al. A two-compartment exposure device for foliar uptake study[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 143 :126-128.
- [13] 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]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40 :907-916.
- [14] 鲁如坤. 土壤农化分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.  
LU Ru-kun. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing :China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [15] 郇红建, 蒋 新, 王 芳, 等. 叶类蔬菜有机氯农药残留测定过程中提取溶剂和净化材料的优化[J]. 环境化学, 2004, 23(5) :587-590.  
GAO Hong-jian, JIANG Xin, WANG Fang, et al. Extraction solvent and solid-phase material in determination organochlorine pesticides in leaf vegetables[J]. *Environmental Chemistry*, 2004, 23(5) :587-590.
- [16] Barton M G. Bioconcentration[J]. *Environmental Science and Technology*, 1990, 24(11) :1612-1618.
- [17] Connell D W, Markwell R D. Bioaccumulation in the soil to earthworm[J]. *Chemosphere*, 1990, 20 :91-100.
- [18] Topp E, Scheunert I, Attar A, et al. Factors affecting the uptake of <sup>14</sup>C labeled organic chemicals by plant from soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1986, 11 :219-228.
- [19] Schonherr J, Reidere M. Foliar penetration and accumulation of organic chemicals in plant cuticles[J]. *Review of Environmental Contamination and Toxicology*, 1989, 108 :1-70.
- [20] Mackay D, Fraser A. Bioaccumulation of persistent organic chemicals : mechanisms and models[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 110 :375-391.
- [21] Franzaring J, Van Der Eerden L J M. Accumulation of airborne persistent organic pollutants (POPs) in plants[J]. *Basic and Applied Ecology*, 2000(1) :25-30.
- [22] 赵玉丽, 杨利民, 王秋泉. 植物——实时富集大气持久性有机污染物的被动采样平台[J]. 环境化学, 2005, 24(3) :233-240.  
ZHAO Yu-li, YANG Li-min, WANG Qiu-quan. Vegetation as a passive sampler for air pollution monitoring of persistent organic pollutants[J]. *Environmental Chemistry*, 2005, 24(3) :233-240.
- [23] Lodovici M, Akpan V, Casalini C, et al. PAHs in leaves as a measure of air pollution in urban and rural sites of Tuscany[J]. *Chemosphere*, 1998, 36 (8) :1703-1712.
- [24] 郇红建, 蒋 新, 常 江, 等. 气态 DDTs 在菠菜和胡萝卜体内的生物富集规律[J]. 中国环境科学, 2006, 26(5) :575-578.  
GAO Hong-jian, JIANG Xin, CHANG Jiang, et al. Bioaccumulation rule of gaseous DDTs in the bodies of spinach (*Spinacia oleraceae* L.) and carrot (*Daucus carota var sativa* DC)[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(5) :575-578.
- [25] Klffom W G, Wandiga S O, Nganga P K, et al. Variation of plant p, p'-DDT uptake with age and soil type and dependence of dissipation on temperature[J]. *Environment International*, 1999, 25(4) :479-487.
- [26] Peters R, Kelsey J W, White J C. Differences in p, p'-DDE bioaccumulation from compost and soil by the plants *Cucurbita pepo* and *Cucurbita maxima* and the earthworms *Eisenia fetida* and *Lumbricus terrestris*[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 148 :539-545.