

# 地膜中酞酸酯类化合物对土壤—玉米的污染及其模型模拟

于立红<sup>1</sup>, 高玉梅<sup>2</sup>, 吴亚铭<sup>1</sup>, 张有利<sup>1</sup>

(1. 黑龙江八一农垦大学, 黑龙江省 大庆 163319; 2. 鸡西市森林病虫害防治检疫站, 黑龙江省 鸡西 158100)

**摘要:** 采用盆栽试验研究了不同地膜残留量处理酞酸酯类化合物邻苯二甲酸二丁酯(DBP)、邻苯二甲酸二异辛酯(DEHP)对土壤—玉米体系的污染及模型模拟。结果表明: 土壤中 DBP 含量 0.024~0.553 mg/kg, DEHP 含量在 0.251~7.120 mg/kg; 植株中 DBP 含量 0.222~1.434 mg/kg, DEHP 含量 0.022~0.234 mg/kg。各生育时期各处理土壤中 DBP 和 DEHP 含量变化规律相同, 高倍地膜残留量处理 DBP, DEHP 含量高于低倍残留量。土壤中 DEHP 含量明显高于 DBP 含量, 植株中 DEHP 含量很低。采用 3 次重复试验数据建立了土壤与植株中 DBP 和 DEHP 含量关系模型, 模型通过了显著性检验, 达到了极显著水平 ( $p < 0.01$ )。DBP 模型的最优模型为  $F = 0.438 + 0.984 \frac{X^2}{\ln^2(X)}$  ( $R = 0.809$ ); DEHP 模型的最优模型为  $F = 0.003X^3 - 0.025X^2 + 0.062X + 0.024$  ( $R = 0.797$ )。采用与建立模型相独立的数据对模型进行了检验, DBP 和 DEHP 最优模型的平均预测误差为 17.5% 和 19.24%, 模型计算值与实测值之间的相关系数  $R$  为 0.712, 0.743, 模型符合程度较好。模型的建立可以为我国农田酞酸酯类化合物精准管理提供理论依据。

**关键词:** 地膜; 酞酸酯; 模型; 玉米

**中图分类号:** X53

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2017)05-0347-05

## Soil-Corn System Polluted by Phthalate Esters in Plastic Film and Its Model Simulation

YU Lihong<sup>1</sup>, GAO Yumei<sup>2</sup>, WU Yaming<sup>1</sup>, ZHANG Youli<sup>1</sup>

(1. Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China;

2. Jixi City Forest Pest Control and Quarantine Station, Jixi, Heilongjiang 158100, China)

**Abstract:** The pot experiment was conducted to study the pollution of dibutyl phthalate(DBP), ethylhexyl phthalate (DEHP) in soil and corn with different residual amounts of mulching plastic film and the model simulation. According to the experiment, contents of DBP are 0.024~0.553 mg/kg and contents of DEHP are 0.251~7.120 mg/kg in soil. contents of DBP are 0.222~1.434 mg/kg and contents of DEHP are 0.022~0.234 mg/kg in plant. The contents of DBP and DEHP in high residual mulching film samples are higher than those in the low and the difference is significant. Change patterns of DBP and DEHP in soil are same in corn growth periods with different residual amounts of mulching plastic film. The contents of DBP and DEHP in high residual mulching film samples are higher than those in the low. Content of DEHP in soil is significantly higher than DBP. Contents of DEHP in plants are very low. The model is established by repeated 3 times test data of DBP and DEHP contents in soil and plant relationship model, model passes the test of significance, reaches to the significant level ( $p < 0.01$ ). Optimal model of DBP content in soil and plant is  $F = 0.438 + 0.984 \frac{X^2}{\ln^2(X)}$  ( $R = 0.809$ ). Optimal model of DEHP is  $F = 0.003X^3 - 0.025X^2 + 0.062X + 0.024$  ( $R = 0.797$ ). Independent data are used to test the model. The average prediction errors of DBP and DEHP model are 17.5% and 19.24%. The correlation coefficients of model between calculated value and measured

data are 0.712 and 0.743. The fit level of the model is good. The model can provide theory basis for precise management of phthalate esters in farmlands.

**Keywords:** plastic film; phthalic esters; model; corn

地膜是农业生产的重要物质资料,具有保湿、保温、防病、防虫、抑制杂草生长等作用,有利于作物生长发育,提高作物产量,极大地促进了我国农业生产的发展。随着地膜使用量和使用年限的增加,大量残留地膜引起的白色污染问题,严重影响了农产品的品质。酞酸酯类化合物又称邻苯二甲酸酯类物质(PAEs),它是塑料生产中为了提高塑料产品的可塑性和强度而添加的一种改性添加剂。研究表明,我国农田土壤—植株存在一定程度的酞酸酯污染问题<sup>[1-5]</sup>。Zeng等<sup>[6]</sup>对广州近郊农田40个土样调查中,检测到的16种酞酸酯类化合物最高含量可达33.6 mg/kg。蔡全英等<sup>[7]</sup>研究表明,广州、深圳地区蔬菜基地表层土壤的27个检测样品中几乎都检测出DEHP与DBP,两者占PAEs总量的90%以上。对于酞酸酯类化合物的研究国内外学者已经做了大量工作<sup>[8-10]</sup>,这些研究主要集中在PAEs对土壤质量、作物生长、土壤酶活性、微生物多样性及作物生理生化等方面的影响研究<sup>[11-12]</sup>。对于PAEs在土壤—植株体系污染的模型研究国内外鲜见报道。本研究基于盆栽试验对玉米生长的各生育时期不同地膜残留量土壤和植株中酞酸酯类化合物邻苯二甲酸二丁酯(DBP)、邻苯二甲酸二异辛酯(DEHP)含量的测定分析,采用多种经验模型进行分析、模拟、检验,建立土壤与植株中酞酸酯类化合物关系的统计估算模型。模型的建立可以为我国农田酞酸酯类化合物精准管理提供有效工具,为地膜安全使用提供理论依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验设在黑龙江八一农垦大学试验基地(大庆),玉米品种先玉131,土壤类型为盐化草甸土。土壤pH值7.8,土壤中PAEs含量为DBP 0.080 mg/kg,DEHP 0.543 mg/kg,土壤养分含量:有机质 $31.48 \times 10^3$  mg/kg,碱解氮124.3 mg/kg,速效磷( $P_2O_5$ )11.5 mg/kg,速效钾( $K_2O$ )161.6 mg/kg。供试地膜宽50 cm,厚0.008 mm,主要成分为聚乙烯、抗氧化剂、增塑剂等,由大庆市第五塑料厂提供。地膜中PAEs含量为DBP 1.037 mg/kg,DEHP 30.964 mg/kg。

### 1.2 试验设计

1.2.1 试验方法 采用盆栽试验,将地膜剪成边长为0.05 m的正方形小块,先均匀搅拌于盆栽土壤

中,然后人工逐个摆种,出苗后每盆定植1株,试验用盆为直径30 cm,高50 cm的瓦盆。每盆施用尿素1.20 g,磷酸二铵0.06 g,硫酸钾0.03 g。人工除草,定期浇水,田间持水量保持在60%左右。各盆栽处理除地膜残留量外无其他因素差异。

1.2.2 试验设计 每个处理12次重复,随机区组排列。试验设4个处理,分别为CK(0 kg/hm<sup>2</sup>),1倍(65.9 kg/hm<sup>2</sup>),3倍(197.7 kg/hm<sup>2</sup>)和5倍(329.5 kg/hm<sup>2</sup>)地膜残留量,即CK处理每盆添加0 g地膜、1倍处理每盆添加0.47 g地膜、3倍处理每盆添加1.41 g地膜、5倍处理每盆添加2.35 g地膜。播种后30,60,90,120 d每个处理各取3个盆栽样品,测定土壤和地上植株中DBP和DEHP含量。试验过程、取样及测定的所有过程均不接触塑料制品。

### 1.3 采样及检测

1.3.1 土壤与植株取样方法 将每盆土壤全部倒出混合均匀后,采用四分法取样。土壤样品自然风干,研磨前去除根系和杂质,过100目尼龙筛保存。植株样品于105℃杀青30 min,70℃烘干称重粉碎。

1.3.2 DBP和DEHP检测 样品提取:用分析天平称取1.00 g样品,放入50 ml的三角瓶中,加30 ml正己烷,浸泡过夜。震荡4 h,提取三次,混合滤液转入装有100 ml硫酸钠溶液的500 ml分液漏斗中,振荡5 min后,静止30 min,充分分层,弃去水相。有机相过无水硫酸钠,放入KD瓶浓缩至1 ml。样品净化:过活化的florisil柱。用丙酮:正己烷(1:9)做淋洗液淋洗。淋洗液转入KD瓶浓缩至1 ml。

采用气相色谱测定,气相色谱仪为Agilent6 890N,配置火焰离子化检测器(FID)(Made in USA),色谱柱采用DP-5毛细管柱。色谱条件:进样口温度:300℃,分流进样。柱箱采用程序升温方式升温。检测器温度320℃,H<sub>2</sub>:40 ml/min,空气:400 ml/min,N<sub>2</sub>:40 ml/min分别测定DBP和DEHP。

### 1.4 统计分析

用Excel 2003软件进行常规图形处理,用SPSS 17.0软件进行统计分析,模型拟合,显著性水平 $p=0.05$ ,极显著水平 $p=0.01$ 。模型的选择标准是:(1)模型和模型的拟合参数概率极显著或显著相关;(2)模型的残差平方和(RSS)较小, $F$ 值较大;(3)模型的调整相关系数( $R_{adj}^2$ )相对较大,三者综合进行考虑,确定最优模型。

本文建立两类模型,一是土壤中 DBP 含量与植株中 DBP 含量关系的单因子模型,二是土壤中 DEHP 含量与植株中 DEHP 含量关系的单因子模型。建立模型的数据为 3 次重复的试验数据,检验模型的数据采用的是与建立本模型相独立的 3 次重复数据。每类模型的建立和检验均采用 48 组数据,模型表达式如下。

$$F=aX+b \tag{1}$$

$$F=a\ln(X)+b \tag{2}$$

$$F=a+b\frac{X^2}{\ln^2(X)} \tag{3}$$

$$F=aX^3+bX^2+cX+d \tag{4}$$

式中: $F$  表示植株中 DBP 或 DEHP 含量; $X$  表示土壤中 DBP 或 DEHP 含量; $a,b,c,d$  为参数,下同。

2 结果与分析

2.1 土壤—植株中酞酸酯类化合物的污染

大豆不同生育时期土壤和植株中 DBP 和 DEHP 含量变化特征见图 1—4。各生育时期各处理土壤中 DBP 含量 0.024~0.553 mg/kg,其中 CK 处理各生育时期土壤中 DBP 含量平均值为 0.058 mg/kg,1 倍地膜残留量处理土壤中 DBP 含量平均值为 0.285 mg/kg,3 倍地膜残留量处理 DBP 的平均值为 0.341 mg/kg,5 倍地膜残留量处理 DBP 的平均值为 0.457 mg/kg;除 CK 外各处理的最高值均出现在生育后期,CK、1 倍、3 倍和 5 倍地膜残留量处理最高值含量分别为 0.08,0.426,0.472,0.553 mg/kg。

7.12 mg/kg,其中 CK 处理各生育时期土壤中 DEHP 含量平均值为 0.362 mg/kg,1 倍地膜残留量处理土壤中 DEHP 含量平均值为 2.489 mg/kg,3 倍地膜残留量处理 DEHP 的平均值为 5.418 mg/kg,5 倍地膜残留量处理 DEHP 的平均值为 5.939 mg/kg;CK、1 倍、3 倍和 5 倍地膜残留量处理最高值含量分别为 0.52,3.322,6.027,7.12 mg/kg。

各生育时期各处理植株中 DBP 含量 0.222~1.434 mg/kg,其中 CK 处理各生育时期植株中 DBP 含量平均值为 0.381 mg/kg,1 倍地膜残留量处理植株中 DBP 含量平均值为 0.447 mg/kg 为,3 倍地膜残留量处理 DBP 的平均值为 0.675 mg/kg,5 倍地膜残留量处理 DBP 的平均值 0.905 mg/kg;各处理的最高值均出现在生育后期,CK、1 倍、3 倍和 5 倍地膜残留量处理最高值含量分别为 0.513,0.587,0.896,1.434 mg/kg。

各生育时期各处理植株中 DEHP 含量 0.022~0.234 mg/kg,其中 CK 处理各生育时期植株中 DEHP 含量平均值为 0.042 mg/kg,1 倍地膜残留量处理植株中 DEHP 含量平均值为 0.059 mg/kg,3 倍地膜残留量处理 DEHP 的平均值为 0.067 mg/kg,5 倍地膜残留量处理 DEHP 的平均值为 0.109 mg/kg;各处理的最高值均出现在生育后期,CK、1 倍、3 倍和 5 倍地膜残留量处理最高值含量分别为 0.067,0.087,0.136,0.234 mg/kg。各生育时期各处理土壤中 DBP 和 DEHP 含量变化规律相同,无论是土壤还是植株中 DBP 和 DEHP 含量都是高倍地膜残留量处理高于低倍地膜残留量处理。

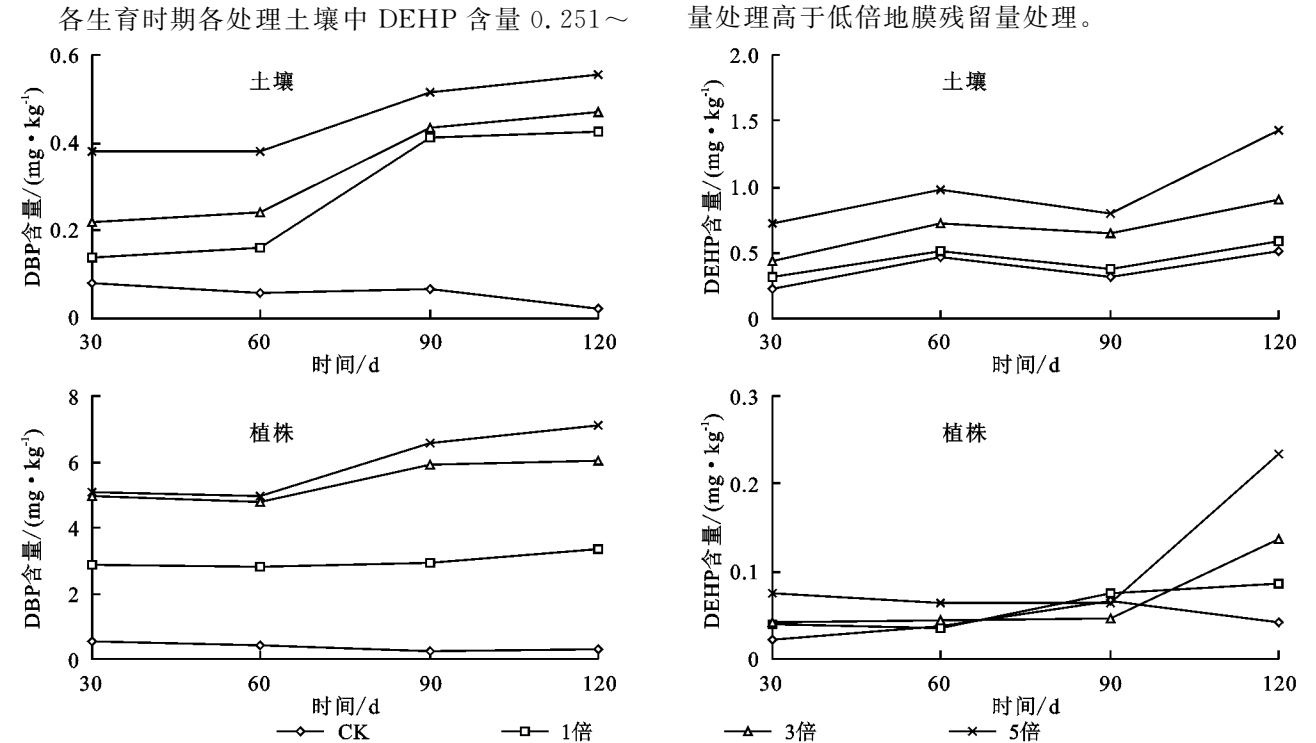


图 1 玉米各生育时期各处理土壤、土壤中 DBP、DEHP 含量比较

2.2 模型的建立

分别用表 1,2 中 4 类模型模拟土壤与植株中 DBP 和 DEHP 含量的关系,模型模拟表明,土壤中 DBP 和 DEHP 含量与玉米植株中 DBP 和 DEHP 含量之间有较强的相关关系。DBP 含量的 4 类拟合模型的调整相关系数  $R$  为  $0.595\sim 0.809$ ,相关关系均达到了极显著水平( $p<0.01$ )。其中模型  $F=a+b\frac{X^2}{\ln^2(X)}$  参数敏感性达到了极显著水平,RSS 最小, $F$  值最高, $R$  最大,所以土壤与植株中 DBP 含量的最优模型为  $F=0.438+0.984\frac{X^2}{\ln^2(X)}$  ( $R=0.809$ )。DEHP 含量的 4 类拟合模型的调整相关系数  $R_{adj}^2$  为  $0.396\sim 0.797$ ,相关关系均达到了极显著水平( $p<0.01$ )。其中三次方模型参数  $a,b$  敏感性达到了极显著水平, $c,d$  敏感性达到了显著水平。RSS 最小, $F$  值最高, $R$  值最大,所以土壤与植株中 DEHP 含量的最优模型为三次方模型  $F=0.003X^3-0.025X^2+0.062X+0.024$  ( $R=0.797$ )。

表 1 土壤与植株中 DBP 和 DEHP 含量关系的模型参数

| 指标   | 模型                          | 参数                |          |         |         |
|------|-----------------------------|-------------------|----------|---------|---------|
|      |                             | $a$               | $b$      | $c$     | $d$     |
| DBP  | $F=aX+b$                    | 1.222***          | 0.272*** |         |         |
|      | $F=a\ln(X)+b$               | 0.192***          | 0.922*** |         |         |
|      | $F=a+b\frac{X^2}{\ln^2(X)}$ | 0.438***          | 0.984*** |         |         |
|      | $F=aX^3+bX^2+cX+d$          | 15.618            | -9.644   | 2.242   | 0.296   |
| DEHP | $F=aX+b$                    | 0.012***          | 0.026    |         |         |
|      | $F=a\ln(X)+b$               | 0.017             | 0.055*** |         |         |
|      | $F=a+b\frac{X^2}{\ln^2(X)}$ | 0.028             | 0.006**  |         |         |
|      | $F=aX^3+bX^2+cX+d$          | 0.003***-0.025*** |          | 0.062** | 0.024** |

注: \*\* 表示模型或参数的敏感性达到了显著水平; \*\*\* 表示模型或参数的敏感性达到了极显著水平。

表 2 土壤与植株中 DBP 和 DEHP 含量关系的模型检验

| 指标   | 模型                          | 残差平方和 | $F$ 值  | 相关系数  | 显著性 |
|------|-----------------------------|-------|--------|-------|-----|
| DBP  | $F=aX+b$                    | 0.673 | 15.108 | 0.720 | *** |
|      | $F=a\ln(X)+b$               | 0.904 | 7.657  | 0.595 | *** |
|      | $F=a+b\frac{X^2}{\ln^2(X)}$ | 0.483 | 26.543 | 0.809 | *** |
|      | $F=aX^3+bX^2+cX+d$          | 0.509 | 6.995  | 0.798 | *** |
| DEHP | $F=aX+b$                    | 0.028 | 5.908  | 0.545 | *** |
|      | $F=a\ln(X)+b$               | 0.034 | 2.603  | 0.396 | *** |
|      | $F=a+b\frac{X^2}{\ln^2(X)}$ | 0.030 | 4.685  | 0.501 | *** |
|      | $F=aX^3+bX^2+cX+d$          | 0.015 | 6.972  | 0.797 | *** |

2.3 模型检验

采用平均预测误差 MPE 和相关系数  $R$  对模型的预测精度进行检验。所建立的 DBP 和 DEHP 模型都通过了显著性检验,达到了极显著水平( $p<0.01$ )。DBP 和 DEHP 模型的平均预测误差为  $17.5\%$  和  $19.24\%$ ,相关系数  $R$  为  $0.712,0.743$ (表 3)。结果表明,模型的计算值与实测值符合程度较好,模型具有较好的适切性。

$$MPE=\frac{100}{n}\sum_{i=1}^n\frac{|Y_{i\text{测定值}}-Y_{i\text{计算值}}|}{Y_{i\text{测定值}}}$$

表 3 DBP 和 DEHP 最优模型的检验结果

| 指标   | 最优模型                        | 平均预测<br>误差 MPE/% | 相关<br>系数 R | 显著性 |
|------|-----------------------------|------------------|------------|-----|
| DBP  | $F=a+b\frac{X^2}{\ln^2(X)}$ | 17.52            | 0.712      | *** |
| DEHP | $F=aX^3+bX^2+cX+d$          | 19.24            | 0.743      | *** |

3 讨论与结论

(1) 试验表明土壤中 DEHP 含量明显高于 DBP 含量,这可能与地膜本身 DEHP 含量较 DBP 含量明显偏高有关系,也可能与 DBP 和 DEHP 在土壤中的降解速度有关。研究表明<sup>[13]</sup>,土壤中邻苯二甲酸酯类化合物的降解主要是在微生物的作用下完成的,碳链越短,降解速度越快,土壤中含量越低。陈英旭等<sup>[14]</sup>在对土壤中 DBP 和 DEHP 的降解速度研究中进一步指出,其研究的 3 类土壤中 DBP 的降解速度均大于 DEHP,降解速度可以用一级反应动力学方程来模拟。本研究与前人研究结果相同。

本研究还发现虽然土壤中 DEHP 含量高于 DBP 含量,但是玉米植株中 DEHP 含量却很低,明显低于 DBP。研究者之前在对大豆各生育时期植株体内 DEHP 含量的检测也发现,DEHP 含量很低,检测不出来<sup>[1]</sup>。而尹睿等<sup>[5]</sup>的研究结果证实,土壤中的 DEHP 绝大多数都被土壤颗粒所吸附,植物的地上部分 DBP 的含量较高,而 DEHP 含量很低,植物对 DEHP 的吸收性差。Kato 等<sup>[15]</sup>也报道了生长于 DEHP 污染的土壤上的茼蒿、茼蒿和菠菜中测不到 DEHP。众多试验表明地膜中 DEHP 对植物的生长是安全的。

(2) 模型模拟表明,土壤与玉米植株中 DBP 含量的关系模型中,最优模型为  $F=0.438+0.984\frac{X^2}{\ln^2(X)}$  ( $R=0.809$ ),DEHP 最优模型为三次方模型,其模型表达式为  $F=0.003X^3-0.025X^2+0.062X+0.024$  ( $R=0.797$ )。土壤中 DBP 和 DEHP 含量与玉米植株中 DBP 和 DEHP 含量呈正相关关系,这与研究者之前在对土壤—大豆植株中 DBP

和 DEHP 含量的污染研究结论相一致<sup>[16]</sup>。

(3) 土壤与植株中 DBP 和 DEHP 含量关系受地膜中酞酸酯类化合物含量、土壤类型、酞酸酯类化合物在土壤中的降解速度、植株根系对酞酸酯类化合物的吸收速度等多种因素的影响。地膜在生产过程中需添加 40%~60% 不等的酞酸酯类化合物作为增塑剂以保证塑料的可塑性<sup>[17]</sup>。不同种类、厚度的地膜酞酸酯类化合物的含量不同,因此进入到土壤中的酞酸酯类化合物存在差异性。土壤类型不同,土壤容重、含水量、pH 值及土壤有机碳含量不同,土壤中酞酸酯化合物含量也不同。有研究表明,土壤中酞酸酯类化合物含量与土壤容重存在一定的相关性,土壤容重较大的土壤,酞酸酯类化合物含量较高<sup>[18]</sup>。土壤中微生物种类、数量及酶活性影响着地膜的降解速率,同时也影响着植物根系在土壤中的吸收和在植株中的迁移转化速率<sup>[14]</sup>。本研究中未考虑上述因素对模型的影响,因此模型拟合结果存在不确定性。

取样测定的频率也是影响模型估算不确定性的重要因素。数据是模型建立的基础,理论上检测数据应尽可能多,才能更贴切地模拟模型。本研究是在玉米的各个生育期进行采样测定,试验遇到特殊天气情况无法取样时推迟取样,在测定中可能遗漏掉酞酸酯类化合物在土壤和植株中季节变化的峰值。因此,本研究中模型拟合结果的不确定性可能较大。

(4) 植株中 DBP 和 DEHP 含量受众多因子协同作用的影响,此次研究主要集中于对土壤中 DBP 和 DEHP 含量与植株中 DBP 和 DEHP 含量的估算模型研究,缺乏对环境因子影响的综合评价。今后在植株中酞酸酯类化合物模型建立研究中,应综合考虑土壤类型、微生物、酶活性等参数的长期观测试验研究,建立各环境因子耦合的交互作用模型,以提高模型的精确度。

#### 参考文献:

- [1] 于立红,王鹏,焦峰,等. 地膜中酞酸酯类化合物及重金属对土壤—大豆体系的污染研究[J]. 水土保持研究, 2011,18(3):30-34.
- [2] 蔡全英,莫测辉,吴启堂,等. 水稻土施用城市污泥盆栽通菜土壤中邻苯二甲酸酯(PAEs)的残留[J]. 环境科学学报, 2003,23(3):365-369.
- [3] 庞金梅,段亚利,池宝亮,等. DEHP 在土壤和白菜中的残留及毒性分析[J]. 环境化学, 1995,14(3):239-242.
- [4] 尹睿,林先贵,王曙光,等. 农田土壤中酞酸酯污染对辣椒品质的影响[J]. 农业环境保护, 2002,21(1):1-4.
- [5] 尹睿,林先贵,王曙光,等. 土壤中 DBP/DEHP 污染对几种蔬菜品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004,23(1):1-5.
- [6] Zeng F, Cai K Y, Xie Z Y, et al. phthalate esters (PAEs): Emerging organic contaminants in agricultural soils in peri-urban areas around Guangzhou, China[J]. Environ. Pollu., 2008,156:425-434.
- [7] 蔡全英,莫测辉,李云辉,等. 广州、深圳地区蔬菜生产基地土壤中邻苯二甲酸酯(PAEs)研究[J]. 生态学报, 2005,25(2):283-285.
- [8] Holger M K, Hermann M B, Jürgen A. Di(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) metabolites in human urine and serum after a single oral dose of deuterium-labelled DEHP[J]. Archives of Toxicology, 2004,78(3):123-130.
- [9] Patil N K, Kundapur R, Shouche Y S, et al. Degradation of a Plasticizer, di-n-Butylphthalate by *Delftia* sp. TBKNP-05[J]. Current Microbiology, 2006, 52(3): 225-230.
- [10] Patil N K, Karegoudar T B. Parametric studies on batch degradation of a plasticizer di-n-butylphthalate by immobilized *Bacillus* sp[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2005,21(8):1493-1498.
- [11] 秦华,林先贵,陈瑞蕊,等. DEHP 对土壤脱氢酶活性及微生物功能多样性的影响[J]. 土壤学报, 2005,42(5): 829-834.
- [12] 高军,陈伯清. 酞酸酯污染土壤微生物效应与过氧化氢酶活性的变化特征[J]. 水土保持学报, 2008,22(6): 166-169.
- [13] 张建,石义静,崔寅,等. 土壤中邻苯二甲酸酯类物质中降解及其对土壤酶活性的影响[J]. 环境科学, 2010,31(12):3056-3061.
- [14] Chen Y X, Sheng D S, Hu Z Q, et al. Degradation of phthalic acid esters (PAEs) in soils[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1997,17(3):340-345.
- [15] Kato K, Nakaoka T, Ikeda H. Contamination of phthalic acid esters in vegetables[C]// Chem. Abstr. 1981,95:60034K.
- [16] 于立红,于立河,王鹏,等. 地膜中邻苯二甲酸酯类化合物及重金属对土壤—大豆的污染[J]. 干旱地区农业研究, 2012,30(1):43-47.
- [17] 安琼,靳伟,李勇,等. 酞酸酯类增塑剂对土壤—作物系统的影响[J]. 土壤学报, 1999,36(1):118-125.
- [18] 汪军,骆永明,马文亨,等. 典型设施农业土壤酞酸酯污染特征及其健康风险[J]. 中国环境科学, 2013,33(12):2235-2243.