

# 莠去津在吉林省不同土壤类型中的解吸特征

孙静<sup>1</sup>, 马秀兰<sup>1,2</sup>, 刘鑫<sup>1</sup>, 张婧<sup>1</sup>, 李婷<sup>1</sup>, 张浩<sup>1</sup>, 王玉军<sup>1</sup>

(1.吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118;

2.农业部产地环境污染防治重点实验室, 天津市农业环境与农产品安全重点实验室, 天津 300011)

**摘要:** 为了探究莠去津污染土壤中莠去津的解吸特性, 通过批量平衡法, 研究了莠去津在白浆土、黑土、盐碱土上的解吸特征及影响因子。结果表明: 3种土壤类型中莠去津的解吸过程经历了快速解吸、慢速解吸、最终达到解吸平衡3个阶段, 平衡时间为720 min; 采用准二级动力学方程拟合效果最好。Freundlich方程可以较好地描述莠去津在3种土壤中的解吸等温曲线( $R^2 > 0.969$ )。  $\Delta G < 0$ ,  $\Delta H > 0$ ,  $\Delta S > 0$  说明其解吸为自发吸热且无序的过程。莠去津在盐碱土中的解吸率最高, 其次为黑土, 白浆土解吸率最低。土壤pH升高或添加生物炭均能够降低莠去津在土壤中的解吸。

**关键词:** 莠去津; 白浆土; 黑土; 盐碱土; 解吸

中图分类号: S-3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)04-0315-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.04.044

## Study of Atrazine Desorption on Different Soils in Jilin Province

SUN Jing<sup>1</sup>, MA Xiulan<sup>1,2</sup>, LIU Xin<sup>1</sup>, ZHANG Jing<sup>1</sup>, LI Ting<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>, WANG Yujun<sup>1</sup>

(1.College of Resources and Environmental, Jilin Agricultural University, Changchun 130118;

2.Key Laboratory of Environmental Pollution Prevention and Control, Ministry of Agriculture, Tianjin Key Laboratory of Agricultural Environment and Agricultural Product Safety, Tianjin 300011)

**Abstract:** To investigate the desorption characteristics of atrazine in different soils contaminated by atrazine, the desorption behavior and its affecting factors were studied by batch balance method in albic soil, black soil, and saline soil. The results showed that the process of atrazine desorption in the three soils experienced three stages: rapid desorption, slow desorption and finally desorption equilibrium, and the equilibrium time was 12 h. Freundlich equation could better describe the desorption isotherm curve of atrazine in three soils ( $R^2 > 0.969$ ).  $\Delta G < 0$ ,  $\Delta H > 0$ ,  $\Delta S > 0$ . This indicated that desorption was a spontaneous and disordered process of heat absorption. Atrazine had the highest desorption rate in saline soil, followed by black soil and albic soil. Increasing the pH value of soil or adding biochar could reduce the desorption capacity of atrazine in soil.

**Keywords:** atrazine; albic soil; black soil; saline-alkali soil; desorption

莠去津作为长期大面积使用的均三氮苯类有机农药,常施用于玉米的苗前、苗后用于除草,在莠去津施加过程中会有20%~70%长期残留于土壤中,是世界范围内土壤和地下水中最常检测到的农药之一<sup>[1-2]</sup>。莠去津分子被土壤颗粒吸附后,部分小分子依附于土壤颗粒表面或缝隙中,容易被解吸、被生物利用或迁移,莠去津在不同土壤环境中解吸的难易程度,直接影响其流动性及生物利用率<sup>[3]</sup>。有研究<sup>[4]</sup>发现,不同土壤类型中有机质含量、pH、土壤地质等因素直接影响莠去津的解吸特征。在土壤酸化及盐碱

化土壤中莠去津污染现象的频发对地表水及地下水造成严重污染。

白浆土、黑土和盐碱土为我国东北地区典型的农田土壤类型,其主要种植作物为玉米。白浆土质地较黏重,大多呈酸性,黑土层薄,白浆层明显,有机质含量不高;黑土多呈中性,有机质含量高且有肥沃的腐殖质层;盐碱土有机质含量较少,土壤胶体中含有大量交换性钠,呈强碱性<sup>[5]</sup>。

目前,国内外已有很多学者对莠去津在不同土壤类型中的解吸特征进行了相关研究, Huang等<sup>[6]</sup>研

收稿日期: 2018-12-24

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200203); 国家重点专项(2016YFC0501201); 吉林省自然科学基金项目(20180101086JC); 国家自然科学基金项目(31672051)

第一作者: 孙静(1994—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事农田面源污染防治研究。E-mail: 651811397@qq.com

通信作者: 马秀兰(1974—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事面源污染防治研究。E-mail: 491277643@qq.com

究了土壤性质对土壤中莠去津解吸的量化效应,发现在未经开垦的不同类型土壤中均存在莠去津的滞留现象,且有机质、黏粒含量及 pH 是影响解吸的关键土壤性质;龚香宜等<sup>[7]</sup>研究有机农药在不同深度的农田土壤的吸附解吸行为;张燕飞等<sup>[8]</sup>对比了乙草胺在红土、水稻土、潮土中的解吸特性。但有关于酸性、中性、碱性土壤类型对莠去津的解吸特性对比研究鲜见报道。

本文研究了莠去津在白浆土、黑土和盐碱土中的解吸行为,以及 pH、生物炭对其解吸的影响,以期土壤中莠去津动态残留提供依据。

表 1 试验土壤理化性质

| 土壤类型 | 有机质/<br>(g · kg <sup>-1</sup> ) | 阳离子交换量/<br>(mol · kg <sup>-1</sup> ) | pH    | 莠去津背景值/<br>(mg · kg <sup>-1</sup> ) | 颗粒组成/% |       |       |
|------|---------------------------------|--------------------------------------|-------|-------------------------------------|--------|-------|-------|
|      |                                 |                                      |       |                                     | 黏粒     | 粉粒    | 砂粒    |
| 白浆土  | 14.54                           | 22.63                                | 5.87  | 0.014                               | 31.90  | 37.20 | 30.90 |
| 黑土   | 30.10                           | 22.32                                | 7.10  | 0.043                               | 38.32  | 55.25 | 6.43  |
| 盐碱土  | 6.80                            | 12.56                                | 10.50 | 0.016                               | 29.70  | 32.10 | 38.20 |

## 1.2 数据分析方法

(1) 莠去津吸附量表达式:

$$C_g = (C_0 - C_e)V/m$$

式中: $C_g$ 为莠去津在土壤中的吸附量(mg/kg); $C_0$ 为莠去津的初始浓度(mg/L); $C_e$ 为莠去津吸附平衡的溶液浓度(mg/L); $V$ 为溶液体积(mL); $m$ 为土壤样品质量(g)。

(2) 莠去津解吸量表达式:

$$C_d = C_e V/m$$

式中: $C_d$ 为莠去津在土壤中的解吸量(mg/kg); $C_e$ 为莠去津的解吸平衡溶液浓度(mg/L); $V$ 为解吸溶液体积(mL); $m$ 为土壤样品质量(g)。

(3) 解吸率表达式:

$$W_d = C_d / C_g \times 100$$

式中: $W_d$ 为解吸率(%)。

(4) 解吸动力学模型

准二级动力学方程:

$$q_t = q_e^2 kt / (1 + q_e kt)$$

Elovich 方程:

$$q_t = a + b \ln t$$

式中: $q_t$ 、 $q_e$ 分别为时间 $t$ 和平衡条件下莠去津的解吸量(mg/g); $t$ 为解吸时间(min); $k$ 为准二级动力学方程解吸速率常数; $a$ 为与解吸反应初始速度有关的常数; $b$ 为与解吸活化能有关的常数。

(5) 等温解吸方程

Langmuir 方程:

$$1/C_d = 1/q + 1/(K_L q_{\max} C_a)$$

Freundlich 方程:

$$\log C_d = \log K_F + (1/n) \log C_a$$

式中: $C_d$ 为莠去津平衡解吸量(mg/kg); $C_a$ 为莠去津

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试土壤

莠去津标准品(纯度>99.9%),甲醇(色谱纯),HCl、NaOH、NaNO<sub>3</sub>均为分析纯试剂。生物炭以玉米秸秆为原材料,经马弗炉(450℃,2h)热解,冷却后过60目筛,pH 9.2。供试土壤为白浆土、黑土和盐碱土,分别于2018年6月20日采自吉林省永吉县、公主岭市、安广镇的玉米农田表层土壤,取样深度为0—20cm,自然风干后过100目筛备用,供试土壤基本性质见表1。

的解吸平衡质量浓度(mg/L); $q_{\max}$ 为解吸平衡时莠去津的最大解吸量(mg/kg); $K_L$ 为解吸亲和力常数(L/mg); $K_F$ 为解吸系数; $n$ 为解吸强度常数。

(6) 解吸热力学参数

$$\Delta G = -RT \ln K_F$$

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

式中: $K_F$ 为 Freundlich 常数; $T$ 为绝对温度(K); $R$ 为气体常数(8.314 J/(mol · K)); $\Delta S$ 为标准熵变(kJ/(mol · K)); $\Delta H$ 为标准焓变(kJ/mol); $\Delta G$ 为吉布斯自由能(kJ/mol)。绘制以 $\ln K$ 为纵坐标, $1/T$ 为横坐标曲线,由线性方程的斜率和截距,可分别得到 $\Delta H$ 和 $\Delta S$ 。

(7) 解吸滞后系数(HI):

$$HI = (C_g^s - C_e^s) / C_e^s$$

式中: $C_g^s$ 、 $C_e^s$ 分别为平衡浓度下吸附解吸出莠去津的浓度(mg/kg)。

### 1.3 试验设计

1.3.1 吸附—解吸动力学试验 称取3种供试土壤(2.000 0±0.000 5)g,置于离心管中,按水土比5:1注入10 mL浓度为5 mol/L的莠去津溶液(以0.01 mol/L CaCl<sub>2</sub>为背景溶液),在SPY 50双层培养摇床于25℃恒温振荡培养24 h后,放入H1850高速台式离心机中于10 000 r/min离心10 min,测定上清液中莠去津含量。

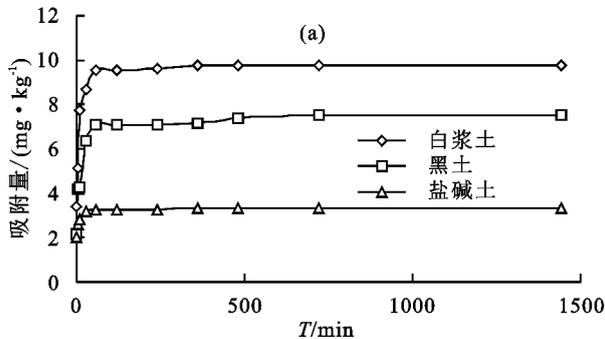
吸附结束后分别在离心管中加入10 mL 0.01 mol/L无莠去津的CaCl<sub>2</sub>溶液,用玻璃棒搅拌离心管底部土样,于25℃下分别振荡10,20,30,60,120,240,360,480,720,1 440 min后取样,离心后将上清液过0.45 μm滤膜,采用高效液相色谱测定溶液中莠去津的浓度。色谱条件:流动相甲醇:水为60:40

(V/V)的混合溶液,流动相流速为 1 mL/min,柱温为 30 ℃,进样量为 20  $\mu$ L,紫外检测波长为 222 nm,保留时间 7.847 min。根据上清液中莠去津浓度绘制动力学曲线,确定莠去津解吸平衡时间。

**1.3.2 等温吸附—解吸试验** 称取 3 种供试土壤 (2.000 0 $\pm$ 0.000 5) g,置于离心管中,注入 10 mL 浓度分别 1.5, 3.5, 12, 24, 30 mol/L 的莠去津溶液 (以 0.01 mol CaCl<sub>2</sub> 为背景溶液),于 25 ℃ 恒温振荡培养 24 h,于 10 000 r/min 离心 10 min,测定上清液中莠去津含量。吸附结束后分别加入 10 mL 浓度为 0.01 mol/L 的 CaCl<sub>2</sub> 溶液,用玻璃棒搅拌离心管底部土样,于 25 ℃ 下分别振荡 12 h,离心后测定莠去津含量,绘制解吸等温线。

**1.3.3 解吸热力学试验** 参照 1.3.1 试验,分别设置振荡温度均为 15, 25, 35 ℃,进行重复试验,测定莠去津平衡浓度,绘制热力学解吸等温曲线。

**1.3.4 背景溶液不同 pH 对解吸量的影响** 参照试验 1.3.1 进行吸附试验,于 25 ℃ 恒温振荡培养 12 h。吸附结束后离心,测定上清液中莠去津含量。分别在弃去上清液的离心管中加入 10 mL pH 为 3.0, 5.0, 7.0, 9.0, 11.0 的浓度为 0.01 mol/L 的 CaCl<sub>2</sub> 溶液进



行解吸。

**1.3.5 生物炭添加量对解吸量的影响** 参照试验 1.3.1 进行吸附试验,于 25 ℃ 恒温振荡培养 12 h。吸附结束后离心,测定上清液中莠去津含量。分别在弃去上清液的离心管中加入 0.05%, 0.10%, 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.00% 的生物炭,混匀后,加入 10 mL 浓度为 0.01 mol/L 的 CaCl<sub>2</sub> 溶液进行解吸。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤中莠去津解吸动力学

莠去津在 3 种土壤类型中吸附/解吸动态变化见图 1。从图 1a 可以看出,当吸附时间达到 12 h 时,莠去津在土壤中的吸附量趋于稳定,土壤吸附点位逐渐饱和,吸附基本到达平衡,此时白浆土、黑土和盐碱土中吸附量分别为 9.64, 7.22, 3.26 mg/kg。从图 1b 可以看出,3 种土壤中莠去津的解吸量均随时间的增加而增大。0~60 min 为快速解吸阶段,60~360 min 慢速解吸阶段,360~720 min 逐渐达到解吸平衡,其中盐碱土中莠去津的解吸速度最快,60 min 时莠去津解吸量约为最大解吸量的 76%, 720 min 时莠去津在 3 种土壤中解吸均达到平衡。

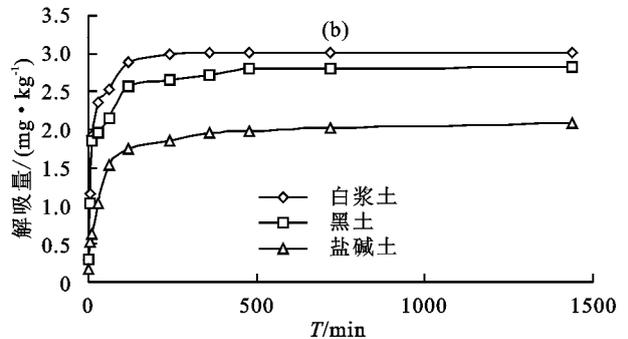


图 1 莠去津 3 种土壤中吸附/解吸量的动态变化

采用准二级动力学及 Elovich 模型对莠去津解吸行为进行拟合<sup>[9]</sup>。从表 2 可以看出,准二级动力学方程拟合效果最好, $R^2$  均大于 0.960,最大解吸量理论值分别为 3.04, 2.75, 2.08 mg/kg,与测定值 3.02, 2.83, 2.08 mg/kg 相近。

表 2 准二级动力学及 Elovich 模型的解吸常数和系数

| 土壤类型 | 准二级动力学模型 |       |       | Elovich 模型 |       |       |
|------|----------|-------|-------|------------|-------|-------|
|      | $q_e$    | $k$   | $R^2$ | $a$        | $b$   | $R^2$ |
| 白浆土  | 3.038    | 0.043 | 0.990 | 0.755      | 0.376 | 0.878 |
| 黑土   | 2.750    | 0.046 | 0.960 | 0.640      | 0.349 | 0.910 |
| 盐碱土  | 2.082    | 0.020 | 0.988 | 0.118      | 0.299 | 0.956 |

### 2.2 土壤中莠去津的解吸等温线

当初始吸附浓度为 5 mg/L 时,3 种土壤对莠去津最大吸附量分为白浆土 9.86 mg/kg、黑土 7.95 mg/kg 和盐碱土 3.55 mg/kg。当初始吸附浓度为 30 mg/L 时,3 种土壤对莠去津最大吸附量分别为白浆土 36.18 mg/kg,黑土 30.08 mg/kg,盐碱土吸附量

最小,为 13.34 mg/kg。从图 2a 可以看出,3 种土壤莠去津的解吸量均随初始浓度的增加而逐渐增大。当达到解吸平衡时,最大解吸量分别为白浆土 12.44 mg/kg,黑土 11.57 mg/kg,盐碱土 7.46 mg/kg。从图 2b 可以看出,随初始浓度的增加,3 种土壤的解吸率呈逐渐降低趋势,莠去津在白浆土、黑土、盐碱土中的解吸率分别由 48.11%, 50.32%, 56.84% 降至 34.37%, 37.48%, 52.79%。其解吸率能够反映莠去津在土壤中的稳定性,解吸率越低,稳定性越高,进而有利于土壤修复<sup>[10]</sup>。

不同土壤类型对其吸附的莠去津解吸程度也不同,其中,白浆土酸性较强,黑土有机质含量高,且黏粒含量较高,盐碱土黏粒和有机质含量低且碱性强。土壤中有机质的腐殖酸结构具有能够与有机农药结合的特殊位点,对莠去津有较强的表面吸附能力<sup>[11]</sup>。因此莠去津在白浆土与黑土中不易被解吸,在盐碱土

中更容易被解吸,由此可以证明,土壤中 pH、有机

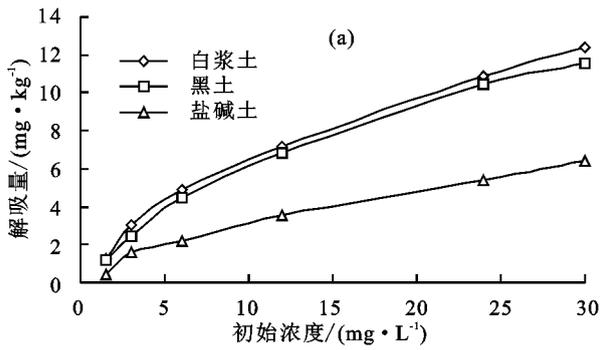


图 2 莠去津在 3 种土壤中解吸等温线及解吸率变化

利用 Freundlich 模型及 Langmuir 模型拟合吸附—解吸等温数据。从表 3 可以看出, Freundlich 和 Langmuir 模型均能较好地描述莠去津在土壤中吸附与解吸特征, 相关系数  $R^2$  均在 0.944 以上。但 Freundlich 模型拟合效果更优, 可能由于 3 种类型土壤均以表面非均匀的多层解吸为主。吸附常数  $K_f$  表示吸附容量, 其值越大, 表明土壤与莠去津之间的结合力越强<sup>[5]</sup>, 白浆土的  $K_f$  最大, 解吸率最低, 盐碱土的  $K_f$  最低, 解吸率最高。说明当  $K_f$  低的土壤中, 莠去津的吸附量较小, 对莠去津的吸附能力也较弱, 从而导致解吸能力增大<sup>[6]</sup>。

表 3 莠去津在 3 种土壤中解吸等温线的拟合参数

| 类型 | 供试土壤 | Langmuir |        |       | Freundlich |       |       |
|----|------|----------|--------|-------|------------|-------|-------|
|    |      | $K_L$    | $Q_m$  | $R^2$ | $K_f$      | $n$   | $R^2$ |
| 吸附 | 白浆土  | 0.053    | 64.125 | 0.986 | 4.440      | 1.497 | 0.992 |
|    | 黑土   | 0.039    | 61.564 | 0.994 | 3.249      | 1.403 | 0.996 |
|    | 盐碱土  | 0.041    | 24.450 | 0.978 | 1.399      | 1.475 | 0.982 |
| 解吸 | 白浆土  | 0.048    | 20.578 | 0.993 | 1.470      | 1.587 | 0.993 |
|    | 黑土   | 0.044    | 20.240 | 0.994 | 1.276      | 1.514 | 0.995 |
|    | 盐碱土  | 0.056    | 10.022 | 0.969 | 0.798      | 1.619 | 0.944 |

解吸量与吸附量存在较大差异时被定义为解吸的滞后效应。为探究试验结果的可比性, 本研究对滞后现象采用滞后系数 ( $HI$ ) 进行量化<sup>[12]</sup>,  $HI$  越小, 表明土壤对污染物的固持能力越强, 污染物更不容易迁移。莠去津在 3 种土壤中的解吸滞后系数见表 4。

表 5 莠去津在 3 种土壤中的解吸热力学参数

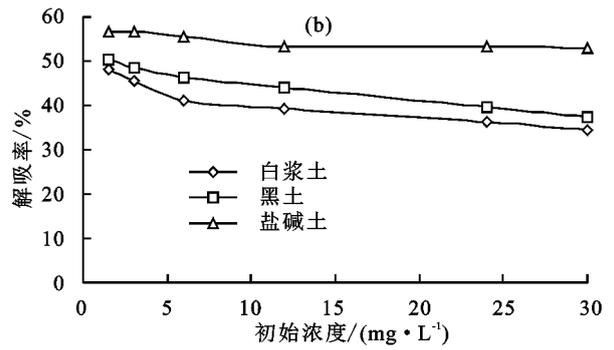
| 土壤类型 | $K_f$ |       |       | $\Delta G / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$ |        |        | $\Delta H / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$ | $\Delta S / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$ |
|------|-------|-------|-------|--|--------|--------|--|--|
|      | 15 °C | 25 °C | 35 °C | 15 °C  | 25 °C  | 35 °C  |  |  |
| 白浆土  | 1.068 | 1.470 | 1.889 | -0.157   | -0.954 | -1.627 | 21.029   | 0.074  |
| 黑土   | 0.587 | 1.307 | 1.747 | 1.275  | -0.663 | -1.428 | 40.412   | 0.137  |
| 盐碱土  | 0.502 | 0.798 | 1.119 | 1.650  | 0.559  | -0.287 | 29.599   | 0.097  |

从表 6 可以看出, 莠去津在一定浓度下, 其滞后系数均随温度的升高呈降低趋势, 当温度为 35 °C 时, 滞后系数最低, 滞后效应减弱<sup>[15]</sup>。在温度相同的情况下, 滞后顺序均表现为盐碱土 > 黑土 > 白浆土。

## 2.4 背景溶液不同 pH 对莠去津解吸特性的影响

从图 3a 可以看出, 在 pH 为 3.0~11.0 范围内, 莠去

质、黏粒含量是解吸过程中的重要影响因素。



从表 4 可以看出,  $HI$  数值均大于 0, 说明莠去津的解吸均呈现滞后现象。随莠去津初始浓度逐渐升高, 滞后系数呈增长趋势, 滞后效应越来越明显。出现此现象的原因可能为莠去津被吸附于土壤黏粒矿物的层间结构中, 或被土壤中有有机质吸附不易被解吸出来。莠去津在 3 种土壤中的滞后系数大小关系为盐碱土 > 黑土 > 白浆土。盐碱土中莠去津的解吸滞后效应最明显, 这与盐碱土黏粒含量少、有机质含量低、对莠去津的固持能力较弱有关<sup>[5,13]</sup>。

表 4 莠去津在 3 种土壤中解吸滞后系数  $HI$

| 土壤类型 | $c_0 = 1.5 \text{ mol/L}^1$ | 3     | 6     | 12    | 24    | 30    |
|------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 白浆土  | 0.989                       | 1.003 | 1.079 | 1.211 | 1.481 | 1.551 |
| 黑土   | 1.061                       | 1.007 | 1.160 | 1.268 | 1.517 | 1.594 |
| 盐碱土  | 1.135                       | 1.399 | 1.498 | 1.662 | 1.744 | 1.799 |

## 2.3 土壤中莠去津解吸热力学

从表 5 可以看出, 莠去津在 3 种土壤中的解吸热力学参数随温度升高,  $K_f$  值逐渐增大, 当温度为 35 °C, 莠去津在白浆土、黑土、盐碱土中的解吸滞后效应最明显, 与 15 °C 相比解吸率分别增加 16.58%, 11.38%, 30.04%, 温度升高增加莠去津在土壤中的解吸行为。对热力学数据进行拟合, 得到  $\Delta G < 0$ ,  $\Delta H > 0$ ,  $\Delta S > 0$ , 说明莠去津解吸是自发、吸热且熵增的过程<sup>[14]</sup>。随溶液温度降低,  $\Delta G$  值升高, 进一步证实低温将抑制土壤中莠去津的解吸。

津在 3 种土壤中的解吸量随 pH 升高逐渐增大。pH 为 3.0 时, 莠去津在白浆土、黑土、盐碱土中的解吸量最少分别为 2.16, 2.04, 1.93 mg/kg, 对环境产生的危害最小。当 pH 增至 11.0 时, 莠去津在白浆土、黑土、盐碱土中解吸量分别升高至 3.46, 3.34, 2.96 mg/kg。从图 3b 可以看出, 当 pH 为 11.0 时, 吸附量与解吸率均达到最大, 此时

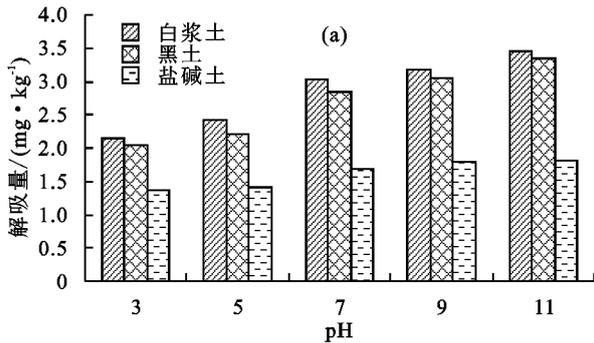
莠去津在白浆土解吸率为 50.18%，黑土解吸率为 58.08%，盐碱土解吸率为 63.73%。

表 6 不同温度下莠去津在 3 种土壤解吸滞后系数 HI

| 土壤类型 | 15 °C | 25 °C | 35 °C |
|------|-------|-------|-------|
| 白浆土  | 1.744 | 1.574 | 1.067 |
| 黑土   | 1.760 | 1.594 | 1.102 |
| 盐碱土  | 1.988 | 1.789 | 1.236 |

注:莠去津浓度为 30 mg/L。

解吸率的变化说明 pH 对莠去津在土壤中的解



吸行为具有显著影响。较低的 pH 可以降低莠去津的解吸量,这与龚香宜等<sup>[7]</sup>的研究趋势一致,进一步解释了莠去津在 3 种土壤中解吸能力的顺序为盐碱土>黑土>白浆土。pH 升高后,羧基团脱质子、氢键断裂,有机质聚合体成为阴离子,土壤中阳离子态含量降低呈现负电荷状态。由于同性电荷排斥,更多有机分子在土壤表面进行解吸,低 pH 环境可降低土壤中阿特拉津的迁移与流失速率<sup>[16-17]</sup>。

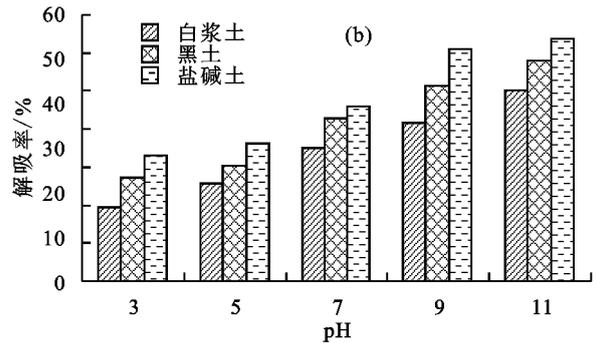


图 3 不同溶液 pH 对莠去津在 3 种土壤类型中的解吸量及解吸率的影响

## 2.5 生物炭添加量对莠去津解吸特性的影响

从图 4 可以看出,随着生物炭添加量的增加,莠去津在 3 种土壤中的解吸量逐渐增大,解吸率逐渐降低。当生物炭添加量为 1% 时,白浆土、黑土、盐碱土中莠去津的解吸率最低分别为 40.96%,48.79%,52.49%,与未添加生物炭相比,解吸率分别降低 5.24%,7.21%,16.33%。说明在添加生物炭后,莠去津的吸附能力和固

持能力增强,从而导致莠去津解吸量下降<sup>[18]</sup>。

生物炭对莠去津吸附的贡献率比土壤高,这可能是由于生物炭表面吸附点位的数量多,莠去津更易与这些吸附点位结合,以往有研究<sup>[19-20]</sup>表明,生物炭中的有机质组分对莠去津的吸附受其脂肪性和极性的影响,并通过氢键作用使莠去津固定于土壤中,使其解吸更难进行。

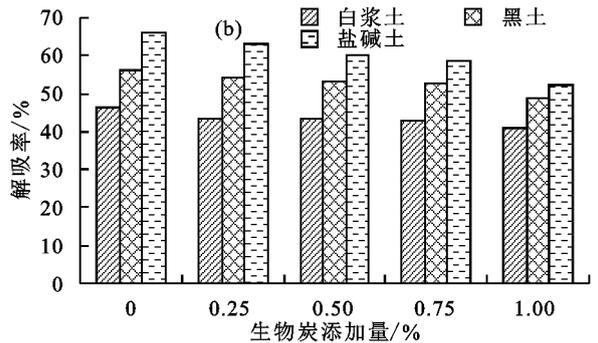
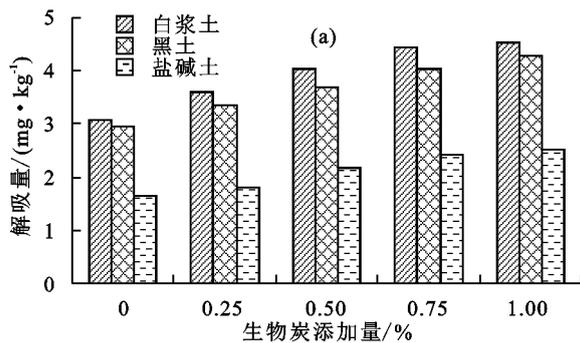


图 4 不同生物炭添加量对莠去津在 3 种土壤类型中解吸量及解吸率的影响

## 3 结论

(1) 莠去津在土壤上的解吸特性特征表明,莠去津在白浆土、黑土和盐碱土解吸过程呈现快速解吸、慢速解吸和平衡解吸 3 个阶段,12 h 基本达到解吸平衡,解吸过程符合准二级动力学方程。

(2) 莠去津在 3 种土壤中的解吸规律可以用 Freundlich 方程描述,解吸量随温度的升高而升高,白浆土具有最高的吸附能力。莠去津的解吸过程均存在滞后现象,且解吸系数随莠去津初始浓度的增加而增大。

(3) pH 对莠去津解吸的影响研究表明,酸性条件可抑制莠去津从土壤中的解吸,与 pH 为 7.0 时相

比较,当 pH 为 3.0 时莠去津在 3 种土壤中的解吸量降低约 14.62%;生物炭含量的增加可抑制土壤中莠去津的解吸,当生物炭添加量为 1% 时莠去津在 3 种土壤中的解吸量降低约 9.59%。

### 参考文献:

- [1] Salazar L M, Prado B, Zamora O, et al. Mobility of atrazine in soils of a wastewater irrigated maize field[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2018, 255: 73-83.
- [2] 刘超,邢茂德,边文波.鲁中地区玉米田除草剂筛选试验研究[J].农业科技通讯,2017(5):67-70.
- [3] 张承,龙友华,吴小毛.敌草胺在土壤中的吸附及其与持

- 久性和生物有效性之间的关系[J].农药学学报,2016,18(5):633-643.
- [4] 瞿梦洁,李慧冬,刘伟,等.水土环境介质中阿特拉津修复过程研究进展[J].生态毒理学报,2017,12(4):119-128.
- [5] 边炜涛,马秀兰,王富民,等.环丙沙星在盐碱土中吸附特性的研究[J].农业环境科学学报,2016,35(10):1953-1959.
- [6] Huang Y F, Liu Z Z, He Y, et al. Quantifying effects of primary parameters on adsorption-desorption of atrazine in soils [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(1):82-93.
- [7] 龚香宜,何炎志,孙云雷.有机氯农药在农田土壤中的吸附解吸特征[J].环境科学与技术,2014,37(12):16-19.
- [8] 张燕飞,蔡磊明,赵华,等.乙草胺在 3 种土壤中的吸附和解吸附特性[J].农药,2015,54(2):98-102.
- [9] 黄丽,杨华,孙康,等.活性炭对丁酮的吸附动力学研究[J].生物质化学工程,2017,51(5):29-35.
- [10] 石健,邹开云,丁建东.阿特拉津在土壤中的解吸行为研究[J].安徽农业科学,2010,38(12):6441-6443.
- [11] 姜蕾,贾林贤,林靖凌,等.土壤有机质、pH 值和表面活性剂对杀菌剂戊菌唑在土壤中吸附与解吸行为的影响[J].农药,2015,54(12):906-910.
- [12] 黄玉芬,刘忠珍,李衍亮,等.土壤矿物和胡敏酸对阿特拉津的吸附—解吸作用研究[J].土壤学报,2016,53(1):155-165.
- [13] 徐志英,任莉,陈小军,等.鱼藤酮在 3 种土壤中的吸附—解吸附特性[J].农药学学报,2018,20(1):110-117.
- [14] 王金贵,吕家珑,曹莹菲.镉和铅在 2 种典型土壤中的吸附及其与温度的关系[J].水土保持学报,2011,25(6):254-259.
- [15] 汪玉,司友斌.纳米粘土矿物对阿特拉津的吸附—解吸特性研究[J].农业环境科学学报,2009,28(1):125-129.
- [16] 陈成,刘廷凤,孙成.土壤中铜与阿特拉津交互作用下的吸附行为研究[J].农业环境科学学报,2016,35(7):1294-1299.
- [17] 王玉军,李文朋,张铎,等.阿特拉津在土柱中的淋溶规律研究[J].水土保持学报,2011,25(3):254-256.
- [18] Huang Y F, Liu Z Z, He Y, et al. Impact of soil primary size fractions on sorption and desorption of atrazine on organo-mineral fractions [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(6):4396-4405.
- [19] 吴蓓蓓.生物炭增强土壤吸附阿特拉津的作用及机理[D].杭州:浙江大学,2016.
- [20] 李玉梅,王根林,刘征宇,等.生物炭对土壤中莠去津残留消减的影响[J].作物杂志,2014(2):137-141.
- (上接第 195 页)
- [20] 王景燕,龚伟,胡庭兴.川南坡地不同退耕模式对土壤腐殖质及团聚体碳和氮的影响[J].水土保持学报,2012,26(2):155-160.
- [21] 王宁,张有利,王百田,等.山西省油松林生态系统碳氮磷化学计量特征[J].水土保持研究,2015,22(1):72-79.
- [22] 张亚冰,吕文强,周传艳,等.贵州月亮山 5 个优势树种叶片与土壤生态化学计量特征[J].水土保持研究,2017,24(5):182-188.
- [23] 曾全超,李鑫,董扬红,等.黄土高原延河流域不同植被类型下土壤生态化学计量学特征[J].自然资源学报,2016,31(11):1881-1891.
- [24] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3):139-151.
- [25] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of world[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1):2-3.
- [26] 冯春晓,艾应伟,王克秀,等.恢复年限对裸露边坡土壤团聚体颗粒和碳、氮、磷分布的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):156-161.
- [27] 曾全超,李鑫,董扬红,等.陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征[J].自然资源学报,2015,30(5):870-879.
- [28] Jiao F, Wen Z M, An S S, et al. Successional changes in soil stoichiometry after land abandonment in Loess Plateau, China [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 58(10):249-254.
- [29] 王维奇,仝川,贾瑞霞,等.不同淹水频率下湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J].水土保持学报,2010,24(3):238-242.