

杂交苏丹草 (*Sorghum bicolor* × *S. sudanense*) 修复 DDT 污染土壤效果研究

邢素芝, 汪建飞, 段立珍, 谭志静

(安徽科技学院, 安徽凤阳 233100)

摘要: 采用盆栽试验, 研究了杂交苏丹草吸收和富集 DDT 的规律及其对 DDT 污染土壤的修复效果。结果表明: 土壤中添加高浓度的 DDT, 对杂交苏丹草的生物量没有显著影响, 说明杂交苏丹草对 DDT 有耐受能力; 杂交苏丹草对 DDT 及其主要降解产物都有吸收, 在旺盛生长期, 植株中 DDT 的累积速率也较快; 杂交苏丹草根系中 DDT 及其主要降解产物的浓度是茎叶中相应组分浓度的 4.81~10.32 倍, 质量比在 0.57~1.55 倍之间; 杂交苏丹草从土壤中吸收 DDT 占添加量的 11.3%, 而在其生长期, 土壤中 DDT 消失量为 56.0%。

关键词: 杂交苏丹草; DDT; 植物修复

中图分类号: X53

有机氯农药 DDT 是全球性的环境污染物, 尽管自从 20 世纪 70 年代以来, 世界大多数国家就已停止生产和使用该类农药, 但其对生态环境的影响依然存在, 甚至在北极与南极地区, 仍可检测出 DDT 残留。在不少食品中所检测出的 DDT 残留, 与土壤中受 DDT 污染密切相关^[1-4]。而且, 直到现在许多第三世界国家仍在使用 DDT^[2]。目前, 各国科学家仍在跟踪 DDT 对环境的影响, 尤其是监测其在环境中的变化与在食物中的残留量, 并不断地努力探索消除其影响的途径^[4]。

利用植物修复土壤有机物污染近年来受到广泛重视^[2-5]。杂交苏丹草是一种新育成的优良饲料作物, 近年来在江淮流域有较大面积栽培^[6]。由于具有生物量大、根系发达、生长速度快、生长周期短、适宜在各种土壤上生长等显著特点, 使得它在修复农药和重金属污染土壤方面具有重要的研究价值和广阔的利用前景。本研究以盆栽的方法, 研究了杂交苏丹草对 DDT 及其主要降解产物的吸收与富集, 以及土壤与杂交苏丹草中 DDT 的质量平衡, 旨在为 DDT 污染土壤的植物修复技术提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试作物

供试杂交苏丹草的品种为“皖草 2 号”(Tx623A × 722), 由安徽科技学院钱章强等育成^[6]。

1.2 供试土壤

采用安徽科技学院科技种植园日光温室土壤。黄褐土类, 黄白土属。土壤质地黏壤, 基本理化性状为: 有机质 28.87 g/kg, 全 N 1.80 g/kg, 碱解 N 210 μg/g, 有效 P 78 μg/g, 速效 K 225 μg/g, pH(H₂O) 6.8。试验前将风干土壤全部过 2 mm 筛, 备用。

1.3 试验设计

参照安凤春等^[7]的试验方案, 土壤中污染物 DDT 的添加量设计为高低两种浓度水平 (分别简称为 HC 和 LC), LC 污染物的总浓度为 0.215 mg/kg, 各组分添加量分别为 p,p'-DDE 0.031 mg/kg、p,p'-DDD 0.043 mg/kg、o,p'-DDT 0.043 mg/kg 和 p,p'-DDT 0.099 mg/kg; HC 处理各组分添加量均为 LC 的 3 倍 (设置 HC 的目的是考察高浓度 DDT 对苏丹草生物量的影响); 同时设不加农药的空白试验 (CK)。

设置 HC 处理是用来考察杂交苏丹草对 DDT 的耐受能力; LC 处理用来研究杂交苏丹草对 DDT 的吸收与富集规律。

1.4 试验方法

试验于 2004 年在安徽科技学院日光温室内进行。采用盆栽土培试验, 所用盆钵为直径 28 cm、高 20 cm 带有托盘的塑料盆钵。每盆装土 7 kg, 加入底肥, 用量均为 4 g 尿素 (含 N 460 g/kg)、4 g 过磷酸钙 (含 P₂O₅ 120 g/kg)、2 g 氯化钾 (含 K₂O 600 g/kg), 并根据试验设计用量投加 DDT, 充分混匀。各处理设 12 次重复。

4 月 1 日播种。播种前每盆浇水 1 L。4 月 15 日

基金项目: 安徽省教育厅自然科学基金项目 (2004KJ087) 和安徽科技学院自然基金项目 (2003YZ06) 资助。

作者简介: 邢素芝 (1967—), 女, 安徽太和人, 副教授, 主要从事蔬菜栽培和设施土壤研究。E-mail: jykjwjf@sina.com

苗,每盆留 8 棵长势基本一致的杂交苏丹草苗。生长过程中各试验处理均采用常规管理,定期观察并记录杂交苏丹草的生长情况。盆栽试验过程中,对于水分管理采取的方法是,先通过试验研究了供试土壤水吸力与含水量之间的定量关系^[8],然后用张力计控制与调节整个试验过程中水分,决定浇水的时间与用量。灌溉用水全部为蒸馏水。

5 月 10 日第一次采集土壤与草的样品,以后每隔 15 天采集 1 次土壤与杂交苏丹草样品,将植株的茎叶和根系分开。对于 HC 和 CK 样品,只测量鲜重,LC 样品按节 1.5 要求进行前处理后,再分析其中的 DDT 含量。

前后共采样 4 次,每次采样时,从 3 个不同的盆钵中取样。

1.5 测定项目和方法

依次用蒸馏水和丙酮清除吸附在杂交苏丹草表面的泥土与农药,然后用丙酮和石油醚 (1:1) 的混合溶液浸泡过夜,高速捣碎,过滤,滤液加入 20 g/L Na₂SO₄ 水溶液,分层后弃去水相,有机相用浓硫酸净化。

土壤样品风干后研碎,过 40 目筛,称取 2 g (准确至 0.001 g),丙酮/石油醚 (1:1) 浸泡过夜,超声提取,滤液用浓硫酸净化。

GC-ECD 测定条件:岛津 GC-17A 气相色谱仪,电子捕获检测器 (ECD),0.25 mm × 30 m DB-1 型弹性石英毛细管柱,载气 (N₂) 纯度 99.998%。流量 20 ml/min;压力 150 kPa,分流比 20:1。进样口温度 280,检测器温度 300,程序升温,初始温度 195,停留 7 min 之后,以 10 /min 升温至 230,恒定 15min;按保留时间外标法峰面积定量。

1.6 数据的统计分析

试验数据的方差和回归分析采用 DPS 数据处理系统。

2 结果与讨论

2.1 土壤 DDT 污染对杂交苏丹草生物量的影响

图 1 显示了在 CK (对照)、LC (低浓度)、HC (高浓度) 3 种 DDT 水平处理的土壤上杂交苏丹草 (包括地上部分和根系两部分) 鲜重随时间的变化情况。从图 1 中可以看出,在生长初期,添加 DDT 的处理,杂交苏丹草的鲜重要稍稍高于 CK,而到生长后期,即后两次采样时,CK 的鲜重均略高于添加 DDT 的处理,表现为 DDT 添加量越大,杂交苏丹草的生物量越小的趋势。

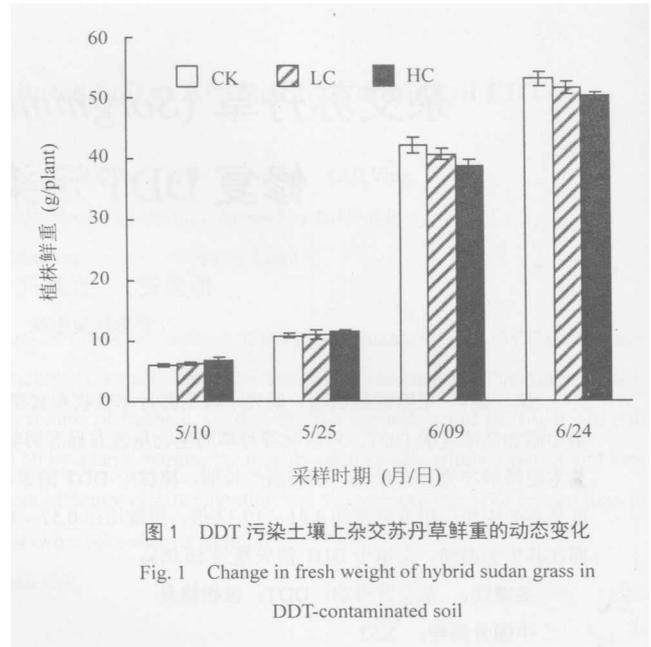


图 1 DDT 污染土壤上杂交苏丹草鲜重的动态变化

Fig. 1 Change in fresh weight of hybrid sudan grass in DDT-contaminated soil

方差分析结果表明,同一采样时期的 3 个处理之间,杂交苏丹草的鲜重没有显著差异。杂交苏丹草鲜重的动态变化表明,它对土壤中 DDT 的毒性有较强的忍耐性,这也说明了杂交苏丹草具备了修复土壤 DDT 污染的前提条件。

2.2 杂交苏丹草对 DDT 及其主要降解产物的吸收与富集

对于 LC 处理,杂交苏丹草对 DDT 各组分都有一定吸收;在不同采样期,杂交苏丹草中 DDT 总量在 0.376 ~ 0.860 mg/kg FW 之间变化 (表 1)。这和安凤春等^[9]的研究结果基本一致。他们发现,在 Manhattan 草中富集的 DDT 可以达到 0.68 mg/kg FW。由表 1 还可看出,4 个组分的 DDT 含量随着生育进程在植株中均呈下降的趋势,DDT 总含量也呈现出下降的趋势。这是由于在生长初期,杂交苏丹草对 DDT 有一个显著吸收,在第 1 次采样之后,杂交苏丹草进入旺盛生长阶段,生物量显著增加,对植株中各组分产生稀释效应,故而呈现出 DDT 各组分含量随生育期变化而下降的趋势。

在土壤中添加浓度较高的组分 p,p'-DDT,在杂交苏丹草中含量也高;但是,杂交苏丹草对 DDT 各组分的吸收比例,与添加的比例则不完全一致,如 p,p'-DDD 和 o,p-DDT 在土壤中施加浓度相同,但苏丹草中 p,p'-DDD 的含量则较高。

随着杂交苏丹草的生长,其生物量显著增加,吸收的 DDT 的量也是不断增加的 (图 2)。生长前期,累积的 DDT 相对较少;在第 2 次采样到第 3 次采样之间,是杂交苏丹草生长最快的时期,也是吸收 DDT 最多的

表 1 DDT 及其主要降解产物在杂交苏丹草中的含量变化 (mg/kg, FW)

Table 1 Variation of concentrations of DDT and its main degradation products in hybrid sudan grass

DDT 组分	采样时间 (月/日)			
	5/10	5/25	6/09	6/24
p,p'-DDE	0.130 ± 0.005	0.089 ± 0.006	0.040 ± 0.003	0.035 ± 0.003
o,p'-DDT	0.120 ± 0.004	0.093 ± 0.004	0.058 ± 0.003	0.050 ± 0.005
p,p'-DDD	0.219 ± 0.007	0.186 ± 0.015	0.113 ± 0.008	0.103 ± 0.006
p,p'-DDT	0.391 ± 0.008	0.376 ± 0.008	0.210 ± 0.008	0.188 ± 0.009
∑DDT	0.860 ± 0.022	0.744 ± 0.021	0.421 ± 0.005	0.376 ± 0.011

注：表中数据均为 LC 处理样品的测定结果，以平均数 ± 标准差表示，n = 3。

时期。从图 2 可以看出，这一时期，DDT 累积曲线斜率较大；之后，可能由于根系吸收能力下降，植株生物量增加有限，累积 DDT 的量相对较小，在累积曲线上表现为相对平缓。

根据这样的累积规律，如果在生长旺盛时期收获苏丹草，则其从土壤中吸收的 DDT 的量与生长后期相比，并没有显著减少。这样，在相同的时间内，可以多种植几茬，从而有可能在较短的时间，修复 DDT 污染的土壤。

2.3 DDT 及其主要降解产物在杂交苏丹草中的分布

从表 2 可以看出，4 个采样时期，杂交苏丹草根系中 DDT 及其主要降解产物的浓度都显著地高于茎叶中的浓度，根系中各组分的浓度是茎叶中相应组分浓度的 4.81~10.32 倍，浓度分布差异显著。越是生长的后期，DDT 及其主要降解产物在杂交苏丹草根系与地上部分浓度比越高，说明生长后期，在根系部位富集更多的 DDT 及其主要降解产物。

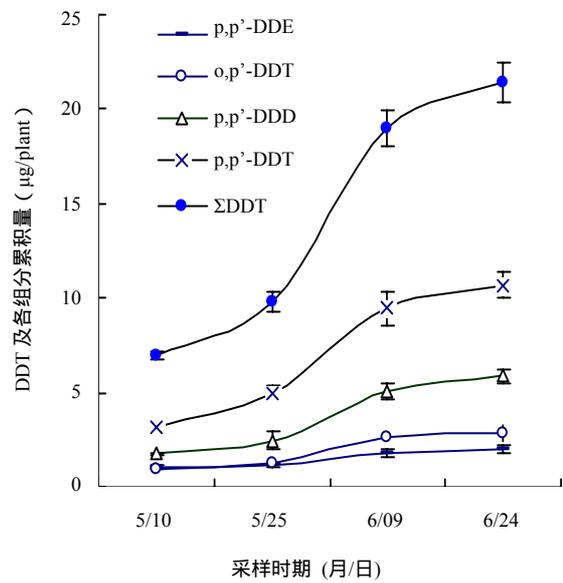


图 2 杂交苏丹草 DDT 累积量

Fig. 2 DDT accumulation curves in sudan hybrid grass

表 2 DDT 及其主要降解产物在杂交苏丹草根系和地上部分的浓度比与质量比

Table 2 Concentration and mass ratios of root to shoot of hybrid sudan grass in DDT and its main degradation products

采样时间 (月/日)	类别	p,p'-DDE	o,p'-DDT	p,p'-DDD	p,p'-DDT	∑DDT
5/10	浓度比	5.57	5.96	4.81	6.36	5.73
	质量比	0.65	0.61	0.75	0.57	0.63
5/25	浓度比	6.30	7.00	5.33	6.99	6.40
	质量比	0.78	0.72	0.93	0.70	0.77
6/09	浓度比	8.08	7.55	5.82	7.47	7.20
	质量比	1.12	1.20	1.55	1.22	1.27
6/24	浓度比	10.32	9.00	6.93	9.17	8.75
	质量比	0.96	1.06	1.44	1.08	1.13

DDT 及其主要降解产物在杂交苏丹草根系和地上部分的质量比的变化幅度在 0.57 ~ 1.55 之间，其质量分布不象浓度分布存在显著差异。在第 1 次采样时，

根系中累积的 DDT 量要低于地上部分，说明其吸收的 DDT 及其主要降解产物被根系吸收后，能较快转移到地上部分，到生长后期，滞留在根系中的 DDT 的量有

增加的趋势。

2.4 DDT 及其主要降解产物在杂交苏丹草与土壤系统中的平衡

由表 3 可知, 杂交苏丹草吸收的 DDT 及其主要降解产物的总量, 占土壤中添加量的 11.3%, 第 1 次植草后, 土壤中残留的量为添加量的 32.7%, 而消失量

为 56.0%, 占了一半以上的量。据报道, 在以植草修复 DDT 污染的土壤时, 通过草的吸收可以带走土壤中 0.13% ~ 3.0% 的 DDT^[7]。我们的试验结果显然要高于这个数值, 究其原因, 主要是由于杂交苏丹草有较大的生物量, 而其植株中 DDT 的含量与文献报道的则基本一致^[7]。

表 3 DDT 及其主要降解产物在杂交苏丹草和土壤系统中的质量平衡
Table 3 Mass balance of DDT and its main degradation products in the grass and soil system

	p,p'-DDE	o,p'-DDT	p,p'-DDD	p,p'-DDT	∑DDT
DDT 施加量 (μg/盆)	217	301	301	693	1512
草中富集量 (μg/盆)	15.9	22.8	46.9	85.5	171.1
占百分数 (%)	7.3	7.6	15.6	12.3	11.3
土中残留量 (μg/盆)	67.9	118.9	106.6	200.3	493.7
占百分数 (%)	31.3	39.5	35.4	28.9	32.7
消失量 (μg/盆)	133.2	159.2	147.5	407.5	846.7
占百分数 (%)	61.4	52.9	49.0	58.8	56.0

污染物从土壤中消失应是它们从土壤中挥发、淋溶与生物化学降解几种效应共同作用的结果^[4]。有资料报道, DDT 通过挥发而从土壤损失的量占原施药量的 0.43%^[9]。农药的挥发主要发生在土壤的表层, 有植被生长的土壤也要减弱农药的挥发。DDT 及其主要降解产物都属于强亲脂性物质, 在土壤中具有强吸附力和弱迁移力。因而, 在种植草的试验期间, 土壤中的 DDT 挥发量以及随水淋失量是很少的。

土壤中 DDT 损失的主要因素是土壤中以微生物为主的生物降解作用参与的结果。有报道指出, 植物释放到根际区的有机分泌物和酶能有效地降解农药及其他有机物^[5]。杂交苏丹草的根系相当发达, 根部所释放的酶和有机分泌物更有利于 DDT 及其主要降解产物在土壤中的微生物降解。这种设想有待于进一步通过实验验证。植物修复技术是植物本身对污染物的吸收与富集以及土壤中微生物对污染物的降解共同作用的结果, 其中根分泌物的参与是不可忽视的。

2.5 种植杂交苏丹草修复 DDT 污染土壤周期预测

参照安凤春等^[7]的方法, 使用下列关系式预测污染土壤植物修复周期。

$$i = \frac{\lg(C_i / C_0)}{\lg A}$$

式中: C_0 为土壤中 DDT 的原始浓度 (mg/kg); C_i 为草种植第 i 次后土壤中 DDT 的浓度 (mg/kg); A 为第一次植草结束时土壤中 DDT 的残留率 (%); i 为种植

草的次数, 每次以 3 个月为一个过程。

当污染土壤中 DDT 浓度为 0.2 mg/kg, 土壤中 DDT 的残留量下降至 0.001 mg/kg 时, 杂交苏丹草所需要种植的次数为 5 次。

3 结论

(1) 杂交苏丹草对土壤中 DDT 的污染有一定的耐受能力, 而且具有生物量大、根系发达、生长速度快、生长周期短等显著特点, 因此, 使得它在修复 DDT 污染土壤方面具备了潜力。

(2) 杂交苏丹草对土壤中的 DDT 及其主要降解产物有一定的吸收, 在生长旺盛时期吸收的量也较多。吸收的 DDT 及其主要降解产物在杂交苏丹草根系和地上部分的质量比变化幅度在 0.57 ~ 1.55 之间; 杂交苏丹草吸收的 DDT 在生长前期向地上部转移较多, 越到生长后期, 向地上部转移的量相对越少。

(3) 杂交苏丹草从土壤中吸收 DDT 的量只占添加量的 11.3%, 而在此生长期, 土壤中 DDT 消失量为 56.0%, 占了一半以上的量。土壤中 DDT 消失可能主要与杂交苏丹草的根系所释放的酶和有机分泌物有关。

参考文献:

- [1] Gao HJ, Jiang X, Wang F, Bian YR, Wang DZ, Dend JC, Yan DY. Residual levels and new inputs of chlorinated POPs in agricultural soils from Taihu Lake Region. *Pedosphere*, 2005, 15 (3): 301-309

- [2] 赵炳梓, 张佳宝, 朱安宁, 夏敏, 卢信, 蒋其鳌. 黄淮海地区典型农业土壤中六六六 (HCH) 和滴滴涕 (DDT) 的残留量研究. 空间分布及垂直分布特征. 土壤学报, 2005, 42 (6): 916-922
- [3] 吴志峰, 李芳柏, 匡耀求, 万洪富. 城郊新建开发区土壤环境特征垂直变化分析. 土壤, 2005, 37 (1): 37-40
- [4] 张从, 夏立江. 污染土壤生物修复技术. 北京: 中国环境科学出版社, 2000: 85-97
- [5] Steven DS, James JG. Enhanced phytoremediation of chlorobenzoates in rhizosphere soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31: 299-305
- [6] 钱章强, 詹秋文. 杂交草 2 号的选育及栽培要点. 科学养鱼, 1997 (1): 39
- [7] 安凤春, 莫汉宏, 郑明辉, 张兵. DDT 污染土壤的植物修复技术. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3 (7): 39-44
- [8] 汪建飞, 李粉茹, 金德胜. 黄白土的持水特性及施用有机物料的效应研究. 水土保持学报, 2002, 16 (2): 133-135
- [9] 安凤春, 莫汉宏, 郑明辉, 张兵. DDT 及其主要降解产物污染土壤的植物修复. 环境化学, 2003, 22 (1): 19-25

Effects of Hybrid Sudan Grass (*Sorghum Bicolor* × *S. Sudanense*) in Remediating DDT-Contaminated Soil

XING Su-zhi, WANG Jian-fei, DUAN Li-zhen, TAN Zhi-jing

(Anhui Science and Technology University, Fengyang, Anhui 233100, China)

Abstract: Pot experiments were conducted to study laws of DDT absorption and accumulation by hybrid sudan grass and effects of the grass in remediating DDT-contaminated soils. Results showed that no significant impact of high DDT application rate was found on biomass of hybrid sudan grass, indicating tolerance of the grass to DDT; the grass absorbed both DDT and its main degradation products, especially during its vegetative growth stage; the concentrations of DDT and its main degradation products in roots were 4.81~10.32 times as much as in shoot, and the masses were 0.57~1.55 times as much; and the grass absorbed 11.3% of the amount of DDT added into the soil, and soil DDT was depleted by 56.0% during the entire growing period of the grass.

Key words: Hybrid sudan grass, DDT, Phytoremediation