

PAEs对烟草生长及其在土壤—烟草系统的累积特征

张欣¹, 吴思¹, 高飞¹, 陈秋实¹, 张仕祥², 焦加国¹

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心, 南京 210095; 2. 中国烟草总公司郑州烟草研究院, 郑州 450001)

摘要: 盆栽试验条件下, 通过外源添加 DBP/DEHP 制成 0, 20, 50, 100, 200 mg/kg 的浓度梯度, 来研究 PAEs 对烟草生长的影响及其在土壤—烟草系统的累积特征。结果表明: 外源 DBP/DEHP 的添加对烟草地上部生物量和茎粗无显著影响, 烟草株高随外源 DBP/DEHP 浓度的增加呈现不同的变化趋势, 其中黄棕壤烟草株高显著降低, 红壤的显著增加, 而黄壤的无变化; 黄壤根系活力随外源 DBP/DEHP 浓度先增高后降低, 而黄棕壤和红壤的无显著变化。DBP/DEHP 浓度对部分烟草抗氧化酶活性有显著影响, 而对土壤的脱氢酶和脲酶活性基本无影响。随外源 PAEs 浓度的增加, 土壤中 DBP/DEHP 含量均呈现上升的趋势, 以黄棕壤 DBP 含量增加幅度最大, 添加 200 mg/kg DBP 时是 CK(外源不添加 DBP/DEHP)的 3.56 倍; 黄棕壤和红壤 DEHP 浓度大幅增加, 黄棕壤和红壤添加 200 mg/kg DEHP 时分别是 CK 的 27.47, 27.34 倍。相比于 CK 大多数烟叶中和根系中 DBP/DEHP 有不同程度的提升。随外源 DBP/DEHP 浓度的增加, 会在一定程度上促进土壤和烟叶 DBP/DEHP 的积累。

关键词: 土壤; 烟草生长; DBP/DEHP; 累积特征

中图分类号: X131.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)03-0378-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.03.055

Effects of Exogenous PAEs Addition on Tobacco Growth and Its Accumulation Characteristics in Soil-Tobacco System

ZHANG Xin¹, WU Si¹, GAO Fei¹, CHEN Qiushi¹, ZHANG Shixiang², JIAO Jiaguo¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization, Nanjing 210095;

2. China National Tobacco Corporation Zhengzhou Tobacco Research Institute, Zhengzhou 450001)

Abstract: Under the pot experiment, DBP/DEHP was added exogenously with the concentrations of 0, 20, 50, 100, 200 mg/kg respectively to study the effect of PAEs on tobacco growth and its accumulation characteristics in soil-tobacco systems. The results showed that the addition of exogenous DBP/DEHP had no significant effect on the aboveground biomass and stem diameter of tobacco, and the plant height of tobacco showed different trends with the concentration of exogenous DBP/DEHP. The plant height of tobacco remained unchanged in yellow soil, decreased in yellow brown soil, and increased in red soil. The root activity of yellow soil decreased with the increase of exogenous DBP/DEHP concentration, while there was no significant change in yellow brown soil. DBP/DEHP concentration had a significant effect on tobacco antioxidant enzyme activity in some soils, but had no effect on soil denitrogenase and urease activity. With the increase of the concentrations of PAEs, the DBP/DEHP contents in the soil increased, with the highest increase for the DBP contents in the yellow brown soil, which reached its 3.56 times that of CK under the 200 mg/kg DBP. The concentrations of DEHP in yellow brown soil and red soil increased significantly, which were 27.47 times and 27.34 times of CK, respectively when adding 200 mg/kg DEHP. Compared with CK, most tobacco leaves and roots were improved in DBP/DEHP with different degrees. With the increase of the concentration of exogenous DBP/DEHP, the accumulation of DBP/DEHP in soil and tobacco leaves will be promoted to some extent.

Keywords: soil; tobacco growth; DBP/DEHP; accumulation characteristic

收稿日期: 2018-11-24

资助项目: 中国烟草总公司科技项目(110201603010); 郑州烟草研究院院长科技发展基金项目(112018CA0130)

第一作者: 张欣(1994-), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土壤污染物调查及评价研究。E-mail: 2016103068@njau.edu.cn

通信作者: 焦加国(1981-), 男, 副教授, 主要从事土壤生态研究。E-mail: jiaguojiao@njau.edu.cn

张仕祥(1976-), 男, 高级农艺师, 主要从事生态环境研究。E-mail: xuyizhangshix@163.com

烟草种植通常采取地膜覆盖的方式,以达到提高土壤温度、保持土壤养分、减少病虫害、促进植株生长发育的目的。地膜的使用量呈现逐年上升的趋势^[1],其导致的问题不容忽视,危害农村生态环境、造成“白色污染”,破坏土壤结构、降低耕地质量。地膜的主要成分是PAEs(邻苯二甲酸酯),烟田土壤地膜的大量残留已导致PAEs在土壤和烟叶中积累。根据前期对关于贵州烟田土壤PAEs调查结果表明,不同覆膜年限土壤中PAEs的含量为2.36~2.86 mg/kg,相应的烟叶中PAEs的含量为3.06~4.02 mg/kg,土壤中PAEs的含量已超过美国PAEs土壤的治理标准^[2]。PAEs残留在土壤中会导致严重的污染,而且会逐渐释放到环境中^[3],增加对人类和动物致癌、致畸、致突变的几率,破坏人和动物的正常内分泌活动^[4-5]。美国环境保护局(US EPA)将邻苯二甲酸二甲酯(DMP)、邻苯二甲酸二乙酯(DEP)、邻苯二甲酸正二丁酯(DBP)、邻苯二甲酸二正辛酯(DnOP)、邻苯二甲酸二(2-乙基己)酯(DEHP)、邻苯二甲酸二丁酯(BBP)6种PAEs类物质列为优先污染物^[6]。

PAEs的环境归宿和生态效应已受到学者的广泛关注,目前主要的研究方向集中于PAEs对蔬菜生长情况和品质的影响。有研究^[7]表明,DEHP胁迫下,2种水稻幼苗生物量均随着DEHP浓度的升高而降低;水稻根系分泌物中低分子有机酸受到PAEs

胁迫后质量浓度大多降低^[8];随土壤中施加DBP/DEHP浓度的增加,辣椒果实中的维生素C和辣椒素含量随着DBP/DEHP浓度的增加而下降^[9]。植物对PAEs的吸收积累特征,有研究^[10]表明,随着DBP/DEHP污染水平的增高,花生植株各部位DBP和DEHP含量均呈现显著升高的趋势。PAEs对土壤微生物及对土壤酶活性的影响,有研究^[11]表明,PAEs在短时间内会增加土壤微生物的代谢活性和增加微生物的遗传多样性;DBP/DEHP对土壤酶活性的影响,有研究^[12-13]表明,DBP/DEHP并对土壤脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶有抑制作用。

本试验选取DBP和DEHP作为代表性酞酸酯类污染物,研究外源添加不同浓度DBP/DEHP对烟草生长的影响及其在烟草和土壤中累积特征,明确DBP/DEHP在不同土壤—植物系统中的环境行为差异,探讨不同土壤类型对DBP/DEHP积累的影响,以期对烟叶生产过程中PAEs的生态风险评估提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤选择贵州遵义黄壤、福建邵武黄棕壤和江西抚州红壤的典型烟草种植区,采集0—20 cm表层土壤,将土壤风干去除杂物后,过5 mm筛待用。供试土壤理化性质见表1。供试烟草品种为“云烟97”。

表1 土壤理化性质

土壤类型	地理坐标	pH	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	DBP/ (mg·kg ⁻¹)	DEHP/ (mg·kg ⁻¹)
黄棕壤(福建)	117°20'30" E, 27°18'01" N	4.86	28.36	3.64	0.60	0.54	0.66
黄壤(贵州)	106°52'07" E, 27°53'44" N	7.22	15.99	1.19	0.77	0.55	0.80
红壤(江西)	116°25'16" E, 27°51'26" N	5.77	5.73	0.54	0.13	0.67	0.84

PAEs污染土壤的制备:参考曾巧云等^[14]的方法,将一定量DBP/DEHP(质量比1:1)溶于丙酮溶剂中,配成总浓度为10 g/L的丙酮溶液。将DEHP和DBP稀释制成0,20,50,100,200 mg/kg系列浓度梯度。然后添加到供试土壤中,待丙酮彻底挥发干净后,充分混匀。将尿素,过磷酸钙和硫酸钾混合作基肥一次性施入土壤(纯N用量为0.1 g/kg, N:P₂O₅:K₂O为1.0:1.5:3.0)。用蒸馏水调至田间持水量的60%,10天后进行粉碎、混匀和装盆。

1.2 盆栽条件

试验地点在南京市蔬菜科学研究所温室内进行。每个浓度梯度4次重复,共计60盆。采用规格为220 mm(内径)×180 mm(高)的陶瓷花盆,每盆装土5 kg(风干重)。于2018年3月19日移栽,将采用育苗基质培养的3片真叶期烟苗移栽至盆中,每盆1株烟草,所有盆定期做随机排列,定期浇灌,保证含水量为田间持水量的60%。

1.3 测定方法

1.3.1 样品采集和前处理 盆栽35天后(团棵期),测定其烟叶中部叶片的SPAD值。盆栽60天(旺长期)后测定烟草株高、茎粗和烟叶中部叶片的SPAD值。之后收获,分地上、地下部采集。样品依次用自来水,蒸馏水洗净,揩干后测鲜重。采集烟叶、根系和土壤样品,烟叶样品的采集每盆烟草采集其上部、中部和下部烟叶混合为1个样品,烟叶样品部分放入-70℃冰箱中保存待测,用于烟草抗氧化酶指标的测定;部分烟叶样品进行杀青处理,用于DBP/DEHP的测定。小部分根系用于根系活力的测定,其余进行根系扫描。部分土样放入-4℃冰箱中保存,用于土壤酶活性的测定;部分土样风干,用于土壤DBP/DEHP和土壤养分的测定。土壤和烟叶样品的前处理参考文献[15]。

1.3.2 测定指标和方法 PAEs测定:采用气相色谱质谱联用(GC-MS)对样品PAEs进行测定,采用

选择性离子监测 (SIM) 模式和毛细管柱进行色谱分离。使用高纯氦气载气, 温度程序设定为初始温度 60 ℃, 保持 1 min, 以 20 ℃/min 的速率至 220 ℃, 保持 1 min, 再以 5 ℃/min 的速率至 280 ℃, 保持 15 min。每次进样 1 μL, 进样口温度为 280 ℃。

土壤速效氮、速效磷、速效钾的测定均采用常规分析方法^[16]; 采用便携式叶绿素仪测定 SPAD 值; 采用 TTC 法测定根系活力的; 使用根系分析软件 Win RHIZO 对图像进行处理, 获得总根长、总根体积和根表面积相关参数; 土壤酶类和烟草抗氧化酶指标采用苏州科铭公司生产试剂盒测定。

1.4 数据统计分析

采用 Excel 2016 和 SPSS 25.0 软件对数据进行统计分析。采用 Duncan 检验法 ($P < 0.05$) 进行方差分析和多重比较 ($\alpha = 0.05$)。利用 Origin 2016 软件作图, 图表中数据为平均值 ± 标准误差。

2 结果与分析

2.1 外源添加 DBP/DEHP 对烟草生长及生理特征的影响

2.1.1 外源添加 DBP/DEHP 对烟草地上部生长的影响 3 种土壤中, 不同 DBP/DEHP 浓度对烟草株高的影响呈现不同的趋势, 黄壤烟草株高没有显著差异, 黄棕壤烟草株高降低, 红壤烟草株高呈现增加的趋势。整体来看, 烟草株高表现为黄棕壤 > 黄壤 > 红壤。3 种土壤中, 不同 DBP/DEHP 浓度对烟草茎粗均无显著影响 ($p < 0.05$), 红壤烟草茎粗整体低于黄壤和黄棕壤。整体上, 不同浓度对 3 种土壤烟草地上部生物量均影响不大, 不同土壤类型间, 地上部生物量顺序与烟草株高相一致 (表 2)。

表 2 外源添加 DBP/DEHP 对不同土壤烟草株高、茎粗及烟草地上部鲜重的影响

土壤类型	DBP/DEHP 浓度/ (mg · kg ⁻¹)	株高/ cm	茎粗/ mm	地上部 鲜重/g
黄壤	0	75.83 ± 5.04a	13.03 ± 0.37a	198.18 ± 5.79b
	20	78.93 ± 0.90a	13.23 ± 0.31a	236.17 ± 13.80a
	50	75.23 ± 3.46a	14.39 ± 0.42a	241.00 ± 7.09a
	100	80.53 ± 4.34a	13.68 ± 0.83a	229.17 ± 3.84a
	200	81.67 ± 4.43a	13.56 ± 0.35a	237.83 ± 7.31a
黄棕壤	0	100.20 ± 5.83a	13.54 ± 0.74a	271.83 ± 20.93a
	20	103.87 ± 2.25a	13.27 ± 0.34a	289.00 ± 5.03a
	50	94.97 ± 0.72ab	14.00 ± 0.69a	290.50 ± 7.81a
	100	88.87 ± 2.17ab	14.02 ± 0.43a	264.67 ± 11.85a
	200	77.83 ± 2.60c	14.98 ± 0.75a	258.33 ± 15.70a
红壤	0	79.50 ± 6.64bc	10.86 ± 0.73a	144.00 ± 1.32ab
	20	75.58 ± 4.81c	11.59 ± 0.74a	166.88 ± 2.90ab
	50	96.63 ± 9.17ab	11.47 ± 0.27a	171.13 ± 13.20a
	100	115.58 ± 2.57a	10.91 ± 0.18a	162.13 ± 3.91ab
	200	99.85 ± 5.41a	9.99 ± 0.57a	139.88 ± 13.14b

注: 表中数据为平均值 ± 标准误差; 不同小写字母表示数据差异显著性达到 5% 水平。

2.1.2 外源添加 DBP/DEHP 对烟草 SPAD 值的影响 由表 3 可知, 不同 DBP/DEHP 浓度对团棵期烟草 SPAD 值的影响呈现不同的趋势, 黄壤 SPAD 值呈现逐渐下降的趋势, 黄棕壤 SPAD 值呈现先升高后下降的趋势, 红壤没有显著性差异。但不同土壤类型间, 整体来看红壤 SPAD 值最高, 黄壤和黄棕壤较低。旺长期烟草不同浓度间的情况类似于团棵期, 但不同土壤类型间的情况与团棵期不同, 整体来看黄棕壤 SPAD 值最高, 红壤次之, 黄壤最低。

表 3 外源添加 DBP/DEHP 对不同土壤烟草团棵期和旺长期 SPAD 值的影响

烟草生育时期	DBP/DEHP 浓度/ (mg · kg ⁻¹)	SPAD		
		黄壤	黄棕壤	红壤
团棵期	0	41.67 ± 0.88a	43.33 ± 1.78ab	45.43 ± 2.64a
	20	41.43 ± 0.94a	44.83 ± 1.58a	41.30 ± 1.55a
	50	34.90 ± 1.99b	38.90 ± 2.39bc	42.63 ± 1.51a
	100	37.17 ± 0.42b	34.07 ± 1.20c	42.63 ± 0.22a
	200	37.60 ± 0.72b	36.40 ± 1.39c	44.23 ± 0.32a
旺长期	0	44.87 ± 3.40a	46.07 ± 1.28a	44.85 ± 0.63a
	20	40.00 ± 1.12ab	47.73 ± 1.34a	42.58 ± 1.23a
	50	37.50 ± 0.61b	45.80 ± 4.27a	43.68 ± 1.95a
	100	34.93 ± 1.03b	43.33 ± 0.96a	43.28 ± 1.67a
	200	34.77 ± 1.51b	40.77 ± 0.62a	40.93 ± 0.22a

2.1.3 外源添加 DBP/DEHP 对烟草抗氧化酶活性的影响 黄壤和红壤的烟草过氧化氢酶 (CAT) 活性随 DBP/DEHP 浓度的增加大致呈现增加的趋势, 而黄棕壤的烟草 CAT 活性随 DBP/DEHP 浓度呈现降低的趋势。黄壤烟草超氧化物歧化酶 (SOD) 活性在受 DBP/DEHP 胁迫时会有不同程度的提升, 黄棕壤的烟草 SOD 活性在受 DBP/DEHP 胁迫时先增加后降低, 红壤的烟草 SOD 活性在各个污染浓度处理间没有显著差异 ($p < 0.05$)。黄壤和红壤过氧化物酶 (POD) 活性呈现先增加后降低的趋势, 黄棕壤不同 DBP/DEHP 浓度对 POD 活性无显著影响 ($p < 0.05$)。对于丙二醛 (MDA) 来说, 红壤 MDA 活性呈现增加的趋势, 而黄棕壤呈现下降的趋势, 黄壤 MDA 活性没有显著差异 ($p < 0.05$)。整体来看, 不同土壤类型间, CAT 活性、SOD 活性、POD 活性和 MDA 顺序均为黄壤 > 红壤 > 黄棕壤 (表 4)。

2.1.4 外源添加 DBP/DEHP 对烟草根系生长的影响 3 种土壤中, 外源添加 DBP/DEHP 对烟草总根长的影响呈现不同的趋势, 黄壤烟草总根长呈现降低的趋势, 黄棕壤烟草总根长先升高后降低, 红壤烟草株高基本无变化。但不同土壤类型间, 烟草的总根长为黄棕壤 > 黄壤 > 红壤, 与地上部生物量的趋势相一致。土壤类型为黄壤和黄棕壤烟草的根系活力随 DBP/DEHP 浓度增加呈现先升高后降低的趋势, 红壤不同, 根系活力无显著影响 ($p < 0.05$)。整体来看, 不同土壤类型间烟草根系活力没有显著差异 (表 5)。

表 4 外源添加 DBP/DEHP 对不同土壤植株酶活性的影响

土壤类型	DBP/DEHP 浓度/ (mg · kg ⁻¹)	CAT 活性/ (nmol · min ⁻¹ · mg ⁻¹ prot ⁻¹)	SOD 活性/ (U · mg ⁻¹ prot ⁻¹)	POD 活性/ (U · mg ⁻¹ prot ⁻¹)	MDA/ (nmol · mg ⁻¹ prot ⁻¹)
黄壤	0	89.50 ± 4.33a	47.99 ± 6.96b	47.40 ± 7.08b	1.27 ± 0.09a
	20	120.31 ± 23.16a	250.26 ± 83.25a	34.51 ± 8.68b	1.55 ± 0.35a
	50	90.94 ± 4.68a	145.49 ± 3.15ab	129.50 ± 20.91a	1.02 ± 0.10a
	100	118.33 ± 23.17a	196.00 ± 99.85ab	32.43 ± 10.06b	1.46 ± 0.32a
	200	134.10 ± 31.88a	113.21 ± 8.83ab	64.20 ± 11.99b	1.62 ± 0.27a
黄棕壤	0	82.55 ± 2.26a	67.87 ± 16.83b	37.65 ± 5.05a	1.05 ± 0.13a
	20	72.45 ± 5.15ab	84.65 ± 7.39ab	24.24 ± 0.07a	0.83 ± 0.10ab
	50	66.30 ± 7.71ab	109.83 ± 3.08a	39.79 ± 11.04a	0.67 ± 0.03b
	100	56.17 ± 6.54b	83.68 ± 7.49ab	36.22 ± 6.12a	0.63 ± 0.05b
	200	55.78 ± 4.72b	74.85 ± 4.81ab	24.29 ± 7.22a	0.59 ± 0.03b
红壤	0	71.96 ± 5.00a	124.83 ± 3.68a	23.67 ± 6.74c	0.69 ± 0.03a
	20	110.25 ± 19.59a	90.76 ± 17.37a	44.21 ± 3.81ab	1.40 ± 0.26a
	50	89.99 ± 5.43a	135.63 ± 9.13a	42.56 ± 2.39ab	1.15 ± 0.14a
	100	107.93 ± 13.90a	147.57 ± 16.16a	56.45 ± 5.18a	1.30 ± 0.15a
	200	89.51 ± 3.98a	149.61 ± 30.17a	28.82 ± 3.34bc	0.99 ± 0.29a

表 5 外源添加 DBP/DEHP 对烟草根系的影响

土壤类型	DBP/DEHP 浓度/ (mg · kg ⁻¹)	总根长 /m	根表面积 /cm ²	总根体积 /cm ³	根系活力/ (μg · g ⁻¹ · h ⁻¹)
黄壤	0	26.05 ± 5.08a	498.16 ± 64.05b	9.59 ± 0.65a	1.33 ± 0.08b
	20	16.48 ± 0.83ab	422.93 ± 43.78b	7.98 ± 1.53a	1.53 ± 0.08a
	50	14.39 ± 3.50b	425.33 ± 30.60b	9.21 ± 1.41a	1.62 ± 0.01a
	100	20.35 ± 1.51ab	627.07 ± 220.13b	8.11 ± 0.55a	1.14 ± 0.04c
	200	19.11 ± 2.52ab	1147.41 ± 145.18a	7.06 ± 1.17a	1.15 ± 0.01c
黄棕壤	0	28.47 ± 4.05ab	692.24 ± 56.12a	13.59 ± 0.34a	1.20 ± 0.01a
	20	30.67 ± 2.70a	739.97 ± 62.22a	14.36 ± 1.38a	1.25 ± 0.09a
	50	27.90 ± 3.65ab	650.49 ± 88.21ab	12.34 ± 1.80ab	1.29 ± 0.14a
	100	20.70 ± 0.75b	471.82 ± 27.33b	8.71 ± 1.26b	1.31 ± 0.12a
	200	27.60 ± 1.43ab	626.28 ± 545.27ab	11.45 ± 1.15ab	1.21 ± 0.04a
红壤	0	10.88 ± 2.96a	293.13 ± 65.69a	6.42 ± 1.16a	1.58 ± 0.09a
	20	10.49 ± 1.07a	290.81 ± 30.61a	6.43 ± 0.75a	1.30 ± 0.12a
	50	10.99 ± 0.75a	301.77 ± 32.18a	6.64 ± 1.03a	1.43 ± 0.13a
	100	10.94 ± 0.64a	300.41 ± 24.16a	6.64 ± 0.82a	1.38 ± 0.08a
	200	11.47 ± 1.45a	274.41 ± 35.79a	5.26 ± 0.80a	1.41 ± 0.06a

2.2 外源添加 DBP/DEHP 对土壤性质的影响

2.2.1 外源添加 DBP/DEHP 对土壤养分状况的影响 3 种土壤中,外源添加不同 DBP/DEHP 浓度对黄棕壤和红壤速效氮、速效磷和速效钾含量的影响均没有显著影响 ($p < 0.05$),随外源 DBP/DEHP 浓度的增加在一定程度上会降低黄壤速效氮和速效钾的含量,速效磷呈现先增高后降低的趋势。不同土壤类型间,土壤速效氮磷钾含量相差较为明显,速效氮和速效钾含量为黄壤 > 黄棕壤 > 红壤;速效磷含量为黄棕壤 > 黄壤 > 红壤(表 6)。

2.2.2 外源添加 DBP/DEHP 对土壤酶活性的影响 总体上,外源添加 DBP/DEHP 对土壤脱氢酶活性和脲酶活性均无显著影响,但不同土壤类型间土壤脱氢酶活性为黄棕壤 > 黄壤 ≈ 红壤。土壤脲酶活性为黄壤 > 黄棕壤 > 红壤,与土壤速效氮含量的趋势

相同(图 1、图 2)。

2.3 外源添加 DBP/DEHP 对其在烟叶—土壤系统中累积的影响

2.3.1 DBP 在烟叶—土壤系统中累积特征 由图 3 可知,3 种土壤的 DBP 浓度整体上都随着外源 DBP 浓度的增加而增加,其中黄棕壤 DBP 增加趋势最为明显,且浓度均相应高于其他 2 种土壤。3 种土壤类型中,烟叶 DBP 浓度均随着外源 DBP 浓度的增加而增加,且烟叶的浓度基本相当,整体在 5.82~10.24 mg/kg。黄壤中,根系 DBP 浓度随外源 DBP 浓度增加而显著增加,但黄棕壤和红壤中的根系 DBP 浓度无显著变化。整体来看,不同土壤类型间土壤 DBP 浓度顺序为黄棕壤 > 黄壤 > 红壤;红壤中烟草根系的 DBP 浓度均相应高于其他 2 种土壤;3 种土壤类型间烟叶 DBP 含量相当。DBP 检出的浓度顺序为根系 ≈ 茎叶 > 土壤。

表 6 不同 DBP/DEHP 浓度下土壤速效氮、速效磷和速效钾的含量 单位:mg/kg

土壤类型	DBP/DEHP 浓度	速效氮	速效磷	速效钾
黄壤	0	157.85±0.23a	53.28±2.22a	156.33±6.74a
	20	153.77±0.23ab	56.18±1.76ab	150.83±12.38a
	50	131.13±4.61c	48.88±1.64bc	156.67±3.47a
	100	129.73±4.77c	44.23±2.88c	156.17±1.09a
	200	147.12±1.81b	78.88±5.62c	122.00±5.21b
黄棕壤	0	112.82±5.99a	77.96±8.88a	130.00±2.08a
	20	112.78±0.95a	70.07±0.96a	127.00±13.11a
	50	118.07±1.30a	76.39±1.30a	139.67±5.84a
红壤	100	120.17±0.42a	79.48±10.59a	144.17±7.25a
	200	118.77±10.27a	10.15±0.85a	142.33±6.58a
	0	45.73±1.60a	8.68±0.51a	77.67±1.45a
黄壤	20	45.37±1.49a	9.51±0.47a	76.00±4.93a
	50	48.05±2.09a	8.70±1.83a	68.50±1.04a
	100	49.92±3.03a	8.61±0.59a	75.67±7.13a
黄棕壤	200	45.92±2.99a	10.15±0.85a	76.17±6.28a

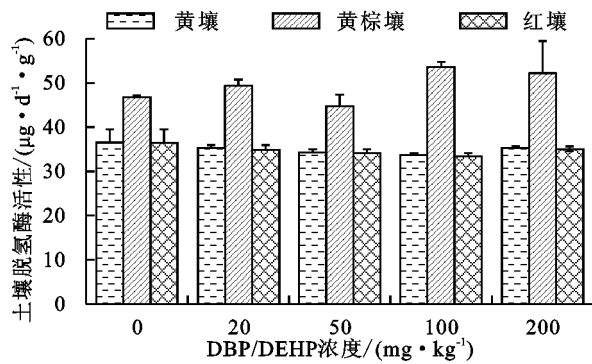


图 1 不同 DBP/DEHP 浓度下土壤脱氢酶活性

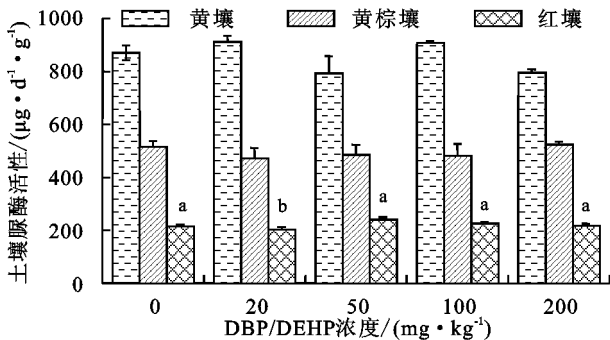


图 2 不同 DBP/DEHP 浓度下土壤脲酶活性

2.3.2 DEHP 在烟叶—土壤系统中累积特征 由图 4 可知,3 种土壤 DEHP 浓度整体上随着外源 DEHP 浓度的增加而增加,其中黄棕壤和红壤 DEHP 增加趋势最为明显,黄壤 DEHP 含量最低。黄壤和黄棕壤烟叶 DEHP 浓度均随着外源 DEHP 浓度的增加而增加,红壤 DEHP 先增高后降低,外源添加 DEHP 对烟草根系 DEHP 含量无明显影响。不同土壤类型间土壤 DEHP 含量为低浓度时黄棕壤>红壤>黄壤,高浓度时红壤>黄棕壤>黄壤;3 种土壤烟叶的浓度基本相当;整体上,红壤烟草根部 DEHP 含量最高,黄棕

壤次之,黄壤烟草根部 DEHP 含量最低。

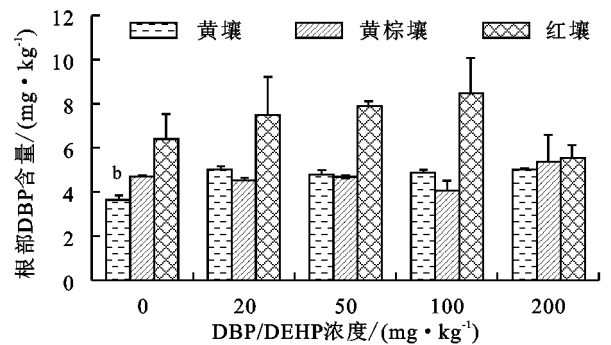
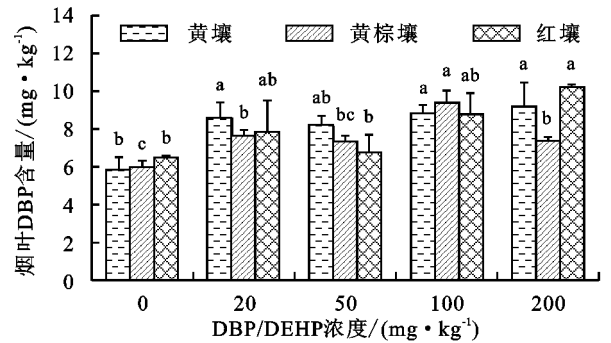
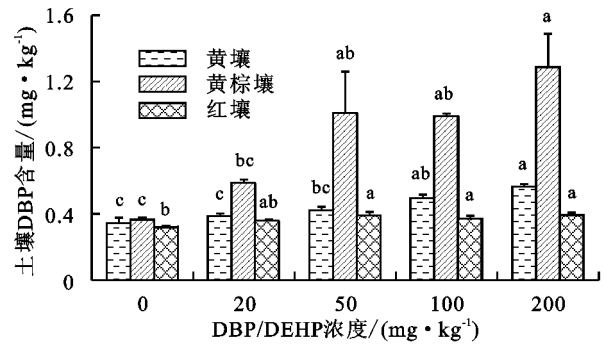


图 3 不同 DBP/DEHP 浓度下土壤、烟叶和根部 DBP 的含量

3 讨论

3.1 外源添加 DBP/DEHP 对烟草生长及土壤理化性质的影响

本研究表明,外源 DBP/DEHP 添加对烟草茎粗、地上部生物量和根系的影响均较小。外源添加 DBP/DEHP 对黄壤烟草株高无影响,抑制了黄棕壤株高,但提升了红壤株高。可能由于红壤烟叶 DBP 积累较少,不足以对株高造成抑制,由于养分使得株高增加。相关研究^[17]表明,DBP/DEHP 会抑制蔬菜株高,但也有研究^[18]表明,外源 PAEs 能够促进水稻分蘖期和孕穗期的株高的增加。3 种土壤中,以黄棕壤烟草株高最高。不同土壤类型烟草茎粗、地上部生物量和根系的生长顺序为黄棕壤>黄壤>红壤。可能由于红壤本身的肥力较低,导致烟草茎粗、地上部生物量和根系情况低于黄壤和黄棕壤。

植物自身拥有植物的活性氧清除系统,主要由 SOD、CAT 和 POD 这些酶组成^[19]。MDA 作为细胞内膜脂过氧化或脱脂的产物,其含量的多少可以代表膜损

伤程度的大小^[20]。黄壤和红壤的烟草 CAT 随 DBP/DEHP 浓度的增加大致呈现增加的趋势,表明 DBP/DEHP 会对烟草造成不同程度的损害,烟草植株受到 DBP/DEHP 胁迫时会增加自身的活性以清除体内过多的 H₂O₂,以维持植物的正常生命活动;而黄棕壤的烟草 CAT 活性随 DBP/DEHP 浓度呈现降低的趋势,表明植物体内的 H₂O₂ 大多超出了 CAT 的清除范围,可能会对 CAT 酶系统产生毒害。

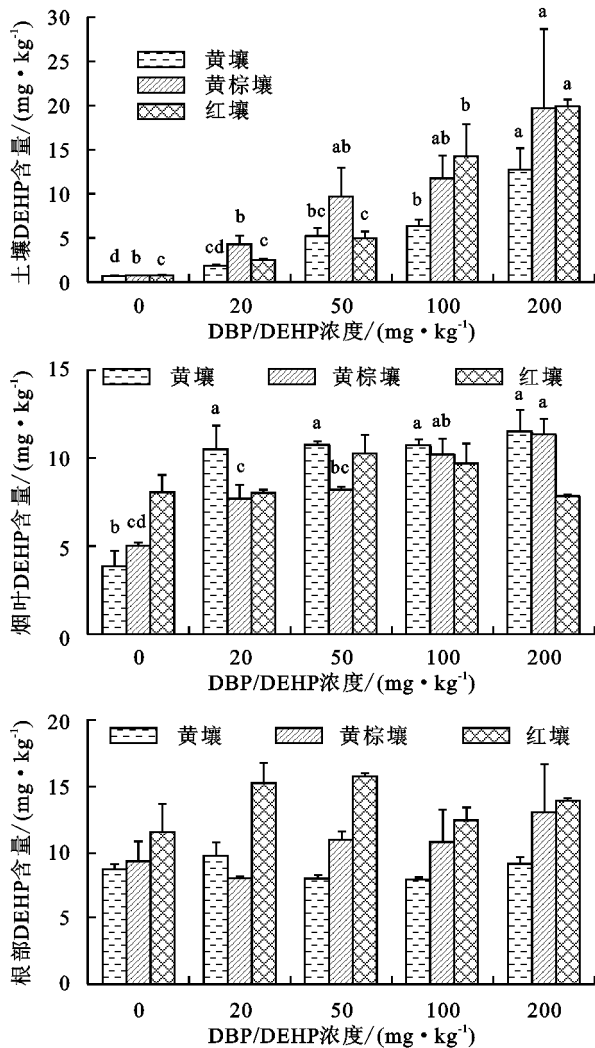


图4 不同 DBP/DEHP 浓度下土壤、烟叶和根部 DEHP 的含量

脱氢酶活性提高一般是土壤中的微生物受到 PAEs 胁迫的应激反应,分泌大量脱氢酶来抵制毒害,本研究表明,外源添加 DBP/DEHP 对土壤脱氢酶活性基本无影响,可能由于污染浓度不足以让植物产生应激反应。土壤脲酶与土壤速效氮趋势相同,不同土壤类型间比较,黄棕壤土壤脲酶含量较高,黄棕壤次之,红壤的土壤脲酶活性最低。因为土壤脲酶活性反映了土壤的氮素状况,土壤脲酶活性越高代表土壤速效氮含量越高。

3.2 外源添加 DBP/DEHP 对其在土壤-烟草系统积累的差异

总体来看,随着外源 DBP/DEHP 浓度的增加,土

壤、烟叶叶片和根系的 DBP 含量均有不同程度增加,其中以黄棕壤 DBP 含量增加幅度最大。DBP 外源添加浓度为 200 mg/kg 时,黄棕壤的 DBP 含量是其 CK 的 3.56 倍。这可能与黄棕壤的高有机质含量、土壤腐殖质强大的成键作用有关^[21]。但在不同土壤的烟草根系中,红壤的烟草根系 DBP 浓度却高于黄棕壤,此情况与宋广宇关等^[21]于 PAEs 在土壤蔬菜系统的研究类似,其黄棕壤的浓度范围是 3.22~3.46 mg/kg,根系中浓度为 1.59~2.96 mg/kg,而红壤的浓度范围是 0.49~0.71 mg/kg,根系中浓度为 1.81~13.91 mg/kg,可能与土壤的老化和生物有效性有关^[22];对于 DEHP 而言,土壤中 DEHP 浓度随外源 DEHP 的添加而增加,其中黄棕壤和红壤 DEHP 浓度大幅增加,土壤外源添加 200 mg/kg 时,黄棕壤和红壤 DEHP 分别是 CK 的 27.47, 27.34 倍。在低浓度处理时(20 mg/kg),表现出很明显的生物富集现象,烟叶和烟草根系中的 DEHP 是分别是土壤的 1.82~5.89, 1.9~5.48 倍,可能是由于烟叶更多吸收了土壤中挥发出来的 DEHP。

本试验中,不添加外源 DBP 时,烟叶和根系均有 DBP 富集,浓度范围是 5.82~6.48 mg/kg。类似的研究^[20]表明,水培试验中不添加 DBP 时,其萝卜叶片中 DBP 依然高达 10 mg/kg,可能是萝卜叶片吸收了来自空气中的 DBP,并在叶片富集,有一部分甚至转移到了根部,但具体原因还有待进一步考证。

DBP 检出的浓度顺序为根系≈茎叶>土壤,表明 DBP 易于在烟草中富集,可能由于烟叶的叶面积较大且叶片数较多更容易吸收 DBP。不同品种菜心茎叶中 DBP 的含量高低与其叶面积大小有一定的正相关性^[14]。依据前期的调查结果^[2]表明烟叶中 DBP 含量平均为土壤中的 1.33 倍。烟叶中 DBP/DEHP 高于土壤的原因可能是 PAEs 分子量较大,结构复杂,属于疏水性有机物,进入植物体内后,不易被代谢分解,表现出较强的生物富集性。同样的植物富集多于土壤的情况也出现在土壤-蔬菜系统中,南京设施菜地绝大多数蔬菜的 ΣPAEs 浓度都高于相应的土壤,黄瓜和芥菜中是土壤的 2 倍以上^[23];北京设施菜地 PAEs 的调查^[24]表明,16 种蔬菜中 DBP 的平均含量约为相应土壤的 1.14 倍,DEHP 的平均含量约为相应土壤的 1.48 倍。关于作物对土壤中 PAEs 的吸收累积途径,主要有 2 种观点:一是土壤中 PAEs 被根系吸收进而在茎叶中累积^[25-26];二是土壤中 PAEs 挥发出来进而被茎叶吸收累积^[27]。但由于研究的 PAEs 化合物和作物品种的不同,以及种植条件的不同,会使得研究结果不一致。因此,要关注 PAEs 在土壤-烟草系统的生态风险。目前关于烟草 PAEs 化合物的转移途径尚不清楚,可采用同位素示踪技术来探寻。

4 结论

综上,外源 DBP/DEHP 的添加对烟草地上部生物量和茎粗无显著影响,烟草株高随外源 DBP/DEHP 浓度的增加在不同土壤中呈现不同的变化趋势。随着外源 DBP/DEHP 浓度增加,黄壤根系活力先增高后降低,而黄棕壤和红壤的无显著变化。整体上,DBP/DEHP 浓度对烟草抗氧化酶活性和土壤的脱氢酶和脲酶活性影响不大。烟草根系和烟叶可以吸收累积 PAEs 化合物,并与土壤污染程度成正比。无论土壤、烟叶还是根系,DEHP 相较于 DBP 更容易积累。土壤中 DBP 和 DEHP 的含量均小于相应的烟叶和根系。不同土壤类型土壤 DBP 的含量从高到低依次是黄棕壤、黄壤和红壤。随 DBP/DEHP 浓度的增加,会在一定程度上促进烟叶的积累。

参考文献:

- [1] Department of Rural Survey National Bureau of Statistics of China. China rural statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2012.
- [2] 张欣,李志涛,陈秋实,等.地膜使用年限对遵义市烟田土壤和烟叶邻苯二甲酸酯累积的影响[J].应用生态学报,2018,29(10):3311-3318.
- [3] Kong S, Ji Y, Liu L, et al. Diversities of phthalate esters in suburban agricultural soils and wasteland soil appeared with urbanization in China [J]. Environmental Pollution, 2012, 170(8): 161-168.
- [4] Xu G, Li F, Wang Q. Occurrence and degradation characteristics of dibutyl phthalate (DBP) and di-(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) in typical agricultural soils of China [J]. Science of the Total Environment, 2008, 393(2/3): 333-340.
- [5] Ma L L, Chu S G, Xu X B. Phthalate residues in greenhouse soil from Beijing suburbs, People's Republic of China [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2003, 1(2): 394-399.
- [6] Wang H, Liang H, Gao D W. Occurrence and risk assessment of phthalate esters (PAEs) in agricultural soils of the Sanjiang Plain, northeast China [J]. Environmental Science & Pollution Research International, 2017, 24(24): 19723-19732.
- [7] 陈意良,鲁磊安,莫测辉,等. DEHP 胁迫对高/低累积邻苯二甲酸酯品种水稻抗氧化酶系统的影响[J].热带作物学报,2016,37(8):1484-1488.
- [8] 陈桐,蔡全英,吴启堂,等. PAEs 胁迫对高/低累积品种水稻根系形态及根系分泌低分子有机酸的影响[J].生态环境学报,2015,24(3):494-500.
- [9] Yin R, Lin X G, Wang S G, et al. Effect of DBP/DEHP in vegetable planted soil on the quality of capsicum fruit [J]. Chemosphere, 2003, 50(6): 801-805.
- [10] 饶潇潇,王建超,周震峰.花生对土壤中邻苯二甲酸酯的吸收累积特征[J].环境科学学报,2017,37(4):1531-1538.
- [11] 谢慧君,石义静,滕少香,等.邻苯二甲酸酯对土壤微生物群落多样性的影响[J].环境科学,2009,30(5):1286-1291.
- [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] 庞国飞,高习海,高军.酞酸酯污染对土壤脲酶与磷酸酶的动态影响[J].安徽农业科学,2009,37(36):18075-18077.
- [14] 曾巧云,莫测辉,蔡全英,等.邻苯二甲酸二丁酯在不同品种菜心-土壤系统的累积[J].中国环境科学,2006,26(3):333-336.
- [15] He L Z, Fan S L, Müller K, et al. Biochar reduces the bioavailability of di-(2-ethylhexyl) phthalate in soil [J]. Chemosphere, 2016, 142: 24-27.
- [16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2011.
- [17] Kong X, Jin D, Jin S L, et al. Responses of bacterial community to dibutyl phthalate (DBP) pollution in a soil-vegetable ecosystem [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 353: 142-150.
- [18] 杨子江,饶刚顺,肖立中.酞酸酯污染胁迫对 2 个水稻品种生长和生理特性的影响[J].广东农业科学,2013,40(7):1-3.
- [19] 朱小文.不同提取条件对植物组织 SOD、POD 和 CAT 酶活性的影响[J].食品科技,2018,43(5):265-269.
- [20] 罗广华,王爱国,郭俊彦.几种外源因子对大豆幼苗 SOD 活性的影响[J].植物生理学报,1990,3(3):239-244.
- [21] 宋广宇,代静玉,胡锋.邻苯二甲酸酯在不同类型土壤-植物系统中的累积特征研究[J].农业环境科学学报,2010,29(8):1502-1508.
- [22] Li C, Chen J, Wang J, et al. Phthalate esters in soil, plastic film and vegetable from greenhouse vegetable production bases in Beijing, China: Concentrations, sources and risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2016, 568: 1037-1043.
- [23] 陈永山,骆永明,章海波,等.设施菜地土壤酞酸酯污染的初步研究[J].土壤学报,2011,48(3):516-523.
- [24] 王佳斌.蔬菜对 PAEs 的吸收及其分布情况研究[D].江苏苏州:苏州科技大学,2018.
- [25] 曾巧云,莫测辉,蔡全英,等.萝卜对邻苯二甲酸酯(PAEs)吸收累积特征及途径的初步研究[J].环境科学学报,2006,26(1):10-16.
- [26] 曾巧云,莫测辉,蔡全英,等.菜心对邻苯二甲酸酯(PAEs)吸收途径的初步研究[J].农业工程学报,2005,21(8):137-141.
- [27] Schmitzer J L, Scheunert I, Korte F. Fate of bis-(2-ethylhexyl) ¹⁴C phthalate in laboratory and outdoor soil-plant systems[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 1988, 36(1): 210-215.