

# 多环芳烃对冬小麦早期生长的影响研究\*

邢维芹<sup>1, 2</sup> 骆永明<sup>1†</sup> 吴龙华<sup>1</sup> 宋静<sup>1</sup> 董强<sup>1</sup> 滕应<sup>1</sup>

(1中国科学院南京土壤研究所土壤环境与污染修复重点实验室, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室

(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(2河南工业大学化学化工学院, 郑州 450001)

## EFFECTS OF PAHs ON EARLY DEVELOPMENT OF WINTER WHEAT SEEDLINGS GROWN IN DIFFERENT SOILS

Xing Weiqin<sup>1, 2</sup> Luo Yongming<sup>1†</sup> Wu Longhua<sup>1</sup> Song Jing<sup>1</sup> Dong Keqiang<sup>1</sup> Teng Ying<sup>1</sup>

(1Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2School of Chemistry and Chemical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

关键词 多环芳烃; 冬小麦; 早期; 生长; 抑制; 促进

中图分类号 X171.5 文献标识码 A

多环芳烃 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs) 是一类重要的土壤有机污染物, 其在土壤上半衰期为 2 个月至 2 年<sup>[1]</sup>, 很多 PAHs 具有毒性、致癌、致畸和致突变的作用<sup>[2-3]</sup>。但由于单靠化学分析难以评价 PAHs 的毒性<sup>[4]</sup>, 因此, PAHs 污染土壤的生物生态风险评价成为人们关注的热点。高等植物是陆地生态系统的主要组成部分, 仅在近十年来开始被用来评价生态环境风险。平衡、稳定、健康的土壤生态系统可生长出优良的植物, 反之, 不稳定或受污染的土壤生态系统则会对植物正常生长发育带来负面影响。根据高等植物的生长情况可以监测和判断土壤的污染程度, 评价土壤质量<sup>[5-6]</sup>。目前已建立的高等植物毒理试验的方法主要有三种: 根伸长、种子发芽、早期秧苗生长实验<sup>[7]</sup>。相对于农药和重金属, 多环芳烃对植物毒性的数据较少<sup>[8]</sup>。

PAHs 在土壤中的行为受到土壤性质, 尤其是土壤有机质和黏粒含量的影响。PAHs 的分子量

越大, 其亲脂性越强, 越易与土壤有机质部分结合, 导致其生物有效性降低, 因此其生物毒性也随着分子量的增大而降低<sup>[8-9]</sup>; PAHs 也易与土壤有机质中芳香性结构比例较大的有机质组分结合<sup>[10-11]</sup>。因此, 同一 PAHs 在不同性质土壤上的毒性并不同, 但有关土壤类型或性质对 PAHs 的植物毒性影响方面报道甚少。同时, 也有研究表明, 土壤中 PAHs 及其他有机污染物随着与土壤基质接触时间的延长, 其生物有效性逐渐下降<sup>[12]</sup>。但目前还未见到通过生物试验表征 PAHs 老化过程中毒性变化的报道。

本试验的目的是采用红砂土和潮土作为供试土壤, 拟研究萘、菲和苯并[a]芘对冬小麦早期根系和地上部生长的影响, 探讨不同分子量多环芳烃在不同类型土壤中的生物毒性和生物可利用性, 以确定植物根系伸长和地上部生长与多环芳烃间的剂量-效应关系, 为多环芳烃污染土壤的生物生态风险评估提供科学依据。

\* 国家重点基础研究发展规划项目 (2002CB4108010)、国家自然科学基金重点项目 (40432005) 和中国科学院知识创新项目 (kzcx2-yw-404 CXTD-Z2005-4) 共同资助

† 通讯作者, E-mail: ymluo@issas.ac.cn

作者简介: 邢维芹 (1972-), 女, 河南安阳人, 博士, 主要从事土壤污染和修复研究。E-mail: weiqinxing@yahoo.com.cn

收稿日期: 2006-09-21; 收到修改稿日期: 2007-12-18

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

供试潮土(底锈干润锥形土, Endorustic Cambosols)和红砂土(富铝湿润富铁土, Allitidic Ferrisols)分别采自天津和江西鹰潭 0~20 cm 土层, 风干后混匀, 过 2 mm 筛。潮土、红砂土的 pH 分别为 8.20 和 5.02 其有机碳、CEC 分别为  $6.84 \text{ g kg}^{-1}$ 、 $2.88 \text{ g kg}^{-1}$  和  $13.8 \text{ mol kg}^{-1}$ 、 $11.0 \text{ mol kg}^{-1}$ ; 土壤颗粒组成为: 13.3%、14.8% (< 2  $\mu\text{m}$  颗粒), 74.3%、30.0% (2~50  $\mu\text{m}$  颗粒) 和 12.4%、55.2% (> 50  $\mu\text{m}$  颗粒)。土壤 pH 测定所用水土比为 2.5:1, 有机碳采用重铬酸钾容量法测定、CEC 用 EDTA-铵盐快速法测定, 颗粒组成用 LS230 激光粒度仪(美国 Beckman Coulter)测定。颗粒组成的测定用仪器本身的方法, 其他测定方法均参照文献 [13]。

### 1.2 供试作物

供试冬小麦扬麦 158 (*Triticum aestivum* L., 'Yangmai 158') 种子购自扬州市农业科学研究所。

### 1.3 植物毒性试验

参照文献 [14], 并根据本实验室条件作了部分改进, 具体步骤如下: 先将砂(约 90% 颗粒粒径小于 1 mm, 普通建筑用砂)洗净, 过 2 mm 筛, 烘干; 根据试验设计, 取不同量萘、菲及苯并[a]芘(Fluka 产品, 均为分析纯, 纯度大于 99%) 分别溶解于丙酮(每盆用量均为 100 ml) 后与 50 g 砂混合, 放入通风橱晾干。取含 PAHs 的砂分别与供试土壤混匀, 混合后的土壤 PAHs 浓度为 0.1、1.0、5.0、10.0、20.0 和 100.0  $\text{mg kg}^{-1}$ 。将混合土壤装入直径 8 cm、深 11 cm 的圆柱状塑料杯中, 每杯装入相当于 400 g 烘干土的风干土, 留少量风干土, 加蒸馏水使杯中土壤水分为其田间持水量的 70%, 播入已发出 2 mm 芽的小麦种子 10 粒, 覆上所留土壤, 盖上盖子(盖子材料与杯相同, 上有一个直径约 2 mm 的孔)(以减少 PAHs 的挥发)。所有土壤装入杯中后土壤深度约 9 cm。在人工气候箱(珠江牌 LRH-250-GS, 广东省医疗器械厂)中培养, 日夜光照长度分别为 16/8 h 日夜温度为  $20 \pm 1.5^\circ\text{C}$  /  $18 \pm 1.5^\circ\text{C}$ , 相对湿度为 40%~60%。重量法控制含水量, 每天加蒸馏水 2 次。同时取前述洗净的砂播种发芽小麦作对照。播种 67 h 后(根据预备试验, 在这一时期内对照砂中根系长度在 70 mm 左右)收获, 测定各处理

的小麦根系和地上部长度。每个处理重复 4 次。测量每个平行的 10 株植物的根系或地上部长度, 求算术平均值。

### 1.4 PAHs 老化后对冬小麦根系伸长的影响试验

将以上试验结束后获得的萘、菲和苯并[a]芘污染土壤保持 70% 田间持水量(WHC), 在 4°C 下避光保存 25 d(每盆土壤装入一个塑料袋, 密封), 之后装入前述塑料杯中, 按上述方法进行对冬小麦第二次生长试验。经第一次生长试验后, 由于收获植株时其根系粘附了少量土壤, 因此每盆中的土壤剩余量为最初加入重量的 90% 左右。

### 1.5 数据处理

根系或地上部生长抑制率按下式计算: (对照长度-处理长度)/对照长度  $\times 100\%$ 。不同用量下冬小麦的根系或地上部长度间的差异显著性用 LSD 法检验。

EC20 值估计: 将不同 PAHs 的冬小麦根系或地上部长度的抑制率和土壤 PAHs 用量作散点图, 并以平滑曲线将各点连接。估计抑制率为 20% 时曲线所对应的 PAHs 用量, 此即为 EC20 值。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同 PAHs 组分对冬小麦早期生长的影响

在红砂土中, 萘、菲和苯并[a]芘对冬小麦早期生长的影响有很大的不同。与对照相比, 萘浓度在  $50 \text{ mg kg}^{-1}$  以上时, 对冬小麦根系和地上部长度均产生显著抑制 ( $p < 0.05$ ), 并且这种抑制作用随浓度增大而增大。当浓度在  $1000 \text{ mg kg}^{-1}$  时, 萘对根系和地上部的抑制率分别是 83.4% 和 86.6%, 表明在红砂土上萘对冬小麦根系和地上部的抑制作用相近。

与对照相比, 所有菲浓度对冬小麦根系长度的影响未达到显著水平差异 ( $p > 0.05$ ); 当菲浓度在  $10 \text{ mg kg}^{-1}$  以上时, 地上部长度与对照产生显著差异 ( $p < 0.05$ )。而且当菲浓度在  $10 \text{ mg kg}^{-1}$  时, 对冬小麦根系和地上部的抑制率分别为 -5.4% 和 16.1%, 当菲浓度为  $1000 \text{ mg kg}^{-1}$  时, 对根系和地上部的抑制率分别为 12.2% 和 54.4%。表明菲对红砂土上冬小麦根系长度影响较小, 而地上部的伸长生长抑制作用较大。

苯并[a]芘浓度在 0.1、 $10 \text{ mg kg}^{-1}$  时, 冬小麦根系长度显著小于其他浓度时的根系长度 ( $p < 0.05$ ), 其他浓度下根系长度间无显著差异

( $p > 0.05$ ); 浓度为  $10 \text{ mg kg}^{-1}$  时, 地上部长度显著小于除对照外的其他浓度处理, 其他处理间根系长度无显著差异 ( $p > 0.05$ )。这一结果表明, 在较大浓度时, 苯并[a]芘对冬小麦的根系和地上部的伸长均有一定的促进作用。

根据冬小麦生长抑制率与 PAHs 浓度间的关系曲线可得到了 EC20 估计值见表 1 所示。对地上部而言, 萘和菲的 EC20 估计值分别为  $55.6 \text{ mg kg}^{-1}$  和  $8.1 \text{ mg kg}^{-1}$ 。在 Sverdup 等<sup>[15]</sup>的研究中, 菲对芥菜、红三叶和多年生黑麦草三种植物苗鲜重的 EC20 值为  $37 \sim 300 \text{ mg kg}^{-1}$ 。

表 1 菲和萘在不同土壤上对根系和地上部的 EC20 估计值 ( $\text{mg kg}^{-1}$ )

土壤	根系		地上部	
	萘	菲	萘	菲
红砂土	28.5	—	55.6	8.10
潮土	295	61.7	316	46.8

## 2.2 不同土壤类型中 PAHs 对冬小麦早期生长的影响

不同土壤上同一 PAHs 对扬麦 158 早期生长的影响明显不同。萘在红砂土上对冬小麦根系和地上部产生显著抑制作用 ( $p < 0.05$ ) 的起始浓度均为  $50 \text{ mg kg}^{-1}$ ; 而在潮土上, 只有当浓度达到  $1000 \text{ mg kg}^{-1}$  时, 冬小麦地上部长度才与对照出现显著差异 ( $p < 0.05$ )。当浓度为  $1000 \text{ mg kg}^{-1}$  时, 萘在红砂土和潮土上对冬小麦根系的抑制率分别为 83.4% 和 92.7%, 在两种土壤上对地上部的抑制率分别为 86.6% 和 92.4%, 表明 PAHs 的毒性效应受土壤类

型的影响较小。菲在红砂土上未对冬小麦根系的生长产生显著的抑制作用, 所有处理与对照间均无显著差异 ( $p > 0.05$ ), 而在潮土上在  $50 \text{ mg kg}^{-1}$  以上浓度时出现显著的抑制作用 ( $p < 0.05$ ); 在潮土和红砂土两种土壤上 PAHs 浓度大于  $50 \text{ mg kg}^{-1}$  时对冬小麦地上部生长表现出显著的抑制作用 ( $p < 0.05$ ), 其抑制率分别达 21.5% 和 33.7%。

在红砂土上苯并[a]芘对冬小麦早期根系生长有一定的促进作用, 这与本研究组另一试验结果<sup>[16]</sup>一致。潮土上 B[a]P 浓度为 50 和  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  时, 根系长度显著大于浓度为  $1000 \text{ mg kg}^{-1}$  时的长度 ( $p < 0.05$ ), 但所有处理与对照间差异不显著 ( $p > 0.05$ )。表明红砂土与潮土上苯并[a]芘对冬小麦早期根系长度影响较小。

红砂土上苯并[a]芘对地上部长度影响, 对照与所有处理间均无显著差异, 而 1、50、100、200 和  $1000 \text{ mg kg}^{-1}$  浓度时的地上部长度显著大于用量为  $10 \text{ mg kg}^{-1}$  时的地上部长度; 潮土上不同苯并[a]芘浓度处理地上部长度间均无显著差异 ( $p > 0.05$ )。表明与根系相比, 两种土壤上地上部受苯并[a]芘的影响较小。从表 1 还可看出, 相对同一 PAH 及同一植物部位来说, 潮土上的 EC20 值大于红砂土上的数值。这可能与红砂土的有机碳含量和黏粒含量均小于潮土有关。因为土壤有机碳和黏粒是土壤对亲脂性有机污染物形成吸附的主要组分<sup>[17, 18]</sup>。

## 2.3 供试土壤 PAHs 老化对红砂土上冬小麦早期生长的影响

由表 2 可知, 在土壤外加萘进行第一次小麦幼苗试验并保存 25 d 后, 其对冬小麦根系和地上部

表 2 萘、菲和苯并[a]芘老化前后对冬小麦早期生长的影响<sup>1)</sup>

PAHs 加入量 ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	萘				菲				苯并[a]芘			
	未老化		老化		未老化		老化		未老化		老化	
	根长 (cm)	地上部 (cm)	根长 (cm)	地上部 (cm)	根长 (cm)	地上部 (cm)	根长 (cm)	地上部 (cm)	根长 (cm)	地上部 (cm)	根长 (cm)	地上部 (cm)
0	19.2a	31.3ab	16.2ab	24.7a	24.0ab	36.1a	24.1a	25.8a	25.9c	75.6a	25.3ab	38.5
1	19.0a	31.0ab	14.1bc	26.6a	25.1a	31.5b	23.2a	24.4a	28.9b	72.5ab	26.9a	36.4
10	18.7a	31.2ab	16.9ac	26.6a	25.3a	31.0b	20.2b	20.2b	21.3d	74.0ab	23.9b	37.5
50	12.6b	36.2a	13.4c	25.6a	23.8ab	23.5c	16.0c	13.2c	35.2a	72.6ab	26.8a	36.1
100	5.8c	28.7b	7.5d	26.4a	21.7ab	22.6c	13.3cd	9.7c	33.9a	73.0ab	28.0a	38.9
200	3.7d	26.3b	4.0e	25.6a	25.0ab	23.7c	13.8c	10.1d	34.6a	70.0b	27.2a	36.3
1000	3.2d	7.4c	2.2e	8.0b	21.1b	25.1c	11.0d	10.3d	34.7a	72.4ab	27.3a	38.1

1) 表中“未老化”是指将萘、菲、苯并[a]芘加入土壤后随即进行第一次小麦生长试验 (67 h) 后得到的根、地上部长度结果; “老化”是指在第一次生长试验结束, 并将这些土壤放置 25 d 后再次进行小麦生长试验 (67 h) 得到的小麦根、地上部长度结果。同一行中不同数字后字母不同表示在  $p < 0.05$  水平上存在显著差异

生长的抑制明显减弱。以处理  $200 \text{ mg kg}^{-1}$  浓度为 例,老化前对根系和地上部的抑制率分别为 80.8% 和 75.3%,老化和挥发的影响,25 d后萘对根系和地上部的抑制率减弱为 16.1% 和 -4.6%。在新加入的情况下,菲对冬小麦根系抑制作用较小,老化后则抑制作用明显增大。如菲浓度为  $200 \text{ mg kg}^{-1}$  时,老化前后冬小麦根系的抑制率分别为 -4.0% 和 34.6%,而对地上部均有显著的抑制作用。即菲对根系的影响表现为老化后毒性增加,而对地上部表现出老化后菲的毒性降低。不同浓度苯并[a]芘老化前对冬小麦根系和地上部长度均产生一定程度的显著影响( $p < 0.05$ ) (表 2),这种影响在大部分浓度下表现为促进根系和地上部的伸长,老化后根系长度仅在  $0 \text{ mg kg}^{-1}$  和  $200 \text{ mg kg}^{-1}$  两种浓度下存在显著差异( $p < 0.05$ ),而地上部长度在各浓度下均无显著差异。在本试验条件下,红砂土上菲老化后对根系和地上部的 EC20 值分别为  $17.8 \text{ mg kg}^{-1}$  和  $8.7 \text{ mg kg}^{-1}$ ,对地上部的抑制率的 EC20 值略微增加;萘老化后对根系和地上部的 EC20 值分别为  $218.8 \text{ mg kg}^{-1}$  和  $354.8 \text{ mg kg}^{-1}$ 。除菲老化前由于没有得到 EC20 值外,其他情况下 EC20 值均是老化后明显大于老化前,即老化后萘和菲对植物的毒性显著减小。

### 3 小 结

在红砂土和潮土上 3 种 PAHs 中,小分子量的萘在较低浓度时对冬小麦早期生长表现出较大的抑制作用,菲的抑制作用较萘小,而苯并[a]芘呈现出一定的生长促进作用。在有机质和黏粒含量较低的红砂土上,萘浓度大于  $50 \text{ mg kg}^{-1}$  时冬小麦根系和地上部产生显著抑制作用,而在潮土上其浓度达到  $1000 \text{ mg kg}^{-1}$  时对冬小麦地上部长度出现显著差异。菲对地上部的抑制浓度在两种类型土壤上均为  $50 \text{ mg kg}^{-1}$ 。苯并[a]芘在红砂土上对冬小麦根系生长有一定的促进作用,而在潮土上对冬小麦根系的影响较小。老化后 3 种 PAHs 组分对冬小麦根系和地上部的影响(抑制或促进)大都表现为减小,只有菲对根系的影响例外。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Mackay D, Shiu W Y, M a K C. Illustrated Handbook of Physical Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals Polynuclear Aromatic Hydrocarbons Polychlorinated Dioxins and Dibenzofurans Lewis Publishers, Chelsea Michigan USA, 1992
- [ 2 ] Goldman R, Enewold L, Pellizzari E, et al. Smoking increase carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in human lung tissue Cancer Res., 2001, 61: 6367~6371
- [ 3 ] Mastrangelo G. Polycyclic aromatic hydrocarbons and cancer in man Environ. Health Perspect. 1997, 104: 1166~1170
- [ 4 ] Bispo M, Jourdain J, Jauzein M. Toxicity and Genotoxicity of industrial soils polluted by polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). Org. Geochem., 1999, 30: 947~952
- [ 5 ] Knoke K, Mawood T M, Cassidy M B, et al. A comparison of five bioassays to monitor toxicity during bioremediation of pentachlorophenol contaminated soil Water, Air and Soil Pollution, 1999, 110: 157~169
- [ 6 ] Mishra A, Choudhury M A. Monitoring of phytotoxicity of lead and mercury from germination and early seedling growth indices in two rice cultivars Water, Air and Soil Pollution, 1999, 110: 340~345
- [ 7 ] Greene J C, Bartels C L, Warren-Hicks W J, et al. Protocols for Short-term Toxicity Screening of Hazardous Waste Sites US Environmental Protection Agency, 1988, EPA/600/3-88/029
- [ 8 ] Watts R J, Dilly S E. Evaluation of iron catalysts for the Fenton-like remediation of diesel-contaminated soils J Hazard. Mater., 1996, 51: 209~224
- [ 9 ] Bayard R, Bama L, Mahjoub B, et al. Influence of the presence of PAHs and coal tar on naphthalene sorption in soils J Contam. Hydrol., 2000, 46: 61~80
- [ 10 ] Kile D E, Chiou C T. Water solubility enhancement of nonionic organic contaminants In: Suffet I H, MacCarthy P, eds. Aquatic Humic Substances: Influence on Fate and Treatment of Pollutants Adv. in Chem. Ser. 219. Am. Chem. Soc., Washington DC, 1989, 131~157
- [ 11 ] Chiou C T, McGroddy S E, Kile D E. Partition characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons on soils and sediments Environ. Sci. Technol., 1998, 32: 264~269
- [ 12 ] Northcott G, Jones K. Partitioning, extractability, and formation of nonextractable PAH residues in soil: 1. Compound differences in aging and sequestration. Environ. Sci. Technol., 2001, 35: 1103~1110
- [ 13 ] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000, 573~579
- [ 14 ] ISO (International Organization for Standardization). Soil Quality-determination of the Effects of Pollutants on Soil Flora Part 1: Method for the Measurement of Inhibition of Root Growth ISO 11269-1. Geneva, Switzerland, 1995
- [ 15 ] Sverdrup L E, Krog P H, Nielsen T, et al. Toxicity of eight polycyclic aromatic compounds to red clover (*Trifolium pratense*), ryegrass (*Lolium perenne*), and mustard (*Sinapis alba*). Chemosphere, 2003, 53: 993~1003
- [ 16 ] Xing W, Luo Y, Wu L, et al. Accumulation and phytoavailability of B[a]P in an acidic sandy soil Environmental Geochemistry and Health, 2006, 28: 143~148
- [ 17 ] 陈静, 王学军, 胡俊栋, 等. 腐植酸对土壤持留多环芳烃的影响. 农业环境科学学报, 2005, 25: 849~853
- [ 18 ] 倪进治, 骆永明, 张长波. 长江三角洲地区土壤环境质量与修复研究 III. 农业土壤不同粒径组分中菲和苯并[a]芘的分配特征. 土壤学报, 2006, 43(5): 717~722