

镉-苯并(a)芘单一及复合污染对小麦种子萌发的影响

刘 垚^{1,2}, 张 薇^{1*}, 刘鸣达¹

(1.沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866; 2.齐齐哈尔市环境工程评估中心, 黑龙江 齐齐哈尔 161005)

摘 要:通过高等植物生态毒理试验,以根长、芽长和发芽率为主要测定指标,研究了镉-苯并(a)芘单一/复合污染对小麦种子萌发的影响,以考察两者复合污染的生态效应并筛选敏感毒性诊断指标。结果表明,镉与苯并(a)芘单一/复合污染条件下,小麦根伸长、芽长和发芽率均受到不同程度的影响。其中,镉单一污染条件下小麦的根长和芽长显著高于对照,表现为刺激生长效应;苯并(a)芘单一污染胁迫显著抑制了小麦根长和芽长的伸长;两者复合污染促进了小麦的生长。单一污染条件下,苯并(a)芘对小麦种子早期生长的毒害效应大于镉。两种污染物在供试浓度范围内相互作用的联合毒性效应为拮抗特征。3个指标中,小麦发芽率的指示效应最不明显。

关键词:镉;苯并(a)芘;复合污染;种子萌发

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)02-0265-05

Effect of Cadmium – benzo(a)pyrene Single and Combined Pollution on Wheat Seed Germination

LIU Yao^{1,2}, ZHANG Wei^{1*}, LIU Ming-da¹

(1. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2. Environmental Engineering Assessment Center of Qiqihar, Qiqihar 161005, China)

Abstract: Eco-toxicological tests were carried out to investigate the effect of single/combined pollution of cadmium (Cd) and benzo(a)pyrene (BaP) on germination of wheat seeds. Seminal root length, shoot elongation and germination rate of wheat were chosen as the indexes to indicate the ecological effects, and to screen sensitive indicators of toxicity diagnosis. The results showed that the three indexes all had changes at different degree under Cd and BaP single/combined pollution. Wheat root length and shoot elongation were both significantly longer than those of the control upon single Cd exposure, showing a stimulation effect, while under the single BaP pollution, these two indexes were significantly inhibited. Cd-BaP combined pollution stimulated the growth of wheat. Early growth of wheat seed treated with BaP was slower than that with Cd, which indicated BaP had more serious toxic effect on wheat seed. The joint toxicity of the interaction two pollutants was antagonistic to seed germination within the tested concentrations of this experiment. Among the three indexes, wheat germination rate showed the weakest indicative effect in response to Cd and BaP pollution in soil.

Keywords: cadmium; benzo(a)pyrene; combined pollution; seed germination

随着工农业的快速发展及乡村的城市化,我国土壤污染问题日趋严重、污染面积也在逐年增加。土壤污染问题已经成为我国当代最为严峻的环境问题之一^[1]。土壤污染生态毒理诊断研究作为化学分析方法的补充,是判断污染物对生物潜在毒性的的重要手段,能从整体上表征土壤的质量状况,近年来逐渐受到国

内外学者的广泛关注。调查表明,目前已发表的有关毒理学研究论文中,约 70%涉及单一污染物,少数复合污染毒理诊断的研究也多以两种污染物高剂量混合污染居多^[2],而对于环境中客观存在的中低剂量复合污染以及污染物之间相互作用的毒性效应和污染诊断研究较少,往往在一定程度上使研究结果与现实相脱离,不足以解释和解决实际存在的问题。

重金属镉和苯并(a)芘是环境中普遍存在的、具有代表性的无机和有机污染物。重金属和多环芳烃可以通过工业排放、化肥施用、污水灌溉、污泥农用等途径进入农田系统,不仅对作物生长和发育产生不良影

收稿日期:2011-05-23

基金项目:沈阳农业大学青年教师科研基金资助项目

作者简介:刘 垚(1985—),男,硕士研究生,工程师,主要从事土壤生态环境方面的研究。E-mail:wjsliuyao@163.com

* 通讯作者:张 薇 E-mail:zhangweilm04@163.com

响,而且会通过食物链对人和动物健康构成威胁,是目前环境科学领域研究的热点之一^[3-4]。有关镉和苯并(a)芘复合污染毒性效应的研究多以水环境中鱼类为研究对象^[5],土壤介质中的研究较少。

本试验以小麦为供试植物,从土壤环境中镉和苯并(a)芘污染的实际情况出发,选取自然土壤进行实验室人工染毒,研究两者单一和复合污染条件下对小麦种子发芽和早期生长的影响,确定不同剂量下污染物复合污染的联合毒性模式,为土壤复合污染生态风险评估提供方法论和科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

CdCl₂ 购于沈阳化学试剂厂, BaP 购于 Aldrich 公司(德国),均为分析纯。其他药品均为市购分析纯。

供试土壤为棕壤,采自沈阳农业大学天柱山山麓 0~20 cm 土层。土壤理化性质为:有机质含量 16.70 g·kg⁻¹,全氮 0.81 g·kg⁻¹,全磷 0.49 g·kg⁻¹,速效钾 84.3 mg·kg⁻¹,pH(H₂O)为 6.51,CEC 16.29 cmol·kg⁻¹。土壤自然风干,过 1 mm 筛备用。小麦(*Triticum aestivum*)种子(辽春 18 号)由沈阳农业大学种子站提供。

1.2 土壤染毒实验

根据《土壤环境质量标准》的三级标准以及土壤污染物含量的文献调研确定单一及复合污染物浓度: Cd 单一污染浓度设定为 0、1.25、5.0、10.0 mg·kg⁻¹ 和 20.0 mg·kg⁻¹; BaP 单一污染浓度设定为 0、0.1、0.5、1.0 mg·kg⁻¹ 和 2.0 mg·kg⁻¹。复合污染浓度设计: Cd 为 1.25、5 mg·kg⁻¹ 和 10 mg·kg⁻¹, BaP 为 0.1、0.5 mg·kg⁻¹ 和 2 mg·kg⁻¹,两两复合共 9 组。Cd 和 BaP 分别以水溶液和丙酮溶液的形式加入到未污染的土壤中,平衡 7 d 后风干备用。预实验以丙酮作为溶剂对照加入土壤中,平衡 7 d 后种植小麦,其发芽率与空白(无丙酮)相比无明显差异,因此正式试验中未设溶剂对

照组。

1.3 研究方法

所有玻璃器皿使用前用 K₂CrO₄-H₂SO₄ 洗液清洗,再用自来水冲洗干净,蒸馏水冲洗一遍,于烘箱 120 ℃烘干备用。称取 50 g 干土于 90 mm 的培养皿中。调节土壤含水量至最大持水量的 60%,避光平衡 48 h,并将 15 粒种子播种于土壤中,盖好盖子,置于恒温培养箱中 25 ℃黑暗培养,当小麦对照芽长达到 20 mm 时,终止培养,取出发芽种子,测量根长、芽长,并计算发芽率。其中根长是指根和芽接点处到最长根尖的长度,芽长是根基点到芽尖的长度;当且仅当根长和芽长均超过 3 mm 时,才认为是发芽成功。每处理重复 3 次。

1.4 数据分析

根长、发芽抑制率的计算:
抑制率=(对照-处理)/对照×100%
所有试验数据采用 SPSS13.0 和 Excel 等进行处理,数据用平均数±标准误差(Mean±SD)表示。各浓度组与对照组用 LSD 法进行比较, *P*<0.05 被认为有显著差异, *P*<0.01 被认为有极显著差异。

2 试验结果

2.1 镉单一污染对小麦早期生长的影响

镉单一污染对小麦根长、芽长和发芽率的影响见表 1。土壤镉污染对小麦根长和芽长具有促进作用。统计分析表明,不同浓度 Cd 单一污染对小麦根长的促进作用达到极显著水平(*P*<0.01),对小麦芽长的促进作用达到显著水平(*P*<0.05),而对小麦发芽率的影响不显著(*P*>0.05),根(芽)长抑制率(*y*)与镉浓度(*x*)之间拟合方程见表 1,由方程可知,随着镉污染浓度的增加,小麦根长和芽长增加,表现为促进生长效应。

2.2 苯并(a)芘单一污染对小麦早期生长的影响

苯并(a)芘单一污染对小麦根伸长、芽长和发芽

表 1 镉单一污染对小麦发芽和早期生长的影响
Table 1 Effect of cadmium exposure on wheat germination and early growth

指标	Cd 浓度/mg·kg ⁻¹				
	0	1.25	5.00	10.00	20.00
根伸长抑制率/%	0±4.29a	-7.82±2.01b	-11.89±5.54b	-15.23±4.97b	-23.36±2.27c
芽长抑制率/%	0±8.52a	-14.18±2.60b	-9.93±9.55b	-22.44±4.71b	-28.18±2.81c
发芽率/%	83.33±1.92b	86.67±4.71ab	93.33±3.85a	93.33±2.72a	85.00±4.19b
根长抑制率与镉浓度拟合		$y=0.038\ 5x^2-1.783\ 3x-2.785\ 7$		$R^2=0.934\ 2$	$P<0.01$
芽长抑制率与镉浓度拟合		$y=0.047\ 8x^2-2.150\ 9x-4.384$		$R^2=0.815\ 6$	$P>0.05$

注:表中数据为平均值±标准差,同行不同小写字母表示不同处理差异显著(*P*<0.05),表 2 同。

率的影响见表 2。BaP 单一污染对小麦根长和芽长具有抑制作用。方差分析表明,不同浓度 BaP 污染对小麦根长和芽长的抑制作用达到显著水平($P<0.05$),而对小麦发芽率的影响不显著($P>0.05$)。根(芽)长抑制率(y)与 BaP 浓度(x)之间拟合方程见表 2,由方程可知,在试验浓度范围内,小麦芽长和根长抑制率随着 BaP 污染浓度的增加而先升高后降低。根长和芽长受到抑制表明土壤中 BaP 的存在影响小麦种子的正常生长发育,小麦已受到其毒害作用。

2.3 镉与苯并(a)芘复合污染对小麦早期生长的影响

镉和 BaP 污染对小麦根长和芽长的影响见表 3 和表 4。试验结果表明,两者的复合污染对小麦根伸长和芽长均具有促进作用。统计分析显示,Cd 和 BaP 两者复合与单一污染对小麦根(芽)长的影响存在显著性差异($P<0.05$),但不同复合污染组合间根(芽)长抑制率差异不显著($P>0.05$)。

表 5 显示了 Cd 与 BaP 复合污染对小麦发芽率的影响。两者复合污染与单一污染下小麦发芽率存在显著性差异($P<0.05$)。单一污染条件下小麦发芽率低于两者复合污染的情况,说明复合污染对小麦发芽具有促进作用,但不同复合污染组合间发芽率差异不显著($P>0.05$)。

3 讨论

本研究在供试浓度范围内($0\sim20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),镉单一污染对小麦根长、芽长和发芽率均表现为促进作用,统计分析表明不同浓度镉污染对根长和芽长的影响差异显著,并与镉污染浓度之间存在显著的正相关关系。林仁漳等^[9]的研究表明,土壤外源 Cd 在 $0\sim33\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度范围内对小麦幼苗生长不产生明显的毒害作用,且 Cd 污染下幼苗生物量和株高均比对照有不同程度的增加,以 $3.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理增幅最大,其促进生长的效应与本研究结果相似。马文丽等^[7]研究也表明,镉处理对乌麦和小麦的种子萌发具有低浓度下

表 3 Cd-BaP 复合污染对小麦根伸长抑制率的影响(%)
Table 3 Effect of Cd-BaP combined exposure on inhibition rate of wheat root elongation(%)

Cd 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	BaP 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		
	0.1	0.5	2
0	5.58±8.94a	23.83±2.17a	14.60±6.07a
1.25	-67.38±3.596 9b	-77.76±2.05b	-46.71±1.53b
5	-70.82±3.716 2b	-71.63±3.76b	-71.69±4.09b
10	-62.92±5.567 0b	-69.83±6.95b	-69.01±3.91b

注:表中数据为平均值±标准差,同列不同小写字母表示不同处理差异显著($P<0.05$)。表 4、表 5 同。

表 4 Cd-BaP 复合污染对小麦芽长抑制率的影响(%)
Table 4 Effect of Cd-BaP combined exposure on inhibition rate of wheat shoot elongation(%)

Cd 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	BaP 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		
	0.1	0.5	2
0	7.07±8.31a	20.90±6.52a	18.60±7.48a
1.25	-87.76±2.30b	-89.85±4.55b	-67.06±12.52b
5	-76.07±10.01b	-84.47±4.50b	-88.44±4.60b
10	-70.98±6.34b	-79.05±4.92b	-79.42±4.91b

表 5 Cd-BaP 复合污染对小麦发芽率的影响(%)
Table 5 Effect of Cd-BaP combined exposure on germination rate of wheat(%)

Cd 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	BaP 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		
	0.1	0.5	2
0	80.00±4.71a	73.33±7.20a	83.33±1.92a
1.25	96.67±1.92b	93.33±2.72b	96.67±1.92b
5	96.67±3.33b	91.67±1.67b	96.67±1.92b
10	91.67±3.19b	95.00±3.19b	98.33±1.67b

刺激和高浓度下抑制的效应。另外,也有很多研究报道 Cd 污染胁迫可导致植物生长受阻,甚至枯萎死亡等^[8-9]。Cd 对植物的影响存在剂量-效应特征,不同研究结果存在差异可能与试验选用的植物种类、土壤性质、暴露方法的不同有关。但普遍认同低剂量下可刺激植物生长,其相关机制目前尚不完全清楚^[6],有学者

表 2 苯并(a)芘单一污染对小麦发芽和早期生长的影响
Table 2 Effect of BaP exposure on wheat germination and early growth

指标	BaP 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$				
	0	0.10	0.50	1.00	2.00
根伸长抑制率/%	0±7.08c	5.58±8.94bc	23.83±2.17a	20.95±8.11ab	14.60±6.07b
芽长抑制率/%	0±8.73c	7.07±8.31bc	20.90±6.52b	33.18±9.08a	18.60±7.48b
发芽率/%	86.67±5.44a	80.00±4.71ab	73.33±7.20b	86.67±6.09a	83.33±1.92a
根长抑制率与镉浓度拟合		$y=-16.159x^2+39.398x+2.189$		$R^2=0.852\ 7$	$P<0.01$
芽长抑制率与镉浓度拟合		$y=-23.097x^2+56.715x+1.476$		$R^2=0.984\ 1$	$P<0.01$

认为低浓度范围内活性氧自由基含量升高,可激活蛋白酶,调节合成以及诱导基因表达等,进而促进细胞分裂和增殖,宏观表现为刺激生长。但是随着污染物浓度的增加和胁迫时间的延长,自由基积累过多,保护酶系统逐渐被抑制,抗氧化酶系统多种酶之间的活性比不平衡,细胞内多种功能膜被破坏,使生理代谢紊乱,直至产生细胞凋亡等毒害效应^[10]。在本实验中,Cd污染对小麦种子萌发及幼苗生长表现为刺激效应,说明在供试浓度范围内短时间(3 d)Cd胁迫没有对小麦产生毒害作用,相反这种胁迫使小麦出现生理应激而引发“过渡补偿”,进而表现出刺激生长^[6]。低浓度苯并(a)芘单一污染对小麦根长、芽长和发芽率具有一定的抑制作用。方差分析显示BaP污染引起小麦根长和芽长显著变化,芽长和BaP浓度之间存在显著的负相关,而根长和BaP污染浓度之间没有显著相关性。抑制效应表明,在供试浓度范围BaP已经对小麦的早期生长产生了毒害作用。

研究显示,重金属与有机物的植物毒害机制有所不同^[1]。从形态上看,植物在重金属污染条件下,除了根伸长受抑制外,无其他受害特征。一旦形态上表现出受害状况即可表明重金属污染已相当严重^[6]。但多环芳烃污染时,首先表现出明显的根径变细,既而根长受抑制的特征,这很可能是由于有机污染导致土壤水分和养分传输受阻而造成植物生长的生理障碍^[12]。本实验中,小麦的根长和芽长在BaP污染浓度极低的情况下即可产生抑制反应,而重金属Cd供试浓度范围内表现为促进效应,说明小麦早期生长受多环芳烃有机污染的影响更大,对有机物的反应相对重金属更为灵敏,这与宋玉芳等研究结果一致^[13-14]。两污染物单一及复合污染对小麦种子根长和芽长的影响与对照相比差异显著,而发芽率的变化并不明显,说明发芽率的污染指示效应为三者中最弱的。这可能与种子发芽与根生长过程有关。由于种子萌发更多依赖于胚内养分供应,影响其对污染物的敏感性,从而部分掩盖土壤污染对种子的毒害效应,只有当土壤中污染物的浓度达到一定水平时才表现出毒性作用;种子萌发后,分化出的根直接暴露于土壤中,在吸收养分的同时,污染物质也随之被动吸收,因而根生长和芽伸长全过程都受到土壤污染条件的影响,对土壤污染物的反映更直接、敏感^[15-17]。此结果与其他学者的研究结果一致,如王红旗等^[18]研究发现小麦种子萌发率对铅和苯并(a)芘单一及复合污染的敏感性均低于芽长和根长抑制率。丁克强等^[12]的研究也表明,小麦种子的根

伸长抑制率对土壤中苯并(a)芘污染更敏感。

对Cd-BaP单一与复合污染情况下小麦根伸长、芽长和发芽率的对比结果表明:两者单一污染与复合污染对小麦根伸长、芽长和发芽率均存在显著性差异($P<0.05$),但各Cd-BaP复合污染组合之间的差异不显著($P>0.05$)。Cd单一污染对小麦种子萌发3个指标均产生促进作用,而BaP单一污染对3个指标均产生抑制作用,两者复合条件下对小麦种子根长、芽长和发芽率均起促进作用。按照Bliss分类方法^[19]定义各复合污染情景的联合作用类型,根据表1至表5数据,3指标中任一指标Cd和BaP单一污染效应之和均大于Cd-BaP复合污染的效应值,表明二者在供试浓度范围内的联合毒性效应为拮抗特征。王红旗等^[18]的研究表明,Pb-BaP复合污染对小麦根伸长的联合作用均表现为拮抗作用,甚至出现抑制率为负值的促进生长现象,与本研究结果一致。重金属与多环芳烃间的拮抗作用在其他研究中也曾报道过,如对羊头鲈鱼的急性毒性研究表明菲和锌的毒性具有拮抗作用,可能因为菲改变了溶酶体膜的稳定性及功能,从而影响了溶酶体,解除Zn的毒害作用^[20]。有学者研究Cd与BaP复合污染对底栖鱼的急性毒性,发现两者的联合作用与污染物含量有关,最终表现为协同或拮抗作用^[5]。有关重金属和多环芳烃复合污染作用机理,一般学者主要从污染物跨膜和代谢等方面研究^[21]。如Sikkema等^[22]认为,PAHs等脂溶性化合物可同细胞膜上的脂溶性分子结合,改变细胞膜的结构和通透性,进而影响污染物的毒性。也有研究认为,Cd能减弱BaP对底栖鱼的毒性是由于镉能够直接影响细胞色素P450酶系统,从而影响BaP的代谢及其有毒产物的产生^[23]。与此相似,本试验也观察到Cd会削弱BaP对小麦萌发的抑制作用,但其机制有待于进一步研究。

4 结论

(1)在供试浓度范围内,BaP-Cd单一/复合污染条件下,小麦种子萌发和早期生长的生理指标均产生了不同程度的响应,其中根长和芽长指标对污染物的敏感性强于发芽率。

(2)Cd单一污染对小麦种子根长、芽长和发芽率都起一定的促进作用,低浓度BaP单一污染对三者产生了抑制作用,而两者复合污染对3个指标均起促进作用,说明两种污染物在供试浓度范围相互作用的联合毒性效应为拮抗特征。

(3)从小麦对重金属镉和多环芳烃苯并(a)芘的响应规律上看,后者在较低剂量下即可对小麦种子发芽和早期生长产生影响,相对于前者对小麦的毒性更大。

参考文献:

- [1] 钟晓兰,周生路,赵其国. 城乡结合部土壤污染及其生态环境效应[J]. 土壤, 2006, 38(2): 122-129.
ZHONG Xiao-lan, ZHOU Sheng-lu, ZHAO Qi-guo. Soil contamination and its eco-environmental impacts in the urban-rural marginal area[J]. *Soils*, 2006, 38(2): 122-129.
- [2] Steevens J A, Benson W H. Toxicokinetic interactions and survival of *Hyalella azteca* exposed to binary mixtures of chlorpyrifos, dieldrin, and methyl mercury[J]. *Aquatic Toxicology*, 2001, 51: 377-388.
- [3] Wei B G, Yang L S. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China[J]. *Microchemical Journal*, 2010, 94(2): 99-107.
- [4] Hamdi H, Benzarti S, Manusadzian L, et al. Bioaugmentation and biostimulation effects on PAH dissipation and soil ecotoxicity under controlled conditions [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(8): 1926-1935.
- [5] Van den Hurk P, Faisal M, Roberts J M H. Interaction of cadmium and benzo[a]pyrene in mummichog (*Fundulus heteroclitus*): Effects on acute mortality[J]. *Marine Environmental Research*, 1998, 46: 525-528.
- [6] 林仁漳,杜文超,王晓蓉,等. 土壤外源 Cd 胁迫对小麦幼苗生长自由基代谢及抗氧化酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 23-29.
LIN Ren-zhang, DU Wen-chao, WANG Xiao-rong, et al. Free radical metabolism and response of antioxidant enzymes in wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) exposed to soil cadmium[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1): 23-29.
- [7] 马文丽,金小弟,王转花. 镉处理对乌麦种子萌发幼苗生长及抗氧化酶的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(1): 54-59.
MA Wen-li, JIN Xiao-di, WANG Zhuan-hua. Effects of cadmium on seed germination, growth of seedling and antioxidant enzymes of rye and wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(1): 54-59.
- [8] 张金彪,黄维南. 镉对植物的生理生态效应的研究进展[J]. 生态学报, 2000, 20(3): 514-523.
ZHANG Jin-biao, HUANG Wei-nan. Advances on physiological and ecological effects of cadmium on plants[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2000, 20(3): 514-523.
- [9] Wang M E, Zhou Q X. Joint stress of chlorimuron-ethyl and cadmium on wheat *Triticum aestivum* at biochemical levels[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144(2): 572-580.
- [10] 朱云集,王展阳,马元喜,等. 铜胁迫对小麦根系生长发育及生理特性的影响[J]. 麦类作物, 1997, 17(5): 49-51.
ZHU Yun-ji, WANG Zhan-yang, MA Yuan-xi, et al. Copper stress on wheat root growth and physiological characteristics influence[J]. *Triticultural Crops*, 1997, 17(5): 49-51.
- [11] 周启星,孔繁翔,朱琳. 生态毒理学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 334-378.
ZHOU Qi-xing, KONG Fan-xiang, ZHU Lin. *Ecotoxicology: Principles and methods*[M]. Beijing: Science Press, 2004: 334-378.
- [12] 丁克强,骆永明,刘世亮. 多环芳烃对土壤中小麦发育的生态毒性效应[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2008, 16(2): 52-56.
DING Ke-qiang, LUO Yong-ming, LIU Shi-liang. Ecotoxicity effect of polycyclic aromatic hydrocarbons on wheat growth[J]. *Journal of Nanjing Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2008, 16(2): 52-56.
- [13] 宋玉芳,周启星,许华夏,等. 重金属对土壤中小麦种子发芽与根伸长抑制的生态毒性[J]. 应用生态学报, 2002, 13(4): 459-462.
SONG Yu-fang, ZHOU Qi-xing, XU Hua-xia, et al. Eco-toxicology of heavy metals on the inhibition of seed germination and root elongation of wheat in soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(4): 459-462.
- [14] 宋玉芳,周启星,许华夏,等. 菲、芘、1,2,4-三氯苯对土壤高等植物根伸长抑制的生态毒性效应[J]. 生态学报, 2002, 22(11): 1945-1950.
SONG Yu-fang, ZHOU Qi-xing, XU Hua-xia, et al. Eco-toxicological effects of phenanthrene, pyrene and 1, 2, 4-Trichlorobenzene in soils on the inhibition of root elongation of higher plants[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2002, 22(11): 1945-1950.
- [15] Liu X L, Zhang S Z, Shan X Q, et al. Toxicity of arsenate and arsenite on germination, seedling growth and amylolytic activity of wheat[J]. *Chemosphere*, 2005, 61: 293-301.
- [16] 范飞,周启星,王美娥. 基于小麦种子发芽和根伸长的麝香酮污染毒性效应[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1396-1400.
FAN Fei, ZHOU Qi-xing, WANG Mei-e. Toxic effect of musk ketone based on the determinations of wheat (*Triticum aestivum*) seed germination and root elongation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(6): 1396-1400.
- [17] 刘宛,孙铁珩,周启星,等. 氯苯胁迫对大豆种子萌发的伤害[J]. 应用生态学报, 2002, 13(2): 141-144.
LIU Wan, SUN Tie-heng, ZHOU Qi-xing, et al. Chlorobenzene-stressing injury of the germination of soybean seed[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(2): 141-144.
- [18] 王红旗,王帅,宁少尉,等. 土壤铅-苯并(a)芘复合污染对小麦种子生长的影响研究[J]. 环境科学, 2011, 32(3): 886-895.
WANG Hong-qi, WANG Shuai, NING Shao-wei, et al. Effects of combined pollution of lead and benzo[a]pyrene on seed growth of wheat in soils[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(3): 886-895.
- [19] 周启星. 复合污染生态学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995: 20-21.
ZHOU Qi-xing. *Composite pollution ecology*[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1995: 20-21.
- [20] Moreau C J, Klerks P L, Haas C N. Interaction between phenanthrene and zinc in their toxicity to the sheepshead minnow (*Cyprinodon variegatus*) [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1999, 37: 251-257.
- [21] 沈国清,陆贻通,周培. 土壤环境中重金属和多环芳烃复合污染研究进展[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2005, 23(1): 102-106.
SHEN Guo-qing, LU Yi-tong, ZHOU Pei. Advances of research on combined pollution of heavy metals with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil environment[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science)*, 2005, 23(1): 102-106.
- [22] Sikkema J, De Bont J A M, Poolman B. Interactions of cyclic hydrocarbons with biological membrane[J]. *Biol Chem*, 1994, 269: 8022-8028.
- [23] Van den Hurk P, Roberts J M H, Faisal M. Interaction of cadmium and benzo[a]pyrene in mummichog (*Fundulus heteroclitus*): Biotransformation in isolated hepatocytes [J]. *Marine Environmental Research*, 1998, 46: 529-532.