

人工合成麝香对小麦种子发芽的生态毒性

陈苏^{1,2}, 孙丽娜^{*}, 孙铁珩^{1,2}, 晁雷³, 孙维科¹, 姜阳¹

(1. 沈阳大学区域污染环境生态修复教育部重点实验室, 沈阳 110044; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所陆地生态过程重点实验室, 沈阳 110016; 3. 辽宁省环境科学研究院, 沈阳 110031)

摘要:采用土培实验,研究了佳乐麝香(HHCB)和吐纳麝香(AHTN)对小麦种子发芽的生态毒性,测定了这2种人工合成麝香对小麦种子发芽率、根伸长抑制率和芽伸长抑制率的影响。结果表明,小麦种子的发芽率与这2种人工合成麝香浓度之间剂量-效应关系不明显,低剂量条件下(佳乐麝香 $\leq 150 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,吐纳麝香 $\leq 200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),对小麦发芽具有一定的促进作用。在实验浓度范围内,佳乐麝香和吐纳麝香处理下小麦的发芽率分别为77.78%~95.56%和84.44%~97.78%。小麦的根伸长抑制率(或芽伸长抑制率)与2种人工合成麝香的浓度之间均存在良好的剂量-效应关系。利用线性模型计算得出的佳乐麝香和吐纳麝香对小麦芽长的 EC_{50} 分别为 $155.84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $290.58 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,对小麦根伸长的 EC_{50} 分别为 $215.66 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $323.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。2种人工合成麝香对小麦敏感部位的 EC_{50} 值表明佳乐麝香对小麦的毒性要强于吐纳麝香。

关键词:人工合成麝香;佳乐麝香;吐纳麝香;小麦;生态毒性

中图分类号:X171.5 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2011)05-1477-05

Ecotoxicity of Synthetical Musks on Wheat (*Triticum aestivum*) Based on Seed Germination

CHEN Su^{1,2}, SUN Li-na¹, SUN Tie-heng^{1,2}, CHAO Lei³, SUN Wei-ke¹, LOU Yang¹

(1. Key Laboratory of Regional Environment and Eco-remediation, Ministry of Education, Shenyang University, Shenyang 110044, China; 2. Key Laboratory of Terrestrial Ecological Process, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. Liaoning Academy of Environmental Sciences, Shenyang 110031, China)

Abstract: With soil culture the ecotoxicological effects of galaxolide (HHCB) and tonalide (AHTN) on the germination of wheat (*Triticum aestivum*) seeds were investigated. And the influence of these two synthetical musks on the wheat germination rate, inhibition rate of root elongation and inhibition rate of shoot elongation were studied. The results showed that there were no obvious dose-effect relationship between wheat germination rate and concentrations of these two synthetical musks. Lower dose (HHCB $\leq 150 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, AHTN $\leq 200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) could accelerate the germination of wheat. Under the test concentrations of synthetical musks, the wheat germination rates treated with HHCB and AHTN were 77.78%~95.56% and 84.44%~97.78%, respectively. There were good dose-effect relationship between inhibition rate of root elongation (or inhibition rate of shoot elongation) and synthetical musks concentrations. The EC_{50} of HHCB and AHTN based on shoot were $155.84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $290.58 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and were $215.66 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $323.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ based on root from linear model. The EC_{50} of wheat sensitive positions showed that the toxicity of HHCB was stronger than AHTN.

Key words: synthetical musks; galaxolide (HHCB); tonalide (AHTN); wheat (*Triticum aestivum*); ecotoxicity

人工合成麝香是一类工业香料添加剂,广泛应用于化妆品、洗涤用品、香水、护肤品等产品中。由于大量使用,持续不断地输入环境,其中的一些典型化合物如佳乐麝香(HHCB)和吐纳麝香(AHTN)等在环境中的浓度日益升高^[1],一定程度上造成了环境污染。人工合成麝香具有较强的亲脂性,易在食物链中积累和富集。目前,研究人员在污水处理厂的进水、出水和污泥^[2-5]、表层水^[6,7]、水体颗粒相、水体沉积物^[8,9]、土壤、大气样品^[10-13]以及鱼、虾、贝类等生物体^[14,15]均检测出了这类化合物,甚至在人体的脂肪组织、血液和母乳^[16,17]中也测出了合成麝香化合物^[18]。人工合成麝香作为一种新兴污染

物(emerging pollutants),已成为药物和个人护理品类污染物(PPCPs)的重要组成部分,虽然它的应用历史不长,但产量高,应用广,使用后通过生活污水、生活污水收集系统、污水处理厂、再生水灌溉与污泥农用等渠道进入并积累于环境,对人和生物体产生不同的毒性。我国作为人工合成麝香生产的主要大国之一,环境中人工合成麝香的污染研究还较

收稿日期:2010-05-12;修订日期:2010-08-07

基金项目:国家自然科学基金重点项目(40930739);辽宁省教育厅重点实验室项目(LS2010110);辽宁省优秀人才项目(2009R44);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07208-005, 2008ZX07208-003)

作者简介:陈苏(1979~),女,博士,副教授,主要研究方向为退化生态系统的修复, E-mail: mailchensu@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: mailsydx@yahoo.com.cn

少^[8]。目前相关研究主要集中在水体、沉积物、污泥中人工合成麝香的分布特征研究^[9, 20]以及人工合成麝香对各种生物影响的剂量关系,涉及的生物主要有鱼、老鼠、细菌等,大部分对人工合成麝香的研究还仅局限于水生生态系统,对于其在土壤-植物系统中的毒性效应研究还很少^[1, 21]。土壤作为陆地生态系统的重要组成部分,在物质循环、能量转化等方面具有不可估量的作用,有关人工合成麝香在土壤-植物系统中的残留分布、迁移转化、生态毒性以及对人类健康的影响值得关注。

本实验选用小麦为供试植物,通过发芽实验,研究工业生产中广泛使用且具典型代表性的2种人工合成麝香——佳乐麝香和吐纳麝香,在土壤介质中对小麦发芽、芽伸长抑制率和根伸长抑制率的影响,确定小麦发芽、芽伸长及根伸长对人工合成麝香的敏感程度,以期在土壤-植物系统中人工合成麝香污染的生态风险评价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

人工合成麝香佳乐麝香和吐纳麝香均购于SIGMA-ALDRICH公司,纯度分别为50% [液体试剂,稀释剂为邻苯二甲酸二乙酯(DEP)]和98% (固体试剂),其分子式均为 $C_{18}H_{26}O$,结构式见图1所示。佳乐麝香和吐纳麝香的辛醇/水系数($\lg K_{ow}$)分别为5.3和5.4;生物富集系数(BCF)分别为1584和597^[21]。

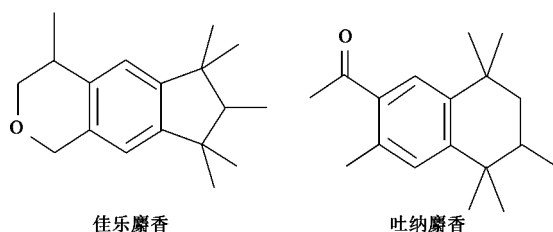


图1 佳乐麝香和吐纳麝香的结构

Fig.1 Chemical structure of galaxolide and tonalide

供试土壤为草甸棕壤,采自于中国科学院沈阳应用生态研究所生态实验站0~20 cm表层土壤,pH值6.50,有机质1.55%,砂粒21.4%,粉粒46.5%,黏粒32.1%。

供试植物为小麦(*Triticum aestivum*),其品种为辽春18号,购自于沈阳农业大学种子站。

1.2 实验方法

采用土培实验,根据预实验中小麦根伸长抑制率10%~60%,设置佳乐麝香和吐纳麝香单一处理的实验浓度为0、50、100、150、200、250和300 $mg \cdot kg^{-1}$ 。称取50.0 g风干土壤于90 mm培养皿中,按照上述浓度将配置好的人工合成麝香-丙酮溶液(人工合成麝香的浓度为1 g/L)投加到土壤中并混合均匀,待丙酮挥发干净后开始正式实验。每个培养皿播种15粒种子(饱满、均匀,经过3% H_2O_2 消毒),调节土壤含水量至最大持水量(WHC)的60%,每个处理设3次重复。培养皿放置在25℃的恒温培养箱(GZP-250S,上海产)中黑暗培养。当对照芽长达到20 mm时终止培养,取出种子,分别测量根伸长、芽长并计算各处理种子的发芽率、芽伸长抑制率和根伸长抑制率。

1.3 数据分析

芽伸长(或根伸长)抑制率按下式计算:

$$\text{抑制率} = \frac{(\text{对照} - \text{处理})}{\text{对照}} \times 100\%$$

实验数据采用SPSS13.0进行处理,结果以平均值±标准差表示,利用单因素方差分析中的LSD多重比较检验不同处理间的结果差异显著性,统计显著性设为 $p < 0.05$,极显著设为 $p < 0.01$ 。

2 结果与讨论

2.1 人工合成麝香对小麦发芽率的影响

在实验浓度范围内,佳乐麝香和吐纳麝香处理下小麦的发芽率分别为77.78%~95.56%和84.44%~97.78%。由图2可见,佳乐麝香对小麦种子发芽率的抑制作用均强于吐纳麝香(除人工合成麝香浓度50 $mg \cdot kg^{-1}$ 处理外)。佳乐麝香浓度较低时(50~150 $mg \cdot kg^{-1}$),对小麦发芽起到促进作用,而当其处理浓度较高时(>150 $mg \cdot kg^{-1}$)对小麦发芽起抑制作用。吐纳麝香在浓度范围50~200 $mg \cdot kg^{-1}$ 时均促进小麦发芽,当浓度较高时(>200 $mg \cdot kg^{-1}$)则对小麦的发芽起到明显的抑制作用。本实验的结果表明,佳乐麝香和吐纳麝香在一定浓度范围内(分别是50~150 $mg \cdot kg^{-1}$ 和50~200 $mg \cdot kg^{-1}$),促进了小麦的发芽。范飞等^[22]的研究表明,麝香酮浓度0.5~30 $mg \cdot kg^{-1}$ 范围内对小麦的发芽率起促进作用,认为在该浓度范围内,麝香酮属于硝基麝香,作为一种有机物,很可能导致小麦种子种皮的组分发生改变,进而促进小麦的发芽。本研究中采用的佳乐麝香(HHCB)和吐纳麝香(ANTN)属于多环麝香,由于人工合成麝香具有类雌激素作用,

因而可能会对小麦种子的发芽起到促进作用。在土壤环境中,当佳乐麝香和吐纳麝香的浓度分别大于 $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,小麦种子的发芽率开始受到影响,然而高浓度人工合成麝香在环境中并不常见,由于种子发芽过程主要受胚内养分供应,受外界物质影响较小,导致土壤污染对种子发芽的毒害作用被部分掩盖,因此,种子发芽率不适宜作为人工合成麝香污染生态毒理学的敏感指标。

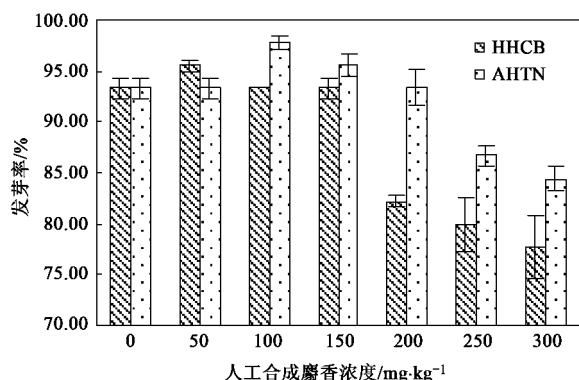


图2 佳乐麝香和吐纳麝香对小麦发芽率的影响

Fig. 2 Influence of galaxolide and tonalide on wheat germination rate

2.2 人工合成麝香对小麦根伸长抑制率的影响

由图3可知,在实验浓度范围内,小麦的根伸长抑制率随着人工合成麝香浓度的增加而呈现上升趋势。佳乐麝香在 $50 \sim 300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的浓度范围内,均对小麦根伸长起抑制作用;而吐纳麝香在 $50 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 浓度范围内促进了小麦根的生长,根伸长抑制率为负值,当其浓度 $> 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时对小麦的根伸长才起到抑制作用。以小麦根伸长抑制率对人工合成麝香浓度进行的回归分析表明(见表1),2

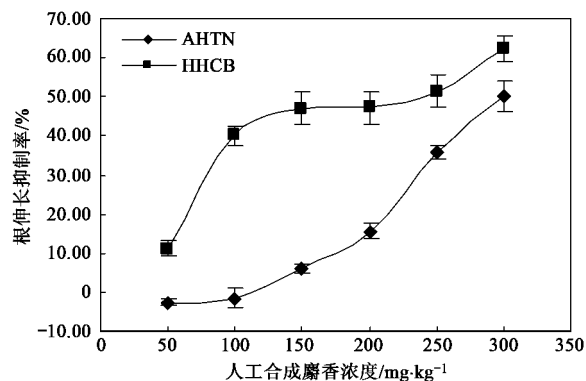


图3 佳乐麝香和吐纳麝香对小麦根伸长抑制率的影响

Fig. 3 Influence of galaxolide and tonalide on inhibition rate of root elongation

种麝香浓度与小麦根伸长抑制率之间的关系均可以用对数方程和线性方程来拟合,就佳乐麝香而言,对数模型的拟合最好,而吐纳麝香则以线性方程的拟合最佳。

表1 人工合成麝香浓度与根伸长抑制率的拟合方程¹⁾

Table 1 Fitted equations of the synthetical musks concentration and inhibition rate of root elongation

方程类型	人工合成麝香	拟合方程	R^2	n
线性模型	佳乐麝香	$RI = 0.17x + 14.20$	0.80 [*]	6
	吐纳麝香	$RI = 0.22x - 21.41$	0.92 ^{**}	6
对数模型	佳乐麝香	$RI = 25.07 \ln x - 82.37$	0.92 ^{**}	6
	吐纳麝香	$RI = 27.98 \ln x - 122.90$	0.74 [*]	6

1) * 表示 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$, 下同; x 为人工合成麝香的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); RI 为小麦根伸长抑制率 (%)

在土壤介质中,同一浓度条件下,佳乐麝香对小麦的根伸长抑制率均高于吐纳麝香,表明土壤对不同种类人工合成麝香的抑制作用的影响不同,可能是与土壤对人工合成麝香的缓冲强度有关^[23],这有待于结合这2种人工合成麝香在土壤中的吸附-解吸特性来作进一步解释。

2.3 人工合成麝香对小麦芽伸长抑制率的影响

不同处理浓度下,小麦芽伸长抑制率见图4,总体上,随着2种人工合成麝香浓度的增加,芽伸长抑制率亦随之增高。土壤中吐纳麝香浓度为 $0 \sim 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,其对小麦芽伸长抑制率的影响较小并且也较为平缓,而当其浓度 $> 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,芽伸长抑制率显著提高。相同浓度下,佳乐麝香对小麦芽伸长抑制率显著高于吐纳麝香,这与2种麝香对根伸长的处理结果类似,表明佳乐麝香对小麦的毒害作用明显高于吐纳麝香。

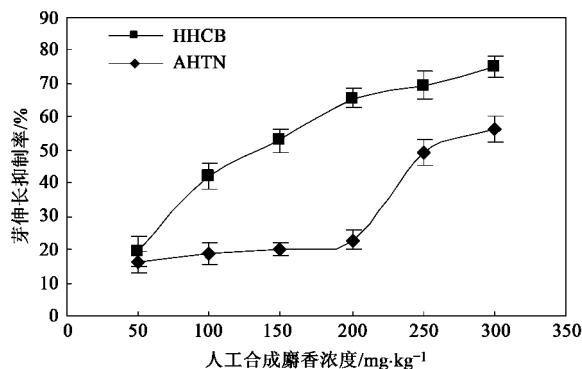


图4 人工合成麝香对小麦芽伸长抑制率的影响

Fig. 4 Influence of galaxolide and tonalide on inhibition rate of shoot elongation

人工合成麝香与小麦芽伸长抑制率之间的拟合方程如表 2 所示,其中佳乐麝香浓度与芽伸长抑制率的关系以线性模型和对数模型很好的拟合均达到了极显著水平 ($p < 0.01$);而对数模型不适宜对吐纳麝香浓度与芽伸长抑制率的拟合 ($p > 0.05$),线性模型则可以拟合吐纳麝香浓度与芽伸长抑制率的关系 ($p < 0.05$)。本研究表明,佳乐麝香和吐纳麝香对小麦芽长的抑制率均明显高于其对根伸长的抑制率,这与范飞等^[21]对麝香酮和佳乐麝香的研究结果一致,其研究结果亦表明人工合成麝香处理下小麦芽长的抑制率高于对根长的抑制率。

表 2 人工合成麝香浓度与芽伸长抑制率的拟合方程^[1]

Table 2 Fitted equations of the synthetical musks concentration and inhibition rate of shoot elongation

方程类型	人工合成麝香	拟合方程	R^2	n
线性模型	佳乐麝香	$SI = 0.21x + 16.81$	0.92**	6
	吐纳麝香	$SI = 0.17x + 1.18$	0.81*	6
对数模型	佳乐麝香	$SI = 31.30\ln x - 102.60$	0.99**	6
	吐纳麝香	$SI = 20.72\ln x - 73.28$	0.62	6

1) x 为人工合成麝香的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); SI 为小麦芽伸长抑制率 (%)

本研究中小麦种子发芽、芽伸长及根伸长对人工合成麝香的敏感顺序依次为:芽伸长 > 根伸长 > 发芽率。鲍艳宇等^[23]采用土培和水培实验,确定土霉素和四环素对小麦的生态毒性敏感顺序:根伸长 > 发芽率 > 芽伸长。安婧等^[24]的水培研究发现土霉素对小麦种子发芽的毒性大小依次为:根长 > 芽长 > 发芽率。虽然供试植物均为小麦,但是对不同的污染物,小麦的发芽率、根伸长和芽伸长的对污染物的敏感顺序却不尽相同。

此外,利用线性模型(表 2)计算得出的佳乐麝香和吐纳麝香对小麦芽长的 EC_{50} 分别为 $153.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $290.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;利用线性模型(表 1)计算得出的佳乐麝香和吐纳麝香对小麦根伸长的 EC_{50} 分别为 $215.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $323.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。虽然这 2 种麝香的分子式相同,结构相似,但小麦对佳乐麝香和吐纳麝香毒害的敏感程度相差较大,小麦对佳乐麝香的毒害更为敏感。万寅婧等^[25]研究了芘、菲、萘、苯对小麦的生态毒性影响,发现苯环数目越少,溶解度越大,对小麦发芽与根伸长的抑制程度越大, $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 是芘污染土壤的小麦根伸长半数抑制浓度;本研究中,HHCB 和 AHTN 对小麦根长 EC_{50} 分别为 $215.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $323.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而范飞等^[22]的研究发现麝香酮对小麦根长的 EC_{50} 为

$47.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由于麝香酮是单环麝香,HHCB 和 AHTN 均为 2 环麝香,芘为 3 环有机物,其苯环数逐渐递增,所以从 EC_{50} 值可知麝香酮对小麦的毒性要显著高于 HHCB、AHTN 和芘,这表明麝香酮对小麦的毒害作用高于佳乐麝香,其次是吐纳麝香,而芘对小麦的毒害作用要小于这 3 种人工合成麝香。

3 结论

(1) 人工合成麝香在低剂量条件下(佳乐麝香 $\leq 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 吐纳麝香 $\leq 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),对小麦发芽具有一定的促进作用。

(2) 小麦的根伸长抑制率(或芽伸长抑制率)与 2 种人工合成麝香的浓度之间均存在良好的剂量-效应关系。

(3) 佳乐麝香和吐纳麝香对小麦芽长的 EC_{50} 分别为 $155.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $290.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,对小麦根伸长的 EC_{50} 分别为 $215.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $323.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] 周后星,王美娥,范飞,等. 人工合成麝香的环境污染、生态行为与毒理效应研究进展 [J]. 环境科学学报, 2008, 28(1): 1-11.
- [2] Ricking M, Schwarzbauer J, Hellou J, et al. Polycyclic aromatic musk compounds in sewage treatment plant effluents of Canada and Sweden - first results [J]. Marine Pollution Bulletin, 2003, 46(4): 410-417.
- [3] Artola-Garicano E, Borkent I, Hermens J L M, et al. Removal of two polycyclic musks in sewage treatment plants: freely dissolved and total concentrations [J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(14): 3111-3116.
- [4] Horii Y, Reiner J L, Loganathan B G, et al. Occurrence and fate of polycyclic musks in wastewater treatment plants in Kentucky and Georgia, USA [J]. Chemosphere, 2007, 68(11): 2011-2020.
- [5] Shek W M, Murphy M B, Lam J C W, et al. Synthetic polycyclic musks in Hong Kong sewage sludge [J]. Chemosphere, 2008, 71(7): 1241-1250.
- [6] Peck A M, Hornbuckle K C. Synthetic musk fragrances in Lake Michigan [J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(2): 367-372.
- [7] Moldovan Z. Occurrences of pharmaceutical and personal care products as micropollutants in rivers from Romania [J]. Chemosphere, 2006, 64(11): 1808-1817.
- [8] Dsikowitzky L, Schwarzbauer J, Littke R. Distribution of polycyclic musks in water and particulate matter of the Lippe River (Germany) [J]. Organic Geochemistry, 2002, 33(12): 1747-1758.
- [9] Buerge I J, Buser H R, Müller M D, et al. Behavior of the

- polycyclic musks HHCB and AHTN in lakes, two potential anthropogenic markers for domestic wastewater in surface waters [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37** (24): 5636–5644.
- [10] Kallenborn R, Gatermann R, Planting S, *et al.* Gas chromatographic determination of synthetic musk compounds in Norwegian air samples [J]. *Journal of Chromatography A*, 1999, **846** (1–2): 295–306.
- [11] Chen D H, Zeng X Y, Sheng Y Q, *et al.* The concentrations and distribution of polycyclic musks in a typical cosmetic plant [J]. *Chemosphere*, 2007, **66** (2): 252–258.
- [12] Xie Z Y, Ebinghaus R, Temme C, *et al.* Air-sea exchange fluxes of synthetic polycyclic musks in the North Sea and the Arctic [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41** (16): 5654–5659.
- [13] Peek A M, Linebaugh E K, Hornbuckle K C. Synthetic musk fragrances in Lake Erie and Lake Ontario sediment cores [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40** (18): 5629–5635.
- [14] Wan Y, Wei Q W, Hu J Y, *et al.* Levels, tissue distribution, and age – related accumulation of synthetic musk fragrances in Chinese Sturgeon (*Acipenser sinensis*): comparison to organochlorines [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41** (2): 424–430.
- [15] Schmid P, Kohler M, Gujer E, *et al.* Persistent organic pollutants, brominated flame retardants and synthetic musks in fish from remote alpine lakes in Switzerland [J]. *Chemosphere*, 2007, **67** (9): S16–S21.
- [16] Hutter H P, Wallner P, Moshhammer H, *et al.* Blood concentrations of polycyclic musks in healthy young adults [J]. *Chemosphere*, 2005, **59** (4): 487–492.
- [17] Ulla R, Ursula P, Michael A, *et al.* Concentrations of polybrominated diphenyl ethers, organochlorine compounds and nitro musks in mother's milk from Germany (Bavaria) [J]. *Chemosphere*, 2008, **72** (1): 87–94.
- [18] 曾祥英, 桂红艳, 陈多宏, 等. 环境中合成麝香污染现状 [J]. *环境监测与管理*, 2007, **19** (2): 10–14.
- [19] 郭亚文, 张晓岚, 钱光人, 等. 城市污泥中合成麝香的分布特征 [J]. *环境科学*, 2009, **30** (5): 1493–1498.
- [20] 陈多宏, 胡学玲, 盛彦清, 等. 典型污水处理厂中多环麝香的污染特征 [J]. *生态环境学报*, 2009, **18** (1): 101–105.
- [21] 范飞. 土壤环境中人工合成麝香的生态行为及效应研究 [D]. 沈阳: 中国科学院沈阳应用生态研究所, 2008.
- [22] 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.
- [23] 鲍艳宇, 周启星, 谢秀杰. 四环素类抗生素对小麦种子芽与根伸长的影响 [J]. *中国环境科学*, 2008, **28** (6): 566–570.
- [24] 安婧, 周启星, 刘维涛. 土霉素对小麦种子发芽与幼苗生长发育的生态毒性 [J]. *环境科学*, 2009, **30** (10): 3022–3027.
- [25] 万寅婧, 占新华, 周立祥. 土壤中莰、菲、蔡、苯对小麦的生态毒性影响 [J]. *中国环境科学*, 2005, **25** (5): 563–566.