

东北地区 23 种杂草对多环芳烃超积累特性研究

张敏¹, 梁红^{1*}, 高大文^{1,2}, 张百慧¹, 李欣平¹, 郭晓虎¹

(1. 东北林业大学林学院环境科学系, 哈尔滨 150040; 2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

摘要:采用盆栽试验的方法研究了东北地区 23 种杂草对土壤中多环芳烃(菲)的积累特性. 结果表明, 在这 23 种杂草中, 东北蒲公英、委陵菜和白屈菜地上部富集系数均大于 1, 分别为 1.01、4.98、38.24, 且地上部菲含量分别为 15.18、74.70 和 573.62 mg/kg, 均高于根部的菲含量(分别为 2.83、16.34 和 9.66 mg/kg), 白屈菜尤为突出, 其位移系数高达 59.75. 3 种植物均具有很强的从根部向地上部运输菲的能力, 符合超富集植物的基本特征. 杂草植物地上部菲含量与地上部生物量的分析表明, 这些植物对菲的积累量与植物地上部生物量的大小无关. 这些结果说明, 东北蒲公英、委陵菜和白屈菜这 3 种杂草对菲表现出超积累的特性, 筛选出菲富集能力强且地上部生物量大的植物是可行的.

关键词: 植物修复; 杂草; 多环芳烃; 菲; 超富集特征

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)10-3088-06

Characteristics of 23 Species of Weed in Northeast of China Hyperaccumulating PAHs in Contaminated Soils

ZHANG Min¹, LIANG Hong¹, GAO Da-wen^{1,2}, ZHANG Bai-hui¹, LI Xin-ping¹, GUO Xiao-hu¹

(1. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Pot experiments were conducted to investigate the 23 species of weed accumulation characteristics of phenanthrene, as a representative of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), from soil in the northeast of China. The result indicated that among the 23 species, the bioconcentration factors of *Taraxacum ohwianum* K., *Potentilla aiscolor* B. and *Chelidonium majus* L. were all higher than 1, which were 1.01, 4.98, 38.24 respectively. The phenanthrene concentrations in roots were 2.83, 16.34 and 9.66 mg/kg which were lower than those in aboveground part with phenanthrene concentrations were 15.18, 74.70 and 573.62 mg/kg, respectively. The hyperaccumulators were indicated by strong conveyance of phenanthrene from root to aboveground part. The analysis of phenanthrene concentration in aboveground weed and aboveground plant biomass showed that the accumulation of phenanthrene in plant were not correlated with their biomass. It concluded that *Taraxacum ohwianum* K., *Potentilla aiscolor* B. and *Chelidonium majus* L. had hyperaccumulative characteristics of phenanthrene, and it is possible to screen out plants with high biomass and hyperaccumulation capability.

Key words: phytoremediation; weeds species; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); phenanthrene; hyperaccumulative property

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是指 2 个以上的苯环连在一起的化合物, 它广泛存在于环境中^[1-3]. 因其具有毒性、生物蓄积性和半挥发性并能在环境中持久存在, 而被列入典型持久性有机污染物 (POPs), 受到国际科学界的广泛关注^[1-4]. PAHs 由于性质稳定、难被生物降解, 在土壤环境中呈不断积累的趋势, 严重危害着土壤的生产和生态功能、农产品质量和人类健康. 修复土壤 PAHs 污染已成为国内外土壤和环境科学界共同关注的一个热点问题^[1-6].

目前, 研究治理多环芳烃的主要方法为物理、化学及微生物法, 植物修复技术还没有被广泛应用, 特别是对有机污染物的植物修复研究相对滞后^[7,8]. 植物修复是利用植物原位处理污染土壤的

方法^[1,9]. 植物可通过提取、降解、稳定、挥发等作用, 去除土壤或水体中的污染物, 达到净化环境的目的, 它具有高效、低成本、不破坏环境、不引起二次污染等优点^[10-12]. 用于植物修复技术的植物理想特征是: 有强大的须根系, 能够适应多种污染物, 并生长旺盛, 有较大的生物量, 且生长期短, 根系要深, 能够穿透较深的土层^[13,14]. 草类植物生长迅速、须根发达, 能吸收较多的污染物, 且费用低廉, 因而是植物修复技术中常被用到的植物种类^[15,16]. 杂草是最常见的草类, 具有生物量大、种类多、易于在逆境

收稿日期: 2010-10-03; 修订日期: 2011-05-03

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目 (E200834); 城市水资源与水环境国家重点实验室自主课题项目 (2010DX04)

作者简介: 张敏 (1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为植物抗性分子生物学.

* 通讯联系人, E-mail: liangh119@hotmail.com

中生长等特点,特别当水肥条件得到改善后能迅速生长^[17, 18]. 所以,杂草比其他草类有更大的生长优势^[16]. 目前,利用东北地区常见杂草进行土壤污染修复的研究已有报道,主要以重金属等为研究对象,而对于有机污染物 PAHs 的研究报道还较少.

笔者选用东北地区 23 种常见杂草对 PAHs 进行累积特性研究,旨在探讨东北地区植物修复难降解有机物污染土壤的可行性. 本试验以菲为 PAHs 代表物,采用盆栽种植的形式,研究植物对菲的累积特性,并初步探讨了地上部分与根部分的菲含量与其相应生物量的关系,以期为东北地区 PAHs——菲的超富集植物的筛选和污染土壤的修复提供相应资料和部分物质基础.

1 材料与方

1.1 试剂和仪器

菲购自北京化学试剂公司,分子式 $C_{14}H_{10}$, $M_r = 178.23$,含量 $\geq 97.0\%$,丙酮、正己烷均为分析纯,甲醇为分析纯.

所用主要仪器:KQ-100DB 型数控超声波清洗器、R-205 旋转蒸发器、W202B 恒温水浴锅、80-2B 离心机、Agilent21100 高效液相色谱仪(HPLC).

1.2 试验设计

供试潮土采自哈尔滨城市林业示范基地,为兴安落叶松林下表层土,有机质含量为 2.8%,pH 为 7.6. 土样采集后,风干,过 5 mm 筛. 本试验采用盆栽试验的方法,对每种杂草以土壤中投加菲处理的花盆与未处理组作为对照. 查阅相关报道^[19-21],确定土壤中投加菲含量为 $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

试验中每花盆加土 8 kg,每盆投加菲量 120 mg. 土壤中投加菲的具体做法如下:称取菲 120 mg,置于 250 mL 锥形瓶中,100 mL 丙酮溶解,后与 500 g 土搅拌混合均匀,通风柜内风干,待丙酮挥发后,加 500 g 未污染土搅拌混匀后,分别加 1、2、4 kg 未污染土,混合均匀,50% 田间持水量下平衡 4 d 后待用. 杂草经催芽处理后播于花盆中,7~10 d 后间苗至适宜植株密度,定期浇水,观察并记录各盆中杂草生长状况. 同时做投加药品无植物对照. 放置于温室中,以保持适宜的温度和湿度. 在成熟期采杂草样,采样后,用蒸馏水充分淋洗,再用滤纸蘸干表面水分,于冰箱中保存,待分析.

1.3 供试植物

杂草共有 9 科 23 种(表 1),除马唐、稗草由南京农业大学杂草研究室提供种子外,其余的种子都采自哈尔滨城市林业示范基地,均为东北地区常见杂草.

表 1 供试杂草种类及生长时间¹⁾
Table 1 Weed species and growth period

植物科	植物种	种植日期	生长时间/d
禾本科	稗草(<i>Echinochloa crusgalli</i> (L.) Beauv.)	2007-11-23	110
	马唐(<i>Digitaria sanguinalis</i> (L.) Scop.)	2007-11-28	105
	狗尾草(<i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv.)	2008-05-30	83
	止血马唐(<i>Digitaria ischaemum</i> (Schreb.) Schreb. Ex Muhl)	2008-05-30	83
藜科	藜(<i>Chenopodium album</i>)	2007-12-03	120
	轴藜(<i>Axyris amaranthoides</i> L.)	2008-04-29	94
	中亚滨藜(<i>Atriplex centralasiatica</i> Hjin.)	2008-05-30	83
茄科	龙葵(<i>Solanum nigrum</i> L.)	2007-12-20	83
苋科	反枝苋(<i>Amaranthus retroflexus</i> L.)	2007-12-20	83
车前科	车前(<i>Plantago asiatica</i> L.)	2008-04-29	94
唇形科	野薄荷(<i>Mentha haplocalyx</i> Briq.)	2008-06-02	81
大戟科	铁苋菜(<i>Acalypha australis</i> L.)	2008-04-10	113
菊科	猪毛蒿(<i>Artemisia scoparia</i> Waldst. et Kit.)	2008-04-20	103
	黄毛蒿(<i>Artemisia velutina</i> Pamp.)	2007-12-20	113
	牛膝菊(<i>Galinsoga parviflora</i> Cav.)	2008-04-29	113
	大籽蒿(<i>Artemisia sieversiana</i> Willd.)	2007-11-11	169
十字花科	独行菜(<i>Lepidium apetalum</i> Willd.)	2007-11-11	170
伞形科	迷果芹(<i>Sphallerocarpus gracilis</i> (Bess.) K.-Pol.)	2007-11-11	169
	东北蒲公英(<i>Taraxacum ohwianum</i> Kitam.)	2008-05-30	83
茜草科	柔毛水杨梅(<i>Geum japonicum</i> Thunb. var. <i>chinense</i> F. Bolle)	2007-12-03	148
罂粟科	白屈菜(<i>Chelidonium majus</i> L.)	2008-05-30	83
堇菜科	堇菜(<i>Viola verecunda</i> A. Gray)	2007-12-03	148
蔷薇科	委陵菜(<i>Potentilla aiscolor</i> Bunge)	2008-05-30	83

1) 每种杂草对照组与处理组的种植和采集日期相同,在此不分别列出

1.4 样品分析

1.4.1 植物样品分析^[21-29]

采集的植物样品分为根部和地上部(茎、叶和花序)两部分,粉碎混匀,称总重后取适量于 250 mL 锥形瓶中,用 20 mL 1:1 的丙酮和正己烷超声萃取 30 min,连续萃取 2 次,将萃取液收集,转入分液漏斗静置,分去水相,将有机相转移至圆底烧瓶中,45℃ 恒温旋转蒸发至干,用甲醇定容到 10 mL,过 0.45 μm 孔径有机相滤膜后,高效液相色谱(HPLC)分析,各样品重复 2 次。

1.4.2 HPLC 分析条件

根据参考文献[21~26]和在实际仪器条件下调整,确定 HPLC 分析条件如下:色谱柱为 Φ416 mm × 150 mm 烷基 C18 柱;流动相为甲醇/水(体积

比 80:20),流速 1 mL/min;柱温为 30℃;进样量 30 μL;检测波长为 245 nm。

2 结果与分析

2.1 杂草植物生长情况

从植物的生长状态来看,大部分杂草处理花盆植物的长相长势与对照花盆植物的生长情况相比并无明显差别,即土壤虽受到多环芳烃污染但并没有抑制植物的正常生长。藜作为植株较高的植物,处理花盆中出现植株倒伏、黄叶、落叶现象;莴菜处理花盆中植株叶片明显小于对照花盆中的。相反的,稗草、车前则很明显地表现出经处理植株长势优于对照的现象。这 23 种杂草共分 2 批种植。2 批杂草的生长情况见表 2。

表 2 2 批杂草的生长情况

Table 2 Growing situation of two groups of weeds

杂草	种植时期	生长情况	分析
第 1 批	2007 年 11 月~2008 年 1 月 (冬季,属于反季种植)	杂草种子不易发芽,出苗时间长,生长速度慢,易出现病症,植株较矮小,生长周期长达 5 个月	花盆放置于温室中,温度与湿度条件都可满足其生长需求,但仍与其在自然环境中的生长环境相差很大,特别是通风状况难以改善
第 2 批	2008 年 4~6 月	杂草出苗、生长都很快,长相长势良好,生长周期一般在 3 个月左右	在东北地区正是植物生长季节,杂草生长条件适宜

东北地区纬度高,冬季寒冷且时间长,夏季低温,在气候上具有冷湿的特征,以冷湿的森林和草甸草原景观为主,具有独特的植物种群。而目前,超富集植物主要是通过野外采样分析法进行筛选,植物修复也主要适用于现场修复形式,即在被污染土壤区域种植植物以实现土壤的修复。所以在东北地区,无论是对超富集植物筛选还是植物修复的实际应用,都会受到季节时间的很大限制。气象条件的不同会对土壤有机污染物的植物修复造成很大的影响,如风和湿度会影响污染物的挥发和植物的蒸腾作用,温度影响土壤和植物对污染物的吸附和分配能力^[30]。如果冬季进行温室内试验,则需要耗费更多的人力、物力,而且其效果可能会与自然环境中试验的结果存在很大差别。在本试验中,第一批冬季种植的杂草在植物生长情况、体内菲富集量等方面都明显弱于第二批杂草。

东北地区区域广阔,植物资源丰富,气候特征明显,在进行适用于大面积污染修复治理的植物筛选时,要注意综合考虑当地气象条件下风、温度、湿度的影响,盆栽试验条件应尽量与自然环境中一致。而通过改善栽培技术或种植条件增加植物地上部分生物量,提高对污染物的富集效率是值得关

注的。

2.2 杂草植物对菲的积累特性

Brooks 等^[31]于 1977 年提出了超富集植物概念,当时用以定义地上部 Ni 积累超过 1 000 mg·kg⁻¹ 的植物。现几乎公认的超富集植物应同时具备的特征主要有 3 项:一是植物地上部(茎和叶)重金属含量是普通植物在同一生长条件下的 100 倍,其临界含量分别为 Zn 10 000 mg·kg⁻¹、Cd 100 mg·kg⁻¹、Au 1 mg·kg⁻¹、Pb、Cu、Ni、Co 均为 1 000 mg·kg⁻¹;二是植物地上部重金属含量大于根部该种重金属含量;三是植物的生长未受明显伤害且富集系数较大^[32-34]。而较理想的超富集植物还应具有生长期短、抗病虫能力强、地上部生物量大、能同时富集 2 种或 2 种以上重金属的特点。在此,为便于分析,将其引申于对有机污染物的积累,即植物地上部污染物含量大于根部该种污染物含量,植物地上部富集系数(BCF) > 1,植物的生长未受明显伤害且富集系数较大。

表 3 列出了投加菲处理的花盆中杂草体内菲的含量。从表 3 可以看出,这些植物大多数均表现为根部菲含量大于地上部菲含量,不具备超积累植物的一般特征。

表 3 杂草体内菲含量

Table 3 Concentrations of phenanthrene in weeds

植物种 ¹⁾ (第一批)	部位	含量 /mg·kg ⁻¹	BCF ²⁾	植物种 ¹⁾ (第二批)	部位	含量 /mg·kg ⁻¹	BCF ²⁾
迷果芹	地上	5.83 ± 0.75	0.39	牛膝菊	地上	68.98	4.60
	根	5.46 ⁴⁾	0.36		根	2 529.79	168.65
独行菜	地上	11.31 ± 5.31	0.75	狗尾草	地上	3.45 ± 0.18	0.23
	根	4.98 ± 2.65	0.33		根	4.51 ± 0.65	0.30
黄花蒿	地上	24.71 ± 3.54	1.65	车前	地上	15.72 ± 1.06	1.05
	根	81.27 ± 7.54	5.42		根	30.44 ± 6.02	2.03
稗草	地上	nd ³⁾		东北蒲公英	地上	15.18 ± 0.11	1.01
	根	41.44	2.76		根	2.83 ± 0.43	0.19
马唐	地上	1.81 ± 0.23	0.12	止血马唐	地上	11.65 ± 2.64	0.78
	根	24.26 ± 3.21	1.62		根	59.84 ± 5.04	3.99
菘菜	地上	1.87 ± 0.40	0.12	委陵菜	地上	74.70 ± 10.74	4.98
	根	4.96 ± 0.66	0.33		根	16.34 ± 0.22	1.09
藜	地上	2.64 ± 0.74	0.18	轴藜	地上	3.71	0.25
	根	7.69 ± 1.57	0.51		根	25.17	1.68
柔毛水杨梅	地上	nd		猪毛蒿	地上	365.09	24.34
	根	nd			根	657.95	43.86
龙葵	地上	21.68 ± 1.30	1.45	野薄荷	地上	37.74	2.52
	根	39.93 ± 9.71	2.66		根	75.74	5.05
反枝苋	地上	6.81	0.45	白屈菜	地上	573.62 ± 77.68	38.24
	根	nd			根	9.66 ± 2.76	0.64
大籽蒿	地上	11.98	0.80	中亚滨藜	地上	11.38	0.76
	根	27.62	1.84		根	13.80	0.91
				铁苋菜	地上	46.98	3.13
					根	237.44	15.83

1) 第一批种植时期为 2007 年 11 月~2008 年 1 月;第二批种植时期为 2008 年 4~6 月; 2) BCF 为生物富集系数,即 bioconcentration factor;因种植杂草量较少,土壤中菲的降解不明显,土壤中菲含量以 15 mg·kg⁻¹计; 3) nd 表示未检出,下同; 4) 设置 2 个平行样,其中一个样品未测出含量,下同

23 种杂草中,黄花蒿、龙葵、牛膝菊、车前、东北蒲公英、委陵菜、猪毛蒿、野薄荷、白屈菜、铁苋菜等 10 种杂草地上部分对菲的富集系数 > 1,分别为 1.65、1.45、4.60、1.05、1.01、4.98、24.34、2.52、38.24、3.13,其中东北蒲公英、委陵菜和白屈菜 3 种植物地上部分的菲含量分别为 15.18、74.70 和 573.62 mg·kg⁻¹,高于根部的菲含量(分别为 2.83、16.34 和 9.66 mg·kg⁻¹),白屈菜尤为突出,其位移系数(地上部污染物含量/根部污染物含量)高达 59.75,具有很强的从根部向地上部运输菲的能力,符合超富集植物的基本特征.而黄毛蒿、龙葵、牛膝菊、车前、猪毛蒿、野薄荷、铁苋菜 7 种植物虽然地上部分富集系数较高,表现出对菲较强的富集能力,但根部分菲含量高于地上部分,不属于超富集植物.但这 7 种植物地上部和根部菲含量都很高,如猪毛蒿地上部和根部菲含量分别为 365.09 和 657.95 mg·kg⁻¹,对菲具有很强的积累能力.

稗草、马唐、大籽蒿、轴藜、止血马唐 5 种杂草对菲的积累能力也很强,表现在根部菲的富集系

数 > 1,分别为 2.76、1.62、1.84、1.68、3.99,但这 5 种植物地上部分菲富集系数较小,菲主要积累在根部,从根部向地上部运输菲的能力较差,对菲的提取修复能力可能受到限制.迷果芹与独行菜的地上部菲含量均高于根部菲含量,但其富集系数均小于 1,即植物体内菲含量均未超过土壤中菲的浓度,对菲的富集能力很弱,未满足超富集植物的基本特征.

2.3 植物体内菲含量与生物量的关系

图 1、2 分别为 2 批供试植物地上部菲含量与植物生物量、根部菲含量与生物量的对应关系图.为了保证植物在相同生长条件下进行比较分析,增加结果的可靠性,将 2 批种植的杂草分开进行数据处理,利用相关系数(r)检验法分析生物量与菲含量的相关性,第 1 批与第 2 批杂草地上部的相关系数分别为 0.068、0.297,第 1 批与第 2 批杂草根部的相关系数分别为 0.333、0.268,绝对值均小于临界值(临界值:第 1 批 0.666、第 2 批 0.576),分析表明,生物量与菲含量之间不存在显著相关性.这表明,植物地上部和根部生物量都与菲富集含量无关.

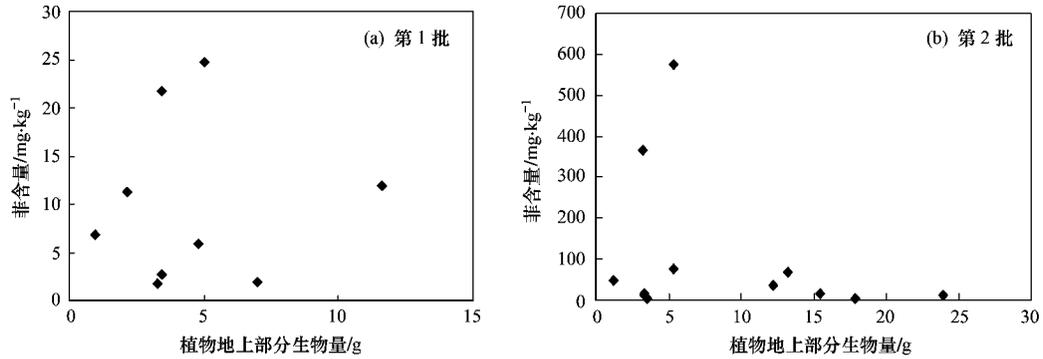


图 1 植物地上部生物量与菲含量

Fig. 1 Biomass and phenanthrene concentration in aboveground parts of weeds

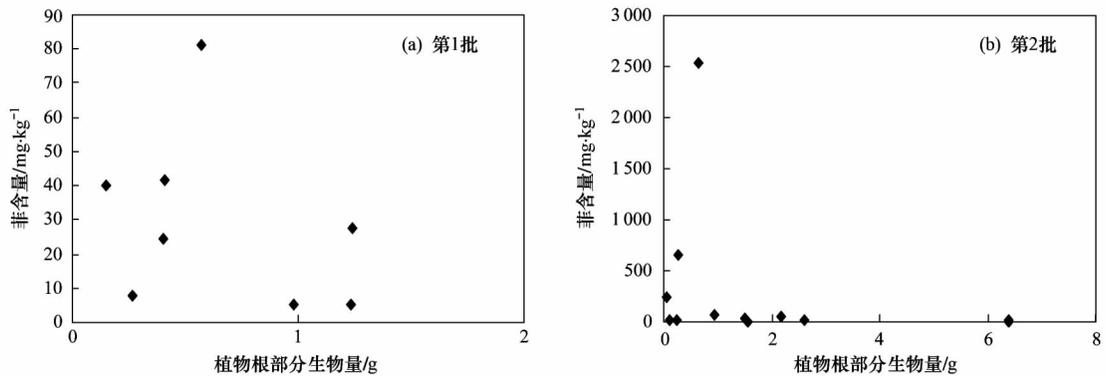


图 2 植物根部生物量与菲含量

Fig. 2 Biomass and phenanthrene concentration in root of weeds

在进行超富集植物筛选时,植物修复的效率取决于植物地上部分含量及其生物量,如果地上部生物量高的植物也能表现出超富集特性,进行植物修复时更有利于提高提取修复效率^[9]。

3 结论

(1) 在 23 种杂草中,东北蒲公英、委陵菜和白屈菜 3 种植物地上部富集系数分别为 1.01、4.98、38.24,均大于 1,且地上部菲含量分别为 15.18、74.70 和 573.62 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,高于根部的菲含量(分别为 2.83、16.34 和 9.66 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),具有很强的从根部向地上部运输菲的能力,表现出超富集植物的特征,具有进行深入研究的价值。

(2) 生物量于菲含量相关性研究结果显示,杂草地上部富集的菲含量与其生物量的大小无关,生物量与菲含量之间不存在显著相关性,筛选出地上部生物量大且具有强富集菲能力的植物是有价值并且可行的。

参考文献:

- [1] 丁克强,骆永明.多环芳烃污染土壤的生物修复[J].土壤,2001,33(4):169-178.
- [2] Dugay A, Herrenkench C, Czok M, *et al.* New procedure for selective extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons in plants for gas chromatographic-mass spectrometric analysis [J]. Journal of Chromatography A, 2002,958(1-2):1-7.
- [3] Juhasz A L, Naidu R. Bioremediation of high molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbons: a review of the microbial degradation of benzo [a] pyrene [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2000,45(1-2):57-88.
- [4] Chaney R L, Angle J S, McIntosh M S, *et al.* Using hyperaccumulator plants to phytoextract soil Ni and Cd [J]. Bioscience,2005,60(3-4):190-198.
- [5] 赵文昌,程金平,谢海赞,等.环境中多环芳烃(PAHs)的来源与监测分析方法[J].环境科学与技术,2006,29(3):105-107.
- [6] 许超,夏北成.土壤多环芳烃污染根际修复研究进展[J].生态环境,2007,16(1):216-222.
- [7] 夏会龙,吴良欢,陶勤南.有机污染环境的植物修复研究进展[J].应用生态学报,2003,14(3):457-460.
- [8] Haritash A K, Kaushik C P. Biodegradation aspects of polycyclic

- aromatic hydrocarbons (PAHs): A review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **169**(1-3): 1-15.
- [9] Tang C S, Sun W H, Toma M, et al. Evaluation of agriculture-based phytoremediation in Pacific island ecosystems using trisector planters[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2004, **6**(1): 17-33.
- [10] 周启星,宋玉芳.植物修复的技术内涵及展望[J]. *安全与环境学报*,2001,**1**(3):48-53.
- [11] Brooks R R, Chambers M F, Nickls L J, et al. Phytomining[J]. *Trends in Plant Science*, 1998,**3**(9): 359-362.
- [12] Channy R L, Malik M, Li Y M. Phytoremediation of soil metals [J]. *Current Opinions in Biotechnology*, 1997,**8**(3): 279-284.
- [13] Günther T, Dornberger U, Fritsche W. Effects of ryegrass on biodegradation of hydrocarbons in soil [J]. *Chemosphere*, 1996, **33**(2):203-215.
- [14] Alkorta I, Hernández-Allica J, Becerril J M, et al. Recent findings on the phytoremediation of soils contaminated with environmentally toxic heavy metals and metalloids such as zinc, cadmium, lead, and arsenic[J]. *Reviews Environmental Science and Biotechnology*, 2004,**3**(1):71-90.
- [15] 肖苏,张新全.草类植物在污染环境修复中的研究应用概述 [J]. *安徽农业科学*, 2007,**35**(36):11961-11964.
- [16] Wei S H, Zhou Q X, Saha U K. Hyperaccumulative characteristics of weed species to heavy metals[J]. *Water Air Soil Pollut*, 2008, **192**(1-4): 173-181.
- [17] 魏树和,周启星,王新. 18 种杂草对重金属的超积累特性研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2003,**11**(2):152-160.
- [18] 魏树和,周启星,王新,等. 杂草中具重金属超积累特征植物的筛选[J]. *自然科学进展*, 2003,**13**(12):1259-1265.
- [19] 左谦,刘文新,陶澍,等. 环渤海西部地区表层土壤中的多环芳烃[J]. *环境科学学报*, 2007,**27**(4):667-671.
- [20] 袁东星,杨东宁,陈猛,等. 厦门西港及闽江口表层沉积物中多环芳烃和有机氯污染物的含量及分布[J]. *环境科学学报*, 2001,**21**(1):107-112.
- [21] 凌婉婷,高彦征,李秋玲,等. 植物对水中菲和芘的吸收[J]. *生态学报*, 2006, **26**(10):3332-3338.
- [22] Gao Y Z, Zhu L Z. Phytoremediation for phenanthrene and pyrene contaminated soils[J]. *Journal of Environmental Science*, 2005, **17**(1):14-18.
- [23] 高彦征,凌婉婷,朱利中,等. 黑麦草对多环芳烃污染土壤的修复作用及机制[J]. *农业环境科学学报*, 2005, **24**(3):498-502.
- [24] 占新华,周立祥,万寅婧,等. 水溶性有机物对植物吸收菲的影响及其机制研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(9):1884-1888.
- [25] Simonich S L, Hites R A. Vegetation-atmosphere partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Environment Science and Technology*, 1994, **28**(5):939-943.
- [26] 杨艳,凌婉婷,高彦征,等. 几种多环芳烃的植物吸收作用及其对根系分泌物的影响[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(3): 593-599.
- [27] 杨道杰,魏树和,周启星,等. 外源氨基酸对龙葵修复 Cd-PAHs 污染土壤的强化作用[J]. *生态学杂志*, 2009, **28**(9): 1829-1834.
- [28] Yi H, Crowley D E. Biostimulation of PAH degradation with plants containing high concentrations of linoleic Acid [J]. *Environment Science and Technology*, 2007, **41**(12): 4382-4388.
- [29] Navarro R R, Ichikawa H, Morimoto K, et al. Enhancing the release and plant uptake of PAHs with a water-soluble purine alkaloid[J]. *Chemosphere*, 2009, **76**(8):1109-1113.
- [30] 林道辉,朱利中,高彦征. 土壤有机污染植物修复的机理与影响因素[J]. *应用生态学报*, 2003, **14**(10):1799-1803.
- [31] Brooks R R, Lee J, Reeves R D, et al. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1977, **7**: 49-57.
- [32] Baker A J M, Brooks R R, Pease A J, et al. Studies on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa within the genus *Silene* L. (Caryophyllaceae) From Zaire [J]. *Plant and Soil*, 1983, **73**(3):377-385.
- [33] Baker A J M, Brooks R R. Terrestrial higher plants which accumulate metallic elements-a review of their distribution, ecology and phytochemistry[J]. *Biorecovery*, 1989, **1**(2): 81-126.
- [34] McGrath S P, Zhao F J. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2003, **14**(3): 277-282.