



全国中文核心期刊
中国科技核心期刊

环境工程学报

Chinese Journal of Environmental Engineering



第9卷 第12期

Vol.9 No.12

中国科学院
生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版

12
2015

目次

综 合 评 述

含磷材料在铅污染土壤修复中的应用	宋 波	曾炜铨	陆素芬	余元元(5649)
新型过硫酸盐活化技术降解有机污染物的研究进展	高焕方	龙 飞	曹园城	黄国文 谭怀琴 张永红(5659)

水 污 染 防 治

一株贫营养异养硝化-好氧反硝化细菌的分离鉴定及脱氮特性	黄廷林	白士远	张海涵	周石磊	何秀秀(5665)
城市污水处理过程中 DOM 的三维荧光光谱及紫外谱图特性				杨 毅	杨霞霞(5672)
磁性壳聚糖/膨润土复合吸附剂吸附 Cu^{2+}	施 周	刘立山	杨秀贞	邓 林	(5677)
氧化铁改性砂联合生物预处理对氨氮的吸附特性					
.....	李冬梅	林洁漫	李子亚	林显增	刘 贝 黄明珠 梅 胜(5683)
小型景观水体中病原微生物的分布特性				周进宏	王晓昌 徐丽梅(5689)
PDMDAAC 改性膨润土对石油类污染物脱附行为的研究	邵 红	李云姣	丁 佳	高 鹤	李可心 陈 利(5697)
滇池流域某分流制小区雨水径流水质及初期冲刷规律研究	付国楷	陈水平	陆 颂	潘成勇	徐官安(5703)
聚乙烯醇(PVA)改性膨胀石墨对亚甲基蓝废水的吸附	赵 越	马乐宽	赵康平	吴 波	杨文杰(5709)
背角无齿蚌净化养殖水体中的重金属	陈修报	刘洪波	苏彦平	戈贤平	杨 健(5714)
纳米四氧化三铁作为助凝剂去除水中藻类	付 雯	蒋 丹	张 波	何义亮	王 拯(5721)
磷酸铵镁 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 碱促热解动力学	余荣台	任洪强	谢志鹏	汪长安	马 湘(5727)
上海市初期雨水调蓄设施评估体系的构建			吴小康	叶春明	吴 佳(5732)
地下水中锰对滤料表面氧化膜去除氨氮的影响	汪 洋	黄廷林	文 刚		张瑞峰(5737)
水中盐酸环丙沙星的超声降解	葛 鑫	郭照冰	祝胜男	魏 英	彭璐璐 陈 姝(5745)
厌氧-好氧工艺处理垃圾焚烧厂渗滤液工程运行效果			陈 燕	任洪艳	阮文权(5750)
南方某市饮用水源三氯乙醛生成特性	蔡广强	刘丽君	卢小艳	张金松	曲 莹 张德明(5757)
直接接触式膜蒸馏浓缩处理高浓度发酵废液效能		康 昀	曲 丹	封 莉	程 翔 张立秋(5763)
美人蕉有机酸组分对铜绿微囊藻的化感作用	刘晓宇	傅海燕	黄国和	柴 天	高攀峰 吴义诚(5769)
进水氨氮浓度对好氧/缺氧/延长闲置 SBR 脱氮除磷性能的影响					
.....	刘芳芳	陈洪波	李小明	杨 麒	赵建伟 向 沙 李娟娟 贾利涛(5775)
景观生态-SBR 复合工艺生活污水处理效能与污泥性状			李 谱	孙飞云	董文艺 袁佳佳 李朋飞(5783)
亚硫酸钠和腐植酸对李氏禾生长和铬积累的影响			程志刚	张学洪	张杏锋 刘 杰(5788)
臭氧高级氧化法降解生化尾水中喹啉		陈傲蕾	章丽萍	常凤民	葛艳菊 王凯军(5795)
醋酸纤维素多孔纳米纤维的制备及其吸附性能			赵璿云	江慧华	陈良壁(5801)
聚多巴胺包覆的 Fe_3O_4 去除水体中的染料	李晓燕	宋 娟	张升晓	张媛媛	刘军深 徐 强(5807)
某城市污水处理厂废水化学除磷沉淀特性及影响因素			郁 娜	袁林江	吕景花(5813)
助溶剂甲醇对化学物质紫外光解的影响	涂宁宇	刘 洋	刘国光	吕文英	谢文玉(5818)
邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯对硝化型曝气生物滤池的影响及其去除效能	李小冬	王亚军	曹相生	孟雪征	(5825)
不同基质与布水方案下人工湿地水分运移的模拟			戴梦玲	陈孝兵	王 妍(5831)
人工快速渗滤系统非饱水层去除 COD 和氨氮	平玉焕	张焕祯	王智丽	王茜微	宋志晓(5837)
以泡沫镍为阴极的电芬顿法对苯酚的降解	古振澳	柴一荻	杨 乐	邱 珊	陈德坤 周 楨(5843)
硫酸盐型厌氧氨氧化反应器的启动特性					
.....	秦永丽	蒋永荣	刘成良	刘可慧	黎海清 刘远志 王 昭 郭丹妮 陆冬云 孙振举 卢青青 李良剑(5849)
絮凝-UV/ O_3 法处理粘胶纤维生产中的废碱液			王 兵	郑燕坪	林 义(5855)
缺氧-曝气生物流化床工艺处理合成氨工业氨氮废水中试研究	戴 昕	安立超	李辉军	吴亚杰	(5860)
油菜秸秆髓芯对水中铜离子吸附作用及其机理	张 宏	蒋 菊	刘燕梅	向金凤	刘 新(5865)
双子表面活性剂杂化海藻酸钠微球的制备及其在环保领域中的应用	何 帅	刘兴利	高宇航	李 阳	(5874)
北方景观水体中生态浮床的植物筛选与水质净化效果	温奋翔	王 兵	肖 波	王庆海	赵东阳 陈 乐(5881)
电 Fenton 法预处理餐饮废水	周 俊	熊 仁	文 敏	成 曦	(5887)
兰炭末对废水中三聚甲醛的吸附特性			董 梅	刘 伟	(5891)
粉煤灰复合氧化钙去除铬渣渗滤液中的总铬	赵晟铎	陈忠林	沈吉敏	赵 霞	徐 浩 张 晋 沈彦晴(5897)
FeCl_3 及 AlCl_3 对中温厌氧消化系统产生 H_2S 的抑制作用	张 玲	郑西来	余宗莲	杨居园	谢经良(5907)
低温条件下不同面积浮岛对 N、P 的净化效果	林 立	祝浩翔	徐 伟	唐源英	曹 冉 王海洋(5915)

Mg/Al/Fe 水滑石的焙烧产物对 F^- 的吸附	郭 宇	岳秀萍	刘吉明 (5921)
软模板法碳电极制备及在废水脱盐中的应用	蔡文波	李桂莉	刘笑研 (5927)

大气污染防治

光散射颗粒物监测仪在环境空气监测中的适用性	曲 松	李 媚	黄玉虎	任碧琪	秦建平	孙雪松	王军玲 (5934)
氨-Fe(II)EDTA 法同步脱硫脱硝中试研究	张 顾	王世杰	李富智	朱 平	王志勇	宋孝红 (5939)	
哈尔滨市大气污染与气象因素的相关性分析		杨 莹	王 琨	崔 晨	刘元海	黄丽坤 (5945)	
脉冲喷吹 2 000 mm 长滤筒的清灰性能	王 岩	张明星	李倩倩	林龙沅	颜翠平	陈俊东 (5951)	
Fe-Mn 基分子筛催化剂 NH ₃ 低温选择性催化还原 NO 性能			刘立忠	白燕玲	么 远	王宇翔 (5957)	
锰氧化物改性活性炭去除空气中甲醛	周昕彦	张 芄	蒋 文	杨易韬	林莉莉	张 巍 (5965)	
紫外可见分光光度法测定苏丹红 I 标记的大豆油浓度		刘海弟	李伟曼	李文辉	吴镇江	陈运法 (5973)	
临沂市一次持续性雾霾过程的阶段性成因分析				朱义青	胡顺起	曹张驰 (5979)	
压差法大气污染物采样误差分析			杨文举	苗德华	邓三鹏	祁宇明 (5987)	
椰壳碳基吸附剂的脱汞特性			谭增强	牛国平	陈晓文	安 振 (5992)	
大型燃煤机组 SCR 脱硝系统优化					张翠珍	赵学葵 (5997)	
多种神经网络在华北西部区域城市空气质量预测中的应用				谢 超	马民涛	于肖肖 (6005)	

固体废物处置

四川城市生活垃圾重金属污染状况及来源分析	刘育辰	王莉淋	伍 钧	杨 刚	漆 辉	邓仕槐 (6010)
螯合剂与水泥协同稳定垃圾焚烧灰渣中的重金属	常 威	蒋旭光	邱琪丽	池 涌	严建华 (6019)	
浓磷酸预处理废弃棉织物回收葡萄糖和涤纶的优化	董祝君	蔡郡倬	邱婧雯	肖文雄	沈 飞 (6027)	
利用粉煤灰硫酸浸取液制备十二水硫酸铝铵	赵 瑜	谢宇琪	郭彦霞	程文婷	程芳琴 (6034)	
污泥热干化过程中重金属 Pb、Cu、Zn 的形态转化及稳定特性			李进平	胡云娇	陈思奇 (6041)	
盐溶法去除糖厂滤泥中蛋白质的条件优化	刘洪波	陈宝娣	李 宁	李海华	郭继强 (6045)	
高炉熔渣四辊离心法制取矿渣棉	龙 跃	杜培培	李智慧	张良进	张玉柱 (6049)	
硫酸亚铁对粉煤灰中不同价态铬元素淋滤特性的影响	吴 乐	刘 哲	史玲玲	王 鹏	龚 勋 (6054)	
污泥的高温微好氧消化-厌氧消化工艺研究			程洁红	戴 雅	张春勇	戴界红 (6059)
不同泥质类型河流底泥脱水药剂优化实验研究	马 涛	康兴生	刘旭阳	张 峰	刘长青 (6065)	
阳极添加三价铁离子对沉积型微生物燃料电池运行特性的影响			赵亚楠	李秀芬	任月萍	王新华 (6073)
低温碱溶脱除液晶显示器(LCD)玻璃基板粉末中的硅和铝						
.....	王 帅	关 杰	任浩华	袁 昊	苏瑞景	顾卫星
				徐林元	谢俊燕	谭伟兴 (6078)
河流重金属污染底泥的稳定化实验研究			康兴生	马 涛	王 睿	顾俊杰 (6083)
硼泥的水热固化机理与抗压强度	佟 钰	刘俊秀	夏 枫	王 琳	王宝金 (6090)	
ZnO/Al ₂ O ₃ -SiO ₂ 固体碱催化动物脂肪废油制备生物柴油	邱 露	谭 浩	黄建东	郑 重	周 超	欧阳峰 (6097)
HTM 铜矿尾矿库浅层剖面重金属赋存形态及污染特征			张 卫	魏忠义	龙精华	王秋兵 (6103)
电弧流溶胞技术促进污泥厌氧消化					张君杰	郭 媛 (6110)
未燃尽碳表面卤化汞的解吸反应机理	高正阳	杨朋飞	吕少昆	吉 硕	孟欣欣	赵 航 (6115)

土壤污染防治

不同粒级土壤磁化率与重金属污染特征的相关关系	许端平	李晓波	苗 丹	吴 瑶	孙 璐 (6121)	
大豆、龙葵单作和间作对砒污染土壤的修复	王效国	呼世斌	程治文	王娇娇	魏丽琼 (6128)	
内蒙古某电厂周围土壤汞分布特征及其影响因素	王道涵	杨亚利	任 鹏	黄利民 (6135)		
生物质炭对污染土壤中的镉生物有效性及阿特拉津消解的影响	杨惟薇	潘丽萍	张超兰	严静娜	覃 霞	梁定国 (6141)
生物酶生态修复重金属污染土壤	林维晟	吴海泉	胡家朋	黄雪婷	徐颖惠 (6147)	

环境生物技术

一株苯胺降解菌的分离及其降解特性	张 浩	刘玉香	呼婷婷	赵 晶 (6154)		
铁碳微电解与微生物共作用降解 BDE-209	刘莉莉	刘瑞红	陈轶伦	林匡飞 (6161)		
基于 Aspen Plus 软件的生物质气与煤混合燃烧烟气排放特性计算分析	张小桃	贾耀磊	卢 毅	贾 伟 (6167)		
降解 H ₂ S 功能菌的分离及降解特性	吕 溪	任爱玲	张 瑾	韩梦非	郭 斌	古海峰 (6173)
2015 年总目次	(1)					

大豆、龙葵单作和间作对芘污染土壤的修复

王效国 呼世斌* 程治文 王娇娇 魏丽琼

(西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100)

摘要 土壤多环芳烃(PAHs)污染控制是当前土壤污染防治与保护的热点问题。采用室内盆栽实验,选择 PAHs 中具有代表性的四环化合物芘(Pyrene)作为研究对象,研究了大豆、龙葵单作和间作对不同浓度芘污染土壤的修复效果。结果表明:低浓度的芘(10 mg/kg)在一定程度上促进了大豆的生长,而高浓度的芘(250 mg/kg)则对大豆的生长有抑制作用;龙葵的生长没有受到芘污染(10~250 mg/kg)的影响;间作对大豆、龙葵的生长均有不同程度的促进作用。污染物芘在大豆和龙葵(成熟期)中的分布情况是:地下部分>地上部分;间作并未对大豆、龙葵中的芘含量造成显著影响。同一污染水平下,不同种植模式的修复效果为:大豆-龙葵间作>大豆单作>龙葵单作>无植物对照。因此,大豆-龙葵间作是一种既能有效修复芘污染土壤,又能充分利用污染土地资源的修复模式。

关键词 大豆 龙葵 间作 芘 植物修复

中图分类号 X53 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2015)12-6128-07

Phytoremediation of pyrene contaminated soil by monoculture and intercropping of *Glycine max* and *Solanum nigrum*

Wang Xiaoguo Hu Shibin Cheng Zhiwen Wang Jiaojiao Wei Liqiong

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contamination control has become one of important directions of soil contamination control at present. Through pot experiment in greenhouse, this study investigated the remediation of pyrene contaminated soil by *Glycine max* and *Solanum nigrum* in different planting patterns. The results showed that low concentration of pyrene (10 mg/kg) promoted the growth of *Glycine max*, but high concentration inhibited its growth. The effect of pyrene in this experiment on the growth of *Solanum nigrum* was not significant. The biomass of *Glycine max* and *Solanum nigrum* was higher in the intercropping treatments than in the monoculture treatment. The distribution of pyrene in *Glycine max* and *Solanum nigrum* (mature period) was root > shoot. There was no significant difference in the pyrene concentration of plants between monoculture and intercropping treatments. The remediation effect at the same contamination level decreased in the order: intercropping of *Glycine max* and *Solanum nigrum* > monoculture of *Glycine max* > monoculture of *Solanum nigrum* > the control treatment. Therefore, intercropping of *Glycine max* and *Solanum nigrum* is an effective way to repair pyrene contaminated soil which can make full use of the contaminated land simultaneously.

Key words *Glycine max*; *Solanum nigrum*; intercropping; pyrene; phytoremediation

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是环境中普遍存在的一种持久性有机污染物^[1]。大量研究表明,PAHs具有慢性毒性和致癌、致畸和致突变的“三致”作用,严重危害环境和人体健康^[2,3]。PAHs由于水溶性差,辛醇-水分配系数高,常被吸附于土壤颗粒上,因此其对土壤的污染问题尤为突出^[4,6]。污染土壤的修复方法有物理法、化学法和生物法,通常根据污染物种类不同选取不同的修复方法。植物修复技术(phytoremediation)是近年来发展起来的一项主要用来清除环境中有毒污染物的绿色修复技术^[7]。许多研究表明,植物不仅

能够吸收、积累和降解土壤中的多环芳烃,更重要的是植物通过促进根际微生物的活性加速土壤中多环芳烃的降解^[8-11],因此,植物修复是一种具有很大开发潜力的修复技术。由于目前植物修复技术的研究主要集中在超富集植物上,而对低富集农作物的研究较少,因此在土壤修复过程中往往需要中断污染

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA101404-4)

收稿日期:2014-09-04; **修订日期:**2014-09-17

作者简介:王效国(1990—),男,硕士,主要从事污染土壤修复研究。

E-mail: xiaoguo1@126.com

* 通讯联系人, E-mail: hushibin2003@nwsuaf.edu.cn

地区的农业生产,影响粮食生产安全,不适合我国国情。间作套种是我国传统农业技术精髓之一,选择适当的作物形成间套作修复体系,既可实现对污染土壤的修复,又可保证粮食生产,这已成为目前土壤修复研究的新热点^[12],尤其适合我国污染程度轻,涉及面广的农田土壤。

目前,间作套种在修复重金属污染土壤方面已有报道^[13-17],而在修复有机物污染土壤方面的研究尚不多见。本文选择 PAHs 中具有代表性的四环化合物芘(pyrene)为研究对象,通过室内盆栽实验,研究了大豆、龙葵单作和间作对芘污染土壤的修复效果,以期提出一种 PAHs 污染土壤植物修复的新模式,达到既有效修复污染土壤,又充分利用污染农田土地资源的目的。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 供试土壤

供试土壤采自杨凌西北农林科技大学校园(0~20 cm),土壤为褐土类,塿土亚类。土样采回后自然风干,过 2 mm 筛后备用。土壤基本理化性质如下:pH 7.62,有机质 8.09 g/kg,全氮 1.21 g/kg,速效磷 5.23 mg/kg,全钾 13.38 g/kg,芘未检出。

1.1.2 供试植物

龙葵(*Solanum nigrum*)种子购自日当午农场,大豆(*Glycine max*)种子购自杨凌示范区种子站。

1.1.3 试剂与仪器

试剂:供试药品芘(Pyrene,纯度>98%)购自百灵威科技有限公司。层析用硅胶(200~300目)、二氯甲烷、丙酮、正己烷、无水硫酸钠,均为分析纯;甲醇为色谱纯。

仪器:101-2型电热鼓风干燥箱,电子天平,玛瑙球研磨仪,KQ-300DE 医用数控超声波清洗器,LXJ-IIIB 型低速大容量多管离心机,直径 0.7 cm×25 cm 层析柱,旋转蒸发仪,Waters600 高效液相色谱仪,配有 Waters 2487 紫外检测器,φ 4.6 mm×250 mm C18 反相色谱柱。

1.2 实验方法

1.2.1 实验设计

盆栽实验在西北农林科技大学科研温室中进行。实验设置 4 个芘污染浓度:0、10、50 和 250 mg/kg。将芘以丙酮溶液的形式加入土壤中,混合均匀,

然后静置稳定至丙酮完全挥发(约半个月)。种植前采样测定土壤中芘的初始浓度,结果见表 1。稳定后的土壤按每盆 3.5 kg 装盆,将大豆和龙葵种子播入盆中,待大豆、龙葵株高约 2 cm 时定苗,最终每盆保留长势一致的 6 株幼苗,其中间作处理大豆和龙葵各 3 株,各污染水平均设置无植物对照组,所有处理均设 3 个重复。不定时浇水,保持土壤 WHC60% 左右,生长 90 d 后收获。

表 1 土壤外源添加芘浓度及土壤初始芘浓度
Table 1 Volume of pyrene addition and initial concentration of pyrene in treated soils (mg/kg)

处理名称	植物	外源添加芘浓度	土壤初始芘浓度
D0	大豆	0	ND
L0	龙葵	0	ND
DL0	大豆+龙葵	0	ND
D10	大豆	10	10.42±1.08
L10	龙葵	10	10.42±1.08
DL10	大豆+龙葵	10	10.42±1.08
D50	大豆	50	51.04±1.31
L50	龙葵	50	51.04±1.31
DL50	大豆+龙葵	50	51.04±1.31
D250	大豆	250	249.17±2.25
L250	龙葵	250	249.17±2.25
DL250	大豆+龙葵	250	249.17±2.25

注:字母 D 表示大豆,L 表示龙葵,DL 表示大豆龙葵间作,字母后的数字表示外源添加芘的浓度,0 表示未添加芘的土壤,ND 表示未检出,下同。

1.2.2 样品采集

90 d 盆栽实验结束后,用直尺测定其株高。将大豆和龙葵分为地上、地下部分收获并用去离子水冲洗干净。将所有植物样品装入信封中,在 65℃ 下烘至恒重,测定其干重。烘干的植物样用玛瑙研钵磨细,过 60 目尼龙筛,放于冰箱(4℃)中备用。

土壤样品采用四分法采集^[18],土壤样品风干后,用玛瑙研钵磨细,过 100 目尼龙筛,放于冰箱(4℃)中备用。

1.2.3 测定方法

土壤和植物中芘含量测定:土壤和植物中芘的提取参照袁馨等的方法^[19]。

HPLC/UV 分析条件:流动相为甲醇:水(83:17),流速为 1.0 mL/min,柱温 30℃,进样量为 20 μL;检测波长 235 nm。芘检测限为 54.9 pg/L。土样中芘的加标回收率为 92.42% (n=5, RSD<5.5%);植物样中加标回收率分别为 85.2% (n=5, RSD<7.89%),可以满足实验要求。

1.2.4 数据处理

土壤中芘的去除率(dissipation rate, DR)的计算公式如下:

$$DR = \frac{C_{initial} - C_{end}}{C_{initial}} \times 100\%$$

式中: $C_{initial}$ 为土壤中芘的初始浓度,mg/kg DW; C_{end} 为经过 90 d 处理后土壤中芘的残留浓度,mg/kg DW。

植物中芘的富集系数(bio-concentration factors, BCF)的计算公式如下:

$$BCF = \frac{C_{plant}}{C_{end}}$$

式中: C_{plant} 为植物中芘的浓度,mg/kg DW。实验数据用 DPS 软件进行方差分析和显著性检验,实验数据表示为平均值 ± 标准误差,采用 Excel2010 制图。

2 结果与讨论

2.1 芘污染对大豆和龙葵生长的影响

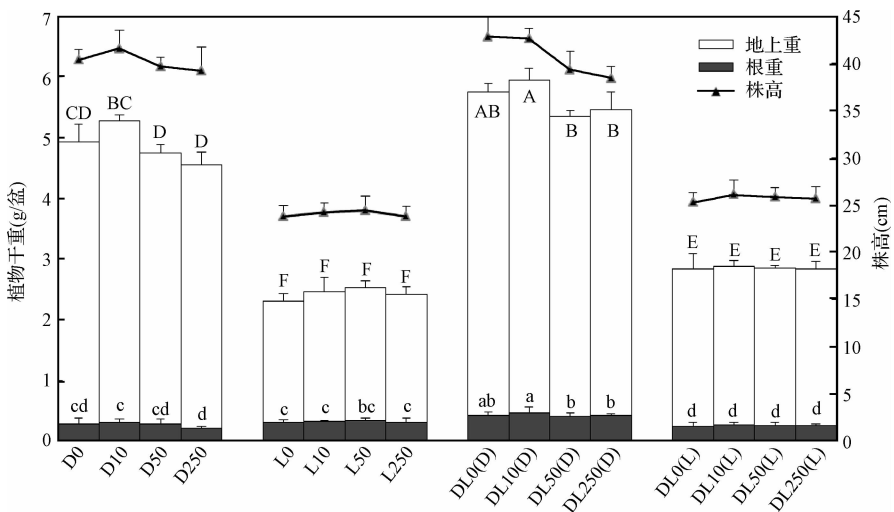
各处理植物生长 90 d 后,间作大豆和龙葵生物量 ×2 与单作生物量的结果比较如图 1 所示。各处理水平下大豆和龙葵均能正常生长。同一种植模式下,在污染水平为 10 mg/kg 时,作物的生物量达到最高。单作大豆模式下,污染物水平为 10 mg/kg 时,大豆(D10)地下部分和地上部分干重分别为 0.32 和 4.95 g/盆,比未加污染物处理(D0)的分别高出 11.76% 和 6.93%;当污染物水平达到 250 mg/kg 时,大豆(D250)地下部分和地上部分干重分别为

0.23 和 4.33 g/盆,比未加污染物处理(D0)的分别低 21.8% 和 6.54%。说明低浓度的芘(10 mg/kg)在一定程度上促进了大豆的生长,而高浓度的芘(250 mg/kg)则对大豆的生长有抑制作用。很多研究表明,芘污染浓度较低时,对植物生长有促进作用;芘污染浓度较高时,对植物生长有较强的抑制作用^[9, 19]。无论是单作还是间作,龙葵的生物量和株高都没有受到芘污染的影响,说明龙葵对芘有着良好的耐受能力。

通过对间作中作物和单作中作物生物量进行比较可以发现,对未投加污染物的处理,间作大豆的地上部分干重为 5.31 g/盆,明显高于单作处理($P < 0.05$);间作龙葵的地上部分干重为 2.59 g/盆,比单作处理高 29.88%。说明间作对大豆和龙葵的生长均有不同程度的促进作用。李隆等^[20, 21]认为,间作较单作有明显的产量优势是由于间作明显提高了作物对氮磷钾的吸收量。

2.2 土壤中芘的去除

植物生长 90 d 后,土壤中芘的残留浓度见表 2。由表 2 可知,土壤中芘的残留浓度随着初始浓度的增加而增大,而其去除率却随着初始浓度的增加而减小。当芘污染水平为 10 mg/kg 时,无植物对照处理的土壤芘残留浓度为 5.31 mg/kg,去除率为 49.07%,而种植植物处理(D10、L10 和 DL10)的芘残留浓度分别为 1.61、2.43 和 1.34 mg/kg,去除率分别达到 84.59%、76.66% 和 87.16%。由此可知,同一污染水平下,种植植物处理中土壤芘残留浓度



注:图中横坐标中括号内字母 D 和 L 分别表示间作下的大豆和龙葵,柱形图上的大小写字母代表 0.05 显著水平,下同。

图 1 不同芘污染水平对大豆、龙葵生物量的影响

Fig. 1 Effect of different pyrene concentrations and planting patterns on growth of Glycine max and Solanum nigrum

均低于无植物对照处理,其去除率明显高于无植物对照处理($P < 0.05$)。因此,种植大豆和龙葵明显促进了土壤中芘的降解,这可能是由于植物的根际效应强化了微生物对污染物的降解作用^[22]。此外,同一污染水平下,单作大豆处理的芘去除率高于单作龙葵的芘去除率。有研究表明,根瘤菌剂可以有效提高土壤中芘的降解率^[23],这可能是以下两方面的原因导致的:一方面根瘤菌能促进宿主根的伸长,增加污染物与根的接触面积,同时也能促进宿主根释放更多的分泌物到根际微环境中,调节根际微生物的生存环境^[24];另一方面添加根瘤菌可能改变根际土壤的微生物活性,提高了根际土壤微生物群落的功能多样性^[25],从而加强土壤中有机污染物的生物降解。

同一污染水平下,大豆龙葵间作处理的芘残留量最低,去除率最高。当芘污染水平为 10 mg/kg 时,DL10 处理中土壤芘残留浓度仅为 1.34 mg/kg,去除率达到 87.16%,而大豆、龙葵单作处理的土壤芘残留浓度分别为 1.61、2.43 mg/kg,去除率分别为 84.59%、76.66%。由此可知,大豆和龙葵间作明显促进了土壤中芘的降解,间作模式的修复效果优于单作。潘声旺等^[26]通过研究油菜和紫花苜蓿混种对菲、芘污染土壤的修复,认为混种模式的修复效果高于单种模式;张晓斌等^[27]通过研究黑麦草和苜蓿间作对菲污染土壤的修复效应,得出了类似的结论。

表 2 土壤中芘的残留浓度及其去除率

Table 2 Pyrene residuals in soil and its removal rate		
处理名称	土壤中芘残留浓度 (mg/kg)	去除率 (%)
10	5.31 ± 0.82f	49.07 ± 7.87f
D10	1.61 ± 0.14fg	84.59 ± 1.34ab
L10	2.43 ± 0.21fg	76.66 ± 2.02b
DL10	1.34 ± 0.36g	87.16 ± 3.45a
50	29.04 ± 2.11d	43.11 ± 4.13fg
D50	13.50 ± 1.17e	73.56 ± 2.29c
L50	15.50 ± 1.33e	69.64 ± 2.61cd
DL50	12.17 ± 0.79ef	76.16 ± 1.55bc
250	152.29 ± 14.38a	38.88 ± 5.77g
D250	89.49 ± 5.92c	64.08 ± 2.38d
L250	108.86 ± 9.25b	56.31 ± 3.71e
DL250	85.04 ± 11.67c	67.47 ± 4.68cd

2.3 芘在大豆和龙葵中的分布及其富集系数

由表 3 可知,植物中芘的含量随着污染物浓度

的升高而变大,且污染物芘在植物中的分布情况是:地下部分 > 地上部分。各污染水平下,单作条件下大豆(D10、D50、D250)地下部分芘含量分别为 2.84、20.50 和 98.29 mg/kg,单作条件下龙葵(L10、L50、L250)地下部分芘含量分别为 2.75、19.46 和 96.04 mg/kg,同一污染水平下单作大豆和单作龙葵地下部分的芘含量并无显著差异($p < 0.05$)。各污染水平下,间作条件下大豆(DL10、DL50、DL250)地下部分的芘含量分别为 2.93、21.04 和 101.29 mg/kg,与单作条件下无显著差异,说明与龙葵间作并未对大豆根部的芘含量造成明显影响。各处理下大豆地上部分芘含量在 0.76 ~ 9.21 mg/kg 之间,龙葵的在 0.74 ~ 7.29 mg/kg 之间,明显低于地下部分的芘含量,大豆和龙葵之间的差别并不显著,说明间作没有对植物地上部分的芘含量产生明显影响。植物积累总量最高的仅为 58.8 μg/盆,其对土壤中芘去除的贡献率不足 1%。潘声旺等^[28]通过研究沿阶草对土壤中芘、菲的修复发现,植物积累并不是土壤中菲、芘去除的主要原因,植物-微生物交互作用、微生物降解作用才是土壤中菲、芘去除的主要原因。

生物富集系数(bio-concentration factors,简称BCFs)是植物体内污染物的累积量与其生长土壤中污染物残留量的比值,常用于植物修复能力评价研究,BCFs 越大,表明植物的修复能力越高^[29]。各污染水平下,大豆的地下部分和地上部分的富集系数分别在 1.10 ~ 2.19 之间和 0.09 ~ 0.61 之间,龙葵地下部分和地上部分的富集系数分别在 0.88 ~ 2.03 之间和 0.07 ~ 0.58 之间。无论是大豆还是龙葵,地上部分的富集系数均小于地下部分的富集系数,可见根部是大豆和龙葵积累芘的主要部位,芘向地上部分的转运较少。有研究表明,黑麦草、沿阶草、苏丹草等植物能修复芘污染土壤,虽然其根和茎叶均能吸收累积土壤中的芘,但同一处理的茎和叶中芘含量要远小于根中的芘含量^[28,30,31];张慧等^[32]的研究表明,玉米不同部位对芘的累积特征为:根 > 叶 > 茎。蔡顺香等^[33]认为,植物的这种吸收特征可能是由于芘为亲脂型有机物,其在水中的溶解度仅为 0.14 mg/L(25℃),又因其分子量较大,大多数吸附于须根表面和细胞间隙,难以向地上部分转移。

3 结 论

(1)低浓度的芘(10 mg/kg)在一定程度上促进

表 3 茈在大豆、龙葵中的分布及其富集系数

Table 3 Distribution of pyrene in plants and its bio-concentration factors

处理	植物	植物地下部分茈含量 (mg/kg)	植物地上部分茈含量 (mg/kg)	植物积累总量 (μg/盆)	地下部分 富集系数	地上部分 富集系数
D10	大豆	2.84 ± 0.42c	0.76 ± 0.11d	4.66 ± 1.15ef	1.77 ± 0.08b	0.47 ± 0.02a
L10	龙葵	2.75 ± 0.35c	0.74 ± 0.18d	2.48 ± 0.47f	1.13 ± 0.03d	0.30 ± 0.09b
DL10	大豆	2.93 ± 0.18c	0.82 ± 0.04d	2.42 ± 0.76f	2.19 ± 0.15a	0.61 ± 0.04a
DL10	龙葵	2.71 ± 0.23c	0.78 ± 0.23d	1.94 ± 0.74g	2.03 ± 0.08ab	0.58 ± 0.04a
D50	大豆	20.50 ± 1.62b	3.46 ± 2.01c	21.45 ± 0.38c	1.52 ± 0.04c	0.26 ± 0.03b
L50	龙葵	19.46 ± 1.19b	3.76 ± 1.28c	14.98 ± 1.86cd	1.26 ± 0.10d	0.24 ± 0.08bc
DL50	大豆	21.04 ± 2.11b	3.53 ± 0.33c	13.1 ± 1.45d	1.73 ± 0.09bc	0.29 ± 0.08b
DL50	龙葵	20.15 ± 1.6b	3.43 ± 1.76c	7.18 ± 1.87e	1.66 ± 0.07bc	0.28 ± 0.05b
D250	大豆	98.29 ± 4.44a	8.46 ± 1.43ab	58.8 ± 0.39a	1.10 ± 0.06de	0.09 ± 0.01d
L250	龙葵	96.04 ± 5.26a	7.29 ± 2.71ab	46.5 ± 0.50b	0.88 ± 0.08d	0.07 ± 0.01d
DL250	大豆	101.29 ± 9.21a	9.21 ± 1.2a	44.85 ± 0.18b	1.18 ± 0.07d	0.11 ± 0.01cd
DL250	龙葵	98.76 ± 6.71a	6.75 ± 1.42b	21.4 ± 3.43c	1.15 ± 0.03d	0.08 ± 0.01d

了大豆的生长,而高浓度的茈(250 mg/kg)则对大豆的生长有抑制作用;龙葵的生长没有受到茈污染的影响;间作对大豆和龙葵的生长均有不同程度的促进作用。

(2)同一污染水平下,不同种植模式的茈去除率为:大豆-龙葵间作>大豆单作>龙葵单作,这可能与其根际环境有关。

(3)污染物茈在大豆和龙葵中的分布情况是:地下部分>地上部分,地上部分的富集系数均小于地下部分的富集系数,茈向地上部分的转运较少;间作并未对大豆和龙葵中的茈含量造成明显影响。

参 考 文 献

[1] Powell S. N. , Singleton D. R. , Aitken M. D. Effects of enrichment with salicylate on bacterial selection and PAH mineralization in a microbial community from a bioreactor treating contaminated soil. *Environmental Science & Technology*, **2008**, 42(11) : 4099-4105

[2] Wilson S. C. , Jones K. C. Bioremediation of soil contaminated with polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs) : A review. *Environmental Pollution*, **1993**, 81(3) : 229-249

[3] Menzie C. A. , Potocki B. B. , Santodonato J. Exposure to carcinogenic PAHs in the environment. *Environmental Science & Technology*, **1992**, 26(7) : 1278-1284

[4] Ahn S. , Werner D. , Luthy R. G. Modeling PAH mass transfer in a slurry of contaminated soil or sediment amended with organic sorbents. *Water Research*, **2008**, 42(12) : 2931-2942

[5] Dong T. T. T. , Lee B. K. Characteristics, toxicity, and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons

(PAHs) in road dust of Ulsan, Korea. *Chemosphere*, **2009**, 74(9) : 1245-1253

[6] 刘世亮, 骆永明, 曹志洪, 等. 多环芳烃污染土壤的微生物与植物联合修复研究进展. *土壤*, **2002**, 34(5) : 255-263

Liu Shiliang, Luo Yongming, Cao Zhihong, et al. Progress in study on bioremediation of PAHs-contaminated soil using soil microorganisms combined with plant. *Soils*, **2002**, 34(5) : 255-263 (in Chinese)

[7] 范淑秀, 李培军, 何娜, 等. 多环芳烃污染土壤的植物修复研究进展. *农业环境科学学报*, **2007**, 26(6) : 2007-2013

Fan Shuxiu, Li Peijun, He Na, et al. Research of phytoremediation on contaminated soil with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). *Journal of Agro-Environment Science*, **2007**, 26(6) : 2007-2013 (in Chinese)

[8] Fan Shuxiu, Li Peijun, Gong Zongqiang, et al. Promotion of pyrene degradation in rhizosphere of alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Chemosphere*, **2008**, 71(8) : 1593-1598

[9] Gao Yanzheng, Zhu Lizhong. Plant uptake, accumulation and translocation of phenanthrene and pyrene in soils. *Chemosphere*, **2004**, 55(9) : 1169-1178

[10] Maliszewska-Kordybach B. , Smreczak B. , Klimkowicz-Pawlas A. , et al. Monitoring of the total content of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in arable soils in Poland. *Chemosphere*, **2008**, 73(8) : 1284-1291

[11] 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. *环境科学学报*, **2010**, 30(3) : 593-599

Yang Yan, Ling Wanting, Gao Yanzheng, et al. Plant uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and

- their impacts on root exudates. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **2010**, 30(3): 593-599(in Chinese)
- [12] 卫泽斌, 郭晓方, 丘锦荣, 等. 间套作体系在污染土壤修复中的应用研究进展. *农业环境科学学报*, **2010**, 29(增刊): 267-272
- Wei Zebin, Guo Xiaofang, Qiu Jinrong, et al. Innovative technologies for soil remediation: Intercropping or co-cropping. *Journal of Agro-Environment Science*, **2010**, 29(supplement): 267-272(in Chinese)
- [13] An Lingyao, Pan Yanhui, Wang Zhubing, et al. Heavy metal absorption status of five plant species in monoculture and intercropping. *Plant and Soil*, **2011**, 345(1-2): 237-245
- [14] Jiang Cheng'ai, Wu Qitang, Sterckeman T., et al. Co-planting can phytoextract similar amounts of cadmium and zinc to mono-cropping from contaminated soils. *Ecological Engineering*, **2010**, 36(4): 391-395
- [15] 李凝玉, 李志安, 丁永祯, 等. 不同作物与玉米间作对玉米吸收积累镉的影响. *应用生态学报*, **2008**, 19(6): 1369-1373
- Li Ningyu, Li Zhian, Ding Yongzhen, et al. Effects of intercropping different crops with maize on the Cd uptake by maize. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **2008**, 19(6): 1369-1373(in Chinese)
- [16] 熊国焕, 高建培, 王宏镔, 等. 间作条件下螯合剂对龙葵和大叶井口边草吸收重金属的影响. *农业环境科学学报*, **2011**, 30(4): 666-676
- Xiong Guohuan, Gao Jianpei, Wang Hongbin, et al. Effects of chelators on the uptake of heavy metals by *Solanum nigrum* and *Pteris cretica* var. *Nervosa* growing in an intercropping system. *Journal of Agro-Environment Science*, **2011**, 30(4): 666-676(in Chinese)
- [17] 赵颖, 刘利军, 党晋华, 等. 不同植物与玉米间作对玉米吸收多环芳烃和重金属的影响. *环境工程*, **2014**, 10(7): 138-141
- Zhao Ying, Liu Lijun, Dang Jinhua, et al. Effects of intercropping different crops with maize on its uptake of the PAHs and heavy metal. *Environmental Engineering*, **2014**, 10(7): 138-141(in Chinese)
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析(第3版). 北京: 中国农业出版社, **2000**
- [19] 袁馨, 魏世强, 潘声旺. 苏丹草对土壤中菲苳的修复作用. *农业环境科学学报*, **2009**, 28(7): 1410-1415
- Yuan Xin, Wei Shiqiang, Pan Shengwang. The remediation of phenanthrene and pyrene in soil by Sudan grass (*Sorghum vulgare* L.). *Journal of Agro-Environment Science*, **2009**, 28(7): 1410-1415(in Chinese)
- [20] 李隆, 李晓林, 张福锁, 等. 小麦大豆间作条件下作物养分吸收利用对间作优势的贡献. *植物营养与肥料学报*, **2000**, 6(2): 140-146
- Li Long, Li Xiaolin, Zhang Fusuo, et al. Uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium as related to yield advantage in wheat/soybean intercropping. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, **2000**, 6(2): 140-146(in Chinese)
- [21] 李隆, 杨思存, 孙建好, 等. 小麦/大豆间作中作物种间的竞争作用和促进作用. *应用生态学报*, **1999**, 10(2): 197-200
- Li Long, Yang Sicun, Sun Jianhao, et al. Interspecific competition and facilitation in wheat/soybean intercropping system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **1999**, 10(2): 197-200(in Chinese)
- [22] Reilley K. A., Banks M. K., Schwab A. P. Dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere. *Journal of Environmental Quality*, **1996**, 25(2): 212-219
- [23] 陈强培, 郭楚玲, 廖长君, 等. 绿肥植物绿豆去除土壤中苳的实验研究. *农业环境科学学报*, **2013**, 32(6): 1172-1177
- Chen Qiangpei, Guo Chuling, Liao Changjun, et al. Removal of pyrene in soil by leguminous green manure plant mung bean. *Journal of Agro-Environment Science*, **2013**, 32(6): 1172-1177(in Chinese)
- [24] Johnson D. L., Maguire K. L., Anderson D. R., et al. Enhanced dissipation of chrysene in planted soil: The impact of a rhizobial inoculum. *Soil Biology & Biochemistry*, **2004**, 36(1): 33-38
- [25] 滕应, 骆永明, 高军, 等. 多氯联苯污染土壤菌根真菌-紫花苜蓿-根瘤菌联合修复效应. *环境科学*, **2008**, 29(10): 2925-2930
- Teng Ying, Luo Yongming, Gao Jun, et al. Combined remediation effects of arbuscular mycorrhizal fungi-legumes-rhizobium symbiosis on PCBs contaminated soils. *Environmental Science*, **2008**, 29(10): 2925-2930(in Chinese)
- [26] 潘声旺, 魏世强, 袁馨, 等. 油菜-紫花苜蓿混种对土壤中菲、苳的修复作用. *中国农业科学*, **2009**, 42(2): 561-568
- Pan Shengwang, Wei Shiqiang, Yuan Xin, et al. Mechanisms of the removal and remediation of phenanthrene and pyrene in soil with mixed cropping of alfalfa and rape. *Scientia Agricultura Sinica*, **2009**, 42(2): 561-568(in Chinese)
- [27] 张晓斌, 梁宵, 占新华, 等. 菲污染土壤黑麦草/苜蓿间作修复效应. *环境工程学报*, **2013**, 7(5): 1974-1978

- Zhang Xiaobin, Liang Xiao, Zhan Xinhua, et al. Inter-cropping remediation of ryegrass and clover in phenanthrene-contaminated soil. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2013**, 7(5): 1974-1978(in Chinese)
- [28] 潘声旺, 魏世强, 袁馨, 等. 沿阶草 (*Ophiopogon japonicus*) 对土壤中菲的修复作用. 生态学报, **2008**, 28(8): 3654-3661
- Pan Shengwang, Wei Shiqiang, Yuan Xin, et al. Mechanisms of the removal and remediation of phenanthrene and pyrene in soil by dwarf lilyturf. Acta Ecologica Sinica, **2008**, 28(8): 3654-3661(in Chinese)
- [29] Arnot J. A., Gobas F. A. P. C. A review of bioconcentration factor (BCF) and bioaccumulation factor (BAF) assessments for organic chemicals in aquatic organisms. Environmental Reviews, **2006**, 14(4): 257-297
- [30] 凌婉婷, 高彦征, 李秋玲, 等. 植物对水中菲和芘的吸收. 生态学报, **2006**, 26(10): 3332-3338
- Ling Wanting, Gao Yanzheng, Li Qiuling, et al. Uptake of phenanthrene and pyrene by ryegrass from water. Acta Ecologica Sinica, **2006**, 26(10): 3332-3338(in Chinese)
- [31] Angelova V. R., Ivanova R. V., Delibaltova V. A., et al. Use of sorghum crops for in situ phytoremediation of polluted soils. Journal of Agricultural Science and Technology A, **2011**, 1(5): 693-702
- [32] 张慧, 党志, 易筱筠, 等. 玉米修复芘污染土壤的初步研究. 环境化学, **2010**, 29(1): 29-34
- Zhang Hui, Dang Zhi, Yi Yiaoyun, et al. Phytoremediation of soil contaminated with pyrene by maize CT38 (*Zea mays* L.). Environmental Chemistry, **2010**, 29(1): 29-34(in Chinese)
- [33] 蔡顺香, 何盈, 邱孝煊, 等. 多环芳烃芘对小白菜生长和元素吸收及营养品质的影响. 土壤通报, **2010**, 41(2): 452-457
- Cai Shunxiang, He Ying, Qiu Xiaoxuan, et al. Effects of polycyclic aromatic hydrocarbon pyrene on growth, uptake of pyrene and other elements, nutritious qualities of Chinese cabbage. Chinese Journal of Soil Science, **2010**, 41(2): 452-457(in Chinese)