



文章栏目：土壤污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201912062

中图分类号 X53

文献标识码 A

刘非凡, 白建峰, 顾卫华, 等. 烟曲霉 f4 对黑麦草修复电子废物拆解场地土壤重金属的影响[J]. 环境工程学报, 2020, 14(7): 1886-1893.

LIU Feifan, BAI Jianfeng, GU Weihua, et al. Effects of *Aspergillus fumigatus* f4 on the soil heavy metal remediation in e-waste dismantling site by ryegrass[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(7): 1886-1893.

## 烟曲霉 f4 对黑麦草修复电子废物拆解场地土壤重金属的影响

刘非凡<sup>1,2</sup>, 白建峰<sup>1,2,\*</sup>, 顾卫华<sup>1,2</sup>, 苑文仪<sup>1,2</sup>, 庄绪宁<sup>1,2</sup>, 赵静<sup>1,2</sup>, 宋小龙<sup>1,2</sup>, 刘倩<sup>1,2</sup>, 张承龙<sup>1,2</sup>, 王景伟<sup>1,2</sup>

1. 上海第二工业大学电子废弃物研究中心, 上海 201209

2. 上海电子废弃物资源化协同创新中心, 上海 201209

第一作者: 刘非凡 (1996—), 女, 硕士研究生。研究方向: 污染土壤修复。E-mail: 707188354@qq.com

\*通信作者: 白建峰 (1978—), 男, 博士, 教授。研究方向: 污染土壤与修复等。E-mail: jfbai@sspu.edu.cn

**摘要** 为了探究烟曲霉 f4 对黑麦草修复电子废物拆解场地土壤重金属的影响, 通过实验比较接菌处理和不接菌处理黑麦草的生物量、重金属含量、重金属形态分布、富集系数和迁移系数。结果表明: 接菌处理前 20 d 阶段黑麦草地上部分的生物量最大, 随着时间推移, 地上部生物量逐渐减少; 接菌处理与不接菌处理之间地下部生物量存在显著差异, 接菌后, 其生物量的增幅为 91.27%; 在接菌处理的地下部, Ni、Cu、Zn、Cd、Cr 和 Pb 的含量与不接菌处理相比, 其增幅分别为 484%、398%、470%、355%、531%、490%; 根际土壤中重金属形态发生改变, 接菌处理与不接菌处理相比, Cd、Cu、Zn、Pb 和 Cr 的弱酸可提取态占比提高了 0.9%、0.8%、0.5%、0.3%、0.1%。烟曲霉 f4 能促进黑麦草生长, 提高根际土壤中重金属的弱酸可提取态的含量, 增加黑麦草对其富集, 从而提高了黑麦草对重金属的修复效率。

**关键词** 电子废物拆解场地; 黑麦草; 烟曲霉; 重金属污染

近年来, 电子垃圾的产生量随着电子产品的大量使用而剧增。在拆解过程中, 电子垃圾被随意倾倒或填埋, 这种方法会浸出有害物质和重金属, 导致处理场地周边地下水和土壤的污染<sup>[1-2]</sup>。露天焚烧电子废物以收集贵金属的做法同样会导致空气污染和环境污染。家庭作坊使用酸洗方法回收重金属, 随意倾倒, 进一步加剧了重金属从电子废物中释出并进入土壤<sup>[3]</sup>。有研究表明, 电子废物拆解场地存在多种重金属或重金属与有机污染的复合污染, 其中重金属污染以铅、镉、铜、镍为主<sup>[4]</sup>。这些有毒元素会导致植物形态异常和代谢紊乱, 最终导致植物减产<sup>[5]</sup>。土壤中的重金属迁移性差、持久性强、毒性高, 导致了土壤很难通过自身进行修复<sup>[6]</sup>。

植物-微生物联合修复具有环境友好、资源节约的优点, 从而受到了广泛关注。微生物能够在重金属胁迫条件下促进植物生长和生存。微生物通过分泌铁载体、氨基酸以及络合重金属等方式

收稿日期: 2019-12-09; 录用日期: 2020-03-28

基金项目: 上海市 II 类高原学科-环境科学与工程; 上海协同创新中心建设项目 (ZF1224); 上海第二工业大学重点学科建设项目 (XXKZD1602); 上海第二工业大学研究生项目基金 (EGD18YJ0064)

改变土壤中重金属的赋存形态来缓解重金属对植物的毒害作用<sup>[7]</sup>。微生物可在重金属存在的条件下,产生抗性机制<sup>[8]</sup>。黑麦草具有生长速度快、产量高、生长季节长、适应性广且具有耐性等特点。赵树民等<sup>[9]</sup>研究发现,巨大芽孢杆菌可以强化黑麦草对污染土壤中的铜、镉的吸收。马婵华<sup>[10]</sup>的研究表明,黑麦草吸收污染土壤中的镉。敬路淮等<sup>[11]</sup>的研究表明,黑麦草对复合重金属污染土壤中重金属均具有良好的富集能力,能大大地提高黑麦草对重金属修复的利用效率。史鼎鼎等<sup>[12]</sup>研究发现,添加细菌J6菌株可以促进黑麦草生长,提高黑麦草生物量,强化黑麦草对土壤中Pb、Cd的吸收。张永兰等<sup>[13]</sup>的研究表明,黑麦草可以对覆土下的铜尾矿进行修复。通过以上研究可知,具有功能性的微生物联合植物修复土壤重金属污染是一种有效的方法,针对多种重金属混合污染土壤值得深入研究。

本研究针对电子废物拆解场地多重重金属污染土壤,通过利用实验室筛选获得的具有重金属耐性、分泌吡啶乙酸以及解磷的烟曲霉f4,通过盆栽实验测定黑麦草地上部和地下部的生物量、黑麦草吸收和富集重金属的能力以及不同处理对根际土壤中重金属形态的影响,明确烟曲霉f4强化黑麦草对电子废物拆解场地土壤修复的能力。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

植物选用南方多年生黑麦草。供试土壤采自台州市路桥区电子废物无序拆解场地表层土壤(0~10 cm),土壤经过风干后过5目筛,保存备用;取混匀后的少量土壤过100目筛,测定土壤中重金属含量。

供试土壤中的铜、锌、铬、铅、镉超过《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)<sup>[14]</sup>。土壤中Cu质量分数为5 384 mg·kg<sup>-1</sup>,超过标准约53倍;土壤中Zn质量分数为24 078 mg·kg<sup>-1</sup>,超过标准约80倍;土壤中Cr质量分数为727 mg·kg<sup>-1</sup>,超过标准约2倍;土壤中Pb质量分数为4 302 mg·kg<sup>-1</sup>,超过标准约18倍;土壤中Cd质量分数为54.2 mg·kg<sup>-1</sup>,超过标准约68倍。

实验室保藏的具有铬、铅、铜和锌抗性的烟曲霉(*Aspergillus fumigatus*)f4,该菌具备分泌吡啶乙酸(IAA)和溶磷的能力。

### 1.2 实验试剂

过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)、氢氟酸(HF)、浓硝酸(HNO<sub>3</sub>)、高氯酸(HClO<sub>4</sub>)、冰醋酸(CH<sub>3</sub>COOH)、盐酸羟胺(NH<sub>2</sub>OH·HCl、醋酸铵(CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>)均为分析纯。

### 1.3 实验仪器

pH计(STARTER3100, OHAUS);精密电子天平(AL204, 瑞士MEMETTLER TOLEDO公司);微波消解仪(ANTON PAAR);电感耦合等离子体光谱仪(ICAP-7200, 赛默飞世尔科技中国有限公司)。

### 1.4 实验方案

盆栽实验周期为60 d,每20 d对黑麦草地上部进行收割,地下部在第60天收取。将风干后的电子废物拆解场地土壤装盆,每盆装入1 kg污染土,撒入0.6 g黑麦草种子。盆栽实验分为2组:接菌处理(烟曲霉f4)和不接菌处理(ck)。取10 mL菌悬液至接菌处理盆栽中,不接菌处理加入10 mL无菌水,每个处理3次重复。每周浇透盆栽2次,不额外供给营养液。

沿着土壤表层将黑麦草地上部进行收集,将黑麦草根系取出,抖落根系周围土壤,收集紧密粘连在黑麦草根系上的土壤,用去离子水将根系清洗干净。将黑麦草在105 ℃下烘2 h,再放在60 ℃下烘干至恒重并测定其干质量<sup>[15]</sup>。

## 1.5 分析方法

使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)对土壤和植物中重金属含量进行测定。土壤中重金属测定过程为:称取根际土壤 0.200 0 g 于消解罐中,加入 5 mL 硝酸(HNO<sub>3</sub>)、3 mL 氢氟酸(HF)、1 mL 过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)<sup>[16]</sup>,置于微波消解仪内进行消解;微波消解完成后,使用 3 mL 高氯酸(HClO<sub>3</sub>)赶酸,定容至 50 mL。植物中重金属测定过程为:称取植物样 0.200 0 g 于消解罐中,加入 8 mL 王水,置于微波消解仪内进行消解;微波消解完成后,使用 3 mL 高氯酸(HClO<sub>3</sub>)赶酸,定容至 50 mL。

土壤中的重金属的形态分别为弱酸可提取态、可氧化态、可还原态、残渣态,采用BCR连续提取法<sup>[17]</sup>对根际土壤中重金属的形态进行分析。

## 1.6 富集系数

植物富集系数(BCF)是某种元素在植物地上部或地下部的含量与植物所生长的土壤中该元素含量的比值,反映植物对某种元素的富集能力<sup>[18]</sup>,计算方法见式(1)。

$$F_{\text{BCF}} = \frac{C_{\text{plant}}}{C_{\text{soil}}} \quad (1)$$

式中: $F_{\text{BCF}}$ 为植物富集系数; $C_{\text{plant}}$ 为植物地上部或地下部的重金属含量,mg·kg<sup>-1</sup>; $C_{\text{soil}}$ 为土壤重金属含量,mg·kg<sup>-1</sup>。

## 1.7 迁移系数

植物迁移系数(TF)是植物地上部某元素的含量与地下部该元素含量的比值,反映植物对该元素的迁移能力<sup>[18]</sup>,计算方法见式(2)。

$$F_{\text{TF}} = \frac{C_{\text{shoot}}}{C_{\text{root}}} \quad (2)$$

式中: $F_{\text{TF}}$ 为植物迁移系数; $C_{\text{shoot}}$ 为植物地上部的重金属含量,mg·kg<sup>-1</sup>; $C_{\text{root}}$ 为植物根部的重金属含量,mg·kg<sup>-1</sup>。当 $F_{\text{TF}} > 1$ 时,植物易将地下部吸收的元素输送到地上部;当 $F_{\text{TF}} < 1$ 时,植物防止重金属元素向地上部迁移,可降低重金属引起的毒性<sup>[19]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 菌株对黑麦草生长的影响

图1反映了为接菌处理与不接菌处理黑麦草地上部和地下部干质量的对比结果。可以看出,地上部分为3个阶段进行收割,1~20、21~40、41~60 d分别标记为D1、D2、D3。在D1阶段,接菌处理使黑麦草地上部生物量提高了2.16%,与不接菌处理无显著差异;D2阶段,接菌处理使黑麦草地上部生物量提高了43.56%,与不接菌处理有显著差异;D3阶段,接菌处理使黑麦草地上部生物量提高了28.64%,与不接菌处理无显著差异。接菌处理使黑麦草地下部生物量提高了91%,与不接菌处理有显著差异。在同一处理中,D1与D2、D3黑麦草地上部生物量有差异,由于地下部是第60天进行收割,随着时间的推移,地下部受到毒害作用越来越强,这可能会对黑麦草地上部的生长产生了影响。严警等<sup>[20]</sup>的研究表明,筛选到的根瘤菌

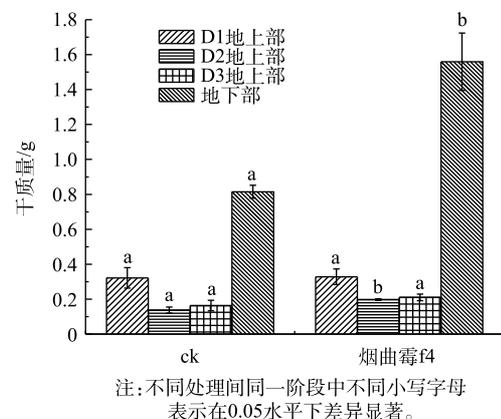


图1 黑麦草地上部与地下部干质量

Fig. 1 Dry weight of rye grass above and below ground

对于黑麦草生物量增加无显著的促进作用。本研究中的烟曲霉 f4 与其类似, 虽无显著的促进作用, 但是接菌处理对于黑麦草地上部生物量有所提高。

## 2.2 烟曲霉对黑麦草吸收重金属的影响

由表 1 可知, 接种烟曲霉 f4 能够显著提高黑麦草对地下部重金属的积累。相较于不接菌处理, Ni、Cu、Zn、Cd、Cr、Pb 的增幅分别为 484%、398%、470%、355%、531% 和 490%。对地上部来说, 接种烟曲霉 f4 后, 地上部重金属含量相较于不接菌处理普遍降低。在烟曲霉 f4 的作用下, 黑麦草根吸收重金属后, 通过形成带有铁载体、特殊代谢物和菌株转运体的复合物来限制重金属的生物利用度。赵会会等<sup>[21]</sup>筛选出了能活化 Cd 的菌株, 接种在黑麦草幼苗上, 能够促进黑麦草的生长。其中, 接菌处理的黑麦草根系 Cd 相较于不接菌处理增加了 57.64%。赵树民等<sup>[9]</sup>筛选出了巨大芽孢杆菌, 在 Cd 污染、Cu 污染或 Cd 与 Cu 混合污染土壤中, 接种巨大芽孢杆菌后, 黑麦草地下部重金属含量较不接菌处理高, 巨大芽孢杆菌的施加对黑麦草地下部根系富集重金属能力提高。本研究发现接种烟曲霉 f4 后黑麦草地下部根系积累重金属的能力优于巨大芽孢杆菌。

表 1 黑麦草各部位重金属含量  
Table 1 Heavy metal concentrations in aboveground and belowground biomass of ryegrass mg·kg<sup>-1</sup>

重金属元素	取样部位	不接菌处理	接菌处理
Cu	D1地上部	64.58±5.26a	58.97±6.52a
	D2地上部	43.28±9.29a	87.99±3.01b
	D3地上部	791.22±32.89a	424.78±15.03b
	地下部	772.53±28.36a	3 854.06±273.39b
Cd	D1地上部	1.25±0.16a	1.33±0.27a
	D2地上部	1.33±0.20a	3.78±0.21b
	D3地上部	12.48±0.24a	8.83±0.37b
	地下部	10.32±0.52a	50.88±0.82b
Cr	D1地上部	13.07±1.09a	10.53 ±1.66a
	D2地上部	8.71±0.86a	17.71±1.74b
	D3地上部	27.26±1.37a	24.08±1.63a
	地下部	45.20±2.14a	285.51±4.98b
Zn	D1地上部	410.35±4.14a	403.27±2.93a
	D2地上部	323.78±28.86a	945.02±4.80b
	D3地上部	4 414.28±197.67a	2 933.36±69.25b
	地下部	3 032.71±171.94a	17 310.42±83.50b
Pb	D1地上部	141.53±1.60a	132.04±2.67b
	D2地上部	124.00±2.28a	70.32±8.18b
	D3地上部	564.98±3.98a	283.56±2.24b
	地下部	418.40±14.37a	2 469.09±159.84b

注: 不同小写字母表示在0.05水平下差异显著。

## 2.3 土壤-植物体系中重金属迁移特性

由表 2 可知, 不接菌处理, 黑麦草地上部 D3 的 Cu、Cd、Zn、Pb 的迁移系数均大于 1。这说明在 D3 阶段, 不接菌处理的黑麦草易将地下部重金属 (Cu、Cd、Zn、Pb) 转移到地上部; 对于 D1 和 D2 阶段, 接菌处理与不接菌处理, 迁移系数并无显著差异。不接菌处理对于地上部重金属

表2 黑麦草对重金属的迁移系数与富集系数  
Table 2 Migration coefficient and enrichment factor of heavy metals in ryegrass  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

重金属元素	取样部位	不接菌处理		接菌处理	
		TF	BCF	TF	BCF
Cu	D1地上部	0.08	0.01	0.02	0.01
	D2地上部	0.06	0.01	0.02	0.02
	D3地上部	1.02	0.15	0.11	0.08
	地下部		0.14		0.72
Cd	D1地上部	0.12	0.02	0.03	0.02
	D2地上部	0.13	0.02	0.08	0.07
	D3地上部	1.21	0.23	0.19	0.16
	地下部		0.19		0.94
Cr	D1地上部	0.29	0.02	0.04	0.01
	D2地上部	0.19	0.01	0.06	0.02
	D3地上部	0.6	0.04	0.08	0.03
	地下部		0.06		0.39
Zn	D1地上部	0.14	0.02	0.02	0.02
	D2地上部	0.11	0.01	0.05	0.04
	D3地上部	1.46	0.18	0.17	0.12
	地下部		0.13		0.72
Pb	D1地上部	0.34	0.03	0.05	0.03
	D2地上部	0.3	0.03	0.03	0.02
	D3地上部	1.35	0.13	0.11	0.07
	地下部		0.1		0.5

的富集系数与接菌处理地上部重金属系数并无显著性差异。但是，地下部重金属的富集系数接菌与不接菌存在显著性差异。这可能是金属的移动与微生物通过分泌的络合剂与各种氧化和化学反应引发的<sup>[22]</sup>。接菌后，黑麦草对于重金属的富集显著增强。

#### 2.4 菌株对土壤重金属形态的影响

表3为根际土壤中重金属的形态分布。可以看出，烟曲霉 f4 将可氧化态 Cd 转化成弱酸可提取态、可还原态和残渣态 Cd；烟曲霉 f4 将残渣态 Cr 转化成弱酸可提取态、可氧化态和可还原态 Cr；烟曲霉 f4 将可氧化态 Cu 转化成弱酸可提取态、可还原态和残渣态 Cu；烟曲霉 f4 将可氧化态

表3 土壤中重金属形态分布  
Table 3 Form distribution of heavy metals in soil %

重金属元素	弱酸可提取态		可还原态		可氧化态		残渣态	
	ck	烟曲霉 f4	ck	烟曲霉 f4	ck	烟曲霉 f4	ck	烟曲霉 f4
Cu	9.6	10.4	17.1	23.6	30.4	20.3	42.9	45.7
Cd	27.7	28.6	19.2	21.7	21.8	14.6	31.3	35.1
Cr	0.4	0.5	4.1	5.9	40.9	40.8	54.6	52.8
Pb	8.9	9.2	25.9	30.3	16.7	4.6	48.5	55.9
Zn	19.4	19.9	23.3	24.4	14.6	11.4	42.7	44.3

Zn 转化成可还原态 Zn; 烟曲霉 f4 将可氧化态 Pb 转化成可还原态和残渣态 Pb。不同重金属在作物体内的迁移能力有所不同<sup>[23]</sup>, 电子废物拆解场地土壤中重金属迁移能力大小依次为 Cd>Zn>Cu>Pb>Cr。烟曲霉 f4 通过产有机酸活化了土壤中难以移动的重金属, 增强了重金属的迁移性和有效性<sup>[24]</sup>。兰翔等<sup>[25]</sup>发现产黄头孢霉 (CC) 和头孢霉 (SP) 可改变土壤中重金属的形态。这可能是菌株分泌的有机物质与土壤中重金属结合, 降低了土壤中重金属的活性。

由表 4 可知, 不接菌处理黑麦草地下部 Cu、Cd、Cr、Pb、Zn 的弱酸可提取态含量与根际土壤中 Cu、Cd、Cr、Pb、Zn 含量呈负相关; 接菌处理黑麦草地下部 Cu、Cr、Pb、Zn 的弱酸可提取态含量与根际土壤中 Cu、Cr、Pb、Zn 呈正相关, 与 Cd 呈负相关。这表明接种烟曲霉 f4 后, 根际土壤中 Cu、Cr、Pb、Zn 的弱酸可提取态含量越高, 黑麦草地下部含量亦越高。不接菌处理黑麦草地下部 Cu、Cd、Cr 的可还原态含量与根际土壤中 Cu、Cd、Cr 含量呈正相关, 与 Pb、Zn 呈负相关; 接菌处理黑麦草地下部 Cu、Zn 的还原态含量与根际土壤中 Cu、Zn 含量呈正相关, 与 Cr、Pb、Cd 呈负相关。这表明接种烟曲霉 f4 后, 根际土壤中 Cu、Cd、Cr 的可还原态含量越高, 黑麦草地下部含量亦越高。不接菌处理黑麦草地下部 Cu、Cd、Cr、Pb、Zn 的可氧化态含量与根际土壤中 Cu、Cd、Cr、Pb、Zn 含量呈负相关; 接菌处理黑麦草地下部 Cu、Cd、Cr、Pb、Zn 的可氧化态含量与根际土壤中 Cu、Cd、Cr、Pb、Zn 含量呈正相关。这表明接种烟曲霉 f4 后, 根际土壤中 Cu、Cd、Cr、Pb、Zn 的可氧化态含量越高, 黑麦草地下部含量亦越高。

表 4 黑麦草地下部中重金属与其土壤中各形态的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between heavy metals in the belowground part of ryegrass and the forms of heavy metals in soil

重金属元素	弱酸可提取态		可还原态		可氧化态	
	ck	烟曲霉f4	ck	烟曲霉f4	ck	烟曲霉f4
Cu	-0.969	0.363	0.076	0.828	-0.372	0.872
Cd	-0.955	-0.493	0.464	-0.992 <sup>1)</sup>	-0.593	0.002
Cr	-0.832	0.083	0.704	-0.824	-0.435	0.611
Pb	-0.941	0.433	-0.777	-0.496	-0.413	0.933
Zn	-0.917	0.319	-0.247	0.609	-0.968	0.763

注: 1)表示在0.05水平下相关性显著。

### 3 结论

1) 通过测定接菌和不接菌处理黑麦草地上部、地下部生物量, 接菌处理 (烟曲霉 f4) 较不接菌处理 3 个阶段地上部生物量增幅分别为 2.16%、43.56%、28.64%。地下部生物量增幅 91.27%, 达到差异显著水平。

2) 通过对黑麦草地上部、地下部重金属含量的测定, 接菌处理 (烟曲霉 f4) 相较于不接菌处理黑麦草地下部 Ni、Cu、Zn、Cd、Cr、Pb 的含量增幅分别为 484%、398%、470%、355%、531%、490%。接菌后利于黑麦草地下部对重金属的富集。

3) 通过 BCR 逐级提取法对根际土壤进行形态分析, 发现接种烟曲霉 f4 后能够活化根际土壤中的 Cd、Cu、Ni、Zn、Pb, 使得弱酸可提取态占比增多。烟曲霉 f4 能强化黑麦草对电子废物拆解场地土壤重金属的修复。

### 参考文献

[1] 马永鹏, 黄子石, 徐斌, 等. 我国电子废弃物管理与回收处理分析[J]. 湖南有色金属, 2019, 35(5): 61-65.

- [2] PANT D, JOSHI D, UPRETI M K, et al. Chemical and biological extraction of metals present in e-waste: A hybrid technology[J]. *Waste Management*, 2012, 32(5): 979-990.
- [3] BURNS K N, SAYLER S K, NEITZEL R L, et al. Stress, health, noise exposures, and injuries among electronic waste recycling workers in Ghana[J]. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 2019, 14(1): 1-11.
- [4] 刘晓文, 温勇, 蔡信德, 等. 电子废弃物土壤污染整治分析: 以广东省清远市为例[J]. *环境保护*, 2018, 46(1): 61-64.
- [5] SHALINI T, CHARU L. Heavy metal stress, signaling, and tolerance due to plant-associated microbes: An overview[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 452-463.
- [6] GUL I, MANZOOR M, HASHMI I, et al. Plant uptake and leaching potential upon application of amendments in soils spiked with heavy metals (Cd and Pb)[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 249: 109408.
- [7] ULLAH A, MUSHTAQ H, ALI H, et al. Diazotrophs-assisted phytoremediation of heavy metals: a novel approach[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 22(4): 2505-2514.
- [8] ALY A H, DEBBAB A, PROKSCH P. Fungal endophytes: Unique plant inhabitants with great promises[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, 90(6): 1829-1845.
- [9] 赵树民, 李晓东, 虞方伯, 等. 巨大芽孢杆菌LY02对黑麦草修复重金属污染土壤的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 340-344.
- [10] 马婵华. 黑麦草植物对农田重金属镉污染土壤的修复效果研究[J]. *现代农业科技*, 2019(3): 148-152.
- [11] 敬路淮, 陈晓明, 肖伟, 等. 黑麦草修复重金属污染土壤与废水及富集植物的微生物降解[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(6): 1449-1456.
- [12] 史鼎鼎, 梁小迪, 徐少慧, 等. EDTA与抗性细菌对黑麦草吸收复合污染红壤中铅镉的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(8): 1634-1641.
- [13] 张永兰, 王友保. 多年生黑麦草对覆土作用下铜尾矿的修复[J]. *草业科学*, 2019, 36(1): 3-10.
- [14] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618-2018[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.
- [15] 张婷, 赵春程, 傅金民, 等. 棘孢曲霉对多年生黑麦草牧草品质和产量的影响[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(12): 3667-3672.
- [16] 王景伟, 代双艳, 顾卫华, 等. 多级驯化嗜酸菌淋滤电子废弃物拆解地土壤重金属的效果[J]. *安全与环境学报*, 2019, 19(1): 283-289.
- [17] 张永利, 刘晓文, 陈启敏, 等. Tessier法和改进BCR法提取施加熟污泥后黄土中Cd的对比研究[J]. *环境工程*, 2019, 37(5): 34-38.
- [18] CHEN Y M, YANG W J, CHAO Y Q, et al. Metal-tolerant *Enterobacter* sp. strain EG16 enhanced phytoremediation using *Hibiscus cannabinus* via siderophore-mediated plant growth promotion under metal contamination[J]. *Plant and Soil*, 2016, 413(1/2): 203-216.
- [19] 黄芳, 辜娇峰, 周航, 等. 不同马铃薯品种对Cd、Pb吸收累积的差异[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 370-376.
- [20] 严警, 夏丽, 盛下放, 等. 耐重金属苜蓿中华根瘤菌的筛选及其与能源植物联合富集铜的特性[J]. *草业学报*, 2019, 28(2):

102-111.

- [21] 赵会会, 方志刚, 马睿, 等. 耐镉根际促生菌的筛选及其对一年生黑麦草镉吸收积累的影响[J]. 草地学报, 2017, 25(3): 554-560.
- [22] PANT D, GIRI A, DHIMAN V. Bioremediation techniques for e-waste management[J]. Waste Bioremediation, 2018(6): 105-125.
- [23] 莫争, 王春霞, 陈琴, 等. 重金属Cu, Pb, Zn, Cr, Cd在水稻植株中的富集和分布[J]. 环境化学, 2002, 21(2): 110-116.
- [24] 莫争, 王春霞, 陈琴, 等. 重金属Cu, Pb, Zn, Cr, Cd在土壤中的形态分布和转化[J]. 农业环境保护, 2002, 21(1): 9-12.
- [25] 兰翔, 曹霞, 谭启玲, 等. 两株耐铅镉真菌对土壤中铅镉赋存形态及小白菜吸收积累的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(6): 2095-2102.

(本文编辑: 金曙光, 郑晓梅, 张利田)

## Effects of *Aspergillus fumigatus* f4 on the soil heavy metal remediation in e-waste dismantling site by ryegrass

LIU Feifan<sup>1,2</sup>, BAI Jianfeng<sup>1,2,\*</sup>, GU Weihua<sup>1,2</sup>, YUAN Wenyi<sup>1,2</sup>, ZHUANG Xuning<sup>1,2</sup>, ZHAO Jing<sup>1,2</sup>, SONG Xiaolong<sup>1,2</sup>, LIU Qian<sup>1,2</sup>, ZHANG Chenglong<sup>1,2</sup>, WANG Jingwei<sup>1,2</sup>

1. Waste Electrical and Electronic Equipment Research Centre of Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China

2. Shanghai Collaborative Innovation Centre for Waste Electrical and Electronic Equipment Recycling, Shanghai 201209, China

\*Corresponding author, E-mail: jfbai@sspu.edu.cn

**Abstract** In order to investigate the effect of *Aspergillus fumigatus* f4 on the soil heavy metal remediation in e-waste dismantling site by ryegrass, the experiments were conducted to compare the biomass, heavy metal content, heavy metal form distribution, enrichment coefficient, and migration coefficient of ryegrass treated with and without *Aspergillus fumigatus* f4 inoculation. The results showed that the aboveground biomass of ryegrass reached the largest at the 20 d-stage before the inoculation, and then gradually decreased with time. There was a significant difference in the substratum biomass of ryegrass between the treatments with and without *Aspergillus fumigatus* f4 inoculation. The biomass after inoculation increased by 91.27%. Compared with the non-inoculated treatment, the content of Ni, Cu, Zn, Cd, Cr, and Pb in the substratum biomass of ryegrass with *Aspergillus fumigatus* f4 inoculation increased by 484%, 398%, 477%, 355%, 531%, and 490%, respectively. The forms of heavy metals in ryegrass rhizosphere also changed. Compared with the non-inoculated treatment, the proportion of weakly acid extractable forms of Cd, Cu, Zn, Pb, and Cr in ryegrass rhizosphere with *Aspergillus fumigatus* f4 inoculation increased by 0.9%, 0.8%, 0.5%, 0.3% and 0.1%, respectively. *Aspergillus fumigatus* f4 could promote the growth of ryegrass, increase the content of weak acid extractables of heavy metals in the rhizosphere soil, and their enrichment by ryegrass, and thereby improve the remediation efficiency of heavy metals by ryegrass.

**Keywords** e-waste dismantling site; ryegrass; *Aspergillus fumigatus*; heavy metal pollution