

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2018.01.028

油菜对 Cd 污染土壤的修复潜力分析

冯 刚, 王 鑫, 白九元, 赵 云

(四川大学生命科学学院生物资源与生态环境教育部重点实验室, 成都 610065)

摘要: 以甘蓝型油菜为研究材料, 利用盆栽试验研究了不同浓度 Cd(0, 1, 2 mg/kg) 胁迫下油菜的吸收特性, 以及土壤微生物群落结构变化。结果表明: 随着 Cd 浓度的升高, 油菜植株对 Cd 的吸收显著增加, 而且油菜地上部分的吸收量显著高于地下部分, 其中茎的 Cd 浓度最高, 籽粒最低; 油菜将 Cd 从地下转移到地上部分的转运系数随外源 Cd 浓度的升高而呈现先升高后下降的趋势; 且低浓度 Cd 处理下, 油菜对 Cd 的转运系数较高, 修复效率可以达到 6.841%~7.752%。土壤微生物多样性分析发现, Cd 改变了土壤微生物群落的结构, 降低了部分优势菌群的相对丰度, 而油菜可以增加这些菌群的相对丰度, 提高土壤微生物多样性。因此, 种植油菜有利于土壤生态系统的稳定性, 可以用于修复中等程度 Cd 污染土壤。

关键词: 镉; 油菜; 植物修复技术; 土壤微生物群落; 微生物多样性

中图分类号: X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2018)01-0172-07

Analysis of the potential remediation of oilseed rape to soils contaminated with cadmium

FENG Gang, WANG Xin, BAI Jiu-Yuan, ZHAO Yun

(Key Laboratory of Bio-Resource and Eco-Environment of Ministry of Education, College of life sciences, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The pot-experiment was conducted to analysis the absorption characteristics of oilseed rape and the change of soil microbial community structure under different Cd concentrations. Results indicated that the absorption of Cd in the plant increased significantly as the rising of Cd concentrations, and the content in the shoot was higher than that of roots. Cd concentration in stem was the highest, and Cd concentration in seed was the lowest. The translocation factors (TFs) of Cd in oilseed rape showed a trend of first increasing and then decreased with the rising of Cd concentrations. At a low Cd concentration, the translocation factors (TFs) of Cd in oilseed rape was higher and the remediation rate can reach 6.841%~7.752%. Soil microbial diversity analysis showed that Cd contamination altered soil microbial community structure and reduced the relative abundance of some dominant bacteria, but cultivation of oilseed rape can increase the relative abundance of them, and increase the soil microbial diversity. Therefore, cultivation of oilseed rape is beneficial to the stability of soil ecosystem and can be used to remediate the medium Cd-contaminated soil.

Keywords: Cadmium; Oilseed rape; Phytoremediation; Soil microbial community; Microbial diversity

收稿日期: 2017-01-17

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD05801-5); 四川省科技支撑项目(2016NZ0050)

作者简介: 冯刚(1990-), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为分子遗传学与基因工程. E-mail: fenggangscu@foxmail.com

通讯作者: 赵云. E-mail: zhaoyun@scu.edu.cn

1 引言

随着工业化、城市化和农业现代化的发展,特别是当代农业生产中各种含有重金属的农药和化肥的大量使用、城市生活污水和垃圾处理不当以及工业“三废”的不合理排放,使得土壤重金属污染已成为各国环境工作者研究的焦点问题。有统计数据显示,我国遭受重金属污染的耕地面积有 2500 万 hm^2 , 重金属含量超标的粮食年产量多达 1200 万吨,直接经济损失约 200 亿元^[1]。国家农业部数据表明,全国 104 万 hm^2 污灌区中约有 64.8% 的耕地不同程度地受到重金属污染^[2]。环保部及国土资源部 2014 年公布对全国 630 万土地污染状况评估结果时,指出重金属污染面积占总调查面积的 21.7%,其中以 Cd 污染最为突出,约占 7%。土壤重金属污染成为限制农作物产量和品质的关键因素,还可以通过食物链的富集对人体健康带来潜在的危害。因此,超积累植物修复镉污染土壤对于保障镉污染土壤的农业生产安全及利用都具有十分重要的现实意义和应用前景。

植物修复技术(Phytoremediation)是利用重金属超富集植物根系吸收污染土壤中的有毒有害物质并运移至植物地上部,通过收割地上部分并集中处理,通过连续种植这种植物,使土壤中重金属含量降低到可接受的水平^[3]。以植物为基础的植物修复具有经济、绿色、环境友好和可原位修复等优点^[4],成为当前环境修复领域的一个研究热点。目前有关植物修复技术的研究开展得较多,而且取得了不少进展,已经发现的对 Cd、Co、Pb、Cu、Ni、Zn 等重金属有超富集作用的植物 400 多种,但具有推广价值的超积累植物通常植株矮小、生物量低、生长缓慢,使其对某些重金属提取效率偏低。许多超积累植物种群零星分布,一般在偏远地带,植物种子较小,繁殖体的收集较为困难。不易于机械化操作,修复效益低,达到土壤重金属标准含量的时间长,并不能有效解决面源性的重金属污染问题。甘蓝型油菜(*Brassica napus* L.)是我国广泛种植的油料作物之一,其生物量大,易栽培,根系发达的特点,且能耐受一定程度的重金属^[5-8],因此,许多学者将甘蓝型油菜作为土壤 Cd 修复研究的理想作物进行研究^[8-10]。但是目前的这些研究主要集中于幼苗期油菜对 Cd 的富集情况,很少涉及到成熟期,此外,植物富集重金属的高低还取决于环境中重金属的浓度,这些研究所用的浓度远远高于土壤

实际的 Cd 浓度,因此,对于实际的推广有一定的局限性和不足。

根际微生物群落结构和组成与诸多因素相关,如根的形态、根际分泌物、植物所处生长期以及土壤的理化特性等。有关农作物与细菌多样性的报道逐渐增多^[11],然而重金属污染土壤中油菜根际细菌多样性的研究却鲜有报道。本研究以甘蓝型油菜作为实验材料,采用盆栽方式,通过在土壤中添加外源镉栽培油菜,研究在镉胁迫条件下,成熟期油菜对 Cd 吸收特征及其修复效果,借助高通量测序技术研究镉和油菜对土壤微生物多样性的影响,为重金属 Cd 污染土壤修复油菜的筛选和推广应用提供一定的理论依据。

2 材料与方法

2.1 材料

供试油菜:甘蓝型油菜(*Brassica napus* L.)波里马细胞质雄性不育恢复系(84100-18),由本课题组选育。

供试土壤:供试土壤购自四川省成都市三圣花乡农资市场(土壤采自四川省成都市温江区无污染的郊区农田),土壤性质为壤土,使用前充分混匀,土壤的基本理化性质如下:pH 为 6.663 ± 0.039 , 有机质(Organic Matter)为 43.813 ± 0.458 g/kg, 全氮(Total nitrogen)含量为 3.620 ± 0.115 g/kg, 全磷(Total phosphorus)含量为 1.095 ± 0.025 g/kg, 全钾(Total potassium)含量为 19.966 ± 0.212 g/kg, Cd 含量为 0.17 ± 0.01 mg/kg。

2.2 方法

2.2.1 土壤镉处理 将混匀的土壤自然风干,去除石块和杂质后,将相应浓度的镉溶液加入试验土壤中搅拌均匀,土壤中镉浓度分别为 0、1 和 2 mg/kg,放置一个月后装盆。

2.2.2 油菜种植和样品采集 选取籽粒饱满、大小一致、无虫害的油菜种子(84100-18)50 粒,用无菌水浸泡 12 h 后,分别播种于镉浓度 0、1 和 2 mg/L 的花钵土壤中,采用喷壶根据土壤情况适时浇水,试验时间从 2014 年 10 月 25 日至 2015 年 5 月 10 日在四川大学望江校区种植区进行全生育期露天培养。每个浓度重复 3 次。

到油菜成熟期之后收获整株植物,根系用小铲挖出,小心地连根拔出整株油菜,抖落油菜根围的土,并迅速分离油菜根,去除根上的大颗粒土壤后用自来水冲洗干净,收集剩下的根际土装进自封

袋,放入冰盒中,待全部采集完后运回实验室,转移到 -80°C 冰箱保存.空白对照组未种植油菜,则去掉表面 $3\sim 5\text{cm}$ 的土壤,四分法收集土壤,运送保存方式同上.并采集拔除油菜后的非根际土壤 500g (去表面土壤后的 $5\sim 10\text{cm}$ 深的土壤),同样于 -80°C 保存,留作后续的化学分析.

2.2.3 检测方法 植物样品:将采集的植株分成根、茎、角果和籽粒四个部分, 105°C 下杀青 15min ,然后在 75°C 下烘干至恒重研细.取干粉 0.2g ,采用石墨消解仪消解(HNO_3 和 HClO_4 法消化,二者体积比为 $5:1$),升温程序见表1,消解完成后进行赶酸,当样品溶液蒸至近干时(约 1mL),停止赶酸,于消解管中定容到 50mL .用电感耦合等离子质谱(ICP-MS, Inductively coupled plasma mass spectrometry)对植物根、茎、角果和籽粒四个部分中Cd含量进行测定,各样品3次重复.植物样品Cd的分析过程中采用国家标准参比物质GBW07603(灌木枝叶成分分析标准物质)进行质量控制.

表1 植物样品消解步骤

Tab.1 Plant sample digestion process

步骤	温度($^{\circ}\text{C}$)	时间(min)
1	70	15
2	155	50
3	180	15

试验土壤微生物群落的评估分析参照 Bloem 等^[12]的方法.自土壤中提取的微生物基因组DNA经检测合格后使用 Illumina MiSeq 平台(上海美吉生物医药科技有限公司)上机测序.土壤的理化性质主要测定有机质、总氮、总磷、总钾、pH 以及土壤中Cd含量这六个指标.

2.2.4 数据处理 试验数据采用 SPSS19.0 软件进行统计分析,Origin8 和 Excel 作图.以小写字母 a、b 和 c 等小写英文字母表示不同处理之间的差异显著性($p < 0.05$).用转运系数来评价植物将重金属从地下向地上的运输和富集能力,即植株地上部分Cd含量与地下部Cd含量的比值^[13].

MiSeq 测序得到的 PE reads 首先根据 overlap 关系进行拼接,同时对序列质量进行质控和过滤,区分样本后进行 OTU 聚类分析和物种分类学分析.基于 OTU 聚类分析结果,进行物种多样性指数分析以及测序深度的检测;基于分类学信息,在各个分类水平上进行群落结构的组成分析.

3 结果与分析

3.1 Cd 在油菜各部位的分布

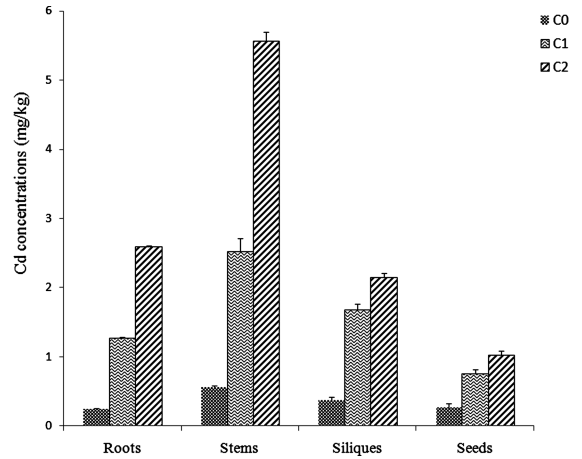


图1 成熟期油菜各部分Cd含量(mg/kg)

Fig.1 Cd concentrations in different tissues of oil-seed rape

成熟期油菜根、茎、角果和籽粒各个器官中均有Cd,其中茎含量最高,籽粒含量最低,表明茎是油菜储存Cd的最主要器官(图1).在未添加Cd的土壤中,油菜各部位的Cd浓度差异不显著($P > 0.05$),随土壤Cd浓度增加油菜各部位的Cd含量呈显著升高的趋势($P < 0.05$),实验组中油菜根、茎、角果和籽粒的Cd含量分别为对照组的 $3\sim 10$ 倍.在相同浓度Cd污染土壤中,成熟期油菜根、角果和籽粒中部位的Cd浓度仅为茎部的 $18\sim 50\%$,均显著($P < 0.05$)低于其茎部Cd含量.在 1mg/kg Cd处理下,油菜籽粒的Cd含量仅为其根的 59.3% ,茎的 30.0% ,角果的 45% ; 2mg/kg Cd处理下,油菜籽粒的Cd含量仅为其根的 39.5% ,茎的 18.4% ,角果的 47.6% ,表明油菜籽粒Cd含量远远低于茎的Cd含量,说明茎对Cd的吸收效果更好,以至于油菜茎的Cd含量显著高于其他部位($P < 0.05$)(图1).

随着土壤中外源镉处理浓度的增加,成熟期油菜地上部及其各器官的转运系数基本呈下降趋势(表2).在较低浓度(1mg/kg)下,油菜地上/地下转运系数最高,在 2mg/kg Cd,转运系数最低.相比于角果和籽粒,茎的转运系数较大,说明Cd由根系向茎转运的较多,向角果和籽粒中转运的较少.此外,高浓度外源镉(2mg/kg)处理下,茎对Cd仍然具有较高的转运系数,角果和籽粒的转运系数则显著降低($P < 0.05$),也说明茎是油菜富

集 Cd 的主要器官,同时角果和籽粒低的 Cd 转运系数减少其向籽粒中转移,保证了食用部分的安全性.此外,研究结果表明,在低浓度 Cd 污染(1 mg/

kg)的条件下,油菜对土壤 Cd 的净化率可以达到 7.752%;在高浓度(2 mg/kg Cd)下也可以达到 6.841%.

表 2 成熟期油菜对 Cd 的转运系数

Tab. 2 Translocation factors (TFs) of Cd in oilseed rape

转运系数(Translocation factors)	根/茎	茎/角果	角果/籽粒	地下部/地上部	净化率(%)
C ₀	2.26 ± 0.046a	0.66 ± 0.084b	0.72 ± 0.114b	1.30 ± 0.064c	—
C ₁	1.98 ± 0.159a	0.67 ± 0.032b	0.45 ± 0.045c	1.61 ± 0.118d	7.752 ± 0.089
C ₂	2.40 ± 0.059a	0.35 ± 0.018b	0.48 ± 0.036c	1.21 ± 0.013d	6.841 ± 0.124

图 2 所示为成熟期油菜在整个生长周期所吸附的 Cd 在其各部位(根、茎、角果和籽粒)的分布情况.从中可以看出,被油菜所吸附的 Cd 超过 40%集中于油菜的茎,大约 70%的 Cd 集中在油菜非食用部分,这主要是由于土壤中的 Cd 向油菜籽粒运输的过程中,受到了根、茎和角果的 3 层过滤和阻隔作用,特别是茎对 Cd 的高转运系数,以及角果和籽粒对 Cd 的低转运系数,阻碍了 Cd 向籽粒中的转移.

3.2 油菜对 Cd 污染土壤微生物群落结构的影响

3.2.1 细菌群落物种丰度和多样性指数 表 3 中的数据是基于 97%的相似度得到的 OTU 聚类结果和多样性指数(Alpha-diversity),Alpha 多样性分析可以反映土壤细菌的群落结构和多样性,其中计算菌群丰度的指数有:Chao 和 ACE,计算菌群多样性的指数有:Shannon 和 Simpson,测序深度指数有 Coverage.可以看到,种了油菜的土壤(C)检测到的细菌 OTU 均高于未种植(CK)土壤,

OTU 数目最多的是 C₁ (2254),最少的是 CK₁ (1767),ACE、Chao 和 Shannon 也是如此.表明 Cd 污染改变了土壤微生物的群落结构,降低微生物的多样性,而在 Cd 污染的土壤种植油菜后,土壤微生物多样性有所提高,群落结构也更加复杂,有助于这一生态系统的稳定性.

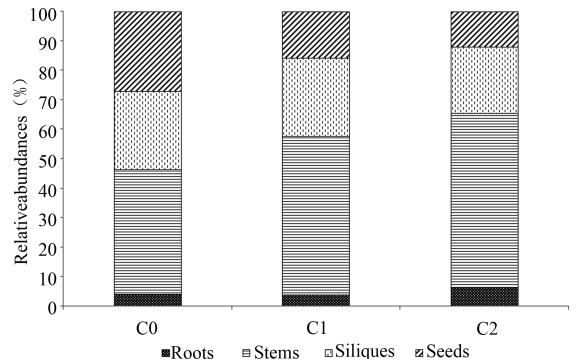


图 2 Cd 在油菜中的分布
Fig. 2 Distribution of Cd in oilseed rape cultivars

表 3 基于相似度为 97%的 OTUs 聚类和多样性指数

Tab. 3 Comparison of the estimated OTU richness and diversity indices for clustering at 97% identity

样品名称	外源镉浓度 (mg/kg)	序列结果		多样性指数 ^a			
		Total Reads	OTUs ^a	ACE	Chao	Shannon	Coverage
CK ₀	0	42925	1985	2117	2133	6.58	99.4%
CK ₁	1	34720	1767	1921	1954	6.34	99.2%
CK ₂	2	45002	1906	2059	2069	6.43	99.4%
C ₀	0	34645	2162	2362	2392	6.7	99.0%
C ₁	1	42787	2254	2409	2419	6.63	99.3%
C ₂	2	40289	2245	2405	2417	6.71	99.3%

3.2.2 细菌群落结构分析 通过与 Silva 数据库进行比对,得到了每一个 OTU 所对应的各个分类水平(界、门、纲、目、科、属、种)上的物种分类信息.在进行分类学分析的过程中,取 97%的相似度,以 *norank* 代表那些在数据库的相应的分类学水平没

有分类学信息的序列;以 *unclassified* 代表那些由于低于置信阈值而不能在数据库中进行分类的序列.经过比对,全部样品中的细菌可以分为 38 个门,325 个科,或者是 563 个属.物种相对丰度前十的门水平的细菌占全部微生物的 95%以上.

在分类学门水平(图 3),变形菌门(*Proteobacteria*)在所有样品中的丰度都是最高的,为 38.62% (CK₂) ~ 46.14% (CK₁);其后是拟杆菌(*Bacteroidetes*)和绿弯菌(*Chloroflexi*),它们各自的相对丰度分别为:11.93%~16.63%和 5.34%~12.31%。其他主要的有酸杆菌门(*Acidobacteria*)、放线菌门(*Actinobacteria*)、芽单胞菌门(*Gemmatimonadetes*)和 *Candidate_division_TM7*, 占总数的 25~33%。在中等 Cd 浓度水平(1 mg/kg),变形菌门和拟杆菌门的相对丰度均显著高于其他 2 个 Cd 浓度水平(0 和 2 mg/kg)的,绿弯杆菌门的相对丰度表现与之相反。通过比较 CK 和 C 组微生物在不同 Cd 浓度下相对丰度的表现,可以发现 Cd 污染降低了大部分土壤微生物的相对丰度,破坏了群落结构的稳定性,而通过种植油菜却可以削弱 Cd 污染的这种破坏作用,进而恢复土壤微生物多样性。

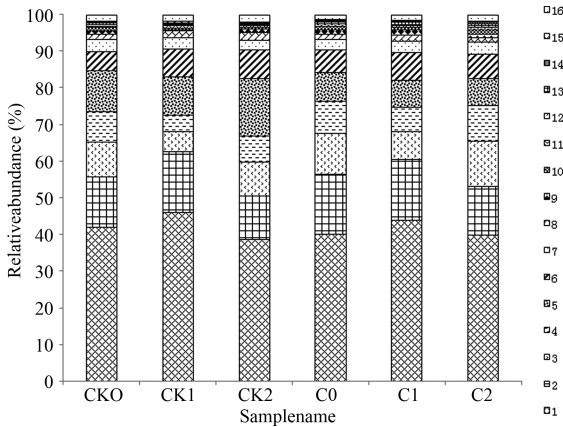


图 3 细菌群落结构组分图(门水平)

Fig. 3 Bacterial community structure composition (at phylum level).

1: *Proteobacteria*, 2: *Bacteroidetes*, 3: *Chloroflexi*, 4: *Acidobacteria*, 5: *Actinobacteria*, 6: *Gemmatimonadetes*, 7: *Candidate_division_TM7*, 8: *Firmicutes*, 9: *Verrucomicrobia*, 10: *Cyanobacteria*, 11: *Nitrospirae*, 12: *Deinococcus_Thermus*, 13: *Chlorobi*, 14: *Planctomycetes*, 15: *Fibrobacteres*, 16: *Others*.

在不同 Cd 浓度下 *Proteobacteria* 的相对丰度都是最高的,为进一步的了解 *Proteobacteria* 中的细菌丰度具体变化,我们绘制 *Proteobacteria* 在纲水平的群落结构组分图(图 4)。可以看到土壤样品中的变形菌门主要由 α -变形菌纲(*Alpha-proteobacteria*)、 β -变形菌纲(*Beta-proteobacteria*)、 γ -变形菌纲(*Gamma-proteobacteria*)和 δ -变形菌纲(*Delta-proteobacteria*)组成。在 CK 组中 *Alpha-proteobacteria* 所占的比例比 C 组的高,并且其相对丰度随 Cd 处理水平的增加而减少(CK₀ > CK₁

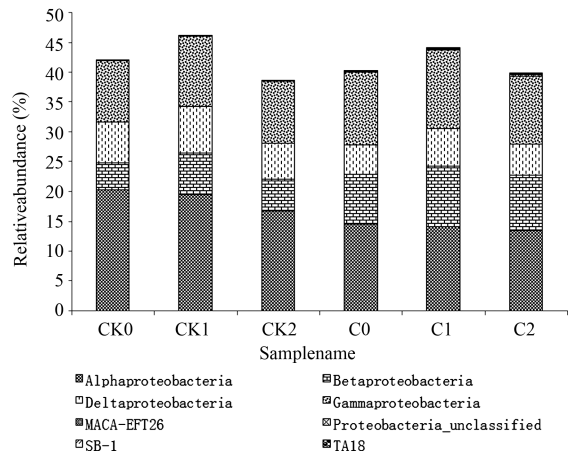


图 4 变形菌门群落结构(纲水平)

Fig. 4 *Proteobacteria* community structure (at class level)

> CK₂),在 C 组也是如此(C₀ > C₁ > C₂)。在中等 Cd 胁迫水平(1 mg/kg), *Beta-proteobacteria*, *Gamma-proteobacteria* 和 *Delta-proteobacteria* 的相对丰度菌显著高于其他 2 个 Cd 浓度水平(0 和 2 mg/kg),这三种菌的相对丰度随 Cd 浓度基本呈现一个先升高后下降的趋势。结果表明,Cd 污染降低了大部分微生物(*Beta-proteobacteria*, *Gamma-proteobacteria*, *Delta-proteobacteria*, *MACA-EFT26*, *Proteobacteria_unclassified*, *TA18*)的相对丰度,而种植油菜后这些微生物的相对丰度有所增加(图 4)。

在分析土壤微生物优势菌群时,以相对丰度在所有样品中均大于 1.00% 的属水平的微生物作为优势菌,经过筛选之后总共有 9 种(图 5)。在 CK 组中这 9 种微生物的相对丰度基本都是随 Cd 浓度的增加而呈现下降趋势,而 C 组中大部分微生物(6 种)的相对丰度都是先升高后下降,而且 C 组的优势菌的相对丰度都高于 CK 组,表明 Cd 污染和油菜都可以改变这些优势菌的相对丰度,其中 Cd 降低了这些微生物的相对丰度,而油菜可以增加这些优势菌群的相对丰度。结合前文油菜对土壤中 Cd 的吸附效果,推测是油菜缓解了 Cd 对土壤微生物的毒害,即油菜对 Cd 的吸收积累降低了土壤的 Cd 含量,从而降低 Cd 对土壤微生物的毒害,此外根系活动还为微生物提供适宜的生存环境。

4 讨论

镉在生物体内无任何生物学功能,属于非必需元素,具有高毒性、高流动性和长期性等特点,且极易被植物吸收并积累在各器官,并通过食物链危害

人类健康. 本研究结果表明, 油菜对镉的吸收途径主要是由根系吸收后再转运到地上部位, 成熟期油菜各个器官的 Cd 含量随外源 Cd 浓度的增加呈显著升高的趋势, 油菜茎中的 Cd 含量均高于油菜其他器官, 同时研究还发现, 油菜籽粒中的 Cd 含量远远低于其他器官中的含量, 推测这是由于植物的自我解毒防御功能所致, 土壤中的 Cd 向上转运的过程中, 经过根、茎和角果的 3 层过滤作用, 以及茎对 Cd 的高转运系数, 和角果与籽粒对 Cd 的低转运系数, 使得进入籽粒的 Cd 大幅下降, 这一特性有利于保证中度污染地区食品的安全性, 使得油菜用于修复 Cd 污染土壤成为可能.

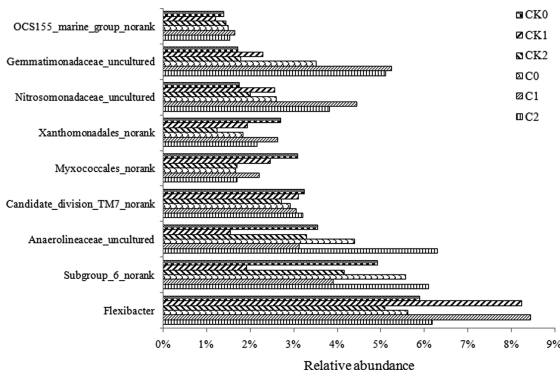


图 5 优势菌的相对丰度(属水平)

Fig. 5 Relative abundances of dominant bacteria (at genus level)

此外, 油菜属于十字花科, 植株中富含 S 元素, 是 Cd 高积累型植物^[9, 14], 本研究结果表明, 成熟期油菜不同器官 Cd 含量为茎 > 角果 > 根 > 籽粒, 对于 Cd 的单株积累量较高, 虽然不如那些 Cd 超积累植物, 但是油菜单季生物量高, 这也使得油菜对 Cd 污染土壤的单季净化率较高, 在我们的研究中油菜对土壤重金属 Cd 的综合去除率达到 22.75%~25.9%, 其中油菜单单独作用的去除效率为 6.841%~7.752%。我们在工业污染严重的大田的相关实验, 结果表明, 油菜对重金属污染土壤(1.571 mg/kg Cd) 的去除效果达到 60.8% (未发表)。Ebbs and Kochian^[14] 的研究结果表明, 油菜对重金属 Zn 浓度为 11000 mg/kg 的土壤净化率是超积累植物 *Thlaspi caerulescens* 的 4 倍, 最重要的原因就是 6 周内油菜的生物量达到了 *T. caerulescens* 的 10 倍. 成熟期油菜在本地的产量可以达到, 地上秸秆部分一般产量为 6000 kg/ha, 据此我们可以得到一个理论值, 即单季油菜地上秸秆部分吸镉 12561~23121 mg/ha(1~2 mg/kg Cd).

16s rDNA 存在于所有的细菌中, 且十分保

守, 是三界生物分类系统的基础^[15]. 本文采用 Illumina MiSeq 高通量测序技术对不同 Cd 处理水平下种植甘蓝型油菜和未种植土壤样品中的细菌 16s rDNA 序列进行测序, 获得了细菌的遗传与组成信息, 通过分析发现, 在空置组(CK 组)中, 随着 Cd 浓度增加土壤细菌群落的丰富度和多样性呈降低趋势; 而在种植油菜组(C 组)中, 土壤细菌群落的丰富度和多样性随 Cd 浓度的增加呈增加趋势; 相同 Cd 浓度水平下种植甘蓝型油菜的土壤细菌群落的丰富度和多样性均高于空置组; 说明甘蓝型油菜有助于恢复 Cd 污染土壤微生物多样性. 从优势菌群分布图可知, 油菜和 Cd 污染均导致了细菌群落的变化, 其中 Cd 降低了这些优势微生物的相对丰度, 而油菜可以增加这些菌群的相对丰度. 因此推测油菜的种植缓解了 Cd 对土壤微生物的毒害, 可能是油菜对 Cd 的吸收积累降低了土壤的 Cd 含量, 以及油菜根系分泌物的活化作用促进植物对 Cd 的吸收或固定作用降低有效态 Cd 对微生物的毒害, 此外根系活动还为微生物提供能源和适宜的生存环境.

研究表明, 油菜对 Cd 有一定程度的耐性和积累能力, 而且油菜还可以减弱 Cd 对土壤微生物结构影响, 并增加细菌群落的多样性, 有利于土壤生态系统的稳定性. 植物修复技术是当前环境修复领域一个比较有希望的技术^[16, 17]. 其关键是要找到一种生物量大、生长迅速且具有一定经济价值安全有效的植物替代现有的生物量小且多为草本植物的超积累植物, 以尽量缩短修复周期, 降低修复成本. 油菜基本上都具有这些特点, 高生物量, 对 Cd 有一定程度的耐性和积累能力, 此外, 油菜属于本地品种, 不存在环境风险, 而且籽粒中的 Cd 含量低, 也不存在食品安全问题, 所以可以用于中等程度污染土壤的修复.

参考文献:

- [1] 袁伟, 郭宗楼, 袁华. 污水灌溉的研究现状及利用前景分析[J]. 中国农村水利水电, 2005, 6: 19.
- [2] 陈志良, 仇荣亮, 张景书, 等. 重金属污染土壤的修复技术[J]. 环境保护, 2001, 8: 21.
- [3] Cunningham S D, Anderson T A, Schwab A P, et al. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants [J]. Adv Agron, 1996, 56: 55.
- [4] Mcgrath SP, Zhao J, Lombi E. Phytoremediation of metals, metalloids, and radionuclides [J]. Adv Agronomy, 2002, 75: 1.

- [5] Ben G A, Charles G, Hourmant A, *et al.* Physiological behaviour of four rapeseed cultivar (*Brassica napus* L.) submitted to metal stress[J]. CR Biol, 2009, 332: 363.
- [6] Hernández-Allica J, Becerril J M, Garbisu C. Assessment of the phytoextraction potential of high biomass crop plants [J]. Environ Pollut, 2008, 152: 32.
- [7] Cai Q. Zinc tolerance and accumulation in eight oil crops[J]. J Plant Nutr, 2010, 33: 982.
- [8] 王亭亭, 王中浩, 熊方建, 等. 铀胁迫对油菜的生长及抗氧化酶的影响[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2014, 51: 171.
- [9] 苏德纯, 黄焕忠. 油菜作为超累积植物修复镉污染土壤的潜力[J]. 中国环境科学, 2002, 22: 48.
- [10] 金美芳, 林明凤, 施翔. 镉胁迫对油菜种子萌发和根系生长的影响[J]. 种子, 2011, 30: 70.
- [11] Germida J J, Siciliano S D, de Freitas J R, *et al.* Diversity of root-associated bacteria associated with field-grown canola (*Brassica napus* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. FEMS Microbiol Eco, 1998, 26: 43.
- [12] Bloem J, Hopkins D W, Benedetti A, *et al.* Microbiological methods for assessing soil quality [M]. CABI Pub, 2006: 249.
- [13] 董林林, 赵先贵, 巢世军, 等. 镉污染土壤的植物吸收与修复研究[J]. 土壤与作物, 2008, 24: 292.
- [14] Ebbs S D, Kochian L V. Toxicity of zinc and copper to Brassica species; Implications for phytoremediation [J]. J Environ Qual, 1997, 26: 776.
- [15] 曾祥勇, 董雅舒, 胡贝, 等. 不同年份窖泥细菌 16S rDNA 系统发育分析[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2014, 51: 6.
- [16] Arduini I, Ercoli L, Mariotti M, *et al.* Response of miscanthus to toxic cadmium applications during the period of maximum growth[J]. Environ Exp Bot, 2006, 55: 29.
- [17] Anderson C, Moreno F, Meech J. A field demonstration of gold phytoextraction technology [J]. Miner Eng, 2005, 18: 385.