

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.01.017

孙崇, 刘芬, 陈子毓, 等. 巯基坡缕石对镉砷复合污染土壤钝化修复及微生物群落的影响. 土壤, 2024, 56(1): 128–134.

## 巯基坡缕石对镉砷复合污染土壤钝化修复及微生物群落的影响<sup>①</sup>

孙崇<sup>1</sup>, 刘芬<sup>1</sup>, 陈子毓<sup>1</sup>, 达胤臣<sup>1</sup>, 伍钧<sup>1</sup>, 梁学峰<sup>2</sup>, 徐敏<sup>1\*</sup>

(1 四川农业大学环境学院, 成都 611130; 2 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

**摘要:** 为探究巯基坡缕石对镉(Cd)-砷(As)复合污染土壤的修复效果及其对土壤生态功能的影响, 以 Cd-As 复合污染水稻土为研究对象, 探究了 1%、2% 巯基坡缕石添加对土壤理化性质、Cd 和 As 有效态的影响, 并采用高通量测序技术分析了不同处理对土壤微生物群落结构的影响。结果表明: 巯基坡缕石添加显著降低了土壤 pH, 其中 2% 处理下 pH 降低更明显。与对照相比, 1% 和 2% 巯基坡缕石处理下, 土壤有机质含量分别增加了 30.2%、60.9%, Cd 的有效态含量与毒性特性浸出量分别降低了 97.7%~98.3%、77.1%~92.7%, 而 As 的有效性未发生显著变化。巯基坡缕石添加对土壤微生物多样性及丰度无显著影响, 但属水平下 *Pseudanabaena\_NgrPSIn22* 和 *Pseudomonas* 的相对丰度显著降低了 85.4%~98.1%、75.3%~78.9%。巯基坡缕石处理下土壤微生物群落结构显著改变, 其中 pH 和 Cd 的有效性是显著影响因素。总之, 巯基坡缕石不仅能显著降低 Cd 有效性, 提高土壤有机质含量, 还会影响细菌群落结构, 增加土壤抗病菌丰度和减少固氮菌丰度。

**关键词:** 巯基坡缕石; 镉砷复合污染土壤; 微生物群落; 生态功能; 环境因子

中图分类号: X53 文献标志码: A

### Effects of Mercaptopalygorskite on Remediation of Cd-As Co-contaminated Soil and Its Microbial Community

SUN Chong<sup>1</sup>, LIU Fen<sup>1</sup>, CHEN Ziyu<sup>1</sup>, DA Yinchen<sup>1</sup>, WU Jun<sup>1</sup>, LIANG Xuefeng<sup>2</sup>, XU Min<sup>1\*</sup>

(1 College of Environmental Sciences, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2 Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

**Abstract:** To explore the remediation effects of mercaptopalygorskite on cadmium (Cd)-arsenic (As) co-contaminated soil and its microbial community, in this study, 1% and 2% mercaptopalygorskite were applied to Cd-As co-contaminated paddy soil to explore their effects on soil properties, the availabilities of Cd and As. High-throughput sequencing technology was also used to explore the effect of mercaptopalygorskite on microbial community. The results showed that the addition of mercaptopalygorskite significantly reduced soil pH, and the effect was more obvious under 2% mercaptopalygorskite treatment. Compared with the control, soil organic matter contents increased significantly by 30.2% and 60.9% under 1% and 2% mercaptopalygorskite treatments, respectively, the concentration of available Cd and toxicity characteristic leaching procedure (TCLP) of Cd was reduced by 97.7%–98.3% and 77.1%–92.7% under 1% and 2% mercaptopalygorskite treatments, respectively. Whereas the concentration of available As changed insignificantly. Furthermore, the addition of mercaptopalygorskite had no significant effect on soil microbial diversity and richness, however, the relative abundance of *Pseudanabaena\_NgrPSIn22* and *Pseudomonas* genuses decreased by 85.4%–98.1% and 75.3%–78.9%, respectively. Mercaptopalygorskite addition significantly altered soil microbial community structure, with pH and Cd availability being the main factors affecting microbial community structure. In conclusion, mercaptopalygorskite can not only significantly reduce the availability of Cd and promote soil organic matter content, but also impact soil microbial community structure and increase the abundance of disease-resistant bacteria and reduce the abundance of azotobacter.

**Key words:** Mercaptopalygorskite; Cd-As co-contaminated soil; Microbial community; Ecological function; Environmental factor

①基金项目: 国家自然科学基金项目(42107017)和成都市科技项目(2020-YF09-00023-SN 和 2020-YF09-00012-SN)资助。

\* 通讯作者(xumin\_xyz@126.com)

作者简介: 孙崇(2001—), 男, 四川广元人, 硕士研究生, 主要从事土壤污染治理研究。E-mail: sc108930@163.com

土壤重金属污染是全球面临的重要环境问题。大气沉降、工农业以及采矿业等自然与人为活动使得大量重金属进入土壤<sup>[1-2]</sup>，其中土壤镉(Cd)和砷(As)的污染较为严重，且多以复合污染形式存在<sup>[3]</sup>。我国 Cd 的点位超标率为 7.0%，As 的点位超标率为 2.7%<sup>[4]</sup>。Cd 在环境中易迁移，通过食物链进入人体，导致“痛痛病”，威胁人体健康<sup>[5-6]</sup>。As 通过根系进入作物组织，抑制作物生长，导致作物减产<sup>[7]</sup>。更重要的是，As 会引起人体系统相关疾病，有致癌风险<sup>[8]</sup>。而 Cd、As 在土壤中呈现相反的活性，导致二者复合污染土壤的修复具有较大难度<sup>[3, 9]</sup>。因此，寻找协同修复 Cd、As 污染土壤的方法对农业环境健康与人类健康具有重要意义。

坡缕石为硅镁酸盐黏土矿物，在自然界中储量丰富，具有丰富的表面官能团，但其对 Cd 的固定效果不佳<sup>[10]</sup>。采用巯基改性的坡缕石对水中以及土壤中的 Cd、Pb 和 Zn 等重金属具有良好的固定效果<sup>[11-12]</sup>。Liang 等<sup>[12]</sup>研究显示，巯基改性可显著提高坡缕石对 Cd<sup>2+</sup>的吸附。然而，巯基改性的坡缕石对复合重金属污染土壤的钝化效果尚不清楚，尤其是对 Cd-As 复合污染土壤的钝化还鲜见报道。

农田土壤修复后对土壤生态功能的影响是评价其修复效果重要的参考。微生物是土壤中最活跃的成分，参与土壤物质循环，对土壤肥力、酶活性的提升，以及维持土壤生态功能等具有重要意义<sup>[13]</sup>。微生物丰度及多样性受重金属影响较大。一般来说，重金属污染会抑制微生物活动，降低微生物丰度与多样性<sup>[14]</sup>，从而影响土壤生态功能。因此，在巯基坡缕石修复 Cd-As 复合污染土壤的过程中，探究微生物多样性及群落结构的变化对土壤生态功能的影响具有重要意义。然而目前关于巯基坡缕石对土壤生态功能影响的报道较少。

基于此，本研究以土培试验为依托，通过添加不同剂量的巯基坡缕石，分析巯基坡缕石对土壤基本性质，Cd、As 固定效果和土壤生态功能的影响，以为巯基坡缕石在土壤修复的广泛应用提供理论及数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试土壤为 Cd-As 复合污染土壤，采自绵竹市某工业园区附近农田(104°15'17"E, 31°25'6"N)的表层(0~20 cm)，土壤类型为水稻土。将土壤在室温下自然风干，清除土壤中的石块和植物残体，并分别过

2、0.149 mm 的尼龙筛，备用。供试土壤基本理化性质为：pH 8.82，全磷 0.6 g/kg，全钾 11.58 g/kg，全氮 1.3 g/kg，有机质 20.59 g/kg，总砷 64.07 mg/kg，总镉 2.74 mg/kg。

供试修复材料为巯基坡缕石，利用高速剪切溶胶-凝胶法制得，由农业农村部环境保护科研监测所提供。巯基坡缕石的基本理化性质为：pH 7.68，总镉 0.12 mg/kg，总铜 6.99 mg/kg，总锌 6.84 mg/kg，SiO<sub>2</sub> 644 g/kg，MgO 205 g/kg，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 104 g/kg，Na<sub>2</sub>O 15 g/kg，CaO 12 g/kg。巯基坡缕石表面负载巯基(-SH)<sup>[12, 15]</sup>。

### 1.2 试验设计

试验设置 3 个处理：①CK：不添加巯基坡缕石；②OC1：添加 1% (m/m)巯基坡缕石；③OC2：添加 2% (m/m)巯基坡缕石。每个处理设置 3 次重复。具体操作如下：称取 100 g 过 2 mm 筛的风干污染土壤于 500 mL 培养瓶中，加入巯基坡缕石，混匀，随后加入蒸馏水至田间饱和持水量的 60%，置于温室大棚中于自然光照条件下进行培养试验。每天采用称重法补充水分，培养 135 d 后采样。

培养结束后，取出约 10 g 土壤于离心管中在 -80℃ 环境下保存，用于分析土壤微生物指标。剩余部分土壤风干后过 100 目和 10 目筛，于密封袋在室温下保存，用于土壤基本理化性质分析。

### 1.3 样品测定

土壤 pH 采用电位法测定；阳离子交换量(CEC)采用乙酸铵交换法测定；土壤有机质(OM)采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定；土壤全氮(TN)采用半微量凯氏法测定；土壤全磷(TP)和全钾(TK)采用 HClO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 消煮后分别用钼锑抗比色法和火焰光度计法测定；有效磷采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定；土壤 Cd、As 和 Fe 总量采用硝酸-氢氟酸-高氯酸进行消解，分别使用电感耦合等离子体光谱仪(Nex ION 300x)、原子荧光仪(AFS2202E)和全谱仪(ICAP5110)测定。

Cd 和 As 的毒性特性浸出(Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP)采用 pH 为 2.64 ± 0.05 的 0.1 mol/L 醋酸溶液，按照土液比 1:20(m:V)浸提 18 h，获得浸出液并调节 pH 至 2，测定浸出液中 Cd 和 As 含量。有效态 Cd 和 As 分别用 DTPA 浸提剂和 0.5 mol/L NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 浸提剂提取后测定。

土壤铁(Fe)形态采用分级提取法测定，分为 5 个形态：交换态、络合态、无定形态、结晶态、残渣态，分别采用 1 mol/L MgCl<sub>2</sub> 溶液(pH 7)、0.1 mol/L 焦磷

酸钠溶液(pH 10)、0.2 mol/L 酸性草酸铵(包含 0.2 mol/L 草酸和 0.2 mol/L 草酸铵, pH 3.2)、DCB (Dithionite-citrate-bicarbonate)溶液、硝酸-氢氟酸-高氯酸进行提取。所提取溶液采用邻菲罗啉比色法测定 Fe 含量。

采用试剂盒(QIAquick Gel Extraction Kit)进行土壤 DNA 提纯,并在 Illumina MiSeq 平台进行测序。微生物的高通量测序由美因健康科技(北京)有限公司完成。

#### 1.4 数据处理

使用 Excel 2019 和 SPSS 26.0 对试验数据进行整理与统计分析,使用单因素方差分析中的 LSD 检验法对数据进行显著性分析( $P < 0.05$ )。用 Origin 2021 及 Canoco 5 作图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 巯基坡缕石添加对土壤理化性质的影响

添加巯基坡缕石显著降低了土壤 pH,并显著提

升了土壤有机质含量(表 1)。与 CK 相比,OC1 与 OC2 处理下土壤 pH 分别降低了 0.81、1.04 个单位( $P < 0.05$ ),这可能是由于巯基的添加使土壤中有机的含量增加,从而降低土壤 pH<sup>[11]</sup>。土壤有机质作为土壤肥力与缓冲能力的重要指标,其含量对于土壤健康具有重要意义<sup>[16]</sup>。土壤培养后,与培养前相比,CK 处理下土壤有机质下降了 42.1%,而与 CK 相比,OC1 和 OC2 处理下土壤有机质分别增加了 30.2%、60.9% ( $P < 0.05$ )。巯基坡缕石主要成分为无机矿物,添加巯基坡缕石不会直接增加土壤有机质含量,土壤有机质含量的变化可能是由于坡缕石改性后,巯基包裹着坡缕石,增加团粒结构,包裹了更多的有机物质,减少了有机质与微生物的接触,从而降低了有机质的消耗<sup>[17]</sup>。这表明添加巯基坡缕石有利于保持土壤肥力与缓冲能力。此外,Zhao 等<sup>[18]</sup>研究发现,相较于其他含硫物质如  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  和硫单质,巯基可显著提高土壤溶解性有机碳,这也解释了添加巯基坡缕石后有机质显著提高的现象。

表 1 不同处理下土壤理化性质变化  
Table 1 Soil physiochemical properties under different treatments

处理	pH	全磷(g/kg)	全钾(g/kg)	全氮(g/kg)	有机质(g/kg)	有效磷(mg/kg)	CEC(cmol/kg)
CK	8.82 ± 0.34 a	2.91 ± 0.17 a	5.75 ± 0.08 a	0.82 ± 0.02 a	11.92 ± 0.64 c	101.39 ± 3.34 a	4.80 ± 0.94 a
OC1	8.01 ± 0.04 b	2.65 ± 0.06 a	5.79 ± 0.08 a	0.82 ± 0.06 a	15.52 ± 0.84 b	92.89 ± 3.51 a	4.87 ± 0.12 a
OC2	7.78 ± 0.08 b	2.69 ± 0.16 a	5.80 ± 0.21 a	0.87 ± 0.02 a	19.18 ± 0.46 a	96.94 ± 3.74 a	4.98 ± 0.17 a

注:表中同列不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ );下同。

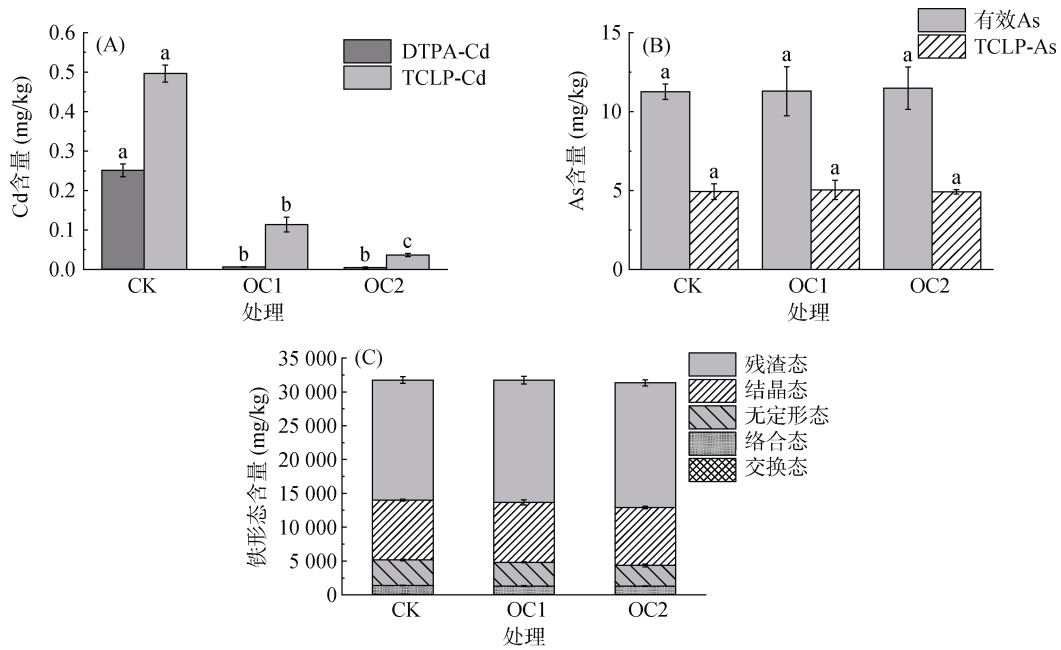
### 2.2 巯基坡缕石添加对土壤 Cd 和 As 有效性的影响

对于农田土壤,土壤中重金属有效性直接影响农产品中重金属含量,通常采用 DTPA 浸提测定重金属生物有效性。同时对于重金属污染土壤,TCLP 量是其修复效果的重要指标。如图 1 所示,与 CK 相比,添加巯基坡缕石后,土壤 DTPA-Cd 与 TCLP-Cd 含量均显著降低,分别降低了 97.7%~98.3% 和 77.1%~92.7% ( $P < 0.05$ ),表明巯基坡缕石对 Cd 具有较好的固定效果。这一结果与 Wang 等<sup>[19]</sup>的研究结果一致。相比热改性坡缕石<sup>[10]</sup>、酸活化坡缕石<sup>[20]</sup>,本研究的巯基坡缕石对 Cd 有效性抑制效果具有明显的优势(表 2)。

通常情况下,土壤金属阳离子有效态含量与土壤 pH、CEC 呈负相关性<sup>[15]</sup>,但本研究中,土壤 CEC 无显著变化,pH 显著降低(表 1),而 Cd 有效性显著降低,这说明坡缕石不是通过调节土壤 pH 和 CEC 来降低 Cd 有效性。Cd 有效性显著降低可能是因为  $\text{Cd}^{2+}$  为软酸类金属离子,其对含硫(S)配体具有亲和性<sup>[12]</sup>。

本研究所用的巯基坡缕石硫的含量为 2.72 mmol/g,巯基坡缕石表面所负载的巯基易与  $\text{Cd}^{2+}$  发生配位络合反应,从而使  $\text{Cd}^{2+}$  转变为更稳定的状态<sup>[21]</sup>。此外,土壤有机质是影响重金属有效性的重要因素,重金属通过与有机质中的羧基和羟基等含氧官能团发生吸附络合等作用<sup>[22]</sup>,从而固定于有机质表面。本研究中,添加巯基坡缕石显著减少了土壤有机质的消耗,从而保存了更多土壤有机质中的官能团与较为活泼的组分含量,有利于土壤对 Cd 的吸附。

土壤中 As 的有效性受土壤氧化还原条件、共存离子和 Fe 形态等影响。As 是一种多价态元素,在还原条件下,As(V)被还原为 As(III),其有效性与毒性均大幅增加。此外,由于磷酸根与砷酸根性质类似,会竞争砷酸根与土壤的吸附点位。Fathi-Gerdeldani 等<sup>[23]</sup>研究发现,在向土壤添加磷酸盐后,即使在氧化环境下,As 的释放量仍然有所提高。此外,土壤中 As 与 Fe 具有显著的相关性,As 通常以 As(V)的形式固定于 Fe 矿物中,当处于淹水环境时 Fe(III)(氢



(图中不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ ))

图 1 不同处理下 Cd(A)和 As(B)的有效态含量变化及铁形态差异(C)

Fig. 1 Concentrations of available Cd (A) and As (B) and iron fractions (C) under different treatments

表 2 不同稳定剂对镉污染土壤修复效果比较  
Table 2 Remediation effects of different stabilizers on cadmium-contaminated soil

序号	稳定剂	剂量(%)	钝化率(%)	参考文献
1	铁锌改性秸秆生物炭	3	57.5	[21]
2	热改性坡缕石	3	32.6	[10]
3	酸改性坡缕石	2	31.1	[20]
4	巯基坡缕石	0.3	76.5	[15]

氧化物发生还原溶解,使吸附固定的 As 释放到环境中还原,溶解性与移动性提高<sup>[24]</sup>。本研究中,巯基坡缕石的添加未显著改变 As 有效性,主要是因为有机黏土本身含有大量带负电荷的胶体,其添加对以阴离子形式存在的 As 的有效性无显著影响<sup>[25]</sup>。同时,本研究中土壤含水量为田间持水量的 60%,土壤呈现氧化环境,不利于 As 的还原溶解。此外,由图 1 和表 1 可知,巯基坡缕石的添加,并未使土壤中 Fe 形态与有效磷的含量发生显著变化,这表明土壤 Fe 矿

物并未发生明显变化,且土壤中磷酸根无显著差异,因此对 As 的有效性无显著影响。综上,添加巯基坡缕石对土壤 As 有效性无显著影响。

### 2.3 巯基坡缕石添加对土壤微生物的影响

**2.3.1 对微生物多样性与丰度的影响** 土壤微生物多样性与土壤生态系统的功能多样性呈正相关关系<sup>[13]</sup>,因此土壤微生物多样性对于评价土壤健康至关重要。本研究中,添加巯基坡缕石后,土壤 OTUs(表 3)有所提高,但并未呈现显著差异,这表明添加有机黏土有利于土壤微生物丰度的增加,但这种增加的作用有限,Chao1 指数的变化同样也说明这一点。Shannon 指数与 Simpson 指数表示微生物多样性高低,其数值越大,微生物多样性越好。由表 3 可得,1% 巯基坡缕石处理下 Shannon 指数和 Simpson 指数有所增加,但未出现显著差异。Li 等<sup>[11]</sup>将巯基坡缕石添加进 Cd 污染土壤后,也发现各指标数值差异不大,对细菌群落多样性影响较小。

表 3 不同处理下微生物多样性指数

Table 3 Microbial diversity indexes under different treatments

处理	OTUs	Chao1	Shannon	Simpson
CK	1 145.0 ± 81.0 a	1 152.8 ± 82.9 a	7.75 ± 0.57 a	0.96 ± 0.02 a
OC1	1 274.0 ± 236.0 a	1 279.4 ± 235.8 a	8.61 ± 0.27 a	0.99 ± 0.00 a
OC2	1 231.5 ± 71.5 a	1 241.7 ± 71.6 a	7.63 ± 0.01 a	0.95 ± 0.01 a

**2.3.2 对微生物群落结构及生态功能的影响** 为了进一步分析巯基坡缕石对土壤生态的影响,探讨了

不同处理下门水平和属水平下细菌丰度的变化。图 2A 显示,变形菌门(Proteobacteria)(28.0% ~ 52.5%)、

厚壁菌门(Firmicutes)(15.8% ~ 30.0%)、放线菌门(Actinobacteriota)(10.3% ~ 13.5%)为各处理下土壤的优势菌门,这与其对重金属具有较强的耐受能力有关<sup>[26]</sup>。变形菌门广泛存在于 Cd 污染土壤中,Wang 等<sup>[19]</sup>在碱性 Cd 污染土壤中发现变形菌门占 28.9% ~ 30.8%; Li 等<sup>[11]</sup>用巯基坡缕石修复土壤 Cd 污染时,变形菌门占 38.1% ~ 41.8%。此外,变形菌门、厚壁菌门和放线菌门除耐受 Cd 之外,还是耐砷细菌<sup>[26]</sup>。本研究土壤为 Cd-As 复合污染土壤,因此耐砷的变形菌门、厚壁菌门和放线菌门微生物的丰度较高。与 CK 相比,变形菌门相对丰度在 OC2 处理下提高了 53.4%( $P < 0.05$ ),这可能与硫循环密切相关。硫循环过程离不开硫代谢菌的参与,如硫杆菌可氧化土壤中的硫,而硫代谢菌属于变形菌门<sup>[19, 27]</sup>。添加巯基坡缕石会引入大量巯基,在促进硫循环的同时也会刺激硫代谢菌生长,从而提高变形菌门丰度。

值得注意的是,添加巯基坡缕石后蓝藻细菌门(Cyanobacteria)在 OC1 和 OC2 处理下相对丰度分别降低了 73.0% 和 94.3%( $P < 0.05$ )。蓝藻为光自养微生物,在众多环境中被发现,包括重金属污染区域<sup>[28]</sup>。如 Anjana 等<sup>[29]</sup>从纺织厂重金属污染土壤中分离出钙质氮球菌和衣球菌两种蓝藻菌,并用于 Cr(VI)的吸附。同时,重金属除会对微生物产生毒害外,一些重金属如 Cu、Zn、Mn 等是微生物生长过程中必要的

微量元素<sup>[28]</sup>,对微生物生长代谢至关重要。添加巯基坡缕石后,不仅会固定 Cd,还会吸附环境中的 Cu<sup>[30]</sup>等微量元素,这可能抑制蓝藻的生长。

除门水平外,各处理间细菌属水平下也具有显著差异。图 2B 显示,假鱼腥蓝细菌属(*Pseudanabaena\_NgrPSIn22*)(0.22% ~ 11.6%)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)(6.17% ~ 9.18%)、鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)(3.93% ~ 8.73%)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)(1.22% ~ 5.79%)、溶杆菌属(*Lysobacter*)(4.26% ~ 21.38%)为各处理下土壤优势细菌。与 CK 相比,OC1、OC2 处理下假鱼腥蓝细菌属相对丰度显著降低,分别降低了 85.4% 和 98.1%( $P < 0.05$ ),这主要是因为假鱼腥蓝细菌属适合在偏碱性环境下生存,而巯基坡缕石处理下土壤 pH 为 7.78 ~ 8.10(表 1),不利于其生长,从而导致其相对丰度下降<sup>[31]</sup>。假单胞菌属对众多污染物,如重金属、抗生素和无机化合物等具有较好的耐受性<sup>[32]</sup>。本研究中,与 CK 相比,OC1、OC2 处理下假单胞菌属相对丰度分别下降了 78.9%、75.3%( $P < 0.05$ ),这是由于假单胞菌属对 pH 敏感,适合在较高的 pH 下存活<sup>[32]</sup>。本研究中,随着巯基坡缕石的增加,土壤 pH 逐渐降低,不利于假单胞菌生长。此外,与 CK 相比,OC2 处理下溶杆菌属丰度提高了 312%( $P < 0.05$ ),这是由于添加巯基坡缕石后土壤有机质含量显著提高,而有机质含量高的环境有利于溶杆菌生长<sup>[33]</sup>。

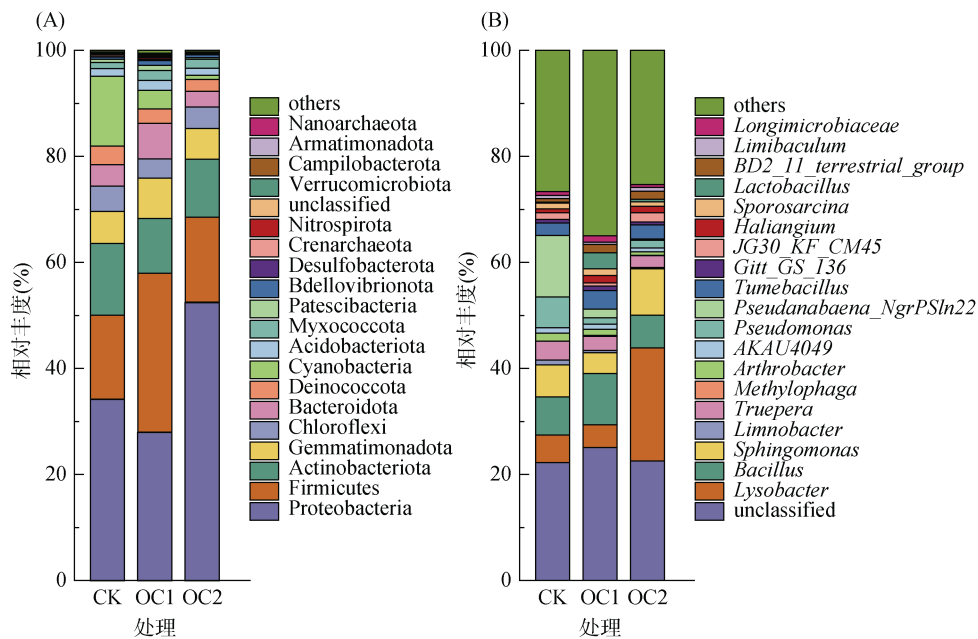


图 2 不同处理下门水平(A)和属水平(B)的土壤微生物群落组成

Fig. 2 Soil microbial community compositions at phylum (A) and genus (B) levels under different treatments

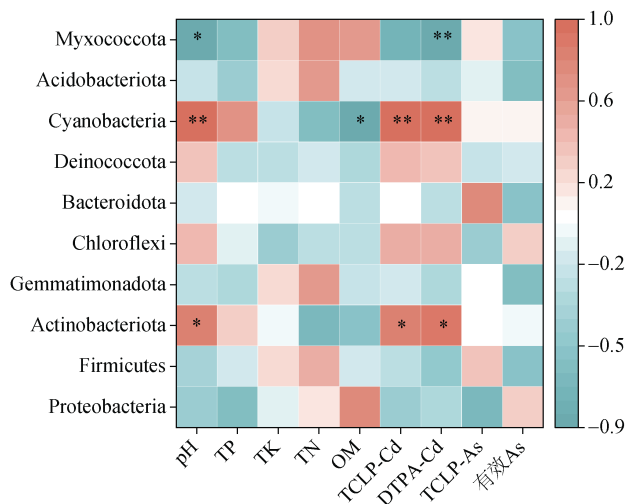
综上,巯基坡缕石会显著改变土壤细菌优势菌群,影响土壤生态功能,如蓝藻细菌门中分布着大量

固氮菌,固氮菌可以提高土壤中氮化合物含量,尤其是无机氮。本研究中的假鱼腥蓝细菌属为固氮菌属,



巯基坡缕石添加后,其相对丰度显著降低,可能削弱土壤氮循环<sup>[34]</sup>。此外,溶杆菌与假单胞菌可与病原微生物竞争营养物质,同时分泌可抑制植物病害的代谢物,起到防治作物病害的作用<sup>[35]</sup>,对维护农田土壤健康至关重要。本研究中,溶杆菌属相对丰度显著增加,而假单胞菌相对丰度显著降低,二者的相反变化对土壤健康的影响还需进一步研究验证。

**2.3.3 环境因子与微生物群落结构的相关性** 为了进一步明确环境因子与土壤微生物群落的关系,对门水平的主要细菌与土壤理化因子进行 Pearson 相关性分析(图 3)。结果显示, pH 和 Cd 的有效性是影响微生物群落的重要因素。与大数研究相同,本研究中 pH 为影响微生物的显著因素,这是由于 pH 能引起土壤重金属有效性、有机质腐殖化和土壤酶活性等的变化<sup>[32]</sup>。同时, pH 是微生物生长的限制因素,如本研究中的蓝藻细菌门更偏好碱性环境,巯基坡缕石的添加降低了土壤 pH,使蓝藻生长环境恶化,相对丰度降低,与 Rangsayatorn 等<sup>[31]</sup>的研究一致。本研究中的蓝藻细菌门与放线菌门丰度和 Cd 的有效性呈显著负相关,这是由于其通过特殊的代谢能力减少重金属对自身的毒性<sup>[27]</sup>。此外,添加巯基坡缕石后, Cd 的有效性降低, Cd 对粘球菌门(Myxococcota)的毒性降低,因此粘球菌门丰度升高。然而,有机质对微生物群落的影响并没有产生显著影响,与前人研究不一致。这可能是由于巯基坡缕石引起的 pH 与 Cd 的有效性变化对微生物群落影响强于有机质的影响,这说明巯基坡缕石通过显著改变土壤 pH 与 Cd 的有效性对微生物群落产生影响。



(网格中的星号表示 Pearson 相关性的显著性水平:  
\*\* $P < 0.01$ , \* $P < 0.05$ )

图 3 环境因子与微生物群落的 Pearson 相关性

Fig. 3 Pearson correlations between microbial community and environmental parameters

### 3 结论

巯基坡缕石可显著降低 Cd-As 污染土壤中 Cd 的有效性,其中 2% 巯基坡缕石处理效果更佳。添加巯基坡缕石可显著降低土壤 pH,提高土壤有机质含量,表明巯基坡缕石可改善土壤质量。添加巯基坡缕石后,土壤微生物群落结构显著改变,土壤固氮菌丰度显著降低,抗病菌丰度显著增加,其中 pH 和 Cd 的有效性是影响微生物群落结构的主要因素。

### 参考文献:

- [1] Xu D M, Fu R B, Wang J X, et al. Chemical stabilization remediation for heavy metals in contaminated soils on the latest decade: Available stabilizing materials and associated evaluation methods — A critical review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 321: 128730.
- [2] 曹锐,王悦,陈爽,等. 镉砷复合污染水稻土原位钝化修复技术研究进展[J]. *土壤学报*, 2023, 60(3): 657–672.
- [3] 王一,王松,施柳,等. 不同稳定化材料对镉砷复合污染土壤稳定化修复效果研究[J]. *土壤通报*, 2022, 53(5): 1203–1211.
- [4] 杜衍红,王向琴,刘传平,等. 铁改性木本泥炭对镉砷复合污染稻田的修复效果研究[J]. *农业现代化研究*, 2021, 42(2): 311–320.
- [5] 张盛楠,黄亦玫,陈世宝,等. 不同外源物质对镉砷复合污染胁迫下油菜生理指标和镉砷积累的影响[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(7): 2214–2222.
- [6] Wang Y L, Xu Y M, Sun G H, et al. Comparative effects of *Tagetes patula* L. extraction, mercapto-palygorskite immobilisation, and the combination thereof on Cd accumulation by wheat in Cd-contaminated soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 224: 112639.
- [7] 李英,商建英,黄益宗,等. 镉砷复合污染土壤钝化材料研究进展[J]. *土壤学报*, 2021, 58(4): 837–850.
- [8] Liao X, Li Y M, Miranda-Avilés R, et al. *In situ* remediation and *ex situ* treatment practices of arsenic-contaminated soil: An overview on recent advances[J]. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 2022, 8: 100157.
- [9] 彭瑜,王海娟,王宏斌. 农田土壤砷、镉协同钝化修复的研究进展[J]. *土壤*, 2021, 53(4): 692–699.
- [10] 陶玲,管天成,刘瑞珍,等. 热改性坡缕石对土壤 Cd 污染的钝化修复研究[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(4): 782–790.
- [11] Li X Z, Jia R, Lu X Z, et al. The use of mercapto-modified palygorskite prevents the bioaccumulation of cadmium in wheat[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 417: 125917.
- [12] Liang X F, Xu Y M, Tan X, et al. Heavy metal adsorbents mercapto and amino functionalized palygorskite: Preparation and characterization[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2013, 426: 98–105.

- [13] 朱永官, 彭静静, 韦中, 等. 土壤微生物组与土壤健康[J]. 中国科学: 生命科学, 2021, 51(1): 1–11.
- [14] 杨素勤, 魏森, 张彪, 等. 连续施用改性生物质炭对镉铅土壤修复效果及其对微生物群落结构的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1460–1471.
- [15] Wang Y L, Xu Y M, Liang X F, et al. Effects of mercapto-palygorskite on Cd distribution in soil aggregates and Cd accumulation by wheat in Cd contaminated alkaline soil[J]. Chemosphere, 2021, 271: 129590.
- [16] 李博, 赵琼, 毛兵, 等. 我国东部主要类型土壤酸缓冲能力的影响因素[J]. 生态学杂志, 2021, 40(12): 3901–3910.
- [17] 李玉龙. 巯基改性坡缕石钝化镉污染土壤及微生物学特征研究[D]. 保定: 河北大学, 2020.
- [18] Zhao M, Liu X W, Li Z T, et al. Inhibition effect of sulfur on Cd activity in soil-rice system and its mechanism[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 407: 124647.
- [19] Wang Y L, Xu Y M, Huang Q Q, et al. Effect of sterilization on cadmium immobilization and bacterial community in alkaline soil remediated by mercapto-palygorskite[J]. Environmental Pollution, 2021, 273: 116446.
- [20] 陶玲, 刘伟, 刘瑞珍, 等. 酸活化坡缕石对土壤中 Cd 的钝化效果研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2021, 40(4): 795–803.
- [21] 武晓微, 翟文珺, 高超, 等. 钝化剂对土壤性质及镉生物有效性的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(3): 562–569.
- [22] Yang T T, Xu Y M, Huang Q Q, et al. An efficient biochar synthesized by iron-zinc modified corn straw for simultaneously immobilization Cd in acidic and alkaline soils[J]. Environmental Pollution, 2021, 291: 118129.
- [23] Fathi-Gerdelidani A, Towfighi H, Shahbazi K. Kinetic studies on arsenic release from geogenically enriched soils under oxidized and reduced conditions[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2022, 242: 107083.
- [24] 钟松雄, 尹光彩, 陈志良, 等. 水稻土中砷的环境化学行为及铁对砷形态影响研究进展[J]. 土壤, 2016, 48(5): 854–862.
- [25] Sun Y C, Wang T T, Bai L, et al. Application of biochar-based materials for remediation of arsenic contaminated soil and water: Preparation, modification, and mechanisms[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10(5): 108292.
- [26] 吴丹. 抗砷细菌的筛选、促生和抗砷基因的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- [27] Li J, Wu B, Luo Z, et al. Immobilization of cadmium by mercapto-functionalized palygorskite under stimulated acid rain: Stability performance and micro-ecological response[J]. Environmental Pollution, 2022, 306: 119400.
- [28] Chakdar H, Thapa S, Srivastava A, et al. Genomic and proteomic insights into the heavy metal bioremediation by cyanobacteria[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 424(Pt C): 127609.
- [29] Anjana K, Kaushik A, Kiran B, et al. Biosorption of Cr(VI) by immobilized biomass of two indigenous strains of cyanobacteria isolated from metal contaminated soil[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 148(1/2): 383–386.
- [30] Cao J S, Wang C, Fang F, et al. Removal of heavy metal Cu(II) in simulated aquaculture wastewater by modified palygorskite[J]. Environmental Pollution, 2016, 219: 924–931.
- [31] Rangsayatorn N, Upatham E S, Kruatrachue M, et al. Phytoremediation potential of *Spirulina (Arthrospira) platensis*: Biosorption and toxicity studies of cadmium[J]. Environmental Pollution, 2002, 119(1): 45–53.
- [32] Qian X, Lü Q X, He X S, et al. *Pseudomonas* sp. TCd-1 significantly alters the rhizosphere bacterial community of rice in Cd contaminated paddy field[J]. Chemosphere, 2022, 290: 133257.
- [33] Huang X W, Yang X L, Lin J H, et al. Biochar alleviated the toxicity of atrazine to soybeans, as revealed by soil microbial community and the assembly process[J]. Science of the Total Environment, 2022, 834: 155261.
- [34] 张金丽. 固氮蓝藻对水稻生长和酸性土壤微生物群落的影响研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- [35] 刘岳飞, 吴人敏, 张传进, 等. 地膜对植椒土壤生物学特性和细菌多样性的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 986–993.