

简介

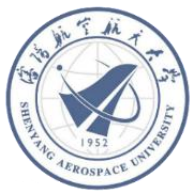


魏砾宏教授，博士生导师
辽宁省清洁能源重点实验室副主任
能源环境分析测试中心副主任

❖ 研究领域为能源和环保，重点开展大气污染控制及污水处理工艺的相关研究，主要在碳基能源清洁低碳利用、污水处理工艺等方面开展理论探索及技术开发。新的方向是**污染土壤的修复技术**。

❖ 主持及参与国家级省部级项目30余项，**主持国家重点研发计划专项子课题、航空科学基金，省重点专项、省自然科学基金、辽宁省教育厅项目、省/市创新人才项目等项目10余项。**

❖ 发表学术论文80余篇，SCI/EI收录论文47篇，**1篇ESI高被引论文。授权发明专利5件。获辽宁省科技进步二等奖1项，辽宁省科技进步三等奖2项。作为技术负责人参与2个团体标准的制定。**



沈阳航空航天大学
SHANGY AEROSPACE UNIVERSITY



能源与环境学院
ENERGY AND ENVIRONMENT

土壤重金属污染及修复技术研究

魏砾宏 教授/博士生导师



第一届岩土工程与可持续发展技术论坛

2025年4月11日

01 | **我国土壤重金属污染现状**

02 | **土壤重金属污染修复技术**

03 | **污泥蛋白的提取及土壤修复材料制备及应用**

04 | **生物碳溶剂性有机质及对铜的吸附**

05 | **工作展望**

CONTENTS

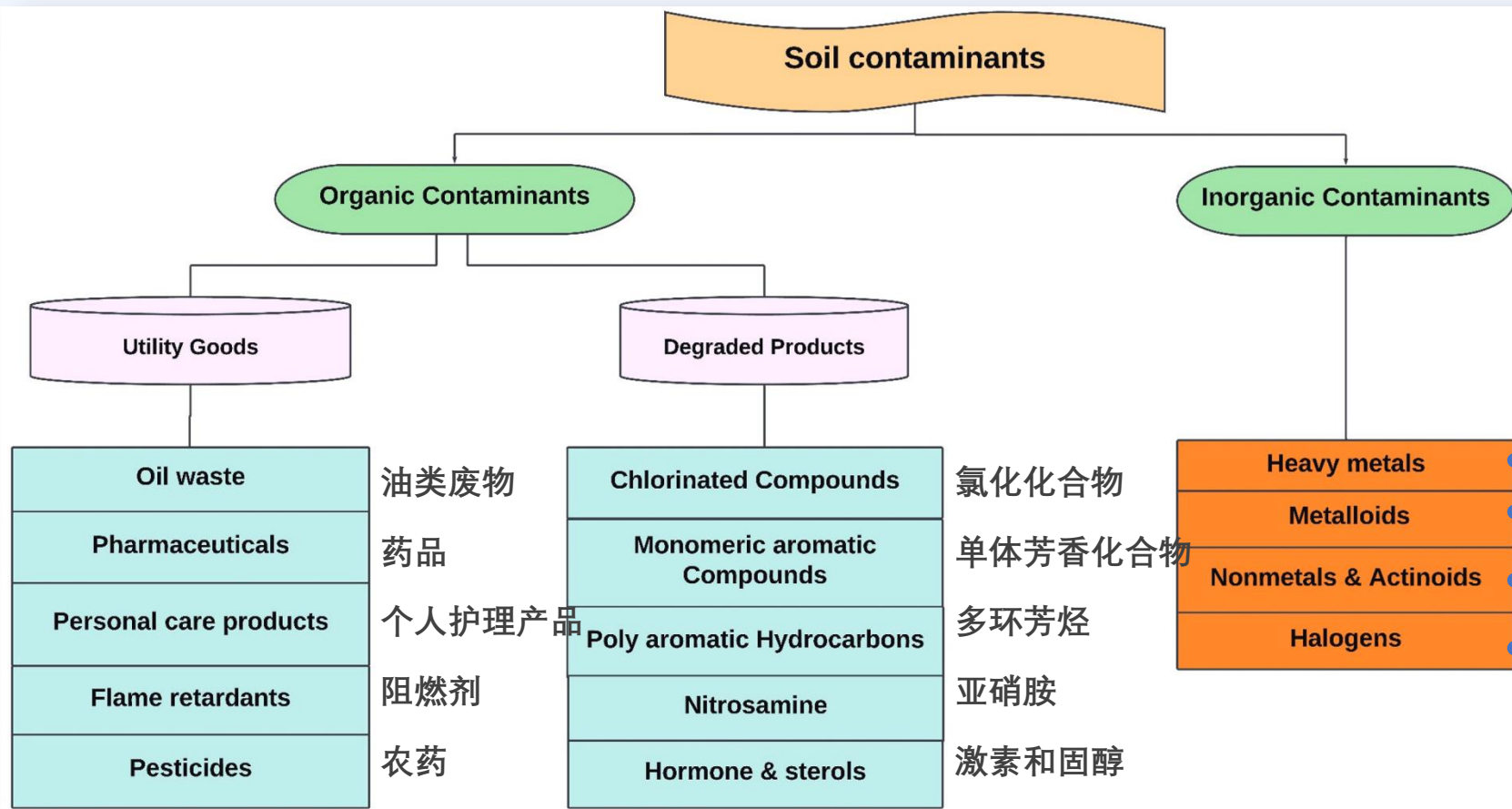


沈阳航空航天大学
SHENYANG AEROSPACE UNIVERSITY



我国土壤重金属污染现状及来源

土壤污染物



重金属, 包括锰 (Mn)、铅 (Pb)、镉 (Cd)、铬 (Cr)、镍 (Ni)、铜 (Cu)、钴 (Co)、钒(V)、汞 (Hg) 和锌 (Zn)

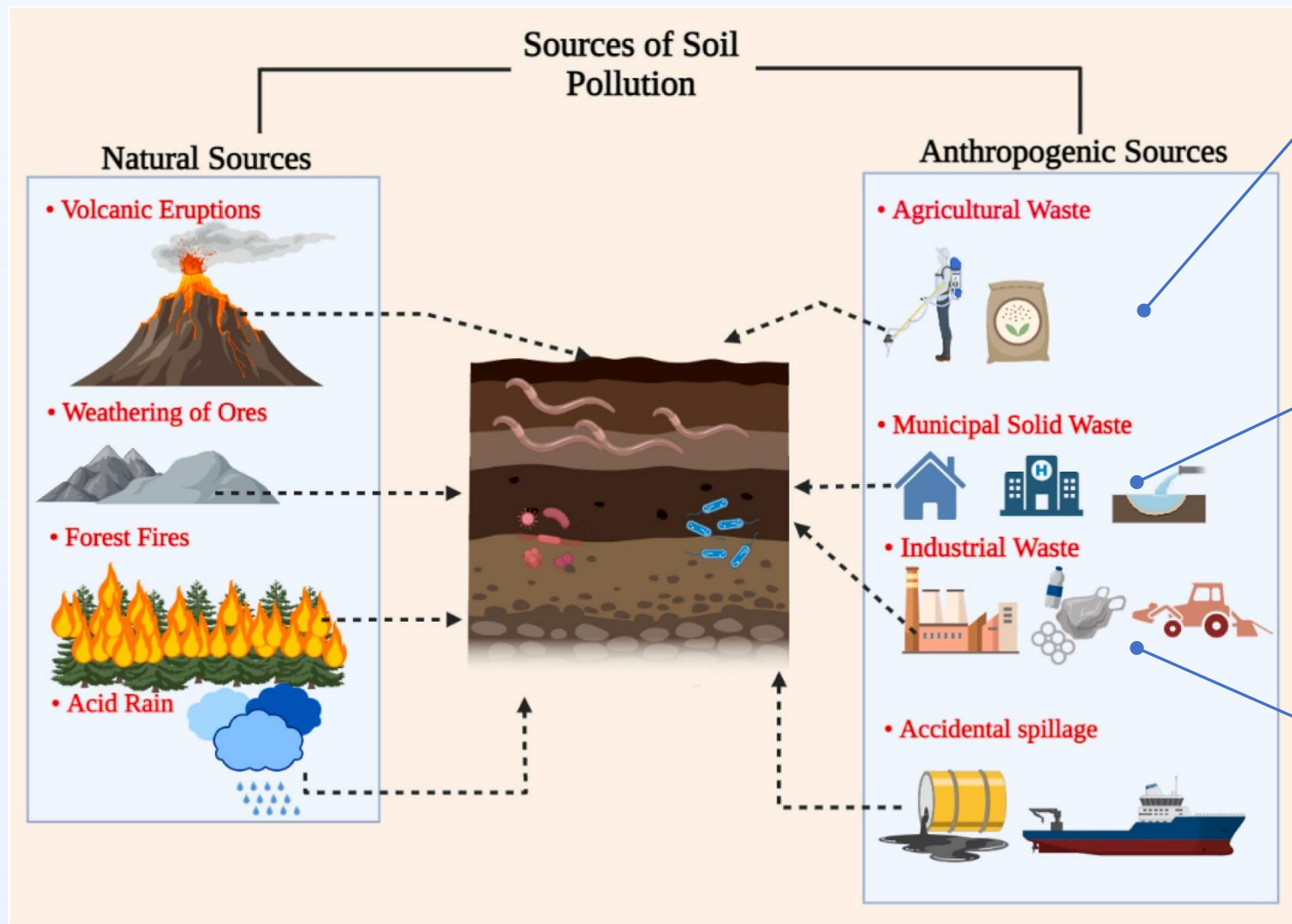
类金属, 如砷 (As)、硼(B)和锑 (Sb)

非金属, 如硒 (Se)

卤素如碘(I)、氟化物(F)和**放射性元素**如铀(U)

我国土壤重金属污染现状及来源

土壤污染物来源



□ 葡萄园和果园中使用**铜**基杀菌剂；
 □ 柑橘、苹果、桃子、草莓和其他水果历史上使用含有**铜 (Cu)**、**锰 (Mn)** 和**锌 (Zn)**。

□ 历史上**铅基涂料**的使用和**车辆**排放；
 □ **铅管**和**储水箱**；
 □ **锌 (Zn)** 和**铜 (Cu)** 主要来自**交通**排放的大气沉积；

□ **汞 (Hg)** 则通常与**燃煤**和**工业**排放；
 □ 非证实**电子废物回收**和**处理**场地**镉 (Cd)**、**铬 (Cr)**、**铅 (Pb)** 和**汞 (Hg)**。

□ **铅、镉、铜**等金属开采过程、选矿和冶炼**废水**排放、**尾矿**和**低质量废矿**的堆积；

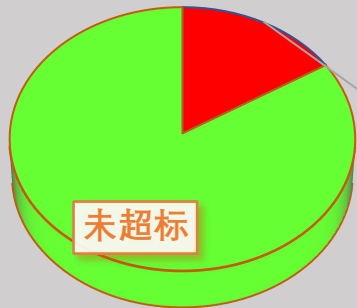
□ 印染：**砷、镉、钴、铜、铅、汞**和**镍**；
 □ 制革：**富含铬**；
 □ 煤炭：**飞灰**中**富含汞、铜**。

我国土壤重金属污染现状及来源

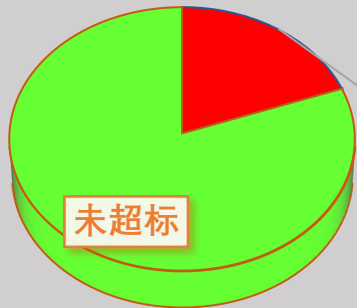
土壤污染物

2014年《全国土壤污染状况调查公报》

全国土壤总点位



全国耕地总点位



Types of pollutants	Exceedance rate (%)	Mild (%)	Slight (%)	Moderate (%)	Severe (%)
Cd	7.0	5.2	0.8	0.5	0.5
Hg	1.6	1.2	0.2	0.1	0.1
As	2.7	2.0	0.4	0.2	0.1
Cu	2.1	1.6	0.3	0.15	0.05
Pb	1.5	1.1	0.2	0.1	0.1
Cr	1.1	0.9	0.15	0.04	0.01
Ni	4.8	3.9	0.5	0.3	0

2016年 国务院印发《土壤污染防治行动计划》



01 | 我国土壤重金属污染现状

02 | 土壤重金属污染修复技术

03 | 污泥蛋白的提取及土壤修复材料制备及应用

04 | 生物碳溶剂性有机质及对铜的吸附

05 | 工作展望

CONTENTS



沈阳航空航天大学
SHENYANG AEROSPACE UNIVERSITY



土壤重金属污染修复技术

土壤污染修复技术 (SPRT):

减少土壤中污染物浓度、固定污染物或将其转化为低毒/无毒物质的技术。

物理修复技术

- ♥ 土壤置换
- ♥ 热处理
- ♥ 玻璃化
- ♥ 电动修复

化学修复技术

- ♥ 固化/稳定技术
- ♥ 土壤淋洗技术
- ♥ 高级氧化

生物修复技术

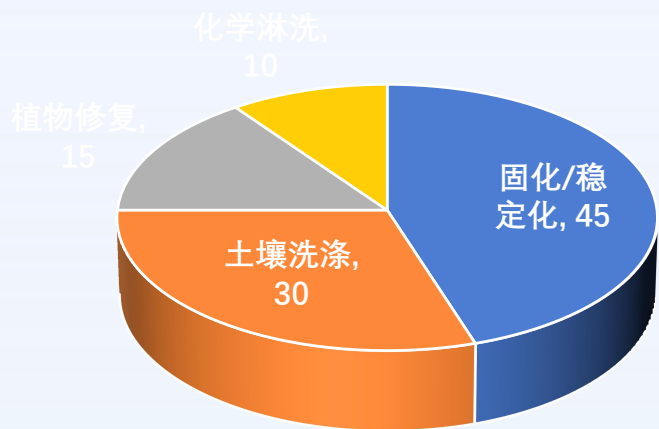
- ♥ 植物修复
- ♥ 动物修复
- ♥ 微生物修复

联合修复技术的创新与应用



土壤重金属污染修复技术

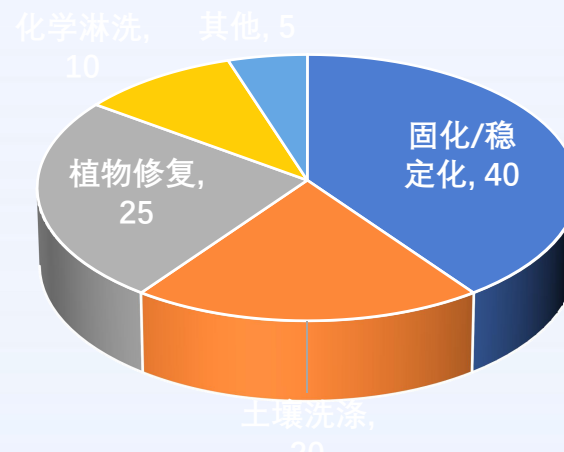
美国重金属污染场地修复技术使用比例



- 原位技术平均成本: \$50-150/m³
- 异位技术平均成本: \$200-400/m³
- 生物修复技术成本最低: \$ 30-80/m³

1. US EPA Superfund Remedial Annual Report (2023)
2. Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC) 2022 Data
3. Journal of Environmental Management (2023)
4. National Institute of Environmental Health Sciences (NIEHS) Reports

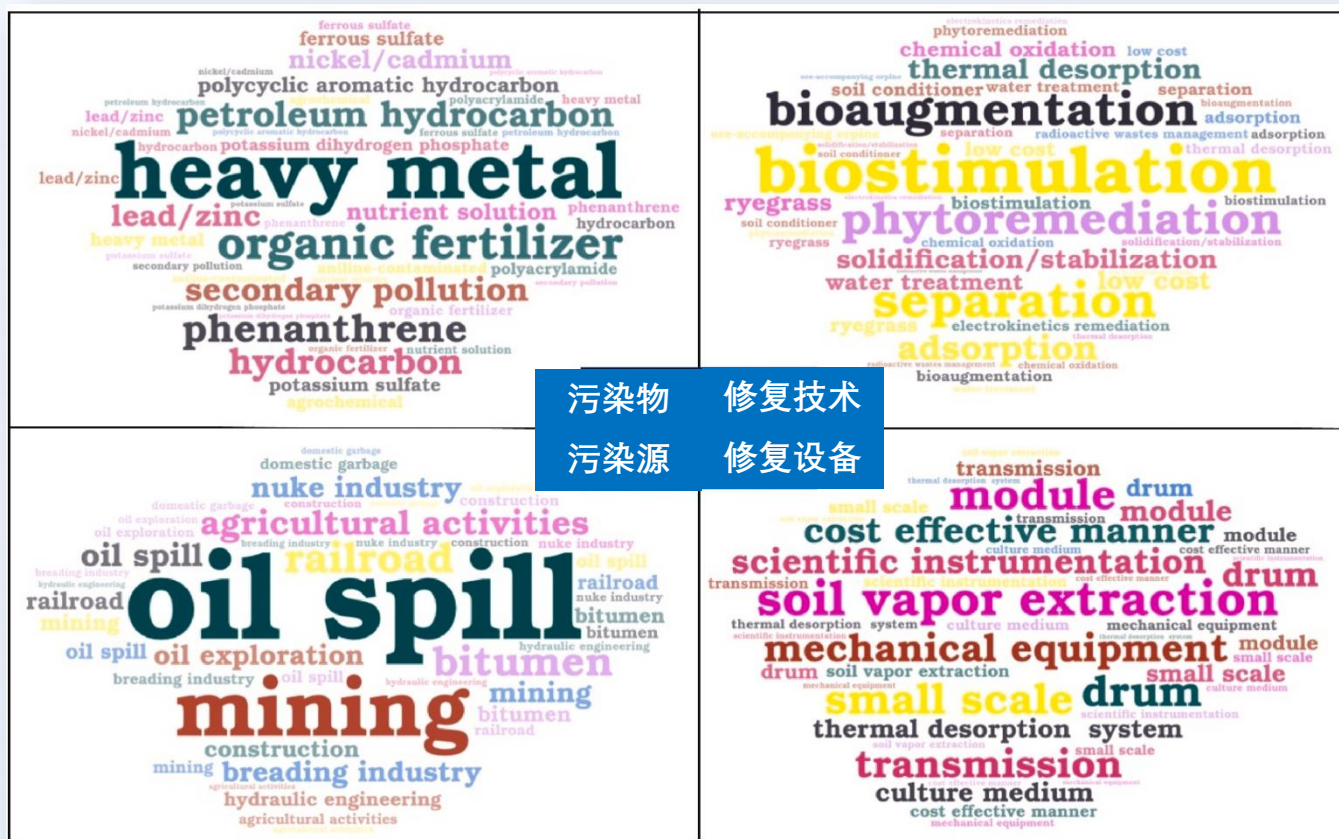
中国重金属污染场地修复技术使用比例



- 原位修复技术:
 - ✓ 化学氧化: \$ 80-150/m³
 - ✓ 生物修复: \$ 50-100/m³
 - ✓ 土壤气相抽提: \$ 70-120/m³
- 异位修复技术:
 - ✓ 固化/稳定化: \$ 100-200/m³
 - ✓ 热脱附: \$ 250-400/m³
 - ✓ 土壤淋洗: \$ 150-300/m³

1. 生态环境部《全国土壤污染状况调查报告》
2. 中国环境科学研究院 (CRAES) 2022年数据
3. 《环境科学与技术》期刊 (2023)
4. 中国土壤修复行业年度报告 (2023)

土壤重金属污染修复技术



- 2006年至2020年间，发布了14,435项SPRT专利（占总数的79%）；
- 美国、日本、韩国具有垄断地位；
- 美国的知识流出，流向世界知识产权组织（WIPO）、欧洲专利局（EPO）、中国和德国等，形成知识流动盈余；
- 中国拥有大量的专利优先权，但主要为“知识流入国家”。

SPRT的知识图（关键字的颜色是随机的，大小表示其相对重要性）

Zefeng Qi, Yixin Han, et al. Environmental Pollution, 316 (2023) 120661.

土壤重金属污染修复技术

未来方向

1. 绿色可持续修复技术

2. 高效精准修复技术

3. 智能化与集成化修复

4. 资源化与循环经济

5. 政策与标准化支持

2.1 纳米材料修复

- ❑ **功能化纳米材料**：开发磁性纳米颗粒、碳基纳米材料等，实现重金属的**高效吸附与分离**。
- ❑ **智能控释材料**：设计pH/氧化还原响应型材料，**精准释放修复剂**。
- ❑ **纳米材料安全性**：研究纳米材料的生态毒性及长期稳定性。

- ❑ **技术规范与标准**：制定重金属污染修复的技术导则和评价标准。
- ❑ **资金支持与市场化**：完善修复基金机制，推动修复产业市场化。
- ❑ **国际合作**：加强与国际先进技术的交流与合作，提升技术水平。

土壤重金属污染修复技术

我国在重金属污染修复领域已建立的技术导则和评价标准

类型	名称	标准号	发布机构
1.团体标准	重金属—有机物复合污染土壤修复技术规范 稳定化—堆体式热脱附	征求意见稿 (2023)	中华环保联合会
	重金属污染土壤生态风险评估技术指南	征求意见稿 (2022)	中华环保联合会
2.风险控制和调查方法	土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准	GB 15618-2018	生态环境部
	土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准	GB 36600-2018	生态环境部
	土壤质量 城市及工业场地土壤污染调查方法指南	GB/T 36200-2018	农业农村部
3.行业标准	污染土壤修复工程技术规范 固化/稳定化	HJ 1282-2023	生态环境部
	建设用地土壤修复技术导则	HJ 25.4-2019	生态环境部
	污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则	HJ 25.5-2018	生态环境部
	污染地块地下水修复和风险管控技术导则	HJ 25.6-2019	生态环境部

❑ 缺乏全面性，未及时纳入新兴技术（植物-微生物联合修复，智能控释材料修复、基于AI的污染预测等）

❑ 污染重点省份出台地方标准，同时建立“国标-地标”动态协调机制。

01 | 我国土壤重金属污染现状

02 | 土壤重金属污染修复技术

03 | 污泥蛋白的提取及土壤修复材料制备及应用

04 | 生物碳溶剂性有机质及对铜的吸附

05 | 工作展望

CONTENTS

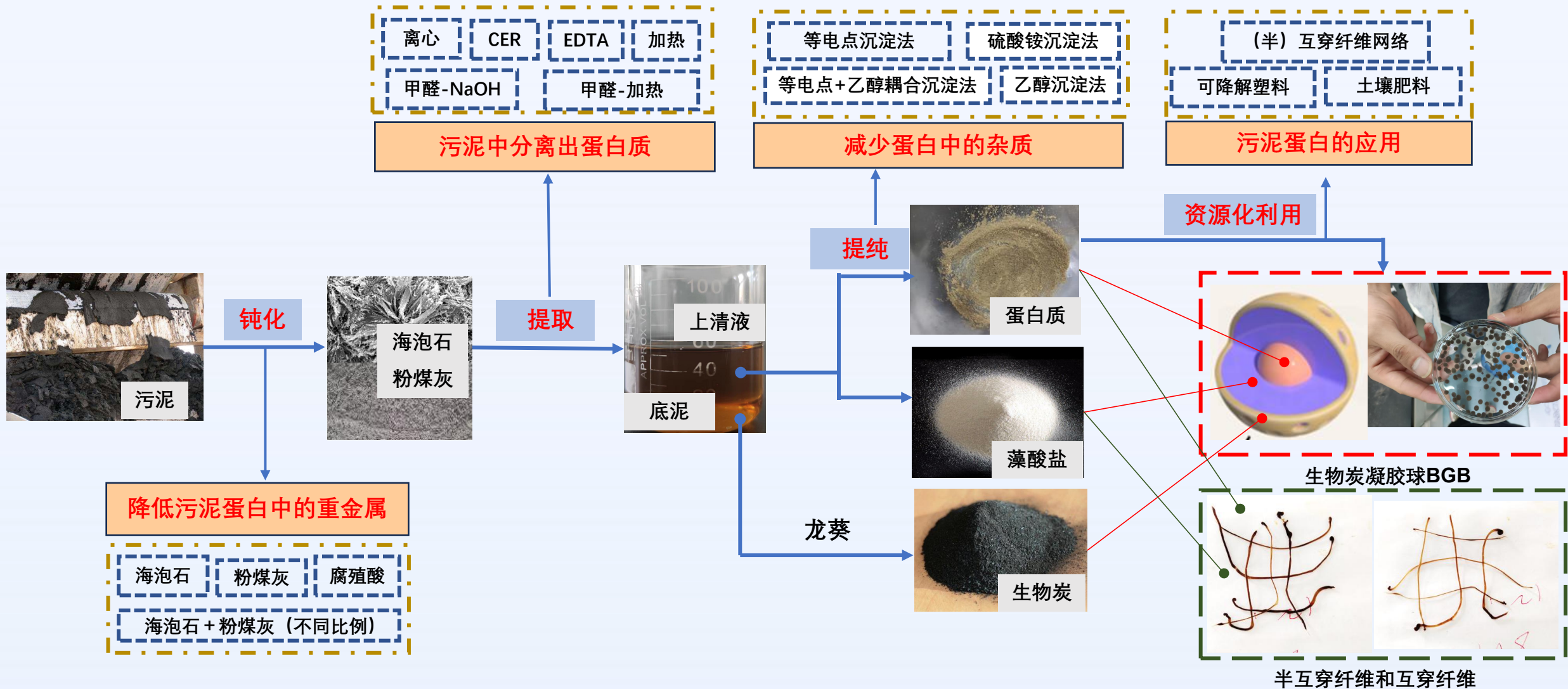


沈阳航空航天大学
SHENYANG AEROSPACE UNIVERSITY



污泥蛋白的提取及土壤修复材料的制备和应用

研究思路



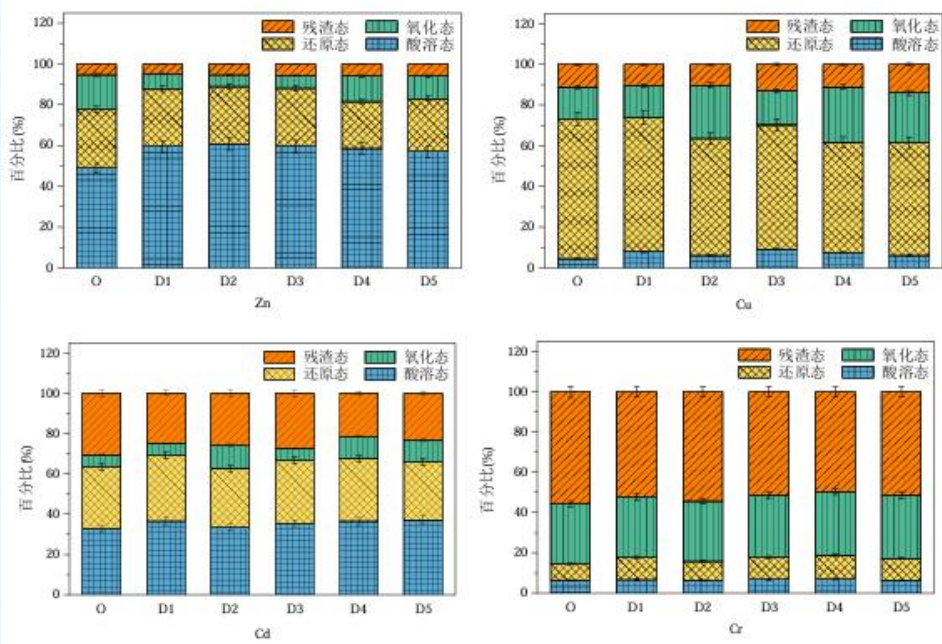
污泥蛋白的提取及土壤修复材料的制备和应用

污泥重金属的钝化

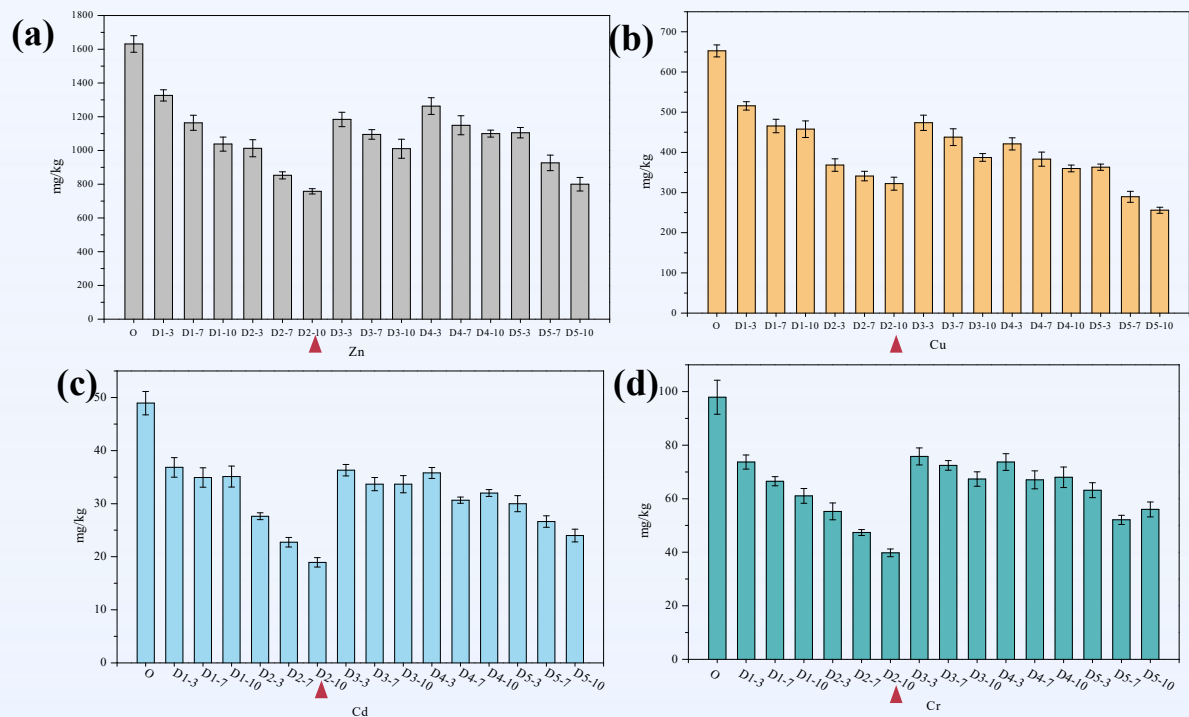
海泡石、粉煤灰对污泥重金属含量影响

钝化剂添加量

编号	配比	添加量(g/g TSS)			
D1	粉煤灰				
D2	海泡石				
D3	3:1	0	0.03	0.07	0.10
D4	1:1				
D5	1:3				



改性剂对污泥底渣重金属形态的影响

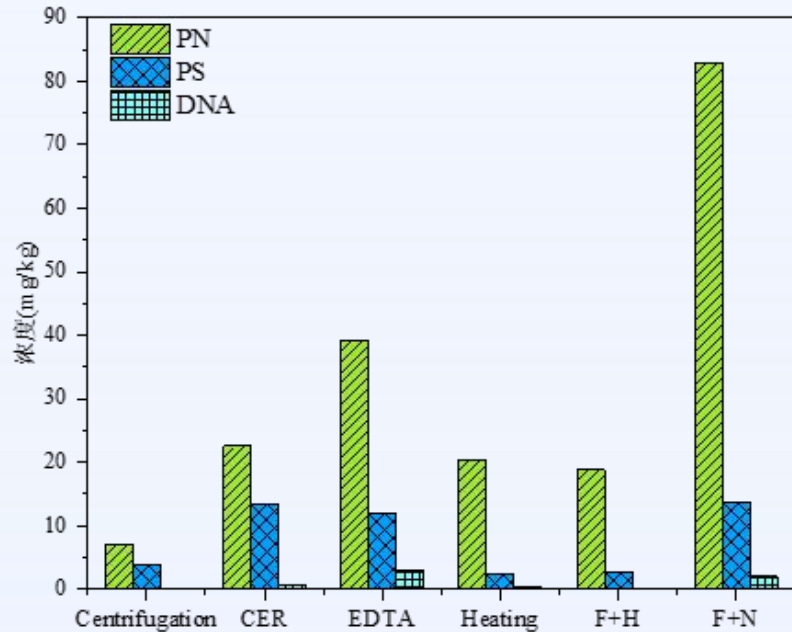


改性剂对污泥底渣重金属含量影响

- 钝化后的污泥底渣中Zn, Cu, Cd, Cr重金属含量相应的增加;
- 底渣中Zn以酸溶态, Cu还原态、Cr以残渣态、Cd以酸溶态和还原态为主。

污泥蛋白的提取及土壤修复材料的制备和应用

污泥蛋白的提取



不同方法提取EPS组分含量

F+H为甲醛-加热, F+N为甲醛+NaOH

污泥蛋白的提取分析

Extraction methods (提取方法)	Protein(mg/gT SS)	Carbohydrate(mg /gTSS)	DNA(mg/gT SS)	EPS(mg/gT SS)
Centrifugation (离心)	7.04	3.79	0.07	10.90
CER (阳离子交换树脂)	22.52	13.50	0.78	36.8
EDTA (乙二胺四乙酸)	39.28	11.93	2.87	54.08
Heating (加热)	20.45	2.32	0.42	23.19
Formaldehyde Heating (甲醛加热)	18.82	2.67	0.14	21.63
Formaldehyde+ NaOH	82.79	13.63	2.01	98.43

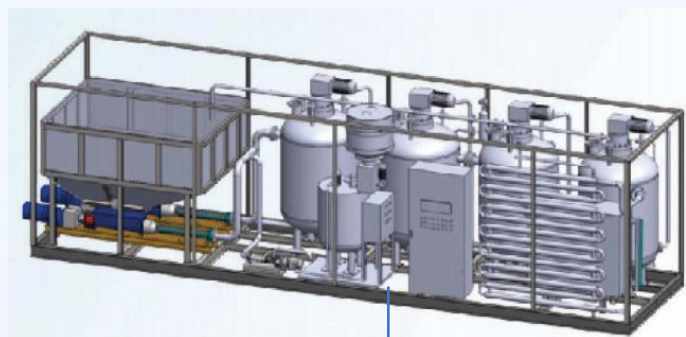
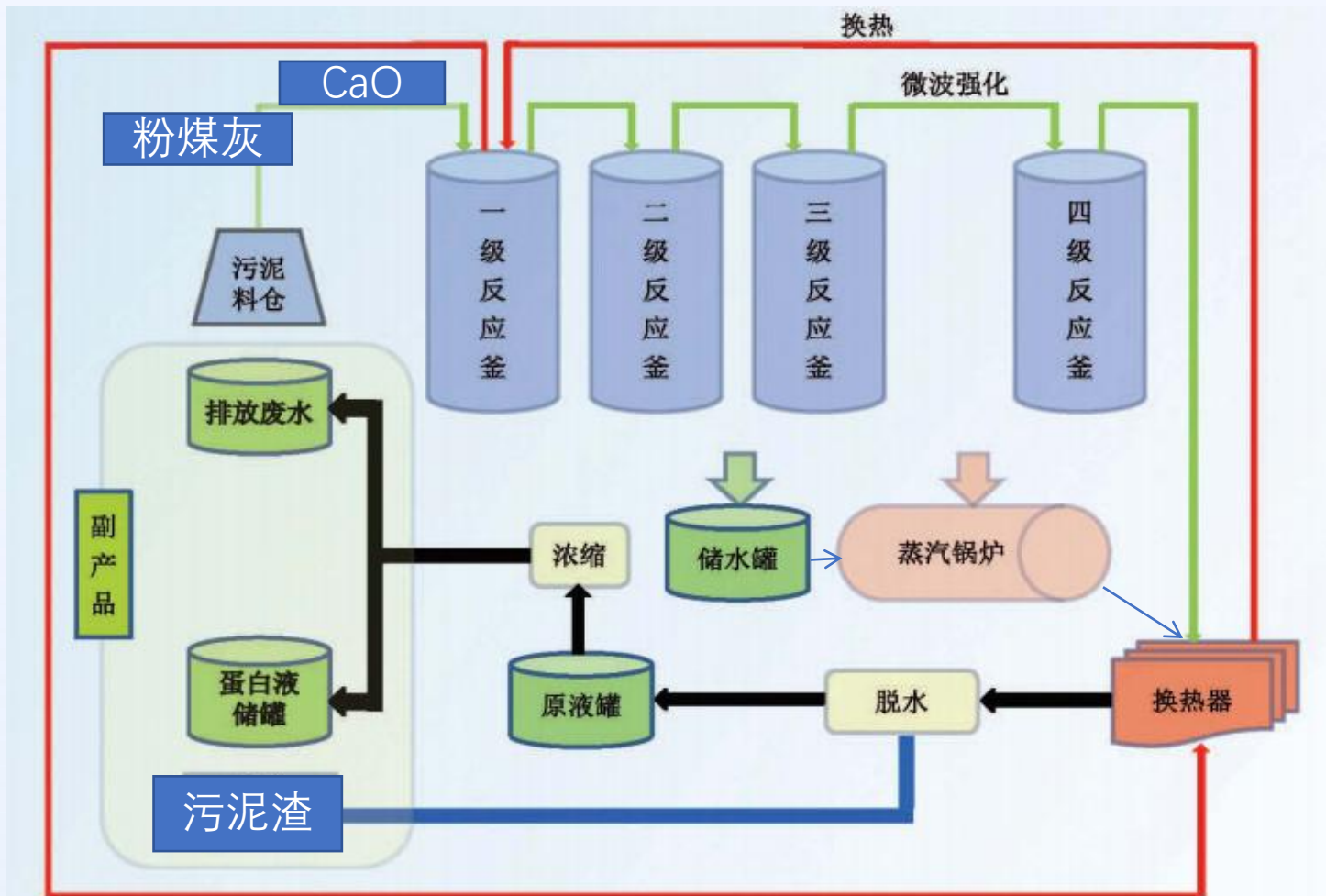
- EPS提取率: 甲醛-NaOH > EDTA > CER > 加热 > 甲醛-加热 > 离心;
- 甲醛+NaOH提取方式的DNA含量越高, 表明细胞裂解程度大, EPS提取率越高。

污泥蛋白的提取及土壤修复材料的制备和应用

成果转化

蛋白质提取-钝化的规模化工艺流程

与葫芦岛某企业合作



蛋白浓缩液

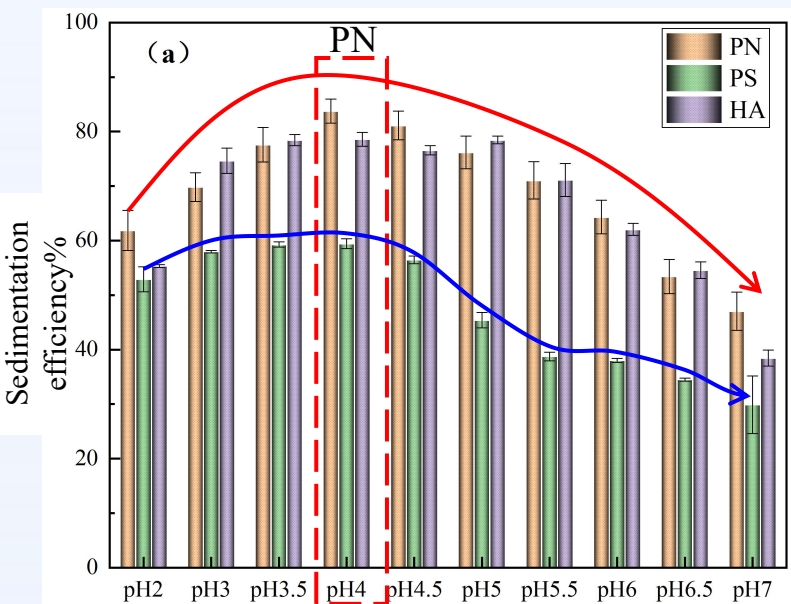


喷雾干燥样品

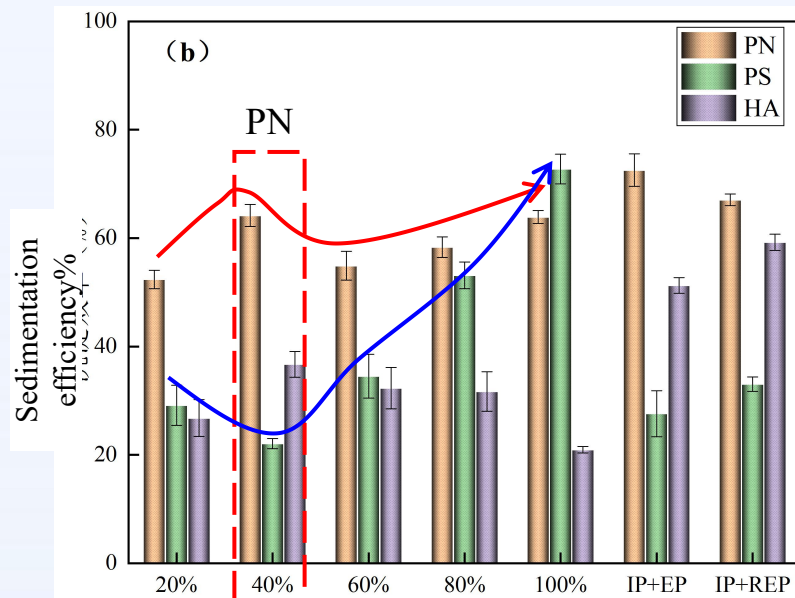
污泥蛋白的提取及土壤修复材料的制备和应用

污泥蛋白的提纯

不同处理方法对蛋白质沉淀效率的影响

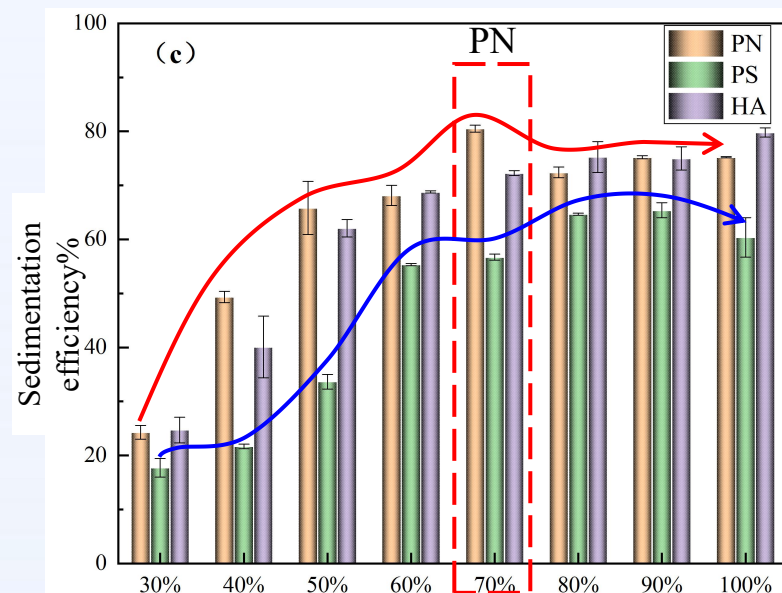


等电点沉淀法IPP



乙醇沉淀法EP

等电点+乙醇耦合沉淀法



硫酸铵沉淀法AS

- IPP, pH = 4, PN的沉淀效率: 83.76 %。
- EP, 乙醇浓度: 40 %, PN的沉降效率: 64.17 %。
- AS, 硫酸铵溶液: 70 %, PN的沉降效率: 80.52 %。
- CP, PN的沉降效率, 乙醇和等电点+乙醇分别为72.55和68.25 %。

污泥蛋白的提取及土壤修复材料的制备和应用

污泥蛋白的应用

(半)互穿网络纤维的制备和长度

半互穿网络纤维



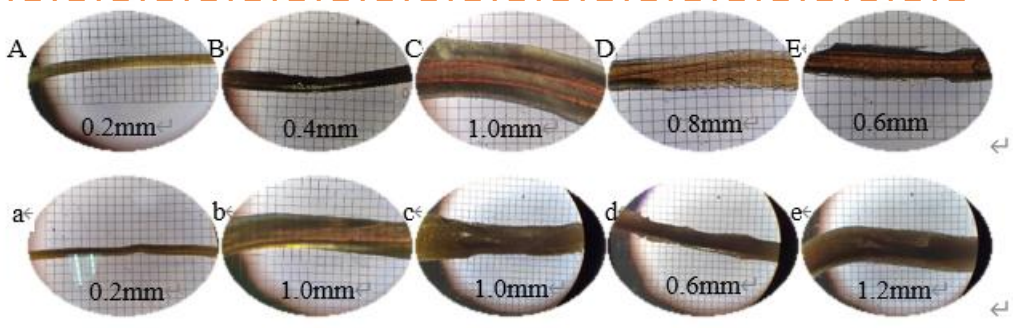
互穿网络纤维



(半)互穿网络纤维的长度

纤维类型	ALE: Alginate	长度(cm)			平均值
互穿网络纤维	Alginate	5.7	5.5	6.5	5.9
	1:1	4.5	4.8	4.2	4.5
	2:1	2.7	3.5	4.0	3.4
	3:1	2.0	1.7	1.8	1.83
	4:1	2.0	2.1	1.7	1.93
半互穿网络纤维	Alginate	8.0	6.2	6.0	6.73
	1:1	5.5	5.9	6.0	5.8
	2:1	5.0	5.5	6.5	5.67
	3:1	2.0	2.2	2.6	2.27
	4:1	3.0	2.7	2.8	2.83

将Alginate与所提取的ALE及PN以不同的比例进行混合，以TG (谷氨酰胺转氨酶)和CaCl₂交联，湿法纺丝制备了(半)互穿网络纤维



((A) 纤维Alginate; (B) 纤维1:1; (C) 纤维2:1; (D) 纤维3:1; (E) 纤维4:1; (a) 半纤维Alginate; (b) 半纤维1:1; (c) 半纤维2:1; (d) 半纤维3:1; (e) 半纤维4:1)

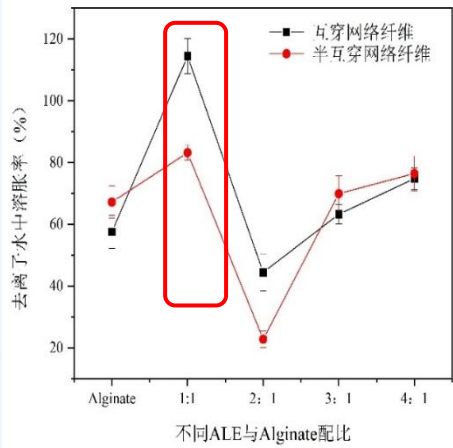
(半)互穿网络纤维的微观结构

- 纯Alginate可延长互穿网络纤维与半互穿网络纤维长度，
- 随着掺杂比的提高，互穿网络纤维与半互穿网络纤维的长度逐渐降低。

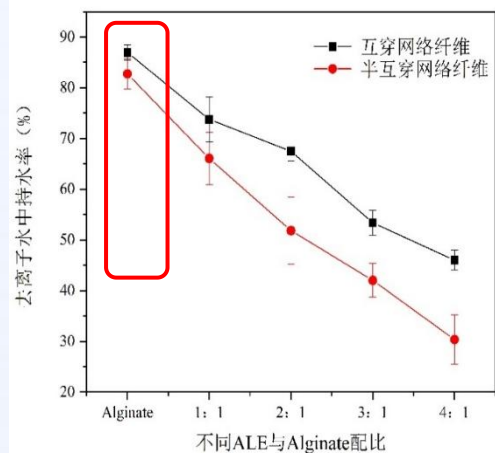
污泥蛋白的提取及土壤修复材料的制备和应用

污泥蛋白的应用

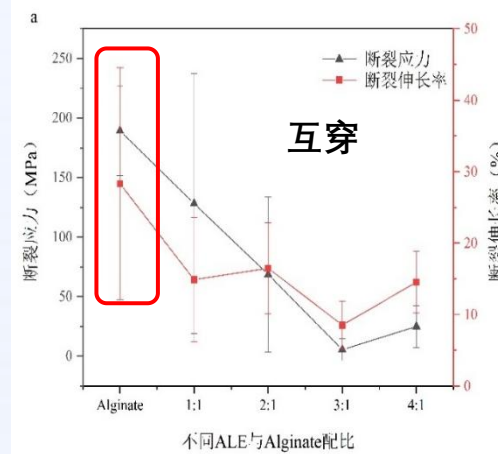
(半) 互穿网络纤维的性质



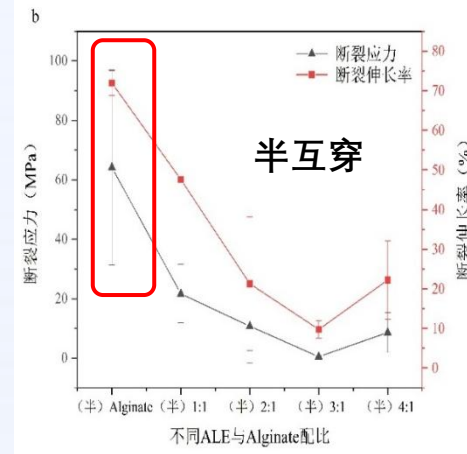
溶胀率



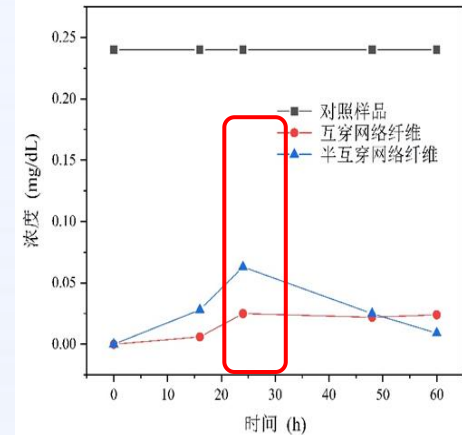
持水性



断裂应力和断裂伸长率



两种纤维中磷酸根的缓释情况



- 互穿纤维的溶胀率、持水率、断裂应力均高于半互穿纤维，且具有更慢的磷酸根释放速率；
- 溶胀率：为80-110%，半互穿网络纤维 < 互穿网络纤维；
- 持水率：为80-90%，高于文献中的纤维持水率为40%-60%。
- 互穿纤维的最大断裂应力是半互穿纤维的两倍，TG的加入使网络间结合地更为紧密增强了纤维的拉伸效果。
- 磷酸根释放：互穿网络纤维0.025 mg/dL < 半互穿网络纤维0.063 mg/dL

污泥蛋白的提取及土壤修复材料的制备和应用

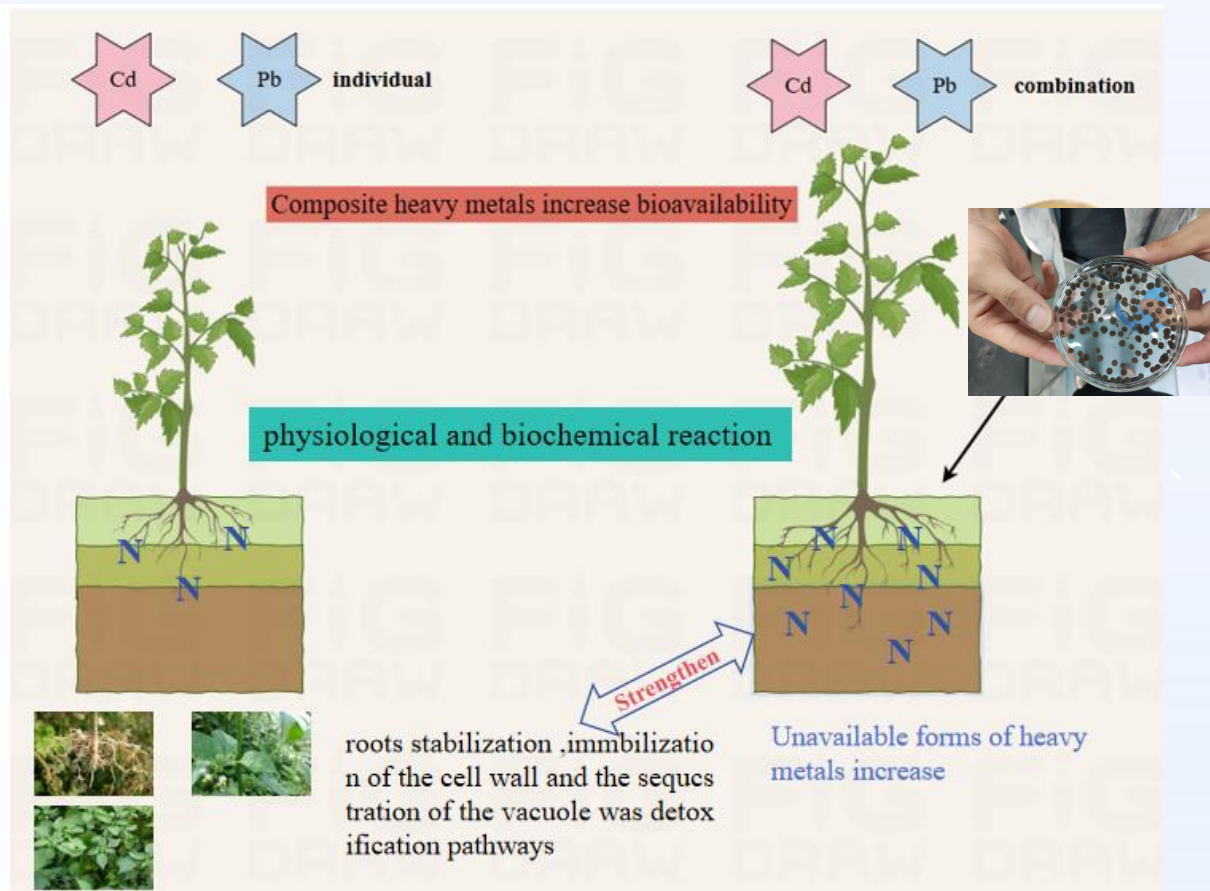
污泥蛋白的应用

生物炭凝胶球BGB土壤改良剂, 龙葵吸附Cd,Pb,Cr,

重金属的联合修复

联合修复盆栽实验

Plant-BGB



植物-BGB联合修复技术

BGB的修复目标

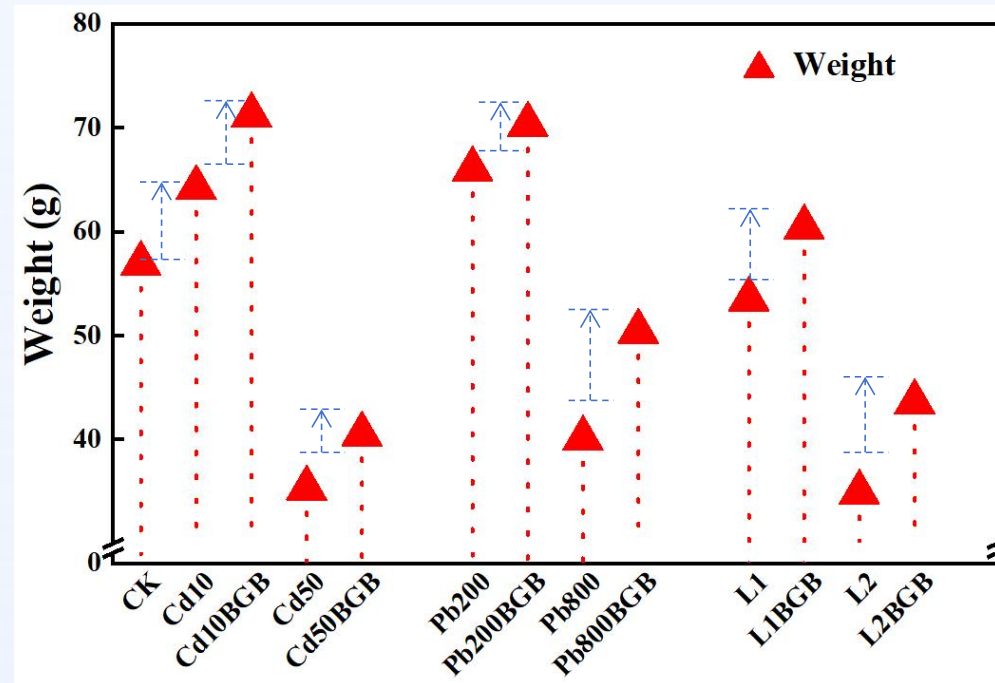
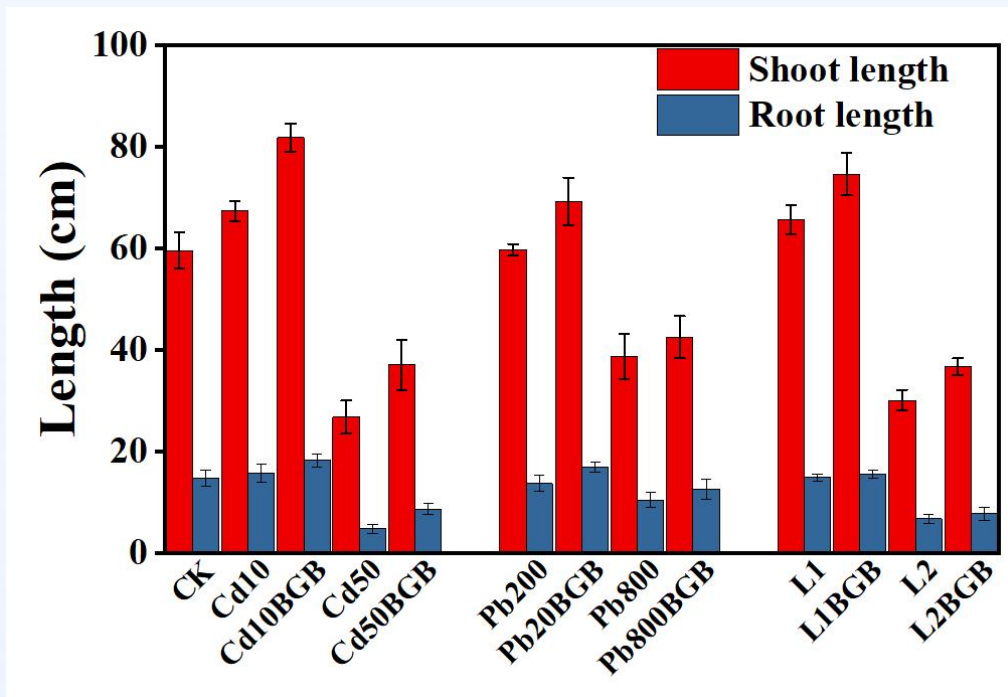
- ◆ 提升植物生物量:
从4.85%提高到12.9%
- ◆ 富集重金属:
植物对Pb、Cd的富集率
平均提高11%
重金属土壤有效残留降低:
Cd (19.75%~43.75%)
Pb (9.5%)
- ◆ 调节土壤物理化学性质:



污泥蛋白的提取及土壤修复材料的制备和应用

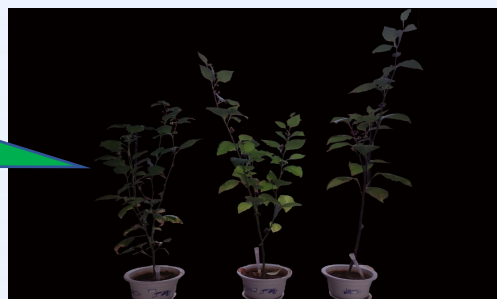
污泥蛋白的应用

土壤改良剂，龙葵吸附Cd,Pb



处理方式对龙葵生长的影响

毒物兴奋效应



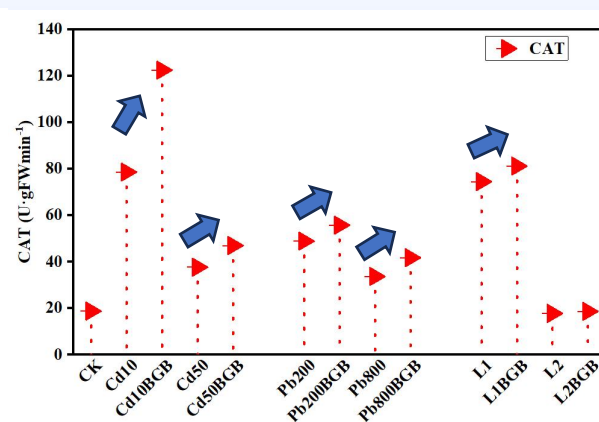
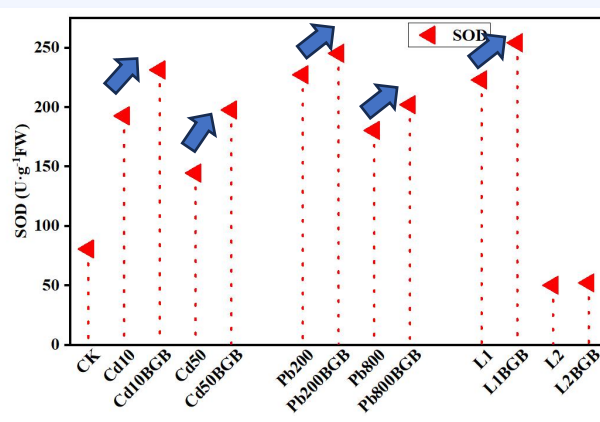
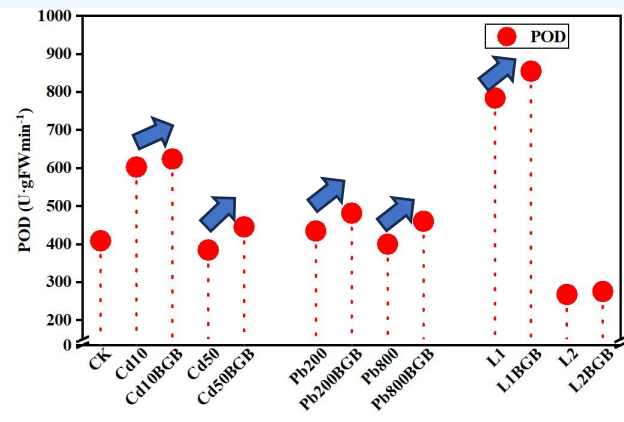
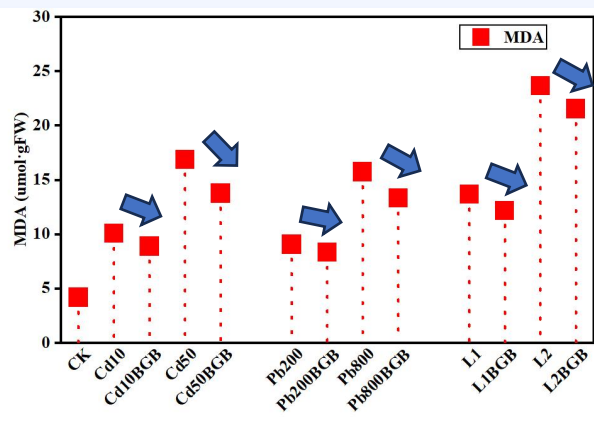
CK Cd10 Cd10BGB

- Pb、Cd添加量与植物株高、根长、生物量呈负相关趋势；
- 添加BGB提高了生物量(从4.85 %提高到12.9 %)。

污泥蛋白的提取及土壤修复材料的制备和应用

污泥蛋白的应用

土壤改良剂



MDA通常用作评估氧化应激对植物细胞损伤程度的指标。

SOD、POD、CAT这三种酶是植物主要的抗氧化酶。

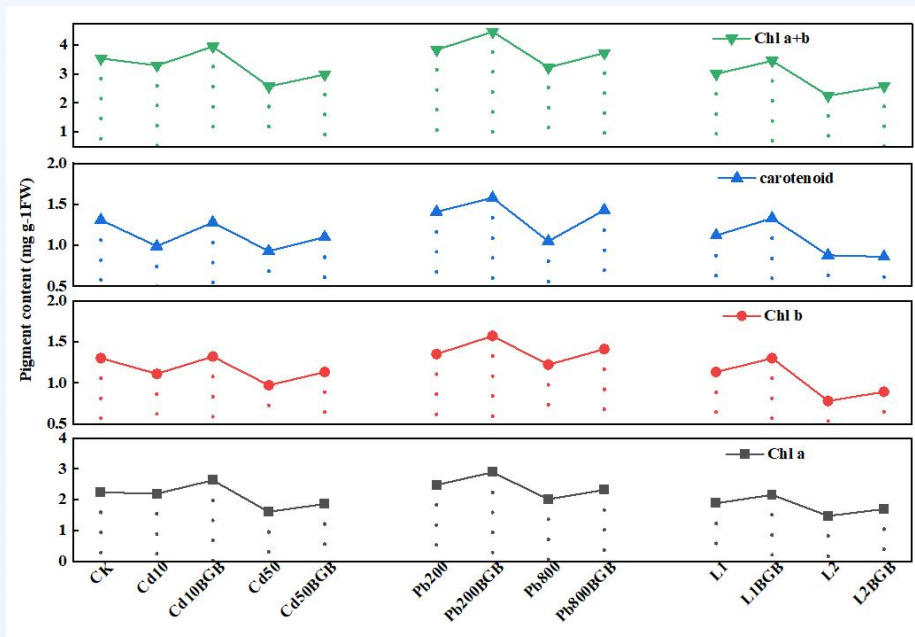
BGB的添加降低了MDA含量,8.3%~18.4%。

BGB的添加提高了三种酶 (POD、CAT、SOD由4.9%提高到24.7%)的活性。

污泥蛋白的提取及土壤修复材料的制备和应用

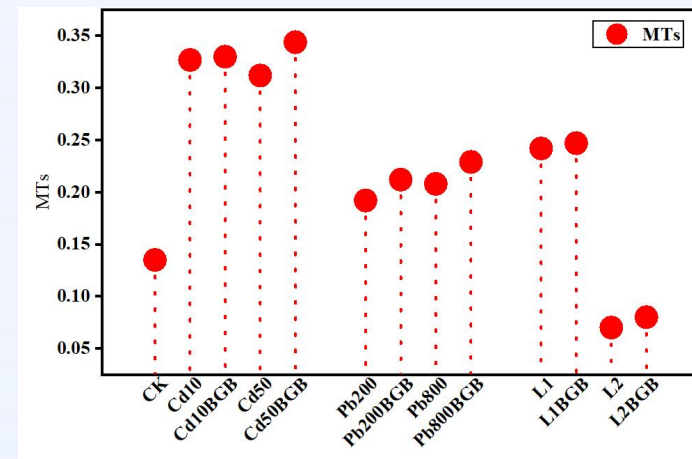
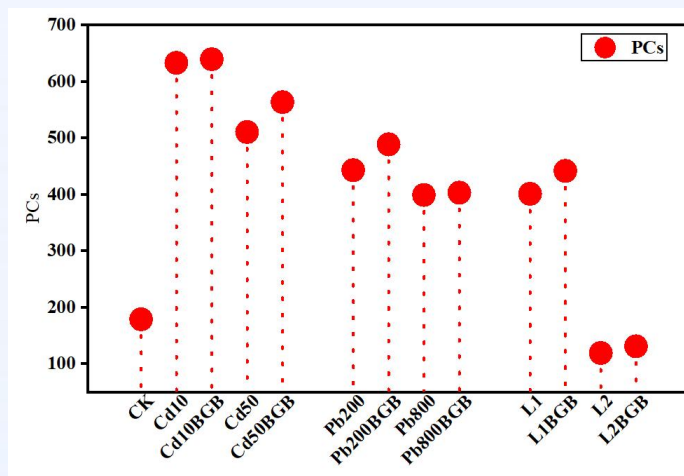
污泥蛋白的应用

土壤改良剂



植物光合色素的变化

BGB的添加提高了光合色素(14.6 %~19.6 %)的含量。



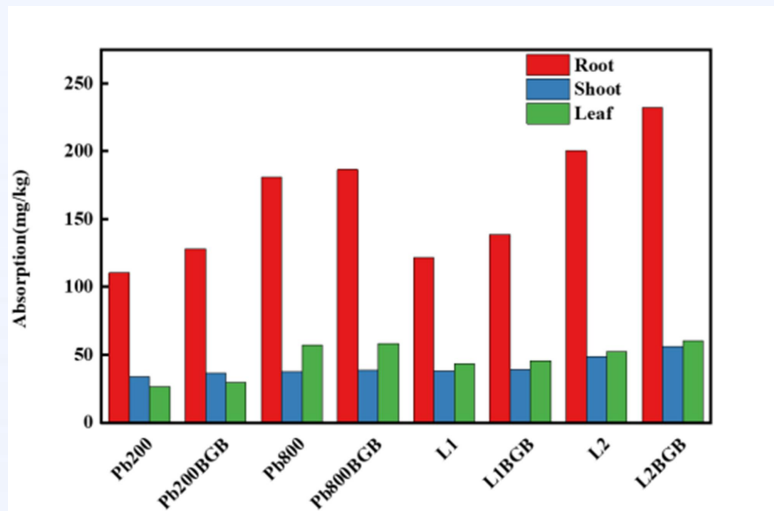
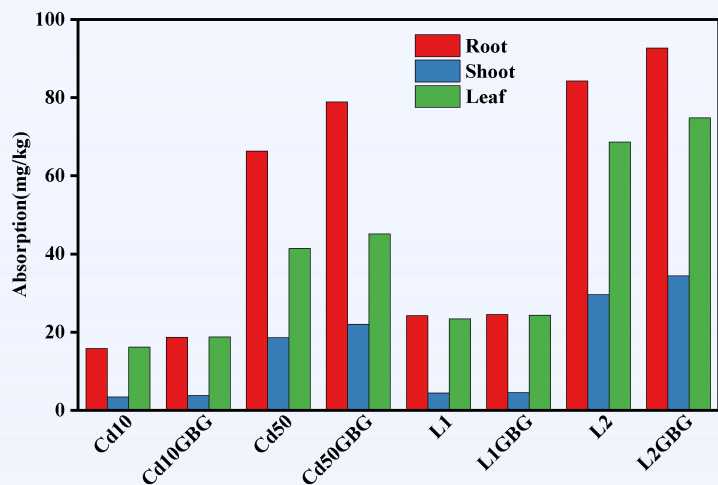
金属结合蛋白的变化

BGB的添加提高了金属结合蛋白MTs、PCs(1%~10.4%)的含量。

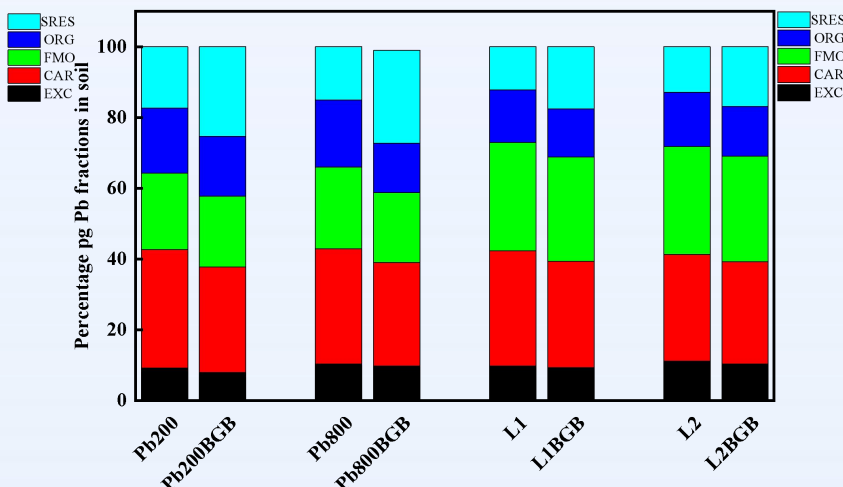
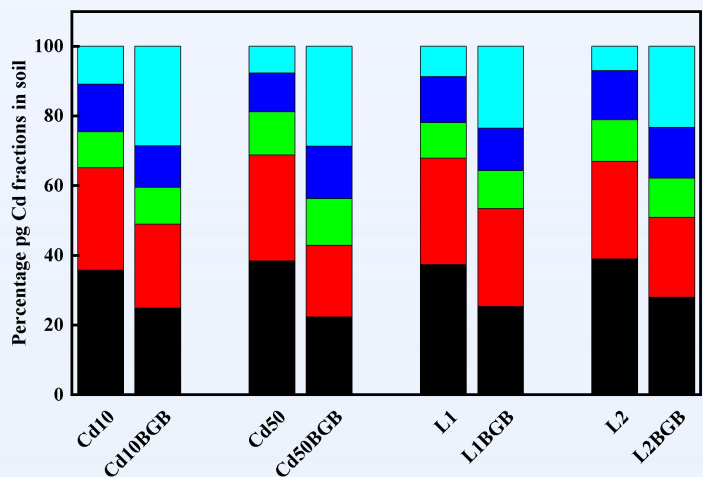
污泥蛋白的提取及土壤修复材料的制备和应用

污泥蛋白的应用

植物吸收量及土壤残留重金属形态变化



不同处理方式中龙葵根、茎、叶吸收量



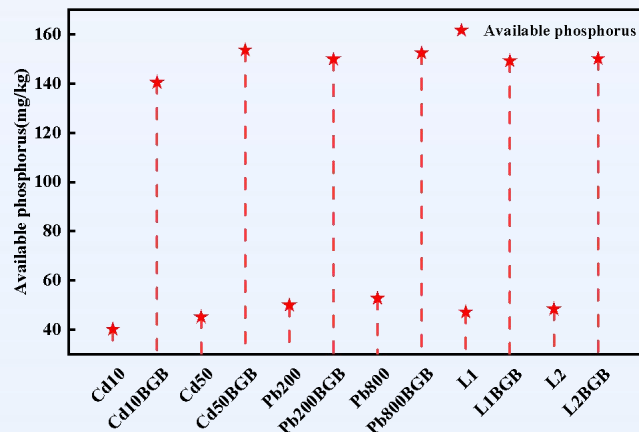
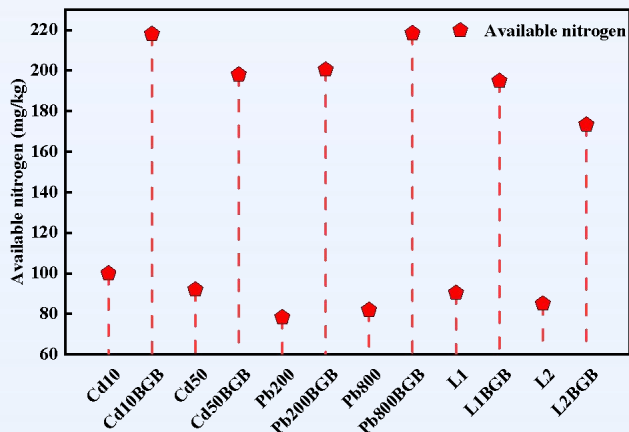
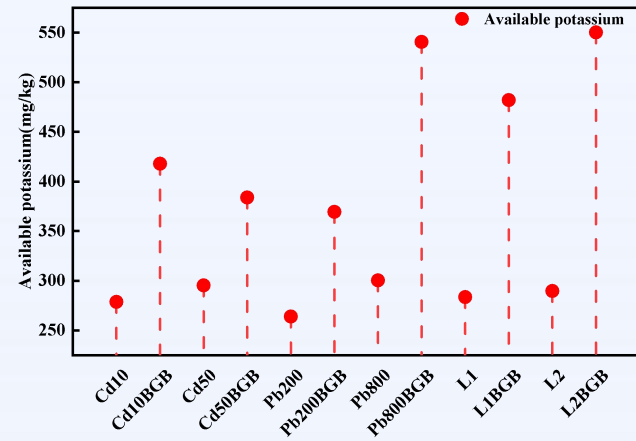
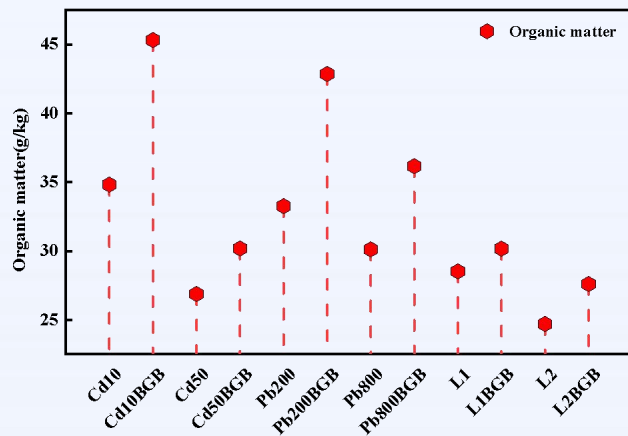
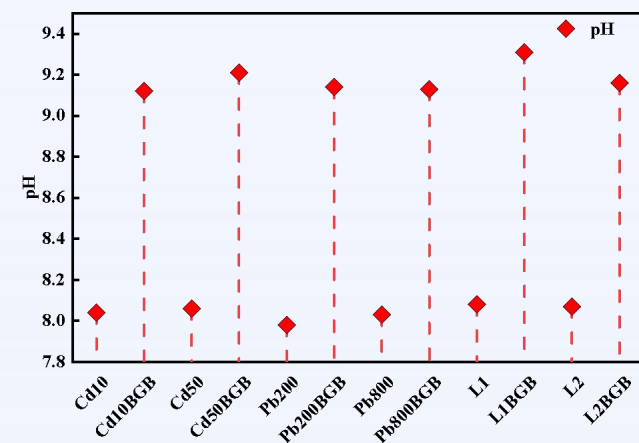
不同处理土壤中重金属化学形态

- 随着Pb、Cd初始添加浓度从低到高，植物根、茎和叶的吸收量增加；
- BGB的加入增强了植物对Pb、Cd的吸收(平均11%)；
- BGB的添加显著降低了土壤残留Cd (19.75%~43.75%) 和Pb (平均9.5%) 的有效性。

污泥蛋白的提取及土壤修复材料的制备和应用

污泥蛋白的应用

土壤理化性质



- BGB中生物炭和污泥蛋白呈碱性，导致土壤pH上升；
- 相较于单一植物处理，联合修复中土壤有机质、有效氮、有效钾和有效磷平均提高了18.14%、129.14%、216.83%和58.89%。

不同处理土壤理化性质的变化

污泥蛋白的提取及土壤修复材料的制备和应用

创新驱动绿色发展

技术研发成果

- ✓ 全链条技术突破：**钝化→提取→提纯→高值化利用**
- ✓ 为污泥资源化利用提供 **创新性解决方案**



技术优势

- ✓ 高效提取：蛋白提取率至 **65%**
- ✓ 应用广泛：**缓释肥料**（提高肥效与控释性）、**土壤修复**（重金属吸附与有机质提升）、**生物基材料**等领域



01 | 我国土壤重金属污染现状

02 | 土壤重金属污染修复技术

03 | 污泥蛋白的提取及土壤修复材料制备及应用

04 | 生物碳溶剂性有机质及对铜的吸附

05 | 工作展望

CONTENTS



沈阳航空航天大学
SHENYANG AEROSPACE UNIVERSITY



生物炭溶解性有机质 (DOM) 及对铜的吸附

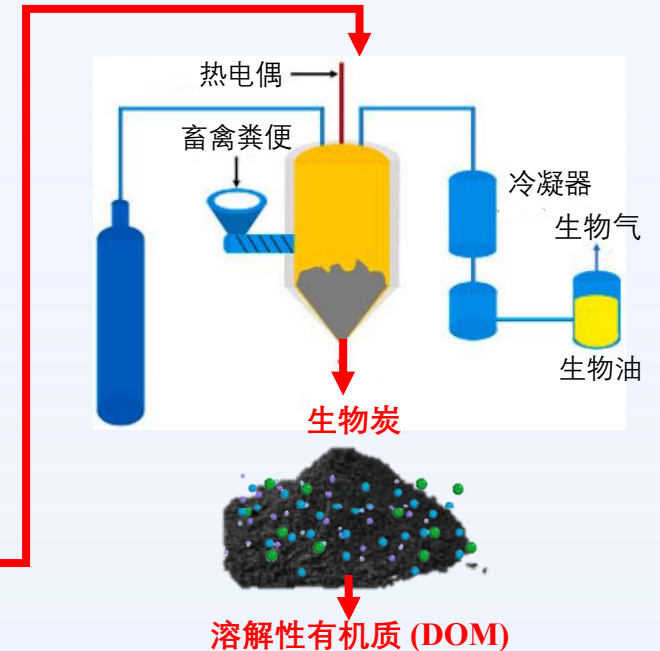


畜禽粪便

> 40亿吨

畜禽粪便资源化策略

- 消化** —— 效率低下，释放有毒气体
- 堆肥** —— 传播病原体，释放温室气体
- 焚烧** —— 释放有毒气体和灰分
- 热解** —— 效率高，条件宽松，产物多样，环境友好

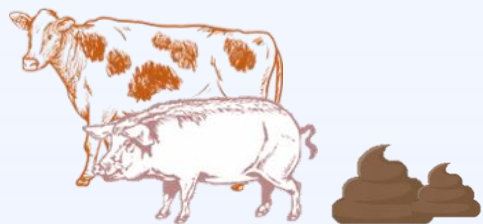


拟解决的问题

- 畜禽粪便生物炭衍生的溶解性有机质的组分结构特征；
- 重金属的络合机制。

生物炭溶解性有机质 (DOM) 及对铜的吸附

生物炭制备



干燥过筛



热解



- 热解温度: 300、400、500、600、700°C;
- N₂气氛为200 mL/min;
- 加热速率为5°C/min, 停留时间3h。

DOM提取

1g

100 mL

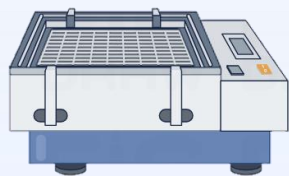
250r/min 24h



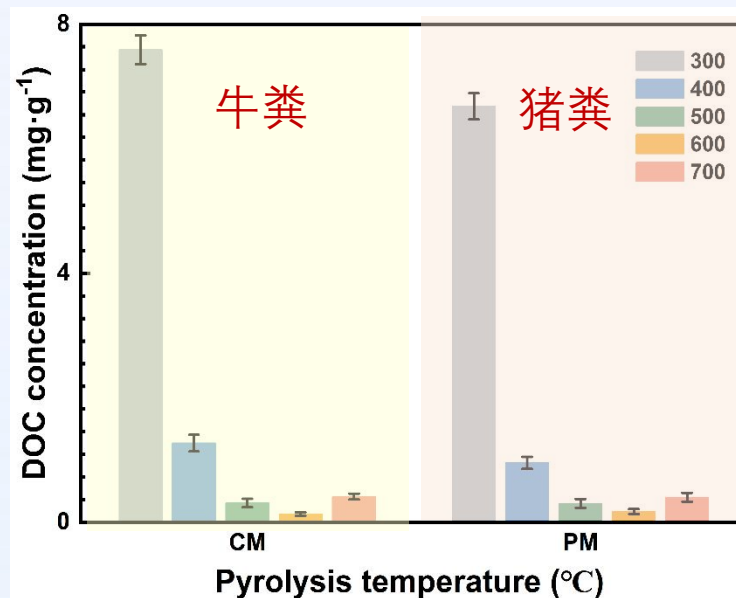
+



→



DOM含量



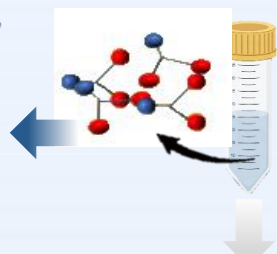
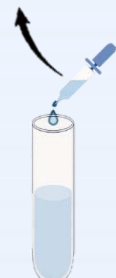
金属滴定

Cu(NO₃)₂

0.1M HNO₃和NaOH



←



DOM

0.45μm

□ 牛粪 > 猪粪;

□ 热解温度↑, DOM含量先↓后↑, 在600°C降至最低

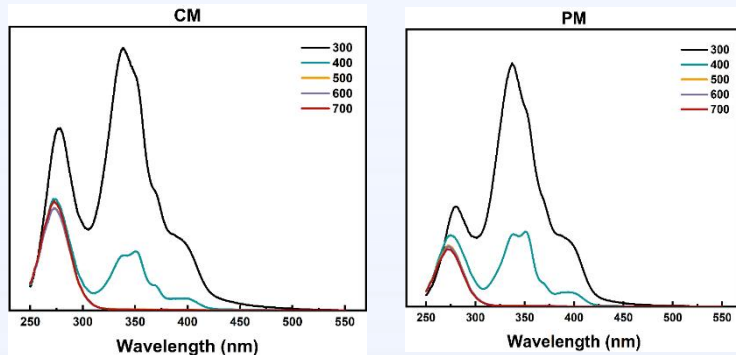
0, 1, 5, 10, 15, 30,
45, 60, 80, 100 μM

pH=6±0.05

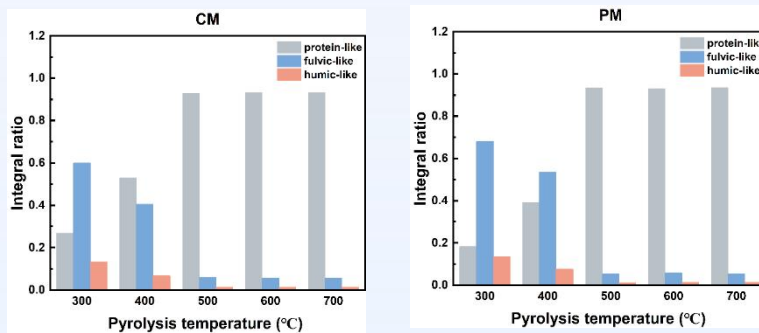
生物炭溶解性有机质 (DOM) 及对铜的吸附

DOM特征

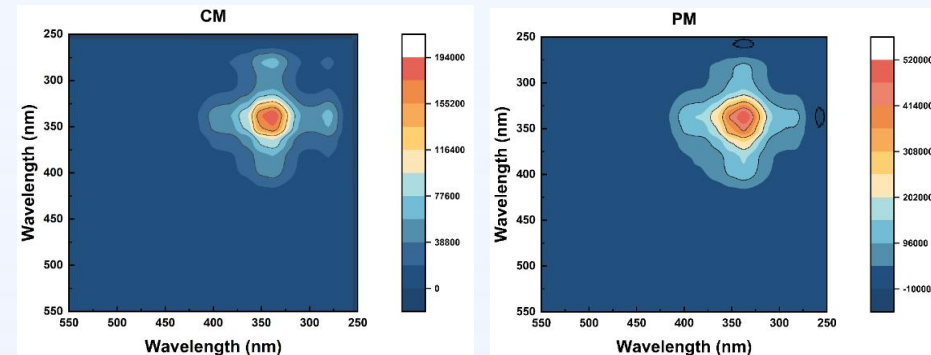
同步荧光光谱分析



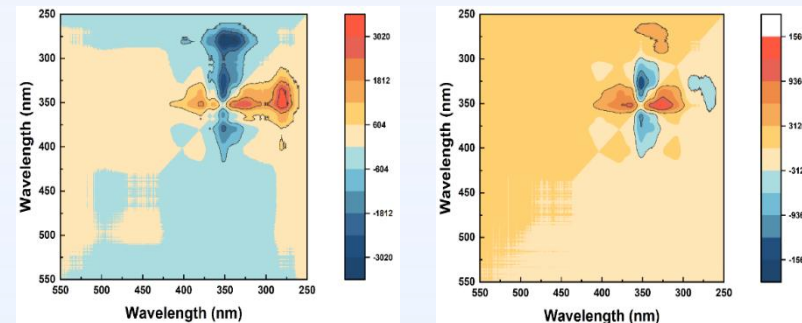
同步荧光光谱分析



组分积分比例



SFS常规同步(上) 2D-COS图



SFS常规异步(下) 2D-COS图

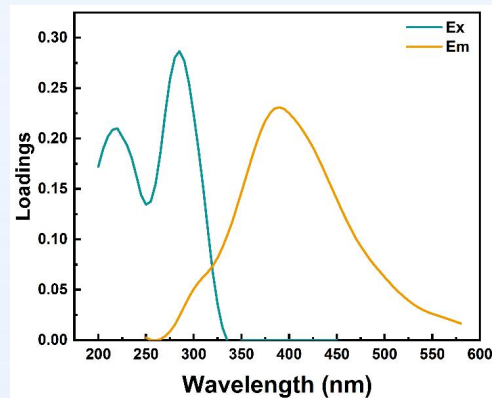
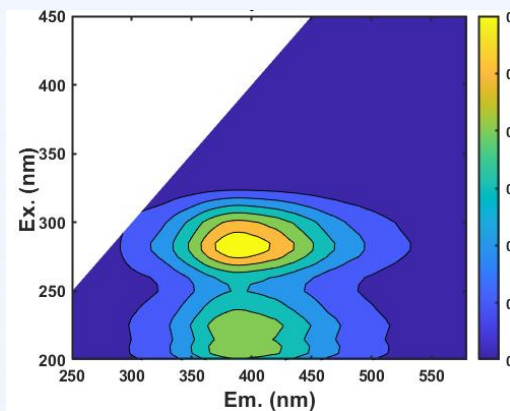
- DOM由类蛋白、类富里、类胡敏物质组分;
- 低热解温度生物炭的DOM以类富里物质为主, 高温则以类蛋白质物质为主。

生物炭溶解性有机质 (DOM) 及对铜的吸附

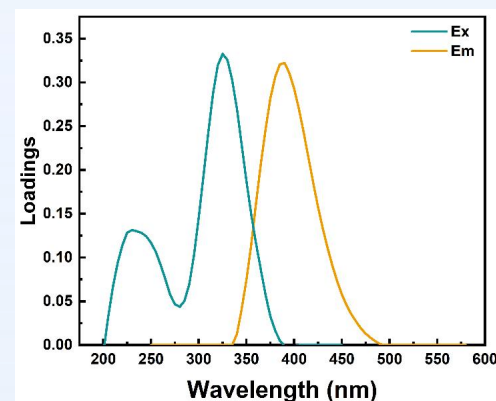
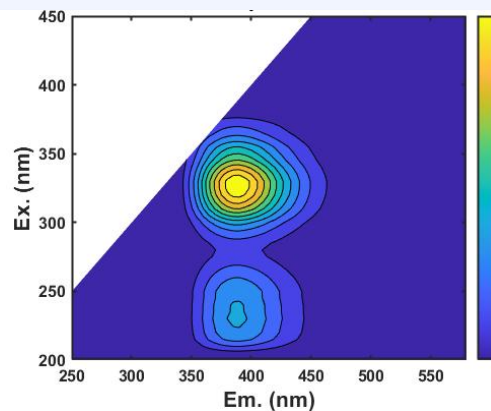
DOM特征

三维荧光光谱分析

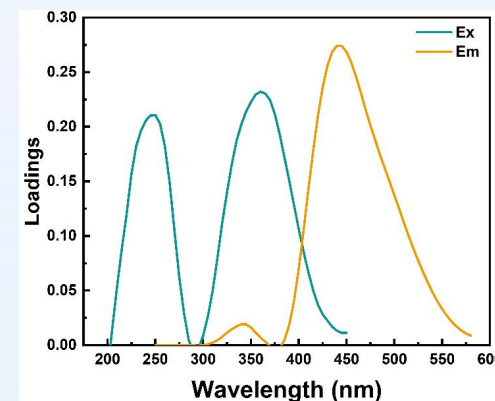
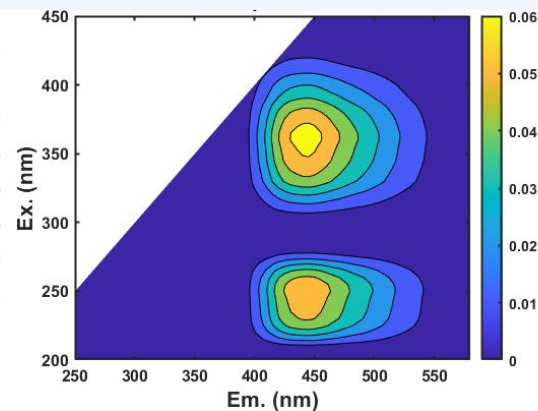
类蛋白质
色氨酸类物质



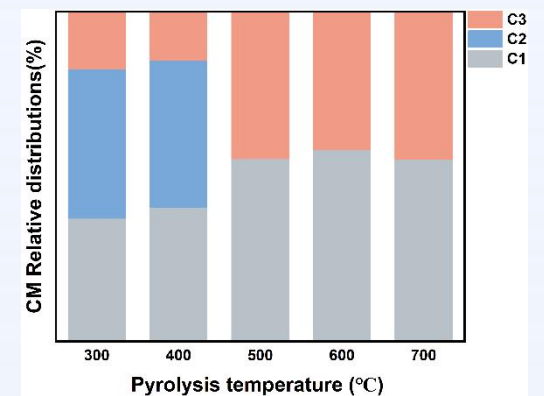
类富里物质
UVC类腐殖质和
UVA类海洋腐殖质



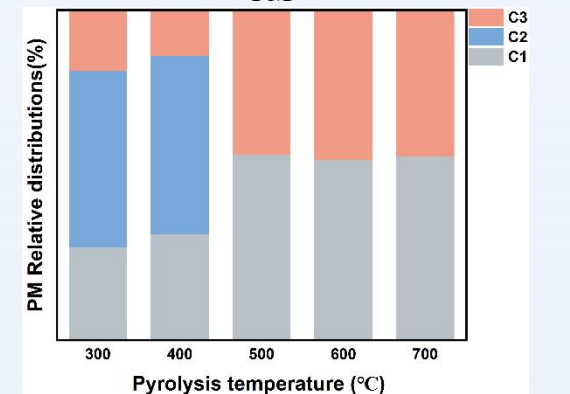
类胡敏物质
UVC类腐殖质和
UVA类腐殖质



CM



PM

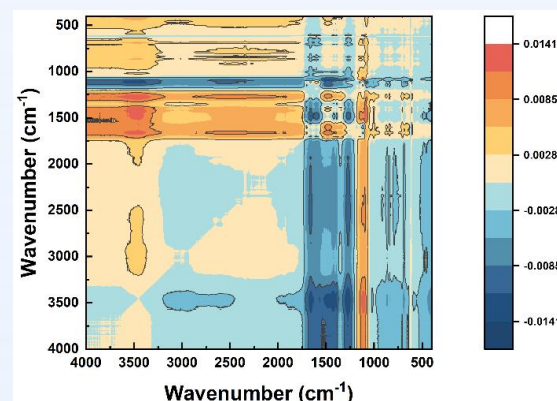
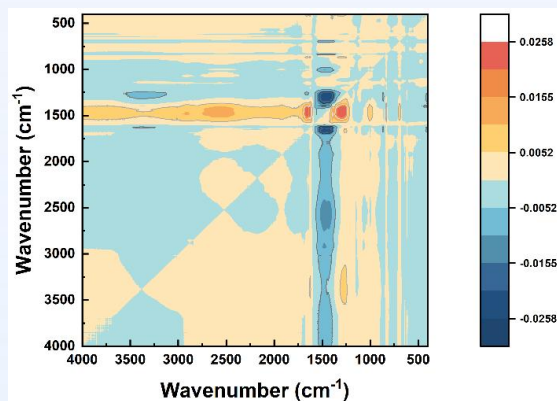
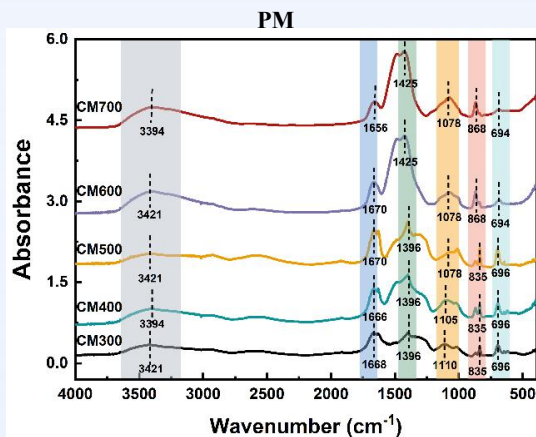
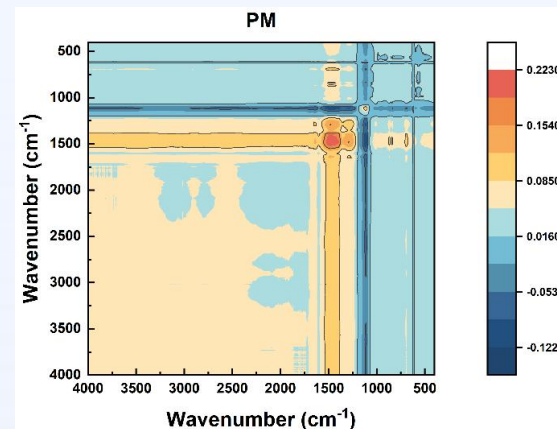
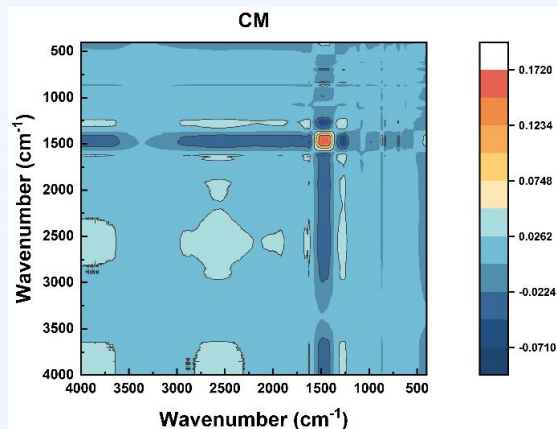
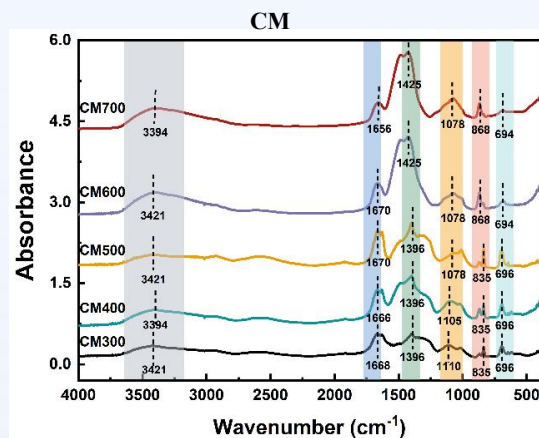


热解温度较低时, 亲水性UVC类腐殖质和UVA类海洋腐殖质为主; 高温, 疏水性组分色氨酸为主。

生物炭溶解性有机质 (DOM) 及对铜的吸附

DOM特征

红外光谱分析



DOM含有丰富的-OH、芳香族C=C、脂肪族C-H、多糖C-O、-CH₃、-CH₂官能团

多糖C-O > C-H > 芳环C=C > -OH

C-H > 芳环C=C > 多糖C-O

CM的多糖C-O对热解温度的升高最敏感；而PM则相反

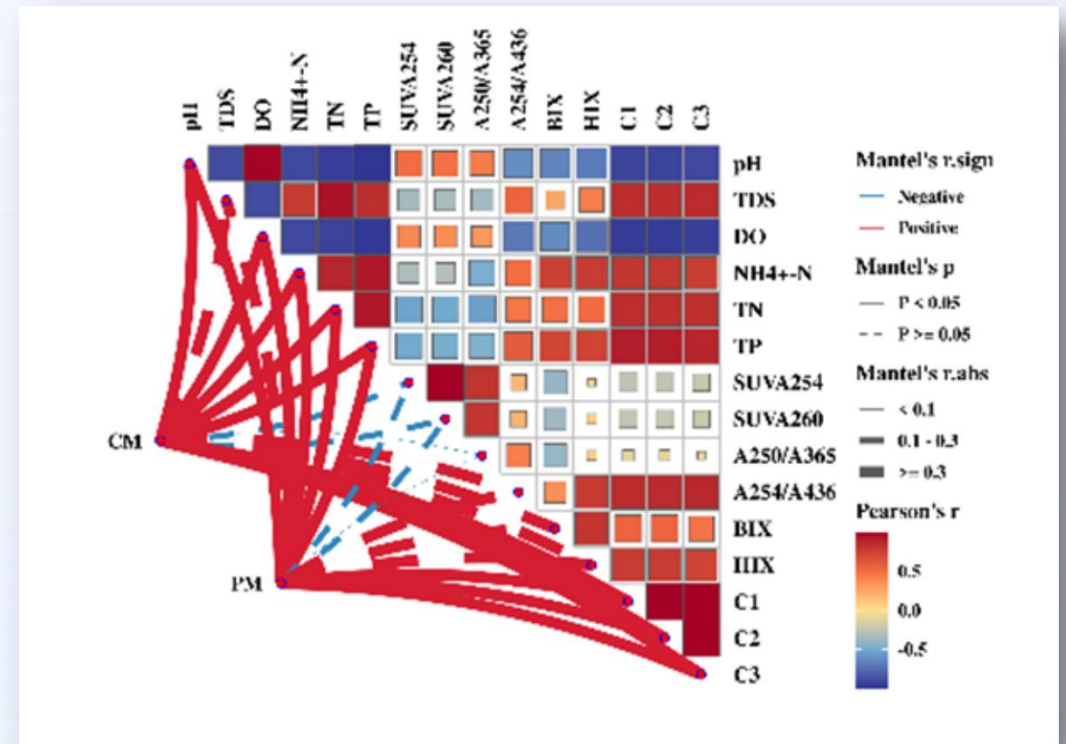
生物炭溶解性有机质 (DOM) 及对铜的吸附

DOM特征

水质分析

样品	pH	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP
CM300	8.54	2.64	5.495	5.096
CM400	9.79	0.75	1.409	4.610
CM500	10.26	0.45	0.549	1.244
CM600	11.28	0.27	0.645	0.014
CM700	11.35	0.01	0.072	0.015
PM300	8.58	1.20	6.808	3.950
PM400	10.02	0.99	4.776	2.250
PM500	10.53	0.66	5.158	1.132
PM600	11.41	0.54	3.296	0.014
PM700	11.32	0.21	3.105	0.058

曼特尔检验相关性分析

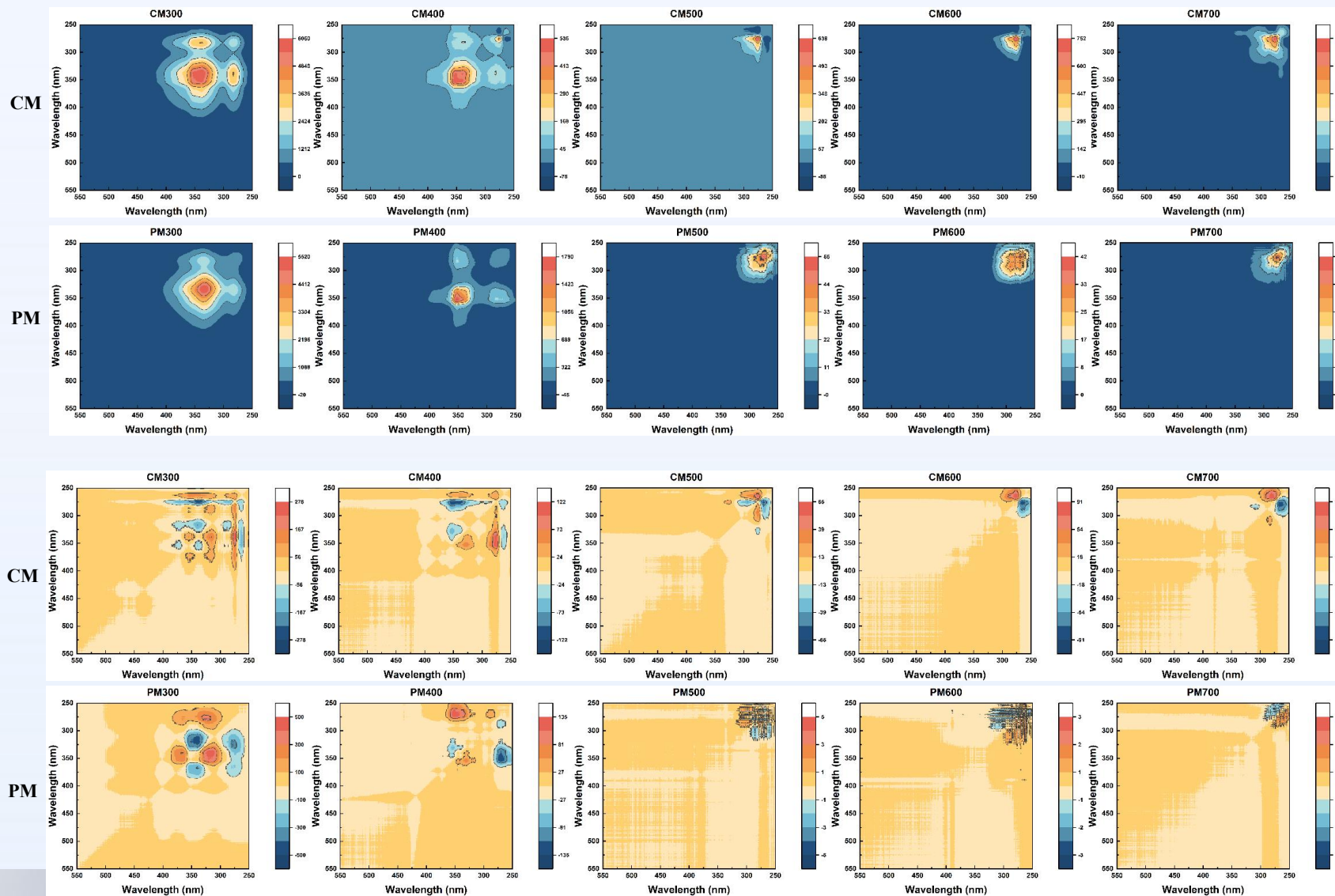


- 低温牛粪生物炭DOM释放的植物营养物质更多；
- 低温牛粪生物炭DOM以类腐殖质组分为主导，腐殖化程度高，含丰富植物营养物质，更适合应用于土壤改良

生物炭溶解性有机质 (DOM) 及对铜的吸附

DOM与Cu(II)的络合

同步荧光光谱



低温生物炭DOM类
富里和类蛋白质物质
组分与Cu(II)络合

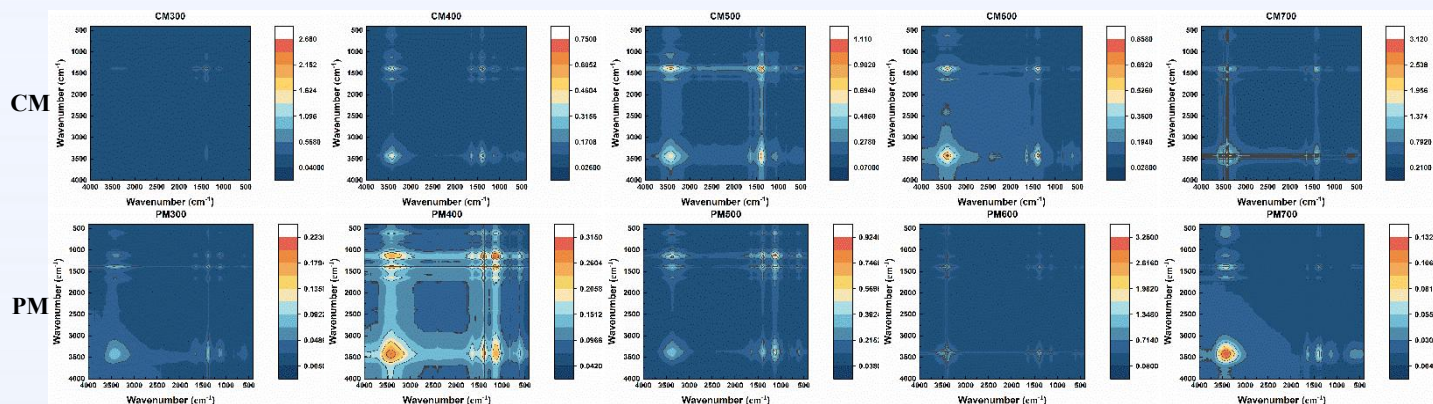
类富里物质组分

类蛋白质物质组分

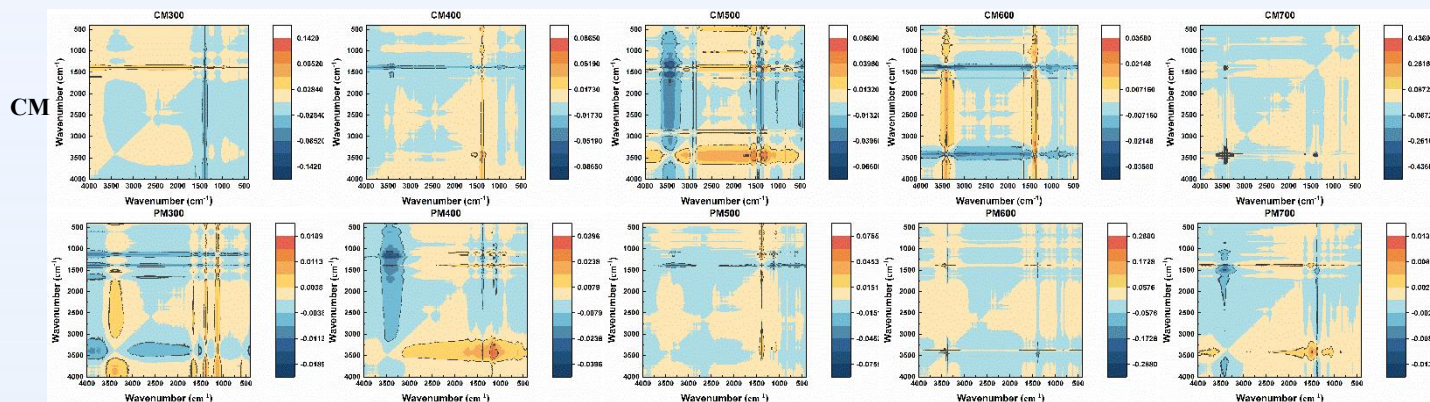
高温生物炭DOM中
仅类蛋白质物质组分
与Cu(II)络合

生物炭溶解性有机质 (DOM) 及对铜的吸附

DOM与Cu(II)的络合



□ 高温生物炭DOM与Cu的络合顺序为脂肪族C-H>芳香族C=C>-OH>多糖C-O



□ 低温生物炭DOM与Cu的络合顺序为-OH>芳香族C=C>脂肪族C-H>多糖C-O

生物炭溶解性有机质 (DOM) 及对铜的吸附

结论

粪基DOM以类腐殖质、类富里物质和类蛋白为主

低温：类腐殖质、类富里物质
>类蛋白；

高温：类腐殖质、类富里物质
<类蛋白。

01

300-400°C是制备粪基生物炭得最佳温度

DOM含量高：以亲水性类腐殖质和类海洋腐殖质为主；

更多的络合位点：丰富的-OH官能团与Cu(II)络合。

02

牛粪比猪粪更适宜做生物炭

DOM的含量：牛粪生物炭大于猪粪生物炭；

植物营养水平和生物利用度：牛粪更多氨氮、总氮以及总磷释放量。

03

01 | 我国土壤重金属污染现状

02 | 土壤重金属污染修复技术

03 | 污泥蛋白的提取及土壤修复材料制备及应用

04 | 生物碳溶剂性有机质及对铜的吸附

05 | 工作展望

CONTENTS



沈阳航空航天大学
SHENYANG AEROSPACE UNIVERSITY



工作展望

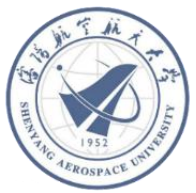
1. BGB智能释控材料的开发和应用；

2. 智能释控的互穿纤维土壤改良研究及应用；

3. 生物炭-微生物联合土壤重金属修复。

4. 土壤修复技术的工程应用及标准化。

从实验室到产业化——共拓污染土壤修复技术应用蓝海



沈阳航空航天大学
SHANGY AEROSPACE UNIVERSITY



能源与环境学院
ENERGY AND ENVIRONMENT

谢谢，请批评指正！

汇报人：魏砾宏

第一届岩土工程与可持续发展技术论坛

2025年4月11日