

由工业环保网主办的第十四届 2026 工业废水处理新技术与研发
成果交流大会暨供需对接展示大会 中国·杭州



双碳目标下城市多源污泥绿色处理 技术选择与高值资源化利用新路径

杨长明 研究员 博士生导师
同济大学环境科学与工程学院

2026.03.22



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

目录

CONTENTS

- ◆ 污泥及其处理处置技术概述
- ◆ 污泥绿色低碳高效脱水工艺及优化
- ◆ 脱水污泥高值资源化利用与产品开发
- ◆ 基于降碳减污的污泥全产业链安全处理处置技术创新
- ◆ 结论与展望





01

污泥及其处理处置技术概述

一、污泥及其处理处置技术概述

1.1 污泥的来源与特性

污水污泥

来源于城镇污水处理厂的初沉池、二沉池和深度处理设施。2023年我国城市污水处理总量达642.7亿 m^3 ，污水处理污泥总量已突破7527万t（以含水率80%计）。我国污泥有机质含量（以挥发性固体含量VS表示）通常为30%~70%，均值为50%。



管渠污泥

排水管网养护过程中清捞出的沉积物，不仅包含了来自雨水和污水中的容易沉淀的颗粒物，还混有道路冲洗物、生活垃圾、砂石和来自建筑工地的泥沙等成分。管渠污泥VS为17%~20%，无机质占比超过80%。



河湖底泥

河流、湖泊中的泥沙、黏土和动植物残骸等经长时间物理化学和生物转化沉降于水体底部形成的沉积层。河湖底泥的VS通常为3%~15%，主要由腐殖质构成。



一、污泥及其处理处置技术概述

1.1 污泥的来源与特性

污泥具有污染和资源双重属性，且具有复杂特性，这给污泥无害化处理和资源化利用工作提出了新要求。

双重属性

- ◆ 污泥既是一种**污染物**，含有重金属、病原体和新兴污染物；
- ◆ 污泥也是一种**可以利用的资源**，其含有的碳是宝贵的生物质能源，氮可回收做氮肥，磷可作为重要的战略性资源。

复杂特性

- ◆ 多介质（固-液-气三相），多组分、易腐败（类蛋白、类多糖、类脂质、无机物质、惰性物质、水分）；
- ◆ 有毒有害物质（重金属、病原微生物、持久性有机物）；
- ◆ 多重交互作用（易腐-惰性有机分子交联超分子结构）。

一、污泥及其处理处置技术概述

1.2 污泥处理处置主流技术体系

厌氧消化 + 土地利用

好氧发酵 + 土地利用

干化焚烧 + 建材利用

深度脱水 + 应急填埋

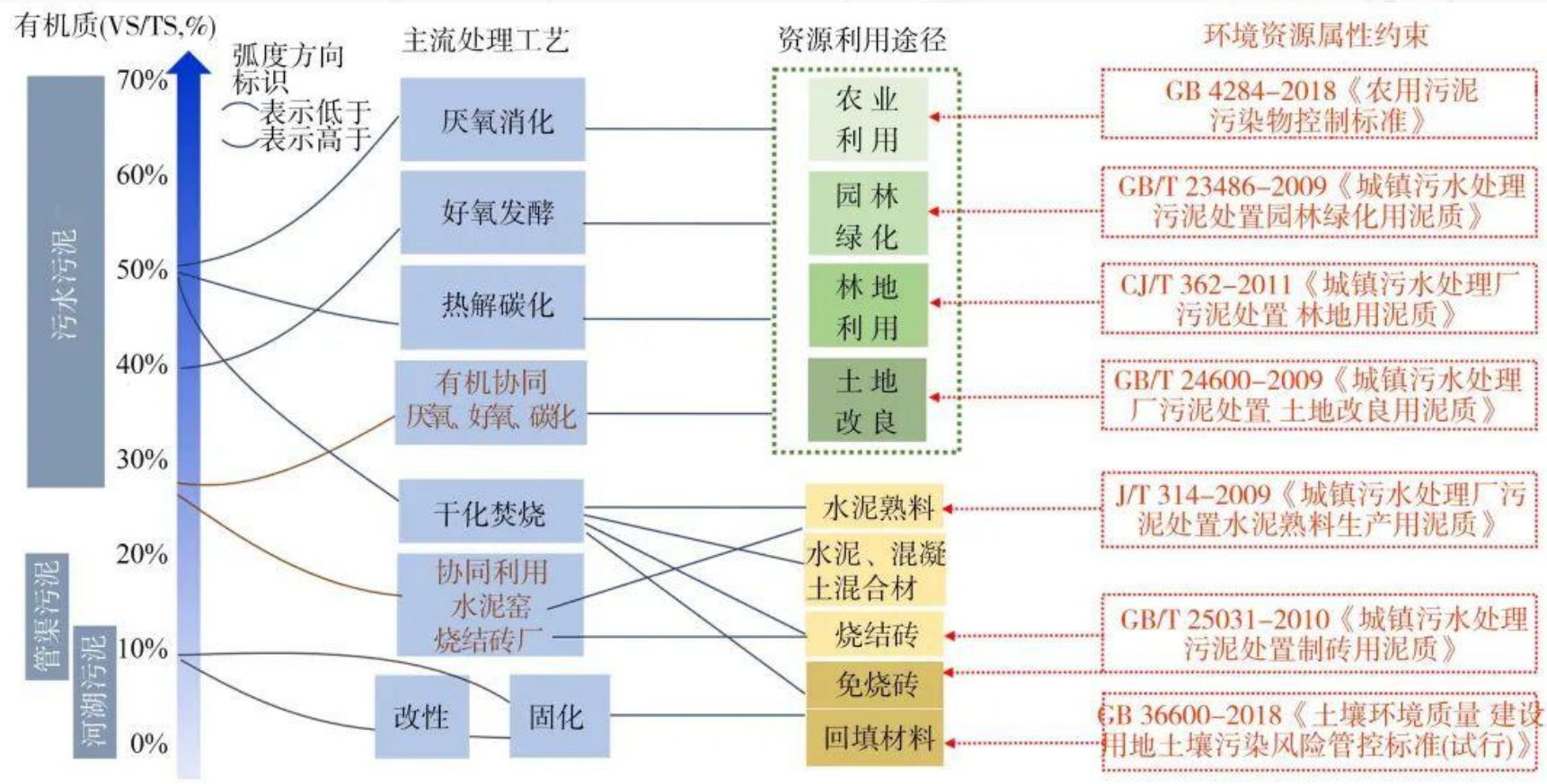


图1 基于多源污泥有机质含量的适用处理技术和资源利用途径

1.3 双碳目标下污泥处理处置的核心要求

双碳目标推动污泥处理处置从“分散、单一、粗放”向系统、协同、绿色低碳、高值资源化转型，核心要求体现为：

①

以资源利用为导向，根据泥质特性选择**梯级利用技术**，有机质含量 $\geq 30\%$ 的污泥优先能源化、资源化， $< 30\%$ 的污泥优先建材 / 工程利用。

②

强化**全链条碳减排**，降低处理过程能耗、物耗，控制逸散性温室气体排放，提升碳补偿效应。

③

推动“**泥水统筹**”与多元协同，实现多源污泥与厨余垃圾等有机废弃物协同处理、污泥处理与排水系统上下游协同、跨行业资源循环协同。



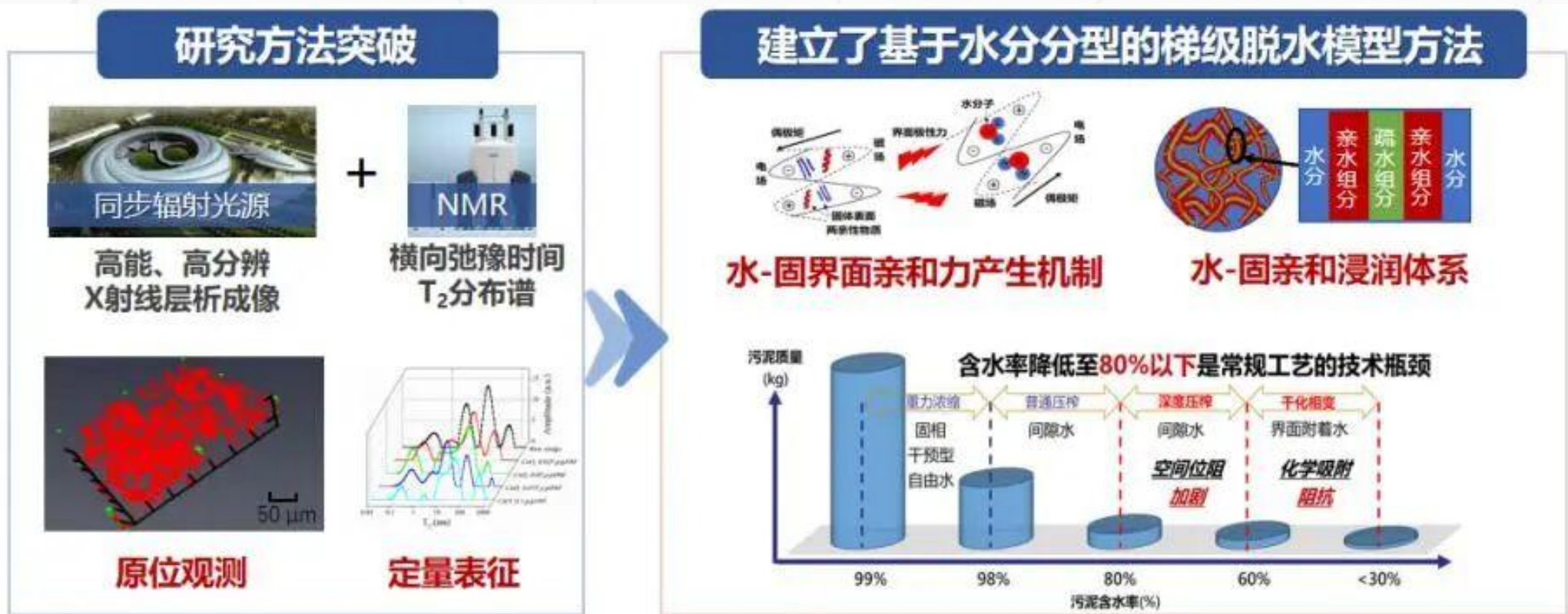
02

污泥绿色低碳高效脱水工艺及优化

二、污泥绿色低碳高效脱水工艺及优化

2.1 污泥水分分型理论与梯级脱水模型

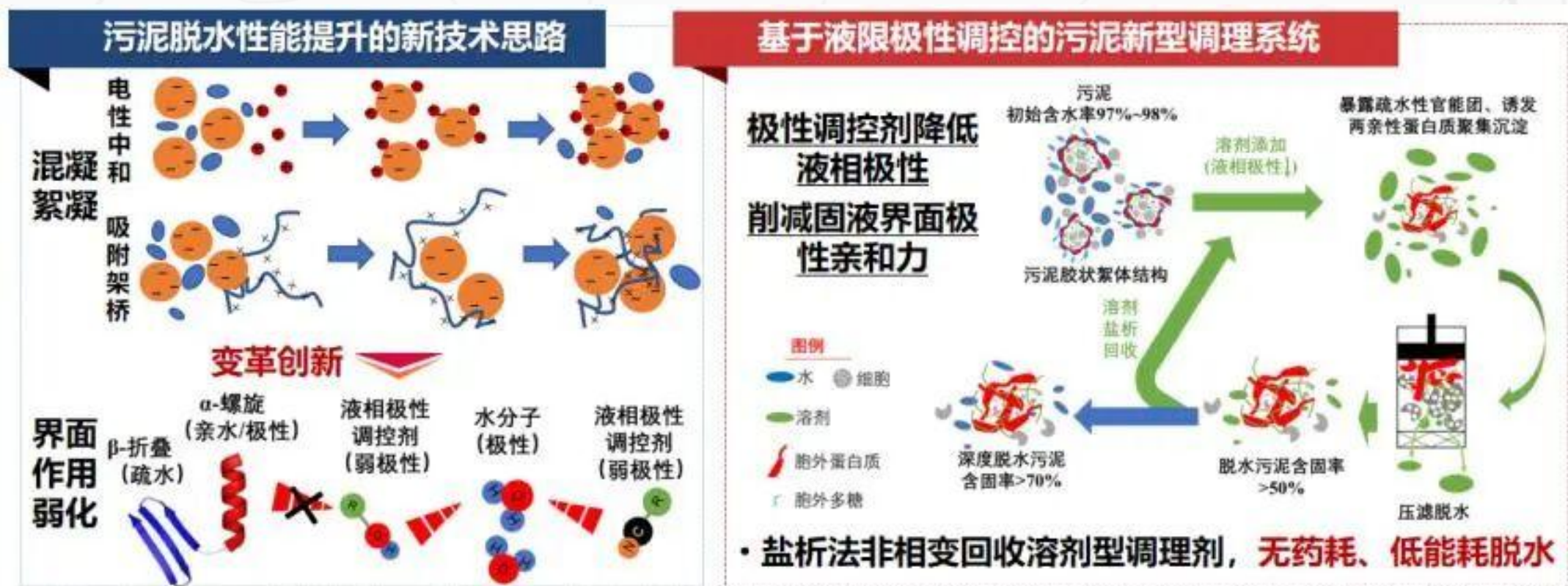
通过建立基于水分分型的梯级脱水模型方法，发现结合水的空间位阻和界面亲和是污泥水-固分离关键碍阻因子，突破了污泥水-固微尺度赋存状态的原位可视化、无损定量化瓶颈。



二、污泥绿色低碳高效脱水工艺及优化

2.2 基于液相极性调控的水-固分离新方法

基于液相极性调控的污泥新型调理系统，实现了污泥水-固分离由非选择性破壁溶胞向界面极性力靶向削减的变革式创新。

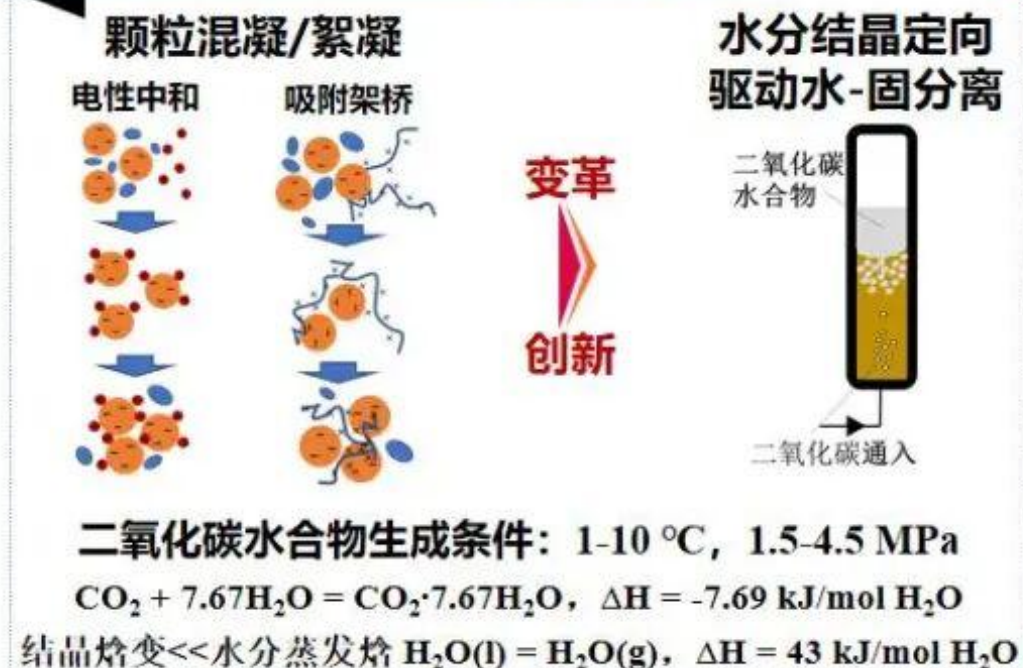


二、污泥绿色低碳高效脱水工艺及优化

2.3 基于水分结晶的污泥脱水调理新技术

基于水分结晶的污泥新型调理系统，实现了污泥水-固分离由颗粒混凝/絮凝向水分定向迁移的变革式创新。

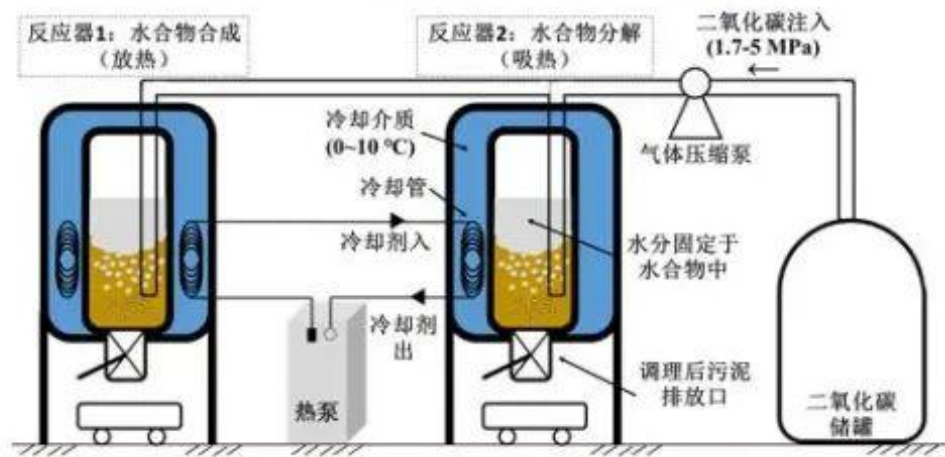
技术原理--结晶反应驱动间隙水脱除



基于水分结晶的污泥新型调理系统

气体调理剂循环利用、脱水泥饼中无药剂残留

双反应器交替运行，热泵耦合水合物的合成放热/分解吸热过程，实现系统能量平衡

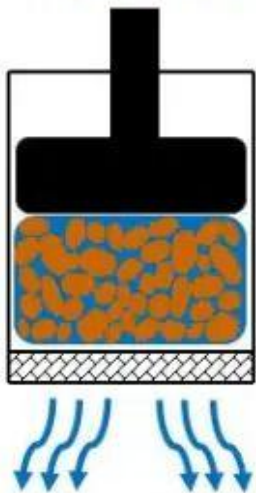


2.4 开发梯级高压压滤污泥固液分离新方法

将污泥固液分离过程抽象为多孔体系中水的渗流过程，转盘式挤压油缸，适用多种污泥，无需热源蒸汽，常规药剂调理，含水率低至30%，无臭味无粉尘。

理论模型

污泥固液分离
过程抽象为
多孔体系中水
的渗流过程



水-固浸润分布的“海绵体”
模型

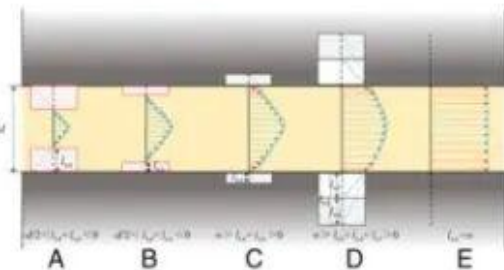
$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$
$$l_{s,t} = C/(\cos\theta + 1)^2$$
$$\mu(d) = \mu_l \frac{A_l(d)}{A_t(d)} + \mu_\infty [1 - \frac{A_l(d)}{A_t(d)}]$$
$$Q_s = \frac{\pi}{8\mu(d)} [(d/2)^4 + 4(d/2)^3]_{s,t} \frac{\partial p}{\partial z}$$

Hagen-Poiseuille方程

量化计算固体对水分的
束缚强度

机制解析

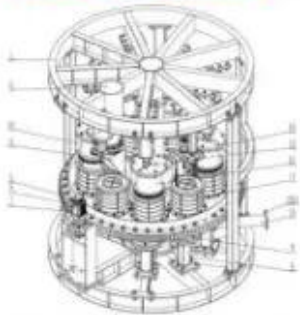
- **粘滞层**：水-固相互作用使得边壁附近水分的粘度、密度明显高于自由水
- **限域孔道**：粘滞层厚度5-10 nm，占孔道直径的1/3-2/3
- 污泥固体内存在限域孔道



限域孔道内水分的驱动机制：

水分沿孔道压力梯度 (12-16 MPa)
≥ 孔道边壁粘滞阻力

技术装备



转盘式挤压油缸

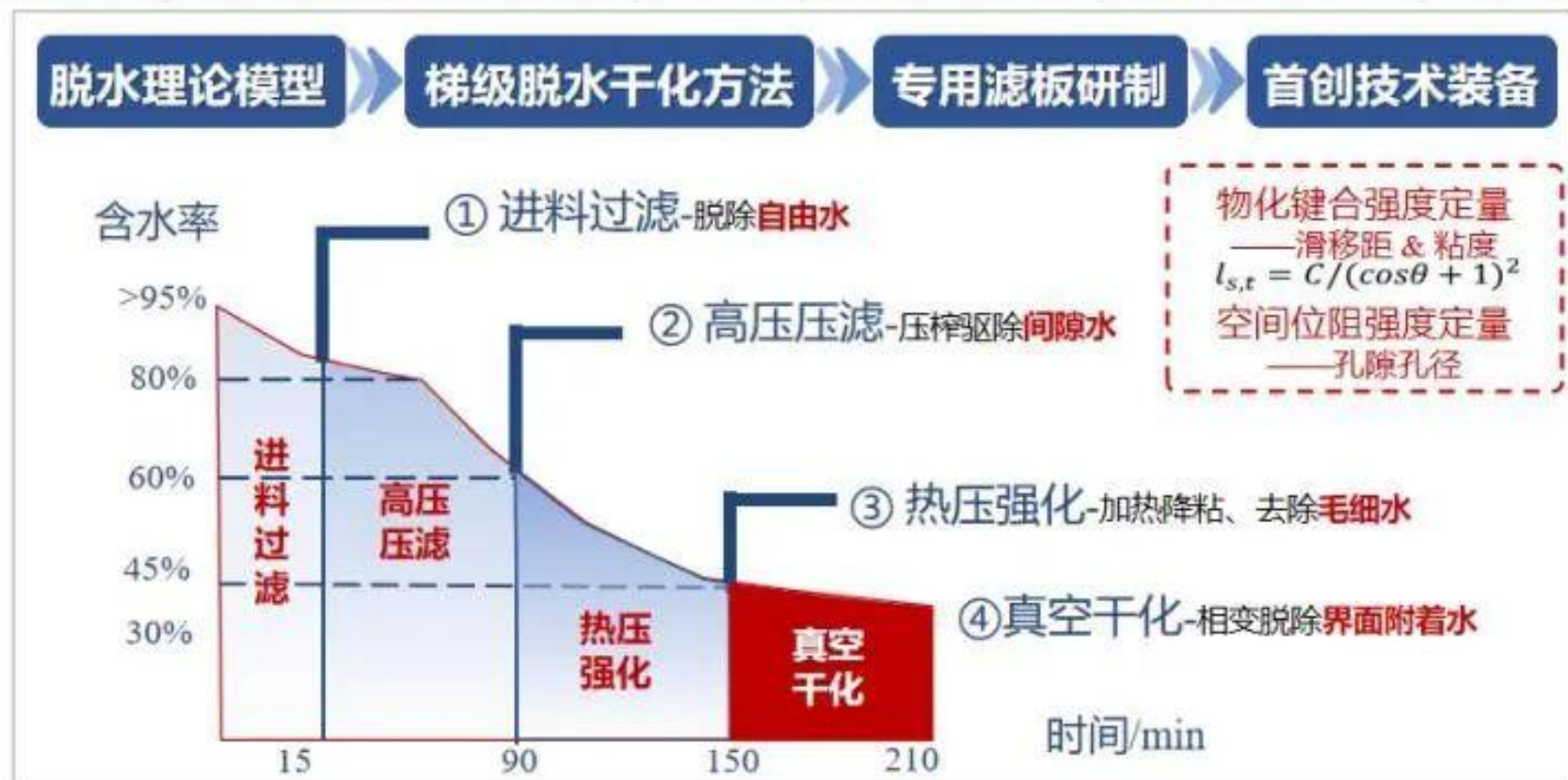


- ✓ 适用多种污泥
- ✓ 无需热源蒸汽
- ✓ 常规药剂调理
- ✓ 含水率低至30%
- ✓ 无臭味无粉尘

二、污泥绿色低碳高效脱水工艺及优化

2.5 全球首创低温真空脱水干化一体化技术装备

攻克了压滤脱水耦合真空干化的梯级驱水精准调控关键技术，提出了基于低品位热源的污泥真空干化新方法，综合能耗比传统技术降低65%。



创新利用低品位热源

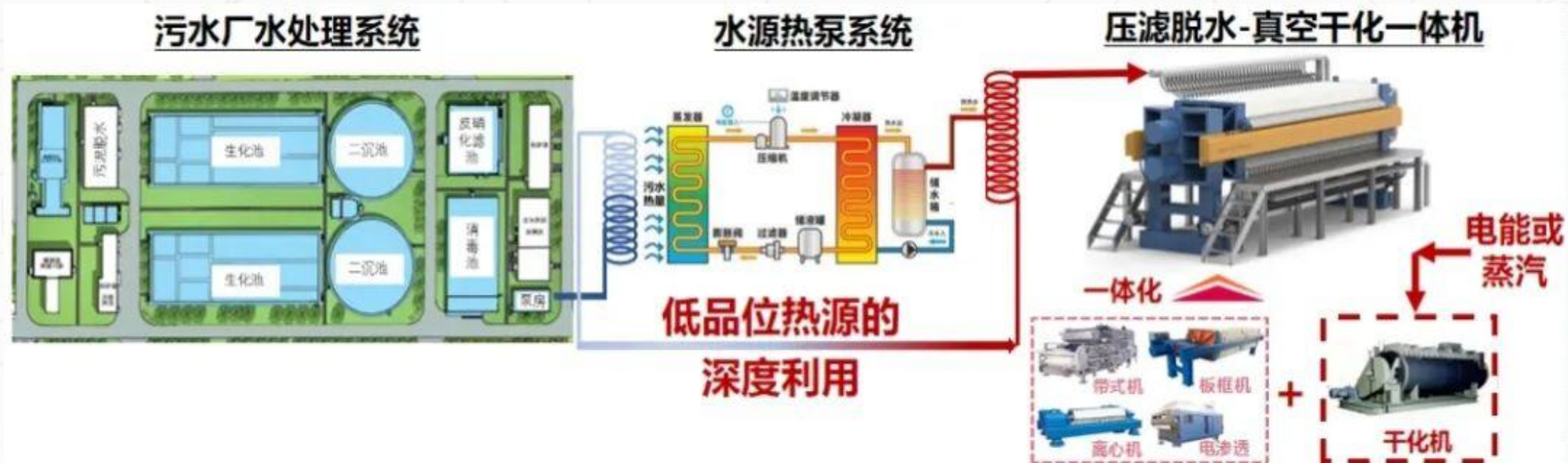


耐高温、耐高压、耐真空滤板
首创全自动化生产、大容量压注的全封闭生产工艺

二、污泥绿色低碳高效脱水工艺及优化

2.6 水源热泵耦合污泥低温真空干化技术

该技术作为污泥脱水干化模式的变革，真空干化温度 $60-80^{\circ}\text{C}$ ，水源热泵回收污水低品位热源即可满足真空干化需求，解决了污水源热泵耦合污泥低温真空干化的工程技术难题，率先建成了我国首个水源热泵-压滤脱水-真空干化一体化系统示范工程，节省污泥干化能耗30%以上，牵头编制了中国水协团体标准。





03

脱水污泥高值资源化利用与产品开发

三、脱水污泥高值资源化利用与产品开发

3.1 污泥基生物炭制备及在新污染物去除中的应用

3.1.1 污泥基生物炭的制备与改性

污泥基生物炭 (Sludge-derived biochar, SBC) 是指污泥经过脱水、干燥、碳化等处理后得到的一种新型生物质材料。该途径不仅实现了**污泥的减量化和稳定化**，还转化成了**高价值功能材料**。

制备技术

包括热裂解法、微波热解法和水热碳化的法。热解温度是最关键的控制参数：低温热解 (250 ~ 350°C) 有利于表面形成丰富的有机官能团；中温热解 (350 ~ 600°C) 是平衡SBC产率与性能的最佳温度范围；高温热解 (>600°C) 碳化程度更高，石墨微晶结构增多，导电性增强。

改性优化策略

包括物理活化和化学改性。物理活化使用CO₂、水蒸气等氧化性气体在高温下对SBC进行二次处理，显著增大比表面积和孔容积。化学改性包括酸/碱改性和金属负载改性，可引入特定活性位点或赋予其新功能（如磁性等）。

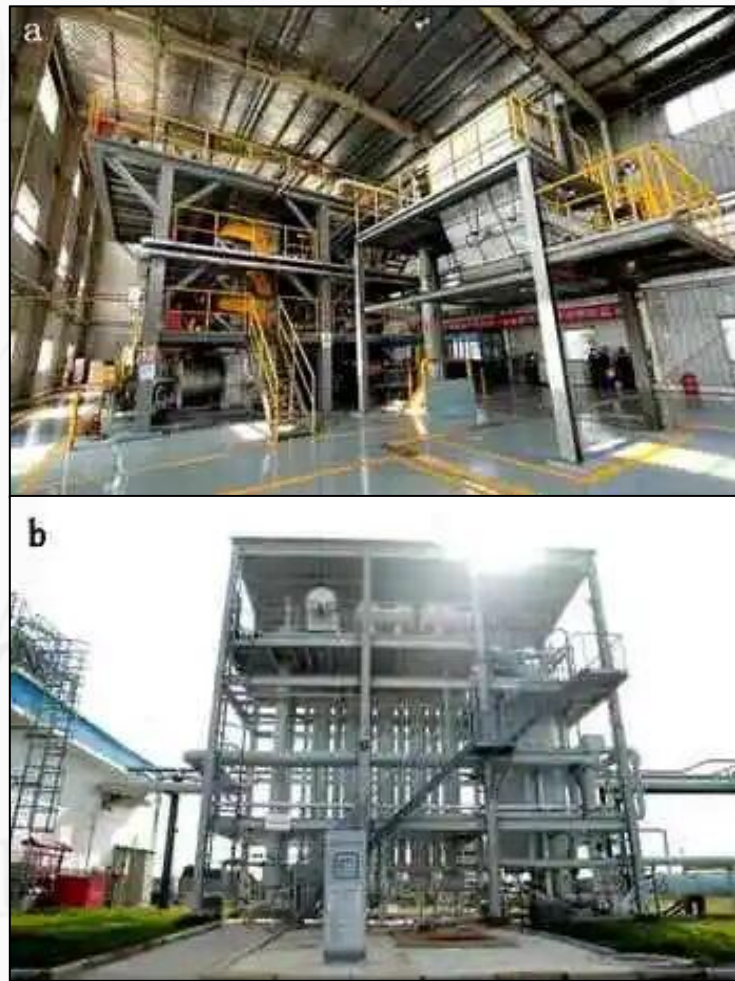


图2 热解碳化(a)和水热碳化(b)生产装置

三、脱水污泥高值资源化利用与产品开发

3.1 污泥基生物炭制备及在新污染物去除中的应用

3.1.1 污泥基生物炭的制备与改性

污泥基生物炭 (Sludge-derived biochar, SBC) 是指污泥经过脱水、干燥、碳化等处理后得到的一种新型生物质材料。该途径不仅实现了**污泥的减量化和稳定化**，还转化成了**高价值功能材料**。

制备原料与预处理

市政污泥的组成复杂,以微生物菌胶团、有机残片、无机颗粒、重金属和病原体为主,其固有的物化特性是决定生物炭品质的关键因素。在热解前,污泥须经过必要的预处理,如通过药剂调理机械脱水后,直接水热碳化或干燥以降低含水率,再通过粉碎提升物料的均一性。

污泥基生物炭制备原理及产物

污泥基生物炭(sludge-derived biochar, SBC)是污泥热解的产物,热解过程通常是指污泥在无氧或低氧环境下,经加热升温引起分子分解产生生物炭、可冷凝液体和气体产物的过程。该过程使得污泥中有机物及难以被分离和去除的ECs分解,形成了具有比表面积大、孔隙结构发达、富碳固碳的SBC。利用污泥制备生物炭的技术主要有热裂解法、微波热解法和水热碳化法等。



图 生物炭

三、脱水污泥高值资源化利用与产品开发

3.1.1 污泥基生物炭的制备与改性

热解碳化

热解碳化是污泥基生物炭（SBC）制备的核心环节，在惰性气氛（ N_2 或 Ar ）中缺氧裂解污泥。

- ◆ **低温热解**（ $250 \sim 350^\circ C$ ）：挥发分大量析出，形成丰富有机官能团（ $-COOH$ 、 $-OH$ 等），但孔隙发育不完全，比表面积仅 $30 \sim 50 \text{ m}^2/\text{g}$ ，主要依靠表面官能团吸附。
- ◆ **中温热解**（ $350 \sim 600^\circ C$ ）：平衡产率与性能的最佳范围。有机物进一步裂解，孔隙结构显著发育，比表面积增大；官能团部分分解，疏水性增强。研究表明， $600^\circ C$ 条件下制备的SBC比表面积可达 $214.97 \text{ m}^2/\text{g}$ 。
- ◆ **高温热解**（ $>600^\circ C$ ）：碳化程度更高，石墨微晶增多，导电性增强。比表面积可能因孔隙塌陷而减小，但平均孔径增大；官能团大量减少，灰分升高。高温有利于重金属稳定化，降低浸出风险。
- ◆ **微波热解**（ $400 \sim 800^\circ C$ ）：利用微波（ 2.45 GHz ）使极性分子高速旋转摩擦生热，加热均匀，孔隙结构更发达，吸附性能更好。优化条件下（ $500^\circ C$ 、 30 min 、 640 W ）可获得最高碘值。

水热碳化法

水热碳化(HTC)是在亚临界水条件下进行的,适用于高含水率生物质(如污泥、藻类)的处理。该方法能在较低温度($180 \sim 250^\circ C$)下实现生物质的碳化。

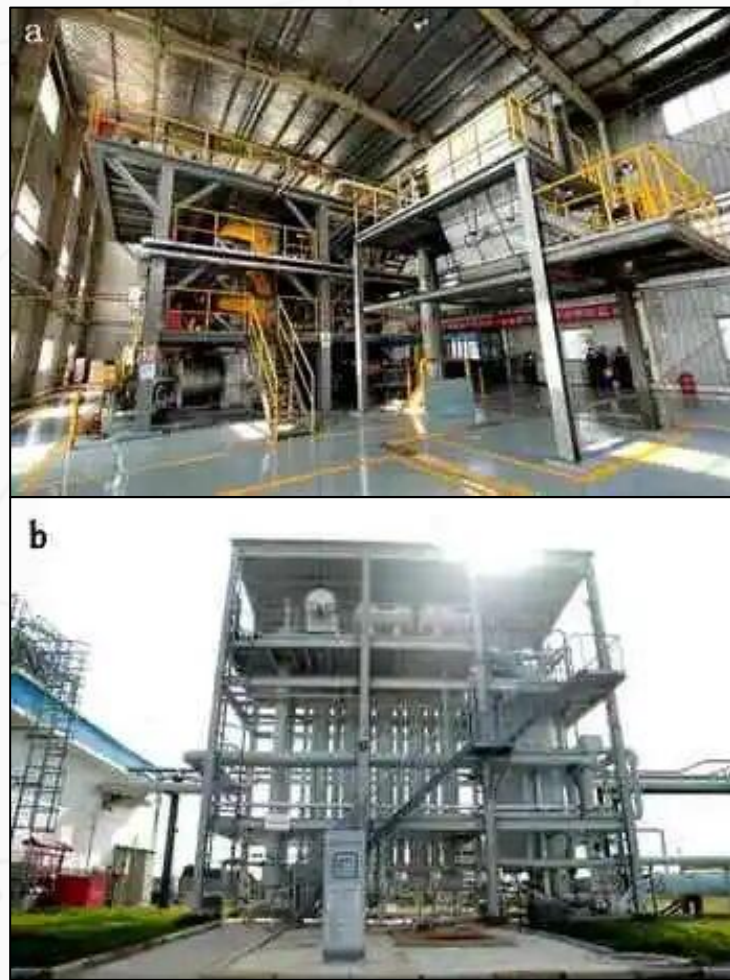


图 热解碳化(a)和水热碳化(b)生产装置

三、脱水污泥高值资源化利用与产品开发

3.1.1 污泥基生物炭的制备与改性

改性优化策略

SBC改性能够进一步增大比表面积、优化孔径分布、引入特定活性位点或赋予其新功能(如磁性等),提高SBC对污染物的去除性能。SBC改性技术有物理活化和化学改性两种。

- ◆ **物理活化**: 通常在热解后,使用**二氧化碳(CO₂)**、**水蒸气**等氧化性气体在高温下对SBC进行二次处理。这些气体与碳基质发生反应($C+H_2O\rightarrow CO+H_2$, $C+CO_2\rightarrow 2CO$),从而蚀刻出新的孔隙,显著增大比表面积和孔容积。

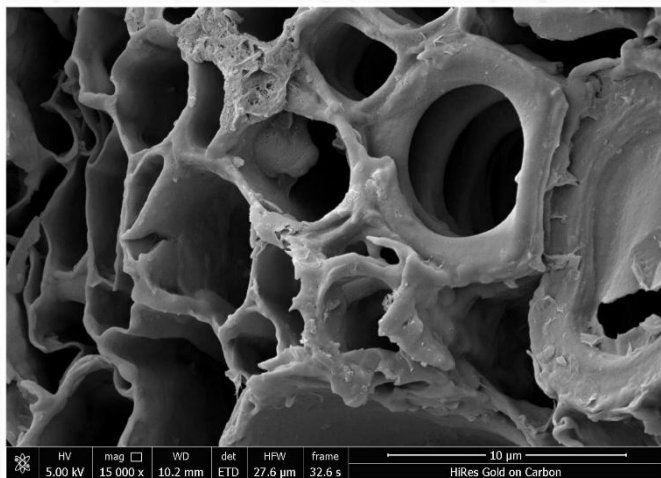
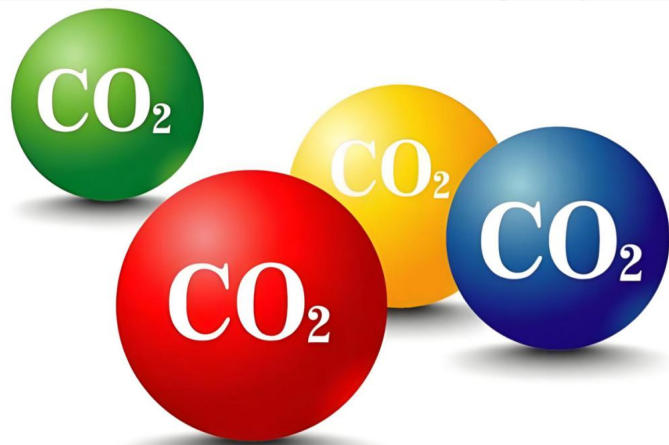


图 改性生物炭结构

三、脱水污泥高值资源化利用与产品开发

3.1.1 污泥基生物炭的制备与改性

改性优化策略

◆ **化学改性**：是通过化学反应改性SBC,根据改性剂的种类分为**酸/碱改性和金属负载改性**。

□ **酸洗**可有效去除SBC中的灰分暴露被堵塞的孔隙,同时引入含氧官能团,常用的酸有HCl、HNO₃、H₃PO₄。

□ **碱改性**中常用的碱有KOH、NaOH,是制造高性能多孔碳的强效手段,比表面积可在1000 m²/g以上。

□ **金属负载改性**是赋予SBC催化功能的最主要策略。通过浸渍法将铁(Fe)、铜(Cu)、锰(Mn)、镁(Mg)等金属盐负载至SBC上,后续经热解或还原处理形成金属氧化物或纳米零价金属颗粒。

例如：**MgO和CuO**等金属氧化物负载可为新污染物提供丰富的表面吸附位点,并通过非均相催化机制降解污染物；**磁性铁氧化物**(Fe₃O₄,γ-Fe₂O₃)负载提供了催化位点,可用于活化过一硫酸盐(PMS)或过二硫酸盐(PDS)。



图 氢氧化钠和四氧化三铁

三、脱水污泥高值资源化利用与产品开发

3.1 污泥基生物炭制备及在新污染物去除中的应用

3.1.2 新污染物去除效能与机制

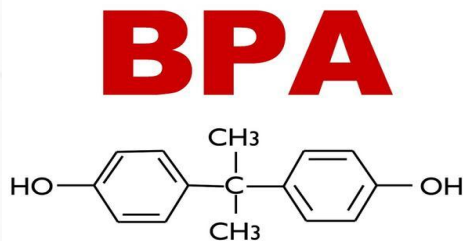
抗生素去除

SBC既能通过孔隙吸附和表面络合富集抗生素，又能活化过一硫酸盐(PMS)等氧化剂产生硫酸根自由基($\cdot\text{SO}_4^-$)、羟基自由基($\cdot\text{OH}$)和非自由基单线态氧($^1\text{O}_2$)等，将抗生素降解为小分子产物甚至矿化为 CO_2 和 H_2O 。



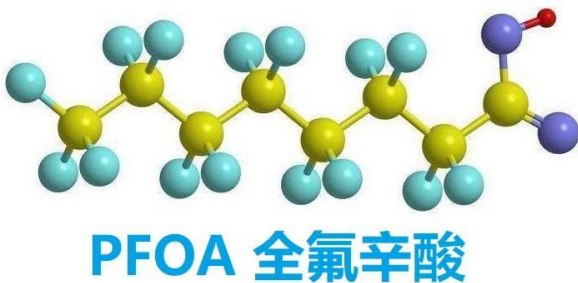
内分泌干扰物 (EDCs) 去除

双酚A (BPA)、雌二醇 (E2) 等具有疏水性和芳香环结构。SBC的碳基质与EDCs间存在强烈的 π - π 电子供体-受体相互作用和疏水作用。磁性污泥炭可以通过孔隙填充、静电吸引、氢键作用、疏水作用、 π - π 电子供体-受体相互作用、离子交换和表面配位作用去除BPA，吸附量达9227.96 mg/kg。



全氟化合物 (PFCs) 去除

针对SBC疏水疏油且带负电的特性，改性策略侧重于构建静电相互作用。铁锰双金属改性SBC可以高效催化过二硫酸盐(PDS)氧化降解全氟辛酸磺酸(PFOS)，30 min时的降解率便已超过了90%。



三、脱水污泥高值资源化利用与产品开发

3.1 污泥基生物炭制备及在新污染物去除中的应用

3.1.3 污泥及其衍生品用于工业废水除氟

污泥类型	主要发现/制备方法	关键数据/性能	应用形式/场景
城市污水厂 剩余污泥	富含碳元素，直接吸附F ⁻ ，受投加量、pH、时间影响	投加量20 g/L时，10 mg/L F ⁻ 去除率达83.1%；pH适应范围3-10	直接烘干粉碎后作为吸附剂
脱硅污泥	含大量针状羟基氧化铁晶体，吸附机理涉及离子交换和静电吸附	pH 2-10时去除率>90%；25℃实际吸附量达6.3 mg/g	直接作为氟离子吸附剂
给水厂污泥	富含铝盐，与粉煤灰、水泥等制备免烧结陶粒	陶粒对总磷和氟化物去除率较普通陶粒分别提升6.1倍和2.7倍	水处理滤料（动态吸附柱试验）
铝污泥	非晶态铝对氟有良好亲和性；通过热改性或海藻酸钠包埋成型	热改性后去除率90.60%；海藻酸钠包埋后达95.09%	海藻酸钠包埋凝胶球
碳化污泥	通过热解、酸/碱改性、负载金属（铝钪）或复配阴离子树脂制备复合材料	具有资源化效果好、成本低的特点	除氟滤料、生物炭复合材料
含铝污泥	与废盐酸、碳酸钙等反应聚合，制备液体除氟剂	实现工业废酸与含铝固废的综合利用	液体除氟剂

三、脱水污泥高值资源化利用与产品开发

3.1 污泥基生物炭制备及在新污染物去除中的应用

3.1.3 污泥及其衍生品用于工业废水除氟

城市污水处理厂剩余污泥的直接利用

城市污水厂剩余污泥富含有机质与碳元素，是潜在的生物吸附剂。

- 研究显示，将其烘干粉碎后直接处理含氟废水，室温下1 h可达吸附平衡；在污泥投加量 20 g/L 时，对初始质量浓度 10 mg/L 的模拟含氟水去除率**达 83.1%**。
- 且这种污泥在**pH为3–10**范围内除氟效果稳定，可用于多种工业废水处理。

工业副产脱硅污泥的应用

钢板清洗废酸净化产生的脱硅污泥是高效氟离子吸附剂，**富含针状羟基氧化铁晶体**，Zeta 电位为 6.98。

- 在 pH 2–10 范围内，对氟离子去除率稳定在 **90%** 以上；25°C下实际吸附量达 6.3 mg/g。
- **吸附机理**：以离子交换与静电吸附为主，为自发放热的物理单分子层均匀吸附，同时伴随部分化学吸附。

三、脱水污泥高值资源化利用与产品开发

3.1 污泥基生物炭制备及在新污染物去除中的应用

3.1.3 污泥及其衍生品用于工业废水除氟

给水厂污泥的资源化制备陶粒

给水厂污泥主要来自净水混凝沉淀，富含铝盐絮凝体。

- 以其为主要原料，复配粉煤灰、水泥和激发剂，可制备新型免烧结陶粒。
- 在**最佳配比**（给水厂污泥45%、粉煤灰25%、水泥25%、激发剂5%）下制备的陶粒，用作污水处理厂尾水的深度处理滤料。
- 在动态吸附柱试验中，水力停留时间为8 h时，其对氟化物的去除率稳定在19.1%左右，相较于普通陶粒，其**除氟性能提升了2.7倍**。

铝污泥的改性与成型

水厂铝污泥中的铝主要以**非晶态**结构存在，这种非晶态铝对氟离子有很好的亲和性。

- **热改性**：当温度为400℃时，改性污泥对氟化物的去除率可从原污泥的72.80%提升至90.60%。
- **包埋固定化**：以海藻酸钠包埋热改性污泥制备凝胶球，吸附性能优异且易固液分离，最优条件下除氟率可达 95.09%，明显优于原污泥。

三、脱水污泥高值资源化利用与产品开发

3.1 污泥基生物炭制备及在新污染物去除中的应用

3.1.3 污泥及其衍生品用于工业废水除氟

碳化/改性污泥衍生复合滤料

- **金属负载：**以市政污泥为原料，通过热解、活化及共沉淀工艺，可以制备铝钨负载的污泥生物炭复合材料，用于**强化除氟**。
- **复合滤料：**有专利公开一种碳化污泥基除氟复合滤料，由 50 ~ 70 份多步改性碳化污泥、15 ~ 35 份阴离子树脂及黏土、粘结剂、造孔剂复配而成，适用于**半导体芯片、玻璃刻蚀等高浓度含氟废水**，具有资源化率高、成本低、除氟效果好等优点。

其他利用形式：液体除氟剂

除了固体吸附剂和滤料，污泥还可以用于制备液体除氟药剂。

- 例如：利用工业副产废盐酸、碳酸钙和铝制品行业的含铝污泥为主要原料，通过反应和聚合，可以制备出液体除氟剂。
- 这种方法不仅处理了废酸和含铝固废，实现了**“零排放”**和**“资源化”**，而且生产成本低，产品质量稳定。

3.2 污泥及衍生品在土壤修复中的应用

污泥及改性生物炭富含有机质、营养元素与功能性官能团，可用于盐碱地土壤改良与矿区重金属污染土壤治理，通过改善土壤理化性质、固定重金属、提升土壤肥力，实现土壤修复与污泥资源的循环利用，符合“**以废治废**”的绿色发展理念。

盐碱地土壤改良

盐碱地核心问题: 土壤 pH 高、盐分含量高、有机质匮乏、土壤结构板结。

污泥好氧发酵产物与污泥基生物炭施入盐碱地后，可通过以下机制实现改良：

- ❑ 生物炭的**多孔结构**降低土壤容重，提升土壤透气性与保水保肥能力；
- ❑ 污泥中的有机质与生物炭表面的**含氧官能团**（-COOH、-OH）中和土壤碱性，降低土壤 pH 与盐分含量；
- ❑ 污泥中的**氮、磷、钾及微量元素**补充土壤肥力，促进土壤微生物群落结构优化，提升土壤酶活性，改善土壤微生态环境。



图3 盐碱地

三、脱水污泥高值资源化利用与产品开发

国家对新污染物的治理规划

战略定位：从“起步探索”向“全面攻坚”提速”

“新污染物协同治理”被列入“十五五”规划109项重大工程项目，标志着环境治理进入精准化、系统化的新阶段。

- ◆ **地位升级**：新污染物治理与大气、水、土壤、固废、危废并列，形成了“天-水-土-废-毒-新”的全要素治理闭环。
- ◆ **PFAS为核心对象**：凭借“永久化学品”特性，PFAS已成为新污染物协同治理的核心攻坚对象。
- ◆ **管控跨越**：监管范围将从“单一物质”（如PFOS、PFOA）向“全类物质”（参考OECD定义）实现历史性跃升。

“十五五”规划
109项
重大工程项目

三、脱水污泥高值资源化利用与产品开发

国家对新污染物的治理规划

关键发展趋势

维度	核心变化	要点
监测体系	从"底数不清"→"精准识别"	• 国家将PFAS纳入水环境基准研究 • AI+大数据实现60万+化合物智能筛查 • 构建"水-土-气-生"立体监测网
标准法规	从"非强制"→"强制达标"	• 四川已出台首个地方排放限值，国家标准预计"十五五"出台 • 饮用水指标可能从"参考项"升级为"强制项" • 管控延伸至生产、使用、排放、废弃全生命周期
市场机遇	新兴增长极开启	• 绿色替代：无氟防水剂、消防泡沫需求爆发 • 检测产业：质谱仪、筛查软件、第三方检测等赛道率先爆发 • 治理技术：活性炭/树脂吸附、膜过滤已成熟；电化学/等离子体降解技术待突破

三、脱水污泥高值资源化利用与产品开发

国家对新污染物的治理规划

企业应对策略

面对国内外日益严苛的PFAS监管环境，我国企业应从以下四个维度提前布局：

1. 建立供应链合规管理体系

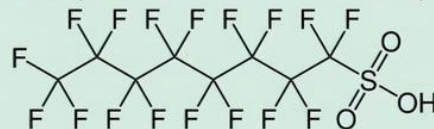
- **识别风险点：**企业需全面排查电子、汽车、半导体、包装等材料中隐匿的PFAS成分。注意SDS（安全数据表）可能因痕量存在而未标出的风险。
- **标准化数据模型：**构建包含CAS级标记、多层BOM（物料清单）关系图和风险评分的合规数据模型。
- **建立可审计系统：**确保数据存储具备版本控制、时间戳和证据追踪功能，以满足欧美等国日益严格的合规审计要求。

2. 推进技术创新与替代战略

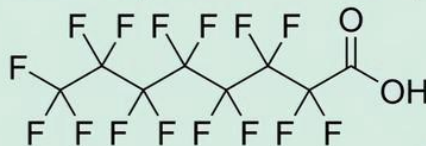
- **加速无氟研发：**积极开发PFAS-free认证产品，如在氟化工领域开发无PFOA聚合工艺、降解不产生TFA的第五代含氟制冷剂等。
- **储备减脱氟技术：**针对工业排放，提前布局“脱氟”末端治理设备。
- **应对检测标准变更：**欧盟等国已引入碱性水解前处理等新检测方法，企业需同步更新自检技术，避免因“检出量提高”导致产品被退运。

PFAS

PFOS (Perfluorooctanesulfonic acid)



PFOA (Perfluorooctanoic acid)



三、脱水污泥高值资源化利用与产品开发

国家对新污染物的治理规划

企业应对策略

3. 强化职能分工与ESG管理

- **明确RACI矩阵：**在企业内部明确合规部门（监管逻辑）、工程/研发（替代方案）、采购（供应商督导）和法务的职能分工。
- **提升ESG评级：**主动推进PFAS替代有助于提升ESG评级，降低跨境贸易合规风险，并有望获得“十五五”规划下的绿色金融政策支持。

4. 应对区域化差异管控

- **出口合规对标：**出口企业必须同时满足多套定义（如欧盟的“全类淘汰”与美国的“分级管理”），确保在各目标市场均能实现合规。
- **关注监管时间表：**密切关注2026年后欧盟及美国各州关于消费品中PFAS禁令的正式生效节点，提前寻找替代供应商。



三、脱水污泥高值资源化利用与产品开发

3.2 污泥及衍生品在土壤修复中的应用

矿区重金属污染土壤治理

矿山废弃地土壤具有重金属背景值高、土壤结构破损、肥力低下等问题，污泥堆肥（SSC）与改性污泥基生物炭可通过原位多效稳定效应实现重金属污染土壤治理，同时促进矿区植被恢复：

- **重金属固定：**污泥及生物炭中的有机质、铁铝（氢）氧化物、磷酸盐可通过络合、吸附、共沉淀作用将土壤中活性高的重金属（As、Cr、Cu、Pb、Zn 等）转化为残渣态，降低其迁移性与生物有效性；
- **土壤肥力提升：**污泥堆肥为矿区植物生长提供有机质与营养元素，促进植物生物量增长 2~4 倍，植物根系的固土作用进一步减少重金属的地表径流与地下渗流迁移；
- **优化施用方式：**混拌施用优于平铺，可抑制 Cr、Cu、Pb、Zn 下移；225 t/ha 高施用量可使地下渗流中重金属浓度降至 1/10 以下。Cd 风险可通过碱性改性污泥生物炭或种植富集植物控制。

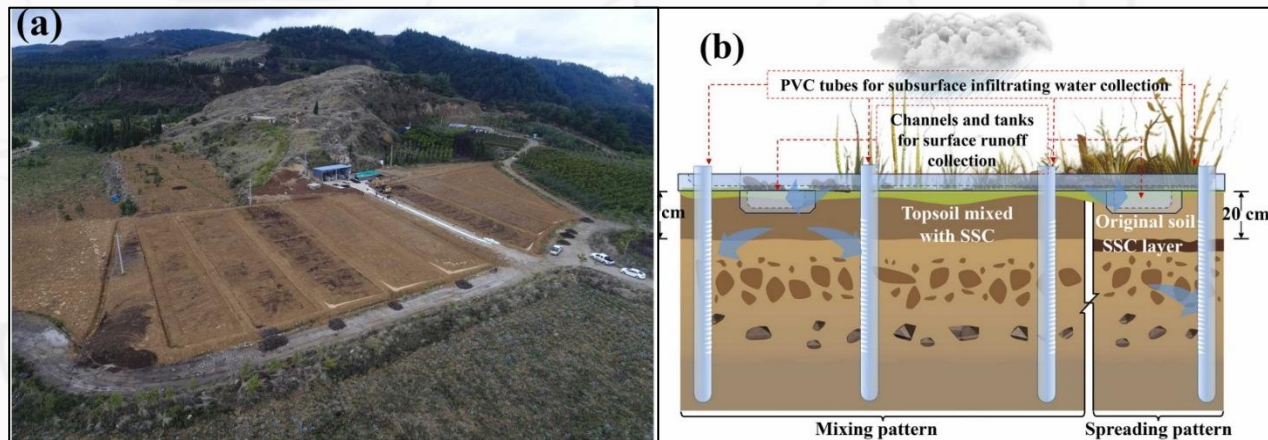


图4 (a) 矿区航拍照片和 (b) 大规模田间试验设计剖面布局示意图

三、脱水污泥高值资源化利用与产品开发

3.3 从污泥中提取植物激素的高值化利用

污泥经**碱性热水解（ATH）**技术处理后，固相有机物向液相迁移，溶解性总氮、腐殖酸、蛋白质大幅提升，为植物激素合成提供充足前体，不同类型污泥的植物激素生成具有特异性。

剩余活性污泥（RAS）

富含 L - 色氨酸（TRP）、小分子肽、氨基酸，经 ATH 处理后高效合成生长素（以 IAA 为主），浓度达 $1.58 \times 10^4 \sim 7.93 \times 10^4 \mu\text{g/L}$ ，合成路径为 TRP 脱羧与芳香族取代反应，具有热力学自发性，生长素可显著促进植物生长。

厌氧消化污泥（ADS）

因厌氧胁迫积累 α - 亚麻酸（ALA），经 ATH 处理后定向合成**茉莉酸（JA）**，浓度达 $6.61 \times 10^0 \sim 2.56 \times 10^3 \mu\text{g/L}$ ，合成路径为 ALA 氧化与环化反应，茉莉酸可增强植物的抗逆性（抗生物攻击、干旱、盐害）。

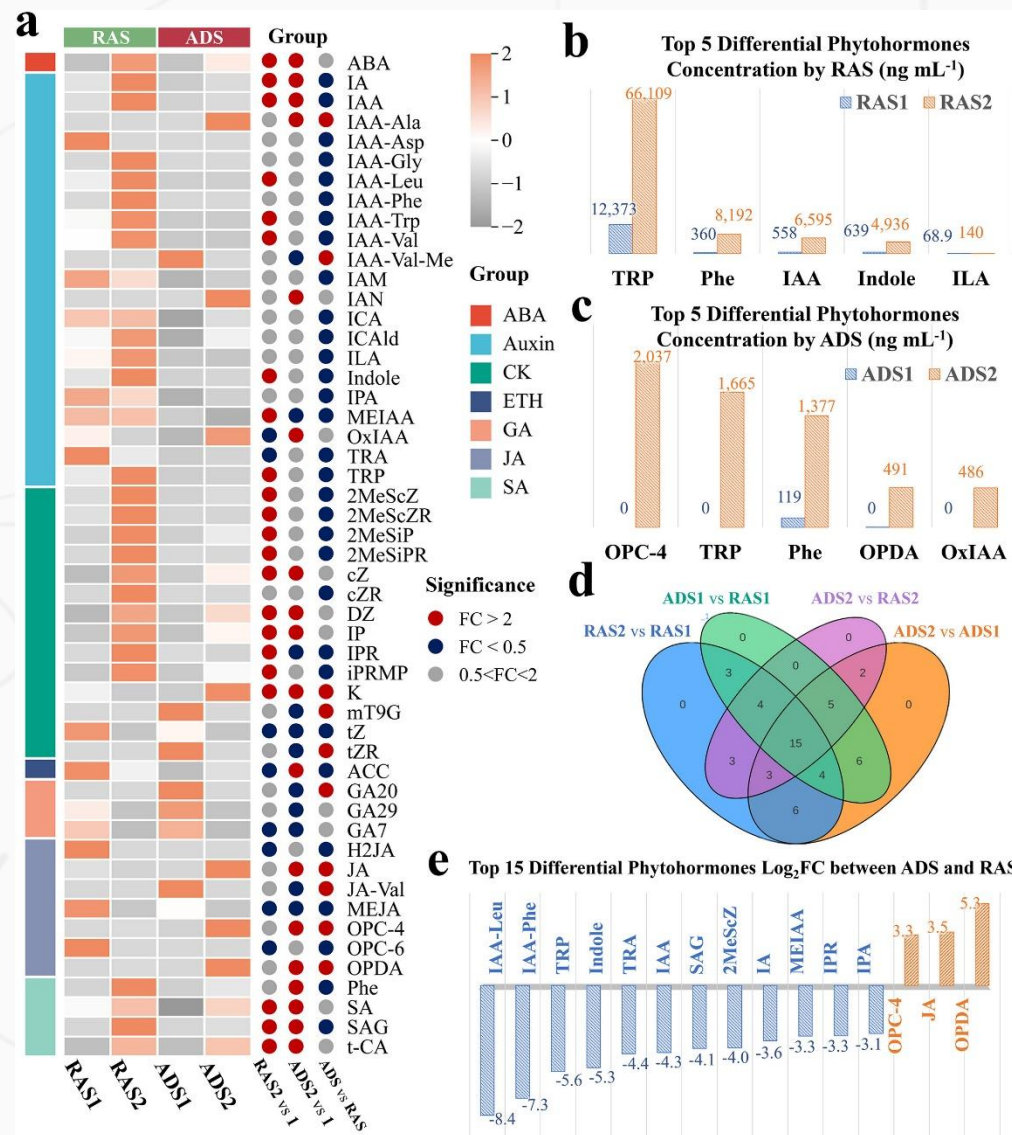


图 RAS组和ADS组中植物激素相关数据组间比较。

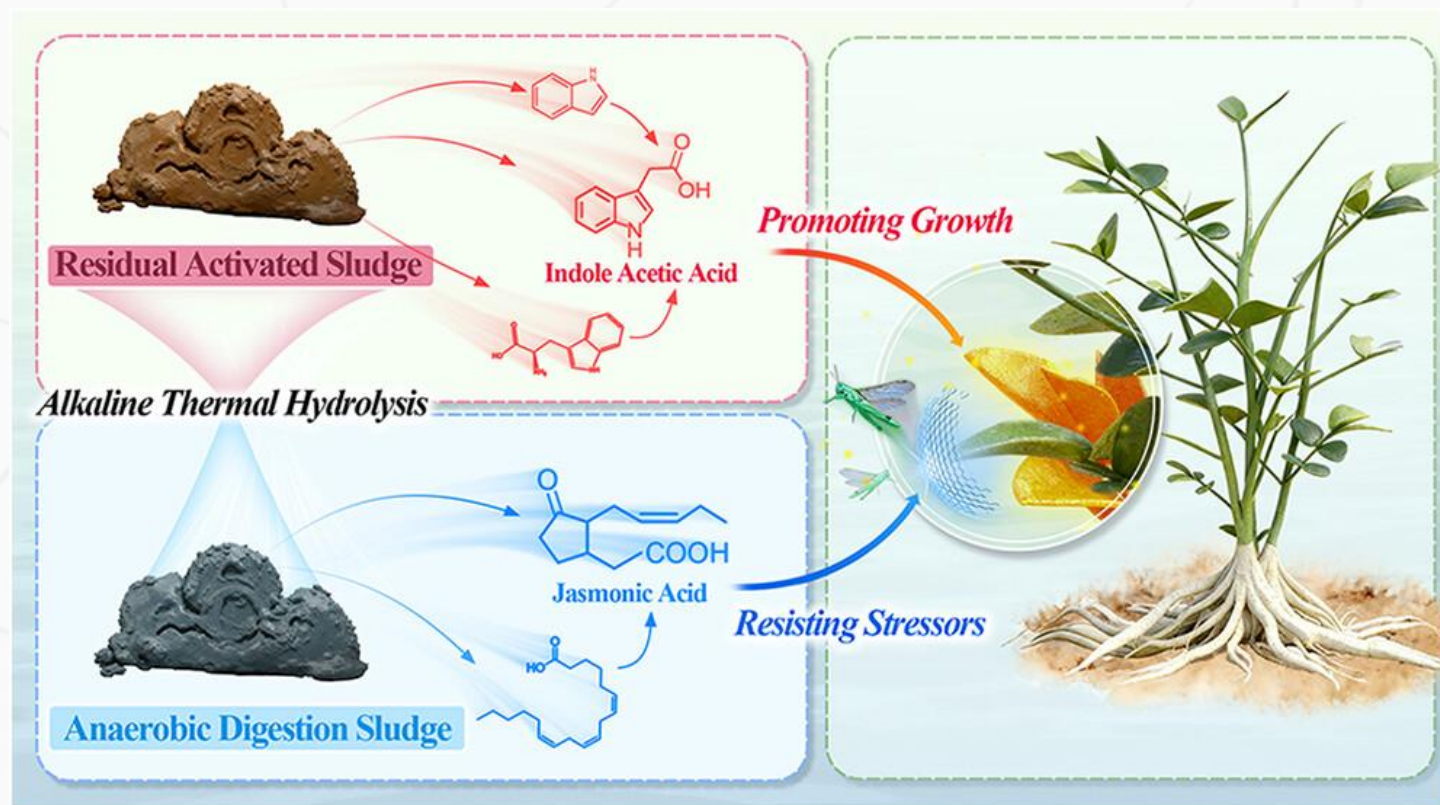
三、脱水污泥高值资源化利用与产品开发

3.3 从污泥中提取植物激素的高值化利用

ATH 技术优化工艺条件:

处理时间 2 h、温度 160°C、固体含量 14%

- ◆ 此时植物激素浓度达农业应用标准，且产物中重金属含量远低于中、美、欧盟肥料标准限值，污泥体积可**缩小 60%**。
- ◆ 提取植物激素后的液相产物可作为植物生长调节剂，固相残渣可用于烟草种植、矿山修复或制备吸附板材，全链条碳排放为-326~-253 kgCO₂/t（含水率 80% 污泥），**实现了污泥的负碳高值利用。**



三、脱水污泥高值资源化利用与产品开发

3.4 利用污泥制备单原子催化剂 (SACs)

单原子催化剂具有原子级利用效率、可调电子环境与优异的催化活性，是催化领域的研究热点，但传统合成方法成本高昂、资源密集。

制备原理

污泥中富含 Fe、Cu、Mn、Ni 等金属元素与碳基质，通过热解 - 球磨 - 酸蚀工艺，将分散的金属原子通过 N、S、P 等杂原子配位锚定于污泥基碳载体上，形成污泥基 SACs，解决了传统 SACs 合成依赖超纯前驱体的问题。

应用前景

污泥基 SACs 可应用于水净化、制氢、电催化燃料合成等领域，如活化过硫酸盐降解新污染物、电催化 CO₂还原、甲烷重整制氢等，成为下一代环境基础设施的核心催化材料。

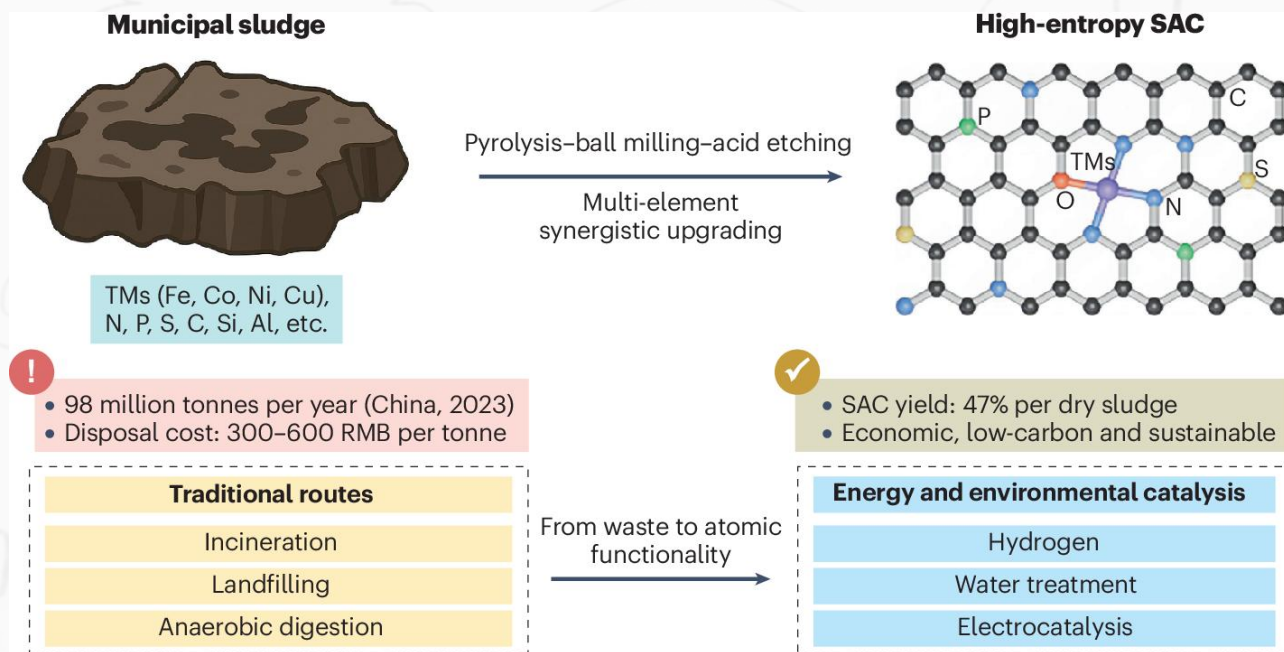


图1 从市政污泥到原子级功能

三、脱水污泥高值资源化利用与产品开发

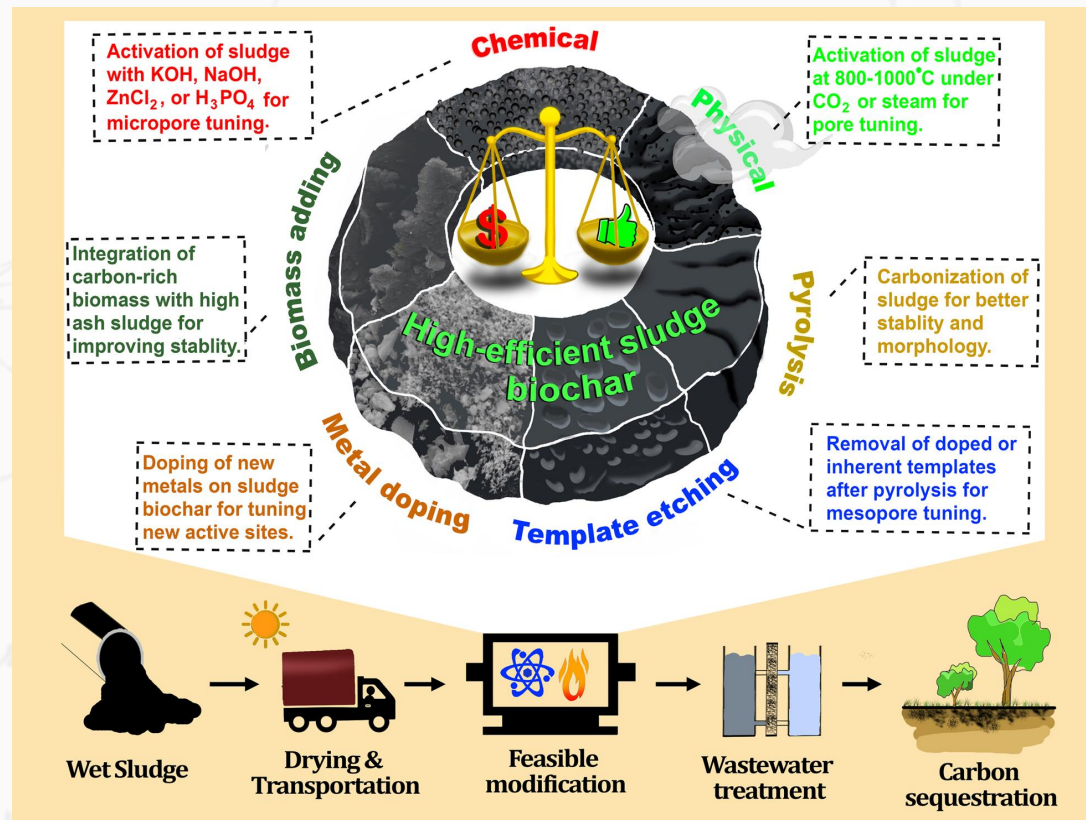
污泥基生物炭固碳作用

固碳核心逻辑：

污泥基生物炭通过**源头减碳** + **碳封存**双重路径实现固碳。

- ❑ 热解工艺阻止污泥溶解释放 CO_2 、甲烷、一氧化二氮等温室气体，
- ❑ 将碳稳定结合在生物炭结构中，施用于土壤后完成长期碳封存；
- ❑ 失效污泥基吸附剂填埋后，其固定碳可长期留存于土壤，实现二次固碳。

碳封存稳定性与时长： 600°C 以上高温生产的污泥生物炭稳定碳含量**超 90%**，碳留存寿命超 100 年，添加到土壤中可固碳长达**数千年**；工业规模分析显示，污泥生物炭中约 71% 的碳可实现百年以上封存。



三、脱水污泥高值资源化利用与产品开发

污泥基生物炭固碳作用

固碳与减排效率:

- 每使用 1 吨污泥生物炭可**封存 2-3 吨碳**；利用生物炭技术整体可实现 48%~54% 的温室气体净减排；
- 将污泥热解温度从300 °C提升至600 °C，十年内每公顷二氧化碳减排量可从 **301 吨增至 932 吨**；
- 热解工艺可将每吨干污泥的 CO₂当量排放量从 **2.432 吨降至 1.607 吨**。

碳留存判定指标:

- 可通过 900°C工业分析测定固定碳含量，或计算有机氢碳比 / 氧碳比表征；
- 当有机氢碳比大于0.5时，生物炭的碳在 100 年内的留存率可达 50%。



三、脱水污泥高值资源化利用与产品开发

污泥基生物炭固碳作用

固碳过程优势

01

系统自给自足，进一步减碳

热解过程中产生的气体可为蒸汽干燥和热解环节自身提供燃料，多余蒸汽冷凝成的热水还可应用于区域供热网等场景，全程无需额外大量外部能源输入，**减少了能源生产带来的二氧化碳排放**，形成循环减碳的闭环。

02

保留营养物质，不影响固碳价值

热解转化为生物炭的过程中，可保留植物和动物必需的磷等营养物质与矿物质，在实现固碳的同时，让污泥生物炭**具备改良土壤的附加价值**，不牺牲其资源化属性。

03

去除有害物质，提升固碳环境效益

制备过程中可消除生物质中的微塑料、医疗残留物等有害污染物，还能通过物理和化学作用吸附其他污染物、固定污泥中固有的微污染物，相比传统污泥处理方法，在固碳的同时解决了污泥的污染问题，**提升了整体环境效益**。



04

基于降碳减污的污泥全产业链安全 处理处置技术创新

四、基于降碳减污的污泥全产业链安全处理处置技术创新

4.1 多源污泥有机质梯级利用技术

基于不同污泥的有机质含量可以选择适用的处理技术和利用途径。

污泥有机质含量	种类	技术和途径
VS $\geq$ 30%	污水污泥	优先通过能源化和资源化途径实现有机质的转化利用
VS<30%	管渠污泥、河湖底泥	优先考虑建材、工程利用，通过替代传统矿物资源降低碳排放

厌氧消化技术优化

厌氧消化是污泥稳定化和无害化处理的重要手段，不仅能回收污泥中的生物质能，其产物经腐熟陈化后还可用于土地利用。

- 通过**采用高含固厌氧消化工艺**，进泥含固率从传统的5%提升到15%，在同等处理规模下，消化池体积可节省2/3，加热保温能耗显著降低。
- 通过**优化消化池型和搅拌、合理设计停留时间、投加促效材料**等手段可以提高污泥有机质的降解率。

例如：假设降解率从40%提高至50%，
1座规模为400 t/d（以含水率5%计）的
传统厌氧消化设施的沼气产量可增加
800~1000 m³/d，相应的CO₂排放减少
2.7~3.4 t/d。

四、基于降碳减污的污泥全产业链安全处理处置技术创新

4.1 多源污泥有机质梯级利用技术

好氧发酵技术升级

好氧发酵能够将污泥中的有机质转化为较为稳定的腐殖质，使得产物具有较高的稳定化程度，便于土地利用。通过**装备化和智能化手段**实现发酵条件和过程的精确控制是降低碳排放的重要途径。基于温度、湿度和氧含量等关键参数的自动监测，结合物料输送、供氧、匀翻和除臭等环节的协同控制，可以优化整个发酵流程。



图 智能好氧发酵设备

四、基于降碳减污的污泥全产业链安全处理处置技术创新

4.1 多源污泥有机质梯级利用技术

热解碳化技术

热解碳化是在一定温度（通常为400~700℃）、无氧或缺氧条件下，通过裂解方式将污泥中挥发分脱出，同时保留污泥中的大部分碳，使**最终产物稳定性和碳含量大幅提高**的过程。

- 污泥热解碳化和焚烧同样具有**显著减量、集约高效无害化**的优势，并且具有更低的硫氧化物、氮氧化物和温室气体排放，**不产生二噁英**，且固体产物中重金属稳定性较高。
- 以处理规模为50000 m³的污水处理厂为例，与污泥焚烧相比，采用碳化技术后的碳排放量**可降低75%**。

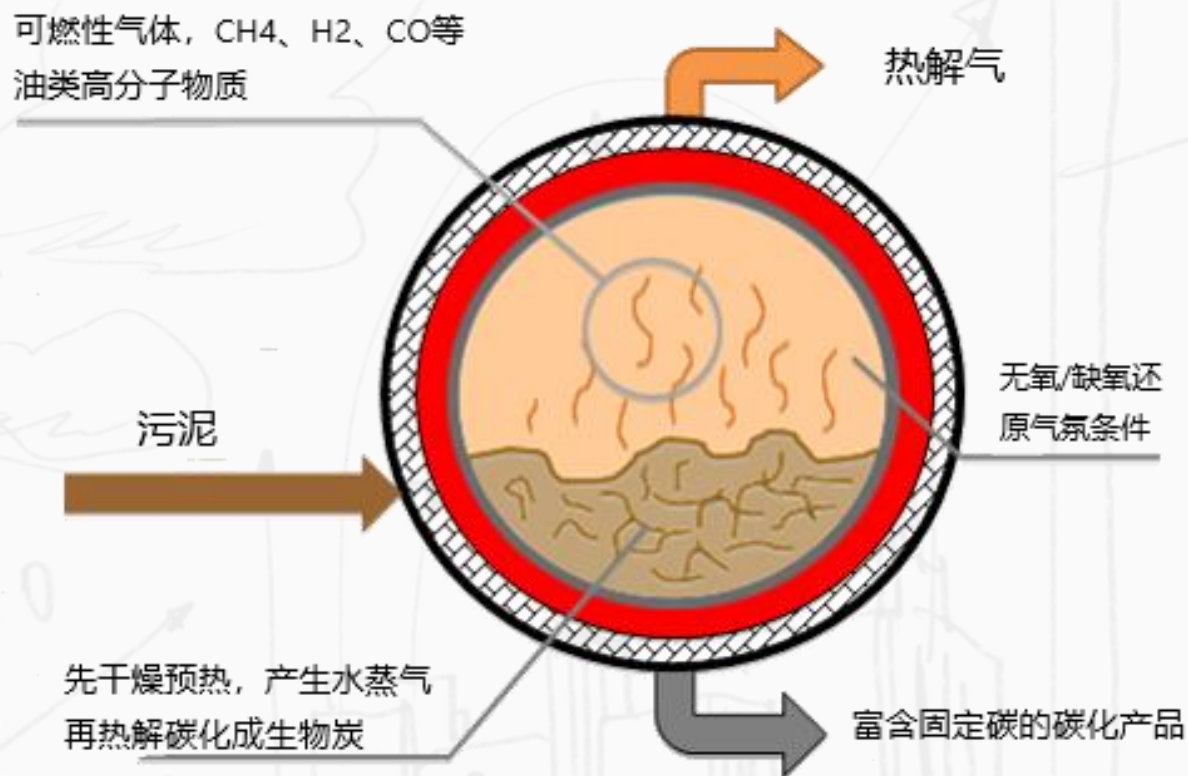


图 污泥热解碳化的工作原理

四、基于降碳减污的污泥全产业链安全处理处置技术创新

4.2 多元协同减碳模式

多源物料协同



有机物料协同：

将**市政污泥**与**厨余垃圾**、**农业秸秆**、**畜禽粪便**等有机废弃物进行协同厌氧消化，利用基质互补优势提高沼气产率（产气量增加 20%~30%），稳定消化工艺运行；同时实现成本分摊，总投资成本节省 20%~40%，占地节省 30%~50%，沼气热电联产可实现污水处理厂能源自给自足，大幅降低碳排放。



无机物料协同：

将**管渠污泥**、**河湖底泥**、**污泥焚烧灰渣**等无机质污泥与**建筑垃圾**、**建筑渣土**协同制备免烧砖、工程回填材料，或替代黏土烧制水泥熟料、砖瓦，每利用 1 t 干污泥替代水泥生料可**减少 CO₂ 排放 53 kg**，同时减少天然矿物资源开采，实现固废资源的循环利用。

四、基于降碳减污的污泥全产业链安全处理处置技术创新

4.2 多元协同减碳模式

排水系统上下游协同

01

科学取消化粪池

化粪池厌氧产 CH_4 年排放当量约 2778 万 tCO_2 ，且截留碳源导致污泥有机质含量降低；取消化粪池可提升污水 C/N 值，改善污泥泥质，将化粪池的无序碳排放转化为污泥厌氧消化的**可控能源利用**，实现排水系统碳减排。

02

提升污水处理厂除砂性能

优化沉砂池参数，采用微细颗粒分离技术，提高污水中无机颗粒去除率，减少污泥中的无机质占比，**提升污泥有机质含量**，为后续资源化利用奠定基础。

03

优化污水处理工艺

污水处理工艺的选择与运行需与污泥处理协同考虑，通过**精细化智能管控优化曝气和药剂投加**，避免污泥内源代谢，提升污泥有机质品质；采用主流 AB 法与侧流厌氧氨氧化工艺结合，可实现剩余污泥产量最大化与有机质富集，**提升污泥资源化利用效率**。

四、基于降碳减污的污泥全产业链安全处理处置技术创新

4.2 多元协同减碳模式

跨行业协同

排水 - 农业协同

污泥基植物激素、污泥堆肥应用于农业生产，**替代部分化肥和农药**，减少农业面源污染，实现“污泥 - 农田”的资源循环。

排水 - 建材协同

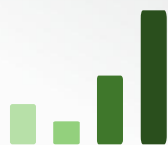
污泥热解炭、焚烧灰渣用于**制备建材**，污泥无机质**替代天然黏土**，推动建材行业的低碳转型。

01

02

03

04



排水 - 能源协同

污泥厌氧消化产沼气用于**热电联产**、**甲烷重整制氢**，污泥热解气化制氢与生物基燃料，实现污泥的能源化利用，替代化石能源，降低能源领域碳排放。

排水 - 环保协同

污泥基生物炭、SACs 用于**水环境治理与土壤修复**，实现“污泥处理 - 污染治理”的以废治废，降低环保产业的资源消耗。

四、基于降碳减污的污泥全产业链安全处理处置技术创新

4.3 全产业链碳足迹管控

◆ 生命周期评估 (LCA)

对污泥从运输、脱水、处理、资源化到最终处置的全链条进行 LCA，量化各环节的能耗、资源消耗与碳排放，识别碳减排关键节点，优化工艺路线。

◆ 温室气体排放控制

针对污泥厌氧消化、好氧发酵、热解碳化等过程中的 CH_4 、 N_2O 等逸散性温室气体，采用收集利用、工艺优化、生物调控等方式实现减排，如厌氧消化的沼气收集、好氧发酵的智能化曝气控制。

◆ 碳封存与碳汇提升

污泥热解炭施入土壤可实现长期碳封存，污泥基生物炭改良土壤促进植物生长，提升生态系统碳汇能力，实现污泥处理的碳负排放。





05

结论与展望

5.1 主要结论

市政污泥作为污水处理的必然副产物，具有污染和资源双重属性。在双碳目标下，基于泥质特性选择资源利用途径并进一步降低处理过程的碳排放，是实现污泥处理**减污降碳协同增效**的关键。

1

污泥绿色低碳高效脱水技术取得显著进展，包括基于水分分型的梯级脱水模型、液相极性调控的水-固分离新方法、低温真空脱水干化一体化技术等，为后续资源化利用奠定了坚实基础。

2

脱水污泥的**高值资源化利用**路径多元化，碱性热水解技术实现了污泥中植物激素的高效提取，污泥基单原子催化剂等开辟了污泥超高值资源化新方向。

3

基于降碳减污的污泥全产业链技术创新需推动多源物料协同、排水系统上下游协同、跨行业协同，通过泥水统筹、碳足迹管控、温室气体减排，实现污泥处理**全链条**的减污降碳协同增效。

4

5.2 发展趋势

1 技术研发向精细化、智能化、低耗化发展

- ◆ 依托材料科学、分子生物学、人工智能等多学科交叉，开发更高效的污泥改性、提取、合成技术；
- ◆ 利用人工智能与大数据实现污泥处理过程的智能化管控，精准调节工艺参数，降低能耗与物耗，提升处理效率与产品品质。

1

2

资源化利用向高值化、多元化、全组分发展

- ◆ 突破污泥单一资源利用的局限，实现污泥中碳、氮、磷、金属、有机质等全组分的高值资源化；
- ◆ 进一步开发污泥基生物基化学品、功能性碳材料、缓释肥料等高端产品，提升污泥的资源价值与经济收益。

5.2 发展趋势

处理模式向系统协同、区域统筹、园区化发展

- ◆ 推动“泥水统筹”的排水系统优化，实现多源污泥与有机废弃物的区域统筹处理；
- ◆ 将污泥处理设施纳入静脉产业园区，构建集污泥处理、资源回收、能源利用、跨行业协同于一体的园区化发展模式，提升规模效应与资源循环效率。

3

4

5

研究范式向多学科交叉、产学研深度融合发展

- ◆ 依托多学科的交叉融合，开展污泥处理的基础理论与关键技术研究；
- ◆ 推动产学研深度融合，实现从实验室研究到工程化应用、产品化开发的全链条转化，加快污泥绿色低碳技术的产业化落地。

标准体系与政策机制向完善化、协同化发展

- ◆ 加快建立污泥基产品的质量标准与环境安全评价体系，明确其应用规范；
- ◆ 完善污泥处理的碳核算、碳交易机制，将污泥处理的碳减排效应纳入碳市场，通过政策引导与经济激励推动污泥绿色低碳技术的研发与应用；
- ◆ 建立合理的污泥处理收费机制，保障污泥全产业链的可持续发展。



感谢观看

——同舟共济——