# 化工污泥热解制备生物炭及其资源化利用过程中污染物迁移规律研究

马婷婷
安徽基越环境检测有限公司，安徽 滁州 239000

[摘要]化工污泥中重金属、多环芳烃（PAHs）这类持久性污染物，随便堆存或者简单填埋，雨水淋滤、微生物长期作用下容易造成二次污染，而热解制备生物炭，在现阶段看，是能同时实现污泥减量化、资源化的技术。化工污泥来源杂，组分波动大，区域处置能力分配不均，不少地区还停留在焚烧和填埋为主的模式。热解过程重金属、PAHs，还有含氮、含硫污染物，会在固、液、气三相之间不断发生迁移和形态转化。试验结果表明，550～650℃这一中高温区间，有利于重金属向残渣态转变，直接降低它在环境里的迁移性和生态风险，但温度低于这个区间时，重金属活性形态占比会明显上升。PAHs 的行为和重金属不同，大部分会进入热解气与热解液，残留在固体生物炭中的量相对偏低，600℃左右的热解条件，可以明显抑制生物炭基质内部新 PAHs 的合成。污泥中原有的磷、钾等营养元素，在热解后大多保留在生物炭产物中，具备作为土壤改良材料或者污水吸附剂的基础潜力。据此提出通过温度调控、共热解、烟气净化及标准化资源化路径控制污染物迁移的对策，以供参考。

[关键词]化工污泥；热解；生物炭；污染物迁移；资源化利用
DOI：10.33142/ect.v4i10.20655　　中图分类号：X711　　文献标识码：A

# Study on the Migration Law of Pollutants during the Preparation of Biochar by Pyrolysis of Chemical Sludge and Its Resource Utilization Process

MA Tingting
Anhui Jiyue Environmental Testing Co., Ltd., Chuzhou, Anhui, 239000, China

**Abstract:** Persistent pollutants such as heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in chemical sludge can easily cause secondary pollution through random storage or simple landfill, rainwater filtration, and long-term microbial action. However, the technology of preparing biochar through pyrolysis can achieve both sludge reduction and resource utilization at present. The sources of chemical sludge are diverse, with significant fluctuations in composition and uneven distribution of regional disposal capacity. Many regions still rely on incineration and landfill as the main modes of disposal. During pyrolysis, heavy metals, PAHs, nitrogen-containing and sulfur-containing pollutants will constantly migrate and transform between solid, liquid and gaseous phases. The experimental results show that the medium to high temperature range of 550~650 ℃ is conducive to the transformation of heavy metals into residual states, directly reducing their mobility and ecological risks in the environment. However, when the temperature is below this range, the proportion of active forms of heavy metals will significantly increase. The behavior of PAHs is different from that of heavy metals. Most of them will enter the pyrolysis gas and solution, and the amount of residual PAHs in solid biochar is relatively low. The pyrolysis conditions at around 600 ℃ can significantly inhibit the synthesis of new PAHs inside the biochar matrix. The original nutrients such as phosphorus and potassium in sludge are mostly retained in the biochar products after pyrolysis, and have the potential to be used as soil improvement materials or sewage adsorbents. Based on this, strategies for controlling pollutant migration through temperature regulation, co-pyrolysis, flue gas purification, and standardized resource utilization pathways are proposed for reference.

**Keywords:** chemical sludge; pyrolysis; biochar; pollutant migration; resource utilization

## 引言

石化、精细化工与煤化工产能持续上量，产业集群不断扩容，化工废水处理工段产出的海量化工污泥[1]。该类污泥的有机质含量比较高，絮体内部夹杂着大量的无机盐晶体，部分样品还检测出高难度较难降解的有机污染物。如果采取露天简易堆存或直接填埋的方式，这种操作不仅会导致有害物质易下渗污染土壤与地下水，而且会损耗污泥中可回收碳源及营养物质。污泥热解制备生物炭技术减


Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

容效果比较显著，固相产物稳定性比较强，可以同步回收资源[2]。目前关于污泥的处置主要采取建材化利用，产品的附加值比较低，处置产能长期存在缺口，在一定程度上对污泥资源化技术规模化落地应用起到制约作用。现有研究存在明显局限，较少针对化工污泥多种复合污染物，追踪其在热解制生物炭及后续资源化全链条中的迁移归趋。文章围绕化工污泥热解制备生物炭，研究污染物迁移转化与二次释放风险并提出调控对策。

## 1 化工污泥的来源、组成与污染特征

化工污泥大多出自化工企业内部的废水处理系统，里面混杂着初沉污泥、生化剩余污泥，还有一部分含重金属与难降解有机物的浓缩污泥，主要污染物类型如表 1 所示。

从处置需求看，化工污泥本身的含水率居高不下，体量庞大，如果直接送去填埋，不仅会大量占用了土地资源，污染物渗滤带来的环境风险也就很难管控。常规焚烧虽能做到快速减容，可焚烧产生的飞灰带来了二次污染问题。污泥热解在无氧/限氧下分解有机物，实现减容、灭菌、重金属固存于生物炭，只要控制好工艺条件，相比只重减量化的方案，其资源化路径就更有优势，再配合后续精制处理，价值还能进一步提升。

## 2 化工污泥热解制备生物炭技术概况

热解是指化工污泥在隔绝或控制氧气的条件下受热分解，有机物裂解为可燃气体与焦油，无机物与残余碳再形成生物炭的过程。典型工艺流程见图 1。

表 1　化工污泥中主要污染物类型及来源

| 污染物类别 | 典型代表 | 主要来源 | 环境风险 |
|---|---|---|---|
| 重金属 | Zn、Cu、Cr、Pb、Ni、Cd、As | 催化剂、电镀/酸洗废水、原料带入 | 高生物有效态易浸出，危害土壤与生物 |
| 多环芳烃 | 2～5 环 PAHs | 石化裂解、煤化工副产物 | 具有致癌致畸性，生物累积 |
| 含氮化合物 | 铵盐、蛋白质、吡咯/吡啶类 | 生化处理、含氮原料 | 热解时释放 $NH_3$、HCN、$NO_x$ |
| 含硫化合物 | 硫酸盐、硫化物 | 硫酸工艺、含硫原料 | 热解时释放 $SO_2$、$H_2S$ 等 |
| 无机盐类 | 氯化物、磷酸盐 | 工艺介质、药剂投加 | 影响生物炭性质与利用方向 |

图1 化工污泥热解制备生物炭及资源化利用工艺流程

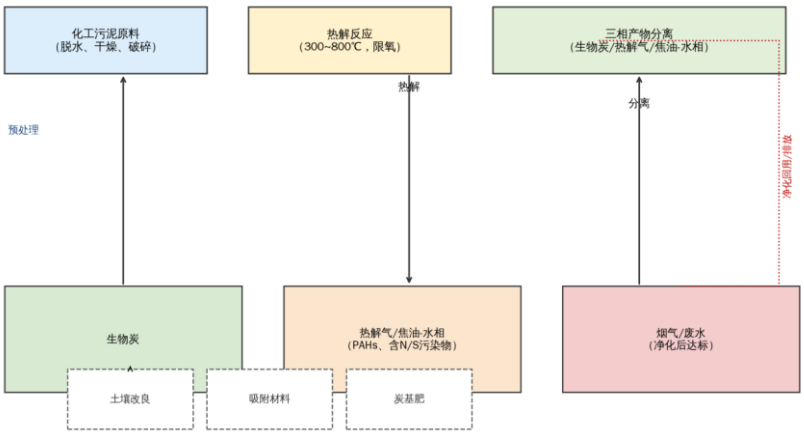



图 1　化工污泥热解制备生物炭及资源化利用工艺流程图

研究表明，热解温度提高以后，生物炭的产量逐渐减少，它的比表面积、碳化程度和芳香度也都增加了。热解温度从 400℃增加到 800℃，污泥炭的产率由大约 55%降到大约 48%。可以看出，较高的温度对污泥中有机物的充分裂解和减容是有利的。另外，温度会对污染物在不同相间进行分配产生影响，是控制污染物迁移的重要工艺参数。升温速率和停留时间这两个因素也不能忽略。升温速率太快，就会导致污泥颗粒内外温差较大，焦油的二次裂解也不够完全，再加上停留时间太短的话，有机物的转化过程就不能完成。只要把这两个参数结合起来考虑泥质的特点进行优化，就能得到更好的热解效果[3]。

## 3 热解过程中污染物的迁移规律

### 3.1 重金属的迁移与形态转化

重金属是进行化工污泥热解研究的一个重要方面。一般说来，大多数重金属（Cu、Zn、Cr、Ni、Pb 等）在热解时主要保留在生物炭固体部分，表现出向炭中积累的倾向，其积累的程度大约是 Cu>Ni、As>Pb、Cr>Zn>Cd[4]。重金属在固相富集一方面是因为有机物和水分蒸发引起的浓缩作用，另一方面和热解条件下重金属与生物炭矿物组分、含氧官能团的结合有关。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

热解温度对重金属迁移具有决定性影响，温度升高，会促进重金属向稳定的形态转化。只要采用 550～650℃的中高温热解炭化工艺，就能推动重金属从高生物有效形态（弱酸提取态、可还原态），再向稳定性更强的可氧化态、残渣态发生迁移转化。脱水污泥里 Zn 的高生物有效态占比原本可高达 81.62%，经过热解处理之后，这一数值就大幅降低至 12.91%左右。污泥炭中 Cr、Pb、Ni、Cu 这几种重金属，它们的稳定形态占比已经达到了 94%以上。

这种转化一方面源于热解过程中有机质的碳化重构，使重金属被新生碳基质包裹或与无机矿物形成稳定结合相。热解产物形成的碱性环境，也有利于重金属转化为氢氧化物、磷酸盐这类低溶解形态被固定了，只要完成这一步固持，就能大幅降低重金属浸出以及被生物利用的潜在风险。与此同时，部分易挥发元素会在高温条件下发生气相迁移。As 在 400℃时，约 98%都保留于生物炭之中；再把温度升至 500℃以上，它的保留率就会出现明显下降，这和 As 处在还原性气氛下所具备的挥发性直接相关。Pb、Cd 在 600℃升至 700℃时残留率亦出现显著下降[5]。因此，热解温度的选择，需要在充分减容、抑制易挥发重金属气相释放这两者之间找到平衡，适宜的中温（约 600℃）可在保证重金属锁定的同时，降低其生物的有效性与生态毒性。

### 3.2 多环芳烃（PAHs）的迁移与生成

PAHs 是化工污泥热解过程中另一类关注度较高的污染物。研究表明，热解过程中 PAHs 趋向富集于液相产物，其次为气相，固相中残留极少；在 350～1050℃范围内，650℃时液相中 16 种 PAHs 总质量比最高可达 96%，750℃时气相中相应比例约为 21.3%，而固相中仅在 650℃时约达 1%。从环数分布看，液相中以 2、3、4 环 PAHs 为主，高温阶段伴随大分子裂解与二次合成、环化反应，气相中低环 PAHs 生成量升高。

热解温度对生物炭中 PAHs 残留具有非单调影响。对污泥生物炭的研究显示，300～600℃内 PAHs 生成量随温度升高而降低，600℃时达到最低（约 5.3mg/kg）；但当温度升至 700℃时，PAHs 含量反而大幅升高（可达 200mg/kg 以上），可能与高温下焦油类物质的环化缩合与再沉积有关。因此，为获得 PAHs 含量低、环境安全性好的生物炭，热解温度应控制在中温区间，并合理设置停留时间。

图2 热解温度对化工污泥重金属迁移与形态转化的影响

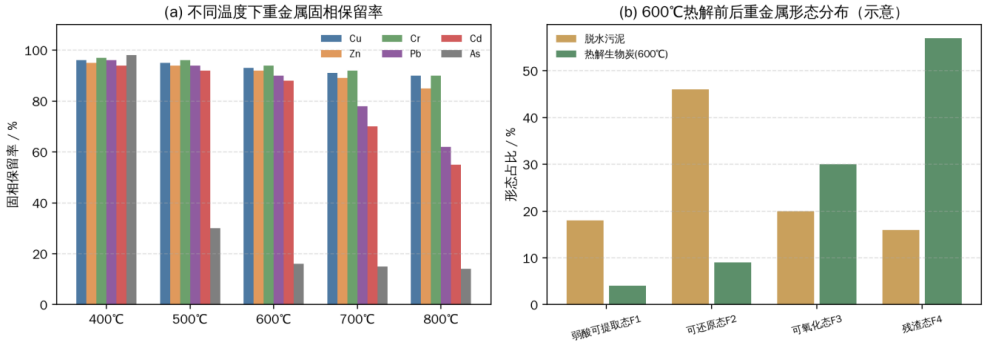



图 2　热解温度对化工污泥重金属迁移与形态转化的影响示意图

图3 污泥热解过程中多环芳烃的迁移与分配

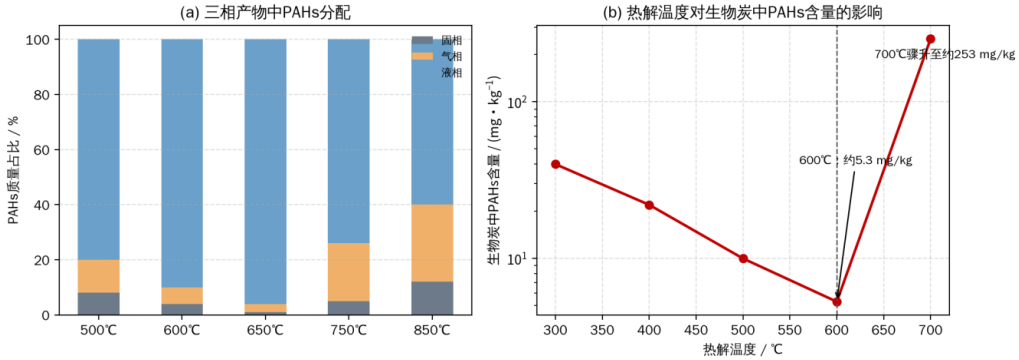



图 3　污泥热解三相产物中多环芳烃分配示意图


Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

### 3.3 养分元素与含氮含硫无机污染物的迁移

除重金属与 PAHs 外，热解过程中养分元素及含氮含硫物质的迁移同样影响生物炭的利用价值与烟气治理。对污泥生物炭制备过程的研究表明，N 在污泥中以铵盐、蛋白质、吡咯、吡啶等多种形态存在，热解温度升高使 N 在生物炭中含量逐渐降低、气相中明显增加，液相中则在 600℃后减少；而 P 和 K 几乎全部保留于生物炭中，P 在低温下多以焦磷酸盐形式存在、高温下转为偏磷酸盐。这说明热解能在一定程度上富集磷钾养分，提升生物炭的炭基肥化潜力。

与此同时，化工污泥中含氮含硫组分在热解时释放 $NH_3$、HCN、$NO_x$ 及 $SO_2$、$H_2S$ 等无机污染物。已有研究指出，600℃以下大部分含氯化合物发生释放，含硫污染物呈双峰释放特征，高温峰主要源于硫酸盐分解。这些气相污染物须经冷凝、洗涤、吸附等净化单元处理后方可排放，是热解装置设计不可忽视的环节。

## 4 生物炭资源化利用过程中污染物的迁移与风险

### 4.1 土壤改良与农用方向

生物炭孔隙发达、比表面积大、含有一定养分，可作土壤改良剂。施入土壤后，生物炭通过提高土壤 pH、阳离子交换容量（CEC）和有机质含量，增强对重金属的吸附固定能力，促使其由弱酸可提取态、可还原态向可氧化态、残渣态转化，从而降低重金属生物有效性与浸出毒性。与此同时，生物炭中的稳定形态重金属在土壤环境中的长期稳定性，以及在特定土壤条件下可能发生的再释放，仍是农用资源化需持续关注的风险点。需要注意的是，化工污泥基生物炭施用于农业土壤时，须满足相关农用污泥污染物控制标准对重金属等指标的限值要求，并控制施用量与施用期限，避免因生物炭中重金属富集导致土壤超标。同时，相关技术政策亦明确，污泥用于土地改良和园林绿化须先进行稳定化和无害化处理，并满足相应泥质标准要求。

### 4.2 水处理与吸附材料方向

由于具有较大的比表面积和表面官能团，污泥基生物炭可以作为废水处理的吸附剂，用来除去重金属、染料和有机污染物。对污泥基生物炭吸附作用的研究发现，吸附机理有表面络合、离子交换、共沉淀和 π-π 作用等。在实际应用中，生物炭的吸附性能受到比表面积、孔径分布、表面含氧官能团的种类、溶液 pH 等因素的影响，可以通过活化、负载金属氧化物或者进行表面改性等方法来提高吸附容量和选择性。但是吸附达到饱和后的生物炭如果处理不好，富集的污染物可能会重新进入环境，应该协调吸附再生和饱和炭的最终处理，防止二次污染。

### 4.3 资源化全链条的污染物归趋

将热解和资源化利用看作一个整体，污染物的移动情况可以这样来说明：“固相固定-气相/液相分离-利用环节重新分配”这样的方法，热解过程中，重金属、磷钾等物质主要保留在固相生物炭中，PAHs、含氮、含硫的物质则容易转移到液相和气相，到资源化阶段，如果把生物炭施加到土壤里，重金属的形态一般会变得比较稳定，但是也可能产生富集积累的危险。所以，对污染物的控制应该贯穿于制备和利用的整个过程。

## 5 污染物迁移控制策略与展望

把热解温度保持在适当的中温范围，大约 600℃，可以将重金属稳定下来的同时防止 PAHs 重新生成，调整反应气氛，比如用 $CO_2$气氛，还可以改变生物炭的孔隙结构，保存里面的养分。只用污泥进行热解，得到的产物重金属含量比较高，比表面积也比较小，有一些缺点，加入生物质、矿物或者一部分工业废弃物这样的辅助材料，加强重金属的固定作用，改善生物炭的性能，达到以废治废的目的。热解气、焦油中含有较多的 PAHs，还有含氮、含硫的无机污染物，用冷凝、洗涤、吸附结合起来的方法进行处理，可以达到排放标准的要求。另外，根据目前的有关规定，对生物炭的使用进行风险控制，建立化工污泥从来源、泥质特性、热解产物，到最终资源化利用的整个档案，加上信息化管理的方法，减少二次污染的可能性。配套的产业支持也很关键，配合区域循环经济计划进行化工园区的循环化改造，建设好危险废物集中处置设施。还有许多

表 2 化工污泥热解制备及资源化全过程中污染物迁移归趋

| 阶段 | 重金属 | 多环芳烃 | 养分元素（N/P/K） | 含氮含硫无机物 |
|---|---|---|---|---|
| 热解制备 | 多保留于生物炭并趋于稳定形态；As、Pb、Cd 高温易挥发 | 主要进入液相与气相，固相残留少；600℃左右残留最低 | N 部分进入气相，P、K 多保留于生物炭 | 释放 $NH_3$、HCN、$NO_x$、$SO_2$ 等进入气相 |
| 资源化（土壤改良） | 在土壤中趋于稳定形态，但存在长期累积风险 | 生物炭残留低，释放风险相对可控 | 磷钾缓释，利于肥力提升 | 氮素缓释，需防过量施用 |
| 资源化（吸附材料） | 吸附富集污水重金属，饱和炭有二次释放风险 | 可吸附去除部分有机物，需关注饱和炭处置 | 一般不作主要用途 | 需评估吸附过程副反应 |

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

方面需要进一步研究。可以对煤化工、石化、精细化工这类典型的化工污泥，建立相应的污染物指纹数据库。采用多尺度表征方法以后，重金属和有机污染物在热解过程中相互影响的迁移机理，得到更详细的说明。研制出新的功能化生物炭，材料既能起到固定重金属的作用，又能进行养分的缓释。农田里使用生物炭会有生态上的问题，应该继续进行一些田间试验，以便于对化工污泥热解综合利用的技术进行大规模的推广。

## 6 结论

（1）化工污泥热解制备生物炭可在实现大幅减容的同时，使多数重金属稳定化并保留于固相，但需统筹温度对减容与易挥发重金属、PAHs 生成的影响。

（2）重金属、磷钾大多富集于生物炭固相，只要达到中高温，就会促使它们向稳定形态转化；PAHs 主要进入了液相与气相，固相残留得很少，600℃左右的热解，就有利于抑制生物炭中 PAHs 生成；含氮含硫无机污染物再进入气相，就需要做净化处理。

（3）生物炭资源化利用中，土壤改良与农用方向须满足污染物控制标准并防范重金属长期累积，吸附材料方向需统筹饱和炭处置；污染物控制应贯穿“制备-利用”全链条。

[参考文献]

[1]吕颖,李平,苏小虎,等.污泥基生物炭的制备及其重金属吸附性能研究[J].石油化工应用,2026,45(9):86-92.
[2]马娇,余波,李箫宁,等.污泥复合生物炭的制备及其吸附性能研究[J].工业水处理,2026,46(2):133-141.
[3]赵伟繁,戴亮,王刚,等.污泥生物炭重金属吸附剂的制备及改性研究进展[J].功能材料,2020,51(11):11083-11088.
[4]陈林,平巍,闫彬,等.不同制备温度下污泥生物炭对Cr(VI)的吸附特性[J].环境工程,2020,38(8):119-124.
[5]王彦,左宁,姜媛媛,等.污泥生物炭中氮硫行为及环境效应研究进展[J].化工进展,2020,39(4):1539-1549.

作者简介：马婷婷（1993—），女，内蒙古乌兰察布人，汉族，本科，应用化学，就职于安徽基越环境检测有限公司，从事验收编制工作。


Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.