

利用废旧婴儿尿布焦炭修复铜污染土壤

A. Kavinthini¹, A. D. Igalavithana²

¹ 佩拉德尼亚大学 斯里兰卡

² 澳大利亚联邦科学与工业研究组织 澳大利亚

【摘要】由于一次性塑料消费量的增加，塑料（包括用过的一次性婴儿尿布（UDD））正成为日益严重的土壤污染物。UDD 含有 50% 的塑料，例如高吸水性聚合物，需要 100 多年才能降解。本研究重点研究了热解作为一种回收方法，从 UDD 中生产塑料炭，评估了其作为土壤中固定污染土壤中铜的改良剂的有效性。向未受污染的土壤中添加（240 mg/kg）硫酸铜（II）。根据 UDD 的热重分析，选择 550°C 作为热解温度。在将产生的塑料炭施用于土壤之前，对其进行了表征。在以 0%（对照），1% 和 2.5% 的比例施用塑料炭后，对受污染的土壤进行培养。培养一个月后，通过使用 1M NH₄OAc 的单次萃取和使用 0.01M CaCl₂ 的连续萃取来测量 Cu 的固定化。分析了土壤 pH 值、电导率以及 Na、Mg、K、P、Ca 和 N 的有效性。连续萃取分析表明，用塑料炭处理的土壤中可提取的 Cu 浓度显著降低（ $p < 0.05$ ），塑料炭对铜的固定率为 86%。两种塑料炭剂量的降低都是一致的。塑料炭的性质，例如其高 pH 值（11.27）、灰分含量（36.68%）和电导率-EC（0.03dS/m），可能有助于提高土壤 pH 值并促进 Cu 的固定。此外，塑料炭表面存在 CH、C=O、OH、NH、PH 和 C-Cl 等功能团和羧酸类功能团，以及其高固定碳含量（48.14%），可能支持 Cu 的固定。此外，它在 550°C 时具有 70 cmol⁺ kg⁻¹，这些发现表明，UDD 产生的塑料炭可有效用于固定污染土壤中的 Cu。UDD 的热解代表了一种有前途的废物管理实践，可最大限度地减少环境污染。

【关键词】土壤改良剂；一次性婴儿尿布；固定剂；塑料炭

【基金项目】本论文由大学研究经费资助，所有研究设施由斯里兰卡佩拉德尼亚大学农业学院土壤科学系提供。

【收稿日期】2025 年 3 月 15 日

【出刊日期】2025 年 4 月 16 日

【DOI】10.12208/j.ssas.20250005

Remediation of copper contaminated soil by char derived from used disposable baby diapers

A. Kavinthini¹, A. D. Igalavithana²

¹University of Peradeniya, Peradeniya, Sri Lanka

²CSIRO, Waite Campus, Urrbrae, Australia

【Abstract】Plastic, including used disposable baby diapers (UDD), is a growing soil pollutant due to increasing single-use plastic consumption. UDDs contain 50% plastic such as super absorbent polymers that take over 100 years to degrade. This study focused on pyrolysis as a recycling method to produce plastic char from UDDs, evaluating its efficacy in the soil as an amendment to immobilize the copper in contaminated soil. Uncontaminated soil was spiked (240 mg/kg) with copper (II) sulphate. Based on the thermogravimetric analysis of UDD, 550°C was selected as the pyrolysis temperature. The plastic char produced was characterized before being applied to the soil. The contaminated soil was incubated after applying plastic char at the rates of 0% (control), 1%, and 2.5%. Immobilization of Cu was measured after one month of incubation by single extraction using 1M NH₄OAc and consecutive extraction using 0.01 M CaCl₂ methods. The soil pH, electrical conductivity, and availability of Na, Mg, K, P, Ca, and N were analysed. The consecutive extraction analysis revealed a significant ($p < 0.05$) reduction in extractable Cu concentration in the soil treated with plastic char and the immobilization percentage of copper by plastic char was 86%. The decrease was uniform for both plastic char doses. The properties of plastic char, such as its high pH (11.27),

注：本文于 2024 年发表在 International Journal of Food Science and Agriculture 期刊 8 卷 1 期，为其授权翻译版本。

ash content (36.68%), and Electrical conductivity-EC (0.03 dS/m), likely contributed to increasing soil pH and facilitating Cu immobilization. Furthermore, the presence of functional groups such as C-H, C=O, OH, N-H, P-H, and C-Cl and carboxylic acid-like functional groups on the surface of plastic char, along with its high fixed carbon content (48.14%), likely supported the immobilization of Cu. In addition, it has $70 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$ at 550°C . These findings indicate that plastic char derived from UDD can be effectively utilized to immobilize Cu in contaminated soil. The pyrolysis of UDD represents a promising waste management practice that minimizes environmental pollution.

【Keywords】 Soil Amendment; Disposable Baby Diapers; Immobilization; Plastic Char

1 简介

塑料瓶、聚乙烯袋等塑料制品在环境中的积累通常被称为塑料垃圾或塑料污染。这种积累对动植物栖息地的生存及其健康构成威胁。随着全球塑料产量的不断增长,塑料回收变得越来越重要。据文献[1]称,塑料是最广泛使用的聚合物之一。在当今世界,农业、城市和现代活动共同产生了大量废物,加剧了环境挑战。2009年,全球生产了约1400亿片一次性尿布。特别是老年人或需要护理的人对成人一次性尿布的使用量迅速增加,导致日本的尿布产量激增,从1999年的79亿片增加到2011年的145亿片。一次性婴儿尿布(UDD)是塑料垃圾中一种主要的类型。虽然一次性婴儿尿布为婴儿护理提供了极大的便利,但其一次性的特性给废物管理带来了重大挑战^[2]。尿布通常由外层、中层和内层组成,每层均由不同的材料制成。收集和分配层(ADL)包含由丝和羊毛等蛋白质基纤维制成的绒毛浆、棉和木浆等纤维素纤维以及高吸水性聚合物(SAP)。外层由聚丙烯(PP)和聚乙烯(PE)组成,中层包含由纤维素和蛋白质基纤维制成的吸收芯,内层由PP和PE组成^[2]。废旧尿布的处理是一项艰巨的挑战,预计到2022年,年产量将达到近710亿美元。堆肥、热解、厌氧消化、暗发酵和焚烧等各种技术为全球塑料回收提供了潜力^[3]。有效的废旧尿布回收方法包括生物降解和热解。废旧婴儿尿布的成分包括生物质(纤维素)、聚合物(聚乙烯和聚丙烯)和吸附剂,这使得传统的处理和增值策略(例如填埋和酯交换)变得复杂。热解技术可以灵活地重新分配生物质和废料中的碳化合物,并在无氧环境中生产三种类型的热解产物(液态油、气体和焦炭)。微量元素污染是一个众所周知的全球性环境问题,它是由自然和人类活动造成的,会污染水和土壤。微量矿物质不可生物降解,会长期存在。传统方法利用有机和无机改良剂来解决这个问题。然而,

最近的趋势是利用塑料焦作为修复工具,利用其特性来固定土壤中的微量矿物质。塑料焦具有众多孔隙、巨大的比表面积、高阳离子交换容量(CEC)和丰富的表面功能团,对微量矿物质具有优异的吸附性能。本研究旨在通过研究用户态度和废物处理实践来了解环境问题并提出解决方案。该研究探讨了利用从旧婴儿尿布中提取的塑料炭修复人为污染土壤样本(含微量元素,例如铜)的潜力。该研究将冲积土的培养实验结果与先前的研究结果进行了比较。如果假设成立,后续试验可以确定将塑料炭应用于污染土壤的可行性,从而有望在不久的将来提供一种环保有效的修复方法^[4]。

2 方法

2.1 土壤采样与表征

代表性土壤样品取自基准点(KN2)康提系列土壤($7^\circ 15' 51.77'' \text{N}$, $80^\circ 35' 39.88'' \text{E}$)。收集的土壤风干后过筛至小于2.00毫米的孔径,然后使用硫酸铜特意加标,得到修复措施所需的土壤铜浓度:每千克土壤含240.00毫克铜。随后,将污染土壤培养一周,然后分析土壤的理化性质。土壤质地采用文献[5]中描述的移液器法测定。土壤有机碳百分比采用文献[6]中的烧失量法计算。使用1:5土壤:蒸馏水悬浮液测定土壤pH值和电导率(EC)^[7]。

2.2 废旧婴儿尿布(UDD)炭的制备

将仅含有液体废物(人类排泄物)的旧一次性婴儿尿布(UDD)转化为塑料焦炭的过程涉及几个步骤。首先,将UDD切成小块,并在空气中晾干几周。然后,将干燥的UDD放入马弗炉(西班牙Hobersal)内的不锈钢反应器中。容器用紧密贴合的盖子盖住,以尽量减少热解过程中的空气暴露。将UDD在 550°C 的温度下进行30分钟的热解。该过程完成后,将所得产物粉碎并筛分为小于2.00毫米的颗粒。这些颗粒被储存在密封容器中,直到准备使用。此后,制备的产品记为UDD 550,其中

550 表示热解温度^[8]。

2.3 废旧婴儿尿布 (UDD550) 炭的表征

550 的基本特性。在 550°C 下加热 30 分钟之前和之后测量了 UDD 样品的产率, 产率定义为热解过程后塑料焦重量与原料初始重量 (41.30%) 的百分比。测定了水分、挥发性物质、灰分和固定碳的百分比。分别使用 pH 计 (EUTECH pH 510) 和 EC 计 (EUTECH CON2700) 以 1:20 (样品/蒸馏水) 的比例测量 pH 值和电导率。使用凯氏定氮法测定总氮含量。通过 Olsen P 法提取有效磷。使用半微量 Schollbenger 法以 pH 为 7 的 1M 醋酸铵溶液测定阳离子交换容量。用原子吸收分光光度计 (安捷伦科技, 马来西亚) 测定重金属和可交换阳离子。使用 KBr 颗粒光谱仪收集 FT-IR 光谱, 波数范围为 500 至 4000 cm⁻¹^[9]。

2.4 土壤培养研究和土壤分析

进行了一项培养研究, 以评估 UDD550 和铜 (Cu) 在土壤中的固定潜力。将铜污染土壤 (200 g) 和 1%、2.5% (w/w) 的改良剂 UDD₅₅₀ 充分混合, 放入 400 ml 高密度聚乙烯瓶中。容器的盖子被固定, 并在盖子顶部钻孔, 以在培养期间创造有氧条件。将土壤的含水量调整为水持水量的 70%, 并在 25°C 下在黑暗中培养 29 天。每个处理保持四次重复。培养完成后, 将土壤风干并测定土壤化学性质。单次和连续提取确定土壤中重金属的可用性和迁移性。使用 1M NH₄ OAc (pH 7) 溶液, 以土壤与 NH₄ OAc 为 1:5 的比例对金属进行单次萃取。通过使用 0.01M 氯化钙 (CaCl₂), pH 5.5 溶液对土壤进行连续萃取来评估金属迁移动力学。将土壤与 CaCl₂ 的比例为 1:5 的悬浮液在 25°C 下振荡 24 小时, 对土壤进行连续萃取四次^[10]。

2.5 统计分析

表 1 采用标准方法测量塑性炭的性质, 根据 Oh 和 Shinogi (2013) 获得的数据, 将 UDD550 与三种不同温度产生的塑性炭进行比较

UDD samples	pH 1: 20	EC dSm-1	Total-N	Available P2O5 (g kg ⁻¹)	CEC cmolc kg ⁻¹	Ash content %	Fixed carbon content %	Volatile matter content %	Moisture content %	Available potassium content %
UDD500	11.31	0.15	0.39	4.34	42.03	19.10	20.11	60.22	0.57	3.42
UDD550	11.27	0.33	0.39	3.78	70.00	48.84	36.68	13.95	0.53	6.26
UDD700	12.03	0.44	0.12	4.34	87.06	51.65	42.44	5.40	0.51	2.95
UDD900	12.62	1.22	0.03	5.79	95.09	52.18	45.08	2.33	0.40	9.90

数据经正态分布检验^[11], 由于所有数据均呈正态分布, 因此进一步采用参数检验来评估改良剂的效果。采用皮尔逊相关性分析探讨各处理中可提取元素含量与土壤性质之间的关系。采用单因素方差分析 (ANOVA), 并在 $p < 0.05$ 时进行 Tukey 显著差异 (HSD) 检验, 以比较各处理间的差异并识别显著性差异^[10]。

3 结果

在进行塑料炭培养分析之前, 对土壤的初始性质进行了分析。根据美国农业部 (USDA) 土壤质地三角划分标准, 土壤质地为砂壤土 (粘土-2.27%, 粉土-7.84%, 砂土-82.72%), 土壤等级为红壤土。土壤有机质含量为 1.19%, 有机质含量较低。土壤风干后含水率为 2.11%, 土壤持水量为 21.25%。

表 1 所示。结果显示, pH 值 塑料焦呈碱性。塑料焦样品的电导率 (EC) 较高。总氮含量较低。消解塑料焦炭分后, 对塑料焦中有效磷 (P) 含量和有效钾 (K) 含量进行了分析。其含量显著较高。观察到固有铜浓度, 低于粮农组织允许的限值。

使用 FT-IR 来识别 UDD 样品中存在的特定化学功能团。图 1 显示了 UDD 550 的 FT-IR 发射光谱。在 UDD 550 的光谱中, 观察到 OH (3750 cm⁻¹)、CH (2750-3500 cm⁻¹)、C=O (1630 cm⁻¹)、NH (1555 cm⁻¹)、羧酸 (2250-2500 cm⁻¹)、PH (1057 cm⁻¹) 和 C-Cl (713 cm⁻¹) 等各种谱带。2250-2500 cm⁻¹ 左右的峰宽且强, 其中含有大量羧基。4 OAc 溶液进行单次萃取分析, 考察处理对培养土壤铜浓度的影响。结果如图 2 所示, 处理 B1 和 B2.5 的铜浓度平均值低于对照 (B0), 且对照与处理 B1 和 B2.5 之间存在显著差异。但处理 B1 和 B2.5 之间无显著差异, 说明塑料炭施用量 (1%、2.5%) 对铜污染土壤的固定化影响不显著。

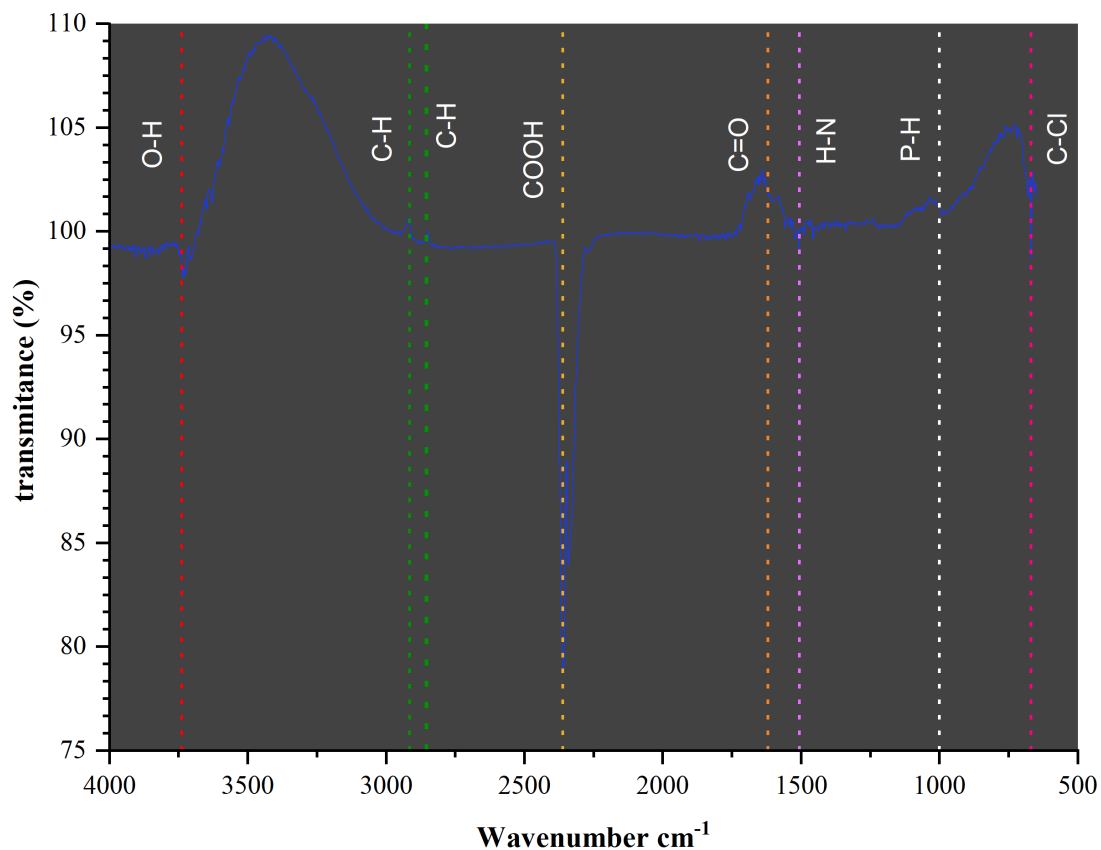


图 1 塑料炭的 FT-IR 发射光谱图。虚线带表示 550° C 时塑料炭表面上的功能基团。彩色虚线表示发生发射的波数。每个峰都表明存在功能基团

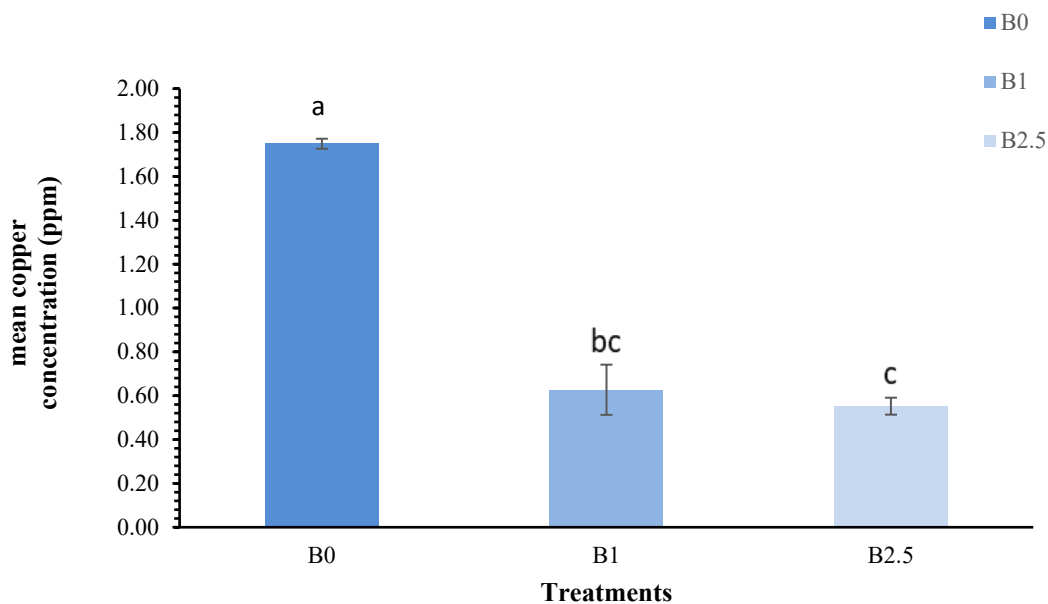


图 2 1M NH₄OAc 可提取培养土壤中的 Cu，垂直线表示标准偏差。垂直线上方的字母表示 $p < 0.05$ 的统计显著差异 (Tukey 事后检验)。处理：BO 表示对照，B1 - 1% w/w 塑料炭，B2.5 - 2.5% w/w 塑料炭

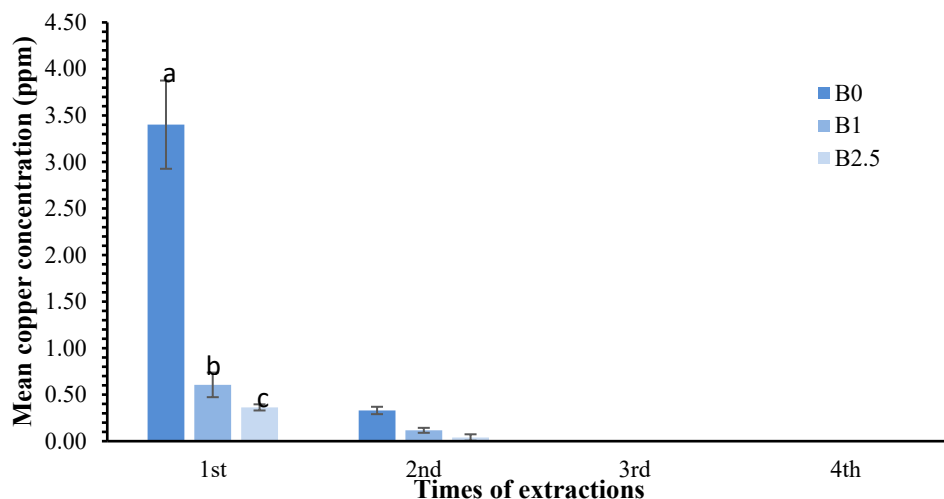


图3 0.01M CaCl₂对培养土壤中的铜进行连续萃取，垂直线表示在 $p < 0.05$ 时统计显著差异上方字母的标准偏差（Tukey 事后检验）。处理：B0- 对照，B1- 1% w/w 塑料炭，B2.5- 2.5% w/w 塑料炭

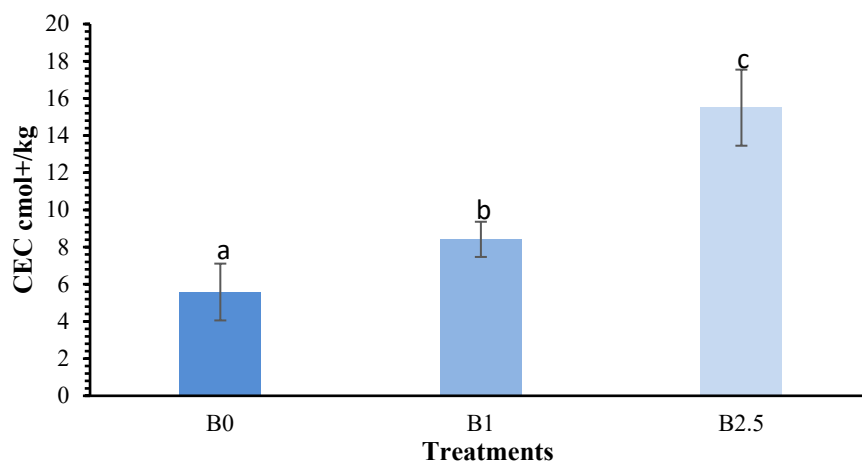


图4 培养土壤的阳离子交换容量，垂直线表示标准偏差。垂直线上方的字母表示 $p < 0.05$ 的统计显著差异（Tukey 事后检验）。处理：BO 表示对照，B1 - 1% w/w 塑料炭，B2.5 - 2.5% w/w 塑料炭

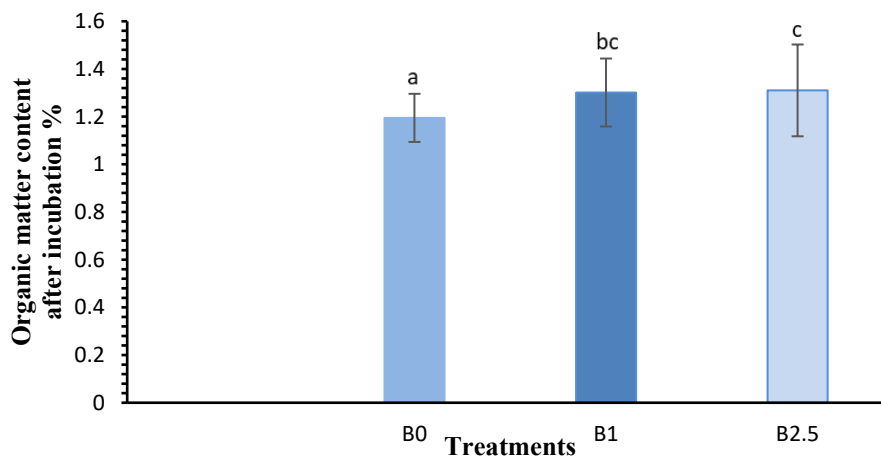


图5 培养期后测量了铜污染土壤中有机物含量的改善。垂直线表示标准偏差。垂直条上方的字母表示 $p < 0.05$ 的统计显著差异（Tukey 事后检验）。处理：BO 表示对照，B1 - 1% w/w 塑料炭，B2.5 - 2.5% w/w 塑料炭

注：a 为括号； b 为括号； c 为括号。表示三种处理在上述参数上存在显著差异。

0.01M CaCl₂ 溶液进行连续分析, 以探究重金属释放动力学。添加塑料炭作为土壤改良剂显著降低了四次萃取过程中金属(尤其是铜)的迁移率。与对照相比, 两种处理(B1 和 B2.5)在第一次和第二次萃取中有效铜浓度均显著降低。随后, 在第三次和第四次萃取中, 由于塑料炭处理, 铜浓度低于检测限。对照(B0)与两种处理之间存在显著差异。

在培养土壤中施用塑料炭可提高阳离子交换容量(CEC), 具体数值取决于施用量。观察到的趋势如下: 对照<处理 1<处理 2。

初始土壤有机质含量(1.19%)随着塑料炭施用量的增加而增加, 以有机质含量为基础的增幅最高可达 1.31%。

培养 29 天后, 观测了土壤铜浓度及相关化学和

表 2 培养后土壤的化学性质。数据以平均值加标准差的形式呈现。括号后的字母表示 $p < 0.05$ 时存在显著差异 (Tukey 事后检验)

Treatment	pH	EC	Na mg/kg	K mg/kg	Mg mg/kg	Ca g/kg	N g/kg	P mg/kg
B0	7.50±0.05 a ¹	0.07±0.00 a	0.23±0.03 a	11.63±0.43 a	2.35±0.05 a	0.70±0.26 a	0.51±0.12 a	0.16±0.05 a
B1	9.50±0.07 b	0.71±0.04 b ¹	11.45±8.60 b	31.72±3.12 b	1.72±0.31 b	0.13±0.05 b	0.37±0.03 b	0.89±0.18 b
B2.5	10.34±0.03 c	1.78±0.04 c	20.6±6.35 c	98.86±6.40 c	1.56±0.11 c	0.10±0.02 c	0.20±0.03 c	1.51±0.03 c ¹

注: a¹ 是括号; b¹ 是括号; c¹ 为括号, 表示三种处理在上述参数上均存在显著差异。

4 讨论

使用热重分析仪对旧尿布进行热解分析时, 发现主要重量减轻阶段发生在 30.05°C 至 200°C 之间。由于脱水, 尿布的重量从 100.56% 下降到 81.92%, 去除了高达 18.64% 的水分。通常, 这种脱水和除水阶段发生在旧一次性婴儿尿布中木质纤维材料的初始热解过程中。图 6 显示了 400 至 600°C 温度范围内 UDD 的主要分解情况。该过程导致尿布显著分解, 重量减轻高达 30.96%。尿布由碳氢化合物、聚合物和木质纤维素成分(纤维素、半纤维素和木质素)组成, 分解后很可能转化为挥发性物质。在 800 至 1000°C 之间, 观察到进一步的分解和重量减轻, 表明发生了被动热解。此阶段涉及 UDD 中固定碳的逐渐稳定分解。经分析发现, 这些尿布含有 48.14% (重量) 的固定碳, 可以通过热解有效回收, 生成有价值的碳质材料, 例如固体塑料焦^[12]。通过对塑料焦(UDD 550)的性质进行表征, pH 值 塑料焦呈碱性。观察到这种极端的 pH 值, 是因为热解过程后塑料焦样品的灰分成分中保留了碱

物理参数。

相关性分析结果显示, 培养土壤 pH 值与单次提取中铜浓度的降低呈负相关。pH 值的升高导致铜的固定化, pH 值与铜浓度之间呈较高的负相关性 ($r = -0.969$)。同时测量了土壤电导率(EC), 发现与单次提取中铜的固定化呈正相关 ($r = -0.809$)。测量了土壤钠(Na)浓度, 发现随着铜浓度的降低, 钠浓度增加。钠浓度与铜离子浓度呈中等程度的负相关 ($r = -0.781$)。镁(Mg)浓度与铜浓度的降低呈正相关 ($r = +0.937$)。有效磷(p)浓度与铜浓度的降低呈负相关 ($r = -0.887$)。随着铜浓度的降低, 钾(K)浓度呈上升趋势 ($r = -0.714$), 钙(Ca)浓度呈下降趋势 ($r = +0.915$); 随着铜浓度的降低, 速效氮(N)呈下降趋势 ($r = +0.787$)。

性阳离子盐。根据[9], 将热解固体产物添加到酸性土壤中, pH 值会升高, 因为 K⁺、Ca²⁺和 Mg²⁺等碱性金属的浓度会增加。高 pH 值是这种塑料焦的一个有用属性, 当添加到酸性土壤中时, 它可以中和土壤的酸度; 因此, 它可以用来修复酸性土壤中的重金属。由于释放了不同的矿物盐, 观察到塑料焦样品具有高电导率(EC), 这指的是塑料焦中存在溶解离子。该值表明, 当用作土壤改良剂时, 塑料焦会显著提高土壤 EC, 并且根据文献[9], EC 值与热解温度呈正相关。尽管由于尿液的热解温度很高(550°C), UDD 中含有大量的氮, 但会发生氮的挥发。因此, 在塑料焦中观察到的总氮含量较低。根据文献[9], 总氮含量随热解温度的升高而降低。在消化塑料焦的灰分成分后, 分析了塑料焦中有效磷(P)含量和有效钾(K)含量。这是因为尿液中含有大量的盐。固有的铜浓度可以忽略不计。在培养实验中, 向土壤中添加硫酸铜盐。选择 240 mg/kg 土壤的浓度, 因为根据粮农组织的规定, 土壤中铜的最大允许含量通常在 50-100 mg/kg 之间。

此外,在 240 mg/kg 的浓度下,幼苗的出苗会受到影响。为了了解培养后重金属的动力学,我们进行了单一提取方法,结果表明塑料焦由于其高比表面积和表面功能团而能够固定铜。铜也可以被微生物、粘土矿物、固有有机质、锰和铁的氧化物以及碳酸盐结合沉淀固定。在对照组中,铜的固定是由于结合沉淀^[10],我们使用 pH 值为 5.5 的 0.01M CaCl₂ 进行连续提取,模拟根际条件。结果显示,在酸性 pH 条件下,与对照组相比,两种塑料焦率均有效降低了土壤铜的迁移率^[10]。

本研究中使用的塑料焦含有含氧功能团,例如羧基和羰基,它们可以增强土壤的 CEC (图 1)。这是因为羧基和羰基可以增强土壤的 CEC。这是因为羰基在水中容易去质子化,导致塑料焦表面带更多

负电荷。然而,值得注意的是,塑料焦对 CEC 的影响可能因所用原料的类型和所施加的热解温度而异。与 500 和 700 °C 相比,UDD 在 550°C 下的 CEC 为 70 cmol + kg⁻¹ ^[9]。培养后,观察了铜浓度和土壤化学和物理参数。根据分析,塑料焦的 pH 值和 EC 与降低铜浓度呈正相关。

由于其高灰分含量 (表 1) 显示,容器中含有碱性离子,这是 pH 值和 EC 值升高的原因。氮与铜浓度降低呈负相关。容器内 pH 值的升高会导致氨挥发,并与铜浓度降低呈正相关。Na、P、K 与铜浓度降低呈负相关,这是由于婴儿尿液中含有较多的磷酸钠和磷酸钾,而钙盐和镁盐含量较少,导致灰分含量较高^[13]。因此,钙和镁与铜浓度降低呈负相关。

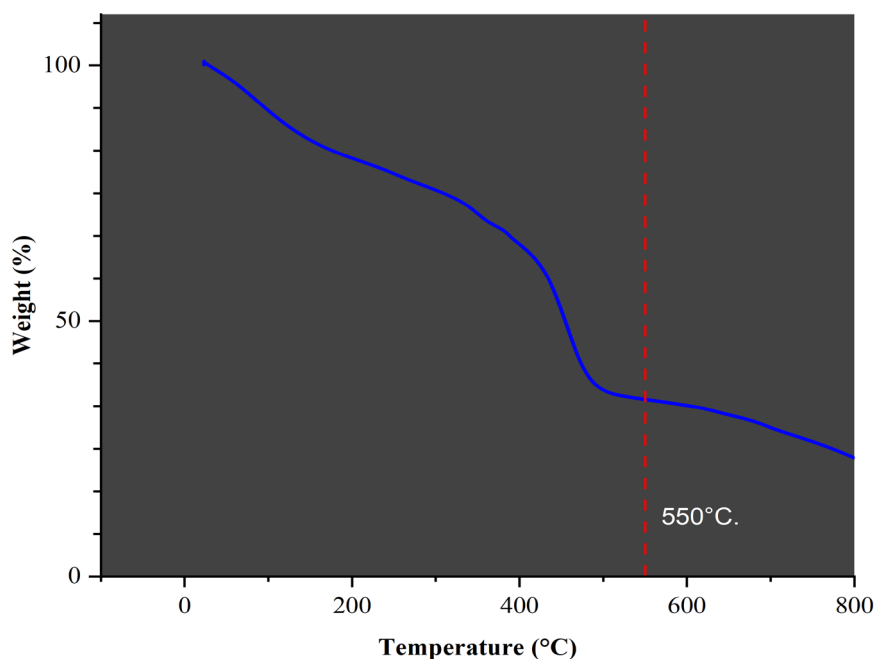


图 6 使用过的一次性婴儿尿布 (UDD) 的热重分析,用于确定 UDD 热解的合适温度。参考虚线表示重量百分比不会突然变化的温度。该图描绘了重量百分比如何随温度升高而降低

5 结论

一次性婴儿尿布 (UDD) 正成为许多国家关注的焦点。实验结果表明,热解过程可有效减少其体积。对所得塑料焦的表征表明,其固定碳和灰分含量高、挥发性物质含量低,pH 值、EC 值和 CEC 值也高。这表明,塑料焦可以作为土壤改良剂重新利用,通过提高 pH 值并释放养分 (因为其灰分含量高)。它所含的固有铜 (Cu) 浓度微乎其微,不

会对环境造成危害。塑料焦的表面积大,且具有众多功能基团 (例如 CH、C=O、OH、NH、PH、C-Cl 和羧酸),有助于铜在处理过的土壤中固定化。连续萃取分析表明,与对照相比,用塑料焦处理的土壤中铜浓度显著降低,尽管两种塑料焦施用率之间没有显著差异。

这些结果表明,由 UDD 制成的塑料焦可以有效固定污染土壤中的铜 ($p < 0.05$) 并改善土壤 pH 值。

总而言之，热解 UDD 是一种高效的废物处理方法，不会污染环境。

参考文献

- [1] S. Serranti and G. Bonifazi. "Techniques for separation of plastic wastes." *Use Recycl. Plast. Eco-efficient Concr.*, pp. 9-37, Jan. 2019.
- [2] J. Płotka-Wasyłka, et al. "End-of-life management of single-use baby diapers: Analysis of technical, health and environment aspects." *Sci. Total Environ.*, vol. 836, Aug. 2022,
- [3] S. C. Khoo, X. Y. Phang, C. M. Ng, K. L. Lim, S. S. Lam, and N. L. Ma. "Recent technologies for treatment and recycling of used disposable baby diapers." *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 123, pp. 116-129, Mar. 2019.
- [4] P. Campos and J. M. De la Rosa. "Assessing the Effects of Biochar on the Immobilization of Trace Elements and Plant Development in a Naturally Contaminated Soil." *Sustain.* 2020, Vol. 12, Page. 6025, vol. 12, no. 15, p. 6025, Jul. 2020.
- [5] S. J. Indorante, R. D. Hammer, P. G. Koenig, and L. R. Follmer. "Particle-Size Analysis by a Modified Pipette Procedure." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 54, no. 2, pp. 560-563, Mar. 1990.
- [6] B. E. Davies. "Loss-on-Ignition as an Estimate of Soil Organic Matter." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 38, no. 1, pp. 150-151, Jan. 1974.
- [7] B.-M. Wilke. "Determination of Chemical and Physical Soil Properties." *Monit. Assess. Soil Bioremediation*, pp.47-95, Dec. 2005.
- [8] Y. Zhou, Y. Liu, W. Jiang, L. Shao, L. Zhang, and L. Feng. "Effects of pyrolysis temperature and addition proportions of corncob on the distribution of products and potential energy recovery during the preparation of sludge activated carbon." *Chemosphere*, vol. 221, pp. 175-183, Apr. 2019.
- [9] T. K. Oh and Y. Shinogi. "Characterization of the pyrolytic solid derived from used disposable diapers." *Environ. Technol. (United Kingdom)*, vol. 34, no. 24, pp. 3153-3160, Dec. 2013.
- [10] A. D. Igalavithana, et al. "Metal(loid) immobilization in soils with biochars pyrolyzed in N₂ and CO₂ environments." *Sci. Total Environ.*, vol. 630, pp. 1103-1114, Jul. 2018.
- [11] P. Royston. "Which measures of skewness and kurtosis are best?" *Stat. Med.*, vol. 11, no. 3, pp. 333-343, Jan. 1992.
- [12] T.-K. Oh and Y. Shinogi. "Environmental Technology Characterization of the pyrolytic solid derived from used disposable diapers Characterization of the pyrolytic solid derived from used disposable diapers." *Environ. Technol.*, vol. 34, no. 24, pp. 3153-3160, 2013.
- [13] J. E. Slater. "Retentions of nitrogen and minerals by babies 1 week old." *Br. J. Nutr.*, vol. 15, no. 1, pp. 83-97, 1961.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS