工业固废协同处置对土壤理化性质的影响分析

苏志成

（瑞盛环境股份有限公司，江苏 宜兴 214215）

摘 要 为了研究工业固废协同处置技术对土壤理化性质的影响规律，确定合适的协同处置比例，本研究选择典型工业固废和供试土壤，设置不同的固废协同处置比例梯度进行试验。用标准化的检测方法系统测定和分析处置后土壤物理性质（容重、孔隙度、含水量等）和化学性质（pH值、有机质含量、养分含量、重金属含量等）的变化特点，比较不同处置比例下土壤理化性质的差异。结果表明，工业固废协同处置对土壤理化性质有显著影响，合理的处置比例可以改善土壤孔隙结构、提高土壤有机质和养分含量，但是过量处置容易造成土壤pH失衡、重金属累积等问题。根据试验结果，分析固废协同处置对土壤理化性质的影响机理，提出兼顾土壤改良和固废无害化处置的协同工艺适宜范围。研究成果可为工业固废资源化利用与土壤生态修复的协同发展提供数据支撑和技术参考。

关键词 工业固废；协同处置；土壤物理性质；土壤化学性质；处置比例

中图分类号：X705；S153 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.040

0 引言

随着工业化的不断发展，工业固废的排放量也在不断增大，传统的堆存、填埋等方式处置工业固废，占用大量土地，而且容易通过淋溶、渗漏等方式造成土壤、水体、大气环境污染，对生态系统安全构成威胁[1]。工业固废协同处置属于固废无害化、减量化、资源化的重要技术途径，依靠多种固废的配伍协同，可以实现污染物的协同降解、养分的互补利用，给固废资源化利用提供新方向。目前，对于单一工业固废对土壤性质的影响已有较多的研究，但是不同类型工业固废协同处理后对土壤物理、化学性质的综合影响规律以及合适的处置比例的研究还比较缺乏，协同作用机理也未完全明了。因此，本文进行工业固废协同处置对土壤理化性质影响的试验，分析处置后土壤理化指标变化特征，确定合适的协同处置比例，探讨其内在机理，为工业固废协同资源化利用技术优化、土壤生态修复、区域生态环境质量改善提供理论依据和实践支撑[2]。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤取自某典型农田表层土壤（0 cm～20 cm），去除石块、根系等杂质后，自然风干、研磨、过2 mm筛，备用。土壤基础理化性质如下：容重1.32 g/cm^3，孔隙度48.5%，田间持水量22.3%，pH值6.8，有机质含量18.6 g/kg，全氮1.05 g/kg，全磷0.62 g/kg，全钾18.3 g/kg，重金属（铅、镉、铬）含量均符合土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 15618-2018）限值要求。选取当地排放量较大的粉煤灰、钢渣两种典型固废，经过预处理去除杂质，烘干至恒重，研磨过1 mm筛。粉煤灰主要化学成分：SiO_2 52.3%、Al_2O_3 28.6%、CaO 6.8%；钢渣主要化学成分：CaO 42.5%、Fe_2O_3 21.3%、SiO_2 15.6%；两种固废均经检测无有毒有害物质超标，具备协同处置的可行性。

1.2 试验设计

试验采用盆栽的方式进行，以粉煤灰和钢渣固废协同处置比例为变量，设置五个处理组，CK（对照组，不加固废）、T1（2%固废）、T2（5%固废）、T3（8%固废）、T4（12%固废），每组做三次重复，保证试验数据的可靠性。每个试验盆装土5 kg，按照设定的比例加入预处理后的工业固废，充分搅拌后，调节土壤含水量至田间持水量的70%，放在温室里培养，培养周期为90 d，在培养期间定期浇水，保持土壤含水量稳定，避免外界因素的干扰。

1.3 检测指标与方法

培养结束后，采集各处理组的土壤样品，按照标准化的方法测定有关指标。土壤物理性质指标：容重用环刀法测定，孔隙度根据容重和土壤密度计算得出，

作者简介：苏志成（1987-），男，硕士研究生，工程师，研究方向：生态环境工程。

田间持水量用重量法测定；土壤化学性质指标：pH 值用电位法（土水比 1:2.5）测定，有机质含量用重铬酸钾氧化—外加热法测定，全氮用凯氏定氮法测定，全磷用钼锑抗比色法测定，全钾用火焰光度法测定，重金属（铅、镉、铬）含量用电感耦合等离子体质谱法（ICP-MS）测定。

2 试验结果与分析

2.1 工业固废协同处置对土壤物理性质的影响

不同的工业固废协同处置比例对于土壤物理性质的影响是不一样的。对照组 CK 的土壤容重都呈下降趋势，孔隙度和田间持水量呈上升趋势，且变化规律一致，在 T2 处理组（5% 固废）达到最佳效果。由表 1 可知，T2 处理组土壤容重为 1.16 g/cm^3，比 CK（1.32 g/cm^3）减少了 12.1%；孔隙度提高到 53.5%，比 CK 提高了 10.3%；田间持水量达到 24.2%，比 CK 提高了 8.5%。T4 处理组（12% 固废）土壤容重比 T2 处理组增加 4.8%，孔隙度减少 3.2%，田间持水量下降 2.9%。这说明适量工业固废协同处置可以改善土壤颗粒结构，降低容重、增加孔隙度，提高土壤保水能力，但是过量添加容易造成固废颗粒团聚胶结，反而破坏土壤物理结构的稳定性。

表 1 不同协同处置比例对土壤物理性质的影响

处理组	容重（g/cm^3）	孔隙度（%）	田间持水量（%）
CK（0%）	1.32±0.03a	48.5±1.22c	22.3±0.85c
T1（2%）	1.25±0.02b	50.8±1.05b	23.1±0.78b
T2（5%）	1.16±0.03c	53.5±1.31a	24.2±0.92a
T3（8%）	1.18±0.02c	52.8±1.14a	23.9±0.81a
T4（12%）	1.21±0.03b	51.8±1.20b	23.5±0.75b

2.2 工业固废协同处置对土壤化学性质的影响

工业固废协同处置对土壤化学性质的影响是双向的，既可以提高土壤养分储备，也可以引起 pH 失衡和重金属微量累积，且该效应随处置比例的变化而变化[3]。土壤养分及有机质方面，各处理组均优于对照组，其中 T2 处理组提升效果最好，T4 处理组虽然养分含量较高，但是综合风险上升。土壤有机质、全氮、全磷、全钾含量均随固废添加比例增加先升后降，峰值均出现在 T2 处理组，该组土壤有机质含量达到 23.0 g/kg，比 CK 提高 23.6%；全氮、全磷、全钾含量分别为 1.24 g/kg、0.78 g/kg、20.6 g/kg，比 CK 分别提高 18.2%、25.8%、12.5%。

养分提高主要是由于粉煤灰和钢渣中含有的钙、硅、氮磷等元素可以直接补充土壤养分库，疏松的固废结构给微生物活动提供了一个良好的环境，有利于土壤有机质的合成和积累。在 pH 值和重金属方面，随着固废添加量的增加，土壤的 pH 值呈持续上升的趋势，CK 组 pH 值为 6.8，T2 组升至 7.3，处于适宜作物生长的范围（6.0 ～ 7.5），而 T3、T4 处理组的 pH 值分别达到 7.6、7.9，超出了适宜的范围，容易造成土壤中磷、铁等元素的固定，降低养分有效性。

从重金属含量上看，各处理组的铅、镉、铬含量均满足《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》（GB 15618-2018）限值要求，但是呈微量累积的趋势。T4 处理组铅、镉含量比 CK 分别上升 15.3%、12.1%，铬含量上升 8.7%，主要是由于工业固废中含有微量的重金属，随着固废添加量的增加在土壤中逐渐富集。因此适量的固废协同处置可以改善土壤的化学性质，过量则容易造成 pH 失衡和重金属微量累积，造成土壤质量潜在风险[4]。

2.3 不同协同处置比例对土壤理化性质的差异分析

为了更直观地反映各个处理组土壤理化性质的综合表现，用隶属函数法对容重、孔隙度、有机质、全氮、全磷、全钾、pH 值 7 项主要指标进行综合评价，得到各处理组综合得分（见表 2）。结果表明，各处理组综合得分排序为 T2（0.82）＞ T3（0.65）＞ T1（0.53）＞ T4（0.48）＞ CK（0.31），T2 处理组综合表现最好，与其他处理组差异显著。

方差分析结果表明，T2 处理组与其它处理组的各

表 2 不同协同处置比例下土壤理化性质综合评价得分

处理组	容重	孔隙度	有机质	全氮	全磷	全钾	pH 值	综合得分
CK（0%）	0.21	0.25	0.28	0.30	0.27	0.32	0.45	0.31±0.04d
T1（2%）	0.43	0.51	0.46	0.42	0.48	0.45	0.58	0.53±0.03c
T2（5%）	0.85	0.92	0.87	0.82	0.89	0.78	0.75	0.82±0.05a
T3（8%）	0.78	0.85	0.81	0.76	0.83	0.72	0.38	0.65±0.04b
T4（12%）	0.62	0.68	0.73	0.69	0.75	0.66	0.21	0.48±0.03c

项指标及综合得分差异均达到显著水平（P＜0.05），说明5%的固废协同处置比例是该试验条件下适宜的固废协同处置比例。

3 工业固废协同处置影响土壤理化性质的机理及工艺优化方向

3.1 工业固废协同处置影响土壤理化性质的机理

工业固废协同处置对土壤理化性质的影响，是物理作用和化学作用共同作用产生的[5]。

从物理机理上看，粉煤灰呈疏松多孔结构，钢渣颗粒硬度高，二者协同添加可以填充土壤孔隙，打破土壤黏粒团聚体，降低容重、增加孔隙度，提高土壤保水保肥的物理空间；但是过量添加时，固废颗粒之间容易发生胶结反应，形成致密团聚体，导致土壤孔隙堵塞，物理性质变差。

从化学机理上讲，钢渣中含有的碱性氧化物（CaO、MgO）可以中和土壤的酸性，提高pH值，释放钙、磷等养分元素；粉煤灰中的硅、铝元素可以和土壤有机质结合，促进养分的固定和积累；但是过量添加时，碱性物质累积造成pH值过高，固废中微量重金属通过吸附、沉淀作用在土壤中累积，进而影响土壤的化学性质。固废协同处置还可以间接影响土壤微生物群落结构，从而调节土壤有机质分解和养分循环，进一步加强土壤理化性质的影响。

3.2 工业固废协同处置工艺的适宜性与优化方向

根据试验结果，5%的工业固废（粉煤灰、钢渣各占50%）的协同处置比例为该试验条件下最合适的方案，既可以实现工业固废的资源化利用，又可以改善土壤理化性质，具有生态效益和环境安全性的双重优势。

从工艺优化的角度来说，首先要根据固废的类型来调整配伍比例，对不同成分的工业固废进行预处理（活化、筛分）来降低有害成分的含量，从而提高协同处置的效果。其次要结合目标土壤类型（酸性、碱性、中性）来调节固废添加量，对于酸性土壤可以适当增加钢渣的比例来中和酸性；对于碱性土壤则减少钢渣的添加量，防止pH值失衡。最后可以引入微生物强化技术，搭配功能微生物菌剂来缓解过量固废造成的土壤结构恶化的问题，同时促进重金属钝化，提高协同处置的综合效益。

4 结论

本研究采用不同比例的工业固废（粉煤灰和钢渣的比例为1:1）协同处置对土壤理化性质的影响试验，通过图表数据的分析得出如下结论：

一是工业固废协同处置对土壤理化性质有显著影响，呈现低比例弱效、中比例最优、高比例劣化的规律，适量添加可以改善土壤物理结构（降低容重、增加孔隙度）、提高土壤化学性质（增加有机质和养分含量），过量添加会导致土壤物理结构恶化、pH失衡和重金属微量累积。

二是不同的协同处置比例对土壤理化性质的影响差异很大。经过综合评价，5%的固废添加比例为试验最优比例，在该比例下土壤容重、孔隙度等物理指标和有机质、养分等化学指标均达到最优水平，pH值适宜，重金属含量未超标，综合效益最高。

三是工业固废协同处置通过物理填充、化学反应、微生物调控的协同作用影响土壤理化性质，粉煤灰和钢渣的颗粒互补、成分协同可以实现固废资源化和土壤改良的双赢。

该研究成果为工业固废协同处置技术的推广应用、土壤生态修复提供数据支撑和试验依据，但是试验只针对农田土壤与粉煤灰、钢渣组合，且为90 d短期培养试验，存在一定的局限性。未来需要扩大试验范围，涵盖不同的土壤类型（酸性、碱性土壤）以及工业固废的组合，开展长期定位试验，监测土壤理化性质和生态功能的长期变化，进一步优化协同处置工艺参数，探索固废预处理技术与微生物强化技术的耦合应用，为不同区域、不同类型固废与土壤的协同处置提供更加全面、可靠的技术参考，推动工业固废资源化利用与生态环境保护的协同发展。

参考文献：

[1] 杨超,唐焕,王蔓.生活垃圾焚烧发电厂协同处置一般工业固废环境影响评价难点分析[J].清洗世界,2025,41(03):169-171.

[2] 叶恒棣,蔡飞翔,丁成义,等.热解与烧结协同处置富碳有机固废的新工艺[J].烧结球团,2022,47(06):49-56.

[3] 姜萌萌,钟崇巍,胡蝶,等.生物炭-污泥协同黑麦草修复煤基固废堆场表层土壤及重金属污染风险评价[J].环境工程学报,2025,19(06):1455-1463.

[4] 罗欢.皮革固废制多孔炭治理土壤污染研究[J].西部皮革,2025,47(13):4-6.

[5] 关冰,吕林有,赵艳,等.多源固废协同利用沙地生态治理的可行性探讨[J].水土保持应用技术,2022(06):4-6.