粉煤灰与农业固废制备土壤调理剂系列产品研究与应用

谢肥东[1]，余学军[2]，侯刘涛[1]，沈小炎[1]，汪敬恒[1,3*]，陈佳晖[4]

[1]河南龙宇煤化工有限公司　河南永城
[2]河南省科学院　河南郑州
[3]南京沃野化工科技有限公司　江苏南京
[4]开封民众制药有限公司　河南开封

【摘要】本文介绍了粉煤灰和农作物秸秆、畜禽粪污对环境的污染及其化学组成特征，研究了对粉煤灰化学活化（活化剂 A+B，用量为粉煤灰质量的 3.5%，常温搅拌 10 min），对秸秆、粪污混合物微生物发酵腐熟（复合菌剂接种量 0.8%，堆肥周期 40 d），并以此为原料制备土壤调理系列产品的工艺路线和方法。产品在河南 3 个试验点的小麦-玉米（花生、大豆、高粱、红薯、芝麻、烟叶）轮作体系中进行连续三年定位试验，结果表明，产品处理组较对照组增产 5.1%~15.5%。重金属溶出试验显示产品符合 GB 15618-2018 土壤环境质量标准，环境风险可控。粉煤灰的土地利用，既可消除粉煤灰和农业固废对环境的污染，又可减少化肥施用量，对提高粉煤灰综合利用效率和水平，推动大宗固废由“低效、低值、分散利用”向“绿色、高效、高值、规模化利用”转变提供了一条新途径。

【关键词】粉煤灰；活化；农业固废；发酵腐熟；土壤调理剂；节能降碳
【收稿日期】2026 年 7 月 5 日　【出刊日期】2026 年 8 月 1 日　【DOI】10.12208/j.aes.20260011

Research and application of a series of soil conditioners prepared from fly ash and agricultural solid waste

Feidong Xie[1], Xuejun Yu[2], Liutao Hou[1], Xiaoyan Shen[1], Jingheng Wang[1,3], Jiahui Chen[4]*

[1]Henan Longyu Coal Chemical Co., Ltd., Yongcheng, Henan
[2]Henan Academy of Sciences, Zhengzhou, Henan
[3]Nanjing Woye Chemical Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu
[4]Kaifeng Minzhong Pharmaceutical Co., Ltd., Kaifeng, Henan

【**Abstract**】This paper introduces the environmental pollution and chemical composition characteristics of fly ash, crop straw, and livestock manure, and studies the chemical activation of fly (activators A B, dosage 3.5% of fly ash mass, stirred at room temperature for 10 min), and the microbial fermentation and decomposition of the and manure mixture (composite microbial agent inoculation dosage 0.8%, composting cycle 40 d), and the process routes and methods for preparing a series of soil conditioner products using as raw materials. The products were subjected to continuous three-year fixed-location trials in wheat-maize (peanut, soybean, sorghum, sweet potato, sesame, tobacco) rotation systems three test sites in Henan. The results showed that the product treatment group increased the yield by 5.1% to 15.5% compared to the control group Heavy metal leaching tests showed that the products comply with the GB 15618-2018 Soil Environmental Quality Standard, and the environmental risk is controllable. The utilization of fly ash can both eliminate the environmental pollution caused by fly ash and agricultural solid waste, and reduce the application of chemical fertilizers. It provides a new pathway to improve the utilization efficiency and level of fly ash, and promote the transformation of bulk solid waste from “inefficient, low-value, and decentralized utilization” to “green, efficient, high-value, and large-scale utilization”.

【**Keywords**】Fly ash; Activation; Agricultural solid waste; Fermentation and decomposition; Soil conditioner; Energy saving and carbon reduction

*通讯作者：汪敬恒（1961-）男，河南睢县人，博士，教授级高工，研究方向：化工、环保、土壤污染治理与修复、碳中和及资源化利用等。

粉煤灰是一种燃煤过程中产生的固体废弃物。我国是世界上最大的煤炭生产和消费国，粉煤灰是我国排量较大的大宗工业废渣之一。根据我国燃煤量估算，2025 年我国粉煤灰年产生量高达 9 亿吨，累计堆积量已超 30 亿吨。如此大量的粉煤灰，不仅会占用大量土地，若处理不当，将造成扬尘和雾霾，污染大气，引发土壤酸碱失衡等现象，对环境造成严重破坏；若排入水系会造成河流淤塞，其中的有毒化学物质还会对人体和生物造成危害。虽然粉煤灰已在建工、建材、水利等各部门得到广泛应用，但仍存在利用附加值偏低、技术含量不高等问题。粉煤灰的处理和资源化利用问题已经成为社会关注的焦点问题之一[1]。

由于粉煤灰含有多种植物生长所必需的中、微量元素，且呈碱性，具有多孔结构，可疏松和改良酸性土壤，根据我国土壤大面积严重酸化的情况，国内外学者相继开展了用粉煤灰改良酸性土壤的大量研究。中国科学院过程工程研究所等利用粉煤灰制备土壤调理剂，可增加土壤孔隙率，改善微生物环境[2]，刘建森等制备的粉煤灰基土壤保水调理剂能够改善土壤的物理、化学和微生物反应，增加土壤肥力[3]，内蒙古科技大学以工业废料粉煤灰作为原料，解决了粉煤灰堆积占用土地及可能的环境污染问题，实现了废物利用[4]，武琳等认为，粉煤灰的养分含量较为丰富，作为改良剂可有效提升土壤的肥力，促进植物生长[5]，中南大学柴立元团队提出大宗工业固废“类土壤化”利用新范式[6]，河南省化工研究所汪敬恒团队以粉煤灰和高炉水淬渣为基本原料制备稀土磁化复合肥，加拿大西安大略大学 Fyfe 教授团队践行了粉煤灰回归土壤的理念，何雪莲等开展了酸性土壤改良与开发利用研究[7]，赵学强等进行了酸性土壤利用的科学问题与策略研究[8]。20 多年的理论和实践研究表明，将粉煤灰施加到土壤当中用于改善土壤生态系统，能够有效沃化土壤，深度改善土壤结构，增强土壤的持水保肥能力，促进植物根系发育，是综合改善土壤水-气-肥-热生化系统的有效措施[9]。

农业固废（植物秸秆、林果枝叶、养殖粪污）是在农业生产活动过程中产生的固体废弃物。2024 年，我国主要农作物秸秆产生量约 8.7 亿吨，畜禽粪污质量超过 30 亿吨（含尿液）。秸秆焚烧，会造成大量扬尘、烟雾和温室气体，严重污染大气，畜禽粪污无序排放，会严重污染水源和耕地，造成疫病传播，危害生物体健康。

随着中国《生态环境法典》的颁布和实施，粉煤灰和农业废弃物等大宗固废的治理和资源化综合利用，消除其对生态环境的污染，已成为摆在我们面前的重大课题，受到国家及业界的高度重视。为此，我们根据粉煤灰和农业固废的化学组成和生化特性，深入开展了粉煤灰与农业固废的土地利用研究与应用。

1 粉煤灰的特性

粉煤灰的特性：粉煤灰是灰白色或灰褐色的粉状颗粒物，化学成分复杂，呈碱性，是由细小实心或空心无定型玻璃微珠及少量炭组成，形状不规则，粒径在 0.1μm～300.0μm，我国粉煤灰的平均粒度小于 20μm，比表面积 1500cm^2/g～3600cm^2/g，平均比重约 2.1g/cm^3。玻璃体物相占 50％～80％。由于粉煤灰呈球形多孔结构，毛细现象强烈，具有较好的火山灰活性、渗透性和吸附性，稳定性好，放射性低，可吸附有害物质，具有保水、保肥、疏松土壤、增加土壤团粒结构、为植物提供营养等多项功能。因此，粉煤灰的土地利用，已成为近年来研究的热点。

2 农业固废的特性

农作物秸秆主要是由 C、N、H、O 元素组成的有机物，还含有少量的由 P、K、Ca、Mg、S、Cu、Te、Zn、Mn 等元素组成的无机化合物。秸秆具有孔隙度高，持水性强等特性，通过微生物发酵腐熟后作为有机肥料还田，可疏松土壤，增加土壤透气性和团粒结构。畜禽粪污与农作物秸秆具有类似的化学组成，以及发酵腐熟后与发酵腐熟后的秸秆具有类似的特点和功能，施入土壤，均具有改善土壤质量，提升土壤肥力良好作用。

3 粉煤灰的土地利用依据

经检测，不同地区的粉煤灰中均含有大量的植物有益元素硅（11.48%～31.14%）和一定量的营养元素 P（0.00%～0.90%）、K（0.22%～3.10%）、Ca（0.30%～25.10%）、Mg（0.05%～1.92%）、S（0.03%～4.75%）、Te（1.90%～18.51%）、Mn（0.03%～1.82%）、Ti（0.40%～1.80%）等，并呈碱性，其 pH 值通常在 10.0~13.0。

以中国平煤神马集团联合盐化有限公司产生的粉煤灰为例，经检测，主要元素氧化物含量见表 1、有害元素（重金属）含量见表 2。

表 1　粉煤灰中主要元素氧化物含量（%）

样品	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	SO_3	TiO_2
20240319	47.1	26.4	14.47	2.99	0.68	0.47	1.02	0.04	4.81	1.42
20241025	39.2	23.6	19.49	4.13	1.37	2.36	1.5	0.18	6.17	1.25

表 2　有害元素含量（mg/kg）

样品	Pb	Cd	Cr	Hg	As
20240524	50	<3	52	<2	7.2

从检测数据可知，粉煤灰中的植物营养元素和碱性特征，为其土地利用提供了良好的物质基础，完全可用于制备农业肥料、土壤调理剂和矿区生态修复及四荒地的复垦复耕材料等系列产品。对于人们关注的有害元素（重金属）含量也低于农田肥料和土壤改良剂国家相关标准规定的指标，对土壤和农作物不会产生不良影响，具有很高的综合利用价值。

4 土壤调理剂系列产品制备

4.1 粉煤灰活化

优选粉煤灰复合活化剂 A+B，并配制成一定浓度的水溶液喷入粉煤灰（用量为粉煤灰质量的3.5%），常温搅拌 10min，调控粉煤灰的物化特性，使粉煤灰中大量的植物营养元素释放出来，提高其活性成分，同时提高粉粒的比表面积，以增加粉煤灰与土壤的接触面积，解决粉煤灰中营养元素不易被植物吸收利用的问题。

4.2 农业固废腐熟

选取养殖粪污和粉碎后的植物秸秆，作为产品有机质成分及中、微量元素的补充，并调节 C/N 比至 20~30：1，将秸秆、粪污与生物菌剂（用量为秸秆、粪污的 0.8%）进行混合发酵腐熟 40d，陈化待用。

4.3 系列产品生产

根据不同土壤类型、种植的作物品种及产品用途，设计出不同的产品配方，将活化后的粉煤灰和发酵腐熟、陈化后的农业固废，配入适量无机营养元素等按比例配伍混合，并调节适宜的 pH 值，经造粒、烘干（温度 80℃~90℃）、冷却（≤40℃）、抛圆、扑粉、筛分等工序即可生产有机肥、有机无机复混肥、酸化土壤调理剂及生态修复材料等系列产品（或不经造粒直接应用）。

4.4 产品技术指标

以粉煤灰和农作物秸秆、粪污等为主要原料，通过技术处理，制备的有机肥、有机无机复混肥、土壤调理剂等，其技术指标分别满足 NY/T525-2026、GB/T18877-2020、NY/T3034-2016 等技术指标要求，完全可用于农业生产，且安全风险可控。

5 工艺流程

以粉煤灰和农业固废为主要原料生产有机肥、有机无机复混肥、酸化土壤调理剂及生态修复材料等系列产品工艺流程见图 1。

6 产品应用

6.1 应用领域

系列产品可广泛用于基本农田和高标准农田的土壤改良、地力提升，重金属污染的土壤修复，矿区开采后的生态修复、四荒地（荒山、荒沟、黄坡、荒丘）的复垦复耕等领域。适用于各类土壤和各种作物，其土壤调理剂更适合于酸化土壤。同时还可根据土壤类型和作物品种，设计不同的产品配方，以取得最佳的应用效果。

6.2 产品功效

产品通过在北方小麦—玉米、花生、大豆、红薯、高粱、芝麻、烟草等农作物和经济作物三年轮作的大田定位试验表明，与常规施肥对比，土壤 pH 值平均提升 0.2 个单位，有机质含量提高 1.5 个百分点，增加了土壤透气性和团粒结构，提高土壤肥力，作物增产幅度为 5.1%~15.5%，并具有抗虫、抗病害和抗倒伏等功效，尤其用于酸化土壤，效果更为显著，不同作物产量增产效果见表 3。

7 产品安全性评价

经检测，以粉煤灰和农业固废为主要原料制备的以粉煤灰和农业固废为主要原料生产有机肥、有机无机复混肥、酸化土壤调理剂及生态修复材料等产品的技术指标均符合国家相关标准要求，同时对小麦及玉米的茎、叶、秆、籽粒等进行重金属元素含

量检测，显示均未检出（均在仪器检出限以下）。刘宝勇等在不同 PH 值、不同时间下，对粉煤灰及土壤调理剂中重金属的溶出试验表明，五大重金属（Pb、Cr、Cd、As、Hg）在整个溶出过程中的溶出量均低于地下水 4 类标准限制、地表水 5 类标准限制，符合农业用水标准，环境风险较小[10]，武琳等通过检测表明，粉煤灰处于轻微生态危害水平，用作改良土壤是可行的，对于提高土壤肥力、吸附重金属和改良土壤都具有良好的应用前景[11]。说明粉煤灰用于土壤改良是安全的，完全可进行土地利用。

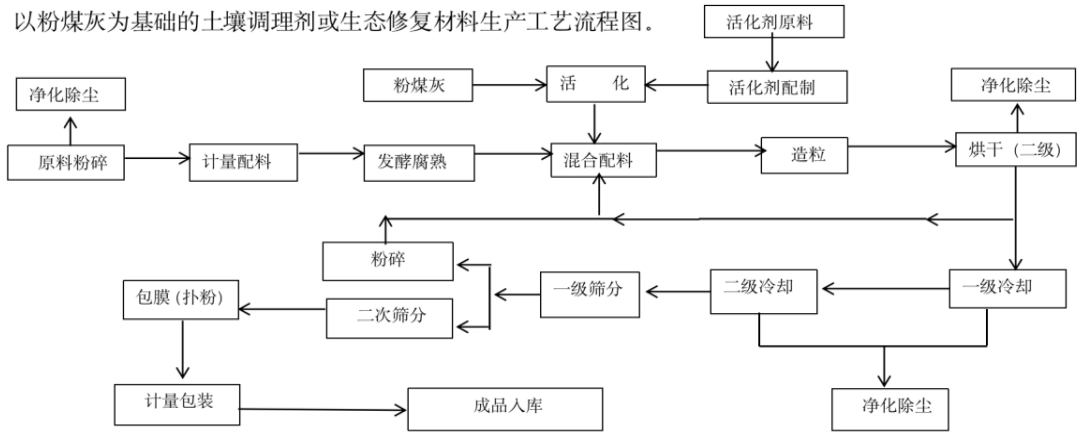

图 1　有机肥、有机无机复混肥、酸化土壤调理剂及生态修复材料等系列产品工艺流程

表 3　不同作物品种产量增产效果（%）

作物品种	小麦	玉米	花生	大豆	红薯	高粱	芝麻	烟草
增产幅度	5.3~11.8	7.5~15.5	9.1~14.7	8.9~13.1	5.1~13.7	6.7~12.9	8.7~11.6	7.9~13.6

8 粉煤灰土地利用的意义

由于化学肥料的长期过度施用，造成了大面积的土壤酸化和板结，直接影响着植物对营养元素的吸收，严重制约着我国的粮食安全和农业的可持续发展。以粉煤灰和农业固废制备酸化土壤调理剂，既可消除大宗固废对环境的污染，又可改善土壤物理化学性质，可有效形成土壤胶体，增加土壤团粒结构，提高土壤透气性，起到保肥、促根、提高肥料利用率的作用，减少化肥施用量。推动大宗固体废弃物由“低效、低值、分散利用”向“绿色、高效、高质、高值、规模化利用”转变，促进经济社会发展全面绿色转型具有重要意义。

9 结论

粉煤灰通过活化，一方面会有大量的植物营养元素和有益元素释放出来，提高粉煤灰中的活性成分，另一方面可大幅提高粉煤灰的比表面积，施入土壤后，增加粉煤灰与土壤的接触面积，平衡土壤养分，改良缺素土壤，更有利于植物对营养成分的吸收，提高作物产量，改善农产品品质。

粉煤灰的土地利用，可提高大宗固废资源利用效率和水平，既能消除其对环境的污染，还可释放其占压的大量土地。开发的系列产品，可用于土壤改良、矿山治理、园林绿化、酸性和沙化土地治理、恢复土壤地力等，同时可大幅减少化肥施用量，助力“双碳”目标的实现，为我国的生态环境和粮食安全、节能降碳发挥作用。

参考文献

[1] 方超,张治国,郑永红等,粉煤灰作土壤改良剂的研究进展,淮南职业技术学院学报,2021(4):146-148。

[2] 中国科学院过程工程研究所等, 中国一种利用粉煤灰制备土壤调理剂的方法及应用,CN202511288247.2[P] ,20260127

[3] 刘建森,毕建杰,冯永来等,中国一种粉煤灰基土壤保水调理剂及其制备方法,CN201911108303.4[P] ,20200117

[4] 内蒙古科技大学,中国一种粉煤灰基盐碱土壤调理剂及其制备方法,CN202411066806.0[P] ,20241029

[5] 武林,郑永红、张治国等,粉煤灰用作土壤改良剂的养分和污染风险评价,环境科学与技术,2020(9),219-227

[6] 李青竹 ,司梦莹 ,廖骐 ,杨卫春,杨志辉 ,柴立元,大宗工业固废“类土壤化”利用新范式,中国工程科学, 2025 , 27(3):106-116

[7] 何雪莲,段明宇,韦超前.酸性土壤改良与开发利用:主要障碍因素及对策分析.绿色科技,2025,27(8):123-128

[8] 赵学强,潘贤章.海艺,董晓英,车景,王超,时玉,柳开楼,沈仁芳.酸性土壤利用的科学问题与策略.土壤学报. 2023. 60 (5): 1248—1263

[9] 申俊峰,李胜荣,霍晓君,刘斯文,周学武,牛花朋,李 祯,梁勇,粉煤灰改善土壤生态系统的矿物学机制及其应用工程,矿物岩石,2025,45(1):42-54

[10] 刘宝勇,姚同宇,马淑花等,粉煤灰及土壤调理剂中重金属赋存形态和溶出规律,环境科学与技术,2021(502):292-298.

[11] 武琳,粉煤灰用作土壤改良剂的污染风险评价及影响因子研究[D],合肥,安徽理工大学,2021.

版权声明：©2026 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。
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

OPEN ACCESS