

# 粉煤灰改土效应研究\*

吴家华 刘宝山 董云中 刘继青 王 岗

(山西省农科院土壤肥料研究所, 030031)

## 摘 要

六个省市多年试验研究证明燃煤电厂湿排法排出的粉煤灰改良粘质土壤增产效果明显,亩施粉煤灰 1.5 万到 3 万公斤时,小麦增产  $12.7 \pm 5.8\%$ , 玉米增产  $12.1 \pm 3.5\%$ , 水稻增产  $13.5 \pm 7.0\%$ , 此外对谷子、棉花、蔬菜均有一定的增产效果。

试验表明: 粘质土壤施入粉煤灰后,可以降低容重,增加孔隙度,调节三相比,提高地温,缩小膨胀率,明显的改善了粘土的物理性质,并能增磷、增硅,促进土壤中微生物活性,从而有利于土壤的保温、保墒,有利于养分的转化,为作物生长创造了良好的土壤环境。

**关键词** 灰煤灰,粘质土壤,改良

粉煤灰是燃煤电厂排放的废渣,据不完全统计,我国每年排放粉煤灰约六千万吨,利用率为 30% 左右。可供农业利用的是灰水比为 1:20 的湿排法排出的粉煤灰。这方面的研究国际上是从 50 年代开始的<sup>1)</sup>,日本、捷克、美国、英国、法国、前苏联等国家开展粉煤灰改土,作为作物生长刺激剂等方面的试验研究。我国是 60 年代后期开始的<sup>1),2)</sup>,70 年代北方十余省市相继开展了研究,并取得了一定的进展,但是研究都是零散的和系统的。80 年代水电部正式下达大型科研任务,组织全国二十余个科研单位和大专院校,协作攻关。现将有关粉煤灰改土增产效应方面的研究结果报告如下。

## 一、研究方法

粉煤灰不同施用量的田间试验是在太原市南郊化章堡、庞家寨、东城角三个村上进行,另在晋城县的渠头村(粘质红黄土)、永济县农科所(垆土)进行辅助试验。供试作物为:小麦、玉米、水稻。试验小区面积为 0.05 亩,重复三次,随机排列。砂质潮土上处理是:0.125 万公斤/亩、0.25 万公斤/亩、0.5 万公斤/亩、1.0 万公斤/亩和对照共 5 个。粘质潮土上处理是:0.5 万公斤/亩、1.0 万公斤/亩、1.5 万公斤/亩、2 万公斤/亩、对照和 1.5 万公斤/亩、2 万公斤/亩、2.5 万公斤/亩、3 万公斤/亩、对照各 5 个。上述田间试验均按土壤肥料常规试验方法进行。

供试粉煤灰的理化性质:粉煤灰是发电厂粉煤经过高温燃烧后的残渣,是一种大小不等、形状不规则的粒状体,颗粒内有蜂窝状结构,其直径 50% 以上是  $50-100\mu\text{m}$ ,  $>0.01\text{mm}$  的物理性砂粒含量约占

\* 此项研究系水电部重点项目:由山西土肥所主持,参加课题组的有:天津土肥所姚炳贵同志;西北农学院刘鹤生同志;吉林市农科所陈开盛同志;湖北土肥所邓小玉同志;山东济宁地区农科所;山西粮油研究所曲济周同志;山西电力局王茂林同志。

1) 刘鹤生,1983:变废为宝具有多种功效的土壤改良剂——电厂粉煤灰。山东济宁,全国粉煤灰农业利用研究学术讨论会。

87.5%,比重为 2.0—2.1,容重为 0.61g/cm<sup>3</sup>。粉煤灰的化学组成为: 二氧化硅 30—50%,三氧化铝为 20—30%,高达 40%,三氧化铁为 2—7%,氧化钙为 0.5—2.9%,氧化镁 0.7—1.0%,氧化钾 0.2—0.5%,氧化钠为 0.2—0.6%,磷为 0.05—0.1%。另外,尚含有一定的对作物有益的微量元素: 硼为 57.8mg/kg,铜为 20.1mg/kg,钼为 8.6mg/kg,锌为 38.2mg/kg,锰为 79.8mg/kg。粉煤灰呈碱性反应,干灰 pH 约为 10—12;供试的湿灰约为 8.4—8.7,放置 20 天后可降至 8.3 左右。

## 二、结果与讨论

### (一) 粉煤灰改土增产效果

通过在三种不同土壤类型上进行近 60 个田间小区试验的结果表明: 粘质土壤上施用适量粉煤灰对小麦、玉米、水稻等作物都有显著的增产效果,其中小麦平均增产 12.7±5.8%,玉米平均增产 12.1±3.5%,水稻平均增产 13.5±7.0%,此外对谷子、棉花、蔬菜等也有一定的增产效果。

1. 砂质潮土上施用粉煤灰的增产效果 在太原南郊砂质潮土上试验,每亩施用粉煤灰二年累加用量不超过两万公斤,小麦、玉米各处理间增产均小于 4.0% (表 1),因此,砂质潮土上施用粉煤灰其改土增产效果不明显,同时也无后效。

表 1 太原南郊不同施灰量砂质土上的作物产量

Table 1 Crop yield on sandy soils applied with different amounts of coal ash in the southern suburbs of Taiyuan

处 理 (万 kg/mu) Treatment	小区试验产量 (kg/mu) Yield of plot				增减产 (%) Increment or decrment	作 物 Crop
	I	II	III	平 均 Average		
0.125	647	600	647	631.4	3.6	第一茬 玉 米
0.25	624	566	577	589.0	-3.3	
0.5	618	589	600	602.3	-1.2	
1.0	635	595	629	614.7	0.87	
对照	629	595	640	609.4	0	
0.25	512.5	420	480	470.9	-1.2	第二茬玉米 (累加用量)
0.5	510	485	470	483.4	1.45	
1.0	515	460	500	491.7	3.2	
2.0	510	440	530	493.4	3.55	
对照	480	450	500	476.5	0	
0.25	232.5	215	210	219.2	2.77	后茬小麦 (后效观察)
0.5	250	190	200	213.3	0	
1.0	240	210	200	216.7	1.6	
2.0	245	215	205	221.7	3.9	
对照	230	210	200	213.3	0	

### 2. 粘质土壤上施用粉煤灰的增产效果(表 2)

(1) 小麦 太原、晋城、永济三市,三种类型粘质土壤上 22 个试验结果: 亩施粉煤灰 0.5 万至 4 万公斤,平均增产 14% (8.32—19.4%),其中亩施粉煤灰 2 万公斤增产 11.2%; 3 万公斤增产 19.4%,达显著水平,高达 4 万公斤时增产仍明显。天津在粘质潮

土上亩施 1 万至 4 万公斤,平均亩产 185.3 公斤,比对照 160 公斤增产 15.8%,而壤质潮土上同样施灰量亩均产 168 公斤,比对照 148 公斤增产 13.5%。西北农学院在褐土生土上亩施粉煤灰 0.5 万到 1.5 万公斤时,平均亩产 434.4 公斤,比对照 394.2 公斤增产 10.2%;山东黑粘土施灰平均亩产 327.4 公斤,比对照 303.5 公斤增产 7.9%。

表 2 太原市南郊不同施灰量粘质潮土上作物增产效果

Table 2 Effect of applying different amounts of coal ash on the yields of crops on clayey fluvo liquis soils in the southern suburb of Taiyuan

作物 Crop	处理 (万 kg/mu) Treatment	小区试验产量 (kg/mu) Yield of plot				增产(%) Increment of yield	F 值 F value
		I	II	III	Average		
小麦	1.5	265	235	240	246.67	10.45	$F = 4.7$ $F_{0.05} = 3.48$ $F_{0.01} = 5.99$
	2.0	265	240	240	248.33	11.19	
	2.5	270	245	255	256.67	14.93	
	3.0	280	265	255	266.67	19.4	
	对照	220	230	220	223.33		
玉米	0.5	460	450	500	470	9.3	$F = 4.75$ $F_{0.05} = 3.84$ $F_{0.01} = 7.01$
	1.0	480	490	490	486.7	13.2	
	1.5	490	450	510	483.3	12.4	
	2.0	500	490	500	496.7	15.5	
	对照	460	380	450	430		
水稻	1.5	335	395	363	364.3	12.1	$F = 3.94$ $F_{0.05} = 3.48$ $F_{0.01} = 5.99$
	2.0	345	370	396	370.5	14.0	
	2.5	370	337	378	361.7	11.3	
	3.0	390	415	395	400	23.1	
	对照	300	330	345	325		

(2) 玉米 太原、晋城二种类型粘质土壤上 14 个试验结果: 亩施粉煤灰 0.5 万到 3 万公斤时,平均增产 12.6%(9.3—15.5%),其中亩施 1.5 万公斤增产 12.4%,2 万公斤增产 15.5%,均达显著水平。天津亩施灰 1 万到 4 万公斤平均亩产 624.5 公斤,比对照 572 公斤增产 9.2%,西北农学院增产 8.4%(亩施灰量 0.5 万公斤)。吉林利用粉煤灰与草炭配合,施于白浆层,其中单施粉煤灰的亩产 275 公斤,比对照 238 公斤增产 15.5%。

(3) 水稻 太原市南郊 10 个试验结果表明,亩施粉煤灰 0.5 万至 3 万公斤,平均增产 15.1%(10.4—23.1%),其中亩施 1.5 万公斤增产 12.1%,2 万公斤增产 14.0%,3 万公斤增产 23%。达显著水平。天津亩施灰 2 万公斤亩产 396 公斤,比对照 355 公斤增产 11.5%,湖北试验施灰 2 万—3 万公斤,晚稻平均亩产 501.9 公斤,比对照 404.9 公斤增产 23.96%。

(4) 棉花 永济市农科所试验结果是:亩施粉煤灰 1 万—2.5 万公斤时,平均增产 12.13%(9.8—18.5%),其中亩施 1.5 万公斤增产 18.5%(三次平均亩产皮棉 84.5 公斤,与对照 71.3 公斤相比),2 万公斤平均亩产皮棉 80 公斤,比对照增产 12.2%。

3. 粉煤灰改良土壤适宜施用量 确定适宜施灰量,要兼顾增产效果、环境影响、经济效益等方面,以上述结果来看,亩施 0.5 万到 4 万公斤,小麦、玉米、水稻等主要粮食作

物都有显著的增产效果,但以 1.5 万—3 万公斤改土增产效果最好,同时考虑到粉煤灰中有害物质的安全控制,所以把 1.5 万—3 万公斤的亩施用量确定为主要作物的一般适宜施灰量。在此范围内,不同粮食作物与不同质地土壤的具体施灰量大小顺序为水稻>玉米>小麦;粘土>壤土。

## (二) 粉煤灰改土增产原因的探讨

### 1. 粉煤灰对粘质土壤物理性质的影响

试验证明:粘质土壤施入粉煤灰后,可以明显地改良土壤质地,降低容重,增加孔隙度,提高地温,缩小膨胀率,从而显著地改善了粘质土壤的物理性质,促进土壤中微生物活性,有利于养分转化,有利于保温保墒,使水、肥、气、热趋向协调,为作物生长创造了良好的土壤环境。

(1) 粉煤灰可降低粘土中粘粒含量,改良质地:山西、天津地区在小于 0.01mm 粘粒含量为 54.6—64.4% 的试验土壤上,亩施粉煤灰 1 万—4 万公斤,平均粘土中粘粒含量减少 4—8.9% (表 3),而且粘粒含量是随施灰量的增加而递减的,有显著的直线负相关性,回归方程:  $y = 58.6 - 1.17x$ ,  $r = -0.95$ ,即亩施灰 0.5 万公斤可减少粘粒含量 1.17%。

表 3 粘质土壤施用粉煤灰后机械组成

Table 3 The mechanical composition of clayey soil after applying coal ash

处理 (万 kg/亩) Treatment	机械组成(%)(粒径: mm) Mechanical composition							
	>0.25	0.25—0.05	0.05—0.01	0.01—0.005	0.005—0.001	<0.001	<0.01 物理性粘粒	>0.01 物理性砂粒
0.5	1.44	0.16	38.0	15.6	16.8	28.0	60.4	39.6
1.0	1.18	2.42	35.0	14.6	17.8	29.0	59.6	38.8
1.5	1.68	3.92	36.0	13.6	16.8	28.0	58.4	41.6
2.0	1.12	4.48	37.0	12.6	22.8	22.0	57.4	42.6
对照	0.98	26.2	32.0	16.6	19.8	28.0	64.4	35.6

(2) 粉煤灰可减小粘土容重: 35 个不同施灰量的施灰土壤测定,平均容重为  $1.18 \pm 0.109\text{g/cm}^3$ ,比无灰对照土壤 ( $N = 6$ ) 容重  $1.33 \pm 0.09\text{g/cm}^3$ ,减小  $0.16\text{g/cm}^3$  (表 4),而且在亩施灰 8 万公斤内,粘土容重随施灰量增加而递减,有显著的负相关性,回归方程:  $y = 1.28 - 0.025x$ ,  $r = -0.92$ ,从方程分析,每亩施 0.5 万公斤灰,可降低容重  $0.025\text{g/cm}^3$ ,从而符合了高产土壤容重为  $1.1—1.2\text{g/cm}^3$  的要求。

表 4 不同施灰量粘质土壤容重 ( $\text{g/cm}^3$ )

Table 4 Bulk density of clayey soils after applying different amounts of coal ash

地 点 Site	处 理 (万 kg/亩) Treatment					
	1.0	2.0	3.0	4.0	8.0	对照
太原东城角村	1.31	1.29	1.20	1.13	—	1.41
山东济宁农科所农场	1.32	1.26	—	1.16	1.09	1.40
天津十三顷村	—	—	—	1.11	0.99	1.27

(3) 粉煤灰可增加粘土的孔隙度: 32 个不同施灰量的施灰土壤测定,平均土壤孔隙

度为  $53.3 \pm 3.7\%$ , 比无灰对照土 ( $N = 8$ )  $47.9 \pm 2.7\%$  增加  $5.4\%$ 。在亩施灰量 8 万公斤之内, 孔隙度是随施灰量的增加而递增的, 有显著的正相关性, 回归方程:  $y = 49.4 - 1.04x$ ,  $r = 0.96$ , 从方程分析, 亩施 0.5 万公斤灰可增加粘土孔隙度  $1.04\%$  (表 5)。

(4) 粉煤灰可调节土壤三相比: 土壤施入粉煤灰后减少了粘粒含量, 降低了容重, 增加了孔隙度, 随之土壤的三相比关系也发生了变异: 砂质土壤上, 不施粉煤灰的对照地其固相:液相:气相为  $1:0.87:0.14$ , 大小孔隙度比为  $1:6.2$ ; 亩施粉煤灰 0.5 万公斤的三相比为  $1:0.94:0.21$ , 大小孔隙度比为  $1:4.5$ ; 亩施 2 万公斤的三相比为  $1:1.32:0.28$ , 大小孔隙度比为  $1:4.7$ 。因此, 在砂质土上施用粉煤灰后虽然液相、气相有所增加, 但其大小孔隙比均未达到适宜的程度, 所以增产效果不明显, 同试验产量结果一致。在粘质土壤上, 施用粉煤灰后, 不仅改变了土质, 调节了三相比, 而且使其大小孔隙的比例处于最适宜的  $1:2-4$  的范围内。亩施 1.5 万公斤三相比为  $1:1.25:0.43$ , 大小孔隙度比为  $1:2.9$ , 亩施 3 万公斤的三相比为  $1:1.47:0.38$ , 大小孔隙度比为  $1:3.87$ , 而不施灰的对照地其三相比为  $1:0.85:0.17$ , 大小孔隙度比为  $1:5$ 。

表 5 不同施灰量粘质土壤孔隙度(%)

Table 5 Porosity of clay soils after applying different amounts of coal ash

地 点 Site	处 理 (万 kg/mu) Treatment					对 照
	1.0	2.0	3.0	4.0	8.0	
太原东城角村	49.4	52.1	53.3	54.1	—	45.8
山东济宁地区农科所农场	50.66	51.05	—	52.37	57.95	47.8
天津十三顷村	—	—	—	54.61	57.09	50.1

(5) 粉煤灰可提高粘土 15cm 土层内温度: 在太原南郊试验地上, 从 4 月 16 日玉米播种到 5 月 30 日全部出苗连续 18 天的地温观察表明: 施用粉煤灰对与作物苗期生长密切相关的 5cm、10cm 土层温度影响较大。5cm 土层中亩施 1.5 万公斤—2 万公斤粉煤灰比对照地温度提高  $0.7-1.1^{\circ}\text{C}$ , 亩施 0.5 万—1 万公斤粉煤灰比对照提高  $0.5^{\circ}\text{C}$  左右; 10cm 土层中, 亩施 0.5 万—2 万公斤粉煤灰均比对照地提高  $0.5^{\circ}\text{C}$  左右; 而 15cm—20cm 处的地温变化不大。因此在春寒而导热性能差的粘质土上施用适量的粉煤灰对春播作物争取早出苗、早育苗夺高产具有一定的现实意义。

(6) 粉煤灰可减小土壤膨胀率: 据西北农学院测定: 褐土生土 0—20cm 的膨胀率为  $7.1\%$ , 亩施粉煤灰 0.15 万公斤后, 土壤膨胀率为  $4.99\%$ , 减少  $2.11\%$ , 从而有利于防止土壤流失。

## 2. 粉煤灰对土壤化学性质的影响

(1) 施用粉煤灰可以提高土壤中有效磷含量: 山西、天津 11 个电厂粉煤灰中有效磷含量平均为  $73.5\text{mg}/\text{kg}$  ( $19-184\text{mg}/\text{kg}$ ), 比一般缺磷土壤中有效磷含量高 1—6 倍。山西省在潮土上亩施灰 0.5 万—6 万公斤, 94 个施灰土壤测定平均有效磷含量为  $26.2 \pm 16.4\text{mg}/\text{kg}$ , 比无灰对照土壤 ( $N = 30$ ), 平均  $19.4 \pm 11\text{mg}/\text{kg}$ , 增加  $35.1\%$ 。吉林市白浆土上增施粉煤灰土壤中有效磷平均为  $34.1\text{mg}/\text{kg}$ , 比无灰土壤  $29.2\text{mg}/\text{kg}$ , 增加  $16.8\%$ 。山东

济宁在黑粘土上亩施 2 万公斤, 土壤中有有效磷为 23mg/kg, 比对照 15mg/kg 增加 53.3%。湖北农科院土肥所在武昌山坡乡试验, 亩施粉煤灰 1 万至 2 万公斤, 土壤中有有效磷平均为 18.6mg/kg, 比对照土壤 12.0mg/kg 增加 55%。

(2) 施用粉煤灰对土壤酸碱度的影响: 由于粉煤灰含有一定的碱土金属, 如钾、钠、钙、镁, 所以呈碱性反应。干灰的酸碱度通常高达 11.0 以上, 但绝大多数电厂的粉煤灰是湿排的, pH 值较低, 为 7.7—8.7(表 6), 当灰进入储灰场后, 由于本身的吸附性能力较强, 灰中的氧化钙与水生成氢氧化钙, 吸附空气中的二氧化碳形成碳酸钙, 使其 pH 降解, 一般排出的新灰经过 20 天后, pH 就降低至 8.3 左右(表 7)。粉煤灰施入土壤后, 经过测定 ( $N = 20$ ), pH 值为  $8.19 \pm 0.35$ , 与对照 ( $N = 5$ ) 酸碱度接近, 亩施粉煤灰 2 万至 5 万公斤, 2 年、4 年、10 年后测定石灰混合物和地下水, 其 pH 值均与本底接近, 都在作物正常生长的 pH 8.1—8.3 范围内。因此施入 4 万公斤以下的粉煤灰对微碱性土壤的酸碱度并不产生影响。

(3) 粉煤灰对土壤有效硅含量的影响: 在有效硅较低的土壤上, 粉煤灰同腐殖酸结

表 6 山西主要电厂粉煤灰的 pH 值

Table 6 pH values of coal ash in the major power plants of Shanxi Prouince

电厂名称 Power plant	煤灰类型 Coal ash type	pH	电厂名称 Power plant	煤灰类型 Coal ash type	pH
太原一电厂	湿灰	8.70	临汾电厂	湿灰	8.60
太原二电厂	湿灰	8.60	运城电厂	湿灰	8.48
永济电厂	湿灰	8.70	侯马电厂	干灰	11.00
巴公电厂	干灰	11.60	霍县电厂	湿灰	8.40
神头电厂	湿灰	8.70	大同电厂	湿灰	7.70
娘子关电厂	液态灰渣	9.00			

表 7 太原一电厂粉煤灰储放不同天数 pH 值

Table 7 Variation of coal ash pH after storing for different time(Taiyi Power Plant)

项 目 Item	时间(日/月) Time(day/month)								
	17/5	20/5	24/5	27/5	30/5	2/6	5/6	8/6	11/6
pH	9.9	9.5	8.7	8.7	8.6	8.5	8.3	8.2	8.3
间隔累加天数	排出新灰	3	7	10	13	16	18	21	24

合施用, 可以提高土壤中有有效硅含量。吉林市农科所在河淤土、白浆土和泥炭土三种土壤中施用等量草炭加氮磷化肥的基础上, 每亩再加施粉煤灰 1500—3000 公斤种植水稻试验, 其稻苗含硅量分别比不加粉煤灰的增加 33.13%、17.14%、85.17%, 同时三种土壤中有有效硅含量由 10.7、5.22、14.53mg/100g, 分别提高到 19.0、20.35 和 74.15mg/100g, 因而使插秧后的稻苗生长速度加快, 增强抗病, 促进成熟, 有利于水稻高产稳产。

### 3. 粉煤灰和草炭腐殖酸结合施用于白浆土对土壤微生物的影响

吉林市农科所采用粉煤灰与草炭腐殖酸结合在白浆土上进行大田试验, 连施二年后

种大豆,自开花期土壤根系层的微生物活性明显增强,一直延续到籽实成熟期。据测定:细菌、放线菌和真菌都表现有一致的增长趋势。细菌:7月施灰的为784.6万/克干土,比不施灰的483.5万/克干土增加62.3%,9月份增加41.4%;放线菌:7月份施灰的为81.9万/克干土,比不施灰的40.1万/克干土增加1.04倍;真菌:7月份施灰的为20.6万/克干土,比不施灰的14.8万/克干土增加39.2%,而9月份基本一致。并表现细菌类群的芽孢菌、放线菌的白色菌群、真菌类的青霉菌占有一定的优势。在大面积的对比试验田上,也表现出同样的趋势。

试验结果表明:粉煤灰对白浆土微生物活性的提高是显著的,增加了芽孢菌,有利于促进草炭有机成分在土壤中的腐殖化过程;提高了青霉菌从而增强了土壤生物中的抗性,使有益微生物占优势;白色菌群增多,又有利于增进固氮微生物活性。因此,粉煤灰在这类土壤中施用,改善了土壤的生态环境,为农作物的生长发育创造良好的土壤环境条件。

### 参 考 文 献

1. 刘茂林、贾根兴,1963: 利用粉煤灰作农肥和试验初报。江苏学报,第3卷2期,119—122页。
2. 电力建设总局,1965: 火力发电厂灰渣综合利用调查。电力技术,第3期,42页。
3. Rees, W. J., and G. H. Sidrak., 1956: Plant nutrition on fly ash. *Plant and Soil*. 8: 145—159.
4. Holliday, R. et al., 1958: Plant growth on fly ash. *Nature*. 181: 1079—1080.

## STUDY ON EFFECT OF SOIL AMELIORATION WITH COAL ASH

Wu Jiahua, Liu Baoshan, Dong Yunzhong, Liu Jiqing and Wang Gang

(*Institute of Soil and Fertilizer, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, 030031*)

### Summary

A four-year field experiment was carried out in six provinces and cities for studying the effect of clayey soil amelioration with coal ash produced by the wet method in power plants on crop yields. The results showed that by applying 15000 to 30000 kg/mu coal ash into soil, wheat yield increased by  $12.7 \pm 5.8\%$ , crop yield by  $12.1 \pm 3.5\%$ , and the rice yield by  $13.5 \pm 7.0\%$ , with a certain effect on the yields of foxtail millet, sweet potato, cotton, and vegetables. Besides, after application of coalash, clay content of soil decreased, density and swelling value reduced, porosity of soil increased and the ratio of 3 phases (gas, liquid, solid) was adjusted. Coal ash could also improve the physical properties of clayey soil, increase soil P, and Si contents and promote microbial activities, thus raising soil temperature, enhancing the transformation of soil nutrients and creating a good soil environment for crop growth.

**Key words** Coal ash, Clayey soil, Soil amelioration