

# 人工降雨条件下施加粉煤灰对耕作土壤结构和水土流失的影响研究

段喜明<sup>1,2,3</sup>, 吴普特<sup>2,3</sup>, 王春红<sup>1</sup>, 冯浩<sup>2,3</sup>

(1. 山西农业大学林学院, 太谷 030801; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100;  
3. 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 杨凌 712100)

**摘要:** 利用人工模拟降雨试验, 研究了 0°~ 20°坡度下的耕作土壤施加 0~ 10% 的粉煤灰后, 对土壤结构和入渗、产流、产沙的影响。研究表明: 随农田耕作层中粉煤灰含量的增加, 土壤入渗速率明显加快, 含 10% 粉煤灰土壤的入渗速率, 较对照(土壤不加粉煤灰)提高了 55.34%; 施加粉煤灰降低了土壤容重, 增加了土壤孔隙度, 含 10% 粉煤灰的土壤, 在 10°坡时的容重较对照减小了 17.42%, 而孔隙度提高了 9.84%; 坡面产流量和土壤流失量降低, 含 10% 粉煤灰的土壤, 在 20°坡时的产流量仅为对照的 26.87%。因此, 施加 10% 的粉煤灰, 可有效改善土壤结构和蓄水减沙, 具有较高的实用价值。

**关键词:** 人工降雨; 粉煤灰; 耕作土壤结构; 水土流失

**中图分类号:** S157.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2006)08-0050-04

段喜明, 吴普特, 王春红, 等. 人工降雨条件下施加粉煤灰对耕作土壤结构和水土流失的影响研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 50-53.

Duan Ximing, Wu Pute, Wang Chunhong, et al. Effects of farming soil treated with fly-ash on soil structure and erosion through artificial rainfall simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(8): 50-53. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

粉煤灰是以煤为燃料的火力发电厂排出的废弃物, 目前中国对粉煤灰的处理主要以灰场贮存为主, 仅灰场的占地面积就达  $3.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 贮灰总量超过  $6 \times 10^8 \text{ t}^{[1-3]}$ 。

目前, 国内外关于粉煤灰在农业方面的研究, 主要集中在改良土壤结构和影响农业环境方面。研究发现, 随着土壤中粉煤灰含量的增加, 可有效改善土壤理化性质, 如增加透气透水性; 提高地温和土壤持水性; 增加土壤有效磷、硝态氮含量, 调节土壤酸碱度, 补给土壤微量元素等<sup>[4,5]</sup>。而当土壤耕作层中的粉煤灰含量超过  $600 \text{ t/hm}^2$  后<sup>[6]</sup>, 粉煤灰中的重金属元素会污染土壤和粮食作物, 同时还会造成土壤碱化, 对土壤环境产生负面影响。因此已有研究认为, 粉煤灰的最大安全含量一般不应超过  $600 \text{ t/hm}^2$ 。

据实地调查, 大量的粉煤灰在运输、堆放过程中, 会向周边漂移、扩散, 造成火电厂周围农田中粉煤灰含量较高, 但实际耕作层中的粉煤灰含量不超过 10%, 即  $380 \text{ t/hm}^2$ 。在这一含量下, 农田耕作层的土壤结构、尤其是水土流失会发生怎样的变化, 目前却极少有人涉及。

因此, 本研究以人工降雨为条件, 以电厂周边农田

中 10% 的粉煤灰含量为高限值, 分析不同的粉煤灰含量对土壤结构和水土流失的影响, 以寻求一条在农业方面吸纳粉煤灰的有效途径。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验准备

#### 1) 试验用土和用灰

野外实地调查发现, 粉煤灰自然飘落到耕地表面后, 经过多次的翻、耕、锄、耙, 基本滞留在 30 cm 耕作层内<sup>[7]</sup>, 所以将耕作层土壤作为试验材料。

试验用土为山西省太谷县杨家庄的耕作层土壤。该土壤属褐土性土, 黏性较大, 容重  $1.25 \sim 1.30 \text{ g/cm}^3$ , 土壤含水率 8%~10%, 有机质含量  $29.597 \text{ g/kg}$ , pH 值 7.36。

试验用粉煤灰取自太原第一热电厂, pH 值为 9.45。相应的粒径组成分析见表 1。

表 1 试验用土壤与粉煤灰的粒径组成

Table 1 Compositions of particular diameters of experimental

粒径范围 /mm	soil and fly-ash				%
	> 0.05	0.05~ 0.01	0.01~ 0.005	0.005~ 0.001	
土壤	21	43	10	10	16
粉煤灰	38	42	11	8	1

#### 2) 试验装置

试验装置主要包括人工降雨机和模拟耕作土壤两部分。人工降雨机由供水、稳压和降雨 3 个子系统组成; 模拟耕作土壤为可变坡的有机玻璃(适于土壤湿润锋的观察)实验槽(长×宽×高=  $150 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}$ ), 槽内盛放不同粉煤灰含量的土壤。

收稿日期: 2005-09-07 修订日期: 2006-04-27

基金项目: 国家“九五”重点科技项目(96-004-05-06)第一子专题“流域综合治理与有限水分高效利用技术体系研究”

作者简介: 段喜明(1967—), 男, 山西太谷人, 副教授, 博士, 主要从事农业水土工程研究。山西太谷 山西农业大学林学院, 030801。

Email: duanximing0208@sina.com

## 1.2 试验处理

1) 坡度 因 25° 以上的坡地需退耕还林, 故选定 5 个试验坡度, 即 0°、5°、10°、15° 和 20°;

2) 雨强 当地多年平均暴雨雨强为 0.77 mm/min<sup>[8]</sup>。结合人工降雨装置的调试和率定, 最终确定试验雨强为 0.79 mm/min;

3) 粉煤灰含量 确定 4 个混合比例(粉煤灰占 30 cm 耕作层土壤的重量百分比), 即 0(对照, 无粉煤灰)、5%(粉煤灰 190 t/hm<sup>2</sup>)、7.5%(粉煤灰 285 t/hm<sup>2</sup>) 和 10%(粉煤灰 380 t/hm<sup>2</sup>)。

因此, 本试验是在  $I = 0.79$  mm/min 的定雨强条件下, 设置 0°、5°、10°、15° 和 20° 共 5 个坡度, 坡长均为 150 cm; 每个坡度下又分别按照 0(对照)、5%、7.5% 和 10% 4 种粉煤灰含量进行设计。每一坡度下均为 4 个处理、2 次重复, 以减小试验误差。

## 1.3 试验方法

1) 率定雨强至  $I = 0.79$  mm/min;

2) 将有机玻璃槽调至 0°(水平), 然后将取自试验地的耕作层土壤过 2 mm 土筛, 按粉煤灰含量为 0、5%、7.5% 和 10% 依次配和均匀(随用随配), 初始含水率控制在 8%~10%。装入槽中后, 压实、整平, 保持容重 1.25~1.30 g/cm<sup>3</sup>;

3) 降雨开始后, 记录分时段( $\Delta t = 9$  min) 土壤湿润锋的潜移过程、达稳渗时间以及产流量随时间的变化过程和累积量等;

4) 对不同粉煤灰含量的土壤产流量分别进行过滤、烘干和称量, 以计算相应的土壤流失量;

5) 0° 坡 4 种粉煤灰配比土壤的降雨依次完成后, 再把土槽分别调至 5°、10°、15° 和 20° 重复以上过程。

本试验共降雨 40 场。分析并整理试验数据后, 得出以下试验结果<sup>[9-12]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 对入渗的影响

以 20° 坡的试验土壤为例, 随着土壤中粉煤灰含量的增加, 土壤的平均入渗率和稳定入渗率都明显提高。其入渗过程符合考斯加可夫(Kostiakov)入渗公式, 经回归分析, 得到其相应的回归方程与相关系数。

如图 1 所示, 由下到上分别代表不含粉煤灰(对照)、含 5% 粉煤灰、含 7.5% 粉煤灰和含 10% 粉煤灰的土壤的回归曲线, 相应的回归方程依次为

$$i = 20.95t^{-0.6343}, r = 0.9539$$

$$i = 23.97t^{-0.6180}, r = 0.9503$$

$$i = 22.56t^{-0.5933}, r = 0.9579$$

$$i = 17.21t^{-0.4340}, r = 0.9729$$

均具有较高的相关性。

由图 1 及相应的回归方程可知, 随着土壤中粉煤灰含量的增加, 土壤的入渗速率在明显加快。在入渗时间  $t = 9 \sim 63$  min 的 7 个测定时刻( $\Delta t = 9$  min), 与对照相比, 含 10% 粉煤灰土壤的入渗速率平均提高了 55.34%, 即由对照的平均 2.62 mm/min, 提高到 4.07

mm/min。

由此可看出, 增加土壤耕作层中粉煤灰的含量, 可明显提高土壤水的蓄存, 为农作物生产提供水分供给。

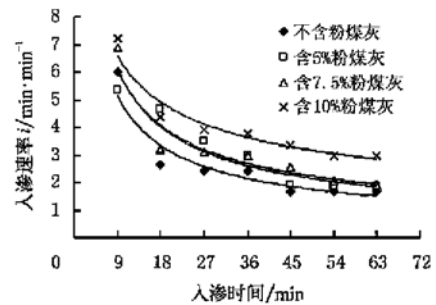


图 1 20° 坡在不同粉煤灰含量下的土壤入渗曲线

Fig. 1 Soil infiltration rate under different contents of fly-ash at 20° slope

### 2.2 对土壤结构的影响

对 10° 坡的不同粉煤灰含量的土壤进行降雨前后的土壤结构分析, 发现在雨前土壤初始含水率和容重保持基本一致的情况下, 随着粉煤灰含量的提高, 雨后土壤容重逐渐减小, 由对照(粉煤灰含量 0)的 1.55 g/cm<sup>3</sup>, 降到最小时的 1.28 g/cm<sup>3</sup>(粉煤灰含量 10%), 下降了 17.42%; 而孔隙度则相应地由 41.69% 提高到了 51.53%。在其他坡度下的结果也与此类似。

因此, 在土壤耕作层中施加粉煤灰后, 可从降低土壤容重和增加土壤孔隙度 2 个方面, 来改善土壤的结构(表 2), 为农作物生产提供良好的土壤环境。

表 2 不同粉煤灰含量的 10° 坡在降雨前后的特征值对照表  
Table 2 Characteristic values before and after precipitation under different contents of fly-ash at 10° slope

粉煤灰 含量 /%	雨前土壤特征值			雨后土壤特征值		
	含水率 /%	容重 /g · cm <sup>-3</sup>	孔隙度 /%	含水率 /%	容重 /g · cm <sup>-3</sup>	孔隙度 /%
0	7.55	1.26	52.31	29.67	1.55	41.69
5	7.82	1.25	52.96	29.93	1.34	49.60
7.5	6.99	1.25	52.96	29.95	1.30	50.96
10	7.04	1.25	52.96	30.63	1.28	51.53

### 2.3 对产流的影响

1) 对产流时间的影响

对于 10° 坡的 4 种粉煤灰含量(0、5%、7.5% 和 10%) 下的试验土壤, 相应的产流时间依次为 12、15、20 和 21 min。可见, 随着粉煤灰含量的增加, 土壤的产流时间在逐渐延迟, 含 10% 粉煤灰土壤的最大延迟率达 75%。

2) 对产流量的影响

由图 2 可知, 随着坡度的逐渐增加, 当加大土壤中粉煤灰的含量时, 相应的产流量降幅明显加快。如 0° 坡含 10% 粉煤灰的土壤的产流量, 是其对照(0° 坡含 0 粉煤灰的土壤)的 42.86%; 而 20° 坡含 10% 粉煤灰的土壤的产流量, 仅为其对照(20° 坡含 0 粉煤灰的土壤)的

26.87%。说明粉煤灰在高含量、大坡度时减小土壤产流量的效果最明显。

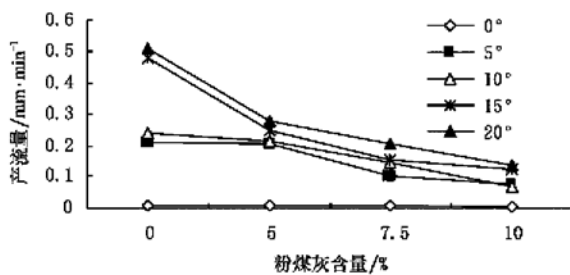


图2 不同坡度下的粉煤灰含量与产流量关系  
Fig. 2 Relationships between fly-ash contents and runoff yields under different slopes

#### 2.4 对土壤流失量的影响

对上述各产流量中的泥沙含量进行分析,即可得到相应的土壤流失量。结果发现,在各坡度下,随着土壤中粉煤灰含量的提高,土壤流失量呈下降的趋势,但下降幅度并不像产流量那么明显;且与坡度变化的关系不大(表3)。

表3 不同坡度和不同粉煤灰含量时的土壤流失量

Table 3 Soil losses under different slopes and contents of fly-ash  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

粉煤灰含量 /%	坡度/(°)				
	0	5	10	15	20
0	3.382	2.303	3.398	3.963	3.923
5	4.526	2.147	2.406	3.587	3.964
7.5	3.286	3.400	2.629	2.589	3.384
10	2.542	2.083	3.782	2.443	3.624

### 3 结论与讨论

以农田耕作层中施加10%,即 $380 \text{ t/hm}^2$ 的粉煤灰为高限值,随着粉煤灰含量的增加,可得出以下基本结论。

1) 可明显提高土壤水的蓄存。以 $20^\circ$ 坡为例,在入渗时间 $t = 9 \sim 63 \text{ min}$ 的过程中,对照土壤的入渗速率由 $5.20 \text{ mm/min}$ 下降到 $2.62 \text{ mm/min}$ ;而含10%粉煤灰的土壤的入渗速率则由 $6.63$ 下降到 $4.07 \text{ mm/min}$ 。平均入渗速率提高了55.34%。为农作物生产提供了良好的水分供给。

2) 可从降低土壤容重和增加土壤孔隙度2个方面来改善土壤的结构。以 $10^\circ$ 坡为例,含10%粉煤灰的土壤与对照相比,容重减小了17.42%,而孔隙度提高了9.84%。为农作物生产提供良好的土壤环境。

3) 可明显延迟土壤的产流时间。以 $10^\circ$ 坡为例,含

10%粉煤灰的土壤与对照相比,产流时间延迟率达75%。

4) 在陡坡地中可明显加大产流量的降幅。含10%粉煤灰土壤的产流量,在 $0^\circ$ 坡时是其对照( $0^\circ$ 坡含0粉煤灰的土壤)的42.86%;而在 $20^\circ$ 坡时仅为其对照( $20^\circ$ 坡含0粉煤灰的土壤)的26.87%。

5) 使土壤流失量呈现下降趋势,但不如产流量那么明显;且与坡度变化的关系不大。 $0^\circ \sim 20^\circ$ 坡的土壤流失量,对照(含0粉煤灰)为 $2.303 \sim 3.963 \text{ kg/m}^3$ ,含10%粉煤灰土壤为 $2.083 \sim 3.782 \text{ kg/m}^3$ 。

综上可看出,对于各种坡度的耕作土壤,在施加 $380 \text{ t/hm}^2$ 的粉煤灰后,可有效地改善土壤结构,并起到蓄水减沙的作用,无论从农业生产还是水土保持角度来讲,都是非常有利的。

粉煤灰作为以煤为燃料的火力发电厂排出的废弃物,使用成本一般仅运输费一项。因此在火电厂周边地区的农村,群众可利用农闲季节,靠农用车自行拉运,费用很小。将粉煤灰送到田间后,按要求比例均匀铺撒,并及时翻耕入土,以避免随风飞扬造成污染和损耗。

该研究在应用方面,具有成本低、实施技术简单的优点,结合其明显的改善土壤结构和蓄水减沙作用,具有较高的实用推广价值。

#### [参考文献]

- [1] 杨朝辉. 粉煤灰在农业生产应用上的研究[J]. 资源开发与市场, 1994, 10(6): 29-30.
- [2] 梁志芳. 粉煤灰及其利用[J]. 矿山环保, 2003, (1): 15-17.
- [3] 王茂林, 张绍如, 刘秉龙. 山西粉煤灰在农业方面的利用[J]. 粉煤灰综合利用, 1997, (3): 5-8.
- [4] 汪海珍, 徐建民, 谢正苗. 粉煤灰对土壤和作物生长的影响[J]. 土壤与环境, 1999, 8(4): 305-308.
- [5] 焦有, 李贵宝, 吴德科. 粉煤灰作为土壤改良剂的效用及其环境评价[J]. 河南科学, 1997, 15(4): 470-475.
- [6] 吴家华. 粉煤灰改土效应研究[J]. 土壤学报, 1995, (8): 334-340.
- [7] 王茂林, 李成英. 粉煤灰在农业方面的利用[J]. 粉煤灰综合利用, 1997, 3: 48-50.
- [8] 山西省暴雨洪水计算实用手册[Z]. 内部资料, 1991.6.
- [9] 王百田, 王斌瑞. 黄土坡面地表处理与产流过程研究[J]. 水土保持学报, 1994(2): 18-24.
- [10] 刘贤叔, 康绍忠. 降雨入渗和产流问题研究的若干讲展与评述[J]. 水土保持通报, 1999, 19(2): 57-62.
- [11] 黄明斌, 李玉山. 坡地单元降雨产流分析及平均入渗速率计算[J]. 水土保持学报, 1999, 5(1): 63-68.
- [12] 陈洪松, 邵明安, 张兴昌, 等. 野外模拟降雨条件下坡面降雨入渗、产流试验研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 5-8.

## Effects of farming soil treated with fly-ash on soil structure and erosion through artificial rainfall simulation

Duan Ximing<sup>1,2,3</sup>, Wu Pute<sup>2,3</sup>, Wang Chunhong<sup>1</sup>, Feng Hao<sup>2,3</sup>

(1. College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China; 3. National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Through artificial rainfall simulation, the farming soil structure and infiltration, water and sediment yields were studied under different slopes from 0° to 20° and different contents of fly-ash from 0 to 10%. Results show that with the increase of fly-ash content in the farming soil, the soil infiltration rate accelerates obviously. The infiltration rate of farming soil with fly-ash of 10% improves by 55.34% than that of the contrast (soil without fly-ash). The soil bulk density decreases and the soil porosity increases after adding fly-ash. Compared with the contrast, the bulk density of farming soil with fly-ash of 10% reduces by 17.42%, and the porosity improves by 9.84% at 10° slope. The runoff yield and soil losses decrease. The runoff yield of farming soil with fly-ash of 10%, accounts for 26.87% of that of the contrast at 20° slope. Therefore, after exerting 10% fly-ash in the cultivated soil layers, the soil structure can be improved effectively, and the runoff and sediment are intercepted, which have higher practical value.

**Key words:** artificial rainfall; fly-ash; farming soil structure; soil erosion