

## 粉煤灰作土壤侵蚀的磁示踪剂研究初报\*

董元杰 史衍玺<sup>†</sup>

(山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018)

USING FLY ASH AS A MAGNETIC TRACER TO STUDY  
SOIL EROSIONDong Yuanjie Shi Yanxi<sup>†</sup>

(College of Resources and Environment, Shandong Agriculture University, Tai'an, Shandong 271018, China)

关键词 粉煤灰; 土壤侵蚀; 磁示踪剂

中图分类号 S157 文献标识码 A

自 1954 年召开的第五次国际土壤学会代表大会上介绍了土壤磁性研究工作<sup>[1~3]</sup>, 磁化率在环境科学研究中得到了广泛应用<sup>[4~8]</sup>。一些学者讨论了沉积物磁性与物源之间的关系, 并将其用于河流底移质泥沙运动和沉积物来源的示踪<sup>[9~10]</sup>。该方法的优点是简便易行, 省时省力、廉价, 对大、小土壤团聚体、泥沙均适用, 近来此法用于监测和评估山坡地的土壤侵蚀和沉积也有成功的先例<sup>[11~13]</sup>。本文选择粉煤灰施入土壤中作为磁示踪剂, 研究坡面土壤侵蚀, 取得了初步成果。

## 1 材料与方法

## 1.1 试验地

在鲁中山区碧霞湖小流域的坡面上, 选择了一块东西向的坡度为 8°, 东西向长约 18 m 而南北向宽为 20 m 的试验地, 将整块试验地划分为自南向北编号依次为 A、B、C、D 的四个小区, 每个小区的东、西、南、北长分别为 18 m, 南北宽为 5 m, 在小区的边上都打起宽度为 30 cm、高度为 20 cm 的围堰, 并包被塑料布。试验区土壤为发育在片麻岩母质上的砂质棕壤, 容重为 1.2~1.4 g cm<sup>-3</sup>, 密度在 2.5 g cm<sup>-3</sup> 左右, pH 为 6.0~6.5, 磁性矿物以磁铁矿为主, 土壤磁化率为

$$(69 \sim 138) \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}。$$

## 1.2 实验处理

对各种磁性物质的比较后选择了粉煤灰, 因为粉煤灰的磁化率为  $(308 \sim 385) \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ , 相当于坡面土壤磁化率背景值的 2~6 倍, 可选作示踪物质。本试验的粉煤灰采自泰安市热电厂, 容重为 0.8 g cm<sup>-3</sup>, 比重 2.17, 磁性矿物以磁赤铁矿为主, 含有微量 Cr、As 等有害元素。

2003 年 8 月 16 日在原地将示踪剂与所取 0.05 m 深度的表层土壤按质量 1:10 的比例混合, 分上、中、下三个部位投放在长为 6 m, 宽度为 5 m, 深度为 0.05 m 的选定试验地的 A 区上坡、B 区下坡和 C 区中坡, 每区用示踪剂 225 kg, 然后利用 WCE-1 型磁化率仪进行磁测获取一组土壤磁化率值作为布设示踪剂后土壤的磁性背景值, D 区作为空白不施加粉煤灰; 9 月 10 日上午天气晴好 (两次强度降雨和一次中度降雨之后) 测取了第二组磁化率值; 10 月 19 日上午天气晴朗 (又经过一次强度较大两次强度较小的降雨之后) 测取了第三组磁化率值。每次磁测后都利用 10 cm 硬质塑料取样设备在每个小区的各坡位采集一个混合土样。

## 1.3 样品分析

在试验室内将土样风干去除杂物, 用木棒压碎,

\* 山东省自然科学基金项目(Y2001D01)资助

† 通讯作者, E-mail: yxshi@sdau.edu.cn

作者简介: 董元杰(1977~), 男, 博士研究生, 主要从事土壤磁学与土壤侵蚀学研究工作。E-mail: dongyj@eyou.com

收稿日期: 2004-09-15; 收到修改稿日期: 2005-03-20

称取 500 g 依次过 2 mm、1 mm、0.5 mm、0.25 mm、0.1 mm 和 0.03 mm 尼龙筛,将筛分的各组分土样称重,分别记录,装入塑料袋并测定各组土样的磁化率,仿照实验室内用铜套筛进行土壤结构分析,我们也将筛分所得各粒级土样称为团聚体,肉眼看多为近似粒状,故暂取其通过的各级筛孔孔径作为其“粒径”。

#### 1.4 降雨量测定

在试验地设置 5 个雨量桶,降雨后将实测结果折算为 12 h 的降雨量,求平均值,然后进行降雨等级的划分(表 1),来推测侵蚀力的大小<sup>[14]</sup>。

表 1 试验期间试验区的降雨记录

日期	12小时雨量(mm)	雨级	侵蚀力
8月16日	0	无雨	无
8月22日	36.6	暴雨	大
8月23日	63.0	暴雨	大
8月27日	12.8	中雨	中
9月11日	29.4	大雨	大
9月17日	12.5	中雨	中
10月11日	13.0	中雨	中

表 2 D 区坡面土壤的全土和各级团聚体磁化率  $\times(10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1})$  及其百分含量

坡位	日期	各级团聚体(粒径 mm)															
		全土		$d > 2$		$2 > d > 1$		$1 > d > 0.5$		$0.5 > d > 0.25$		$0.25 > d > 0.1$		$0.1 > d > 0.03$		$d < 0.03$	
		$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)
D 上	8月16日	95	22.0	8	11.4	20	14.7	32	12.9	52	17.4	115	9.2	54	11.5	25	
	9月10日	91	26.4	20	16.8	34	15.3	49	12.0	69	17.0	123	5.5	54	6.5	38	
	10月19日	89	29.1	9	16.9	27	16.1	48	11.0	69	16.1	123	4.9	58	5.2	49	
D 中	8月16日	138	14.8	18	13.7	58	16.9	62	16.4	85	20.9	231	8.9	96	7.6	40	
	9月10日	131	17.0	25	14.4	43	17.2	58	15.4	102	22.2	231	6.6	100	6.2	40	
	10月19日	151	12.6	20	14.1	37	16.3	46	17.8	69	24.4	231	7.6	100	6.3	31	
D 下	8月16日	128	27.6	22	21.5	53	15.2	60	11.8	88	15.0	196	4.1	62	4.0	37	
	9月10日	100	32.1	37	19.9	48	14.8	52	10.4	85	14.9	177	3.2	45	2.2	14	
	10月19日	123	19.4	25	17.2	37	18.2	46	16.0	81	19.3	162	4.2	77	5.2	40	

注:“全土”是指筛分后得到的各级团聚体样品,按其质量百分重新混合而成的土壤样品(以下同)

2.1.3 下坡土壤磁化率 D 区下坡土壤磁化率在降雨期间表现出与中坡相同的趋势(表 2 和表 3),其原因与中坡土壤磁化率变化的原因一致。

2.2 施用示踪剂小区土壤磁化率的变化及其研究坡面土壤侵蚀的可行性

2.2.1 A 区 降雨后 A 区上坡施粉煤灰的全土

## 2 结果与分析

2.1 未施用磁性示踪剂小区(D 区)的全土磁化率的变化

2.1.1 上坡土壤磁化率 D 区上坡全土的磁化率在各次降雨后逐步降低(表 2)。可以看出,以 0.5 mm 的粒径为界,大于 0.5 mm 的各级团聚体的磁化率与此粒级百分含量大体上成反相关趋势,而在 0.03~0.5 mm 的粒径范围内,则土壤磁化率与此级组分含量成正相关(表 2);粒径小于 0.03 mm 的各级团聚体易于被坡面径流冲出试验区,所以对磁化率的影响不大。粒径 0.03~0.5 mm 的各级团聚体磁化率高(表 2),降雨后在雨滴分散作用和径流冲刷作用下从上坡向下移动,造成上坡土壤磁化率的降低。

2.1.2 中坡土壤磁化率 降雨后 D 区中坡全土的磁化率表现出先减后增的趋势(表 2),因为在 8 月 16 日至 9 月 12 日之间的降雨过程中以侵蚀为主,这一点由土壤团聚体组成的变化也可以看出(表 2)。而 9 月 12 日至 10 月 19 日间的雨强较小(表 1),径流从上坡侵蚀掉的高磁性的组分在中坡发生沉积引起中坡土壤磁化率的升高(表 2 和表 3)。

及各级团聚体的磁化率呈现出递减的趋势(表 4)与前述未施粉煤灰的 D 区上段相同,而土壤磁化率降低的幅度更大(表 3 和表 4),至于 8 月 27 日前的雨后土壤磁化率下降幅度较大,而此日后的土壤磁化率下降幅度较小,则是由于前一时期降雨量远远大于后一时期所致(表 1 和表 3)。

表 3 各区全土磁化率  $\times(10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1})$  变化

日期	D 区磁化率变化幅度(%)		A 区磁化率变化幅度(%)		C 区磁化率变化幅度(%)		B 区磁化率变化幅度(%)	
8 月 16 日	D 上		A 上施		C 上		B 上	
9 月 10 日	D 上	- 4. 21	A 上施	- 25. 84	C 上	- 2. 22	B 上	- 1. 27
10 月 19 日	D 上	- 2. 20	A 上施	- 21. 72	C 上	- 9. 09	B 上	- 6. 41
8 月 16 日	D 中		A 中		C 中施		B 中	
9 月 10 日	D 中	- 5. 07	A 中	- 24. 18	C 中施	- 17. 01	B 中	- 19. 77
10 月 19 日	D 中	15. 27	A 中	37. 68	C 中施	- 8. 83	B 中	44. 93
8 月 16 日	D 下		A 下		C 下		B 下施	
9 月 10 日	D 下	- 21. 88	A 下	- 19. 77	C 下	- 0. 88	B 下施	- 9. 03
10 月 19 日	D 下	23. 00	A 下	53. 62	C 下	2. 68	B 下施	- 5. 56

表 4 A 区坡面土壤的全土和各级团聚体磁化率  $\times(10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1})$  及其百分含量

坡位	日期	各级团聚体(粒径 mm)															
		全土	$d > 2$		$2 > d > 1$		$1 > d > 0.5$		$0.5 > d > 0.25$		$0.25 > d > 0.1$		$0.1 > d > 0.03$		$d < 0.03$		
		$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)
A 上	8 月 16 日	267	38. 6	12	10. 5	58	7. 3	29	5. 9	65	11. 8	200	20. 8	338	4. 5	246	
	9 月 10 日	198	27. 6	11	10. 6	40	12. 8	57	14. 7	138	28. 7	277	3. 5	215	1. 6	123	
	10 月 19 日	155	42. 7	11	12. 6	42	8. 6	46	6. 9	75	22. 4	369	4. 7	277	1. 5	185	
A 中	8 月 16 日	69	35. 6	8	16. 3	35	12. 2	23	9. 4	40	9. 7	68	9. 6	54	7. 2	46	
	9 月 10 日	95	43. 7	4	15. 6	17	10. 5	18	6. 6	29	9. 1	58	9. 4	38	4. 1	42	
	10 月 19 日	91	33. 5	3	12. 0	8	10. 7	17	9. 6	31	12. 3	65	12. 2	46	9. 2	35	
A 下	8 月 16 日	69	33. 6	14	21. 4	22	13. 6	26	7. 3	25	10. 9	63	8. 6	42	1. 6	14	
	9 月 10 日	86	40. 6	12	19. 3	18	12. 8	17	8. 9	32	8. 7	57	5. 2	46	3. 8	23	
	10 月 19 日	106	24. 5	5	16. 0	15	16. 0	26	12. 9	35	14. 5	58	8. 8	48	6. 0	35	

中坡土壤的磁化率在 8 月 27 日前呈现减小趋势,在此以后表现出增大的趋势,且在此过程中增大的幅度小于减小的幅度,这是由于在此前降雨强度大,中坡土壤侵蚀以剥蚀过程为主,高磁化率的组分被搬运走而造成磁化率的下降,此后由于雨强的减弱造成径流对坡面土壤的侵蚀减弱,此时中坡土壤的侵蚀以剥蚀和沉积并存,而以沉积占主导,故土壤磁化率升高(表 4)。

下坡土壤磁化率的变化趋势与中坡土壤相同,两个时段相比,8 月 27 日以后土壤磁化率的增加量远远大于此日以前土壤磁化率的减少量,与中坡相比在此日前下坡土壤磁化率的减少幅度低于中坡,而在此日后磁化率的增加幅度则远大于中坡土壤(表 4)。中坡和下坡土壤磁化率变化幅度的差异,是由于在雨强大时,径流对中坡土壤的冲刷力大于对下坡土壤的冲刷力,径流从中坡带走细颗粒相

对多于下坡所致;在雨强小时坡面径流在上坡冲刷下的泥沙在中坡的沉降少,在下坡的沉降多。

A 区土壤磁化率和各级团聚体含量的变化情况(表 4),与不施示踪剂的 D 区土壤的变化趋势相同(表 3),但 A 区的变化比 D 区大得多(表 4)。上坡施加示踪剂的 A 区土壤磁化率和细团聚体含量的变化幅度也远大于不施示踪剂的 D 区,这是由于施用示踪剂后明显提高了土壤磁化率,证明了施用磁性示踪剂能大大提高监测和研究坡面土壤侵蚀的效果。

2.2.2 C 区 除了施加磁性示踪剂的 C 区中坡土壤磁化率一直减小外(表 3 和表 5),C 区上坡和下坡全土的磁化率变化趋势以及包括中坡在内的各坡位土壤各级团聚体含量的变化趋势,均与 A、B、D 区相同(表 2、表 4 和表 6)。其原因均是不同时段雨强的差异导致土壤侵蚀不同所致(表 1 和表 5)。施加

磁性示踪剂的C区中坡土壤磁化率逐渐减小,与未施示踪剂的D区中坡土壤不同,并非是在上坡泥沙未在中坡沉积,恰恰是由于上坡泥沙沉积的稀释作用

造成磁性矿物含量相对减少,导致磁化率的降低,这一点与B区下坡施示踪剂的土壤磁化率的变化原因相同。

表5 C区坡面土壤的全土和各级团聚体磁化率  $\times(10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1})$  及其百分含量

坡位	日期	各级团聚体(粒径mm)														
		全土	$d > 2$		$2 > d > 1$		$1 > d > 0.5$		$0.5 > d > 0.25$		$0.25 > d > 0.1$		$0.1 > d > 0.03$		$d < 0.03$	
		$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)	$\times$
C上	8月16日	90	21.2	9	9.3	35	11.2	35	13.0	57	19.9	108	9.7	62	14.8	49
	9月10日	88	35.6	14	18.2	23	11.9	32	10.3	46	13.9	62	3.8	31	6.2	15
	10月19日	80	37.3	9	15.0	32	11.1	38	9.61	46	12.2	85	5.5	46	8.5	40
C中	8月16日	341	22.6	3	6.7	25	8.1	55	8.8	104	35.0	338	7.4	354	10.1	308
	9月10日	283	23.6	3	7.7	15	9.9	51	11.9	77	34.2	308	5.7	231	6.4	215
	10月19日	258	26.0	3	8.8	38	11.6	71	14.5	200	30.5	338	3.9	246	3.6	185
C下	8月16日	113	15.9	15	11.4	26	14.9	35	16.8	65	24.3	162	6.3	96	9.7	45
	9月10日	112	15.7	2	16.1	46	17.9	45	15.3	69	21.3	154	6.8	65	6.3	35
	10月19日	115	13.5	32	13.7	34	16.7	54	17.6	72	25.0	138	5.5	65	7.7	54

2.2.3 B区 在下坡施用磁性示踪剂的B区,其未施示踪剂的上坡和中坡土壤磁化率变化以及上、中、下三坡段土壤团聚体组成的变化,与D区和A

区的上坡和中坡土壤磁化率的变化一致(表2、表4和表6),其原因与上文中提及的相同,只是变化显著程度明显弱于A区。

表6 B区坡面土壤的全土磁化率和各级团聚体磁化率  $\times(10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1})$  及其百分含量

坡位	日期	各级团聚体(粒径mm)														
		全土	$d > 2$		$2 > d > 1$		$1 > d > 0.5$		$0.5 > d > 0.25$		$0.25 > d > 0.1$		$0.1 > d > 0.03$		$d < 0.03$	
		$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)	$\times$	含量(%)	$\times$
B上	8月16日	79	38.5	6	10.1	25	9.7	28	8.9	54	13.9	85	7.7	42	10.1	42
	9月10日	78	36.7	8	15.2	34	11	43	8.6	38	11.6	77	9.2	43	7.5	35
	10月19日	73	44.6	12	15.6	25	10.5	42	7.7	46	8.6	73	6.1	35	6.1	38
B中	8月16日	86	41	14	7.1	20	8.5	40	9.6	66	20.7	108	4.3	34	7.9	45
	9月10日	69	42.4	12	13.0	25	8.5	26	8.1	51	9.3	92	13.5	42	4.2	40
	10月19日	100	36.0	8	14.3	32	12.0	42	9.2	58	17.3	100	6.6	48	3.8	42
B下	8月16日	277	27.7	12	10.4	55	7.8	62	9.1	108	32.1	338	11.2	292	0.9	169
	9月10日	252	23.9	7	9.2	32	9.8	49	10.9	69	24.0	262	15.9	246	5.0	185
	10月19日	238	28.0	9	8.6	34	8.9	54	9.9	92	20.9	285	20.6	277	2.3	200

与A区和D区土壤磁化率变化所不同的是,B区下坡土壤的磁化率不是先减小后增大,而是持续减小(表2),因为B区的下坡施有粉煤灰,下坡土壤遭受径流剥蚀磁性物质被带出小区,从而造成土壤磁化率的降低(表3和表6);8月27日以后土壤磁化率的持续下降并非在雨强减小后上坡泥沙没有在下坡沉积,恰恰是由于泥沙的沉积使下坡土壤中的磁性示踪剂遭到稀释所致。

### 3 小结和建议

1) 用施加粉煤灰作磁性示踪剂来监测和研究土壤侵蚀是一种简便、快捷、廉价的方法,可以在实验室抗冲槽中或小面积的田间模拟研究中广泛应用与此类似的其他含铁工矿业废弃物,如选铁厂的尾矿,也可考虑选作磁示踪剂。

2) 对于磁性较低利用土壤自然磁性难以示踪的土壤, 在坡面的上坡位施用磁性示踪剂能提高土壤磁性, 可以提高利用土壤磁性研究土壤侵蚀的可行性, 本试验证明上坡是施加示踪剂来研究坡面土壤侵蚀的最佳部位。

3) 坡面不同空间部位土壤的侵蚀存在着明显的差异, 其中以净剥蚀为主的上坡土壤侵蚀最为严重, 中坡其次, 下坡居中。降雨后坡面不同空间部位土壤磁性的改变, 是由于降雨过程中径流的剥蚀作用造成土壤粒级组成发生变化, 导致不同空间部位土壤中高磁性组分的含量发生变化所造成的。

4) 由于粉煤灰含有重金属, 易污染土壤, 不宜大量施用, 或可改用电磁场处理过的磁化粉煤灰, 以提高其磁性而减少其用量, 如同用它作土壤磁改良剂时那样<sup>[1]</sup>。对于强磁性土壤, 如一部分红壤及强磁性母岩发育的土壤宜用磁性更强的磁化粉煤灰或磁化铁尾矿, 以减少其用量, 同时提高其示踪效果。因此, 有必要研制一种与土壤理化性质相近、廉价的、用量少而不易对土壤造成污染的示踪剂进行大面积的应用。

#### 参考文献

[1] 俞劲炎, 卢升高. 土壤磁学. 南昌: 江西科学技术出版社, 1990. 97~103

- [2] 董元杰, 史衍玺. 磁测技术在土壤侵蚀研究中的应用. 水土保持学报, 2003, 17(6): 73~76
- [3] 史衍玺. 山东省主要土壤磁化率的研究. 山东农业大学学报, 1992, 23(4): 388~392
- [4] 卢升高, 张子玉, 俞劲炎, 等. 玄武岩发育土壤的磁化率及其机理解析. 土壤学报, 1999, 36(4): 544~550
- [5] 韩晓非, 柳云龙, 陈永强, 等. 低丘侵蚀红壤垦种熟化过程中土壤磁性特征演变规律. 水土保持学报, 2001, 15(2): 60~63
- [6] 刘良梧, 茅昂江, 胡雪峰, 等. 磁化率—沉积、成土作用环境的指示剂. 土壤, 2001, 33(2): 98~101
- [7] 卢升高. 中国土壤磁性与环境. 北京: 高等教育出版社, 2003. 5
- [8] Lu S G. Influence of particle size on magnetic properties of soils in Zhejiang Province, China. *Pedosphere*, 2000, 10(1): 81~88
- [9] 俞立中, 张卫国. 沉积物来源组成定量分析的磁诊断模型. 科学通报, 1998, 43(19): 2034~2041
- [10] 徐孝彬, 王建. 潮滩底移质泥沙运动磁性示踪试验及问题. 南京师范大学学报, 1996, 19(3): 85~87
- [11] Ventura Jr E, Nearing M A, Norton L D. Developing a magnetic tracer to study soil erosion. *Catena*, 2001, 43: 277~279
- [12] Gennadiev A N, Olson K R, Chemyanskii S S, *et al.* Quantitative assessment of soil erosion and accumulation processes with the help of a technogenic magnetic tracer. *Eurasian Soil Science*, 2002, 35(1): 17~29
- [13] Ventura E, Nearing M A, Amore E, *et al.* The study of detachment and deposition on a hillslope using a magnetic tracer. *Catena*, 2002, 48: 149~161
- [14] 苏荣在, 吴兴国. 广西区域基于 T213 降雨的雨级预报试验分析. 广西气象, 2003, 24(1): 1~4