

聚丙烯酰胺增加土壤降雨入渗减少 侵蚀的模拟试验研究 II. 侵蚀*

雷廷武^{1,2} 唐泽军¹ 张晴雯² 赵军²

(1 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2 中国科学院水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要 土壤侵蚀和雨水的流失是干旱、半干旱地区制约农业发展乃至生态环境良性循环的两个主要因素。聚丙烯酰胺 (PAM, Polyacrylamide) 对土壤的性质有着明显的改进作用, PAM 具有良好的黏结力, 能有效改良土壤的表层结构, 提高土壤的稳定性, 增加土壤的入渗率, 减少土壤侵蚀。本文试图通过人工降雨模拟实验, 获得不同的 PAM 的使用量及覆盖率与土壤侵蚀量在不同的雨强、不同的坡度条件下的关系。实验表明, 经 PAM 处理后土壤的入渗性能和抗侵蚀的性能都有所提高, PAM 能明显地黏结着土壤表面的颗粒, 形成大的团聚体, 阻碍土壤结皮的形成, 减少土壤侵蚀。

关键词 封闭和结皮, 产沙量, 土壤侵蚀

中图分类号 S157

土壤侵蚀和雨水的流失是干旱、半干旱地区制约农业发展乃至生态环境良性循环的两个主要因素。这两个因素是一个问题的两个方面, 一场一定强度的降雨通常会伴随出现雨水流失和土壤侵蚀。50 多年前, Ellison 建立了土壤侵蚀概念的基本框架, 认为土壤侵蚀由四个基本过程构成: (1) 雨滴冲击引起的剥离; (2) 雨滴溅蚀引起的迁移; (3) 土壤表面径流引起的剥离; (4) 土壤表面径流引起的迁移^[1]。现在许多的土壤侵蚀模型就是在这一个概念的基础上发展而来的。土壤侵蚀包含一系列的连续事件: 土壤颗粒的剥离、携带、运移和沉积^[2], 在土壤侵蚀过程中, 土壤表面的封闭和结皮起着十分重要的作用, 虽然结皮影响土壤侵蚀的机理还不十分清楚, 但有一点是肯定的, 结皮能显著地减低土壤的入渗率, 增加地表的径流量, 继而增加对土壤物质的冲刷和携带能力, 进一步增加土壤颗粒的分离, 导致土壤侵蚀^[3-10]。

许多学者发现聚丙烯酰胺 (PAM, Polyacrylamide) 对土壤的性质有着改进的作用, 经 PAM 处理后土壤的入渗率要大得多, PAM 明显地吸附着土壤表面的颗粒, 起着类似于黏结物质的作用, 黏结土壤的单颗粒, 形成大的团聚体抵抗雨滴的破坏作用, 土壤表面的结构和高入渗得以维持, 阻碍土壤结皮的形成, 减少土壤侵蚀^[2, 6, 11-16]。PAM 能减少土壤侵蚀的原因是: (1) 径流减少, 减低了径流的冲刷能量; (2) 土壤表面的团聚体的颗粒更大, 径流不易将其冲刷、带走; (3) 降低了径流携带土壤颗粒的能力^[7]。

关于 PAM 改良土壤的研究早在上世纪 50 年代就进行过有益的探索, 但由于经济上的原因, 直到现在, PAM 改良土壤才有了现实的意义。据估计, 美国西部在 1996 年大约有 160 000~200 000 hm² 土地使用了 PAM, 控制土壤侵蚀的效果十分显著, 大约减少了 500 万~1 000 万 t 的土壤流失^[15]。可以预见, 使用 PAM 来控制土壤侵蚀的趋势将会迅速增长。

本实验研究基于以下三个目的: (1) 国外大多数学者采用 PAM 作为土壤改良剂控制土壤侵蚀, 提高土壤入渗的方法是将 PAM 溶于灌溉水中, 而我国西北干旱、半干旱的灌溉农业很不发达, 大多数是旱地农业或雨养农业, 因而本实验试图对国外现在流行的方法进行改进, 将 PAM 与黄绵土混合, 直接撒在土壤的表面, 在自然降雨的作用下使其溶解, 从而达到控制土壤侵蚀、提高入渗率的目的。 (2) 通过人工降雨模拟实验, 获得土壤侵蚀量与不同雨强、不同坡度、不同 PAM 使用量及覆盖率之间的关系。 (3) 推荐

* 科技部山区雨水储蓄农业高效利用产业化示范工程、中国科学院“引进国外杰出人才”基金项目资助

收稿日期: 2001-06-19; 收到修改稿日期: 2001-11-05

在当地的水文、气象、地貌等自然地理条件和农业生产状况下最佳 PAM 的使用方法和使用量。

1 实验材料与方法

参见文献[17]。

2 结果与讨论

产沙量的多少是衡量土壤侵蚀强弱的一个直接标志。为了检验 PAM 减少土壤侵蚀的效果,将对照的产沙量设定为 100%,其余四种处理与之进行对比,现将第 I 阶段降雨和第 II 阶段降雨实验数据分析处理、计算后列于表 1。从表中可看出,第 I 阶段降雨实验表明,无论哪种雨强和坡度,PAM 都具有较好的减少土壤侵蚀的效果。当雨强小于 100 mm h^{-1} 时,这种效果尤为明显,当坡度小于 36.40%时,覆盖率 B 和 A 两种 PAM 处理的产沙量只有 1%左右,坡度达到 46.63%时,产沙才有所增加,但仍低于 5%;覆盖率 C 的也有相当好的效果,产沙量一般在 10%以下,当坡度较大时产沙量会大于 15%。雨强达到 150 mm h^{-1} 时,PAM 的效果有所下降,但覆盖率 A 的产沙量仍小于 10%,覆盖率 B 和 C 两种 PAM 处理的产沙量有所增大,达到 10%~50%。

表 1 PAM 处理和秸秆覆盖与对照产沙量的百分比

Table 1 Percentage of treatments of PAM and straw coverage against CK in sediment concentration

雨强 Rainfall (mm h^{-1})	坡度 Slope (%)	第 I 阶段降雨 The first rainfall				第 II 阶段降雨 The second rainfall			
		秸秆覆盖 Straw coverage	PAM 覆盖 C PAM coverage	PAM 覆盖 B PAM coverage	PAM 覆盖 A PAM coverage	秸秆覆盖 Straw coverage	PAM 覆盖 C PAM coverage	PAM 覆盖 B PAM coverage	PAM 覆盖 A PAM coverage
			C	B	A		C	B	A
50	8.74	41.31	20.64	15.33	7.58	34.87	39.33	58.27	45.9
	17.63 ¹⁾								
	36.40	76.81	10.41	10.26	8.12	142.63	12.95	8.51	6.89
	46.63	35.18	2.55	1.5	0.93	163.63	52.84	28.12	16.52
100	8.74	56.06	1.55	0.27	0.36	61.65	6.61	1.96	2.88
	17.63	90.29	38.78	0.77	1.77	31.9	87.14	18.43	11.58
	36.40	76.63	4.14	4.47	1.56	61.59	6.9	4.84	4.37
	46.63	153.08	15.95	5.71	3.13	70.25	11.96	5.9	4.89
150	8.74	111.5	48.45	16.6	4.64	35.7	31.56	7.98	3.74
	17.63	81.1	7.49	3.27	3.57	53.06	20.7	20.43	5.82
	36.40	144.54	32.3	48.17	16.65	71.76	54.14	36.44	19
	46.63	123.15	32.51	21.59	9.27	129.89	48.5	42.94	14.99

1) 未能获得实验数据

当雨强大于 100 mm h^{-1} 时,PAM 处理与对照的产沙量的百分比随坡度增大而增加,显然,大雨强大坡度将增大径流的侵蚀能量,这在一定程度会削弱 PAM 的作用,PAM 处理的产沙量随之增大。但是,在雨强 50 mm h^{-1} 左右时,可发现 PAM 处理与对照的产沙量的百分比随坡度增大而减小。似乎是坡度越大,产沙量越小,其实是因为在小坡度条件下,对照的产沙量已经很小了,如坡度为 8.47%时,产沙量平均为 $0.00248 \text{ g ml}^{-1}$ 左右,这时尽管 PAM 处理的绝对产沙量已经很小,但相比对照的百分比仍会是一个较大的值。随着坡度的增大,对照的土壤侵蚀将增加,产沙量显著增大,PAM 处理的效果立即显现出来,PAM 处理与对照的产沙量的百分比随之减小。

第 II 阶段降雨实验仍然显示 PAM 具有很好的减少土壤侵蚀的效果。但与第 I 阶段降雨实验相比,

PAM 处理、秸秆覆盖与对照产沙量的百分比明显增大。主要有两种原因:原因之一, 对照的产沙量大为减少(图 1), 这是由于前一次降雨, 土壤中的含水量大为增加, 土壤颗粒间结合水的黏结力减少了土壤的溅蚀, 同时, 第 II 阶段降雨试验所形成的径流量大为减小(见文献[17])。另外, 前一阶段降雨形成的结皮可能也减少了一部分因雨滴冲击而形成的土壤侵蚀量。结皮在以下两个方面影响土壤侵蚀: (1) 增强土壤表面的应力, 减少土壤的剥离; (2) 增加土壤表面的径流量, 继而增加土壤物质的携带能力, 加大对土壤的侵蚀。显然这是对土壤侵蚀产生影响的两种相反作用, 哪种作用占主导地位将决定土壤侵蚀的作用过程。原因之二, 随着降雨量的累积, PAM 的作用会逐渐减小, PAM 处理的产沙量将提高。这一正一反的作用使得 PAM 处理、秸秆覆盖与对照产沙量的百分比明显增大。

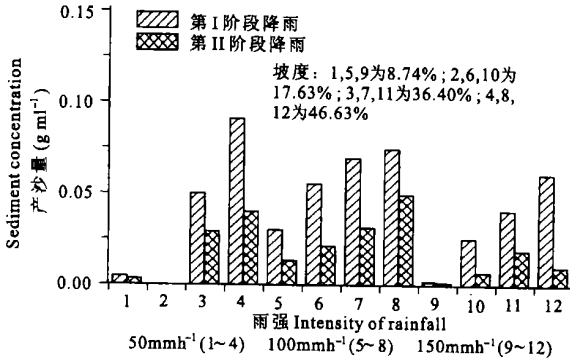


图 1 前后降雨阶段控制的产沙量对比

Fig. 1 Comparison of sediment concentrations between the first and second storm events in CK

需要说明的一点是, 表中的百分数是通过对比各个处理在产流后每分钟产沙量的数据而得到的, 如果把这些产沙量的数据加权整个降雨时间的话, 表中的百分数还会有所降低, 因为对照的初始产流时间比其它处理一般要早。

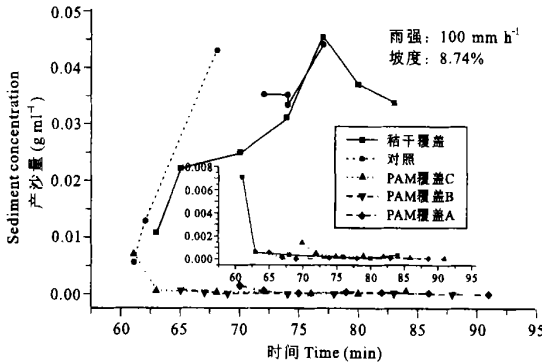


图 2 产沙量随时间变化曲线

Fig. 2 Sediment concentration as a function of time in different treatments

在土壤产沙的过程中, 即土壤侵蚀的过程中, 土壤中的团聚体及土壤颗粒间的黏结作用有着十分重要的作用。土壤表面经 PAM 覆盖后, 在雨水的溶解作用下, PAM 的黏结作用会维护土壤表层的团粒结构, 同时形成一些新的团聚体, 使得土壤中的团聚体增多, 或增大团聚体的体积。另一方面, PAM 会增大土壤颗粒间的黏结力, 使土壤团聚体能有机的连接在一起, 在土壤表面形成一层保护膜, 有效地抑制土壤的产沙。图 2 是雨强 100 mm h⁻¹、坡度 8.74% 条件下第 I 阶段的产沙量随时间变化曲线图, 它很好地解释了这种作用过程, 尽管对照、秸秆和 PAM 处理实验槽初始产流的时间不一样, 但最初产流时刻的

产沙量基本上都在同一数量级范围内,这是因为PAM还没有完全发挥作用,但随着降雨的累积、对照和PAM处理的产沙趋势向两个相反的方向发展。从图2中可看出,对照的产沙量随时间不断增大,最后有所降低,实际上,这时土壤表面的径流量也是在随时间不断增大,最后趋于稳定,从某种程度上说,产沙量是随径流量不断增大而增大,而PAM处理的曲线走势则完全不一样,虽然PAM处理土壤表面的径流量相对对照来说会明显减少,但自身的径流量还是随时间逐渐增大,然而产沙量却没有随径流量增大而增大,而是逐渐减小并趋于稳定。

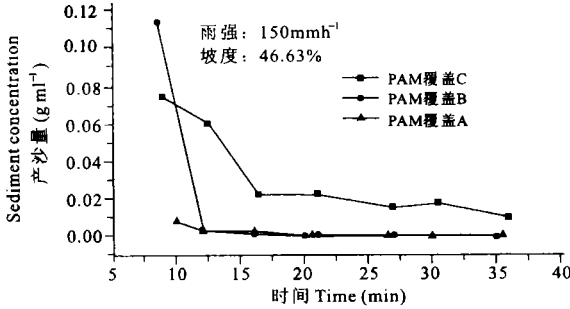


图3 PAM处理产沙量随时间变化曲线

Fig.3 Sediment concentration as a function of time in PAM treatments

无规律性,产沙量可能随时间增大,也可能随时间减小。

图4是图2同一实验前后阶段PAM处理产沙量对比图,反映出同一实验两阶段产沙的差异,它们前后阶段的产沙量发生了微妙的变化,后阶段的产沙量随时间逐渐增大,产沙量曲线有逐渐抬起的趋势,这种趋势在坡度越大、雨强越大的实验中更为明显。这说明在降雨的溶解和淋漓作用下,PAM的黏结力受到一定的削弱,土壤中有一部分团聚体会产生分离,径流中的悬浮颗粒将逐渐增多。从图中可看出,产沙曲线在实验后阶段呈发散状,PAM覆盖率越小,产沙量越大,而且时间提前。

传统的观点认为秸秆能有效地减少土壤侵蚀,这种理论似乎很有道理,也很好理解。秸秆覆盖能有效地防止雨滴打击土壤,起到减少土壤颗粒分离和扩散的作用,秸秆覆盖还能缓冲地表径流的流速,降低对土壤的冲刷作用,同时秸秆可截留雨水从而降低雨滴的动能,这些都能有效地减少土壤侵蚀。本实验对这一观点未能予以充分支持,实验数据表明(表1),当雨强为50 mm h⁻¹时,秸秆覆盖具有一些效果,大约能减少50%的土壤侵蚀,当雨强达到100 mm h⁻¹时,在坡度较小的条件下,土壤侵蚀量与对照处理的土壤侵蚀量就大致相当了。当雨强为100 mm h⁻¹而坡度又大时,及雨强达到150 mm h⁻¹时,秸秆覆盖不但不能减少土壤侵蚀量,反而成为增加土壤侵蚀量的一个因素,其侵蚀量已经大于对照处理的侵蚀量。虽然秸秆覆盖能缓冲地表径流的流速,但也正是这种原因,使得大量的雨水得以在土壤表面滞留,形成许多小“水库”,在积聚水量的同时也积聚了雨水的势能,当这种势能增大到一定的值时,就会对土壤产生“决堤”式的冲刷,加上秸秆覆盖不像自然植被一样具有很好的根系固土作用,所以土壤侵蚀的增大就不可避免了。可见在大坡度或大雨强的条件下,秸秆覆盖有害无益。

其它坡度和雨强的第I阶段实验也表明,PAM处理的产沙量都是随时间而不断地减少,产沙规律具有类似的趋势,只是程度不一而已。一般来说,在雨强小、坡度小的条件下,三种PAM处理的产沙量的大小都在一个数量级范围内,产沙量随时间变化的三条曲线会重叠在一起,随雨强和坡度的增大,PAM覆盖率小的产沙量明显增大,三条曲线不再重叠一起,而且,PAM覆盖率小的产沙曲线也不再是随时间稳定地减小,而是具有一定的波动性(图3)。这说明小覆盖率的PAM处理不足以克服大动力下的土壤侵蚀。对照的产沙过程则表现出

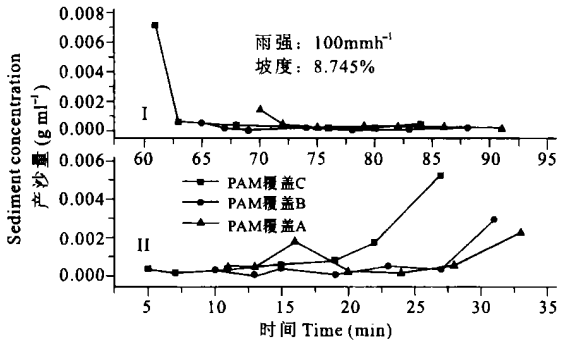


图4 同一实验第I、II次降雨PAM处理产沙量对比图

Fig.4 Comparison of sediment concentrations between the first and second rainfall events in PAM treatments

3 结 论

土壤侵蚀和土壤入参与土壤侵蚀和地表径流是水土作用过程中紧密相联的两个问题。增加土壤入渗,减少地表径流,无疑将减少土壤侵蚀;同样,减少土壤侵蚀,也就是维护土壤的良好结构,必能增加土壤入渗,减少地表径流。利用 PAM 的实质就是利用它良好的黏结性能,加强土壤的团粒结构,减少颗粒的分离,缓解土壤表层的封闭作用,防止土壤表层形成结皮,从而达到提高土壤入渗率、减少土壤侵蚀的目的。

实验表明 PAM 具有良好的黏结力,能有效改良土壤的表层结构,提高土壤的稳定性,增加土壤的入渗率,减少土壤侵蚀。进一步支持了 Lentz 和 Shainberg 等^[6]的假定:少量的 PAM 就能增加土壤表层颗粒之间的黏结力,并能防止土壤侵蚀。

将 PAM 按一定比例与黄绵土混合后直接撒在土壤表面上的使用方法是行之有效的。该方法与国外流行的灌溉水中加 PAM 的方法相比,同样具有良好的效果。Lentz 和 Sojoká^[17]等的结果是采用 PAM 3.5~8.0 kg hm⁻²获得减少 80%~99% 的土壤流失量和增加 15%~50% 的入渗;Kristian Aase 等^[14]在 20 mm 水深的灌溉试验中使用 2 kg hm⁻²PAM 减少了 75% 的土壤流失量,增加了 70% 的入渗;Shainberg 等^[9]使用 PAM 20 kg hm⁻²获得了很好的入渗效果。在本实验中,C 覆盖率的 PAM 用量为 4.0 kg hm⁻²,A 覆盖率的 PAM 用量为 10 kg hm⁻²,在雨强 50 mm h⁻¹左右、坡度小于 17.63% 的条件下,第 I 阶段降雨实验中 4.0 kg hm⁻²的 PAM 用量可减少 95% 以上的土壤流失量,增加 20%~50% 的入渗,而 10 kg hm⁻²的 PAM 用量,则可在雨强 150 mm h⁻¹以下、坡度 46.63% 以下的各种组合条件下,获得理想的结果,可减少 90%~99% 的土壤流失量,增加 40%~60% 的入渗量。在第 II 阶段降雨实验中,土壤流失量相对增大,但土壤的入渗效果却更好。

参考文献

1. Huang C, Wells L K, Norton L D. Sediment transport capacity and erosion processes: Model concepts and reality. *Earth Surf. Process Landforms*, 1999, 24: 503~516
2. Behr Hur M, Lety J, Shainberg I. Polymer effect on erosion under laboratory rainfall simulator conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990, 54: 1 092~1 094
3. Moore D C, Singer M J. Crust formation effects of soil erosion processes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990, 48: 1 117~1 123
4. Levy G J, Levin J, Shainberg I. Seal formation and interrill soil erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, 58: 203~209
5. Shama P P, Gupta S C, Rawls W J. Soil detachment by single raindrops of varying kinetic energy. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1991, 55: 301~307
6. Lentz R D, Shainberg I, Sojka R E, *et al.* Preventing irrigation furrow erosion with small applications of polymers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, 56: 1 926~1 932
7. Smith H J C, Levy G J, Shainberg I. Water droplet energy and soil amendments: Effect on infiltration and erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990, 54: 1 084~1 087
8. Bajracharya R M, Lal R. Crusting effects on erosion processes under simulated rainfall on a tropical alfisol. *Hydrol. Process*, 1998, 12: 1 927~1 938
9. Remley P A, Bradford J M. Relationship of soil crust morphology to inter rill erosion parameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1989, 53: 1 215~1 221
10. Bissonris Y L, Fox D, Bresson L M. Incorporating crusting processes in erosion models. *In: Boardman J, Mortlock D F. ed. NATO ASI Series, Modelling Soil Erosion by Water. Springer Verlag Berlin Heidelberg*, 1998, 237~246
11. Behr hur M, Lety J. Effect of polysaccharides, clay dispersion, and impact energy on water infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1989, 53: 233~238
12. Helalia A M, Lety J, Graham R C. Crust formation and clay migration effects on infiltration rate. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1988, 52: 251~255
13. Aly S M, Lety J. Physical properties of sodium treated soil as affected by two polymers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990, 54: 501~504
14. Kristian Aase J, Bjomeberg D L, Sojka R E. Sprinkler irrigation runoff and erosion control with polyacrylamide: laboratory

- tests. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1998, 62:1 681~ 1 687
15. Sojka R E, Lentz R D, Westmann D T. Water and erosion management with multiple applications of polyacrylamide in furrow irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1998, 62: 1 672~ 1 680
 16. Levy G J, Levin J, Gal M, *et al.* Polymers' effects on infiltration and soil erosion during consecutive simulated sprinkler irrigations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, 56: 902~ 907
 17. 唐泽军, 雷廷武, 张晴雯, 等. 聚丙烯酰胺增加土壤降雨入渗减少侵蚀的模拟试验研究 I . 入渗. *土壤学报*, 2003, 40(2): 178~ 185
 18. Lentz R D, Sojka R E. Field results using polyacrylamide to manage furrow erosion and infiltration. *Soil Sci.*, 1994, 158: 274~ 282
 19. Shainberg I, Warrington D N, Rengasamy P. Water quality and PAM interactions in reducing surface sealing. *Soil Sci.*, 1990, 149: 301~ 307

EFFECTS OF POLYACRYLAMID APPLICATION ON INFILTRATION AND SOIL EROSION UNDER SIMULATED RAINFALLS

II. EROSION CONTROL

Lei Ting-wu^{1,2} Tang Ze-jun¹ Zhang Qing-wen² Zhao jun²

(1 College of Hydraulic and Civil Engineering, China Agriculture University, Beijing 100083, China; 2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Summary

Soil erosion and water loss are two serious problems threatening the ecosystem and preventing the development of agriculture in the semiarid and arid regions. Polyacrylamide(PAM) can significantly amend the properties of soil. PAM, with high viscosity, can effectively improve the surface structure of soil, enhance the stability of soil, increase water infiltration and reduce soil erosion. The objective of this paper, with experiments conducted with rainfall simulator, was to determine the relations between soil erosion and applications of PAM under conditions of different rainfall intensities and slopes. Experiments showed that the soils treated with PAM had better infiltration and stability properties. With cohering significantly with particles of soil at surface, forming bigger aggregates and halting the formation of crust, PAM can provide erosion control and benefit infiltration.

Key words Sealing and crust formation, Sediment, Soil erosion