

陡坡耕地施加 PAM 侵蚀产沙规律 及临界坡长的试验研究*

刘纪根

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

雷廷武 潘英华 夏卫生 张晴雯

(中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要 PAM(聚丙烯酰胺)作为一种土壤结构改良剂施用于地表,能显著的减小径流和土壤侵蚀量。本研究设计了一系列人工降雨模拟试验,定量研究了坡度、坡长、PAM 覆盖度、雨强对陡坡耕地土壤侵蚀产沙的影响。试验采用三种雨强:50 mm h⁻¹、100 mm h⁻¹、150 mm h⁻¹,四种坡度:5°、10°、20°、25°(8.74%、17.63%、36.4%、46.63%),四种当量坡长:8 m、16 m、24 m、40 m,五种地表处理:对照、麦草覆盖、三种 PAM 覆盖度 A、B、C(A < B < C)。通过侵蚀产沙试验结果,鉴别了不同坡度、PAM 覆盖度、雨强条件下陡坡耕地无土壤侵蚀的临界坡长。结果表明,PAM 能显著地减少土壤侵蚀产沙量,延长陡坡耕地的临界坡长。

关键词 PAM, 土壤结构改良剂, 陡坡耕地, 侵蚀产沙, 临界坡长

中图分类号 S157.1

陡坡耕地是径流与侵蚀产沙的主要源地。黄河入海的细颗粒泥沙,相当部分来自陡坡耕地地表^[1]。坡面上的径流与泥沙如果能全部拦蓄不下沟,则沟谷地的径流量与泥沙量将显著减少。黄土高原 70% 的陡坡耕地,由于其土壤结构松散并且遇水崩解、区域降雨集中、强度大、植被盖度低等因素的影响,导致坡面侵蚀及由于坡面径流集中而引起的沟道侵蚀相当严重,不但直接影响着当地的农业生产及环境,还严重威胁到黄河下游地区人民的生命财产安全。人们花费大量财力物力,采取生物措施、耕作措施和工程措施来减少和防治土壤侵蚀,但陡坡耕地上的问题仍然未能得到妥善解决,依然十分严重。国际上不同地区的研究表明,对于特定的土壤,用恰当的 PAM(聚丙烯酰胺)作为土壤结构改良剂或稳定剂,可以增加表层土壤颗粒之间的凝聚力,维护良好的地表土壤结构,防止土壤结皮,增加土壤的入渗率,减少地表径流,从而可以防止或大大减少土壤侵蚀^[2]。据估计,美国西部在 1996 年大约有 160 000 到 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 万到 1 000 万 t 的土壤侵蚀^[3]。应该指出,发达国家农耕地使用 PAM 的研究均是在缓坡地上进行的,PAM 的使用对类似黄土高原上的陡坡耕地是否具有同等的减少土壤侵蚀的效果尚待研究。国内在对陡坡耕地上施加 PAM 增加入渗,减少土壤侵蚀的系统定量研究还很少见,对黄土高原上应用 PAM 的研究就更少。本研究旨在通过人工降雨模拟试验,获得土壤侵蚀量与不同雨强、坡度、坡长及 PAM 使用量和覆盖度之间的关系。为黄土区陡坡耕地上使用 PAM 防治土壤侵蚀提供依据和指导。

1 试验材料和方法

试验采用中国科学院水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室的双向对喷式人工模拟降雨装置,降雨过程由计算机系统自动控制,降雨高度 14 m。试验降雨量控制在 50 mm h⁻¹、100 mm h⁻¹、150 mm h⁻¹。试验土槽长 8 m,宽 3 m,深 0.3 m,坡度可在 0~30° 之间调整。试验采用 5°、10°、20°、25°(8.74%、17.63%、36.4%、46.63%) 四个坡度。试验时将 3 m 宽的土槽分为 15 个部分,每个小土槽 PAM

* 中国科学院“引进国外杰出人才”基金项目(982602)和国家自然科学基金项目(40171062)资助

收稿日期:2001-09-15;收到修改稿日期:2002-02-20

的覆盖度分别为 0(对照)、A(40%)、B(60%)、C(80%), 并设有 1 个麦草覆盖处理。试验设 3 个重复。因试验在室内进行, 受试验装备的限制, 坡长这一因素不易改变, 本试验采用了当量坡长的方法, 即在坡地的上方加入一定的水量(径流量)来代替坡长的影响。其具体做法是: 根据 8 m 的坡长所产生的径流来确定坡上的供水流量。代表的意义是, 当一定坡长不产生(可见的)土壤侵蚀而只产生径流时, 就意味着在这一坡长上产生的径流的能量尚不足使土壤由地表剥离而产生土壤侵蚀; 土壤还可以承受更多的径流冲刷。将相当于当前的坡面径流量的水流引入上坡, 即相当于在坡面的上方增加了一个与当前坡长及地表条件相当的坡面。这就是当量坡长所包含的意义。为此将试验分为两个过程, 先做 8 m 长坡长的试验, 然后根据 8 m 坡长所产生的径流来确定在上坡加入的水流量。为方便试验, 先做 8 m 坡长、一种坡度、一种雨强的试验, 得到径流量。然后分别在上坡加入 1 倍、2 倍、4 倍于坡面径流的水流量, 并人工降雨, 中间不换土。即在同一坡度、同一雨强、不同 PAM 覆盖度下, 先进行 8 m 坡长的降雨试验, 然后进行当量坡长为 16 m、24 m、40 m 的降雨试验。供试土壤为安塞黄绵土, 采用耕层(0~20 cm)土壤。颗粒组成为: 砂粒(>0.05 mm)含量 12.6%, 粉粒(0.05~0.005 mm)占 72.3%, 粘粒(<0.005 mm)占 15.1%, 属轻质壤土。土壤有机质含量介于 3.0~4.5 g kg⁻¹之间。

试验前先将土壤风干, 使土壤含水率均一。装土时先在土槽中装 15 cm 左右的沙子, 上面盖一层沙布, 再装 15 cm 左右的土, 装土容重控制在 1.09 g cm⁻³左右, 用以模拟耕层土壤。然后把与干土混合好的 PAM 均匀撒在土表上。

试验前在各个小土槽的上、中、下分放雨量筒一个, 标定每个土槽的实际雨强。试验中记录产流随时间的变化, 即每隔 3~5 min 采一次样, 记下采样时间及采样体积以此估算径流变化过程。试验后用烘干法分析采样径流中的泥沙含量。

2 结果与分析

2.1 坡度对侵蚀产沙的影响

国内外众多研究表明, 坡度是坡面土壤侵蚀中影响较大的因素之一。土壤侵蚀量随坡度的增加而增加, 在某一临界坡度之后, 土壤侵蚀量随坡度的增加而减小^[4-6]。将雨强为 150 mm h⁻¹、坡长为 8 m 时四种不同坡度下侵蚀产沙量随时间变化的实测点点绘在图 1~图 4, 分别代表 PAM 覆盖度 C、B、A、对照时的侵蚀产沙量。

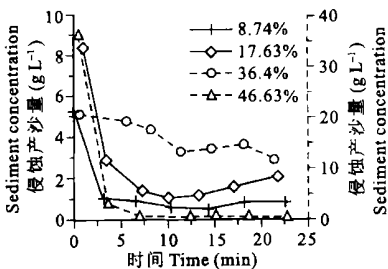


图 1 PAM 覆盖度 C 时侵蚀产沙量随时间变化曲线
实线对应纵坐标左轴, 虚线对应纵坐标右轴, 其它图同

图 1 PAM 覆盖度 C 时侵蚀产沙量随时间变化曲线

Fig. 1 Curve between sediment concentration in runoff and time under PAM coverage C

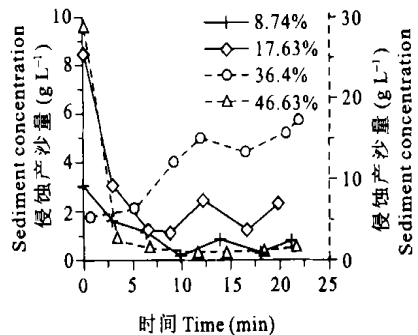


图 2 PAM 覆盖度 B 时侵蚀产沙量随时间变化曲线

Fig. 2 Curve between sediment concentration in runoff and time under PAM coverage B

从图中可以看出, 产流开始后含沙量很高, 随后开始下降。这主要是因为原始坡较干燥, 表土比较松散, 相互间粘结力小, 降雨击溅以及片流作用很容易将表土颗粒携带下来, 因此含沙量很大。降雨到一定阶段, 由于雨滴击溅, 土壤含水量变化等因素使土粒间发生变化, 土壤粘结力加强, 侵蚀含沙量减小^[7]。同时, 随着坡度的增加, 侵蚀含沙量也增加, 但在 25° 时侵蚀产沙量反而减小, 表明在 20°~25° 之间存在一临界坡度。

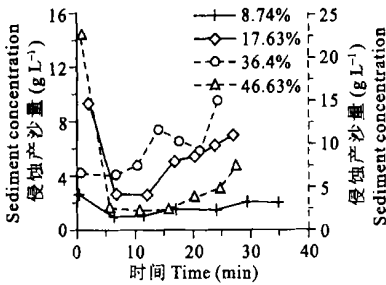


图3 PAM覆盖度A时侵蚀产沙量随时间变化曲线

Fig. 3 Curve between sediment concentration in runoff and time under PAM coverage A

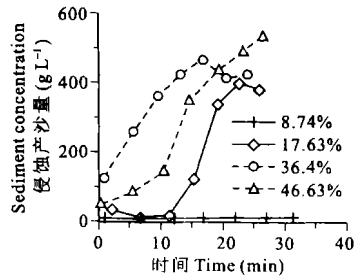


图4 对照时侵蚀产沙量随时间变化曲线

Fig. 4 Curve between sediment concentration in runoff and time under control

关于临界坡度国内外已作了大量的研究,但对临界坡度的大小,理论上仍没有完全解决。许多室内外试验已经证明,临界坡度介于 $25 \sim 28^\circ$ 之间^[4]。靳长兴^[5]认为,临界坡度与坡面水深和土壤表面颗粒粒径有关,并指出临界坡度在 $24 \sim 29^\circ$ 之间。赵晓光等^[6]认为,临界坡度随土壤结构及降雨因子的变化应有一定的变化幅度,并指出黄土高原土壤侵蚀的临界坡度在 $21.4 \sim 45^\circ$ 之间,黄绵土约为 28° 。本试验研究表明,临界坡度在 $20 \sim 25^\circ$ 之间,与 28° 有一定差异,这可能与室内降雨及土壤处理等因素有关。

将 150 mm h^{-1} 不同坡度时的累积侵蚀量和侵蚀减少率列表1。从表1中可看出,随着坡度的增加,其累积侵蚀量也增加,在 25° 时侵蚀量反而减小。相对对照来说,四种坡度下覆盖PAM的侵蚀量显著的低于对照的侵蚀量,减小侵蚀量在 $80.58\% \sim 99.52\%$,且随着坡度的增加,其侵蚀减小率越大,即坡度越大,PAM的减沙效果越显著。

表1 不同坡度时累积侵蚀量及侵蚀量减少率

Table 1 Accumulative erosion and erosion reduction rate at different slopes

坡度 Slope	累积侵蚀量 Accumulative erosion(g)				侵蚀量减少率 Erosion reduction rate(%)		
	PAM	PAM	PAM	对照	PAM	PAM	PAM
	Rate C	Rate B	Rate A	Control	Rate C	Rate B	Rate A
5°	43.10	70.11	89.04	458.499	90.60	84.71	80.58
10°	163.67	249.74	391.50	15369.71	98.94	98.38	97.45
20°	167.43	266.31	590.67	23225.35	99.28	98.85	97.46
25°	102.46	147.85	185.49	21383.85	99.52	99.31	99.13

2.2 坡长对侵蚀产沙的影响

坡长是决定坡面水流能量沿程变化,影响坡面径流与水流侵蚀产沙过程的重要地貌因素之一。部分学者认为,当水流中的泥沙含量接近输沙能力时,坡面长度增加,水体中的含沙量会增加,水流能量多消耗于搬运泥沙,结果导致水流侵蚀趋于减弱。另一些人认为,当水流中的泥沙含量很低时,从上坡到下坡水深将逐渐增加,水流侵蚀力也会增加^[8,9]。将不同坡长水流含沙量随降雨历时的变化曲线点绘如图5~图8,分别代表PAM覆盖度C、B、A、对照时的侵蚀产沙量。

当PAM覆盖度最大为C时,从图5中可以看出,无细沟发育,仅为坡面降雨径流侵蚀的8m、16m坡长水流含沙量在降雨过程中基本保持稳定;24m坡长在降雨后期则有细沟雏形发育,侵蚀含沙量慢慢增加;40m坡长在降雨初期就有细沟发育,侵蚀含沙量急剧增加。当PAM覆盖度最大为B、A时,图6、7

中, 8 m 坡长侵蚀含沙量保持稳定, 无细沟发育; 16 m 坡长降雨一段时间后, 侵蚀含沙量增加, 细沟侵蚀形成; 24 m、40 m 坡长在降雨初期就有细沟发育, 侵蚀含沙量剧增, 到一定阶段后侵蚀含沙量又趋于稳定, 细沟已经形成最佳过水与输沙断面, 细沟逐渐趋于稳定或处于动态平衡, 侵蚀含沙量也逐渐达到平稳。当无 PAM 覆盖时, 图 8 中, 8 m 坡长细沟发育已经形成。当形成细沟侵蚀时, 侵蚀含沙量发生明显的转折, 其转折点的位置, 决定于细沟侵蚀发生的时间^[9]。通过分析曲线转折点, 则可揭示细沟发育的临界时间及细沟发育达到动态平衡的时间, 使我们能更好地了解不同坡面上侵蚀产沙变化过程及内在规律。

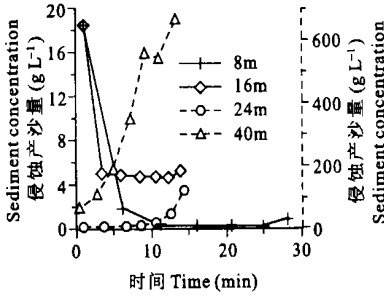


图 5 PAM 覆盖度 C 时侵蚀产沙量随时间变化曲线

Fig. 5 Curve between sediment concentration in runoff and time under PAM coverage C

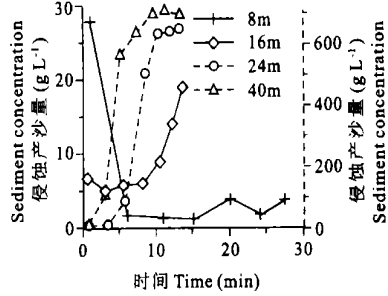


图 6 PAM 覆盖度 B 时侵蚀产沙量随时间变化曲线

Fig. 6 Curve between sediment concentration in runoff and time under PAM coverage B

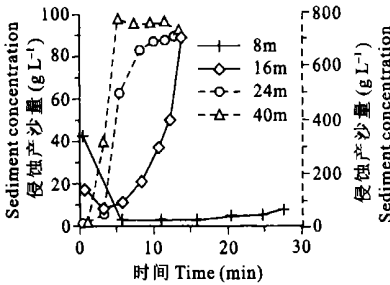


图 7 PAM 覆盖度 A 时侵蚀产沙量随时间变化曲线

Fig. 7 Curve between sediment concentration in runoff and time under PAM coverage A

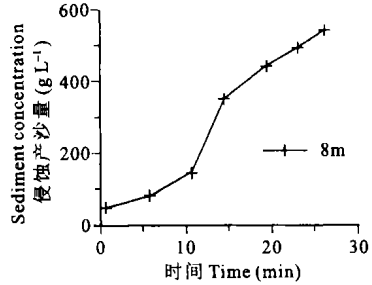


图 8 对照时侵蚀产沙量随时间变化曲线

Fig. 8 Curve between sediment concentration in runoff and time under control

四种地表处理如图 5~ 图 8 都表明, 随着坡长的增加, 侵蚀含沙量也增加。这主要是因为当坡度一定时, 坡长越长, 其接受降雨的面积越大, 因而径流量越大, 当坡越长时, 将有较大的重力位能, 因此当其转化为动能时能量也越大, 其冲刷力也就增大^[10]。同时, 当达到一定坡长(临界坡长)时, 则产生了新的飞跃。通过分析不同坡面侵蚀含沙量随降雨历时的变化曲线, 则可得到不同坡面发生细沟侵蚀的临界坡长, 为减小黄土区陡坡耕地细沟侵蚀提供依据。

2.3 PAM 对侵蚀产沙的影响

杜尧东等^[11]研究发现, 在坡地施用 PAM 后可以减小地表径流, 提高土壤含水量, 促进土壤沉降, 增强土壤结构性和水稳性, 因而提高了土壤的持水性和抗冲性, 减小了土壤侵蚀量和肥力流失量, 有利于作物增产。从图 5~ 图 8, 四种坡度的侵蚀产沙量随时间变化曲线图中可以看出, 覆盖 PAM 后, 其细沟发育的临界坡长增加, 且 PAM 覆盖度越大, 发生细沟侵蚀的临界坡长越长。裸露地在 8 m 长坡长已有细沟发育, PAM 覆盖度在 A、B 时, 在 16 m 坡长时才有细沟发育, PAM 覆盖度在 C 时, 在 24 m 坡长才有细

沟雏形发育。雨滴打击裸地,使地表结实,飞溅的细颗粒阻塞土壤空隙,造成土壤入渗率减小,径流增加,侵蚀产沙量也增加。覆盖 PAM,其阴离子增加了土壤的阳离子代换量,增强水稳性团聚体的凝聚和悬浮能力;其强劲的胶结能力使降雨或径流对土粒的分离能力得到减小,保持了土壤的团聚体,减小结皮的形成,维持良好的孔隙状况,增加入渗,减小径流,从而减小侵蚀含沙量^[2,3]。将不同 PAM 覆盖度下侵蚀产沙量随降雨历时变化曲线点绘如图 9~ 图 12, 分别代表 150 mm h⁻¹ 时 5°、10°、20°、25° (8.74%、17.63%、36.4%、46.63%) 的侵蚀产沙量。从图中可以看出,在坡面条件一定时,覆盖 PAM 后,其侵蚀产沙量显著的低于裸地,且随着 PAM 覆盖度的增加,侵蚀产沙量减小。从表 1 也可看出,覆盖 PAM,其累积侵蚀量显著的低于对照,且 PAM 覆盖度越大,侵蚀减少率越大。

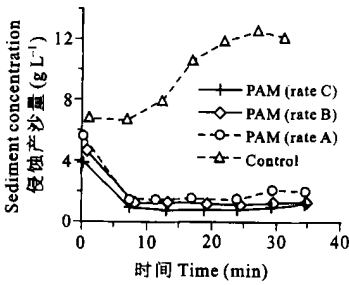


图 9 5° 时侵蚀产沙量随时间变化曲线

Fig. 9 Curve between sediment concentration in runoff at slope 5 degree

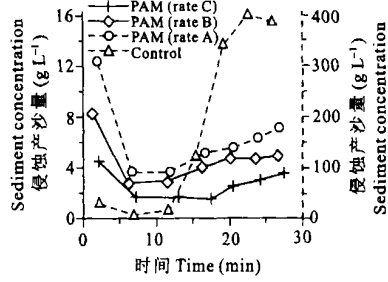


图 10 10° 时侵蚀产沙量随时间变化曲线

Fig. 10 Curve between sediment concentration in runoff at slope 10 degree

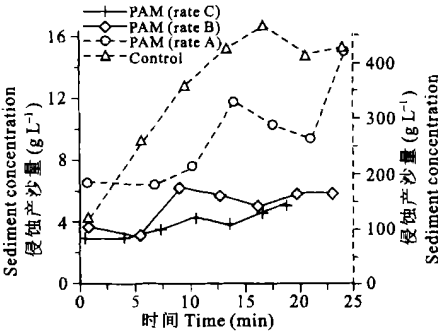


图 11 20° 时侵蚀产沙量随时间变化曲线

Fig. 11 Curve between sediment concentration in runoff at slope 20 degree

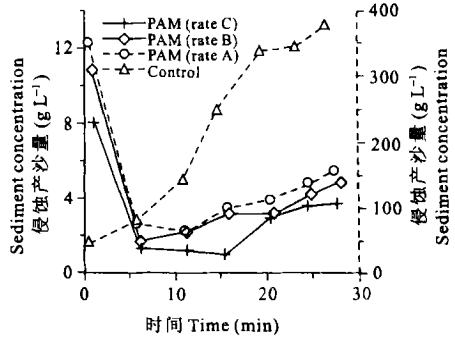


图 12 25° 时侵蚀产沙量随时间变化曲线

Fig. 12 Curve between sediment concentration in runoff at slope 25 degree

2.4 雨强对侵蚀产沙的影响

降雨因素是促成坡地水力侵蚀发生发展的主要外营力条件,众多学者对其都作了比较详尽的研究。降雨强度增大,最直观的表现就是径流增大,对土壤的冲刷力增大。此外,降雨强度增大,雨滴的直径和末速都增大,因而它的动能也增大,对土壤的击溅作用表现的也十分强烈;同时,使坡面水层紊动强度加大,水流的夹沙能力加强。所以,随着降雨强度的增大,侵蚀含沙量也增大。图 13~ 图 16, 10° 时四种地表处理的侵蚀产沙曲线图表明,三种 PAM 覆盖度和对照下,降雨强度增大,侵蚀含沙量也增大。在雨强一定时,覆盖 PAM 侵蚀产沙量显著的小于对照的侵蚀产沙量。

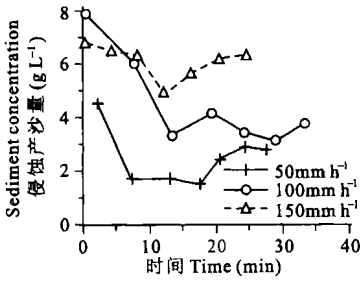


图 13 PAM 覆盖度 C 时侵蚀产沙量随时间变化曲线

Fig. 13 Curve between sediment concentration in runoff and time under PAM coverage C

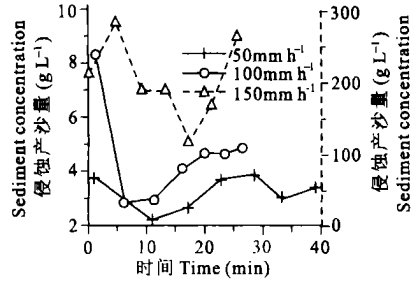


图 14 PAM 覆盖度 B 时侵蚀产沙量随时间变化曲线

Fig. 14 Curve between sediment concentration in runoff and time under PAM coverage B

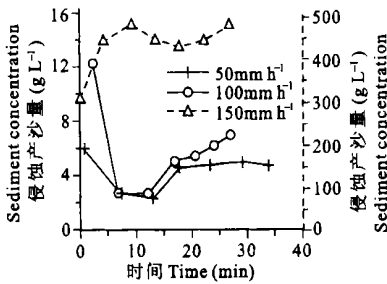


图 15 PAM 覆盖度 A 时侵蚀产沙量随时间变化曲线

Fig. 15 Curve between sediment concentration in runoff and time under PAM coverage A

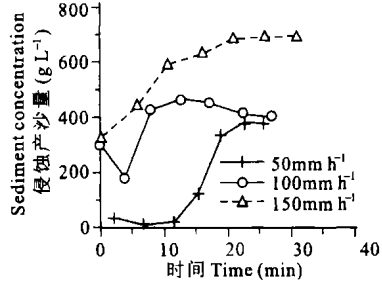


图 16 对照时侵蚀产沙量随时间变化曲线

Fig. 16 Curve between sediment concentration in runoff and time under control

3 结 论

1. 三种 PAM 覆盖度和对照下,随着坡度的增加,侵蚀产沙量也增加,但在 25° 时侵蚀产沙量反而减小,表明在 20~ 25° 之间存在一临界坡度。相对对照来说,四种坡度下覆盖 PAM 的侵蚀量显著的低于对照的侵蚀量,坡度越大,PAM 的减沙效果越显著。

2. 随着坡长的增加,侵蚀产沙量也增加。覆盖 PAM 后,其细沟发育的临界坡长增加,且 PAM 覆盖度越大,发生细沟侵蚀的临界坡长越长。

3. 在坡面条件一定时,覆盖 PAM 后,其侵蚀产沙量显著的低于对照,且随着 PAM 覆盖度的增加,侵蚀产沙量减小。

4. 三种 PAM 覆盖度和对照下,降雨强度增大,侵蚀产沙量也增大。在雨强一定时,覆盖 PAM 侵蚀产沙量显著的小于对照的侵蚀产沙量。

参考文献

1. 蔡强国. 坡面侵蚀产沙模型的研究. 地理研究, 1988, 7(4): 94~ 102
2. Lentz R D, Sojka R E. Field results using polyacrylamide to manage furrow erosion and infiltration. Soil Science, 1994, 158(4): 274- 282
3. Sojka R E, Lentz R D, Westermann D T. Water and erosion with multiple applications of polycrylamide in furrow irrigation. Soil Sci. Soc. Am. J. , 1998, 62: 1 672~ 1 680
4. 靳长兴. 论坡面侵蚀的临界坡度. 地理学报, 1995, 50(2): 234~ 239
5. 靳长兴. 坡度在坡面侵蚀中的作用. 地理研究, 1996, 15(3): 57~ 63

6. 赵晓光, 吴发启, 刘秉正, 等. 再论土壤侵蚀的坡度界限. 水土保持研究, 1996, 6(2): 42~ 46
7. 徐为群, 倪晋仁, 徐海鹏, 等. 黄土坡面侵蚀过程实验研究 I. 产流产沙过程. 水土保持学报, 1995, 9(3): 9~ 18
8. 蔡强国, 王贵平, 陈永宗. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟. 北京: 科学出版社, 1998
9. 蔡强国. 坡长对坡耕地侵蚀产沙过程的影响. 云南地理环境研究, 1998, 10(1): 34~ 42
10. 张洪江. 土壤侵蚀原理. 北京: 中国林业出版社, 2000
11. 杜尧东, 夏海江, 刘作新, 等. 聚丙烯酰胺防治坡地水土流失试验研究. 水土保持学报, 2000, 14(3): 10~ 13

EFFECT OF POLYACRYLAMIDE ON SEDIMENT LOSS AND CRITICAL SLOPE LENGTH OF STEEP CULTIVATED SLOPE LAND

Liu Ji-gen

(Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Lei Ting-wu Pan Ying-hua Xia Wei-sheng Zhang Qing-wen

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Summary

Polyacrylamide (PAM), as a new effective soil amendment, applied on to soil surface, can significantly reduce runoff and erosion. With a series of rainfall simulation tests, effects of slope degree, slope length, PAM coverage and rain intensity on soil sediment loss of steep cultivated slope land are approached. The experiment is designed to have 3 levels of rain intensity: 50 mm h⁻¹, 100 mm h⁻¹ and 150 mm h⁻¹; 4 slope degree: 5°, 10°, 20° and 25° (8.74%, 17.63%, 36.4% and 46.63%); 4 equivalent slope length: 8 m, 16 m, 24 m and 40 m; and 5 treatments: control, straw coverage, 3 PAM coverage-A, B and C (A < B < C). Based on the experiment results, the critical slope length for soil erosion on steep cultivated slope land is determined. The results show that PAM can significantly reduce the amount of sediment loss, and lengthen the critical slope length on steep cultivated slope land.

Key words PAM, Soil amendment, Steep cultivated slope land, Sediment loss, Critical slope length