PAM 与不同土壤调理剂混合施用对降雨入渗和土壤侵蚀的影响

于海龙[1]，于 健[2]，李 平[3]，张俊生[2]，李玉兰[4]，唐德强[5]

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木工程学院，内蒙古 呼和浩特 010018；
2. 内蒙古水利科学研究院，内蒙古 呼和浩特 010020；3. 内蒙古农业大学，内蒙古 呼和浩特 010018；
4. 锡林郭勒盟水利勘测设计队，内蒙古 锡林郭勒 026000；5. 中建六局土木工程有限公司，内蒙古 呼和浩特 010040)

摘 要：土壤中施用聚丙烯酰胺(PAM)可以提高降雨入渗率，减少土壤侵蚀量。PAM 大多施用于土壤表面。为了研究 PAM 与不同土壤调理剂混合施用对入渗率和侵蚀量的影响，对 PAM(22.5 kg/hm^2)与保水剂(45 kg/hm^2)、粉煤灰(1 500 kg/hm^2)、腐殖酸(900 kg/hm^2)混合的 6 种施用方法进行了试验。结果表明，施加了 PAM 的土壤调理剂均能显著提高降雨入渗率和减少土壤侵蚀量。与对照相比，施加了 PAM 处理的降雨入渗率较对照试验提高了 1.8～2.7 倍，土壤侵蚀量减少约 50%～70%，PAM 与粉煤灰和腐殖酸混合施用提高降雨入渗率效果最为显著，PAM 和保水剂混合施用减少土壤侵蚀量最多，PAM 与粉煤灰和腐殖酸混合施用相比单独施用 PAM 均没有显著性差异。综合比较结果发现，PAM 与粉煤灰混合施用增加降雨入渗率和减少径流的效果最好，PAM 与保水剂混合施用抗土壤侵蚀效果最好。

关键词：入渗；侵蚀；PAM；保水剂；粉煤灰；腐殖酸

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2012)05-0152-04 **中图分类号**：S722.7

Effects of Different PAM Application Modes Mixed with Soil Conditioners on Rainfall Infiltration and Soil Erosion

YU Hai-long[1], YU Jian[2], LI Ping[3], ZHANG Jun-sheng[2], LI Yu-lan[4], TANG De-qiang[5]

(1. *College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia* 010018, *China*; 2. *Inner Mongolia Academy of Water Conservancy Sciences, Hohhot, Inner Mongolia* 010018, *China*; 3. *Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia* 010018, *China*; 4. *Xilin Gol League Water Survey and Design Team, Xilin Gol, Inner Mongolia* 026000, *China*; 5. *Civil Engineering Co., Ltd., Sixth Engineering Bureau of China Construction, Hohhot, Inner Mongolia* 010040, *China*)

Abstract: Application of polyacrylamide(PAM) in soil can not only improve rainfall infiltration rate, but also reduce soil erosion. Usually, PAM is applied on soil surface. In order to study the effects of the mixtures of PAM with other soil conditioners on rainfall infiltration rate and soil erosion, six application treatments were evaluated by mixing PAM(22.5 kg/hm^2) with superabsorbent polymers(45 kg/hm^2), fly ash(1 500 kg/hm^2) and humic acid(900 kg/hm^2). Results showed that the application of PAM mixed with soil conditioners could significantly increase rainfall infiltration rate and reduce soil erosion. Rainfall infiltration rate was 1.8 to 2.7 times higher than the control, while soil erosion rate was reduced by about 50% to 70%. The mixture containing PAM, fly ash and humic acid had the most significant effect on the increase in infiltration rate. Mixing PAM with superabsorbent polymers led to the greatest reduction of soil erosion. Moreover, there was no significant difference when PAM was applied alone and mixed with fly ash and humic acids. Overall, the application of PAM mixed with fly ash had the best effect on the increase of rainfall infiltration and reduction of runoff. Soil erosion resistance was the best when PAM was mixed with superabsorbent polymer.

Keywords: infiltration; erosion; PAM; superabsorbent polymer; fly ash; humic acid

收稿日期：2011-11-21 **修回日期**：2011-12-12

资助项目：国家自然科学基金项目，水利部推广项目，内蒙古自然科学基金重点项目“PAM 在农田节水中的应用”(50769006，TG1144)

作者简介：于海龙(1984—)，男(汉族)，黑龙江省巴彦县人，硕士研究生，主要研究方向为土壤改良、水土保持。E-mail：yuhailong1013@126.com。

通信作者：于健(1958—)，男(汉族)，内蒙古自治区临河县人，教授级高工，主要从事节水灌溉技术与材料研究。E-mail：jianyu192005@yahoo.com.cn。

我国北方旱作农业地区降雨量较少而且比较集中,蒸发量大,加之土壤有机质含量低,降雨过程中土壤表面会产生封闭作用,进而形成土壤结皮[1-3],严重影响降水入渗,易引起地表径流与土壤侵蚀。地表径流和土壤侵蚀是导致水土流失与农业生产效率低下的一个主要原因[4]。中国是水土流失最严重的国家之一[5],而水土流失产生的主要原因之一是土壤表层在雨滴的打击作用下形成的一层密实结层,导致降雨入渗率下降。PAM 能有效改善土壤结构,可增加土壤的团聚体及土壤表面粗糙度,降低土壤容重,提高土壤总孔隙率和毛管孔隙度,使土壤颗粒和孔隙结构保持稳定,进而抑制土壤结皮、提高土壤入渗率、增加土壤含水量和减少土壤侵蚀,对提高旱地作物产量具有重要的作用[6-12]。近年来,对 PAM 在土壤改良和水土流失方面的影响进行了广泛的研究,但目前的研究主要集中在单独施用 PAM 对土壤结构、土壤水分、土壤孔隙等方面的影响[3,6-20],有关 PAM 与其他土壤调理剂混合施用对土壤入渗和侵蚀的影响还缺乏深入研究。本文选取 PAM 与 3 种土壤调理剂(保水剂、粉煤灰和腐殖酸)混合的不同施用方法,研究 PAM 与不同土壤调理剂混合施用对土壤入渗与侵蚀影响的差异,评价不同方法与不同土壤调理剂对 PAM 功效的影响,为旱作农业区应用 PAM 技术提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验土样采自准格尔旗,该地的土壤很容易产生土壤结皮。土样过 4 mm 筛,置于干燥处。按土壤容重计算托盘中的土壤重量,按托盘面积计算托盘中全部土壤需要的药品,然后将土样和药品混合,置于盆中。经测定,1 个试验组 3 盘所需试验用土约为5.7 kg。试验土样的物理和化学性质指标如表 1 所示。

表 1　试验土壤的物理和化学性质

土 壤	颗粒组成/%			CEC/	$CaCO_3$/	ESP/	EPP	Ca+Mg	pH 值
	沙粒	粉粒	黏粒	(cmol·kg^{-1})	%	%			
壤砂土	72.50	12.50	15.00	13.00	3.23	2.15	4.13	9.89	8.10

注:CEC 为可交换阳离子量; ESP 为可交换钠百分量; EPP 为可交换钾百分量

(1) 试验药品。PAM(分子量 1 200 万)按 22.5 kg/hm^2 施用;保水剂(superabsorbent polymers,S),按 45 kg/hm^{2}施用;腐殖酸(humic acid,H)按 900 kg/hm^2 施用;粉煤灰(fly ash,F)按 1 500 kg/hm^2 施用。

(2) 7 个试验处理。① 对照(未施用土壤调理剂); ② PAM;③ F+H; ④ PAM+F+H; ⑤ PAM+S; ⑥ PAM+F; ⑦ PAM+H。

1.2　试验方法

试验采用滴式降雨模拟器[20],这种降雨模拟器由一个 75 cm×60 cm×8 cm 有机玻璃材质的密闭水箱组成,通过一套 20 mm×20 mm 均匀分布头朝下的注射针头(大约 1 200 个)产生雨滴直径已知的连续降雨,平均雨滴直径为 2.97×10^{-2} mm。从距地面 2.2 m高度处降落,产生的冲击速度为 5.46 m/s,动能为 15 (g·kJ)/m^3,降雨强度保持在 36 mm/h。水箱与装置有偏心轮的电机连接,使水箱小幅度摆动,保证模拟降雨的均匀性。

在 20 cm×40 cm×4 cm 的托盘中铺 1 cm 厚过 1 mm筛的沙层,把培养好干燥的土壤破碎通过直径 4 mm的筛子过筛,滤出土块破碎后放入托盘中,并平整土壤表面。将托盘中的试验土样通过其下部的排水管用自来水(地下水 EC=0.36 dSm^{-1})使其饱和。托盘土壤饱和后,将其放在降雨模拟器下方,待到下部排水管不再滴水,掀起挡水板,经历 72 mm 脱离子水(即蒸馏水)模拟天然降雨。托盘的坡度保持在 15%,以便能够收集到径流过程中土壤流失的量。降雨入渗量通过托盘下面出水口流到带有刻度的量筒内,每隔 2 min 采集 1 次入渗量。记录入渗量随时间变化过程。降雨产生的径流被收集在 1 个桶中,最后量测水量。随后,混合径流水量,取 3 个水样,烘干,计算出整个径流过程所带走的土壤流失的总量。每组试验进行 3 次重复,实验结果取平均值。

1.3　培养方案

将试验用剂与少量土样混合搅匀,然后均匀地洒在盆中,再搅拌 2 min,使其与土样均匀混合。为模拟施用一段时间后的效果,对混合好的土样进行培养:用喷壶向盆中土样喷水,边喷水边翻动土样,搅拌 2 min,喷水量约 230 ml;用手揉搓土样,至土样松散,以免土壤结块;将处理后的土样放置至干后,再喷水、搅拌,揉搓至松散。如此 5 个轮回用时约为 42 d(用时受阳光、温度、湿度影响)。

2　结果与讨论

2.1　PAM 与不同土壤调理剂混合施用对降雨入渗的影响

各试验处理的降雨入渗变化过程如图 1 所示。

从图 1 中对照入渗过程可以看出，降雨初始阶段入渗率迅速下降，说明试验土样在雨水的打击下，容易产生土壤结皮。与对照相比，F＋H 处理对降雨入渗过程无明显作用，施用了 PAM 的处理均明显改变了入渗过程，提高了入渗率，其中施用 PAM＋F＋H 的试验处理效果最为显著。

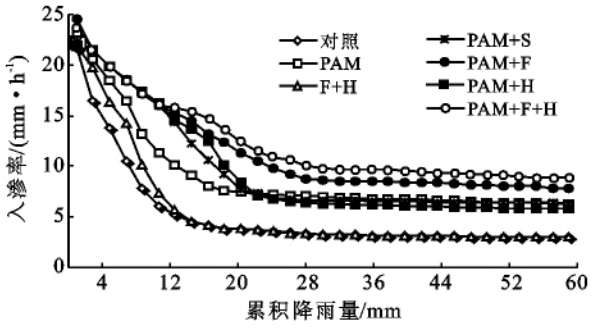


图 1 各试验处理对降雨入渗的影响

各试验处理的降雨稳定入渗率如表 2 所示，从表 2 中可以看出，对照试验的稳定入渗率最小。与对照相比，F＋H 处理的稳定入渗率与对照差异不显著，说明腐殖酸和粉煤灰混合施用虽然可以通过提高土壤的孔隙度来提高入渗量，却对土壤结皮没有减轻作用，改善土壤入渗性能不明显。与对照相比，施用了 PAM 的处理均提高了入渗率，但提高的程度不同，稳定入渗率在 4.98～7.38 mm/h，为对照的1.8～2.7 倍，其中 PAM＋F＋H 处理效果最好。与单独施用 PAM 处理相比，PAM＋S 处理和 PAM＋H 处理没有显著性差异；PAM＋F 处理和 PAM＋F＋H 处理有显著性差异，均提高了稳定入渗率。

表 2 各处理稳定入渗率及土壤侵蚀量

处 理	稳定入渗率/(mm·h^{-1})	侵蚀量/g
对 照	2.65a	80.62a
PAM	5.23b	38.22b
F＋H	2.67a	108.62c
PAM＋F＋H	7.38d	36.53b
PAM ＋ S	5.21b	24.05d
PAM ＋ F	6.60d	37.00b
PAM ＋ H	4.98b	32.17bd

注：同列中不同字母表示处理间存在显著性差异($p<0.05$)。

粉煤灰使 PAM 的功效更加明显，入渗率比对照提高了 149%。这是由于粉煤灰遇水溶解后会产生大量的离子，土壤中的电解质浓度增加，PAM 遇水形成的阴性凝聚体相互间的排斥力减小，使 PAM 凝聚体能明显地黏结着土壤表面的颗粒，形成大的团聚体，增加入渗率，同时阻碍土壤结皮的形成，减少土壤侵蚀。

在土壤中施加 PAM 与腐殖酸的混合物，对降雨入渗率无明显作用。腐殖酸对植物有更好的吸收土壤中矿物质的作用，腐殖酸中约 90%是颗粒[21]，在降雨时不易溶解，溶解的小部分仍然对 PAM 有一定的影响。PAM，粉煤灰，腐殖酸 3 者混合为本试验中稳定入渗率最高的，原因是 PAM 受到粉煤灰和腐殖酸的共同作用，使其对入渗率的提高更加明显。

施用保水剂对降雨入渗率无明显作用，但可明显提高土壤的持水能力，增加土壤毛管孔隙度，降低土壤容重，减少土壤的深层渗漏等，从而提高作物产量。多数研究认为保水剂功效主要反映在提高土壤含水率，施用保水剂提高不同质地土壤含水率 10%～15%，质地越粗的土壤，保水剂效果越好[22-24]。

2.2 PAM 与不同土壤调理剂混合施用对土壤侵蚀的影响

各试验处理产生的土壤侵蚀量见表 2。与对照相比，F＋H 处理的土壤侵蚀量增加了 34.7%，施加了 PAM 的处理均显著减少了土壤侵蚀量，减少 50%～70%，其中 PAM＋S 的效果最显著。与 PAM 处理相比，PAM＋S 处理土壤侵蚀量减少了 37.1%，具有显著差异，PAM＋F，PAM＋H 和 PAM＋F＋H 处理的土壤侵蚀量和 PAM 处理相比都没有显著性差异。

PAM 遇水溶解后在土壤表面形成长链聚合体，这种聚合体被土壤团粒表面吸附，并与土壤颗粒紧密结合在一起，从而增强土壤表面的胶结力，减少土壤的侵蚀量。施加 PAM 和保水剂的土壤抗侵蚀能力好于单独施用 PAM，这是因为除了 PAM 对土壤的作用外，保水剂也可提高土壤的抗侵蚀能力。

施加粉煤灰和腐殖酸的土壤侵蚀量有所增加，因为土壤中随着离子的增加，土壤颗粒结合力降低，土壤表面颗粒松散，导致土壤侵蚀量增加。而施加 PAM 和粉煤灰或腐殖酸的处理与单独施用 PAM 基本没有区别，原因是粉煤灰可以使土壤表层松散，却仍被 PAM 高分子长链所吸附，故侵蚀量没有增加。

2.3 土壤表面形态

未施用 PAM 的处理土壤表面平滑，没有土壤团粒。表面土壤原有的团聚体在雨水的冲击下破碎，导致土壤表面密实度增大并形成土壤板结，土壤板结层形成的特征是表面难见雨滴打击坑，土壤表面光滑。

施加 PAM 的土壤表面有明显的雨滴打击坑，这是因为 PAM 具有胶结作用，能够保持土壤结构的稳定性，水稳性团聚体的分形维数因 PAM 的作用而减少[25]，降低雨滴及径流对土壤颗粒的分离作用，因此，

能够提高土壤的抗侵蚀能力。表面大量的土壤团聚体没有被破坏[26]，在 PAM 胶结作用下土壤表面部分被结合在一起，导致土壤表面变得粗糙。同时，当土壤中加入保水剂，土壤团聚体含量显著增加，保水剂对土壤团聚结构的形成有促进作用，所以土壤团聚体的形成也是入渗率提高的原因之一。

3　结 论

（1）PAM 与土壤混合施用可明显增加降雨入渗，可提高稳定入渗率 1.8～2.7 倍。相比 PAM 单独施用，PAM 与粉煤灰混合施用和 PAM 与粉煤灰、腐殖酸混合施用可以进一步提高入渗率，分别提高稳定入渗率 1.3 倍和 1.4 倍。

（2）PAM 与土壤混合施用可明显减少土壤侵蚀，可减少土壤侵蚀量达到 50%～70%。相比 PAM 单独施用，PAM 与保水剂混合施用可以进一步减少土壤侵蚀，减少土壤侵蚀量达 37.1%。

综合比较得到，在 PAM 与保水剂、粉煤灰和腐殖酸混合施用方法中，PAM 与粉煤灰混合施用增加降雨入渗和减少径流的效果最好，PAM 与保水剂混合施用减少土壤侵蚀的效果最好。

[参 考 文 献]

[1] Duley F I. Surface factors affecting the rate of intake of water by soils[J]. Soil. Sci. Soc. Am. Proc.，1939，4：60-64.

[2] Helalia A M，Letey J，Graham R C. Crust formation and clay migration effects on infiltration rate[J]. Soil Sci. Soc. Am. J，1988，52：251-255.

[3] 唐泽军，雷廷武，张晴雯，等. 降雨及聚丙烯酰胺(PAM)作用下土壤的封闭过程和结皮的形成[J]. 生态学报，2002，22(5)：675-681.

[4] 蒋定生，王宁，王煜. 黄土高原水土流失与治理模式[M]. 北京：中国水利水电出版社，1998.

[5] 陈雷，陈雷副部长在全国第二次水土流失遥感调查成果新闻发布会上讲话[EB/OL]. [2012-04-27]. http：//www. hwcc. com. cn. 2002-1-21.

[6] Sirjacobs D，Shainberg I，Rapp I，Levy，G J. PAM，sediments，and interrupted flow effects on rill erosion and intake rate[J]. Soil Sci. Soc. Am. J，2000，64：1487-1495.

[7] Ben-hur M，Faris J，Letey J. Polymers as soil conditioners under consecutive irrigation and rainfall [J]. Soil Sci. Soc. Am.，1989，54(4)：1173-1177.

[8] Sojka R E，Lentz R D，Westermann D T. Water and erosion management with multiple applications of polyacrylamide in furrow irrigation[J]. Soil Sci. Soc. Am.，1998，62：1672-1680.

[9] 冯浩，吴普特，黄占斌. 聚丙烯酰胺(PAM)对黄土坡地降雨产流产沙过程的影响[J]. 农业工程学报，2001，17(5)：48-51.

[10] 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[J]. 土壤学报，2003，40(2)：178-185.

[11] 肇普兴，夏海江. 聚丙烯酰胺的保土、保水、保肥及改土增产作用[J]. 水土保持研究，1997，4(4)：98-104.

[12] 员学锋，吴普特，冯浩. 聚丙烯酰胺(PAM)的改土及增产效应[J]. 水土保持研究，2002，9(2)：55-58.

[13] 员学锋，吴普特，汪有科，等. 施加 PAM 条件土壤养分淋溶试验研究[J]. 水土保持通报，2003，23(2)：26-28.

[14] 曹丽花，刘合满，赵世伟. 土壤改良剂对黄绵土持水性能的改良效应研究[J]. 水土保持通报，2009，29(1)：133-141.

[15] 潘英华，雷廷武，张晴雯. 土壤结构改良剂对土壤水动力学参数的影响[J]. 农业工程学报，2003，19(4)：37-39.

[16] 张淑芬. 坡耕地施用聚丙烯酰胺防止水土流失试验研究[J]. 水土保持科技情报，2001(2)：8-19.

[17] 夏海江，杜尧东，孟维忠. 聚丙烯酰胺防治坡地土壤侵蚀的室内模拟试验[J]. 水土保持学报，2000，14(3)：14-17.

[18] 刘纪根，雷廷武，夏卫生，等. 施加 PAM 的坡地降雨入渗过程及其模型研究[J]. 水土保持学报，2001，15(3)：51-54.

[19] 于健，雷廷武，Shainberg I，等. 不同 PAM 施用方法对土壤入渗和侵蚀的影响[J]. 农业工程学报，2010，26(7)：38-44.

[20] Yu J，Lei T，Shainberg I，et al. Infiltration and erosion in soils treated with dry PAM and gypsum[J]. Soil Sci. Soc. Am. J.，2003，67：630-636.

[21] 张文启，马军，孟哲，等. 腐殖酸除锰及利用微滤膜分析有机锰质量分数[J]. 哈尔滨商业大学学报，2005，21(1)：27-29.

[22] 杜尧东，王丽娟，刘作新. 保水剂及其在节水农业上的应用[J]. 河南农业大学学报，2000，34(3)：255-259.

[23] 陈学仁. 保水剂在农村水利领域开发和应用的探索[J]. 中国农村水利水电，2000(6)：19-24.

[24] 褚达华，田大增，李谦. IAC—13 高吸水剂保水改土效应的研究[J]. 河北农业大学学报，1988，11(3)：1-6.

[25] 曹丽花，赵世伟，梁向锋，等. PAM 对黄土高原主要土壤类型水稳性团聚体的改良效果及机理研究[J]. 农业工程学报，2008，24(1)：45-49.

[26] Beh-hur M，Letey J. Effect of polysaccharides，clay dispersion，and impact energy on water infiltration [J]. Soil Sci. Soc. Am. J.，1989，53：233-238.