

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.020

# PAM 和 SAP 防治库区坡地肥料污染试验\*

廖人宽 杨培岭 任树梅 易杭 周博

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 选取北京市怀柔区水库附近一处坡地栗园作为试验地,用表土改良剂(聚丙烯酰胺,PAM)和土壤保水剂(SAP)进行坡地栗园的肥料污染防治,通过人工降雨试验方法对PAM的防污效应进行了研究,同时进行为期2年(2010~2011年)的野外监测试验,研究了技术应用以后坡面水土和养分流失,土壤剖面墒情和氮素运移等情况。结果表明:PAM减小坡面次降雨径流氮素平均质量浓度和污染物排放负荷的幅度分别为5%~8%和16%~22%,其中PM的处理减少坡面氮素流失方面效果最好;与未施加化学制剂的对照PS0相比,化学制剂联合处理组PS1、PS2分别提高根层土壤含水率10.4%、23.7%,提升根层氮素含量3.8%、22.3%,减少坡面径流含沙率30.7%、61.7%,减少坡面径流硝态氮流失14.7%、30.7%。

**关键词:** 农业面源污染 库区 表土改良剂 土壤保水剂

**中图分类号:** S157.2; X592 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)07-0113-08

## PAM and SAP Application for Reservoir Area Slope Manure Pollution Control

Liao Renkuan Yang Peiling Ren Shumei Yi Hang Zhou Bo

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Taking hillside orchards in Huairou district as the experimental plot, PAM and SAP were selected to apply for controlling manure pollution in this orchard. The antifouling effect of PAM on sloping field was tested by artificial rainfall experiment, and the outdoor monitoring experiment was carried out from 2010 to 2011. After applying the proposed technology, soil erosion and nutrient runoff in soil slope, also the soil water content and nutrient migration in soil profile were discussed. The results showed that PAM could reduce event mean concentration and pollution emission load of individual rainfall by 5% ~ 8% and 16% ~ 22%, respectively. PM treatment is the best in this experiment. Compared with control treatment PS0, chemical antifouling treatments PS1 and PS2 could promote the water content of soil root layer by 10.4% and 23.7%, increase nutrient content by 3.8% and 22.3%, reduce sediment in slope runoff by 30.7% and 61.7%, and reduce nitrate nitrogen content in slope runoff by 14.7% and 30.7%, respectively.

**Key words:** Agricultural area-source pollution Reservoir area Surface soil ameliorants Soil moisture maintainer

### 引言

北京市水源保护地周边山区,土壤侵蚀型肥料面源污染对水库水环境质量造成了一定的影响。而且,由于土壤侵蚀发生在陆地表面透水性的地表,其

发生发展过程不但比城市径流更为复杂,同时也严重威胁地表生态系统的生态安全<sup>[1]</sup>。近20年来,日趋严重的农业面源污染现状已成为全球关注的焦点<sup>[2-9]</sup>。国内外农业面源污染防治的普遍做法主要是采用防污缓冲带、人工湿地等工程措施,需要进行

收稿日期:2012-11-15 修回日期:2013-01-20

\*北京市科学技术计划资助项目(pxm2009\_035324\_092070)

作者简介:廖人宽,博士生,主要从事化学节水、防污技术研究,E-mail: nanming163@163.com

通讯作者:杨培岭,教授,博士生导师,主要从事农业高效用水技术研究,E-mail: yangpeiling@126.com

一定规模的工程建设,但北京市山区地形条件复杂,工程建设面临很大难度。应用高分子化学制剂进行污染防治的技术,无需进行大规模的工程投入,预处理后将化学制剂(保水剂、表土改良剂等化学制剂)直接施用于土壤或作物上即可实现其作用效果<sup>[10-12]</sup>。

表土结构改良剂(聚丙烯酰胺,PAM)分子长链上的酰胺基可与许多物质亲和、吸附形成氢键,因此具有很强的黏聚性。PAM被广泛应用于改良土壤结构,防止表土结皮,保持水土等方面<sup>[13-14]</sup>。土壤保水剂(SAP)是一种人工合成的具有很强的吸水能力的高分子树脂,能够吸收比自身重10~1000倍的水分<sup>[15]</sup>。研究表明,适量的保水剂施入土壤中后,能够减少水分和养分的深层淋溶<sup>[16-17]</sup>。目前将化学制剂应用于肥料污染防治的研究偏重于化学制剂的单独应用以及人工降雨条件下的研究<sup>[18-19]</sup>,联合应用的试验研究较少,特别是联合应用于自然降雨条件下坡地果园水土侵蚀型肥料污染的防治还未见报道。

本文采用人工降雨试验对次降雨条件下的

PAM坡面防污效果进行探索,并针对北京市怀柔雨养农业坡地果园肥料污染特点,提出化学制剂联合防污技术,采用野外监测试验,选用2种典型的化学制剂——表土结构改良剂(PAM)和土壤保水剂(SAP)进行联合应用,通过控制、减少水土流失及水肥深层渗漏,以期达到直接减轻农业面源污染程度的目的。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

人工降雨坡地试验在密云石匣小流域水土侵蚀监测站的标准径流场(长10 m、宽5 m)中进行,种植作物为玉米(抽雄期),坡度为5°,自然降雨坡地试验地址选择在怀柔区杨家庄村坡地板栗种植园开展,供试果树为6~8年生板栗,胸径15~20 cm,该区域全年平均气温为6~10℃,多年平均降水量为645 mm,多集中于6、7、8月份,占全年降水量的70%。果园土壤剖面颗粒组成和物理化学性质见表1。2010~2011年试验地降水情况见图1。

表1 土壤剖面颗粒组成和物理化学性质

Tab.1 Textural composition, physical and chemical properties of soil profile

试验类型	土壤深度 /cm	颗粒质量分数/%			田间持水率 /%	容重 /g·cm <sup>-3</sup>	总氮质量 分数/%
		砂粒(粒径 0.05~2 mm)	粉粒(粒径 0.002~0.05 mm)	粘粒(粒径 0~0.002 mm)			
		人工降雨	0~15	64.4			
	15~40	76.4	21.6	2.0	13.4	1.43	0.13
自然降雨	0~20	44.4	43.6	12.0	17.7	1.18	0.19
	20~40	38.4	43.6	18.0	16.7	1.22	0.16
	40~60	30.4	41.6	28.0	17.7	1.56	0.11

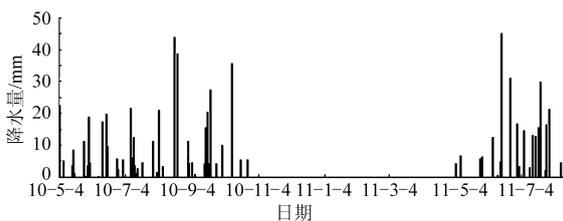


图1 2010~2011年试验小区降水情况

Fig.1 Rainfall in experimental plot from 2010 to 2011

### 1.2 选用的化学制剂及施用方法

供试SAP选用山东省东营华业新材料有限公司生产的农林保水剂,为聚丙烯酰胺-丙烯酸交联共聚物掺入凹凸棒粘土的有机-无机复合型土壤保水剂,淡黄色颗粒,粒径为2.0~4.0 mm;供试PAM选用山东省东营华业新材料有限公司生产的农用表土结构改良剂PAM,为聚丙烯酰胺类表土改良剂,白色颗粒,粒径为0.5~1.0 mm。

人工降雨试验开始前将PAM与干土混合拌匀后(PAM与干土质量比例为1:200)在坡面进行撒

施;自然降雨试验于2010年5月18日在板栗树树冠投影的1/3~2/3处沟施施入SAP,施入沟尺寸为40 cm×20 cm×40 cm;2010年6月7日将PAM与干土混合拌匀后(PAM与干土质量比例为1:200)在试验小区坡面进行撒施,2011年6月10日进行一次补施,2次施用方式和施用量均相同。

### 1.3 试验区布置及试验方法

人工降雨试验:降雨器由6组亨特PS系列规格12A喷头组合而成,每组2个喷头,喷洒半径4.5~5.0 m,小区布置见图2,选择无风天进行降雨试验;设置2种降雨强度,分别为40 mm/h(每组开启1个喷头,降雨均匀度为0.83,实测降雨强度为37.2 mm/h)、80 mm/h(每组开启2个喷头,降雨均匀度为0.81,实测降雨强度为75.9 mm/h);设置4个PAM处理小区,分别为PN(施用量为0 g/m<sup>2</sup>),PL(施用量为0.25 g/m<sup>2</sup>),PM(施用量为0.5 g/m<sup>2</sup>),PH(施用量为1.0 g/m<sup>2</sup>),每个处理设置2个重复,试

验开始前施入尿素 75 kg/hm<sup>2</sup>。降雨试验开始后,记录开始产流时间,产流后 6 min 第 1 次取样,然后每隔 6 min 取 1 次样,产流后再持续降雨 42 min,此时各试验区域流量基本稳定,试验结束后测试径流收集液体积和氮素质量浓度。

自然降雨试验:试验开始前对自然坡地进行人工平整,整理成 4.5°~6°的坡面地形,小区规格为 5 m×10 m,小区之间用土垄进行分割,防止降雨径流相互混淆,在坡面下方设置降雨径流液收集池。试验设置 3 个处理小区,分别为 PS0(PAM 施用量为 0 g/m<sup>2</sup>,SAP 施用量为 0 g/m<sup>2</sup>),PS1(PAM 施用量为 0.25 g/m<sup>2</sup>,SAP 施用量为 15.0 g/m<sup>2</sup>),PS2(PAM 施用量为 0.5 g/m<sup>2</sup>,SAP 施用量为 15.0 g/m<sup>2</sup>),每个处理设置 2 个重复。该地区离水库较近,只施有机肥(N 质量分数为 2.31%,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>质量分数为 2.81%,K<sub>2</sub>O 质量分数为 2.24%)作为底肥,施用量为 37 500 kg/hm<sup>2</sup>,生育期内不进行追肥和灌水处理。自然降雨后,从径流液收集池取样检测养分坡面流失和水土侵蚀情况;同时,对小区根系层(20~40 cm)土壤进行取样分析,检测含水率和氮素的含量。试验监测时间为 2010 年 6 月~12 月和 2011 年 6 月~10 月。

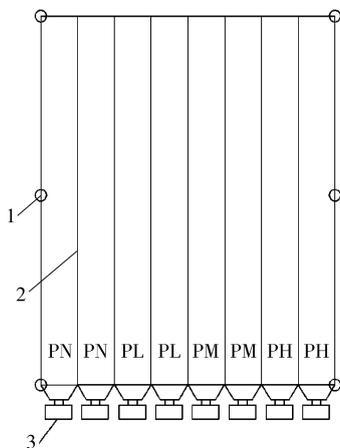


图 2 人工降雨小区布置图

Fig. 2 Experimental plot arrangement for artificial rainfall

1. 喷头 2. 挡水隔板 3. 径流收集桶

#### 1.4 测试方法

土壤含水率和径流含沙率(质量浓度)采用称量法测试;土壤及径流收集液中硝态氮含量采用紫外分光光度计进行测试;土壤总氮含量采用半微量凯式法进行测试。

#### 1.5 数据分析

##### (1) 次降雨径流平均质量浓度

采用次降雨径流平均质量浓度评价降雨径流污染状况,计算公式为

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{(Q_i C_i + Q_{i+1} C_{i+1}) \Delta t}{2}}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{(Q_i + Q_{i+1}) \Delta t}{2}} \quad (1)$$

式中  $E$ ——某次降雨径流中污染物的平均质量浓度,mg/L

$\Delta t$ ——样本  $i$  和样本  $i+1$  之间的取样时间间隔,min

$Q_i$ ——样本  $i$  在  $t$  时刻的流量,L/min

$C_i$ ——样本  $i$  在  $t$  时刻径流中污染物的质量浓度,mg/L

##### (2) 次降雨污染物排放负荷

采用次降雨污染物排放负荷评价单位坡面上的污染物排放强度,计算公式为

$$P = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{C_i + C_{i+1}}{2} \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \Delta t}{1\,000ab} \quad (2)$$

式中  $P$ ——某次降雨下污染物的排放负荷,mg/m<sup>2</sup>

$a$ 、 $b$ ——降雨区域的长和宽,m

##### (3) 其他分析

采用 One-Way ANOVA (SPSS 15.0) 进行方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 人工降雨条件下坡面产流特征

图 3a、3b 分别为在 80 mm/h 和 40 mm/h 降雨强度下的坡面径流量随降雨历时的变化情况。从图中可以看出,降雨强度依然是影响产流的主要因素,80 mm/h 降雨强度下各小区产流时间明显早于 40 mm/h 降雨强度。PAM 在降低坡面产流方面有一定的作用,但在降雨产流初期作用效果不明显,产流 20~30 min 时间内,与未施加 PAM 的对照小区相比,80 mm/h 和 40 mm/h 降雨强度下处理小区减小产流的平均幅度分别为 8.4% 和 13.5%;在产流 20~30 min 以后,PAM 颗粒逐渐溶解进入土壤,其在减少坡面径流方面的效果明显增强,与未施加 PAM 的对照小区相比,80 mm/h 和 40 mm/h 降雨强度下处理小区减小产流的平均幅度分别为 15.9% 和 18.8%。

### 2.2 人工降雨条件下坡面氮素流失特征

图 4a、4b 分别为在 80 mm/h 和 40 mm/h 降雨强度下的坡面可溶态总氮和硝态氮随降雨历时的变化情况,图中图例“80”、“40”分别表示降雨强度 80 mm/h 和 40 mm/h。随着降雨历时的增加,径流液氮素质量浓度逐渐下降。从对氮素次降雨径流平均质量浓度和次降雨排放负荷的分析来看(见

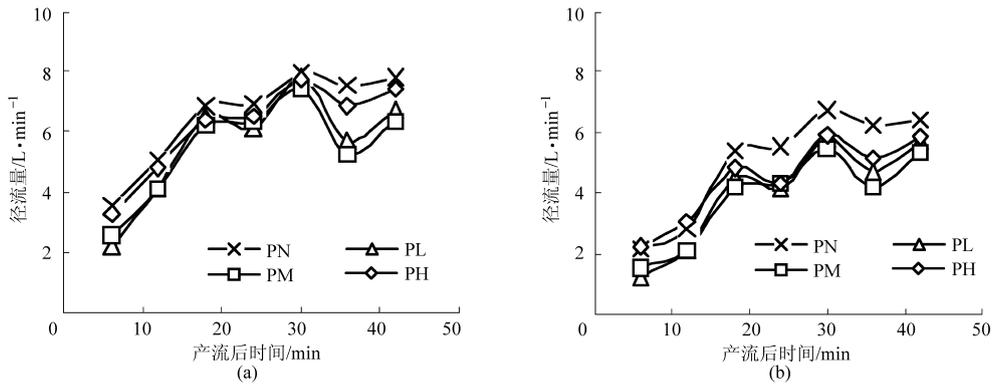


图3 不同降雨强度下坡地径流量

Fig. 3 Slope runoff in different rainfall intensities

(a) 80 mm/h (b) 40 mm/h

表2), 80 mm/h 的次降雨强度下总氮和硝态氮径流平均质量浓度从大到小依次为: PN、PH、PL、PM; 40 mm/h 的次降雨强度下总氮径流平均质量浓度从大到小依次为: PN、PL、PH、PM, 硝态氮次降雨强度下径流平均质量浓度从大到小依次为: PN、PH、PL、PM, 说明 PAM 的处理能够减少氮素流失的径流平均质量浓度, 与对照组小区相比, 80 mm/h 降雨强度下可溶态总氮和硝态氮平均减少幅度分别为 8%、6%, 40 mm/h 降雨强度下可溶态总氮和硝态氮平均减少幅度分别为 6%、5%; 与对照小区相比, 处理小区可溶态总氮和硝态氮次降雨排放负荷值也呈现减

小的趋势, 80 mm/h 降雨强度下平均减少幅度为 18%、16%, 40 mm/h 降雨强度下平均减少幅度为 22%、21%; 在所有处理小区中, PM 处理无论是次降雨径流平均质量浓度还是次降雨排放负荷均为最小, 说明 PM 小区的 PAM 施用量处理在减少坡面氮素流失方面效果最好。

2.3 自然降雨坡面水土流失特征

在试验监测期内, 于 2010 年间共采集了 5 次降雨径流情况, 2011 年间共采集了 4 次降雨径流情况, 对总共 9 次降雨后收集到的径流液样品进行了化验分析, 图 5 为不同监测日各小区的径流液含沙

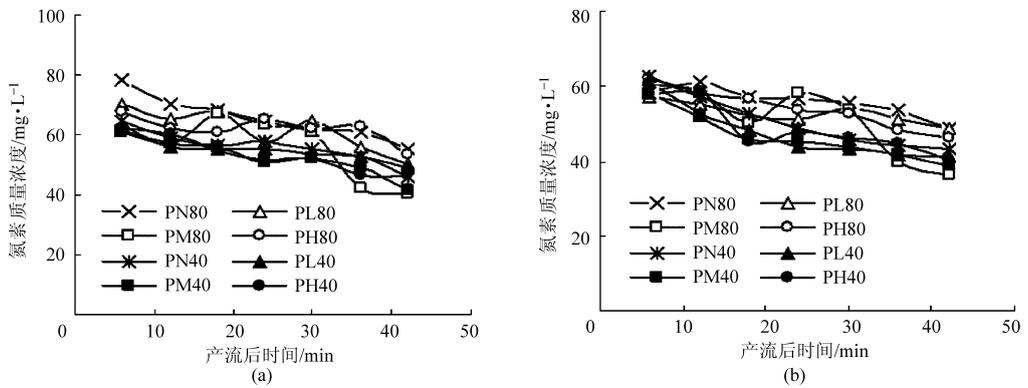


图4 不同降雨强度下坡地径流溶解态氮素流失

Fig. 4 Mass concentration of dissolved nitrogen in different rainfall intensities

(a) 总氮 (b) 硝态氮

表2 不同降雨强度下坡地溶解态氮素平均质量浓度和流失负荷

Tab. 2 Event mean concentration and pollutant emission load of dissolved nitrogen runoff in different rainfall intensities

参数	降雨强度/mm·h <sup>-1</sup>							
	80				40			
	PN	PL	PM	PH	PN	PL	PM	PH
开始产流时间/min	6.800	7.200	7.100	7.100	8.800	9.100	9.300	9.200
总氮径流平均质量浓度/mg·L <sup>-1</sup>	64.847	61.561	57.399	62.231	55.274	54.211	51.925	52.509
总氮污染排放负荷/mg·m <sup>-2</sup>	2.541	2.079	1.883	2.307	1.677	1.307	1.204	1.401
硝态氮径流平均质量浓度/mg·L <sup>-1</sup>	55.824	52.631	51.072	53.575	49.010	45.454	44.964	47.924
硝态氮污染排放负荷/mg·m <sup>-2</sup>	2.193	1.784	1.682	1.981	1.485	1.094	1.043	1.283

率情况。与对照小区 PS0 相比,处理小区 PS1、PS2 的径流含沙率平均减少 30.7%、61.7%。从统计分析结果来看,在 2010 年 7 月 19 日,2010 年 8 月 22 日,2010 年 9 月 27 日,2011 年 6 月 15 日,2011 年 7 月 2 日,2011 年 8 月 12 日,处理组小区的径流含沙率显著低于( $p < 0.05$ )对照组。这说明化学制剂的施

入,能够增强土壤对表面土粒的固持,对降雨的冲刷侵蚀起到明显的抵御作用。在 2011 年 6 月 15 日,降水量为 9 个监测日内的最大值 45 mm,PS2 处理小区和未施加化学制剂的 PS0 相比达到了极显著差异( $p < 0.01$ ),这说明其在抵御较大强度降雨上的作用更加明显。

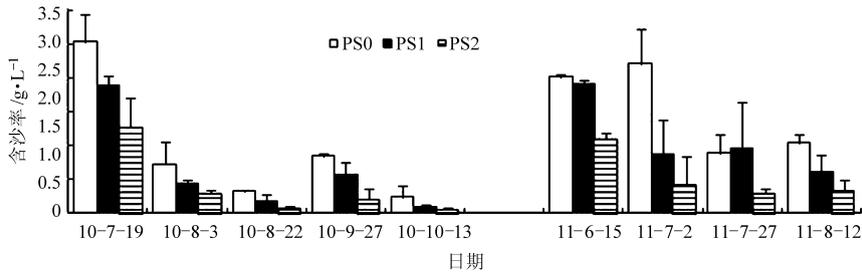


图 5 不同时间各小区降雨径流含沙率

Fig.5 Runoff sediment at different time

### 2.4 自然降雨坡面氮素流失特征

图 6、7 分别为不同时间坡面径流收集液中溶解态总氮和硝态氮质量浓度。结果表明,化学防污技术能在一定程度上减小降雨径流液中的总氮和硝态氮含量,与未施加化学制剂的 PS0 小区相比,PS1 小区总氮和硝态氮质量浓度平均减小幅度为 14.2% 和 14.7%,PS2 小区总氮和硝态氮质量浓度平均减小幅度为 24.4% 和 30.7%,这说明化学制剂施入后

不仅减少了径流液中的泥沙含量,同时还能够减少径流中的氮素流失。从统计分析结果来看,总氮质量浓度在 2010 年 9 月 27 日的检测结果中表现为显著差异( $p < 0.05$ ),硝态氮质量浓度在 2010 年 7 月 19 日,2011 年 6 月 15 日为显著性差异( $p < 0.05$ ),其他监测时间点未发现显著性差异,且各个监测日内均未发现极显著性差异。

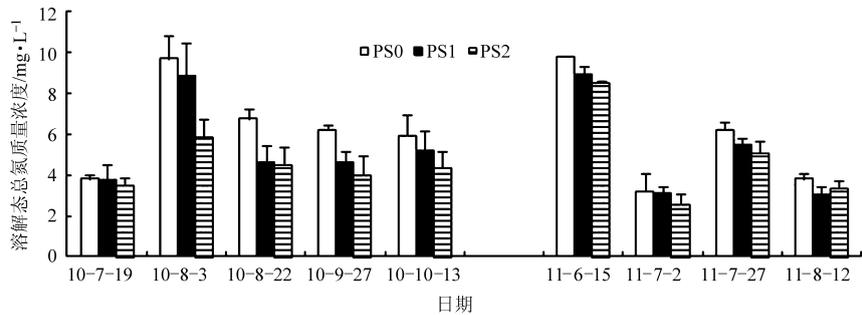


图 6 不同时间各小区降雨径流溶解态总氮质量浓度

Fig.6 Mass concentration of dissolved total nitrogen at different time

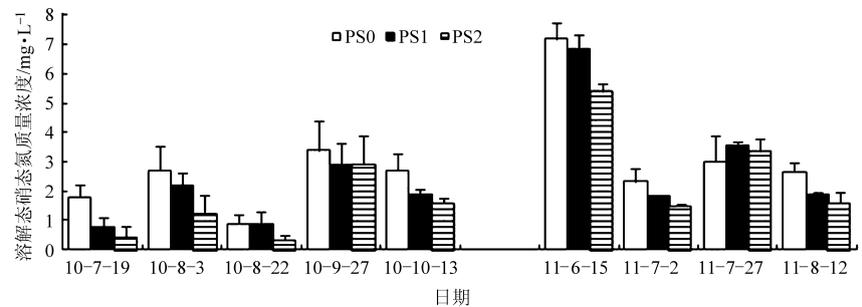


图 7 不同时间各小区降雨径流溶解态硝态氮质量浓度

Fig.7 Mass concentration of dissolved nitrate nitrogen at different time

### 2.5 自然降雨土壤剖面墒情分布

图 8 为各小区不同时间根层土壤含水率。结果表明,处理组小区 PS1 和 PS2 的土壤含水率普遍高

于对照组小区 PS0,平均提升幅度为 10.4% 和 23.7%。在 2010 年 7 月 19 日,2010 年 9 月 27 日,2011 年 6 月 15 日,2011 年 7 月 2 日表现为显著性

( $p < 0.05$ ) 差异。这是由于 SAP 被施入 0 ~ 40 cm 土层中, 该土层因为 SAP 的存在, 使土壤处于恒湿状态, 并且当 SAP 里面蓄持的水分被作物吸收

利用后, SAP 的反复吸水功能还能使其从降雨中吸持水分, 从而使该层土壤一直处于较高的土壤含水率。

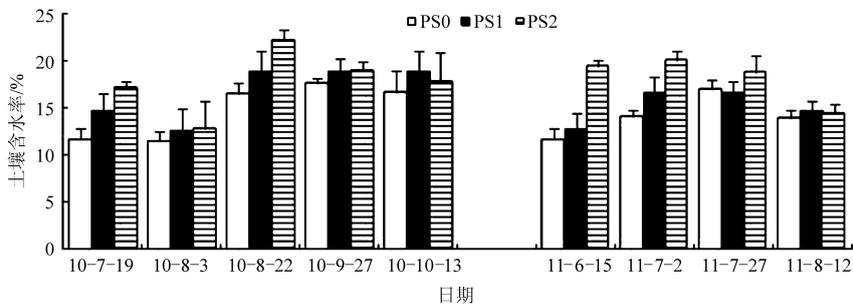


图8 不同时间各小区根层土壤含水率

Fig. 8 Soil moisture content in root layer at different time

## 2.6 自然降雨根层土壤氮素含量

图9为根层土壤总氮质量浓度和硝态氮质量比。从总氮质量浓度看, 处理小区和对照组差异不大, 整体趋势为总氮质量浓度逐渐降低。就硝态氮而言, 与 PS0 小区相比, PS1 和 PS2 小区硝态氮质量

比均有不同程度的提高, 平均提升幅度分别为 3.8% 和 22.3%, 2010 年 8 月 3 日, 2011 年 6 月 15 日为显著性差异 ( $p < 0.05$ )。这表明, 化学制剂的联合施入能够在一定程度上减少硝态氮的淋溶渗漏量, 从而提升根区的养分含量。

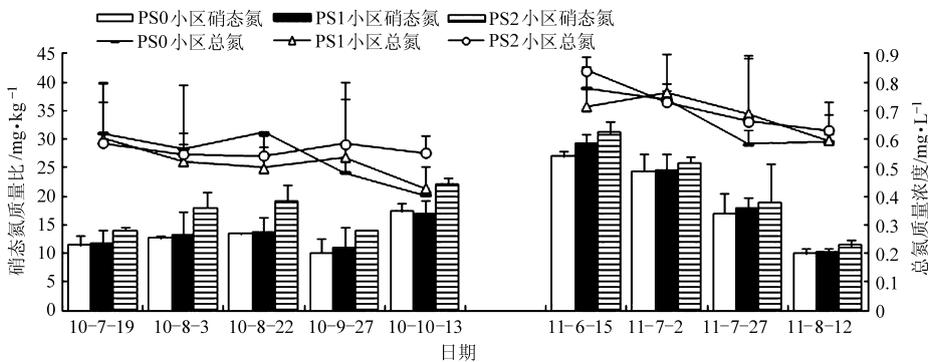


图9 不同时间根层土壤总氮质量浓度和硝态氮质量比

Fig. 9 Mass concentration of total nitrogen and nitrate nitrogen in root layer at different time

## 3 讨论

SAP 和 PAM 的施入能够有效降低坡面土壤流失, 提升土壤根层的含水率和养分水平, 减少硝态氮的深层渗漏。本试验选取的表土结构改良剂 PAM 和土壤保水剂 SAP 分别发挥了不同的作用功效。就 PAM 而言, 表施 PAM 以后减轻了土壤结皮程度, 减少了坡面径流及径流携带的表层土壤, PAM 分子随水溶解后进入到土壤中, 增强了水稳性团聚体的凝聚和悬浮能力, 原本松散的表土颗粒与 PAM 分子结合形成更多的稳定性团聚体<sup>[20]</sup>, 改变了表层土壤的孔隙状况, 形成了更多的连通孔隙, 使水分能够较多地进入土壤中, 使这一层位土壤的含水率上升。Green V S 等<sup>[21]</sup> 和 Ajwa H A 等<sup>[22]</sup> 的研究也通过室内试验证明了 PAM 的施入能够形成更多的稳定性团聚体从而增强水分入渗能力。在进行农业应用时, PAM 的施用量也是一个值得考虑的重要因素。

当 PAM 施用量较大时, PAM 分子与土壤颗粒强烈作用, 会堵塞土壤孔隙, 减少水分的入渗。所以, 应针对不同的防控目标, 确定经济合理的 PAM 施用量。小剂量的 PAM 施用主要用于抑制土表结皮和提高土壤入渗率, 大剂量的 PAM 用量主要应用于北方风蚀区的土壤改良<sup>[23-24]</sup>。将 PAM 和石膏、秸秆等混合施用, 在提升 PAM 作用性能上也有一定的帮助<sup>[25]</sup>。

就 SAP 而言, 施入到作物根层以后, 一方面能够对进入到土壤根层中的水分和肥料进行反复吸持, 增大了根层土壤水肥相对含量, 降低了水肥的深层渗漏量; 另一方面, SAP 的施入使土体膨胀, 降低了土壤容重<sup>[26]</sup>, 增加了土壤中的空气含量, 改变了土壤有机质的分解矿化速度, 有利于土壤中好氧型微生物的生长<sup>[27]</sup>, 同时根区富集的养分能够供给微生物生长所需足够的资源, 从而提高了土壤硝化作用, 提高了氮素的利用效率。黄震等<sup>[28]</sup> 的淋溶试

验也表明保水剂对土壤水分、尿素和硝酸铵都有保持作用。

## 4 结论

(1)与对照小区相比,处理小区可溶态氮素次降雨径流平均质量浓度减少幅度为 5%~8%,次降雨污染物排放负荷值减少幅度为 16%~22%。在所有处理中,PM 处理在减少坡面氮素流失方面效果最好。

(2)PAM 和 SAP 联合施用以后,坡面水土流失

和硝态氮流失显著减小,与未施加化学制剂的对照小区 PS0 相比,处理小区 PS1、PS2 的径流含沙率平均减小 30.7%、61.7%,硝态氮平均减小 14.7%、30.7%,同时提升了根层土壤含水率和养分含量,处理小区 PS1、PS2 的土壤含水率平均增长 10.4%、23.7%,硝态氮含量平均增长 3.8%、22.3%。

(3)处理小区 PS1 和 PS2 与对照小区 PS0 相比,均体现出了较好的维持土壤墒情、减少肥料污染的效果,但 PS2 处理的效果更加突出,在较大降雨发生时,作用明显。

## 参 考 文 献

- 1 张玉斌,郑粉莉,武敏,等. 土壤侵蚀引起的农业非点源污染研究进展[J]. 水科学进展, 2007, 18(1): 123~132.  
Zhang Yubin, Zheng Fenli, Wu Min, et al. Research progresses in agricultural non-point source pollution caused by soil erosion [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(1): 123~132. (in Chinese)
- 2 吴磊,龙天渝,王玉霞,等. 基于分布式水文模型的嘉陵江流域氮磷非点源污染负荷预测[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 55~60.  
Wu Lei, Long Tianyu, Wang Yuxia, et al. Prediction of non-point source nitrogen and phosphorus pollution load in Jialing River watershed based on distributed hydrological model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(3): 55~60. (in Chinese)
- 3 刘亚琼,杨玉林,李法虎. 基于输出系数模型的北京地区农业面源污染负荷估算[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 7~12.  
Liu Yaqiong, Yang Yulin, Li Fahu. Estimation of pollution loads from agricultural nonpoint sources in Beijing region based on export coefficient modeling approach [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(7): 7~12. (in Chinese)
- 4 Holvoet K, van Griensven A, Seuntjens P, et al. Sensitivity analysis for hydrology and pesticide supply towards the river in SWAT [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2005, 30(8): 518~526.
- 5 刘博,徐宗学. 基于 SWAT 模型的北京沙河水库流域非点源污染模拟[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 52~61.  
Liu Bo, Xu Zongxue. Simulation of non-point source pollution the Shahe Reservoir catchment in Beijing by using SWAT model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(5): 52~61. (in Chinese)
- 6 王兵,刘国彬,张光辉,等. 黄土丘陵区中尺度流域水土流失治理环境效应评估[J]. 农业机械学报, 2012, 43(7): 28~35.  
Wang Bing, Liu Guobin, Zhang Guanghui, et al. Ecological and environmental assessment on the effects of water and soil loss comprehensive harness in meso-scale watershed in loess hilly region [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 28~35. (in Chinese)
- 7 吴永红,胡正义,杨林章. 农业面源污染控制工程的“减源-拦截-修复”(3R)理论与实践[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 1~6.  
Wu Yonghong, Hu Zhengyi, Yang Linzhang. Strategies for controlling agricultural non-point source pollution: reduce-retain-restoration (3R) theory and its practice [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(5): 1~6. (in Chinese)
- 8 Watanabe H, Grismer M E. Diapion transport through inter-row vegetative filter strips: micro-ecosystem modeling[J]. Journal of Hydrology, 2001, 247(3): 183~199.
- 9 Mander U, Ain K, Valdo K, et al. Nutrient runoff dynamics in a rural catchment: influence of land-use changes, climate fluctuations and ecotechnological measures[J]. Ecological Engineering, 2000, 14(4): 405~417.
- 10 Liao Renkuan, Yang Peiling, Ren Shumei, et al. Effects of typical chemical agents on preventing pollution and controlling drought in a cherry orchard[J]. Advanced Materials Research, 2012, 550~553: 1340~1344.
- 11 张富仓,李继成,雷艳,等. 保水剂对土壤保水持肥特性的影响研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(1): 120~128.  
Zhang Fucang, Li Jicheng, Lei Yan, et al. Effects of super absorbent polymer on retention properties of soil water and nutrient [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(1): 120~128. (in Chinese)
- 12 杨永辉,吴普特,武继承,等. 复水前后冬小麦光合生理特征对保水剂用量的响应[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 116~123.  
Yang Yonghui, Wu Pute, Wu Jicheng, et al. Response of photosynthetic parameters of winter wheat before and after re-watering to different rates of water-retaining agent [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 116~123. (in Chinese)

- 13 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.  
Yu Jian, Lei Tingwu, Shainberg I, et al. Effects of different application methods of polyacrylamide(PAM) on soil infiltration and erosion [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(7): 38~44. (in Chinese)
- 14 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.  
Cao Lihua, Zhao Shiwei, Liang Xiangfeng, et al. Improvement effects of PAM on soil water-stable aggregates and its mechanisms in different soils in the Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(1): 45~49. (in Chinese)
- 15 Li Yunkai, Xu Tingwu, Ouyang Zhiyun, et al. Micromorphology of macromolecular superabsorbent polymer and its fractal characteristics [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 113(6): 3510~3519.
- 16 姚建武, 王艳红, 唐明灯, 等. 施用保水剂对旱地赤红壤持水能力及氮肥淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 191~194.  
Yao Jianwu, Wang Yanhong, Tang Mingdeng, et al. Effects of water retaining agents on water holding capacity and nitrogen leaching loss in latosol red soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5): 191~194. (in Chinese)
- 17 廖人宽, 杨培岭, 任树梅. 高吸水树脂保水剂提高肥效及减少农业面源污染[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 1~10.  
Liao Renkuan, Yang Peiling, Ren Shumei. Review on super absorbent polymer application for improving fertilizer efficiency and controlling agricultural non-point source pollutions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(17): 1~10. (in Chinese)
- 18 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): 674~681.  
Tang Zejun, Lei Tingwu, Zhang Qingwen, et al. Sealing process and crust formation at soil surface under the impacts of raindrops and polyacrylamide [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(5): 674~681. (in Chinese)
- 19 陈晓燕, 周继, 魏朝富, 等. 人工模拟降雨条件下 PAM 对紫色土养分流失的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(4): 548~560.  
Chen Xiaoyan, Zhou Ji, Wei Chaofu, et al. Influence of polyacrylamide on loss of purple soil nutrient during simulated rainfall [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(4): 548~560. (in Chinese)
- 20 唐泽军, 左海萍, 于健, 等. ESP 值和黏粒含量对土壤表面封闭作用的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 51~55.  
Tang Zejun, Zuo Haiping, Yu Jian, et al. Effects of exchangeable sodium percentage and clay content on seal formation on soil surface [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(5): 51~55. (in Chinese)
- 21 Green V S, Stott D E, Gravel J G, et al. Stability analysis of soil aggregates treated with anionic polyacrylamides of different molecular formulations [J]. Soil Science, 2004, 169(8): 573~581.
- 22 Ajwa H A, Trout T J. Polyacrylamide and water quality effects on infiltration in sandy loam soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(2): 643~650.
- 23 陈渠昌, 雷廷武, 唐泽军, 等. 施用 PAM 防治松散土风蚀的机理及其抵御风沙流能力研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 1~6. (in Chinese)  
Chen Quchang, Lei Tingwu, Tang Zejun, et al. Study on mechanism by use of PAM to keep from wind erosion of loosening soil and its capability to withstand wind flow with sand [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(4): 1~6. (in Chinese)
- 24 陈渠昌, 江培福, 雷廷武, 等. 利用 PAM 防治松散扰动沙土风蚀效果的风洞试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 7~11.  
Chen Quchang, Jiang Peifu, Lei Tingwu, et al. Wind tunnel experiment on the impacts of polyacrylamide on wind erosion of loosen soil materials [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(10): 7~11. (in Chinese)
- 25 Yu Jian, Lei Tingwu, Shainberg I, et al. Infiltration and erosion in soil treated with dry PAM and gypsum [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(2): 630~636.
- 26 Han Yuguo, Yang Peiling, Luo Yuanpei, et al. Porosity change model for watered super absorbent polymer-treated soil [J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 61(6): 1197~1205.
- 27 Sojka R E, Entry J A, Fuhrman J J. The influence of high application rates of polyacrylamide on microbial metabolic potential in an agricultural soil [J]. Applied Soil Ecology, 2006, 32(2): 243~252.
- 28 黄震, 黄占斌, 李文颖, 等. 不同保水剂对土壤水分和氮素保持的比较研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 245~249.  
Huang Zhen, Huang Zhanbin, Li Wenying, et al. Effect of different super absorbent polymers on soil moisture and soil nitrogen holding capacity [J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2010, 18(2): 245~249. (in Chinese)