

# 聚丙烯酰胺对紫色土坡地耕作位移及土壤结构的影响

王勇<sup>1</sup>, 李富程<sup>2</sup>, 汪璇<sup>1</sup>, 刘静<sup>1</sup>, 杨威<sup>1</sup>, 王刚<sup>1</sup>

(1. 四川农业大学水利水电学院, 四川 雅安 625014; 2. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010)

**摘要:** 为了采用化学措施防治坡地耕作侵蚀, 以紫色土典型坡耕地为研究对象, 采用磁性示踪和模拟耕作等技术研究了聚丙烯酰胺(PAM)后不同坡度(5°, 10°, 15°, 20°, 25°)坡地耕作位移和土壤团聚体结构稳定性的影响。结果表明: (1) 添加 PAM 后不同坡度坡地耕作位移均明显低于对照(未添加 PAM), 其中在 20° 和 25° 坡面显著减少了 49.16% 和 67.96%; (2) 与对照相比, 土壤中添加 PAM 后 < 0.25 mm 非水稳定性团聚体含量在 5°, 10°, 15°, 20°, 25° 坡度分别减少了 33.74%, 46.67%, 37.56%, 52.70%, 62.50%, 不同坡度土壤团聚体结构破坏率(PAD)平均降低了 60.05%, 而平均质量直径(MWD)和平均几何直径(GMD)值分别增加了 41.94% 和 55.09%; (3) 耕作位移量与 PAD 值呈显著的正线性相关性, 而与 MWD 和 GMD 值呈负线性相关性( $P < 0.05$ )。坡地土壤添加 PAM 后可以有效降低耕作位移量, 增强土壤结构稳定性, 减少耕作侵蚀。在农业生产中 PAM 可用于控制较陡( $\geq 20^\circ$ )坡地的耕作侵蚀。

**关键词:** 聚丙烯酰胺(PAM); 耕作位移; 团聚体结构破坏率(PAD); 平均质量直径(MWD)

**中图分类号:** S157.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2017)04-0051-06

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbxb.2017.04.009

## Impacts of Polyacrylamide (PAM) on Tillage Translocation and Soil Structural Stability on Purple Soil Slope

WANG Yong<sup>1</sup>, LI Fucheng<sup>2</sup>, WANG Xuan<sup>1</sup>, LIU Jing<sup>1</sup>, YANG Wei<sup>1</sup>, WANG Gang<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014;

2. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010)

**Abstract:** In order to reveal the effect of chemical measures on prevent tillage erosion of sloping fields in purple soil, the impacts of polyacrylamide (PAM) on soil structural stability and tillage translocation were studied in the plots with five slope degrees as 5°, 10°, 15°, 20° and 25° using magnetic tracer and stimulated tillage experiments. The results indicated that: (1) Mean translocation distances of plots added PAM were significantly lower than that of CK (without PAM application), and the tillage translocation significantly decreased by 49.16% and 67.96% on 20° and 25° slope plots, respectively; (2) Compared with CK, the content of non water stable aggregate that less than 0.25 mm declined by 33.74%, 46.67%, 37.56%, 52.70%, and 62.50% on the 5°, 10°, 15°, 20°, and 25° slope plots added PAM, respectively. In the plots added PAM, the percentage of mean aggregate destruction (PAD) decreased by 60.05%, while mean weight diameter (MWD) and mean geometric diameter (MGD) increased by 41.94% and 55.09%, respectively, compared with CK; (3) Tillage translocation was positively linear correlated with PAD, while was negatively correlated with MWD and MGD ( $P < 0.05$ ). These results suggested that the application of PAM could effectively reduce tillage translocation, enhance soil structure stability, and reduce soil erosion. PAM can be used to control tillage erosion on the steep slope (over 20°).

**Keywords:** polyacrylamide (PAM); tillage translocation; the percentage of mean aggregate destruction (PAD); mean weight diameter(MWD)

我国作为粮食生产大国,耕作是涉及粮食种植区域最广的人类活动。由耕作引起的土壤侵蚀,即耕作侵蚀不容忽视,尤其在坡耕地上,强烈耕作侵蚀已引起土壤质量退化、作物减产、生产力降低和加速水力

侵蚀等一系列严重的后果<sup>[1-6]</sup>。研究表明,长期农业耕种导致我国紫色土区坡地耕作侵蚀速率达到 48~151 t/(hm<sup>2</sup>·a)<sup>[7]</sup>,极大地超过了紫色土的容许流失量 8~12 t/(hm<sup>2</sup>·a)<sup>[8]</sup>。Zhang 等<sup>[7]</sup>调查发现,耕作

侵蚀造成坡面顶部作物产量仅仅是坡底的 50%，甚至更少。我国耕地紧缺和人口众多的矛盾更凸显了加强耕作侵蚀研究和有效防治坡地土壤流失的重要性和紧迫性。目前防治坡地土壤流失主要采用传统的植物措施、工程措施、农业措施等，然而采用新技术防治由耕作引起的土壤流失研究较少。

聚丙烯酰胺(PAM)作为一种有效的土壤改良剂，可增加土壤颗粒间的凝聚力，稳定土壤结构，提高土壤抗侵蚀的功能。国内外相关研究结果均表明 PAM 对土壤入渗、水稳定性团聚体、细沟侵蚀和产水产沙等特征具有重要的影响<sup>[9-13]</sup>。目前 PAM 的应用多集中于水力侵蚀的相关研究中，并取得了许多有价值的研究成果，而对紫色土区坡耕地耕作侵蚀的影响研究鲜见报道。因此，研究土壤结构改良剂 PAM 对坡地土壤耕作位移及团聚体稳定性的影响对制定高强度利用下坡地水土保持措施提供技术支撑、控制坡耕地土壤流失和合理利用紫色土坡地资源具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验区位于四川省遂宁水土保持试验站内，该站地处四川盆地中部嘉陵江中下游丘陵区，琼江流域上游，平均海拔约 420 m，多年平均气温 18℃，气候类型属于亚热带湿润气候，四季分明，多年平均降雨量 933 mm，主要集中于 5—9 月。土壤母质为侏罗系遂宁组岩层发育而成的紫色土，pH 呈中性到微碱性，土壤结构稳定性差，保水能力低，有机质含量少，抗冲刷和抗蚀能力较弱。研究区域坡耕地分布广泛，属于紫色土主要分布区域之一，区域内坡耕地具有坡度大、可耕地面积少、耕作侵蚀显著的特点。该试验站在 1984 年至今开展了坡耕地不同坡度同等耕作条件下(采用当地农民常规的耕作习惯，即小春小麦，大春甘薯，一年两熟轮作，横坡开行)的水土流失观测，站内布设有 5°、10°、15°、20°、25°共 5 种不同坡度的径流小区，小区坡长 20 m，宽 5 m。试验站收集了大量关于径流小区地质水文等方面的资料，为本试验开展提供了良好的基础。

### 1.2 耕作位移测定试验

耕作位移试验在径流小区内进行，将 5°、10°、15°、20°、25°的径流小区分为左边 2 m 和右边 3 m 两部分(图 1a)，分别作为对照区域(未添加 PAM)和试验区域(土壤中添加 PAM)。试验采用的 PAM 为阴离子线型高分子聚合物，其分子量为  $1.4 \times 10^7$  g/mol，电荷密度为 20%。已有研究表明，当 PAM 用量为 0.75~1.25 g/m<sup>2</sup>，能显著调节土壤结构<sup>[14]</sup>，因此本试验设置 PAM 浓度为 0.8 g/m<sup>2</sup>，溶于蒸馏水中持续搅拌 30 min。将配制好的 PAM 水溶液用小型喷壶均匀地喷施在每个不同坡度径流小区的试验区

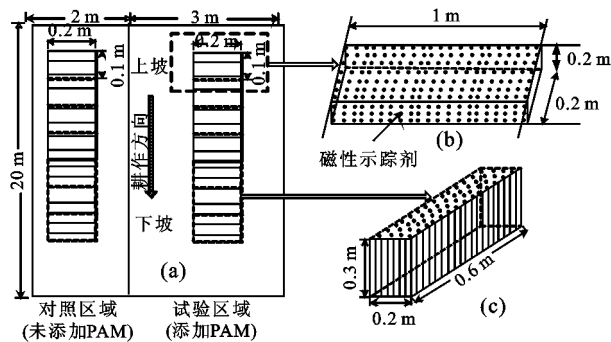
域，晾晒一段时间后，通过水分测定仪测定添加 PAM 前后坡面土壤含水量基本一致后，进行模拟耕作试验。相关试验和样品采集于 2016 年 10 月完成。

通过模拟耕作试验，结合磁性示踪技术，测定试验地与对照地的耕作位移量。具体操作过程分为构建示踪小区—模拟耕作—磁性测定 3 个步骤，主要操作方式为：

(1)构建示踪小区：分别在对照区域和试验区域挖掘长 1.0 m，宽 0.2 m，高 0.2 m 的长方体示踪小区(图 1b)，将挖出的土壤堆放于塑料布上，添加 1 kg 磁性示踪剂(钛铁矿粉)，充分搅拌使示踪剂均匀地附着在土壤上，利用磁化率仪进行多点测定。如果多次测定值变化较大，则重新搅拌混合，直到不同点位土壤磁化率基本一致后，将混有磁性示踪剂的土壤回填于示踪小区内。

(2)模拟耕作：按照常规耕作方式在对照区域和试验区域进行常规耕作，耕作范围完全覆盖示踪小区区域。耕作从示踪小区下部向上部进行，耕作方向及耕作深度等均按照当地实际操作方式进行。

(3)磁性测定：模拟耕作完成后从标记小区基部至扩散最远点连续取样，利用长、宽、高分别为 0.6、0.2、0.3 m 的金属框垂直插入耕作后的土壤中至耕作深度(图 1c)，采集金属框内的土壤样品，采样深度为实际耕作深度，采样宽度为 0.2 m，间距为 0.1 m，将采集的土壤样品充分混匀后，利用磁化率仪测定土壤样品的磁化率，然后利用相关模型计算出耕作位移量。每个处理重复 2 次，每个土壤样品的磁化率测定 5~7 次，取其平均值作为样品最终磁性值。



注：(a)径流小区；(b)示踪小区；(c)采样区。

图 1 示踪小区布设及采样位置

### 1.3 样品采集及测定

用取土铲在试验地和对照地不同位置分别取出表层 0—20 cm 的原状土壤团聚体样品，装入塑料盒，带回实验室中自然风干后，用手将土壤样本中的大颗粒物沿自然结构轻轻剥成直径约 10 mm 的小土块，并除去样本表层的生物残骸和根系等杂质。土壤团聚体的分布状况通过干筛法和湿筛法来测定。干筛法：将风干后的土壤样品置于标准检验筛(孔径依次为 10、5、2 mm)顶部，将标准检验筛置于 8411 型电动振筛机上振荡 10 min，然后按其干筛百分数比配成 50 g 湿筛样品。湿筛法：将干筛配置的 50 g 样品

置于 TTF-100 型土壤团聚体分析筛组(孔径依次为 5, 2, 1, 0.5, 0.25 mm)顶部,将筛组置于团粒分析仪的振荡架上。先浸泡样品 10 min,然后以 5 cm 振幅、30 次/min 的频率在水中振荡 30 min,振荡过程中筛组上缘部分不得低于水面。将各级筛子上的团聚体洗入已知质量的烧杯中,再将烧杯置于 105 ℃烘箱下烘干 12 h,待冷却后从烘箱中取出样品在空气中放置 24 h 后,称其重量,然后加入六偏磷酸钠溶液分离出团聚体中沙粒含量。计算各级团聚体质量分数,在此基础上计算团聚体相关评价指标。

#### 1.4 数据处理

耕作位移量应用类流体旋转理论并依据示踪剂的移动分布进行计算<sup>[15-16]</sup>:

$$D_d = \int_0^L [1 - \frac{C(x)}{C_0}] dx \quad (1)$$

式中: $D_d$  为耕作引起的平均土壤位移距离(m); $C_0$  为耕作前标记区的土壤磁化率(SI); $C(x)$  为耕作后的土壤磁化率(SI); $L$  为取样的最大距离(m)。

反映土壤团聚体稳定性的评价指标主要有团聚体破坏率(PAD)、平均质量直径(MWD)、平均几何直径(GMD)。PAD 是从团聚体破碎的程度评价土壤结构稳定性的一个重要指标,其值越大说明团聚体越容易遭到破坏,土壤稳定性也就越差,反之,PAD 越小,表明团聚体稳定性越好。MWD 和 GMD 值越大代表土壤结构稳定性越好,越小则稳定性越差。团聚体结构破坏率(PAD)计算方法为:

$$PAD = \frac{W_T - W_s}{W_T} \times 100 \quad (2)$$

式中:PAD 为团聚体破坏率(%); $W_T$  为供试土壤的总重量中>0.25 mm 干筛团聚体重量(g); $W_s$  为>0.25 mm 水稳定性团聚体重量(g)。

土壤团聚体稳定性评价指标平均质量直径(MWD)和平均几何直径(GMD)计算公式分别为:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n W_i X_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (3)$$

式中:MWD 为团聚体平均质量直径(mm); $W_i$  为干(湿)筛法中各粒级团聚体质量(g); $X_i$  为相邻两级团聚体的平均粒径(mm)。

$$GMD = \exp \left\{ \frac{\sum W_i \ln X_i}{\sum W_i} \right\} \quad (4)$$

式中:GMD 为团聚体平均几何直径(mm); $W_i$  为第  $i$  粒径团聚体质量(g); $\ln X_i$  为土壤粒级平均直径的自然对数。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同坡度耕作位移量的变化

由图 2 可知,不同坡度坡面土壤中添加 PAM 后耕作位移变化差异较大。单因素方差分析结果显示,

在 10°, 15°, 20°, 25° 坡度坡面土壤中添加 PAM 后耕作位移与对照(未加 PAM)相比,耕作位移量均发生了显著减少( $P < 0.05$ )。在 5° 坡地内,添加 PAM 后耕作位移量未发生显著变化( $P = 0.14$ ),随着坡度的增大,添加 PAM 后坡面土壤耕作位移量的变化趋势越明显,其中在 20° 和 25° 径流小区内变化最显著( $P < 0.01$ ),与对照相比,添加 PAM 后耕作位移量降低了 49.16% 和 67.96%。添加 PAM 后耕作位移量明显变小是由于 PAM 具有很强的黏滞力<sup>[17]</sup>,改变了土壤内部微环境及土力学特性。PAM 容易将耕作分散开的土壤颗粒相互缠绕黏结,同时增强土壤与生物残骸和根系等物质的黏聚力,形成结构稳定的土壤复合体,并增大土壤表层粗糙度和抗剪强度,从而影响耕作过程中坡面土壤空间分布格局。另外,由于 PAM 在水中溶解后,具有极强的絮凝能力,将土壤表层的颗粒黏结起来产生结皮,加强了土壤表层的整体性,阻碍土壤发生侧向位移;渗入到土壤颗粒间的 PAM,隔绝了颗粒间的接触,减少了能量在颗粒间的传递和土粒破碎速率,使土壤颗粒的稳定性增强<sup>[18]</sup>。

随着径流小区坡度增大,添加 PAM 与对照坡面土壤耕作位移量均逐渐增大,这与以前相关研究结果一致,即坡度是影响耕作位移的重要因素<sup>[16,19]</sup>。坡度的大小决定了重力沿坡面方向分力的大小,直接影响耕作过程中土壤位移大小,通常坡度越大,沿着坡面方向的重力分力越大,重力势能越大,根据能量守恒定理,其动能也越大,从而导致坡面土壤的位移量增大。而 PAM 自身的黏滞性会阻碍耕作过程中土壤向下坡移动,减少耕作侵蚀量。不同坡度坡面土壤添加 PAM 与对照耕作位移量的变异系数(CV)分别为 37.66% 和 28.85%,这主要是在较陡(20° 和 25°)的坡地内,PAM 对土壤迁移的阻碍作用加强,使其与较缓(<20°)坡地耕作位移变化差异较小。结果表明,PAM 对控制较陡(≥20°)坡地的耕作侵蚀作用明显。因此,在坡度较陡坡面,宜采用等高耕作或者减少耕作次数等保护性耕作措施结合 PAM 的应用能有效减少坡面土壤侵蚀与水土流失。

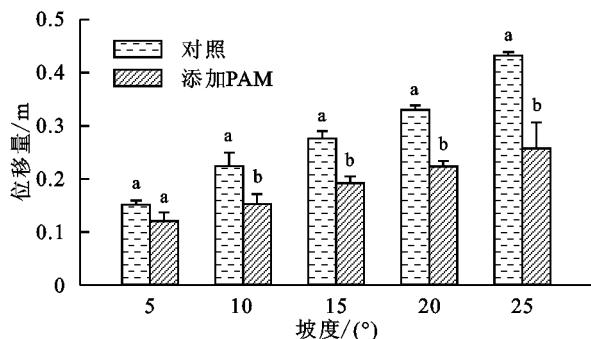
### 2.2 不同粒径团聚体分布

土壤团聚体的分布特征是反映土壤质量的重要指标之一。由图 3 和图 4 可知,干筛情况下 PAM 对 10~5 mm 和 <2 mm 粒径团聚体含量影响较大,添加 PAM 后不同坡度坡地 10~5 mm 粒径团聚体平均含量为 48.99%(42.62%~53.28%),而对照平均为 37.64%(35.51%~40.42%);5~2 mm 粒径团聚体含量变化不明显,添加 PAM 后 <2 mm 粒径团聚体平均含量为 14.62%(10.56%~19.87%),对照平

均含量 22.98% (18.20% ~ 26.94%)。表明添加 PAM 后,土壤大粒径(10~5 mm)团聚体含量增加,而小粒径(<2 mm)团聚体含量减少。

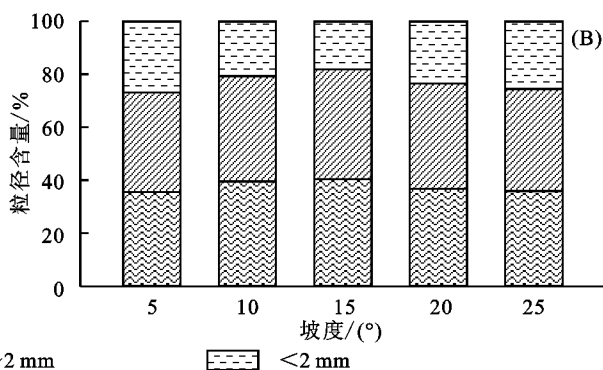
在湿筛条件下,添加 PAM 后坡面土壤中<0.25 mm 粒径非水稳定性团聚体含量发生了明显的变化,在 5°,10°,15°,20°,25°坡度坡面土壤添加 PAM 后比对照分别减少了 33.74%,46.67%,37.56%,52.70%,62.50%,而>0.25 mm 的水稳定性团聚体含量明显增加,这与王永敏等、李元元等<sup>[20-21]</sup>通过室内土柱培养试验得出的结果一致。造成这种结果主要是由于 PAM 吸水溶胀后,耕作破碎和分散的土粒容易被 PAM 分子以贯穿、缠绕和吸附等方式捕捉<sup>[20,22]</sup>,从而使小粒径的土壤聚集在一起形成较大的土团。随着坡度增加,

>0.25 mm 的水稳定性团聚体含量增加的幅度越大,表明 PAM 对提高坡度较陡坡面土壤水稳定性团聚体的作用更明显。



注:同一坡度不同字母分别表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

图 2 添加 PAM 和对照坡面土壤耕作位移量的变化



注:A 为添加 PAM;B 为对照。下同。

图 3 干筛团聚体粒径分布

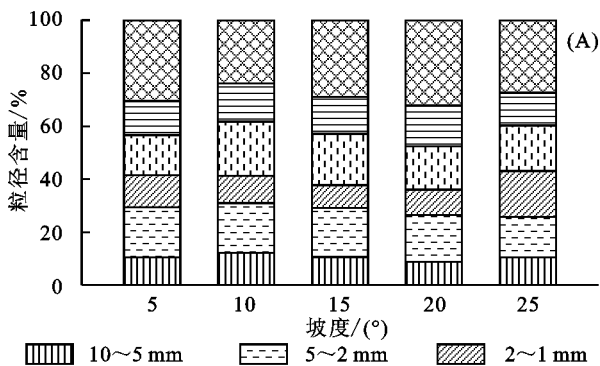


图 4 水稳定性团聚体粒径分布

### 2.3 PAM 对团聚体稳定性的影响

由表 1 可知,与对照比较,添加 PAM 后不同坡度坡面土壤 PAD 值显著减少( $P < 0.05$ ),平均降低了 60.05%,其中在 25°坡面降低了 81.65%,这主要是由于 PAM 具有较强的胶结作用,使土壤结构破碎速率降低。不同坡度坡面土壤中添加 PAM 后 MWD 和 GMD 值比对照分别增加了 41.94% (34.92% ~ 61.90%) 和 55.09% (39.15% ~ 73.99%),这主要是 PAM 能有效减少土壤中<0.25 mm 粒径非水稳定性团聚体的含量,而使>0.25 mm 粒径团聚体含量显著增加(图 3)。由于 PAM 的黏滞作用,使土壤形成较好的团粒结构,分子链之间的相互作用和滑韧性就形成了一定的抗分散性<sup>[23-24]</sup>。PAM 可以有效改善土壤结构,增强团聚

体稳定性,并形成一定数量的胶结物质,减少水和土壤颗粒的亲合力,使土壤团聚体不易在水中分散,从而增强坡面土壤抗蚀性<sup>[17]</sup>。本研究表明,受强烈耕作坡面土壤中添加 PAM 显著降低团聚体破坏率,可增强土壤结构稳定性。

### 2.4 耕作位移与土壤结构稳定性的关系

由图 5 可知,耕作位移量与 PAD 值呈显著的正线性相关性,表明耕作位移量的大小会显著影响土壤团聚体的破坏率,位移量越大,团聚体破坏越严重。在相同位移量下,添加 PAM 土壤破坏率明显低于对照。耕作位移量与 MWD 和 GMD 呈显著的负线性相关性,说明耕作位移量与团聚体结构稳定性关系密切,耕作过程中土壤位移量越小,其侵蚀量越少,进而影响土壤结

构稳定性。

与对照相比,添加 PAM 后,耕作位移量与 MWD 和 GMD 直线方程斜率的绝对值明显降低,因此,PAM 显著影响团聚体和耕作位移量之间的关

系。土壤中添加 PAM 后 MWD 和 GMD 值比对照大,表明 PAM 对团聚体结构具有重要影响,PAM 长链上的烯胺基可亲和、吸附许多物质,产生氢键,从而吸附土壤颗粒<sup>[25-26]</sup>,提高土壤结构稳定性。

表 1 不同土壤处理团聚体稳定性特征

坡度/ (°)	PAD/%		MWD/mm		GMD/mm	
	添加 PAM	对照	添加 PAM	对照	添加 PAM	对照
5	13.34±2.22	19.04±1.34	1.83±0.29	1.35±0.09	0.74±0.09	0.50±0.03
10	13.59±3.85	23.96±2.44	1.96±0.01	1.41±0.01	0.84±0.04	0.54±0.01
15	15.04±3.64	26.37±1.09	1.80±0.04	1.34±0.13	0.73±0.01	0.52±0.04
20	24.15±3.51	33.45±1.95	1.64±0.04	1.19±0.08	0.65±0.01	0.41±0.02
25	13.96±3.17	25.36±3.06	1.79±0.07	1.10±0.10	0.76±0.04	0.44±0.02
平均值	16.02±4.59	25.63±5.20	1.80±0.12	1.28±0.13	0.74±0.07	0.48±0.05

由于 PAM 的黏结作用可以增加土壤表层颗粒间的凝聚力,从而使土壤具有明显的团粒化效果,且形成的团聚体水稳性很强。PAM 对土壤胶结作用的实质是由于其表面有大量的亲水基团,通过氢键对土壤黏粒吸附、凝聚,使体积增大形成稳定的团聚体<sup>[9]</sup>。PAM 作为土壤调节剂,能有效减少耕作位移量,增强土壤团聚体稳定性,改善土壤内部结构和微环境,在农业生产中可用来防治紫色土坡地耕作侵蚀,提高土壤生产力。

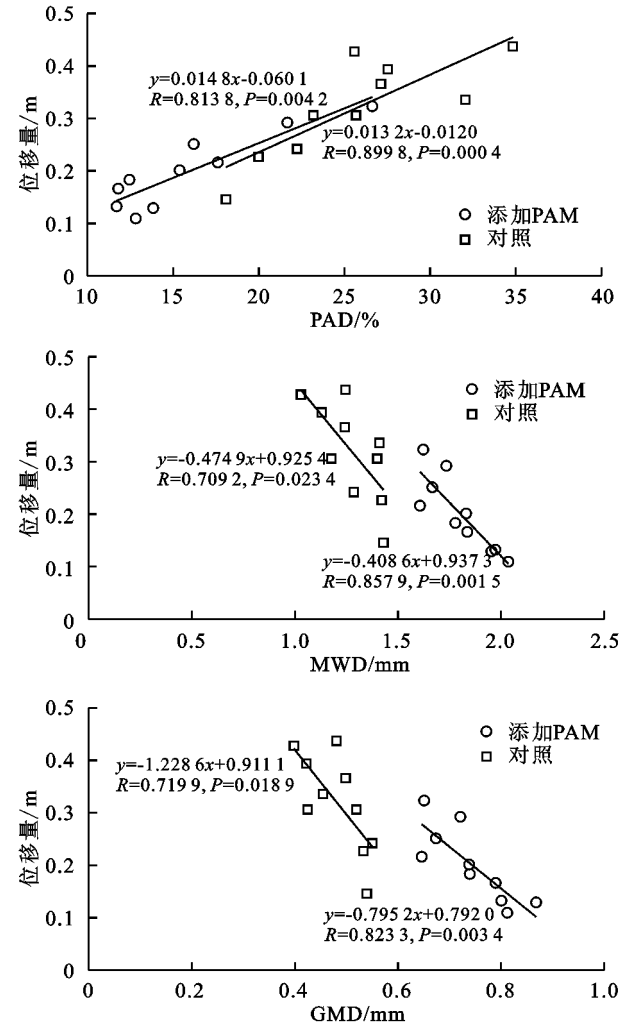


图 5 耕作位移与 PAD、MWD、GMD 的相关性

3 结论

(1)坡地土壤中添加 PAM 后,耕作过程中可显著减小耕作位移量。随着坡度的增大,添加 PAM 后坡面土壤耕作位移量的变化趋势越明显,其中在 20°和 25°坡面变化最显著。表明 PAM 影响耕作过程中坡面土壤的空间分布格局,对坡面土壤的迁移具有较强的阻碍作用,尤其在较陡(≥20°)坡地内。

(2)在不同坡度坡面土壤中添加 PAM 后,其<0.25 mm 粒径非水稳定性团聚体含量明显减少,>0.25 mm 水稳定性团聚体含量显著增加。与对照比较,添加 PAM 后不同坡度坡面土壤 PAD 值明显下降,而 MWD 和 GMD 显著增加;PAM 可以有效增强坡地土壤结构稳定性。

(3)在受耕作侵蚀严重的紫色土区坡地土壤中添加 PAM 可以有效降低耕作位移量,提高土壤结构稳定性,减少耕作侵蚀,而且施用方法简便,尤其适用于防治坡度较陡且耕作强度较大区域的土壤流失。

参考文献:

[1] Baartman J E M, Temme A J A M, Schoorl J M, et al. Did tillage erosion play a role in millennial scale landscape development? [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2012, 37(15): 1615-1626.

[2] 张加琼,杨明义,刘章,等. 耕作侵蚀研究述评[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(1): 144-150.

[3] Wang Y, Zhang J H, Li F C. Using Cesium-137 to investigate soil quality under conservation tillage on steep lands[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 69(5): 439-448.

[4] Blanco H, Lal R. Principles of soil conservation and management[M]. Netherlands: Springer, 2010.

[5] Zhang J H, Wang Y, Jia L Z, et al. An interaction between vertical and lateral movements of soil constituents by tillage in a steep-slope landscape[J]. Catena, 2017, 152(5): 292-298.

[6] Wang Y, Zhang J H, Zhang Z H, et al. Impact of tillage erosion on water erosion in a hilly landscape[J]. Science of the Total Environment, 2016, 551(5): 522-532.

- [7] Zhang J H, Lobb D A, Li Y, et al. Assessment of tillage translocation and tillage erosion by hoeing on the steep land in hilly areas of Sichuan, China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 75(2): 99-107.
- [8] 刘刚才, 李兰, 周忠浩, 等. 紫色土容许侵蚀量的定位试验确定[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(6): 90-94.
- [9] Chen Z, Chen W, Li C, et al. Effects of polyacrylamide on soil erosion and nutrient losses from substrate material in steep rocky slope stabilization projects[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 54(6): 26-33.
- [10] Mamedov A I, Huang C, Aliev F A, et al. Aggregate stability and water retention near saturation characteristics as affected by soil texture, aggregate size and polyacrylamide application[J]. *Land Degradation and Development*, 2017, 28(2): 543-552.
- [11] 潘德峰, 闫少锋. 不同浓度聚丙烯酰胺(PAM)防治土壤侵蚀的试验研究[J]. *中国水土保持*, 2014(6): 32-34.
- [12] 吕威, 李淑芹, 雷廷武, 等. 聚丙烯酰胺应用对黄土复合坡面降雨产流的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(6): 71-79.
- [13] 吕威, 李淑芹, 李法虎, 等. 聚丙烯酰胺对凹凸型坡土壤侵蚀影响的室内试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(10): 122-128.
- [14] 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, 19(1): 141-145.
- [15] Lobb D A, Quine T A, Govers G, et al. Comparison of methods used to calculate tillage translocation using plot-tracers[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 56(4): 321-328.
- [16] 李富程, 花小叶, 赵丽, 等. 紫色土坡地犁耕方向对耕作侵蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(6): 35-40.
- [17] 刘纪根, 张平仓, 陈展鹏. 聚丙烯酰胺对扰动红壤可蚀性及临界剪切力的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(7): 45-49.
- [18] 陈渠昌, 雷廷武, 唐泽军. 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.
- [19] Jia L Z, Zhang J H, Zhang Z H, et al. Assessment of gravelly soil redistribution caused by a two-tooth harrow in mountainous landscapes of the Yunnan-Guizhou Plateau, China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 168(5): 11-19.
- [20] 王永敏, 李俊颖, 王定勇. PAM 对潮土水稳性团聚体的影响[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(6): 297-299.
- [21] 李元元, 王占礼. 聚丙烯酰胺(PAM)防治土壤风蚀的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 1002-1008.
- [22] Lentz R D, Freeborn L L. Sediment and polyacrylamide effects on seepage from channeled flows[J]. *Soil Science*, 2007, 172(10): 770-789.
- [23] 李晶晶, 白岗栓. 聚丙烯酰胺的水土保持机制及研究进展[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(5): 115-120.
- [24] 廖人宽, 杨培岭, 任树梅, 等. PAM 和 SAP 防治库区坡地肥料污染试验[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(7): 113-120.
- [25] 王丹, 宋湛谦, 商士斌, 等. 高分子材料在化学固沙中的应用[J]. *生物质化学工程*, 2006, 40(3): 44-47.
- [26] Lu S, Chen F, Ngo H H, et al. Effect of straw and polyacrylamide on the stability of land/water ecotone soil and the field implementation[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 94(9): 12-21.

(上接第 43 页)

- [16] 张礼平, 张乐飞, 曾凡平. ENSO 与中国东部夏季降水的关联[J]. *热带气象学报*, 2012, 28(2): 177-186.
- [17] Sen R S, Rouault M. Spatial patterns of seasonal scale trends in extreme hourly precipitation in South Africa[J]. *Applied Geography*, 2013, 39(5): 151-157.
- [18] Stephenson T S, Vincent L A, Allen T, et al. Changes in extreme temperature and precipitation in the Caribbean region, 1961—2010[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(9): 2957-2971.
- [19] Consuelo R M, Guillermo B R, Leo S D. Changes of erosive rainfall for El Niño and La Niña years in the northern Andean highlands of Peru[J]. *Climatic Change*, 2007, 85(11): 343-356.
- [20] Marta A M, Santiago B. Do atmospheric teleconnection patterns influence rainfall erosivity? [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 450(2): 168-179.
- [21] Chiara V B, Elisa P G, Paolo F, et al. Temporal trends in extreme rainfall intensity and erosivity in the Mediterranean region: A case study in southern Tuscany, Italy[J]. *Climatic Change*, 2015, 128(1): 139-151.
- [22] IPCC. Climate change impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of working group II to the forth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge UK and New York, USA: Cambridge University Press 84, 2007.
- [23] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. *地理科学*, 2002, 22(6): 705-711.
- [24] 许武成, 王文, 马劲松, 等. 1951—2007 年的 ENSO 事件及其特征值[J]. *自然灾害学报*, 2009, 8(4): 18-24.
- [25] 陈世发. ENSO 对韶关市 1951—2013 年降雨侵蚀力影响研究[J]. *地理科学*, 2016, 36(10): 1573-1580.
- [26] 苏雅丽, 张艳芳. 陕西省土地利用变化的碳排放效益研究[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(1): 152-156.
- [27] 任国玉, 柳艳菊, 孙秀宝, 等. 中国大陆降水时空变异规律: 趋势变化原因[J]. *水科学进展*, 2016, 27(3): 327-348.
- [28] 薛峰, 刘长征. 中等强度 ENSO 对中国东部夏季降水的影响及其与强 ENSO 的对比分析[J]. *科学通报*, 2007, 52(3): 2798-2805.
- [29] 焦梦梁. ENSO 与影响福建省热带气象数量和强度关系研究[J]. *应用海洋学报*, 2016, 35(1): 33-37.