

不同土壤管理措施下坡耕地产流产沙和氮磷流失特征

常松果¹, 胡雪琴², 史东梅¹, 丁文斌¹, 蒋 平¹

(1. 西南大学资源环境学院,西南大学水土保持生态环境研究所,重庆 400715;
2. 重庆医药高等专科学校医学技术系,重庆 401331)

摘要: 采用野外径流小区定位观测法,研究次降雨条件下腐殖酸(HA)、聚丙烯酰胺(PAM)、绿肥(GM)3 种土壤管理措施对紫色丘陵区坡耕地产流产沙及氮磷养分流失的影响。结果表明:A 型(小雨量、短历时、低雨强)降雨发生频率最高,占降雨样本数的 71%,B 型(大雨量、长历时、中雨强)和 C 型(中雨量、中历时、高雨强)降雨是引发土壤侵蚀的主要降雨类型。不同土壤管理措施下侵蚀性降雨的临界降雨量差异不显著,降雨量>10.0 mm 时坡面开始产流产沙。A 型降雨下产流量:CK(123.49 L)>HA(60.67 L)>GM(53.67 L)>PAM(32.15 L),差异显著($P<0.05$);产沙量:CK(30.91 g)>HA(10.49 g)>GM(5.50 g)>PAM(5.12 g),CK 组与 GM 组和 PAM 组差异显著($P<0.05$)。B 型降雨下不同土壤管理措施间产流量与产沙量差异不显著($P>0.05$)。C 型降雨下产流量:CK(375.45 L)>HA(26 L)>GM(239.00 L)>PAM(182.10 L),CK 组与 PAM 组间差异显著,措施间产沙量差异不显著($P>0.05$)。次降雨条件下各土壤管理措施径流中氮素流失量差异显著,对照组全氮流失量是绿肥和聚丙烯酰胺 2.1~2.6 倍,水解氮流失量约为绿肥和聚丙烯酰胺 2.7 倍。不同土壤管理措施径流中磷素流失量总体趋势为:对照>腐殖酸>聚丙烯酰胺>绿肥,差异不显著($P>0.05$)。不同土壤管理措施径流中磷的流失形态主要以水溶态为主。研究结果表明,A 型降雨下聚丙烯酰胺、腐殖酸、绿肥减流减沙和减少氮磷流失效益显著,其中聚丙烯酰胺效益最优。

关键词: 产流产沙; 氮磷流失; 坡耕地; 土壤管理措施; 紫色丘陵区

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2016)05-0034-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2016.05.006

Characteristics of Runoff and Sediment, Nitrogen and Phosphorus Losses under Soil Management Measures in Sloping Farmland

CHANG Songguo¹, HU Xueqin², SHI Dongmei¹, DING Wenbin¹, JIANG Ping¹

(1. College of Resources and Environment, Institute of Soil and Water Conservation and Eco-environment, Southwest University, Chongqing 400715; 2. Department of Medical Technology, Chongqing Medical and Pharmaceutical College, Chongqing 401331)

Abstract: The characteristics of runoff and sediment, nitrogen and phosphorus losses under soil management measures in sloping farmland in purple hilly region were studied by the method of runoff plots observation. Soil management measures were humic acid (HA), polyacrylamide (PAM), green manure (GM), and one control group (CK) was set. The results showed that: A-type (minor amount of rainfall, short duration, low rainfall intensity) rainfall occurred more frequently in the study area, which accounted for 71% of the total number of rainfall recorded. However B-type (great amount of rainfall, long duration, moderate rainfall intensity) and C-type (medium amount of rainfall, moderate duration, high rainfall intensity) rainfall were more likely to produce runoff and sediment. Critical rainfall of erosive rainfall of soil management measures were quite approximate, which meant that the sloping farmland began to produce runoff and sediment when rainfall was more than 10 mm. The runoff yield of A-type rainfall: CK (123.49 L)>HA (60.67 L)>GM (53.67 L)>PAM (32.15 L), the difference was significant among soil management measures($P<0.05$). Sediment yield: CK (30.91 g)>HA (10.49 g)>GM (5.50 g)>PAM (5.12 g), the sediment yield of control group was significantly different from that of GM and PAM. The difference of runoff and sediment yield among the measures were not significant under B-type rainfall. The runoff yield of A-type rainfall: CK (375.45 L)>HA (26 L)>GM (239.00 L)>PAM (182.10 L), the runoff yield of control group and PAM was signifi-

cantly different. No significant difference was found in sediment yield among soil management measures. The nitrogen loss of several conservation practices varied significantly, the total nitrogen loss of control group was 2.1~2.6 times of that green manure and polyacrylamide, hydrolysis nitrogen loss was about 2.7 times of that green manure and polyacrylamide. The general trend of phosphorus loss in the runoff: The control group > green manure > humic acid > polyacrylamide, however no significant difference was found among them ($P > 0.05$). The loss of phosphorus in runoff is mainly in the form of water soluble phosphorus. Polyacrylamide, humic acid and green manure significantly benefit the reduction of runoff, sediment and nitrogen and phosphorus loss, and the polyacrylamide was most effective under the condition of A-type rainfall.

Keywords: runoff and sediment; losses of nitrogen and phosphorus; slope land; soil management measures; purple hilly region

水土流失不仅导致耕地肥力退化,加剧江河湖库淤积和洪涝灾害,也是面源污染发生的重要形式和运输载体。紫色丘陵区坡耕地是长江中上游地区农业生产的主体单元和重要的侵蚀地貌单元,是长江上游最为重要的农业耕作区域之一^[1-3],在自然因素和人类活动的干扰及其叠加效应下,已成为我国仅次于黄土高原的水土流失区和三峡库区最重要面源污染来源^[1,4-5]。因此,关于紫色丘陵区坡耕地的产流产沙和氮磷流失特征的研究备受关注。

近年来,撒施聚丙烯酰胺 (polyacrylamide, PAM)、施用腐殖酸和绿肥等土壤管理措施已得到广泛研究和应用。冯浩等^[6]和陈渠昌等^[7]研究表明,聚丙烯酰胺可以凝聚土壤表层颗粒,维系良好的土壤结构,增加降雨入渗,减少地表径流和土壤侵蚀^[8]。腐殖酸作为一种新型有机肥,对耕层土壤细菌数量和土壤酶活性有显著的影响,进而影响土壤酸碱度和碳氮磷养分含量^[9]。倡国涵等^[10]连年翻压绿肥的田间定位试验研究表明,翻压绿肥可降低土壤紧实度,促进土壤中微生物的活动以及养分的转化和释放,进而加速土壤团粒状结构的形成,改善土壤结构。目前,聚丙烯酰胺、腐殖酸和绿肥的应用主要集中在改良土壤理化性质,如入渗特性、土壤酶活性等,次降雨条件下对田块尺度产流产沙和氮磷养分流失的影响探索研究较少。因此,对比研究 PAM、腐殖酸、绿肥 3 种土壤管理措施次降雨条件下产流产沙和氮磷流失特征,不仅可以加深对 PAM、腐殖酸和绿肥应用效益的认识,同时为紫色丘陵区坡耕地控制水土流失和面源污染提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于西南大学紫色丘陵区坡耕地水土流失监测基地,地处北碚向斜中部,地理位置为 $106^{\circ}26'E$, $30^{\circ}26'N$,海拔为 230 m,年平均气温为 $18.3^{\circ}C$,全年总日照时数 1 270 h,年降水量 1 105.4 mm。土壤为中生代侏罗系沙溪庙组灰棕紫色沙泥页岩母质上发育的中性紫色土。

1.2 试验设计

试验于 2015 年 4—8 月供试作物玉米 (川单 13) 生长期进行。苗床基施氮肥 (尿素: 250 kg/hm^2), 4 月 20 日将三叶期的玉米幼苗从苗床移栽至径流小区,行距 80 cm,株距 30 cm,等高耕作,并在拔节期前追施复合肥 (150 kg/hm^2),玉米从移栽至收获期间无人工灌溉,不同处理玉米生长期间田间管理措施均相同,皆参照本地农民种植习惯。

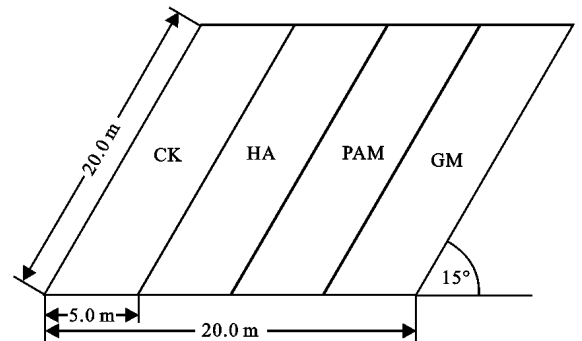


图 1 试验小区平面布置

试验共设置 4 个 $5\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的径流小区,坡度为 15° ,各径流小区四周均修筑 30 cm 水泥挡水墙,以防径流在小区间渗漏。小区下部设置矩形径流出水口,观测室内径流桶通过导流渠连接径流出水口,承接小区的产流和产沙。每个处理 3 个重复,试验处理设置如下: (1) 对照组 (CK), 玉米生长期间小区没有任何土壤管理措施; (2) 施用腐殖酸 (HA), 玉米移栽之前按 600 kg/hm^2 作为基肥施加,并覆盖 2~4 cm 表土; (3) 地表施用聚丙烯酰胺 (PAM), 玉米移栽之前按 2.0 g/m^2 剂量施加 PAM,称取适量土壤与 PAM 充分混合,均匀撒施在径流小区坡面地表; (4) 施用绿肥 (GM), 2014 年 9 月播种绿肥 (黑麦草), 2015 年 2 月翻压绿肥 $7\ 500\text{ kg/hm}^2$,翻压深度约 12 cm。试验小区平面布置如图 1 所示。

1.3 样品采集与数据分析方法

2015 年 4—8 月的降雨量来自重庆市气象局。产流量通过观测室内的径流桶记录测定,搅拌径流桶取 500 ml 径流和泥沙均匀混合样,过滤,烘干,称重,计算得到产沙量,每次 3 个重复。总氮含量 (TN) 根

据过硫酸钾氧化—紫外分光光度计法测定,水解氮含量根据碱水解法测定,总磷(TP)含量根据过硫酸钾消解—钼锑抗分光光度法^[11]测定,水溶性磷含量根据 NaHCO₃ 法测定。

为分析紫色丘陵区坡耕地不同土壤管理措施次降雨下产流产沙特征、氮磷养分流失特征,本文使用 SPSS19.0 进行了聚类分析、方差分析。聚类分析采用 K-均值聚类法和系统聚类法,方差分析采用最小显著性差异(LSD)法,检验不同土壤管理措施下产流量、产沙量和氮磷养分流失量的差异性。

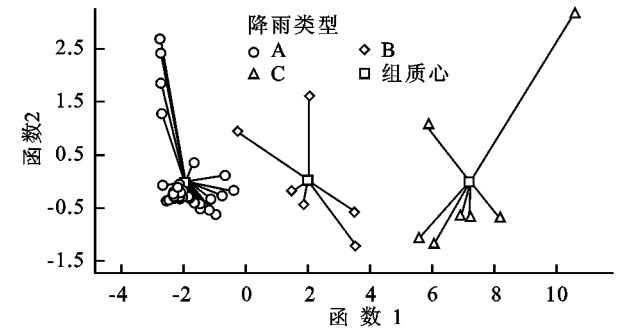
2 结果与分析

2.1 降雨特征分析

试验区自玉米移栽(2015 年 4 月 20 日,三叶期)至收获(8 月 16 日)共观测记录降雨 45 场次,期间降雨总量 679.0 mm,单场降雨量均<80.8 mm,平均降雨量 15.5 mm,侵蚀性降雨(坡面产生地表径流的降雨)21 场,总侵蚀性降雨量 536.4 mm。降雨在玉米各发育期间的分配差异明显,主要集中在拔节期和灌浆一成熟期。拔节期(5 月 10 日—6 月 5 日),降雨量 188.8 mm,占试验期间总降雨量的 27.1%;灌浆一成熟期(6 月 15 日—8 月 16 日),降雨量 459.4 mm,占试验期间总降雨量的 65.9%;三叶期(4 月 18 日—4 月 25 日)、五叶期(4 月 26 日—5 月 10 日)和抽雄一吐丝期降雨少,仅占试验期间总降雨量的 7.0%。

试验观测表明,降雨量、降雨历时、降雨强度是影响降雨侵蚀力重要降雨变量,降雨量相同的条件下,降雨历时和降雨强度等降雨特征的差异,会导致不同的水土流失结果^[12]。因此,基于降雨特征进行不同降雨类型区分,是全面分析坡地产流、产沙和养分流失特征的基础。根据观测的 45 场降雨的降雨量、降雨历时、降雨强度^[13] 3 个降雨特征指标,综合 K-均值聚类 and 系统聚类法分析结果,将 45 场降雨分为 3 类,3 种降雨类型的降雨量、降雨强度差异呈显著性($P<0.01$),降雨历时差异呈显著性($P<0.05$)。如图

2 所示,3 种雨型典型判别函数散点分别聚集在组质中心,其中 A 雨型相对集中,B 和 C 雨型更为分散;C 雨型与 A、B 雨型相距较远,边界清晰,A 雨型与 B 边界略有交错,表明 A 雨型次降雨特征较稳定,B、C 雨型次降雨特征变化幅度大,降雨聚类分析结果较优。



注:函数 1、函数 2 分别为典型判别式函数。

图 2 降雨类型判别散点图

表 1 统计了不同降雨类型特征,基于降雨量、降雨历时、降雨强度指标的阈值、 V_{25} (下四分位数)和 V_{75} (上四分位数)特征,研究区的不同雨型降雨特点可概括为:A 型降雨为小雨量(0.4~2.9 mm)、短历时(2.0~22.0 h)、低雨强(0.20~0.59 mm/h)型降雨,B 型降雨概括为大雨量(37.8~52.2 mm)、长历时(7.0~17.0 h)、中雨强(3.01~5.40 mm/h)型降雨,C 型降雨为中雨量(17.6~80.5 mm)、中历时(4.5~23.0 h)、高雨强(1.18~13.42 mm/h)型降雨。45 场降雨中,A、B、C 型降雨分别为 32 场、6 场、7 场,占总观测记录降雨样本数的 71%,13%,16%,分别占总降雨量的 26%,40%,34%。从降雨频率角度讲,A 型降雨是研究区的最主要降雨类型。A、B、C 3 类降雨的侵蚀性降雨场次分别是 8 场、6 场、7 场,占各自降雨样本的 25%,100%,100%,侵蚀性降雨量分别为 65.4 mm,271.7 mm,230.5 mm。因此,从降雨侵蚀力方面看,B 型和 C 型降雨是使坡面产流产沙的主要动力,是造成坡面土壤侵蚀的主要降雨类型,同时也表明较高的雨量和雨强组合更容易驱动坡面土壤侵蚀的发生。

表 1 不同降雨类型特征

降雨类型	样本数	总降雨量/mm	侵蚀性降雨场次	侵蚀性降雨量/mm	特征指标			
					指标	降雨量/mm	降雨历时/h	降雨强度/(mm·h ⁻¹)
A	32	176.8	8	65.4	阈值	0.4~2.9	2.0~22.0	0.2~0.6
					V ₂₅	2.2	4.1	0.34
					V ₇₅	7.9	8.4	0.94
					阈值	37.8~52.2	7.0~17.0	3.01~5.40
B	6	271.7	6	271.7	V ₂₅	41.3	12.0	3.13
					V ₇₅	48.1	15.0	3.94
					阈值	17.6~80.5	4.5~23	1.18~13.42
					V ₂₅	21.9	5.5	2.21
C	7	230.5	7	230.5	V ₇₅	30.8	11.5	5.14

注:V₂₅:25%分位数取值;V₇₅:75%分位数取值;P:降雨量;T:降雨历时;I:降雨强度。

2.2 不同土壤管理措施下产流产沙响应特征

2.2.1 降雨与产流产沙关系特征 整个试验期间共观测记录 21 场侵蚀性降雨(坡面产生地表径流的降雨),CK 组、HA 组、PAM 组、GM 组产流次数分别为 21,20,21,20,产沙次数依次为 21,20,19,20。PAM

组产流产沙次数不同的原因:4 月 30 日和 5 月 14 日两场降雨在 PAM 组径流小区没有产生泥沙,PAM 凝聚土壤表层颗粒,维系良好的土壤结构,降低了径流的径流含沙率^[16]。

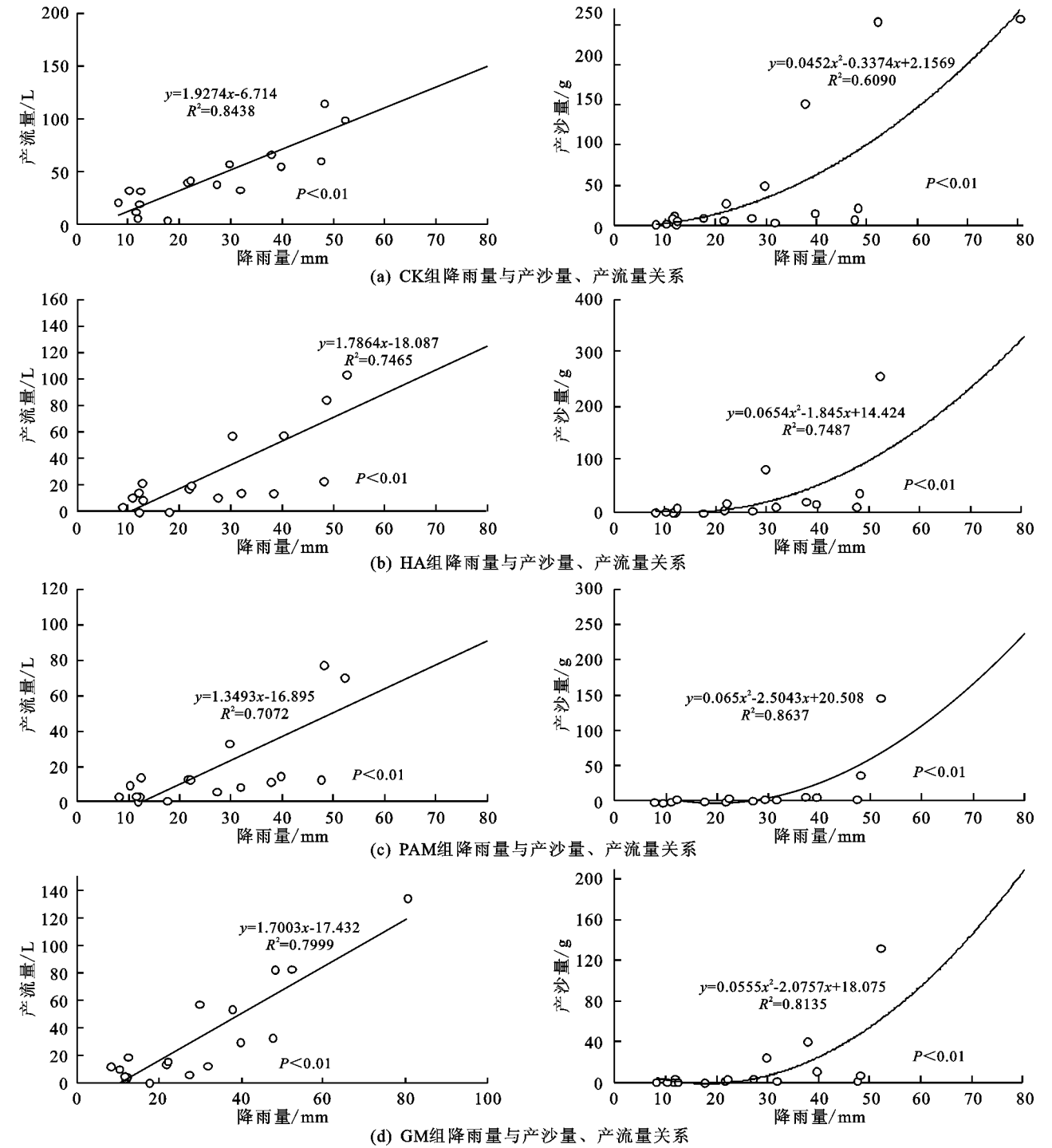


图 3 不同土壤管理措施下降雨量与产流量、产沙量关系

由图 3 可以看出,当降雨量>10.0 mm 时,标准径流小区都有径流和泥沙产生,即不同土壤管理措施下侵蚀性的临界降雨差异不明显。由统计分析可知,产流量总体趋势为 CK(894.48 L)>HA(607.12 L)>GM(573.96 L)>PAM(400.34 L),产沙量的总体趋势为 CK(844.11 g)>HA(698.02 g)>PAM

(454.30 g)>GM(440.06 g),4 种处理的土壤侵蚀程度 CK 组最严重,PAM 组最弱。不同处理条件下产流量和产沙量皆随着降雨量的增加而增大,这与李素清等^[14]在黄土高原和黄炎和等^[15]在闽南的研究结果一致。CK 组、HA 组、PAM 组和 GM 组产流量与降雨量具有显著($P<0.01$)线性回归关系;CK 组、

HA 组、PAM 组和 GM 组的产沙量与降雨量呈显著性正相关关系,产沙量随降雨量的变化遵循一元二次($y=ax^2+bx+c$,且 $a>0$)函数规律。土壤侵蚀量既由侵蚀营力破坏、剥蚀作用产生的泥沙量来控制,也受制于外力搬运、堆积的泥沙的运移能力。降雨量增加不仅意味着坡面地表径流和径流剪切力的增大,同时加强了径流运移泥沙的能力,进而导致产流量、产沙量的增加。

不同处理间的产流量与降雨量的拟合曲线斜率为 $1.93(CK)>1.79(HA)>1.70(GM)>1.35(PAM)$,表明不同处理间土壤对于雨滴击溅和径流冲刷导致的侵蚀的敏感度是不同的,CK 组的侵蚀敏感性最高,PAM 组侵蚀敏感性最低。这可能是不同土壤管理措施改变了土壤的理化性质引起。腐殖酸和绿肥可提高土壤中有机质含量和酶的活性^[16],促进土壤中微生物的活动以及养分的转化和释放,进而促进土壤团粒状结构的形成,改善土壤结构,增加土壤的疏松性和入渗性能,提高的土壤抗侵蚀能力。与腐殖酸和绿肥通过提高微生物活性等生物过程间接改善土壤物理性质相比,聚丙烯酰胺可直接作用于土壤颗粒,具有黏聚土壤颗粒、改善土壤结构作用,能有效缓解雨滴击溅、抑制结皮,增加土壤入渗能力,防止水土流失^[7]。

不同处理间的产沙量与降雨量的拟合曲线是一曲率不断变大的凹函数,它表明随着降雨量的增大,单位降雨量产生的泥沙量迅速增大,即产沙量随降雨量变化过程表现出明显的阶段性,在低雨量区($P<40.0\text{ mm}$)产沙量增加缓慢,高雨量区($P>40.0\text{ mm}$)产沙量迅速增加。降雨量处于低雨量区时,与 CK 组相比,PAM 组、GM 组和 HA 组减沙效应明显,产沙量仅为 CK 组的 11.1%,29.8%,49.6%;高雨量区,各处理的减沙效应差异不明显。由 3 类不同降雨类型特征可知,大雨量往往伴随着高雨强(例如 B 型和

C 型降雨),大雨量和高雨强双重效应下,雨滴压实和分散土壤颗粒强烈,阻塞土壤孔隙,形成一层紧实的“不透水层”,极大地降低了入渗速率,增加地表径流和泥沙流失量,进而导致高雨量区不同处理间减沙效应差异不明显。

2.2.2 不同降雨类型下土壤管理措施对产流产沙的影响 降雨因素、坡度坡长、植被覆盖以及水土保持措施等是影响坡面尺度水土流失的主要因子,其中降雨是驱动土壤侵蚀最重要影响因子之一,是雨滴击溅和径流冲刷的动力来源^[17-18]。

由表 2 可知,在不同类型的降雨条件下,各土壤管理措施的产流量和产沙量的差异显著性不相同。A 型降雨条件下,CK 组与 HA 组、PAM 组和 GM 组的产流量均具有显著的差异性($P<0.05$);产沙量只有 CK 组与 PAM 和 GM 组表现出显著的差异性。HA 组、PAM 组和 GM 组的产流量和产沙量差异不显著,这是由于腐殖酸、聚丙烯酰胺和绿肥均能改善土壤结构,提高土壤入渗性能和抗侵蚀性原因。B 型降雨条件下,不同处理间的产流量和产沙量差异均不显著;C 型降雨条件下,只有 CK 组与 PAM 组的产流量表现出显著的差异性,不同处理间的产沙量差异均不显著。与对照组相比,B 和 C 型降雨下不同土壤管理措施间减流减沙效益不显著,这可能是因为:B 和 C 型降雨多发生在玉米的灌浆—成熟期(6 月 15 日—8 月 16 日),此时地表覆盖度 $>40\%$,茎叶交错密织,截留雨水,消缓雨滴击溅侵蚀;同时发达的根系与土壤形成土—根复合体,加筋锚固作用明显,增强土壤抗侵蚀性能,从而干扰和覆盖了不同土壤管理减流减沙效益。由表 2 可知,B 型降雨 $P>37.8\text{ mm}$, $I>3.01\text{ mm/h}$,因此在紫色丘陵区当降雨量大于 37.8 mm,降雨强度高于 3.01 mm/h 时,腐殖酸、聚丙烯酰胺和绿肥的减流减沙效益不明显。

表 2 不同降雨类型下各土壤管理措施的产流量和产沙量方差矩阵

降雨 类型	管理 措施	产流量				产沙量			
		CK	HA	PAM	GM	CK	HA	PAM	GM
A	CK	—	10.47*	15.22*	11.64*	—	3.40	4.30*	4.23*
	HA		—	4.75	1.67	—	0.90	0.83	
	PAM			—	−3.59		—	−0.07	
B	CK	—	22.06	41.91	22.87	—	29.76	49.27	51.45
	HA		—	19.84	0.80	—	19.50	21.68	
	PAM			—	19.03		—	2.18	
C	CK	—	15.75	23.51*	18.26	—	−0.06	15.37	12.07
	HA		—	7.76	2.51	—	15.42	12.12	
	PAM			—	−5.25		—	−3.30	

注: * 表示 $P<0.05$

2.3 次降雨条件下不同土壤管理措施径流中氮磷流失特征

在土壤侵蚀的降雨—土壤—径流过程中,径流淋

洗携带和泥沙颗粒吸附大量的土壤养分,降低土壤生产力,造成严重的水体富营养化,是产生农业非点源污染的重要源头之一。本文筛选了 6 场之前数日未

发生降雨的侵蚀性降雨,排除前期降雨干扰,以揭示次降雨条件下不同土壤管理措施径流中氮磷流失特征。6场侵蚀性降雨分别为:5月22日, $P=27.1\text{ mm}$, $I=1.18\text{ mm/h}$;5月26日, $P=12.1\text{ mm}$, $I=2.02\text{ mm/h}$;6月1日, $P=39.7\text{ mm}$, $I=2.34\text{ mm/h}$;6月16日, $P=21.6\text{ mm}$, $I=2.40\text{ mm/h}$;6月29日, $P=80.5\text{ mm}$, $I=13.42\text{ mm/h}$;7月22日, $P=47.6\text{ mm}$, $I=3.97\text{ mm/h}$ 。

由图4可知,不同土壤管理措施径流中氮素、磷

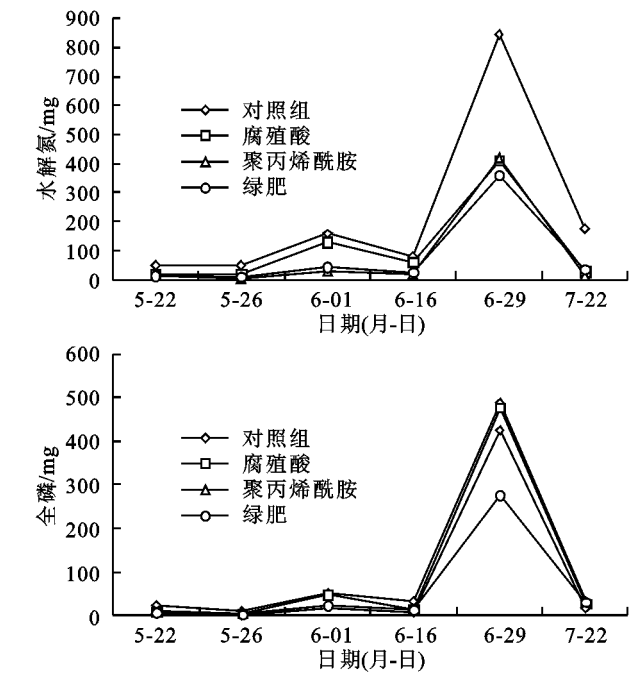


图4 次降雨条件下不同土壤管理措施氮磷流失量

次降雨条件下不同土壤管理措施径流中氮素流失量差异明显,以CK组最高,其次为HA组,再次GM组,PAM组的流失量最低,CK组全氮流失量是GM组和PAM组2.1~2.6倍,水解氮流失量约为GM组和PAM组2.7倍,与不同土壤管理措施间产流量、产沙量的总体趋势类似。这表明施用腐殖酸、聚丙烯酰胺和绿肥具有控制氮素流失作用,特别是PAM和绿肥效果明显。研究表明,绿肥减少氮素流失的驱动力来源于其改善土壤结构的间接效应,施用绿肥虽然可增加土壤氮素含量和促进氮素转化^[20-21],但绿肥翻入土壤后,在微生物的作用下,不断地分解产生分泌酶和腐殖质,促进土壤团粒结构形成,增强土壤抗侵蚀和保水能力,从而降低土壤氮素淋溶和地表径流迁移氮素可能性。PAM和腐殖酸皆可增加土壤团聚体,改善土壤入渗,减少径流和土壤侵蚀,进而间接起降低氮素流失作用。

次降雨条件下不同土壤管理措施径流中磷素流失量总体趋势呈现CK组>HA组>PAM组>GM组,但差异不显著($P>0.05$),当次降雨量<40 mm(5月22日、5月26日、6月1日、6月16日、7月22

素流失量与降雨量呈正相关关系,流失量均在降雨量最大的6月29日达到峰值。降雨量6月1日<7月22日,而氮磷流失量6月1日>7月22日,可能是不同玉米生育期地表覆盖不同造成的,7月22日玉米处于灌浆一成熟期,其植被覆盖度远大于拔节期(5月10日—6月5日),植物茎叶可以有效削弱雨滴动能,改变降雨再分配,减少地表径流,降低表层土壤氮、磷向径流迁移,而表层以下的土壤养分很难向表层径流迁移,从而降低氮、磷流失量^[19]。

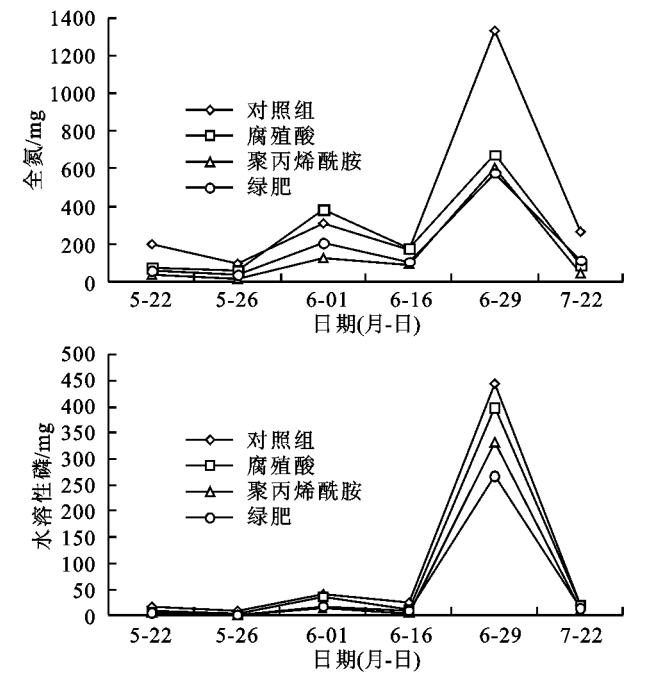


图5 不同土壤管理措施径流中不同形态磷的流失量

日)时,全磷和水溶性磷流失量接近,全磷平均流失量77.9 mg,平均水溶性磷流失量64.4 mg。这与滕玲玲^[22]PAM可显著降低紫色土磷素淋溶浓度和控制磷素流失结果不同,可能是由于坡度、PAM用量、PAM施用时间差异等造成的。

土壤中的磷素主要通过地表径流和地下径流淋溶、土壤颗粒吸附携带等途径进入水体,径流中携带的总磷包括颗粒态和可溶态两种。

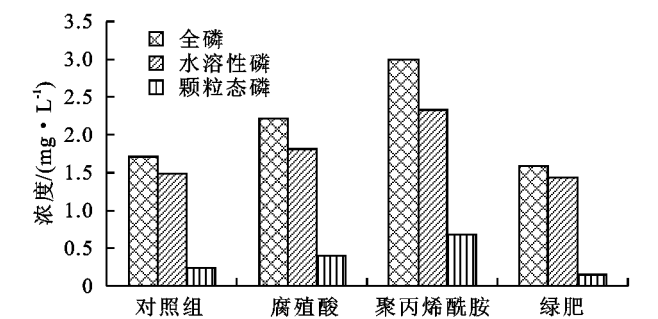


图5 不同土壤管理措施径流中不同形态磷的流失量

由图5可知,不同土壤管理措施下水溶性磷的搬运迁移是径流中磷的主要流失形态,占总磷的比重在77.4%~90.5%之间,平均82.9%,颗粒态磷所占比

例较小。这说明,本试验区中性紫色土磷素主要通过径流冲刷淋洗的方式进入地表径流中的。

3 结论

(1)基于降雨量、降雨历时、降雨强度,研究区域的降雨可以分为 A 型(小雨量、短历时、低雨强)、B 型(大雨量、长历时、中雨强)、C 型(中雨量、中历时、高雨强)。A 型降雨是研究区的发生频率最高的降雨类型,B 型和 C 型降雨是使坡面产流产沙的主要降雨类型。

(2)不同土壤管理措施下侵蚀性降雨量临界值差异不明显,在降雨量>10.0 mm 坡面开始产流产沙。不同处理间土壤对于雨滴击溅和径流冲刷导致的侵蚀的敏感度是不同的,CK 组的侵蚀敏感性最高,PAM 组侵蚀敏感性最低。产沙量随降雨量变化过程表现出明显的阶段性,在低雨量区($P<40.0\text{ mm}$)产沙量增加缓慢,高雨量区($P>40.0\text{ mm}$)产沙量迅速增加。

(3)不同降雨类型下各土壤管理措施的减流减沙效应不同。A 型(小雨量、短历时、低雨强)降雨下,腐殖酸、聚丙烯酰胺和绿肥保水减流效应明显,聚丙烯酰胺保土减沙明显;B 型(大雨量、长历时、中雨强)降雨下,腐殖酸、聚丙烯酰胺和绿肥减流减流减沙效果不明显;C 型(中雨量、中历时、高雨强)降雨下,只有聚丙烯酰胺保水减流效果明显。

(4)次降雨条件下不同土壤管理措施径流中氮素流失量差异明显,对照组流失量最高,其次为腐殖酸组,再次聚丙烯酰胺组,绿肥组的氮流失量最低。不同土壤管理措施径流中磷素流失量总体趋势呈现对照组>腐殖酸组>聚丙烯酰胺组>绿肥组,但差异不显著($P>0.05$)。不同土壤管理措施下水溶性磷的搬运迁移是径流中磷的主要流失形态。

参考文献:

[1] 何毓蓉. 中国紫色土[M]. 北京:科学出版社,2003.
[2] 罗艺,吴福忠,杨万勤,等. 四川盆地紫色丘陵区不同种植模式下氮流失特征[J]. 环境科学学报,2010,30(11): 2221-2228.
[3] 刘刚才. 紫色土侵蚀规律及其防治技术[M]. 成都:四川大学出版社,2008.
[4] 唐寅. 紫色丘陵区坡耕地土壤侵蚀特征及植被覆盖与管理因子研究[D]. 重庆:西南大学,2012.
[5] 罗艺. 长江上游典型紫色丘陵区面源污染模型[D]. 成都:四川农业大学,2010.

[6] 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.
[7] 陈渠昌,雷廷武,李瑞平. PAM 对坡地降雨径流入渗和水力侵蚀的影响研究[J]. 水利学报,2006,37(11):1290-1296.
[8] Lentz R D. Inhibiting water infiltration with polyacrylamide and surfactants: Applications for irrigated agriculture[J]. Journal of Soil & Water Conservation,2003,58(5):290-300.
[9] 李锦. 施用不同有机肥对紫色土碳氮磷影响的研究[D]. 成都:四川师范大学,2015.
[10] 倡国涵,赵书军,王瑞,等. 连年翻压绿肥对植烟土壤物理及生物性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(4):905-912.
[11] 袁东海,王兆骞,陈欣,等. 红壤小流域不同利用方式氮磷流失特征研究[J]. 生态学报,2003,23(1):188-198.
[12] Wei W,Chen L,Fu B,et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China[J]. Journal of Hydrology, 2007,335(3/4):247-258.
[13] 秦伟,左长清,晏清洪,等. 红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J]. 农业工程学报,2015,31(2):124-132.
[14] 李素清,李斌,张金屯. 不同降雨量下的黄土高原土壤侵蚀特征分析[J]. 农业环境科学学报,2005,24(1):94-97.
[15] 黄炎和. 闽南地区的土壤侵蚀与治理[D]. 福州:福建师范大学,2001.
[16] 靳志丽,刘国顺,聂新柏. 腐殖酸对土壤环境和烤烟矿质吸收影响的研究[J]. 中国烟草科学,2002,23(3):15-18.
[17] 何杨洋,王晓燕,段淑怀. 密云水库上游流域次降雨坡面产流产沙特征[J]. 农业工程学报,2015,31(24):134-141.
[18] 万丹. 紫色土不同利用方式下土壤侵蚀及氮磷流失研究[D]. 重庆:西南大学,2007.
[19] 王辉,王全九,邵明安. PAM 对黄土坡地水分养分迁移特性影响的室内模拟试验[J]. 农业工程学报,2008,24(6):85-88.
[20] 叶协锋,杨超,李正,等. 绿肥对植烟土壤酶活性及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(2):445-454.
[21] 李正. 绿肥对植烟土壤培肥改良效应及烤烟产质量的影响[D]. 郑州:河南农业大学,2010.
[22] 滕玲玲. PAM 对紫色土坡地土壤磷素流失的控制效应与机理分析[D]. 重庆:西南大学,2008.