

坡形和 PAM 对黄土坡地水土养分迁移特征的影响

邢伟民¹, 王懿潼¹, 徐浩林², 杨培岭², 敖畅²

(1.扬州大学水利科学与工程学院,江苏 扬州 225009;2.中国农业大学水利与土木工程学院,北京 100083)

摘要:通过野外径流小区人工降雨试验,研究坡形和聚丙烯酰胺(PAM)对径流量、土壤侵蚀和养分流失的影响。试验设置2个PAM施用量,分别为0,2 mg/L;9种坡形处理,即4个凹形坡,4个凸形坡,1个直形坡。结果表明:(1)与均匀坡面相比,凸形坡的平均土壤流失量、氨氮流失量和磷酸盐流失量分别增加25.12%,24.01%和26.96%,且土壤和养分流失量随着凸形坡面的凸度增加而增加,凹形坡的平均土壤流失量、氨氮流失量和磷酸盐流失量分别减小13.53%,10.85%和19.95%;(2)凹形和凸形坡面的径流量差异很小,且均大于均匀面的径流量;(3)施用PAM后,3种坡形的坡面土壤流失均减少90%以上,养分流失减少28.19%~68.13%,且PAM施用 in 凸形坡上减少水土养分流失量效果最佳。

关键词:坡形;聚丙烯酰胺;土壤侵蚀;养分流失;黄土坡地

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)06-0135-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2020.06.020

Effects of Polyacrylamide and Slope Shape on Transportation of Soil Water and Nutrients from the Loess Sloping Land

XING Weimin¹, WANG Yitong¹, XU Haolin², YANG Peiling², AO Chang²

(1.College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009;

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

Abstract: To investigate the effects of slope shapes and polyacrylamide (PAM) applications on runoff, soil erosion and nutrient loss, this study conducted the field artificial rainfall experiments with two PAM application rates and nine slope shapes. The results showed that the average amount of soil, ammonia nitrogen and phosphate losses from convex slopes increased by 25.12%, 24.01% and 26.96% compared to the uniform slopes, respectively, while those of concave slopes decreased by 13.53%, 10.85% and 19.95%, respectively. Soil and nutrient losses were also increased with the increase of convexity in convex slopes. For runoff, there was little difference between concave and convex slopes, but the runoff amounts of both convex and concave slopes were greater than those of uniform slopes. After PAM application, the soil loss decreased by more than 90% and the nutrient loss decreased by 28.19%~68.13%. Application of PAM had the best effect on reducing soil erosion and nutrient loss in convex slopes.

Keywords: slope shape; Polyacrylamide; soil erosion; nutrient loss; loess slope

水土流失作为一个环境和农业的综合问题,不仅导致土壤养分流失和土地质量退化,还造成河流泥沙堆积和地表水富营养化等一系列环境问题。坡地土壤养分的流失与地形、降雨、土壤质地等多种条件密切相关^[1],而地形条件中又包括坡度、坡长和坡形等多个变化因素。目前大多数研究^[2-3]主要关注坡度和坡长对坡地水土流失的影响,对坡形的研究相对较少。

自然坡地中坡面形状大多是不规则的,坡度和坡长

是坡形的基本组合要素。坡面的凹凸程度影响坡面薄层水流运动特性和局部坡度^[4],进而影响坡面土壤侵蚀的发育过程和发育程度。杨丽娜等^[5]的研究结果表明,凹形坡产流量和含沙量最大,其次为凸形坡,直线形坡最小;Wu等^[6]的研究结果表明,坡面产沙量表现为凸形坡>直线形坡>凹形坡,其主要原因是凹形坡泥沙沉积于坡面下部1/3处,导致产沙较少;于晓杰等^[3]通过室内模拟降雨试验研究了不同坡形坡面的

收稿日期:2020-05-27

资助项目:国家自然科学基金项目(51239009)

第一作者:邢伟民(1990—),男,讲师,主要从事水土保持与氮磷迁移研究。E-mail: xingweimin@yzu.edu.cn

通信作者:杨培岭(1958—),男,教授,主要从事农田水利学研究。E-mail: yangpeiling@126.com

产沙过程表明,不同坡形坡面水流含沙量的排序为凹形坡>凸形坡>直线形,且坡形对侵蚀产沙的影响程度与降雨历时、雨强和坡度呈正相关。

地形是影响坡地水土养分流失的重要因素^[7-9]。Wu 等^[10]通过人工模拟降雨试验发现,氮素流失与坡度显著相关;Zhang 等^[11]通过室内模拟降雨试验发现,悬浮固体和磷的损失量随着坡度的增加而增加;安妙颖等^[12]和 Chaplot 等^[13]通过对不同坡度的模拟降雨试验发现,坡面的氮损失与径流时间和坡长有关,并且氮流失量随着坡长的增加而增加。除坡度和坡长外,坡面形状也是影响地表水流和土壤侵蚀的重要因素,因此同样会影响坡面土壤养分迁移过程。目前,有关坡面形状对土壤养分流失的影响研究较少。吕威^[14]研究了不同坡度组合对坡面养分流失的影响表明,坡形对径流速效磷影响不显著,而对泥沙中硝态氮含量影响较为显著。而复杂坡面条件下土壤养分流失过程,以及坡形对土壤和养分流失的影响机理尚不清晰。

坡面水土流失和养分流失也与水土保持措施有关^[15]。聚丙烯酰胺(PAM)作为一种有机土壤改良剂,广泛用于水土流失治理^[16-17]。PAM 是一种高度细分的有机化合物,溶解后具有很强的黏附力。在土壤中施用 PAM 后,土壤颗粒通过溶解的 PAM 连接在一起,有效提高了土壤的抗侵蚀能力^[18]。此外,带负电的 PAM 分子可与土壤颗粒、阳离子(例如 Ca^{2+})等相互吸附,有效改善土壤团聚体的结构并增强了土壤结构的稳定性^[19]。宋月君等^[20]发现,施用 PAM 能有效降低南方典型土壤的产沙率;Entry 等^[21]通过在沟灌中的试验发现,添加 PAM 后田间土壤氮素损失减少 31%;李晶晶等^[22]研究了不同 PAM 施用量在苹果坡地中的应用效果发现,径流和侵蚀泥沙中的铵态氮、速效磷和速效钾的浓度均随聚丙烯酰胺撒施量的增加而降低。此外,PAM 对土壤养分流失的影响还与养分离离子所带电荷有关,Li 等^[23]发现,在降雨前在坡面上施用 PAM 颗粒硝酸盐的流失量增加,但氨氮的流失量减少。目前大多数研究是将 PAM 施用在直形坡面上,而 PAM 在不同坡形上运用的研究较少,因此,仍需深入探究复杂坡面下施加 PAM 对土壤侵蚀和养分流失的影响。

综上所述,先前的研究已经证明坡面形状对土壤侵蚀过程具有显著影响,但坡面形状对土壤养分迁移过程影响的研究较为缺乏,特别是坡面凹凸程度的对养分迁移的影响机理仍需深入探讨。此外,本研究还试图探讨不同坡形坡面上 PAM 的应用效果。因此,本次研究的目的包括:(1)通过野外人工降雨试验探

究不同坡度条件下径流、土壤侵蚀和养分流失的过程;(2)研究 PAM 在不同坡形坡面上减少土壤侵蚀和养分流失的效果。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验于 2018 年 4—10 月于内蒙古自治区和林格尔县($40^{\circ}12'N, 111^{\circ}41'E$)试验基地进行。研究区为半干旱气候条件,年平均气温为 6.2°C ,年蒸发蒸腾量为 623.4 mm ,年平均降雨量为 392.8 mm ,且降雨主要集中在 6—9 月,历史最大降雨强度为 99.1 mm/d 。为了确定土壤质地,从每个坡面的 0—20 cm 表层中随机收集 5 个土壤样品,并采用 Malvern 激光粒度分析仪测量样品土壤粒度分布,土壤中含砂 84.23% ($>0.020\text{ mm}$),粉砂 10.84% ($0.020\sim 0.002\text{ mm}$)和黏土 4.93% ($<0.002\text{ mm}$)。根据国际土壤质地分类标准归类,研究区土壤为壤质砂土。土壤容重为 1.42 g/cm^3 ,总氮和总磷含量分别为 $0.17, 0.35\text{ g/kg}$, $\text{pH } 8.3$ 。

1.2 试验处理

试验区共分为 9 个坡形小区,包括 4 个凹形坡、4 个凸形坡和 1 个直形坡,所有坡形平均坡度为 15° ,坡宽 0.8 m ,坡长 10 m 。凹凸等级划分方法为:较直形坡坡面中心点向下塌陷 $10, 20, 30, 40\text{ cm}$ 凹形坡分别记为 A1、A2、A3、A4;坡面中心点向上凸起为 $10, 20, 30, 40\text{ cm}$ 凸形坡分别记为 T1、T2、T3、T4;直形坡记为 P。设计 2 个 PAM 施用量,包括 $0, 2\text{ g/m}^2$ 。本次试验共计 $18(2\times 9)$ 个处理。PAM 处理的试验组分别记为 T1—P、T2—P、T3—P、T4—P、P—P、A1—P、A2—P、A3—P、A4—P(表 1)。

1.3 试验装置

不同坡形小区的试验装置系统主要包括模拟降雨系统、径流小区、PVC 隔板、径流收集桶、雨量桶等。试验中采用侧喷模拟降雨。通过设置不同喷头型号和个数,以水泵的工作压力来控制模拟降雨的强度和均匀,模拟降雨高度设置为 3 m ,降雨面积为 $5\text{ m}\times 10\text{ m}$ 。试验设计降雨强度 50 mm/h ,试验降雨高度 3 m ,在试验前率定其强度和均匀度。降雨区内水平布置 50 个雨量桶,行距、列距均为 1 m ,模拟降雨 10 min 测量桶内水的体积,求其均匀度。通过测量,整个小区实测雨强为 51.3 mm/h ,均匀度为 81.6% 。采用色斑法测定雨滴直径,雨滴终速通过修正沙玉清公式计算,结果表明雨滴平均粒径 1.4 mm ,雨滴终速为 5.2 m/s ,降雨动能为 $13.52\text{ J}/(\text{mm}\cdot\text{m})$ 。

径流小区投影面积为 $5\text{ m}\times 10\text{ m}$,用 PVC 板将其分成 6 个区域,中间 4 个区域单宽均为 80 cm ,用

于试验,两侧区域单宽均为 90 cm,用于率定降雨强度。PVC 板埋深 30 cm,土壤上方露出 20 cm,防止

由雨滴击溅作用引起的土壤水分和土壤颗粒的飞溅,影响试验结果的准确性。

表 1 试验处理

坡形	凹凸 程度/cm	PAM 施用量/ (g · m ⁻²)	简写	坡形	凹凸 程度/cm	PAM 施用量/ (g · m ⁻²)	简写
凸	10	0	T1	凸	10	2	T1—P
凸	20	0	T2	凸	20	2	T2—P
凸	30	0	T3	凸	30	2	T3—P
凸	40	0	T4	凸	40	2	T4—P
平	0	0	P	平	0	2	P—P
凹	10	0	A1	凹	10	2	A1—P
凹	20	0	A2	凹	20	2	A2—P
凹	30	0	A3	凹	30	2	A3—P
凹	40	0	A4	凹	40	2	A4—P

1.4 试验方法

模拟降雨前先将坡面进行除草、平整,然后将速溶复合肥(N:P:K=24:6:10)溶解后采用喷雾的形式均匀的喷洒在坡面表面,各坡面施肥量均控制在 80 g/m²。对于施加 PAM 的试验组,将 PAM 颗粒与少量干土混合后均匀施撒在坡面土壤表面,不施用 PAM 的试验组,将等量干土均匀施撒在坡面土壤表面。施用干土或干土与 PAM 混合物完成后,试验开始前采用喷雾湿润小区,保证在模拟降雨前土壤含水率基本一致。野外模拟降雨试验一般在早上 5:00—7:00 无风条件下进行,以保证降雨的均匀度,因此在试验前一天晚上对土壤进行湿润。

模拟降雨持续 45 min,坡面开始产生不间断径流时记录产流时刻,并收集第 1 个径流样品,产流开始后 10,15,20,30,40,45 min 收集径流样品,每次收集持续 1 min。通过测量径流桶高度得到径流体积,然后从径流桶中取 200 mL 样品,静置 48 h 直至沉淀完成。上清液用于测量氨氮和磷酸盐浓度,采用流动分析仪法测定径流及泥沙中的养分浓度。泥沙烘干后测量重量,计算径流中的含沙率。

2 结果与分析

2.1 坡面径流过程

从图 1 可以看出,在没有施用 PAM 的试验组中,平坡的平均产流时间为 4.80 min,比凹形坡(4.26 min)和凸形坡(3.43 min)晚。施用 PAM 后,9 个坡面的径流的开始时间延迟 0.66~2.50 min,且凸形面坡上仍最先产流,PAM 推迟径流时间最长效果也出现在凸形坡面。这表明在凸形坡施用 PAM 能够更好地延迟产流时间。

由图 1 还可看出,不同试验组的径流率均随着降雨时间的增加而逐渐增加,最后趋于稳定。在没有施用 PAM 的试验组中,凹形坡面径流率大于均匀坡面

和凸形坡面,而均匀坡面和凸形坡面的径流率在整个降雨过程中无明显差异。整体上,PAM 处理的径流率均低于无 PAM 处理的,这说明 PAM 可以减少坡面径流。在 PAM 处理的试验组中,径流率大小关系为凸形坡面>均匀坡面>凹形坡面,且径流率随凸形坡凸度的增加而增加。

由表 2 可知,凸形坡面的径流总量最大,其次为凹形坡面,均匀坡面的径流总量最小。凸形坡面的平均总径流量分别比凹形和均匀坡面的径流大 7.5%和 10.0%。在没有施用 PAM 施用的试验组中,径流量总量随着凹度和凸度的增大而增大。施用 PAM 后总径流量明显减少,但在凹形坡面中径流总量变化不大,而在凸形坡面中,随着凸度的增大而增大。

2.2 坡面产沙过程

不同坡形和 PAM 处理的径流含沙率随降雨时间的变化见图 2。在无 PAM 处理的试验组中,径流含沙率在降雨开始后 20 min 内逐渐增加,之后小幅波动。PAM 处理试验组中,径流含沙率在降雨开始后 15 min 迅速下降,然后逐渐增加。未施用 PAM 处理的径流含沙率约为 PAM 处理的 15 倍。这表明施用 PAM 能有效地减少降雨过程中的土壤流失。未施加 PAM 试验的降雨期间,凸形坡面的径流含沙率大于凹形坡面和均匀坡面,而 T4 处理的径流含沙率最大。在施用 PAM 处理的试验组中,径流中凹形坡面的径流含沙率低于凸形坡面和均匀坡面。整体而言,径流中的含沙率从 A1 到 A4 逐渐降低,但从 T1 到 T4 逐渐增加。

在没有施用 PAM 的试验组中,4 个凹形坡面的平均土壤流失量(14.5 kg)低于凸面坡度(21.0 kg)和均匀坡面(16.8 kg),且土壤流失量随着凸度的增大而增大,随着凹度的增大而减小。在施用 PAM 处理的试验组中,土壤流失量减少 90%以上,且土壤流失量的随凹凸程度变化的规律与不施用 PAM 的试验

结果类似。

2.3 坡面氮磷流失过程

径流中氨氮浓度随降雨时间变化见图 3。不同处理组的径流氨氮浓度随降雨时间逐渐降低。施用 PAM 试验组的径流氨氮浓度一般小于不施用

PAM 试验组。此外,在 PAM 试验组中,径流氨氮浓度在降雨开始后的前 30 min 急剧降低,随后降低速率逐渐放缓。在降雨过程中,凸形坡面的径流氨氮浓度高于凹形坡面和均匀坡面,其中 T4 的径流氨氮浓度最大。

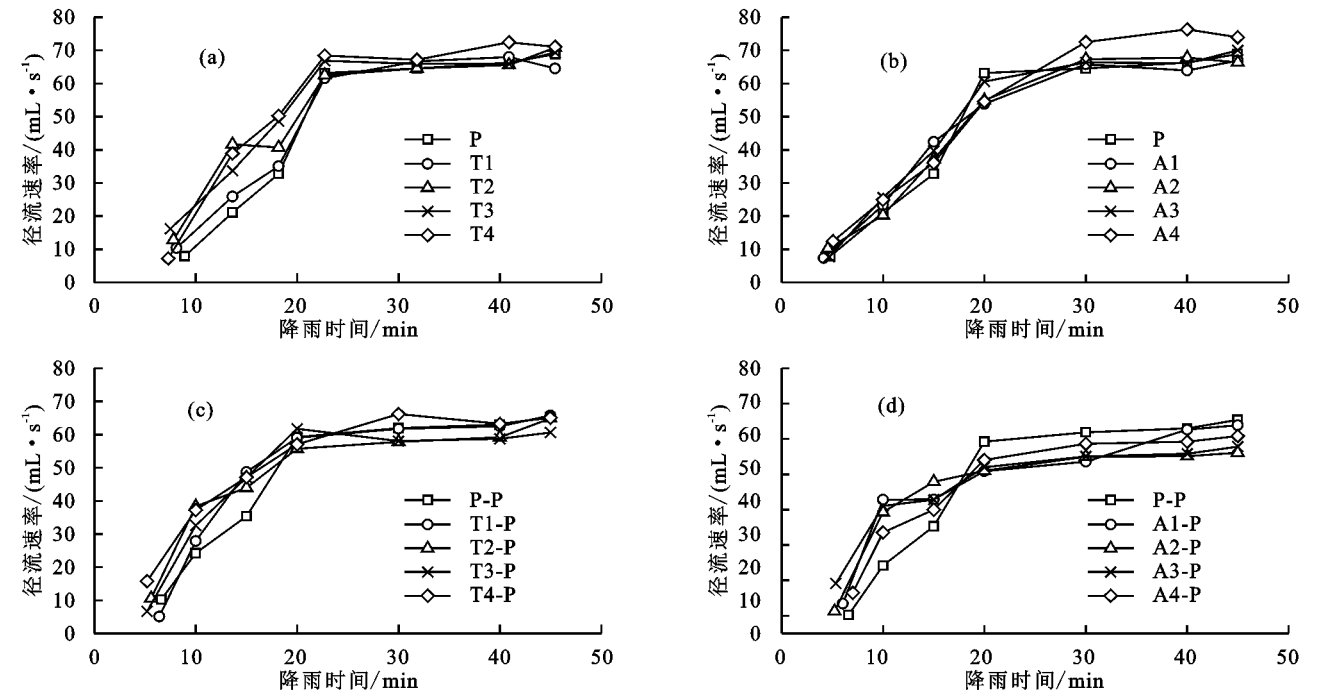


图 1 径流速率随降雨时间的变化过程

表 2 不同坡形和 PAM 处理的径流总量、土壤流失量、氮磷流失量

坡形	无 PAM 处理				PAM 处理			
	径流总量/ L	土壤 流失量/kg	氨氮 流失量/mg	磷酸盐 流失量/mg	径流总量/ L	土壤 流失量/kg	氨氮 流失量/mg	磷酸盐 流失量/mg
T1	129.11	16.63	450.72	577.66	123.93	1.13	262.77	218.55
T2	135.98	20.00	510.55	630.42	121.49	1.18	300.24	227.27
T3	139.50	22.21	548.51	755.83	122.77	1.35	345.92	240.87
T4	145.01	25.14	684.91	937.13	131.88	1.41	491.86	388.74
P	124.86	16.78	442.44	571.23	119.69	0.99	225.30	200.13
A1	124.15	15.26	410.08	502.99	118.82	0.54	187.91	185.04
A2	124.78	14.45	380.71	499.42	116.67	0.52	192.07	178.76
A3	128.44	14.58	388.53	412.49	117.66	0.47	224.45	205.16
A4	133.64	13.75	398.48	414.19	116.79	0.46	229.20	201.84

径流中磷酸盐浓度随降雨时间的变化与氨氮浓度的变化相似。在没有施用 PAM 处理的试验组中,径流中磷酸盐浓度的顺序为凸形坡>均匀坡>凹形坡(图 4a、图 4b)。与未施用 PAM 处理的试验组相比,施用 PAM 的试验组 9 个坡形坡面径流中磷酸盐浓度都相对较低,这表明施用 PAM 可以减少坡面径流磷酸盐的损失。在 PAM 处理试验组中,凸形坡面径流中的磷酸盐浓度高于均匀坡面和凹形坡面,尤其是在降雨的前 30 min。而整个降雨过程中均匀坡面和凹形坡面的径流磷酸盐浓度差异不明显(图 4c、图 4d)。

从表 2 可以看出,在未施加 PAM 的试验组中,

凸形坡的平均氨氮流失总量最大,其次是均匀坡,凹形坡最小。凸形坡面径流中的氨氮的流失量比均匀坡面增加 24.0%,而比凹面坡面减少 10%。随着坡面从 A4 到 T4 的变化,径流中氨氮流失量逐渐增大。对于 9 种不同形状坡面,施用 PAM 处理后径流氨氮流失总量均明显降低。在 PAM 处理中,径流氨氮流失量随凸度的增加而增加,在 T4 处理中最大。

总磷酸盐流失量随凹度和凸度的变化和氨氮的相似。与不施用 PAM 的坡面相比,凸形和均匀坡面上磷酸盐损失量减少 58.5%~68.1%,而凹形坡面减少约 57%。该结果表明,在凸形和均匀坡面上施用

PAM 具有更好减少磷酸盐随径流流失的效果。

3 讨论

3.1 坡形对水土养分流失的影响

在不均匀坡面上,沿坡面的局部坡度差异很大,因此非均匀坡面的径流、土壤流失和养分流失可能与均匀坡面有很大差异^[2,24]。在凸形坡面和凹形坡面中,径流总量相似(表 2),且均大于均匀坡面。但是,在凸形坡和

凹形坡上的产汇流过程是不同的。对于凸形坡,更多的细小颗粒通过地表径流运输,这可能堵塞土壤表面孔隙,从而降低渗透能力^[25]。但对于凹形坡来说,由于地表径流流速的降低,地表水流携带的土壤颗粒沉积在坡的末端,导致坡面末端土壤孔隙堵塞和渗透率降低^[6]。此外,凹凸程度的增大会增大坡面的承雨面积。因此,径流量总量随凹度和凸度的增加而增加。

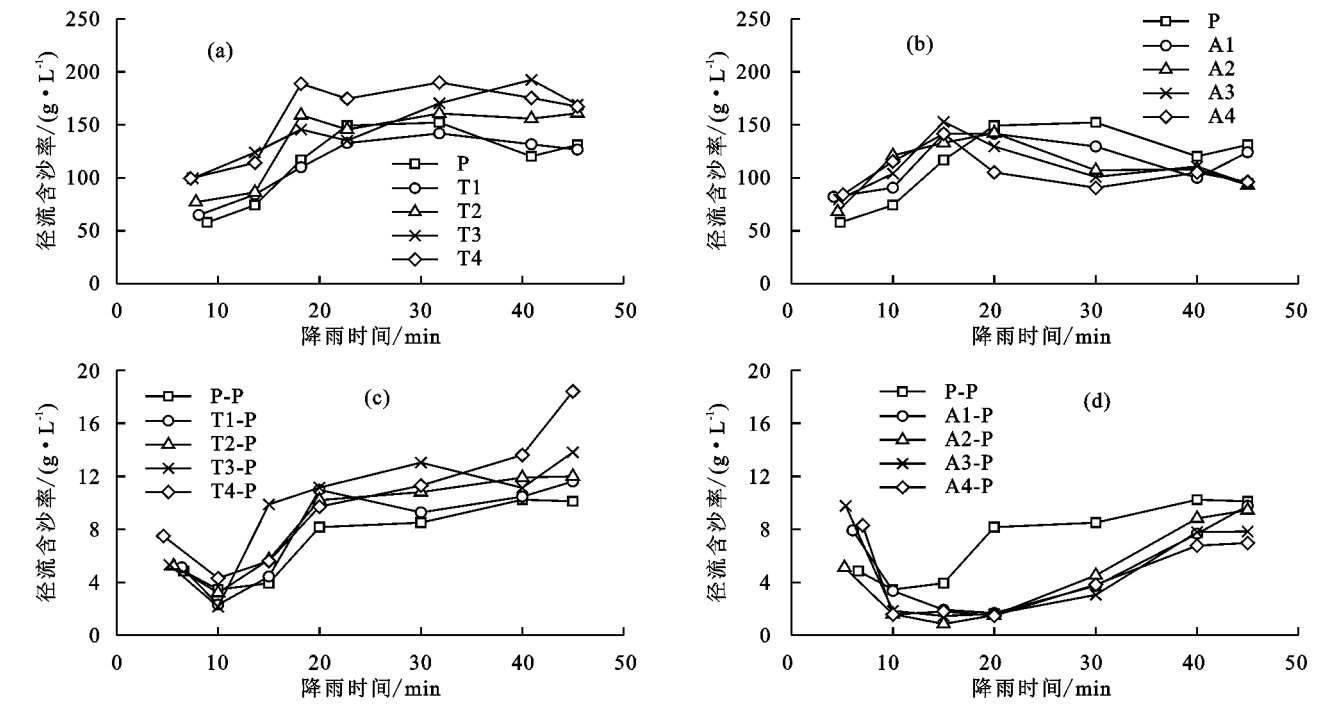


图 2 径流含沙率随降雨时间的变化过程

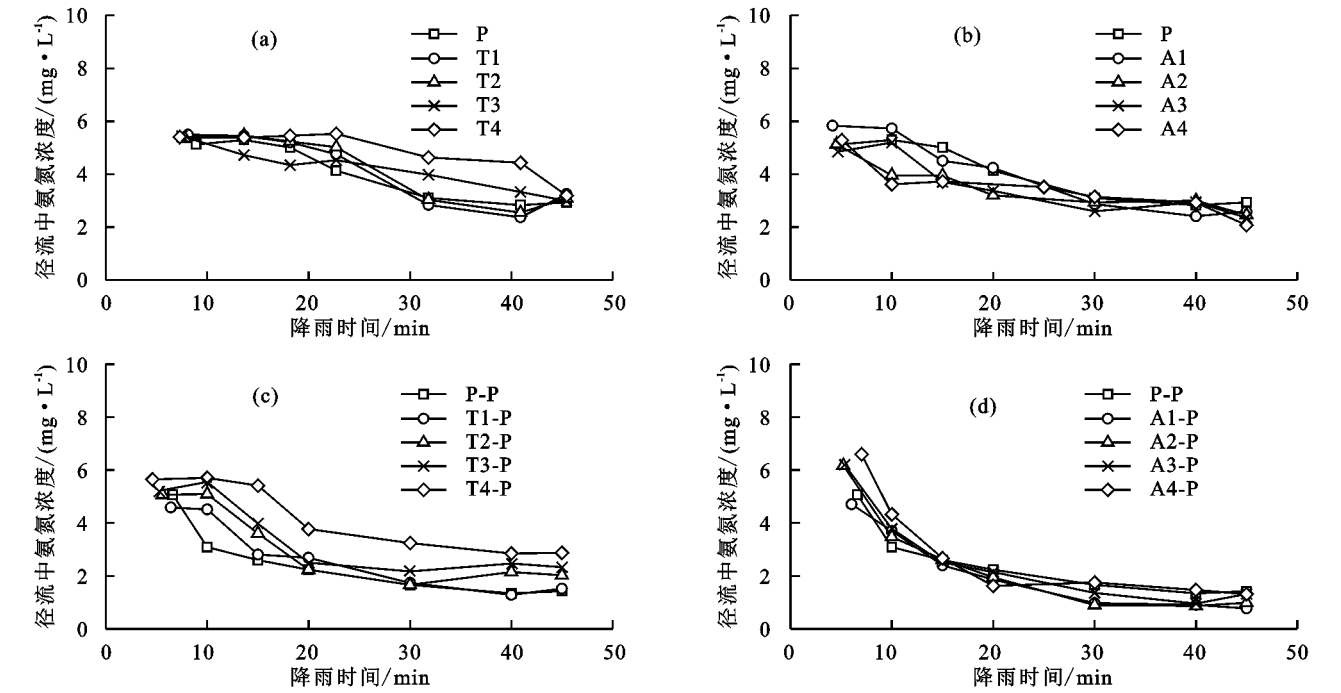


图 3 径流中氨氮浓度随降雨时间的变化过程

与凹形和均匀坡相比,凸形坡土壤流失量更多,这与 Sensoy 等^[2]通过自然降雨的监测结果类似。此外,径流土壤流失量从凹到凸逐渐增大。这主要是由于地表

水流的剪切力随着坡度的增加而增加,坡度较大的坡面在降雨过程中更容易发生沟壑侵蚀,导致径流携带更多的土壤^[26-27]。对于凸形坡,下半坡的坡度大于均匀坡的

坡度,并随着凸度的增加而增加。因此在凸形坡的下半部很容易产生沟蚀,特别是 T3 和 T4 处理的凸形坡上。通常,土壤侵蚀量与径流量成正比^[9]。在凹形坡中,土壤流失量随着凹度的增大而减少,但径流量却轻微增

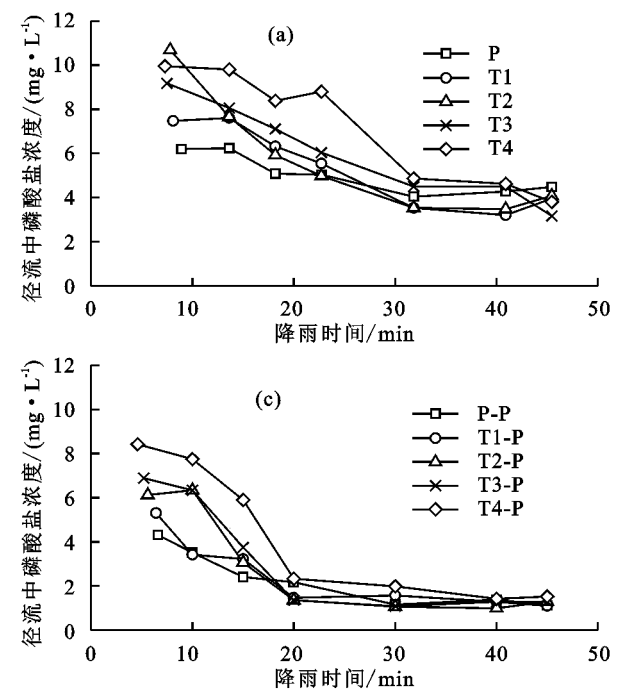


图 4 径流中磷酸盐浓度随降雨时间的变化过程

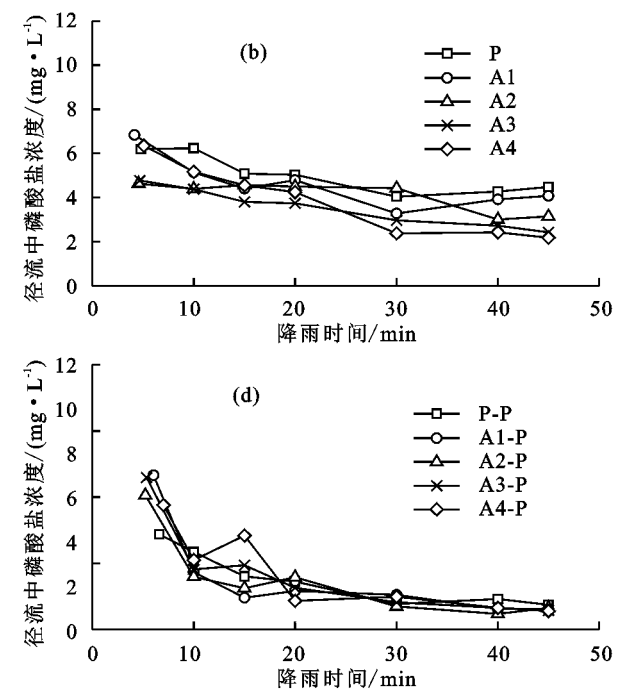
氨氮和磷酸盐的流失量随着凸度的增大而增大,随着凹度的增大而减小(表 2)。这主要是由于土壤损失随着凸起程度的增加而逐渐增加。有研究^[28]表明,径流中的养分流失量与土壤流失量成正相关。细沟侵蚀在凸形坡下半部分更容易产生,造成更多的土壤流失,从而导致径流中的养分含量更高,流失量增大。

3.2 PAM 对水土养分流失的影响

在坡面表层土壤中施加 PAM 后,不同坡形坡面的径流和土壤流失量均减少。PAM 可以改善土壤结构,并抑制土壤结皮,从而抑制降雨过程中土壤入渗能力的降低^[29]。PAM 溶解后,带负电荷的 PAM 分子通过阳离子(Ca²⁺)与带负电荷的土壤颗粒吸附在一起,从而增强土壤团聚体的稳定性^[15]。同时,PAM 溶液还具有很强的黏度,提高土壤结构的稳定性,增强土壤的抗侵蚀性^[19]。此外,PAM 溶液的黏度也会降低径流的流速,从而导致径流的侵蚀动力降低。

与不施用 PAM 的试验组相比,PAM 处理的坡面氨氮和磷酸盐损失量分别减少 28.2%~54.1%和 50.2%~64.5%(表 3)。Xing 等^[9]研究表明,土壤侵蚀是降雨径流过程中土壤养分流失的主要原因之一。施加 PAM 可减少约 90%土壤流失量,从而减少随土壤颗粒流失的土壤养分。李晶晶等^[22]的研究表明,PAM 对坡面养分流失的影响也与溶质所带的电荷有关,土壤中磷酸盐的吸附能力大于氨氮^[30],因此,

大。在凹形坡的下半部分,由于坡度的变缓,地表径流流速变慢,导致流动携带的土壤颗粒沉积,这不仅减少土壤流失的数量,而且堵塞土壤表面孔隙并降低了渗透能力,从而增加凹形坡面的径流。



PAM 在减少磷酸盐损失方面表现更好(表 3)。

另外,PAM 在坡面减少水土养分流失的效果还与地形条件有关^[17]。本研究中,PAM 减少径流的作用随着凹度和凸度的增大而增加。PAM 减少的土壤流失量从凸形坡到凹形坡逐渐减少,但其在各个坡形土壤流失量中的占比却逐渐增大。随着坡面形状从凹到凸,地表水流在坡面下半的冲刷能力逐渐增强,将超过施用 PAM 后土壤的抗侵蚀能力,因此,凸形坡上土壤流失的减少比例低于凹形坡面和均匀坡面。

施用 PAM 对氨氮和磷酸盐流失的减少量随凹形坡到凸形坡大多呈逐渐增加趋势,但 PAM 对氨氮和磷酸盐流失减少量所占的比例先增大后减小。坡地养分流失是由土壤侵蚀和溶质扩散共同决定的^[8,31]。在凸形坡上,土壤侵蚀量较大(图 4b),因此土壤侵蚀引起的养分流失占主导地位。土壤流失量随凸度的增加而增加,而 PAM 减少土壤流失的效果随凸度的增加而降低(表 3),施用 PAM 减少的养分流失比例下降。施用 PAM 后,凹形坡面的土壤流失量相对较小,因此,由溶质扩散引起的养分流失比例增加。此外,在凹形坡下半部分径流的流速降低,这增加了溶质扩散的作用时间。因此,凹形坡面的养分流失量变化不大,甚至随着 PAM 处理中凹度的增加而略有增加。

表 3 PAM 对不同坡形坡面水土养分流失减少量及其比例

坡形	径流 减少量/L	土壤流失 减少量/kg	氨氮流失 减少量/mg	磷酸盐流失 减少量/mg	径流减少 比例/%	土壤流失 减少比例/%	氨氮减少 比例/%	磷酸盐流 减少比例/%
T1	5.18	15.50	187.95	359.11	4.01	93.22	41.70	62.17
T2	14.49	18.82	210.30	403.15	10.65	94.10	41.19	63.95
T3	16.73	20.86	202.59	514.95	11.99	93.93	36.93	68.13
T4	13.13	23.73	193.05	548.39	9.05	94.38	28.19	58.52
P	5.17	15.79	217.14	371.10	4.14	94.10	49.08	64.97
A1	5.33	14.72	222.16	317.95	4.30	96.44	54.18	63.21
A2	8.11	13.93	188.64	320.66	6.50	96.40	49.55	64.21
A3	10.78	14.12	164.08	207.34	8.39	96.78	42.23	50.26
A4	16.85	13.29	169.28	212.36	12.61	96.65	42.48	51.27

注:表中减少量与减少比例均是基于不施用 PAM 处理。

4 结 论

(1)与凹形坡和均匀坡相比,凸形坡土壤和养分流失最多,且土壤和养分流失随着凸形坡的凸度增加而增加。

(2)凹形和凸形坡面的径流量差异不大,且均大于均匀坡面。

(3)施用 PAM 有效减少土壤侵蚀和养分流失,且减少的效果与坡面的形状有关,PAM 应用在凸形坡面时减少水土流失和养分流失的效果最佳。

本研究为不同坡形和 PAM 应用下的径流,侵蚀和氮磷素流失提供了数据支持和理论依据,对优化流域的面源污染和水土保持措施的管理具有重要意义。然而,本研究的结果是基于次降雨和单一土壤类型,因此需要长期监测不同土壤类型地区的降雨过程中水土养分流失,以充分探究坡形和施用 PAM 的长期影响机理。

参考文献:

[1] 王全九,杨婷,刘艳丽,等.土壤养分随地表径流流失机理与控制措施研究进展[J].农业机械学报,2016,47(6): 67-82.

[2] Sensoy H, Kara O. Slope shape effect on runoff and soil erosion under natural rainfall conditions[J]. Forest-Bio-geosciences and Forestry,2014,7(2):110-114.

[3] 于晓杰,魏勇明.不同坡形坡面侵蚀产沙过程的影响研究[J].水土保持研究,2010,17(1):97-100.

[4] Rieke-Zapp D H, Nearing M A. Slope shape effects on erosion[J]. Soil Science Society of American Journal, 2005,69(5):1463-1471.

[5] 杨丽娜,范昊明,郭成久,等.不同坡形坡面侵蚀规律试验研究[J].水土保持研究,2007,14(4):237-239.

[6] Wu S B, Chen L, Wang N L, et al. Two-dimensional rainfall-runoff and soil erosion model on an irregularly rilled hillslope [J]. Journal of Hydrology, 2020, 580: 124346.

[7] Wang W, Wu X h, Yin C M, et al. Nutrition loss through surface runoff from slope lands and its implications for agricultural management[J].Agricultural Water Management,2019,212:226-231.

[8] Xing W M, Yang P L, Ao C, et al. Mathematical model of ammonium nitrogen transport to runoff with different slope gradients under simulated rainfall[J].Water,2019, 11(4):675-690.

[9] Xing W M, Yang P L, Ren S M, et al. Slope length effects on processes of total nitrogen loss under simulated rainfall[J].Catena,2016,139:73-81.

[10] Wu L, Qiao S S, Peng M L, et al. Coupling loss characteristics of runoff-sediment-adsorbed and dissolved nitrogen and phosphorus on bare loess slope[J].Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25 (14):14018-14031.

[11] Zhang R R, Li M, Yuan X, et al. Influence of rainfall intensity and slope on suspended solids and phosphorus losses in runoff[J].Environmental Science and Pollution Research,2019,26(33):33963-33975.

[12] 安妙颖,韩玉国,徐磊,等.基于 KINEROS2 对坡面径流侵蚀及总氮流失的模拟分析[J].应用基础与工程科学学报,2019,27(4):753-767.

[13] Chaplot V A M, Le Bissonnais Y. Runoff features for interrill erosion at different rainfall intensities, slope lengths, and gradients in an agricultural loessial hill slope[J]. Soil Science Society of American Journal, 2003,67(3):844-851.

[14] 吕威.复合坡面土壤侵蚀与养分流失及其调控模拟试验研究[D].北京:中国农业大学,2017.

[15] 王爱萍,李法虎.聚丙烯酰胺(PAM)应用对土壤养分流失和环境的影响[C].第二届全国农业环境科学学术研讨会,中国:云南 昆明,2007.

[16] 李虎军,王全九,陶汪海,等.不同改良剂对黄土坡耕豆地水土及氮磷流失的影响[J].中国水土保持科学, 2017,15(6):117-125.

- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Abrol V, Shainberg I, Lado M, et al. Efficacy of dry granular anionic polyacrylamide (PAM) on infiltration, runoff and erosion[J].European Journal of Soil Science,2013,64(5):699-705.
- [20] 宋月君,黄炎和,杨洁,等.南方典型土壤坡面产流产沙过程对PAM的响应[J].农业机械学报,2017,48(8):279-287.
- [21] Entry J A, Sojka R E. The efficacy of polyacrylamide to reduce nutrient movement from an irrigated field[J].Transactions of the ASABE,2003,46(1):75-83.
- [22] 李晶晶,邹超煜,白岗栓.聚丙烯酰胺对坡地苹果园水土流失和土壤养分流失的影响[J].应用生态学报,2016,27(9):2991-2999.
- [22] Li F H, Wang A P. Interaction effects of polyacrylamide application and slope gradient on potassium and nitrogen losses under simulated rainfall[J].Catena,2016,136:162-174.
- [24] Lima J L M P, Isidoro J M G P, Lima I D, et al. Longitudinal hillslope shape effects on runoff and sediment loss: Laboratory flume experiments[J].Journal of Environmental Engineering,2018,144(2):4017097.
- [25] Assouline S, Ben-Hur M. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing[J].Catena,2006,66(3):211-220.
- [26] 乔闪闪,吴磊,彭梦玲.人工模拟降雨条件下黄土坡面水—沙—氮磷流失特征[J].环境科学研究,2018,31(10):1728-1735.
- [27] 张会茹,郑粉莉.不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2011,25(3):40-43.
- [28] Ao C, Yang P L, Zeng W Z, et al. Impact of raindrop diameter and polyacrylamide application on runoff, soil and nitrogen loss via raindrop splashing[J].Geoderma,2019,353:372-381.
- [29] Yu J, Lei T, Shainberg I, et al. Infiltration and erosion in soils treated with dry PAM and Gypsum[J].Soil Science Society of America Journal,2003,67(2):630-636.
- [30] Pratiwi E P A, Hillary A K, Fukuda T, et al. The effects of rice husk char on ammonium, nitrate and phosphate retention and leaching in loamy soil[J].Geoderma,2016,277:61-68.
- [31] Gao B, Walter M T, Steenhuis T S, et al. Investigating raindrop effects on transport of sediment and non-sorbed chemicals from soil to surface runoff[J].Journal of Hydrology,2005,308(1/4):313-320.

(上接第 134 页)

- [21] Wang Y, Shao M A, Zhu Y, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China[J].Agricultural and Forest Meteorology,2011,151(4):437-448.
- [22] 王海燕,刘廷玺,王力,等.科尔沁沙地坳甸交错区土壤水分的空间变异规律[J].干旱区研究,2013,30(3):438-443.
- [23] 肖洪浪,李新荣.沙坡头站雨养人工生物防护体系水平衡研究五十年[J].中国沙漠,2005,25:24-30.
- [24] 钟韵,费良军,傅渝亮,等.多因素影响下土壤上升毛管水运动特性 HYDRUS 模拟及验证[J].农业工程学报,2018,34(5):83-89.
- [25] Xie S B, Qu J J, Zhang K C, et al. Hydrothermal variation and its influence on the desertified ground surface of Qinghai-Tibet Plateau[J].Applied Thermal Engineering,2018,131:201-208.
- [26] 王修康,戚兴超,刘艳丽,等.泰山山前平原三种土地利用方式下土壤结构特征及其对土壤持水性的影响[J].自然资源学报,2018,33(1):63-74.
- [27] 余冬立,郑加兴,刘营营,等.围垦年限和土壤容重对海涂土壤水分运动参数的影响[J].农业机械学报,2015,46(2):120-125.
- [28] Nadporozhskaya M A, Mohren G M J, Chertov O G, et al. Dynamics of soil organic matter in primary and secondary forest succession on sandy soils in The Netherlands: An application of the ROMUL model[J].Ecological Modelling,2006,190(3/4):399-418.
- [29] Jia G M, Cao J, Wang C, et al. Microbial biomass and nutrients in soil at the different stages of secondary forest succession in Ziowulin, northwest China[J].Forest Ecology and Management,2005,217(1):117-125.
- [30] Liu Y, Miao M, Chang X, et al. Higher species diversity improves soil water infiltration capacity by increasing soil organic matter content in semi-arid grasslands[J].Land Degradation and Development,2019,30:1599-1606.