

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0411

王丽,王力,王全九.2015.PAM 对不同坡度坡地产流产沙及氮磷流失的影响[J].环境科学学报,35(12):3956-3964

Wang L, Wang L, Wang Q J. 2015. Impacts of PAM on runoff, sediment, nitrogen and phosphorus loss under the different slope lands [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(12): 3956-3964

PAM 对不同坡度坡地产流产沙及氮磷流失的影响

王丽^{1,2}, 王力^{1,2,*}, 王全九²

1. 西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 杨凌 712100

2. 中国科学院水利部水土保持研究所 杨凌 712100

收稿日期: 2015-01-12

修回日期: 2015-04-09

录用日期: 2015-04-09

摘要:聚丙烯酰胺(PAM)是一种高效土壤改良剂,能影响土壤入渗、产流及溶质迁移、淋失。通过人工模拟降雨试验,研究了5°、15°和25°3个坡度水平下PAM对黄土高原沟壑区黑垆土坡地土壤侵蚀及氮磷流失情况的影响。结果显示:施加PAM后增加了5°和15°坡面的总产流量却减少了25°坡面的总产流量;PAM组初始产沙量较大,8 min以后,施加PAM组与对照组产沙速率出现差异并开始降低,表明施用PAM的起作用时间约为8~10 min。5°、15°和25°3个坡度的减沙率分别为38.2%、3.7%和53.9%。PAM对3个坡度径流中磷浓度有减小作用且不受坡度变化的影响,对5°和15°坡面铵态氮浓度影响不明显,但对25°坡面铵态氮浓度有明显减小作用。此外,PAM的施用能降低铵态氮初始流失浓度。施加PAM能影响土壤水分的再分配过程并减少3个坡度坡面硝态氮和磷的向下淋失。施加PAM后,5°、15°和25°坡面磷流失总量显著减少,减小幅度分别为77.6%、64.5%和85.1%;径流硝态氮流失总量随着坡度的增加先增加后减少,在15°~20°之间存在改变PAM对硝态氮影响作用的转折坡度值。PAM处理后的硝态氮流失量与径流量在0.05水平上显著相关,相关系数为0.998;PAM能够显著减少陡坡25°坡面溶解态铵态氮的流失量,减少幅度为60.1%。该项研究结果可为当地PAM的合理有效施用和提高水分及养分利用率提供科学指导。

关键词:土壤改良剂;PAM;坡度;入渗;产流产沙;氮磷流失

文章编号: 0253-2468(2015)12-3956-09

中图分类号: S157.4 X501

文献标识码: A

Impacts of PAM on runoff, sediment, nitrogen, and phosphorus loss under the different slope lands

WANG Li^{1,2}, WANG Li^{1,2,*}, WANG Quanjiu²

1. State Key Laboratory Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateaus, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100

2. Institute of Soil and Water Conservation Chinese Academy of Science & Ministry of Water Resources, Yangling 712100

Received 12 January 2015;

received in revised form 9 April 2015;

accepted 9 April 2015

Abstract: PAM is an effective soil conditioner that can affect soil infiltration, runoff, solute transport, and nitrogen leaching. In this paper, impacts of PAM on soil erosion and nitrogen and phosphorus loss under 5°, 15° and 25° slopes on dark loessial soils in gully region of the Loess Plateau were studied under the artificial rain experiments. The results showed: ① After applying PAM, the total runoff of 5° and 15° were increased but on 25° slope was reduced; initial sediment yield was higher in the PAM group, and 8 min later sediment yield started to reduce and there were significant differences between PAM and the control group. This indicated that work time of PAM was started about 8 to 10 minutes later or so, and the sediment reduction of three slope (5°, 15°, 25°) were 38.2%, 3.7% and 53.9%, respectively. ② In PAM group, phosphorus concentrations of all three slope reduced and it was not affected by the change of slope; for the 5° and 15° slope, the effect of PAM on ammonium nitrogen concentration was not obvious, but the ammonium nitrogen concentration of 25° slope reduced significantly; In addition, the application of PAM could reduce the initial concentration of ammonium nitrogen. ③ PAM could affect the moisture redistribution process and reduced the downward leaching of nitrate nitrogen and phosphorus of all three slope (5°, 15° and 25°). ④ After applying PAM, the total phosphorus loss of 5°, 15° and 25° slope decreased by 77.6%, 64.5% and 85.1% respectively; Total nitrate nitrogen loss was increased with the increase of slope first and then decreased, and there was a slope between 15°~20° slope that could change the effect of PAM on nitrate nitrogen; In PAM group, nitrate nitrogen loss was significant correlated with runoff at the 0.05 level, the correlation coefficient was 0.998; PAM could significantly reduce dissolved ammonia nitrogen loss by 60.1% in 25° slope. The study results could provide effective guidance for the application of

基金项目: 国家自然科学基金(No.51239009)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No.51239009)

作者简介: 王丽(1990—),女,E-mail: wangli626729317@126.com; * 通讯作者(责任作者),E-mail: wangli5208@nwsuaf.edu.cn

Biography: WANG Li(1990—), female, E-mail: wangli626729317@126.com; * Corresponding author, E-mail: wangli5208@nwsuaf.edu.cn

PAM to improve utilization of water and nutrients.

Keywords: soil conditioner PAM; slope; infiltration; runoff and sediment; nitrogen and phosphorus loss

1 引言(Introduction)

氮、磷流失是造成农业面源污染的主要因素,而农业面源污染已经成为水体污染的主要原因(马立珊等,1997;史志华等,2002;刘静等,2012)。因此,减少水土流失、增加坡地保水保肥效应是该地区增加农业生产量和减少面源污染的关键环节,而聚丙烯酰胺(PAM)的改良土壤作用有望能在保持粮食产量的基础上减少水土养分流失。

聚丙烯酰胺(PAM)是一种新型高效土壤结构改良剂,属线型高分子化合物,可溶于水且具有很强的黏聚作用,在全世界范围内得到了广泛的研究与应用,尤其在水土流失严重的黄土高原地区,PAM的施用更加重要。作为土壤结构改良剂,其增加土壤表层颗粒间凝聚力、维系土壤结构、增强土壤抗蚀能力、减少水土流失等作用已被诸多研究证实(Ben-Hur *et al.*,1989; Nadler *et al.*,1996)。张淑芬(2001)和冯浩等(2001)的研究得出,PAM能够维护土壤团聚体的结构并形成新的团聚体,与水相互作用产生的黏聚作用能有效缓解雨滴对土壤的表面打击并抑制结皮的形成,从而可以增加土壤的入渗能力,减少地表径流,防止水土流失。然而,对于不同地面坡度、土壤类型、不同PAM施用量及施用方法,PAM的影响效应差异较大,PAM的保水、保土、保肥和增产效益也并未达成共识。也有研究得出,PAM对土壤入渗率有着截然相反的效果,比如对于黄绵土而言,PAM不但没有提高其入渗速度,相反是降低了其入渗率(刘东等,2006; Sirjacobs *et al.*,2000)。张长保等(2008)的研究也发现,砂黄土在不同PAM用量下均较对照表现出降低入渗、增加径流,并能有效减少土壤侵蚀,其侵蚀量随PAM用量增加而减少。Lentz(2003)研究得出,PAM具有降低入渗或提高入渗作用,取决PAM的类型、使用剂量、土壤类型及操作方法等。

虽有众多学者(张淑芬,2001;冯浩等,2001;夏卫生等,2002)研究了PAM改良土壤结构,减缓水土流失的功效,但大多集中于PAM在入渗、产流、产沙等方面的影响效应,关于施加PAM对养分流失的研究报导还相对较少。对于黄土高原沟壑区坡地,养分流失与水土流失并存,不同坡度的坡地其水土流失与养分流失过程亦存在差异,因此,探求PAM对

养分迁移与流失的影响尤为重要。本研究通过室内人工降雨,探究PAM对不同坡度坡地的产流产沙及氮磷流失的影响,为PAM在黄土高原地区坡地上的应用及推广提供科学依据。

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 试验装置和试验材料

在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室模拟降雨大厅进行人工降雨,采用侧喷式自动模拟降雨系统,喷头高度16 m,雨滴降落终速可达到自然雨滴降落终速的98%以上,降雨特性接近于天然降雨(周佩华等,2000)。供试土壤为代表性的黑垆土,采自陕西省长武县王东沟小流域耕地表层0~20 cm的耕层土,原始土壤有机质含量为1.52%,硝态氮含量 $10.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,铵态氮含量 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $5.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤质地为粘黑垆土,颗粒组成中砂粒(2~0.02 mm)占23.18%,细砂粒(0.02~0.002 mm)占43.17%,粘粒(<0.002 mm)占33.65%。供试土壤风干后过5 mm筛,去除石块、植物根系等杂质。实验土槽规格为:2.0 m×0.3 m×0.55 m(长×宽×高)。在土槽的径流出口处安装“V”形钢槽收集径流,底部均匀打有小孔,模拟自然透水坡面。土壤装至50 cm处与出口齐平,另外3边有5 cm安全加高以防止雨滴击溅使坡面物质流失。

2.2 试验方法

土壤制备:将风干去杂后的土壤混合均匀,按照统一含水量标准15%进行风干晾晒,若含水量低于该标准则进行补水,使全土槽土壤含水量达到预设水平。根据预设容重 $1.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 分层装槽,共装5层,每层装土厚度为10 cm,夯实并抓毛表面以防止土层之间分离。顶层10 cm土壤称重后再次晾晒,使含水量低于设计标准,产生水量差供配肥用。根据长武当地农民施肥习惯,按照施肥标准 $\text{P } 110 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{N } 150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 统一土槽初始养分含量。用预设含水量水平与顶层干土实测含水量的差值乘以顶层土壤质量,计算出配肥所需水量。按照配肥标准将所需用量的磷酸二氢钙和尿素溶于计算所得水量中,喷洒于顶(表)层所需土壤并混合均匀,用塑料布覆盖静置24 h后装槽。继续用塑料布将土槽覆盖以防土壤水分蒸发使含水量发生变化,静置24 h后进行降雨实验。

PAM 的施加: 按照 $1.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 的标准(潘英华, 2004) 称取 PAM 与 5 kg 左右土壤混合, 均匀撒施于供试土槽内土壤坡面。

降雨过程: 降雨强度(雨强) 定为 $1.9 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 降雨前多次率定雨强, 当降雨大小和均匀度均达到要求时开始降雨试验, 降雨历时 70 min, 重复 2 场。坡度设计为 5° 、 15° 、 25° , 分为施加 PAM 和对照两组, 均设 3 次重复。当径流槽地表开始产流, 记录初始产流时间, 在产流初期 10 min 内每隔 2 min 收集径流水样, 之后每隔 5 min 收集径流水样直到降雨结束。其余径流全部收集在径流大桶内。

取样过程: 径流样静置 4 h 后取上清液冷藏, 经过滤后测定水溶性磷、硝态氮、铵态氮。降雨结束 3 h 后, 对每个径流槽挖剖面取样, 挖好剖面后观察湿润锋位置并用钢尺测量出入渗深度。在 $0 \sim 4 \text{ cm}$ 深度内每 2 cm 取一次样, 以后每 1 cm 取样 1 个, 每次取样横向、纵向分别平行取 3 个重复, 直至取至湿润锋处。径流槽中部每 5 cm 取一个样, 3 次重复, 测定水分变化。采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 浸提-钼锑抗比色法测定土壤速效磷; $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KCl}$ 浸提法-流动元素分析仪测定土壤硝态氮和铵态氮(王辉等 2008b)。

3 种溶质流失强度计算公式为:

$$m(t) = c(t) \times r(t) \quad (1)$$

式中 t 表示产流时间; $m(t)$ 表示 t 时刻的径流溶质流失率 ($\text{mg} \cdot \text{min}^{-1}$); $c(t)$ 表示 t 时刻坡面出口处的径流浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); $r(t)$ 表示 t 时刻径流率 ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)。

3 结果与分析(Results and analysis)

3.1 PAM 对产流产沙过程的影响

降雨过程中雨滴打击和径流冲刷造成坡耕地土壤侵蚀, 土壤改良剂不仅能够改善土壤结构、促进团粒形成, 而且能够蓄水保墒。施加土壤改良剂 PAM 后, 不同坡度坡面产流产沙情况有所不同。图 1 是 5° 、 15° 、 25° 3 种坡度坡面施加 PAM 与空白对照两组实验的产流产沙情况。坡面开始均匀产流后, 两组处理不同坡度坡面的产流速率随着产流时间的变化均先呈增加趋势, 然后在 $8 \sim 10 \text{ min}$ 左右产流速率趋于稳定值。施加 PAM 后, 5° 、 15° 坡面单位时间产流量均有明显增加, 与对照组均存在显著差异性 ($p < 0.05$), 稳定产流速率分别为 $(1.15 \pm 0.03) \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $(1.17 \pm 0.06) \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 为对照坡面的 1.13 和 1.03 倍; 但 25° 坡面施加 PAM 后稳定产流速率略

低于对照坡面但差异不显著。不同坡度坡面施加 PAM 后径流量增加程度大小为 5° 坡面 $> 15^\circ$ 坡面, 这是因为坡面实际承雨面积随着坡度的增加而减小, 坡面蓄水量也随之减少, PAM 以固体颗粒施于坡面, 需吸水溶解后分子链之间的交错网络才能形成, 其粘聚作用才能发挥功效, 由于 25° 坡面承接雨量最少, PAM 的凝聚作用较为缓慢, 因此 25° 坡面稳定产流速率最低, 总产流量也低于对照坡面。通过用对数函数拟合发现, PAM 组与对照组 3 个坡度产流速率随时间的变化过程均符合对数曲线, 以 15° 坡面拟合公式为例:

$$Y = 0.0439 \ln t + 1.0187 \quad R^2 = 0.7 \quad (\text{PAM}) \quad (2)$$

$$Y = 0.0666 \ln t + 0.8978 \quad R^2 = 0.8 \quad (\text{对照}) \quad (3)$$

式中 Y 为产流速率 ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$) t 为产流时间 (min)。

两种处理下产沙量的变化趋势为在产流开始 $0 \sim 10 \text{ min}$ 内, 初始产沙量较大, 随后产沙速率迅速减少并趋于稳定。因为降雨初期坡面表施的 PAM 与水作用不充分, PAM 尚未完全溶解, 对坡面还没有形成保护, 所以 PAM 组初始产沙量也较大; 8 min 以后, 施加 PAM 组与对照组产沙速率出现差异并开始降低, 表明施用 PAM 的起作用时间约为 $8 \sim 10 \text{ min}$ 。施加 PAM 与对照两组中的 15° 坡面产沙量均为最大, 在 $0 \sim 2 \text{ min}$ 产沙速率分别达到 $118.9 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ (PAM) 和 $149.1 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ (对照)。施加 PAM 组 3 个坡度坡面的稳定产沙速率均在 $24 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ 左右, 低于对照组 15° ($26.3 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$) 和 25° ($36.4 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$) 坡面的稳定产沙速率, 但差异不显著; 而在 0.05 水平上显著高于对照组 5° 坡面的稳定产沙速率 ($9.9 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$)。施加 PAM 的 3 个坡度坡面总产沙量大小为 5° 坡面 $< 15^\circ$ 坡面 $> 25^\circ$ 坡面, 说明 25° 时侵蚀量反而减小, 这与刘纪根等(2003) 的研究结果相同。与对照组相比, 施加 PAM 的 5° 和 25° 坡面总产沙量均显著小于对照组 ($p < 0.05$), 减沙率分别为 38.2% 和 53.9%; 而 15° 坡面减沙率为 3.7%, 差异不显著。结果说明降雨使坡面湿润后, PAM 的网状结构形成, 产生凝聚作用, 使坡面土壤颗粒粘结在一起, 土壤表层结构变得稳定而不容易被径流冲刷侵蚀, 因而施加 PAM 后径流中含沙量减少, 且其减沙作用随着坡度的增加而增大。

施加 PAM 与对照组 3 个坡度的平均径流深随产流时间变化趋势为: 在均匀产流开始后 $0 \sim 10 \text{ min}$ 径流深度呈增加趋势, 随后趋于稳定。 5° 和 15° 坡面施加 PAM 后其稳定径流深度为 19.2 mm 和 18.6

mm, 比对照组略大但无显著差异. 这是因为在降雨过程中, 土壤表面的 PAM 吸水膨胀后堵塞土壤孔隙, 阻碍水分向下运移, 且 PAM 具有黏聚作用, 遇水后与表层土壤结合, 形成了一层 PAM、水和土壤组

成的结构稳定的“饱和层”, 使土壤入渗能力大大降低. 25°坡面由于实际承雨面积最小, 产流量最少, PAM 发生作用所需时间最长, 因此, 稳定径流深度较浅, 为 14.3 mm.

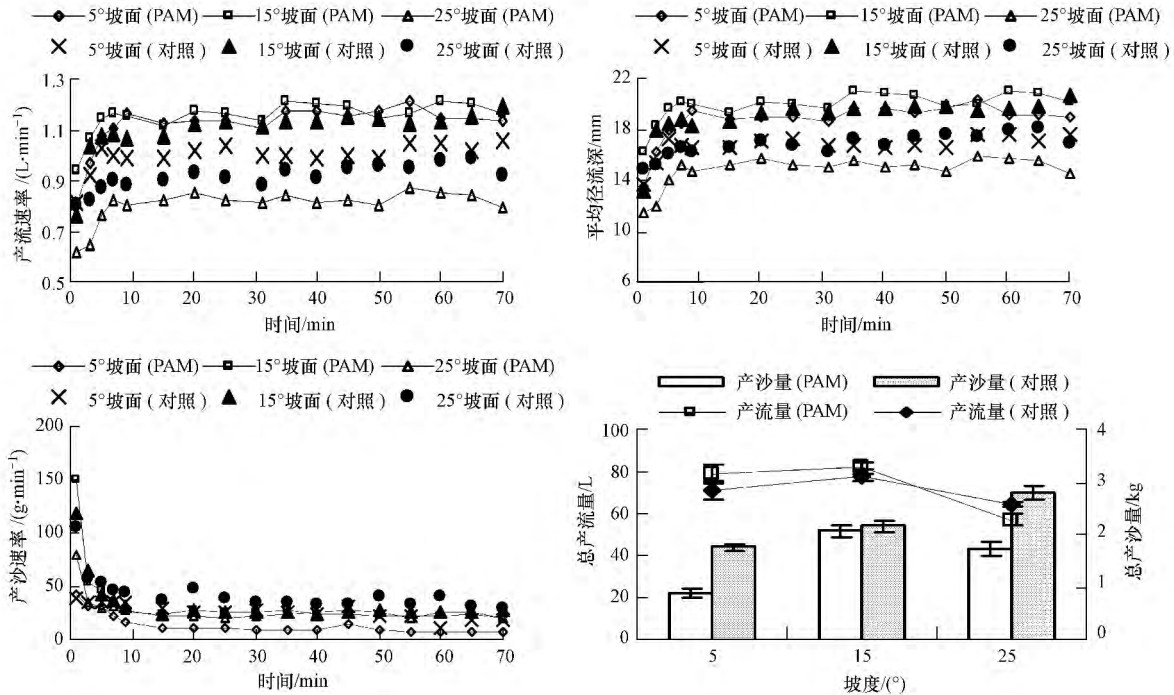


图 1 不同处理下坡面产流-产沙过程

Fig.1 The yield of runoff-sediment under different treatment conditions

3.2 径流中氮磷浓度变化

施加 PAM 后, 坡地土壤物理状况发生改变, 且 PAM 对不同坡度产流产沙的影响程度大小不同, 进而对土壤养分流失过程产生影响. 此外, 土壤中不同养分其化学性质不同, 流失情况也不尽相同.

图 2 是施加 PAM 与对照两种处理对径流中水溶性磷、硝态氮和铵态氮浓度随产流历时变化过程的影响结果. 3 种养分浓度变化均表现为初期径流中养分浓度很高, 在产流初期 10 min 内浓度迅速下降, 10 min 后基本达到稳定浓度值. 从水溶性磷浓度变化趋势图可以明显看出, 施加 PAM 后径流中水溶性磷浓度显著低于对照组磷浓度 ($p < 0.05$), 且 3 个坡度水溶性磷浓度稳定值非常接近, 平均稳定磷浓度为 $0.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($\pm 0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 说明 PAM 对径流中磷浓度有减小作用但不受坡度变化的影响, 而对照组 3 个坡度稳定径流磷浓度的大小为 25° 坡面 $> 15^\circ$ 坡面 $> 5^\circ$ 坡面. 由于 PAM 发挥了保土功效, 抑制了细沟侵蚀的发生, 避免表层土壤大量流失, 表层以下的土壤养分很难向径流迁移 (王辉等, 2008a),

因此, 径流中磷浓度比对照组坡面低. 对照组坡面无 PAM 保护情况下, 表层土壤易形成细沟, 在雨滴不断打击和径流冲刷下, 表层土壤团聚体被分解并逐渐被剥蚀, 泥沙随径流大量流失, 泥沙中的磷会向径流中不断释放, 导致径流磷的浓度较高. 此外, 施加 PAM 的 15° 坡面在 0~5 min 内产流速率迅速增加且产沙速率减小幅度最大, 所以, 径流中磷浓度初期达到最大值, 随后浓度迅速降低.

径流硝态氮和铵态氮浓度随产流时间变化趋势表现为在 0~10 min 内先大幅度降低然后趋于稳定浓度. 由于硝态氮不易被土壤吸附, 施加 PAM 后径流中硝态氮稳定浓度值与对照组稳定浓度值差异不显著 ($p > 0.05$), 说明 PAM 对硝态氮流失特征影响不明显. PAM 组 3 个坡面铵态氮稳定浓度值比较集中, 介于 $0.17 \sim 0.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 对照组 5° 、 15° 、 25° 3 种坡面铵态氮稳定浓度值分别为 0.16 、 0.18 、 $0.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 说明 PAM 对 5° 和 15° 坡面径流铵态氮浓度影响不明显, 但对 25° 坡面径流铵态氮

浓度有明显减小作用,减小幅度为 43.8% ($p < 0.05$). 对照组 15°和 25°坡面径流铵态氮初始浓度均显著

大于 PAM 组 ($p < 0.05$),证明 PAM 的施用能降低铵态氮初始流失浓度.

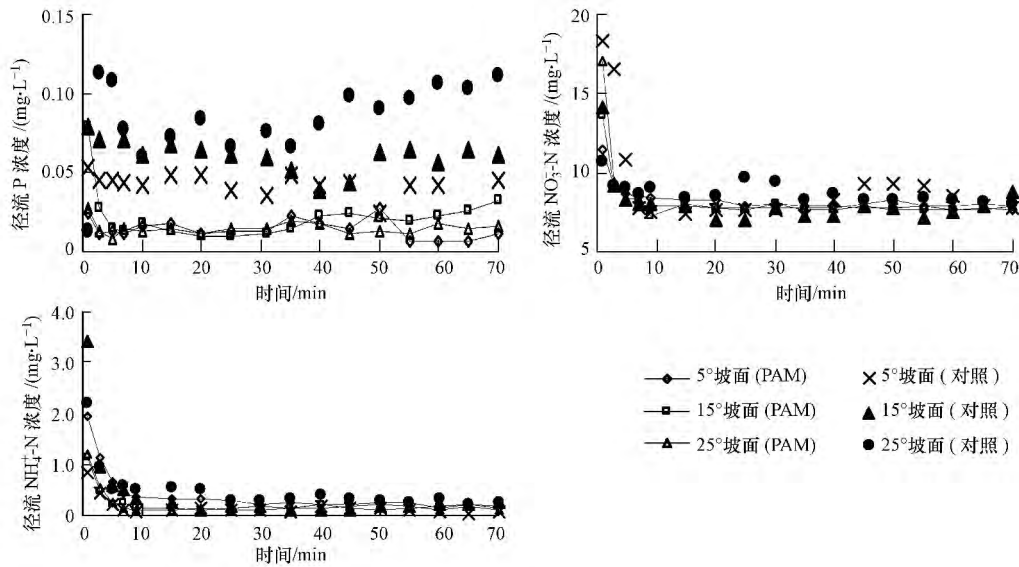


图 2 径流磷、硝态氮、铵态氮浓度变化过程

Fig.2 The change of phosphorus ,nitrate and ammonium concentration in runoff

3.3 氮磷流失强度及流失总量

径流中养分流失强度受径流速率和养分浓度两个因素共同影响.施加土壤改良剂 PAM 不仅影响坡面径流速率,而且影响土壤养分的入渗和流失情况.通过公式 (1) 来计算 3 种溶质流失强度.

施加 PAM 与对照两组处理的不同坡面水溶性磷、硝态氮和铵态氮随产流时间流失率的变化如图

3 所示.磷的流失强度随产流时间的变化趋势与其浓度的变化趋势一致,对照组 3 个坡度水溶性磷平均流失强度的大小为 25°坡面>15°坡面>5°坡面,且存在显著差异 ($p < 0.05$),随坡度增加,磷平均流失强度的递增幅度为 75%和 14.3%,并且在整个产流时间内,磷流失强度相对稳定,波动不大.施加 PAM 后 3 个坡度磷流失强度显著低于对照,15°坡面在

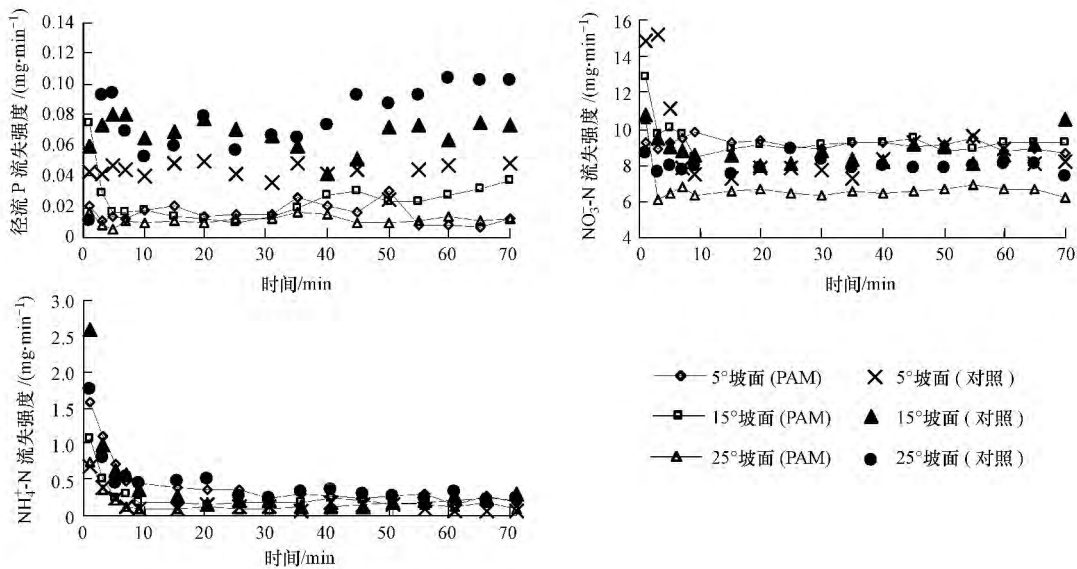


图 3 径流磷、硝态氮、铵态氮流失强度

Fig.3 The erosion intensity of phosphorus ,nitrate and ammonium

0~5 min 内,磷流失强度迅速下降,降幅达到71.4%,与该坡面径流中磷浓度迅速降低的趋势一致.两组处理中,15°坡面硝态氮稳定流失强度均为最大,分别为 $(9.1 \pm 0.8) \text{ mg} \cdot \text{min}^{-1}$ (PAM) 和 $(8.7 \pm 1.1) \text{ mg} \cdot \text{min}^{-1}$ (对照).施加 PAM 后,25°坡面硝态氮流失强度显著低于对照($p < 0.05$),其稳定流失强度为 $6.6 \text{ mg} \cdot \text{min}^{-1}$,而5°和15°坡面硝态氮稳定流失强度均高于对照组.因此,当坡面产流稳定后,施加 PAM 能有效降低25°坡面硝态氮流失强度.对5°和15°坡面硝态氮的流失则存在增加现象.这与 PAM 对3个坡度产流速率的影响一致,硝态氮易溶于水,不为土壤胶体吸附,随流量的增大其流失量也增大.不同处理的3个坡度铵态氮流失强度随产流时间的变化趋势一致,在0~10 min 流失强度减小,10 min 后达到稳定.通过比较两组处理不同坡度铵态氮稳定流失强度的大小发现:对照组25°坡面流失强度最大,5°坡面最小;PAM 组5°坡面流失强度最大,25°坡面最小,PAM 对15°坡面溶解态铵态氮流失无影响,表明施加 PAM 对陡坡(25°坡面)溶解态铵态氮流失有显著减小作用($p < 0.05$),减小幅度为60.05%,而施加 PAM 的5°坡面铵态氮稳定流失强度为对照组5°坡面的2.6倍,与5°坡面总产沙量变化一致.

图4反映了不同处理下水溶性磷、硝态氮、铵态氮流失总量随坡度的变化.施加 PAM 的3个坡面水溶性磷流失总量最大的为15°坡面,达到1.7 mg;对照组25°坡面水溶性磷流失总量最大,达到5.6 mg.由于施加 PAM 的3个坡面产沙量小于对照组,径流中与泥沙解吸而进入液体的溶解态磷含量亦随着径流挟沙量的减少而减少,因此,施加 PAM 后水溶

性磷流失总量均极显著小于对照组($p < 0.01$),减小幅度分别为5°坡面减少了77.6%,15°坡面减少了64.5%,25°坡面减少了85.1%.对于5°和15°坡面,施加 PAM 后随径流流失的硝态氮总量大于对照组,增加量分别为37.8 mg 和42.2 mg,分别占对照坡面流失总量的5.5%和6.1%,施加 PAM 的15°~25°坡面之间,随着坡度的增加,硝态氮流失总量明显下降,此变化趋势与产流量随坡度的变化一致,PAM 处理后的硝态氮流失量与径流量在0.05水平上显著相关,相关系数为0.998.此外,在15°~25°之间不同处理下的硝态氮流失量曲线发生交叉,交叉点大致出现在20°之前,说明施加 PAM 后径流硝态氮流失总量随着坡度的增加先增加后减少,并在15°~20°之间存在改变 PAM 对硝态氮影响作用的转折坡度值.施加 PAM 后的25°坡面硝态氮流失总量显著小于对照组($p < 0.05$),减小幅度为17.9%,说明 PAM 有助于减少陡坡硝态氮流失.产流开始时施加 PAM 的5°坡面径流铵态氮流失总量远远高于对照组($p < 0.01$),达到对照组的2.8倍,这是因为 PAM 对5°坡面有增加产流的作用,对于实际承雨面积最大的5°坡面,径流量增加能使尿素中的氮很快溶解并在脲酶作用下水解,很容易在短时间内造成土壤氮挥发进入径流而损失.对于15°和25°坡面,PAM 组铵态氮随径流流失量小于对照组,其中,25°坡面的减少作用最大,减小幅度达到60.8%,与对照组存在极显著差异($p < 0.01$).因此,在15°~25°坡度较大的坡面,PAM 能够明显减少铵态氮随径流的流失量,且减小幅度随坡度的增加而增大.

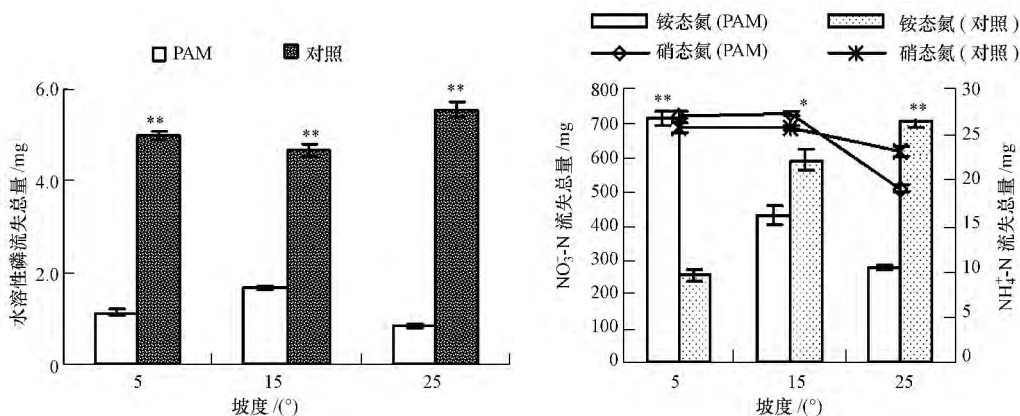


图4 径流磷、硝态氮、铵态氮流失总量

Fig.4 The total loss of phosphorus, nitrate and ammonium

3.4 湿润锋内水分-养分垂直分布

杨永辉等(2007)的研究表明:PAM能够明显改善黑垆土的持水性能.表层土壤施加PAM后土壤入渗状况发生了变化,由图5可以看出,在0~6 cm土层深度,施加PAM的各坡面含水量随深度增加而减小的幅度不大,并小于对照坡面的减小趋势,以下土壤深度内,随着深度的增加,两种处理的土壤含水量急剧减少,但在10~12 cm土层中,施加PAM的3个坡面土壤含水量要高于对照坡面,因此,施加PAM能影响土壤水分的再分配过程.由于PAM具有较强的持水性(沈丽萍,2005),可以降低土壤水分的深层渗漏,进而也会影响土壤养分的淋溶迁移.

不同处理方式下湿润层内土壤速效磷含量随深度变化并无明显差异,整体呈现随深度增加速效磷含量减少的趋势,但减小梯度并不大,这是因为磷容易被土壤固定,很少向土壤深层迁移,其淋溶流失强度较氮、钾等为弱(杨武德等,1999;陈玲等,2013).湿润锋深度内磷含量的垂直分布差异不大.施加PAM后的5°和25°坡面在0~7 cm土层内,速效磷含量稳定在7~8 mg·kg⁻¹,其含量高于对照组,且减小幅度小于对照组,15°坡面,速效磷含量随深度的变化趋势与对照组相比没有明显不同,因此,对于缓坡和陡坡,施加PAM能明显增加土壤对磷的固持能力,减少0~7 cm土层磷随水下移,起到抗淋

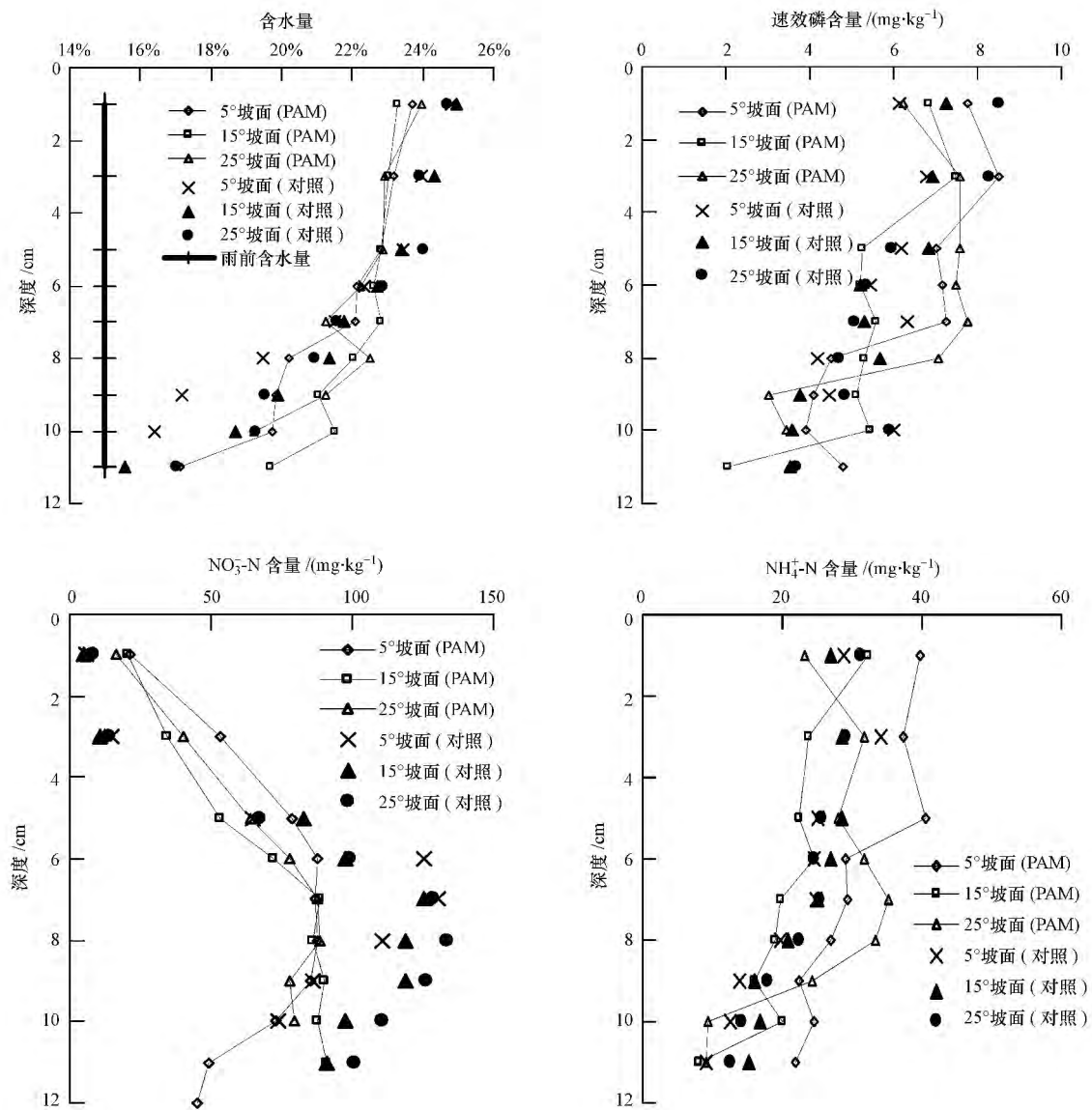


图5 水分-养分的垂直分布

Fig.5 Vertical distribution of nutrients-water

溶作用.对于硝态氮,施加 PAM 与对照组坡面都发生向下淋溶,但淋溶程度随深度的变化过程不同.从图中可以看出,在 0~6 cm 深度,两种处理下的硝态氮均发生明显的向下淋溶,除了在 0~2 cm 土层 PAM 组硝态氮含量高于对照组外,以下淋溶趋势一致,无明显差异,但在 6 cm 深度内 PAM 组硝态氮总含量高于对照组.在 6~10 cm 深度,土壤硝态氮含量增加,硝态氮发生积累,且对照组硝态氮含量大于 PAM 组.由此说明,对照组硝态氮向下淋溶量大于 PAM 组.施加 PAM 后减少了 3 个坡度坡面 0~6 cm 土层硝态氮的向下淋失.在整个湿润层内,铵态氮含量随深度的增加而减少,对照组 3 个坡面与 PAM 组 3 个坡面铵态氮含量变化趋势无明显差异,但 PAM 组 5°和 25°两个坡面铵态氮含量均高于对照组,而 15°坡面铵态氮含量则小于对照组,所以, PAM 能够减少缓坡和陡坡铵态氮的挥发损失和淋失.

4 讨论(Discussion)

本文在 3 种坡度(5°、15°、25°)条件下,研究了 PAM 对坡地水土流失和氮磷流失的影响.结果发现: PAM 增加了 5°和 15°坡面的径流量,并减少了 3 个坡度坡面总产沙量.正如 Giménez 等(1992)的研究: PAM 的长分子链在絮凝水中泥沙的同时,长链的尾部也堵塞了土壤的传导孔隙,从而减少土壤的水力传导.因此,地表施用 PAM 可能降低土壤入渗,增加径流量;同时,由于其絮凝作用在土壤表面人为的形成结皮,也可能减少径流所引起的土壤损失(陈渠昌等,2006). Ben-Hur 等(1997)的研究也证实,在降雨过程中,溶解在水中的 PAM 起着絮凝剂的作用, PAM 很长的分子链中的一部分吸附了土壤颗粒,而其很长的尾部仍在溶液中,将土壤颗粒桥接在一起而絮凝水中的泥沙,使土壤颗粒(泥沙)黏结在一起从而减少了土壤侵蚀.本研究减少泥沙并增加径流的结果与以上学者的研究结果一致.但是,对于 25°坡面,表面施加 PAM 后径流量减少,这一结果可能反映出了 PAM 减少径流的效应.由于 25°坡面坡度大、实际承雨面积小,其坡面径流量本身就小于缓坡.王全九等(2009)的研究也得出,当坡度为 25°时,径流量急剧减少.因此,25°时径流量减小的原因包括 PAM 和坡度两个方面,而且 PAM 对黑垆土土壤坡面径流的影响效应是:随坡度的增加先增加径流后减小径流.

本研究中施加 PAM 后径流中铵态氮初始浓度

降低的结果与赵亮等(2011)的研究结果相同,该研究还得出 PAM 增强了铵态氮吸附水平,降低铵态氮流失水平.但是,本研究发现, PAM 组 15°和 25°坡面径流铵态氮总流失量均小于对照组,而 5°坡面铵态氮流失总量则明显大于对照组,是对照组 5°坡面的 2.8 倍.出现这种差异的原因可能有两点:一是坡度不同,赵亮等(2011)研究的坡度统一为 10°,实际承雨面积小于 5°坡面,5°坡面产流晚但坡面蓄水时间长,土壤中的铵态氮能够充分进入径流,施加 PAM 更是增加了坡面径流量,因而 PAM 组 5°坡面铵态氮流失量大于对照坡面;二是土壤不同,本研究采用黑垆土,与砂壤土相比,容重小,孔隙多,通透性良好,利于水分入渗,土壤含水量高.综合可知,与对照组相比,施加 PAM 后的 5°坡面径流量大;与赵亮的研究相比,黑垆土土体含水量高,正如高鹏程等(2005)的研究所述:土壤含水量越高,越能促进尿素向铵态氮的转化.因此, PAM 组 5°坡面径流量的增加利于尿素水解,径流中铵态氮流失量较大.

5 结论(Conclusions)

1) 施加 PAM 后增加了 5°和 15°坡面总产流量却减少了 25°坡面总产流量. PAM 组与对照组 3 个坡度产流速率随时间的变化过程均符合对数曲线,决定系数 R^2 均达到 0.65 以上. PAM 组 3 个坡度的产沙量均少于对照组.

2) 施加 PAM 后径流中水溶性磷浓度显著低于对照组,径流中硝态氮稳定浓度值与对照组稳定浓度值差异不大; PAM 对 5°和 15°坡面径流铵态氮浓度影响不明显,但对 25°坡面铵态氮浓度有显著减小作用.

3) 施加 PAM 后,水溶性磷流失总量均小于对照组;径流硝态氮流失总量随着坡度的增加先增加后减少,在 15°~20°之间存在改变 PAM 对硝态氮影响作用的转折坡度值; PAM 对陡坡(25°坡面)溶解态铵态氮流失量有显著减少作用,但 5°坡面铵态氮随径流流失量有所增加.

责任作者简介:王力,男,中国科学院水利部水土保持研究所研究员,博士生导师.研究方向主要为森林(生态)水文、生态修复、同位素水文.发表论文 50 余篇,其中 SCI 收录 12 篇, EI 收录 6 篇,一级学会刊物 15 余篇.

参考文献(References):

Ben-Hur M, Fans J, Malik M, et al. 1989. Polymers as soil conditioners

- under consecutive irrigations and rainfall [J]. Soil Science Society of America Journal, 53(4): 1173-1177
- Ben-Hur M, Keren R. 1997. Polymer effects on water infiltration and soil aggregation [J]. Soil Science Society of America Journal, 61(2): 565-570
- 陈玲, 宋林旭, 崔玉洁, 等. 2013. 模拟降雨条件下黄棕壤坡耕地磷素流失规律研究 [J]. 农业环境科学学报, 32(1): 49-55
- 陈渠昌, 雷廷武, 李瑞平. 2006. 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, 37(11): 1290-1296
- 冯浩, 吴普特, 黄占斌. 2001. 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, 17(5): 48-51
- 高鹏程, 张一平, 张海, 等. 2005. 水热耦合作用下尿素转化为铵态氮的动力学模型 [J]. 植物营养与肥料学报, 11(1): 21-26
- Giménez D, Dirksen C, Miedema R, et al. 1992. Surface sealing and hydraulic conductances under varying-intensity rains [J]. Soil Science Society of America Journal, 56(1): 234-242
- Lentz R D. 2003. Inhibiting water infiltration with Polyacrylamide and surfactants: applications for irrigated agriculture [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 58(5): 290-300
- 刘东, 任树梅, 杨培岭. 2006. 聚丙烯酰胺 (PAM) 对土壤水分蓄渗能力的影响 [J]. 灌溉排水学报, 25(4): 56-58
- 刘静, 路凤, 杨延钊, 等. 2012. 南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究 [J]. 环境科学, 33(9): 3070-3075
- 刘纪根, 雷廷武, 潘英华, 等. 2003. 陡坡耕地施加 PAM 侵蚀产沙规律及临界坡长的试验研究 [J]. 土壤学报, 40(4): 504-510
- 马立珊, 汪祖强, 张水铭, 等. 1997. 苏南太湖水系农业面源污染及其控制对策研究 [J]. 环境科学学报, 17(1): 39-47
- Nadler A, Perfect E, Kay B D. 1996. Effect of polyacrylamide application on the stability of dry and wet aggregates [J]. Soil Science Society of America Journal, 60(2): 555-561
- 潘英华. 2004. 物理化学调控对土壤水分运动特性的影响研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学
- 沈丽萍. 2005. 应用聚丙烯酰胺改善砂土保水性的试验研究 [J]. 吉林水利, (3): 20-21; 24
- 史志华, 蔡崇法, 丁树文, 等. 2002. 基于 GIS 的汉江中下游农业面源氮磷负荷研究 [J]. 环境科学学报, 22(4): 473-477
- Sirjacobs D, Shainberg I, Rapp I, et al. 2000. Polyacrylamide, sediments, and interrupted flow effects on rill erosion and intake rate [J]. Soil Science Society of America Journal, 64(4): 1487-1495
- 王辉, 王全九, 邵明安. 2008a. 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, 24(6): 85-88
- 王辉, 王全九, 邵明安. 2008b. 前期土壤含水量对黄土坡面氮磷流失的影响及最优含水量的确定 [J]. 环境科学学报, 28(8): 1571-1578
- 王全九, 穆天亮, 王辉. 2009. 坡度对黄土坡面径流溶质迁移特征的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 27(4): 176-179
- 夏卫生, 雷廷武, 刘纪根. 2002. PAM 防治水土流失的研究现状及评述 [J]. 土壤通报, 33(1): 78-80
- 杨武德, 王兆骞, 眭国平, 等. 1999. 土壤侵蚀对土壤肥力及土地生物生产力的影响 [J]. 应用生态学报, 10(2): 175-178
- 杨永辉, 武继承, 赵世伟, 等. 2007. PAM 的土壤保水性能研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 35(12): 120-124
- 张长保, 王全九, 樊军, 等. 2008. 模拟降雨下 PAM 对砂黄土养分迁移影响实验研究 [J]. 灌溉排水学报, 27(1): 82-85
- 张淑芬. 2001. 坡耕地施用聚丙烯酰胺防治水土流失试验研究 [J]. 水土保持科技情报, (2): 18-19
- 赵亮, 唐泽军. 2011. 聚丙烯酰胺施用对铵态氮地表径流迁移的影响及解析模拟 [J]. 农业工程学报, 27(3): 49-54
- 周佩华, 张学栋, 唐克丽. 2000. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟实验大厅降雨装置 [J]. 水土保持通报, 20(4): 27-30; 45