

南方典型土壤坡面产流产沙过程对 PAM 的响应

宋月君^{1,2} 黄炎和¹ 杨洁^{2,3} 左继超^{2,3} 廖凯涛^{2,3} 肖龙⁴

(1. 福建农林大学林学院, 福州 350002; 2. 江西省水土保持科学研究院, 南昌 330029;
3. 江西省土壤侵蚀与防治重点实验室, 南昌 330029; 4. 泰和县水土保持站, 吉安 343700)

摘要: 采用室外人工模拟降雨试验方式, 系统对比研究了 2 种聚丙烯酰胺 (Polyacrylamide, PAM) 配比方案 (2 g/m² 和 10 g/m², 分别用 PAM1200-2 和 PAM1200-10 表示) 在 140 mm/h 短时强降雨条件下对坡度为 10° 的南方红壤区 4 种不同典型岩性发育土壤坡面的产流、产沙过程的影响机制。结果表明: 各坡面总产流量、单位采样时段径流系数、累积单位采样时段径流系数均有显著提升 ($p < 0.01$), 径流提升率由大到小依次为: 第四纪红壤坡面、红砂岩红壤坡面、紫色土坡面、花岗岩红壤坡面; 除花岗岩红壤坡面外, PAM1200-10 的径流提升率均大于 PAM1200-2, 坡面产生稳流的时间由短到长依次为: 第四纪红壤坡面 (12 min)、红砂岩红壤坡面 (15 min)、花岗岩红壤坡面 (24 min) 和紫色土坡面 (24 min), 2 种 PAM 配比在提升坡面产流方面, 无显著性差异; 各坡面的总产沙量、单位采样时段泥沙质量浓度、单位采样时段泥沙量均显著降低 ($p < 0.01$), 2 种 PAM 配比方式均以第四纪红壤坡面减沙率最为显著, 其余不同配比的坡面减沙率略有不同, 除紫色土坡面, PAM1200-10 的减沙率均大于 PAM1200-2; 其中 PAM1200-2 的减沙率波动性较大, 除紫色土坡面外, PAM1200-10 配比的减沙率均较为平稳, 在花岗岩红壤坡面, PAM1200-10 与 PAM1200-2 相比, 减沙成效显著 ($p < 0.01$)。

关键词: 南方红壤区; 人工模拟; 短时强降雨; 聚丙烯酰胺; 典型土壤坡面; 产流产沙过程

中图分类号: S157.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298 (2017)08-0279-09

Response of Runoff and Sediment to PAM in Typical Soil Slopes of South China

SONG Yuejun^{1,2} HUANG Yanhe¹ YANG Jie^{2,3} ZUO Jichao^{2,3} LIAO Kaitao^{2,3} XIAO Long⁴

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China
2. Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang 330029, China
3. Jiangxi Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention, Nanchang 330029, China
4. Soil and Water Conservation Station of Taihe County, Ji'an 343700, China)

Abstract: The artificial simulation rain experiment in field was designed to study the influence mechanism of polyacrylamide (PAM) on the process of runoff and sediment in four typical red soil slopes derived from different soil parent materials of South China under the condition of 140 mm/h short-duration heavy rainfall. The experimental treatments included two kinds of PAM application rate of 2 g/m² and 10 g/m², which were expressed as PAM1200-2 and PAM1200-10, respectively. The results showed that the total runoff, unit sampling time runoff coefficient, cumulative sampling time runoff coefficient in each slope were increased significantly ($p < 0.01$), and the runoff with elevation order was quaternary red soil slope, red sandstone red soil slope, purple soil slope and granite red soil slope. The increase efficiency of runoff in the treatment of PAM1200-10 was more than that in PAM1200-2 treatment in different soil slopes except granite red soil slope. The increasing order of steady flow time was quaternary red soil slope (12 min), red sandstone red soil slope (15 min), granite red soil slope (24 min) and purple soil slope (24 min). There was no significant difference between the two kinds of PAM application rate (PAM1200-2 and PAM1200-10) in raising runoff yield. There was a significant decrease ($p < 0.01$) in the total sediment, unit sampling time sediment concentration and unit sampling time sediment of each

收稿日期: 2017-06-01 修回日期: 2017-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41461058)、江西省科技成果重点转移转化项目 (20132BBI90025)、水利部公益性行业科研专项 (201501047) 和江西省水利重大科技项目 (KT201616、KT201518)

作者简介: 宋月君 (1982—), 男, 博士生, 江西省水土保持科学研究院高级工程师, 主要从事土壤侵蚀研究, E-mail: well3292@126.com
通信作者: 黄炎和 (1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究, E-mail: yanhehuang@163.com

slope, the sediment reduction rate was the most remarkable in quaternary red soil slope with both of the two kinds of PAM application rate, there was slight difference in sediment reduction in red soil slopes derived from other three types of parent materials. The sediment reduction rate of PAM1200 - 10 was greater than that of PAM 1200 - 2 in different soil slopes, except purple soil slope. Among them, the sediment reduction rate of PAM1200 - 2 was more volatile than that of PAM1200 - 10. The sediment reduction rate of PAM1200 - 10 was relatively stable except the purple soil slope. In granite red soil slope, the effect of the sediment reduction of PAM1200 - 10 was significantly improved than that of PAM1200 - 2 ($p < 0.01$).

Key words: red soil regions of South China; artificial simulation; short time heavy rainfall; PAM; typical soil slopes; runoff and sediment process

引言

我国是世界水土流失最为严重的国家之一,自 20 世纪 50 年代开始水土保持治理工作以来,通过植物、工程以及耕作等措施的开展,取得了一定的成效。然而,据第一次全国水利普查成果,我国现有水土流失面积 294.91 万 km², 占国土总面积的 30.72%, 治理任务仍然艰巨。伴随着水土保持治理工作对新技术、新方法的需求,聚丙烯酰胺 (Polyacrylamide, PAM) 作为一种新的水土保持化学措施,受到了广大学者的关注,并针对其改良土壤、防控水土流失等方面开展了一系列的试验研究与推广工作。研究发现合理使用 PAM 可以很好地改善土壤结构,增强土壤水稳性,提高土壤的抗水蚀能力^[1-2],还可以减少由于水土流失造成的大量有机质和氮、磷、钾等养分的流失^[3-6]。目前, PAM 已经在东北黑土区、西北黄土区以及部分南方红壤区进行了相关土壤侵蚀方面的试验研究与推广工作^[1-20]。在东北黑土区坡地施用 PAM 可减少土壤侵蚀量 56% 以上,不同的 PAM 施用量以及分子类型对于土壤的蓄水保土效果各不相同,其中以阴离子型分子量 300 万 ~ 400 万的效果最好^[1];黄土高原作为我国 PAM 研究最早的区域,相关学者分别从改良土壤理化性质,减少水土流失方面开展了研究工作, PAM 在改善土壤质量以及防控水土流失方面效果显著,施用 PAM 可有效提高砂壤土的土壤入渗率以及减少土壤侵蚀^[11-12];在南方红壤区研究发现,将 PAM 混合细土施于不同坡度的扰动红壤坡面,其减沙效率均在 90% 以上^[14]。针对不同的分子量、离子型、施用方式以及施用土壤对象, PAM 防控土壤侵蚀的成效有所不同^[3],由于 PAM 防治水土流失操作简单、投资少、见效快,在南方雨养农业区具有广泛的推广应用前景^[2]。目前,关于 PAM 在南方红壤区的研究主要集中在单一土壤类型的研究上^[10,14],而对于不同类型土壤坡面防控水土流失的系统对比研究鲜见报道。

南方红壤区所在地区降雨丰沛,一次大的降雨造成的土壤侵蚀量可能会占到全年的 60% 以上^[16]。鉴于此,本文通过野外人工模拟降雨试验,研究南方红壤区不同典型岩性发育土壤坡面在短时强降雨条件下 PAM 措施的产流、产沙特征,探讨不同土壤坡面产流、产沙特征对 PAM 措施的响应机制,以期为南方红壤区坡耕地的水土保持化学治理措施提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

该试验区位于江西水土保持生态科技园内 (115°42'38" ~ 115°43'06"E, 29°16'37" ~ 29°17'40"N, 海拔高度介于 30 ~ 100 m 之间)。园区地处江西省北部鄱阳湖流域博阳河水系的德安县城郊,属亚热带湿润季风气候区,多年平均降水量 1 397.3 mm,多年平均气温 16.7℃,年日照时数 1 650 ~ 2 100 h,多年平均无霜期 249 d^[16]。土壤为第四纪红黏土发育的红壤,土壤呈酸性至微酸性。

1.2 研究方法

1.2.1 供试土壤

供试土壤分别为江西省内分布广泛的第四纪红土、花岗岩、红砂岩发育的红壤以及紫色页岩发育的紫色土,所有土壤均采自江西省各土壤类型分布中心地带,具有较好的代表性,相关土壤的基本理化性质如表 1 所示。

表 1 土壤基本理化性质特征

Tab. 1 Characteristics of soil physical and chemical properties					
土壤类型	填土容重/ (g·cm ⁻³)	机械组成(质量分数)/%			有机质质量比/ (g·kg ⁻¹)
		粘粒 (0 ~ 0.002 mm)	粉粒 (0.002 ~ 0.05 mm)	砂粒 (0.05 ~ 2.0 mm)	
第四纪红壤	1.19	8.25	63.93	27.82	6.50
花岗岩红壤	1.19	16.49	24.74	58.77	7.48
红砂岩红壤	1.42	2.06	20.63	77.31	2.59
紫色土	1.56	2.05	24.63	73.32	2.94

1.2.2 试验设计与方法

试验所用 PAM 试剂均产自河南元亨净水材料厂,为阴离子型(水解度为 10%),相对分子量为 1 200 万^[10]。主要采取野外人工模拟降雨的方式开展试验研究(图 1),人工模拟降雨试验主要是将从野外取回的 4 类土样风干后过 5 mm 筛,然后装入 4 个长 3 m、宽 1.5 m、高 0.5 m 的土槽中,填土厚度为 0.45 m。在装填土之前,先在土槽底部填 2 cm 厚的小碎石。并铺上透水纱布,以保持试验土层的透水状况接近天然坡面。静置相同时间(4 h)待其含水量稳定之后,将配好的 PAM 溶液均匀地喷洒在供试土壤表面,待其充分风干后进行模拟降雨试验。PAM 溶液的质量浓度设定为 0.5 g/L,施用量设定为 0、2、10 g/m²,通过折算,每个人工模拟降雨试验土槽的 PAM 溶液喷适量分别为 0、18、90 L。其中 0 g/m²施用量土壤作为该试验的对照处理(CK),2 g/m²和 10 g/m²施用量,分别用 PAM1200-2 和 PAM1200-10 来表示。该试验采用的人工模拟降雨装置降雨高度为 3 m,喷嘴为下喷式组合喷嘴,降雨均匀度大于 85%,可控降雨有效面积为 4 m × 10 m,试验采用 140 mm/h 的降雨强度用以模拟短时强降雨事件,试验土槽的坡度参照江西省坡耕地设定为 10°,尾部放置集水器用来收集坡面产流和泥沙。每次试验降雨历时 30 min,每 3 min 收集一次径流泥沙,获得其过程径流量和泥沙量。每个试验设 2 个重复,结果取平均值。



图 1 野外人工模拟降雨设备
Fig. 1 Field artificial rainfall simulator

1.2.3 数据获取与分析方法

采用单位采样时段(3 min)径流系数、累积单位采样时段径流系数、单位采样时段泥沙质量浓度、单位采样时段泥沙量、总径流量以及总泥沙量等 6 项数据指标,开展产流、产沙过程特征分析。

单位采样时段径流量(Unit sampling time runoff, UR)采用量筒测量法获取(单位为 L)。

单位采样时段径流系数(Unit sampling time runoff coefficient, URC)计算公式为

$$C_{URC} = \frac{R_{UR}}{R_{UP}} \times 100\% \tag{1}$$

式中 C_{URC} ——单位采样时段径流系数, %

R_{UR} ——单位采样时段径流深, mm
 R_{UP} ——单位采样时段降雨量, mm
累积单位采样时段径流系数(Cumulative sampling time runoff coefficient, CRC)计算公式为

$$C_{CRC} = \frac{\sum_{i=1}^N R_{URi}}{\sum_{i=1}^N R_{UPi}} \times 100\% \tag{2}$$

式中 C_{CRC} ——累积单位采样时段径流系数, %
 R_{URi} ——第 i 次采样时段的径流深, mm
 R_{UPi} ——第 i 次采样时段的降雨量, mm
 N ——采样次数, 取 10
单位采样时段泥沙质量浓度(Unit sampling time sediment concentration, USC):采用烘干法获取(单位为 g/L)。

单位采样时段泥沙量(Unit sampling time sediment, US)计算公式为

$$S_{US} = 4.5 R_{UR} C_{USC} \tag{3}$$

式中 S_{US} ——单位采样时段泥沙量, g
 R_{UR} ——单位采样时段径流深, mm
 C_{USC} ——单位采样时段泥沙质量浓度, g/L
其中 4.5(m²)为径流深与径流量转换系数。

总径流量(Total runoff, TR)和总泥沙量(Total sediment, TS)分别为各单位采样时段径流量以及泥沙量的总和。

试验采集数据的相关性分析与制图均采用 Minitab 16.0 和 Excel 软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同岩性土壤坡面产流过程特征分析

2.1.1 单位采样时段径流系数(URC)特征

施用 PAM 后各土壤坡面地表均易形成一层胶结物质结皮,从而阻碍地表径流的下渗^[10],各坡面 URC 均有不同程度的显著提升($p < 0.01$),其中以第四纪红壤坡面提升最为显著,提升率均在 78% 以上,第四纪红壤质地粘重,粉、粘粒质量分数可占到土壤粒径组成的 70% 以上(表 1),与其他土壤相比,土壤入渗能力差,同时有研究证明,第四纪红壤中正电荷含量明显高于其他 3 类土壤^[17],更有利于土壤颗粒与阴离子 PAM 结合,也是造成此结果的主要原因。如图 2 所示,降雨初期,URC 可提升 3.5 倍以上,6 min 后产流趋于稳定,URC 提升率介于 10% ~ 70% 之间;花岗岩红壤坡面, PAM1200-2 和 PAM1200-10 的 URC 提升率分别为 30.92% 和 25.69%,降雨初期, URC 的提升率可高达 2.4 倍和

1.86 倍,6 min 后 URC 提升率介于 0 ~ 25% 之间,低于第四纪红壤坡面;红砂岩红壤坡面,PAM1200-2 和 PAM1200-10 的 URC 提升率分别为 55.45% 和 63.00%,降雨初期,可分别达 2.5 倍和 2.3 倍,后期

主要介于 0 ~ 100% 之间,期间波动较大;紫色土坡面,PAM1200-2 和 PAM1200-10 的 URC 提升率分别为 39.62% 和 44.18%,降雨初期可高达 2.0 倍,后期主要介于 0 ~ 40% 之间。

表 2 不同 PAM 配比坡面径流提升率
Tab.2 Runoff elevation rate of slopes with different PAM ratios

土壤类型	单位采样时段径流系数(URC)		累积单位采样时段径流系数(CRC)	
	PAM1200-2	PAM1200-10	PAM1200-2	PAM1200-10
第四纪红壤	78.24	83.47	53.56	59.94
花岗岩红壤	30.92	25.69	11.82	10.85
红砂岩红壤	55.45	63.00	36.70	45.64
紫色土	39.62	44.18	26.57	31.35

由表 2 也可以看出,第四纪红壤坡面的 URC 提升率最为显著,红砂岩红壤坡面次之,花岗岩红壤坡面最差。第四纪红壤坡面、红砂岩红壤坡面和紫色土坡面的 URC 提升率均为 PAM1200-10 大于 PAM1200-2,PAM 施用量与坡面产流量呈正相关,该结果与王丽等^[3]的研究结果一致。只有

花岗岩红壤坡面的 PAM1200-10 小于 PAM1200-2,但均无明显性差异。这可能与花岗岩土壤粒径组成以砂粒为主,容重较其他岩性土壤小,土壤孔隙度较其他岩性土壤大有关,PAM1200-2 配比溶液更容易下渗与土壤颗粒凝结,从而阻断土壤径流入渗所致。

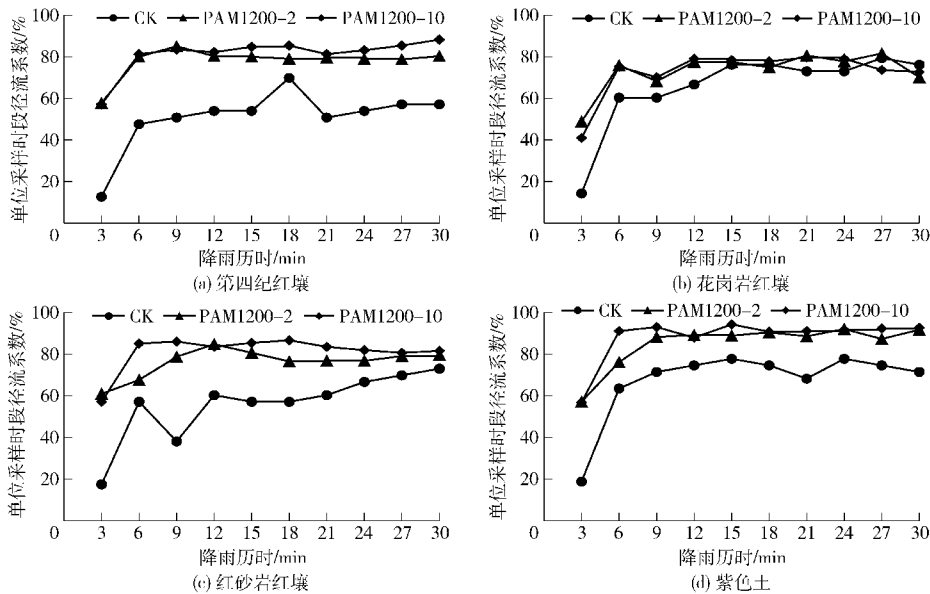


图 2 不同 PAM 配比坡面单位采样时段径流系数变化曲线

Fig.2 Unit sampling time runoff coefficient of slopes with different PAM ratios

2.1.2 累积单位采样时段径流系数(CRC)特征

如图 3 所示,与 URC 类似,各坡面 CRC 均有不同程度的显著提升($p < 0.01$),其中以第四纪红壤坡面最为显著,提升率均在 53% 以上,CRC 自降雨 12 min 起趋于稳定,主要介于 70% ~ 80% 之间,其中,PAM1200-2 的 CRC 呈现微量下降趋势;花岗岩红壤坡面的 CRC 自降雨开始至 15 min,PAM1200-10 略高于 PAM1200-2,随后两者相当,主要介于 60% ~ 70% 之间,并呈现微量递增趋势;红砂岩红壤坡面的 CRC 自降雨开始至 15 min 提升显著,随后 CRC 趋于稳定,主要介于 70% ~ 80% 之间,PAM1200-10

均高于 PAM1200-2;紫色土坡面的 CRC 自降雨开始至 21 min 内提升显著,随后趋于稳定,主要介于 80% ~ 90% 之间。

不同岩性土壤坡面的产流过程存在差异,第四纪红壤坡面在降雨 12 min 时即出现了稳流,并且 PAM1200-2 出现了微量下降趋势,这可能与 PAM 施用配比较稀,在雨滴打击坡面的影响下,破坏了地表 PAM 结皮层,致使雨水、径流下渗所致,稳流时间比 CK 对照提前了 6 min;花岗岩红壤坡面稳流主要出现在降雨 24 min 后,这可能与土壤粒径组成有一定的关系,花岗岩土壤粒径主要以砂粒为主,土质

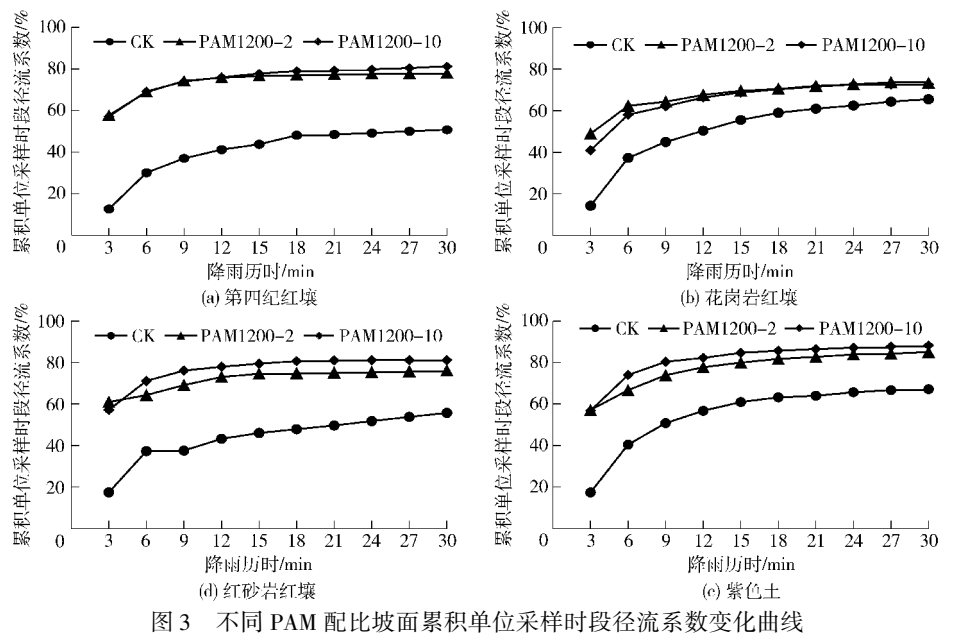


图 3 不同 PAM 配比坡面累积单位采样时段径流系数变化曲线

Fig. 3 Cumulative sampling time runoff coefficient of slopes with different PAM ratios

松散,地表 PAM 胶结层易被降雨破坏,致使地表径流入渗损耗,延长了稳流出现的时间;红砂岩红壤坡面稳流出现在降雨 15 min 后,与第四纪红壤坡面相当;紫色土坡面稳流出现在降雨 24 min 后,其 CK 对照在降雨后 27 min 才出现稳流,出现稳流的时间差别不大,这可能与紫色土土壤中所含负电荷最高有关^[17],影响了土壤颗粒对阴离子 PAM 的吸收与胶结,消减了 PAM 阻断坡面径流下渗的能力。CRC 提升率从大到小依次为:第四纪红壤坡面、红砂岩红壤坡面、紫色土坡面、花岗岩红壤坡面,只有花岗岩红壤坡面 PAM1200-10 的 CRC 小于 PAM1200-2,其他均为 PAM1200-10 大于 PAM1200-2。

2.2 不同岩性土壤坡面产沙过程特征分析

2.2.1 单位采样时段泥沙质量浓度(USC)特征

如表 3 所示,各坡面 USC 均有明显减少,其中,以第四纪红壤坡面减沙成效最为显著,整体减

沙率均在 93% 以上,PAM1200-10 的减沙率最高,可达 97.31%,第四纪红壤因土壤黏重以及正电荷含量最高,有利于土壤颗粒对 PAM 阴离子的吸收,从而提高了土壤的抗侵蚀能力;其他 3 类岩性发育土壤坡面中,PAM1200-2 的 USC 减沙率由大到小依次为:紫色土坡面(79.82%)、红砂岩红壤坡面(78.69%)、花岗岩红壤坡面(77.77%),PAM1200-10 的减沙率正好与之相反;紫色土坡面 PAM1200-2 的减沙率要优于 PAM1200-10,其余岩性土壤坡面均为 PAM1200-10 优于 PAM1200-2,其中,花岗岩红壤坡面 PAM1200-10 与 PAM1200-2 相比具有明显的减沙效果($p < 0.01$),花岗岩红壤坡面 PAM 施用量与减沙率存在较好的正相关关系,这与张兆福^[10]的研究结论一致,对于其余岩性土壤坡面,两者之间的减沙效果差异不显著。

表 3 不同 PAM 配比坡面泥沙减少率

土壤类型	单位采样时段泥沙质量浓度(USC)		单位采样时段泥沙量(US)	
	PAM1200-2	PAM1200-10	PAM1200-2	PAM1200-10
第四纪红壤	93.38	97.31	88.27	94.90
花岗岩红壤	77.77	95.32	75.03	94.66
红砂岩红壤	78.69	86.59	68.09	79.04
紫色土	79.82	77.48	72.28	67.58

如图 4 所示,第四纪红壤坡面 USC 减少率主要介于 88%~98% 之间,较为平稳;花岗岩红壤坡面 USC 减少率主要介于 60%~98% 之间,其中,PAM1200-2 的 USC 减少率存在波动式递减趋势,PAM1200-10 的 USC 减少率较为平稳,基本上保持在 90% 以上;红砂岩红壤坡面 USC 减少率主要介于

70%~95% 之间,PAM1200-2 的 USC 减少率存在波动性,呈现“双峰双谷”现象,PAM1200-10 的 USC 减少率基本维持在 80% 以上,波动性不大,整体呈现略微下降趋势;紫色土坡面 USC 减少率主要介于 60%~95% 之间,PAM1200-2 的 USC 减少率呈现“单峰单谷”式波动,整体呈现下降趋势;

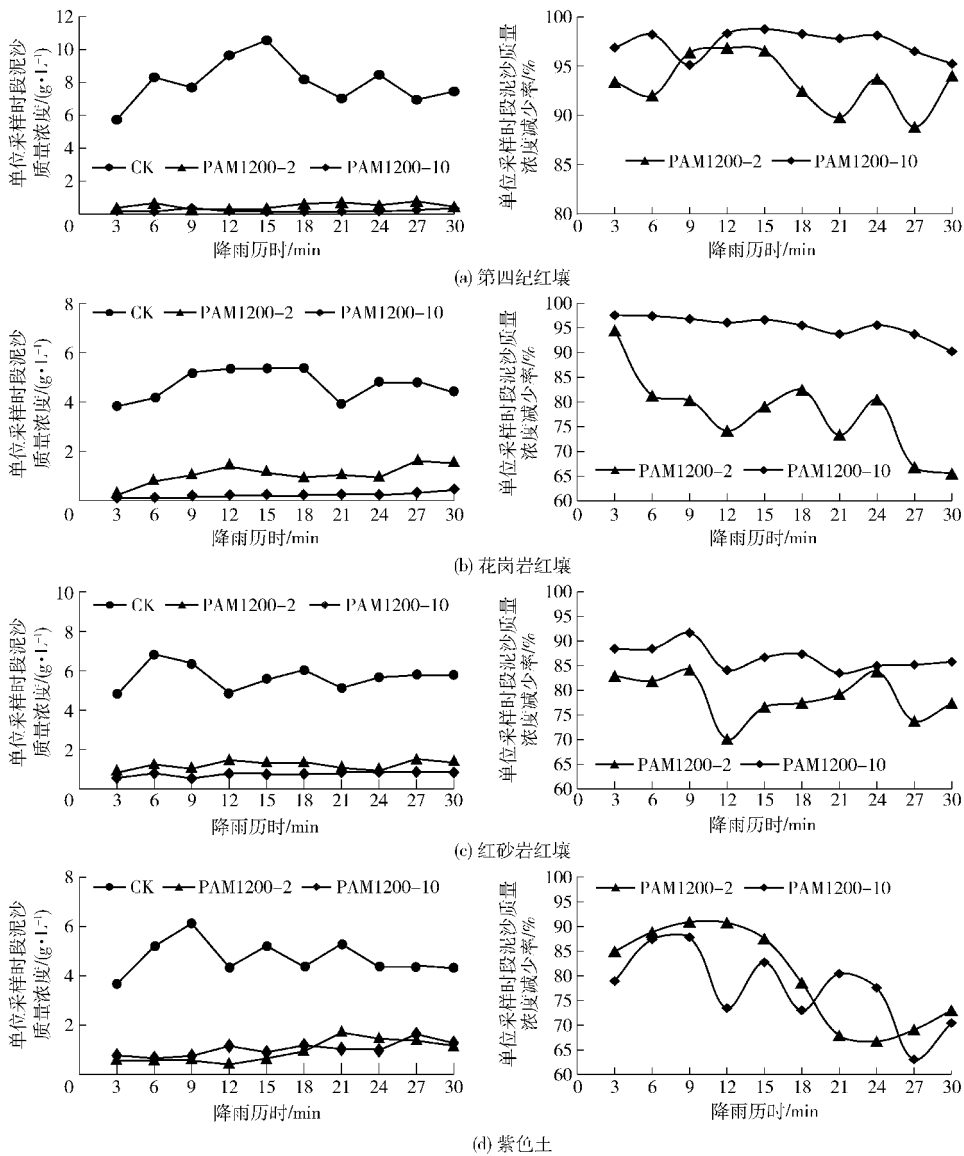


图 4 不同 PAM 配比坡面单位采样时段泥沙质量浓度及其减少率变化曲线

Fig. 4 Sediment concentration per unit sampling time of slopes with different PAM ratios

PAM1200-10 的 USC 减少率波动性显著,整体呈现下降趋势,主要介于 60%~85% 之间。

2.2.2 单位采样时段泥沙量(US)特征

US 是单位采样时段产流与泥沙浓度的综合体现,如表 3 所示,第四纪红壤坡面 US 减少率总体在 88% 以上,其中以 PAM1200-10 的 US 减少率最高,可达 94.90%;其他 3 类土壤坡面 PAM1200-2 的 US 减少率由大到小依次为:花岗岩红壤坡面(75.03%)、紫色土坡面(72.28%)、红砂岩红壤坡面(68.09%),PAM1200-10 的减沙效果略有不同,从大到小依次为:花岗岩红壤坡面(94.66%)、红砂岩红壤坡面(79.04%)、紫色土坡面(67.58%);紫色土坡面 PAM1200-2 减沙成效优于 PAM1200-10,其余岩性土壤坡面均为 PAM1200-10 优于 PAM1200-2,花岗岩红壤坡面 PAM1200-10 与 PAM1200-2 相比具有显著的减沙效果($p < 0.01$),

这可能与各土壤中所含正负电荷量以及土壤质地和粒径组成有关,其中花岗岩红壤坡面减沙结果与张兆福^[10]研究得出的结果一致。同时也充分证明了 PAM 具有优越的土壤颗粒胶结作用,在提升坡面产流量的同时,使得坡面产沙量大为降低^[3]。

如图 5 所示,第四纪红壤坡面 US 减少率主要介于 69%~98% 之间,PAM1200-2 和 PAM1200-10 的 US 减少率均表现为先增后减,但变化幅度不大;花岗岩红壤坡面的 US 减少率主要介于 65%~98% 之间,PAM1200-2 的 US 减少率整体呈现下降趋势,PAM1200-10 的 US 减少率基本保持在 90% 以上,后期略有降低;红砂岩红壤坡面的 US 减少率主要介于 40%~85% 之间,PAM1200-2 的 US 减少率波动性较大,整体呈现上升趋势,PAM1200-10 的 US 减少率基本保持在 80% 左右,呈微量上升趋势;紫色土坡面的 US 减少率主要介于 30%~90%

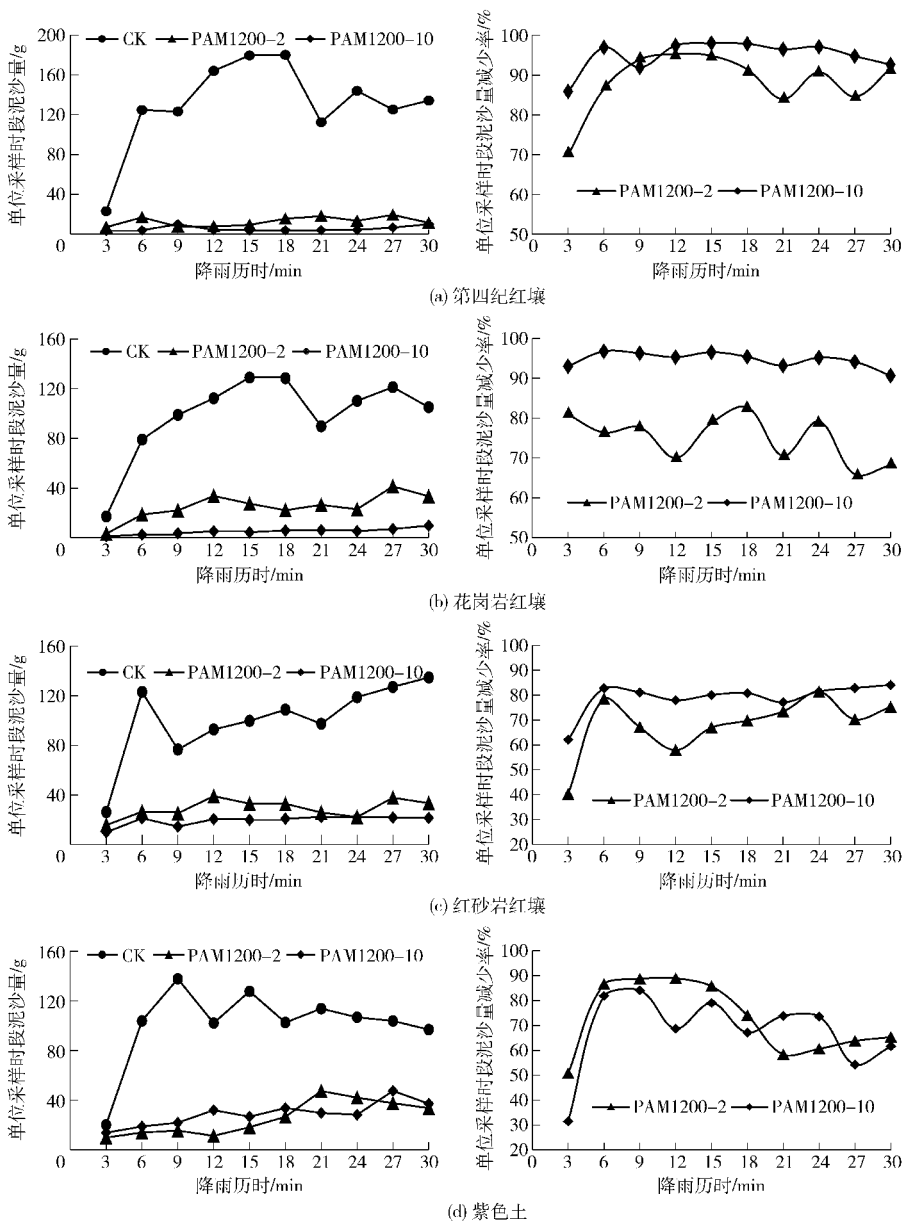


图 5 不同 PAM 配比坡面单位采样时段泥沙量及减沙成效

Fig. 5 Sediment yield per unit sampling time of slopes with different PAM ratios

之间,PAM1200-2 和 PAM1200-10 的 US 减少率均呈现先增后减趋势,波动性均较大,降雨初期减沙率陡然提升,随后呈下降趋势。

PAM 在防控不同岩性土壤坡面土壤侵蚀过程中,表现出了不同的特性,第四纪红壤质地黏重,正电荷含量最高,PAM 防控土壤侵蚀成效最为平稳和显著;红砂岩红壤和紫色土砂粒含量高,不利于 PAM 与土壤微颗粒的胶结,PAM 防控土壤侵蚀能力有所降低,波动性较大;紫色土所含负电荷最高,可能是造成 PAM 防控土壤侵蚀能力较低以及 PAM1200-2 比 PAM1200-10 减沙成效好的主要原因^[17]。

2.3 总产流量 (TR) 和总产沙量 (TS) 特征分析

如表 4 所示,TR 方面,不同岩性土壤坡面 CK

对照主要介于 160.0 ~ 211.5 L 之间,施用 PAM 后,各坡面产流均有所提升,除去花岗岩红壤坡面 PAM1200-2 大于 PAM1200-10,其他均为 PAM1200-10 大于 PAM1200-2;TS 方面,不同岩性土壤坡面 CK 对照主要介于 991.59 ~ 1 310.69 g 之间,施用 PAM 后,各坡面的总减沙成效显著,其中以第四纪红壤坡面的减沙率最高,其次为花岗岩红壤坡面,紫色土坡面减沙率最小,其中,只有紫色土的总减沙率 PAM1200-2 大于 PAM1200-10,其他均为 PAM1200-10 大于 PAM1200-2。

3 讨论

PAM 的施用方法主要包括地面喷施^[10]和土壤混施^[3],2 种施用方式的对坡面产流产沙的影响各

表 4 不同 PAM 配比坡面总产流量和产沙量

Tab. 4 Total runoff yield and sediment yield of slopes with different PAM ratios

土壤类型	总产流量/L			总产沙量/g		
	CK	PAM1200-2	PAM1200-10	CK	PAM1200-2	PAM1200-10
第四纪红壤	160.0	245.7	255.9	1 310.69	125.68	53.26
花岗岩红壤	206.5	230.9	228.9	991.59	251.53	51.36
红砂岩红壤	175.5	239.9	255.6	1 005.25	291.32	194.26
紫色土	211.5	267.7	277.8	1 015.62	256.23	289.53

不相同,其中,实施坡面喷施方式的研究发现,在减流方面效果不佳,反而会增加坡面的产流量,特别是坡度较缓的坡面^[3],本文主要采用地面喷施的方式进行 PAM 的施用,研究发现 PAM 对不同岩性发育土壤坡面均有提升径流率的功效,同时伴随着 PAM 施用量的增加,大多数岩性发育土壤坡面产流率存在递增趋势,这与王丽等^[3]和张兆福^[10]的研究结论一致;在产沙方面,施用 PAM 后,溶解在水中的 PAM 具有絮凝剂的作用,PAM 可将土壤颗粒桥接在一起而絮凝水中的泥沙,使土壤颗粒黏结在一起从而减少土壤侵蚀^[16],同时在坡面形成一层 PAM 胶结结皮层,减少雨滴对地表的贱蚀,使得地表土壤得以保留,减沙效率均较显著,同时,伴随着 PAM 施用量的增加,大多岩性发育土壤坡面减沙成效呈现递增趋势,这与王丽等^[3]和刘纪根等^[8]的研究结果一致。研究还发现,在产流特征方面,花岗岩发育红壤坡面出现了伴随 PAM 施用量增加,产流减少的情况;产沙特征方面,紫色土坡面出现伴随 PAM 施用量增加,产沙量增大,出现此情况的原因可能与土壤本身性质以及施用 PAM 后,随着降雨的持续,雨滴打击地表加上初始径流对坡面的冲刷,PAM 的粘结力受到一定的削弱,土壤颗粒被分离,径流中的悬浮颗粒逐渐增多,从而侵蚀产沙量增加,此外不同岩性发育土壤所含的正电荷以及负电荷数量直接影响到土壤颗粒对 PAM 阴离子的吸收与胶结作用,致使不同土壤坡面表现出不同的产流、产沙特征。

4 结论

(1)施用 PAM 后,南方红壤区 4 种典型岩性土壤坡面的单位采样时段径流系数、累积单位采样时

段径流系数均显著提升($p < 0.01$),其中以第四纪红壤坡面径流提升率最大,其次为红砂岩红壤坡面,提升率最小的为花岗岩红壤坡面,除去花岗岩红壤坡面,PAM1200-10 的径流提升率均大于 PAM1200-2,但无显著性差异。

(2)施用 PAM 后,不同岩性土壤坡面出现稳流的时间存在差异,稳流时间从短到长依次为:第四纪红壤坡面(12 min)、红砂岩红壤坡面(15 min)、花岗岩红壤坡面(24 min)和紫色土坡面(24 min)。

(3)施用 PAM 后,不同岩性土壤坡面的单位采样时段泥沙质量浓度、单位采样时段泥沙量均显著降低($p < 0.01$),在单位采样时段泥沙质量浓度方面,PAM1200-2 的减沙率从大到小依次为:第四纪红壤坡面、紫色土坡面、红砂岩红壤坡面、花岗岩红壤坡面,PAM1200-10 除去第四纪红壤坡面减沙率最大外,其他岩性土壤与之正好相反;单位采样时段泥沙量方面,PAM1200-2 的减沙率从大到小依次为:第四纪红壤坡面、花岗岩红壤坡面、紫色土坡面、红砂岩红壤坡面,PAM1200-10 的减沙率排序与单位采样时段泥沙质量浓度排序相同,其中 PAM1200-2 的减沙率波动性较大,PAM1200-10 除紫色土坡面外,其他土壤减沙率均较为平稳,在花岗岩红壤坡面,PAM1200-10 的减沙率较 PAM1200-2 成效显著($p < 0.01$)。

(4)在总产流量方面,施用 PAM 均有提升产流量的效果,施用量越大提升产流效果越明显,只有花岗岩红壤坡面相反;在总产沙量方面,施用 PAM 均有较好的减沙效果,伴随着施用量的增加减沙率呈现增大趋势,特别是第四纪红壤和花岗岩红壤坡面,PAM1200-10 与 PAM1200-2 相比减沙成效显著,紫色土坡面 PAM1200-2 减沙率略高于 PAM1200-10。

参 考 文 献

1 夏海江, 杜尧东, 孟维忠. 聚丙烯酰胺防治坡地土壤侵蚀的室内模拟试验[J]. 水土保持学报, 2000, 14(3):14-17.
XIA Haijiang, DU Yaodong, MENG Weizhong. Simulated experiment of preventing soil erosion with polyacrylamide on sloping field [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(3):14-17. (in Chinese)

2 于素华. 用聚丙烯酰胺控制丰雨区农地土壤侵蚀[J]. 水土保持应用技术, 2005(3):13-16.

3 王丽, 王力, 王全九. 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, 2015, 35(12):3956-3964.
WANG Li, WANG Li, WANG Quanjiu. Impacts of PAM on runoff, sediment, nitrogen, and phosphorus loss under the different

- slope lands[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(12): 3956–3964. (in Chinese)
- 4 张长保, 王全九, 樊军, 等. 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*, 2008, 27(1): 82–85. ZHANG Changbao, WANG Quanjiu, FAN Jun, et al. Effects of different quantity of PAM on nutrient transfer under artificial rainfall with sandy loess[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008, 27(1): 82–85. (in Chinese)
- 5 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/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(7): 113–120. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130720&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.020.
- LIAO Renkuan, YANG Peiling, REN Shumei, et al. PAM and SAP application for reservoir area slope manure pollution control [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(7): 113–120. (in Chinese)
- 6 赵智, 唐泽军, 杨凯, 等. PAM与粉煤灰改良沙土中重金属的迁移和富集规律[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(7): 83–89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130716&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.016.
- ZHAO Zhi, TANG Zejun, YANG Kai, et al. Metal transportation and accumulation in sandy soil amended by fly ash and PAM[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(7): 83–89. (in Chinese)
- 7 于健, 雷廷武, SHAINBERG Isaac, 等. PAM特性对砂壤土入渗及土壤侵蚀的影响[J]. *土壤学报*, 2011, 48(1): 21–27. YU Jian, LEI Tingwu, SHAINBERG Isaac, et al. Effects of molecular weight and degree of hydrolysis of PAM on infiltration and erosion of sandy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(1): 21–27. (in Chinese)
- 8 刘纪根, 雷廷武, 潘英华, 等. 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*, 2003, 40(4): 504–510. LIU Jigen, LEI Tingwu, PAN Yinghua, et al. Effect of Polyacrylamide on sediment loss and critical slope length of steep cultivated slope land[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(4): 504–510. (in Chinese)
- 9 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 CSAE*, 2010, 26(7): 38–44. (in Chinese)
- 10 张兆福. 施用聚丙烯酰胺(PAM)防治花岗岩崩岗崩积体侵蚀的适用性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014. ZHANG Zhao-fu. Study of polyacrylamide (PAM) application for controlling colluvial deposits erosion of granite collapsing hill [D]. Fuzhou: Fujian University of Agriculture and Forestry, 2014. (in Chinese)
- 11 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. LI Jingjing, BAI Gangshuan. Mechanism of PAM on soil and water conservation and its development[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(5): 115–120. (in Chinese)
- 12 赵智, 唐泽军, 宋满刚, 等. 粉煤灰和聚丙烯酰胺对沙质土壤中玉米生长的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(6): 136–142. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130624&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.024.
- ZHAO Zhi, TANG Zejun, SONG Man'gang, et al. Effect of sandy soils amendment with fly ash and polyacrylamide on corn growth[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(6): 136–142. (in Chinese)
- 13 夏卫生, 雷廷武, 刘纪根. PAM防治水土流失的研究现状及评述[J]. *土壤通报*, 2002, 33(1): 78–80. XIA Weisheng, LEI Tingwu, LIU Jigen. Development and review of research of preventing soil erosion with polyacrylamide (PAM)[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(1): 78–80. (in Chinese)
- 14 刘纪根, 张平仓, 陈展鹏. 聚丙烯酰胺(PAM)对扰动红壤侵蚀产沙过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(6): 9–13. LIU Jigen, ZHANG Pingcang, CHEN Zhanpeng. Effects of polyacrylamide (PAM) on processes of sediment yield for disturbed red soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(6): 9–13. (in Chinese)
- 15 谢颂华, 曾建玲, 杨洁, 等. 南方红壤坡地不同耕作措施的水土保持效应[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(9): 81–86. XIE Songhua, ZENG Jianling, YANG Jie, et al. Effects of different tillage measures on soil and water conservation in slope farmland of red soil in Southern China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(9): 81–86. (in Chinese)
- 16 BENHUR M, FARIS J, MALIK M, et al. Polymers as soil conditioners under consecutive irrigations and rainfall[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 53(4): 1173–1177.
- 17 张勇, 陈效民, 邓建强, 等. 不同母质发育的红壤电荷特性研究[J]. *土壤*, 2011, 43(3): 481–486. ZHANG Yong, CHEN Xiaomin, DENG Jianqiang, et al. Charge properties in three kinds of red soils from different parent materials [J]. *Soils*, 2011, 43(3): 481–486. (in Chinese)
- 18 赵亮, 唐泽军. 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*, 2011, 27(3): 49–54. ZHAO Liang, TANG Zejun. Effects of polyacrylamide application on ammonium nitrogen transport to surface runoff and its analytical modeling[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(3): 49–54. (in Chinese)
- 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. WANG Hui, WANG Quanjiu, SHAO Ming'an. Laboratory simulation experiment of impact of polyacrylamide on transportation of soil water and nutrients from the loess sloping land[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(6): 85–88. (in Chinese)
- 20 吴淑芳, 吴普特, 冯浩, 等. 高分子聚合物防治坡地土壤侵蚀模拟试验研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(2): 19–22. WU Shufang, WU Pute, FENG Hao, et al. Preventing sloping soil erosion with macromolecule polymers through simulated experiment[J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(2): 19–22. (in Chinese)