

秸秆覆盖红壤径流养分流失效益及径流剪切力影响研究

白永会^{1,2}, 查轩^{1,2}, 查瑞波^{1,2}, 张婧^{1,2}, 戴金梅^{1,2}, 王丽园^{1,2}, 刘川^{1,2}, 范章怀^{1,2}

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 福建省亚热带资源与环境重点实验室, 福州 3500072)

摘要: 采用模拟降雨试验的方法, 研究秸秆覆盖条件下红壤侵蚀效益及动力影响因素。模拟降雨强度 2.0 mm/min, 坡度 20°, 径流小区(长 1.5 m, 宽 0.5 m, 深 0.3 m)条件下, 供试土壤为赤红壤。结果表明: (1) 秸秆覆盖减流效益达到 69.3%, 减沙效益达到 99.2%; 明显提高土壤的入渗速率, 渗透效益达到了 32%, 秸秆覆盖有较好的水土保持效益。(2) 秸秆覆盖有效减少径流总氮、径流溶解态氮、径流颗粒态氮、径流总磷、径流溶解态磷、径流颗粒态磷的流失, 减少径流中氮流失效益均达到 74% 以上, 减少径流中磷流失效益均达到 78% 以上, 径流中元素流失均以溶解态氮磷元素大于颗粒态氮磷元素, 秸秆覆盖减少径流中磷养分流失的效益大于氮养分的流失效益。(3) 建立单位面积单位时间径流剪切力和产沙率、径流总氮、径流溶解态氮、径流颗粒态氮和径流总磷、径流溶解态磷、径流颗粒态磷流失速率的模型, 初步推断径流剪切力是土壤侵蚀的主要动力因素。(4) 秸秆覆盖和未覆盖的临界启动径流剪切力分别为 2.8 N/m² 和 1.5 N/m²。

关键词: 秸秆覆盖; 效益; 氮磷流失; 径流剪切力; 人工降雨

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)06-0094-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2017.06.016

Effects of Straw Mulching on Soil Erosion Benefits and Runoff Shear Force Under Simulated Rainfall

BAI Yonghui^{1,2}, ZHA Xuan^{1,2}, ZHA Ruibo^{1,2}, ZHANG Jing^{1,2},

DAI Jinmei^{1,2}, WANG Liyuan^{1,2}, LIU Chuan^{1,2}, FAN Zhanghuai^{1,2}

(1. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007;

2. Subtropical Fujian Province key Laboratory of Resources and Environment, Fuzhou 350007)

Abstract: By the experiments of simulated rainfall, the effects of straw mulching on nitrogen and phosphorus loss and runoff shear force were studied. Soil plots (1.5 m length × 0.5 m width × 0.3 m height) and rainfall intensity (2.0 mm/min) and slope gradient (20°) were established. Latosolic red soil was selected. The results showed that: (1) Straw mulching significantly decreased sediment yield and runoff volume, the benefit was 69.3% in runoff volume, and 99.2% in sediment yield. The infiltration rate of soil was improved at 32%, so straw mulching could conserve soil and water significantly. (2) Straw mulching significantly decreased the loss of runoff-associated total nitrogen, particulate nitrogen, dissolved nitrogen and total phosphorus, dissolved phosphorus, particulate phosphorus, and the loss benefits were more than 74% in nitrogen more than 78% in phosphorus. The runoff-associated dissolved nitrogen and phosphorus loss were greater than the particulate nitrogen and phosphorus loss. Straw mulching reduced the runoff-associated phosphorus loss greater than that of nitrogen. (3) Cubic equations were established between runoff shear force per unit area per unit time and runoff-associated nitrogen and phosphorus loss rates and sediment yield rates, and the preliminary inference indicated that runoff shear force was the main dynamic factor of soil erosion. (4) The critical starting runoff shear force was 2.8 N/m² under straw mulching, and 1.5 N/m² under non-straw mulching.

Keywords: straw mulching; benefits; nitrogen and phosphorus loss; runoff shear force; simulated rainfall

我国南方红壤区总面积达 1.2 × 10⁶ km², 约占全国的 12%, 在我国农业和经济的持续发展中发挥着重要的作用。同时该区受区域独特的地形和气候

影响, 如夏季高温暴雨集中, 土壤风化程度高, 可侵蚀性极强, 地形以山地丘陵为主, 地形破碎, 坡度大, 母岩抗冲抗蚀能力差, 人口多开发破坏程度高, 水土流

收稿日期: 2017-07-13

资助项目: 国家重点研发项目“南方红壤低山丘陵区水土流失综合治理”(2017YFC05054); 国家科技支撑计划项目“强度侵蚀区退化生态系统修复关键技术的研发与集成”(2014BAD15B02); 福建师范大学地理科学学院 2017 年度研究生科研创新基金项目(B2015112)

第一作者: 白永会(1980—), 女, 内蒙古赤峰人, 博士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: fjbaiyonghui@163.com

通信作者: 查轩(1961—), 男, 陕西咸阳人, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: xzha@fjnu.edu.cn

失极其严重^[1]。土壤养分流失通常以两种形态进入径流:一是溶解态,通常情况下,养分溶解于土壤溶液中,通过水分交换方式进入地表径流;另一种是吸附态,这部分养分被吸附在土壤颗粒表面,通过解吸或伴随侵蚀泥沙进入地表径流。研究发现土壤养分进入地表径流的过程受到多种因素的影响,如降雨特征、土壤质地、坡面特征、地表覆盖及管理控制措施等,深入研究以上因素和各个因素之间的内在相互作用,有助于更好地理解和控制土壤养分随地表径流的迁移过程,减少水土流失。其中秸秆覆盖是地表覆盖减少土壤侵蚀的措施之一,它具有拦截雨滴、调节地表径流、改良地表土壤的固结等作用,是延缓或阻止土壤侵蚀并影响土壤养分随径流流失的重要因素之一。Hallsted等^[2]从二十世纪三十年代以来首次开展秸秆覆盖研究,表明秸秆覆盖在减少地表径流,减少土壤流失量、减少土壤氮磷养分以及改善土壤物理条件、提高土壤肥力等方面已经被大量研究和生产实践得到证实,但针对南方红壤区秸秆覆盖的养分流失效益研究较少。土壤养分流失过程是土壤表层养分与降雨、径流相互作用的过程^[3-5],Lyle等^[6]通过试验水槽首次模拟研究了土壤剥蚀率和径流剪切力的关系,证明地表径流是水土流失的主要驱动力;Foster等^[7]通过研究提出,当径流剪切力大于土壤的临界剪切应力时,土壤颗粒被剥蚀,产沙量和土壤养分随地表径流流失,国际上的几种土壤侵蚀过程的模型其中 WEPP 模型采用了水流剪切力参数^[8-10],径流剪切力已经成为国内外水土流失领域重要研究内容和研究热点。已往的研究多集中单方面研究秸秆覆盖或者径流剪切力,但是针对有无秸秆覆盖条件下的径流剪切力对于径流量、泥沙量、氮磷养分流失效益影响的研究较少。鉴于此,本文主要运用人工降雨的方法,从红壤小区秸秆覆盖条件下探讨红壤径流养分流失效益和径流剪切力,为提出有效控制红壤坡面水土流失养分流失措施提供理论支撑和实践参考。

1 材料与方法

1.1 供试土样

试验土壤为莆田市东圳库区内常太镇(25°45'N, 118°55'E),常太镇水土流失面积为 38.54 km²,供试土壤采样时取 0—50 m 的土层,土壤质地分类参考国际土壤质地分类标准,为赤红壤。供试土壤的理化性质:土壤容重 1.33 g/cm³,pH 4.5,全氮含量 2.41 g/kg,全磷含量 0.18 g/kg,速效磷含量 3.24 g/kg,砂砾(0.05~1 mm)含量 35%,粉类(0.005~0.05 mm)含量 31%,黏粒(<0.005 mm)含量 24%。

1.2 试验设计

模拟降雨装置采用中科院水保所生产的 BX—1

型侧喷式野外模拟降雨器,降雨均匀度大于 80%,降雨调控范围在 20~200 mm/h 之间,喷头距地面垂直高度 6 m,通过压力阀和喷头组合控制雨强和雨滴直径能够达到试验要求。试验前将土样自然风干并通过 10 mm 孔径的筛,除去石砾、枯落物等杂质并充分混匀以备使用。试验所用小区实体模型土槽为移动式可变坡度钢槽,长 1.5 m,宽 0.5 m,深 0.3 m,土槽下部有向外延伸的“V”形出水口,下部设置排水孔。试验前先在土槽下部填 5 cm 细沙,以保持试验用土的透水状况接近天然坡面。采用分层填装的方法,边填充、边压实,环刀法测定土壤容重使填装土层的容重保持在 1.33 g/cm³,土壤容重接近供试土壤的容重,土壤紧实度由下至上依次降低,使试验土壤剖面接近自然土壤剖面。并在压实过程中使用土壤硬度计(TYD—1)型速测仪随机测定土壤紧实度,通过调整确保同一土层土壤紧实度值一致。

1.3 样品采集与测定方法

本次试验设计坡度为 20°雨强为 2.0 mm/min,每次试验降雨量为 50 mm,试验设计无秸秆覆盖和秸秆覆盖两个小区,秸秆覆盖选用收割后稻草秸秆,自然风干后将秸秆按约 20 cm 切割成段。按单位面积覆盖植被质量为 333.3 g/m²,小区面积为 0.75 m²,则稻草秸秆覆盖质量为 250 g 均匀覆盖小区,将备好的平均地径为 5.57 mm 稻草秸秆均匀覆盖在土壤表面,并通过调整,使覆盖厚度达到 1 cm。降雨时观测记录降雨和产流时间,产流后每隔 3 min 采集一次径流样,并记录每 3 min 产流的体积;每场室内模拟降雨试验历时 25 min,重复 3 次,分析计算 3 次试验数据的平均值。同时,沿小区设观测断面 3 个,从坡顶自上而下分别设在 0.5,1.0,1.5 m 处。对每个断面横向设 3 个测点,均观测断面表面流速 KMnO₄ 染色示踪法测流速。径流样静置过夜,过滤上部清液,在 4 ℃ 保存并尽快进行实验室分析测定径流总氮、溶解态氮、径流总磷、溶解态磷测定,剩余混水样经烘箱 105 ℃ 烘干,测定其泥沙含量。径流总氮和溶解态氮采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法^[11]测定,径流总磷采用钼锑抗分光光度法测定,溶解态氮的水样 0.45 μm 滤膜过滤后采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法测定,溶解态磷水样经 0.45 μm 滤膜过滤后采用钼锑抗分光光度法测定,颗粒态磷的含量由总磷—溶解态磷计算,颗粒态氮的含量由总氮—溶解态氮计算。

1.4 研究方法

(1)减流效益计算公式为:

$$RRB = R_b - R_m / R_b \times 100\%$$

式中:RRB 为减流效益(%); R_b 和 R_m 为无秸秆覆盖

和秸秆覆盖覆盖小区的径流总量(L)。

(2)减沙效益计算公式为:

$$SRB = S_b - S_m / S_b \times 100\%$$

式中:SRB 为减沙效益(%); S_b 和 S_m 为无秸秆覆盖和秸秆覆盖小区的产沙总量(g)。

(3)渗透速率计算公式^[12]为:

$$SIR = R_i \times \cos \alpha - 10 \times R_j / s \times t$$

式中:SIR 为渗透速率(mm/min); R_i 为雨强(mm/min); α 为小区坡度(°); R_j 为第 j 次取的径流量(mL); t 为降雨持续时间(min);10 为换算系数; S 为坡面受雨面积(cm^2),该计算公式没有考虑水分蒸发的影响。

(4)渗透总量计算公式为:

$$\text{渗透总量} = \text{平均渗透速率} \times \text{降雨持续时间}$$

(5)渗透效益计算公式为:

$$SIB = SI_m - SI_b / SI_b \times 100\%$$

式中:SIB 为渗透效益(%); SI_m 和 SI_b 是秸秆覆盖渗透总量和无秸秆覆盖渗透总量(mm)。

(6)径流剪切力计算公式^[6,13]为:

$$\tau = \gamma \times R \times J = \rho \times g \times h \times \sin \alpha$$

$$h = q / u = Q / (u \times B \times t)$$

式中: τ 为径流剪切力(N/m^2); ρ 为水体密度($1\,000\text{ kg}/\text{m}^3$); g 为重力加速度(N/kg); α 为地面坡度(°); h 为径流深(m); q 为 t 时间内的单宽流量($\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$); Q 为径流总量(m^3); t 为取样间隔时间(min); B 为过水断面的宽度(m); u 为径流速率(m/min)。

1.5 数据处理及分析方法

方差分析采用 SPSS 17.0 单因素 ANOVA 模块处理,拟合方程采用 Origin 8.5 拟合,图表制作采用 Excel 2007 和 Origin 8.5。

2 结果与分析

2.1 秸秆覆盖的产流产沙效益分析

秸秆覆盖能够拦截部分降雨能量,阻止雨滴直接打击土壤表面,减少土壤颗粒分离和扩散,防止地表结皮,同时秸秆覆盖还能增加地表糙率,促进地表径流的入渗,从而减少径流总量和降低地表径流的流速

和挟沙能力,降低对土壤的冲刷作用,减小径流流速与提高了土壤水分含量,覆盖秸秆通过对地表径流的拦蓄,起到了减流、减沙的效益,有无秸秆覆盖条件下产流产沙见表 1。在本试验小区秸秆覆盖 250 g 条件下,坡度为 20°,降雨强度为 2.0 mm/min,无秸秆覆盖和秸秆覆盖的条件下径流总量分别为 25.5, 7.8 L,泥沙总量分别为 157.3, 1.2 g,减流效益达到 69.3%,减沙效益达到 99.2%。表明秸秆覆盖对雨滴的阻挡削弱雨滴的动能和势能,从而减弱了雨滴对土壤团聚体的破坏,改善了土壤结构,有利于降雨入渗,杨永辉等^[14]和郑子成等^[15]研究也表明,秸秆覆盖提高了地表糙度,促进入渗,随着地表糙度的增加,地表临时性蓄水能力增强,延缓了坡面的汇流作用,减缓了地表的冲刷,产流产沙量降低。于亚莉等^[16]研究表明秸秆覆盖、生物炭、聚丙烯酰胺 3 种处理下的土壤管理措施,其中秸秆覆盖控制紫色土水土流失效果最明显,本试验采用秸秆覆盖红壤,尽管土壤类型不一样,也达到了相应的减流减沙效果。

表 1 秸秆覆盖条件下产流产沙及渗透性效益

处理	径流 总量/L	泥沙 总量/g	渗透 总量/mm	减流 效益/%	减沙 效益/%	入渗 效益/%
秸秆覆盖	7.8	1.2	36.1			
无覆盖覆盖	25.5	157.3	11.5	69.3	99.2	32

2.2 有无秸秆覆盖下入渗效益分析

控制土壤侵蚀主要包括两个方面:改变上层土壤结构和坡面设计。通常借助施用有机肥、土壤改良剂、耕作措施、植被残留覆盖等增加上层土壤的渗透特性,以保持最大的地表径流的渗透率,这是控制土壤侵蚀的重要方法。图 1 表明有无秸秆覆盖下土壤的渗透速率,秸秆覆盖的渗透速率明显大于无秸秆覆盖的渗透速率,随着降雨历时的延长,渗透速率呈总体减少的趋势,是因为土壤渗透达到饱和状态产生地表径流,所以坡度为 20°,雨强为 2.0 mm/min 条件下,秸秆覆盖可以减缓雨滴对土壤表面的击溅作用,增加地表粗糙度,截留径流,减小地表径流产生,增加径流的下渗,无覆盖覆盖和有秸秆覆盖渗透总量为 36.1, 11.5 mm,秸秆覆盖渗透效益达到了 32%(表 1)。

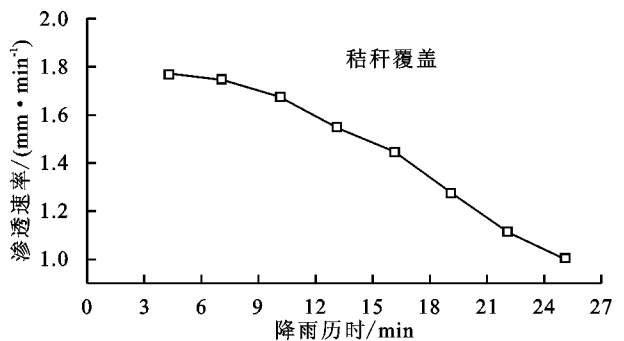
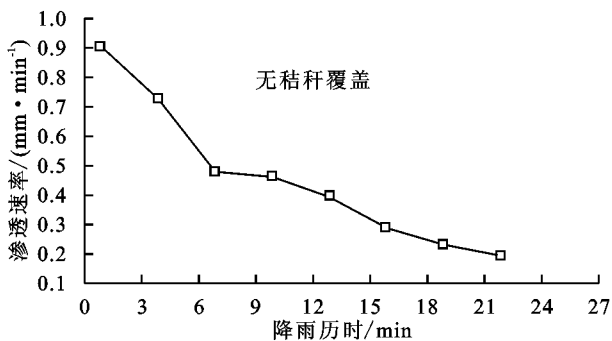


图 1 有无秸秆覆盖条件下渗透速率

2.3 有无秸秆覆盖下氮磷养分元素效益分析

土壤养分流失过程错综复杂,而土壤中的养分通过径流进入地表水是养分流失的主要途径。水流引起的土壤颗粒侵蚀导致水流与土壤水以及土壤养分混合,土壤养分伴随侵蚀的土壤颗粒进入地表径流。秸秆覆盖阻碍了地表径流的冲刷,减少了迁移出小区的地表径流量与泥沙流失量,减少了溶解态养分的流失。从表 2 可以看出,秸秆覆盖条件下总氮流失 86.9 mg,溶解态氮流失 85.3 mg,颗粒态氮流失 1.6 mg,总磷流失 5.9 mg,溶解态磷流失 2.9 mg,颗粒态氮流失 2.46 mg;无秸秆覆盖条件下总氮流失 337.5

mg,溶解态氮流失 329.8 mg,颗粒态氮流失 7.6 mg,总磷流失 25.9 mg,溶解态磷流失 13.6 mg,颗粒态磷流失 12.4 mg;秸秆覆盖有效减少径流总氮流失效益达到 74.2%,减少径流溶解态氮流失效益达到 74.1%,减少径流颗粒态氮流失效益达到 78.9%。减少径流总磷效益达到 77.2%,减少径流溶解态磷流失效益达到 78.6%,减少径流颗粒态磷流失效益达到 79.8%,秸秆覆盖对于径流中磷元素的流失效益大于氮元素,而且径流中氮磷元素均以溶解态的养分流失效益的大于颗粒态养分流失,秸秆覆盖有效减少径流中氮磷养分的流失。

表 2 有秸秆覆盖条件下的径流氮磷养分效益

处理	径流氮磷元素/mg					
	总氮	溶解态氮	颗粒态氮	总磷	溶解态磷	颗粒态磷
秸秆覆盖	86.9	85.3	1.6	5.9	2.9	2.5
无秸秆覆盖	337.5	329.9	7.6	25.9	13.56	12.4
养分流失效益/%	74.2	74.1	78.9	77.2	78.6	79.8

2.4 有无秸秆覆盖下径流剪切力和产沙率的关系

由水力学和流体力学理论可知,降雨达到土壤入渗饱和以后,产生地表径流,地表径流沿坡面梯度方向产生导致坡面侵蚀的径流冲刷力也称为径流剪切力,径流剪切力要克服其与坡面间的摩擦阻力和土壤颗粒间的黏结力,使坡面土壤颗粒随着径流被分散、剥离和迁移搬运,从而造成坡面土壤流失,为径流输移侵蚀土壤提供物质来源。径流剪切力越大,作用于土壤的有效剪切力就越多,剥离的土壤越多,侵蚀越严重。根据径流剪切的计算公式得出,有无秸秆覆盖的第一次产流产沙的径流剪切力为临界启动径流剪切力,所以有秸秆覆盖和无秸秆覆盖的临界剪切力分

别为 2.8 N/m² 和 1.5 N/m²,但随着降雨历时的延长,秸秆覆盖小区的地表径流的积累,径流剪切力逐渐增大,径流剪切力的增大是因为降雨量的累积导致地表径流的增多和地表径流流速的增大,所以随着降雨历时的延长,径流剪切力增大(图 2),有秸秆覆盖的情况下表现出径流剪切力逐渐增大,但是产沙量比较小,原因是径流剪切力的作用力作用在秸秆上,所以有秸秆覆盖相比无秸秆覆盖的产沙速率较小。秸秆覆盖和无覆盖的单位面积径流剪切力和单位面积单位时间坡面产沙率存在较好的拟合关系,方程中 r 代表单位面积单位时间径流剪切力, y 代表单位面积单位时间产沙率,分析表明有显著的相关性(表 3)。

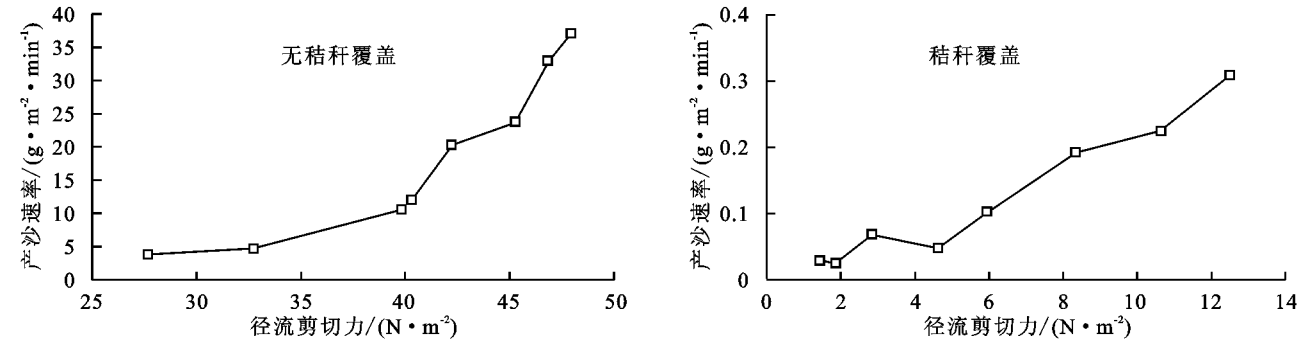


图 2 有无秸秆覆盖条件下径流剪切力和产沙率的关系

表 3 有无秸秆覆盖下单位面积单位时间径流剪切力和产沙率的关系

处理	拟合方程	R ²
无秸秆覆盖	$y = -0.369r^3 + 6.566r^2 - 28.67r + 40.75$	0.975 **
秸秆覆盖	$y = -5.84r^3 + 0.012r^2 - 0.057r + 0.095$	0.775 **

注: ** 表示在 0.01 水平上达到极显著差异。下同。

2.5 径流剪切力和氮磷养分流失的关系

降雨是坡面土壤侵蚀的主要动力因子,水流的侵蚀能力决定了土壤溶质进入地表径流的总量和

强度,伴随水流的冲刷作用,土壤溶质层不断暴露于土壤表层并与土壤水混合,进入地表径流,地表水的侵蚀能力在养分的流失过程中起主导作用,Parr 等^[17]和 Richardson 等^[18]研究表明,水流剪切力加速土壤溶质进入地表径流。径流溶解态和泥沙结合态的两种迁移方式引起养分流失占总流失量的百分比目前仍在研究中,大量研究表明土壤养分进入地表径流的主要内在驱动力大致可以归纳为对流扩散作用、雨滴击溅搅动、水流的冲刷作用等^[19-21]。在

本试验条件下,径流剪切力通过水流的扩散溶解土壤中的养分,通过雨滴的激溅作用和冲刷作用促进土壤氮磷养分的溶解,通过拟合方程分析(图 3),建立含有径流剪切力和单位面积单位时间径流中氮

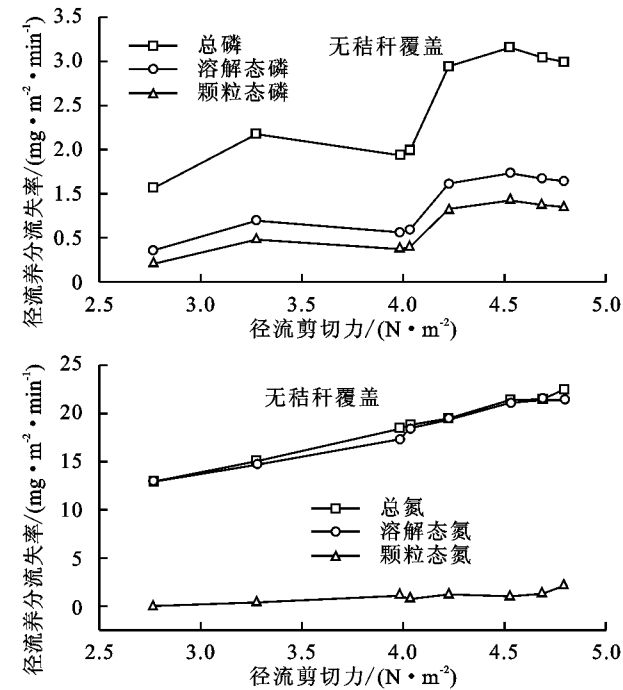


图 3 有无秸秆覆盖下单位面积单位时间径流剪切力和径流氮磷养分流失关系

表 4 有无秸秆覆盖下单位面积单位时间径流剪切力和径流磷元素的拟合方程

处理	养分磷元素(径流)	拟合方程	R ²
无秸秆覆盖	总磷	$y=0.127r^3-1.2r^2+4.23r-3.6$	0.559 **
	溶解态磷	$y=-0.07r^3+0.66r^2+4.235r-1.978$	0.559 **
	颗粒态磷	$y=0.058r^3+0.54r^2+1.91r-1.63$	0.559 **
秸秆覆盖	总磷	$y=2.56r^3-0.005r^2+0.09r-0.083$	0.762 **
	溶解态磷	$y=-1.28r^3+0.0018r^2+0.035r+0.031$	0.655 **
	颗粒态磷	$y=3.84r^3+0.007r^2+0.055r-0.05$	0.899 **

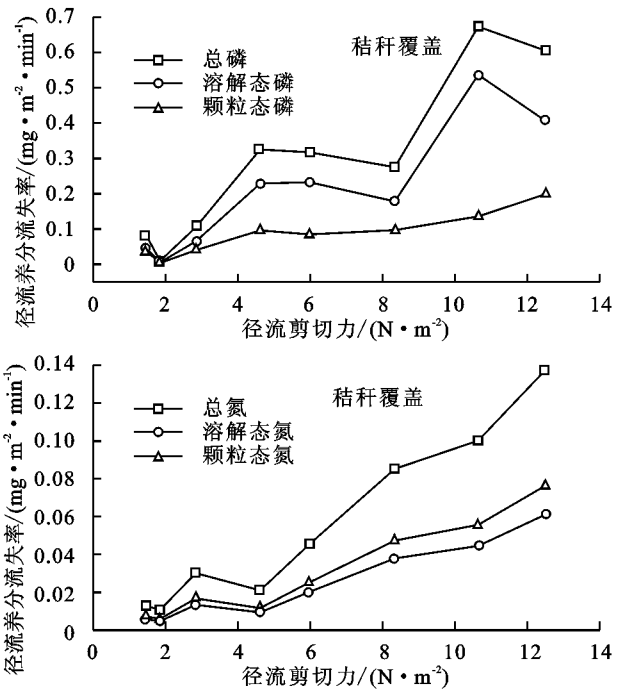
表 5 有无秸秆覆盖下单位面积单位时间径流剪切力和径流氮元素的拟合方程

处理	养分氮元素(径流)	拟合方程	R ²
无秸秆覆盖	总氮	$y=-0.28r^3+3.32r^2+8.31r-16.34$	0.993 **
	溶解态氮	$y=-1.105r^3+12.97r^2-45.26r+62.33$	0.980 **
	颗粒态氮	$y=0.49r^3-5.46r^2+20.56r+25.58$	0.730 **
秸秆覆盖	总氮	$y=-4.54r^3+0.001r^2-0.001r+0.013$	0.968 **
	溶解态氮	$y=-2.018r^3+6.65r^2-8.23r+0.006$	0.975 **
	颗粒态氮	$y=-2.52r^3+8.31r^2-0.001r+0.007$	0.597 **

3 讨论

秸秆覆盖能够增加地表粗糙度,促进土壤水分入渗,提高坡面水分利用效率,减少地表径流,秸秆覆盖能有效控制水土流失这一结论和王安等^[22]的研究结果一致。秸秆覆盖也减少了径流中氮磷养分元素的流失,这一研究结果与王静等^[23]研究结果一致,尤其减少磷元素的流失,说明秸秆覆盖的应用可以减少化

磷径流养分流失预测模型(表 4~表 5)。方程中 r 表示单位面积单位时间径流剪切力, y 表示单位面积单位时间径流中氮磷的流失速率,结果表明二者存在显著的相关性。



肥的使用,避免秸秆的废弃,实现经济效益,还可以减少化肥的过度使用而引起的面源污染问题,实现生态效益。从泥沙产量来看,秸秆覆盖有效阻止土壤颗粒剥蚀,防止土壤颗粒的迁移,结果表明径流剪切力是从本质上影响土壤颗粒迁移的条件,是判断该秸秆覆盖水土保持措施效果的重要因素。

4 结论

(1)无覆盖和秸秆覆盖径流总量分别为 25.5, 7.8 L,泥沙总量分别为 157.3,1.2 g,渗透总量为 36.1,11.5 mm,减沙效益 69.3%,减流效益 99.2%,渗透效益 32%,秸秆覆盖起到减流减沙增加渗透总量的效益。

(2)秸秆覆盖能有效减少径流中总氮、溶解态氮、颗粒态氮、总磷、流溶解态磷、颗粒态磷的流失,减少流失效益达 74% 以上,减少磷流失效益均达 78% 以上,其中径流中氮磷元素流失均以溶解态的氮磷大于颗粒态氮磷,减少径流中磷元素的效益大于氮元素流失的效益。秸秆覆盖起到减少氮磷养分流失效益。

(3)拟合单位面积单位时间径流剪切力和产沙率、径流总氮、径流溶解态氮、径流颗粒态氮和径流总磷、径流溶解态磷、径流颗粒态磷流失速率方程,初步推断径流剪切力是土壤侵蚀主要动力因素。

(4)秸秆覆盖和无秸秆覆盖的临界启动径流剪切力分别为 2.8 N/m² 和 1.5 N/m²。

参考文献:

- [1] 赵其国. 红壤物质循环及其调控[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [2] Hallsted A L, Coles E H. A preliminary report of the relation between yield of winter wheat and moisture in the soil at seeding time[J]. *Journal of Agricultural Research*,1930,41(6):467-477.
- [3] 蒋翔,李博,李元,等. 秸秆覆盖对桃一大豆套种地表径流及 N、P 流失的影响[J]. *水土保持学报*,2015,29(6):41-44,73.
- [4] 唐涛,郝明德,单凤霞. 人工降雨条件下秸秆覆盖减少水土流失的效应研究[J]. *水土保持研究*,2008,15(1):9-11.
- [5] 王丽,王力,王全九,等. 不同坡度坡耕地土壤氮磷的流失与迁移过程[J]. *水土保持学报*,2015,29(2):69-75.
- [6] Lyle W M, Smedon E T. Relation of compaction and other soil properties to erosion resistance of soil[J]. *Trans of the ASAE*,1965,8:419-422.
- [7] Foster G R, Meyer L D. Transport of soil particles by shallow flow[J]. *Trans of the ASAE*,1972,15(1):99-102.
- [8] 柳玉梅,张光辉,李丽娟,等. 不同长度小麦秸秆覆盖下黄土耕地坡面流水动力学特性[J]. *农业工程学报*,2017,33(4):153-160.
- [9] 刘彦辰. 坡径流冲刷条件下冻融坡面土壤剥蚀率与侵蚀因子关系分析[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2016.
- [10] 郁耀闯,王长燕. 黄土丘陵区典型农耕地土壤临界剪切力季节变化[J]. *中国农业科学*,2016,49(21):4149-4159.
- [11] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会编. 水和废水监测分析方法[M]. 第4版. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [12] 潘成忠,上官周平. 牧草对坡面侵蚀动力参数的影响[J]. *水利学报*,2005,36(3):371-377.
- [13] Sun J M, Yu X X, Li H Z, et al. Simulated erosion using soils from vegetated slopes in the Jiufeng Mountains, China[J]. *Catena*,2016,136(1):128-134.
- [14] 杨永辉,武继承,吴普特,等. 秸秆覆盖与保水剂对土壤结构、蒸发及入渗过程的作用机制[J]. *中国水土保持科学*,2009,7(5):70-75.
- [15] 郑子成,何淑勤,吴发启. 降雨条件下地表粗糙度对片蚀的影响及其变化[J]. *农业工程学报*,2010,26(增刊1):139-145.
- [16] 于亚莉,史东梅,蒋平. 不同土壤管理措施对坡耕地土壤氮磷养分流失的控制效应[J]. *水土保持学报*,2017,31(1):9-11.
- [17] Parr A D, Richardson C, Lane D D, et al. Pore water uptake by agricultural runoff[J]. *Journal of Environmental Engineering*,1987,113(1):49-63.
- [18] Richardson C P, Parr A D. Modify Fickian model for solute uptake by runoff[J]. *Journal of Environmental Engineering*,1988,114(4):792-809.
- [19] 汪庆兵,曹旖旎,张建锋,等. 浙江赋石水库集水区板栗林土壤氮素迁移特征[J]. *应用生态学报*,2017,28(2):545-553.
- [20] Ahuja L R, Sharpley A N, Yamamoto M Y, et al. The depth of rainfall-runoff-soil interaction as determining ^{32}P [J]. *Water Resources Research*,1981,17(4):969-974.
- [21] Gao B, Walter M T, Steenhuis T S, et al. Investigating ponding depth and soil detachability for a mechanistic erosion model using a simple experiment[J]. *Journal of Hydrology*,2003,277(1/2):116-124.
- [22] 王安,郝明德,王英文. 人工降雨条件下秸秆覆盖及留茬的水土保持效应[J]. *水土保持通报*,2012,32(2):26-28.
- [23] 王静,郭熙盛,王允青. 秸秆覆盖与平衡施肥对巢湖流域农田氮素流失的影响研究[J]. *土壤通报*,2011,42(2):331-335.
- [16] 王雪松,谢永生,陈曦,等. 砾石对赣北红土工程锥状堆积体侵蚀规律的影响[J]. *泥沙研究*,2015(1):67-73.
- [17] Wang L Y, Shi Z H. Size selectivity of eroded sediment associated with soil texture on steep slopes[J]. *Soil Science Society of America Journal*,2015,79(3):917-929.
- [18] 申楠,王占礼,陈浩. 黄土坡面细沟水流分离能力[J]. *山地学报*,2015,33(2):191-198.
- [19] 宋阳,刘连友,严平,等. 土壤可蚀性研究述评[J]. *干旱区地理*,2006,29(1):124-131.
- [20] 李宏伟,王文龙,黄鹏飞,等. 土石混合堆积体土质可蚀性 K 因子研究[J]. *泥沙研究*,2014(2):49-54.

(上接第14页)