

模拟降雨条件下纳米碳对黄土坡面养分流失的影响

胡梓超¹, 周蓓蓓¹, 王全九^{1,2}

(1. 西安理工大学水利水电学院, 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048;

2. 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, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 基于野外人工模拟降雨试验, 初步研究了 90 mm/h 的降雨强度下, 条施不同纳米碳含量(质量含量分别为 0, 0.01, 0.05, 0.07, 0.10 kg/kg)对黄土坡面水分及养分流失调控的影响。结果表明:(1)纳米碳含量对降雨入渗过程及坡面产流量有显著影响, 随着纳米碳含量的增大, 平均入渗率呈增大趋势, 而径流量呈减小趋势。(2)与对照相比较, 纳米碳的存在可显著缓解土壤侵蚀。纳米碳的质量比为 0.01, 0.05, 0.07, 0.10 kg/kg 的小区可分别降低坡面径流量 40%, 41%, 68% 和 74%, 降低坡面产沙量为 27%, 50%, 68% 和 79%。(3)条施纳米碳可以有效保持黄土坡面土壤养分含量。与对照组相比较, 纳米碳的质量比为 0.01, 0.05, 0.07, 0.10 kg/kg 的小区分别降低径流氮的流失量为 47%, 52%, 74% 和 79%, 降低泥沙氮的流失量为 10%, 60%, 74%, 87%; 分别降低径流磷的流失量为 63%, 63%, 88% 和 86%, 降低泥沙磷的流失量为 29%, 56%, 86%, 83%; 分别降低径流钾的流失量为 43%, 46%, 81% 和 83%, 降低泥沙钾的流失量为 25%, 62%, 78%, 87%。

关键词: 纳米碳; 人工模拟降雨; 平均入渗率; 径流量; 产沙量; 养分流失

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2016)04-0001-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.04.001

Effects of Nano Carbon on Nutrient Loss of Loess Slope Under Simulated Rainfall

HU Zichao¹, ZHOU Beibei¹, WANG Quanjiu^{1,2}

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Based on field simulated rainfall experiments, the study preliminarily investigated the effects of water and nutrient loss on loess slope with drill fertilization of different nano carbon contents (0 kg/kg, 0.01 kg/kg, 0.05 kg/kg, 0.07 kg/kg, 0.10 kg/kg) under 90 mm/h rainfall intensity. The results showed that: (1) The nano carbon had a significant influence on the rainfall infiltration process and the slope runoff amount. With the increasing content of nano carbon, the average infiltration rate tended to increase, and the runoff tended to decrease. (2) Compared with the control treatment, nano carbon could significantly alleviate soil erosion. The plots with 0.01 kg/kg, 0.05 kg/kg, 0.07 kg/kg and 0.10 kg/kg nano carbon reduced runoff amount on slope by 40%, 41%, 68% and 74%, respectively, and reduced sediment yield on slope by 27%, 50%, 68% and 79%, respectively. (3) Drill fertilization of nano carbon could effectively maintain the soil nutrient content on the loess slope, and compared with control treatment, the plots of 0.01 kg/kg, 0.05 kg/kg, 0.07 kg/kg and 0.10 kg/kg nano carbon reduced the loss of nitrogen in runoff by 47%, 52%, 74% and 79%, respectively, reduced the loss of nitrogen in sediment by 10%, 60%, 74% and 87%, respectively, reduced the loss of phosphorus in runoff by 63%, 63%, 88% and 86%, respectively, reduced the loss of phosphorus in sediment by 29%, 56%, 86% and 83%, respectively, reduced the loss of potassium in runoff by 43%, 46%, 81% and 83%, respectively, and reduced the loss of potassium in sediment by 25%, 62%, 78% and 87%, respectively.

Key words: nano carbon; artificial rainfall simulation; average infiltration rate; runoff; sediment yield; nutrient loss

收稿日期:2016-03-22

资助项目:国家自然科学基金项目(51239009);陕西省科技支撑项目(2013KJXX-38);陕西省自然科学基金项目(2015JQ5161)

第一作者:胡梓超(1990—),男,硕士,主要从事农业水土环境与生态环境研究。E-mail:413662964@qq.com

通信作者:周蓓蓓(1982—),女,博士,副教授,主要从事农业水土与生态环境研究。Email:happyangle222@gmail.com

黄土地区地域辽阔,自然资源丰富,其国土资源在我国国民经济中占有重要地位,对西北经济发展起着关键作用。但黄土区开发历史长,生态系统脆弱,严重的水分养分流失、土壤质量持续下降及荒漠化不仅是目前亟待解决的问题,同时也是制约黄土区农业生产效率及生态环境健康发展的关键问题。国内众多学者为了解决这一问题进行了大量室内外研究及理论分析,积累了大量宝贵的试验数据,取得了一定的成果,但由于黄土区恶劣的气候环境及土体自身原因,研究进展极为缓慢。

近年来已有众多学者希望通过向黄土坡面施加土壤改良剂,如 PAM 及生物炭(Biochar)等方法,来缓解黄土高原的水土养分流失问题。但 PAM 属于纯化学大分子物质,不能全面考虑土壤有机质及有机碳的积累,目前仍处于试验研究阶段,未能进行大面积实施^[1];同时生物炭由于颗粒较大,其调控效果依靠极大的施用量,较难用于实际应用,且极易随降雨径流进入河流,人为造成水域污染^[2-3]。

纳米科技为上个世界 80 年代初逐步发展起来的前沿、交叉性新兴学科领域,它的迅猛发展将在 21 世纪促使几乎所有领域产生一场革命性的变化,以及在各领域的全面推广应用^[4]。纳米材料由于自身具有不同其他宏观离子和微观分子和原子的特殊性质,在土壤结构的形成、元素迁移转化、土壤化学生物反应的调控方面具有重要的作用。不同于其他金属纳米材料,碳元素在土壤及土壤-植被-大气循环体中广泛存在,可避免给土壤及植被带来不良影响,且已有研究表明纳米碳遇水可提升土壤电动位,降低土壤 pH 值,提升土壤离子浓度,促进养分释放^[5];同时纳米碳具有巨大的比表面及小尺寸效应,极易与土壤中营养元素和微量元素发生吸附或耦合成为高效复合肥料^[6-7]。刘艳丽等^[8]对比分析将纳米碳施加于土壤表层以下及均匀混合于土壤中对土壤水分及养分迁移影响,结果发现,纳米碳施加于土表以下可有效增加水分和养分在土壤中的滞留时间,提高土壤持水能力,减缓土壤中养分渗漏流失。若将纳米碳用于黄土区土壤中必然对我国黄土区水土肥流失调控产生较大促进作用。因此本文借鉴纳米材料科学研究的经验,利用已有的坡面水土及养分流失理论和技术,实现水土保持突破性的变革,使提升我国黄土区土壤保水控肥性能成为可能。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区域位于中国科学院水土保持研究所神木

试验站。该试验站所处的六道沟小流域(110°21′—110°23′E,38°46′—38°51′N)是典型的水蚀风蚀交错带生态环境脆弱区,面积 6.89 km²,年平均气温 8.4℃,月均温差明显,最低、最高温度分别出现在 1 月和 7 月。年平均降水量为 437.4 mm,且相对集中,年际变化显著,年雨量变化为 108.6~819.1 mm 之间,流域年内降水分极不均匀,6—9 月占全年降水的 65%~85%,属于典型的干旱半干旱季风气候^[9-11]。该区域气候变化剧烈,旱涝灾害频繁,流域内土壤类型包括风沙土和干润砂质新成土,土壤结构疏松,抗蚀性差,水土流失非常严重^[12-13]。试验小区内土壤为干润砂质新成土,中性偏碱,pH 8.0,粘粒含量 15.7%,粗粉粒含量 34.47%,砂粒含量 46.83%,土壤基础养分为有机质含量 11.32 g/kg,全氮含量 0.82 g/kg,全磷含量 0.61 g/kg,全钾含量 21.18 g/kg。

选择该流域坡度为 14°~15°的坡耕地,布设 5 块面积为 1 m² 的正方形试验小区(图 1)。在除对照外的 4 块小区,选取坡上、坡中、坡下 3 个位置条施纳米碳。条施纳米碳宽度为 5 cm,土壤与纳米碳混合层深度为土壤表面以下 5—10 cm。在施加纳米碳之前,将土表 5 cm 土壤取出置于一旁,将地表下 5 cm 土壤与一定质量纳米碳混合后将表土回填。小区条施纳米碳后,静置 3 个月后进行模拟降雨试验。为防止降雨渗漏及径流溢出,利用 40 cm 高的钢板将小区三面围起,铁板高出土壤表面 20 cm。径流流出端安装“Y”形径流出口,出口下方人工挖出一个深坑用于放置承接径流的塑料水桶。

由于坡地土壤各小区养分含量差异较大,所含溶质的化学组成也不同,不便对某一化学组成的溶质作重点研究,亦难在可控条件下,对各种影响因素作比较分析。因此为了便于对比分析纳米碳对坡面养分随地表径流迁移的影响,本研究在各小区坡地表面均匀喷施覆盖率为 40 g/m² 的磷酸二氢钾、溴化钾和硝酸钾混合液。

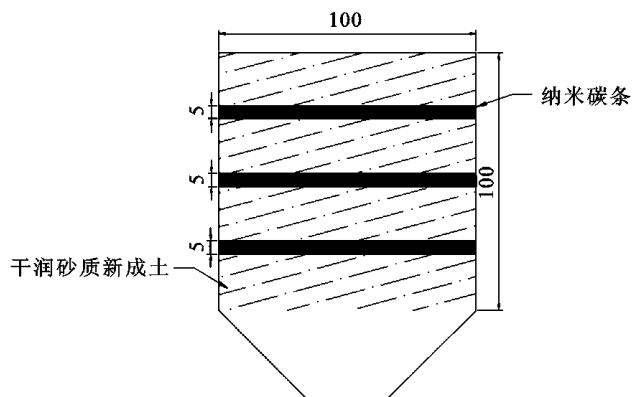


图 1 试验小区设置

1.2 模拟降雨装置

模拟降雨设备采用西安理工大学水资源所研发针孔式人工野外模拟降雨器。该降雨器结构见图 2, 图 3。降雨器主要组成部分为:(1)侧壁标有代表不同雨强水位线刻度的水槽架;(2)10 块用于生成雨滴的布针板,单位面积为 0.1 m^2 ;(3)用于支撑水槽的支架;(4)固定于支架上端的多功率振荡器;(5)4 块防风装置;(6)保障降雨过程中持续供水的多功率抽水泵;(7)3 个雨量筒,规格为直径 10 cm ,高 10 cm ;(8)自动升降式降雨器针头疏通装置。

试验前将降雨器架设于试验小区,架设高度为 1.2 m 。使用降雨器前后,利用针头疏通装置清理降雨器针头,确保所有针头无堵塞现象。将防风装置打开确保降雨范围内不受风力影响,调试多功率抽水泵及多功率振荡器,保证雨强稳定,并使用雨量筒测量雨强,直至雨强满足试验要求。坡面产流后,降雨历时 40 min ,降雨过程结束后,再次使用雨量筒测量雨强,确保降雨结束时雨强与初始雨强一致。

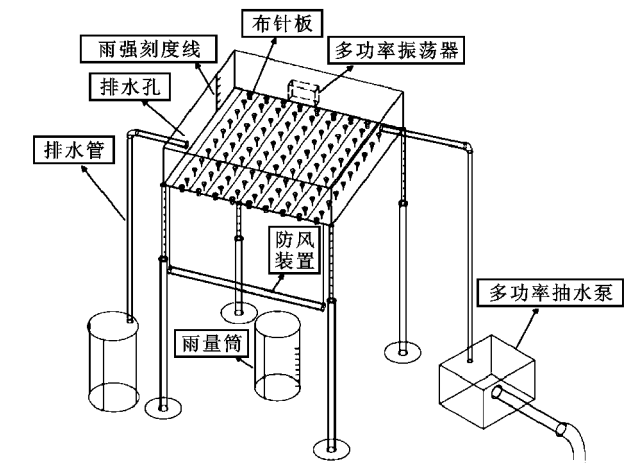


图 2 针孔式人工野外模拟降雨器

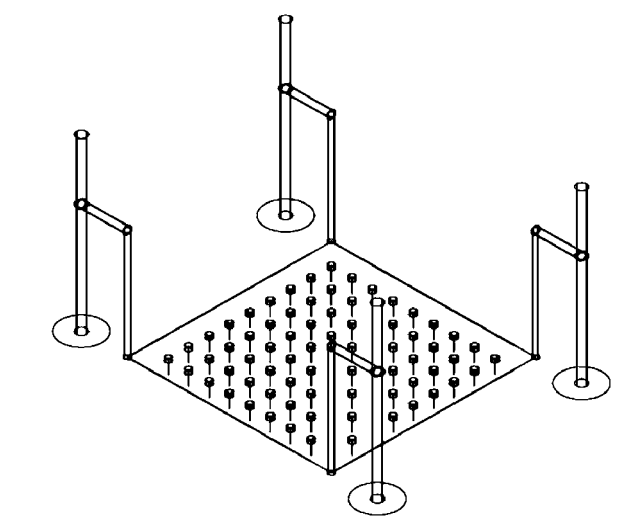


图 3 自动升降式降雨器针头疏通装置

1.3 试验方法

研究区域在夏季多发 $70\sim90\text{ mm}$ 的强降雨,为

模拟较大雨强下纳米碳对黄土坡面养分流失的影响,设定试验模拟雨强为 90 mm/h 。降雨开始前,测得土壤初始质量含水量为 0.014 kg/kg ,质量含量分别为 $0, 0.01, 0.05, 0.07, 0.10\text{ kg/kg}$ 的试验小区土壤容重分别为 $1.323, 1.331, 1.344, 1.349, 1.362\text{ g/cm}^3$ 。降雨开始后,记录降雨时间,当坡面开始产流时记录产流时间。产流后径流水汇入径流桶中,前 15 min 内每间隔 3 min 收集 1 次径流桶水样,产流 15 min 后每间隔 5 min 收集 1 次径流样,直至降雨结束。每次收集前后,对该径流桶进行称重;降雨结束后,将径流桶静置澄清后,分别取上清液过滤,冷藏保存;水桶中液体风干后,对桶内泥沙称重并取泥沙样本,供化学分析。降雨结束后,试验小区自然风干,待小区内土壤水分含量达到初始含水量,分别测得氮磷钾含量,并对小区重新进行一定量氮磷钾喷施,使其与第一次降雨前土壤初始养分含量一致,随后进行第二次人工模拟降雨。

选取 1 mol/L 的乙酸铵溶液作为浸提液,使用原子吸收分光光度计测水样和沙样中的速效钾;选取 0.01 mol/L 的氯化钙溶液作为浸提液,使用紫外-可见分光光度计测水样和沙样中的硝态氮;选取 0.5 mol/L 的碳酸氢钠溶液作为浸提液,钼盐溶液与抗坏血酸混合液为显色剂,使用紫外-可见分光光度计测水样和沙样中的速效磷。

2 结果与分析

2.1 纳米碳对黄土坡地产流的影响

2.1.1 纳米碳对初始产流时间的影响 初始产流时间是径流的重要参数之一。从表 1 可以看出,初始产流时间随纳米碳含量的增加而延长,表明纳米碳可以有效延缓产流时间。在我国西北半干旱黄土区的土壤中,径流通常在超渗条件下产生。因此,与不施加纳米碳的对照组土壤相比较,在土壤表面 5 cm 以下施加纳米碳可以增加土壤的持水能力,从而延缓初始产流时间,这与刘艳丽等^[8]的研究结果一致。进一步分析表 1 可以看出,纳米碳含量低于 0.5 kg/kg 时,其对初始产流时间的影响效果更为明显,而当纳米碳含量进一步增加至 $0.7\sim1\text{ kg/kg}$ 时,初始产流时间无显著延长。

2.1.2 纳米碳对黄土坡面径流及泥沙量的影响 坡面径流是坡面土壤侵蚀发生的动力因素,径流量的变化将最终导致侵蚀量的不同。依据实测数据,将野外模拟降雨条件下,坡面产流后,不同纳米碳含量对坡地累积径流量和累积泥沙量的影响见图 4。由图 4 可以看出,试验小区累积径流量均随时间延长而增加,随纳

米碳含量增加而呈减小趋势。在产流初期,由于坡面土壤含水量较低,水分入渗量大,产流量小,纳米碳对试验小区累积径流量影响较小,曲线重合度较大。随着试验的进一步进行,土壤含水量增大,入渗量减小,产流增大。且在相同降雨历时,累积径流量随纳米碳含量的增加呈明显的减小趋势。其中纳米碳的质量含量为 0.07 kg/kg 和 0.10 kg/kg 的试验小区在相同降雨历时内曲线重合度较大,累积径流量最小。

由图 4 还可看出,试验小区累积泥沙量变化趋势同样均随时间延长而增加,且纳米碳对累积泥沙量影响显著。随纳米碳含量增加,泥沙量呈减小趋势,且

在降雨过程中,与对照组相比较,纳米碳质量比为 0.01,0.05,0.07,0.10 kg/kg 的小区分别降低坡面径流量为 40%,41%,68%和 74%,降低坡面产沙量为 27%,50%,68%和 79%。

表 1 不同纳米碳含量对产生径流的影响

纳米碳含量/ (kg · kg ⁻¹)	产流时间/min	
	重复 1	重复 2
0	3.16	3.50
0.1	4.76	4.89
0.5	6.87	7.12
0.7	8.28	8.37
1.0	8.38	8.97

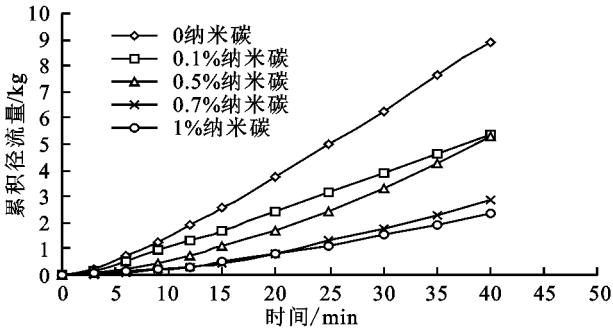
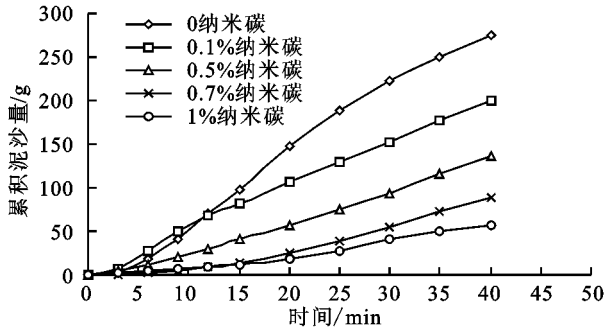


图 4 不同纳米碳含量的坡地累积径流量、累积泥沙量变化过程



为进一步研究纳米碳对坡面径流侵蚀影响,依据实测净流量、降雨量及公式(1)计算出坡地平均入渗速率^[14],并将结果绘于图 5。

$$i_a = (P t \cos \alpha - \frac{10R}{S}) / t \tag{1}$$

式中: i_a 为坡面平均入渗率(mm/min); P 为降雨强度(mm/min); α 为地表坡度; R 为 t 时间内产生的径流量(ml); S 为坡面面积(cm^2); t 为降雨时间(min)。

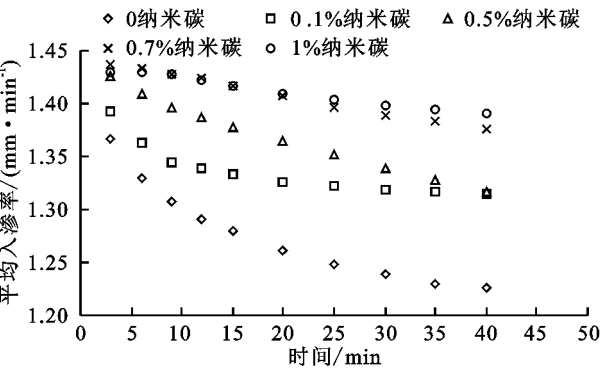


图 5 不同纳米碳含量的坡地平均入渗率变化过程

由图 5 可以看出,降雨过程中各试验小区平均入渗率均随降雨时间延长而减小,随纳米碳含量的增加显著增大。纳米碳的质量含量为 0.07 kg/kg 和 0.10 kg/kg 的小区同一降雨历时内其入渗率均明显高于其他 3 组小区。这一结果与吕金榜等^[15]室内一维垂直土柱试验研究结果相同。当纳米碳在土壤表层以下时,其极大的比表面积和强吸附性有效增加了土壤

的入渗速率,有效延缓了径流的发生。由于在降雨过程中,表层土壤和细小的土壤颗粒最容易被冲刷侵蚀,条施的纳米碳可有效减缓上坡段对下坡段土壤的冲刷与侵蚀,同时纳米碳增加了黄土坡面土壤颗粒的团聚作用,改善了土壤结构稳定性,亦减缓了土壤在降雨过程中发生的侵蚀。

2.2 纳米碳对养分流失的影响

坡地土壤养分径流损失一般表现为 2 种形式:其一,溶解于径流中的养分随径流液流失,这一部分的养分主要是可溶性养分;其二,吸附和结合于泥沙颗粒表面以无机态和有机质形式存在的养分,这一部分养分多为可矿化的养分^[16]。

依据实测数据,将野外模拟降雨条件下,纳米碳对 5 个小区的径流、泥沙中的氮、磷、钾养分含量的影响绘于图 6 至图 8。由图 6 可以看出,在降雨初期,土壤粘粒含量较高,吸附于表层土壤颗粒和存在于径流中的硝态氮浓度较高,在坡面径流的稀释溶解作用下,5 块试验小区径流和泥沙中硝态氮初始含量较大且均随着坡面纳米碳含量的增加而减少,降雨历时 10 min 后,径流泥沙中硝态氮含量均急剧减小,且各试验小区曲线图和散点图重合度较大,表明大量表层土壤中的硝态氮不断被雨水淋溶到土层深处,径流和泥沙中的硝态氮浓度逐渐降低并趋于稳定。

而土壤对磷有较强吸附作用,因此径流浓度衰减

变化表现平缓,但由于降雨—径流与土壤相互作用,逐渐解吸土壤中的磷,迁移到径流中。从图 7 可以看出,产流初期,在雨滴的打击作用和径流的面蚀作用下,大量吸附磷元素的土壤颗粒随径流迁移,径流泥沙中初始含磷量较大,而混合纳米碳的坡面土壤在纳米碳的团聚作用下,将易被径流冲刷的细颗粒胶结在一起,使土壤有更强的抗冲性,因此在径流过程中损失的磷明显少于对照组。随着降雨历时的增加,土壤中的磷随径流泥沙流失和入渗水淋溶累积至深层土壤,逐渐趋于稳定。

动性和水溶性都比较强,产流初期五块小区径流中钾离子浓度均较大,曲线重合度较高。随着产流时间的增加,大量钾离子溶解于径流中流失,浓度迅速减小,且随纳米碳含量增加,径流中钾离子浓度降低。这主要由于钾离子极易随径流及水分迁移,在在产流后,一部分钾离子随着径流沿坡面下移,同时有一部分随降雨入渗水垂直向下运移,且条施纳米碳的坡面土壤入渗率较大,有利于钾离子随入渗水纵向运移,从而大大减少了钾离子随径流的流失。图 8 表明,钾离子的吸附性较差,且在流失泥沙中主要富集于较小粒级的土壤颗粒,因此产流后泥沙中钾离子浓度较低。

径流中钾离子浓度变化见图 8。由于钾离子移

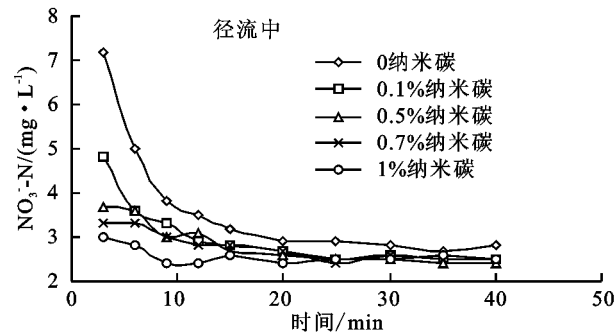


图 6 不同纳米碳含量的坡地径流泥沙中硝态氮含量变化过程

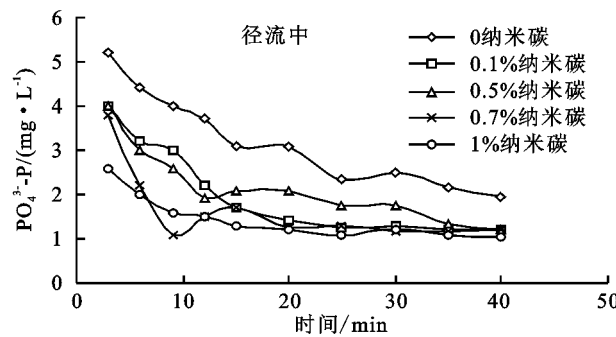
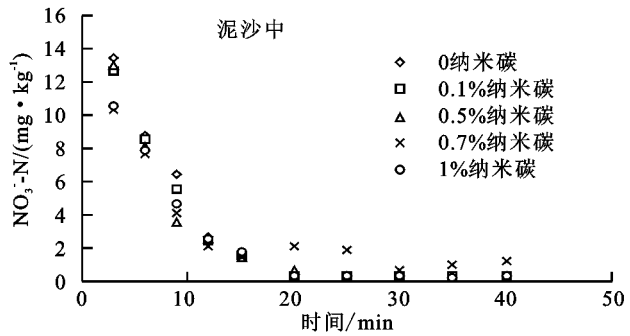


图 7 不同纳米碳含量的坡地径流泥沙中速效磷含量变化过程

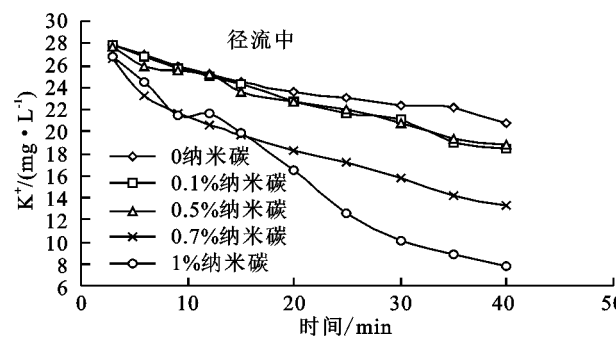
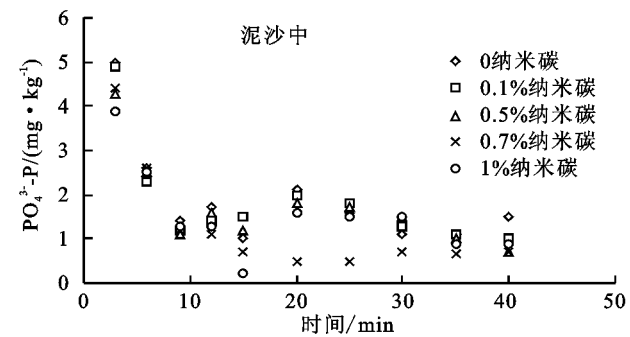
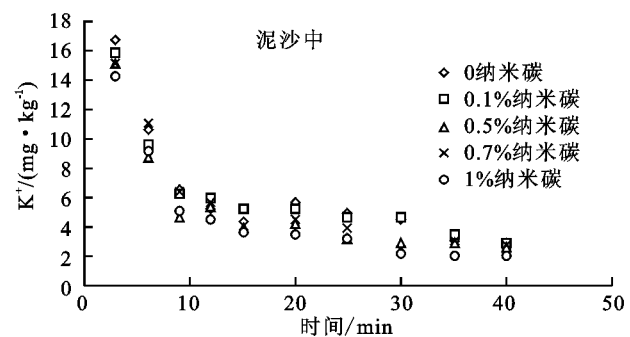


图 8 不同纳米碳含量的坡地径流泥沙中钾离子含量变化过程



2.3 纳米碳含量对坡地径流泥沙养分流失量的影响

坡地径流中挟带养分数量的多少受到土壤初始养分含量、容重、土壤初始含水率、质地及降雨特性、下垫面条件等多项因素的影响。在其他条件一致的情况下,径流养分流失量只与径流浓度和径流量有关,计算公式为^[17]:

$$m(t)=c(t) \times r(t) \quad (2)$$

式中: $m(t)$ 为产流 t 时刻径流养分流失率(mg/min); $c(t)$ 为产流 t 时刻径流养分浓度(mg/L); $r(t)$ 为产流 t 时刻径流量(L/min); t 为产流时刻(min)。

为了描述径流养分流失量动态变化过程,可利用公式^[16]为:

$$M=\int_0^T m(t) dt=\int_0^T c(t) r(t) dt \quad (3)$$

式中: M 为径流养分累积流失量(mg); T 为产流历时

(min),其他参数同前。

依据公式(3)获得在不同处理下的径流及泥沙中养分流失量,根据计算结果将径流及泥沙中养分流失量变化过程曲线绘于图 9 至图 10。

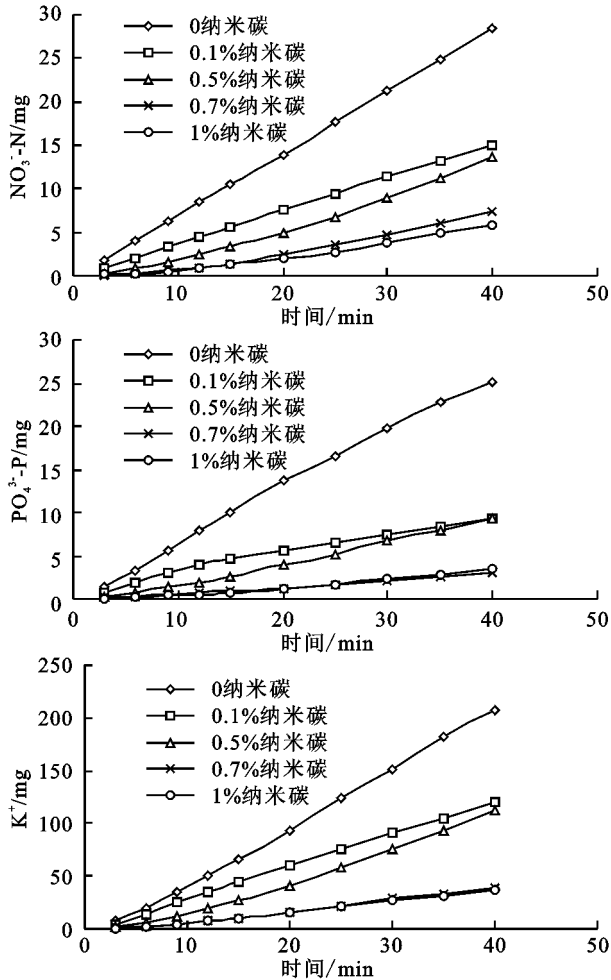


图 9 不同纳米碳含量的坡地径流养分流失量累积变化过程

由图 9,图 10 所示径流、泥沙的养分流失量变化过程可知,施加纳米碳质量比例越大的小区,其养分流失量增长越缓慢,质量比为 0.07 kg/kg 和 0.10 kg/kg 的小区,其径流养分流失量累积变化过程线重合度较高,且养分流失量增长速率明显小于其他试验组。没有施加纳米碳的对照小区,径流养分累积流失量以较大的速率持续增加,表明在降雨过程中,其表层土壤在雨滴击溅和径流冲刷作用下不断被侵蚀而随径流流失,表层土壤被剥蚀殆尽后,下层土壤又给径流提供了新的养分源。在降雨过程中,与对照组相比较,纳米碳质量比为 0.01,0.05,0.07,0.10 kg/kg 的小区分别降低径流氮的流失量为 47%,52%,74%和 79%,降低泥沙氮的流失量为 10%,60%,74%,87%;分别降低径流磷的流失量为 63%,63%,88%和 86%,降低泥沙磷的流失量为 29%,56%,86%,83%;分别降低径流钾的流失量为 43%,46%,81%和 83%,降低泥沙钾的流失量为 25%,62%,78%,87%。

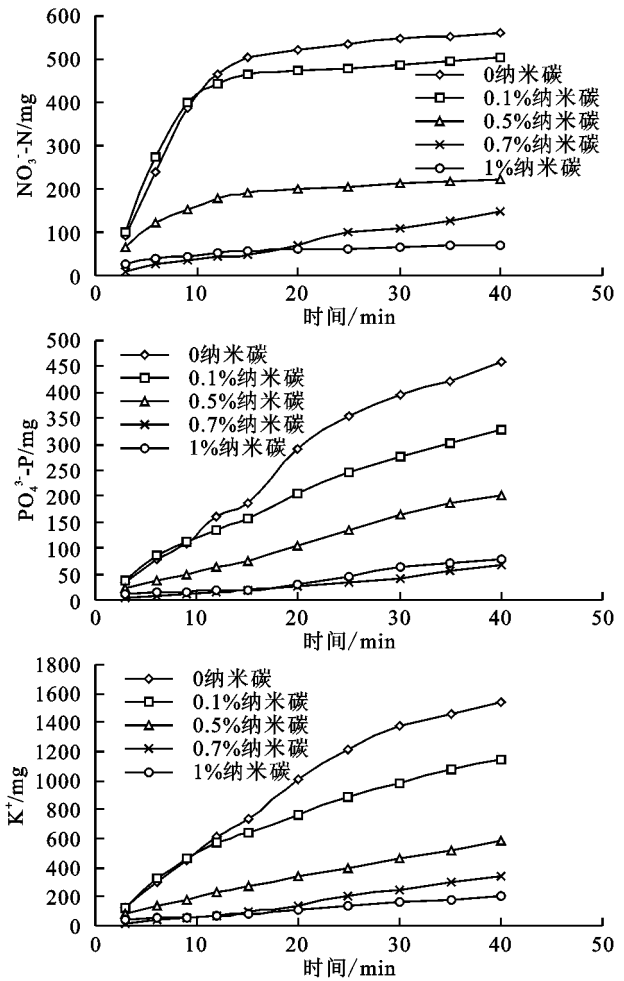


图 10 不同纳米碳含量的坡地泥沙养分流失量累积变化过程

3 结论

通过野外模拟降雨试验,研究了降雨强度为 90 mm/h 条件下,纳米碳对黄土坡面养分流失特征的影响。初步得到结论为纳米碳对试验小区坡面降雨入渗过程影响显著;随着纳米碳含量的增加,同一降雨历时内,平均入渗率呈增大趋势,径流量呈减小趋势;由泥沙累积量变化过程可知,纳米碳对黄土坡面土壤有明显的稳固作用,减缓了降雨对坡面的冲刷侵蚀;条施纳米碳显著降低了径流泥沙中硝态氮、速效磷和钾离子的流失量,纳米碳质量比例为 0.07 kg/kg 和 0.10 kg/kg 的试验小区,土壤养分保持效果最佳。因此,在黄土坡地施加纳米碳,不但可以降低土壤侵蚀,还可减少坡地土壤养分流失,延缓土壤质量退化,对黄土地区的生态环境保护具有显著作用。

参考文献:

- [1] 员学锋. PAM 的土壤保水、保肥及作物增产效应研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2003.
- [2] 何绪生,张树清,余雕,等. 生物炭对土壤肥料的作用及未来研究[J]. 中国农学通报,2011,27(15):16-25.
- [3] 高雪. 生物炭土壤环境效应研究进展[J]. 城市建设理论研究,2014(15):1-5.