

# 模拟降雨下纳米碳对风沙土硝态氮迁移特征的影响

陈晓鹏<sup>1</sup>, 周蓓蓓<sup>1</sup>, 彭 遥<sup>1</sup>, 胡梓超<sup>1</sup>, 王全九<sup>1,2</sup>

(1. 西安理工大学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. 中科院水利部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 杨陵 712100)

**摘要:** 通过在神木六道沟流域开展模拟降雨试验, 分别在试验小区上、中、下位置施加不同施加量的纳米碳(0.0%, 0.1%, 0.5%, 0.7% 和 1.0%)研究其对硝态氮随径流、泥沙迁移及在土壤中再分布过程的影响。设计 1.0 m×1.0 m 降雨小区, 前期在土壤表层以下 5—10 cm 埋入不同施加量纳米碳, 另设不施加纳米碳的小区为参照。采用针孔式人工模拟降雨器进行模拟降雨, 降雨强度为 90 mm/h, 降雨历时为 40 min。降雨前后分别采集土壤剖面土样, 降雨过程中定时收集径流及泥沙, 用以研究纳米碳对于硝态氮迁移过程的影响。结果表明, 在土壤中施加纳米碳, 可有效减少坡面产流产沙量, 且累计径流量、累计产沙量与土壤中纳米碳施加量呈现负相关关系; 纳米碳的施加同样可降低径流、泥沙中硝态氮含量, 随着纳米碳施加量的增加, 径流和泥沙中硝态氮流失量减少, 纳米碳施加量为 1.0% 时, 可减少径流中硝态氮流失 65.3%, 泥沙中硝态氮流失 85.7%; 土壤剖面硝态氮变化对比表明, 施加纳米碳处理中表层硝态氮含量明显低于对照处理, 且在 10—15 cm 出现硝态氮含量峰值, 均大于对照处理。通过等效径流迁移深度分析硝态氮流失情况, 无纳米碳施加处理的 EDR 最大, 随着纳米碳施加量的增加, 各处理的 EDR 依次减小。综上, 在黄绵土中施加纳米碳, 可有效减少土壤硝态氮的流失量, 在黄土区土壤中施加纳米碳并提高施入纳米碳的比例, 对于该地区硝态氮流失的治理具有积极作用。

**关键词:** 纳米碳; 模拟降雨; 产流产沙; 硝态氮迁移; 等效径流迁移深度

**中图分类号:** S157.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2017)06-0052-06

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.06.009

## Effect of Nano-carbon on Nitrate Nitrogen Transport in Aeolian Sandy Soil Under Simulated Rainfall

CHEN Xiaopeng<sup>1</sup>, ZHOU Beibei<sup>1</sup>, PENG Yao<sup>1</sup>, HU Zichao<sup>1</sup>, WANG Quanjiu<sup>1,2</sup>

(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, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** High weathered soils in arid and semi-arid area are characterized by low soil fertility and high erosion potential. This paper evaluated the influences of nano-carbon on nitrate nitrogen transport on the sloping land (15°) of the Chinese Loess Plateau. Simulated rainfall experiments were performed on a natural, fallow loessial slope in the Shenmu Erosion and Environment Research Station, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, which locates in the Liudaogou watershed, Shenmu County, Shaanxi Province. Five application rates (i. e., 0.0%, 0.1%, 0.5%, 0.7%, and 1.0%) of nano-carbon were selected under the simulated rainfall experiments (rainfall intensity of 90 mm/h, and rainfall duration of 40 min). A constant-intensity rainfall method was adopted under natural conditions. Field plots were established on the slope that had been fallow for 5 years. The rainfall simulator came from the independent design of Xi'an University of Technology. Under the 90 mm/h rainfall intensity, the simulated rainfall experiments were carried out for 10 times in the 5 different pretreated plots in order to analyze the nitrate nitrogen loss for all the treatments. The main results were as follows: The application of nano-carbon in soil

收稿日期: 2017-06-30

资助项目: 国家自然科学基金项目(51239009; 41371239); 陕西省科技支撑项目(2013KJXX-38); 陕西省自然科学基金项目(2015JQ5161); 西安理工大学特色研究计划项目(2016TS013)

第一作者: 陈晓鹏(1992—), 男, 硕士, 主要从事农业水土环境与生态环境研究。E-mail: 36084883@qq.com

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

could effectively reduce the runoff and sediment yield, and the cumulative runoff and sediment yield had negative correlation with the amount of carbon applied in the soil. The application of nano-carbon could also reduce the nitrate nitrogen content in runoff and sediment, and the amount of nitrate nitrogen loss in runoff and sediment decreased with the increase of nano-carbon content. Compared with the change of nitrate nitrogen in soil profile, the application of nano-carbon could reduce the loss of nitrate nitrogen in the surface layer and increase the nitrate nitrogen content at 10—15 cm soil layer. By analyzing the effective depth of transport by runoff, the EDR under the control was max. With the increase of the amount of nano-carbon content, the EDR of each treatment decreased in turn. The results provided a guide for controlling soil water and nutrient loss on the sloping land.

**Keywords:** nano-carbon; simulated rainfall; runoff and sediment yield; nitrate nitrogen transport; effective depth of transport by runoff

我国黄土地区土壤以黄绵土为主,由于其土质疏松,持水性差,易造成严重的水土流失灾害。然而,在水土资源流失的同时,土壤中部分氮素也易随之流失,其中相当一部分以坡面径流及淋洗途径损失。进而造成土壤肥力的下降,地下水环境的氮富集污染,导致生态环境更加严峻<sup>[1-2]</sup>。因此,提高土壤对氮的吸附作用,是减少氮素淋失、降低水体富营养化的重要途径<sup>[3]</sup>。

近年来,纳米碳作为一种新型土壤改良剂,引起国内外较高关注。纳米材料具有小尺寸效应、表面界面效应、量子尺寸效应和量子隧道效应等基本特性,将纳米材料应用在土壤中,势必会对土壤结构、土壤中元素迁移及化学生物反应等方面有一定影响<sup>[4-5]</sup>。同时,纳米碳不同于其他金属纳米材料,在土壤及土壤—植被一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<sup>[6]</sup>,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,提升土壤离子浓度,促进养分释放<sup>[7]</sup>;同时纳米碳具有的巨大的比表面积及小尺寸效应,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<sup>[6]</sup>。已有学者研究表明,在黄绵土中施加纳米碳,可减少坡面径流冲刷作用,对于黄土地区水土流失的治理具有积极作用<sup>[8-9]</sup>。胡梓超等<sup>[10]</sup>研究发现,纳米碳的施加,可有效保持黄土坡面土壤养分含量,降低径流中氮磷钾等养分的流失。而在黄土坡面上施加纳米碳后,径流中养分流失降低的同时,养分在坡面土壤中再分布情况以及纳米碳对土壤中养分运动的影响并没有涉及研究。因此,本文通过人工模拟降雨试验,以硝态氮为研究对象,研究土壤中施加纳米碳对土壤中硝态氮迁移过程以及纳米碳对于土壤固氮作用的影响,进而揭示降雨过程中纳米碳对于阻碍土壤硝态氮流失的作用机理和硝态氮在土壤剖面的再分布特征,以期为黄土高原地区水土养分流失的治理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验于2015年7—9月在中国科学院神木侵蚀与环境试验站进行,2016年7月进行试验重复。该试验站位于陕西省神木县六道沟流域,海拔1 081.0~1 273.9 m,平均气温8.4℃,平均降水408.5 mm,其中6—9月降雨量占全年的80.93%,而且多是暴雨,最大日降雨量为132 mm,降水年际变化大,最大年降水量8 191.1 mm,最小106.8 mm。该地区主要土壤类型包括风沙土和绵沙土,本试验小区内土壤为风沙土,其中黏粒、粉粒和砂粒所占比例分别为15.70%,37.47%和46.83%,pH 8.0,有机质含量11.32 g/kg,全氮含量0.82 g/kg。

### 1.2 试验设计

试验小区设计为1.0 m×1.0 m,坡度设计为15°,采用针头式降雨器进行模拟降雨试验。试验设置5个小区,每个小区纳米碳的施加比例分别为0.0%,0.1%,0.5%,0.7%和1.0%。每个小区在坡上、坡中、坡下3个位置条施纳米碳,条施宽度为5 cm,条施深度在坡面表层以下5—10 cm。施加纳米碳之前,将土壤表层以下0—5 cm土壤取出置于一旁,将地表下5—10 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,为了降低人为扰动对土壤的影响,静置恢复4个月后进行模拟降雨试验。降雨小区四周用铁片作挡板,插入地表10 cm左右直至固定,在小区底部再用铁片围成“V”形汇流口,下接径流桶承接降雨产生的径流。

试验降雨装置采用西安理工大学自主设计研发的针孔式人工降雨器<sup>[11]</sup>。针孔式降雨器主要由支架(可上下调节高度)、水槽(针头、振动装置)和供水装置3部分组成。降雨高度为1.2 m,可降雨控制面积为1.5 cm<sup>2</sup>。每次降雨前需反复率定雨强,可通过调节水槽内的水位高度来调节雨强的大小。本次试验降雨强度依据当地多年侵蚀性降雨资料,设计雨强为90

mm/h,降雨历时为 40 min。为模拟土壤中  $\text{NO}_3^-$ —N 的变化过程,在降雨开始前,根据神木当地农民的施肥习惯,将硝酸钾替代  $\text{NO}_3^-$ —N,以 10 g/m<sup>2</sup> 的施量与水混合,均匀喷施在小区坡面上,放置 24 h,使养分有足够的时间在表层一定深度分布。

试验所用纳米碳来源于上海海诺炭业有限公司,碳粉粒径为 40 nm,原料采用 5 年生竹子,经高温炭化,纳米级超细研磨精制组成。

模拟降雨开始前,用土钻在小区内随机定点采集土壤剖面土样,用来测定土壤初始质量含水率和土壤初始  $\text{NO}_3^-$ —N 含量。土样采集深度为 30 cm,用烘干法测定剖面各层土壤质量含水率,当土壤剖面质量含水率平均值相差在 10% 以内,开始模拟降雨试验。从降雨开始时计时,记录坡面产流时间,产流后用径流桶收集坡面产生径流,0~15 min 之间,每隔 3 min 收集一次径流,15~40 min 之间,每隔 5 min 收集一次径流。降雨结束后采集土样,采集深度为 30 cm 处,土壤样品的处理方法同降雨前。记录径流桶中径流量后,对各时间段径流采样留底后,风干径流桶中的径流液,收集径流产生的泥沙,称质量获得泥沙含量,同样留取部分土样用于后期养分测定。

### 1.3 样品分析

土壤样品及径流液中  $\text{NO}_3^-$ —N 含量的测定通过 DR 6000 紫外可见光分光光度计进行。测定方法一般有水杨酸比色法和双波长比色法两种<sup>[12]</sup>。

**水杨酸比色法:**取 0.2 mL 澄清待测液(对土壤中的  $\text{NO}_3^-$ —N 测定用 0.01 mol/L 的氯化钙溶液静提,径流液则不需要)于 50 mL 比色管中,加 0.5 mL 含 5% 水杨酸的浓硫酸,静置 20 min 后,再加 9.3 mL 氢氧化钠溶液,冷却至室温,用 DR 6000 可见光分光光度计在 410 nm 处测定吸光度值;

**双波长比色法:**取 1 mL 澄清待测液(对土壤中的  $\text{NO}_3^-$ —N 测定用 0.01 mol/L 的氯化钙溶液静提,径流液则不需要)于 10 mL 比色管中,用 DR 6000 可见光分光光度计在 203~230 nm 处测定吸光度值。

采用两种测定方法对样品中硝态氮含量进行测定,由于水杨酸比色法每次取样量较少,提取过程中人为误差因素影响较大,每次试验测定结果不稳定,所以,本试验采用双波长比色法进行土壤和径流液样品的测定。

### 1.4 理论分析

(1) 坡面养分流失量计算。在模拟降雨过程中,径流养分流失主要有两种形态,分别为径流水中的溶

解态和径流泥沙中的吸附态。一次降雨事件的养分流失量可根据下式计算<sup>[13]</sup>:

$$m_r(t) = c_r(t) \times r(t), m_s(t) = c_s(t) \times s(t) \quad (1)$$

$$M = \sum_{t=0}^{40} m_r(t) + \sum_{t=0}^{40} m_s(t) \quad (2)$$

式中: $M$  为坡面养分流失总量( $\text{mg}/\text{m}^2$ ); $m_r(t)$ 、 $m_s(t)$  分别为坡面随径流和泥沙流失的养分质量( $\text{mg}/\text{m}^2$ ); $c_r(t)$  为径流中养分浓度( $\text{mg}/\text{L}$ ); $c_s(t)$  为泥沙中养分浓度( $\text{mg}/\text{kg}$ ); $r(t)$  为径流量( $\text{L}/\text{m}^2$ ); $s(t)$  为泥沙量( $\text{kg}/\text{m}^2$ )。

(2) 有效混合层深度模型。在降雨过程中,会形成一种雨滴、径流及土壤交互作用的混合层。土壤溶质能够参与径流流失的土层厚度,被称为降雨—径流—土壤混合层深度(简称混合层深度)<sup>[14~15]</sup>。在黄土地区养分流失研究中,由于黄土坡地受土壤侵蚀影响较为严重,土壤溶质迁移过程尤其复杂。王全九等<sup>[14]</sup>认为土壤混合层深度内包括了随土壤入渗水迁移的溶质和随地表径流迁移的溶质,以径流溶质为研究对象,提出了等效径流迁移深度概念,建立了只考虑土壤溶质地表迁移总量的等效径流迁移深度(EDR)模型。具体为:

$$h_d = \frac{10W_{\text{总}}}{\rho_s c_0 A} \quad (3)$$

式中: $h_d$  为等效径流迁移深度( $\text{cm}$ ); $W_{\text{总}}$  为径流迁移溶质总量( $\text{mg}$ ); $\rho_s$  为土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); $c_0$  为土壤溶质初始含量( $\text{mg}/\text{kg}$ ); $A$  为土壤表面积( $\text{m}^2$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同纳米碳施加量对径流量和产沙量的影响

在坡面自然降雨过程中,坡面径流量是土壤产生侵蚀的主要动力,径流量的变化导致土壤侵蚀量的不同<sup>[16]</sup>。而坡面径流和泥沙是养分流失的载体,通过在土壤中施加改良剂,改变坡面土壤的持水势能,进而改变坡面径流和泥沙输出量,达到养分流失调控的目的。依据实测数据,在模拟降雨条件下,不同纳米碳施加量对坡面径流和泥沙量的影响绘于图 1。由图 1a 可以看出,随着降雨时间的延长,坡面累计径流量增加。但随着不同纳米碳的施加量,各处理径流量增加的幅度不一致,在土壤中纳米碳的施加比例越大,坡面产生径流量越少。其中,将 0.1% 纳米碳处理与无施加纳米碳处理进行对比,施加纳米碳的处理具有较明显的减流作用,纳米碳施加比例从 0.1% 升至 1.0%,分别可减少径流 39.7%、40.8%、67.7% 和 74.4%,说明纳米碳施加在坡面中,可有效阻碍坡面产流量,提高坡面土壤的持水能力。由图 1 中曲线可以看出,在降雨初期,各处理中累计径流量曲线重合度较高,这主要由于降雨初期降雨量大部分入渗到土

壤中,各处理之间没有较大差异;但随着降雨的进行,坡面入渗到达纳米碳埋设位置(表层以下5—10 cm),由于纳米碳的施加改变了土壤结构,土壤总孔隙体积增加,且小孔隙增多,毛细管作用力增强,土样

吸持水量增多<sup>[17]</sup>,所以渗入土壤中的降雨量增多,坡面径流量随之减少,各处理之间的累计径流量差异逐渐明显。当坡面土壤入渗饱和后,径流趋于稳定,累计径流量变化趋势呈现直线上升。

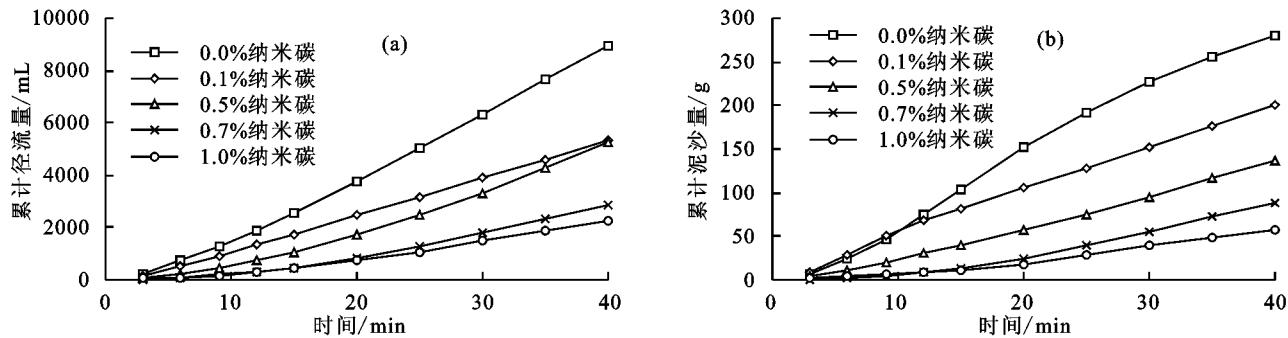


图1 不同纳米碳施加量对累计径流量和泥沙量的影响

径流中的挟沙量主要是由于降雨对坡面的击打和径流的冲刷而产生,其中,坡面径流是土壤流失的主要因素。图1b显示了坡面产沙量随降雨时间的变化情况。由图1b可以看出,坡面累计产沙量随着降雨时间的延长,同样呈现不断增加的趋势。相对于无施加纳米碳的处理,在施加过纳米碳的处理中降雨导致的径流挟沙量明显减小,且随着纳米碳施加比例的增加,各处理中累计泥沙量依次减少28.5%,51.1%,68.1%和79.7%。这说明土壤中施加纳米碳在减少径流的同时,可以减少径流中的挟沙量,并且随着纳米碳施加比例的增加,减沙效果越来越明显。在降雨过程中,坡面径流携带泥沙主要来源于土壤微小颗粒,由于坡面条施纳米碳处理,在减少径流的同时,纳米碳增加了土壤颗粒的团聚作用,改善了土壤的结构稳定性,使得坡面土壤表层侵蚀量减少,即径流中累计泥沙量减少,降低了土壤在降雨过程中的流失量。

## 2.2 不同纳米碳施加量对径流硝态氮迁移的影响

坡面养分流失过程与径流关系密切,在坡面产流的过程中,径流对坡面表层土壤不断冲刷,土壤养分

亦随径流向下游失。图2表示了径流中硝态氮流失量与纳米碳施加量的关系。由图2a可以看出,径流中硝态氮流失量变化呈现先增大后趋于稳定的趋势,这主要是由于降雨前期降雨量大部分入渗到坡面土壤中,产流较少,对于土壤中硝态氮的侵蚀量较少,随着径流量的增加,对坡面土壤侵蚀加剧,径流中硝态氮含量也在不断增加,直到径流量趋于稳定,硝态氮流失量也趋于稳定。在无施加纳米碳的处理对照中,无纳米碳处理中单位时间内硝态氮流失量明显高于其他纳米碳施加处理。在模拟降雨结束(降雨产流后40 min)时,施加纳米碳的处理中,径流硝态氮每分钟流失量较无纳米碳处理分别减少39.4%,21.3%,54.4%和65.3%。在无纳米碳处理中,第9 min时,径流硝态氮流失量基本趋于稳定,而其他施加纳米碳的处理中,稳定时间都往后延迟,其中0.7%和1.0%纳米碳施加比例中,稳定时间基本在第35 min左右。这可能是由于施加纳米碳改变土壤结构导致,坡面径流偏小,且不易对表层土壤进行完全侵蚀,故稳定时间向后延迟。

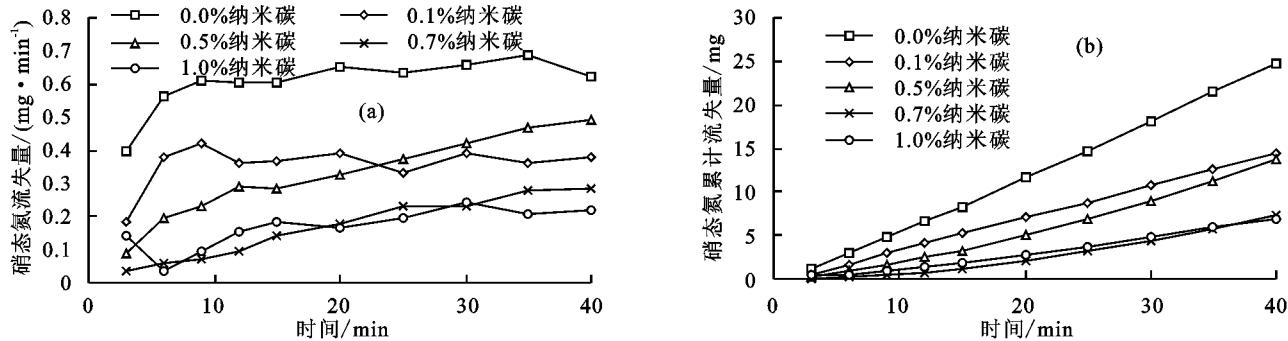


图2 不同纳米碳施加量对径流中硝态氮流失量的影响

从图2b可以看出,无纳米碳施加的处理中,硝态氮累计流失量远大于其他施加纳米碳的处理,说明土壤中施加纳米碳可有效减少土壤中硝态氮的流失。对0.1%~1.0%不同施加比例纳米碳处理中,径流

硝态氮累计流失量与纳米碳的施加量呈负相关关系。纳米碳施加量越多,对于坡面土壤中硝态氮的固留效果越好。单因素方差分析显示,径流硝态氮累计流失量的差异性显著,与纳米碳施加量之间极度相关

( $P > 0.05$ )。对径流硝态氮累计流失量进行幂函数拟合(表 1)。结果显示,随着纳米碳施加比例增加,径流对土壤硝态氮的侵蚀能力降低,土壤对硝态氮养分的固持能力增强。

表 1 径流硝态氮累计流失量随时间变化关系拟合

纳米碳施加比例/%	幂函数拟合	$R^2$
0.0	$S = 0.3555t^{1.1582}$	0.9990
0.1	$S = 0.1786t^{1.2158}$	0.9894
0.5	$S = 0.0545t^{1.5044}$	0.9986
0.7	$S = 0.0136t^{1.6877}$	0.9961
1.0	$S = 0.0103t^{1.9256}$	0.9643

### 2.3 不同纳米碳施加量对泥沙硝态氮迁移的影响

在坡地土壤养分径流损失中,除了溶解于径流中随径流液流失的可溶性养分外,还有一部分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<sup>[18]</sup>。图 3 表示不同纳米碳施加量对于泥沙中硝态氮流失量的影响。由图 3a 可以看出,各处理中泥沙硝态氮每分钟流失量基本总体由大到小的变化趋势。其中,0.0% 和 0.1% 纳米碳施加比例的处理中,硝态氮流失量有一段上升的过程,这可能是由于纳米碳施加量少,对于土壤结构的作用不明显,径流量对于表层土壤的冲蚀较严重。随着径流的增加,坡面表层土壤抗冲蚀能力增强至相对稳定,泥沙中硝态氮含量也逐渐减少。在 0~20 min 内,不同处理间差异较大,随着纳米碳施加量的增加,泥沙硝态氮的流失量也逐渐减少,这主要由于纳米碳作用于土壤结构后形成的结果。第 20 min 之后,各处理间的差异缩小,泥沙硝态氮的流失量趋于稳定,接近于零值。这是因为混合层中硝态氮含量快速下降,参与径流流失的硝态氮很少。

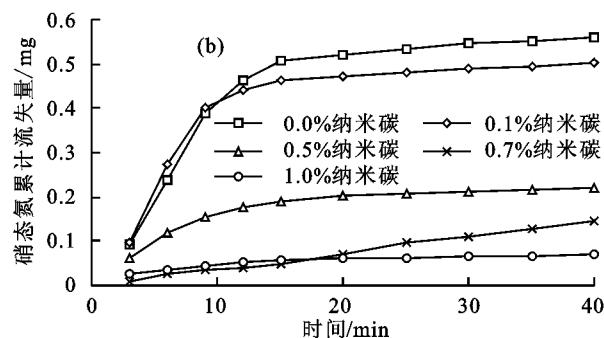
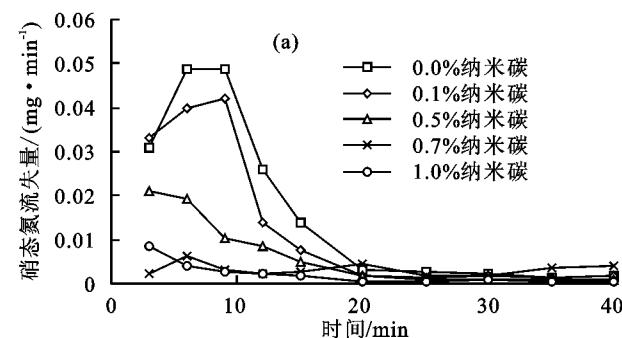


图 3 不同纳米碳施加量对泥沙中硝态氮流失量的影响

从图 3b 可以看出,硝态氮累计流失量的总体趋势是先增加后趋于稳定。随着纳米碳施加比例的增加,硝态氮的流失量减小,相比于无施加纳米碳处理,其他各处理中硝态氮流失量分别减少 10.5%, 60.5%, 74.1% 和 87.5%, 说明纳米碳的施加对于泥沙中硝态氮的流失具有很好的抑制效果。

### 2.4 不同纳米碳施加量对土壤剖面硝态氮分布特征的影响

在模拟降雨条件下,地表土层里的硝态氮除了随地表径流流失以外,还会向土壤深层迁移,因此会出现类似于水分入渗的运动规律,同时又具有其本身的迁移特性<sup>[19]</sup>;另外,土壤剖面硝态氮含量分布特征也可以反映地表径流硝态氮流失规律。图 4 显示了不同纳米碳施加量下土壤剖面硝态氮的分布。由 4a 可以看出,5 个处理下土壤硝态氮含量均随着土壤深度增大呈现出先增大后减小的变化趋势,即存在一个峰值。各对比处理中,随着纳米碳施加比例的增加,峰值不断增大,而表层硝态氮含量越来越低,这也使得土壤中硝态氮含量参与径流流失的概率减小,进一步说明纳米碳施加量增加,而径流中硝态氮含量降低的

原因。无施加纳米碳的处理中,峰值出现在表层下 5—10 cm,而施加纳米碳的处理中,峰值均向深层迁移,基本均在 10—15 cm,且在 1.0% 纳米碳施加量处理下,峰值达到了最大值为 2.48 mg/kg,这说明纳米碳的施加可促进土壤中硝态氮向深层迁移,减少径流流失的概率。

图 4b 显示了模拟降雨前后土壤各剖面硝态氮含量的对比差值。从图 4b 可以看出,在不同纳米碳施加量下,土壤表层以下 0—15 cm 各处理间对比差值最为明显,15 cm 以下差值基本无变化,说明在模拟降雨过程中,降雨量已入渗到表层下 15 cm 处。在表层下 0—5 cm,无施加纳米碳的处理中土壤硝态氮含量差值明显高于其他处理,降雨过程中表层土壤硝态氮流失最多;而在 5—15 cm 处,各处理间土壤硝态氮差值均为正值,说明表层土壤硝态氮随径流向土壤深层迁移,其中,随着纳米碳施加量的增加,硝态氮差值越来越明显,1.0% 纳米碳施加量前后差值最大。在 10—15 cm 处,降雨后土壤硝态氮含量增幅最大,进一步说明了纳米碳的施加,改变了土壤对于硝态氮的固持作用。

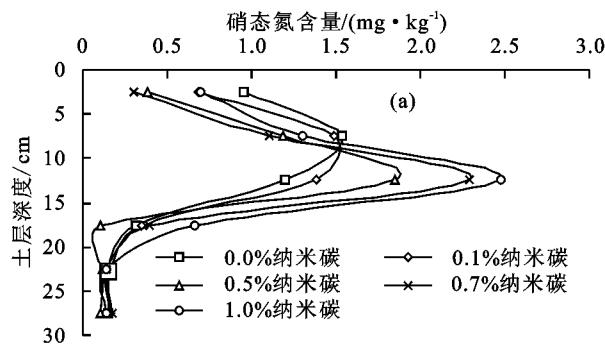


图4 不同纳米碳施加量对土壤剖面硝态氮分布的影响

## 2.5 坡面混合层深度确定

通过在各试验小区土壤表层喷施等量模拟硝态氮,表层初始硝态氮含量接近,那各处理等效径流迁移深度主要取决于地表流失量。通过公式(3)进行计算,得出0.0%,0.1%,0.5%,0.7%,1.0%5个处理的等效径流迁移深度(EDR)分别为1.737,1.030,0.959,0.510,0.485 cm,可知无施加纳米碳处理的EDR最大,随着纳米碳施加量的增加,各处理的EDR依次减小。EDR主要取决于地表径流养分流失量和土壤养分初始质量的比值,施加纳米碳的处理中,地表径流硝态氮流失量呈线性递减,所以EDR的取值也呈递减趋势,这说明纳米碳可有效降低土壤中等效径流迁移深度,减缓径流对表层土壤硝态氮的冲刷。同时,EDR可以直观反映出纳米碳对于黄土地区水土养分流失的影响。

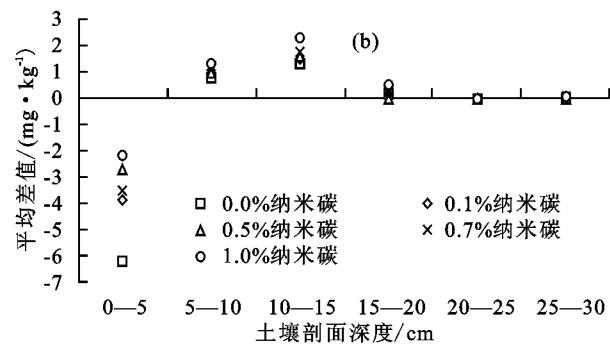
## 3 结论

本文通过在神木六道沟流域开展模拟降雨试验,研究了不同纳米碳施加量对风沙土中硝态氮迁移的影响,主要结论为:

(1)在土壤中施加纳米碳,可以有效减少坡面产流产沙量,且随着纳米碳的施加量增多,坡面累计径流量和累计泥沙量均逐渐减小,呈现负相关关系;其中,纳米碳施加量为1.0%的处理较无施加纳米碳的处理,可减少径流74.4%,减少泥沙流失79.9%。

(2)纳米碳的施加可有效减少径流和泥沙中硝态氮的流失量。0.1%~1.0%不同施加比例纳米碳处理中,径流硝态氮累计流失量与纳米碳的施加量呈负相关关系,其中,1.0%纳米碳施加量处理中,径流可减少硝态氮流失65.3%,泥沙中可减少85.7%。因此,纳米碳施加量越多,对于坡面土壤中硝态氮的固留效果越好,土壤中施加纳米碳可有效减少土壤中硝态氮的流失。

(3)降雨后土壤剖面硝态氮分布呈现单峰值现象,施加纳米碳处理的峰值均大于未施加纳米碳的处理,且峰值基本均处于10—15 cm。对比降雨前后各剖面硝态氮差值,未施加纳米碳处理的土壤表层硝态氮流失最



多,而5—15 cm剖面硝态氮差值随纳米碳施加量的增多而增大。对比未施加纳米碳的处理,在施加纳米碳的处理中,硝态氮更多地留在土壤表层以下。

(4)通过等效径流迁移深度分析硝态氮流失情况,无施加纳米碳处理的EDR最大,随着纳米碳施加量的增加,各处理的EDR依次减小。纳米碳可有效降低土壤中等效径流迁移深度,减缓径流对表层土壤硝态氮的冲刷。同时,EDR可以直观反映出纳米碳对于黄土地区水土养分流失的影响。

## 参考文献:

- [1] Bouwman A F, Boumans L J M, Batjes N H. Estimation of global  $\text{NH}_3$  volatilization loss from synthetic fertilizers and animal manure applied to arable lands and grasslands[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2002, 16(2):1-14.
- [2] Franklin D, Truman C, Potter T, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses from variable and constant intensity rainfall simulations on loamy sand under conventional and strip tillage systems[J]. Journal of Environmental Quality, 2007, 36(3):846.
- [3] Juang T C, Wang M K, Chen H J, et al. Ammonium fixation by surface soils and clays[J]. Soil Science, 2001, 166(5):345-352.
- [4] 刘秀梅, 冯兆滨, 张树清, 等. 纳米—亚微米级复合材料对褐潮土有机无机复合体含量及各粒级复合体中C、N、P含量与分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(1):57-63.
- [5] 陈军辉, 尹华强, 刘勇军, 等. 纳米碳材料及在环境保护中的应用前景[J]. 化工环保, 2004, 24(增刊1):120-122.
- [6] 肖强, 孙焱鑫, 王甲辰, 等. 纳米材料在土壤与植物营养领域的应用进展[J]. 中国土壤与肥料, 2009(4):10-15.
- [7] 刘键, 张志明, 金攻. 纳米碳长效环保复合肥料:中国, 101362659[P]. 2009.
- [8] 周蓓蓓, 陈晓鹏, 吕金榜, 等. 纳米碳对不同植被覆盖下黄土坡地降雨侵蚀的抑制效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2):116-124.
- [9] 吕金榜, 周蓓蓓, 王全九. 地表下纳米碳混合层对土壤入渗过程的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2):126-130.