

# 纳米碳对扰动黄绵土水分入渗过程的影响\*

谭 帅<sup>1</sup> 周蓓蓓<sup>1†</sup> 王全九<sup>1,2</sup>

(1 西安理工大学水资源研究所, 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** 将纳米材料应用于土壤物理学领域对减少土壤水分流失、提高土壤水肥利用效率、优化土壤物理结构有着重要的意义。基于扰动黄绵土土柱室内一维入渗试验, 研究了纳米碳含量(质量含量分别为 0、0.001、0.005、0.007、0.010 g g<sup>-1</sup>)对扰动黄绵土的水分入渗过程及饱和导水率的影响。结果表明:(1)纳米碳对扰动黄绵土水分入渗有显著影响。一定入渗历时内, 随着纳米碳含量增大, 累积入渗量及湿润锋推进速率均呈显著减小趋势。(2)Kostiakov 公式和 Philip 方程均能较好地描述添加纳米碳的扰动黄绵土累积入渗量随时间的变化过程。其中, Kostiakov 公式拟合精度更高。(3)湿润锋随时间变化符合幂函数关系。(4)纳米碳对扰动黄绵土的饱和质量含水量和饱和导水率影响同样显著。随纳米碳含量增加, 前者增大, 后者减小, 与纳米碳含量变化分别符合二项式和指数函数关系。

**关键词** 纳米碳; 累积入渗量; 湿润锋; 饱和质量含水量; 饱和导水率

**中图分类号** S152.7

**文献标识码** A

纳米科学技术(Nano ~ ST)是在纳米尺寸(10<sup>-7</sup> ~ 10<sup>-9</sup> m)范围内认识和改造世界, 通过直接操作和安排原子、分子来创制新的物质。用纳米技术改造的纳米材料以其巨大的比表面积、高活性点位及优良的光电性能等特点引起国际上的关注<sup>[1-3]</sup>。由于纳米材料所具备的特殊性质, 因此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。其中, 纳米材料中的纳米碳在土壤环境中的应用较广泛, 纳米碳不同于金属材料, 碳元素有稳定的化学性质, 在土壤及土壤-植被-大气循环中广泛存在, 具有环境友好性。此外, 纳米碳是在纳米状态下对碳原子的大小和结构进行有效控制的碳材料, 是一种低燃点和非导电的改性碳<sup>[4-5]</sup>, 具有强吸附性、高活化性等特点。王艳等<sup>[6]</sup>通过对大豆的吸水和失水试验调查发现, 添加纳米碳的肥料能激活种子的酶活性, 促进种子快速吸水和提前发芽, 随纳米溶胶浓度增加, 种子失水率逐渐降低; 添加纳米碳的肥料还能提高大豆抗病能力, 促进磷肥吸收, 具有明显节磷

效果。Khaydarov 等<sup>[7]</sup>用纳米碳高聚合物对重金属污染的地下水及土壤进行修复, 研究表明纳米碳高聚合物对水域距离范围为 1 ~ 100 m 和土深范围为 1 ~ 100 cm 内的重金属污染有明显的修复效果。Wu<sup>[8]</sup>将纳米碳加入到缓释肥料和缺乏氮素的水稻土中, 研究了纳米碳肥料对水稻产量以及氮素利用率的影响, 研究表明施加纳米碳肥料后, 水稻产量及氮肥有效利用率明显增加, 且加入纳米碳可在一定程度上减少氮肥造成的水环境污染。在农业土壤环境领域, 国内外对纳米碳在土壤修复、污水处理以及肥料增效方面的研究较多<sup>[4,9-11]</sup>, 但在土壤水分运动机理及持水性等方面的研究却很少。

同时由于黄土高原陕北地区大部分土壤质地疏松, 保水保肥性较差, 使得该区域水土流失极为严重, 若将吸水保肥性极强的纳米碳加入该质地土壤, 势必对该区域土壤持水保肥性有显著影响。因此, 本研究基于室内试验, 将纳米碳加入黄土高原典型土壤黄绵土中, 初步研究纳米碳含量对黄绵土入渗过程的影响, 拟为纳米碳在改善黄绵土理化性

\* 国家自然科学基金项目(51239009, 41001132)、中央财政支持地方高校发展专项资金特色重点学科项目(106-00X101, 106-5X1205)、陕西省科技新星资助计划项目(2013KJXX-38)资助

† 通讯作者, E-mail: happyangle222@gmail.com

作者简介: 谭 帅(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事农业水土资源与生态环境研究。E-mail: tan-shuai@hotmail.com

收稿日期: 2012-12-18; 收到修改稿日期: 2013-04-17

质、提高土壤保水保肥性及改善黄土高原水土流失现象等方面提供参考依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试土壤

黄绵土是一种弱发育土壤,以中小孔隙为主,结构性较差,结构体容易被破坏<sup>[12]</sup>,属于黄土高原典型土壤,因此本试验采用黄绵土为供试土样。土壤样品采自陕西省安塞县。选取 3~4 m<sup>2</sup> 的正方形区域,为

减小耕层有机质含量较高的影响,除去耕层 10 cm 左右的土壤,用小铲将土面整平,取样土层为犁底层表层 5 cm<sup>[13]</sup>。将土样放在阴凉、干燥、通风、无特殊气味和无灰尘污染的室内风干。风干后去除土样中的枯枝落叶、植物根茎、动物残体等侵入物,用木制擀杖将土样压碎,过 2 mm 不锈钢筛,留以备用。测得土壤初始质量含水量为 0.008 g g<sup>-1</sup>。利用英国马尔文公司生产的 MS2000 激光粒度分析仪进行颗粒分析,土壤粒级分析结果见表 1,按国际制土壤质地分类标准,供试土样为砂土和壤砂土。

表 1 颗粒组成

Table 1 Particle size composition (%)

土壤 Soil	黏粒 Clay < 0.002mm	粉粒 Silt 0.002 ~ 0.02mm	细砂粒 Fine sand 0.02 ~ 0.2mm	粗砂粒 Coarse sand 0.2 ~ 2mm
黄绵土 Loessal soil	5.53	19.32	71.97	3.18

### 1.2 试验方法

本试验采用一维垂直定水头法测定不同纳米碳含量下的扰动黄绵土入渗过程及饱和导水率,供水水头控制在 3.6 cm。为便于观察入渗过程,试验土样用土柱填装,马氏瓶控制水位,土柱和马氏瓶均采用厚为 0.5 cm、内径为 5 cm、高为 35 cm 有机玻璃柱,底部为 1 cm 厚的有机玻璃板。试验共设 5 组处理,每组各设 2 个重复。采用平均粒径为 40 nm、纯度为 99% 的纳米碳作为混合介质。各处理中纳米碳和供试土样分别按照纳米碳含量为 0、0.001、0.005、0.007、0.010 g g<sup>-1</sup> 混合,其中,0 g g<sup>-1</sup> 为不含纳米碳的对照处理。设定土样填装容重为 1.4 g cm<sup>-3</sup>,分 4 层(每层厚为 5 cm)装入有机玻璃柱内,填装每层土样时,用卷着的硬纸片将土样慢慢送入有机玻璃柱底部,用搅拌棒将每层土样与纳米碳颗粒混合均匀,并在层与层之间刮毛。在有机玻璃柱底部填放纱布和滤纸,防止土壤颗粒流失堵塞出流孔口。此外,在填装好的土柱顶部放一层滤纸,防止蒸馏水从土柱顶部加入时直接冲刷土柱,破坏土柱上表面。试验过程中,记录马氏瓶中水位高度及土柱中湿润锋随时间的推进距离,直至湿润锋达到柱底。

入渗试验结束后,将土柱置于蒸馏水中充分饱和。继续采用定水头法测定土壤饱和导水率,供水水头仍控制在 3.6 cm,试验过程中每 30 min 记录出流液质量,直至出流液质量恒定。

采用环刀法测定不同纳米碳含量下扰动黄绵土的饱和和质量含水量,每个处理重复 3 次。

### 1.3 基本原理

Kostiakov<sup>[14]</sup> 根据大量试验和实测资料提出了入渗经验公式

$$I = at^n \quad (1)$$

式中, $I$  为累积入渗量(cm), $t$  为入渗历时(min), $a$ 、 $n$  为经验常数。

Philip<sup>[15]</sup> 基于积水入渗试验,通过对土壤水分运动基本方程的求解,提出了 Philip 入渗方程。在入渗历时较短的情况下,累积入渗量  $I$  可表示为

$$I = St^{0.5} \quad (2)$$

式中, $S$  为吸渗率(cm min<sup>-0.5</sup>),其他符号意义同式(1)。

若土壤是各向同性的、均匀的多孔介质,在整个流区内水流是连续的,且环境温度恒定,则水分在土壤中的运动服从达西定律(Darcy's law)<sup>[13,16-17]</sup>

$$K_s = \frac{QL}{AtH} \quad (3)$$

式中, $K_s$  为饱和导水率(cm min<sup>-1</sup>), $Q$  为出流量(ml), $L$  为土柱长度(cm), $A$  为土柱横截面积(cm<sup>2</sup>), $t$  为渗透时间(min), $H$  为渗流路径始末断面的总水头差(cm)。

## 2 结 果

### 2.1 纳米碳含量对扰动黄绵土累积入渗量的影响

累积入渗量是指单位面积流入土壤中的水量,为水分运动特征之一。为了便于观察,一维垂直累

积入渗量用马氏瓶中水柱下降高度即入渗水深 (cm) 表示。根据实测数据, 将 5 组纳米碳含量下扰动黄绵土的累积入渗量随时间变化过程绘于图 1。从图 1 中可以看出, 5 个处理土柱内的累积入渗量均随时间延长而增加, 曲线斜率由陡趋于平缓, 表明添加纳米碳与不添加纳米碳的扰动黄绵土累积入渗量变化较为类似。进一步分析图 1 可以看出, 在入渗初期, 纳米碳对扰动黄绵土的累积入渗量影响较小, 曲线重合度较大; 入渗继续进行, 随纳米碳含量增加, 相同入渗历时, 累积入渗量呈减小趋势。主要是由于在入渗初始阶段, 水势梯度较大, 基质势为影响累积入渗量的主要因素, 因此在最初几分钟内, 累积入渗量随纳米碳含量变化较小; 而后随时间推移, 纳米碳含量对其变化影响逐渐明显。这可能是由于纳米碳的加入填充了土壤中孔隙, 有效孔隙及水分通道成为影响累积入渗量的主要因素。由于纳米碳极其细小, 具有极大比表面积, 加入纳米碳后, 虽然小孔隙增多, 但可供水分流动和互相连通的孔隙减少, 水流弯曲度增加, 使得导水率降低, 从而累积入渗量减小。这在促进根系吸水、改善砂土保水性等方面具有极大潜力。

为进一步分析纳米碳对黄绵土入渗过程的影响, 利用 Kostiakov 公式和 Philip 方程对累积入渗量随时间变化过程进行拟合。拟合结果见表 2。由 Kostiakov 公式及 Philip 方程拟合结果可以看出, 各拟合方程的决定系数  $R^2$  较高, 均达到显著性水平 ( $p < 0.05$ ), 拟合结果较好。表明 Kostiakov 公式及 Philip 方程均能较好地反映添加纳米碳扰动黄绵土

的累积入渗量变化过程, 其中用 Kostiakov 公式拟合精度较高。Kostiakov 公式中,  $a$  表示第一个单位计时后的累积入渗量,  $n$  反映累积入渗量的衰减程度。进一步分析表中参数, 随纳米碳含量增加,  $a$  值减小,  $n$  值增加, 可知累积入渗量的衰减程度越大。对于 Philip 方程参数变化, 从表 2 可以看出, 随纳米碳含量增加, 吸渗率  $S$  呈减小趋势。其中, 吸渗率  $S$  为反映土壤入渗能力的指标, 即吸渗率越小则土壤入渗能力越小。由于加入纳米碳改变了扰动黄绵土的土壤结构, 土样中水流速度减慢, 从而水分下渗能力减弱, 吸渗率  $S$  减小。这在防止水土流失、有效减缓降水入渗过程下渗至土壤深层或地下水中的速率及提高土壤保水性等方面具有重要意义。

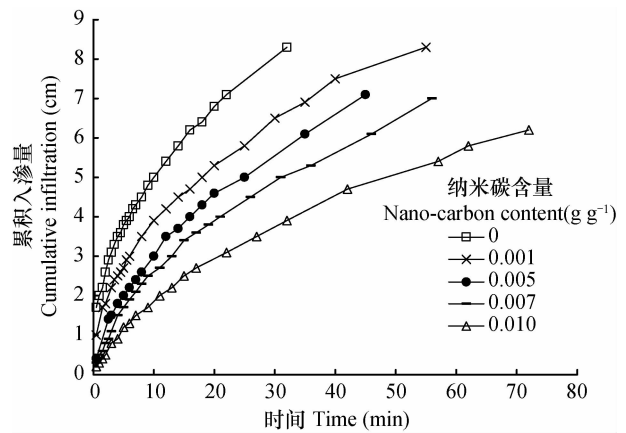


图 1 纳米碳含量对累积入渗量随时间变化的影响

Fig. 1 Effect of content of nano-carbon on variation of cumulative infiltration with time

表 2 不同纳米碳含量条件下累积入渗量随时间变化过程的拟合结果

Table 2 Fitting of the variation of cumulative infiltration with time relative to content of nano-carbon

纳米碳含量 Nano-carbon content ( $\text{g g}^{-1}$ )	Kostiakov 公式拟合参数 Fitting parameters of Kostiakov			Philip 方程拟合参数 Fitting parameters of Philip equation	
	$a$	$n$	$R^2$	$S$	$R^2$
0	2.054	0.396	0.994	1.573	0.968
0.001	1.368	0.451	0.997	1.181	0.995
0.005	0.720	0.617	0.993	1.001	0.986
0.007	0.552	0.671	0.992	0.869	0.979
0.010	0.339	0.709	0.993	0.683	0.970

## 2.2 纳米碳含量对扰动黄绵土湿润锋推进深度的影响

湿润锋是指水分下渗过程中, 土壤被湿润的先头部位与干土层形成的明显交界面, 是反映下渗水

流的垂向运动特征之一<sup>[18]</sup>。图 2 为入渗过程中 5 种纳米碳含量下扰动黄绵土湿润锋深度随时间的变化图。从图 2 中可以看出, 随入渗历时增加, 湿润锋深度逐渐增加。入渗初期, 湿润锋推进速率均较

大,纳米碳对土壤湿润锋运移的影响差异较小。随入渗继续进行,湿润锋变化速率趋于稳定,添加不同纳米碳含量的土样湿润锋变化开始出现显著差异。单位时间内湿润锋的变化随纳米碳含量增加而减小。可能主要是由于加入纳米碳后,一方面土样中黏粒含量增加,使得对水分的吸持能力提高;另一方面,土样中水分运动通道曲折,水流路径更加复杂,水分运移减慢,从而湿润锋推进受阻。因此,一定入渗历时内,随纳米碳含量增加,湿润锋推进深度减小。对比图 1,可以看出湿润锋和累积入渗量随时间变化的趋势基本一致。

根据曲线变化趋势,用幂函数对湿润锋深度随时间的变化过程进行拟合,即  $Z_f = at^b$ 。式中,  $Z_f$  为湿润锋深度 (cm),  $t$  为入渗历时 (min),  $a$ 、 $b$  均为拟合参数。拟合结果见表 3。由表 3 可见,用幂函数对添加不同纳米碳含量的黄绵土湿润锋深度变化过程进行拟合,其决定系数均大于 0.99,达到显著水平 ( $p < 0.01$ )。随纳米碳含量增加,  $a$  值减小,  $b$  值

增大。类似 Kostiakov 公式,  $a$  表示第一个单位计时后的湿润锋,  $b$  反映湿润锋的衰减程度。同均质黄绵土,添加不同纳米碳含量的扰动黄绵土湿润锋随时间推进过程同样遵循幂函数变化规律。

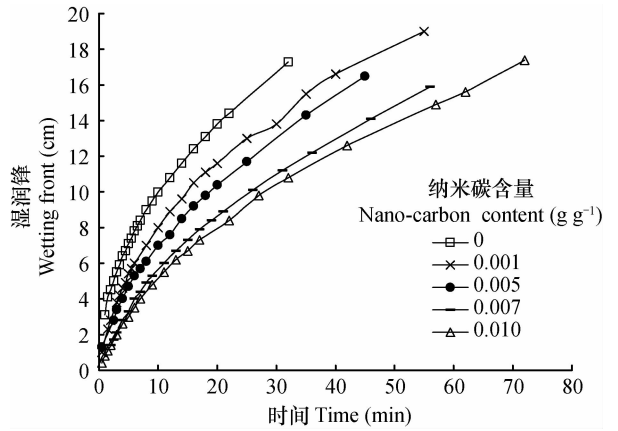


图 2 纳米碳含量对湿润锋深度随时间变化的影响  
Fig. 2 Effect of content of nano-carbon on movement of wetting front with time

表 3 湿润锋推进过程拟合系数

Table 3 Fitting coefficients of wetting front movement

纳米碳含量 Nano-carbon content (g g <sup>-1</sup> )	a	b	R <sup>2</sup>
0	3.835	0.433	0.992
0.001	2.281	0.573	0.995
0.005	1.362	0.665	0.996
0.007	1.107	0.725	0.992
0.010	0.854	0.737	0.991

### 2.3 纳米碳含量对扰动黄绵土持水性的影响

持水能力是通过物理方式大量截留水而阻止水渗出的能力。饱和体积含水量是反映土壤最大持水容量的水分常数之一,而饱和含水量又与饱和质量含水量相关,因此本文就不同纳米碳含量的饱和质量含水量进行讨论。将测得的饱和质量含水量与纳米碳含量变化关系绘于图 3。从图中可以看出饱和质量含水量随纳米碳含量增加呈递增趋势。原因可能是由于加入纳米碳,改变了试验土样结构,一方面使得黄绵土的总孔隙体积增加;另一方面小孔隙增多,毛细管力增强,土样吸持水量增多,最终导致饱和质量含水量增加。因此,在土壤的保水保肥方面,纳米碳有明显的改善作用。

进一步分析图 3,采用二项式对纳米碳含量 ( $x$ , g g<sup>-1</sup>) 对应的饱和质量含水量 ( $\theta_s$ , g g<sup>-1</sup>) 进行拟合,

拟合方程为  $\theta_s = 725.390x^2 + 0.007x + 0.314$ , 决定系数  $R^2$  为 0.997,达到显著性水平 ( $p < 0.01$ )。由于本试验中施加纳米碳最高含量为 0.010 g g<sup>-1</sup>,关于纳米碳对土壤作用的内在机理,纳米碳保水保肥综合指标的建立,以及最佳纳米碳施加百分比的确定仍需进一步研究。

### 2.4 纳米碳含量对土壤饱和和导水率的影响

土壤饱和导水率  $K_s$  是反映土壤导水性的重要指标,是在单位水势梯度下,单位时间内通过单位面积的水量<sup>[19-23]</sup>。它主要与土壤的质地、结构、有机质含量、盐分含量等因素有关<sup>[24-25]</sup>。土壤饱和和导水率是土壤物理属性之一,对土壤水分分布具有重要影响,因此对土壤饱和和导水率进行研究对模拟土壤运动和土壤溶质迁移均有重要的意义<sup>[26]</sup>。

根据达西定律计算 5 种纳米碳含量对应的饱和

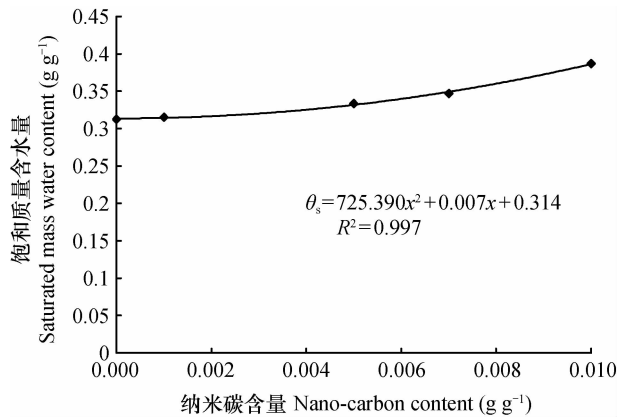


图3 纳米碳含量对饱和和质量含水量的影响

Fig. 3 Effect of content of nano-carbon on saturated mass water content

导水率并将其关系绘于图4。可以看出,随纳米碳含量的增加,饱和导水率呈减小趋势。其主要原因是由于加入纳米碳后,土样入渗能力下降,从而饱和导水率减小。对5组处理土样的饱和导水率和纳米碳含量采用指数函数进行拟合,拟合方程为  $K_s = 0.055 4e^{-44.579x}$ ,  $K_s$  为饱和导水率 ( $\text{cm min}^{-1}$ ),  $x$  为纳米碳含量 ( $\text{g g}^{-1}$ ), 决定系数  $R^2$  为 0.817, 显著性水平  $p < 0.05$ 。因此,纳米碳在控制土壤深层渗漏方面具有重要意义。

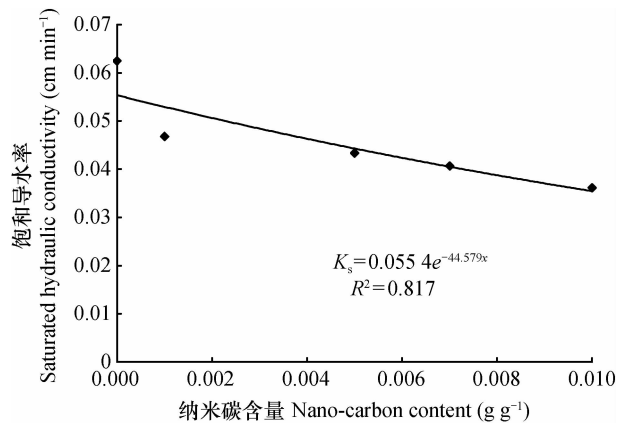


图4 纳米碳含量对饱和导水率的影响

Fig. 4 Effect of content of nano-carbon on saturated hydraulic conductivity

### 3 结 论

本试验采用定水头法分析了纳米碳含量对扰动黄绵土入渗过程及饱和导水率的影响。可以得到以下结论:纳米碳对扰动黄绵土水分入渗过程影响显著。随着纳米碳含量增加,相同入渗时间内,

累积入渗量及湿润锋呈减小趋势;湿润锋深度与时间关系遵循幂函数变化;Kostiakov公式与Philip方程均能较好地表征添加不同纳米碳含量的扰动黄绵土累积入渗量的变化过程。其中,Kostiakov公式拟合精度更高;纳米碳对扰动黄绵土饱和质量含水量和饱和导水率影响同样显著。随纳米碳含量增加,饱和质量含水量增加,而饱和导水率减小,其变化分别符合二项式和指数函数关系。

### 参 考 文 献

- [1] 张立德,牟季美. 纳米材料和纳米结构. 北京:科学出版社, 2006;2—6. Zhang L D, Mou J M. Nanomaterials and nanostructures (In Chinese). Beijing: Science Press, 2006;2—6
- [2] 杨文胜,高明远,白玉白,等. 纳米材料与生物科技. 北京:化学工业出版社,2005;1—3. Yang W S, Gao M Y, Bai Y B, et al. Nanomaterials and biotechnology (In Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 2005;1—3
- [3] 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. 中国土壤与肥料,2009(4):10—15. Xiao Q, Sun Y X, Wang J C, et al. Application progress of nano-materials in soil and plant nutrition research fields (In Chinese). Soil and Fertilizer Sciences in China, 2009(4):10—15
- [4] 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. 化工环保,2004,24(Z1):120—122. Chen J H, Yin H Q, Liu Y J, et al. Nano-carbon materials and potential applications in environmental protection (In Chinese). Environmental Protection of Chemical Industry, 2004, 24(Z1):120—122
- [5] 马筠,刘键,张志明. 纳米增效肥料在冬小麦上的应用研究. 腐植酸,2009(2):14—20. Ma J, Liu J, Zhang Z M. Application study of carbon nano-fertilizer on growth of winter wheat (In Chinese). Humic Acid, 2009(2):14—20
- [6] 王艳,韩振,张志明,等. 纳米碳促进大豆生长发育的应用研究. 腐植酸,2010(4):17—23. Wang Y, Han Z, Zhang Z M, et al. Effect of nano-carbon on soybean growth (In Chinese). Humic Acid, 2010(4):17—23
- [7] Khaydarov R A, Khaydarov R R, Gapurova O. Water purification from metal ions using carbon nanoparticle-conjugated polymer nanocomposites. Water Research, 2010, 44(6):1927—1933
- [8] Wu M Y. Effects of incorporation of nano-carbon into slow-released fertilizer on rice yield and nitrogen loss in surface water of paddy soil//Intelligent system design and engineering applications (ISDEA), Third International Conference on. IEEE, 2013: 676—681
- [9] 梁太波,蔡宪杰,过伟民,等. 纳米碳用量对烤烟生长发育和钾素吸收积累的影响. 烟草科技,2011(11):61—65. Liang T B, Cai X J, Guo W M, et al. Effect of nano-carbon application rates on growth, development and potassium accumulation of flue-cured tobacco (In Chinese). Tobacco Science & Technology, 2011(11):61—65
- [10] 成杰民. 改性纳米黑碳应用于钝化修复重金属污染土壤中的问题探讨. 农业环境科学学报,2011,30(1):7—13. Cheng

- J M. Discussion on application of modified nano-particle black carbon for the remediation of soil heavy metals pollution (In Chinese). *Journal of Agro-environment Science*, 2011, 30(1): 7—13
- [11] 钱银飞, 邱才飞, 邵彩虹, 等. 纳米碳肥料增效剂对水稻产量及土壤肥力的影响. *江西农业学报*, 2011, 23(2): 125—127, 139. Qian Y F, Qiu C F, Shao C H, et al. Effects of nanometer carbon fertilizer synergist on rice yield and soil fertility (In Chinese). *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2011, 23(2): 125—127, 139
- [12] 赵允格, 许明祥, 王全九, 等. 黄土丘陵区退耕地生物结皮对土壤理化性状的影响. *自然资源学报*, 2006, 21(3): 441—448. Zhao Y G, Xu M X, Wang Q J, et al. Impact of biological soil crust on soil physical and chemical properties of rehabilitated grassland in hilly Loess Plateau, China (In Chinese). *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(3): 441—448
- [13] 胡伟, 邵明安, 王全九, 等. 取样尺寸对土壤饱和导水率测定结果的影响. *土壤学报*, 2005, 42(6): 1040—1043. Hu W, Shao M A, Wang Q J, et al. Effects of sampling size on measurements of soil saturated hydraulic conductivity (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(6): 1040—1043
- [14] Kostiakov A. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of melioration. Moscow: Transactions Communication International Society Soil Science 6th, 1932: 17—21
- [15] Philip J. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Science*, 1957, 83(5): 345—358
- [16] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. *土壤水动力学*. 北京: 清华大学出版社, 1988. Lei Z D, Yang S X, Xie S C. *Soil Hydrodynamics* (In Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 1988
- [17] 邵明安, 王全九, 黄明斌. *土壤物理学*. 北京: 高等教育出版社, 2006. Shao M A, Wang Q J, Huang M B. *Soil physics* (In Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2006
- [18] 张启昌, 孟庆繁, 兰晓龙. 黄土低山丘陵区湿润锋运动的实验研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1996, 2(4): 84—88. Zhang Q C, Meng Q F, Lan X L. Study on damp-surface motion in loess low hill area (In Chinese). *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*. 1996, 2(4): 84—88
- [19] AFares A K, Alva P N, KediKizza M, et al. Estimation of soil hydraulic properties of sandy soil using capacitance probes and guelph, permeameter. *Soil Science*, 2000, 165(10): 768—777
- [20] Kamwar R S, Rizvi H A, Ahemd M, et al. Measurement of field-saturated hydraulic conductivity by using Guelph and velocity permeameters. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32(6): 1885—1890
- [21] Wang C, McKeague J A, Topp G C. Comparison of estimated and measured horizontal Ksat values. *Canadian Journal of Soil Science*, 1985, 65(4): 707—715
- [22] 吕国安, 陈明亮, 王春潮. 丹江口库区石渣土土壤水分特性研究. *华中科技大学学报*, 2000, 19(4): 342—345. Lü G A, Chen M L, Wang C C. Study on the soil water characteristics of the lithosol in the Danjiangkou Reservoir Basin (In Chinese). *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2000, 19(4): 342—345
- [23] 陈效民, 潘根兴, 王德建, 等. 太湖地区农田生态环境中土壤饱和导水率研究. *水土保持通报*, 2000, 20(5): 11—12. Chen X M, Pan G X, Wang D J, et al. A study on saturated hydraulic conductivity of farmland environment soil of Taihu Lake region (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2000, 20(5): 11—12
- [24] 吴华山, 陈效民, 叶民标, 等. 太湖地区主要水稻土的饱和导水率及其影响因素研究. *灌溉排水学报*, 2006, 25(2): 46—48. Wu H S, Chen X M, Ye M B, et al. Study on the soil saturated hydraulic conductivity and the infection factors of the main paddy soils in Taihu Lake region (In Chinese). *Journal of Irrigation and Drainage*, 2006, 25(2): 46—48
- [25] 孙荣国, 韦武思, 王定勇. 秸秆-膨润土-PAM 改良材料对砂质土壤饱和导水率的影响. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 89—93. Sun R G, Wei W S, Wang D Y. Effect of straw-bentonite-PAM improved material on saturated hydraulic conductivity of sandy soil (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1): 89—93
- [26] 刘春利, 邵明安. 黄土高原坡地表层土壤饱和导水率和水分含量空间变异特征. *中国水土保持科学*, 2009, 7(1): 13—18. Liu C L, Shao M A. Spatial variation of saturated hydraulic conductivity and soil water of the surface layer of a slope on the Loess Plateau (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(1): 13—18

## EFFECTS OF NANO-CARBON ON WATER INFILTRATION PROCESS IN DISTURBED LOESSAL SOIL

Tan Shuai<sup>1</sup> Zhou Beibei<sup>1†</sup> Wang Quanjiu<sup>1,2</sup>

(1 Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Losses Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract** Application of nano-materials to soil physics is significant in reducing soil water loss and improving soil water and fertilizer utilization efficiency and soil physical structure. A one-dimensional water infiltration experiment was

carried out in disturbed loessal soil columns in laboratory for analysis of effects of content of nano-carbon ( $0 \text{ g g}^{-1}$ ,  $0.001 \text{ g g}^{-1}$ ,  $0.005 \text{ g g}^{-1}$ ,  $0.007 \text{ g g}^{-1}$  and  $0.010 \text{ g g}^{-1}$ ) on soil water infiltration process and saturated hydraulic conductivity. Results showed that (1) the influence of nano-carbon on water infiltration in the disturbed loessal soil was significant, and within a certain infiltration time period, cumulative infiltration and wetting front moving rate tended to decrease with the increasing content of nano-carbon; (2) Kostiakov formula and Philip equation could both be used to describe how cumulative water infiltration varied with time in the disturbed loessal soil treated with nano-carbon and the former fitted better; (3) variation of the wetting front with time demonstrated a power function relationship; (4) nano-carbon also affected significantly saturated mass water contents and saturated hydraulic conductivity in the disturbed loessal soil, and with the increasing content of nano-carbon, the former tended to increase, while the later decrease, which fitted well the binomial expression and exponential function, respectively.

**Key words** Nano-carbon; Cumulative infiltration; Wetting front; Saturated mass water content; Saturated hydraulic conductivity

(责任编辑:檀满枝)