

基于 Hydrus 模拟纳米碳对黄土坡面 土壤水分运动特征的影响

张育华, 周蓓蓓, 陈晓鹏, 段曼莉

(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)

摘 要:黄土高原水土流失严重, 纳米碳可对黄土坡面水土流失起到较好调控作用。基于 Hydrus 模型, 结合野外坡地模拟降雨试验数据, 分析了纳米碳对黄土地区坡地降雨侵蚀的影响过程, 并通过模型确定相关参数, 为治理黄土地区水土流失及评价模型适用性提供依据。结果表明: 纳米碳可提高降雨在坡地土壤的水分入渗量, 增加土壤对降雨的容纳能力, 且纳米碳施加量越大, 土壤增渗效果越好, 其中施量为 1.0% 时, 裸地、柠条、苜蓿、黄豆、玉米累积入渗量分别增加 17%, 5%, 12%, 6%, 7%; Hydrus 软件的模拟结果可有效反映纳米碳对坡面降雨入渗的影响过程, 通过对相关系数 R^2 , 平均绝对值误差 MAE 和均方根误差 RMSE 分析, Hydrus 拟合结果可信度较高。通过对土壤拟合水力参数的对比分析, 纳米碳对土壤水分入渗过程具有较大影响, 随纳米碳施加量的增加, 各水力参数的变化与纳米碳施加量存在明显的线性关系, 进气吸力 h_d (斜率为 41~146)、形状系数 n (斜率为 0.381~2.573)、饱和导水率 K_s (斜率为 0.023~0.064) 均呈增大趋势。

关键词: Hydrus; 纳米碳; 模拟降雨; 坡地入渗; 水力参数

中图分类号: S152.72

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2020)01-0132-07

Effect of Nano Carbon on Soil Moisture Movement Characteristics in the Loess Slope Based on Hydrus Simulation

ZHANG Yuhua, ZHOU Beibei, CHEN Xiaopeng, DUAN Manli

(State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 701148, China)

Abstract: Soil and water loss in the Loess Plateau is serious, and nano carbon can play a good role in regulating water and soil loss on the loess slope. Therefore, this paper analyzed the influence of nano carbon on rainfall erosion on sloping land in loess area by combining the simulated rainfall and the Hydrus model on the field. The relevant parameters are determined by the model to provide a basis for controlling soil and water loss in the loess area and applicability of the evaluation model. The specific results are as follows. Nano carbon can increase the rainfall infiltration on slope soil, increase the soil capacity to accommodate rainfall, and the greater the amount of nano-carbon is applied, the better soil infiltration increases. while the application rate is 1.0%, the cumulative infiltration of bare land, caragana, medlar, soybean, and corn increased by 17%, 5%, 12%, 6%, and 7%, respectively. The simulation results of Hydrus can effectively reflect the effect of nano carbon on the rainfall infiltration on the slope. the Hydrus fitting results are highly reliable through the analysis of the influence of the correlation coefficient R^2 , the average absolute value error MAE and the root mean square error RMSE. Nano carbon has a great influence on the process of soil water infiltration according to comparing and analyzing the hydraulic parameters of soil fitting. The change of hydraulic parameters has a significant linear relationship with the amount of nano carbon, the suction h_d (slope is 41~146), the shape factor n (slope is 0.381~2.573), and the saturated hydraulic conductivity K_s (slope is 0.023~0.064) show the increasing trend with the increase of nano carbon application rate.

收稿日期: 2019-01-29

修回日期: 2019-03-23

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

第一作者: 张育华(1996—), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要从事农业水土与生态环境研究。E-mail: 854767844@qq.com

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

Keywords: Hydrus; nano carbon; simulated rainfall; slope infiltration; hydraulic parameters

我国黄土地地区地形起伏,植被覆盖率低,降雨集中,是我国水土流失问题最严重的地区之一^[1]。为有效防治水土流失,国内学者针对黄土地区的现状采取了大量措施,如工程措施、耕作措施、土壤改良措施等^[2]。但工程措施耗资太大,耕作措施容易受区域分布影响不易开展^[3],因此更多学者将土壤改良剂作为改善黄土物理性质的重要方法。本文将基于前人的研究基础,将纳米碳作为改良剂施加于土壤中,并基于 Hydrus 软件模拟土壤水分入渗过程,以期探索纳米碳对土壤水分的运移的影响,为施加改良剂的实际田间水分运移动态模拟提供可能。

Hydrus 模型是由美国盐土实验室开发的系列软件,用于模拟不同初始条件下的饱和—非饱和土壤的水、盐、热运移,并且涵盖了作物根系吸水和土壤持水能力的滞后影响,可以设定不同的恒定或非恒定边界条件,具有良好的适用性。目前,Hydrus 软件在我国主要用于模拟土壤水分运移及溶质迁移。Yi Caiqiong 等^[4]通过 Hydrus-1D 模拟黄土高原土壤前期含水量,发现 Hydrus-1D 可较好反映土壤的水分运动,刘小璐等^[5]运用 Hydrus 模型模拟不同降雨对坡面水分入渗过程的影响,发现降雨强度相同时,降雨历时越长土

壤含水量增量越大。董起广^{〔6〕}利用 HYDRUS 软件建立的黄土高原丘陵沟壑区暴雨条件下土壤水分的运移,发现模型能够较好地反映土壤水分的分布。但是这些研究仅限于水分运动及溶质运移等,并未深入对土壤的水力参数进行探讨。

因此本文基于国内外学者已有的研究基础,依据土壤水分运动理论,采用 Hydrus 软件,对不同植被覆盖条件下纳米碳对土壤水分入渗过程的影响进行数值模拟,分析土壤水分的入渗规律,评价模拟效果,同时研究纳米碳对土壤水力参数的影响,为黄土地区水资源高效利用提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2015 年 7—9 月在中国科学院水土保持研究所神木侵蚀与环境试验站进行,试验站位于中国黄土高原北部神木县以西 14 km 的六道沟流域。该流域面积 6.89 km²,海拔 1 081~1 274 m,年均气温 8.4℃,年均降雨量为 408.5 mm,日最大降雨量为 132 mm。该地区土壤类型分为风沙土和黄绵土,试验小区所采用土壤为风沙土,具体理化性质见表 1。

表 1 降雨小区土壤理化性质

土壤类型	颗粒含量/%			pH	容重	有机质/	全氮/	全磷/
	黏粒	粉粒	沙粒			(g·kg ⁻¹)	(g·kg ⁻¹)	(g·kg ⁻¹)
风沙土	15.70	37.47	46.83	8.0	1.45	11.32	0.82	0.61

1.2 试验数据来源

1.2.1 试验方案设计 试验小区面积为 100 cm×100 cm 的正方形,坡度 15°。设置 4 组不同植被覆盖(柠条、苜蓿、黄豆和玉米)的坡面处理以及 1 组裸地作为空白对照,共 5 组。在小区上选取坡上、坡中、坡下 3 个位置布置纳米碳—土壤混合带。每条混合带宽 5 cm,厚 5 cm,长 100 cm。每种植被覆盖的小区分别布置 4 个梯度的纳米碳—土壤混合带(纳米碳质量比例分别为 0.1%,0.5%,0.7%和 1.0%),一组 CK 处理(纳米碳质量比例为 0.0%)共 5 组。共计有 25 个小区。试验采用西安理工大学自主研发的针孔式人工模拟降雨器进行人工降雨^[7]。

供试的纳米碳购自上海海诺炭业有限责任公司,

碳粉直径为 40 nm,是以椰子壳为原料,经高温炭化后研磨制成,微孔结构丰富,比表面积大,吸附性强。其具体理化性质见表 2。

1.2.2 试验测定方法 模拟降雨试验前对小区坡面进行取土,取土位置在小区坡面中部,从表层开始每隔 5 cm 取一层,取土深度为表层以下 30 cm,将每层土取一部分样品分别装入铝盒,利用烘干法测量土壤含水率;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。模拟降雨前调节降雨器强度,设置降雨强度为 0.15 cm/min,待雨强稳定后将降雨器移至小区开始进行降雨,降雨时间为 40 min。降雨结束后,移去降雨器,对坡面进行取土,取土方法与降雨前相同,取土后测量土壤含水率^[7]。

表 2 纳米碳的基本性质

直径/nm	pH	含水量/%	含灰量/%	堆密度/(g·cm ⁻³)	碘吸附值/(mg·g ⁻¹)	BET/(m ² ·g ⁻¹)
<40	9.6	5.00	59.95	0.38	1300	1300

1.3 数值模拟

1.3.1 基本方程 Hydrus 模型确定参数的基础是土壤含水率—水分特征曲线,并通过网格和时间步长灵敏的分析、检查及确认所提出的模型的稳健性,具有较高的准确性^[8]。

在模型中,由于土壤表面为坡面,因此水分运动方程采用修改过的 Richards 方程表示:

∂θ/∂t = ∂/∂x [K(∂h/∂x + cosα)] (1)

式中:θ 是体积含水量;h 是压力水头(cm);t 是时间(min);x 是空间坐标(cm);α 是坡面方向与垂直方向之间的夹角;K 为非饱和导水率(cm/min)。

土壤水分特征曲线模型和水力学参数采用 Van Genuchten 的土壤水力性能参数表示:

θ(h) = { θr + (θs - θr) / (1 + |αh|)^m, h ≥ 0; θs, h < 0 (2)

K(h) = { Ks Se^l [1 - (1 - Se^(1/m))^m]^2, h ≥ 0; Ks, h < 0 (3)

Se = (θ - θr) / (θs - θr), m = 1 - 1/n (4)

式中:θ 是体积含水量;θr 是滞留含水量(cm³/cm³);Ks 是饱和含水量(cm/min);α 是进气吸力倒数;m, n, l, α 是模型参数;h 是水的负压,取正值。

1.3.2 模型概化 为研究不同纳米碳施加量对土壤水分动态变化规律,将试验小区简化为二维(垂直和水平)非饱和和水分运动模型。模拟区域水平长度(底边长)取原小区侧边长度(100 cm)的 1/4(25 cm),坡度 15°,右边界高 30 cm。模拟时间为 2018 年 7 月 1 日至 2018 年 8 月 25 日。

1.3.3 边界条件的设置 将降雨前实测的土壤含水率设置为土壤初始含水率。上边界条件设定为变通量,下边界条件设定为自由排水,侧边界条件设定为自由排水。大气边界条件根据模拟降雨强度给出,由于模拟降雨历时较短,因此不考虑植被根系吸水与土表蒸发。

1.4 模型评价

为了评价模型的准确性,设置相关水力参数,模拟降雨后土壤剖面的含水率,通过决定系数 R²,平均绝对值误差 MAE 和均方根误差 RMSE 对模拟结果的准确性进行评价分析。R² 和 RMSE 用以衡量模拟结果精确度,MAE 用以衡量计算偏差,具体计算公式如下:

R² = 1 - (Σ_{i=1}^N (ζ'_i - ζ_i)²) / (Σ_{i=1}^N (ζ_i - ζ_i)²) (5)

RMSE = √(1/N Σ_{i=1}^N (ζ'_i - ζ_i)²) (6)

MAE = 1/N Σ_{i=1}^N (ζ'_i - ζ_i) (7)

式中:N 表示测试点数;ζ'_i 表示计算值;ζ_i 表示实测值;ζ_i 表示实测值的平均值;i 表示测点。

2 结果与分析

2.1 纳米碳对坡面土壤含水率影响极其模拟研究

小区土壤剖面含水率分布可反映土壤水分的入渗规律,可用以验证模型模拟的有效性。图 1 为纳米碳处理对各小区土壤剖面体积含水率实测值^[7]与模拟值的对比;表 3 为实测值与模拟值的相关度。从图 1 可以看出散点基本分布在参考线两侧。进一步观察表 3 可知,不同处理的相关度 R² 整体均在 0.74 以上,黄豆、玉米拟合结果较好(最低 0.82)、柠条(最低 0.80)、苜蓿(最低 0.78)次之、裸地较差(最低 0.74)。由于是野外试验,存在许多不可控因素,因此,整体模拟结果存在可信度,可以反映降雨下坡面土壤含水率的分布规律。

表 3 实测体积含水率与模拟体积含水率的相关度 R²

处理类型	裸地	柠条	苜蓿	黄豆	玉米
0.0%	0.96	0.86	0.90	0.91	0.94
0.1%	0.91	0.91	0.95	0.84	0.82
0.5%	0.87	0.98	0.98	0.86	0.90
0.7%	0.80	0.94	0.78	0.82	0.92
1.0%	0.74	0.80	0.95	0.97	0.93

2.2 坡面土壤水分累积入渗量的准确性对比

土壤入渗能力与土壤自身特性有直接联系,通过降雨前后的土壤体积含水率的增量,结合模拟小区的土壤体积,可计算获得整个降雨历时的实际降雨入渗量,即累积入渗量。为分析纳米碳对坡面水分入渗量的影响,将各植被覆盖的坡面水分累积入渗量与纳米碳含量之间的关系见图 2。结果显示,当纳米碳含量为 0 时,裸地的累积入渗量最小,不同植被覆盖的坡面水分累积入渗量大小虽有所不同,但均比裸地大(柠条 9%,苜蓿 17%,黄豆 12%,玉米 9%),由于植被根系的分布增加土壤大孔隙的含量^[9],进而提高降雨入渗量。从图中还可发现,随纳米碳含量的增加,各植被覆盖下土壤水分累积入渗量基本呈增加趋势;当纳米碳含量为 1.0%时,裸地、柠条、苜蓿、黄豆、玉米累积入渗量分别增加约 17%,5%,12%,6%,7%,裸地与苜蓿的增幅明显高于其他处理,说明纳米碳可有效提高土壤水分的入渗作用且对裸地与苜蓿覆盖下的坡面影响较为显著。

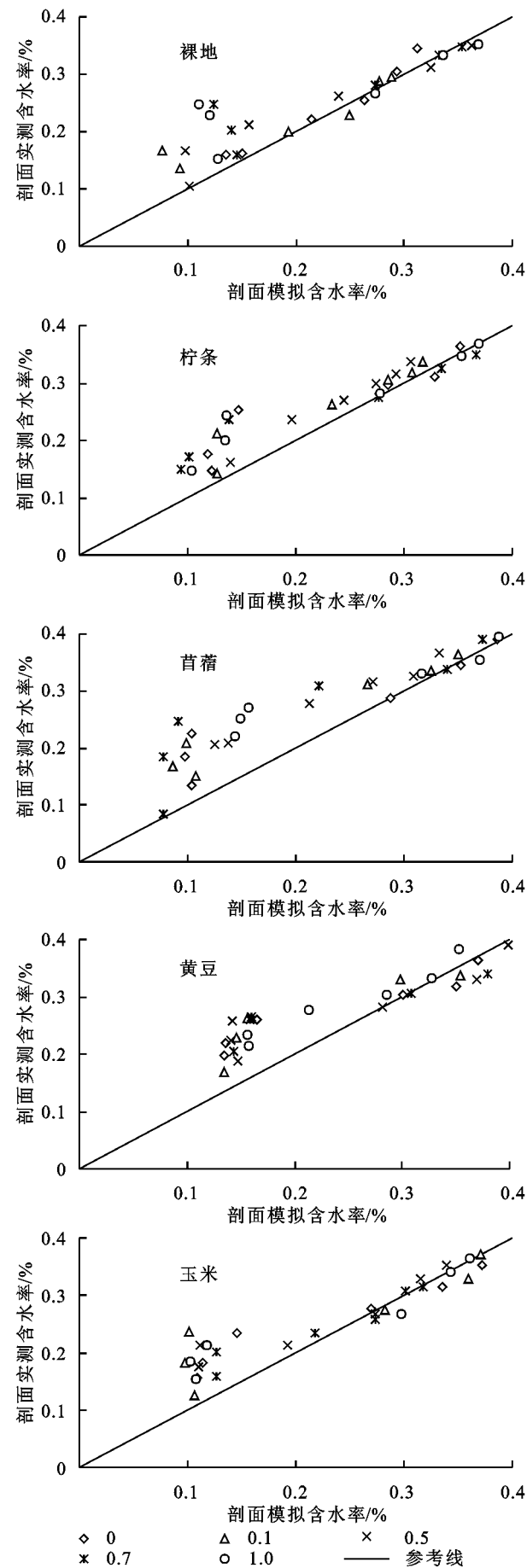


图 1 模拟与实际测点体积含水率的关系

这是因为纳米碳的存在使该层土壤的小孔隙急剧增多,从而使基质吸力变大,且随着纳米碳含量的增加,纳米碳层的潜在基质吸力越大,进而导致入渗速率进一步加快,因此当土壤中存在纳米碳混合层时,入渗速率明显加快^[10]。

表 4 为实测试验结束后的累积入渗量与 Hydrus 模型模拟入渗量的对比分析结果,可以看出模型反推的土壤累积入渗量与实测值误差较小,均方根误差 RMSE 与平均绝对值误差 MAE 均 ≥ 0.01 ,且 ≤ 0.1 ,说明模拟效果较好,表明 Hydrus 模型可以较好的模拟坡面水流的入渗。

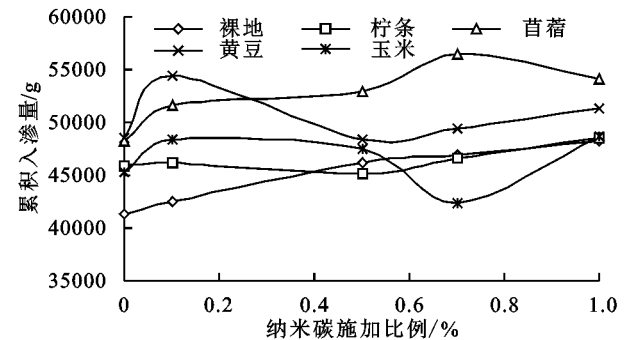


图 2 纳米碳对土壤水分累积入渗量的影响

2.3 纳米碳对土壤水力参数的影响

已知 Hydrus 模型模拟的结果与实测数据存在良好的关联度。因此,本研究利用 Hydrus 对土壤水力参数进行反推,进一步分析纳米碳对土壤水力参数的影响。

2.3.1 纳米碳对土壤进气吸力的影响 土壤进气吸力值表示饱和土壤开始脱水时的临界吸力值,土壤进气吸力值越大,饱和土壤排水需要的吸力越大,土壤的持水能力越大。依据拟合结果,将纳米碳对土壤进气吸力 h_a 的影响绘于图 3,由图 3 可以看出未施加纳米碳的土壤进气吸力无显著变化;纳米碳—土壤混合条层的土壤进气吸力随纳米碳施量的增加整体呈线性增加趋势(斜率分别为 69.119, 41.179, 68.825, 146.78, 52.403)。由此进一步证明了纳米碳可有效提高土壤的持水能力,减少深层渗漏。

2.3.2 纳米碳对土壤形状系数的影响 形状系数为一经验常数,可以改变土壤水分特征曲线的形状。图 4 所示为纳米碳对土壤形状系数 n 的影响。由图可以看出,未施加纳米碳的土壤的形状系数 n 亦未发生明显变化,而添加纳米碳土壤的形状系数与纳米碳施量呈正比关系(斜率分别为 0.381, 1.088, 2.573, 1.466, 1.379)。这主要由于纳米碳的施加改善了土壤孔隙结构,提高了土壤孔隙的空间连通性。

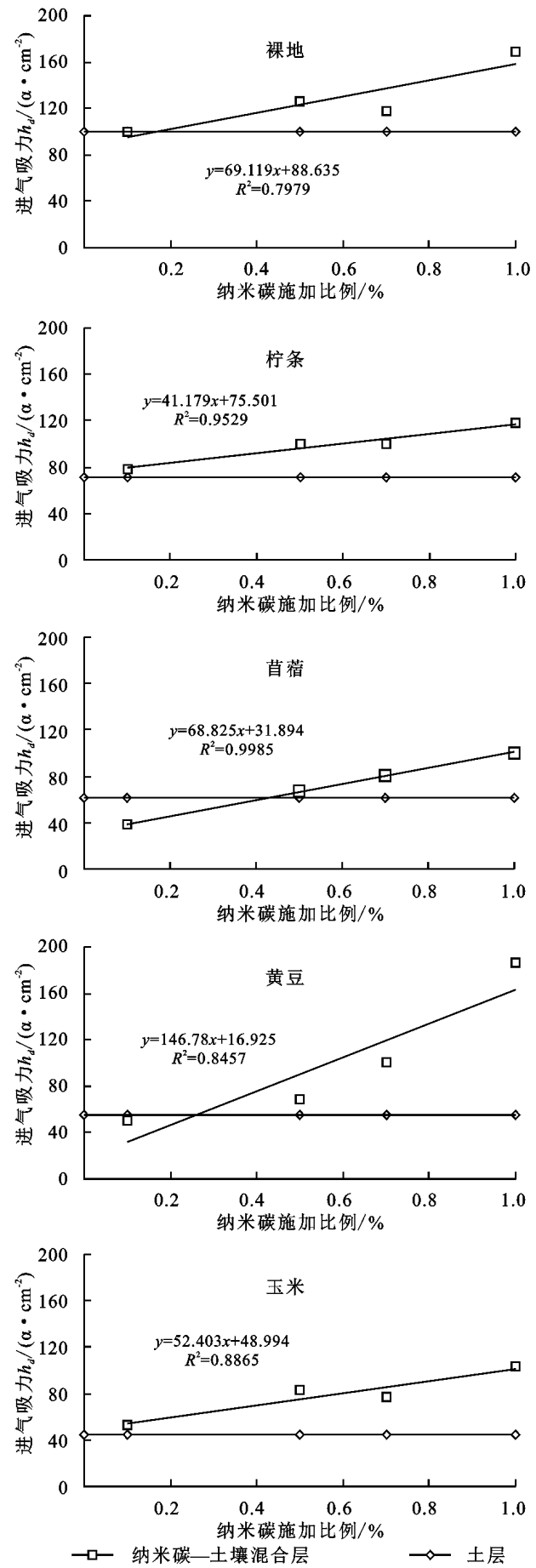


图 3 纳米碳对土壤进气吸力的影响

表 4 实测累积入渗量与 Hydrus 模型模拟入渗量的对比

植被类型	纳米碳施加比例/%	实测累积入渗量/g	模拟累积入渗量/g	RMSE	MAE
裸地	0.00	41366	37563	0.018	0.015
	0.10	42548	35786	0.042	0.029
	0.50	46153	39970	0.037	0.029
	0.70	46914	36645	0.057	0.036
	1.00	48277	36103	0.073	0.049
柠条	0.00	45936	36350	0.051	0.038
	0.10	46117	37049	0.039	0.030
	0.50	45157	36749	0.029	0.028
	0.70	46581	36761	0.054	0.041
	1.00	48462	37741	0.054	0.038
苜蓿	0.00	48239	36465	0.062	0.042
	0.10	51666	36413	0.062	0.051
	0.50	52902	37284	0.057	0.052
	0.70	56530	37775	0.086	0.063
	1.00	54147	39084	0.071	0.055
黄豆	0.00	46813	36690	0.059	0.047
	0.10	52490	39181	0.060	0.050
	0.50	46749	37093	0.062	0.048
	0.70	47644	36966	0.067	0.054
	1.00	49528	36891	0.049	0.042
玉米	0.00	45342	36875	0.051	0.042
	0.10	48438	38331	0.067	0.046
	0.50	47437	37115	0.050	0.036
	0.70	47362	36883	0.034	0.025
	1.00	48720	38809	0.056	0.043

2.3.3 纳米碳对土壤饱和导水率的影响 土壤饱和导水率指土壤被水饱和时,单位水势梯度下、单位时间内通过单位面积的水量,其值大小可体现土壤的导水能力。根据模拟结果,将纳米碳对土壤饱和导水率 K_s 的影响绘于图 5。通过分析图中散点的趋势,可以看出随纳米碳施加量的增大,未施加纳米碳土壤的饱和导水率未发生改变,而添加纳米碳后,土壤饱和导水率均随纳米碳含量增加呈增加趋势。进一步分析图 5,可以发现未施加纳米碳土壤中,植被覆盖下的土壤饱和导水率普遍高于裸地,这可能主要由于植物根系分布增加水流通道进而增加了饱和导水率。土壤饱和导水率受土壤的孔隙分布特征的影响,其中孔隙尤其是有效孔隙是饱和和水流良好的通道^[1]。综上可知,小区土壤施加纳米碳后,经过长时间与土壤作用,其土壤饱和导水率增加,可显著提升土表水分下渗能力,减少坡面水分流失,进而减弱了坡面土壤侵蚀冲刷作用。

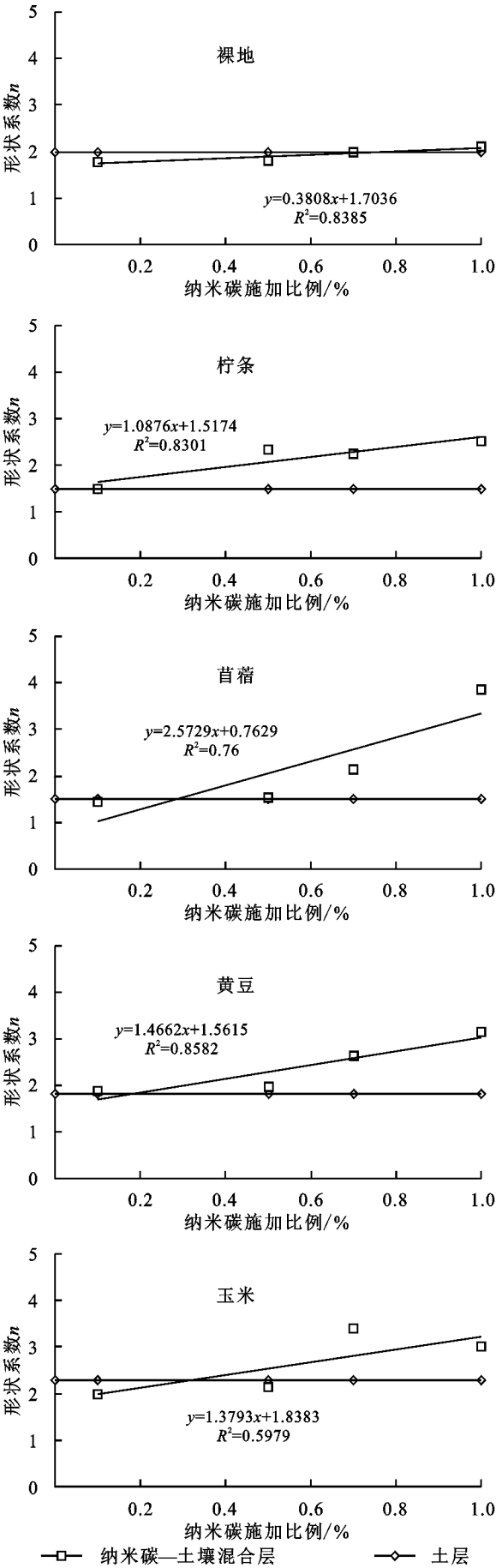


图 4 纳米碳对土壤形状系数的影响

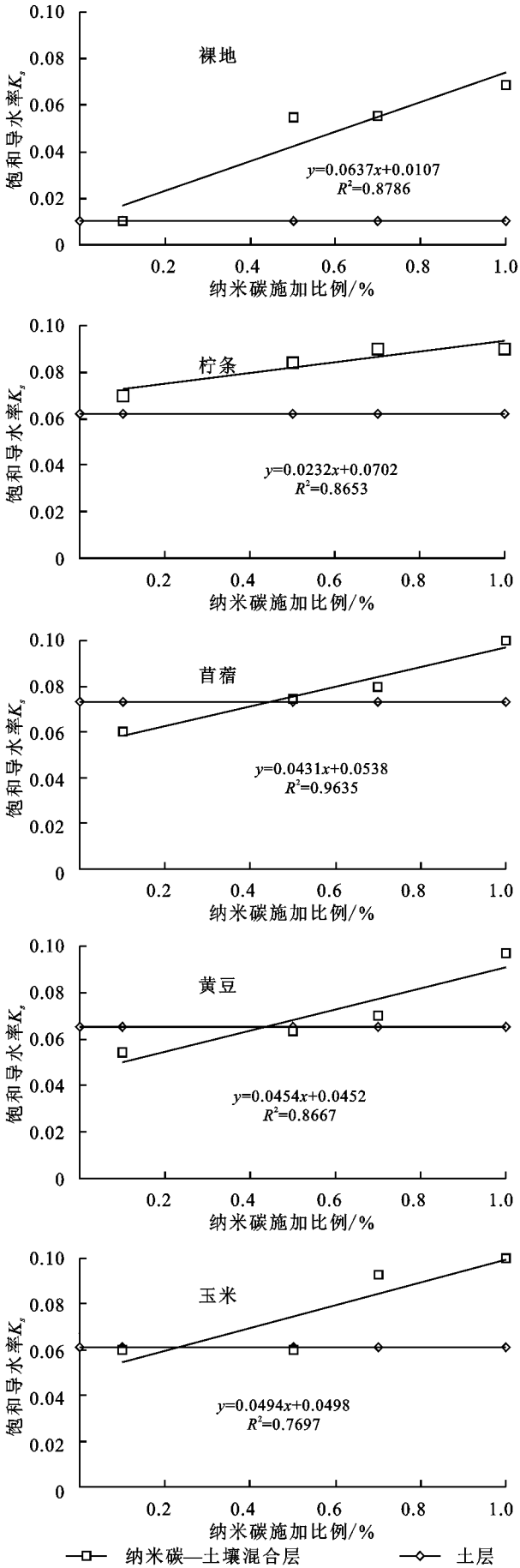


图 5 纳米碳对土壤饱和和导水率的影响

3 结论

(1) 纳米碳有助于土壤水分入渗,随着纳米碳施加比例的增加(0.1%,0.5%,0.7%及 1.0%),有效增加了土壤对降雨的容纳能力,且纳米碳施加量越大,土壤入渗量增加越明显。其中,裸地增幅最大,为 17%,植被覆盖条件下,苜蓿的增幅最大,为 12%。

(2) 在 Hydrus 模拟坡面剖面 6 个测点共计 30 cm 深的土壤含水率的基础上,通过拟合优度 R^2 ,平均绝对值误差 MAE 和均方根误差 RMSE 等对反推结果的准确性进行评价,验证了 Hydrus 在坡面降雨入渗的适用性。

(3) 利用 Hydrus 模型模拟黄土坡面水流入渗过程,反推土壤水力参数,得知随纳米碳含量施加的增加,土壤进气吸力 α 、形状系数 n 、饱和导水率 K_s 等均显著增加,进一步表明纳米碳对坡面土壤有增渗保水的作用。

参考文献:

- [1] 李健,陈海迟.黄土丘陵区坡面水土流失规律研究[J].干旱区资源与环境,1996,10(1):71-76.
- [2] 田卫堂,胡维银,李军,等.我国水土流失现状和防治对策分析[J].水土保持研究,2008,15(4):204-209.
- [3] 吴江琪,马维伟,李广,等.黄土高原 4 种植被类型对土

壤物理特征及渗透性的影响[J].水土保持学报,2018,32(4):133-138.

- [4] Yi C Q, Fan J. Application of HYDRUS-1D model to provide antecedent soil water contents for analysis of runoff and soil erosion from a slope on the Loess Plateau [J]. Catena, 2016,139:1-8.
- [5] 刘小璐,鲁克新,李鹏,等.不同降雨条件下坡面土壤水分入渗过程研究与模拟[J].干旱区资源与环境,2018,32(11):114-118.
- [6] 董起广.基于 HYDRUS 的黄土高原丘陵沟壑区土壤水分入渗模拟[J].节水灌溉,2018(8):90-92,98.
- [7] 陈晓鹏.纳米碳对黄土区水土流失及养分运移特征的影响研究[D].西安:西安理工大学,2018.
- [8] Karandish F, Šimůnek J. An application of the water footprint assessment to optimize production of crops irrigated with saline water: A scenario assessment with HYDRUS[J]. Agricultural Water Management, 2018, 208:67-82.
- [9] 荐圣淇,赵传燕,彭焕华,等.利用染色示踪与图像处理技术研究根系对土壤大孔隙的影响[J].兰州大学学报:自然科学版,2011,47(5):62-66.
- [10] 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.
- [11] 陈风琴,石辉.缙云山常绿阔叶林土壤大孔隙与入渗性能关系初探[J].西南师范大学学报:自然科学版,2005,30(2):350-353.

(上接第 131 页)

- [13] 裴承敏,王云琦,张守红,等.重庆缙云山毛竹林次降雨再分配特征及穿透雨的空间异质性[J].水土保持学报,2018,6(5):202-207.
- [14] 周烨,何太蓉,武雪倩.重庆缙云山国家级自然保护区典型林分凋落物持水性研究[J].重庆师范大学学报:自然科学版,2018,3(2):11-15.
- [15] Gavinet J, Ourcival J M, Limousin J M. Rainfall exclusion and thinning can alter the relationships between forest functioning and drought[J]. New Phytologist, 2019,223:1267-1279.
- [16] Ghimire C P, Bruijnzeel L A, Lubczynski M W, et al. Transpiration and stomatal conductance in a young secondary tropical montane forest: contrasts between native trees and invasive understorey shrubs[J]. Tree Physiology, 2018,38(7):1053-1070.
- [17] Staal A, Tuinenburg O A, Bosmans J H C, et al. Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon [J]. Nature Climate Change, 2018,8(6):539-543.
- [18] Hu Y, Zhao P, Shen W, et al. Responses of tree transpiration and growth to seasonal rainfall redistribution

in a subtropical evergreen broad-leaved forest[J]. Ecosystems, 2018,21(4):811-826.

- [19] Zhang Z, Zhao P, Zhao X, et al. The tree height-related spatial variances of tree sap flux density and its scale-up to stand transpiration in a subtropical evergreen broadleaf forest[J]. Ecohydrology, 2018,11(7):1979-1983.
- [20] Baumgarten M, Hesse B D, Augusta H, et al. Responses of species-specific sap flux, transpiration and water use efficiency of pine, spruce and birch trees to temporarily moderate dry periods in mixed forests at a dry and wet forest site in the hemi-boreal zone[J]. Journal of Agricultural Meteorology, 2019,75(1):13-29.
- [21] Zhang X, Wang Y, Wang Y, et al. Effects of social position and competition on tree transpiration of a natural mixed forest in Chongqing, China [J]. Trees, 2019,5(2):1-14.
- [22] Collins A R, Burton A J, Cavaleri M A. Effects of experimental soil warming and water addition on the transpiration of mature sugar maple[J]. Ecosystems, 2018,21(1):98-111.