

陈静, 张孟豪, 杨倩楠, 等. 蚯蚓改良水浇地土壤入渗性能及影响因素分析 [J]. 福建农业学报, 2023, 38 (11): 1367-1375.
CHEN J, ZHANG M H, YANG Q N, et al. Water Infiltration of Soil Affected by Earthworms [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2023, 38 (11): 1367-1375.

蚯蚓改良水浇地土壤入渗性能及影响因素分析

陈 静^{1,2}, 张孟豪³, 杨倩楠^{1,2}, 张晓龙^{1,2}, 王 超^{1,2}, 张 池³, 刘科学^{1,2*}

(1. 广州新华学院资源与城乡规划学院, 广东 广州 510520; 2. 广东省华南城乡经济社会发展研究院, 广东 广州 510642; 3. 华南农业大学资源环境学院, 广东 广州 510642)

摘 要:【目的】探究蚯蚓不同生态类型和密度对水浇地土壤水分入渗特征的影响。【方法】选取表栖型赤子爱胜蚓 (*Eisenia fetida*) 和深栖型参状远盲蚓 (*Amyntas aspergillum*) 为研究对象, 以无蚯蚓土壤处理为对照, 采用一维定水头土柱模拟试验, 探究蚯蚓不同生态类型和密度 (低密度 $4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 高密度 $8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 对土壤湿润锋、累积入渗量、入渗速率、含水率的影响及其与土壤性状的关系, 并利用 Philip 模型和 Kostiakov 模型拟合分析土壤水分入渗规律。【结果】①在相同时间内, 蚯蚓明显降低湿润锋推进距离、推进速率、累积入渗量及入渗速率, 尤其是低密度参状远盲蚓影响最为显著 ($P<0.01$), 且低密度蚯蚓的入渗性能较高密度蚯蚓处理差。②各处理入渗结束后, 土壤含水率存在差异, 参状远盲蚓极显著提高土壤含水率 ($P<0.01$), 且低密度处理最佳。③蚯蚓通过改变土壤的理化性质来降低土壤水分的入渗性能, 其中电导率 (Electricity conductivity, EC) 值、有效磷 (Available phosphorus, AP) 值和砂粒为土壤水分入渗的主要驱动因素。④与 Philip 模型拟合结果相比, 采用 Kostiakov 模型拟合效果更适用, 对参状远盲蚓处理土壤入渗过程的拟合精度 ($R_{MSE}\leq 4.80\text{ mm}$) 更高, 且参状远盲蚓极显著降低了累积入渗量衰减程度 ($P<0.01$)。【结论】经赤子爱胜蚓和参状远盲蚓改良后的水浇地土壤 (壤砂质地), 水分入渗性能降低, 但对水分的蓄持能力增加。在改良水浇地土壤时, 添加低密度的参状远盲蚓有利于土壤持水。

关键词: 赤子爱胜蚓; 参状远盲蚓; 水浇地; 入渗性能

中图分类号: S157.3

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2023) 11-1367-09

Water Infiltration of Soil Affected by Earthworms

CHEN Jing^{1,2}, ZHANG Menghao³, YANG Qiannan^{1,2}, ZHANG Xiaolong^{1,2}, WANG Chao^{1,2}, ZHANG Chi³, LIU Kexue^{1,2*}

(1. School of Resources and Planning, Guangzhou Xinhua University, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 2. Institute of South China Urban-Rural Economic and Social Development, Guangzhou, Guangdong 510642, China; 3. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

Abstract: 【Objective】 Effects of earthworms of different ecological classifications on water infiltration of the soil in which they inhabited were studied. 【Method】 Epigeic *Eisenia fetida* and endo-anecic *Amyntas aspergillum* were separately placed in soil containers to compare with one without earthworms. In a vertical one-dimensional stable water potential infiltration experimentation, the wetting front movement, accumulated infiltration, infiltration rate, and moisture content of the soil in the containers were monitored to analyze the correlation between soil properties and presence of the different types of earthworms in low-density at $4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ or high-density at $8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. The Philip and Kostiakov models were applied to mathematically describe the water infiltration function. 【Result】 ① The existence of earthworms simultaneously reduced the advancing distance, advancing rate, cumulative infiltration amount, and infiltration rate of the water wetting front in the soil, especially in the case of low-density *A. aspergillum* ($P<0.01$). The effect was more significant under low-density than high-density of the earthworms. ② Water retention of soil changed with the earthworm-induced water infiltration pattern which increased significantly by the low-density *A. aspergillum* treatment ($P<0.01$). ③ The major driving factors on soil that affected water

收稿日期: 2023-02-02 修回日期: 2023-07-12

作者简介: 陈静 (1995—), 女, 硕士, 主要从事土壤生态环境相关研究, E-mail: 1286697987@qq.com

* 通信作者: 刘科学 (1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土壤生态环境相关研究, E-mail: 28257448@qq.com

基金项目: 广东省自然科学基金项目 (2021A1515011543); 广东省教育科学“十三五”规划项目 (2020GXJK116); 广州新华学院教职工科研启动基金项目 (2020KYZD02)

infiltration attributed by the earthworms were electricity conductivity, available phosphorus, and sand. ④ Kostiakov model fitted the correlation between the soil water infiltration and the earthworm treatments more than Philip model did. A high fitting accuracy on $R_{MSE} \leq 4.80$ mm was observed on the treatment by *A. aspergillum*. Moreover, *A. aspergillum* also significantly decreased the attenuation of cumulative water infiltration ($P < 0.01$). 【Conclusion】 The water infiltration could be significantly lowered and moisture retention raised in a loamy sandy soil by the presence of *E. fetida* or *A. aspergillum*. It was conceivable that, at the density of $4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ of *A. aspergillum*, land of similar kind of soil could benefit from the improved water holding capacity as a result.

Key words: *Eisenia fetida*; *Amyntas aspergillum*; loamy soil; water infiltration of soil

0 引言

【研究意义】水浇地是指有水源保证和灌溉设施的耕地农田,是农业生产的重要土地类型之一。我国水浇地总面积 3211.48 万 hm^2 , 约占耕地面积的 25.12%^[1], 灌溉用水量巨大。据水利部 2021 年《中国水资源公报》统计,我国耕地实际灌溉用水量约为 $5325.00 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 农田灌溉水有效利用系数仅为 0.568^[2]。因此,选择适宜的土壤改良方式,提高有限水资源蓄持和利用潜力,对保障我国粮食生产和水资源节约利用具有重要意义。【前人研究进展】土壤入渗过程作为降水和灌溉水参与水分循环的关键环节,不仅限制土壤水分库容和植物对水分的可利用程度,也影响农业水资源的利用效率^[3-4]。研究土壤入渗过程可检验水浇地土壤结构均衡性、土壤孔隙度和连通性以及土壤保水能力^[5]。土壤入渗性能受土壤结构、质地、化学性质等因素的影响^[6-8]。其中,土壤结构、质地直接影响土壤水分入渗特性,而土壤化学性质间接影响土壤水分入渗特性。例如,交换性钠离子通过诱导土壤黏粒膨胀和团聚体的崩解,影响土壤水分入渗性能^[9]。 Mg^{2+} 通常被认为是土壤颗粒的胶结剂,而磷素添加对土壤团聚体结构的改变也有显著影响^[10]。这些元素均可通过改变土壤结构,进而对土壤入渗特性产生影响。蚯蚓在维持土壤生态系统结构和功能方面具有重要作用,通过掘穴、取食、排泄等活动影响土壤质地、团聚体稳定性、持水特征、土壤酸碱度、有机碳含量及矿质养分有效性,进而影响土壤入渗规律^[11-12]。Capowiez 等^[13]发现土壤水分入渗是由土壤理化性质、蚯蚓种类以及密度共同决定的。由于蚯蚓对地表残留物的觅食行为,其种类和密度可能影响径流量和土壤损失,使得土壤水分入渗规律发生变化^[14]。蚯蚓能有效聚集土壤颗粒,改善土壤结构。研究表明,不同大小团聚体的数量和空间排列决定了土壤孔隙的分布,进而影响土壤的水力特性、通气性和水盐运动^[15]。此外,蚓粪作为蚯蚓的排泄物,养分含量高,团聚体结构稳定,可有效改善土壤结构和性质。将蚓粪添加至土壤后改变了土壤含水量和毛管水向上运动,

能显著增强土壤的保水能力^[16]。在热带地区,蚓粪可以通过减少地表径流来降低土壤侵蚀的风险^[17]。蚓粪增加了土壤表面的粗糙度,此时的蚓粪相当于吸水材料,减缓了水分入渗速率^[18]。【本研究切入点】蚯蚓活动在不同土壤中对水文过程的作用一直备受关注。目前多数研究集中于蚯蚓在自然条件下对土壤水分运移的影响^[19-20],而对于利用蚯蚓改良水浇地土壤后,土壤水分入渗过程的变化,尤其是蚯蚓不同生态类型和密度对水浇地土壤改良后的入渗特征的影响尚不清楚。【拟解决的关键问题】本文选取常见的模式蚓——表栖型赤子爱胜蚓 (*Eisenia fetida*) 和华南地区广泛分布的深栖型参状远盲蚓 (*Amyntas aspergillum*) 为研究对象,采用一维定水头土柱模拟试验,探究蚯蚓改良水浇地土壤水分入渗性能及其影响因素,以期对蚯蚓改良水浇地土壤水分运移研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤和有机物料均采自华南农业大学农场 ($23^{\circ} 16' \text{ N}$, $113^{\circ} 35' \text{ E}$)。将采集的土壤风干,去除石砾等杂物后过 2 mm 筛,其基本理化性质如下: pH 6.93, 土壤有机碳 (Soil organic carbon, SOC) $18.60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 (Total nitrogen, TN) $2.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷 (Total phosphorus, TP) $0.28 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全钾 (Total potassium, TK) $24.38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 砂粒 83.4%, 粉粒 9.2%, 黏粒 8.4%, 据美国制土壤分级标准确定为壤砂土。将采集的有机物料风干后切碎为 2 cm 的块状,其基本理化性质如下: pH 8.07, 有机碳 $301.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, TN $26.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, TP $3.11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, TK $40.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

供试蚯蚓为表栖型赤子爱胜蚓和深栖型参状远盲蚓,分别来自华南农业大学蚯蚓养殖基地及农场。在适宜环境下培养一周后,挑选大小一致、具有成熟环的蚯蚓进行接种。每条赤子爱胜蚓重量约 0.5 g, 每条参状远盲蚓约 5.0 g。

1.2 试验方法

根据蚯蚓的种类和密度共设置 5 个处理:空白

土壤对照 (CK), 低密度赤子爱胜蚓处理 (E_1)、高密度赤子爱胜蚓处理 (E_2)、低密度参状远盲蚓处理 (A_1) 和高密度参状远盲蚓处理 (A_2), 其中低密度蚯蚓 $4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、高密度蚯蚓 $8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。每组试验重复 3 次。

试验于 2021 年 10 月至 2022 年 2 月在华南农业大学蚯蚓试验基地进行。土壤预培养阶段: 分别装 2.5 kg 土壤于直径 15 cm 、高度 20 cm 的塑料盆中。每盆加入上述有机物料 100 g , 控制温度在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 称重法保持 $60\%\sim 80\%$ 的田间持水量, 黑色大棚中培养 30 d ; 接种蚯蚓阶段: 土壤预培养阶段结束后, 分别加入赤子爱胜蚓和参状远盲蚓, 再培养 60 d 。培养结束后土柱破坏性取样, 人工挑出蚯蚓, 风干土壤, 风干后取一小部分测定各处理土壤的理化性质, 剩余的土壤用于填装土柱测定土壤入渗特性。

土壤 pH、电导率 (Electricity conductivity, EC) 均采用无 CO_2 水以土水质量比 $1:2.5$ 浸提, 分别以 pH 计和电导率仪测定; SOC 采用重铬酸钾外加加热法测定; TN 采用凯氏定氮法测定; 有效磷 (Available phosphorus, AP) 含量采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定; 速效钾 (Available potassium, AK) 含量采用乙酸铵浸提—火焰原子吸收法测定; 土壤机械组成采用吸管法进行测定, 以土壤粉粒、黏粒、砂粒共同表征土壤机械组成的变化^[21]。

采用一维定水头垂直积水入渗法^[22]测定土壤入渗特性, 入渗装置由马氏瓶 (高 60 cm , 直径 6 cm) 和土柱 (半径 5 cm , 高 25 cm) 两部分组成。土柱和马氏瓶是由透明有机玻璃 (5 mm 厚) 制作而成, 土柱底部是 3 mm 均匀分布的排气孔板。装土前, 为消除壁面优势流的影响, 在土柱的内壁上均匀涂抹凡士林; 为防止细土粒进入排气孔, 在底部放入直径为 10 cm 的滤纸。按照土壤容重 $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 填装土柱, 每次装土厚度为 2 cm , 用夯土器夯实后, 为避免土层间分离, 再用打毛器将土壤表面打毛。装土深度为 20 cm , 每 2 cm 装土质量平均为 212.1 g 。马氏瓶控制供水恒定为 5 cm , 积水高度为 3 cm 。在遮阴无风的室内进行入渗试验, 以减弱表土水分的大气蒸发。入渗开始时, 按照前密后疏原则观测湿润锋运移, $0\sim 10\text{ min}$ 观测间隔为 1 min , $10\sim 20\text{ min}$ 间隔为 2 min , $20\sim 40\text{ min}$ 间隔为 5 min , 40 min 后间隔为 10 min 。湿润锋推进距离至 20 cm 时停止, 持续供水直至土柱下方有水滴出现结束入渗。用取土器垂直于土柱取 20 cm 深度土壤, 充分混匀后, 采用干燥法测定土壤含水率。

本研究采用幂函数拟合湿润锋运移随时间变化

的数据^[23]。

(1) 湿润锋运移与入渗时间 t 呈幂函数关系

$$F = at^b \quad (1)$$

式中: F 为湿润锋运移, mm ; a 为第 1 个计时单位后的湿润锋推进距离, mm ; t 为入渗历时, min ; b 为湿润锋进程的衰减程度。

为了进一步研究不同蚯蚓对土壤入渗过程的影响, 本研究采用 Philip 和 Kostiakov 入渗模型拟合土壤累积入渗量随时间变化的数据。

(2) Philip 入渗模型^[24]

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

式中: I 为单位时间内累积入渗量, mm ; S 为吸渗率, $\text{mm}\cdot\text{min}^{-0.5}$; t 为入渗历时, min ; A 为稳定入渗率, $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。土壤吸渗率 S 是土壤依靠毛管力吸收液体能力的量度, 反映土壤前期的入渗能力, S 值越大代表土壤入渗能力越强; 稳定入渗率 A 反映土壤达到饱和时的入渗率。

(3) Kostiakov 入渗模型^[25]

$$I(t) = Kt^n \quad (3)$$

式中: K 、 n 为经验系数, 其中 K 反映初始入渗能力, n 反映累积入渗量的衰减程度; t 为入渗历时, min 。

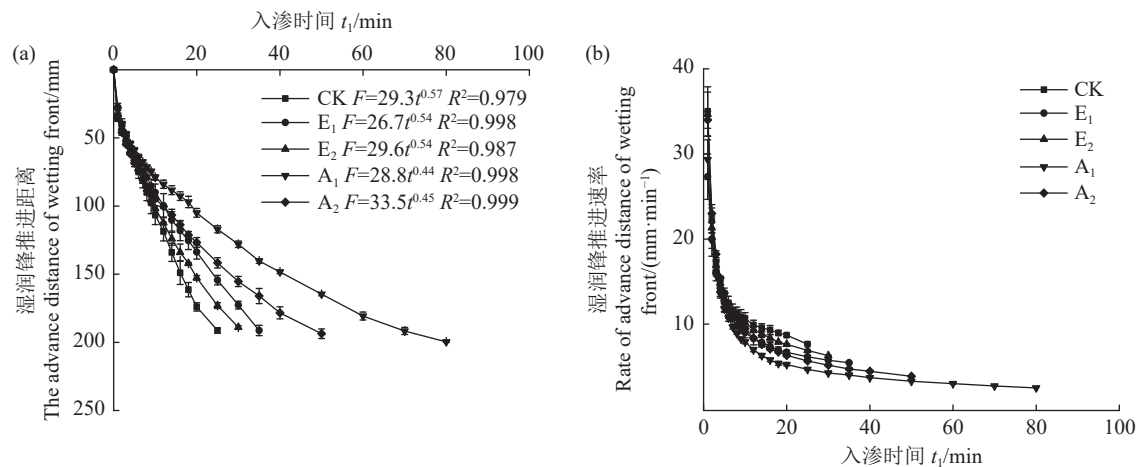
1.3 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析。采用单因素 (One-way ANOVA) 方差分析和 Duncan's 法进行多重比较, 用 Pearson's 法对入渗性能和土壤性状进行相关性分析, 利用 Origin 8.5 进行绘图和函数拟合。图表中数据为平均值 $\pm$ 标准差。

2 结果与分析

2.1 蚯蚓对湿润锋推进距离及速率的影响

土壤水分入渗过程中, 湿润锋为湿润区最前方与干土层形成的明显交界面。由图 1 可知, 随着时间推移, 各处理湿润锋持续推进, 但推进速率在逐渐减小, 在入渗初期湿润锋推进速率较快, 然后逐渐放慢速率至相对稳定阶段。在相同时间内, 蚯蚓的添加明显降低了湿润锋推进距离和速率, 且参状远盲蚓处理的变化最为明显。无论是赤子爱胜蚓还是参状远盲蚓, 高密度蚯蚓处理的湿润锋推进距离均大于低密度蚯蚓处理。另外, 对湿润锋与入渗时间的关系进行幂函数拟合。图 1 (a) 拟合结果显示: 不同蚯蚓条件下湿润锋推进距离与入渗时间拟合的决定系数 R^2 均大于 0.97 , 说明此幂函数能较好地模拟添加蚯蚓后土壤湿润锋推进距离的规律, 湿



a: 不同处理的湿润锋推进距离; b: 不同处理的湿润锋推进速率。
a: Advance distance of wetting front of different treatments; b: Rate of advance distance of wetting front.

图 1 各处理对湿润锋推进距离及速率的影响

Fig. 1 Effects of earthworm treatments on distance and rate of wetting front advance in soil

润锋推进距离与入渗时间之间呈幂函数关系。

由表 1 可知, 在试验进行至 5 min 时, CK 与各处理湿润锋推进距离最大差值为 8.3 mm, 说明在入渗初期, 蚯蚓对湿润锋推进影响较小。随着时间的推移, 在 10、20 min 时, CK 与各处理湿润锋推进距离最大差值分别为 27.7、69.0 mm, 差异逐渐变大, 差异极显著 ($P<0.01$, 下同); 在试验结束 (25 min) 时, CK 与各处理湿润锋推进距离差异显著 ($P<0.05$, 下同), 与 A₁ 的差值最大为 74.3 mm, 呈极显著差异。

2.2 蚯蚓对土壤累积入渗量及入渗速率的影响

由图 2 (a) 可知, 累积入渗量随时间不断增大, 但各蚯蚓处理对累积入渗量的影响存在差异, 且变化趋势与湿润锋推进距离相似。入渗开始后 9 min, 各处理的累积入渗量的大小顺序均为 CK>E₂>E₁>

A₂>A₁。试验土壤为壤砂土, 砂粒含量高, 粒间空隙大, 水分易渗入且排水快, 难以蓄持水分。然而, 经过蚯蚓处理后, 无论是生态种类不同还是密度不同, 都在一定程度上提高了入渗结束时的累积入渗量。表 2 显示在 5 min 时各处理间的差异较小 (6.6、11.0、19.6、22.3 mm), 在入渗 10、20、25 min 时, A₁ 处理的累积入渗量最大, 与 CK 差异极显著, 分别为 68.7、87.6、80.7 mm, 呈现先增大后相对稳定的趋势。

由图 2 (b) 可知, 在入渗开始阶段, 各处理的人渗速率急速下降一段时间后, 呈现缓慢下降趋势, 而在入渗即将结束时又表现出相对稳定的状态。从入渗开始后 5 min 至入渗结束, 蚯蚓处理均小于 CK, 其差异逐渐增大后又呈减小趋势。表 3 为各处理特定时间内的人渗速率。结果显示, 蚯蚓处理初始 (1 min) 入渗速率普遍高于 CK, 与其最大差值为 13.0 mm·min⁻¹, 说明蚯蚓处理提高了土壤表层对水分的吸收能力, 此时水分运动是土壤基质势和重力势的共同作用。试验至 25 min 时, 各处理入渗速率基本稳定, 其中 E₁、A₁、A₂ 处理的稳定 (25 min) 入渗速率均极显著低于 CK, 与其最大差值为 3.2 mm·min⁻¹, 说明蚯蚓减缓了土壤内部对水分的吸收速率, 此时蚯蚓处理的水分运动以土壤基质势为主, 而 CK 水分运动以重力势为主。总之, 无论是从累积入渗量还是入渗速率来看, 均表现出低密度参状远盲蚓的作用更显著。

2.3 蚯蚓对土壤含水率的影响

由图 3 可知, 蚯蚓对土壤含水率有一定的影响, 且与其种类和密度有关。与 CK 相比, 赤子爱胜蚓处理的土壤含水率虽有所提高 (0.6%~1.9%),

表 1 各处理不同时段湿润锋推进距离
Table 1 Distance of wetting front advance in soil under earthworm treatments at different times

处理 Treatment	湿润锋推进距离 The advance distance of wetting front/mm			
	5 min	10 min	20 min	25 min
CK	67.3±3.8Aa	106.7±6.8Aa	174.0±3.1Aa	191.3±1.9Aa
E ₁	62.7±5.6Aa	90.0±6.1ABbc	133.7±5.2Cc	154.3±3.5Cc
E ₂	65.0±2.7Aa	101.7±1.9Aab	152.7±1.7Bb	173.0±2.1Bb
A ₁	59.0±1.5Aa	79.0±2.0Bc	105.0±3.2Dd	117.0±2.7De
A ₂	68.3±1.2Aa	94.7±1.8ABab	126.67±3.5Cc	141.7±3.8Cd

表中不同大、小写字母表示各处理间差异极显著 ($P<0.01$) 或显著 ($P<0.05$)。下同。
Data with different lowercase letters on same column indicate significant difference at 0.05 level; those with different capital letters, significant difference at 0.01 level. Same for below.

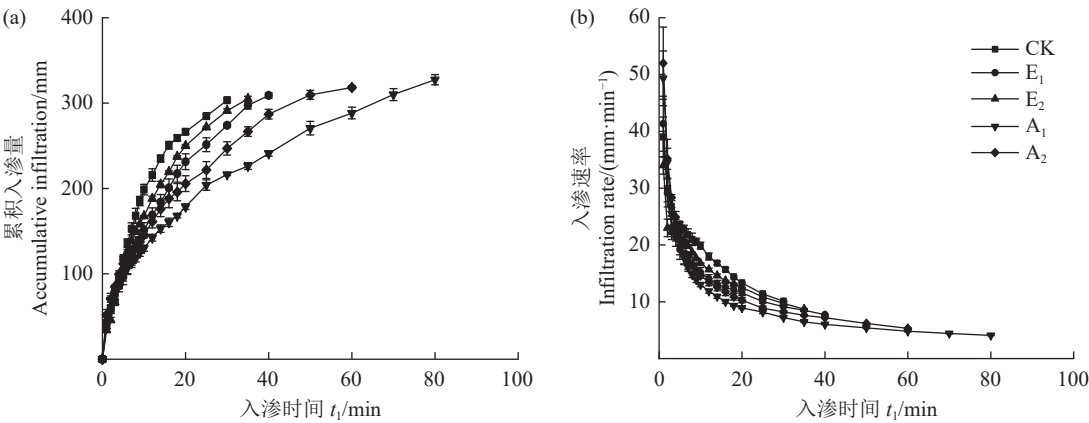


图 2 各处理对累积入渗量及入渗速率的影响

Fig. 2 Effects of earthworm treatments on accumulated water infiltration and infiltration rate of soil

表 2 各处理不同时间段的累积入渗量

Table 2 Accumulated water infiltration in soil under earthworm treatments at different times

处理Treatment	累积入渗量 Accumulative infiltration/mm			
	5 min	10 min	20 min	25 min
CK	118.3±8.7Aa	198.7±8.3Aa	266.3±9.2Aa	284.7±8.1Aa
E ₁	96.0±4.9Ab	151.7±0.7BCbc	231.3±1.2BCb	251.3±0.9Bb
E ₂	107.3±7.3Aab	167.7±3.6Bbc	250.0±3.2ABab	271.7±6.0ABa
A ₁	98.7±4.8Aab	130.0±3.8Cd	178.7±9.2Dd	204.0±9.9Cc
A ₂	111.7±1.8Aab	145.7±6.2BCcd	205.7±2.6CDc	221.7±1.8Cc

表 3 各处理入渗速率的动态变化

Table 3 Changes on infiltration rate of soil after earthworm treatments

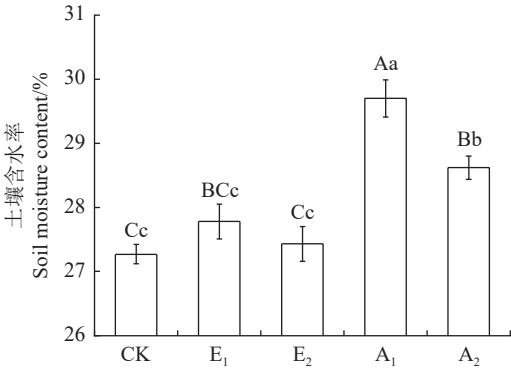
(单位: mm·min⁻¹)

处理 Treatment	初始 (1 min) 入渗速率 Initial infiltration rate	中期 (10 min) 入渗速率 Mid-term infiltration rate	稳定 (25 min) 入渗速率 Stable infiltration rate
CK	39.0±3.5Aab	19.9±0.6Aa	11.4±0.1Aa
E ₁	41.3±4.8Aab	15.2±0.8BCbc	10.1±0.3Bb
E ₂	34.0±1.5Ab	16.8±0.0Bb	10.9±0.0ABa
A ₁	49.3±4.8Aab	13.0±0.4Cd	8.2±0.2Cc
A ₂	52.0±6.4Aa	14.6±0.4BCcd	8.9±0.4Cc

但差异不显著。然而，参状远盲蚓处理的土壤含水率极显著提高 3.1%~8.9%，且以 A₁ 最佳。

2.4 土壤理化性状及其与土壤入渗性能的关系

不同蚯蚓培养后土壤理化性质见表 4。土壤 pH 分析结果显示：E₁ 处理极显著低于其他处理，而 A₂ 处理极显著高于其他处理。土壤 EC 值分析结果显示：E₂ 和 A₂ 处理较 CK 显著降低 33.5% 和 34.4%，A₁ 较 CK 极显著降低 53.8%。SOC、TN、AP、AK 分析结果显示：与 CK 相比，仅 A₂ 处理的 SOC 极显著



图中不同大、小写字母表示各处理间差异极显著 ($P<0.01$) 或显著 ($P<0.05$)。

Data with different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level; those with different capital letters, significant difference at 0.01 level.

图 3 蚯蚓处理对入渗后土壤含水率的影响

Fig. 3 Effect of earthworm treatments on moisture retention of water-infiltrated soil

增加 37.5%，参状远盲蚓处理 (A₁ 和 A₂) 的 AP 极显著降低 30.8%~33.3%；E₂ 处理的 AK 较 A₁ 虽显著降低，但较其他处理无明显差异。土壤机械组成分析结果显示：与 CK 相比，蚯蚓处理的砂粒含量均极显著降低，而粉粒和黏粒含量均极显著增加。

土壤作为一个复杂的介质，其水分入渗状况必然会受到土壤理化性质的影响。土壤入渗特征与其影响因子的相关性分析见表 5。不同蚯蚓处理的中期 (10 min) 入渗速率、稳定 (25 min) 入渗速率、25 min 累积入渗量均与 EC、AP 和砂粒呈显著正相关，尤其是与 AP 达到极显著水平 ($P<0.01$)，表明中期 (10 min) 入渗速率、稳定 (25 min) 入渗速率、25 min 累积入渗量三者都随 EC、AP 增加而增强，且土壤砂粒越多，入渗性能越强。此外，初始 (1 min) 入渗率与 AP 呈显著负相关，说明 AP 的增加减弱了土壤初始入渗性能。总的来看，经蚯蚓

表 4 蚯蚓培养后土壤的理化性质
Table 4 Properties of soil in presence of earthworms

处理 Treatments	pH	电导率 EC/ ($\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)	有机碳 SOC/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	总氮 TN/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效磷 AP/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效钾 AK/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	砂粒 Silt/%	粉粒 Powder/%	黏粒 Clay/%
CK	7.65±0.04Bb	786.35±173.10Aa	18.68±0.00Bb	2.27±0.13Aa	0.39±0.01Aa	0.57±0.02Aab	83.4±1.0Aa	9.2±0.3Bb	7.5±1.2Bb
E ₁	7.45±0.04Cc	684.52±109.68ABab	19.49±0.00Bb	2.53±0.26Aa	0.36±0.02Aa	0.56±0.02Aab	72.8±1.0Bb	15.6±0.4Aa	11.7±1.1Aa
E ₂	7.61±0.04Bb	522.57±156.88ABbc	19.34±0.00Bb	2.43±0.04Aa	0.37±0.03Aa	0.44±0.03Ab	72.0±0.7Bb	15.8±0.3Aa	12.2±0.5Aa
A ₁	7.60±0.06Bb	363.32±78.06Bc	19.52±0.00Bb	2.33±0.21Aa	0.27±0.03Bb	0.61±0.04Aa	72.3±0.6Bb	15.7±0.9Aa	12.0±0.9Aa
A ₂	7.79±0.02Aa	516.12±109.52ABbc	25.69±0.00Aa	2.31±0.22Aa	0.26±0.24Bb	0.49±0.20Aab	73.2±1.6Bb	14.2±1.5Aa	12.7±0.1Aa

表 5 土壤入渗能力与其影响因子的相关性分析
Table 5 Correlation between water infiltration of soil and various affecting factors

入渗特征 Infiltration characteristics	pH	电导率EC	有机碳SOC	总氮TN	有效磷AP	有效钾AK	砂粒 Sand	粉粒 Powder	黏粒 Clay
初始（1 min）入渗率 Initial infiltration rate	0.205	-0.418	0.341	0.126	-0.522*	0.422	-0.205	0.127	0.286
中期（10 min）入渗率 Mid-term infiltration rate	0.019	0.560*	-0.289	0.046	0.788**	-0.079	0.794**	-0.765**	-0.751**
稳定（25 min）入渗率 Stable infiltration rate	-0.148	0.664**	-0.367	0.115	0.820**	-0.267	0.565*	-0.522*	-0.563*
25 min累积入渗量 Accumulative infiltration	-0.189	0.644**	-0.417	0.147	0.858**	-0.270	0.601*	-0.559*	-0.595*

表中“*”表示 $P<0.05$ ；“**”表示 $P<0.01$ 。
“*” indicates significant difference at 0.05 level; “**” indicates significant difference at 0.01 level.

活动后，EC 值、AP 和砂粒为土壤水分入渗的主要驱动因素，表明蚯蚓处理可以通过改变土壤的理化性质来降低土壤水分的入渗性能。

2.5 土壤入渗模型拟合效果

为进一步了解蚯蚓对入渗过程的影响，通过 Philip 和 Kostiakov 入渗模型进行拟合效果分析。如表 6 所示，尽管 Philip 模型的决定系数 R^2 在 0.975~0.998， R_{MSE} 在 3.12~12.61 mm，该模型对入渗过程的拟合较好且对于赤子爱胜蚓处理，Philip 模型拟合精度更高，但是 CK、E₁ 和 E₂ 的土壤稳渗率 A 为负值，与事实不符，说明 Philip 模型不适用于以

上处理土壤入渗过程的模拟。Kostiakov 模型的决定系数 R^2 在 0.981~0.999， R_{MSE} 在 2.36~19.21 mm，说明 Kostiakov 模型对入渗过程的拟合很好。与 Philip 模型相比，Kostiakov 模型对参状远盲蚓处理的拟合精度更高。E₁、E₂ 处理的 K 值低于 CK，表明赤子爱胜蚓处理土壤的初始入渗性能减弱；A₁、A₂ 处理高于 CK，表明参状远盲蚓处理土壤的初始入渗性能增强；仅 E₂ 处理较 A₁ 和 A₂ 处理差异显著（ $P<0.05$ ），其他处理之间作用均不显著。A₁、A₂ 处理的 n 值极显著低于其他处理（ $P<0.01$ ），说明参状远盲蚓处理累积入渗量的衰减程度更小。

表 6 不同蚯蚓处理下 Philip 和 Kostiakov 入渗模型拟合结果
Table 6 Fitting of Philip and Kostiakov models on water infiltration of soil under earthworm treatments

处理 Treatment	Philip模型 Philip model					Kostiakov模型 Kostiakov model				
	S	A	R_{MSE}/mm	G_{MER}	R^2	K	n	R_{MSE}/mm	G_{MER}	R^2
CK	64.18Aa	-20.47Bb	12.61	2.68	0.975	41.38ab	0.64Aa	19.21	2.73	0.981
E ₁	53.46Bc	-18.03Bb	4.97	2.72	0.996	39.52ab	0.57Aa	6.50	2.72	0.996
E ₂	59.04Ab	-23.35Bb	8.66	2.68	0.988	35.45b	0.65Aa	16.87	2.73	0.981
A ₁	35.04De	19.69Aa	3.12	2.71	0.998	48.83a	0.43Bb	2.36	2.72	0.999
A ₂	41.38Cd	16.74Aa	5.63	2.71	0.995	52.28a	0.45Bb	4.80	2.72	0.998

3 讨论

土壤入渗过程是水分在土壤中逐渐移动达到动态平衡的过程,主要受到供水强度和土壤入渗性能的影响。其中,土壤质地、容重、含水量、孔隙结构等是影响土壤入渗能力的内部因子^[6-7]。在本研究中,随着入渗时间的推移,各处理湿润锋推进速率和入渗速率均逐渐减小至平缓。与前人研究结果相似^[26],其原因是在水分入渗的初始阶段,土壤干燥程度较高,基质势大,水分入渗的阻力小。因此,初始阶段湿润锋推进进程快,累积入渗量多。但对比不同蚯蚓处理,蚯蚓处理的初始(1 min)入渗速率较高,尤其是参状远盲蚓处理,这是由于经蚯蚓改良后,具有良好孔隙结构的蚓粪及其含有的大量亲水官能团能加速土壤对水分的吸收^[27]。然而,随着水分含量增加,土体表层的持水量接近饱和状态,水分入渗主要受重力势的影响,湿润锋推进距离和累积入渗量曲线逐渐平缓,入渗速率急剧减小。经蚯蚓改良后土壤表层前期吸水过多,下层土壤空气排出慢,对土壤孔隙产生封闭作用,水分入渗以基质势为主,因此入渗速率逐渐低于 CK。

本研究发现,蚯蚓的添加对湿润锋运移特征和累积入渗量均产生了一定的影响,降低了湿润锋推进速率和入渗速率,从而降低了土壤入渗性能,提高土壤含水率。这是由于蚯蚓通过改变水浇地土壤的理化性质,从而使得入渗性能下降。作为“生态系统工程师”的蚯蚓通过吞食、掘穴、排泄等生命活动不仅能改变土壤机械组成、团聚体结构和容重,还可以提高土壤养分含量和微生物活性^[28]。本研究所采用的土壤为水浇地壤砂土,养分贫瘠且结构差,其入渗过程可能受土壤养分含量的影响。杨振奇等^[29]运用约束性排序方法分析土壤因子与入渗速率的关系,发现养分贫瘠且结构差的土壤入渗过程受多因素的综合影响,水浇地土壤结构与人为管理措施有关,其入渗过程主要受土壤养分条件的影响。为进一步探明原因,本研究通过相关性分析发现 EC、AP、土壤机械组成与入渗性能存在显著相关关系。武敏等^[30]通过室内变水头渗透试验也证明了土壤渗透系数随 EC 值的降低而下降,其原因是盐离子与土壤胶体发生交换吸附作用,导致土壤孔隙特征发生了改变。而作为土壤重要养分之一的磷影响土壤水分入渗,主要原因在于磷通过生成难溶性沉淀、促进微生物释放胶结物质等方式来提高土壤大团聚体的含量,从而增加了土壤大孔隙,改变土壤结构,影响土壤入渗^[31-32]。孙娜等^[33]通过野外试验和室内

检测研究土壤入渗过程及其影响因素,结果表明黏粒含量越高,其土壤孔隙较小,土壤通气透水性能受到限制,从而导致入渗能力下降。事实上,黏粒含量越高、颗粒越细、固体相比表面积越大、表面能越高、吸附能力越大的情况下,对应的土壤吸水和保水能力越好。

许多研究表明蚯蚓的生态类型和密度对土壤物理、化学、生物特性的影响不同^[9,34],可能对土壤水分入渗的作用也存在差异。本研究发现,不同蚯蚓生态类型对土壤水分入渗性能影响差异明显。在整个入渗过程中,参状远盲蚓的入渗历时更久,湿润锋推进距离速率更缓慢,入渗速率也较慢,总入渗水量更多,这是源于作为深栖种的参状远盲蚓个体大,主要吞食土壤和有机物料的混合物,其排泄物与土壤形成的大团聚体含量较多^[35]。研究表明,大团聚体是影响土壤入渗性能的最重要因子之一^[36-37]。本研究发现无论是高密度还是低密度蚯蚓,蚯蚓对土壤水分入渗均有一定的阻滞作用,尤其是参状远盲蚓的作用更强。这可能是由于参状远盲蚓及其体内微生物的生命活动利用了土壤中更多的磷,使得土壤中磷与 Ca^{2+} 生成磷酸二钙、磷酸八钙以及磷灰石等难溶性沉淀的化学反应相对减少,从而改变土壤结构,抑制了土壤入渗性能^[31-32]。此外,对于不同蚯蚓密度而言,无论是赤子爱胜蚓还是参状远盲蚓,密度越低,湿润锋推进速率和入渗速率越慢,相同质量土壤所蓄持的水分越多,这说明利用蚯蚓改良水浇地土壤提高水分蓄持,需要关注蚯蚓的投放密度,在本研究中添加低密度蚯蚓更为合适。这也许与本研究土壤本底值较低、蚯蚓密度过高、所消耗的土壤养分更多有关,具体还需要进一步在大田应用研究中验证。

4 结论

在相同入渗时间内蚯蚓降低了湿润锋推进距离和入渗速率,延缓土壤入渗,尤其是低密度深栖型参状远盲蚓。参状远盲蚓提高土壤水分入渗后的含水率,以低密度较好。赤子爱胜蚓和参状远盲蚓均可通过改变土壤的理化性质来降低土壤水分的入渗性能,EC、AP 和砂粒为土壤水分入渗的主要驱动因素。Kostiakov 模型对参状远盲蚓处理土壤入渗过程的拟合精度较 Philip 模型更高。在改良水浇地土壤时,添加低密度($4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的参状远盲蚓利于土壤持水。

参考文献:

- [1] 国务院第三次全国国土调查领导小组办公室. 第三次全国国土调查

- 主要数据公报[EB/OL]. [2022-09-05]. http://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202108/t20210826_2678340.html.
- [2] 中华人民共和国水利部. 2021年度《中国水资源公报》[EB/OL]. [2022-09-06]. http://mwr.gov.cn/xw/slyw/202206/t20220616_1579606.html.
- [3] 张妙, 李秧秧, 白岗栓. 生物炭和PAM共施对黄绵土水分入渗和蒸发的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25 (5): 124–130.
- ZHANG M, LI Y Y, BAI G S. Effects of mixed use of biochar and polyacrylamide on water infiltration and evaporation in loessial soil [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25 (5): 124–130. (in Chinese)
- [4] NADRA K G, MOHAMMED K, MOHAMMED E H E O. Interaction between soil physicochemical parameters and earthworm communities in irrigated areas with natural water and wastewaters [J]. *Applied and Environmental Soil Science*, 2017, 2017: 1–16.
- [5] 徐远慧, 冯璐, 屈媛媛, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕还草年限对土壤性质和入渗性能的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36 (2): 57–63.
- XU Y H, FENG L, QU Y Y, et al. Effects of different restoration years of grain for green on soil properties and infiltration performance in loess gully region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36 (2): 57–63. (in Chinese)
- [6] 谭学进, 穆兴民, 高鹏, 等. 黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J]. 中国环境科学, 2019, 39 (2): 713–722.
- TAN X J, MU X M, GAO P, et al. Effects of vegetation restoration on changes to soil physical properties on the loess plateau [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39 (2): 713–722. (in Chinese)
- [7] 黄晖, 毕舒贻, 肖肖萌, 等. 深圳城市绿地土壤入渗性能及影响因素研究[J]. 中国农学通报, 2020, 36 (14): 74–79.
- HUANG H, BI S Y, ZI X M, et al. Urban green spaces in Shenzhen: Soil infiltration capacity and its influencing factors [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36 (14): 74–79. (in Chinese)
- [8] 韩生生, 刘苏峡, 宋献方, 等. 西沙赵述岛地表蒸散发实验[J]. 地理研究, 2021, 40 (1): 172–184.
- HAN S S, LIU S X, SONG X F, et al. Field evapotranspiration experiment in Zhaoshu Island of Xisha Islands, South China Sea [J]. *Geographical Research*, 2021, 40 (1): 172–184. (in Chinese)
- [9] CASS A, SUMNER M E. Soil pore structural stability and irrigation water quality: I. empirical sodium stability model [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46 (3): 503–506.
- [10] ALPEROVITCH N, SHAINBERG I, KEREN R. Specific effect of magnesium on the hydraulic conductivity of sodic soils [J]. *Journal of Soil Science*, 1981, 32 (4): 543–554.
- [11] LAVELLE P, SPAIN A, BLOUIN M, et al. Ecosystem engineers in a self-organized soil [J]. *Soil Science*, 2016, 181 (3/4): 91–109.
- [12] EMMERLING C, RASSIER K M, SCHNEIDER R. A simple and effective method for linking field investigations of earthworms and water infiltration rate into soil at pedon-scale [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2015, 178 (6): 841–847.
- [13] CAPOWIEZ Y, SAMMARTINO S, MICHEL E. Burrow systems of endogeic earthworms: Effects of earthworm abundance and consequences for soil water infiltration [J]. *Pedobiologia*, 2014, 57 (4/5/6): 303–309.
- [14] SHUSTER W, MCDONALD L, MCCARTNEY D, et al. Nitrogen source and earthworm abundance affected runoff volume and nutrient loss in a tilled-corn agroecosystem [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35 (5): 320–327.
- [15] BRONICK C J, LAL R. Soil structure and management: A review [J]. *Geoderma*, 2005, 124 (1/2): 3–22.
- [16] LI Y P, SHAO M G, WANG J A, et al. Effects of earthworm cast application on water evaporation and storage in loess soil column experiments [J]. *Sustainability*, 2020, 12 (8): 3112.
- [17] LE BAYON R C, BINET F. Earthworm surface casts affect soil erosion by runoff water and phosphorus transfer in a temperate maize crop [J]. *Pedobiologia*, 2001, 45 (5): 430–442.
- [18] CHEN M Y, SHAO M A, WEI X R, et al. Earthworm (*Metaphire guillelmi*) activities increase the risk of soil erosion—a simulation experiment [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2022, 47 (7): 1734–1743.
- [19] LIU T, CHENG J, LI X D, et al. Effects of earthworm (*Amyntas aspergillum*) activities and cast mulching on soil evaporation [J]. *CATENA*, 2021, 200: 105104.
- [20] 李彦霏, 邵明安, 王娇. 蚯蚓粪覆盖对土壤水分蒸发过程的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55 (3): 633–640.
- LI Y P, SHAO M A, WANG J. Effects of earthworm cast mulch on soil evaporation [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (3): 633–640. (in Chinese)
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第三版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 曲芷程, 栗云召, 于君宝, 等. 黄河口湿地典型植物群落土壤水、盐入渗过程模拟[J]. 生态学杂志, 2022, 41 (5): 903–911.
- QU Z C, LI Y Z, YU J B, et al. Simulation of soil water and salt transportation of typical plant community in estuarine wetland of the Yellow River Delta [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41 (5): 903–911. (in Chinese)
- [23] 詹舒婷, 宋明丹, 李正鹏, 等. 不同秸秆生物炭对土壤水分入渗和蒸发的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35 (1): 294–300.
- ZHAN S T, SONG M D, LI Z P, et al. Effects of different straw biochars on soil water infiltration and evaporation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35 (1): 294–300. (in Chinese)
- [24] 刘子涵, 才璐, 董勤各, 等. PE微塑料对土壤水分入渗的影响及入渗模型适宜性评价[J]. 中国环境科学, 2022, 42 (4): 1795–1802.
- LIU Z H, CAI L, DONG Q G, et al. Effect of PE microplastics on soil water infiltration and suitability evaluation of infiltration model [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42 (4): 1795–1802. (in Chinese)
- [25] 舒方瑜, 董勤各, 冯浩, 等. 不同有机物料对黄土高原治沟造地土壤水分运移的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36 (1): 74–79.
- SHU F Y, DONG Q G, FENG H, et al. Effects of different organic materials on water movement in gully land consolidation soil on the loess plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36 (1): 74–79. (in Chinese)
- [26] 吴军虎, 邵凡凡, 刘侠. 蚯蚓粪对土壤团聚体组成和入渗过程水分运移的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33 (3): 81–87.

- WU J H, SHAO F F, LIU X. Effects of earthworm casts on soil aggregate composition and water transport during infiltration [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33 (3) : 81–87. (in Chinese)
- [27] HALLAM J, HODSON M E. Impact of different earthworm ecotypes on water stable aggregates and soil water holding capacity [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2020, 56 (5) : 607–617.
- [28] HUANG J H, ZHANG W X, LIU M Y, et al. Different impacts of native and exotic earthworms on rhizodeposit carbon sequestration in a subtropical soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 90: 152–160.
- [29] 杨振奇, 秦富仓, 李旻宇, 等. 砒砂岩区不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究 [J]. *生态环境学报*, 2020, 29 (4) : 733–739.
- YANG Z Q, QIN F C, LI M Y, et al. Soil infiltration capacity and its influencing factors of different land use types in feldspathic sandstone region [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29 (4) : 733–739. (in Chinese)
- [30] 武敏, 范昊明, 刘爽, 等. SAR, EC与水温对辽西褐土入渗速率的影响研究 [J]. *水土保持研究*, 2015, 22 (3) : 276–279.
- WU M, FAN H M, LIU S, et al. Effects of SAR/EC and water temperature on infiltration in cinnamon of western Liaoning [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22 (3) : 276–279. (in Chinese)
- [31] 宋美芳, 胡镇江, 胡义涛, 等. 长期施磷对水旱轮作生产力及土壤团聚体磷分布的影响 [J]. *长江大学学报 (自科版)*, 2018, 15 (18) : 1–6, 90.
- SONG M F, HU Z J, HU Y T, et al. Effects of long term application of phosphate fertilizer on the production and distribution of soil aggregates in a paddy-upland rotation system [J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2018, 15 (18) : 1–6, 90. (in Chinese)
- [32] 曲植, 李健, 李铭江, 等. 磷素添加对土壤水分一维垂直入渗特性的影响 [J]. *农业工程学报*, 2022, 38 (5) : 72–78.
- QU Z, LI J, LI M J, et al. Effects of phosphorus addition on one-dimensional vertical infiltration characteristics of soil water [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38 (5) : 72–78. (in Chinese)
- [33] 孙娜, 李瑞平, 苗庆丰, 等. 河套灌区畦田内不同位置土壤入渗特性及影响因素分析 [J]. *节水灌溉*, 2022 (2) : 1–6.
- SUN N, LI R P, MIAO Q F, et al. Analysis of soil infiltration characteristics and influencing factors at different locations in fields at Hetao irrigation district [J]. *Water Saving Irrigation*, 2022 (2) : 1–6. (in Chinese)
- [34] 崔莹莹, 吴家龙, 张池, 等. 不同生态类型蚯蚓对赤红壤和红壤团聚体分布和稳定性的影响 [J]. *华南农业大学学报*, 2020, 41 (1) : 83–90.
- CUI Y Y, WU J L, ZHANG C, et al. Impacts of different ecological types of earthworm on aggregate distribution and stability in typical latosolic red and red soils [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2020, 41 (1) : 83–90. (in Chinese)
- [35] 陈楚楚, 黄新会, 刘芝芹, 等. 滇西北高原湿地不同植被类型下的土壤入渗特性及其影响因素 [J]. *水土保持通报*, 2016, 36 (2) : 82–87.
- CHEN C C, HUANG X H, LIU Z Q, et al. Infiltration characteristics and influencing factors of surface soil in plateau wetland of northwest Yunnan Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36 (2) : 82–87. (in Chinese)
- [36] 郑凯利, 邓东周. 若尔盖湿地土壤入渗性能及其影响因素 [J]. *水土保持研究*, 2019, 26 (3) : 179–184, 191.
- ZHENG K L, DENG D Z. Characteristic and influencing factors of soil infiltration in zoige wetland [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26 (3) : 179–184, 191. (in Chinese)
- [37] 王皓宇, 张池, 吴家龙, 等. 壮伟远盲蚓(*Amyntas robustus*)和南美岸蚓(*Pontoscolex corethrurus*)的人工生长繁殖及其对赤红壤碳氮磷素的影响 [J]. *西南农业学报*, 2020, 33 (7) : 1528–1537.
- WANG H Y, ZHANG C, WU J L, et al. Growth and fecundity of *Amyntas robustus* and *Pontoscolex corethrurus* on laboratory conditions and effects on carbon, nitrogen and phosphorus properties of South China lateritic red soil area [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33 (7) : 1528–1537. (in Chinese)

(责任编辑：张梅)