

# 蚯蚓粪对土壤团聚体组成和入渗过程水分运移的影响

吴军虎, 邵凡凡, 刘侠

(西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

**摘要:** 通过室内土壤团聚体组成分析试验和土柱一维垂直入渗试验, 探究蚯蚓粪对土壤团聚体组成、抗水蚀稳定性以及入渗过程中水分运移特性的影响。结果表明: (1) 蚯蚓粪可以有效降低土壤容重, 增加 0.25~2 mm 粒级大团聚体的数量, 分形维数  $D$  从 2.84 减小至 2.65, 减小了 6.69%, 显著提高了土壤团聚体抗水蚀稳定性; (2) 施加比例为 1/20 时, 可以显著增加湿润锋的运移距离, 而后随着施加比例的增大, 湿润锋距离有不同程度的减小, 但均大于未施加蚯蚓粪的处理, 且各处理下的湿润锋运移距离与入渗时间的关系均可用幂函数描述; (3) 蚯蚓粪比例的增大可以显著提高累积入渗量和稳定阶段的入渗速率, 当施加比例为 1/3 时, 累积入渗量较对照组增大 48.74%; 其中 Kostiakov-Lewis 模型对入渗过程的模拟准确度最高, 也更接近实测值。

**关键词:** 蚯蚓粪; 土壤团聚体; 入渗; 水分运移; Kostiakov-Lewis 模型

**中图分类号:** S152.4; S156.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2019)03-0081-07

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.03.013

## Effects of Earthworm Casts on Soil Aggregate Composition and Water Transport During Infiltration

WU Junhu, SHAO Fanfan, LIU Xia

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

**Abstract:** The effects of earthworm casts on soil aggregate composition, water-erosion stability and water transport characteristics during infiltration were studied by indoor soil aggregate composition analysis and one-dimensional soil vertical infiltration test. The results showed that: (1) The earthworm casts could effectively reduce the soil bulk density and increase the number of large aggregates of 0.25~2 mm. The fractal dimension  $D$  decreased from 2.84 to 2.65 by 6.69%, improving the water-resistant stability of soil aggregates significantly. (2) When the application ratio was 1/20, the migration distance of the wet front could be significantly increased, and then the wet front distance was reduced to some extent as the application ratio increased. But both were larger than the treatment without earthworm casts. The relationship between the wet front migration distance and the infiltration time under each treatment could be described by a power function. (3) The increase of the proportion of earthworm casts could significantly increase the cumulative infiltration amount and infiltration rate. When the ratio was 1/3 at the same time, the cumulative infiltration amount increased by 48.74% compared with the non-applied. The Kostiakov-Lewis model had the highest simulation accuracy, which simulated value was closer to the measured.

**Keywords:** earthworm casts; soil aggregates; infiltration; water transport; Kostiakov-Lewis model

蚯蚓粪是蚯蚓将有机物料进行消化后所产生的一种黑色、多孔且易于利用的活性物质。蚯蚓粪具有良好的团粒结构以及持久的肥力, 并且可以改善土壤的通气性和保水性, 是一种良好的土壤结构改良剂。近年来, 国内外很多专家学者对蚯蚓粪在农田培肥、土壤微生物活性、土壤重金属污染修复以及盐碱土改

良等方面的应用做了大量的研究。在农田培肥和微生物活性方面, Jouquet 等<sup>[1]</sup>研究表明, 有机碳和氮的矿化随着蚯蚓粪总粒径的增加而增加; Chaoui 等<sup>[2]</sup>研究表明, 与常规堆肥和合成肥料相比, 蚯蚓粪是植物营养素的有效来源, 并且它不会使土壤产生盐分胁迫; 李欢等<sup>[3]</sup>研究表明, 施用蚯蚓粪可以显著调节土

壤微生物碳并且提高氮肥利用率;单颖等<sup>[4]</sup>研究表明,蚯蚓粪可以提高砖红壤 pH,并且随着蚯蚓粪添加量的提高,全态和有效态养分含量随之增加;王明友等<sup>[5]</sup>研究表明,蚯蚓粪与化肥配施能明显提高豇豆土壤的活性有机碳含量,且能显著增强土壤微生物活性。在土壤污染修复方面, Park 等<sup>[6]</sup>研究表明,蚯蚓粪的改良可以刺激垃圾填埋场覆土甲烷的氧化能力;侯健等<sup>[7]</sup>研究表明,蚯蚓粪吸附剂对溶液中  $\text{Cu}^{2+}$  具有极强的吸附能力;刘萌萌<sup>[8]</sup>研究表明,蚯蚓粪可以有效降低土壤中 Cd、As 的可移动性、生物可利用性和生物毒性,由于蚯蚓粪具有大的比表面积以及较强的吸附能力,增加了土壤的孔隙度,因此可以较大程度地吸附重金属。在盐碱土改良方面,王福友等<sup>[9]</sup>研究表明,添加蚯蚓粪处理使土壤 CEC 含量增加了 3.2%,且能降低土壤中全盐含量。在蚯蚓粪对土壤蒸发的影响方面,李彦需等<sup>[10]</sup>研究表明,蚯蚓粪覆盖可以有效抑制土壤蒸发。到目前为止,在蚯蚓粪对土壤团聚体结构和水分入渗过程的影响方面的研究尚不多见。

本研究以室内团聚体试验和土柱试验为主,通过在土壤中施加不同比例蚯蚓粪,探究蚯蚓粪对土壤团聚体结构和一维垂直入渗过程的影响,揭示蚯蚓粪对土壤结构、土壤孔隙等物理特性的影响机理,分析施加不同比例蚯蚓粪对入渗过程中湿润锋运移以及累积入渗量的影响作用。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

1.1.1 供试土样 试验用土于 2018 年 7 月取自中科院院长武黄土高原农业生态试验站(35°12' N, 107°40' E)空闲农田地的耕作表层 0—20 cm,用 MS2000 激光粒度分析仪对供试土样进行颗粒组成分析,其黏粒含量为 8.56%,粉粒含量为 81.31%,砂粒含量为 10.13%。依据国际制土壤质地分类标准,供试土壤属于粉砂质壤土。利用环刀法测得土壤容重为 1.35 g/cm<sup>3</sup>。将供试土壤碾碎,除去其中的碎石、枯草及根系残留物等杂质,风干而后过 2 mm 筛备用。

1.1.2 供试蚯蚓粪 试验用蚯蚓粪 (*Earthworm casts*) 为大平 2 号赤子爱胜蚯蚓 (*Eisenia foetida*) 所产,选购自淮安松裕农业科技有限公司。蚯蚓粪颗粒组成为砂粒 20.79%、粉粒 57.70% 和黏粒 21.51%。

### 1.2 试验设计

试验于 2018 年 8 月 1 日在西安理工大学土壤物理实验室开展,正式试验前进行预备试验来确定蚯蚓粪的装填比例,设置蚯蚓粪与土壤质量比例为 1/3 和 1/2,当质量比为 1/2 时,入渗过程中土体会发生膨胀,而质量比例为 1/3 时土体较为稳定。故本试验共设置质量比为 0~1/3 的 5 个处理,即:不施加蚯蚓粪

的对照组(CK),施加与土壤质量比例为 1/20, 1/10, 1/5, 1/3 的蚯蚓粪;每个处理 3 次重复,蚯蚓粪过 1 mm 筛后按上述比例与风干后过 2 mm 筛的干土混和搅拌均匀。

1.2.1 土壤水稳性团聚体测定试验 水稳性团聚体采用荷兰 Eijkelkamp 公司生产的 Wet Sieving Apparatus (湿筛分装置)测定,试验前按照设定的质量比例将蚯蚓粪与干土搅拌均匀,装入塑料培养盆中,使其保持 70% 左右的田间最大持水量,每隔 1 天通过称重法充水量,培养 7 天后将土样取出置于实验盘中,待水分散失至不黏手时,将其轻轻掰碎成尺寸为 1 cm 左右的小土块,再将其置于阴凉处使其完全阴干。在土壤水稳性团聚体测定仪的 8 个不同孔径的筛子中分别称取 4.0 g 土样,在筛子下方放置 8 个钢罐,并装入一定量的纯水,使其在筛子放下时刚好能够淹没筛中土样,浸泡 20 min 后开机使其上下摇动 3 min;然后更换 8 个钢罐,加入 2 g/L 的六偏磷酸钠溶液,继续上下摇动 8 min,然后将 16 个钢罐放入烘箱烘干 8 h。

1.2.2 一维垂直入渗试验 供试土壤装填容重为 1.35 g/cm<sup>3</sup>,蚯蚓粪的装填容重为 0.7 g/cm<sup>3</sup>。由于蚯蚓粪施入土壤会因为吸水膨胀而引起土壤容重的变化,为尽可能贴近野外实际情况,降低蚯蚓粪施加引起土体膨胀对入渗过程的影响;本试验采用蚯蚓粪和土样依照各自容重以及质量比例来确定的混合容重来进行土柱的装填(表 1)。

试验用土柱为有机透明玻璃材质,尺寸为:内径 5 cm、壁厚 0.5 cm、高 46 cm,设置土柱表面积水深度为 3.0 cm,装土高度为 42 cm,按照每层 5 cm 进行装填,试验开始后连续记录马氏瓶中水位高度和湿润锋位置处刻度,直至入渗 300 min 时停止试验。

表 1 施加不同比例蚯蚓粪对容重的影响

处理	混合容重/ (g · cm <sup>-3</sup> )	容重减小/ (g · cm <sup>-3</sup> )
CK	1.35	0
1/20	1.32	0.03
1/10	1.29	0.06
1/5	1.24	0.11
1/3	1.19	0.16

### 1.3 理论和模型

1.3.1 土壤团聚体稳定性评价指标 土壤团聚体的稳定性采用:(1)水稳性团聚体粒级分布状况指标包括平均重量直径 MWD、几何平均直径 GMD、>0.25 mm 团聚体含量  $R_{0.25}$ ;(2)土壤结构几何形状评价指标采用分形维数来分别描述<sup>[11-13]</sup>。

(1)MWD、GMD 和  $R_{0.25}$ <sup>[11]</sup>计算公式为:

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n \bar{X}_i W_i \quad (1)$$

$$\text{GMD} = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n m_i \ln \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \right] \quad (2)$$

$$R_{0.25} = \frac{M_{T>0.25}}{M_T} \quad (3)$$

式中:  $\bar{X}_i$  为  $i$  粒级团聚体平均直径 (mm);  $W_i$  为粒级团聚体重量所占的比例 (%);  $m_i$  为  $i$  粒级团聚体的重量 (g);  $M_T$  为团聚体总重量 (g)。

(2) 分形维数的计算采用杨培岭等<sup>[14]</sup> 推导的公式:

$$\frac{M(r < \bar{X}_i)}{M_T} = \left( \frac{\bar{X}_i}{\bar{X}_{\max}} \right)^{3-D} \quad (4)$$

对公式(4)两边取对数可得:

$$\lg \left[ \frac{M(r < \bar{X}_i)}{M_T} \right] = (3-D) \lg \left( \frac{\bar{X}_i}{\bar{X}_{\max}} \right) \quad (5)$$

式中:  $\bar{X}_i$  为  $i$  粒级团聚体平均直径 (mm);  $M(r < \bar{X}_i)$  为粒径小于  $\bar{X}_i$  的团聚体的重量 (g);  $\bar{X}_{\max}$  为团聚体的最大粒径 (mm)。

1.3.2 入渗模型 选用 4 种模型<sup>[15-18]</sup> 对入渗过程进行模拟:

(1) Philip 入渗公式表达式为:

$$I(t) = St^{0.5} + At \quad (6)$$

式中:  $I(t)$  为累积入渗量 (cm);  $S$  为吸渗率 (cm/min<sup>0.5</sup>);  $A$  为稳渗率 (cm/min);  $t$  为入渗时间 (min)。

(2) Kostiakov 入渗公式表达式为:

$$I(t) = kt^n \quad (7)$$

式中:  $k$  为入渗系数 (cm/min);  $n$  为入渗指数, 能够反映土壤入渗能力的衰减。

(3) Kostiakov-Lewis 入渗公式表达式为:

$$I(t) = kt^n + f_0 t \quad (8)$$

式中:  $k$  为入渗系数 (cm/min);  $n$  为入渗指数;  $f_0$  为土壤相对稳定入渗率 (cm/min), 即单位土壤势梯度下饱和土壤的入渗速率或非饱和土壤入渗达到相对稳定阶段的入渗速率。

(4) Horton 入渗公式表达式为:

$$I(t) = i_f t + \frac{(i_0 - i_f)}{\beta} (1 - e^{-\beta t}) \quad (9)$$

式中:  $i_f$  为稳渗率 (cm/min);  $i_0$  为初始入渗率 (cm/min);  $\beta$  为系数。

## 1.4 数据处理

试验中数据均取 3 次重复的平均值, 采用 Excel 2016 软件进行数据处理, 采用 Origin 2017 软件作图以及模型的参数拟合, 用 SPSS 24.0 软件进行数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 施加不同比例蚯蚓粪对水稳性团聚体的影响

2.1.1 施加不同比例蚯蚓粪对水稳性团聚体组成的影响 由表 2 可知, 施加不同比例蚯蚓粪处理均对各粒级土壤团聚体组成产生显著的影响, 与 CK 相比较, 随着蚯蚓粪比例的增大, 显著增加了 >2, 1~2, 0.5~1, 0.25~0.5 mm 粒级的团聚体数量, 分别较 CK 增加 226%, 417.43%, 134.97%, 424.10%; 从微团聚体粒级分布来看, 与 CK 相比, 蚯蚓粪施加比例对 0.125~0.25, 0.053~0.063, <0.045 mm 粒级团聚体含量的影响没有明显的变化规律, 而随着施加比例的增大, 0.063~0.125, 0.045~0.053 mm 粒级团聚体的数量均显著减少。

表 2 不同施加比例的水稳性团聚体组成

处理	不同粒径团聚体/%								
	>2 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	0.125~0.25 mm	0.063~0.125 mm	0.053~0.063 mm	0.045~0.053 mm	<0.045 mm
CK	0.23	0.77	3.26	2.78	11.01	33.40	11.13	10.57	26.85
1/20	0.31	1.03	7.94	2.14	9.87	31.01	7.76	7.11	32.83
1/10	0.37	1.43	6.01	6.12	16.49	24.98	7.75	5.86	30.99
1/5	0.53	1.56	12.65	3.20	14.17	24.71	12.47	1.93	28.78
1/3	0.75	4.40	7.66	14.57	17.30	13.87	13.32	4.84	23.29

2.1.2 施加不同比例蚯蚓粪对水稳性团聚体粒级分布状况指标的影响 MWD、GMD 和  $R_{0.25}$  是反映土壤水稳性团聚体粒级大小分布状况的评价指标。MWD、GMD 和  $R_{0.25}$  越大, 表示土壤团聚体的平均粒径团聚度越高, 稳定性越强, 抗水蚀能力越强。由表 3 可知, 与 CK 相比, 施加蚯蚓粪处理的 MWD、GMD 和  $R_{0.25}$  值均大幅提高, 且随着蚯蚓粪施加比例增大到 1/3 时达到最大值, 较 CK 分别提高了 104.34%, 59.62% 和 288.78%。这可能是蚯蚓粪中含有大量的富里酸、胡敏酸等持久性有机胶结剂, 增大了土壤颗粒间的黏结力, 在短时间内形成大量的抗水力分散

的结构单元, 尤其是 >0.25 mm 粒级的团聚体数量大幅增加, 显著提高了团聚体稳定性。

表 3 蚯蚓粪施加比例对团聚体分布指标的影响

处理	MWD/mm	GMD/mm	$R_{0.25}$
CK	0.1268	0.0842	0.0704
1/20	0.1596	0.0917	0.1142
1/10	0.1725	0.1008	0.1392
1/5	0.2118	0.1125	0.1794
1/3	0.2591	0.1344	0.2737

2.1.3 施加不同比例蚯蚓粪对分形维数  $D$  的影响

土壤分形维数是反映土壤结构几何形状的参数, 土壤团聚体粒径分布的分形维数反映了土壤水稳性团

聚体数量及水稳性团聚体对土壤结构与稳定性的影响趋势,即团聚体分形维数越小,土壤则具有良好的结构与稳定性<sup>[12]</sup>。由图 1 可知,本试验各处理的分形维数为 2.65~2.84,与 CK 相比较,施加蚯蚓粪处理下均不同程度地降低了土壤团聚体分形维数  $D$  的值,分别降低 1.06%,1.76%,2.82%,6.69%。

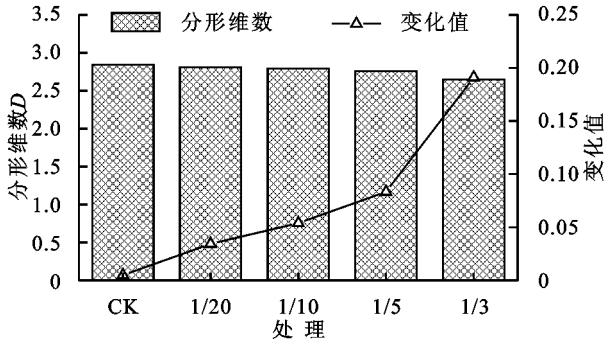


图 1 蚯蚓粪施加比例对团聚体分形维数  $D$  的影响

进一步分析可以看出,施加蚯蚓粪均可以有效改善土壤团聚体稳定性评价指标 MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 、分形维数  $D$ ,这可能是蚯蚓粪本身就具有大量的真菌菌丝体和碳水化合物类胶结物质,在经过 7 天的培养后,蚯蚓粪与土壤结构之间有了更好的结合,蚯蚓粪在土壤中所释放出来的菌丝和胶结物质使得土壤颗粒在菌丝表面大量附着并互相粘结;同时由于蚯蚓粪中含有大量的腐殖质,并且腐殖质可以吸附土壤中的  $Ca^{2+}$ ,并与其凝结聚合形成稳定的骨架结构;从而在物理和生物化学的多重效应下形成大量水稳性大团聚体,使得土壤结构在水蚀作用下更容易保持其稳定性不致崩解破坏,显著改善了土壤抗水蚀分散特性<sup>[16]</sup>。

## 2.2 施加不同比例蚯蚓粪对入渗过程的影响

### 2.2.1 施加不同比例蚯蚓粪对湿润锋运移的影响

土壤积水入渗过程中,将土壤含水率剖面分为饱和区、过渡区、传导区、湿润区和湿润锋。湿润锋是指湿润区前缘干湿土壤的交界面,可以用来表征水分在土壤基质势和重力势的共同作用下沿着土壤孔隙的运动特征。

施加不同比例蚯蚓粪对湿润锋的运移产生显著的影响,由图 2 可知,各处理随时间推移均不同程度增加了湿润锋一维垂向的推移距离,且入渗初期湿润锋运移速率较快,然后逐渐放慢速率至稳定推移阶段。与 CK 相比,施加蚯蚓粪处理下,湿润锋的推移距离随施加比例的增大而呈减小趋势,但均大于 CK;施加比例为 1/20 和 1/10 的处理下,湿润锋在入渗初期就以一较大的速度向下推移,随着入渗时间的增加与 CK 呈现出较大的差异,且 2 种处理在入渗开始后一段时间内较为一致,入渗后期施加比例为 1/20 的处理逐渐呈现出略大于 1/10 处理的趋势;施加比例为 1/5 和 1/3 的处理下,均不同程度增加了湿

润锋的推移距离,但均小于 1/20 处理。以入渗 300 min 为例,与 CK 相比,各处理下的湿润锋距离分别为:33.5(1/3),35.0(1/5),38.2(1/10),38.8(1/20) cm,均大于 28.3(CK) cm;且较 CK 依次分别增大 18.37%,23.67%,28.27%,30.39%。进一步分析可知,施加蚯蚓粪之后,可以不同程度地降低土壤容重,增加土壤孔隙度,加快湿润锋向下推移的速率;在施加比例为 1/20 时,蚯蚓粪水解后使得其位置被水分占据,且由于释放出的菌丝和有机黏合物质较少,不能够有效地吸附土壤颗粒,使得土壤中形成大量的连通孔隙,从而湿润锋以较快的速度向下层土壤推移;施加比例增大到 1/3 时,蚯蚓粪颗粒吸水后发生膨胀,且释放出的大量菌丝和有机黏结物黏结周围土壤颗粒,增大了土体稳定性,虽然总孔隙度增大,但比施加量较少时产生的连通的大孔隙数量有所减少,所以湿润锋推移过程较施加比例小时有所减慢。

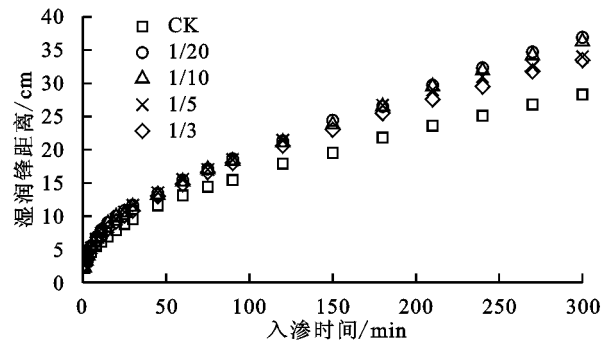


图 2 蚯蚓粪施加比例对湿润锋运移距离的影响

对湿润锋与入渗时间的关系进行幂函数拟合,拟合公式为  $F=at^b$ 。式中: $a$ 、 $b$  为经验常数。由表 4 可知,幂函数  $F=at^b$  可以很好地描述不同蚯蚓粪施加量处理下入渗过程中湿润锋与入渗时间的关系,各处理决定系数  $R^2$  均大于 0.993 8。施加蚯蚓粪处理下的参数  $a$  均显著大于 CK,其值分布在 2.082~2.260;施加蚯蚓粪处理下的幂指数  $b$  也均显著大于 CK,且随着蚯蚓粪施加量的增加呈现减小趋势,且在施加比例为 1/20 的时候达到最大值 0.492,说明施加蚯蚓粪可以不同程度地促进湿润锋下移的速率和运移距离。

表 4 湿润锋深度与入渗时间拟合参数

处理	$a$	$b$	$R^2$
CK	1.983	0.463	0.9985
1/20	2.146	0.492	0.9938
1/10	2.082	0.495	0.9946
1/5	2.260	0.475	0.9987
1/3	2.179	0.475	0.9976

### 2.2.2 施加不同比例蚯蚓粪对累积入渗量的影响

累积入渗量是指入渗开始后一定时间内通过地表单位面积渗入到土壤中的总水量,是入渗率关于入渗时间的积分<sup>[18]</sup>。土壤入渗过程达到稳定之前,常用累

积入渗量来表征土壤入渗能力。由图 3 可知,随着入渗时间的推移,各处理下的累积入渗量均呈增加趋势,但不同处理间的累积入渗量却表现出较大差异。与 CK 相比较,施加比例为 1/20 和 1/10 的处理下,累积入渗量在入渗开始后均保持较大的增大速度,随着时间的推移,累积入渗量均显著大于 CK;施加比例为 1/5 和 1/3 的处理在入渗 90 min 之前增大幅度较为一致,但较 CK 相比,累积入渗量均显著增大,在入渗 150 min 左右就达到 CK 处理入渗 300 min 所达到的累积入渗量;当入渗过程进行到 300 min 时,施加比例为 1/3 处理下的累积入渗量从 11.9 cm 增大到 17.7 cm,增大 48.74%,其他各处理分别为 17.2(1/5),15.9(1/10),14.7(1/20) cm,均大于 11.9(CK) cm。且较 CK 依次分别增大 44.54%,33.61%,23.53%;这可能是由于大量的蚯蚓粪施入,大幅提高了总孔隙度;再加之蚯蚓粪颗粒内部具有多孔结构,本身可以储存大量的水分,同时在蚯蚓粪中的菌丝和腐殖酸等有机质矿物的作用下,周围土壤颗粒之间相互黏结<sup>[19]</sup>,使得原本土壤结构中的连通大孔隙被大量封闭或半开敞式的孔隙所取代,同时这些孔隙也可以赋存大量水分,所以施入蚯蚓粪后相同体积的土体中储水孔隙的数量开始增多,进而增加了累积入渗量。

### 2.2.3 施加不同比例蚯蚓粪对入渗模型参数的影响

为了进一步探究施加不同比例蚯蚓粪对土壤入渗过程的影响,本研究采用了 Philip、Kostiakov、Kostiakov-Lewis 和 Horton 4 个入渗模型对实测入渗结果进行拟合。

表 5 不同比例蚯蚓粪施加处理下入渗模型拟合参数

处理	Philip 模型			Kostiakov 模型			Kostiakov-Lewis 模型				Horton 模型			
	S	A	R <sup>2</sup>	k	n	R <sup>2</sup>	k	n	f <sub>0</sub>	R <sup>2</sup>	i <sub>f</sub>	i <sub>0</sub>	β	R <sup>2</sup>
CK	0.7162	0.0026	0.9956	0.7483	0.4729	0.9967	0.9938	0.3625	0.0129	0.9999	0.0276	0.2935	0.0703	0.9965
1/20	0.7884	0.0036	0.9987	0.7585	0.5192	0.9984	0.9996	0.4115	0.0147	0.9995	0.0359	0.2940	0.0588	0.9960
1/10	0.8809	0.0014	0.9982	0.8858	0.5032	0.9980	1.2372	0.3766	0.0177	0.9999	0.0378	0.3389	0.0617	0.9971
1/5	0.9389	0.0030	0.9994	0.9096	0.5145	0.9993	1.0361	0.4626	0.0091	0.9995	0.0400	0.3141	0.0489	0.9977
1/3	0.9794	0.0023	0.9984	0.9605	0.5099	0.9983	1.1127	0.4518	0.0104	0.9986	0.0414	0.3367	0.0516	0.9946

Kostiakov 模型在各处理下的决定系数 R<sup>2</sup> 分布在 0.996 7~0.999 3,拟合结果均较好,与 CK 相比,入渗参数 k 均显著大于 CK,且随着施加比例的增大,k 值从 0.748 3 增大到 0.960 5;施加蚯蚓粪处理下的入渗指数 n 均大于 CK,但随着蚯蚓粪比例的增加呈波动变化,但均保持在 0.5 左右,这与前面 Philip 模型拟合的结果较为一致。

Kostiakov-Lewis 模型是在 Kostiakov 模型的基础上增加了稳定入渗项部分,从表 5 可以看出,Kostiakov-Lewis 模型的决定系数 R<sup>2</sup> 分布在 0.998 6~0.999 9,与 CK 相比较,各处理 k 值均显著大于 CK,且与蚯蚓粪施

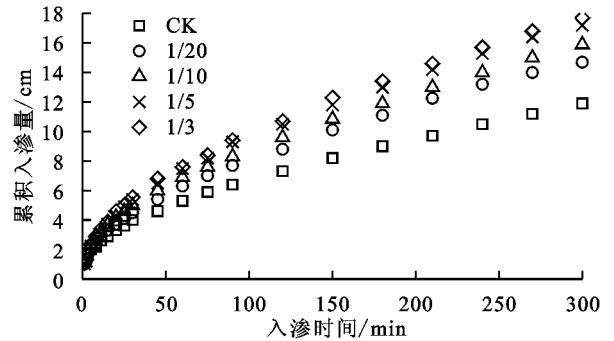


图 3 蚯蚓粪施加比例对累积入渗量的影响

Philip 入渗模型中土壤吸渗率 S 指土壤依靠自身毛管力的作用吸持或排出水分的能力,是表征土壤初始阶段入渗能力的主要指标;稳渗率 A 为土壤的稳定入渗率,表征水在土壤中的渗透性能,在入渗后期对入渗能力起主导作用。由表 5 可知,各处理下的 Philip 入渗模型拟合结果的决定系数 R<sup>2</sup> 均大于 0.995 6,说明 Philip 入渗模型可以很好地模拟不同比例蚯蚓粪施加量处理下的入渗过程,且随着施加蚯蚓粪比例的增大,土壤吸渗率 S 依次增大,与 CK 相比,施加比例为 1/3 处理下的吸渗率从 0.716 2 mm/min<sup>0.5</sup> 增加到 0.979 4 mm/min<sup>0.5</sup>,增大了 36.75%,达到显著水平;各处理下的稳渗率 A 之间无明显规律,但均分布在 0.001 4~0.003 6;这可能的原因是蚯蚓粪的施加致使土体结构发生膨胀,在增大蚯蚓粪结构内部容量的同时相应减小了土壤颗粒之间的孔隙大小,使得蚯蚓粪结构体内和外部土壤颗粒之间产生水势差,使得水分大量涌入蚯蚓粪内部,进而增大了土壤的吸渗率 S。

加比例呈正相关关系,各处理 n 值均显著大于 CK,这与前面 Kostiakov 模型拟合结果一致;各处理下的相对稳定入渗率 f<sub>0</sub> 并未表现出明显规律。

Horton 入渗模型的拟合结果见表 5,施加蚯蚓粪处理下的初始入渗率 i<sub>0</sub> 均显著大于 CK,施加比例为 1/3 处理的初始入渗率从 0.293 5 增大到 0.336 7,增大了 14.72%,施加蚯蚓粪处理显著增大了稳定入渗率 i<sub>f</sub>,且与施加比例之间呈正相关关系;β 为衰减系数,与 CK 相比,其他各处理下 β 值均有一定减小,这说明施加蚯蚓粪后,增加了入渗过程中的水势梯度,使得入渗率衰减缓慢,从而起到增加入渗的作用。

进一步对表 5 进行分析,可以看出 4 个模型均可以很好地模拟不同比例蚯蚓粪施加处理下的入渗过程,但各个模型之间均存在差异,其中 Philip 模型和 Kostiakov 模型可以很好地模拟入渗初期的过程,但随着入渗过程的推移在入渗后期均表现出较大误差,Kostiakov-Lewis 模型由于增加稳定入渗项,所以拟合结果最接近实测值,而 Horton 入渗模型的模拟结果相对较差。

#### 2.2.4 施加不同比例蚯蚓粪对土壤入渗率的影响

入渗率是单位时间内进入单位面积土壤表面的水量,即土壤表面水分通量。施加不同比例蚯蚓粪的入渗率变化见图 4。入渗初期,不同处理下的入渗率具有很大差异,较 CK 相比,随着蚯蚓粪施加比例的增大,入渗速率依次增大,这可能是由于蚯蚓粪的施加增加了土壤有效孔隙和团聚体数量,提高了土壤储水度,促进了水分在土体中的运动,从而增大了土壤表面水量的入渗速率。随着入渗时间的推移,各处理下的入渗率均不断减小,在入渗 50 min 以后,CK 和施加比例为 1/5 和 1/3 处理下的入渗速率基本一致;在整个入渗过程中,其他各处理在相同时刻的入渗率均大于 CK,且  $CK < 1/20 < 1/10 < 1/5 < 1/3$ ,说明随着施加蚯蚓粪比例的增大,可以显著增加土壤入渗速率。

进一步分析可以看出,施加不同比例蚯蚓粪处理下,土壤入渗过程进入稳定入渗阶段所用的时间也不同,施加蚯蚓粪的比例越大,进入稳定入渗时期所用的时间越长,这可能是由于蚯蚓粪的存在,改变了土壤结构,形成了大量连续的储水小单元,从而增大了水力传导度,使得水分大量进入蚯蚓粪团粒结构内,整个入渗过程也较 CK 更晚进入稳定入渗时期。

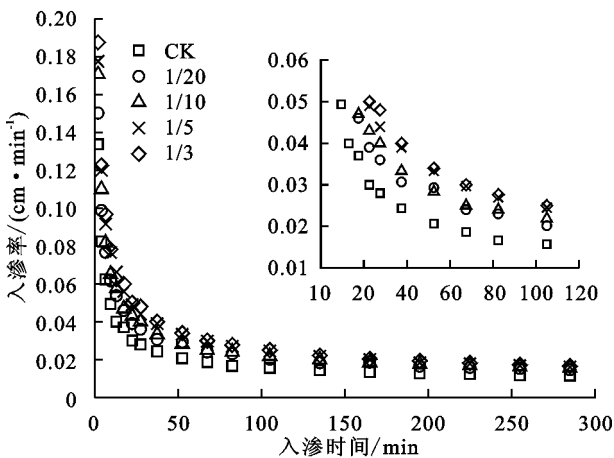


图 4 蚯蚓粪施加比例对入渗率的影响

本研究供试土壤为粉砂质壤土,质地较轻,但其不易于储存水分。在施入蚯蚓粪后,可以使黏粒分散,砂粒凝结<sup>[20]</sup>,由于蚯蚓粪颗粒并不均一,且蚯蚓粪具有比天然土壤更均匀的孔隙系统,不同粒径的蚯蚓粪和土壤颗粒进行重组而形成细长孔和圆孔,进而

对混合土体结构和不同孔隙的分布产生影响,提高了总孔隙度;其次,蚯蚓粪中较大含量的有机碳作为土壤矿物颗粒之间的黏合剂<sup>[21]</sup>,以及真菌菌丝和氨基酸等将小的矿物质吸附黏结形成大颗粒<sup>[22-23]</sup>,再经过干燥、收缩、胶结等过程来增加土壤结构的稳定性,同时含有较多的有机碳使得蚯蚓粪具有轻度斥水性<sup>[24-25]</sup>,在入渗初期蚯蚓粪并不会因为过度吸水而膨胀,但随着含水量的增大,斥水性开始下降,使得水分开始大量进入团粒结构内,同时当蚯蚓粪施加量较大时,土壤容重显著降低,孔隙数量增多,当蚯蚓粪由于吸水而膨胀压缩周围孔隙的强度大于孔隙所能提供的最大输水能力时,水分向下层移动的速率会受到抑制,从而使得同样的入渗时间内湿润锋运移距离比蚯蚓粪施加量较小时有所减小。

### 3 结论

(1) 蚯蚓粪可以有效降低土壤容重,增加土壤大团聚体数量,显著提高了土壤团聚体抗水蚀稳定性。随着蚯蚓粪施加比例的增大,混合土体的结构稳定性有效提高;施加蚯蚓粪可以显著增加 0.25~2 mm 粒级大团聚体的数量,还可以大幅减少 <0.25 mm 粒级的团聚体数量,提高了团聚体粒级组成中水稳性大团聚体结构水平,增强了团聚体稳定性和抗水蚀能力,起到改良土壤结构的作用。

(2) 蚯蚓粪对湿润锋运移距离的影响程度受到蚯蚓粪施加比例的控制,施加比例为 1/20 时,可以显著增加湿润锋的运移距离,而后随着施加比例的增大,湿润锋距离有不同程度的减小,但均大于未施加蚯蚓粪的处理;且各处理下的湿润锋运移距离与入渗时间的关系均符合幂函数关系。

(3) 蚯蚓粪比例的增大可以显著提高累积入渗量和入渗速率,当施加比例为 1/3 时,累积入渗量较未施加时增大 48.74%;4 种模型都可以很好地模拟施加不同比例蚯蚓粪处理下的累积入渗量随时间的变化过程,其中 Kostiakov-Lewis 模型的模拟准确度最高,也更接近实测值。

#### 参考文献:

- [1] Jouquet P, Thi P N, Hong H N, et al. Laboratory investigation of organic matter mineralization and nutrient leaching from earthworm casts produced by *Amyntas khami* [J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 47(1): 24-30.
- [2] Chaoui H I, Zibilske L M, Ohno T. Effects of earthworm casts and compost on soil microbial activity and plant nutrient availability [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35(2): 295-302.
- [3] 李欢,向丹,李晓林,等. 蚯蚓粪和生物有机肥对土壤养

- 分及夏玉米产量的调控作用[J]. 土壤通报, 2011, 42(5): 1179-1183.
- [4] 单颖, 赵凤亮, 邹刚华, 等. 施用不同配比蚯蚓粪对海南耕地砖红壤肥力特性的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(增刊1): 338-342.
- [5] 王明友, 井大炜, 张红, 等. 蚯蚓粪对豇豆土壤活性有机碳及微生物活性的影响[J]. 核农学报, 2016, 30(7): 1404-1410.
- [6] Park S, Lee I, Cho C, et al. Effects of earthworm cast and powdered activated carbon on methane removal capacity of landfill cover soils [J]. *Chemosphere*, 2008, 70(6): 1117-1123.
- [7] 侯健, 张静, 马艺铭, 等. 改性蚯蚓粪对重金属  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附性能研究[J]. 环境保护与循环经济, 2018, 38(6): 17-20.
- [8] 刘萌萌. 蚯蚓粪对土壤中 Cd、As 形态及小白菜吸收 Cd、As 的影响研究[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2016.
- [9] 王福友, 王冲, 刘全清, 等. 腐植酸、蚯蚓粪及蚯蚓蛋白肥料对滨海盐碱土壤的改良效应[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(5): 89-94.
- [10] 李彦霁, 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.
- [11] 侯晓娜, 李慧, 朱刘兵, 等. 生物炭与秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成和有机碳分布的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(4): 705-712.
- [12] 吴军虎, 陶汪海, 王海洋, 等. 羧甲基纤维素钠对土壤团聚体结构及水分运动特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 117-123.
- [13] 杨婷, 吴军虎. 凹凸棒土对土壤团聚体结构及水力参数的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(6): 46-51.
- [14] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1896.
- [15] 吴军虎, 杨婷. 凹凸棒土对土壤水分运动基本参数的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 188-192.
- [16] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 40-45.
- [17] Dashtaki S G, Homaee M, Mahdian M H, et al. Site-dependence performance of infiltration models [J]. *Water Resources Management*, 2009, 23(13): 2777-2790.
- [18] 李昊哲, 樊贵盛. Kostiakov 入渗模型参数的预测精度对比分析研究[J]. 节水灌溉, 2017(11): 27-30.
- [19] 朱玲, 李辉信, 刘宾, 等. 老化和风干处理对蚓粪微生物学性质和结构稳定性的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 120-127.
- [20] 乔力盘·阿不力米提, 亚库甫, 阿地里. 蚯蚓粪对改良土壤的作用[J]. 现代农业, 2018(1): 10-11.
- [21] Goebel M O, Bachmann J, Reichstein M, et al. Soil water repellency and its implications for organic matter decomposition-is there a link to extreme climatic events [J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(8): 2640-2656.
- [22] Marinissen J C Y, Dexter A R. Mechanisms of stabilization of earthworm casts and artificial casts [J]. *Biology & Fertility of Soils*, 1990, 9(2): 163-167.
- [23] Zhang X, Wang J, Xie H, et al. Comparison of organic compounds in the particle-size fractions of earthworm casts and surrounding soil in humid Laos [J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, 23(2): 147-153.
- [24] Jouquet P, Bottinelli N, Podwojewski P, et al. Chemical and physical properties of earthworm casts as compared to bulk soil under a range of different land-use systems in Vietnam [J]. *Geoderma*, 2008, 146(1/2): 231-238.
- [25] Lipiec J, Turski M, Hajnos M, et al. Pore structure, stability and water repellency of earthworm casts and natural aggregates in loess soil [J]. *Geoderma*, 2015, 243/244: 124-129.
- [15] 蔡志坚.  $\gamma$ -聚谷氨酸活化磷矿粉对 Pb 污染土壤铅形态及小白菜生长的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- [16] 陈勉, 陈磊, 孙康, 等.  $\gamma$ -聚谷氨酸研究进展[J]. 食品与药品, 2018, 20(1): 75-80.
- [17] 王洪斌, 成明, 盛菊, 等.  $\gamma$ -聚谷氨酸明胶膜对重金属离子吸附特性研究[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(19): 3956-3959.
- [18] 张静, 程圆, 李静, 等.  $\gamma$ -聚谷氨酸对土壤环境的影响研究进展[J]. 农技服务, 2014, 31(12): 4-6.
- [19] 黄巧义, 唐拴虎, 李苹, 等. 包膜材料  $\gamma$ -聚谷氨酸对菜心的农学效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1645-1654.

(上接第 80 页)

- [11] 王传海, 何都良, 郑有飞, 等. 保水剂新材料  $\gamma$ -聚谷氨酸的吸水性能和生物学效应的初步研究[J]. 中国农业气象, 2004, 25(2): 19-22.
- [12] 鞠蕾, 马霞, 张佳.  $\gamma$ -聚谷氨酸的发酵及保水性能[J]. 中国酿造, 2011(7): 57-60.
- [13] 史文娟, 梁嘉平, 陶汪海, 等. 添加  $\gamma$ -聚谷氨酸减少土壤水分深层渗漏提高持水能力[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 94-100.
- [14] Doran J W, Zeiss M R. Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality [J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, 15(1): 3-11.