

天然沸石对土壤水分运动特性及水稳性团聚体的影响

吴军虎, 刘 侠, 邵凡凡, 李玉晨, 王泽祥

(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:【目的】为研究沸石对土壤水分运动及团聚体分布的影响。【方法】向土壤中加入 0%、5%、10%、15%、20% 的沸石, 进行室内土柱试验和水稳性团聚体分析试验, 研究了施加沸石对土壤水分运动和土壤水稳性团聚体的影响。

【结果】①沸石可以减小土壤累计入渗量和入渗速率, 并阻碍湿润锋的推进, 与对照组相比, 添加沸石试验组的累计入渗量和入渗率不断减小, 添加 20%沸石, 累计入渗量、入渗率、湿润锋减小幅度最大; ②利用 Kostiakov 和 Philip 入渗模型拟合试验数据, Kostiakov 模型和 Philip 模型拟合后 R^2 均大于 0.99, 拟合效果较好, 拟合参数 A、S 均小于对照组, 进一步验证沸石有减缓入渗的作用。③沸石对水稳性团聚体及分形维数的影响与其添加量有较大关系, 沸石施加量由 0 增加到 10%时, ≥ 0.25 mm 土壤水稳性团聚体的量、分形维数分别由 10.8%增加到 18.3%、2.69 减小到 2.58, 沸石施加量继续增加到 20%, ≥ 0.25 mm 团聚体量减小至 6%, 分形维数增大至 2.72。【结论】沸石能够减缓土壤水分入渗过程, 在一定量的施加范围内, 沸石能增大土壤中水稳性团聚体量。

关键词: 沸石; 水分; 土壤; 入渗

中图分类号: S152

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2019037

吴军虎, 刘侠, 邵凡凡, 等. 天然沸石对土壤水分运动特性及水稳性团聚体的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(4): 34-41.

WU Junhu, LIU Xia, SHAO Fanfan, et al. Effect of Natural Zeolite on Soil Water Movement Characteristics and Water Stability Aggregates [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(4): 34-41.

0 引言

【研究意义】沸石是一种硅铝酸盐矿物质^[1], 空间上由 1 个铝原子或者硅原子与 4 个氧原子构成四面体^[2], 具有较高的比表面积、表面电荷密度和较强的吸附性、离子交换能力^[3-4], 已有部分学者将沸石用于改良土壤, 土壤水稳性团聚体与土壤结构稳定性密切相关, 能显著影响水分下渗、径流^[5], 土壤水分入渗的快慢会影响水资源利用效率^[6], 因此, 研究沸石对土壤水分入渗及水稳性团聚体的影响有重要意义。

【研究进展】魏样等^[7]将沸石用于山地新增耕地, 发现施用沸石可显著提高土壤水分。刘陆涵等^[8]研究发现, 沸石处理能减少水分出流量, 具有明显的保持水分效果。魏江生等^[9]将沸石用于透水性强的沙质土壤, 可增大土壤的有效水量和有效雨量。Eroglu 等^[10]研究发现单独使用或与其他肥料混合使用, 沸石都可以提高作物的产量和氮吸收, 此外, 沸石对 P、K 等主要土壤养分有同样的效应, 这与其阳离子交换量有关^[11]; 王浩等^[12]发现沸石对轻、中度镉污染土壤和含

交换态铅、水溶性铅的土壤具有改良作用; 沸石对土壤中菌类繁殖有一定的抑制作用, 如 Zhang 等^[13]发现, 加入沸石后, 可以减少 1.5%的 ARGs (雄激素调节基因) 复制。邱素芬等^[14]研究发现, 在好氧条件下, 500 °C 时沸石强化热处理对重金属铜、锌的固定效果明显提高; Coltorti 等^[15]发现沸石能够减少养分的流失, 提高作物用水效率; Shah 等^[16]通过试验研究发现沸石的存在能够促进养分缓慢向土壤溶液中释放, 有效抑制土壤养分的淋溶流失, 以供植物吸收。戴显庆等^[17]和马媛媛等^[18]研究均表明, 沸石施加量为 15% 时, ≥ 0.25 mm 机械稳定性团聚体量增加。【创新点】现有关于沸石改良土壤的相关研究多为改良重金属污染土壤和土壤养分有效性二方面, 对土壤团聚体和水分运动影响方面研究较少, 关于沸石对黑垆土水分运动及团聚体分布的作用尚不清楚。【拟解决关键问题】本文首次将沸石混入黑垆土中, 通过试验研究土壤水分运动过程和水稳性团聚体状况, 以期明确沸石对黑垆土的水分运动特性和水稳性团聚体分布的影响, 为黄土地区解决水土流失问题提供一定依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验土样于 2018 年 7 月取自陕西省长武县王东

收稿日期: 2019-04-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (51239009); 西北干旱生态水利工程国家重点实验室科研课题项目 (2016ZZKT-9); 陕西省教育厅重点试验室科研计划项目 (17JS096)

作者简介: 吴军虎 (1974-), 男, 陕西铜川人。教授, 博士, 主要从事农业生态环境和水文水资源研究。E-mail: 149252825@qq.com

村 (35°12'N, 107°40'E, 海拔 1 211 m) 闲置农田 0~20 cm 的耕作层, 取土前, 用环刀法^[19]测得土壤体积质量为 1.31 g/cm³, 试验前先将土样自然风干, 去除根系, 随后过 2 mm 筛备用。烘干法测得土壤含水率 0.4%、饱和含水率为 35%, 利用英国马尔文仪器有限公司生产的 Mastersizer 2 000 激光粒度分析仪分析其机械组成, 黏粒量为 8.56%, 粉粒量为 81.31%, 砂粒量为 10.13%, 根据国际制土壤质地分类标准划分为粉砂质壤土。

沸石采用郑州恒诺滤材公司生产的未改性天然沸石, 粒径大小为 80~100 目 (0.15~0.18 mm), 外观为灰白色, 孔隙率≥50%, 具有高的阳离子交换、吸收、催化、脱水和养分保留能力^[10], 在农业或饲料添加剂中使用中比较安全。

1.2 试验方法

1.2.1 室内入渗试验

已有研究表明, 沸石量为 20% 时土壤持水能力最强。综合考虑, 主要研究 0%、5%、10%、15%、20% 共 5 种沸石添加量对入渗及水稳性团聚体的影响, 各处理设 2 组重复。

试验于 2018 年 8 月在西安理工大学土壤物理实验室进行, 入渗前, 将沸石分别按照 0%、5%、10%、15%、20% 的质量比与土样均匀混合, 记为 T0 (对照组)、T1、T2、T3、T4 处理, 以 5 cm 的装土高度、1.31 g/cm³ 的体积质量, 分 8 次装入高 50 cm、直径 5 cm 的圆柱形有机玻璃土柱中, 各层间刮毛, 为防止土柱底部发生土粒损失, 装土前在土柱底部平铺 1 层滤纸。装土完成后, 在土壤表面加铺 1 层滤纸, 以保证土面在入渗过程中不被冲刷至破坏, 均匀入渗。供水装置采用高 50 cm、直径 5 cm 的马氏瓶, 水头控制为 4 cm, 入渗开始后, 按设定时间记录马氏瓶内水面高度与土柱湿润锋的高度, 考虑土柱高度, 试验进行 300 min。

1.2.2 水稳性团聚体分析试验

供试土样的水稳性团聚体试验利用荷兰 Eijkelkamp 公司生产的 Wet Sieving Apparatus (湿筛分装置) 测定, 试验前, 取部分入渗后的土样烘干, 并将装置配的 16 个钢罐称质量并编号, 筛罐按孔径由大到小的顺序安装在湿筛分试验装置上, 1~8 号钢罐装入 3/4 的纯水, 9~16 号钢罐装入六偏磷酸钠溶液, 依次将 1~8 号钢罐放在筛罐下方, 下调筛罐位置, 称 4.0 g 烘干后的土样加入各筛罐中, 开启湿筛分装置振荡 3 min 后, 取下 1~8 号钢罐, 依次放上 9~16 号钢罐, 振荡 8 min, 试验结束后将 1~16 号筛罐放入烘箱, 在 105 °C 下烘干 8 h, 记录烘干后钢罐的质量, 本试验测定的粒径级别分别是 2、1、

0.5、0.25、0.125、0.063、0.053、0.045 mm。

1.3 分析方法

1.3.1 入渗模型

常见的入渗公式有 Horton 公式、Kostiakov 公式、Philip 公式, 后 2 种形式简单, 便于拟合和参数确定, 本文主要采用后 2 种公式对参数拟合。

1) Kostiakov 模型

$$f(t) = at^b, \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 为入渗率 (cm/min); a 、 b 为常数; t 为时间 (min); a 表示入渗开始后第 1 个单位时段末的累计入渗量; b 反映土壤的入渗能力的衰减速度。

2) Philip 模型

$$i = St^{-0.5} + A, \quad (2)$$

式中: i 为入渗率 (cm/min); S 为吸渗率 (cm/min); A 为稳定入渗率 (cm/min); t 为入渗时间 (min)。在入渗初期, S 起主要作用, 随着入渗时间的增长, A 逐渐成为影响入渗的主要因素。

1.3.2 土壤水稳性团聚体分析

分别用水稳性团聚体量^[20]、大于 0.25 mm 的团聚体的量、分形维数分析土壤的水稳性。

1) 水稳性团聚体量

水稳性团聚体量 (%) = 水稳性团聚体质量 (g) / 土壤样品总质量 (g) × 100%

2) 大于 0.25 mm ($R_{0.25}$) 和平均质量直径 (MWD)

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

$$MWD = \sum_{i=1}^n (\bar{d}_i w_i). \quad (4)$$

式中: M_T 为团聚体总质量; $\bar{d}_i$ 为 i 与 $i+1$ 粒级间团聚体的粒径平均直径; w_i 为 i 粒级团聚体所占质量比。

3) 分形维数 (D)

土壤是由不同大小、形状的颗粒、孔隙组成的具有分形特征的结构系统, 常用能反映形体占有空间的有效性的分形维数来描述这一特征^[21-22], 分形维数也被用来表征土壤团聚体量、土壤的通透性和抗蚀性, 采用杨培岭等^[23]推导的公式计算:

$$\left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}} \right)^{3-D} = \frac{W(\delta < \bar{d}_i)}{W_0}. \quad (5)$$

对式 (5) 2 边同时取对数得:

$$(3-D) \lg \left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}} \right) = \lg \left[\frac{W(\delta < \bar{d}_i)}{W_0} \right]. \quad (6)$$

将 $\lg\left(\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}}\right)$ 与 $\lg\left[\frac{W(\delta < \bar{d}_i)}{W_0}\right]$ 进行线性拟合, 即

可求出分形维数 D 。

式 (5)、式 (6) 中: $\bar{d}_i$ 为 i 与 $i+1$ 粒级间团聚体的平均直径; W_0 为各粒级土粒质量和; $d_{\max}$ 为最大粒级的平均直径; $W(\delta < \bar{d}_i)$ 小于 $\bar{d}_i$ 的累积土粒质量。

2 结果与分析

2.1 沸石施加量对入渗特性影响

2.1.1 沸石施加量对累计入渗量、入渗率的影响

不同沸石添加比例下的累计入渗量、入渗率实测曲线如图 1 所示 (图中不同字母表示, 不同处理间差异显著 ($P < 0.05$))。由图 1 可知, 整个入渗过程中, 在 0~20% 的添加范围内, 不断增大沸石比例, 相同时间内累计入渗量、入渗率均逐渐减小, 150 min 时, T0 处理累计入渗量达到 14.5 cm, T4 处理仅有 8.9 cm, 累计入渗量减小了 38.6%。初渗期, 表面土壤含水率小, 水势梯度大, 入渗率较大, 此时, 沸石对入渗的

影响不明显 ($P > 0.05$), 100 min 后, 入渗率明显减小, 累计入渗量与时间接近线性相关, 这是由于入渗时间较长, 入渗路径增长, 入渗面与湿润锋之间的水势梯度减小, 此时入渗主要受重力势影响, 已经达到稳定入渗状态, 累计入渗量与时间线性相关^[24]。沸石施加量小于 10%, 各处理间累计入渗量、入渗率差异较大, 沸石与土壤质量比高于 10% 后, 各处理组间累计入渗量、入渗率的差异减弱, 土壤中加入沸石, 土壤密度增大, 总孔隙度减小, 当沸石添加量大于 10%, 密度、孔隙减小速度变缓^[18], 这与累计入渗量、入渗率的组间变化趋势一致。入渗结束时, 5%、10%、15%、20% 处理组的累计入渗量分别比 T0 处理减少了 13.24%、32.42%、36.52%、39.27%, 各处理组间差异显著, 沸石可增加粉砂质壤土中 10 μm 和 50~250 μm 的微团聚体量, 填充土壤中的部分孔隙^[25], 此外, 添加沸石可增大土壤的毛管持水率和饱和含水率^[26], 影响水分下渗进程, 综上所述, 沸石可减缓土壤水分的总体入渗过程。

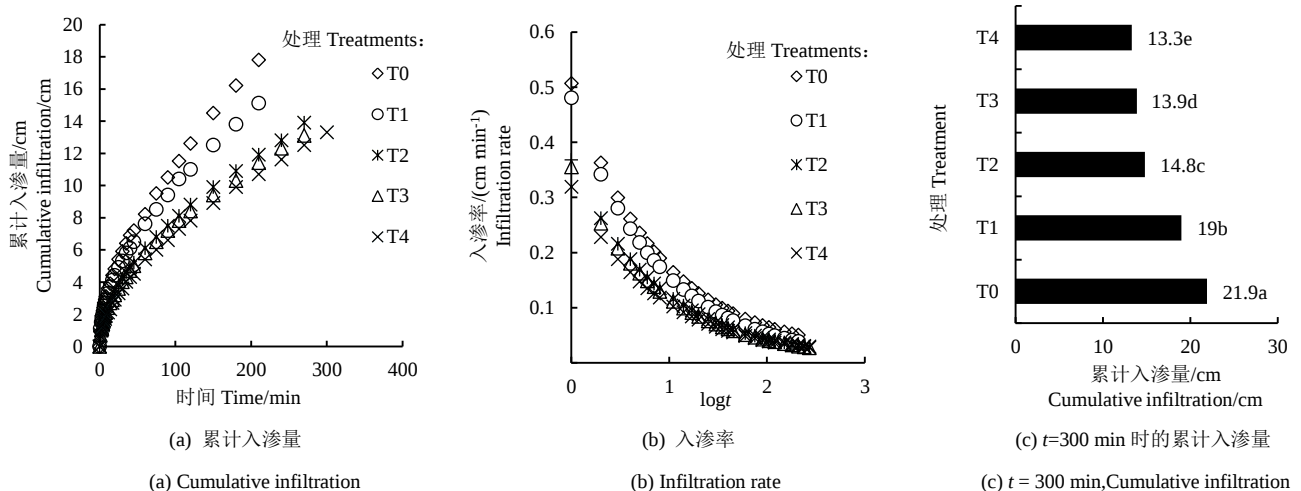


图 1 不同处理累计入渗量

Fig.1 Cumulative infiltration of different treatments

2.1.2 沸石施加量对湿润锋迁移特性的影响

湿润锋可反映下渗水流的垂向运动特征^[27]。由图 2 可发现, 不同处理入渗开始前 5 min, 湿润锋推进距离相差不大, 随着入渗的进行, 不同处理下的湿润锋推进距离差异逐渐增大。T4 处理湿润锋运移距离变化幅度最大, 对比各处理发现, 由 T1 到 T2 处理间湿润锋运移距离变化最大。根据已有研究, 混入沸石可增加土壤密度^[18], 湿润锋运移阻力, 另一方面, 沸石本身是多孔结构, 对水有很大的亲和力^[28], 进入土壤中的水分一部分被土壤中的沸石吸收, 一部分向下运移, 沸石添加量直接影响下渗的水量, 减缓湿润锋的推进。

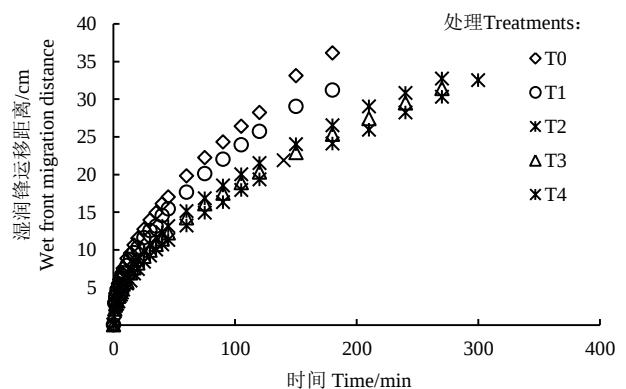


图 2 不同处理湿润锋的变化

Fig.2 Wet front migration of different treatments

对湿润锋 Z 和入渗时间 t 进行拟合,符合指数函数 $Z=at^b$, a 为第 1 个计时单位后的湿润锋的推进距离; b 为湿润锋进程的衰减程度。由表 1 可知,拟合 R^2 均大于 0.99,且不同处理下差异极显著,随着沸石添加量的增加,系数 a 逐渐减小,系数 b 逐渐增加。

表 1 湿润锋与时间的拟合参数

Table1 Fitting parameters of wetting front and time			
处理 Treatments	a	b	R^2
T0	2.549 51	0.503 00	0.999 2
T1	2.306 28	0.503 02	0.998 59
T2	1.891 03	0.508 64	0.999 84
T3	1.745 62	0.514 57	0.999 41
T4	1.455 32	0.541 25	0.999 43

2.1.3 沸石施加量对入渗模型参数的影响

根据实测数据,进行 Kostiakov 模型和 Philip 模型拟合,结果见表 2。由表 2 可知,各处理拟合结果决定系数均在 0.99 以上,拟合效果较好,在 Kostiakov 模型中,假设初始入渗率无穷大,时间无限大时的入渗率趋近 0,与土柱入渗的情况不符^[29],模型中的参数也没有明确的物理意义^[30],Philip 模型中的吸渗率 S 指依靠毛管力吸收或释放液体的能力,反映了土壤的入渗能力^[31],参数 A 反映稳定入渗率。土壤中沸石添加量会影响吸渗率 S 的大小,增大沸石添加量,吸渗率 S 由 0.980 4 减小到 0.621 5。加入沸石使土壤中的毛管孔隙减小^[18],土壤水分迁移能力减弱。在 Kostiakov 模型中, a 与前 2 min 的入渗速度有关, b 与土壤入渗能力的衰减速度有关,各处理随着沸石量的增加,参数 a 逐渐减小,与前 2 min 实测入渗速度结果一致。

表 2 入渗参数拟合结果

Table 2 Fitting results of infiltration parameters						
处理 Treatments	Kostiakov 模型			Philip 模型		
	a	b	R^2	S	A	R^2
T0	1.006 8	0.474 0	0.996 5	0.980 4	0.016 1	0.998 9
T1	1.001 5	0.508 0	0.998 6	0.950 0	0.005 7	0.999 3
T2	0.680 3	0.465 0	0.999 7	0.721 5	0.007 1	0.999 8
T3	0.677 0	0.475 0	0.998 8	0.697 8	0.006 9	0.999 8
T4	0.619 2	0.471 0	0.997 2	0.621 5	0.008 4	0.999 6

2.2 沸石施加量对水稳性团聚体的影响

水稳性团聚体指由性质稳定的胶体胶结团聚而形成的具有抵抗水破坏能力的,在水中浸泡、冲洗而不易崩解的 ≥ 0.25 mm 的土壤团粒^[32]。土壤团聚体在很大程度上影响土壤的物理化学性质,较好的团粒结构有利于改善土壤透气保水能力。

2.2.1 沸石对各级水稳性土壤团聚体量的影响

不同处理水稳性团聚体量分析见表 3。从表 3 可以看出,添加沸石对土壤水稳性团聚体影响较为明显,与 T0 处理相比,T1、T2、T3 处理土壤水稳性团聚体量不同程度的增加,T4 处理土壤水稳性团聚体量明显降低,T1 处理主要作用于 0.5~2 mm 土壤水稳性团聚体,其中 0.5~1 mm 粒级间的水稳性团聚体量增加最为明显;T2 处理对 0.25~2 mm 水稳性团聚体量影响较大,其中 0.25~0.5 mm 由 2.35%增加至 10.73%,T3 处理 ≥ 0.25 mm 水稳性团聚体量相比 T2 处理,减小了 5.12%,但与 T0 处理相比有所增加,T4 处理 0.25~2 mm 间各级土壤团聚体都不同程度地减小,与 T0 处理相比,1~2 mm 的团聚体量减小了 1.56%, ≥ 0.25 mm 水稳性团聚体量减小了 4.75%,总体上,T1、T2、T3 处理组促进水稳性团聚体的形成,其中 T2 处理效果最佳,T4 处理不利于土壤水稳性团聚体的形成,甚至分散水稳性团聚体,破坏土壤结构。土壤中的孔隙状况决定土壤中物质的转移形式和速率^[33],沸石中的阳离子遇水易与其他离子进行交换,促使土粒絮凝形成团聚体的同时,也减小了土壤中的毛管孔隙总数^[34],降低土壤水分的迁移能力,影响土壤水分入渗特性。

表 3 不同处理水稳性团聚体量

Table 3 Water stable agglomerates of different treatments %					
粒径 Particle size/mm	T0	T1	T2	T3	T4
≥ 2	0.13d	0.3c	0.4b	0.53a	0.52a
1~2	2.44c	3.58b	1.36	4.62a	0.87d
0.5~1	5.85c	8.45a	6.22b	6.22b	3.32d
0.25~0.5	2.34b	1.4d	10.37a	1.85c	1.29d
大团聚体 Large aggregates	10.76c	13.37b	18.35a	13.23c	6.01d
0.125~0.25	15.68c	7.88d	2.45e	20.78b	33.29a
0.125~0.063	26.15d	34.12b	50.51a	29.61c	13.69e
0.063~0.053	16.47a	14.18b	3.83e	6.09d	12.25c
0.053~0.45	0.48b	0.33c	3.99a	0.01d	0.44bc
≤ 0.45	30.46b	29.76d	20.87e	30.28c	34.32
微团聚体 Microaggregates	89.24b	86.27d	81.65e	86.77c	93.99

2.2.2 沸石对 $R_{0.25}$ 、平均质量直径 (MWD) 的影响

大于 0.25 mm 的团聚体对土壤肥力有重要影响,沸石对水稳性大团聚体的与其添加量有关,并不是单一的相关性,在 T0、T1、T2 处理呈正相关,T3、T4 处理组呈负相关,T1、T2 处理 ≥ 0.25 mm 团聚体的

量比 T0 处理分别增加了 2.83%、7.59%，T3 处理 ≥ 0.25 mm 水稳性团聚体量相比 T0 处理增加了 2.47%，但与 T2 处理相比，降低了 5.12%，T4 处理组 ≥ 0.25 mm 水稳性团聚体量相比 T0 处理明显减少，分散了水稳性土壤团聚体，根据现有试验，综合考虑试验效果和经济成本，沸石添加量选用 10% 左右较为合适，MWD 的变化趋势与 $R_{0.25}$ 相似，MWD 反映了土壤团聚体大小分布状况，MWD 越大，团聚体的稳定性越强，反之越小^[35]。

表 4 不同处理 MWD 和 $R_{0.25}$ Table 4 MWD and $R_{0.25}$ of different treatments

处理 Treatments	T0	T1	T2	T3	T4
MWD/mm	0.169	0.197	0.179	0.217	0.151
$R_{0.25}/\%$	10.800	13.700	18.300	13.200	6.010

2.2.3 沸石对分形特征的影响

分形维数反映了土壤几何形体^[36]。T1、T2、T3 处理分形维数分别为 2.69、2.63、2.58，说明经此 3 种处理后，土壤的水稳性大团聚体量增大，T4 处理分形维数增大至 2.72。在沸石掺配量较小时，沸石颗粒对土壤颗粒的黏结作用更加明显。分形维数的大小与各级团粒结构的多少密切相关，当土壤 ≥ 0.25 mm 团聚体量增大时，分形维数减小，反之，分形维数增大。

3 讨论

3.1 沸石添加量对土壤水分入渗的影响

入渗过程受土壤质地、体积质量、团聚体等多种因素的影响^[6]，添加沸石后，土壤累积入渗量、入渗率均减小，沸石能有效减缓土壤水分运动过程，与 T0 处理相比，入渗率、累计入渗量、湿润锋等均减小。沸石是一种能够贮藏水分的疏松多孔结构^[34]，并且能在外界条件改变时自由排出水分，达到蓄水保墒的目的，早前研究已经证明^[37]，沸石的施加改变土壤孔隙状况^[27]，增大土壤体积质量^[18]，也会减缓土壤水分下渗过程。

3.2 沸石添加量对水稳性团聚体的影响

沸石对水稳性团聚体的影响与施加量有关，当沸石含量为 0%、5%、10%、15% 时，粒径 ≥ 0.25 mm 水稳性团聚体量增加，在 10% 时达到最大（13.73），与姜淳等^[37]研究结果一致，沸石的强离子交换能力、大比表面积都能促进土粒絮凝形成团聚体。继续增大沸石添加量至 20%，粒径 ≥ 0.25 mm 水稳性团聚体总量仅有 6.01%，戴显庆等^[17]、马媛媛等^[18]也得出类似的结论。小体积的团聚体量也大量增加，这些微小团聚体在水分运移和重力的双重作用下填充土壤空隙^[38]，影响土壤中的水分运动。

4 结论

1) 向黑垆土施入沸石，可减小土壤的累计入渗量和入渗率，沸石添加量越大，阻渗效果越明显，沸石量大于 10% 时，入渗率、累计入渗量相比 10%，变化甚微。

2) 加入一定量的沸石后，沸石的大比表面积和强静电场，有利于土壤水稳性团聚体的形成，当沸石添加量由 0 增加到 10% 时，水稳性大团聚体由 10.76% 增加到 18.35%，但是继续增加沸石添加量至 15%，水稳性团聚体减小至 13.2%，当沸石添加量到 20% 时，水稳性团聚体仅有 6.01%，过量的沸石分散土壤中原有的水稳性团聚体结构，破坏土壤的结构。

3) 应用沸石改良土壤时，沸石添加量不大于 10% 较为适宜，对粉砂质壤土入渗影响明显，又不致破坏土壤团聚体。

参考文献:

- [1] HUANG A S, CARO J. Cationic polymer used to capture zeolite precursor particles for the facile synthesis of oriented zeolite LTA molecular sieve membrane[J]. Chemistry of Materials, 2010, 22(15): 4 353-4 355.
- [2] 杨臻, 李培启. 改性沸石在废水处理中的应用分析[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(6): 49-51.
- [3] YANG Zhen, LI Peiqi. Application analysis of modified zeolite in wastewater treatment[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2018, 36(6): 49-51.
- [4] REHAKOVA M, CUVANOVA S, DZIVAK M, et al. Agricultural and agrochemical uses of natural zeolite of the clinoptilolite type[J]. Current Opinion in Solid State & Materials Science, 2004, 8(6): 397-404.
- [5] 何云华, 李航, 刘新敏, 等. 天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究[J]. 环境科学, 2015, 36(3): 1 027-1 036.
- [6] HE Yunhua, LI Hang, LIU Xinmin, et al. Ion specificity during ion exchange equilibrium in natural clinoptilolite[J]. Environmental Science, 2015, 36(3): 1 027-1 036.
- [7] 陆铸畴, 包忻怡, LIU Xiao, 等. 应用 Le Bissonnais 法研究三峡库区消落带土壤水稳性团聚体稳定性[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(5): 115-120.
- [8] LU Zhuchou, BAO Xinyi, LIU Xiao, et al. Stability of soil aggregates in riparian zone of the Three Gorges reservoir studied using the le bissonnais method[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(5): 115-120.
- [9] 王幼奇, 包维斌, 赵云鹏, 等. 生物炭添加对淡灰钙土水分入渗过程的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(12): 60-65.
- [10] WANG Youqi, BAO Weibin, ZHAO Yunpeng, et al. Amending soil by biochar reduces the ability of the soil to infiltrate water[J]. Journal of

- Irrigation and Drainage, 2018, 37(12): 60-65.
- [7] 魏样, 张宝强, 罗玉虎. 沸石对山地新增耕地质量改善效应研究[J]. 西部大开发(土地开发工程研究), 2019(4): 53-56, 61.
WEI Yang, ZHANG Baoqiang, LUO Yuhu. Effect of zeolite on quality improvement of newly cultivated land in mountainous areas[J]. Western Development (Land Development Engineering Research), 2019(4): 53-56, 61.
- [8] 刘陆涵, 马妍, 刘振海, 等. 三种环境材料对土壤水肥保持效应的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1 811-1 819.
LIU Luhan, MA Yan, LIU Zhenhai, et al. Effect of three kinds of environmental materials on soil moisture and fertility conservation[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(9): 1 811-1 819.
- [9] 魏江生, 山本太平, 董智, 等. 在干旱区农业开发中对人工沸石作用的探讨[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(3): 150-152.
WEI Jiangsheng, YAMAMOTO Tahei, DONG Zhi, et al. Effect of artificial zeolite for agriculture development in arid land[J]. Journal of Arid Land Resources & Environment, 2005, 19(3): 150-152.
- [10] EROGLU N, EMEKCI M, ATHANASSIOU C G. Applications of natural zeolites on agriculture and food production[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(11): 3 487-3 499.
- [11] ABDI G, KHOSH-KHUI M, ESHGHI S. Effects of natural zeolite on growth and flowering of strawberry (fragaria x ananassa duch.)[J]. International Journal of Agricultural Research, 2006, 1(4): 384-389.
- [12] 王浩, 章明奎. 天然矿物对茶园土壤中铅的固定作用[J]. 茶叶科学, 2008, 28(2): 129-134.
WANG Hao, ZHANG Mingkui. Effect of natural minerals on immobilization of lead in soils of tea garden[J]. Journal of Tea Science, 2008, 28(2): 129-134.
- [13] ZHANG J Y, CHEN M X, SUI Q W, et al. Impacts of addition of natural zeolite or a nitrification inhibitor on antibiotic resistance genes during sludge composting[J]. Water Research, 2016, 91: 339-349.
- [14] 邱素芬, 魏来, 于文静, 等. 沸石强化热处理对土壤中铜和锌的固定作用[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(2): 711-715.
QIU Sufen, WEI Lai, YU Wenjing, et al. Immobilization of copper and zinc in the soil through zeolite-enhanced thermos treatment[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(2): 711-715.
- [15] COLTORTI M, DI G D, FACCINI B, et al. ZeoLIFE, a project for water pollution reduction and water saving using a natural zeolite cycle[C]// 86^o Congresso Nazionale della Società Geologica Italiana, 2012.
- [16] SHAH G, SHAH G M, RASHID M, et al. Bedding additives reduce ammonia emission and improve crop N uptake after soil application of solid cattle manure[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 209: 195-204.
- [17] 戴显庆, 冀晓东, 杨茂林, 等. 天然沸石对黑土团聚体含量及稳定性的影响[J]. 中国水土保持, 2016(5): 38-41, 77.
DAI Xianqing, JI Xiaodong, YANG Maolin, et al. Influence of natural zeolite to aggregate content and stability of black soil[J]. Soil and Water Conservation in China, 2016(5): 38-41, 77.
- [18] 马媛媛, 戴显庆, 彭绍好, 等. 天然沸石对松嫩平原黑钙土理化性质和保水能力的影响[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(2): 51-57.
MA Yuanyuan, DAI Xianqing, PENG Shaohao, et al. Effects of natural zeolite on physical and chemical properties and water retention capacity of chernozem in Songnen Plain of northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(2): 51-57.
- [19] 魏如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 269.
WEI Rukun. Chemical analysis method of soil agriculture[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999: 269.
- [20] 徐香茹, 汪景宽. 土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展[J]. 土壤通报, 2017, 48(6): 1 523-1 529.
XU Xiangru, WANG Jingkuan. A review on different stabilized mechanisms of soil aggregates and organic carbon[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(6): 1 523-1 529.
- [21] GANIYU S, RABIU J A, OLATOYE R O. Predicting hydraulic conductivity around septic tank systems using soil physico-chemical properties and determination of principal soil factors by multivariate analysis[J]. Journal of King Saud University - Science, 2020, 32(1): 555-562.
- [22] CRAWFORD J W, VERRALL S, YOUNG I M. The origin and loss of fractal scaling in simulated soil aggregates[J]. European Journal of Soil Science, 1997, 48(4): 643-650.
- [23] 杨婷, 吴军虎. 凹凸棒土对土壤团粒结构及水力参数的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(6): 46-51.
YANG Ting, WU Junhu. Effect of attapulgite to soil aggregate structure and hydraulic parameters[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(6): 46-51.
- [24] 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.
WU Junhu, YANG Ting. Influence of attapulgite on basic parameters of soil water movement[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6): 188-192.
- [25] 曹晓燕. 天然沸石在土地整理中的应用[J]. 国土资源, 2002(6): 35.
CAO Xiaoyan. Application of natural zeolite in land consolidation [J]. Land & Resources, 2002(6): 35.
- [26] 潘根兴, 于革, 殷善达, 等. 天然沸石某些农业化学性状研究[J]. 江苏农业学报, 1991, 7(4): 31-36.
PAN Genxing, YU Ge, YIN Shanda, et al. Some agrochemical properties of natural zeolite[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 1991, 7(4): 31-36.
- [27] 张乃于, 闫双堆, 任倩, 等. 珍珠岩粒径对土壤水分运移的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(2): 22-28.
ZHANG Naiyu, YAN Shuangdui, REN Qian, et al. Water movement in

- soil amended with perlite particles of different sizes[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(2): 22-28.
- [28] 徐根洪. 天然沸石改良土壤的作用机理[J]. *矿产保护与利用*, 2003(5): 18-20.
- XU Genhong. The Mechanism of the Improvement of soil with natural zeolite[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2003(5): 18-20.
- [29] 韩冰, 吴钦孝, 李秧秧, 等. 黄土丘陵区人工油松林地土壤入渗特征的研究[J]. *防护林科技*, 2004(5): 1-3, 49.
- HAN Bing, WU Qinxiao, LI Yangyang, et al. Study on the characteristics of soil infiltration of pinus tabulaeformis stand in the loess hilly areas[J]. *Protection Forest Science and Technology*, 2004(5): 1-3, 49.
- [30] 李春茂, 徐勤学, 吴攀, 等. 不同土地利用方式峰丛坡地土壤入渗特征及其模拟[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(1): 47-52, 60.
- LI Chunmao, XU Qinxue, WU Pan, et al. Simulation analysis on soil infiltration under different land use in Karst hillsides[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(1): 47-52, 60.
- [31] 袁建平, 张素丽, 张春燕, 等. 黄土丘陵区小流域土壤稳定入渗速率空间变异[J]. *土壤学报*, 2001, 38(4): 579-583.
- YUAN Jianping, ZHANG Suli, ZHANG Chunyan, et al. Spatial variation of steady water infiltration rates of small watershed in hilly and gully loess region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(4): 579-583.
- [32] VOGEL H, ROTH K. Quantitative morphology and network representation of soil pore structure[J]. *Advances in Water Resources*, 2001, 24(3): 233-242.
- [33] 武敏, 冯绍元. 不同地下水埋深土壤水分入渗规律研究[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(S1): 79-81.
- WU Min, FENG Shaoyuan. Study on soil water infiltration law under different water tables[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(S1): 79-81.
- [34] 李长洪, 李华兴, 张新明. 天然沸石对土壤及养分有效性的影响[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(2): 163-165.
- LI Changhong, LI Huaxing, ZHANG Xinming. Effects of natural zeolite on soil properties and nutrient efficiency[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(2): 163-165.
- [35] 孙一惠, 马岚, 张栋, 等. 2 种扦插护岸植物根系对土壤结构的改良效应[J]. *北京林业大学学报*, 2017, 39(7): 54-61.
- SUN Yihui, MA Lan, ZHANG Dong, et al. Root distribution characteristics of two cuttage plants on bank slope and its effects on soil aggregates[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(7): 54-61.
- [36] 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): 1 896-1 899.
- YANG Peiling, LUO Yuanpei, SHI Yuanchun. Fractal characteristics of soils characterized by particle size weight distribution[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993(20): 1 896-1 899.
- [37] 姜淳, 周恩湘, 霍习良, 等. 沸石改土保肥及增产效果的研究[J]. *河北农业大学学报*, 1993, 16(4): 48-52.
- JIANG Chun, ZHOU Enxiang, HUO Xiliang, et al. A Study of Zeolite Effects on Fertility and productivity of poor Soils[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 1993, 16(4): 48-52.
- [38] 冀保毅, 程琴, 卫云飞, 等. 不同灌溉方式对农田土壤性状和花生落果率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(6): 8-12.
- JI Baoyi, CHENG Qin, WEI Yunfei, et al. Impact of irrigation methods on soil physical properties and abscission of peanut seeds[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(6): 8-12.

Effect of Natural Zeolite on Soil Water Movement Characteristics and Water Stability Aggregates

WU Junhu, LIU Xia, SHAO Fanfan, LI Yuchen, WANG Zexiang

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

Abstract: In the loess area of China, the problems of drought, lack of rainfall and shortage of water and soil resources are increasingly prominent. The soil quality is seriously degraded, which restricts the development of local agriculture. Zeolite plays an important role in soil structure and nutrient improvement. The aggregate content is closely related to the stability of soil structure. Soil water movement affects infiltration and runoff process.

【Objective】 This paper is to study the effects of zeolite on soil water movement and aggregate distribution, and to provide theoretical basis for improving the structure and water storage capacity of loess area, increasing crop yield and increasing growth, and sustainable development of agriculture. **【Method】** By adding different proportion of zeolite to soil, indoor soil column test and water stability aggregate analysis test were carried out. The effects of adding 0%, 5%, 10%, 15%, and 20% zeolite on soil water infiltration, soil water stability aggregate volume, average mass diameter and fractal dimension were studied. **【Result】** Zeolite could reduce the amount

and rate of cumulative soil infiltration, and hinder the advancement of the wetting front. Compared with the control group, the cumulative infiltration amount and rate of the zeolite test group were continuously reduced. When 20% zeolite was added, the infiltration amount, rate, and wetting front decreased the most. Kostiakov and Philip infiltration models were used to fit the experimental data. After fitted, R^2 was greater than 0.99, and the fitting effect was better. The fitting parameters A and S were smaller than those in the control group. The absorption rate and stable infiltration rate decreased in different degrees, further verify that zeolite could slow down infiltration. The effect of zeolite on water-stable aggregates and fractal dimensions had a greater relationship with its content. When the zeolite content was increased from 0 to 10%, the content of water-stable aggregates in ≥ 0.25 mm increased from 10.8% to 18.3% and the fractal dimension decreased from 2.69 to 2.58. The aggregate volume of water stability increased, and the soil erosion resistance and permeability increased. When the zeolite content was increased to 20%, the content of ≥ 0.25 mm aggregates decreased to 6%, and the fractal dimension increased to 2.72, at which time, the soil structure became poor. The changes of fractal dimension and soil aggregate indicated that zeolite can improve soil structure. When the amount of zeolite was 5%, 10% and 15%, the MWD of the soil increased, and the maximum was at 15%. The amount of zeolite added continued to increase to 20%, and the MWD of the soil decreased to 0.151, which was 10.65% lower than that of the control group. **【Conclusion】** It shows that zeolite can slow down the process of soil moisture infiltration. Within a certain range, zeolite can increase the content of water-stable aggregates in the soil. When the content of zeolite increased to 20%, the content of water stable aggregate decreases greatly, which shows that the excessive application of zeolite will destroy the soil structure. This study can provide a theoretical basis for the improvement of black loam soil by zeolite.

Key words: zeolite; soil aggregate; soil amendment; infiltration

责任编辑：陆红飞