

生化黄腐酸对土壤物理性质及水分运动特性的影响

吴军虎, 李玉晨, 邵凡凡, 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: 为了探究生化黄腐酸(biochemical fulvic acid, BFA)在土壤结构改良方面的应用,通过向土壤中添加 BFA,研究其在不同浓度处理下对土壤物理性质及水分运动特性的影响。结果表明:(1)随着 BFA 施加比例提高,土壤中 >0.25 mm 的水稳性团聚体数量显著增多,施加比例为 20 g/kg 时, $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 分别增加 284.98%,105.64%,35.06%,分形维数降低 2.17%。(2)在温度与 pH 变化的影响下,随着施加比例增大,Zeta 电位的绝对值逐渐增大,施加比例为 20 g/kg 时,Zeta 电位的绝对值分别提高 11.77%,59.70%。(3)向土壤中施加 BFA 可以显著增强土壤的入渗能力,提高累积入渗量与入渗率,随着施加比例的增大,累积入渗量提高 28.83%;3 种入渗模型均能较好地模拟土壤水分入渗过程。

关键词: 生化黄腐酸; 团聚体; Zeta 电位; 水分运移; 入渗模型

中图分类号:TQ314.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)04-0159-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.04.022

Effects of Biochemical Fulvic Acid on Physical Properties and Water Movement Characteristics

WU Junhu, LI Yuchen, SHAO Fanfan, WANG Zexiang

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

Abstract: In order to explore the application of biochemical fulvic acid (BFA) in soil structure improvement, the influence of BFA on soil physical properties and water movement characteristics under different concentrations was studied by adding BFA to soil. The results showed that: (1) As the proportion of BFA increased, the number of water-stable aggregates >0.25 mm in soil increased significantly. When the proportion was 20 g/kg, $R_{0.25}$, mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) increased by 284.98%, 105.64%, and 35.06%, respectively, the fractal dimension decreased by 2.17%. (2) Under the influence of temperature and pH change, the absolute value of Zeta potential first increased and then decreased as the application ratio increased. When the application ratio was 20 g/kg, the absolute value of Zeta potential increased by 11.77% and 59.70%, respectively. (3) Applying BFA to soil could enhance soil infiltration capacity, increase cumulative infiltration and infiltration rate, and accelerate soil moisture front migration. Moreover, with the increase of application ratio, soil moisture infiltration capacity was significantly enhanced. Cumulative infiltration and was increased by 28.83%. The three infiltration models could simulate the soil water infiltration process well.

Keywords: biochemical fulvic acid; soil aggregate; Zeta potential; water transport; infiltration model

近年来,随着社会的不断发展,我国的土壤质量在不断下降,如何改良土壤、建设绿色农田成为当下的研究热点^[1]。生化黄腐酸(BFA)是自然界中广泛分布的高分子有机复合物,兼备土壤改良与植物生长调节功能于一体,其对土壤与作物均无毒害,属于环境友好型绿色肥料,对我国的生态农业发展具有突出作用^[2]。目前已有大量专家学者^[3]投入到黄腐酸的研究中,并得出黄腐酸对土壤改良、作物生长、重金属

污染和土壤修复等多方面的有利成果。在土壤改良方面,黄腐酸溶于水可形成胶结物质,促进土壤团聚体的形成,并且黄腐酸中的羟基与羧基能够与酸性及碱性物质结合形成黄腐酸盐,起到缓冲作用,调节土壤的 pH,有效改善盐碱地土壤^[4-5]。在作物生长方面,黄腐酸可以减少土壤中的养分流失,促进作物根系发育,提高作物产量与品质,黄腐酸还具有多种活性官能团,其活性是天然腐殖酸的 10 倍,易被作物吸

收稿日期:2021-01-15

资助项目:国家自然科学基金重点项目(51239009);西北旱区生态水利工程国家重点实验室科研项目(2016ZZKT-9);陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(17JS096)

第一作者:吴军虎(1974—),男,陕西铜川人,教授,硕士生导师,主要从事农业生态环境和水文水资源研究。E-mail: wujunhu@126.com

收,土壤中施入黄腐酸还可以提高有机质含量及作物对肥料的吸收率^[6-7]。土壤修复方面,黄腐酸具有较强的阳离子交换能力,可以与土壤中金属阳离子发生吸附、络合反应,从而降低土壤中重金属的生物有效性,并且减少作物对重金属的摄取,减少作物中重金属离子的累积,达到土壤修复的目的^[8]。在畜牧业中,黄腐酸含有多种动物体所需的营养物质,可以直接参与动物的生理代谢,促进动物生长发育,提高动物的免疫力,补充并促进营养吸收^[9]。

BFA 是利用微生物发酵技术从秸秆等废料中提取^[10-11],在大大降低成本的同时却不降低质量,且秸秆原料十分丰富,通过合理的废弃物利用解决秸秆燃烧带来的污染问题,符合我国绿色农业的理念,促进农业的可持续发展。因此,本研究向土壤中施加 BFA,通过室内土柱试验与团聚体培养试验,进一步分析 BFA 对土壤结构特性与土壤水分运动特征的影响作用,以期为当今土壤改良与农业发展提供理论依据与数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验土样 供试土样于 2020 年 7 月取自中国科学院院长武农业生态试验站(35°12'N,107°40'E)休耕农田的 0—20 cm 表层耕作土壤,通过环刀法测得土壤容重为 1.35 g/cm³,将取回的土样风干,去除土样中的枯枝、根系、残留物等杂质,研磨后过 2 mm 筛备用。利用马尔文激光粒度仪 Mastersizer 2000 对土样进行机械组成分析,测得其黏粒含量为 9.60%,粉粒含量为 78.20%,砂粒含量为 12.20%。根据国际制土壤质地分类标准,将其划分为砂壤土。

1.1.2 供试黄腐酸 试验中所用的生化黄腐酸(BFA)由山东优索化工科技提供,外观为棕黄色粉末,其中黄腐酸含量≥90%,有机质≥70%,粗蛋白≥40%,水溶性蛋白≥98%,K₂O≥5%,N≥10%,微量元素≥2%,pH 4~6。

1.2 试验方法

1.2.1 土壤水稳性团聚体试验 试验采用荷兰公司生产的湿筛分装置测定供试土样的水稳性团聚体。试验前,将 BFA 分别按照设定比例(0,5,10,15,20 g/kg)与供试土样混合均匀,将混合后的土样分别放入塑料盒中培养 10 天后测定其团聚体含量。在培养过程中,每隔 1 天通过称重法补充水分,使其保持在田间持水量的 70%左右。培养结束后,将土样取出放在塑料盘上,待其干燥后将土样掰成 1 cm 左右的立方体土块,并将塑料盘放置在室外阴凉通风处风干。试验时称取 4 g 土样,采用喷雾器将土样喷湿后放入选定粒径的筛罐中,将筛罐放在摇筛装置支架

上,筛罐下放置称量过质量的不锈钢水罐,通过摇筛装置支架上的加水孔向水罐中加入去离子水至筛罐放下后浸没土样,浸泡 10 min 后启动马达,筛罐上下摇动 3 min 后停止。接下来将摇筛装置支架升高,更换已称量过的不锈钢水罐,加入 2 g/L 的六偏磷酸钠溶液,放下支架后启动马达,上下摇动 8 min 后停止,将加入去离子水和六偏磷酸钠溶液的水罐放入烘箱中烘干 8 h,待水分充分烘干后称量不锈钢水罐质量。

1.2.2 土壤胶体 Zeta 电位测定 试验采用美国 Brookhaven 公司生产的 90 plus Zeta 型 Zeta 电位及粒度分析仪测定。土壤团聚体试验结束后,称取 0.01 g 培养 10 天的土样放入离心管中,加入 50 mL 去离子水,将离心管放入超声波分散器中分散 10 min,通过 0.1 mol/L 的 HCl 与 NaOH 将溶液 pH 调节为 5,6,7,8,9,分别取 1.3 mL 左右溶液加入比色皿中,测定温度为 25 °C 时不同 pH 下的土壤胶体 Zeta 电位,通过 Particle Solution 软件设置温度为 5,10,15,20,25,30,35,40 °C,测定 pH=7 时不同温度下的 Zeta 电位。

1.2.3 一维垂直入渗试验 试验于 2020 年 7—9 月在西安理工大学土壤物理实验室进行,正式试验开始前先进行前期的预试验。当 BFA 与土样的质量比<5 g/kg 时,与对照组相比,其对土壤一维垂直入渗的影响很小,当 BFA 与土样的质量比>20 g/kg 时,随着 BFA 施加增大,土壤一维垂直入渗变化不再明显。经过初步的探索研究,本试验共设 5 组处理,每个处理 3 次重复,BFA 与土壤的质量比分别为 0,5,10,15,20 g/kg,分别记为 CK、B5、B10、B15、B20。

试验选用高为 46 cm,内径为 5 cm,壁厚 0.5 cm 的有机玻璃土柱。试验开始前,为了减小与野外试验的误差,考虑到 BFA 施入土壤中会起到吸水作用引起土壤容重变化,假设装填容重减小情况见表 1,将 BFA 与处理好的土样以设置比例混合均匀,每 5 cm 分层装入有机玻璃土柱中,层间刮毛,装土高度为 40 cm。试验供水系统为马氏瓶,设置水头高度为 3 cm。试验过程中,分别记录马氏瓶刻度及土柱湿润锋运移距离。

表 1 每 5 cm 装填土壤与 BFA 质量及容重变化

处理	土样/g	BFA/g	容重/ (g·cm ⁻³)
CK	132.47	0	1.350
B5	131.81	0.66	1.343
B10	131.15	1.32	1.336
B15	130.48	1.99	1.329
B20	129.82	2.65	1.323

1.3 基本理论与指标计算

1.3.1 土壤水稳性团聚体稳定性分析 分析土壤团

聚体通常采用的指标^[12-13]为:

(1)不同粒级水稳性团聚体的质量百分比

$$W_i = \frac{m_i}{4} \times 100\% \quad (1)$$

式中: W_i 为*i*粒级水稳性团聚体质量百分比(%); m_i 为*i*粒级的团聚体的质量(g)。

(2) >0.25 mm 团聚体含量 $R_{0.25}$ 计算公式为

$$R_{0.25} = \frac{M_{T>0.25}}{M_T} \quad (2)$$

式中: $M_{T>0.25}$ 为粒径 >0.25 mm 团聚体的质量(g); M_T 为团聚体总质量(g)。

(3)平均重量直径 MWD、几何平均直径 GMD 计算公式为

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n \overline{X}_i W_i \quad (3)$$

$$\text{GMD} = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n m_i \ln \overline{X}_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \right] \quad (4)$$

式中: \overline{X}_i 为*i*粒级的团聚体平均的直径(mm); W_i 为*i*粒级的团聚体所占的质量比(%); m_i 为*i*粒级的团聚体的质量(g)。

(4)分形维数的计算公式采用 Tyler 等^[14]推导的公式

$$\left(\frac{\overline{X}_i}{\overline{X}_{\max}} \right)^{(3-D)} = \frac{M(r < \overline{X}_i)}{M_T} \quad (5)$$

对公式(5)两边取对数可得

$$(3-D) \lg \left(\frac{\overline{X}_i}{\overline{X}_{\max}} \right) = \lg \left[\frac{M(r < \overline{X}_i)}{M_T} \right] \quad (6)$$

式中: $M(r < \overline{X}_i)$ 为粒径小于 \overline{X}_i 的团聚体质量(g); M_T 为团聚体总质量(g); \overline{X}_{\max} 为团聚体的最大粒径(mm)。

1.3.2 入渗模型 本文选用 Philip 模型(理论模型)、Kostiakov 模型(经验模型)、修正的 Kostiakov 模型(经验模型)模拟 BFA 对土壤入渗特性的影响^[15-16]。

(1)Philip 入渗表达式为:

$$I = S t^{0.5} + A t \quad (7)$$

式中: I 为累积入渗量(cm); t 为入渗时间(min); S 为吸渗率($\text{cm}/\text{min}^{0.5}$); A 为稳渗率(cm/min)。

(2)Kostiakov 入渗表达式为:

$$I = k t^n \quad (8)$$

式中: I 为累积入渗量(cm); t 为入渗时间(min); k 为经验系数(cm/min); n 为经验指数,能够反映土壤入渗能力的衰减。

(3)修正的 Kostiakov 入渗表达式为:

$$I = k t^n + f_0 t \quad (9)$$

式中: I 为累积入渗量(cm); t 为入渗时间(min); k 为经验系数(cm/min); n 为经验指数; f_0 为稳定入渗率(cm/min)。

1.4 数据处理

试验取 3 次重复,试验数据采用 Excel 2019 软件处理,文中数据参数拟合及绘图采用 Origin 2018 软件。

2 结果与分析

2.1 施加 BFA 对水稳性团聚体的影响

土壤水稳性团聚体是分布在土壤中形态各异的具有水稳定性的结构单元,对土壤结构稳定性具有非常重要的作用,其中粒径 ≥ 2 mm 称为超大团聚体,2~0.25 mm 为大团聚体,0.25~0.053 mm 为微团聚体, <0.053 mm 为黏粒^[17]。水稳性团聚体的含量增大,可以使土壤颗粒之间的孔隙增加,而黏粒含量过高则使土壤孔隙变小,甚至堵塞土壤孔隙,降低土壤通气性,不利于作物生长。因此,土壤中水稳性团聚体含量对土壤团粒结构的改良具有重要意义。

2.1.1 施加 BFA 对水稳性聚体组成的影响 从图 1 可以看出,随着 BFA 的施加比例提高,土壤水稳性团聚体含量有所增加,黏粒含量逐渐减少。各处理中土壤 ≥ 2 mm 的超大团聚体含量由 1.23% 分别增加至 1.47%,2.19%,3.53%,4.88%,增大 2.97%;2~0.25 mm 的大团聚体含量由 1.70% 分别增加至 3.79%,4.64%,6.14%,6.40%,增大 2.76%;0.25~0.053 mm 的微团聚体由 33.72% 增加至 35.72%,37.02%,38.86%,39.44%,增大 16.96%; <0.053 mm 的黏粒含量由 63.35% 减小至 59.02%,56.1%,51.47%,49.28%,减小 22.21%。由此可见,施加 BFA 可以使土壤中的团聚体含量增大,黏粒含量减少,这可能是因为 BFA 是由微生物发酵后的产物,其中丰富的菌丝起到网织作用,将土壤微黏粒交织在一起,使黏粒凝结成微团聚体^[18],并且 BFA 含有多种活性基团,这些活性基团使土壤颗粒更加牢固地黏结在一起,提高土壤颗粒之间的胶结能力,从而促进黏粒形成微团聚体,微团聚体形成大团聚体,大团聚体又聚集在一起形成超大团聚体,达到增加土壤孔隙度的效果,以此来改良土壤结构^[19]。

2.1.2 施加 BFA 对水稳性团聚体稳定性指标的影响分析 本研究通过 >0.25 mm 团聚体含量 $R_{0.25}$ 、平均重量直径 MWD、几何平均直径 GMD 来评价土壤水稳性团聚体的稳定性(表 2)。随着 BFA 施加比例增大, $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 的值逐渐增大, $R_{0.25}$ 由 0.029 3 增至 0.112 8,提高 284.98%;MWD 由 0.106 3 分别增至 0.218 6,提高 105.64%;GWD 由 0.071 6 增至 0.096 7,提高 35.06%。由此可知,施加 BFA 对稳定性评价指标的影响显著,且施加比例与 3 种指标值呈

正相关关系,施加比例达到 20 g/kg 时,评价指标 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 达到最大值。说明施加 BFA 可以显著提高 >0.25 mm 团聚体数量,增大团聚体平均重量直与平均几何直径,提高土壤水稳性团聚体稳定性,达到改良土壤结构的效果。

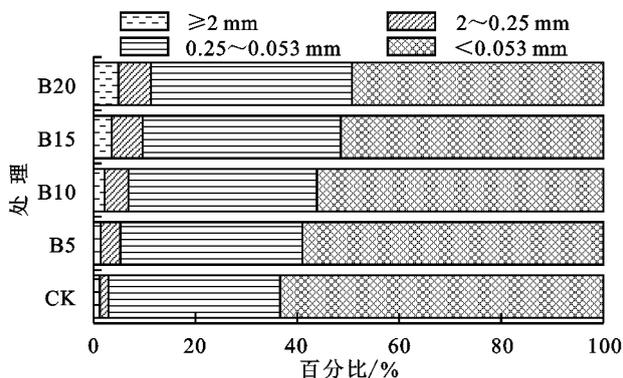


图 1 BFA 对水稳性团聚体组成的影响

表 2 施加 BFA 对团聚体评价指标的影响

处理	$R_{0.25}$	MWD/mm	GMD/mm
CK	0.0293	0.1063	0.0716
B5	0.0526	0.1290	0.0776
B10	0.0683	0.1506	0.0822
B15	0.0967	0.1900	0.0911
B20	0.1128	0.2186	0.0967

2.1.3 BFA 对分形维数的影响 土壤分形维数反映土壤水稳性团聚体的稳定性,土壤分形维数越小,表示土壤团粒结构越稳定,抗分散与侵蚀的能力越强^[20]。本文对比了 BFA 处理下的土壤分形维数的变化特征表明,施加 BFA 能降低土壤的分形维数,且分形维数与施加比例呈正相关关系。根据图 2 可知,各试验组的分形维数分别为 2.881 1, 2.860 5, 2.848 2, 2.826 8, 2.818 7, 分别降低 0.72%, 1.14%, 1.88%, 2.17%, 说明 BFA 可以显著降低土壤分形维数,使水稳性团聚体结构更稳定。

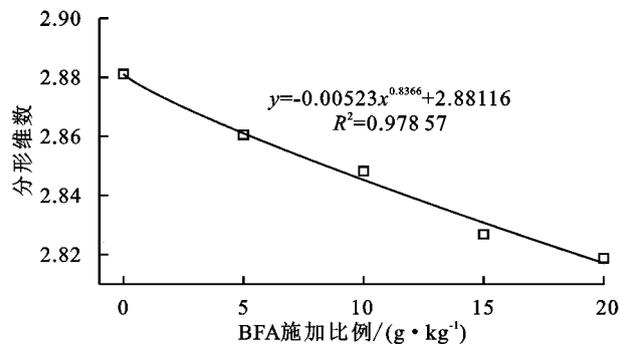


图 2 BFA 对分形维数 D 的影响

2.2 施加 BFA 对土壤胶体 Zeta 电位的影响

土壤胶体是指土壤中非常微小的颗粒,直径通常在 1~1 000 nm,活跃度极高,对土壤性质作用明显。土壤胶体 Zeta 电位是指剪切面的电位,能够度量土壤颗粒间互相排斥或吸引的强度,是反映土壤胶体系

统的稳定性的重要指标,Zeta 电位的绝对值越大,抗分散的能力越强,土壤胶体越稳定,不易聚沉;反之,Zeta 电位绝对值越低,土壤胶体则越不稳定,土壤颗粒易凝结或聚沉^[21]。土壤胶体 Zeta 电位受许多因素影响,尤其是温度与 pH,本研究设定不同温度与 pH,通过 Zeta 电位值的变化,探究 BFA 在不同条件下对土壤胶体稳定性的影响。

2.2.1 不同温度下 BFA 对土壤胶体 Zeta 电位的影响 从图 3 可以看出,pH 为 7 时,随着温度的升高,各试验组的土壤胶体 Zeta 电位绝对值均逐渐减小,可见,温度升高会使土壤颗粒之间的吸引力增大,当吸引力大于排斥力时,土壤胶体变得不稳定,土壤颗粒发生凝结或聚沉^[22]。但在温度相同的条件下,施加 BFA 处理下的 Zeta 电位绝对值较 CK 组有所增大,且施加比例在 0~20 g/kg 范围内,Zeta 电位绝对值随施加比例的增大而增大,施加比例为 20 g/kg 时,Zeta 电位绝对值提高 11.77%。由此可以看出,BFA 可以增大土壤胶体 Zeta 电位的绝对值,减小温度对土壤胶体稳定性的影响。这可能是因为随着温度的升高,增大土壤胶体的布朗运动,使得土壤颗粒间互相吸引聚沉,而施加 BFA 后,由于 BFA 含有丰富的官能团,这些官能团解离后使土壤颗粒滑动面上的电荷数增大,从而提高 Zeta 电位的绝对值,使土壤胶体更稳定不易聚沉。

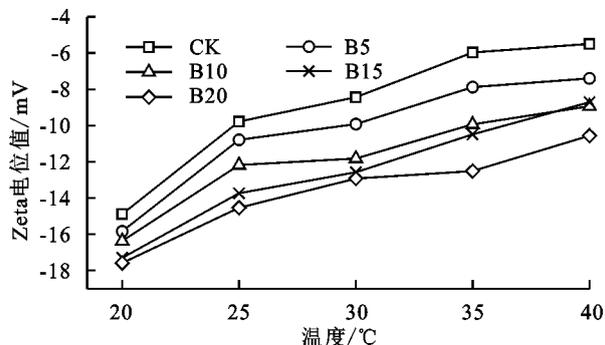


图 3 不同温度下 BFA 对土壤胶体 Zeta 电位的影响

2.2.2 不同 pH 下 BFA 对土壤胶体 Zeta 电位的影响 从图 4 可以看出,设定温度为 25 °C 时,各试验组的 Zeta 电位值均随 pH 的增大而增大。可见,pH 的增大使土壤胶体表面的负电荷数逐渐增大,土壤胶体变得更加稳定^[23],且在 pH 相同时,BFA 处理下的试验组较 CK 组的 Zeta 电位的绝对值有所提高,BFA 施加比例在 20 g/kg 时 Zeta 电位绝对值达到最大,与对照组相比提高 59.70%。这可能是由于 pH 的增大,BFA 中的官能团发生解离后带负电,增大土壤胶体颗粒滑动面上的负电荷数量,使得 Zeta 电位负值增大,从而提高土壤胶体的稳定性。

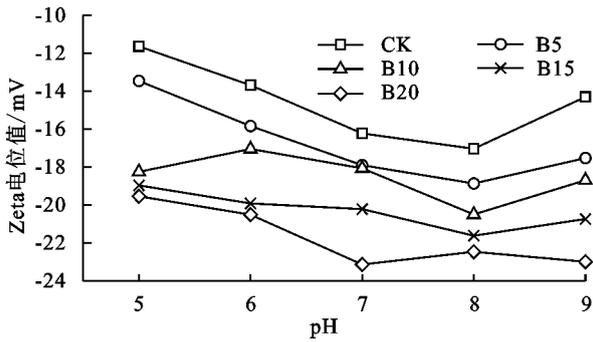


图 4 不同 pH 下 BFA 对土壤胶体 Zeta 电位的影响

2.3 施加 BFA 对土壤水分入渗过程的影响

2.3.1 施加 BFA 对累积入渗量的影响 累积入渗量是指入渗过程中通过地表单位面积的总水量^[16]。由图 5 可知,5 组试验中的累积入渗量均随入渗时间的推移逐渐增大,入渗前 50 min,各试验组之间累积入渗量的增大幅度较为相似;50 min 后,各试验组之间的增速存在明显差异,但均随时间的推移缓慢增加,最终逐渐趋于平稳状态,270 min 后 B20 组率先结束入渗过程。施加 BFA 对累积入渗量的影响显著,且随着施加比例增大,入渗时间达到 270 min 时,累积入渗量较对照组分别增加 5.62%,12.84%,19.21%,28.83%。由此可见,施加 BFA 可以显著增加土壤累积入渗量。这可能是由于 BFA 是一种具有吸水性的天然有机物,含有大量羟基^[2],水分进入施加 BFA 的土壤后与 BFA 的羟基之间通过氢键结合,将水分储存在土壤孔隙中,所以促进水分的下渗,增加累积入渗量。

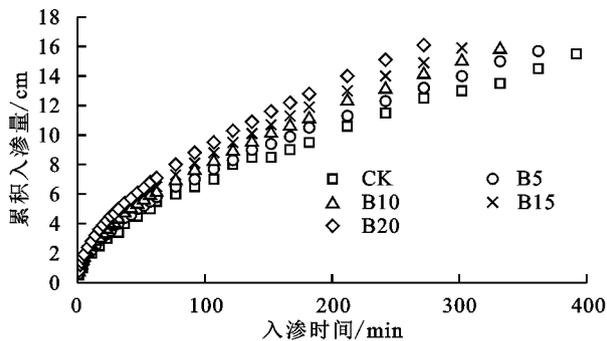


图 5 施加 BFA 对累积入渗量的影响

2.3.2 施加 BFA 对入渗率的影响 土壤入渗率是指单位时间内通过单位面积土壤的水量^[12]。从图 6 可以看出,各处理组的入渗率在入渗初期较大,随着时间的推移入渗率明显减小,最终趋于稳定,但同一时刻下,BFA 处理的入渗率明显大于对照组。以 270 min 时刻的入渗率为例,对照组入渗率为 0.045 9 cm/min,随着 BFA 施加比例的增大,入渗率分别为 0.048 5,0.051 8,0.054 8,0.059 2 cm/min,较对照组分别增大 0.002 6,0.005 9,0.008 9,0.013 3 cm/min,进一步说明 BFA 可以增强土壤的入渗能力。这是因

为 BFA 中含有多种含氧官能团,这些基团可以将水分子吸附在一起,有利于水分的下渗,从而提高入渗率。随着 BFA 施加比例增大,土壤入渗率有所增大,提高土壤入渗率的能力更加显著。

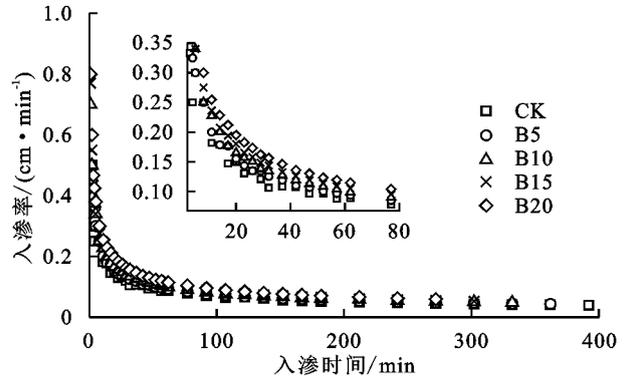


图 6 施加 BFA 对入渗率的影响

2.3.3 施加 BFA 对湿润锋运移的影响 在土壤一维垂直积水入渗过程中,湿润锋是指被水分湿润的土层与干土层的明显的交界面,湿润锋的运移特征可以反映出一维垂直土壤水分的入渗特征^[12]。BFA 对湿润锋迁移产生显著的影响,由图 7 可知,在入渗初期,各组的湿润锋运移曲线差距较小,湿润锋运移距离不断增加。随着入渗时间的推移,在 50 min 后差异明显增大,与未施加 BFA 的对照组相比,随着 BFA 的施加比例增大,同一时刻的湿润锋运移距离不断减小,在湿润锋运移距离相同时,均在不同程度上缩短湿润锋运移时间。以 270 min 时刻处的湿润锋运移距离为例,对照组的湿润锋运移距离为 34.0 cm,施加 BFA 处理下的湿润锋运移距离分别为 35.4,36.7,37.9,40.0 cm,分别增大 1.4,2.7,3.9,6.0 cm,湿润锋运移距离显著增大。以 40 cm 处的湿润锋运移距离为例,对照组所需时间为 390 min,施加 BFA 处理下的所需时间分别为 362,325,303,267 min,所需时间明显缩短。

进一步分析可知,由于土体表面的 BFA 浓度较小,在入渗初期水分子并未充分接触到 BFA,因此初期湿润锋的差异不明显。随着入渗过程的进行,土体中与水分子接触的 BFA 逐渐增多,BFA 的吸水性得到充分体现,其与水分子接触后会将水分子牢牢锁在土壤孔隙中,并且与水分子快速充满土壤孔隙,所以在同一时刻,施加 BFA 的试验组较对照组的湿润锋运移距离更大,且随着 BFA 施加比例的增大,其作用效果更明显。

2.3.4 施加 BFA 对入渗模型参数的影响 为了进一步探究 BFA 对土壤水分运动过程的影响,本文利用 Philip、Kostiakov、修正的 Kostiakov 模型分别对入渗过程进行拟合(表 3)。由其中的决定系数 R^2 可以看出,利用 3 种入渗模型进行拟合的效果均达到

0.9 以上,说明 3 种入渗模型可以较好地模拟土壤中施加 BFA 对土壤累积入渗量的变化过程。

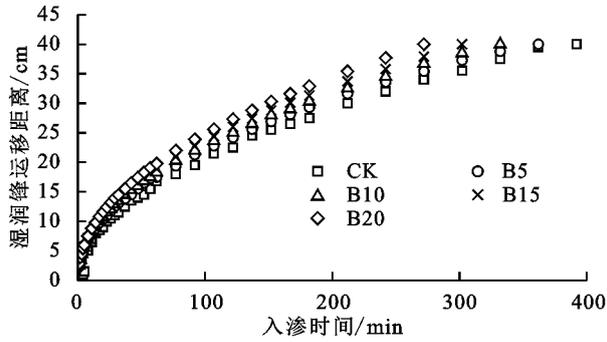


图 7 施加 BFA 对湿润锋运移的影响

根据 Philip 模型的拟合结果可以看出,施加不同浓度 BFA 处理组的吸渗率由 0.608 8 增加至 0.828 6,增大 36.10%,随着 BFA 施加比例的增大,吸渗率显著提高;稳定入渗率由 0.008 2 增加至 0.009 0,增大 9.76%,进一

表 3 施加 BFA 对入渗模型参数的影响

处理	Philip 模型			Kostiakov 模型			修正的 Kostiakov 模型			
	S	A	R ²	k	n	R ²	k	n	f ₀	R ²
CK	0.6088	0.0082	0.9983	0.5222	0.5632	0.9978	0.6172	0.0405	0.0082	0.9981
B5	0.6575	0.0085	0.9997	0.5692	0.5608	0.9994	0.6546	0.0167	0.0085	0.9997
B10	0.7095	0.0087	0.9998	0.6256	0.5548	0.9995	0.7086	0.0119	0.0087	0.9998
B15	0.7533	0.0088	0.9995	0.6692	0.5532	0.9997	0.7415	0.0071	0.0084	0.9996
B20	0.8286	0.0090	0.9995	0.7525	0.5451	0.9997	0.8196	0.0079	0.0087	0.9995

3 结论

(1)向土壤中施加 BFA 可以显著提高土壤中 >0.25 mm 的团聚体含量, $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 3 种评价指标也显著增大,土壤分形维数显著降低,说明 BFA 可以促进土壤水稳性团聚体的形成,提高其抗分散能力,使水稳性团聚体更加稳定,对改良土壤结构有较大的促进作用。

(2)向土壤中施加 BFA 能够增大土壤 Zeta 电位的绝对值,减小温度与 pH 的变化对土壤 Zeta 电位值的影响,使土壤胶体颗粒不易聚沉,达到提高土壤胶体稳定性的效果。

(3)BFA 能有效提高土壤的入渗能力,随着施加比例的增大,累积入渗量、入渗率、湿润锋运移距离均显著增大,且 3 种模型均可以较好地模拟土壤水分入渗过程。

综上所述,施加 BFA 均可改良土壤团粒结构,显著增强土壤水分的入渗能力,提高团聚体稳定性与土壤抗侵蚀能力。

参考文献:

- [1] 郑苗.建设绿色农田推动农业可持续发展[J].中国农业综合开发,2020(12):26-27.
- [2] 张常书,左文.黄腐酸的生物活性及应用研究[J].磷肥与复肥,2018,33(3):21-23.
- [3] 张萌欣,薛胜平,王晓环,等.黄腐酸应用概述及研究课

步阐明 BFA 可以提高土壤水分的入渗能力。

根据 Kostiakov 模型的拟合结果可以看出,经验系数 k 随 BFA 的施加量增大而增大,由 0.522 2 增至 0.752 5,增大 44.10%。由此可见,Kostiakov 模型与 Philip 模型的拟合结果一致,进一步说明施加 BFA 对土壤入渗过程有显著的促进作用。

根据修正的 Kostiakov 模型的拟合结果可以看出,施加 BFA 的处理组与对照组相比,经验系数 k 显著增大,其中施加 BFA 的处理组较对照组的经验系数由 0.617 2 增至 0.819 6,增大 32.79%。此外,修正的 Kostiakov 模型还加入了稳定入渗率 f_0 这一参数,施加 BFA 的处理组较对照组的稳定入渗率均由 0.008 2 增至 0.008 7,降低 6.10%,根据表 3 可以看出,3 种入渗模型均可以较好地拟合施加 BFA 对土壤入渗过程中的水分变化。

题展望[J].腐植酸,2020(5):15-19,26.

- [4] Shao, F, Wu J, Li Y, et al. An approximate semi-analytical model of sediment and nutrient transport on slopes under rainfall conditions[J]. Soil Science Society of America Journal, 2020, 84(4): 1247-1266.
- [5] 吕冬青,张铭谷,马玉增,等.黄腐酸对蒜套棉制度下棉花产量品质及土壤性状的影响[J].水土保持学报,2020, 34(2): 222-230.
- [6] Cerozi B D S. Fulvic acid increases iron bioavailability in aquaponic systems: Theoretical designs and practical considerations to prevent iron deficiency in plants[J/OL]. Aquacultural Engineering, 2020, 90. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102091>.
- [7] 安学忠,王娟,何淑萍,等.黄腐酸对制种玉米增产效果的研究[J].甘肃农业,2020(9):87-90,97.
- [8] Rashid I, Murtaza G, Dar A A, et al. The influence of humic and fulvic acids on Cd bioavailability to wheat cultivars grown on sewage irrigated Cd-contaminated soils[J/OL]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 205. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111347>.
- [9] Mao Y. Modulation of the growth performance, meat composition, oxidative status, and immunity of broilers by dietary fulvic acids[J]. Poultry Science, 2019, 98(10): 4509-4513.

(下转第 171 页)

- [J].资源科学,2000,15(4):375-382.
- [5] 范晓秋.水资源生态足迹研究与应用[D].南京:河海大学,2005.
- [6] 黄林楠,张伟新,姜翠玲,等.水资源生态足迹计算方法[J].生态学报,2008,28(3):1279-1286.
- [7] 杜轶,张治国,董晓辉,等.基于水资源生态足迹模型的水资源可持续性研究[J].山西水土保持科技,2015(4):15-17.
- [8] 张勇,张治国,董晓辉,等.基于 ARIMA 模型的山西省水资源生态足迹时间序列分析[J].安徽农业科学,2016,44(22):53-55,59.
- [9] 关格格,贾陈忠,秦巧燕.基于水生态足迹的山西省水资源利用研究[J].人民黄河,2017,39(7):96-99.
- [10] 赵春芳,董朝阳,伍磊,等.浙江省水资源生态足迹时空格局[J].水土保持通报,2016,36(1):242-248.
- [11] 张义,邹永福,李丰生,等.基于灰色神经网络模型的水资源生态足迹预测:以广西为例[J].人民长江,2017,48(1):37-42.
- [12] 贾陈忠,乔扬源,关格格,等.山西省水资源生态足迹时空变化特征及驱动因素[J].水土保持研究,2019,26(2):370-376.
- [13] 左其亭,姜龙,冯亚坤,等.黄河沿线省区水资源生态足迹时空特征分析[J].灌溉排水学报,2020,39(10):1-8,34.
- [14] 张倩,谢世友.基于水生态足迹模型的重庆市水资源可持续利用分析与评价[J].灌溉排水学报,2019,38(2):93-100.
- [15] 张养安,郑志峰,王永红.汉中市水域生态承载力的研究与分析[J].水土保持学报,2017,31(5):356-360.
- [16] 李睿佳,宋厚娟,赵冰清,等.黄河中游(禹门口—汾河入黄口)区域水资源生态赤字的动态研究[J].山西农业科学,2017,45(9):1507-1512.
- [17] 路瑞,赵琰鑫.基于水资源生态足迹的黄河流域水资源利用评价[J].人民黄河,2020,42(11):48-52,134.
- [18] 张岳.中国水资源与可持续发展[M].南宁:广西科学技术出版社,2000:2-3.
- [19] 谭秀娟,郑钦玉.我国水资源生态足迹分析与预测[J].生态学报,2009,29(7):3559-3568.
- [20] 张宇鹏.我国生态足迹区域差异比较研究[D].长春:吉林大学,2010.
- [21] 高中良,郑钦玉,谭秀娟,等.“国家公顷”生态足迹模型中均衡因子及产量因子的计算及应用:以重庆市为例[J].安徽农业科学,2010,38(15):7868-7871.
- [22] 顾晓薇,王青,刘建兴,等.基于“国家公顷”计算城市生态足迹的新方法[J].东北大学学报(自然科学版),2005,26(4):295-298.
- [23] 吴开亚,王玲杰.基于全球公顷和国家公顷的生态足迹核算差异分析[J].中国人口·资源与环境,2007,17(5):80-83.
- (上接第164页)
- [10] 王法奎.生化黄腐酸的生物学功能及其在饲料中的应用[J].饲料与畜牧,2013(6):10-12.
- [11] 汪善锋,汪海峰,陈安国.生化黄腐酸的应用效果与作用机理[J].中国饲料,2004(22):12-13.
- [12] 吴军虎,任敏.羟丙甲纤维素对土壤水分入渗特性及水稳性团聚体的影响[J].水土保持学报,2018,32(6):66-71,235.
- [13] 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.
- [14] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal,1992,56(2):362-369.
- [15] 周利颖,李瑞平,苗庆丰,等.河套灌区不同掺沙量对重度盐碱土壤水盐运移的影响[J].农业工程学报,2020,36(10):116-123.
- [16] 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.
- [17] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils [J]. Soil Science Society of America Journal,1993,57(4):1071-1076.
- [18] 罗珍,朱敏,线岩相洼,等.丛枝菌根真菌侵染对紫色土水稳性团聚体特征的影响[J].土壤通报,2012,43(2):310-314.
- [19] 尚应妮,胡斐南,赵世伟,等.不同胶结物质对黄绵土团聚体形成的影响[J].水土保持学报,2017,31(2):204-208,239.
- [20] 吴军虎,陶江海,王海洋,等.羧甲基纤维素钠对土壤团粒结构及水分运动特性的影响[J].农业工程学报,2015,31(2):117-123.
- [21] 马任甜,胡斐南,刘婧芳,等.黄土高原植被恢复过程中土壤表面电学性质演变特征[J].土壤学报,2020,57(2):392-402.
- [22] 牛岩.在不同温度下土壤胶体分散系稳定性分析[J].现代农业科技,2018(9):223,227.
- [23] 牛岩.砒砂岩与沙复配土在不同 pH 条件下的 Zeta 电位特性[J].黑龙江农业科学,2018(4):42-45.