

生化黄腐酸对盐碱土水盐运移特征及盐基离子组成的影响

孙燕, 王春宏, 王全九, 曲植, 王建, 张曦元

(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: 生化黄腐酸(biochemical fulvic acid, BFA)在改善土壤结构、促进作物生长与提高肥效方面均表现出较好的应用价值。为探讨添加 BFA 对盐碱土水盐运移规律的影响,揭示 BFA 淋盐增效机理,基于一维垂直土柱入渗试验,对不同 BFA 添加量(0,1,2,4,8 g/kg)条件下盐碱土的水盐运移特征、入渗模型参数及土壤交换性盐基离子组成进行了研究。结果表明,入渗条件下增加 BFA 能够降低土壤水分入渗速率,延长入渗时间,提高土壤保水性能。Kostiakov 模型、Philip 模型和代数模型均能较好地描述入渗过程,模型参数中经验系数(K)、吸渗率(S)和综合形状系数(α)均随 BFA 添加量的增加呈先减小后增加的变化趋势。与对照相比,添加 BFA 均能提高土壤持水效率和相对脱盐率,在 2 g/kg BFA 添加量条件下,0—20 cm 土层内土壤平均体积含水率提高 3.38%,平均持水效率提高 10.65%,相对脱盐率提高 36.32%。此外,相比对照,添加 BFA 后土壤交换性盐基总量(total exchangeable base, TEB)均有所增加,TEB 组成中 Ca^{2+} 浓度增加, Na^+ 浓度降低。因此,在盐碱土中添加 BFA 能够显著影响土壤水分入渗和水盐运移特征,改善土壤水盐分布状况,对盐碱土具有较好的保水和脱盐效果,且添加 BFA 后土壤 TEB 显著增加,能够显著改善土壤交换性盐基离子组成,提升土壤质量。

关键词: 生化黄腐酸;湿润锋;累积入渗量;入渗模型;交换性盐基离子

中图分类号: S156.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)04-0228-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.04.029

Effects of Biochemical Fulvic Acid Application on Water and Salt Transport Characteristics and Basic Ion Composition of Saline-alkaline Soil

SUN Yan, WANG Chunhong, WANG Quanjiu, QU Zhi, WANG Jian, ZHANG Xiyuan

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

Abstract: Biochemical fulvic acid (BFA) has shown favorable application value in improving soil structure, promoting crop growth and improving fertilizer efficiency. In order to explore the effect of BFA addition on the water-salt migration law of saline-alkali soil, and reveal the salt leaching efficiency mechanism of BFA, this research based on one-dimensional vertical soil column infiltration experiment, to investigate the water-salt migration characteristics, the parameters of the infiltration model, and the composition of soil exchangeable base ions of saline alkali soil under different BFA application amounts (0, 1, 2, 4 and 8 g/kg). The results showed that the application of BFA under infiltration conditions could reduce the soil water infiltration rate, prolong infiltration time and improve soil water retention performance. The Kostiakov model, Philip model and algebraic model could all describe the soil infiltration process well. The empirical coefficient K , the absorption rate S and the comprehensive shape coefficient α in the models all showed a trend of decreasing and then increasing with the increasing of BFA application amount. Compared with the control, the application of BFA could improve the soil water holding efficiency and relative desalination rate. Under the condition of 2 g/kg BFA addition, the average volume water content, average water holding efficiency and relative desalination rate in 0—20 cm soil layer increased by 3.38%, 10.65% and 36.32%, respectively. In addition, compared with the control, the total exchangeable base (TEB) of soil increased after adding BFA, and the concentration of Ca^{2+} in TEB increased, while the concentration of Na^+ decreased. Therefore, BFA application could significantly affect soil water infiltration and water and salt transport

收稿日期: 2021-12-30

资助项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41907010);国家自然科学基金重点项目(41830754);国家自然科学基金面上项目(41977043);中国博士后科学基金项目(2019M653708)

第一作者: 孙燕(1990—),女,副教授,主要从事盐碱地改良与植物生理生态研究。E-mail: sunyan199058@126.com

通信作者: 王全九(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤物理与养分运移研究。E-mail: wquanjiu@163.com

characteristics, improve the distribution of soil water and salt, and had favorable effect on water retention and desalination of saline soil. Moreover, studies have found that BFA application could significantly increase soil TEB, significantly improve soil exchangeable base ion composition and improve soil quality.

Keywords: biochemical fulvic acid; wetting front; cumulative infiltration; infiltration model; exchangeable base ion

盐碱土是我国重要的后备耕地土壤资源,土壤盐碱化趋势的不断扩大,严重制约了农业生产水平水平的提高。因此,针对我国土壤盐碱化程度日益加重、耕地资源日趋短缺以及粮食需求日益高涨的现状,改良盐碱地以保证农业的可持续发展具有重要意义^[1-2]。利用化学措施(如施加腐殖酸等改良剂)是改良盐碱地的重要途径之一,其通过改变盐碱土壤胶体吸附性阳离子的组成,改善土壤结构和土壤养分状况,以达到改良土壤的目的^[3]。

黄腐酸(fulvic acid, FA)可被认为是腐殖酸的一种,具备腐殖酸的所有特性,但相比于腐殖酸,其相对分子质量更小、生理活性更大、水溶性更高^[4]。FA根据其来源不同,可分为矿源黄腐酸(mineral fulvic acid, MFA)和生化黄腐酸(biochemical fulvic acid, BFA)。MFA生产工艺复杂,成本较高^[5],其制备原料多为风化煤、褐煤、泥炭等不可再生资源^[6],且过度开采会破坏生态环境;BFA是从作物秸秆中利用微生物技术提取得到,相比于MFA具有更高的生理活性,充分利用作物秸秆既可以为BFA生产提供充足原料,又可以为农业废弃物再利用提供有效途径。此外,BFA在土壤中较短的矿化周转时间对维护地球碳储存以及对温室气体的间接减排有着重要意义^[7-8]。

有研究^[9-11]表明,在土壤改良中施用FA能够促进土壤中矿物质溶解,增加土壤中有效养分含量,提高养分供应强度和肥料利用率,且FA能够显著提高葡萄^[12]、马铃薯^[13]、小麦^[14]等作物的抗逆抗盐胁迫能力,有效防治植物病害^[15]。BFA自身具有胶体特性,含有丰富的活性官能团和较高的化学和生物活性,通过吸附和缓冲作用可减轻重金属等物质对土壤和作物的危害^[16]。向土壤中添加适量的BFA可增加土壤中水稳性团聚体数量,增大Zeta电位的绝对值和累积入渗量^[17],菜田盐碱土施用一定量的BFA可以明显改善盐碱土壤结构,降低盐分含量^[18]。目前,针对BFA的作用机理研究,一方面集中于对其自身化学组成性质的研究^[19-20];另一方面集中于BFA促进作物生理生长和增产提质方面^[21],并通过探讨作物生长过程中土壤结构和养分含量的变化来反映BFA对土壤的改良效果^[22],而缺乏针对添加BFA条件下土壤水分运动和溶质运移过程的研究。因此,本研究考虑到BFA在改良盐碱

土和促进作物生长的过程中必然会涉及到土壤水分入参与水盐运移过程这一重要因素的变化,且探究以土壤为介质的水盐运移过程对于土壤盐碱化防治、预测预报土壤中溶质的时空分布和变化至关重要,从而开展一维垂直土柱入渗试验,设置不同水平的BFA添加量处理,研究其在盐碱土水分入渗条件下的水盐分布特征及其对入渗模型参数的影响,明晰BFA对土壤水分运移和盐分降低的作用效果,并通过对比分析不同BFA添加量条件下交换性盐基总量(total exchangeable base, TEB)及其组成的变化情况,以期为进一步明确BFA作用机理和盐碱土改良与可持续利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土样于2021年5月取自新疆巴州试验田表层0—20 cm土壤,土壤容重为 1.56 g/cm^3 ,初始含水率为 $0.01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,饱和含水率为 $0.38 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,初始含盐量为 3.88 g/kg ,pH为8.19,属于轻度盐碱土^[23]。土样的黏粒、粉粒和砂粒体积分数分别为1.81%, 21.78%, 76.41%,根据国际制土壤质地分类标准判定供试土样为砂质壤土。

供试BFA是山东廊坊松本科技有限公司生产的BFA-POWDER,其BFA $\geq 90\%$,pH为6~8,棕色粉末状,水溶性 $\geq 99\%$,比表面积为 $43.781 \text{ m}^2/\text{g}$,是一种水溶性好、生理活性较高的大分子物质,其C、H、O、N元素组成分别为38.59%, 4.83%, 35.82%, 1.60%,其H/C、O/C、N/C原子比分别为1.50, 0.70, 0.04。

1.2 试验方法

试验于2021年5月在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进行。由于目前有关BFA一维垂直土柱入渗试验研究的相关报道较少,试验开始前依据BFA吸水特性,参考有关 γ -聚谷氨酸(Poly- γ -glutamic acid, γ -PGA)、聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAM)、羧甲基纤维素钠(carboxymethylcellulose sodium, CMC)等相关研究^[24-26]文献,通过BFA吸水性能试验发现,BFA吸水倍数约为 10 g/g ,进一步参考王全九等^[26]的研究结果,将BFA添加量设定为0, 0.1%, 0.2%, 0.4%和0.8%。因此,本试验共设5组处理,每个处理3次重复,BFA添加量分别为0(CK), 1, 2, 4, 8 g/kg。

试验所用的装填土柱采用厚度为 0.5 cm 的有机玻璃材料制成,内径 8 cm,高 50 cm,外侧贴有刻度纸,作为试验前装土的参照依据以及读取湿润锋读数,土柱底端设有固定法兰式透气板。供水装置为马氏瓶,内径 8 cm,厚度 0.5 cm,高 45 cm,主要为试验提供稳定的入渗水头,侧壁贴有刻度纸,便于记录试验过程中马氏瓶内水量随时间的变化。

试验先将 BFA 与土样按质量比混合均匀,按容重 1.56 g/cm^3 装填土柱。装填土柱前,在有机玻璃土柱底部放置滤纸,以防止入渗过程中土壤颗粒流失堵塞出流孔口。将混合均匀的土样按每 5 cm 土层装入有机玻璃土柱中,层与层之间打毛衔接,土层深度共 45 cm,装土完毕后在土壤最上层表面放置滤纸,以防止入渗水流冲击破坏土壤表面。试验前向土柱顶部倒入定量的试验用水,以减小累积入渗量的初始误差,并调整马氏瓶与土柱的位置,控制土壤表层积水在 2 cm 左右。在试验过程中,采取先密后疏的原则用秒表计时,记录各处理入渗时间、马氏瓶中水柱高度、土柱中湿润锋运移距离的变化数据,当湿润锋运移深度达到 31 cm(垂直入渗模拟有限元入渗,入渗深度需达到土柱深度 $2/3$ 以上,即入渗率达到稳定状态)时,停止计时和供水,同时用吸管吸出土柱顶部积水。将入渗后的土柱从底部拆开,去除水分未入渗到的干土部分,再利用土锤将剩余土壤推出以采取土样。

1.3 指标测定方法

将土样放置在阴凉处自然风干、碾压,去除杂物过 2 mm 筛后进行各种指标的测定。土壤容重采用环刀法测定,土壤机械组成采用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000 型,马尔文仪器有限公司,英国)测定,BFA 比表面积采用 ASAP2020M 型比表面积分析仪(MICROMERITICS 公司,美国)测定,BFA 所含 C、H、O、N 等元素采用 Vario EL 型元素分析仪(Element 公司,德国)测定。

土壤含水量采用烘干法测定。每个土柱取样 7 次,取样土层深度分别为 0—1, 5—6, 10—11, 15—16, 20—21, 25—26, 30—31 cm,取样后放入铝盒中并立即称重,然后放入烘箱中烘干至恒重并称重,计算得到土壤含水量。

土壤含盐量采用电导法测定。将风干后的每层土样进行研磨,按照 1:5 的土水比称取 18 g,并加入 90 mL 纯水浸提,充分搅拌并静置 8 h 后采用 DDS-307 型电导率仪测定电导率,通过供试土壤与电导率与含盐量关系转换得到土壤含盐量。

交换性盐基离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})的测定以乙酸铵为土壤交换剂,将浸出液中的交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 采用原子吸收分光光度法测定,土壤交换性

K^+ 、 Na^+ 采用火焰光度法测定^[27]。

交换性盐基总量(total exchangeable base, TEB)(cmol/kg)采用加和法计算各交换性盐基离子总和得到,即:

$$\text{TEB} = \text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} \quad (1)$$

1.4 入渗模型

入渗模型可分为经验模型与理论模型,Kostiakov 经验模型计算方便,能较好地反映土壤入渗特征^[28];理论模型中,Philip 理论模型^[29]相比 Kostiakov 模型多一个常数项,其物理意义明确,广泛应用于均质土壤垂直入渗的情况。此外,王全九等^[30]提出的垂直一维非饱和土壤水分运动代数模型物理意义明确,通过累积入渗量和湿润锋深度易求得模型参数^[31]。因此,选用上述 3 种模型对比分析,通过模型参数变化反映 BFA 对入渗特性的影响。

Kostiakov 入渗公式为:

$$I = Kt^{1-a} \quad (2)$$

式中: I 为累积入渗量(cm),反映土壤水分入渗前期的入渗能力^[28]; t 为入渗时间(min); a 为经验入渗指数; K 为经验入渗系数(cm/min)。

Philip 入渗公式可简化^[29]为:

$$I = St^{0.5} \quad (3)$$

式中: S 为吸渗率(cm/min)。

代数模型可用水分运动特征量进行表征,模型中累积入渗量的表达式^[30]为:

$$I = Z_f (\theta_s - \theta_r) \frac{1}{1+\alpha} + (\theta_r - \theta_i) Z_f \quad (4)$$

式中: θ_s 为饱和含水率(%); θ_r 为滞留含水率(%); θ_i 为初始含水率(%),由于初始含水率较低,取滞留含水率等于初始含水率 $\theta_r = \theta_i$,将公式(4)变形为

$$I = \frac{(\theta_s - \theta_r)}{1+\alpha} Z_f \quad (5)$$

式中: Z_f 为湿润锋深度(cm); α 为土壤水分特征曲线和非饱和导水率综合形状系数。

1.5 数据处理与统计分析

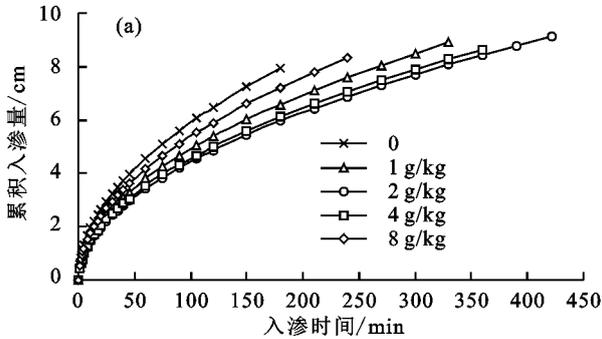
采用 Microsoft Excel 2013 软件进行数据整理和绘图,SPSS 22.0 软件进行显著性分析和相关性分析,Matlab 2018a 软件进行模型参数拟合。

2 结果与分析

2.1 BFA 添加量对盐碱土壤水分入渗特征的影响

累积入渗量随入渗时间的变化趋势在一定程度上能够反映土壤水分入渗能力的大小,湿润锋深度能够反映水流入渗时的垂向运动特征。不同 BFA 添加量处理供试土壤累积入渗量和湿润锋深度随入渗时间的变化过程见图 1。由图 1 可知,各处理之间累积入渗量和湿润锋深度在入渗初期差异不明显,但从

50 min 后出现明显差异。当对照组入渗至 31 cm 时, BFA 为 1, 2, 4, 8 g/kg 添加量处理的湿润锋深度相比对照组分别减少 26.07%, 34.98%, 31.35%, 13.86%, 且差异显著 ($p < 0.05$); 全部试验土柱入渗至 31 cm



时, BFA 为 1, 2, 4, 8 g/kg 添加量处理的累积入渗量相比对照分别增加 12.36%, 14.75%, 9.08%, 5.17%, 且差异显著 ($p < 0.05$); BFA 添加量为 2 g/kg 入渗历时最长, 累积入渗量最大。

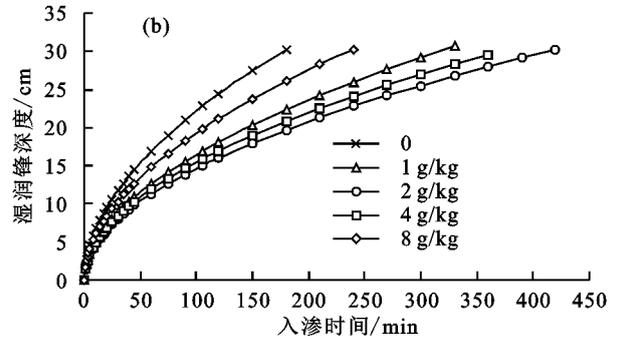


图1 BFA对盐碱土壤水分入渗特征的影响

入渗初期各 BFA 添加量下湿润锋深度和累积入渗量曲线重合度较高, 这是由于 BFA 在短历时内发挥作用效果较小, 直到入渗 50 min 后 BFA 的作用效果才逐渐明显。入渗中后期, 相同入渗时间条件下, 各添加量处理相比于对照组, 累积入渗量和湿润锋深度均减小, 呈现出减幅随添加量先增大后减小的变化趋势; 相同湿润锋深度条件下, 各添加量处理相比于对照组, 累积入渗量均增加, 呈现出增量随添加量先增大后减小的变化趋势。这一方面是由于 BFA 不仅具有胶体特性, 而且其自身元素组成中 C、H、O、N 元素占主要成分, 可作为一种有机质进入土壤, 能够促进土壤中水稳性团聚体的形成和提高土壤胶体的稳定性^[22]; 另一方面, BFA 分子链中的大量羧基与水分子形成氢键, 使之与水分子发生结合而有较高的水溶性, 同时 BFA 苯环含量较少, 含有丰富的亲水基团, 具有较高的吸水性能, 吸水倍数较高, 使得 BFA 不易成粒, 而是通过自身吸水膨胀, 影响土壤水的黏滞性, 使得土壤孔隙和通透性发生变化, 在相同土层入渗深度时, 提高土壤储存的水量, 较多的水分得以保留在土壤中, 降低土壤入渗速率, 使水分入渗更均匀^[26], 这对于促进根系吸水、改善砂土保水性等方面具有重要意义。另外, 相同入渗时间条件下, 当 BFA 添加量 > 2 g/kg 时, 累积入渗量和湿润锋深度的变化幅度均呈现减小趋势, 这可能是由于土壤团粒含量并非随着 BFA 添加量的增加而增加, 添加量过高对改善土壤孔隙结构的效果并不明显^[14], 当 BFA 添加量过多时自身会发生聚合吸水膨胀^[32], 土壤孔隙相对增大, 土壤水溶液的黏滞性相对降低, 反而相对减小土壤水分入渗阻力, 表现出 BFA 添加量为 4, 8 g/kg 时对累积入渗量和湿润锋深度的影响程度减弱。

2.2 BFA 添加量对入渗模型参数的影响

为分析和验证 BFA 对土壤水分运动的影响, 分别采用 Philip 模型、Kostiakov 入渗模型和代数模型对实测

数据进行拟合, 求解能够反映水分入渗能力的水力参数, 各参数大小与土壤结构和孔隙状况有关。由表 1 可知, 各拟合方程的决定系数 R^2 较高, 3 个入渗模型均能较好地描述土壤中添加 BFA 的入渗过程。

对于 Kostiakov 入渗模型, 经验系数 (K) 表示入渗开始后第 1 个单位时段末的累积入渗量, 在数值上和第 1 个单位时段平均入渗速率相等, 是表征入渗初始阶段土壤入渗能力的主要参数^[28], 经验指数 (a) 可反映土壤水分入渗能力的衰减速率^[25], 能够表征土壤入渗能力随入渗时间的变化过程。随着 BFA 添加量的增加, 经验系数 (K) 呈先减小后增大的变化趋势, 且均小于对照组, 经验指数 (a) 呈先增大后减小的变化趋势, 且均大于对照组, 表明添加 BFA 能够降低土壤水分入渗速率, 且随着 BFA 添加量的增加, 初始时的入渗速率呈先减小后增大、土壤水分入渗能力的衰减速率呈先增大后减小的变化规律。对于 Philip 入渗模型, 模型中的吸渗率 (S) 反映土壤依靠毛管力吸收或者放出水分的能力^[33]。随着 BFA 添加量的增加, 吸渗率 (S) 呈先减小后增大的变化趋势, 但都小于对照组, 表明添加 BFA 后土壤毛管作用力对土壤水分吸持能力呈现先降低后上升的变化规律。对于代数模型, 土壤水分特征曲线和非饱和导水率综合形状系数 (α) 是由累积入渗量和湿润锋深度的实测数据进行拟合得到, 能够反映累积入渗量对湿润锋深度变化的响应程度。随着 BFA 添加量的增加, 综合形状系数 (α) 呈先减小后增大的变化趋势, 但均小于对照组, 表明添加 BFA 后单位湿润锋深度的变化条件下累积入渗量的变幅均增大, 增幅随 BFA 添加量呈先增大后减小的变化规律, 亦即土壤持水量随 BFA 添加量的增加呈现先增大后减小的变化规律。

2.3 BFA 添加量对土壤剖面含水率的影响

不同 BFA 添加量入渗条件下, 不同土层深度 (0—30 cm) 土壤体积含水率变化见图 2。由图 2 可

知,土壤体积含水率随土层深度的增加而减少。由于入渗时间较长,入渗至 31 cm 土层深度处所需的最小时间为 180 min,最大时间为 420 min,表层土壤含水率最大且接近饱和含水率。不同 BFA 添加量条件下土壤体积含水率相比对照均有所增加,在 0—20 cm 土层范围内,BFA 添加量为 1,2,4,8 g/kg 的土壤平均体积含水率分别为 34.45%,36.00%,35.02%,33.57%,呈现出先增大后减小的变化趋势,相比对照处理分

表 1 Kostiakov、Philip、代数入渗模型参数拟合结果

添加量/ (g · kg ⁻¹)	Kostiakov 入渗模型			Philip 入渗模型		代数模型	
	经验	经验	决定	吸渗率	决定	综合形状	决定
	系数(K)	指数(a)	系数(R ²)	(S)	系数(R ²)	系数(α)	系数(R ²)
0(CK)	0.508±0.028a	0.471±0.005c	0.9951	0.578±0.003a	0.9983	0.453±0.020a	0.9845
1	0.438±0.001b	0.480±0.003b	0.9969	0.484±0.002c	0.9993	0.310±0.017c	0.9866
2	0.434±0.002c	0.496±0.006a	0.9986	0.443±0.001e	0.9997	0.265±0.010d	0.9948
4	0.430±0.012bc	0.490±0.006ab	0.9984	0.453±0.001d	0.9998	0.303±0.012c	0.9933
8	0.493±0.012a	0.484±0.002b	0.9987	0.532±0.002b	0.9994	0.381±0.024b	0.9804

注:表中数据为平均值±标准差;同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异达显著水平($p < 0.05$)。

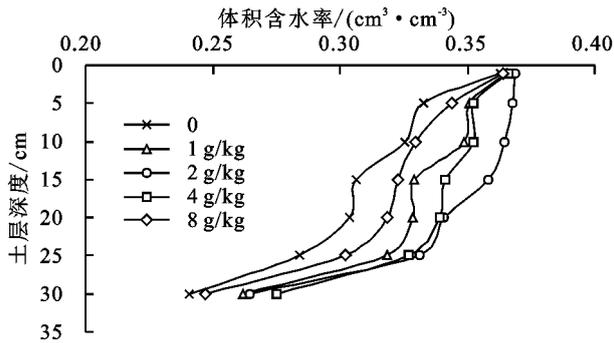


图 2 不同 BFA 添加量下土壤体积含水率分布

表 2 不同 BFA 添加量下土层持水效率

土层 深度/cm	持水效率/%			
	1 g/kg	2 g/kg	4 g/kg	8 g/kg
0—1	0.62±0.23b	1.57±0.34a	0.79±0.15b	0.31±0.07c
5—6	5.42±1.12b	10.50±2.17a	5.97±1.33b	3.42±0.91c
10—11	7.12±1.32b	12.02±1.91a	8.20±1.41b	1.20±0.74c
15—16	7.44±1.23c	17.01±2.31a	11.39±1.49b	5.29±1.03c
20—21	8.21±1.18b	12.15±2.11a	11.67±1.57a	4.83±1.01c
25—26	12.04±1.26b	16.58±2.37a	14.97±1.71ab	6.24±1.11c
30—31	13.05±2.56b	18.20±2.15a	14.34±3.82ab	2.70±1.39c

注:表中数据为平均值±标准差;同行数字后不同小写字母表示不同处理间差异达显著水平($p < 0.05$)。下同。

不同 BFA 添加量入渗条件下土壤体积含水率的变化响应了湿润锋深度和累积入渗量的变化,一方面是由于 BFA 自身较好的吸水性使得土壤中水稳性团聚体数量和非毛管孔隙数量增加,有利于土壤水分储存;另一方面,BFA 自身化学性质也发挥一定作用。当土壤呈碱性时,BFA 的酸性功能团释放出的 H⁺ 与 Ca²⁺ 和 Na⁺ 等盐基离子进行交换,H⁺ 与 OH⁻ 生成 H₂O,在降低土壤碱性的同时可使土壤保水透水性增强^[34],土壤吸持水量增加,提高了土壤体积含

别增加 1.82%,3.38%,2.39%,0.95%,且差异显著($p < 0.05$)。定义不同 BFA 添加量处理下一定土层深度内的土壤体积含水率与对照组土壤体积含水率之差和对照组土壤体积含水率的比值为土层持水效率。由表 2 可知,土层持水效率随土层深度的增大而增大,BFA 添加量为 2 g/kg 时土层持水效率最高,在 0—20 cm 土层范围内平均持水效率达 10.65%,且与 1,4,8 g/kg BFA 添加量处理差异显著($p < 0.05$)。

水率。但当 BFA 添加量过多时,土壤有机酸含量过大,可能影响土壤颗粒中离子的溶解,使砂质壤土中形成的细小颗粒减少,同时由于 BFA 吸膨作用增大土壤孔隙,导致水分传导度增加,土壤最大吸持水量发生变化^[35],因而在 4,8 g/kg BFA 添加量作用下的土壤含水率和持水效率虽有所增加,但增幅量降低。综上所述,不同 BFA 添加量均对土壤剖面含水率分布有显著影响,BFA 的添加能够改善土壤水分分布状况,提高土壤的保水持水能力,储存更多水分在作物根部的土层深度处。

2.4 BFA 添加量对土壤剖面含盐量的影响

由图 3 可知,不同 BFA 添加量下土壤剖面含盐量均随着土层深度的增加而增加。在 0—20 cm 土层,与对照相比,添加 1,2,4,8 g/kg BFA 的平均含盐量均比对照减小 0.99,1.42,0.70,0.27 g/kg,且差异显著($p < 0.05$);在 20 cm 以下土层,添加 1,2,4,8 g/kg BFA 的平均含盐量均比对照增加 6.71,4.75,5.81,2.74 g/kg,各处理间差异显著($p < 0.05$)。将添加 BFA 入渗下的土壤含盐量减去对照组土壤含盐量后与对照组含盐量的比值为负时,定义为相对脱盐率,反之为相对积盐率。由于各处理在 0—20 cm 土层范围内表现出含盐量减少的趋势,因此计算得出 0—20 cm 土层深度内不同 BFA 添加量入渗条件下的土壤相对脱盐率。由表 3 可知,在 0—20 cm 土层,添加 1,2,4,8 g/kg BFA 的平均相对脱盐率呈现出先增大后减小的变化趋势,平均相对脱盐率分别为 18.0%,36.3%,25.8%,8.6%,各处理之间差异显著($p < 0.05$)。

土壤水分入渗的过程也是土壤中溶质随水分迁移的过程,在初始条件相同的前提下,入渗历时的延

长使土壤溶质随着土壤水分的运动向土壤深层迁移而发生淋洗,淋洗程度由累积入渗量的大小和土壤离子的活动性强弱所决定^[36],水分在土壤中的渗透流速越慢,压盐、排盐效果越好^[37],此为盐碱地土壤中“以水压盐”降低土壤盐分的机理。0—20 cm 土层内不同 BFA 添加量下的含盐量均小于对照组,基本处于脱盐范围,这与水分入渗过程有关。不同添加量 BFA 作用于盐碱土后,土壤水分入渗历时相比对照均有所延长,在相同湿润锋深度处,添加 BFA 为 1, 2, 4, 8 g/kg 的累积入渗量均大于对照组 ($p < 0.05$),盐分随水分入渗的发生向土层深处迁移,且水分含量越大,盐分离子在水中溶解更充分,压盐效果越好,脱盐效率越高。刘小媛等^[38]亦研究发现,添加黄腐酸能够显著降低 0—10 cm 土层含盐量。此外,20 cm 以下土层的含盐量均大于对照组,这是由于上层盐分淋洗到下层后形成累积,致使更多盐分向湿润锋处迁移的结果。因此,添加 BFA 能够显著影响土壤水盐分布。

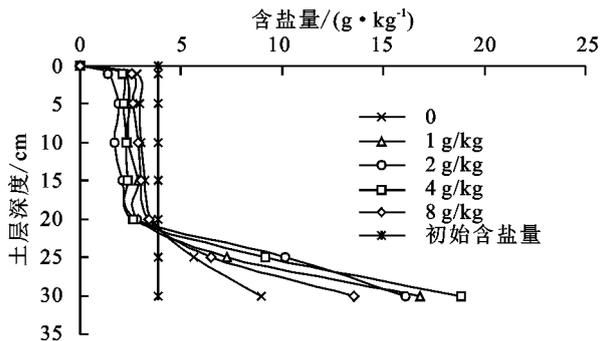


图 3 不同 BFA 添加量下土壤含盐量分布

表 3 不同 BFA 添加量入渗时的土壤相对脱盐率

土层 深度/cm	土壤相对脱盐率/%			
	1 g/kg	2 g/kg	4 g/kg	8 g/kg
0—1	24.0±8.2b	50.5±9.1a	25.7±1.4b	10.1±4.8c
2—5	18.6±4.9c	36.1±7.4a	25.9±1.9b	10.6±5.5c
6—10	21.5±3.7b	45.0±9.8a	25.2±2.1b	4.8±1.2d
11—15	9.7±5.1c	35.1±4.3a	25.7±2.0b	6.4±2.3c
16—20	17.2±1.6b	20.6±1.3a	16.2±1.9b	3.3±1.1c
0—20	18.0±1.7c	36.3±2.8a	25.8±4.9b	8.6±3.1d

2.5 BFA 添加量对 TEB 及其组成的影响

土壤交换性盐基总量 (TEB) 在很大程度上反映土壤尤其是非酸性土壤的保肥、缓冲能力,TEB 越高,代表土壤具有更多的 H^+ 交换位点与更强的缓冲能力^[39]。土壤交换性盐基离子 (K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}) 组成是评价土壤质量的重要指标,关系到植物的生长过程^[40],直接影响土壤中团粒结构的形成过程及团粒结构的组成分布状况^[41],其中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 可以改善土壤结构, K^+ 可以作为作物生长的必需营养元素^[42],而 Na^+ 含量的增加通常会破坏土壤的团粒结构,使土壤结构性变差,盐碱土中 Na^+ 含量降低有利于改善土壤结构,增强土壤透水性能。图 4 为不

同 BFA 添加量条件下 TEB 的剖面分布情况。由图 4 可知,在添加量为 2, 4 g/kg 时 TEB 逐渐增加,特别是在添加量为 2 g/kg 时差异极显著 ($p < 0.01$);但在添加量为 1, 8 g/kg 时 TEB 虽然表现出一定的增加趋势,但处理之间差异并不显著 ($p > 0.05$)。这可能与 TEB 组成 (包括 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+}) 的变化有关,选择与对照处理 TEB 含量差异最为显著的 2 g/kg 添加量处理进行分析 (图 5) 可知,在 0—30 cm 土层中,与对照组相比,在 2 g/kg 添加量处理下 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 平均浓度分别增加 20.94%, 9.54%, 10.54%, Na^+ 平均浓度减少 14.72%, 其中 Ca^{2+} 浓度相对最高,占 TEB 组成的 90% 以上。

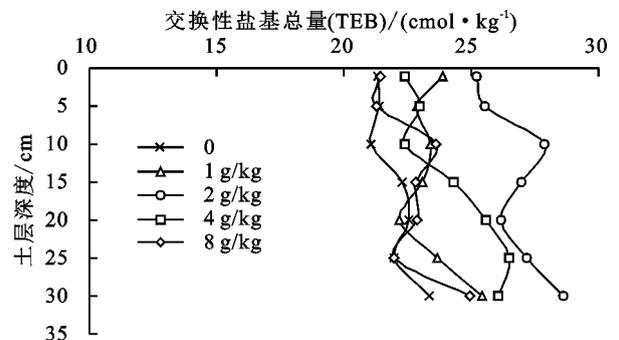


图 4 不同 BFA 添加量下土壤交换性盐基总量变化

TEB 及其组成的变化,一方面与 BFA 自身结构特性有关,其较大的比表面积为离子交换、吸附、络合等反应的发生提供了丰富的位点,在一定程度上能够促进盐基离子之间的交换;另一方面,与 BFA 的生理活性有关。有研究^[10,19]表明,BFA 是含有芳香结构和羧基、酚羟基等诸多基团的有机物质,其自身所拥有的含氧酸性官能团、离子交换结构和活泼的氢键结合体系使得 BFA 的化学和生物活性较高,作用于土壤中对土壤盐分组成中的阳离子能以离子键和共价键的形式起到吸附和离子交换的作用。由于土壤胶体表面吸附着的阳离子一般可被其他类型的阳离子交换而从胶体表面解吸,置换能力顺序为 $Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$,因此添加 BFA 可能促进 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 与有害离子 Na^+ 的置换作用,其中以 Ca^{2+} 为主,将钠胶体转变为钙胶体,该转变过程以间接提供二价阳离子源 (Ca^{2+}) 来置换土壤胶体中的交换性 Na^+ ,有利于土壤胶体进一步发生凝聚^[29,43];同时本研究中当 BFA 添加量为 8 g/kg 时,TEB 及其组成含量与对照组相比差异并不显著 ($p > 0.05$),说明该转变过程可能并非随着 BFA 添加量的增加而愈加明显。另外, Na^+ 浓度的降低也可作为对土壤表层盐分含量减少的解释,郑敏娜等^[44]亦研究表明,添加黄腐酸能降低土壤中 Na^+ 含量。

当具备良好结构特性和更高生理活性的 BFA 作用于盐碱土后,土壤胶体上的交换性 Ca^{2+} 浓度增加,

交换性 Na^+ 浓度降低,这可能与 BFA 促进土壤胶体上阳离子的置换作用有关,使得土壤 TEB 得到提高。结合在盐碱土中添加 BFA 能够延长土壤水分入渗历时,增大土壤累积入渗量和降低土壤表层含盐量的

显著效果,表明 BFA 在增强盐碱化土壤保肥和缓冲能力,以及改善土壤水盐分布等方面具有积极作用,从而为 BFA 改良盐碱化土壤和提升土壤质量提供理论参考。

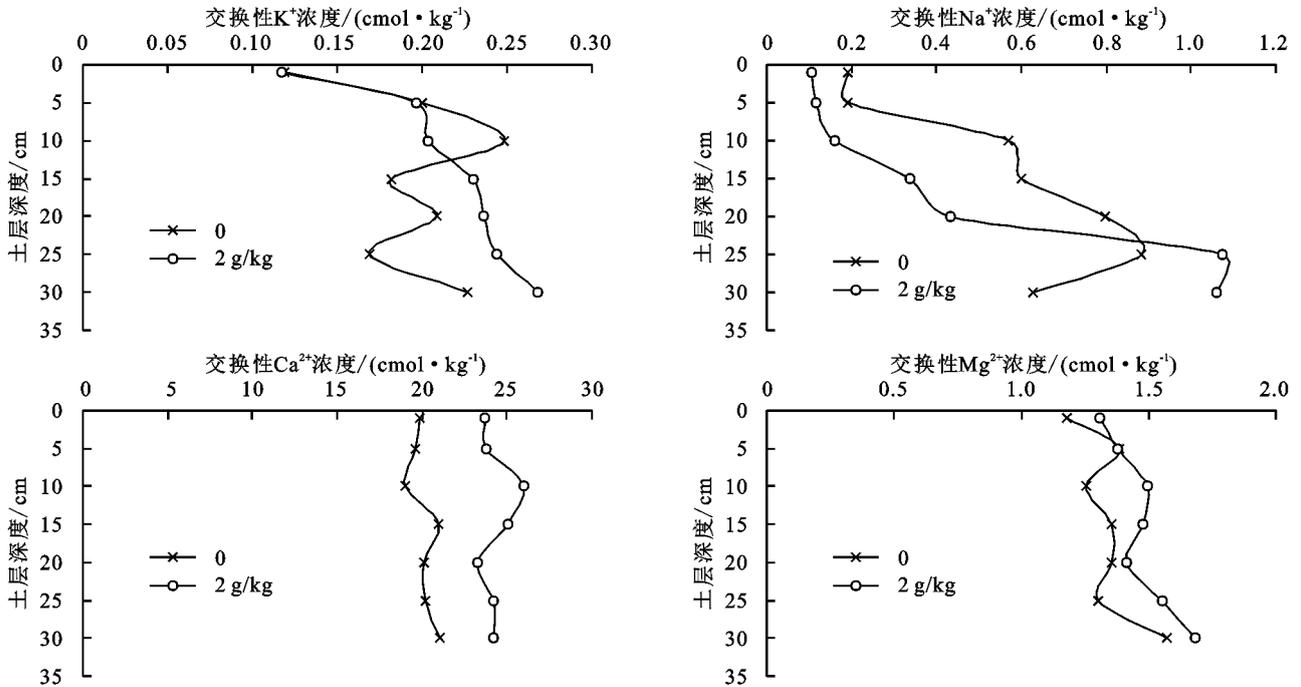


图 5 2 g/kg BFA 添加量时土壤交换性盐基离子变化

3 结论

(1)在盐碱土中添加 BFA 能够显著影响土壤水盐运移特征和影响入渗模型参数。当对照组入渗至 31 cm 时,BFA 为 1,2,4,8 g/kg 添加量处理的湿润锋深度相比对照组分别减少 26.07%,34.98%,31.35%,13.86%;全部试验土柱入渗至 31 cm 时,BFA 为 1,2,4,8 g/kg 添加量处理的累积入渗量相比对照分别增加 12.36%,14.75%,9.08%,5.17%。Kostiakov 模型、Philip 模型和代数模型参数中经验系数(K)、吸渗率(S)和综合形状系数(α)均小于对照处理,经验指数(a)均大于对照处理。

(2)在盐碱土中添加 BFA 能够改善土壤水盐分布状况,对盐碱土具有较好的保水和脱盐效果。与对照相比,添加 BFA 均能提高土壤持水效率和相对脱盐率,在 2 g/kg BFA 添加量条件下,0—20 cm 土层内土壤平均体积含水率提高 3.38%,平均持水效率提高 10.65%,相对脱盐率提高 36.32%。

(3)在盐碱土中添加 BFA 后土壤 TEB 显著增加,能够显著改善土壤交换性盐基离子组成,提升土壤质量。BFA 促进土壤中交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 与有害离子 Na^+ 的置换作用,在 2 g/kg 添加量时交换性 Ca^{2+} 平均浓度增加 20.94%,交换性 Na^+ 平均浓度减少 14.72%。

参考文献:

- [1] 王倩姿,王玉,孙志梅,等.腐植酸类物质的施用对盐碱地的改良效果[J].应用生态学报,2019,30(4):1227-1234.
- [2] 于宝勒.盐碱地修复利用措施研究进展[J].中国农学通报,2021,37(7):81-87.
- [3] Muscolo A, Sidari M, Nardi S. Humic substance: Relationship between structure and activity. Deeper information suggests univocal findings[J].Journal of Geochemical Exploration,2013,129:57-63.
- [4] Kluáková M. Conductometric study of the dissociation behavior of humic and fulvic acids [J]. Reactive and Functional Polymers,2018,128:24-28.
- [5] 李秀颖,叶华,刘变变,等.矿源黄腐酸的提取工艺研究[J].腐植酸,2016(5):24-27.
- [6] 张萌欣,薛胜平,王晓环,等.黄腐酸应用概述及研究课题展望[J].腐植酸,2020(5):15-19,26.
- [7] 李文新,史清琪.生化黄腐酸 BFA 可持续发展的新支点[J].科技与经济画报,2002(3):31-33.
- [8] 杨晓玲,朱京涛,张建文.生化黄腐酸的提取及其理化性质的研究[J].吉林农业大学学报,2003,25(1):18-20,23.
- [9] 李志鹏,刘浩,于晓娜,等.黄腐酸对植烟土壤改良及烟叶品质的影响研究[J].土壤通报,2016,47(4):914-920.
- [10] Liu X Y, Yang J S, Tao J Y, et al. Elucidating the effect and interaction mechanism of fulvic acid and nitrogen fertilizer application on phosphorus availability

- in a salt-affected soil [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21: 2525-2539.
- [11] Li W P, Yao H, Chen K Q, et al. Effect of foliar application of fulvic acid antitranspirant on sugar accumulation, phenolic profiles and aroma qualities of *Cabernet Sauvignon* and *Riesling* grapes and wines [J]. *Food Chemistry*, 2021, 351: e129308.
- [12] Li Z L, Liu Z G, Zhang M, et al. The combined application of controlled-release urea and fulvic acid improved the soil nutrient supply and maize yield [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2021, 67(5): 633-646.
- [13] Zhang Y J, Zhou Q L, Li Y M, et al. Effects of fulvic acid on agronomic traits and yield of autumn potato [J]. *Agricultural Science and Technology*, 2017, 18(8): 1448-1451.
- [14] Qin Y, Zhu H, Zhang M, et al. GC-MS analysis of membrane-graded fulvic acid and its activity on promoting wheat seed germination [J]. *Molecules*, 2016, 21(10): 1363-1373.
- [15] Xu D D, Deng Y Z, Xi P G, et al. Fulvic acid-induced disease resistance to *Botrytis cinerea* in table grapes may be mediated by regulating phenylpropanoid metabolism [J]. *Food Chemistry*, 2019, 286: 226-233.
- [16] 任焯静. 生化黄腐酸在石油烃污染土壤修复中的应用研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2018.
- [17] 吴军虎, 李玉晨, 邵凡凡, 等. 生化黄腐酸对土壤物理性质及水分运动特性的影响 [J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 159-164, 171.
- [18] 杨宇, 金强, 卢国政, 等. 生化黄腐酸土壤改良剂对菜田盐碱土壤理化性质的影响 [J]. *北方园艺*, 2010(5): 45-46.
- [19] 成绍鑫. 生化黄腐酸与其他来源黄腐酸组成性质的初步比较 [J]. *腐植酸*, 2009(2): 1-8, 20.
- [20] 王智, 张惠芬, 秦谊, 等. 矿源黄腐酸与生化黄腐酸热裂解组分的对比研究 [J]. *腐植酸*, 2020(5): 20-26.
- [21] 卢维宏, 张乃明, 张丽, 等. 增效肥料对设施栽培小白菜生长及土壤酶活性的影响 [J]. *南方农业学报*, 2019, 50(9): 2022-2028.
- [22] 张春练, 娄奥林, 曾令强, 等. 矿源黄腐酸和生化黄腐酸异同以及作用机理浅析 [J]. *安徽化工*, 2021, 47(5): 55-57.
- [23] 赵子珍, 尹雪峰. 同朔地区风蚀沙化盐碱地造林技术 [J]. *内蒙古林业调查设计*, 2012, 35(5): 60-61.
- [24] 哈丽代姆·居麦, 宁松瑞, 王全九, 等. 施加 PAM 与 CMC 对土壤水分入渗与蒸发特征的影响 [J]. *水土保持学报*, 2020, 34(1): 121-127, 134.
- [25] 史文娟, 梁嘉平, 陶汪海, 等. 添加 γ -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.
- [26] 王全九, 张继红, 谭帅. 微咸水入渗下施加 PAM 土壤水盐运移特性研究 [J]. *土壤学报*, 2016, 53(4): 1056-1064.
- [27] 李科, 李志军. 土壤农化分析方法 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2019.
- [28] 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.
- [29] 吴军虎, 陶汪海, 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.
- [30] 王全九, 邵明安, 郑纪勇. 土壤水分运动与溶质迁移 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [31] 孙燕, 朱梦杰, 王全九, 等. 加氧微咸水溶氧量对土壤水盐运移特征的影响 [J]. *农业机械学报*, 2019, 50(6): 299-305.
- [32] 杜作勇, 庾先国, 王彦惠, 等. 腐殖酸对 U(VI) 的吸附机理研究 [J]. *环境化学*, 2019, 38(8): 1768-1774.
- [33] 付秋萍, 王全九, 樊军. 盘式吸渗仪吸渗率计算方法比较 [J]. *农业机械学报*, 2009, 40(9): 56-62.
- [34] 孙在金. 脱硫石膏与腐植酸改良滨海盐碱土的效应及机理研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2013.
- [35] 王春霞, 王全九, 吕廷波, 等. 添加化学改良剂的砂质盐碱土入渗特征试验研究 [J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 31-35.
- [36] Nandagiri L, Prasad R. Relative performances of textural models in estimating soil moisture characteristic [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1997, 123(3): 211-214.
- [37] 吕桂军, 康绍忠, 张富仓, 等. 盐渍化土壤不同入渗条件下水盐运动规律研究 [J]. *人民黄河*, 2006(4): 52-54.
- [38] 刘小媛, 杨劲松, 姚荣江. 化肥减量配施黄腐酸降低盐渍农田 NaCl 含量提高氮磷养分有效性的协同效应 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(8): 1339-1350.
- [39] 温军, 王晓丽, 王彦龙. 长江源区 3 种地形高寒草地土壤阳离子交换量和交换性盐基离子的分布特征及其机理探讨 [J]. *生态环境学报*, 2019, 28(3): 488-497.
- [40] 曾路生, 高岩, 李俊良, 等. 寿光大棚土壤团聚体中交换性盐基离子组成与土壤团聚性关系 [J]. *水土保持学报*, 2011, 25(5): 224-228, 233.
- [41] 袁俊吉, 蒋先军, 胡宇, 等. 不同植被覆盖对养分在土壤水稳性团聚体中分布特征的影响 [J]. *水土保持学报*, 2009, 23(6): 112-117, 122.
- [42] 周少丽, 贺燕, 杨亚婷. 黄腐酸对铜(II)的吸附行为及吸附机理的研究 [J]. *应用化工*, 2010, 39(2): 244-246, 250.
- [43] 韩晓日, 蒋海英, 郭春雷, 等. 施用新型多元素螯合肥对玉米产量、养分吸收与利用的影响 [J]. *沈阳农业大学学报*, 2016, 47(2): 159-165.
- [44] 郑敏娜, 梁秀芝, 韩志顺, 等. 不同措施对苏打型盐碱土土壤盐分淋洗特征的影响 [J]. *山西农业科学*, 2021, 49(3): 318-323.