生物炭基盐渍土改良剂的制备及其改良效果

辛世纪[1,2,3], 张 一[1,2,3], 窦孟杰[1], 孙晓阳[1], 王 薇[1,2], 贾宏涛[2,3,4]
(1.新疆农业大学 资源与环境学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2.新疆农业大学 生物炭工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3.新疆土壤与植物生态过程重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052; 4.新疆农业大学 生命科学学院/土壤生物学研究室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘 要: [目的]探究不同生物炭基复合改良剂配比对盐渍土盐分淋洗与盐分离子迁移的调控效应,并从微观孔隙结构演变角度揭示其作用机理,为盐渍化地区治理提供理论依据和技术支持。[方法]设计不同生物炭与有机肥复合配比的盐渍土改良剂,通过圆盘造粒法制备。设置生物炭:有机肥:助剂分别为TJ_1(2:5:3),TJ_2(4:3:3),TJ_3(6:1:3)3种复合改良剂处理,单一组分处理CBC(7:0:3)与COF(0:7:3),助剂对照CA及空白对照CK,共7个处理。模拟常规灌溉条件进行土柱淋洗试验,结合X射线显微CT(分辨率27.73 μm)三维重构技术,量化分析土壤孔隙特征与脱盐效率的关系。[结果]①CT扫描证实,复合造粒改良剂显著重塑了土壤微观物理结构。最优处理TJ_2的大孔隙(>0.50 mm)度达到3.60%,是CK的9.47倍,且形成了发达的纵向连通孔隙网络,为可溶性盐分快速淋洗提供了物理通道。②所有改良剂均能显著增强盐渍土盐分淋洗能力,提高脱盐率,与CK相比显著促进Na^+,Cl^-和SO_4^{2-}等主要有害盐分的迁移淋失。③试验表明,复合改良剂总体优于单一组分与助剂对照,所有改良剂处理均降低EC和SAR。其中生物炭:有机肥:助剂为4:3:3表现最优,总脱盐率达49.74%,显著高于其他处理;在0—20 cm土层,生物炭:有机肥:助剂为4:3:3对盐分离子去除效果最显著,Na^+和Cl^-残留量较CK分别降低62.60%和65.76%;同时EC降至331 μS/cm,较CK下降44.15%,SAR降至0.98,较CK降低47.03%。[结论]生物炭与有机肥复配可显著提升脱盐率和促进主要有害盐分离子淋洗,其中生物炭:有机肥:助剂为4:3:3表现最优,对新疆盐渍土的治理效果最佳。

关键词: 土壤改良剂; 生物炭; 盐渍土; 土柱淋溶
文献标识码: B **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0258-12 **中图分类号:** S156.4

文献参数: 辛世纪, 张一, 窦孟杰, 等.生物炭基盐渍土改良剂的制备及其改良效果[J].水土保持通报, 2026,46(5):258-269. Xin Shiji, Zhang Yi, Dou Mengjie, et al. Preparation of biochar-based salt-affected soil amendments and their amelioration effects [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(5):258-269.
DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.017 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.05.017**

Preparation of biochar-based salt-affected soil amendments and their amelioration effects

Xin Shiji[1,2,3], Zhang Yi[1,2,3], Dou Mengjie[1], Sun Xiaoyang[1], Wang Wei[1,2], Jia Hongtao[2,3,4]
(1.*College of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang* 830052, *China*; 2.*Biochar Engineering Technology Research Center, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang* 830052, *China*; 3.*Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes, Urumqi, Xinjiang* 830052, *China*; 4.*College of Life Sciences/Laboratory of Soil Biology, Xinjiang Agricultural University, Urumqi , Xinjiang* 830052, *China*)

Abstract: [Objective] This study was conducted in order to investigate the regulatory effects of different biochar-based composite amendment ratios on salt leaching and ion migration in salt-affected soil, and reveal the underlying mechanisms from the perspective of microscopic pore structure evolution, and to provide a theoretical basis and technical support for the management of salt-affected areas. [Methods] Biochar-organic fertilizer composite amendments with different ratios were designed and prepared via disc granulation in the present study.

收稿日期:2026-01-07 **修回日期:**2026-03-16 **采用日期:**2026-03-21
资助项目:新疆维吾尔自治区重点研发专项子课题"农林废弃物生物碳基肥研发"(2022B02013-3-1); 新疆土壤与植物生态过程重点实验室开放基金项目(24XJTRZWY01); 新疆维吾尔自治区"三农"骨干培养项目(2023SNGGGCC002)
第一作者:辛世纪(1999—),男(汉族),新疆维吾尔自治区沙湾市人,硕士研究生,研究方向为盐渍土改良。Email:xsj9012@163.com。
通信作者:贾宏涛(1975—),男(汉族),陕西省高陵区人,博士,教授,主要从事土壤环境质量与安全相关研究。Email:jht@xjau.edu.cn。

Seven treatments were established: three composite amendment treatments with biochar: organic fertilizer: additive ratios of 2∶5∶3 (TJ_1), 4∶3∶3 (TJ_2), and 6∶1∶3 (TJ_3); two single-component treatments, 7∶0∶3 (CBC) and 0∶7∶3 (COF); an additive control (CA); and a blank control (CK). A soil column leaching experiment was conducted under simulated conventional irrigation conditions. The relationship between soil pore characteristics and desalination efficiency was analyzed using X-ray micro-computed tomography (micro-CT, resolution 27.73 μm) and three-dimensional (3D) reconstruction techniques. [Results] ① Results of CT scanning confirmed that the composite granulated amendments significantly reshaped the soil microphysical structure. The optimal treatment, TJ_2, achieved a macroporosity (>0.50 mm) of 3.60%, which was 9.47 times that of CK. TJ_2 formed a well-developed, longitudinally connected pore network, providing physical channels for the rapid leaching of soluble salts. ② All amendments significantly increased the salt leaching capacity and desalination rate. Compared with CK, these amendments improved the migration and leaching of major harmful ions (e.g., Na^+, Cl^-, and SO_4^{2-}). ③ All amendment treatments reduced EC and SAR, and the composite amendments generally outperformed the single-component treatments and the additive control. The total desalination rate of the TJ_2 treatment was significantly higher than that of other treatments, with the highest value of 49.74%. At a soil depth of 0—20 cm, the TJ_2 treatment showed the most significant removal of salt ions. The residual Na^+ and Cl^- contents were reduced by 62.60% and 65.76%, respectively, compared with CK. Similarly, EC decreased to 331 μS/cm, representing a reduction of 44.15%, and SAR decreased to 0.98, representing a reduction of 47.03%, compared with CK. [Conclusion] The co-application of biochar and organic fertilizer significantly improves desalination rates and facilitates the leaching of major harmful salt ions. The biochar: organic fertilizer: additive ratio of 4∶3∶3 yields the optimal performance and shows the best remediation effect on salt-affected soils in Xinjiang.

Keywords: soil amendment; biochar; salt-affected soil; soil column leaching

全球约有 1.38×10^9 hm^2 的土地受到盐渍化影响,占陆地面积的10.7%,主要分布在干旱和半干旱地区[1]。最新预测表明,到21世纪中叶,全球超过50%的农业用地将面临盐渍化导致的退化风险[2]。新疆维吾尔自治区是中国农业和棉花生产最关键的地区之一,其典型的温带大陆性干旱气候与广泛的灌溉农业,也使其成为土壤盐渍化的重灾区。据统计,新疆盐渍化土地面积约占全区总耕地面积的30.85%[3],土壤盐渍化会导致土壤肥力降低,破坏土壤的理化性质,降低农田土壤的透气性和渗透性,盐渍土壤中的钠离子、镁离子破坏植物细胞,降低光合作用,导致作物的生长受到抑制,农作物产量下降[4]。然而,全球盐碱化面积仍在以每年10%的速度增长,这将持续影响作物生产力[5]。因此,迫切需要寻求适用于新疆地域特点的高效、低成本的盐渍土改良技术来解决土壤盐渍化导致的作物减产问题。

盐渍土修复改良与利用包含两个关键步骤:改善土壤质量以及通过淋洗去除表耕层土壤中过量的盐分。淋洗是指水分在土壤剖面中渗透,将盐分带离根区。为实现这一目标,必须改善盐渍化土壤的物理和水力特性,从而提高其淋洗潜力,即盐分从根区被移除的效率。为改良土壤性质,常施加各类有机和无机改良剂,如动物粪便、菌剂、有机肥、堆肥和生物炭等[6-7]。有研究[8]发现,生物炭改良剂自身携带的无机物成分(如K^+,Ca^{2+},Mg^{2+})与盐碱土中的Na^+发生置换作用,使得盐渍土中Na^+含量及其比例降低,土壤结构发生变化。生物炭因其高比表面积和低密度而改善土壤通气性,增加大孔隙比例和促进盐分浸出的能力而受到关注[9]。它减少了可溶性Na^+,增加了Ca^{2+}和Mg^{2+}的含量,并丰富了土壤有机质和养分,从而减轻了作物盐胁迫[10],使土壤溶液中Ca^{2+}浓度上升以及容重、电导率(EC)和钠吸附比(SAR)的降低,促进了Na^+从土壤剖面的淋失[11]。例如,施用0.5%(质量比)的猪粪、棉秆和玉米秸秆生物炭能显著促进土壤盐分的洗脱和脱盐速率[12]。在河套灌区盐碱土田间试验中,常规施肥+有机土壤改良剂+复合土壤改良剂在改善土壤理化性质方面优于常规施肥或单添加有机肥[13]。Shaygan等[14]的一项土柱研究表明,对于粉砂壤土,添加20%(质量比)木屑在促进盐分淋洗和降低表层盐度方面优于40%(质量比)细砂。而哈茨木霉菌配施有机肥协同使用可产生更优结果,有效改善土壤结构促进修复土壤[15],从而降低土壤耕作层盐分,促进作物生长。

目前对使用单一材料改良盐渍土的效果及原理关注较多,但对不同材料组合改良剂的研发以及改

良效果与离子组成变化关注较少。因此,本研究旨在探明在模拟大田常规灌溉条件下:①引入显微CT技术,量化分析改良剂对土壤三维孔隙结构的重塑特征,揭示“结构-过程”的耦合机理;②加入不同改良剂时,盐渍化土壤盐分淋洗与脱盐过程的特征及差异;③了解淋洗脱盐过程中,不同盐分离子淋洗运移的特点;④寻找改善盐渍土的最佳物料组合:考虑淋滤潜力和达到的土壤质量。本研究结果可为盐渍化地区治理提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

该试验于2025年5月在新疆农业大学农科楼试验地开展。供试土壤采自新疆沙湾市144团新疆农业大学棉花教学科研基地(85°40′39″E,44°26′20″N)。该地区降水稀少,日照充足,全年蒸发量高达1 900 mm。供试土壤类型为灰漠土,质地属壤土。其中土壤剖面(0—20 cm)土壤可溶性总盐含量为5.40 g/kg,土壤pH值为8.44,电导率为1 516 μS/cm,Ca^{2+},Mg^{2+},Na^{+}和K^{+}含量分别是0.55,0.23,0.63和0.12 g/kg;HCO_3^-,Cl^-和SO_4^{2-}含量分别为0.05,0.19和2.27 g/kg。根据新疆维吾尔自治区地方标准《盐渍土分类与分级》(DB65/T 3189—2010),属于中度盐渍土。

1.2 供试材料

1.2.1 生物炭基改良剂

本试验设置TJ_1,TJ_2,TJ_3,CBC,COF,CA及CK共7个处理。除CK外,各处理改良剂中助剂质量比固定为30%,其余部分由生物炭/有机肥构成;各处理改良剂按土壤质量2%施用并充分混匀。3种复合改良剂中生物炭、有机肥和助剂质量配比分别为TJ_1=2∶5∶3,TJ_2=4∶3∶3,TJ_3=6∶1∶3;单一材料处理中生物炭、有机肥和助剂质量配比分别为CBC=7∶0∶3,COF=0∶7∶3。CA处理为助剂单施对照,按惰性填充物∶助剂=7∶3。CK为空白对照,不施加改良剂。所有改良剂均通过圆盘造粒法制备,其主要原材料包括:生物炭:以棉花秸秆为原料,在限氧条件下于500 ℃热解1 h制备;有机肥:商品羊粪有机肥,购自施可得塞拉(中国)有限公司;助剂:为固定配方,包含微生物菌剂(枯草芽孢杆菌、哈茨木霉,购自山东君德生态科技有限公司)、黏合剂(膨润土,由新疆心连心能源化工有限公司提供)和无机肥(尿素与磷酸二氢钾,购自天津市致远化学试剂有限公司)。供试生物炭基本理化性质:pH值为10.87,电导率为7.47 mS/cm,全碳含量为55.52%。供试有机肥基本理化性质:pH值为8.55,有机质为45%。复合改良剂的盐分离子本底值详见表1。

制备时,按固定质量比精确称取各组分,置于HBY-300型包衣抛光机(瑞安市瀚博机电有限公司)中。喷洒少量去离子水,滚动造粒后,筛分粒径为2.00~4.75 mm的颗粒,于40 ℃下烘干48 h,密封保存备用。各处理成品改良剂的可溶性盐分离子含量详见表1。

表1 供试改良剂中主要可溶性盐分离子质量浓度

Table 1 Mass concentrations of major soluble salt ions in tested amendments 单位:g/kg

处理组	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	SO_4^{2-}	Cl^-	HCO_3^-
TJ_1	2.21±0.11^{b}	3.67±0.18^{b}	1.92±0.10^{c}	7.27±0.36^{a}	9.76±0.49^{b}	3.19±0.16^{b}	10.84±0.54^{b}
TJ_2	1.41±0.07^{c}	2.26±0.11^{c}	1.43±0.07^{d}	6.01±0.30^{c}	6.11±0.31^{c}	1.86±0.09^{c}	6.64±0.33^{c}
TJ_3	0.67±0.03^{d}	0.93±0.05^{d}	0.57±0.03^{e}	4.31±0.22^{d}	2.65±0.13^{d}	0.88±0.04^{d}	2.96±0.15^{d}
CBC	0.12±0.01^{e}	0.03±0.00^{e}	3.71±0.19^{a}	3.71±0.19^{e}	0.90±0.05^{e}	0.18±0.01^{e}	0.83±0.04^{e}
COF	3.36±0.17^{a}	5.62±0.28^{a}	2.65±0.13^{b}	6.55±0.33^{b}	12.59±0.63^{a}	4.36±0.22^{a}	14.57±0.73^{a}
CA	0.11±0.01^{e}	0.02±0.00^{e}	0.29±0.01^{f}	3.63±0.18^{e}	0.89±0.04^{e}	0.17±0.01^{e}	0.84±0.04^{e}

注:①数值为平均值±标准误;②不同小写字母表示处理间差异显著(p<0.05)。

1.3 淋溶方案设计

根据自然土壤剖面层次与厚度,严格控制土壤容重为1.40 g/cm^{3}装填土柱。称取所需土壤(<5 mm),依次从底部开始装填PVC管土柱(内径d=10 cm,高度h=50 cm),为降低边际效应和水土流失,在土柱底部放置2 cm厚石英砂(<2 mm)和两层滤纸。管壁周围均匀涂抹薄层凡士林,防止优势流产生。每次装填厚度为5 cm,分层界面处用毛刷处理,以消除分层界面。棉花等主要农作物的根系主要集中在0—40 cm的土壤剖面内,确定装土高度为40 cm。其中0—20 cm表层土壤,各改良剂按照质量比2%与土壤混合均匀后装填土柱,每个处理3次重复。土柱底部用PVC板密封,中间留2 mm孔连接硬塑管,下方放置500 ml烧杯承接淋洗液。用医用输液器向土柱滴加去离子水,保持约2 cm的静水头,根据新疆沙湾田间常规滴灌总量3 420 m^3/hm^2,确定土柱模拟总灌水

量为2 400 ml,每7 d淋溶1次,每次收集淋洗液400 ml,每处理3个重复,每次收集淋洗液测量电导率。根据淋洗液电导率变化规律,参照岳燕等[7]研究的具体方法,以CK第1批淋洗液EC为初始值,当EC较初始值下降32%与55%时分别作为急降(P_1)与缓降(P_2),缓降(P_2)与稳定(P_3)的分界点;据此定义1—2批为急降(P_1)阶段,第3—4批为缓降(P_2),第5—6批为稳定(P_3)阶段。当淋洗液电导率相邻批次值趋于稳定时停止试验。试验结束后测得淋洗液电导率,3阶段淋洗液主要水溶性盐分离子,0—20 cm与20—40 cm土层主要可溶性盐分离子。

1.4　测定方法

淋出液电导率直接测定,土壤电导率采用水土比5∶1浸提电位法测定;土壤与浸出液Ca^{2+},Mg^{2+}采用EDTA络合滴定法测定;K^+,Na^+采用火焰光度计法测定;HCO_3^-采用中和滴定法测定;SO_4^{2-}采用EDTA间接滴定法测定;Cl^-采用硝酸银滴定法测定[16];土壤钠吸附比(SAR)根据Ca^{2+},Mg^{2+},Na^+质量浓度进行计算,计算前统一换算为当量浓度[17]。

土壤孔隙结构测定与分析方法:淋洗试验结束后,为无损观测土壤微观结构的变化特征,选取各处理(CK,TJ_1,TJ_2,TJ_3,CBC,COF及CA)0—20 cm土层原状土柱进行X射线计算机断层扫描(X-ray Computed Tomography, CT)。采用CT-1000桌面型X射线显微CT扫描仪(天津三英精密仪器股份有限公司),设定工作电压为80 kV,电流为150 μA。扫描过程中,土柱在旋转台上旋转360°,探测器采集投影数据,有效体素分辨率(Voxel resolution)设定为27.73 μm。获得原始投影数据后,利用图像处理软件Dragonfly进行三维重构与数字化分析。为消除边缘效应,在重构体中央选取13.85 mm×13.85 mm×13.85 mm的立方体作为感兴趣区域(region of interest, ROI)。

采用最大类间方差法(Otsu algorithm)确定灰度阈值,将图像分割为土壤固相和孔隙相。基于分割后的二值化图像,利用球状模型算法提取并计算总孔隙度及不同等效孔径(equivalent diameter)的孔隙分布特征。参考相关研究,将监测孔隙划分为3级:大孔隙(>0.50 mm)、中孔隙(0.20~0.50 mm)和小孔隙(0.06~0.20 mm)。

脱盐率计算方法:

$$R_{total}=\frac{\sum M_{leached}}{M_{soil_initial}+M_{amendment}} \tag{1}$$

式中:$\sum M_{leached}$为土柱淋洗液中排出的可溶性盐总量(g);$M_{soil_initial}$为土壤初始可溶性盐总量(g);$M_{amendment}$为改良剂带入可溶性盐总量(g)。

单批脱盐率计算公式为

$$R_n=\frac{M_{leached_n}}{(M_{soil_initial}+M_{amendment})-\sum_{i=1}^{n-1}M_{leached_i}} \tag{2}$$

式中:$M_{leached_n}$为第n批次淋洗液中可溶性盐分总量(g);$M_{soil_initial}$为土壤初始可溶性盐总量(g);$M_{amendment}$为改良剂带入可溶性盐总量(g);$\sum_{i=1}^{n-1}M_{leached_i}$为前$n$-1批次累计排出的盐分总量(g)。

1.5　数据统计

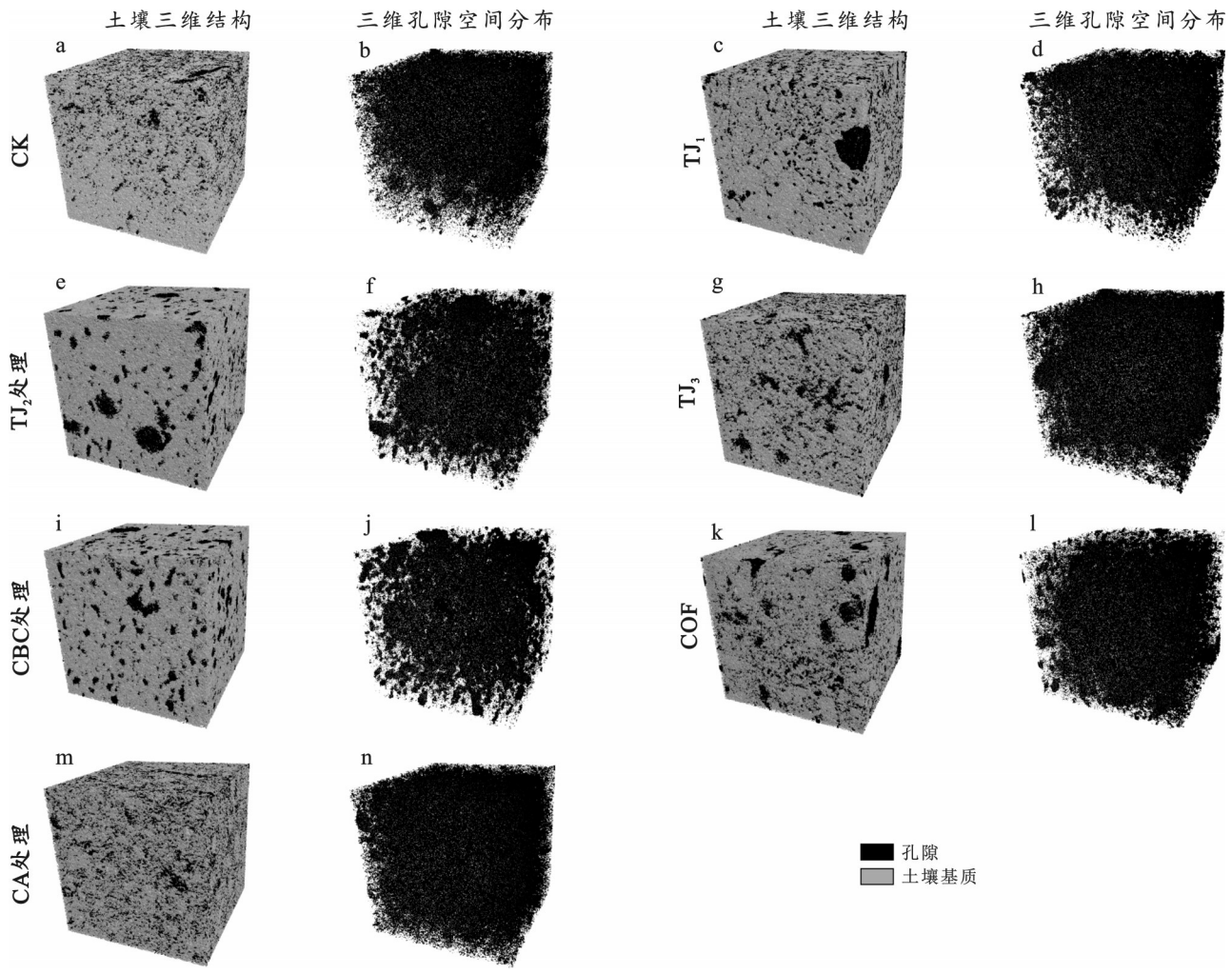
采用Excel 2019对数据进行统计;采用R语言统计包中的agricolae包进行LSD多重比较($p<0.05$);采用OriginPro 2024与Dragonfly进行绘图。

2　结果与分析

2.1　不同生物炭基改良剂对土壤微观孔隙结构的影响

土壤孔隙的空间形态与分布是驱动水分入渗和盐分淋洗的物理基础。基于CT扫描的三维重构结果如图1所示,CK处理(图1a)的土壤内部结构高度致密,可视化的孔隙数量极少且分布零散,主要以孤立的闭合孔隙为主,缺乏连通性,表现出明显的板结特征。相比之下,添加改良剂的处理(图1c—1n)均在不同程度上改善了土体内部孔隙结构。TJ_2处理(图1c)在三维视图中表现出较为发达的孔隙网络形态,孔隙分布更加丰富。TJ_3与CBC处理也增加了孔隙数量,但在孔隙发育程度及大孔隙分布方面整体弱于TJ_2处理。

进一步对孔隙结构进行量化分析(图2),结果表明改良剂显著改变了土壤的孔径分布。总孔隙度方面,各处理表现为:TJ_2>TJ_3>TJ1>CBC>COF>CA>CK。TJ_2处理的总孔隙度较CK显著提升了70.89%。大孔隙(>0.50 mm)孔径范围通常被认为是土壤通气透水和盐分快速淋洗的主要通道。结果表明,TJ_2处理的>0.50 mm孔隙度高达3.60%,是CK的9.47倍,同时也显著高于单一生物炭处理CBC和单纯有机肥处理COF。TJ_1和TJ_3的大孔隙度分别为1.94%和2.03%,均低于TJ_2。值得注意的是,在0.06~0.20 mm的小孔隙范围内,CK处理的比例最高,为1.34%;而TJ_2处理最低,为0.43%。



注:三维孔隙空间图像和孔隙网络模型选取区域尺寸(ROI)为13.85 mm×13.85 mm×13.85 mm。

图1 不同改良剂处理下土壤孔隙结构的三维重建特征

Fig.1 Three-dimensional reconstruction characteristics of soil pore structure under different amendment treatments

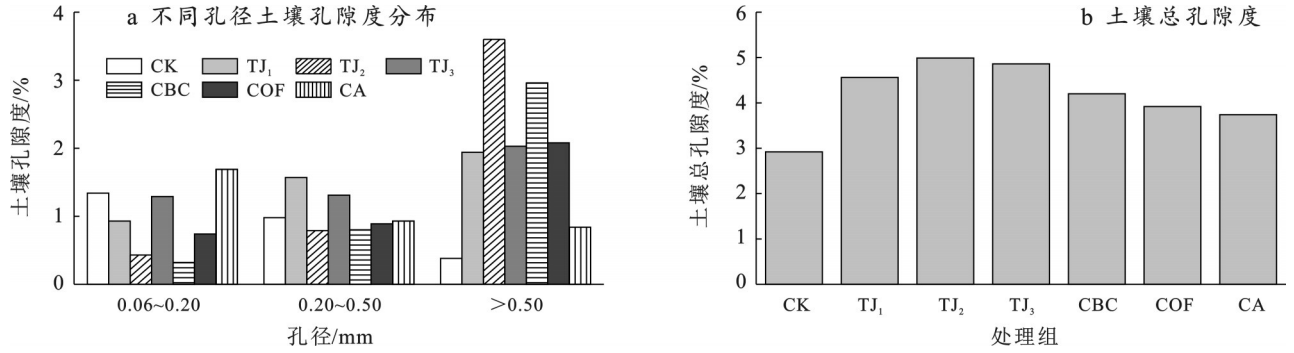


图2 不同改良剂处理对孔径分布及土壤孔隙度的影响

Fig.2 Effects of different amendments on soil porosity and pore size distribution

2.2 不同生物炭基改良剂对单批脱盐率与淋洗液电导率的影响

如图3所示,随着淋洗次数的增加,所有处理的淋洗液EC值均随淋洗批次的增加而持续下降。CK处理EC值从第1批的10.25 mS/cm下降至第6批的3.39 mS/cm,这表明单纯的去离子水淋洗能有效洗脱土柱中的可溶性盐分。施加改良剂的处理组,其各批次的淋洗液EC值均显著低于CK组。在复合改良剂处理中,TJ_3与TJ_2处理降幅较大,分别较CK降低25.59%与22.19%。CA处理在6批次时,EC较CK降低15.33%,低于复合改良剂处理与CBC处理,处理间表现为:CBC>TJ_2>TJ_1≈COF>CA>CK。单批脱盐率均随淋洗次数增加而持续下降,在第1批淋洗时,TJ_2处理较CK提高60.39%,TJ_3与CBC分别

较CK提高40.44%与41.13%。CA第1批单批脱盐率较CK提高31.04%;在淋洗后期,除TJ_2外,各处理与CK的差距缩小,TJ_2处理较CK提高97.29%,而CA较CK提高1.76%。

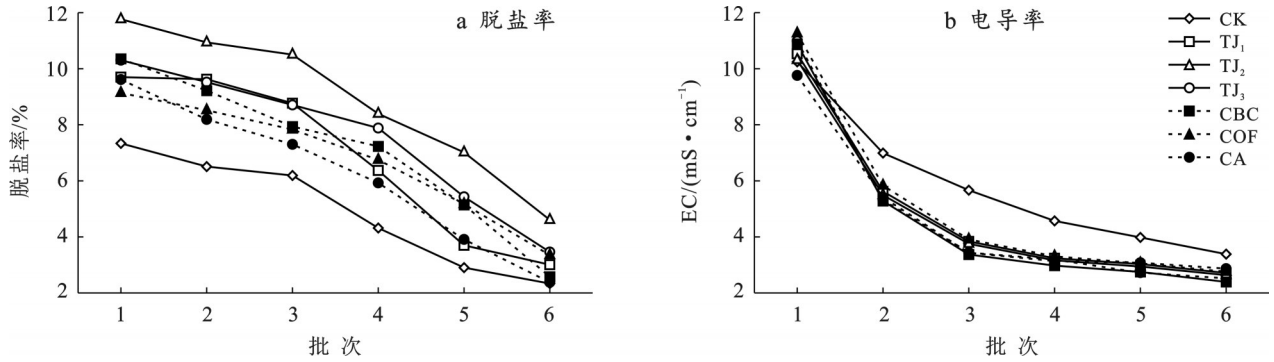


图3　不同改良剂处理下盐渍土脱盐率与土柱电导率(EC)的变化特征

Fig.3　Changes in electrical conductivity (EC) and desalination rate of salt-affected soil columns under different amendment treatments

2.3　不同生物炭基改良剂对淋洗液离子的影响

2.3.1　不同生物炭基改良剂中淋洗液主要阳离子变化

由图4可知,所有土柱淋洗液中阳离子主要为Na^+,K^+,Ca^{2+},Mg^{2+},其浓度呈现下降趋势。在P_1阶段Na^+淋出强度差异显著,与CK相比,TJ_2处理在P_1阶段Na^+淋出量提高约55%~60%,为各处理中最高;TJ_3处理与CBC处理提升幅度约为40%~50%;TJ_1与COF的提升幅度较小。CA处理在P_1阶段Na^+淋出量较CK提高约25%~30%。Ca^{2+}与Mg^{2+}质量浓度变化趋势与Na^+基本一致,但处理间差异幅度较小,复合改良剂处理较CK的提升幅度大部分在15%~30%范围内。在P_2和P_3阶段,各处理阳离子浓度普遍下降,但TJ_2处理在P_2阶段仍保持较高的Na^+淋出量,较CK提升幅度约为30%~40%,相比之下,CA处理在P_2阶段Na^+淋出量较CK提高10%~15%,作用明显弱于复合改良剂处理。而CA处理Na^+淋出量不足5%。Ca^{2+}与Mg^{2+}处,阳离子淋出量趋于平缓。TJ_2处理Na^+淋出量处理间差异较小。

2.3.2　不同生物炭基改良剂中淋洗液阴离子变化

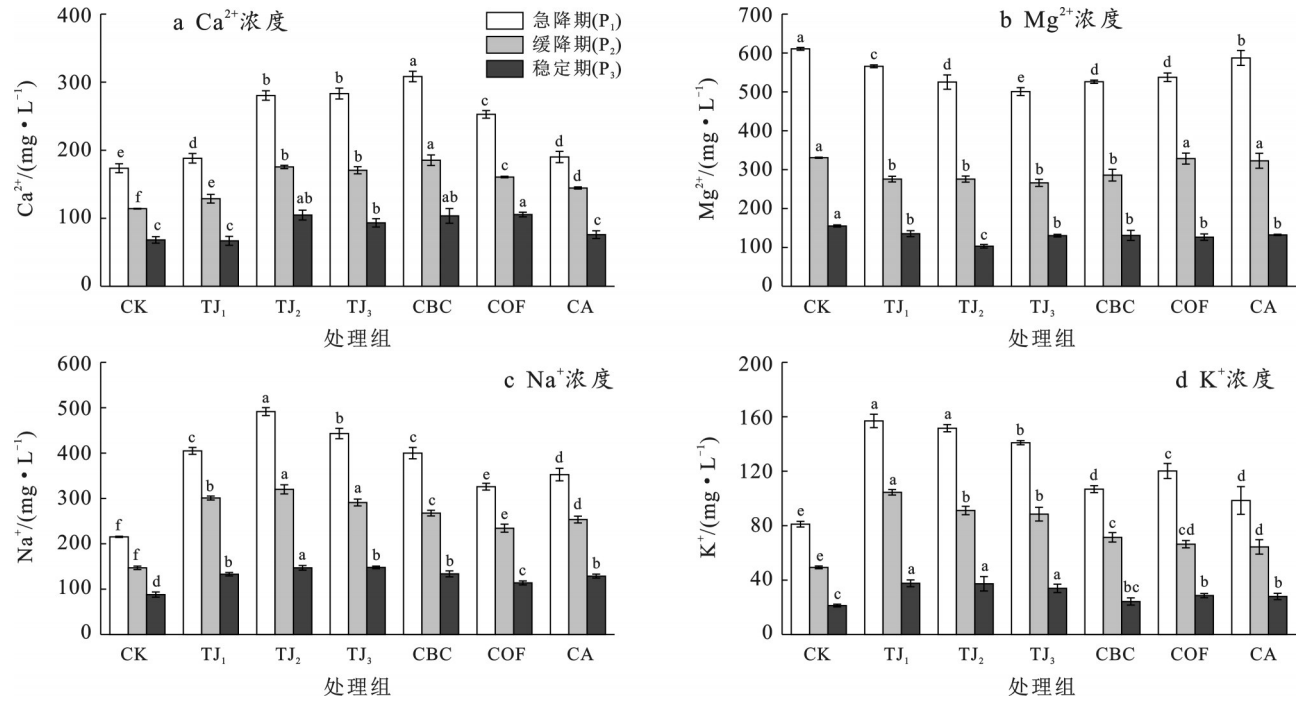
淋洗液中SO_4^{2-},Cl^-和HCO_3^-浓度变化如图5所示。由图5可以看出,各阴离子浓度随淋洗阶段呈现下降趋势,在急降(P_1)阶段,TJ_2处理的SO_4^{2-}浓度最高,显著高于CK,分别为2 058.25 mg/L与1 480.93 mg/L,提升幅度为38.83%。TJ_2处理Cl^-质量浓度为1 770.73 mg/L,较CK提升幅度超过150%。随着淋洗进行,P_2和P_3阶段各阴离子浓度均显著下降,但不同处理间下降幅度存在差异。其中,TJ_2处理在P_2阶段SO_4^{2-}和Cl^-浓度仍保持较高水平,其中SO_4^{2-}由P_1阶段的2 058.25 mg/L降至1 516.15 mg/L,降幅约27%;Cl^-由1 770.73 mg/L降至938.24 mg/L,降幅在47%,表明其在中期淋洗过程中仍具有较强的阴离子持续淋出能力。

2.4　不同生物炭基改良剂对土壤剖面盐分离子的影响

由图6可知,淋洗结束后土壤剖面主要阳离子中Na^+,Ca^{2+}和Mg^{2+}残留量均随土层深度增加呈下降趋势。CK处理中,Na^+在20—40 cm土层的质量浓度显著高于0—20 cm土层,分别为789.45和455.13 mg/kg;0—20 cm耕作层中,各生物炭基改良剂处理均显著降低了Ca^{2+},Mg^{2+}和Na^+的含量,TJ_2处理Na^+质量浓度降至170.24 mg/kg,较CK降低62.60%;20—40 cm土层降至283.65 mg/kg,较CK降低64.07%。TJ_1与TJ_3处理较CK分别下降58.09%与57.64%,但均弱于TJ_2处理;在0—20 cm土层CBC与COF的Na^+较CK下降46.08%与49.09%。CA处理对Na^+的降幅有限,0—20 cm土层较CK降低28.90%,弱于改良剂处理。Ca^{2+}质量浓度较CK分别下降63%,43%和73%,Mg^{2+}质量浓度较CK分别下降48%,58%和52%。CK处理Ca^{2+}与Mg^{2+}的残留量在20—40 cm土层高于0—20 cm土层。0—20 cm土层中,施加改良剂均显著降低Ca^{2+}与Mg^{2+}残留,其中Ca^{2+}降幅为39.18%~60.20%,Mg^{2+}降幅为26.92%~57.52%。在20—40 cm土层,TJ_2对Ca^{2+}降幅最大,较CK降低71.37%。

各处理土壤剖面中阴离子(SO_4^{2-},Cl^-,HCO_3^-)的分布如图7所示。由图7可以看出,在0—20 cm土层中,各处理SO_4^{2-}残留量较CK显著降低,降幅在69.15%~78.97%,其中TJ_2与TJ_3处理对SO_4^{2-}的去除效果较为显著,其质量浓度降至317.80 mg/kg与313.60 mg/kg,分别降低75.14%与75.46%。Cl^-方面,0—20 cm土层TJ_2处理残留最低,为34.91 mg/kg,

较CK降低65.76%;对20—40 cm土层的分析表明,Cl^-残留总体高于表层,TJ_2处理显著低于CK,且降幅达49.12%;TJ_1,TJ_3与CBC降幅约为39%～40%,COF降幅为17.57%,CA降幅为28.54%。



注:不同小写字母表示同一阶段内不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

图4 不同改良剂处理下淋洗液中主要阳离子浓度的变化特征

Fig.4 Variations in concentrations of major cations in leachate under different amendment treatments

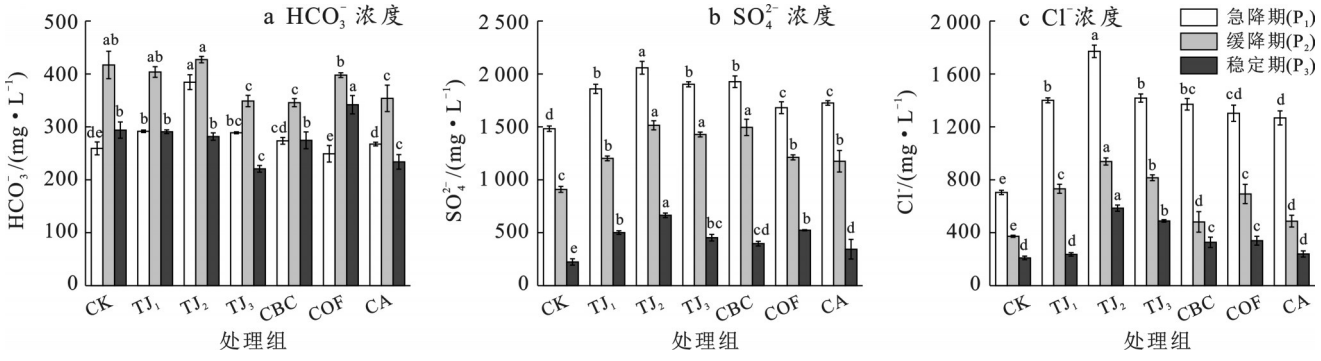


图5 不同改良剂处理下淋洗液中主要阴离子浓度的变化特征

Fig.5 Variations in concentrations of major anions in leachate under different amendment treatments

2.5 不同生物炭基改良剂对土壤剖面脱盐率、电导率、钠吸附比和pH值的影响

由图8可以看出,淋洗结束后土壤剖面电导率(EC)在不同处理间差异显著。在0—20 cm的耕作层,对照组的EC值最高,为592.67 μS/cm。与之相比,各改良处理组的EC值均显著降低,降幅在8.94%至44.15%。其中,TJ_2处理的EC值显著低于CK,为331 μS/cm,较CK显著降低44.15%;TJ_3较CK降低36.56%,CBC与TJ_1处理分别降低27.84%与17.15%;在20—40 cm的深层土壤中,EC值的分布规律发生明显变化。CK组的EC值升高至919.33 μS/cm,较表层增加55.15%,这表明盐分在剖面下层聚集;TJ_2处理最低为476.00 μS/cm,TJ_3与CBC分别降低45.36%与43.87%,TJ_1降低40.68%,COF与CA分别降低20.56%与27.52%。在0—20 cm土层,CK组的SAR值为1.86,除CA外,其余改良处理组的SAR值介于0.98～1.36,降幅为26.86%～47.03%。CBC与TJ_2处理较CK显著降低了26.86%～47.03%;TJ_1与TJ_3分别降低39.75%与36.13%,TJ_2处理的效果尤为突出,其SAR值小于1.00。在20—40 cm土层,CK的SAR值升至2.73,而各改良剂处理SAR均显著低于CK,其中TJ_2与TJ_1处理分别较CK下降45.76%与44.50%;TJ_3,CBC与COF分别降低36.81%～41.05%,CA处理深层SAR为2.07,较CK

降低 24.17%。总体脱盐率方面,改良剂显著提高了土柱全程总脱盐率。CK 处理总脱盐率为 30.49%;各处理均高于 CK,TJ_2 处理的脱盐率最高,为 49.74%,较 CK 提高 19.25%,TJ_3 处理次之,为 43.76%;COF 较 CK 提高 9.56%,CA 处理总脱盐率为 36.35%,较 CK 提高 6.80%。各处理脱盐率的总体表现为:TJ_2>TJ_3>CBC>TJ_1>COF>CA>CK。如图 8d 所示,各处理对土壤 pH 值具有显著的调控作用,且表现出明显的土层差异。在 0—20 cm 耕作层中,CK 处理的 pH 值维持在 8.30。添加复合改良剂显著降低了表层土壤碱度,其中 TJ_2 处理的降碱效果最为显著,其 pH 值降至 7.90,较 CK 显著降低了 0.40 个单位;TJ_1 与 TJ_3 处理次之,分别为 8.09,8.21;而 CBC,COF 和 CA 较 CK 无显著差异。在垂直分布上,20—40 cm 深层土壤的 pH 值总体高于 0—20 cm 表层土壤,表现出底土碱度累积特征。尽管如此,TJ_2 处理在深层仍保持了最优的改良效果,其 pH 值为 8.25,较 CK 显著降低 0.24。

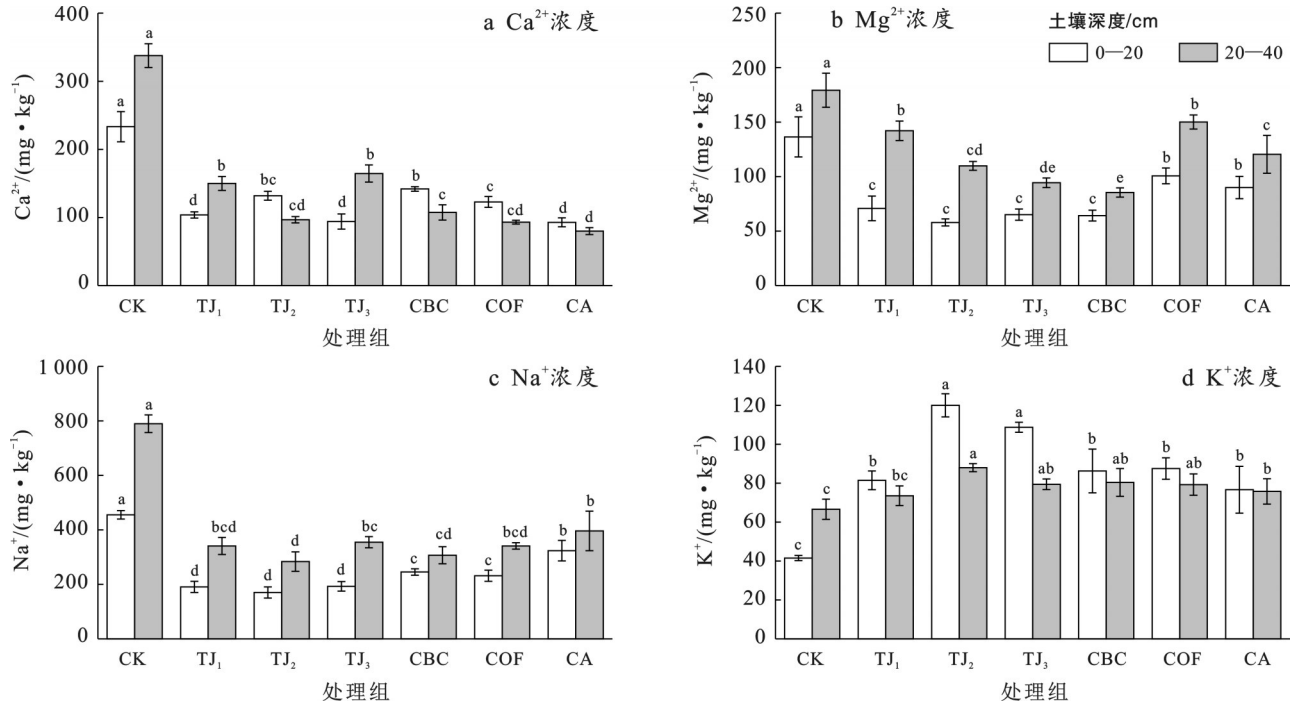


图 6　不同改良剂处理下盐渍土试验土柱剖面主要阳离子的分布特征

Fig.6　Distribution characteristics of major cations along profiles of experimental salt-affected soil columns under different amendment treatments

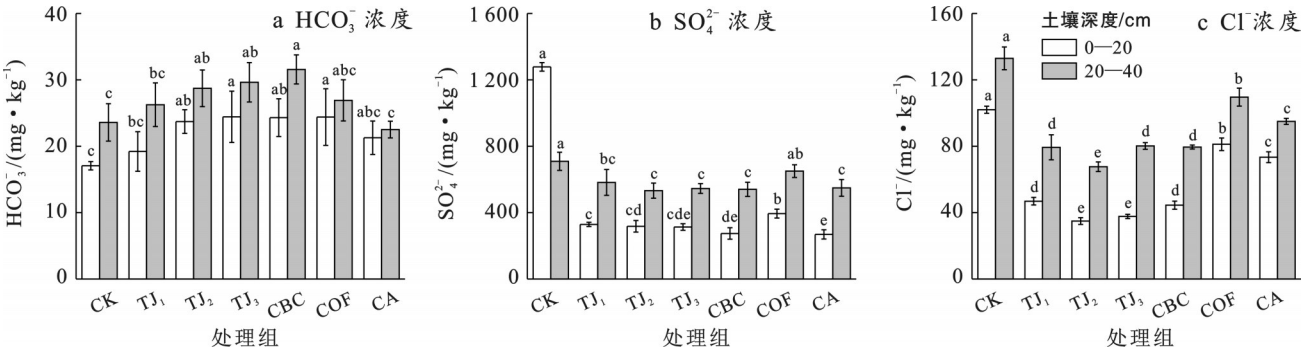


图 7　不同改良剂处理下盐渍土试验土柱剖面主要阴离子的分布特征

Fig.7　Distribution characteristics of major anions along profiles of experimental salt-affected soil columns under different amendment treatments

3　讨　论

3.1　土壤孔隙结构空间分布

土壤水分入渗与溶质运移的效率主要受制于土壤的孔隙分布特征,特别是大孔隙的数量与连通性。根据土壤物理学中的 Poiseuille 定律,土壤导水率与孔隙密切相关,大孔隙的微小增加将带来渗透能力的指数级提升,从而为可溶性盐分淋洗提供优先流通道。

研究结果显示，CK处理的大孔隙度比例少，表明在对照组中淋洗过程中即使有水分输入，盐分也难以排出，由于缺乏重力水流动的物理通道，溶解的盐分被滞留在微孔隙中。相比之下，TJ_2处理将大孔隙度提升了近10倍。圆盘造粒工艺的独特优势与传统的粉末混合不同，其具有一定机械强度的复合改良剂充当了土壤多孔骨架。它们不仅支撑起土体防止大孔隙坍塌堵塞，其自身丰富的大孔隙还与土壤团聚体孔隙相互连接，形成了连通导水孔隙[18]。这种大孔隙打破了高密度土壤的紧实结构，使得淋洗水能快速流出土体带走可溶性盐分。而TJ_3处理效果下降，可能是存在过高比例的生物炭导致造粒颗粒强度不足，破碎产生的细小炭粉填充了部分大孔隙，限制了优先流的形成。这种孔隙结构的优化不仅解释了淋洗初期（P_1阶段）TJ_2处理极高的脱盐速率，也解释了TJ_3处理生物炭含量更高，效果反而下降的缘由，过量的细颗粒生物炭填充了部分大孔隙空间，限制了优先流的形成。因此，4∶3∶3的复配比例在连通排盐孔隙网络方面达到了最佳平衡点[19]。

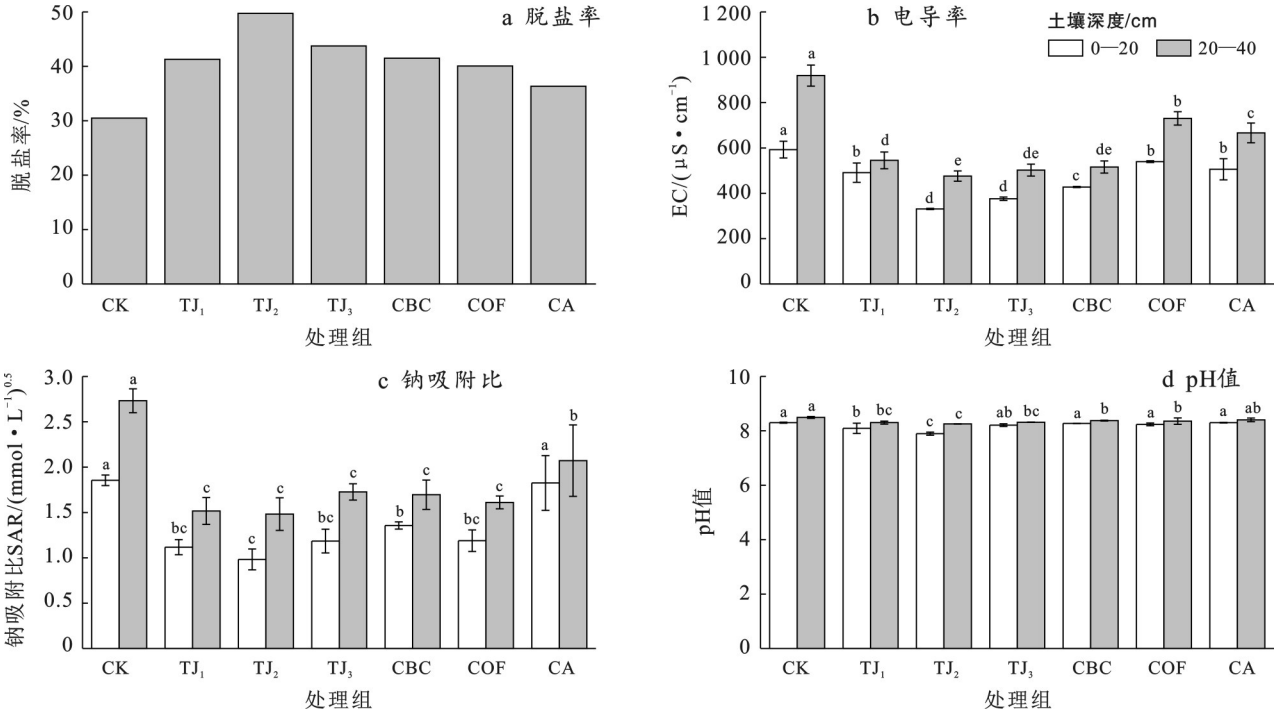


图8 不同改良剂处理对土壤脱盐率、电导率（EC）、钠吸附比（SAR）和pH值的影响

Fig.8 Effects of different amendment treatments on soil desalination rate, electrical conductivity (EC), sodium adsorption ratio (SAR), and pH value

3.2 盐分淋洗效率与离子选择性运移

土壤盐分的淋洗不仅受到土壤连通孔隙分布造成的物理冲刷影响，也受双电层理论支配的离子吸附—解吸动力学过程。改良剂通过引入有机胶体和特定离子，改变土壤胶体表面的电荷性质与离子竞争关系，从而打破原有的盐分吸附平衡，促进有害离子的释放与迁移。由淋洗液变化过程可知，各处理在促进盐分迁移方面差异显著。淋洗过程中淋洗液电导率、单批脱盐率及主要离子浓度的动态变化结果表明，所有改良处理均显著降低了淋洗液EC值，促进了土壤盐分的淋出[20]。其中，TJ_2处理在整个淋洗阶段始终表现出较低的EC值以及较高的脱盐率和Na^+，Cl^-淋出浓度，显示出更优的脱盐效果；此外，助剂对照可在一定程度上促进盐分淋出，但其对土壤改善效果整体弱于复合改良剂处理，说明复合改良剂优势不是单一组分的贡献，而是与材料复配后的协同调控有关。该结果表明，TJ_2处理在生物炭与有机肥配比在一定程度上实现了较为合理的结构支撑与化学活化协同[21]，有利于提高水分运移过程中盐分的同步迁移效率。这一效应与生物炭发达的孔隙结构改善土壤水力特性，以及有机肥缓释养分和溶解性有机质增强离子交换与迁移过程的共同作用有关[22]。生物炭的高孔隙度可改善土壤团聚体结构，增加导水孔隙的比例，为盐分随水快速下渗提供了高效的物理通道；有机肥的加入提供了易分解有机质，其分解过程中产生的有机酸等物质通过络合作用促进土壤胶体上Na^+等离子的交换解析，同时通过其有机质对土壤颗粒的胶结作用，有利于维持淋

洗过程的水分入渗与盐分持续迁移[23]。本研究结果进一步表明,在生物炭复合改良剂中,并非生物炭比例越高越利于盐分淋失,而是存在生物炭与有机肥的最佳配比区间,TJ_2与TJ_3处理的总脱盐率分别为49.74%与43.76%。这与杨晓娟[23]的研究结果类似,表明在复合体系中存在一个最佳的物料平衡点。与单一生物炭或有机肥处理相比,在一定施用条件下,复合配施可能降低单一材料带来的结构与可溶性盐分释放波动风险[24]。

3.3　土壤电导率、SAR,pH值与盐基离子脱盐率

土壤碱化度降低的核心在于施加改良剂对土壤的钙与钠的置换,利用二价离子置换胶体表面的交换性钠离子。TJ_2处理显著将表层pH值从8.30降至7.90,促进了土壤中难溶性钙盐的溶解与释放,高浓度的Ca^{2+}置换了胶体上的Na^+,从而从化学机制上加速了Na^+的淋失[25]。结合淋洗液阴离子组成特征,SO_4^{2-}在淋洗液中为主要阴离子,表示硫酸盐迁移对该阶段EC下降贡献较大。反映出盐基离子的选择性淋洗行为[26]。

对于0—20 cm脱盐效果的物理机制,CT扫描结果证实,改良剂显著重塑了表层微观结构,增加大孔隙比例,驱动了表层盐分的快速洗脱。然而,盐分随重力水向下淋洗必然导致土壤剖面溶质的重新分布。淋洗后20—40 cm土层的电导率(EC)与Na^+残留量总体高于0—20 cm表层,深层剖面存在盐分累积效应。值得注意的是,相较于CK处理在20—40 cm处形成的严重盐分聚集,改良剂的深层EC较CK显著降低,Na^+残留量降低。这表明复合改良剂在促进表层高效脱盐的同时,改善了深层水力传导连通性,有效缓解盐分在20—40 cm的集聚风险。

在脱盐过程中,淋洗易引发速效养分同步下渗流失风险。通过监测淋洗前后土壤速效钾K^+的分布证实。TJ_2处理在大幅降低剖面EC的同时,显著提高了0—20 cm表层土壤的K^+含量。这一机制主要受离子动力学与材料吸附特性的协同调控:相较于水合半径较大、易在有机质分解产生的有机酸络合作用下随水下移的Na^+和Cl^-,K^+的水合半径较小且电荷密度较高,更易被生物炭极其发达的孔隙结构物理截留,并被其表面丰富的含氧官能团及负电位点静电吸附[27]。与刘静[28]等报道的有机肥单施提高盐基离子但缺乏选择性的结果相比,生物炭的协同引入有助于实现盐基离子的定向调控。同时,TJ_2处理下Cl^-/SO_4^{2-}比值最低,表明Cl^-潜在毒害得到缓解,这一特性对新疆氯敏感作物的安全生产具有重要意义[29]。需要指出的是,本研究虽证实了4:3:3配比的改良剂在调控孔隙结构与水盐运移方面的显著优势,但仍存在一定的局限性。首先,本研究受限于模拟浅根系作物分布的40 cm土柱设计试验,未能直接评估更深层底土的变化特征,但依据水盐运移客观规律,在大田实际灌溉且无配套暗管排盐条件下,淋洗脱出的盐分向40—60 cm迁移并累积的风险客观存在,需在后期大田试验中重点监测;室内土柱淋洗试验属于短期控制试验,无法完全模拟盆栽或大田条件下复杂的环境因素及作物根系对改良剂稳定性的长期影响;其次,关于复合改良剂中微生物菌剂在盐碱胁迫下的定殖效率及其与土著微生物的互作机制尚需深入探究。

4　结　论

(1)显微CT结果证实复合造粒改良剂能大幅优化土壤孔隙结构。圆盘造粒工艺相比传统混合具有土壤骨架支撑的优势;最优配比4:3:3将导水大孔隙(>0.50 mm)比例由CK的0.38%提升至3.60%,并提高大孔隙在孔隙网络中的比例。这种物理结构的重构打破了盐渍土板结问题,驱动盐分快速淋洗。

(2)在模拟灌溉土柱淋洗条件下,施用复合改良剂均可显著促进盐分淋洗并提高脱盐效率。与CK相比,各处理全程总脱盐率由30.49%提高至36.35%~49.74%,其中生物炭:有机肥:助剂为4:3:3处理最高,表明复合改良剂对盐分洗脱具有更强促进作用。

(3)改良剂施用显著降低土壤剖面盐分水平与钠碱化风险指标。生物炭:有机肥:助剂为4:3:3处理0—20 cm土层EC降至331 μS/cm,SAR降至0.98;同时0—20 cm土层Na^+与Cl^-残留量分别较CK降低62.60%与65.76%,显示其在表层脱盐方面效果最优。综合来看,生物炭:有机肥:助剂为4:3:3的复合改良剂对新疆盐渍土的治理综合效果最优。

未来的研究将聚焦于田间原位试验,重点评估该改良剂在长周期内的结构稳定性与生态效益,以期为新疆盐渍土的可持续治理提供更具实践指导意义的参数支撑。

参考文献(References)

[1] FAO. Global status of salt-affected soils [R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024.

[2] 王遵亲,祝寿泉,俞仁培,等.中国盐渍土[M].北京:科学出版社,1993.
Wang Zunqin, Zhu Shouquan, Yu Renpei, et al. Chinese Saline Soils [M]. Beijing: Science Press, 1993.

[3] 吕宁,石磊,戴昱余,等.新疆盐碱地治理利用研究回顾与启示[J].灌溉排水学报,2024,43(12):1-10.
Lyu Ning, Shi Lei, Dai Yuyu, et al. Reclamation of saline-alkali soils in Xinjiang: A review [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024,43(12):1-10.

[4] 杨劲松,姚荣江,王相平,等.中国盐渍土研究:历程、现状与展望[J].土壤学报,2022,59(1):10-27.
Yang Jinsong, Yao Rongjiang, Wang Xiangping, et al. Research on salt-affected soils in China: History, status quo and prospect [J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(1):10-27.

[5] Wang Ziyan, Tan Wenjuan, Yang Dengqin, et al. Mitigation of soil salinization and alkalization by bacterium-induced inhibition of evaporation and salt crystallization [J]. Science of the Total Environment, 2021, 755: 142511.

[6] 关欣,王丹丹,刘佳凝,等.蒙脱石与复合菌剂配施提高田菁改良盐渍土的效果[J].植物营养与肥料学报,2024,30(2):331-341.
Guan Xin, Wang Dandan, Liu Jianing, et al. Combined use of montmorillonite and microbial inoculum improves the remediation efficiency of *Sesbania cannabina* in saline soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(2):331-341.

[7] 岳燕,郭维娜,林启美,等.加入不同量生物质炭盐渍化土壤盐分淋洗的差异与特征[J].土壤学报,2014,51(4):914-919.
Yue Yan, Guo Weina, Lin Qimei, et al. Salt leaching in the saline soil relative to rate of biochar applied [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014,51(4):914-919.

[8] 孙燕,刘建旗,吴建鑫,等.不同生物质材料对盐碱土理化特性及水盐运移特征的影响[J/OL].土壤学报,2025. https://link.cnki.net/urlid/32.1119.P.20250617.1604.002.
Sun Yan, Liu Jianqi, Wu Jianxin, et al. Effects of Different Biomass Materials on the Physicochemical Properties and Water-Salt Transport Characteristics of Saline-Alkali Soil [J/OL]. Acta Pedologica Sinica, 2025. https://link.cnki.net/urlid/32.1119.P.20250617.1604.002.

[9] Hu Baowei, Ai Yuejie, Jin Jie, et al.Efficient elimination of organic and inorganic pollutants by biochar and biochar-based materials [J]. Biochar, 2020,2(1):47-64.

[10] Zhao Yonggan, Zhang Wenchao, Wang Shujuan, et al. Effects of soil moisture on the reclamation of sodic soil by flue gas desulfurization gypsum [J]. Geoderma, 2020,375:114485.

[11] Chaganti V N, Crohn D M, Šimůnek J. Leaching and reclamation of a biochar and compost amended saline-sodic soil with moderate SAR reclaimed water [J]. Agricultural Water Management, 2015,158:255-265.

[12] 孔芊芊.生物炭对南疆盐渍土团聚体特征和水盐运移的影响[D].新疆 阿拉尔:塔里木大学,2023.
Kong Qianqian. Effects of biochar on aggregate characteristics and water and salt transport in saline soil in southern Xinjiang [D]. Ala'er, Xinjiang: Tarim University, 2023.

[13] 冀拯宇,周吉祥,张贺,等.不同土壤改良剂对盐碱土壤化学性质和有机碳库的影响[J].农业环境科学学报,2019,38(8):1759-1767.
Ji Zhengyu, Zhou Jixiang, Zhang He, et al. Effect of soil conditioners on the soil chemical properties and organic carbon pool of saline-sodic soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019,38(8):1759-1767.

[14] Shaygan M, Baumgartl T, Arnold S, et al. The effect of soil physical amendments on reclamation of a saline-sodic soil: Simulation of salt leaching using HYDRUS-1D [J]. Soil Research,2018,56(8):829-845.

[15] 万婷婷,何浩,程李洋,等.哈茨木霉菌配施改良剂对盐碱土理化特性及棉花抗盐碱响应的协同机制[J].中国农学通报,2025,41(21):145-155.
Wan Tingting,He Hao,Cheng Liyang,et al.Synergistic mechanism of application of trichoderma harzianum and amendments on physicochemical properties of saline-alkali soil and cotton's salt alkali resistance response [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2025, 41(21):145-155.

[16] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科学技术出版社,2000.
Lu Rukun. Methods of soil agrochemical analysis [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

[17] Lesch S M, Suarez D L.A short note on calculating the adjusted SAR index [J]. Transactions of the ASABE, 2009,52(2):493-496.

[18] Liu Jingjing, Lu Shenggao. Amendment of different biochars changed pore characteristics and permeability of Ultisol macroaggregates identified by X-ray computed tomography (CT) [J]. Geoderma, 2023,434:116470.

[19] 苏盼杰.咖啡壳热解炭化制备生物炭基肥及炭化工艺参数优化研究[D].云南 昆明:云南农业大学,2024.
Su Panjie. Preparation of biochar-based fertilizer from coffee shell by pyrolysis and carbonization and optimization of carbonization process parameters [D]. Kunming, Yunnan: Yunnan Agricultural University, 2024.

[20] Zubairu A M, Ocansey C M, Gangwar R K, et al. Overview of biochar role in remediating soil salinity stress in crops [J]. Discover Sustainability, 2025,6(1): 1185.

[21] Yan Bojing, Zhang Yuping, Wang Yizhe, et al. Biochar amendments combined with organic fertilizer

improve maize productivity and mitigate nutrient loss by regulating the C-N-P stoichiometry of soil, microbiome, and enzymes [J]. Chemosphere, 2023,324:138293.

[22] Lehmann J, Joseph S. Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation [M]. London: Routledge, 2015.

[23] 杨晓娟,何浩,程李洋,等.盐渍土施用有机物料对作物生长及土壤盐碱指标的影响[J].环境科学,2025,46(3):1751-1761.
Yang Xiaojuan, He Hao, Cheng Liyang, et al. Effects of organic materials applied to saline soil on crop growth and soil salinealkali index [J]. Environmental Science, 2025,46(3):1751-1761.

[24] Ni Panpan, Wang Shiqin, Liu Bingxia, et al. Effects of organic manure and biochar-based fertilizer application on soil water and salt transport in brackish water irrigated soil profile [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2023,23(3):3120-3136.

[25] Daba A W. Rehabilitation of soil salinity and sodicity using diverse amendments and plants: A critical review [J]. Discover Environment, 2025,3(1):53.

[26] Saifullah, Dahlawi S, Naeem A, et al. Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities [J]. Science of the Total Environment, 2018,625:320-335.

[27] 杨旸,赖黎明,王靖,等.生物炭与有机肥配施对盐碱土改良和向日葵产量的影响[J].北方农业学报,2024,52(4):50-58.
Yang Yang, Lai Liming, Wang Jing, et al. Impacts of combined application biochar and organic fertilizer on saline-alkali soil amendment and sunflower yield [J]. Journal of Northern Agriculture, 2024,52(4):50-58.

[28] 刘静,郝祝霞,沈佳瑜,等.不同有机肥对土壤盐分的影响及崇明柑橘适用有机肥的筛选[J].安徽农业科学,2024,52(3): 134-140.
Liu Jing, Hao Zhuxia, Shen Jiayu, et al. Effects of different organic fertilizers on soil salinity and screening of organic fertilizers suitable for Chongming citrus [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2024, 52(3): 134-140.

[29] 李思平,曾路生,李旭霖,等.不同配方生物炭改良盐渍土对小白菜和棉花生长及光合作用的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):363-368.
Li Siping, Zeng Lusheng, Li Xulin, et al. Amelioration of saline soil with different biochar fertilization formulas and its effects on growth and photosynthesis of *Brassica chinensis* and cotton [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(2):363-368.

(上接第 257 页)

[26] Wang Hao, Zhou Huimin, He Jinsheng, et al. Divergent phenological responses of soil microorganisms and plants to climate warming [J]. Nature Geoscience, 2025,18(8):753-760.

[27] Liu Yulin, Zhang Jingjing, Bader M K, et al. Soil type and temperature determine soil respiration seasonal dynamics in dairy grassland [J]. Soil Ecology Letters, 2024,6(4):240250.

[28] Isbell F, Craven D, Connolly J, et al. Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes [J]. Nature, 2015,526(7574):574-577.

[29] Eisenhauer N, Lanoue A, Strecker T, et al. Root biomass and exudates link plant diversity with soil bacterial and fungal biomass [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 44641.

[30] 施秀珍,王建青,黄志群,等.树种多样性对土壤微生物群落结构和元素生物地球化学循环的影响研究进展[J].生态学报,2022,42(15):6092-6102.
Shi Xiuzhen, Wang Jianqing, Huang Zhiqun, et al. Research progresses in the effects of tree species diversity on soil microbial communities and biogeochemical cycling of elements [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(15):6092-6102.

[31] Lange M, Eisenhauer N, Sierra C A, et al. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage [J]. Nature Communications, 2015,6:6707.

[32] Wright J P, Naeem S, Hector A, et al. Conventional functional classification schemes underestimate the relationship with ecosystem functioning [J]. Ecology Letters, 2006,9(2):111-120.