试验研究

燕麦还田对次生盐渍化农田土壤化学性质的影响

马玉露[1], 萨如拉[1], 马金慧[1], 陈 桃[2]

(1.内蒙古民族大学 草业学院.内蒙古 通辽 028000; 2.东北农业大学.黑龙江 哈尔滨 150030)

摘 要: [目的]探究不同种植密度燕麦还田对次生盐渍化农田土壤化学性质的影响,为科尔沁沙地及同类盐碱灌区生态修复、地力提升和农业可持续利用提供科学依据与技术支撑。[方法]在内蒙古自治区通辽市科尔沁左翼中旗花吐古拉镇北乌日格吐村典型的次生盐碱化农田中,设置低密度(YMD)、中密度(YMZ)和高密度(YMG)3个燕麦还田处理组,以无燕麦种植及还田的裸地作为对照(CK)。待燕麦生长至7月初进行燕麦还田,于还田前3 d及后3个月采集0—20 cm土层土壤样品,测定其pH值、交换性钠百分含量(ESP)、阴阳离子组成、有机质含量以及碱解氮、速效磷和速效钾等指标。[结果]燕麦还田可改善盐渍化土壤化学性状,YMG改良效果最优。各燕麦还田处理土壤有机质较CK增幅近4.87 g/kg;YMG处理土壤pH值、ESP较CK分别降低了0.93和8.19%,高密度处理的改良效果最为突出;YMG处理K^+,Na^+,Cl^-,HCO_3^-,CO_3^{2-}较CK分别依次降低了0.44,0.45,0.19,0.19和0.13 g/kg;Ca^{2+},Mg^{2+},SO_4^{2-}分别上升0.19,0.12,0.18 g/kg;相较CK,YMD,YMZ,YMG碱解氮含量依次提升21.00,28.00和44.33 mg/kg,速效磷含量提升5.21,6.95和7.20 mg/kg,速效钾含量提升22.58,26.57和34.54 mg/kg,养分随种植密度升高逐步提高。[结论]在次生盐渍化农田中种植并翻压不同密度燕麦还田可有效缓解土壤盐碱化程度,并显著提升土壤肥力水平。

关键词: 次生盐碱地; 燕麦还田; 土壤化学性质; 科尔沁沙地

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0001-09 **中图分类号:** S156.4

文献参数: 马玉露, 萨如拉, 马金慧, 等.燕麦还田对次生盐渍化农田土壤化学性质的影响[J].水土保持通报,2026,46(5):1-9. Ma Yulu, Sa Rula, Ma Jinhui, et al. Effects of oat straw return on chemical properties of secondary saline-alkali farmland soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(5):1-9.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.005 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.05.005**

Effects of oat straw return on chemical properties of secondary saline-alkali farmland soil

Ma Yulu[1], Sa Rula[1], Ma Jinhui[1], Chen Tao[2]

(1.*College of Grassland Science, Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao, Inner Mongolia* 028000, *China*; 2.*Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang* 150030, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of oat straw return at different planting densities on the soil chemical properties of secondary saline-alkali farmland were investigated in order to provide scientific evidence and technical support for ecological restoration, soil fertility improvement, and sustainable agricultural use in the Horqin sandy land and similar saline-alkali irrigation areas. [Methods] In a typical secondary saline-alkali farmland in Beiwujietu village, Hatuogula Town, Horqin Left Middle Banner, Tongliao City, Inner Mongolia Autonomous Region, three oat straw return treatment groups: low density (YMD), medium density (YMZ), and high density (YMG) were established, with bare land without oat cultivation or return serving as the control (CK). Oat straw return was conducted in early July when oats had grown to maturity. Soil samples were collected from the 0—20 cm soil layer three days before oat straw return and three months after oat straw return. The pH value, exchangeable sodium percentage (ESP), cation and anion composition, organic matter content, as well as alkali-hydrolyzable nitrogen,

收稿日期:2025-12-02 **修回日期:**2026-04-01 **采用日期:**2026-04-03

资助项目:内蒙古自治区科技创新引导项目"通辽地区盐碱地综合改良技术与应用研究"(KJCX1602)

第一作者:马玉露(1969—),男(蒙古族),内蒙古自治区通辽市人,博士,教授,主要从事土壤改良方面的研究。Email:mayulu2015@126.com。

通信作者:陈桃(1998—),女(汉族),贵州省福泉市人,硕士研究生,研究方向为环境保护与修复。Email:18375119755@163.com。

available phosphorus, and available potassium were measured. [Results] Oat straw return improved the chemical properties of saline-alkali soils, with the YMG treatment showing the best amelioration effect. In all oat straw return treatments, soil organic matter increased by nearly 4.87 g/kg compared to the control (CK). In the YMG treatment, soil pH value decreased by 0.93 and ESP decreased by 8.19%, respectively, compared to CK, with the high-density treatment showing particularly notable amelioration effects. In the YMG treatment, K^+, Na^+, Cl^-, HCO_3^- and CO_3^{2-} were reduced by 0.44, 0.45, 0.19, 0.19, and 0.13 g/kg, respectively, compared to the control (CK), while Ca^{2+}, Mg^{2+}, and SO_4^{2-} increased by 0.19, 0.12, and 0.18 g/kg, respectively. Compared with CK, the alkali-hydrolyzable nitrogen content in YMD, YMZ, and YMG increased by 21.00, 28.00, and 44.33 mg/kg, respectively. The available phosphorus content increased by 5.21, 6.95, and 7.20 mg/kg, and the available potassium content increased by 22.58, 26.57, and 34.54 mg/kg, respectively. Nutrient levels gradually increased with higher planting densities. [Conclusion] Planting and incorporating oats at different densities into secondary saline-alkali farmland can effectively alleviate soil salinization and significantly improve soil fertility.

Keywords: secondary saline-alkali land; oat straw return; soil chemical properties; Horqin sandy land

土地盐碱化是全球性的资源与环境问题,不仅造成土壤质量衰退、生态系统退化,还严重制约干旱半干旱地区农业可持续发展,阻碍乡村振兴战略的实施。在全球气候变化与不合理农业利用叠加影响下,土壤盐渍化与次生盐渍化过程持续加剧,已成为限制土地资源高效利用,影响粮食安全和生态安全的重要障碍。中国盐碱土资源总量约9.91×10^7 hm^2,其中现代盐渍化土壤3.70×10^7 hm^2,残余盐渍化土壤4.49×10^7 hm^2,类型多,分布广,治理难度大,合理改良与高效利用盐碱地对保障国家耕地安全具有重要战略意义[1]。

内蒙古自治区通辽市地处科尔沁沙地腹地,耕地总面积达2.13×10^6 hm^2,是中国东北西部重要的粮食及饲草生产基地。但受气候干旱、蒸发强烈、地下水埋深浅等自然条件影响,区域内土壤盐渍化问题突出。同时,长期集约化种植,化肥过量投入,有机肥施用不足及连作障碍等人为因素,进一步加剧了土壤板结,有机质下降,盐分表聚和养分失衡,导致耕地质量持续退化,生态脆弱性不断增强。如何通过绿色、低成本、可持续的农艺措施实现盐碱地改良与地力提升,已成为当地农业生产与生态治理面临的迫切需求。

绿肥还田作为一项经典的培肥改土技术,能够有效增加土壤有机质输入,改善土壤结构,调节土壤酸碱环境,提升微生物活性,在盐渍化土壤修复中具有显著优势。研究表明,绿肥翻压还田可促进土壤有机碳累积,提高土壤保水保肥能力,降低土壤容重,增强盐分淋洗效果,从而有效抑制土壤返盐、减轻碱化危害[2]。绿肥在腐解过程中释放的有机酸及微生物代谢产物,可促进土壤胶体稳定,减少水溶性钠盐对作物的毒害,实现"以肥压盐,以肥改碱"的改良目标。燕麦(*Avena sativa*)为禾本科燕麦属一年生草本作物,具有耐旱、耐寒、耐贫瘠、耐盐碱等突出抗逆特性,生物量大,适应性强,是盐碱逆境条件下理想的绿肥与饲草兼用型作物[3]。中国燕麦主产区集中在内蒙古、河北、山西等北方干旱半干旱农牧区,其中内蒙古种植面积和产量长期位居全国首位,具备大规模绿肥种植与就地还田的天然优势[4]。目前,国内外学者已从绿肥品种筛选、还田方式、培肥效应等方面开展大量研究,证实绿肥对土壤理化性质及作物生长具有显著改善作用[5-6]。但现有研究多聚焦于豆科与普通禾本科绿肥,针对耐盐作物燕麦作为绿肥压青还田,尤其是不同种植密度下燕麦还田对盐碱土化学性质改良机制的研究仍相对薄弱。为此,本研究以科尔沁地区典型次生盐渍化土壤为对象,通过田间燕麦种植与压青还田试验,系统分析不同种植密度燕麦还田对土壤pH值、电导率、盐分离子组成、有机质及速效养分等关键化学指标的影响,阐明燕麦还田对盐碱土的改良效应与调控机制,以期为科尔沁沙地及同类盐碱灌区生态修复,地力提升和农业可持续利用提供科学依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于内蒙古自治区通辽市科尔沁左翼中旗花吐古拉镇北乌日格吐村,地理坐标为东经121°55′—122°21′,北纬43°39′—43°58′,海拔180~200 m。研究区地处西辽河流域与松辽平原过渡地带,地貌以沙丘、平缓盐碱滩地相间分布为特征,是科尔沁沙地典型的盐渍化土壤集中分布区。区域属温带大陆性季风气候,四季分明,昼夜温差大,降水时空分布不均,多年平均降水量385.1 mm,多年平均气温6 ℃,蒸发量远大于降水量,干旱指数高,土壤盐分表聚作用强烈,次生盐渍化与碱化过程十分突出。供试土

壤为次生盐碱土,地块地势平缓,局部微低洼,土壤剖面发育均匀,是该区典型的耕地土壤类型。长期受气候、水文及人为耕作等因素影响,土壤盐分含量高、碱化度高,结构较差,有机质含量偏低,农业生产力水平受限。试验前0—20 cm耕层土壤基础化学性质详见表1。

表1　试验区盐碱地土壤耕层(0—20 cm)基本化学性质

Table 1　Basic chemical properties of soil cultivation layer (0—20 cm) in saline-alkali land in experimental area

有机质	土壤离子/(g·kg^{-1})								pH值	ESP/%
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	Na^+	K^+	SO_4^{2-}		
0.60	0.27	0.25	0.14	0.28	0.22	0.52	0.57	0.25	9.16	22.76

注:ESP代表土壤碱化度。下同。

1.2　试验设计

试验于2024年在内蒙古自治区通辽市科尔沁左翼中旗花吐古拉镇北乌日格吐村试验区开展。田间小区采用随机区组设计,选取地势平坦,土壤肥力与盐碱化程度均一的地块,布设30 m×30 m的试验大区。在大区中选取30 m×10 m区域作为核心试验小区,并进一步划分为3个30 m×3 m的独立处理小区,小区间设置0.5 m隔离带以避免相互干扰。试验设置3个燕麦种植密度处理,分别为149(YMD),225(YMZ)和300 kg/hm^2(YMG),供试燕麦品种为“邦德”。同时,在试验区域内设置30 m×1 m裸地小区作为空白对照(CK),各处理均设置3次重复。2024年5月5日完成燕麦播种,田间管理措施保持一致。于2024年6月29日(燕麦还田前),采用三点取样法与四分法相结合的方式,在各小区0—20 cm耕层采集土壤样品,代表还田前土壤本底状况。2024年7月4日,将各处理小区燕麦植株整体刈割,并用旋耕机均匀翻压入土,实现燕麦全量还田。经过一个生长季的腐解与土壤演化,于2024年10月8日在各试验小区进行定位取样,采集还田后0—20 cm耕层土壤样品,用于分析不同密度燕麦还田对土壤化学性质的改良效应。

1.3　测定指标与方法

土壤有机质的测定采用重铬酸钾滴定法-外加热法[7];CO_3^{2-}和HCO_3^-含量采用双指示剂-中和滴定法测定[8];Cl^-采用硝酸银滴定法[9];K^+和Na^+含量采用火焰光度法测定[10];Mg^{2+}和Ca^{2+}含量采用EDTA滴定法测定[11];SO_4^{2-}采用EDTA间接络合滴定法进行测定[12];交换性钠离子采用乙酸铵-氢氧化铵火焰光度法测定[13];阳离子交换量CEC用乙酸钠-火焰光度法测定[14],土壤pH值的测定采用1∶1水浸电位法[15];碱解氮含量采用碱解扩散法测定[16];速效磷含量采用0.5 mol/L $NaHCO_3$钼锑抗比色法测定[17];速效钾含量采用火焰光度法测定[18]。

采用Excel进行试验数据的统计,利用DPS数据处理系统进行试验数据的方差分析,所采用的显著水平为$p<0.05$,使用Origin 2021进行数据可视化。

ESP=(交换性钠/阳离子交换量)×100%

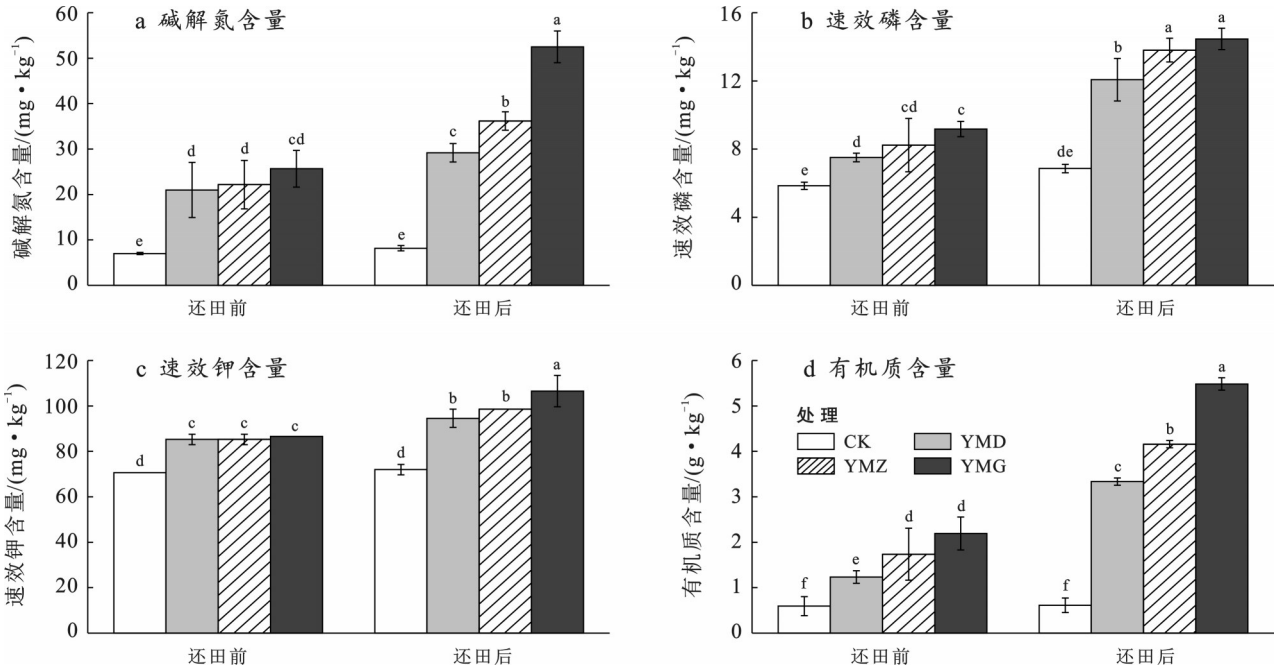
式中:ESP为土壤碱化度(%)。

2　结果与分析

2.1　不同密度燕麦还田土壤中速效氮磷钾及有机质的变化

由图1a可知,土壤碱解氮含量随燕麦种植密度增大呈显著升高趋势。还田前,YMD,YMZ,YMG处理土壤碱解氮含量分别为21.00,22.17,25.67 mg/kg;还田后,YMD,YMZ,YMG处理分别提升至29.17,36.17,52.50 mg/kg。与同期CK相比,各处理碱解氮增幅在还田前为14.00~18.67 mg/kg,还田后扩大至21.00~44.33 mg/kg。方差分析结果表明,还田后较还田前显著提升8.17~26.83 mg/kg($p<0.05$),说明燕麦还田可显著提升土壤供氮能力,且提升效果随种植密度增加而增强。图1b表明,土壤速效磷含量同样随燕麦种植密度增加显著升高,且YMG处理在各时期均显著高于YMD处理。还田前YMD,YMZ,YMG处理速效磷含量分别为7.51,8.23和9.17 mg/kg,还田后依次升至12.07,13.81和14.46 mg/kg,较还田前分别增加4.56,5.58,5.29 mg/kg。与同期对照相比,速效磷增幅由还田前1.67~3.33 mg/kg,提升至还田后5.21~7.60 mg/kg,表明燕麦还田可有效活化土壤磷素,提高磷素有效性。由图1c可见,燕麦还田对土壤速效钾具有显著提升效应。还田前YMD,YMZ,YMG处理速效钾含量分别为85.27,85.27和86.60 mg/kg,还田后分别增至94.57,98.55和106.52 mg/kg,较还田前显著提升9.30~19.92 mg/kg。与同期CK相比,各处理速效钾增幅由还田前14.61~15.94 mg/kg,提高至还田后22.58~34.54 mg/kg,体现出明显的补钾与增肥效果。由图1d可见,燕麦还田可显著提高土壤有机质含量。还田前YMD,YMZ,YMG处理有机质分别

为1.23，1.74和2.19 g/kg，较CK（0.59 g/kg）提高0.64～1.60 g/kg；还田后各处理分别升至3.34，4.16和5.48 g/kg，较CK提高2.72～4.87 g/kg。整体来看，还田后较还田前平均提升2.60 g/kg，差异达显著水平，说明燕麦绿肥翻压是增加盐碱土有机质积累的重要途径[19]。



注：小字母代表各处理间的显著性差异（$p<0.05$）。CK为对照组；YMD，YMZ，YMG分别代表低密度、中密度和高密度燕麦还田处理组。下同。

图1 不同密度燕麦还田处理土壤养分变化

Fig.1 Changes in soil nutrients under different density oat returning treatments

2.2 不同密度燕麦还田对土壤酸碱度（pH）及碱化度（ESP）的影响

由图2a可见，燕麦种植及还田处理均能显著降低盐渍化土壤pH值。对照CK土壤pH值始终稳定在9.16左右，呈强碱性特征。还田前，YMD，YMZ，YMG处理土壤pH值分别降至8.63，8.60和8.56，较CK显著降低0.53～0.60；还田后，各处理pH值进一步下降，较CK降幅扩大至0.56～0.93，其中YMG处理降碱效果最为突出。说明试验区燕麦种植可在一定程度上缓解土壤碱化，而翻压还田能够进一步强化酸性调节作用，降碱效果更稳定，更显著。

由图2b可知，燕麦还田对土壤碱化度（ESP）具有显著调控作用。CK土壤ESP高达22.76%，碱化特征明显。还田前，YMD，YMZ，YMG处理ESP分别降至19.87%，18.63%和16.61%，均显著低于CK，且随种植密度提高呈逐步降低趋势。还田后，各处理ESP较CK降幅进一步提升至3.09%～8.18%，各处理间差异达显著水平。产生这种现象的主要原因在于，燕麦还田增加了土壤有机质输入，改善了土壤结构并打破了耕层板结，提高了水分入渗与淋洗能力，进而加速了可溶性钠盐的下移排出，有效降低了土壤碱化风险。

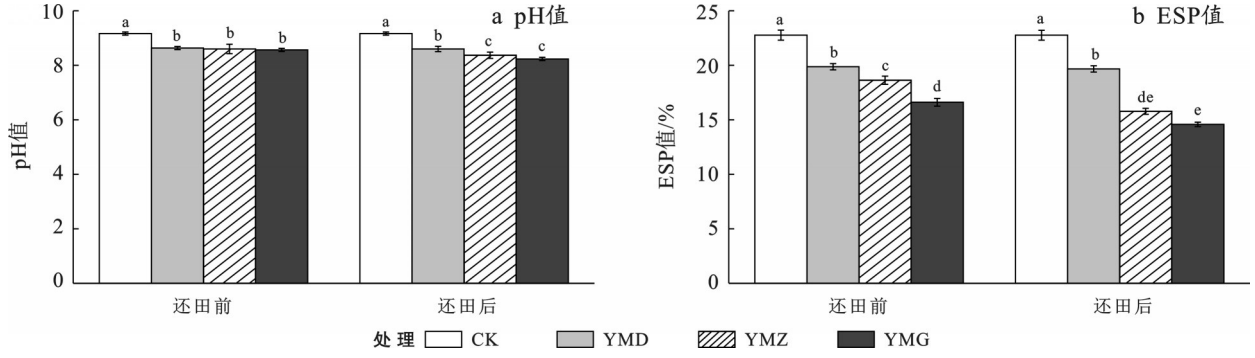


图2 不同密度燕麦还田土壤pH值和ESP值变化

Fig.2 Changes in pH value and ESP values in soils under different densities of oat straw returning fields

2.3　不同密度燕麦还田土壤离子的变化

2.3.1　不同密度燕麦还田土壤中阳离子的变化

由图 3a 可以看出,燕麦还田可显著降低土壤 K^+ 含量。还田前,CK 土壤 K^+ 含量为 0.57 g/kg,YMD,YMZ,YMG 处理较其分别降低 0.26,0.33,0.33 g/kg;还田后,CK 土壤 K^+ 含量为 0.52 g/kg,各处理降幅进一步扩大至 0.28～0.44 g/kg,处理间差异达显著水平。由图 3b 可知,燕麦还田对土壤 Na^+ 具有显著消减作用。还田前,各处理 Na^+ 含量较 CK(0.52 g/kg)降低 0.08～0.22 g/kg;还田后脱钠效果进一步增强,降幅提升至 0.34～0.45 g/kg,整体表现为:YMD>YMZ>YMG 的梯度特征。由图 3c 可见,燕麦还田可有效提高土壤 Ca^{2+} 含量。还田前各处理较 CK(0.25 g/kg)仅小幅提升 0.04～0.05 g/kg,差异未达显著水平;还田后增幅显著扩大至 0.11～0.19 g/kg。还田处理效果明显优于单一种植,且随翻压量增加呈上升趋势,这与根系归还、残体分解释放、有机酸活化及碳酸盐矿物溶解密切相关。由图 3d 可知,燕麦还田对土壤 Mg^{2+} 具有一定提升效应。还田前各处理较 CK(0.24 g/kg)略有升高,但差异不显著;还田后效果趋于明显,其中 YMD,YMZ,YMG 处理较 CK 分别显著增加 0.07,0.08,0.12 g/kg。

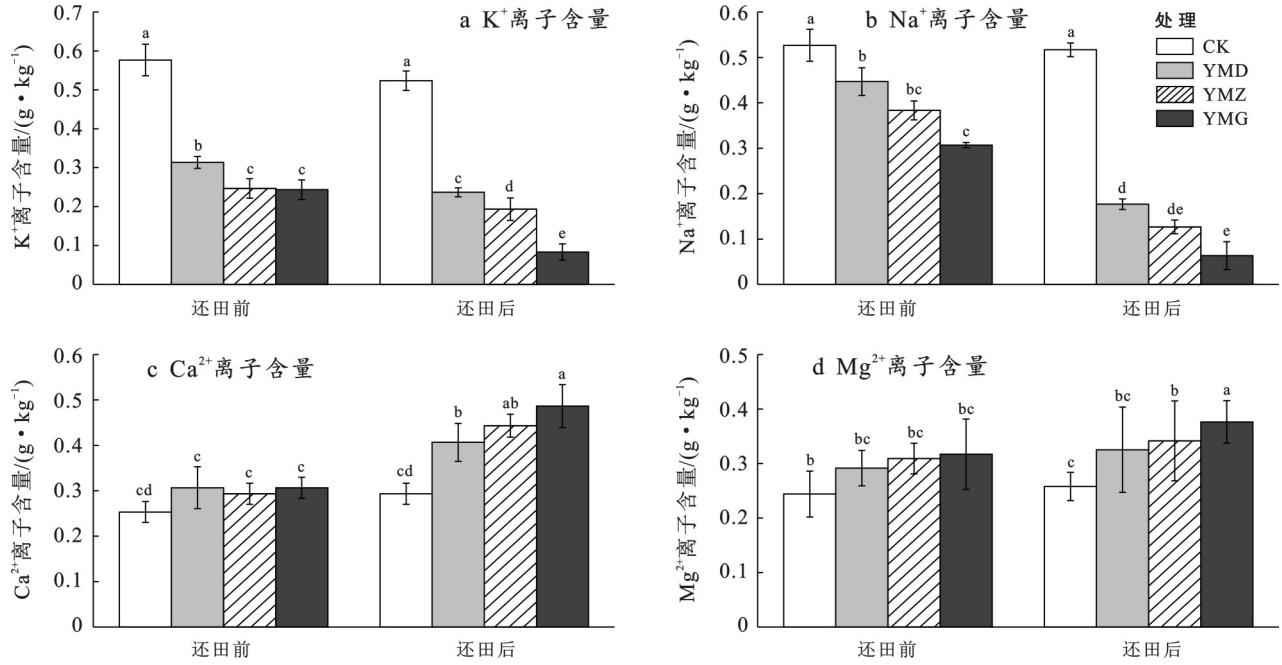


图 3　不同密度燕麦还田土壤中阳离子含量变化

Fig.3　Changes in cation contents in soils under different densities and oat straw returning fields

2.3.2　不同密度燕麦还田土壤中阴离子的变化

由图 4a 可以看出,燕麦还田对土壤 Cl^- 具有显著的消减效果。还田前,各处理 Cl^- 含量较 CK(0.22 g/kg)显著降低约 0.17 g/kg,不同种植密度间未表现出显著差异;还田后,各处理 Cl^- 含量进一步降至 0.04～0.05 g/kg,显著低于对照水平,其中 YMD 与 YMZ 处理间差异不显著,说明还田可有效促进氯离子淋溶下移。

由图 4b 可知,燕麦还田能够显著降低土壤 HCO_3^- 含量。还田前,各处理 HCO_3^- 含量介于 0.16～0.25 g/kg,较 CK(0.28 g/kg)呈显著下降趋势,密度间差异不显著;还田后,各处理较 CK 降幅扩大至 0.10～0.19 g/kg,YMD 与 YMZ 处理间差异未达显著水平,体现出稳定的降碱效果。由图 4c 可见,燕麦还田可显著降低土壤 CO_3^{2-} 含量。CK 土壤 CO_3^{2-} 含量较高,为 0.14 g/kg,碱化特征明显。还田前,各处理 CO_3^{2-} 较 CK 分别下降 0.05,0.07 和 0.10 g/kg,差异达显著水平,其中 YMZ 与 YMG 处理间差异不显著。还田后,CO_3^{2-} 含量整体呈现 YMD>YMZ>YMG 的梯度变化,各处理较 CK 分别显著降低 0.08,0.09 和 0.13 g/kg,YMD 与 YMZ 间差异不显著,说明高密度还田更有利于碳酸盐转化与脱除。由图 4d 可知,燕麦还田对土壤 SO_4^{2-} 具有明显提升作用。还田前,各处理 SO_4^{2-} 含量为 0.28～0.29 g/kg,与 CK(0.25 g/kg)差异不显著;还田后,各处理较 CK 显著增加 0.09～0.18 g/kg,YMD 与 YMZ 处理间差异不显著,这与燕麦残体分解释放有机硫,土壤矿物活化及硫形态转化密切相关。

2.4　燕麦还田下土壤有机质、pH 值、八大离子的相关性

2.4.1　燕麦还田后土壤中各指标的统计分析

由表 2 可知,燕麦还田后 0—20 cm 耕层土壤中,

Ca^{2+}含量最高，其次为SO_4^{2-}和Mg^{2+}，pH值与ESP仍处于较高水平。标准差分析显示，Na^+变幅最大（0.26），CO_3^{2-}与Mg^{2+}最小（均为0.05）；ESP变幅最大（3.74）。变异系数分析表明，仅pH值的变异系数小于10%（4.76%），呈现弱空间变异特征；其余离子及指标变异系数均在10%～100%，属中等变异特征。

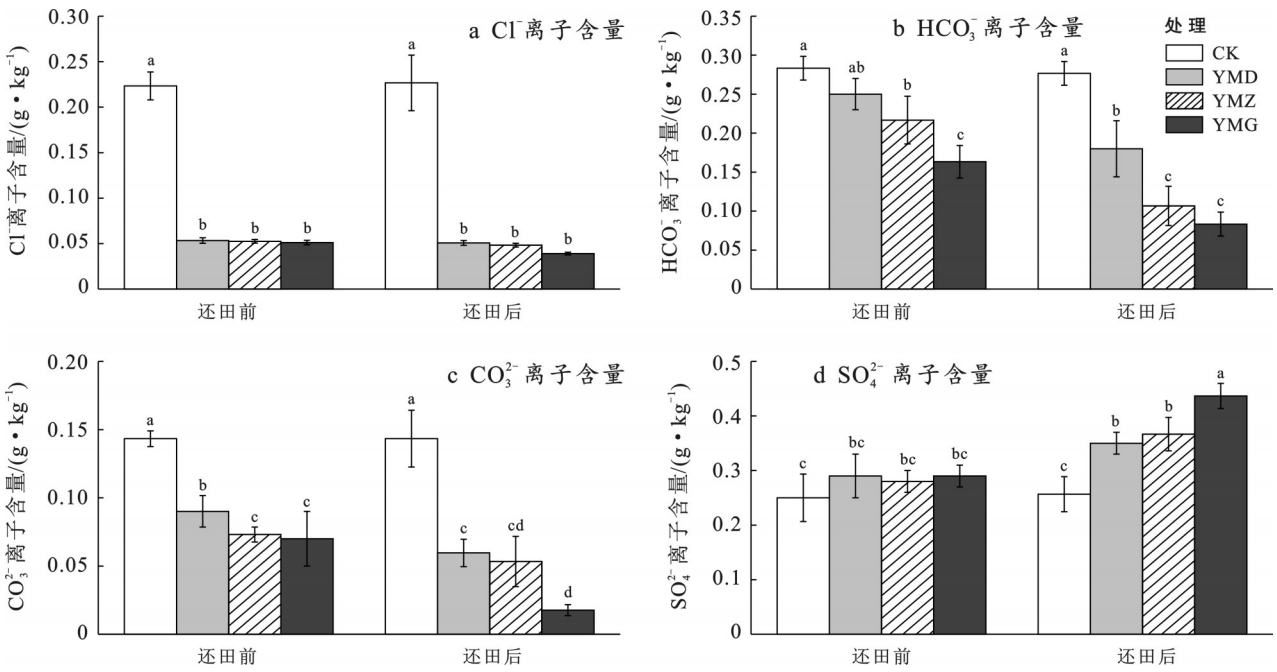


图4 不同密度燕麦还田土壤中阴离子含量变化

Fig.4 Variations in anion content in soils under different densities and oat straw return periods

表2 燕麦还田后土壤中各指标的统计分析

Table 2 Statistical analysis of soil indicators after oat straw return

指标	平均值±标准差	变异系数/%
K^+/(g·kg^{-1})	0.27±0.20	75.29
Na^+/(g·kg^{-1})	0.25±0.26	92.13
Ca^{2+}/(g·kg^{-1})	0.40±0.09	23.33
Mg^{2+}/(g·kg^{-1})	0.32±0.05	16.49
Cl^-/(g·kg^{-1})	0.09±0.12	97.43
CO_3^{2-}/(g·kg^{-1})	0.04±0.05	76.35
HCO_3^-/(g·kg^{-1})	0.16±0.09	54.46
SO_4^{2-}/(g·kg^{-1})	0.35±0.08	21.95
有机质/(g·kg^{-1})	3.39±2.06	60.76
pH值	8.59±0.41	4.76
ESP/%	18.20±3.74	20.54

2.4.2 土壤中有机质、pH值、八大离子的相关性分析

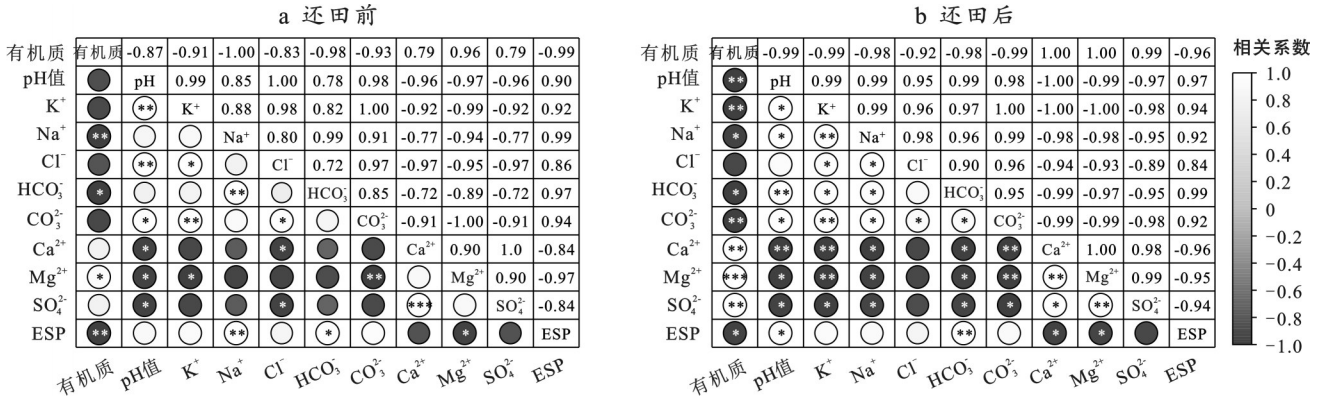
由图5可知，燕麦还田前后土壤有机质、pH值及8大离子的相关性格局整体较为相似，均呈现明显的群组化特征。土壤有机质与Ca^{2+}，Mg^{2+}，SO_4^{2-}之间呈显著正相关关系，构成相对稳定的正向关联组；K^+，Na^+，Cl^-，CO_3^{2-}，HCO_3^-与pH值，ESP之间均呈显著正相关关系，共同组成盐碱特征关联组；而以有机质为代表的土壤改良类指标与以Na^+，CO_3^{2-}，pH值为代表的盐碱障碍类指标之间整体呈显著负相关关系，组间拮抗特征明显。还田前，各指标间相关性达到极强的显著水平，其中Na^+与有机质，CO_3^{2-}与Mg^{2+}均呈完全负相关，相关系数均为－1；SO_4^{2-}与Ca^{2+}呈完全正相关，相关系数为1，指标间线性耦合程度极高。还田后，整体相关格局保持不变，但指标间的相关程度进一步加强，Ca^{2+}和Mg^{2+}与多数土壤指标均表现出高度显著的相关性，其中与有机质呈极显著正相关，与K^+呈极显著负相关，相关系数绝对值均处于较高水平。整体上，燕麦还田前后的相关矩阵均表现出稳定的群组特征，同组内指标联系紧密，组间以负相关为主，清晰反映出盐渍化土壤中各离子组成与理化性质间存在稳定的协同与拮抗关系。

3 讨论与结论

3.1 讨 论

本研究结果表明，在次生盐渍化农田中，燕麦种植与压青还田能够系统性改善土壤化学性质，是实现盐碱地绿色改良与地力提升的有效措施。其核心机制在于，燕麦还田通过增加外源有机质输入，驱动一系列生物化学反应协同发生，从多维度阻断并逆转土壤盐碱化过程[20-22]。燕麦残体在腐解过程中，不仅可以向土壤持续释放氮、磷、钾等速效养分，显著

提升土壤肥力水平,更重要的是会产生大量有机酸与CO_2,对土壤碱性起到中和作用,促使pH值明显下降。这一酸化效应与有机质改良效应相结合,能够促进土壤碳酸盐矿物溶解,提高Ca^{2+}和Mg^{2+}等二价阳离子的有效性[23-25]。活化后的Ca^{2+}和Mg^{2+}可与土壤胶体上吸附的Na^+发生离子置换反应,将交换性Na^+释放至土壤溶液[26]。与此同时,有机质改善土壤结构并增强渗透性,为盐分淋洗提供良好条件,使Na^+,K^+,Cl^-等随水分下渗移出耕层,最终实现土壤脱盐脱碱的综合效果[27-30]。



注:①黑色和灰色分别表示正相关和负相关;②*,**,***分别表示相关性在统计学上有意义($p\leqslant0.05$),($p\leqslant0.01$)和($p\leqslant0.001$)。

图5　燕麦还田前后土壤各指标的相关性分析

Fig.5　Correlation analysis of soil indicators before and after oat straw return

本研究通过离子动态变化与相关性分析进一步揭示了改良过程的内在关联。结果显示,土壤有机质、Ca^{2+},Mg^{2+}与SO_4^{2-}之间形成显著正相关的改良促进因子群,而与Na^+,K^+,Cl^-,CO_3^{2-},HCO_3^-,pH值及ESP构成的盐碱障碍因子群呈极显著负相关。燕麦还田明显强化了上述拮抗关系,其中Ca^{2+}与Mg^{2+}处于核心调控地位,是驱动离子置换与盐分淋失的关键[31-32]。同时,燕麦种植密度直接决定还田生物量,对改良效果具有显著调控作用。高密度还田因有机物料投入充足,腐解产酸能力更强,对土壤结构与盐分运移的改善作用更为突出,在降低致害离子含量,提升土壤养分水平方面表现最优。具体结论为:①在土壤养分方面,燕麦还田能够显著提高土壤碱解氮含量,说明有机残体矿化较为充分,可为土壤持续供氮。同时,还田处理可有效活化土壤固定态磷,减少磷素吸附沉淀,提高速效磷含量,有利于提升作物对磷素的吸收利用效率。燕麦腐解过程还能释放大量钾素,使土壤速效钾含量显著提升,且在高密度种植条件下效果最明显,对于改善盐渍土养分状况,增强作物抗逆性,提升产量与品质具有重要作用。②在pH值及K^+调控方面,燕麦还田通过腐解产生有机酸,中和土壤碱性,同时促进微生物活动与有机质积累,增强土壤缓冲能力,从而显著降低pH值。与单一种植相比,还田更有利于降低土壤K^+含量,主要原因包括有机胶体对K^+的吸附固定、土壤透水性增强促进钾离子淋失,以及pH值下降改变钾离子有效性与存在形态。③在Na^+消减方面,试验区地势平缓、排水条件较弱、降水偏少,Na^+易表聚累积,是苏打型盐渍化形成的主要原因。燕麦种植与还田均能有效降低Na^+含量,其中高密度还田效果最佳。其主要机制一方面是燕麦生长过程对Na^+的吸收与富集,另一方面是还田产生的有机酸提高Ca^{2+}和Mg^{2+}活度,促进交换性Na^+被置换解离,进而通过淋洗作用排出土体。④在Mg^{2+}与Cl^-变化方面,土壤Mg^{2+}含量随燕麦种植密度提高呈上升趋势,高密度还田提升作用最显著,主要来源于燕麦残体分解释放以及有机酸对含镁矿物的溶解活化。Cl^-移动性较强,种植与还田均能降低其含量,高密度还田通过改善土壤入渗性能强化淋洗作用,使脱氯效果更加稳定。⑤在CO_3^{2-},HCO_3^-和SO_4^{2-}调控方面,种植与还田均可降低HCO_3^-含量,但受密度影响不显著,主要与燕麦对其吸收较少,同时根系呼吸及微生物代谢产生CO_2可部分转化形成HCO_3^-有关。CO_3^{2-}对酸碱环境变化敏感,随还田量增加显著降低,高密度还田通过持续产酸促进CO_3^{2-}向HCO_3^-转化,显著减弱土壤碱化程度。此外,燕麦还田可提高土壤SO_4^{2-}含量,且随还田量增加效果更明显,主要与有机硫矿化释放、硫化物氧化及pH值变化调控硫形态转化有关。

综上所述,盐渍化土壤与正常土壤相比,存在有机质含量低,养分供应失衡,离子比例失调等突出问题,各障碍因子相互耦合,共同导致土壤理化与生物学性质劣化,严重制约作物生长。盐碱地改良的核

心在于同步提升有机质,平衡养分,优化离子组成。本研究表明,燕麦还田通过“增有机质—降pH值—促离子置换—强盐分淋洗”的协同改良路径,可有效优化土壤离子结构,降低碱化风险,提升土壤综合肥力,为科尔沁地区盐碱地生态修复与可持续利用提供了重要理论依据与技术支撑。

3.2 结 论

(1)燕麦还田可显著提升次生盐渍化土壤的养分水平,有效改善土壤贫瘠化现状。试验期间土壤有机质含量整体呈现:CK<还田前<还田后的变化规律,且随燕麦种植密度增加表现为:YMD<YMZ<YMG,其中还田后高密度处理YMG较CK显著提升约4.87 g/kg,增肥效果显著。同时,土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量在还田后均实现显著提升,且高密度种植下的提升效果更为突出,表明燕麦绿肥还田能够有效增强土壤供肥能力,对盐碱地培肥具有重要作用。

(2)燕麦还田能够显著调控土壤水溶性离子组成,促使土壤离子结构向良性方向转化。K^+,Na^+,Cl^-,HCO_3^-和CO_3^{2-}等致碱致盐离子整体呈:CK>还田前>还田后,YMD>YMZ>YMG的下降趋势;而Ca^{2+},Mg^{2+},SO_4^{2-}等有益二价离子则呈相反趋势显著升高。其中,还田后Ca^{2+}较CK增加0.11~0.19 g/kg,Na^+较CK减少0.34~0.45 g/kg,说明燕麦还田可通过离子置换与盐分淋洗实现土壤离子平衡优化。

(3)燕麦还田可显著降低土壤pH值与碱化度(ESP),有效缓解土壤强碱化障碍。还田后土壤pH值较CK降低0.57~0.93,ESP降低3.09%~8.19%,土壤碱化程度得到明显抑制。相关性分析进一步表明,土壤有机质与pH值,ESP及一价阳离子,CO_3^{2-}呈显著负相关,与Ca^{2+},Mg^{2+},SO_4^{2-}呈显著正相关,说明有机质提升是驱动土壤降盐、降碱与离子优化的关键机制。

综上所述,燕麦还田通过增加土壤有机质输入、降低土壤碱化程度、调控水溶性离子平衡等多重途径,系统改善了科尔沁次生盐渍化土壤的化学性质,能够有效缓解盐碱障碍,提升耕地质量,可为区域盐碱地生态修复与可持续利用提供理论依据与技术支撑。

参考文献(References)

[1] 马玉露,马金慧,贾桂华,等.机械混匀盐碱土配施不同物料对土壤碱化特征的影响[J].内蒙古民族大学学报(自然科学版),2021,36(6):476-483.
Ma Yulu, Ma Jinhui, Jia Guihua, et al. Effects of mechanical mixing saline alkali soil and different materials on soil alkalization characteristics [J]. Journal of Inner Mongolia Minzu University (Natural Sciences Edition), 2021,36(6):476-483.

[2] N'Dayegamiye A, Tran T S. Effects of green manures on soil organic matter and wheat yields and N nutrition [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2001, 81(4): 371-382.

[3] 蔡天革,李洋洋,姜雪,等.不同氮锌水平对燕麦生长特性和品质的影响[J].沈阳大学学报(自然科学版),2024,36(2):104-111.
Cai Tiange, Li Yangyang, Jiang Xue, et al. Effects of different nitrogen and zinc levels on growth characteristics and quality of oats [J]. Journal of Shenyang University (Natural Science), 2024,36(2):104-111.

[4] Zhang Hongyu, Liu Ningkun, Wang Yaru, et al. Super-pangenome analyses across 35 accessions of 23 *Avena* species highlight their complex evolutionary history and extensive genomic diversity [J]. Nature Genetics, 2025, 57(9):2276-2288.

[5] Song Ying, Gao Mingxiu, Li Zhi. Impacts of straw return methods on crop yield, soil organic matter, and salinity in saline-alkali land in north China [J]. Field Crops Research, 2025,322:109752.

[6] 李俊伟.燕麦对盐胁迫和碱胁迫的响应机制[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.
Li Junwei. The mechanism of oat response to salt stress and alkali stress [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.

[7] Tiller M, Reading L, Dawes L, et al. Effects of particle size fractions and clay content for determination of soil organic carbon and soil organic matter [J]. Soil and Tillage Research, 2025,252:106568.

[8] 刘莎,胡雨彤,赵汀葳,等.沼液对番茄生长和土壤细菌群落及功能的影响[J].中国农业大学学报,2026,31(4):83-96.
Liu Sha, Hu Yutong, Zhao Tingwei, et al. Effects of biogas slurry application on tomato growth and soil bacterial community and function [J]. Journal of China Agricultural University, 2026,31(4):83-96.

[9] 李亚莉,路国梁,吴正虎,等.不同改良剂对冬小麦产量、养分吸收及土壤养分的影响[J].中国农学通报,2026,42(2):128-132.
Li Yali, Lu Guoliang, Wu Zhenghu, et al. Effects of different amendments on yield and nutrient uptake of winter wheat and soil nutrients [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2026,42(2):128-132.

[10] 赵丽霞,程坤,卞清,等.盐碱化程度对外源有机碳在土壤团聚体中固存的影响[J/OL].(2026-02-09).土壤学报,1-13.https://link.cnki.net/urlid/32.1119.P.20260209.1448.006.
Zhao Lixia, Cheng Kun, Bian Qing, et al. Effects of

salinization degree on the sequestration of exogenous organic carbon in soil aggregates [J/OL]. (2026-02-09). Acta Pedologica Sinica, 1-13. https://link.cnki.net/urlid/32.1119.P.20260209.1448.006.

[11] 周俊杰.新疆环塔里木盆地土壤盐渍化特征及其对土壤和植物碳储量的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2025.
Zhou Junjie. Characteristics of soil salinity and its effect on soil and plant carbon storage in the ring Tarim basin of Xinjiang [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2025.

[12] 吴桂玲,吴晓晖,欧为友,等.青海湖流域盐沼湿地典型植被群落土壤盐分离子分布研究[J].生态环境学报,2025,34(8):1228-1239.
Wu Guiling, Wu Xiaohui, Ou Weiyou, et al. Study on the distribution of soil salinity ions in typical vegetation communities of salt marsh wetlands in the Qinghai Lake basin [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2025, 34(8):1228-1239.

[13] 刘雪.土地利用和耕作管理方式对盐碱土壤的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2025.
Liu Xue. The impact of land use and farming management practices on saline-alkali soils [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2025.

[14] 王海森,李强,张兰英,等.改良物料对土默川平原盐渍土壤微生物群落的差异化影响[J/OL].(2026-01-06).环境科学,1-20. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202509120.
Wang Haisen, Li Qiang, Zhang Lanying, et al. Differential effects of amendment materials on microbial communities in saline soil of Tumochuan plain [J/OL]. (2026-01-06). Environmental Science, 1-20. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202509120.

[15] 崔丽洋,张磊,贾夏,等.结合生态系统服务的南疆盐碱地土壤质量评价[J].生态环境学报,2026,35(2):245-255.
Cui Liyang, Zhang Lei, Jia Xia, et al. Soil quality assessment of saline-alkali land in southern Xinjiang combined with ecosystem services [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2026,35(2):245-255.

[16] Wang Cunhu, Li Di, Mei Hao, et al. The genotypically conserved core microbiota modulates nutrient turnover in soybean rhizosphere [J]. Journal of Advanced Research, 2025,47:123-135.

[17] 蒋富昌.灌溉-生物炭联合调控对盐渍化土壤理化性质及甜菜产量的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2025.
Jiang Fuchang. Impact of combined irrigation-biochar-regulation on application on soil physical andchemical properties and sugar beet yield [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2025.

[18] 陈娜,郭全恩,曹诗瑜,等.不同改良剂对河西盐碱地饲用玉米土壤养分及盐离子影响[J].草地学报,2026,34(7):2688-2697.
Chen Na, Guo Quan'en, Cao Shiyu, et al. Effects of different amendments on soil nutrients and salt ions of forage maize in Hexi saline-alkali land [J]. Acta Agrestia Sinica, 2026,34(7):2688-2697.

[19] 胡佳乐.耐盐微生物与不同改良物料联合施用对滨海盐土改良效果研究[D].江苏 扬州:扬州大学,2025.
Hu Jiale. Study on the effect of salt-tolerant microorganisms combined with different amendment materials on the improvement of coastal saline soils [D]. Yangzhou, Jiangsu: Yangzhou University, 2025.

[20] 张涛.玉米废弃物与矿源类有机肥配施对盐碱土壤性质及燕麦产能的影响[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2024.
Zhang Tao. Effects of combined application of maize waste and mineral organic fertilizer on properties of saline-alkali soil and productivity of oat [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.

[21] Zhou Guopeng, Li Guilong, Liang Hai, et al. Green manure coupled with straw returning increases soil organic carbon via decreased priming effect and enhanced microbial carbon pump [J]. Global Change Biology, 2025,31(5):e70232.

[22] 刘芳燕.有机改良剂对稻改旱盐碱地地力及大豆产量的影响[D].宁夏 银川:宁夏大学,2024.
Liu Fangyan. Effect of organic amendments on soil fertility and yield of soybean in paddy field changed to dryland [D]. Yinchuan, Ningxia: Ningxia University, 2024.

[23] 雷琬莹,李娜,滕培基,等.农田生态系统有机物料腐解过程及土壤培肥机制研究[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(9):1393-1408.
Lei Wanying, Li Na, Teng Peiji, et al. Decomposition processes of organic materials and their mechanisms of improv-ing soil fertility in cropland ecosystems [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022,30(9):1393-1408.

[24] 齐浠含.苏打盐碱土淡化土层的构建及改良效果研究[D].辽宁 鞍山:辽宁科技大学,2023.
Qi Xihan. Research on construction and improvement effect of desalinated soil layer of soda saline-alkali soil [D]. Anshan, Liaoning: University of Science and Technology Liaoning, 2023.

[25] Meng Xiangtian, Zhang Xuechen, Li Yunuo, et al. Nitrogen fertilizer builds soil organic carbon under straw return mainly via microbial necromass formation [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2024,188:109223.

(下转第 31 页)