DOI:10.20176/j.cnki.nxdz.20260506

粉煤灰基土壤调理剂对盐碱地土壤-作物系统的影响评估

田生昌[1,2]，左　忠[1*]，徐　龙[2]，周小平[2]，
杨　慧[1]，程嘉庆[2]，王建花[3]，张　敏[4]

(1.宁夏农林科学院 林业与草地生态研究所,宁夏 银川 750002;
2.宁夏农垦前进农场有限公司,宁夏 平罗 753402; 3.宁夏农垦集团有限公司,宁夏 银川 750004;
4.宁夏回族自治区农垦事业管理局 农林牧技术推广服务中心,宁夏 银川 750004)

摘　要:为研究粉煤灰基土壤调理剂改良盐碱地的效果,实现废弃物粉煤灰的大宗消纳,分别在水稻地、玉米地施用粉煤灰基土壤调理剂,并以未施用地为对照实验,在施用前后分别取0～20,＞20～40 cm耕层土壤,检测土壤中盐、有机质的质量含量,土壤pH值等指标;当年秋季收获后计算水稻和玉米的产量,评价粉煤灰基土壤调理剂的改良效果。结果表明,在水稻地、玉米地施用粉煤灰基土壤调理剂,秋季0～20,＞20～40 cm土壤中盐的质量含量较对照组显著降低($P<0.05$),而土壤pH值、有机质的质量含量变化不大,水解氮的质量含量减少,有效磷和速效钾的质量含量增加,但均不显著;水稻地、玉米地0～20 cm耕层土壤中盐的质量含量分别降低29.65%～48.14%($P<0.05$),70.34%～89.59%($P<0.05$);水稻地、玉米地＞20～40, ＞40～60 cm耕层土壤中盐的质量含量均降低,但降低幅度较小;水稻穗粒数、结实粒均增加,千粒质量增加0.78 g,产量增加53.70 kg/667 m^2,增产12.80%,达到473.70 kg/667 m^2($P<0.05$);青贮玉米成苗率、收获株数均增加25.00%,单株鲜质量增加1.47%,产量增加0.20 t/667 m^2,增产8.37%,达到2.59 t/667 m^2,但产量差异不具有统计学意义。施用粉煤灰基土壤调理剂,能够改良盐碱土壤,使作物增产,具有推广利用价值。

关键词:粉煤灰基土壤调理剂;改良盐碱地;作物;土壤盐分;产量
分类号:(中图)S156.4;X705　　**文献标志码:**A

联合国粮食与农业组织发布的2021年统计数据显示,全球盐渍土壤面积逾8.33亿hm^2,占地球面积的8.7%[1]。2021年,中国第3次土地调查结果显示,分布于新疆、青海、内蒙古及宁夏等地的盐碱土壤以硫酸盐-氯化物类型为主,面积大约0.077亿hm^2,占中国盐碱地总面积的96.1%[2]。随着人口增长,人均耕地面积减少和土地资源紧缺等问题日益突出,而盐碱地可作为耕地后备资源与“潜在粮仓”。同时,对盐碱地进行综合治理与利用,在拓展农业生产空间与保障国家粮食安全等方面具有重要意义[3]。近年来,国内外针对盐碱地改良的研究结果显示,通过物理、化学、生物和综合措施,可定向调节土壤中的盐分运移,进而改善土壤结构、增加土壤养分与矿物质含量,从而促进农作物根系吸收水分与养分[4-7],具体表现为土壤盐碱化程度降低、盐碱地面积减少、农作物可种植面积与产量增加[8-10]。但个别地区盐碱地治理措施不科学,导致优质宜垦盐碱耕地面积减少,盐碱化和盐碱地空间分布碎片化程度持续加剧,致使对其开发利用难度不断加大[11-15]。

宁夏农垦前进农场自1952年成立以来,通过优化组装配套大型农业机械设备,将渠道大水漫灌输

收稿日期:2025-01-21
基金项目:宁夏回族自治区重大科技成果转化项目(2023CJE09053);宁夏回族自治区“十四五”重点研发项目(2024BBF02007);“十四五”国家重点研发计划(2021YFD1900605);宁夏回族自治区林草局退耕还林生态效益监测专项
作者简介:田生昌(1966—),男,研究员,主要从事盐碱地改良与利用技术研究,(电子信箱)nxpltsc@163.com。
***通信联系人:**左忠(1976—),男,研究员,主要从事土壤风蚀监测与荒漠化防治技术研究,(电子信箱)nxzuozhong@163.com。
引用格式:田生昌,左忠,徐龙,等.粉煤灰基土壤调理剂对盐碱地土壤-作物系统的影响评估[J].宁夏大学学报(自然科学版中英文),2026,47(4):326-337.

水模式改为高效节水滴灌模式，将沟道排水改为以暗管排水为主、沟道排水为辅，进而使灌排操作基本实现自动化；将凭经验管理水肥模式改为按作物水肥需求的精准管理模式；合理规划沟渠路构架，去除多余沟渠路建成大条田，建设高标准农田约0.2万 hm^2，使耕地面积净增10%以上，极大地提高了农机作业效率，推动了土地改良及合理利用[16-19]。但是，由于水资源不足、化肥施用量过量和有机肥施用量少，土壤结构被破坏，局地土壤盐碱化程度加重，作物产量低而不稳和种植效益低等问题依然存在。

粉煤灰是在燃煤电厂等能源工业生产过程中产生的固体废弃物之一，其化学成分与土壤相似，以易于结构改性的Al、Si元素为主，且富含植物生长必需的中微量元素，具有制备土壤改良材料的天然优势[20-22]。宁夏、内蒙古和新疆等地区的粉煤灰存量大，其消纳问题备受关注。中国科学院过程工程研究所与北方民族大学对粉煤灰进行了系统研究，以结构改性的Al、Si基材料为主，去除有害重金属，再添加其他土壤调理功能成分，制得粉煤灰基土壤调理剂，并将其用于土壤改良，取得了较好的改良效果。而且，通过粉煤灰基土壤调理剂改良盐碱土地，有望解决大宗粉煤灰滞纳问题。目前，宁夏盐碱地面积达17.8万 hm^2，约占全区耕地总面积的40%左右，亟需进行土壤改良[23-27]。为此，在宁夏农垦前进农场土壤施用粉煤灰基土壤调理剂，分析利用废弃物粉煤灰生产的土壤调理剂对盐碱地土壤-作物系统的影响，进而为宁夏及全国盐碱地土壤改良提供技术参考。

1　实验部分

1.1　研究区概况

宁夏农垦前进农场位于银川平原北部、平罗县西（106°13′～106°26′E、38°45′～38°55′N），土地面积约2万 hm^2，海拔为1 091～1 240 m，年均降水量为220 mm，年均气温为8.3 ℃（≥10 ℃的积温达3 223.6 ℃），年均日照时间为3 039.6 h，无霜期为163 d。该地土壤类型有潮土、灌淤土及碱土等7种。由于受到自然条件的影响，该地土壤盐碱程度较高，其中，盐碱地面积约占该农场总耕地面积的60%。土壤中有机质、N、P的质量含量较低，肥力水平普遍低下；土壤中微量元素除有效B的质量含量较高外，其他有效微量元素的质量含量均较低；土壤中有效Zn、Mn、Mo的质量含量缺乏，且低于农作物生长发育所需的临界值。该地的主要自然灾害为持久性高温干旱、干热风、沙尘及暴雨等。

1.2　实验材料

采用中国科学院过程工程研究所和北方民族大学材料科学与工程学院研发的粉煤灰基土壤调理剂（专利号分别为ZL202011035383.8、ZL202110114441.4、ZL202110164441.5）。该粉煤灰基土壤调理剂的制备方法：去除工业废弃物粉煤灰中污染土壤环境、危害土壤健康的重金属等物质，再添加土壤改良剂等成分。

1.3　实验设计及实施

采用大区对比法进行设计和实施。作物品种：水稻为‘宁粳43号’、玉米为‘先玉1225’。水稻、玉米实验地各选4块，进行3个处理（施用）、1个对照（CK）实验（未施）。通过方差分析，研究和评估粉煤灰基土壤调理剂的施用效果及其对作物产量的影响。粉煤灰基土壤调理剂的施用量，水稻实验地为30 t/hm^2、玉米实验地为22.5 t/hm^2。水稻实验地共4处（R1，R2，R3，CK1），选在一站二队（λ_N=38°42′、φ_E= 106°20′），地下水位约1.2 m；玉米实验地共4处（M1，M2，M3，CK2），选在二站七队（λ_N=38°41′、φ_E= 106°21′）和八队（λ_N=38°41′、φ_E= 106°19′），地下水位约1.6 m。

在实施粉煤灰基土壤调理剂前、后，测定土壤的盐碱化程度、基础养分等，然后分析和评估施用效果。在水稻、玉米播种前，一次性施用粉煤灰基土壤调理剂。将粉煤灰基土壤调理剂均匀撒于地表，再旋耕15～20 cm深度，使其与土壤混合均匀。其他各项田间管理与当地其他作物一致。

分别在2024年3月中旬（播种前）、10月上旬（收获后）采样，使用人工土钻按0～20，＞20～40，＞40～60 cm将土壤分3层。采用S形采样法，采集典型地块土壤样品54个，并将相同土壤样品混合均匀，标记后送检。

测定项目包括土壤pH值，土壤中盐、有机质、N、P、K、水解氮、有效磷及速效钾的质量含量。依据行业标准LY/T 1249—1999《土壤碱化度的计算》计算土壤碱化度。调查项目有水稻和玉米的苗情、苗势，收获时籽粒性状和产量等。

1.4　土壤样品检测

1）仪器。FE28型pH计（美国Mettler-Toledo公司）、DDS-307型电导率仪（上海仪电科学仪器股份有限公司）、8400型全自动定氮仪（瑞士Büchi公司）、M410型火焰光度计（英国Sherwood科学仪器公司）、722S型可见分光光度计（上海仪电分析仪器有限公司）。

2)检测依据[28]:NY/T 1377—2007、LY/T 1251—1999(3.2 电导法)、NY/T1121.6—2006、LY/T 1228—2015(3.1凯氏定氮法与4水解性氮的测定)、LY/T 1232—2015(3.2酸溶法与4.1比色法)、LY/T 1234—2015(4速效钾的测定)、LY/T 1243—1999(31 mol/L乙酸铵交换法)、LY/T 1213—1999(2烘干法)。

1.5 数据处理及作图

采用Excel 2010软件进行数据统计,用SPSS 17.0软件进行分析,用Origin 2021软件作图。

2 结果与分析

2.1 施用粉煤灰基土壤调理剂对土壤的影响

在水稻、玉米实验地施用粉煤灰基土壤调理剂后,土壤盐碱指标见表1。在播种前、收获后,0~20,>20~40 cm土层(h)土壤中盐的质量比(w(s))显著减少($P<0.05$);pH值、有机质的质量比(w(C))变化不大,差异不具有统计学意义;水解氮的质量比($w(N_s)$)减少;有效磷的质量比($w(P_s)$),水稻实验地减少,玉米实验地增加;速效钾的质量比($w(K_s)$)增加。

表1 施用粉煤灰基土壤调理剂后0~20,>20~40 cm土壤的盐碱指标

Tab. 1 Salinity and alkalinity indicators for soil layers at 0−20 cm and >20−40 cm after applying fly ash−based soil conditioner

作物	h/cm	实验	w(s)/(g·kg^{-1})		pH值		w(C)/(g·kg^{-1})		$w(N_s)$/(mg·kg^{-1})		$w(P_s)$/(mg·kg^{-1})		$w(K_s)$/(mg·kg^{-1})	
			播种前	收获后	播种前	收获后	播种前	收获后	播种前	收获后	播种前	收获后	播种前	收获后
水稻	0~20	R1	6.92A	4.09B	7.95a	8.40a	24.00a	23.60a	74.30a	59.30a	46.20a	26.90b	150.00a	346.00b
		R2	10.2A	5.29B	8.48a	8.48a	22.50a	25.50a	75.30a	53.00b	56.10a	41.70a	136.00a	307.00b
		R3	4.52A	3.18B	8.08a	8.22a	24.37a	22.50a	63.70a	37.30b	42.50a	34.00a	146.00a	216.00b
		CK1	8.60a	9.77a	8.24a	8.26a	9.34a	10.46a	77.88a	64.90a	47.75a	40.50a	244.00a	301.00b
	>20~40	R1	6.00A	2.63B	8.06a	8.73b								
		R2	4.18a	3.32b	8.40a	8.76a								
		R3	4.53a	3.02b	8.00a	8.33a								
		CK1	9.09	9.39	8.23a	8.30a								
玉米	0~20	M1	7.30A	0.76B	8.72a	9.04a	8.21a	8.57a	19.70a	37.30a	12.70a	21.10a	119.00a	162.00a
		M2	2.36a	0.52b	9.21a	8.72a	6.04a	8.53a	61.00a	24.30b	20.40a	46.40b	150.00a	157.00a
		M3	6.71A	1.99B	9.15a	8.83a	7.34a	9.09a	22.00a	37.70a	5.21a	10.40a	139.00a	205.00b
		CK2	3.30a	2.84a	8.70a	8.55a	9.24a	9.11a	38.68a	30.64a	8.28a	60.69b	225.69a	281.35b
	>20~40	M1	3.35a	0.84b	8.57a	9.01a								
		M2	2.51a	0.71b	9.09a	9.27a								
		M3	5.25A	1.60B	9.17a	9.34a								
		CK2	2.38a	2.59a	8.82a	8.60a								

注:数据中a,b代表差异具有统计学意义($P<0.05$);A,B代表差异极具统计学意义($P<0.01$),在表2~表12中均代表相同含义。

由表1可知,在播种前、收获后,对于h=0~20,>20~40 cm土壤,水稻对照地(CK1)中w(s)增加,pH值略增加;对于h=0~20 cm土壤,玉米对照地(CK2)中,w(s)降低0.46 g/kg;去除这部分影响再分析,发现在各处理下,w(s)依然处于显著水平。对于h>20~40 cm土壤,CK2中w(s)增加;对于h=0~20,>20~40 cm土壤,CK2中pH值略有减小,但差异不显著;而土壤中w(C)、w(N)、w(P)、w(K)均发生变化,但变化相对较小。

2.2 土壤盐碱化程度

2.2.1 土壤中的盐分 在水稻、玉米实验地施用粉煤灰基土壤调理剂,播种前、收获后,h=0~20,>20~40,>40~60 cm土壤中的w(s)见表2。

种植前,水稻实验地中w(s)=4.52~10.20 g/kg,收获后w(s)=3.18~5.29 g/kg,较施用粉煤灰基土壤调理剂前显著降低($P<0.01$),降低29.65%~48.14%;3块水稻实验地的盐渍化程度分别发生重度盐碱地→中度盐碱地、极重度盐碱地→中度盐碱地、中度盐碱地→中度较轻盐碱地的改变,显示粉煤灰基土壤调理剂的改良效果明显。

种植前,玉米实验地中w(s)=2.36~7.30 g/kg,收获后w(s)=0.52~1.99 g/kg,较施用粉煤灰基土壤调理剂前显著降低($P<0.01$),降低70.34%~89.59%;3块玉米实验地的盐渍化程度分别发生重度盐渍地→非盐渍化地、轻度盐渍地→非盐渍化地、重度盐渍地→非盐渍化地的改变,显示粉煤灰基土壤调理剂的改良效果明显。

种植前、收获后,水稻、玉米实验地20~40,>40~60 cm土壤中,w(s)分别降低20.57%~

表 2　水稻、玉米实验地种植前、收获后土壤中 w(s)的变化

Tab. 2　Changes in w(s) in soil of the rice and maize experimental fields before sowing and after harvesting

作物	实验	h/cm	w(s)/(g•kg^{-1}) 种植前	w(s)/(g•kg^{-1}) 收获后	Δw(s)/(g•kg^{-1})	Δw(s)/%	土壤盐渍化程度
水稻	R1	0～20	6.92±0.740a	4.09±0.940b	−2.830	−40.900	重→中
		＞20～40	6.00±0.899a	2.63±1.082b	−3.370	−56.170	重→轻
		＞40～60	3.98±0.882a	1.98±0.765b	−2.000	−50.250	中→轻
	R2	0～20	10.2±0.980A	5.29±0.840B	−4.910	−48.140	极重→中
		＞20～40	4.18±0.779a	3.32±0.691a	−0.860	−20.570	中→中$^-$
		＞40～60	4.55±0.565a	3.00±0.402b	−1.550	−34.070	中→中$^-$
	R3	0～20	4.52±0.580a	3.18±0.360b	−1.340	−29.650	中→中$^-$
		＞20～40	4.53±0.945a	3.02±0.153a	−1.510	−33.330	中→中$^-$
		＞40～60	3.62±1.64a	1.70±0.254a	−1.920	−53.040	中→轻
玉米	M1	0～20	7.30±1.470A	0.76±0.420B	−6.540	−89.590	重→轻
		＞20～40	3.35±0.679A	0.84±0.369B	−2.510	−74.930	中→轻
		＞40～60	2.54±0.401A	0.74±0.208B	−1.800	−70.870	中→轻
	M2	0～20	2.36±1.830a	0.52±0.038a	−1.840	−77.970	轻→轻$^-$
		＞20～40	2.51±0.125A	0.71±0.061B	−1.800	−71.710	轻→轻$^-$
		＞40～60	2.87±0.336A	1.28±0.377B	−1.600	−55.750	轻→轻$^-$
	M3	0～20	6.71±2.410a	1.99±0.470b	−4.720	−70.340	重→轻
		＞20～40	5.25±2.022a	1.60±0.456b	−3.650	−69.520	中→轻
		＞40～60	3.62±0.932a	1.54±0.770b	−2.080	−57.460	中→轻

注:盐碱地分级分类以 $w(Cl^- - SO_4^{2-}) > w(CO_3^{2-} - HCO_3^-)$ 的类型为依据,参考第 3 次全国土壤普查分类分级标准中 w(s)的分级标准(同地取 3 次测定的平均值)。

56.17%、55.75%～89.59%,即粉煤灰基土壤调理剂对盐碱地的改良效果明显。

施用粉煤灰基土壤调理剂对土壤盐分降低效果明显(图 1～图 2,图中 a,b 代表差异具有统计学意义($P<0.05$);A,B 代表差异极具统计学意义($P<0.01$),这在图 3～图 11 中代表相同的含义)。玉米实验地土壤中 w(s)降低幅度(55.75%～89.59%)远大于水稻地。究其原因,在玉米实验地采用高效节水灌溉和暗管排水等技术,有效降低了地下水位,地下水带走了部分盐分;2024 年降雨频繁,降雨量较大,也使土壤中 w(s)降低。但是具体的降盐机制有待进一步研究。

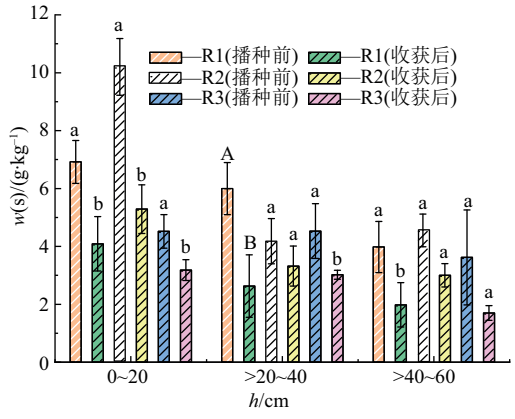


图 1　水稻实验地种植前、收获后土壤中 w(s)

Fig. 1　w(s) in soil of the rice experimental field before sowing and after harvesting

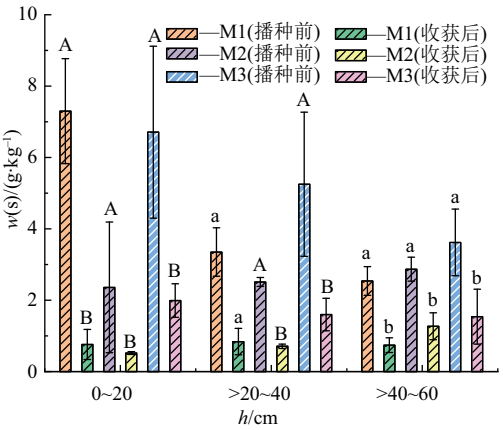


图 2　玉米实验地种植前、收获后土壤中 w(s)

Fig. 2　w(s) in soil of the maize experimental field before sowing and after harvesting

2.2.2　土壤碱化程度(pH 值)　在水稻、玉米实验地施用粉煤灰基土壤调理剂,播种前、收获后 h=0～20,＞20～40,＞40～60 cm 土壤的 pH 值见表 3。由表 3 可知,种植前,水稻实验地 h=0～20 cm 土壤的 pH=7.95～8.48、收获后 pH=8.22～8.48,pH 值略有升高,但是 3 块水稻实验地仍为轻度碱化土壤,且碱化程度不变。种植前,玉米实验地 0～20 cm 土壤的 pH=8.72～9.21、收获后 pH=8.72～9.05,其中 1 块地的 pH 值升高(轻度碱化地→重度碱化地),其他 2 块地的 pH 值降低(重度碱化地→中度碱化地)。

表3 水稻、玉米实验地种植前、收获后土壤的pH值变化

Tab. 3 Changes in soil pH values of the rice and maize experimental fields before sowing and after harvesting

作物	实验	h/cm	pH值		ΔpH	变化率/%	土壤碱化程度
			种植前	收获后			
水稻	R1	0～20	7.95±0.026a	8.40±0.069b	0.450	5.660	轻→轻$^+$
		＞20～40	8.06±0.051a	8.73±0.300b	0.670	8.310	
		＞40～60	8.11±0.025A	9.10±0.263B	1.010	12.450	
	R2	0～20	8.48±0.035a	8.48±0.020a	0	0	轻→轻$^+$
		＞20～40	8.40±0.072A	8.76±0.066B	0.360	4.290	
		＞40～60	8.24±0.020a	9.27±0.544b	1.030	12.500	
	R3	0～20	8.08±0.106a	8.22±0.104a	0.140	1.730	轻→轻$^+$
		＞20～40	8.00±0.172a	8.33±0.081b	0.330	4.130	
		＞40～60	8.14±0.072a	8.56±0.191b	0.420	5.160	
玉米	M1	0～20	8.72±0.035a	9.04±0.297a	0.320	3.670	轻→重
		＞20～40	8.57±0.128a	9.01±0.210b	0.440	5.130	
		＞40～60	8.69±0.042A	9.41±0.108B	0.720	8.290	
	M2	0～20	9.21±0.499a	8.72±0.115a	−0.490	−5.320	重→重
		＞20～40	9.09±0.049a	9.27±0.743a	0.180	1.980	
		＞40～60	9.55±0.170a	9.69±0.525a	0.140	1.470	
	M3	0～20	9.15±0.151a	8.83±0.384a	−0.320	−3.500	重→重
		＞20～40	9.17±0.181a	9.34±0.670a	0.170	1.850	
		＞40～60	9.21±0.180a	9.18±0.611a	−0.030	−0.330	

注:盐碱地分级分类以$w(Cl^- - SO_4^{2-}) > w(CO_3^{2-} - HCO_3^-)$类型为依据,参考第3次全国土壤普查分类分级标准中pH值的分级标准(同地取3次测定的平均值)。

种植前、收获后,3块水稻、玉米实验地h=20～40,＞40～60 cm土壤的pH值增减量分别为4.13%～12.50%,−0.33%～8.29%,即水稻、玉米实验地的pH值略升高,碱化程度略有加重。

因此,施用粉煤灰基土壤调理剂后,水稻、玉米实验地土壤的pH值略升高(图3～图4)。究其原因,与粉煤灰基土壤调理剂自身的碱性密切相关,这有待进一步深入研究。

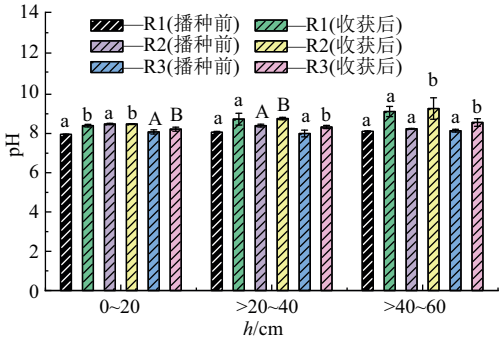


图3 水稻实验地种植前、收获后土壤pH值

Fig. 3 pH values in soil of the rice experimental field before sowing and after harvesting

2.3 土壤中有机质的质量比(w(C))

有机质是土壤中各种形态含碳有机物质的总称,能改善土壤的物理结构,提高土壤的保水、保肥

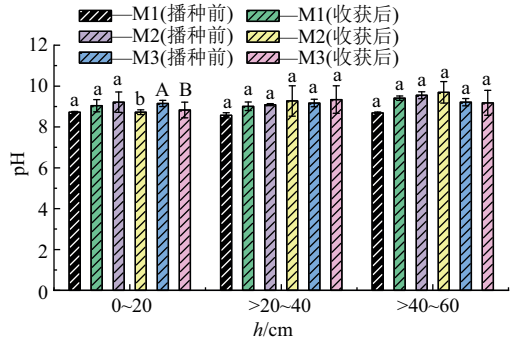


图4 玉米实验地种植前、收获后土壤pH值

Fig. 4 pH values in soil of the maize experimental field before sowing and after harvesting

能力,其w(C)直接影响土壤的肥力。施用粉煤灰基土壤调理剂后,水稻、玉米实验地耕层土壤中w(C)没有明显变化(表4、图5)。

由表4、图5可知,在3块水稻实验地施用粉煤灰基土壤调理剂后,种植前、收获后h=0～20 cm土壤中w(C)处于中上水平。其中,有两块地土壤中w(C)降低、一块地土壤中w(C)增加,但总w(C)变化不大,仍处于中上水平。在对3块玉米实验地施用粉煤灰基调理剂后,种植前、收获后h=0～20 cm土壤中w(C)增加,但增加幅度不大,仍处于低等水平。因此,在水稻、玉米实验地施用粉煤灰基土壤

表 4　水稻、玉米实验地种植前、收获后 0~20 cm 土壤中 w(C)

Tab. 4　w(C)in soil layers at 0−20 cm of the rice and maize experimental fields before sowing and after harvesting

作物	实验	w(C)/(g•kg^{-1})		Δw(C)/(g•kg^{-1})	变化率/%	w(C)分级/(g•kg^{-1})	w(C)变化
		种植前	收获后				
水稻	R1	24.0±0.721a	23.6±3.732a	−0.400	−1.670	20.00~30.00	中上→中上
	R2	22.5±1.001a	25.5±3.830a	3.000	13.330		中上→中上
	R3	24.37±1.320a	22.5±0.954a	−1.870	−7.670		中上→中上
青贮玉米	M1	8.21±0.205a	8.57±0.482a	0.360	4.380	6.00~10.00	低→低
	M2	6.04±0.746a	8.53±1.607a	2.490	41.230		低→低
	M3	7.34±0.498a	9.09±2.284a	1.750	23.840		低→低

注:参考第 3 次全国土壤普查中 w(C)的分级标准(同地取 3 次测定的平均值)。

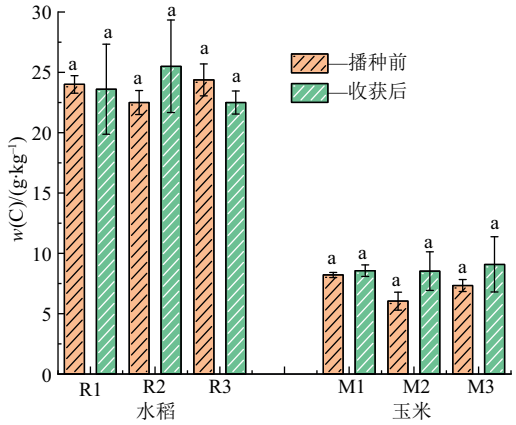


图 5　水稻、玉米实验地种植前、收获后 0~20 cm 土壤中 w(C)

Fig. 5　w(C))in soil layers at 0−20 cm of the rice and maize experimental fields before sowing and after harvesting

调理剂,对土壤中 w(C)的影响甚微。要提高土壤中 w(C),应采取增施有机肥、推广秸秆还田及因地制宜种植绿肥等措施。

2.4　土壤中 N、P、K 的质量比(w(N)、w(P)、w(K))

N、P、K 元素是维持植物生命活动的基本营养元素。在施用粉煤灰基土壤调理剂后,耕层 h=0~20 cm 土壤中 w(N)、w(K)略有增加,w(P)增加极显著(表 5~表 7、图 6~图 8)。

由表 5~表 7、图 6~图 8 可知,在对 3 块水稻实验地施用粉煤灰基土壤调理剂后,种植前、收获后耕层 h=0~20 cm 土壤中,w(N)处于中上水平。其中,有两块地土壤中 w(N)降低、一块地土壤中 w(N)增加,但 w(N)变化不大,仍处于中上水平。对 3 块玉米实验地施用粉煤灰基土壤调理剂后,种植前、收获后耕层 h=0~20 cm 土壤中 w(N)增加,由极低等水平变为低等水平;w(P)增加,由低等水平变为中等水平;w(K)增加,由中、高等水平变为高等水平。因此,在水稻、玉米实验地施用粉煤灰基土壤调理剂,对土壤中 w(P)影响较大,对土壤中 w(K)有一定影响,而对土壤中 w(N)影响不大。

2.5　土壤中水解氮、有效磷、速效钾的质量比(w(N_s)、w(P_s)、w(K_s))

N_s、P_s、K_s作为植物的有效养分,是评价土壤肥力高低的重要指标。在水稻、玉米实验地施用粉煤灰基土壤调理剂,对耕层土壤中 w(N_s),w(P_s),w(K_s)有一定影响(表 8~表 10、图 9~图 11)。

表 5　水稻、玉米实验地种植前、收获后 0~20 cm 土壤中 w(N)

Tab. 5　w(N) in soil layers at 0−20 cm of the rice and maize experimental fields before sowing and after harvesting

作物	实验	w(N)/(g•kg^{-1})		Δw(N)/(g•kg^{-1})	变化率/%	w(N)分级/(g•kg^{-1})	w(N)变化
		种植前	收获后				
水稻	R1	1.36±0.020a	1.32±0.058a	−0.040	−2.940	1.00~1.50	中上→中上
	R2	1.25±0.038a	1.28±0.106a	0.030	2.400		
	R3	1.31±0.081a	1.24±0.035a	−0.070	−5.340		
玉米	M1	0.45±0.015a	0.55±0.040b	0.100	22.220	<0.50、(0.50~0.75)	极低→低
	M2	0.43±0.083a	0.46±0.053a	0.030	6.980		
	M3	0.47±0.012a	0.59±0.153a	0.120	25.530		

注:参考第 3 次全国土壤普查分级中 w(N)的分级标准(同地取 3 次测定的平均值)。

表6 水稻、玉米实验地种植前、收获后0~20 cm土壤中w(P)

Tab. 6 w(P)in soil layers at 0−20 cm of the rice and maize experimental fields before sowing and after harvesting

作物	实验	w(P)/(g•kg^{-1})		Δw(P)/(mg•kg^{-1})	变化率/%	w(P)分级/(g•kg^{-1})	w(P)变化
		种植前	收获后				
水稻	R1	0.60±0.100a	0.83±0.030b	0.230	38.330	0.50~0.75(低)、0.75~1.00(中)	低→中
	R2	0.50±0.021A	0.91±0.026B	0.410	82.000		
	R3	0.68±0.029A	0.85±0.026B	0.170	25.000		
玉米	M1	0.45±0.050A	0.69±0.042B	0.240	53.330	0.50~0.75(低)、0.75~1.00(中)	低→中
	M2	0.55±0.021a	0.84±0.196a	0.290	52.730		
	M3	0.50±0.060a	0.72±0.070b	0.220	44.000		

注:参考第3次全国土壤普查分级中w(P)的分级标准(同地取3次测定的平均值)。

表7 水稻、玉米实验地种植前、收获后0~20 cm土壤中w(K)

Tab. 7 w(K) in soil layers at 0−20 cm of the rice and maize experimental fields before sowing and after harvesting

作物	实验	w(K)/(g•kg^{-1})		Δw(K)/(mg•kg^{-1})	变化率/%	w(K)分级/(g•kg^{-1})	w(K)变化
		种植前	收获后				
水稻	R1	17.3±3.732a	20.9±0.153a	3.600	20.810	10.00~15.00(中)、15.00~20.00(高)	中→高
	R2	12.7±4.251a	20.5±1.127b	7.800	61.420		中→高
	R3	18.1±0.462A	20.5±0.600B	2.400	13.260		高→高
玉米	M1	15.1±3.265a	19.6±0.929a	4.500	29.800	10.00~15.00 (中)、15.00~20.00 (高)	中→高
	M2	19.7±0.681a	19.4±0.451a	−0.300	−1.520		高→高
	M3	19.0±3.651a	18.9±0.709a	−0.100	−0.530		高→高

注:参考第3次全国土壤普查分级中w(K)的分级标准(同地取3次测定的平均值)。

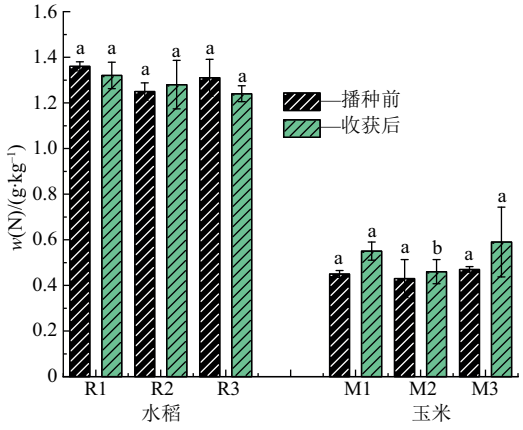


图6 水稻、玉米实验地种植前、收获后0~20 cm土壤中w(N)

Fig. 6 w(N) in soil layers at 0−20 cm of the rice and maize experimental fields before sowing and after harvesting

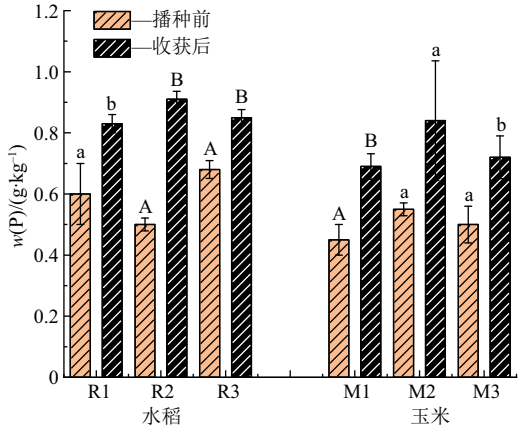


图7 水稻、玉米实验地种植前、收获后0~20 cm土壤中w(P)

Fig. 7 w(P) in soil layers at 0−20 cm of the rice and maize experimental fields before sowing and after harvesting

由表8~表10、图9~图11可知,在3块水稻实验地施用粉煤灰基土壤调理剂后,h=0~20 cm土壤中w(N_s)减少,由中等水平变为低等水平;而3块玉米实验地h=0~20 cm土壤中w(N_s),有两块地增加,一块地减少,但都处于低等或极低等水平。分别对3块水稻、玉米地施用粉煤灰基土壤调理剂后,h=0~20 cm土壤中w(P_s)增加,由中高等水平变为高等水平;而土壤中w(N_s)增加,由中上等水平变为高等水平。因此,在水稻、玉米实验地施用粉煤灰基土壤调理剂,对土壤中w(N_s)、w(P_s)、w(K_s)有影响,其中,土壤中w(P_s)增加明显(调理剂起到活化作用)[29];w(N_s)、w(K_s)减少。整体而言,w(P_s)、w(K_s)增加,w(N_s)降低。

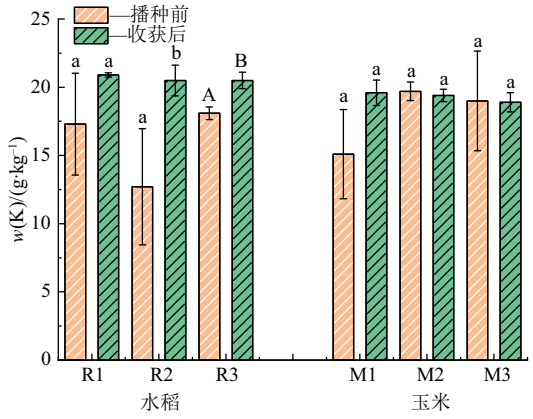


图 8　水稻、玉米实验地种植前、收获后 0~20 cm 土壤中 $w(K)$

Fig. 8　$w(K)$ in soil layers at 0−20 cm of the rice and maize experimental fields before sowing and after harvesting

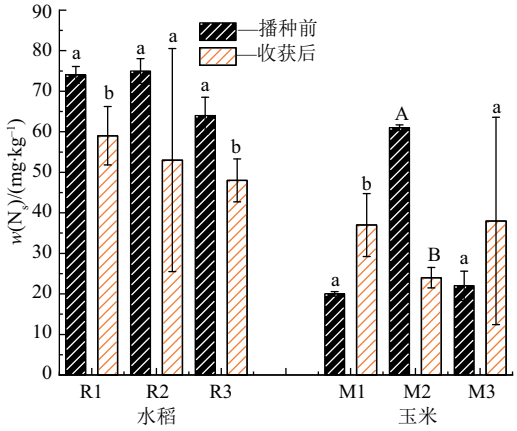


图 9　水稻、玉米实验地种植前、收获后 0~20 cm 土壤中 $w(N_s)$

Fig. 9　$w(N_s)$ in soil layers at 0−20 cm of the rice and maize experimental fields before sowing and after harvesting

表 8　水稻、玉米实验地种植前、收获后 0~20 cm 土壤中 $w(N_s)$

Tab. 8　$w(N_s)$ in soil layers at 0−20 cm of the rice and maize experimental fields before sowing and after harvesting

作物	实验	$w(N_s)$/(mg•kg^{-1})		$\Delta w(N_s)$/(mg•kg^{-1})	变化率/%	$w(N_s)$分级/(g•kg^{-1})	$w(N_s)$变化
		种植前	收获后				
水稻	R1	74.3±2.082a	59.3±7.024b	−15.000	−20.270	>60.00~90.00(中)、30.00~60.00(低)、	中→低
	R2	75.3±3.055a	53.0±27.51a	−22.300	−29.330		
	R3	63.7±4.509a	48.0±5.292b	−15.700	−25.000		
玉米	M1	19.7±0.577a	37.3±7.767b	17.600	85.000	<30.00(极低)	极低→低
	M2	61.0±8.718A	24.3±2.517B	−36.700	−60.660		中→极低
	M3	22.0±3.606a	37.7±25.58a	15.700	72.730		极低→低

注:参考第 3 次全国土壤普查中 $w(N_s)$ 的分级标准(同地取 3 次测定的平均值)。

表 9　水稻、玉米实验地种植前、收获后 0~20 cm 土壤中 $w(P_s)$

Tab. 9　$w(P_s)$ in soil layers at 0−20 cm of the rice and maize experimental fields before sowing and after harvesting

作物	实验	$w(P_s)$/(mg•kg^{-1})		$\Delta w(P_s)$/(mg•kg^{-1})	变化率/%	$w(P_s)$分级/(g•kg^{-1})	$w(P_s)$变化
		种植前	收获后				
水稻	R1	46.2±6.274a	26.9±3.972b	−19.300	−41.770	5.00~10.00(中)、>10.00~20.00(中上)、	极高→高
	R2	56.1±2.157a	41.7±5.823b	−14.400	−25.670		
	R3	42.5±6.955a	34.0±5.244a	−8.500	−20.000		
玉米	M1	12.7±1.803a	21.1±8.624a	8.400	66.140	20.00~40.00(高)、>40.00(极高)	中上→高
	M2	20.4±3.996a	46.4±21.63a	26.000	127.450		高→极高
	M3	5.21±0.375a	10.4±4.147a	5.190	99.620		中→中上

注:参考第 3 次全国土壤普查中 $w(P_s)$ 的分级标准(同地取 3 次测定的平均值)。

表 10　水稻、玉米实验地种植前、收获后 0~20 cm 土壤中 $w(K_s)$

Tab. 10　$w(K_s)$ in soil layers at 0−20 cm of the rice and maize experimental fields before sowing and after harvesting

作物	实验地点	$w(K_s)$/(mg•kg^{-1})		$\Delta w(K_s)$/(mg•kg^{-1})	变化率/%	$w(K_s)$分级/(g•kg^{-1})	$w(K_s)$变化
		种植前	收获后				
水稻	R1	150±10.780A	346±19.140B	196.000	130.670	100.00~150.00(中上)、	中上→极高
	R2	136±14.360A	307±22.500B	171.000	125.740		
	R3	146±18.340a	216±31.560b	70.000	47.950		
玉米	M1	119±7.937a	162±43.590a	43.000	36.130	150.00~200.00(高)、>200.00(极高)	中上→高
	M2	150±19.080a	157±24.760a	7.000	4.670		
	M3	139±7.937a	205±74.040a	66.000	47.480		

注:参考第 3 次全国土壤普查中 $w(K_s)$ 的分级标准(同地取 3 次测定的平均值)。

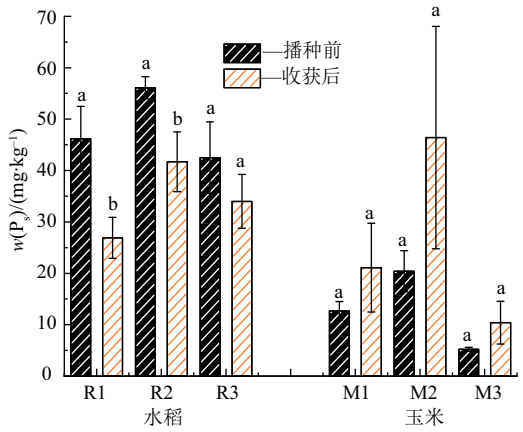


图10 水稻、玉米实验地种植前、收获后0~20 cm土壤中$w(P_s)$

Fig. 10 $w(P_s)$ in soil layers at 0-20 cm of the rice and maize experimental fields before sowing and after harvesting

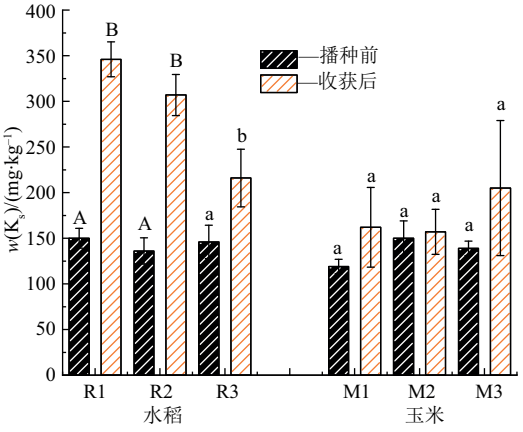


图11 水稻、玉米实验地种植前、收获后0~20 cm土壤中$w(K_s)$

Fig. 11 $w(K_s)$ in soil layers at 0-20 cm of the rice and maize experimental fields before sowing and after harvesting

2.6 施用粉煤灰基土壤调理剂对水稻、玉米生长的影响

施用粉煤灰基土壤调理剂,对水稻、玉米产量构成因素及产量的影响见表11~表12。在施用粉煤灰基土壤调理剂后,水稻穗粒数、结实粒均增加,千粒质量增加0.78 g,产量增加53.70 kg/667 m^2,增产12.80%,产量达473.70 kg/667 m^2(表11)。方差分析结果显示,产量结果差异具有统计学意义($P<0.05$)。

表11 施用粉煤灰基土壤调理剂对水稻产量构成因素及产量的影响

Tab. 11 Effects of applying fly ash-based soil conditioner on the yield components and yield of rice

实验	处理	穗数/(万穗·667 m^{-2})	穗粒数/个	结实粒/个	千粒质量/g	理论产量/(kg·667 m^{-2})	实际产量/(kg·667 m^{-2})	增产、增幅
1	施用	30.0±3.702a	65±17.44a	62±16.05a	26.12±1.527a	485.80	473.7±14.42a	53.70 kg (12.80%)
2	未施用	28.5±2.606a	64±14.42a	59±13.26a	25.34±1.652a	426.10	420.0±12.01b	

注:4月30日通过无人机撒播,播种量为22.5 kg/667 m^2。施用粉煤灰基土壤调理剂2.0 t/667 m^2,面积为12.0 hm^2;未施用粉煤灰基土壤调理剂的面积为12.0 hm^2。其他田间管理一致,地力同等。

表12 施用粉煤灰基调理剂对玉米产量构成因素及产量的影响

Tab. 12 Effects of applying fly ash-based soil conditioners on the yield components and yield of maize

实验	处理	行距(株距)/cm	成苗率/%	收获株数/(株·667 m^{-2})	单株鲜质量/(kg·株$^{-1}$)	理论产量/(t·667 m^{-2})	实际产量/(t·667 m^{-2})	增产、增幅
1	施用	75×35	85.0	5100±282a	0.69±0.052a	3.52	2.59±0.226a	0.20 t (8.37%)
2	未施用	75×35	60.0	3600±687a	0.68±0.047a	2.45	2.39±0.161a	

注:4月10日通过机械播种。施用粉煤灰基土壤调理剂1.0 t/667 m^2,面积为16.0 hm^2;未施用粉煤灰基土壤调理剂的面积为16.0 hm^2。其他田间管理一致,地力同等。

在施用粉煤灰基土壤调理剂后,玉米的成苗率增加25.00%、收获株数增加25.00%、单株鲜质量增加1.47%,产量(鲜质量以玉米含水率30%进行计算)增加0.20 t/667 m^2,增产8.37%,产量达2.59 t/667 m^2(表12)。方差分析结果显示,玉米产量结果差异不具有统计学意义。

以上分析结果显示,在种植水稻实验地施用粉煤灰基土壤调理剂的效果优于玉米。

3 讨论与结论

3.1 讨论

盐碱地严重制约土地有效利用和作物正常生长发育。粉煤灰作为大宗工业固体废弃物,能够改善盐碱土孔隙结构、促进团聚体形成、降低容重,促进离子交换、降低pH值与Na^+的含量,当与有机肥、腐殖酸等复配,可弥补盐碱土中养分、有机质不足等[29]。该研究结果显示,在水稻、玉米实验

地施用粉煤灰基土壤调理剂,h=0～20 cm 土壤中 w(s)分别降低 29.65%～48.14%,70.34%～89.59%;土壤中 w(C)、w(P)、w(K)、$w(P_s)$、$w(K_s)$均增加,但差异性不具有统计学意义。由此可见,粉煤灰富含的微量元素和较多孔隙,促使土壤中积累更多养分和水分,从而提高了土壤中 w(C)、w(P)、w(K)、$w(P_s)$、$w(K_s)$。同时,粉煤灰还提高了土壤温度,进而影响固氮菌、硝化菌的固氮和硝化作用,最终提高土壤中氮素的储存量[30]。

在施用粉煤灰基土壤调理剂后,水稻的穗粒数、结实粒均增加,千粒质量增加 0.78 g,产量增加 53.70 kg/667 m^2,增产 12.80%,产量达 473.70 kg/667 m^2;玉米的成苗率、收获株数均增加 25.00%,单株鲜质量增加 1.47%,产量增加 0.20 t/667 m^2,增产 8.37%,产量达 2.59 t/667 m^2。可见,土壤中养分质量含量增加,促使植物根系呼吸作用增强,为根系生长提供了动力,进而提高了光合速率和二氧化碳同化率,最终促进作物生长与产量增加。

土壤水盐周年运动具有显著的规律性变化特征:春季为蒸发积盐期,夏灌后为淋溶脱盐期,秋季为积盐期,冬灌后为相对稳定期。随着研究方法和治理技术的不断发展,通过巩固-防治-综合治理(生物学治理措施)方法调控土壤中水盐平衡,必将成为主流。当前和今后盐碱地治理主要侧重:(1)通过恢复和建设植被调控水盐平衡;(2)针对植物避盐性,开展植物根系避盐研究,种植耐盐植物等;(3)改良盐碱地灌水水质,利用肥料调控土壤水盐平衡;(4)应用高效节水技术,加强培肥和种植等新技术应用;(5)开展冬季咸水结冰灌溉及相关配套技术研究,探索这些技术在宁夏银北灌区盐碱地改良中的适用性等。还应在长期监测基础上,适时调整和完善改良措施;加强各措施在植物耐盐性(植物根系避盐机理等)及耐盐品种培育方面的应用研究;加强对次生、潜在盐渍化土地的防治对策及综合治理研究,做到“因地制宜,综合防治”。

该研究与已有研究相比,存在一定的差异[29-31]。在玉米地施用粉煤灰基土壤调理剂后,0～60 cm 土壤中 w(s)降低 55.75%～89.59%,且达到极显著水平,究其原因:高效节水灌溉与暗管排水技术联用,以及雨水持续淋洗等多因素叠加作用。这方面的研究未见相关报道,今后应深入开展粉煤灰基土壤调理剂的主要作用机理及最佳应用途径研究;加强材料科学、环境科学及农业科学等多学科交叉合作,开展长期施用粉煤灰与其他土壤改良剂的复合使用效果及对土壤生态的影响研究;通过改性、开发新技术研究,降低应用成本,提高粉煤灰的土壤调理效果和改良能力。

该研究结果显示,高效节水灌溉技术、暗管排水技术对土壤中盐的质量含量下降亦有贡献[32-34],具体贡献率还有待进一步研究。由于气候变化和人为活动的双重影响,盐碱地治理应围绕生态水文过程及土壤盐碱化效应、盐碱障碍消减和产能与生态效益提升等方面进行深入研究。

3.2　结论

1)在水稻、玉米实验地施用粉煤灰基土壤调理剂后,播种前、收获后,h=0～20,＞20～40 cm 土壤中,w(s)显著减少(P＜0.05);pH 值、w(C)变化不大,且差异不显著;$w(N_s)$减少。水稻实验地土壤中 $w(P_s)$减少,玉米实验地土壤中 $w(P_s)$、$w(K_s)$增加。

2)水稻实验地 h=0～20 cm 土壤中 w(s)降低 29.65%～48.14%(P＜0.05),3 块实验地的盐渍化程度分别呈现重度盐渍地→中度盐渍地、极重度盐渍地→中度盐渍地、中度盐渍地→轻度盐渍地的变化。玉米实验地 h=0～20 cm 土壤中 w(s)降低 70.34%～89.59%(P＜0.05),3 块实验地的盐渍化程度分别呈现重度盐渍地→非盐渍地、轻度盐渍地→非盐渍地、重度盐渍地→非盐渍地的变化。水稻、玉米实验地 h=20～40,＞40～60 cm 土壤中 w(s)降低,且降低幅度较小。总之,在种植水稻、玉米的盐碱地施用粉煤灰基土壤调理剂,能够降低土壤中盐分,达到改良土壤的目的。

3)种植前,水稻、玉米实验地 h=0～20 cm 土壤的 pH 值分别为 7.95～8.48,8.72～9.21;收获后,土壤的 pH 值分别为 8.22～8.40,8.72～9.05。因此,在水稻、玉米实验地施用粉煤灰基土壤改良剂后,土壤的 pH 值略有降低,但变化较小,差异不具有统计学意义。

4)水稻、玉米实验地 h=0～20 cm 土壤中 w(C)未发生明显变化;w(N)变化较小,差异不具有统计学意义;w(P)、w(K)均增加(P＜0.05);$w(N_s)$减少;$w(P_s)$、$w(K_s)$增加,但差异均不具有统计学意义。

5)在施用粉煤灰基土壤调理剂后,水稻的穗粒数、结实粒均增加,千粒质量增加 0.78 g,产量增加 53.70 kg/667 m^2,增产 12.80%,产量达 473.70 kg/667 m^2,产量差异具有统计学意义(P＜0.05)。玉米的成苗率增加 25.00%,收获株数增加 25.00%,单株鲜质量增加 1.47%,产量(单株鲜质量按含水

率30%进行计算)增加0.20 t/667 m^2,增产8.37%,产量达2.59 t/667 m^2,产量差异不具有统计学意义。因此,在水稻施用粉煤灰基土壤调理剂的增产效果优于玉米。

参考文献:

[1] 陆宝金,田生昌,左忠,等. 盐渍化土地可持续利用研究综述及展望[J]. 宁夏大学学报(自然科学版),2023,44(1):79-88.

[2] 孔超,赵金,潘少斌. 提高植物耐盐性的方法途径及展望[J]. 土壤与作物,2024,13(4):462-470.

[3] 王雁,田生昌,左忠. 宁夏盐碱地改良暗管排水脱盐效果研究[J]. 宁夏大学学报(自然科学版),2021,42(4):456-462.

[4] 樊丽琴,王旭,沈婧丽,等. 灌溉水质-种植方式结合对银北灌区盐碱地水热盐状况的影响[J]. 中国土壤与肥料,2024(11):70-79.

[5] 张红玲,张娜,王乐,等. 宁夏引黄灌区盐碱地成因及治理模式探讨[J]. 水利发展研究,2025,25(7):81-87.

[6] 程永钢,金辉,郑普山,等. 间作绿肥对盐碱地土壤改良及青贮玉米产量的影响[J]. 农业资源与环境学报,2024,41(5):1100-1110.

[7] 史镜昭,谢小伟,唐瑀璠,等. 不同玉米品种(系)成熟期耐盐碱性综合评价[J]. 宁夏大学学报(自然科学版),2023,44(2):163-169.

[8] 田生昌,陈新会,马建军,等. 种稻对周围旱地土壤盐分和土壤水分含量的影响[J]. 西北农业学报,2012,21(7):77-83.

[9] 黄河. 不同改良剂对盐碱土的影响研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2015.

[10] 郭军成,王明国,耿荣,等. 秸秆还田和有机肥对宁夏银北盐碱地改良效果研究[J]. 中国农学通报,2024,40(24):73-78.

[11] 胡文友,陶婷婷,田康,等. 中国农田土壤环境质量管理现状与展望[J]. 土壤学报,2021,58(5):1094-1109.

[12] 张舒欣,侯迎,郑芳,等. 宁夏农业干旱多尺度时空演变特征[J/OL]. 宁夏大学学报(自然科学版),2024:1-9(2024-11-22)[2025-09-30]. DOI:10.20176/j.cnki.nxdz.000065.

[13] 陆阳,王乐,张红玲. 宁夏平罗县井渠结合灌区地下水盐运移规律研究[J]. 水利水电技术,2017,48(3):165-170.

[14] 吴霞,张永宏,樊丽琴,等. 平罗县地下水埋深动态变化特征及驱动因素分析[J]. 中国农村水利水电,2020(6):76-81.

[15] 杨军,孙兆军,王旭. 龟裂碱土地下水埋深、矿化度和盐分离子年内时空变化特征研究[J]. 节水灌溉,2016(3):45-51.

[16] 刘小京,刘孟雨. 盐生植物利用与区域农业可持续发展[M]. 北京:气象出版社,2002:221-225.

[17] 俞慧友,王迎霞. 宁夏万亩水稻试验田破"碱"重生[N]. 科技日报,2024-09-26(3).

[18] 马建军,田生昌,田慧萍,等. 宁夏银北引黄灌区灌淤土壤养分丰缺状况研究[J]. 中国农学通报,2012,28(26):236-242.

[19] 李建如,马建军. 宁夏平罗县耕地地力评价与测土配方施肥[M]. 银川:阳光出版社,2011.

[20] 田生昌,李月祥. 不同含盐量土壤对盐柳1号苗木生长影响[J]. 西北林学院学报,2018,33(1):120-125.

[21] 陈翔宇. 粉煤灰基土壤调理剂盐碱地改良机理研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.

[22] 肖国举,秦萍,罗成科,等. 犁翻与旋耕施用脱硫石膏对改良碱化土壤的效果研究[J],生态环境学报,2010,19(2):433-437.

[23] 金梁,乌力更,魏丹,等. 石膏改良苏打碱土:经济改良层石膏用量的确定[J]. 生态学杂志,2012,31(7):1745-1750.

[24] 任恩良,邱轩浩,王丽,等. 粉煤灰改良盐碱地研究现状与展望[J]. 金属矿山,2024(12):26-35.

[25] 徐建明,刘杏梅."十四五"土壤质量与食物安全前沿趋势与发展战略[J]. 土壤学报,2020,57(5):1143-1154.

[26] 段云飞. 支持盐碱地综合利用的财政政策研究[J]. 当代农村财经,2024(11):39-42.

[27] 冯起,尹鑫卫,朱猛,等. 统筹推进西北地区盐碱地综合治理利用:现状、挑战与对策建议[J]. 中国科学院院刊,2024,39(12):2060-2073.

[28] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.

[29] 陈翔宇. 粉煤灰基土壤调理剂盐碱地改良机理研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.

[30] 王曼华,陈为峰,宋希亮,等. 秸秆双层覆盖对盐碱地水盐运动影响初步研究[J]. 土壤科学,2017,54(6):1395-1403.

[31] 吴孝炯,常星岚,李进军,等. 粉煤灰基材料对盐碱土离子淋出的促进效应[J]. 环境科学与技术,2025,48(7):173-179.

[32] 王磊. 农田水利工程高效节水灌溉发展思路探析[J]. 吉林农业,2018(23):79.

[33] 孟超然,颜林,张书捷,等. 干旱区长期膜下滴灌农田耕层土壤盐分变化[J]. 土壤科学,2017,54(6):1386-1394.

[34] 康金虎. 宁夏引黄灌区微咸水灌溉技术试验研究[D]. 银川:宁夏大学,2005.

Assessment of the Effects of Fly Ash-Based Soil Conditioners on Saline-Alkali Soil-Crop Systems

TIAN Shengchang[1,2], *ZUO Zhong*[1*], *XU Long*[2], *ZHOU Xiaoping*[2], *YANG Hui*[1], *CHENG Jiaqing*[2], *WANG Jianhua*[3], *ZHANG Min*[4]

(1. Institute of Forestry and Grassland Ecology, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China;
2. Ningxia Nongken Qianjin Farm Co., Ltd., Pingluo 753402, China;
3. Ningxia Agricultural Group Co., Ltd., Yinchuan 750004, China;
4. Ningxia Agricultural Reclamation Agricultural, Forestry and Animal Husbandry Technology Extension Service Center, Yinchuan 750004, China)

Abstract: In order to investigate the effectiveness of fly ash-based soil conditioners in improving saline-alkali land, and to achieve large-scale utilization of the waste material fly ash, fly ash-based soil conditioners were applied in rice and maize fields, with untreated fields as controls. Soil samples were collected from the 0-20 cm and 20-40 cm soil layers before and after application to measure indicators such as soil salinity, organic matter content, and soil pH. At the time of autumn harvest, the yields of rice and maize were calculated to evaluate the improvement effect of the fly ash-based soil conditioners. The results showed that the application of fly ash-based soil conditioners in both rice and maize fields significantly reduced the salt content in the 0-20 cm and 20-40 cm soil layers in autumn compared to the control ($P<0.05$), while changes in soil pH and organic matter content were minimal. The content of hydrolyzed nitrogen decreased, and the contents of available phosphorus and quick-acting potassium increased, although these changes were not significant. The salt content in the 0-20 cm soil layer of rice and maize fields decreased by 29.65% to 48.14% ($P<0.05$) and 70.34% to 89.59% ($P<0.05$), respectively. The salt content in the 20-40 cm and 40-60 cm soil layers also decreased, but the reduction was smaller. The number of grains per rice panicle and the number of filled grains increased, with a thousand-grain weight increase of 0.78 g, resulting in a yield increase of 53.70 kg/667 m^2, which is a 12.80% increase, reaching 473.70 kg/667 m^2 ($P<0.05$). The seedling emergence rate and the number of harvested corn plants both increased by 25.00%, with a single plant fresh weight increase of 1.47%, leading to a yield increase of 0.20 t/667 m^2, an 8.37% increase, reaching 2.59 t/667 m^2, although the yield difference was not significant. The application of fly ash-based soil conditioners can improve saline-alkali soils and increase crop yields, demonstrating its potential for widespread application.

Key words: fly ash-based soil conditioner; saline-alkali land improvement; crops; soil salinity; yield

(责任编辑　高继红)