

张婧,陈庆锋,刘伟,等. 秸秆还田对盐碱地土壤及作物生长的影响研究进展[J]. 江苏农业科学,2022,50(11):13-22.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.11.002

秸秆还田对盐碱地土壤及作物生长的影响研究进展

张婧,陈庆锋,刘伟,李青,高新国,马君健

[齐鲁工业大学(山东省科学院)/山东省分析测试中心,山东济南 250014]

摘要:秸秆综合利用和盐碱地改良是目前农业研究的主要挑战之一。本文综述了秸秆还田对盐碱地的影响,主要从秸秆不同还田方式、还田量等对土壤理化性质、土壤微生物及酶活性、作物生长特性和产量影响等角度进行综述。总体而言,秸秆还田可以使盐碱地土壤容重降低,抑制盐碱地土壤水分蒸发,降低土壤盐分含量,改善土壤养分供应,增加微生物数量和酶活性,提高作物产量等。目前秸秆还田改良盐碱地室内试验较多,连续多年大田试验较少,室内试验无法模拟野外盐碱地受当地土壤性质、气候等多因素影响情况,使得研究结果在实际应用中效果较差。此外,盐碱地改良是一项复杂工程,实际应用中要综合治理,及时调整和完善改良措施,使其能有效推广到农业实际生产中。

关键词:秸秆还田;盐碱地;土壤质量;作物生长;研究进展

中图分类号: S156.4⁺4;X712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2022)11-0013-10

盐碱地(或盐碱土、盐渍土)包括盐化土壤、碱化土壤、盐土和碱土^[1],其特征是盐碱成分较高,抑制植物生长,甚至使植物无法成活^[2]。据统计,全世界盐碱地面积为 9.543 8 亿 hm^2 ^[3],我国盐碱地总面积约有 9 913 万 hm^2 ,主要分布在东北、华北、西北以及沿海地区^[1,4-5]。据统计,世界上近 20% 的灌溉土地正受到土壤盐碱化的威胁^[6],土壤高盐度已严重威胁农业可持续发展^[7-8]。

我国秸秆年产量在 7 亿 t 以上,主要秸秆有小麦、水稻、棉花等,秸秆富含 N、P、K 等营养元素,目前有近 5 亿 t 秸秆被广泛用于生产肥料、燃料、工业原料、饲料等,尚有 2.45 亿 t 左右的秸秆被弃置乱堆、焚烧^[9]。未利用秸秆带来了资源浪费及环境污染问题,秸秆处置问题迫切需要解决。

近年来,国内外研究人员针对秸秆改良盐碱地进行了大量的研究,并取得了一定成果。秸秆还田使未利用秸秆资源得到利用,同时还可以改善土壤质量、实现农作物增产。本文将从秸秆还田方式、还田量以及秸秆还田对土壤及作物生长情况等产生的影响进行总结,旨在为秸秆还田改良盐碱地的研究和推广提供参考。

1 秸秆还田利用方式

秸秆还田改良盐碱地试验一般选择当地种植作物的秸秆,包括棉花、小麦、水稻、玉米及芦苇秸秆等。秸秆还田利用方式主要有直接还田、间接还田和综合利用。

直接还田主要包括秸秆表层覆盖还田、秸秆翻压还田及秸秆深层填埋等^[9-10]。秸秆直接还田研究方向主要集中在秸秆不同填埋深度及不同填埋量对盐碱地土壤水盐运移及理化特性、作物生长、土壤微生物数量、土壤酶活性等的影响^[11-23],还有部分研究比较覆秸秆、覆沙、施加脱硫石膏、施加粉煤灰、覆地膜等不同方式^[24-36],以及将不同改良方式进行组合,探讨其对盐碱地的改良效果。

收稿日期:2021-08-05

基金项目:山东省重大科技创新工程(编号:2019JZZY010723);山东省泰山学者青年专家经费(编号:tsqn201812086);齐鲁工业大学(山东省科学院)科教产融合创新试点工程(编号:2020KJC-ZD13)。

作者简介:张婧(1983—),女,山东济南人,硕士,工程师,主要从事环境污染修复研究。E-mail:J.Zhang@qlu.edu.cn。

通信作者:刘伟,博士,高级工程师,主要从事环境生物学研究。E-mail:ll_liuwei@163.com。

[98] Xiong W, Lee T C, Rommelfanger S, et al. Phosphoketolase pathway contributes to carbon metabolism in cyanobacteria [J]. Nature Plants, 2015, 2(1): 1-8.

[99] Bar-Even A, Noor E, Lewis N E, et al. Design and analysis of synthetic carbon fixation pathways [J]. Proceedings of the National

Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(19): 8889-8894.

[100] Wu G, Yan Q A, Jones J A, et al. Metabolic burden: cornerstones in synthetic biology and metabolic engineering applications [J]. Trends in Biotechnology, 2016, 34(8): 652-664.

间接还田是将秸秆处理后再还田的一种方式^[37-38]。间接还田主要包括沤制还田、堆腐还田及过腹还田^[37-38]。秸秆间接还田研究方向主要为腐熟或发酵秸秆、生物炭、粪便等还田后对盐碱地土壤理化性质、土壤微生物及作物生长等产生的影响^[39-44]。

综合还田是将秸秆直接还田与间接还田相结合的一种还田方式^[10]。综合还田研究方向主要为秸秆与腐熟或发酵秸秆、动物粪便等以不同比例配施还田对土壤理化性质、土壤微生物和作物生长等产生的影响^[45-47]。

2 秸秆还田对盐碱地土壤理化性质的影响

2.1 秸秆还田对盐碱地土壤物理性质的影响

土壤物理性质制约土壤肥力水平,良好的土壤物理性质有利于作物扎根和根系的延伸,同时土壤物理性质也与土壤的化学性质及生物学性质关系密切^[19]。土壤物理性质包括土壤结构、容重、水分、孔隙度、团聚体组成等^[48]。盐碱地土壤容重高、结构粘滞、团粒结构少、透水透气性较差^[11]。秸秆还田改变了土壤物理结构,使土壤容重降低,孔隙度增加,促进了土壤团聚体的形成,提高了土壤蓄水保水能力^[11]。

2.1.1 秸秆还田对土壤水分的影响 秸秆表层覆盖使上层土壤水分蒸散速度减慢,抑制了土壤表面水分蒸发散失^[11,15-16,18,49-50],秸秆深埋能够改善土壤结构,阻止水分下渗^[51],限制深层土壤水分蒸发^[11,13,52]。Cao 等研究发现,在土壤渗透方面,秸秆覆盖渗透率高于秸秆深埋,秸秆深埋会阻碍水分下渗,但就减少土壤水分蒸发而言,初期秸秆覆盖好于秸秆深埋,但后期由于秸秆深埋限制了深层土壤的蒸发消耗,使得秸秆深埋好于秸秆覆盖^[53]。赵永敢等研究认为,在植物生长不同时期,受降雨影响,秸秆表层覆盖和填埋对土层含水量变化产生不同影响^[32,54]。Zhao 等研究表明,秸秆覆盖 + 秸秆填埋大大增加了 0~40 cm 深度土壤含水率,使其在向日葵生长季节土壤含水率大于秸秆填埋,但由于填埋秸秆层阻碍了深层土壤水向上供给,使得随后季节秸秆覆盖 + 填埋处理土壤含水率小于秸秆覆盖,后期降水量增加,秸秆填埋层阻止水分下渗,有效保存雨水,使土壤含水量增加,含水量大于秸秆覆盖^[54]。李芙蓉研究表明,秸秆填埋深度越深,土壤含水率越高,原因是秸秆填埋深度较浅时,会阻断

土壤毛细管的连续性,使表层土壤水分更容易蒸发消耗,而填埋深度深时,对土壤孔隙度和渗透性的改善作用更加显著,使得土壤含水率更高^[11]。王静等研究表明,秸秆还田 + 腐熟剂较秸秆还田处理土壤含水量提高了 1.88%~10.80%^[42]。原因可能是腐熟剂的添加加速了秸秆分解,增加了土壤有机质,改善土壤结构,降低土壤容重,从而提高了土壤保水能力。

不同秸秆还田量对土壤水分的影响不同。王曼华等研究认为,秸秆表层覆盖量越大,对水分蒸发抑制越显著,秸秆覆盖量与填埋量之比为 2:1 时,抑制土壤水分蒸发效果最好^[18]。孙博等研究表明,秸秆覆盖量越多,土壤蒸发量越小,当秸秆覆盖量达 0.75 kg/m² 时,秸秆抑制土壤水分蒸发效果趋于稳定^[55]。

2.1.2 秸秆还田对盐碱地土壤容重、土壤孔隙度及其他物理特性的影响 秸秆还田可以降低土壤容重^[11-12,24,56],增加土壤孔隙度^[11,19,57]及土壤渗透系数^[58]。李芙蓉研究认为,在降低土壤容重和提高土壤孔隙度方面,秸秆表层覆盖 + 深层填埋效果优于秸秆表层覆盖和秸秆深层填埋,原因是秸秆覆盖能够降低降水对地表的冲刷,减轻阳光暴晒,减少地表径流,从而能够减少破坏表层土壤,秸秆深层填埋对秸秆层以上的土壤剖面有疏松效果,从而改善土壤结构^[11]。宋楠等研究表明,秸秆还田量越多,土壤容重越低,孔隙度越高,土壤紧实度也有降低趋势^[56,58-59]。郑悦还通过对比试验表明,还田量相同条件下,秸秆还田土壤容重低于生物炭还田,这可能与秸秆体积较大、透水速度较快有关^[59]。另外,王静等研究表明,在降低土壤容重方面,秸秆还田 + 腐熟剂处理优于秸秆直接还田^[42]。

土壤大团聚体所占比例高是土壤肥沃的标志之一^[60]。秦都林等研究认为,秸秆还田使表层土大于 5 mm 土壤大团聚体含量显著增加,小于 0.25 mm 土壤微团聚体含量显著降低,原因是秸秆还田提高了土壤有机质,促使土壤中微团聚体向大团聚体转化^[12,19]。何瑞成等研究认为,土壤中施加颗粒秸秆、牧草及羊粪等处理后,使粒径大于 0.25 mm 的水稳性团聚体含量增加,提高了土壤水稳性团聚体的稳定性,改善了水稳性团聚体的形态,原因可能是秸秆等还田后,为土壤提供碳源,使有机碳含量增加,利于土壤团聚体形成,此外秸秆等还田后提高了微生物数量及活性,间接促进水稳

性团聚体的形成和稳定性^[29]。王静等研究发现,秸秆还田 + 腐熟剂增加了大于 0.25 mm 土壤风干团聚体含量,降低了小于 0.25 mm 风干团聚体含量^[42]。杨华等研究发现,接种土著微生物 + 半腐熟玉米秸秆 + 牛粪处理土壤团聚体形成效果好于外源微生物 + 腐熟有机肥,产生了 0.62% 的 >2 mm 大团聚体,同时使 0.25 ~ 2 mm 团聚体的形成比例增加,原因可能是半腐熟秸秆的添加,为微生物代谢提供了物质基础,微生物分解有机质,促进了团聚体的形成^[60]。

秸秆还田对盐碱地土壤物理性质改善主要机理是秸秆还田抑制土壤水分蒸发,起到保水效果^[11-12],同时秸秆还田可以疏松土壤,提高土壤孔隙度及通气性^[56],降低土壤容重及土壤紧实度^[56-59],提高土壤有机质,促进土壤大团聚体的形成^[12],从而提高了土壤结构的稳定性。

2.2 秸秆还田对土壤化学性质的影响

2.2.1 秸秆还田对土壤盐分调控作用

秸秆还田能够抑制盐分向土壤表层聚积,降低土壤盐分含量,对增进土壤脱盐和控制土壤返盐有良好效果^[11-13,24,27-28]。秸秆不同还田方式对土壤盐分的空间分布影响不同,秸秆表层覆盖降低水分蒸发,减少土壤盐分表聚,其抑盐效果主要在土壤表层^[11,54,61],秸秆深层填埋能抑制秸秆层以下盐分向上运移,但造成了秸秆上层盐分运移加快,对表层积盐现象改善效果不佳,甚至表层含盐量略高于秸秆表层覆盖^[11,62-63]。秸秆表层覆盖结合深埋处理可以阻断水分蒸发,从而有效抑制秸秆下层盐分向上运移,同时也能抑制盐分向表层运移^[11,18]。Zhao 等研究发现,秸秆覆盖可以显著降低 0 ~ 20 cm 土层含盐量,但 20 ~ 40 cm 土层含盐量有所增加,原因可能是秸秆覆盖可以保存水分,减少地表径流,促进水分下渗,将表层土壤中积累的盐分淋洗到更深的土层中^[54]。同时研究还发现,秸秆覆盖 + 填埋方式下土壤表层含盐量低于秸秆覆盖^[54]。秸秆填埋可使土壤表层盐含量降低 12.1% ~ 56.4%^[64],原因可能是秸秆填埋层阻止水分下渗,延长了水分在填埋层以上的停留时间,促进了可溶性盐离子交换和吸收,使土壤中盐分充分溶解,提高了淋盐效率,溶解后的盐分随水下移到填埋层以下^[65]。此外,填埋层切断了土壤毛细管,减少水分蒸发,从而防止地下水和深层土壤中的溶解盐上升到土壤表层。王曼华等研究表明,从抑盐效果方面来看,上盖地膜 +

下埋秸秆 > 上盖秸秆 + 下埋秸秆 > 地膜覆盖 > 秸秆深埋,地膜覆盖由于在地表形成不透气阻隔层,使水分蒸发减少,同时秸秆填埋层阻碍了深层土壤盐分随水上移,使地表土壤盐分含量降低,但是地膜覆盖容易对土壤造成污染,秸秆双层覆盖可能是一种更好的盐碱地改良方式^[18,32,66]。

秸秆不同还田量对土壤抑盐效果不同,大多数研究认为秸秆还田量越大,对土壤抑盐效果越好,且表层土的脱盐率好于深层土^[15-18,64,67],具体见表 1。其机理可能是秸秆覆盖抑制土壤表层水分蒸发,秸秆覆盖量越小,土壤水分蒸发量越大,其累积含盐量也越大^[15],秸秆覆盖量增加,高返盐率土层逐渐下移,盐分表聚性逐渐减弱,同时秸秆填埋可以切断土壤毛细管,填埋量越大,从深层土壤中上升的水越少,而且秸秆层一旦干燥,没有有效的水力连接,大多数盐分进入深层土壤后,往往不会再返回表层土壤^[64]。但也有部分研究认为,秸秆还田量越大,土壤含盐量越高^[59,68],其机理尚未可知。因此,应进一步研究秸秆还田量与土壤盐分含量的关系。

在相同秸秆还田量对土壤脱盐效果方面,不同研究有所差异,这可能与当地土壤条件、气候条件、地下水等有关。

有部分学者研究灌溉与秸秆填埋共同作用对盐碱地土壤脱盐效果的影响。卢闯等研究发现,秸秆填埋 + 常规春灌水量和秸秆填埋 + 90% 常规春灌水量处理脱盐效果都比较好,盐分淋洗深度可以达到 50 ~ 60 cm,缺水地区可以选择秸秆填埋 + 90% 常规春灌水量处理^[69]。Pang 等研究发现,灌溉微咸水(或咸水) + 秸秆覆盖处理具有较好的脱盐效果,表层土盐分增幅显著低于只灌溉微咸水(不覆盖秸秆)处理,与覆盖处理相比,不覆盖处理样点表层土壤盐分平均增加了 20%^[70-71]。上述研究结果对淡水缺乏地区农田灌溉具有指导意义,但是上述研究缺乏长期连续试验,需从农业可持续发展角度进一步加强试验研究。

不同秸秆还田方式对土壤的抑盐效果不同。徐国凤等研究认为,秸秆和羊粪还田均可以降低土壤全盐含量,但是羊粪处理降盐效果更显著,原因可能是试验种植的夏玉米生长周期短,秸秆未能完全腐解,土壤养分提高较小,而羊粪的施加显著增加了土壤养分,改善了土壤结构,降盐效果较好^[35]。王静等研究认为,秸秆还田配施不同秸秆腐熟剂对

表 1 不同秸秆还田量对土壤脱盐效果的影响

秸秆还田方式	土壤 pH 值	土层深度 (cm)	秸秆还田量 (kg/m ²)	脱盐率 (%)	参考文献
表层覆盖	8.23	0~10	1.2	20.5	[16]
			0.9	5.3	
			0.6	2.4	
			0.3	-1.2	
		0~40	1.2	-2.9	
			0.9	-6.5	
			0.6	-54.0	
			0.3	-53.8	
表层覆盖	8.66±0.04	0~10	1.5	94.8/98.0/97.3	[17]
			3.0	96.1/97.7/96.9	
	8.66±0.04	10~20	1.5	94.6/97.6/96.6	
			3.0	97.2/97.8/98.0	
	8.68±0.03	20~40	1.5	88.8/96.2/94.4	
			3.0	94.3/95.7/97.1	
表层覆盖	8.56	0~40	0.9	70.26	[18]
深层填埋				56.76	
表层覆盖与深层填埋 1:1				83.36	
表层覆盖与深层填埋 2:1				68.53	
表层覆盖与深层填埋 1:2				76.32	
表层覆盖	—	0~10	0.3	42.47	[67]
			0.45	41.69	
			0.6	67.78	
		10~20	0.3	18.29	
			0.45	12.35	
			0.6	15.18	
		20~40	0.3	-33.00	
			0.45	-27.24	
			0.6	27.54	
深层填埋	9.1~9.7	0~30	0.6	6.2~45.3	[64]
			1.2	19.9~63.4	
			1.8	59.6~68.0	

注：“—”表示文献中未给出土壤 pH 值。

降低全盐量效果优于秸秆直接还田,原因可能是秸秆还田+腐熟剂,使秸秆腐熟速度加快,土壤养分增加,使土壤物理性质得到改善,从而降盐效果较好^[42]。Zhao 等研究发现,生物炭施用显著降低了 0~40 cm 土层盐含量和 Na⁺ 浓度,其机理可能是生物炭具有多孔性、较大的比表面积及较强的羟基吸附能力,施用生物炭可以增加盐、钠的淋溶量,生物炭中富含 Ca²⁺、Mg²⁺,能够代换土壤胶体吸附的 Na⁺。此外,生物炭的添加还阻碍了土壤返盐^[72]。

2.2.2 秸秆还田对盐碱地土壤 pH 值的调控作用

李芙荣等研究认为,秸秆还田可以降低土壤 pH 值,其机理可能有以下几种情况:(1)交换性钠被其他离子交换淋洗到深层^[11,58-59];(2)秸秆在腐解过程中,能够产生有机酸,中和土壤碱性盐类^[58];(3)秸秆还田可以疏松土壤,增加土壤气体与空气的交换,加快作物根系生长,呼吸作用产生的 CO₂ 溶于水产生 H⁺,此外根系分泌物也会降低 pH 值^[56];(4)秸秆还田增加了土壤微生物数量,提高了土壤酶活性,改善了土壤生物性状,从而降低其 pH 值^[27]。但秦都林等研究表明,秸秆还田有降低土壤

pH 值的趋势,但还未达到显著差异水平^[12,24]。因此,还需要对秸秆还田对盐碱地 pH 值的影响方面进行深入研究。

不同秸秆还田方式对土壤 pH 值的降低效果不同。徐国凤等研究发现,秸秆和羊粪还田均可以降低土壤 pH 值,其中羊粪处理土壤 pH 值降低效果显著,原因可能是施加羊粪后,在土壤微生物及土壤酶活性影响下,产生了大量有机酸,使土壤 pH 值下降^[35]。徐娜娜研究发现,发酵秸秆对土壤 pH 值降低效果优于直接添加秸秆,原因是发酵秸秆的添加提高了土壤微生物数量及微生物活性,提高土壤呼吸强度,使土壤中 HCO_3^- 以 CO_2 的形式排出,降低了土壤 pH 值^[73]。

2.2.3 秸秆还田对盐碱地土壤养分的影响 秸秆中含有大量的碳、氮、磷、钾等营养元素,其还田后可以改善盐碱地土壤养分供应,提高土壤有机碳^[74-75]、有机质和养分含量^[72]。Duiker 等研究发现,土壤有机碳含量与秸秆施用量存在正线性相关关系^[76]。Huo 等研究发现,经过 4 年秸秆填埋还田使 0 ~ 40 cm 土层有机碳含量提高 10.78%,0 ~ 60 cm 土层平均可溶性有机碳(DOC)提高 37.45%^[77]。秦都林等研究表明,秸秆旋耕还田显著提高了 0 ~ 20 cm 土层土壤有机质、速效钾含量,降低了 0 ~ 20 cm 土层速效磷含量,对 20 ~ 60 cm 土层含量无显著影响,原因可能是秸秆还田为土壤提供了丰富的 C、N、P、K 等营养物质,提高了土壤有机质含量、土壤微生物及酶活性,增加了土壤中有效养分含量^[12]。速效磷含量降低的原因可能是棉花秸秆中磷含量比较低,秸秆腐解释放到土壤后被土壤颗粒吸附固定,此外秸秆还田导致作物长势变好,增加了对养分的需求,导致土壤中速效磷含量降低。土壤硝态氮和铵态氮含量有显著提高,原因可能是秸秆还田改善了土壤环境,减弱了降雨的淋洗作用,此外秸秆还田为土壤异养微生物活动提供碳源,促进土壤氮的矿化作用,进而增加了土壤中硝态氮及铵态氮含量^[12]。

不同秸秆还田方式对土壤肥力的影响不同。徐国凤等研究发现,秸秆、生物有机肥和羊粪还田均可以提高土壤表层养分含量,但是羊粪、生物有机肥处理效果显著,原因可能是还田时间较短,秸秆尚未完全腐解^[35]。葛云等研究表明,秸秆粉碎填埋+秸秆覆盖、秸秆覆盖、秸秆粉碎填埋处理土壤有机质分别提高了 60.14%、59.76%、40.02%^[28]。

陈晓东等研究发现,正常秸秆、颗粒秸秆等都可以提高盐碱地土壤腐殖质含量,颗粒秸秆在提高各结合形态腐殖质含量方面优于其他处理,原因可能是颗粒秸秆经粉碎和高温、高压处理,其较正常秸秆更容易腐解^[30]。

关于施加发酵秸秆与未发酵秸秆对土壤养分的影响,目前的研究结论并不完全统一。如韩剑宏等研究玉米秸秆与污泥以不同比例混合发酵、以不同量施加到盐碱地后,盐碱地中有机质、速效磷、速效钾、速效氮含量均比施加未发酵秸秆高,原因可能是施加未发酵秸秆,其腐解过程中需要养分;但是速效氮含量对比未施加前原土含量有所降低,速效磷含量变化不大,原因可能是,微生物利用秸秆腐解产生的 N 作为营养物质,另外秸秆中 P 含量较低,对土壤磷含量的作用不明显^[41]。徐娜娜研究发现,施加纤维素降解菌的发酵秸秆比未发酵秸秆土壤有机质、全钾、全氮、全磷、速效氮、速效磷、速效钾等显著增加^[73];而周晓飞研究则表明,施加纤维素降解菌的发酵秸秆比未发酵秸秆土壤有机质、速效磷含量显著增加,速效钾变化不大,速效氮部分处理增加、部分处理降低^[78]。王静等研究发现,施加秸秆+腐熟剂比施加未发酵秸秆土壤有机质、全氮、碱解氮含量显著增加,但速效磷、速效钾含量降低^[42]。

3 秸秆还田对盐碱地土壤微生物及酶活性的影响

3.1 秸秆还田对盐碱地土壤微生物数量的影响

秸秆还田能够增加盐碱地土壤微生物数量^[10,23,25-26,69,79],调节土壤中微生物群落结构^[79],显著增加土壤微生物群落的丰富度^[25]及其对碳源的利用能力等^[25-26]。何瑞成等研究发现,施加颗粒秸秆、秸秆、牧草、羊粪等处理与原土相比,其细菌、真菌、放线菌数量分别提高了 73.82% ~ 142.41%、87.95% ~ 256.92%、7.81% ~ 59.75%^[79],其机理可能如下:(1)秸秆还田为微生物生长提供了大量的 C、N 作为能源,提高了盐碱地的 C/N,促进了微生物的生长和繁殖,提高其活性^[25,79-80];(2)秸秆还田降低土壤容重,增加土壤孔隙度,改善了土壤结构、微生物生存环境,利于微生物繁殖和生长^[23,25,79]。此外,李凤霞等研究发现,秸秆还田后土壤细菌及真菌所占微生物总数比例均有所增加,但放线菌比例有所降低,具体原因尚不明确^[25,79]。

范富等研究发现,秸秆还田量越大,土壤中细

菌、真菌及放线菌的数量越多;秸秆填埋深度越深,土壤中细菌、真菌及放线菌的数量越少。原因可能是秸秆还田为微生物生长提供碳、氮等元素,改善土壤结构,同时适宜的填埋深度保证空气流通,有利于细菌、真菌及放线菌生长^[23,81]。

Li 等研究发现,与秸秆覆盖+填埋及秸秆填埋相比,地膜覆盖+秸秆填埋可显著提高盐碱地土壤细菌、真菌及放线菌数量,提高了细菌群落多样性,原因是地膜覆盖+秸秆填埋提高了表层土壤温度,降低了土壤盐分含量,改善了微生物生长环境^[66]。

3.2 秸秆还田对盐碱地土壤微生物生物量碳氮及土壤呼吸强度的影响

土壤微生物量碳氮及土壤呼吸强度是反映土壤微生物活性的重要指标^[79]。何瑞成等研究发现,添加颗粒秸秆、正常秸秆、羊粪和牧草均可以显著提高土壤微生物生物量碳氮,其中添加颗粒秸秆效果最显著,使土壤微生物生物量碳、氮含量分别提高了 63.21%、46.02%^[79]。徐娜娜研究发现,与对照相比,直接施加秸秆粉使土壤微生物生物量碳氮减少,但施加发酵秸秆使土壤微生物生物量碳氮增加,其中微生物生物量氮与对照差异显著,原因是施加发酵秸秆后,提高了土壤转化酶活性,使土壤中氮素增加^[73]。Huo 等研究发现,与对照相比,地膜覆盖+秸秆填埋、秸秆填埋处理在第 1 年可使 0~60 cm 土壤微生物生物量碳含量分别提高 102.65%、48.13%,第 2 年分别提高 52.49%、24.63%,原因可能是秸秆还田为土壤提供碳源,促进微生物繁殖,地膜覆盖使土壤水热条件得到改善,也有利于微生物的增殖。但是地膜或秸秆连续使用下,土壤微生物生物量碳含量呈下降趋势,这可能是由于土壤水分、盐分、温度等环境的变化,使得微生物数量减少,此外,随着还田年限增加,土壤团聚体稳定性增加,为颗粒有机碳提供更好的保护,使其更不容易被微生物利用^[77]。

此外,研究还发现秸秆还田可以提高土壤呼吸强度^[19,73,79]。秸秆还田对盐碱地土壤微生物生物量碳氮及土壤呼吸强度影响机理可能为:秸秆还田改善了土壤物理性状,提高了土壤有机质含量^[82],提高了土壤 C/N,从而提高了微生物活性,促进植物根系生长,进而提高土壤微生物生物量碳、氮含量及促进土壤呼吸^[73,79]。

3.3 秸秆还田对盐碱地土壤酶活性的影响

秸秆还田可对土壤酶活性产生影响^[23]。王双

磊研究发现,秸秆还田可以显著提高 0~20 cm 土层蔗糖酶、脲酶及过氧化氢酶活性,但对 20~60 cm 土层无显著影响,这可能与深层土壤微生物数量及动植物活体或残体数量较少有关^[19]。何瑞成等研究发现,施加颗粒秸秆、正常秸秆、牧草、羊粪等处理与未施加有机物料相比,其过氧化氢酶、转化酶、纤维素酶活性分别提高了 11.42%~18.03%、19.11%~23.22%、69.01%~79.32%,其中颗粒秸秆处理效果最好,原因可能是:秸秆还田增加了微生物数量,提高了其活性,使微生物分泌物增加,另外施加颗粒秸秆使得土壤大小空隙分布均匀,提高了植物根系活力,从而提高土壤酶活性^[79]。韩剑宏等研究发现,发酵及未发酵秸秆还田均可提高碱性磷酸酶、脲酶、纤维素酶和过氧化氢酶的活性,其中发酵秸秆效果最好,原因可能是:施加未发酵秸秆后,其腐解过程消耗部分养分,而发酵后的秸秆施加后可以直接作为有机肥料,为土壤微生物提供营养,也可以作为土壤酶的良好基质^[41]。

不同秸秆还田量对土壤酶活性影响不同。范富等研究发现,随着秸秆还田量增加,脲酶、蛋白酶、淀粉酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶活性增强^[23]。萨如拉等研究发现,添加秸秆腐熟剂处理土壤酶活性一般高于未添加处理,其中秸秆还田量高时,碱性磷酸酶和纤维素酶活性较高,其机理可能是:秸秆还田量高的情况下,改变了土壤微生物群落结构,提高了大多数水解酶活性^[83]。

此外还有研究学者对比分析了秸秆还田与秸秆生物炭还田对土壤微生物和酶活性影响。田小平等研究发现,添加秸秆生物炭和秸秆均可以提高盐碱地土壤微生物多样性,其中添加秸秆效果较好^[84],另外添加秸秆显著提高了土壤 β -葡萄糖苷酶和土壤脱氢酶的活性,而秸秆生物炭则有一定的抑制作用^[84-85],其原因可能是:秸秆含有更多易被微生物降解的有机物,进而促进微生物生长,提高其酶活性,而生物炭中的碳结构稳定,不容易被微生物利用,因此抑制了微生物生长,使酶活性降低^[84]。

综上所述,秸秆还田提高酶活性机理可能有以下几种情况:(1)秸秆还田可以调节土壤表层土温,温度低时产生增温效应,温度高时产生降温效应,能够为酶促反应提供适合的温度^[21,79]。(2)秸秆还田可以提高土壤微生物数量及其活性,从而提高了包括土壤酶在内的分泌物数量^[21,41,79]。

4 秸秆还田对盐碱地作物生长特性及产量的影响

秸秆还田可以提高作物出苗率、产量、株高等^[16,19,25,31,67,86]。Zhao 等研究发现,与未填埋秸秆处理相比,秸秆填埋可使向日葵生物量提高 4.9%~12.9%,种子产量提高 11.6%~12.1%^[87]。秦都林等研究发现,秸秆还田可显著提高棉花籽棉、皮棉产量^[12]。李凤霞等研究发现,盐碱地施加秸秆后,增加了苜蓿株高和干质量,并且随着苜蓿生长年限的增加,产量也在增加^[25],其机理主要是秸秆还田改善了土壤理化性质,提高了土壤养分含量,

从而促进作物生长,提高其产量等^[12,25,87]。作物生长与秸秆填埋量相关,秸秆填埋量越大,作物出苗率、产量等越大(表 2)。范富等研究发现,秸秆用量越大,大麦的出苗率越高,其平均株高及产量也越高,其原因是秸秆用量的增加,改善了盐碱地土壤理化性质、肥力状况,改善了作物生长环境^[23]。李斌等研究发现,秸秆还田量越大,油菜根长和根体积也越大,原因可能是随着秸秆还田量的增加,对土壤理化性质改善效果越明显,从而更能促进作物生长^[88]。

表 2 不同秸秆还田量对作物生长的影响

秸秆	秸秆还田量 (kg/m ²)	作物	作物生长情况(与对照相比)(%)				参考文献
			作物生物量	株高	产量	作物根系	
玉米秸秆	1.20	向日葵	4.9~12.9	—	11.6~12.1	—	[86]
棉花秸秆	0.30	棉花	—	—	籽棉 11.57、皮棉 18.56(第 1 年) 籽棉 19.01、皮棉 19.78(第 2 年) 籽棉 13.24、皮棉 18.73(第 3 年)	—	[12]
玉米秸秆	0.75	苜蓿	—	33.3	76.9(第 1 年) 125.0(第 2 年)	—	[25]
牛粪	0.75	苜蓿	—	37.5	86.1(第 1 年) 21.9(第 2 年)	—	
玉米秸秆	3.00	大麦	—	13.3~60.0(第 1 年) -9.1~13.6(第 2 年) -4.8~14.3(第 3 年)	-16.4~-1.6(第 1 年) 0~16.5(第 2 年) 59.2~82.4(第 3 年)	—	[23]
	4.5			66.7~80.0(第 1 年) 27.3~36.4(第 2 年) 42.9~57.1(第 3 年)	54.5~155.0(第 1 年) 66.5~167.0(第 2 年) 126.7~215.6(第 3 年)	—	
	6.00			53.3~166.7(第 1 年) 13.6~104.5(第 2 年) 33.3~123.8(第 3 年)	275.1~418.0(第 1 年) 283.5~417.0(第 2 年) 275.2~410.4(第 3 年)	—	
油菜秸秆	6.75	油菜	—	—	—	50.1(根长) 50.0(根体积)	[87]
	13.49					74.1(根长) 83.3(根体积)	
	20.24					83.1(根长) 100.0(根体积)	
玉米秸秆	0.60	向日葵	—	—	10.4	—	[64]
	1.20				48.8		
	1.80				97.9		

注:“—”表示文献中并未给出相应数据。

不同秸秆还田方式对作物生长产生的影响不同。Zhao 等研究发现,秸秆覆盖+填埋处理向日葵株高和叶面积指数大于秸秆覆盖,原因是秸秆覆盖+填埋处理对土壤理化性质改善效果更好^[54]。赵永敢等研究发现,上盖地膜+下埋秸秆促进食葵

生长发育,积累了较多干物质,其原因是上盖地膜+下埋秸秆处理使食葵生长前期土壤水分含量充足,整个生长期土壤盐分含量较低,为食葵生长提供了较好的环境;上盖秸秆+下埋秸秆在生长前期可以促进食葵生长发育,效果不如上盖地膜下埋

秸秆显著,后期长势减缓,干物质积累减少,其原因是后期土壤盐分含量上升,使净光合速率降低,从而影响干物质积累;秸秆深埋在生育期内土壤盐分含量较高,后期土壤水分含量较低,净光合速率较低,抑制了食葵生长,干物质积累较少^[32]。徐国凤等研究发现,盐碱地施加羊粪及秸秆均可以提高玉米产量,其中羊粪可以增产 15.2%,秸秆可以增产 7.6%^[35]。何瑞成等研究发现,施加有机物料可以显著提高水稻穗长、有效穗数、每穗总粒数、产量、结实率、千粒质量,施加牧草处理水稻穗长最长、结实率最高,施加颗粒型秸秆水稻有效穗数、每穗总粒数、千粒质量及产量最高,均优于施加正常秸秆、牧草以及羊粪,其原因可能是秸秆还田提高土壤微生物数量及其活性,微生物能够分解土壤中微量营养元素,为作物提供养分,促进作物发育,增加其产量^[79]。

秸秆与有机肥、腐熟剂或菌肥配施处理可以提高作物产量等。马飞等研究发现,秸秆及有机肥施用可以显著提高春小麦株高、穗干质量、叶干质量、茎干质量及总生物量,其原因可能是秸秆还田改善土壤理化性质,提供植物生长所需的养分^[47],此外秸秆还田能提高植物光合速率,从而促进植物生长。秸秆+有机肥配施还田春小麦生长及总生物量显著高于单独秸秆还田和施用有机肥,其原因可能是生物肥中的微生物可以加快秸秆的腐熟,从而充分释放秸秆中的养分^[20]。卢培娜等研究发现,腐熟秸秆还田、施加菌肥及腐熟秸秆+菌肥还田可以增加燕麦株高、根长,提高根系活力,促进干物质积累,提高燕麦叶片净光合速率、蒸腾速率及燕麦叶片气孔导度,提高燕麦叶片 SPAD 值,提高燕麦小穗数、千粒质量、籽粒产量和鲜干草产量,其中腐熟秸秆还田+1 500 kg/hm² 菌肥效果最好,其原因因为腐熟秸秆还田后,产生的腐植酸为微生物提供了丰富的 C、N,从而加速微生物矿化作用,提高土壤酶活性^[40]。

综上所述,秸秆还田影响作物生长、提高作物产量,其机理为:秸秆还田改善了土壤理化性质,提高了土壤养分含量,使土壤微生物数量增加,提高了土壤酶活性,从而促进作物生长,提高其产量。

5 展望

通过对秸秆还田改良盐碱地研究结果的概述,发现目前研究还存在一些不足之处,今后的研究应

该注重以下几个方面:(1)目前研究多为短期研究(<5 年),且以室内试验为主,连续多年大田试验较少。室内试验无法模拟野外盐碱地受当地土壤性质、气候等多因素影响情况,使得研究结果在实际应用中效果较差。另外,盐碱地改良是一个漫长的过程,目前的短期研究无法反映土壤改良的后续效应。(2)盐碱地水盐运移是一个动态过程,应加强跟踪监测,同时根据不同土壤类型等,构建模型体系,综合评价不同秸秆还田量及还田方式改良效果,筛选出最佳还田模式,以利于后期推广应用。(3)目前秸秆还田对盐碱地土壤理化性质影响机理研究不够深入,应进一步加强研究。(4)秸秆还田后对盐碱地土壤微生物等产生影响,从而影响土壤结构和功能,需要进一步开展秸秆还田-土壤微生物-作物生长相互作用等研究。(5)目前对于秸秆还田成本与经济效益研究较少,以后应研究多种有机物料如何配施,使改良效果最佳、经济效益最大。

参考文献:

- [1]王遵亲,祝寿泉,俞仁培,等. 中国盐渍土[M]. 北京:科学出版社,1993.
- [2]刘太祥,毛建华,马履一,等. 中国盐碱滩地生态综合改良与植被构建技术[M]. 天津:天津科学技术出版社,2011.
- [3]陈晓飞,王铁良,谢立群. 盐碱地改良:土壤次生盐渍化防治与盐渍土改良及利用[M]. 沈阳:东北大学出版社,2006.
- [4]关胜超. 松嫩平原盐碱地改良利用研究[D]. 长春:中国科学院大学,2017.
- [5]杨真,王宝山. 中国盐渍土资源现状及改良利用对策[J]. 山东农业科学,2015,47(4):125-130.
- [6]Li J G, Pu L J, Han M F, et al. Soil salinization research in China: advances and prospects[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(5):943-960.
- [7]Mondal M K, Bhuiyan S I, Franco D T. Soil salinity reduction and prediction of salt dynamics in the coastal ricelands of Bangladesh[J]. Agricultural Water Management, 2001, 47(1):9-23.
- [8]Bakker D M, Hamilton G J, Hetherington R, et al. Salinity dynamics and the potential for improvement of waterlogged and saline land in a Mediterranean climate using permanent raised beds[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 110(1):8-24.
- [9]徐阳春,韦中. 秸秆还田实用技术[M]. 2 版. 南京:江苏凤凰科学技术出版社,2019.
- [10]郑永照,岳杨,董本春,等. 玉米秸秆还田技术及其对农田土壤效应研究进展[J]. 农业科技通讯,2018(2):44-46.
- [11]李芙蓉. 滨海滩涂盐渍土覆盖阻盐控盐和土壤质量提升技术模式研究[D]. 马鞍山:安徽工业大学,2013:11-57.
- [12]秦都林,王双磊,刘艳慧,等. 滨海盐碱地棉花秸秆还田对土壤理化性质及棉花产量的影响[J]. 作物学报,2017,43(7):1030-1042.

- [13] 乔雪涛,何欣燕,何俊,等. 不同秸秆填埋量对盐碱土水盐运移及垂柳反射光谱的影响[J]. 生态学报,2018,38(22): 8107–8117.
- [14] 马惠绒,张沛琪,冯婷,等. 灌溉条件下秸秆深层覆盖对盐碱地改良的效果[J]. 内蒙古水利,2013(3): 93–94.
- [15] 王海娟,马红娜,姜海波. 秸秆覆盖对塔里木盆地南缘绿洲农田土壤水盐运移的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(17): 281–285.
- [16] 梁建财,史海滨,杨树青,等. 秸秆覆盖对盐渍土壤水盐状况及向日葵产量的影响[J]. 土壤通报,2014,45(5): 1202–1206.
- [17] 崔士友,张蛟,翟彩娇,等. 秸秆覆盖增强滩涂重盐雨水脱盐的效果[J]. 土壤通报,2018,49(5): 1198–1205.
- [18] 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]. 土壤学报,2017,54(6): 1395–1403.
- [19] 王双磊. 棉花秸秆还田对盐碱地棉田土壤理化性质和生物学特性的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2015:4–39.
- [20] 李学平,刘萍. 深耕旋秸秆还田对内陆盐碱地土壤肥力和作物产量的效应[J]. 江苏农业科学,2016,44(1): 133–135.
- [21] 汪成忠,胡永红,周翔宇,等. 水稻秸秆还田对崇明盐碱地土壤酶活性和微生物数量的影响[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(8): 132–138.
- [22] 乔雪涛,何俊,范秀华,等. 引黄灌区次生盐碱地速生杨光谱与光合特性对不同秸秆层的响应[J]. 生态学报,2019,39(15): 5573–5583.
- [23] 范富,张庆国,郇继承,等. 玉米秸秆夹层改善盐碱地土壤生物性状[J]. 农业工程学报,2015,31(8): 133–139.
- [24] 王启龙,卢楠,魏样. 不同改良措施对定边盐碱地土壤理化性质、黑麦草生长及产量的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(11): 282–286.
- [25] 李凤霞,郭永忠,王学琴,等. 不同改良措施对宁夏盐碱地土壤微生物及苜蓿生物量的影响[J]. 中国农学通报,2012,28(30): 49–55.
- [26] 郭永忠,李凤霞,王学琴,等. 不同改良措施对银川平原盐碱地土壤微生物区系的影响[J]. 河南农业科学,2012,41(11): 58–63.
- [27] 何欣燕,乔雪涛,赵海艳,等. 不同隔离垫层对宁夏盐碱地盐碱动态和土壤养分及垂柳生长的影响[J]. 应用与环境生物学报,2018,24(5): 1152–1157.
- [28] 葛云,程知言,胡建,等. 不同秸秆利用方式下江苏滨海盐碱地盐碱障碍调控[J]. 江苏农业科学,2018,46(2): 223–227.
- [29] 何瑞成,吴景贵,李建明. 不同有机物料对原生盐碱地水稳性团聚体特征的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(3): 310–316.
- [30] 陈晓东,吴景贵,范围,等. 不同有机物料对原生盐碱地土壤腐殖质结合形态及组成的影响[J]. 水土保持学报,2019,33(1): 200–205.
- [31] 张加强,骆霞虹,金关荣,等. 地表覆盖对不同类型盐碱地红麻生长及产量的影响[J]. 浙江农业科学,2015,56(12): 1936–1939.
- [32] 赵永敢,逢焕成,李玉义,等. 秸秆隔层对盐碱土水盐运移及食葵光合特性的影响[J]. 生态学报,2013,33(17): 5153–5161.
- [33] 冯国艺,张谦,王树林,等. 秸秆还田对滨海盐碱地棉苗光合特性及生长的影响[J]. 棉花学报,2015,27(3): 248–253.
- [34] 张蛟,崔士友,冯芝祥,等. 气候因子和地表覆盖对沿海滩涂土壤盐分动态的影响[J]. 中国生态农业学报,2018,26(2): 294–302.
- [35] 徐国凤,同延安. 不同改良措施对卤阳湖盐碱地土壤性质及玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2019,37(3): 232–237.
- [36] Zhao Y G, Li Y, Wang S J, et al. Combined application of a straw layer and flue gas desulphurization gypsum to reduce soil salinity and alkalinity[J]. Pedosphere, 2020, 30(2): 226–235.
- [37] 龚静静,胡宏祥,朱昌雄,等. 秸秆还田对农田生态环境的影响综述[J]. 江苏农业科学,2018,46(23): 36–40.
- [38] 崔新卫,张杨珠,吴金水,等. 秸秆还田对土壤质量与作物生长的影响研究进展[J]. 土壤通报,2014,45(6): 1527–1532.
- [39] 卢培娜,刘景辉,张丰屹. 不同改良措施对盐碱地燕麦形态生理及产量的影响[J]. 中国农学通报,2018,34(15): 20–25.
- [40] 卢培娜,刘景辉,张丰屹. 菌肥及腐熟秸秆还田对盐碱地燕麦土壤特性的影响[J]. 北方农业学报,2017,45(5): 37–42.
- [41] 韩剑宏,王旭平,张连科,等. 发酵玉米秸秆对盐碱地土壤肥力指标的影响[J]. 灌溉排水学报,2017,36(12): 56–61.
- [42] 王静,肖国举,张峰举,等. 秸秆还田配施腐熟剂对银北盐碱地改良效果研究[J]. 干旱地区农业研究,2017,35(6): 209–215, 283.
- [43] 王帅,李玲,付战勇,等. 施肥对黄河三角洲区盐碱化土壤活性碳、氮的影响[J]. 农业现代化研究,2014,35(6): 804–809.
- [44] 刘鸿娇,侯亚红,王磊. 秸秆生物炭还田对围垦盐碱土壤的低碳化改良[J]. 环境科学与技术,2014,37(1): 75–80.
- [45] 李可哗,薛志忠,王文成,等. 滨海盐碱地土壤改良添加物筛选研究[J]. 北方园艺,2014(19): 165–168.
- [46] 马利静,冷寒冰,秦俊,等. 盐碱地改良对土壤理化性质和植物生物量的影响[J]. 江苏农业科学,2012,40(5): 330–332.
- [47] 马飞,许兴,肖国举,等. 秸秆还田与有机肥对银北盐碱地春小麦光合作用及生长的影响[J]. 贵州农业科学,2016,44(9): 80–83.
- [48] 王果. 土壤学[M]. 北京:高等教育出版社,2009.
- [49] Balwinder – Singh, Eberbach P L, Humphreys E, et al. The effect of rice straw mulch on evapotranspiration, transpiration and soil evaporation of irrigated wheat in Punjab, India[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(12): 1847–1855.
- [50] Mulumba L N, Lal R. Mulching effects on selected soil physical properties[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 98(1): 106–111.
- [51] Zhang H Y, Lu C, Pang H C, et al. Straw layer burial to alleviate salt stress in silty loam soils: impacts of straw forms[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(1): 265–276.
- [52] 郭相平,杨泊,王振昌,等. 秸秆隔层对滨海盐渍土水盐运移影响[J]. 灌溉排水学报,2016,35(5): 22–27.
- [53] Cao J S, Liu C M, Zhang W J, et al. Effect of integrating straw into agricultural soils on soil infiltration and evaporation[J]. Water Science and Technology, 2012, 65(12): 2213–2218.

- [54] Zhao Y G, Pang H C, Wang J, et al. Effects of straw mulch and buried straw on soil moisture and salinity in relation to sunflower growth and yield[J]. *Field Crops Research*, 2014, 161: 16–25.
- [55] 孙 博, 解建仓, 汪 妮, 等. 秸秆覆盖对盐渍化土壤水盐动态的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(4): 180–184.
- [56] 宋 楠. 农艺措施对甘肃引黄灌区新垦盐碱荒地改良效果研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2014: 19–44.
- [57] 郑艳美. 秸秆生物反应堆对滨海盐碱土的改良培肥效果[J]. *贵州农业科学*, 2013, 41(5): 97–99.
- [58] 范 富, 徐寿军, 宋桂云, 等. 玉米秸秆造夹层处理对西辽河地区盐碱地改良效应研究[J]. *土壤通报*, 2012, 43(3): 696–701.
- [59] 郑 悦. 生物炭与秸秆还田对盐碱地水稻土壤理化形状及产量的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2015: 11–40.
- [60] 杨 华, 陈莎莎, 冯哲叶, 等. 土壤微生物与有机物料对盐碱土团聚体形成的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(10): 2080–2085.
- [61] 秦嘉海. 免耕留茬秸秆覆盖对河西走廊荒漠化土壤改土培肥效应的研究[J]. *土壤*, 2005, 37(4): 447–450.
- [62] 虎 胆·吐马尔白, 吴旭春, 迪力达. 不同位置秸秆覆盖条件下土壤水盐运动实验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2006, 25(1): 34–37.
- [63] 乔海龙, 刘小京, 李伟强, 等. 秸秆深层覆盖对土壤水盐运移及小麦生长的影响[J]. *土壤通报*, 2006, 37(5): 885–889.
- [64] Zhao Y G, Wang S J, Li Y, et al. Effects of straw layer and flue gas desulfurization gypsum treatments on soil salinity and sodicity in relation to sunflower yield[J]. *Geoderma*, 2019, 352: 13–21.
- [65] 赵永敢, 王 婧, 李玉义, 等. 秸秆隔层与地膜覆盖有效抑制潜水蒸发和土壤返盐[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(23): 109–117.
- [66] Li Y Y, Pang H C, Han X F, et al. Buried straw layer and plastic mulching increase microflora diversity in salinized soil[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(7): 1602–1611.
- [67] 王成宝, 杨思存, 霍 琳, 等. 地面覆盖方式对新垦盐碱地的抑盐和增产效果研究[J]. *甘肃农业科技*, 2014(11): 42–45.
- [68] 孙伟红. 长期秸秆还田改土培肥综合效应的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2004: 17.
- [69] 卢 闯, 逢焕成, 张宏媛, 等. 春灌结合秸秆隔层促进土壤脱盐增加微生物多样性[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(18): 87–94.
- [70] Pang H C, Li Y Y, Yang J S, et al. Effect of brackish water irrigation and straw mulching on soil salinity and crop yields under monsoonal climatic conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(12): 1971–1977.
- [71] Bezborodov G A, Shadmanov D K, Mirhashimov R T, et al. Mulching and water quality effects on soil salinity and sodicity dynamics and cotton productivity in Central Asia[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 138(1/2): 95–102.
- [72] Zhao W, Zhou Q, Tian Z Z, et al. Apply biochar to ameliorate soda saline – alkali land, improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 722: 137428.
- [73] 徐娜娜. 微生物降解秸秆对盐碱地改良的机理研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2014: 18–31.
- [74] Havlin J L, Kissel D E, Maddux L D, et al. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54(2): 448–452.
- [75] Saroa G S, Lal R. Soil restorative effects of mulching on aggregation and carbon sequestration in a Miamian soil in central Ohio[J]. *Land Degradation & Development*, 2003, 14(5): 481–493.
- [76] Duiker S W, Lal R. Crop residue and tillage effects on carbon sequestration in a Luvisol in central Ohio[J]. *Soil and Tillage Research*, 1999, 52(1/2): 73–81.
- [77] Huo L, Pang H C, Zhao Y G, et al. Buried straw layer plus plastic mulching improves soil organic carbon fractions in an arid saline soil from Northwest China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 165: 286–293.
- [78] 周晓飞. 秸秆微生物堆肥配方优化及对盐碱地改良初探[D]. 天津: 天津理工大学, 2012: 19–21.
- [79] 何瑞成, 吴景贵. 有机物料对原生盐碱地土壤生物学性质的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55(3): 774–782.
- [80] Zhu T S, Shao T Y, Liu J Y, et al. Improvement of physico – chemical properties and microbiome in different salinity soils by incorporating Jerusalem artichoke residues [J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 158: 103791.
- [81] 贾相岳. 玉米秸秆造夹层处理对盐碱地土壤微生物数量的影响[J]. *南方农业*, 2017, 11(10): 24–27.
- [82] Wu Y P, Li Y F, Zheng C Y, et al. Organic amendment application influence soil organism abundance in saline alkali soil [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 54: 32–40.
- [83] 萨如拉, 杨恒山, 范 富, 等. 秸秆还田量和腐熟剂对秸秆降解率和土壤理化性质的影响[J]. *河南农业科学*, 2018, 47(9): 56–61.
- [84] 田小平, 王 磊, 王 蕊, 等. 秸秆与秸秆生物炭还田对土壤微生物群落结构的影响[J]. *工业微生物*, 2017, 47(6): 1–6.
- [85] 侯亚红, 王 磊, 付小花, 等. 土壤呼吸对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其微生物机制[J]. *工业微生物*, 2014, 44(5): 7–13.
- [86] 李长洲, 袁国印, 王一柳, 等. 秸秆还田配施钾肥对水稻产量与钾素吸收的影响[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(2): 43–47.
- [87] Zhao Y G, Li Y Y, Wang J, et al. Buried straw layer plus plastic mulching reduces soil salinity and increases sunflower yield in saline soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 363–370.
- [88] 李 斌, 王家平, 李鲁华, 等. 油菜秸秆还田对盐碱地油菜根系生长发育的影响[J]. *新疆农垦科技*, 2018, 41(11): 24–29.