

有机肥替代部分化肥对滨海盐碱地土壤改良和小麦产量的影响^①

李玉¹, 田宪艺¹, 王振林², 代兴龙², 董元杰^{1*}, 贺明荣^{2*}

(1 山东农业大学资源与环境学院, 土壤资源高效利用国家工程实验室, 山东泰安 271018; 2 山东农业大学农学院, 山东泰安 271018)

摘要: 合理利用有机肥资源, 将有机肥替代部分化肥是实现减肥目标的重要技术途径之一。特别对于盐碱化土壤, 有机肥替代部分化肥既能减少化肥的使用又能改善土壤的理化性质, 促进作物产量的提高。本文以滨海盐碱地为研究对象, 2014—2016年连续两年在滨州市无棣县渤海粮仓试验基地通过大田试验, 研究了不施肥(CK)、普通化肥(CCF)、有机肥替代低量化肥(LOM)、有机肥替代中量化肥(MOM)、有机肥替代高量化肥(HOM)5种施肥模式对盐碱地土壤改良和小麦产量的影响。结果表明: 与CK相比, CCF处理对盐碱地土壤盐分的影响不大, 而有机肥替代部分化肥处理显著降低了土壤水溶性盐总量和pH, 特别是在小麦开花期, MOM和HOM处理明显改善了土壤盐碱化, 显著降低了土壤中水溶性钠和交换性钠的比例, 使ESP和SAR值减小, 其中以HOM处理对滨海盐碱土的土壤盐分改良效果最佳; 与CK相比, 各施肥处理的土壤养分含量均有提高, 有机肥替代处理与CCF相比, 对土壤全氮和有效磷的含量影响不明显, 而HOM处理的速效钾含量显著高于其他处理, 在一定程度上抑制了Na的毒害, 有机肥替代处理还显著提高了土壤有机质的含量, 改善了土壤环境; 从CK到HOM, 小麦产量依次递增, 与CCF相比, 有机肥替代处理LOM、MOM、HOM分别增产7.5%、18.8%、26.4%。综上, 有机肥替代部分化肥, 达到了减肥的目的, 并对滨海盐碱地有明显的改良效果, 提高了小麦产量。且在3个有机肥替代部分化肥的施肥处理中, 以HOM施肥处理对滨海盐碱地的改良效果最优, 获得的小麦产量最高。

关键词: 有机肥替代化肥; 盐碱地; 土壤盐分; 土壤养分; 小麦产量

中图分类号: S287; S512.1 文献标识码: A

近年来, 随着经济与社会的发展, 在农业生产中, 为了追求作物高产, 化肥的施用量逐年增加。增施化肥在提高农作物产量的同时, 也对生态环境产生了负面影响, 并已经严重威胁到我国农业的可持续发展^[1]。众多研究表明我国化肥施用量已经超过了经济意义上的最优施用量^[2], 并已给农民带来经济效益上的损失^[3]。有研究证明化肥的过量施用使农田生态系统中物质和能量循环平衡发生改变, 降低了耕作土壤的质量, 造成了严重的环境污染问题, 已成为农业点源污染的主要来源^[4-6]。因此, 优化施肥方式, 提高土壤肥力和作物产量, 实现农业的可持续发展迫在眉睫。而合理利用有机肥资源, 有机肥替代部分化肥, 是实现中国到2020年化肥零增长目标的重要途径之一^[7]。有机肥替代部分化肥不仅可以减少化肥过量施

用引起的农业污染问题, 还可以改善农田土壤质量, 提高农作物品质^[8]。

面对耕地数量不断减少、质量逐渐下降以及粮食安全等问题, 加强土地综合治理, 提高土地开发利用, 开发利用一定数量的耕地后备资源成为补充耕地、保障粮食安全的重要途径之一^[9]。在我国可耕地中盐碱地面积占总耕地面积的20%以上^[10], 盐碱地是广泛分布的一种低产土壤类型, 土壤盐渍化使土壤内盐分大量积累, 并引起一系列问题, 如土壤结构黏滞、通气性差、土温上升慢、养分释放慢等, 导致表层土壤盐渍化进一步加剧, 造成土壤冷、硬、板现象^[11], 还严重制约着作物的生长发育, 显著降低作物产量^[12-13], 从而使土地的利用率降低, 荒地增多, 加深了人多地少的矛盾。盐碱地作为我国重要的

基金项目: 山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019ZZ021)、国家重点研发计划项目(2017YFD0201705)和山东省重大科技创新工程项目(2017CXGC0301)资助。

* 通讯作者(yuanjiedong@163.com; mrhe@sdau.edu.cn)

作者简介: 李玉(1996—), 女, 山东阳谷人, 硕士研究生, 主要从事土壤与植物营养研究。E-mail: 2392815362@qq.com

后备耕地战略资源,其开发利用改良工作的开展对保障我国粮食安全、促进农业可持续发展、改善生态环境以及推动区域经济协调发展具有重要意义^[14]。此外,长期施用化肥容易导致土壤板结、盐分在土壤表层积聚,加剧土壤盐碱化程度。

为此,前人对施用有机肥改良盐碱地做了大量研究,研究表明盐碱土施用有机肥,可以增加土壤有机质,促进土壤团聚体形成,改善土壤结构^[15],降低土壤 pH^[16],为作物提供持久营养^[17],是一种改善土壤盐碱化的有效措施;吕品^[18]的研究表明:增施有机肥可改善盐碱土生态环境,促进脱盐、抑制返盐;杨明等^[19]通过田间与盆栽模拟试验研究了有机肥对苏打盐碱土的改良效果,研究也表明施用有机肥后土壤 pH 显著下降,土壤盐基离子组分发生显著变化,土壤有机质、全氮、全磷、全钾含量显著增加;而徐阳春和沈其荣^[20]的研究结果表明,长期施用有机肥能够改变土壤不同粒级的组成,促进土壤团粒结构的形成,改善土壤的理化性质;周伟红^[21]通过研究施

用有机肥对土壤理化性质的影响,验证了施用有机肥使土壤的容重降低、孔隙度增大、透水性增强,促进盐分淋洗下移。

由此可见,前人的研究大部分集中在施用有机肥对盐碱地土壤理化性质的改良方面,而本文从减碳角度出发,通过在山东省滨州市无棣县渤海粮仓实验示范基地布置大田试验,研究有机肥替代部分化肥对土壤盐分和养分的影响,探讨有机肥替代部分化肥对盐碱地土壤的改良效应;同时研究了有机肥替代部分化肥对盐碱地小麦产量的影响,为滨海盐碱地改良与小麦的合理施肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在山东省滨州市无棣县渤海粮仓试验基地(37°55'4"N, 117°55'18"E)进行。该试验点属于温带季风气候,土壤类型为滨海盐渍土,土壤基本理化性质见表 1。

表 1 试验前 0~20 和 20~40 cm 土层基础地力
Table 1 Basic soil characteristics in 0-20 cm and 20-40 cm depths

土层(cm)	盐分含量(g/kg)	pH	电导率(dS/m)	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
0~20	1.50	7.54	4.6	14.64	1.31	12.17	533.45
20~40	1.00	7.84	2.5	11.00	0.80	2.58	407.72

1.2 试验设计

该试验地耕作制度一年两熟,前茬作物为玉米,秸秆还田。供试小麦品种为“山农 22”。第一年在 2014 年 10 月 20 日播种,2015 年 6 月 13 日收获。第二年在 2015 年 10 月 22 日播种,2016 年 6 月 17 日收获。

试验设 5 个处理(表 2)。试验小区面积为 40 m² (4 m × 10 m) 小麦播种量为 300 kg/hm²,行间距 28.5 cm。每个处理重复 3 次,小区随机排列。有机肥总养分(氮磷钾) 50 g/kg,速效氮含量 2.7 g/kg。有机肥氮含量以速效氮计,基施氮肥(化肥+有机肥)等氮量施入。

表 2 化肥及有机肥施用量
Table 2 Application rates of chemical fertilizers and organic fertilizers in experiment

处理	N 用量(基施+追施)(kg/hm ²)	P ₂ O ₅ 用量(kg/hm ²)	K ₂ O 用量(kg/hm ²)	有机肥用量(t/hm ²)
CK(不施肥)	0	0	0	0
CCF(普通化肥)	105+105	96	90	0
LOM(有机肥替代低量化肥)	105(10.13)+105	96	90	3.75
MOM(有机肥替代中量化肥)	105(20.25)+105	96	90	7.50
HOM(有机肥替代高量化肥)	105(40.5)+105	96	90	15.00

注:括号中数字表示施用有机肥的 N 含量。

土壤样本分别于小麦返青期、拔节期、开花期、灌浆期、成熟期取样,每个处理均用土钻分别采集 0~20、20~40 cm 土层的土壤样品,作为供试土样。每个小区取 9 个样点,混合均匀,作为一个重复。取得土壤样品后,挑出土壤中的石块和动植物残体,风干,研磨,分别过 1 mm 和 0.25 mm 筛,用于测定土

壤盐分和养分。小麦于成熟期采集,测定产量。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤理化性质测定 土壤水溶性盐总量及 pH 的测定,水土比 5:1;全氮采用半微量凯氏定氮法;有效磷采用 0.05 mol/L NaHCO₃ 溶液浸提-紫外分光光度计比色法;速效钾采用 1 mol/L NH₄Ac 溶

液浸提-火焰光度计法；有机质含量采用重铬酸钾外加热法；测定方法参考鲍士旦^[22]和鲁如坤^[23]。

水溶性离子的测定，水土比 5:1；交换性离子的测定，1 mol/L、pH 7.0 CH₃COONH₄:土 = 5:1，相关计算公式如下：

$$\text{SAR} = \frac{[\text{Na}^+]}{0.5[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]^{1/2}} \quad (1)$$

$$\text{ESP} = \frac{\text{Na}_{\text{ex}}^+}{\text{CEC}} \quad (2)$$

1.3.2 小麦产量测定 成熟期在每个小区 1.0 m² 的微区内进行单位面积穗数的调查；在长势均匀一致的区域随机取 30 个单穗用于每穗粒数的调查；小麦收获后脱粒，风干后调整为含水量为 12% 的籽粒产量(干物质含量为 88%)，并用于籽粒千粒重的调查。

1.4 数据处理

采用 Excel 2003 软件处理数据和绘表，采用 DPS 7.05 软件进行统计分析，采用最小显著极差法(LSD)进行差异显著性检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 有机肥替代部分化肥对盐碱地土壤盐分的影响

2.1.1 有机肥替代部分化肥对盐碱地土壤水溶性盐总量的影响 如图 1 所示，4 月 5 日前后，由于气候条件，水分蒸发量大，土壤水溶性盐总量上升，其他时期相对稳定。0~20 cm 和 20~40 cm 土层盐分含量变化规律基本相同，且 0~20 cm 土层盐分含量普遍高于 20~40 cm。在 0~20 cm 土层，4 月 5 日前

土壤水溶性盐总量呈现为 CK > CCF > 各有机肥替代处理 4 月 5 日后土壤水溶性盐总量呈现为 CCF > CK > 各有机肥替代处理，特别在 5 月 26 日小麦灌浆期，与 CK 相比，CCF 处理的土壤水溶性盐总量上升了 20.4%，而 LOM、MOM、HOM 处理分别下降了 28.3%、21.2%、22.0%。在 20~40 cm 土层，土壤水溶性盐总量基本呈现 CK > CCF > LOM > HOM > MOM 的趋势；且与 CK 相比，CCF 与之差距较小，而 LOM、MOM、HOM 3 个处理土层水溶性盐分含量普遍低于 CK，特别是在 5 月 9 日小麦返青期和 6 月 8 日小麦成熟期处理间差异显著；小麦成熟期 LOM、MOM、HOM 处理与 CK 相比土层水溶性盐总量分别下降了 34.3%、36.7%、26.6%。0~20 cm 和 20~40 cm 土层水溶性盐分含量变化均说明有机肥替代部分化肥能够降低盐碱地耕层土壤盐分含量，进而改善盐碱地土壤环境。

2.1.2 有机肥替代部分化肥对盐碱地土壤 pH 的影响 如图 2 所示，不同时期各个土层土壤 pH 差异明显，4 月 5 日前后，土壤 pH 达到峰值，后期呈明显下降趋势。0~20 cm 土层 pH 在峰值时各处理均高于 CK，但在其他时期各处理的土壤 pH 均明显低于 CK，特别是在 3 月 3 日、5 月 26 日及 6 月 8 日前后各处理间差异显著，基本表现为 CK > CCF > LOM > MOM > HOM；在 6 月 8 日小麦成熟期时，有机肥替代处理 LOM、HOM、MOM 的 pH 较 CCF 处理分别下降了 27.7%、33.8%、31.4%。20~40 cm 土层各处理间 pH 差异不明显。说明有机肥替代化肥处理对盐碱地 0~20 cm 土层 pH 影响明显，且随着有机肥替代量的增加土壤 pH 呈逐渐下降趋势。

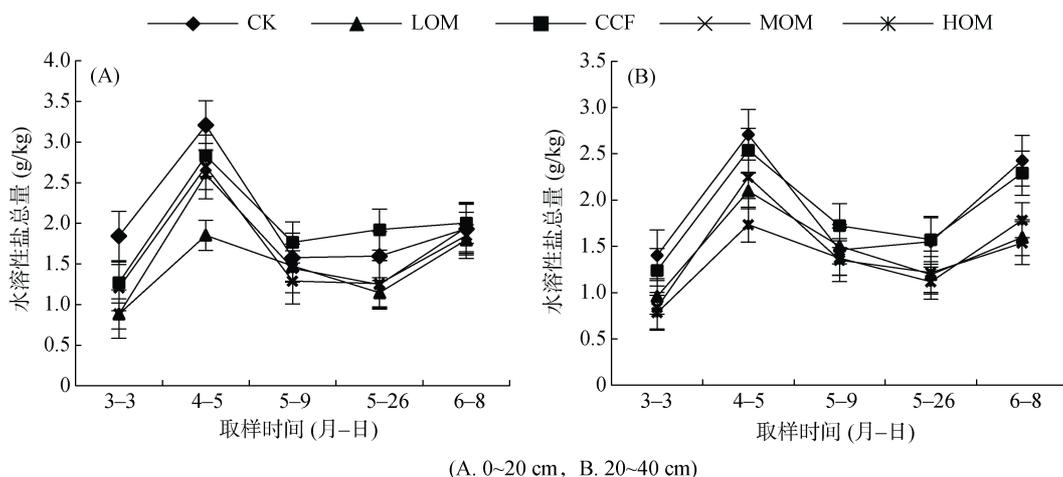


图 1 有机肥替代不同量化肥对土壤水溶性盐分含量的影响

Fig. 1 Soil water-soluble salt contents under different organic fertilizers substituting for chemical fertilizers

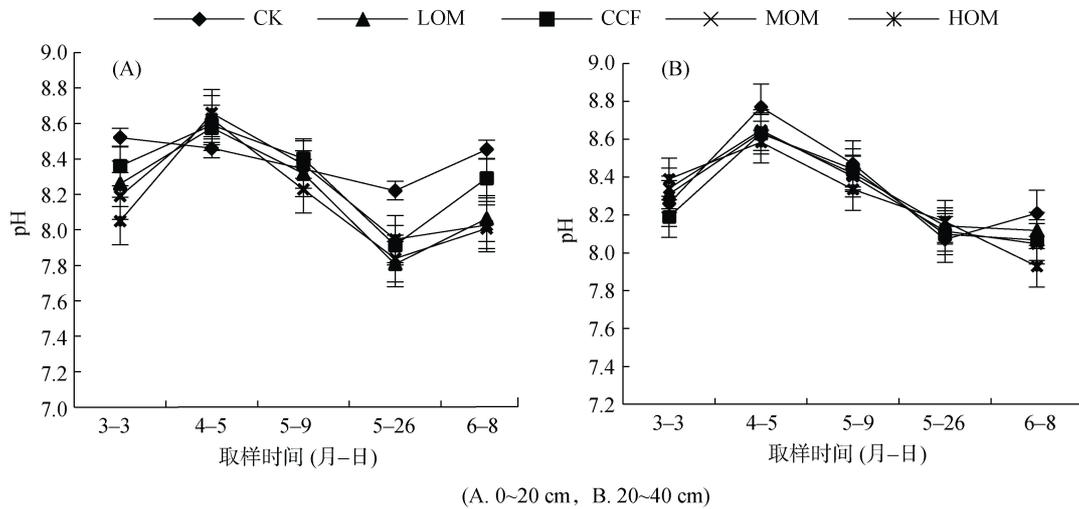


图 2 有机肥替代不同量化肥对土壤 pH 的影响
Fig. 2 Soil pH under different organic fertilizers substituting for chemical fertilizers

2.1.3 有机肥替代部分化肥对盐碱地土壤 Na 离子的影响 如表 3 所示, ESP 值 > 15, 说明盐碱化程度较高。但有机肥替代部分化肥的处理阳离子交换量 CEC 值、交换性 Na 含量及二者比值 ESP 普遍低于 CCF 处理, 且随着有机肥替代量的增加而逐渐降低, 表明有机肥可以改善土壤盐碱化程度, 促进土壤脱盐。各处理之间前期差异较小, 后期差异较大, 并随着时间变化各指标呈逐渐减小趋势。

如表 4 所示, 土壤在盐碱化程度下, 土层水溶性

Na 含量较高且 20~40 cm 土层高于 0~20 cm 土层, 与 CK 相比, 只施普通化肥的 CCF 处理在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层均增加了土层水溶性 Na 含量, 加剧了土壤的盐碱化程度; 而各土层有机肥替代化肥处理的土层水溶性 Na 含量普遍低于 CK 处理。说明单施化肥处理只能加剧土壤的盐碱化程度, 而使用有机肥替代部分化肥则能够明显降低土层水溶性 Na 含量, 改善土壤盐碱环境。对于土层水溶性 Ca、Mg 离子 0~20 cm 土层含量高于 20~40 cm 土层, 与 CK

表 3 有机肥替代不同量化肥对土壤交换性钠和钠饱和度的影响
Table 3 Soil exchangeable Na and ESP under different organic fertilizers substituting for chemical fertilizers

指标	土层 (cm)	3月3日					6月8日				
		CK	CCF	LOM	MOM	HOM	CK	CCF	LOM	MOM	HOM
阳离子交换量	0~20	16.85	21.31	16.25	18.11	20.47	20.62	19.70	20.62	17.83	17.76
CEC (cmol/kg)	20~40	20.94	21.49	20.45	19.72	18.37	14.86	17.60	17.45	16.72	15.43
交换性 Na (cmol/kg)	0~20	3.50	3.32	2.41	3.16	2.28	3.41	3.35	2.44	2.20	2.58
	20~40	4.08	4.05	3.71	3.58	3.01	4.10	3.72	3.15	2.85	2.87
交换性 Na 百分比	0~20	20.78	15.58	14.86	17.44	11.13	16.55	17.01	11.84	12.36	14.53
ESP (%)	20~40	19.47	18.83	18.14	18.13	16.40	27.62	21.14	18.06	17.03	18.63

表 4 有机肥替代不同量化肥对土壤水溶性钠、钙、镁和钠吸附比的影响
Table 4 Soil water-soluble Na, Ca, Mg and SAR under different organic fertilizers substituting for chemical fertilizers

指标	土层 (cm)	3月3日					6月8日				
		CK	CCF	LOM	MOM	HOM	CK	CCF	LOM	MOM	HOM
Na (meq/L)	0~20	10.90	11.28	9.68	11.04	8.82	11.88	11.92	9.83	9.42	9.54
	20~40	12.55	12.83	10.94	11.20	10.79	13.03	13.67	11.33	9.99	10.60
Ca (meq/L)	0~20	5.38	5.38	5.83	4.70	7.42	7.42	6.51	6.51	7.42	8.10
	20~40	4.47	4.24	5.15	4.47	5.60	5.38	5.60	6.51	6.74	6.28
Mg (meq/L)	0~20	0.62	0.59	1.05	0.54	1.09	0.63	0.65	1.09	1.20	1.09
	20~40	0.62	0.56	0.63	0.54	0.71	0.56	0.73	0.63	0.73	0.70
钠吸附比 SAR	0~20	8.90	9.23	7.38	9.65	6.05	8.38	8.91	7.13	6.41	6.29
	20~40	11.12	11.71	9.09	10.01	8.59	10.70	10.87	8.48	7.31	8.02

相比,有机肥替代处理普遍高于CK,CCF与CK处理差异不明显。说明施用有机肥能够增加土壤中水溶性Ca、Mg的含量,改善根际营养状态,有利于作物生长。钠吸收比率(SAR)20~40 cm土层要高于0~20 cm土层,且随着时间变化各处理的钠吸收比率下降,各处理间的差异与土层水溶性Na含量变化趋势基本一致。

2.2 有机肥替代部分化肥对盐碱地土壤有机质和N、P、K的影响

如图3A所示,由于秸秆还田等诸多因素的影响,各处理间土壤有机质含量存在差异,但变化无明显规律,可以看出各土层有机肥替代处理的有机质含量高于CK、CCF,说明有机肥替代化肥,可增加土壤中有机质的含量。如图3B、3C所示,全氮和有效磷含量在施肥处理间存在一定差异但变化无明显规律,0~20 cm土层全氮和有效磷含量普遍高于20~40 cm。0~20 cm土层,4月5日左右CK处理的全氮含量明显高于其他处理,但在6月8日小麦收获期时,LOM、MOM、HOM处理的全氮含量已经超过CK处理,较CK处理分别提高14.2%、2.4%、15.7%。6月8日小麦收获期,0~20 cm土层,CCF处理有效磷含量最低,LOM、MOM、HOM处理较CCF分别高39.0%、67.0%、46.8%;20~40 cm土层,CK处理有效磷含量最低,CCF、LOM、MOM、HOM处理较CK分别高241.8%、14.7%、309.5%、36.4%。如图3D所示,0~20 cm土层速效钾含量高于20~40 cm土层,0~20 cm和20~40 cm土层速效钾含量变化规律基本一致。在各个时期HOM处理土壤速效钾含量均为最大值,且明显高于其他处理;其次为MOM处理,其他处理间差异较小。到6月8日小麦收获期时,与CK处理相比,0~20 cm土层CCF、LOM、HOM、MOM速效钾含量分别高13.2%、21.2%、27.2%、27.1%;20~40 cm土层CCF、LOM、HOM、MOM速效钾含量分别高17.7%、17.6%、17.9%、42.3%。

2.3 有机肥替代部分化肥对盐碱地小麦产量的影响

由表5可知,2014—2016年两个生长季小麦产量变化趋势一致,试验处理从CK到HOM,产量依次递增,其中以高量有机肥替代处理效果最优。与CK相比,施肥处理增产58%以上,说明在盐碱地上,肥料(有机肥和无机肥)的投入能够获得较高的产量。

与CCF相比,LOM、MOM、HOM分别增产7.5%、18.8%、26.4%,说明有机肥替代部分化肥能够促进小麦增产,并且产量随有机肥替代化肥量的增加而增

加。从产量构成因素来看,各处理间的穗粒数差异较小,穗数和粒重差异较大,且在小麦两年的收获季中,表现出相同的变化趋势,说明该试验条件下,穗数和粒重是影响盐碱地小麦产量的关键因素。

3 讨论

3.1 有机肥替代部分化肥对盐碱地土壤盐分的影响

土壤水溶性盐分含量,是判断土壤的盐渍状况的重要指标,当土壤中盐分达到一定数量后,将直接影响作物种子的萌发和植株正常生长,通常认为土壤中可溶性盐分质量分数大于0.2%时,农作物受害^[24],本试验条件下土壤盐浓度在0.2%左右,表明小麦受到盐害的影响。土壤pH对土壤微生物活性、有机质转化和土壤养分迁移具有重要影响,滨海盐碱地pH在8.0~8.8之间变化,呈碱性环境,抑制了微生物活性,影响小麦对养分的吸收。前人研究表明增施有机肥料,有机无机结合,可以改善盐渍土土壤生态环境,促进脱盐、抑制返盐,以有机物质调控土壤水盐平衡和肥盐平衡^[25-28]。本研究结果表明,有机肥替代部分化肥能够降低土壤耕层盐分含量(图1),使小麦在生长发育部分时期盐分含量低于0.2%。而在4月5日左右,土壤盐分较高,是因为这一时期气温升高,而降水稀少,使土壤水分蒸发剧烈;另一方面由于小麦处于拔节期,需水较多,导致土壤表层盐分的积累。而有机肥对土壤的改良作用减少了土壤表层水分的蒸发,降低了盐分从下层向表层的移动速率,抑制了土壤返盐。结合表3中K、Na、Ca、Mg等阳离子含量的变化,可以看出有机肥替代部分化肥降低了土壤盐分含量,同时促进了离子含量的变化。Na含量降低,K、Ca和Mg升高,改善了根际养分状况,有利于小麦的生长。其中有机肥替代部分化肥降低土壤pH,这与其减少土壤盐分含量和促进盐离子比例变化有关。土壤钠含量处于动态变化,用有机肥替代部分化肥,可降低土壤表层水溶性钠和交换性钠的含量和比例(表3),有利于作物生长。Beck等人^[29]认为交换性钠解离会产生OH⁻,OH⁻是土壤碱度的重要来源,即交换性钠解离会促进土壤碱化,pH升高。SAR和ESP值的降低表明有机肥替代部分化肥能够降低根部Na引起的单盐毒害,有利于增加小麦对其他矿质元素的吸收。

耿泽铭^[30]研究发现,施用有机肥对土壤阳离子交换量、水溶性盐离子的含量、pH、碱化度具有明显改善作用;刘媛媛等^[31]通过室内模拟培养试验,发现土壤含盐量与有机肥施用量呈极显著正相关,而

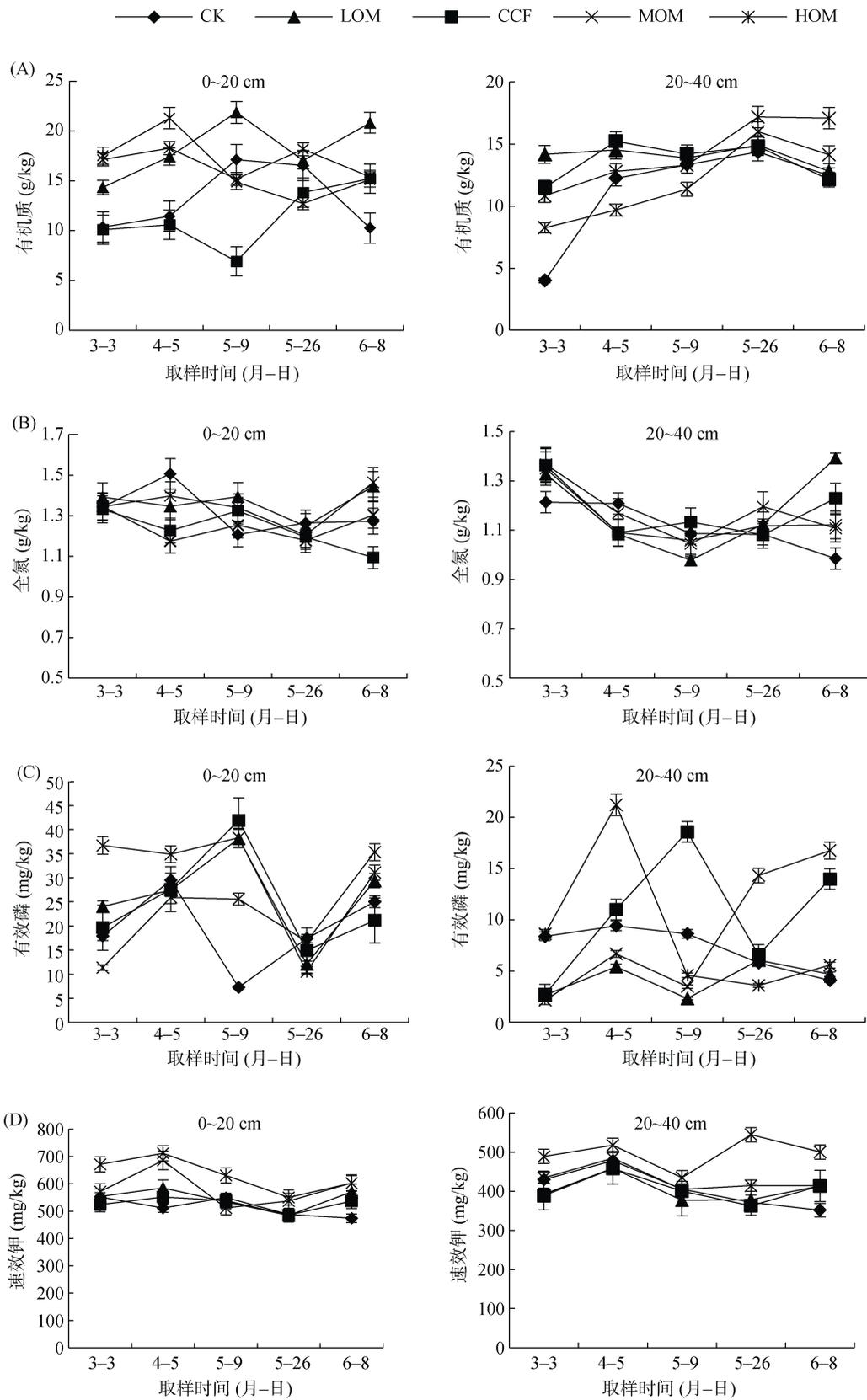


图 3 有机肥替代不同量化肥对土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾含量的影响

Fig. 3 Soil organic matter, total nitrogen, available P and K under different organic fertilizers substituting for chemical fertilizers

表 5 小麦产量及其构成因素
Table 5 Yield and yield components of wheat under different treatments

处理	2014—2015 年小麦产量及其构成因素			2015—2016 年小麦千粒重与产量		
	穗数($10^4/m^2$)	穗粒数(粒/穗)	千粒重(g)	产量(kg/hm^2)	千粒重(g)	产量(kg/hm^2)
CK	472.5 d	43.4 a	35.2 b	3 738 d	40.4 a	3 806 d
CCF	502.5 c	43.4 a	32.6 d	6 701 c	36.5 b	6 015 c
LOM	603.0 b	41.9 b	34.0 c	6 786 c	37.5 b	6 841 c
MOM	612.0 a	42.0 b	35.7 b	7 704 b	39.3 ab	7 375 b
HOM	610.5 a	43.4 a	37.1 a	8 079 a	40.1 a	7 951 a

注：表中同列数据小写字母不同表示处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平。

与尿素用量无明显的相关性；罗佳等^[32]证实了等量供肥条件下，有机肥处理对不同生育期的土壤总盐含量有一定影响，总体上呈减少趋势。本研究结果与此一致，在等氮量施入水平条件下，以有机肥替代高量化肥对土壤盐分的改良效果最显著，并随有机肥替代量的增加，土壤盐分依次减少。这可能是随着有机肥替代量增加，有机肥改良土壤结构、吸收性能和理化性质的作用加强，说明有机肥确实有促进脱盐、抑制反盐的作用。

3.2 有机肥替代部分化肥对盐碱地土壤有机质和 N、P、K 的影响

土壤有机质含量是土壤肥力及土壤-作物生态系统发展的重要指标，它是形成土壤团粒结构的粘合剂，它不仅能改良土壤结构、吸收性能和理化性质，而且还能植物提供一定的养分^[33]。大量研究表明，有机肥可以有目的地提高土壤表层中有机质含量，使土壤形成良好的团聚体结构，提高土壤养分，从而增强土壤保肥供肥能力^[34]，弥补长期耕作或土壤贫瘠带来的不利影响。本试验研究也表明，有机肥替代部分化肥能增加土壤中有机质含量，有利于有机质的积累。而不同施肥处理之间有机质含量存在差异，但变化无明显规律，但可以看出各土层有机肥替代处理的有机质含量要高于不施有机肥的处理，说明有机肥替代部分化肥能够提高土壤中有机质的含量，改良盐碱地土壤理化性质，但受到秸秆还田等诸多因素的影响，短期内增加效果较小，需要长期投入。

N、P、K 作为土壤肥力最重要的指标，是影响作物生长的重要大量元素，也是施肥的三大主要元素。与化肥相比，有机肥料在提供作物养分、维持地力、改善土壤结构和保护农业生态环境方面具有不可替代的作用^[32]。前人研究表明施用有机肥能够显著提高土壤全效养分含量^[35-36]，而田小明等^[37]通过温室盆栽试验，研究了连续 3 年施用不同量的有机肥对土壤养分含量的影响，结果表明随着有机肥用量的增

加，土壤养分也在增加。本研究也表明有机肥替代部分化肥对滨海盐土 N、P、K 的含量有一定作用。在等氮量施入条件下，由于秸秆还田等诸多环境因素差异，不同有机肥替代部分化肥处理对土壤全氮、有效磷的影响存在一定差异但不明显。而本试验中盐碱土速效钾含量较高(图 3)，尤其有机肥替代高量化肥处理速效钾明显高于其他处理。K 作为小麦所需的大量元素，而同等量的 Na 则成为有害元素。由于有机肥对土壤的改良作用，使高含量的 K^+ 存在，在一定程度上抑制了对 Na^+ 的吸收，减少了 Na 的毒害作用。K 充足可以提高小麦的抗逆性，更有利于适应盐碱条件。因此，有机肥能够一定程度提高土壤肥力，改善土壤环境。

3.3 有机肥替代部分化肥对盐碱地小麦产量的影响

盐碱环境下，土壤盐分和不均匀的养分分布均会影响小麦的产量。刘艳等^[38]通过在黄河三角洲盐碱地上进行增施有机肥对杂交狼尾草产量的研究表明，增施有机肥能明显增加杂交狼尾草的产量，改善其饲草品质。宿庆瑞等^[26]也证实了在盐渍化土壤上施用有机肥，有机无机结合，可以改善盐渍土壤环境，提高水稻产量。本研究结果表明，在等氮量施入条件下，有机肥替代部分化肥能显著提高小麦产量，并且随着有机肥替代量的增加而增加。这主要是由于有机肥改善了土壤的理化性质，增加土壤中有机质含量，培肥土壤，更新土壤腐殖质组成，提高土壤的保墒和保肥能力^[39]。等氮量施入条件下，有机肥替代部分化肥使土壤盐分降低，改善土壤肥力和物理结构，从而形成良好的土壤环境，从而为小麦生长奠定坚实基础。随着有机肥替代量的增加，对土壤改良作用增强，根系获得有效养分的能力提高，从而使小麦的氮素利用率得到提高，小麦产量逐渐增加。

孟祥浩等^[40]通过盐碱地上 8 个小麦品种(系)的研究，表明了穗数是影响盐碱地小麦产量的重要因

素；而李树华等人^[41]研究发现盐胁迫导致产量下降的主要原因是穗数的减少和粒重的下降。本研究发现单位面积穗数和粒重是影响小麦产量的关键因素，其中不施肥处理产量最低，其亩穗数和粒重也最低；在等氮量施入水平条件下，随有机肥替代量的增加，单位面积穗数和千粒重显著增加，使产量也呈正相关增加。这与施用有机肥后增加了土壤养分积累、提高了土壤供肥能力密切相关。说明在等氮量施入水平条件下，有机肥是通过对滨海盐碱土的改良，改善了土壤理化性质，促进小麦根系发育，根系获得养分的能力提高，促进小麦分蘖和小穗分化，来增加穗数和粒重，保障产量的增加。其中有机肥替代高量化肥处理使小麦产量达到最高，这可能是随着有机肥替代量的增加，有机肥对盐碱土的改良作用增强，改善了小麦根际营养状态，促进了小麦生长。

4 结论

有机肥替代部分化肥对滨海盐碱地有较好改良效果，能够显著降低土壤盐碱化程度。不同有机肥替代处理间对土壤水溶性盐和 pH 等影响显著，并随着有机肥替代量的增加，土壤盐分依次降低，并显著降低了土壤中水溶性钠和交换性钠的比例，使 ESP 和 SAR 值减小；施用有机肥能够提高土壤肥力，虽对土壤全氮、有效磷的含量影响不明显，但土壤速效钾含量明显高于其他处理，在一定程度上抑制了 Na 的毒害，还明显提高了土壤有机质的含量，改善了土壤环境。此外，盐碱环境下，施用有机肥替代部分化肥可明显提高小麦单位面积穗数和籽粒重量，从而提高小麦产量，且小麦产量随着有机肥替代量的增加而增加。

综上所述，在减少化肥施用量的情况下，有机肥替代部分化肥既能通过降低土壤盐分、提高土壤肥力，改良盐碱地土壤理化性质，又能使小麦产量得到提高。本研究表明，在等氮量施入水平条件下，有机肥替代高量化肥处理，即当有机肥施用量为 15 t/hm² 时，对盐碱地土壤改良效应最强，小麦产量达到最高，但不一定会是最优替代量。若要确定对土壤改良效应的最优替代量，则需要做进一步研究。

参考文献：

[1] 董勤各, 冯浩, 杜建. 秸秆粉碎还田与化肥配施对冬小麦棵间蒸发的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(1): 33-40

[2] 仇焕广, 栾昊, 李瑾, 等. 风险规避对农户化肥过量施用行为的影响[J]. 中国农村经济, 2014(3): 85-96

[3] 栾江, 仇焕广, 井月, 等. 我国化肥施用量持续增长的原因分解及趋势预测[J]. 自然资源学报, 2013, 28(11): 1869-1878

[4] Fischer G, Winiwarter W, Ermolieva T. Integrated modeling framework for assessment and mitigation of nitrogen pollution from agriculture: Concept and case study for China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2010, 136(1/2): 116-124

[5] Velthof G L, Oudendag D, Witzke H P. Integrated assessment of nitrogen emissions from agriculture in EU-27 using MITERRA-Europe[J]. Journal of Environmental Quality, 2009, 38: 402-417

[6] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327: 1008-1010

[7] 李司童, 毛凯伦, 韦成才, 等. 蚯蚓粪肥替代部分化肥对连作烟田土壤肥力的影响及评价[J]. 华北农学报, 2018, 33(增刊): 238-245

[8] 罗佳, 刘丽珠, 王同, 等. 有机肥与化肥配施对黄瓜产量及土壤微生物多样性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(5): 774-779

[9] 吕晓, 徐慧, 李丽, 等. 盐碱地农业可持续利用及其评价[J]. 土壤, 2012, 44(2): 203-207

[10] 赵春. 盐胁迫下小麦苗期渗透调节物质含量的变化研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(24): 11473-11474

[11] 高亮, 丁春明, 王炳华, 等. 生物有机肥在盐碱地上的应用效果及其对玉米的影响[J]. 山西农业科学, 2011, 39(1): 47-50

[12] Munns R. Comparative physiology of salt and water stress[J]. Plant, Cell & Environment, 2002, 25(2): 239-250

[13] Ashraf M. Some important physiological selection criteria for salt tolerance in plants[J]. Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 2004, 199(5): 361-376

[14] 盛玲. 盐碱地开发利用: 不止于改良[J]. 中国农村科技, 2017, 10(269): 76-79

[15] 沈嘉祥, 杨美林, 马木兰, 等. 新型天然烤烟抑芽剂一恒隆系列的研究[J]. 云南农业大学学报, 2000, 15(3): 184-186

[16] 杨合法, 解永丽, 范聚, 等. 不同施肥对保护地土壤肥力及作物产量的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(9): 250-254

[17] Li G Y, Li B G, Yang T. Chaetoinidicins A-C, three isoquinoline alkaloids from the fungus Chaetomium indium[J]. Organic Letters, 2006, 8(16): 3613-3615

[18] 吕品. 松嫩平原稻区防止次生盐渍化的研究[J]. 国土与自然资源研究, 2002(1): 39-41

[19] 杨明, 孙毅, 高玉山, 等. 有机肥对苏打盐碱土的改良效果研究[J]. 吉林农业科学, 2013, 38(3): 43-46

[20] 徐阳春, 沈其荣. 长期施用不同有机肥对土壤各粒级复合体中碳、氮、磷含量与分配的影响[J]. 中国农业科学, 2000, 33(5): 65-71

[21] 周伟红. 有机肥对土壤培肥和作物产量的影响[D]. 湖南: 湖南农业大学, 2007

[22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986

- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [24] Weier K L, Macrae I C. Net mineralization, net nitrification and potentially available nitrogen in the subsoil beneath a cultivated crop and a permanent pasture[J]. *Soil Science*, 1993, 44: 451-458
- [25] 吕品. 松嫩平原稻区防止次生盐渍化的研究[J]. *国土与自然资源研究*, 2002(1): 39-41
- [26] 宿庆瑞, 李卫孝, 迟凤琴. 有机肥对土壤盐分及水稻产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(4): 299-301
- [27] 李凤霞, 王雪琴, 郭永忠, 等. 不同改良措施对银川平原盐碱地土壤性质及酶活性的影响[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(6): 13-18
- [28] 田小明, 李俊华, 危常州, 等. 连续 3 年施用生物有机肥对土壤有机质组分、棉花养分吸收及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 7(4): 374-378
- [29] Beck C G, Van E M, Bleemen N V. The alkalinity of alkali soil[J]. *Soil Sci.*, 1973, 24(1): 129-136
- [30] 耿泽铭. 施用生物有机肥对盐渍土改良效果及玉米产量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013
- [31] 刘媛媛, 李廷轩, 余海英, 等. 有机肥与尿素配施对设施土壤盐分含量与组成变化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(2): 292-298
- [32] 罗佳, 盛建东, 王永旭, 等. 不同有机肥对盐渍化耕地土壤盐分、养分及棉花产量的影响[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(3): 48-53
- [33] 王丽娜, 陈金林, 梁珍海, 等. 黄麻秸秆还田及有机肥对滨海盐土的改良试验[J]. *林业科技开发*, 2009, 23(3): 88-91
- [34] 邢鹏飞, 高圣超, 马鸣超, 等. 有机肥替代部分无机肥对华北农田土壤理化性质、酶活性及作物产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2016(3): 98-104
- [35] 苏秦, 贾志宽, 韩清芳, 等. 宁南旱区有机培肥对土壤水分和作物生产力影响的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(6): 1466-1469
- [36] 侯金权, 张杨珠, 龙怀玉, 等. 不同施肥处理对白菜的物质积累与养分吸收的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(5): 201-204
- [37] 田小明, 李俊华, 王成, 等. 连续 3 年施用生物有机肥对土壤养分、微生物生物量及酶活性的影响[J]. *土壤*, 2014, 46(3): 481-488
- [38] 刘艳, 李金胜, 王菊英, 等. 有机肥不同用量对黄河三角洲盐碱地杂交狼尾草产量和品质的影响[J]. *山东农业科学*, 2014, 46(6): 89-92
- [39] 李国红. 有机肥对小麦产量和品质的影响[J]. *农业工程技术*, 2017, 37(23): 19
- [40] 孟祥浩, 张玉梅, 薛远赛, 等. 滨海盐碱地条件下不同小麦品种(系)花后旗叶可溶性物质、灌浆速率及产量因素的分析[J]. *作物杂志*, 2016(1): 135-139
- [41] 李树华, 许兴, 惠红霞, 等. 不同小麦品种(系)对盐碱条件下的生理及农艺性状反应[J]. *麦类作物学报*, 2000, 20(4): 63-67

Effects of Substitution of Partial Chemical Fertilizers with Organic Fertilizers on Soil Improvement and Wheat Yield in Coastal Saline and Alkaline Land

LI Yu¹, TIAN Xianyi¹, WANG Zhenlin², DAI Xinglong², DONG Yuanjie^{1*}, HE Mingrong^{2*}

(1 *College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University & National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer, Taian, Shandong 271018, China*; 2 *College of Agronomy, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China*)

Abstract: Rational utilization of organic fertilizer resources and substitution of organic fertilizers for some chemical fertilizers is one of the important ways to achieve the goal of reducing the application of chemical fertilizers. The substitution of organic fertilizers for some chemical fertilizers can reduce the use of chemical fertilizers and improve soil physiochemical properties and promote crop growth especially for saline soil. This paper took the coastal saline-alkaline land as the research object, a two-year field experiment was conducted from 2014 to 2016 at the Bohai Experimental Base in Wudi County, Binzhou to study the effects of five fertilization patterns: non-fertilizer (CK), common chemical fertilizer (CCF), and organic fertilizer substituting low-level chemical fertilizer treatment (LOM), organic fertilizer substituting medium-level chemical fertilizer treatment (MOM), and organic fertilizer substituting high-level chemical fertilizer treatment (HOM) on saline soil improvement and wheat yield. The results showed that compared with CK, the effect of CCF treatment was not significant on soil salinity, while the replacement of some chemical fertilizers with organic fertilizers significantly reduced the total amount of water-soluble salts, and pH, especially in the flowering stage of wheat, soil salinization under MOM and HOM treatments were significantly improved, the proportion of soil water-soluble Na and exchangeable Na were significantly reduced, and ESP and SAR values were decreased. HOM treatment had the best improvement in salinity in coastal salt-alkali soil. Compared with CK, all fertilization treatments improved soil nutrients. Compared with CCF treatment, organic fertilizer substitution treatments had no significant effect on soil total nitrogen and available phosphorus contents. However, the content of available potassium in HOM treatment was significantly higher than those in other treatments, and Na toxicity was inhibited to a certain extent. Organic fertilizer replacement treatment also significantly increased the content of soil organic matter and improved the soil environment. Compared with the CCF treatment, the organic fertilizer substitution treatments, LOM, MOM, and HOM increased wheat yield by 7.5%, 18.8% and 26.4%, respectively. In summary, organic fertilizers replacing part of chemical fertilizers can achieves the goal of reducing the use of chemical fertilizers, has obvious improvement effect on coastal saline-alkaline soil, and can promote wheat yield. In the three kinds of organic fertilizers treatments, HOM treatment has the best effect on the improvement of saline-alkali soil and the highest yield of wheat.

Key words: Organic fertilizer substitute chemical fertilizer; Soil nutrient; Saline-alkali soil; Soil enzyme activity; Wheat yield