DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.03.006

梁婷, 刘明, 李帅, 等. 均衡施肥对滩涂盐碱农田稻麦轮作系统土壤养分与作物生长和养分吸收的影响. 土壤, 2021, 53(3): 483–490.

均衡施肥对滩涂盐碱农田稻麦轮作系统土壤养分与作物生长和养分吸收的影响①

梁 婷, 刘 明, 李 帅, 杨 敏, 曹惠翔, 陈 妮, 赵耕毛*

(南京农业大学资源与环境科学学院/江苏省海洋生物学重点实验室, 南京 210095)

摘 要: 以耐盐小麦和水稻为材料, 研究了滩涂盐碱地养分均衡对轮作稻麦生长和养分吸收的影响。试验设不施肥(CK)、常规施肥(TF)、中量元素肥料+常规施肥(TS)、螯合态微量元素肥+常规施肥(TM)和中量元素肥料+螯合态微量元素肥料+常规施肥(TSM)5 个处理。结果表明: ①大量元素方面, 小麦季 TSM 处理显著提高了土壤碱解氮和速效钾水平, 分别较 TF 处理增长 23.22% 和 7.10%; 水稻季 TSM 处理土壤有效磷和速效钾显著提高, 较 TF 处理分别提高 19.78% 和 7.44%; 稻麦轮作体系均衡施肥(TSM)显著降低了土壤含盐量, 由 3.09 g/kg 土降为 1.88 g/kg 土; ②中微量元素方面, 小麦季 TSM 处理显著提高了土壤 S、Fe 含量, 分别较 TF 处理增长了 196.3%、13.75%; 水稻季 TSM 处理土壤 Si、Ca、Fe、Mnn 含量较 TF 处理显著提高, 分别增加了 27.42%、11.60%、12.05%、16.20%; ③TSM 处理小麦和水稻生物量明显提高, 较 TF 处理增长了 19.47% 和 20.12%, 且 TSM 处理较 TF 处理作物养分含量显著提高(P<0.05); ④施肥处理明显提高了稻麦植株中各营养素的积累, 作物产量增加, TSM 处理小麦和水稻较 CK 分别增产了 14.37% 和 46.46%, 与 TF 处理相较, 小麦增产 7.55%, 水稻增产效果不显著。综上所述, 均衡施肥有效提高了养分库容和养分利用效率, 促进了盐碱地轮作稻麦生长和产量形成。因此, 在常规施肥的基础上配施中微量元素肥料作为优选的均衡施肥模式可作为滩涂盐土粮食轮作区主要施肥模式加以推广应用。

关键词: 盐碱地; 稻麦轮作; 土壤养分; 中微量元素; 产量

中图分类号: S51; S147.2; S156.4 **文献标志码:** A

Effects of Balanced Fertilization on Soil Nutrients and Growth and Nutrient Absorption of Rice-wheat Rotation System in Saline-alkali Farmland of Tidal Flat

LIANG Ting, LIU Ming, LI Shuai, YANG Min, CAO Huixiang, CHEN Ni, ZHAO Gengmao*

(*College of Resources and Environmental Sciences* / *Jiangsu Provincial Key Laboratory of Marine Biology, Nanjing Agricultural University, Nanjing* 210095, *China*)

Abstract: In this paper, salt-tolerant wheat and rice were used as materials to study their growths and yields under nutrient-balanced fertilization systems in seashore saline-alkali farmland in the reclamation area in Zhong Road Port of Dafeng County, Yancheng City, Jiangsu Province. The designed treatments included no fertilization (CK), conventional fertilization (TF), medium element fertilizer + conventional fertilization (TS), chelated trace element fertilizer + conventional fertilizer (TM) and medium element fertilizer + chelated trace element fertilizer + conventional fertilization (TSM). The results showed that in wheat season, TSM significantly increased soil alkaline nitrogen and available potassium contents by 23.22% and 7.10% respectively compared with TF. In rice season, TSM also significantly increased soil available phosphorus and potassium by 19.78% and 7.44% respectively compared with TF. TSM significantly reduced soil salinity from 3.09 g/kg to 1.88 g/kg in rice-wheat rotation system. In wheat season, TSM significantly increased soil S and Fe contents by 196.3% and 13.75% respectively compared with TF. In rice season, TSM significantly increased soil Si, Ca, Fe, and Mn contents by 27.42%, 11.60%, 12.05% and 16.20% respectively compared with TF. Compared with TF, TSM significantly increased wheat and rice biomass by 19.47% and 20.12% respectively, and also significantly increased nutrient contents in different organs. Fertilization increased the accumulation of

①基金项目: 江苏省重点研发计划项目(BE2017337)、国家自然科学基金项目(31370422)和江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(17)-1001)资助。

* 通讯作者(seawater@njau.edu.cn)

作者简介: 梁婷(1992—), 女, 江苏扬州人, 硕士研究生, 主要从事海岸带生态学、盐土农业研究。E-mail: 893990934@qq.com

nutrients in different organs of rice and wheat and promoted crop yields, TSM significantly increased wheat and rice biomass by 14.37% and 46.46% respectively compared with CK. Wheat yield was increased by 7.55% whereas rice yield changed insignificantly compared with TF. In summary, balanced fertilization effectively improved nutrient storage capacity and nutrient utilization efficiency, therefore promoted the growth and yield of rice and wheat. Thus, adding medium and trace elements in conventional fertilizers is the optimal balanced fertilization model for seashore saline-alkali farmland.

Key words: Saline-alkali land; Rice-wheat rotation; Soil nutrients; Medium and trace elements; Yield

中国拥有 18 000 km 海岸线，沿海滩涂面积约 200 万 hm^2，其中江苏约占我国海涂面积的 1/4 [1]。随着江苏沿海开发上升为国家战略，滩涂开发与“第二粮仓”建设被提上日程。但是，土壤盐渍化和养分失衡问题，一直是制约苏北滩涂农业生产的关键因素[2-3]。

水稻和小麦是我国最主要的两大粮食作物，稻麦轮作是粮食种植区主要种植制度之一[4]，轮作制度有利于保持土壤养分、提高土壤肥力，且防止并抑制发生各种病虫草等的危害[5]。然而传统施肥方式大量使用化肥，导致中微量营养元素缺失、土壤盐分增高、土壤结构恶化，影响作物营养吸收，致使经济产量下降[6]。

中微量营养元素作为作物不可或缺的营养元素，参与了作物重要代谢过程，包括叶绿素合成、光合作用、氢氧还原、酶活化和膜完整性等[7]。施用中微量元素肥料，能平衡供应农作物中所需的各营养素，大大增强了作物抗寒、抗高温和抗干旱等抗逆能力，促进作物正常发育，提高农产品产量，且有效提高了肥料利用率，减少因大量元素肥施用过多引起的土壤、水源污染[8]。已有大量研究表明，不同微量元素在小麦花期喷施，可以提高籽粒产量、蛋白质组分含量、面筋含量等[9]。施用不同用量中量元素肥能增加水稻茎壁厚度与粗度，显著提高抗折力[10]，促进水稻有效分蘖。微肥对大豆作物的密度、单株分枝数、有效豆荚数及粒数也有积极促进的作用[11]，且中微量元素肥料在当季水果以及蔬菜上均有广泛应用[12-14]。近年来，国内外单季作物施用中微量元素肥的研究取得了明显进展，但针对盐碱地稻麦轮作均衡施肥方面的研究依然鲜见报道。

本研究探索中微量元素对滨海盐碱地土壤养分、稻麦生长和养分吸收的影响，旨在揭示土壤-作物体系养分平衡供给规律，为江苏盐渍化中低产田地力保育与轮作稻麦的高产、稳产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验品种(系)：小麦品种(系)是宁麦 13 号，为江苏省农业科学院粮食作物研究所选育的耐盐新品系；水稻品种为淮稻 5 号，是淮阴市农科所杂交选育而成的迟熟中粳新品种。

供试肥料：尿素(含 N 46.6%)、磷酸一铵(含 N 12.17%，P_2O_5 61.74%)、硫酸钾复合肥(N-P_2O_5- K_2O：15-15-15)由江苏省金色农业有限公司提供；缓控释肥(N-P_2O_5-K_2O：29-13-5)，由南京尊龙生物科技有限公司提供；中量元素肥料(硫镁肥 SO_3-MgO：16-12、硅钙镁肥 SiO_2-CaO-MgO：15-15-5)，由山东莱州市莱玉化工有限公司提供；氨基酸螯合态微量元素肥(微量元素：Fe 2.5%、Mn 2%、Zn 3.5%)，由南京肥甘农业科技有限公司提供。

1.2 试验地概况

试验地位于江苏省盐城市大丰中路港垦区，该地区四季分明，气温适中，雨量充沛，年平均气温 14.1 ℃，无霜期 213 d，常年降水量 1 042.2 mm，日照 2 238.9 h，土壤类型为滨海盐渍土。该地区滩涂均为已围垦区，土地大多被新型农业经营主体承包，土地利用类型为多年的小麦-水稻轮作。土壤剖面中沉积层次明显，黏砂相间，地下水位较浅，土壤中、低层氧化还原交互进行，有明显的锈纹斑及碳酸盐分异与聚集，土壤有盐碱化趋势。2017 年 10 月份取试验地 0 ~ 20 cm 的表层土进行检测，盐分 3.09 g/kg，pH 7.95，土壤有机质为 5.85 g/kg，全氮 0.45 g/kg，碱解氮 46.08 mg/kg，全钾 14.39 g/kg，速效钾 266.67 mg/kg，全磷 0.45 g/kg，有效磷 32.48 mg/kg，中、微量元素含量见表 1。

表 1 供试土壤中、微量元素含量

Table 1 Contents of medium and trace elements in tested soil

中微量元素	S	Mg	Si	Ca	Fe	Mn	Zn
全量(g/kg)	2.23	7.44	0.06	33.26	18.59	0.42	0.05
有效态(mg/kg)	286.53	391.54	7.76	1669.92	2.04	0.57	3.07

1.3 试验设计

试验时间：小麦季为 2017 年 10 月至 2018 年 6 月，水稻季为 2018 年 6 月至 11 月。试验设置 5 个处理，3 次重复，采取随机区组设计，共计 15 个小区。每个小区面积 30 m^2 (长×宽=6 m ×5 m)，试验区面积

约 450 m^2。稻麦花期为自然授粉，在适当时期进行防除杂草和防治病虫害。

5 种不同施肥模式分别为：不施肥(CK)、常规施肥(TF)、常规施肥+中量元素肥(TS)、常规施肥+微量元素肥(TM)、常规施肥+中量元素肥+微量元素肥(TSM)。其中小麦季常规施肥方式为基肥 225 kg/hm^2 磷酸一铵和 225 kg/hm^2 尿素，返青肥 150 kg/hm^2 尿素，拔节孕穗肥 150 kg/hm^2 尿素和 225 kg/hm^2 硫酸钾复合肥，中量元素肥 750 kg/hm^2 硫镁肥，微量元素肥 15 kg/hm^2；水稻季常规施肥方式为基肥 600 kg/hm^2 尊龙缓控释肥，返青肥和拔节孕穗肥同小麦，中量元素肥 300 kg/hm^2 硅钙镁肥，微量元素肥 15 kg/hm^2。

1.4　样品采集与测定

于 2018 年 5 月 28 日(小麦成熟期)和 2018 年 10 月 22 日(水稻成熟期)分别进行植株和土壤样品的采集。在每个小区采用对角线法随机选取长势基本一致具有代表性的 10 株作物，采样时注意保证植株根部的完整性。用取土器随机选取 0 ~ 20 cm 的耕作层土壤，采用“四分法”处理土样，去除土层杂质，土样风干过 1 mm 和 0.25 mm 筛等，保存待用。

将植株样品放入网袋带回实验室，清水洗净，鲜样 105 ℃、30 min 杀青；分植株根部与地上部，70 ℃烘干至恒重，称重记录。用磨样机粉碎植株各部位，放入写好编号的自封袋，制成所需干样保存待测。成熟期对小区进行考种，测定株高和生物量，对田间作物进行样方测产，并且测定作物的穗长、穗粒数和千粒重等。植株中全氮含量采用凯氏定氮法测定[15]，其余各元素含量采用硝酸消煮法，并通过电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定。

按照文献[15]所述方法，测定土壤基本理化性质：土壤 pH(水土比 2.5:1)采用电位法测定；水溶性盐采用电导法测定；有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定；有效磷采用 0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸提-钼锑抗比色法测定；速效钾采用 1 mol/L NH_4OAc 浸提-火焰光度计测定；碱解氮采用碱解扩散法测定；有效硅采用柠檬酸浸提-硅钼蓝比色法测定；交换性钙、镁含量采用 NH_4OAc 浸提-原子吸收分光光度法测定；土壤全氮采用半微量开氏法测定[15]。土壤中其他元素全量采用四酸消煮法(盐酸:硫酸:氢氟酸:高氯酸=10:5:5:3)测定，元素有效态采用 DTPA 浸提-电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定。

1.5　数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 25.0 软件进行统计和相关性的分析，数据以平均值表示，并通过单因素方差分析(ANOVA)比较不同处理间的差异显著性(P<0.05)。

2　结果与分析

2.1　盐碱地稻麦轮作体系土壤理化性状

土壤盐分、有机质、pH、碱解氮、有效磷、速效钾以及中微量营养素含量等指标能有效反映盐碱化中低产田地力水平。2017—2018 年，稻麦轮作栽培过程中，均衡施用中微量元素肥料使土壤理化性状发生明显变化(表 2)。

表 2　麦稻收获期滨海盐土基本理化性状

Table 2　Basic soil physiochemical properties in wheat and rice harvest periods

谷物	处理	盐分 (g/kg)	pH	有机质 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	全硫/全硅 (g/kg)	全钙 (g/kg)	全镁 (g/kg)	全铁 (g/kg)	全锰 (mg/kg)	全锌 (mg/kg)
小麦	CK	2.62 a	7.60 a	6.26 a	39.29 b	30.82 a	197.33 b	0.33 ab	28.86 a	6.45 a	19.75 a	403.57 b	70.82 a
	TF	2.31 a	7.67 a	5.89 a	51.47 ab	33.20 a	204.33 b	0.27 b	26.96 a	7.02 a	18.38 b	431.78 a	68.95 a
	TS	2.71 a	7.55 a	6.81 a	53.15 ab	36.14 a	177.00 c	0.30 ab	29.41 a	8.14 a	18.35 b	414.84 ab	73.94 a
	TM	2.72 a	7.61 a	5.92 a	40.24 b	28.44 a	193.33 bc	0.73 ab	28.70 a	7.50 a	19.06 ab	433.07 a	86.02 a
	TSM	2.50 a	7.64 a	6.31 a	63.42 a	29.39 a	218.83 a	0.80 a	28.03 a	7.43 a	20.22 a	431.97 a	81.61 a
水稻	CK	2.44 a	7.86 b	10.10 a	60.67 a	51.57 ab	203.00 b	0.058 b	32.90 c	9.51 b	19.69 b	417.63 b	47.34 c
	TF	2.15 ab	7.89 b	10.21 a	56.00 a	54.34 ab	219.50 ab	0.062 b	34.82 bc	10.85 a	20.50 b	413.82 b	66.41 b
	TS	1.95 b	7.88 b	9.61 a	58.92 a	57.15 ab	229.67 a	0.078 a	38.31 a	11.48 a	22.14 a	446.66 ab	88.10 a
	TM	1.84 b	8.04 a	8.79 b	53.67 a	42.94 b	235.67 a	0.058 b	36.93 ab	11.23 a	21.92 a	454.76 ab	67.08 b
	TSM	1.88 b	7.81 b	10.09 a	61.25 a	65.09 a	235.83 a	0.079 a	38.86 a	11.15 a	22.97 a	480.84 a	69.45 b

注：同列小写字母不同表示同一谷物种植不同处理间差异显著(P<0.05)，下同。

小麦收获季，与 CK 相比，施肥处理土壤碱解氮含量均有所提高，其中 TSM 处理含量最高，显著高

于 TM 处理 57.60%(P<0.05)，较 TF 处理增长了 23.22%。TSM 处理土壤速效钾含量最高，比 TS、TM 处理显著提高了 23.62%、12.79%(P<0.05)，较 TF 处理增长了 7.10%。土壤 S、Fe 元素含量均在 TSM 处理中最高，且分别显著高于 TF 处理 196.30%、13.75%(P<0.05)。除了 TS 处理，施肥明显提高了土壤 Mn 含量(P<0.05)，各处理均是对照的 1.07 倍，但施肥处理间无显著差异(P>0.05)。

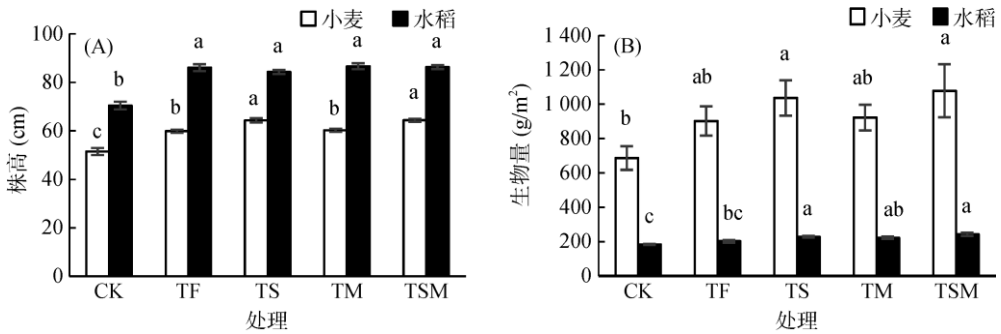
水稻收获季，施肥处理(TF 除外)较不施肥处理土壤盐分显著降低(P<0.05)。TSM 处理土壤有效磷含量最高，比 TM 处理显著提高了 51.58%(P<0.05)，较 TF 处理增长了 19.78%。除 TF 处理外，其他施肥处理较 CK 明显提高了土壤速效钾的含量(P<0.05)，其中 TSM 处理效果最佳，较 TF 处理增长了 7.44%。TSM 处理明显促进了土壤中 Si 元素的吸收(P<0.05)，与 TF、TM 处理比较差异显著(P<0.05)，分别提高了 27.42%、36.21%。TSM 处理土壤 Ca 含量显著高于 TF 处理 11.60% (P<0.05)。TSM 处理土壤 Fe、Mn 元素的含量均最高，与 TF 处理差异显著(P<0.05)，分别增长了 12.05%、16.20%。

2.2 盐碱地稻麦生长、产量及其构成

株高是反映稻麦生长情况的重要指标(图 1A)。在小麦季，施肥处理后作物株高均不同程度增加，增幅为 16.26% ~ 25.09%，其中 TSM 处理下的小麦株高值最大，较其他处理的提升效果最为显著，增幅为 25.09%，且较 TF 处理明显增长了 7.59% (P<0.05)。在水稻季，施肥处理后的作物株高均显著高于对照组(P<0.05)，增幅为 19.68% ~ 23.04%，但各施肥处理间无显著性差异(P>0.05)。

生物量是指某一时刻单位面积内作物的干重总量，本文用 g/m^2 表示，可以反映每个小区稻麦的生长状况(图 1B)。成熟期，稻麦生物量大小均表现为 TSM 处理> TS 处理>TM 处理>TF 处理>CK。小麦、水稻施肥处理后生物量的增幅分别为 31.40% ~ 56.98%、10.24% ~ 32.42%，其中 TSM 处理均增幅最大，分别为 56.98%、32.42%，且较 TF 处理增长了 19.47%、20.12% (P<0.05)。

稻麦轮作体系作物产量构成包括穗长、穗粒数、千粒重和实际产量等(表 3)。结果表明，TSM 处理明显提高了小麦的千粒重，较 CK 显著增长了 17.32% (P<0.05)，且较 TF 处理增长了 14.70%；TSM 处理小麦实际产量较 CK 和 TF 处理分别提高了 14.37%、7.55%。在水稻季，TSM 处理下水稻的穗粒数、千粒重和实际产量均显著高于 CK 组 (P<0.05)，分别增长了 29.80%、15.62%、46.46%；TSM 处理下水稻穗长、穗粒数和千粒重值均最大，与 TF 处理相比，TSM 处理下的水稻穗粒数和千粒重促进效果更为显著(P<0.05)，比 TF 处理提高了 17.40%、7.78%。



(图中小写字母不同表示处理间差异达 P<0.05 显著水平，下图同)

图 1 不同处理下成熟期稻麦株高和生物量

Fig. 1 Plant heights and biomass of wheat and rice in harvest periods under different treatments

表 3 不同处理下稻麦的产量构成

Table 3 Rice and wheat yield components under different treatments

处理	小麦				水稻			
	穗长(cm)	穗粒数(粒)	千粒重(g)	实际产量(kg/hm^2)	穗长(cm)	穗粒数(粒)	千粒重(g)	实际产量(kg/hm^2)
CK	5.91 a	34.28 ab	28.53 b	4 100 a	13.14 a	73.49 c	23.24 c	4137 b
TF	6.27 a	35.63 a	29.18 ab	4 360 a	12.92 a	81.25 bc	24.93 b	6457 a
TS	6.56 a	35.85 a	29.358 ab	2 936 a	13.14 a	85.72 abc	25.58 ab	6089 a
TM	6.58 a	30.70 ab	31.58 ab	3 760 a	13.65 a	86.19 ab	25.34 b	5780 a
TSM	6.17 a	24.38 b	33.47 a	4 689 a	13.64 a	95.39 a	26.87 a	6059 a

2.3　不同施肥处理稻麦植株养分含量

2.3.1　稻麦植株大量元素含量　　由图 2 可知,成熟期小麦中 N、P、K 元素含量变化范围分别为 16.78 ~ 23.41、3.60 ~ 3.96、39.61 ~ 62.22 g/kg，其中 TSM 处理 N、K 元素含量最高，且比 TF 处理分别显著增长了 14.92%、13.51%(P<0.05)，但 4 个施肥处理 P 含量无显著性差异(P>0.05)。可见，中微量元素肥料的配施促进了小麦中 N、K 元素的吸收。

成熟期水稻中，N 元素含量变化范围为 17.52 ~ 23.67 g/kg，各处理 N 含量从大到小排序为：TSM 处理>TS 处理>TM 处理>TF 处理>CK，其中 TSM 处理与 CK、TF、TM 处理均有显著性差异，且较 TF 处理增加 24.00%(P<0.05)；水稻植株中 P、K 元素含量变化范围分别为 7.09 ~ 8.06、19.02 ~ 49.68 g/kg，施肥后水稻中 P、K 明显提高(P<0.05)，但 4 个施肥处理间无显著性差异(P>0.05)。可见，中微量元素肥料的配施促进了水稻中 N 元素的累积。

2.3.2　稻麦植株中量元素含量　　由图 3 可知，成熟期小麦中 S 元素含量变化范围为 31.13 ~ 72.28 g/kg，其中 TSM 处理最高，与其他处理均有显著性差异 (P<0.05)，较 TF 处理增长了 58.43%，各处理 S 含量大小排序为：TSM 处理>TF 处理>TM 处理>TS 处理>CK；Ca 元素含量变化范围为 11.00 ~ 15.44 g/kg，且 TSM 处理 Ca 含量分别显著高于 CK、TF、TS、TM 处理 40.36%、29.87%、35.29%、18.84%(P<0.05)；Mg 元素含量变化范围为 6.02 ~ 8.09 g/kg，其中 TSM 处理的 Mg 含量最高，与 CK、TF、TS 处理均差异显著(P<0.05)，分别增长了 34.36%、17.15%、19.04%，但与 TM 处理无显著性差异 (P>0.05)。

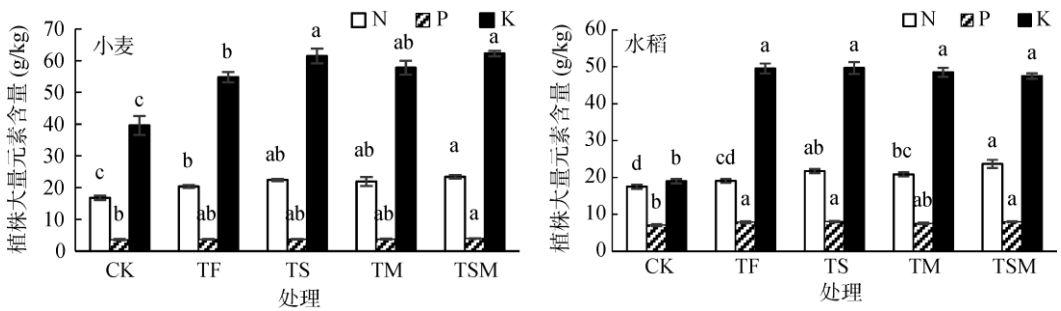


图 2　不同处理下稻麦中氮、磷、钾含量

Fig. 2　N, P and K contents in wheat and rice under different treatments

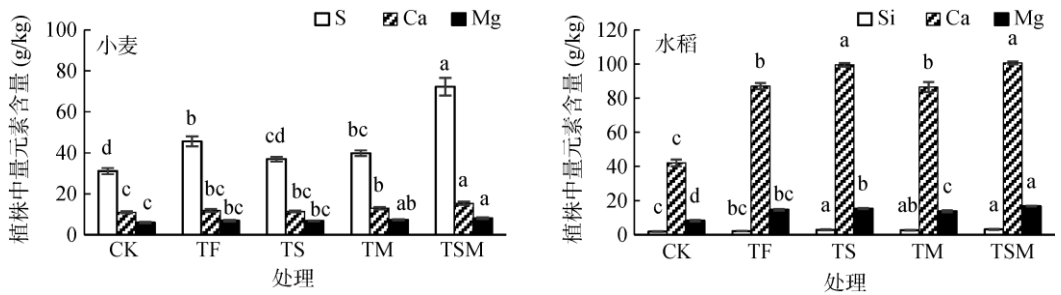


图 3　不同处理下稻麦中 **S**、**Si**、**Ca** 和 **Mg** 含量

Fig. 3　Contents of S, Si, Ca and Mg in wheat and rice under different treatments

成熟期水稻中，Si、Ca、Mg 元素含量变化范围分别为 1.77 ~ 3.06、42.04 ~ 100.67、8.25 ~ 16.70 g/kg，其中 TSM 处理均最高，与 TF 处理都有着显著性差异(P<0.05)，分别增长了 46.85%、15.56%、14.29%。

2.3.3　稻麦植株微量元素含量　　由图 4 可知,成熟期小麦中各处理 Fe、Mn 含量大小排序均为：TSM 处理>TF 处理>TM 处理>TS 处理>CK；Zn 元素含量变化范围为 41.88 ~ 60.16 mg/kg，施肥后 Zn 含量较 CK 明显提高(P<0.05)，但 4 个施肥处理间无显著性差异(P<0.05)。

成熟期水稻中，Fe 元素含量变化范围为 32.72 ~ 56.04 g/kg，其中 TSM 处理 Fe 含量最高，与其他处理均有显著性差异 (P<0.05)，分别较 CK、TF、TS、TM 处理增长了 71.28%、17.45%、11.59%、22.36%；Mn 元素含量变化范围为 1.85~11.05 g/kg，施肥后 Mn 含量明显提高 (P<0.05)，且 TSM 处理较 TF 处理显著提高 13.89%(P<0.05)，与 TS、TM 处理无明显差异(P>0.05)；Zn 元素含量变化范围为 246.74 ~ 357.37 mg/kg，施肥后

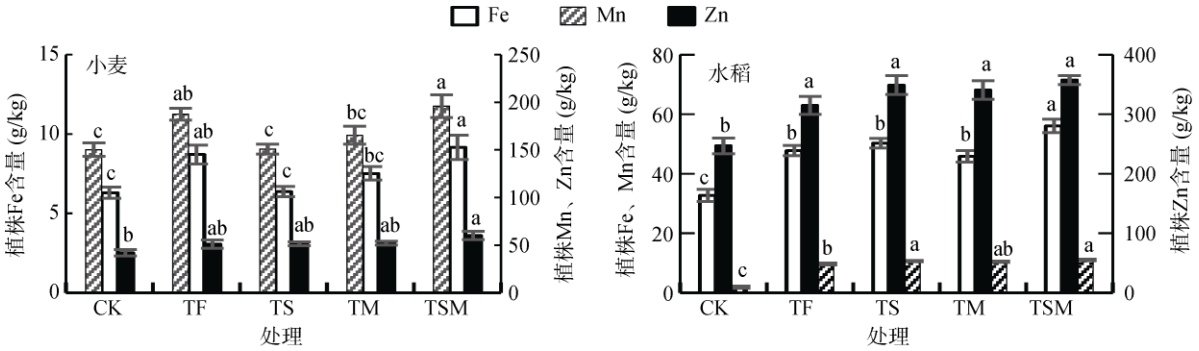


图 4 不同处理对稻麦轮作体系作物 Fe、Mn、Zn 含量的影响

Fig. 4 Contents of Fe, Mn and Zn in wheat and rice under different treatments

水稻中 Zn 含量明显提高 (P<0.05)，但 4 个施肥处理间无显著性差异 (P>0.05)。

3 讨论

3.1 均衡施肥对稻麦轮作土壤肥力特征的影响

除 N、P、K 大量元素肥外，中微量元素肥料也是一种补充营养元素的优质肥料，还是良好的土壤改良剂。土壤是作物赖以生存的基础，而肥料是作物的“粮食”，中微量元素则是作物不可或缺的“营养品”，三者是作物正常生长的充分条件[16]。前人研究表明，微生物菌肥和中微量元素配施提高了土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量，有效补给了土壤养分[17]。本试验中，在常规施肥的基础上配施中微量元素肥料明显提高了小麦土壤的碱解氮和速效钾含量，显著降低了水稻土壤中的含盐量，且增长了水稻土壤中的有效磷、速效钾含量，改良了盐碱土现状，这与前人的研究结果一致。

为维持农作物的正常生长，土壤中需及时补充植物的必需营养元素，一旦营养成分不均衡，会导致土壤基本理化性质变差，产出降低，即出现“掠夺式种植”现象。施肥对土壤中、微量元素含量影响较大，施肥是增加土壤 Fe、Mn、Zn、Cu 等微量元素的主要途径，长期施用 Zn、Mn、B 肥能增强作物对土壤水分和养分的吸收利用，增加土壤中相应微量元素的含量[18]。在常规施肥的基础上配施中微量元素肥，增加了土壤中植物所需的中微量元素[17,19]，本研究结果与此结论一致。本试验中，不同施肥处理对土壤中、微量营养元素含量影响不一，在常规施肥的基础上配施中微量元素肥料有利于土壤 Si、Ca、Mg、S、Fe、Mn、Zn 等营养元素的积累。在小麦季，与 TF 处理相比，TSM 处理显著提高了土壤 S、Fe 含量，同时也可以提升土壤中 Zn 含量，但效果不明显。在水稻季，土壤 Si、Ca、Fe、Mn 元素在 TSM 处理中含量最高，分别比 TF 处理显著增加了 27.42%、11.60%、12.05%、16.20%，可见均衡施肥比常规施肥处理更有利于提高土壤中、微量营养元素含量，进一步提升土壤肥力。

3.2 均衡施肥对小麦-水稻生长和产量构成的影响

在田间试验中，施肥措施对作物产量的形成起着至关重要的作用。为提高作物产量，人们常常首选氮、磷、钾肥，忽视了微肥的使用，进一步导致了大量元素和中微量营养素的平衡，作物产量下降[20]。因此，微肥的施用是必不可少的，应注重增加作物中微量元素含量。前人研究表明，Zn、Mn、Cu 及其配合能增加小麦株高和分孽数，促进小麦正常生长发育[21]。施用微肥还能提高小麦穗粒数、结实率和千粒重，增加各生育期冬小麦的干物质积累，从而使小麦增产[22-23]。伍龙梅等[24]研究表明，施用中微量元素肥料处理对超级杂交籼稻株型和干物质积累具有一定的积极作用，且能提高水稻的抗倒伏能力有利于水稻产量的形成[10]。在本研究中，施肥处理后成熟期稻麦的株高和生物量明显提高。TSM 处理下的小麦、水稻株高值最大，分别为 64.41、86.33 cm，较 CK 明显增长了 25.09%、22.52%。TSM 处理、TS 处理小麦株高和水稻生物量比 TF、TM 处理显著增加，可见在常规施肥基础上配施中量元素和配施中微量元素肥料更有效促进了稻麦轮作系统作物的生长，与前人研究结果[25]相一致。在常规施肥的基础上配施中微量元素肥后，小麦、水稻分别增产了 14.37% 和 46.46%，但与其他施肥处理间无显著性差异，可能是由于滩涂土壤盐分波动较大，表层易积盐，影响了作物对中微量营养元素的吸收。TSM 处理明显提高了小麦的千粒重，且 TSM 处理水稻穗长最大，与常规施肥处理相比，Si，Ca，Mg 肥和微量元素肥配施处理下的水稻穗粒数和千粒重促进效果更为显著，充分说明了均衡施肥在作物增产增收中的显著作用。

3.3　均衡施肥对小麦-水稻作物营养元素积累的影响

营养元素的积累和吸收对作物生长发育具有极其重要的作用，除大量元素外，中微量元素虽然含量较少，但也参与了植物体内的生理生化过程，其必要性不可忽视。众多研究表明，微量元素肥的施用可强化籽粒营养元素，从而明显提高农作物的产量和品质[26]。韩金玲等[27]研究表明，施 Zn 可增加 N、P 的吸收，提高植株中 N、P 的积累量，尤其是籽粒 N 的累积，王锋堂等[28]也有类似研究，结果表明 Mg、Ca、Zn、Cu 肥喷施后会改变植物的养分吸收利用，本试验研究结果与此一致。本研究表明，不同施肥处理对稻麦作物中营养元素的影响不一。TSM 处理显著提升了小麦和水稻中 N、P、K 大量元素含量，与常规施肥相比，中微量元素肥料配施处理后更有利于小麦中 N、K 营养元素和水稻中 N 素的吸收。此外，在小麦中，TSM 处理 S、Ca、Mg 元素含量较常规施肥处理分别显著增长了 58.43%、29.87%、17.15%；在水稻中，TSM 处理明显提高了作物中 Si、Ca、Mg 含量，与 TF 处理都有着显著性差异(P<0.05)，分别增长了 46.85%、15.56%、14.29%。TSM 处理稻麦微量元素含量均最高，相比常规施肥处理，常规施肥的基础上配施中微量元素肥料处理明显提高了水稻中 Fe、Mn 营养素的累积。总体上，均衡施肥对稻麦营养元素含量的提高效果最为显著，平衡了盐渍土稻麦养分，提高植物耐盐能力，从而达到增产优质的效果。

4　结论

常规施肥的基础上配施中微量元素肥料能够显著提高土壤 0 ~ 20 cm 的土壤速效钾含量，明显降低了水稻盐碱土的含盐量，与仅常规施肥相比，显著增长了小麦盐碱土中 S、Fe 含量和水稻盐碱土中 Si、Ca、Fe、Mn 含量，促进了土壤养分均衡。同时，常规施肥与中微量元素配施显著提高了作物株高和生物量；与常规施肥相比，均衡施肥明显增加了作物中的养分积累，进一步促进了作物产量的提高，稻麦千粒重明显增加，小麦实际产量提升，水稻穗粒数促进效果更为显著。因此，滩涂盐碱地均衡施肥方式对稻麦轮作体系盐渍化中低产田地力保育与稻麦增产具有重要意义，建议此模式可加以推广使用。

参考文献：

[1] 赵秀芳, 杨劲松, 姚荣江. 基于典范对应分析的苏北滩涂土壤春季盐渍化特征研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 422–428.

[2] 张建兵, 杨劲松, 姚荣江, 等. 苏北典型新围垦海涂农田盐碱障碍因子特征分析[J]. 土壤, 2013, 45(3): 548–553.

[3] 金志丰, 陈诚, 谢薇. 沿海滩涂开发空间优化与管制研究——以江苏省大丰区为例[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 277–281.

[4] 杨利, 张建峰, 张富林, 等. 长江中下游地区氮肥减施对稻麦轮作体系作物氮吸收、利用与氮素平衡的影响[J]. 西南农业学报, 2013, 26(1): 195–202.

[5] 杨利, 张建峰, 张富林, 等. 长江中下游地区氮肥减施对稻麦轮作体系作物氮吸收、利用与氮素平衡的影响[J]. 西南农业学报, 2013, 26(1): 195–202.

[6] 华建峰, 杜丽娟, 王菖丰, 等. 混合盐胁迫对江苏省沿海常用绿化树种生长的影响及耐盐性评价[J]. 植物资源与环境学报, 2015, 24(3): 41–49.

[7] 刘春生. 土壤肥料学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006.

[8] 中国有机肥协会. 中微量元素肥料的作用[N]. 江苏农业科技报, 2019-12-25(5).

[9] 李泽鹏. 小麦花期喷施不同微量元素对产量和品质的影响[J]. 南方农业, 2018, 12(3): 106–110.

[10] 李惠芬, 张彬, 黄庆, 等. 中微量元素肥料不同用量对超级稻品种倒伏及产量的影响[J]. 中国稻米, 2016, 22(2): 21–26.

[11] 杨勇. 北安市大豆微量元素水溶肥料试验报告[J]. 农业与技术, 2016, 36(5): 52, 56.

[12] 叶胜兰. 叶面喷施铁肥对山地梨枣产量及品质的影响[J]. 安徽农学通报, 2018, 24(14): 91–93,140.

[13] 周君花, 闵跃中, 肖世贤. 中微量元素肥料在葡萄栽培技术中的试验[J]. 现代园艺, 2015(1): 3–4.

[14] 侯文通, 代明, 陈日远, 等. 硅钙磷钾肥对花生产量品质及经济效益的影响[J]. 山东农业科学, 2014, 46(2): 89–91.

[15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[16] 范业宽, 叶坤合. 土壤肥料学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.

[17] 张丽娜. 微生物菌肥和中微量元素在冀西北坝上地区萝卜上的应用研究[D]. 张家口: 河北北方学院, 2017.

[18] 李春霞. 锰、铁和钼肥处理种子与叶面喷施对小麦生长与吸收的影响及其机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.

[19] 周晓今, 陈茹梅, 范云六. 植物对铁元素吸收、运输和储存的分子机制[J]. 作物研究, 2012, 26(5): 605–610.

[20] 兴荣荣. 锌铁微肥对冬小麦产量与品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.

[21] 陈美亿. 锌锰铜及其配合在冬小麦上的效应[J]. 土壤肥料, 1996(3): 30–33.

[22] 张琨琨, 曹重阳, 孙帅, 等. 微量元素锰对小麦生长发育的影响研究进展[J]. 现代农业科技, 2016(22): 11–12.

[23] 杨静. 喷施微量元素对冬小麦、夏玉米生长发育、产量及品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.

[24] 伍龙梅, 李惠芬, 张彬, 等. 中微量元素肥料对超级杂交籼稻株型和干物质积累的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(28): 1–6.

[25] Cole J C, Smith M W, Penn C J, et al. Nitrogen, phosphorus, calcium, and magnesium applied individually or as a slow release or controlled release fertilizer increase growth and yield and affect macronutrient and micronutrient concentration and content of field-grown tomato plants[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 211: 420–430.
[26] 郭九信, 隋标, 商庆银, 等. 氮锌互作对水稻产量及籽粒氮、锌含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1336–1342.
[27] 韩金玲, 李雁鸣, 马春英, 等. 施锌对小麦开花后氮、磷、钾、锌积累和运转的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(3): 313–320.
[28] 王锋堂, 杨福孙, 陈才志, 等. 不同中微量元素对槟榔结果与产量特征的影响[J]. 热带作物学报, 2019, 40(5): 857–863.