



何苏南,陈环宇,郁凯,等. 有机无机肥配施对江苏滨海盐碱土农田生产力和碳库的影响[J]. 南京农业大学学报,2024,47(2):274-283.
HE Sunan, CHEN Huanyu, YU Kai, et al. Effects of combined application of organic with inorganic fertilizers on farmland productivity and carbon pool in saline-alkali soil of Jiangsu Province[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2024, 47(2): 274-283.

有机无机肥配施对江苏滨海盐碱土农田 生产力和碳库的影响

何苏南¹,陈环宇¹,郁凯¹,王凯¹,孙果丽¹,朱小梅¹,贺亭亭¹,
邓晔¹,邢锦城^{1*},张倩^{2*},王绪奎³,郁洁³

(1.江苏沿海地区农业科学研究所,江苏 盐城 224000;2.中国林业科学研究院林业研究所,北京 100091;
3.江苏省耕地质量与农业环境保护站,江苏 南京 210036)

摘要:[目的]有机肥施用是江苏滨海轻度盐碱地主要的改土提质技术,本试验通过研究在有机替代模式下夏玉米种植系统农田生产力和土壤碳库的变化特征,探索在粉垄耕作模式下有机肥还田同氮肥减量的最佳比例。[方法]按照等氮量投入原则,以当地氮肥施用(CK)为对照,设置25%有机肥+75%氮肥(CT25)、50%有机肥+50%氮肥(CT50)、75%有机肥+25%氮肥(CT75)、有机肥全量替代氮肥(CT100)处理,开展粉垄耕作模式下不同比例有机肥替代氮肥玉米种植田间试验,对玉米农田生产力和土壤碳库指标进行测定。[结果]与氮肥全量施用相比,有机肥替代化肥比例在25%~50%时,玉米籽粒产量可增加8.74%~11.21%,其中CT25处理的玉米光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、胞间CO₂浓度(C_i)显著增加,土壤全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾含量均较单施氮肥显著增加,有机替代比例超过50%以上时玉米产量和土壤养分较纯施氮肥无显著变化。相较于纯施氮肥,有机肥替代比例在25%~75%时土壤碳储量提升9.47%~14.61%,这主要依赖于土壤有机碳含量和容重的显著增加。土壤有机碳含量和玉米产量呈显著的正相关关系。[结论]粉垄耕作模式下,有机肥替代氮肥在25%~50%可以显著改善土壤理化性质,增加土壤碳储量,提升农田生产力,可作为江苏滨海旱作玉米种植推荐施肥技术。

关键词:有机肥;替代比例;产量;土壤碳库;粉垄

中图分类号:S513;S143.6

文献标志码:A

文章编号:1000-2030(2024)02-0274-10

Effects of combined application of organic with inorganic fertilizers on farmland productivity and carbon pool in saline-alkali soil of Jiangsu Province

HE Sunan¹, CHEN Huanyu¹, YU Kai¹, WANG Kai¹, SUN Guoli¹, ZHU Xiaomei¹, HE Tingting¹,
DENG Ye¹, XING Jincheng^{1*}, ZHANG Qian^{2*}, WANG Xukui³, YU Jie³

(1. Institute of Agricultural Sciences in Jiangsu Coastal Areas, Yancheng 224000, China; 2. Research Institute of Forestry,
Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. Jiangsu Province Farmland Quality
and Agricultural Environmental Protection Station, Nanjing 210036, China)

Abstract: [Objectives] Combined application of organic with inorganic fertilizers technology is the main effective soil improvement way in mild saline-alkali land. The objective of this paper was to investigate the effects of different organic fertilizers partial substitution for chemical nitrogen (N) fertilizer on crop yield and soil carbon pool in maize cropping system, and find out the best ratio of organic fertilizer substitution to increase crop yield and improve carbon sequestration efficiency in farmland under smashing ridge tillage. [Methods] Field experiments on replacing nitrogen fertilizer with different proportions of organic fertilizer under the principle of equal nitrogen input in maize cultivation under the powder ridge cultivation mode were designed. Five treatments with local nitrogen fertilizer application as the control (CK), organic fertilizer substituted the whole chemical N fertilizer (CT100), 75% organic fertilizer substitution for chemical N fertilizer (CT75), 50% organic fertilizer substitution for chemical N fertilizer (CT50), 25% organic fertilizer substitution for chemical N fertilizer (CT25) were formed. The measurement of maize agricultural productivity and soil carbon pool were

收稿日期:2023-12-22

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(22)3145];江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目(BE2022304);盐城市基础
研究计划资助项目(YCBK2023024);江苏省沿海集团科技“揭榜挂帅”项目(2022YHTDJ014)

*通信作者:邢锦城,副研究员,研究方向为盐碱地改良技术研究,E-mail:sdauxxx@163.com;张倩,博士,副研究员,研究方向为盐碱地生态修
复,E-mail:langli_zhang@126.com。

determined. [Results] Compared with the full application of nitrogen fertilizer, when the proportion of organic fertilizer replacing chemical fertilizer was 25%–50%, the maize grain yield increased by 8.74%–11.21%. Especially 25% organic fertilizer replaced nitrogen fertilizer, the photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), transpiration rate (T_r), and intercellular CO_2 concentration (C_i) of maize significantly increased. The soil total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK), as well as contents of available N, P, K all significantly increased. When the organic substitution ratio increased to more than 50%, there was no significant change in maize yield and soil nutrients compared with pure nitrogen fertilizer. Compared with pure nitrogen fertilizer, soil carbon storage increased by 9.47%–14.61% when the replacement ratio of organic fertilizer was 25%–75%, which was mainly dependent on the significant increase of soil organic carbon content and bulk density. There was a significant correlation between soil organic carbon content and maize yield. [Conclusions] Partial substitution of 25%–50% nitrogen fertilizer with organic fertilizer under smashing ridge tillage could significantly improve soil physical and chemical properties, increase soil carbon storage, and increase maize yield, which could be used as a recommended fertilization technique for maize cultivation in coastal dryland areas of Jiangsu Province.

Keywords: organic fertilizer; replacement ratio; yield; soil carbon pool; smashing ridge tillage

滨海盐碱地是我国重要的耕地储备资源,然而,滨海盐碱地具有耕地质量差,土壤盐分高、养分低、矿化度高等特征,化肥施入土壤后只有少部分被作物吸收,而绝大部分的肥料会随水流失或被土壤固定,易于造成次生盐渍化。同时,土壤低有机质通常限制了产量对化肥施用的响应^[1]。因此,如何提高滨海农田土壤有机质,在保证土壤结构稳定的同时提升土壤质量是关键的破解之法。

施用有机肥可以改善土壤盐碱质地,提升土壤有机质含量,使作物在生长时得到更加均衡持续的养分供给,从而实现作物产量的稳定提升^[2]。然而,一般有机肥的肥效发挥比较慢,有机肥粉碎不彻底或者埋藏深度较浅都会影响肥效的释放,对于产量的影响往往是一个长期的过程^[3-4]。为了保证农田产量,在肥力相对较低的盐碱农田上单纯进行有机肥替代是很难实现的。大量研究同样表明,有机无机肥料配合施用比单施化肥或有机肥具有明显的优势,二者配施是维持作物高产和提高土壤有机碳的重要途径^[5-7]。然而,不同研究区域由于土壤性质、种植模式以及有机肥类型的差异,适用的有机无机配合施用模式并不相同^[8-9]。因此,为达到本区域滨海农田改土增效的目的,需要基于滨海盐碱地的特征,采用契合当地种植结构的方式对有机无机配施措施进行适当的调整。

粉垄耕作可以增加有机肥埋藏深度,提升有机肥肥效的发挥,同时也能缓解土壤次生盐渍化,是滨海盐碱地治理的有效措施^[10-11]。因此,在粉垄耕作的基础上进行有机无机配施,可以实现滨海盐碱地耕作措施和施肥体系的系统优化。目前,粉垄同有机化肥协同农作模式研究还主要集中在有机肥作为补充肥料添加上^[12],关于其替代氮肥的可能性还鲜有报道,同时粉垄耕作下有机肥化肥最佳配施比例也不清楚。为保证滨海农田的高效可持续发展,有必要进一步探究有机无机配施模式与农田生产力提升的关系。

本研究在粉垄耕作模式下开展不同比例有机肥替代氮肥下农田生产力和土壤固碳变化研究,旨在构建适宜本区域的农作制度,筛选出合适的粉垄有机无机肥配施协同耕作技术,为促进滨海农业生产的可持续性和提高粮食产量提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于江苏省盐城市大丰区滩涂农业示范基地(32°59′45″N、东经 120°49′30″E)进行,该试验地年均气温 13~16 °C,无霜期 208~220 d,年均降雨量 900~1 300 mm,年日照时数 2 100~2 600 h。试验区土壤质地为砂质壤土。土壤 0~20 cm 基本性质:全氮含量 0.95 g·kg⁻¹,碱解氮含量 46.33 mg·kg⁻¹,速效磷含量 33.23 mg·kg⁻¹,速效钾含量 201.25 mg·kg⁻¹,水溶性盐含量 1.82 g·kg⁻¹,有机质含量 15.73 g·kg⁻¹,pH 值为 8.51(水提)。

1.2 试验材料

选用当地常见的夏玉米栽培品种‘红旗 1302’,夏播全生育期 105 d。化肥纯氮为 300 kg·hm⁻²,磷肥 120 kg·hm⁻²,钾肥 120 kg·hm⁻²(化肥类型主要为尿素,含 N 46%;硫酸钾,含 K₂O 50%;过磷酸钙,含 P₂O₅ 12%)。有机肥选用市面上常见的商品有机肥,其基本性质为全氮含量 2.52%,P₂O₅ 含量 4.42%,K₂O 含量 1.83%,有机质含量 45.09%,pH 7.26,按照 12 t·hm⁻²用量施用。磷钾肥同有机肥作为基肥一次施入。氮肥分为 10%基肥、50%攻秆肥、40%壮穗肥施用。

1.3 田间试验设计

粉垄耕作模式下,按照等氮量投入原则,设置有机肥替代 25% 氮肥 (CT25)、有机肥替代 50% 氮肥 (CT50)、有机肥替代 75% 氮肥 (CT75)、有机肥全量替代氮肥 (CT100) 处理,以常规氮肥施用 (CK) 为对照,比较粉垄耕作模式下夏玉米种植系统在有机肥梯度性替代下农田生产力和土壤碳库的变化特征。玉米采用直播方式,播种行距为 60 cm,株距为 20 cm,种植密度为每公顷 60 000 株左右。每个处理重复 3 次,各小区面积为 100 m²,采用随机区组方式分配各处理小区。

1.4 样品采集和测定方法

在玉米拔节期、孕穗期及成熟期各小区随机选取 5 株植株进行生长状况测定:使用米尺测定玉米植株地表至雄穗顶端的高度为株高;茎粗为使用游标卡尺测定植株地上部第 3 节间横截断面的直径;使用直尺测定穗位叶的最长和最宽处,叶面积校正系数为 0.70,对叶面积进行计算;使用叶绿素仪 (SPAD) 测定穗位节叶片,测定其上部、中部、下部 3 个数值取平均值为测定数据。在玉米抽穗后,采用便携式光合作用系统测定仪 LI-6400 (LI-COR Lincoln, USA) 测定主茎倒 2 叶的净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、蒸腾速率 (T_r)、胞间 CO₂ 浓度 (C_i)。在玉米成熟期于每个小区随机选取 3 个样方,每个样方内为双行 10 株植株,将玉米果穗脱粒后进行称重,再折算成公顷产量。

在玉米收获期取表层土壤至实验室阴干后过筛,采用 H₂SO₄ 消煮-凯氏定氮法测定全氮含量,碱解-扩散法测定土壤碱解氮含量,采用 H₂SO₄-HClO₄ 消煮-钼锑抗比色法测定全磷含量;采用 NaHCO₃ 浸提、钼锑抗比色法测定速效磷含量, H₂SO₄ 消煮-火焰光度法测定全钾含量,醋酸铵浸提-火焰光度法测定速效钾含量^[13]。采用环刀法测定表层土壤容重,土壤样品带回实验室置于烘箱中 105 °C 烘干至恒重后称量。同时,在玉米播种前和收获后分别取表层土壤,阴干后过筛,采用重铬酸钾氧化-外加热法测定其有机碳含量。将收获后和播种前的土壤有机碳储量进行相减,得出土壤有机碳变化量。根据土壤有机碳含量进行有机碳储量计算^[14], $SOC = BD \times H \times C \times 10$ 。式中: SOC 为土壤有机碳储量 (t·hm⁻²); BD 为土壤容重 (g·cm⁻³); H 表示土层深度 (m); C 表示各土层的土壤有机碳含量 (g·kg⁻¹); 10 为单位换算系数。

1.5 数据处理与分析

利用 DPS 9.01 软件进行数据处理和单因素方差分析,采用邓肯新复极差法进行差异显著性检验;采用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 有机无机肥配施下玉米生育期地上部生物量及产量性状

从表 1 可知:在玉米拔节期,有机肥配施比例低于 75% 时单株干重较 CK 无显著性差异,有机肥全量替代处理单株干物质则较 CK 显著降低,降幅达 32.65%,这主要受茎干重降低的影响;在玉米孕穗期,各有

表 1 有机无机肥配施下玉米生育期干物质积累变化

Table 1 Accumulation of aboveground dry matter in organic-inorganic combination application treatments at maize growth stage

指标 Item	处理 Treatment	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Boot stage	成熟期 Maturation stage
茎干重 Stem dry weight	CK	20.00±1.15 ^a	43.33±0.88 ^c	46.33±1.45 ^b
	CT25	21.33±0.67 ^a	63.00±2.31 ^a	61.67±2.73 ^{ab}
	CT50	14.67±2.16 ^b	65.00±1.00 ^a	54.00±2.08 ^{ab}
	CT75	13.00±2.00 ^b	51.33±2.33 ^b	69.67±9.24 ^a
	CT100	10.67±1.20 ^b	54.33±2.33 ^b	58.00±0.58 ^{ab}
叶干重 Leaf dry weight	CK	12.00±0.57 ^{ab}	24.33±1.45 ^b	27.33±1.20 ^a
	CT25	15.00±1.53 ^a	30.33±1.76 ^a	23.67±1.86 ^a
	CT50	14.67±0.88 ^a	26.67±0.88 ^{ab}	24.67±2.33 ^a
	CT75	14.00±1.00 ^a	25.67±1.20 ^b	23.67±0.33 ^a
	CT100	10.33±0.33 ^b	24.66±0.67 ^b	25.00±1.53 ^a
穗干重 Panicle dry weight	CK		26.00±2.65 ^{ab}	110.33±3.28 ^b
	CT25		27.33±2.33 ^{ab}	116.67±1.20 ^a
	CT50		19.33±0.88 ^c	114.00±1.00 ^{ab}
	CT75		31.00±0.58 ^a	91.33±1.45 ^c
	CT100		21.33±0.88 ^{bc}	78.00±2.00 ^d

续表 1 Table 1 continued

指标 Item	处理 Treatment	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Boot stage	成熟期 Maturation stage
总干重 Total dry weight	CK	31.67±1.20 ^{ab}	93.67±3.76 ^c	184.13±1.68 ^c
	CT25	36.33±1.56 ^a	120.67±6.12 ^a	201.79±4.80 ^a
	CT50	29.33±2.85 ^{ab}	111.00±2.00 ^{ab}	192.67±2.60 ^b
	CT75	27.00±3.06 ^{bc}	108.00±2.65 ^{ab}	176.88±2.97 ^d
	CT100	21.33±1.45 ^c	100.33±2.73 ^{bc}	160.87±0.71 ^e

注:同列数据后不同字母表示不同处理之间差异显著($P < 0.05$)。CK:当地氮肥施处理;CT25:25%有机肥+75%氮肥处理;CT50:50%有机肥+50%氮肥处理;CT75:75%有机肥+25%氮肥处理;CT100:有机肥全量替代氮肥处理。下同。

Note: Different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at 0.05 level. CK: Local nitrogen fertilizer application as the control; CT25: Organic fertilizer substituted 25% of chemical N fertilizer treatment; CT50: Organic fertilizer substituted 50% of chemical N fertilizer treatment; CT75: Organic fertilizer substituted 75% of chemical N fertilizer treatment; CT100: Organic fertilizer substituted the whole chemical N fertilizer treatment. The same as follows.

机肥替代处理单株干重较 CK 均显著增加,其中 CT25、CT50、CT75 处理增加显著,增幅分别为 28.82%、18.50%、15.30%,CT100 处理单株干重较 CK 增加 7.11%,但并不显著;在玉米成熟期,各处理单株干重与 CK 相比差异显著,其中 CT25 处理最高,较 CK 显著增加 9.59%,CT50 处理较 CK 显著增加 4.64%,CT75、CT100 处理则较 CK 显著降低,降幅分别为 3.94%、12.63%。

CT25、CT50 处理的玉米产量均较 CK 增加,增幅分别为 11.21%、8.74%,且差异显著。CT100 处理玉米产量较 CK 增加了 0.78%,CT75 处理则较 CK 降低了 0.29%,且二者均不显著(图 1)。

2.2 有机无机肥配施下玉米生长及光合特征

2.2.1 株高和茎粗

从图 2 可知:在玉米各生育期株高差异明显,拔节期各处理株高较 CK 均有所增加,随着有机肥替代比例的增加,CT25、CT50、CT75、CT100 处理株高较 CK 分别增加 11.64%、0.52%、7.25%、11.35%,其中 CT25、CT100 表现出显著差异;玉米孕穗期各替代处理除 CT25 外株高均较 CK 显著增加,CT50、CT75、CT100 处理增幅分别为 7.22%、8.21%、13.55%;成熟期各替代处理株高较 CK 均显著降低,

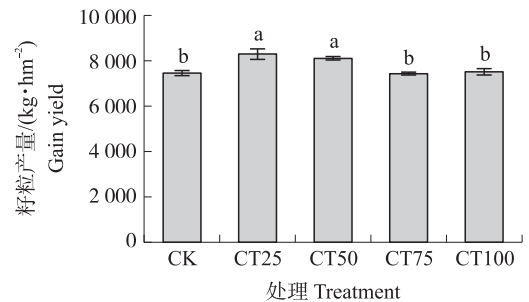


图 1 不同处理对玉米籽粒产量的影响
Fig. 1 Effect of different treatments on maize grain yield

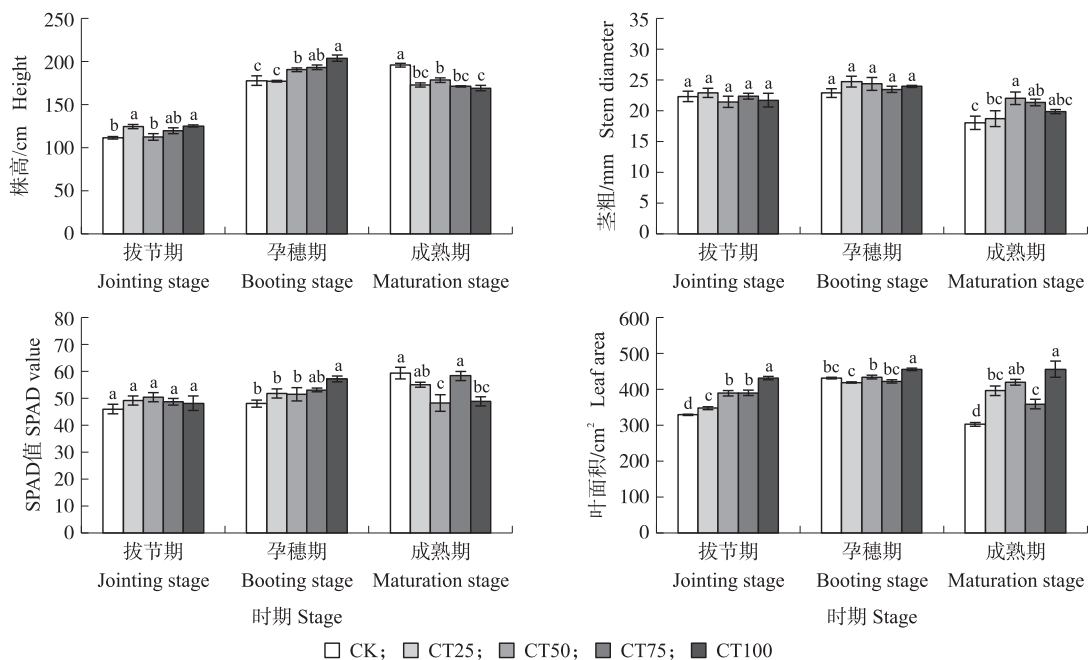


图 2 不同处理玉米各生育期生长特征差异

Fig. 2 Differences in growth characteristics of maize at different growth stages under different treatments

不同小写字母表示同一时期不同处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

Different small letters mean significant difference in different treatments at 0.05 level in the same stage. The same as follows.

CT25、CT50、CT75、CT100 处理降幅分别为 11.65%、9.96%、13.72%、15.55%。各替代处理玉米茎粗在拔节期、孕穗期尽管较 CK 有所增加,但均未表现出差异;在成熟期 CT25、CT50、CT75、CT100 处理茎粗较 CK 明显增加,增幅分别为 3.77%、21.42%、14.97%、8.59%,其中 CT50、CT75 处理与 CK 相比差异显著。

2.2.2 单株 SPAD 值和叶面积 由图 2 可知:玉米叶片 SPAD 值在拔节期并未表现出显著差异;在孕穗期,各替代处理 SPAD 值均较 CK 有所增加,其中 CT75、CT100 处理增加显著,增幅分别为 9.70%、17.19%;CT50、CT100 处理成熟期 SPAD 值则较 CK 显著降低,降幅分别为 20.10%、17.93%,CT25、CT75 处理尽管也较 CK 有所降低,但并未达到显著水平。各替代处理玉米叶面积在拔节期、成熟期均较 CK 显著增加,仅 CT100 在孕穗期叶面积较 CK 显著增加 5.88%,其他有机肥替代处理无显著差异,但各替代处理叶面积随着替代比例的增加,叶面积呈现出显著增加的趋势。

2.2.3 光合生理指标 由图 3 可知:各处理玉米叶片的光合生理指标差异显著,其中 CT25 处理的净光合速率(P_n)较 CK 显著增加,增幅为 23.23%,其他有机无机肥配施处理差异不显著;CT25、CT50、CT75 处理叶片的蒸腾速率(T_t)较 CK 均显著增加,增幅分别为 16.35%、16.11%、19.08%,CT100 处理则较 CK 显著降低了 38.52%;有机肥替代比例在 25%~75%时,气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)较 CK 均显著增加,有机肥全量替代化肥显著降低。

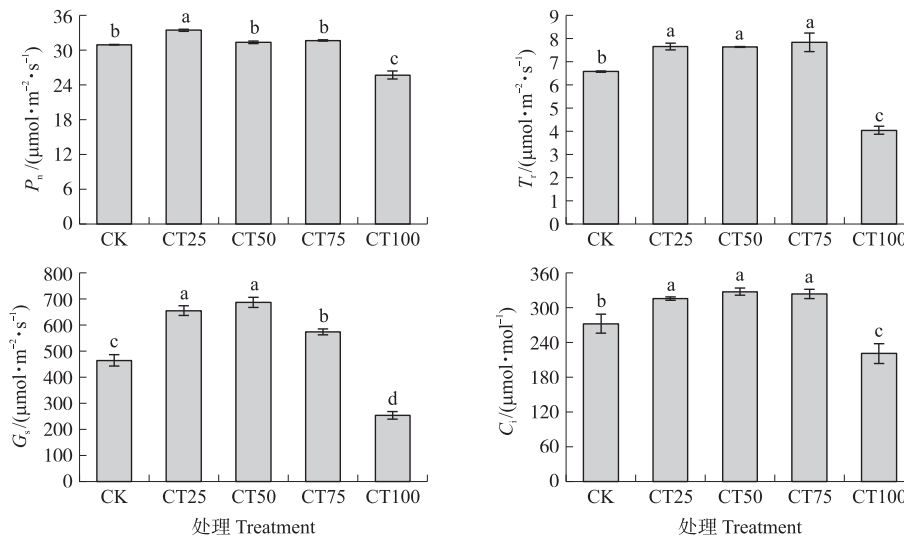


图 3 不同处理对玉米叶片光合生理的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on the photosynthetic physiology of maize leaves

P_n :净光合速率 The photosynthetic rate; G_s :气孔导度 Stomatal conductance; T_t :蒸腾速率 Transpiration rate; C_i :胞间 CO_2 浓度 Intercellular CO_2 concentration. 下同 The same as follows.

2.3 有机无机肥配施下玉米土壤养分及碳库变化

2.3.1 土壤养分变化 从图 4 可知:CT25、CT50 处理土壤全氮含量较 CK 分别显著增加 17.15%、13.85%,CT75、CT100 处理则较 CK 分别降低 3.95%、0.41%,但并未达到显著水平;各替代处理土壤全磷含量变化趋势同全氮一致,其中 CT100 处理全磷含量最低,较 CK 处理显著降低 3.27%;CT25、CT50 处理土壤全钾含量较 CK 处理显著增加,增幅分别为 5.88%、4.16%,CT75、CT100 处理全钾含量则较 CK 显著降低,降幅分别为 5.12%、5.92%;CT25 处理土壤碱解氮含量较 CK 显著增加 17.61%,CT50、CT100 处理无显著性差异,CT75 处理则较 CK 显著降低 7.61%;土壤速效磷和速效钾含量变化趋势比较一致,有机肥配施在 25%~75%时土壤速效磷和速效钾含量均较 CK 显著增加,增幅分别在 8.55%~20.17%、8.88%~12.26%,CT100 处理速效磷含量较 CK 降低 1.20%,速效钾含量则较 CK 增加 1.76%,但均未达到显著水平。

2.3.2 土壤碳库变化 由图 5 可知:CT100 处理土壤有机碳含量较 CK 降低 3.84%,但并未达显著水平,CT50、CT75 处理土壤有机碳较 CK 显著增加,增幅分别为 5.76%、6.78%,尽管 CT25 处理土壤有机碳较 CK 增加 2.13%,但差异并不显著;CT25、CT50、CT75 处理土壤容重较 CK 均显著增加,增幅分别为 7.15%、7.70%、4.67%,CT100 处理与 CK 相比无显著差异;CT25、CT50、CT75 处理土壤碳储量较 CK 显著增加,其中 CT50 增幅最大,达到 13.35%,CT75、CT25 处理则各增加 11.01%、9.47%,CT100 处理土壤碳储量较 CK 降低 3.78%,但差异并不显著;CT25、CT50、CT75 处理表现出固碳,CT100 和 CK 处理则表现出负碳。

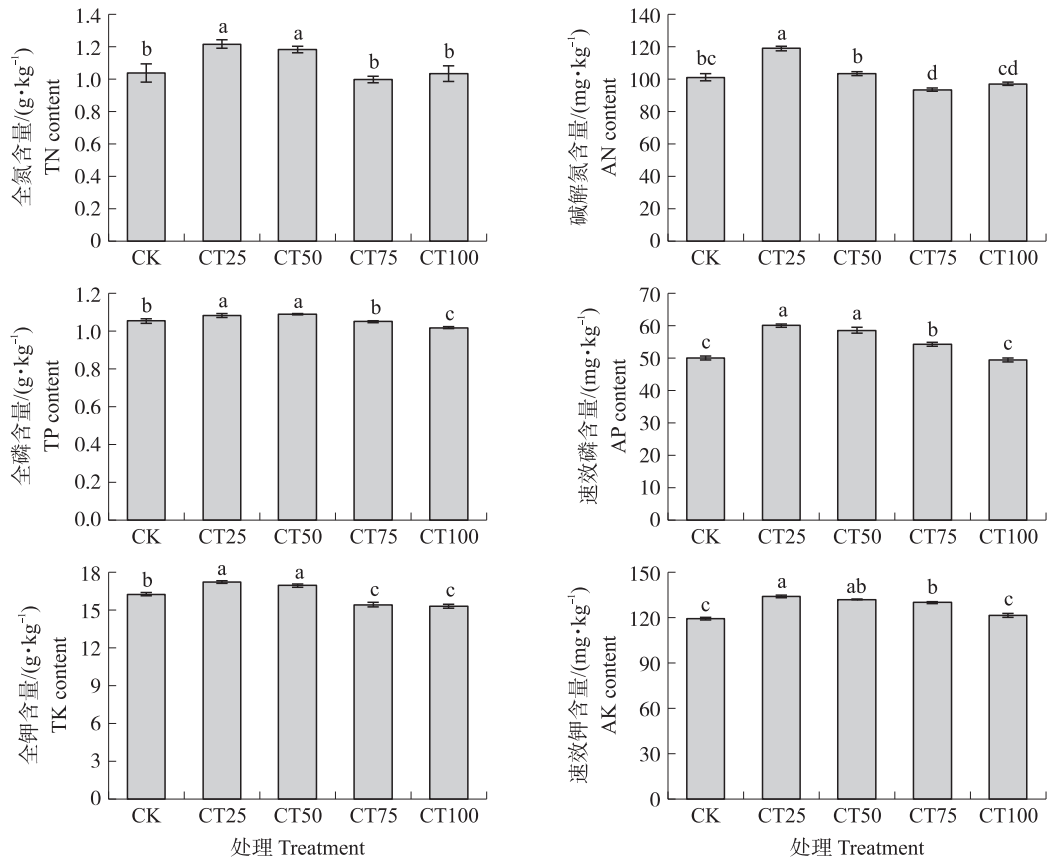


图 4 不同处理对土壤理化性质的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on soil physicochemical properties

TN:全氮 Total nitrogen;TP:全磷 Total phosphorus;TK:全钾 Total potassium;AN:碱解氮 Alkali-hydro nitrogen;AP:速效磷 Available phosphorus;AK:速效钾 Available potassium. 下同 The same as follows.

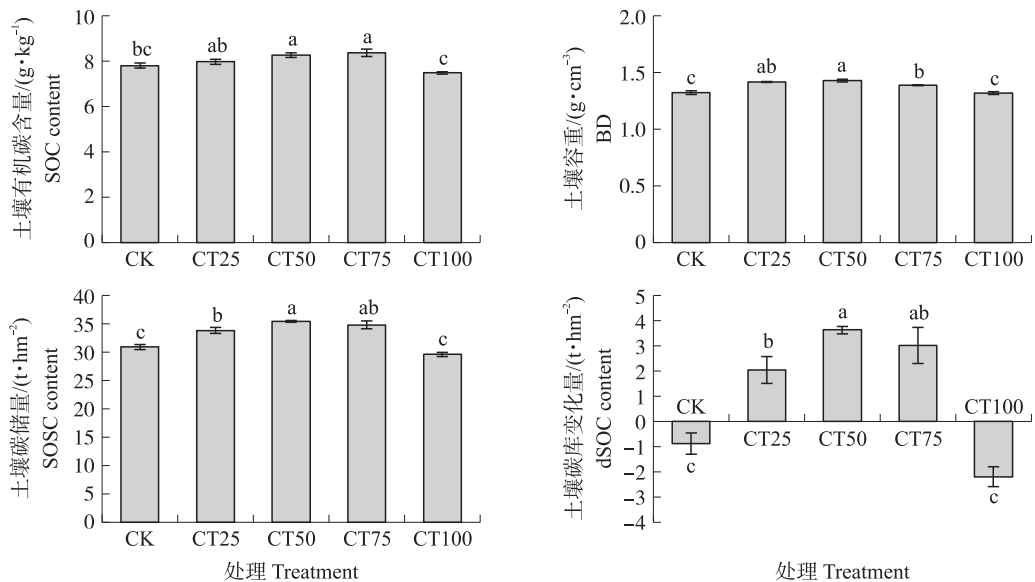


图 5 不同处理对土壤碳库的影响

Fig. 5 Effects of different treatments on soil organic carbon

SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon;BD:土壤容重 Soil bulk density;SOSC:土壤碳储量 Soil carbon storage;dSOC:土壤碳库变化量 Changes in soil carbon storage. 下同 The same as follows.

2.4 有机无机肥配施下玉米产量和生理生化指标相关性分析

从玉米生长各指标参数和产量的相关关系(图 6)来看,玉米株高、茎粗、叶面积、SPAD 值等生理指标和土壤全磷含量具有相关性。碱解氮和光合生理相关指标显著负相关,土壤有机碳、速效磷、速效钾和产

量显著正相关,而碱解氮与产量无明显相关性。

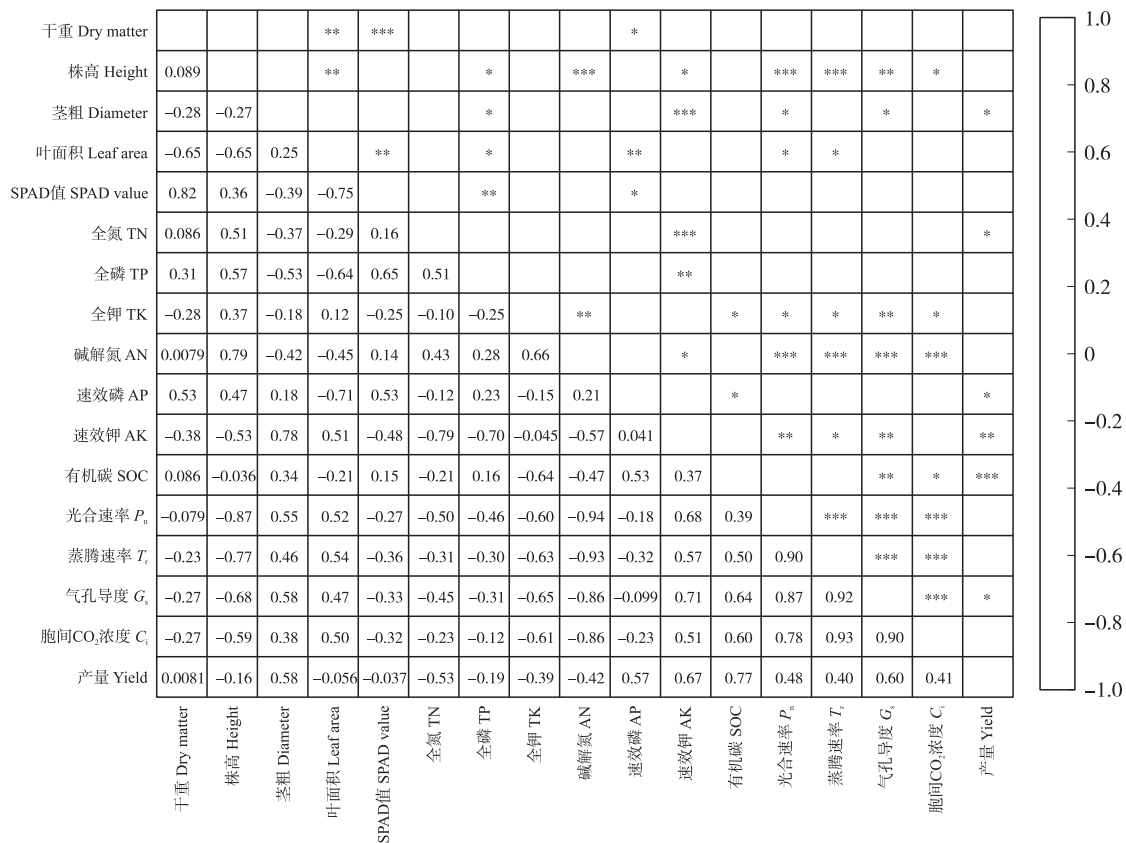


图 6 关键指标相关性分析
Fig. 6 Correlation analysis of various indicators

* P<0.05, ** P<0.01, *** P<0.001.

3 讨论

3.1 有机无机肥配施农田响应机制

光合作用是作物产量形成的基础,光合生理指标是反映生物量高低的重要决定因素^[15]。前人对粉垄和有机肥互作对甘蔗光合生理影响的研究表明,有机肥处理的叶片气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率高于常规施肥,有机肥提升了植物干物质的积累和运转^[16]。本研究中,我们同样发现有机肥替代比例在 75%以下时玉米叶片的光合速率、蒸腾速率等高于纯施氮肥。而在全量替代时光合生理指标则有所降低,这主要由于有机肥养分释放规律造成的。前期有机肥释放肥力较慢,不足以满足玉米生长,拔节期有机替代处理的单株干物重等低于全量氮肥处理,在生长中后期则有所恢复。本研究中,在玉米成熟期,有机肥替代 25%~50%氮肥处理的干物质积累显著高于常规施肥,这和玉米产量表现具有一致性。玉米成熟期,有机肥替代化肥处理株高和 SPAD 值较常规施肥分别降低 7.96%~15.55%、1.68%~18.64%,而茎粗和叶面积则相较单施氮肥分别增加了 3.77%~21.42%、18.73%~50.77%。当前,大多数研究表明,有机肥部分替代化肥后可显著提升作物株高^[17],增加叶片 SPAD 值^[18]等生长特征。也有研究表明有机无机肥配施后作物株高和叶面积并未受明显影响^[3]。这可能和不同作物品种在生理指标对养分的竞争力差异相关。

农田作物增产和农艺效率的提升密切相关。大量研究表明,有机肥同无机肥配施可改善土壤结构,提升养分利用效率,显著增加作物产量^[19-21]。本研究中,有机肥配施化肥比例在 50%以下时,土壤全氮、全磷、全钾以及碱解氮、速效磷、速效钾含量均较单施氮肥显著增加,有机肥配施比例升至 50%以上时土壤养分较单施氮肥减少,但并未达到显著水平,这和前人研究结果^[22-23]也具有一致性。同时,土壤养分差异和玉米产量变化也是一致的,这表明产量的增加往往与土壤养分状况改善有关。李素丽等^[11]研究表明,在粉垄耕作条件下选择合适的有机肥与复合肥配施可增加土壤速效养分和有机质、全氮、全磷含量,实现作物增产的目的。此外,任晓月等^[24]研究表明,经过粉垄处理后的土壤碱解氮和速效钾的含量是影响玉

米产量的主要因素。Bado 等^[25]在西非酸性土壤的玉米试验结果表明,土壤速效磷每增加一个单位,玉米产量可增加 16%。本研究中,我们发现土壤全氮、速效磷和速效钾含量与玉米产量显著相关,这同 Mahmood 等^[26]研究结果也具有 consistency。因此,选择合适的有机肥替代化肥比例配合施用,可以改善土壤理化性质,提升农田土壤质量。

化肥与有机肥配施被认为是维持作物高产和提高土壤有机碳的重要途径^[27]。特别是在旱地施用有机肥对有机质含量增加的响应更显著^[28]。在本研究中,有机肥替代 25%~75%时,土壤有机碳含量增加 2.13%~6.78%,土壤碳储量提升 9.47%~14.61%。前人研究表明,有机肥替代化肥可以降低土壤容重,增加土壤有机质,进而增加农田碳储量。本研究中有机肥替代相较于单施化肥同样增加了土壤有机碳含量,但有机肥替代处理的土壤容重并未较单施化肥呈现降低的趋势。这种现象可能是粉垄耕作对于土壤容重影响更显著,有机肥施用后增加了土壤团聚体的稳定性,缓解了土壤孔隙度的增加^[29]。研究表明,短期有机无机肥配施处理通过增加表层土壤大团聚体比例和平均直径,有利于表层土壤团聚体的稳定性^[30]。因此,农田土壤碳储量的增加,往往与土壤有机碳含量和容重的提升有关。总之,土壤碳库的演变是一个较为缓慢的过程,其短期含量的变化并不能真实反映土壤质量的增减,有必要对农田碳库的收支状况进行动态持续性监测,同时对土壤团聚体变化、水分和养分循环特征等与土壤固碳排碳过程密切相关的因素进行进一步研究。

3.2 有机无机肥最佳配施比例

施氮是提高谷物产量的基本举措,氮源的高效利用是实现可持续集约化的关键^[31]。前人研究表明,有机无机肥配合施用较单施氮肥可以提升玉米的可持续产量指数,保持产量的稳定性^[6]。在本研究中,玉米在粉垄耕作模式下,有机肥替代化肥比例小于 50%相较于常规施肥表现出显著增产,而在替代比例超过 50%时,与单施氮肥无显著差异。Wei 等^[32]对全球 133 项关于有机肥替代化肥后的玉米产量和环境效应进行了荟萃分析,结果表明玉米生产中最佳产量的有机肥替代氮肥比例为 40%~60%。Zheng 等^[33]研究表明粉垄耕作可以在保证植物净初级生产力和氮利用效率的同时达到减氮 30%^[33]。这表明,粉垄同有机肥替代协同进行时,可增加有机肥替代氮肥的比例,实现农田降本增效的目的。

大量研究表明,土壤有机碳含量和玉米籽粒产量高度相关^[34-35]。本研究中土壤有机碳含量和产量同样呈现极显著的相关关系。这表明土壤有机碳的提升是作物增产的重要环节。本研究中,有机肥替代氮肥比例小于 75%时,有机碳含量同样随有机肥替代比例增加而增加。然而,有机肥配合化肥减施可以增加土壤有机碳含量,增加碳储量,但这种增加趋势并不是绝对的。全氮量有机肥替代可能呈现有机碳降低的趋势。因此,有机肥替代氮肥的比例并不是越高越好。同时,有机肥的替代比例和土壤本身的性质有很大关系。有研究表明,在中等生产力草甸褐土中,短期有机肥化肥配施(即以等氮量有机肥替代 15%~30%化肥)有利于改善土壤性状和玉米籽粒产量^[30]。根据本研究区域土壤性质的特征和产量响应变化,粉垄耕作下玉米农田的有机肥替代氮肥比例应控制在 25%~50%。

参考文献 References:

- [1] Marenya P P, Barrett C B. State-conditional fertilizer yield response on western Kenyan farms[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2009, 91(4): 991-1006.
- [2] 杨旖璇, 屈忠义, 杨威, 等. 氮肥和有机肥配施对盐碱地酿酒高粱生长、氮素利用效率及土壤 N₂O 排放的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(6): 116-127.
Yang Y X, Qu Z Y, Yang W, et al. Effects of combined application of nitrogen fertilizer and organic fertilizer on the growth, nitrogen use efficiency of brewing sorghum and soil N₂O emission in saline-alkali land[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(6): 116-127 (in Chinese with English abstract).
- [3] Ayoola O T, Makinde E, Ande O. Performance of high protein maize variety and soil nutrient changes with fortified organic fertilizer[J]. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 2008, 6(3/4): 278-281.
- [4] Sychev V G, Naliukhin A N, Shevtsova L K, et al. Influence of fertilizer systems on soil organic carbon content and crop yield: results of long-term field experiments at the geographical network of research stations in Russia[J]. *Eurasian Soil Science*, 2020, 53(12): 1794-1808.
- [5] 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.
Luo J, Liu L Z, Wang T, et al. Effect of combined application of chemical fertilizer with organic manure on cucumber yield and soil microbial diversity[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(5): 774-779 (in Chinese with English abstract).
- [6] Efthimiadou A, Bilalis D, Karkanis A, et al. Combined organic/inorganic fertilization enhance soil quality and increased yield, photosynthesis and

- sustainability of sweet maize crop[J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2010, 4(9): 722-729.
- [7] 李磊, 司海丽, 朱志明, 等. 有机肥氮替代化肥氮对盐碱地玉米氮素利用率及土壤理化指标的影响[J]. *西北农业学报*, 2023, 32(7): 1068-1077.
- Li L, Si H L, Zhu Z M, et al. Effect of substitute of chemical fertilizer N with organic manure N on N utilization efficiency in maize and soil physicochemical indexes in saline-alkali land[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2023, 32(7): 1068-1077 (in Chinese with English abstract).
- [8] 李孝良, 胡立涛, 王泓, 等. 化肥减量配施有机肥对皖北夏玉米养分吸收及氮素利用效率的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2019, 42(1): 118-123. DOI: 10.7685/jnau.201804012.
- Li X L, Hu L T, Wang H, et al. Effects of combination of chemical fertilizer reduction with organic manure on nutrient uptake and nitrogen utilization efficiency of summer maize in Northern Anhui Province[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2019, 42(1): 118-123 (in Chinese with English abstract).
- [9] 赵欣蕊, 张翠英, 张树明, 等. 不同施肥模式对滨海盐碱地土壤性质及玉米产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2023, 8: 84-90.
- Zhao X R, Zhang C Y, Zhang S M, et al. Effect of different fertilizer application patterns on soil properties and maize yield in coastal saline soils[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023, 8: 84-90 (in Chinese with English abstract).
- [10] 韦本辉, 申章佑, 周佳, 等. 粉垄耕作改良盐碱地效果及机理[J]. *土壤*, 2020, 52(4): 699-703.
- Wei B H, Shen Z Y, Zhou J, et al. Study on effect and mechanism of improving saline-alkali soil by fenlong tillage[J]. *Soils*, 2020, 52(4): 699-703 (in Chinese with English abstract).
- [11] 李素丽, 梁晓莹, 韦本辉, 等. 有机肥对粉垄蔗地土壤养分及甘蔗产量品质的影响[J]. *广西植物*, 2021, 41(9): 1509-1515.
- Li S L, Liang X Y, Wei B H, et al. Effects of organic fertilizer on soil and the yield and quality of sugarcane under the condition of smashing ridge tillage[J]. *Guihaia*, 2021, 41(9): 1509-1515 (in Chinese).
- [12] 刘佳琪, 彭光爵, 郑重道, 等. 粉垄及秸秆腐熟有机肥对湖南稻作烟区土壤养分和烤烟产质量的影响[J]. *西南农业学报*, 2022, 35(2): 397-404.
- Liu J Q, Peng G J, Zheng Z Y, et al. Effects of vertical rotary tillage and straw decomposed organic fertilizer on soil nutrients, yield and quality of flue-cured tobacco in Hunan Province[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 35(2): 397-404 (in Chinese with English abstract).
- [13] 鲍士旦. 土壤化学分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 16-85.
- Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 16-85 (in Chinese).
- [14] 郭戎博, 李国栋, 潘梦雨, 等. 秸秆还田与施氮对耕层土壤有机碳储量、组分和团聚体的影响[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(20): 4035-4048.
- Guo R B, Li G D, Pan M Y, et al. Effects of long-term straw return and nitrogen application rate on organic carbon storage, components and aggregates in cultivated layers[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(20): 4035-4048 (in Chinese with English abstract).
- [15] 许大全. 光合速率、光合效率与作物产量[J]. *生物学通报*, 1999, 34(8): 11-13.
- Xu D Q. Photosynthetic rate, photosynthetic efficiency and crop yield[J]. *Bulletin of Biology*, 1999, 34(8): 11-13 (in Chinese).
- [16] 杨丽佩, 韩世健, 韦本辉, 等. 有机肥与粉垄互作对甘蔗光合生理特性及组织细胞结构的影响[J/OL]. *作物杂志*, 2023: 1-14. (2023-03-09). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1808.S.20230309.1103.002.html>.
- Yang L P, Han S J, Wei B H, et al. Effects of interaction between organic fertilizer and fenlong on photosynthetic physiological characteristics and tissue and cell structure of sugarcane[J/OL]. *Crops*, 2023: 1-14. (2023-03-09). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1808.S.20230309.1103.002.html> (in Chinese with English abstract).
- [17] Mutlu A. The effect of organic fertilizers on grain yield and some yield components of barley[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2020, 29(12): 10840-10846.
- [18] Brodowska M S, Wyszowski M, Kordala N. Use of organic materials to limit the potential negative effect of nitrogen on maize in different soils[J]. *Materials*, 2022, 15(16): 5755.
- [19] Qu J, Liu Y, Xu X, et al. Effects of application of microbial and organic fertilizer on soil fertility and crop yield of a black soil in China[J]. *Agrochimica*, 2020(3): 223-238.
- [20] Li K L, Wang C, Li X L, et al. Long-term effect of integrated fertilization on maize yield and soil fertility in a calcareous fluvisol[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2021, 67(10): 1400-1410.
- [21] Hu Q L, Wang J G, Da Y Z, et al. The effects of plastic mulching and different fertilization on soil nutrients, yield and soil microbiome in maize field[J]. *Cereal Research Communications*, 2023, 51(3): 773-784.
- [22] 杨佳宜, 陈焘, 肖艳松, 等. 外源有机碳输入结合垂直耕作对土壤养分和烤烟生长发育的影响[J]. *西南农业学报*, 2020, 33(8): 1665-1670.
- Yang J Y, Chen T, Xiao Y S, et al. Effects of exogenous organic carbon input combined with vertical tillage on soil nutrients and growth and development of flue-cured tobacco[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33(8): 1665-1670 (in Chinese with English abstract).
- [23] 聂朝阳, 杨帆, 王志春, 等. 耕作协同物料添加对苏打盐碱化耕地土壤理化性质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(1): 235-243.
- Nie Z Y, Yang F, Wang Z C, et al. Effects of tillage synergistic material addition on physical and chemical properties of cultivated sodic-saline

- soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*,2023,41(1):235-243(in Chinese with English abstract).
- [24] 任晓月,陈彦云,梁新华. 粉垄耕作对宁夏银北盐碱地土壤养分及玉米产量的影响[J]. *西南农业学报*,2022,35(5):1063-1068.
Ren X Y,Chen Y Y,Liang X H. Effect of Fenlong tillage on soil nutrients and maize yield in saline land of Ningxia Yinbei irrigation area[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*,2022,35(5):1063-1068(in Chinese with English abstract).
- [25] Bado B V,Lompo F,Sedogo M P, et al. Establishment of the critical limit of soil-available phosphorous for maize production in low acidic ultisols of West Africa[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*,2010,41(8):968-976.
- [26] Mahmood F,Khan I,Ashraf U, et al. Effects of organic and inorganic manures on maize and their residual impact on soil physico-chemical properties[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*,2017,17(1):22-32.
- [27] Li H,Feng W T,He X H, et al. Chemical fertilizers could be completely replaced by manure to maintain high maize yield and soil organic carbon (SOC) when SOC reaches a threshold in the Northeast China Plain[J]. *Journal of Integrative Agriculture*,2017,16(4):937-946.
- [28] Wei W L,Yan Y,Cao J, et al. Effects of combined application of organic amendments and fertilizers on crop yield and soil organic matter: an integrated analysis of long-term experiments[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*,2016,225:86-92.
- [29] 靳晓敏,杜军,沈润泽,等. 宁夏引黄灌区粉垄栽培对玉米生长和产量的影响[J]. *农业科学研究*,2013,34(1):50-53.
Jin X M,Du J,Shen R Z, et al. The effect of sumash-ridging cultivation technology on the growth and yield of corn in Yellow River irrigation district of Ningxia[J]. *Journal of Agricultural Sciences*,2013,34(1):50-53(in Chinese with English abstract).
- [30] Zhai L C,Zheng M J,Zhang L H, et al. Short-term co-application of organic and chemical fertilizer benefits topsoil properties and maize productivity in a medium-productivity meadow-cinnamon soil[J]. *Agronomy*,2023,13(3):944.
- [31] Wang L L,Li Q,Coulter J A, et al. Winter wheat yield and water use efficiency response to organic fertilization in Northern China: a meta-analysis[J]. *Agricultural Water Management*,2020,229:105934.
- [32] Wei Z B,Ying H,Guo X W, et al. Substitution of mineral fertilizer with organic fertilizer in maize systems: a meta-analysis of reduced nitrogen and carbon emissions[J]. *Agronomy*,2020,10(8):1149.
- [33] Zheng B F,Jing Y F,Zou Y D, et al. Responses of tobacco growth and development, nitrogen use efficiency, crop yield and economic benefits to smash ridge tillage and nitrogen reduction[J]. *Agronomy*,2022,12(9):2097.
- [34] Nie S W,Huang S M,Zhang S Q, et al. Effects of various fertilizations on soil organic carbon and total nitrogen in winter wheat-summer corn rotation in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. *Journal of Food Agriculture & Environment*,2012,10(1):567-572.
- [35] Thakur A,Sharma R P,Sankhyan N K, et al. Effect of 46 years' application of fertilizers, FYM and lime on physical, chemical and biological properties of soil under maize:wheat system in an acid Alfisol of northwest Himalayas[J]. *Soil Use and Management*,2023,39(1):357-367.

责任编辑:刘怡辰