

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.02.004

刘艳, 叶鑫, 包红静, 等. 秸秆还田配施化肥对春玉米耕层土壤理化性质及产量的影响. 土壤, 2023, 55(2): 254–261.

秸秆还田配施化肥对春玉米耕层土壤理化性质及产量的影响^①

刘艳¹, 叶鑫¹, 包红静¹, 王晓晖², 隽英华^{1*}

(1 辽宁省农业科学院植物营养与环境资源研究所, 沈阳 110161; 2 瓦房店市农业技术推广中心, 辽宁瓦房店 116300)

摘要: 通过连续 3 a 田间定位试验, 研究了不同秸秆还田方式配施化肥对春玉米耕层土壤理化性质及产量的影响。结果表明: 秸秆还田能显著提高各土层的田间持水量 8.6% ~ 18.0%, 降低土壤紧实度 6.3% ~ 27.5%, 且以秸秆深翻和深旋还田方式效果较好, 同时这两种方式还能显著降低 20 ~ 40 cm 土层容重。连续秸秆还田后耕层土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量较无还田处理平均提高 21.2%、8.6%、15.0% 和 17.2%。此外, 在秸秆还田时配合适量氮肥施用更利于土壤养分的提高, 其中秸秆深翻和秸秆深旋配施 210 kg/hm² 氮肥和 90 ~ 120 kg/hm² 钾肥可显著提升土壤养分状况, 促进春玉米穗长、穗粗和百粒重的增加, 进而提高春玉米产量, 是辽宁棕壤区春玉米生产中比较理想的一种农艺措施, 在农业发展中具有一定的应用和推广价值。

关键词: 秸秆还田; 土壤理化性质; 春玉米; 产量

中图分类号: S152 文献标志码: A

Effects of Straw Incorporation Combined with Fertilizer on Physiochemical Properties of Soil and Yield of Spring Maize

LIU Yan¹, YE Xin¹, BAO Hongjing¹, WANG Xiaohui², JUAN Yinghua^{1*}

(1 Institute of Plant Nutrition and Environmental Resource, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China; 2 Agricultural Technology Extension Center of Wafangdian City in Liaoning Province, Wafangdian, Liaoning 116300, China)

Abstract: A 3-year located field experiment was conducted to study the influences of different straw incorporation methods combined with fertilizers on physiochemical properties of soil and yield of spring maize. The results show that no matter under what kind of straw returning methods, compared with non-straw returning, straw incorporation significantly increases the field capacity of every soil layer by 8.6%–18.0%, reduces soil compactness by 6.3%–27.5%, and deep turning and deep rotation of straws is better in the effects, which also significantly reduces soil bulk density of 20–40 cm. Straw incorporation increases the contents of soil organic matter by 21.2%, alkaline nitrogen by 8.6%, available phosphorus by 15.0% and available potassium by 17.2% in the plough layer after continuous straw returning for 3 years compared with the non-straw returning. In addition, appropriate nitrogen fertilizer combined with straw returning is more conducive to the improvement of soil nutrients. The application of 210 kg/hm² nitrogen and 90–120 kg/hm² potassium fertilizer with straw deep turning and rotation significantly improves soil nutrients, promotes the ear length and diameter as well as 100-grain weight, so increases the yield of spring maize, thus, it is an ideal model in spring maize production and has good application and promotion potential in agricultural development in brown soil area in Liaoning.

Key words: Straw incorporation; Physiochemical properties of soil; Spring maize; Yield

作物秸秆是农业生产中的主要副产物, 每年我国作物秸秆产量高达 7 亿 ~ 9 亿 t^[1-2], 资源量极其丰富。作物秸秆中含有丰富的氮磷钾和中微量元素, 秸秆还田不仅能将其本身的养分元素归还给土壤, 维持土壤

养分平衡, 培肥地力, 而且还能通过还田耕作改善土壤耕层结构^[3-4], 促进土壤水分、养分库容扩大^[5-6], 有效提升农业生产力, 是实现农业绿色发展的一项重要农艺措施^[7]。已有研究表明, 合理利用秸秆资源无

①基金项目: 沈阳市科技计划项目(21-109-3-01), 辽宁省揭榜挂帅项目(2021JH1/10400039), 辽宁省重点研发计划项目(2021JH2/10200030)和国家重点研发计划项目(2018YFD0300303)资助。

* 通讯作者(juanyong_001@sohu.com)

作者简介: 刘艳(1980—), 女, 硕士, 副研究员, 主要从事植物营养与高效施肥研究。E-mail: liuyan1980@163.com

论对土壤还是作物产量均有影响。徐嘉翼等^[8]在辽北的研究结果显示, 秸秆连年翻压还田可显著降低整个耕层土壤容重, 增加表层土壤含水率, 改善土壤养分状况, 提高产量 13.6%。隋鹏祥等^[9]的研究结果表明, 秸秆还田显著增加了春玉米产量和水分利用效率, 同时提高了 0~60 cm 土层的硝态氮、有效磷和速效钾含量。

然而也有研究显示, 由于秸秆碳氮比较高, 自然状态分解时需要消耗一定的氮素, 故而造成土壤微生物与作物争氮的现象, 影响作物前期生长^[10-11]。另外, 作物秸秆中的钾离子还田后虽然可以快速释放进入土壤, 但其有效性受外界环境影响后与化肥钾相差甚远^[12], 尤其在低钾土壤上, 如果单纯依靠秸秆还田并不能满足作物对钾素的需求, 因此, 秸秆还田后不宜盲目地增加或减少氮钾肥的用量, 进一步研究秸秆还田配施氮钾肥具有重要的意义。宫明波等^[13]的研究表明, 秸秆还田配施中等氮肥可以显著提高作物产量, 同时显著提高土壤有机质和速效钾含量。Chen 等^[14]通过长期定位试验发现, 秸秆还田配施化肥可以显著提高土壤有机碳、全氮和有效磷含量。目前, 已有的秸秆还田与化肥配施研究多集中在氮素上, 关于秸秆还田同时与氮钾肥配施的研究则鲜有报道。鉴于此, 本文利用 3 a 定位试验研究了春玉米不同秸秆还田方式与氮钾肥配施对土壤理化性质及玉米产量的影响, 以期为本地区秸秆还田条件下氮钾肥的合理施用、土壤的可持续利用及粮食的增产提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于 2018—2020 年在瓦房店市元台镇(39°31'10"N, 122°3'16"E)进行。该区属暖温带大陆性季风气候, 冬无严寒, 夏无酷暑, 四季分明, 年平均气温 9.3 °C, 无霜期 165~185 d, 年降水量 580~750 mm, 5—9 月有效日照总数约 1 100 h, ≥ 10 °C 有效积温约 3 200 °C。供试土壤为棕壤土, 耕层土壤(0~20 cm)基本理化性质为: pH 5.2, 全氮 0.74 g/kg, 全磷 1.09 g/kg, 全钾 23.9 g/kg, 有机质 9.22 g/kg, 碱解氮(N) 81 mg/kg, 有效磷(P₂O₅) 20.2 mg/kg, 速效钾(K₂O) 55.0 mg/kg。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计, 主因素为 4 个秸秆还田方式(S): S1 为秸秆粉碎深翻还田, S2 为秸秆粉碎深旋还田, S3 为秸秆覆盖免耕还田, S4 为秸秆不还田; 副因素为施肥(F), 设 2 个氮水平(N, 210、180 kg/hm²)

和 2 个钾水平(K₂O, 120、90 kg/hm²)4 个组合: F1 为 N210-K120, F2 为 N210-K90, F3 为 N180-K120, F4 为 N180-K90。试验共 16 个处理, 3 次重复, 每个小区长为 20 m, 宽为 3.6 m(6 垄), 面积为 72 m²。每年秋季机械收获玉米时将秸秆全部粉碎, 在经灭茬机处理后, 按试验要求进行还田操作, 深翻还田 30 cm, 深旋还田 20 cm, 覆盖还田铺于地表, 不还田将秸秆离田后常规旋耕 12 cm。氮、磷、钾肥分别为尿素(含 N 460 g/kg)、磷酸二铵(含 N 180 g/kg, P₂O₅ 460 g/kg)和氯化钾(含 K₂O 600 g/kg)。各处理磷肥统一用量为 P₂O₅ 90 kg/hm²。全部肥料均在播种时一次性侧施入。供试玉米品种为当地常规品种宏硕 899, 生育期约 130 d, 种植密度 4 000 株/亩(1 亩=667 m²), 生育期内无灌溉。每年 5 月上旬播种, 10 月上旬收获。除草和田间管理按常规管理方式。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤物理性状 玉米收获后, 采用环刀法测定土壤容重和田间持水量。用标准体积为 100 cm³ 环刀在秸秆还田主区采集 2.5、22.5 和 42.5 cm 土层的原状土, 分别代表 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层土壤样品, 每区随机选取 3 点, 用胶带密封环刀后带回实验室用于容重和田间持水量的测定; 每区利用 SC900 土壤硬度仪, 按照“S”型随机观测法, 测定 0~45 cm 土壤紧实度, 每区 6 次重复, 计算其平均值。

1.3.2 土壤化学性质 玉米收获后, 各小区采集 0~20 cm 耕层土壤用于化学性质的测定。采用重铬酸钾容量法测定有机质; 采用碱解扩散法测定速效氮; 采用 NaHCO₃ 溶液浸提, 钼锑抗比色法测定有效磷; 采用 NH₄OAC 溶液浸提, 火焰光度计法测定速效钾。

1.3.3 产量及其构成因素 玉米收获时, 各小区取 12 m² 测产, 按 14% 含水率折合成单位面积产量。另选取有代表性的果穗 10 穗, 待风干后于室内考种, 测定穗长、穗粗、秃尖长和百粒重等产量构成因素。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 进行数据处理; 应用 SPSS22 进行 GLM 单变量(Univariate)方差分析, Duncan 法进行多重比较; 采用 Origin 9.1 绘图。

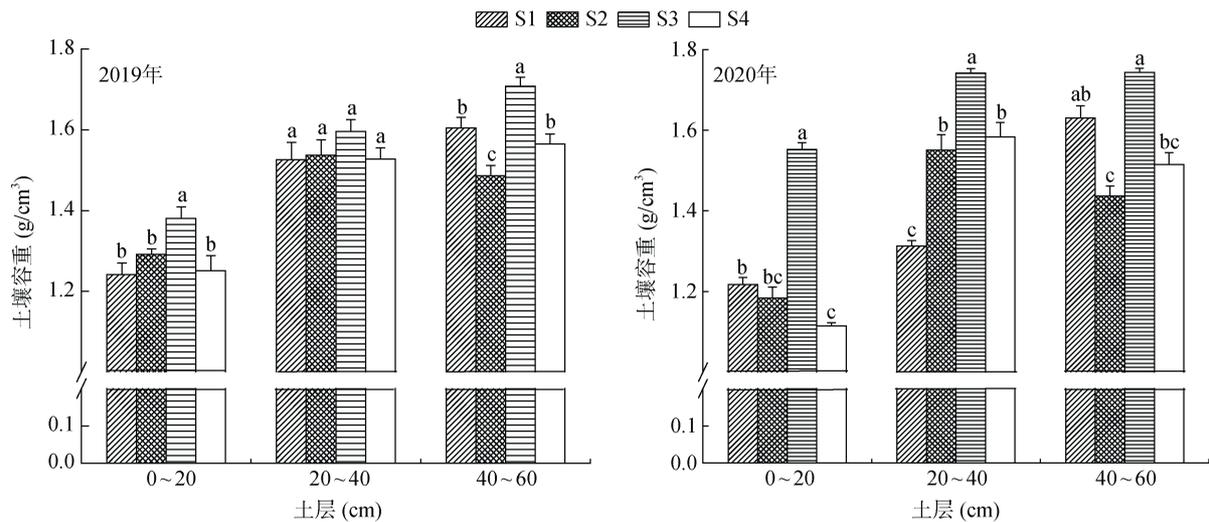
2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田方式对土壤物理性状的影响

2.1.1 土壤容重 土壤容重和孔隙度等物理指标是决定土壤水、肥、气、热等因素相互协调, 以满足作物正常生长发育需要的重要因素。连续 2 a 试验结

果显示,土壤容重随土层深度增加而增加(图 1)。在 0~20 cm 表层,两年结果均显示 S3 处理的容重最大,平均为 1.47 g/cm³,显著高于其他处理 21.6%~28.2%,主要是由于免耕处理没有土壤耕作的过程,使表层土壤变得相对结实。在 20~40 cm 土层,2019 年由于秸秆还田年限较短故各处理差异不显著,2020 年各处理容重表现为 S1<S2<S4<S3,S1 处理的容重最低,较 S4 处理显著降低 17.1%($P<0.05$),主要与秸秆深翻还田后打破犁底层使该层土壤较为松散有关。在 40~60 cm 土层,两年变化趋势一致,各处理表现为 S2<S4<S1<S3,S2 处理容重显著低于其他处理 5.1%~17.6%;S1 处理较 20~40 cm 土层有所增加,可能是由于深翻犁对下层土壤造成挤压,故而容重有所增加。

2.1.2 田间持水量 从图 2 可知,2019 年,在 0~20 cm 土层秸秆还田处理的田间持水量都高于无秸秆处理,顺序为 S1>S2>S3>S4,其中 S1 和 S2 处理较 S4 处理(对照)差异显著,提高了 22.2% 和 12.8%;在 20~40 cm 土层,S3 和 S1 处理的田间持水量较 S4 处理显著提高了 10.8% 和 9.8%;在 40~60 cm 土层,秸秆还田处理的田间持水量均高于无秸秆处理,顺序为 S2>S1>S3>S4,其中 S2 和 S1 处理较 S4 处理提高了 38.2% 和 14.9%,差异显著。2020 年,各土层田间持水量的变化趋势基本一致,均表现为 S1≈S2>S3≈S4,S1 和 S2 处理较 S4 处理各土层持水量分别增加 8.6% 和 11.7%、13.7% 和 9.6%、18.0% 和 14.2%,且差异显著。说明秸秆连续还田后能增加耕



(图中不同小写字母表示同一土层不同处理间差异在 $P<0.05$ 水平上显著,下同)

图 1 不同秸秆还田方式对土壤容重的影响

Fig. 1 Effects of different maize straw returning on soil bulk density

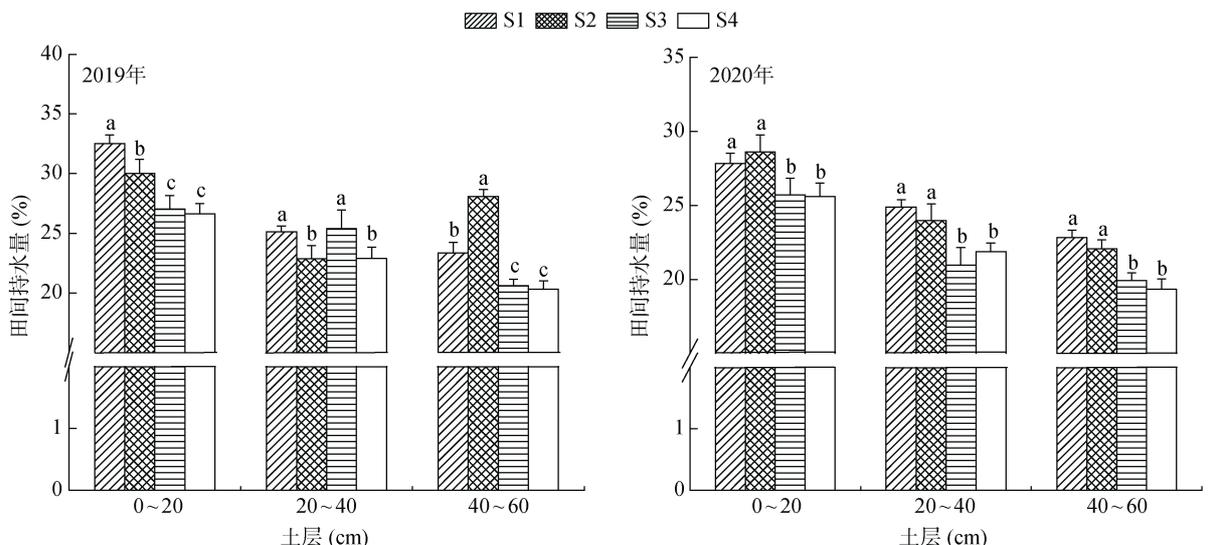


图 2 不同秸秆还田方式对田间持水量的影响

Fig. 2 Effects of different maize straw returning on field capacity

层及深层土壤田间持水量,且深翻和深旋的还田方式对于增强土壤持水能力更好。

2.1.3 土壤紧实度 从图 3 可以看出,各处理土壤紧实度随着土层深度的增加呈先快速增加后趋于平稳的趋势。经过 3 a 田间试验后各秸秆还田处理均降低了 0~40 cm 土层的土壤紧实度,具体表现为 0~20 cm 土壤紧实度随土层加深逐渐增加,各处理平均紧实度大小为 S1<S2<S3<S4,其中 S1、S2 和 S3 处

理较 S4 处理平均降低 20.3%、13.8% 和 6.3%,说明秸秆还田对耕层土壤结构影响较大,不同程度地减缓了紧实度的增加,这与张丽等^[15]的研究结果一致。在 20~40 cm 土层,各处理土壤紧实度不再显著增加,呈平缓稳定或缓慢下降趋势,其中 S1、S2 和 S3 处理紧实度较 S4 处理平均降低 22.0%、16.1% 和 27.5%,可能是下层土壤缺少了机械耕作的扰动,因此土壤紧实度较稳定。

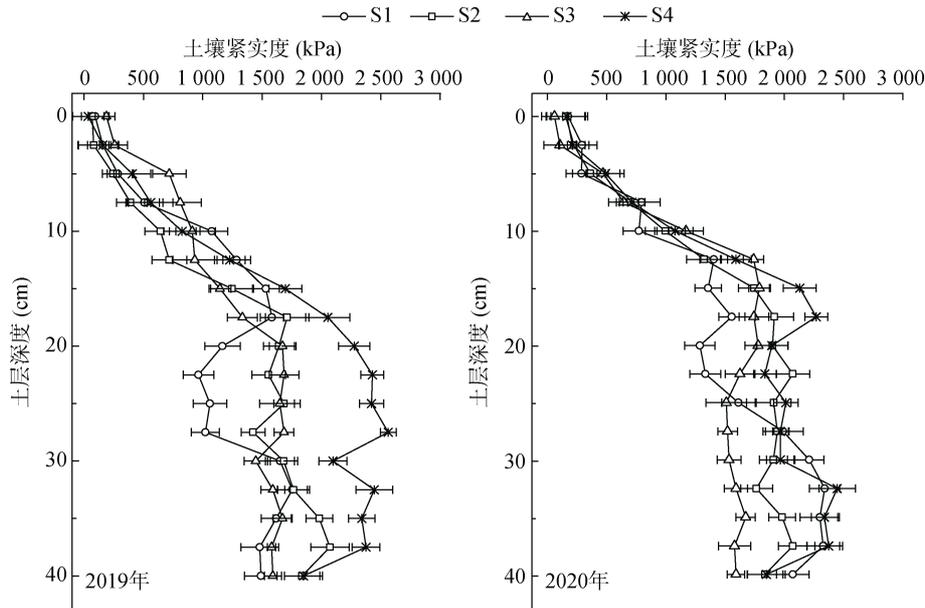


图 3 不同秸秆还田方式对土壤紧实度的影响

Fig. 3 Effects of different maize straw returning on soil compactness

2.2 秸秆还田配施化肥对土壤养分的影响

多因素交互结果表明(表 1),秸秆还田极显著影响了土壤有机质含量($P<0.001$),连续 2 a 试验结果均显示秸秆还田各处理有机质含量显著高于无秸秆处理($P<0.05$),两年分别平均提高 5.2% 和 21.1%。此外,施肥、秸秆与施肥交互均对有机质含量产生显著影响($P<0.01$)。多重比较结果显示,高氮量组合处理(F1、F2)的有机质含量显著高于 F4 处理,平均高出 2.8%~15.8%。另外,从表 1 还可以看出,秸秆还田配合高氮处理的有机质含量显著高于无秸秆低氮处理。

秸秆还田、施肥、秸秆还田与施肥交互对碱解氮和有效磷含量均产生了极显著影响($P<0.001$)。连续 2 a 试验结果表明, S1 和 S2 处理碱解氮含量较 S4 处理平均提高 2.5% 和 8.6%,且 2020 年差异达显著水平;秸秆还田各处理有效磷含量在 2020 年较 S4 处理提高了 10.8%~17.8%,其中 S1 和 S2 处理提高显著。

从施肥角度分析发现, F1 处理碱解氮和有效磷含量在 2 a 试验结果中均是最高,与其他施肥组合差异显著,其次是高氮低钾 F2 处理和低氮高钾 F3 处理,与 F4 处理差异亦达显著水平,说明在有秸秆还田的条件下需要适当地增加氮肥或钾肥的用量才能保证土壤中速效养分的扩充。

秸秆还田显著影响了土壤速效钾含量($P<0.05$),2020 年秸秆还田各处理的速效钾含量均显著高于无秸秆处理,平均提高 13.8%~20.6%;此外秸秆还田各处理中, S1 处理显著高于 S2 和 S3 处理,说明秸秆在深翻还田时扰动土壤能够促进速效钾的释放。施肥对速效钾含量的影响两年结果不相一致,2019 年有极显著影响($P<0.01$),但 2020 年无显著影响,可能与两年的气候和降雨量差异较大有关。秸秆还田和施肥的交互对速效钾含量有显著或极显著影响, S1F1 和 S2F1 处理较 S4F4 处理的速效钾含量均有显著提高($P<0.05$)。

表 1 秸秆还田与施肥对土壤养分的影响及交互作用
Table 1 Effects and interaction of straw returning and fertilization on soil nutrients

秸秆 还田	施肥	2019 年				2020 年			
		有机质 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	有机质 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
S1	F1	15.68 ± 0.13 ab	86.5 ± 1.33 a	22.8 ± 0.20 a	61.2 ± 0.04 a	20.78 ± 0.01 a	76.1 ± 2.17 b	29.4 ± 1.10 ab	76.2 ± 0.64 a
	F2	16.36 ± 0.07 a	77.1 ± 1.33 b	17.1 ± 0.11 c	53.2 ± 0.72 b	19.44 ± 1.07 a	69.6 ± 0.01bc	30.3 ± 0.65a	53.3 ± 0.05 c
	F3	15.73 ± 0.01 ab	87.8 ± 0.01 a	11.7 ± 0.01 e	55.5 ± 0.42 ab	16.26 ± 0.72 b	63.8 ± 0.04 c	26.0 ± 1.05 b	56.2 ± 0.1 c
	F4	15.16 ± 0.09 bc	78.1 ± 0.98 b	18.5 ± 0.65 b	55.2 ± 0.34 ab	15.85 ± 0.67 bc	60.1 ± 0.72 d	19.5 ± 0.65 cd	58.8 ± 1.13 c
S2	F1	15.19 ± 0.09 bc	90.4 ± 1.33 a	16.2 ± 0.10 cd	60.5 ± 0.60 a	21.31 ± 1.78 a	81.1 ± 1.45 a	32.7 ± 0.65 a	75.7 ± 1.42 a
	F2	15.49 ± 0.04 b	91.8 ± 1.33 a	15.7 ± 0.11cd	51.8 ± 0.98 b	19.62 ± 1.79 a	71.0 ± 1.45 bc	21.3 ± 0.15 c	50.7 ± 0.01 cd
	F3	15.02 ± 0.11 c	79.8 ± 2.66 b	11.9 ± 0.45 e	55.6 ± 2.68 ab	15.33 ± 0.58 c	69.6 ± 0.04 bc	27.8 ± 0.10 ab	56.5 ± 1.33 c
	F4	14.61 ± 0.05 cd	66.5 ± 0.02 d	14.5 ± 0.50 d	66.5 ± 1.34 a	17.28 ± 0.80 ab	76.8 ± 1.90 b	22.0 ± 1.50 c	55.8 ± 0.25 c
S3	F1	15.96 ± 0.01 a	75.8 ± 1.33 bc	18.8 ± 0.20 b	62.5 ± 0.73 a	17.68 ± 0.81 ab	68.1 ± 1.45 bc	33.7 ± 0.55 a	58.8 ± 3.24 c
	F2	15.40 ± 0.15 b	64.2 ± 1.02 d	18.9 ± 0.10 b	66.5 ± 1.03 a	16.38 ± 0.69 b	66.7 ± 1.81 c	28.0 ± 0.30 ab	56.2 ± 0.28 c
	F3	15.89 ± 0.07 a	65.8 ± 0.67 d	15.6 ± 0.32cd	49.8 ± 0.01 b	15.99 ± 1.02 bc	73.2 ± 0.72 b	18.8 ± 1.05 d	62.8 ± 0.02 b
	F4	15.67 ± 0.19ab	66.5 ± 0.01 d	16.6 ± 1.15 c	54.4 ± 0.89 b	15.16 ± 1.19 c	60.1 ± 0.72 d	18.5 ± 0.15 d	53.8 ± 1.70 c
S4	F1	15.31 ± 0.04 b	89.8 ± 0.67 a	23.7 ± 0.02 a	50.8 ± 8.61 b	16.29 ± 0.41 b	75.4 ± 1.45 b	26.4 ± 0.25 b	57.6 ± 0.79 c
	F2	15.18 ± 0.11 bc	84.5 ± 3.33ab	24.7 ± 0.40 a	43.8 ± 1.23 c	12.71 ± 0.74 d	73.2 ± 2.17 b	19.8 ± 0.55 cd	46.3 ± 0.25 d
	F3	14.02 ± 0.59 e	73.2 ± 2.66 c	11.6 ± 0.14 e	47.1 ± 0.47 bc	13.07 ± 0.02 d	74.6 ± 2.17 b	23.4 ± 0.85 c	49.0 ± 0.25 cd
	F4	14.45 ± 0.04 d	73.8 ± 2.01 c	14.5 ± 0.13 d	45.8 ± 0.97bc	15.99 ± 1.11bc	63.8 ± 1.45 c	19.8 ± 0.15 cd	50.6 ± 1.01 c
S1		15.73 ± 0.16 a	82.4 ± 1.85 a	17.5 ± 1.50 b	56.5 ± 1.13 b	18.08 ± 0.83 a	71.7 ± 1.90 b	26.3 ± 1.64 a	61.4 ± 3.29 a
S2		15.08 ± 0.12 b	82.1 ± 3.88 a	14.6 ± 0.63 c	58.6 ± 2.17 a	18.38 ± 1.00 a	74.6 ± 1.88 a	25.9 ± 1.78 a	59.7 ± 3.62 b
S3		15.72 ± 0.10 a	68.1 ± 1.75 b	17.5 ± 0.58 b	54.4 ± 2.50 c	16.30 ± 0.50 b	67.0 ± 1.87 c	24.7 ± 2.44 ab	57.9 ± 2.66 b
S4		14.74 ± 0.23 c	80.3 ± 2.82 a	18.6 ± 2.15 a	54.7 ± 1.92 c	14.52 ± 0.67 c	67.4 ± 2.32 c	22.3 ± 1.06 b	50.9 ± 1.71 c
	F1	15.53 ± 0.12 a	85.6 ± 2.26 a	20.4 ± 1.15 a	61.2 ± 2.40 a	19.02 ± 0.88 a	75.2 ± 1.87 a	30.5 ± 1.12 a	67.1 ± 3.43 a
	F2	15.61 ± 0.17 a	79.4 ± 3.93 b	19.1 ± 1.3 a	53.8 ± 3.11 b	17.04 ± 1.15 b	70.1 ± 1.16 b	24.8 ± 1.68b	51.6 ± 1.37 c
	F3	15.16 ± 0.30 ab	76.6 ± 3.15 b	12.7 ± 0.64 c	54.7 ± 1.30 b	15.16 ± 0.54 c	70.3 ± 1.64 b	24.0 ± 1.33b	56.4 ± 1.88 b
	F4	14.97 ± 0.19 b	71.2 ± 1.93 c	16 ± 0.68 b	54.5 ± 2.81 b	16.07 ± 0.47 bc	65.2 ± 2.67 c	19.9 ± 0.58c	54.8 ± 1.46 b
S		<0.0001***	<0.0001***	<0.0001***	<0.0001***	<0.0001***	<0.0001***	<0.0001***	0.022*
F		0.007**	<0.0001***	<0.0001***	0.003**	0.017*	<0.0001***	<0.0001***	ns
S×F		0.002**	<0.0001***	<0.0001***	0.003**	0.004**	<0.0001***	<0.0001***	0.013*

注：表中同列不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平处理间差异显著。S 表示秸秆还田处理，F 表示施肥处理，S×F 表示交互作用；* 表示达 $P < 0.05$ 显著水平，** 表示达 $P < 0.01$ 显著水平，*** 表示达 $P < 0.001$ 显著水平，ns 表示不显著。下同。

2.3 秸秆还田配施化肥对玉米产量及其构成的影响

从多因素交互作用结果(表 2)可以看出，2 a 试验结果中秸秆还田均对穗长有极显著性影响($P < 0.001$)，2019 年对穗粗和百粒重有极显著影响($P < 0.001$)，2020 年对秃尖长有显著性影响($P < 0.05$)。施肥均对穗长有极显著性影响($P < 0.05$)，对穗粗无影响。二者的交互作用在 2019 年对产量构成各因素均无显著影响，在 2020 年对穗粗和百粒重有显著性影响。多重比较结果表明，秸秆还田各处理的穗长和穗粗均高于无秸秆处理 0.6% ~ 4.6% 和 2.0% ~ 33.9%，其中 S1 和 S2 处理与 S4 处理差异达显著水平。从施肥角度分析发现，2019 年高氮量施肥处理能提高玉米穗长、

穗粗和百粒重，较低氮低钾的 F4 处理分别平均提高 2.8%、1.8% 和 2.6%，且 F1 和 F2 处理的穗长较 F4 处理增加差异显著，说明施肥可通过提高穗长来促进产量的形成。

从多因素交互作用结果还可以看出，秸秆还田、施肥和二者的交互作用对产量有极显著或显著性影响($P < 0.05$)。连续 2 a 试验结果表明(表 2)，秸秆还田各处理的产量均高于无秸秆还田处理，S1、S2 和 S3 处理比 S4 处理两年分别提高 17.2% 和 13.9%、9.8% 和 16.2%、7.3% 和 2.9%，其中 S1 和 S2 处理与 S4 处理差异达显著水平，主要是由于深耕秸秆还田后能够打破犁底层，增加耕层厚度，促进了玉米根系对下

表 2 秸秆还田与施肥对产量及其构成因素的影响及交互作用
Table 2 Effects and interaction of straw returning and fertilization on maize yield and its components

秸秆还田	施肥	2019 年						2020 年					
		穗长 (cm)	穗粗 (cm)	秃尖长 (cm)	百粒重 (g)	产量 (kg/hm ²)	穗长 (cm)	穗粗 (cm)	秃尖长 (cm)	百粒重 (g)	产量 (kg/hm ²)		
S1	F1	18.2 ± 0.47 b	3.65 ± 0.09 c	0.49 ± 0.15 b	34.4 ± 1.88 bc	10 778 ± 715 a	18.7 ± 0.29 a	4.73 ± 0.03 ab	0.07 ± 0.07 d	34.0 ± 0.41 ab	12 818 ± 227 ab		
	F2	18.3 ± 0.15 ab	3.66 ± 0.03 c	0.63 ± 0.4 ab	33.8 ± 0.67 c	9 719 ± 314 ab	18.1 ± 0.25 ab	4.73 ± 0.07 ab	0.33 ± 0.07 bc	32.6 ± 0.54 cd	11 803 ± 704 abc		
	F3	18.2 ± 0.23 b	3.64 ± 0.05 c	0.84 ± 0.31 a	33.7 ± 0.37 c	9 419 ± 468 b	18.3 ± 0.55 a	4.71 ± 0.06 b	0.23 ± 0.09 c	33.7 ± 0.35 b	11 398 ± 495 bcd		
	F4	17.0 ± 0.47 d	3.40 ± 0.09 c	0.87 ± 0.32 a	32.5 ± 0.43 de	7 363 ± 512 f	17.6 ± 0.12 b	4.77 ± 0.07 a	0.47 ± 0.24 b	35.4 ± 1.40 a	10 545 ± 723 de		
S2	F1	18.2 ± 0.10 b	3.64 ± 0.02 c	0.40 ± 0.15 b	33.1 ± 1.47 cd	9 149 ± 251 bc	18.2 ± 0.37 a	4.82 ± 0.06 a	0.27 ± 0.18 c	35.5 ± 0.33 a	11 638 ± 234 bc		
	F2	18.3 ± 0.03 ab	3.67 ± 0.01 c	0.70 ± 0.20 ab	35.3 ± 0.38 b	8 953 ± 307 bcd	17.6 ± 0.60 b	4.53 ± 0.03 cd	0.53 ± 0.27 b	34.6 ± 1.05 ab	13 041 ± 503 a		
	F3	18.4 ± 0.37 ab	3.68 ± 0.07 c	0.67 ± 0.09 ab	33.2 ± 0.27 cde	8 676 ± 450 cd	18.6 ± 0.34 a	4.73 ± 0.12 ab	0.20 ± 0.02 c	35.8 ± 0.25 a	11 696 ± 608 bc		
	F4	18.2 ± 0.30 b	3.64 ± 0.06 c	0.85 ± 0.29 a	35.8 ± 1.18 ab	7 336 ± 575 f	18.6 ± 0.17 a	4.77 ± 0.03 a	0.57 ± 0.32 b	34.4 ± 0.68 ab	11 153 ± 555 cd		
S3	F1	18.5 ± 0.12 ab	4.88 ± 0.06 a	0.67 ± 0.26 ab	37.3 ± 1.02 a	9 729 ± 320 ab	18.1 ± 0.19 ab	4.70 ± 0.10 b	0.80 ± 0.12 a	34.8 ± 0.72 ab	11 041 ± 503 cd		
	F2	18.7 ± 0.15 a	4.87 ± 0.04 a	1.20 ± 0.55 a	35.5 ± 0.64 b	9 342 ± 580 bc	17.6 ± 0.20 b	4.70 ± 0.06 b	0.30 ± 0.15 bc	33.2 ± 1.68 bc	9 317 ± 417 f		
	F3	18.6 ± 0.25 ab	4.97 ± 0.03 a	1.00 ± 0.21 a	36.7 ± 0.78 a	8 152 ± 579 cde	17.6 ± 0.38 b	4.67 ± 0.03 bc	0.70 ± 0.32 ab	32.0 ± 0.57 cd	10 906 ± 254 cd		
	F4	18.0 ± 0.06 bc	4.53 ± 0.37 ab	1.55 ± 0.51 a	35.8 ± 0.23 ab	7 708 ± 634 ef	17.6 ± 0.27 b	4.47 ± 0.07 d	1.00 ± 0.20 a	33.2 ± 0.82 bc	10 821 ± 446 cd		
S4	F1	18.2 ± 0.43 b	4.47 ± 0.36 ab	0.33 ± 0.23 b	35.3 ± 0.92 b	7 110 ± 274 f	18.5 ± 0.23 a	4.57 ± 0.07 cd	0.47 ± 0.29 b	33.5 ± 0.41 b	10 335 ± 132 de		
	F2	17.6 ± 0.33 cd	4.31 ± 0.35 b	0.17 ± 0.07 b	36.1 ± 0.78 ab	8 727 ± 454 bcd	17.7 ± 0.15 b	4.67 ± 0.07 bc	0.13 ± 0.07 c	32.9 ± 0.13 cd	10 156 ± 631 e		
	F3	17.7 ± 0.12 c	4.65 ± 0.12 ab	0.93 ± 0.48 a	34.1 ± 1.76 bc	8 143 ± 135 cde	16.9 ± 0.40 c	4.70 ± 0.12 b	0.73 ± 0.35 ab	34.7 ± 1.23 ab	10 086 ± 456 e		
	F4	17.7 ± 0.12 c	4.70 ± 0.06 ab	1.03 ± 0.27 a	32.4 ± 1.01 e	7 819 ± 372 de	17.0 ± 0.34 bc	4.90 ± 0.06 a	1.20 ± 0.31 a	30.2 ± 1.12 d	10 315 ± 677 de		
S1	F1	18.4 ± 0.11 a	4.81 ± 0.10 a	0.71 ± 0.15 a	33.6 ± 0.49 b	9 320 ± 434 a	18.2 ± 0.18 ab	4.73 ± 0.03 a	0.28 ± 0.07 b	33.9 ± 0.45 a	11 641 ± 347 a		
	F2	18.3 ± 0.11 ab	4.53 ± 0.12 b	0.65 ± 0.10 a	34.3 ± 0.56 b	8 733 ± 341 ab	18.3 ± 0.22 a	4.71 ± 0.04 a	0.39 ± 0.12 b	34.0 ± 0.74 a	11 882 ± 299 a		
	F3	17.9 ± 0.22 bc	3.66 ± 0.02 c	0.62 ± 0.17 a	36.4 ± 0.38 a	8 529 ± 278 b	17.7 ± 0.13 bc	4.63 ± 0.04 a	0.70 ± 0.12 a	33.3 ± 0.54 a	10 521 ± 275 b		
	F4	17.8 ± 0.14 c	3.59 ± 0.04 c	1.35 ± 0.40 a	34.5 ± 0.66 b	7 950 ± 226 c	17.5 ± 0.23 c	4.71 ± 0.05 a	0.63 ± 0.17 a	33.9 ± 0.42 a	10 223 ± 224 b		
S2	F1	18.3 ± 0.14 a	4.16 ± 0.18 a	0.57 ± 0.11 a	35.0 ± 0.75 a	9 191 ± 443 a	18.4 ± 0.10 a	4.70 ± 0.04 a	0.40 ± 0.10 b	34.5 ± 0.32 a	11 458 ± 260 a		
	F2	18.2 ± 0.15 a	4.13 ± 0.17 a	0.93 ± 0.42 a	35.2 ± 0.38 a	9 185 ± 215 a	17.7 ± 0.16 b	4.66 ± 0.03 a	0.33 ± 0.08 b	32.2 ± 0.57 b	11 079 ± 499 a		
	F3	18.2 ± 0.15 a	4.23 ± 0.18 a	0.86 ± 0.14 a	34.4 ± 0.59 a	8 598 ± 245 a	17.9 ± 0.27 b	4.70 ± 0.04 a	0.47 ± 0.14 b	34.1 ± 0.52 a	11 021 ± 272 a		
	F4	17.7 ± 0.19 b	4.07 ± 0.19 a	0.97 ± 0.19 a	34.2 ± 0.61 a	7 557 ± 236 b	17.8 ± 0.20 b	4.73 ± 0.05 a	0.81 ± 0.15 a	34.4 ± 0.49 a	10 709 ± 277 a		
S	0.009**	***	ns	0.003**	0.002**	0.009**	ns	0.037*	ns	***			
F	0.024*	ns	ns	ns	***	0.045*	ns	0.023*	0.002**	ns			
S×F	ns	ns	ns	ns	0.019*	ns	0.010*	ns	0.022*	0.033*			

层土壤养分的吸收,进而增加产量。施肥各处理产量顺序为 F1>F2>F3>F4,其中高氮处理 F1 和 F2 较低氮处理平均提高 3.7%~13.8%,差异达显著水平;高钾处理 F1 和 F3 较低钾处理平均提高 3.2%~6.3%,但差异不显著。另外,从整体上看, S1F1>S1F4、S2F1>S2F4、S3F1>S3F4,且差异均显著。

3 讨论

3.1 秸秆还田配施化肥对土壤物理性状的影响

秸秆还田后经腐解产生的腐殖质是土壤结构的胶结剂,能调控土壤团粒结构的形成^[16],从而间接改善土壤结构。与常规耕作相比,免耕虽然对土壤不产生扰动,但是土壤沉降作用已使土壤颗粒间排列比较紧实,再加上春种秋收时的机械压实,即使表层覆盖了秸秆,依然使土壤容重显著增加,尤其 0~20 cm 土壤容重增加了 21.6%~28.2%,这与徐莹莹等^[17]研究结果一致。土壤紧实度是评估土壤结构的一个重要指标,可用于表征土壤压实强度^[18]。本研究中虽然秸秆还田方式不同,但却都不同程度地缓解了土壤板结紧实的问题,且以深翻和深旋秸秆还田方式更优。深翻或深旋还田方式通过深耕作业楔入或混入秸秆改善了土壤松紧程度,提高了土壤孔隙度^[19],扩大了土壤水分的贮存空间,容纳更多的大气降水,加之秸秆本身的亲水性,使 0~20 cm 土层的田间持水量提高 22.2% 和 12.8%,紧实度降低了 20.3% 和 13.8%。对于 20 cm 以下土壤,通过深耕还田打破犁底层,利于水分传导与入渗,有效增加了相应土层土壤的田间持水量,有效预防田间径流的发生^[20],对于缓解研究区域内由年际间降水不均和年内降水分布不均而引起的季节性干旱具有十分重要的作用。

3.2 秸秆还田配施化肥对土壤养分的影响

秸秆中含有丰富的氮、磷、钾和各种微量元素等多种养分,还田后可为土壤补充部分外源有机物质,同时提高土壤中养分的有效性^[21]。已有研究表明,秸秆连续还田后耕层土壤有机质、全氮磷钾和速效氮磷钾含量均有显著增加^[22]。本研究也有相同结论,秸秆连续还田 3 a 后,有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量较无秸秆还田平均提高 21.2%、8.6%、15.0% 和 17.2%。土壤养分含量的增加与秸秆腐解释放养分有直接的关系,孙哲等^[23]、匡恩俊等^[24]已对玉米秸秆的养分释放情况做了相关研究。土壤有机质含量显著提升,一方面是由于秸秆还田后它本身就充当了碳源;另一方面,外源碳的持续加入激发了土壤微生物的活性和数量,加强了微生物矿化和固定程度,促进

了秸秆中碳在土壤中的固定和积累^[25]。因此,在本研究有机质和速效养分含量的显著增加,主要来源于玉米秸秆中的养分释放。此外,本研究还发现,在秸秆还田条件下,低施肥量处理的有机质和碱解氮含量低于高氮施肥处理,可能是由于低施肥量尤其是低氮量,导致玉米地上和根系生物量减少,地上部凋落物、根系及其分泌物进入土壤的量大大降低,有机碳的积累少、分解快^[26]。另外,玉米秸秆碳氮比较高,还田后亦需要大量微生物分解,缺氮导致秸秆腐解不完全,影响其养分释放,从而不利于土壤养分含量的积累。因此,本研究显示,秸秆还田的同时应配合大量氮肥的投入,更有利于秸秆腐解与有机养分的矿化,促进养分积累,实现土壤深层次培肥,这与宋佳杰等^[27]研究较为一致。

3.3 秸秆还田配施化肥对玉米产量的影响

关于秸秆还田配施化肥对玉米产量影响的研究很多,但不同土壤类型、气候区域所得结果存在差异。本研究结果表明,秸秆还田、施肥和二者的互作对玉米产量都有显著或极显著影响,秸秆还田处理均能提高玉米产量 2.9%~17.2%,且秸秆深翻和深旋处理产量提高显著,分析其原因应是深耕秸秆还田一方面将秸秆翻埋或深混于土中更有利于秸秆腐解释放它本身含有的丰富营养元素,从而补充和调节农田土壤养分^[28];另一方面,深翻/深旋秸秆还田改善土壤结构,有利于根系下扎生长,吸收更多的养分,从而提高玉米产量^[29]。另有研究表明,秸秆还田同时减少 10%~20% 化肥用量,仍能提高作物产量^[30-31]。而本文研究结果显示,秸秆还田只有与高氮量(210 kg/hm²)配施才能够显著提高玉米产量,施用低肥量有减产风险,主要原因可能是玉米秸秆还田后会引发土壤 C/N 比过高,出现土壤养分被微生物争夺,使作物前期缺肥,进而影响产量。本试验区土壤基础养分并不丰富,因此在秸秆还田时需要配合适量的氮肥才能更充分地激发和利用秸秆中的养分,达到培肥增产的目的。

4 结论

在本试验条件下及土壤和气候相近区域,施肥及田间管理相同的情况下,秸秆深翻或深旋还田显著降低土壤容重和土壤紧实度,增加田间持水量,有效改善土壤物理性状;同时配合 210 kg/hm² 氮肥和 90~120 kg/hm² 钾肥可显著提升土壤养分状况,同时提高春玉米产量,可见,该秸秆还田和施肥模式是辽宁棕壤区春玉米生产中比较理想的一种农艺措施,在农业发展中具有一定的应用和推广价值。

参考文献:

- [1] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 1-21.
- [2] 靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 等. 秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(8): 3985-3996.
- [3] 杨帆, 董燕, 徐明岗, 等. 南方地区秸秆还田对土壤综合肥力和作物产量的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(11): 3040-3044.
- [4] Bijay-Singh, Shan Y H, Johnson-Beebout S E, et al. Chapter 3 crop residue management for lowland rice-based cropping systems in Asia[M]//Advances in Agronomy. Amsterdam: Elsevier, 2008: 117-199.
- [5] Lu S G, Sun F F, Zong Y T. Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol)[J]. CATENA, 2014, 114: 37-44.
- [6] Hong C, Su Y, Lu S G. Phosphorus availability changes in acidic soils amended with biochar, fly ash, and lime determined by diffusive gradients in thin films (DGT) technique[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(30): 30547-30556.
- [7] 陈云峰, 夏贤格, 杨利, 等. 秸秆还田是秸秆资源化利用的现实途径[J]. 中国土壤与肥料, 2020(6): 299-307.
- [8] 徐嘉翼, 牛世伟, 安景文, 等. 基于秸秆还田条件下辽北地区适宜耕作方式及施肥量研究[J]. 玉米科学, 2018, 26(5): 102-109.
- [9] 隋鹏祥, 张文可, 梅楠, 等. 不同秸秆还田方式对春玉米产量、水分利用和根系生长的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 255-261.
- [10] 王旭东, 陈鲜妮, 王彩霞, 等. 农田不同肥力条件下玉米秸秆腐解效果[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 252-257.
- [11] Ichir L L, Ismaili M, Hofman G. Recovery of ^{15}N labeled wheat residue and residual effects of N fertilization in a wheat-wheat cropping system under Mediterranean conditions[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, 66(2): 201-207.
- [12] 姜超强, 郑青松, 祖朝龙. 秸秆还田对土壤钾素的影响及其替代钾肥效应研究进展[J]. 生态学杂志, 2015, 34(4): 1158-1165.
- [13] 宫明波, 王圣健, 李振清, 等. 麦玉两熟秸秆长期全量还田模式下氮肥对冬小麦生长发育、产量及品质的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(20): 7-14.
- [14] Chen Y L, Xin L, Liu J T, et al. Changes in bacterial community of soil induced by long-term straw returning[J]. Scientia Agricola, 2017, 74(5): 349-356.
- [15] 张丽, 张中东, 郭正宇, 等. 深松耕作和秸秆还田对农田土壤物理特性的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 102-106, 117.
- [16] Bucka F B, Kölbl A, Uteau D, et al. Organic matter input determines structure development and aggregate formation in artificial soils[J]. Geoderma, 2019, 354: 113881.
- [17] 徐莹莹, 刘玉涛, 王宇先, 等. 黑龙江省西部地区秸秆还田方式对土壤性状及玉米产量的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2021(10): 9-13.
- [18] Catania P, Badalucco L, Laudicina V A, et al. Effects of tilling methods on soil penetration resistance, organic carbon and water stable aggregates in a vineyard of semiarid Mediterranean environment[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(9): 348.
- [19] 邹文秀, 韩晓增, 严君, 等. 耕翻和秸秆还田深度对东北黑土物理性质的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 9-18.
- [20] 韩晓增, 邹文秀, 陆欣春, 等. 旱作土壤耕层及其肥力培育途径[J]. 土壤与作物, 2015, 4(4): 145-150.
- [21] Chen S Y, Zhang X Y, Shao L W, et al. Effects of straw and manure management on soil and crop performance in North China Plain[J]. CATENA, 2020, 187: 104359.
- [22] 严君, 韩晓增, 邹文秀, 等. 长期秸秆还田和施肥对黑土肥力及玉米产量的影响[J]. 土壤与作物, 2022, 11(2): 139-149.
- [23] 孙哲, 毕军, 夏光利, 等. 2种耕作方式下玉米还田秸秆养分释放特征研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(9): 133-136.
- [24] 匡恩俊, 迟凤琴, 张久明, 等. 不同耕作方式与有机物料配施后对土壤主要特性的影响[J]. 土壤与作物, 2019, 8(4): 395-404.
- [25] Liu X, Zhou F, Hu G Q, et al. Dynamic contribution of microbial residues to soil organic matter accumulation influenced by maize straw mulching[J]. Geoderma, 2019, 333: 35-42.
- [26] 袁嫚嫚, 邬刚, 胡润, 等. 秸秆还田配施化肥对稻油轮作土壤有机碳组分及产量影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 27-35.
- [27] 宋佳杰, 徐郗阳, 白金泽, 等. 秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(9): 4839-4847.
- [28] 王富华, 黄容, 高明, 等. 生物质炭与秸秆配施对紫色土团聚体中有机碳含量的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 929-939.
- [29] 成臣, 汪建军, 程慧煌, 等. 秸秆还田与耕作方式对双季稻产量及土壤肥力质量的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 247-257.
- [30] 裴雪霞, 党建友, 张定一, 等. 化肥减施下有机替代对小麦产量和养分吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(10): 1768-1781.
- [31] 张愉飞, 隋跃宇, 陈一民, 等. 秸秆还田条件下不同施氮水平对玉米产量及氮肥利用率的影响[J]. 土壤与作物, 2021, 10(4): 395-403.