

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.04.010

刘晓霞, 杨东. 秸秆还田方式对土壤质量和萝卜产量及品质的影响. 土壤, 2023, 55(4): 771–778.

秸秆还田方式对土壤质量和萝卜产量及品质的影响^①

刘晓霞¹, 杨东^{2*}

(1 浙江省耕地质量与肥料管理总站, 杭州 310020; 2 浙江省农业科学院农产品质量安全与营养研究所, 农产品质量安全危害因子与风险防控国家重点实验室, 杭州 310021)

摘要: 本文以萝卜(品种为枇杷叶)为研究对象, 采用田间试验探究了无秸秆还田(CK), 秸秆粉碎还田(SC)、过腹还田(SM)、炭化还田(SB)、粉碎+过腹还田(SC+SM)、粉碎+炭化还田(SC+SB)、过腹+炭化还田(SM+SB)对土壤理化性质和萝卜产量及品质的影响。结果表明, 6种秸秆还田方式均显著提高了土壤有机质和全氮含量, 但对土壤速效钾含量的影响不同, 其中SC、SM和SB 3种还田方式不影响土壤速效钾含量, 而SC+SM、SC+SB和SM+SB 3种秸秆组合还田方式显著提高了土壤速效钾含量; 不同秸秆还田方式对萝卜生物量和叶片叶绿素相对含量(SPAD值)的影响不同, 除SC+SM处理萝卜肉质根鲜物质量、叶片SPAD值显著低于对照外, 其他秸秆还田处理萝卜肉质根鲜物重量和叶片SPAD值均显著高于对照; 秸秆还田处理萝卜品质较对照显著提升, 6种秸秆还田处理萝卜维生素C、可溶性糖、总酚、类黄酮含量均显著高于对照, 且不同还田方式间无差异; 秸秆还田还显著降低了萝卜硝酸盐含量, 提高了可溶性蛋白含量, 其中SC+SM、SC+SB和SM+SB 3种秸秆组合还田处理表现突出, 硝酸盐含量降低36.04%~40.63%, 可溶性蛋白含量提升41.70%~56.11%; SC、SM和SB处理次之, 硝酸盐含量降低15.15%~22.58%, 可溶性蛋白含量提升16.61%~25.11%; 6种秸秆还田方式下萝卜铁离子还原能力(FRAP)显著高于对照, 但1, 1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基清除能力(DPPH)不同, 其中SM、SC+SM、SC+SB和SM+SB处理萝卜DPPH值显著高于对照, SC和SB处理萝卜DPPH值与对照接近。综上所述, 除SC+SM处理降低了萝卜产量外, SC、SM、SB、SC+SB、SM+SB等5个秸秆还田处理均提高了土壤肥力和作物产量、改善了产品品质, 其中SC+SB、SM+SB在降低萝卜硝酸盐含量方面表现尤为突出。考虑到操作的难易程度, 常规蔬菜生产中建议采用秸秆粉碎还田、过腹还田、炭化还田3种方式, 种植根菜、叶菜等硝酸盐高积累型蔬菜时建议采用粉碎+炭化还田、过腹+炭化还田2种秸秆组合还田模式。

关键词: 秸秆还田; 土壤质量; 萝卜产量; 品质

中图分类号: S-3 **文献标志码:** A

Effects of Straw Return on Soil Properties, Yield and Quality of Radish (*Raphanus sativus* L.)

LIU Xiaoxia¹, YANG Dong^{2*}

(1 Cultivated Land Quality and Fertilizer Administration Station of Zhejiang Province, Hangzhou 310020, China; 2 State Key Laboratory for Managing Biotic and Chemical Threats to the Quality and Safety of Agro-Products, Institute of Agro-Product Safety and Nutrition, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

Abstract: The effects of different straw return treatments, including no straw (CK), straw crushed (SC), straw manure (SM), straw biochar (SB), straw crushed+straw manure (SC+SM), straw crushed+straw biochar (SC+SB), and straw manure+straw biochar (SM+SB) on soil properties, yield and quality of radish (*Raphanus sativus* L.) were studied by field experiments. The results showed that all straw return treatments significantly increased the contents of soil organic matter and total nitrogen, but had different effects on the content of soil available potassium, among them, SC+SM, SC+SB and SM+SB significantly increased the content of soil available potassium while SC, SM and SB had no effects. Straw return had different effects on biomass and SPAD value of radish, which were significantly lower under SC+SM while significantly higher under other straw

①基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2021C03025)、浙江省“三农九方”科技协作计划项目(2022SNJF024)和浙江省废弃生物质循环利用与生态处理技术重点实验室开放基金项目(2021REWB01)资助。

* 通讯作者(yangdong101991@163.com)

作者简介: 刘晓霞(1986—), 女, 山东胶州人, 博士, 高级农艺师, 主要研究方向为土壤改良培肥、科学施肥技术推广。E-mail: 10914048@zju.edu.cn

return treatments than CK. The quality of radish after straw return was significantly improved compared with CK, the contents of vitamin C, soluble sugar, total phenol and flavonoid of radish treated with straw return were significantly higher than CK, and there was no difference among the straw return treatments. Straw return significantly reduced nitrate content and increased soluble protein content of radish, among them, the effects of SC+SM, SC+SB and SM+SB were more prominent, with nitrate content reduced by 36.04%–40.63% while soluble protein content increased by 41.70%–56.11%; followed by SC, SM and SB, nitrate content decreased by 15.15%–22.58% while soluble protein content increased by 16.61%–25.11%. Radish FRAP values of straw return were significantly higher than CK, but DPPH values were different, among them, DPPH values of radish were significantly higher under SM, SC+SM, SC+SB and SM+SB than CK, while DPPH values of radish in SC and SB were close to CK. SC, SM, SB, SC+SB and SM+SB all improved soil fertility, crop yield and product quality, among them, SC+SB and SM+SB were better in reducing radish nitrate content. In conclusion, SC, SM and SB were recommended for conventional vegetable production, while SC+SB and SM+SB recommended for vegetables with high nitrate accumulation, such as leafy vegetables.

Key words: Straw return; Soil quality; Radish yield; Vegetable quality

我国秸秆资源丰富,近年来秸秆年均产量高达 9 亿 t, 占全球总产量的 30% 左右^[1]。秸秆还田作为其综合利用的主要方式,既能缓解土壤退化、提高土壤肥力水平、改善土壤理化性质、增加作物产量、提升蓄水保墒能力^[2-3],又可减轻焚烧、堆积对生态环境的负面影响,是实现秸秆资源高效利用和农业绿色可持续发展的有效措施^[4-5]。

科学合理的秸秆还田技术是发挥秸秆养分潜力的基础^[6]。当前,我国秸秆还田主要有粉碎还田、过腹还田和炭化还田 3 种方式^[2]。粉碎还田是最为常见的秸秆利用途径,可显著提高土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾等养分含量,增加土壤孔隙度,降低土壤容重^[7-8],但存在分解缓慢、化感物质积累、病虫害加重等风险^[9]。秸秆过腹还田是指将秸秆作为饲料喂家禽,产生的粪便经处理后转化为有机肥还田,过腹还田可有效避免上述问题,但用量较大,施肥成本较高,长期施用条件下存在土壤重金属累积风险^[10]。近年来,秸秆炭化还田作为新型秸秆还田方式日益受关注。研究认为,秸秆炭化还田在土壤改良、增产培肥等方面优势突出^[11-12],是生态系统极具潜力的秸秆资源利用方式^[13]。

目前,秸秆主要还田方式(粉碎还田、过腹还田、炭化还田)对作物产量、耕地质量的影响均有报道,但较少涉及秸秆还田方式效应效果的比较研究;此外,我国农业发展已经由单纯的追求产量逐步向“量质并重”发展,但以往的研究主要集中在秸秆还田对作物产量的影响,关于对营养成分、生物活性物质和抗氧化能力等品质指标方面影响的探索相对较少。因此,本研究基于田间试验,采用等养分试验设计比较了秸秆还田方式对耕地质量、作物产量及品质的影响,以期对秸秆还田最佳方式的筛选提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验时间为 2021 年,试验地点位于浙江大学农业科学试验站长兴分站(119°38'25"E, 30°53'45"N)。该地区属于亚热带季风气候,年均气温 12 ~ 17 °C,年日照时数 1 613 ~ 2 430 mm,种植模式为稻-菜轮作。供试土壤类型为潮土,耕层土壤(0 ~ 20 cm)pH 为 5.99,有机质含量为 20.08 g/kg,土壤全氮、全磷和全钾含量分别为 2.95、0.39 和 3.45 g/kg。

1.2 田间试验设计

采用等养分田间试验,设置无秸秆还田(CK)、粉碎还田(SC)、过腹还田(SM)、炭化还田(SB)、粉碎还田+过腹还田(SC+SM)、粉碎还田+炭化还田(SC+SB)、过腹还田+炭化还田(SM+SB)共 7 个处理,每个处理 3 次重复;各处理随机排列,每个试验小区面积 6.84 m²(3.6 m×1.9 m)。其中,SC 处理秸秆用量为 4 500 kg/hm²;根据秸秆用量一致原则,确定 SM 处理秸秆有机肥用量为 2 475 kg/hm²(秸秆过腹转化系数约为 0.55)^[14],SB 处理秸秆生物质炭用量为 1 500 kg/hm²(水稻秸秆炭化转化系数按 1/3 计)^[15];组合处理中秸秆还田量翻倍,即 SC+SM 处理为 4 500 kg/hm²秸秆和 2 475 kg/hm²秸秆有机肥,SC+SB 处理为 4 500 kg/hm²秸秆和 1 500 kg/hm²秸秆生物质炭,SM+SB 处理为 2 475 kg/hm²秸秆有机肥和 1 500 kg/hm²秸秆生物质炭。播种前 7 d,秸秆、有机肥和生物质炭均匀撒施,并翻耕入土。不同秸秆还田方式所用物料养分含量见表 1。

供试萝卜 (*Raphanus sativus* L.)品种为“枇杷叶”,购自浙江省种子公司。萝卜常规产量约 30 000 kg/hm²,以此确定 N、P₂O₅ 和 K₂O 用量分别为

表1 供试材料基本养分含量
Table 1 Basic nutrient contents of tested materials

处理	供试材料	pH	有机碳(g/kg)	N(g/kg)	P ₂ O ₅ (g/kg)	K ₂ O(g/kg)
SC	秸秆	6.85	368.2	21.9	3.0	20.6
SM	有机肥	8.72	728.4	52.5	22.8	16.3
SB	生物质炭	9.48	456.2	16.1	4.2	29.8

360、120 和 240 kg/hm²。秸秆、秸秆有机肥、秸秆生物质炭按设计量还田,其他 N、P₂O₅ 和 K₂O 养分均由化肥提供,且保证 7 种不同处理间养分供应量相同。供试化肥为尿素(N 46%)、钙镁磷肥(P₂O₅ 15%)和氯化钾(K₂O 60%),播种前 7 d 施用钙镁磷肥和氯化钾,播种前施用尿素,肥料全部做基肥,不追肥。萝卜株行距为 5 cm × 8 cm,田间管理方式按照当地萝卜常规生产技术标准统一执行。

1.3 样品采集与分析

成熟前各处理选取 5 株萝卜叶片,在叶片相同部位测定叶绿素相对含量 SPAD 值;成熟期各处理选取长势均匀的 3 株萝卜冲洗干净后擦干水分,分别测定肉质根(可食用部分)鲜物质量和地上部生物量,各处理数值以平均值表示。成熟期测定萝卜肉质根硝酸盐、维生素 C、可溶性糖、可溶性蛋白、总酚和类黄酮含量。采收后,五点采样法收集各处理 0 ~ 20 cm 耕层土壤,常温避光风干并去除杂物和植物残体后过 2 mm 筛用于测定土壤 pH 以及土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾含量。

硝酸盐含量采用水杨酸法测定,维生素 C 含量采用 2,6-二氯酚法测定,可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定,可溶性蛋白含量采用 Bradford 法测定,总酚含量采用 Folin-Ciocalteu 法测定,类黄酮含量采

用检测试剂盒法测定,抗氧化能力采用 DPPH 和 FRAP 法测定,叶片 SPAD 值采用叶绿素测定仪 (SPAD-502)测定;土壤 pH 采用电位计法测定,土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定,全氮含量采用凯氏定氮法测定,有效磷含量采用钼锑抗比色法测定,速效钾含量采用火焰光度计法测定^[16]。

1.4 数据统计分析

采用 DPS 2000 软件进行方差分析(ANOVA)和统计分析,处理间显著性差异采用 Duncan's 新复极差法进行检验($P < 0.05$),采用 Origin 8.5 软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田方式对土壤理化性质的影响

分析萝卜采收后各处理土壤理化性质指标,结果如表 2 所示,不同秸秆还田方式均显著提高了土壤有机质和全氮含量,分别较 CK 处理增加了 5.84% ~ 10.80% 和 4.17% ~ 8.97% ($P < 0.05$),但对土壤 pH 和有效磷含量无影响 ($P > 0.05$);不同秸秆还田方式对土壤速效钾含量的影响不同,SC、SM 和 SB 3 种秸秆单一还田方式不影响土壤速效钾含量,而 SC+SM、SC+SB 和 SM+SB 3 种秸秆组合还田方式显著提高了土壤速效钾含量,分别较 CK 提高 17.39%、14.79% 和 13.17%。

表2 秸秆还田方式对土壤 pH 和养分含量的影响
Table 2 Effects of straw return treatments on soil pH and nutrient contents

处理	pH	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
CK	5.92 ± 0.17 a	21.57 ± 0.74 c	6.24 ± 0.10 b	16.89 ± 1.00 a	115.45 ± 9.30 bc
SC	5.73 ± 0.02 a	23.07 ± 0.22 b	6.75 ± 0.11 a	16.30 ± 1.18 a	104.96 ± 5.42 c
SM	5.89 ± 0.18 a	22.83 ± 0.97 b	6.50 ± 0.19 a	17.07 ± 1.42 a	127.12 ± 1.83 ab
SB	5.84 ± 0.17 a	22.84 ± 0.26 b	6.74 ± 0.26 a	17.77 ± 0.70 a	123.60 ± 12.14 ab
SC+SM	5.80 ± 0.17 a	23.90 ± 0.20 a	6.80 ± 0.20 a	17.06 ± 1.48 a	135.53 ± 1.92 a
SC+SB	5.85 ± 0.15 a	23.15 ± 0.32 b	6.75 ± 0.23 a	16.52 ± 0.98 a	132.52 ± 0.98 a
SM+SB	5.92 ± 0.07 a	23.42 ± 0.40 ab	6.60 ± 0.22 a	16.87 ± 1.15 a	130.66 ± 4.27 a

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

2.2 秸秆还田方式对萝卜生物量和 SPAD 值的影响

由表 3 可知,不同秸秆还田方式对萝卜肉质根鲜物质量的影响不同,除 SC+SM 处理肉质根鲜物质量显著低于 CK 外,其他秸秆还田方式均显著提高了肉

质根鲜物质量 ($P < 0.05$),提高幅度为 10.24% ~ 18.54%。萝卜地上部生物量测定结果显示,除 SC+SM 处理地上部生物量显著低于 CK,其他处理地上部生物量与 CK 均无差异 ($P > 0.05$)。植物叶片 SPAD 值可间接反

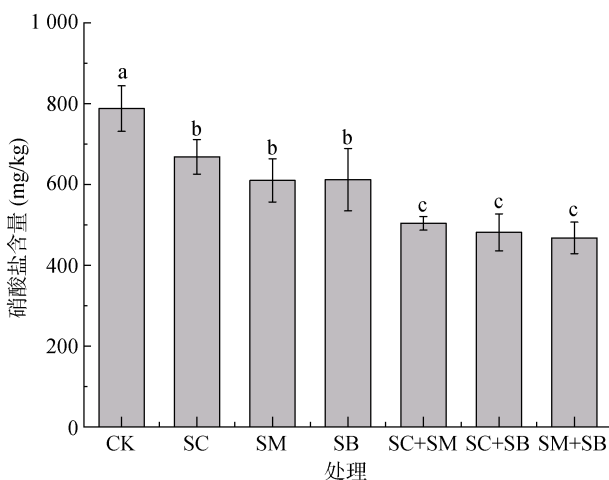
表 3 秸秆还田方式对萝卜生物量和 SPAD 值的影响
Table 3 Effects of straw return treatments on radish biomass and SPAD values

处理	肉质根鲜物质量 (g/plant)	地上部生物量 (g/plant)	SPAD 值
CK	10.84 ± 0.57 b	15.56 ± 0.43 a	32.21 ± 0.34 b
SC	12.08 ± 0.47 a	14.90 ± 0.53 a	33.68 ± 1.11 a
SM	12.85 ± 0.58 a	14.84 ± 0.93 a	33.79 ± 0.68 a
SB	12.74 ± 0.45 a	15.16 ± 1.15 a	34.79 ± 0.83 a
SC+SM	8.19 ± 0.89 c	9.19 ± 1.55 b	29.43 ± 1.11 c
SC+SB	12.31 ± 0.34 a	14.58 ± 1.02 a	33.58 ± 0.98 a
SM+SB	11.95 ± 0.36 a	15.83 ± 1.74 a	33.94 ± 0.82 a

映植物叶绿素相对含量高低和光合作用水平,是评价植物长势的有效指标。结果表明,除 SC+SM 处理萝卜叶片 SPAD 值显著低于 CK 外,其他秸秆还田方式叶片 SPAD 值显著高于 CK(提高 4.25% ~ 8.01%, $P < 0.05$),表现出不同程度的生长优势。

2.3 秸秆还田方式对萝卜硝酸盐含量的影响

蔬菜硝酸盐含量是影响人体健康的重要因素^[17],施肥是调节蔬菜硝酸盐含量的有效措施^[18]。由图 1 可知,秸秆还田处理均显著降低了萝卜硝酸盐含量,其中秸秆还田组合处理(SC+SM、SC+SB、SM+SB)萝卜硝酸盐含量最低,分别较 CK 降低 36.04%、38.83% 和 40.63%; SC、SM 和 SB 等 3 种单一秸秆还田处理硝酸盐含量次之,分别较 CK 降低 15.15%、22.58% 和 22.32%。



(图中小写字母不同表示处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平,下同)

图 1 秸秆还田方式对萝卜硝酸盐含量的影响

Fig. 1 Effects of straw return treatments on nitrate accumulation in radish

2.4 秸秆还田方式对萝卜品质的影响

维生素 C、可溶性糖和可溶性蛋白含量是衡量作物营养品质的重要指标,其含量高低决定蔬菜营养价

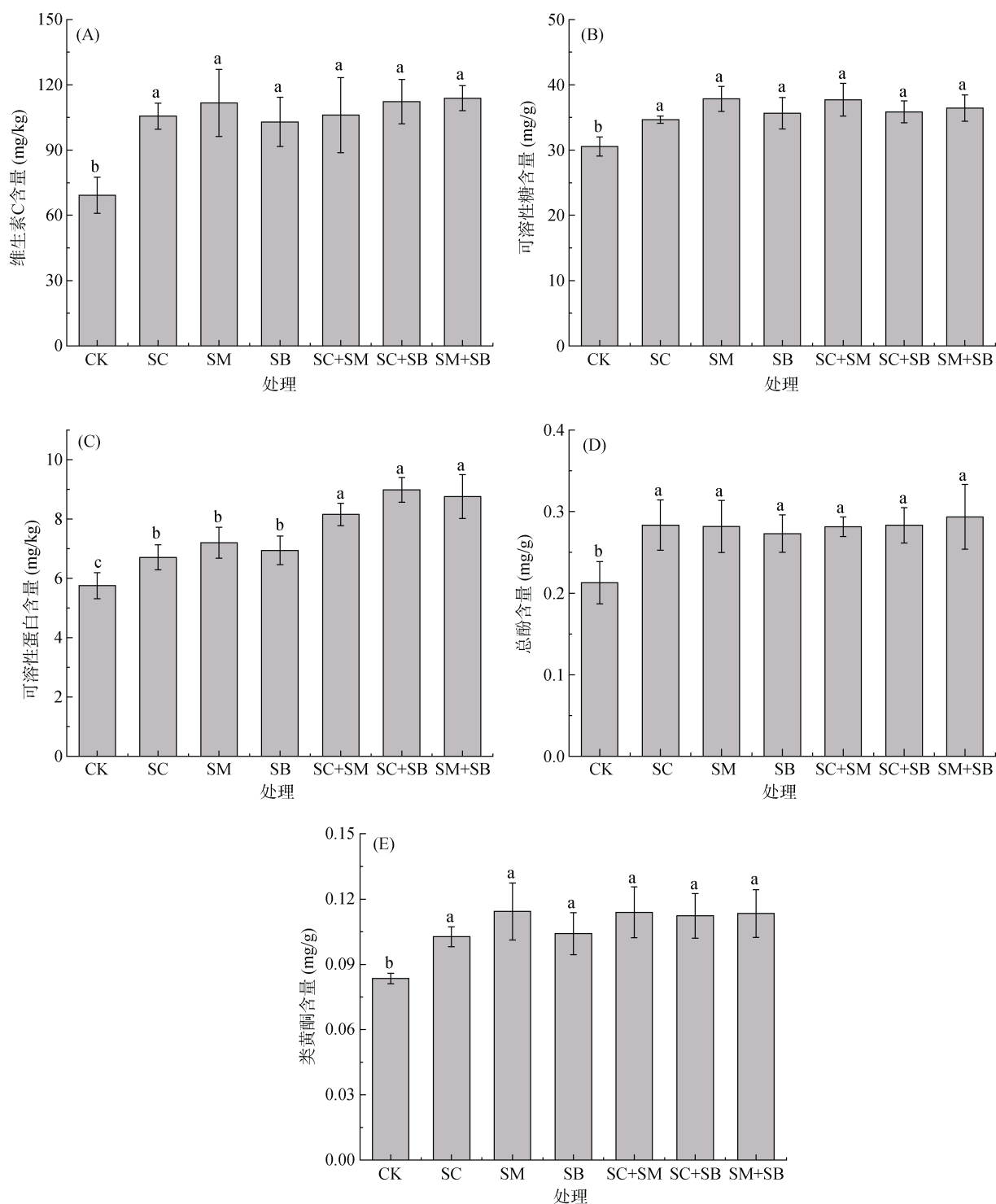
值,而总酚和类黄酮等活性物质具有抗氧化等生理保健功能,共同影响蔬菜的品质及其商品价值。由图 2A~2C 可见,秸秆还田显著提高了萝卜肉质根维生素 C、可溶性糖和可溶性蛋白含量,分别较 CK 提高了 48.65% ~ 64.38%、13.42% ~ 23.93% 和 16.61% ~ 56.09% ($P < 0.05$); 不同秸秆还田处理间萝卜肉质根维生素 C 和可溶性糖含量无差异,但秸秆组合还田处理(SC+SM、SC+SB 和 SM+SB)可溶性蛋白含量显著高于秸秆单一还田处理(SC、SM 和 SB) ($P < 0.05$)。由图 2D、2E 可知,秸秆还田提高了萝卜中总酚和类黄酮含量,较 CK 处理分别显著提高了 28.26% ~ 37.90% 和 23.04% ~ 36.96% ($P < 0.05$),但不同秸秆处理间差异均不显著 ($P > 0.05$)。

2.5 秸秆还田方式对萝卜抗氧化能力的影响

摄取食物中的天然抗氧化物质是提升人体抗氧化能力的重要途径^[19]。DPPH 和 FRAP 值是表征抗氧化能力的有效方式, DPPH 可反映自由基清除能力, FRAP 值常用来反映样品总抗氧化能力。秸秆还田显著影响萝卜 FRAP 值,6 种秸秆还田处理 FRAP 值较 CK 提高 27.40% ~ 44.23% ($P < 0.05$); 但处理间 DPPH 值不同,其中 SM、SC+SM、SC+SB 和 SM+SB 等 4 种秸秆还田模式萝卜 DPPH 值显著高于 CK, SC 和 SB 处理萝卜 DPPH 值与 CK 接近(图 3)。

3 讨论

秸秆是农田土壤有机质的重要来源,前人研究发现,秸秆粉碎还田、过腹还田及炭化还田均可有效提高土壤有机质含量^[20-21]。但也有研究认为大量秸秆直接还田时,短时间内无法腐烂分解成为有机质,易造成耕作障碍、发芽率降低、病虫害增加等一系列负面影响^[22]。为实现秸秆资源合理利用,本文探讨了不同秸秆还田方式对土壤质量和作物生长的影响。研究结果发现,秸秆粉碎还田、过腹还田、炭化还田及不同组合还田处理下,土壤有机质含量均显著高于无秸秆还田,主要是由于秸秆粉碎或过腹还田后促进了土壤微生物大量繁殖,形成土壤微生物活动层,加速了对有机态养分的分解,进而提高了土壤有机质含量^[23]。秸秆炭化还田是粉碎还田和过腹还田的有效补充,一方面秸秆生物质炭吸附土壤有机分子,并通过催化活性促进有机小分子聚合形成土壤有机质^[24];另一方面秸秆炭具有疏松多孔的结构,为土壤微生物栖息、生长和繁殖提供了重要场所,进而促进了土壤有机物质的分解和土壤有机质的形成^[25]。



(A. 维生素 C 含量; B. 可溶性糖含量; C. 可溶性蛋白含量; D. 总酚含量; E. 类黄酮含量)

图 2 秸秆还田方式对萝卜品质的影响

Fig. 2 Effects of straw return treatments on radish quality

秸秆中含有大量氮、磷、钾等营养元素，可有效提高土壤养分指标^[14, 20]。本研究发现，不同秸秆还田方式土壤全氮含量均显著高于对照，但有效磷含量与对照接近，主要是由于磷素养分总投入为 120 kg/hm²，仅为氮肥的 1/3、钾肥的 1/2，磷素不仅投入总量相对较

低，且磷肥施入土壤后大部分(90% 以上)以难溶态形式存在，仅有少量为有效磷，因此，土壤养分检测数据显示不同处理间土壤有效磷含量无差异。土壤速效钾含量的高低与秸秆还田方式有关(表 2)，秸秆还田后养分的释放主要依靠微生物分解作用，秸秆为

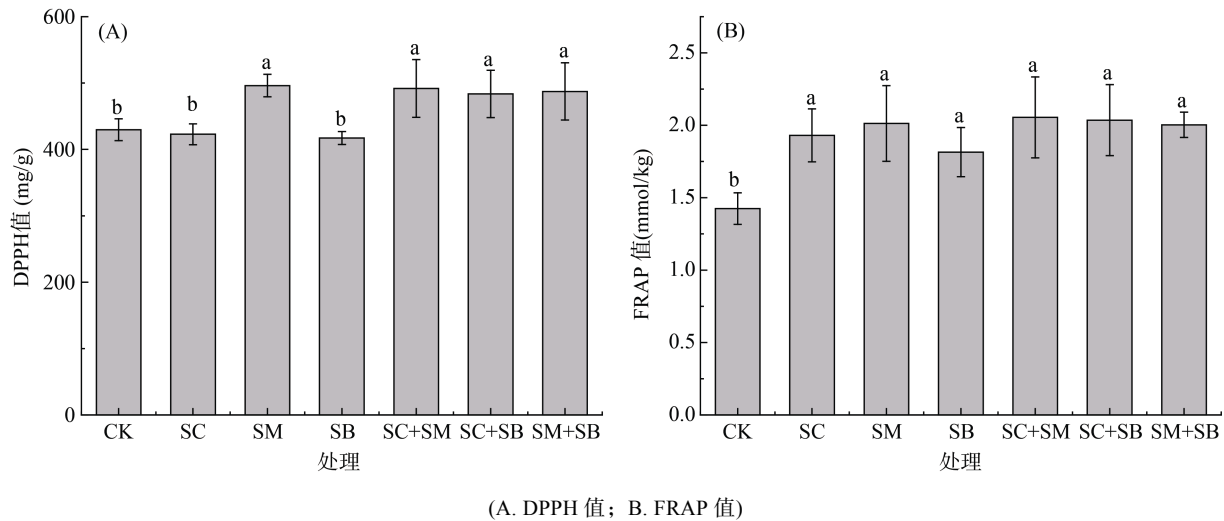


图 3 秸秆还田方式对萝卜抗氧化能力指标的影响

Fig. 3 Effects of straw return treatments on antioxidant capacity of radish

微生物提供养分并对土壤微生物群落演替起到一定的定向选择功能^[26-27],可能导致部分分解固定钾元素的微生物在秸秆组合还田方式中活性更强,因而秸秆组合还田方式在土壤速效钾增加效果方面更为显著。此外,组合还田对微生物的生长也有较好的促进作用,也可能是速效钾增加的又一重要因素。秸秆还田处理下土壤 pH 出现微弱降低趋势,可能主要是由于秸秆还田提高了土壤微生物数量和活性,导致大量有机酸的产生所致,这与刘美艳^[28]的研究结果一致。

早期,曾木祥等^[29]对全国 19 个省市 107 份秸秆还田试验进行归纳发现秸秆直接还田有较好的增产效果,秸秆过腹还田可提高小麦-玉米轮作体系作物的产量水平^[14],而秸秆炭化还田也有利于作物产量的增加^[30]。本研究发现,在养分供应一致条件下,粉碎还田+过腹还田处理萝卜生物量显著低于对照,其他秸秆还田处理下萝卜生物量均显著高于对照,可能是由于上述秸秆还田方式增加了土壤有机质、全氮等植物生长必需元素的含量(表 2),提高了叶绿素相对含量水平(表 3),促进叶片的光合作用,进而提高了萝卜产量。秸秆粉碎还田+过腹还田处理萝卜产量不增反降,一方面可能是由于还田生物量较大,耕层土壤间隙大,影响了萝卜种子生根发芽;另一方面大量的秸秆和过腹有机肥均需要微生物分解,而微生物在高速代谢和大量繁殖过程中必然与作物争夺氮源,影响萝卜长势和产量。

硝酸盐是致癌物亚硝胺的前体,易引发肠胃癌等疾病,其含量的高低是衡量蔬菜品质的重要指标^[31]。本研究发现,秸秆炭化还田处理萝卜硝酸盐含量降低 20% 以上,这与前人在菠菜、番茄、辣椒等蔬菜上

的研究结果基本一致^[32-34]。这可能是由于生物质炭具有丰富孔隙结构和较高电荷密度,能够固持、缓释土壤部分有效态氮,减少根系附近硝态氮的积累,降低硝态氮的吸收,进而降低植物体硝酸盐的合成和积累^[35]。此外,其他不同秸秆还田方式也可降低萝卜肉质根硝酸盐含量,主要是由于秸秆在微生物作用下转化成有机物质,而大量田间试验证实有机物质具有降低硝酸盐含量的作用^[36]。

维生素 C、可溶性糖、可溶性蛋白、总酚和类黄酮含量是衡量蔬菜品质的重要指标,前人研究发现添加生物质炭可提高小白菜、菠菜等蔬菜维生素 C、可溶性糖和可溶性蛋白的含量^[33, 37],施用有机肥菠菜维生素 C、可溶性蛋白及可溶性糖含量分别提高 30%、20% 和 18%^[35]。本研究发现,不同秸秆还田方式均有效提高了萝卜可食部位维生素 C、可溶性糖、可溶性蛋白、总酚和类黄酮含量,这可能是由于还田物质富含有机碳和作物生长所需的营养元素(表 1),其输入可提高土壤养分含量(表 3),进而促进植株体内营养物质和功能性活性物质的合成和积累,并直接或间接提高作物的抗氧化能力。

DPPH 和 FRAP 是体外评价活性物质抗氧化能力的常用方法,前人研究发现有机无机配施可提高作物抗氧化能力和自由基清除能力^[38],50% 的有机肥配施 50% 的化肥具有最佳的抗氧化成分积累效果^[39]。本研究发现,秸秆还田处理均有效提高了萝卜可食部位 FRAP 值,但秸秆粉碎还田和炭化还田处理下 DPPH 值与对照相比差异不显著,可能是由于粉碎还田和炭化还田有机肥替代比例不高,低剂量的有机肥配施化肥对萝卜可食部位 DPPH 值的影响不大。

4 结论

秸秆粉碎还田、过腹还田、炭化还田、粉碎+炭化还田、过腹+炭化还田等5种秸秆还田方式均表现出较好的地力培肥、产量提升、品质改善效果, 其中粉碎+炭化还田、过腹+炭化还田在降低硝酸盐积累、提升可溶性蛋白含量方面表现尤为突出, 但鉴于秸秆粉碎还田+炭化还田、过腹还田+炭化还田2种秸秆组合还田模式操作较为繁琐, 可用于根菜、叶菜等硝酸盐高积累型蔬菜的生产, 其他蔬菜的生产可采用简便易操作的粉碎还田、过腹还田及炭化还田模式。

参考文献:

- [1] 石祖梁, 贾涛, 王亚静, 等. 我国农作物秸秆综合利用现状及焚烧碳排放估算[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(9): 32-37.
- [2] 李一, 王秋兵. 我国秸秆资源养分还田利用潜力及技术分析[J]. 中国土壤与肥料, 2020(1): 119-126.
- [3] 周子军, 郭松, 陈琨, 等. 长期秸秆覆盖对免耕稻-麦产量、土壤氮组分及微生物群落的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 1148-1159.
- [4] Berhane M, Xu M, Liang Z Y, et al. Effects of long-term straw return on soil organic carbon storage and sequestration rate in North China upland crops: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(4): 2686-2701.
- [5] 赵颖, 周枫, 罗佳琳, 等. 水稻秸秆还田配施肥料对小麦产量和氮素利用的影响[J]. 土壤, 2021, 53(5): 937-944.
- [6] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 526-535.
- [7] 吴鹏年, 王艳丽, 侯贤清, 等. 秸秆还田配施氮肥对宁夏扬黄灌区滴灌玉米产量及土壤物理性状的影响[J]. 土壤, 2020, 52(3): 470-475.
- [8] 张奇, 陈燦, 陈效民, 等. 不同秸秆还田深度对黄棕壤土壤物理性质及其剖面变化的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(2): 308-314.
- [9] 赵绪生, 齐永志, 闫翠梅, 等. 小麦、玉米两熟秸秆还田土壤中6种有机酸对小麦纹枯病的化感作用[J]. 中国农业科学, 2020, 53(15): 3095-3107.
- [10] 叶雪珠, 肖文丹, 赵首萍, 等. 浙江省商品有机肥中重金属含量变化趋势及风险管控对策[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(5): 954-965.
- [11] 王昆艳, 官会林, 卢俊, 等. 生物质炭施用量对旱地酸性红壤理化性质的影响[J]. 土壤, 2020, 52(3): 503-509.
- [12] 孙宁婷, 王小燕, 周豪, 等. 生物质炭种类与混施深度对紫色土水分运移和氮磷流失的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 722-732.
- [13] 张璐, 董达, 平帆, 等. 逐年全量秸秆炭化还田对水稻产量和土壤养分的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2319-2326.
- [14] 赵凌霄, 姜丽娜, 马建辉, 等. 秸秆过腹还田配施氮肥对小麦-玉米周年产量及土壤理化性质的影响[J]. 河南农业科学, 2020, 49(11): 26-36.
- [15] 顾美英, 唐光木, 葛春辉, 等. 不同秸秆还田方式对和田风沙土壤微生物多样性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(4): 489-498.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] Mehri F, Heshmati A, Moradi M, et al. The concentration and health risk assessment of nitrate in vegetables and fruits samples of Iran[J]. *Toxin Reviews*, 2021, 40(4): 1215-1222.
- [18] Liu X Q, Ko K Y, Kim S H, et al. Effect of amino acid fertilization on nitrate assimilation of leafy radish and soil chemical properties in high nitrate soil[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2007, 39(1/2): 269-281.
- [19] 许馨. 烘焙条件对油茶籽油抗氧化活性成分的影响及其机制研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021.
- [20] 张叶叶, 莫非, 韩娟, 等. 秸秆还田下土壤有机质激发效应研究进展[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1381-1392.
- [21] Fang Q, Wang Y Z, Uwimpaye F, et al. Pre-sowing soil water conditions and water conservation measures affecting the yield and water productivity of summer maize[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 245: 106628.
- [22] 季陆鹰, 葛胜, 郭静, 等. 作物秸秆还田的存在问题及对策[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(6): 342-344.
- [23] 王应, 袁建国. 秸秆还田对农田土壤有机质提升的探索研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2007, 27(S2): 120-121, 126.
- [24] 勾芒芒, 屈忠义. 生物炭对改善土壤理化性质及作物产量影响的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2013(5): 1-5.
- [25] 董炜华, 李晓强, 宋扬. 土壤动物在土壤有机质形成中的作用[J]. 土壤, 2016, 48(2): 211-218.
- [26] 高永祥, 李若尘, 张民, 等. 秸秆还田配施控释掺混尿素对玉米产量和土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1507-1519.
- [27] 郭振威, 李永山, 陈梦妮, 等. 长期秸秆还田和施用有机肥对连作棉田土壤化学性质及微生物数量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(11): 177-186.
- [28] 刘美艳. 冬种绿肥与秸秆还田对连作棉田土壤理化性质及酶活性的影响[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
- [29] 曾木祥, 王蓉芳, 彭世琪, 等. 我国主要农区秸秆还田试验总结[J]. 土壤通报, 2002, 33(5): 336-339.
- [30] 惠超, 杨卫君, 宋世龙, 等. 生物炭施用对麦田土壤团聚体机械稳定性及春小麦产量的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(2): 349-355.
- [31] Li X G, Zhang W D, Laden F, et al. Dietary nitrate intake and vegetable consumption, ambient particulate matter, and risk of hypertension in the Nurses' Health study[J]. *Environment International*, 2022, 161: 107100.
- [32] 李大伟, 周加顺, 潘根兴, 等. 生物质炭基肥施用对蔬菜产量和品质以及氮素农学利用率的影响[J]. 南京农业

- 大学学报, 2016, 39(3): 433-440.
- [33] 戚琳, 宋修超, 韩承辉, 等. 不同热解温度水稻秸秆生物炭对菠菜生物量和品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(23): 132-135.
- [34] 刘玉学, 王耀锋, 吕豪豪, 等. 不同稻秆炭和竹炭施用水平对小青菜产量、品质以及土壤理化性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1438-1444.
- [35] Cao H, Ning L F, Xun M, et al. Biochar can increase nitrogen use efficiency of *Malus hupehensis* by modulating nitrate reduction of soil and root[J]. Applied Soil Ecology, 2019, 135: 25-32.
- [36] 夏思瑶, 王冲, 王新宇. 施用有机肥对生菜产量和品质影响的 Meta 分析[J]. 中国土壤与肥料, 2021(6): 312-318.
- [37] 付嘉英, 乔志刚, 郑金伟, 等. 不同炭基肥料对小白菜硝酸盐含量、产量及品质的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(34): 162-165.
- [38] 徐扬, 刘引, 彭政, 等. 化肥减量配施有机肥对药用菊花产量、品质和药理活性的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2800-2808.
- [39] 范倩, 殷洁, 白如霞, 等. 施肥对紫苏生长及次级代谢产物和籽粒产质量的影响[J]. 中国中药杂志, 2019, 44(21): 4588-4595.