

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.02.034

CSTR:32310.14.stbxb.2025.02.034

房佰涵,李钥瑶,杨茂琪,等.干旱区棉秆不同还田量对土壤理化性质及棉花生长的影响[J].水土保持学报,2025,39(2):230-237,249.

FANG Baihan, LI Yueyao, YANG Maoqi, et al. Effects of different cotton straw returning rates on soil physicochemical properties and cotton growth [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(2): 230-237, 249.

干旱区棉秆不同还田量对土壤理化 性质及棉花生长的影响

房佰涵, 李钥瑶, 杨茂琪, 郭晓雯, 叶 扬, 郭慧娟, 闵 伟

(石河子大学农学院, 新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆 石河子 832003)

摘 要: [目的] 以棉花秸秆资源合理利用为背景, 通过研究棉秆不同还田量对土壤理化性质、硝态氮淋洗、养分转化酶活性及棉花生长的影响, 为干旱区滴灌棉田土壤培肥和农业可持续发展提供理论依据。

[方法] 以新疆灰漠土为研究对象, 试验设置 4 个处理: 无还田(CK)、棉秆半量还田(50%ST)、棉秆全量还田(100%ST)和棉秆 2 倍量还田(200%ST), 比较各处理对土壤养分、土壤酶活性及产量的影响。[结果] 与无还田处理比, 棉秆不同还田量显著增加土壤大团聚体占比, 增幅为 88.44%~126.80%, 显著提高团聚体平均质量直径和几何平均直径, 增强团聚体的稳定性; 棉秆半量、全量和 2 倍量还田显著降低土壤体积质量, 显著增加土壤孔隙度和水分体积分数, 其中, 水分体积分数增幅为 22.83%~42.06%; 棉秆还田显著增加土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾质量分数; 棉秆全量、2 倍量还田均显著降低 0~100 cm 土体硝态氮淋洗量; 棉秆还田显著增加土壤脲酶和碱性蛋白酶活性; 棉秆全量还田显著增加棉花株高、SPAD、Chl 值、干物质重; 棉秆半量、全量和 2 倍量还田则显著提高棉花氮素、磷素和钾素的吸收量, 从而促进棉花的生长发育; 棉秆还田显著增加籽棉产量和氮肥利用率, 增幅分别为 4.61%~12.59% 和 7.41%~17.52%。[结论] 棉秆还田通过提升大团聚体的占比, 改善土壤物理结构, 增加土壤养分, 降低养分淋失, 进而增加土壤养分转化酶活性, 促进棉花的生长和养分吸收, 最终提高籽棉产量和氮肥利用率。

关键词: 棉秆还田; 土壤养分; 土壤酶活性; 棉花生长; 氮肥利用率

中图分类号: S562

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0230-08

Effects of Different Cotton Straw Returning Rates on Soil Physicochemical Properties and Cotton Growth

FANG Baihan, LI Yueyao, YANG Maoqi, GUO Xiaowen, YE Yang, GUO Huijuan, MIN Wei

(Key Laboratory of Oasis Ecological Agriculture of Xinjiang Corps, College of Agriculture,
Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: [Objective] Based on the rational utilization of cotton straw resources, this study studied the effects of different amounts of cotton straw returning on soil physicochemical properties, nitrate-nitrogen leaching, nutrient invertase activity and cotton growth, in order to provide a theoretical basis for soil fertility improvement and sustainable agriculture development in drip-irrigated cotton fields in arid areas. [Methods] Four treatments were set up, including no returning (CK), half returning of cotton straw (50%ST), full returning of cotton straw (100%ST), and double returning of cotton straw (200%ST). [Results] The proportion of large aggregates in soil was significantly increased by different rates of cotton straw returning to the field, and the increase under cotton straw returning to the field by 88.44% to 126.80% compared with no return. Meanwhile, cotton straw returning significantly increased the mean mass diameter and geometric mean diameter of aggregates, and enhanced the stability of aggregates. 50%ST, 100%ST and 200%ST significantly decreased soil bulk density,

收稿日期: 2024-11-04

修回日期: 2024-12-30

录用日期: 2025-01-06

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-01-20

资助项目: 国家自然科学基金项目(32160742); 兵团指导性项目(2022DZ011); 石河子大学大学生研究训练计划项目(SRP2024212)

第一作者: 房佰涵(2001—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事土壤肥力与养分循环研究。E-mail: 1107274737@qq.com

通信作者: 闵伟(1986—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤肥力与调控研究。E-mail: minwei555@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

increased soil porosity and soil water content, compared with CK, with soil water content being increased by 22.83% to 42.06%. Cotton straw returning to the field significantly increased the contents of soil organic matter, total nitrogen, alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus and available potassium. Compared with CK, 100%ST and 200%ST significantly decreased nitrate-nitrogen leaching in the 0—100 cm soil. The activities of soil urease and alkaline protease were significantly increased with the increase of cotton straw returning rate. 50%ST significantly increased cotton plant height, SPAD, Chl value, and dry matter weight. 50%ST, 100%ST, and 200%ST significantly increase the absorption of nitrogen, phosphorus, and potassium by cotton, thereby promoting the growth and development of cotton. Cotton straw returning significantly increased seed cotton yield by 4.61% to 12.59%, and nitrogen-use efficiency was significantly increased by 7.41% to 17.52%, compared with CK. [Conclusion] Cotton straw returning to the field can increase the proportion of large aggregates, reduce soil bulk density, increase soil porosity and water content, improve soil physical structure, and increase soil nutrient content, reduce nutrient leaching, thereby increasing the activities of soil nutrient convertases, promoting the growth and nutrient absorption of cotton, and improve the yield of seed cotton and nitrogen-utilization efficiency.

Keywords: cotton straw returning to the field; soil nutrients; soil enzyme activity; cotton growth; nitrogen-use efficiency

Received: 2024-11-04

Revised: 2024-12-30

Accepted: 2025-01-06

Online(www.cnki.net): 2025-01-20

新疆是我国最大的优质棉产区,2023年新疆棉花种植总面积为 $2.497 \times 10^6 \text{ hm}^2$,总产量为539.4万t,产量在全国占比高达90.2%^[1]。西北干旱区主要面临的问题包括土壤结构差、养分质量分数低,因此,提高耕地质量已成为干旱区农业生产的核心问题。新疆可利用秸秆资源丰富,且秸秆中含有较多的养分,其中,有机碳、氮、磷和钾的养分资源分别可达 1.18×10^7 、 3.16×10^5 、 1.33×10^5 、 $4.41 \times 10^5 \text{ t}$ ^[2]。秸秆还田策略在增加土壤养分、促进微生物多样性和活性等方面发挥重要作用,并对作物生长具有积极的影响^[3]。而如今的农业生产中存在秸秆利用率低且施用方式和还田量不合理的问题,不仅造成物质资源的浪费,还对土壤形成一定的危害。有研究^[4]表明,不合理的秸秆还田不利于提高作物产量,还表现出一些不利影响,如氮、磷流失或抑制作物生长,直接造成农业面源污染和农作物减产。因此,秸秆的综合利用是协调环境安全和保证产量的适宜途径。如何在不造成环境污染的前提下高效利用秸秆资源,已成为现代农业可持续发展的研究热点。

众所周知,作物的生长不断消耗土壤中的养分,向土壤中添加作物残留物质不仅能防止土壤养分流失,还可以显著提升环境效益^[5]。秸秆中含有作物和土壤微生物可以利用的营养元素,包括碳、氮、磷、钾和其他营养元素^[6],还田后可通过释放营养元素来调节营养平衡。秸秆还田不仅是处理农业废弃物的有效方法,也是增加土壤养分最直接的手段之一,可改善土壤的物理化学及生物学性质。有研究^[7]表明,秸

秆还田可以减少土壤侵蚀,防止径流和渗漏造成的养分损失,进而增加微生物数量最终促进土壤养分循环和改善土壤团聚体结构。除此之外,秸秆还田还是提升土地肥力和作物生产力^[8]的重要策略,也是实现全球农业可持续发展的主要手段之一。然而,传统的秸秆还田方式也存在许多问题。例如,在大田种植时通常采用秸秆覆盖而不进行深翻,导致秸秆分解速度较慢,出苗率降低,且微生物无法快速吸收利用秸秆腐解产生的养分,造成土壤有机质提升不明显,进而导致作物产量降低^[9]。不同量的秸秆还田后,其腐解速率不同,导致养分释放的量和速率不同,可造成土壤性质和作物吸收养分有所差异。针对我国气候类型、土壤类型、耕作类型和耕作制度的多样性,不同区域秸秆还田对土壤的影响存在较大的差异,适宜的秸秆最佳还田量也有所不同,因此,在秸秆还田时应考虑当地的实际情况。本研究通过探究棉秆不同量还田对土壤理化性质、水分和养分淋失及棉花生长的影响,确定最佳的棉秆还田量,为提升新疆非盐渍化滴灌棉田土壤肥力和促进棉花生长提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验设在石河子大学农科综合教学实验中心(44°33'N, 86°98'E)进行,气候为温带大陆性气候,年降水量100.7~224.6 mm,潜在年蒸发量为1 000~1 500 mm(图1)。土壤类型为灌耕灰漠土,质地为壤土。供试作物为棉花,品种为“新陆早66号”。试验地土壤基础理化性质为:pH 7.97,土壤盐分($\text{EC}_{1:5}$)

0.13 dS/m, 有机质 (SOM) 14.70 g/kg, 全氮 (TN) 0.72 g/kg, 全磷 (TP) 1.08 g/kg, 碱解氮 (AN) 56.75 mg/kg, 速效磷 (AP) 15.31 mg/kg, 速效钾 (AK) 310.40 mg/kg。

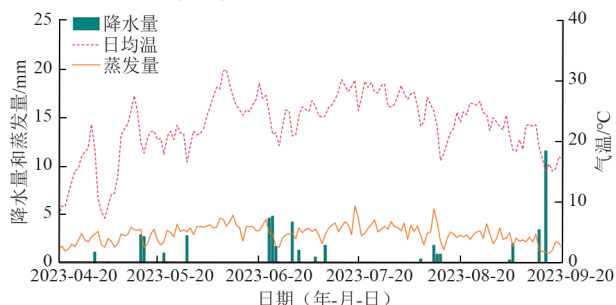


图 1 试验期内降水量、气温和蒸发量

Fig. 1 Precipitation, temperature and evapotranspiration during the test period

1.2 试验设计

本研究已连续开展 3 年 (2021—2023 年) 秸秆不同还田量田间定位试验, 供试材料为棉花秸秆。棉花秸秆基本性状为: pH 7.50, 总有机碳 343.42 g/kg, 全氮 7.76 g/kg, 全磷 6.11 g/kg, 全钾 6.80 g/kg。棉花秸秆还田量设置 4 个水平: 无还田 (CK)、秸秆半量还田 (50%ST, 3 t/hm²)、秸秆全量还田 (100%ST, 6 t/hm²) 和秸秆倍量还田 (200%ST, 12 t/hm²)。为了计算氮肥利用率, 单独设立 1 个不施氮处理, 采用随机区组设计, 每个处理重复 3 次, 共 15 个小区。棉花秸秆全部机械粉碎后旋耕入土, 于棉花收获后 10 月中旬施入农田土壤。

棉花种植采用覆膜栽培, 采用膜下滴灌种植技术, 1 膜 3 管 6 行 (宽窄行), 行距配置为 (66+10) cm, 株距为 10 cm, 毛管间距为 76 cm, 种植密度为 2.22×10^5 株/hm²。播种时间为 2023 年 4 月 28 日。为保证棉花出苗, 采用“干播湿出”方式, 即播种后滴出苗水 30 mm。2023 年棉花生长期共灌水 9 次, 6 月中旬开始至 8 月下旬结束, 灌溉周期为 7~10 d, 总灌溉量 450 mm。各处理氮、磷、钾肥用量相同, 其中, 磷、钾肥作为基肥, 在播种前一次性施入, 磷肥 (重过磷酸钙, 以 P₂O₅ 计) 和钾肥 (氯化钾, 以 K₂O 计) 施用量分别为 105 kg/hm², 120 kg/hm², 氮肥 (尿素, 以 N 计) 作为追肥, 用量为 300 kg/hm², 在生育期内分 5 次随水滴施, 初花期开始, 吐絮期前结束, 其他栽培管理措施参照当地大田生产。

1.3 样品的采集与测定

1.3.1 土壤样品的采集与处理 在棉花花铃期 (8 月 20 日) 采集耕层 (0~30 cm) 土壤样品, 每个小区随机选择 3 个样点。土样混合均匀后剔除其中的杂物取一部分用于测定土壤含水量, 将剩余土样风干后, 粉

碎过筛, 分别测定土壤理化性质和酶活性。在棉花吐絮期用刀具切取 (0~30 cm) 原状土壤样品, 于室内通风避光处自然风干, 用于测定土壤团聚体的分级。

1.3.2 渗漏液的采集与处理 在试验小区中设置微区试验, 使用直径 40 cm、高 100 cm 的铁桶在试验开始前预先埋入土中, 每个微区由 1 个固定滴头供水, 在桶底部接出流管, 用于收集土壤渗漏液, 监测水分渗漏和硝态氮淋洗。每次灌溉后 48 h, 收集渗漏液并测定渗漏液体积和硝态氮质量分数, 计算棉田硝态氮淋失量。

1.3.3 植物样品采集与处理 在棉花铃期 (8 月 20 日) 采集植株样品, 每个小区随机取 3 株棉花, 棉花植株自子叶节剪下, 并分成叶、茎和棉铃 3 部分, 用蒸馏水洗净后, 105 °C 下杀青 30 min, 70 °C 烘干至恒重。将植株各部分称重后, 粉碎过 1 mm 筛, 用于棉株养分的测定。

1.3.4 土壤理化性质的测定 土壤体积质量采用环刀法测定; 孔隙度由土壤体积质量和比重计算土壤总孔隙度; 土壤水分体积分数采用烘干称重法测定; 土壤团聚体采用湿筛法测定; 有机质采用重铬酸钾外加热法测定; 全氮采用凯氏法测定; 碱解氮采用碱解扩散法测定; 速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定; 速效钾采用火焰光度计法测定。各指标测定均参考文献^[10]。

1.3.5 水分渗漏量和硝态氮淋洗量测定 采用量筒收集微区 0~100 cm 土层土体的渗漏液, 并测定渗漏液体积; 用流动分析仪测定淋洗液硝态氮浓度。

1.3.6 土壤酶活性的测定 土壤脲酶 (S-UE) 和蛋白酶 (S-ALPT) 分别采用苯酚钠-次氯酸钠比色法、茚三酮比色法测定; 碱性磷酸酶 (S-ALP) 活性采用磷酸苯二钠比色法测定^[11]。

1.3.7 棉花生长、产量和养分吸收的测定 在棉花花铃期测定棉花株高; 使用 SPAD 仪测棉花倒三叶 SPAD 值。采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 凯氏定氮法测定全氮, 钼锑抗比色法测定植株全磷, 火焰光度法测定植株全钾^[10]。在棉花收获期采用实收计产的方法测定籽棉产量。

1.4 计算方法与数据分析

1) >0.25 mm 团聚体质量分数 ($R_{0.25}$, %) 计算公式为:

$$R_{0.25} = \frac{M_{r>0.25}}{M_T} 100\% \quad (1)$$

2) 团聚体平均质量直径 (MWD, mm) 计算公式为:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i \quad (2)$$

3) 团聚体几何平均直径 (GMD, mm) 计算公式为:

$$\text{GMD} = \exp\left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \log \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i}\right] \quad (3)$$

式中: x_i 为第*i*个筛子上团聚体的平均直径,mm; w_i 为第*i*个筛子上团聚体质量百分比,%; $R_{0.25}$ 为粒径>0.25 mm 团聚体质量分数,%; $M_{>0.25}$ 为粒径>0.25 mm 团聚体质量,g; M_T 为团聚体的总质量,g。

4)氮肥利用率计算公式为:

$$N = (N_1 - N_2) / N_3 \times 100\% \quad (4)$$

式中: N_1 为施肥区棉花氮素吸收总量,kg/hm²; N_2 为不施肥区棉花氮素吸收总量,kg/hm²; N_3 为氮肥施用量,kg/hm²[12]。

使用 IBM SPSS Statistic 26.0、Microsoft Excel 2019 和 Origin 2023 软件对试验数据进行分析 and 制图。方差分析和差异显著性比较采用单因素方差(one way-ANOVA)和邓肯(Duncan's)法($\alpha=0.05$)。

表 1 棉秆不同还田量对土壤水稳性团聚体的影响

Table 1 Effects of different cotton straw returning rates on soil water-stable aggregates

处理	各粒级团聚体百分比/%				
	>2 mm	1~2 mm	0.25~1 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm
CK	7.35±0.38d	3.35±0.52c	14.53±0.43d	41.09±0.82a	33.68±1.56a
50%ST	16.67±0.55a	6.32±0.40b	24.97±0.90c	25.05±1.04b	26.99±0.64b
100%ST	14.49±0.45b	7.96±0.40a	29.95±0.79b	25.99±1.34b	21.61±1.00c
200%ST	13.85±0.61c	8.17±0.26a	34.69±0.66a	24.90±0.25c	18.39±0.42d

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

2.1.2 土壤团聚体稳定性特征 棉秆不同还田量显著增加土壤团聚体稳定性(表 2)。与 CK 相比,50%ST、100%ST 和 200%ST 处理显著增加>0.25 mm 土壤团聚体质量分数、团聚体平均质量直径(MWD)和团聚体几何平均直径(GMD),分别增加 90.09%、107.69%、124.81% 和 75.00%、77.78%、83.33% 和 28.57%、35.71%、42.86%,且>0.25 mm 土壤团聚体质量分数、团聚体平均质量直径(MWD)和团聚体几何平均直径(GMD)随棉秆还田量的增加呈增加趋势。

表 2 棉秆不同还田量对>0.25 mm 土壤团聚体质量分数、团聚体平均质量直径和几何平均直径的影响

Table 2 Effects of different cotton straw returning rates on the content of >0.25 mm soil aggregates, the average mass diameter and geometric mean diameter of aggregates

处理	$R_{2.5}/\%$	MWD/mm	GMD/mm
CK	25.23±0.75d	0.36±0.01c	0.42±0.01d
50%ST	47.96±0.85c	0.63±0.01b	0.54±0.01c
100%ST	52.40±0.84b	0.64±0.01b	0.57±0b
200%ST	56.72±0.82a	0.66±0.01a	0.60±0.01a

2.1.3 土壤物理性质 棉秆不同还田量对土壤物理性质的影响见表 3。与 CK 处理相比,50%ST、100%ST 和 200%ST 处理显著降低土壤体积质量,分别降低 5.43%、10.70% 和 11.15%;但显著

2 结果与分析

2.1 土壤物理性质

2.1.1 土壤团聚体粒级分布 棉秆不同还田量对土壤水稳性团聚体的影响见表 1。与 CK 处理相比,50%ST、100%ST 和 200%ST 处理显著增加>2 mm 粒级占比,分别增加 126.80%、97.14% 和 88.44%,且随还田量的增加,>2 mm 粒级增加程度降低;50%ST、100%ST 和 200%ST 处理显著增加 1~2、0.25~1 mm 粒级占比,分别增加 88.66% 和 71.85%、137.61% 和 106.13%、143.88% 和 138.75%;50%ST、100%ST 和 200%ST 处理显著降低 0.053~0.25 和<0.053 mm 粒级占比,分别降低 39.04% 和 19.86%、36.75% 和 35.84%、39.40% 和 45.40%。

增加土壤孔隙度,分别增加 5.17%、10.19% 和 10.62%。

棉秆不同还田量对土壤水分体积分数的影响见表 3。与 CK 处理相比,50%ST、100%ST 和 200%ST 处理显著增加土壤水分体积分数,分别增加 24.06%、42.06% 和 22.83%。

表 3 棉秆不同还田量对土壤体积质量、孔隙度和水分体积分数的影响

Table 3 Effects of different cotton straw returning rates on soil bulk density, porosity and water content

处理	土壤体积质量/(g·cm ⁻³)	孔隙度/%	土壤水分体积分数/%
CK	1.29±0.02a	51.23±0.75c	14.21±1.27c
50%ST	1.22±0.02b	53.87±0.74b	17.63±0.97b
100%ST	1.15±0.02c	56.44±0.59a	20.19±0.65a
200%ST	1.15±0.02c	56.66±0.12a	17.46±0.37b

2.2 土壤养分

棉秆不同还田量显著增加土壤养分(表 4)。与 CK 处理相比,50%ST、100%ST 和 200%ST 处理显著增加土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾质量分数,分别增加 10.48%、28.10%、51.87%、28.55%、37.55%、45.50%、27.19%、57.14%、77.56%、11.74%、17.33%、45.28% 和 7.86%、12.24%、16.94%,且土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾的

质量分数随棉秆还田量的增加呈增加趋势。但对于土壤碳氮比而言,与 CK 处理相比,50%ST 处理降低土壤碳氮比,降幅为 5.35%,200%ST 处理显著增加土壤碳氮比,增幅为 15.04%。

表 4 棉秆不同还田量对土壤养分的影响

Table 4 Effects of different cotton straw returning rates on soil nutrient

处理	有机质/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	C:N
CK	13.34±0.78d	0.56±0.02d	20.20±1.16d	272.26±4.75d	15.20±0.39c	12.57±0.81bc
50%ST	14.74±0.45c	0.72±0.01c	25.70±0.84c	293.67±3.42c	16.98±0.35b	11.90±0.29c
100%ST	17.09±0.59b	0.77±0.01b	31.75±1.43b	305.59±3.05b	17.83±0.39b	12.90±0.09b
200%ST	20.26±0.62a	0.81±0.01a	35.87±1.32a	318.38±4.56a	22.08±0.38a	14.46±0.64a

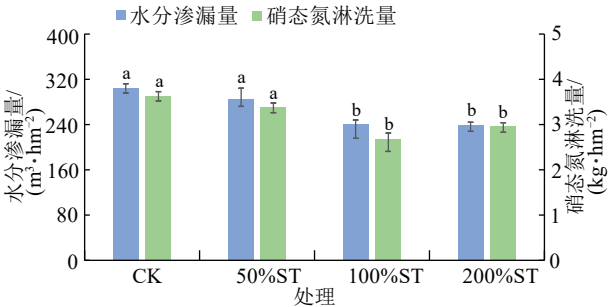
2.3 土壤水分渗漏量和硝态氮淋洗量

棉秆不同还田量对土壤养分及硝态氮淋洗的影响见图 2。对于土壤水分渗漏量而言,与 CK 处理相比,100%ST 和 200%ST 处理显著降低土壤水分渗漏量,分别降低 21.11% 和 21.64%;对于土壤硝态氮淋洗量而言,与 CK 处理相比,100%ST 和 200%ST 处理显著降低土壤硝态氮淋洗量,分别降低 26.02% 和 18.15%。

2.4 土壤氮磷转化相关酶活性

棉秆不同还田量对棉田土壤氮磷转化相关酶活性的影响见表 5。与 CK 处理相比,50%ST、100%ST 和 200%ST 处理显著增加土壤脲酶、碱性蛋白酶和碱性磷酸酶活性,分别增加 9.37%、21.36%、37.22%, 18.92%、45.95%、53.35% 和 78.87%、114.50%、

161.33%,且土壤脲酶、碱性蛋白酶和碱性磷酸酶活性随棉秆还田量的增加呈增加趋势。



注:图柱上方不同字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 2 棉秆不同还田量对土壤水分渗漏量和硝态氮淋洗量的影响

Fig 2 Effects of different cotton straw returning rates on soil water leakage and nitrate-nitrogen leaching

表 5 棉秆不同还田量对土壤脲酶、碱性蛋白酶和碱性磷酸酶活性的影响

Table 5 Effects of different cotton straw returning rates on soil urease, alkaline protease and alkaline phosphatase activities in cotton field

处理	脲酶/(U·g ⁻¹)	碱性蛋白酶/(U·g ⁻¹)	碱性磷酸酶/(U·g ⁻¹)
CK	802.54±11.14c	0.37±0.02c	5345.37±226.36c
50%ST	877.72±22.66b	0.44±0.04b	9561.39±501.45b
100%ST	973.95±35.32b	0.54±0.33b	11465.76±609.34b
200%ST	1101.24±35.54a	0.56±0.03a	14017.59±247.00a

2.5 棉花生长、养分吸收和氮肥利用率

棉秆不同还田量对棉花株高和叶片 SPAD 值的影响见图 3。与 CK 处理相比,100%ST 和 200%ST 显著增加棉花株高,增幅分别为 7.83% 和 5.35%;与 CK 处理相比,100%ST 处理棉花叶片 SPAD 值显著增加 3.51%,而 50%ST 和 200%ST 处理对棉花叶片 SPAD 值有增加趋势。

棉秆不同还田量对棉花干物质重的影响见图 4。与 CK 处理相比,50%ST、100%ST 和 200%ST 处理显著增加棉花茎、叶、铃以及总干物质重,分别增加 11.56%、25.57%、18.95%, 23.11%、41.68%、31.12%, 9.09%、27.28%、12.06% 和 13.00%、30.31%、17.49%,且棉花茎、叶、铃及总干物质重随棉秆还田量的增加呈先增加后减少的趋势。

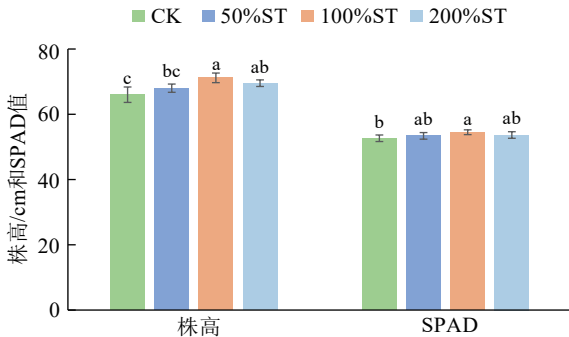


图 3 棉秆不同还田量对棉花株高和叶片 SPAD 值的影响

Fig 3 Effects of different cotton straw returning rates on cotton plant height and leaf SPAD value

棉秆不同还田量对棉花氮素、磷素和钾素吸收的影响见表 6。与 CK 处理相比,50%ST、100%ST 和 200%ST 处理棉花氮素吸收显著增加 5.19%、

12.26%、7.72%; 磷素吸收显著增加 15.03%、30.01%、31.63%; 钾素吸收显著增加 11.20%、30.41%、22.11%, 且棉花养分吸收量随棉秆还田量的增加呈现先增加后减少。与 CK 处理相比, 50%ST、100%ST 和 200%ST 处理显著增加籽棉产量和氮肥利用率, 增幅为 4.61%、12.59%、5.57% 和 7.41%、17.52%、11.03%。

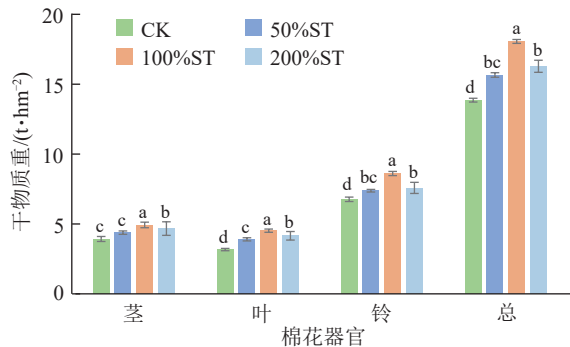


图 4 棉秆不同还田量对棉花各器官干物质重的影响
Fig 4 Effects of different cotton straw returning rates on the dry matter weight of various organs of cotton

3 讨论

3.1 棉秆不同还田量对土壤物理性质的影响

秸秆还田是改善土壤结构的优良措施, 有利于土壤团粒结构的形成和土壤物理结构稳定性的提升。土壤团聚体是提升土壤结构稳定性的基础, 也是土壤养分的重要载体, 更是评价土壤肥力水平的重要指标之一。

有研究^[13]表明, 秸秆还田可显著影响土壤团聚体组成和稳定性, 棉秆在土壤腐解的过程中产生腐殖酸, 与土壤中的钙、镁胶结可形成水稳性团粒结构, 进而改善土壤结构。本研究表明, 与不还田处理相比, 棉秆还田能提高 >0.25 mm 土壤团聚体质量分数, 并降低土壤小团聚体 (0.053~0.25 mm) 和微团聚体 (<0.053 mm) 的占比, 说明棉秆还田促进小团聚体和微团聚体向土壤水稳性大团聚体转化, 土壤团聚体的稳定性增强^[14]。随着棉秆还田量的增加, 土壤大团聚体质量分数、平均质量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD) 也呈增加趋势, 说明秸秆还田量的增加有利于土壤团粒结构的形成^[15-16]。

本研究发现, 土壤体积质量随棉秆还田量的增加显著降低, 而土壤孔隙度随棉秆还田量的增加显著提升, 原因是秸秆还田后能增加土壤 >0.25 mm 粒级占比, 提升土壤团聚体的稳定性, 进而提高土壤通透性, 最终改善土壤的物理结构^[17]。土壤水分体积分数是影响棉花生长发育的重要因素之一, 随着棉花生长发育进程, 耗水量也随之增加。本研究发现, 棉秆还田显著增加土壤水分体积分数, 一方面是因为棉花秸秆具有一定的吸水和保水能力, 在粉碎还田后使得土壤孔隙增大, 促进水分入渗; 另一方面, 棉秆腐解的产物能够与土粒胶结形成团聚体, 提高土壤吸附水分的能力^[18]。

表 6 棉秆不同还田量对棉花氮素、磷素、钾素吸收、籽棉产量和氮肥利用率的影响

Table 6 Effects of different cotton straw returning rates on nitrogen, phosphorus, and potassium uptake of cotton, seed cotton yield and nitrogen-use efficiency in cotton field

处理	氮素吸收/(kg·hm ⁻²)	磷素吸收/(kg·hm ⁻²)	钾素吸收/(kg·hm ⁻²)	籽棉产量/(kg·hm ⁻²)	氮肥利用率/%
CK	188.09±3.58c	25.37±0.87c	119.85±2.80d	5 348.89±167c	43.88±1.19c
50%ST	197.85±4.89b	29.19±1.27b	133.27±1.55c	5 595.45±75b	47.13±1.63bc
100%ST	211.16±4.78a	32.99±1.08a	156.29±5.40a	6 022.07±99a	51.57±1.60a
200%ST	202.61±7.56ab	33.40±1.98a	146.35±2.35b	5 647.08±47b	48.72±2.52ab

3.2 棉秆不同还田量对土壤养分及硝态氮淋洗的影响

目前, 秸秆还田不仅是最简单有效的资源利用方式, 也是一种有效增加土壤肥力的改良措施。秸秆中含有 N、P、K、Ca、Mg、S 等矿质营养元素, 还田后可增加土壤养分和有效性, 进而提升土壤肥力。棉秆作为外部碳源, 还田显著增加土壤有机质质量分数, 同时土壤结构得到改善可促进有机质的矿化和硝化速率, 增加土壤碳氮养分^[19]。添加秸秆可提高生物有效碳的可用性, 为土壤微生物提供能量, 促进氮的矿化^[20]; 在硝态氮淋洗的试验中发现, 全量和 2 倍量秸秆还田处理显著降低硝态氮的淋洗, 归因于棉秆还田固定土壤中的氮素, 减少氮素的淋溶和损

失, 并在后续的矿化作用中释放氮素, 进而增加土壤氮素养分^[21]。秸秆含有氮、磷和钾等营养元素, 能够增加土壤、氮、磷和钾养分质量分数。有研究^[22-23]表明, 还田后显著增加土壤速效钾、速效磷和碱解氮质量分数, 且随秸秆还田量增加而增加, 但在较高还田量 (60 t/hm²) 下养分质量分数降低^[24]。

3.3 棉花不同秸秆还田量对棉田土壤氮磷转化相关酶活性的影响

土壤酶作为土壤生物学性质的重要指标之一, 在秸秆还田、有机质分解和土壤养分循环中扮演着重要角色。土壤中氮、磷等养分的转化主要取决于酶系统。土壤酶活性反映养分的代谢活性, 是评价土壤肥力的重要指标^[25]。土壤脲酶也是土壤氮素循

环的重要酶,能水解尿素,释放出可被植物吸收利用的氮源。有研究^[26-27]表明,秸秆还田普遍提升N、P循环相关的土壤酶活性。本研究发现,棉秆还田能够提高土壤中脲酶、碱性蛋白酶和碱性磷酸酶的活性,并且随着棉秆还田量的增加土壤酶活性也随之提高,其原因是秸秆还田改善土壤性质,提高土壤养分质量分数,为土壤相关微生物提供丰富的能量物质^[28],优化土壤微生物的生存环境,促进微生物的代谢活动,并能刺激微生物分泌参与氮、磷循环的酶,进而增加酶活性^[29]。

3.4 棉花不同秸秆还田量对棉花生长、养分吸收及氮肥利用的影响

秸秆富含多种营养元素,还田有利于作物的生长发育。本研究表明,单施化肥及化肥与棉秆配施均显著提高棉花株高、叶片SPAD值和生物量。在常规施肥的基础上添加棉花秸秆发现,棉秆还田显著增加叶片SPAD值,原因是氮肥的施用和秸秆还田能够改善土壤结构,增加土壤养分质量分数,有利于作物根的生长,促进棉花养分吸收,进而利于棉花地上部的生长发育及养分吸收,最终增加棉花产量^[30]。

氮、磷和钾对作物的生长发育与产量起着重要的作用,氮素和磷素是植物体内蛋白质、植物激素、叶绿素、细胞核蛋白、磷脂等多种化合物的重要成分,而钾素促进作物体内淀粉和糖的形成,并参与作物的新陈代谢,提高作物的抗逆性。有研究^[31-32]发现,秸秆还田能够促进作物的养分吸收,提高肥料的利用率。本研究发现,棉秆全量还田均显著提高棉花地上部的氮素和磷素吸收量,可能与秸秆还田腐解产生的有机酸能促进磷的分解和释放有关,氮主要以不溶性有机形式存在,使其具有缓慢释放^[33]。棉秆还田还提高氮肥利用率,随着还田量的增加呈先增加后降低趋势。与单施氮肥相比,秸秆还田提高籽棉产量,原因是施用秸秆能够改善土壤理化性质,为土壤提供丰富的C、N、P和K等营养元素,提高土壤肥力,有利于土壤养分的循环与利用^[34],最终增加棉花籽棉产量。

4 结论

1) 棉秆还田能改善土壤的物理、化学及生物学性质。棉秆还田显著增加土壤大团聚体质量分数、平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD),提升土壤团聚体的稳定性,改善土壤物理结构,显著增加土壤水分体积分数。

2) 施加棉秆后提高土壤肥力,减少水分和氮素流失。秸秆还田提供良好的生存环境,促进N、P循环的酶生成,导致酶活性增加。同时良好的土壤物理结构有利于根系生长,促进棉花生长发育和养分

吸收,提高氮肥利用率,最终提高籽棉产量,其中以全量效果最佳。

参考文献:

- [1] 国家统计局,生态环境部. 中国环境统计年鉴(2023) [M]. 北京: 中国统计出版社有限公司, 2024.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook on environment (2023) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2024.
- [2] 张良绘, 庞梦舟. 新疆主要作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J]. 磷肥与复肥, 2016, 31(9): 47-50.
ZHANG L H, PANG M Z. Quantity estimation and utilization of main crop straws nutrient resources in Xinjiang [J]. Phosphate and Compound Fertilizer, 2016, 31(9): 47-50.
- [3] 邱琛, 韩晓增, 陆欣春, 等. 东北黑土区玉米秸秆还田对土壤肥力及作物产量的影响[J]. 土壤与作物, 2020, 9(3): 277-286.
QIU C, HAN X Z, LU X C, et al. Effects of maize straw incorporation on soil fertility and crop production in the black soil region of Northeast China [J]. Soils and Crops, 2020, 9(3): 277-286.
- [4] LI H D, LIU Y, JIAO X Y, et al. Response of soil nutrients retention and rice growth to biochar in straw returning paddy fields[J]. Chemosphere, 2023, 312: e137244.
- [5] PLAZA C, ZACCONE C, SAWICKA K, et al. Soil resources and element stocks in drylands to face global issues[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): e13788.
- [6] JIN Z Q, SHAH T, ZHANG L X, et al. Effect of straw returning on soil organic carbon in rice-wheat rotation system: A review[J]. Food and Energy Security, 2020, 9(2): e216230067.
- [7] WANG S C, ZHAO Y W, WANG J Z, et al. The efficiency of long-term straw return to sequester organic carbon in Northeast China's cropland[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(2): 436-448.
- [8] LI Y, SONG D P, DANG P F, et al. Combined ditch buried straw return technology in a ridge-furrow plastic film mulch system: Implications for crop yield and soil organic matter dynamics[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 199: e104596.
- [9] 陈丽明. 长期秸秆还田下双季稻田土壤碳氮转化特征及其微生物学机制[D]. 南昌: 江西农业大学, 2023.
CHEN L M. Characteristics and microbial mechanism of soil carbon and nitrogen transformation in double cropping rice field under long-term straw returning[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2023.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [11] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
GUAN S Y. Soil enzyme and its research method [M].

- Beijing: Agricultural Publishing House, 1986.
- [12] LI F S, LIANG J H, KANG S Z, et al. Benefits of alternate partial root-zone irrigation on growth, water and nitrogen use efficiencies modified by fertilization and soil water status in maize [J]. *Plant and Soil*, 2007, 295(1): 279-291.
- [13] HAN L F, ZHANG B, CHEN L Y, et al. Impact of biochar amendment on soil aggregation varied with incubation duration and biochar pyrolysis temperature [J]. *Biochar*, 2021, 3(3): 339-347.
- [14] 刘欣萌, 姜涵, 魏文良, 等. 秸秆与秸秆生物炭还田对石灰性潮土有机碳固定的影响[J]. *土壤通报*, 2023, 54(6): 1316-1325.
- LIU X M, JIANG H, WEI W L, et al. Effects of straw and straw biochar returning on soil organic carbon sequestration in calcareous fluvo-aquic soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(6): 1316-1325.
- [15] 刘晖, 吴红艳, 冯建, 等. 秸秆还田量对半干旱区褐土团聚体稳定性及有机碳组分的影响[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(1): 219-225.
- LIU H, WU H Y, FENG J, et al. Effects of straw returning amount on soil aggregate stability and organic carbon fractions in semi-arid cinnamon soil area [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(1): 219-225.
- [16] 孟庆英, 邹洪涛, 韩艳玉, 等. 秸秆还田量对土壤团聚体有机碳和玉米产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(23): 119-125.
- MENG Q Y, ZOU H T, HAN Y Y, et al. Effects of straw application rates on soil aggregates, soil organic carbon content and maize yield [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(23): 119-125.
- [17] TUYISHIMIRE E, CUI J F, TANG X Y, et al. Interactive effects of honeysuckle planting and biochar amendment on soil structure and hydraulic properties of hillslope farmland [J]. *Agriculture*, 2022, 12(3): e414.
- [18] 程东娟, 齐鸣, 刘淙琮. 秸秆还田量对土壤持水性影响的室内试验研究[J]. *节水灌溉*, 2020(9): 30-32.
- CHENG D J, QI M, LIU C C. Laboratory experimental study on the effect of straw returning amount on soil water-holding properties [J]. *Water Saving Irrigation*, 2020(9): 30-32.
- [19] 郭丽欣, 王越, 杜雨婷, 等. 生物炭与秸秆配施对设施土壤有机碳矿化及理化性质的影响[J]. *北京农学院学报*, 2022, 37(1): 43-50.
- GUO L X, WANG Y, DU Y T, et al. Effects of proportioning fertilization combined between biochar and straw on soil organic carbon mineralization and physicochemical properties of greenhouse soil [J]. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 2022, 37(1): 43-50.
- [20] PANG J W, WANG Y H, WANG B F, et al. Biochar application increases maize yield under film mulching due to higher soil organic content and soil aggregate stability in a semi-arid area [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2023, 23(4): 1718-1732.
- [21] 麦逸辰, 卜容燕, 韩上, 等. 添加不同外源氮对水稻秸秆腐解和养分释放的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(22): 210-219.
- MAI Y C, BU R Y, HAN S, et al. Effects of adding different exogenous nitrogen on rice straw decomposition and nutrient release [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(22): 210-219.
- [22] 王丽娜, 杨瑛, 杜苏. 生物炭施入对盐碱土壤影响的研究现状[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(8): 81-87.
- WANG L N, YANG Y, DU S. Research status of the effects of biochar application on saline-alkali soils [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(8): 81-87.
- [23] 王丽渊, 李小龙, 任天宝, 等. 生物质炭化还田作为土壤改良与循环农业的技术途径分析[J]. *湖北农业科学*, 2020, 59(14): 18-24.
- WANG L Y, LI X L, REN T B, et al. Analysis of biomass carbonization and conversion to fields as a technical approach to soil improvement and circular agriculture [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2020, 59(14): 18-24.
- [24] LI C J, XIONG Y W, QU Z Y, et al. Impact of biochar addition on soil properties and water-fertilizer productivity of tomato in semi-arid region of Inner Mongolia, China [J]. *Geoderma*, 2018, 331: 100-108.
- [25] 张英, 武淑霞, 雷秋良, 等. 不同类型粪肥还田对土壤酶活性及微生物群落的影响[J]. *土壤*, 2022, 54(6): 1175-1184.
- ZHANG Y, WU S X, LEI Q L, et al. Effects of different types of manure returning to the field on soil enzyme activities and microbial communities [J]. *Soils*, 2022, 54(6): 1175-1184.
- [26] 钱九盛, 谢文逸, 何中华, 等. 施用生物质炭对桃园土壤肥力及黄桃产量和品质的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(3): 680-688.
- QIAN J S, XIE W Y, HE Z H, et al. Effect of biochar amendment on orchard soil fertility and yellow peach yield and quality [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(3): 680-688.
- [27] 王丽, 赵惠丽, 赵英. 生物质炭配施木灰对石灰性土壤固碳和微生物群落的影响[J]. *土壤*, 2022, 54(2): 320-328.
- WANG L, ZHAO H L, ZHAO Y. Effects of co-application of biochar and wood ash on carbon sequestration and microbial communities in calcareous soils [J]. *Soils*, 2022, 54(2): 320-328.
- [28] 李侠, 胡一民, 贝水宽, 等. 施肥方式和土壤水分变化对秸秆降解特征及微生物秸秆碳利用效率的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2023, 28(11): 79-89.
- LI X, HU Y M, BEI S K, et al. Effects of long-term fertilization and soil moisture on straw decomposition and microbial straw-carbon use efficiency [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(11): 79-89.

(下转第249页)

- 的影响[J].农业工程学报,2024,40(5):141-147.
- QI D L, ZHU J Q. Effects of drought-flood abrupt alternation on the characteristics of leaf senescence and grain yield of maize [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40 (5): 141-147.
- [33] 杨生权.土壤和叶片养分状况对柑橘产量和品质的影响:以重庆忠县柑橘园为例[D].重庆:西南大学,2008.
- YANG S Q. Studies on the influence of soil and leaf nutrient on citrus fruit's output and quality: Taking citrus orchards in Zhongxian County of Chongqing as an example[D].Chongqing: Southwest University, 2008.
- [34] 刘东海,乔艳,谢和平,等.夷陵区柑橘园土壤和叶片养分状况研究[J].中国土壤与肥料,2020(5):237-242.
- LIU D H, QIAO Y, XIE H P, et al. Study on nutrient status of citrus orchard soils and leaves in Yiling [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(5):237-242.
- [35] 张朝坤,洪雅芳,肖靖,等.番石榴生殖生长期土壤和叶片氮磷钾含量变化特征[J].南方农业学报,2022, 53(5):1245-1252.
- ZHANG C K, HONG Y F, XIAO J, et al. Variation characteristics of the contents of nitrogen, phosphorus and potassium in the soil and leaves of *Psidium guajava* L. during the reproductive growth period [J]. Journal of Southern Agriculture, 2022, 53(5):1245-1252.
- [36] 孙寅虎,张光勇,杜浩,等.云南省菠萝蜜主要种植园土壤与叶片养分现状分析[J].中国土壤与肥料,2023(7): 174-181.
- SUN Y H, ZHANG G Y, DU H, et al. Analysis of soil and leaf nutrients in jackfruit plantations in Yunnan province [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(7): 174-181.
- [37] 尹杰.贵州柑橘园土壤与树体养分状况及其评价[D].贵阳:贵州大学,2007.
- YIN J. Nutrient status and evaluation of soil and trees in Guizhou citrus orchard [J]. Guiyang: Guizhou University, 2007.
- [38] 曹胜,欧阳梦云,周卫军,等.湖南省柑橘园土壤营养状况及其对叶片养分的影响[J].土壤,2019, 51(4): 665-671.
- CAO S, OUYANG M Y, ZHOU W J, et al. Soil nutrient status of citrus orchard and its effects on nutrients in citrus leaf in Hunan Province [J]. Soils, 2019, 51(4): 665-671.
- [39] 郭宏,杜毅飞,王海涛,等.黄土高原苹果园土壤和叶片养分状况分析:以陕西省黄陵县为例[J].土壤,2015, 47(4):682-689.
- GUO H, DU Y F, WANG H T, et al. Analysis of soil and leaf nutrients in apple orchards in the Loess Plateau: A case study of Huangling County, Shaanxi Province [J]. Soils, 2015, 47(4):682-689.
- (上接第237页)
- [29] 梁路,马臣,张然,等.有机无机肥配施提高旱地麦田土壤养分有效性及酶活性[J].植物营养与肥料学报,2019, 25(4):544-554.
- LIANG L, MA C, ZHANG R, et al. Improvement of soil nutrient availability and enzyme activities in rain-fed wheat field by combined application of organic and inorganic fertilizers [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(4):544-554.
- [30] 刘颖颖,卜容燕,唐杉,等.连续秸秆-紫云英协同还田对双季稻产量、养分积累及土壤肥力的影响[J].植物营养与肥料学报,2020, 26(6):1008-1016.
- LIU Y Y, BU R Y, TANG S, et al. Effect of continuous straw-Chinese milk vetch synergistic return to the field on yield, nutrient accumulation and soil fertility of double cropping rice [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(6):1008-1016.
- [31] 姚丽茹,李伟,朱员正,等.施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响[J].环境科学,2023, 44(6):3396-3407.
- YAO L R, LI W, ZHU Y Z, et al. Effects of biochar application on soil bacterial community diversity and winter wheat growth in wheat fields [J]. Environmental Science, 2023, 44(6):3396-3407.
- [32] 张斯梅,段增强,顾克军,等.稻秸还田下减量施氮对小麦产量、养分吸收及土壤理化性质的影响[J].土壤,2023, 55(3):537-543.
- ZHANG S M, DUAN Z Q, GU K J, et al. Effects of reduced nitrogen fertilization on wheat yield, nutrient uptake and soil physicochemical properties under rice straw returning [J]. Soils, 2023, 55(3):537-543.
- [33] YAN C, YAN S S, JIA T Y, et al. Decomposition characteristics of rice straw returned to the soil in North-east China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2019, 114(3):211-224.
- [34] 冷明珠,金月,童喻浩,等.秸秆还田量对土壤肥力和小麦产量的影响[J].浙江农业科学,2022, 63(4):679-681.
- LENG M Z, JIN Y, TONG Y H, et al. Effect of straw returning amount on soil fertility and wheat yield [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2022, 63(4):679-681.