

麦后复种绿肥对麦田土壤养分及小麦产量的影响

朱 强¹, 车宗贤^{1,2,3,4*}, 张久东^{2,3,4}, 崔 恒^{2,3,4}

¹甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州

²甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃 兰州

³国家土壤质量凉州观测实验站, 甘肃 兰州

⁴农业部甘肃耕地保育与农业环境科学观测试验站, 甘肃 兰州

收稿日期: 2024年3月12日; 录用日期: 2024年6月14日; 发布日期: 2024年6月26日

摘要

【目的】为研究西北灌区最佳绿肥替代氮肥比例, 探究麦后复种绿肥农田土壤养分含量, 土壤酶活性变化, 结合小麦产量, 研究西北灌区最佳绿肥替代化肥比例, 为当地小麦种植提供参考依据。【方法】试验一共有六个处理: 不施肥, 当地传统施肥, 85%氮肥N + 15%绿肥N, 70%氮肥N + 30%绿肥N, 55%氮肥N + 45%绿肥N和40%氮肥N + 60%绿肥N, 于2023年4月至10月对土壤中有机质、全氮、全碳和硝态氮含量和脲酶和过氧化氢酶的活性进行研究。【结果】土壤中有机质、全氮、全碳和硝态氮含量均有不同程度增加, 绿肥种植也能增加土壤中脲酶和过氧化氢酶的活性, 70 C + 30 G处理土壤酶活性最高, 结合2022年和2023年小麦平均产量, 处理70 C + 30 G平均产量最高, 为4821 kg/hm²。【结论】西北灌区麦后复种绿肥模式中, 70%化肥氮 + 30%绿肥氮处理效果最佳, 可同时土壤酶活性最高作物经济最好, 达到双赢的目的。

关键词

麦后复种绿肥, 土壤养分, 小麦, 绿肥

Effect of Replanting Green Manure after Wheat on Soil Nutrients and Wheat Yield in Wheat Fields

Qiang Zhu¹, Zongxian Che^{1,2,3,4*}, Jiudong Zhang^{2,3,4}, Heng Cui^{2,3,4}

¹College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu

²Institute of Soil, Fertilizer and Water-Saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu

*通讯作者。

³National Agricultural Experimental Station for Soil Quality in Lanzhou, Lanzhou Gansu

⁴Gansu Cultivated Land Conservation and Agricultural Environment Scientific Observation and Experiment Station, Ministry of Agriculture, Lanzhou Gansu

Received: Apr. 12th, 2024; accepted: Jun. 14th, 2024; published: Jun. 26th, 2024

Abstract

[Objective] To study the optimal green manure replacement ratio of nitrogen fertilizer in northwest irrigation district, to investigate the soil nutrient content of green manure farmland replanted after wheat, changes in soil enzyme activity, combined with the yield of wheat, to study the optimal green manure replacement ratio of fertilizer in northwest irrigation district, and to provide a reference basis for local wheat cultivation. **[Methods]** The experiment included six treatments: no fertilization, local traditional fertilization, 85% nitrogen fertilizer N + 15% green manure N, 70% nitrogen fertilizer N + 30% green manure N, 55% nitrogen fertilizer N + 45% green manure N, and 40% nitrogen fertilizer N + 60% green manure N. From April to October 2023, the study focused on the soil organic matter, total nitrogen, total carbon, and nitrate nitrogen content, as well as the activity of urease and catalase enzymes. **[Results]** Organic matter, whole nitrogen, whole carbon and nitrate nitrogen contents in soil were increased to different degrees, green manure planting also increased the activities of urease and catalase in soil, and soil enzyme activities were highest in the 70 C + 30 G treatment, and combined with the average wheat yields of 2022 and 2023, the treatment 70 C + 30 G had the highest average yield of 4821 kg/hm². **[Conclusion]** In the wheat-post green manure cropping model of the northwest irrigation area, the treatment of 70% chemical fertilizer nitrogen + 30% green manure nitrogen yields the best results, achieving the highest soil enzyme activity and the best crop economy, thus reaching a win-win situation.

Keywords

Replanting Green Manure after Wheat, Soil Nutrients, Wheat, Green Manure

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

绿色发展将是未来农业生产的主基调, 1963年农业部组建了全国绿肥试验网应对全国绿肥生产需要 [1], 绿肥是一种优质的肥源, 具有营养成分高, 养分全面的优点, 可培肥土壤, 提高肥料利用效率, 对环境的污染也有改良作用, 绿肥作物是可与其他作物进行间、套、轮作模式, 或将作物鲜体作为肥料施入土壤、直接翻压到土壤中, 可利于农作物生长发育, 对土壤理化性状进行改良, 绿肥相比其他一年或多年生植物, 绿肥的优势在于生长周期短, 并且绿肥能根据土壤不同的种类为其提供丰富的养分。大多数绿肥作物为豆科作物, 如: 如紫云英、苕子、紫花苜蓿、豌豆、田菁等, 其作物鲜体称为绿肥[2], 在国外, 由于绿肥可以在短时间内覆盖地表根系茂密, 因此绿肥可以起到防止风蚀, 水蚀, 水土流失的作用, 故而被称为覆盖作物[3]。绿肥施入后, 经过腐解过程将绿肥本身丰富的矿物质分解释放到农田土壤中, 提供种植作物本身所需的营养成分, 绿肥投入是一项重要的农田管理措施, 采用相应的措施可促成土壤改良和主作物增产稳产。

绿肥对土壤的改良作用主要体现在对土壤理化性状, 以及土壤酶生物学方面的影响[4], 绿肥的翻压, 施入必定会引起土壤空间结构的改变, 土壤容重, 孔隙度以及良好的土壤团粒结构均可提高土壤的通气性, 良好的通气性对土壤中微生物的活性有积极作用, 进而影响土壤中有机质的分解, 还可以提高土壤的保水性和透水性, 增加土壤的比表面积和孔隙度, 使得土壤的保水保肥效率升高, 良好的土壤团粒结构可促进栽培作物根系呼吸作用, 更好的提高对土壤中水分和养分的利用[5] [6]。作物体内吸收利用的氮大多是来源于土壤中的可吸收的氮素, 而土壤中氮素通过矿化和运移, 其过程极易受外界肥源的影响, 有研究表面绿肥还田这一方式可降低土壤层 0~15 cm 和 15~30 cm 的容重, 绿肥还田对作物产量, 养分吸收, 土壤养分含量有明显影响, 可为作物提供有利的生活环境[7]。种植绿肥有利于提高土壤酶活性, 土壤养分含量, 也可以增加土壤本身的稳定性、疏水性、和腐殖化程度[8], 通过绿肥的施用可提高土壤有机碳及总氮含量, 并且土壤有机质含量也随之升高。Bianca 等[9]发现, 通过绿肥施用的不同方式, 土壤有机碳和总氮含量有增加的趋势, 土壤有机质含量随绿肥施入量随之升高。评价土壤肥力大小将土壤中无机氮的含量作为一项重要的参数, 无机氮的含量是作物生长发育过程中吸收利用的主要形态, 土壤中无机氮的形式主要是以铵态氮($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$)的方式存在[10], 硝态氮包含土壤中硝酸盐和亚硝酸盐, 铵态氮则指土壤中的铵离子, 其两者都是为作物生长发育所需氮素的主要吸收形式。土壤氮循环过程中, 土壤酶对土壤氮素转化过程起至关重要的作用, 绿肥还田过程中微生物可释放其养分供种植作物吸收利用, 绿肥也属于清洁的氮源, 增施氮肥可影响土壤酶活性, 有研究表明增施氮肥可提高土壤脲酶的活性, 土壤过氧化氢酶活性却截然相反[11], 而未施氮处理的土壤中, 土壤中更多的养分会分配到酶的合成过程中, 从而作物吸收利用的养分将会降低[12], 施氮过量也会导致加剧土壤中微生物碳限制, 由于施氮导致的土壤酸化会对土壤过氧化氢酶活性有所影响。

本试验是基于甘肃省农业科学院武威实验站中麦后复种绿肥替代化肥最佳配比长期定位试验, 以绿洲灌区麦田为研究对象, 在等氮磷的条件下, 监测 2023 年小麦绿肥毛叶苕子生育期土壤养分以及小麦产量的影响, 从而探寻增加土壤养分的绿肥替代化肥最佳配比。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

试验于 2023 年 4 月~2023 年 7 月在甘肃省农业科学院武威绿洲农业试验站进行。实验站设在甘肃省武威市凉州区永昌镇白云村, 当地海拔 1504 m, 年平均气温 7.8°C, 无霜期 150 天, 平均降雨量 222 mm, 蒸发量 2021 mm 为温带大陆性干旱气候, 土壤为典型的灌漠土。

2.2. 试验设计

本试验基于甘肃省农业科学院武威试验站绿肥化肥配施长期定位试验, 对 2023 年麦后复种毛叶苕子全生育期进行土壤养分, 土壤酶数据分析工作。麦后复种绿肥试验共有 6 个处理: 不施肥(CK), 当地传统施肥(100 C), 85%化肥 N + 15%绿肥 N (85 C + 15 G), 70%化肥 N + 30%绿肥 N (70 C + 30 G), 55%化肥 N + 45%绿肥 N (55 C + 45 G), 40%化肥 N + 60%绿肥 N (40 C + 60 G), 3 次重复, 具体施肥量见(表 1), 小麦收获后进行毛叶苕子复种(CK 与 100 C 处理不复种毛叶苕子), 共 18 个小区, 小区之间打 50 cm × 30 cm 的地埂, 小区面积 20 m² (4 m × 5 m), 试验采用单因素随机区组设计, 其中化学氮肥 60% 做底肥, 三叶期追肥 40%, 磷肥与绿肥全部基施。绿肥为小麦成熟后毛叶苕子盛花期收割的干草, 含 N 30 g/kg, P 3.5 g/kg, K 33 g/kg。(此处的绿肥用量为干草重量此处重钙用量的算法为 713~2.25 * 3.5/0.43, 0.43 为重钙的含磷量, 从而保证磷肥用量一致, 小麦播种量 450 kg/hm², 毛叶苕子播种量 60 kg/hm²)。

Table 1. Fertilizer application rate of different treatments**表 1. 不同处理施肥量表**

编号 No.	处理 Treatment	化学 N Chemical fertilizer N/(kg/hm ²)	P2O5 (kg/hm ²)	绿肥 Green manure/(kg/hm ²)
①	空白 CK	0	0	0
②	当地传统施肥 FFP100%	225	150	0
③	85%化肥 N + 15%绿肥 N 85% fertilizer N + 15% green manure N	191	146	1125
④	70%化肥 N + 30%绿肥 N 70% fertilizer N + 30% green manure N	158	142	2250
⑤	55%化肥 N + 45%绿肥 N 55% fertilizer N + 45% green manure N	124	138	3375
⑥	40%化肥 N + 60%绿肥 N 40% fertilizer N + 60% green manure N	90	134	4500

2.3. 取样方法

土壤样品采集

小麦收获后每小区采集 5 点 0~20 cm 耕作层混合土样，作为 1 次重复，小区 3 个重复样品剔除石块及动植物残体等杂质后放在阴凉通风处自然风干再粉碎、过筛备测土壤养分。

2.4. 测定方法

- 1) 小麦籽粒及秸秆测定：收获后取小麦籽粒及秸秆样品测定碳氮含量。
- 2) 产量：小麦成熟期每小区随机取 30 株考种，脱粒称重，按 14%籽粒含水量折合计算单位面积籽粒产量。
- 3) 土样测定：测定土壤有机质、全氮、全碳、铵态氮、硝态氮、脲酶、过氧化氢酶。

2.5. 统计分析

试验数据使用 Microsoft Excel 2019 整理分析，IBM SPSS Statistics 26 软件进行方差分析，LSD 法进行显著性检验($P < 0.05$)，利用 Origin 2021 软件中的“Paired Comparison Plot”包制作温室气体排放通量、温室气体累积排放量，不同施肥配比关系图。

3. 结果与分析

3.1. 麦后复种绿肥绿肥模式中绿肥替代化肥对产量及植株养分的影响分析

2022 年至 2023 年小麦产量整体有下降趋势(表 2)，CK 处理有略微上升趋势，2022 年处理 85 C + 15 G，70 C + 30 G，55 C + 45 G 相比 100 C 处理增产 12.8%、12.0%、2.5%，2023 年处理 85 C + 15 G，70 C + 30 G，55 C + 45 G，40 C + 60 G 与相比 100 C 处理增产 22.5%、25.1%、11.7%、19.3%。2022 年产量最高为处理 85 C + 15 G，产量为 5547 kg/hm²，处理 70 C + 30 G 产量为 5506 kg/hm²，2023 年产量最高为处理 70 C + 30 G，产量为 4136 kg/hm²，处理 85 C + 15 G 产量为 4053 kg/hm²，两年平均产量最高为处理 70 C + 30 G，产量为 4821 kg/hm²。

Table 2. Impact of green manure as a substitute for chemical fertilizers on wheat production (2022~2023)
表 2. 绿肥替代化肥对小麦产量的影响(2022~2023 年)

处理 No. Treatment		产量 Yield/(kg/hm ²)	
		2022 年 Year	2023 年 Year
1	CK	2108.40 ± 163.71b	2530.00 ± 340.27b
2	100 C	4915.96 ± 374.64a	3307.33 ± 133.57ab
3	85 C + 15 G	5547.35 ± 220.51a	4052.67 ± 387.73a
4	70 C + 30 G	5505.75 ± 258.00a	4136.00 ± 534.51a
5	55 C + 45 G	5040.52 ± 286.38a	3694.00 ± 45.03a
6	40 C + 60 G	4852.93 ± 144.57a	3944.00 ± 219.39a

注: 图中不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)下同。

3.2. 麦后复种绿肥模式中绿肥替代化肥对小麦籽粒秸秆碳氮含量

Table 3. Carbon and nitrogen content of wheat seed straw in different treatments (2023)

表 3. 不同处理小麦籽粒秸秆碳氮含量(2023 年)

处理 No. Treatment		秸秆 stalk		籽粒 seeds	
		有机碳 organic carbon	全氮 total nitrogen	有机碳 organic carbon	全氮 total nitrogen
1	CK	356.5 ± 14.26b	0.44 ± 0.03a	370.07 ± 24.06a	2.25 ± 0.05a
2	100 C	397.77 ± 20.81ab	0.49 ± 0.05a	379.53 ± 6.4a	2.25 ± 0.01a
3	85 C + 15 G	387.2 ± 16.14ab	0.53 ± 0.06a	373.3 ± 11.21a	2.14 ± 0.02a
4	70 C + 30 G	372.87 ± 9.75ab	0.46 ± 0.02a	387.07 ± 18.02a	2.13 ± 0.01a
5	55 C + 45 G	413.8 ± 4.51a	0.59 ± 0.05a	371.3 ± 13.65a	2.14 ± 0.02a
6	40 C + 60 G	382.27 ± 12.91ab	0.5 ± 0.05a	393.37 ± 16.29a	2.12 ± 0.1a

在 2023 年绿肥替代化肥不同处理下种植小麦秸秆籽粒养分(表 3)可知, 55 C + 45 G 与 CK 处理小麦秸秆中有机碳含量差异显著, 空白处理与不同的施肥处理小麦籽粒秸秆养分含量均无差异, 在小麦籽粒养分中, 相比较 100 C 处理, 70 C + 30 G 与 40 C + 60 G 粒籽中有机碳成分有所升高, 85 C + 15 G、70 C + 30 G、55 C + 45 G 和 40 C + 60 G 处理小麦籽粒中全氮含量都有略微降低, 说明在小麦生长发育过程中, 绿肥替代化肥处理对小麦籽粒中养分含量会有影响, 但并不会对小麦的籽粒养分含量发生太大的变化。

3.3. 麦后复种绿肥中土壤全氮、有机质和全碳含量

3.3.1. 麦后复种绿肥不同处理土壤全氮含量

麦后复种绿肥模式中长期施用绿肥替代化肥会对土壤全氮含量产生一定的影响(图 1)。小麦生育期间, 相较于 100 C 处理, 施用绿肥替代化肥可提高土壤全氮含量, 土壤全氮含量随着绿肥替代比例的提高呈现出不断上升的趋势, 提升幅度在 1.2%~9.6%, 绿肥替代比例超过 45% 的情况下, 与 100 C 处理差异达到显著水平, 且绿肥替代化肥处理的 55 C + 45 G, 40 C + 60 G 比当地传统施肥 100 C 土壤中全氮含量多 8.6%, 9.6%。毛叶苕子盛花期土壤中全氮含量有所差异, 55 C + 45 G, 40 C + 60 G 与当地传统施肥 100 C 土壤中全氮含量差异显著, 且比 100 C 处理土壤中全氮含量多 13.9%, 13.4%, 且绿肥复种处理相比较传统施肥 100 C 土壤中全氮提升幅度在 9.0%~13.9%, 相比较两个时期各处理全氮含量提升了 25.3%~33.7%, 复种绿肥处理相比较 CK, 100 C 处理土壤中全氮含量提升幅度大, 且土壤全氮含量要显

著高于 CK, 100 C 处理。

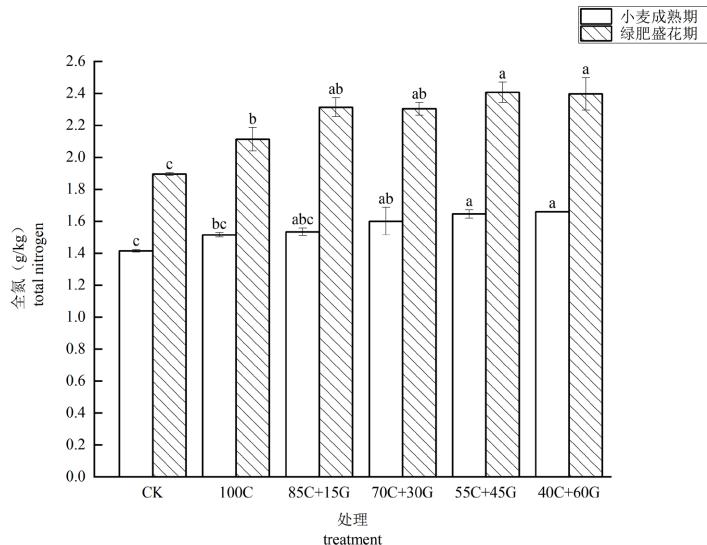


Figure 1. Soil total nitrogen content of green manure at maturity and bloom stage of wheat
图 1. 小麦成熟期绿肥盛花期土壤全氮含量

3.3.2. 麦后复种绿肥不同处理土壤有机质含量

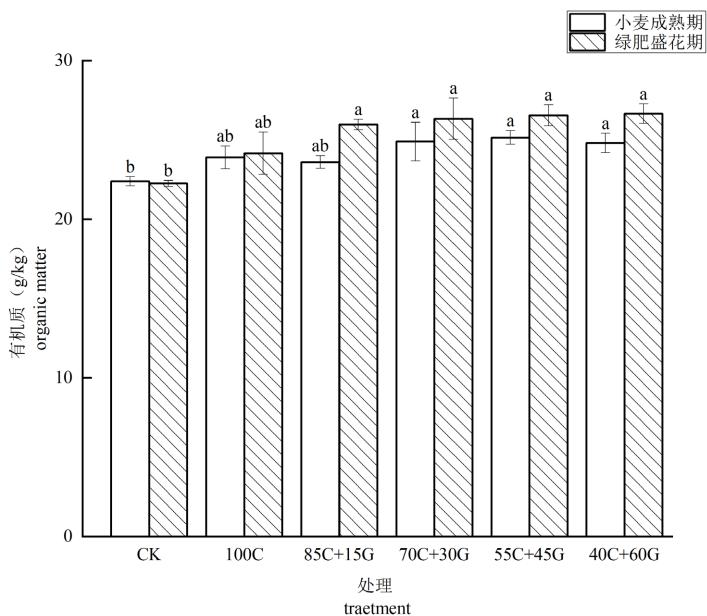


Figure 2. Soil organic matter content of green manure at maturity and bloom stage of wheat
图 2. 小麦成熟期绿肥盛花期土壤有机质含量

麦后复种绿肥模式中长期施用绿肥替代化肥会对土壤有机质含量产生一定的影响(图 2)。在小麦成熟期, 绿肥替代化肥处理的 70 C + 30 G, 55 C + 45 G, 40 C + 60 G 处理土壤有机质含量显著高于 CK 处理, 且均高于传统施肥 100 C 处理的土壤有机质含量, 相较于 100 C 处理土壤有机质含量高 4.2%, 5.2%, 3.8%, 而绿肥盛花期测得土壤中有机质含量可知, 复种绿肥毛叶苕子 85 C + 15 G, 70 C + 30 G, 55 C + 45 G,

40 C + 60 G 处理与 CK 空白处理差异显著, 且均高于传统施肥 100 C 处理, 相较于 100 C 处理土壤有机质含量高, 升高幅度在 7.4%~10.2%。绿肥生育期间, 各处理土壤中有机质含量的变化为, CK 处理土壤有机质含量降低 0.7%, 100 C 处理土壤有机质含量升高 1.1%, 85 C + 15 G 处理土壤有机质含量升高 9.1%, 70 C + 30 G 处理土壤有机质含量升高 5.4%, 55 C + 45 G 处理土壤有机质含量升高 5.3%, 40 C + 60 G 处理土壤有机质含量升高 6.9%。所以麦后复种绿肥有利于土壤中有机质含量的积累。

3.3.3. 麦后复种绿肥不同处理土壤全碳含量

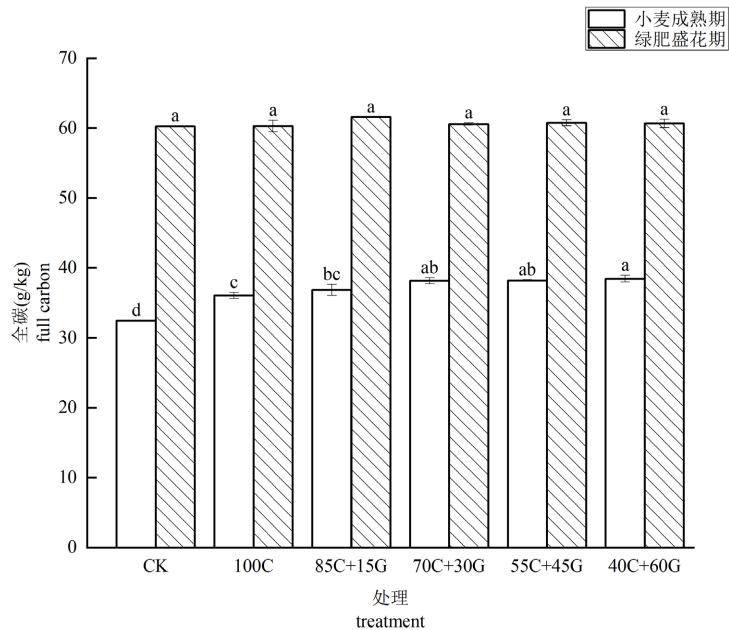


Figure 3. Soil full carbon content of green manure at maturity and bloom stage of wheat
图 3. 小麦成熟期绿肥盛花期土壤全碳含量

麦后复种绿肥模式中长期施用绿肥替代化肥会对土壤全碳含量产生一定的影响(图 3)。小麦成熟期测得土壤全碳含量可以看出, 绿肥替代化肥 70 C + 30 G, 55 C + 45 G, 40 C + 60 G 处理, 土壤全碳含量显著高于 CK, 100 C 处理, 且相较于传统施肥 100 C 处理土壤中全碳含量高 5.8%, 6.0%, 6.7%, 在绿肥盛花期测得土壤中全碳含量可以看出各处理直接无差异, 且复种绿肥对不同处理之间土壤全氮的含量无差异, 所以处理都处在一个稳定的区间内, 85 C + 15 G 处理土壤全碳含量最高, 为 61.61 G/KG。但在绿肥毛叶苕子生育期间总体来看, 无论是复种绿肥的 85 C + 15 G, 70 C + 30 G, 55 C + 45 G, 40 C + 60 G 处理, 还是无复种绿肥的 CK, 100 C 处理土壤中全碳的含量均有大幅度提升。

3.4. 麦后复种绿肥不同处理土壤硝态氮

3.4.1. 麦后复种绿肥不同处理土壤硝态氮

在麦后复种绿肥模式中, 小麦生育期绿肥替代化肥处理会提高土壤硝态氮的利用率(图 4), 复种绿肥生育过程中可帮助土壤重新储存硝态氮, 在小麦成熟期 85 C + 15 G, 70 C + 30 G, 55 C + 45 G, 40 C + 60 G 与 CK 处理差异显著, 与 100 C 处理土壤表层硝态氮含量差异显著, 相较于 100 C 处理, 土壤硝态氮含量分别减少 67.3%, 66.9%, 63.7%, 63.8%。在绿肥盛花期, 85 C + 15 G, 70 C + 30 G, 55 C + 45 G, 40 C + 60 G 与 CK, 100 C 处理差异显著, 相较于 100 C 处理, 土壤硝态氮含量分别增加 65.1%, 69.9%, 1.03%, 0.52%, 相比较小麦成熟期与绿肥盛花期土壤硝态氮含量, CK, 100 C 处理中土壤硝态氮含量有

明显降低, 分别减少 9.36 mG/KG, 11.71 mG/KG, 85 C + 15 G, 70 C + 30 G, 55 C + 45 G, 40 C + 60 G 处理中土壤硝态氮含量有明显升高, 升高幅度在 5.82 mG/KG~10.30 mG/KG, 绿肥生育期间, 闲置 CK, 100 C 处理土壤中硝态氮含量有明显下降, 分别降低 9.36 mG/KG, 11.71 mG/KG。由此可得在小麦生育期, 绿肥配施化肥处理的小麦更容易吸收土壤中硝态氮, 从图中明显看出复种绿肥与闲置土壤硝态氮含量的变化, 复种绿肥后土壤中硝态氮含量明显升高, 所以毛叶苕子生育期根系有利于土壤中硝态氮的储存。

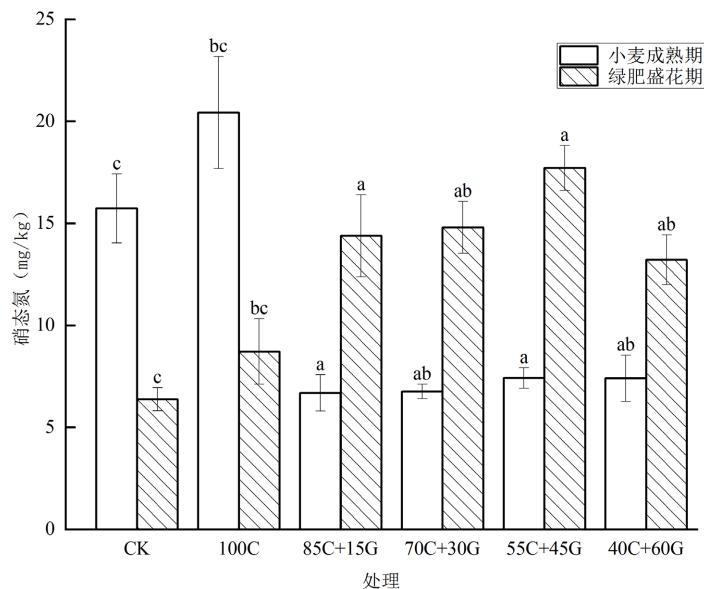


Figure 4. Soil nitrate nitrogen content of green manure at maturity and bloom stage of wheat
图 4. 小麦成熟期绿肥盛花期土壤硝态氮含量

3.4.2. 麦后复种绿肥不同处理土壤铵态氮

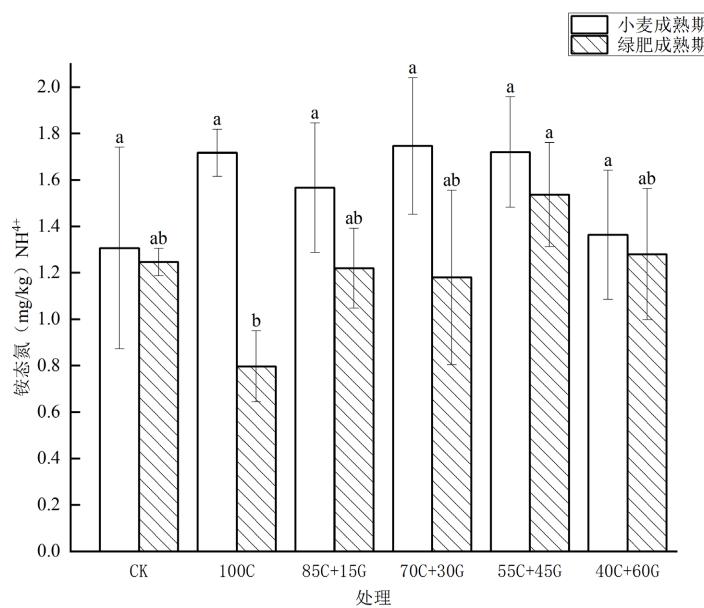


Figure 5. Soil ammonium nitrogen content of green manure at maturity and bloom stage of wheat
图 5. 小麦成熟期绿肥盛花期土壤铵态氮含量

在麦后复种绿肥模式中, 小麦收获期各施肥处理土壤铵态氮含量与CK处理无明显差异(图5), 但施肥处理土壤铵态氮含量均高于CK处理中土壤铵态氮含量, 在绿肥盛花期, 55 C + 45 G 处理显著高于100 C 处理土壤铵态氮含量, 其他处理均无显著性, 但绿肥替代化肥处理比传统施肥处理土壤铵态氮都高, 相比较小麦成熟期与绿肥盛花期每个处理之间土壤铵态氮含量, CK, 85 C + 15 G, 70 C + 30 G, 55 C + 45 G, 40 C + 60 G 各处理土壤铵态氮含量比小麦成熟期铵态氮含量均有降低, 在施肥处理中, 100 C 处理土壤铵态氮含量减少最多, 绿肥处理相比较100 C 处理土壤中铵态氮的含量损失会慢一些。说明, 在复种绿肥时期, 无论是闲置的CK, 100 C 处理还是复种绿肥的85 C + 15 G, 70 C + 30 G, 55 C + 45 G, 40 C + 60 G 均会消耗土壤中铵态氮的含量, 这个时期是土壤铵态氮含量降低的时期。

3.5. 麦后复种绿肥不同处理土壤酶活性

3.5.1. 麦后复种绿肥不同处理土壤脲酶活性

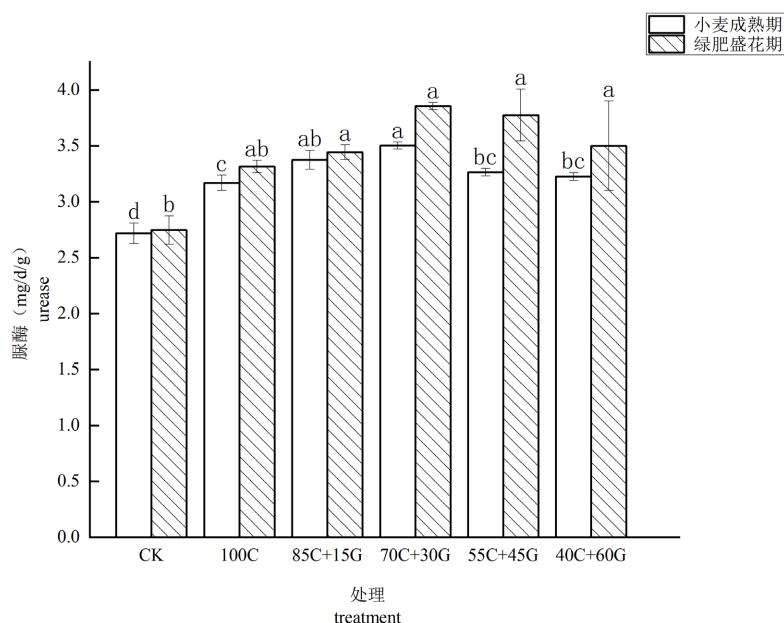


Figure 6. Soil urease activity of green manure at maturity and bloom stage of wheat
图 6. 小麦成熟期绿肥盛花期土壤脲酶活性

在麦后复种绿肥模式中, 通过小麦成熟期, 绿肥盛花期土壤中脲酶活性发现添加肥料均能提升土壤中脲酶活性(图6), 两个时期70 C + 30 G 处理的脲酶含量均最高, 绿肥替代量梯度提升到30%, 土壤脲酶活性随绿肥量逐渐加强, 超过30%后, 绿肥量再次增加土壤脲酶活性反而会有下降的趋势, 小麦成熟期绿肥替代处理土壤的脲酶活性均显著高于CK处理, 85 C + 15 G 处理与100 C 处理土壤的脲酶活性差异显著, 70 C + 30 G 处理与100 C 处理土壤的脲酶活性差异极显著, 当绿肥替代量达到30%时, 比100 C 处理土壤的脲酶活性高10.5%, 土壤的脲酶含量为3.50 mg/d/g, 但绿肥替代化肥处理土壤脲酶活性均高于当地传统施肥, 85 C + 15 G, 70 C + 30 G, 55 C + 45 G, 40 C + 60 G 处理土壤脲酶活性比100 C 处理分别提升6.5%, 10.5%, 3.0%, 1.8%。绿肥盛花期土壤脲酶活性中可知, 85 C + 15 G, 70 C + 30 G, 55 C + 45 G, 40 C + 60 G 处理土壤脲酶活性显著高于空白对照CK, 30%绿肥替代量处理的土壤中脲酶活性最强, 土壤中脲酶含量为3.86 mg/d/g, 绿肥替代化肥处理相比较传统施肥处理的土壤土壤脲酶活性均有所升高, 上升幅度在3.8%~16.4%, 相比较两个时期土壤中脲酶的活性, 绿肥毛叶苕子生育期均可增加土壤

中脲酶活性, 闲置期的 CK, 100 C 处理土壤中脲酶活性也有略微提升, 且两个时期土壤中脲酶活性有相近的趋势。

3.5.2. 麦后复种绿肥不同处理土壤过氧化氢酶活性

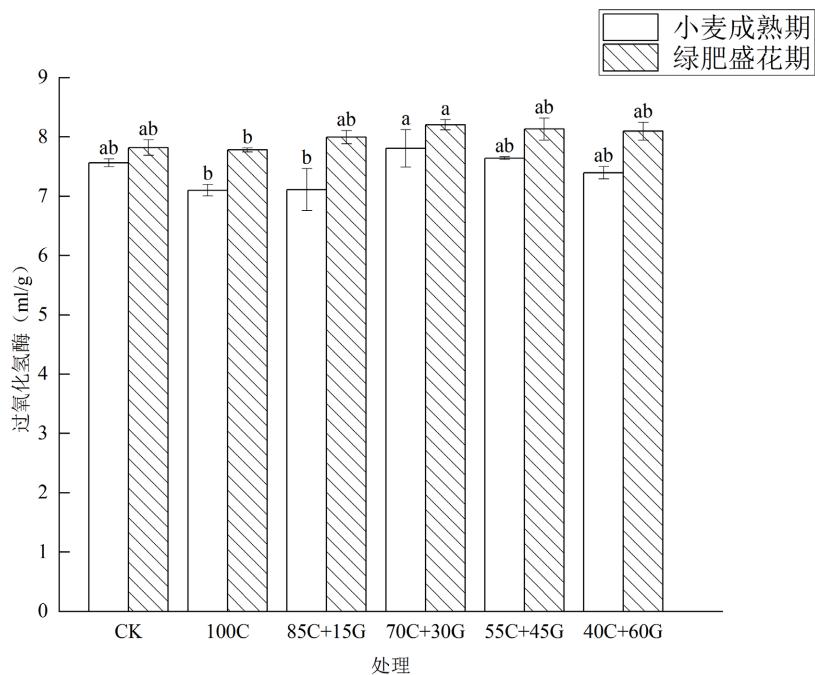


Figure 7. Soil peroxidase activity of green manure at maturity and bloom stage of wheat
图 7. 小麦成熟期绿肥盛花期土壤过氧化氢酶活性

麦后复种绿肥对土壤过氧化氢酶有一定的影响(图 7), 从小麦成熟期绿肥盛花期测得的土壤过氧化氢酶活性中可得 100 C 处理比 CK 处理土壤过氧化氢酶活性有略微下降趋势, 两个时期土壤过氧化氢酶活性最高为 70 C + 30 G 处理, 两个时期 70 C + 30 G 处理过氧化氢酶含量分别为 7.81 ml/g, 8.20 ml/g。在小麦成熟期测得的土壤酶活性中可知, 70 C + 30 G 处理与 100 C, 85 C + 15 G 处理土壤过氧化氢酶活性差异显著, 替代化肥处理的 85 C + 15 G, 70 C + 30 G, 55 C + 45 G, 40 C + 60 G 处理相比较传统施肥 100 C 处理土壤过氧化氢酶活性均有所提高, 分别提高 0.2%, 10%, 7.6%, 4.2%。在绿肥盛花期测得的土壤酶活性中可知, 70 C + 30 G 处理与 100 C 处理土壤过氧化氢酶活性差异显著, 替代化肥处理的 85 C + 15 G, 70 C + 30 G, 55 C + 45 G, 40 C + 60 G 处理相比较传统施肥 100 C 处理土壤过氧化氢酶活性均有所提高, 分别提高 2.8%, 5.4%, 4.5%, 4.1%, 从图中可以看出, 无论是作为绿肥生育期闲置的 100 C 和 CK 处理, 还是复种绿肥的 85 C + 15 G, 70 C + 30 G, 55 C + 45 G, 40 C + 60 G 处理相比较小麦成熟期测得的土壤过氧化氢酶活性均有不同程度的提高, 由此可得, 土壤闲置与复种绿肥都可增强土壤中过氧化氢酶的活性。

4. 讨论

4.1. 绿肥替代化肥对小麦产量的影响

2023 年较 2022 年产量相比有下降趋势, 这与长期定位实验田综合地力下降有关, 与刘学彤[13]和高杰军[14]研究结果一致, 其原因可能是随时间年限增加, 土壤供肥能力下降, 本实验得出, 在绿肥量达到

45% 后, 小麦的产量相比于其他绿肥化肥配施处理会减产, 配施绿肥处理比当地传统施肥增产 11.7%~25.1%, 平均增产 18.4%, 两年绿肥替代化肥在 15%~30% 时产量相比于当地传统施肥产量高且稳定。对于小麦籽粒秸秆的养分含量, 不同处理对小麦的籽粒和秸秆的养分影响微乎其微, 有研究表明[15] 小麦籽粒硝酸还原酶活性随氮肥用量的增加而提高, 籽粒氮含量也会随氮素用量的增加而增加原因, 本试验中测得各处理中籽粒全氮含量无明显差异相一致, 本实验是以等氮条件下绿肥替代化肥为试验, 施入麦田氮含量是相同的, 所以各处理中小麦秸秆籽粒中测得的全氮含量直接无差异。

4.2. 绿肥替代化肥对土壤全氮的影响

小麦收获后复种绿肥毛叶苕子后, 无论有无毛叶苕子种植的土壤全氮, 有机质, 全碳含量均有提升, 且有毛叶苕子种植处理的土壤中全氮, 有机质, 全碳含量高于无毛叶苕子种植。土壤有机质, 全氮是土壤供肥能力的一项重要指标, 而利用有机肥部分替代化肥是一种有效的提高土壤供肥能力的措施。田想[16]和吴茜虞[17]研究中表明绿肥或有机肥替代化肥可有效减少种植成本, 提高土壤全氮有, 机质, 全碳含量, 这与本研究的结果一致。本研究中采用的绿肥是一种清洁的有机肥源, 含有丰富的氮源, 毛叶苕子腐解过程可增加土壤全氮、有机质, 全碳含量, 改良土壤养分结构进而提高土壤供肥能力。且已有研究表明, 绿肥配施化肥可显著提升土壤中全氮含量[18], 这与本研究结果一致, 绿肥毛叶苕子配施化肥作为底肥的施入对土壤全氮含量有增加趋势, 且本研究还发现绿肥不同的替代比例会对土壤全氮含量产生一定的影响, 本研究以 40 C + 60 G 处理土壤全氮含量最高, 为 1.66 g/kg, 其原因可能是绿肥提供的氮素可更好的留在土壤中, 既减少麦田 N₂O 排放, 又提高了土壤的供肥能力, 所以绿肥毛叶苕子确实可以替代部分常规施氮肥的一部分, 并且不会降低土壤的养分, 从而达到减施化学氮的目的。

本试验中小麦成熟期绿肥配施化肥处理土壤硝态氮含量显著低于无绿肥配施处理的土壤, 复种绿肥毛叶苕子后有毛叶苕子种植的土壤中硝态氮含量均有大幅度升高, 无毛叶苕子种植的土壤中硝态氮含量反而会降低, 而且土壤中铵态氮的差异无显著性, 这与韩梅[19]的研究施肥土壤 0~20 cm 硝态氮含量差异显著研究结果一致, 而无绿肥毛叶苕子种植的土壤中硝态氮含量下降, 这与樊军[20]在陕西做的长期定位试验研究结果一致, 硝态氮的变化可能是因为无绿肥种植的土壤中由于长时间的土壤空闲, 土壤中本矿化成的硝态氮随灌水, 雨水淋溶向土壤深层移动, 使土壤浅层的硝态氮含量降低, 而毛叶苕子种植的土壤中硝态氮含量没有降低反而升高, 说绿肥毛叶苕子根系的固氮作用, 既能固定土壤中的硝态氮, 还能为土壤提供硝态氮, 所以有毛叶苕子种植的土壤中硝态氮含量会升高。小麦成熟期与绿肥盛花期测个麦田中土壤中铵态氮的含量无差异, 相比较绿肥成熟期有无绿肥种植的土壤相比较小麦成熟期土壤中铵态氮含量均有所降低, 这与苗艳芳[21]和孙亚斌[22]的研究结果一致, 硝铵态氮是旱地土壤中作物主要吸收的养分, 绿肥毛叶苕子的种植对土壤中铵态氮的需求量较高, 从而在绿肥生育期间降低了土壤中铵态氮的含量, 来年种植小麦时, 绿肥毛叶苕子配施化肥时, 绿肥分解后在土壤微生物的作用下, 将土壤中的有机氮转化为无机氮供作物生长发育。

农田土壤中生物酶的活性对土壤中氮素的循环和作物根系养分的供给有重要影响, 土壤中脲酶的过氧化氢酶的活性对农田温室气体的排放密切相关。通过研究本试验中脲酶和过氧化氢酶活性中可得, 在小麦成熟期, 绿肥毛叶苕子替代化肥处理土壤的两种酶中, 都呈现出先上升后下降的趋势, 且两种酶在 70 C + 30 G 处理中活性最高, 在绿肥毛叶苕子盛花期两种酶也呈现出先上升后下降的趋势, 70 C + 30 G 处理中活性最高, 由此可得脲酶和过氧化氢酶在绿肥替代化肥量在一定的范围内有上升趋势, 达到峰值后绿肥量再升高土壤中脲酶和过氧化氢酶的活性反而会有所降低, 这与秦玮玺[23]和李潮海[24]的研究结果一致, 结果表明绿肥的施加量对土壤中脲酶和过氧化氢酶的活性在一定范围内可以刺激这两种酶的活性, 绿肥毛叶苕子盛花期相比较小麦成熟期测得土壤脲酶和过氧化氢酶活性均有所提高, 毛叶苕子种植

期间, 有无毛叶苕子种植的土壤中酶活性均有升高, 且脲酶体现出绿肥参与处理的土壤相比较无绿肥参与的土壤脲酶活性差异显著, 但毛叶苕子种植的土壤相比较无毛叶苕子种植的 CK 和 100 C 处理的土壤中两种酶的活性会更高, 所以说明绿肥替代化肥处理的小麦生育期, 还是绿肥种植期, 绿肥参与的土壤中土壤酶活性会更高, 无论是绿肥作为配施化肥的肥料还是作为农田作物都有利于提升土壤中脲酶和过氧化氢酶的活性。

5. 结论

本实验麦后复种绿肥对土壤中有机质、全氮、全碳和硝态氮含量均有不同程度增加, 绿肥种植也能增加土壤中脲酶和过氧化氢酶的活性, 70 C + 30 G 处理中小麦成熟期, 绿肥盛花期酶活性达到了最高, 结合 2022 年 2023 年小麦平均产量, 处理 70 C + 30 G 平均产量最高, 为 $4821 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 所以在西北灌区麦后复种绿肥这个模式中, 搭配 70% 化肥氮 + 30% 绿肥氮处理效果最佳, 可同时土壤酶活性最高作物经济最好, 达到双赢的目的。

基金项目

国家现代农业产业技术体系项目(CARS-22); 国家重点研发计划项目(2021YFD1700204)。

参考文献

- [1] 陈礼智, 王隽英, 张淑珍, 等. 绿肥在持续农业中的地位和作用[C]//全国绿肥试验网的发展及其成就. 沈阳: 辽宁大学出版社, 1992: 1-7.
- [2] 刘宏伟. 绿肥作物还田后腐解规律及对土壤肥力与玉米产量的影响[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- [3] Khan, R.A.A., Ullah, N., Alam, S.S., et al. (2019) Management of *Ralstonia solanacearum* (Smith) Wilt in Tomato Using Green Manure of the Medicinal Plant *Adhatoda vasica* (L.) Nees. *Gesunde Pflanzen*, **72**, 129-138. <https://doi.org/10.1007/s10343-019-00492-4>
- [4] 曹文超, 郭景恒, 宋贺, 等. 设施菜田土壤 pH 和初始 C/NO₃⁻对反硝化产物比的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 24(5): 23-25.
- [5] 周泉, 王龙昌, 邢毅, 等. 稻秆覆盖条件下紫云英间作油菜的土壤团聚体及有机碳特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 160-167.
- [6] 张钦, 于恩江, 林海波, 等. 连续种植不同绿肥的土壤团聚体碳分布及其固持特征[J]. 中国土壤与肥料, 2019(1): 71-78.
- [7] 连泽晨. 绿肥和秸秆还田对水稻产量、养分吸收及土壤肥力的影响[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- [8] 刘威, 熊又升, 徐祥玉, 等. 减量施肥模式对稻麦轮作体系作物产量和养分利用效率的影响[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(5): 91-99.
- [9] De Jesus Souza, B., Do Carmo, D.L., Santos, R.H.S., et al. (2019) Residual Contribution of Green Manure to Humic Fractions and Soil Fertility. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, **19**, 878-886. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00086-z>
- [10] 莫宇, 高峰, 王宇, 等. 不同施氮条件下再生水灌溉对土壤理化性质及脲酶活性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(1): 95-100.
- [11] 刘瑾. 施氮对旱作农田土壤温室气体排放的影响因素研究[D]: [博士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2022.
- [12] 吕艳杰, 于海燕, 姚凡云, 等. 稻秆还田与施氮对黑土区春玉米田产量、温室气体排放及土壤酶活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(11): 1456-1463.
- [13] 刘学彤, 郑春莲, 曹薇, 等. 长期定位施肥对土壤有机质、不同形态氮含量及作物产量的影响[J]. 作物杂志, 2021(4): 130-135.
- [14] 高杰军, 于豪杰, 王家嘉, 等. 长期秸秆直接还田对小麦生长和产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(14):

- 143-145.
- [15] 葛君, 姜晓君. 施氮量对小麦旗叶光合特性、SPAD 值、籽粒产量及碳氮代谢的影响[J]. 天津农业科学, 2019, 25(3): 1-4.
- [16] 田想, 张威, 伍玉鹏, 等. 绿肥种植配施减量氮肥对橘园土壤肥力及果实质量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(6): 197-204.
- [17] 吴茜虞, 续勇波, 雷宝坤, 等. 粪肥替代对稻田土壤氮素、有机质及氮素吸收利用率的影响[J]. 西南农业学报, 2023, 36(10): 2217-2223.
- [18] 吴科生, 车宗贤, 包兴国, 等. 长期翻压绿肥对提高灌漠土土壤肥力和作物产量的贡献[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(6): 1134-1144.
- [19] 韩梅, 胤婷婷, 曹卫东. 青海高原长期复种绿肥毛叶苕子对土壤供氮能力的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(6): 104-109.
- [20] 樊军, 郝明德, 党廷辉. 旱地长期定位施肥对土壤剖面硝态氮分布与累积的影响[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 23-26.
- [21] 苗艳芳, 李生秀, 扶艳艳, 等. 旱地土壤铵态氮和硝态氮累积特征及其与小麦产量的关系[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1013-1021.
- [22] 孙亚斌, 胡发龙, 韩梅, 等. 麦后复种绿肥模式与施氮制度对土壤氮素及小麦产量的互作效应[J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(4): 57-64, 74.
- [23] 秦玮玺, 斯贵才, 雷天柱, 等. 氮肥添加对土壤微生物生物量及酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(1): 170-175.
- [24] 李潮海, 王小星, 王群, 等. 不同质地土壤玉米根际生物活性研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(2): 412-418.