

# 长期施用控释掺混尿素对麦田土壤酶活性及养分的影响

高丽超<sup>1</sup>, 郑文魁<sup>1,2</sup>, 程运龙<sup>1</sup>, 张民<sup>1</sup>, 王淳<sup>1</sup>

(1. 土肥高效利用国家工程研究中心, 山东农业大学资源与环境学院,  
山东 泰安 271018; 2. 山东农大肥业科技股份有限公司, 山东 肥城 271600)

**摘要:** 为探究秸秆还田条件下长期施用控释掺混尿素对土壤酶活性及养分状况的影响。基于自 2008 年开始的长期定位施肥田间试验, 于 2021 年小麦返青期、挑旗期、灌浆期和成熟期采集 0—20 cm 土壤样品, 以不施氮肥为对照, 研究秸秆还田条件下控释掺混尿素(CRF)和普通尿素(BBF)2 种氮肥类型及不施氮(N 0 kg/hm<sup>2</sup>)、减量(N 120 kg/hm<sup>2</sup>, N1)、常量(N 240 kg/hm<sup>2</sup>, N2)和增量(N 360 kg/hm<sup>2</sup>, N3)4 个施氮水平对麦季土壤酶活性及土壤养分的影响, 并对指标进行相关性分析。结果表明: 相同施氮水平下的控释掺混尿素处理较普通尿素处理土壤蔗糖酶活性提高 9.6%~21.0%, 纤维素酶活性提高 9.0%~31.5%。在小麦返青期和成熟期, 控释掺混尿素处理的土壤硝态氮含量显著高于普通尿素处理, 提高 23.2%~145.0%。在返青期, CRF2 处理土壤铵态氮含量较 BBF2 处理显著提高 148.0%; 成熟期, 各施氮水平的控释掺混尿素处理的土壤铵态氮含量均显著高于普通尿素处理。CRF1 和 CRF2 处理的小麦籽粒产量分别较 BBF1 和 BBF2 处理提高 9.8%和 12.4%。土壤脲酶、过氧化氢酶活性与土壤全氮、有机质、硝态氮含量呈显著正相关关系, 过氧化氢酶、纤维素酶活性与速效磷和有效钾含量呈显著负相关关系。秸秆还田配施控释掺混尿素较普通尿素提高小麦生育中后期土壤酶活性, 更有利于小麦前、后期速效氮供应, 长期施用显著提高土壤有机质含量, 可提高土壤的保肥性和缓冲性, 培肥土壤, 其中以常量控释掺混尿素施肥为最优处理。

**关键词:** 控释掺混尿素; 土壤酶; 土壤养分; 长期施肥

中图分类号: S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)02-0343-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2023.02.040

## Effects of Long-term Application of Blended Controlled-release Urea on Soil Enzyme Activities and Nutrients in Stubble Wheat Fields

GAO Lichao<sup>1</sup>, ZHENG Wenkui<sup>1,2</sup>, CHENG Yunlong<sup>1</sup>, ZHANG Min<sup>1</sup>, WANG Chun<sup>1</sup>

(1. National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources,  
College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018;  
2. Shandong Nongda Fertilizer Technology Co., Ltd., Feicheng, Shandong 271600)

**Abstract:** In order to investigate the effects of long-term application of blended controlled-release urea (CRF) on soil enzyme activities and nutrient status under straw returning condition to the field, soil samples ranging from 0 to 20 cm were collected from the field experiment of long-term positioning fertilization since 2008 at the rejuvenation stage, flag stage, filling stage and maturity stages of wheat in 2021. Without fertilized nitrogen as a control, the effects of CRF and normal urea (BBF), and four application levels that no nitrogen application (N 0 kg/hm<sup>2</sup>), reduced nitrogen application (N 120 kg/hm<sup>2</sup>, N1), conventional nitrogen application (N 240 kg/hm<sup>2</sup>, N2) and increased nitrogen application (N 360 kg/hm<sup>2</sup>, N3) on soil enzyme activities and soil nutrients in wheat season were studied under straw returning, and the correlation analysis of the indexes was conducted. The results showed that under the same nitrogen application level, soil sucrase activity and cellulase activity were increased by 9.6%~21.0% and 9.0%~31.5% under CRF treatment compared with BBF treatment, respectively. The soil nitrate nitrogen content in CRF treatment was significantly higher than that in BBF treatment at the rejuvenation and maturity stages of wheat, increasing by 23.2%~145.0%. At the rejuvenation stage, the soil NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N content under CRF2 treatment was significantly increased by 148.0% compared with that in BBF2 treatment. At maturity stage, the content of ammonium nitrogen in soil

收稿日期: 2022-07-25

资助项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2020QD113)

第一作者: 高丽超(1997—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土肥资源高效利用研究。E-mail: lcgao2020@163.com

通信作者: 郑文魁(1989—), 男, 讲师, 硕士生导师, 主要从事土壤化学过程与养分高效利用研究。E-mail: wkzheng2013@163.com

under CRF treatments was significantly higher than that of BBF treatments at all nitrogen application levels. Compared with BBF1 and BBF2, CRF1 and CRF2 treatments increased wheat grain yield by 9.8% and 12.4%, respectively. Soil urease and catalase activities were significantly positively correlated with the contents of soil total nitrogen, organic matter and nitrate nitrogen, while catalase and cellulase activities were significantly negatively correlated with phosphorus and available potassium contents. Straw returning combined with CRF increased soil enzyme activities at the middle and late growth stages of wheat compared with BBF, and was more conducive to the supply of available nitrogen at the early and late growth stages of wheat. Long-term application of straw returning combined with CRF significantly increased soil organic matter content, improved soil fertility retention and buffering, and improved soil fertility. Among them, the optimal treatment was CRF with conventional fertilizer application rate.

**Keywords:** blended controlled-release urea; soil enzymes; soil nutrients; long-term fertilization

氮肥对作物生长和产量的提高至关重要。目前我国是最大的氮肥投入国,农田氮素盈余量巨大,氮素损失严重<sup>[1]</sup>。氮肥流失造成土壤酸化和次生盐渍化,引起土壤肥力下降,还对大气和水体造成污染,不利于农田的可持续发展<sup>[2]</sup>。控释氮肥的氮素养分释放速率与作物的吸收速率保持一致,能够显著提高氮素利用率,改良产量构成因子,提高作物产量和品质<sup>[3]</sup>。因此,应用控释氮肥是改善农业氮素管理、保障稳产高产、减少氮素投入的重要途径之一。

秸秆是一种宝贵的农业生物质资源,秸秆还田可提高土地肥力,有效减少化肥的使用<sup>[4-5]</sup>。研究<sup>[6-7]</sup>表明,秸秆还田配施氮肥对土壤—农作物体系中氮素投入和输出平衡有积极作用,可以提高土壤氮营养元素的供应能力和利用效率;Wang 等<sup>[8]</sup>研究结果表明,秸秆还田只有配施合理的氮肥才可以提高土壤的氮素供应能力,供农作物吸收利用。

土壤是农业之本,维持好土壤环境是农业可持续发展的重要措施。合理的秸秆还田配施氮肥还可以形成农作物所喜好的土壤环境<sup>[9]</sup>。土壤酶活性能够反映土壤生物活性和肥力,是影响土壤肥力的关键因素。也有研究<sup>[10]</sup>表明,秸秆还田可提高土壤脲酶、磷酸酶和纤维素酶等土壤酶活性;冯朋博等<sup>[11]</sup>研究表明,普通尿素与控释尿素配施能够提高土壤脲酶、碱性磷酸酶活性,调节耕层土壤不同氮形态含量,持续稳定地为玉米生长发育提供所需的氮素。施用控释掺混氮肥可以在减少施肥量基础上,提高氮肥利用率和水稻产量,具有显著的经济和生态效益<sup>[12]</sup>。与常规尿素相比,秸秆与缓控释肥配施可以显著减少双季稻田氨挥发<sup>[13]</sup>,提高土壤有机质含量,小麦产量提高 9.1%~23.6%,玉米产量提高 2.2%~3.7%<sup>[14]</sup>。秸秆还田配施控释掺混尿素可协同增效,显著提高土壤肥力和作物产量<sup>[15]</sup>。近年来,随着秸秆还田技术的推广,在秸秆还田基础上如何优化氮肥施用的种类、施肥量、施肥时间和施用方法一直是农业研究的热

点。相关研究多集中于作物产量和品质、土壤肥力和氮吸收利用等方面,对于不同氮肥类型与秸秆还田配施的研究较少,目前秸秆还田配施控释掺混肥在小麦—玉米轮作体系中普遍应用,但该施肥模式下对于土壤酶活性研究较少,长期研究更为缺乏。本文通过自 2008 年开始的大田定位试验,探讨长期秸秆还田下不同氮肥种类和水平之间对土壤酶活性和土壤养分状况的影响,从而为秸秆还田配施控释掺混尿素技术推广提供理论依据及数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

试验地点位于山东省淄博市桓台县生态与可持续发展实验站(36°57'75"N,117°59'21"E),年平均气温 13.0℃,年降水量 640.5 mm,无霜期约 200 天,在中国土壤系统分类中,试验区土壤土类为淡色潮湿锥形土,亚类为石灰淡色潮湿锥形土(Carbonatic Ochri-Aquic Cambosols),土壤质地为粉土(含黏粒 14.03%,砂粒 12.49%,粉粒 73.48%)质地。定位试验开始时(2008 年 6 月)耕层土壤基础性质为 pH 8.35(土水比 1:2.5),速效磷含量 9.2 mg/kg,速效钾含量 112.5 mg/kg,硝态氮含量 5.0 mg/kg,铵态氮含量 4.1 mg/kg,有机质含量 18.3 g/kg,全氮含量 0.81 g/kg<sup>[16]</sup>。

供试小麦品种为“济麦 22”,生育期约 240 天,玉米品种为“郑单 958”,生育期约 103 天。冬小麦于每年 10 月中旬播种,翌年 6 月中旬收获,夏玉米每年 6 月下旬种植,10 月上旬收获。小麦播种量为 120 kg/hm<sup>2</sup>,玉米种植密度为 82 000 株/hm<sup>2</sup>。作物籽粒收获后,秸秆机械化粉碎直接还田,还田深度为 20 cm。其他管理措施同农户常规管理。供试肥料为硫加树脂包膜控释尿素(PSCU,含 N 35%)和树脂包膜控释尿素(PCU,含 N 43%),养分释放期均为 3 个月,均由土肥高效利用国家工程研究中心研制生产。大颗粒尿素(Urea,含 N 46%)、过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 16%)和硫酸钾(含 K<sub>2</sub>O 50%)。

1.2 试验设计

试验共设 7 个处理,每个处理重复 3 次,试验小区面积为 26 m<sup>2</sup>。各处理分别为:(1)CK,不施氮肥;(2)CRF1,1/2 常规施氮量的控释掺混尿素;(3)CRF2,常规施氮量控释掺混尿素;(4)CRF3,3/2 常规施氮量的控释掺混尿素;(5)BBF1,1/2 常规施氮量的普通尿素;(6)BBF2,常规施氮量的普通尿素;(7)BBF3,3/2 常规施氮量的普通尿素。其中 CRF1、CRF2 和 CRF3 处理中的氮肥为 PSCU:PCU:Urea 按纯氮比例 5:2:3 掺混而成,一次性基施;BBF1、BBF2 和 BBF3 处理中的氮肥为普通尿素,60%基施,40%于拔节期追肥。各处理磷、钾肥均一次性基施。具体施肥方案见表 1。

表 1 施肥处理和施肥量

| 处理   | 冬小麦肥料施用量/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) |                               |                  | 夏玉米肥料施用量/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) |                               |                  | 年施氮量/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> ) |
|------|-------------------------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------------|-------------------------------|------------------|--------------------------------------------------|
|      | N                                   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | N                                   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O |                                                  |
| CK   | 0                                   | 120                           | 90               | 0                                   | 75                            | 300              | 0                                                |
| CRF1 | 120                                 | 120                           | 90               | 150                                 | 75                            | 300              | 270                                              |
| CRF2 | 240                                 | 120                           | 90               | 300                                 | 75                            | 300              | 540                                              |
| CRF3 | 360                                 | 120                           | 90               | 450                                 | 75                            | 300              | 810                                              |
| BBF1 | 120                                 | 120                           | 90               | 150                                 | 75                            | 300              | 270                                              |
| BBF2 | 240                                 | 120                           | 90               | 300                                 | 75                            | 300              | 540                                              |
| BBF3 | 360                                 | 120                           | 90               | 450                                 | 75                            | 300              | 810                                              |

注:CK 为不施氮肥;CRF1 为 1/2 常规施氮量的控释掺混尿素;CRF2 为常规施氮量控释掺混尿素;CRF3 为 3/2 常规施氮量控释掺混尿素;BBF1 为 1/2 常规施氮量的普通尿素;BBF2 为常规施氮量的普通尿素;BBF3 为 3/2 常规施氮量的普通尿素。下同。

1.3 样品采集与测定

于 2021 年期采集小麦返青期(3 月 9 日)、挑旗期(4 月 14 日)、灌浆期(5 月 13 日)、成熟期(6 月 9 日)0—20 cm 土壤样品,采用对角线 5 点取样法,充分混合后采用四分法,留取约 200 g 土壤样品,装密封袋,带回实验室,将样品分为 2 份:一份过 2 mm 筛,置于-20 ℃冰箱用于土壤酶活性和硝态氮、铵态氮的测定;另一份置于遮光处自然风干,研磨并分别过 2,0.25 mm 筛,测定土壤样品的理化性质。

土壤脲酶采用苯酚钠一次氯酸钠比色法测定;过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法测定;碱性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法测定;蔗糖酶和纤维素酶活性采用 3,5—二硝基水杨酸比色法测定<sup>[17]</sup>。土壤硝态氮含量采用 KCl 浸提—双波长紫外分光光度法测定;铵态氮含量采用 KCl 浸提—靛酚蓝比色法测定;有机质含量采用重铬酸钾—外加热法测定;全氮含量采用全自动定氮仪测定;有效磷含量采用 NaHCO<sub>3</sub> 浸提—钼锑抗比色法测定;速效钾含量采用 NH<sub>4</sub> OAc 浸提—火焰光度计测定<sup>[18]</sup>。

1.4 数据分析方法

数据处理与统计分析通过 Excel 2019 和 SPSS 23.0 软件完成,土壤酶活性与土壤养分选取单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)进行多重比较( $p=0.05$ )。相关性分析使用斯皮尔曼(Spearman)法( $p<0.05$ , $p<0.01$ );采用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田下控释掺混尿素对土壤酶活性的影响

2.1.1 秸秆还田下控释掺混尿素对土壤脲酶活性的影响 在返青期,不同氮肥类型处理的脲酶活性差异不显著(图 1);从施肥量来看,BBF 处理中增施氮肥处理脲酶活性显著高于常量以及减量施氮处理,而 CRF 处理 3 个施肥水平间脲酶活性无显著差异。在挑旗期、灌浆期和收获期,增施氮肥处理下,BBF3 处理脲酶活性显著高于 CRF3 处理,提高 7.3%~23.2%。其余施氮水平下 2 种氮肥类型间差异不显著。在灌浆期和成熟期,控释掺混尿素处理 3 个施肥水平间脲酶活性无显著差异,普通尿素处理中增施氮肥处理脲酶活性显著高于常量以及减量氮肥处理。整体来看,减量和常量施氮处理下不同氮肥类型间脲酶活性差异不显著,过量施氮下,普通尿素处理脲酶活性在挑旗期、灌浆期和收获期显著高于控释掺混尿素处理,提高 7.3%~23.2%。

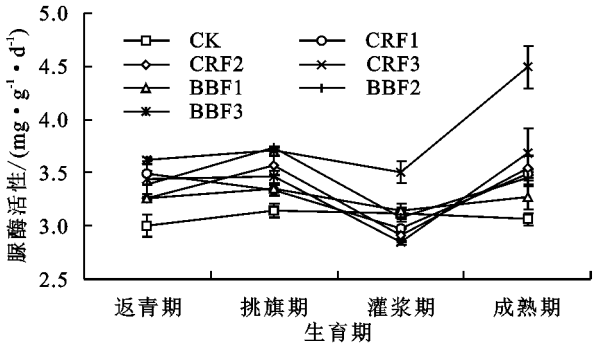


图 1 不同处理的小麦各生育期土壤脲酶活性

2.1.2 秸秆还田下控释掺混尿素对土壤碱性磷酸酶活性的影响 土壤碱性磷酸酶活性随生育期呈现先降低后稳定的趋势(图 2),施氮肥显著提高土壤碱性磷酸酶活性,相同施肥量下不同氮肥类型间碱性磷酸酶活性无显著差异。同一氮肥类型下,在返青期,CRF1 处理碱性磷酸酶活性显著高于 CRF3 处理,在挑旗期,BBF2 处理碱性磷酸酶活性显著高于 BBF1 处理,在灌浆期,CRF2 和 BBF2 处理碱性磷酸酶活性较 CRF3 和 BBF3 处理分别显著提高 7.8%和 6.6%。在成熟期,各施氮肥处理间碱性磷酸酶活性无显著差异。

2.1.3 秸秆还田下控释掺混尿素对土壤过氧化氢酶活性的影响 土壤过氧化氢酶活性随小麦生育期呈现先升高后稳定的趋势(图 3)。相同施氮量处理下,

返青期 CRF3 处理过氧化氢酶活性较 BBF3 处理提高 9.4%，挑旗期 CRF1 处理过氧化氢酶活性较 BBF1 处理提高 6.8%，其余时期各施氮量处理下不同氮肥类型之间过氧化氢酶活性无显著差异。在返青期，不同氮肥处理间均表现出增量施氮处理过氧化氢酶活性显著高于常量和减量施氮处理，且常量和减量施氮处理间过氧化氢酶活性无显著差异。控释掺混尿素处理下，挑旗期 CRF1 处理过氧化氢酶活性显著高于 CRF2 和 CRF3 处理，灌浆期 CRF1 和 CRF2 处理过氧化氢酶活性显著高于 CRF3 处理，成熟期 CRF1 处理过氧化氢酶活性显著高于 CRF3 处理，其他处理间差异不显著。在挑旗期、灌浆期和成熟期，普通尿素处理各施氮水平下无显著差异。

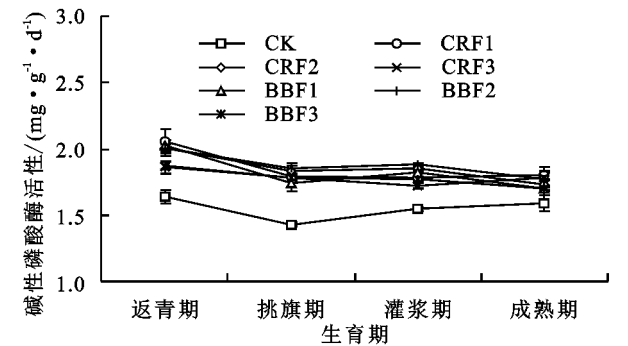


图 2 不同处理的小麦各生育期土壤碱性磷酸酶活性

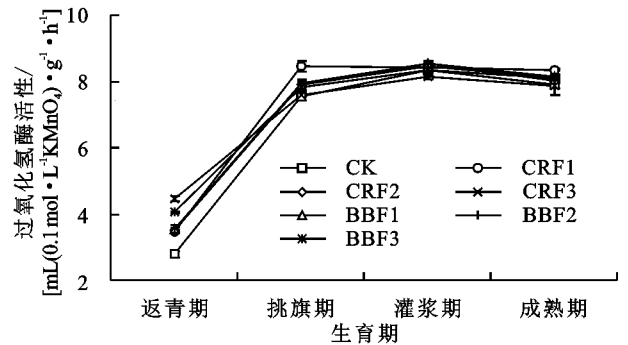


图 3 不同处理的小麦各生育期土壤过氧化氢酶活性

2.1.4 秸秆还田下控释掺混尿素对土壤蔗糖酶活性的影响 土壤蔗糖酶活性随生育期呈现先降低后升高再降低的趋势(图 4)。在返青期，相同施氮水平下，CRF1 处理蔗糖酶活性显著高于 BBF1 处理，BBF2 处理蔗糖酶活性显著高于 CRF2 处理。在挑旗期，控释掺混尿素处理 CRF2 和 CRF3 处理蔗糖酶活性显著高于 CRF1 处理，分别提高 21.0% 和 18.4%；普通尿素处理 BBF2 处理蔗糖酶活性显著高于其他 2 个氮肥水平。相同施氮水平下，CRF2 和 CRF3 处理蔗糖酶活性显著高于 BBF2 和 BBF3 处理，分别提高 12.6% 和 21.6%。在灌浆期，同一氮肥类型不同施氮水平间蔗糖酶活性差异不显著。相同施氮水平下，CRF1 和 CRF2 处理蔗糖酶活性显著高于 BBF1 和 BBF2 处理，分别提高 10.4% 和 9.6%。在成熟期，控

释掺混尿素处理 CRF3 处理蔗糖酶活性显著高于 CRF2 处理；普通尿素处理下不同施氮水平间蔗糖酶活性差异不显著。相同施氮水平下，CRF3 处理蔗糖酶活性较 BBF3 处理显著提高 16.7%。

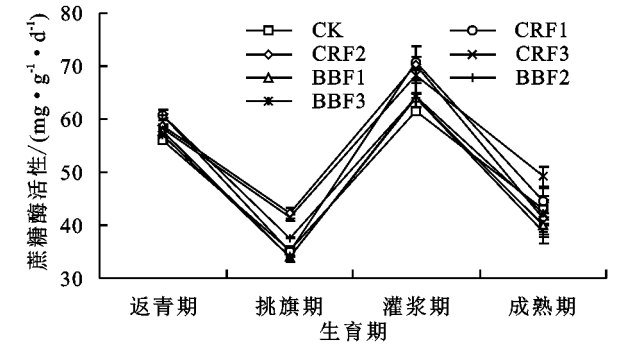


图 4 不同处理的小麦各生育期土壤蔗糖酶活性

2.1.5 秸秆还田下控释掺混尿素对土壤纤维素酶活性的影响 土壤纤维素酶活性随小麦生育期基本呈现先降低后升高的趋势(图 5)。控释掺混尿素处理下，灌浆期 CRF1 处理纤维素酶活性较 CRF3 处理显著提高 9.2%，成熟期 CRF1 处理纤维素酶活性显著高于 CRF2 和 CRF3 处理，分别提高 25.1% 和 14.8%，其他时期不同施氮水平下各处理纤维素酶活性差异不显著；普通尿素处理下，各时期下不同施氮水平处理间纤维素酶活性无显著差异。同一施氮水平下，返青期 CRF2 处理纤维素酶活性较 BBF2 处理显著提高 20.4%，灌浆期 CRF1 和 CRF3 处理纤维素酶活性分别较 BBF1 和 BBF3 处理显著提高 12.4% 和 9.0%，成熟期 CRF1 处理纤维素酶活性较 BBF1 处理显著提高 31.5%，其他时期各施氮水平下不同氮肥类型间纤维素酶活性差异达不到显著水平。

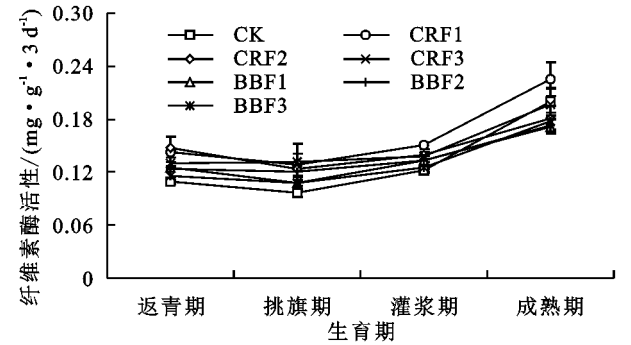


图 5 不同处理的小麦各生育期土壤纤维素酶活性

2.2 秸秆还田下控释掺混尿素对土壤养分的影响 2.2.1 秸秆还田下控释掺混尿素对土壤全氮、有机质含量的影响 在小麦成熟期，控释掺混尿素处理下，各施氮水平处理间全氮含量无显著差异，CRF2 和 CRF3 处理土壤有机质含量较 CRF1 处理显著提高 7.0% 和 8.0%(表 2)。普通尿素处理下，土壤全氮含量随施氮量增加而显著提高，BBF3 处理土壤有机质含量显著高于其余 2 个水平处理；同一施氮水平下，减量施氮下控释掺混尿素处理全氮含量比普通尿素处理提高 14.1%。

不同氮肥处理下有机质含量差异不显著。控释掺混尿素处理常量过量施氮处理较减量施氮处理提高土壤碳氮比,而普通尿素处理常量过量施氮处理较减量施氮处理降低土壤碳氮比,减量施氮下控释掺混尿素处理较普通尿素处理降低土壤碳氮比。

表 2 小麦成熟期全氮和有机质含量

| 处理   | 全氮含量/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 有机质含量/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 碳氮比         |
|------|--------------------------------|---------------------------------|-------------|
| CK   | 0.95±0.0023c                   | 19.46±0.06d                     | 11.92±0.01b |
| CRF1 | 1.13±0.0038ab                  | 21.22±0.31c                     | 10.90±0.12d |
| CRF2 | 1.15±0.0059ab                  | 22.71±0.18ab                    | 11.47±0.05c |
| CRF3 | 1.15±0.0059ab                  | 22.92±0.09a                     | 11.57±0.10c |
| BBF1 | 0.99±0.0070c                   | 21.14±0.03c                     | 12.44±0.07a |
| BBF2 | 1.11±0.0144b                   | 21.53±0.17bc                    | 11.29±0.17c |
| BBF3 | 1.16±0.0344a                   | 22.91±0.96a                     | 11.45±0.14c |

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

2.2.2 秸秆还田下控释掺混尿素对土壤硝态氮和铵态氮含量的影响

除灌浆期 CRF1 和 CRF2 处理土

壤硝态氮含量差异不显著外,各时期土壤硝态氮含量随施氮量增加而增加(表 3)。在返青期和成熟期,同一施氮水平下,控释掺混尿素处理土壤硝态氮含量均显著高于普通尿素处理,提高 23.2%~145.0%。在挑旗期,BBF2 和 BBF3 处理土壤硝态氮含量显著高于 CRF2 和 CRF3 处理,分别提高 12.1%和 32.1%。在灌浆期,BBF2 处理硝态氮含量显著高于 CRF2 处理,而减量和增量施氮水平下控释掺混尿素硝态氮含量显著高于普通尿素处理。

在返青期,CRF2 处理土壤铵态氮含量较 CRF1 和 CRF3 处理分别提高 85.5%和 74.1%,普通尿素处理各施氮水平间无显著差异,CRF2 处理土壤铵态氮含量显著高于 BBF2 处理,提高 148.0%。在挑旗期和成熟期,CRF3 处理土壤铵态氮含量较 CRF1 和 CRF2 处理显著提高 41.6%~52.7%,普通尿素处理各施氮水平间无显著差异,CRF3 处理土壤铵态氮含量显著高于 BBF3 处理。在灌浆期,同施氮水平不同氮肥处理间土壤铵态氮含量无显著差异。

表 3 小麦不同生育期土壤硝态氮、铵态氮含量

单位:mg/kg

| 处理   | 硝态氮含量      |           |           |           | 铵态氮含量     |          |            |          |
|------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|------------|----------|
|      | 返青期        | 挑旗期       | 灌浆期       | 成熟期       | 返青期       | 挑旗期      | 灌浆期        | 成熟期      |
| CK   | 23.5±0.5f  | 21.4±0.7f | 10.3±0.3e | 35.7±0.7b | 5.5±0.3ab | 7.6±0.1a | 15.0±0.1ab | 4.0±0.4a |
| CRF1 | 46.2±0.4d  | 31.1±0.7e | 21.8±0.2d | 22.2±0.5d | 3.4±0.2cd | 2.5±0.1c | 16.5±0.7a  | 2.6±0.1b |
| CRF2 | 113.1±0.1b | 38.9±0.4d | 22.3±0.6d | 34.8±0.2b | 6.3±0.5a  | 2.6±0.5c | 15.6±0.3ab | 2.4±0.1b |
| CRF3 | 117.5±0.4a | 62.4±0.5b | 48.1±1.2a | 75.3±0.2a | 3.6±0.7cd | 3.8±0.2b | 14.2±0.8b  | 3.7±0.4a |
| BBF1 | 37.5±0.8e  | 32.6±0.6e | 10.9±0.5e | 16.3±0.2e | 4.6±0.5bc | 2.8±0.1c | 15.9±0.2ab | 1.5±0.2c |
| BBF2 | 50.1±0.7d  | 43.6±0.5c | 25.4±0.9c | 21.0±1.0d | 2.5±0.4d  | 2.9±0.1c | 14.2±0.9b  | 1.7±0.1c |
| BBF3 | 71.8±3.4c  | 82.4±0.8a | 45.8±0.3b | 30.7±0.9c | 2.7±0.6d  | 2.4±0.1c | 14.4±0.3b  | 1.1±0.2c |

2.2.3 秸秆还田下控释掺混尿素对土壤有效磷含量的影响

在返青期,控释掺混尿素处理下土壤有效磷含量从高到低依次为 CRF3>CRF1>CRF2,BBF1 处理土壤有效磷含量显著高于 BBF2 和 BBF3 处理(表 4)。相同施氮水平下,CRF3 处理土壤有效磷含量显著高于 BBF3 处理,而减量和常量施氮下 BBF 处理有效磷含量显著高于 CRF 处理。在挑旗期,减量和常量施氮下 CRF 处理有效磷含量显著高于 BBF 处理,提高 39.0%和 19.5%。在灌浆期,控释掺混尿

素处理下各施氮水平间土壤有效磷含量差异不显著,BBF1 处理土壤有效磷含量显著高于 BBF3 处理。同一施氮水平下,控释掺混尿素处理土壤有效磷含量均显著高于普通尿素处理,提高 14.2%~39.0%。在成熟期,CRF1 处理土壤有效磷含量显著高于 CRF2 处理,BBF2 处理土壤有效磷含量显著高于 BBF3 处理,减量和增量施氮下 CRF 处理有效磷含量显著高于 BBF 处理,而 BBF2 处理土壤有效磷含量显著高于 CRF2 处理。

表 4 小麦不同生育期土壤有效磷和速效钾含量

单位:mg/kg

| 处理   | 有效磷含量     |            |            |            | 速效钾含量       |            |            |             |
|------|-----------|------------|------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|
|      | 返青期       | 挑旗期        | 灌浆期        | 成熟期        | 返青期         | 挑旗期        | 灌浆期        | 成熟期         |
| CK   | 36.4±0.5a | 35.2±1.6b  | 29.0±0.4a  | 22.0±0.3a  | 351.0±1.7ab | 359.5±1.7a | 323.9±1.5a | 334.1±1.3a  |
| CRF1 | 26.8±0.2d | 27.9±0.1c  | 20.3±0.5b  | 19.9±1.4ab | 329.0±3.4d  | 320.5±2.4b | 318.8±1.7a | 295.1±1.7b  |
| CRF2 | 22.7±0.1f | 30.9±0.6b  | 19.1±0.9bc | 12.0±0.6d  | 276.4±2.9e  | 298.5±3.5d | 298.5±1.7b | 232.4±1.6e  |
| CRF3 | 29.7±0.4c | 24.2±0.4de | 20.5±1.4b  | 18.3±0.8b  | 344.2±1.1bc | 262.9±1.7e | 252.7±1.9e | 283.2±1.6c  |
| BBF1 | 31.3±0.6b | 20.0±0.7f  | 17.6±0.2cd | 14.9±2.0cd | 356.1±1.2a  | 240.9±2.6f | 220.5±2.5f | 201.9±1.8f  |
| BBF2 | 25.2±0.2e | 25.9±0.2cd | 16.7±0.4de | 16.9±0.7bc | 340.8±1.1c  | 308.6±1.5c | 281.5±2.9c | 273.1±1.5d  |
| BBF3 | 25.2±0.5e | 23.1±0.5e  | 14.8±0.8e  | 12.2±0.5d  | 337.5±2.5c  | 327.3±2.8b | 274.7±1.1d | 278.1±1.2cd |

2.2.4 秸秆还田下控释掺混尿素对土壤速效钾含量的影响

在小麦返青期,减量和常量施氮处理下普通

尿素处理土壤速效钾含量显著高于同一施氮水平下控释掺混尿素处理,分别提高 8.2%和 23.3%(表 4)。

在挑旗期,控释掺混尿素处理的土壤速效钾含量随施氮量增加而降低;普通尿素处理的土壤速效钾含量随施氮量增加而升高。CRF1 处理土壤速效钾含量显著高于 BBF1 处理,而常量和增量施氮处理下普通尿素处理土壤速效钾含量显著高于同一施氮水平下控释掺混尿素处理,分别提高 3.4% 和 24.5%。在灌浆期,减量和常量施氮处理下控释掺混尿素处理土壤速效钾含量显著高于同一施氮水平下普通尿素处理,分别提高 44.6% 和 6.0%,BBF3 处理土壤速效钾含量显著高于 CRF3 处理。在成熟期,CRF1 处理土壤速效钾含量显著高于 BBF1 处理,而 BBF2 处理土壤速效钾含量显著高于 CRF2 处理。

2.2.5 秸秆还田下控释掺混尿素对小麦籽粒产量的影响 对长期定位试验 2021 年小麦籽粒产量进行分析(图 6),结果表明,连续 13 年施用氮肥后小麦籽粒产量较氮空白处理显著提高 195.2%~240.0%。减量、常量和增量施氮处理的控释掺混尿素之间小麦籽粒产量差异不显著。过量施用普通尿素(BBF3)较减量施用处理(BBF1)小麦籽粒产量显著提高 8.5%。在减量和常量施氮水平下,控释掺混尿素处理的小麦籽粒产量显著高于普通尿素处理,分别增产 9.8% 和 12.4%,而在过量施氮水平下 2 种氮肥类型的小麦籽粒产量差异不显著。

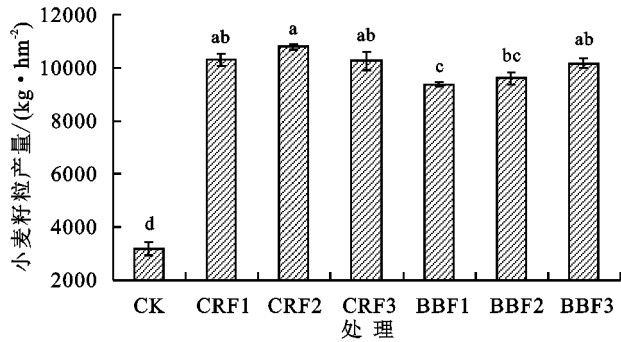


图 6 不同处理的小麦籽粒产量

3 讨论

3.1 秸秆还田配施不同类型氮肥对土壤酶活性影响

土壤酶是近年来农田研究的一个重要方向,相较于较为稳定的土壤化学性质,土壤酶活性能够在较短时期内反映出土壤状况的变化,土壤酶活性极易受环境因子影响<sup>[19]</sup>。有研究<sup>[20]</sup>表明,秸秆还田配施适宜氮肥量可提高土壤酶活性。本研究中,施氮量对脲酶和碱性磷酸酶活性有显著影响,脲酶、蔗糖酶和纤维素酶活性受到氮肥类型的影响,氮肥类型和施氮量的交互作用显著影响脲酶活性(表 5)。李委涛等<sup>[21]</sup>研究表明,秸秆还田配施氮肥对土壤酶影响较大,秸秆还田配施氮肥对根际土壤过氧化氢酶、脲酶和转化酶活性的提高有明显的作

用,氮肥在一定范围内增加可以激活土壤酶的活性,但氮肥施加量超过一定值,土壤酶活性被抑制。在低量(60 kg/hm<sup>2</sup>)、中量(120 kg/hm<sup>2</sup>)、高量(180 kg/hm<sup>2</sup>)3 个施氮水平试验中,低量和中量施氮水平提高蔗糖酶和脲酶活性,中量和高量施氮水平提高碱性磷酸酶活性<sup>[24]</sup>。本试验中出现相似的结果,土壤碱性磷酸酶活性主要受施肥量影响,且减量常量在整个生育期都可以保持较高的活性。其中,在灌浆期,减量施氮处理碱性磷酸酶活性较过量施氮处理提高 6.6%~7.8%。钱海燕等<sup>[25]</sup>研究认为,秸秆还田配施低量氮肥处理其脲酶活性高于配施高量氮肥处理。本研究中,控释掺混尿素处理下各施氮水平处理间脲酶活性在小麦返青期、灌浆期和成熟期无显著差异,普通尿素处理中,过量施氮处理脲酶活性均显著高于其他 2 个施氮水平处理,提高 7.0%~30.1%。

闫东良等<sup>[26]</sup>研究发现,控释氮肥与尿素配比为 1:2 和 2:1 时能够通过前期尿素氮的快速释放和后期控释氮肥氮的持续释放的互补作用,增加玉米生育后期土壤酶活性和土壤无机氮含量。本试验相同施氮水平下,控释掺混尿素处理较普通尿素处理蔗糖酶活性提高 9.6%~21.0%,纤维素酶活性提高 9.0%~31.5%。控释掺混尿素处理较普通尿素处理能够保持土壤蔗糖酶和纤维素酶较高的活性。过量施氮下,普通尿素处理脲酶活性在挑旗期、灌浆期和收获期显著高于控释掺混尿素处理,提高 7.3%~23.2%。

3.2 秸秆还田配施不同类型氮肥对土壤养分的影响

本研究中,施氮量对土壤全氮、有机质、硝态氮、有效磷和速效钾含量有显著影响(表 5)。土壤氮形态受土壤干湿交替影响较大,旱季硝态氮为主要存在形式<sup>[27]</sup>,除灌浆期 CRF1 和 CRF2 处理土壤硝态氮含量差异不显著外,各时期土壤硝态氮含量随施氮量增加而增加。本试验处理下,挑旗期和灌浆期的控释掺混尿素处理土壤速效钾含量随施肥量增多而降低,挑旗期的普通尿素处理土壤速效钾含量随施肥量增多而增多。控释掺混尿素处理下,各施氮水平处理间全氮含量无显著差异,CRF2 和 CRF3 处理土壤有机质含量较 CRF1 处理显著提高 7.0% 和 8.0%。普通尿素处理下,土壤全氮含量随施氮量增加而显著提高,BBF3 处理土壤有机质含量显著高于其余 2 个水平处理。

氮肥类型对土壤全氮、有机质、硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾含量均有显著影响(表 5)。同一施氮水平下,控释掺混尿素处理返青期和成熟期土壤硝态氮含量均显著高于普通尿素处理,提高 23.2%~145.0%。整体来看,控释掺混尿素较普通尿素提高返青期常量增量施氮水平和成熟期各施氮水平铵态氮含量,小麦生育中后期土壤有效磷含量比普通尿素

处理高 14.2%~39.0%。减量施氮条件下全氮含量比普通尿素处理提高 14.1%。

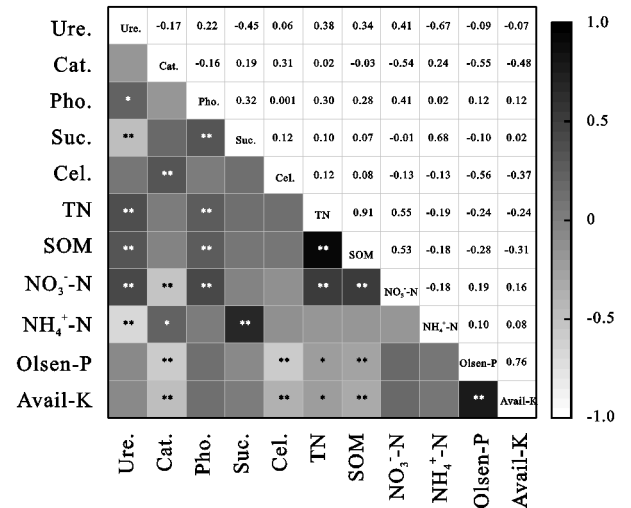
表 5 小麦生育期、施肥种类和秸秆还田对土壤酶活性、土壤养分的方差分析

| 指标    | 生育期(S) | 氮类型(N) | 施氮量(R) | S×N | S×R | N×R | S×N×R |
|-------|--------|--------|--------|-----|-----|-----|-------|
| 脲酶    | * *    | * *    | * *    | NS  | * * | * * | *     |
| 过氧化氢酶 | * *    | NS     | NS     | NS  | * * | NS  | * *   |
| 碱性磷酸酶 | * *    | NS     | * *    | NS  | *   | NS  | NS    |
| 蔗糖酶   | * *    | * *    | NS     | NS  | * * | NS  | NS    |
| 纤维素酶  | * *    | * *    | NS     | NS  | NS  | NS  | NS    |
| 全氮    | NS     | * *    | * *    | NS  | NS  | * * | NS    |
| 有机质   | NS     | *      | * *    | NS  | NS  | *   | NS    |
| 硝态氮   | * *    | * *    | * *    | * * | * * | * * | * *   |
| 铵态氮   | * *    | * *    | NS     | NS  | * * | * * | * *   |
| 有效磷   | * *    | * *    | * *    | * * | * * | * * | * *   |
| 速效钾   | * *    | * *    | * *    | * * | * * | * * | * *   |

注:S×N 表示生育期与氮肥类型交互;S×R 表示生育期与施氮量交互;N×R 表示氮肥类型与施氮量交互;S×N×R 表示生育期、氮肥类型与施氮量交互;\*、\* \* 表示影响达到  $p<0.05$ 、 $p<0.01$  显著水平,NS 表示影响不显著。

3.3 土壤酶活性和土壤养分的相互关系

全氮含量显著影响土壤水解酶活性<sup>[28]</sup>。多数研究<sup>[29-30]</sup>表明,过氧化氢酶、脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性与有机质和全氮含量显著正相关,土壤蔗糖酶和脲酶活性主要受土壤碳氮含量的影响<sup>[31]</sup>,土壤硝态氮含量与过氧化氢酶活性存在显著正相关关系<sup>[32]</sup>。本研究中,脲酶、过氧化氢酶与全氮、有机质、硝态氮呈显著正相关(图 7)。



注:Ure.为脲酶;Cat.为过氧化氢酶;Pho.为碱性磷酸酶;Suc.为蔗糖酶;Cel.为纤维素酶;TN 为全氮;SOM 为有机质;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 为硝态氮;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 为铵态氮;Olsen-P 为有效磷;Avail-K 为速效钾;\*、\* \* 分别表示影响达到  $p<0.05$  和  $p<0.01$  显著水平; $n=84$ 。

图 7 土壤酶活性和土壤养分的相关性分析

当土壤中有有机质含量增加时,酶促反应的主要底物增加可以极大地促进土壤微生物的活动,从而使土壤酶活性提高。此外,土壤酶也可以与有机质相结合增强其稳定性。合理施肥还可以提高脲酶与过氧化氢酶活性,促进氮素形态转化,防止过氧化氢对作物根系的毒害作用,提升土壤的自净能力。土壤蔗糖酶和过氧化氢酶与土壤有效磷和速效钾呈较强的负相

关<sup>[33]</sup>。过氧化氢酶、纤维素酶与速效磷和有效钾呈负相关(图 7),说明这 2 种酶活性的变化可以显著影响有效磷和速效钾含量,过氧化氢酶和纤维素酶活性降低,可能导致土壤中有效养分不能被活化,难以被植物吸收,进而使其积累于土壤<sup>[34]</sup>。

4 结论

(1)控释掺混尿素处理较普通尿素处理蔗糖酶活性提高 9.6%~21.0%,纤维素酶活性提高 9.0%~31.5%。在小麦返青期和成熟期,控释掺混尿素处理土壤硝态氮含量较普通尿素处理显著提高 23.2%~145.0%。控释掺混尿素处理较普通尿素处理可提高返青期常量施氮水平、挑旗期过量施氮水平和成熟期各施氮水平铵态氮含量。

(2)过量施用普通尿素处理土壤脲酶活性均显著高于常量和减量施用处理,提高 7.0%~30.1%。施肥量对土壤碱性磷酸酶活性影响显著,与过量施肥相比,减量和常量施肥条件下磷酸酶在整个生育期均保持较高活性。其中,在灌浆期,常量施氮处理碱性磷酸酶活性较过量施氮处理提高 6.6%~7.8%。

(3)连续 13 年施用氮肥后小麦籽粒产量较氮空白处理显著提高 195.2%~240.0%。在减量和常量施氮水平下,控释掺混尿素处理的小麦籽粒产量较普通尿素处理分别提高 9.8%和 12.4%,而在过量施氮水平下 2 种氮肥类型的小麦籽粒产量差异不显著。

综上所述,控释尿素掺混肥较普通尿素掺混肥处理能提高小麦中后期土壤酶活性和速效氮的供应强度和容量,有利于土壤有机质积累。因此,秸秆还田配施控释尿素掺混肥是有利于麦季土壤酶活性和养分提高的施肥模式。

参考文献:

[1] Zhang C, Ju X T, Powlson D, et al. Nitrogen surplus benchmarks for controlling N pollution in the main

- cropping systems of china[J]. Environmental Science and Technology, 2019, 53(12): 6678-6687.
- [2] 孙帅欣, 程杰杰, 陈云鹏. 玉米联合固氮菌 *Kosakonia radicincitans* GXGL-4A 转座突变体系的构建[J]. 微生物学通报, 2018, 45(8): 1711-1718.
- [3] 关瑞, 张民, 诸葛玉平, 等. 控释氮肥一次性基施提高谷子产量和氮素利用率[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(4): 639-646.
- [4] Wang W H, Cheng Z C, Cong Q. The comprehensive utilization technology of crop straw[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 446(3): e032047.
- [5] Zhang M M, Song D P, Pu X, et al. Effect of different straw returning measures on resource use efficiency and spring maize yield under a plastic film mulch system[J]. European Journal of Agronomy, 2022, 134: e126461.
- [6] Qin X L, Huang T T, Lu C, et al. Benefits and limitations of straw mulching and incorporation on maize yield, water use efficiency, and nitrogen use efficiency[J]. Agricultural Water Management, 2021, 256: e107128.
- [7] 巨晓棠. 氮肥有效率的观念及意义: 兼论对传统氮肥利用率的理解误区[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 921-933.
- [8] Wang Z, Wang Z, Ma L J, et al. Straw returning coupled with nitrogen fertilization increases canopy photosynthetic capacity, yield and nitrogen use efficiency in cotton[J]. European Journal of Agronomy, 2021, 126: e126267.
- [9] Su Y, Kwong R W, Tang W L, et al. Straw return enhances the risks of metals in soil[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 207: e111201.
- [10] 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.
- [11] 冯朋博, 康建宏, 梁熠, 等. 普通尿素与控释尿素配施比例和方法对土壤氮素供应和春玉米产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(4): 692-704.
- [12] 花可可, 李蒙蒙, 钟成虎, 等. 沿江单季稻区控释掺混肥施用效应研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 314-323.
- [13] 肖其亮, 朱坚, 彭华, 等. 秸秆与缓控释肥配施对双季稻田氨挥发的控制效果[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(12): 2788-2800, 2809.
- [14] 张华艳, 牛灵安, 郝晋珉, 等. 秸秆还田配施缓控释肥对土壤养分和作物产量的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(1): 140-149.
- [15] 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.
- [16] Zheng W K, Liu Z G, Zhang M, et al. Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system[J]. Field Crops Research, 2017, 205(6): 106-115.
- [17] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [18] 鲍士旦. 土壤生化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] Xu X W, Qu Q, Chen Y H, et al. Responses of soil enzyme activity and soil organic carbon stability over time after cropland abandonment in different vegetation zones of the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2021, 196: e104812.
- [20] Li Z Q, Li D D, Ma L, et al. Effects of straw management and nitrogen application rate on soil organic matter fractions and microbial properties in North China Plain[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19: 618-628.
- [21] 李委涛, 李忠佩, 刘明, 等. 秸秆还田对瘠薄红壤水稻土团聚体内酶活性及养分分布的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3886-3895.
- [22] 杨滨娟, 黄国勤, 钱海燕. 秸秆还田配施化肥对土壤温度、根际微生物及酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 150-157.
- [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] 夏雪, 谷洁, 车升国, 等. 施氮水平对壤土微生物群落和酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(8): 1618-1627.
- [25] 钱海燕, 杨滨娟, 黄国勤, 等. 秸秆还田配施化肥及微生物菌剂对水田土壤酶活性和微生物数量的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(3): 440-445.
- [26] 闫东良, 何灵芝, 李欢, 等. 控释尿素和普通尿素配比对不同氮效率玉米叶片衰老特性和土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(23): 9410-9421.
- [27] Shang Q Y, Gao C M, Yang X X, et al. Ammonia volatilization in Chinese double rice-cropping systems: A 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments[J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, 50: 715-725.
- [28] 谢洪宝, 于贺, 陈一民, 等. 秸秆深埋对不同氮肥水平土壤蔗糖酶活性的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(24): 79-83.
- [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.
- [30] 张美曼, 范少辉, 官凤英, 等. 竹阔混交林土壤微生物生物量及酶活性特征研究[J]. 土壤, 2020, 52(1): 97-105.
- [31] 胡华英, 张燕林, 褚绍沅, 等. 红壤侵蚀区不同植被恢复阶段土壤酶活性和生物多样性变化[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(3): 734-741.
- [32] 李慧永, 刘小刚, 张文慧, 等. 遮阴下滴灌施肥对小粒种咖啡土壤质量和水分利用的影响[J]. 华南农业大学学报, 2022, 43(2): 57-67.
- [33] 周利军, 林小兵, 武琳, 等. 镉污染稻田土壤理化性质、微生物及酶活性的差异性分析[J]. 环境工程, 2020, 38(10): 202-206, 227.
- [34] 万盼, 黄小辉, 熊兴政, 等. 农药施用浓度对油桐幼苗生长及土壤酶活性、有效养分含量的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(1): 73-80.