

控释肥配施玉米秸秆对麦季土壤酶活性及养分的影响

高丽超¹, 郑文魁^{1,2}, 郭新送², 程运龙¹, 张民¹

(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: 为了探究控释尿素掺混肥与玉米秸秆长期互作对麦季土壤酶活性和土壤养分状况的影响,基于华北平原棕壤区小麦—玉米轮作 8 年定位施肥试验,对比研究了玉米秸秆还田(S)与不还田条件下施用控释尿素掺混肥(CRF)与普通尿素掺混肥(BBF)对麦季土壤酶活性及土壤养分的影响。结果表明:秸秆不还田条件下,CRF 处理较 BBF 处理显著提高土壤中中性磷酸酶(返青期和成熟期)、蔗糖酶(返青期和孕穗期)和纤维素酶(返青期和孕穗期)活性及成熟期有机质、硝态氮和有效磷含量,其中,成熟期中性磷酸酶活性显著提高 29.6%,硝态氮含量显著提高 34.8%。秸秆还田条件下,BBF+S 处理成熟期脲酶、纤维素酶、孕穗期中性磷酸酶活性显著高于 CRF+S 处理,其他时期 2 种类型掺混肥土壤酶活性无显著差异。CRF+S 处理成熟期土壤全氮、有机质、硝态氮和有效磷含量显著高于 BBF+S 处理。氮肥种类和玉米秸秆还田的交互作用对土壤中性磷酸酶、蔗糖酶和纤维素酶活性及土壤全氮、硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾含量影响显著,秸秆还田较不还田处理显著提高中性磷酸酶、蔗糖酶活性、速效钾和有效磷含量。综上表明,玉米秸秆还田和不还田条件下控释尿素掺混肥较普通尿素掺混肥处理均能显著增加土壤有机质含量,提高小麦后期速效氮磷养分的供应强度和供应容量,其中玉米秸秆还田配施控释尿素掺混肥处理在提高土壤酶活性和土壤养分方面表现最优。研究结果可为秸秆还田下氮肥优化施用提供理论依据。

关键词: 土壤酶; 玉米秸秆还田; 控释尿素掺混肥; 土壤养分; 普通尿素掺混肥

中图分类号: S158.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)06-0356-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.06.043

Effects of Controlled Release Fertilizer Combined with Maize Straw on Soil Enzyme Activities and Nutrients in Wheat Season

GAO Lichao¹, ZHENG Wenkui^{1,2}, GUO Xinsong², CHENG Yunlong¹, ZHANG Min¹

(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 explore the effects of long-term interaction between controlled-release urea blended fertilizer and maize straw on soil enzyme activities and soil nutrient status in wheat season, based on 8-year experiment of positioned fertilization experiment of wheat-maize rotation in brown soil of North China Plain, the effects of controlled-release urea blended with urea (CRF) and bulk blending urea (BBF) on soil enzyme activities and soil nutrients in wheat season were compared under maize straw returning (S) and non-returning conditions. The results showed that under the condition of no straw returning, compared with BBF treatment, the CRF treatment significantly increased the neutral phosphatase activity (rejuvenation and maturity stages), sucrase activity and cellulase activity (rejuvenation and booting stages) and the content of soil organic matter, NO₃⁻—N and Olsen phosphorus (Olsen—P) at maturity. At maturity, the neutral phosphatase activity and NO₃⁻—N content increased by 29.6% and 34.8%, respectively. Under the condition of straw returning, activities of urease and cellulase at maturity and neutral phosphatase activity at booting stage were significantly higher in the BBF+S treatment than that in the CRF+S treatment, but there was no

收稿日期:2022-03-31
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,主要从事土壤化学过程与养分高效利用研究。E-mail: wkzheng2013@163.com
张民(1958—),男,教授,主要从事土壤肥科学、新型肥料研发与应用研究。E-mail: minzhang-2002@163.com

significant difference in soil enzyme activities between the two types of blended nitrogen fertilizers at other stages. The content of soil total nitrogen, soil organic matter, NO_3^- —N and Olsen—P at maturity was significantly higher in the CRF+S treatment than that in the BBF+S treatment. The interaction of nitrogen fertilizer types and maize straw returning had significant effects on the activities of neutral phosphatase, sucrase and cellulase in soil and the contents of total nitrogen, NO_3^- —N, NH_4^+ —N, Olsen—P and available potassium in soil. Straw returning significantly increased the activities of neutral phosphatase and sucrase and the contents of available potassium and Olsen—P compared with non-returning treatment. In summary, under the conditions of straw returning and non-returning, CRF treatment could significantly increase soil organic matter content, improve the supply intensity and supply capacity of available nitrogen and phosphorus nutrients in late stage of wheat compared with the BBF treatment, and the treatment of CRF+S showed the best performance in improving soil enzyme activity and soil nutrients. The research results could provide a theoretical basis for the optimal application of nitrogen fertilizer under straw returning.

Keywords: soil enzymes; maize straw returning; controlled-release urea mixed fertilizer; soil nutrients; common urea mixed fertilizer

土壤酶是土壤中最活跃的成分之一,在养分转化循环、有机质分解等方面发挥着关键作用^[1-2],如纤维素酶参与纤维素的降解,蔗糖酶、过氧化氢酶与土壤有机质转化相关^[3-4],脲酶是促进土壤氮素转化的专一酶^[5],磷酸酶促进土壤有机磷转化^[6-7]。土壤酶活性能够客观评估土壤营养状况,探讨土壤酶活性的变化对评估农田土壤养分和土壤质量具有重要意义。

秸秆是一种重要的可再生资源,Ndzelu 等^[8]研究发现,玉米秸秆还田可增加土壤有机碳含量,并改善土壤结构;同时秸秆还田下微生物量碳含量和脲酶、木聚糖酶、蔗糖酶和纤维素酶等碳氮循环酶活性均有所提高^[9-11]。氮素是影响秸秆分解的关键因子,施氮可促进秸秆中氮、磷、钾及纤维素类碳水化合物释放^[12],从而培肥土壤^[13-14]。秸秆含有高碳氮比,合理配比下进行秸秆还田与施氮互作可以明显提升土壤质量,增加作物产量^[15]。有研究^[15]发现,秸秆全量还田配施全量氮肥显著降低土壤容重,土壤过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性显著提高,秸秆全量还田配施全量和 80%氮肥处理的小麦产量显著高于半量还田和不还田处理。常规施肥下,玉米秸秆还田量 6 000, 9 000 kg/hm² 均能增强土壤酶活性,提高土壤微生物量^[10]。秸秆还田与氮肥配施增加土壤养分含量,水稻产量随施氮量增加呈先升后降的趋势,以秸秆全量还田配施 240 kg/hm² 的氮肥为最优^[16]。高永祥等^[17]在秸秆还田小麦—玉米轮作系统中发现,秸秆还田配施控释尿素掺混肥可协同增效,显著提高土壤肥力、玉米产量、氮素累积利用率和净收益。

近年来,秸秆还田配施氮肥研究多集中于秸秆量与施氮量的互作以及作物产量和品质、土壤肥力和氮吸收利用等方面,对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尿素掺混肥在小

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,且缺乏长期试验研究。因此,本试验基于连续 8 年定位试验,通过探究玉米秸秆还田与不还田条件下不同类型掺混肥长期施用对冬小麦生长不同时期土壤酶活性和土壤养分状况的影响,为农业可持续发展、作物高产的田间养分管理及轻简化施肥模式提供理论依据及数据支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验地位于山东省泰安市山东农业大学土肥高效利用国家工程研究中心南校区试验站(36°09′14″N, 117°09′01″E),年平均气温 12.9 °C,年平均降水量 697 mm,无霜期约 195 天。试验区土壤为棕壤,耕层土壤基础性质在定位试验开始时(2013 年 6 月)为 pH 7.28(水土比 1:2.5),有机质含量 11.40 g/kg,全氮含量 0.78 g/kg, NO_3^- —N 含量 10.7 mg/kg, NH_4^+ —N 含量 7.8 mg/kg,有效磷含量 39.2 mg/kg,速效钾含量 75.7 mg/kg^[18]。

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。作物籽粒收获后,小麦秸秆均全部还田,玉米秸秆分为全量还田和不还田,还田方式为秸秆粉碎后翻压还田。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,以及大颗粒尿素(Urea,含 N 46%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 16%)和氯化钾(含 K_2O 60%)。小麦季 N— P_2O_5 — K_2O 用量按照 150—150—75 kg/hm² 施入;玉米季 N— P_2O_5 — K_2O 用量按照 150—75—150 kg/hm² 施入。

1.2 试验设计

试验共设 6 个处理,每个处理重复 3 次,试验小区面积为 16 m²。各处理分别为:(1)CK,不施氮肥;(2)BBF,普通尿素掺混肥;(3)CRF,控释尿素掺混肥;(4)CK+S,不施氮肥+玉米秸秆还田;(5)BBF+S,普通尿素掺混肥+玉米秸秆还田;(6)CRF+S,控释尿素掺混肥+玉米秸秆还田。其中,BBF 和 BBF+S

处理的 60%基施,40%于拔节期追肥,CRF 和 CRF+S 处理中的氮肥为 PSCU:PCU:Urea 为 3:3:4 掺混而成,一次基施。各处理磷、钾肥均一次性基施。施肥方案列于表 1 中。小区实行大小行种植,大行宽 25 cm,小行宽 15 cm,每小区种植小麦 20 行,播种量为 150 kg/hm²,大行的正中央条形开沟施肥,其他管理措施同农户常规管理。

表 1 施肥处理与施肥量								单位:kg/hm ²
编号	代号	处理	施肥量(N—P ₂ O ₅ —K ₂ O)		肥料使用方法		秸秆	
			小麦季	玉米季	氮肥	磷、钾肥		
1	CK	不施氮肥	0—150—75	0—150—75	—	基施	不还田	
2	BBF	普通尿素掺混肥	150—150—75	150—150—75	60%基施+40%追施	基施	不还田	
3	CRF	控释尿素掺混肥	150—150—75	150—150—75	100%基施	基施	不还田	
4	CK+S	不施氮肥	0—150—75	0—150—75	—	基施	还田	
5	BBF+S	普通尿素掺混肥	150—150—75	150—150—75	60%基施+40%追施	基施	还田	
6	CRF+S	控释尿素掺混肥	150—150—75	150—150—75	100%基施	基施	还田	

1.3 样品采集与测定方法

于 2021 年小麦返青期(3 月 12 日)、孕穗期(4 月 12 日)和成熟期(6 月 7 日)采集 0—20 cm 各处理土壤样品,装密封袋,带回实验室,将样品分为 2 份:一份置于遮光处自然风干,用于测定土壤全氮、有机质、有效磷和速效钾;另一份置于-20℃冰箱用于土壤酶活性和硝态氮、铵态氮的测定。

土壤脲酶、过氧化氢酶、磷酸酶、蔗糖酶和纤维素酶活性分别采用苯酚钠—次氯酸钠比色法、高锰酸钾滴定法、磷酸苯二钠比色法、3,5—二硝基水杨酸比色法和 3,5—二硝基水杨酸比色法测定^[19]。土壤硝态氮采用 KCl 浸提—双波长紫外分光光度法,铵态氮采用 KCl 浸提—靛酚蓝比色法,有机质采用重铬酸钾—外加热法,全氮采用全自动定氮仪,有效磷采用 NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法,速效钾采用 NH₄OAc 浸提—火焰光度计测定^[20]。

1.4 数据分析方法

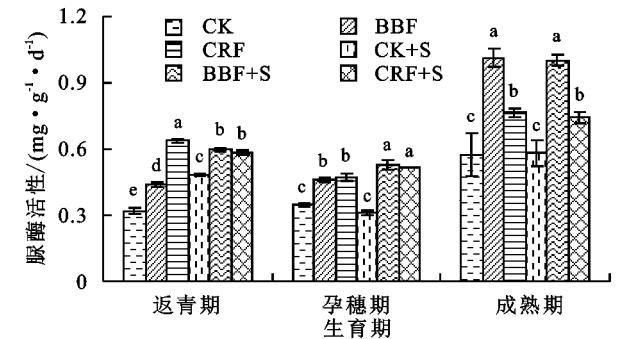
数据处理与统计分析通过 Excel 2019 和 SPSS 23.0 软件完成,土壤酶活性与土壤养分选取单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)进行多重比较($p=0.05$)。相关性分析使用斯皮尔曼(Spearman)法($p<0.05$, $p<0.01$)。采用 Excel 2019 和 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 玉米秸秆还田与不同氮肥类型互作对土壤酶活性的影响

2.1.1 玉米秸秆还田与不同氮肥类型互作对土壤脲酶活性的影响 在小麦返青期、孕穗期和成熟期,土壤脲酶活性整体呈先降低后升高趋势,且在成熟期达到最高(图 1)。在返青期,不还田下 CRF 处理脲酶

活性较 BBF 处理显著提高 45.1%,玉米秸秆还田条件下 BBF+S 和 CRF+S 处理脲酶活性差异不显著,说明配施玉米秸秆还田后氮肥类型对脲酶活性无显著性影响。玉米秸秆还田 CK+S 和 BBF+S 处理脲酶活性分别较不还田处理显著提高 52.0%和 36.2%,而 CRF+S 处理的脲酶活性显著低于 CRF 处理。在孕穗期,不同氮肥类型处理间脲酶活性无显著差异。玉米秸秆还田 BBF+S 和 CRF+S 处理土壤脲酶活性显著高于不还田 BBF 和 CRF 处理,增幅分别为 14.8%和 9.8%。在成熟期,玉米秸秆还田对脲酶活性无显著差异影响,BBF 和 BBF+S 处理土壤脲酶活性均显著高于 CRF 和 CRF+S 处理。



注:图中不同字母表示同一生育期不同处理差异显著($p<0.05$)。下同。

图 1 不同处理的小麦各生育期土壤脲酶活性

2.1.2 玉米秸秆还田与不同氮肥类型互作对土壤过氧化氢酶活性的影响 在小麦 3 个生育期,土壤过氧化氢酶活性与脲酶活性呈现相同趋势。玉米秸秆还田对土壤过氧化氢酶活性无显著影响(图 2),说明本试验过氧化氢酶活性不受玉米秸秆还田影响。在返青期,不还田 CRF 处理较 CK 处理酶活性显著提高 8.7%,还田下 BBF+S、CRF+S 较 CK+S 处理酶活性提高 9.6%和 10.4%,其他处理之间差异不显著。

在孕穗期,不还田下各处理过氧化氢酶活性差异不显著。玉米秸秆还田下,BBF+S 处理过氧化氢酶活性显著高于 CK+S 和 CRF+S 处理,其他处理之间差异不显著。在成熟期,秸秆不还田下,BBF 处理较 CK 处理过氧化氢酶活性显著提高 12.7%,其余处理之间差异性不显著。玉米秸秆还田下,各处理土壤过氧化氢酶活性差异不显著。

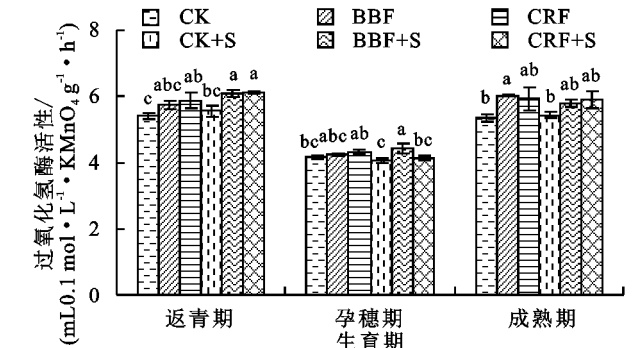


图 2 不同处理的小麦各生育期土壤过氧化氢酶活性

2.1.3 玉米秸秆还田与不同氮肥类型互作对土壤中
性磷酸酶活性的影响 土壤中性磷酸酶活性随小麦
生育期呈现先降低后稳定趋势(图 3)。在返青期,玉
米秸秆还田显著提高土壤中性磷酸酶活性,CK+S、
BBF+S 和 CRF+S 处理中性磷酸酶活性较 CK、
BBF 和 CRF 处理分别提高 15.0%,17.5%和 10.3%。
在孕穗期和成熟期,不还田条件下 CRF 处理酶活性
显著高于 BBF 处理;玉米秸秆还田条件下,2 种类型
氮肥处理差异不显著,说明配施玉米秸秆还田后氮肥
类型对中性磷酸酶活性无显著性影响。相同施肥处
理下,成熟期玉米秸秆还田 CK+S 和 BBF+S 处理
过氧化氢酶活性分别较不还田 CK 和 BBF 处理显著
提高 27.4%和 35.2%,其他处理无显著差异。

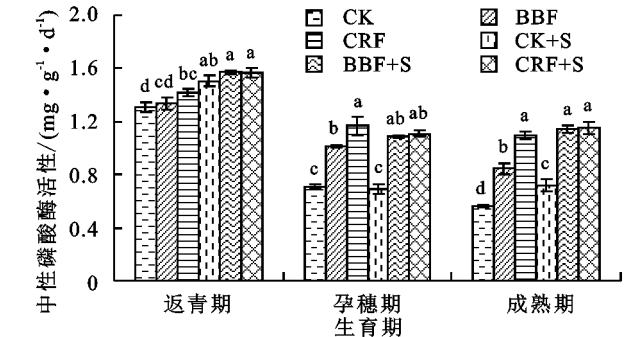


图 3 不同处理的小麦各生育期土壤中中性磷酸酶活性

2.1.4 玉米秸秆还田与不同氮肥类型互作对土壤蔗
糖酶活性的影响 土壤蔗糖酶活性随小麦生育期的变
化趋势与中性磷酸酶活性趋势一致。玉米秸秆还田下,
各生育期下不同处理间土壤酶活性无差异(图 4)。在返
青期,不还田条件下,CRF 处理酶活性较 BBF 处理显著
提高 8.9%。玉米秸秆还田 CK+S、BBF+S 和 CRF+S

处理蔗糖酶活性分别较不还田 CK、BBF 和 CRF 处理提
高 37.4%,23.0%和 12.1%。在孕穗期,不还田下 CRF 处
理蔗糖酶活性较 BBF 处理提高 9.8%。玉米秸秆还
田各处理蔗糖酶活性较不还田各处理均无显著差异。
在成熟期,2 种类型掺混肥处理蔗糖酶活性差异不显
著,玉米秸秆还田 CK+S、BBF+S 和 CRF+S 处理
蔗糖酶活性较不还田 CK、BBF 和 CRF 处理分别显
著提高 15.0%,13.3%和 11.1%,说明蔗糖酶活性主
要受玉米秸秆还田影响。

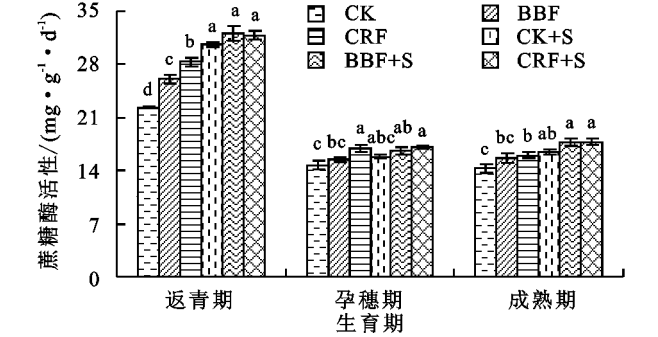


图 4 不同处理的小麦各生育期土壤蔗糖酶活性

2.1.5 玉米秸秆还田与不同氮肥类型互作对土壤纤
维素酶活性的影响 在小麦 3 个生育期,土壤纤维素
酶活性在孕穗期下降,在成熟期升高(图 5),与脲酶
和过氧化氢酶活性变化趋势一致。在返青期,玉米秸秆
不还田下,CRF 处理酶活性显著高于 BBF 处理。玉米
秸秆还田下,CRF+S 处理纤维素酶活性与 BBF+S 处
理差异不显著,说明配施玉米秸秆还田后氮肥类型对
纤维素酶活性无显著性影响。玉米秸秆还田 CK+S、
BBF+S 和 CRF+S 处理较不还田 CK、BBF 和 CRF 处
理纤维素酶活性分别显著提高 70.5%,34.6%和 22.3%。
在孕穗期,不还田下,CRF 处理纤维素酶活性显著高
于 BBF 处理,提高 11.3%,说明 CRF 更有利于土壤
微生物分泌纤维素酶。玉米秸秆还田处理酶活性较
不还田处理均无显著差异。在成熟期,玉米秸秆还田
下,BBF 处理纤维素酶活性显著高于 CRF 处理。秸
秆不还田 CRF 处理酶活性显著高于玉米秸秆还田
CRF+S 处理,玉米秸秆还田 CK+S 和 BBF+S 处
理酶活性分别与不还田各处理无显著差异。

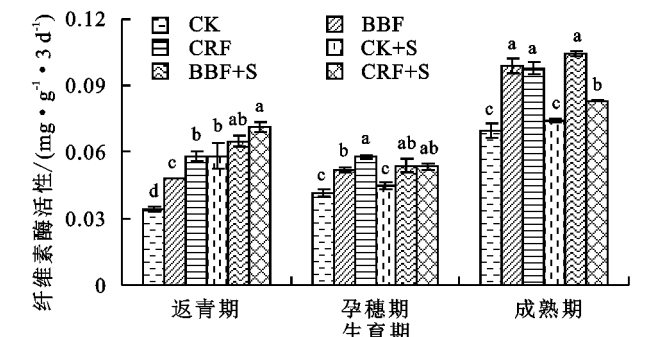


图 5 不同处理的小麦各生育期土壤纤维素酶活性

2.2 玉米秸秆还田与不同氮肥类型互作对土壤养分的影响

2.2.1 玉米秸秆还田与不同氮肥类型互作对土壤全氮、有机质含量的影响 在小麦成熟期,玉米秸秆还田处理全氮和有机质含量显著高于不还田处理,全氮增幅为 12.5%~18.7%,有机质增幅为 5.4%~6.2% (表 2),说明玉米秸秆还田更有利于土壤碳氮积累。不还田条件下,CRF 处理有机质含量较 BBF 处理提高 6.5%,全氮含量差异不显著。玉米秸秆还田下,CRF+S 处理土壤全氮和有机质含量较 BBF+S 处理分别显著提高 4.7%和 7.1%。不还田下,CRF 处理土壤碳氮比显著高于 BBF 处理。玉米秸秆还田处理较不还田处理土壤碳氮比显著降低 4.6%~10.3%。

2.2.2 玉米秸秆还田与不同氮肥类型互作对土壤硝态氮和铵态氮含量的影响 在返青期,2 种类型掺混肥处理土壤硝态氮含量差异不显著(表 3)。玉米秸秆还田 CK+S 处理硝态氮含量显著高于不还田 CK 处理,而不还田 BBF 和 CRF 处理显著高于 BBF+S 和 CRF+S 处理。在孕穗期,无论玉米秸秆还田或不还田条件下,普通尿素掺混肥处理硝态氮含量显著高

于控释尿素掺混肥处理,说明追肥后,土壤中硝态氮含量升高。玉米秸秆还田 CK+S 处理硝态氮含量显著高于不还田 CK 处理,BBF 处理显著高于 BBF+S 处理,CRF 与 CRF+S 处理差异不显著。在成熟期,玉米秸秆还田和不还田条件下 CRF 较 BBF 处理均能显著提高硝态氮含量,增幅为 34.8%~97.3%。玉米秸秆还田配施氮肥 BBF+S 和 CRF+S 处理硝态氮含量分别显著高于不还田 BBF 和 CRF 处理,分别提高 35.6%和 98.5%,CK+S 处理硝态氮含量与 CK 处理差异不显著。

表 2 小麦成熟期有机质和全氮含量

处理	全氮含量/ (g · kg ⁻¹)	有机质含量/ (g · kg ⁻¹)	碳氮比
CK	0.64±0.0056e	11.43±0.48e	10.30±0.35ab
BBF	0.75±0.0042c	13.04±0.15c	10.11±0.15bc
CRF	0.75±0.0036c	13.89±0.10b	10.74±0.11a
CK+S	0.72±0.0036d	12.14±0.19d	9.83±0.15bcd
BBF+S	0.85±0.0067b	13.74±0.02b	9.34±0.06d
CRF+S	0.89±0.0055a	14.71±0.06a	9.64±0.04cd

注:表中数据为平均值±标准误差;同列数据后不同字母表示处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

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	孕穗期	成熟期	返青期	孕穗期	成熟期
CK	13.74±0.25d	6.96±0.25e	18.40±0.49c	2.58±0.22b	1.60±0.04c	4.02±0.14c
BBF	32.93±1.31a	31.62±0.40a	22.10±1.60c	2.65±0.29b	2.74±0.04a	4.63±0.10b
CRF	31.72±0.56a	18.41±0.24c	29.79±1.36b	2.64±0.07b	2.64±0.02a	4.93±0.27ab
CK+S	18.33±0.56c	8.52±0.05d	19.70±0.74c	3.00±0.24b	2.06±0.06b	4.76±0.07ab
BBF+S	27.31±0.18b	29.54±0.22b	29.97±0.52b	3.75±0.04a	2.20±0.31b	4.86±0.01ab
CRF+S	27.44±0.27b	19.02±0.40c	59.14±2.44a	3.72±0.03a	2.34±0.02ab	5.13±0.17a

土壤铵态氮含量在 1.60~5.13 mg/kg,随小麦生育期整体呈先下降后上升趋势(表 3)。2 种类型处理土壤铵态氮含量差异不显著。在返青期,玉米秸秆还田 BBF+S 和 CRF+S 处理铵态氮含量较不还田 BBF 和 CRF 处理显著提高 41.5%和 40.9%。在孕穗期,CK+S 处理铵态氮含量高于 CK 处理,而 BBF 处理铵态氮含量高于 BBF+S 处理,CRF 与 CRF+S 铵态氮含量差异不显著。在成熟期,CK+S 处理较 CK 处理铵态氮含量显著提高 18.4%,其他处理差异不显著。

2.2.3 玉米秸秆还田与不同氮肥类型互作对土壤速效磷钾含量的影响 在返青期,玉米秸秆不还田条件下,BBF 处理土壤有效磷含量最高,CK 和 CRF 处理间差异不显著,还田条件下,BBF+S 处理有效磷含量显著高于 CRF+S 处理(表 4)。返青期,玉米秸秆还田显著提高氮空白和普通尿素掺混肥处理土壤有效磷含量,对控释尿素掺混肥处理影响不显著。在孕

穗期,控释尿素掺混肥处理土壤有效磷含量显著低于其他处理。玉米秸秆还田显著提高氮空白处理有效磷含量,对掺混肥处理影响不显著。在成熟期,玉米秸秆还田较不还田处理显著提高土壤中有效磷含量,提高幅度为 30.4%~50.2%,其中 CK+S 和 CRF+S 处理最高,BBF 处理最低。

在小麦返青期,无论玉米秸秆还田或不还田条件下,控释尿素掺混肥处理土壤速效钾含量显著低于其他处理(表 4)。在小麦孕穗期,不还田条件下,CRF 与 BBF 处理间土壤速效钾含量差异不显著;还田条件下,CRF+S 处理速效钾含量低于 BBF+S 处理。在返青期和孕穗期,玉米秸秆还田较不还田处理显著增加土壤中速效钾含量,增幅为 9.5%~63.2%。在小麦成熟期,施氮肥处理土壤速效钾含量较不施氮肥处理显著降低 13.7%~46.8%。玉米秸秆还田 CK+S 处理速效钾含量显著高于不还田 CK 处理,其余处理间差异不显著。

2.2.4 土壤酶活性与土壤养分含量的关系 氮肥类型对土壤脲酶、中性磷酸酶、蔗糖酶和纤维素酶活性及土壤养分含量有极显著影响;玉米秸秆还田对中性磷酸酶和蔗糖酶活性以及土壤全氮、有机质、硝态氮和速效磷钾含量有极显著影响,对脲酶和纤维素酶活性有显著性影响(表 5)。氮肥类型和秸秆还田的交互作用对中性

磷酸酶、蔗糖酶和纤维素酶活性有极显著影响,土壤全氮和速效氮磷钾含量也因二者交互作用差异显著。除蔗糖酶活性与硝态氮和铵态氮含量之间,中性磷酸酶活性与铵态氮含量之间均未达到显著水平,脲酶、中性磷酸酶、蔗糖酶和纤维素酶活性与硝态氮、铵态氮、全氮和有机质含量均呈显著正相关关系(图 6)。

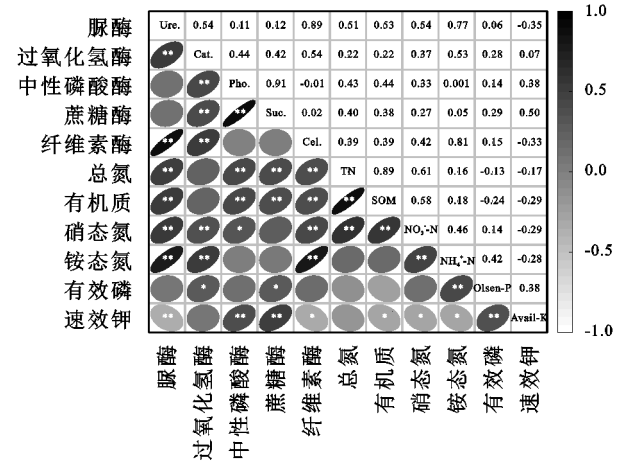
表 4 小麦不同生育期土壤有效磷和速效钾含量 单位:mg/kg

处理	有效磷含量			速效钾含量		
	返青期	孕穗期	成熟期	返青期	孕穗期	成熟期
CK	45.76±1.60c	36.51±0.71b	48.68±0.31b	94.23±1.36c	83.30±0.75c	85.94±2.53b
BBF	53.00±0.77b	36.82±1.34b	34.36±1.56d	92.72±0.65c	77.65±1.36cd	74.14±1.63c
CRF	42.68±0.82cd	31.58±2.07c	41.75±2.00c	85.19±1.00d	74.26±2.64d	74.07±2.29c
CK+S	52.38±2.16b	52.84±1.26a	63.47±2.70a	153.79±1.31a	91.22±4.56ab	131.17±5.69a
BBF+S	60.85±1.01a	37.59±1.78b	47.30±2.04bc	150.39±1.96a	92.72±2.53a	76.14±4.35bc
CRF+S	38.67±0.86d	27.73±1.16c	62.70±1.47a	121.25±0.87b	84.43±1.36bc	69.73±3.29c

表 5 小麦生育期、施肥种类和玉米秸秆还田对土壤酶活性、土壤养分的方差分析

指标	生育期 (T)	氮肥类型 (N)	玉米秸秆 还田(S)	T×N	T×S	N×S	T×N×S
脲酶	* *	* *	*	* *	*	NS	*
过氧化氢酶	* *	NS	NS	NS	NS	NS	NS
中性磷酸酶	* *	* *	* *	* *	* *	* *	NS
蔗糖酶	* *	* *	* *	*	* *	* *	*
纤维素酶	* *	* *	*	* *	* *	* *	NS
全氮	NS	* *	* *	NS	NS	* *	NS
有机质	NS	* *	* *	NS	NS	NS	NS
硝态氮	* *	* *	* *	* *	* *	* *	* *
铵态氮	* *	* *	NS	NS	*	* *	* *
有效磷	* *	* *	* *	* *	* *	* *	* *
速效钾	* *	* *	* *	* *	* *	* *	* *

注: *、* * 表示差异达到 $p<0.05$ 、 $p<0.01$ 显著水平;NS 表示差异不显著。



注: Ure.、Cat.、Pho.、Suc.、Cel.、TN、SOM、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、Olsen-P、Avail-K 分别为脲酶、过氧化氢酶、中性磷酸酶、蔗糖酶、纤维素酶、总氮、有机质、硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾含量; * 和 * * 表示影响达到 $p<0.05$ 、 $p<0.01$ 显著水平; $n=54$ 。

图 6 土壤酶活性和土壤养分的相关性分析

3 讨论

3.1 玉米秸秆还田配施不同类型氮肥对土壤酶活性的影响

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^[12]。土壤酶活性极易受环境因子影响^[21]。有研究^[22]表明,秸秆还田和施肥均能提高土壤酶活性,如玉米秸秆还田处理下脲酶和纤维素酶活性较不还田处理显著提高 22.5%~44.6%和 23.9%~52.1%,与不还田处理相比,玉米秸秆还田下孕穗期施氮肥处理脲酶活性提高 9.8%~14.8%,返青期 3 个处理和成熟期不施氮肥和普通尿素掺混肥处理中性磷酸酶活性提高 10.3%~35.2%。秸秆深埋可显著提高土壤蔗糖酶活性,且随着施氮肥水平增加可显著提高土壤蔗糖酶活性^[23]。施氮还提高土壤碱性磷酸酶活性^[24]和酸性磷酸酶活性^[25]。

不还田下,CRF 处理较 BBF 处理提高返青期脲酶、蔗糖酶和纤维素酶活性,孕穗期中性磷酸酶、蔗糖酶和纤维素酶活性以及成熟期中性磷酸酶活性,BBF 处理在成熟期脲酶活性高于 CRF 处理,说明控释尿素较普通尿素能显著提高土壤碳氮代谢酶活性及磷酸酶活性^[26]。在成熟期,秸秆还田下普通尿素掺混肥处理脲酶和纤维素酶活性显著高于控释尿素掺混肥处理,这可能是由于一方面,普通尿素掺混肥处理下玉米秸秆腐解较慢^[27],纤维素含量高,因此纤维素酶活性高;另一方面,微生物分解秸秆时消耗氮素,脲酶活性高可提供更多速效氮,但此时小麦对氮素需求较少,可能会造成氮素损失。

3.2 玉米秸秆还田配施不同类型氮肥对土壤养分的影响

玉米秸秆还田对土壤全氮、有机质、硝态氮、有效磷和速效钾含量有显著影响(表 6)。在提高土壤养分方面,秸秆还田较不还田处理可显著提高土壤有机质和全氮含量^[28-30]。本研究得到相同结果,玉米秸秆还田较不还田处理提高不施氮肥和普通尿素掺混肥处理成熟期全氮、有机质和有效磷含量,增幅分别为 12.5%~18.7%,5.4%~6.2%和 37.7%~50.2%,但秸秆腐解过程中微生物可能消耗了分土壤氮素,从而降低返青期施氮肥处理硝态氮含量和孕穗期普通尿素掺混肥处理硝态氮和铵态氮含量。刘学彤等^[31]研究认为,秸秆还田与氮肥合理配施可提高土壤碱解氮和硝态氮含量,固持土壤有机质和全氮。玉米秸秆还田配施氮肥处理成熟期土壤硝态氮、铵态氮、全氮和有机质含量明显高于秸秆不还田处理,说明长期玉米秸秆还田配施氮肥有利于土壤碳氮积累,提高土壤养分含量,与程曼等^[9]研究结果一致。在返青期和孕穗期,控释尿素掺混肥处理的土壤有效磷和速效钾含量不高于或低于其他处理,可能是此处理下小麦生长旺盛,吸收土壤更多有效磷钾养分。在成熟期,控释尿素掺混肥处理硝态氮和有机质含量显著高于普通尿素掺混肥处理,说明 CRF 较 BBF 处理更有利于土壤养分积累。

3.3 土壤酶活性和土壤养分的相互关系

土壤养分含量与土壤酶活性可以共同表征土壤的肥力水平。土壤中的大部分酶属于诱导酶类,其活性和数量受底物浓度和微生物自身对养分需求的限制^[32]。土壤酶活性的变异是多因子综合作用的结果,全氮是影响水解酶活性的主要因子^[23]。多数研究^[6,33]表明,过氧化氢酶、脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性与有机质显著相关。在本研究中,土壤酶(脲酶、

过氧化氢酶和纤维素酶)活性与土壤有效氮含量呈显著正相关关系,土壤酶(脲酶、中性磷酸酶、蔗糖酶和纤维素酶)活性与土壤全氮和有机质含量显著正相关(图 6)。这可能是因为这 4 种酶的功能主要都是驱动土壤碳氮磷养分转化,土壤有机质是酶促反应的主要底物,当土壤中有有机质含量增加时,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,土壤酶也可以和有机质相结合增强其稳定性^[34]。良好的土壤环境能更好地促进作物生长,增加作物产量。在本试验条件下,秸秆还田和不还田条件下控释尿素掺混肥较普通尿素掺混肥处理 2014—2020 年小麦分别增产 11.8%~46.9%和 9.6%~39.9%^[35-37]。因此,合理的施肥措施能够形成土壤、作物和微生物之间关系的良性循环,对提高和维持土壤生态系统的可持续发展具有重要意义。

4 结论

玉米秸秆还田较不还田显著提高麦季土壤中磷酸酶和蔗糖酶活性。玉米秸秆不还田下控释尿素掺混肥处理较普通尿素掺混肥处理提高麦季土壤中磷酸酶活性、蔗糖酶和纤维素酶活性,而玉米秸秆还田下,氮肥种类对土壤酶活性无显著影响。秸秆还田和不还田条件下控释尿素掺混肥处理小麦成熟期土壤有机质,硝态氮和有效磷含量均显著高于配施普通尿素处理。综合分析,控释尿素掺混肥较普通尿素掺混肥处理能提高小麦后期速效氮磷养分的供应强度和供应容量,有利于土壤有机质积累,且秸秆还田配施控释尿素掺混肥在提高土壤酶活性和土壤养分方面表现最优。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] Xiao L, Liu G B, Li P, et al. Ecological stoichiometry of plant-soil-enzyme interactions drives secondary plant succession in the abandoned grasslands of Loess Plateau, China[J].Catena,2021,202:e105302.
- [2] 徐军山,苏雪,贾志鹏,等.增温对结皮土壤系统氮转化速率及微生物生物量碳氮与酶活性的影响[J].土壤学报,2021,58(3):788-797.
- [3] 邓欧平,李翰,熊雷,等.秸秆、猪粪混施对麦田根际土壤过氧化氢酶与蔗糖酶活性的影响[J].土壤,2018,50(1):86-92.
- [4] 孙慧,张建锋,胡颖,等.土壤过氧化氢酶对不同林分覆盖的响应[J].土壤通报,2016,47(3):605-610.
- [5] 边雪廉,赵文磊,岳中辉,等.土壤酶在农业生态系统碳、氮循环中的作用研究进展[J].中国农学通报,2016,32

- (4):171-178.
- [6] 王涛,马宇丹,许亚东,等.退耕刺槐林土壤养分与酶活性关系[J].生态学杂志,2018,37(7):2083-2091.
- [7] 杨瑞,刘帅,王紫泉,等.秦岭山脉典型林分土壤酶活性与土壤养分关系的探讨[J].土壤学报,2016,53(4):1037-1046.
- [8] Ndzelu B S, Dou S, Zhang X W. Maize straw return can increase labile soil organic carbon fractions and improve water-stable aggregates in Haplic Cambisol[J]. Journal of Arid Land, 2021, 213: e105090.
- [9] 程曼,解文艳,杨振兴,等.黄土旱塬长期玉米秸秆还田对土壤养分、酶活性及玉米产量的影响[J].中国农业学报(中英文),2019,27(10):1528-1536.
- [10] 刘高远,和爱玲,杜君,等.玉米秸秆还田量对砂姜黑土酶活性、微生物生物量及细菌群落的影响[J].农业资源与环境学报,2021,39(5):1033-1040.
- [11] 马立晓,李婧,邹智超,等.免耕和玉米秸秆还田对我国土壤碳循环酶活性影响的荟萃分析[J].中国农业科学,2021,54(9):1913-1925.
- [12] 信彩云,王瑜,赵庆雷,等.稻田肥料减施对小麦秸秆腐解规律的影响[J].中国农学通报,2021,37(13):8-13.
- [13] Chen A L, Zhang W Z, Sheng R, et al. Long-term partial replacement of mineral fertilizer with in situ crop residues ensures continued rice yields and soil fertility: A case study of a 27-year field experiment in subtropical China [J]. Science of the Total Environment, 2021, 787: e147523.
- [14] 李录久,吴萍萍,耿言安,等.玉米秸秆还田结合氮肥运筹管理对白土稻田土壤理化性状的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(5):1259-1266.
- [15] 赵吉平,权宝全,郭鹏燕,等.玉米秸秆还田与施氮量对土壤质量及小麦产量的影响[J].华北农学报,2021,36(2):176-181.
- [16] 孟祥宇,冉成,刘宝龙,等.玉米秸秆还田配施氮肥对东北黑土稻区土壤养分及水稻产量的影响[J].作物杂志,2021(3):167-172.
- [17] 高永祥,李若尘,张民,等.玉米秸秆还田配施控释掺混对玉米产量和土壤肥力的影响[J].土壤学报,2021,58(6):1507-1519.
- [18] Zheng W K, Zhang M, Liu Z G, et al. Combining controlled-release urea and normal urea to improve the nitrogen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system [J]. Field Crops Research, 2016, 197: 52-62.
- [19] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.
- [20] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [21] 王丽君,程瑞梅,肖文发,等.氮添加对三峡库区马尾松—栓皮栎混交林土壤微生物生物量和酶活性的影响[J].应用生态学报,2022,33(1):42-50.
- [22] 吕艳杰,于海燕,姚凡云,等.玉米秸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.
- [23] 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.
- [24] 高小峰,闫本帅,吴春晓,等.长期施肥对黄土丘陵坡地农田土壤质量和谷子产量的影响[J].干旱地区农业研究,2021,39(5):76-83.
- [25] 谢欢,张秋芳,曾泉鑫,等.施氮通过改变微生物生物量磷驱动杉木人工林土壤磷组分转化[J].生态学杂志,2020,39(12):3934-3942.
- [26] 郝胜磊,蔡廷瑶,冯小杰,等.新型肥料对全球三大粮食作物产量和土壤生物学活性影响的 Meta 分析[J].植物营养与肥料学报,2021,27(9):1496-1505.
- [27] 郑文魁,卢永健,邓晓阳,等.控释氮肥对玉米秸秆腐解及潮土有机碳组分的影响[J].水土保持学报,2020,34(5):292-298.
- [28] 靳玉婷,李先藩,蔡影,等.玉米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.
- [29] 刘明,张爱君,陈晓光,等.玉米秸秆还田配施化肥对土壤肥力及鲜食甘薯产量和品质的影响[J].应用生态学报,2020,31(10):3445-3452.
- [30] 王娟娟,朱紫娟,钱晓晴,等.全年稻麦秸秆还田对稻田土壤细菌群落结构的影响[J].中国土壤与肥料,2022(4):57-65.
- [31] 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.
- [32] 田善义,王明伟,成艳红,等.化肥和有机肥长期施用对红壤酶活性的影响[J].生态学报,2017,37(15):4963-4972.
- [33] 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.
- [34] 赵婧,王亚男,曾希柏,等.不同改良措施对第四纪红壤酶活性的影响[J].土壤学报,2022,59(4):1160-1176.
- [35] 郑文魁.控释尿素在小麦—玉米轮作体系中的养分高效利用研究[D].山东 泰安:山东农业大学,2017.
- [36] 周洪印.控释尿素配合秸秆还田及磷钾肥对小麦玉米产量和土壤肥力的影响[D].山东 泰安:山东农业大学,2019.
- [37] Li R C, Gao Y X, Chen Q, et al. Blended controlled-release nitrogen fertilizer with straw returning improved soil nitrogen availability, soil microbial community, and root morphology of wheat[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 212: e105045.