

稻麦轮作下不同还田模式对土壤酶活性的影响研究

邓欧平, 谢汀, 李燕, 邓良基*

(四川农业大学资源环境学院, 成都 611130)

摘要:在成都平原区研究不同还田模式对土壤酶活性的影响,旨在阐明稻麦轮作下不同还田模式与土壤酶活性的关系,并探索成都平原最佳还田模式,为种植业废弃物的农业资源化利用提供科学依据。在为期1年的田间定位试验中,按照秸秆直接还田、食用菌生产转化后菌渣还田两种主要模式、设置秸秆全量还田(100%SR)、菌渣低量还田(50%FR)、菌渣全量还田(100%FR)、菌渣高量还田(250%FR)和常规化肥(对照为CF)五种施肥处理,并按生育期测定不同处理下土壤酶活性和土壤养分,分析其相关性。结果表明,成都平原稻麦轮作条件下秸秆还田和菌渣还田均能够提高土壤酶活性,且表现为高量菌渣还田优于低量菌渣还田,全量菌渣还田优于全量秸秆还田;从作物整个生育期来看,土壤脱氢酶、脲酶、蔗糖酶和中性磷酸酶活性均呈现先增后减的单峰变化;土壤脱氢酶和中性磷酸酶活性表现为成熟期低于生长初期,脲酶和蔗糖酶则相反。相关性分析表明,土壤脱氢酶、脲酶、蔗糖酶和中性磷酸酶活性与土壤养分的相关性较好,能够反映当季土壤的肥力状况,是评价土壤管理的良好指标。

关键词:成都平原;稻麦轮作;秸秆还田;土壤酶活性

中图分类号:X712 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)10-2027-08 doi:10.11654/jaes.2013.10.018

Effect of Different Residue Covering Mode on Soil Enzyme Activity Under Rice-wheat Rotation

DENG Ou-ping, XIE Ting, LI Yan, DENG Liang-ji*

(College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: The soil enzyme is a key criterion for evaluating different residue covering approaches, as it is an important indicator of soil quality and function. The objectives of this study are (1) to study the activities of dehydrogenation, urease, invertase and neutral phosphatase in different plant growing stages; (2) to determine the relationship between different landspreading mode and soil enzyme activity under rice-wheat rotation; and (3) to provide the best approach for recycling of agriculture waste. The field experiment designed five treatments according to applied nitrogen(N) quantities, i.e., 256 N kg·hm⁻²(CF) from urea, 256 N kg·hm⁻²(100%SR) from straw, and 128(50%FR), 256(100%FR) and 384(150%FR) N kg·hm⁻² from mushroom residue. The results showed that application of straw and mushroom residues could increase soil enzyme activities of dehydrogenation, urease, invertase and neutral phosphatase, and soil enzyme activities were higher at 100%SR than at 100%SR. Soil enzyme activity of urease, invertase and neutral phosphatase was observed higher in the period of jointing and heading as compared to those in tilling and mature. Moreover, the enzyme activity had closely related with the soil fertility factors for various residue covering practices, particularly for the relationship between soil organic matter and available nutrient. Thus, we concluded that indicators of soil enzyme activities were reliable for efficiency assessment of residue covering practices.

Keywords: Chengdu Plain; rice-wheat rotation; straw returning; soil enzyme activity

土壤酶是土壤的组成成分之一,是土壤生物化学过程的积极参与者,也是物质生态循环和能量流动中表现最活跃的物质之一,在土壤生态系统中具

有重要作用^[1]。土壤酶活性是表征土壤质量和土壤肥力的重要指标,也是衡量土壤质量变化的预警和敏感指标,它能表征土壤的综合肥力特征及土壤养分转化进程,预测土壤中各种生物化学过程的强度和方向^[2]。因此,大量的研究采用土壤酶活性指标反映不同作物品种、耕作方式和施肥方式对土壤质量和土壤肥力的影响^[3-4]。

施肥的方式多种多样,随着绿色农业和循环农业

收稿日期:2013-03-06

基金项目:国家支撑计划(2012BAD14B18);公益性行业科研专项项目(201211050)

作者简介:邓欧平(1987—),女,助教,主要研究方向为农田生态和水土保持。E-mail:182338008@qq.com

*通信作者:邓良基 E-mail:auh6@sicau.edu.cn

的发展,种、养废弃物作为绿色生态的有机肥料日益受到重视,我国是农业种植大国,每年能生产 5 亿 t 秸秆,600 万 t 菌渣,这些种植业废弃物因其节本增效的优点被大范围推广^[5]。近年来关于菌渣、秸秆还田的研究较多,主要集中在对土壤理化性质、作物产量、土壤养分及温室气体排放的影响等方面^[6-14],虽然对土壤酶活性的影响也有报道^[15-17],但针对平原区稻麦轮作体系,同时探讨秸秆、菌渣两种种植业废弃物还田对作物不同生育期内土壤酶活性的变化,还鲜有报道。因此,于 2009—2010 年在成都平原区进行定位试验,通过设置不同的施肥处理方式,研究稻麦轮作条件下,种植业废弃物对各生育期土壤酶活性的影响,分析土壤酶活性与土壤养分的相关关系,探索适宜成都平原作物生产和环境保护的土壤培肥方式,为种植业废弃物的农业资源化利用提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验于 2009—2010 年在成都市西部大邑县韩场镇进行,该区海拔 540 m,具有典型的盆地气候特征。大邑县位于亚热带湿润季风气候区内,气候温暖湿润,热量充足,降水充沛,夏无酷暑,冬无严寒,四季分明;境内多年年平均气温 16.0 ℃,降水量 1 098.2 mm,日照时数 1 033.8 h,无霜期 284 d。境内土壤类型多样,主要分为水稻土、潮土、紫色土、黄壤、黄棕壤等,其中,水稻土是在人工淹水种稻条件下逐渐形成的,为县境内的主要农业耕作土壤类型。供试土壤的理化性质见表 1。

1.2 试验设计

试验设置 5 个施肥处理(表 2):常规化肥处理(根据当地施肥习惯,氮、磷、钾的比例为 6.22:1:1.2),秸秆全量还田处理和 3 个菌渣还田处理(以常规化肥处理的全氮用量为基础确定有机肥施用量,再按当地施肥比例补充调平磷钾肥)。试验采用单因素随机区组排列,5 个处理,3 次重复,小区面积为 30 m²,小区之间筑土埂,并用 60 μm 厚的薄膜相互间隔至犁底层。水稻季供试品种为冈优 94-11,除 45 kg·hm⁻² 的钾肥在水稻扬花期前施用外,其余无机肥在水稻移栽后立即施入各小区,而麦秆和菌渣在水稻移栽 4 d 后施入;小麦季供试品种为蓉麦 2 号,除谷秆外所有肥料均在小麦播种前施入各小区,而谷秆则是在小麦播种后施入。所有肥料的施用均为表施。在水稻和小麦生长过程中,除草、病虫害防治等按照当地常规管理进行。

供试菌渣采自成都市大邑县韩场镇兰田食用菌有限公司的标准化菇房,为稻草-牛粪配方种植的双孢蘑菇菌废料,水稻季菌渣养分含量为:全氮 5.98 g·kg⁻¹、全磷 0.61 g·kg⁻¹、全钾 2.47 g·kg⁻¹;小麦季菌渣含量为:全氮 7.01 g·kg⁻¹、全磷 0.81 g·kg⁻¹、全钾 2.99 g·kg⁻¹。供试秸秆为上季收获后的麦秆或谷秆,水稻季秸秆养分含量为:全氮 7.21 g·kg⁻¹、全磷 0.88 g·kg⁻¹、全钾 1.19 g·kg⁻¹;小麦季秸秆含量为:全氮 7.23 g·kg⁻¹、全磷 1.45 g·kg⁻¹、全钾 1.42 g·kg⁻¹。

1.3 研究方法

1.3.1 采样方法

分别于水稻的分蘖期(2009 年 5 月 30 日)、拔节期(2009 年 6 月 25 日)、抽穗期(2009 年 7 月 25 日)

表 1 供试土壤主要理化性质

Table 1 The major physico-chemical properties of the experimental soil

pH	容重/g·cm ⁻³	有机质/g·kg ⁻¹	全钾/g·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	碱解氮/mg·kg ⁻¹
6.85	1.13	57.9	21.2	1.05	2.90	270	20.4	125

表 2 试验设计

Table 2 Experimental design

处理代码	处理	水稻季/kg·hm ⁻²					小麦季/kg·hm ⁻²				
		麦秆	菌渣	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	谷秆	菌渣	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CF	常规化肥	—	—	93.3	15	18	—	—	163.3	26.3	31.5
100%SR	秸秆全量还田	12 898.3	—	—	—	—	22 544.4	—	—	—	—
50%FR	菌渣低量还田	—	7 773.6	46.8	10.3	—	—	11 647.6	81.8	16.9	—
100%FR	菌渣全量还田	—	15 550.5	—	—	—	—	23 295.3	—	—	—
250%FR	菌渣高量还田	—	38 877.3	—	—	—	—	58 238.2	—	—	—

和成熟期(2009 年 8 月 15 日)以及小麦的苗期(2009 年 11 月 20 日)、分蘖期(2009 年 12 月 25 日)、拔节期(2010 年 2 月 5 日)、抽穗期(2010 年 3 月 5 日)和成熟期(2010 年 4 月 5 日),按 5 点取样法用土钻分别取样。每次取样取 0~10 cm 的表层土,同时取 3 次重复。采回的土样一部分放入 4 ℃冰箱保存,以备土壤酶测定使用;一部分作为风干土用于基础养分的测定。

1.3.2 测定方法

土壤养分测定:土壤的有机质(SOM)采用重铬酸钾外加热法;全氮(TN)采用半微量开氏法;全磷(TP)采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法;全钾(TK)采用 NaOH 熔融-火焰光度法;碱解氮(HN)采用碱解扩散法;速效磷(AP)采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 浸提-钼锑抗比色法;速效钾(AK)采用 NH_4OAc 浸提-火焰光度法^[18]。

土壤酶测定:蔗糖酶(Invertase)采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定;脲酶(Urease)采用苯酚钠比色法测定;磷酸酶(Phosphatase)采用磷酸苯二钠比色法测定;脱氢酶(Dehydrogenase)采用红色甲臍(TPF)生成法测定^[19]。

1.4 数据分析方法

试验所获得数据采用 Microsoft Excel 2007 进行初步整理、分析和绘制图表,用 SPSS 17.0 进行方差分析和相关性分析。

2 结果与分析

土壤脱氢酶、脲酶、蔗糖酶和中性磷酸酶分别作为表征微生物氧化还原能力^[20]、土壤氮素状况^[21]、土壤生物活性^[15]和土壤磷素有效化强度的重要酶^[22-23],不同还田模式下,其活性有着明显的差异。

2.1 作物生育期内土壤脱氢酶活性变化情况

由图 1 可以看出,土壤脱氢酶在作物生长季内呈先增后降的单峰曲线变化趋势,峰值出现在水稻季拔节期和小麦季分蘖期。与作物生长初期相比,水稻成熟期各处理土壤脱氢酶活性有所降低,降低比例为 69.63%~84.11%,小麦成熟期各处理土壤脱氢酶活性有所提高,提高比例为 29.49%~49.65%。

水稻和小麦生育初期,各处理间差异不大。进入拔节期后,秸秆全量还田(100%SR)、菌渣全量还田(100%FR)和高量菌渣还田(250%FR)处理的土壤脱氢酶活性均高于化肥(CF)处理,其中成熟期的 250%FR 处理显著高于 CF 处理($P<0.05$)。整个生育期,土壤脱氢酶活性随菌渣还田量的增加而增加,除小麦季

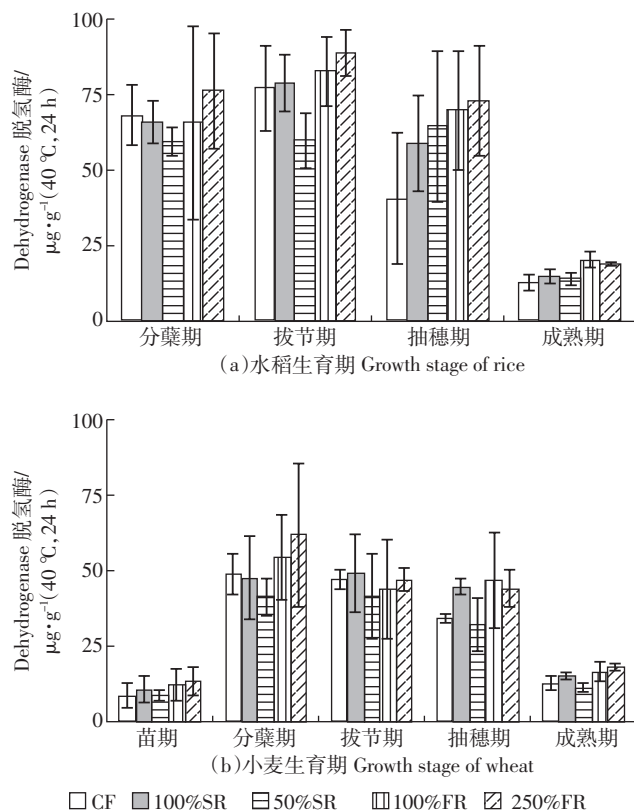


图 1 作物生育期内土壤脱氢酶变化

Figure 1 Soil dehydrogenase activities at different growth stages of crop

成熟期 250%FR 处理显著高于 50%FR 处理($P<0.05$)外,其他生育期菌渣还田处理之间差异不显著。从整个生育期来看土壤脱氢酶活性平均值,水稻季表现为 250%FR ($64.21 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) > 100%FR ($58.98 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) > 100%SR ($54.23 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) > CF ($49.29 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) > 50%FR ($49.05 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$),小麦季表现为 100%FR ($34.87 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) > 250%FR ($37.94 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) > 100%SR ($33.13 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) > CF ($29.69 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) > 50%FR ($26.98 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)。

2.2 作物生育期内土壤脲酶活性变化情况

由图 2 可以看出,土壤脲酶在水稻和小麦生育期内均呈单峰曲线变化,抽穗期以前土壤脲酶缓慢增加,抽穗期达到峰值,此后缓慢降低;与作物生长初期相比,水稻和小麦成熟期各处理土壤脲酶活性略有提高,提高比例为 1.96%~19.59%和 1.38%~22.52%。

与化肥(CF)处理相比,秸秆还田(SR)和菌渣还田(FR)处理在作物生育期内均能提高土壤脲酶活性,其中 100%FR 与 250%FR 处理在小麦拔节期、抽穗期和成熟期显著高于 CF 处理($P<0.05$),除水稻拔节期外,其他氮量秸秆还田和菌渣还田各处理分别比 CF 处理高 4.04%~23.92%和 11.65%~47.30%。除水稻拔

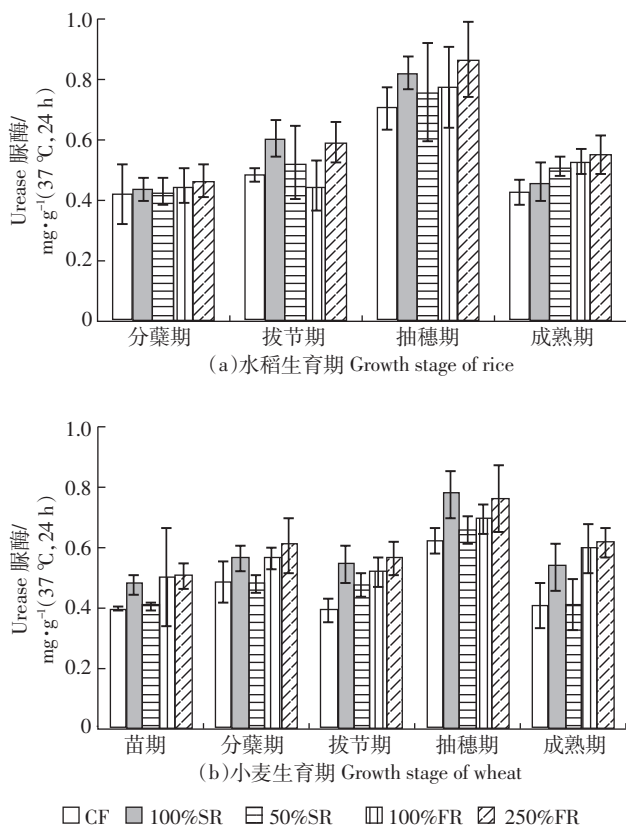


图2 作物生育期内土壤脲酶变化

Figure 2 Soil urease activities at different growth stages of crop

节期外,土壤脲酶活性随菌渣还田量的增加而增强,水稻生育期内,50%FR、100%FR和250%FR处理的土壤脲酶活性分别为0.43~0.76、0.45~0.78、0.46~0.87 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$;小麦生育期内分别为0.40~0.66、0.50~0.69、0.50~0.76 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。从水稻和小麦整个生育期看,水稻季土壤脲酶的活性平均值为250%FR($0.62\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)>100%SR($0.58\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)>50%FR($0.56\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)>100%FR($0.55\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)>CF($0.51\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$),小麦季表现为250%FR($0.61\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)>100%SR($0.58\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)>100%FR($0.57\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)>50%FR($0.48\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)>CF($0.46\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)。

2.3 作物生育期内土壤蔗糖酶活性变化情况

由图3可以看出,土壤蔗糖酶在水稻和小麦生育期内均呈单峰曲线变化,抽穗期以前土壤蔗糖酶缓慢增加,抽穗期达到峰值,此后再缓慢降低;与作物生长初期相比,水稻和小麦成熟期各处理土壤蔗糖酶活性有所提高,提高比例分别为6.09%~21.59%和33.71%~72.18%。

与化肥(CF)处理相比,水稻生育期内,秸秆还田(SR)和菌渣还田(FR)处理均能提高土壤中蔗糖酶活性,提高比例为1.21%~39.47%,其中在分蘖期50%

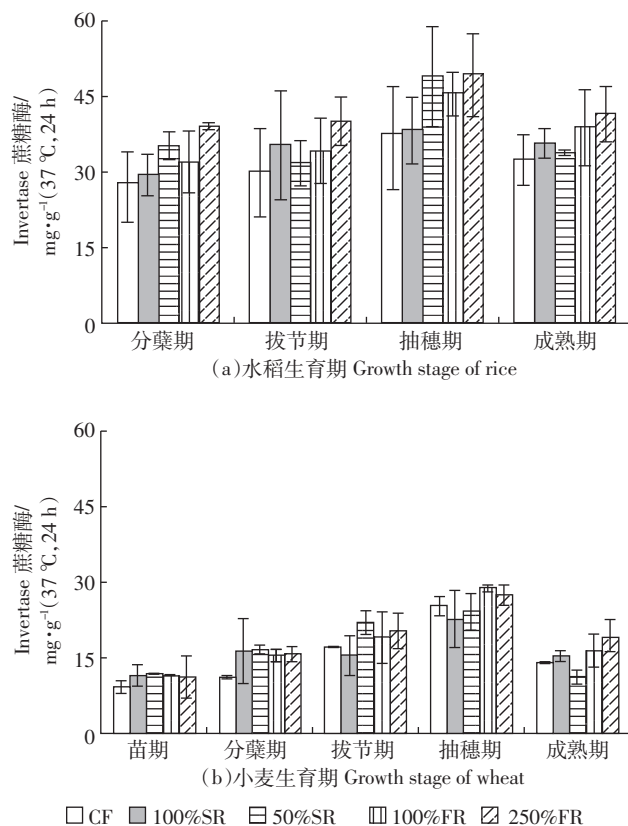


图3 作物生育期内土壤蔗糖酶变化

Figure 3 Soil invertase activities at different growth stages of crop

FR和250%FR处理显著高于CF处理($P<0.05$)。而在小麦生育期内,秸秆还田和菌渣还田处理的土壤蔗糖酶活性在拔节期前均高于化肥处理,拔节期后只有250%FR和100%FR处理高于化肥处理。从整个生育期来看,水稻季土壤蔗糖酶活性平均值表现为250%FR($42.46\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)>100%FR($37.66\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)>50%FR($37.37\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)>100%SR($34.62\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)>CF($32.16\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$),小麦季也表现为250%FR($18.86\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)>100%FR($18.29\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)>50%FR($17.19\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)>100%SR($16.34\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)>CF($15.47\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$),同时水稻季的土壤蔗糖酶活性显著高于小麦季($P<0.05$)。

2.4 作物生育期内土壤中性磷酸酶活性变化情况

由图4可以看出,土壤中性磷酸酶在水稻和小麦生育期内均呈单峰曲线变化,苗期到拔节期,土壤中中性磷酸酶活性增加,拔节期至抽穗期出现峰值,此后逐渐降低;与作物生长初期相比,水稻和小麦成熟期土壤中中性磷酸酶活性均略有降低,降低比例分别为11.15%~22.42%和6.02%~11.59%。

与化肥(CF)处理相比,水稻生育期内,秸秆还田(SR)和菌渣还田(FR)处理均能提高土壤中性磷酸酶

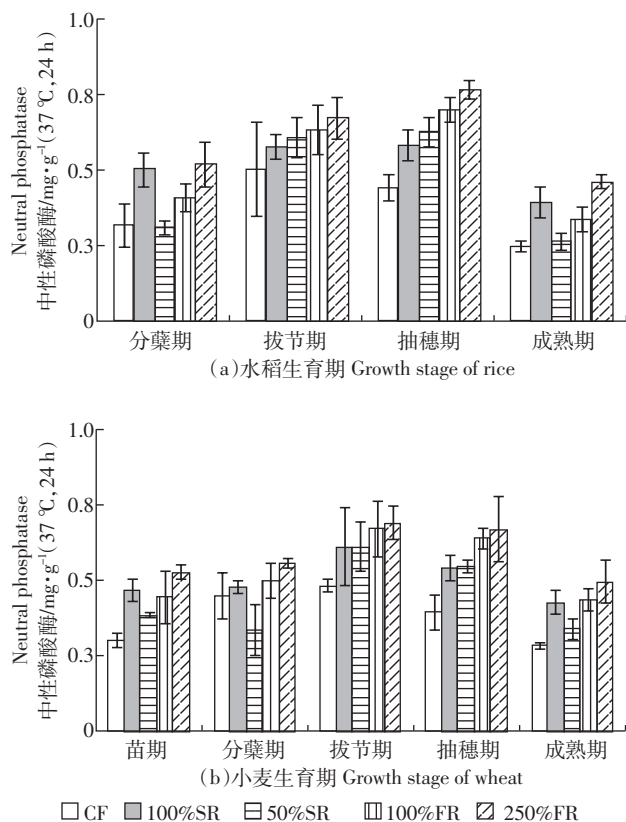


图4 作物生育期内土壤中性磷酸酶变化

Figure 4 Soil neutral phosphatase activities at different growth stages of crop

活性,提高比例为 29.48%~88.10%,其中分蘖期和成熟期除 50%FR 外各处理均能显著高于 CF 处理 ($P < 0.05$)。而在小麦生育期,秸秆还田和菌渣还田处理的土壤中性磷酸酶活性除分蘖期 50%FR 外均高于化肥处理,提高比例为 48.03%~75.75%。从水稻和小麦整个生育期看,水稻季中性磷酸酶的活性平均值表现为 250%FR ($0.60 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > 100%FR ($0.52 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > 100%SR ($0.51 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > 50%FR ($0.45 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > CF ($0.37 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$),小麦季也表现为 250%FR ($0.59 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > 100%FR ($0.54 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > 100%SR ($0.50 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > 50%FR ($0.44 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > CF ($0.38 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)。

3 讨论

3.1 稻麦轮作下不同施肥处理对土壤酶活性的影响

土壤酶活性很大程度受到作物品种、耕作制度和施肥管理方式的影响,常被用于指示土壤功能随生态压力和土地管理的变化情况^[3-4]。对于作物施肥管理方式的改变,土壤酶活力的敏锐性超过一些土壤化学指标,比如土壤有机质^[24]。本研究经过一年的野外定位试验,测定了不同施肥方式下,水稻和小麦各生育期

的土壤酶变化情况。研究发现秸秆全量还田、菌渣全量还田和菌渣高量还田处理的土壤脱氢酶、脲酶、蔗糖酶和中性磷酸酶活性均高于化肥处理;水稻季成熟期只有磷酸酶表现为 250%FR、100%SR 和 100%FR > CF ($P < 0.05$),脱氢酶表现为 250%FR > CF ($P < 0.05$);小麦季成熟期也是磷酸酶表现为 250%FR、100%SR 和 100%FR > CF ($P < 0.05$),其他酶表现为 250%FR、100%SR > CF ($P < 0.05$)。这说明与化肥相比,秸秆还田可显著提高磷酸酶活性,菌渣还田可显著提高大部分土壤酶活性。这是因为秸秆和菌渣其本身含有丰富的纤维素、木质素等富碳物质以及氮、磷、钾多种营养元素^[25],腐解能使土壤综合生态因子得到改善,土壤中的微生物数量增加、活性更趋活跃,促进了酶活性的提高;而酶活性的提高又增强了土壤微生物的活动,形成了良好的“互动效应”^[26]。关于秸秆和菌渣还田对土壤酶活性的影响,大部分研究认为秸秆和菌渣还田可以提高土壤酶活性^[26-28],但也有秸秆和菌渣还田对个别土壤酶活性影响不明显甚至降低的报道^[16,29],可能是因为土壤酶活性还受到土壤质地、种植制度以及气候条件的影响。

秸秆和菌渣都是种植业有机废弃物,含有丰富的纤维素、木质素等富碳物质以及氮、磷、钾多种营养元素^[25],但其养分含量、腐熟程度和腐解速率不同,对土壤酶活性的影响也有差异。本研究中,土壤脱氢酶、脲酶和蔗糖酶在作物成熟期均表现出 100%FR > 100%SR,说明菌渣作为腐熟过的有机肥,对土壤酶活性的促进作用高于秸秆。菌渣是秸秆循环利用后的产物,在利用过程中发生腐解,已产生一定数量的微生物,施入土壤后,较等氮量的秸秆携带微生物数量更多,进一步腐解释放养分的速率更快,从而更能表现出对酶活性的促进作用。刘佳斌等^[30]和黄春^[13]的研究也证明腐熟后的有机物对土壤养分、微生物数量和土壤酶活性的促进作用更强。

3.2 作物生育期内土壤酶活性与土壤养分相关性

土壤养分影响作物的生长发育,酶类则参与土壤中复杂的生物化学反应和物质循环,其中包括土壤养分的转化。土壤有机质、氮、磷、钾是土壤肥力的重要标志^[33]。很多学者就土壤酶活性与土壤养分的相关关系进行了研究,结果表明二者关系十分密切^[31-33]。

本研究就水稻和小麦生育期内土壤酶活性与土壤有机质、速效养分和全量养分的相关性进行了研究,结果如表 3 和表 4,不难看出:水稻季的土壤脲酶和蔗糖酶,小麦季的土壤蔗糖酶表现出与有机质呈显

表 3 作物生育期内土壤酶活性与土壤养分的相关性分析(水稻季)

Table 3 Correlation analysis of soil nutrient and soil enzyme activity in the period of crop growth(rice season)

指标 Factors	有机质 SOM	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	碱解氮 HN	速效磷 AP	速效钾 AK
中性磷酸酶 Neutral phosphatase	0.383	0.04	0.035	0.778*	0.851*	0.838*	0.624*
脲酶 Urease	0.646*	0.5	0.477	0.845*	0.862*	0.619*	0.276
蔗糖酶 Invertase	0.571*	0.5	0.59	0.507	0.67*	0.804*	0.623*
脱氢酶 Dehydrogenase	0.472	0.197	0.422	0.58	0.822*	0.347	0.427

注:* 在 0.05 水平上相关性显著($n=15$)。

Note:* Correlation is significant at the 0.05 level($n=15$).

表 4 作物生育期内土壤活性与土壤养分相关性分析(小麦季)

Table 4 Correlation analysis of soil nutrient and soil enzyme activity in the period of crop growth(wheat season)

指标 Factors	有机质 SOM	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	碱解氮 HN	速效磷 AP	速效钾 AK
中性磷酸酶 Neutral phosphatase	0.684	0.195	0.042	0.159	0.786*	0.872*	0.732*
脲酶 Urease	0.505	0.640	0.349	0.285	0.946*	0.770*	0.83*
蔗糖酶 Invertase	0.750*	0.595	0.785*	0.503	0.808*	0.772*	0.849*
脱氢酶 Dehydrogenase	0.143	0.120	0.142	0.212	0.895*	0.554*	0.686*

注:* 在 0.05 水平上相关性显著($n=15$)。

Note:* Correlation is significant at the 0.05 level($n=15$).

著正相关关系($P<0.05$)。这可能是由于有机质可增强土壤孔隙度、通气性和结构性,有显著的缓冲作用和持水力,而且还是土壤酶的有机载体^[34],二者必然具有很强的相关性。徐强等^[35]和王笛等^[33]的研究也证明了土壤酶活性与土壤有机质关系十分密切。另外,土壤酶活性与土壤速效养分的相关性相比土壤全量养分更强,这可能是因为酶活性提高直接促进了土壤养分释放与有效化,从而增加了土壤中有效养分的含量,所以可以很好地表征当季土壤的肥力状况^[35]。

总的来看,土壤酶活性与土壤养分的相关性普遍较强,可以作为表征土壤肥力的重要指标,另外也从侧面证明了秸秆还田和菌渣还田对于优化土壤,提高土壤肥力的重要作用。

4 结论

本文综合探讨了不同施肥处理对土壤酶活性的影响,并分析了土壤酶活性与土壤养分二者之间的相关性,结论如下:

(1)成都平原稻麦轮作条件下,土壤脱氢酶、脲酶、蔗糖酶和中性磷酸酶活性均呈现先增后减的单峰变化,土壤脱氢酶和中性磷酸酶活性表现为成熟期低于生长初期,而脲酶和蔗糖酶则相反;另外秸秆全量还田、菌渣全量还田和菌渣高量还田处理的土壤脱氢酶、脲酶、蔗糖酶和中性磷酸酶活性均高于化肥处理,其中秸秆还田可显著提高磷酸酶活性,而菌渣还田可

显著提高大部分土壤酶活性;在作物成熟期土壤脱氢酶、脲酶和蔗糖酶活性均表现出菌渣全量还田>秸秆全量还田。

(2)相关性分析表明,土壤中性磷酸酶、脲酶、蔗糖酶和脱氢酶活性与土壤养分的相关性较好,能够反映当季土壤的肥力状况,是评价土壤管理的良好指标。在成都平原区采用秸秆还田和菌渣还田的保护性农业措施能有效促进土壤质量的可持续发展。

(3)秸秆全量还田、菌渣全量还田和菌渣高量还田处理的土壤脱氢酶、脲酶、蔗糖酶和中性磷酸酶活性均高于化肥处理;水稻季成熟期磷酸酶表现为 250%FR、100%SR 和 100%FR>CF($P<0.05$),脱氢酶表现为 250%FR>CF($P<0.05$);小麦季成熟期磷酸酶表现为 250%FR、100%SR 和 100%FR>CF($P<0.05$),其他酶表现为 250%FR、100%SR>CF($P<0.05$)。在本试验的施肥水平以及常规田间管理条件下,秸秆和菌渣还田处理对于优化土壤,提高土壤肥力具有重要作用。鉴于菌渣还田土壤的长期效应以及对土壤微生物生理代谢影响的复杂性,适宜菌渣还田量的选择还需进行长期定位试验研究。

参考文献:

- [1] 徐 雁, 向成华, 李贤伟. 土壤酶的研究概况[J]. 四川林业科技, 2010, 31(2): 14-20.
XU Yan, XIANG Cheng-hua, LI Xian-wei. The general situation of the

- study of soil enzyme[J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2010, 31(2):14-20.
- [2] 姜勇, 梁文举, 闻大中. 免耕对农田土壤生物学特性的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(3):347-351.
- JIANG Yong, LIANG Wen-ju, WEN Da-zhong. Zero tillage in farmland soil biological characteristics influence[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(3):347-351.
- [3] Melero S, Ruiz Porras J C, Herencia J F, et al. Chemical and bio-chemical properties in a silty loam soil under conventional and organic management[J]. *Soil Tillage Research*, 2006, 90:162-70.
- [4] Yang L J, Li T L, Li F S, et al. Fertilization regulates soil enzymatic activity and fertility dynamics in a cucumber field[J]. *Scientia Horticulturae*, 2008, 116:21-26.
- [5] 路文涛, 贾志宽, 张鹏, 等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3):522-528.
- LU Wen-tao, JIA Zhi-kuan, ZHANG Peng, et al. Effects of straw returning on soil labile organic carbon and enzyme activity in semi-arid areas of Southern Ningxia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3):522-528.
- [6] Chen Hua-lin, Zhou Jiang-min, Xiao Bao-hua. Characterization of dissolved organic matter derived from rice straw at different stages of decay[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(5):915-922.
- [7] 吕美蓉, 李增嘉, 张涛, 等. 少免耕与秸秆还田对极端土壤水分及冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1):41-44.
- LÜ Mei-rong, LI Zeng-jia, ZHANG Tao, et al. Effects of minimum or no-tillage system and straw returning on extreme soil moisture and yield of winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(1):41-44.
- [8] 赵鹏, 陈卓. 秸秆还田配施化学氮肥对冬小麦氮效率和产量的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(6):1014-1018.
- ZHAO Peng, CHEN Fu. Effects of straw mulching plus nitrogen fertilizer on nitrogen efficiency and grain yield in winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(6):1014-1018.
- [9] Sunita Gaind, Lata Nain. Chemical and biological properties of wheat soil in response to paddy straw incorporation and its biodegradation by fungal inoculants[J]. *Biodegradation*, 2007, 18(4):495-503.
- [10] 陈春梅, 谢祖彬, 朱建国, 等. FACE处理的小麦秸秆还田对稻田CH₄排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4):1550-1555.
- CHEN Chun-mei, XIE Zu-bin, ZHU Jian-guo, et al. Effects of amendment of wheat straw produced under FACE condition on soil CH₄ emission in paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4):1550-1555.
- [11] Ma J, Li X L, Xu H, et al. Effects of nitrogen fertilizer and wheat straw application on CH₄ and N₂O emissions from a paddy rice field[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45:359-367.
- [12] 路文涛. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤理化性状及作物产量的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2011.
- LU Wen-tao. Effects of straw returning on physico-chemical characters of soil and the yield of crops in dry farmland area of southern Ningxia[D]. Yangling:North West Agriculture and Forestry University, 2011.
- [13] 黄春. 成都平原稻麦轮作下菌渣还田对土壤酶活性的影响[D]. 成都:四川农业大学, 2010.
- HUANG Chun. Effects of field return of fungal residues on soil enzyme activities in a paddy soil under a rice-wheat rotation in Chengdu Plain[D]. Chengdu:Sichuan Agricultural University, 2010.
- [14] 温广婵, 叶正钱, 王旭东, 等. 菌渣还田对稻田土壤养分动态变化的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3):82-86.
- WEN Guang-chan, YE Zheng-qian, WANG Xu-dong, et al. Effects of edible fungus residue on dynamic changes of soil nutrients in paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(3):82-86.
- [15] 韩新忠, 朱利群, 杨敏芳, 等. 不同小麦秸秆还田量对水稻生长、土壤微生物生物量及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11):2192-2199.
- HAN Xin-zhong, ZHU Li-qun, YANG Min-fang, et al. Effects of different amount of wheat straw returning on rice growth, soil microbial biomass and enzyme activity[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11):2192-2199.
- [16] 闫超, 刁晓林, 葛慧玲, 等. 水稻秸秆还田对土壤溶液养分与酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(5):1232-1236.
- YAN Chao, DIAO Xiao-lin, GE Hui-ling, et al. Effects of rice straw returning on nutrients in soil solution and activities of soil enzymes[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(5):1232-1236.
- [17] 张伟, 龚久平, 刘建国. 秸秆还田对连作棉田土壤酶活性的影响[J]. 生态环境学报, 2011, 20(5):881-885.
- ZHANG Wei, GONG Jiu-ping, LIU Jian-guo. Effect of returning cotton stalk to long-term continuous cropping field on soil enzyme activities[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(5):881-885.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业出版社, 2000:101-131.
- LU Ru-kun. Soil agricultural chemical analysis method[M]. Beijing:China Agriculture Press, 2000:101-131.
- [19] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社, 1986:274-328.
- GUAN Song-yin. Soil method enzyme and its research[M]. Beijing:Agri-culture Press, 1986:274-328.
- [20] 成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒度分析及其应用[M]. 北京:地质出版社, 1978:31-65.
- Northern Shaanxi Team of Chendu Geological College. Sedimentary rock (content) particle size analysis and its application[M]. Beijing:Geological Publishing House, 1978:31-65.
- [21] 高明, 周保同, 魏朝富, 等. 不同耕作方式对稻田土壤动物、微生物及酶活性的影响研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(7):1177-1181.
- GAO Ming, ZHOU Bao-tong, WEI Chao-fu, et al. Effect of tillage system on soil animal, microorganism and enzyme activity in paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(7):1177-1181.
- [22] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京:科学出版社, 1987.
- ZHOU Li-kai. Soil enzymology[M]. Beijing:Science Press, 1987.
- [23] Sharpley A N. Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49:905-911.
- [24] Doran J W, Sarrantonin M, Liebig M A. Soil health and sustainability[J]. *Advances in Agronomy*, 1996, 56:1-54.

- [25] 李明德, 吴海勇, 聂 军, 等. 稻草及其循环利用后的有机废弃物还田效用研究[J]. 中国农业科学, 2010, 43(17):3572-3579.
- LI Ming-de, WU Hai-yong, NIE Jun, et al. Straw and recycling of organic waste utility research[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(17):3572-3579.
- [26] 吴海勇, 李明德, 刘琼峰, 等. 农业有机废弃物还田的生态经济效益研究[J]. 土壤, 2012, 44(5):769-775.
- WU Hai-yong, LI Ming-de, LIU Qiong-feng, et al. Straw and recycling of organic waste utility research[J]. *Soils*, 2012, 44(5):769-775.
- [27] 甄丽莎, 谷 洁, 高 华, 等. 秸秆还田与施肥对土壤酶活性和作物产量的影响[J]. 西北植物学报, 2012, 32(9):1811-1818.
- ZHEN Li-sha, GU Jie, GAO Hua, et al. Straw returned and fertilizer application on soil enzyme activity and the influence of crop yield[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, 32(9):1811-1818.
- [28] 杨文平, 王春虎, 茹振钢. 秸秆还田对冬小麦根际土壤酶活性及产量的影响[J]. 河南农业科学, 2011, 40(7):41-43.
- YANG Wen-ping, WANG Chun-hu, RU Zhen-gang. Straw returned on winter wheat rhizosphere soil enzyme activity and the influence of yield[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2011, 40(7):41-43.
- [29] 谢 放, 魏孔丽, 陈京津, 等. 香菇渣对土壤微生物和酶活性的影响[J]. 湖南农业科学, 2010, (5):54-58.
- XIE Fang, WEI Kong-li, CHEN Jing-jin, et al. Mushroom residue on the soil microbes and the influence of the enzyme activity[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2010, (5):54-58.
- [30] 刘佳斌, 李传宝, 王宏燕. 秸秆还田不同处理方式对黑土微生物数量和土壤酶活性的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(9):5285-5287.
- LIU Jia-bin, LI Chuan-bao, WANG Hong-yan. Effects of different way of straw returning on microorganism quantity and soil enzyme in black soil[J]. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2012, 40(9):5285-5287.
- [31] 宋海燕, 李传荣, 许景伟, 等. 滨海盐碱地枣园土壤酶活性与土壤养分、微生物的关系[J]. 林业科学, 2007, 43(1):28-32.
- SONG Hai-yan, LI Chuan-rong, XU Jing-wei, et al. Coastal saline and alkaline land analyzed the soil enzyme activity and soil nutrient microbial relationship[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(1):28-32.
- [32] 袁 亮, 李絮花, 李 润, 等. 设施栽培土壤磷酸酶活性及其与土壤养分的关系[J]. 山东农业科学, 2007(2):80-82.
- YUAN Liang, LI Xu-hua, LI Run, et al. Soil phosphatase activity and its relation with soil nutrient content in sheltered planting fields[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2007(2):80-82.
- [33] 王 笛, 马风云, 姚秀粉, 等. 黄河三角洲退化湿地土壤养分、微生物与土壤酶特性及其关系分析[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(5):94-98.
- WANG Di, MA Feng-yun, YAO Xiu-fen, et al. Properties of soil microbes, nutrients and soil enzyme activities and their relationship in a degraded wetland of Yellow River Delta[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2012, 10(5):94-98.
- [34] Schlöter M, Leubner M, Henlin T, et al. Ecology and evolution of bacterial micro diversity[J]. *FEMS Microbiology Review*, 2000, 24:647-660.
- [35] 徐 强, 程智慧, 孟焕文, 等. 玉米-线辣椒套作系统中土壤养分与根际土壤微生物、酶活性的关系[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12):2747-2754.
- XU Qiang, CHENG Zhi-hui, MENG Huan-wen, et al. Relationships between soil nutrients and rhizospheric soil microbial communities and enzyme activities in a maize-capsicum intercropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12):2747-2754.