

基于旋耕玉米秸秆还田条件下土壤微生物、 酶及速效养分的动态特征

闫洪奎, 于 泽, 王欣然, 李春阳, 赵 丽, 计默睿, 王立为

(沈阳农业大学农学院, 沈阳 110866)

摘要: 为研究旋耕条件下秸秆还田的腐解机理, 设置不同数量秸秆还田处理, 分别于玉米拔节期、抽雄期、乳熟中期、完熟期测定土壤微生物数量、土壤酶活性和速效养分含量。结果表明: (1) 秸秆还田促进土壤微生物繁殖, 提高土壤酶活性, 增加碱解氮含量, 降低速效磷和速效钾含量; 秸秆量为 $11\ 250\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时真菌、细菌、放线菌数量及蔗糖酶、纤维素酶活性增幅最大; 秸秆量为 $7\ 500\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时脲酶、磷酸酶活性和碱解氮增幅最大, 速效磷、速效钾降幅最大。 (2) 部分土壤微生物数量与土壤酶活性之间存在相关性, 播种后 40 天, 土壤真菌、细菌、放线菌数量、纤维素酶活性之间存在正相关, 真菌与磷酸酶活性呈负相关; 播种后 67 天, 放线菌与磷酸酶、蔗糖酶呈正相关; 播种后 140 天, 放线菌与蔗糖酶呈正相关。 (3) 部分土壤酶活性之间存在相关性, 播种后 67 天, 脲酶与纤维素酶、磷酸酶与蔗糖酶之间呈正相关; 播种后 140 天, 蔗糖酶与纤维素酶呈正相关, 脲酶与蔗糖酶、纤维素酶呈负相关。 (4) 土壤酶活性与速效养分存在相关性, 播种后 40, 112 天的脲酶、67 天的纤维素酶、112, 140 天的磷酸酶与碱解氮含量呈正相关; 播种后 40 天, 蔗糖酶与速效钾呈正相关, 播种后 40, 67, 112 天脲酶活性与速效钾含量呈负相关。 (5) 碱解氮与速效磷含量呈负相关, 播种后 40, 112, 140 天的碱解氮与速效钾含量呈负相关。

关键词: 玉米; 旋耕; 秸秆还田; 土壤微生物; 土壤酶; 速效养分

中图分类号: S154.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0276-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.02.041

Dynamic Characteristics of Soil Microorganisms, Enzymes and Available Nutrients Under the Conditions of the Corn Straw Returning Based on Rotary Tillage

YAN Hongkui, YU Ze, WANG Xinran, LI Chunyang, ZHAO Li, JI Muorui, WANG Liwei

(College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866)

Abstract: In order to understand the decomposing mechanism of the straw returning to field under rotary tillage, the different treatments based on amounts of straw returning were set up. Soil microbial biomass, soil enzymes activities and available nutrients contents were measured at maize jointing stage, male stage, middle maturity stage and mature stage respectively. The results showed that: (1) The straw returning could promote the soil microbial reproduction, increase the soil enzymes activities and the content of alkali hydrolyzable nitrogen, but decrease the contents of available phosphorus and available potassium. The number of fungi, bacteria, actinomycetes and sucrase and cellulase activities increased substantially under the straw returning amount of $11\ 250\ \text{kg}/\text{hm}^2$. Urease and phosphatase activities and the contents of alkali hydrolyzable nitrogen increased under $7\ 500\ \text{kg}/\text{hm}^2$, but the available phosphorus and available potassium decreased. (2) There were positive correlations between the number of soil fungi, bacteria, actinomyces and cellulase activity, but the fungi quantity was negatively related to phosphatase activity after planting for 40 days. Actinomycetes quantity was positively related to phosphatase and sucrase after 60 days, and related to sucrase after 140 days. (3) There were correlations among the soil enzymes activities. Urease was positively related to cellulose, and phosphatase was positively correlated with sucrase in 67 days. Sucrase was positively related to cellulose, and urease was negatively related to sucrase and cellulose in 140 days. (4) There were correlations between the soil enzymes

activities and the available nutrients contents. Urease in 40 days and 112 days, cellulase in 67 days, phosphatase in 112 and 140 days had positive correlations with alkali hydrolyzable nitrogen contents.

Keywords: maize; rotary tillage; straw returning; soil microorganism; soil enzyme; available nutrients

玉米是重要的粮经饲作物。随着玉米产量的快速提升,同时也产生相当数量的秸秆。由于得不到合理利用,多数秸秆被焚烧,既污染环境又存在火灾隐患。据统计,2010年全国农作物秸秆总产量中玉米秸秆占28.57%,全国直接还田平均17.6%,所有玉米秸秆产量中,处于第一位的东北直接还田仅为11%,第二位的华北达到31%^[1]。世界农业发达的欧美国家,秸秆还田起步早,技术成熟,应用面积大,其中美国秸秆还田比率达到了68%,英国甚至达到73%^[2]。据测算,每100 g秸秆中含碳44.2 g、氮(N)0.62 g、磷(P₂O₅)0.25 g、钾(K₂O)1.44 g及钙、镁、铁、硫、硅等微量元素,是极其优质的肥源^[3]。研究表明秸秆还田增加土壤有机质和氮、磷、钾等养分含量,改善土壤理化性状,有效促进作物生长发育,提高作物产量^[4-11]。作为土壤生态系统重要组成部分的微生物,在秸秆还田过程中起到绝对的作用^[12]。通过秸秆还田途径可向土壤输送的大量有机碳源成为土壤微生物繁殖的所需营养,从而促进微生物区系的多样化,同时提高土壤酶活性,由此促进土壤腐殖质形成,释放秸秆营养养分,改善土壤通透性和保水保肥能力^[13-14]。秸秆还田效果与秸秆数量、还田方式、耕作制度、土壤质量、地力水平、施肥水平等因素密切相关;无论是覆盖方式、旋耕方式还是深翻方式还田,土壤微生物数量都随土层深度增加而快速减少,秸秆腐解和转化效率下降^[15-19]。我国秸秆还田的应用不仅存在技术推广、经济收益等难题,还包括配套技术、还田机制等尚未明确^[1]。本研究基于旋耕条件下秸秆数量的梯度还田试验,探索现有耕层条件下秸秆粉碎还田的土壤生物学特性与秸秆养分释放的关系。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在沈阳农业大学北部试验地进行,棕壤,中低肥力,供试玉米品种为郑单958。

1.2 试验设计

试验处理设还田秸秆量分别为0, 3 750, 7 500, 11 250, 15 000 kg/hm²(以J₀、J₁、J₂、J₃、J₄表示),小区面积10 m²,3次重复。2016年5月8日按照试验方案将粉碎的玉米秸秆(长度≤5 cm)均匀撒在小区内,用旋耕机进行15 cm深度旋耕、起垄;5月11日施入玉米一次性专用复合肥600 kg/hm²(N—P₂O₅—K₂O为25—15—15),播种密度60 000株/hm²,田间管理与大田一致。分别于拔节始期、抽雄始期、乳熟中期、完熟期

(即播种后第40, 67, 112, 140天)按“S”形采集0—15 cm土壤样品,每区8点。

1.3 测定项目

碱解氮含量采用碱解扩散法测定;速效磷含量采用0.5 mol/L NaHCO₃法测定;速效钾含量采用NH₄OAC浸提—火焰光度法^[20]测定;土壤真菌、细菌、放线菌采用计数法测定,其培养基分别为牛肉膏蛋白胨琼脂培养基、淀粉铵盐培养基和马丁培养基^[21];脲酶活性采用苯酚钠—次氯酸钠比色法测定;磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定;蔗糖酶活性采用3,5—二硝基水杨酸比色法测定;纤维素酶活性采用蒽酮比色法^[22]测定。

2 数据分析

采用Excel 2010进行数据处理,SPSS软件进行方差和相关性分析(方差显著性的 P 值分别为0.05, 0.01,相关显著性 P 值分别为0.01, 0.05),LSD法检验处理间差异显著性。

3 结果与分析

3.1 不同秸秆还田量下土壤微生物数量的动态变化

方差分析表明,各采样时期处理间土壤微生物数量差异显著(表1)。总体而言,播种后40, 67天的真菌和细菌迅速增多,112, 140天快速下降。对于放线菌,40, 140天数量相对较多,67天最少。

40天时J₁和J₂的真菌数量与J₀相近,J₃超过J₀,J₄低于J₀;67天时J₃超过J₀,其余处理与J₀相近;与40天相比,67天的J₁、J₄分别增加70.1%和89.1%,J₀、J₂、J₃分别下降29.6%,33.1%,30.4%。

40天时还田处理细菌数量超过J₀,其中J₃最多,其次为J₂、J₄和J₁;67天时,J₁、J₃超过J₀,其余处理与J₀相近;与40天相比,J₁、J₂、J₄分别增加473.3%,95.8%,229.6%,J₃下降41.9%。

40天时J₃放线菌数量超过J₀,其余与J₀相近。67天时J₄、J₃超过J₀;与40天相比,J₄增加23.7%,J₁~J₃分别下降62.8%,41.3%,57.5%;112天时J₁超过J₀;与67天相比,J₁~J₄分别增加265.7%,17.3%,16.1%,47.4%;140天时J₂、J₃超过J₀;与112天相比,J₂~J₄分别增加100.3%,79.3%,10.0%,J₁下降32.6%。

真菌、细菌、放线菌数量的时间变化动态符合三次多项式,其中真菌一、二、三次项的符号相同,细菌的二、三次项的符号相同,说明不同处理的变化规律存在一定相似性。相关分析表明,播种后40天,随着还田秸秆数量的增加,真菌与细菌、真菌与放线菌、细

菌与放线菌之间的数量变化趋势极其相似(r 依次为 0.910^{**}, 0.866^{**}, 0.960^{**})。

表 1 不同秸秆还田量对土壤微生物数量的影响

测定 指标	处理	测定时期				模拟方程	R^2
		40 d	67 d	112 d	140 d		
真菌/ ($10^2 \cdot g^{-1}$)	J0	878.5bc	618.9b	1.7c	9.7a	$y=0.0249x^3-6.0182x^2+329.61x+3637.4$	1.000
	J1	526.8bc	8961ab	4.7ab	5.1b	$y=0.0737x^3-20.783x^2+1714.6x-34778$	1.000
	J2	981.9b	656.7b	2.3c	5.4b	$y=0.0235x^3-5.5014x^2+261.82x+6641.7$	1.000
	J3	1586.7a	1103.9a	2.7bc	5.0b	$y=0.0428x^3-10.285x^2+546.54x+7723.3$	1.000
	J4	421.5c	797.2ab	6.9a	3.7b	$y=0.0676x^3-19.18x^2+1598.5x-33365$	1.000
	F	6.725 ^{**}	3.987 [*]	8.562 ^{**}	5.840 [*]		
细菌/ ($10^6 \cdot g^{-1}$)	J0	34.2c	316.9b	4.1b	1.2b	$y=0.3357x^3-97.72x^2+8559.2x-204085$	1.000
	J1	88.9bc	509.4a	5.3b	1.6b	$y=0.5236x^3-151.86x^2+13215x-310253$	1.000
	J2	178.6b	349.6b	4.3b	1.9b	$y=0.2984x^3-84.808x^2+7090.9x-149186$	1.000
	J3	683.6a	397.1ab	11.9a	4.5a	$y=0.0851x^3-15.792x^2-118.22x+92910$	1.000
	J4	95.7bc	315.3b	5.3b	1.8b	$y=0.3013x^3-86.849x^2+7464.2x-169324$	1.000
	F	4.213 [*]	4.104 ^{**}	3.692 [*]	3.69 [*]		
放线菌/ ($10^4 \cdot g^{-1}$)	J0	16.3ab	6.5b	8.5b	12.0c	$y=-0.0004x^3+0.154x^2-16.186x+592.99$	1.000
	J1	16.4ab	6.1b	22.2a	15.0bc	$y=-0.0019x^3+0.513x^2-42.268x+1153.4$	1.000
	J2	15.7ab	9.2ab	10.8b	21.6a	$y=1E-04x^3+0.0166x^2-5.0418x+325.38$	1.000
	J3	23.3a	9.9a	11.5b	20.7ab	$y=-0.0003x^3+0.1486x^2-17.874x+732.45$	1.000
	J4	8.6b	10.6a	15.7ab	17.2abc	$y=-0.0001x^3+0.033x^2-1.6571x+107.59$	1.000
	F	40.058 ^{**}	3.593 [*]	14.034 ^{**}	7.842 ^{**}		

注: $F_{0.05}(4,14)=3.478$, $F_{0.01}(4,14)=5.994$ 。下同。

3.2 不同秸秆还田量下土壤酶活性的动态变化

方差分析表明,相同采样时期处理间的土壤酶活性差异显著或极显著(表 2)。总体而言,还田处理增加土壤酶活性。J1~J4 处理与 J0 相比,脲酶活性分别增加 17.4%,20.8%,9.0%,4.7%,磷酸酶活性分别增加 37.5%,66.4%,25.5%,64.8%,蔗糖酶活性分别增加 1.6%,7.9%,19.3%,22.8%,纤维素酶活性分别增加 8.9%,25.2%,39.7%,24.0%。

40 天时 J2、J1 处理的脲酶活性超过 J0,其余处理与 J0 相近;67 天时所有处理均超过 J0;与 40 天相比,J1~J4 分别增加 12.5%,10.0%,2.1%,11.0%;112 天时 J1~J3 超过 J0;与 67 天相比,J2、J3 分别增加 7.9%,10.6%,J4 下降 14.5%;140 天时 J2~J4 低于 J0;与 112 天相比,J1~J4 分别下降 5.0%,21.0%,15.0%,2.4%。

40 天时 J1、J2、J4 的磷酸酶活性超过 J0,J3 与 J0 相近;67 天时所有处理均超过 J0;与 40 天相比,J3 增加 9.8%,J1、J2、J4 分别下降 25.9%,10.5%,14.9%;112 天时所有处理均超过 J0;与 67 天相比,J1、J2、J4 分别增加 20.9%,54.0%,2.6%,J3 下降 13.3%;140 天时 J2、J4 超过 J0;与 112 天相比,J3、J4 分别增加 8.1%,12.4%,J1、J2 分别下降 21.6%和 7.1%。

40 天时所有处理蔗糖酶活性均低于 J0;67 天时 J3、J4 超过 J0;与 40 天相比,J1~J4 分别下降 45.7%,45.0%,13.6%,26.0%;112 天时所有处理均超过 J0;与 67 天相比,J1~J4 分别增加 62.8%,35.2%,15.5%,3.4%;140 天时所有处理均超过 J0;与 112

天相比,J1 下降 18.5%。

40 天时 J3、J4 纤维素酶活性超过 J0,其余处理与 J0 相近;67 天所有处理均超过 J0;与 40 天相比,J1~J4 分别下降 69.3%,61.4%,70.0%,74.6%;112 天时 J1 超过 J0;与 67 天相比,J1 增加 16.0%,J2~J4 分别下降 31.1%,27.3%,23.5%;140 天时 J2~J4 超过 J0;与 112 天相比,J2~J4 分别增加 56.3%,108.5%,67.9%,J1 下降 44.5%。

脲酶、磷酸酶、蔗糖酶和纤维素酶活性的时间变化动态符合三次多项式,其中蔗糖酶和纤维素酶各项符号相同,说明不同处理的变化规律相似。随着还田秸秆数量的增加,播种后 67 天的脲酶活性与纤维素酶相似($r=0.731^*$)、磷酸酶活性与蔗糖酶相似($r=0.843^{**}$);140 天的蔗糖酶活性与纤维素酶相似($r=0.831^*$),但脲酶活性与蔗糖酶、纤维素酶相反(r 分别为 -0.820^{**} , -0.770^*)。

3.3 不同秸秆还田量下土壤养分含量的动态变化

方差分析表明,相同时期处理间的土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量存在差异(表 3)。总体而言,秸秆还田增加土壤碱解氮含量,但降低速效磷和速效钾含量。与 J0 相比,J1~J4 处理的碱解氮含量分别增加 20.5%,50.3%,18.3%,24.6%,速效磷含量分别下降 2.7%,53.4%,20.1%,21.4%,速效钾含量分别下降 23.0%,38.9%,15.1%,9.6%。

40 天时所有处理的碱解氮含量超过 J0;67 天时 J2~J4 超过 J0;与 40 天相比,J3、J4 分别增加 10.3%,

9.6%,J1、J2 分别下降 8.1%,4.0%;112 天时 J1、J2 超过 16.8%;140 天时 J1、J2、J4 超过 J0;与 112 天相比,J1、J2、J0;与 67 天相比,J2~J4 分别下降 5.2%,22.8%,J4 分别增加 3.7%,3.3%,10.3%,J3 下降 4.2%。

表 2 不同秸秆还田量对土壤酶活性的影响

测定 指标	处理	测定时期				模拟方程	R ²
		40 d	67 d	112 d	140 d		
脲酶/ (NH ₃ -N mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	J0	0.03587b	0.03458c	0.03907c	0.04292a	y=-2E-08x ³ +5E-06x ² -0.0005x+0.0479	1.000
	J1	0.04149a	0.04669a	0.04655b	0.04420a	y=2E-08x ³ -6E-06x ² +0.0007x+0.0217	1.000
	J2	0.04360a	0.04795a	0.05171a	0.04084b	y=-5E-08x ³ +1E-05x ² -0.0005x+0.0505	1.000
	J3	0.04044ab	0.04128b	0.04565b	0.03880c	y=-6E-08x ³ +1E-05x ² -0.0009x+0.0585	1.000
	J4	0.04005ab	0.04445ab	0.03799c	0.03708c	y=6E-08x ³ -2E-05x ² +0.0015x+0.0048	1.000
	F	8.893**	9.515**	5.856*	13.865**		
磷酸酶/ (酚 mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	J0	0.8506c	0.6087d	0.6383d	0.7033b	y=-1E-06x ³ +0.0004x ² -0.0395x+1.8998	1.000
	J1	1.1535a	0.8547c	1.0333b	0.8103b	y=-4E-06x ³ +0.001x ² -0.088x+3.273	1.000
	J2	1.0226b	0.9156b	1.4102a	1.3115a	y=-4E-06x ³ +0.0011x ² -0.0858x+2.9581	1.000
	J3	0.8226c	0.9461b	0.8202c	0.8868b	y=2E-06x ³ -0.0004x ² +0.0344x+0.056	1.000
	J4	1.2456a	1.0597a	1.0876b	1.2227a	y=-5E-07x ³ +0.0002x ² -0.0249x+1.9411	1.000
	F	3.597*	19.901**	13.082**	23.173**		
蔗糖酶/ (Glu·mg ⁻¹ ·d ⁻¹)	J0	0.9896a	0.3633b	0.5421c	0.4426d	y=-9E-08x ³ +3E-05x ² -0.0028x+0.094	1.000
	J1	0.7539c	0.4096b	0.6668ab	0.5437c	y=-1E-07x ³ +3E-05x ² -0.0029x+0.0967	1.000
	J2	0.8317bc	0.4577b	0.6187bc	0.6139bc	y=-4E-08x ³ +1E-05x ² -0.0018x+0.0716	1.000
	J3	0.7248c	0.6264a	0.7238a	0.7143a	y=-5E-08x ³ +2E-05x ² -0.0024x+0.0933	1.000
	J4	0.8760b	0.6484a	0.6704ab	0.6751ab	y=-7E-08x ³ +3E-05x ² -0.0028x+0.1027	1.000
	F	4.005*	13.792**	6.733**	19.956**		
纤维素酶/ (Glu·mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	J0	0.02131c	0.00503c	0.00549b	0.00560c	y=-5E-06x ³ +0.0014x ² -0.134x+4.371	1.000
	J1	0.02190c	0.00673b	0.00781a	0.00433c	y=-4E-06x ³ +0.0011x ² -0.0981x+3.1369	1.000
	J2	0.02265bc	0.00875a	0.00603b	0.00942b	y=-3E-06x ³ +0.0009x ² -0.0828x+2.915	1.000
	J3	0.02651a	0.00794a	0.00577b	0.01204a	y=-1E-06x ³ +0.0003x ² -0.0291x+1.4319	1.000
	J4	0.02613ab	0.00665b	0.00508b	0.00853b	y=-1E-06x ³ +0.0004x ² -0.0405x+1.9298	1.000
	F	28.550**	104.887**	46.963**	13.695**		

40 天时 J2、J3 处理的速效磷含量低于 J0,其余处理与 J0 相近;67 天时 J2、J4 低于 J0;与 40 天相比,J3 增加 19.8%,J1、J2、J4 分别下降 11.8%,23.0%,10.5%;112 天时 J2~J4 低于 J0;与 67 天相比,J1 增加 17.5%,J2~J4 分别下降 2.3%,12.0%,11.6%;140 天所有处理均低于 J0;与 112 天相比,J2、J4 分别增加 8.6%,6.6%,J1、J3 分别下降 12.5%和 5.6%。

40 天时所有处理的速效钾含量均低于 J0;67 天时 J1~J3 低于 J0;与 40 天相比,J3、J4 分别增加 13.1%和 22.2%;112 天 J4 超过 J0,J1~J3 低于 J0;与 67 天相比,J1、J4 分别增加 8.0%和 5.1%,J2、J3 分别下降 11.9%,11.6%;140 天时所有处理均低于 J0;与 112 天相比,J3 增加 9.2%,J1、J2、J4 分别下降 4.5%,10.2%,14.1%。

碱解氮、速效磷和速效钾含量变化动态符合三次多项式。相关分析表明,随着还田秸秆数量的增加,播种后 40、67、112、140 天碱解氮含量的变化趋势与速效磷负相关(r 依次为 -0.771*, -0.743*, -0.775*, -0.805*);40、112、140 天的碱解氮含量与速效钾负相关(r 依次为 -0.866**, -0.818**, -0.916**)。

3.4 土壤微生物数量、酶活性、速效养分之间的关系

为揭示土壤微生物、酶活性、速效养分对还田秸秆数量的响应关系,进行各测定时期的相关分析。结果表明,播种后 40 天,纤维素酶活性与真菌、细菌和放线菌数量存在极显著的正相关(r 分别为 0.901**, 0.999**, 0.950**),磷酸酶活性与真菌数量显著负相关(0.780*),脲酶活性与碱解氮含量极显著正相关(0.955**),与速效钾极显著负相关(-0.974**),蔗糖酶活性与速效钾含量呈极显著正相关(0.830**);播种后 67 天,磷酸酶、蔗糖酶活性与放线菌数量呈显著或极显著正相关(r 分别为 0.797*, 0.903**),脲酶活性与速效钾含量呈极显著负相关(-0.869**),纤维素酶活性与碱解氮含量呈极显著正相关(0.923**);播种后 112 天,纤维素酶活性与放线菌数量呈显著正相关(0.734*),脲酶活性与碱解氮含量呈显著正相关(0.779*),与速效钾含量呈极显著负相关(-0.966**);磷酸酶活性与碱解氮含量呈极显著正相关(0.946**);播种后 140 天,纤维素酶、蔗糖酶的活性与放线菌数量呈极显著正相关(r 为 0.837**, 0.815**),磷酸酶活性与碱解氮含量呈极显著正相关(r 为 0.843**)。

表 3 不同秸秆还田量对土壤养分含量的动态影响

单位:mg/kg

测定 指标	处理	测定时期				模拟方程	R ²
		40 d	67 d	112 d	140 d		
碱解氮	J0	71.8c	73.2d	73.6c	70.7c	$y = -9E-06x^3 + 0.0012x^2 - 0.0018x + 70.395$	1.000
	J1	91.5b	84.1c	84.9b	88.1b	$y = -3E-05x^3 + 0.0101x^2 - 1.117x + 121.76$	1.000
	J2	114.1a	109.6a	103.8a	107.2a	$y = 3E-05x^3 - 0.0056x^2 + 0.1833x + 113.92$	1.000
	J3	90.8b	100.1b	77.3bc	74.0c	$y = 0.0002x^3 - 0.0496x^2 + 4.1409x - 6.5505$	1.000
	J4	89.8b	98.5b	81.9bc	90.3b	$y = 0.0002x^3 - 0.0505x^2 + 4.0852x - 4.7126$	1.000
	F	27.189**	41.163**	12.033**	92.675**		
速效磷	J0	27.3ab	27.1a	30.4a	31.4a	$y = -2E-05x^3 + 0.0047x^2 - 0.3662x + 35.522$	1.000
	J1	29.6a	26.1a	30.6a	26.8b	$y = -6E-05x^3 + 0.0174x^2 - 1.4211x + 62.749$	1.000
	J2	16.2d	12.5c	12.2c	13.2d	$y = -1E-05x^3 + 0.0045x^2 - 0.5121x + 30.264$	1.000
	J3	21.9c	26.2a	23.0b	21.7c	$y = 4E-05x^3 - 0.0109x^2 + 1.0178x - 3.6678$	1.000
	J4	25.9b	23.2b	20.5b	21.8c	$y = 9E-06x^3 - 0.0014x^2 - 0.0269x + 28.66$	1.000
	F	40.389**	60.823**	71.852**	39.831**		
速效钾	J0	176.3a	173.9a	151.6b	156.6a	$y = 0.0001x^3 - 0.0384x^2 + 2.713x + 119.63$	1.000
	J1	123.4bc	123.2c	133.1c	127.1c	$y = -9E-05x^3 + 0.0229x^2 - 1.667x + 159.17$	1.000
	J2	118.9c	106.1c	93.4d	83.9d	$y = -3E-05x^3 + 0.0103x^2 - 1.2742x + 155.58$	1.000
	J3	132.4b	149.8b	132.4c	144.6b	$y = 0.0003x^3 - 0.0701x^2 + 5.907x - 8.0032$	1.000
	J4	129.2bc	157.9ab	165.9a	142.5b	$y = -2E-05x^3 - 0.0088x^2 + 2.1446x + 58.552$	1.000
	F	22.084**	22.083**	88.752**	65.755**		

4 结论与讨论

4.1 旋耕秸秆还田增加土壤微生物的数量

秸秆还田改变了土壤微生物数量,但不同测定时期有所不同。玉米秸秆深翻还田 50 天时,土壤细菌、放线菌和真菌数量分别增加 53.7%,47.8%和 212.2%^[14]。玉米秸秆深翻还田后各生长时期的小麦根际 0—20 cm 的真菌、细菌、放线菌数量明显增加,小麦生长期土壤微生物数量先升后降^[23];灰色草甸土试验结果表明,玉米秸秆深翻和旋耕还田的 0—30 cm 土层细菌增加 36.46%和 9.80%,真菌增加 22.10%和 21.90%,放线菌增加 23.55%和 17.38%,深翻与旋耕还田对细菌和放线菌的影响不同,对真菌没有影响,旋耕还田主要影响 0—10 cm 土层的微生物^[24]。连续 4 年棉花秸秆旋耕还田的 0—20,20—40,40—60 cm 土层土壤微生物量碳含量分别提高 13.63%,14.32%,10.60%,活跃微生物量分别提高 11.57%,15.03%,20.30%^[25]。但也有不同结果,高大响等^[26]进行稻麦轮作的稻—麦秸秆旋耕还田结果表明,还田后 30 天真菌和放线菌数量下降,细菌数量增加,还田后 60 天细菌数量增加,还田后 90 天真菌和放线菌数量增加。在 3 000~12 000 kg/hm² 范围内添加玉米粉碎秸秆的小麦盆栽土壤中的微生物量均高于对照,且以 9 000 kg/hm² 处理最多^[27]。

本研究表明,播种后 40,67 天的真菌和细菌数量最多,之后快速下降,各测定时期的放线菌数量变化较小。秸秆还田促进真菌、细菌和放线菌的繁殖,其中 J2、J3 处理增加真菌数量,J1、J2、J3、J4 处理增加细菌和放线菌数

量,所有处理中 J3 增幅最大。播种后 40 天时,土壤真菌、细菌和放线菌间存在极显著的正相关性。

4.2 秸秆还田增加脲酶、磷酸酶、纤维素酶和蔗糖酶活性

纤维素酶、蔗糖酶、磷酸酶、脲酶是植物残体在土壤中腐解和转化的重要酶类。作为植物残体碳水化合物重要组分之一的纤维素在纤维素酶作用下形成纤维二糖,再经纤维二糖酶作用下分解为葡萄糖,因此纤维素酶是土壤碳循环过程中的重要酶类^[28];蔗糖酶将蔗糖分解为葡萄糖和果糖,在增加土壤易溶性营养物质过程中起重要作用;广泛存在于土壤中的脲酶专项转化尿素,与土壤碱解氮的供应紧密相关^[22];磷酸酶是土壤脱磷过程(即土壤有机磷转化为无机磷)的重要酶类,催化硝酸盐还原为亚硝酸盐,其活性与土壤的磷素状况及碳、氮含量相关^[29-31]。

许多试验表明,玉米、小麦、水稻秸秆还田后,土壤脲酶、磷酸酶活性均有不同程度提高^[32-34]。周礼恺等^[31]研究表明,棕壤磷酸酶活性与土壤有效磷量负相关,但黑土和草甸土则没有关系。添加 0~2.4% 秸秆的室内培养初期,土壤蔗糖酶、纤维素酶和脲酶活性增强,之后逐渐下降,酶活性与秸秆数量呈正相关^[35]。稻—麦秆旋耕还田 30 天脲酶活性增加,还田后 60 天纤维素酶及碱性磷酸酶活性增加^[26]。4 年不同数量小麦秸秆深层还田的 0—60 cm 土层脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性以 6 000 kg/hm² 处理最高,其次处理为 9 000,3 000 kg/hm²^[36]。

本研究表明,4 个测定时期的脲酶、磷酸酶活性

变化较小,40天的蔗糖酶和纤维素酶活性最高。秸秆还田的土壤酶活性均高于不还田处理,其中J2处理的脲酶和磷酸酶活性增幅最大,J3处理的蔗糖酶和纤维素酶活性最大。播种后67天的脲酶与纤维素酶活性、磷酸酶与蔗糖酶活性呈正相关;140天的蔗糖酶与纤维素酶活性呈正相关,脲酶与蔗糖酶、纤维素酶活性呈负相关。

4.3 秸秆还田增加碱解氮含量,降低速效磷和速效钾含量

灰色草甸土的试验表明,深翻配套秸秆还田0—30 cm土层的碱解氮、速效磷、速效钾含量分别增加26.60%,19.81%,23.95%,旋耕配套秸秆还田分别增加16.34%,0.92%,12.53%,深翻增幅大于深松,0—10 cm土层增幅最大^[24]。连续4年的棉花秸秆旋耕还田,3个土层(0—20,20—40,40—60 cm)的碱解氮含量依次增加13.23%,27.51%,12.87%,速效钾含量依次增加12.30%,11.47%,8.08%,碱解氮含量以中层土壤增幅最大,速效钾含量则为表层土壤增幅最大^[25]。4年小麦秸秆深层还田后,0—60 cm土层土壤速效磷、速效钾、碱解氮含量最多的处理为6 000 kg/hm²,其次9 000 kg/hm²,3 000 kg/hm²最低^[36]。王双磊等^[37]进行的3年还田秸秆量为5 000 kg/hm²试验表明,棉花秸秆还田增加0—20 cm土层的碱解氮和速效钾含量,但速效磷含量没有明显变化。综上所述,秸秆还田对土壤速效养分的影响:一是增加速效养分含量,但增幅与土壤类型有关;二是速效养分的增幅不与还田的秸秆数量呈正比,存在最适还田数量;三是碱解氮、速效钾、速效磷在各土层的增幅存在差异。

本研究表明,各处理4个测定时期的碱解氮、速效磷和速效钾含量变化较大。秸秆还田增加土壤碱解氮含量,但降低速效磷和速效钾含量,其中J2处理的碱解氮增幅最大,速效磷和速效钾降幅最大。40,67,112,140天的碱解氮与速效磷含量负相关,40,112,140天的碱解氮与速效钾含量负相关。

前述研究结果均显示秸秆还田并未降低土壤速效养分含量,与本研究结果存在较大差异,这可能是土壤微生物活动和新鲜秸秆加入有关。众所周知,还田后的秸秆需要通过土壤微生物繁殖才能进行腐解转化,该过程需要适宜的养分比例,其中C/N是主要影响因素之一。通常微生物自身C/N低于土壤C/N,特别是秸秆还田会增加土壤总C量,降低该比值。秸秆还田后因土壤类型、生态条件、秸秆来源、还田方式不同,秸秆释放养分的进程可能存在差异。本研究所采用的旋耕还田方式增加了秸秆在耕层土壤中的均匀性,土壤微生物特别是真菌和细菌数量呈现明显的阶段性快速增加,土壤有效氮(即碱解氮)的释放量

上升,从而促进土壤微生物对磷、钾的吸收,导致速效磷和速效钾含量下降。经过连续多年还田才有可能稳定提高土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量。因本研究为长期定位试验,其机制有待后续深入研究。

4.4 秸秆还田条件下土壤微生物数量、酶活性、速效养分含量之间的相关性

土壤养分状况影响土壤微生物的繁殖和作物的生长发育,微生物和植物根系分泌各种酶类,因此土壤酶活性与土壤养分有关;另一方面,土壤酶又促进了土壤中有机质的分解与转化,其活性的强弱与土壤养分特别是有效养分的含量密切联系。因此土壤养分与微生物密切相关,特别是微生物处于活跃时期尤为重要。

早期研究表明,蔗糖酶与土壤有机质、氮、磷含量以及微生物数量有关,通常土壤肥力越高蔗糖酶活性越强;脲酶活性与土壤中的有机质含量、微生物数量正相关;磷酸酶与土壤有机质含量、氮含量、微生物数量正相关^[22]。未施秸秆条件下,种植不同作物的粉质中壤0—20 cm土层的脲酶、磷酸酶与土壤有机质、碱解氮、速效磷相关,但纤维素酶没有相关性^[38]。稻—麦秆旋耕还田后,30天的脲酶活性与细菌数量正相关、与真菌和放线菌数量负相关,纤维素酶活性与真菌和放线菌数量正相关;60天的纤维素酶与细菌正相关,与放线菌负相关;90天,纤维素酶与细菌正相关^[26]。按照土壤重量10%添加秸秆的盆栽试验表明,秸秆增加脲酶活性,在玉米生长前期和中期的酶活性迅速上升并逐渐达到最大值^[39]。

本研究同样表明,土壤微生物种类对土壤酶活性的影响与测定时期有关。播种后40天,土壤真菌、细菌、放线菌数量与纤维素酶活性极显著正相关,其中真菌和细菌增加纤维素酶活性。对于磷酸酶活性,播种后40天与土壤真菌存在负相关关系,67天与放线菌有正相关关系。播种后67,140天的放线菌数量与蔗糖酶活性存在正相关关系,其中67天的放线菌数量的减少降低了蔗糖酶活性。

本研究表明,不同时期的土壤酶活性与速效养分含量间存在一定相关性。播种后40天和112天的脲酶活性、67天的纤维素酶活性、112天和140天的磷酸酶活性与碱解氮含量存在正相关关系。播种后40天蔗糖酶活性与速效钾含量存在正相关关系,40,67,112天脲酶活性与速效钾含量存在负相关关系。

参考文献:

- [1] 吕开宇. 中国玉米秸秆直接还田的现状与发展[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 22(3): 171-176.
- [2] 李万良, 刘武仁. 玉米秸秆还田技术研究现状及发展趋势[J]. 吉林农业科学, 2007, 32(3): 32-34.

- [3] 路明. 现代生态农业[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [4] 劳秀荣, 孙伟红, 王真, 等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 618-623.
- [5] 王志明, 朱培立, 黄东迈, 等. 秸秆碳的田间原位分解和微生物量碳的周转特征[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 446-453.
- [6] 王振忠, 吴敬民, 陈留根, 等. 稻麦两熟地区秸秆全量直接还田施肥技术的增产培肥效果[J]. 江苏农业学报, 2003, 19(3): 151-156.
- [7] 蔡晓布, 钱成, 张元, 等. 西藏中部地区退化土壤秸秆还田的微生物变化特征及其影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 463-468.
- [8] 刘世平, 陈后庆, 聂新涛, 等. 稻麦两熟制不同耕作方式与秸秆还田土壤肥力的综合评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 51-56.
- [9] 汤文光, 肖小平, 唐海明, 等. 长期不同耕作与秸秆还田对土壤养分库容及重金属 Cd 的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 168-176.
- [10] 李纯燕, 杨恒山, 刘晶, 等. 玉米秸秆还田技术与效应研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(33): 226-229.
- [11] 官秀杰, 钱春荣, 于洋, 等. 我国玉米秸秆还田现状及效应研究进展[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(9): 10-13.
- [12] Rogers B, Tate R. Temporal analysis of the soil microbial community along a toposequence in Pineland soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(10): 1389-1401.
- [13] 孙瑞莲, 赵秉强, 朱鲁生, 等. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(4): 406-410.
- [14] Castro H F, Classen A T, Austin E E, et al. Soil microbial community responses to multiple experimental climate change drivers[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2010, 76(4): 999-1007.
- [15] Ramakrishna A, Tam H M, Wani S P, et al. Effect of mulch on soil temperature, moisture, weed infestation and yield of groundnut in northern Vietnam [J]. Field Crops Research, 2006, 95(2/3): 115-125.
- [16] 慕平, 张恩和, 王汉宁, 等. 连续多年秸秆还田对玉米耕层土壤性状及微生物量的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 81-85.
- [17] 李秀英, 赵秉强, 李絮花, 等. 不同施肥制度对土壤微生物的影响及其土壤肥力关系[J]. 中国农业科学, 2005, 38(8): 1591-1599.
- [18] 萨如拉. 玉米秸秆低温降解复合菌系的筛选[J]. 中国农业科学, 2013, 46(19): 4082-4090.
- [19] Chaudhary A T, Kennedy I R. Nitrogen fertilizer losses from rice soils and control of environment pollution problems [J]. Communications on Soil Science and Plant Analysis, 2005, 36(11/12): 2531-2537.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] 姚占芳, 吴云汉. 微生物学实验技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005.
- [22] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [23] 杨文平, 单长卷, 王春虎. 秸秆还田量对冬小麦根际土壤微生物及产量的影响[J]. 广东农业科学, 2012(5): 59-61.
- [24] 李纯燕, 杨恒山, 萨如拉, 等. 不同耕作措施下秸秆还田对土壤速效养分和微生物量的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 197-201, 210.
- [25] 刘艳慧, 双磊, 李金埔, 等. 棉花秸秆还田对土壤速效养分及微生物特性的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(7): 1037-1046.
- [26] 高大响, 黄小忠, 王亚萍. 秸秆还田及腐熟剂对土壤微生物特性和酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 44(12): 468-471.
- [27] 车慧. 秸秆处理下冬小麦生长及土壤微型生物群落动态究[D]. 河南开封: 河南大学, 2011.
- [28] T. Ф. 哈兹耶夫. 土壤酶活性[M]//郑洪元译. 北京: 科学出版社, 1980.
- [29] Knowles R. Denitrification[J]. Microbiology. Revision, 1982, 46: 43-70.
- [30] 孟昭鹏, 关松荫, 沈桂琴, 等. 土壤磷酸酶活性与有机磷含量的关系[C]//辽宁科学技术出版社. 全国土壤酶学研究文集, 沈阳, 1988: 228-231.
- [31] 周礼杞, 张志明, 曹承绵, 等. 黑土和棕壤的酶活性[C]//辽宁科学技术出版社. 全国土壤酶学研究文集, 沈阳, 1988: 7-15.
- [32] 赵兰坡. 施用有机物料对土壤的培肥作用[J]. 土壤通报, 1996, 27(2): 76-78.
- [33] 关松荫. 土壤酶活性影响因子的研究 I. 有机肥料对土壤中酶活性及氮磷转化的影响[J]. 土壤学报, 1989, 26(1): 72-77.
- [34] 吴景贵, 王明辉, 任成礼, 等. 非腐解有机物培肥对水田土壤水解酶活性动态变化的影响[J]. 土壤通报, 1988, 29(6): 253-256.
- [35] 闫慧荣, 曹永昌, 谢伟, 等. 玉米秸秆还田对土壤酶活性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(7): 177-184.
- [36] 卫婷, 韩丽娜, 韩清芳, 等. 有机培肥对旱地土壤养分有效性及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 611-620.
- [37] 王双磊, 刘艳慧, 宋宪亮, 等. 棉花秸秆还田对土壤团聚体有机碳及氮磷钾含量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3944-3952.
- [38] 刘建新. 不同农田土壤酶活性与土壤养分相关关系研究[J]. 土壤通报, 2004, 35(4): 523-525.
- [39] 沈宏, 曹志洪. 玉米生长期间土壤微生物量与土壤酶变化及其相关性研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(4): 471-474.