

长期持续秸秆还田对土壤理化特性、酶活性和产量性状的影响

张 聪¹, 慕 平¹, 尚建明¹

(1. 甘肃农业大学 农学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 兰州 730070)

摘 要: 秸秆还田是改善土壤性质、提高土壤肥力和增加作物产量的一项有效措施。研究在玉米秸秆长期持续还田背景下, 探索延长还田年限时土壤理化性状、耕层土壤酶活性变化特点以及对玉米产量性状的影响。本试验利用甘肃省平凉试验站长期玉米秸秆还田定位试验田, 在前期研究基础上, 探究还田年限进一步延长累积达到还田 9 年(Y_9)、还田 12 年(Y_{12})和还田 15 年(Y_{15})时土壤理化特性、玉米生育期酶活性动态变化以及玉米产量性状的变化特征。结果表明: 秸秆还田随着年限的延长对土壤容重、土壤孔隙度、土壤 pH 有很好的改良效果; 秸秆还田年限的继续延长使 0—30 cm 土层有机碳、全氮、全磷、速效磷、碱解氮、速效钾含量增长幅度下降, 即当还田年限达到 10 年以上时土壤有机碳和土壤养分趋于一定的饱和状态; 玉米生育期 0—30 cm 土层中土壤过氧化氢酶、脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性表现出随着年限的延长而升高的趋势; 秸秆还田能有效提高玉米籽粒产量, 但并没有随着年限的延长而持续大幅度增加。因此, 实践中考虑在持续进行秸秆还田 10 年以上可适当减少该地秸秆还田量从而更高效地利用秸秆资源持续提高土壤性能。

关键词: 玉米; 秸秆还田; 土壤养分; 土壤酶活性

中图分类号: S157.2; S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)01-0092-07

Effects of Continuous Returning Corn Straw on Soil Chemical Properties, Enzyme Activities and Yield Trait

ZHANG Cong¹, MU Ping¹, SHANG Jianming¹

(1. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Sciences, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Returning straw into soil is the effective measure to improve the soil properties, improve soil fertility and increase crop yields. This research under the background of corn straw returned for a long time to explore the changes of soil physical and chemical properties, the surface soil enzyme activity change characteristics and the effect of maize yield with increasing years of straw returning. This experiment used corn straw returning field test in Experimental Station in Gansu Province to explore (Y_0 , Y_9 , Y_{12} , Y_{15}) soil physical and chemical properties and the growth period of maize enzyme activity dynamically and the change of maize yield traits with years of straw returned on the basis of previous research. The results show that straw returning has good modified effects on soil bulk density, soil porosity, soil pH with the extension of years of straw returning; extending the years of straw returning reduced the growth rate of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, available P, alkaline hydrolysis nitrogen, available K in the 0—30 cm soil layer, and the soil organic carbon and soil nutrient reached the balance when the straw returning lasted more than 10 years; soil catalase, urease, alkaline phosphatase and invertase activities showed the rising trend with the extension of the years in the 0—30 cm soil layer in the growth period of maize, and with maize growth period, soil enzyme activities showed dynamic changes. Straw returning can effectively improve the corn

收稿日期: 2016-12-19

修回日期: 2017-03-02

资助项目: 甘肃省科技厅支撑项目“陇东黄土高原长期全量秸秆玉米秸秆还田土壤碳增汇效应及调控机制研究”(1506RJZA012); 甘肃农业大学青年导师扶持基金“黄土高原长期秸秆还田土壤碳增汇效应及调控机制研究”(GAU-QNDS-201503)

第一作者: 张聪(1990—), 男, 甘肃甘谷人, 在读硕士研究生, 主要从事玉米栽培及生态生理科学研究。E-mail: 727402740@qq.com

通信作者: 慕平(1971—), 男, 甘肃兰州人, 副教授, 主要从事玉米育种及栽培生理科学研究。E-mail: mup@gsau.edu.cn

grain yield, but not dramatically increased with the extension of years. Therefore, we may be considered to reduce the amount of straw returning appropriately when practice of straw returning lasted more than 10 years so as to more efficiently use the corn straw to improve soil nutrients.

Keywords: corn; straw returned; soil nutrients; soil enzyme activity

我国是农业生产大国,近年来农业生产在持续稳定使各类农产品增产的同时作物秸秆作为其附属产物也日益增长。据统计,至2013年全国仅玉米秸秆总量达到2.48亿t,占全国秸秆总产量的24.17%^[1]。甘肃省是我国西部重要的农业省份,2016年全省粮食产量为1158.7万t,附带产出了2000多万t的秸秆,其中玉米秸秆1349万t^[2-3]。众所周知农作物秸秆中含有碳、氮、磷、钾等多种丰富的营养成分,在饲料、肥料、造纸、生物质能源、燃料、和发电等方面具有很高的利用价值^[4]。但是受制于资金、技术及农业生产特点等条件的困扰,我国很多地区长期以来对于大宗作物秸秆并没有形成专业化、产业化的处理模式而使其充分利用,大量作物秸秆被废弃堆置甚至直接焚烧,造成的环境污染和资源浪费的事件屡见报道,受到人们普遍关注^[5-6]。因此,近年来对于秸秆资源综合利用,特别是在农田系统循环利用成为了国内外的研究热点^[7-8]。其中武均等^[9]研究指出秸秆还田能显著改善土壤容重和孔隙度,优化土壤物理性状,进而提高土壤水、肥、气、热的供给能力,提高作物产量。黄金花等^[10]研究发现秸秆还田处理能显著提高耕层土壤有机碳含量。土壤养分是植株生长发育各阶段所必需的营养元素,是土壤肥力高低的决定性因素^[11],赵士诚等^[12]研究发现秸秆还田增加了土壤TN,TP含量,徐燕等^[13]研究证明连续秸秆还田能有效提高土壤AN,AP,AK含量,且连续还田效果好于隔年还田。但不同地区的研究由于气候、土壤以及还田作物的不同使其对土壤的改善效果出现差异^[14-15]。土壤酶参与了土壤中多种氧化还原反应以及土壤养分的固定与释放,是土壤肥力的直接影响因素^[16]。罗珠珠等^[17]研究发现,秸秆还田可以有效提高表层土壤蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶等土壤酶活性,对深层土壤的影响较小。但在实际生产中,由于还田技术不完善、秸秆根茬导致种子霉变和种子生长受阻等负效应^[18]。另外大多数研究只是探究了不同耕作措施和短期秸秆还田下土壤性质的变化,而长期秸秆还田下土壤理化性状及酶活性变化的研究较少。因此,本试验依托于甘肃农业大学平凉试验站自2002年设置的长期玉米秸秆还田定位试验,进一步探究秸秆还田年限继续延长后耕层土壤物理性状、土壤养分和酶活性的变化情况,为秸秆还田的推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验设在甘肃农业大学平凉试验站(106°25'E, 35°24'N)长期玉米秸秆全量还田定位试验田,海拔高度1170m,年平均日照达1981h,≥10℃年积温2862.8℃,无霜期163d,年均温9.4℃,年降水量600mm,属于季风型大陆性气候。试验区设有自2002年、2005年、2008年开始还田处理的试验田,以没有还田处理的地块作为对照,4种不同年限处理分别标记为Y₀(未还田)、Y₃(2008—2010)、Y₆(2005—2010)、Y₉(2002—2010),2010年测定不同还田年限0—20cm土层中土壤养分和有机质含量显示,Y₉、Y₆、Y₃和Y₀处理pH值分别为8.35、8.51、8.77、8.93,土壤有机碳SOC含量分别为18.12g/kg、15.42g/kg、12.25g/kg、7.07g/kg,土壤全氮TN含量分别为1.36g/kg、1.22g/kg、1.07g/kg、0.96g/kg,土壤全磷TP含量分别为1.93g/kg、1.86g/kg、1.81g/kg、1.79g/kg,土壤碱解氮AN含量分别为68.27mg/kg、63.86mg/kg、62.24mg/kg、56.89mg/kg,土壤速效磷AP含量分别为29.85mg/kg、28.27mg/kg、27.32mg/kg、26.98mg/kg,土壤速效钾AK含量分别为221.42mg/kg、218.08mg/kg、217.46mg/kg、212.39mg/kg。

1.2 田间试验设计

本试验在甘肃农业大学平凉试验站长期玉米全量秸秆还田定位试验田进行。依托于试验区自2002年、2005年和2008年以来进行连续全量玉米秸秆(9800kg/hm²)还田的试验田,设有无秸秆还田、连续全量秸秆还田9a、连续全量秸秆还田12a及连续全量秸秆还田15a共4种处理,4种不同年限处理分别标记为Y₀(没有进行秸秆还田)、Y₉(2008—2016年连续全量秸秆还田)、Y₁₂(2005—2016年连续全量秸秆还田)和Y₁₅(2002—2016年连续全量秸秆还田)。玉米品种为富农588,采用宽行距为0.6m,窄行距为0.4m的宽窄行种植方法,小区行长10m,面积50m²,三个重复,种植密度为5.25万株/hm²。每个重复处理小区均施氮肥150kg/hm²(尿素),磷肥150kg/hm²(过磷酸钙)各处理于入冬前,玉米果穗收获后(10月下旬),将玉米秸秆粉碎后全部还田覆盖地表,春季播种前(3月下旬)旋耕入土。2016年三月下旬,玉米播种前期于各处理田间S形采

样,先除去土样表面的枯叶和秸秆,再用内径为5 cm的土钻在各小区分层取0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm,30—50 cm的土样,每个样品均为多点采集混合而成,然后用四分法取出足够的样品,挑出石粒和根系后过2 mm筛用于土壤养分的测定,再于苗期、拔节期、散粉期、灌浆期和收获期取0—30 cm土样测定土壤酶活性。

1.3 土壤理化指标测定

土壤有机碳采用重铬酸钾—浓硫酸外加热法;全氮用凯氏定氮法;全磷用酸溶钼锑抗比色法;速效钾用醋酸铵提取—火焰光度法;碱解氮用扩散法;速效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定^[19]。

土壤过氧化氢酶用高锰酸钾滴定法;碱性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法;蔗糖酶用3,5-二硝基水杨酸比色法;脲酶用靛酚蓝比色法测定^[20]。

玉米成熟后,每小区收获中间两行玉米果穗,晒干后脱粒称质量,子粒产量以14%含水量为标准折算为小区产量。

1.4 数据分析

采用Microsoft Excel 软件对数据进行处理,并

用SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析,然后用邓肯法(Duncan)测验处理间差异显著性($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 持续还田不同年限处理对土壤容重和孔隙度的影响

土壤容重和孔隙度是土壤的重要物理性质,主要受当地气候、土壤动物、微生物及耕作措施的影响,对土壤透气性能、持水量、抗侵蚀能力和根系生长阻力有非常大的影响^[21]。本试验采用秸秆还田的耕作措施改良土壤,由图1可知,在0—50 cm土层中各处理土壤容重均表现为还田土壤低于未还田土壤,且随着土层深度的增加容重增加。 Y_{15} 土壤容重在 $1.24 \sim 1.43 \text{ g/cm}^3$ 范围内变化, Y_{15} 相较于 Y_{12} 下降0.17%,0.28%,0.13%,0.72%, Y_{12} 土壤容重在 $1.24 \sim 1.44 \text{ g/cm}^3$ 之间变化, Y_{12} 相较于 Y_9 下降1.15%,0.31%,1.56%,0.42%, Y_9 土壤容重在 $1.25 \sim 1.45 \text{ g/cm}^3$ 变化, Y_9 相较于 Y_0 下降1.10%,3.00%,10.67%,8.71%。可知0—20 cm土层中土壤容重变化不明显。

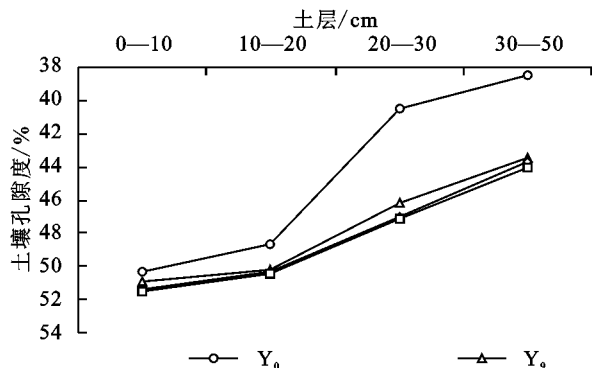
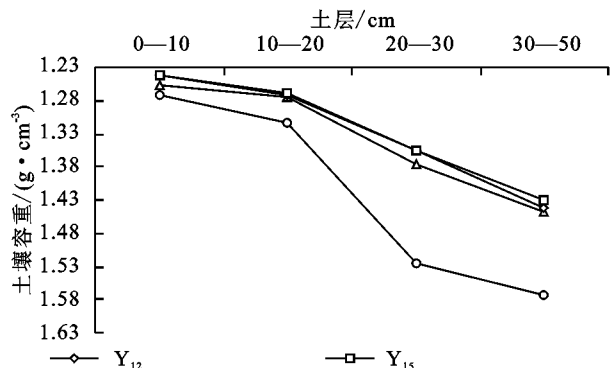


图1 不同还田年限0—50 cm土层土壤容重和孔隙度的变化

土壤孔隙度表现出随年限延长升高,随土层深度的加深减小的趋势。图1可看出0—20 cm表层土壤中各处理土壤孔隙度变化不明显,但随着土层的加深,20—50 cm土层中 Y_{15} 土壤孔隙度值在44.09%~47.10%之间变化, Y_{15} 较 Y_{12} 增加0.15%,0.92%, Y_{12} 土壤孔隙度值为43.69%~47.03%之间变化, Y_{12} 较 Y_9 增加1.80%,0.54%, Y_9 土壤孔隙度值为43.45%~46.20%之间变化, Y_9 较 Y_0 增加14.19%,12.79%。由此可知,秸秆还田措施能够有效提高20—50 cm土层土壤孔隙度,这与作物根系和耕作方式密切相关,且随着还田时间的延长改良效果越好。

2.2 持续还田不同年限处理对土壤pH的影响

土壤酸碱度是一个重要的土壤性质,影响土壤养分的有效性,并且间接影响了作物的生长发育。由表1可知,随着还田年限的延长土壤pH表现出一定的下降趋势, Y_{15} 的pH值变化范围在8.31~8.49,较



Y_{12} 下降0%,0.36%,0.24%; Y_{12} 的pH值变化范围在8.31~8.51,较 Y_9 下降0.48%,0.95%,0.47%; Y_9 的pH值变化范围在8.35~8.55,较 Y_0 下降6.70%,4.72%,3.63%。方差分析显示0—10 cm土层中 Y_{15} , Y_{12} 和 Y_9 之间未达到0.05显著水平,但相比于对照均有明显改善;10—20 cm土层中各处理达到0.05显著水平;20—30 cm土层中 Y_{15} 与 Y_{12} 间未达到0.05显著水平。对比试验区数据可知, Y_9 较 Y_6 , Y_3 和 Y_0 下降1.92%,5.03%,6.95%。由此可知,秸秆还田随着年限的延长对土壤pH的影响越大,且对表层土壤pH值的影响较大,随土层深度的下降影响力也随之减小,土壤pH值的增幅随着年限的延长而下降。

2.3 持续还田不同年限处理对土壤SOC,TN,TP的影响

土壤有机碳影响着土壤团粒结构的稳定性、土壤保肥性能和土壤微生物活性等一系列土壤物理化学

过程,是土壤肥力高低的重要指标。表 1 可知,0—10 cm 土层中各处理对 SOC 含量的影响差异显著($p<0.05$),且各处理的 SOC 含量均显著高于对照(Y_0)。其中 Y_{15} 分别高于 Y_{12} , Y_9 , Y_0 处理 1.10%, 4.02%, 160.50%, Y_{12} 分别高于 Y_9 , Y_0 处理 2.89%, 157.62%, Y_9 高于对照 150.40%,说明秸秆还田能有效增加土壤有机碳含量。土壤氮素主要在有机质中分解转化及保存,是植物体内氨基酸的组成部分、是构成蛋白质的成分,也是植物进行光合作用起决定作用的叶绿素的组成部分。表 1 中 TN 含量各处理达到 0.05 显著水平,

Y_{15} 相较于 Y_{12} , Y_9 , Y_0 增加了 0.74%, 3.24%, 44.07%, Y_{12} 相较于 Y_9 , Y_0 增加了 2.48%, 43.01%, Y_9 相较对照增加了 39.55%。土壤氮素含量过低时作物生长缓慢、矮小瘦弱、根系发育不良、成熟延迟,严重影响作物产量和品质。TP 含量各处理达到 0.05 显著水平, Y_{15} 相较于 Y_{12} , Y_9 , Y_0 增加了 0.76%, 2.73%, 11.94%, Y_{12} 相较于 Y_9 , Y_0 增加了 1.96%, 11.10%, Y_9 相较于对照增加了 8.97%。可见,长期秸秆还田能有效增加 0—10 cm 土壤 SOC, TN 和 TP 的含量,且随着年限的增加 SOC, TN 和 TP 含量的增加效果越好。

表 1 不同还田年限土壤 PH 及养分含量变化

土层/ cm	还田 年限	pH	有机碳/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)
0—10	Y_{15}	8.31a	18.85a	1.40a	1.98a	70.16a	32.36a	235.70a
	Y_{12}	8.31a	18.64b	1.39b	1.97b	70.11a	31.64b	234.46b
	Y_9	8.35a	18.12c	1.35c	1.93c	68.43b	28.82c	223.36c
	Y_0	8.91b	7.24d	0.97d	1.77d	56.06c	26.85d	198.36d
10—20	Y_{15}	8.36a	16.33a	1.22a	1.78a	60.47a	25.32a	207.36a
	Y_{12}	8.39b	15.53b	1.11b	1.77a	60.35a	24.68b	203.62b
	Y_9	8.47c	15.59b	1.12b	1.74b	56.70b	22.17c	195.12c
	Y_0	8.87d	7.03c	0.83c	1.55c	47.53c	19.64d	183.66d
20—30	Y_{15}	8.49a	11.56a	0.99a	1.59a	46.52a	16.44a	190.25a
	Y_{12}	8.51a	9.63b	0.98ab	1.55b	45.46a	14.39b	187.33b
	Y_9	8.55b	9.17c	0.98b	1.53c	46.47b	12.38c	170.36c
	Y_0	8.86c	6.01d	0.79c	1.50d	40.10c	11.33d	163.63d

注:同土层同列相同字母表示差异不显著($p<0.05$)。

10—20 cm 土层中 SOC 含量在 Y_{12} 和 Y_9 间未达到 0.05 显著水平, Y_{15} 较 Y_{12} , Y_9 , Y_0 增加了 5.16%, 4.78%, 132.50%。TN 含量在 Y_{12} 与 Y_9 间未达到 0.05 显著水平, Y_{15} 较 Y_{12} , Y_9 , Y_0 增加了 9.67%, 8.34%, 45.95%。TP 含量在 Y_{15} 和 Y_{12} 间未达到 0.05 显著水平, Y_{15} 较 Y_{12} , Y_9 , Y_0 增加了 0.40%, 2.15%, 15.13%。20—30 cm 土层中 SOC, TN, TP 含量变化中 Y_{15} 较 Y_{12} , Y_9 , Y_0 增加了 20.01%, 26.12%, 92.48%, 1.35%, 0.77%, 25.02%, 2.76%, 3.89%, 6.05%。且 TN 在 Y_{15} 和 Y_{12} 间差异不显著, Y_{12} 和 Y_9 间差异不显著。试验区数据 0—20 cm 土层中 SOC 含量 Y_9 较 Y_6 , Y_3 , Y_0 增加了 17.53%, 47.92%, 156.28%, TN 含量 Y_9 较 Y_6 , Y_3 , Y_0 增加了 11.48%, 27.10%, 41.67%, TP 含量 Y_9 较 Y_6 , Y_3 , Y_0 增加了 3.76%, 6.63%, 7.82%。

由此可见,秸秆还田能够有效提高土壤中 SOC, TN, TP 的含量,改善土壤的养分状况,特别是土壤中 SOC 和 TN 含量的增加效果好于 TP,说明秸秆还田对耕层土壤 SOC 和 TN 的补偿效果较好。对比试验区数据可知,随着秸秆还田年限的进一步延长且达到十年以上时土壤 SOC, TN, TP 含量增加幅度明显下降,由此可知,土壤中 SOC, TN, TP 含量在十几年长期秸秆投放下可能接近达到饱和状态。

2.4 持续还田不同年限处理对土壤 AN, AP, AK 的影响

土壤速效氮(AN)、速效磷(AP)、速效钾(AK)不仅是作物生长发育所必需的三大基本元素,也是影响土壤微生态环境系统平衡的重要因素。它受地形、气候、施肥、灌溉等众多因子的影响,是评价土壤质量与肥力的重要因素。由表 1 可见,0—10 cm 土层中 AN 含量在 Y_{15} 和 Y_{12} 间未达到 0.05 显著水平, Y_{15} 较 Y_{12} , Y_9 , Y_0 增加了 0.07%, 2.52%, 25.15%, Y_{12} 较 Y_9 , Y_0 增加了 2.45%, 25.07%, Y_9 较 Y_0 增加了 22.07%。AP 含量变化中处理间达到 0.05 显著水平, Y_{15} 较 Y_{12} , Y_9 , Y_0 增加了 2.30%, 12.30%, 20.55%, Y_{12} 较 Y_9 , Y_0 增加了 9.78%, 17.85%, Y_9 较 Y_0 增加了 7.35%。AK 含量变化中处理间达到 0.05 显著水平, Y_{15} 较 Y_{12} , Y_9 , Y_0 增加了 1.84%, 5.53%, 18.83%, Y_{12} 较 Y_9 , Y_0 增加了 3.63%, 16.69%, Y_9 较 Y_0 增加了 12.60%。

10—20 cm 土层中 AN 含量 Y_{15} 和 Y_{12} 间未达到 0.05 显著水平, Y_{15} 较 Y_{12} , Y_9 , Y_0 增加了 0.20%, 6.64%, 27.22%, Y_{12} 较 Y_9 , Y_0 增加了 6.43%, 26.97%, Y_9 较 Y_0 增加了 19.29%。AP 含量处理间达到 0.05 显著水平, Y_{15} 较 Y_{12} , Y_9 , Y_0 增加了 2.58%,

14.20%, 28.94%, Y_{12} 较 Y_9 , Y_0 增加了 11.33%, 25.70%, Y_9 较 Y_0 增加了 12.90%。AK 含量处理间达到 0.05 显著水平, Y_{15} 较 Y_{12} , Y_9 , Y_0 增加了 1.84%, 6.27%, 12.90%, Y_{12} 较 Y_9 , Y_0 增加了 4.36%, 10.87%, Y_9 较 Y_0 增加了 6.24%。

20—30 cm 土层中 AN, AP, AK 含量变化中 Y_{15} 较 Y_{12} , Y_9 , Y_0 增加了 2.33%, 0.10%, 16.00%, 14.23%, 32.77%, 45.13%, 1.56%, 11.68%, 16.27%, AN 含量在 Y_{15} 与 Y_{12} 间未达到 0.05 显著水平。试验区数据显示, 在 0—20 cm 土层中 AN, AP, AK 含量 Y_9 较 Y_6 , Y_3 , Y_0 增加了 6.91%, 9.69%, 20.00%, 5.59%, 9.26%, 10.64%, 1.53%, 1.82%, 4.25%, 由此可见, 秸秆还田对耕层土壤速效养分的补偿作用明显, 且随着年限的延长补偿效果越好, 随着深度的下降补偿效果降低。与试验区数据相比, 耕层土壤 AN, AP, AK 含量变化也表现出一定的饱和特性, 但没有 SOC, TN, TP 含量表现出的那么明显。

2.5 持续还田不同年限处理对玉米生育期土壤酶活性的影响

土壤酶是不同耕作措施下土壤肥力的敏感性指标, 其主要来自作物根系分泌物和土壤微生物增殖, 在有机质的分解和养分循环过程中起着重要作用, 其活性反映了土壤中各种生物化学反应的强度。由图 2 可知, 秸秆还田显著提高了玉米生育期 0—30 cm

土层中土壤中 4 种酶的酶活性强度, 并且土壤过氧化氢酶、脲酶和碱性磷酸酶在 4 种处理下酶活性变化趋势一致, 表现出从苗期到拔节期迅速升高, 且在拔节期达到最大值, 从拔节期到灌浆期缓慢下降, 在收获期出现略微回升。土壤蔗糖酶活性变化趋势不同于其他酶活性, 在 4 种处理下酶活性变化表现出从苗期到灌浆期一直升高, 在灌浆期达到最大值, 从灌浆期到收获期缓慢下降。其中土壤脲酶和碱性磷酸酶活性在灌浆后酶活性迅速减小, 主要是因为灌浆减少了土层中氧气含量, 进而阻碍了土层中化学反应的进行, 此外土壤过氧化氢酶在灌浆期下降不明显和土壤蔗糖酶活性在灌浆期达到最大值, 说明灌浆对土壤过氧化氢酶和蔗糖酶活性的影响较小。土壤过氧化氢酶、脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性变化中 Y_{15} , Y_{12} , Y_9 较 Y_0 平均增加了 18.09%, 11.80%, 9.56%, 28.62%, 26.11%, 22.76%, 36.01%, 31.40%, 20.47%, 34.30%, 23.79%, 15.19%。图中的显著性分析结果显示, 在玉米的各个生育时期中, 还田处理下的土壤酶活性均显著高于未还田处理下的土壤酶活性, 而土壤酶活性极易在外界环境的影响下发生变化, 所以在玉米有些生育期内并未表现出随着还田年限的延长而酶活性增加的趋势。由此可见, 秸秆还田能有效提高玉米生育期 0—30 cm 土层中 4 种酶活性, 且酶活性随着还田年限的升高表现出一定的上升趋势。

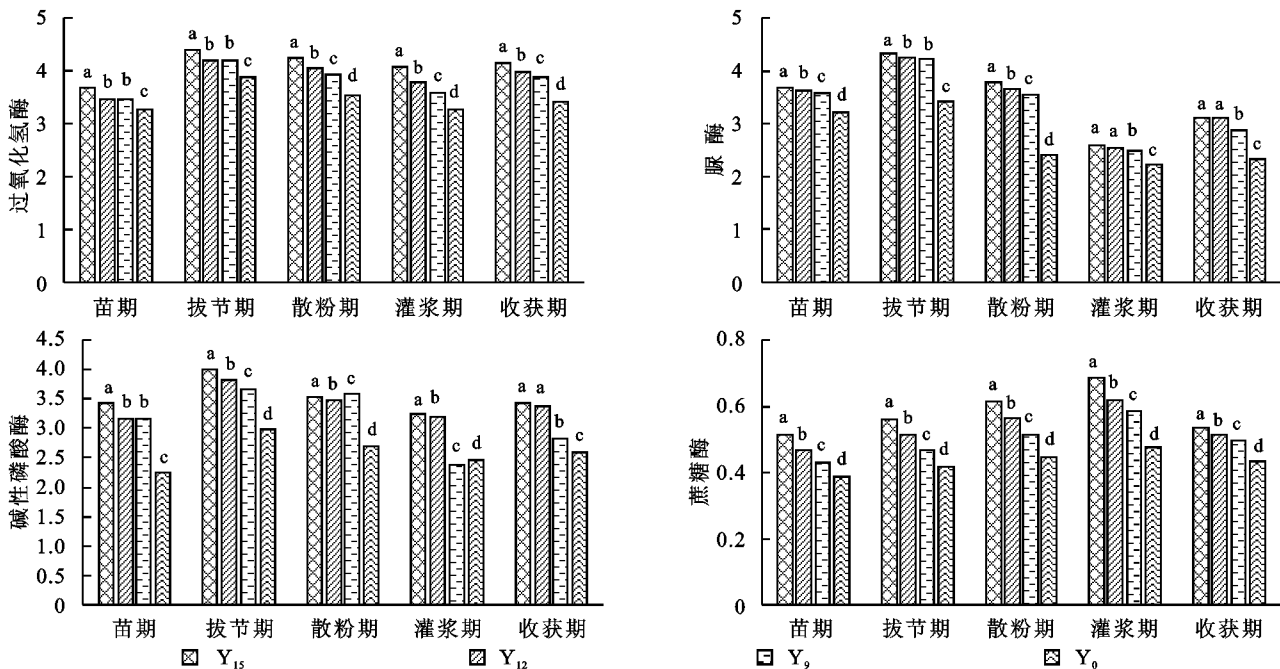


图 2 不同还田年限下 0—30 cm 土层土壤酶活性变化

2.6 玉米植株农艺性状和产量对长期秸秆还田的响应

土壤性质的优良决定了作物生长状况的好坏, 而耕作措施对土壤的改良最终反映在作物产量上, 长期秸秆还田对玉米农艺性状和产量也表现出强烈的影响。

由表 2 可知, 玉米株高表现出随着秸秆还田年限的延长而增高的趋势, Y_{15} 处理分别较 Y_{12} , Y_9 , Y_0 高出 0.1, 5.4, 15.4 cm, Y_{15} 与 Y_{12} 处理间未达到 0.05 显著水平; 棒三叶面积 Y_{15} 与 Y_{12} 处理间未达到 0.05 显著水平, Y_{15}

处理分别较 Y_{12} , Y_9 , Y_0 高出 0.01%, 0.77%, 1.37%; 穗位高 Y_{15} 处理分别较 Y_{12} , Y_9 , Y_0 上升 0.3, 2.1, 11.9 cm, Y_{15} 与 Y_{12} 处理间未达到了 0.05 显著水平; 穗长随着年限的延长变化不明显, 处理间未达到 0.05 显著水平, 这是因为穗长主要受遗传因素控制; 但是, 百粒重和亩产处理间未达到显著水平, 其中百粒重 Y_{15} 处理分别较 Y_{12} , Y_9 , Y_0 增加 0.78%, 4.03%, 16.22%, 籽粒产量 Y_{15} 处理分别较 Y_{12} , Y_9 , Y_0 提高 0%, 1.33%, 7.04%。由此可见, 秸秆还田能显著提高玉米籽粒的质量, 提高玉米产量。但随着还田年限的延长玉米籽粒产量和百粒重的增幅明显减小, 这与秸秆还田年限延长后土壤养分增幅减小和该品种的遗传因素有关。

表 2 长期不同秸秆还田对玉米产量性状的影响						
处理	株高/ cm	叶面积 (棒三叶)/cm ²	穗位高/ cm	穗长/ cm	百粒重/ g	产量/ (kg·hm ⁻²)
Y_{15}	226.5a	826.8a	96.7a	19.0a	38.7a	11457a
Y_{12}	226.4a	826.7a	96.4a	19.1a	38.4a	11457a
Y_9	221.1b	820.5b	94.6b	18.9a	37.2b	11307b
Y_0	210.9c	815.6c	84.8c	17.1b	33.3c	10703c

注: 同列相同字母表示差异不显著 ($P<0.05$)。

3 结论和讨论

土壤容重和孔隙度影响着土壤中水、肥、气和微生物等的迁移, 影响着植株根系的延展, 进而影响植株对土壤养分的吸收和根系的呼吸状态。相关研究表明^[22], 运用合理的保护性耕作措施能有效降低土壤容重, 增加土壤孔隙度, 且秸秆覆盖还田对土壤的改良效果随着深度的下降而减小。本研究显示, 0—50 cm 土层中土壤容重表现出随着还田年限的延长较对照缓慢降低的趋势, 土壤孔隙度显现出较对照逐渐增大的趋势, 这与李玮等^[23]的研究结果一致。这是因为秸秆在微生物和酶的共同作用下持续向土壤中提供大量有机物质, 且这种秸秆分解有机物的密度小于土壤密度, 因此分解物与土壤颗粒结合形成稳定疏松的团类结构, 从而改善了土壤紧实程度, 进而降低了土壤容重, 增大了土壤孔隙度。与此同时, 本研究发现土壤容重的降低和孔隙度的增大并不是随着秸秆还田年限延长呈现无限下降和增长的趋势, 而是表现出随着还田年限延长达到一定饱和性和平衡性的特点, 如本试验区还田 10 a 以上耕层土壤容重变化幅度显著降低。这可能是因为每年秸秆摄入量和土壤有机物质消耗量达到动态平衡。土壤酸碱度会导致土壤一系列化学反应发生变化, 如降低土壤养分的有效性或产生有害物质, 进而影响植物的生长。本研究中土壤 pH 值变化范围在 8.3~8.88, 且

随着年限增加呈缓慢下降趋势, 这与朱强根等^[24]试验趋势一致。与试验区数据对比可发现, 随着年限的持续延长, 土壤 pH 值并未继续大幅度下降, 而是表现出一定的平衡性。这可能是因为, 试验区在长期秸秆还田和外界环境的循环作用下使土壤 pH 值达到一定的平衡。

本研究显示, 随着还田年限持续延长土壤中有有机碳、全氮、全磷含量相比于对照显著增加, 且随着土层深入土壤有机碳、全氮、全磷含量逐渐下降; 土壤速效养分也表现出随着还田年限的延长速效养分含量相对于对照显著增加, 随着土层深度下降速效养分含量逐渐减小, 这与张婧等^[25]研究结果一致。这是因为传统耕作在每年作物生育期消耗了大量土壤养分, 土壤中微生物活动消耗了大量有机碳, 作物收获后没有弥补这种消耗, 而秸秆在土壤中分解后正好弥补了养分和有机碳的消耗。与试验区数据对比发现, 随着还田年限的持续延长土壤中有有机碳、全氮、全磷含量增加幅度下降, 但是土壤速效养分的增加幅度下降趋势不明显。这可能是因为, 首先由于植物较易吸收土壤中的速效养分, 导致土壤中不易吸收的养分被逐渐积累下来, 达到了该区土壤有机碳、全氮、全磷含量的库容; 其次土壤中速效养分处于作物吸收与秸秆分解释放的动态平衡中, 因此土壤速效养分的积累比较缓慢。

土壤过氧化氢酶、脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶随着玉米生育期的变化表现出一定的规律性, 四种还田年限下酶活性变化趋势基本一致, 且随着还田年限的延长酶活性逐渐升高, 这与杨招弟等^[26]研究结果一致。土壤酶活性在前期逐渐升高, 这是因为, 一方面春季地温随着气温的回升逐渐升高, 温度增加了土壤酶与底物的亲和力, 从而增加了酶的活性; 另一方面作物的快速生长使根系活力和分泌物增加, 进而刺激加强了微生物活力和酶活性强度。土壤脲酶和碱性磷酸酶在拔节期达到峰值后逐渐降低, 这可能是玉米快速生长时对氮和磷的需求量较大, 反馈调节使得脲酶和碱性磷酸酶活性升高, 之后需求量减小进而使酶活性下降。土壤过氧化氢酶是土壤微生物和作物根系分泌的保护作物免受氧化氢毒害的酶, 其酶活性随着作物生长和根系微生物的变化而变化, 所以过氧化氢酶活性在拔节期后缓慢下降。土壤蔗糖酶在灌浆期达到峰值后逐渐下降, 这可能是因为玉米籽粒缓慢成熟过程中根系和根系微生物需要更多的能量物质才能把营养物质运送到籽粒中, 所以蔗糖酶在灌浆期出现峰值。总体而言, 秸秆还田增加土壤酶的反应底物, 减少外力了对土壤的扰动, 随着还田年限的延长土壤中的秸秆残渣也越来越多, 因此在外界

温湿度一样的情况下使得土壤酶活性随着还田年限的延长而升高。

土壤中的酶、养分、微生物及其各种动物都是植物生长发育中不可或缺的因素,各个因素在玉米生长发育成熟阶段起到非常重要的作用,在其协同作用下玉米才会高产优质。本试验中,秸秆还田显著增加了玉米株高、穗位高、但棒三叶叶面积、穗长、百粒重和籽粒产量,这与袁玲等^[27]研究结果相似。但棒三叶叶面积和穗长随着还田年限的延长增加不明显,这可能是因为这两个性状受遗传因素的影响较大,受环境因素的影响较小。而百粒重和籽粒产量在还田年限 10 a 以上时其再增产效果不明显,这可能是因为,长期秸秆还田使土壤养分含量不再大幅度上升,从而导致籽粒产量在还田 6 a 和 9 a 基础上的再增产效果不明显。

综上所述,秸秆还田有效增加了土壤有机碳和养分含量,改善了土壤的物理性状,提高了耕层土壤的酶活性。但在还田年限的持续延长下,秸秆还田对土壤的改良效果不再继续上升,表现出有机碳、养分、籽粒产量等性质不再大幅度增加。因此,在秸秆还田达到十年或以上时可适当减少秸秆的还田量,从而更高效地利用玉米秸秆和持续提高改善土壤性能。

参考文献:

- [1] 左旭,王红彦,王亚静,等. 中国玉米秸秆资源量估算及其自然适宜性评价[J]. 中国农业资源与区划,2015,36(6):5-10.
- [2] 袁凤香. 甘肃农作物秸秆综合利用的现状分析与对策研究[J]. 农业工程学报(农产品加工业),2012(2):40-43,45.
- [3] 潘强,杨耀华,赵成龙,等. 甘肃省玉米秸秆饲料回收利用机械化现状及对策[J]. 饲料广角,2017(2):45-47.
- [4] 吴鸿欣,曹洪国,韩增德,等. 中国玉米秸秆综合利用技术介绍与探讨[J]. 农业工程,2011(3):9-12.
- [5] Wit C, Cassman K G, Olk D C. Crop rotation and residue management effects on carbon sequestration, nitrogen cycling and productivity of irrigated rice systems[J]. Plant Soil, 2000,225(1):263-278.
- [6] Blanco-Canqui H, Lal R. Soil structure and organic carbon relationships following 10 years of wheat straw management in no-till[J]. Soil and Tillage Research, 2007,95(1):240-254.
- [7] 徐泰平,朱波,汪涛,等. 秸秆还田对紫色土坡耕地养分流失的影响[J]. 水土保持学报,2006,2(1):30-32,36.
- [8] 蒋向,任洪志,贺德先. 玉米秸秆还田对土壤理化性状与小麦生长发育和产量的影响研究进展[J]. 麦类作物学报,2011,31(3):569-574.
- [9] 武均,蔡立群,罗珠珠,等. 保护性耕作对陇中黄土高原

雨养农田土壤物理性状的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(2):112-117.

- [10] 黄金花,刘军,杨志兰,等. 秸秆还田下长期连作棉田土壤有机碳活性组分的变化特征[J]. 生态环境学报,2015,24(3):387-395.
- [11] 郑立臣,宇万泰,马强,等. 农田土壤肥力综合评价研究进展[J]. 生态学杂志,2004,23(5):156-161.
- [12] 赵士诚,曹彩云,李科江,等. 长期秸秆还田对华北潮土肥力、氮库组分及作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(6):1441-1449.
- [13] 徐燕,霍仕平,邱诗春,等. 玉米秸秆还田对土壤理化特性影响的研究[J]. 中国农学通报,2016,32(23):87-92.
- [14] 王碧胜,蔡典雄,武雪萍,等. 长期保护性耕作对土壤有机碳和玉米产量及水分利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(6):1455-1464.
- [15] 闫超,刁晓琳,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.
- [16] 张星杰,刘景辉,李立军,等. 保护性耕作对玉米土壤微生物和酶活性的影响[J]. 玉米科学,2008,16(1):91-95,100.
- [17] 罗珠珠,黄高宝,张仁陟,等. 保护性耕作对旱作农田耕层土壤肥力及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(5):1085-1092.
- [18] 李少昆,王克如,冯聚凯,等. 玉米秸秆还田与不同耕作方式下影响小麦出苗的因素[J]. 作物学报,2006,32(3):463-465.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2010.
- [20] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京:农业出版社,1986.
- [21] 郑纪勇,邵明安,张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J]. 水土保持学报,2004,18(3):53-56.
- [22] 黄国勤,杨滨娟,王淑彬,等. 稻田实行保护性耕作对水稻产量、土壤理化及生物学性状的影响[J]. 生态学报,2015,35(4):1226-1234.
- [23] 李玮,乔玉强,陈欢,等. 秸秆还田和施肥对砂姜黑土理化性质及小麦—玉米产量的影响[J]. 生态学报,2014,34(17):5052-5061.
- [24] 朱强根,朱安宁,张佳宝,等. 保护性耕作下土壤动物群落及其与土壤肥力的关系[J]. 农业工程学报,2010,26(2):70-76.
- [25] 张婧,张仁陟,左小安. 保护性耕作对黄土高原农田土壤理化性质的影响[J]. 中国沙漠,2016,36(1):137-143.
- [26] 杨招弟,蔡立群,张仁陟,等. 不同耕作方式对旱地土壤酶活性的影响[J]. 土壤通报,2008,39(3):514-517.
- [27] 袁玲,张宣,杨静,等. 不同栽培方式和秸秆还田对水稻产量和营养品质的影响[J]. 作物学报,2013,39(2):350-359.