

紫色土区不同秸秆还田量对土壤酶活性的影响

刘东海¹, 乔 艳¹, 李 晓², 李双来¹, 张 智¹, 李 菲¹, 胡 诚^{1*}

(1. 湖北省农业科学院植保土肥研究所, 湖北 武汉 430064;

2. 广水市农业科学研究所, 湖北 广水 432700)

摘 要: 为了探明长期秸秆不同还田量下紫色土区土壤酶活性及其主要驱动因子, 以持续 12 年的四川紫色土长期定位试验为依托, 设置: 秸秆不还田 (CK)、30% 还田 (RMW30)、50% 还田 (RMW50) 和 100% 还田 (RMW100) 4 个处理, 测定了土壤各种酶活性以及土壤理化性质。结果显示, 与 CK 处理比较, RMW100 处理显著提高土壤有机质、碱解氮和速效钾含量以及 pH。秸秆不同还田量处理均降低了 β - 纤维二糖苷酶 (CBH)、纤维素酶 (CL)、酚氧化酶 (PhOx) 和过氧化物酶 (Perox) 活性, 提高了磷酸酶 (Phos)、硫酸酯酶 (Sul)、 β - 葡萄糖苷酶 (β G)、 α - 葡萄糖苷酶 (α G)、 β - 木糖苷酶 (β X)、乙酰氨基葡萄糖苷酶 (NAG) 和亮氨酸氨基肽酶 (LAP) 活性。随着秸秆还田量的增加, β - 纤维二糖苷酶 (CBH) 活性呈现降低趋势。冗余分析 (RDA) 显示土壤 pH 是土壤酶活性变化的主控因子, 解释了方差变异的 60.20%, 达到显著水平。因此, 紫色土区秸秆还田主要是通过土壤 pH 对土壤酶活性产生影响。秸秆 100% 还田增加了土壤肥力, 提高了土壤 pH, 是提升紫色土区土壤质量最优的管理措施。

关键词: 紫色土; 秸秆还田量; 土壤酶; 速效养分

作物秸秆富含有机质及各种营养元素, 是重要的有机资源之一^[1-2], 长期作物秸秆还田影响土壤有机碳^[3-4]、有机氮^[5]、pH^[6] 和有效磷^[7] 等理化性质以及土壤酶活性^[8]。土壤酶是由土壤微生物合成和分泌的, 是有机质形成和分解的催化剂^[9], 在秸秆分解过程中发挥着不可替代的作用^[10]。土壤酶活性是评价土壤质量和养分转化能力的重要指标^[11], 可分为水解酶和氧化酶, 前者负责获取 C、N 和 P 以支持初级新陈代谢, 后者可降解木质素等顽固化合物^[12-13]。Wei 等^[14] 施用农作物秸秆提高了磷酸酶、脲酶和转化酶活性水平, 发现酶活性水平与土壤有机质含量有关。Zhao 等^[15] 通过两年秸秆还田田间试验表明, 0 ~ 15 cm 土层土壤脲酶、转化酶和过氧化氢酶活性分别提高 11.4%、41.0% 和 12.9%。张鑫等^[16] 发现相比于单施化肥处理, 秸秆还田配合施用化肥处理显著提高了土壤 β - 葡萄糖苷酶、纤维二糖苷酶、 β - 木糖苷酶、 α - 葡萄糖苷酶的活性。Zhang

等^[8] 发现随着秸秆还田量的增加, 土壤酶活性呈现增加的趋势。Zhao 等^[17] 发现高秸秆还田量改变了微生物群落结构, 提高了大多数水解酶活性和轻组分有机碳和重组分有机碳。李倩等^[18] 在玉米旱作栽培条件下秸秆覆盖量为 9000 kg/hm² 时, 碱性磷酸酶活性最高。Wang 等^[19] 在玉米秸秆还田量为 9000 kg/hm² 时提高了旱地土壤肥力、作物产量和水分利用效率。

紫色土区耕地面临土层浅薄化、养分贫瘠化等土壤肥力退化问题, 秸秆还田有助于紫色土区退化旱地肥力恢复与重建^[20]。为了探明长期秸秆不同还田量下该区土壤中与 C、N 和 P 转化相关的酶活性及其驱动因子, 本研究依托中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站 12 年的长期定位试验, 采用微孔板荧光法测定了与土壤 C、N 和 P 转化相关的 11 种酶活性和土壤理化性质, 利用相关性分析和冗余分析 (RDA) 探索土壤酶活性和土壤理化性质的内在关系, 以期解析长期不同秸秆还田量下影响土壤酶特征的关键理化因子, 为科学合理利用秸秆、培肥土壤、提高土壤质量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究依托四川盆地中北部盐亭县林山乡的中

收稿日期: 2021-04-22; 录用日期: 2021-05-24

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0200500 和 2017YFD0200608)。

作者简介: 刘东海 (1984-), 助理研究员, 硕士, 主要研究土壤肥力。E-mail: liudonghai111@126.com。

通讯作者: 胡诚, E-mail: huchenghcx@163.com。

国科学院盐亭紫色土农业生态试验站 (105° 27' E, 31° 16' N), 至今已经持续 12 年。该区地处涪江支流弥江、湍江的分水岭上, 海拔 400 ~ 600 m。属中亚热带湿润季风气候, 气候温和、四季分明, 年均气温 17.3 °C, 极端最高气温 40 °C, 极端最低气温 -5.1 °C, ≥ 10 °C 年积温 5000 ~ 6000 °C, 无霜期 297 d, 年平均降水量 826 mm, 降雨主要集中于夏季。田间持水量 28.1% ~ 38.3%, 凋萎湿度 5.4% ~ 7.7%, 为典型旱作土壤, 厚度为 20 ~ 60 cm。2011 年 CK 处理有机质 12.10 g/kg, 全氮 0.87 g/kg, 有效磷 11.00 mg/kg, 速效钾 106.50 mg/kg, pH 8.34。

1.2 试验设计

玉米小麦轮作, 试验采用完全随机区组设计, 4 个处理: (1) 秸秆不还田 (CK); (2) 秸秆 30% 还田 (RMW30); (3) 秸秆 50% 还田 (RMW50); (4) 秸秆 100% 还田 (RMW100)。每个处理 3 个重复, 共 12 个小区, 小麦或玉米秸秆粉碎 <10 cm, 均匀覆盖后, 翻耕还田, 小区面积均为 10 m × 6 m, 各处理的施肥管理均一致。化肥施用量: 氮肥为碳铵 (N 17%) 和尿素 (N 46%)、磷肥为过磷酸钙 (P₂O₅ 12%)、钾肥为氯化钾 (K₂O 60%)。玉米小麦轮作下施肥情况, 玉米季每公顷纯养分 N:P:K=150:90:36, 小麦季每公顷纯养分 N:P:K=130.5:72:45。玉米施肥分为两次, 底肥和追肥比例为 3:2, 底肥施碳铵, 追肥施尿素。小麦季节, 施肥 1 次, 碳铵、过磷酸钙和氯化钾一次性基施。

1.3 样品采集和测试方法

2019 年小麦收获后, 每个小区按 “S” 形取样法取 6 个点混合为 1 个土样, 深度 0 ~ 20 cm。土样装入无菌密封袋, 后置于保温箱带回实验室, 一部分立即测定土壤酶活性, 另一部分风干测定理化性质。

采用 96 微孔酶标板荧光分析法^[21] 测定土壤磷酸酶 (Phos)、硫酸酯酶 (Sul)、 β - 葡萄糖苷酶 (β G)、 β - 纤维二糖苷酶 (CBH)、纤维素酶 (CL)、表示 β - 木糖苷酶 (β X)、 α - 葡萄糖苷酶 (α G)、乙酰氨基葡萄糖苷酶 (NAG)、亮氨酸氨基肽酶 (LAP)、酚氧化酶 (PhOx) 和过氧化物酶 (Perox) 活性。取 1.00 g 新鲜土壤样品, 加入 100 mL 50 mmol/L 的醋酸钠缓冲溶液 (pH 为土壤样品 pH 的平均值, 如样品之间 pH 相差较大, 需配置不同缓冲溶液), 用磁力搅拌器使其均质化

后移取 200 μ L 悬浮液于酶标板中, 以缓冲液为空白, 4- 甲基羟基香豆素 (MUB) 为标准物, LAP 采用 7- 氨基 -4- 甲基香豆素 (AMC) 为标准物, 不同酶加入对应的底物, 25 °C 黑暗培养 4 h 后 (酸性土壤需加入 50 μ L 1 mol/L 的 NaOH 溶液终止反应), 在激发光 365 nm、发射光 450 nm 的条件下, 用 Synergy H/M 酶标仪测定其荧光度, 酶活性以每克每小时干物质产生底物的纳摩尔数 [nmol/(g · h)] 计算。试剂购于 Sig-ma-Aldrich Co. Ltd. 公司。

土壤理化性质采用常规方法测定^[22], 土壤 pH 采用复合电极测定, 水土比为 2.5:1; 土壤有效磷采用碳酸氢钠溶液浸提 - 钼锑抗比色法测定; 土壤速效钾采用醋酸铵溶液浸提 - 原子吸收分光光度计测定。有机质采用重铬酸钾容量法测定, 碱解氮采用碱解扩散法测定。

1.4 数据处理分析

试验数据采用 Excel 2019 处理数据, 利用 SPSS 20.0 进行单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和最小显著性差 (LSD) 进行多重比较 ($\alpha=0.05$)。采用 Pearson 法对土壤理化指标与酶活性进行相关分析。采用 Canoco 5.0 进行冗余分析 (RDA)。图表数据均是平均值 $\pm$ 标准偏差。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田对土壤理化性质的影响

与 CK 相比, RMW30、RMW50 和 RMW100 处理中土壤 pH 分别显著提高了 0.60、0.56 和 0.53 个单位, 碱解氮含量分别增加了 9.24%、11.19% 和 18.14%, 速效钾含量分别增加了 1.28%、41.78% 和 63.32%。仅 RMW100 显著增加了土壤碱解氮、速效钾和有机质含量, 其中有机质含量显著增加了 15.70% (表 1), 说明秸秆全量还田有助于提升土壤养分含量。

2.2 秸秆还田对土壤酶活性的影响

与 CK 比较, 秸秆还田均降低了 β - 纤维二糖苷酶、纤维素酶、酚氧化酶和过氧化物酶活性, 其中 β - 纤维二糖苷酶活性显著降低 (表 2); 随着秸秆还田量的增加, β - 纤维二糖苷酶活性呈现降低趋势, MW100 处理中 β - 纤维二糖苷酶活性显著降低了 45.00%。秸秆还田均提高了磷酸酶、硫酸酯酶、 β - 葡萄糖苷酶、 α - 葡萄糖苷酶、 β - 木糖苷酶、乙酰氨基葡萄糖苷酶和亮氨酸氨基肽酶活性; RMW30、

表 1 长期秸秆还田对土壤理化性质的影响

处理	有机质 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	pH
CK	17.83 ± 1.36b	73.30 ± 10.83b	16.97 ± 2.71a	202.90 ± 55.18b	7.37 ± 0.12b
RMW30	16.37 ± 0.31b	80.07 ± 7.04ab	16.83 ± 2.37a	205.50 ± 31.62b	7.97 ± 0.15a
RMW50	17.20 ± 1.06b	81.50 ± 4.53ab	16.80 ± 2.29a	287.67 ± 30.85ab	7.93 ± 0.06a
RMW100	20.63 ± 1.59a	86.60 ± 2.43a	19.27 ± 4.95a	331.37 ± 83.59a	7.90 ± 0.10a

注：同一列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

表 2 长期秸秆还田对土壤酶活性的影响

[nmol/(g·h)]

处理	Phos	Sul	β G	CBH	CL	β X
CK	348.40 ± 26.51b	2.97 ± 1.85a	306.90 ± 65.15b	193.97 ± 20.83a	0.83 ± 0.15a	128.67 ± 42.92a
RMW30	739.93 ± 205.83a	8.50 ± 4.78a	637.97 ± 174.78a	144.93 ± 19.91b	0.43 ± 0.21a	214.10 ± 105.38a
RMW50	524.13 ± 96.77ab	8.07 ± 2.91a	599.70 ± 122.92a	112.53 ± 29.84b	0.67 ± 0.29a	211.33 ± 37.88a
RMW100	584.03 ± 96.46a	8.33 ± 3.91a	505.50 ± 123.75ab	106.77 ± 27.82b	0.47 ± 0.29a	222.40 ± 96.82a

处理	α G	NAG	LAP	PhOx	Perox
CK	143.00 ± 47.69a	39.97 ± 12.31a	649.70 ± 215.49b	0.90 ± 0.10a	0.70 ± 0.26a
RMW30	237.90 ± 117.05a	60.47 ± 11.43a	1744.17 ± 689.50a	0.50 ± 0.26a	0.30 ± 0.20a
RMW50	234.83 ± 42.08a	51.27 ± 16.27a	378.17 ± 360.23ab	0.70 ± 0.26a	0.63 ± 0.40a
RMW100	247.07 ± 107.60a	51.23 ± 19.15a	1393.37 ± 355.70ab	0.53 ± 0.23a	0.43 ± 0.32a

RMW50 和 MW100 处理中磷酸酶活性分别显著提高了 112.4%、50.40% 和 67.63%， β - 葡萄糖苷酶活性分别显著提高了 107.90%、95.41% 和 64.70%，乙酰氨基葡萄糖苷酶活性显著提高了 51.3%、28.21% 和 28.20%。

2.3 秸秆还田下土壤酶活性与理化性质的相关性

速效钾与碱解氮呈显著正相关，与有机质和有效磷呈极显著正相关。pH 与磷酸酶、硫酸酯酶、 β - 葡萄糖苷酶、亮氨酸氨基肽酶极显著正相关，与 β - 木糖苷酶和 α - 葡萄糖苷酶显著正相关，与 β - 纤维二糖苷酶显著负相关；碱解氮与亮氨酸氨基肽酶显著正相关（表 3）。

纤维素酶、酚氧化酶与过氧化物酶三者间两两极显著正相关。亮氨酸酶与乙酰氨基葡萄糖苷酶、 β - 木糖苷酶和 α - 葡萄糖苷酶四者间两两极显著正相关。磷酸酶与硫酸酯酶、 β - 葡萄糖苷酶三者间两两极显著正相关，三者均与亮氨酸酶、乙酰氨基葡萄糖苷酶、 β - 木糖苷酶和 α - 葡萄糖苷酶分别显著正

相关。

RDA 分析可以看出，长期不同秸秆还田量对土壤酶分布产生差异，CK 处理分布于第四象限；RMW30 处理分布比较分散，在第一、三象限；RMW50 处理主要分布在 Y 轴上半轴，而 RMW100 处理主要分布在第三象限（图 1）。RDA 前 2 个排序轴保留了土壤酶活性数据总方差的 78.10%，即 5 个环境因子在前 2 个轴中累计解释了土壤酶活性特征的 78.10%。pH 与 Phos、Sul、 β G、LAP、NAG、 β X 和 α G 正相关，pH 与 CL、PhOx、Perox、CBH 负相关，OM 与各个水解酶近似垂直，相关性小，该结果与相关分析（表 3）的结果一致。各试验处理点在 RDA 图上的分布及与土壤酶的位置关系可以看出，秸秆不还田（CK）处理 CBH 活性较高，RMW30 处理主要提高了 Phos、Sul、 β G 和 NAG 活性，RMW100 处理主要提高了 β X 和 α G 活性。土壤酶变化主要由土壤 pH 驱动，解释了方差变异的 60.20%，达到显著水平。

表 3 土壤酶和理化性质的相关性

项目	Phos	Sul	βG	CBH	NAG	βX	αG	LAP	PhOx	Perox	CL	OM	AN	AP	AK	pH
Phos	1.00	0.84**	0.88**	-0.20	0.70*	0.77**	0.77**	0.95**	-0.32	-0.39	-0.39	-0.05	0.50	0.19	0.16	0.76**
Sul		1.00	0.90**	-0.23	0.86**	0.97**	0.97**	0.94**	-0.07	-0.10	-0.12	0.07	0.56	0.32	0.36	0.72**
βG			1.00	-0.25	0.80**	0.83**	0.83**	0.94**	-0.20	-0.24	-0.26	-0.16	0.45	0.12	0.25	0.80**
CBH				1.00	-0.01	-0.16	-0.16	-0.24	0.59*	0.32	0.51	-0.18	-0.55	-0.04	-0.47	-0.71*
NAG					1.00	0.85**	0.85**	0.83**	-0.03	-0.11	-0.06	-0.07	0.38	0.33	0.19	0.51
βX						1.00	1.00**	0.88**	0.12	0.08	0.07	0.10	0.49	0.44	0.41	0.60*
αG							1.00	0.88**	0.12	0.08	0.07	0.10	0.49	0.44	0.41	0.60*
LAP								1.00	-0.21	-0.29	-0.28	-0.04	0.61*	0.26	0.27	0.80**
PhOx									1.00	0.89**	0.97**	-0.09	-0.36	0.36	0.07	-0.53
Perox										1.00	0.96**	-0.05	-0.45	0.37	0.17	-0.43
CL											1.00	-0.10	-0.44	0.39	0.08	-0.55
OM												1.00	0.45	0.54	0.72**	-0.10
AN													1.00	0.44	0.61*	0.60*
AP														1.00	0.75**	-0.04
AK															1.00	0.28
pH																1.00

注: * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平相关性显著。

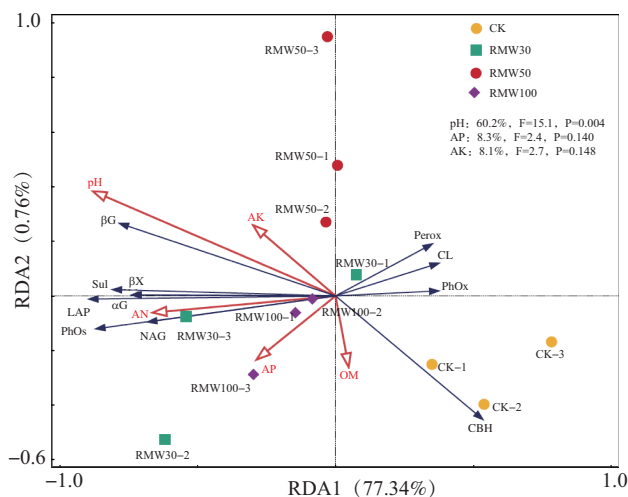


图 1 土壤酶活性与土壤指标的冗余分析 (RDA)

注:红色空心箭头表示土壤指标,蓝色箭头表示土壤酶活性,红色实线长短表示该土壤指标与土壤酶活性显著相关程度的大小。

3 讨论

3.1 不同秸秆还田量对紫色土土壤速效养分的影响

农作物秸秆是作物生长所需的 C、K 和微量元素的重要来源,在还田后有助于维持土壤养分平衡^[23]。本研究显示,与 CK 处理比较,仅 RMW100 处理显著提高了土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量,这与张志毅等^[24] 全量还田提高土壤养分含量的结论一致。随着秸秆还田量的增加,有机质含量呈现增加的趋势,与已有研究^[25-26] 的结论一致。秸秆还田导致土壤有机碳的净累积,从而提高土壤有机质含量^[27-29]。土壤碱解氮的提高,可能是因为施用秸秆可以促进土壤 N 以适合作物需要的速度转化为缓效性 N 源,从而提高 N 效率^[30]。华萃等^[31] 研究指出,2011 年不同秸秆还田量对紫色土土壤有机质、有效磷、pH 的影响不显著,唯有速效钾含量随秸秆还田量的增加显著提高,pH 值范围在 8.30 左右。同一试验点,本研究中不同秸秆还田量处理土壤 pH 7.93 平均降低了 0.37,与张聪等^[6] 秸秆还田随着年限的延长土壤 pH 出现下降趋势的结论一致。不同秸秆还田量处理平均 pH 高于 CK 处理,可能是由于秸秆还田有助于在适当范围内有效调节土壤 pH,以平衡土壤养分的固定和补给^[32]。同时 RMW100 处理显著提高了土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量,与 Akhtar 等^[7] 结论一致,他们指出与秸秆不还田相比,全

秸秆还田 0 ~ 40 cm 土层土壤速效氮、有效磷和速效有机碳平均水平分别提高了 31.9%、32.0% 和 32.4%，说明秸秆全量还田有利于提高土壤肥力。

3.2 不同秸秆还田量对紫色土土壤酶活性的影响

本研究中纤维素酶与酚氧化酶、过氧化物酶两两极显著正相关, 秸秆不同还田量处理均降低了 β -纤维二糖苷酶、纤维素酶、酚氧化酶和过氧化物酶活性, 与李森^[33]在稻麦轮作下秸秆还田处理均能不同程度提高纤维素酶、 β -葡萄糖苷酶、酚氧化酶和过氧化物酶活性的结论不一致, 可能是不同的耕作方式、土壤类型和秸秆种类等因素导致的差异。关于酚氧化酶和过氧化氢酶活性的下降, 可能与土壤 pH 下降有关^[34], 亦或者是与土壤氮素的富集有关^[35]。

张鑫等^[16]指出, 秸秆还田配施化肥处理显著提高了土壤 β -葡萄糖苷酶、纤维二糖苷酶、 β -木糖苷酶、 α -葡萄糖苷酶的活性。本研究与其不同之处是秸秆还田降低了纤维二糖苷酶, 随着秸秆还田量的增加, β -纤维二糖苷酶活性还呈现降低的趋势。本研究秸秆还田提高了磷酸酶和硫酸酯酶活性, 磷酸酶可以加强酯和磷酸酐的水解, 释放出植物可直接使用的磷酸盐^[36-38], 提高土壤有效磷含量。秸秆还田还提高了乙酰氨基葡萄糖苷酶和亮氨酸氨基肽酶活性, 可能是因为秸秆还田导致有机碳的积累^[6], 间接造成土壤 N 元素的相对亏缺, 当矿质氮浓度较低的情况下, 参与 N 循环的 LAP 和 NAG 的活性被激发, 从而获取更多有机氮^[39-41]。

3.3 紫色土土壤酶活性分布特征及其驱动因子

本研究通过对与 C、N、P 和 S 循环相关的酶进行冗余分析看出, 长期不同秸秆还田量导致土壤酶分布出现差异。土壤 pH 是紫色土土壤酶变化的主要影响因子, 而夏文建等^[42]认为土壤全氮和微生物生物量碳是红壤稻田酶活性关键决定因子, 说明不同土壤类型对酶活性存在不同影响。

4 结论

紫色土区长期秸秆还田提高了土壤养分含量和土壤 pH。与秸秆不还田 (CK) 比较, RMW100 处理土壤 pH、有机质、碱解氮和速效钾分别显著提高了 7.19%、15.70%、18.14% 和 63.32%。pH 与大部分土壤酶存在显著相关性, 冗余分析显示, 秸

秆还田条件下, 土壤 pH 是土壤酶变化的主要影响因素, 解释了方差变异的 60.20%, 达到显著水平。因此, 秸秆全部还田是紫色土区提升土壤质量较适宜的管理措施。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Zhang P, Wei T, Jia Z, et al. Soil aggregate and crop yield changes with different rates of straw incorporation in semiarid areas of northwest China [J]. Geoderma, 2014, 230: 41-49.
- [3] Merante P, Dibari C, Ferrise R, et al. Adopting soil organic carbon management practices in soils of varying quality: implications and perspectives in Europe [J]. Soil and Tillage Research, 2017, 165: 95-106.
- [4] 石含之, 赵沛华, 黄永东, 等. 秸秆还田对土壤有机碳结构的影响 [J]. 生态环境学报, 2020, 29(3): 536-542.
- [5] 叶超, 张昀, 燕香梅, 等. 秸秆还田方式和数量对棕壤有机氮活性的影响 [J]. 土壤通报, 2018, 49(6): 1383-1389.
- [6] 张聪, 慕平, 尚建明. 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 [J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 92-98.
- [7] Akhtar K, Wang W, Ren G, et al. Changes in soil enzymes, soil properties, and maize crop productivity under wheat straw mulching in Guanzhong, China [J]. Soil and Tillage Research, 2018, 182: 94-102.
- [8] Zhang P, Chen X, Wei T, et al. Effects of straw incorporation on the soil nutrient contents, enzyme activities, and crop yield in a semiarid region of China [J]. Soil and Tillage Research, 2016, 160: 65-72.
- [9] Burns R G, DeForest J L, Marxsen J, et al. Soil enzymes in a changing environment: current knowledge and future directions [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 58: 216-234.
- [10] Reddy A P, Simmons C W, D'haeseleer P, et al. Discovery of microorganisms and enzymes involved in high-solids decomposition of rice straw using metagenomic analyses [J]. PLoS One, 2013, 8(10): e77985.
- [11] Štursová M, Baldrian P. Effects of soil properties and management on the activity of soil organic matter transforming enzymes and the quantification of soil-bound and free activity [J]. Plant and Soil, 2011, 338(1-2): 99-110.
- [12] Sinsabaugh R L, Moorhead D L. Resource allocation to extracellular enzyme production: a model for nitrogen and phosphorus control of litter decomposition [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1994, 26(10): 1305-1311.
- [13] Tiemann L K, Billings S A. Indirect effects of nitrogen amendments on organic substrate quality increase Enzymatic Activity driving decomposition in a mesic grassland [J]. Ecosystems, 2011, 14(2): 234-247.
- [14] Wei T, Zhang P, Wang K, et al. Effects of wheat straw incorporation on the availability of soil nutrients and enzyme activities in semiarid areas [J]. PLoS One, 2015, 10(4): e0120994.
- [15] Zhao X, Yuan G, Wang H, et al. Effects of full straw incorporation on soil fertility and crop yield in rice-wheat rotation for silty clay loamy cropland [J]. Agronomy, 2019, 9(3): 133.
- [16] 张鑫, 周卫, 艾超, 等. 秸秆还田下氮肥运筹对夏玉米不同时期土壤酶活性及细菌群落结构的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(2): 295-306.
- [17] Zhao S C, Li K J, Zhou W, et al. Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 216: 82-88.
- [18] 李倩, 张睿, 贾志宽. 玉米旱作栽培条件下不同秸秆覆盖量对土壤酶活性的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2009(4): 152-154.
- [19] Wang X, Jia Z, Liang L, et al. Changes in soil characteristics and maize yield under straw returning system in dryland farming [J]. Field Crops Research, 2018, 218: 11-17.
- [20] 朱波, 陈实, 游祥, 等. 紫色土退化旱地的肥力恢复与重建 [J]. 土壤学报, 2002(5): 743-749.
- [21] DeForest J L. The influence of time, storage temperature, and substrate age on potential soil enzyme activity in acidic forest soils using MUB-linked substrates and l-DOPA [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(6): 1180-1186.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析(3版) [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] Wang W, Sardans J, Wang C, et al. Straw application strategy to optimize nutrient release in a southeastern China rice cropland [J]. Agronomy, 2017, 7(4): 84.
- [24] 张志毅, 范先鹏, 夏贤格, 等. 长三角地区稻麦轮作土壤养分对秸秆还田响应——Meta 分析 [J]. 土壤通报, 2019 50(2): 401-406.
- [25] Zhang P, Wei T, Li Y, et al. Effects of straw incorporation on the stratification of the soil organic C, total N and C: N ratio in a semiarid region of China [J]. Soil and Tillage Research, 2015, 153: 28-35.
- [26] Cong P, Li Y Y, Wang J, et al. Increasing straw incorporation rates improves subsoil fertility and crop yield in the Huang-Huai-Hai Plain of China [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2020, 66(14): 1976-1990.
- [27] Tan D S, Jin J Y, Huang S W, et al. Effect of long-term application of K fertilizer and wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems [J]. Agricultural Sciences in China, 2007, 6(2): 200-207.
- [28] Li Z, Liu M, Wu X, et al. Effects of long-term chemical fertilization and organic amendments on dynamics of soil organic C and total N in paddy soil derived from barren land in subtropical

- China [J]. Soil and Tillage Research, 2010, 106 (2): 268–274.
- [29] Wu L, Zhang W, Wei W, et al. Soil organic matter priming and carbon balance after straw addition is regulated by long-term fertilization [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 135: 383–391.
- [30] Zibilske L M, Bradford J M, Smart J R. Conservation tillage induced changes in organic carbon, total nitrogen and available phosphorus in a semi-arid alkaline subtropical soil [J]. Soil and Tillage Research, 2002, 66 (2): 153–163.
- [31] 华萃, 吴鹏飞, 何先进, 等. 紫色土区不同秸秆还田量对土壤线虫群落的影响 [J]. 生物多样性, 2014, 22 (3): 392–400.
- [32] Liu X, Herbert S J, Hashemi A M, et al. Effects of agricultural management on soil organic matter and carbon transformation: a review [J]. Plant Soil and Environment, 2006, 52 (12): 531–543.
- [33] 李森. 秸秆还田下土壤易变有机碳及相关酶活性研究 [D]. 成都: 四川农业大学, 2015.
- [34] Sinsabaugh R L. Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynamics of soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42 (3): 391–404.
- [35] Matocha C J, Haszler G R, Grove J H. Nitrogen fertilization suppresses soil phenol oxidase enzyme activity in no-tillage systems [J]. Soil Science, 2004, 169 (10): 708–714.
- [36] Wei K, Chen Z, Zhu A, et al. Application of ^{31}P NMR spectroscopy in determining phosphatase activities and P composition in soil aggregates influenced by tillage and residue management practices [J]. Soil and Tillage Research, 2014, 138: 35–43.
- [37] Zhu J, Qu B, Li M. Phosphorus mobilization in the Yeyahu Wetland: phosphatase enzyme activities and organic phosphorus fractions in the rhizosphere soils [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2017, 124: 304–313.
- [38] Boring T J, Thelen K D, Board J E, et al. Phosphorus and potassium fertilizer application strategies in corn-soybean rotations [J]. Agronomy, 2018, 8 (9): 195.
- [39] Olander L P, Vitousek P M. Regulation of soil phosphatase and chitinase activity by N and P availability [J]. Biogeochemistry, 2000, 49 (2): 175–191.
- [40] Weintraub M N, Schimel J P. Seasonal protein dynamics in Alaskan arctic tundra soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37 (8): 1469–1475.
- [41] Kelley A M, Fay P A, Polley H W, et al. Atmospheric CO_2 and soil extracellular enzyme activity: a meta-analysis and CO_2 gradient experiment [J]. Ecosphere, 2011, 2 (8): 1–20.
- [42] 夏文建, 柳开楼, 张丽芳, 等. 长期施肥对红壤稻田土壤微生物生物量和酶活性的影响 [J]. 土壤学报, 2021, 58 (3): 628–637.

Effects of different amounts of straw returning on soil enzyme activity in purple soil

LIU Dong-hai¹, QIAO Yan¹, LI Xiao², LI Shuang-lai¹, ZHANG Zhi¹, LI Fei¹, HU Cheng^{1*} (1. Institute of Plant Protection and Soil Fertilizer, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan Hubei 430064; 2. Institute of Agricultural Science in Guangshui City in Hubei Province, Guangshui Hubei 432700)

Abstract: In order to find out the soil enzyme activity and its main driving factors in purple soil area under long-term straw returning, a 12-year long-term located experiment was conducted in purple soil in Sichuan. Four treatments were set up: without straw (CK), 30% of straw returning (RMW30), 50% of straw returning (RMW50) and 100% of straw returning (RMW100). The soil enzyme activities and soil physical and chemical properties were determined. The results showed that compared with CK treatment, RMW100 treatment significantly increased the contents of soil organic matter, alkali-hydrolyzable nitrogen, available potassium and pH. Different straw returning treatments decreased the activities of β -cellobisidase (CBH), cellulase (CL), phenoloxidase (PhOx) and peroxidase (Perox), and increased the activities of phosphatase (Phos), sulfase (Sul), β -glucosidase (β G), α -glucosidase (α G), β -xylosidase (β X), acetylglucosaminidase (NAG) and leucine aminopeptidase (LAP). With the increase of the amount of straw returning to the field, the activity of β -cellobisidase (CBH) decreased. Redundancy analysis (RDA) showed that soil pH was the main factor controlling the change of soil enzyme activity, explaining 60.20% of the variance variation, reaching a significant level. Therefore, the effect of straw returning on soil enzyme activity is mainly through soil pH in purple soil. 100% of the straw returning increased soil fertility, improved the soil pH, which is the optimal management measures to improve the soil quality of the purple soil.

Key words: purple soil; amounts of straw returning; soil enzymes; available nutrients