

激发式秸秆还田对麦季潮土团聚体中酶活性的影响^①

赵永超^{1,2}, 李晓鹏¹, 闫一凡^{1,2}, 王一明¹, 刘建立^{1*}

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 秸秆还田是提升潮土有机质、改良土壤结构的重要措施。添加有机肥和微生物菌剂可激发土壤微生物活性, 促进秸秆腐解、提高土壤酶活性。本研究通过潮土区田间小区试验, 研究激发式秸秆还田及微生物菌剂对土壤团聚体中酶活性的影响, 结果表明: 在小麦整个生育期: 施加有机肥(8% 氮来自有机肥)的处理, 不同级别团聚体中的酶活性(脲酶、蔗糖酶、纤维素酶、碱性磷酸酶)比一次性施肥及常规施肥处理高 8.15%~66.93%, 且差异显著 ($P < 0.05$); 施加有机肥对 0.25~0.053 mm 团聚体中纤维素酶和碱性磷酸酶活性的增加效果明显; 添加微生物菌剂可提高不同级别团聚体中脲酶、纤维素酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶的活性, 不同酶活性的增幅存在差异; 团聚体中脲酶、纤维素酶活性在苗期较低而后逐渐升高; 蔗糖酶、碱性磷酸酶的活性在苗期较低, 至拔节期大幅升高而后逐渐降低; 氮肥不同基肥与追肥比例对土壤团聚体中酶活性也有一定影响: 试验表明, 基追比为 5:5 的处理不同级别团聚体中脲酶、纤维素酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶的活性高于基追比 6:4 的处理。

关键词: 潮土; 激发式秸秆还田; 土壤酶活性; 土壤团聚体

中图分类号: S154.3; S156.92 **文献标识码:** A

土壤酶是一个敏感的生物学指标^[1], 可及时、准确、灵敏地反映土壤中各种生化过程的方向和强度^[2], 对土壤肥力的演化具有重要影响^[3-4]。农业生产中的各种管理措施都会对土壤的理化性质、微生物区系产生影响^[5-9], 从而进一步影响土壤酶的活性, 因此研究秸秆还田条件下土壤酶活性的变化特征对秸秆还田提升土壤地力有一定的指导意义。

秸秆还田是培肥地力的重要措施, 对改善土壤的水、肥、气、热等都有重要的作用^[10-12]。在秸秆还田过程中添加有机肥作为激发源(激发式秸秆还田)对土壤酶活性等的影响已有报道, 许仁良等^[13]的研究发现综合运用秸秆还田、有机肥和氮肥的处理根际真菌的数量、根际生物量态养分、有机质含量显著增加; 王丽娜等^[14]的研究表明秸秆还田配施有机肥有利于增加土壤微生物数量和酶活性, 明显改善土壤肥力。但这些研究均以某一土层的均匀混合土壤样品为研究对象, 没有考虑土壤微环境对酶活性等的影响。实际上土壤是由不同级别团聚体胶结形成的统一整体。已有的研究表明, 不同级别团聚体的形成环境和胶结类型不同, 其物质和能量的循环转化速度也存在着差

异^[15], 因此微生物的代谢和内部物质的组成等会出现差异^[16], 导致土壤酶活性产生差异。为了进一步揭示激发式秸秆还田提升地力的效果, 了解酶活性在团聚体中的分布, 本试验以黄淮海平原潮土为研究对象, 对氮肥不同基追比、微生物菌剂添加条件下激发式秸秆还田对土壤团聚体中酶活性变化进行研究, 探讨土壤团聚体中酶的分布特征及氮肥不同基追比、微生物菌剂添加条件下对其分布的影响, 以期明确激发式秸秆还田对于潮土地力的培肥机理提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于河南省新乡市封丘县。潮土是该县分布最广、面积最大的耕作土壤, 占全县土壤面积的 98.4%。该地区属于半干旱半湿润的暖温带季风气候, 多年平均降雨量为 605 mm, 全年降雨量的 60%~90% 多集中在 5—10 月, 年平均气温为 13.9 。

1.2 试验设计

试验区土壤为典型的潮土, 土壤基本理化性状见

基金项目: 国家重点研发计划课题项目(2016YFD0200603, 2016YFD0300601)和国家自然科学基金项目(41771265)资助。

* 通讯作者(jlliu@issas.ac.cn)

作者简介: 赵永超(1989—), 男, 河南平顶山人, 硕士研究生, 主要从事土壤改良方面的研究。E-mail: zhaoyc@issas.ac.cn

表 1. 种植模式为冬小麦-夏玉米轮作。试验开始于 2014 年小麦季, 试验处理如表 2 所示。每个处理设 4

次重复, 共 20 个小区, 各小区按照随机区组排列, 小区面积 $45 \text{ m} \times 4.5 \text{ m} = 202.5 \text{ m}^2$, 各小区之间起垄隔开。

表 1 土壤基本理化性质
Table 1 Basic physical and chemical properties of tested soil

有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	pH	土壤颗粒组成(g/kg)			容重(g/cm ³)	土壤质地
					黏粒	粉粒	砂粒		
5.81	0.46	0.52	18.6	8.63	226.1	310.9	463.0	1.34	黏壤土

表 2 试验处理
Table 2 Fertilization treatments of experiment

代码	处理	基追比		施肥量
		小麦季	玉米季	
M0	一次性施肥	-	-	1 000 kg/hm ²
M1	常规施肥	6 : 4	4 : 6	N: 250 kg/hm ² P ₂ O ₅ : 160 kg/hm ²
M2	常规施肥(8% 氮来自有机肥)	6 : 4	4 : 6	
M3	常规施肥+微生物菌剂	6 : 4	4 : 6	
M4	常规施肥(8% 氮来自有机肥)	5 : 5	5 : 5	

注：8% 氮来自有机肥是指施入有机肥的氮素含量占总施氮量的 8%；基追比：氮肥基肥与追肥的比例。

所有处理均为玉米秸秆粉碎还田, 小麦秸秆覆盖还田, 具体操作为: 玉米收获后, 采用机械粉碎的方式将玉米秸秆全部翻埋入土壤中, 玉米秸秆还田量约为 9 000 kg/hm²; 小麦收获后秸秆不移除, 覆盖于土壤表面。根据封丘县当地生产实践和前期工作经验, 化肥的施加水平为: N 250 kg/hm²、P₂O₅ 160 kg/hm², 不施加钾肥。微生物菌剂为酵母发酵浓缩物等, 由中国科学院南京土壤研究所微生物课题组研制, 用量为 30 kg/hm²; 有机肥为经过腐熟发酵鸡粪, 由新乡县普路托斯农业科技有限公司生产(N 1.5%; P 1%; K 0.6%)。所用化肥为: 尿素(N 46%)、磷酸二铵(N 18%、P₂O₅ 46%)、复合肥(小麦季: N 16%、P₂O₅ 16%、K₂O 16%; 玉米季: N 28%、P₂O₅ 6%、K₂O 6%)。

肥料的施用方法: 小麦季: 机械旋耕作业前将有机肥、化肥(基肥)与微生物菌剂混合均匀后撒施; 玉米季: 待玉米出苗后将有机肥、化肥(基肥)与微生物菌剂混合均匀后人工穴施。作物灌溉等农事管理均按照当地常规方式进行。

1.3 样品采集与分析测定

于 2015 年 9 月—2016 年 6 月小麦季的苗期、拔节期、孕穗期和成熟期采集表层 0~20 cm 土样, 每个小区内随机选取 5 个样点, 混合为一个土样。土壤团聚体样品采集: 田间采集到的原状土壤样品放入到硬质塑料盒带回实验室, 风干至土块含水量达到土壤塑限(含水量 23% 左右)时^[17-19], 用手把大土块沿着其自然结构拆成不同大小的土块, 除去植物根系、小

石块等, 然后在室温下风干^[5]。

采用干筛法进行土壤团聚体分级: 称取一定量的风干土样放入到罗列好的套筛中, 套筛由上而下的孔径大小分别为: 2、0.25 和 0.053 mm, 最下面放置一个无孔的底盘, 加盖后采用人工手筛的方法左右震荡 200 次, 分离出 >2 mm、2~0.25 mm、0.25~0.053 mm、<0.053 mm 的土壤团聚体^[20]。

各级团聚体的质量百分含量 = 该级团聚体质量 / 土壤样品总质量 × 100%

选取 3 个粒径 (>2 mm、2~0.25 mm、0.25~0.053 mm) 的土壤进行酶活性的测定。脲酶活性(以 NH₃-N 的质量计)采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定, 单位为 mg/(g·24h); 纤维素酶活性(以葡萄糖质量计)采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定, 单位为 mg/(g·72h); 土壤蔗糖酶活性(以葡萄糖质量计)采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定, 单位为 mg/(g·24h); 土壤碱性磷酸酶活性(以酚质量计)采用磷酸苯二钠比色法测定, 单位为 mg/(g·24h)^[5]。

采用 SPSS19.0 和 Excel2010 软件对试验数据进行分析、作图, 每个试验处理结果以 4 个重复的小区数据平均值和标准差来表示。

2 结果与分析

2.1 激发式秸秆还田对土壤干筛团聚体组成的影响
由表 3 可以看出, 不同施肥处理在一定程度上改变了 0~20 cm 土层土壤干筛团聚体的分布, 同级别

团聚体含量各处理间差异不显著。添加有机肥的处理 >0.25 mm 团聚体的含量较其他处理(M0、M1、M3)高 0.38% ~ 6.44%。这说明了添加有机肥能改善土壤的团聚体结构,增加了大团聚体含量^[21]。在整个生育期, >2 mm 团聚体含量略有下降, 2 ~ 0.25 mm 团

聚体的含量呈现先下降后上升的变化规律, 0.25 ~ 0.053 mm 团聚体的含量先上升后下降, 这可能是由于前期的冰冻作用使大粒径团聚体发生破坏^[22-23], 后期水热条件的变化也可能对 >2 mm 的团聚体产生了影响, 有关这一现象还需要进一步的研究讨论。

表 3 不同处理土壤干筛团聚体组成(g/kg)
Table 3 Distribution of soil dry-sieved aggregates under different treatments

生育期	团聚体	M0	M1	M2	M3	M4
苗期	> 2 mm	703.5 a	663.9 a	714.3 a	703.5 a	735.5 a
	2 ~ 0.25 mm	172.2 a	239.9 a	217.0 a	217.0 a	183.5 a
	0.25 ~ 0.053 mm	108.6 a	91.9 ab	64.4 c	79.7 bc	74.7 bc
拔节期	> 2 mm	696.5 a	679.9 a	721.3 a	700.1 a	708.8 a
	2 ~ 0.25 mm	176.0 a	195.7 a	181.9 a	188.6 a	169.6 a
	0.25 ~ 0.053 mm	121.8 a	122.1 a	96.5 b	108.0 ab	104.4 ab
孕穗期	> 2 mm	653.8 a	642.2 a	677.6 a	650.0 a	695.9 a
	2 ~ 0.25 mm	223.3 a	225.4 a	217.7 a	230.8 a	200.8 a
	0.25 ~ 0.053 mm	113.9 a	101.4 a	104.4 a	112.8 a	101.7 a
成熟期	> 2 mm	625.4 a	613.5 a	648.8 a	635.0 a	679.6 a
	2 ~ 0.25 mm	260.5 a	278.9 a	247.2 a	259.1 a	219.6 a
	0.25 ~ 0.053 mm	112.3 a	107.1 a	101.0 a	105.5 a	99.3 a

注: 同一行中小写字母不同表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.2 激发式秸秆还田对土壤团聚体酶活性的影响

2.2.1 土壤团聚体脲酶活性

由图 1 可以看出, 在小麦整个生育期内, 不同级别团聚体中脲酶活性呈现相同的变化趋势: 在苗期、拔节期土壤脲酶活性较低, 而后逐渐升高。同一级别团聚体中, 添加有机肥处理(M2、M4)的土壤团聚体中脲酶活性较其他处理(M0、M1、M3)高 22.02% ~ 66.93%, 且差异显著($P < 0.05$), 罗世琼等^[24]的研究有相似的结果。这说明了有机肥能显著提高脲酶的活性, 可能有两方面的原因: 一是加入的有机肥提供了脲酶产生的底物; 二是有机肥中大量的营养元素和有机物质为作物的生长和微生物的繁殖创造了条件, 提高了土壤脲酶的活性。总体来看, 添加有机肥的处理 2 ~ 0.25 mm 团聚体中脲酶活性较高, 施加化肥处理的脲酶活性最大值在不同生育期存在于不同级别团聚体中。

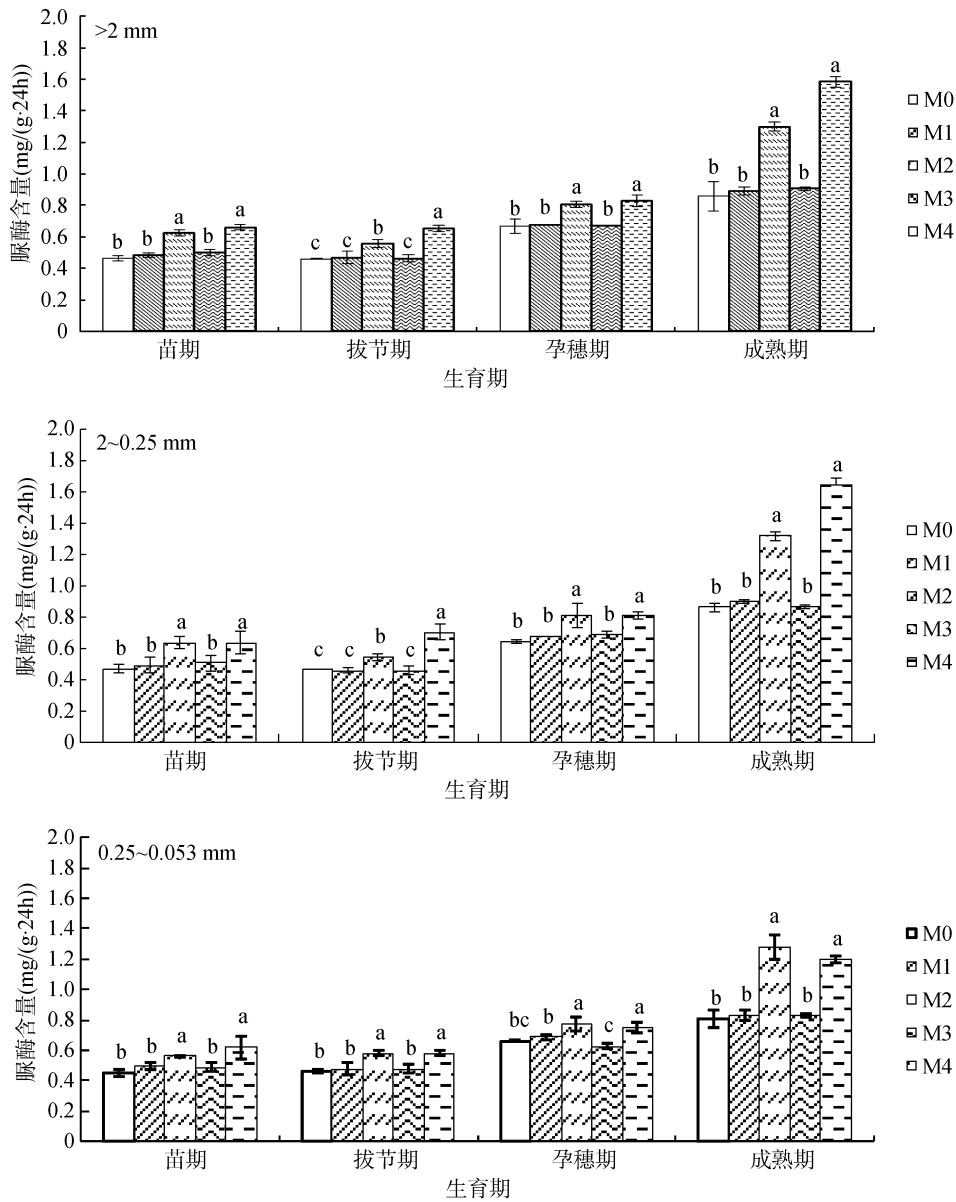
不同基追比对土壤团聚体中脲酶活性也有影响。在整个生育期内, > 2 mm、2 ~ 0.25 mm 团聚体中脲酶活性表现为基追比为 5 : 5 的处理较基追比为 6 : 4 处理高 8.29% ~ 20.01%, 在拔节期这种差异达到了显

著水平($P < 0.05$)。苗期和拔节期, 两种基追比对 0.25 ~ 0.053 mm 团聚体中脲酶活性的影响也表现为 $M4 > M2$, 在孕穗期和成熟期却呈现 $M2 > M4$ 的现象。

与 M0 处理相比, 施加微生物菌剂对土壤脲酶活性的提高有一定的作用, 但是增幅不大, 在整个生育期内, 最高增幅为 8.05%。微生物菌剂提高土壤脲酶活性可能是由于微生物菌剂本身带有一定的微生物, 土壤中丰富的营养物质为微生物的活动创造了条件, 微生物代谢功能旺盛, 脲酶活性提高。

2.2.2 土壤团聚体纤维素酶活性

纤维素酶由土壤微生物产生, 可作用于作物秸秆的分解。由图 2 可以看出, 整个生育期内, 不同大小团聚体中纤维素酶活性呈现从苗期到成熟期逐渐增大的趋势。同一级别团聚体中, 不同处理措施对纤维素酶活性的影响呈现 $M2、M4 > M3$ $M1 > M0$ 的变化规律, 且 $M2、M4$ 与 $M0、M1、M3$ 处理间纤维素酶活性的差异达到了显著水平($P < 0.05$)。在整个生育期内, 不同施肥处理, 0.25 ~ 0.053 mm 团聚体中纤维素酶活性的增加较快, 在整个生育期最高增幅达 215.00%。



(图中同一生育期小写字母不同表示处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平, 下同)

图 1 不同处理方式对土壤团聚体中脲酶活性的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on urease activities in soil aggregates

在整个生育期内, 0.25 ~ 0.053 mm、>2 mm 团聚体中基追比 5 : 5 处理的纤维素酶活性较基追比 6 : 4 处理高 12.50% ~ 86.21%。>2 mm 团聚体中纤维素酶活性差异在苗期、成熟期达到了显著水平($P < 0.05$) ; 0.25 ~ 0.053 mm 团聚体中纤维素酶活性在苗期、孕穗期达到了显著水平($P < 0.05$)。2 ~ 0.25 mm 团聚体中纤维素酶活性在苗期、成熟期表现为基追比 5 : 5 处理高于基追比 6 : 4 的处理, 且差异显著; 拔节期和孕穗期呈现基追比 5 : 5 处理低于基追比 6 : 4 处理的现象。

与 M0 处理相比, 施加微生物菌剂土壤纤维素

酶活性的增幅为 2.94% ~ 96.88%, 在成熟期 0.25 ~ 0.053 mm 团聚体中 M0、M3 处理间纤维素酶活性的差异达到了显著水平($P < 0.05$) ; 在整个生育期, 施加微生物菌剂 >2 mm、2 ~ 0.25 mm、0.25 ~ 0.053 mm 团聚体中纤维素酶活性的增幅分别为 : 2.94% ~ 10.20%、4.13% ~ 37.50%、31.81% ~ 96.88% ; 因此施加微生物菌剂能在一定程度上增加土壤纤维素酶的活性, 且对于 0.25 ~ 0.053 mm 团聚体中纤维素酶活性的增加效果明显。

2.2.3 土壤团聚体蔗糖酶活性 蔗糖酶广泛存在于土壤中, 它能增加土壤中易溶性的营养物质, 作为

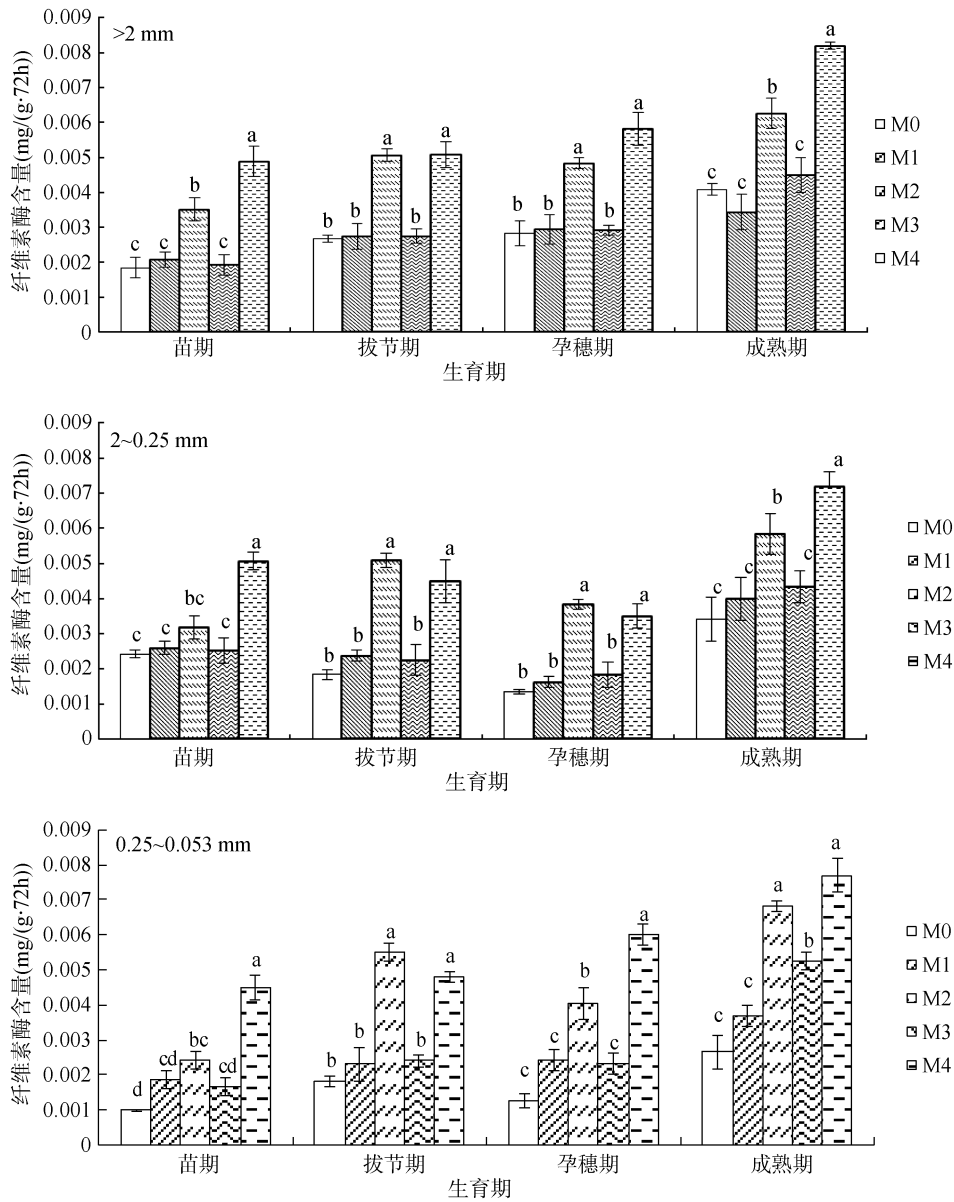


图 2 不同处理方式对土壤团聚体中纤维素酶活性的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on cellulase activities in soil aggregates

评价土壤熟化程度和肥力的一个指标^[5, 25]。蔗糖酶参与土壤有机碳的循环, 可以将土壤中的蔗糖分解为有利于微生物利用的单糖^[26]。激发式秸秆还田对土壤蔗糖酶活性的影响如图 3 所示。在整个生育期内, 不同处理、不同级别团聚体中蔗糖酶活性的变化趋势相似, 在拔节期达到峰值。同一生育期, 施用有机肥的处理不同级别团聚体中土壤蔗糖酶活性均高于施用化肥的处理, 增幅为 4.14% ~ 18.03%, 且差异显著 ($P < 0.05$)。

在小麦整个生育期, 不同级别团聚体中蔗糖酶活性的大小顺序为基追比 5:5 的处理蔗糖酶活性较基追比 6:4 处理高 1.13% ~ 5.46%, 且 >2 mm、2~0.25 mm、

0.25 ~ 0.053 mm 团聚体中两种基追比处理间蔗糖酶活性分别在: 成熟期; 苗期、孕穗期、成熟期; 拔节期、孕穗期、成熟期达到了显著水平 ($P < 0.05$)。

与 M0 处理相比, 添加微生物菌剂土壤蔗糖酶活性在苗期和拔节期增幅较小, 不同级别团聚体中蔗糖酶活性差异不显著 ($P > 0.05$); 孕穗期和成熟期不同级别团聚体中蔗糖酶活性的增幅较大, 差异达到了显著水平 ($P < 0.05$)。

2.2.4 土壤团聚体碱性磷酸酶活性 在小麦整个生育期, 土壤碱性磷酸酶活性在拔节期达到了最大值, 孕穗期、成熟期略有下降(图 4)。不同级别团聚体中碱性磷酸酶活性与纤维素酶变化规律相

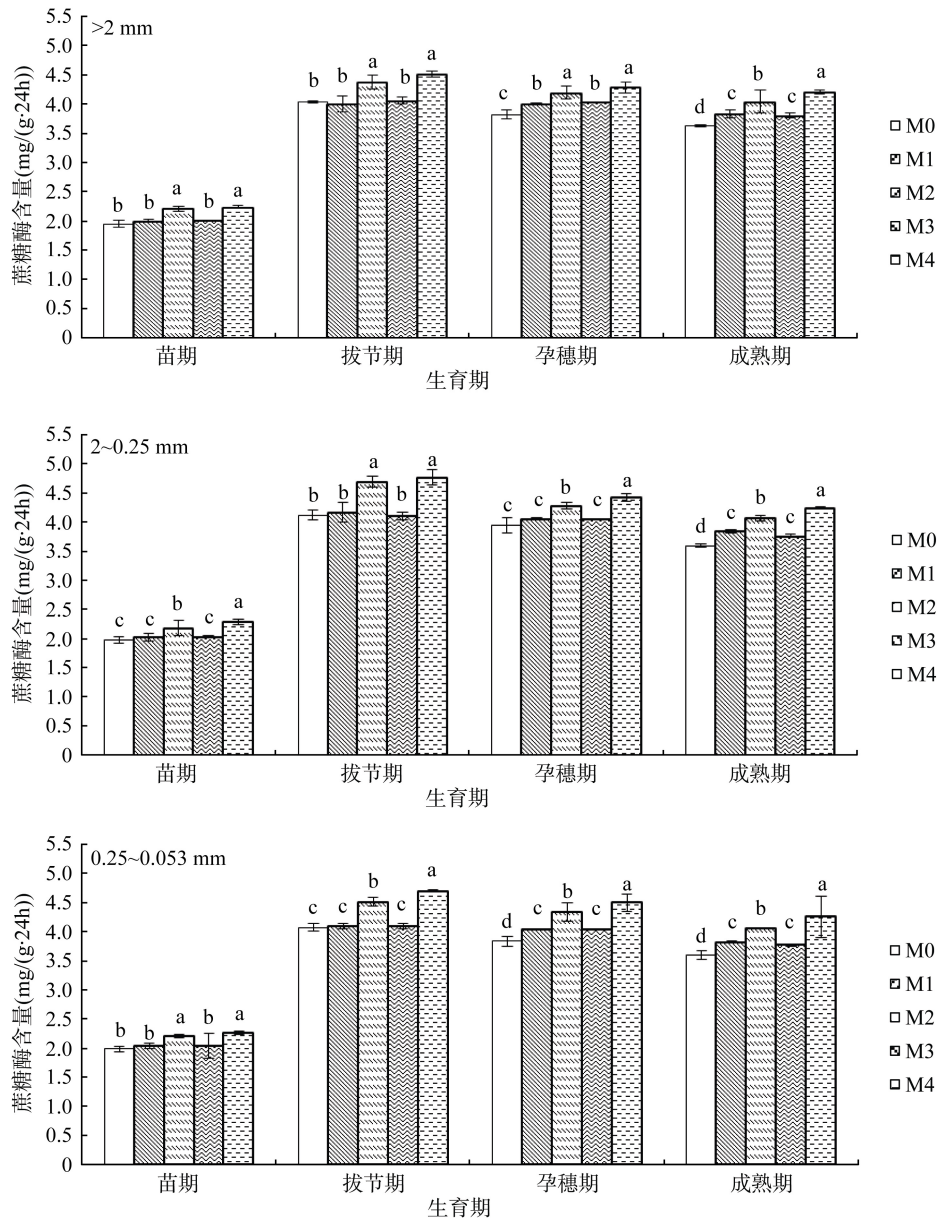


图 3 不同处理方式对土壤团聚体中蔗糖酶活性的影响
 Fig. 3 Effects of different treatments on invertase activities in soil aggregates

似，即施用有机肥对土壤碱性磷酸酶活性有显著的提高作用($P < 0.05$, 苗期 > 2 mm 团聚体中碱性磷酸酶的活性除外)。成熟期施加有机肥的处理团聚体中碱性磷酸酶活性呈现随团聚体直径增大而减小的趋势，且施加有机肥的处理不同级别团聚体中碱性磷酸酶活性的变幅(19.60%)高于施加化肥(10.66%)的处理，邱莉萍等^[27]对长期培肥壤土的研究也有相同的规律。添加微生物菌剂土壤团聚体中碱性磷酸酶活性的增幅为 4.44%~20.59%，说明了微生物菌剂的添加对于提高土壤磷素的利用具有一定的作用。

不同基追比对土壤碱性磷酸酶活性亦有影响。在整个生育期内，与基追比为 6:4 的处理相比，基追比为 5:5 的处理不同级别团聚体中土壤碱性磷酸酶活性的增幅为 0.51%~9.09%，差异不显著($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 添加有机肥对土壤团聚体中酶活性的影响

施加有机肥的处理不同级别团聚体中土壤酶活性的增幅为 4.14%~66.93%，与施加化肥处理相比这种差异达到了显著水平($P < 0.05$)，该结果与 Dick 等^[28]和 Nayak 等^[29]有关有机肥对土壤酶活性的研究成果

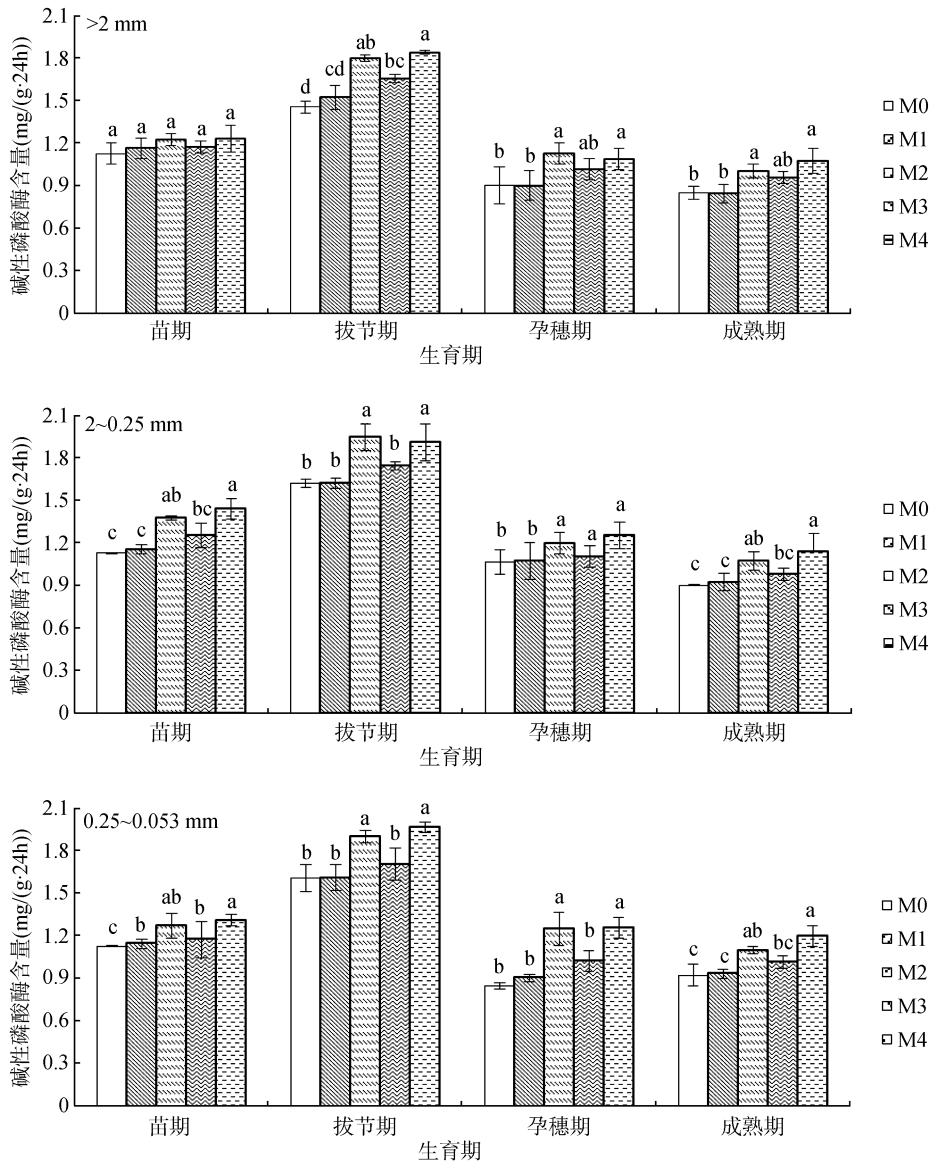


图 4 不同处理方式对土壤团聚体中碱性磷酸酶活性的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on alkaline phosphatase activities in soil aggregates

一致。有机肥提高土壤酶活性可能是由于有机肥为土壤酶的产生提供了底物，同时有机肥中丰富的营养物质为产酶微生物的活动创造了条件，微生物的代谢功能明显提高^[30]，土壤酶活性提高；此外，有机肥中也含有丰富的酶类，对土壤有“加酶”作用。施加有机肥影响了团聚体内酶的分布，本研究发现不同级别团聚体中脲酶和纤维素酶主要分布在大团聚体中，蔗糖酶和碱性磷酸酶主要分布在 0.25 ~ 0.053 mm 的小团聚体中。邱莉萍等^[27]对长期培肥重质壤土的研究表明脲酶、碱性磷酸酶的活性随团聚体直径的增大而减小，不同级别团聚体中蔗糖酶的变化随培肥措施不同而有所不同；Liu 等^[31]对砂壤水稻土的研究发现，< 0.053 mm

粒级内蔗糖酶、磷酸酶和脲酶是所有粒级中最低的。不同种类酶在不同类型土壤、不同级别团聚体中分布存在差异，这可能是由于不同类型土壤形成的团聚体的稳定性不同，因此对土壤酶的保护程度也存在差异；此外，与不同级别团聚体粘结的主要物质不同^[32]，导致团聚体内土壤酶与团聚体的结合方式及吸附能力存在差异^[33]，这些都影响着不同级别团聚体中酶的活性，因此有关长期培肥条件下潮土不同级别团聚体中酶活性的分布今后还有探讨的必要。

3.2 氮肥不同基肥与追肥比例对土壤团聚体中酶活性的影响

秸秆还田是生产中培肥地力的重要技术措施，但

是秸秆还田极易造成土壤碳氮比的失调,秸秆腐解与幼苗“争氮”,对作物生长不利,因此秸秆还田过程中添加外源氮素显得尤为重要。已有的研究表明秸秆直接还田后,适宜秸秆腐解的C:N为(0~25):1^[34],玉米秸秆的C:N较高,因此在生产上在秸秆还田的同时,要配合施入一定量的氮肥,调节土壤碳氮比。该地区玉米秸秆还田量约为9000 kg/hm²,还田秸秆的有机碳含量为435.00 g/kg,全氮含量为5.80 g/kg,施氮量为250 g/hm²,按照基追比为6:4和5:5计算,基追比为6:4时,C:N为19,基追比为5:5时C:N为22,因此基追比为5:5条件下更有利于秸秆的腐解。杜世州等^[35]的研究也发现,氮肥基追比为5:5~4:6是实现淮北地区小麦超高产栽培的适宜基追比。作物秸秆含有大量微生物生命活动的营养物质,秸秆腐解后大量的营养物质为微生物的生长和繁衍创造了更多可利用的底物^[36],土壤微生物的代谢功能明显提高^[30]。有的研究表明,土壤微生物的代谢产物是土壤酶的重要来源^[37],土壤团聚体是土壤微生物活动的重要场所^[38],因此基追比为5:5处理提高了不同级别团聚体中酶的活性。

3.3 微生物菌剂对土壤酶活性的影响

与施用化肥相比,添加微生物菌剂提高了不同级别团聚体中酶的活性,郭新送等^[39]、解媛媛等^[40]的研究有相似的结果。微生物菌剂提高土壤酶活性可能是由于微生物菌剂本身带有一定的微生物和酶类,土壤中丰富的营养物质为微生物的生长创造了条件,提高了土壤酶的活性^[40]。本研究中,微生物菌剂对不同种类酶活性的增幅不同,这可能是由于微生物菌剂中不同种类的微生物数量存在差异,因此导致土壤酶的产生存在差异。

4 结论

1) 在冬小麦整个生育期,潮土团聚体中脲酶、纤维素酶活性在苗期较低而后逐渐升高;蔗糖酶、碱性磷酸酶的活性呈现苗期较低,至拔节期大幅升高而后降低的趋势。

2) 有机肥、微生物菌剂和氮肥不同基肥与追肥比例对潮土酶活性均产生影响,但是影响不同:添加有机肥(8%氮来自有机肥)能显著提高潮土不同级别团聚体中酶(脲酶、纤维素酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶)的活性,且对0.25~0.053 mm团聚体中纤维素酶和碱性磷酸酶活性的增加效果明显;微生物菌剂对潮土酶活性的增加有一定的作用,但差异不显著;总体来看基追比为5:5的处理土壤酶的活性高于基追比为

6:4的处理。

参考文献:

- [1] Marx M C, Wood M, Jarvis S C. A microplate fluorimetric assay for the study of enzyme diversity in soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33(12/13): 1633-1640
- [2] 陶宝先, 张金池, 崔志华, 等. 苏南丘陵区林地土壤酶活性及其与土壤理化性质的相关性[J]. *生态与农村环境学报*, 2009, 25(2): 44-48
- [3] Boerner R E J, Brinkman J A, Smith A. Seasonal variations in enzyme activity and organic carbon in soil of a burned and unburned hardwood forest[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(8): 1419-1426
- [4] Zhang Y M, Zhou G Y, Wu N, et al. Soil enzyme activity changes in different-aged spruce forests of the eastern Qinghai-Tibetan plateau[J]. *Pedosphere*, 2004, 14(3): 305-312
- [5] 关荫松. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986
- [6] Melero S, López-Garrido R, Murillo J M, et al. Conservation tillage: Short-and long-term effects on soil carbon fractions and enzymatic activities under Mediterranean conditions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104(2): 292-298
- [7] Waldrop M P, Zak D R, Sinsabaugh R L, et al. Nitrogen deposition modifies soil carbon storage through changes in microbial enzymatic activity[J]. *Ecological Applications*, 2004, 14(4): 1172-1177
- [8] 程东娟, 刘树庆, 王殿武, 等. 长期定位培肥对土壤酶活性及土壤养分动态变化影响[J]. *河北农业大学学报*, 2003(3): 33-36, 45
- [9] 沈芳芳, 袁颖红, 樊后保, 等. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(2): 517-527
- [10] 杜臻杰, 陈效民, 邓建强, 等. 不同施肥处理红壤水肥耦合效应的研究[J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(5): 15-18
- [11] 赵红, 袁培民, 吕贻忠, 等. 施用有机肥对土壤团聚体稳定性的影响[J]. *土壤*, 2011, 43(2): 306-311
- [12] 陈中玉, 张祖立, 白小虎. 农作物秸秆的综合开发利用[J]. *农机化研究*, 2007(5): 194-196
- [13] 许仁良, 王建峰, 张国良, 等. 秸秆、有机肥及氮肥配合使用对水稻土微生物和有机质含量的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(13): 3584-3590
- [14] 王丽娜. 黄麻秸秆还田及施用有机肥对滨海盐土的改良试验(学位论文)[D]. 南京: 南京林业大学, 2009
- [15] Young I M, Crawford J W. Interactions and self-organization in the soil-microbe complex[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1634-1637
- [16] Adesodun J K, Adeyemi E F, Oyegoke C O. Distribution of nutrient elements within water-stable aggregates of two tropical agro-ecological soils under different land uses[J]. *Soil Tillage Research*, 2007, 92(1/2): 190-197
- [17] 刘中良, 宇万太, 周桦, 等. 长期施肥对土壤团聚体分布和养分含量的影响[J]. *土壤*, 2011, 43(5): 720-728

- [18] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4695-4704
- [19] 蒲玉琳, 林超文, 谢德体, 等. 植物篱-农作坡地土壤团聚体组成和稳定性特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 122-128
- [20] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978
- [21] Bashir K, Ali S, Ijaz S S, et al. Effect of Organic Amendments on Distribution, Stability and Carbon Concentration of Soil Aggregates[J]. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 2016, 53(4): 955-961
- [22] Oztas T, Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability[J]. Catena, 2003, 52(1): 1-8
- [23] Bochove van, Prevost E D, Pelletier F. Effects of freeze-thaw and soil structure on nitrous oxide produced in a clay soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1638-1643
- [24] 罗世琼, 杨宇虹, 晋艳, 等. 长期培肥对烤烟-小麦轮作红壤各级团聚体氮及其酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 127-132
- [25] Zantua M I, Dumenil L C, Bremner J M. Relationships between soil urease activity and other soil properties[J]. Soil Science Society of America Journal, 1977, 41(2): 350-352
- [26] 杜伟文, 欧阳中万. 土壤酶研究进展[J]. 湖南林业科技, 2005(5): 80-83, 86
- [27] 邱莉萍, 张兴昌, 张晋爱. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布[J]. 生态学报, 2006, 26(2): 364-372
- [28] Dick R P, Rasmussen P E, Kerle E A. Influence of long-term residue management on soil enzyme-activities in relation to soil chemical-properties of a wheat-fallow system[J]. Biology and Fertility of Soils, 1988, 6(2): 159-164
- [29] Nayak D R, Babu Y J, Adhya T K. Long-term application of compost influences microbial biomass and enzyme activities in a tropical *Aeric Endoaquept* planted to rice under flooded condition[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39(8): 1897-1906
- [30] 胡可, 李华兴, 卢维盛, 等. 生物有机肥对土壤微生物活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 303-306
- [31] Liu Y R, Li X, Shen Q R, et al. Enzyme activity in water-stable soil aggregates as affected by long-term application of organic manure and chemical fertiliser[J]. Pedosphere, 2013, 23(1): 111-119
- [32] Oades J M. Soil organic-matter and structural stability-mechanisms and implications for management[J]. Plant and Soil, 1984, 76(1/3): 319-337
- [33] Bach E M, Hofmockel K S. Soil aggregate isolation method affects measures of intra-aggregate extracellular enzyme activity[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2014, 69: 54-62
- [34] 王敏强, 闻杰. 玉米秸秆还田技术及易出现的问题[J]. 现代农业科技, 2008(8): 151
- [35] 杜世州, 曹承富, 张耀兰, 等. 氮肥基追比对淮北地区超高产小麦产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(6): 1027-1033
- [36] 徐华勤, 肖润林, 邹冬生, 等. 长期施肥对茶园土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(8): 3355-3361
- [37] 刘善江, 夏雪, 陈桂梅, 等. 土壤酶的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011(21): 1-7
- [38] 李娜, 韩晓增, 尤孟阳, 等. 土壤团聚体与微生物相互作用研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(9): 1625-1632
- [39] 郭新送, 丁方军, 陈士更, 等. 控释尿素配施微生物菌剂的氮肥利用率及土壤酶活性研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 277-282
- [40] 解媛媛, 谷洁, 高华, 等. 微生物菌剂酶制剂化肥不同配比对秸秆还田后土壤酶活性的影响[J]. 水土保持研究, 2010, 17(2): 233-238

Effects of Straw Returning via Application of Organic Fertilizer as Primer on Fluvo-aquic Soil Enzyme Activities in Soil Aggregates

ZHAO Yongchao^{1,2}, LI Xiaopeng¹, YAN Yifan^{1,2}, WANG Yiming¹, LIU Jianli^{1*}

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;*

2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Straw return is an important measure to improve soil organic content and structure on Fluvo-aquic soil. Adding organic fertilizer and microorganism inoculant can stimulate soil biological activity, promote straw decomposition and improve soil enzyme activity. A field experiment on the effects of straw returning via application of organic fertilizer and microorganism inoculant on Fluvo-aquic soil enzyme activities in soil aggregates was conducted. The results showed that: 1) During the entire wheat growing period, compared with onetime and routine fertilization methods, the treatments with organic fertilizer significantly increased the activities of urease, cellulose, invertase and alkaline phosphatase in different size aggregates by 8.15%–66.93%. The treatments with organic fertilizer significantly increased the activities of cellulose and alkaline phosphatase in 0.25–0.053 mm aggregates. 2) Microorganism inoculant addition had increasing effect on the activities of urease, cellulose, invertase and alkaline phosphatase in different size aggregates, but there were differences in the increases of enzyme activities. 3) The enzymes differed in different size aggregates in response to different treatments at different growth stages. Invertase and alkaline phosphatase tended to be lower in seedling stage, peaked at the elongation stage and then decreased at the seedling and booting stages, while urease and cellulose increased steadily throughout the whole growth period. 4) The enzymes differed in different size aggregates in response to different nitrogen fertilizer base/chase ratios, comparatively, the ratio of 5 : 5 had higher enzyme activities (urease, cellulose, invertase and alkaline phosphatase) than the ratio of 6 : 4.

Key words: Fluvo-aquic soil; Priming effect straw return; Soil enzyme activity; Soil aggregates