套作糯玉米对西兰花连作田土壤微生物量及酶活性的影响

张学鹏 曹玉博 宁堂原* 方倩囡 徐子雯 韩惠芳 李增嘉

(山东农业大学农学院/作物生物学国家重点实验室/农业部作物水分生理与抗旱种质改良作物重点实验室/山东省作物生物学重点实验室, 山东泰安 271018)

摘 要 本文研究了套作糯玉米(*Zea mays* L. *sinensis* Kulesh)及其秸秆还田的种植模式下土壤生物活性的变化,以明确套作模式和秸秆还田减缓西兰花连作田连作障碍的效果。以西兰花单作为对照,设置西兰花套作糯玉米且糯玉米秸秆还田-西兰花(B/MR-B)、西兰花套作糯玉米且糯玉米秸秆不还田-西兰花(B/M-B)、西兰花-西兰花(B-B),共3个处理,分别测定土壤微生物生物量碳(MBC)、氮(MBN)以及脲酶、蔗糖酶、中性磷酸酶、过氧化氢酶活性。结果表明:套作并秸秆还田有效提升MBC和MBN,玉米和西兰花共生阶段后期MBC和MBN较高;套作并秸秆还田可有效提高土壤脲酶、中性磷酸酶和蔗糖酶活性,促进有机养分的转化和有效化;秸秆还田前期胁迫作物分泌过氧化氢,导致土壤过氧化氢酶活性升高,套作处理可有效减缓土壤中过氧化氢的累积。相关分析表明,MBC与脲酶、蔗糖酶、中性磷酸酶、过氧化氢酶显著相关或极显著正相关,MBN与脲酶、蔗糖酶、中性磷酸酶极显著正相关。套作并秸秆还田可改善西兰花连作田土壤生态环境,在一定程度上有效缓解西兰花连作障碍。

关键词 套作;秸秆还田;连作障碍;土壤微生物生物量碳;土壤微生物生物量氮;土壤酶活性

Effects of intercropping with waxy maize on soil microbial biomass and enzyme activity of continuous broccoli field.

ZHANG Xue-peng, CAO Yu-bo, NING Tang-yuan*, FANG Qian-nan, XU Zi-wen, HAN Hui-fang, LI Zeng-jia (*College of Agriculture, Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology/Key Laboratory of Crop Water Physiology and Drought-Tolerance Germplasm Improvement of Ministry of Agriculture/Shandong Key Laboratory of Crop Biology, Taian* 271018, *Shandong, China*).

Abstract: Using continuous cropping as a contrast, the effects of different intercropping patterns of waxy maize and maize straw returning on soil microbial biomass and enzyme activities were studied. The aim was to know how intercropping and maize straw returning benefit for solving continuous cropping obstacle problems in vegetable fields. Three treatments were used, including relay-intercropping mode of broccoli and waxy maize with waxy maize straw returning (B/MR-B), relay-intercropping mode of broccoli and waxy maize without waxy maize straw returning (B/M-B), broccoli continuous cropping (B-B). The activities of soil urease, sucrase, neutral phosphatase and catalase, and soil microbial biomass carbon (MBC) and nitrogen (MBN) were analyzed. Relay-intercropping with straw returning increased MBC and MBN, especially during the later co-existence period of maize and broccoli. Moreover, the activities of urease, neutral phosphatase and invertase were increased, and the transformation of organic nutrients in the soil was improved. Hydrogen peroxide was secreted by crop roots in the early stage of residues incorporation, which increased the activity of catalase. The intercropping system may have the potential to de-

公益性行业(农业)科研专项(201103001 和 201503121-05)、科技支撑计划项目(2012BAD14B07)、山东省科技发展计划项目(2014GNC111007)和山东农业大学学生发展性项目(nxyfzzz1401)资助。
收稿日期: 2015-04-02 接受日期: 2015-09-01
*通讯作者 E-mail: ningty@163.com

crease the accumulation of hydrogen peroxide in the soil. Soil urease activity, sucrase activity, neutral phosphatase activity and catalase activity had significant positive correlations with MBC. Soil urease activity, sucrase activity, neutral phosphatase activity had significant positive correlations with MBN. Therefore, relay-intercropping with straw returning can improve soil environment and reduce continuous cropping obstacles to some extent.

Key words: relay-intercropping; straw returning; continuous cropping obstacles; soil microbial biomass carbon; soil microbial biomass nitrogen; soil enzyme activity.

随着中国蔬菜产业的发展,中国蔬菜的种植面积不断扩大。然而,由于栽培蔬菜种类单一,过度追求产量和效益以及农民的种植习惯等因素,导致土壤生态和生物环境恶化、病虫害加重、产量和品质下降等连作障碍的出现,严重地制约了蔬菜产业的可持续发展(肖雪梅,2013)。土壤中的酶和微生物活性高低可以代表土壤中物质代谢的活跃程度及养分物质循环状况,在一定程度上反映作物对养分吸收利用与生长发育状况等,是衡量土壤质量的重要指标,其对土壤受到的干扰比较敏感,能够反映不同条件下土壤质量的变化(Frankenberger *et al.*,1983;Mijangos *et al.*,2006;Shukla *et al.*,2011)。大量研究表明,土壤微生态失调是导致连作障碍的主要原因之一,连作条件下土壤生物环境变劣,主要表现为土壤微生物种群结构、数量和比例失衡,土传病虫害加重以及降低土壤酶活性,从而影响土壤中某些养分的活化(肖雪梅,2013;谷岩等,2012)。因此,当前亟待解决的问题是如何有效地减缓蔬菜连作带来的弊端,而从农业生态角度考虑探索一套合理的作物复合系统是不错的选择。

研究表明,合理套作和秸秆还田是有效改善土壤微生态环境,减缓连作障碍比较有效的措施(苏世鸣等,2008;王田涛,2013)。其中秸秆作为外源碳介入农田土壤后不仅使土壤酶促反应底物增加,还可增加土壤微生物可利用碳源及改善其生存环境,从而促使微生物生长和提高土壤酶活性(斐鹏刚等,2014)。套作使作物的根系分泌物、作物残体和根系残留物在土壤中积累,增加了土壤微生物营养物质的获取,刺激了土壤微生物的活性(朱丽霞等,2003)。此外,套作的作物能影响土壤温度、湿度等环境因子,改善作物生长的土壤微生态环境(庄岩等,2009)。本课题组前期对西兰花秸秆以及西兰花田土壤浸提液的化感效应研究表明,二者均有较强的化感效应,这可能正是西兰花田产生连作障碍的主要原因;同时研究还表明,西兰花连作下土壤微生物活性以及土壤酶活性均呈显著下降之势(仲惟磊,2011;张洁莹,2013)。关于套作玉米并秸秆还田对连作菜田土壤生态环境改善的相关报道较少。因此,本研究以西兰花和糯玉米为主要研究材料,分析讨论西兰花套作玉米与玉米秸秆还田对西兰花连作田土壤生物活性的影响,探索构建集约高效的农作制度,为连作菜田土壤生态环境的改善以及农业的可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地条件

试验于2013—2014年在山东省莱阳市照旺庄(36°54′16.34″N,120°44′44.35″E)进行,试验地属温带季风型大陆性气候,冬暖夏凉,四季分明,平均温度为11.2 ℃,年平均降雨量为800 mm。本试验地为长期定位试验田,于2011年4月开始进行试验处理,土壤基本理化性状为:有机质9.15 g·kg^{-1}、全氮0.67 g·kg^{-1}、硝态氮34.71 mg·kg^{-1}、铵态氮4.41 mg·kg^{-1}、速效磷25 mg·kg^{-1}、速效钾90 mg·kg^{-1}、pH 6.73。

1.2 试验设计

本试验以西兰花、糯玉米为试验材料,套作处理:西兰花套作糯玉米且糯玉米秸秆还田-西兰花(B/MR-B)、西兰花套作糯玉米且糯玉米秸秆不还田-西兰花(B/M-B);单作处理:西兰花-西兰花(B-B)。共3个处理,3次重复。具体试验设计及作物茬口安排如图1所示,每个处理面积:10 m(长)×20 m(宽)=200 m^2。垄宽65 cm,套作行比为1行玉米:2行西兰花。西兰花行距65 cm,株距40 cm,玉米株距20 cm。春季西兰花分别于4月10日左右移栽入试验田;5月初将玉米套种于西兰花行间,于8月左右收获;玉米收获后将B/MR-B处理的玉米秸秆全部还田于B/MR-B处理的小区,秸秆还田量为4230 kg·hm^{-2};秋季西兰花播期为8月10日左右,于10月1—15日收获。为了更好地控制肥料因素对试验的影响,将本试验的施肥定为:春季西兰花和秋季西兰花种植前,试验田均统一施用750

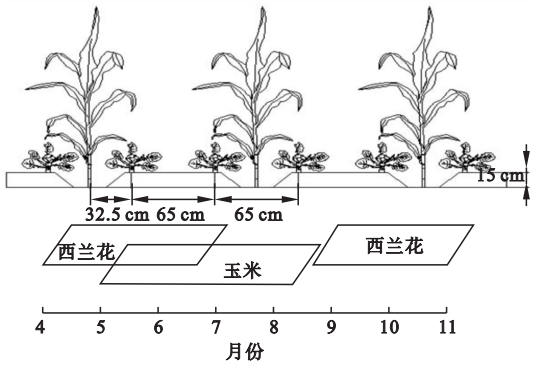


图 1 试验设计及作物茬口安排
Fig.1 Experimental design and cropping arrangement

kg·hm^{-2}复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O=12∶13∶20)做基肥;玉米小口期,试验田统一追施尿素 300 kg·hm^{-2};春季西兰花和秋季西兰花开花期追施 300 kg·hm^{-2}蔬菜专用冲施肥(N∶P_2O_5∶K_2O=2∶1∶3)。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 土壤样品采集 分别在春菜种植期(2013 年 4 月 14 日和 2014 年 4 月 2 日)、玉米苗期(2013 年 5 月 8 日和 2014 年 5 月 3 日)、春菜收获期(2013 年 6 月 20 日和 2014 年 6 月 9 日)、玉米开花期(2013 年 7 月 9 日和 2014 年 7 月 2 日)、玉米收获期(2013 年 7 月 31 日和 2014 年 7 月 26 日)、秋菜收获期(2013 年 10 月 9 日和 2014 年 10 月 2 日),于每个处理小区的西兰花行间随机取 3 个土壤样点,分 0~10、10~20 cm 二个层次,分别混合,一份 4 ℃条件下保存,用于测定土壤微生物生物量碳、氮;一份土样风干后分别研磨过 60 目筛,用于测定土壤酶活性。

1.3.2 土壤微生物生物碳、氮含量测定 土壤微生物生物量碳、氮:采用氯仿熏蒸-K_2SO_4提取法,将欲熏蒸土样置于内径 30 cm 可抽气的干燥器内隔板上,干燥器底部放置装有 30 mL 无乙醇氯仿的 100 mL 烧杯,另外放置 1 个装有蒸馏水的小烧杯使熏蒸时土壤含水量不变,以及一个装有 NaOH 的小烧杯吸收 CO_2。随之抽气,直到氯仿出现气泡沸腾后持续 5 min,停止抽气,紧接着密闭干燥器,并将其置于室温黑暗处,24 h 后取出土样,在通气良好的地方放置 2~3 h,使残留土壤中的氯仿尽可能挥发。不熏蒸的土样置于另一干燥器中,用蒸馏水代替氯仿,与用氯仿熏蒸一样处理,作为不熏蒸对照。取熏蒸和未熏蒸的土样,转入 100 mL 三角瓶中,按土水比 1∶4 加 0.5 mol·L^{-1}的 K_2SO_4溶液,振荡 30 min 后过滤,滤液中有机碳采用重铬酸钾容量法测定,全氮采用茚三酮比色法测定。土壤微生物生物量碳、氮含量以熏蒸和未熏蒸的有机碳、全氮含量之差分别除以 K_{EC}和 K_{EN}得到,其中 K_{EC}=0.38,K_{EN}=0.2(吴金水,2006)。

1.3.3 土壤酶活性的测定 脲酶活性(按 NH_3-N 质量计)采用靛酚蓝比色法测定,单位为 mg·g^{-1}·24 h^{-1},缓冲液为 pH 6.7 柠檬酸盐缓冲液;中性磷酸酶活性(按苯酚质量计)采用磷酸苯二钠比色法测定,单位为 mg·g^{-1}·24 h^{-1},缓冲液为 pH 7.0 柠檬酸盐缓冲液;蔗糖酶活性(按葡萄糖质量计)采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,单位为 mg·g^{-1}·24 h^{-1},缓冲液为 pH 5.5 磷酸缓冲液;过氧化氢酶活性(按高锰酸钾体积计)采用高锰酸钾滴定法测定,单位为 mL·g^{-1}·h(关松荫,1986)。

1.4 数据分析

用 Microsoft Excel 2003 和 DPS 7.05 软件对数据进行处理和统计分析,SigmaPlot 10.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式对土壤微生物生物量碳、氮的影响

2.1.1 对土壤微生物生物量碳的影响 由表 1 可以看出,2013 年 0~10 cm 土层,除玉米开花期外 B/MR-B处理的 MBC 显著高于 B-B,春菜种植期、玉米苗期、春菜收获期 B/M-B 处理显著高于 B-B;10~20 cm 土层,各处理的 MBC 变化趋势与 0~10 cm 土层基本一致,B/MR-B 在春菜收获期和玉米收获期达到峰值,B/MR-B 比 B/M-B 和 B-B 分别高出 59.3%、61.1%和 32.0%、76.1%,玉米苗期、玉米收获期 B-B 处理均显著低于 B/MR-B 和 B/M-B。2014 年0~10 cm土层,除春菜种植期和玉米苗期外 B-B 处理的 MBC 均低于 B/MR-B 和 B/M-B,其中春菜收获期、玉米开花期、玉米收获期和秋菜收获期达到差异显著,玉米开花期前,MBC 呈现出 B/M-B>B/MR-B,玉米开花期后逐渐呈现出 B/MR-B>B/M-B;10~20 cm 土层,MBC 在春菜收获期达第一个高峰,B/MR-B处理分别比 B/M-B 和 B-B 显著提高 9.7%和 11.0%,秋菜收获期达第二个高峰,B/MR-B处理分别比 B/M-B 和 B-B 显著提高 26.4%和 66.8%,除春菜种植期和春菜收获期外 B-B 处理均显著低于 B/MR-B 和 B/M-B。由上述分析可看出,套作糯玉米一定程度上提高了西兰花田 MBC,而套作糯玉米并秸秆还田能够显著改善西兰花田 MBC。

表1 不同种植模式对菜田MBC的影响(mg·kg^{-1})
Table 1 Influence of planting patterns on MBC of vegetable field

年份	土层(cm)	处理	春菜种植期	玉米苗期	春菜收获期	玉米开花期	玉米收获期	秋菜收获期
2013	0~10	B/MR-B	119.8±16.5 a	346.6±15.0 b	463.3±18.8 a	180.9±10.4 c	420.6±12.6 a	259.6±25.3 a
		B/M-B	119.7±34.9 a	370.9±8.8 a	345.8±8.0 b	270.9±8.4 b	284.2±18.2 c	185.2±19.1 c
		B-B	75.1±1.2 b	252.5±10.1 c	250.2±10.0 c	383.6±21.4 a	356.2±22.5 b	222.5±10.0 b
	10~20	B/MR-B	112.0±6.8 b	212.0±7.0 a	312.4±2.1 a	81.7±4.3 c	357.6±26.2 a	236.5±27.8 a
		B/M-B	68.6±11.2 c	96.9±6.0 b	196.1±13.0 b	174.2±1.3 b	271.0±28.9 b	151.8±14.0 c
		B-B	164.8±11.2 a	74.7±3.3 c	193.9±3.2 b	208.0±8.8 a	203.1±24.1 c	187.7±15.0 b
2014	0~10	B/MR-B	111.84±19.80 b	247.65±37.07 b	592.41±14.71 b	380.59±12.44 a	587.21±70.29 a	808.10±39.51 a
		B/M-B	122.79±13.91 b	302.74±12.03 a	622.53±12.24 a	372.24±28.04 ab	425.58±62.93 b	731.22±52.05 a
		B-B	242.91±9.71 a	282.56±20.08 ab	384.90±11.56 c	328.90±15.09 b	316.49±28.26 c	576.81±93.20 b
	10~20	B/MR-B	234.32±6.83 a	246.24±26.61 a	346.65±20.74 a	198.09±16.64 a	229.57±36.14 b	612.59±64.20 a
		B/M-B	71.31±2.29 b	208.33±20.11 a	315.95±1.46 b	84.94±3.70 b	366.31±23.57 a	484.64±38.51 b
		B-B	47.26±3.84 b	114.37±38.12 b	312.40±2.52 b	40.26±4.11 c	106.79±32.42 c	367.36±35.58 c

同列不同小写字母表示同一年份同一土层不同处理差异达显著水平($P<0.05$)。下同

2.1.2 对土壤微生物生物量氮的影响 由表2可以看出,2013年0~10 cm土层,B/MR-B在春菜收获期达最高值,分别比B/M-B和B-B显著高出36.2%和69.8%,春菜收获期、玉米开花期、秋菜收获期MBN表现为B/MR-B>B/M-B>B-B,并达到显著水平;10~20 cm土层,B/MR-B在玉米收获期达峰值,分别比B/M-B和B-B显著高出77.0%和136.0%,除春菜种植期外MBN表现为B/MR-B>B/M-B>B-B,在春菜收获期、玉米开花期、玉米收获期达到显著水平。2014年0~10 cm土层,B/MR-B处理在玉米开花期达到峰值,分别比B/M-B和B-B显著高出49.1%和73.6%,MBN整体表现为B/MR-B>B/M-B>B-B,其中春菜种植期、玉米开花期和玉米收获期B/MR-B比B/M-B显著高出21.7%、49.1%和26.5%;10~20 cm土层,MBN整体表现为B/MR-B>B/M-B>B-B,B/M-B和B-B处理在春菜收获期达峰值,B/M-B比B-B显著高出23.0%;而B/MR-B在玉米开花期达峰值,与0~10 cm土层峰值同步,分别比B/M-B和B-B显著高出62.3%和145.8%。由上述分析可以看出,相比西兰花单作套作糯玉米一定程度上提高了西兰花田MBN,而套作糯玉米并秸秆还田能够更进一步提升MBN。

2.2 不同种植模式对土壤酶活性的影响

2.2.1 不同种植模式对土壤脲酶活性的影响 由图2可看出,2013年0~10 cm土层B/MR-B处理的脲酶活性在玉米苗期、玉米开花期、秋菜收获期显著高于B/M-B和B-B,玉米收获后,B/MR-B处理显著升高,表明秸秆还田显著提升0~10 cm土层的脲酶活性;10~20 cm土层B-B处理在玉米苗期以后到秋菜收获前要显著低于B/MR-B和B/M-B。2014年各处理脲酶活性在春菜收获期达到峰值,此时的0~10 cm土层B/MR-B和B/M-B分别比B-B处理显著提高了19.3%和5.6%,除玉米苗期外B/MR-B处理均显著高于B/M-B,B-B处理显著低于B/MR-B

表2 不同种植模式对菜田MBN的影响(mg·kg^{-1})
Table 2 Influence of planting patterns on MBN of vegetable field

年份	土层(cm)	处理	春菜种植期	玉米苗期	春菜收获期	玉米开花期	玉米收获期	秋菜收获期
2013	0~10	B/MR-B	14.85±2.46 c	60.44±4.94 a	80.44±5.37 a	62.73±4.86 a	55.28±9.75 a	50.33±9.85 a
		B/M-B	29.52±3.46 b	29.04±4.02 b	59.04±3.92 b	44.07±4.37 b	25.16±3.05 b	33.87±4.80 b
		B-B	36.02±1.93 a	31.37±3.33 b	47.37±3.03 c	28.37±2.54 c	25.16±2.30 b	20.27±1.54 c
	10~20	B/MR-B	10.67±1.09 b	28.46±2.41 a	38.46±3.41 a	35.74±4.61 a	44.01±6.72 a	17.41±2.78 a
		B/M-B	11.27±1.17 b	14.73±2.42 b	18.41±2.59 b	19.87±3.36 b	24.87±2.49 b	14.43±2.72 a
		B-B	23.61±2.75 a	14.31±0.93 b	11.53±3.36 c	12.88±0.63 c	18.65±2.03 c	8.05±1.17 b
2014	0~10	B/MR-B	50.27±4.51 a	56.98±6.92 a	58.32±6.80 a	98.66±6.93 a	39.53±1.65 a	21.45±3.03 a
		B/M-B	41.32±3.99 b	50.34±6.11 a	54.26±4.66 a	66.17±6.09 b	31.25±1.55 b	20.87±3.25 a
		B-B	35.27±2.37 b	37.00±4.24 b	24.15±2.81 b	56.83±5.84 b	18.60±1.86 c	19.68±2.40 a
	10~20	B/MR-B	21.23±1.84 a	29.90±2.89 a	37.33±3.23 b	49.25±7.17 a	30.11±3.72 a	17.77±3.26 a
		B/M-B	16.16±1.56 b	20.90±2.29 b	44.48±2.51 a	30.35±5.49 b	23.14±3.18 b	14.61±2.61 a
		B-B	14.65±1.35 b	18.97±3.77 b	36.16±1.52 b	20.04±2.60 c	21.35±3.08 b	7.63±1.15 b

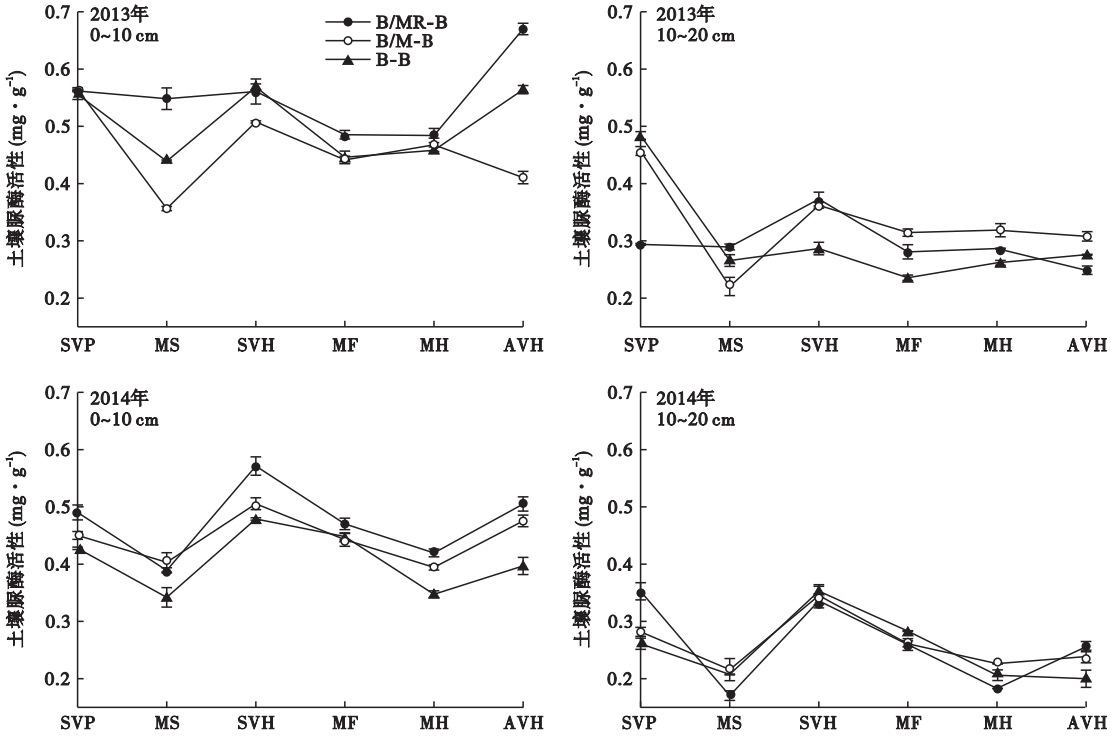


图 2　不同种植模式下土壤脲酶活性

Fig.2　Soil urease activity under different planting patterns

SVP、MS、SVH、MF、MH、AVH 分别表示春菜种植期、玉米苗期、春菜收获期、玉米开花期、玉米收获期、秋菜收获期。

和 B/M-B,表明 B-B 处理下土壤氮素供应能力较低;玉米收获后秸秆还田进一步提升 0~10 cm 和 10~20 cm 土层的脲酶活性。以上结果表明,套作并秸秆还田有助于改善土壤环境,提高脲酶活性,促进尿素转化和植株氮素营养吸收。

2.2.2　不同种植模式对土壤蔗糖酶活性的影响　由图 3 可以看出,2013 年 0~10 cm 土层,蔗糖酶活性 B/MR-B 和 B/M-B 在玉米开花期达到峰值,分别比 B-B 处理显著提高了 27.6% 和 12.0%,除玉米苗期和春菜收获期,B/MR-B 处理均显著高于 B/M-B 和 B-B;10~20 cm 土层蔗糖酶活性均在玉米收获期达到峰值,B/MR-B 和 B/M-B 分别比 B-B 处理显著提高了 40.7% 和 18.1%,各时期 B/MR-B 处理均高于 B/M-B,在春菜种植期、玉米苗期、玉米收获期和秋菜收获期达到显著水平。2014 年不同处理 0~10 cm 和 10~20 cm 土层的蔗糖酶活性动态变化规律基本一致,B/MR-B 处理均在玉米苗期和玉米收获期出现峰值,其中 0~10 cm 土层 B/MR-B 比 B/M-B 和 B-B 分别显著高出 34.0%、47.5% 和 8.2%、12.7%,10~20 cm 土层 B/MR-B 比 B/M-B 和 B-B 分别显著高出 53.5%、32.8% 和 32.1%、19.9%。以上结果表明,套作并秸秆还田有助于改善土壤环境,提高蔗糖酶活性,促进蔗糖水解和碳循环。

2.2.3　不同种植模式对土壤中性磷酸酶活性的影响　由图 4 可以看出,2013 年 0~10 cm 土层,中性磷酸酶活性在春菜收获期达到峰值,此时 B/MR-B 分别比 B/M-B 和 B-B 处理显著提高了 9.2% 和 31.9%,整体表现为 B/MR-B>B/M-B>B-B,其中在春菜种植期、玉米苗期和春菜收获期 B/MR-B 显著高于其他两个处理;10~20 cm 土层 B/MR-B 在春菜收获期达到峰值,B/MR-B 分别比 B/M-B 和 B-B 处理显著提高了 90.7% 和 39.2%,各时期 B/MR-B 处理均高于 B/M-B 和 B-B,在玉米苗期、春菜收获期、玉米收获期达到显著水平。2014 年 0~10 cm 土层除春菜种植期外 B/MR-B 处理显著高于 B/M-B,除春菜收获期和玉米开花期外 B/M-B 处理均显著高于 B-B;10~20 cm 土层中性磷酸酶活性变化趋势基本与 0~10 cm 一致,除春菜种植期外 B/MR-B 处理均高于 B/M-B,其中在玉米苗期、春菜收获期、玉米收获期、秋菜收获期达到显著水平,除秋菜收获期外 B/M-B 处理均高于 B-B,其中在春菜种植期、玉米苗期、玉米收获期达到显著水平。以上结果表明,套作并秸秆还田有助于改善土壤环境,提高中性磷酸酶活性,改善土壤磷素的供应状况。

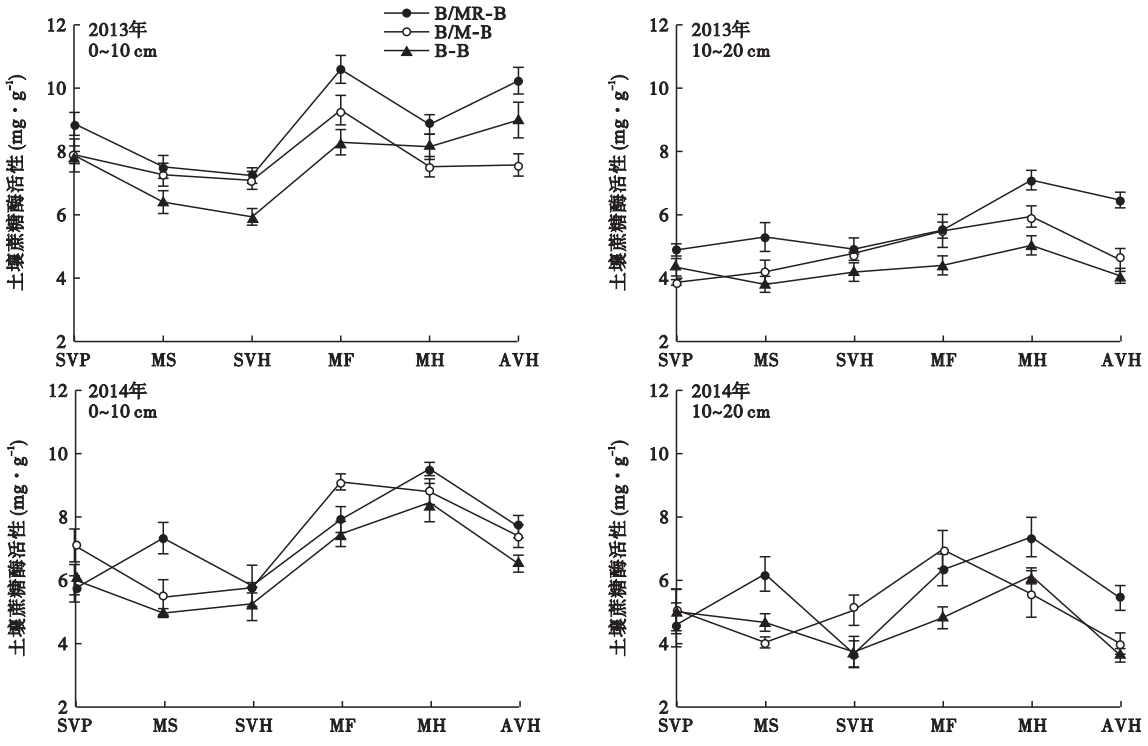


图 3 不同种植模式下土壤蔗糖酶活性

Fig.3 Soil saccharase activity under different planting patterns

SVP、MS、SVH、MF、MH、AVH 分别表示春菜种植期、玉米苗期、春菜收获期、玉米开花期、玉米收获期、秋菜收获期。

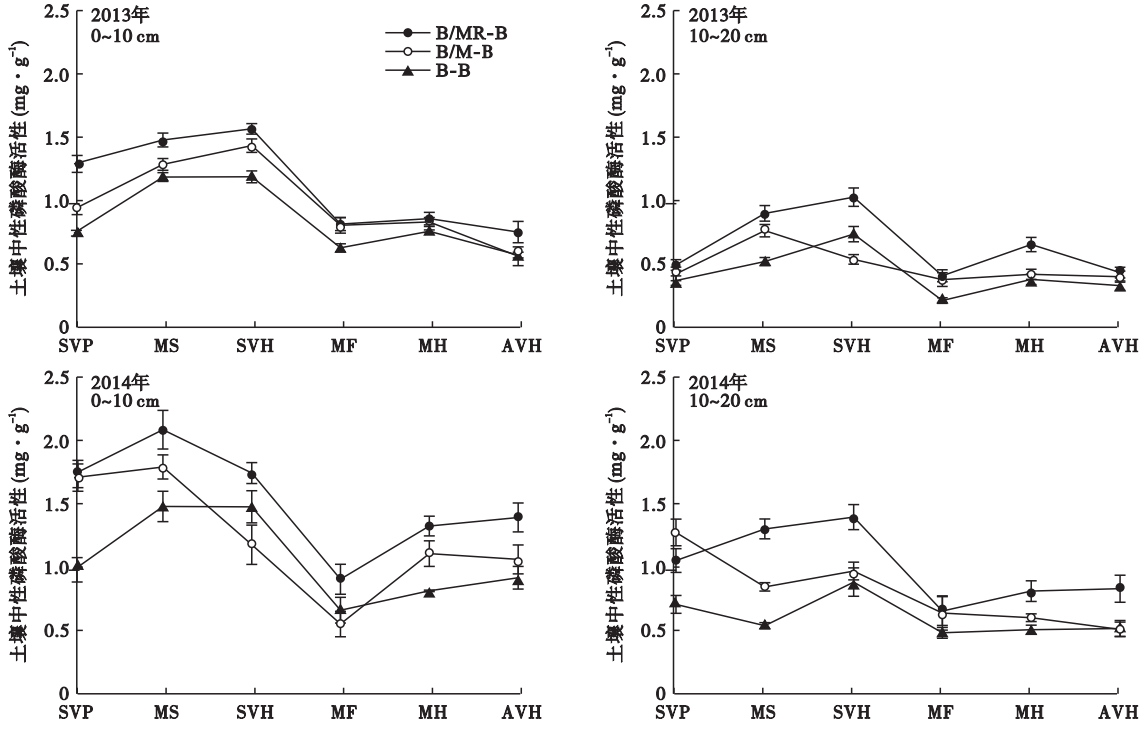


图 4 不同种植模式下土壤中性磷酸酶活性

Fig.4 Soil neutral phosphatase under different planting patterns

SVP、MS、SVH、MF、MH、AVH 分别表示春菜种植期、玉米苗期、春菜收获期、玉米开花期、玉米收获期、秋菜收获期。

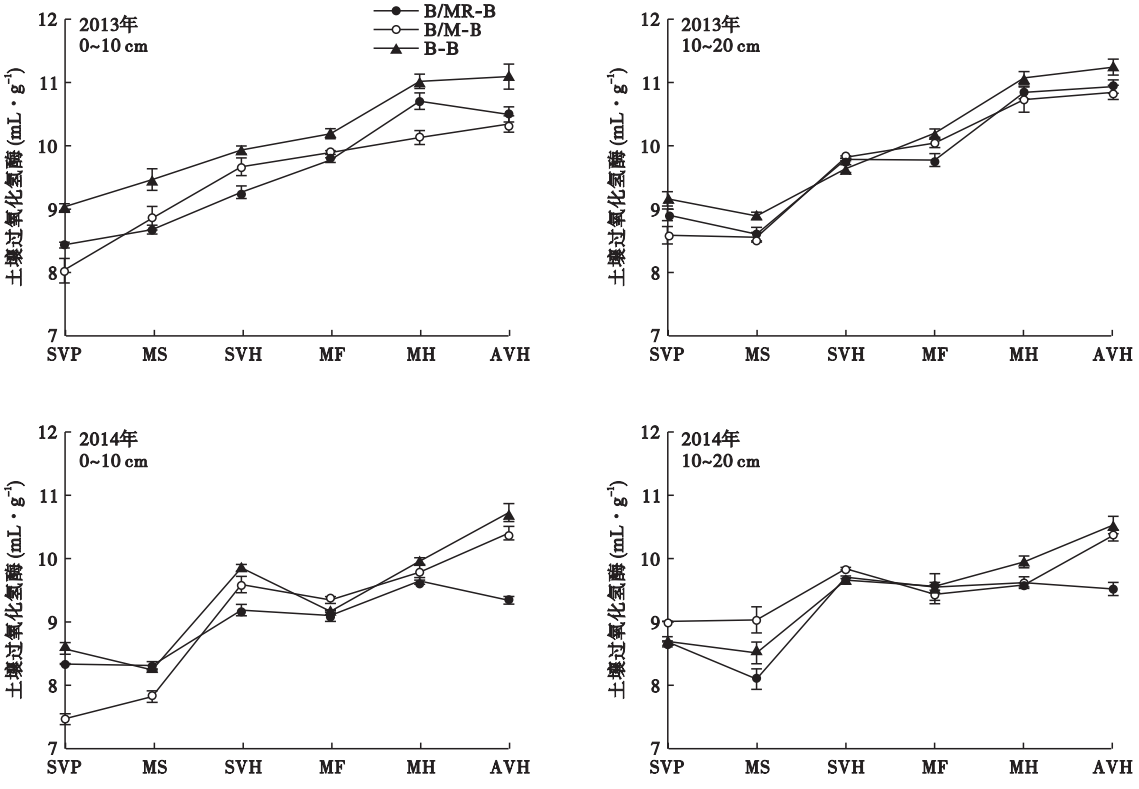


图 5 不同种植模式下土壤过氧化氢酶活性

Fig.5 Soil catalase activity under different planting patterns

SVP、MS、SVH、MF、MH、AVH 分别表示春菜种植期、玉米苗期、春菜收获期、玉米开花期、玉米收获期、秋菜收获期。

2.2.4 不同种植模式对土壤过氧化氢酶活性的影响

从图 5 可看出,2013 和 2014 年 0~10 cm 和 10~20 cm 土层过氧化氢酶活性整体表现为递增趋势,说明作物生育期间土壤中过氧化氢不断累积。2013 年 0~10 cm土层中 B-B 处理各个时期均显著高于 B/MR-B和 B/M-B,表明 B-B 处理下土壤中累积了较多的过氧化氢,从而影响作物的正常生长发育;玉米收获期、秋菜收获期和春菜种植期 B/MR-B 处理高于 B/M-B,考虑到 2012 年的秸秆还田的作用,说明秸秆还田在前期秸秆的腐解过程中使土壤中过氧化氢含量显著增高,从而导致土壤过氧化氢酶活性增高;10~20 cm 土层,除春菜收获期外 B-B 处理显著高于 B/MR-B 和 B/M-B,B/MR-B 和 B/M-B 之间差异不显著。2014 年 0~10 cm 土层除玉米苗期和玉米开花期外 B-B 处理高于 B/MR-B 和 B/M-B,除春菜种植期和玉米苗期外 B/M-B 处理高于 B/MR-B;玉米收获秸秆还田后,0~10 cm 和 10~20 cm 土层过氧化氢酶活性均显著降低。以上结果表明,套作并秸秆还田可有效减缓土壤中过氧化氢的累积。

2.3 微生物生物量碳、氮与土壤酶的相关性分析

由表 3 可看出,MBC 与脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶显著相关,与中性磷酸酶极显著相关;MBN 与脲酶、蔗糖酶、中性磷酸酶极显著正相关;MBN 与过氧化氢酶不相关,与杨敏芳等(2013)的研究结果一致。

表 3 土壤微生物量碳氮与土壤酶的相关性分析

Table 3 Correlation coefficient between soil microbial biomass and enzyme activities

	MBC	MBN	脲酶	蔗糖酶	中性磷酸酶
MBN	0.27*				
脲酶	0.28*	0.49**			
蔗糖酶	0.25*	0.47**	0.57**		
中性磷酸酶	0.34**	0.48**	0.42**	0.19	
过氧化氢酶	0.25*	−0.23	−0.06	0.12	−0.53**

*$P<0.05$; **$P<0.01$。

3 讨 论

本研究表明,套作玉米后西兰花连作田 MBC 得到显著的提升。套作可促进根系分泌物、作物残体和根系残留物在土壤中积累,为土壤的微生物提供更多的营养物质和能源物质,不断改善根际的营养状况,进而增加微生物的活性(戴建军等,2003;雍太文等,2011)。同时,套作也有效提高了 MBN,原

因除了两种作物的根系相互作用外,还可能是套作可以利用不同层次的土壤氮素,缓解同一土层氮素的过度消耗,从而提高土壤微生物对氮素的固持能力。秸秆还田具有很强的持水能力,可增加土壤含水量,进而改善土壤理化性状,促进微生物生长繁殖(路怡青等,2013)。秸秆还田可有效提高 MBC、MBN,与前人结果基本一致(王芸等,2006;贾伟等,2008)。其主要原因是,土壤微生物在对秸秆进行腐解的同时,其利用秸秆中的碳源物质大量进行繁殖,将秸秆中的碳同化为微生物量碳,同时从土壤中吸取部分氮素作为自身机体的组成部分,将土壤氮素同化为微生物体氮(王志明等,2003)。另外,MBC、MBN 在春菜收获期—玉米开花期达到最高,其主要原因有:1)春菜收获期前,玉米处于苗期到拔节期,生长缓慢,对土壤养分的吸收能力很弱;2)随着玉米的生长,春菜收获期—玉米开花期正是玉米和西兰花共生生物量最大阶段,二者根系分泌物增多,为微生物的活动增加了能源;3)随着气温的升高土壤温度上升,根系周围土壤微生物活性也迅速增强,土壤微生物对土壤中氮素固持加快,使土壤微生物生物量增加(井大炜等,2013)。随着生育进程的推进,各处理的 MBN 含量逐渐降低,表明一部分微生物生物量氮又被释放出来,以供玉米和秋季西兰花生长发育的需要,这反映出土壤微生物生物量氮是植物有效氮的重要储备以及在协调土壤氮素供应方面的重要作用(何振立,1997)。

土壤脲酶、磷酸酶和蔗糖酶作为 3 种不同水解酶参与高分子有机化合物的水解反应,对于丰富土壤中能被植物和微生物利用的可溶性营养物质有重要作用(刘建国等,2009)。本试验研究表明,套作处理有效提高了土壤脲酶、蔗糖酶和中性磷酸酶活性。这可能是两作物共生调节了根系的生理活动促进了根系分泌物和腐解物的作用,继而促进了土壤微生物活动,使土壤多种酶活性处于较高水平(Niemi *et al.*,2005;徐强等,2007),从而促进有机养分的转化和有效化,增强土壤的养分供应能力。本研究还表明,套作玉米并秸秆还田提高了土壤脲酶、蔗糖酶和中性磷酸酶活性。其原因可能是一方面秸秆还田能显著提高各类微生物的数量,尤其是细菌的数量,为微生物提供新的能源(刘更另等,1991);另一方面,秸秆本身也带入大量活的微生物,而土壤酶主要来自微生物和植物根系的分泌作用(徐国伟等,2009)。土壤过氧化氢酶能够促进土壤中过氧化氢的分解,避免其过量累积对生物体造成毒害。本研究中,过氧化氢酶活性整体表现出单作>套作不还田>套作还田,这与前人关于间套作和秸秆还田能够提升土壤过氧化氢酶活性的结论相反(徐国伟等,2009;慕平等,2011;张伟等,2011)。究其原因可能是,由于本试验田多年的套作与秸秆还田处理使土壤环境得到显著的改善,土壤中过氧化物累积明显减少,而蔬菜长年连作加剧了根系分泌和累积大量的过氧化物自毒物质,进而诱导土壤过氧化氢酶活性的升高来分解有毒过氧化氢。秸秆还田在前期提高了土壤过氧化氢酶活性,在后期土壤过氧化氢酶活性有所降低,这可能是因为秸秆直接还田腐熟程度较低,地表覆盖施入土壤后需要较长时间进行氧化发酵,造成了土壤中的低氧环境(曹仕明等,2002),胁迫西兰花根系分泌过氧化氢,进而促使过氧化氢酶活性提高。

本研究结果显示,MBC、MBN 与土壤脲酶、蔗糖酶、中性磷酸酶活性的相关性达显著或极显著水平。这是土壤肥力、土壤微生物与土壤酶协同发展的结果,土壤中营养物质的循环在很大程度上依赖微生物的活动以及土壤酶对底物的转化作用,而秸秆还田可促进微生物的大量繁殖,进而土壤酶活性增加(刘文娜等,2006;曹淑宝等,2012)。从以上 MBC、MBN 与土壤酶活性的相关性分析结果来看,MBC、MBN 和土壤酶活性能很好地反映土壤肥力状况,可以作为有效评价土壤质量的生物学指标。

本研究结果还表明,0~10 cm 土层中的 MBC、MBN 和酶活性均要高于 10~20 cm 土层,出现这种表层富集现象的原因可能是:表层土壤可以更好地与外界进行物质和能量的交换,随着土层的加深,土壤状况趋向不利于微生物活动和繁殖,从而酶活性降低(Taylor *et al.*,2002;刘建国等,2008)。无论是土壤酶活性还是 MBC、MBN 在各土层处理间的动态变化趋势基本一致,说明秸秆还田和套作处理影响某时期土壤酶活性或 MBC、MBN,但对其在一年内的变化趋势影响不大,其变化趋势可能还受到管理措施、气候、土壤类型等因素的影响。因此,对它们之间的关系及其对土壤的可持续发展的影响还需进一步研究。

参考文献

曹仕明, 廖 浩, 张 翼, 等. 2002. 施用腐熟秸秆肥对烤烟根系土壤微生物和酶活性的影响. 中国烟草学报, **20**

(2): 75-79.
曹淑宝, 刘全伟, 王立群, 等. 2012. 短期放牧对草甸草原土壤微生物与土壤酶活性的影响. 微生物学通报, **39**(6): 741-748.
戴建军, 宋朋慧, 闰暮春, 等. 2003. 不同种植方式对苗期大豆、玉米根际土壤酶活性及微生物量碳、氮的影响. 东北农业大学学报, **44**(2): 17-22.
斐鹏刚, 张均华, 朱练峰, 等. 2014. 秸秆还田的土壤酶学及微生物学效应研究进展. 中国农学通报, **30**(18): 1-7.
谷 岩, 邱 强, 王振民, 等. 2012. 连作大豆根际微生物群落结构及土壤酶活性. 中国农业科学, **45**(19): 3955-3964.
关松荫. 1986. 土壤酶及研究方法. 北京: 农业出版社.
何振立. 1997. 土壤微生物量及其在养分循环和环境质量评价中的意义. 土壤, (2): 61-69.
贾 伟, 周怀平, 解文艳, 等. 2008. 长期秸秆还田秋施肥对褐土微生物碳、氮量和酶活性的影响. 华北农学报, **23**(2): 138-142.
井大炜, 邢尚军. 2013. 鸡粪与化肥不同配比对杨树苗根际土壤酶和微生物量碳、氮变化的影响. 植物营养与肥料学报, **12**(3): 455-461.
刘更另, 金维续. 1991. 中国有机肥料. 北京: 中国农业出版社.
刘建国, 卞新民, 李彦斌, 等. 2008. 长期连作和秸秆还田对棉田土壤生物活性的影响. 应用生态学报, **19**(5): 1027-1032.
刘建国, 张 伟, 李彦斌, 等. 2009. 新疆绿洲棉花长期连作对土壤理化性状与土壤酶活性的影响. 中国农业科学, **42**(2): 725-733.
刘文娜, 吴文良, 王秀斌, 等. 2006. 不同土壤类型和农业用地方式对土壤微生物量碳的影响. 植物营养与肥料学报, **12**(3): 406-411.
路怡青, 朱安宁, 张佳宝, 等. 2013. 免耕和秸秆还田对潮土酶活性及微生物量碳氮的影响. 土壤, **45**(5): 894-898.
慕 平, 张恩和, 王汉宁, 等. 2011. 连续多年秸秆还田对玉米耕层土壤理化性状及微生物量的影响. 水土保持学报, **25**(5): 81-85.
苏世鸣, 任丽轩, 霍振华, 等. 2008. 西瓜与旱作水稻间作改善西瓜连作障碍及对土壤微生物区系的影响. 中国农业科学, **41**(3): 704-712.
王 芸, 韩 宾, 史忠强, 等. 2006. 保护性耕作对土壤微生物特性及酶活性的影响. 水土保持学报, **20**(4): 120-122.
王田涛. 2013. 间套种植对当归连作障碍的修复机理(硕士学位论文). 兰州: 甘肃农业大学.
王志明, 朱培立, 黄东迈, 等. 2003. 秸秆碳的田间原位分解和微生物量碳的周转特征. 土壤学报, **40**(3): 446-453.
吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 2006. 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 北京: 气象出版社.
肖雪梅. 2013. 套作大蒜或青蒜消减大棚黄瓜连作障碍的效果及机理研究(硕士学位论文). 杨陵: 西北农林科技大学.
徐 强, 程智慧, 孟焕文, 等. 2007. 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. 应用生态学报, **18**(12): 2747-2754.
徐国伟, 段 骅, 王志琴, 等. 2009. 麦秸还田对土壤理化性质及酶活性的影响. 中国农业科学, **42**(3): 934-942.
杨敏芳, 朱利群, 韩新忠, 等. 2013. 耕作措施与秸秆还田对稻麦两熟制农田土壤养分、微生物生物量及酶活性的影响. 水土保持学报, **27**(2): 272-281.
雍太文, 杨文钰, 向达兵, 等. 2011. 不同种植模式对土壤氮素转化及酶活性的影响. 应用生态学报, **22**(12): 3227-3235.
张 伟, 龚久平, 刘建国. 2011. 秸秆还田对连作棉田土壤酶活性的影响. 生态环境学报, **20**(5): 881-885.
张洁莹. 2013. 间套作模式与秸秆还田对菜田连作障碍的减缓效果及机理(硕士学位论文). 泰安: 山东农业大学.
仲惟磊. 2011. 玉米蔬菜不同间套模式对菜田土壤特性影响的研究(硕士学位论文). 泰安: 山东农业大学.
朱丽霞, 章家恩, 刘文高. 2003. 根系分泌物与根际微生物相互作用研究综述. 生态环境, **12**(1): 102-105.
庄 岩, 吴凤芝, 杨 阳, 等. 2009. 轮套作对黄瓜土壤微生物多样性及产量的影响. 中国农业科学, **42**(1): 204-209.
Frankenberger WT, Dick WA. 1983. Relationship between enzyme activities and microbial growth and activity indices in soil. *Soil Science Society of America Journal*, **47**: 945-951.
Mijangos I, Pérez R, Albizu I, *et al*. 2006. Effects of fertilization and tillage soil biological parameters. *Enzyme and Microbial Technology*, **40**: 100-106.
Niemi RM, Vepsalainen M, Wallenius K, *et al*. 2005. Temporal and soil depth-related variation in soil enzyme activities and in root growth of red clover (*Trifolium pratense*) and timothy (*Phleum pratense*) in the field. *Applied Soil Ecology*, **30**: 113-125.
Shukla G, Varma A. 2011. Soil Enzymology. New York: Springer.
Taylor JP, Wilson B, Mills MS, *et al*. 2002. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and sub-soils using various techniques. *Soil Biology and Biochemistry*, **34**: 387-401.

作者简介 张学鹏,1988 年生,硕士研究生,主要研究方向为农业生态学。E-mail: zhangxuepeng22@163.com
责任编辑 魏中青