

# 不同施肥模式对设施菜田土壤酶活性的影响

王文锋<sup>1</sup> 李春花<sup>1</sup> 黄绍文<sup>\*</sup> 高伟<sup>2</sup> 唐继伟<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部植物营养与肥料重点实验室, 北京 100081; <sup>2</sup>天津市农业资源与环境研究所, 天津 300192)

**摘要** 利用天津日光温室蔬菜不同施肥模式定位试验,研究了6种施肥模式对设施菜田土壤酶活性的影响.结果表明:番茄生育期间不同施肥模式土壤 $\alpha$ -葡萄糖苷酶、 $\beta$ -木糖苷酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、 $\beta$ -纤维二糖苷酶、几丁质酶和磷酸酶的活性总体上均呈先增后降的趋势,土壤脲酶活性呈先增高后趋于平缓的趋势.与全部施用化肥氮相比,5种有机无机肥料配施模式土壤酶活性均有所提升,且随猪粪施用量的增加,尤其是配施秸秆条件下,土壤酶活性显著增加.番茄各生育期土壤酶活性与土壤微生物生物量碳、氮和可溶性有机碳、氮之间总体上呈显著或极显著正相关关系.同等养分投入量下,有机无机肥配施,特别是配施一定的秸秆可有效提高设施菜田土壤酶活性,维持较高的菜田土壤肥力,有利于设施蔬菜的可持续生产.

**关键词** 不同施肥模式; 设施菜田; 土壤酶活性

**Effects of different fertilization patterns on soil enzyme activities in greenhouse vegetable field.** WANG Wen-feng<sup>1</sup>, LI Chun-hua<sup>1</sup>, HUANG Shao-wen<sup>1\*</sup>, GAO Wei<sup>2</sup>, TANG Ji-wei<sup>1</sup> (<sup>1</sup>*Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China;* <sup>2</sup>*Tianjin Institute of Agricultural Resources and Environment, Tianjin 300192, China*).

**Abstract:** A fixed-site greenhouse vegetable fertilization experiment was carried out to study effects of 6 fertilization patterns on soil enzyme activities in Tianjin City, Northern China. The results showed that during the growing stages of tomato, activities of soil  $\alpha$ -glucosidase,  $\beta$ -xylosidase,  $\beta$ -glucosidase,  $\beta$ -cellobiosidase, chitinase and phosphatase in different treatments all increased first and then decreased, while soil urease activities increased first and then became flat. Compared with the chemical nitrogen fertilizer treatment, soil enzyme activities were much higher in treatments of combined application of organic materials with chemical fertilizers, and rose with the increasing input of pig manure and especially the application of straw. A significant positive correlation was found between soil enzyme activities, microbial biomass carbon (MBC), microbial biomass nitrogen (MBN), and dissolved organic carbon (DOC) and dissolved organic nitrogen (DON) contents at different growing stages of tomato. Under the condition of same nutrient input, the combined application of inorganic fertilizers with organic materials, especially a certain amount of corn straw, was capable of increasing soil enzyme activities and keeping soil fertility and sustainability in greenhouse vegetable production.

**Key words:** fertilization pattern; greenhouse vegetable; soil enzyme activities.

设施蔬菜生产能够打破传统蔬菜生产受季节性和地域性限制的不足,在解决我国北方地区冬淡季

蔬菜供应、增加农民收入方面具有积极意义<sup>[1]</sup>.但设施菜田过量施肥现象非常普遍<sup>[2-4]</sup>,导致了一系列土壤问题<sup>[5-6]</sup>.土壤酶参与了土壤中所有的生化反应<sup>[7]</sup>,是土壤有机质分解和养分循环的主要生物学机制<sup>[8-9]</sup>,其活性反映了土壤中各种生物化学过程的方向和强度<sup>[10]</sup>,并受土壤理化性质的显著影响<sup>[11]</sup>,可以作为土壤肥力和质量的敏感指标<sup>[12-13]</sup>.

本文由现代农业产业技术体系建设专项(CARS-25-C-11)和公益性行业(农业)科研专项(201203095)资助 This work was supported by the China Agriculture Research System (CARS-25-C-11) and the Special Fund for Agro-Scientific Research in the Public Interest, China (201203095).

2015-09-08 Received, 2015-12-24 Accepted.

\*通讯作者 Corresponding author. E-mail: huangshaowen@caas.cn

通过土壤酶活性来评价不同农艺措施对设施菜田土壤肥力和健康的影响已成为近几年研究的热点.已有研究在栽培制度、栽培方式、种植年限、作物残茬等对土壤酶活性的影响方面有一些报道.研究表明,设施蔬菜轮作土壤酶活性显著高于连作土壤<sup>[14]</sup>,蔬菜套作<sup>[15]</sup>和施加作物残茬<sup>[16-17]</sup>也是增强设施菜田土壤酶活性的有效措施,随蔬菜种植年限的延长,不同土壤酶活性变化并不一致<sup>[18-20]</sup>.土壤  $\alpha$ -葡萄糖苷酶、 $\beta$ -木糖苷酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、 $\beta$ -纤维二糖苷酶、几丁质酶、脲酶和磷酸酶是土壤有机质降解和碳、氮、磷等养分转化相关的重要酶类<sup>[21]</sup>,通过测定其活性,可以了解土壤养分供应和肥力状况.但是,目前关于不同施肥模式对设施菜田土壤酶活性影响方面的研究少见报道.本文利用日光温室蔬菜不同施肥模式定位试验,研究蔬菜生育周期内不同施肥模式土壤酶活性动态变化特征及其与土壤微生物生物量碳、氮和可溶性有机碳、氮之间的关系,以期寻求经济节约、高效合理的施肥模式,为实现设施蔬菜生产的可持续发展提供依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

定位试验地点位于天津市西青区辛口镇第六埠村,试验区域属暖温带半湿润大陆性气候,全年平均温度为 11.6 ℃,全年日照总量为 2810 h,全年无霜期为 203 d,自然降水总量为 586 mm.供试日光温室东西走向,长 80 m、宽 6.5 m(含 0.5 m 通道),前部有通风口,白天适时敞开通风,夜间或降雨时关闭.

供试土壤类型为中壤质潮土,地下水埋深为 1 m.定位试验于 2009 年 10 月开始(定位试验开始时棚龄为 7 年),种植制度为春茬番茄-秋冬茬芹菜轮作,试验开始前 0~20 cm 耕层土壤基本性质为:有机质 25.4 g·kg<sup>-1</sup>,硝态氮 186.2 mg·kg<sup>-1</sup>,速效磷 144.6 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 404.0 mg·kg<sup>-1</sup>,pH 7.9.供试芹菜(*Apium graveolens*)品种为‘文图拉’,番茄(*Lycopersicon esculentum*)品种为‘朝研 299’.

1.2 试验设计

定位试验共设 6 个处理,分别为:1)全部施用化肥氮(4/4CN);2)3/4 化肥氮+1/4 猪粪氮(3/4CN+1/4PN);3)2/4 化肥氮+2/4 猪粪氮(2/4CN+2/4PN);4)1/4 化肥氮+3/4 猪粪氮(1/4CN+3/4PN);5)2/4 化肥氮+1/4 猪粪氮+1/4 秸秆氮(2/4CN+1/4PN+1/4SN);6)2/4 化肥氮+2/4 秸秆氮(2/4CN+2/4SN),所有处理氮、磷、钾量相同.番茄和芹菜按推荐量施肥,番茄茬施用的 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 总量分别为 450、225 和 600 kg·hm<sup>-2</sup>,芹菜茬 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 总量分别为 450、300 和 600 kg·hm<sup>-2</sup>.春茬番茄和秋冬茬芹菜各处理的具体氮和碳投入量见表 1.每个处理 3 次重复,随机排列.试验小区面积 14.4 m<sup>2</sup>(宽 2.4 m×长 6.0 m),番茄株、行距分别为 0.3 和 0.6 m,种植密度为 25000 株·hm<sup>-2</sup>;芹菜株、行距分别为 0.20 m 和 0.15 m,种植密度为 330570 株·hm<sup>-2</sup>.小区间埋设 PVC 板(深度 105 cm;100 cm 地下,5 cm 地上;厚度 4 mm),防止小区之间养分和水分的横向迁移.

有机肥全部基施.化肥除部分基施外,其余部分

表 1 试验处理及氮、碳投入量  
Table 1 Treatments and the corresponding N and C inputs (kg·hm<sup>-2</sup>)

生长季 Growth stage	处理 Treatment	氮投入量 N input				碳投入量 C input		
		CN	PN	SN	合计 Total N	PC	SC	合计 Total C
番茄 Tomato	I	450	0	0	450	0	0	0
	II	337.5	112.5	0	450	1130	0	1130
	III	225.0	225.0	0	450	2260	0	2260
	IV	112.5	337.5	0	450	3391	0	3391
	V	225.0	112.5	112.5	450	1130	4618	5748
	VI	225.0	0	225.0	450	0	9236	9236
芹菜 Celery	I	450.0	0	0	450	0	0	0
	II	337.5	112.5	0	450	1130	0	1130
	III	225.0	225.0	0	450	2260	0	2260
	IV	112.5	337.5	0	450	3391	0	3391
	V	225.0	112.5	112.5	450	1130	4618	5748
	VI	225.0	0	225.0	450	0	9236	9236

CN: 化肥氮 Nitrogen in chemical fertilizer; PN: 猪粪氮 Nitrogen in pig manure; SN: 玉米秸秆氮 Nitrogen in corn straw; PC: 猪粪碳 Pig manure C; SC: 玉米秸秆碳 Corn straw C. I: 4/4CN; II: 3/4CN+1/4PN; III: 2/4CN+2/4PN; IV: 1/4CN+3/4PN; V: 2/4CN+1/4PN+1/4SN; VI: 2/4CN+2/4SN.

作追肥施用。番茄季处理 1~6 所用化肥中, 20% 的氮肥、70% 的磷肥和 20% 的钾肥作基肥, 其余的氮肥和钾肥分别在番茄开花期、第一穗果膨大期、第二穗果膨大期和第三穗果膨大期分 4 次追施, 其中氮肥的追施比例分别为 30%、30%、10% 和 10%, 钾肥的追施比例分别为 10%、30%、30% 和 10%, 剩余的磷肥分别在第一次追肥和第二次追肥各施入 15%。芹菜季处理 1~6 所用化肥中, 20% 的氮肥、70% 的磷肥和 20% 的钾肥基肥, 其余氮肥和钾肥在芹菜 5~6 叶期、8~9 叶期和 11~12 叶期分 3 次追施, 其中氮肥的追施比例分别为 35%、35% 和 10%, 钾肥的追施比例分别为 10%、35% 和 35%, 剩余的磷肥在第一次追肥时全部施入。

定位试验所施用的化肥为尿素 (含 N 46%)、过磷酸钙 (含  $P_2O_5$  12%)、磷酸二铵 (含 N 18%, 含  $P_2O_5$  46%)、氯化钾 (含  $K_2O$  60%)、磷酸二氢钾 (含  $P_2O_5$  52%, 含  $K_2O$  34%)。所用商品猪粪中 N、 $P_2O_5$ 、 $K_2O$  和 C 的含量分别为  $2.17\% \pm 0.13\%$ 、 $1.39\% \pm 0.14\%$ 、 $1.63\% \pm 0.19\%$  和  $(218.0 \pm 5.0) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  (干基), 猪粪的水分含量为  $28.9\% \pm 4.6\%$ ; 所用秸秆中 N、 $P_2O_5$ 、 $K_2O$  和 C 的含量分别为  $1.04\% \pm 0.10\%$ 、 $0.32\% \pm 0.08\%$ 、 $1.69\% \pm 0.17\%$  和  $(426.9 \pm 8.2) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  (干基), 秸秆的水分含量为  $64.9\% \pm 6.4\%$ 。根据猪粪和秸秆 N 含量及含水量确定其施用量,  $P_2O_5$  和  $K_2O$  缺失部分由化肥补足。

基肥方式为肥料撒施后旋耕入土, 追肥方式为肥料溶于水后随水冲施。处理 1~6 是依据田间持水量进行灌溉, 当田间持水量低于 60% 时进行灌溉。为保证灌水量的准确, 每个小区均安装有单独的 PVC 进水管, 并用水表记录灌水量。各处理番茄季和芹菜季灌水总量分别为 3889 和 3334  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

### 1.3 土壤样品采集及测定方法

第 10 茬蔬菜 (春茬番茄) 生育期间, 分别于 2014 年 1 月 26 日 (番茄施基肥前)、2 月 21 日 (番茄定植后 20 d)、3 月 12 日 (番茄定植后 40 d)、4 月 2 日 (番茄定植后 60 d)、4 月 22 日 (番茄定植后 80 d)、5 月 12 日 (番茄定植后 100 d) 及 6 月 3 日 (番茄定植后 120 d, 拉秧期) 采集土壤样品。取样方法是在每个小区内按 S 形布设 10 个点, 用不锈钢土钻采取 0~20 cm 土壤样品, 立即剔除石砾和植物残根等杂物, 混合均匀, 迅速过 2 mm 筛后, 取一部分于  $-20^\circ\text{C}$  冰箱内保存, 用于土壤酶活性的测定; 另取一部分于  $4^\circ\text{C}$  冰箱内保存, 用于土壤微生物生物量碳、氮和可溶性有机碳、氮含量的测定; 剩余部分风干, 过筛,

用于常规养分指标测定。

土壤  $\alpha$ -葡萄糖苷酶、 $\beta$ -木糖苷酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、 $\beta$ -纤维二糖苷酶、几丁质酶和磷酸酶活性采用荧光微型版检测技术测定<sup>[9,22-23]</sup>。土壤脲酶采用靛酚蓝比色法测定<sup>[24]</sup>, 脲酶活性用  $38^\circ\text{C}$  培养 3 h 后单位土质量  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的毫克数表示。

土壤微生物生物量碳采用熏蒸提取-容量分析法测定, 土壤微生物生物量氮采用熏蒸提取后凯氏定氮法测定<sup>[25]</sup>。土壤可溶性有机碳采用  $\text{K}_2\text{SO}_4$  提取后高温外热重铬酸钾氧化法测定; 可溶性有机氮按 Zhong 等<sup>[26]</sup>的方法测定: 可溶性有机氮含量 =  $\text{K}_2\text{SO}_4$  浸提总氮含量 - 土壤矿质态氮 ( $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{NO}_3^--\text{N}$ ) 含量。

### 1.4 数据处理

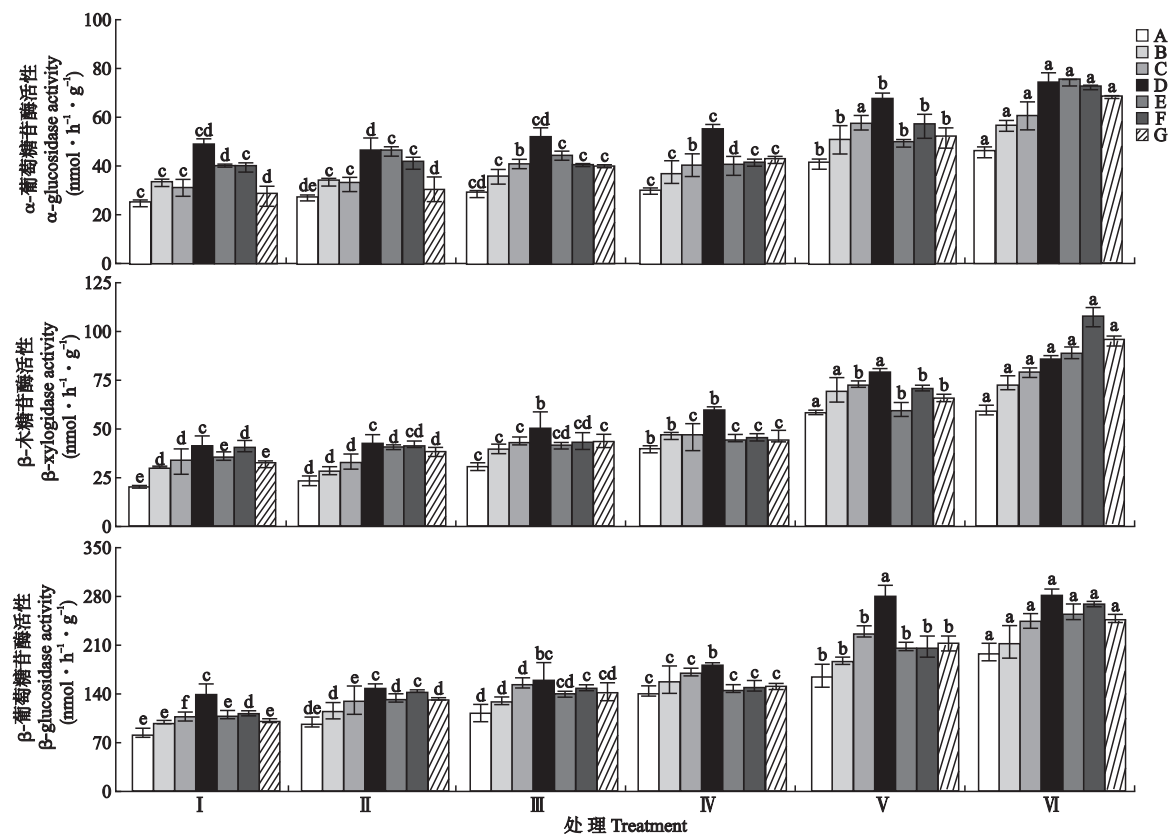
数据采用 Microsoft Excel 2010 和 SAS 8.0 统计软件进行分析。采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和最小差异差数法 (LSD) 进行差异显著性分析, 显著性水平设定为  $\alpha = 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 番茄生育期间不同施肥模式土壤酶活性动态变化特征

由图 1 和图 2 可以看出, 番茄生育期间不同施肥模式土壤  $\alpha$ -葡萄糖苷酶、 $\beta$ -木糖苷酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、 $\beta$ -纤维二糖苷酶和几丁质酶的活性总体上均呈先增后降的趋势, 且较高土壤酶活性均出现在番茄定植后 60 d, 依次分别为 57.4、60.0、199.3、48.3 和 33.2  $\text{nmol} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ; 土壤磷酸酶活性总体上也呈先增后降的趋势, 较高土壤酶活性出现在番茄定植后 100 d, 为 609.2  $\text{nmol} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ; 土壤脲酶活性总体上呈先增高后趋于平缓的趋势。

番茄生育期间各取样时期有机无机肥料配施模式的土壤  $\alpha$ -葡萄糖苷酶、 $\beta$ -木糖苷酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、 $\beta$ -纤维二糖苷酶、几丁质酶、磷酸酶、脲酶等酶活性均高于单施化肥模式, 其中以配施秸秆模式的土壤酶活性相对较高。有机无机肥料配施模式 3/4CN+1/4PN、2/4CN+2/4PN、1/4CN+3/4PN、2/4CN+1/4PN+1/4SN 和 2/4CN+2/4SN 土壤中,  $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性较 4/4CN 模式平均分别增加 4.1%、14.1%、16.2%、51.1% 和 83.4%;  $\beta$ -木糖苷酶活性平均分别增加 7.3%、26.9%、40.9%、106.5% 和 155.7%;  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性平均分别增加 20.0%、30.6%、46.8%、98.8% 和 128.3%;  $\beta$ -纤维二糖苷酶活性平均分别增加 23.5%、45.9%、75.7%、186.9% 和 242.6%; 几丁质酶



**图 1** 番茄生育期间不同施肥模式土壤  $\alpha$ -葡萄糖苷酶、 $\beta$ -木糖苷酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶活性动态的变化

**Fig.1** Dynamics of soil  $\alpha$ -glucosidase,  $\beta$ -xylosidase and  $\beta$ -glucosidase activities under different fertilization patterns during growth period of tomato.

A: 施基肥前 Before basal fertilization; B: 定植后 20 d 20 days after transplanting; C: 定植后 40 d 40 days after transplanting; D: 定植后 60 d 60 days after transplanting; E: 定植后 80 d 80 days after transplanting; F: 定植后 100 d 100 days after transplanting; G: 定植后 120 d 120 days after transplanting. I: 4/4CN; II: 3/4CN+1/4PN; III: 2/4CN+2/4PN; IV: 1/4CN+3/4PN; V: 2/4CN+1/4PN+1/4SN; VI: 2/4CN+2/4SN. 不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ ). Different small letters meant significant difference among treatments in the same growth period at 0.05 level. 下同 The same below.

活性平均分别提高 22.4%、58.7%、82.1%、178.3%和 248.9%;土壤脲酶活性平均分别增加 7.4%、14.4%、23.7%、41.8%和 58.0%;土壤磷酸酶活性平均分别增加 16.2%、33.0%、47.9%、60.5%和 78.9%。

随着猪粪用量的增加,土壤酶活性总体上均呈增加的趋势.与低量配施猪粪模式 3/4CN+1/4PN 相比,中量配施猪粪模式 2/4CN+2/4PN 和高量配施猪粪模式 1/4CN+3/4PN 土壤  $\alpha$ -葡萄糖苷酶、 $\beta$ -木糖苷酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、 $\beta$ -纤维二糖苷酶、几丁质酶、磷酸酶、脲酶等 7 种酶活性依次分别增加 9.5% 和 11.4%、18.3%和 31.4%、8.9%和 22.4%、18.1%和 42.1%、29.8%和 49.0%、7.5%和 16.3%。

配施秸秆模式土壤酶活性均高于配施猪粪模式.与高量配施猪粪模式 1/4CN+3/4PN 相比,配施秸秆模式 (2/4CN+1/4PN+1/4SN 和 2/4CN+2/4SN) 土壤中以上 7 种酶活性依次增加 30.3%和 57.8%、46.7%和 81.6%、35.4%和 55.5%、63.1%和

94.8%、52.7%和 91.5%、8.5%和 20.9%、4.9%和 28.1%。

**2.2 土壤酶活性与土壤微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳、氮含量的关系**

番茄不同取样时间土壤微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳、氮含量如表 2 所示.番茄生育期间不同取样时期土壤微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳、氮含量总体上均呈先增后降的变化趋势.与单施化肥相比,有机无机肥料配施模式,尤其是配施秸秆模式土壤微生物生物量碳、氮和可溶性有机碳、氮含量显著提高。

相关性分析表明 (表 3),番茄生育期间各取样时间不同土壤  $\alpha$ -葡萄糖苷酶、 $\beta$ -木糖苷酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、 $\beta$ -纤维二糖苷酶、几丁质酶、脲酶、磷酸酶等 7 种酶活性与土壤微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳之间均呈极显著正相关关系.土壤酶活性与土壤可溶性有机氮之间也具有很好的相关性,除番茄定植



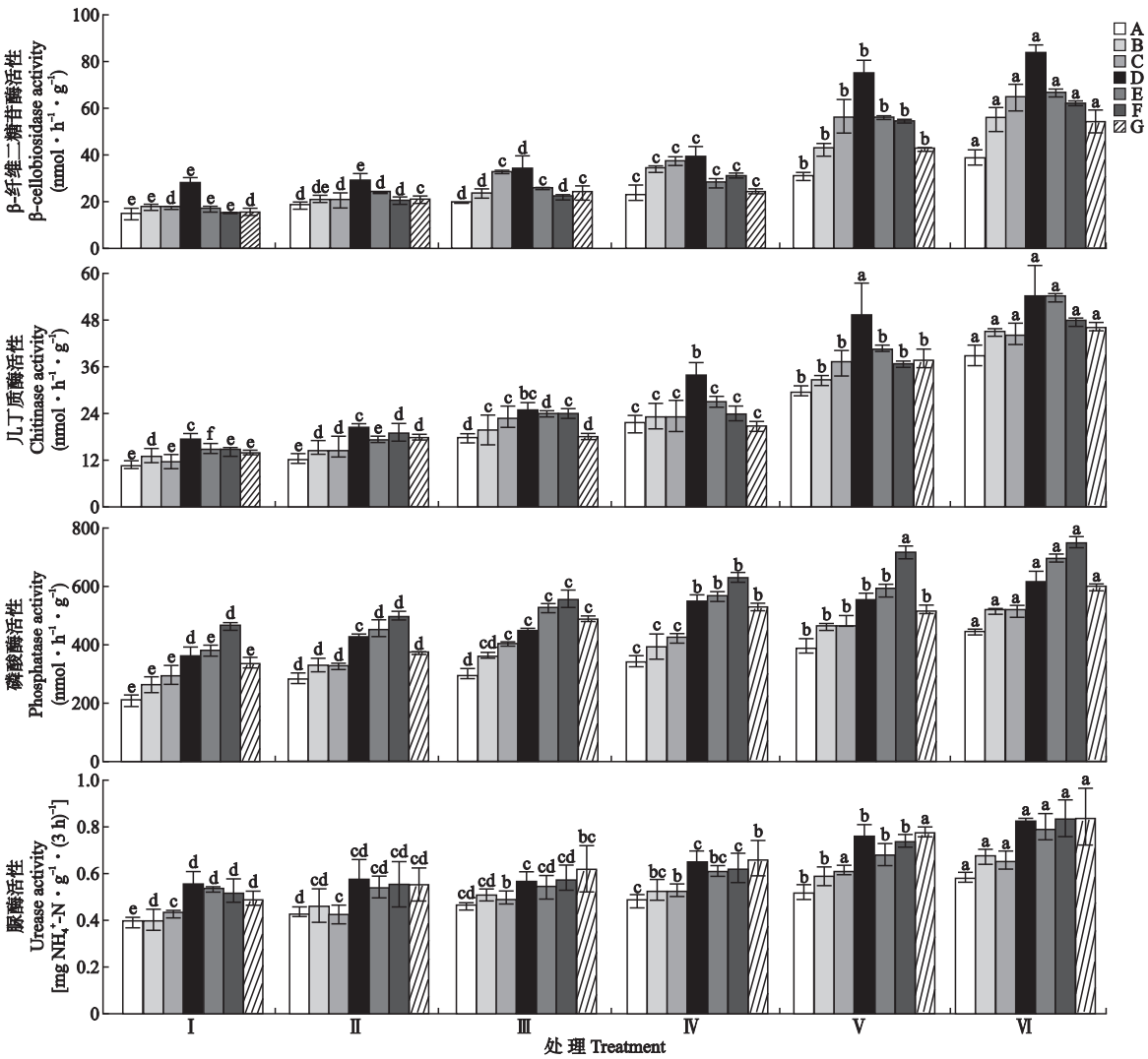


图2 番茄生育期间不同施肥模式土壤  $\beta$ -纤维二糖苷酶、几丁质酶、磷酸酶和脲酶活性的动态变化  
Fig.2 Dynamics of soil  $\beta$ -cellobiosidase, chitinase, phosphatase and urease activities under different fertilization patterns during growth period of tomato.

后 100 d 外,其他各取样时期 7 种土壤酶活性与土壤可溶性有机氮之间总体上均呈显著或极显著正相关关系。

### 3 讨 论

#### 3.1 不同施肥模式对设施菜田土壤酶活性的影响

有机无机肥料配施模式较单施化肥模式可显著提高设施菜田土壤酶活性,其中以配施秸秆模式土壤酶活性较高.本研究中,第 10 茬蔬菜(设施春茬番茄)生育期间,有机无机肥料配施模式(3/4CN+1/4PN、2/4CN+2/4PN、1/4CN+3/4PN、2/4CN+1/4PN+1/4SN 和 2/4CN+2/4SN)土壤  $\alpha$ -葡萄糖苷酶、 $\beta$ -木糖苷酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、 $\beta$ -纤维二糖苷酶、几丁质酶、脲酶和磷酸酶活性较单施化肥模式(4/4CN)均有不同

程度的提高,且随猪粪用量的增加,尤其是配施秸秆处理土壤酶活性显著增加.与单施化肥相比,有机无机肥料配施模式能显著提高土壤中有机质的含量<sup>[27-29]</sup>,而土壤有机质不仅是土壤中酶促底物的主要供源<sup>[30]</sup>,还可以作为土壤酶的有机载体,保持土壤酶的活性和稳定性<sup>[13, 31-32]</sup>.许多研究表明,土壤酶活性与土壤有机质含量呈显著正相关<sup>[33-34]</sup>.此外,有机无机肥料配施还能显著增加土壤微生物生物量碳、氮<sup>[35]</sup>,提高土壤微生物群落结构多样性和活性<sup>[36]</sup>,从而间接地促进土壤酶活性的提高.单施化肥则导致土壤无机养分升高,抑制土壤酶的产生<sup>[37]</sup>,长期施用还可能导致土壤板结、容重增加、土壤酸化和盐渍化等问题<sup>[38]</sup>,使土壤酶活性降低.所以,有机无机肥料配施模式土壤酶活性显著高于单

表 2 番茄生育期间不同施肥模式土壤微生物生物量碳、氮和可溶性有机碳、氮含量  
Table 2 Soil microbial biomass carbon and nitrogen, dissolved organic carbon and nitrogen contents under different fertilization patterns during growth period of tomato (mean±SD, mg · kg<sup>-1</sup>)

项目 Item	处理 Treatment	施基肥前 Before basal fertilizer application	定植后天数 Days after transplanting					
			20	40	60	80	100	120
MBC	I	110.5±9.1e	132.3±8.3d	164.8±21.2c	135.4±9.1d	189.2±49.1c	118.6±24.9b	111.7±1.6b
	II	120.7±4.3e	202.0±37.5c	195.2±21.9bc	150.4±43.5cd	186.4±45.1c	132.5±10.3ab	137.8±19.9ab
	III	152.1±11.0d	190.4±40.5c	186.4±12.2bc	187.2±11.3bcd	201.1±11.8bc	148.6±9.5ab	139.1±32.7ab
	IV	195.2±16.0c	231.9±18.8bc	267.5±22.8a	196.6±6.8bc	259.5±31.2ab	151.2±41.2ab	159.4±57.5a
	V	232.9±8.9b	281.3±15.3b	226.0±20.6ab	234.4±33.3ab	256.9±17.6ab	161.5±8.1a	160.1±10.5ab
	VI	286.7±6.8a	338.0±35.1a	267.7±41.5a	272.1±45.7a	281.2±55.5a	162.1±19.7a	191.0±46.8a
MBN	I	20.1±1.9e	22.3±1.7d	26.9±2.9c	38.6±5.5c	28.1±4.1c	24.9±3.3c	23.8±6.1c
	II	25.5±2.4d	28.0±4.1cd	35.8±16.0c	39.1±6.4c	30.1±8.1bc	26.0±0.8c	31.7±7.2c
	III	27.2±3.6cd	29.4±2.4cd	47.0±1.6b	53.4±3.2b	33.3±5.8bc	26.2±3.0c	45.3±0.4b
	IV	33.3±4.0bc	38.1±13.8bc	49.4±3.4b	49.0±5.7b	36.1±2.4bc	32.4±5.1bc	50.5±8.5b
	V	36.6±5.7ab	46.4±9.6ab	48.5±1.4b	66.8±2.9a	38.5±3.9b	39.4±6.9ab	52.7±2.1b
	VI	43.1±6.3a	52.6±5.8a	57.2±4.4a	68.8±4.7a	48.2±4.4a	50.1±11.8a	66.1±9.7a
DOC	I	28.1±3.8b	41.2±2.6d	45.2±2.0d	51.5±6.2d.	52.5±9.8d	46.2±8.7d	30.8±0.4c
	II	33.8±3.9b	46.4±10.6d	48.4±3.9d	49.4±3.8d	59.3±3.9cd	53.3±2.7cd	40.4±2.0b
	III	34.7±2.3b	61.7±4.6c	63.0±4.0c	66.7±2.6c	68.3±6.2cd	66.5±5.9b	41.4±0.9b
	IV	53.1±0.9a	62.2±6.4c	66.3±1.4c	67.4±3.6c	75.0±9.4bc	53.8±4.6cd	58.1±4.7a
	V	54.0±7.2a	74.4±4.9b	77.3±2.3b	83.9±3.9b	87.2±6.3b	64.3±2.8bc	60.7±3.6a
	VI	56.1±4.6a	86.9±6.6a	91.3±2.5a	93.9±2.8a	106.4±15.8a	106.9±6.9a	60.8±1.2a
DON	I	6.6±0.9c	8.1±0.3c	13.5±0.9b	11.7±2.5c	14.5±3.8c	14.3±1.9a	16.4±3.0a
	II	7.7±0.8c	7.8±0.8c	14.7±0.7b	13.2±0.4c	16.0±2.7bc	15.8±2.4a	16.4±2.1a
	III	10.6±1.7b	11.3±0.1b	16.2±1.2b	16.8±1.9bc	18.1±0.6bc	17.0±0.6a	17.8±3.4a
	IV	12.6±2.8ab	16.8±3.6a	19.4±2.0a	19.7±0.5ab	18.9±0.7b	19.2±1.2	18.0±3.5a
	V	12.3±1.1ab	17.5±3.0a	21.7±3.0a	20.0±3.8ab	19.4±4.1ab	18.7±3.4a	18.1±3.6a
	VI	13.1±1.1a	18.2±0.4a	20.6±1.9a	23.4±5.0a	22.8±3.8a	18.9±6.1a	21.2±1.7a

MBC: 土壤微生物生物量碳 Soil microbial biomass carbon; MBN: 土壤微生物生物量氮 Soil microbial biomass nitrogen; DOC: 可溶性有机碳 Dissolved organic carbon; DON: 可溶性有机氮 Dissolved organic nitrogen.

施化肥模式.本研究中,化肥配施秸秆模式较化肥配施猪粪模式对设施菜田土壤酶活性的提高作用更显著.可能是由于配施秸秆模式碳投入量远高于配施猪粪模式(表 1),较高的碳投入使土壤中碳含量迅速提升,而土壤酶活性与土壤碳浓度呈显著正相关<sup>[39-40]</sup>,因此,配施秸秆模式土壤酶活性相对较高.本试验中,5 种有机无机肥料配施模式土壤酶活性由低到高的变化顺序总体上与碳投入量由小到大的变化顺序一致(3/4CN+1/4PN<2/4CN+2/4PN<1/4CN+3/4PN<2/4CN+1/4PN+1/4SN<2/4CN+2/4SN),说明土壤酶活性与土壤碳投入量密切相关.

3.2 设施蔬菜不同生育期土壤酶活性的差异

设施菜田土壤酶活性受蔬菜生育期的显著影响.本试验中,土壤 α-葡萄糖苷酶、β-木糖苷酶、β-葡萄糖苷酶、β-纤维二糖苷酶和几丁质酶活性在番茄生育期间总体上均呈先增后降的变化趋势,且均在番茄长势旺盛时(番茄定植后 60 d,盛果期)土壤酶活性相对较高.这一方面是因为作物不同生育阶段,其根系分泌物的数量和种类不同所致<sup>[41]</sup>.当作物生长旺

盛时,根系代谢活动较快,分泌增多,而根系分泌物中不仅含有大量的土壤酶类<sup>[31-32]</sup>,还含有土壤微生物生长所需的糖类、氨基酸等养分,从而间接增强了土壤酶活性<sup>[40,42]</sup>.另一方面,作物生长旺盛时对养分需求强烈,导致土壤养分减少,会刺激土壤生物产生更多的土壤酶类来保证土壤养分的供应<sup>[37]</sup>.作物生育期间,土壤温度变化也是影响土壤酶活性的重要因子<sup>[32]</sup>.在一定温度阈值内升高温度可以提高酶动力学常数,从而提高土壤酶活性,但过高的温度会使土壤酶钝化和失活<sup>[43]</sup>.同时,较高温度下土壤细菌等大量热变性导致土壤微生物含量减少<sup>[44-45]</sup>,也会引起土壤酶分泌量的减少和活性降低.本研究中,番茄生育期内土壤温度呈不断升高的趋势,土壤 α-葡萄糖苷酶等与土壤碳转化相关的酶活性总体上均呈先增后降的变化趋势,可能是由于土壤温度由“较低-较适-较高”变化而引起土壤酶活性的变化.而土壤脲酶活性总体呈先升高后趋于平缓的趋势,土壤磷酸酶活性在番茄定植后 100 d(拉秧期)相对较高,可能是由于不同类型的土壤酶对温度的反应不

表 3 土壤酶活性与土壤微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳、氮含量之间的相关系数  
Table 3 Correlation coefficients between soil enzyme activities and microbial biomass carbon and nitrogen, dissolved organic carbon and nitrogen contents

取样时间 Sampling time	项目 Item	α-GLU	β-XYL	β-GLU	β-CEL	CHI	URE	PHOS
B	MBC	0.95 **	0.96 **	0.97 **	0.95 **	0.98 **	0.91 **	0.95 **
	MBN	0.86 **	0.85 **	0.86 **	0.85 **	0.90 **	0.81 **	0.90 **
	DOC	0.83 **	0.86 **	0.85 **	0.82 **	0.85 **	0.81 **	0.86 **
	DON	0.68 **	0.77 **	0.78 **	0.73 **	0.77 **	0.76 **	0.79 **
T <sub>20</sub>	MBC	0.83 **	0.87 **	0.94 **	0.91 **	0.89 **	0.80 **	0.91 **
	MBN	0.82 **	0.84 **	0.86 **	0.86 **	0.80 **	0.76 **	0.77 **
	DOC	0.87 **	0.91 **	0.94 **	0.92 **	0.90 **	0.80 **	0.92 **
	DON	0.78 **	0.88 **	0.90 **	0.86 **	0.81 **	0.71 **	0.82 **
T <sub>40</sub>	MBC	0.62 **	0.61 **	0.66 **	0.68 **	0.67 **	0.71 **	0.74 **
	MBN	0.83 **	0.80 **	0.84 **	0.87 **	0.85 **	0.83 **	0.93 **
	DOC	0.92 **	0.93 **	0.96 **	0.97 **	0.95 **	0.94 **	0.96 **
	DON	0.71 **	0.77 **	0.81 **	0.76 **	0.73 **	0.74 **	0.80 **
T <sub>60</sub>	MBC	0.83 **	0.86 **	0.80 **	0.85 **	0.83 **	0.83 **	0.80 **
	MBN	0.93 **	0.93 **	0.89 **	0.91 **	0.88 **	0.89 **	0.83 **
	DOC	0.94 **	0.95 **	0.92 **	0.93 **	0.92 **	0.91 **	0.87 **
	DON	0.72 **	0.77 **	0.70 **	0.75 **	0.74 **	0.70 **	0.84 **
T <sub>80</sub>	MBC	0.51 **	0.64 **	0.68 **	0.63 **	0.70 **	0.74 **	0.75 **
	MBN	0.77 **	0.80 **	0.81 **	0.79 **	0.83 **	0.81 **	0.78 **
	DOC	0.77 **	0.86 **	0.91 **	0.88 **	0.90 **	0.78 **	0.89 **
	DON	0.58 *	0.66 **	0.73 **	0.66 **	0.70 **	0.58 *	0.76 **
T <sub>100</sub>	MBC	0.47 *	0.44	0.56 *	0.54 *	0.53 *	0.57 *	0.60 **
	MBN	0.82 **	0.88 **	0.81 **	0.85 **	0.85 **	0.82 **	0.80 **
	DOC	0.89 **	0.90 **	0.89 **	0.78 **	0.88 **	0.77 **	0.73 **
	DON	0.28	0.37	0.44	0.46	0.41	0.48 *	0.44
T <sub>120</sub>	MBC	0.61 **	0.61 **	0.61 **	0.59 **	0.54 *	0.71 **	0.61 **
	MBN	0.87 **	0.83 **	0.86 **	0.82 **	0.78 **	0.82 **	0.91 **
	DOC	0.80 **	0.76 **	0.83 **	0.78 **	0.80 **	0.77 **	0.87 **
	DON	0.45	0.49 *	0.49 *	0.49 *	0.49 *	0.35	0.48 *

B: 施基肥前 Before basal fertilizer application; T<sub>20</sub>: 定植后 20 d 20 days after transplanting; T<sub>40</sub>: 定植后 40 d 40 days after transplanting; T<sub>60</sub>: 定植后 60 d 60 days after transplanting; T<sub>80</sub>: 定植后 80 d 80 days after transplanting; T<sub>100</sub>: 定植后 100 d 100 days after transplanting; T<sub>120</sub>: 定植后 120 d 120 days after transplanting. α-GLU: 土壤 α-葡萄糖苷酶 Soil α-glucosidase; β-XYL: 土壤 β-木糖苷酶 Soil β-xylosidase; β-GLU: 土壤 β-葡萄糖苷酶 Soil β-glucosidase; β-CEL: 土壤 β-纤维二糖苷酶 Soil β-cellobiosidase; CHI: 土壤几丁质酶 Soil chitinase; URE: 土壤脲酶 Soil urease; PHOS: 土壤磷酸酶 Soil phosphatase. \*  $P<0.05$ ; \*\*  $P<0.01$  ( $n=18$ ,  $r_{0.01}=0.59$ ,  $r_{0.05}=0.47$ ).

同<sup>[43]</sup>.此外,水分、空气、团聚体、矿质元素、pH 等土壤理化性质的变化既可以直接影响土壤酶活性<sup>[11]</sup>,也可以通过影响土壤微生物区系来对土壤酶活性产生间接影响<sup>[46-47]</sup>.所以,设施蔬菜生育期间土壤酶活性动态变化是作物、土壤微生物、土壤理化性质等综合作用的结果.但关于设施蔬菜作物、土壤理化性质和微生物区系对不同酶活性的影响程度还有待进一步研究.

3.3 设施菜田土壤酶活性与土壤微生物生物量碳、氮和可溶性有机碳、氮含量的关系

设施菜田土壤酶活性与土壤微生物量碳、氮和可溶性有机碳、氮含量之间密切相关.因为土壤有机质的转化是通过土壤微生物进行的,而土壤酶在催化有机质分解和养分循环过程中起着关键作用,能够将土壤中复杂的大分子有机化合物分解成糖类、

氨基酸、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>等小分子化合物,供土壤微生物和植物吸收利用<sup>[11,21]</sup>.已有研究表明,土壤酶活性与土壤微生物和土壤养分含量之间均具有明显的平行性.郭继勋等<sup>[48]</sup>对不同草原植被下碱化草甸土的研究表明,土壤酶活性随着土壤微生物量的增加而不断增强,且与有机质、全氮和全磷之间呈指数正相关.Taylor 等<sup>[49]</sup>研究指出,随土层深度的增加,土壤酶活性和细菌数量(通过微生物生物量碳估量)均呈下降趋势,土壤酶活性与土壤细菌丰度和有机质含量之间均呈显著正相关关系.Fernandes 等<sup>[50]</sup>研究了施用城市污泥对土壤微生物学特性的影响,结果显示,土壤酶活性和微生物生物量碳、氮均随污泥施用量的增加而增加,且两者间的相关性显著.焦晓光等<sup>[51]</sup>对黑土和暗棕壤的研究指出,土壤脲酶、磷酸酶、转化酶、过氧化氢酶活性与土壤有机质、全氮、全

磷、碱解氮、速效磷含量的相关性均达显著水平.本研究表明,番茄生育期间各取样时期土壤  $\alpha$ -葡萄糖苷酶、 $\beta$ -木糖苷酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、 $\beta$ -纤维二糖苷酶、几丁质酶、脲酶、磷酸酶等酶活性与土壤微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳、氮含量之间总体上均呈显著或极显著正相关关系.说明土壤酶作为土壤有机质分解和养分转化循环的催化剂,与土壤养分含量和微生物生物量之间密切相关,是评价土壤肥力和土壤微生物活性的敏感指标.

#### 4 结 论

在作物、土壤微生物、土壤温度等理化性质的综合作用下,不同土壤酶活性在番茄生育期内变化不尽一致,总体上在番茄长势旺盛期土壤酶活性相对较高.土壤酶活性与土壤微生物生物量碳、氮及土壤可溶性有机碳、氮含量密切相关.同等养分投入量下,与单施化肥模式相比,有机无机肥料配施模式尤其是配施秸秆模式能显著提高设施菜田土壤酶活性,是维持设施菜田较高土壤肥力,促进设施菜田土壤可持续利用的高效施肥模式.

#### 参考文献

- [1] Li T-L (李天来). Current situation and prospects of greenhouse industry development in China. *Journal of Shenyang Agricultural University* (沈阳农业大学学报), 2005, **36**(2): 131–138 (in Chinese)
- [2] Zhang T-L (张桃林), Li Z-P (李忠佩), Wang X-X (王兴祥). Soil degradation and its eco-environmental impact under highly-intensified agriculture. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2006, **43**(5): 843–850 (in Chinese)
- [3] Chen Z-J (陈竹君), Gao J-J (高佳佳), Zhao W-Y (赵文艳), et al. Effects of application of phosphorus and potassium fertilizers on ion compositions of soil solution in solar greenhouse. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2011, **27**(2): 261–266 (in Chinese)
- [4] Huang S-W (黄绍文), Wang Y-J (王玉军), Jin J-Y (金继运), et al. Status of salinity, pH and nutrients in soils in main vegetable production regions in China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2011, **17**(4): 906–918 (in Chinese)
- [5] Li T-X (李廷轩), Zhou J-M (周健民), Duan Z-Q (段增强), et al. Nutrient management of greenhouse cropping systems in China. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2006, **19**(4): 70–75 (in Chinese)
- [6] Hu YC, Song ZW, Lu WL, et al. Current soil nutrient status of intensively managed greenhouses. *Pedosphere*, 2012, **22**: 825–833
- [7] Bandick AK, Dick RP. Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, **31**: 1471–1479
- [8] Badiane NNY, Chotte JL, Pate E, et al. Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions. *Applied Soil Ecology*, 2001, **18**: 229–238
- [9] DeForest JL. 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. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**: 1180–1186
- [10] Tian Y-Q (田永强), Cao Z-F (曹之富), Zhang X-Y (张雪艳), et al. Changes of soil enzyme activities under different agricultural treatments in greenhouse and its correlation analysis. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2009, **15**(4): 857–864 (in Chinese)
- [11] Aon MA, Colaneri AC. Temporal and spatial evolution of enzymatic activities and physico-chemical properties in an agricultural soil. *Applied Soil Ecology*, 2001, **18**: 255–270
- [12] Yang W-Q (杨万勤), Wang K-Y (王开运). Advances on soil enzymology. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 2002, **8**(5): 564–570 (in Chinese)
- [13] Liu S-J (刘善江), Xia X (夏雪), Chen G-M (陈桂梅), et al. Study progress on functions and affecting factors of soil enzymes. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2011, **27**(21): 1–7 (in Chinese)
- [14] Wu F-Z (吴凤芝), Meng L-J (孟立君), Wang X-Z (王学征). Soil enzyme activities in vegetable rotation and continuous cropping system under shed protection. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2006, **12**(4): 554–558 (in Chinese)
- [15] Sun C-J (孙彩菊), Cheng Z-H (程智慧), Meng H-W (孟焕文), et al. Variation of soil microorganism quantities and enzyme activities at the third year cultivation of continuous positional intercropping of tomato with garlic under plastic tunnel. *Journal of Northwest A&F University* (Natural Science) (西北农林科技大学学报:自然科学版), 2012, **40**(12): 97–105 (in Chinese)
- [16] Sun Y-W (孙艺文), Wu F-Z (吴凤芝). Effects of wheat and oat residues on growth of continuous cucumber cropping and soil enzymatic activity. *China Vegetables* (中国蔬菜), 2013(4): 46–51 (in Chinese)
- [17] Zhang H (张浩), Zhao J-Z (赵九洲), Zhang L (张丽), et al. Effects of different proportion of soybean stubble and continuous cropping soil on tomato growth and development and rhizosphere soil environment. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica* (西



- 北农业学报), 2014, **23**(7): 138–145 (in Chinese)
- [18] Ma Y-H (马云华), Wei M (魏 珉), Wang X-F (王秀峰). Variation of microflora and enzyme activity in continuous cropping cucumber soil in solar greenhouse. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(6): 1005–1008 (in Chinese)
- [19] Wu Z-H (吴忠红), Du X-M (杜新民), Zhang Y-Q (张永清), *et al.* The microbe amount and enzymes activities of soil in greenhouse in Jinnan area. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2007, **23**(1): 296–298 (in Chinese)
- [20] Zhao Q (赵 秋), Gao X-B (高贤彪), Ning X-G (宁晓光), *et al.* Changes of pH and enzyme activities in greenhouse soils of different planting years in Tianjin. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica* (华北农学报), 2012, **27**(1): 215–217 (in Chinese)
- [21] Caldwell BA. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review. *Pedobiologia*, 2005, **49**: 637–644
- [22] Marx MC, Wood M, Jarvis SC. A microplate fluorimetric assay for the study of enzyme diversity in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**: 1633–1640
- [23] Stemmer M. Multiple-substrate enzyme assays: A useful approach for profiling enzyme activity in soils? *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**: 519–527
- [24] Lin X-G (林先贵). Principles and Methods of Soil Microbiology Research. Beijing: Higher Education Press, 2010 (in Chinese)
- [25] Wu J-S (吴金水), Lin Q-M (林启美), Huang Q-Y (黄巧云), *et al.* Soil Microbial Biomass Methods and Application. Beijing: China Meteorological Press, 2006 (in Chinese)
- [26] Zhong Z, Makeschin F. Soluble organic nitrogen in temperate forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**: 333–338
- [27] Pan G, Zhou P, Li Z, *et al.* Combined inorganic/organic fertilization enhances N efficiency and increases rice productivity through organic carbon accumulation in a rice paddy from the Tai Lake region, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, **131**: 274–280
- [28] Tong C, Xiao H, Tang G, *et al.* Long-term fertilizer effects on organic carbon and total nitrogen and coupling relationships of C and N in paddy soils in subtropical China. *Soil and Tillage Research*, 2009, **106**: 8–14
- [29] 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. *Soil and Tillage Research*, 2010, **106**: 268–274
- [30] Wan Z-M (万忠梅), Song C-C (宋长春). Advance on response of soil enzyme activity to ecological environment. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2009, **40**(4): 951–956 (in Chinese)
- [31] Zhang Y-M (张咏梅), Zhou G-Y (周国逸), Wu N (吴 宁). A review of studies on soil enzymology. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* (热带亚热带植物学报), 2004, **12**(1): 83–90 (in Chinese)
- [32] Wan Z-M (万忠梅), Wu J-G (吴景贵). Study progress on factors affecting soil enzyme activity. *Journal of Northwest A&F University* (Natural Science) (西北农林科技大学学报: 自然科学版), 2005, **33**(6): 87–92 (in Chinese)
- [33] Kanchikerimath M, Singh D. Soil organic matter and biological properties after 26 years of maize-wheat-cowpea cropping as affected by manure and fertilization in a Cambisol in semiarid region of India. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2001, **86**: 155–162
- [34] Bastida F, Kandeler E, Hernández T, *et al.* Long-term effect of municipal solid waste amendment on microbial abundance and humus-associated enzyme activities under semiarid conditions. *Microbial Ecology*, 2008, **55**: 651–661
- [35] Gu Y, Zhang X, Tu S, *et al.* Soil microbial biomass, crop yields, and bacterial community structure as affected by long-term fertilizer treatments under wheat-rice cropping. *European Journal of Soil Biology*, 2009, **45**: 239–246
- [36] Zhong W, Gu T, Wang W, *et al.* The effects of mineral fertilizer and organic manure on soil microbial community and diversity. *Plant and Soil*, 2010, **326**: 511–522
- [37] Olander LP, Vitousek PM. Regulation of soil phosphatase and chitinase activity by N and P availability. *Biogeochemistry*, 2000, **49**: 175–191
- [38] Zhang B-Y (张北赢), Chen T-L (陈天林), Wang B (王 兵). Effects of long-term uses of chemical fertilizers on soil quality. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2010, **26**(11): 182–187 (in Chinese)
- [39] Marx MC, Kandeler E, Wood M, *et al.* Exploring the enzymatic landscape: Distribution and kinetics of hydrolytic enzymes in soil particle-size fractions. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**: 35–48
- [40] Allison SD, Jastrow JD. Activities of extracellular enzymes in physically isolated fractions of restored grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**: 3245–3256
- [41] Wichern F, Mayer J, Joergensen RG, *et al.* Release of C and N from roots of peas and oats and their availability to soil microorganisms. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, **39**: 2829–2839
- [42] Garcla-Gil JC, Plaza C, Soler-Rovira P, *et al.* Long-term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**: 1907–1913
- [43] Wu X-C (吴秀臣), Sun H (孙 辉), Yang W-Q (杨万勤). Effects of elevated temperature and atmospheric

- carbon dioxide on activity of soil enzymes. *Soils* (土壤), 2007, **39**(3): 358–363 (in Chinese)
- [44] Joergensen RG, Brookes PC, Jenkinson DS. Survival of the microbial biomass at elevated temperatures. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, **22**: 1129–1136
- [45] Verburg PSJ, Dam VD, Hefting M, *et al.* Microbial transformation of C and N in a boreal forest floor as affected by temperature. *Plant and Soil*, 1999, **208**: 187–197
- [46] Aon MA, Sarena DE, Burgos JL, *et al.* (Micro) biological, chemical and physical properties of soils subjected to conventional or no-till management: An assessment of their quality status. *Soil and Tillage Research*, 2001, **60**: 173–186
- [47] Cao H (曹 慧), Sun H (孙 辉), Yang H (杨 浩), *et al.* A review: Soil enzyme activity and its indication for soil quality. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 2003, **9**(1): 105–109 (in Chinese)
- [48] Guo J-X (郭继勋), Lin H-J (林海俊). Enzymic activity of alkaline meadow soil with different grassland vegetations. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1997, **8**(4): 412–416 (in Chinese)
- [49] Taylor JP, Wilson B, Mills MS, *et al.* Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**: 387–401
- [50] Fernandes SAP, Bettiol W, Cerri CC. Effect of sewage sludge on microbial biomass, basal respiration, metabolic quotient and soil enzymatic activity. *Applied Soil Ecology*, 2005, **30**: 65–77
- [51] Jiao X-G (焦晓光), Wei D (魏 丹), Sui Y-Y (隋跃宇). Effects of long-term fertilization on the soil enzyme activities and soil nutrients of the black and dark brown soils. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2011, **42**(3): 698–703 (in Chinese)

---

作者简介 王文锋,男,1988年生,硕士研究生.主要从事肥料资源利用研究. E-mail: wwfeng1008@163.com

责任编辑 张凤丽

---