

不同肥料对有机栽培番茄生长和土壤酶及微生物量的影响

王延军¹, 宗良纲^{1*}, 李锐¹, 杨永岗², 肖兴基², 卢东², 刘瑞龙³, 叶广涛³

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095;

2. 国家环境保护总局有机食品发展中心, 江苏 南京 210042; 3. 香港长江生命科技国际有限公司, 香港 95588)

摘要: 通过田间试验, 研究了生态肥与有机肥混合、矿粉与有机肥混合以及单施有机肥对番茄生长及土壤养分、微生物量和酶的影响。结果表明, 生态肥与有机肥混合处理可明显促进番茄根系生长发育和提高叶绿素含量, 其产量显著高于单施有机肥及矿粉与有机肥混合施用处理, 分别增产 14.9% 和 15.8%。同时, 生态肥与有机肥混合处理可明显改善土壤速效养分的供给水平, 其 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 都显著高于其他处理。番茄生长中期和后期不同施肥处理的脲酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶的活性均以生态肥与有机肥混合处理最高。在番茄生长期, 生态肥与有机肥混合处理的土壤微生物量碳显著高于另外 2 个处理, 表明施用生态肥有利于增加土壤肥力和促进番茄生长。

关键词: 番茄生长; 施肥调控; 土壤酶; 土壤微生物生物量碳

中图分类号: S181 文献标识码: A 文章编号: 1000-2030 (2007) 03-0083-05

Effects of different fertilizers on the growth of tomato and soil enzymes activities and microbial biomass-C

WANG Yan-jun¹, ZONG Liang-gang^{1*}, LI Rui¹, YANG Yong-gang², XIAO Xing-ji²,

LU Dong², LIU Rui-long³, YE Guang-tao³

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Organic Food Development Center of China SEPA, Nanjing 210042, China; 3. CK Life Sciences Int'l. Inc., Hong Kong 95588, China)

Abstract: Field experiments were carried out to examine the effects of different fertilizers on growth of tomato, soil enzymes activities and soil microbial biomass-C. In this study, three treatments consisted of control, organic fertilizer only; MF, mineral powder combined with organic fertilizer, EF, eco-fertilizer added with organic fertilizer. Results showed that EF could markedly improve roots activities and growth of tomato and chlorophyll content (SPAD values); it could significantly raise yields of tomato. EF increased by 14.9% and 15.8% in yields than control and MF, respectively. Different fertilizations had obviously different effects on nutrient character of soil, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ contents of EF-treated soils were significantly higher than MF and control. At the middle and later periods of tomato growing, urease, acid phosphatase and catalase activities were higher in EF than control and MF, variations of the parameters were significant ($P < 0.05$). EF could noticeably enhance soil microbial biomass-C in developmental stages of tomato, its values were significantly higher than other treatments. So, eco-fertilizer added with organic fertilizer could improve soil fertility greatly and reach to higher outputs.

Key words: tomato growth; fertilization control; soil enzyme; soil microbial biomass-C

土壤养分供需矛盾和病虫害综合防治是制约有机农业发展的两大技术瓶颈。目前有机农业的研究主要集中于生产、认证和管理方面, 而针对土壤养分供应特性和作物养分需求之间矛盾的研究, 大多停留在如何加强有机农业的内部循环和建立合理的轮作和休田制度上, 有关常规和有机农业土壤理化性质和生物学特性的比较研究较多, 而缺乏针对有机栽培下土壤养分调控技术的系统研究^[1]。相关研究表明, 施用有机物料可以使土壤保持较稳定的酸碱环境^[2]; 就长期而言有机农业生产可以获得与常规农业相近的作物产量^[2-3]。Gunapala 等^[4]的研究指出, 常规农业土壤微生物数量与土壤 N 含量呈负相关, 而有机农业生产体系下二者呈正相关。我国有机农业的产量与常规农业相比普遍较低。因而, 国内关于符

收稿日期: 2006-05-17

基金项目: 绿色和平资助项目 (200103)

作者简介: 王延军, 硕士研究生。* 通讯作者: 宗良纲, 教授, 主要从事环境质量与食品安全方面的研究,

E-mail: zonglg@njau.edu.cn。

合有机生产要求的肥料试验研究也逐步展开。研究表明：有机生物活性肥可提高作物产量和品质，促进土壤微生物繁衍和增强土壤酶活性，从而可以培肥土壤提高土壤肥力，达到增产的目的^[5-6]。为此，本研究选择符合有机生产要求的生态肥作为研究对象，并通过与目前有机农场习惯施用有机肥或矿粉与有机肥混合施用的效果比较，探讨其对番茄生长和土壤微生物和酶的影响，旨在为有机农业生产合理供肥提供科学依据和解决途径。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤状况

试验于2005年3月至8月在南京溧水普朗克有机农场进行，已连续进行了3年有机栽培生产。土壤类型为典型黄棕壤，土壤pH 4.85，有机质 $9.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，全氮 $1.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，全磷 $0.17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，全钾 $18.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，铵态氮 $10.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，硝态氮 $27.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，速效磷 $20.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，速效钾 $175.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，阳离子交换量 $11.22 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 供试肥料和供试作物

生态肥为香港长江生命科技国际有限公司提供的NutriSmart系列肥中的NST型肥料（养分含量：有机质 $61 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $4.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全磷 $47.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全钾 $4.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效氮 $597 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $19.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $3215 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、酵母活性孢子大于等于 $2.5 \times 10^8 \text{ g}^{-1}$ ；主要成分：煤矸石、磷矿石、淀粉），矿粉有机肥复混肥（养分含量：有机质 $150 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、腐殖酸 $15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $112.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全磷 $37.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全钾 $10.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ；主要成分：煤矸石、磷矿石、有机物料），有机肥为普朗克有机农场自行堆制的厩肥（有机质 $260 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $12.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全磷 $19.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全钾 $7.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ）。供试品种为金丰番茄。

1.3 试验设计

试验设3个处理：CK（有机肥 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ）；MF（矿粉有机肥复混肥 $750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ + 有机肥 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ）；EF（NST型生态肥 $750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ + 有机肥 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ），均作为基肥施入。所有处理在番茄的全生育期以有机肥作追肥，每次用量为 $1.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，共3次。3次重复，随机区组排列，小区面积为 20 m^2 。

1.4 试验方法

1.4.1 定植和施肥 每个小区定植60株。基肥混合均匀，开沟条施，以穴施方式追肥3次。

1.4.2 样品采集 在定植前（试验开始0 d）、生长中期（45 d）、全部采收结束时（100 d）及采收结束后1个月（130 d）每小区按多点法采集0~20 cm土层土壤得到混合样。新鲜土样一部分置冰箱内冷藏（4℃，少于72 h）供土壤酶活性和微生物生物量C等分析；另一部分风干后用于土壤养分测定。番茄根活力和叶片叶绿素含量（SPAD值）测定于番茄生长中期和后期进行。

1.4.3 测定项目及方法 化学指标：土壤pH（土水质量比为1:2.5）、土壤阳离子交换量、土壤有机质含量、土壤全氮、全磷、速效磷、铵态氮和硝态氮等按常规测定方法^[7]。生物指标：土壤酸性磷酸酶活性用磷酸苯二钠比色法；脲酶用奈氏比色法；过氧化氢酶用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KMnO}_4$ 滴定法^[8]；土壤微生物生物量C用氯仿熏蒸浸提TOC-5000A自动分析仪测定^[9]；根活力测定为TTC法^[10]。

1.5 数据处理

试验数据采用Excel 2003统计软件处理和差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对番茄生长及产量的影响

由表1可以看出，EF处理的番茄产量与另外2个处理差异显著（ $P < 0.05$ ）。EF与CK、MF相比，其产量分别增加了14.9%和15.8%，这说明有机肥与生态肥配施可较大幅度增加作物产量。

根作为植物吸收和合成的主要器官，其生长情况和活力水平直接影响地上部的营养水平及产量^[11]。EF的根干重极显著高于CK和MF（ $P < 0.01$ ）；MF与CK间差异不明显。在番茄生长中期和后期，根活力从大到小均为EF、CK、MF，其中CK、MF与EF差异显著（ $P < 0.05$ ）。生长后期由于植株根系衰

老, 根活力下降, 较生长中期 EF、CK 和 MF 分别下降了 8.7%、16.1% 和 37.2%, 表明生态肥不仅可以促进番茄根系的生长, 同时也能增强根活力和延缓根系衰老。

番茄叶片叶绿素含量在不同施肥处理下也有较大差异。生长中期 EF 处理叶片 SPAD 值极显著高于 CK ($P < 0.01$); 而 MF 显著低于 EF 但显著高于 CK。生长后期叶片 SPAD 值都有所下降, 依次为 EF、CK、MF, 且差异显著。可见, 生态肥可以提高叶片叶绿素含量, 从而增强光合能力增加光合产物, 为番茄增产奠定基础。

表 1 不同施肥处理对番茄生长及产量的影响

Table 1 Effects of different fertilizer treatments on growth and yields of tomato

处理 Treatment	根干重/g Root dry weight per plant	根活力/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ Root activity		叶片 SPAD 值 Leaf SPAD		小区产量/kg Plot yield	产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ Yield
		生长中期 Middle stage	生长后期 End stage	生长中期 Middle stage	生长后期 End stage		
		CK	3.86 ± 0.23^B	319.7 ± 4.9^b	268.1 ± 6.6^{bA}		
MF	3.56 ± 0.13^B	287.3 ± 8.4^c	180.5 ± 7.1^{cB}	51.5 ± 0.7^{bAB}	48.2 ± 0.4^b	92.5 ± 2.1^b	4 625
EF	4.73 ± 0.21^A	360.2 ± 12.1^a	328.7 ± 8.5^{aA}	53.7 ± 1.1^{aA}	51.7 ± 0.6^a	107.2 ± 1.7^a	5 362

注: 1) 同列数据比较, 不同大、小写字母分别表示在 0.01 和 0.05 水平上差异显著。The different capital and small letters in the same column show significant difference at 0.01 and 0.05 levels.

2) CK: 有机肥 Organic fertilizer; MF: 矿粉与有机肥混合 Mineral powder combined with organic fertilizer; EF: 生态肥与有机肥混合 Eco-fertilizer added with organic fertilizer. The same as follows.

2.2 不同施肥处理对土壤有机质及 N、P、K 养分含量的影响

供试前土壤有机质含量较低, 供试 EF、CK 和 MF 后有机质含量分别增加了 2.5、2.4 和 1.4 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 2), 处理间差异显著。相关研究表明向土壤中施加有机物质不但具有促进有机质分解的激发效应, 同时也可以促进土壤有机质含量的增加^[12-13], 改善腐殖质品质, 从而提高土壤的供肥能力。

由表 2 可以看出, 供试后土壤氮、磷的全量及有效态都有不同程度的增加。EF 的全氮含量极显著高于 MF 和 CK; MF 处理全磷显著低于其他两种处理。供试后 EF 处理铵态氮和硝态氮都显著高于 MF 和 CK; 供试后, 土壤速效磷含量 EF、MF 和 CK 较供试前分别增加了 93.7%、67.1% 和 83.1%, 其中 EF 显著高于 MF。供试后速效钾含量依次为 EF、CK、MF, EF 与 MF 差异显著, 这是因为番茄生长吸收大量速效钾, 降低了土壤中交换性钾含量, 从而增加了土壤钾的释放量^[14]。

表 2 不同施肥处理对土壤有机质和主要养分含量的影响

Table 2 Effects of different fertilizer treatments on contents of soil organic matter and N, P, K

处理 Treatments	有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ Organic matter	全氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ Total N	全磷/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ Total P	铵态氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ $\text{NH}_4^+ \text{-N}$	硝态氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ $\text{NO}_3^- \text{-N}$	速效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Available P	速效钾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Available K
CK	11.42 ± 0.40^a	1.47 ± 0.01^C	0.25 ± 0.02^a	17.0 ± 1.2^b	32.5 ± 3.2^b	37.9 ± 1.1^{ab}	238.5 ± 4.2^a
MF	10.71 ± 0.30^a	1.94 ± 0.06^B	0.19 ± 0.01^b	18.6 ± 1.1^b	30.6 ± 1.8^b	34.6 ± 2.1^b	208.5 ± 4.7^b
EF	11.82 ± 0.70^a	2.71 ± 0.09^A	0.26 ± 0.02^a	24.2 ± 0.9^a	48.5 ± 2.6^a	40.1 ± 1.2^a	249.5 ± 5.4^a

2.3 生态肥对土壤酶学特征的影响

土壤酶参与土壤中许多重要的生物化学过程, 如腐殖质的合成与分解, 其活性可以代表土壤中物质代谢的旺盛程度, 是表征土壤肥力的重要指标之一^[8,15]。其中, 脲酶酶促产物——氨是作物氮源之一, 尿素氮肥水解与脲酶密切相关。从表 3 可以看出, 供试前各处理的土壤脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶差异较小。番茄幼苗移栽到生长中期 (45 d), 脲酶活性从大到小依次为 EF、MF、CK, 且差异显著。随着番茄生命活动的减弱, 脲酶活性降低, 100 d 时依次为 EF、CK、MF, 其中 MF 显著低于其余两处理。移除番茄植株后 (130 d), 各处理脲酶活性较移栽 100 d 时变化较小, 不同处理间差异较小。表明: 在番茄生长的各个时期, 生态肥与有机肥混合处理的脲酶活力均高于另外两处理, 这可能与生态肥的活性物质代谢作用密切相关。

移栽后 45 d, 各处理土壤酸性磷酸酶活性均较供试前大幅增加, 其中 EF 极显著高于 CK (表 3)。这时番茄生长处于旺盛期, 对养分的需求量大, 磷酸酶活性的增加可加速土壤有机磷脱磷速度, 改善速

效磷的供应水平^[8], 有利于番茄生长。100 d 时酸性磷酸酶活性较生长中期略降低, 但 EF 和 MF 的磷酸酶活性极显著高于 CK ($P < 0.01$), 此后, 各处理磷酸酶活性都大幅下降, 接近供试前水平。

表3 不同施肥调控措施对土壤酶活性的影响

Table 3 Effect of different fertilizer treatments on soil enzyme activities

处理 Treatments	移栽后时间/d Time after transplanting	脲酶/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ Urease	磷酸酶/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ Acid phosphatase/phenol	过氧化氢酶/ $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ Catalase
CK	0	0.49 ± 0.03^a	12.1 ± 0.3^a	4.01 ± 0.12^a
	45	0.71 ± 0.03^b	28.4 ± 0.7^B	4.82 ± 0.29^b
	100	0.63 ± 0.01^a	24.7 ± 0.5^B	5.80 ± 0.25^{ab}
	130	0.64 ± 0.03^a	13.6 ± 0.5^a	4.92 ± 0.33^a
MF	0	0.52 ± 0.05^a	11.9 ± 0.3^a	3.89 ± 0.29^a
	45	0.74 ± 0.03^{ab}	29.8 ± 0.6^{AB}	4.86 ± 0.26^b
	100	0.55 ± 0.04^b	26.6 ± 0.2^A	5.54 ± 0.10^b
	130	0.57 ± 0.01^a	11.3 ± 0.2^b	4.35 ± 0.20^a
EF	0	0.48 ± 0.04^a	12.4 ± 0.2^a	3.97 ± 0.41^a
	45	0.80 ± 0.04^a	31.0 ± 0.6^A	5.40 ± 0.22^a
	100	0.66 ± 0.01^a	26.9 ± 0.5^A	6.71 ± 0.29^a
	130	0.65 ± 0.03^a	12.1 ± 0.3^{ab}	5.38 ± 0.33^a

在番茄生长期过氧化氢酶活性一直处于增加的趋势, 移栽 45 d 时从大到小依次为 EF、MF、CK, 100 d 时各处理过氧化氢酶活性较移栽 45 d 时都有所增加, 其中 EF 高于 MF 且差异显著。移除番茄植株后过氧化氢酶活性都降低, 其大小依次为 EF、CK、MF, 但各处理间差异不显著 (表 3)。相关研究表明: 过氧化氢酶活性与土壤有机质含量和微生物数量有关, 它参与生物呼吸代谢的同时分解呼吸过程中产生的对生物体有毒害作用的过氧化氢^[8], 因而过氧化氢酶活性增强可有效保护土壤微生物的正常活动。

国外的相关研究表明: 增施有机物料和微生物肥料有利于改善土壤理化性质和微生物区系, 提高土壤微生物数量和土壤转化酶、磷酸酶、过氧化物酶和脲酶活性^[16-18]。土壤酶是土壤活性蛋白质, 来源于土壤微生物的分泌和植物根系分泌^[19]。番茄在生长中期, 土壤脲酶、酸性磷酸酶及过氧化氢酶的活性都有较大提高, 这与番茄根系的生长活动有关, 其分泌物促进了土壤微生物的繁殖和增强了相关酶的活性。番茄生长后期脲酶和酸性磷酸酶活性减弱, 但过氧化氢酶活性继续增强; 移除植株后, 脲酶活性变化较小, 而磷酸酶和过氧化氢酶活性则较明显地减弱, 这些酶在不同时期其活性变化方面的趋同性和非一致性, 不仅和酶自身的性质有关, 可能也和不同施肥处理对土壤理化性质、微生物及番茄生长活动的综合影响相关, 其机理尚待进一步研究。

2.4 生态肥对土壤微生物生物量 C 的影响

土壤微生物生物量 C 是土壤生物活性和土壤质量的一个重要指标, 它既是土壤有机质和土壤养分

转化和循环的动力, 也是土壤中的活性有效成分^[20-21]。图 1 表明, 供试前土壤微生物生物量 C 差别很小, 移栽 45 d 时, 各处理土壤微生物生物量 C 较供试前都成倍增加, EF 明显高于 MF 和 CK 且差异达极显著水平。随着番茄根系活动减弱分泌物减少, 各处理土壤微生物生物量 C 均有不同程度地降低, 100 d 时 EF 土壤微生物生物量 C 极显著高于其他处理 ($P < 0.01$); CK 与 MF 差异亦极显著。而收获 1 个月 (130 d), CK、MF 和 EF 土壤微生物生物量 C 分别只有 449.4、380.3 和

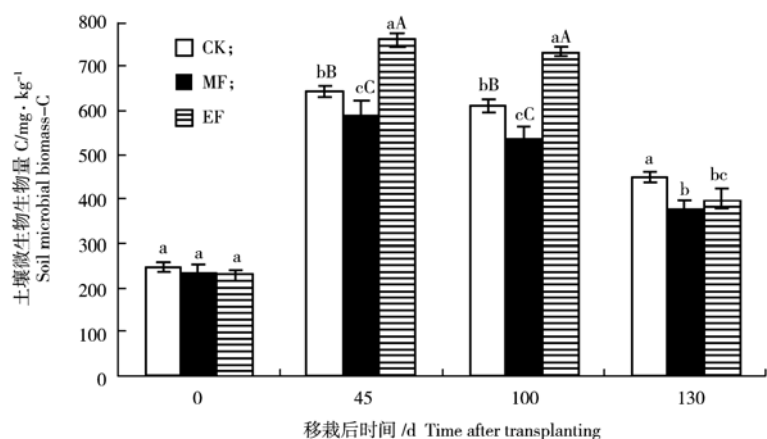


图1 不同施肥处理对土壤微生物生物量 C 的影响

Fig.1 Effect of different fertilizer treatments on soil microbial biomass-C

410.6 mg · kg⁻¹, 与移栽 100 d 时相比都有较大的减少。

以上结果表明, 施肥和植株根系分泌物为微生物的生长和繁殖提供了营养, 而生态肥增加土壤微生物量的效果明显优于其他肥料处理, 这可能与生态肥中酵母孢子在适宜的土壤环境大量萌发, 使土壤微生物数量短期内迅速增加, 加速了土壤养分的分解、转化和释放有关, 从而大大改善了土壤理化环境和微生物区系, 有利于土壤微生物生长繁殖^[16-18], 也为处于生长旺盛期的植株生长提供了充足的养分, 从而为增产打下了基础。毕军等^[6]的研究指出活性肥料处理的土壤在细菌、真菌和放线菌的种群数量上都明显高于其他肥料处理。

3 结论

生态肥通过其微生物组分的调控作用, 促进土壤及肥料中养分的分解、转化和释放, 使养分释放速率与作物吸收养分规律具有较高的同步性, 更好地满足了番茄不同生长时期对养分的需求, 促进了番茄根系和叶片等营养器官的生长发育, 因而表现出显著的增产作用。

生态肥与有机肥配施可显著增强土壤关键酶如脲酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶的活性; 生态肥不仅可以作为土壤微生物的能源, 也可以改善根际土壤环境, 促进微生物繁衍和延缓微生物的衰减, 实现培肥土壤和改善土壤速效养分供给水平的目标。

参考文献:

- [1] Doran J W, Elliott E T, Paustian K. Soil microbial activity, nitrogen cycling, and long-term changes in organic carbon pools as related to fallow tillage manage [J]. *Soil & Tillage Research*, 1998, 49: 3-18
- [2] Stamatiadis S, Werner M, Buchanan M. Field assessment of soil quality as affected by fertilizer application in a broccoli field(San Benito County, California) [J]. *Applied Soil Ecology*, 1999, 12: 217-225
- [3] Letourneau D K, Drinkwater L E, Shennan C. Effects of soil management on crop nitrogen and insect damage in organic vs. conventional tomato fields [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1996, 57: 179-187
- [4] Gunapala N, Scow K. Dynamics of soil microbial biomass and activity in conventional and organic farming systems [J]. *Soil Biol Biochem*, 1998, 30: 805-816
- [5] 范美蓉, 刘强, 荣湘民, 等. 有机无机复混肥对莴苣产量和品质的影响 [J]. *湖南农业大学学报: 自然科学版*, 2005, 31(3): 415-419
- [6] 毕军, 夏光利, 张昌爱, 等. 有机生物活性肥料对冬小麦及土壤活性质量影响的试验研究 [J]. *土壤通报*, 2004, 36(2): 230-233
- [7] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-200, 301-321
- [8] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986: 274-196, 266-288
- [9] Joergensen R G, Schmaedeke F, Windhorst K, et al. Biomass and activity of microorganisms in a fuel oil contaminated soil [J]. *Soil Biol Biochem*, 1995, 27(9): 1137-1143
- [10] 李合生. 植物生理和生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版, 2000: 119-121
- [11] 严小龙, 廖红, 戈振扬, 等. 植物根构型特性与磷吸收效率 [J]. *植物学通报*, 2000, 17(6): 511-519
- [12] 李梦梅, 龙明华, 黄文浩, 等. 生物有机肥对提高番茄产量和品质的机理初探 [J]. *中国蔬菜*, 2005(4): 18-20
- [13] Hsieh C H, Hong C M, Hong K Y. Effect of surface application of cattle manure on soil physical and chemical properties on pangola grass pasture [J]. *Journal of Taiwan Livestock Research*, 1997, 30(4): 395-409
- [14] 沈宏, 曹志洪, 徐志洪. 施肥对土壤不同碳形态及碳库管理指数的影响 [J]. *土壤学报*, 2000, 37(2): 166-173
- [15] 余松烈. 作物栽培学 [M]. 北京: 农业出版社, 1982: 203-215
- [16] Albiach R, Canet R, Pomanes F, et al. Microbial biomass content and enzymatic activities after the application of organic amendments to a horticultural soil [J]. *Bioresource Technology*, 2000, 75: 43-48
- [17] Marcote I, Hernández T, Garcénde T, et al. Influence of one or two successive annual applications of organic fertilizers on the enzyme activities of a soil under barley cultivation [J]. *Bioresource Technology*, 2001, 79: 147-154
- [18] de Caire G Z, de Cano M S, Palma R M, et al. Changes in soil enzyme activities following additions of cyanobacteria biomass and exopolysaccharide [J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, 32: 1985-1987
- [19] 周礼恺. 土壤酶学 [M]. 北京: 科学出版社, 1987: 135-241
- [20] 李世清, 李生秀. 有机物料在维持土壤微生物体氮库中的作用 [J]. *生态学报*, 2001, 21(1): 136-142
- [21] Jimenez M L, de la Horra A M, Pruzzo L, et al. Soil quality: a new index based on microbiological and biochemical parameters [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4): 302-306