

# 长期定位施肥对潮土腐植酸含量及其相关因素的影响

王俊华<sup>1</sup>, 林先贵<sup>1\*</sup>, 尹睿<sup>1</sup>, 褚海燕<sup>1</sup>, 陈梅生<sup>1,2</sup>, 戴珏<sup>1,2</sup>, 钦绳武<sup>1</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室, 南京土壤研究所 - 香港浸会大学土壤与环境联合开放实验室, 南京 210008; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 利用中国科学院封丘农业生态国家实验站潮土农田生态系统养分平衡长期定位试验地, 研究不同施肥处理对春秋两季土壤腐植酸含量、微生物生物量碳及转化酶活性的影响。结果发现, 与不施肥对照相比, 单施 NK 或单施 PK 对土壤 pH 和有机碳含量均没有显著影响; 单施有机肥、施 NPK 化肥、1/2 OM + 1/2 NPK 有机无机配施以及施 NP 等 4 种处理均显著抑制了土壤 pH 的升高, 提高了土壤有机碳与全氮含量; 其中单施有机肥还显著提高了土壤腐殖质中胡敏酸的含量以及微生物生物量碳和转化酶活性, 有机肥与化肥配施效果次之。结果表明, 长期施用有机肥更有利于提高土壤肥力质量与健康质量。

**关键词:** 长期定位施肥; 腐植酸; 微生物生物量碳; 土壤转化酶活性; 土壤质量

中图分类号: S154.36

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2009)02-0352-06

## Changes in soil humic acid, microbial biomass carbon and invertase activity in response to fertilization regimes in a long-term field experiment

WANG Jun-hua<sup>1</sup>, LIN Xian-gui<sup>1\*</sup>, YIN Rui<sup>1</sup>, CHU Hai-yan<sup>1</sup>, CHEN Mei-sheng<sup>1,2</sup>, DAI Jue<sup>1,2</sup>, QIN Shen-wu<sup>1</sup>

(1 Joint Open Laboratory of Soil and the Environment, Institute of Soil Science and Hongkong Baptist University/Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Chinese Academy of Sciences/State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture,

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

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

**Abstract:** A long-term located field for nutrients equipoise experiment in Fengqiu National Agro-ecological Experiment Station was conducted to investigate the effects of different fertilization on soil humic acid concentrations, soil microbial biomass, and invertase activities of fluvo-aquic soils. There were seven treatments of the experiment: organic manure (OM), half organic manure plus half fertilizer (1/2OMN), fertilizer NPK, fertilizer NP, fertilizer NK, fertilizer PK, and the control (CK, without fertilization). The results showed that soil organic carbon and total nitrogen concentrations are significantly different with a similar pattern among fertilization regimes, and the order from high to low was OM, 1/2 OMN, NPK, NP, PK, NK, which was just contrary to soil pH. Generally speaking, only organic manure increased soil humic acid significantly. In addition, OM had highest soil microbial biomass C and invertase activity, while 1/2 OMN took the second place. It indicated that, long-term organic fertilization would be better on elevating soil fertility and health properties.

**Key words:** long-term located fertilization; humic acid; microbial biomass carbon; soil invertase activity; soil quality

收稿日期: 2008-03-06 接受日期: 2008-05-27

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(kzcx2-yw-408)与重大项目(KSCX1-YW-09-05); 国家重点基础研究发展规划项目(2005CB121108)资助。

作者简介: 王俊华(1963—)女, 江苏南京人, 实验师, 主要从事土壤微生物与生物化学及酶学方向研究。E-mail: jhwang@issas.ac.cn

\* 通讯作者 Tel: 025-86881589, E-mail: xglin@issas.ac.cn

土地的高强度利用往往导致土壤营养元素缺乏、肥力下降,影响了作物产量、产品质量和经济效益<sup>[1]</sup>。施肥已成为保障作物产量的重要措施,但也对土壤性质产生深远的影响<sup>[2]</sup>。所以,研究长期施肥对土壤肥力、作物产量和生态环境的影响显得非常重要<sup>[3]</sup>。大量研究表明,土壤有机质在肥力保育与农业可持续发展中发挥着重要作用<sup>[4]</sup>。在自然形成的土壤中,植物的根叶残体随成土过程转变为腐殖质<sup>[5]</sup>,而施肥有利于增加土壤有机质含量,且有机肥比无机肥效果更明显<sup>[4]</sup>。研究发现,土壤腐殖质含量的增加是因为施有机肥增添了肥料自身和植物残体的有机质,而施无机肥则可能是因为提高了植物残体的腐殖化系数;长期施肥对土壤有机质的影响因土壤类型、肥料种类和作物轮作方式等的不同而有所差异,而正确的施肥措施可以促进土壤腐殖质的累积<sup>[4]</sup>。

土壤腐殖质由胡敏酸(Humic acid)、富里酸(Fluvic acid)和存在于残渣中的胡敏素(Humin)等组成<sup>[6]</sup>。目前关于腐植酸(Humic acid)的界定主要有单指胡敏酸<sup>[5]</sup>和同时包括胡敏酸与富里酸<sup>[4]</sup>两种观点。依据其英文名称一般是指胡敏酸<sup>[7]</sup>,它的含量变化一般可被用于评价土壤肥力水平和环境健康状况。例如,土壤腐植酸能促进土壤形成团粒结构,增强植物的生理活性<sup>[5]</sup>;对农药和重金属具有很高的吸附性,减少残留农药进入植物组织,并减轻重金属离子对作物的毒害<sup>[7]</sup>。国内目前关于不同施肥处理对土壤腐殖质组成和腐植酸含量的影响报道较少,单就沈阳棕壤而言,施用有机肥可以显著提高土壤的腐植酸含量<sup>[4]</sup>。然而,长期不同施肥对土壤腐植酸的影响规律是否与土壤有机质一样,因土壤类型不同而有较大差异尚不明确。

在土壤生态系统中,微生物活动与碳循环有密切关系<sup>[8]</sup>,许多微生物参数可应用于评估土壤肥力质量与健康质量,包括土壤微生物生物量及各种酶活性等<sup>[9]</sup>。其中,土壤微生物生物量库的任何变化都会影响土壤养分的循环和有效性<sup>[10]</sup>,并能够较早地指示整个农田生态系统功能的变化<sup>[2]</sup>;土壤酶活性作为生物活性指标,可用于评价土壤营养物质的转化状况以及施肥等农业措施的效果<sup>[11]</sup>。本研究以河南封丘的潮土为研究对象,利用农田生态系统养分平衡长期试验研究,长期不同施肥对土壤腐植酸含量、微生物生物量碳和转化酶活性的影响,旨在为改善土壤肥力质量与健康质量及合理制定施肥策略提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

中国科学院封丘农业生态国家实验站(35°04' N, 113°10' E)位于河南省封丘县,属半干旱半湿润的暖温带季风气候,年均降水量 605 mm,主要集中于 7~9 月。潮土农田生态系统养分平衡长期定位施肥试验始于 1989 年秋季,采用小麦-玉米一年两熟轮作制度,种植当地大面积推广品种。试验灌水视当年降水情况而定,一般小麦灌水 2~3 次,玉米灌水 1~2 次,每次灌水量 900~1200 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。土壤为轻质黄潮土,试验初始时土壤有机质含量为 5.83 g/kg、全 N 0.445 g/kg、全 P 0.50 g/kg、全 K 18.6 g/kg、速效 N 9.51 mg/kg、有效 P 0.83 mg/kg、速效 K 65.4 mg/kg、pH 8.65,土壤缺氮、磷,富钾。

### 1.2 试验设计

试验在 2007 年进行,分为 4 个区组,每个区组设 7 个施肥处理:CK(不施肥对照)、NK、PK、NP、NPK、OM(有机肥)、1/2OMN(即 1/2 OM + 1/2 NPK),组内随机排列。其中,N、P、K 化肥分别为尿素、过磷酸钙和硫酸钾,肥料用量见表 1。有机肥以粉碎的麦秆为主,加入适量粉碎后的大豆饼和棉仁饼,以提高有机肥的含 N 量,每季用量约 4500 kg/hm<sup>2</sup>。有机肥经堆制发酵后再施用,施用前先分析 N、P、K 养分含量,以等 N 量为标准,有机肥中的 P、K 不足部分用 P、K 化肥补足到等量。与当地农户当时所种大田的施肥量相比,试验地的施肥量为中等水平。

表 1 试验地肥料施用量(kg/hm<sup>2</sup>)

Table 1 Fertilization rates in the experimental field

作物 Crops	施肥方式 Fertilization methods	N	P	K
小麦 Wheat	基肥 Base fertilizer	90	75	150
	追肥 Top dressing	60	0	0
玉米 Maize	基肥 Base fertilizer	60	60	150
	追肥 Top dressing	90	0	0

### 1.3 测定项目与方法

于春季(3月26日)和秋季(10月6日)两次采集耕作层(0—20 cm)土样,分别根据分析需求进行预处理,重铬酸钾容量法测定有机碳含量,半微量凯氏法测定全氮含量,碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定有效磷含量,醋酸铵提取—火焰光度法测定速效钾含量,1:2.5 水浸提法测定 pH<sup>[6]</sup>;焦磷酸钠浸

提—重铬酸钾氧化法测定土壤腐殖质组成(以各组分占土壤质量的百分比计)<sup>[12]</sup>;氯仿熏蒸法测定土壤微生物生物量碳<sup>[13]</sup>;3,5-二硝基水杨酸比色法测定土壤转化酶活性(以葡萄糖计)<sup>[14]</sup>。

试验数据用 SPSS 13.0 软件进行统计分析,并使用 Duncan 检验进行多重比较 ( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤基本化学性质

不同施肥处理土壤的基本化学性质(表 2)显示,与试验开始时的 pH 8.65 相比,不施肥土壤(CK)的 pH 值趋于升高(pH 8.76 ~ 8.82),但 OM、1/2OMN、NPK 等均衡施肥土壤的 pH 值均显著低于对照 ( $P < 0.05$ ),即有抑制碱化或降低 pH 的功效;且

春季的作用效果比秋季更为突出,其中又以单施有机肥(OM)效果最显著。缺素施肥处理中 NK、PK 对土壤 pH 无显著影响,但 NP 处理因土壤富 K 而与均衡施肥处理近似,土壤 pH 也显著低于不施肥对照 ( $P < 0.05$ )。不同处理对土壤有机碳含量影响表现为:OM > 1/2OMN > NPK, NP > PK、NK、CK;土壤全氮与有效磷的变化规律与有机碳基本一致,其中 PK 处理较高的有效磷残留是因为土壤缺 N 在一定程度上限制了作物对 P 的大量吸收,施 K 则因土壤富 K 而导致土壤速效钾的累积。本研究结果与试验地 2005 年<sup>[2]</sup>、2006 年<sup>[15]</sup>的测定结果在整体规律上完全一致,表明长期定位施肥特别是施有机肥对土壤 pH 和养分的影响已经达到比较显著稳定的水平。

表 2 长期定位施肥处理后土壤基本化学性质的比较(2007 年)

Table 2 Comparison of soil chemical properties after long-term located fertilization treatments(2007yr)

采样时间 Sampling time	施肥处理 Fertilization treatment	pH	有机碳 Organic C (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	有效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)
3月26日 26 <sup>th</sup> March	CK	8.76 ± 0.04 c	8.90 ± 0.50 a	0.37 ± 0.00 a	0.23 ± 0.01 a	90.55 ± 5.84 b
	NK	8.69 ± 0.07 c	8.76 ± 1.23 a	0.41 ± 0.01 b	0.53 ± 0.13 a	395.35 ± 8.84 e
	PK	8.65 ± 0.10 c	9.48 ± 1.50 a	0.45 ± 0.02 c	27.89 ± 2.48 e	348.17 ± 4.42 d
	NP	8.44 ± 0.08 b	11.52 ± 0.74 b	0.54 ± 0.01 d	12.60 ± 0.79 b	74.61 ± 3.83 a
	NPK	8.45 ± 0.02 b	12.70 ± 0.72 b	0.56 ± 0.02 e	12.52 ± 0.35 b	221.91 ± 10.12 c
	1/2OMN	8.38 ± 0.07 b	16.72 ± 1.66 c	0.74 ± 0.00 f	17.29 ± 1.25 c	234.66 ± 9.63 c
10月6日 6 <sup>th</sup> October	OM	8.12 ± 0.08 a	21.18 ± 1.26 d	1.00 ± 0.03 g	20.96 ± 3.44 d	229.56 ± 12.88 c
	CK	8.82 ± 0.04 c	7.65 ± 0.81 a	0.40 ± 0.02 a	0.22 ± 0.01 a	81.30 ± 4.81 b
	NK	8.77 ± 0.11 bc	8.01 ± 0.95 a	0.42 ± 0.01 a	0.33 ± 0.05 a	351.99 ± 10.12 f
	PK	8.81 ± 0.05 c	9.38 ± 0.40 b	0.50 ± 0.00 b	29.26 ± 2.89 e	326.17 ± 10.99 e
	NP	8.66 ± 0.06 ab	10.46 ± 0.28 c	0.57 ± 0.01 c	8.93 ± 0.92 b	64.09 ± 1.91 a
	NPK	8.65 ± 0.12 ab	11.42 ± 0.89 c	0.64 ± 0.02 d	8.32 ± 0.35 b	167.07 ± 2.21 c
	1/2OMN	8.63 ± 0.06 ab	14.20 ± 0.47 d	0.84 ± 0.03 e	13.97 ± 1.25 c	155.91 ± 6.53 c
	OM	8.60 ± 0.09 a	18.73 ± 0.80 e	1.10 ± 0.04 f	16.55 ± 0.90 d	177.91 ± 2.21 d

注( Note ):同一采样时间同列数据后不同字母表示处理间达 5% 显著水平,下同。Values followed by different letters in a column are significant at 5% level among treatments at the same sampling date. The same below.

### 2.2 土壤胡敏酸、富里酸及胡敏素含量

不同施肥处理对土壤胡敏酸、富里酸及胡敏素含量的影响(图 1)看出,不同施肥处理相同组分间的差异与土壤有机碳含量的变化规律基本一致,即以 OM、1/2OMN、NPK、NP、PK、NK 的顺序递减。其中,胡敏酸含量只有施有机肥(OM)与有机无机配施(1/2OMN) 2 个处理显著高于 CK;富里酸含量也是

以有机肥 OM 和 1/2OMN 处理最高,而施化肥的 NPK 与 NP 处理在秋季显著高于 CK;胡敏素含量表现为 OM > 1/2OMN > NPK, NP, PK, NK, CK 处理最低。表明 NPK 平衡施肥对土壤腐殖质的影响很大程度上只是因为增加了胡敏素的含量,当然在秋季也会表现在富里酸上,但只有含有机肥的处理才能显著提高土壤中胡敏酸的含量。

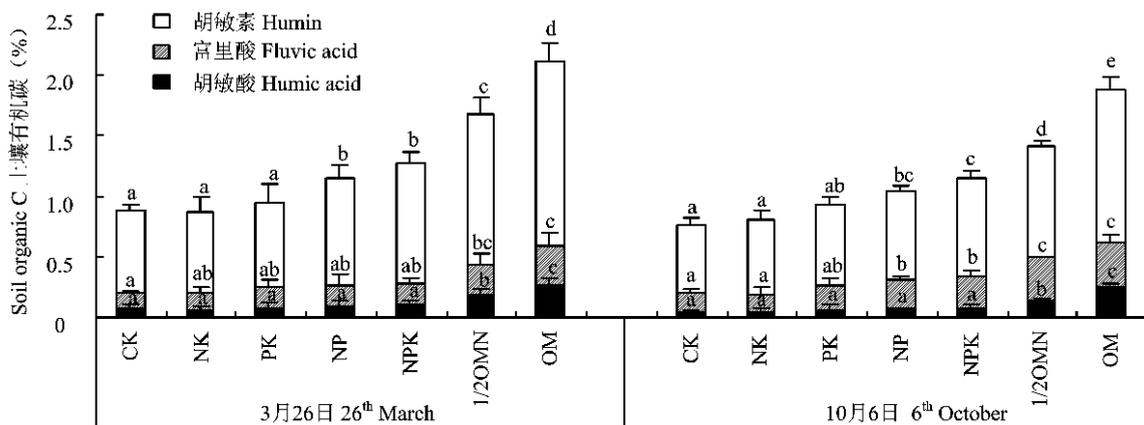


图 1 不同施肥处理土壤胡敏酸、富里酸及胡敏素含量的比较

Fig. 1 Comparisons of soil humic acid, fulvic acid and humin concentrations under the different fertilization treatments

[注 (Note): 柱上不同字母表示处理间在  $P < 0.05$  水平差异显著 Different letters above the bars indicate a significant difference among different treatments at the  $P < 0.05$  level.]

### 2.3 土壤微生物量碳与转化酶活性

土壤微生物量是土壤有机质中最活跃和最易变化的部分<sup>[16]</sup>,对植物养分具有贮存和调节作用,它的大小和活性直接影响养分的矿化、固定<sup>[17]</sup>以及土壤酶的活性<sup>[2]</sup>。其中,土壤转化酶活性与土壤有机质含量和呼吸强度等有关,是表征土壤生物活性强度和评价土壤熟化程度的一个重要指标<sup>[14]</sup>。由不同施肥处理土壤的微生物量碳与转化酶活

性(图 2)看出,施有机肥处理的土壤微生物量碳最高,单施有机肥处理又显著高于 1/2OMN 处理;施化肥处理中只有 NPK 处理显著高于不施肥对照, NK 处理在秋季甚至显著低于对照。不同施肥处理对土壤转化酶活性的影响与微生物量碳基本一致,但缺素施肥中除 NK 处理有低于对照的趋势外,其余处理也均显著高于对照,而 NPK、NP 处理在秋季也显著高于 PK 处理。

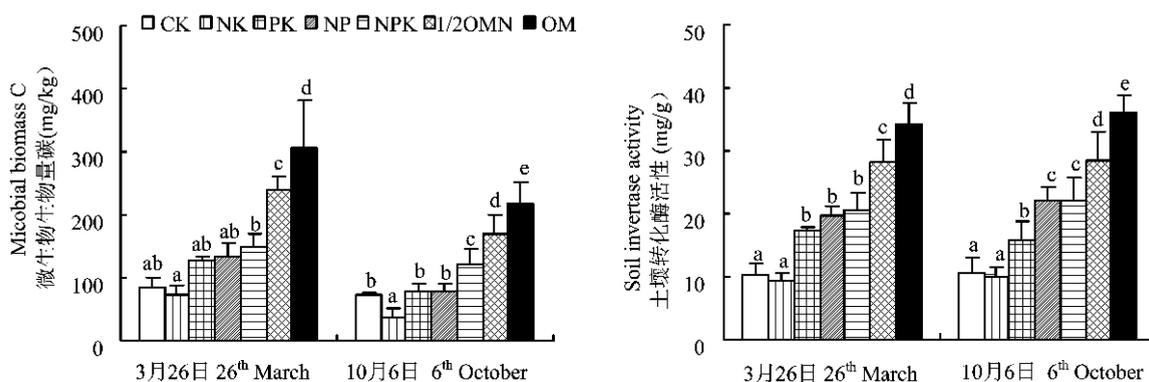


图 2 不同施肥处理土壤微生物量碳与转化酶活性的比较

Fig. 2 Comparisons of soil microbial biomass carbon and invertase activity under the different fertilization treatments

## 3 讨论

土壤的腐植酸含量是其肥力质量与健康质量的一个重要标志。刘小虎等<sup>[4]</sup>研究不同施肥处理对棕壤腐植酸组成和性质的影响发现,施用有机肥对土壤胡敏酸的培肥作用更明显一些,其中有机无机肥配施处理可较大幅度地提高松结态胡敏酸的比例,而减低松结态富里酸的比例。本试验在潮土地区的

研究也发现,单施有机肥或有机无机配施显著提高了土壤腐植酸含量,而施化肥处理中即使是 NPK 平衡施肥也没有检测到腐植酸的明显增加,即只有通过包含一定量有机肥的施肥措施才能起到本质意义上的地力培肥作用。整体来看,单施有机肥或有机无机配施处理主要通过肥料带入、增加植物根系分泌和植株残体含量以及提高土壤微生物腐殖能力的方式增加土壤腐殖质尤其是腐植酸的含量。

与不施肥对照相比,施有机肥和 NPK 平衡施肥(土壤富 K、NP 处理也比较接近平衡施肥)能有效抑制土壤进一步碱化并调节土壤酸碱度向中性靠近(表 2),这一方面是因为肥料的有效性能直接影响土壤 pH 值,另一方面可能是因为植物根系分泌物增加尤其是有机酸增多造成的结果<sup>[18-19]</sup>。显然,土壤 pH 对微生物生命活动具有很大影响<sup>[20]</sup>,而土壤微生物量又与土壤养分含量有直接关系。土壤养分尤其是有机肥的施入也大大增加了土壤微生物的营养源,结果促成了土壤微生物生物量和生理活性的提高,而施化肥特别是缺素施肥处理的作用效果则较为有限。本试验结果也显示,不同施肥处理对土壤转化酶活性的影响与对土壤有机质含量、腐植酸含量及微生物生物量碳的影响规律是一致的。

土壤转化酶对于驱动土壤碳循环及增加易溶性营养物质有重要作用<sup>[14]</sup>。孙瑞莲等<sup>[21]</sup>研究证实,土壤酶活性与土壤养分存有显著相关性,其中有机碳含量对转化酶活性的影响最大。外源养分,如有机肥的施入大大增加了土壤有机碳含量,这为转化酶提供了更多的酶促基质,最大程度地提高了转化酶活性,加快了有机质的分解<sup>[22]</sup>。各化肥处理间,施 P 处理(NPK、NP、PK)土壤的转化酶活性普遍高于缺 P 处理(NK),因为供试土壤缺 NP 而富 K,所以缺 N、P 的施肥处理相比之下是不利于增强土壤转化酶活性的,其中又以缺 P 最为严重,因为缺 N 可以通过生物固氮或者大气沉降等途径得到一定程度的缓解<sup>[2]</sup>。

本研究通过长达 18 年的潮土长期定位施肥试验看出,不同施肥处理之间的差异已达到较为显著和稳定的水平,其中单施有机肥(OM)、平衡施化肥(NPK)或有机无机配施(1/2OMN)均能有效地调节土壤 pH、增加土壤有机碳与全氮含量,而且又以单施有机肥处理土壤的腐植酸含量、微生物生物量碳含量及转化酶活性最高,有机无机配施效果次之,说明长期施用有机肥最有利于提高土壤肥力质量与健康质量。

#### 参 考 文 献:

- [1] 周修冲, 刘国坚, Porth S. 平衡施肥在广东“三高”农业中的作用[J]. 广东农业科学, 1998, (1): 32-34.  
Zhou X C, Liu G J, Porth S. Effects of balance fertilization on Guangdong three-high-agriculture[J]. Guangdong Agric. Sci., 1998, (1): 32-34.
- [2] 王俊华, 尹睿, 张华勇, 等. 长期定位施肥对农田土壤酶活性及其相关因素的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(1): 191-196.  
Wang J H, Yin R, Zhang H Y *et al.* Changes in soil enzymes, microbial biomass, and soil nutrition status in response to fertilization regimes in a long-term field experiment[J]. Ecol. Environ., 2007, 16(1): 191-196.
- [3] 范晓晖, 林德喜, 沈敏, 钦绳武. 长期试验地潮土的矿化与硝化作用特征[J]. 土壤学报, 2005, 42(2): 340-343.  
Fan X H, Lin D X, Shen M, Qian S W. Characteristics of mineralization and nitrification in the calcareous soils from a long term fertilization experimental field[J]. Acta Pedol. Sin., 2005, 42(2): 340-343.
- [4] 刘小虎, 贾庆宇, 安婷婷, 等. 不同施肥处理对棕壤腐殖酸组成和性质的影响[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 328-332.  
Liu X H, Jiao Q Y, An T T *et al.* Effects of fertilization on soil humus components and brown soil properties[J]. Chin. J. Soil Sci., 2005, 36(3): 328-332.
- [5] 刘康怀, 李纯, 兰俊康, 张力. 广西主要类型土壤腐植酸的环境化学特征[J]. 农业环境保护, 2002, 21(1): 49-51, 62.  
Liu K H, Li C, Lan J K, Zhang L. Environmentally Chemical features of humic acid in main types of soils in Guangxi Zhuang Autonomous Region[J]. Agro-Environ. Prot., 2002, 21(1): 49-51, 62.
- [6] 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, 1981. 62-142.  
Institute of Soil Science, CAS. Analytical methods of soil physics and chemistry[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1981. 62-142.
- [7] 卢静, 朱珉, 侯彬, 赵艳锋. 腐植酸与土壤中重金属离子的作用机理研究概况[J]. 腐植酸, 2006(5): 1-5.  
Lu J, Zhu K, Hou B, Zhao Y F. General situation of the reaction mechanisms of humic substances with heavy metal ions in soil[J]. Humic Acid, 2006, (5): 1-5.
- [8] 胡曰利, 吴晓英. 土壤微生物生物量作为土壤质量生物指标的研究[J]. 中南林业学院学报, 2002, 22(3): 51-53.  
Hu Y L, Wu X F. Discussion on soil microbial biomass as a bio-indicator of soil quality for latosol earth[J]. J. Central South For. Univ., 2002, 22(3): 51-53.
- [9] Warentin B P. The concept of soil quality[J]. J. Soil, Land Water Conserv., 1995, 50: 226-228.
- [10] Roy S, Singh J S. Consequences of habitat heterogeneity for availability of nutrients in a dry tropical forest[J]. J. Ecol., 1994, 82: 503-509.
- [11] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京: 农业出版社, 1986. 226-251.  
Xu G H, Zheng H Y. Manual of soil microbiological analytical methods[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986: 249-251.
- [12] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996. 168-170.  
Liu G S. Soil physical and chemical analysis & description of soil profiles[M]. Beijing: Standards Press of China, 1996. 168-170.
- [13] 褚海燕, 曹志洪, 谢祖彬, 等. 镧对红壤微生物碳、氮及呼吸强度的影响[J]. 中国稀土学报, 2001, 19(2): 158-160.  
Chu H Y, Cao Z H, Xie Z B *et al.* Effects of lanthanum on micro-

- bial biomass carbon, nitrogen and respiration in red soil[J]. *J. Rare-Earths*, 2001, 19(2): 158-160.
- [14] 郑洪元, 张德生. 土壤动态生物化学研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1982. 173-265.  
Zheng H Y, Zhang D S. Research methods of soil dynamic biochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1982. 173-265.
- [15] Chu H Y, Fujii T, Morimoto S *et al.* Community structure of ammonia-oxidizing bacteria under long-term application of mineral fertilizer and organic manure in a sandy loam soil[J]. *Appl. Environ. Microb.*, 2007, 73(2): 485-491.
- [16] 李杨, 黄国宏, 史奕. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对农田土壤微生物及其相关因素的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(12): 2321-2325.  
Li Y, Huang G H, Shi Y. Effect of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on soil microbes and related factors[J]. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2003, 14(12): 2321-2325.
- [17] 殷士华. 土壤微生物量及其与养分循环的关系研究进展[J]. *土壤学进展*, 1993(4): 1-8.  
Yin S H. Research progress in soil microbial biomass and its correlation with nutrient cycling[J]. *Prog. Soil Sci.*, 1993, (4): 1-8.
- [18] 付慧兰, 邹永久, 杨振明, 等. 大豆连作土壤 pH 与土壤酶活性[J]. *大豆科学*, 1997, 16(2): 156-161.  
Fu H L, Zou Y J, Yang Z M *et al.* Soil pH of continuous cropping soybean and soil enzyme activity[J]. *Soybean Sci.*, 1997, 16(2): 156-161.
- [19] 田秀平, 李玉梅, 韩晓日. 大豆长期连作及施肥对白浆土 pH 和铁、锌、铜、锰形态的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(2): 253-255.  
Tian Y P, Li Y M, Han X R. Effect of long-term successive planting of soybean and fertilization on pH and forms of Fe, Zn, Cu and Mn in albic soil[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2003, 9(2): 253-255.
- [20] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 55-58.  
Huang C Y. Soil science[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000. 55-58.
- [21] 孙瑞莲, 赵秉强, 朱鲁生, 等. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(4): 406-410.  
Sun R L, Zhao B Q, Zhu L S *et al.* Effects of long-term fertilization on soil enzyme activities and its role in adjusting-controlling soil fertility[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2003, 9(4): 406-410.
- [22] 蒋和, 翁文钰, 林增泉. 施肥十年后的水稻土微生物学特性和酶活性的研究[J]. *土壤通报*, 1990, 21(6): 265-268.  
Jiang H, Weng W Y, Lin Z Q. Microbiological properties and enzyme activities of paddy soil after ten years of fertilization[J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 1990, 21(6): 265-268.