

平菇栽培废料等有机肥对土壤活性有机质和土壤酶活性的影响

申进文¹, 沈阿林², 张玉亭², 霍云凤³

(1 河南农业大学生命科学学院, 郑州 450002; 2 河南省农业科学院, 植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002; 3 河南科技学院, 新乡 453003)

摘要: 通过大田试验研究了不施有机肥(CK)、施用平菇栽培废料(T1)、施用于腐熟牛粪(T2)和烘干鸡粪(T3)在种植黄瓜 0~150 d 内土壤中活性有机质和 4 种土壤酶活性的变化。结果表明: 施入不同有机肥对土壤总有机质含量的影响为烘干鸡粪 > 平菇栽培废料 > 干腐熟牛粪 > 对照; 对活性有机质含量的影响为平菇栽培废料 > 烘干鸡粪 > 干腐熟牛粪 > 对照; 施用平菇栽培废料的土壤中脲酶、转化酶和脱氢酶活性最高, 施用于腐熟牛粪的土壤中过氧化氢酶活性最高。相关性分析显示, 脲酶、转化酶和脱氢酶活性与土壤活性有机质显著相关。用平菇栽培废料做有机肥能有效提高土壤活性有机质含量和土壤酶活性。

关键词: 土壤; 平菇栽培废料; 活性有机质; 土壤酶活性

中图分类号: S153.6⁺2; S141

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2007)04-0631-06

Effects of different organic fertilizers on soil labile organic matter and enzyme activity

SHEN Jin-wen¹, SHEN A-lin², ZHANG Yu-ting², HUO Yun-feng³

(1 College of Life Science, Henan Agriculture University, Zhengzhou 450002, China; 2 Institute of Plant Nutrition, Agricultural Resource and Environmental Science, Henan Academy of Agricultural Science, Zhengzhou 450002, China;

3 Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract: The labile organic matter and enzyme activities of urease, invertase, catalase and dehydrogenase were studied in soils treated with no organic fertilizer(CK), with waste culture material of *Pleurotus ostreatus*(T1), dried composted cattle dung (T2) and dried chicken manure (T3) during the growing period of cucumber (0-150d). The results showed that different fertilizers had different effects on the contents of total organic matter, following the order from high to low: dried chicken manure, waste culture material of *Pleurotus ostreatus*, dried composted cattle dung and control. For the effects on the contents of labile organic matter, the order was waste culture material of *Pleurotus ostreatus* > dried chicken manure > dried composted cattle dung > control. Enzyme activities of urease, invertase, and dehydrogenase in soil treated with waste culture material of *Pleurotus ostreatus* were the highest, and the enzyme activity of catalase was highest in soil treated with dried composted cattle dung. Labile organic matter showed significant positive correlations with the activities of urease, invertase, and dehydrogenase. It was concluded that the content of labile organic matter and soil enzyme activities could be improved efficiently when waste culture material of *Pleurotus ostreatus* was used as organic fertilizer.

Key words: soil; waste material cultured *pleurotus ostreatus*; labile organic matter; enzyme activity

土壤有机质是土壤肥力的重要指标,它影响土壤的物理、化学及生物性质,在土壤肥力方面起着关

键性的作用^[1]。土壤有机质可分为活性有机质(Labile organic matter, LOM)和非活性有机质(Non-labile

收稿日期: 2007-02-28 修改稿收到日期: 2007-04-16

基金项目: 河南省重点科技攻关项目(0223013100)资助。

作者简介: 申进文(1964—),男,河南郑州人,研究员,主要从事食药菌及其栽培废料利用研究。

Tel: 13607660586, E-mail: shenjinwen666@163.com

organic matter, NLOM),前者是指能被 333 mmol/L KMnO_4 完全氧化的部分,后者则不能被完全氧化^[2]。活性有机质根据氧化剂 KMnO_4 的浓度(33 mmol/L、167 mmol/L、333 mmol/L)又可分为高活性有机质、中活性有机质和活性有机质^[3]。由于活性有机质与土壤有效养分、土壤物理性状、耕作措施等具有更密切的关系,近年来正受到土壤肥料研究领域的重视,并成为土壤质量及土壤管理的评价指标之一^[4]。而许多土壤酶活性与土壤有机质含量存在一定的正相关关系,可用来了解或预测某些营养物质的转化情况以及土壤肥力的演变趋势^[5]。

有机肥料在保持、改善和提高土壤肥力,活化土壤养分,增强微生物活性,促进农作物高产、优质等方面有着不可替代的作用^[6-9]。目前,对人畜粪便和农作物秸秆作有机肥的研究较多,而对食用菌栽培中产生的废料可否作有机肥的研究较少,有关食用菌栽培废料作有机肥影响土壤有机质数量和质量的研究鲜见报道^[10]。食用菌生产已成为我国农村经济中发展迅速的一项新兴产业,在我国农村经济的发展中发挥了重要作用。平菇是我国栽培量最大的食用菌,其栽培每年要产生大量的废料,但并未得到有效利用。平菇栽培废料中不仅含有大量的有机质和氮、磷、钾等营养成分^[11],同时还含大量的菌体蛋白及未被充分利用的养料。因此,如何有效利用

平菇栽培废料,使其变废为宝且减少资源浪费和环境污染,是一项值得深入研究的具有重要意义的问题。本文研究了平菇栽培废料作有机肥对土壤活性有机质和土壤酶活性的影响,以期和平菇栽培废料的合理利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2005年3月至2005年8月在河南省郑州市惠济区蔬菜日光温室大棚进行。共设4个处理:(1)对照,不施有机肥(CK);(2)干平菇栽培废料做基肥(T1);(3)干腐熟牛粪做基肥(T2);(4)烘干鸡粪做基肥(T3),每个处理3次重复。种植作物为黄瓜,供试黄瓜品种为“豫园新秀”。施肥处理区的有机肥用量均为 3 kg/m^2 。黄瓜生长期间各处理均不追施肥料,按照黄瓜常规栽培方法进行管理。温室栽培畦长 6.0 m,株行距为 $30 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$,小区面积为 $6 \text{ m} \times 1.8 \text{ m} = 10.8 \text{ m}^2$ 。

供试土壤为潮土,主要化学性质为:有机质 12.67 g/kg ,全氮 1.12 g/kg ,全磷 1.10 g/kg ,全钾 14.7 g/kg 。供试有机物为平菇栽培废料,有机肥为干腐熟牛粪和烘干鸡粪,其主要养分含量见表1。平菇栽培废料作基肥施用前先将其捣碎并暴晒7 d以杀灭菌丝。

表1 供试有机肥(物)的养分含量(g/kg)

Table 1 Nutrient content of organic fertilizer (matter)

有机肥(物) Organic fertilizer(matter)	有机质 Org. matter	全氮 Tot. N	全磷 Tot. P	全钾 Tot. K
平菇栽培废料 Waste culture material	563.2	6.90	0.56	0.85
干腐熟牛粪 Dried composted cattle dung	706.7	15.2	6.15	7.93
烘干鸡粪 Dried chicken manure	489.5	21.3	8.91	13.2

1.2 采样分析

在黄瓜种植 0d、30d、90d 和 150d 分别采集 0—30cm 土样,混合均匀后分成 2 份,一份自然风干后过 1mm 筛,按文献[1]的方法测定土壤有机质和活性有机质;另一份直接用鲜样按文献[12]的方法测定土壤脲酶、转化酶、过氧化氢酶和脱氢酶活性。

2 结果与分析

2.1 不同有机肥对土壤活性有机质的影响

表2结果显示,不施有机肥的对照处理(CK),其土壤有机质总量在 150d 的黄瓜生长期间基本不

变,而施用3种不同有机肥的土壤总有机质呈上升趋势,具体表现为 $T3 > T1 > T2$ 。

不施有机肥的土壤(CK)活性有机质含量呈现下降趋势,当黄瓜生长到 150d 时,土壤活性有机质比初始降低了 15.23%,说明在 CK 处理中,主要增长的是非活性有机质,这与徐明岗等人的研究结果一致^[1]。在等量施加有机肥时,实际施入土壤有机质的量为 $T2 > T1 > T3$,但土壤总有机质的变化表现为 $T3 > T1 > T2$,而土壤活性有机质的变化表现为 $T1 > T3 > T2$,并不完全与施入有机质的量的多少一致,说明土壤有机质的增长与施入有机质的易降解程度

表 2 施入不同有机肥后土壤总有机质及活性有机质的变化

Table 2 Contents of total and labile organic matter in soils treated with different organic fertilizers

处理 Treat.	施入有机质量(kg/m ²) Amount of applied OM		土壤中有有机质含量(g/kg) Soil organic matter content							
	总有机质 TOM	活性有机质 LOM	总有机质 TOM				活性有机质 LOM			
			0 d	30 d	90 d	150 d	0 d	30 d	90 d	150 d
CK	0	0	12.67	13.00	12.89	12.61	1.97 (15.55)	1.86 (14.31)	1.75 (13.58)	1.67 (13.21)
T1	1.69	0.341	12.67	13.46*	14.57**	14.81**	1.97 (15.55)	2.73* (20.28)	2.84** (19.49)	2.92** (19.72)
T2	2.12	0.271	12.67	13.21*	14.26**	14.30**	1.97 (15.55)	2.54* (19.23)	2.62** (18.37)	2.81** (19.65)
T3	1.47	0.269	12.67	13.72*	14.02**	14.90**	1.97 (15.55)	2.63* (19.17)	2.78** (19.83)	2.86** (19.19)

注:括号内数据为土壤活性有机质与总有机质含量的百分比(%);*与CK相比,在0.05水平上差异性显著;**与CK相比,在0.01水平上差异性显著。

Note: The data in brackets is the percentage of labile organic matter in total organic matter; * Difference is significant at the 0.05 level and ** is significant at the 0.01 level compared with CK.

有很大的关系。施入的平菇栽培废料不仅有有机质含量较高,而且因其含有大量的已自溶的菌丝体,其有机物更易被转化成为腐植物质,使得土壤中活性有机质的增加量较大。

2.2 施用不同有机肥对土壤酶活性的影响

在黄瓜种植0 d、30 d、90 d和150 d分别测定土壤的4种酶活性。由图1~图4可以看出,4种处理的土壤中,所检测的土壤酶活性均发生了一定的变化。总体来讲,施用有机肥的土壤酶活性明显高于对照,4种酶活性变化主要体现在生长中期,即生长90 d时均达到最大值,之后则出现下降。不同酶活性变化差别较大。

脲酶是土壤中最活跃的水解酶类之一,能水解施入土壤中的尿素,释放出供作物利用的铵离子,脲酶的活性与土壤中有有机物质含量、氮的供给与利用情况、土壤微生物量和其它养分含量相关^[13-14]。由图1可知,在等量施入干平菇栽培废料、腐熟干牛粪和烘干鸡粪的情况下,土壤的脲酶活性明显增加,脲酶活性大小表现为T1>T3>T2>CK,且当黄瓜生长至90 d时,T1处理的土壤脲酶活性达到最高,不仅比CK提高22.1%,而且比T2和T3分别提高8.1%和3.1%。其原因可能是,施用平菇栽培废料增加了土壤中活性有机质的含量,这为微生物的生长提供了较多更易利用的碳源、氮源等营养物质,促进了

微生物的生长,增加了某些土壤微生物的群体数量。微生物数量的增加及其生长速率的增大可有效地促进脲酶的活性,这是因为:(1)微生物细胞的增殖和裂解可释放出脲酶,增加土壤中脲酶的含量,这也是土壤脲酶的主要来源^[12];(2)脲酶的酶促反应动力学表明,脲酶与底物形成活化络合物时需外界提供一定的能量才能完成活化络合物形成时必须具有的较强的应变、扭曲,甚至键的断裂等变化,从而达到过渡态,而能量主要由土壤中的微生物分解有机物供给,较大数量微生物的新陈代谢能有效地提供脲酶发挥作用所需的能量^[15];(3)土壤中活性有机质是脲酶的重要载体,它们能为脲酶发挥作用提供场所^[14]。

土壤转化酶是与土壤有机碳转化有关的酶类之一,其活性大小可以间接地表征土壤有机碳的转化情况^[16]。图2显示了4个处理中土壤转化酶活性的变化,T1处理的土壤转化酶活性比其它处理都高,黄瓜生长90 d时达到11.2,此后开始下降。由此说明,用平菇栽培废料做基肥时有利于土壤中有机碳的转化。

过氧化氢酶是生物细胞的一类保护酶,保护细胞免受各种自由基的毒害^[16]。从图3可以看出,平菇栽培废料做基肥时,虽然对土壤过氧化氢酶活性的影响低于腐熟牛粪,但仍然对土壤过氧化氢酶的

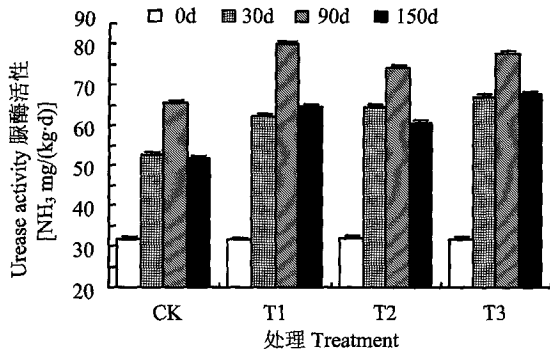


图 1 施用不同有机肥土壤中脲酶活性的变化

Fig.1 The change of urease activity in soils treated with different organic fertilizers

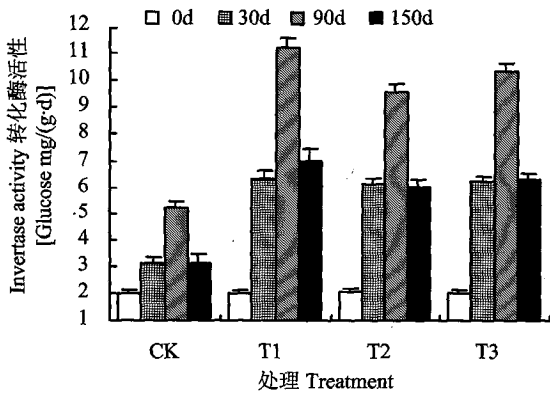


图 2 施用不同有机肥土壤中转化酶活性的变化

Fig.2 The change of invertase activity in soils treated with different organic fertilizers

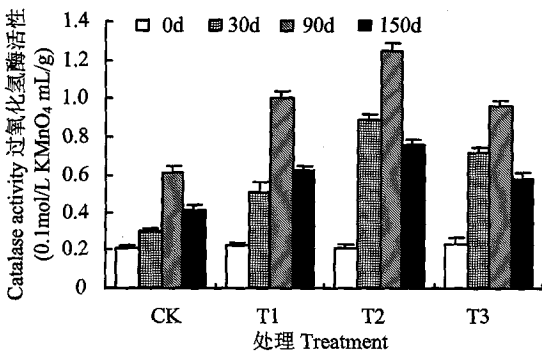


图 3 施用不同有机肥土壤中过氧化氢酶活性的变化

Fig.3 The change of catalase activity in soils treated with different organic fertilizers

脱氢酶是典型的胞内酶,其活性的大小可反映土壤微生物的数量和活性^[17]。图 4 结果显示,T1 处理的土壤中脱氢酶活性明显高于其它处理,在黄瓜生长 90 d 时达到 58.1,比 CK、T2 和 T3 分别高出 72.9%、24.4% 和 8.4%,表明平菇栽培废料可为微生物生长提供相对更易利用的碳源、氮源等营养成分,可有效促进土壤中微生物的生长与活动,从而提高土壤脱氢酶的活性。

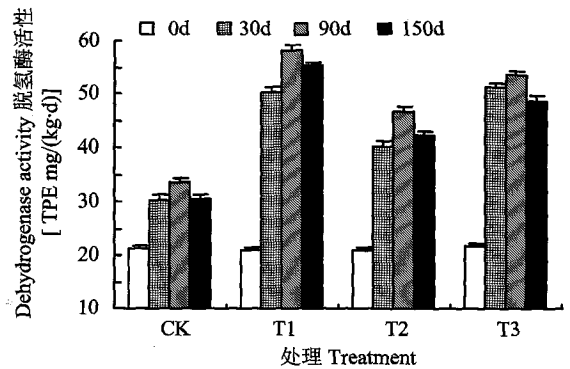


图 4 施用不同有机肥土壤中脱氢酶活性变化

Fig.4 The change of dehydrogenase activity in soils treated with different organic fertilizers

2.3 土壤活性有机质与土壤酶活性的相关性分析

已有研究表明,绝大多数土壤酶活性与土壤有机质含量呈显著正相关,测定相应土壤酶活性,可以间接地了解或预测某些营养物质的转化情况以及土壤肥力的演变趋势^[5]。本试验运用皮尔逊双侧显著检验法对 T1 处理的土壤有机质和酶活性之间的相关性进行了检验。从表 3 可以看出:1)土壤总有机质和活性有机质与脲酶、转化酶和脱氢酶活性的相关性显著,而与过氧化氢酶活性的相关性不显著,活性有机质与脲酶、转化酶和脱氢酶活性的相关性更为显著;2)土壤活性有机质与所检测的 4 种土壤酶活性之间的相关性普遍高于总有机质与酶之间的相关性,表明活性有机质对土壤酶活性的影响更为明显。究其原因可能是施用平菇栽培废料使土壤中的活性有机质增加,而活性有机质不仅为酶提供了载体或底物,而且使土壤微生物的数量和活性大幅度提高,从而使土壤中的酶的含量得到提高并促进了酶的活性。

活性有较大影响,与 CK 相比,在黄瓜生长 90 d 时,平菇栽培废料做基肥时土壤过氧化氢酶活性提高了 63.9%。

表 3 施用平菇栽培废料土壤中有有机质与土壤酶活性的相关系数
Table 3 Correlation coefficients between organic matter and enzyme activities in soil treated with waste culture material of *Pleurotus ostreatus*

项目 Item	脲酶 Urease	转化酶 Invertase	过氧化氢酶 Catalase	脱氢 Dehydrogenase
总有机质 TOM	0.574*	0.725**	0.324	0.653**
活性有机质 LOM	0.621*	0.836**	0.357	0.746**

注: * 在 0.05 水平上相关性显著(n=20); ** 在 0.01 水平上相关性显著(n=20)。

Note: Correlation is significant at the 0.05 Level(n=20); ** Correlation is significant at the 0.01 level(n=20).

3 讨论

土壤活性有机质和土壤酶活性是表征土壤质量和土壤肥力的两个重要指标。本文探讨了施用平菇栽培废料对土壤活性有机质和酶活性的影响,并分析了二者之间的相关性。试验结果表明,施用平菇栽培废料不仅可以增加土壤中活性有机质的含量,而且可以增加土壤中脲酶、转化酶、过氧化氢酶和脱氢酶的活性,其效果还要优于干腐熟牛粪(过氧化氢酶除外)和烘干鸡粪。土壤活性有机质和土壤酶活性之间的相关性分析显示,施用平菇栽培废料的土壤活性有机质与脲酶、转化酶和脱氢酶活性之间有显著的相关性。

不同来源的有机肥在营养成分上有较大的差别,这种差别不仅体现在各成分的含量上,更为重要的是体现在有机营养成分在土壤中的转化情况,如溶解性有机质(Dissolved organic matter, DOM)尤其是溶解性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)和溶解性有机氮(Dissolved organic nitrogen, DON)的产生、转化及利用^[18-20]。如果施用有机肥后其成分在土壤中不能被有效地转化利用,那么即使是有较高的含量,也起不到好的效果。因此在评价有机肥时,不仅要看其中营养成分的含量,也需要注重其成分在土壤中的转化利用情况和对土壤理化性质及土壤微环境的影响。

我国是食用菌生产大国,每年产生大量的栽培废料。食用菌栽培废料含有大量的菌体蛋白、多种代谢产物及未被充分利用的养料,是良好的有机资源。但长期以来,食用菌栽培废料却没有得到有效利用,反而随意丢弃,造成了巨大的资源浪费,还使食用菌栽培环境的杂菌基数不断增加,致使食用菌栽培杂菌污染越来越严重,影响了食用菌栽培的产量和效益。将食用菌栽培废料处理后作为有机肥使用,不仅可以提高土壤肥力,同时也可以变废为宝,形成农业生态系统的良性循环,还能减少环境污染,降低食用菌栽培环境的杂菌基数,促进食用菌产业

的健康可持续发展。

从本试验的结果来看,土壤中某些酶的活性与土壤活性有机质含量之间的相关性比其与土壤总有机质之间的相关性更为明显,更适合用来了解或预测某些营养物质的转化情况以及土壤肥力的演变趋势。但在其它类型土壤中或使用其它有机肥是否具有这种相关性,还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 徐明岗,于荣,王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J]. 土壤学报,2006,43(5): 723-729.
Xu M G, Yu R, Wang B R. Labile organic matter and carbon management index in red soil under long-term fertilization[J]. Acta Pedol. Sin, 2006, 43(5): 723-729.
- [2] Lefroy R D B, Lisle L. Soil organic carbon changes in cracking clay soils under cotton production as studied by carbon fractionation[J]. Australian J. Agric. Res., 1997, 48: 1049-1058.
- [3] Logninow W, Wisniewski W, Strony W M *et al.* Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation[J]. Polish J. Soil Sci., 1987, 20: 47-52.
- [4] 徐明岗,于荣,王伯仁. 土壤活性有机质的研究进展[J]. 土壤肥料,2000(6): 3-7.
Xu M G, Yu R, Wang B R. Progress on the study of soil active organic matter[J]. Soil Fert., 2000(6): 3-7.
- [5] 吴凤芝,赵凤艳,谷思玉,等. 保护地黄瓜连作对土壤生物化学性质的影响[J]. 农业系统科学与综合研究,2002,18(1): 19-22.
Wu F Z, Zhao F Y, Gu S Y *et al.* Effect of the continuous cultivating cucumber on the bio-chemical properties of soil in the plastic greenhouse[J]. System Sci. Compreh. Stud. Agric, 2002, 18(1): 19-22.
- [6] Yuan L, Huang J, Yu S. Responses of nitrogen and relate enzyme activities to fertilization in rhizosphere of wheat[J]. Pedosphere, 1997, 7(2): 141-148.
- [7] 倪进治,徐建民,谢正苗,唐才贤. 不同有机肥料对土壤生物活性有机质组分的动态影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(4): 374-378.
Ni J Z, Xu J M, Xie Z M, Tang C X. Effects of different organic manure on biologically active organic fractions of soil [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2001, 7(4): 374-378.
- [8] 杨青华,韩锦峰. 棉田不同覆盖方式对土壤微生物和酶活性的

- 影响[J]. 土壤学报, 2005, 42 (2): 348-351.
- Yang Q H, Han J F. Effects of mulching on soil microorganisms and enzyme activities in cotton field[J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2005, 42 (2): 348-351.
- [9] 李菊梅, 徐明岗, 秦道珠, 等. 有机肥无机肥配施对稻田氨挥发和水稻产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1): 051-056.
- Li J M, Xu M G, Qin D Z *et al.* Effects of chemical fertilizers application combined with manure on ammonia volatilization and rice yield in red paddy soil [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2005, 11(1): 051-056.
- [10] 李学梅. 食用菌菌渣的开发利用[J]. 河南农业科学, 2003, 5: 40-42.
- Li X M. Application and utilization of waste culture material of edible fungus[J]. *J. Henan Agric. Sci.*, 2003, 5: 40-42.
- [11] 陈翠玲. 食用菌栽培废料养分含量分析[J]. 河南农业科学, 2004, 4: 28-29.
- Chen C L. Analysis on nutrient contents of cultivation waste of edible mushroom[J]. *J. Henan Agric. Sci.*, 2001, 4: 28-29.
- [12] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986, 1-13.
- Guan S Y. Soil enzyme and its research method[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986. 1-13.
- [13] 尤彩霞, 陈清, 任华中, 等. 不同有机肥及有机无机配施对日光温室黄瓜土壤酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 521-523.
- You C X, Chen Q, Ren H Z *et al.* Effect of organic manure with and without urea-dressing on soil enzyme activities in greenhouse growing cucumber[J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2006, 43(3): 521-523.
- [14] 李东坡, 武志杰, 陈利军, 等. 长期培肥黑土脲酶活性动态变化及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2003, 14 (12): 2208-2212.
- Li D P, Wu Z J, Chen L J *et al.* Dynamics of urease activity in a long-term fertilized black soil and its affecting factors[J]. *Chin. J. Appl. ecol.*, 2003, 14 (12): 2208-2212.
- [15] 和文祥, 朱铭莪, 童江云, 等. 有机肥对土壤脲酶活性特征的影响[J]. 西北农业学报, 1997, 6 (2): 73-75.
- He W X, Zhu M E, Tong J Y *et al.* Effect of organic fertilizer on the characteristics of soil urease [J]. *Acta Agric. Bor.-Occident. Sin.*, 1997, 6 (2): 73-75.
- [16] 林匡飞, 徐小清, 郑利, 等. 土壤锗污染对土壤酶活性的生态毒理效应[J]. 土壤学报, 2005, 42 (1): 107-110.
- Lin K F, Xu X Q, Zheng L *et al.* Eco-toxicological effects of Ge-pollution on soil enzyme activities in soil [J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2005, 42 (1): 107-110.
- [17] 褚海燕, 朱建国, 谢祖彬, 等. 稀土元素镧对红壤脲酶、酸性磷酸酶活性的影响[J]. 农业环境保护, 2000, 19 (4): 193-195.
- Chu H Y, Zhu J G, Xie Z B *et al.* Effects of Lan thanum on urease and acid phosphatase activities in red soil [J]. *Agro-Environ. Prot.*, 2000, 19 (4): 193-195.
- [18] 陈同斌, 陈志军. 土壤中溶解性有机质及其对污染物吸附和解吸行为的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(3): 201-210.
- Chen T B, Chen Z J. Dissolved organic matter and its effects on adsorption and desorption of pollutants in soils [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 1998, 4 (3): 201-210.
- [19] Kuitert A T, Mulder W. Water-soluble organic matter in forest soils [J]. *Plant Soil*, 1993, 152 (2): 215-224.
- [20] 赵劲松, 张旭东, 袁星, 等. 土壤溶解性有机质的特性与环境意义[J]. 应用生态学报, 2003, 14 (1): 126-130.
- Zhao J S, Zhang X D, Yuan X *et al.* Characteristics and environmental significance of soil dissolved organic matter [J]. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2003, 14(1): 126-130.