植物营养与肥料学报 2007,13(4):625 - 630
Plant Nutrition and Fertilizer Science

# 纤维素降解菌对农业有机废弃物发酵进行 $CO_2$ 施肥的作用

都韶婷，杜 静，章永松*，林咸永，于承艳
(浙江大学环境与资源学院,教育部环境修复与生态健康重点实验室,浙江杭州 310029)

**摘要**：采用室内培养和大棚试验相结合,对分离的 3 种纤维素降解菌在有机废弃物发酵释放 $CO_2$ 中的作用及其对增加大棚 $CO_2$ 浓度的效果进行了研究。结果表明,分离获得的三种菌均能明显促进有机废弃物发酵 $CO_2$ 的释放,其中菌 A 和菌 C 的效果优于菌 B; 3 种菌混合接种时效果最佳。在大棚栽培条件下,昼间 $CO_2$ 浓度大部分时间低于 300 μL/L,处于亏缺状态; 采用棚中不接种直接发酵也可大幅提高大棚的 $CO_2$ 浓度,但释放的时间只有 9 d 左右; 采用 3 种菌混合接种的方法棚内全天维持 $CO_2$ 浓度 800 μL/L 以上的时间可达 14 d 以上。

**关键词**：有机废弃物; 生物发酵; 大棚 $CO_2$ 施肥; 纤维素降解菌
**中图分类号**：S141.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**:1008-505X (2007)04-0625-06

# Effects of cellulose-degradation fungi on $CO_2$ enrichment by bio-fermentation of agricultural organic wastes

DU Shao-ting, DU Jing, ZHANG Yong-song*, LIN Xian-yong, YU Cheng-yan
(*Ministry of Education Key Lab. of Environmental Remediation and Ecosystem Health, College of Environmental and Resources Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China*)

**Abstract**: The impacts of three cellulose-degradation fungi isolated from compost on $CO_2$ release from fermentation of organic solid wastes and the effects of the fermentation on $CO_2$ enrichment in greenhouse were studied by carrying out an incubation experiment and a trial in greenhouse. Although all three cellulose-degradation fungi (fungus A, fungus B and fungus C) could accelerate $CO_2$ release from fermentation of organic wastes, fungus A and fungus C were more efficient comparing to fungus B. The treatment inoculated with the mixture of three fungi showed the best results on $CO_2$ release. The concentration of $CO_2$ in greenhouse was lower than 300 μL/L during the majority of daytime, indicating $CO_2$ is deficient. $CO_2$ concentration in greenhouse could also largely be improved by fermentation of organic solid wastes without fungus inoculation, but the effective duration only lasts around 9 days. The fastigium and effective duration of $CO_2$ release could be significantly prolonged by inoculating fermentation medium with the mixture of three fungi, which could maintain $CO_2$ concentration higher than 800 μL/L during daytime for at least 14 days.

**Key words**: organic solid wastes; bio-fermentation; $CO_2$ enrichment; cellulose-degradation fungi

人口、环境与资源是 21 世纪全世界所面临的重大问题。农业生态系统中不合理的碳循环,如大量秸秆还田引起的水稻田释放大量的 $CH_4$ 和 $CO_2$,大量秸秆就地焚烧带来的环境污染和 $CO_2$ 排放等对整个生态系统和环境造成了不良后果[1-3]。我国是一个农业大国,又是一个畜牧大国。据粗略统计,每年产生农作物秸秆约 7 亿吨,禽畜粪肥 17.3 亿吨,但利用率很低,既造成生物资源的浪费,也对环境造成

**收稿日期**：2006-04-13　　**修改稿收到日期**：2006-07-15
**基金项目**：浙江省自然科学基金重点项目(Z303465); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2002CB410806); 浙江省"三农五方"项目资助。
**作者简介**：都韶婷(1980—),女,浙江海宁人,博士研究生,主要从事废弃物资源化和养分综合管理研究工作。
Tel: 0571-86971147, E-mail: dushaoting@gmail.com。* 通讯作者 Tel: 0571-86971151, E-mail: yszhang@zju.edu.cn

了严重污染[4-6]。另一方面,近年来我国的作物大棚栽培发展十分迅速,到1998年底,全国以蔬菜栽培为主体的设施园艺面积已达86.7万公顷,居世界第一位,比1981年增长了120倍[7]。然而,大棚栽培中$CO_2$亏缺和土壤退化问题相当严重,已严重制约了大棚栽培经济效益的发挥,进行$CO_2$施肥非常必要。由于农业有机废弃物中含有大量的碳素及其它矿质营养元素,经微生物好氧降解可产生大量的$CO_2$和生物热能。为此我们提出了采用农业有机废弃物生物发酵进行大棚$CO_2$施肥、利用发酵残渣解决土壤退化问题的新思路,并对有机废弃物生物发酵产生$CO_2$的最佳条件进行了探索[8]。然而,进一步试验发现,直接发酵$CO_2$释放的持续时间较短。

有机废弃物生物发酵过程是一个由微生物参与的分解有机物的生物化学过程,有机废弃物降解速度的快慢和降解程度与参与降解的微生物种群密切相关。为此,本试验对好氧堆肥的纤维素分解菌进行了分离,并检验了它们对加速$CO_2$释放和延长$CO_2$持续释放时间的作用,为该方法在生产上的应用进一步提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 纤维素分解菌的分离

1.1.1 培养基 1)羧甲基纤维素钠增殖培养液:CMC-Na 20 g,蛋白胨2.5 g,酵母膏0.5 g,$Na_2HPO_4$ 2.5 g,$KH_2PO_4$ 1.5 g,琼脂20 g,蒸馏水1000 mL,pH 7.0~7.5,0.15 MPa灭菌25~30 min备用[9]。2)滤纸条培养基:$(NH_4)_2SO_4$ 1 g,$MgSO_4.7H_2O$ 0.5 g,$K_2HPO_4$ 1 g,酵母膏0.1 g,滤纸条(1cm×7cm)一块,蒸馏水1000 mL,0.15 MPa灭菌25~30 min备用[9]。3)斜面种子培养基:葡萄糖20 g,蛋白胨2 g,酵母膏3 g,琼脂20 g,蒸馏水1000 mL,$(NH_4)_2SO_4$ 5 g,0.15 MPa灭菌25~30 min备用[9]。

1.1.2 增殖培养 考虑到降解纤维素的微生物主要是嗜热性微生物,故从先前试验的经50℃处理的菌种中收集[8]。将5 g样品置于100 mL的无菌水中,震荡、搅拌,静置1 h,用无菌纱布过滤。取定量滤液接种到盛有增殖培养液的三角瓶内,在50℃下进行摇床培养,3 d后取下三角瓶,用无菌纱布过滤,以得到所需菌种的滤液。

1.1.3 分离与纯化 取滤液的上部清液,在羧甲基纤维素钠培养基上涂布,于40℃培养箱中培养3 d。挑取不同形态的单个菌落接种到盛有滤纸条培养基的三角瓶中,在50℃下培养。若滤纸条分解则按上述方法继续划线分离、培养,得到有滤纸分解能力的纯菌种。

1.1.4 筛选 将得到的菌种回接到滤纸条培养基上,摇床振荡培养48 h,根据其对滤纸培养基的崩解情况筛选得到分解纤维素能力较强的3株菌,分别标记为:菌A、菌B、菌C。将3株菌分别接种到种子培养基斜面上保存,供下列试验使用。

1.1.5 降解菌的制备 在装有1000 mL增殖培养液的5000 mL容器中,分别接入菌A、菌B和菌C,30℃下在摇床上振荡培养72 h,备用。

### 1.2 不同菌株对$CO_2$释放量影响试验

稻草(取自本校农场)和猪粪(取自本校动科院畜牧场)。试验前均已经过自然风干、除杂、粉碎处理,其碳、氮含量和C/N比见表1。

**表1 供试有机废弃物碳、氮含量及C/N比**

**Table 1 Contents of C, N and C/N ratio of organic solid wastes used in the experiments**

| 有机废弃物 Organic solid wastes | C (mg/g) | N (mg/g) | C/N | $H_2O$ (%) |
|---|---|---|---|---|
| 稻草 Rice straw | 358 | 5.8 | 61.7 | 7.9 |
| 干猪粪 Dry pig feces | 328 | 38.9 | 8.4 | 9.1 |
| 鲜猪粪 Fresh pig feces | 171 | 26.9 | 6.4 | 51.2 |

以5 g稻草和0.5 g猪粪作为发酵基质,以硫酸铵调节碳氮比至40:1,以磷酸缓冲液调节初始pH至7.0,含水量为70%。在发酵基质内接种相应的降解菌,并且混匀,放入500 mL锥形瓶中,在50℃的恒温箱内培养28 d,以石泽法[10]隔日测定不同处理$CO_2$释放量。根据接种情况,试验共设8个处理:1)对照(不接种);2)菌A;3)菌B;4)菌C;5)菌A+菌B;6)菌B+菌C;7)菌A+菌C;8)菌A+菌B+菌C。每个处理重复3次。

### 1.3 大棚产气效果试验

试验在3个小型塑料大棚(长×宽×高=6.5 m×5.4 m×2.5 m)中进行。分别设对照棚(无发酵罐)、不接种棚(放入发酵罐)和接种棚(放入发酵罐,并混合接入3种菌)3个处理。棚内均种满蔬菜。发酵罐为自行设计的伞形底好氧发酵罐(图1),采用民用房顶不锈钢蓄水桶改制而成。通气栅(C)设

计为伞顶状栅栏，以利于为基质好氧发酵供氧；水和酸分配板(E)为一只在底板上均匀钻有小孔的不锈钢槽板，当需调节基质水分和 pH 时，将水或酸倒入槽中即可使水或酸均匀分布进入基质。通过空气控制阀(D)调节进气量来控制发酵温度和通气状况。废渣出料口(H)用于发酵后期取出部分废渣，从发酵罐上部添加新料。

根据稻草和猪粪的 C、N 含量，按表 1 中的稻草和鲜猪粪 C、N 含量以及发酵基质最佳 C/N 为 40/1 计算，将 25 kg 稻草和 40 kg 鲜猪粪混合后其 C/N 刚好是 40/1。在接种处理基质中接入菌 A、菌 B 和菌 C，按 1∶1∶1 混合共 500 mL，所有基质均调 pH 至 6.5～7.0，含水量至 70%。然后将基质填入发酵罐开始发酵，每天在上午 7:30 和 11:30 定时以红外线二氧化碳分析仪测定各大棚的 $CO_2$ 浓度，采用定点定位(设离地面 50 cm、100 cm 和 150 cm 3 个高度)用塑料管通出大棚进行测定，连续进行 14 d，并在发酵后的第 7 d 和 14 d 测定了大棚 $CO_2$ 浓度日变化。根据从取样管道(G)取样分析，当 pH 升至 7.5 以上时进行 pH 调节，含水量降至 65% 以下时进行水分调节。在培养过程中未进行 2 次加料。

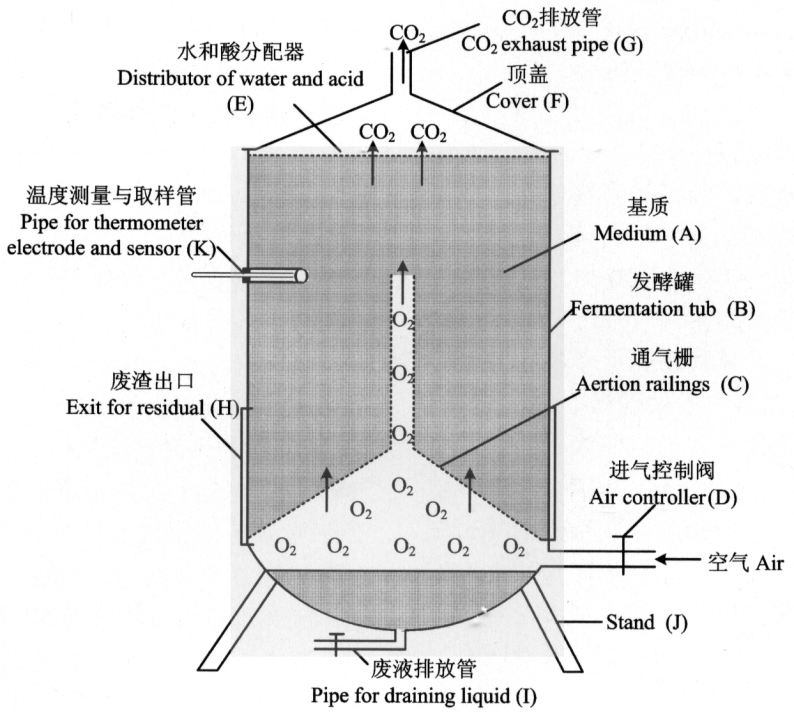


**图 1　$CO_2$ 生物发酵管装置图**

**Fig.1　The bio-reactor for $CO_2$ generation**

## 2　结果与分析

### 2.1　三种纤维素降解菌对有机废弃物发酵过程 $CO_2$ 释放量的影响

各处理培养 28 d $CO_2$ 累计释放量的变化情况(图 2)可以看出，在培养的前 5 d，各处理间的 $CO_2$ 释放量差异不大，这可能与发酵初期基质中含有部分易降解有机物有关。此后，随着易分解有机物的消耗，所有接种处理与对照(不接种)之间的差异开始变大。从单一菌接种结果来看，以接种菌 A 或菌 C 处理的效果较好，在培养期前 20 d 中菌 A 一直优于菌 C，但之后菌 C 的效果开始增大，从 24 d 开始效果接近菌 A，而菌 B 的效果一直较差。从混合接种效果看，不同菌株组合接种表现出了不同的协同效果。菌 A + 菌 B 组合表现出了较好效果，到培养结束，$CO_2$ 累计释放量达到了 3.82 g，比对照处理(2.87 g)增加了 33.3%；但菌 A + 菌 C 和菌 B + 菌 C 组合的效果较差，甚至比单一接种菌 A 或菌 C 的效果差。然而，当 3 种菌混合接种时，则表现出了较佳效果，$CO_2$ 累计释放量达到了 4.12 g，比对照处理增加了 43.5%。看来不同微生物之间的相互作用还是相当复杂的。从本试验结果来看，采用 3 种菌株混

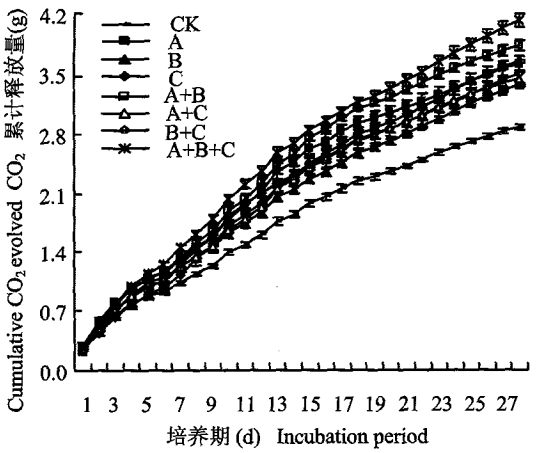


**图2 外接菌种对 $CO_2$ 累积释放量的影响**

**Fig.2 Effect of cellulose-degradation fungi on the cumulative release of $CO_2$**

合接种的方法还是可取的。

### 2.2 有机废弃物生物发酵和纤维素降解菌接种对大棚 $CO_2$ 浓度的影响

图3是大棚条件下自有机废弃物发酵开始至14 d各处理棚中早晨7:30和中午11:30的 $CO_2$ 浓度变化情况。7:30用于观察经晚上作物的呼吸作用和有机废弃物发酵过程对各处理棚中 $CO_2$ 的补充效果；11:30的测定主要观察经作物光合作用高峰期后各处理棚中 $CO_2$ 的下降情况。从图3中可以发现，对照处理棚中的 $CO_2$ 浓度在早晨7:30可维持在440～490 μL/L，比大气 $CO_2$ 浓度高出100 μL/L左右，这主要是由植物的呼吸作用和土壤 $CO_2$ 释放引起的。随着植物光合作用的进行，到中午11:30对照棚中的 $CO_2$ 浓度则降至140～230 μL/L，已处于较严重的亏缺状态。然而，在有机废弃物发酵处理棚中，尤其是纤维素降解菌接种处理棚，无论是早晨7:30还是中午11:30，棚中的 $CO_2$ 浓度从发酵的第2 d就开始迅速增加，到第7 d达到了高峰。接种棚和不接种棚在早晨7:30分别达到了1900和1500 μL/L，相当于对照棚的4倍和3倍；在中午11:30还可分别维持在1100和800 μL/L左右。之后，$CO_2$ 浓度便开始下降，到第10 d，不接种棚的 $CO_2$ 浓度已快接近至对照棚水平。说明在不接种情况下，有机废弃物发酵法维持棚内 $CO_2$ 浓度在500 μL/L以上只有9 d左右时间。而纤维素降解菌接种处理，不但 $CO_2$ 浓度明显比不接种处理高，而且可大大延长 $CO_2$ 释放高峰期和有效持续期，高峰期持续了5 d，直至第14 d，即使在中午11:30棚内 $CO_2$ 浓度还能维持在817 μL/L。Nakasaki[11]指出，有机废弃物在不接种条件下，其 $CO_2$ 释放只能维持9 d，与我们的结果较为一致。可见，在采用有机废弃物发酵进行大棚 $CO_2$ 施肥时，对基质进行混合菌接种是完全必要的。

为了观察各处理棚中 $CO_2$ 浓度是否能满足作物全天光合作用的需要，分别在发酵的第7 d和第14 d测定了棚内 $CO_2$ 浓度日变化(图4)。从中看出，对照棚几乎全天均处于 $CO_2$ 亏缺状态。在不接种处理棚中，即使在发酵高峰期(第7 d)11:00之后 $CO_2$ 浓度也被降至800 μL/L以下。通常，由于大棚栽培条件下光温条件较露地更适合作物生长，合适的 $CO_2$ 浓度可增高至大气浓度的2～3倍[12]。由此可见，若不采用纤维素降解菌接种，有机废弃物发酵法增施大棚 $CO_2$ 还难以满足上述要求。但通过混合菌接种，即使在发酵的第14 d，还能全天候维持大棚 $CO_2$ 浓度在800 μL/L以上。

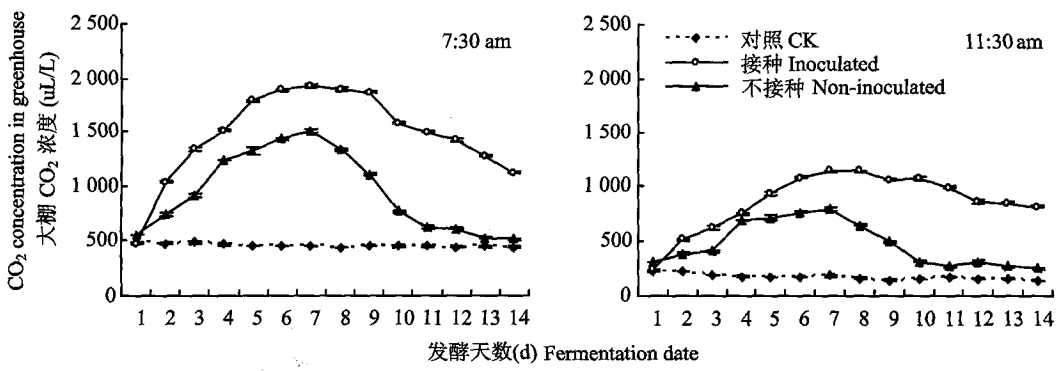


**图3 各处理棚内 $CO_2$ 浓度随发酵期的变化**

**Fig.3 Dynamics of $CO_2$ concentration in greenhouse during fermentation phase**

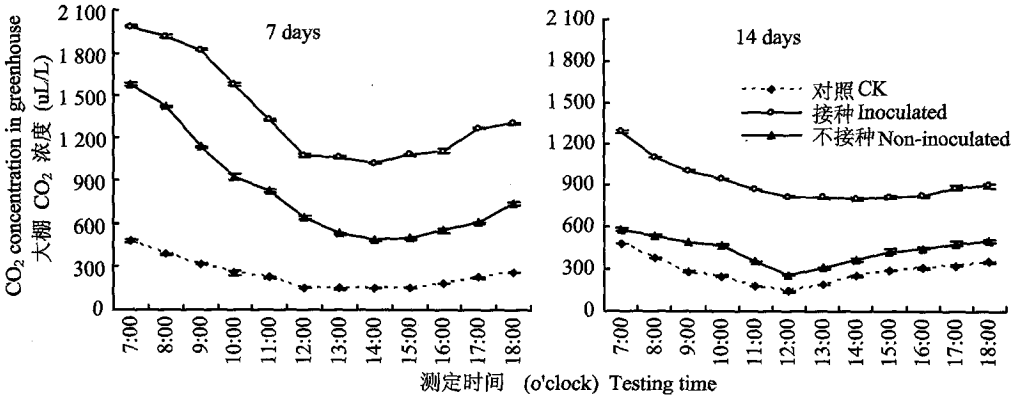


**图 4　各处理棚内 $CO_2$ 浓度日变化**

**Fig.4　Daily changes of $CO_2$ concentration in the greenhouses**

## 3　讨论

秸秆中的有机碳主要是木质纤维素类物质，其中半纤维素和纤维素约占秸秆干物重的 50%～60%[9]，木质素约占 16%～20%[13]，这些木质纤维素难以降解。传统堆肥法一般是采用增加营养和改善环境条件的方法，利用堆制原料中的土著微生物降解，但此方法存在发酵时间长，产生臭气等问题[14]。为了加速有机物降解过程，人们广泛地进行接种效应的研究。冯明谦等[15]的研究表明，在初级发酵前人工接入各菌种 1.5%，能加快垃圾中有机物的降解速度，温度上升迅速，缩短发酵时间 16 h；席北斗等[14]在进行生活垃圾和污泥堆肥的过程中接种高效复合微生物菌群提高了有机污染物的生物降解速率；赵明文等[16]也认为，接种纤维素分解菌群能加速秸秆腐熟分解的效果。从我们以稻草和猪粪为基质通过发酵产生 $CO_2$ 为目的来看，为了加速纤维素类物质降解，并延长 $CO_2$ 释放持续时间，接种合适的微生物种群是完全有必要的。

纤维素酶是降解纤维素生成葡萄糖的一组酶的总称，它往往不是单种酶，而是起协同作用的多组分酶系，大致分为三群：① $C_1$ 酶，即 β-1,4 葡聚糖外切酶；② Cx 酶，即 β-1,4 葡聚糖内切酶；③ β-1 葡萄糖苷酶[17]。Wood 和 Maccpae[18]提出，三类酶在发挥作用时表现出协同作用，尤其是 $C_1 + C_X$ 的组合，表现出很强的分解活性，单独作用则效果较差。而不同菌株产生不同类型的纤维素酶，因此混合菌群分解效果优于单一菌株[19]。在我们的试验发现，不同菌株组合接种表现出了不同的协同效果也再次证实了这一点。此外，木质素由芳香烃衍生物以 C-C 键、-O-键纵横交联在一起，其侧链又与半纤维素结合形成一个十分致密的网络结构，将纤维素分子紧紧包裹在里面，以屏蔽效应阻碍了纤维素酶的作用[20]；要彻底降解纤维素，必须首先降解木质素[21]。通常白腐菌类具有较强的降解木质素能力，而木霉则是公认的降解纤维素能力很强的一种微生物。在本试验中的菌 A + 菌 C 组合似乎也表现出了上述两种微生物的特性。此外，纤维素降解菌产 $CO_2$ 的适宜 pH 条件为 pH 6.0～7.0[22]，我们试验中采用的不同菌株组合效果差异也可能与菌株间对堆料 pH 及温度产生不同影响有关。

大棚栽培条件下，$CO_2$ 亏缺普遍存在，目前农民常采用化学方法（碳酸氢铵 + 硫酸）进行 $CO_2$ 施肥。然而，根据我们调查测定，化学法维持 $CO_2$ 浓度在 500 μL/L 以上只有 1 h 左右，2 h 后即可降至 300 μL/L 以下，故效果往往不够理想。然而，采用本研究提出的有机废弃物发酵法，尤其是混合菌接种处理，可全天候维持大棚 $CO_2$ 浓度 800 μL/L 以上，且释放周期可达两周。该法原料易取，方法简单，适用于大面积生产，而且效果很好。同时，其发酵残渣还可以作为有机肥回施到土壤中，在提高产量、改善品质的同时也可解决土壤退化问题。因此，该方法有望成为既能资源化处置有机废弃物，又可解决大棚 $CO_2$ 亏缺的新方法。

**参 考 文 献：**

[1] Cicerone R J, Oremland R S. Biogeochemical aspects of atmospheric methane [J]. Glob. Boogechem. Cycles. 1988, 2: 299-327.

[2] Glissmann K, Conrad R. Fermentation pattern of methanogenic degradation of rice strew in anoxic paddy soil [J]. FEMS Miccrobiol. Ecol., 2000, 31: 117-126.

[3] Miyata A, Leuning R, Denmead O T *et al*. Carbon dioxide and methane fluxes from an intermittently flooded paddy field [J]. Agric.

For. Meteorol., 2000, 102: 287-303.

[4] 陈翠微,刘长江.农作物秸秆在生态农业中的综合利用[J].中国农业科技导报,2000,2(5): 45-48.
Chen C W, Liu C J. Survey on the comprehensive utilization of crops straw in ecological agriculture [J]. Rev. China Agric. Sci. Tech., 2000, 2(5): 45-48.

[5] 李庆康,吴雷.我国集约化畜禽养殖场粪便处理利用现状和展望[J].农业环境保护,2000,19(4): 251-254.
Li Q K, Wu L. The status and outlook of treatment on excreta from intensive animal farming in China [J]. Agro-Environ. Prot, 2000, 19 (4): 251-254.

[6] 程序,曾映光,王尔大.可持续农业导论[M].北京: 中国农业出版社,1997.31-33.
Cheng X, Zeng Y G, Wang E D. Review of sustainable agriculture [M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 1997, 31-33.

[7] 张福墁. 设施园艺工程与我国农业现代化[J]. 农村实用工程技术/温室园艺,2000(1): 2-3.
Zhang F M. Engineering for horticulture under structure and agricultural modernization in China [J]. Applied Eng. Tech. Rural Areas· Greenhouse Hort., 2000 (1): 2-3.

[8] 杜静,林咸永,章永松.农业废弃物分解产生 $CO_2$ 的影响因子研究[J].应用生态学报,2004,15(3): 501-505.
Du J, Lin X Y, Zhang Y S. Affecting factors of $CO_2$ evolution from biodegradation of agricultural organic wastes [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15 (3): 501-505.

[9] 赵小蓉,林启美,孙焱鑫,等.纤维素分解菌对不同纤维素类物质的分解作用[J].微生物学杂志,2000,20(3): 12-14.
Zhao X R, Lin Q M, Sun Y X *et al*. Decomposition of different cellulose materials by some cellulose-decomposing microbes [J]. J. Microbiol., 2000, 20(3): 12-14.

[10] 秦荣大,郑永章.土壤分析标准方法[B].北京: 北京大学出版社,1998,155-156.
Qin R D, Zheng Y Z. Standard soil analysis [B]. Beijing: Beijing University Press, 1988, 155-156.

[11] Nakasaki K, Nag K, Karita S. Microbial succession associated with organic matter decomposition during thermophilic composting of organic waste [J]. Waste Manage. Res., 2005, 23: 48-56.

[12] 许大全.光合作用及有关过程对长期高 $CO_2$ 浓度的响应[J].植物生理学通讯,1994,30(2):81-87.
Xu D Q. Responses of photosynthesis and related processes to long-term high $CO_2$ concentration [J]. Plant Physil. Commun., 1994, 30 (2): 81-87.

[13] 吴元喜,张晓昱,胡佳华,等.木质纤维素分解菌筛选及木质纤维素降解[J].华中农业大学学报,1997,16(6): 614-617.
Wu Y X, Zhang X Y, Hu J H *et al*. Screen of lignocellulolytic strain and biodegradation of lignocellulose [J]. J. Huazhong Agric. Univ., 1997, 16(6): 614-617.

[14] 席北斗,刘鸿亮,孟伟,等.高效复合微生物菌群在垃圾堆肥中的应用[J].环境科学,2001,22(5): 122-125.
Xi B D, Liu H L, Meng W *et al*. Composting process of municipal solid waste with high effective complex microbial community [J]. Environ. Sci., 2001, 22 (5): 122-125.

[15] 冯明谦,汪立飞,刘德明.高温好氧垃圾堆肥中人工接种初步研究[J].四川环境,2000,19(3): 27-30.
Feng M Q, Wang L F, Liu D M. Study on artificial inoculation of M.S.W. thermophillc aerobic composting [J]. Sichuan Environ., 2000, 19(3): 27-30.

[16] 赵明文,史玉英,李玉祥,等.纤维素分解菌群对水稻秸秆田间腐熟效果的研究[J].江苏农业科学,2000,1: 51-53.
Zhao M W, Zhang X Y, Li Y X *et al*. Effects of cellulose -decomposing mixing strains on crop straw decomposition in the field [J]. Jiangsu Agric. Sci., 2000, 1: 51-53.

[17] 吴显容,穆小民.纤维素酶分子生物学研究进展及趋向[J].生物工程进展,1994,14(4): 25-27.
Wu X R, Mu X M. Progress and trends in cellulose molecule biology [J]. Biology Project Progress, 1994, 14(4): 25-27.

[18] Wood T M, Maccpae S I. Bioconversion of cellulose substance into energy, chemicals and microbial protein [M]. TK Ghose Gall, India, 1978. 111-141.

[19] 史玉英,沈其荣,娄无忌,等.纤维素分解菌群的分离和筛选[J].南京农业大学学报,1996,19(3): 59-62.
Shi Y Y, Shen Q R, Lou W J *et al*. Isolation and screening of cellulose-decomposing mixing strains [J]. J. Nanjing Agric. Univ., 1996, 19(3): 59-62.

[20] Gould J M. Studies on the mechanism of alkaline peroxide delignification of agricultural residues [J]. Biotech. Bioeng., 1985, 20(6): 46-52.

[21] Tuomela M, Hatakka A, Raiskila S *et al*. Biodegradation of radiolabelled synthetic lignin ($^{14}C$ - DHP) and mechanical pulp in a compost environment [J]. Appl. Microbiol. Biotechnol., 2001, 55: 492-499.

[22] Nakasaki K, Yanguchi H, Sasaki Y. Effect of pH control on composting of garbage [J]. Waste Manage. Res., 1993, 11: 117-125.