

农业有机废弃物发酵 CO₂ 施肥在大棚生产上的应用及其环境效应

都韶婷^{1,2}, 单英杰³, 张树生⁴, 章永松^{1*}

(1 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, 浙江省亚热带土壤与植物营养重点开发实验室, 浙江杭州 310029; 2 浙江工商大学环境科学与工程学院, 浙江杭州 310035; 3 浙江省农业厅, 浙江杭州 310020; 4 金华职业技术学院, 浙江金华 321007)

摘要: 利用作物秸秆与畜禽粪便发酵产生 CO₂ 的原理, 设计了适合农业生产用的简易发酵装置。通过接种 3 种高效产气菌及堆料 pH 的调节, 发酵大棚内 CO₂ 浓度可提高 1 倍以上, 且一次堆料的发酵时间可维持 3 周左右。该农业有机废弃物发酵 CO₂ 施肥技术, 可使大棚内的芹菜、生菜、茼蒿、油麦菜和青菜 5 种蔬菜可食部分的生物量分别提高 260%、135%、115%、140% 和 322%。因此, 利用农业有机废弃物发酵进行大棚 CO₂ 施肥, 不仅可以提高作物产量、增加农民收入, 而且有望为农业固废合理处置提供新的策略。

关键词: 有机废弃物; 发酵; 大棚; 二氧化碳施肥; 蔬菜

中图分类号: S141.4

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2010)02-0510-05

Application of CO₂ enrichment by agricultural wastes composting in greenhouses and its environmental benefits

DU Shao-ting^{1, 2}, SHAN Ying-jie³, ZHANG Shu-sheng⁴, ZHANG Yong-song^{1*}

(1 College of Natural Resources and Environmental Science, Zhejiang University/ Ministry of Education Key Lab of Environmental Remediation and Ecosystem Health/ Zhejiang Provincial Key Laboratory of Sub-tropic Soil and Plant Nutrition, Hangzhou 310029, China; 2 College of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310035, China; 3 Zhejiang Agricultural Department, Hangzhou 310020, China; 4 Jinhua College of Profession and Technology, Jinhua 321007, China)

Abstract: In the present study, a simple composting unit based on the use of crop residues and animal manure (CRAM) compost was developed to elevate greenhouse CO₂ concentrations. Through the methods of fungi inoculation and pH regulation, concentration of CO₂ in the composting greenhouse was increased by more than 100% of that in the control greenhouses. Moreover, the release of CO₂ from a heap of fermentation in present unit could last nearly 3 weeks. Consequently, the vegetable yields for all vegetable species including celery (*Apium graveolens* L.), leaf lettuce (*Lactuca virosa* L.), stem lettuce (*Lactuca sativa* L.), oily sowthistle (*Sonchus oleraceus* L.) and Chinese cabbage (*Brassica chinensis* L.) were increased by 260%, 135%, 115%, 140% and 322%, respectively. Therefore, the use of CRAM compost in greenhouses not only increases farmers' income, but also provides us a new strategy for the disposal of agricultural organic wastes.

Key words: organic wastes; fermentation; greenhouse; CO₂ enrichment; vegetable

收稿日期: 2009-02-18

接受日期: 2009-08-14

基金项目: 浙江省重大科技专项(2008C12061-1); 国家科技支撑计划(2008BADA6B02); 教育部博士点基金(200803350117); 浙江省“三农五方”科技协作计划项目; 浙江工商大学青年人才基金(Q09-18, 1260XJ030822)资助。

作者简介: 都韶婷(1980—), 女, 浙江海宁人, 博士, 主要从事蔬菜硝酸盐吸收与积累的生理学机理及环境影响因素方面的研究。

Tel: 0571-86971147, E-mail: dushaoting@gmail.com. * 通讯作者 Tel: 0571-86971151, E-mail: yszhang@zju.edu.cn

据国家统计局年鉴,目前我国秸秆年产量为 6×10^9 吨^[1],焚烧率占 22%^[2]。每年约有 5.5×10^7 吨碳被释放至大气,并伴有大量有益元素(如氮素)的损失。另一方面,我国畜禽粪便年产出量也高达 2.75×10^9 吨^[3]。然而,畜牧业及农户不合理的处置,导致大量氮、磷流入水体并成为水体富营养化的重要成因之一^[4-6]。即使在一些规范化的大型农场,粪便的产出也往往高于当地农用所需^[7]。因此,寻找一条有效解决上述问题的途径显得尤为迫切。

大棚蔬菜生产在我国已十分普遍,据统计,我国蔬菜总种植面积已达 1.76×10^7 公顷,大棚蔬菜占了其中的 14.3%^[8]。据报道,植物生长的最佳 CO₂ 浓度为 800~1000 $\mu\text{L/L}$ 。然而,白天大棚内 CO₂ 浓度一般仅在 100~250 $\mu\text{L/L}$ 内波动,远远低于植物生长所需^[9]。为了解决棚室 CO₂ 亏缺问题,一系列解决方法应运而生。例如,通风换气、高压钢瓶施肥、深施碳铵、燃烧和化学反应施肥法等^[9-10]。但是,这些方法都存在明显缺陷,如通风换气后大棚 CO₂ 浓度最高只能达到大气 CO₂ 浓度(350 $\mu\text{L/L}$),若在冬天敞棚还会引起大棚温度急剧下降;其它几种方法虽然能基本满足作物生长的需求,但使用后的经济负担较重。利用有机物发酵产生的 CO₂ 来进行大棚 CO₂ 施肥^[11],其效果明显优于上述提及的几种方法。为此,研制简易的农业有机废弃物(CRAM)发酵装置,并通过大棚 CO₂ 施肥进行农业生产,不仅能产生经济效益还可使相当一部分农业有机废弃物得到合理处置。本试验通过研制的一种简易发酵装置,考察该运行方式下大棚的蔬菜生产状况,并估算该方法推广的环境效益,以期为农业部门的规划及技术推广提供依据。

1 材料与方 法

1.1 植株栽培

大棚试验位于浙江省金华市,每组试验都分别在 2 个土壤条件一致的相邻大棚(11 m \times 5.5 m \times 3 m)中进行,间距为 40 cm。按以下配方施肥(g/m²): N 21 [CO(NH₂)₂]、K 11 (K₂SO₄)、P 21 [Ca

(H₂PO₄)₂]。5 种较为常见的蔬菜品种:芹菜(*Apium graveolens* L.)、生菜(*Lactuca virosa* L.)、莴苣(*Lactuca scariola* L.)、油麦菜(*Sonchus oleraceus* L.)和青菜(*Brassica chinensis* L.)。每种蔬菜播种面积一致,且种植密度按常规(plant/m²):芹菜 20、生菜 15、莴苣 12、油麦菜 70、青菜 25。其它农艺措施(如水分管理)均一致。

1.2 发酵装置

大棚中心部位放置好氧发酵装置(图 1)。该装置由 4 根高 1.2 m、粗 6 cm 的木棍(或竹竿)作为支架围成正方形(离地约 10 cm),支架外部套上由塑料彩条布加工而成的圆筒型外套(直径约 1 m)。整个发酵装置的有效容积约为 0.9 m³。为保持良好的通气条件,装置底部用 6 cm 宽的木条以 10 cm 间隔悬空,自然透风。发酵原料为约 25 kg 干稻秆和 8 kg 新鲜猪粪(表 1),其 C/N 比正好为最佳 CO₂ 发酵条件,即 40/1^[12]。为了保持较好的发酵条件,在发酵初期加入约 90 L 水,发酵期间还需定期调节水分含量至 70% 左右。为提高发酵效率和延长发酵时间,在发酵混合物中添加了自行筛选的 3 种高效产气微生物。每隔 2 周,用酸性泡菜液(pH 3)调节发

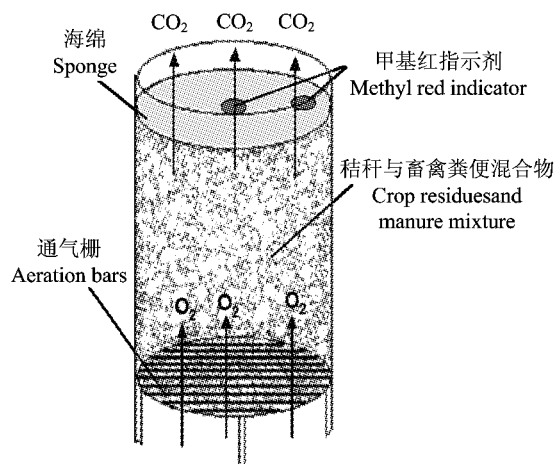


图 1 大棚发酵装置图

Fig.1 Diagram of the crop residues and animal manure composting unit used in the greenhouse

表 1 发酵原料各组分碳、氮、磷及水分含量

Table 1 Contents of carbon, nitrogen and phosphorus, and C/N ratio of agricultural organic wastes used in present research

发酵原料 Materials for fermentation	C	N	P	H ₂ O	C/N
	(mg/g, DW)			(%, FW)	
稻秆 Rice straw	426.2	8.9	1.3	8.0	46.1
猪粪 Pig feces	399.3	29.5	11.5	73.5	13.5

酵混合物 pH 至 6.5~7.0^[12]。为避免发酵过程中产生少量氨气对大棚蔬菜的毒害,我们在发酵装置顶部放入一块用 2 mol/L H₂SO₄ 浸泡过的海绵,并在中央及周边两个小区域喷 2.5 g/L 甲基红指示剂。当指示剂区域变绿时,用 2 mol/L H₂SO₄ 重新浸泡海绵。每隔 20 d 更换一次发酵填料,以保证蔬菜整个生育期所需的气肥,发酵残渣用于下季作物。

1.3 CO₂ 监测及产量测定

用 CO₂/温度测定仪每天监测大棚内 08:00 和 12:00 点的 CO₂ 浓度(Telaire 7001, USA)。在第 8 d,每隔 2 h 连续监测白天大棚内 CO₂ 浓度的变化。经 2 个月的栽培,采取随机收获的方式,每种蔬菜均取 8 株,称取地上部的生物量。

试验数据经 DPS 数据处理软件统计检验,差异

比较采用 t 检验法($P < 0.05$)。

2 结果分析

2.1 CRAM 发酵对大棚内 CO₂ 浓度的影响

为明确 CRAM 发酵产气对增施大棚 CO₂ 的效果,分别于 08:00 和 12:00 对对照棚和处理棚内的 CO₂ 浓度进行了连续 21 d 的监测(图 2)。结果表明,对照棚 CO₂ 浓度经植物夜间的呼吸,08:00 时棚内的 CO₂ 的浓度基本在 500 μL/L 左右。然而,中午 12:00 时 CO₂ 的浓度均降至 250 μL/L 以下,植物处于严重的 CO₂ 饥饿状态。而有机废弃物发酵处理棚内 CO₂ 浓度则相对高得多。试验第 8 d 发酵大棚中 CO₂ 浓度高达 720 μL/L,比未发酵棚提高了 2 倍左右(图 2a)。

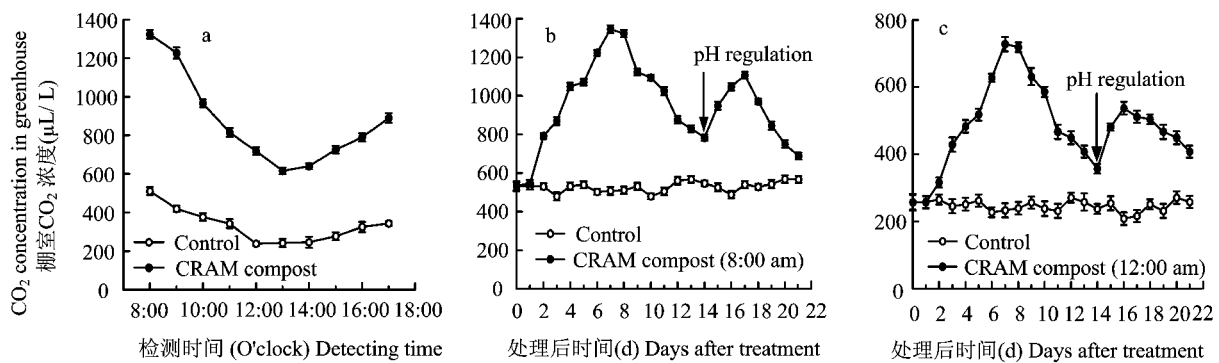


图 2 发酵大棚与对照大棚内 CO₂ 浓度变化

Fig. 2 CO₂ fertilization in crop residues and animal manure compost greenhouse

[注(Note): a—发酵第 8 d 棚内 CO₂ 浓度日变化 Changes in CO₂ concentration in the CRAM (crop residues and animal manure) and control greenhouses during the daytime of the 8th day; b—发酵期间 8:00 定点检测 CO₂ 浓度变化 Daily change of CO₂ concentration in the CRAM and control greenhouses at 8:00; c—发酵期间 12:00 定点检测 CO₂ 浓度变化 Daily change of CO₂ concentration in the CRAM and control greenhouses at 12:00.]

由图 2b、c 可知,在发酵后的第 7 d,CO₂ 的释放达到了最高峰,在此后的 2~3 d 内,CO₂ 的释放速率开始下降。2 周后,处理棚内中午 CO₂ 浓度低于 400 μL/L,此时调节堆料的 pH 值,2 d 后处理棚的 CO₂ 浓度又逐渐上升,并保持棚内 1 周左右较高的 CO₂ 浓度。

2.2 CRAM 发酵法对大棚蔬菜产量的影响

由于 CO₂ 是植物光合作用的主要原料,大棚内的 CO₂ 亏缺问题势必影响作物的产量。利用农业有机废弃物生物发酵进行 CO₂ 施肥后,发酵棚内各蔬菜品种的可食部分均大幅增加,尤其是芹菜和青菜,分别比对照大棚的蔬菜鲜重增加了 260% 和 322%;生菜、莴苣、油麦菜也分别增加了 135%、115% 和 140%(图 3)。这一结果表明利用农业有机废弃物

生物发酵进行 CO₂ 施肥可有效比较棚室内的 CO₂ 亏缺问题,并显著促进棚室蔬菜的增产。

3 讨论

3.1 CRAM 发酵补偿大棚 CO₂ 亏缺

蔬菜大棚 CO₂ 亏缺已成为生产上的重要限制因子,尤其是作物光合作用旺盛时期,棚内 CO₂ 消耗也迅速增强,棚内 CO₂ 浓度急剧降低。因此,棚室中有限的 CO₂,也限制了大棚作物的生长^[13-15]。本试验中,在微生物的作用下 CRAM 堆肥能产生大量 CO₂,因此发酵大棚的 CO₂ 浓度显著高于对照大棚。如第 8 d,对照大棚内 CO₂ 浓度在 240~250 μL/L 范围内波动,无法满足植物生长所需。相反,发酵大棚能维持 CO₂ 浓度在 800~1000 μL/L 至少 6~8 h,非常适

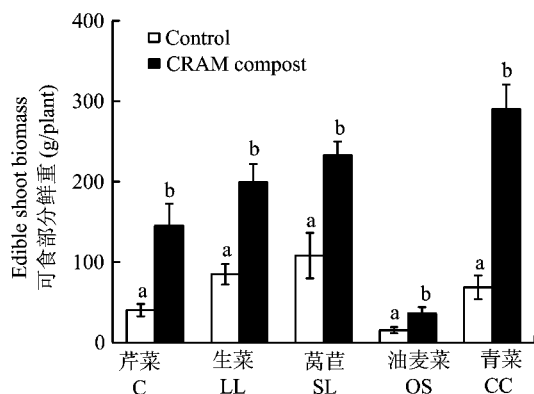


图3 CRAM发酵对大棚蔬菜可食部分单株鲜重的影响

Fig.3 Edible shoot weight of vegetables grown in the CRAM compost treatment

[注(Note): C—Celery; LS—Leaf lettuce; SL—Stem lettuce; OS—Oily sowthistle; CC—Chinese cabbage]

合作物生长。而且,CRAM堆肥是一个动态过程,其产气速率受外界的温度影响。作物光合作用最强的阶段往往是一天中温度最高的时段,因此堆肥产气效率曲线恰好与作物所需吻合,即该CO₂施肥法能全天候维持大棚较高的CO₂浓度,而一般的化学产气法往往只能维持1~2h。不仅如此,CRAM堆肥持久性强,通过pH调节,每次堆肥可持续3周左右,因而,省工省时,易被农民接受。

3.2 CRAM发酵促进蔬菜增产

与对照大棚相比,发酵大棚中5种蔬菜产量都显著增加(图3),这应归因于农业有机废弃物发酵释放的CO₂促进了植物的光合作用^[16-19]。不仅如此,高CO₂浓度同样也会提高N和P的利用效率^[20],同样也有利于植物生长。Manuney等^[21]指出,CO₂浓度为550 μL/L的处理能使棉花产量增加43%,浓度为700 μL/L的处理能使甜菜生物量增加60%^[22]。基于本试验的简易装置,在植物光合作用期间(白天),能使大棚的CO₂维持在有利于植物最

佳生长的浓度,即800~1000 μL/L,且产气持续时间长,这可能是其增产效率远高于一般的CO₂施肥方法的原因。因此,本试验蔬菜产量的增加可归功于作物生长期间棚内农业有机废弃物发酵产CO₂的模式。

3.3 CRAM发酵模式的潜在环境效益

本试验中,面积为11 m × 5.5 m的大棚每次堆肥约消耗8 kg粪便(干重2 kg)和25 kg干稻草,每季作物需再加料2次。因此,每公顷蔬菜大棚每季约消耗4吨粪便和12.4吨秸秆(表2)。由于气候的限制,在中国平均只有半年能进行大棚生产,相当于每年具有消耗粪便12.0 t/hm²及秸秆37.2 t/hm²的能力。因此,若全国2.5 × 10⁶公顷的蔬菜大棚能进行农业有机废弃物发酵,那么每年就能合理处置约3 × 10⁷吨粪便和9.3 × 10⁷吨秸秆。据Gao等^[2]的估计,每年共有5.5 × 10⁷~22 × 10⁷吨粪便流入水体。因此,若能将有有机废弃物发酵法推广,将预计减少总粪便排放的14%~54%,对降低秸秆燃烧的年贡献量达16%(表2)。

虽然上述计算是一个以小推大的过程,与实际存在一定出入,但其环境效益仍不容忽视。我国蔬菜大棚种植面积正大幅增加,尤其是北方。有利的气候条件,蔬菜大棚种植时间远大于估算的6个月^[23]。此外,该生产模式的推广也能有效防止粪便病菌对人体健康的危害,减少粪便流失中对地表地下水的污染等^[24-25]。同样,CRAM发酵模式还能解决目前中国的秸秆问题。众所周知,在中国及其他一些发展中国家,秸秆直接在田焚烧现象较为普遍^[26-27],大量CO₂被释放到大气^[28]。因此,若CRAM发酵法能在全中国推广,促进农民对秸秆的合理使用,也可减缓秸秆燃烧带来的污染问题。

本研究设计的简易装置,不仅制作简单,而且基本材料多样化,可采用木头和竹子等,造价十分便宜,易于在我国推广。另外,若在加料时采用一层层

表2 CRAM发酵法的环境效益评估

Table 2 Assessment of the consumption of manure and crop residues by CRAM compost implementation

农业固废 Agricultural wastes	单位面积每季消耗量 Consumption per harvest (t/hm ²)	年消耗量 Annual consumption		年贡献率 Annual contribution rate (%)
		(t/hm ²) ¹⁾	(t/a) ²⁾	
粪便 Manure	4.0	12.0	30.0	14~54 ³⁾
秸秆 Crop residues	12.4	37.2	93.0	16 ⁴⁾

注(Note): 1)大棚生产按每年3季共6个月计算 Calculated according to three vegetable harvests per year for 6 months; 2)按2.5 × 10⁶公顷的蔬菜大棚计算^[8] Calculated according to 2.5 million ha of land used for vegetable production in greenhouses; 3)按5.5~22 × 10⁷吨粪便流入水体计算^[3] 55 to 220 million tons of the manure were discharged to water bodies every year; 4)按年秸秆产生量6 × 10⁸ t/a计算^[1] Total output of crop residues is nearly 6 × 10⁸ t/a.

加水的方式(或是先将秸秆在水中浸泡过夜),渗滤液非常少,可基本忽略。最重要的是,我们采用在发酵装置顶部放置 H_2SO_4 浸泡过的海绵以及指示剂(也可用试纸)的方法,可有效吸收堆肥过程中释放的氨气;但是尚未对大棚内硫化氢、硫醇、胺等污染物进行检测。农业废弃物发酵模式对作物的增产是毫无质疑的,其对作物品质影响的研究将在今后开展。另外,若能在农业生产中保持大棚的长期密闭状态,也无需担心 CO_2 气肥外泄带来的二次污染。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2005.
- [2] 曹国良, 张小曳, 郑方成, 王亚强. 中国大陆秸秆露天燃烧清单[J]. 资源科学, 2006, 28(1): 9-13.
Cao G L, Zhang X Y, Zheng F C, Wang X Q. Estimating the quantity of crop residues burnt in open field in China [J]. Resour. Sci., 2006, 28: 9-13.
- [3] 高定, 陈同斌, 刘斌, 等. 我国畜禽养殖业粪便污染风险与控制策略[J]. 地理研究, 2006, 25(2): 312-319.
Gao D, Chen T B, Liu B *et al.* Releases of pollutants from poultry manure in China and recommended strategies for the pollution prevention [J]. Geogr. Res., 2006, 25(2): 312-319.
- [4] Zvomuya F, Helgason B L, Larney F J *et al.* Predicting phosphorus availability from soil-applied composted and non-composted cattle feedlot manure [J]. J. Environ. Qual., 2006, 35: 928-937.
- [5] Kleinman P J A, Sharpley A N. Effect of broadcast manure on runoff phosphorus concentrations over successive rainfall events [J]. J. Environ. Qual., 2003, 32: 1072-1081.
- [6] Tabbara H. Phosphorus loss to runoff water twenty-four hours after application of liquid swine manure or fertilizer [J]. J. Environ. Qual., 2003, 32: 1044-1052.
- [7] Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L *et al.* Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen [J]. Ecol. Appl., 1998, 8(3): 559-568.
- [8] 李天来. 我国设施园艺发展的方向[J]. 新农业, 2005, (5): 4-5.
Li T L. Prospect of establishment agriculture in China [J]. New Agric, 2005, (5): 4-5.
- [9] Kläring H P, Hauschild C, Heißner A, Bar-Yosef B. Model-based control of CO_2 concentration in greenhouses at ambient levels increases cucumber yield [J]. Agric. For. Meteorol, 2007, 143: 208-216.
- [10] Linker R, Gutman P O, Seginer I. Robust controllers for simultaneous control of temperature and CO_2 concentration in greenhouses [J]. Contr. Engin. Pract., 1999, 7(7): 851-862.
- [11] Kelleher B P, Leahy J J, Henihan A M *et al.* Advances in poultry litter disposal technology—A review [J]. Biores. Techn., 2002, 83: 27-36.
- [12] 杜静, 林威永, 章永松. 农业废弃物分解产生 CO_2 的影响因素研究[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.
- [13] Hikosaka K, Onoda Y, Kinugasa T *et al.* Plant responses to elevated CO_2 concentration at different scales: leaf, whole plant, canopy, and population [J]. Ecol. Res., 2005, 20: 243-253.
- [14] Fierro A, Tremblay N, Gosselin A. Supplemental carbon dioxide and light improved tomato and pepper seedling growth and yield [J]. Hortsci., 1994, 29 (3): 152-154.
- [15] Buddendorf-Joosten J M C P, Woltering E J P. Components of the gaseous environment and their effects on plant growth and development *in vitro* [J]. Plant Growth Regul., 1994, 15: 1-16.
- [16] den Hertog J, Stulen I, Posthumus F, Poorter H. Interactive effects of growth-limiting N supply and elevated atmospheric CO_2 concentration on growth and carbon balance of Plantage major [J]. Physiol. Plant., 1998, 103: 451-460.
- [17] Poorter H. Interspecific variation in the growth response of plants to an elevated ambient CO_2 concentration [J]. Plant Ecol., 1993, 104: 77-97.
- [18] Heineke D, Kauder F, Frommer W *et al.* Application of transgenic plants in understanding responses to atmospheric change [J]. Plant Cell Environ., 1999, 22: 623-628.
- [19] Vorne V, Ojanpera K, De Temmerman L *et al.* Effects of elevated carbon dioxide and ozone on potato tuber quality in the European multiple-site experiment "CHIP project" [J]. Eur. J. Agron., 2000, 17: 369-381.
- [20] Conroy J P. Influence of elevated atmospheric CO_2 concentrations on plant nutrition [J]. Aust. J. Bot., 1992, 40: 445-456.
- [21] Manuney J R, Kimball B A, Pinter P J *et al.* Growth and yield of cotton in response to a free-air carbon dioxide enrichment (FACE) environment [J]. Agric. For. Meteorol., 1994, 70: 49-67.
- [22] Kohen A E, Venet L, Mousseau M. Growth and photosynthesis of two deciduous forest species at elevated carbon dioxide [J]. Funct. Ecol., 1993, 7: 480-486.
- [23] Zheng L, Yu F Z, Kai S. Augmentative biological control in greenhouses: experiences from China[C]. Switzerland: International Symposium on Biological Control of Arthropods, 2005.
- [24] Malik Y S, Randall G W, Goyal S M. Fate of salmonella following application of swine manure to tile-drained clay loam soil [J]. J. Water Health, 2004, 2: 97-101.
- [25] Daszak P, Cunningham A A, Hyatt A D. Emerging infectious diseases of wildlife-threats to biodiversity and human health [J]. Science, 2000, 287(5452): 443-449.
- [26] Raison R J. Modification of the soil environment by vegetation fires, with particular reference to nitrogen transformations: a review [J]. Plant Soil, 1979, 51: 73-108.
- [27] Graham M H, Haynes R J, Meyer J H. Soil organic matter content and quality: effects of fertilizer applications, burying and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa [J]. Soil Biol. Biochem., 2002, 34: 93-102.
- [28] Friedlingstein P, Solomon S. Contributions of past and present human generations to committed warming caused by carbon dioxide [J]. PNAS, 2005, 102(31): 10832-10836.