

猪粪麦秸反应器好氧堆肥工艺参数优化^{*}

吕黄珍 韩鲁佳 杨增玲

【摘要】 为了探讨不同初始工艺参数(初始碳氮比、通风速率和初始含水率)对猪粪好氧堆肥过程可挥发性固体降解率 η 、相对热产量 H_R 以及堆体温度超过灭菌温度时间 t 的影响,以干麦秸作调理剂,选择初始碳氮比分别为 20、25、30、35,通风速率分别为 0.18、0.26、0.34、0.42 L/(min·kg),初始含水率分别为 55%、60%、65%、70%,进行强制通风好氧堆肥单因素重复试验。在单因素试验基础上,进行了三因素三水平正交优化堆肥试验 $L_9(3^4)$ 。试验结果表明:不同初始碳氮比对 η 和 H_R 影响显著,对 t 影响极显著,通风速率和初始含水率对堆肥过程 η 有一定影响,但对 H_R 及 t 影响不显著。结合正交试验结果,猪粪麦秸强制通风好氧堆肥优选工艺参数组合为:初始碳氮比 20、通风速率 0.34 L/(min·kg)、初始含水率 65%。

关键词: 猪粪麦秸反应器 好氧堆肥 工艺优化 正交试验

中图分类号: S141.4

文献标识码: A

Optimization of Aerobic Composting Parameters on Pig Slurry-wheat Straw Reactor

Lü Huangzhen Han Lujia Yang Zengling
(China Agricultural University)

Abstract

To study the effects of different parameters such as initial C/N ratio, aeration rate and initial water content on volatile solid reduction, relative heat generation H_R and the continue time t of the compost temperature above 50°C during pig slurry-wheat straw composting, the successive single factor composting tests and the orthogonal composting tests were carried out to optimize the composting process, respectively. The dry wheat straw was chosen as bulking agent, successively single factor composting tests were conducted on with the initial C/N ratio of 20, 25, 30 and 35, with the aeration rate of 0.18, 0.26, 0.34 and 0.42 L/(min·kg), and with the initial water content of 55%, 60%, 65% and 70%, respectively. Based on the single factor tests, the orthogonal composting tests of $L_9(3^4)$ were designed. The experimental results showed that the initial C/N ratio had obvious influence on volatile solid reduction rate η and H_R , especially on t , but the aeration rate and water content had not. According to the results of orthogonal composting tests, the optimal parameters for pig slurry-wheat straw composting were obtained as the initial C/N ratio of 20, the aeration rate of 0.34 L/(min·kg) and the initial water content of 65%.

Key words Pig slurry-wheat straw reactor, Aerobic composting, Optimization of initial parameters, Orthogonal test

收稿日期: 2007-03-07

^{*} 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(项目编号:20040019039)

吕黄珍 中国农业大学工学院 博士生, 100083 北京市

韩鲁佳 中国农业大学工学院 教授 博士生导师

杨增玲 中国农业大学工学院 讲师

引言

好氧堆肥是国内外应用最多的粪便资源化、无害化利用手段之一。研究表明^[1~3],采用现代堆肥技术与设备来控制并加速堆肥过程,降解效率可提高10倍以上,且易于实现规模化生产。影响好氧堆肥的主要工艺参数有初始碳氮比、通风速率、初始含水率以及温度等,但如何直接控制、检测及评价这些参数的影响效果则有难度^[4]。很多学者将可挥发性固体降解率 η 作为衡量堆肥效率的一个重要指标^[5~7],结合堆体温度变化评价堆肥无害化程度^[8~9],以优化堆肥工艺^[6~7, 10]。相对热产量 H_R 结合了堆体温度、环境温度以及持续时间,是不同规模、不同原料和不同工艺堆肥效果的综合反映,已被用作现场堆肥潜力的评价尺度和堆肥工艺参数选择的依据^[6~7, 10~13]。

本文采用试验室小型好氧堆肥反应器系统进行不同工艺参数条件下猪粪麦秸好氧堆肥的单因素试验和正交试验,探讨不同工艺参数对好氧堆肥过程可挥发性固体降解率、相对热产量以及堆体中心温度超过50℃的时间的影响,为进一步堆肥工艺优化和过程控制提供参考。

1 试验

试验设备与文献^[14]相同。

1.1 试验设计

1.1.1 单因素试验

(1) 初始碳氮比

为探讨不同初始碳氮比对猪粪麦秸强制通风好氧堆肥过程的影响,选择初始碳氮比分别为20、25、30和35^[1, 3, 6~7],通风速率和初始含水率均为固定值,采用单位质量可挥发性固体单位时间消耗的氧气体积(折合为空气)来表述通风速率,选择折算值0.18 L/(min·kg)为本试验初始条件;好氧堆肥的初始含水率范围一般在50%~70%^[3, 15~18],而鲜猪粪含水率约70%,为满足要求的初始碳氮比,与干麦秸混合后,含水率一般都接近65%。为方便调整且保持相同的初始含水率,将试验各处理初始含水率通过添加蒸馏水均调整至65%,进行不同碳氮比单因素试验。

(2) 通风速率

确定了最佳初始碳氮比后,选择通风速率分别为0.18、0.26、0.34和0.42 L/(min·kg)^[17~18],初始含水率均为65%,进行连续通风速率对猪粪麦秸强制通风好氧堆肥过程影响的试验,确定最佳连续通风速率。

(3) 初始含水率

在确定了最佳初始碳氮比和连续通风速率的基础上,选择初始含水率分别为55%、60%、65%和70%^[1, 3],进行初始含水率对猪粪麦秸强制通风好氧堆肥过程影响的试验,确定最佳初始含水率。

1.1.2 正交试验

在单因素试验基础上,进行三因素三水平正交试验,正交试验设计 $L_9(3^4)$ 如表1所示。

表1 正交试验设计

Tab.1 Design of orthogonal tests

试验 序号	试验因素		
	碳氮比	通风速率/L·(min·kg) ⁻¹	含水率/%
1	20	0.18	55
2	20	0.26	60
3	20	0.34	65
4	25	0.26	55
5	25	0.34	60
6	25	0.18	65
7	30	0.34	55
8	30	0.18	60
9	30	0.26	65

1.2 试验原料

每次试验用鲜猪粪和干麦秸都取自同一固定地点,其中鲜猪粪取自北京郊区高丽营养养猪场,干麦秸取自附近农户,经铡草机铡切至2~5 cm长。鲜样经充分均匀混合,采用四分法取样约500 g,测定总碳、总氮、含水率、灰分及可挥发性固体含量等指标。原料指标测定方法如下:含水率和总固体含量采用(70±5)℃烘箱法测定^[4];干样经粉碎后过100目筛,采用重铬酸钾容量法测定总有机碳和凯氏定氮法测定总氮^[19];550℃灼烧法测定灰分^[4],总固体与灰分的差值是挥发性固体含量;指标测定2次,结果取平均值。堆肥试验原料指标如表2所示。

1.3 试验方法

依据测定的猪粪和干麦秸指标,按照试验设计要求,人工进行鲜猪粪、干麦秸和蒸馏水的充分均匀混合。混合物料进入反应装置后,在通风泵的作用下实现强制通风静态好氧堆肥。由于保温箱在堆肥进行过程中完全密封,为防止热量散失并保持连续性,堆肥过程不进行翻堆操作。试验过程温度采用DL3000采集,数据间隔15 min,由Delta-T Acquire实时监测,当温度下降至稳定后,即认为堆肥过程完成了强制通风好氧堆肥阶段。开箱进行堆肥后物料的充分均匀混合,采用四分法取平行样各约500 g进行理化指标分析,备样放入自封口聚乙烯塑料袋中,将空气尽量排净,封好,冷冻保存。

表2 猪粪和麦秸原料指标

Tab.2 Characteristics of fresh pig slurry and wheat straw

试验方法	原料*	总固体含量/%	含水率/%	灰分含量/%	可挥发性固体含量/%	总碳含量/%	总氮含量/%	碳氮比
碳氮比	猪粪Ⅰ	25.23	74.77	25.33	74.67	37.72	2.55	14.79
	猪粪Ⅱ	29.85	70.15	25.78	74.22	37.00	2.01	18.41
	麦秸	96.75	3.25	6.91	93.09	40.89	0.465	85.43
通风速率	猪粪Ⅰ	25.40	74.60	23.05	76.95	38.73	2.84	13.64
	猪粪Ⅱ	32.03	67.97	25.00	75.00	37.69	2.45	15.37
	麦秸	96.75	3.25	6.91	93.09	40.15	0.47	85.43
含水率	猪粪Ⅰ	28.04	71.96	30.14	69.86	35.04	1.585	22.11
	猪粪Ⅱ	29.45	70.55	38.60	61.40	30.48	1.96	15.55
	麦秸	96.54	3.46	6.67	93.33	41.90	0.415	100.96
正交试验	猪粪Ⅰ	31.00	69.00	32.95	67.05	34.00	1.70	20.00
	猪粪Ⅱ	31.23	68.77	35.00	65.00	32.29	1.43	22.58
	猪粪Ⅲ	30.00	70.00	30.21	69.79	34.89	1.74	19.84
	麦秸	99.00	1.00	6.67	93.33	41.90	0.60	67.00

* 猪粪Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ分别表示各试验处理中的不同批次试验的猪粪

1.4 主要评价指标

选择堆肥过程可挥发性固体降解率 η 、相对热产量 H_R 以及堆体温度超过 50°C 的时间 t 作为堆肥过程和工艺参数评价指标^[5-13],其计算公式为:

(1) 可挥发性固体降解率

$$\eta = \frac{G_e(1 - M_e)V_e - G_0(1 - M_0)V_0}{G_0(1 - M_0)V_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中 G_0, G_e ——堆肥前、后堆体总质量, kg

M_0, M_e ——堆肥前、后堆体含水率, %

V_0, V_e ——堆肥前、后堆体可挥发性固体质量分数, %

(2) 相对热产量

$$H_R = \sum_{i=1}^n \frac{(T_i + T_{i-1})(t_i - t_{i-1})}{2} - \sum_{j=1}^m \frac{(T_j + 10 + T_{j-1} + 10)(t_j - t_{j-1})}{2} \quad (2)$$

式中 T_i, T_{i-1} —— t_i, t_{i-1} 时刻堆体中心温度, $^\circ\text{C}$

T_j, T_{j-1} —— t_j, t_{j-1} 时刻环境温度, $^\circ\text{C}$

(3) 堆体温度超过 50°C 的时间

$$t = t_2 - t_1 \quad (3)$$

式中 t_1 ——堆体温度开始达到 50°C 的时间, d

t_2 ——堆体温度下降至 50°C 的时间, d

2 结果与分析

2.1 单因素影响分析

2.1.1 初始碳氮比

当通风速率为 $0.18 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{kg})$ 、初始含水率为 65% 、初始碳氮比分别为 $20, 25, 30$ 和 35 时, η 平均值分别为 $37.1\%, 27.8\%, 21.5\%$ 和 17.7% 。由

此说明,当碳氮比在 $20 \sim 35$ 范围内,且保持初始含水率和通风速率一致时,猪粪麦秸混合好氧堆肥过程 η 随碳氮比的增加而减小,对其结果进行线性回归分析, $R^2 = 0.9272$ ($p < 0.05$),表明相关关系显著。当碳氮比等于 20 时,堆肥过程产生最大的降解效率与 Larsen 和 McCartney 以及 Tchobanoglous 等的研究结果一致^[6, 20]。相比一般推荐的初始碳氮比 $25 \sim 35$ ^[1, 3, 21-22],碳氮比 20 略偏低,会导致发酵后期产生氨气,需要进行尾气处理,本试验选用的小型堆肥反应器系统密封性好,采用尾气吸收装置进行尾气的收集与分析。但结果显示,碳氮比为 20 时堆肥效率明显提高,如碳氮比 $25, 30$ 和 35 时的 η 与碳氮比 20 时的 η 比值分别为 $0.75, 0.60$ 以及 0.48 。由此说明,猪粪好氧堆肥初始碳氮比 20 能够满足能量需求,而碳氮比稍低,也表示氮元素相对充足,会促使细胞质合成反应的加速,实际堆肥过程,猪粪易于降解的可挥发性固体约占 50% ,不会导致分解不足。

碳氮比为 $20, 25, 30$ 和 35 时 H_R 分别为 $223.8, 176.4, 133.2$ 和 $98.0^\circ\text{C} \cdot \text{d}$,随着碳氮比从 20 升至 35 ,堆肥过程 H_R 逐渐降低。不同初始碳氮比堆肥的 t 分别为 $5.4, 4.8, 3.6$ 和 3.2 d ,也是随碳氮比在 $20 \sim 35$ 范围内的升高而逐渐减小。采用 Matlab 软件对不同初始碳氮比堆肥温度数据进行单因素方差分析, $p = 0.03 < 0.05$,表明不同初始碳氮比对堆肥过程的温度影响显著。

综上所述,当初始含水率和通风速率保持不变,碳氮比从 20 至 35 变化时,堆肥过程 η, H_R 和 t 都是逐渐降低。碳氮比 20 时的 η 明显高于其他处理

过程,且 t 超过 5 d,由此,初始碳氮比 20 是该试验的一个理想条件,容易实现高温、快速好氧堆肥。

2.1.2 通风速率

在初始碳氮比为 20,初始含水率为 65% 的条件下进行不同通风速率堆肥试验。通风速率为 0.18、0.24、0.34 和 0.42 L/(min·kg) 时 η 分别为 29.0%、32.5%、32.1% 和 25.6%。在初始碳氮比和含水率相同的条件下,通风速率在 0.18 ~ 0.42 L/(min·kg) 之间变化时,堆肥过程 η 先增大,后减小;在 0.26 L/(min·kg) 时 η 达到最大值 32.5%。其原因是:通风速率为 0.18 L/(min·kg) 时,产生供氧不足, η 偏小;而当通风速率过高时,会导致堆肥过程通气冷却作用明显,也会阻碍堆肥降解过程, η 也会偏小。采用方差分析分析不同通风速率对 H_R 和 t 的影响, $p=0.9992>0.05$,表明通风速率对堆肥过程 H_R 和 t 变化影响不显著。这是由于整个堆肥过程采用连续通风,堆肥初期氧气充足,反应迅速,堆体温度也迅速升高,但一直保持相同通风速率时,会在后期产生冷却作用,不仅导致 η 减小,也会使堆体温度急剧下降,相应的 H_R 和 t 减小。通风速率大,冷却作用也会越明显,而如果通风速率小,冷却作用也相对小。所以,在通风速率满足堆肥好氧供氧条件的基础上,应取较低的值,以使堆肥后期温度和水分不致于散失过快而破坏好氧高温堆肥无害化要求。结合堆肥过程 η ,确定通风速率 0.26 L/(min·kg) 为该试验条件下的最佳值。

2.1.3 初始含水率

在初始碳氮比 20,通风速率 0.26 L/(min·kg) 的条件下进行不同初始含水率堆肥试验。初始含水率为 55%、60%、65% 和 70% 时 η 分别为 35.2%、36.6%、37.1% 和 34.3%,不同初始含水率的 η 差异不大,采用 Matlab 进行单因素方差分析, $p=0.7434>0.05$,表明初始含水率在 55% ~ 70%,含水率对堆肥降解过程影响不显著。从原理上讲^[1,3],堆肥原料含水率越高,微生物活动性越强,但是含水率过高又会导致孔隙率下降,阻碍好氧堆肥通风供氧,会产生厌氧条件。不同含水率堆肥试验时 H_R 和 t 分别为 216.6、217.8、217.2、218.4℃·d 和 5.2、5.0、5.2、5.3 d。经 Matlab 方差分析, $p=1>0.05$,表明不同初始含水率堆肥试验间差异不显著。分析其原因,堆肥试验所选初始含水率条件虽有一定变化幅度,但都是合适的范围,又保持最佳初始碳氮比和通风条件,所以各堆肥处理效果均较好, η 均接近或超过 35%。在保持最佳初始碳氮比和最佳通风速率以及孔隙率一致条件下,

若堆体初始水分偏低会导致堆肥升温过快,同时伴随水分的散失过快,含水率急剧下降会限制微生物活性;而堆体初始含水率偏高,即便在满足通风条件下,大量水分气化潜热也会导致堆体温度因水分吸热而下降,这些都导致不同初始含水率条件下的堆肥试验温度指标的差异不显著。综合不同初始含水率堆肥过程 η 以及 H_R 和 t ,结合无害化条件,确定初始含水率 65% 作为较优的初始条件。

2.2 正交试验结果及分析

依据单因素好氧堆肥试验结果,确定正交试验三因素三水平分别为:初始碳氮比为 20、25 和 30;通风速率为 0.18、0.26 和 0.34 L/(min·kg) 以及初始含水率为 55%、60% 和 65%,正交试验结果及其方差分析见表 3、4。结果表明,不同初始碳氮比对猪粪麦秸高温好氧堆肥 η 和 H_R 影响显著,对 t 影响极为显著($p=0.01$),它们的值都随碳氮比由 20 至 30 增大而明显下降;而通风速率和不同初始含水率对其影响都不显著($p=0.999$ 和 $p=1$),但通风速率对 t 有一定影响。因为在通风充足的情况下,堆体温度会在初期快速升温,但是到达一定程度后,继续通风,堆肥降解过程产生的热量会随着连续通风而下降。由此可知,确定堆肥过程通风量时,在满足 η 最大化基础上,堆肥后期可进行小风量通风或者不通风而采用翻堆等方式,可降低能耗,也能促使堆肥进一步腐熟。对于含水率的选择,考虑到堆肥高温快速降解和无害化堆肥,应选择含水率偏高的试验组合,但是含水率过高又会导致孔隙率的急剧减小,从而影响通风,所以适宜的通风速率与堆肥物料结构以及含水率高低密切相关。综合正交试验结果,确定最佳堆肥工艺参数组合为:初始碳氮比 20、通风速率 0.34 L/(min·kg) 以及初始含水率 65%。

表 3 正交试验结果

Tab.3 Results of orthogonal tests

试验 序号	试验因素			试验结果		
	碳氮 比	通风速率 /L·(min·kg) ⁻¹	含水 率/%	η /%	H_R /℃·d	t /d
1	20	0.18	55	29.3	265.5	5.5
2	20	0.26	60	32.3	239.3	5.3
3	20	0.34	65	36.2	248.1	5.0
4	25	0.26	55	22.7	207.7	5.0
5	25	0.34	60	27.4	138.6	4.2
6	25	0.18	65	27.7	131.2	4.4
7	30	0.34	55	23.9	103.2	4.1
8	30	0.18	60	25.2	105.4	4.0
9	30	0.26	65	23.9	106.4	4.4

表4 正交试验方差分析结果

Tab.4 ANOVA analysis on orthogonal tests

指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	p 值	显著性
η	初始碳氮比	115.34	2	57.67	44.78	0.02	显著
	通风速率	12.55	2	6.27	4.87	0.17	不显著
	初始含水率	25.67	2	12.83	9.97	0.09	不显著
	误差	2.58	2	1.29			
	总和	156.14	8				
H_R	初始碳氮比	32 667.54	2	16 333.77	25.39	0.04	显著
	通风速率	756.98	2	378.49	0.59	0.63	不显著
	初始含水率	1 877.76	2	938.88	1.46	0.41	不显著
	误差	1 286.78	2	643.39			
	总和	36 589.05	8				
t	初始碳氮比	1.88	2	0.94	121.00	0.01	显著
	通风速率	0.33	2	0.16	21.14	0.05	显著
	初始含水率	0.22	2	0.11	13.86	0.07	不显著
	误差	0.02	2	0.01			
	总和	2.44	8				

3 结论

(1) 不同初始碳氮比堆肥试验表明,初始碳氮比对猪粪麦秸混合好氧高温堆肥过程 η 、 H_R 以及 t 影响显著,且在碳氮比从 20 至 35 变化时, η 、 H_R 以及 t 均随碳氮比升高而降低;不同通风速率和不同初始含水率对堆肥过程 η 、 H_R 以及 t 有一定影响,但是不同处理过程间的差异不显著。

(2) 正交试验表明,初始碳氮比对堆肥过程 η 及 H_R 影响显著,且对 t 影响极为显著 ($p=0.01$); 而初始含水率和初始通风速率对堆肥过程影响不显著;初始碳氮比、通风速率和初始含水率对好氧堆肥的影响作用依次为:初始碳氮比、通风速率、初始含水率。优选组合方案为:初始碳氮比 20、初始通风速率 0.34 L/(min·kg)、初始含水率 65%。

参 考 文 献

- 1 李秀金. 固体废物工程[M]. 北京:中国环境科学出版社,2001.
- 2 Tucker P. Co-composting paper mill sludges with fruit and vegetable wastes[M]. Paisley: University of Paisley, Scotland, 2005.
- 3 赵由才. 实用环境工程手册:固体废物污染控制与资源化[M]. 北京:化学工业出版社,2002.
- 4 Thompson W H. Test methods for the examination of composting and compost[M]. Washington:US Composting Council, 2002.
- 5 McGaughey P H, Gotass H G. Stabilization of municipal refuse by composting[J]. Transaction of the America Society Civil Engineers, 1997, 9(3):276~287.
- 6 Larsen K L, McCartney D M. Effect of carbon to nitrogen (C:N) ratio on bench-scale composting of pulp& paper biosolids [J]. Compost Science & Utilization, 2000, 8(2):147~159.
- 7 Eiland F, Klamer M, Lind A M, et al. Influence of initial C/N ratio on chemical and microbial composition during long term composting of straw[J]. Microb Ecol, 2001, 41(1):272~280.
- 8 Petiot C, Guardia A D. Composting in a laboratory reactor: a review[J]. Composting Science & Utilization, 2004, 12(1): 69~79.
- 9 Mason I G, Milke M W. Physical modeling of the composting environment: a review, part 2: simulation performance[J]. Waste Management, 2005, 25(1): 501~509.
- 10 Leiva M T G, Casacuberta A A, Ferrer A S. Application of experimental design technique to the optimization of bench-scale composting conditions of municipal raw sludge[J]. Compost Science & Utilization, 2003, 11(4):321~329.
- 11 GB 7959—87 粪便无害化卫生标准[S].
- 12 Hogg D, Barth J, Favoino E, et al. Comparison of compost standards within the EU, North America and Australasia[M]. Oxford: The Waste and Resources Action Programme, UK, 2002.
- 13 Laura G W. Effect of soil loading rate on microbial activity during co-composting of diesel contaminated clay soil[D]. Manitoba: University of Manitoba, Canada, 2000.

结果盛期,虽然2次观测中对应处理的光合、蒸腾速率及气孔导度差异明显,但从2次的统计分析结果可以看出,FFFF处理的光合、蒸腾速率及气孔导度仍然较其他8种亏缺处理的大,其中光合速率分别比最小的处理FDDD和FPPP高出约156.8%和159.4%,蒸腾速率则分别是最小处理PPDF和FDDD、FPPP处理的141.6%和152.1%,气孔导度则分别是最小处理FDDD、PPDF和PPDF处理的150%和180%。

结果后期,PDDD和DFDP2种处理的光合速率在2次观测中分别达到了最小,而最小蒸腾速率则出现在PFPD和FPPP,气孔导度最小值发生在PFPD和FPPP、FDDD。在该生育阶段复水的PPDF和DDPF2种处理由于作物的补偿生长效应,辣椒叶片光合、蒸腾速率及气孔导度迅速接近FFFF处理。在结果盛期复水的PDFP和DPFD2种处理尽管其光合、蒸腾及气孔导度在该生育阶段相对于FFFF有一定的下降,但其复水补偿效应仍然在该阶段得以继续发挥,其3种参数依然与FFFF处理比较接近。从叶片 φ_{WUE} 进行分析,

PFPD及PDFP在该生育阶段的两次观测中,叶片 φ_{WUE} 分别为最大,而最小值则出现在FDDD和DFDP2种处理,说明FFFF虽然在各次的观测中光合速率为最大,但是以大量蒸腾失水为代价的,不利于 φ_{WUE} 的提高,这对于追求作物节水、优质、高产是不足取的。

3 结束语

试验研究了时空亏缺灌溉对辣椒株高、叶面积等营养生长指标以及叶片光合速率、蒸腾速率等生理指标的抑制作用,不同阶段复水后株高、总叶面积和光合、蒸腾速率及气孔导度的补偿效应。得出在苗期采用根系均匀亏缺灌溉,开花座果期采用分根交替灌溉,结果盛期和结果后期分别复水和采用根系均匀亏缺灌溉的DPFD处理可以在降低一定光合产物积累的情况下,明显提高叶片水平上的水分利用效率。由于该试验结果是在盆栽条件下获得的,尽管采用了严格的控制方法加以模拟,但仍与田间试验存在较大差异,因而结果有一定局限性,有待于进一步采用多种试验设计验证。

参 考 文 献

- 1 Dorji K, Behboudian M H, Zegbe-Dominguez J A. Water relations, growth, yield and fruit quality of hot pepper under deficit irrigation and partial rootzone drying[J]. *Scientia Horticulture*, 2005, 104(3): 138~149.
- 2 Kirda C, Cetin M, Dasgan Y, et al. Yield response of greenhouse grown tomato to partial root drying and conventional deficit irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 69(3): 191~201.
- 3 Edward H, Ashley B, Steven S, et al. Evaluation of the effects of two deficit irrigation strategies on grapevine cold acclimation, hardiness, growth, yield and fruit quality[R]. Texas Cooperative Extension, Research Progress Report, 2003.
- 4 Wakrim R, Wahbi S, Tahri H, et al. Comparative effect of partial root drying and regulated deficit irrigation on water relations and water use efficiency in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 106(2~3): 275~287.
- 5 Paul E K, Goodwin I. Regulated deficit irrigation and partial rootzone drying[J]. *Irrigation Insights*, 2003, 4: 34~39.
- 6 Zegbe-Dominguez J A, Behboudian M H, Liang A, et al. Deficit irrigation and partial rootzone drying maintain fruit dry mass and enhance fruit quality in 'petopride' processing tomato (*Lycopersicon esculentum*, Mill.) [J]. *Scientia Horticulturae*, 2003, 98(4): 505~510.

(上接第105页)

- 14 吕黄珍,韩鲁佳,张锐. 试验室好氧堆肥反应器系统性能试验[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(1): 91~96.
- 15 Haug R T. The practical handbook of compost engineering[M]. Florida: Lewis Publishers, America, 1993: 248~249.
- 16 蔡建成. 堆肥工程与堆肥工厂[M]. 北京:机械工业出版社, 1990.
- 17 李秀金,董仁杰. 粪草堆肥特性的试验研究[J]. *中国农业大学学报*, 2002, 7(2): 31~35.
- 18 张相铨,王洪涛,聂永丰. 通风量对蔬菜和花卉废弃物混合堆肥的影响[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(10): 134~137.
- 19 NY 525—2002 有机肥料[S].
- 20 Tchobanoglous G, Theisen H, Vigil S. Integrated solid waste management, engineering principles and management issues [M]. New York: McGraw-Hill, Inc., America, 1993.
- 21 Poulsen T G. Solid waste management[M]. Aalborg: Aalborg University, Denmark, 2003.
- 22 吴银宝,廖新弟,汪植三,等. 猪粪好氧堆肥条件的研究[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(增刊): 153~157.