

不同堆肥条件下园林废弃物中有机碳物质的动态变化

刘 佳^{1,2}, 李 婧 男¹, 文 科 军², 王 振 宇¹, 张 清¹

(1. 天津泰达园林建设有限公司, 天津 300457; 2 天津城市建设学院 环境与市政工程系, 天津水质科学与技术重点实验室, 天津 300384)

摘 要:为研究不同堆肥条件对园林有机碳物质的影响,以复合菌剂的添加量、草木体积比(C/N)和翻堆次数为因素进行 $L_9(3^4)$ 正交实验设计,分析了堆肥过程中温度、总有机碳、木质素、纤维素、半纤维素、腐殖质及其组成的动态变化。结果表明:调节 C/N 比、翻堆次数、添加复合菌剂可以加速木质素、纤维素等有机碳物质的降解,有利于在堆肥后期形成腐殖质类物质,提高腐熟程度,其中复合菌剂的添加量是影响总有机碳降解与腐殖质生成最重要的因素。在 4% 投菌量、2:1 草木体积比、1 d 翻 1 次堆的堆肥条件下,园林废弃物堆肥效果较好。

关键词:堆肥;园林废弃物;有机碳;腐殖质

中图分类号:S 141.4;X 705 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2012)24-0174-05

园林废弃物的产生量是随着城市绿化建设的快速发展而迅速增加的,填埋或焚烧等传统的处置方式不仅易造成环境污染,也易造成资源的浪费,因而循环利用园林废弃物成为了园林绿化工作的发展方向^[1]。园林废弃物的有机碳物质含有大量较难降解的纤维素、半纤维素和木质素等,大大限制了其再利用的价值,因此研究园林有机碳物质的快速降解是其循环再利用技术的关键。通过园林废弃物的堆肥处理,可将园林有机碳物质降解转化为有机营养物或腐殖质^[2],使其具有提高土壤肥力、促进植物生长、改善土壤物理结构等功能,降低城市绿地维护成本并带动循环经济发展^[3-5]。

近年来,关于园林废弃物堆肥方面的研究逐渐受到关注,但多集中在氮、磷、钾等营养成分的变化上,且采用混合物料堆肥^[6-8],而对堆肥过程中木质素、纤维素类物质的降解及腐殖质形成的研究报道却很少。现以单一的园林有机碳物质为堆肥原料,探究不同堆肥条件下有机碳物质的动态变化,以期筛选出使园林有机废弃物快速降解的最佳堆肥条件,为后续的循环再利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

堆肥原料为天津泰达园林建设有限公司园林修剪的树枝和草屑,粉碎后木屑粒径为 0.5~2 cm,草屑长度

为 5~10 cm,堆肥原料的基本性质见表 1。试验所用的菌剂为 EM 菌种,由安徽广宇生物技术有限公司生产。

表 1 堆肥原料的基本性质

Table 1 The value of the physical and chemical indicators of compost raw materials

名称	密度 /kg·m ⁻³	pH	EC 值 /μS·cm ⁻¹	含水率 /%	总有机碳质 量分数/%	全氮含量 /%	C/N
草屑	109	7.17	1211	73.92	22.63	1.58	14.32
木屑	254	7.26	900	36.21	35.93	0.42	85.55

1.2 试验方法

堆肥试验在室内进行,试验装置为容积 50 L 的自制保温发酵桶,发酵桶内设有温度感应器。 $L_9(3^4)$ 正交实验设计见表 2,共 9 组处理,重复 3 次。按照试验方案中不同 C/N 比投入原料,混合均匀后放入 EM 菌液,再次充分混匀,并补水调节初始含水率约为 55% 左右进行试验,对含水率进行监控并适当补水以保证含水率在 50%~55% 之间。整个堆肥过程进行 20 d,每隔 5 d 取样测定相关指标,每处理分层多点取样混合以保障样品的代表性。

表 2 $L_9(3^4)$ 正交实验设计

Table 2 $L_9(3^4)$ orthogonal experimental design

处理	投菌量/%	草木体积比(C/N)	翻堆次数/次
1	4	3:5(C/N=50)	2
2	2	2:1(C/N=30)	2
3	0	3:5(C/N=50)	1
4	4	1:1(C/N=40)	3
5	2	3:5(C/N=50)	3
6	4	2:1(C/N=30)	1
7	2	1:1(C/N=40)	1
8	0	1:1(C/N=40)	2
9	0	2:1(C/N=30)	3

注:投菌量指质量分数;翻堆次数表示几天翻堆 1 次,如“2”表示 2 d 翻堆 1 次。

第一作者简介:刘佳(1987-),女,河北唐山人,硕士,研究方向为水土环境的生态修复工程。Email:leares@126.com.

责任作者:李婧男(1983-),女,天津人,博士,工程师,研究方向为土壤生态学。

基金项目:天津市科技支撑计划重点资助项目(11ZCGYSF02200)。

收稿日期:2012-09-03

1.3 项目测定

上午 9:00 测定堆体温度。有机碳的测定采用高温外热重铬酸钾-容量法^[9]；腐殖质组分测定采用氢氧化钠-焦磷酸钠浸提-重铬酸钾容量法，各种腐殖酸含量均以碳质量分数计^[10]；按参考文献^[11]的方法测定纤维素、半纤维素、木质素含量。

种子发芽指数(GI)的测定：堆肥结束后取 20 g 鲜样加入 200 mL 蒸馏水，充分振荡，30℃ 下浸提一昼夜，过滤。吸取 6 mL 滤液，加到铺有滤纸的 9 cm 培养皿内。每个培养皿点播 20 粒饱满的高羊茅种子^[12]，放置在 (20±1)℃^[13] 培养箱中培养，第 10 天^[14]测种子发芽指数(GI)。每个处理重复 3 次，对照为蒸馏水。

发芽指数 GI 的计算方法： $GI(\%) = (\text{堆肥浸提液种子发芽率} \times \text{种子根长}) / (\text{蒸馏水的种子发芽率} \times \text{种子根长}) \times 100$ 。

1.4 数据分析

试验数据采用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 堆肥过程中温度的变化

堆肥中微生物分解有机物，释放出热量，从而使温度上升^[15]。当堆体温度上升到 55℃，并保持 3 d 以上(或 50℃ 以上保持 5~7 d)，就可满足堆肥卫生指标和腐熟的要求^[16]。

由图 1 可知，各处理 1~2 d 后堆体温度上升，进入高温期，持续 7~8 d 后开始下降，12 d 后降到 40℃ 以下，最终趋于稳定并接近室温，表明有机质的分解接近完全。由图 1 还可知，大部分处理高温均在 50℃ 以上，且持续 7~8 d，而 3 d 翻 1 次堆的 4、5 号处理仅 1 d 温度在 50℃ 以上，温度普遍偏低，表明翻堆次数低可能造成供氧不足，限制了有氧微生物分解有机物，降解过程缓慢。此外，区别于其它处理堆肥 1 d 后达到最高温度，未添加菌剂的 3、8、9 号处理均为堆肥 2 d 后才达到最高温度，且温度普遍偏低，表明外加菌剂可促进升温，加速园林有机碳物质的降解。

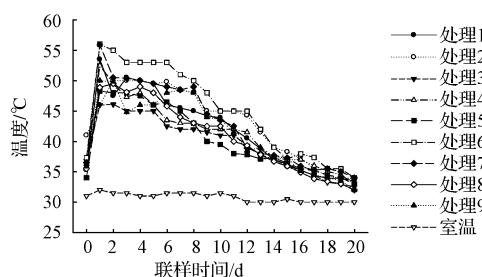


图 1 各处理堆肥过程中温度的变化

Fig. 1 Changes of temperature during composting in different treatments

2.2 总有机碳的动态变化

在堆肥过程中微生物将不稳定的有机物质分解转化为二氧化碳、水、矿物质和稳定的腐植酸并为自身提供必要的生长物质^[12]。由图 2 可以看出，各处理总有机碳质量分数在整个堆肥过程中呈明显的下降趋势，其中降幅最高的为 6 号处理，达到 18.7%，显著高于其它处理组 ($P < 0.05$)。各组处理均在堆肥中、前期有机碳的下降幅度较大，后期趋于缓慢。这是由于在堆肥过程中，微生物首先利用易降解的有机物(可溶性糖、有机酸、淀粉等)，有机碳的分解速度较快；而在堆肥后期，随着易分解物质被完全降解之后，微生物只能利用较难降解的有机物质(纤维素、半纤维素、木质素)作为碳源，因此堆肥后期，有机碳降解速度相对缓慢^[17]。此外，通过表 3 总有机碳的极差分析表明，投菌量的极差最大，3 个因素对总有机碳降解率的影响程度为投菌量 > 草木体积比 > 翻堆次数。

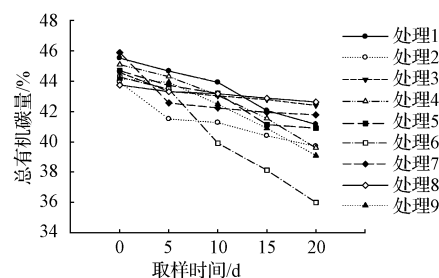


图 2 各处理堆肥过程中总有机碳质量分数的变化

Fig. 2 Changes of total organic carbon mass fraction during composting in different treatments

表 3 总有机碳降解率的极差分析

Table 3 The variance analysis of total organic carbon degradation

处理组	因素水平编号			降解率 /%
	投菌量 /%	草木体积比 (C/N)	翻堆次数 /次	
1	4	3:5	2	9.55
2	2	2:1	2	9.65
3	0	3:5	1	4.84
4	4	1:1	3	12.10
5	2	3:5	3	8.35
6	4	2:1	1	18.66
7	2	1:1	1	8.91
8	0	1:1	2	2.61
9	0	2:1	3	11.37
均值 1/%	18.82	22.74	32.41	
均值 2/%	26.91	23.62	21.81	
均值 3/%	40.31	39.68	31.81	
极差	21.49	16.93	10.60	

2.3 木质素、纤维素、半纤维素的动态变化

由图 3 可知，木质素降解主要集中在堆肥过程的中后期，总降解率最大的为 6 号，达到 43.56%，显著高于其它处理 ($P < 0.05$)。未添加菌剂的 3 号、8 号和 9 号处理组降解率较低，分别为 7.77%、9.74% 和 10.77%。说

明接种微生物菌剂有利于木质素的降解。由图 4 可知,纤维素同木质素变化相似,降解主要集中在堆肥中后期,降解率较大的为 1 号和 6 号,分别为 36.90%、50.96%。3 号、8 号降解率低,分别为 14.39% 和 14.25%。由图 5 可知,半纤维素的变化虽然呈现逐渐降低的趋势,但不如木质素、纤维素变化明显,各处理间也无显著性差异。

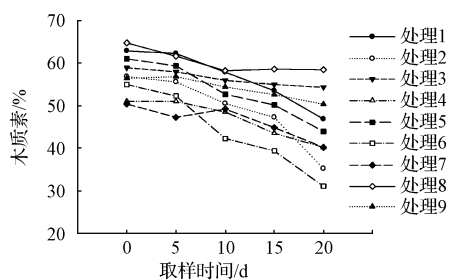


图 3 各处理堆肥过程中木质素质量分数的变化
Fig. 3 Changes of lignin content during composting

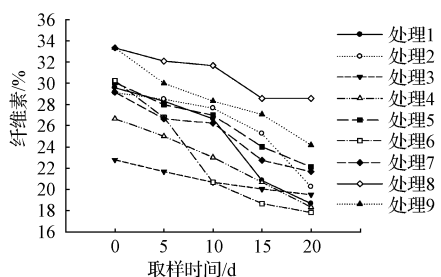


图 4 各处理堆肥过程中纤维素质量分数的变化
Fig. 4 Changes of cellulose content during composting

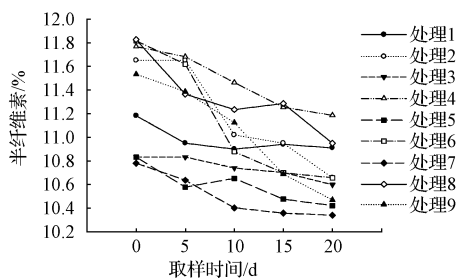


图 5 各处理堆肥过程中半纤维素质量分数的变化
Fig. 5 Changes of hemicelluloses content during composting

2.4 腐殖酸的动态变化

2.4.1 腐殖质含量变化 大部分处理组堆体腐殖质呈现先降低后增加的趋势,这是因为堆肥初期,腐殖质存在一定程度的矿化,而到了后期,微生物开始分解较难降解的纤维素、木质素等物质,并逐渐形成了结构复杂的腐殖质类物质,因此腐殖质含量在后期明显上升^[17]。由表 4 可以看出,增幅较大的组为 2 号组和 6 号组,含量依次增加了 7.8% 和 13.7%。腐殖质含量上升的时间与木质素降解的时间相吻合,均发生在堆肥阶段的中后期。此外,3、5、8、9 号组腐殖质含量没有增加,而是呈现降低的变化趋势,这是由于这几组处理木质素、纤维素

降解率较低,难以在堆肥后期形成腐殖质类物质,从而影响堆肥产品的品质。表 5 腐殖质的极差分析表明,投菌量的极差最大,达到 42.52%,3 个因素对总有机碳降解率的影响程度为投菌量>草木体积比(碳氮比)>翻堆次数。

表 4 各处理腐殖质含量变化(平均值±标准差)

Table 4 Changes of humus content during composting in different treatments(Mean±SD) %					
处理组	取样时间/d				
	0	5	10	15	20
1	22.67±0.24	18.75±0.14	19.36±0.83	20.63±0.34	22.99±1.27
2	24.62±0.38	22.24±0.22	21.59±1.66	22.69±0.86	26.45±1.09
3	24.74±0.39	25.55±1.12	24.49±2.87	21.48±2.17	21.70±1.68
4	24.18±0.56	24.54±0.49	23.91±0.78	22.30±0.26	24.28±0.09
5	21.09±0.30	24.06±1.05	16.49±5.04	18.09±0.90	21.50±0.69
6	24.19±0.62	23.10±0.98	23.41±0.39	27.46±1.89	27.53±0.48
7	22.28±0.43	22.72±0.99	23.45±0.55	22.13±1.01	22.72±0.77
8	22.90±2.01	22.78±0.29	21.91±0.39	22.43±0.58	20.37±1.32
9	22.81±0.48	22.81±0.67	21.63±0.49	21.62±3.04	21.97±0.46

表 5 腐殖质变化极差分析

Table 5 The variance analysis of humus				
试验编号	因素水平编号			变化率 / %
	投菌量 / %	草木体积比 (C/N)	翻堆次数 / 次	
1	4	3:5	2	1.44
2	2	2:1	2	7.50
3	0	3:5	1	-12.27
4	4	1:1	3	0.44
5	2	3:5	3	1.94
6	4	2:1	1	13.92
7	2	1:1	1	2.05
8	0	1:1	2	-10.80
9	0	2:1	3	-3.64
均值 1 / %	-26.72	-8.89	3.70	
均值 2 / %	11.49	-8.32	-1.86	
均值 3 / %	15.80	17.78	-1.26	
极差	42.52	26.67	5.56	

2.4.2 胡敏酸及富里酸含量变化 胡敏酸(HA)和富里酸(FA)是腐殖质的重要组成部分,在很大程度上决定腐殖质的质量^[18-20]。由图 6、7 可知,各处理初始胡敏酸含量较低而富里酸量较高。随着堆肥的进行,富里酸逐步转化为胡敏酸,呈显著下降趋势,被降解的物质重新缩合也会导致胡敏酸含量不断上升^[21]。3 号处理胡敏酸的增加量最小,为原来的 2.7 倍,6 号处理胡敏酸的增幅最大,为原来的 8.4 倍,说明添加菌剂和 C/N 为 30 可促进堆肥过程中富里酸向胡敏酸转化。

2.5 腐熟程度分析

Roletto 等^[22]研究了 5 类木质—纤维素物质的堆肥过程,提出当腐殖化指数(HI, $HI = C_{HA}/C_{FA}$)最小值等于 1 时,可以认为堆肥已经腐熟,适用于评价木质—纤维素类堆肥。种子发芽指数(GI)也是具说服力的堆肥腐熟度指标^[23],一般认为 $GI > 50\%$,堆肥基本腐熟,当 GI 达

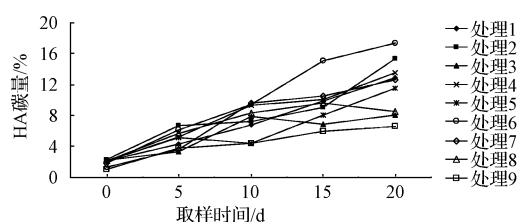


图6 各处理堆肥过程中胡敏酸的变化

Fig. 6 Changes of humic acid during composting

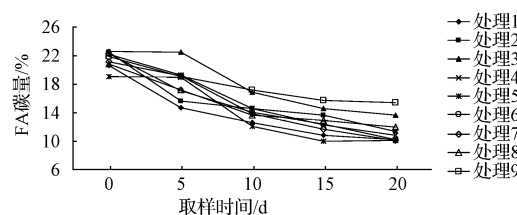


图7 各处理堆肥过程中富里酸的变化

Fig. 7 Changes of fulvic acid during composting

到80%~85%时,堆肥已经完全腐熟,对植物没有毒性^[24-25]。由图8、9可知,堆肥20 d后,处理3、8、9的HI小于1.0;且GI均小于80%,说明这几组处理未完全腐熟。说明不添加菌剂及其它辅料物质,仅靠园林废弃物自然降解难以在20 d内腐熟。6号处理的HI值由0.1增加到1.7,增幅最大,且GI值也最大,为98.99%,说明4%投菌量、2:1草木体积比(C/N=30)、1 d翻堆1次的堆肥条件能加速堆体腐熟。

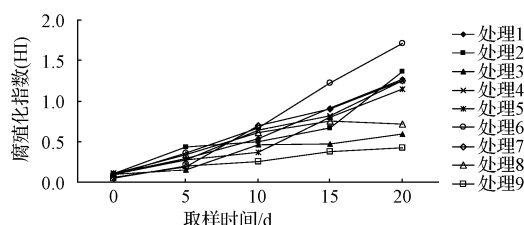


图8 各处理堆肥过程中腐殖化指数(HI)的变化

Fig. 8 Changes of HI during composting

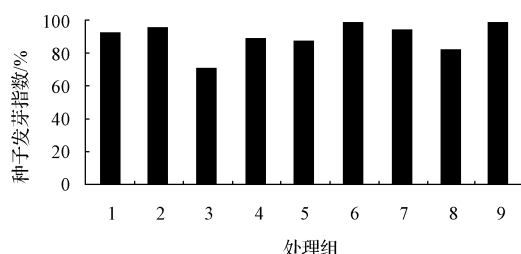


图9 各处理堆肥结束后种子发芽指数(GI)

Fig. 9 The value of germination index after composting

3 讨论与结论

堆肥进程中,伴随着有机碳物质的降解和腐殖质的生成。园林废弃物因含有大量的木质素、纤维素、半纤维素等较难降解的物质,自然降解周期长,如何缩短降

解周期一直是园林有机碳物质循环再利用的研究热点。

该研究结果表明,添加复合菌剂,调整合理的C/N比和翻堆次数,可以有效降解有机碳,特别是木质素、纤维素等较难降解的物质,促进腐殖质的生成,其中复合菌剂的添加量是最重要的影响因素。已有研究表明,木质素降解与腐殖质形成有密切联系,木质素及其降解产物是腐殖质形成的最主要的前体物质,通过复杂的反应机制形成腐殖质^[26]。这一学说在该试验中也得到了证实,木质素、纤维素降解率大的处理组,其腐殖质含量明显上升。腐殖质含量上升的时间也与木质素降解的时间相吻合,均发生在堆肥阶段的中后期。

该试验中各处理组腐殖质含量变化不一,有升有降,特别是在堆肥前期,普遍存在下降的趋势,这与魏自民等^[27]的研究一致。说明在堆肥过程中,随着有机碳的分解,新的腐殖质的形成,堆肥中原有的腐殖质也存在不同程度的矿化。

黄红丽^[26]在对稻草秸秆等农业废弃物堆肥腐殖化的研究表明,加入降解菌后,纤维素、木质素、半纤维素的降解率升高。而该试验纤维素降解率的变化不如木质素、纤维素明显,且各处理间无显著性差异,这可能是由于半纤维素在园林废弃物中含量较低,变化趋势因此也相对较小。此外周晓宏等^[28]的研究也表明,半纤维素降解速度很慢,且很难降解完全,并且纤维素降解菌本身也能形成半纤维素。

调节C/N比、翻堆次数、添加复合菌剂可以促进木质素、纤维素等有机碳物质的降解,有利于在堆肥后期形成腐殖质类物质,促进富里酸转化为胡敏酸,提高腐熟程度。通过总有机碳与腐殖质变化的极差分析表明,其中复合菌剂的添加量是最重要的影响因素。

综合评价,该堆肥试验在4%投菌量、2:1草木体积比(C/N=30)、1 d翻1次堆的堆肥条件下,园林废弃物堆肥效果较好。总有机碳、木质素、纤维素的降解率分别为18.6%、43.56%、50.96%;腐殖质含量增加了13.7%,HI值由0.1增加到1.7,且GI值为98.99%。

参考文献

- [1] 吕子文,方兰海,黄彩娣.美国园林废弃物的处置及对我国的启示[J].中国园林,2007(8):90-94.
- [2] 于鑫,孙向阳,徐佳,等.北京市园林绿化废弃物现状调查及再利用对策探讨[J].山东林业科技,2009(4):5-11.
- [3] 张庆贵,辛雅芬.城市枯枝落叶的生态功能与利用[J].上海建设科技,2005(2):40-41.
- [4] Hartz T K, Giannini C. Duration of composting of yard waste affects both physical and chemical characteristics of compost and plant growth[J]. Hort Science, 1998, 33(7): 1192-1196.
- [5] 王成,鄯光发,彭镇华.有机地表覆盖物在城市林业建设中的应用价值[J].应用生态学报,2005,16(11):2213-2217.
- [6] 魏元帅,常智慧,韩烈保.添加辅料及引入外源微生物对草屑堆肥的影响[J].农业环境科学学报,2007, S2: 591-593.

- [7] 田赞,王海燕,孙向阳,等. 添加竹酢液和菌剂对园林废弃物堆肥理化性质的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 272-278.
- [8] 王惠. 外源添加物在园林绿化废弃物堆腐中的应用[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [9] 严昶升. 土壤肥力研究方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1988.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [11] 熊素敏, 左秀凤, 朱永义. 稻壳中纤维素、半纤维素和木质素的测定[J]. 粮食与饲料工业, 2005(8): 40-41.
- [12] 张亚宁. 堆肥腐熟度快速测定指标和方法的建立[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [13] 国际种子检验协会(ISTA). 国际种子检验规程[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [14] Maathuis F J M, Sanders D. Mechanisms of potassium absorption by higher plant roots[J]. Physiologia Plantarum, 1996(1): 158-168.
- [15] 杨恋. 城市生活垃圾好氧堆肥实验及嗜热微生物群落研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
- [16] 杨光, 袁菊, 蒋秀娅, 等. 城市污水污泥好氧堆肥及农用技术研究[J]. 天津建设科技, 2008(S1): 118-122.
- [17] 魏自民, 李英军, 席北斗, 等. 三阶段温度控制接种法对堆肥有机物变化的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(2): 541-544.
- [18] 杨天学, 席北斗, 魏自民, 等. 生活垃圾与畜禽粪便联合好氧堆肥[J]. 环境科学研究, 2009, 22(10): 1187-1192.
- [19] 姚丽晶, 张晋京, 宴森. 几种胡敏酸和富里酸分子结构模型的三维可视化与特性研究[J]. 土壤通报, 2008, 39(1): 57-61.
- [20] 吴彦瑜, 覃芳慧, 赖杨兰, 等. Fenton 试剂对垃圾渗滤液中腐殖酸的去除特性[J]. 环境科学研究, 2010, 23(1): 94-99.
- [21] 王帅, 王楠, 宴森, 等. 真菌及混合菌对锯木屑类腐殖质形成和转化的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 227-231.
- [22] Roletto E, Barberis R. Chemical parameters for evaluating compost maturity[J]. BioCycle, 1985, 26(2): 46-47.
- [23] 姚政. 用种子发芽力作为生物指标评判鸡粪堆肥腐熟度研究[J]. 土壤肥料, 1995(6): 57-59.
- [24] 钱学玲, 孙义, 李道棠. 模糊综合评价法判别堆肥腐熟度研究[J]. 上海环境科学, 2001, 20(2): 85-87.
- [25] Riffaldi R, Levi-M inzi R P, de Bertoldi M. Evaluation of compost maturity by means of chemical and microbial analyses[J]. Waste Management and Research, 1986(4): 387-396.
- [26] 黄红丽. 木质素降解微生物特性及其对农业废物堆肥腐殖化的影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [27] 魏自民, 王世平, 席北斗, 等. 生活垃圾堆肥过程中腐殖质及有机态氮组分的变化[J]. 环境科学学报, 2007, 27(2): 236-240.
- [28] 周晓宏, 陈洪章, 李佐虎. 固态发酵中纤维素基质降解过程初步研究[J]. 过程工程学报, 2003, 3(5): 448-452.

Dynamic Transformation of Organic Carbon Under Different Composting Conditions

LIU Jia^{1,2}, LI Jing-nan¹, WEN Ke-jun², WANG Zhen-yu¹, ZHANG Qing¹

(1. Teda Landscape Construction Company, Tianjin 300457; 2. Department of Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin Key Laboratory of Water Science and Technology, Tianjin 300384)

Abstract: In order to investigate the effects of different composting conditions on the degradation rate of organic garden carbon substances, the amount of bacteria, vegetation volume ratio (C/N) and turning frequency as the experimental factors, a compost test with an orthogonal experimental design $L_9(3^4)$ was conducted. The variation trends in temperature, total organic carbon concentrations, lignin, cellulose and hemi-cellulose contents, humus and compositing of compound fertilizer during composting were analysis. The results showed that adjustment of C/N ratio, turning frequency and the bacterial reagent benefited the degradation of organic garden carbon substances and the acceleration of maturity, and improved the compost quality. The addition of bacterial reagent was confirmed the most important factor affecting the degradation of organic garden carbon substances and the acceleration of maturity. The conditions of 4% addition of bacterial reagent, 2 : 1 vegetation volume ratio (C/N=30) and one day turns mow once was the best for the composting.

Key words: composting; garden waste; organic carbon; humus