水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

城市污水污泥堆肥腐熟度的评价

作者：夏晓刚　吴星五

简介：　针对污泥的出路问题，提出用堆肥的方法解决。堆肥方法的成功必须要找到合适的腐熟度评价指标和方法。简介了各种现有的堆肥腐熟度评价指标，并提出要在大规模污泥堆肥操作中应用更加快速、简便的腐熟度测试方法。介绍了 4 种腐熟度的快速测试方法：明胶测试法、自热测试法、二氧化碳探测管法和水溶性有机碳测试法。

关键字：污水污泥　堆肥　腐熟度　快速测试

城市污水处理厂的污泥是指处理污水所产生的固态、半固态及液态的废弃物，含有大量的有机物、丰富的氮磷等营养物、重金属以及致病菌和病原菌等，不加处理的任意排放会对环境造成严重的污染［1］。随着城市化的进一步发展，新的污水处理厂将不断建立，必将产生更大量的污泥。尤其以上海市为例，新建或将要建设的石洞口、竹园、白龙港污水处理厂均为大型污水处理厂，一旦三大污水处理厂建成并投入满负荷运行，上海市城市污水处理厂的污泥总量(以含水率 80%折算)的预测值见表 1［2］。由此可见，解决如此大量的污泥的出路问题已成为上海市污水处理的当务之急。

表 1　上海市城市污水处理厂污泥产量估算

来源	污水量(万 m3/d)	污泥产量(含水率 80% t/d)
中心城区污水处理厂(12 座)	38	230
白龙港污水处理厂	120	1050
石洞口、竹园污水处理厂	300～400	2700　～　3600

中国城镇水网 www.chinacitywater.org

小计		3980 ～ 4880

污泥堆肥化的方法是将污泥减量化、无害化、稳定化和资源化融为一体的比较理想的污泥处理方法。既消纳污泥，又充分利用了污泥中大量含有植物生长发育所需的氮、磷、钾及维持植物正常生长发育的多种微量元素和能改善土壤结构的有机质，并且有利于污泥的大规模处理。因此，结合我国的国情，对污水污泥进行堆肥的方法为解决污泥的处置问题提供了良好的前景。

1 堆肥腐熟度的评价指标

1.1 未腐熟堆肥产品的危害

堆肥腐熟度的评价是关系到堆肥的方法能否顺利进行的最为关键的问题之一。未腐熟的产品施用于土壤后，微生物还会利用土壤间隙中的氧气继续活动降解有机物，从而造成厌氧的环境，使植物根系缺氧，并产生 H2S 和 NO 等气体。未腐熟的产品中有很高的碳氮比(25∶1 或更高) ，造成微生物的氮饥饿而去摄取土壤中的氮，使土壤产生缺氮现象。并且在微生物的持续降解活动中还会产生作为副产品的各种有机酸，对植物产生毒性，尤其是乙酸和酚类化合物会抑制植物种子发芽、根系的生长，减少作物的产量［3］ 。

1.2 现有评价指标

虽然国内外在堆肥腐熟度的评价方面已经作了广泛而且很深入的研究，提出了众多的评价指标及方法，但仍没有形成一种公认的堆肥腐熟度指标。

李承强等［4］把堆肥腐熟度指标划分为三类：物理学指标、化学指标(包括腐殖质) 和生物学指标。李艳霞等［5］把堆肥腐熟度的评价方法分为表观分析法、化学分析法、波谱分析法及植物生长分析法 4 类，与前者的分类方法也比较相似。简介如下：

(1)物理学指标或表观分析指标是指堆肥过程中的一些变化比较直观的性质，如温度、气味和颜色等。具体有：①堆肥开始后堆体温度是逐渐升高再降低的变化过程，而堆体腐熟后堆

中国城镇水网 www.chinacitywater.org

体温度与环境温度一致，一般不明显变化，因此温度是堆肥过程中最重要的常规检测指标之一；②堆肥原料具有令人不快的气味，并在堆肥过程中会产生 H2S，NO 等难闻的气体，而良好的堆肥过程后这些气味逐渐减弱并在堆肥结束后消失，所以气味也可以作为堆肥腐熟的指标；③堆肥过程中堆料逐渐发黑，腐熟后的堆肥产品呈黑褐和黑色，颜色也可以作为一判断标准；④对不同时间的堆肥的水萃取物在波长 280 nm，465 nm 和 665 nm 的光学性质研究表明，由于个别有机成分的少量存在，抑制了对短波的吸收，而对 665 nm 波长的可见光影响较少，由此通过检测堆肥萃取物在波长 665 nm 下的吸光度变化可反映堆肥腐熟度。

(2)由于物理学指标难于定量化表征堆肥过程中堆料成分的变化，所以通过分析堆肥过程中堆料的化学成分或化学性质的变化以评价堆肥腐熟度的方法更常用一些。这些化学指标有：有机质变化指标、氨氮指标、腐殖化指标、碳氮比和有机酸等。具体内容包括：①在堆肥过程中，堆料中的不稳定有机质分解转化为二氧化碳、水、矿物质和稳定化有机质，堆料的有机质含量变化显著，因此可以通过一些反映有机质变化的参数(如 COD，BOD 及 VS 等)的测量及某些有机质在堆肥过程中的变化规律来表征腐熟度；②在堆肥的生化降解过程中含氮的成分发生降解产生氨气，在堆肥后期部分氨气被氧化成亚硝酸盐和硝酸盐，所以可以用亚硝酸盐或硝酸盐的存在判断腐熟度，并且由于这两个指标的测定较为快速而简单，具有较好的实用价值；③堆肥过程中伴随着腐殖化的过程，研究各腐殖化参数的变化是评价腐熟度的重要方法，由此提出 CEC(阳离子交换容量)、腐殖质 HS、腐酸 HA、富里酸 FA 、富里部分 FF 及非腐殖质成分 NHF 等参数用以评价堆肥腐熟度；④碳源是微生物利用的能源，氮源是微生物的营养物质，碳和氮的变化是堆肥的基本特征之一，C/N(固相)是最常用于评价腐熟度的参数。而也有研究指出微生物在对堆肥原料的降解中代谢发生在水溶相，因此水溶性有机碳/有机氮的指标可以作为堆肥腐熟度的参数；⑤有机酸广泛存在于未腐熟的堆肥中，可通过研究有机酸的变化评价堆肥腐熟度。

(3)堆料中微生物的活性变化及堆肥对植物生长的影响常用于评价堆肥腐熟度。这些指标主要有呼吸作用、生物活性及种子发芽率等。具体有： ①堆肥是富含腐殖质的稳定产品，微生物处于休眠状态，此时腐殖质的生化降解速率及二氧化碳产生和氧气消耗都较慢，因此可以用二氧化碳的产生和微生物的耗氧速率作为反映腐熟度的指标；②同时也可以用反映微生

物活性变化的参数如酶活性、ATP 和微生物的数量、种类来表征堆肥的稳定和腐熟；③未腐熟的堆肥产品对植物的生长有抑制作用，因此可用堆肥和土壤的混合物中植物的生长状况来评价堆肥的腐熟度，考虑到堆肥腐熟度的实用意义，这是最终和最具说服力的评价方法。

(4)波谱分析法可以从物质结构的角度认识堆肥过程和腐熟度问题，迄今为止较多使用的是13C-核磁共振法和红外光谱法，红外光谱法可以辨别化合物的特征官能团，核磁共振法可提供有机分子的骨架信息。

1.3　堆肥腐熟度指标的应用

在这些评价腐熟度指标的方法中，比较常用的有碳氮比指标，耗氧速率的测定，NO3- -N 和 NH4+-N 的测定比较快速而简单，而用氢氧化钠溶液吸收堆料产生的 CO2 气体以确定其产生量的方法经常作为标准的实验室对比试验方法。但是应用这些评价方法经常会得到不同的结果，这是因为堆肥的腐熟度受很多因素的综合影响，单个指标的评价只能片面地反映某个阻碍因素的作用，不能最直接反映植物的生长特性。因此，不能用单一的指标评价堆肥的腐熟度。而堆肥产品最终要作为有机肥应用于作物的生产，种子发芽指数是一个很好的生物指标，综合反映了堆肥产品的植物毒性，所以目前较为认同的堆肥腐熟度的评价方法是将化学指标与生物指标结合起来，采用多种分析方法测定多个指标，然后根据这些指标综合分析堆肥的腐熟状况。

美国加利福尼亚堆肥质量委员会(CCQC)建议必须用两项以上的化学/生物指标来评价堆肥的腐熟度［6］。他们发展了自己的 CCQC 腐熟度评价指标，这个指标由三部分组成：① 碳氮比；②A 组测试指标中的至少一项；③B 组测试指标中的至少一项。在进行 A 组和 B 组的测试之前，C/N 的测试必须要达到小于或等于 25。A 组测试指标主要是表征堆肥中有机物质的降解程度，内容有 CO2 的释放量、氧气的消耗速率和自热(selfheating)产生量。B 组测试指标主要是表征堆肥产品可能会对植物产生的毒性的一些化学性质，内容有 NH4+-N 和 NO　3--N 的比例、氨浓度、挥发性有机酸的浓度及种子发芽或植物生长试验。

2　几种快速实用的污泥堆肥腐熟度评价方法

中国城镇水网 www.chinacitywater.org

虽然可以反映堆肥腐熟度的评价指标众多，关于腐熟度的研究方法也越来越先进复杂，但是针对每天都要大量产生的污水污泥的堆肥来说，很多方法需要耗费太多的时间，过程也太复杂，不能适用于污泥堆肥腐熟度的评价，因此需要找到更加快速、简单并且比较可靠的方法。

Brewer 等[7]给出的堆肥腐熟度的快速测定的定义是：在一个工作日之内给出有效的结果，方法经济，只需要有经过简单培训的操作人员和容易操作的设备，得到的结果要容易理解。能够适用并比较有发展前途的快速、实用的方法有以下几种。

2.1 明胶测试法

测试的方法为将一定的堆料样品(250 mL,约一杯)放入特制的杯中，在将其密封前把一个塑料的测试器塞入其中。该测试器中有一条化学明胶可以和杯中堆料释放的 CO2 反应并改变颜色，最后将明胶的颜色和对应的颜色表对照即可得出结论。颜色对照表分为从 1(生堆料)到 8(腐熟堆肥)等 8 个级别。

只要使用合理，这个方法可以基本满足所有的标准，且可以在 4 个小时内得出结果，相对于它的花费来说这个方法能给出很好的数据。

2.2 自热测试法

方法是将 1 L 的堆肥样品放入一个绝热的真空瓶中，通过温度计将每天的温度记录下来，直到温度有连续的两天达到最大值。用堆肥达到的最大温度值减去室温值，得到物料的净温度增长值，通过观察每天的净温度增长值来判断堆肥是否达到了稳定和腐熟。堆肥腐熟后的温度增长值是很小的。

虽然这个方法最多需要的时间是 6 天(据报道平均是 4～5 天)，但是测试所需的设备包括真空瓶都容易得到，而且测试结果显示的是很直观的温度，具有很强的操作性。测试所用的真空瓶虽然相对有些贵，但在首次投入使用后，以后再进行测试所需的费用是非常少的。

2.3 二氧化碳探测管法

中国城镇水网 www.chinacitywater.org

将 500 g 的堆肥样品放入广口瓶中，瓶塞是由橡胶制成，以便可以通过注射针抽取瓶中上部空间由堆体所释放的 CO2 气体。抽取出的气体用专门的 CO2 探测管测定浓度。这种管中置有遇见 CO2 就会变色的化学试剂，最后只要是经过校准了的管子就可以很快的以百分数的形式读出 CO2 的浓度。

这是一个很有优势的测试方法，操作简便，比较有代表性。在推肥的腐熟后期开始采样测试，一天的一个测试过程只要 4 个小时。所测的 CO2 浓度只要达到足够低的程度就表明堆肥腐熟了。所用的测试管可以购得。这种方法也还在不断的发展研究中。

2.4　水溶性有机碳(DOC)的测定　　［8～9］

方法为，称取一定重量堆肥鲜样，按堆肥干物质重与双蒸水体积为 1∶10(W (g)∶ V (mL))加入双蒸水，在室温条件下，水平振荡 2 h，然后在 10000 r/min 下离心 10 min，上清液过 0.45 μm 的滤膜，滤液中的有机物就是水溶性有机物(DOM)，其浓度的确定采用 TOC 仪测定水溶性有机碳(DOC)。

研究发现［10］，污泥堆肥过程中水溶性有机物的变化较之固相组分更能灵敏反映堆肥腐熟状况，因此这个方法对于污泥的堆肥有一定的针对性。堆肥腐熟时其 DOC 应降低到比较低的程度。Bernal 等［11］把 DOC＜17 g/kg 作为堆肥腐熟的指标，而 Hue & Liu［12］建立的指标为＜10 g/kg，这要根据具体堆料的差异而制定不同的标准。

3　结语

城市污水污泥的妥善处置是一个亟待解决的问题，污泥堆肥的土地利用方法是一个很好的解决问题的出路，并在近年来得到了广泛的研究和推广。污泥堆肥的腐熟度问题是一个在实际操作中需要重点解决的问题，关系到堆肥产品的销售出路，并且堆肥的腐熟度是堆肥厂的设计、运行及堆肥过程控制的重要依据，关系到堆肥厂的建造成本及运行效率。

对堆肥腐熟度的评价方法和指标虽然众多，但是国内外仍然还没有形成一个合理统一的标准。而对于大规模城市污水污泥堆肥来说，很多指标的测试显得时间过长也过于复杂，因此

中国城镇水网 www.chinacitywater.org

在污泥堆肥腐熟度的评价中发展快速、简单并且比较可靠的方法很有必要。

由于腐熟度的评价与堆肥系统密切相关，受堆肥原料、堆肥方式和所用填充料的影响，每一种具体的堆肥都要根据实际情况确定合适的腐熟度评价方法。

参考文献

1　邓晓林，王国华，任鹤云.上海城市污水处理厂的污泥处置途径探讨.中国给水排水，2000，16(5)：19～22

2　邵志刚，王晓燕.上海市城市污水厂污泥处置工艺选择.上海水务，2001，(4)：33～36

3　T A Butler,L J Sikora,P M Steinhilber,L W Douglass.Compost age and sample storage effects on maturity indicators of biosolids compost.Journal of Environmental Quality，2001,30(6):2141～2149

4　李承强，魏源送，樊耀波，王敏健.堆肥腐熟度的研究进展.环境科学进展，1999，7(6)：1～2

5　李艳霞，王敏健，王菊思.有机固体废弃物堆肥的腐熟度参数及指标.环境科学，1999，20(2)：98～103

6　Will Bakx.California compost quality registration program.Bio Cycle,2002,43(2): 32～39

7　Lina J Brewer, Dan M Sullian. A quick look at quick compost stability tests. Bio Cycle, 2001,42(1): 53～55

8　占新华，周立祥，沈其荣，黄焕忠.污泥堆肥过程中水溶性有机物[LL]　光谱学变化特征.环境科学学报，2001，21(4)：470～474

9　L Wu，L Q Ma,G A Martinez. Comparison of methods for evaluating stability and maturity of biosolids compost. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(2):424～432

中国城镇水网 www.chinacitywater.org

10 Chanyansak V,Kubota H.Carbon/organic nitrogen ration in water extracts as a measure of compost degradation. J Ferment Technol, 1981,59:215～221

11 Bernal M P,C Paredes M A,J Cegarra.Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes.Bioresour Technol, 1998,63: 91～99

12 Hue N V,J Liu. Predicting compost stability. Compost Sci & Utiliz,1995,3: 8～15

◇作者通讯处： 200092 上海市密云路 588 号 城市污染控制国家工程中心 101 室

○电话：(021)65901495

○E-mail：xxg97@sina.com

○修回日期：2002-12-9

中国城镇水网 www.chinacitywater.org