

湿度对堆肥理化性质的影响

罗 维, 陈同斌*

(中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101)

摘要: 水分是堆肥微生物生命活动的基础, 也是堆肥中重要的工艺控制参数。弄清湿度对堆肥微生物及理化性质的影响, 对于优化堆肥工艺参数、提高堆肥效率、降低投资和运行成本具有重要意义。综述了堆肥湿度研究的动态, 指出了当前研究中存在的问题, 并提出了未来的研究方向。大量的研究表明, 湿度低于 45% 或高于 65% 都不利于堆肥处理。湿度太高会导致堆料的压实度增加、FAS 减少、透气性能降低, 从而导致堆体内氧气供应不足、堆肥升温困难、有机物降解速率降低、堆肥周期延长。湿度过低, 水分会限制堆肥微生物的新陈代谢, 导致微生物活性下降、堆肥腐熟困难。由于鼓风、散热、水蒸发等会使堆体内存在湿度的空间变异, 也会降低堆肥效率和堆肥产品的质量。另外, 堆肥湿度还影响堆肥的保肥能力。由各文献得出结论, 堆肥的最佳湿度范围一般为 50%~60% 左右。

关键词: 堆肥; 湿度; 物理性质; 化学性质

Effects of moisture content of compost on its physical and chemical properties

LUO Wei, CHEN Tong-Bin* (*Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101*). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2656~2663.

Abstract: Water, an important processing parameter, is essential to the activity of microorganisms in composting. To understand the effect of composting on physical and chemical properties is of great important to optimize composting parameters, improve its efficiency and reduce capital investment and operational costs. The researches of moisture content in composts are summarized to find out the main existed problems and to suggest its development in the future. The Previous studies indicated that it was not in favor of composting when the moisture content was below 45% or above 65%. If the moisture content in composting is too high, the increase of compaction and the reduction of free air space and bad air permeability in compost pile cause insufficient oxygen supply for microorganisms, resulting in less increase in temperature of composting; therefore, decomposition rate of organic matters decrease and the period of composting will be prolonged. If the moisture of composting is too low, the metabolism of microorganisms will be limited which may lead to inhibit the microbial activity and the mature of composts; therefore, both of the efficiency of composting and the quality of composts are reduced. The existence of spatial variation of moisture content in compost pile, due to aeration, heat dissipation and water evaporation, can also result in the decrease in the composting efficiency and the quality of compost. In addition, retention capability of fertilizer is influenced by the compost moisture, too. It is concluded that the optimal moisture content for composting usually ranges from 50% to 60%.

Key words: moisture content; compost; physical properties; chemical properties

文章编号: 1000-0933(2004)12-2656-08 中图分类号: X705 文献标识码: A

适宜的湿度是堆肥微生物生命活动所需的基本条件之一。湿度过高会导致厌氧发酵, 产生臭气和植物毒性物质, 甚至会使

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(40325003); 科技部农业科技成果转化基金资助项目(02EFN216601217)

收稿日期: 2004-02-12; 修订日期: 2004-05-27

作者简介: 罗维(1972~), 男, 博士生, 主要从事固体废物处理与处置研究。

* 通讯联系人 Author for correspondence. Email: chentb@igsnrr.ac.cn

Foundation item: National Science Fund for Distinguished Young Scholars (Grant No. 40325003); Agricultural Science and Technology Transfer Foundation of Ministry of Science and Technology of China (No. 20EFN216601217)

Received date: 2004-02-12; **Accepted date:** 2004-05-27

Biography: Luo Wei, M.S. candidate, mainly engaged in solid waste treatment and disposal.

微生物活动停止^[1]。湿度太低会使堆料过早干化,因而会抑制微生物的新陈代谢、产生物理稳定而生物活性不稳定的堆肥产品^[2]。弄清湿度对堆肥微生物、物理、化学性质的影响,不仅有利于提高堆肥处理效率、降低堆肥投资和操作成本,而且还有利于堆肥工程以及生物过滤器(bio-filter)的设计及工艺参数的优化与调控。

国内外学者分别从不同角度对堆肥湿度问题进行了一些研究和探索。但是,却少有人对其进行系统的归纳和总结。本文对国内外有关湿度对堆肥微生物、物理、化学性质的影响以及最佳堆肥湿度进行了较系统的总结和评述,以期对堆肥理论研究和工程实践提供参考。

1 湿度对堆肥微生物的影响

一方面,水分不仅为堆肥微生物所需的可溶性营养物质提供载体^[3],而且还为堆肥中的化学和生物反应提供介质^[4];另一方面,堆肥微生物在水中可自由活动,获取营养并得以存活。有人认为,只要能连续供氧,大多堆肥微生物能在水饱和的环境中生存^[1]。因而,水是堆肥微生物进行新陈代谢、生理和生化反应的基础。

水的活度(activity)与自由水呈正相关关系,只有自由水才能向微生物传输可溶性营养物质^[5]。湿度的轻微波动会引起水活度的显著变化,从而明显影响堆肥微生物对有机物的降解。一般认为,水活度低于0.98时微生物活性会降低。尽管水活度很低时一些喜干燥的真菌(xerophilic fungi)也能生长,但是在堆肥过程中这些真菌不会成为优势种群^[6]。不同微生物所要求的水活度范围不同,其中细菌为0.85~0.99、真菌为0.6~0.9^[5]。湿度为8%~12%时,堆肥微生物都会停止生命活动^[7],因此维持堆肥微生物活性的最小湿度应大于12%^[8]。在堆肥过程中,湿度低于40%或高于65%也会限制微生物的生长。湿度由15%增至60%,堆肥微生物活性将随湿度的增大而呈指数增长。当湿度为60%时,堆肥微生物活性几乎是湿度为51%的堆肥微生物活性的2倍^[9]。但是当湿度超过60%时,微生物活性将随湿度的增大而降低。

Tiquia 等进行猪场废弃物堆肥试验时发现:如果堆肥初期给堆料接种细菌(bacterial inoculum),则没有必要在堆肥初期进行湿度调节;反之,如果堆肥过程中调节湿度,则没有必要在堆肥初期接种细菌^[10]。由此表明,是否需要调节堆肥湿度与接种微生物与否有关。

2 湿度对堆肥物理性质的影响

2.1 湿度对压实、压降及堆高的影响

Das 和Keener 通过堆体内气流压降的研究发现,随着湿度的增加,城市污泥压实度明显增加;另外,他们还通过大规模反应器堆肥试验获得了堆肥过程中(堆肥21d)湿度和压实度的变化图。由于堆肥介质是一种类似于土壤的多孔介质,因而可利用土壤压实(缩)度的表示方法来表征堆肥介质的压实度^[11]。目前已将土壤压实方程成功地用于描述城市固体废弃物和城市污泥的特性^[12]。假设多孔介质的压实作用是由于堆体内空域(air space)减少所导致,由此推断:物料的湿度越高、堆体内空域越大,对压实作用越敏感^[11]。

陈同斌等在研究堆肥过程中堆体内不同深度的容重变化时发现,堆肥容重与堆体高度呈明显的正相关关系^[13]。因此,增加堆高会增大堆料(尤其是湿堆料)的容重,导致堆体内产生压实效应。压实效应使堆体中自由空域(free air space,FAS)和气体的渗透性呈明显的垂直变化^[14],从而导致通风需求量的提高、堆体内产生明显的气流通道效应。堆肥的压实作用是堆体内通风、温度、湿度等分布不均的重要原因^[15]。Das 和 Keener 由湿度、压实以及气流量的模拟研究发现,改变堆体高度可改善堆肥产品的均一性,降低运行成本。他们还阐述了不同湿度堆肥条件下的最大堆高以及不同堆高条件下导致厌氧发酵的概率^[11]。

2.2 湿度对孔隙度、自由空域的影响

水能占据堆料间的孔隙,并影响其结构强度,导致孔隙度的减少。因而,湿度的改变在很大程度上也会改变孔隙度、气体交换速率以及供氧能力^[16]。堆肥湿度与孔隙度、FAS 存在着密切的关系,Golueke 等已建立了湿度和孔隙度的关系式^[17]。对于特定物料而言,最佳湿度与维持好氧生物快速降解速率所需的最小FAS 有关。表1 为不同湿度条件下FAS 的大小。由该表说明:同一堆料的湿度越高,其FAS 越小;相同湿度的不同堆料,其FAS 可能不同。一般而言,堆料湿度越高,堆肥所需的FAS 就越大。但是,当湿度大于60%时,FAS 会限制堆肥处理^[9]。Jeris 根据堆肥过程中氧气的消耗速率推断:当FAS 为30%~36%时,微生物降解有机物的能力最强;当FAS 小于28%时,堆肥通气的性能下降。因此,为减少FAS 对堆肥的制约,须确保堆体内的FAS 大于28%。但是如果使用CTB 堆肥调理剂等特殊的堆肥调理剂,即使FAS 低于28%同样也能堆肥成功^[13]。过去对堆肥湿度与FAS 的关系作了许多有益的探索,但是并没有考虑堆体的压实作用对FAS 的影响。由于高湿度堆体具有很大的压实性,因而其压实作用将对FAS 产生明显的影响(堆体下部的FAS 降低尤其明显)^[18]。

实际上,堆肥过程中FAS 的升高在很大程度上取决于堆肥水分的蒸发。一般而言,堆肥早期堆体内FAS 较少,通气及氧气传输可能很困难,但随着水分的蒸发、孔隙的增加,堆体内FAS 将会增大,其值最终将达到40%~65%^[14,19]。

堆体内FAS 的分布还取决于堆肥垛或发酵仓的堆高,因为堆高与堆料的压实作用和物料结构有关。如果堆体较高,则要求混合堆料的湿度较低。Das 和 Keener 认为,为保持堆体内有足够的FAS,如果强制通风静态堆肥的湿度为57%,则其最大堆

表1 湿度与FAS的关系

Table 1 Relationship between moisture content and free air space

堆肥物料 Composting materials	湿度 Moisture(%)	FAS 自由空域(%)	文献来源 References
	<30	50~60	Haug, 1993 ^[19]
	50	>30	Epstein, 1993 ^[20]
	≤57	>28	Das, 1996 ^[11,12]
	≈60	10~15	Epstein, 1993 ^[20]
	>70	0	Haug, 1993 ^[19]
城市污泥+回流污泥 Sewage sludge + composted sewage sludge			
混合城市垃圾 Co-compost of municipal solid wastes	67	30	Jeris, 1973 ^[18]
城市污泥+猪粪 Sewage sludge + animal manure	60	18	陈同斌, 2004 ^[14]

高为3.5m;如果湿度为63%,则最大堆高为2.25m^[11]。Haug 建议,以发酵仓混合堆肥处理城市污泥和回流污泥时,如果堆高为3m,则初始堆肥湿度应低于55%,如果堆高为4m,则初始堆肥湿度最好为50%,否则FAS会降低堆肥效果^[19]。

2.3 湿度对气流阻力和透气性的影响

Das 和 Keener 的研究发现,随着湿度的增大,气流压降明显增加。他们根据多孔介质的Kozeny-Carman 渗透方程开发了一套常用的气流模型。该模型可成功地描述不同湿度、压实度下堆料的空气渗透性能^[11]。

堆体内气流阻力对于通气系统的设计也很重要。Keener 讨论了气流压降对工艺设计和堆肥成本的影响^[21]。Higgins 确定了气流速度在0.25~1.02m/s 范围内污泥-木片堆肥的气流阻力参数^[22]。但是,这些研究并没有考虑到堆肥湿度对压实和压降的影响。

对于细小、均匀的堆肥颗粒而言,其透气性能是孔隙度、孔隙形状、颗粒所处方位、颗粒暴露在流体中的表面积以及孔径分布的函数。Kozeny-Carman 的平均水力半径模型(average hydraulic radius model)描述了堆体内空气渗透能力与孔隙率的关系。他们的研究表明:透气性与 Darcy 定律决定的流体速率有关,随着压实度的增大,透气性呈指数衰减。但对于高吸湿性的物料(例如牛粪堆肥),水分的存在并不增加压实度^[11]。

2.4 湿度对堆肥温度的影响

水的比热高于其他堆料,因而水分可通过传热而影响堆温。水被视为一种“堆温平衡器”,当微生物活动处于低谷时,水分会抑制堆温的变化,当微生物活动处于高峰时,水分会促进热的传导、降低堆体温度^[44]。在堆肥开始后2~6d 内,湿度通常会影响堆肥的升温速率,6d 以后其影响不太明显^[43]。高湿度堆肥(通常大于65%)的升温速率较慢,堆肥周期长,堆体容易过早冷却,甚至无法达到高温堆肥的要求。相反,当堆肥过程中湿度低于40%时,堆温开始降低^[27,48]。由堆温的变化表明,堆肥过程中湿度应维持在50%~60%^[49]。

VanderGheynst 由通风静态床堆肥(an aerated bed composting process)实验发现:在食品废物和城市污泥混合堆肥过程中,最高温度和最高温度所处的位置随着初始湿度和通气速率的改变而改变。对于食品废物堆肥而言,堆体轴线上最高堆温所在的位置与最高湿度所在的位置正好吻合,轴线上最小堆温的位置与最小湿度的位置正好吻合;对于城市污泥堆肥而言,温度与湿度也符合这一规律^[33]。

2.5 堆肥过程中堆料保水性能的变化

堆肥过程中有机物的降解作用会导致堆料保水性能的显著改变。堆肥过程中有效态水会明显增加,堆肥后有效态水达到最大。由不同堆料的保水特征曲线与理想介质的保水能力进行比较发现:堆肥前堆料的保水能力大于50cm 水压,很少低于50cm 水压;但是,随着堆肥的进行,不同堆料的保水能力等于或高于理想介质的保水能力;在堆肥结束时,所有堆料的保水能力达到最大,且高于理想介质的保水能力^[40,41]。导致堆料保水能力增加可能是由于堆肥过程中颗粒粒径减小^[42]、总孔隙度增加、水分释放速率增大的缘故。另外还发现,堆肥结束时堆料的有效态水仍然在可接受的范围,且水分缓冲能力较强^[41]。

3 湿度对化学性质的影响

3.1 湿度对堆肥中氮素损失的影响

堆肥处理过程中存在氮素损失。Cabrera 认为,当堆肥含水量接近其持水能力时,容易导致NH₃ 的挥发,且湿度越高,NH₄-N损失越大^[23]。Tiquia 研究发现,对于湿度为50%和60%的堆体,堆肥前期堆料的NH₄-N 含量降低,堆肥后期相应的(NO₃+NO₂)-N 含量增大;对于湿度为70%的堆体,堆肥前期堆料的NH₄-N 含量迅速降低,但堆肥后期相应的(NO₃+NO₂)-N 含量并不迅速增大^[24]。一些研究还发现,初始湿度影响N 的损失程度^[25,26]。湿度不仅影响NH₄-N 和NO₃-N,而且还影响总氮、NO₂-N、C、N以及总钾、水浸提钾、pH 等。尽管如此,仍有一些参数如灰分含量、总碳、CEC、总磷、水浸提磷不受湿度变化的影响^[27]。总之,堆肥初始湿度越高,堆肥的NH₄-N 损失越大,越不利于堆肥养分的保持。

Shi 等认为,堆肥过程中强化湿度管理会减轻堆肥氮素的损失^[28]。Seekins 也认为,强化湿度管理能阻止营养物质的损失^[29]。但Golueke 的研究发现,强化湿度管理是缩短堆肥周期的必要条件^[30],Barrington 甚至认为,湿度对氮素损失几乎没有影响^[31]。目前有关湿度是否对氮素损失产生影响的问题仍存在较大分歧,对于加强湿度管理是否可以减轻堆肥氮素损失仍待进一步研究和证实。

3.2 湿度对有机物降解速率的影响

湿度是影响微生物降解有机物的重要因素之一^[32]。湿度和有机物降解速率存在密切的关系^[33]。Miller 认为,堆肥过程中湿度的连续下降是有机质降解的标志^[34]。但是,如果堆肥过程中温度下降过快,水分的损失将会导致有机物降解速率的明显降低^[35]。

大量研究表明,当湿度小于45%或大于60%时,有机物降解速率会明显降低。湿度由60%降低到45%时,有机物降解速率的下降幅度相对较小^[19, 27, 36, 37]。湿度高于75%会抑制堆温的快速升高^[38]。鉴于湿度对堆肥的显著影响,Higgins 将非优化的湿度作为有机物降解动力学模型的重要修正因子^[37]。

湿度不但影响有机物的降解速率,有机物的降解速率反过来也影响堆肥的湿度。Baker 通过研究有机物降解程度对湿度和相对湿度的影响,得到了堆肥和膨胀剂的平衡湿度等温曲线^[39]。VanderGheynst 认为,湿度对有机物降解速率的影响与通风速率有关;在最小通风速率条件下,湿度并不限制有机物的降解作用,但是在最大通气速率条件下,堆肥处理50h以后湿度就可能限制微生物活动^[33]。Kelleher 等认为,微生物代谢热不仅可促进水分的蒸发,而且可明显提高有机物的降解速率和腐熟度^[38]。

3.3 湿度对氧气供应的影响

由于氧气在水中的扩散能力仅为其在空气中的扩散能力的1/10000,因而湿度太高会降低氧气向堆肥颗粒内的扩散。Jeris 在研究垃圾堆肥时发现,当湿度小于20%时,氧气吸收率很低、微生物活性很小^[18]。Hamoda 等认为,当湿度大于20%时,随着湿度的增加,氧气吸收率呈线性增加;当湿度为50%~70%时,氧气吸收速率最高;大于这一湿度范围,氧气吸收速率又开始减少,鼓风供氧相当困难^[4, 19]。在整个堆肥过程中,氧气吸收率与湿度之间不是一种简单的线性关系^[35]。

由显微水平下湿度与氧气的交换机理表明:当湿度约为40%时,不会限制氧气传输^[43]。但是如果颗粒太小或压实作用导致孔隙不充分,即使在可接受的湿度范围内,也有可能限制氧气的输送^[44]。堆肥孔隙内氧气的浓度梯度与由湿度差异所导致的水膜层厚度有关^[8]。湿度太高会导致液膜增厚效应和基质效应,这些效应会降低氧气扩散,导致厌氧区域的产生^[44]。

郑玉琪等的研究表明:堆体边缘部分的氧气的浓度和堆体中上部相接近,中心部位的氧气浓度远小于其他部位^[45],其主要原因在于堆体内湿度的空间变异。由强制通风静态堆肥床堆肥实验表明:初始湿度很少影响累积耗氧量(cumulative O₂ consumed),但会对耗氧速率产生影响;通常随着堆肥床下半部湿度的降低,耗氧速率随之降低^[33]。但对于半开放的静态垛堆肥系统而言,堆体中、下部的耗氧速率却很高^[7]。

由于过去对堆体不同剖面氧气浓度空间变异的研究较少,因此,至今仍很难按照统计学方法来评价堆体内的湿度梯度对氧气浓度的影响^[21]。

3.4 湿度对堆肥腐熟度的影响

堆肥过程中,维持适当的湿度对堆肥腐熟过程非常重要。湿度太高会导致厌氧;有机物的持续厌氧会造成有机物的不完全降解,从而产生植物毒性物质^[1]。湿度太低会抑制微生物的活动,使堆肥产品不能完全腐熟^[2]。湿度等于45%或者低于45%时,可能会使堆肥人员误认为堆肥已经腐熟^[3]。罗维 等研究发现,堆肥过程中湿度存在十分明显的空间变异^[15],Tiquia^[46]、陈同斌^[47]等也分别证实堆体上、中、下部堆肥腐熟度的明显差异。因而,湿度的差异是影响堆肥腐熟度的重要原因之一。

4 堆肥的最佳湿度

20世纪50年代,Golueke 阐述了普通堆肥所需要的湿度,并初步探讨了堆肥过程中允许的湿度上限^[17]。目前普遍认为,湿度在70%~80%之间将使堆肥过程中产生厌氧发酵,湿度大于75%就会抑制堆体中微生物的活动^[2, 10]。Hamoda 的研究表明,只要湿度高于60%就会阻碍氧气向堆料内部扩散,从而不利于微生物的降解作用^[4]。Rynk^[1]、Stentiford^[8]、Haug^[19]皆认为,当堆料湿度超过65%时,水会充满堆料颗粒间的孔隙,导致FAS减少、通风受阻,出现厌氧区并产生臭味的中间产物(硫化氢,硫醇,氨气等),甚至可能产生渗滤液,使堆肥中的营养物和病原体随渗滤液流失。尽管如此,有人认为,只要通风能满足微生物对氧气的需求,65%以上湿度仍能顺利实现堆肥^[51]。

一般而言,湿度低于30%会抑制微生物生长或使其休眠^[1, 19]。Jeris 由氧气吸收速率推断,当堆肥的湿度低于20%时,堆肥微生物几乎停止活动^[18]。Jimenez 的研究发现:在堆肥期间,如果湿度低于10%~15%,细菌的代谢通常会停止。因而,在筛分和销售堆肥产品之前,通常要求将其湿度降至37%左右;袋装和商业销售的颗粒状堆肥产品,其湿度应低于20%^[52]。

以上的研究数据表明堆肥过程中存在最佳湿度问题。确定堆肥的最佳湿度时需要综合考虑氧气供给和微生物的水分需求。具体而言,就是既要保持物料孔隙率和透气性的要求,又要考虑微生物的需求。堆肥的最佳湿度由以下因素决定:堆肥的工艺类

型、废弃物的物理状态、所处理的混合物及其孔隙状况等^[53]。确定堆肥的最佳湿度是一个相当复杂的过程,它需要了解堆肥系统中物理、化学性质相互作用的过程与机制。

Jeris 的初步研究表明,各种有机废物的最佳堆肥湿度范围为 25%~80%,后来进一步将其限定在 45%~60%之间;由于在该湿度范围内堆肥颗粒表面将形成薄薄的液膜,在液膜上微生物降解有机物的速率最快^[18]。由于堆肥物料和堆肥方法的差异,也有人认为 40%~70%是可接受的堆肥湿度范围。目前还未见文献系统地总结不同堆料的最佳堆肥湿度范围^[54]。根据笔者收集的资料,现将国内外有关堆肥湿度的文献总结如表 2。

由表 2 可发现,不同堆肥原料和工艺要求的最佳湿度范围存在一定差异,但是大多数人认为,无论何种堆肥原料和工艺,最佳堆肥湿度范围应维持在 50%~60%之间。

表 2 不同堆肥工艺的最佳堆肥湿度

Table 2 Suitable moisture content in different composting processes			
堆肥工艺 Composting processes	堆肥原料 Composting materials	最佳湿度 Suitable moisture (%)	文献来源 References
条 垛 堆 肥 Windrow composting	牛粪和稻壳 Dairy cattle slurry and rice hull	60	Genevini,1996 ^[69]
	牛粪、作物及林业废弃物 Dairy cattle manure with crop and forest residues	55~65	Hong,1983 ^[62]
	农场废弃物 Farming wastes	40~60	Rynk, 1991 ^[55]
	家禽粪便、泥碳或破碎秸秆 Poultry manure slurry and peat or chopped straw	73~80	Fernandes,1994 ^[64]
	畜禽粪便、城市污泥、城市固体废物 Animal manure, sewage sludge and municipal solid wastes (MSW)	45~60	Stratton,1995 ^[57] ; Stentiford, 1996 ^[3] ; Groenhof, 1998 ^[58]
	猪场废弃物 Spent pig litter	50~60	Tiquia,1998 ^[27]
	猪粪 Pig manure	66	庞金华,1999 ^[68]
	农场废弃物 Farming wastes	40~60	Rynk, 1991 ^[55]
通 风 静 态 垛 堆 肥 Static aeration composting		≤ 60	李艳霞,2000 ^[48]
	城市污泥 Sewage sludge	≤ 80	魏源送,2000 ^[65]
		45~55	Epstein, 1997 ^[56]
	城市污泥和猪粪 Sewage sludge and pig manure	50~60	罗维,2004 ^[15]
	城市污泥和有机废弃物 Sewage sludge and organic wastes	50~60	陈世和,1993 ^[61]
好 氧 堆 肥 Aerobic composting	城市和涉农工业废弃物 Urban and agro-industrial residues	50~65	Sharma,1997 ^[53]
	庭院垃圾 Yard garbage	52~58	Snell, 1957 ^[59]
	城市污泥和城市固体废物 Sewage sludge and MSW	50~53	曲颂华,1998 ^[60]
	食物和庭院废物 Food and garden wastes	≤60	Berube, 2001 ^[66]
	植物枯落物、城市污泥 Plant residues and sewage sludge	25~80	Jeris, 1973 ^[18]
	城市污泥和城市固体废物 Sewage sludge and MSW	50~53	曲颂华,1998 ^[60]
	鸡场废物 Broiler litter	70	金家志,1997 ^[67]
	城市污泥 Sewage sludge	60~70	田宁宁,2001 ^[63]
	城市固体废物 MSW	50	Hachicha, 1992 ^[70]
	蔬菜、水果及庭院废弃物 Vegetables, fruits and yard wastes	45~70	Suler, 1977 ^[49]
反 应 器 堆 肥 Invessel composting	食品废物 Food residues	60	Suler,1977 ^[49]
	植物枯落物 Plant residues	60	Jeris, 1973 ^[18]
	植物枯落物和城市污泥 Plant residues and sewage sludge	55	Jeris, 1973 ^[18]
	畜禽粪便、城市污泥、城市固体废物 Animal manure, sewage sludge and MSW	45~60	Stratton,1995 ^[57] ; Stentiford, 1996 ^[3] ; Groenhof, 1998 ^[58]
	城市固体废物 MSW	50~60	Jimenez, 1991 ^[52] ; Golueke, 1991 ^[50] ; Miller, 1989 ^[51] ; Hamoda, 1998 ^[4]
所有堆肥工艺 All compostings	有机废弃物 Organic wastes	50~55	Richard,2002 ^[44]

尽管多方数据证实了最佳堆肥湿度范围,但也有一些文献提出了最佳堆肥湿度值(表2)。据Jeris^[18]和Suler^[49]的研究初步认为,堆肥最佳湿度值为 65%左右。Hamoda 的实验进一步发现,湿度为 60%是最佳湿度值^[4],他的研究结果与Golueke^[50]的研究

结果一致。另一些研究表明,不同堆料所要求的最佳堆肥湿度值不尽相同;对城市污泥堆肥而言,60%的湿度可能并不合适^[19],对于粪水分离后的猪粪堆肥而言,湿度高达79%也能顺利实现堆肥^[51]。归纳大量文献后发现,不同堆料和堆肥工艺,最佳湿度值普遍倾向于60%。

5 结语与展望

总结以上的研究可以看出:堆肥湿度直接影响好氧堆肥的反应速度、堆肥质量,甚至关系到堆肥的成败。湿度低于45%或高于65%都不利用堆肥处理。水活度低于0.98时堆肥微生物活性下降。随着湿度的增加,堆肥的压实度明显增加;湿度越高,堆肥要求的FAS越大;堆体越高,堆肥要求的湿度越低。堆肥湿度增大,气流压降增加、透气性降低。湿度影响堆肥的保肥、保水能力和有机物的降解速率。堆体内湿度的空间变异导致不同部位氧气浓度和腐熟度的差异。最佳湿度范围一般为50%~60%。

今后应着重从以下方面对堆肥湿度进行研究:加强湿度和不同形态的水分对堆肥微生物活性影响的研究。在堆肥湿度对堆肥物理性质影响的研究中,可充分借鉴土壤物理学的理论和方法,努力改变堆肥物理性质研究相对较为薄弱的现状,同时也应加强湿度管理对保肥、除臭以及有机物降解、腐熟的影响研究。在考虑堆肥最佳湿度时,应针对不同物料、调理剂、环境条件和堆肥工艺类型,进行堆肥最佳湿度的系统研究。

堆肥湿度调控和水-热间耦合关系研究是今后堆肥研究中的一个关键问题和技术难点。解决这一难题的一个限制因素是目前尚缺少准确、方便、快速的堆肥湿度测定方法,因此今后应重点攻克这一难关。目前对堆肥湿度的研究多为初浅、定性的研究,且不同研究结果之间常存在较大的分歧,今后应进一步重视湿度变化过程的定量研究和数学模拟。

References:

[1] Rynk R. Monitoring moisture in composting systems. *BioCycle*, 2000, **10**: 53~57.

[2] Bertoldi D M, Vallini G, Pera A. The biology of composting: a review. *Waste Management and Research*, 1983, **1**: 157~176.

[3] Stentiford E I. Composting control: principles and practice. In: de Bertoldi M, Sequi P, Lemmes B eds., *The Science of Composting, Part I*. London (UK): Chapman and Hall, 1996. 49~59.

[4] Hamoda M F, Abu-Qdais H A, Newham J. Evaluation of municipal solid waste composting kinetics. *Resources, Conservation and Recycling*, 1998, **23**: 209~223.

[5] Oriol E, Raimbault M, Roussos S, *et al.* Applied microbiology. *Biotechnology*, 1988, **27**: 498.

[6] Weppen P. Process calorimetry on composting of municipal organic wastes. *Biomass and Bioenergy*, 2001, **21**: 289~299.

[7] Diaz L F, Savage G M, Eggerth L L, *et al.* *Composting and Recycling Municipal Solid Waste*. Boca Raton (USA): Lewis Publishers, 1993. 296.

[8] Miller F C. Matric water potential as an ecological determinant in compost, a substrate dense system. *Microbial Ecology*, 1989, **18**: 59~71.

[9] Schulze K L. Relationship between moisture content and activity of finished compost. *Compost Science*, 1964, **2**: 32~34.

[10] Tiquia S M, Tam N F Y, Hodgkiss I J. Effects of bacterial inoculum and moisture adjustment on composting of pig manure. *Environmental Pollution*, 1997, **96**(2): 161~171.

[11] Das K, Keener H M. Process control based on dynamic properties in composting: moisture and compaction considerations. *The Science of Composting: part 1*. Glasgow (UK): Blackie Academic and Professional, 1996. 116~125.

[12] Das K, Keener H M. Moisture effect on Compaction and permeability in composts. *Environmental Engineering*, 1997, **123**: 275~281.

[13] Chen T B, Luo W, Gao D, *et al.* Stratification of bulk density and its dynamics in the process of co-composting. *Environmental Science*, 2004, **25**(5): 143~147.

[14] Chen T B, Luo W, Gao D, *et al.* Stratification of free air space and its dynamics in the process of co-composting. *Environmental Science*, 2004, **25**(6): 150~153.

[15] Luo W, Chen T B, Gao D, *et al.* Variations of moisture content during co-composting of biosolid and pig manure. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, **24**(1): 126~133.

[16] Miller F C, Finstein M L, and Strom P F. Waste treatment composting as a controlled system. *Biotechnology*, 1986, **8**: 363~398.

[17] Golueke C G, McGauhey P H. Reclamation of Municipal Refuse by Composting. In: *Technical Bulletin No. 9 Sanitary Engineering Research Laboratory*, University of California, Berkeley, CA, USA, 1953.

[18] Jeris J S, Regan R W. Controlling environmental parameters for optimal composting Ⅱ: moisture, free air space and recycle. *Compost Science*, 1973, **1**: 14.

[19] Haug R T. *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993.

[20] Epstein E, Winkler G B, Burge W D, *et al.* A forced aeration system for composting of wastewater sludge. *Journal Water Pollution Control Federation*, 1976, **48**: 688~694.

- [21] Keener H M, Hansen R C, Elwell D L. Pressure drop through compost: implications for design. *Paper presented at the Summer Meeting of the American Society of Agricultural Engineers*, Spokane Wa, June, 1993. Paper No. 93-4032.
- [22] Higgins A J, Chen S, Singley M E. Airflow resistance in sewage sludge composting aeration systems. *Transactions of the American Society for Agricultural Engineering*, 1982, **25**: 1010~1014, 1018.
- [23] Cabrera M J, Chiang S C. Water content effect on denitrification and ammonia volatilization in poultry litter. *Soil Society of America Journal*, 1994, **58**: 811~816.
- [24] Tiquia S M, Tam N F Y, Hodgkiss I J. Changes in chemical properties during composting of spent pig litter at different moisture contents. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1998, **67**: 79~89.
- [25] Tiquia S M, Tam N F Y, Hodgkiss U. Microbial activities during composting of spent pig-and sawdust litter at different moisture contents. *Bioresource Technology*, 1996, **55**: 201~206.
- [26] Bishop P L, Godfrey C. Nitrogen transformation during sludge composting. *Biocycle*, 1983, **24**: 34~39.
- [27] Tiquia S M, Tam N F Y, Hodgkiss I J. Changes in chemical properties during composting of spent pig litter at different moisture contents. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1998, **67**: 79~89.
- [28] Shi W, Jeanette M N, Bruce E M, *et al.* Effects of aeration and moisture during windrow composting on the nitrogen fertilizer values of dairy waste composts. *Applied Soil Ecology*, 1999, **11**: 17~28.
- [29] Seekins B. Troubleshooting the compost pile, Part I. *Biocycle*, 1999, **40**(11): 53~55.
- [30] Golueke C G. *Composting-A Study of the Process and Its Principles*. Emmaus (PA, USA): Rodale Press, 1972.
- [31] Barrington S, Choiniere D, Trigui M, *et al.* Effect of carbon source on compost nitrogen and carbon losses. *Bioresource Technology*, 2002, **83**: 189~194.
- [32] Cookson J T. *Bioremediation Engineering: Design and Application*. New York: McGraw-Hill, 1995. 51.
- [33] VanderGheynst J S, Gossett J M, Walker L P. High-solids aerobic decomposition: pilot scale reactor development and experimentation. *Process Biochemistry*, 1997, **32**: 361~75.
- [34] Miller F C, Finstein M S. Materials balance in the composting of wastewater sludge as aerated by process control. *Journal Water Pollution Control Federation*, 1985, **57**: 122~127.
- [35] Walker L P, Nock T D, Gossett J M, *et al.* The role of periodic agitation and water addition in managing moisture limitations during high-solids aerobic decomposition. *Process Biochemistry*, 1999, **34**: 601~612.
- [36] Chung D S, Fost H P. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains food. *Transactions of the American Society for Agricultural Engineering*, 1967, **30**: 848~852.
- [37] Higgins C W, Walker L P. Validation of a new model for aerobic organic solids decomposition: simulations with substrate specific kinetics. *Process Biochemistry*, 2001, **36**: 875~884.
- [38] Kelleher B P, Leahy J J, Henihan A M, *et al.* Advances in poultry litter disposal technology-a review. *Bioresource Technology*, 2002, **83**: 27~36.
- [39] Baker C S, VanderGheynst J S, Walker L P. Equilibrium moisture isotherms for synthetic food waste and biosolids compost. *Compost Science and Utilization*, 1999, **7**: 6~13.
- [40] DeBoodt M, Verdonck O. Physical properties of substrates in horticulture. *Acta Horticulture*, 1972, **26**: 37~44.
- [41] Bilderback T, Fonteno W C, Johnson D R. Physical properties of media composed of peanut hulls, pine bark and peat moss and their effects on azalea growth. *Journal of American Society for Horticultural Science*, 1982, **106**: 736~741.
- [42] Mbah B N, Odilli P N. Changes in moisture retention properties of five waste materials during short-term mesophilic composting. *Compost Science and Utilization*, 1998, **6**(4): 67~73.
- [43] Miller-Sylvan F C, Hills W. Thermal evolution during composting of sewage sludge. In: de Bertoldi M, Sequi P, Lemmes B (eds.), *The Science of Composting, Part I*. London (UK): Chapman and Hall, 1996. 106~115.
- [44] Richard T. *Excess moisture*. [Http://www.cfe.cornell.edu/compost/MSW.FactSheets/msw.fs2.html](http://www.cfe.cornell.edu/compost/MSW.FactSheets/msw.fs2.html), 2002.
- [45] Zheng Y Q, Chen T B, Gao D, *et al.* Oxygen variation in aerobic composting process of pig manure. *Acta Ecologica Sinica*, **22**(5): 747~751.
- [46] Tiquia S M, Tam N F Y. Characterization and composting of poultry litter in forced-forced aeration piles. *Process Biochemistry*, 2002, **37**: 869~880.
- [47] Chen T B, Luo W, Zhen G D, *et al.* Effect of pile turning on chemical and physical properties in the process of co-composting of sewage sludge and pig manure. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, **24**.
- [48] Li Y X, Wang M J, Wang J S, *et al.* Effect of bulk agent and aeration on sewage sludge composting process. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(10): 1091~1020.
- [49] Suler D J and Finstein M S. Effect of temperature, aeration and moisture content on the CO₂ formation in bench scale continuously

thermophilic composting of solid waste. *Applied and Environmental Microbiology*, 1977, **33**(2): 345~350.

[50] Golueke C G. Principles of Composting, In: *The Biocycle Guide to the Art and Science of Composting*. Emmaus(PA,USA): J. G. Press, 1991.

[51] Liao P H, Vizcarra A T, Chen A, *et al.* Composting salmon farm mortalities with passive aeration. *Compost Science and Utilization*, 1996, **2**(4): 58~66.

[52] Jimenez E I, Garcia V P. Composting of domestic refuse and sludge: evaluation of treatment, pH, C/N ration and cation-exchange capacity. *Resources, Conservation and Recycling*, 1991, **6**: 45~60.

[53] Sharma V K, Canditelli M. Processing of urban and agro-industrial residues by aerobic composting: review. *Energy Covers Management*, 1997, **38**(50): 452~478.

[54] Finstein M S, Hogan J A. Integration of composting process microbiology, facility structure and decision-making. In: Hoitink H A J and Keener H M eds. *Science and Engineering of Composting: Design, Environmental, Microbiological and Utilization Aspects*. Ohio: Renaissance Publishing, 1993. 1~23.

[55] Rynk R, Kamp M, Willson G, *et al.* *On-Farm Composting Handbook*. Ithaca (NY): Ortheast Regional Agricultural Engineering Service, 1991.

[56] Epstein E. *The Science of Composting*. Lanchaster (USA): Technomic Publishing Company, 1997.

[57] Stratton M L, Barker A V, Rechcigl J E. Compost. In: Rechcigl J E ed. *Soil Amendments and Environmental Quality*. Boca Raton (USA): Lewis Publishers, 1995. 249~309.

[58] Groenhof A. Composting - renaissance of an age-old technology. *Biologist*, 1998, **45**: 164~167.

[59] Snell J R. Some engineering aspects of high-rate composting. *Journal of the Sanitary Engineering*, 1957, **1**: 83.

[60] Qu S H, Chen S W. Research on mixed compost of municipal solid wastes and sewage sludge. *Environmental Protection*, 1998, **10**: 15~16.

[61] Chen S H. A review on Chinese municipal solid waste composting technologies. *Environmental Science*, 1993, **15**(2): 53~56.

[62] Hong J H, Matsuda J, Ikeuchi Y. High rapid composting of dairy cattle manure with crop and forest residues. *Transactions of the ASAE*, 1983, **26**(2): 533~541,545.

[63] Tian N N, Ke J M, Wang K J. Development of horizontal rotating aerobic sludge composting device. *China Water and Wastewater*, 2001, **17**(1): 19~22.

[64] Fernandes L, Zhan W, Patni N K, *et al.* Temperature distribution and variation in passively aerated static compost piles. *Bioresource Technology*, 1994, **48**: 257~263.

[65] Wei Y S, Fan J B, Wang M J, *et al.* Control modes of Aeration for composting systems. *Environmental Science*, 2000, **21**(2): 101~104.

[66] Berube E, Beausejour J. *Design and implementation of a composting system for a community food bank and garden*. Canada: McGill University, 2001.

[67] Jin J Z, Shao F J, Lu H. Study on composting treatment of broiler litter. *Agro-environmental Protection*, 1997, **16**(2): 65~67.

[68] Pang Z H. The conflict between water and vapour in thermal composting. *Agro-environmental Protection*, 1997, **18**(2): 73~75.

[69] Genevini P L, Adani F, Villa C. Rice hull degradation by co-composting with dairy cattle slurry. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1997, **43**(1):135~147.

[70] Hachicha R, Hassen A, Jedidi N, Kallal H. Optimal conditions for MSW composting. *Biocycle*, 1992, **33**(6): 76~77.

参考文献:

[13] 陈同斌, 罗维, 高定, 等. 混合堆肥过程中容重的层次效应及其动态变化. *环境科学*, 2004, **25**(5):143~147.

[14] 陈同斌, 罗维, 高定, 等. 混合堆肥过程中自由空域(FAS)的层次效应及其动态变化. *环境科学*, 2004, **25**(6):150~153.

[15] 罗维,陈同斌,高定, 等. 城市污泥与猪粪混合堆肥过程中的湿度空间变异. *环境科学学报*, 2004, **24**(1): 126~133.

[45] 郑玉琪,陈同斌,高定, 等. 猪粪快速好氧堆肥过程中氧气浓度的变化. *生态学报*, 2002, **22**(5):747~751.

[47] 陈同斌, 罗维, 郑国砥, 等. 翻堆对强制通风静态垛混合堆肥过程及其理化性质的影响. *环境科学学报*, 2004, **24**.

[48] 李艳霞, 王敏健, 王菊思, 等. 填充料和通气对污泥堆肥过程的影响. *生态学报*, 2000, **20**(6): 1015~1020.

[60] 曲颂华,陈绍伟. 城市垃圾与污水处理厂污泥的混合堆肥研究. *环境保护*, 1998, **10**: 15~16.

[61] 陈世和. 中国大陆城市生活垃圾堆肥技术概况. *环境科学*, 1993, **15**(2):53~56.

[63] 田宁宁,柯建明,王凯军. 卧式旋转型污泥堆肥装置的研制. *中国给水排水*, 2001, **17**(1): 19~22.

[65] 魏源送,樊建波,王敏健, 等. 堆肥系统的通风系统控制方式. *环境科学*, 2000, **21**(2): 101~104.

[67] 金家志, 罗维, 樊建波, 等. 肉鸡舍垫料堆肥化处理研究. *农业环境保护*, 1997, **16**(2): 65~67.

[68] 庞金华. 高温堆肥的水气矛盾. *农业环境保护*, 1999, **18**(2): 73~75.