

雏鸡舍氨气的原位无动力生物滤器处理试验^{*}

泮进明¹ 叶芳¹ 刘艺青¹ 吕黄珍² 丁颖³ 蒋劲松¹

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083;

3. 杭州师范大学生命与环境科学学院, 杭州 310036)

摘要: 针对室外生物滤器受气候条件影响、维护成本高及我国雏鸡舍密闭加温通风少而导致氨气浓度高危害大等问题, 研究无动力生物滤器原位处理雏鸡舍氨气的效果, 分析了内外基质氮元素、pH 值、电导率(EC)等指标的变化。为期 37 d 与育雏期生产同步的试验表明, 生物滤器的表层基质氨气去除能力不低于 4.03 g/kg, 吸收氨氮含量最高达 1.59 g/kg, 转化硝氮含量最高达 2.69 g/kg, 亚硝氮含量几乎为 0, 基质 pH 值不断下降, 变化范围为 8.81 ~ 7.39, 电导率不断上升, 最大上升量达 2.30 mS/cm。内层基质中氨氮、硝氮与总无机氮含量和电导率均低于表层基质, 需要进一步优化基质厚度。结果表明, 原位无动力生物滤器氨气处理效果好, 可应用于育雏舍污染气体控制。

关键词: 雏鸡舍 氨气 生物滤器 原位 无动力

中图分类号: X506; S831.4⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)07-0204-06

In-situ Unpowered Biofiltration of Ammonia Gas in Chick Houses

Pan Jinming¹ Ye Fang¹ Liu Yiqing¹ Lü Huangzhen² Ding Ying³ Jiang Jingsong¹

(1. School of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

3. College of Life and Environmental Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310036, China)

Abstract: Great hazards could be easily caused by high concentrations of ammonia in chick houses, which are almost inclosed and heated up with low ventilation rate. A technology of in-situ unpowered biofiltration was studied to remove ammonia gas in chick houses. Analytical parameters included inorganic nitrogen compounds, pH value, and electrical conductivity (EC) of the superficial and inner media. Results of 37 d operation in synchronization with a whole circle for chick brooding showed that, in the superficial media, the maximum ammonia elimination capacity was higher than 4.03 g/kg, the maximum ammonium nitrogen absorption ability achieved 1.59 g/kg, the highest nitrate nitrogen content achieved 2.69 g/kg, and nitrite nitrogen content was nearly 0, pH value showed a decreasing trend in the range of 8.81 ~ 7.39, and EC kept increasing with the highest increment of 2.30 mS/cm. However, the contents of ammonium, nitrate and total inorganic nitrogen as well as EC in inner media were far lower than those in superficial media. It suggested that further work should be done towards optimization of media depth setting. In conclusion, in-situ unpowered biofilter exhibited high ammonia elimination capacity and could be applied for contaminated air degradation in chick houses.

Key words: Chick house Ammonia Biofilter In-situ Unpowered

引言

根据联合国粮食及农业组织(FAO)的统计数

据, 目前我国是仅次于美国的世界第二大肉鸡生产国。育雏是肉鸡生产最重要的环节之一, 在专用的育雏舍中集中育雏可以更好地进行疫病与环境控

制,是我国常见的育雏方式之一。育雏一般为多层笼养,养殖密度高,室温高而通风少,易造成污染气体累积^[1]。氨气是肉鸡生产排放的主要污染气体之一,每 500 kg 肉鸡每小时产生的氨气量为 1 ~ 10 g^[2]。有研究表明,鸡舍中氨气质量浓度达 14 mg/m³,持续 6 周以上,就会引起鸡肺充血、水肿等疾病;达 35 mg/m³ 数日后鸡甚至死亡^[3]。雏鸡对氨气更为敏感,中国畜禽场环境质量标准^[4]规定育雏舍氨气质量浓度应低于 10 mg/m³。此外,养殖排放的污染气体也会污染周围居住区,我国恶臭污染物排放标准规定生活区 NH₃ 质量浓度不得超过 1.0 mg/m³^[5]。

畜禽场污染气体常用的治理方法有物理、化学和生物法。生物滤器作为一种常用的生物处理法,具有净化效率高、无二次污染、易于操作等优点,是目前畜禽场常采用的气体净化技术之一^[6]。生物滤器一般位于畜禽舍外,运行时需要用气泵将污染气体抽送至生物滤器内部加以处理,而输送气体不仅消耗电力^[7],低温季节还会引起畜禽舍热量损失^[8]。此外,位于室外的生物滤器受气候条件影响严重,微生物的生长易受影响,维护成本高^[9]。雏鸡舍内温湿度等环境条件稳定^[10],在舍内构建生物滤器对污染气体进行原位处理有利于生物滤器的稳定运行,具有较好的应用前景。

基质是生物滤器运行成功的关键因素^[11],理想的基质应具备适合微生物生长的环境条件,包括足够的营养物质、湿度、中性 pH 值以及充分的碳源供应等^[12-13]。近些年以废治废的思想得到广泛采用,如 Pantoja 等^[14]证明甘蔗渣和椰子壳纤维对污染气体的去除率高达 99%,Park 等^[15]研究发现废弃轮胎颗粒对污染气体的去除率达 90% 以上。污染气体进入生物滤器,被基质吸附/吸收,由气相转移至液相或固相,才能被微生物降解,因而气液或气固相间通畅的质量传递对生物滤器高效运行至关重要^[7]。Lebrero 等^[16]指出气液相之间传质受限会降低微生物代谢活性甚至对微生物产生不利影响。本文采用中药渣堆肥作为生物滤器的基质,重点研究其净化氨气的性能。在无动力生物滤器中,表层与内层基质接触污染气体的机会差别大,其性能差异也是重要研究内容。

1 材料与方法

1.1 试验雏鸡舍

试验在浙江光大种禽业有限公司进行,试验时间为 2011 年 11 月 19 日~2011 年 12 月 26 日,累计运行 37 d,与育雏生产同步。试验育雏鸡舍长、宽、

高为 8.6 m、6.2 m、2.2 m,4 层笼养,最初饲养量为 3 800 羽,第 30 天稀群后剩 1 900 羽。鸡舍用煤气加热,前 7 d 密闭不通风,后 30 d 视天气情况人工开窗通风。

1.2 生物滤器及基质

为实现原位无动力降解氨气,将生物滤器设计加工为 100 cm × 15 cm × 24 cm (长 × 宽 × 高) 的狭长形长方体(图 1)。骨架为不锈钢方管(管径 1 cm),底面为不锈钢,4 个侧面用 18 目不锈钢纱网围护,以保证基质与空气接触,外衬刚性铁丝网(2 cm × 2 cm 网格),以防止填充基质后基质外压导致纱网外凸变形。试验所用基质为堆肥后的中药渣,未接种驯化硝化菌,初始特性见表 1。试验时生物滤器中装入基质 5.8 kg(干质量),放置于距离窗户 0.8 m、地面 1 m 处(与第 3 层雏鸡笼平行),舍内共放置 4 个相同的生物滤器,如图 2 所示。

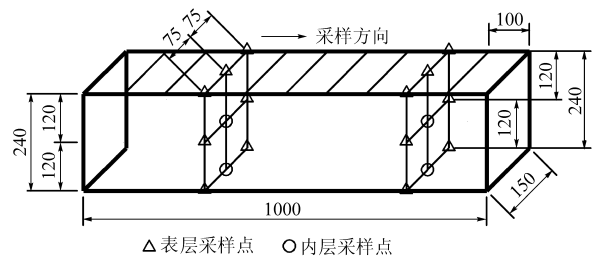


图 1 生物滤器构造及基质采样方法

Fig. 1 Schematic of biofilter and media sampling method

表 1 基质初始特性

Tab. 1 Initial characteristics of media

参数	数值	
pH 值	8. 81	
电导率/ $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$	1. 03	
含水率/%	54. 9	
氨氮(干质量)质量分数/%	0. 48	
亚硝氮(干质量)质量分数/%	0	
硝氮(干质量)质量分数/%	0. 18	
有机氮(干质量)质量分数/%	3. 20	
有机碳(干质量)质量分数/%	31. 5	
堆积密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	445	
	$\geq 2\text{ mm}$	45. 7
粒度分布/%	$1\sim 2\text{ mm}$	40. 4
	$\leq 1\text{ mm}$	13. 9

1.3 基质日常补水、采样与保存方法

参照文献[17~18]研究结果,将基质含水率维持在 50% 左右。每天称量生物滤器,补水至前一天质量。补水工具为小型喷雾器,将生物滤器放置在电子秤上(量程 30 kg,精度 0.1 g),往基质表面均匀喷自来水至目标质量。

基质每 6 天采样一次,直至育雏结束。将生物滤器沿长度方向均分成 10 个采样区,试验期间从一

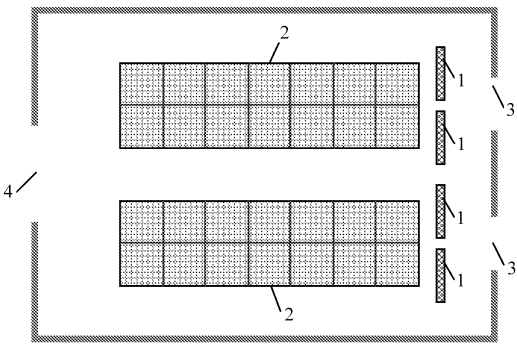


图 2 育雏舍内生物滤器布置示意图

Fig. 2 Location of biofilters inside the chick house

1. 生物滤器 2. 雏鸡笼 3. 窗户 4. 门

端往另一端依次取样(图 1),以避免表层样品与内层样品混杂。每次采样时在一个采样区取表层样品与内层样品两种样品:表层样品即生物滤器表面与空气接触的基质样品,与表面的垂直距离不超过 3 cm,从除底面外的 3 个大侧面多点取样,混匀制样;内层样品即位于生物滤器上表面正中下方约 10 cm 处的基质,在表面基质采样完成后继续下挖至约 10 cm 处采样,挖出的基质先移出,完成采样后回填。取样所得的样品冷藏保存(−4℃)。

1.4 试验环境监测与基质分析方法

环境温度与相对湿度采用“明高”温湿计测读,温度测量精度为 1℃,相对湿度测量精度为 2%,每天 10:00 记录一次。

基质含水率测定参照 NY/T 52—1987^[19],有机碳含量测定参考 Heiri 等^[20]的方法,有机氮含量通过测定全氮间接获得^[21],堆积密度测定取 1 L 基质称量法,粒度分布测定采用筛分称量法^[22],pH 值与电导率(EC)测定参照美国堆肥协会检测标准(TMECC)^[23]。基质分析指标包括氨氮、亚硝氮和硝氮,3 种氮盐之和计为总无机氮,3 种氮盐提取方法参照《土壤农业化学分析方法》^[24],氨氮测定采用纳氏试剂光度法^[25],亚硝氮测定采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法^[26],硝氮测定采用酚二磺酸光度法^[27]。

2 结果

2.1 雏鸡舍内基质蒸发失水规律

基质蒸发失水受育雏舍温度和相对湿度的共同影响(图 3),温度越高,基质越容易蒸发失水;相对湿度越大,基质越不容易蒸发失水,甚至可能出现吸收水分的情况。当鸡舍内温度为 30℃,相对湿度为 72% 时,蒸发失水量达到最大 75.6 g/kg(干基质);当相对湿度为 98%,温度为 18℃ 时,基质失水量为零。在实际生产应用中,总结基质蒸发失水与环境温湿度关系的规律,能够指导工作人员根据环境变

化给生物滤器补水,解除定期人工称量补水的步骤,减少人工投入成本。通过本试验,总结维持基质湿度 50% 的补水原则(按干质量计算):相对湿度大于 90%、温度低于 28℃ 时,基质每天蒸发失水量小于 1.0 g/kg,可以不用给基质补水;当温度高于 28℃ 且相对湿度小于 90% 时,基质每天蒸发失水量大于 50.0 g/kg,约需要补水 60.0 g/kg。

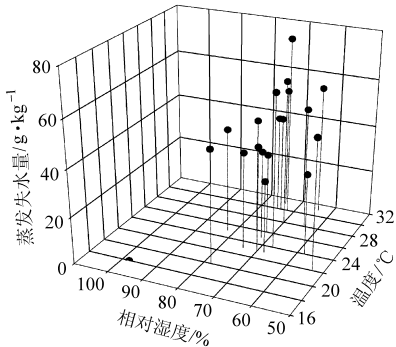


图 3 基质蒸发失水量与环境温湿度关系

Fig. 3 Influence of temperature and relative humidity on evaporation water loss of media

2.2 表层基质氮元素质量比

生物滤器运行过程中,表层基质的氨氮和硝氮质量比基本呈上升趋势,亚硝氮质量比则基本为零,三者之和即总无机氮质量比也基本呈上升趋势(图 4)。运行 37 d,氨氮质量比总增加 0.81 g/kg,日均增加 0.022 g/kg;最小值为 0.43 g/kg,出现在第 6 天;最大值为 1.59 g/kg,出现在第 30 天。硝氮质量比总增加 2.51 g/kg,日均增加 0.068 g/kg;最小值为 0.18 g/kg,为初始质量比;最大值为 2.69 g/kg,出现在第 37 天。总无机氮质量比总增加 3.32 g/kg,日均增加 0.090 g/kg;最小值为 0.67 g/kg,为初始质量比;最大值为 4.08 g/kg,出现在第 30 天。从第 12 天开始,硝氮超过氨氮质量比,整个试验周期前者的增加量为后者的 3.1 倍。

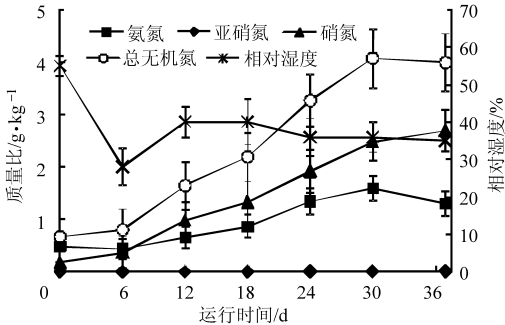


图 4 表层基质无机氮质量比与相对湿度变化曲线

Fig. 4 Evolution curve of various inorganic nitrogen contents and moisture content of superficial media

2.3 内层基质氮元素质量比

内层基质的氨氮质量比呈下降趋势,而硝氮质

量比基本呈上升趋势,亚硝氮质量比基本为零,三者之和即总无机氮质量比也基本呈上升趋势(图 5)。运行 37 d,氨氮质量比总降低 0.33 g/kg,日均下降 0.009 g/kg;最大值为 0.48 g/kg,为初始质量比;最小值为 0.14 g/kg,出现在第 30 天。硝氮质量比总增加 1.24 g/kg,日均增加 0.033 g/kg;最小值为 0.18 g/kg,为初始质量比;最大值为 1.42 g/kg,出现在第 37 天。总无机氮质量比总增加 0.91 g/kg,日均增加 0.025 g/kg;最小值为 0.67 g/kg,为初始质量比;最大值为 1.58 g/kg,出现在第 37 天。从第 6 天开始,硝氮超过氨氮质量比,试验结束时前者的质量比为后者的 9.0 倍。

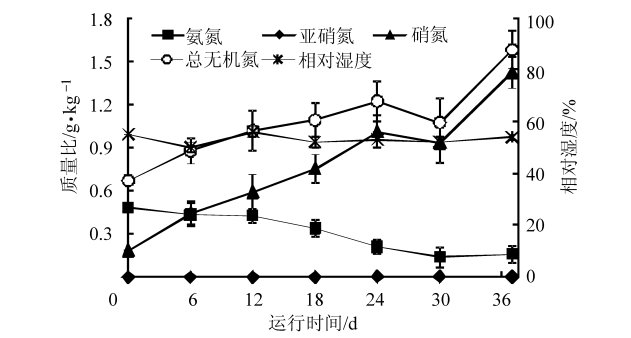


图 5 内层基质无机氮质量比与相对湿度变化曲线
Fig. 5 Evolution curves of various inorganic nitrogen contents and moisture content of inner media

2.4 基质 pH 值和电导率

试验运行 37 d 天过程中,表层基质 pH 值呈先下降后上升再下降的趋势,内层基质 pH 值呈下降趋势,EC 则均呈上升趋势(图 6)。表层基质 pH 值总下降量为 1.21;最大值为 8.81,为初始值;最小值为 7.60,出现在第 37 天。EC 总上升量为 2.30 mS/cm;最小值为 1.03 mS/cm,为初始值;最大值为 3.33 mS/cm,出现在第 37 天。内层基质 pH 值总下降量为 1.42;最大值为 8.81,为初始值;最小值为 7.39,出现在第 37 天。EC 总上升量为 0.39 mS/cm;最小值为 1.03 mS/cm,为初始值;最大值为

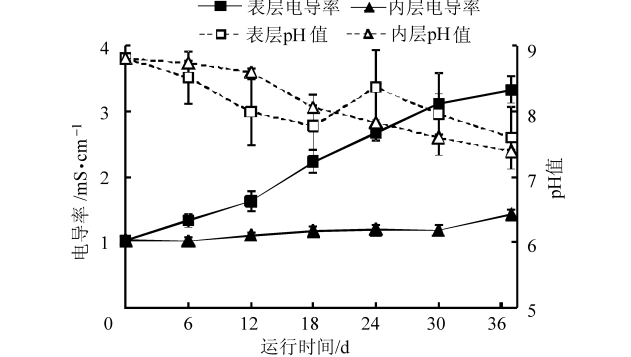


图 6 基质 pH 值与电导率变化曲线
Fig. 6 Evolution curves of pH value and electrical conductivity of media

1.42 mS/cm,出现在第 37 天。比较表层和内层基质的 pH 值,二者均呈弱碱性,相差不大。然而整个试验周期中,表层基质电导率均大于内层基质,第 30 天时表层基质电导率达内层基质的 2.6 倍。

3 讨论

试验中的生物滤器采用无动力运行,舍内氨气先被表层基质吸附/吸收,然后通过微生物的亚硝化和硝化作用转化为硝氮^[22]。因此无机氮(包括 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$),尤其是 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的增加表明除氨效果好。此外,硝化微生物还可以通过同化作用将氮转化为有机氮用于种群繁殖^[22,28]。在微生物种群繁殖过程中,死亡微生物酶解产生的有机氮会首先被新生微生物利用,成为新生物体内有机氮(微生物选择利用氮源的排序为氨基酸氮、蛋白质氮、氨氮、硝氮及氮气^[28]),多余的则被矿化为氨氮^[29]。种群稳定时微生物体内所含有机氮的总量趋于稳定,一般为总输入氮源的 5% 左右^[30~31]。在氧气供应不足时,反硝化微生物可将硝氮反硝化生成 NO 、 N_2O 和 N_2 等^[32],有机氮与反硝化产物之和一般为总输入氮源的 30% 左右^[22,32]。

氨气扩散进入基质后,溶于水产生 NH_4^+ 与 OH^- ,导致 pH 值升高;接着氨氧化菌将 NH_4^+ 氧化为 NO_2^- ,伴随 1 mol H^+ 产生,导致 pH 值下降^[22]。试验过程中,基质的 pH 值总体上呈下降趋势(图 6),说明生物滤器除氨过程中硝化作用强于物理吸收作用,氨氮不断被转化为硝氮^[22]。然而在第 24 天与第 30 天,表层基质的 pH 值超过了第 18 天,从图 4 中第 24 天和第 30 天中硝氮的上升情况可以确定表层基质中硝化作用十分旺盛,其结果是产生 H^+ 导致 pH 值下降;同时从图 4 中可知,第 24 天和第 30 天表层基质的氨氮质量浓度为整个试验过程中的最高水平,这与本试验中雏鸡不断生长而使试验舍内的 NH_3 质量浓度不断升高趋势一致(第 30 天一半雏鸡稀群至另外一间育雏舍),基质吸附的 NH_3 导致 pH 值升高,因此引起的 pH 值增加量甚至超过了硝化作用引起的 pH 值下降量,表现为 pH 值的升高(图 6)。pH 值变化范围为 8.81 ~ 7.39,属于弱碱性,适宜硝化细菌的生长^[6]。如图 3 所示,前 6 天基质中硝氮质量比曲线均在氨氮质量比曲线下方,说明硝化细菌需要 6 d 的环境适应期。表层基质中总无机氮累积上升量达 3.32 g/kg,说明表层基质对氨气的最大去除能力不低于 4.03 g/kg。Yin 等^[33]以接种活性污泥的堆肥处理 NH_3 20 ~ 60 mg/m^3 ,试验运行 30 d 后,生物滤器底部总无机氮质量比也达到 3.00 g/kg 左右。Chen 等^[22]以未接种硝化细菌的堆

肥作为基质处理 NH_3 20 ~ 60 mg/m^3 , 试验运行 30 d 后, 生物滤器底部总无机氮质量比不高于 1.40 g/kg, 然而当堆肥中接种活性污泥运行 175 d 后, 生物滤器底部总无机氮质量比达到 18.4 g/kg, 说明堆肥接种驯化硝化细菌后除氨效果更好。

内层基质氨氮质量比曲线呈下降趋势, 硝氮质量比曲线呈上升趋势, 表明内层基质中氨气渗透量有限, 基质本身氨氮不断被硝化细菌消耗转化为硝氮。由于第 25 ~ 30 天时表层基质硝化作用达到峰值, 消耗氧气最多, 而扩散到基质中氧气量有限, 此时造成内层基质溶氧不足, 反硝化作用增强, 消耗的硝氮量超过硝化作用产生的硝氮量; 此外, 硝化作用使得氨氮不断被转化, 内层氨氮质量比下降(图 5), 上述过程造成第 30 天内层基质总无机氮质量比下降。第 30 ~ 36 天时, 由于雏鸡舍稀群雏鸡数量减少一半, 舍内 NH_3 质量浓度降低, 表层硝化作用减弱, 耗氧速率降低, 扩散进入内层基质的溶解氧增多, 促进了硝化作用, 硝氮质量比升高。

电导率反映了生物滤器吸收并降解鸡舍内污染气体时的氨氮、亚硝氮和硝氮等水溶性盐的变化^[34], 总体而言, 内层基质 EC 上升量较小而表层基质 EC 则近乎呈线性增加(图 6), 变化趋势基本与总无机氮质量比变化趋势相一致(图 4 和图 5)。内层基质中氨氮、硝氮和总无机氮质量比与 EC 均低于表层基质, 第 30 天时总无机氮质量比仅为表层

的 26%, EC 仅为表层的 38%, 说明内层基质的氨气去除效果远不及表层。内层基质相对湿度一直维持 52% 左右, 接近目标相对湿度 50%, 较高的相对湿度意味着基质间的空隙基本被水分填充, 气体需要经过液相才能输入内层基质, 因而导致内层基质功能受限。需要进一步优化基质厚度和湿度控制, 减小氨气与氧气的渗透传质阻力。然而对比 Chen 等^[22]以未接种硝化细菌的堆肥处理 NH_3 20 ~ 60 mg/m^3 , 生物滤器运行 30 d 后, 累积硝氮质量比不足 0.62 g/kg, 本试验中内层基质的硝氮总上升量达 1.24 g/kg, 说明内层基质的氨气去除能力仍比一般未接种的生物滤器高。

4 结束语

试验研究结果表明, 采用中药渣堆肥作为基质的原位无动力生物滤器处理雏鸡舍氨气是可行的。基质中氨氮、硝氮和总无机氮质量比持续升高, 硝氮质量比高于氨氮质量比, pH 值不断下降, 电导率持续上升, 表明中药渣堆肥的生物除氨能力较好。内层基质中氨氮、硝氮和总无机氮质量比与电导率均低于表层基质, 表明需要进一步优化基质厚度, 提高内层基质的除氨能力。同时, 也需要对育雏舍的氨气质量浓度进行监测, 更准确地获取生物滤器的功能参数。总体来说, 原位无动力生物滤器成本低, 氨气处理效果好, 可应用于育雏舍的污染气体的控制。

参 考 文 献

- 1 张凤辉, 曲绵连, 曹纯善, 等. 全程离地饲养商品肉鸡: 育雏三周笼养、育肥在塑料大棚内竹竿架养[J]. 农业工程学报, 1993, 9(增刊 1): 96 ~ 100.
Zhang Fenghui, Qu Mianlian, Cao Chunshan, et al. Broiler all period of the growing broiler kept from the ground; 0 ~ 3 weeks in brooding cage; 4 ~ 7 weeks old in bamboo raft in plastic shed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1993, 9(Supp. 1): 96 ~ 100. (in Chinese)
- 2 Worley J W, Czarick M, Cathey A M. Ammonia emissions from a commercial broiler house[C] // 2002 ASABE Annual Meeting, Paper 024118, 2002.
- 3 Fidanci U R, Yavuz H, Kum C, et al. Effects of ammonia and nitrite-nitrate concentrations on thyroid hormones and variables parameters of broilers in poorly ventilated poultry houses[J]. Journal of Animal and Veterinary Advances, 2010, 9(2): 346 ~ 353.
- 4 NY/T 388—1999 畜禽场环境质量标准[S]. 1999.
- 5 GB 14554—93 恶臭污染物排放标准[S]. 1993.
- 6 Chen L, Hoff S J. Mitigating odors from agricultural facilities: a review of literature concerning biofilters[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2009, 25(5): 751 ~ 766.
- 7 Kraakman N J R, Rocha-Rios J, van Loosdrecht M C M. Review of mass transfer aspects for biological gas treatment[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011, 91(4): 873 ~ 886.
- 8 Shah S B, Basden T J, Bhumbla D K. Bench-scale biofilter for removing ammonia from poultry house exhaust[J]. Journal of Environmental Science and Health: Part B, 2003, 38(1): 89 ~ 101.
- 9 Schmidt D, Janni K, Nicolai R. Biofilter design information[R]. Biosystems and Agricultural Engineering Department, University of Minnesota, No. BAEU-18, 2004.
- 10 施海东, 马恒力, 朱月婷. 肉种鸡育雏期饲养管理[J]. 家禽科学, 2010(8): 18 ~ 20.
- 11 Chung Y C. Evaluation of gas removal and bacterial community diversity in a biofilter developed to treat composting exhaust gases[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 144(1 ~ 2): 377 ~ 385.
- 12 Dorado A D, Lafuente F J, Gabriel D, et al. A comparative study based on physical characteristics of suitable packing materials in

biofiltration[J]. Environmental Technology,2010,31(2):193~204.

13 Hernández J, Prado O J, Almarcha M, et al. Development and application of a hybrid inert/organic packing material for the biofiltration of composting off-gases mimics[J]. Journal of Hazardous Materials,2010,178(1~3):665~672.

14 Pantoja J L R, Sader L T, Damianovic M H R Z, et al. Performance evaluation of packing materials in the removal of hydrogen sulphide in gas-phase biofilters: polyurethane foam, sugarcane bagasse, and coconut fibre[J]. Chemical Engineering Journal, 2010,158(3):441~450.

15 Park J, Evans E A, Ellis T G. Development of a biofilter with tire-derived rubber particle media for hydrogen sulfide odor removal [J]. Water Air and Soil Pollution,2011,215(1~4):145~153.

16 Lebrero R, Rodríguez E, Martin M, et al. H₂S and VOCs abatement robustness in biofilters and air diffusion bioreactors: a comparative study[J]. Water Research,2010,44(13):3905~3914.

17 Chen Yingxu, Yin Jun, Wang Kaixiong, et al. Effects of periods of nonuse and fluctuating ammonia concentration on biofilter performance[J]. Journal of Environmental Science and Health: Part A,2004,39(9):2447~2463.

18 Galera M M, Cho E, Tuuguu E, et al. Effects of pollutant concentration ratio on the simultaneous removal of NH₃, H₂S and toluene gases using rock wool-compost biofilter[J]. Journal of Hazardous Materials,2008,152(2):624~631.

19 NY/T 52—1987 土壤水分测定法[S]. 1987.

20 Heiri O, Lotter A F, Lemcke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results[J]. Journal of Paleolimnology,2001,25(1):101~110.

21 NY/T 53—1987 土壤全氮测定法(半微量开氏法)[S]. 1987.

22 Chen Yingxu, Yin Jun, Wang Kaixiong. Long-term operation of biofilters for biological removal of ammonia[J]. Chemosphere, 2005,58(8):1023~1030.

23 Leege P B, Thompson W H. Test methods for the examination of composting and compost[M]. Bethesda: The USDA and US Composting Council,2002.

24 鲍士旦. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业出版社,2005:60~70.

25 HJ 535—2009 水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法[S]. 2009.

26 HJ/T 197—2005 水质 亚硝酸盐氮的测定 气相分子吸收光谱法[S]. 2005.

27 HJ/T 198—2005 水质 硝酸盐氮的测定 气相分子吸收光谱法[S]. 2005.

28 闵航. 微生物学[M]. 杭州:浙江大学出版社,2005:81~82.

29 Gibbins M J, Loehr R C. Effect of media nitrogen concentration on biofilter performance [J]. Journal of the Air & Waste Management Association,1998,48(3):216~226.

30 Liang Yongkun, Quan Xie, Chen Jingwen, et al. Long-term results of ammonia removal and transformation by biofiltration[J]. Journal of Hazardous Materials,2000,80(1~3):259~269.

31 Baquerizo G, Maestre J P, Machado V C, et al. Long-term ammonia removal in a coconut fiber-packed biofilter: analysis of N fractionation and reactor performance under steady-state and transient conditions[J]. Water Research,2009,43(8):2293~2301.

32 Sakuma T, Jinsirwanit S, Hattori T, et al. Removal of ammonia from contaminated air in a biotrickling filter-denitrifying bioreactor combination system[J]. Water Research,2008,42(17):4507~4513.

33 Yin Jun, Xu Wenfeng. Ammonia biofiltration and community analysis of ammonia-oxidizing bacteria in biofilters[J]. Bioresource Technology,2009,100(17):3869~3876.

34 Ottosen L D M, Juhler S, Guldberg L B, et al. Regulation of ammonia oxidation in biotrickling airfilters with high ammonium load [J]. Chemical Engineering Journal,2011,167(1):198~206.