

养猪场恶臭污染的预测模型及感官评估研究

李佳音^{1,3}, 邹克华^{2,3}, 李伟芳^{2,3*}, 耿静^{2,3}, 闫凤越^{1,3}, 杨伟华^{1,3}

- 1.天津迪兰奥特环保科技有限公司, 天津 300191
- 2.天津市环境保护科学研究院, 天津 300191
- 3.国家环境保护恶臭污染控制重点实验室, 天津 300191

摘要: 现代化、集约化养殖技术促进了养猪业的高效发展,但养殖过程中产生的恶臭污染对环境的影响也逐渐显露出来。为正确识别养猪场恶臭物质组成、建立基于关键致臭物质的恶臭气体预测模型、感官评估恶臭对人产生的心理影响,对天津市某养猪场母猪舍、育肥舍及舍外的恶臭气体进行采样。应用 GC-MS,分析物质组成;根据阈稀释倍数计算结果,确定关键致臭物质;通过研究各组分对复合恶臭的影响,建立复合恶臭气体预测模型;结合臭气浓度与人群实际心理感受,提出养猪场厌恶临界点。结果表明:①该养猪场共检出恶臭物质 48 种,各类型恶臭物质质量分数大小依次为 $w(\text{氨}) > w(\text{含氧烃}) > w(\text{硫化物}) > w(\text{烷烃}) > w(\text{卤代烃}) > w(\text{烯烃}) > w(\text{芳香烃})$ 。②该养猪场关键致臭物质为氨与乙醇,其中氨对复合臭气浓度的影响最大。③养猪场复合恶臭气体预测模型为 $O = 0.34I_1 + 0.75I_2 + 5.81$ (其中, O 为复合臭气浓度指数, I_1 、 I_2 分别为乙醇和氨的恶臭气体指数),经实际样品检验该模型具有良好的预测效果。④养猪场气味属厌恶范畴,厌恶程度随臭气浓度的增加而增强。⑤养猪场厌恶临界点为 13,即臭气浓度大于 13 时,就会对人群产生干扰。研究显示,养猪场恶臭气体组成复杂,对人群的干扰可以用愉悦度进行评价,根据关键致臭物质可以预测感官恶臭污染。

关键词: 养猪场; 恶臭污染; 关键致臭物质; 预测模型; 愉悦度; 感官评估

中图分类号: X512

文章编号: 1001-6929(2020)01-0088-06

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2019.05.18

Prediction Model and Sensory Evaluation of Odor Pollution in Pig Farms

LI Jiayin^{1,3}, ZOU Kehua^{2,3}, LI Weifang^{2,3*}, GENG Jing^{2,3}, YAN Fengyue^{1,3}, YANG Weihua^{1,3}

- 1.Tianjin Sinodour Environmental Technology Co., Ltd., Tianjin 300191, China
- 2.Tianjin Academy of Environmental Science, Tianjin 300191, China
- 3.State Environmental Protection Key Laboratory of Odour Pollution Control, Tianjin 300191, China

Abstract: Pig industry has been promoted efficiently by the modern and intensive breeding technology, while the environmental pollution has been gradually emerged. In order to identify the composition of odorous substances in pig farms, establish an odor prediction model based on the key odorants, and evaluate the psychological effects of human beings by sensory, samples were collected from a pig farm in Tianjin City. The odor material composition was analyzed by GC-MS. The odor contribution of individual component was judged by the results of threshold dilution rate to determine the odorants. The odor prediction model was established by studying the influence of each component. The origin software was used to analyze the relationship between the hedonic tone and the odor concentration. Combined with the odor concentration and the actual psychological feelings of human beings, the unpleasant critical point was established. The results showed that: (1) A total of 48 substances were detected in this pig farm with the order of mass percent: $w(\text{ammonia}) > w(\text{oxygenated hydrocarbon}) > w(\text{sulfide}) > w(\text{alkane}) > w(\text{hydrocarbon}) > w(\text{olefin}) > w(\text{arene})$. (2) The key odorants of the pig farm are ammonia and alcohol, and ammonia has the greatest influence on the overall odor concentration. (3) The composite odor prediction model is: $O = 0.34I_1 + 0.75I_2 + 5.81$, which showed good predictions after a series of verification tests by real samples. (4) The hedonic tone of pig farm belonged to the aversion category, and the unpleasantness increased with the odor concentration. (5) The unpleasant critical point is 13, which means that people will be disturbed if the odor concentration exceeds 13. In conclusion, the odor in pig farm is complex, and its offensiveness can be evaluated by the hedonic tone. The sensory odor pollution can be predicted by the key odorants.

收稿日期: 2018-10-29 修订日期: 2019-05-05

作者简介: 李佳音(1989-),女,辽宁阜新人,工程师,硕士,主要从事恶臭污染防治研究,704431879@qq.com.

* 责任作者,李伟芳(1974-),女,河南安阳人,高级工程师,博士,主要从事恶臭污染防治研究,lwf1919@163.com

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(No.2016YFC0700603-003); 国家自然科学基金项目(No.21577096)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2016YFC0700603-003); National Natural Science Foundation of China (No.21577096)

Keywords: pig farm; odor pollution; key odorant; prediction model; hedonic tone; sensory evaluation

恶臭是养猪场产生的主要环境污染问题之一^[1]。国内外关于养猪场恶臭污染的研究多集中于恶臭气体的排放组成特征及恶臭气体处理技术的开发与优化方面^[2-4],关于养猪场恶臭气体预测方法及感官评估的研究较为鲜见。我国对恶臭污染的监测方法主要是通过由企业厂界和敏感点采集气体样品,然后由专业嗅辨员在实验室测定样品的臭气浓度(无量纲),最后与恶臭排放标准限值进行对比,确定污染程度或超标倍数^[5]。这种传统的人力监测方法,过程复杂且无法及时掌握恶臭污染的变化。通过建立恶臭预测模型,可以根据关键致臭物质的物质浓度预测感官臭气浓度,从而简化监测过程,大幅度降低时间、人力及物力成本,实现臭气浓度的在线监测。

在我国,主要依据臭气浓度对恶臭污染进行评价和对恶臭气体进行管理。然而,臭气浓度与气味自身特点无关,不能真实反映不同气味的差异^[6]。如香水的香味和污水的臭味可能具有相同的臭气浓度值,但人们对二者的心理感受却完全不同,可接受的浓度水平也不同。恶臭污染的影响不仅与气味浓度、强度等定量参数有关,也与气味品质(如水果味、腐败味等)和个体感受(愉悦度或厌恶度)等定性参数相关^[7]。愉悦度表示某个气味样品令人愉快或不愉快的程度,有时也称为厌恶度^[8]。国外研究^[9-11]发现,恶臭产生的烦恼与愉悦度有很强的关系,令人愉悦的气体几乎不会引起人们的烦恼,而令人不愉悦或厌恶的气味则会导致烦恼的发生及引发投诉。因此,德国、英国等国家在欧盟 EN 13725—2003《空气质量用动态气味测定法测定气味浓度》的基础上,增加了强度、愉悦度、气味品质等感官表征因子^[12-14];法国在确定恶臭影响时引入了愉悦度感官指标^[15]。在我国,李伟芳等^[16]组织 73 名嗅辨员,采用 9 级度量法评价香草醛和愈创木酚的愉悦度,分析我国人群愉悦度分布特征,提出愉悦度测评条件。翟增秀等^[17]等针对橡胶制品企业、面包房、垃圾填埋场 3 种典型气味的来源,解析不同源臭气浓度、臭气指数和愉悦度之间的关系,提出了臭气浓度和愉悦度综合评价理论模型。

该研究以养猪场为研究对象,识别养猪场关键致臭物质,分析不同恶臭物质之间的相互作用,建立恶臭预测模型。对养猪场产生的恶臭污染进行愉悦度评价,研究愉悦度与臭气浓度之间的关系,以期对恶臭污染的评估、预测及治理奠定理论基础和方法依据。

1 材料与方法

1.1 样品的采集及测定

选择某养猪场作为监测对象,该养猪场年出栏 500 头生猪,厂区设有母猪舍与育肥舍,是我国小城郊养猪场的典型代表。样品采样点设置在该养猪场的母猪舍、育肥舍及舍外,采样季节为夏季,采样时间为每天 14:00。母猪舍与育肥舍采样 4 d,舍外采样 2 d。所用设备为天津迪兰奥特环公司生产的污染源采样器(SOC-X1),采样方法参照 HJ/T 397—2007《固定源废气测定技术规范》^[18],样品避光运回实验室并在 24 h 内测定。

氨测定采用的仪器为美国哈希公司生产的紫外可见分光光度计(DR5000),测定方法参照 HJ/T 533—2009《环境空气和废气 氨的测定 纳氏试剂分光光度法》^[19];有机物及硫化氢的测定应用采用美国安捷伦公司生产的气相色谱质谱仪(Agilent7890A-5975C),测定方法为气相色谱质谱联用法,标气为 US EPA(美国环境保护局)TO-15;臭气浓度的测定方法参照 GB/T 14675—1993《空气质量 恶臭的测定 三点比较式臭袋法》^[20]。

1.2 关键致臭物质的筛选

关键致臭物质的筛选主要取决于该物质在恶臭气体中恶臭贡献率的大小^[21],可通过阈稀释倍数判断,阈稀释倍数的计算公式^[22]:

$$N = C/T \quad (1)$$

式中: N 为阈稀释倍数(无量纲); C 为质量浓度, mg/m^3 ; T 为该物质嗅阈值, mg/m^3 ,是引起嗅觉的最小物质质量浓度。在恶臭混合气体中,恶臭物质的阈稀释倍数越高,该物质在恶臭气体中的贡献值越大。因此,造成恶臭的关键致臭物质不是物质浓度最高的物质,而是阈稀释倍数最高的物质^[23]。该研究对样品的恶臭组成成分及含量水平进行分析,并结合嗅阈值大小,筛选出关键致臭物质。

1.3 复合恶臭气体预测模型的建立方法

恶臭气体的组成越复杂其相互影响的关系就越复杂^[24]。因此,必须结合大量试验验证并修订嗅阈值与复合臭气浓度的对应系数,以得出科学的数学模型。该研究通过专业人员嗅辨试验的方法,研究养猪场关键致臭物质之间的相互作用规律及其对复合臭气浓度的影响,应用 Minitab 16 软件建立复合恶臭气体预测模型,并将现场采集的样品作为测试集对预测模型进行检验。

1.4 养猪厂恶臭感官评价方法

将源样品稀释 4 个不同的浓度梯度,并分别充入

8 L 的聚酯无臭采样袋作为测试样品. 保证最低浓度与嗅辨小组平均嗅阈值接近, 且较高浓度不会造成人员的健康风险. 各浓度梯度样品按任意顺序给出. 每次测试, 嗅辨员首先判断自己是否感知到气味, 如果没有感知到气味, 用“-”表示, 如果感知到气味再按照愉悦度 9 级度量法^[25] (见表 1) 进行评价, 评价结

果没有对错之分, 只是代表个人感受. 为了尽可能抵消个体之间的主观差异, 选择 8 名合格的嗅辨员组成测试小组, 愉悦度取小组成员的平均值. 使用 Origin pro 8.0 软件的数据拟合模块, 分析愉悦度与臭气浓度之间的关系, 臭气浓度取对数得到反映二者之间量化关系的回归方程.

表 1 愉悦度 9 级度量法

Table 1 The 9 point hedonic scale for odors

愉悦度等级	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
心理感受	极度厌恶	厌恶	中度厌恶	稍感厌恶	既不愉悦也不厌恶	稍感愉悦	中度愉悦	愉悦	非常愉悦

2 结果与讨论

2.1 养猪场关键致臭物质的识别

该养猪场空气中共定量检出恶臭污染组成成分共 48 种, 分别为烷烃、烯烃、芳香烃、卤代烃、硫化物、含氧烃及氨. 其中, w (氨) 最高, w (氨) 在母猪舍、育肥舍及舍外分别为 77.7%、53.5% 及 72.4%; 其次为含氧烃, 共检出 14 种含氧烃, w (含氧烃) 在母猪舍、育肥舍及舍外分别为 4.7%、34.1% 及 10.0%; 另外, 检测到约 11 种烷烃, w (烷烃) 在母猪舍、育肥舍及舍外分别为 6.4%、0.6% 及 5.1%; 检测到卤代烃 9 种, w (卤代烃) 在母猪舍、育肥舍及舍外分别为 4.6%、0.30% 及 2.20%; 检测到烯烃物质 3 种, w (烯烃) 在母猪舍、育肥舍及舍外分别为 2.4%、1.9% 及 1.6%; 检测到芳香烃 8 种, w (芳香烃) 在母猪舍、育肥舍及舍外分别为 1.2%、1.6% 及 3.2%; 检测到硫化物 2 种, w (硫化物) 在母猪舍、育肥舍及舍外分别为 3.0%、8.0% 及 5.5%.

研究^[26]表明: 当物质浓度小于该物质的嗅阈值, 即 N (阈稀释倍数) < 1 时, 该物质对人的嗅觉不会产生刺激; 当物质浓度大于该物质的嗅阈值, 即 $N > 1$ 时, 才会对人产生影响. 该研究结合物质含量及嗅阈值大小, 根据式(1) 计算出各物质 N , 筛选出 $N > 1$ 的物质(见表 2), 其中, 母猪舍、育肥舍及舍外的物质含量为每个单元监测周期内的算数平均值, 嗅阈值数据来源于国家环境保护恶臭污染控制重点实验室.

养猪场等各类恶臭释放设施的污染物释放种类、浓度、频率均存在较大波动, 所筛选的关键致臭物质仅适用于特定养猪场的特定监测条件. 对于该养猪场而言, 母猪舍、育肥舍及舍外阈稀释倍数最大的物质均为氨, 其次为乙醇; 其余 3 种物质阈稀释倍数虽然大于 1, 但与氨及乙醇相比差了至少一个数量级, 它们的恶臭贡献率可忽略不计. 因此该养猪场关键致臭物质可确定为氨与乙醇. 原因是养猪场粪便堆

表 2 养猪场气味物质的阈稀释倍数

Table 2 The dilution rate of the odorants

采样点	气味物质	ρ /(mg/L)	嗅阈值(T)/(mg/L)	N
母猪舍	氨	786.800	0.230	3 421
	乙醇	634.700	1.100	577
	甲硫醇	0.006	0	39
	丙醛	0.180	0.041	11
育肥舍	甲醛	0.880	0.67	1
	氨	645.610	0.230	2 807
	乙醇	347.623	1.100	316
	乙醛	2.555	0.035	73
	丙醛	1.025	0.041	25
舍外	苯乙烯	0.231	0.164	1
	氨	443.214	0.230	1 929
	乙醇	437.400	1.100	398
	硫化氢	0.045	0.002	25
	甲硫醇	0.002	0	13
	丙醛	0.052	0.041	1

积发酵过程中, 微生物的脱羧和脱氨作用产生大量氨气^[27]; 另外, 该厂每天下午会进行消毒水消毒, 而消毒水的主要成分为乙醇及双氧水. 因此, 去除这两种恶臭物质, 对该养猪场除臭效果会比较显著.

2.2 复合恶臭气体模型的建立

配制不同浓度的氨与乙醇的气体样品各 10 组, 作为建模集. 采用三点比较式臭袋法分别测出每一组样品的阈稀释倍数及这两种气体混合后的复合臭气浓度(见表 3).

由表 3 可见, 复合臭气浓度跨度比较大, 10 组复合臭气浓度值的范围为 170~38 791, 其相差几个数量级. 过大的数量级不仅不利于计算、误差较大, 而且也不能真实反映臭气浓度带给人感觉上的差别, 如臭气浓度为 3 000 及 4 000 的气体, 虽然数值上相差比

表 3 乙醇与氨阈稀释倍数与复合臭气浓度

Table 3 The dilution rate of ethanol and ammonia and odor concentration of the mixture

项目	组别									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
乙醇阈稀释倍数	37	50	121	267	430	515	622	870	1 322	2 459
氨阈稀释倍数	29	89	255	468	675	600	793	1 012	1 577	2 515
复合臭气浓度	170	560	1313	2 649	3 911	4 120	4 799	2 917	13 587	38 791

较大,但给人们带来的实际感受却相差无几^[28]. 韦伯费希纳公式表示,人的嗅觉感知与恶臭物质的刺激量成正比^[29],计算公式:

$$S = k \lg R \quad (2)$$

式中, S 为感觉强度, R 为刺激强度, k 为常数. 该研究对臭气浓度进行指数化,得到的结果不仅数量级较小、计算方便,而且更适合反映人类对恶臭污染的嗅觉感觉,计算公式:

$$I = 10 \times \lg N \quad (3)$$

式中, I 为臭气指数.

根据式(3),对表 3 中乙醇阈稀释倍数、氨阈稀释倍数及复合臭气浓度进行指数化,以乙醇与氨的阈稀释倍数指数为自变量,臭气指数为因变量,进行多元线性回归拟合,拟合结果:

$$O = 0.34I_1 + 0.75I_2 + 5.81 \quad (R^2 = 0.81, P < 0.05) \quad (4)$$

式中, O 为复臭气浓度指数, I_1 、 I_2 分别为乙醇和氨的臭气指数. R^2 为 0.81,表示 O 与 I_1 、 I_2 相关性达 81%, $P < 0.05$ 说明建立模型具有很好的统计学意义. 模型中,复合臭气浓度与氨的相关性系数较大,说明氨对复合臭气浓度的影响比较大.

为了验证该方程的准确性,用各采样点每天实际测得的臭气浓度(共计 10 组)进行模型检验,将采集样品中氨和乙醇阈稀释倍数的指数值代入式(4),计算其臭气浓度预测值,然后与臭气浓度实测值相比(见图 1). 由图 1 可见,臭气浓度预测值与臭气浓度实测值较接近,说明式(4)是有效的,二者的拟合度良好, R^2 达 0.81,验证了该研究建立的回归方程可较好地应用在该养猪场恶臭污染的感官预测评估.

2.3 恶臭污染感官评价

现场采集的恶臭样品臭气浓度为 741,依次按 0、10、30 及 100 倍的稀释倍数进行稀释,获得 4 个测试样品,分别用 $Z_1 \sim Z_4$ 表示. 8 名测试小组成员对不同浓度梯度下的样品进行愉悦度评价(见表 4).

由表 4 可见,养猪场排放的气味在不同臭气浓度梯度下的愉悦度均为负值,即令人厌恶的气味. $Z_1 \sim$

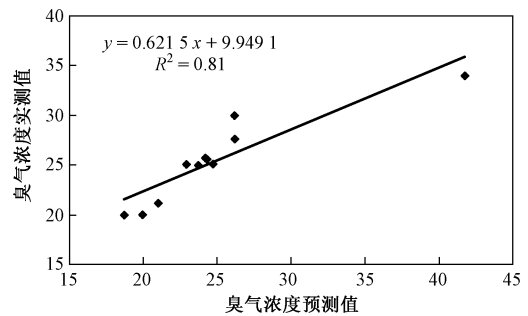


图 1 模型验证结果

Fig.1 Verification of the fitting model

表 4 养猪场气味愉悦度统计情况

Table 4 The evaluation result of the hedonic odor tone

人员序号	愉悦度			
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
1	-4	-3	-2	0
2	-3	-2	-1	0
3	-3	-2	0	0
4	-4	-3	-1	0
5	-4	-3	-1	-1
6	-4	-3	-1	0
7	-4	-3	-1	0
8	-3	-2	0	0
平均值	-3.6	-2.6	-0.9	-0.1

Z_4 的愉悦度平均值分别为 -3.6、-2.6、-0.9、-0.1,说明养猪场产生的气味令人厌恶的程度随浓度的下降而降低. 不同稀释倍数下的愉悦度等级比较集中,0、10、30 及 100 倍稀释倍数下的愉悦度等级主要集中在 -4(极度厌恶)、-3(厌恶)、-1(稍感厌恶)及 0(既不愉快也不厌恶),说明评价人员对这种气味的感受具有相似性.

以臭气浓度的对数值为横坐标,愉悦度为纵坐标,绘制气味愉悦度随臭气指数的变化曲线(见图 2). 由图 2 可见:人们对养猪场气味的厌恶程度随臭气指数的增加而增强,但这种关系体现在一定的臭气浓度范围内. 当某臭气浓度水平下气体的愉悦度或

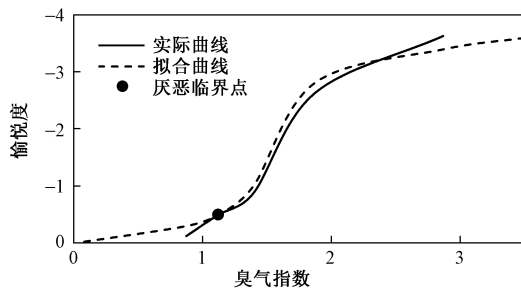


图2 养猪场气味愉悦度与臭气指数的关系

Fig.2 The relationship between the hedonic tone and odor index

厌恶度已达最大值,如臭气浓度继续升高,人的嗅觉敏锐度下降,此时并不能准确的区分感受差异^[30],愉悦度只会趋近于极度厌恶(-4);而当臭气浓度低于人的嗅觉阈值时,则不会引起嗅觉感知,继续降低臭气浓度,愉悦度只会趋近于既不愉悦也不厌恶(0)。

根据表1的愉悦度等级划分标准可知:当愉悦度为0时,人员既不愉悦也不厌恶,因此也不会产生烦恼;当愉悦度为-1时,嗅辨员稍感不快,会产生轻微的烦恼。因此将愉悦度值-0.5对应的臭气浓度作为判定气味物质产生厌恶感受的临界点(简称“厌恶临界点”)^[31],该点表示气味从既不愉悦也不厌恶转变为厌恶时所对应的臭气浓度值。厌恶临界点的确定对恶臭污染的管控工作具有一定的参考意义,为不同恶臭源的精准治理提供科学依据。由图2可见,当养猪场气味的臭气浓度指数小于1.12(臭气浓度为13)时,愉悦度大于-0.5,近似于0,表示在该浓度下人群已经不会产生厌恶感或已闻不出气味了,因此该点可作为该养猪场气味的厌恶临界点,臭气浓度值13可以作为该养猪场的环境影响基准值。

为进一步研究养猪场愉悦度与臭气浓度之间的关系,应用Origin pro 8.0软件进行数据拟合,获得描述愉悦度与臭气浓度之间关系的数学模型。依据图形特点应采用一元二次函数模型进行拟合:

$$y = 0.47x^2 - 3.61x + 2.80 \quad (-4 \leq y \leq 0, R^2 = 0.88) \quad (5)$$

式中, x 为臭气浓度的对数值, y 为愉悦度。随着臭气浓度的增加,愉悦度的绝对值越来越大,说明厌恶感越来越强。由于愉悦度不仅与臭气浓度密切相关,还与恶臭气体强度、个人阈值、气味性质以及个人生活经历等多种复杂因素有关^[32]。因此,该式只能反映养猪场臭气浓度与愉悦度之间的递增关系,仅可通过对臭气浓度的比较来判断愉悦度的相对大小。

3 结论

a) 对该养猪场的恶臭气体进行定量分析,共检

出恶臭物质48种,其质量分数大小依次为 $w(\text{氨}) > w(\text{含氧烃}) > w(\text{硫化物}) > w(\text{烷烃}) > w(\text{卤代烃}) > w(\text{烯烃}) > w(\text{芳香烃})$ 。

b) 关键致臭物质的识别可通过阈稀释倍数判断。根据各物质的物质含量与嗅阈值计算阈稀释倍数,阈稀释倍数越大其恶臭贡献率越高,该猪场的关键致臭物质为氨与乙醇。

c) 恶臭气体各组成成分之间具有复杂的相互作用关系,可采用多元线性回归法分析养猪场关键致臭物质对复合臭气浓度的影响。养猪场复合恶臭气体预测模型为 $O = 0.34I_1 + 0.75I_2 + 5.81$,经检验建立的关系模型对恶臭污染具有良好的预测效果。

d) 养猪场排放的气味属厌恶范畴,厌恶程度随浓度的降低而逐渐减轻,养猪场愉悦度与臭气指数之间符合二次多项式关系。

e) 当臭气浓度降至13时,愉悦度值接近于0,即达到该值时人们既不愉悦也不厌恶,因此臭气浓度值13可作为养猪场的厌恶临界点。

参考文献(References):

- [1] 蒲施桦,解雅东,龙定彪.畜禽舍内恶臭气体控制技术及应用进展[J].猪业科学,2016,33(3):50-52.
PU Shihua, XIE Yadong, LONG Dingbiao. Control technology and application progress of odor in livestock and poultry breeding[J]. Swine Industry Science, 2016, 33(3): 50-52.
- [2] SCHIFFMAN S S, BENNETTA J R, RAYMER J H. Quantification of odors and odorants from swine operations in North Carolina[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 108: 213-240.
- [3] CHOI E, KIM J, CHOI I, et al. Microbial additives in controlling odors from stored swine slurry[J]. Water, Air and Soil Pollution, 2015, 226(4): 104-117.
- [4] LEE E, YOUNG L, JUNG S. Current status and perspectives of livestock environment improving agents for the characteristics and control of swine manure odor[J]. Korean Journal of Microbiology and Biotechnology, 2010, 38(3): 244-254.
- [5] 王媛媛,王琪,李贝,等.恶臭国标测定方法和便携式恶臭测定仪测定结果的比对分析[J].环境监控与预警,2017,9(5):20-23.
WANG Yuanyuan, WANG Qi, LI Bei, et al. Comparative analysis of odor determination by national standard method and portable odor tester[J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2017, 9(5): 20-23.
- [6] SUCKER K, BOTH R, BISCHOFF M, et al. Odor frequency and odor annoyance. Part 1: assessment of frequency, intensity and hedonic tone of environmental odors in the field[J]. International Archives of Occupational and Environmental Health, 2008, 81(6): 671-682.
- [7] NIMMERMARK S. Influence of odour concentration and individual odour thresholds on the hedonic tone of odour from animal

- production[J]. *Biosystems Engineering*, 2011, 108(3):211-219.
- [8] BENSAFI M, ROUBY C, FARGET V, *et al.* Influence of affective and cognitive judgements on autonomic parameters during inhalation of pleasant and unpleasant odors in humans [J]. *Neuroscience Letters*, 2002, 319(3):162-166.
- [9] SUCKER K, BOTH R, BISCHOFF M, *et al.* Odor frequency and odor annoyance part II: dose-response associations and their modification by hedonic tone [J]. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 2008, 81(6):683-694.
- [10] NORDIN S, CLAESON A S, ANDERSSON M, *et al.* Impact of health-risk perception on odor perception and cognitive performance [J]. *Chemosensory Perception*, 2013, 6(4):190-197.
- [11] IAQM. Guidance on the assessment of odour for planning [S]. London: Institute of Air Quality Management, 2014.
- [12] European Committee for Standardization. EN13725 Air quality: determination of odour concentration by dynamic olfactometry [S]. London: Standards Policy and Strategy Committee, 2003.
- [13] CHAIGNAUD M, CARIOU S, POETTE J, *et al.* A new method to evaluate odour annoyance potential [J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2014, 40:13-18.
- [14] BOTH R, SUCKER K, WINNEKE G, *et al.* Odour intensity and hedonic tone-important parameters to describe odour annoyance of residents [J]. *Water Science & Technology*, 2004, 50(4):83-92.
- [15] CHREA C, VALENTIN D, SULMONT R C, *et al.* Culture and odor categorization: agreement between cultures depends upon the odors [J]. *Food Quality and Preference*, 2004, 15(7/8):669-679.
- [16] 李伟芳, 李佳音, 翟增秀, 等. 我国人群对标准气味物质的愉悦度测评特征 [J]. *环境监测管理与技术*, 2018, 30(1):58-60.
LI Weifang, LI Jiayin, ZHAI Zengxiu, *et al.* Chinese people's evaluation characteristics of the hedonic tone of the two standard odorous substances [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2018, 30(1):58-60.
- [17] 翟增秀, 李伟芳, 邹克华, 等. 愉悦度在恶臭污染感官评价中的应用 [J]. *环境工程技术学报*, 2018, 8(5):546-550.
ZHAI Zengxiu, LI Weifang, ZOU Kehua, *et al.* The application of hedonic tone in odour pollution sensory evaluation [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2018, 8(5):546-550.
- [18] 环境保护部. HJ/T 397—2007 固定源废气监测技术规范 [S]. 北京: 中国环境出版社, 2007.
- [19] 环境保护部. HJ/T 533—2009 环境空气和废气 氨的测定 纳氏试剂分光光度法 [S]. 北京: 中国环境出版社, 2009.
- [20] 环境保护部. GB/T 14675—93 空气质量 恶臭的测定 三点比较式臭袋法 [S]. 北京: 中国环境出版社, 1993.
- [21] PARKER D B, KOZIEL J A, CAI L, *et al.* Odor and odorous chemical emission from animal buildings. part 6: odor activity value [J]. *Transactions of the ASABE*, 2012, 55(6):2357-2368.
- [22] ELSNER R J. Odor threshold, recognition, discrimination and identification in centenarians [J]. *Archives of Gerontology and Geriatrics: An International Journal Integrating Experimental, Clinical and Social Studies on Ageing*, 2001, 33(1):81-94.
- [23] WU Chuandong, LIU Jiemin, YAN Luchun, *et al.* Assessment of odor activity value coefficient and odor contribution based on binary interaction effects in waste disposal plant [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 103(2):231-237.
- [24] HOPFER H, HAAR N, STOCKREITER W, *et al.* Combining different analytical approaches to identify odor formation mechanisms in polyethylene and polypropylene [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2012, 402(2):903-919.
- [25] Germany Association for Science and Technology. VDI 3882 Blatt 2: olfactometry-determination of the hedonic odour tone [S]. Dusseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, 1994.
- [26] 芦会杰. 典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价 [J]. *环境科学*, 2017, 38(8):3178-3184.
LU Huijie. Odor emission characteristics and pollution evaluation from typical household rubbish disposal facilities [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(8):3178-3184.
- [27] HANAJIMA D, KURODA K, MORISHITA K, *et al.* Key odor components responsible for the impact on olfactory sense during swine feces composting [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(7):2306-2310.
- [28] 包景岭, 邹克华, 王连生. 恶臭环境管理与污染控制 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009, 141:72.
- [29] AGUS E, ZHANG L F, SEDLAK D L. A framework for identifying characteristic odor compounds in municipal waste water effluent [J]. *Water Research*, 2012, 46(18):5970-5980.
- [30] O'NEILL D H, PHILLIPS V R. A review of the control of odour nuisance from livestock building. part 3: properties of the odorous substances which have been identified in livestock wastes or in the air around them [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1992, 51:157-165.
- [31] 李佳音, 李伟芳, 杨伟华, 等. 三种典型恶臭物质的愉悦度特征 [J]. *环境化学*, 2018, 37(6):1311-1316.
LI Jiayin, LI Weifang, YANG Weihua, *et al.* The hedonic tone of three typical odorants [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(6):1311-1316.
- [32] EDVARD L, STEVEN N, LENNART H, *et al.* Assessment of odor annoyance and its relationship to stimulus concentration and odor intensity [J]. *Chemical Senses*, 1998, 23:113-117.

(责任编辑:刘方)