

徐澍. 生物医学检测犬在人类与动植物疾病筛查领域的应用研究综述 [J]. 中国实验动物学报, 2025, 33(8): 1211-1221.

XU S. Review of the application of biomedical detection dogs in the screening of human and plant-animal diseases [J]. Acta Lab Anim Sci Sin, 2025, 33(8): 1211-1221.

Doi:10.3969/j.issn.1005-4847.2025.08.010

生物医学检测犬在人类与动植物疾病筛查领域的应用研究综述

徐澍*

(中国刑事警察学院, 沈阳 110034)

【摘要】 生物医学检测犬 (biomedical detection dog, BMDD) 能够依靠灵敏的嗅觉对病变产生的挥发性有机化合物 (volatile organic compounds, VOCs) 进行判断并据此对人类与动植物的各类疾病进行筛查。目前国内对这一领域研究较少, 为弥补这一不足, 丰富生物医学检测技术, 对生物医学检测犬在这些疾病筛查领域的应用研究进行了梳理与分析, 探讨其背后的科学依据、应用现状、要点及未来发展趋势并加以综述。研究显示, 生物医学检测犬在人类癌症、传染病、代谢病等多种疾病, 畜牧动物、野生动物疾病以及植物病虫害筛查领域具有较大的发展空间与应用潜力, 有望在未来展现出更显著的经济价值和社会效益。

【关键词】 生物医学; 疾病检测; 检测犬; 挥发性有机化合物

【中图分类号】 Q95-33 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1005-4847 (2025) 08-1211-11

Review of the application of biomedical detection dogs in the screening of human and plant-animal diseases

XU Shu*

(Criminal Investigation Police University of China, Shenyang 110034, China)

Corresponding author: E-mail: 2018990072@cipuc.edu.cn

【Abstract】 Biomedical detection dogs (BMDD) can rely on their sensitive sense of smell to identify volatile organic compounds (VOCs) produced by lesions, enabling them to screen for various diseases in humans and plants and animals. Currently, there is limited research in this area domestically. To address this gap and enrich biomedical detection technology, a systematic review and analysis of the application of biomedical detection dogs in disease screening has been conducted. This exploration discusses the underlying scientific basis, current applications, key points, and future development trends. Research indicates that biomedical detection dogs have significant potential for development and application in screening for various diseases in humans, such as cancer, infectious diseases, and metabolic disorders, as well as in livestock, aquaculture diseases, and plant pests and diseases. They are expected to demonstrate greater economic value and social benefits in the future.

【Keywords】 biomedical; disease detection; detection dog; volatile organic compounds

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

生物医学检测犬 (biomedical detection dog, BMDD), 是将检测病原体相关气味的生物检测犬 (biological detection dog, BDD) 和检测受感染宿主气味变化的医疗检测犬 (medical detection dog,

[基金项目] 2024 年度中央高校基本科研业务费项目 (D2024004)。

Funded by 2024 Central Universities Basic Research Funding Project (D2024004)。

[作者简介] 徐澍, 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 警犬训练与使用。Email: 2018990072@cipuc.edu.cn

MDD)相结合后,形成的整体性概念^[1]。BMDD 应用于人类与动植物疾病筛查领域的研究由来已久,早在 1989 年,《柳叶刀》就发表了犬通过持续嗅闻使主人发现了腿部黑色素瘤的案例^[2],2001 年《柳叶刀》再次发表了一起相似案例^[3],彻底引发了使用检测犬筛查人类疾病的研究热潮,此后利用生物医学检测犬检测人类癌症、感染等人类疾病的研究层出不穷,并在新冠感染暴发后达到研究和应用的高潮。除人类疾病检测外,近年来关于使用 BMDD 进行动物疾病、植物病虫害筛查的研究和应用也逐步增多,与对人疾病筛查一同组成了 BMDD 的整体应用方向,成为生物医学检测领域的又一新兴技术手段。

然而与国外层出不穷的研究截然相反,国内相关的学术研究并不多见^[4]。新冠感染之前,国内仅有零散关于“嗅癌犬”的报道,直到新冠感染后,国外 BMDD 的研究达到高潮,国内才出现了“医学检测犬”的专题研究^[5]。不过,截至 2024 年底,国内的研究基本仍局限于使用检测犬嗅癌和人类流行病筛查两方面,尚无检测其他人类疾病及动植物疾病的专题研究,也从未出现“生物医学检测犬”这一描述,与国外对 BMDD 的广泛研究和应用形成了极为鲜明的对比。这种研究层面上的缺失致使我国生物医疗行业缺少了一项行之有效的技术手段,犬类训养行业也失去了具有相当发展前景的潜在市场。基于这一问题,本综述对生物医学检测犬在人类与动植物疾病筛查领域的应用研究进行了系统梳理与分析,探讨其背后的科学依据、应用领域、犬只要求及未来发展趋势,以期对生物医学检测犬在我国的发展与应用提供理论与实践指导,进一步拓宽人与动物和谐共生的边界。

1 生物医学检测犬应用的科学依据

1.1 特定挥发性有机物能够判断疾病

研究表明,疾病能够引起细胞代谢的改变,而改变后的新陈代谢会产生特定的挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs),这些化合物与健康生物体产生的 VOCs 不同,可以作为检测人类、动植物病情的生物标志物^[6]。在人类医疗活动中已经开始大量采用以固相微萃取(solid-phase microextraction, SPME)和气相色谱-

质谱联用法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)为代表的高端化学分析方法检测 and 鉴定上述具备疾病特点的 VOCs,进而发现和确认疾病^[7-8]。动物方面,VOCs 生物标志物同样可以判断动物疾病,有研究发现小鼠在肺部感染后的 4 ~ 6 h 内就有 25 种 VOCs 标志物出现显著特征变化^[9],还有实证研究通过粪便中 VOCs 标志物成功判断了牛和羊的副结核病,并指出对标志性 VOCs 的检测同样是畜牧动物疾病检测的有效工具^[10]。植物疾病方面,病原真菌感染同样可以造成植物 VOCs 的变化,以此为依据就可以识别特定种类的病原真菌感染^[11]。更多的研究则采用导致虫害的虫卵 VOCs 依据,因为这类 VOC 特异性更强,也更容易被检测^[12]。

1.2 犬能够检测特定 VOCs

由于犬类鼻子的特殊结构、嗅觉基因以及嗅细胞数量的共同作用^[13],使犬的嗅觉具有非凡的灵敏度,即使是极少量的特定气味物也可以在低至万亿分之几的浓度下被检测和识别,这是其他传统分析、设备技术无法达到的灵敏度水平^[14]。出色的嗅觉系统使其特别适合检测含量、挥发性和浓度不同的气味物质^[15],以及立体异构体结构存在细微差异的分子^[16]。生物医学检测犬在工作时,VOCs 会随空气一同被吸入鼻腔,并与位于鼻腔上皮的可以检测 VOCs 的受体细胞相互作用,经神经元传导后产生气味感知,再经大脑分析确定气味种类^[17-18],进而实现捕捉和辨认 VOCs^[19]。另外,除了主要的气态 VOCs,犬对液相中的 VOCs 的嗅觉检测阈值范围也能达到十亿分之 40 到万亿分之 1.5,这也是犬可以检测汗液、尿液和血液等液态样本的前提^[20]。基于上述犬的天赋,通过经典式条件反射或操作性条件反射的原理,可以使犬将特定 VOCs 气味与食物、玩具等奖励物联系起来^[21-22],使其能够寻找和判断带有疾病的特定 VOCs,进而替代昂贵的化学分析方法实现人类与动植物疾病的筛查^[23]。

2 生物医学检测犬在人类疾病筛查领域的应用

人类疾病筛查是生物疾病筛查犬的最主要发展方向,近 30 年有大量的研究集中于此^[24],包

括各类癌症^[25]、细菌感染^[26]、癫痫发作^[27]、传染病^[28]、人类代谢疾病^[29]等。从逻辑上,综合考虑疾病类型、研究热点以及犬所检测的 VOCs 来源,可以将检测犬所筛查的疾病分为:以癌细胞异常增殖产生的 VOCs 标志物为检测对象的肿瘤与癌症类疾病;以病原体产生的 VOCs 标志物为检测对象的传染性疾病;以人体常规代谢、激素紊乱等原因产生的异常人体 VOCs 标志物为检测对象的其他疾病。这 3 大类疾病中,肿瘤与癌症类疾病是长期以来的研究重点,传染性疾病因新冠肺炎的全球大暴发成为近 5 年的研究热点,其他疾病研究始终不温不火,但仍具有一定研究前景。

2.1 肿瘤与癌症类疾病筛查

尽管目前癌症早期筛查的技术手段非常丰富,但都存在一定的不足。常见的 DNA 检测和血液抗体检测依赖于肿瘤标志物的积累,CT 等影像学检查需暴露于电离辐射,且对早期微小病灶的敏感度有限,高通量基因测序成本高昂,内窥镜、活检等又具有显著的侵入性,对患者造成一定影响。相比之下,依托犬类嗅觉筛查人类癌症成本低廉,又具有非侵入性和随意移动部署的灵活性,因此用 BMDD 筛查癌症是目前研究最为集中的人类疾病筛查方向。有系统评价文章指出,在用 BMDD 进行的各类人类疾病检测项目研究中,约 68% 是癌症检测,其中肺癌、前列腺癌和乳腺癌占比为前 3 位^[30]。BMDD 对肺癌的检出率可达 97.6%^[31],总体敏感性和特异性分别为 96.7% ~ 97.5%^[32],对肺部恶性肿瘤的早期发现优于传统手段^[33];BMDD 对前列腺癌的平均检测敏感性为 95%,特异性为 92%^[34],对高危前列腺癌 (ISUP ≥ 2) 同样可靠,检测敏感性为 54% ~ 86%,特异性为 69% ~ 88%^[35];BMDD 对乳腺癌检测敏感性和特异性分别为超过 88% ~ 98%^[36]。此外,包括骨肉瘤^[37]、膀胱癌^[38]、卵巢癌^[39]、结直肠癌^[40]等各类癌症也有较为充分的研究且其总体检出率同样较为理想^[41]。这些研究的检测原理和操作方式都是接近的,即以癌细胞在快速增殖过程中产生的与正常细胞存在显著差异的特定 VOCs 为生物标志物^[42],令生物学检测犬对携带这些 VOCs 标志物的血液、尿液、呼出气等进行嗅认检测来达成筛查目的,生物学检测犬也可以对活检样本、治疗过程的绷带甚

至患者口罩进行检测,进而降低肿瘤与癌症类疾病早期筛查成本帮助提高筛查率^[43]。

2.2 传染性疾病筛查

除癌症外,BMDD 筛查人类疾病的另一热点集中于传染性疾病筛查。目前 BMDD 已被证明可用于传染性结肠炎、结核病、疟疾等传染病的筛查^[44],临床试验中 BMDD 对艰难梭菌检测的敏感性和特异性分别为 92.3% 和 95.4%^[45],对疟疾检测的敏感性和特异性分别为 73.3% 和 91%^[46],对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、克雷伯菌、肠球菌等致病菌的总体灵敏度等于或接近 100%,特异性高于 90%^[47]。除上述常见传染性疾病外,生物医疗检测犬在传染病暴发期中的作用更为突出^[1],使 BMDD 用于新冠感染等高传播性疾病的筛查研究最为集中。有研究以 3249 名新冠肺炎患者为样本进行对照实验,发现 BMDD 检测的敏感性优于使用逆转录酶聚合酶链反应 (reverse transcription-polymerase chain reaction, RT-PCR) 检测的敏感性,具有高灵敏度、周转时间短、成本低、侵入性小和易于应用的独特优势^[48]。2023 年的一项研究使用 BMDD 检测新型冠状病毒感染,发现检测犬的总体灵敏度为 81%,特异性为 98%,准确率为 95%^[49]。此外还有双盲实验使用 15 种可能导致新型冠状病毒感染类似症状的病毒作为干扰因素,测试生物医疗检测犬的气味分化能力,结果显示 BMDD 具备将新型冠状病毒感染与其他病毒感染区分开来的能力^[50]。具体操作层面,用犬检测传染性疾病主要是让犬嗅闻尿液、呼吸等带有 VOCs 气味的载体来进行筛查。其中,由于尿液是人体 VOCs 的主要来源,因此使用尿液载体令犬嗅闻是较为常见的筛查方式^[51]。此外,使用足底气味^[46]、腋窝汗液^[52]、皮肤样本^[53]和呼吸样本^[54]也是常见的有效筛查方式。最近也有研究以人类泪液样本为载体,使犬发现了测试样本中的金黄色葡萄球菌挥发性有机化合物^[55]。

2.3 其他疾病筛查

因为 BMDD 的使用原理是检测特定的 VOCs 生物标志物,因此能够用 BMDD 筛查的其他疾病都具有人体代谢紊乱、内分泌失调等症状,都会造成 VOCs 的特异性变化,这是可以用犬筛查的其他疾病的共通点。2024 年的一项实验研究依

据帕金森患者皮脂中特有的 VOCs 为标志物,使用 BMDD 帮助检测帕金森病,测试发现 BMDD 的检测平均敏感性为 86%,特异性为 89%^[56],该研究指出了专业的 BMDD 对检测的帮助以及同电子鼻等设备协作的可能性。有研究使用伴侣犬进行检测培训,希望在生活中帮助发现警示主人的血糖异常,不过低血糖报警敏感性仅为 35.9%,高血糖报警的敏感性仅为 26.2%^[57]。有实验在对犬加强检测训练后将低血糖发作报警的中位敏感性提升至 83%,对高血糖发作报警的中位敏感性提升至 67%,血糖异常报警率为 81%^[58],证实经过专业训练的专业 BMDD 的重要性。意外的是,BMDD 还可以对包括癫痫(敏感性 86.8%、特异性 98%)^[59]、偏头痛(59.2%的患者发病前伴侣犬出现异常反应)^[60]、发作性睡眠病^[61]等发作性疾病在发病前进行检测和报警。这类发作性疾病不同于癌症、传染病在患病期间能够持续散发特定 VOCs,而是在发病期才出现 VOCs 的显著波动和变化,犬能对这类发作性疾病进行检测,证明犬具备检测急性应激反应相关的生理过程 VOCs 的能力^[62]。基于这种能力,BMDD 被证实也可用于检测筛查创伤后应激障碍(检出率 90%)^[63]等心理性疾病。

总的来说,使用 BMDD 筛查人类的疾病的研究较为充分完整,应用的优劣势也比较明确。优势方面,BMDD 对气味检测的灵敏性要远高于现有人类仪器和方法,同时成本更低,效率也更高。以新型冠状病毒感染的大范围筛查为例,有实验研究指出 BMDD 的日均成本为 79 美元,约相当于 24 次快速检测费用,当单日检测量超过 24 次时,成本就能够持续下降,此外 BMDD 的检测周转时间为 3 h,而常规诊断检测为 11 h,效率显著提高^[64]。但同时,生物医疗检测犬的使用劣势也较为显著,最大的弊端在于犬检测准确性与一致性上。尽管大多数研究证实了 BMDD 检测的可靠性,但许多研究也发现不同犬只之间的检测准确率差异较大^[41,57-58],有研究在非实验室的实地环境进行测试,发现 BMDD 检测的敏感性和特异性均达不到世卫组织的要求^[65]。这种检测准确性与一致性上的弊端这可能跟犬个体、训练、样本等方面的差异有关^[66],并且因为生物的特殊性,很难得到彻底改观。此外,许多疾病尤其是

传染性疾病并不能排除人犬共患病的可能,因此在伦理道德层面,贸然使用 BMDD 也可能存在一定风险^[67]。基于上述优缺点,并结合我国基本国情,可以推断 BMDD 在我国人类疾病筛查领域的研究价值要大于其应用价值。由于我国经济水平不断提高,医疗保障体系完善,群众对肿瘤、癌症等疾病的检测准确性需求远大于低成本需要,因此相比我国,BMDD 在欠发达地区和贫困国家的应用前景可能更好。此外,我国的社会主义体制能够更好地应对大范围烈性传染病,对 BMDD 的需求也并不迫切。当然这也并不意味着使用 BMDD 对人类疾病筛查在我国完全没有价值。2024 年 HALF 等^[68]的一项研究将 BMDD 同人工智能相结合,打造成生物混合检测平台用于无创多癌种筛查,结果显示该平台对前列腺癌、肺癌、直结肠癌等多种癌症的总体灵敏度和特异性分别为 93.9%和 94.3%,对完全未经训练的 14 种恶性肿瘤的敏感性也能达到 81.8%,对早期癌症的检测灵敏度更是能达到 94.8%,该研究认为这种生物混合多癌症筛查平台表现出很高的灵敏度和特异性,完全能够进行早期癌症检测。因此将 BMDD 和人工智能、电子鼻^[38]、GC-MS 法^[51]、生物化学分析^[69]等技术联合使用,可以在降低成本提高效率的同时提升检测准确率,在我国人类疾病检测领域可能会有更好的发展前景。

3 生物医疗检测犬在动植物疾病筛查领域的应用

BMDD 对动植物疾病筛查包括对动物疾病筛查和对植物病虫害筛查两大方面。BMDD 对动物疾病筛查与人类疾病筛查相似,主要是检测患病动物异常代谢 VOCs 标志物,检测样品包括粪便、尿液、黏液拭子等;BMDD 对植物病虫害筛查则通常以病原体代谢 VOCs 或虫卵产生的 VOCs 为主,检测样品则以直接搜索检测为主。目前对 BMDD 在动植物筛查领域的研究明显少于人类疾病,但相关研究近几年明显增多,特别是 BMDD 对植物病虫害检测的研究是近年的热点。

3.1 动物疾病筛查

犬类嗅觉也被证明可有效识别非人类动物的疾病^[23],不过相较于人类疾病筛查,对用

BMDD 进行动物疾病筛查的研究较少。2012 年一项持续 15 年的研究使用两头疾病检测犬来追踪和发现受疥螨 (*Sarcoptes*) 感染的野生动物, 它们在 15 年间发现了 292 只因疥螨感染死亡的和 63 只感染疥癣但仍存活的野生动物^[70], 这项研究拉开了使用 BMDD 对动物疾病进行疾病筛查的序幕。目前这一领域的研究主要集中于对牛疾病的筛查, 有研究经测试显示 BMDD 检测牛病毒性腹泻敏感性在 85% ~ 96% 之间, 特异性在 98% 以上^[71]。有团队于 2022 年和 2024 年两次对用 BMDD 筛查肉牛疾病进行研究, 他们使用牛鼻黏液拭子作为气味载体, 分别测试 BMDD 犬对牛病毒性腹泻病毒、牛疱疹病毒、牛副流感病毒的筛查能力, 研究结果表明, BMDD 的嗅觉可能是检测肉牛疾病的有效手段, 同时他们也指出不同犬的检测能力不同, 样本处理一致性对检测结果影响也很大^[72-73]。还有研究使用 BMDD 检测奶牛牛奶中的金黄色葡萄球菌, 测出检测敏感性和特异性分别为 91.3% 和 97.9%^[74]。BMDD 对鹿科动物慢性消耗性疾病 (chronic wasting disease, CWD) 的筛查也是最近的研究热点。2023 年的一项研究使用 BMDD 对可能患 CWD 的白尾鹿进行筛查, 发现 BMDD 的平均误检率为 13%^[75], 2024 年的另一项研究显示犬检测白尾鹿 CWD 的平均灵敏度为 92%^[76], 平均特异性为 98%, 证实了犬具备这一方面的应用价值。

3.2 植物病虫害筛查

植物病虫害筛查同样具有研究和应用价值。美国农业部早在 2010 年起就开始组织使用 BMDD 检测柑橘溃疡病 (轴突黄单胞菌引起), 并指出 BMDD 检测能够实现约 98% 的准确度^[77]。有研究以月桂酸霉菌 (病原体) 产生的 VOCs 为嗅源, 训练 BMDD 检测患有月桂枯萎病的鳄梨, 在对 9 个鳄梨试验园进行实测后发现犬的平均准确率和阳性预测值分别为 99.4% 和 94.8%, 结果显示 BMDD 的使用能够显著减少月桂枯萎病的传播程度, 帮助划定疾病的区域, 有效降低养护成本^[78]。2025 年发表的一项研究使用 BMDD 筛查感染白粉病 (powdery mildew, PM) 的葡萄藤, 发现检测的灵敏度和特异性达 $(96 \pm 1)\%$ ^[79], 证明了 BMDD 筛查真菌病原体的可靠性。虫害方面, 2021 年的一项研究使用 BMDD 筛查被蛀木长角

甲虫感染的树木, BMDD 的平均敏感性为 80%, 特异性为 95%, 准确性为 92%, 证明犬可以发现害虫的痕迹和残留物, 并将它们与非目标气味区分开来^[80], 2023 年的另一项研究证实犬能够用于筛查威胁林业和农业的斑点灯笼蝇 (spotted lantern fly, SLF) 的虫卵, 筛查的平均敏感性和特异性分别为 $(99.14 \pm 0.33)\%$ 和 $(99.41 \pm 0.21)\%$ ^[81]。另一项实验研究使用 BMDD 筛查到树皮甲虫攻击的云杉, 结果表明工作犬筛查的速度、准确性都高于人类, 能够将从检测到及时移除的时间窗口从大约 1 周扩大到 1 个月^[82]。相较于人类疾病和动物疾病筛查而言, 国内使用 BMDD 进行植物病虫害筛查的尝试并没有落后国外太多, 有报道披露国内已有团队开始使用 BMDD 搜索柑橘黄龙病, 并披露其盆栽训练准确率达 98% 以上, 田间准确率达 90%^[83]。尽管该信息源自媒体报道缺乏系统试验论证, 但也能够说明国内已经开展相关研究。此外中国工作犬管理协会还发布了《工作犬搜索柑橘黄龙病训练及使用规范》团体标准, 标志着这一领域在国内已接近正规化应用^[84]。

总的来说, 使用 BMDD 筛查动植物疾病的研究虽不及筛查人类疾病的研究多, 但发展潜力更大。使用 BMDD 检测动物疾病的研究较少, 这有可能同动物间的共患病较人类更多有关^[67], 也有可能是由于人类医学的研究本就比动物医学研究的体量大有关。由于动物特别是家养畜牧动物对疾病检测的准确性要求远不及人类, 反而对检测成本更为敏感。BMDD 同其他类型工作犬在训养成本上较为接近, 行业内较为优秀的嗅探犬价格基本在万元左右, 月饲养成本在千元内 (该成本依据中国刑事警察学院警犬技术学院警犬饲养管理费用估算), 其训养成本比购置和维护多数检测设备要更低, 这使 BMDD 准确性不高一致性不强的缺点得以隐藏, 其检测成本低效率高的优势得以发挥, 因此 BMDD 在检测畜牧动物、养殖动物、圈养野生动物等动物疾病上, 可能要比筛查人类疾病更为广阔的发展前景和经济社会价值。同理, 植物病虫害筛查对检测的准确性和一致性要求更低, 对成本和效率要求更高, 而犬在保持低成本的前提下, 能在极短时间内搜索和覆盖更大的区域, 在森林中甚至能实现人类专

家 3 倍以上的检测效率^[85],大幅地节省人工和时间成本,更高的检出率也使其能够最大限度地挽回病虫害爆发造成的损失。这些优势使 BMDD 对植物病虫害的检测具有更加明显的市场需求,这也解释了为什么在国内生物医疗检测犬的研究很少,甚至在缺少可靠的实验数据的情况下,依然形成了 BMDD 搜索柑橘黄龙病的应用团队、新闻报道和团体标准。总之,BMDD 在动植物疾病筛查领域虽然研究较少,但具备广阔的发展前景、应用潜力和市场空间,当然也需要进一步的研究加以丰富和支持。

4 BMDD 的应用要点

绝大多数关于 BMDD 的研究都提到了不同 BMDD 犬只之间的检测水平差异以及训练时与实际测试时的检测差异,这种差异可能同嗅觉的温度、环境、年龄等因素有关^[86],但更多研究认为这可能与犬个体差异、训练水平、嗅源选择以及样本处理等方面的不同有关^[24]。这些要点更多地影响着 BMDD 检测的准确性和一致性,是 BMDD 发展应用的关键。从逻辑上,可以将这些使用要点分为提升犬检测能力的要点和提升检测可靠性的要点两方面。此外,使用 BMDD 进行生物检测时,如何避免检测病原微生物等引起的生物安全风险同样十分关键。

4.1 提升犬检测能力的要点:犬只选择与训练

犬检测能力是犬气味捕捉能力、分化能力、示警能力以及其他气味作业能力的综合体现,在犬的方面决定了人类及动植物疾病筛查的水平高低。这种能力是先天本能和后天培养共同影响而成的^[21-22]。先天本能方面要求选择更适合生物医学检测的犬。生物疾病筛查更类似于传统的嗅觉犬,对犬嗅觉的灵敏性和气味分化能力都有较高要求,因此在犬种选择上更加倾向于擅长气味捕捉和分化的传统工作犬品种。一项系统评价研究对 58 个相关项目的 192 头检测犬进行统计,发现应用最多的品种是拉布拉多犬,占比为 27.14%^[23],马里努阿犬、史宾格犬和其他牧羊犬也是主要使用的犬种来源^[23,77]。个体层面,JAMIESON 等^[87]认为合适的检测犬是中等体型、敏捷性高的个体,要有高度地玩耍动力,以及高水平的智力和服从性,且在没有非牵引状态下具

备独立工作能力。有研究还指出 BMDD 要有足够的抗病能力^[84],性格上选取兴奋性、活泼性,要求犬只搜索动力高、欲望强、胆量大、适应能力强的个体^[54,84,88]。

后天培养就是后天对犬的训练。由于犬在检测气味方面的表现与处理更复杂气味信息的能力与长期训练和记忆呈正相关^[89],因此对 BMDD 施加持续科学的训练对提升犬的检测能力很有必要。BMDD 的训练周期各不相同,大多在 2 ~ 15 周^[66],重点训练犬的气味鉴别。气味鉴别是工作犬训练领域的专业术语,指以赋予的特定气味为嗅源,从被鉴物中分辨出与嗅源气味相同的气味并示警的作业形式^[21]。BMDD 对疾病进行筛查的过程,本质上就是传统鉴别引申而成的特殊鉴别形式,因此要依托于鉴别形式着重开展气味鉴别训练以提高犬的气味敏感性和分化能力^[90]。具体训练中还要着重对新异混合目标气味进行训练,进而保证犬在面对新的、未知的相似气味特征做出反应^[91]。植物病虫害筛查犬因其使用环境位于室外,且筛查对象数量多范围广,因此除气味鉴别训练外,还要增加气味搜索训练,以提升犬只的作业耐力和效率^[88]。根据具体筛查对象和场景,植物病虫害筛查犬还要单独进行环绕嗅认训练、盆栽搜索训练、多排连续搜索训练等专项训练^[84]。特别值得注意的是,2020 年的一项实验研究首次提出了示警方式可能对 BMDD 的检测准确性产生影响,实验显示使用坐示警的 BMDD 误报率是站立凝视示警的 BMDD 的两倍^[92],这意味着示警方式的选择可能也比较重要。

4.2 提升检测可靠性的要点:嗅源与样本的一致性

有一只经过严格挑选、训练并测试合格的生物医疗检测犬,可以有效提升疾病筛查的可靠性,但这不是唯一因素,嗅源与被测样本的 VOCs 特征是否具有一致性同样直接影响检测的准确性。嗅源,是指犬识别气味作业所依据的气味及其载体^[21],BMDD 筛查疾病时所用的嗅源应当具有同被检测疾病一致的 VOCs 特征,通过训练,BMDD 能够将嗅源 VOCs 气味与奖励联系起来,在疾病筛查时,犬会寻找与嗅源 VOCs 特征相同的样本,进而完成疾病筛查。因此,在训练前确

定同被筛查疾病 VOCs 特征一致的嗅源气味对训练和后续的实地测试至关重要^[66]。最理想的嗅源当然是直接使用来自患者的样品或病原体,以确保嗅源已被组织病理学检查证实且未被污染^[4],但实践中还要防止嗅源样本带来的风险以及反复使用后 VOCs 变化而失效^[30]。此外生物疾病筛查犬训练与使用过程中的采样程序、气味载体、存储条件等都可能改变被筛查的 VOCs 特征而影响筛查准确性,因此相关环节要格外注意日常训练与实际工作时环境、温度、样本提取与保存方式方法的一致性^[30]。

4.3 降低生物安全风险的要点:灭活处理与筛查辅助工具

在 BMDD 的应用中,病原微生物的嗅源及样本可能携带传染性风险(如细菌、病毒、真菌等),需通过科学灭活处理与辅助工具设计规避生物安全隐患。一般情况下可能感 BMDD 的疾病嗅源及样本需要灭活处理,能够不改变 VOCs 特征的灭活方法包括使用 β -丙内酯^[93]、热失活^[94]、紫外线辐射^[95]等,而对于不具有传染性的癌症、糖尿病、植物虫害等疾病,则可不予灭活处理,根据需求直接从患者身上采样保存并定期更换即可^[66]。为避免隐患,也有研究使用以聚合物材料作为筛查辅助工具来吸附目标气味,再将捕获的气味安全地呈现给犬,实验表明这种方式同样可以起到较为理想的训练效果^[96]。不过即便使用此类吸收性辅助工具,也必须定期以真实灭活样本校准以避免“气味偏差”,因为辅助工具并不能完美地复制气味^[97]。

5 结语

综上所述,BMDD 在动植物疾病筛查领域的应用虽处于起步阶段,但其展现出的潜力、优势以及市场需求不容忽视。未来,随着研究的深入和技术的完善,BMDD 有望在人类与动植物疾病防控中发挥更加重要的作用。为了充分发挥 BMDD 的潜力,还需要在犬只选择与训练、嗅源与样本的处理等方面不断优化和提升,以确保检测的准确性和可靠性。此外,加强跨学科合作,将生物医学、动物医学、植物保护等领域的最新研究成果应用于 BMDD 的研究与实践中,也将是推动其发展的重要途径。总之,生物医疗检测犬在

人类与动植物疾病筛查领域的应用前景广阔,值得我们持续关注和深入研究。

参 考 文 献(References)

- [1] MAUGHAN M N, BEST E M, GADBERRY J D, et al. The use and potential of biomedical detection dogs during a disease outbreak [J]. *Front Med (Lausanne)*, 2022, 9: 848090.
- [2] WILLIAMS H, PEMBROKE A. Sniffer dogs in the melanoma clinic? [J]. *Lancet*, 1989, 1(8640): 734.
- [3] CHURCH J, WILLIAMS H. Another sniffer dog for the clinic? [J]. *Lancet*, 2001, 358(9285): 930.
- [4] 方绍勤,徐虎,李杰,等. 利用犬嗅探挥发性有机物普筛癌症患者的研究进展 [J]. *社区医学杂志*, 2023, 21(15): 810-816.
- [5] FANG S Q, XU H, LI J, et al. Advances in the use of canine sniffing for universal screening of cancer patients for volatile organic compounds [J]. *J Community Med*, 2023, 21(15): 810-816.
- [5] 王林,郭守堂. 管窥医学检测犬 [J]. *中国工作犬业*, 2020, 5: 56-57.
- [6] WANG L, GUO S T. A restricted view of medical testing dogs [J]. *Chin Work Dog*, 2020, 5: 56-57.
- [7] BEHERA B, JOSHI R, ANIL VISHNU G K, et al. Electronic nose: a non-invasive technology for breath analysis of diabetes and lung cancer patients [J]. *J Breath Res*, 2019, 13(2): 024001.
- [8] RATIU I A, BOCOS-BINTINTAN V, MONEDERO F, et al. An optimistic vision of future: diagnosis of bacterial infections by sensing their associated volatile organic compounds [J]. *Crit Rev Anal Chem*, 2020, 50(6): 501-512.
- [9] HARIPRIYA P, RANGARAJAN M, PANDYA H J. Breath VOC analysis and machine learning approaches for disease screening: a review [J]. *J Breath Res*, 2023, 17(2): 024001.
- [10] ARNOLD K, GÓMEZ-MEJIA A, DE FIGUEIREDO M, et al. Early detection of bacterial pneumonia by characteristic induced odor signatures [J]. *BMC Infect Dis*, 2024, 24(1): 1467.
- [11] HODGEMAN R, KRILL C, ROCHFORD S, et al. Detection of *Mycobacterium avium* subsp. *paratuberculosis* in Australian cattle and sheep by analysing volatile organic compounds in faeces [J]. *Sensors (Basel)*, 2024, 24(23): 7443.
- [12] LI X, LI T, LI M, et al. Effect of pathogenic fungal infestation on the berry quality and volatile organic compounds of cabernet sauvignon and petit manseng grapes [J]. *Front Plant Sci*, 2022, 13: 942487.
- [13] CANTU A, AVILES-ROSA E O, HALL N J, et al.

- Evaluation of volatile organic compounds from spotted lanternfly (*Lycorma delicatula*) eggs using headspace odor sampling methods [J]. *Insects*, 2024, 15(10): 739.
- [13] 孙宁. 犬解剖生理学 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社; 2015.
- SUN N. Canine anatomy and physiology [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House; 2015.
- [14] KOKOCIŃSKA-KUSIAK A, WOSZCZYŁO M, ZYBALA M, et al. Canine olfaction: physiology, behavior, and possibilities for practical applications [J]. *Animals (Basel)*, 2021, 11(8): 2463.
- [15] MCLANE-SVOBODA A K, SANCHEZ S W, PARNAS M, et al. Use of living systems for clinical diagnostics by monitoring volatile chemicals [J]. *Trac Trends Anal Chem*, 2024, 180: 117987.
- [16] BUCK L B. The molecular architecture of odor and pheromone sensing in mammals [J]. *Cell*, 2000, 100(6): 611–618.
- [17] SAINI K, RAMANATHAN V. Predicting odor from molecular structure: a multi-label classification approach [J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1): 13863.
- [18] 方伟, 郑吉龙, 付奕铭, 等. 利用犬类嗅觉搜索人体遗骸研究进展 [J]. *法医学杂志*, 2024, 40(3): 269–275.
- FANG W, ZHENG J L, FU Y M, et al. Research progress of using canine olfactory search for human remains [J]. *J Forensic Med*, 2024, 40(3): 269–275.
- [19] 翟嵩, 于汝清, 柳公卿, 等. TNT 气味替代品在搜爆犬早期训练过程中的应用效果研究 [J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2021, 15: 134–138.
- ZHAI H, YU R Q, LIU G Q, et al. Study on the application effect of TNT scent imprint aid in the early training process of bomb-sniffing dogs [J]. *Heilongjiang Anim Sci Vet Med*, 2021, 15: 134–138.
- [20] CONCHA A R, GUEST C M, HARRIS R, et al. Canine olfactory thresholds to amyl acetate in a biomedical detection scenario [J]. *Front Vet Sci*, 2019, 5: 345.
- [21] 周士兵, 陈建峰. 警犬训练学 [M]. 北京: 中国人民公安大学出版社; 2014.
- ZHOU S B, CHEN J F. Police dog training science [M]. Beijing: China People's Public Security University Press; 2014.
- [22] 南会林. 犬行为学原理 [M]. 沈阳: 东北大学出版社; 2011.
- NAN H L. Principles of canine behavior [M]. Shenyang: Northeast University Press; 2011.
- [23] JENDRNY P, TWELE F, MELLER S, et al. Canine olfactory detection and its relevance to medical detection [J]. *BMC Infect Dis*, 2021, 21(1): 838.
- [24] JUGE A E, FOSTER M F, DAIGLE C L. Canine olfaction as a disease detection technology: a systematic review [J]. *Appl Anim Behav Sci*, 2022, 253: 105664.
- [25] 王紫玲, 王小文, 赵勤涛. 犬“嗅诊”人类癌症的临床可行性探究 [J]. *江西畜牧兽医杂志*, 2023, 5: 44–47.
- WANG Z L, WANG X W, ZHAO Q T. Clinical feasibility of dog “sniffing” human cancer [J]. *Jiangxi J Anim Husb Vet Med*, 2023, 5: 44–47.
- [26] CHARLES M K, WANG Y, ZURBERG T, et al. Detecting *Clostridioides (Clostridium) difficile* using canine teams: what does the nose know? [J]. *Infect Prev Pract*, 2019, 1(1): 100005.
- [27] MAA E, ARNOLD J, NINEDORF K, et al. Canine detection of volatile organic compounds unique to human epileptic seizure [J]. *Epilepsy Behav*, 2021, 115: 107690.
- [28] ESKANDARI E, AHMADI MARZALEH M, ROUDGARI H, et al. Sniffer dogs as a screening/diagnostic tool for COVID-19: a proof of concept study [J]. *BMC Infect Dis*, 2021, 21(1): 243.
- [29] DEHLINGER K, TARNOWSKI K, HOUSE J L, et al. Can trained dogs detect a hypoglycemic scent in patients with type 1 diabetes? [J]. *Diabetes Care*, 2013, 36(7): e98–e99.
- [30] BAUËR P, LEEMANS M, AUDUREAU E, et al. Remote medical scent detection of cancer and infectious diseases with dogs and rats: a systematic review [J]. *Integr Cancer Ther*, 2022, 21: 15347354221140516.
- [31] FEIL C, STAIB F, BERGER M R, et al. Sniffer dogs can identify lung cancer patients from breath and urine samples [J]. *BMC Cancer*, 2021, 21(1): 917.
- [32] JUNQUEIRA H, QUINN T A, BIRINGER R, et al. Accuracy of canine scent detection of non-small cell lung cancer in blood serum [J]. *J Am Osteopath Assoc*, 2019, 119(7): 413–418.
- [33] KUDLAK M, ALI M M, WHITLOW KIRK S, et al. Canine scent detection in lung cancer screening [J]. *Cureus*, 2023, 15(5): e38877.
- [34] WARLI S M, FIRSTY N N, VELARO A J, et al. The olfaction ability of medical detection canine to detect prostate cancer from urine samples: progress captured in systematic review and meta-analysis [J]. *World J Oncol*, 2023, 14(5): 358–370.
- [35] HERMIEU J F, HERMIEU M, ROUX A, et al. Contribution of canine olfaction in the diagnostic strategy of intermediate and high-risk prostate cancer: a double-blind validation study [J]. *World J Urol*, 2024, 42(1): 497.
- [36] THULEAU A, GILBERT C, BAUËR P, et al. A new transcutaneous method for breast cancer detection with dogs [J]. *Oncology*, 2019, 96(2): 110–113.
- [37] ORTAL A, RODRÍGUEZ A, SOLIS-HERNÁNDEZ M P, et al. Proof of concept for the use of trained sniffer dogs to

- detect osteosarcoma [J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1): 6911.
- [38] GAYE O, FALL C B, JALLOH M, et al. Detection of urological cancers by the signature of organic volatile compounds in urine, from dogs to electronic noses [J]. *Curr Opin Urol*, 2023, 33(6): 437–444.
- [39] KANE S A, LEE Y E, ESSLER J L, et al. Canine discrimination of ovarian cancer through volatile organic compounds [J]. *Talanta*, 2022, 250: 123729.
- [40] SEO I S, LEE H G, KOO B, et al. Cross detection for odor of metabolic waste between breast and colorectal cancer using canine olfaction [J]. *PLoS One*, 2018, 13(2): e0192629.
- [41] PELLIN M A, MALONE L A, UNGAR P. The use of sniffer dogs for early detection of cancer: a one health approach [J]. *Am J Vet Res*, 2023, 85(1): 0222.
- [42] LIPPI G, CERVELLIN G. Canine olfactory detection of cancer versus laboratory testing: myth or opportunity? [J]. *Clin Chem Lab Med*, 2012, 50(3): 435–439.
- [43] MUPPIDI S S, KATRAGADDA R, LEGA J, et al. A review of the efficacy of a low-cost cancer screening test using cancer sniffing canines [J]. *J Breath Res*, 2021, 15(2): 024001.
- [44] CAMBAU E, POLJAK M. Sniffing animals as a diagnostic tool in infectious diseases [J]. *Clin Microbiol Infect*, 2020, 26(4): 431–435.
- [45] BRYCE E, ZURBERG T, ZURBERG M, et al. Identifying environmental reservoirs of *Clostridium difficile* with a scent detection dog: preliminary evaluation [J]. *J Hosp Infect*, 2017, 97(2): 140–145.
- [46] GUEST C, PINDER M, DOGGETT M, et al. Trained dogs identify people with malaria parasites by their odour [J]. *Lancet Infect Dis*, 2019, 19(6): 578–580.
- [47] MAURER M, MCCULLOCH M, WILLEY A M, et al. Detection of bacteriuria by canine olfaction [J]. *Open Forum Infect Dis*, 2016, 3(2): ofw051.
- [48] HAG-ALI M, ALSHAMSI A S, BOEIJEN L, et al. The detection dogs test is more sensitive than real-time PCR in screening for SARS-CoV-2 [J]. *Commun Biol*, 2021, 4(1): 686.
- [49] CALLEWAERT C, PEZAVANT M, VANDAELE R, et al. Sniffing out safety: canine detection and identification of SARS-CoV-2 infection from armpit sweat [J]. *Front Med (Lausanne)*, 2023, 10: 1185779.
- [50] TEN HAGEN N A, TWELE F, MELLER S, et al. Discrimination of SARS-CoV-2 infections from other viral respiratory infections by scent detection dogs [J]. *Front Med (Lausanne)*, 2021, 8: 749588.
- [51] MAIDODOU L, STEYER D, MONAT M A, et al. Harnessing the potential of sniffing dogs and GC-MS in analyzing human urine: a comprehensive review of sample preparation and extraction techniques [J]. *Microchem J*, 2024, 207: 111907.
- [52] DEVILLIER P, GALLET C, SALVATOR H, et al. Biomedical detection dogs for the identification of SARS-CoV-2 infections from axillary sweat and breath samples [J]. *J Breath Res*, 2022, 16(3): 037101.
- [53] KANTELE A, PAAJANEN J, TURUNEN S, et al. Scent dogs in detection of COVID-19: triple-blinded randomised trial and operational real-life screening in airport setting [J]. *BMJ Glob Health*, 2022, 7(5): 008024.
- [54] 朱海娟, 李金峰. 医学检测犬的研究概述 [J]. *中国工作犬业*, 2024, 5: 12–15.
- ZHU H J, LI J F. The overview of research on medical detection dogs [J]. *Chin Work Dog*, 2024, 5: 12–15.
- [55] RAMOS M T, CHANG G, WILSON C, et al. Dogs can detect an odor profile associated with *Staphylococcus aureus* biofilms in cultures and biological samples [J]. *Front Allergy*, 2024, 5: 1275397.
- [56] HOLT L, JOHNSTON S V. From small to tall: breed-varied household pet dogs can be trained to detect Parkinson's Disease [J]. *Anim Cogn*, 2024, 27(1): 62.
- [57] GONDER-FREDERICK L A, GRABMAN J H, SHEPARD J A. Diabetes alert dogs (DADs): an assessment of accuracy and implications [J]. *Diabetes Res Clin Pract*, 2017, 134: 121–130.
- [58] ROONEY N J, GUEST C M, SWANSON L C M, et al. How effective are trained dogs at alerting their owners to changes in blood glycaemic levels? Variations in performance of glycaemia alert dogs [J]. *PLoS One*, 2019, 14(1): 0210092.
- [59] CATALA A, GRANDGEORGE M, SCHAFF J L, et al. Dogs demonstrate the existence of an epileptic seizure odour in humans [J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 4103.
- [60] MARCUS D A, BHOWMICK A. Survey of migraine sufferers with dogs to evaluate for canine migraine-alerting behaviors [J]. *J Altern Complement Med*, 2013, 19(6): 501–508.
- [61] DOMINGUEZ-ORTEGA L, DÍAZ-GÁLLEGO E, POZO F, et al. Narcolepsy and odor: preliminary report [J]. *Semergen*, 2013, 39(7): 348–353.
- [62] WILSON C, CAMPBELL K, PETZEL Z, et al. Dogs can discriminate between human baseline and psychological stress condition odours [J]. *PLoS One*, 2022, 17(9): e0274143.
- [63] KIIROJA L, STEWART S H, GADBOIS S. Can scent-detection dogs detect the stress associated with trauma cue exposure in people with trauma histories? A proof-of-concept study [J]. *Front Allergy*, 2024, 5: 1352840.

- [64] MUTESA L, MISBAH G, REMERA E, et al. Use of trained scent dogs for detection of COVID-19 and evidence of cost-saving [J]. *Front Med (Lausanne)*, 2022, 9: 1006315.
- [65] MANCILLA-TAPIA J M, LOZANO-ESPARZA V, ORDUÑA A, et al. Dogs detecting COVID-19 from sweat and saliva of positive people: a field experience in Mexico [J]. *Front Med (Lausanne)*, 2022, 9: 837053.
- [66] MELLER S, ALI AL KHATRI M S, ALHAMMADI H K, et al. Expert considerations and consensus for using dogs to detect human SARS-CoV-2-infections [J]. *Front Med (Lausanne)*, 2022, 9: 1015620.
- [67] RAVI V, SAXENA S, PANDA P S. Basic virology of SARS-CoV 2 [J]. *Indian J Med Microbiol*, 2022, 40(2): 182–186.
- [68] HALF E, OVCHARENKO A, SHMUEL R, et al. Non-invasive multiple cancer screening using trained detection canines and artificial intelligence: a prospective double-blind study [J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 28204.
- [69] GUEST C, HARRIS R, SFANOS K S, et al. Feasibility of integrating canine olfaction with chemical and microbial profiling of urine to detect lethal prostate cancer [J]. *PLoS One*, 2021, 16(2): 0245530.
- [70] ALASAAD S, PERMUNIAN R, GAKUYA F, et al. Sarcoptic-mange detector dogs used to identify infected animals during outbreaks in wildlife [J]. *BMC Vet Res*, 2012, 8: 110.
- [71] CRAIG ANGLE T, PASSLER T, WAGGONER P L, et al. Real-time detection of a virus using detection dogs [J]. *Front Vet Sci*, 2016, 2: 79.
- [72] JUGE A E, HALL N J, RICHESON J T, et al. Using canine olfaction to detect bovine respiratory disease: a pilot study [J]. *Front Vet Sci*, 2022, 9: 902151.
- [73] JUGE A E, HALL N J, RICHESON J T, et al. Dogs' ability to detect an inflammatory immune response in cattle via olfaction [J]. *Front Vet Sci*, 2024, 11: 1393289.
- [74] FISCHER-TENHAGEN C, THEBY V, KRÖMKER V, et al. Detecting *Staphylococcus aureus* in milk from dairy cows using sniffer dogs [J]. *J Dairy Sci*, 2018, 101(5): 4317–4324.
- [75] MALLIKARJUN A, SWARTZ B, KANE S A, et al. Canine detection of chronic wasting disease (CWD) in laboratory and field settings [J]. *Prion*, 2023, 17(1): 16–28.
- [76] GOLDEN G J, RAMIREZ E A, STEVENS H N, et al. Biodetection of an odor signature in white-tailed deer associated with infection by chronic wasting disease prions [J]. *PLoS One*, 2024, 19(8): 0303225.
- [77] Agricultural Research Service. Department of Agriculture 2010 Assessment of canine detection for huanglungbing (HLB) in citrus canker (CC) [R]. Washington DC; 2010.
- [78] MENDEL J, BURNS C, KALLIFATIDIS B, et al. Agri-dogs: using canines for earlier detection of laurel wilt disease affecting avocado trees in south Florida [J]. *HortTechnology*, 2018, 28(2): 109–116.
- [79] AVILES-ROSA E O, WEBBERSON E, NITA M, et al. Dogs can detect powdery mildew (*Erysiphe necator*) in grapevine (*Vitis vinifera*) leaves [J]. *J Vet Behav*, 2025, 77: 19–29.
- [80] ARNESEN C H, ROSELL F. Pest detection dogs for wood boring longhorn beetles [J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 16887.
- [81] AVILES-ROSA E O, NITA M, FEUERBACHER E, et al. An evaluation of Spotted Lanternfly (*Lycorma delicatula*) detection dog training and performance [J]. *Appl Anim Behav Sci*, 2023, 258: 105816.
- [82] VOŠVRDOVÁ N, JOHANSSON A, TURČÁNI M, et al. Dogs trained to recognise a bark beetle pheromone locate recently attacked spruces better than human experts [J]. *For Ecol Manag*, 2023, 528: 120626.
- [83] 陈艺娇. “嗅”出黄龙病 [N]. *农民日报*, 2024-10-21 (008).
- CHEN Y J. “Sniffing” out Huanglongbing [N]. *Farmers Daily*, 2024-10-21(008).
- [84] 中国工作犬管理协会, 工作犬搜索柑橘黄龙病训练及使用规范: T/CWDMA 005–2023 [S]. 2024.
- China Working Dog Management Association, Training and use specifications for working dogs in the search for citrus Huanglongbing: T/CWDMA 005–2023 [S]. 2024.
- [85] FULLER A K, AUGUSTINE B C, CLIFTON E H, et al. Effectiveness of canine-assisted surveillance and human searches for early detection of invasive spotted lanternfly [J]. *Ecosphere*, 2024, 15(12): e70113.
- [86] SALAMON A, BARANYA E, ZSIROS L R, et al. Success in the Natural Detection Task is influenced by only a few factors generally believed to affect dogs' olfactory performance [J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 12351.
- [87] JAMIESON L T J, BAXTER G S, MURRAY P J. Identifying suitable detection dogs [J]. *Appl Anim Behav Sci*, 2017, 195: 1–7.
- [88] 熊玉强, 芦帅, 赵勤涛, 等. 训练犬检测人类癌症气味的几个技术要点 [J]. *中国工作犬业*, 2021, 4: 25–27.
- XIONG Y Q, LU S, ZHAO Q T, et al. Several technical points of training dogs to detect the smell of human cancer [J]. *Chin Work Dog*, 2021, 4: 25–27.
- [89] WEI Q, ZHANG H, MA S, et al. Sex- and age-related differences in c-fos expression in dog olfactory bulbs [J]. *Acta Zool*, 2017, 98(4): 370–376.
- [90] MARCHAL S, BREGERAS O, PUAUX D, et al. Rigorous

- training of dogs leads to high accuracy in human scent matching-to-sample performance [J]. PLoS One, 2016, 11 (2): e0146963.
- [91] LAZAROWSKI L, FOSTER M L, GRUEN M E, et al. Olfactory discrimination and generalization of ammonium nitrate and structurally related odorants in Labrador retrievers [J]. Anim Cogn, 2015, 18(6): 1255-1265.
- [92] ESSLER J L, WILSON C, VERTA A C, et al. Differences in the search behavior of cancer detection dogs trained to have either a sit or stand-stare final response [J]. Front Vet Sci, 2020, 7: 118.
- [93] PILCHOVÁ V, PRAJEETH C K, JENDRNY P, et al. β -propiolactone (BPL)-inactivation of SARS-co-V-2: *in vitro* validation with focus on saliva from COVID-19 patients for scent dog training [J]. J Virol Methods, 2023, 317: 114733.
- [94] ESSLER J L, KANE S A, NOLAN P, et al. Discrimination of SARS-CoV-2 infected patient samples by detection dogs: a proof of concept study [J]. PLoS One, 2021, 16 (4): e0250158.
- [95] MENDEL J, FRANK K, EDLIN L, et al. Preliminary accuracy of COVID-19 odor detection by canines and HS-SPME-GC-MS using exhaled breath samples [J]. Forensic Sci Int Synergy, 2021, 3: 100155.
- [96] SINGLETARY M, KRICHBAUM S, PASSLER T, et al. A novel method for training the interdiction of restricted and hazardous biological materials by detection dogs [J]. Front Med (Lausanne), 2022, 9: 847620.
- [97] MALLIKARJUN A, CHARENDOFF I, MOORE M B, et al. Assessing different chronic wasting disease training aids for use with detection dogs [J]. Animals (Basel), 2024, 14 (2): 300.
- [收稿日期] 2025-01-09

《中国实验动物学报》稿约

国内刊号 CN 11-2986/Q 国际刊号 ISSN 1005-4847 邮局代号 2-748

一、杂志介绍

本刊是由中国实验动物学会与中国医学科学院医学实验动物研究所主办的全国性高级学术刊物(月刊),以理论与实践、普及与提高相结合为宗旨,征稿的范围是与实验动物与动物实验相关的生命科学各分支学科,栏目设置包括研究报告、研究快报和进展与综述。要求来稿材料翔实、数据可靠、文字简练、观点明确、论证合理,有创新、有突破、有新意。

本刊是中国科学引文数据库来源期刊、中国学术期刊综合评价数据库来源期刊、中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)统计源期刊、《中国学术期刊文摘》来源期刊;被中国生物学文献数据库、《中国核心期刊(遴选)数据库》、《中国科技论文统计源期刊》(中国科技核心期刊)、《中文核心期刊要目总览》(北大核心)等数据库收录。

二、投稿要求及注意事项

文稿内容要具有创新性、科学性和实用性,论点明确,资料可靠,文字通顺精练,标点符号准确,用词规范,图表清晰。文章字数在 6000 字之内。

投稿网址: <http://zgswdw.cnjournals.com/>

期待您的来稿!