

纪春晓, 刘剑英, 聂祝运, 等. UV-LED对猪场水源重要病原微生物的杀灭效率及其应用研究 [J]. 畜牧与兽医, 2025, 57 (7): 89-96.

JI C X, LIU J Y, NIE Z Y, et al. The killing efficiency of UV-LED on critical pathogenic microorganisms in water sources for piggery and its application [J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2025, 57 (7): 89-96.

UV-LED对猪场水源重要病原微生物的杀灭效率及其应用研究

纪春晓¹, 刘剑英^{1,2}, 聂祝运^{1,2}, 王东亮^{1,2}, 刘德权³, 邹忠⁴, 唐宇龙^{2*}

(1. 湖南农业大学动物医学院, 湖南长沙 410128;

2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 湖南长沙 410125;

3. 湖南普斯赛特光电科技有限公司, 湖南长沙 410205;

4. 华中农业大学动物医学院, 湖北武汉 430070)

摘要: 旨在探讨紫外发光二极管 (UV-LED) 对猪场水源中重要病原微生物的灭活效率, 并分析经 UV-LED 消毒的饮水对断奶仔猪生长性能与免疫指标的影响。通过菌落计数法测定 UV-LED 对副猪格氏菌 (*Glaesserella parasuis*, GPS), 猪链球菌 2 型 (*Streptococcus suis* serotype 2, SS2) 和肠产毒素型大肠杆菌 (*enterotoxigenic Escherichia coli*, ETEC) 3 种致病菌株的杀灭效率; 培养非洲绿猴肾细胞 (Vero), 非洲绿猴胚胎肾细胞 (Marc-145), 猪肾细胞 (PK-15) 与猪肺泡巨噬细胞 (PAM), 对其分别接种伪狂犬病病毒 (PRV)、猪圆环病毒 2 型 (PCV2)、猪繁殖与呼吸综合征病毒 (PRRSV) 和非洲猪瘟病毒 (ASFV), 观察细胞病变情况, 并计算其病毒滴度, 作为 UV-LED 灭活病毒效果的评价指标; 给断奶仔猪饲喂经 UV-LED 消毒的饮水, 测定其对生长性能及血液指标的影响。结果: UV-LED 对于水源中的 GPS、SS2、ETEC 这 3 种病菌均具有很强的杀灭效果, 处理 17 s 以上时, 对以上细菌的杀灭效率可达 99.90% 以上; 对 PRV、PCV2、PRRSV、ASFV 这 4 种病毒均具有杀灭作用, 但杀灭效果存在一定区别, 处理 17 s 以上可完全灭活 PRV、PCV2 与 PRRSV, 而完全灭活 ASFV 需处理 58 s; 断奶仔猪饲喂结果表明, 给予经 UV-LED 消毒饮水, 可显著减少断奶仔猪腹泻率 ($P < 0.05$), 改善肠道功能, 并且可使断奶仔猪血液中白细胞数、淋巴细胞数与单核细胞数显著下降 ($P < 0.05$)。综上, UV-LED 消毒处理可以有效消杀水中常见的病原微生物, 减少断奶仔猪被病原微生物感染的风险, 可应用于水源消毒。

关键词: 紫外发光二极管 (UV-LED); 猪场; 水源; 消毒; 病原微生物

中图分类号: S855 文献标志码: A 文章编号: 0529-5130(2025)07-0089-08

The killing efficiency of UV-LED on critical pathogenic microorganisms in water sources for piggery and its application

JI Chunxiao¹, LIU Jianying^{1,2}, NIE Zhuyun^{1,2}, WANG Dongliang^{1,2}, LIU Dequan³, ZOU Zhong⁴, TANG Yulong^{2*}

(1. College of Veterinary Medicine, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

2. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China;

3. PUSISAT Optoelectronic Technology Co., Ltd., Changsha 410205, China;

4. College of Veterinary Medicine, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: This study was to investigate the inactivation efficiency of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) on key pathogenic microorganisms in water sources and to analyze the effect of UV-LED sterilized drinking water on the growth performance and immunity index of weaned piglets. Firstly, we calculated the killing efficiency of UV-LED against three pathogenic bacterial strains, *Glaesserella parasuis* (GPS), *Streptococcus suis* serotype 2 (SS2), and enterotoxigenic *Escherichia coli* (ETEC), using the colony counting method. Secondly, pseudorabies virus (PRV), porcine circovirus type 2 (PCV2), porcine respiratory and reproductive syndrome virus (PRRSV), and African swine fever virus (ASFV) were inoculated into Vero cells, Marc-14 cells, PK-15 cells, and PAM cells, respectively. The efficiency of UV-LED inactivation of viruses was evaluated by calculated viral titers based on cell lesions. Finally, we further analyzed the effects of growth performance and blood indexes in weaned piglets fed with UV-LED-sterilized drinking water. Our results showed that UV-LED had

收稿日期: 2024-06-22; 修回日期: 2025-04-20

基金项目: 湖南省自然科学基金项目 (2023JJ50314); 湖北省农业生态产品价值实现工程研究项目 (2023-DFZD-57); 云南省重大科技专项 (202102AE090046)

第一作者: 纪春晓, 女, 博士

* 通信作者: 唐宇龙, 副研究员, 研究方向为畜禽健康养殖, E-mail: tangyulong@isa.ac.cn。

a remarkable killing effect on the three pathogens, GPS, SS2, and ETEC, in drinking water. The killing efficiency of the bacteria exceeded 99.90% after 17 seconds of drinking water treatment. For all the tested viruses, UV-LED was able to completely inactivate three of the four viruses after 17 seconds of the treated drinking water, whereas complete inactivation of ASFV requires 58 seconds of treatment. The results of the animal feeding experiment showed that the administration of UV-LED-sterilized drinking water significantly reduced the diarrhea rate ($P < 0.05$), improved the intestinal function as well as significantly decreased the number of white blood cells, lymphocytes, and mononuclear cells in the blood of the weaned piglets ($P < 0.05$). Altogether, UV-LED treatment effectively eliminated pathogens in drinking water for pigs, reduced the risk of infection in the animals, and possessed the value of being applied to the disinfection of water sources.

Keywords: ultraviolet light-emitting diodes (UV-LED); piggeries; water sources; sterilization; pathogenic microorganism

水是生命之源,是一切动物赖以生存的物质基础。作为动物体第一大营养素,水是所有动物都不可缺少的重要组成成分,在动物体内起着运输营养、参与物质代谢和维持动物体温以及酸碱平衡的作用。对于猪场来说,水的安全卫生尤为重要。规模化养猪场的水源主要来自深层地下水,而猪场一般使用的地下水都是在场内打井,猪场自身的污水或其他污染物很容易渗入地下,对深井水造成再污染,使水中病原微生物含量超标,严重威胁猪群的健康。许多猪场中的典型病原微生物,如非洲猪瘟病毒(African swine fever virus, ASFV)可以在水中传播并长时间存活,多种重大流行疾病也可通过水源作为第一传播途径在场内扩散^[1]。

水体消毒是水处理中不可缺少的一道关键工艺流程^[2],其目的是通过技术手段消除水中致病微生物,以防其通过水体传播疾病,保证水的生物安全性。消杀水体中病原菌的处理方法主要包括物理处理、化学处理、机械处理和生物处理等^[3]。目前我国猪场常用的饮水消毒方法以化学消毒为主,即在用水中添加消毒剂,如氯制剂、酸化剂和二氧化氯消毒剂等。化学消毒虽然具有消毒范围广泛、消毒效率高等优势,但部分消毒剂会与水中有机物反应,产生含碳消毒副产物和含氮消毒副产物等对健康有危害的物质^[4],且消毒时伴有刺激性化学物质残留,会腐蚀猪场物品^[5]。此外,随着猪场用水量的提升,使用消毒剂的成本也会逐渐加大。相比之下,紫外发光二极管(UV-LED)作为一种新型紫外光源,不但具有杀菌能力,而且仅需较短时间的辐照就可以有效杀灭饮用水中的病原微生物,具有杀菌效率高、适用范围广、无有害消毒副产物、低成本、无污染、设备简单、不消耗药剂等优点^[6-7],是水处理消毒工艺发展的热门方向^[8],拥有广阔的发展前景。国际照明委员会(CIE)将紫外线在200~400 nm电磁波范围内,按波长划分为UV-A(315~400 nm)、UV-B(280~315 nm)和UV-C(200~280 nm)3个波段。紫外线的灭活能力随波长而变化,而对于水体消毒主要依赖于整个UV-C波段和部分UV-B波段。传统的紫外光是由汞紫外灯产生,现应用的传统汞灯主波长为

253.7 nm^[9]。与传统紫外汞灯相比,UV-LED具有波长单一、光利用率高、耗电低、体积小、不含汞且不会造成环境污染等优势^[10]。本试验选用了UV-LED(275 nm)光源,研究UV-LED对猪养殖过程中常见的副猪格拉瑟菌(*Glaesserella parasuis*, GPS),猪链球菌2型(*Streptococcus suis* serotype 2, SS2),肠产毒素型大肠杆菌(enterotoxigenic *Escherichia coli*, ETEC),伪狂犬病病毒(pseudorabies virus, PRV),猪圆环病毒2型(porcine circovirus type 2, PCV2),猪繁殖与呼吸综合征病毒(porcine respiratory and reproductive syndrome virus, PRRSV)与非洲猪瘟病毒(African swine fever virus, ASFV)等病原体的灭活效率,并分析经UV-LED消杀的饮水对断奶仔猪生长性能与免疫指标的影响,探究UV-LED消毒的方法对猪场水源消毒的可行性,以期能为猪场水源消毒提供更加经济、环保、安全的新思路。

1 材料与方法

1.1 细菌、细胞、毒株与试剂

SS2(ZJ08101), ETEC(SEC470)和GPS(HS0165)菌株由中国科学院亚热带农业生态研究所实验室保存;猪肾细胞(PK-15)(上海碧云天生物科技有限公司)和非洲绿猴胚胎肾细胞(Marc-145)(上海思泰默生物科技有限公司)由中国科学院亚热带农业生态研究所实验室保存;PRV(WH2102), PCV2(CS2008)和PRRSV(CS1907)由中国科学院亚热带农业生态研究所实验室保存;ASFV(SY-1)由华中农业大学实验室保存。PBS缓冲液(北京索莱宝科技有限公司),甲醇(上海沪试有限公司),鼠抗PCV2 Cap蛋白抗体(上海圻明生物科技有限公司),胎牛血清(上海翌圣生物科技),辣根过氧化物酶(HRP)标记山羊抗小鼠IgG(上海碧云天生物科技),乙醇(上海沪试有限公司),多聚甲醛固定液(上海碧云天生物科技),二甲苯(上海沪试有限公司),中性树胶(上海碧云天生物科技)。所有涉及ASFV活病毒操作的试验均在农业农村部非洲猪瘟等重大生猪疾病防控重点实验室内进行。

1.2 UV-LED 消杀设备的应用场景

在实际应用中,猪场水源通过紫外消杀设备,消杀后的水进入蓄水池,可供猪场使用(图1)。消杀设备为内部布满UV-LED的连续U型管道中(每节管道直径20 cm, U型高度80 cm)(图2)。水流流经一组U型管道的时间约为4 s,通过增减U型管道的数量来增加或减少UV-LED 消杀时间。

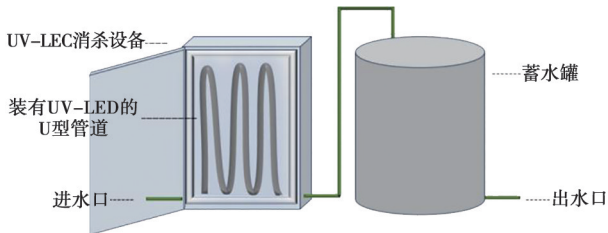


图1 UV-LED 消杀设备工作示意

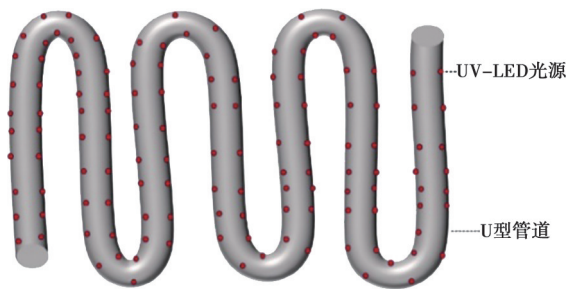


图2 UV-LED 的U型管道

1.3 UV-LED 消杀病原微生物的最适波长与光照强度摸索

以 ETEC 为例,选取 275 nm 与 255 nm 的 UV-LED 光源,对含 ETEC 水样分别进行照射处理 17 s。采用菌落计数法测定其杀菌效率,挑选出灭菌效果最好的波长,在此基础上采用功率分别为 100、80、60、40、30 和 10 W 处理含 ETEC 水样处理 17 s、13 s,确定其最适光照强度,并以此为基础进行后续试验。

1.4 UV-LED 对细菌的杀灭效率

细菌的培养和计数参考本团队之前的研究结果^[11]。试验之前,用无菌双蒸水将细菌悬液浓度配制为 10^7 CFU/mL,将 500 mL 细菌悬液加入装有 UV-LED 圆形钢管中(直径 20 cm,长度 55 cm),闭合开口,打开紫外灯对菌液进行照射处理。其间将水样上下颠倒混匀,以保证水样在充分混合状态下可以受到 UV-LED 均匀照射。通过打开/关闭灯来控制照射时间,光照时间分别为 5、9、13 和 17 s。当达到处理时间后,关闭紫外灯并倒出水样,采用菌落计数法测定消杀前及消杀不同时间后水样中可培养细菌的数目(CFU/mL)。

1.5 猪红细胞和血清的制备

用肝素钠抗凝管采集新鲜的猪外周血,离心收集血清。之后将细胞沉淀按照 21:8 的体积比加入适量的 PBS,上下轻轻颠倒混匀,2 000 r/min 离心 5 min,弃掉上清液,重复洗涤 3 次,最后一次 2 000 r/min 离心 10 min,弃掉上清液后,使用与最初取血体积相等的 PBS 重悬红细胞沉淀,制备 1% 红细胞悬液,现用现配,4 °C 保存。

1.6 ASFV 滴度测定

将 PAM 以 2×10^6 个/孔接种于 96 孔板,在 37 °C、5% CO₂ 培养箱中培养。将 ASFV 病毒液用含 1% 猪血清的 PBS 按 1:10 比例从 10^{-1} 到 10^{-10} 进行梯度稀释,并分别接种于细胞中,每个稀释度接种 4 孔,每孔 50 μL,同时将 10 μL 1% 猪红细胞加入每孔中。将 96 孔板置于 37 °C、5% CO₂ 条件下培养 6 d,每天观察、记录并统计各稀释度培养孔中红细胞吸附(hemadsorption, HAD)反应结果;统计各培养孔中 HAD 结果,使用 Reed-Muench 法计算半数红细胞吸附量(HAD₅₀),测定病毒滴度 $\lg [HAD_{50} \cdot mL^{-1}]$ 。参考国家卫生健康委颁布的 2002 版《消毒技术规范》计算平均灭活对数值,消毒后平均灭活对数值小于 4 时判定为灭活 ASFV。

1.7 UV-LED 对病毒的杀灭效率

培养 Vero、Marc-145 与 PK-15 细胞并制备 PRV、PCV2 和 PRRSV。PRV、PRRSV 制备与滴度测定方法参考本团队之前的研究^[11]。对于 PCV2 的制备:将状态良好的 PK-15 细胞接种于 96 孔板中,待细胞长成致密单层后,将 PCV2 病毒液按 1:10 比例进行梯度稀释,并分别接种于细胞中,置于 37 °C、5% CO₂ 培养箱中孵育;36 h 后弃上清液,PBS 洗涤 3 次;每孔加入 200 μL 固定液,室温固定 10 min;PBS 洗涤 3 次;加入 100 μL 30% H₂O₂ 和甲醇(1:50),室温反应 20 min;PBS 洗涤 3 次;加入 100 μL 含 5% 小牛血清的 PBS 的封闭液,室温孵育 30 min,弃去封闭液;加入 100 μL 1:50 稀释的鼠抗 PCV2 Cap 蛋白抗体,37 °C 作用 1 h;PBS 洗涤 3 次;加入 50 μL 1:100 稀释的 HRP 标记的羊抗鼠 IgG,37 °C 孵育 1 h;轻轻甩去反应液,PBS 洗涤 3 次;滴加 DAB 显色工作液,室温下反应 10 min,显色后加入蒸馏水充分洗涤终止反应;于倒置显微镜观察细胞内的红色信号。按 Reed-Muench 法计算病毒的半数组织细胞感染量(TCID₅₀)。

UV-LED 照射试验之前,用无菌双蒸水配置含病毒水样。将 500 mL 含病毒水样加入装有 UV-LED 圆形钢管中,闭合开口,打开紫外灯对菌液进行照射处理,其间将水样上下颠倒混匀,以保证水样在充分混

合状态下可以受到紫外均匀照射。通过打开/关闭灯来控制照射时间, PRV、SS2、PRRSV 光照时间为 5、9、13、17 和 21 s; ASFV 光照时间为 5、9、13、17、21、29、44 和 58 s。计算照射前后含病毒水样的 TCID₅₀ 与 HAD₅₀, 并计算消杀处理不同时间对病毒的灭活效率。

1.8 断奶仔猪饲喂试验

试验在湖南省长沙市中国科学院亚热带农业生态研究所进行。选取 28 日龄“杜长大”外三元杂交断奶仔猪, 随机分为对照组(饲喂未经消毒饮水, 水源为地下水)和试验组(饲喂经 UV-LED 消毒处理饮水), 每组 6 栏, 每栏 6 头, 共 72 头。每天观察猪舍内温度与湿度, 并按照要求及时对温湿度变化进行调控。每天中午对猪舍通风 1 h, 清扫每个限位栏。断奶仔猪自由采食和饮水、自由活动。记录每日饲料初始重量, 并将每日料槽中剩料晒干称重, 两者差值则为断奶仔猪的日采食总量。断奶仔猪在正式试验期第 1 天与饲喂 35 d 结束当天进行称重, 计算平均日采食量、日增重和料重比。记录仔猪腹泻情况, 计算腹泻率。试验期间每 5 d 取样消杀前后饮水, 分别涂布于 BHI 培养基, 对其重要病原微生物情况进行动态检测。

饲喂 35 d 结束后, 每栏采样 1 头体型相近的正常仔猪, 通过前腔静脉采集血液样本。将血液样本先置于室温下静置 30 min, 然后在 4 ℃、1 800 r/min 离心 15 min, 分离出血清并进行分装, 储存于 -20 ℃ 冰箱中, 用于血液指标分析。屠宰仔猪, 取出心脏、肝脏、脾脏、肺脏、肾脏并分别称重, 计算脏器指数(脏器重量与动物体重的比值)。取出肠道组织, 迅速截取一段长度合适的回肠和十二指肠, 用生理盐水清洗污渍之后放入 4% 的多聚甲醛固定液中, 用于制作组织切片。将固定好的组织依次放入 70%、80%、90%、95%、100% 乙醇溶液中进行脱水, 脱水后的组织放入二甲苯中, 使组织透明。将透明组织融化于石蜡中, 浸蜡 2 h。将浸蜡后的组织放入融化的石蜡中, 用包埋框进行包埋。包埋好的组织块冷却后, 使用切片机将包埋好的组织块切片, 放入二甲苯中脱蜡, 去除组织中的石蜡。将脱蜡后的切片依次放入 100%、95%、90%、80%、70% 乙醇中各浸泡 3 min, 最后用蒸馏水冲洗。将切片放入苏木精染液中染色 10 min, 用蒸馏水冲洗后, 再放入伊红染液中染色 10 min。染色后用蒸馏水冲洗, 去除多余的染液。将染色后的切片依次放入 70%、80%、90%、95%、100% 乙醇溶液中进行脱水, 随后将切片放入二甲苯中浸泡 10 min 进行透明。将透明后的切片取出, 滴加适量的中性树胶, 然后盖上盖玻片进行封

片。在显微镜下观察切片, 对肠道形态进行评价。

2 结果

2.1 UV-LED 消杀 EHEC 的最适波长与光照强度

选取波长 275 和 255 nm 的 UV-LED 光源对含 ETEC 水样照射处理 5 s, 对 ETEC 的杀灭效率分别为 91.98%、86.56%。故选取 275 nm UV-LED 光源进行后续试验。

在功率为 100、80、60、40、30 和 10 W 时分别对含 ETEC 水样进行照射处理 17 s 和 13 s。由图 3 可知, 处理 17 s 后对 ETEC 的杀灭效率分别为 99.97%、99.97%、99.85%、99.50%、88.92%、53.57%; 处理 13 s 后对 ETEC 的杀灭效率分别为 98.97%、98.86%、98.81%、96.89%、78.21%、44.64%。不同光强度(功率)对大肠杆菌的杀灭效率结果表明, UV-LED 消杀效率随着光照强度(功率)的降低而降低; 但功率在 40 W 以上时, 增加光照强度(功率)对杀灭效率影响不明显; 功率低于 40 W 时, 杀灭效率明显减弱; 光照时间长(17 s)的杀灭效率优于光照时间短的(13 s)。

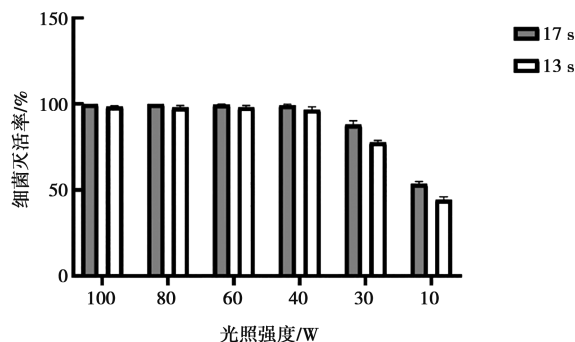


图 3 不同时间光照强度处理对 EHEC 的杀灭作用

2.2 UV-LED 对 3 种细菌的杀灭效率

观察细菌平板中的菌落, 与未进行 UV-LED 消杀处理相比, 经过消杀处理的细菌平板中细菌数明显下降, 分别对其进行计数, 并计算其灭菌效率。由图 4 可知, ETEC 在经过消杀处理 21、17、13、9 和 5 s 后的灭菌效率分别为 99.99%、99.98%、98.85%、86.28% 和 71.83%; SS2 经过消杀灭菌处理 21、17、13、9 和 5 s 后的灭菌效率分别为 99.97%、99.95%、97.77%、85.23% 和 70.75%; GPS 在经过消杀灭菌处理 21、17、13、9 和 5 s 后的灭菌效率分别为 99.98%、99.97%、98.23%、85.77% 和 71.22%。由此表明 UV-LED 消杀处理对于 ETEC、SS2 及 GPS 均有杀灭作用, 且随着处理时间的增加杀灭效率相应提高, 在处理 17 s 以上时, 对以上细菌的杀灭效率可

达 99.90% 以上；处理时间不足 9 s 时杀菌效率下降。

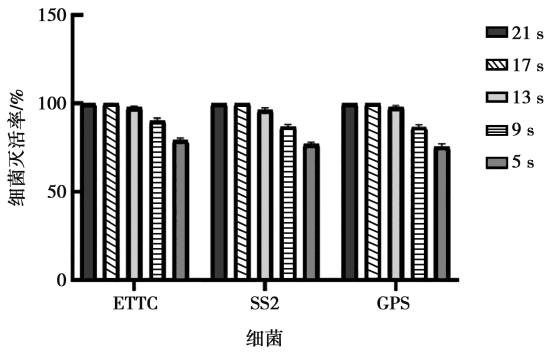


图 4 不同处理时间对细菌的杀灭作用

2.3 UV-LED 对 3 种病毒的杀灭效率

2.3.1 病毒滴度测定

通过终点稀释法测定未处理的感染细胞的病毒滴度，PRV、PCV2 和 PRRSV 的病毒滴度分别为 $10^{3.0}$ 、 $10^{2.25}$ 和 $10^{3.3}$ TCID₅₀/μL。由图 5 可知，经过 UV-LED 消杀处理 21、17、13、9 和 5 s 后，PRV 感染的 PK-15 细胞的病毒滴度分别为 0、0、 $10^{1.87}$ 、 $10^{2.21}$ 和 $10^{2.48}$ TCID₅₀/μL，病毒灭活率分别为 100%、100%、92.50%、83.80% 和 69.80%；PCV2 感染的 PK-15 细胞的病毒滴度分别为 0、0、 $10^{0.75}$ 、 $10^{1.39}$ 和 $10^{1.70}$ TCID₅₀/μL，病毒灭活率分别为 100%、100%、96.80%、86.20% 和 71.80%；PRRSV 感染的 Marc-145 细胞病毒滴度分别为 0、0、 $10^{2.18}$ 、 $10^{2.47}$ 和 $10^{2.75}$ TCID₅₀/μL，病毒灭活率分别为 100%、100%、92.40%、85.20% 和 70.30%。通过光学显微镜下观察细胞形态，对照组病毒感染细胞发生细胞病变效应 (CPE)，细胞大量死亡，PCV2 感染的 PK-15 细胞中可观察到大量红色信号；而经消杀后的病毒液感染的细胞 CPE 孔数明显减少，PCV2 感染的 PK-15 细胞中红色信号减少；紫外处理 17 s 以上时细胞不发生病变；PCV2 感染的 PK-15 细胞中无红色信号，表明 UV-LED 消杀处理对水体中的 PRV、PCV2 和 PRRSV 病毒均具有杀灭作用。

2.3.2 UV-LED 对 ASFV 的杀灭作用

由图 6 可知，经过紫外处理 58、44、29、21、17、13、9 和 5 s 后，对 ASFV 的灭活效率分别为 100%、99.25%、87.40%、85.29%、81.20%、72.35%、61.23% 和 44.19%。在 UV 作用下，照射 58 s 即可使细胞培养液中的 ASFV 完全失活，失去感染细胞的能力，ASFV 感染的 PAM 细胞不出现红细胞吸附现象。表明 ASFV 对 UV 敏感，UV-LED 消杀处理时间越长对 ASFV 的杀灭效果越强。

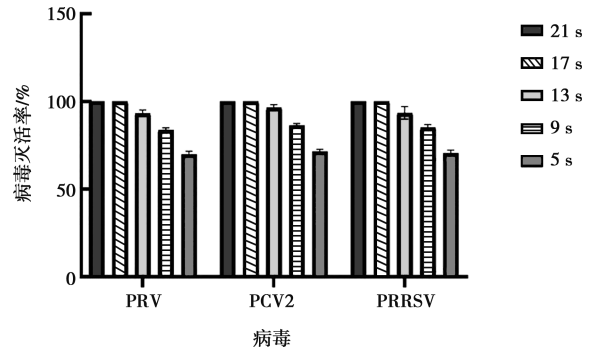


图 5 不同处理时间对病毒的杀灭效率

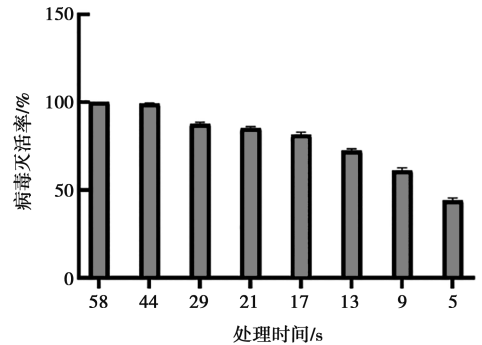


图 6 不同处理时间对 ASFV 的杀灭效率

2.4 断奶仔猪饲喂试验

按照 UV-LED 对病原菌的消杀效率，通过增加 UV-LED 水管长度，保证消杀组断奶仔猪饮用水都经过 40 s 消杀后进入蓄水池。

2.4.1 仔猪生长性能分析

由表 1 可知，仔猪在试验结束时体重均有较大提升。对照组仔猪体重从平均 7.40 kg 提高到 19.94 kg，试验组仔猪体重从平均 7.26 kg 提高到 21.25 kg；采用经 UV-LED 消杀处理饮水使断奶仔猪的平均日增重和日采食量均有少量增加，料重比有少量减少，但均无显著差异 ($P>0.05$)；整个试验期间，对照组平均腹泻率达 32.4%，而试验组仅为 21.7%，两组之间差异显著 ($P<0.05$)。说明应用 UV-LED 消杀处理猪场的饮水是可行的。

表 1 UV-LED 消杀处理饮水对断奶仔猪生长性能的影响

项目	对照组	消杀组
初重/kg	7.40±0.26	7.26±0.25
末重/kg	19.94±0.50	21.25±0.20
平均日增重/kg	0.36±0.01	0.40±0.02
平均日采食量/kg	0.60±0.02	0.64±0.02
料重比	1.67±0.02	1.61±0.02
腹泻率/%	32.4	21.7*

注：* 表示组间差异显著 ($P<0.05$)，下同。

2.4.2 仔猪饮水中病原微生物动态检测

试验 1、5、10、15、20、25、30 和 35 d 的未消杀处理的饮水中细菌数分为 16、37、70、26、19、38、81 和 55 CFU/mL；消杀处理后的饮水中均未检出细菌。

2.4.3 仔猪血液免疫指标分析

由表 2 可知，给予经 UV-LED 消杀饮水可使断奶仔猪血液中白细胞数（WBC）、淋巴细胞数和单核细胞数显著下降（ $P < 0.05$ ）；由表 3 可知，给予经 UV-LED 消杀饮水对于断奶仔猪血液生化各项指标均无显著影响。

表 2 血液常规分析

项目	对照组	消杀组
白细胞数/ ($10^9 \cdot L^{-1}$)	29.06±1.84	23.74±3.41*
中性粒细胞数/ ($10^9 \cdot L^{-1}$)	9.60±1.88	9.54±3.42
淋巴细胞数/ ($10^9 \cdot L^{-1}$)	17.80±1.14	13.62±1.64*
单核细胞数/ ($10^9 \cdot L^{-1}$)	0.74±0.23	0.36±0.13*
嗜酸性粒细胞数/ ($10^9 \cdot L^{-1}$)	0.26±0.17	0.19±0.04
红细胞数/ ($10^9 \cdot L^{-1}$)	6.50±0.52	6.35±0.50
血红蛋白浓度/ ($g \cdot L^{-1}$)	114.50±7.99	110.33±6.07
红细胞压积/%	35.10±2.43	33.47±1.81
平均红细胞体积/ μL	54.08±1.51	52.90±2.82
平均红细胞血红蛋白含量/ pg	17.65±0.37	17.43±0.91
平均红细胞血红蛋白含量/ ($g \cdot L^{-1}$)	326.50±3.69	329.50±2.75
血小板数/ ($10^9 \cdot L^{-1}$)	426.50±74.18	368.00±60.94
血小板平均体积/ μL	10.07±0.55	9.82±0.57
血小板压积/%	0.43±0.08	0.36±0.06

表 3 血液生化指标分析

项目	对照组	消杀组
血清总蛋白/ ($g \cdot L^{-1}$)	52.18±6.28	50.8±4.11
血清白蛋白/ ($g \cdot L^{-1}$)	31.25±2.28	31.63±1.37
谷丙转氨酶/ ($U \cdot L^{-1}$)	50.03±5.99	62.43±7.79
谷草转氨酶/ ($U \cdot L^{-1}$)	49.67±10.84	60.17±8.95
碱性磷酸酶/ ($U \cdot L^{-1}$)	173±10.46	209±46.29
尿酸氮素/ ($mol \cdot L^{-1}$)	2.98±0.84	3.38±1.11
肌酐/ ($mol \cdot L^{-1}$)	79.67±9.69	89.50±16.66
葡萄糖/ ($mol \cdot L^{-1}$)	3.72±0.40	3.68±0.54
总胆固醇/ ($mol \cdot L^{-1}$)	2.23±0.38	2.29±0.29

2.4.4 脏器指数分析

如图 7 所示，与对照组相比，消杀组仔猪各器官指数并无显著变化，均处于正常状态。

2.4.5 肠道切片观察

观察对照组与消杀组仔猪十二指肠和回肠切片，结果表明（图 8、图 9），消杀组的十二指肠和回肠绒毛较为丰富且排列更加清晰，隐窝结构更为明显；对照组肠绒毛排列较为稀疏且肠绒毛出现轻微脱落现象，肠腔内可见脱落的上皮细胞。由此可知，与对照组相比，消杀组的断奶仔猪肠道更加健康。

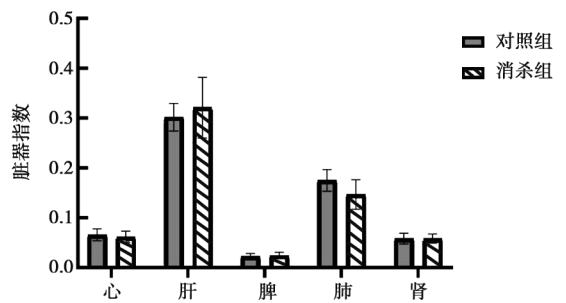
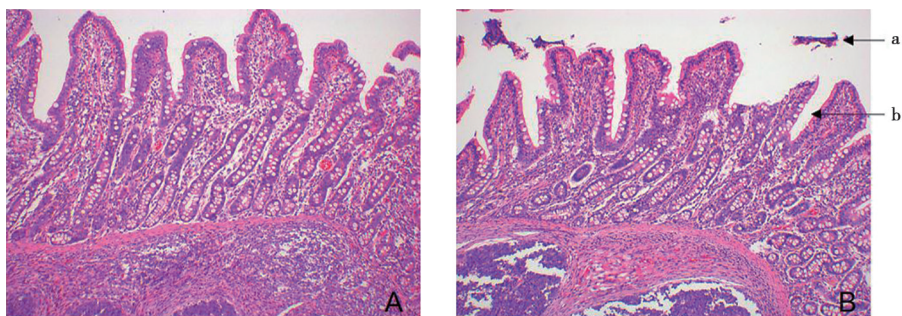
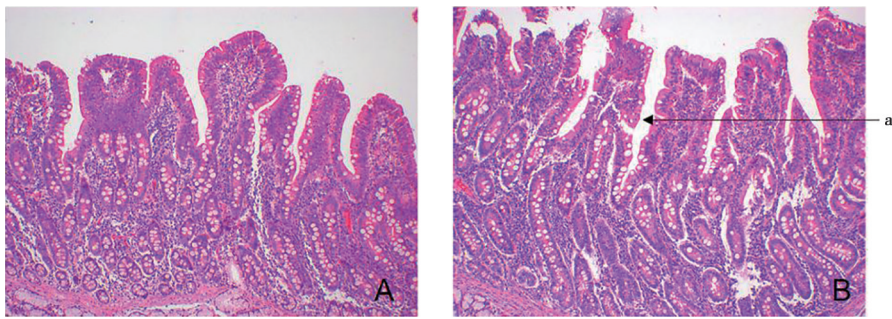


图 7 脏器指数分析



A. 消杀组；B. 对照组，其中 a 表示上皮细胞脱落，b 表示肠绒毛损伤，排列稀疏。

图 8 断奶仔猪回肠切片观察（HE 染色，100×）



A. 消杀组; B. 对照组, 其中 a 表示肠绒毛断裂。

图9 断奶仔猪十二指肠切片观察 (HE 染色, 100×)

3 讨论

水是病原微生物的主要储存载体, 各种水体中病原微生物引起的污染普遍存在, 而且因病原微生物在水中可存活较长时间, 导致了严重的疾病传播风险^[12], 是养猪业生物安全面临的重大威胁之一。目前有许多研究对水中病原微生物灭活进行了相关报道, 例如物理法的滤过消毒, 其原理是过滤器上附带很多微小的孔, 从而滤过病原微生物。Wei 等^[13]通过原位合成法制备出一种新型 AgNPs/明胶海绵, 可通过破坏细胞膜而对水中的大肠杆菌表现出较好的抗菌性能。此外还有化学法的氯化消毒, Muhannad 等^[14]研究了次氯酸钠溶液对废水中存在的芽胞杆菌的消毒效果, 结果发现, 室温下接触 10 min 后, 浓度为 5% 的次氯酸钠溶液可有效灭活芽胞杆菌。Wang 等^[15]使用氯和二氧化氯灭活水中的冠状病毒 SARS-CoV, 取得了良好的效果。尽管这些消毒法的消毒效率很高, 但仍存在一些缺点, 如消毒过滤时间较长、成本较高、操作繁琐及难以大规模使用, 氯化消毒则会与水中有机物生成具有危害的消毒副产物, 且消毒时有化学物质残留, 会腐蚀猪场物品等。

紫外线具有很强的消杀作用, 可通过形成吡啶二聚体来灭活病毒、细菌和真菌等多种微生物^[16]。当微生物吸收紫外线时, 其 DNA 链、核酸和蛋白质的交联断裂, 微生物核酸的生物活性会遭到破坏, 导致微生物死亡^[17]。UV-LED 是一种基于半导体材料将电能转化为光能的新型紫外发射光源, 相比于传统的紫外线光源, UV-LED 具有寿命长、启动快、能耗低、无汞环保、光谱纯度高特点, 并且其体积小、重量轻, 能够在狭小管道内灵活使用。近年来, 许多研究证明了 UV-LED 具有灭活水中病原微生物的作用^[18]。UV-LED 对水中的细菌和病毒的灭活效果与波长相关^[19-20]。Beck 等^[21]研究发现, 与 255 nm

UV-LED 相比, 275 nm UV-LED 对 ETEC 灭活效率更高, 此结果与本研究结果相符。Mawatari 等^[22]研究了 260 nm UV-LED 与低压汞灯对甲型流感病毒的杀灭效果, 在 4.8 MJ/cm² 的剂量下, UV-LED 杀菌能力强于相同照射量下的低压汞灯。消杀试验结果表明, UV-LED 对 ETEC、GPS 与 SS2 均都有明显的杀灭效果, 且杀灭效果随处理时间增加而增强; UV-LED 消杀处理 ASFV 所用时间较其他病毒有明显延长, 分析可能是由于该病毒颗粒较大, 且分子结构复杂从而对 UV 照射的抵抗力更强, 但照射 58 s 也可将 ASFV 完全灭活。

早期断奶仔猪生理情况特殊, 免疫与消化功能尚不健全, 且受断奶应激的刺激, 容易受到病原微生物的感染, 引起腹泻等疾病^[23], 导致其生长缓慢、饲料利用率降低, 甚至导致仔猪大量死亡, 给养殖者造成经济损失。断奶仔猪饲喂试验结果表明, 给予断奶仔猪经 UV-LED 消杀的饮水, 可以显著降低断奶仔猪的腹泻率, 且与饮用未经消毒的饮水仔猪相比, 仔猪十二指肠、回肠更加健康。这表明经 UV-LED 消杀处理饮水后, 减少了水源中病原微生物的含量, 降低了水源中病原微生物对断奶仔猪肠道健康的损害。

临床常用血常规指标作为反映动物机体感染、炎症以及免疫反应状态的参数^[24]。研究表明, 血液白细胞数量增多常见于细菌性炎症及腹泻等多种不良反应^[25]。本研究对断奶仔猪进行血常规分析发现, 对照组猪血液白细胞数高于正常范围 (7.0 ~ 20.0)^[26]; 与对照组相比, 消杀组猪血液中的白细胞数显著下降, 表明给予经 UV-LED 消毒饮水可能降低了断奶仔猪被病原微生物感染的风险, 减少了其被猪场水源中病原微生物感染的情况。

4 结论

UV-LED 消杀对于猪场水源中 ASFV、SS2 等常

见的致病菌和病毒均具有较好的灭活效果, 给予光消杀饮水显著降低了断奶仔猪的腹泻率, 且对于保护仔猪肠道健康有一定的积极作用。此外, 消杀组断奶仔猪血液中的白细胞数、淋巴细胞数和单核细胞数均显著下降。由此可见, UV-LED 消杀具有应用于猪场水源消毒的潜力。

参考文献:

- [1] 李其松, 吴春阳, 吴玉龙, 等. 猪场饮水生物安全浅析 [J]. 猪业科学, 2020, 37 (9): 84-86
- [2] 王占生, 刘文君. 我国给水深度处理应用状况与发展趋势 [J]. 中国给水排水, 2005 (9): 29-33.
- [3] 刘春. 高寒牧区饮用水紫外消毒影响因素数值模拟与参数优化 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.
- [4] 詹兢兢. 饮用水中含氮消毒副产物的生成特性及研究进展 [J]. 绿色科技, 2018 (4): 154-155.
- [5] 刘宇鹤. 二氧化氯的制备及消毒过程中对钢材料的腐蚀特性研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2023.
- [6] 王哲. UV-LED 灭活水中大肠杆菌效能研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2019.
- [7] MORI M, HAMAMOTO A, TAKAHASHI A, et al. Development of a new water sterilization device with a 365 nm UV-LED [J]. Med Biol Eng Comput, 2007, 45 (12): 1237-1241.
- [8] KEBBI Y, MUHAMMAD A I, SANT'ANA A S, et al. Recent advances on the application of UV-LED technology for microbial inactivation: progress and mechanism [J]. Compr Rev Food Sci Food Saf, 2020, 19 (6): 3501-3527.
- [9] 李金东, 张忠杰, 祁智慧, 等. 紫外发光二极管 (UV-LED) 技术对食品微生物灭活应用的研究进展 [J]. 粮油食品科技, 2024, 32 (2): 151-158.
- [10] 柳星星. 深紫外 LED 封装技术及其应用研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [11] 刘广, 龚成燕, 牛凯敏, 等. 连花清瘟药渣及发酵产物的生物活性研究 [J]. 畜牧兽医学报, 2023, 54 (3): 1281-1299.
- [12] 高强, 马芳, 邓晓明, 等. 水环境中病原微生物灭活技术研究进展 [J]. 青海师范大学学报 (自然科学版), 2024, 40 (2): 31-36.
- [13] WEI F, ZHAO X, LI C, et al. A novel strategy for water disinfection with a AgNPs/gelatin sponge filter [J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2018, 25 (20): 19480-19487.
- [14] MUHAMMAD N, GALLARDO V J, SCHUPP D A, et al. Inactivation of *Bacillus* spores in decontamination wash down wastewater using chlorine bleach solution [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2014, 41 (1): 40-47.
- [15] WANG X W, LI J S, JIN M, et al. Study on the resistance of severe acute respiratory syndrome-associated coronavirus [J]. J Virol Methods, 2005, 126 (1/2): 171-177.
- [16] 文尚胜, 左文财, 周悦, 等. 紫外线消毒技术的研究现状及发展趋势 [J]. 光学技术, 2020, 46 (6): 664-670.
- [17] TAKAGI T, NISHIKAWA J, YANAGIHARA M, et al. Microbicidal effect of deep ultraviolet light-emitting diode irradiation [J]. Lasers Med Sci, 2021, 36 (4): 927-931.
- [18] RATTANAKUL S, OGUEM K. Inactivation kinetics and efficiencies of UV-LEDs against *Pseudomonas aeruginosa*, *Legionella pneumophila*, and surrogate microorganisms [J]. Water Res, 2018, 130: 31-37.
- [19] SONG K, MOHSENI M, TAGHIPOUR F. Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: a review [J]. Water Research, 2016, 94: 341-349.
- [20] JENNY R M, JASPER M N, SIMMONS III O D, et al. Heuristic optimization of a continuous flow point-of-use UV-LED disinfection reactor using computational fluid dynamics [J]. Water Research, 2015, 83: 310-318.
- [21] BOWKER C, SAIN A, SHATALOV M, et al. Microbial UV fluence-response assessment using a novel UV-LED collimated beam system [J]. Water Research, 2011, 45 (5): 2011-2019.
- [22] KOJIMA M, MAWATARI K, EMOTO T, et al. Irradiation by a combination of different peak-wavelength ultraviolet-light emitting diodes enhances the inactivation of influenza A viruses [J]. Microorganisms, 2020, 8 (7): 1014.
- [23] 莫畏畏. 早期断奶仔猪腹泻的发生原因及预防措施 [J]. 现代畜牧科技, 2022 (12): 83-85.
- [24] LIEW P X, KUBES P. The neutrophil's role during health and disease [J]. Physiol Rev, 2019, 99 (2): 1223-1248.
- [25] 张宇. 血常规检测的临床意义 [J]. 中国医药指南, 2012, 10 (17): 390-391.
- [26] 侯明权, 陈涛, 周开锋, 等. 不同喂料模式对保育猪血液理化指标影响的研究 [J]. 养猪, 2017 (5): 44-46.