中国农业大学学报 2026,31(11):243-256
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

文致远,郭钰,王朝元,施正香,段娜.基于微酸性电解水的牛粪消毒响应面工艺优化研究[J].中国农业大学学报,2026,31(11):243-256.
WEN Zhiyuan,GUO Yu,WANG Chaoyuan,SHI Zhengxiang,DUAN Na. Response surface optimization of disinfection process for cattle manure using SAEW [J]. *Journal of China Agricultural University*,2026,31(11):243-256.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.11.18

基于微酸性电解水的牛粪消毒响应面工艺优化研究

文致远 郭 钰 王朝元 施正香 段 娜*
(中国农业大学 水利与智能工程学院/农业农村部设施农业工程重点实验室/
农业水资源高效利用全国重点实验室,北京 100083)

摘 要 为获得微酸性电解水(SAEW)对牛粪中典型奶牛乳房炎致病菌杀灭的最优工艺参数,实现再生牛粪垫料的高效绿色杀菌,本研究分析了不同有效氯浓度的SAEW对牛粪中典型奶牛乳房炎致病菌的杀菌效果,并通过响应面法获得最佳杀菌工艺参数并进行验证。结果表明:1)随着有效氯浓度的增加,牛粪中4种奶牛乳房炎致病菌含量逐渐降低,有效氯浓度300 mg/L处理24 h后,除克雷伯菌外,3种致病菌灭菌率均在93%以上;2)以pH、有效氯浓度、处理时间作为3因素进行响应面分析,通过方差分析确定模型的可信性后,明确了对金黄色葡萄球菌和克雷伯菌杀灭的贡献值为有效氯浓度>pH>杀菌时间,对链球菌和大肠杆菌杀灭贡献值为pH>有效氯浓度>杀菌时间;3)通过响应面法优化最终获得了SAEW的最优杀菌工艺为:SAEW pH值为5.5、有效氯浓度374 mg/L,杀菌时间34 h,杀菌后金黄色葡萄球菌含量为3.80±0.17 lg(CFU/g),杀菌率为99.95%,其他3种致病菌无检出。综上,SAEW对奶牛粪污具有良好的消毒潜力,对推动绿色奶牛养殖,促进可持续发展具有重要意义。

关键词 乳房炎致病菌;微酸性电解水;杀菌;响应面分析法
中图分类号 S851.36 **文章编号** 1007-4333(2026)11-0243-14 **文献标志码** A

Response surface optimization of disinfection process for cattle manure using SAEW

WEN Zhiyuan, GUO Yu, WANG Chaoyuan, SHI Zhengxiang, DUAN Na*
(College of Water Resources and Intelligence Engineering/Key Laboratory of Agricultural Engineering in Structure and Environment of Ministry of Agriculture and Rural Affairs/State Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract In order to obtain the optimal process parameters for killing typical mastitis pathogens in cow dung with slightly acidic electrolyzed water (SAEW) and achieve efficient and green sterilization of regenerated cow dung bedding, this study investigated the bactericidal effect of SAEW with different effective chlorine concentrations on typical mastitis pathogens in cow dung, and obtained and verified the optimal sterilization process parameters through response surface methodology. The research results showed that: 1) With the increase of available chlorine concentration, the content of four mastitis pathogens in cow dung gradually decreased. After treatment with an available chlorine concentration of 300 mg/L for 24 hours, the sterilization rates of the three pathogens, except *Klebsiella*, were above 93%. 2)Response surface analysis was performed with pH, available chlorine concentration, and treatment time as three factors. After the credibility of the model was determined by variance analysis, it was determined that the contribution to the killing of *Staphylococcus*

收稿日期:2026-04-01;接受日期:2026-06-20
基金项目:国家现代农业(奶牛)产业技术体系项目(CARS-36)
第一作者:文致远(ORCID:0009-0003-2559-0414),博士研究生,E-mail:S20233092088@cau.edu.cn
通讯作者:段娜(ORCID:0000-0002-9834-4180),教授级高级工程师,主要从事农业废弃物资源化利用技术研究,E-mail:duanna@cau.edu.cn

aureus and *Klebsiella* was available chlorine concentration > pH > sterilization time, and the contribution to the killing of *Streptococcus* and *Escherichia coli* was pH > available chlorine concentration > sterilization time. 3) Combined with the response surface methodology, the optimal sterilization process of SAEW was finally obtained: SAEW pH value of 5.5, available chlorine concentration of 374 mg/L, sterilization time of 34 hours, and the content of *S. aureus* after sterilization was (3.80±0.17) lg(CFU/g), the sterilization rate was 99.95%, and the other three pathogens were not detected. In conclusion, SAEW has good disinfection potential for dairy cow manure, this contributes significantly to the advancing of green dairy farming and the promotion of sustainable development.

Keywords mastitis pathogens; slightly acidic electrolyzed water; sterilization; response surface analysis

随着我国奶牛养殖业的集约化发展,粪污排放集中程度增加,粪污处理难度增大,已成为奶牛养殖业发展的制约因素[1]。牛粪垫料化技术既可以解决奶牛场牛粪消纳问题,又可为奶牛提供松软舒适的卧床垫料,是一种具有良好应用前景的牛粪资源化利用技术[2]。牛粪再生垫料(Recycled manure solids, RMS)是以牛粪为原料,通过好氧发酵、厌氧发酵或烘干等技术生产的卧床垫料[3],因其可实现粪污的资源化利用与较高舒适度的双重优点近年来在奶牛场中应用广泛[4]。然而,RMS应用的生物安全问题不容小觑,未规范RMS生产工艺的奶牛场乳房炎发病率每周高达3.5%[5],相较于沙子等无机垫料,牛粪本身不仅携带致病菌,其有机物成分也易造成致病菌等微生物的繁殖[6]。奶牛乳房炎致病菌包括大肠杆菌、葡萄球菌、链球菌、克雷伯菌、沙门菌等,其中90%以上为前3种致病菌感染[7],大肠杆菌、克雷伯菌为革兰氏阴性菌,金黄色葡萄球菌、链球菌为革兰氏阳性菌[8],为典型的奶牛乳房炎致病菌。牛粪再生垫料的微生物含量与原料中的微生物含量相关[9],且使用过程中奶牛场为了节约成本,无法做到每天更换垫料,随着垫料使用时间的延长,通过牛体、空气流动等进入垫料的致病微生物会逐渐增多[10]。因此,有效杀灭乳房炎致病菌,保证牛粪生产垫料的安全性对牛场的正常运行至关重要。

目前,牛粪垫料的消毒主要存在于生产环节,通过发酵过程中产生的热量杀灭致病菌,但在生产或使用过程中补充消毒剂的研究较为有限。刘菊莲等[11]探究了添加漂白粉与生石灰对牛粪再生垫料中病原微生物的杀灭和抑制作用,结果表明,2种杀菌剂对克雷伯菌和链球菌有明显的抑制作用,大肠杆菌仅在3‰浓度下有明显的抑制作用,对真菌和金黄色葡萄球菌抑制作用不明显,即漂白粉或生石灰均无法实现普遍抑制作用,在杀菌广谱性和杀菌效果方面存在一定局限性。微酸性电解水(Slightly acidic electrolyzed water, SAEW)是一种强力的广谱杀菌剂,杀菌能力与有效氯浓度(Available chlorine concentration, ACC)和氧化还原电位(Oxidation-reduction potential, ORP)密切相关[12]。SAEW是食品工业中应用较为广泛的杀菌剂之一[13],Du等[14]研究指出SAEW攻击细胞壁、细胞膜和细胞器等多个靶点,具有杀菌效果显著、较低的腐蚀性、制备简单和对畜禽生物无刺激性的特点,成为近年来备受关注的畜禽养殖场杀菌剂,以往研究表明SAEW对器械表面[15]、空气[16]、海鲜[17-18]与家畜[19-20]等具有良好的杀菌效果。吕桂芬等[21]通过体外杀菌试验发现,SAEW(ACC 30 mg/L)、SAEW(ACC 60 mg/L)、SAEW(ACC 60 mg/L)+3%甘油、SAEW(ACC 60 mg/L)+10%甘油4种奶牛乳头药浴剂在杀灭大肠埃希菌、金黄色葡萄球菌、无乳链球菌、停乳链球菌的试验中,15 s内杀菌率均超过88%,与传统杀菌剂相比,SAEW杀菌后无残留,更加安全、有效、环保。郝晓霞[22]发现SAEW(250 mg/L)在5 min内即可灭活鸡舍内所采集粪便、饲料和羽毛制成的悬浮液中的全部细菌和真菌,同时,ACC 300 mg/L可显著减少猪舍内墙面、栏杆和地面的表面微生物,复杂基质会削弱SAEW杀菌效果。Liao等[23]通过比较微生物膜的完整性、电位、细胞内酶活性和细胞内活性氧簇水平,研究了SAEW对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的致死效应,指出SAEW严重破坏了微生物膜的完整性和膜电位,对细胞内脂酶的活性也有灭活作用。综上所述,SAEW具有杀菌速度快、杀菌谱广、安全环保等特点,在畜禽养殖消毒领域展现出较高的应用潜力,然而,其杀菌效果仍受有效氯浓度及环境有机物等因素影响,对奶牛粪污杀菌处理及其效果

的研究未见报道。

本文探究了SAEW对牛粪中4种典型奶牛乳房炎致病菌（金黄色葡萄球菌、链球菌、克雷伯菌、大肠杆菌）的杀灭效果，通过响应面法分析了影响SAEW对典型乳房炎致病菌杀灭效果的影响因素和最优杀菌参数，以期为牛粪垫料化技术应用中绿色杀菌剂的开发提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验材料

新鲜奶牛粪取自北京市大兴区某牧场，该牧场奶牛存栏量约2 800头，其中泌乳牛1 300余头，品种为荷斯坦奶牛，试验时间为2021年11月。奶牛场采用刮粪板干清粪工艺，粪污经管道输送至集粪池。试验所用牛粪为牧场健康牛只的粪污，采用固液分离机分离后得到固体牛粪，牛粪含水率为（69.03±0.37）%，金黄色葡萄球菌初始菌数为6.32～8.08 lg（CFU/g），链球菌为6.55～7.96 lg（CFU/g），克雷伯菌为7.02～7.84 lg（CFU/g），大肠杆菌为8.05～8.73 lg（CFU/g）。

1.2　试验设计

以ACC为变量，将400 g牛粪均匀铺设在锡箔纸（40 cm×30 cm）上，铺设厚度约为1 cm，试验采用完全随机区组设计，共5组处理，每组3个平行。试验组中SAEW与牛粪质量比1∶1喷施，使用电动喷雾器向牛粪喷洒不同有效氯浓度的SAEW（100、200、300和400 mg/L）；对照组向牛粪中喷洒等质量去离子水，其他条件均相同。在杀菌24 h后取样测定金黄色葡萄球菌、链球菌、克雷伯菌、大肠杆菌共4种奶牛乳房炎典型致病菌含量，探究SAEW的杀菌效果。

在SAEW杀菌效果的初步研究下，采用响应面设计软件Design-Expert，设计3因素3水平试验以揭示各因素及其交互作用对致病菌的杀灭效果[24]。选取pH、有效氯浓度、处理时间为因素，分别命名为A、B、C；将金黄色葡萄球菌、链球菌、克雷伯菌、大肠杆菌各含量对数值作为响应值，分别用a、b、c、d表示。优化获得SAEW杀灭典型乳房炎致病菌的最佳工艺参数。

1.3　仪器和方法

采用中国农业大学农业农村部设施农业工程重点实验室研发装置（北京睿安德；型号：Anywhere-320w）制备SAEW。向2 L自来水中加入10 g NaCl和2 mL质量分数36%的HCl，启动装置在10 A、220 V的条件下电解，随着电解时间的增加，SAEW中有效氯浓度增加。分别制备100、200、300和400 mg/L不同有效氯浓度的SAEW，添加稀盐酸调节pH为5.5～6.5备用，设备原理图如图1。有效氯检测计（日本KRK笠原理化工业，型号：RC-3F，测量范围：0～300 mg/L）用于检测SAEW的有效氯浓度，超过测量范围的经倍数稀释后进行测定。酸碱度计（中国台湾衡欣，型号：AZ8601）用于测定SAEW的pH值和ORP值。

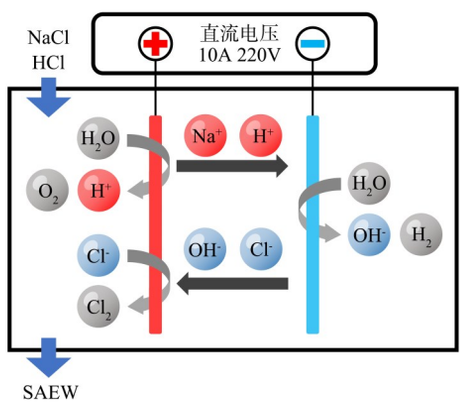


图1　微酸性电解水生产装置（Anywhere-320w）原理图

Fig. 1　Schematic diagram of SAEW production system

牛粪含水率采用电热鼓风干燥箱（上海一恒科学仪器有限公司，型号：DHG-9030）烘干法测量。奶牛乳房炎典型致病菌检测采用平板计数法[25]。大肠杆菌采用麦康凯培养基（HB6238，青岛海博生物）在37 ℃恒温培养箱中培养24 h，生长粉红色菌落；链球菌采用改良爱德华琼脂培养基（HB8706，青岛海博生物）在37 ℃恒温培养箱中培养24 h，生长白色菌落；金黄色葡萄球菌采用Baird-Parker琼脂基础培养基（HB4115，青岛海博生物）在37 ℃恒温培养箱中培养48 h，生长黑色菌落；克雷伯菌采用麦康凯肌醇阿东醇羧苄青霉素琼脂基础培养基（HB8758，青岛海博生物）在37 ℃恒温培养箱中培养24 h，生长紫红色菌落。在不同的稀释梯度平板中选取菌落数在30～300进行计数，菌落计数结果以菌落数的对数表示，即lg（CFU/g），计算公式如式（1）所示。

$$N = \lg n/A \tag{1}$$

式中：N为菌落计数结果（lg（CFU/g）），n为平板中

菌落总数，A为稀释倍数。

2 结果与分析

2.1 SAEW杀菌效果研究

2.1.1 SAEW理化性质

表1为不同有效氯浓度SAEW的pH值和氧化还原电位。随着电解时间的增加，SAEW中的有效氯浓度增加，不同处理组ORP在900 mV左右波动，是制备电解水的最佳条件。不同有效氯浓度的SAEW其pH在6.0左右波动，刘勇等[26]研究了pH值对SAEW次氯酸消毒剂中次氯酸含量和有效氯浓度的影响，结果表明，pH值对有效氯浓度的含量无影响。因此，选择6.0作为pH因素的中间编码水平，以期验证SAEW的使用效果。

表1 微酸性电解水的理化性质

Table 1 Physicochemical properties of SAEW

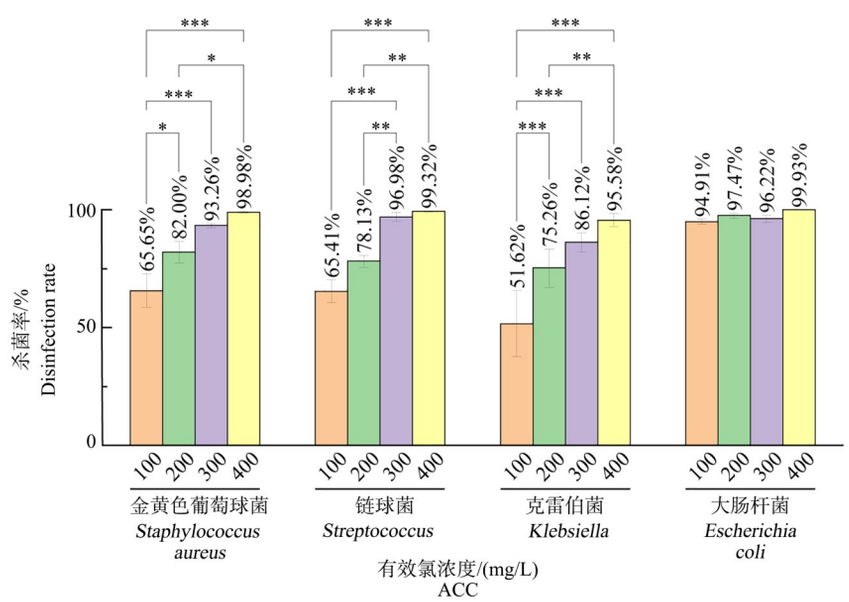
试验组 Test No.	有效氯浓度/(mg/L) ACC	pH	氧化还原电位/mV ORP
1	101±2	6.11±0.02^{c}	900.7±2.5^{a}
2	201±3	6.13±0.02^{c}	897.7±5.1^{a}
3	301±5	6.04±0.03^{b}	912.7±4.9^{bc}
4	400±2	5.93±0.03^{a}	919.0±4.4^{bc}

注：表中所列数值为3次试验数据的平均值±标准差，不同字母表示同列内数值存在显著性差异（$P<0.05$）。

Note: The values listed in the table are the mean ± standard deviation of the data from three experiments. Different letters indicate that there are significant differences between the values in the same column ($P<0.05$).

2.1.2 杀菌效果检验

对杀菌24 h后的4种典型奶牛乳房炎致病菌杀菌率进行显著性分析结果如图2所示。大肠杆菌对SAEW的耐受性最低，在ACC 100 mg/L处理24 h后杀菌率已达到94%以上，ACC变化对大肠杆菌的杀灭效果影响不显著，而其他3种致病菌对ACC



*表示不同处理间差异显著（$P<0.05$），**表示不同处理间差异非常显著（$P<0.01$），***表示不同处理间差异极显著（$P<0.001$）

* indicates a significant difference between treatments ($P<0.05$), ** indicates a highly significant difference ($P<0.01$), and *** indicates an extremely significant difference ($P<0.001$).

图2 不同有效氯浓度对各乳房炎致病菌杀菌率

Fig. 2 Bactericidal rates of various mastitis pathogens at different ACC

的响应趋势较为相似。王加强等[27]指出，有机物载体易影响SAEW的杀菌效果，蛋白质和氨基酸能与SAEW结合形成稳定性较高的氯胺，其释放游离氯缓慢进而影响消毒速率。本研究中致病菌负载载体为牛粪，一定程度上影响了SAEW的消毒速率。ACC 300 mg/L是杀菌效果发生显著性变化的拐点，对于金黄色葡萄球菌、链球菌、克雷伯菌，当ACC低于300 mg/L时，相同致病菌在不同ACC处理组间杀菌率差异显著且杀菌率较低，而ACC在300 mg/L及以上时，其变化对杀菌率没有显著性影响。在处理24 h后，ACC在300 mg/L及以上的试验组中除克雷伯菌外，其他3种致病菌杀灭率均已达到93%以上，表明此时已达到较好的杀菌效果；在ACC为400 mg/L时，除克雷伯菌外其余3种菌杀灭率均达到98%以上。因此，后续响应面试验分别选用24 h和300 mg/L作为处理时间和ACC两因素的中间编码水平。

2.2　基于响应面优化SAEW杀灭乳房炎致病菌

2.2.1　响应面结果与模型拟合

使用Box-Behnken试验方案设计和结果如表2所示。响应面共设计17组试验，依据表格中试验条件，测定4种典型奶牛乳房炎致病菌含量，即各响应值大小。

利用Design-Expert 10软件对试验结果进行拟合，得到金黄色葡萄球菌含量(a)、链球菌含量(b)、克雷伯菌含量(c)与大肠杆菌含量(d)对微酸性电解水pH(A)、有效氯浓度(B)和杀菌时间(C)的回归模型方程见式(2)～(5)，通过方程可以反映交互作用对杀菌效果的影响。该模型适用于电解法制备微酸性电解水，应用于健康牛只消毒场景。

$$a = 6.16 + 0.23A - 0.66B - 0.05C + 0.2AB + 0.11AC - 0.12BC + 0.038A^2 - 0.509B^2 - 0.105C^2 \quad (2)$$

$$b = 5.72 + 0.42A - 0.23B - 0.16C + 0.14AB - 0.059AC - 0.099BC + 0.24A^2 + 0.10B^2 + 0.25C^2 \quad (3)$$

$$c = 5.46 + 0.24A - 0.54B - 0.26C + 0.06AB - 0.12AC - 0.095BC + 0.16A^2 + 0.2B^2 + 0.049C^2 \quad (4)$$

$$d = 5.87 + 0.4A - 0.56B - 0.39C - 0.19AB - 0.33AC - 0.04BC - 0.21A^2 - 0.33B^2 - 0.036C^2 \quad (5)$$

试验采用拟合优度检验(R^2)评估模型的显著性，各响应值的回归模型方差分析如表3所示。R^2判定系数反映了响应面与真实值之间的一致程度，取值范围0～1，数值为1表示完全一致[28-29]。针对每个因素在每个模型中的显著性观察P值，若$P<0.5$，表明该因子显著，反之则不显著，若$P<0.01$，则表明该因子非常显著[30-31]。由表3可知，所有的模型$P<0.5$，表明回归效果显著；失拟项的$P>0.5$，即失拟项并不显著，说明回归模型的拟合效果较好。综上所述，可以使用回归方程来代替实际数据点进行试验结果的分析。

2.2.2　因素贡献率对响应结果的影响分析

各因素对模型的影响程度可以由贡献率K值体现，K越大对模型的影响程度越大，其计算如式(6)所示[32]。

$$\delta = \begin{cases} 0 & F \leqslant 1 \\ 1 - \dfrac{1}{F} & F > 1 \end{cases}$$

$$K_{x_i} = \delta_{x_i} + \frac{1}{2}\sum\nolimits_{j=1、2、3} \delta_{x_i x_j} + \delta_{x_i^2} \quad i = 1、2、3\ i \neq j \quad (6)$$

式中：F为回归方程中各回归项F值；δ为回归项对F值的考核值；K_{x_i}为各因素的贡献率。

各因素对各响应值的贡献率计算结果如表4所示。对于金黄色葡萄球菌和克雷伯菌，ACC贡献率最大，pH次之；而链球菌和大肠杆菌，pH贡献率最大，ACC次之，处理时间对所有响应值的贡献率均最小。这意味着在杀菌处理中，ACC是影响金黄色葡萄球菌和克雷伯菌杀灭率的主要因素，pH是影响链球菌和大肠杆菌杀灭率的主要因素，处理时间对4种典型致病菌杀灭率影响最小。

2.3　各交互因素对不同奶牛乳房炎致病菌杀灭效果影响规律分析

响应图可更直观地看出各因素的影响情况，便于找出最优范围。利用Design-Expert软件分别绘制pH、ACC、杀菌时间对4种致病菌杀灭率响应值交互作用的三维响应图。

2.3.1　金黄色葡萄球菌

各因素交互作用对金黄色葡萄球菌含量的影响如图3所示。图3(a)为处理时间位于中心水平(24 h)时pH与ACC对金黄色葡萄球菌含量的交互作用响应面图。当ACC处于低编码水平时响应值不受pH变化影响，仅在中高水平下随着pH减小而减小，响应值随着ACC编码水平增大先稳定后减

表 2 Box-Behnken试验方案设计和结果

Table 2 Experimental design and results of Box-Behnken

No.		A：pH	B：有效氯浓度/（mg/L） ACC	C：处理时间/h Time	a	b	c	d
编码水平 Code	−1	5.5	200	12				
	0	6.0	300	24				
	1	6.5	400	36				
1		−1	−1	0	6.19	5.94	6.23	5.11
2		1	−1	0	6.40	6.50	6.44	6.28
3		−1	1	0	4.57	5.34	5.08	4.78
4		1	1	0	5.59	6.46	5.53	5.18
5		−1	0	−1	6.01	5.80	5.58	5.35
6		1	0	−1	6.09	6.78	6.22	6.85
7		−1	0	1	5.88	5.76	5.14	5.08
8		1	0	1	6.40	6.50	5.73	5.24
9		0	−1	−1	6.29	6.52	6.47	6.54
10		0	1	−1	5.10	6.13	5.54	5.09
11		0	−1	1	6.23	6.22	6.07	6.01
12		0	1	1	4.57	5.44	4.76	4.40
13		0	0	0	6.30	5.80	5.41	5.96
14		0	0	0	6.02	5.62	5.38	5.91
15		0	0	0	6.28	5.76	5.51	5.64
16		0	0	0	6.03	5.67	5.53	5.81
17		0	0	0	6.18	5.77	5.47	6.05

小，与两因素交互影响作用下变化趋势相同，ACC在两因素交互作用中发挥主要作用。图3(b)为ACC位于中间水平（300 mg/L）时处理时间与pH的交互作用响应面图。响应值随处理时间编码水平增大先增大后减小，随pH编码水平增大逐渐增大，交互影响作用下响应值逐渐增大，处理时间的延长带来的杀菌效果增益无法超越甚至平衡pH增大带来的负增益，即pH在两因素交互作用中发挥主要作用。图3(c)为pH位于中间水平（6.0）时ACC和处理时间对金黄色葡萄球菌含量的交互作用响应面图。在ACC处于低编码水平时处理时间的水平增大响应值仍保持相对稳定，仅在中高水平随着处理时间的编码水平含量逐渐下降，ACC增大响应值先稳定后减小，交互影响作用下金黄色葡萄球菌含量先稳定后减小，ACC在两因素交互作用中发挥主要作用。图3(a)和图3(c)的变化规律相似，都存在一定稳定区间，这与贡献率大小关系相对应，当贡献率差值大于1时，存在稳定区间，在这个区间内响应值几乎只受贡献率大的因素影响。综上所述，在对金黄色葡萄球菌杀灭交互作用中ACC是主要因素，pH次之。柳雅馨[33]在SAEW失活金黄色葡萄球菌机制研究中指出，SAEW可破坏细胞形态，细胞表面出现褶皱以及破碎，胞内抗氧化酶活性大多降低，对过氧化物的分解和清除能力下降至细胞死亡。

2.3.2 链球菌

各因素交互作用对链球菌含量的影响如图4所示。由表4可知，3因素对于响应面值贡献率差值小于0.2，可能在某些编码区间交互作用影响相当甚至表现出与贡献率大小相反的显著影响，响应面图可以很好地对其进行验证。图4(a)为处理时间位于中心水平（24 h）时pH与ACC对链球菌含量的交互作用响应面图。随着ACC编码增大响应值逐渐下降，随着pH的增大响应值逐渐增大，交互影响作

表 3　各响应值的回归模型方差分析

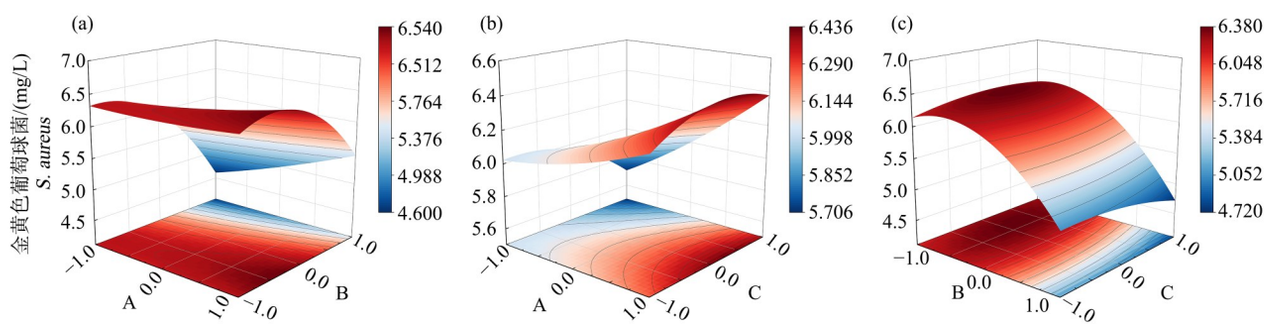
Table 3　ANOVA for the regression models of each response value

方差来源 Source of variation	金黄色葡萄球菌 *S. aureus*				链球菌 *Streptococcus*				克雷伯菌 *Klebsiella*				大肠杆菌 *E. coli*			
	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	*F* 值 *F* value	*P* 值 *P* value	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	*F* 值 *F* value	*P* 值 *P* value	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	*F* 值 *F* value	*P* 值 *P* value	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	*F* 值 *F* value	*P* 值 *P* value
模型	5.34	9	19.44	0.000 4	2.79	9	18.60	0.000 4	3.68	9	41.71	＜0.000 1	6.15	9	10.21	0.002 9
A	0.420 9	1	13.79	0.007 5	1.44	1	86.05	＜0.000 1	0.442 9	1	45.21	0.000 3	1.30	1	19.49	0.003 1
B	3.47	1	113.75	＜0.000 1	0.412 7	1	24.72	0.001 6	2.31	1	235.84	＜0.000 1	2.43	1	36.34	0.000 5
C	0.020 2	1	0.661 6	0.442 8	0.215 5	1	12.91	0.008 8	0.560 8	1	57.25	0.000 1	1.14	1	17.04	0.004 4
AB	0.161 6	1	5.29	0.054 9	0.077 0	1	4.61	0.068 8	0.014 6	1	1.49	0.262 2	0.148 2	1	2.22	0.180 2
AC	0.046 4	1	1.52	0.257 3	0.014 0	1	0.841 1	0.389 6	0.000 4	1	0.043 9	0.840 1	0.448 9	1	6.71	0.035 9
BC	0.055 5	1	1.82	0.219 7	0.038 8	1	2.32	0.171 2	0.036 2	1	3.70	0.095 8	0.000 9	1	0.0135	0.910 9
A^2	0.006 0	1	0.195 0	0.672 1	0.236 1	1	14.14	0.007 1	0.104 4	1	10.66	0.013 8	0.196 0	1	2.93	0.130 7
B^2	1.09	1	35.71	0.000 6	0.042 6	1	2.55	0.154 3	0.171 8	1	17.54	0.004 1	0.433 2	1	6.48	0.038 4
C^2	0.046 1	1	1.51	0.258 8	0.266 4	1	15.96	0.005 2	0.010 5	1	1.07	0.335 6	0.003 4	1	0.050 2	0.829 1
残差 Residual	0.213 7	7			0.116 9	7			0.068 6	7			0.468 3	7		
失拟项 Lack of fit	0.142 4	3	2.66	0.183 9	0.092 5	3	5.07	0.075 3	0.052 7	3	4.42	0.092 6	0.369 8	3	5.00	0.076 9
纯误差 Pure error	0.071 3	4			0.024 3	4			0.015 9	4			0.098 5	4		
校正总计 Corrected total	5.55	16			2.91	16			3.75	16			6.62	16		

表 4 响应面 3 因素对 4 种乳房炎致病菌贡献率分析

Table 4 Calculated contribution rates of three factors to four mastitis-causing pathogens based on response surface analysis

病菌 Pathogens	各因素贡献率/% Contribution rate of each factor			贡献率 Contribution rate
	A：pH	B：有效氯浓度 ACC	C：处理时间 Time	
金黄色葡萄球菌 *S. aureus*	1.504	2.593	0.734	B＞A＞C
链球菌 *Streptococcus*	2.309	2.244	2.145	A＞B＞C
克雷伯菌 *Klebsiella*	2.048	2.467	1.412	B＞A＞C
大肠杆菌 *E. coli*	2.307	2.092	1.367	A＞B＞C



A 为 pH，B 为有效氯浓度，C 为处理时间。pH 的变化范围为－1（5.5）到 1（6.5），有效氯浓度的变化范围为－1（200 mg/L）到 1（400 mg/L），处理时间的变化范围为－1（12 h）到 1（36 h），纵坐标为两因素交互作用下致病菌含量预测值。下同。

A means pH, B means ACC, and C means treatment time. The pH value ranged from －1（5.5）to 1（6.5）, the ACC ranged from －1（200 mg/L）to 1（400 mg/L）, and the treatment time ranged from －1（12 h）to 1（36 h）. The vertical axis was the predicted value of pathogenic bacteria content after the interaction of the two factors. The same below.

（a）有效氯浓度与 pH 交互作用响应面图；（b）处理时间与 pH 交互作用响应面图；（c）处理时间与有效氯浓度交互作用响应面。

（a）Surface of the interaction between ACC and pH；（b）Surface of the interaction between time and pH；（c）Surface of the interaction between time and ACC.

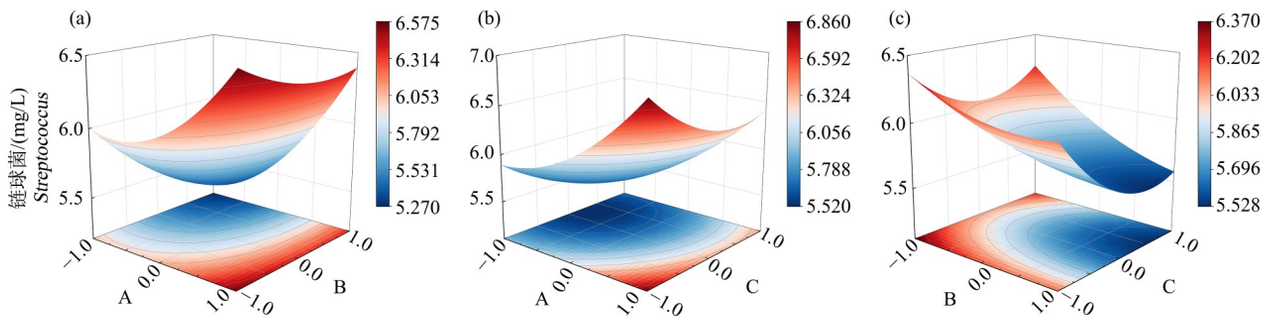
图 3 因素交互作用对金黄色葡萄球菌含量的影响

Fig. 3 Factor interaction for *S. aureus*

用下链球菌含量先减小后增大，低编码水平下 ACC 对响应值影响更显著，高编码水平反之，而 pH 轴方向切面上表现出更大的斜率，总的来说 pH 在两因素交互作用中影响更高。表 4 中 pH 和 ACC 贡献率相近，由于贡献率表示对响应结果影响的平均水平，因此在部分编码水平可能呈现影响效果与贡献率相反。图 4（b）为 ACC 位于中间水平（300 mg/L）时处理时间与 pH 的交互作用响应面图。pH 编码水平的增大响应值逐渐增大，处理时间编码水平的增大响应值先减小后增大，交互作用影响下响应值逐渐增大，在两因素低编码水平响应值增长速度缓慢甚至平稳，即低编码水平两因素影响效果相当，总体来说 pH 在两因素交互作用中影响更大。图 4（c）为 pH 位于中间水平（6.0）时 ACC 和处理时间对链球菌含量的交互作用响应面图。处理时间编码水平增加响应值先减小后增大，ACC 增大响应值逐渐减小，交互影响作用下链球菌含量逐渐减小，在低编码水平表现出协同作用，但处理时间轴方向切面上的斜率更大，此时处理时间影响作用更大，高编码水平响应值变化受 ACC 影响更显著，总体上 ACC 在两因素交互作用中影响更大。综上所述，对链球菌杀灭交互作用中 pH 影响最显著，ACC 次之，且符合贡献率大小规律。

2.3.3 克雷伯菌

各因素交互作用对克雷伯菌含量的影响如图 5 所示。图 5（a）为处理时间位于中心水平（24 h）时



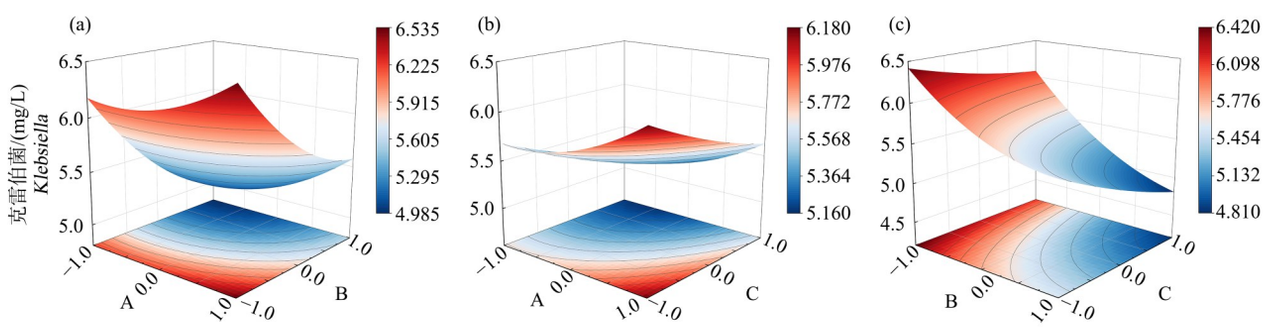
(a)有效氯浓度与pH交互作用响应面图；(b)处理时间与pH交互作用响应面图；(c)处理时间与有效氯浓度交互作用响应面。

(a) Surface of the interaction between ACC and pH; (b) Surface of the interaction between time and pH; (c) Surface of the interaction between time and ACC.

图4　因素交互作用对链球菌含量的影响

Fig. 4　Factor interaction for *Streptococcus*

pH与ACC对链球菌含量的交互作用响应面图。随着ACC编码水平增大响应值逐渐减小，随着pH编码水平增大含量逐渐增大，交互作用下含量逐渐减小，ACC在两因素交互作用中发挥主要作用。图5(b)为ACC位于中间水平(300 mg/L)时处理时间与pH的交互作用响应面图。处理时间编码水平增大响应值逐渐下降，pH编码水平增大使响应值先减小后增大，交互作用下克雷伯菌含量先减小后增大，pH在两因素交互作用中发挥主要作用。图5(c)为pH位于中间水平(6.0)时ACC和处理时间对链球菌含量的交互作用响应面图。处理时间和ACC都表现出随着编码水平的增大克雷伯菌含量逐渐下降，在ACC轴切面方向上表现出更快的变化，即ACC在两因素交互作用中发挥主要作用。综上所述，在对克雷伯菌杀灭交互作用中ACC影响最显著，pH次之。



(a)有效氯浓度与pH交互作用响应面图；(b)处理时间与pH交互作用响应面图；(c)处理时间与有效氯浓度交互作用响应面。

(a) Surface of the interaction between ACC and pH; (b) Surface of the interaction between time and pH; (c) Surface of the interaction between time and ACC.

图5　因素交互作用对克雷伯菌含量的影响

Fig. 5　Factor interaction for *Klebsiella*

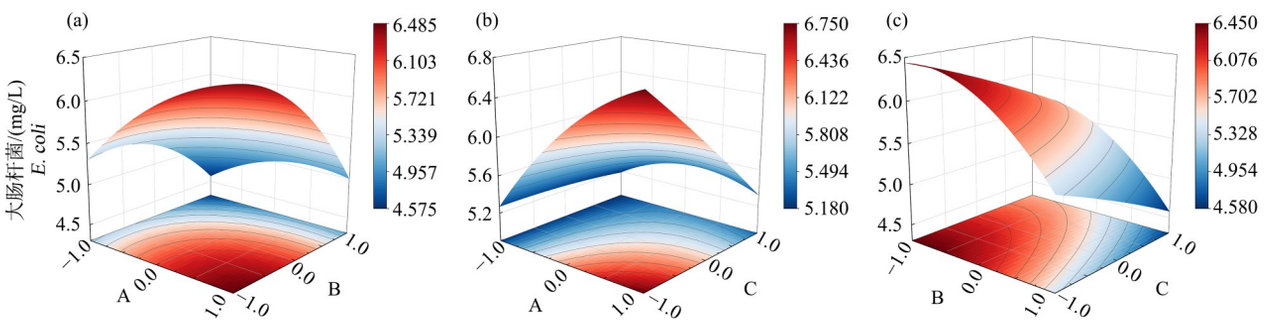
2.3.4　大肠杆菌

各因素交互作用对大肠杆菌含量的影响如图6所示。图6(a)为处理时间位于中心水平(24 h)时pH与ACC对大肠杆菌含量的交互作用响应面图。ACC编码水平的增大响应值先增大后快速减小，pH编码水平的增大响应值增大速度逐渐变缓，交互作用下响应值先增大后减小，在高编码水平下ACC对响应值影响显著，从响应值变化绝对值看，pH在两因素交互作用中发挥主要作用。图6(b)为ACC位于中间水平(300 mg/L)时处理时间与pH的交互作用响应面图。pH编码水平的增大响应值逐渐增大，处理时间编码水平的增大响应值逐渐减小，交互作用影响下响应值先增大后减小，在低编码水平时pH对响应值影响显著，高编码水平时相反，在pH轴方向切面上变化斜率的绝对值更大，总体上来说pH在两因素交互作用中发挥主要作用。图6(c)为

pH位于中间水平(6.0)时ACC和处理时间对链球菌含量的交互作用响应面图。两者交互作用对大肠杆菌的影响与克雷伯菌相似,ACC在两因素交互作用中发挥主要作用。综上所述,在对大肠杆菌杀灭交互作用中pH影响最显著,ACC次之。

2.4 最优条件的选取及验证

在 Design Expert 10 的 Optimization 模块的 Numerical 界面可以根据设定的要求选取最优解条件并做出一定可取性的预测,以实现4种致病菌含量最小化为目标,设定各因素的约束范围如表5。



(a)有效氯浓度与pH交互作用响应面图;(b)处理时间与pH交互作用响应面图;(c)处理时间与有效氯浓度交互作用响应面。

(a) Surface of the interaction between ACC and pH; (b) Surface of the interaction between time and pH; (c) Surface of the interaction between time and ACC.

图6 因素交互作用对大肠杆菌的影响

Fig. 6 Factor interaction for *E. coli*

表5 微酸性电解水对牛粪杀菌效果响应面试验约束条件

Table 5 Experimental constraints on the bactericidal effect of SAEW

名称 Name	设计要求 Requirement	最低值/lg(CFU/g) Minimum	最高值/lg(CFU/g) Maximum	权重 Significance
A:pH	范围内	5.5	6.5	1
B:有效氯浓度/(mg/L) ACC	范围内	200	400	1
C:时间/h Time	范围内	12	36	1
金黄色葡萄球菌 *S. aureus*	最小值	4.57	6.40	1
链球菌 *Streptococcus*	最小值	5.34	6.78	1
克雷伯菌 *Klebsiella*	最小值	4.76	6.47	1
大肠杆菌 *E. coli*	最小值	4.4	6.85	1

依据表5的设计要求分别获得若干组SAEW杀菌参数,将预测给出的所有组合按照有效氯浓度大小排序后,选取有效氯浓度最低的组别进行试验验证,以期获得最经济有效的杀菌参数。表6为最优解组合及其所得的预测值与验证试验获得的实际值的比较。

验证试验显示,根据最优解得到的SAEW杀菌参数对牛粪杀菌后,链球菌、克雷伯菌、大肠杆菌3种奶牛乳房炎致病菌无检出,金黄色葡萄球菌的含菌量降至(3.80±0.17) lg(CFU/g),杀菌率为99.95%,杀菌效果显著。

3 讨 论

3.1 SAEW对致病菌的杀菌效果与差异性分析

本研究已经证实SAEW作为一种绿色消毒剂,在应用于处理牛粪复杂基质时,对典型奶牛乳房炎

表 6　验证试验设计及结果

Table 6　Verification test design and results

类别 Category	pH	有效氯浓度/（mg/L） ACC	时间/h Time	金黄色葡萄球菌数量/lg（CFU/g） *S. aureus*	链球菌数量/lg（CFU/g） *Streptococcus*	克雷伯菌数量/lg(CFU/g) *Klebsiella*	大肠杆菌数量/lg(CFU/g) *E. coli*
预测值 Predicted value	5.50	374.27	33.75	4.78	5.34	4.82	4.72
实际值 Actual value	5.50	374	34	3.80±0.17	0	0	0
对照组 Control group				7.13±0.12	7.10±0.07	7.37±0.08	7.20±0.17

致病菌具有显著的杀菌效果，研究结果与吕桂芬等[21]的体外杀菌试验结论一致。SAEW 对革兰氏阳性菌（如金黄色葡萄球菌）和革兰氏阴性菌（如大肠杆菌）均具有高效的杀菌能力，然而不同致病菌对 SAEW 的敏感性存在明显差异，具体表现为大肠杆菌表现出最高的敏感性，而克雷伯菌的耐受性最强，典型致病菌间杀菌效果差异可能与致病菌的细胞结构有关，这与 Du 等[14]的研究结果一致。革兰氏阴性菌的细胞壁虽含有脂多糖层[34]，但 SAEW 的主要活性成分次氯酸分子量小且呈电中性，可有效穿透细胞壁[35]，迅速破坏其内部结构。而克雷伯菌常具有荚膜结构[36]，在牛粪内有机物包裹下提供额外的物理保护[37]，从而降低了 SAEW 的渗透作用。在牛粪消毒或 RMS 实际生产与应用中，可将克雷伯菌作为消毒效果的关键评估指标，以确保垫料的生物安全性。

3.2　各因素贡献率与交互作用对杀菌工艺的指导意义

通过响应面法分析发现，杀菌效果的主导因素因目标致病菌的不同而异。对于金黄色葡萄球菌和克雷伯氏菌，有效氯浓度（ACC）是关键因素，这对应 SAEW 的杀菌机理依赖于有效氯成分攻击和破坏致病菌细胞的保护屏障[38]。而对于链球菌和大肠杆菌，pH 值的贡献率超过了 ACC。这可能是由于 pH 值直接影响 SAEW 中次氯酸（HClO）与次氯酸根（ClO^-）的平衡，在更接近次氯酸 pKa 值（约 7.5）的酸性环境下（本研究 pH 5.5～6.5），HClO 所占比例更高，其杀菌效力远强于 ClO^-[39]。因此，在实际应用中，通过适当降低 pH 值来提升单位 ACC 的杀菌效率，可能成为优化成本效益的有效策略。此外，链球菌模型中各因素贡献率差值极小（＜0.2），表明各因素间存在显著的协同。在实际生产环境中，不能简单地依赖单一参数的调整，而需综合考虑 pH、ACC 和处理时间的协同配置，才能达到最佳且稳定的杀菌效果。

3.3　应用潜力与面临挑战

本研究通过响应面法优化出最佳工艺参数（pH 5.5，ACC 374 mg/L，处理时间 34 h），在验证试验中取得了极佳的杀菌效果，链球菌、克雷伯菌、大肠杆菌均未检出，金黄色葡萄球菌杀灭率达 99.95%，相较于刘菊莲等[11]报道的漂白粉、生石灰等传统消毒剂存在抑制谱窄、效果不稳定的问题，SAEW 展现出广谱、高效且无有害残留的优势，充分证明了 SAEW 用于牛粪消毒和 RMS 安全生产与应用的可行性，更符合畜牧业绿色可持续发展的要求。

然而，将 SAEW 技术从实验室推广至牧场规模化 RMS 生产仍面临挑战。首先，RMS 的高有机物含量会消耗有效氯可能削弱杀菌作用，因此需保证 SAEW 与底物的充分混合与均匀喷施。其次，SAEW 的稳定性尤其是有效氯的衰减以及大规模制备、储存和使用的成本效益需要进一步评估。未来研究可聚焦 SAEW 与好氧发酵等生物处理工艺的联用，利用生物产热降低粪污湿度并初步降解有机物，再辅以 SAEW 进行终端消毒，有望在保证安全的同时进一步降低运营成本。

4　结　论

本研究创新性地构建了 SAEW 应用于牛粪基质中消杀典型乳房炎致病菌的验证与优化试验，通过单因素试验与响应面优化试验，系统验证了 SAEW 对典型乳房炎的杀菌效果，并确立了实现牛粪无害化处理的最佳工艺参数，主要结论如下：

1)随着有效氯浓度的增加,SAEW对牛粪的杀菌效果增强,除克雷伯菌外,对3种乳房炎典型致病菌在ACC 300 mg/L处理24 h后杀菌率均达到93%以上,ACC 400 mg/L杀菌24 h后杀菌率达到98%以上,对克雷伯菌在ACC 400 mg/L处理24 h后杀菌率达到95%,ACC大于300 mg/L后其浓度变化对杀菌率无显著性影响。

2)以金黄色葡萄球菌和克雷伯菌含量为响应值各因素贡献能力表现相同,即贡献值有效氯浓度>pH>杀菌时间;以链球菌和大肠杆菌含量为响应值各因素贡献能力表现相同,即贡献值pH>有效氯浓度>杀菌时间。链球菌的各因素贡献值差值小于0.2,存在交互影响能力与贡献值大小相反的情况,而金黄色葡萄球菌的各因素间差值大于1,存在单个因素决定整个交互作用的区间。

3)通过响应面分析法,得到最优杀菌工艺为:微酸性电解水pH值为5.5、有效氯浓度为374 mg/L,杀菌时间为34 h,在此条件下杀菌后牛粪中金黄色葡萄球菌含量为3.80±0.17 lg(CFU/g),杀菌率为99.95%,其他3种致病菌无检出,SAEW具有粪便消毒的潜力,可以作为绿色杀菌剂参与RMS生产,提高杀菌速率。

4)SAEW具有制备简单、杀菌广谱性强、杀菌效果显著、使用后无残留等优点,是牛场中理想的绿色杀菌剂。未来研究可进一步拓展实际工程应用中的多变量参数协同优化,重点攻克多元基质与复杂环境因子对消杀效能的干扰难题,为乳业的绿色可持续发展提供坚实的技术支撑。

参考文献 References

[1] 王乃健,于春凤,陈勇,管圣昌,高德峰. 粪污循环利用技术在奶牛场的应用:以潍坊市寒亭区为例[J]. 中国乳业,2025(1):25-29
Wang N J, Yu C F, Chen Y, Guan S C, Gao D F. Application of manure recycling technology in dairy farms-Taking hanting district of Weifang city as an example[J]. *China Dairy*, 2025(1): 25-29 (in Chinese)

[2] 柴晓娟,张晶,顾欣,苏小粉,张昱. 规模化养牛场粪污资源化利用研究进展[J]. 农业科学研究,2025,46(1):32-40
Chai X J, Zhang J, Gu X, Su X F, Zhang Y. Research progress on the resource utilization of manure from large-scale cattle farms[J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2025, 46(1): 32-40 (in Chinese)

[3] 杜云,王盼柳,王斌圣,段娜,施正香,张源辉,宋家西. 牛粪再生垫料生产过程中物料特性及致病菌变化[J]. 农业工程学报,2020,36(18): 197-203
Du Y, Wang P L, Wang B S, Duan N, Shi Z X, Zhang Y H, Song J X. Changes of material characteristics and pathogens in producing process of recycled manure solids [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(18):197-203 (in Chinese)

[4] 刘洋乐,孟毅,魏勇,李智星,彭夏雨. 牛粪可再生垫料(RMS)的安全制备[J]. 中国乳业,2023(2):34-39
Liu Y L, Meng Y, Wei Y, Li Z X, Peng X Y. Safe preparation of cow recycled manure solids(RMS)[J]. *China Dairy*, 2023(2): 34-39 (in Chinese)

[5] 文致远,郑鑫,王朝元,施正香,段娜. 基于文献计量的国内外牛床垫料技术研究态势分析[J]. 中国农业大学学报,2025,30(6):152-161
Wen Z Y, Zheng X, Wang C Y, Shi Z X, Duan N. Research status analysis on cow bedding technology at domestic and abroad based on bibliometrics[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(6): 152-161 (in Chinese)

[6] Rowbotham R F, Ruegg P L. Bacterial counts on teat skin and in new sand, recycled sand, and recycled manure solids used as bedding in freestalls[J]. *Journal of Dairy Science*, 2016, 99(8): 6594-6608

[7] 苗苗,成宇,张莎莎,彭夏雨,魏勇,邹阿玲. 奶牛乳房炎相关抗性基因研究进展[J]. 中国奶牛,2024(8):13-17
Miao M, Cheng Y, Zhang S S, Peng X Y, Wei Y, Zou A L. Research progress on resistance genes of dairy cow mastitis[J]. *China Dairy Cattle*, 2024(8): 13-17 (in Chinese)

[8] 董喜军. 奶牛乳房炎中草药治疗研究[J]. 中国动物保健,2025,27(12):26-27
Dong X J. Research on traditional Chinese medicine treatment for bovine mastitis[J]. *China Animal Health*, 2025, 27(12): 26-27 (in Chinese)

[9] 邢帆,肖太民,李力,范秀娟,王晓. 规模化养牛场牛床垫料再生技术与应用分析[J]. 中国动物保健,2026,28(1):96-97
Xing F, Xiao T M, Li L, Fan X J, Wang X. Analysis of regeneration technology and applications for cattle bedding in large-scale cattle farm[J]. *China Animal Health*, 2026, 28(1): 96-97 (in Chinese)

[10] Bachevska G, Beev G, Dimov D, Stancheva E, Penev T. A comparison of airborne microbial load on four housed dairy farms[J]. *Veterinary Sciences*, 2026, 13(4): 357

[11] 刘菊莲,高总元,孙嘉欣,纪立东,司海丽,王生博. 牛粪再生垫料生产过程中理化特征、致病菌变化及抑制探究[J]. 生态与农村环境学报,2025,41(9):1236-1244
Liu J L, Gao Z Y, Sun J X, Ji L D, Si H L, Wang S B. Exploration of physico-chemical characteristics, pathogenic bacteria changes and inhibition in the production process of cattle manure recycled bedding materials[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2025, 41(9): 1236-1244 (in Chinese)

[12] 马江林,木泰华,张苗. 超声波与微酸性电解水在食品杀菌保鲜中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报,2021,12(13):5244-5250
Ma J L, Mu T H, Zhang M. Research progress on application of ultrasonic and slightly acidic electrolyzed water in food sterilization and preservation[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(13): 5244-5250 (in Chinese)

[13] 刘瑾萱,马泽豪,刘敏,何曙光,石艺琦,牛际涵,张春玲. 微酸性电解水对空肠弯曲菌的杀菌效果及对鸡肉的保鲜作用[J]. 食品研究与开发,2025,46(23):31-37
Liu J X, Ma Z H, Liu M, He S G, Shi Y Q, Niu J H, Zhang C L. Sterilization effect of slightly acidic electrolytic water on *Campylobacter jejuni* and the preservation of chicken[J]. *Food Research and Development*, 2025, 46(23): 31-37 (in Chinese)

[14] Du Y L, Tian Q, Li G J, Yi J J, Hu X S, Jiang Y L. Advanced application of slightly acidic electrolyzed water for fresh-cut fruits and vegetables preservation[J]. *Food Research International*, 2024, 195: 114996

[15] 彭海青,王阳,张志豪,李保明,李成凤,郭娜. 规模鸡场湿帘循环系统添加微

酸性电解水杀菌效果研究[J]. 中国家禽,2022,44(8):73-78
Peng H Q, Wang Y, Zhang Z H, Li B M, Li C F, Guo N. Sterilization effect of adding slightly acidic electrolyzed water to wet curtain circulation systems in scale poultry farms[J]. *China Poultry*, 2022, 44(8): 73-78 (in Chinese)

[16] 郭燕燕,赵由才,宋立杰,兰兵,周涛. 微酸性电解水喷雾消毒对垃圾房生活垃圾微生物群落的影响[J]. 环境污染与防治,2023,45(3):292-299
Guo Y Y, Zhao Y C, Song L J, Lan N, Zhou T. Effects of spraying slightly acidic electrolyzed water on the microbial community of municipal solid waste in municipal solid waste storage room [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2023, 45(3): 292-299 (in Chinese)

[17] 朱峰,吴怡,蓝蔚青,谢晶. 微酸性电解水在水产品保鲜加工中的应用研究进展[J]. 包装工程,2023,44(7):149-157
Zhu F, Wu Y, Lan W Q, Xie J. Research progress on application of slightly acidic electrolyzed water (SAEW) in preservation and processing of aquatic products[J]. *Packaging Engineering*, 2023, 44(7): 149-157 (in Chinese)

[18] 蓝蔚青,刘淑婷,谢晶. 水产品保鲜方式的应用研究进展[J]. 肉类研究,2024,38(7):55-62
Lan W Q, Liu S T, Xie J. Research progress on the application of preservation techniques for aquatic products[J]. *Meat Research*, 2024, 38(7): 55-62 (in Chinese)

[19] 郑炜超,陈华,刘畅,王阳,邱凌,李保明. 栖架立体散养和微酸性电解水在蛋鸡安全生产中的应用[J]. 东北农业大学学报,2021,52(12):49-57
Zheng W C, Chen H, Liu C, Wang Y, Qiu L, Li B M. Application of new large cage aviary unit system and slightly acidic electrolyzed water in safe production of laying hens[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2021, 52(12): 49-57 (in Chinese)

[20] 石志芳,席磊,程璞,彭峰,章四新. 微酸性电解水猪场消毒效果研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2020,48(5):22-30, 41
Shi Z F, Xi L, Cheng P, Peng F, Zhang S X. Application of slightly acidic electrolyzed water (SAEW) spray disinfection in pig farm[J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2020, 48(5): 22-30, 41 (in Chinese)

[21] 吕桂芬,乌云达来,李玉坤,张学礼,赵阳,刘露. 甘油混合条件下微酸性电解水对奶牛乳房炎致病菌体外抑菌效果评价[J]. 中国乳品工业,2018,46(11):4-6,10
Lyu G F, Wuyun D L, Li Y K, Zhang X L, Zhao Y, Liu L. Evaluation of glycerol added slightly acidic electrolyzed water (SAEW) teat dipping agent for dairy cow mastitis pathogens bacteriostatic efficacy *in vitro*[J]. *China Dairy Industry*, 2018, 46(11): 4-6, 10 (in Chinese)

[22] 郝晓霞. 微酸性电解水对畜禽场环境微生物控制研究[D]. 北京:中国农业大学,2014
Hao X X. Inactivation efficiency of slightly acidic electrolyzed water on microorganisms in animal farms[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014 (in Chinese)

[23] Liao X Y, Xuan X T, Li J, Suo Y J, Liu D H, Ye X Q, Chen S G, Ding T. Bactericidal action of slightly acidic electrolyzed water against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* via multiple cell targets[J]. *Food Control*, 2017, 79: 380-385

[24] 冯思敏,廖伟先,潘杰峰,余佳浩,陈碧莲,邵平. 铁皮石斛多糖的低共熔溶剂提取工艺优化[J]. 食品工业科技,2024,45(3):218-225
Feng S M, Liao W X, Pan J F, Yu J H, Chen B L, Shao P. Optimization of deep eutectic solvent extraction process of polysaccharides from dendrobium officinale[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(3): 218-225 (in Chinese)

[25] Mori S, Kurumisawa T, Kawai M, Shinozuka Y, Kawai K. Effect of marbofloxacin and cefazolin concentrations and bacterial count on lipopolysaccharide (LPS) release by *Escherichia coli* and *Klebsiella* pneumoniae isolated from bovine clinical mastitis[J]. *Journal of Veterinary Medical Science*, 2026, 88(6): 789-797

[26] 刘勇,刘长军,王占洪,才学鹏,丁岚峰,宋铭忻. pH值对非电解微酸性次氯酸消毒剂应用中有效氯的影响观察[J]. 中国消毒学杂志,2021,38(7):484-487
Liu Y, Liu C J, Wang Z H, Cai X P, Ding L F, Song M X. The effect of pH value on available chlorine in the application of non-electrolytic slightly acidic hypochlorous acid disinfectant[J]. *Chinese Journal of Disinfection*, 2021, 38(7): 484-487 (in Chinese)

[27] 王加强,陈睿,林曼婷,王洪敏,苏裕心. 不同因素对微酸性电解水消毒效果的影响观察[J]. 中国消毒学杂志,2024,41(9):650-652
Wang J Q, Chen R, Lin M T, Wang H M, Su Y X. Observation on influencing factors affecting the disinfection effect of slightly acidic electrolyzed water[J]. *Chinese Journal of Disinfection*, 2024, 41(9): 650-652 (in Chinese)

[28] 刘子豪,刘俊芳,崔潮,张天然. 基于响应面法的二元固废地聚物配比优化试验研究[J]. 材料导报,2024,38(S2):265-271
Liu Z H, Liu J F, Cui C, Zhang T R. Experimental study on optimization of polymer ratio of binary solid waste ground based on response surface method[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(S2): 265-271 (in Chinese)

[29] 曹启坤,景昊星,李豪. 基于响应曲面法的粉煤灰泡沫混凝土配合比优化[J]. 硅酸盐通报,2024,43(4):1427-1435
Cao Q K, Jing H X, Li H. Optimization of fly ash foam concrete mix proportion based on response surface methodology[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2024, 43(4): 1427-1435 (in Chinese)

[30] 胡静,张品乐,吴磊,陶忠,贾毅. 基于响应面法的ECC基体力学性能研究与配合比优化[J]. 材料导报,2022,36(S2):165-169
Hu J, Zhang P L, Wu L, Tao Z, Jia Y. Study on mechanical properties of cementitious matrix based on response surface method and optimization of the fitting ratio[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(S2): 165-169 (in Chinese)

[31] 刘盼,肖学英,常成功,阿旦春,李颖,董金美,郑卫新,黄青,董飞,刘秀泉,文静. 基于正交试验和响应面法优化煅烧法提锂副产物制备氯氧镁水泥材料的工艺研究[J]. 材料导报,2020,34(S2):308-314
Liu P, Xiao X Y, Chang C G, A D C, Li Y, Dong J M, Zheng W X, Huang Q, Dong F, Liu X Q, Wen J. Study on the technology of preparing magnesium oxychloride cement material by calcination extraction of lithium by-product based on orthogonal experiment and response surface method[J]. *Materials Review*, 2020, 34(S2): 308-314 (in Chinese)

[32] 谢建华,张凤贤,陈学庚,韩英杰,唐炜. 弧形齿滚扎式残膜回收机的设计及参数优化[J]. 农业工程学报,2019,35(11):26-37
Xie J H, Zhang F X, Chen X G, Han Y J, Tang W. Design and parameter optimization of arc tooth and rolling bundle type plastic film residue collector [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(11): 26-37 (in Chinese)

[33] 柳雅馨. 微酸性电解水、脉冲强光和臭氧失活金黄色葡萄球菌的机制研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2021
Liu Y X, The mechanism of slightly acidic electrolyzed water, intense pulsed light and ozone inactivating *Staphylococcus aureus*[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021 (in Chinese)

[34] 王冷眉,赖美君,赵海旭,张文翔,吴范林. 月桂酸单甘油酯对常见有害致病菌

的体外抑菌效果[J]. 江西畜牧兽医杂志,2025(6):15-18
Wang L M, Lai M J, Zhao H X, Zhang W X, Wu F L. In vitro antibacterial effect of monoglycerol laurate on common harmful pathogens[J]. *Jiangxi Journal of Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2025(6): 15-18 (in Chinese)

[35] 谢诚哲,赵国萍,施园,戴英劼,陶怡恺. 微生物灭活强化杀菌反应器污泥原位减量技术研究[J/OL]. 工业水处理,1-13[2026-06-01]. DOI:10.19965/j.cnki.iwt.2025-0589
Xie C Z, Zhao G P, Shi Y, Dai Y J, Tao Y K. Study on in-situ sludge reduction technology of microbial inactivation enhanced sterilization reactor [J/OL]. *Industrial Water Treatment*, 1-13[2026-06-01]. DOI:10.19965/j.cnki.iwt.2025-0589 (in Chinese)

[36] 马云云,朱珍娥,李诗雨,丁晓华. 妊娠期高血压疾病对子代肠道菌群结构的影响[J]. 广西医学,2025,47(1):31-37
Ma Y Y, Zhu Z E, Li S Y, Ding X H. Effect of hypertensive disorder of pregnancy on the structure of intestinal flora in offspring[J]. *Guangxi Medical Journal*, 2025, 47(1): 31-37 (in Chinese)

[37] 刘宝勇,赵硕,陈曦,于皓,何志勇. 微生物修复矿山重金属污染土壤研究进展[J]. 安徽农业科学,2025,53(14):16-21
Liu B Y, Zhao S, Chen X, Yu H, He Z Y. Research progress in microbial remediation of mine soil contaminated with heavy metals[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2025, 53(14): 16-21 (in Chinese)

[38] 肖伟,常蕊. 柠檬酸调pH值对弱酸性电解水理化特性及杀虫效能的影响[J]. 长江蔬菜,2026(10):12-15
Xiao W, Chang R. Effects of pH value adjustment with citric acid on physicochemical properties and insecticidal efficacy of weakly acidic electrolyzed water[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2026(10): 12-15 (in Chinese)

[39] 王昊. 膜生物反应器NaClO膜清洗消毒副产物的生成与控制[D]. 济南:山东大学,2021
Wang H. Formation of disinfection by-products during sodium hypochlorite cleaning of fouled membranes from membrane bioreactors and control method [D]. Jinan: Shandong University, 2021 (in Chinese)

责任编辑:秦梅



第一作者简介: 文致远,中国农业大学水利与土木工程学院农业生物环境与能源工程系博士研究生。主要从事奶牛卧床垫料安全化生产与监控研究。曾获中国农业大学硕士二等奖学金、博士二等奖学金等。



通讯作者简介: 段娜,中国农业大学水利与土木工程学院教授级高级工程师、博士生导师。兼任农业农村部沼气产品及设备质量监督检验测试中心华北工作站副站长、中国农业大学(三河)教授工作站站长、《中国沼气》和*Agriculture*编委。主要从事生物质厌氧/好氧生物转化技术与强化策略、奶牛卧床垫料技术与装备、沼渣沼液安全高值化利用技术与产品等研究。主持“十三五”“十四五”国家重点研发计划课题、国家自然科学基金等多项国家级、省部级课题;授权专利13项,转化专利2项;主持农业行业标准2项,参与发布行业标准7项;发表论文80余篇,包括ESI高被引论文1篇;获得省部级奖励1项,社会力量一等奖2项,校教学成果一等奖3项。