

研究报告

五种不同紫外装置杀灭枯草芽胞杆菌和降解核酸效果的对比研究

刘娜,王亚萍,李景云,崔生辉
(中国食品药品检定研究院,北京 100050)

摘要:目的 比较5种不同紫外装置杀灭枯草芽胞杆菌和降解核酸的效果差异。方法 配制 $0.50 \times 10^6 \sim 1.0 \times 10^6$ CFU/mL浓度的枯草芽胞杆菌菌悬液,放置于距灯源5 cm处,分别经生物安全柜紫外灯、185产臭氧紫外灯、BKS-UV2016家用紫外灯管、JT8-Y30W紫外灯管和深紫外UVC-LED管照射1 min、30 s、10 s、5 s,培养24 h后比较菌落数差异。用细菌基因组核酸和PCR产物分别配制成相同浓度的溶液,放置于距灯源5 cm处,用上述5种紫外装置分别照射1 min后,用荧光定量PCR方法扩增比较Ct值,并分析有效模板浓度差异。对于能有效降解核酸的装置,参照枯草芽胞杆菌部分减少照射时间进一步分析降解情况。结果 在枯草芽胞杆菌实验中,5种紫外装置照射1 min后均能全部杀灭目标菌,当减少照射时间时,深紫外UVC-LED杀灭作用最强。在降解细菌基因组核酸和PCR产物实验中,仅深紫外UVC-LED能降解目的片段,但是降解效率会随着照射时间的减少和样品浓度的降低而减弱。结论 深紫外UVC-LED在较短时间内对枯草芽胞杆菌的杀灭效应更强,且能有效降解核酸从而解决部分PCR污染问题。

关键词:紫外线;深紫外UVC-LED;枯草芽胞杆菌;基因组;PCR产物

中图分类号:R155 文献标识码:A 文章编号:1004-8456(2024)09-0995-05

DOI:10.13590/j.cjfh.2024.09.001

Study on comparing five different UV devices in killing *Bacillus subtilis* and nucleic acid degradation

LIU Na, WANG Yaping, LI Jingyun, CUI Shenghui

(National Institute for Food and Drug Control, Beijing 100050, China)

Abstract: Objective To compare the differences of five different ultraviolet light (UV) devices in killing *Bacillus subtilis* and degrading nucleic acids. **Methods** The *Bacillus subtilis* suspensions with same concentration were placed 5 cm away from the lamp sources and irradiated by the biosafety cabinet UV lamp, 185 ozone producing ultraviolet lamp, BKS-UV2016 household ultraviolet lamp, JT8-Y30W ultraviolet lamp and deep UVC-LED for 1 min, 30 s, 10 s, and 5 s, respectively. Culture CFUs (Clone Forming Unit) were compared After 24 hours. Bacterial genome and PCR products were placed 5 cm from the lamp sources and irradiated for 1 minute by the five UV devices mentioned above. The PCR results were compared to analyse the template concentration difference. If the device degrade nucleic acids, the irradiation time was reduced to further analyze the device. **Results** In killing *Bacillus subtilis* experiment, five UV devices could kill the bacteria after irradiation for 1 minute, but deep UVC-LED had the strongest killing effect when the time was reduced. In bacterial genome and PCR product degradation experiments, only deep UVC-LED showed degradation, and the effect weakens with the decrease of irradiation time and concentration gradually. **Conclusion** Deep UVC-LED has a stronger killing effect on *Bacillus subtilis* in short time, and the device can degrade nucleic acids to solve some PCR pollution problems.

Key words: Ultraviolet light; Deep UVC-LED; *Bacillus subtilis*; Genome; PCR products

随着食品安全意识不断深入人心,人们对安全高效的新型抗菌技术越来越感兴趣^[1]。在众多消毒技术中,紫外线(Ultraviolet Light, UV)消毒因其不会破坏食品的感官品质和营养成分,无潜在化学防腐

收稿日期:2024-05-20

基金项目:科技部“国家重点研发项目”课题(2022YFF1103102)

作者简介:刘娜 女 助理研究员 研究方向为食品安全检测 E-mail: xinyiliuna@163.com

通信作者:李景云 男 主任技师 研究方向为食品安全检测 E-mail: lijingyun@nifdc.org.cn

崔生辉 男 研究员 研究方向为食品安全检测 E-mail: cuishenghui@aliyun.com

李景云和崔生辉为共同通信作者

剂毒性,并且具有成本低、操作简单等优点,而备受青睐,特别是短波紫外线(UV-C, 200~280 nm)已广泛应用于食品生产、检测等领域^[2]。随着发光二极管(Light emitting diodes, LEDs)技术的不断进步,紫外LED装置也应运而生,按发射波长分为近紫外LED(300~400 nm)和深紫外UVC-LED(200~300 nm)。这些装置因其在多个方面的巨大潜在应用价值而备受研究者关注^[3-4]。

在分子生物学实验室中,传统的紫外装置并不能消除核酸污染。目前主要通过分区形式的物理隔绝方法避免核酸污染。聚合酶链式反应(Polymerase chain reaction, PCR)是一种高度灵敏的体外扩增特定核酸片段的分子生物学技术,一旦发生污染,会导致相关工作的停滞。由于PCR操作过程中核酸污染的情况难以完全避免,因此寻找有效降解核酸片段的方法成为PCR实验室的迫切需求。本研究通过比较多种紫外装置的应用效果,旨在为更多实验室在杀灭细菌和降解核酸方面提供数据支持。

1 材料与方 法

1.1 菌株与引物

枯草芽胞杆菌CMCC(B)63501来源于中国医学细菌保藏管理中心(National Center for Medical Culture Collection, CMCC)。引物序列(5'-3')信息如下:Primer F-CAACAAGGAGCTTCAGGACA, Primer R-TTCACTGTGGTCTTGTCTTCC, Probe-FAM-TCATCGC CCTCATCGGCATTGA-BHQ。

1.2 主要试剂

PCR扩增试剂[宝生物工程(大连)有限公司];胰酪大豆胨琼脂(Tryptic soy agar, TSA)培养基(美国BD公司产品)。

1.3 主要仪器

生物安全柜(新加坡ESCO公司);深紫UVC-LED(克诺克深紫UVC-LED便携杀毒器,中国合创智能科技有限公司);JT8-Y30W紫外灯管、BKS-UV2016家用紫外灯管、185产臭氧紫外灯管;电子天平(瑞士梅特勒公司);恒温培养箱、离心机(美国赛默飞公司);基因扩增仪(定量)(美国伯乐公司);螺旋涂布仪(西班牙IUL公司)。

1.4 方 法

1.4.1 用不同紫外装置杀灭枯草芽胞杆菌

制备枯草芽胞菌 $0.50 \times 10^6 \sim 1.0 \times 10^6$ CFU/mL的菌悬液,经生理盐水1:100倍稀释后,用螺旋涂布仪E50模式涂布18块TSA平板,再分别用深紫外UVC-LED装置和生物安全柜紫外灯、185产臭氧紫外灯管、BKS-UV2016家用紫外灯管和JT8-Y30W紫外

灯管各照射1、3、5、10 s和1 min,光源与平板之间距离为5 cm,每个时间点做两个平行实验;同时以2块未经任何照射处理的TSA平板作为对照组。将上述18块TSA平板置于 $(36 \pm 1)^\circ\text{C}$ 培养 (24 ± 2) h后计数。

1.4.2 用不同紫外装置裂解基因组核酸

制备菌株基因组溶液,调节浓度为经扩增后Ct值约为20作为核酸样品。吸取2 μL 核酸样品于8联排PCR扩增管中,将样品管置于PCR仪中 95°C 加热10 min进行干燥;取干燥后的基因组样品放置于距紫外装置光源5 cm处照射1 min。同时设置不经任何照射处理的样品为阳性对照组,不加基因组核酸的样品为阴性对照组。各个样品组均设3个平行。对于按照上述条件可有效降解核酸的紫外装置,进一步更改照射时间为5、10和30 s后继续测试。

1.4.3 用不同紫外装置裂解PCR产物

制备Ct值约为20的PCR产物,用去离子水依次10倍稀释,分别吸取稀释 10^6 倍后的PCR产物2 μL 于8联排PCR扩增管中,将样品管置于PCR仪中 95°C 加热10 min进行干燥;取干燥后的PCR产物放置于距各个紫外装置光源5 cm处照射1 min。同时设置不经任何照射处理的样品为阳性对照组,不加PCR产物的样品为阴性对照组。各个样品组均设3个平行。对于按照上述条件可有效降解PCR产物的紫外装置,进一步更改照射时间为5 s、10 s和30 s后继续测试。对于减少照射时间仍可有效降解PCR产物的紫外装置,进一步探究其对不同浓度PCR产物的降解效率。

1.4.4 荧光定量PCR扩增

按照表1向样品管中加入PCR扩增成分,制备扩增体系。在荧光定量PCR仪上扩增,条件为:5 min 95°C , 30 s 95°C (变性)、30 s 58°C (退火)、40循环。

表1 PCR扩增体系成分表

名称	体积/ μL
引物(10 nmol/ μL)	上下游各1.0
探针	0.5
DNTP mix	0.5
10x Buffer	2.5
Taq酶	0.2
去离子水	20.3
总计	25.0

2 结 果

2.1 不同波长紫外装置杀灭枯草芽胞杆菌的效果

不同紫外装置照射相同浓度的枯草芽胞杆菌后,各个平板菌落数详见表2。从表中可以看出,当照射时间为1 min时,各个紫外装置均能杀灭所有菌落。当照射时间为30 s时,只有BKS-UV2016家

用紫外灯管和 185 产臭氧紫外灯管照射的平板有菌落,其他 3 种紫外装置照射的平板均没有菌落生长。当照射时间为 10、5 和 1 s 时,所有紫外装置照射后的平板均有菌落生长,但是深紫外 UVC-LED

装置照射后的平板菌落数最少;尤其是当照射 1 s 时,非 LED 装置照射后平板菌落数与对照差距均小于 10%,而深紫外 UVC-LED 装置照射后菌落数减少高达 80%。

表 2 5 种紫外装置照射枯草芽胞杆菌后菌落数(光源距平板 5 cm)

Table 2 Clone forming units after *Bacillus subtilis* irradiated by 5 different UV devices (plates 5 cm away from light sources)

紫外装置名称	照射不同时间后菌落数(CFU/皿)					对照(CFU/皿)
	1 min	30 s	10 s	5 s	1 s	
生物安全柜紫外灯	0	0	4	50	376	
185 产臭氧紫外灯管	0	1	6	66	368	
BKS-UV2016 家用紫外灯管	0	2	16	92	390	382
JT8-Y30W 紫外灯管	0	0	20	110	360	
深紫外 UVC-LED 装置	0	0	1	17	65	

2.2 不同波长紫外装置降解细菌基因组核酸的效果

不同紫外装置照射相同浓度细菌基因组核酸溶液 1 min 后,再经荧光定量 PCR 扩增,各个样品 Ct 值详见表 3。阳性对照 Ct 值为 20.62,阴性对照 >40,表明本次实验扩增体系及条件均正常。从表中可以看出,非 LED 装置照射后样品 Ct 值和阳性对照样品差异均 <1,而深紫外 UVC-LED 装置照射后样品 Ct 值和阳性对照相差约 10。

表 3 5 种紫外装置照射基因组溶液后 PCR 扩增结果(光源距管底 5 cm)

Table 3 PCR results after genome solutions irradiated by 5 different UV devices (the tube bottoms 5 cm away from light sources)

紫外装置名称	照射 1 min 后	阴性对照	阳性对照
	Ct 值	Ct 值	Ct 值
生物安全柜紫外灯	20.56		
185 产臭氧紫外灯管	20.73		
BKS-UV2016 家用紫外灯管	20.24	>40	20.62
JT8-Y30W 紫外灯管	20.48		
深紫外 UVC-LED 装置	30.56		

进一步测试深紫外 UVC-LED 装置在更短时间内裂解细菌基因组核酸的结果见表 4。阳性对照 Ct 值为 20.88,阴性对照为 >40,表明本次实验扩增体系及条件均正常。从表中可以看出,随着照射时间的延长,Ct 值在逐步增大,即扩增体系中有效模板浓度在逐步减小,但是幅度均不大。

2.3 不同波长紫外装置降解 PCR 产物的效果

不同紫外装置照射相同浓度 PCR 产物 1 min 后,再经荧光定量 PCR 扩增,各个样品 Ct 值详见表 5。阳性对照 Ct 值为 20.69,阴性对照为 >40,表明本次实验扩增体系及条件均正常。从表中可以看出,非 LED 装置照射后样品 Ct 值和阳性对照样品差异均 <1,而深紫外 UVC-LED 装置照射后样品 Ct 值和阳性对照相差约 7。

进一步测试深紫外 UVC-LED 装置在更短时间

表 4 深紫外 UVC-LED 照射细菌基因组溶液不同时间后 PCR 扩增结果(光源距管底 5 cm)

Table 4 PCR results after genome solutions irradiated by deep UVC-LED with different time (the tube bottoms 5 cm away from light sources)

照射时间	照射后 Ct 值
30 s	23.46
10 s	22.97
5 s	22.76
1 s	21.72
阳性对照	20.88
阴性对照	>40

表 5 5 种紫外装置照射相同浓度 PCR 产物后 PCR 扩增结果(光源距管底 5 cm)

Table 5 PCR results after PCR products irradiated with 5 different UV devices (the tube bottoms 5 cm away from light sources)

紫外装置名称	照射 1 min 后	阴性对照	阳性对照
	Ct 值	Ct 值	Ct 值
生物安全柜紫外灯	20.82		
185 产臭氧紫外灯管	20.22		
BKS-UV2016 家用紫外灯管	20.55	>40	20.69
JT8-Y30W 紫外灯管	20.79		
深紫外 UVC-LED 装置	27.56		

内裂解 PCR 产物的结果见表 6。阳性对照 Ct 值为 20.85,阴性对照 >40,表明本次实验扩增体系及条件均正常。从表中可以看出,随着照射时间的延长,Ct 值在逐步增大,即扩增体系中有效模板浓度在逐步减小,但是幅度均不大。

在 PCR 实验中,一般认为当 Ct 值相差约 3 时,模板浓度相差约 10 倍。依据表 6 测试结果,选择 10 s 作为照射时间,继续测试深紫外 UVC-LED 装置裂解不同浓度 PCR 产物情况,结果见表 7。在阳性对照列,随着模板稀释倍数的增加,Ct 值逐步增大,且阴性对照 >40,表明本次实验扩增体系及条件均正常。从表中可以看出,经过深紫外 UVC-LED 紫外装置照射的样品的 Ct 值均大于相同浓度的阳

表6 深紫外 UVC-LED 装置照射 PCR 产物不同时间后 PCR 扩增结果(光源距管底 5 cm)

Table 6 PCR results after PCR products irradiated by deep UVC-LED with different time (the tube bottoms 5 cm away from light sources)

照射时间(s)及对照	照射后 Ct 值
30	24.60
10	23.83
5	22.88
1	21.72
阳性	20.85
阴性	>40

表7 深紫外 UVC-LED 装置照射不同浓度 PCR 产物 PCR 扩增结果(光源距管底 5 cm)

Table 7 PCR results after different concentration PCR products irradiated by deep UVC-LED (the tube bottoms 5 cm away from light sources)

PCR 产物稀释倍数	照射 10 s 后 Ct 值	阳性对照	阴性对照
10 ²	12.69	4.91	
10 ³	14.69	7.98	
10 ⁴	17.31	11.29	
10 ⁵	19.89	14.90	>40
10 ⁶	21.05	17.97	
10 ⁷	23.15	20.62	
10 ⁸	26.93	24.41	
10 ⁹	29.15	28.12	

性对照组。随着稀释倍数的增大,照射后的样品与对应阳性对照的 Ct 值之间的差距逐渐减小。

3 讨论

紫外线可诱导 DNA 或其他生物分子损伤,从而达到杀灭微生物的效果^[1,5],这一技术在消毒领域得到了广泛应用^[6]。随着 LED 技术的持续进步,UV-LED 在多个领域,如环境^[7]、水^[8]、食品^[9]的消毒中表现出优于传统紫外线的性能^[10-11]。基于 LED 杀灭微生物的原理同样是损伤 DNA 等生物分子^[12],本实验室开展了深入研究,旨在比较不同紫外装置在杀灭细菌和降解核酸方面的效率。

本研究选取枯草芽胞杆菌作为目标菌株,该菌属于厚壁菌门,具有较强的抗逆性,能够抵御外部不良环境条件^[13-14]。实验结果表明,所有紫外装置在 1 min 内均能有效杀灭目标菌。随着照射时间的减少,深紫外 UVC-LED 装置在杀灭枯草芽胞杆菌方面的优势愈发显著。通常,紫外光源的中心波长与被照射菌株的吸收光波长越接近,菌株受到的损伤越严重^[11]。研究表明,杀灭微生物最有效的紫外波长范围为 200~280 nm^[2,15]。本研究所使用的深紫外 UVC-LED 装置,其灯珠发射光波长为 270 nm,正好处于这一有效范围内。与传统的紫外装置相比,深紫外 UVC-LED 装置具有固定波长和多灯珠聚焦的特点。传统紫外装置通常采用全角度发光,导致单

位面积的辐照强度较弱。而深紫外 UVC-LED 装置则将多个灯珠固定于装置内,通过聚焦设计,使多灯珠的辐照集中于直接照射面,从而提高了单位面积的辐照强度,加强了杀灭微生物的作用^[12]。此外,深紫外 UVC-LED 装置还具有响应速度快的特点,意味着在较短时间内可发出目标波长的光,这可能是其在短时间内更有效杀灭微生物的原因之一。

在降解基因组核酸和 PCR 产物的研究中,深紫外 UVC-LED 装置在照射 1 min 内即展现出很好的效果。具体而言,该装置能有效降解核酸片段,使得 Ct 值从约 20 显著增长至 30 和 27,即目的片段的降解效率高达 99%。目前 PCR 技术以其高灵敏度、简便操作、高效检测及高通量特性,已成为生命科学领域不可或缺的检测手段,并在食品安全、生态保护、临床诊断等多个领域得到广泛应用^[16-17]。然而,正是由于其高灵敏性,PCR 实验室一旦发生污染,可能会导致整个实验室的运作陷入瘫痪,且这种污染往往难以预防。本研究的结果表明,深紫外 UVC-LED 装置是降解核酸片段的有效工具。随着照射时间的减少,核酸降解效率虽然有所下降,但这种下降并非线性。这可能与核酸受损的机理有关,即紫外线照射时,核酸可能发生嘧啶二聚体形成、链断裂等结构变化^[18]。当装置的发射光波长与核酸的吸收光波长更接近时,核酸更容易受到损伤^[11]。此外,辐照强度越大,核酸分子内部的损伤越难以修复^[19]。值得注意的是,深紫外 UVC-LED 装置通常采用 AlGaIn 作为荧光源,这种设计使得装置能迅速且高效地通过灯珠发射出目标光,无须预热等额外处理。因此,即使在较短的照射时间内,深紫外 UVC-LED 装置也能对核酸造成损伤^[20]。

紫外光杀灭细菌或降解核酸的效果与辐照强度呈正相关,随着与光源距离的增大,被照射物受到的辐照强度会降低^[21]。例如,上文涉及到的深紫外 UVC-LED 装置在 5 cm 处强度为 58 mw,在 30 cm 处强度为 11 mw。本研究中,样品与紫外光源之间的距离均为 5 cm,明显小于推荐的作用距离(至少 30 cm),可以使样品受到较高的辐照强度,从而便于分析各个紫外装置辐照的区别。

随着科技的进步,以紫外线为代表的冷杀菌技术因不产生次级危害产物且能维持食物原有风味,正逐渐受到研究者的关注。相较之下,核酸污染的问题则一直悬而未决。本研究对 5 种不同的紫外装置进行了比较,结果显示,深紫外 UVC-LED 装置在杀灭细菌和降解核酸方面表现出色,为未来的冷杀菌技术和核酸污染处理技术的发展奠定了坚实

基础。这一发现有望为食品安全、生物实验室的清洁工作以及其他需要高效杀菌和核酸降解的领域带来进步。

参考文献

- [1] YOONTAEK O, JATUWAT S, HYOUNGMIN W, et al. Inactivation efficacy and mechanisms of wavelength-specific UV sources for various strains of *Legionella pneumophila* serogroup 1[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 907.
- [2] 郑巧,张婧,杨苗,等.非热杀菌技术在冷链生鲜食品中杀菌消毒的研究进展[J].*食品安全质量检测学报*,2023,24(11): 197-205.
ZHENG Q, ZHANG J, YANG M, et al. Research progress on non-thermal sterilization technology for sterilization and disinfection in cold chain fresh food[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2023, 24(11): 197-205.
- [3] 周秀红,戴陈伟,辛及娣,等.一种手持式深紫外线发光二极管消毒器在食(饮)具消毒中的应用效果观察[J].*中国消毒学杂志*, 2023, 40(3): 176-178.
ZHOU X H, DAI C W, XIN J D, et al. Observation on application effect of deep ultraviolet LED disinfectant in eating (drinking) utensil disinfection[J]. *Chinese Journal of Disinfection*, 2023, 40(3): 176-178.
- [4] 裘金阳.高光效紫外 LED 封装技术及其应用研究[D].武汉:华中科技大学, 2021.
QIU J Y. Research on high light efficiency of ultraviolet light-emitting diode packaging and its application[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2021.
- [5] SANDRA P R, PAUL O N, ADEFOLAWA A A, et al. Synergistic effect of UV-A and UV-C light is traced to UV-induced damage of the transfer RNA[J]. *Water Research*, 2024, 252:1-8.
- [6] ARBAB T, JAWAD A R, WILLIAM E P, et al. Elucidating the performance of UV-based photochemical processes for the removal of trace organic contaminants[J]. *Chemosphere*, 2024, 350:1-13.
- [7] ANGELA S, ALDO T, DANILO G, et al. UV-A Radiation: safe human exposure and antibacterial activity[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(9): 1-10.
- [8] WEN D, YU Y F, CHUANG C Y A, et al. Advancing sustainable seawater disinfection: Enhanced inactivation and mechanism of pulsed UV-LEDs irradiation on *Tetraselmis* sp[J]. *Environmental Pollution*, 2024, 345: 1-9.
- [9] ARTURO B S, CRISTINA B, SAJAD S, et al. Comparison of the impact of UV-light emitting diode and UV lamp at pilot-plant scale level on quality parameters and consumer perception of fresh chicken meat[J]. *Food Chemistry*, 2024, 434:1-9.
- [10] ITANI N, M. FADEL E.L. Microbial inactivation kinetics of UV LEDs and effect of operating conditions: A methodological critical analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 885: 1-27.
- [11] TANG L, LI A Z, KONG M H, et al. Effects of wavelength on the treatment of contaminants of emerging concern by UV-assisted homogeneous advanced oxidation/reduction processes[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 899: 1-14.
- [12] SCHÖBEL H, DIEM G, KIECHL J, et al. Antimicrobial efficacy and inactivation kinetics of a novel LED-based UV-irradiation technology[J]. *Journal of Hospital Infection*, 2023, 135:11-17.
- [13] IDRIS A L, LI W T, HUANG F G, et al. Impacts of UV radiation on *Bacillus* biocontrol agents and their resistance mechanisms[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2024, 40(58): 1-11.
- [14] MURATOV E, ROSENBAUM F P, FUCHS F M, et al. Multifactorial resistance of *Bacillus subtilis* spores to low-pressure plasma sterilization [J]. *Applied and Industrial Microbiology*, 2024, 90(1): 1-14.
- [15] 林岳,陈华山,陈灿和,等.深紫外发光二极管研究进展及其在杀菌消毒中的应用[J].*厦门大学学报(自然科学版)*, 2020, 59(3): 360-372.
LIN Y, CHEN H S, CHEN C H, et al. Progress in the deep-ultraviolet light-emitting diode and its application on sterilization and disinfection[J]. *Journal of Xiamen University Nature Science*, 2020, 59(3): 360-372.
- [16] SCHREMSE V, ANTONIEWICZ L, TSCHACHLER E, et al. Polymerase chain reaction for the diagnosis of herpesvirus infections in dermatology[J]. *Wien Klin Wochenschr*, 2020, 132(1): 35-41.
- [17] 刘娜,王亚萍,王学硕,等.九种核酸提取裂解剂对PCR扩增效率影响研究[J].*中国食品卫生杂志*, 2023, 35(6): 843-848.
LIU N, WANG Y P, WANG X S, et al. Study on the effect of nine nucleic acid extraction lysing reagents on PCR amplification efficiency[J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2023, 35(6): 843-848.
- [18] YIN R, DAI T, AVCI P, et al. Light based anti-infectives: ultraviolet C irradiation, photodynamic therapy, blue light, and beyond[J]. *Current Opinion in Pharmacology*, 2013, 13(5): 731-762.
- [19] MULLENDERS L H F. Solar UV damage to cellular DNA: from mechanisms to biological effects[J]. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2018, 17(12): 1842-1852.
- [20] CAMPANA R, MORONIA S, PAOLUCCIB D, et al. Efficacy of UV and UV-LEDs Irradiation Models for Microbial Inactivation Applicable to Automated Sterile Drug Compounding[J]. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2023, 899: 2389-2392.
- [21] 吴方.室内微生物污染远紫外线灭菌适用性研究[D].大连:大连理工大学, 2022.
WU F. Study on the applicability of far ultraviolet sterilization for indoor microbial contamination[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.