DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251114003
引用格式: 李斌, 肖雅洁, 何丽莉, 等. 低温氧等离子体耦合紫外技术优化螺旋藻藻泥灭菌条件[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(9): 24–31.
LI B, XIAO YJ, HE LL, *et al*. Optimization of sterilization conditions of *Spirulina platensis* slurry by cold oxygen plasma coupling ultraviolet technology [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(9): 24–31. (in Chinese with English abstract).

低温氧等离子体耦合紫外技术优化螺旋藻藻泥灭菌条件

李 斌, 肖雅洁, 何丽莉, 曹 灿, 曹润泉, 曹雷鹏*
(江西中医药大学院士工作站/药学院, 南昌 330004)

摘 要: 目的 研究低温氧等离子体(cold oxygen plasma, COP)耦合紫外(ultraviolet, UV)技术对螺旋藻藻泥微生物杀灭效果的影响, 并结合色泽、细胞破碎等参数优化灭菌条件。**方法** 调控 COP-UV 技术的功率和时间参数, 对不同质量分数的螺旋藻藻泥进行处理, 测定菌落总数、致病菌数变化, 以及藻泥色泽指标和藻蛋白溶出率。**结果** 综合灭菌效率、成本及藻细胞破裂影响, COP-UV 技术最佳灭菌条件为: 800 W (COP)和 40 W (UV)处理 200 mL 20% (*m*:*V*)藻泥 5 min, 温度最高仅 38 ℃, 其灭菌效率可达 95.66%, 且藻蛋白溶出率为 10.56%, 藻泥总色泽仅有轻微肉眼可见变化, 对 3 种致病菌杀灭顺序为: 枯草芽孢杆菌(74.86%)>大肠杆菌(61.45%)>金黄色葡萄球菌(58.53%), 其可能是致病菌细胞膜及壁的组成差异。**结论** COP-UV 技术可在对螺旋藻细胞结构损伤较小的前提下实现高效灭菌, 有效保障螺旋藻粉及相关产品的安全质量。因此, COP-UV 技术在保障热敏性产品安全质量领域具有潜在的应用前景。

关键词: 低温氧等离子体; 紫外; 螺旋藻; 灭菌; 大肠杆菌

Optimization of sterilization conditions of *Spirulina platensis* slurry by cold oxygen plasma coupling ultraviolet technology

LI Bin, XIAO Ya-Jie, HE Li-Li, CAO Can, CAO Run-Quan, CAO Lei-Peng*
(*Academician Workstation*/*College of Pharmacy*, *Jiangxi University of Traditional Chinese Medicine*, *Nanchang* 330004, *China*)

ABSTRACT: Objective To explore the effects of cold oxygen plasma (COP) coupling ultraviolet (UV) technology on microbial inactivation in *Spirulina platensis* slurry, and optimize sterilization conditions based on parameters such as color and cell fragmentation. **Methods** *Spirulina platensis* slurry with varying mass fractions was processed by adjusting the power and time of COP-UV technology and measuring changes in total bacterial count, pathogenic bacteria count, color and protein solubility. **Results** After comprehensively considering the sterilization efficiency,

收稿日期: 2025-11-14
基金项目: 江西中医药大学博士科研启动项目(2023BSZR019); 国家自然科学基金项目(82260761, 81760708)
第一作者: 李斌(1970—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为食品化学分析。E-mail: 20010260@jxutcm.edu.cn
***通信作者:** 曹雷鹏(1986—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为药食同源产品开发。E-mail: caoleipeng@jxutcm.edu.cn

cost and algal cell rupture, the optimal sterilization conditions for COP-UV technology were as follows: 200 mL 20% (*m*:*V*) algal slurry with 800 W COP and 40 W UV for 5 min treatment, the maximum temperature was only 38 ℃, the sterilization efficiency of the algal slurry reached 95.66% and the dissolution rate of algal cell protein was only 10.56%, the total color of *Spirulina platensis* slurry showed only slight visible changes. In addition, the sterilization order of COP-UV technology on 3 kinds of pathogenic bacteria was: *Bacillus subtilis* (74.86%)>*Escherichia coli* (61.45%)>*Staphylococcus aureus* (58.53%), which might be attributed to the difference in the composition of the cell membrane and wall of pathogenic bacteria. **Conclusion**　COP-UV technology can achieve effective sterilization with minimal structural damage to cells of *Spirulina platensis*, ensuring the safety and quality of *Spirulina platensis* powder and related products. Therefore, COP-UV technology will hold great potential applications in ensuring the quality and safety of heat-sensitive products.

KEY WORDS: cold oxygen plasma; ultraviolet; *Spirulina platensis*; sterilization; *Escherichia coli*

0　引　言

螺旋藻(*Spirulina platensis*)作为一种富含优质蛋白质(干重占比 50%~60%)、天然抗氧化剂、必需脂肪酸及多种微量营养素的功能性食品原料, 在营养保健品、动物饲料等领域展现出广阔应用前景[1–2]。近年来, 随着功能性食品市场的扩张, 螺旋藻藻泥(螺旋藻经采收、浓缩后的湿基产物)作为深加工原料的需求显著增加[3–4]。然而, 藻泥含水量高(大于 80%)、营养物质丰富, 易滋生细菌、霉菌及酵母菌等微生物, 导致产品腐败变质、生物活性成分降解, 甚至产生毒素(如微囊藻毒素), 不仅限制了其在食品及保健品领域的开发应用, 更对螺旋藻产业的可持续发展构成严重制约[5]。目前, 螺旋藻藻泥灭菌主要依赖热力灭菌、化学灭菌和单一物理灭菌等传统方法, 其存在显著缺陷[6]。热力灭菌易破坏藻细胞结构而导致营养物质流失[7], 化学灭菌易残留化学试剂而影响产品安全性及风味, 超声波灭菌效率低、耗时长且易导致藻泥胶体结构破坏[8]。因此, 缺乏高效、低损伤的螺旋藻藻泥灭菌技术成为螺旋藻产业发展的关键瓶颈。

低温等离子体(cold plasma, CP)技术作为新兴绿色安全高效的广谱非热灭菌技术, 可通过破坏微生物细胞膜、DNA 及酶系统, 强效杀灭革兰氏阳性菌、阴性菌及真菌, 但单独使用时灭菌覆盖面积有限[9–11]。DASAN 等[12]报道 650 W 低温空气等离子体处理 11 mL 橘子汁 2 min 可使大肠杆菌菌落总数从 6.18 lg CFU/mL 降低至 1.59 lg CFU/mL, 且气体种类显著影响灭活效率, 如空气杀菌效果低于含高比例 O_2 的改性气体(65% O_2, 30% CO_2, 5% N_2), 这与高氧环境产生的臭氧及活性氧自由基相关[13]。紫外(ultraviolet, UV)灭菌因操作简便、成本低被广泛用于螺旋藻灭菌, 但其效果受基质透光性限制。低温氧等离子体耦合紫外光(cold oxygen plasma coupling ultraviolet, COP-UV)技术通过物理场协同作用, 可实现“1+1>2”的灭菌增效, 目前已在固体食品表面灭菌中展开探索, 但针对高水分、高胶体特性的螺旋藻藻泥, 其灭菌条件(如等离子体功率、藻泥质量分数、紫外功率、处理时间等)的优化研究仍较为匮乏。

因此, 本研究构建以 O_2 为气源的 COP-UV 灭菌系统(图 1), 重点探究其对螺旋藻藻泥中菌落总数及 3 种典型食源性致病菌(大肠杆菌、枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌)的杀灭效果, 结合藻泥色泽、蛋白溶出率及重量流失率等指标优化灭菌条件, 旨在为高效低损伤的热敏性藻类灭菌装备开发提供理论依据与技术支持, 以保障螺旋藻粉及相关产品质量安全, 推动藻类产业可持续发展。

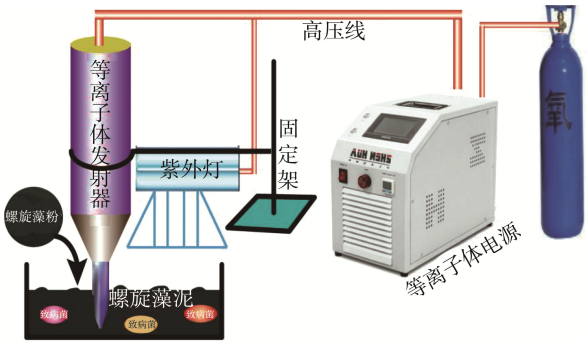


图 1　COP-UV 技术的灭菌装置

Fig.1　Sterilization device of COP-UV technology

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

螺旋藻藻泥(70%~80%水)(江西中藻生物科技有限公司); 大肠杆菌(O157:H7)、枯草芽孢杆菌(CICC 24602)、金黄色葡萄球菌(ATCC13565)(中国工业微生物菌种保藏管理中心)。

胰蛋白胨、酵母浸膏粉、牛肉膏粉、琼脂[分析纯, 华中海威(北京)基因科技有限公司]; 乙醇、叔丁醇、氯化钠、葡萄糖、氢氧化钠、盐酸(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 牛血清蛋白(分析纯, 上海源叶生物有限公司); 实验所用水均为超纯水。

1.2 仪器与设备

TS-10H 型低温氧等离子体-紫外照射装置(中国深圳通森科技自动化设备有限公司); PB-10 型 pH 计[赛多利斯科学仪器(北京)有限公司]; ME204E 型电子天平[梅特勒-托利多(上海)仪器有限公司]; ZXMP-A1150 型恒温培养箱(上海智城分析仪器制造有限公司); L4 型紫外可见分光光度计(上佑科仪器仪表有限公司); KT-80 型恒温培养摇床(常州中贝仪器有限公司); G100 型高压灭菌锅[爱安姆科学仪器(北京)有限公司]; H1-16KR 型高速冷冻离心机(湖南可成仪器设备有限公司); ALN-50S 型菌落计数器(上海昂尼仪器仪表有限公司); TS7700 型色差仪(深圳市三恩科技有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 培养基、溶液的配制

溶菌肉汤(lysogeny broth, LB)培养基(大肠杆菌及枯草芽孢杆菌): 精确配制 1%胰蛋白胨、0.5%酵母浸膏、0.5%葡萄糖、1.0%氯化钠及 1.5%琼脂溶液, 加热煮沸溶解并调节 pH 至 7.0 左右, 在 121 ℃下高压灭菌 15 min。

营养琼脂(nutrient agar, NA)培养基(金黄色葡萄球菌): 精确配制 1%蛋白胨、0.3%牛肉膏、0.5%氯化钠、1.5%琼脂溶液, 加热煮沸溶解并调节 pH 至 7.2~7.4, 在 121 ℃下高压灭菌 15 min。

无菌生理盐水: 精确配制 0.9%氯化钠溶液 1.0 L 后, 于 121 ℃下高压灭菌 15 min。

1.3.2 COP-UV 技术灭菌功率实验设计

本研究采用 O_2 作为气源的低温氧等离子体(cold oxygen plasma, COP)技术提升体系中单线态氧和臭氧的浓度, 同时耦合功率为 40 W 的 UV 照射, 使照射时间与 COP 处理时长保持一致。实验在 200 mL 20% (*m*:*V*)螺旋藻藻泥体系中进行, 固定 COP 喷嘴尖端与藻泥液面距离为 5~8 cm, 等离子体流速设为 40 L/min 以实现从液面到底部的完全处理。通过将 COP 功率在 600~1000 W 范围内调节, 测定处理 1~10 min 后的藻泥菌落总数, 探究不同等离子体功率与处理时间对灭菌效果的影响。

1.3.3 藻泥质量分数对灭菌效果的影响

将收获后的螺旋藻藻泥进行离心(8000 r/min, 10 min)处理, 收获螺旋藻藻泥后, 分别配制 200 mL 的 5%、10%、15%、20%、25% (*m*:*V*)的螺旋藻藻泥, 采用 800 W 低温氧等离子体处理 5 min, 测定藻泥质量分数对 COP-UV 技术灭菌效率的影响。

1.3.4 COP-UV 技术杀灭螺旋藻致病菌实验

枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌和大肠杆菌均为产毒素微生物, 摄入受其污染的食品可引发不同类型胃肠道疾病[14]。枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌和大肠杆菌均参考中国工业微生物菌种保藏管理中心提供的方案进行菌种活化。将接种过枯草芽孢杆菌(LB 培养基)、大肠杆菌(LB 培养基)和金黄色葡萄球菌(NA 培养基)的液体培养基于 250 mL 锥形瓶中, 200 r/min, 37 ℃摇床培养活化 12 h, 得到用于接种藻泥的菌液(5.0~6.0 lg CFU/mL)[15]。取 20 g 螺旋藻粉于水槽(长宽高 8 cm×5 cm×8 cm)中, 加入活化后的菌液 1.5 mL 和无菌水 98.5 mL 混合均匀, 得 20%螺旋藻藻泥。为防止 COP 功率较大时造成藻泥的喷溅导致藻液体积的变化, 用锡箔纸包裹喷头上方 2~3 cm, 并使得锡箔纸呈伞状(直径 4 cm)。采用低温氧等离子体发射器进行灭菌处理, 其喷头与藻泥液面距离为 5.0~8.0 cm。本研究主要探索 COP-UV 技术对枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的灭菌效果, 灭菌 5 min 后测定菌落数。

1.3.5 菌落总数测定

取 1.0 mL 藻液加入到装有 9.0 mL 无菌生理盐水的无菌试管中, 混匀后制备成 1:10 (*V*:*V*)稀释的样品均液。吸取 1.0 mL 上述稀释后的菌液于无菌培养皿(90 mm×15 mm)中, 并取 15~20 mL 无菌琼脂培养基导入培养皿中转动混匀, 待其冷却凝固后将培养皿翻转, 并在 37 ℃下培养 48 h。依据 GB 4789.2—2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》菌落总数测定法中平板计数法对菌落总数进行计数。每组处理结果取 3 个平行的平板平均值并计算出标准偏差[16]。

1.3.6 色泽分析

色差的测定参考曹雷鹏等[17]报道的方法, 利用 TS7700 型色差计, 测色光源为 C 光源, 光斑直径为 8 mm, 均匀选取 5 个测量点, 测定螺旋藻泥灭菌前后的颜色(亮度值 L^*=0~100, 红绿值 a^*=–120~120, 黄蓝值 b^*=–120~120), 并按公式(1)计算总色差变化程度 ΔE, 若 ΔE<1.5, 颜色变化不明显; 1.5<ΔE<3.0, 颜色变化较明显, 肉眼可辨别; ΔE>3.0, 颜色变化明显, 肉眼可明显区分。

$$\Delta E=\sqrt{(L^*-L_0^*)^2+(a^*-a_0^*)^2+(b^*-b_0^*)^2} \tag{1}$$

式中: ΔE 为螺旋藻泥灭菌前后总色泽的变化值; L_0^* 及 L^*为螺旋藻泥灭菌前后的亮度值; a_0^*及 a^*为螺旋藻泥灭菌前后的红绿值; b_0^*及 b^*为螺旋藻泥灭菌前后的黄蓝值。

1.3.7 藻胆蛋白含量分析

螺旋藻藻胆蛋白用紫外分光光度计测定。称 1.0 mg 灭菌前后的螺旋藻藻泥, 8000 r/min 离心 10 min 后收集上清液, 分别测定 620、652、562 nm 的紫外吸光度, 并根据以下公式(2)~(5)分别计算藻蓝蛋白(C-phycocyanin, PC)、别藻蓝蛋白(allophycocyanin, AP)及藻红蛋白(phycoerythrin, PE)的质量浓度(g/L)及蛋白溶出率(*R*)[18]。

$$\mathrm{PC}=\frac{A_{620}-0.474A_{652}}{5.34} \tag{2}$$

$$\mathrm{AP}=\frac{A_{652}-0.208A_{620}}{5.09} \tag{3}$$

$$PE=\frac{A_{562}-2.41PC-0.849AP}{9.62} \quad (4)$$

$$R/\%=\frac{C}{C_0}\times 100\% \quad (5)$$

式中: PC 为 PC 的质量浓度, g/L; AP 为 AP 的质量浓度, g/L; PE 为 PE 的质量浓度, g/L; A_{562} 为上清液在 562 nm 处的吸光度; A_{620} 为上清液在 620 nm 处的吸光度; A_{652} 为上清液在 652 nm 处的吸光度; C_0 为灭菌前藻泥上清液的蛋白质量浓度, g/L; C 为灭菌后藻泥上清液的蛋白质量浓度, g/L; R 为藻细胞蛋白溶出率, %。

1.4　数据处理

以上所有实验均重复 3 次, 数据结果表示为平均值±标准偏差。采用 SPSS 27.0 软件进行统计学单因素方差分析(analysis of variance, ANOVA) (P<0.05), 采用 Excel 2013、Origin 8.5 和 AI 2020 软件进行数据处理和分析。

2　结果与分析

2.1　COP-UV 技术功率对藻泥灭菌效果的影响

图 2A 显示了 COP-UV 技术功率对藻泥菌落的灭菌效果。结果表明 COP-UV 技术对藻泥的灭菌效果与 COP 功率、处理时间呈正相关趋势。处理 2 min 以后, 当 COP-UV 技术功率由 600 W 逐步提升至 1000 W, 藻泥菌落总数呈显著下降趋势。如 COP (800 W)-UV (40 W)处理 200 mL 20% (m:V)藻泥 5 min, 菌落总数最终降低至 2.31×10^4 CFU/g, 其灭菌率达到 95.66%。COP-UV 技术处理藻泥 10 min 后, 所有组的灭菌率均可达到 100%。在 COP-UV 技术杀菌的过程中, 杀菌效果受功率和时间的影响。当 COP 功率低且处理时间短时, 用于杀菌的活性氧(reactive oxygen species, ROS)和活性氮(reactive nitrogen species, RNS)难以被激发, 即便产生, 量也很少, 无法有效杀灭细菌。随着 COP 功率增加或时间延长, 能电离产生的活性氧物质增多, 活性基团 H_2O_2、NO_2^-、臭氧的浓度也相应提高, 杀菌效果显著提升(P<0.05), 表现为菌落数不断减少[10,16]。若功率过低, 即便延长处理时间, 体系中活性氧物质含量依然有限, 杀菌效果也不佳。

由图 2B 可知, 随着 COP 功率的逐渐升高, 螺旋藻藻泥温度上升越快。螺旋藻藻泥(20%)经 COP (800 W)-UV (40 W)处理 5 min 后, 其温度由初始 12.5 ℃上升至 38.0 ℃。同时, COP 功率越高, 螺旋藻藻泥重量损失越明显。如 COP 1000 W COP 处理 10 min 后重量损失近 111.3 g, 损失率为 55.65%。随着 COP-UV 技术处理时间延长时, 水分有效扩散系数呈先增后减趋势。在湿度和气流速度恒定条件下, COP-UV 技术对样品表面刻蚀, 加速表面水分蒸发, 使表层含水率降低、含水率梯度增大, 进而加快水分扩散速度, 这与 KIM 等[19]研究等离子体对辣椒表面的杀菌作用结果一致。由于在螺旋藻灭菌过程中, 无藻泥喷溅损失, 重量损失主要源于水分蒸发。研究发现, 等离子的形成加速了粉末中水分的蒸发进程, 且蒸发的水分在等离子体环境里能够形成氧活性物质[20]。因此, COP-UV 技术展现出了双重功效。一方面, 它具备高效的灭菌能力; 另一方面, 还能促进螺旋藻藻泥升温干燥。这为后续的喷雾干燥成藻粉工艺提供了良好的预处理, 显著提高了干燥速率, 有效缩短了干燥时间, 有望为螺旋藻加工产业带来更高效的生产解决方案。因此, 综合处理成本及效率, 后期采用 600、800 及 1000 W 进行后续实验。

2.2　藻泥质量分数对藻泥灭菌效果的影响

藻泥质量分数也会直接影响 COP-UV 技术的灭菌效果, 图 3A 显示在 800 W 处理 5 min 后不同螺旋藻藻泥质量分数的样品实际图及其灭菌率。COP-UV 技术灭菌效果随着藻泥质量分数的增加呈现先上升后降低的趋势。随着藻泥质量分数增加至 20%, COP-UV 技术灭菌率由 16.38%增加至 66.40%, 当藻泥质量分数继续提升至 25%时, 在相同处理条件下灭菌效果降低至 28.40%, 其可能是由于藻泥的浊度和水分含量不同引起的。随着藻泥质量分数的不同, 藻泥的浊度差异较大。先前研究显示, 空气中水分含量对

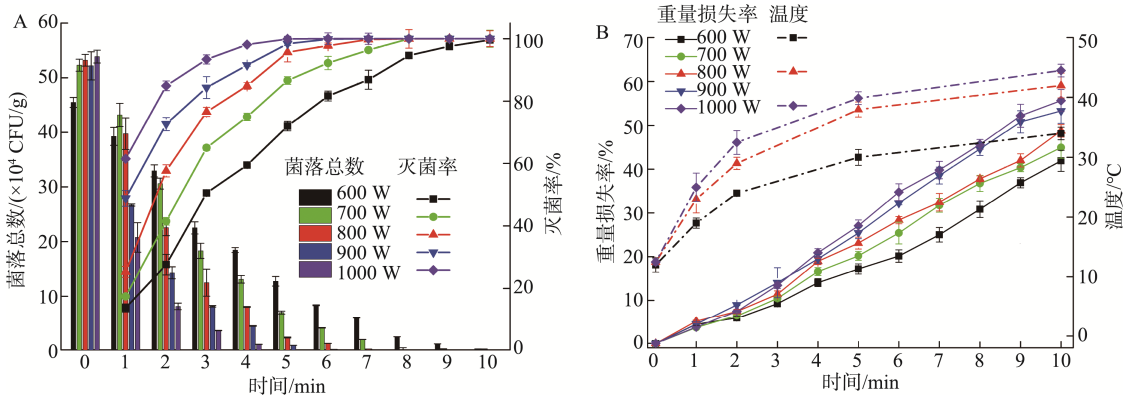


图 2　COP-UV 技术的功率对螺旋藻藻泥菌落(A)及重量-温度(B)的影响

Fig.2　Effects of COP-UV technology power on colonies (A) and weight-temperature (B) of *Spirulina platensis* slurry

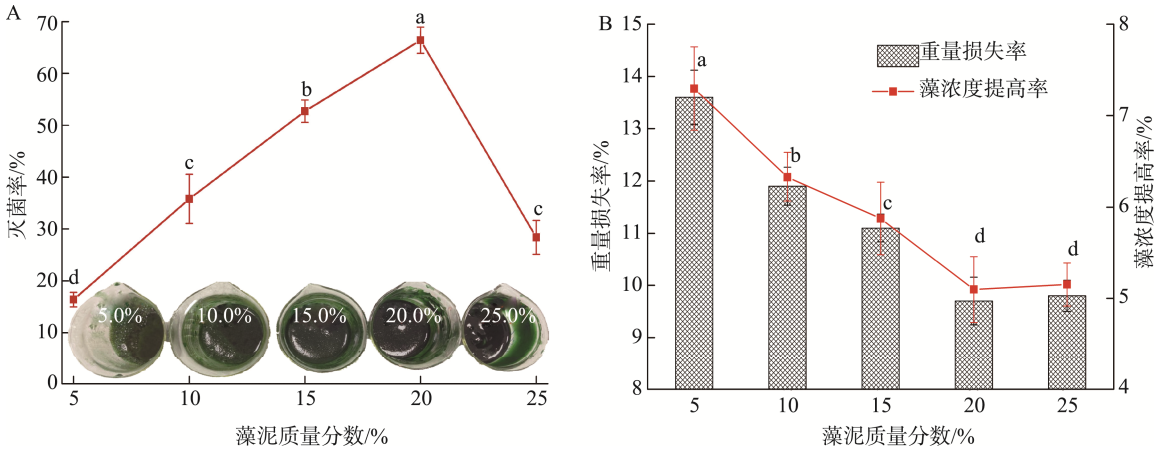
等离子射流中羟基自由基(·OH)的产生影响显著[21]。水分含量越高，激发形成的等离子体里带电氢氧离子浓度越高。然而，由液态水激发产生等离子体需更高能量，否则无法实现。因此，低质量分数条件下，其水分条件水分含量较高，导致灭菌率较低，如5%藻泥质量分数的灭菌率仅为 14.6%。然而，过高藻泥质量分数通过物理屏障、化学消耗及为微生物提供有利生存环境等多种方式，对灭菌过程产生负面影响，导致灭菌率降低[22]。因此，在实际应用中，应选择合适的藻泥质量分数进行灭菌。

图 3B 显示在 800 W 处理条件下各组藻泥质量分数的变化及变化率。结果表明在等离子体灭菌过程中，藻泥的重量损失率逐渐增加，其主要原因是自由水分蒸发加剧、有机物分解 CO_2 和 CO 等气体挥发以及微生物代谢产物变化等多种因素共同作用的结果。随着藻泥浓度增加至 20%，样品总重量损失率及藻质量分数提高率分别由 13.6%、7.5%显著降低至 9.7%、5.1% (P<0.05)。藻泥质量分数超过20%之后，由于藻泥内部的物理屏障和营养物质竞争等因素已经达到了一个相对稳定的状态[23]，COP 依然难以穿透藻泥内部的物理屏障，营养物质的竞争格局也基本保持不变，所以总重损失率和藻质量分数提高率不会出现显著的变化。

2.3 COP-UV 技术对 3 种致病菌杀灭的影响

先前研究报道，等离子体发射器在喷射电流时，会产生多种活性物质(单线态氧、臭氧、氮自由基等)，但起到杀菌作用的主要是单线态氧和臭氧[10,24]。图 4A 显示了 COP 处理 5 min 后，3 种致病菌的菌落总数都呈现大幅度地下降，如 800 W COP 处理 5 min，大肠杆菌的活菌数由 5.47 lg CFU/mL 降低至 2.10 lg CFU/mL，表明 COP-UV 技术对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌都具有较好的杀灭效果，其主要归因于 COP 中大量高速运动的粒子破坏微生物细胞壁和细胞膜，使得细胞内的物质就会泄漏出来，从而导致有害菌死亡。此外，COP-UV 技术中多种活性化学物质臭氧、H_2O_2、·OH 及紫外线也能够攻击有害菌的碱基和磷酸二酯键，造成核酸链的断裂和损伤，破坏遗传信息传递和表达，使有害菌无法繁殖，最终走向死亡[25]。

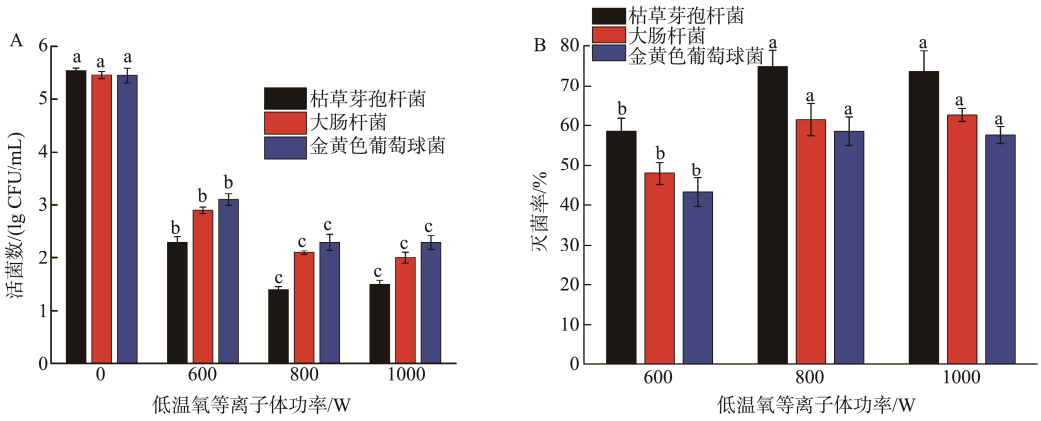
图 4B 显示了 COP-UV 技术对 3 种致病菌的灭菌率，结果显示在 600~800 W 范围内，随着 COP-UV 技术功率的增加而逐渐增加，如当 COP-UV 技术功率由 600 W 增加至 800 W 时，枯草芽孢杆菌的致死率由 58.54%显著增加至 74.86% (P<0.05)，其可能是 COP 增加导致单线态氧和臭氧的含量也逐渐增多[13]。当 COP-UV 技术功率继续增加至 1000 W 时，则对 3 种致病菌的灭菌率无显著性影响 (P>0.05)，可能是 COP-UV 技术功率过高时，单线态氧会在瞬间结合形成臭氧，臭氧再与单线态氧反应生成氧气，引发活性物质湮灭，致使灭菌效果提升不明显[26]。此外，COP-UV 技术对 3 种致病菌的灭菌顺序为：枯草芽孢杆菌>大肠杆菌>金黄色葡萄球菌。在 800 W 等离子体处理 5 min 后，枯草芽苞杆菌、大肠杆菌及金黄色葡萄球菌的致死率分别达到 74.86%、61.45%及 58.53%，这主要与 3 种细菌的细胞壁结构、生理特性等因素相关[27]。COP-UV 技术活性物质可打破枯草芽孢杆菌的芽孢休眠结构，破坏其核心遗传物质与关键酶类，使其难以恢复活性，故对其灭菌效果极佳，而大肠杆菌属于革兰氏阴性菌，其外膜含有脂多糖等成分，具有一定的屏障作用，相较于枯草芽孢杆菌的芽孢结构，大肠杆菌的防御机制相对较强，使得 COP-UV 技术对它的灭菌率较低[28–29]。金黄色葡萄球菌虽是革兰氏阳性菌，细胞壁富含磷壁酸等成分，形成了较为坚韧的保护层，有效抵御了 COP-UV 中活性物质的攻击[30]，因此，COP-UV 技术对金黄色葡萄球菌的灭菌效果最低。



注：不同字母表示组间具有显著性差异(P<0.05)；图 A 中插图为不同螺旋藻藻泥质量分数的样品效果图。

图 3 螺旋藻藻泥质量分数对 COP-UV 技术灭菌效果(A)及藻浓度(B)的影响

Fig.3 Effects of *Spirulina platensis* slurry mass fraction on sterilization rate of COP-UV technology (A) and concentration of the algae (B)



注: 不同字母表示同一致病菌组间具有显著性差异(P<0.05)。

图 4　COP-UV 技术的功率对 3 种致病菌的杀菌效果

Fig.4　Sterilization effects of COP-UV technology power on 3 kinds of pathogenic bacteria

2.4　COP-UV 技术对螺旋藻泥色泽的影响

色泽是评价食品加工过程中营养和感官品质变化的重要指标, 直接影响消费者的购买欲望, 从而影响着产品的市场价值[17,31]。表 1 为 COP-UV 技术处理螺旋藻泥 5 min 后的色泽变化。与对照组相比, 600 W 和 800 W 处理的螺旋藻泥色泽 L^*、a^*、b^*变化无显著性差异(P>0.05), 而 1000 W 处理的藻泥色泽 L^*、a^*、b^*均显著提高(P<0.05), 其主要原因可能归因于 COP 功率提高引起藻细胞破裂, 导致胞内 PC 和叶绿素等色素物质的流出。总色差ΔE 随着低温氧等离子功率的增加而逐渐增加, 800 W 处理后的藻泥总色差 ΔE 为 2.32, 低于 3.0, 表明 800 W 对藻泥的色泽有轻微的肉眼可见变化, 其主要归因于藻细胞色素物质的外流。

2.5　COP-UV 技术对螺旋藻蛋白质溶出的影响

螺旋藻细胞中蛋白质含量高且细胞壁易破裂, 温度较高时藻泥极易发生发酵作用, 既影响色泽, 又降低螺旋藻粉品质[18]。本研究在前期 COP-UV 技术对螺旋藻藻泥的有效灭菌及工艺探究基础上, 进一步研究了经不同功率处理后, 螺旋藻藻泥中蛋白的溶出率及各组分的变化情况。图 5A 显示螺旋藻藻泥蛋白质溶出率随 COP-UV 技术处理时间延长而增加。未处理的原藻泥(20%, m:V), COP (800 W)-UV (40 W)处理 5 min 后的藻蛋白溶出率达到 10.56%, 处理 10 min 后, 其溶出率继续增加至 28.02%。此外, 随着 COP-UV 技术功率的增加, 其蛋白质溶出率也逐渐增加。如 COP-UV 技术处理 10 min 后, 当功率由 600 W 逐渐增加至 1000 W, 其蛋白质溶出率由 17.28%显著增加至 60.43%, 该结果表明与 600 W 相比, 1000 W 不仅灭菌效果更加明显, 且对螺旋藻藻泥的破碎程度也十分明显。

图 5B~D 显示不同功率的 COP-UV 技术处理下 PC、AP 及 PE 的溶出量趋势一致, 均随处理时间延长有上升趋势, 且在 1~5 min 内变化不明显。在 800 W 处理 5 min 后, 藻泥 PC、AP 及 PE 的溶出率分别达到 5.3%、12.6%和 12.5%。在 1000 W 处理 10 min 后, AP 和 PE 的溶出量约为对照组(0 min)的 2 倍。此外, PC 是螺旋藻中活性最强及含量最高的生物活性物质, 可有效清除过氧化物、羟基和烷基自由基, 抑制氧化反应[32]。因此, 螺旋藻藻泥经 COP-UV 技术处理后, 在保证灭菌效果的同时, 收集灭菌后的藻泥溶液, 分离纯化溶出的 PC, 从而达到在有效灭菌的同时实现低成本提取 PC。

表 1　COP-UV 技术对螺旋藻泥色泽的影响

Table 1　Effects of COP-UV technology on color of *Spirulina platensis* slurry

功率/W	L^*	a^*	b^*	ΔE
0	15.31±1.23^b	–5.31±0.52^a	6.23±0.86^c	0.00±0.02^c
600	15.50±0.99^b	–6.62±0.32^b	7.50±0.64^b	1.83±0.30^b
800	16.64±1.31^b	–6.75±0.75^b	7.47±0.84^b	2.32±0.24^b
1000	20.36±1.16^a	–11.64±1.08^c	12.86±1.02^a	10.47±0.98^a

注: 同列不同字母表示差异显著(P<0.05)。

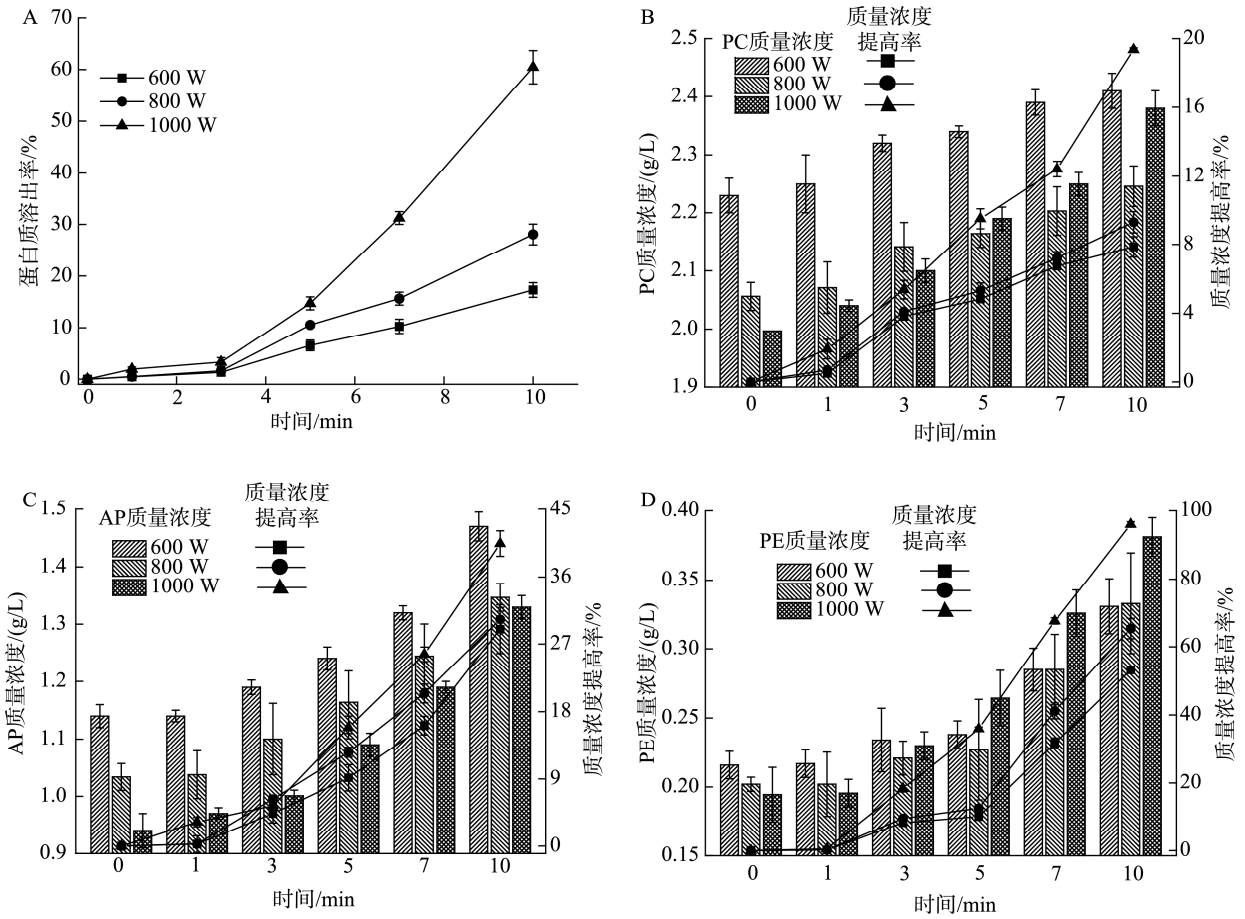


图 5 COP-UV 技术对螺旋藻总蛋白溶出量(A)、PC (B)、AP (C)及 PE (D)溶出的影响

Fig.5 Effects of COP-UV technology on total protein dissolution (A), PC (B), AP (C) and PE (D) of *Spirulina platensis*

3 结 论

本研究采用 COP-UV 技术对螺旋藻藻泥进行灭菌处理，并结合藻细胞破碎及成本优化其灭菌条件。研究结果表明，该技术可在最小化螺旋藻细胞结构损伤的前提下，借助 H_2O_2、NO_2^-、臭氧等活性氧物质破坏微生物细胞壁，引发细菌胞溶死亡，从而实现高效灭菌。综合评估灭菌效率、成本及藻细胞完整性，确定最佳工艺条件为：800 W 功率下处理 20% (*m*:*V*)藻泥 5 min，其灭菌效率达 95.66%，且对螺旋藻细胞结构及天然色泽无明显影响，有效保留了原料固有特性。针对 3 种典型致病菌的杀灭效能顺序为：枯草芽孢杆菌>大肠杆菌>金黄色葡萄球菌，该差异主要归因于不同菌株细胞壁及细胞膜成分的结构差异。本研究证实，COP-UV 技术可在保证灭菌效果的同时减少对螺旋藻热敏性成分的破坏，为高品质螺旋藻产品开发提供了技术支撑。未来研究需重点探索 COP-UV 技术参数(如频率、波形等)对灭菌效果的调控机制，及其对螺旋藻中维生素、矿物质、口感等营养与感官品质的影响，通过优化处理条件，进一步提升热敏性螺旋藻产品的质量安全与市场竞争力。

参考文献

[1] WITHANA TN, RANASINGHE YS, RATHNAYAKE AI, *et al*. Applications of *Spirulina* in the food industry: scientometric and systematic review [J]. Food and Humanity, 2025, 5: 100644.

[2] ZHOU Y, ZHOU J, LI B, *et al*. Selenium accumulation in *Arthrospira platensis* under sulfur-limited conditions: Modulation of selenium/sulfur molar ratio [J]. Algal Research, 2026, 94: 104523.

[3] BUMANDALAI O, BAYLISS KL, MOHEIMANI NR. Innovative processes for combating contaminants in fresh *Spirulina* [J]. Algal Research, 2024, 78: 103397.

[4] ZHOU Y, LI B, HUANG ZH, *et al*. Impact of batch selenium on *Spirulina platensis*: Growth, enrichment, and metabolism [J]. Algal Research, 2025, 92: 104359.

[5] 黎紫含, 曹雷鹏, 刘童莹, 等. 螺旋藻干粉微波灭菌工艺优化[J]. 南昌大学学报(理科版), 2020, 44(4): 364–369.
LI ZH, CAO LP, LIU TY, *et al*. Sterilization of *Spirulina platensis* powder based on microwave technology [J]. Journal of Nanchang University (Science Edition), 2020, 44(4): 364–369.

[6] 毛相朝, 李娇, 陈昭慧. 非热加工技术对食品内源酶的控制研究进展[J]. 中国食品学报, 2021, 21(12): 1–13.
MAO XZ, LI J, CHEN ZH. Research progress on the control of

endogenous enzymes in food by non-thermal processing technologies [J]. China Journal of Food Science, 2021, 21(12): 1–13.

[7] 杨晋辉, 李松励, 郑楠. 热处理对牛乳成分的影响以及热敏感指标的变化研究进展[J]. 食品科学, 2017, 38(7): 302–308.
YANG JH, LI SL, ZHENG N. Effect of heat treatment on milk components and changes in heat-sensitive components: A review [J]. Food Science, 2017, 38(7): 302–308.

[8] 高瑞萍, 朱建飞, 周文斌. 超声加工技术对果蔬汁品质影响及其作用机制研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(7): 326–338.
GAO RP, ZHU JF, ZHOU WB. Progress in understanding the effect and action mechanism of ultrasound processing on the quality of fruit and vegetable juices [J]. Food Science, 2022, 43(7): 326–338.

[9] 徐梦洁, 刘霞. 非热物理杀菌技术在冷链食品中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(17): 144–152.
XU MJ, LIU X. Progress of research on the application of non-thermal physical sterilization technology in cold chain food [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(17): 144–152.

[10] LI ZH, ZHOU T, ZHANG Q, *et al*. Influence of cold atmospheric pressure plasma treatment of *Spirulina platensis* slurry over biomass characteristics [J]. Bioresource Technology, 2023, 386: 129480.

[11] SAMANDEEP K, YOGESH K, VIKRANT S, *et al*. Cold plasma technology: Reshaping food preservation and safety [J]. Food Control, 2024, 163: 110537.

[12] DASAN BG, BOYACI IH. Effect of cold atmospheric plasma on inactivation of *Escherichia coli* and physicochemical properties of apple, orange, tomato juices, and sour cherry nectar [J]. Food Bioprocess Technology, 2018, 11(2): 334–343.

[13] MAHNOT NK, MAHANTA CL, FARKAS BE, *et al*. Atmospheric cold plasma inactivation of *Escherichia coli* and *Listeria monocytogenes* in tender coconut water: Inoculation and accelerated shelf-life studies [J]. Food Control, 2019, 106: 106678.

[14] BENNETT SD, WALSH KA, GOULD LH. Foodborne disease outbreaks caused by *Bacillus cereus*, *Clostridium perfringens*, and *Staphylococcus aureus*-United States, 1998–2008 [J]. Clinical Infectious Diseases, 2013, 57(3): 425–433.

[15] BOUCHARD-ROCHETTE M, MACHRAFI Y, COSSUS L, *et al*. *Bacillus pumilus* PTB180 and *Bacillus subtilis* PTB185: Production of lipopeptides, antifungal activity, and biocontrol ability against *Botrytis cinerea* [J]. Biological Control, 2022, 170: 104925.

[16] ZHOU RW, REZAEIMOTLAGH A, ZHOU R, *et al*. In-package plasma: From reactive chemistry to innovative food preservation technologies [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 120: 59–74.

[17] 曹雷鹏, 牛丽红, 孙晓华, 等. 草鱼冰藏期间新鲜度及热加工性质的变化[J]. 食品科学, 2016, 37(12): 267–272.
CAO LP, NIU LH, SUN XH, *et al*. Changes in freshness and thermal processing properties of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillet during ice storage [J]. Food Science, 2016, 37(12): 267–272.

[18] ZHOU Y, HUANG ZH, LIU YH, *et al*. Stability and bioactivities evaluation of analytical grade C-phycocyanin during the storage of *Spirulina platensis* powder [J]. Journal of Food Science, 2024, 89(3): 1442–1453.

[19] KIM YH, LEE C, YOON KS. Reduction of *E. coli* O157:H7 and *Bacillus cereus* levels in red pepper powder using dielectric barrier discharge (DBD) plasma for enhanced quality [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2022, 76: 102916.

[20] SONG CY, WANG JM, WU LF, *et al*. Quality and physiological changes in fresh-cut mango fruit as affected by cold plasma-activated water [J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 225: 113524.

[21] CHEN Y, CHEN GY, WEI R, *et al*. Quality characteristics of fresh wet noodles treated with nonthermal plasma sterilization [J]. Food Chemistry, 2019, 297: 124900.

[22] SHIVA E, HOSSEIN A, MOHADESEH M, *et al*. Cold plasma-mediated inactivation of spore-forming microorganisms: Mechanisms, quality attributes, and efficiency parameters [J]. Food Science & Nutrition, 2025, 13(6): e70429.

[23] DUARTE S, PANARIELLO BHD. Comprehensive biomedical applications of low temperature plasmas [J]. Archives of Biochemistry & Biophysics, 2020, 693: 108560.

[24] HAN L, PATIL S, BOEHM D, *et al*. Mechanisms of inactivation by high-voltage atmospheric cold plasma differ for *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* [J]. Applied and Environemental Microbiology, 2015, 82(2): 450–458.

[25] SHOUDHO K, UDDIN S, RUMON M, *et al*. Influence of physicochemical properties of iron oxide nanoparticles on their antibacterial activity [J]. ACS Omega, 2024, 9: 33303–33334.

[26] 靳程茗, 王晨航, 裴雪芸, 等. 滑动弧放电对金黄色葡萄球菌的杀菌工艺[J]. 农业工程, 2019, 9(10): 76–80.
JIN CM, WANG CH, PEI XY, *et al*. Sterilization process of sliding arc discharge for *Staphylococcus aureus* [J]. Agricultural Engineering, 2019, 9(10): 76–80.

[27] 马良军, 王佳媚, 黄明明, 等. 不同处理条件对介质阻挡放电低温等离子体杀菌效果及影响机理研究[J]. 微生物学报, 2019, 59(8): 1512–1521.
MA LJ, WANG JM, HUANG MM, *et al*. Study on sterilization effect and influence mechanism of dielectric barrier discharge low-temperature plasma under different treatment conditions [J]. Journal of Microbiology, 2019, 59(8): 1512–1521.

[28] WU XM, LUO YH, ZHAO FJZ, *et al*. Influence of dielectric barrier discharge cold plasma on physicochemical property of milk for sterilization [J]. Plasma Processes and Polymers, 2021, 18(1): e1900219.

[29] AHMED MW, NAQVI SM, QASIM I, *et al*. Degradation of multidrug-resistant *E. coli* by low pressure plasma [J]. International Journal of Food Properties, 2021, 24(1): 1289–1299.

[30] 刘雅夫, 符腾飞, 刘宸成, 等. 低温等离子体对金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌的杀菌效果及动力学特性[J]. 现代食品科技, 2021, 37(12): 127–135.
LIU YF, FU TF, LIU CC, *et al*. Sterilization effect and kinetic characteristics of low-temperature plasma on *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa* [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(12): 127–135.

[31] 邓伟丽, 吴佳敏, 黄惠梅, 等. 低温等离子体对甘蔗汁杀菌效果及品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(8): 77–86.
DENG WL, WU JM, HUANG HM, *et al*. Effects of cold plasma on microbial decontamination and quality of sugarcane juice [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(8): 77–86.

[32] AGRAWAL M, BANSAL S, CHOPRA K. Evaluation of the *in vitro* and *in vivo* antioxidant potentials of food grade phycocyanin [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(11): 4382–4390.

(责任编辑: 安香玉　蔡世佳)