

脉冲电场食品加工杀菌进展

曾新安 教授

佛山科学技术学院 华南理工大学

2022.01.07



产业背景

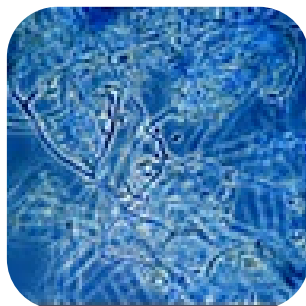
- ◆ 我国食用菌物种**资源丰富**，产量占世界总产量**70%以上**
- ◆ 新鲜食用菌**含水量高**，极易**染菌腐烂**，失去食用价值和商业价值
- ◆ **干燥**可延长食用菌的货架期，降低贮运成本，是食用菌深加工的主要方式之一
- ◆ 食用菌中富含**多糖**、**蛋白**、**核苷**等活性组分，**高效提取**可带来巨大经济效益



木霉菌



青霉菌



脉孢霉菌



食用菌腐烂



热风干燥及相应干制品



食用菌产品



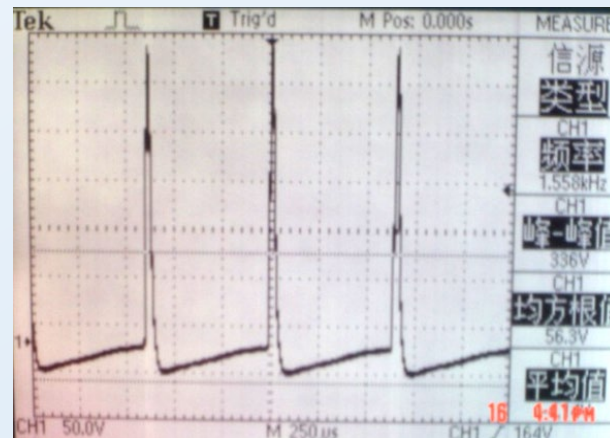
脉冲电场: pulsed electric field, PEF

将电场强度很高持续时间很短的高电压脉冲作用于电极间的物料，以杀灭物料中的微生物或进行改性与强化处理的一种新型物理场处理技术。

- ◆ 电场强度: 10 ~ 100kV/cm
- ◆ 脉冲宽度: <50 μ s
- ◆ 脉冲频率: 通常在1000 Hz以内

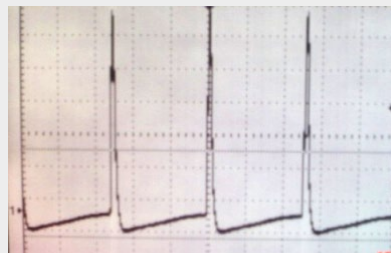
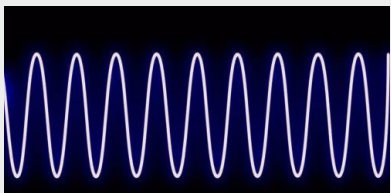
电场分类

- 静电场
- 交变电场:
 - ◆ 连续 (交流电)
 - ◆ 间歇 (脉冲)



脉冲电场

PEF技术几大特点



PEF占空比大

- ◆ 频率1000Hz
- ◆ 脉宽10 μ s
- ◆ 占空比1‰



瞬间场强大

- ◆ 缩微闪电
- ◆ 10 kV/cm
- ◆ 空气击穿



电源功率大

- ◆ 峰值功率MW
- ◆ 平均KW级
- ◆ IGBT控制



均匀快速

- ◆ 直接放电
- ◆ 微秒时间
- ◆ 深层处理

PEF处理能量概念

1. PEF能量

峰值 $U=25\text{ kV}$, $R=100\ \Omega$, $I=U/R=250\text{ A}$

$P=UI=6.25\text{ MW}$

2. PEF加工为什么称为“非热加工”？

脉宽 $\tau=1\ \mu\text{s}$, 频率 $f=1000\text{ Hz}$

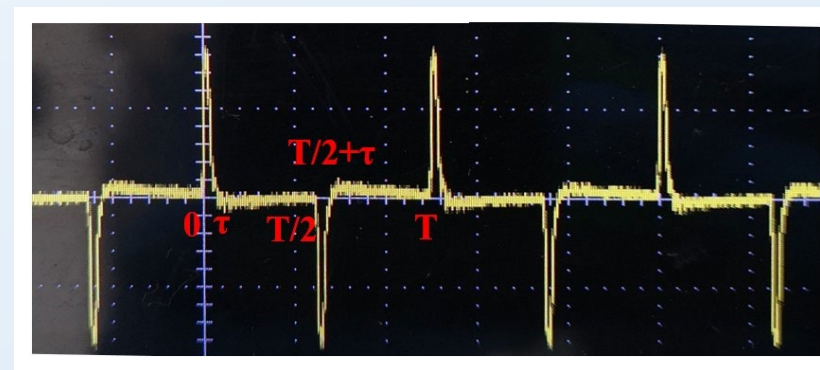
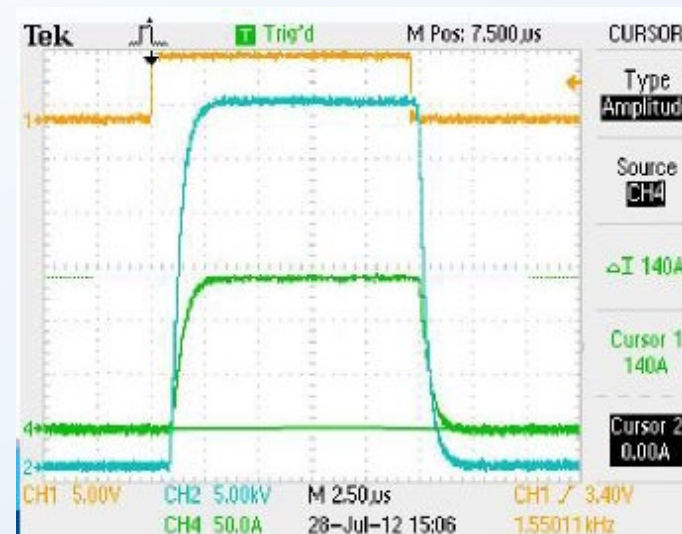
占空比: **1:999**

平均功率: 6.25 kW

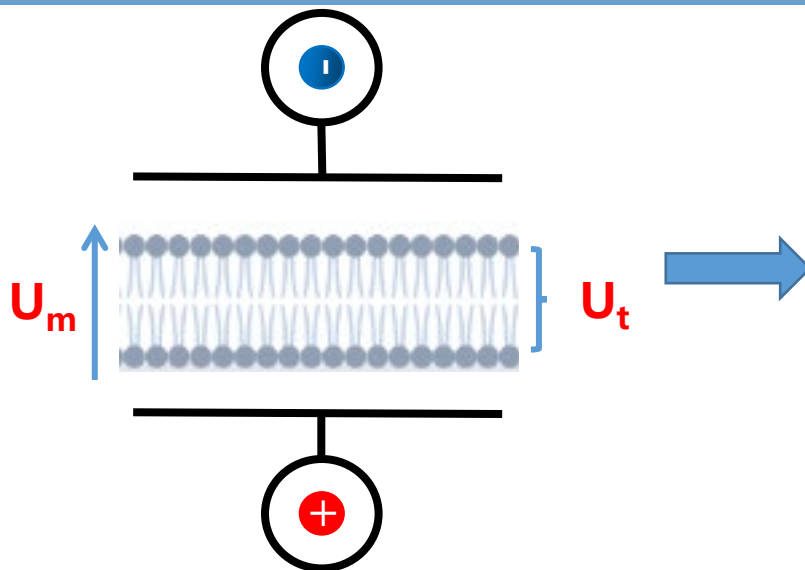
以 100 mL 水为例(v), 输出能量为 62.5 J/mL

$$Q_s = \frac{U \times I \times \tau \times f}{v}$$

理论升温: 14.88°C , 最终温度约为 40°C

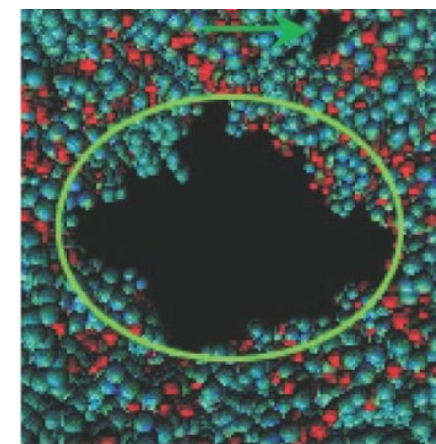


PEF细胞膜穿孔理论

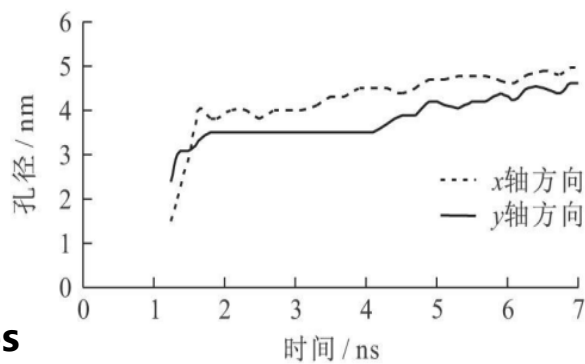


当 U_m 大于临界电压 U_t (0.5-1.5V)
细胞膜损伤

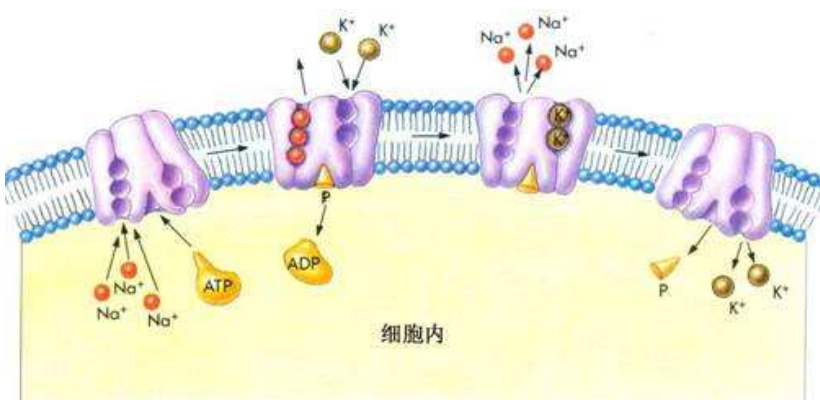
PEF作用后形成跨膜电压 U_m
并与 U_{RT} 叠加



脂双层膜电穿孔俯视图 7



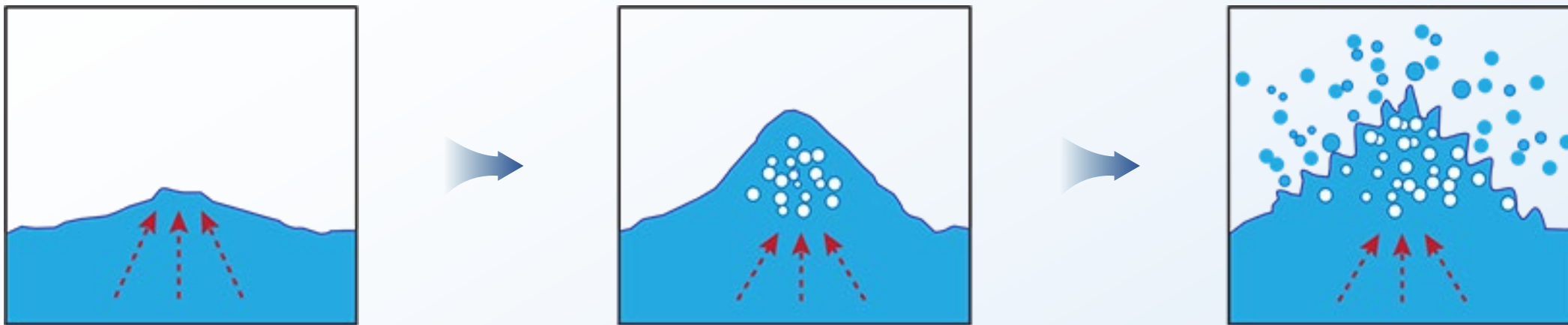
孔径扩大, 孔数增多



细胞膜存在静息电位(U_{RT})
-90 mV到-40 mV

Ref:
Book of the Electroporation-Based Technologies
& Treatment. Chapter 1
姚陈果,等. 高电压技术, 2010, 36(02):423-427

超声波传质理论



超声波空化作用使得物料附近产生大量空化气泡，气泡破裂瞬间产生的**高温高压**形成**冲击波**和**高速微射流**，加速水分迁移和活性组分溶出

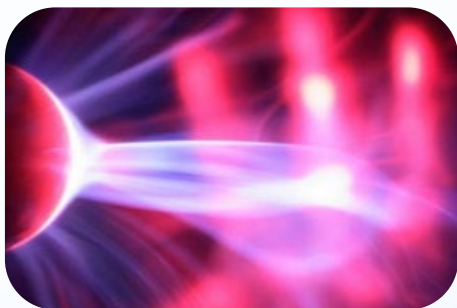
存在问题：所需超声波频率大，处理时间长，高能力输出导致产热严重，热敏活性成分损失严重

预处理技术辅助热风干燥

干燥预处理：通过物理、化学、生物等方法进行干燥前预处理，从而达到加快干燥速率、缩短干燥时间的目的

传统手段包括热烫、化学试剂预处理存在热敏物质损失、安全性、环保等问题

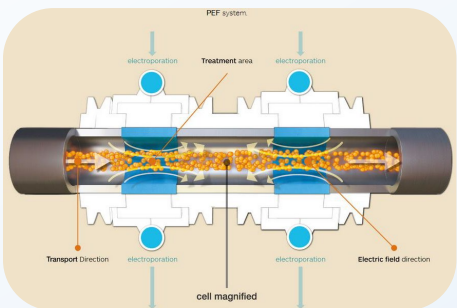
需要开发非热非化学预处理技术辅助热风干燥提高干燥速率，保证产品质量，实现绿色加工



低温等离子体(LTP)



超高压(HPP)



脉冲电场(PEF)



超声波(US)



联和处理

非热加工预处理优势



加速干燥



降低能耗



品质提高



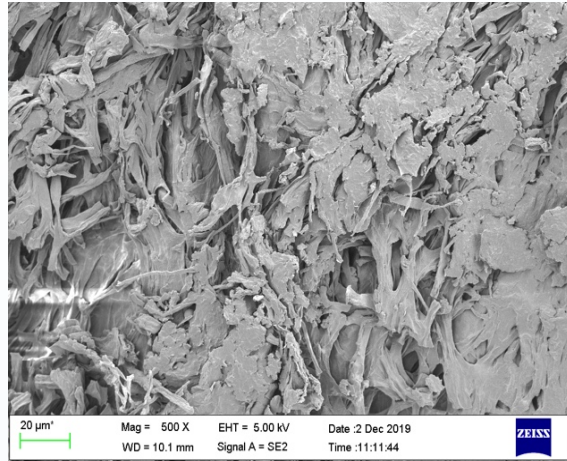
提升风味



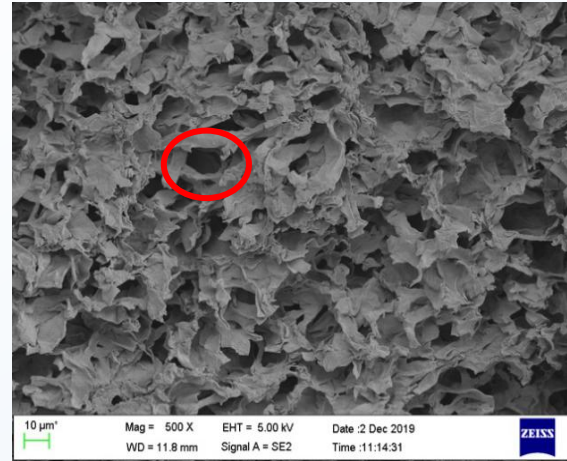
改善色泽

物理场干燥预处理技术

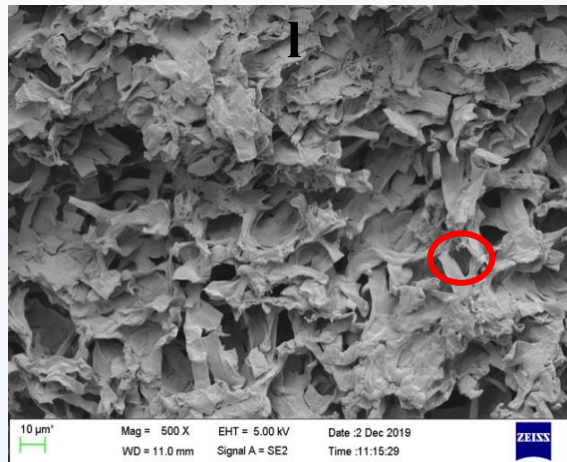
脉冲电场联合超声波预处理干燥香菇



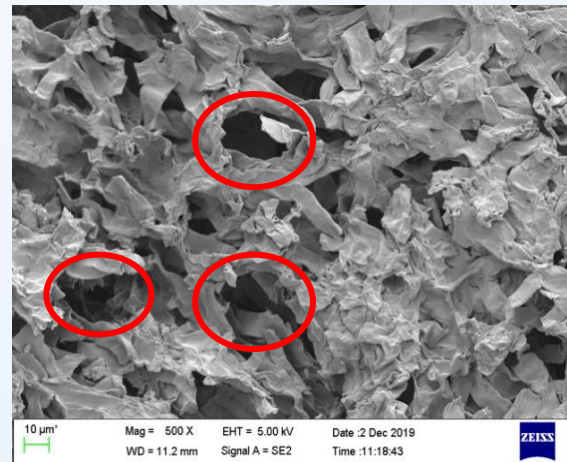
Contro



PEF



US



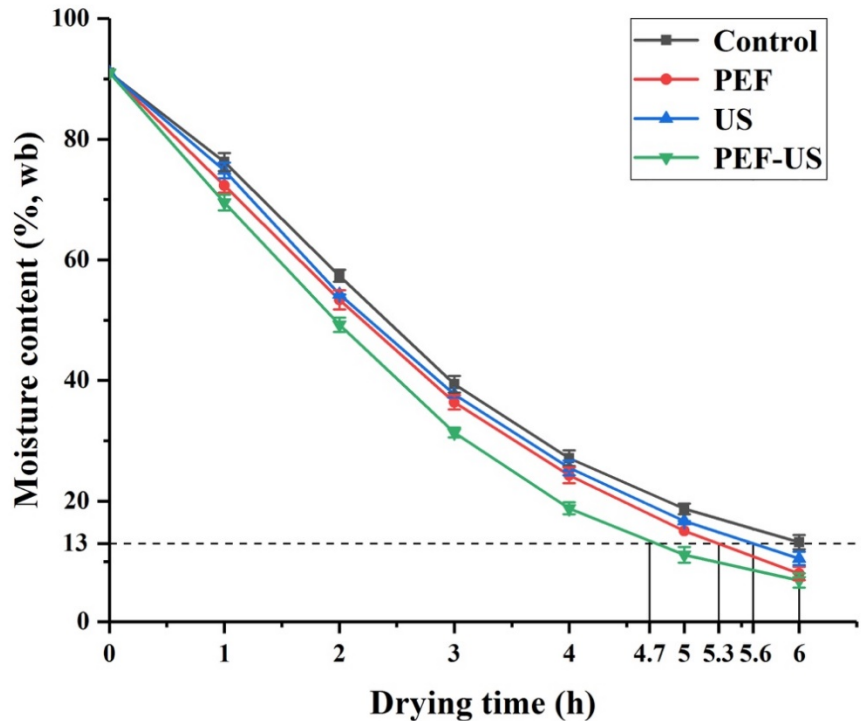
PEF-US

不同预处理条件下香菇的扫描电镜图

➤ 对照组纤维结构有**层叠现象**，说明香菇表面致密，不利于后续的脱水过程

➤ 脉冲电场和超声波处理使结构发生变化，截面呈多孔性的**蜂窝状网状结构**，这些大孔径和孔隙更有利于水分的迁移

预处理对干燥速率的影响

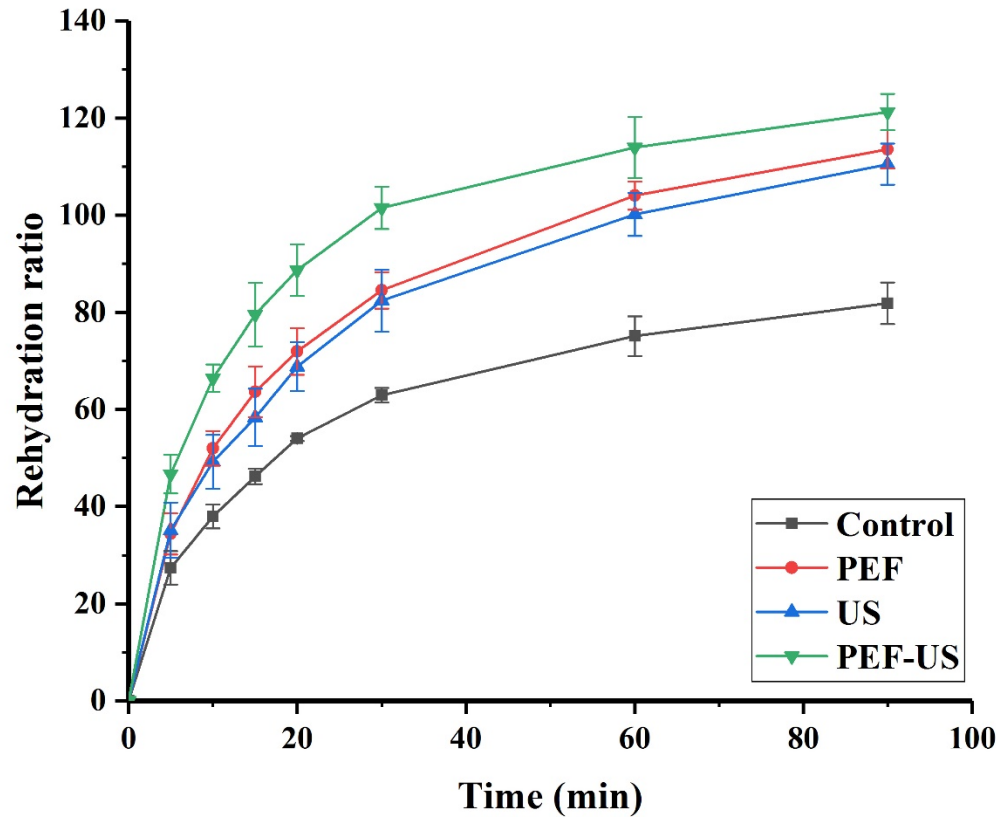


不同预处理方式干燥香菇水分含量变化

- 脉冲电场耦合超声波预处理明显缩短热风干燥时间，从传统干燥的**6h**缩短到**4.7h**
- 联合处理表现出较单一处理手段更好的效果（脉冲电场：**5.3h**；超声波：**5.6h**）
- 水分扩散系数由 $6.06 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ 增加到 $8.67 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$



预处理对香菇复水的影响

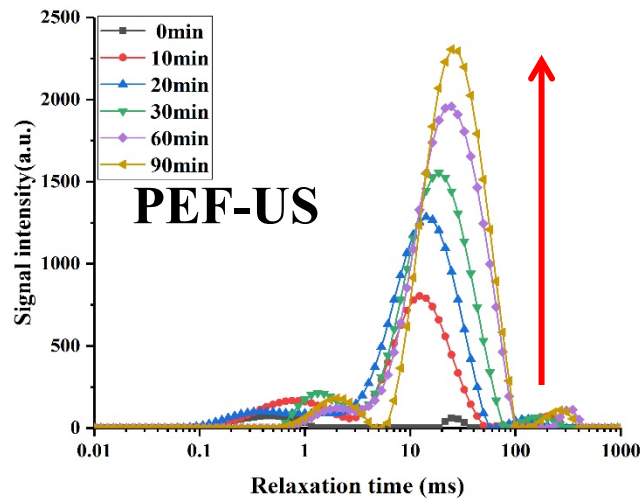
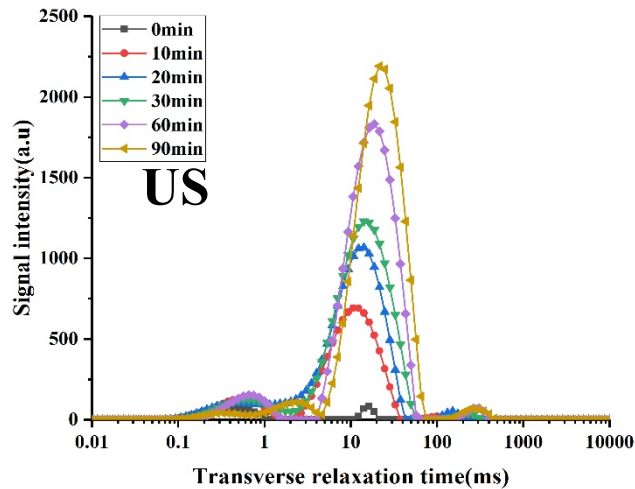
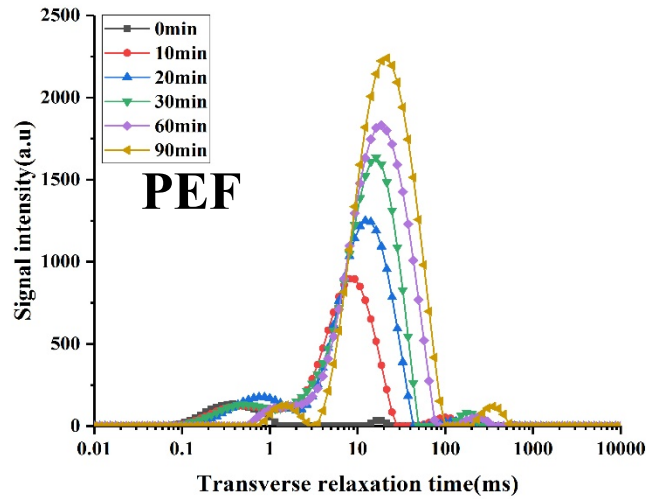
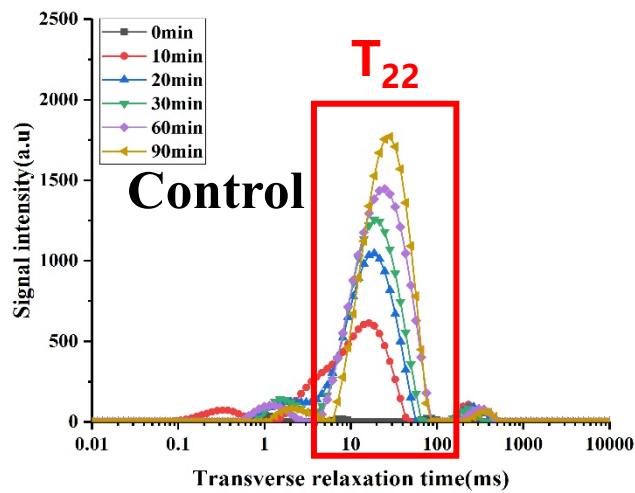


不同预处理方式干燥香菇的复水比



- **复水**是指干燥食品重新润湿的过程，它是评价干燥产品外观以及品质**恢复到原有状态**的重要指标之一
- 脉冲电场和超声波联合预处理**复水率最大**，单独脉冲电场预处理次之

脉冲电场联合超声波预处理干燥香菇



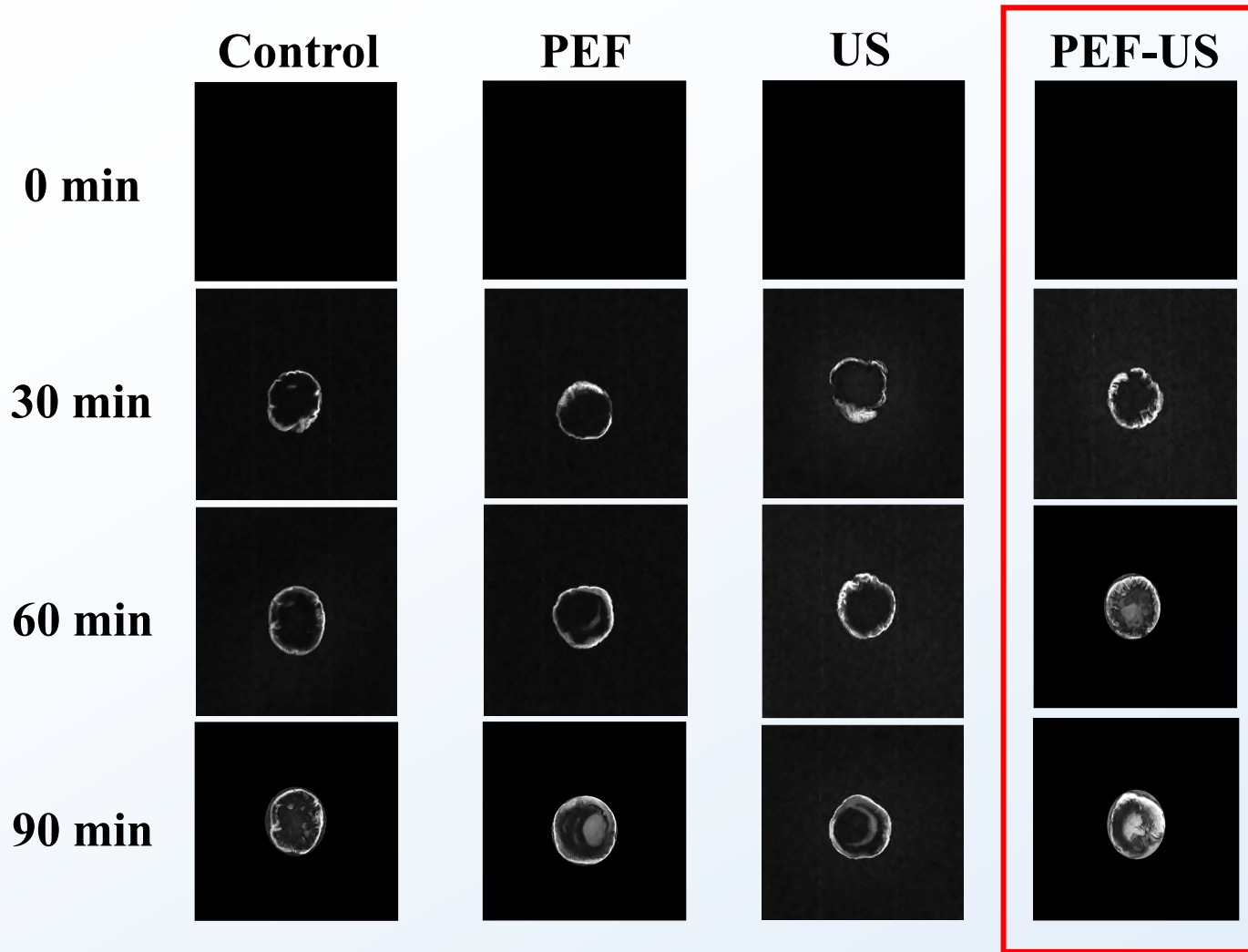
T_{21} (0.01-10 ms) 结合水
 T_{22} (10 -100 ms) 不易流动水
 T_{23} (100 -1000 ms) 自由水

- 复水初期，水分快速进入香菇体内并与细胞组织结合，以不易流动水形式保留香菇体内
- PEF-US组的复水效果最好，其T2弛豫信号明显强于其它各组；对照组复水效果最差，信号强度也相对较弱



香菇复水过程中T₂弛豫时间反演图

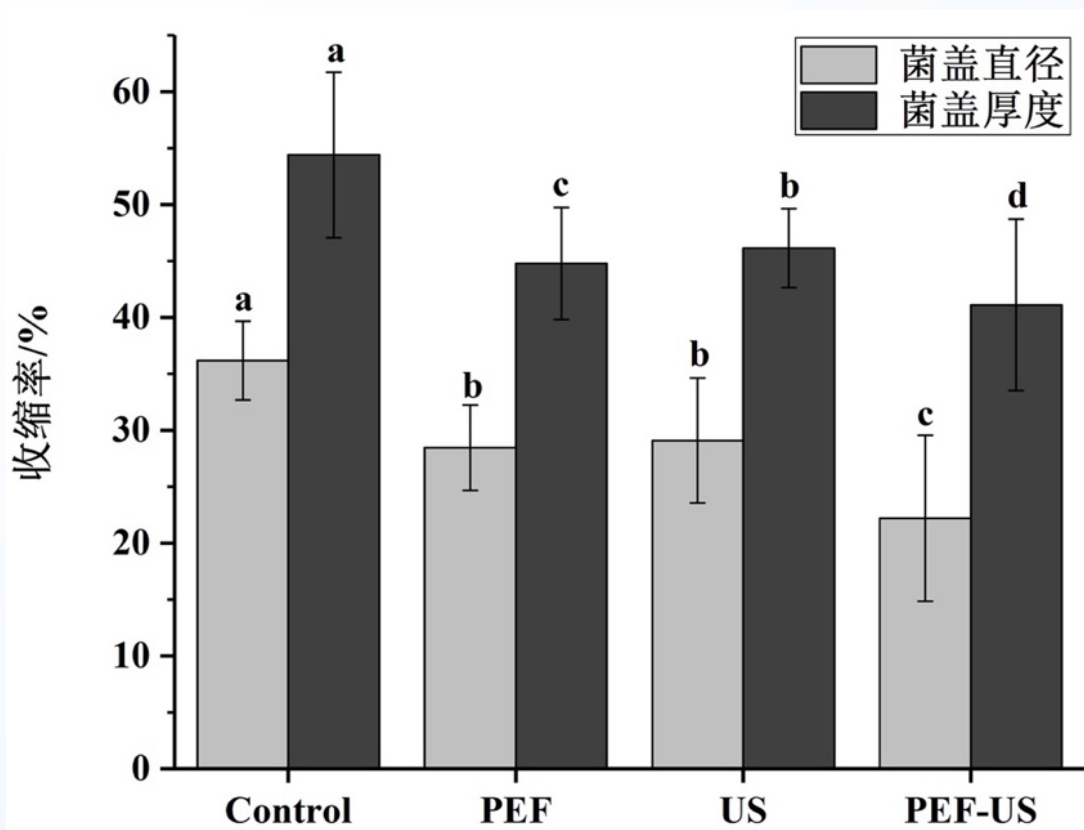
脉冲电场联合超声波预处理干燥香菇



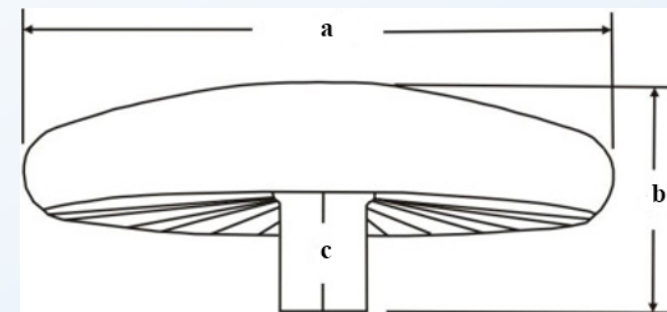
- 灰白度表示水分的含量及分布，颜色越白表示此处水分活信号强，颜色越暗则表示水分信号弱
- PEF-US组水分信号明显强于其余各组，说明其复水能力最强，对照组复水能力相对较差

MRI技术扫描香菇复水过程中2D质子密度图

预处理对香菇品质的影响



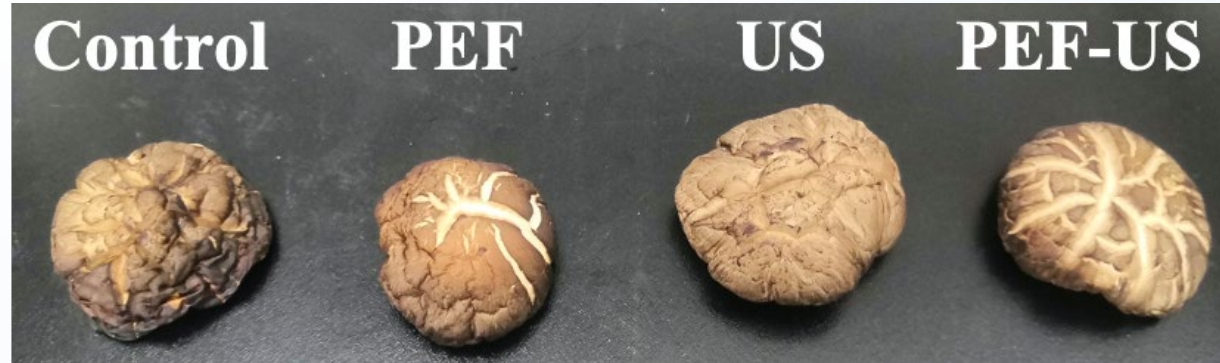
不同预处理方式对香菇收缩率的影响



实验的香菇尺寸参数

- 在热风干燥过程中，由于加热温度较高，水分扩散不均匀，导致菇帽直径和厚度产生**明显的收缩**
- 预处理的香菇收缩率更小，尤其是PEF-US组，脉冲电场联合超声处理可以实现样品的**均匀干燥**，从而**减少收缩**

脉冲电场联合超声波预处理干燥香菇



PEF-US处理的蘑菇显示出均匀的形状和视觉上更好的品质

	Control	PEF	US	PEF-US
总酚 (µg/µL)	161.76 ± 8.56a	193.32 ± 23.73ab	177.36 ± 22.53a	224.17 ± 22.20b
抗氧化活性 (DPPH)	30.83 ± 2.50a	31.79 ± 0.42ab	34.30 ± 0.45bc	34.70 ± 1.19c
可溶性糖含量 (µg/mL)	3.01 ± 0.11a	3.64 ± 0.11b	3.59 ± 0.05b	3.90 ± 0.12c
苏氨酸 (Thr)	9.37 ± 0.07c	10.82 ± 0.08a	10.74 ± 0.05a	10.42 ± 0.02b
谷氨酸 (Glu)	23.51 ± 0.24c	24.88 ± 0.35b	25.17 ± 0.20b	27.32 ± 0.29a

甜味游离氨基酸

鲜味游离氨基酸

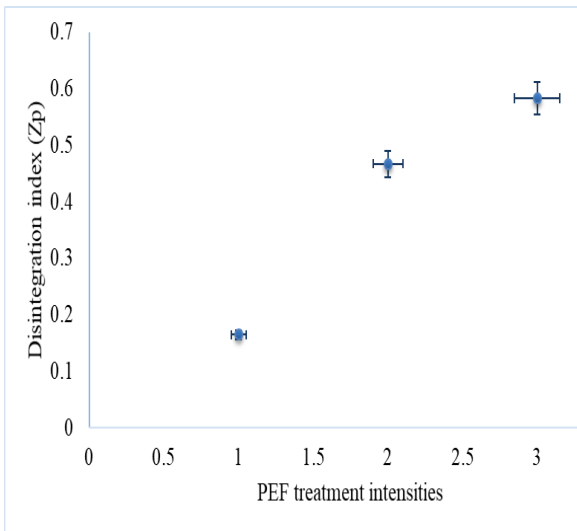


不同预处理方式对干燥香菇营养成分的影响

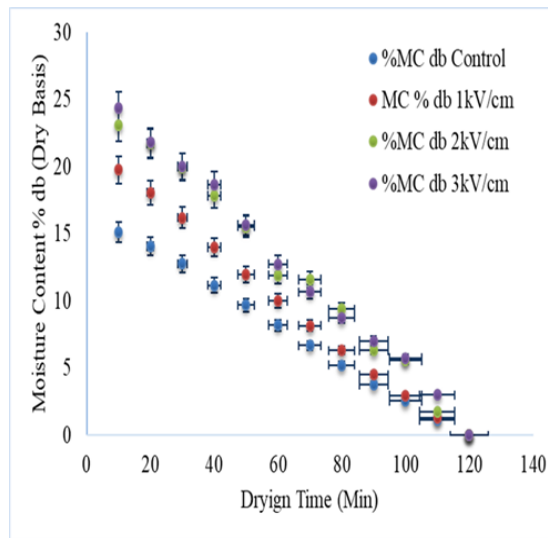
Li, X., Li, J., Wang, R., Rahaman, A., Zeng, X. A., (2021). LWT, 150, 112008
 曾新安, 李想等, 一种超声波协同脉冲电场预处理香菇的干燥方法, CN202011454018.0

脉冲电场联合超声波预处理干燥李子

	场强 (kV/cm)	脉冲 次数	超声频率 (kHz)	超声时间 (min)	水分扩散系数 ($10^{-9}m^2/s$)	斜率 (k)	R^2
Control	0	0	0	0	8.75	-3.45E-06	0.99
PEF+US	1	50	40	30	9.6	-3.82E-06	0.99
PEF+US	2	50	40	30	12.5	-4.92E-06	0.97
PEF+US	3	50	40	30	14.7	-5.81E-06	0.94



不同PEF强度处理对李子细胞崩解指数的影响



PEF+US预处理对李子水分含量的影响

- PEF处理导致李子组织损伤，细胞膜破裂
- PEF与US联合处理可加速李子的水分扩散，提高干燥速率

Rahaman, A., Zeng, X. A. Heat and Mass Transfer (2021), 1-9



脉冲电场辅助提取羊肚菌多糖

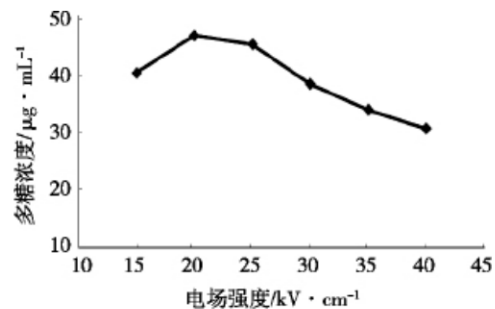


图2 电场强度对羊肚菌多糖得率的影响

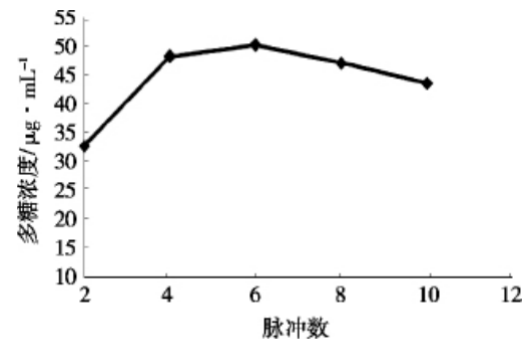


图3 脉冲数对羊肚菌多糖得率的影响

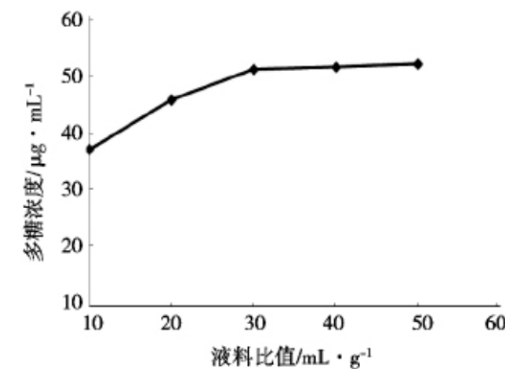
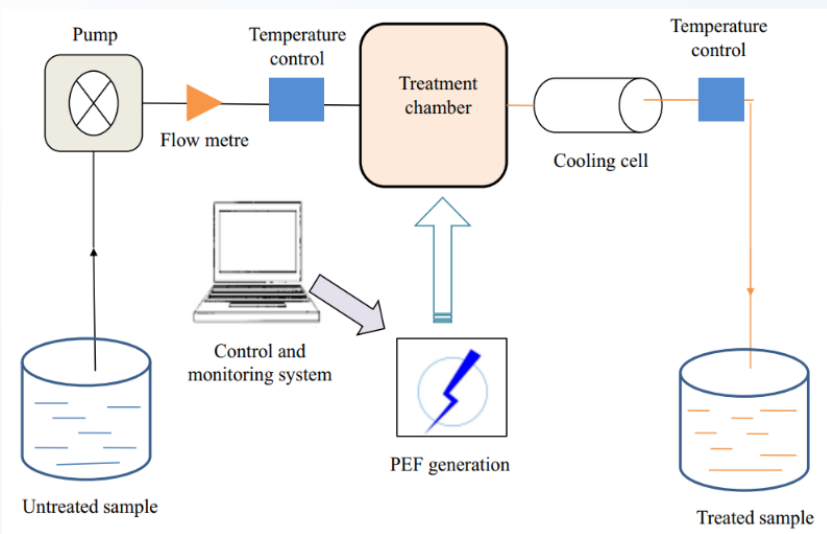


图4 液料比值对羊肚菌多糖得率的影响

电场强度：18kV/cm；脉冲数：7；料液比：27 mL/g

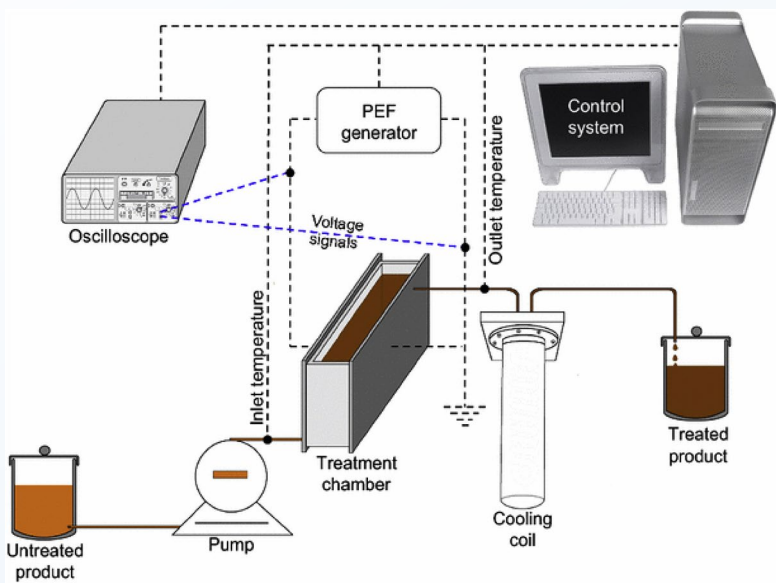
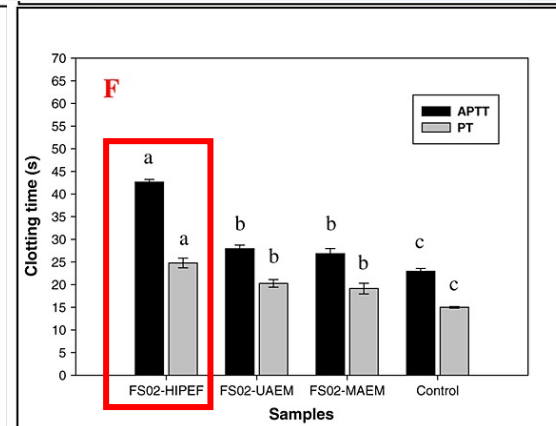
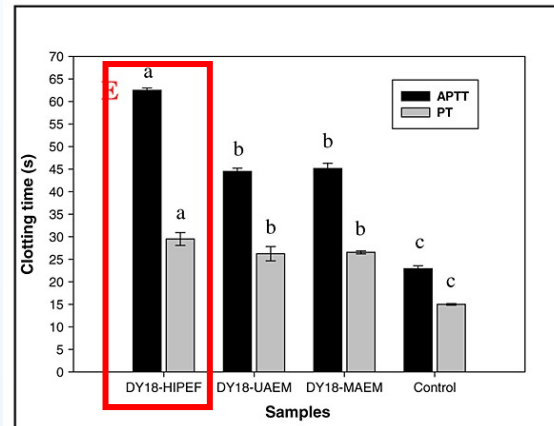
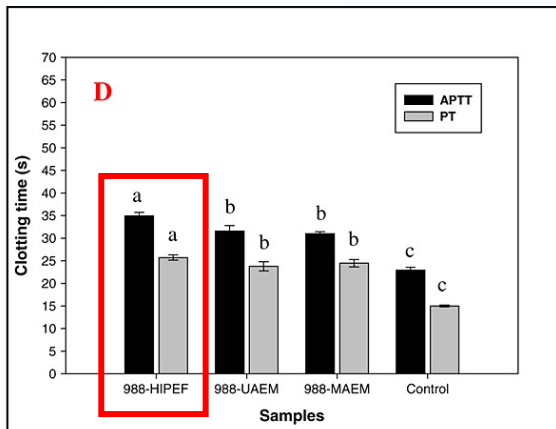
多糖得率：56.03 μg/mL



连续式PEF提取系统

张玉,刘超.高压脉冲电场法提取羊肚菌多糖及其分离纯化[J].食品工业,2016,37(12):54-58

脉冲电场辅助水提提取黑木耳多糖

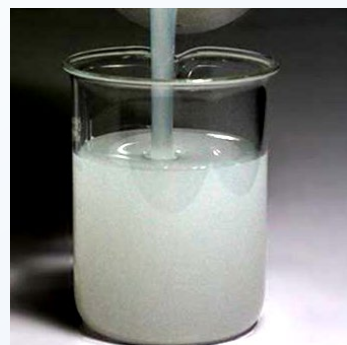
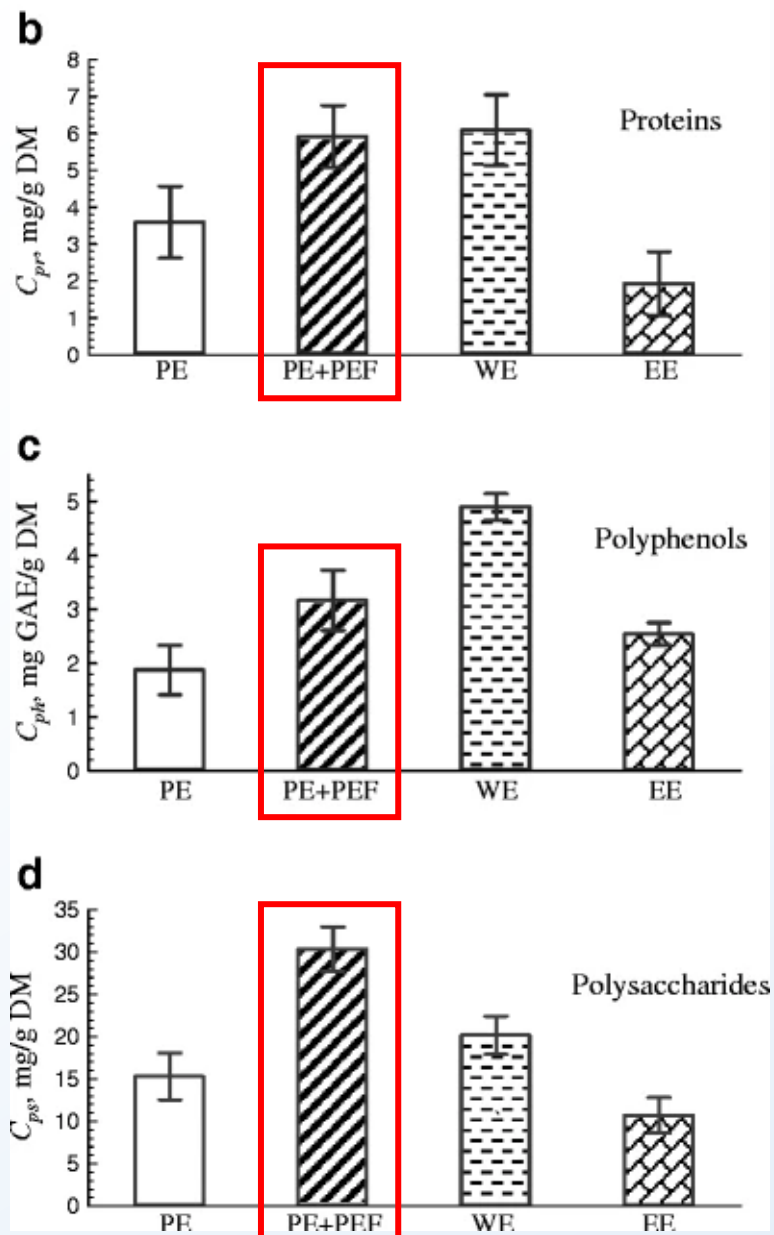


连续式PEF提取系统

- 分别采用**脉冲电场**、**微波**、**超声波**辅助水提提取三种黑木耳多糖
- 脉冲电场提取的多糖表现出最佳的**抗凝血活性**
- 脉冲电场具有**低温短时**提取特点，提取多糖**活性更高**

Li, C., Mao, X., & Xu, B. (2013). Phytochemical analysis, 24(1), 36-40

脉冲电场辅助低压处理提取香菇活性组分



乙醇/热提取体系



脉冲电场+低压提取体系

- 采用**低压、脉冲电场联合低压、热及乙醇**提取香菇中**活性组分**
- 脉冲电场联合低压处理具有较好的**蛋白、多酚及多糖**的提取效果
- 热体系提取率虽高，但是**体系浑浊，不利于后续分离**
- 脉冲电场联合低压提取**溶液澄清，胶体稳定性高，利于后续分离纯化**

Parniakov, O et al (2014). Food and bioprocess technology, 7(1), 174-183.

脉冲电场耦合超声波提取杏仁活性成分

Table 1 Effect of PEF, US and PEF-US treatment on TPC, TFC, condense tannins and anthocyanin contents of almond extract

Treatments	Total phenolics (mg GAE/g dried extract)	Total flavonoids (mg CE/g dried extract)	Condense tannin content (mg CE/g dried extract)	Total anthocyanins (mg/L)
Untreated	15.90 ± 0.10 ^d	7.13 ± 0.046 ^d	0.853 ± 0.006 ^d	0.882 ± 0.08 ^c
US	18.38 ± 0.09 ^c	8.41 ± 0.058 ^c	1.05 ± 0.008 ^c	1.051 ± 0.03 ^b
PEF	19.22 ± 0.12 ^b	8.60 ± 0.041 ^b	1.18 ± 0.007 ^b	1.103 ± 0.04 ^b
PEF-US	21.20 ± 0.06 ^a	9.72 ± 0.051 ^a	1.48 ± 0.013 ^a	1.283 ± 0.09 ^a

Mean values in a column with different letters (a–d) are significantly different ($p < 0.05$)

GAE gallic acid equivalent, CE catechin equivalent



Table 2 Effect of PEF, US and PEF-US treatment on EC₅₀ values of DPPH radical scavenging and antiradical activity of almond extract

Treatments	Mean Reduction (%)	EC ₅₀ Value (DPPH radical scavenging activity)	Slop ± SD	X ² (DF)	^a Antiradical activity
Untreated	36.872 ^d	27.576 (12.12–36.22) ^d	1.877 ± 0.27	0.733 (3)	0.036 ± 0.002 ^a
US	39.434 ^c	23.938 (11.93–36.86) ^c	1.824 ± 0.26	0.367 (3)	0.042 ± 0.003 ^a
PEF	40.336 ^b	21.957 (10.50–33.57) ^b	1.778 ± 0.25	0.507 (3)	0.046 ± 0.002 ^a
PEF-US	42.870 ^a	19.588 (09.02–30.59) ^a	1.752 ± 0.28	0.647 (3)	0.051 ± 0.004 ^a

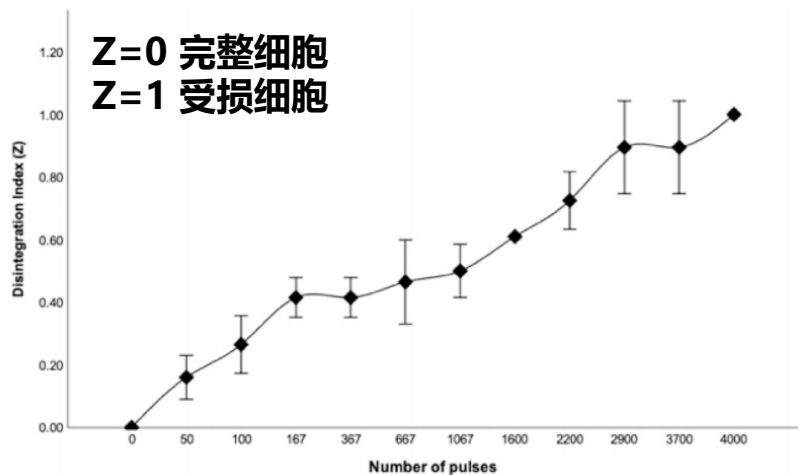
Mean values in a column with different letters (a–d) are significantly different ($p < 0.05$); EC₅₀: effective concentration of sample that can decrease DPPH concentration by 50%; ^aAntiradical activity: 1/EC₅₀. EC₅₀ value of DPPH

PEF协同US处理能提高杏仁中活性物质的提取率，总酚、黄酮、单宁、花青素含量相比较为处理组分别提升33.3%，36.3%，73.5%，45.5%，抗氧化性也有显著提高

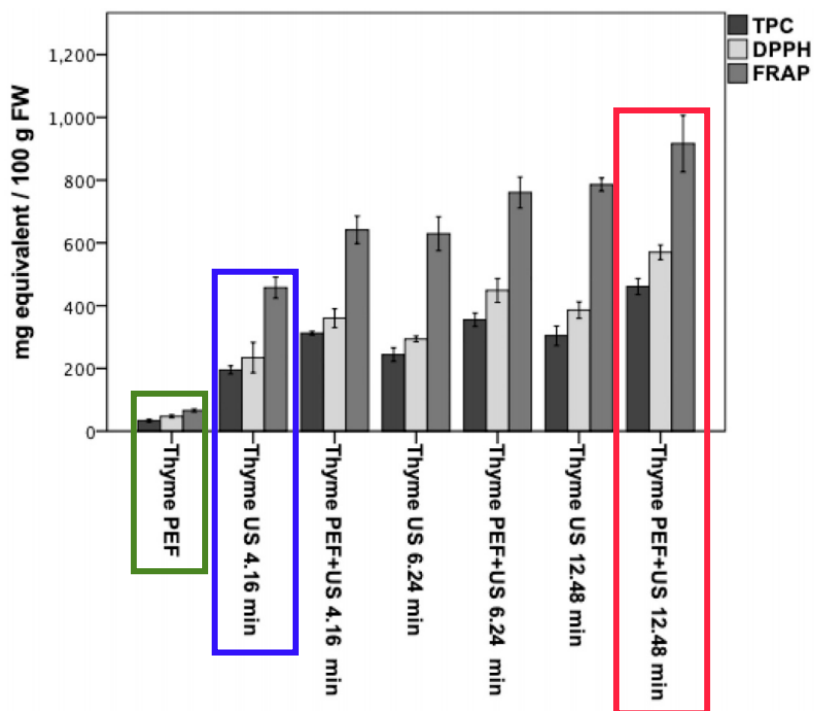
Manzoor, M. F., Zeng, X. A., Journal of Food Science and Technology (2019).56(5), 2355-2364

高被引论文

脉冲电场耦合超声波提取百里香多酚



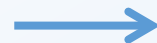
随着脉冲个数的增加，百里香电导率受损指数 (Z) 不断增加，4000个脉冲后细胞几乎完全受损



PEF协同US处理后，百里香提取物的总酚含量、抗氧化值相比较单独处理明显提高

Tzima et al., Innovative Food Science and Emerging Technologies (2021). 69, 102644

系列新型PEF装备研发及应用



15.00 %

干浸出物含量提高

20.00 %

挥发酸含量下降

19.94%

杂醇油含量下降

7.87%

颜色强度提高

18.29 %

花色苷含量提高

21.66 %

黄酮含量提高

15.46%

单宁含量提高

9.23 %

总酚含量提高

脉冲电场耦合超声波加速酚类物质提取效果

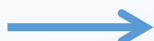
PEF在果酒工业中的应用



派虎科技



青梅酒

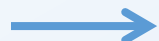
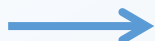


出汁率, 特征风味 ↑

起酵时间 ↓



红枣酒

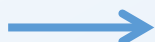


可溶性固形物, 干浸出物 ↑

挥发酸 ↓



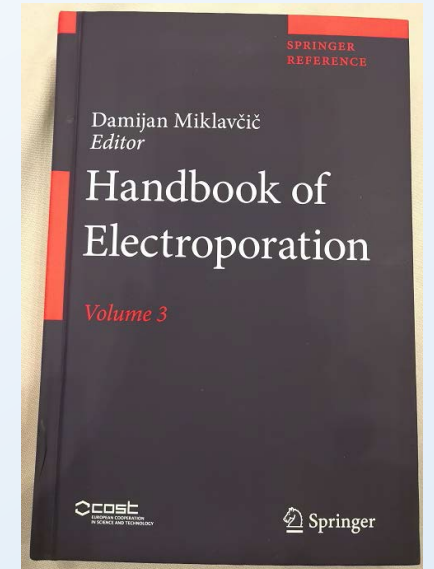
诺丽酒



出汁率, 游离氨基酸 ↑

甲醇 ↓

PEF果蔬深加工技术团队



- ◆ 主编著作2部，参编1部（Springer）
- ◆ 团队专注从事脉冲电场研究27年
- ◆ 发表超过120篇关于PEF的SCI论文，>4000次引用

