

# 环保酵素酶解玉米芯及产氢工艺优化研究

黎昕蕾, 刘玉香\*

(太原理工大学环境与生态学院, 山西 太原 030006)

**摘要:**以玉米芯为产氢底物、自制环保酵素为预处理剂,综合运用 SEM、FT-IR 及 Box-Behnken Design (BBD) 响应面法等手段,深入探究初始 pH、环保酵素添加量与温度对产氢的影响及交互作用。结果表明,环保酵素可有效酶解玉米芯提升产氢量,构建的模型优化出最佳工艺条件为初始 pH 7.18、环保酵素 158.30 mL、温度 30.72°C,预测与实际产氢量相对误差仅 3.92%,为果蔬类废弃物制备环保酵素预处理废弃生物质产氢提供了新的见解。

**关键词:**环保酵素;光发酵制氢;光合细菌;响应面法;工艺优化

中图分类号:X71

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)12-0140-07

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.12.024

## Study on enzymatic hydrolysis of corncobs by environmentally friendly enzyme and optimization of hydrogen production process

LI Xin-lei, LIU Yu-xiang\*

(College of Environment and Ecology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Corncocks are used as the hydrogen-producing substrate, and self-made environmentally friendly enzymes are taken as the pretreatment agent. The methods such as SEM, FT-IR, and Box-Behnken Design (BBD) response surface methodology are employed to investigate deeply the influences and interactions of the initial pH, the addition amount of enzymes, and temperature on hydrogen production. It is indicated that these environmentally friendly enzymes can effectively hydrolyze corncocks and increase the output of hydrogen. The best process conditions are obtained through optimization by the model constructed, including an initial pH of 7.18, an addition amount of 158.30 mL for environmentally friendly enzymes, and a temperature of 30.72°C. The relative error between the predicted and actual hydrogen output is 3.92% only. This study provides new insights into the production of hydrogen from waste biomass pretreated by environmentally friendly enzymes that are made from fruit and vegetable waste.

**Key words:** environmentally friendly enzyme; photo-fermentative hydrogen production; photosynthetic bacteria; response surface methodology; process optimization

“碳达峰”与“碳中和”目标有力地助推了零碳可再生能源技术的进步<sup>[1]</sup>。从化学结构层面来看,氢分子由单纯的氢原子组成,分子构成中不存在碳原子,所以氢能从制取、存储、运输直至终端应用的全流程环节中,均不会产生额外的碳排放<sup>[2-4]</sup>。传统制氢的方式有电解水制氢、煤气化和天然气等,成本昂贵且会对环境造成危害。相比之下,生物制氢工艺更契合可持续发展的战略目标<sup>[5-6]</sup>,生物制氢利用多种可再生生物质资源(农林业废弃物、生活污水等)作为底物进行制氢反应,这一过程不仅实现了生物质资源的高附加值产品转变,还改善了能源短缺等问题<sup>[7-9]</sup>。其中生物制氢又可分为光发酵

制氢、暗发酵制氢和光暗联合发酵产氢等<sup>[10]</sup>。光发酵生物制氢将光合细菌作为产氢菌种,可以在光照厌氧条件下利用光能进行光合作用,具有较高的产氢量和产氢速率<sup>[11]</sup>。光合细菌用来产氢的基质主要包括各种小分子有机酸,发酵之前要对生物质产氢底物进行预处理来提高产氢效果,常用的预处理方法有酸、碱、高温等,这些方法都存在能耗高和二次污染的问题<sup>[12-14]</sup>,也有研究直接利用一些商品酶来进行预处理,但成本高限制了其广泛应用<sup>[15]</sup>。面对生物质预处理这一限制因素,可以将果蔬有机废弃物通过厌氧发酵制作具有高附加值的环保酵素,环保酵素富含各种酶和活性成分,其中的生物酶会

收稿日期:2025-03-03;修回日期:2025-09-27

基金项目:山西省研究生实践创新项目(2023SJ086)

作者简介:黎昕蕾(2000-),女,硕士生;刘玉香(1969-),女,博士,教授,研究方向为废弃物资源化利用及微生物技术研究,通讯联系人,yuxiang-liu2002@126.com。

促进生物质的降解转化,而且环保酵素呈酸性( $\text{pH} < 4$ ),可以将环保酵素作为预处理生物质的酸性有机物,一方面可以减少酸碱等预处理的成本消耗,同时也可以减少二次污染<sup>[16-18]</sup>。所以,将其应用于生物质的酶解过程具有广泛的应用前景,同时其自身又是一种产氢底物<sup>[19]</sup>,不仅可以达到高值转化的目的还能实现以废治废。

本实验通过简单、绿色和经济的方式将废弃果蔬制备成环保酵素并将其应用于玉米芯的预处理进行光发酵产氢。利用 SEM 和 FT-IR 研究了环保酵素预处理玉米芯前后的形貌和性质的变化,通过 BBD 响应面法进行了产氢主要影响因素之间的交互作用分析和产氢工艺的优化,建立产氢预测模型并通过实验验证,为果蔬类废弃物制备环保酵素预处理废弃生物质产氢提供了新的见解。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 产氢底物及菌群

实验所用玉米芯从太原理工大学西区食堂获得,待其自然风干,再经过破壁机磨碎,经 60 目(0.33 mm)分样筛过筛后即为试样,室温下密封塑料袋保存。本研究使用的细菌菌株沼泽红假单胞菌 *Rhodospseudomonas palustris* PB-Z,由太原市污水厂二沉池的活性污泥中分离纯化得到。

#### 1.1.2 环保酵素的制备

将废弃蔬果切碎后,分别与红糖、水按 3:1:10 的质量比混匀,放入 2 L 密闭塑料容器中,室温避光厌氧发酵(20~25℃),该实验过程中使用的环保酵素均取自发酵第 40±2 d。

### 1.2 实验方法

在产氢实验开始前调节 pH 为 7.00。在超净台中接入 30%对数期后期 PB-Z(0.8 g/L)光合产氢细菌。将上述反应器均放在 30℃、光照强度 3 000 Lux 的光照培养箱中进行产氢实验。所有批次试验均进行 3 次,反应器均保持厌氧环境。采用气相色谱仪(GC,日本,Nexis GC-2030)分析氢含量和挥发性脂肪酸含量。

#### 1.3 产氢工艺优化实验设计

通过对初始 pH、环保酵素添加量和玉米芯添加量 3 个因素对环保酵素酶解玉米芯光发酵制氢的影响进行探究,以累积产氢量为指标,单因素实验设计见表 1。在单因素实验的基础上,通过 BBD 实验设计建立回归方程探究最佳产氢工艺条件。

表 1 单因素实验

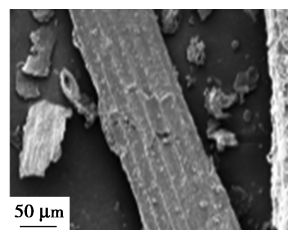
1(150 mL 环保酵素,30℃)			2(pH=7,30℃)			3(pH=7,150 mL 环保酵素)		
初始 pH			环保酵素添加量/mL			温度/℃		
5.5	6.0	6.5	75	100	125	20	25	30
7.0	7.5	8.0	150	175	200	35	40	45

## 2 结果与讨论

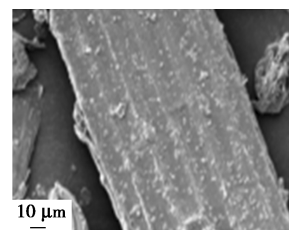
### 2.1 环保酵素添加对光发酵产氢的影响

#### 2.1.1 玉米芯的酶解

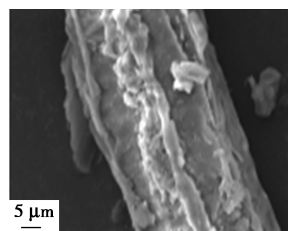
为了验证环保酵素能够有效酶解玉米芯,利用 SEM 对酶解前后玉米芯的微观结构进行了探究,如图 1 所示。从图中可以明显看出,在环保酵素酶解前,玉米芯表面相对光滑、结构致密和形态规整,酶解后的玉米芯结构被破坏,表面变得粗糙且展现出许多破碎和镂空的区域,这表明环保酵素中的纤维素酶和其他功能酶对玉米芯的成分进行了分解,破坏了原有结构<sup>[20]</sup>。环保酵素酶解玉米芯的过程中打破了玉米芯原有的复杂大分子结构,使其被分解成更容易反应的小分子物质,提高了产氢底物的利用率<sup>[21]</sup>。



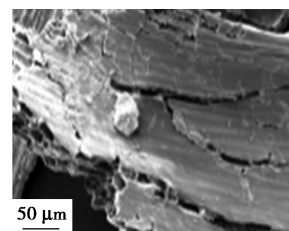
(a) 玉米芯



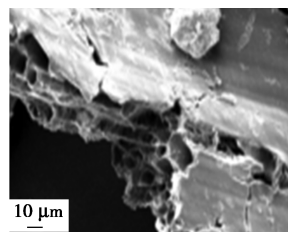
(b) 玉米芯



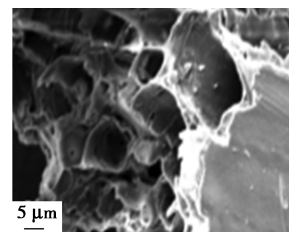
(c) 玉米芯



(d) 酶解玉米芯



(e) 酶解玉米芯



(f) 酶解玉米芯

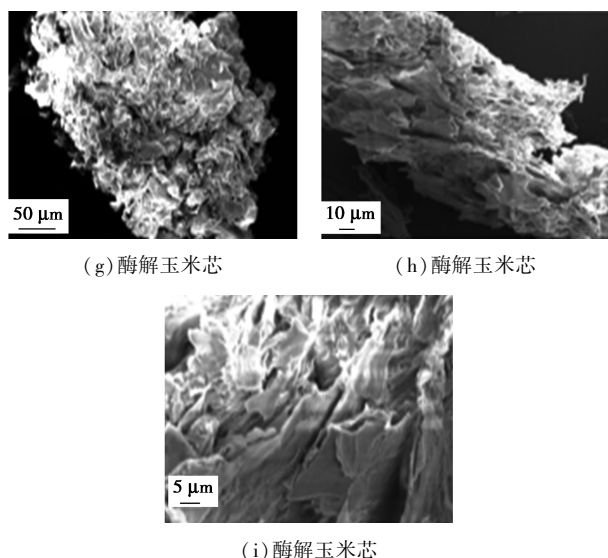


图 1 环保酵素预处理前后玉米芯的 SEM 图

如图 2 所示,从 FT-IR 中可以发现酶解后的玉米芯在  $898\text{ cm}^{-1}$  的特征峰消失,消失的特征峰可归属于纤维素和半纤维素中 C—O—C 的振动。在酶解过程中,环保酵素中所含有的酶选择性断裂  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4)糖苷键,导致多糖主链降解,同时木质素-碳水化合物复合体的破坏进一步削弱了该区域的振动信号。同时可以发现在酶解后的玉米芯  $1\ 030\text{ cm}^{-1}$  处有新的特征峰形成,原因可能是酶解暴露的多糖降解产物(如木糖、低聚糖)中 C—O—H 伸缩振动增强。在  $1\ 170\text{ cm}^{-1}$  处的特征峰发现红移现象,该处特征峰与纤维素结晶区的 C—O 振动及氢键网络相关,红移的原因可能是酶解破坏了纤维素的微纤丝结构,降低结晶度并削弱分子间氢键,导致振动频率降低<sup>[22-23]</sup>。FT-IR 结果和 SEM 一致,进一步证明环保酵素能够有效酶解玉米芯。

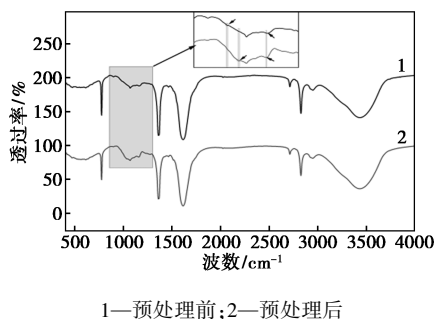


图 2 环保酵素预处理前后玉米芯的 FT-IR 图

### 2.1.2 产氢性能的影响

图 3 为不同组分光发酵产氢量,从图中可以看出玉米芯 240 h 累计产氢量仅为 104.93 mL,环保酵素因其自身也是一种优质的产氢底物,所以在 240 h 累计产氢量达到了 386.61 mL,而玉米芯加环保酵

素实验组 240 h 的累计产氢量高达 1 422.45 mL,远大于玉米芯单组分和环保酵素单组分之和的 491.54 mL,说明环保酵素耦合玉米芯能够起到促进产氢的作用,提高光发酵产氢量。

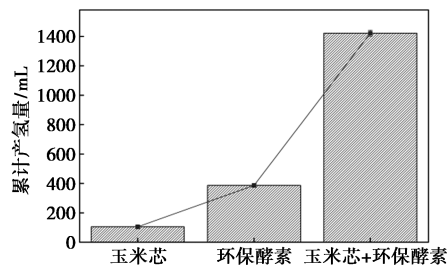


图 3 不同组分的产氢性能

### 2.2 发酵系统的成分变化

光发酵产氢系统中的液相代谢产物浓度变化如图 4 所示,从图中可以看出乙醇和丙酸在产氢过程中一直处于积累状态,表明乙醇和丙酸并不是 PBZ 产氢所消耗的物质。反之,乙酸和丁酸在产氢过程中含量处于先减小然后处于稳定状态,丁酸和乙酸的浓度从产氢开始到 240 h 产氢结束分别减少了 15.3、7.4 g/L,原因可能是光合细菌消耗用于代谢产氢的丁酸和乙酸的量大于发酵液中由还原糖转化而来的丁酸和乙酸的量<sup>[24]</sup>,与产氢实验结果相符合。图 5(a) 为产氢系统原溶液的 3D-EEM,图 5(b)~(d) 分别为产氢 48、96、220 h 时的产氢发酵液的 3D-EEM。从图中可以看出初始原液主要是环保酵素预处理酶解玉米芯后的混合物,含未完全分解的大分子,荧光强度低且分布均匀。在产氢 48 h 时,PBZ 会分解产氢系统中的大分子,产生低聚糖、短链脂肪酸和辅酶等,部分区域荧光会发生增强。在产氢 96 h 时达产氢率峰值,光合色素、铁-硫蛋白等关键产氢物质会发生大量积累,在 3D-EEM 出现峰强度上升。在产氢 220 h,产氢所需要的物质已经被消耗转化,转化而来的副产物和次级代谢物会在产氢系统中生成,使得荧光强度分布改变。

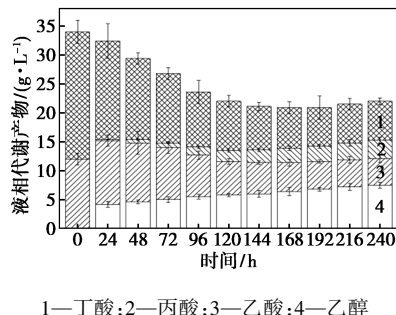


图 4 产氢过程中的液相代谢产物

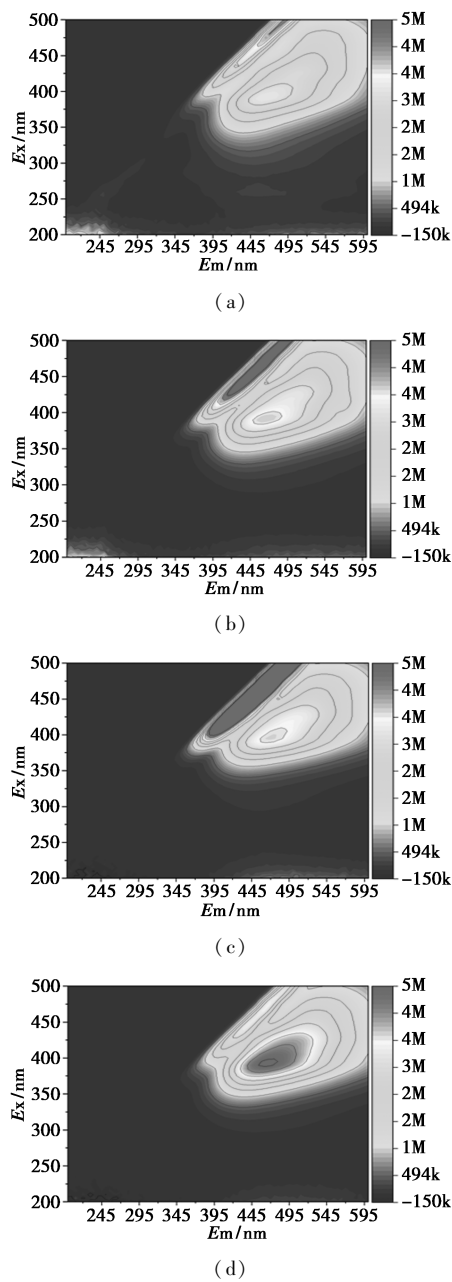


图 5 产氢过程中的 3D-EEM

### 2.3 微生物群落分析

为了揭示群落组成的进化,在门和属水平进行了分类学分析,如表 2 所示。优势微生物属于 Pseudomonadota、Bacillota 和 Bacteroidota 的前 3 个门,其中 Pseudomonadota 门占比最高为 45.73%。根据之前的研究<sup>[25]</sup>,Pseudomonadota 代谢多样,可分解复杂有机物为可用物质;Bacillota 利用碳水化合物等产氢;Bacteroidota 降解纤维素、蛋白质等为小分子底物,共同扩大底物利用范围,三者相互协同,还与其他产氢微生物配合,提高产氢效率和产量。属水平中 Rhodopseudomonas 占比 47.84%,通过多种代谢方式利用光能将有机底物转化为氢气<sup>[26]</sup>。

表 2 门和属分类学分析

门水平	占比/%	属水平	占比/%
Pseudomonadota	45.73	Rhodopseudomonas	47.84
Bacillota	52.19	Clostridium	35.49
Bacteroidota	0.93	Citrobacter	4.65
其他	1.15	其他	12.02

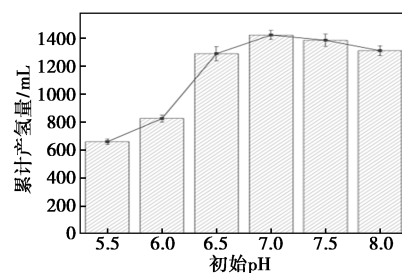
### 2.4 光发酵产氢工艺的优化

#### 2.4.1 单因素实验

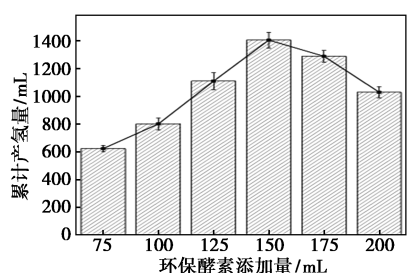
在图 6(a)中,随着初始 pH 从 5.5 上升到 8.0,累计产氢量呈现先上升后下降的趋势。在初始 pH 为 5.5 时累计产氢量最低,随着初始 pH 上升,累计产氢量在初始 pH 为 7.0 时达到最高,相比于 pH 为 5.5 时,累计产氢量从 657.24 mL 上升到 1 422.68 mL,表明光和细菌 PBZ 更适合在中性和偏碱性的条件下产氢,且在偏酸性条件下仍能表现出一定的产氢能力,说明其具有一定的耐酸性。

如图 6(b)所示,随着环保酵素添加量从 75 mL 增加到 200 mL,累计产氢量呈现先上升后下降的趋势,说明环保酵素过少和过多的添加都不利于光合产氢。随着环保酵素添加量增加,累计产氢量在环保酵素添加量为 150 mL 时达到最高,原因可能是随着环保酵素添加量的增多,光发酵系统中产氢物质和纤维素酶的含量升高促进了产氢。但当环保酵素添加量从 150 mL 增加到 200 mL 时,累计产氢量出现下降趋势,原因可能是环保酵素作为产氢底物的一部分,进一步增加导致光法发酵体系中挥发性脂肪酸的积累,抑制了光合细菌 PBZ 的活性,对底物利用不充分,导致产氢能力下降。

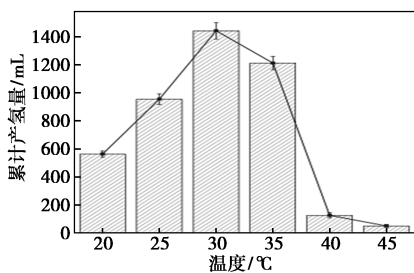
如图 6(c)所示,随着温度从 20℃ 增加到 45℃,累计产氢量呈现先上升后下降的趋势,说明光发酵系统的温度过低和过高都不利于光合产氢。在光发酵系统的温度从 20℃ 上升到 30℃ 时累计产氢量逐渐上升,原因可能是温度过低时会影响细胞活性进而降低其代谢能力导致产氢能力下降。当光发酵系统的温度从 30℃ 上升到 45℃ 时累计产氢量先缓慢



(a) pH



(b) 环保酵素添加量



(c) 温度对产氢的影响

图 6 单因素对产氢性能的影响

下降后急剧下降,在 45℃时累计产氢量仅为 50.24 mL,原因可能是温度过高会导致光合细菌的快速死亡,导致光发酵产氢性能急剧下降。

### 2.4.2 响应面模型设计

单因素实验结果可以发现 pH、环保酵素添加量和温度是影响光发酵产氢的重要因素,因此根据单因素实验结果利用 BBD 模型对这 3 个产氢影响因素进行研究并分析各因素之间的交互作用,以累计产氢量为实验响应值进而优化产氢工艺,实验设计及结果如表 3 所示。

表 3 BBD 实验设计及结果

实验号	初始 pH ( $X_1$ )	环保酵素添加量 ( $X_2$ )/mL	温度 ( $X_3$ )/°C	产气量 (Y)/mL
1	7	150	30	1422.68
2	8	200	30	1002.14
3	8	150	35	1120.21
4	8	100	30	752.56
5	8	150	25	884.35
6	7	150	30	1402.32
7	6	150	25	790.56
8	7	200	25	904.34
9	6	100	30	720.64
10	7	200	35	1057.32
11	6	200	30	750.29
12	7	100	35	758.54
13	6	150	35	790.64
14	7	100	25	739.27
15	7	150	30	1442.36

### 2.4.3 响应面实验结果和方差分析

根据 BBD 实验设计的结果,将初始 pH、环保酵素添加量和温度 3 个影响因素回归拟合后得到的二次编码方程为:

$$Y = 88.39X_1 + 92.88X_2 + 51.02X_3 + 54.98X_1X_2 + 58.94X_1X_3 + 33.43X_2X_3 - 292.24X_1^2 - 323.81X_2^2 - 233.78X_3^2 + 1422.45$$

该二次回归编码方程的  $R^2 = 0.9918$ ,表明该模型在实验范围内实验结果和预测值拟合较好;修正决定系数为 0.9771,表明该方程的拟合程度较高;变异系数为 4.13%,表明实验数据的重复性优异。BBD 实验设计及结果模型如表 4 所示,根据模型参数表明该模型可代替实际值对光发酵产氢进行工艺优化和预测。

表 4 BBD 模型

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	$9.699 \times 10^5$	9	$1.078 \times 10^5$	67.31	0.0001
$X_1$	62504.10	1	62504.10	39.04	0.0015
$X_2$	69020.99	1	69020.99	43.11	0.0012
$X_3$	20827.38	1	20827.38	13.01	0.0154
$X_1X_2$	12092.30	1	12092.30	7.55	0.0404
$X_1X_3$	13898.05	1	13898.05	8.68	0.0320
$X_2X_3$	4469.59	1	4469.59	2.79	0.1556
$X_1^2$	$3.153 \times 10^5$	1	$3.153 \times 10^5$	196.96	<0.0001
$X_2^2$	$3.871 \times 10^5$	1	$3.871 \times 10^5$	241.82	<0.0001
$X_3^2$	$2.018 \times 10^5$	1	$2.018 \times 10^5$	126.04	<0.0001
残差	8004.97	5	1600.99		
失拟项	7203.29	3	2401.10	5.99	0.1464
净误差	801.68	2	400.84		
合计	$9.779 \times 10^5$	14			

### 2.4.4 各影响因素之间的交互作用分析及最佳产氢工艺条件

图 7(a) 显示初始 pH 与环保酵素添加量的交互作用对其酶解玉米芯光发酵产氢的影响。曲面呈典型抛物面且顶部有峰值区域,说明特定初始 pH 与酵素添加量组合下,产氢量达最大。从等高线及曲面趋势看,随 pH 或酵素添加量变化,产氢量均先升后降,过高或过低 pH 不利产氢,需在适宜范围,环保酵素添加量也呈现相同规律。因  $P < 0.05$ ,二者交互作用显著,对产氢量的联合影响非单独影响简单相加,两者相互作用会对光发酵产氢产生独特的效应。

图 7(b) 为初始 pH 和温度的交互作用对环保

酵素酶解玉米芯光发酵产氢的影响。从图中可以看到在固定环保酵素添加量为 150 mL 时,产氢量随 pH 和温度变化呈现先上升后下降趋势,存在一个峰值区域,即有特定的 pH 和温度组合能使产氢量达到最优。因  $P$  值小于 0.05,说明 pH 和温度间交互作用显著。

图 7(c) 显示环保酵素添加量与温度的交互作用对其酶解玉米芯光发酵产氢的影响。三维曲面呈穹顶状,产氢量随二者变化先升后降,存在最佳组合。酵素因量、温度因对微生物及酶促反应影响产氢。二者交互作用  $P=0.1556 > 0.1$ ,作用不显著,联合影响为单独作用叠加,一方变化时另一方对产

氢的影响趋势稳定。

通过 BBD 响应面模型优化得到的最佳产氢工艺条件为:初始 pH 为 7.18、环保酵素添加量为 158.30 mL、温度为 30.72°C,预测最大产氢量为 1 441.86 mL,如图 7(d) 为预测三维响应面图。为了验证该模型的准确性,在最佳工艺条件下进行了光发酵产氢实验,累计产氢量为 1 385.32 mL,与该模型的预测值相比较其相对误差仅为 3.92%,表明该模型拟合程度具有较高的可靠性,具有很好的参考价值。

### 3 结论

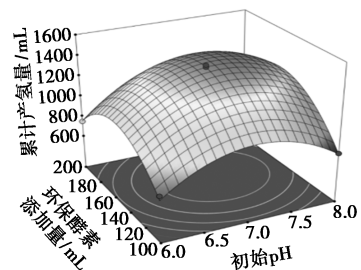
(1) 本研究通过 SEM、FT-IR 表征手段结合产氢实验成功揭示了利用果蔬废弃物制备环保酵素能够有效酶解玉米芯提高光发酵产氢量,为果蔬废弃物的资源化利用和产氢底物的预处理提供了新的见解。

(2) 探究了初始 pH、环保酵素添加量和温度这 3 个主要影响因素及其之间的交互作用对光发酵产氢的影响,结果表明初始 pH 和温度、初始 pH 和环保酵素添加量之间的交互作用对产氢量影响较为显著,环保酵素添加量和温度之间的交互作用对产氢的影响较小。

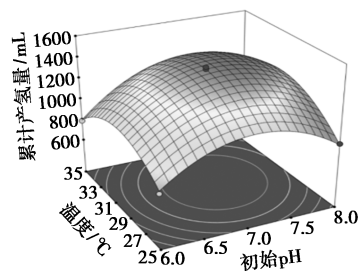
(3) 构建了 BBD 响应面预测模型并优化了光发酵产氢工艺,在最佳产氢工艺条件下实际值与预测值相对误差仅为 3.92%,表明该模型拟合程度具有较高的可靠性,具有很好的参考价值。

### 参考文献

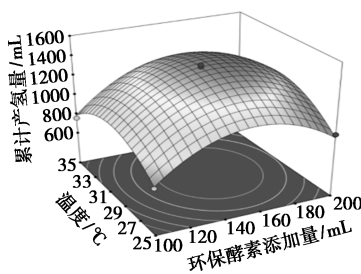
- [1] Evro S, Oni B A, Tomomewo O S. Carbon neutrality and hydrogen energy systems [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 78: 1449–1467.
- [2] Li D, Xu X, Jiang J, et al. Coupled electrocatalytic hydrogen production [J]. *Materials Science and Engineering: Reports*, 2024, 160: 100829.
- [3] De Oliveira D S, Costa A L, Velasquez C E. Hydrogen energy for change: SWOT analysis for energy transition [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2024, 72: 104063.
- [4] Ren C, Zhang S, Li Q, et al. Pilot composite tubular bioreactor for outdoor photo-fermentation hydrogen production: From batch to continuous operation [J]. *Bioresource Technology*, 2024, 401: 130705.
- [5] Li Y, Jiang Q, Yang X, et al. Enhanced photo-fermentative hydrogen production by constructing *Rhodobacter capsulatus*-ZnO/ZnS hybrid system [J]. *Bioresource Technology*, 2024, 414: 131632.
- [6] 马国杰, 郭鹏坤, 常春. 生物质厌氧发酵制氢技术研究进展 [J]. *现代化工*, 2020, 40(7): 45–49, 54.



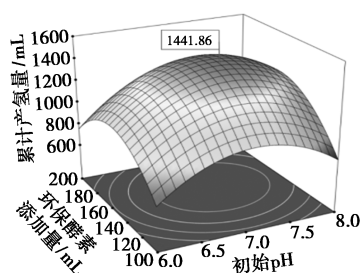
(a)



(b)



(c)



(d)

图 7 响应面交互作用分析及最佳产氢工艺条件

- [7] Sahil S, Singh R, Masakapalli S K, *et al.* Biomass pretreatment, bioprocessing and reactor design for biohydrogen production: A review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2024, 22(4): 1665–1702.
- [8] Aslam A, Bahadar A, Liaquat R, *et al.* Recent advances in biological hydrogen production from algal biomass: A comprehensive review[J]. *Fuel*, 2023, 350: 128816.
- [9] 钟家伟, 谭涛, 谢君, 等. 生物质高值能源转换技术[J]. *化工进展*, 2025, 44(5): 2524–2528.
- [10] Jiang Q, Li Y, Wang M, *et al.* Light energy utilization and microbial catalysis for enhanced biohydrogen: Ternary coupling system of triethanolamine-mediated Fe@C-Rhodobacter sphaeroides[J]. *Bioresource Technology*, 2024, 401: 130733.
- [11] Guo S, Lu C, Wang K, *et al.* Effect of citrate buffer on hydrogen production by photosynthetic bacteria[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 347: 126636.
- [12] Budiman P M, Wu T Y. Role of chemicals addition in affecting biohydrogen production through photofermentation[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 165: 509–527.
- [13] 屈皓, 李玉霞, 刘玉香. 生物质光发酵制氢技术研究进展[J]. *现代化工*, 2025, 45(1): 56–61.
- [14] Zhang T, Jiang D, Li Y, *et al.* Lignin removal, reducing sugar yield and photo-fermentative biohydrogen production capability of corn stover: Effects of different pretreatments[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 346: 126437.
- [15] Zhang C, Zhang L, Ma Y, *et al.* Improving photofermentative hydrogen productivity of photosynthetic bacteria using a formulated Fe and Mo metal supplemented lignocellulosic substrate[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 49: 516–531.
- [16] 程晓娇, 刘玉香, 张松涛. 环保酵素应用的研究进展[J]. *现代化工*, 2023, 43(1): 67–70, 76.
- [17] 苏本营, 周美华, 李晶, 等. 农业废弃物生产环保酵素及其应用研究进展[J]. *北方园艺*, 2024, (8): 119–125.
- [18] Gao Y, Liu P. Research progress in application of garbage enzyme in soil improvement, agricultural production and environmental management[J]. *Advances in Environmental Protection*, 2020, 10(4): 541–548.
- [19] 屈皓, 刘玉香, 李玉霞. 菠萝皮渣发酵液光发酵制氢工艺参数优化[J]. *农业环境科学学报*, 2025, 44(2): 491–498.
- [20] 张文璐, 李海明, 于光, 等. LiBr 辅助球磨预处理提升玉米芯木糖渣酶解转化葡萄糖效率的研究[J]. *中国造纸*, 2024, 43(1): 7–14.
- [21] 路朝阳, 王毅, 荆艳艳, 等. 基于 BBD 模型的玉米秸秆光合生物制氢优化实验研究[J]. *太阳能学报*, 2014, 35(8): 1511–1518.
- [22] 杜涓安, 刘娜, 王园. 酶解玉米芯制备及其水提物体外酵解特性研究[J]. *饲料研究*, 2021, 44(11): 61–64.
- [23] 时有明, 晏翠琼, 孙艳琳, 等. 五种杂交玉米籽粒品质的 FT-IR 光谱研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(11): 2945–2948.
- [24] Zhang T, Jiang D, Li Y, *et al.* Study of the interrelationship between nano-TiO<sub>2</sub> addition and photo-fermentative bio-hydrogen production of corn straw[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 338: 125549.
- [25] Wang H, Xing D, Jin C, *et al.* Cooperation of rhamnolipid and thermophilic bacteria modifies proteinic structure, microbial community, and metabolic traits for efficient solubilization and acidogenesis of mariculture solid wastes[J]. *Water Research*, 2025, 268: 122634.
- [26] Pei Y, Zhang J, Zhou C, *et al.* Hydrothermal carbon microspheres and their iron salt modification for enhancing biohydrogen production[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 385: 129371. ■

(上接第 139 页)

- [10] 薛莹莹, 林福兴, 别小妹, 等. ARTP 诱变联合抗生素抗性选育纳豆激酶高产菌株[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(23): 93–97.
- [11] 王慧冬, 修建龙, 黄立信, 等. 一株采油枯草芽孢杆菌发酵条件优化[J]. *应用化工*, 2021, 50(12): 3223–3226, 3239.
- [12] 武艳芳, 甄静, 郭光光, 等. 毛栓孔菌 XYG422 产木质素降解酶的固体发酵工艺研究[J]. *饲料研究*, 2023, (15): 93–97.
- [13] 徐春燕, 贾晨波, 郭洋, 等. 干旱土壤中产漆酶真菌的分离、鉴定与生长特性分析[J]. *基因组学与应用生物学*, 2021, (3): 1163–1170.
- [14] 叶婷婷, 张建芬, 陈虹. 一株血红栓菌的分离鉴定及其产漆酶发酵条件与脱色研究[J]. *食品工业科技*, 2020, (20): 104–108, 115.
- [15] Salem M M, Mohamed T M, Shaban A M, *et al.* Optimization, purification and characterization of laccase from a new endophytic *Trichoderma harzianum* AUMC14897 isolated from opuntia Ficus-Indica and its applications in dye decolorization and wastewater treatment[J]. *Microbial Cell Factories*, 2024, 23(1): 266.
- [16] 闫忠杰, 王俊明, 刘新利, 等. ARTP 法改良变色栓菌 ATCC20869 发酵漆酶[J]. *齐鲁工业大学学报*, 2024, 38(5): 47–57.
- [17] 吴家和, 罗晓丽, 李淑君, 等. pH 值对培养基颜色的影响研究[J]. *中国棉花*, 1999, (11): 7–8.
- [18] Othman A M, Mahmoud M, Abdelraof M, *et al.* Enhancement of laccase production from a newly isolated *Trichoderma harzianum* S7113 using submerged fermentation: Optimization of production medium via central composite design and its application for hydroquinone degradation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 192: 219–231.
- [19] Nyanhongo G S, Gomes J, Gübitz G, *et al.* Production of laccase by a newly isolated strain of *Trametes Modesta*[J]. *Bioresource Technology*, 2002, 84(3): 259–263.
- [20] 邢宏博, 郑玉娇, 蔡汉聪, 等. 红色红曲菌 BM0321 液态发酵产莫纳可林 K 发酵条件探究[J]. *饲料研究*, 2025, 48(1): 157–162.
- [21] 陈守菊, 李松, 陈阿娜, 等. 一株产漆酶真菌的筛选、鉴定及发酵研究[J]. *安徽工程大学学报*, 2015, 30(2): 6–11. ■