

## 新材料技术

纳米 TiO<sub>2</sub> 光催化条件对乙烯降解性能的影响劳彩娴<sup>1</sup>, 卢立新<sup>1,2</sup>, 潘嘹<sup>1,2</sup>, 卢莉璟<sup>1,2</sup>, 张大海<sup>3</sup>

(1.江南大学 机械工程学院, 无锡 214122;

2.江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 无锡 214122;

3.宿迁利华农业发展有限公司, 宿迁 223833)

**摘要:**目的 研究光源、乙烯初始浓度等反应条件对纳米 TiO<sub>2</sub> 光催化降解乙烯气体的影响, 为纳米 TiO<sub>2</sub> 脱除乙烯的实际应用提供参考。方法 向密闭反应器中加入纳米 TiO<sub>2</sub> 和乙烯气体, 在室温下稳定后, 设置光源和光照强度, 对反应器进行照射, 利用气相色谱法检测乙烯的浓度, 计算乙烯的降解率; 研究紫外光波长、光强度、乙烯初始浓度、纳米 TiO<sub>2</sub> 添加量对乙烯降解效率的影响。结果 在 254 nm 的紫外光照射下, 乙烯的降解率最大, 反应 2 h 后, 降解率高达 95.92%; 光源距离越短, 光强度越高, 当光强度大于 28.00 W/cm<sup>2</sup> 时, 乙烯降解率随光强度的增加急剧上升; 乙烯的降解率随着乙烯初始浓度的增大而降低; TiO<sub>2</sub> 添加量在 0.05~0.5 g 内时, 乙烯的降解率随着纳米 TiO<sub>2</sub> 添加量的增加而增大, 并随着时间的延长逐渐趋于稳定。结论 紫外光波长越短, 光强度越高; 乙烯初始浓度越低, 纳米 TiO<sub>2</sub> 的添加量越多, 乙烯的降解率越大。

**关键词:**果蔬保鲜; 纳米二氧化钛; 光催化; 乙烯; 气相色谱法

中图分类号: O643.36 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)13-0104-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.13.015

Effect of Photocatalytic Conditions on the Degradation Property of Ethylene by Nano-TiO<sub>2</sub>LAO Cai-xian<sup>1</sup>, LU Li-xin<sup>1,2</sup>, PAN Liao<sup>1,2</sup>, LU Li-jing<sup>1,2</sup>, ZHANG Da-hai<sup>3</sup>

(1.School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2.Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, China;

3.Lihua Agricultural Development Co., Ltd., Suqian 223833, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the effects of reaction conditions such as light source and initial ethylene concentration on the photocatalytic degradation of ethylene gas by nano-TiO<sub>2</sub>, to provide reference for the practical application regarding removal of ethylene by nano-TiO<sub>2</sub>. Firstly, the Nano-TiO<sub>2</sub> and ethylene gas were added into the closed reactor. Then, after stabilized at room temperature, the reactor was irradiated at different light intensities with different ultraviolet lights. The ethylene concentration was detected by gas chromatography to calculate the degradation rate of ethylene. In this way, the effects of the ultraviolet light's wavelength, light intensity, initial ethylene concentration and addition amount of Nano-TiO<sub>2</sub> on the degradation efficiency of ethylene were studied. The degradation rate of ethylene was

收稿日期: 2019-02-21

基金项目: 国家科技支撑计划 (2015BAD16B06); 江苏省苏北科技专项资金项目 (BN2015164)

作者简介: 劳彩娴 (1994—), 女, 江南大学硕士生, 主攻食品包装材料。

通信作者: 卢立新 (1966—), 男, 博士, 江南大学教授、博导, 主要研究方向为食品包装技术与安全、包装系统与装备等。

the highest with the irradiation of 254 nm ultraviolet light, which reached up to 95.92% after 2 h. The shorter the light distance, the higher the light intensity. When the light intensity was more than 28.00 W/cm<sup>2</sup>, the ethylene degradation rate increased sharply with the increase of light intensity. The degradation rate of ethylene decreased with the increase of initial concentration of ethylene. When the addition amount of TiO<sub>2</sub> was 0.05~0.5 g, the degradation rate of ethylene increased with the addition of Nano-TiO<sub>2</sub>, and gradually stabilized with the extension of time. The shorter the wavelength of ultraviolet light is, the higher the light intensity is. The lower the initial concentration of ethylene is, the more the Nano-TiO<sub>2</sub> added is, the greater the degradation rate of ethylene is.

**KEY WORDS:** fruit and vegetable preservation; nano-TiO<sub>2</sub>; photocatalysis; ethylene; gas chromatography

我国是一个果蔬大国,每年因果蔬浪费造成的经济损失多达上亿元,造成果蔬浪费的主要原因是果蔬自身积累或从外界引入了过量的乙烯。乙烯<sup>[1-3]</sup>是一种植物内源激素,广泛存在于植物的所有组织内。乙烯浓度达到 0.1 mg/kg 时,即可引发果蔬成熟,过量的乙烯会加剧果蔬成熟,使其迅速衰老、品质劣化,进而缩短果蔬的贮藏寿命。

目前脱除乙烯的方法主要包括<sup>[4]</sup>低压储存、通风换气、物理化学脱除和光催化降解等。其中,纳米 TiO<sub>2</sub> 光催化技术因绿色无污染、操作简便等优点成为了研究热点。纳米 TiO<sub>2</sub><sup>[5-7]</sup>是一种 n 型半导体材料,在波长小于或等于 387 nm 的紫外光照射下可将有机污染物降解为 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 等无害物质。

20 世纪初期,国内外学者<sup>[8-10]</sup>对纳米 TiO<sub>2</sub> 在乙烯脱除上的应用进行了大量研究。林兰钰<sup>[11]</sup>考察了温度、光源和不同贵金属负载对氧化钛基催化剂光降解乙烯效率的影响。黄雅丽<sup>[12]</sup>等采用溶胶-凝胶法和浸渍法制备了掺杂有 Gd<sup>3+</sup> 的 TiO<sub>2</sub> 光催化剂,研究了 2 种不同工艺及反应温度等动力学因素对光催化降解反应的影响。郑森鸿<sup>[13]</sup>等研究了 <sup>60</sup>Co- $\gamma$  射线的辐照剂量对 TiO<sub>2</sub> 薄膜及负载了银和 TiO<sub>2</sub> 的活性炭纤维毡 (Ag-TiO<sub>2</sub>/ACF) 降解乙烯的影响。Chiara<sup>[14]</sup>制备并比较了 5 种不同 TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 质量比的介孔 TiO<sub>2</sub>/纳米 SiO<sub>2</sub> 复合材料脱除乙烯以延长番茄货架期的能力。

目前,虽然在纳米 TiO<sub>2</sub> 光催化乙烯应用领域上的研究众多,但大多都是针对所制备或改性纳米 TiO<sub>2</sub> 的自身特性(如晶型、粒径、掺杂金属离子等)或环境因素(如温度、氧气或水蒸气含量)对乙烯脱除效率的影响进行研究,对于纳米 TiO<sub>2</sub> 光催化降解乙烯使用条件的研究相对较少。综上所述,文中拟研究紫外光波长、光强度、乙烯初始浓度和纳米 TiO<sub>2</sub> 添加量对纳米 TiO<sub>2</sub> 降解乙烯效率的影响,为纳米 TiO<sub>2</sub> 在果蔬保鲜中脱除乙烯的实际应用提供参考。

## 1 实验

### 1.1 材料与仪器

材料主要有标准乙烯气体,体积分数为 0.05%,

液化空气(上海)压缩气体有限公司;纯乙烯气体,无锡市鑫锡仪科技有限公司;二氧化钛,通过溶胶凝胶法自制,晶型为锐钛矿型,粒径为 50~80 nm,比表面积为 59.458 m<sup>2</sup>/g,孔容为 0.347 cm<sup>3</sup>/g,平均孔径为 12.341 nm。

仪器主要有 CL-1000 型紫外光联仪,美国 UVP;紫外照度计,美国 UVP;GC2010 气相色谱仪,岛津(中国)有限公司;鲁尔环手动进样注射器(1, 50 mL),安捷伦;紫外灯管(飞利浦),功率为 8 W,主要输出波长为 365, 310, 254 nm 各 5 支。

## 1.2 方法

### 1.2.1 纳米 TiO<sub>2</sub> 光催化降解乙烯

1) 不同紫外光波长下乙烯的光催化降解。向 20 mL 密闭反应器中加入 0.3 g 自制纳米 TiO<sub>2</sub> 及 2 mL 乙烯气体,在室温下稳定 30 min 后测定反应器内乙烯的初始浓度。设置光源距离为 10 cm,分别采用主波长为 365, 310, 254 nm 的紫外灯管对反应器进行照射,通过测算不同照射时间后乙烯降解率的变化,研究紫外光波长对纳米 TiO<sub>2</sub> 降解乙烯的影响。

2) 不同光强度下乙烯的光催化降解。使用波长为 254 nm 的紫外灯管,改变光源与反应器之间的距离(7, 8.5, 10, 15, 18 cm),保持纳米 TiO<sub>2</sub>、乙烯气体的添加量及其他实验条件和步骤不变,研究光强度对纳米 TiO<sub>2</sub> 降解乙烯的影响。不同光源距离对应的光强度大小通过紫外照度计进行测量。

3) 不同乙烯初始浓度下乙烯的光催化降解。使用波长为 254 nm 的紫外灯管,固定光源距离为 10 cm,向不同体积大小的反应器内注入等量乙烯气体。随后得到乙烯初始体积分数分别为 0.0005%, 0.001%, 0.0025%, 0.005%, 0.01% 的反应装置,保持纳米 TiO<sub>2</sub> 的添加量及其他实验条件和步骤不变,每隔一定时间对各反应器内乙烯的浓度进行检测,研究乙烯初始浓度对纳米 TiO<sub>2</sub> 降解乙烯的影响。

4) 不同纳米 TiO<sub>2</sub> 添加量下乙烯的光催化降解。分别向 20 mL 密闭反应器中加入 2 mL 乙烯气体和不同质量(0.05, 0.1, 0.3, 0.5 g)的纳米 TiO<sub>2</sub>,在室温下稳定 30 min 后测量并记录各反应器内乙烯的初始

浓度。设置光源距离为 10 cm,使用波长为 254 nm 的紫外灯管对反应器进行照射,每隔一定时间对反应器内乙烯的浓度进行检测,研究纳米 TiO<sub>2</sub> 添加量对乙烯光催化降解的影响。纳米 TiO<sub>2</sub> 光催化降解乙烯的实验过程见图 1。

### 1.2.2 乙烯降解率计算

乙烯的光催化降解效率  $\eta$  可以用式 (1) 表示。

$$\eta = \frac{C_0 - C_i}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $C_0$  为乙烯初始浓度;  $C_i$  为乙烯第  $i$  次检测

的体积分数。

乙烯浓度采用气相色谱法检测<sup>[15-17]</sup>。检测时,利用注射器从密闭玻璃反应器中抽取 200  $\mu$ L 乙烯气体进样到气相色谱仪中。色谱检测条件为:岛津 GC2010 气相色谱仪、检测器为 FID、色谱柱为 Rt®-Q-BOND,进样口温度为 150  $^{\circ}$ C、柱温为 35  $^{\circ}$ C、检测器温度为 250  $^{\circ}$ C、载气为氮气(体积分数为 99.999%),流速为 35 mL/min、燃气为 H<sub>2</sub>,流速为 40 mL/min、空气流速为 400 mL/min,分流进样,分流比为 50:1,进样量为 200  $\mu$ L。

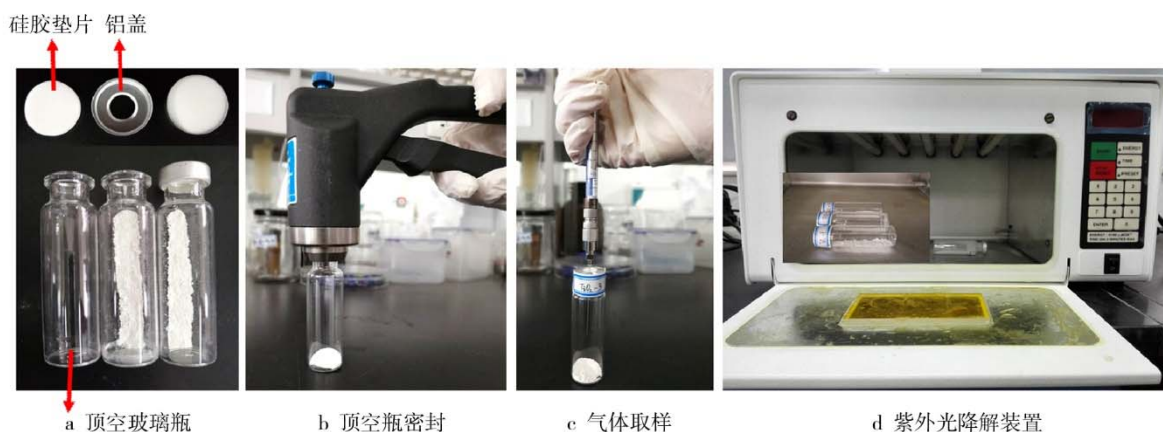


图 1 纳米 TiO<sub>2</sub> 光催化降解乙烯的实验过程

Fig.1 Experimental process of photocatalytic degradation of ethylene by nano-TiO<sub>2</sub>

## 2 结果与讨论

### 2.1 气相色谱法测定乙烯浓度

采用峰面积外标法进行定量,以乙烯标准样品的浓度为横坐标,对应的峰面积为纵坐标,绘制乙烯标准样品的工作曲线,见图 2。

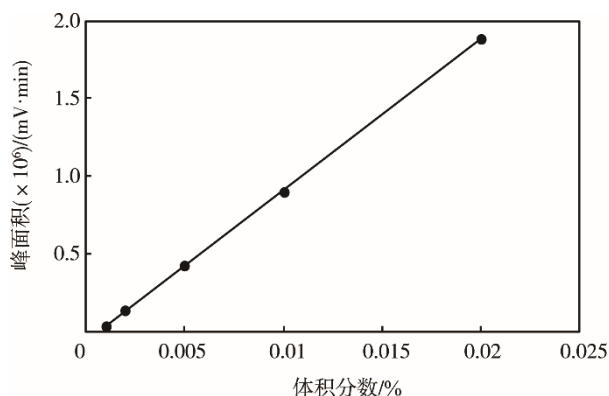


图 2 乙烯标准样品工作曲线

Fig.2 Working curve of standard ethylene sample

由图 2 可知,色谱峰面积与乙烯浓度的线性方程为  $y=9725.23x-64424.13$ ,相关系数  $R^2=0.9999$ ,相关系数大于 99.5%,线性关系优良。

### 2.2 紫外光波长对纳米 TiO<sub>2</sub> 光降解乙烯的影响

纳米 TiO<sub>2</sub><sup>[18]</sup>的禁带宽度为 3.2 eV,当受到波长小于或等于 387 nm 的光线照射时,价带中的电子就会被激发到导带上,形成带负电的高能活性电子  $e^-$ ,同时在价带上产生带正电的空穴  $h^+$ ,最终形成电子-空穴对的氧化还原体系,进而将乙烯氧化降解为 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O。实验比较了 365, 310, 254 nm 等 3 种不同波长的紫外光源对乙烯降解的影响,见图 3。

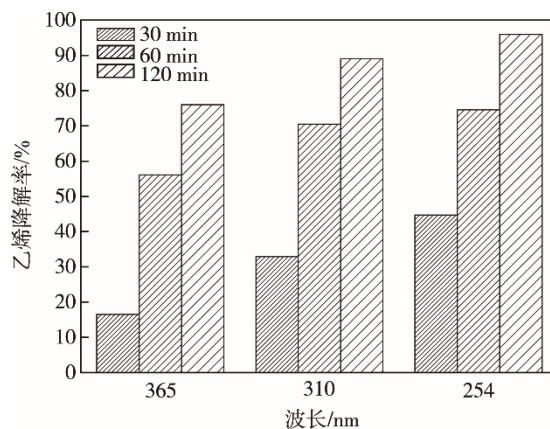


图 3 不同紫外光波长对乙烯降解率的影响

Fig.3 Effect of different ultraviolet wavelengths on the degradation rate of ethylene

由图 3 可知，在波长为 254 nm 紫外光照射下，乙烯的降解率最大，其次是波长为 310 nm 的紫外光，365 nm 紫外光照射下的乙烯降解率相比最小，这表明紫外光的波长越短，乙烯的降解率越大。这可能是由于光源的波长越短，所具有的光能量越大，激发纳米 TiO<sub>2</sub> 中电子的能力越强，因而光降解乙烯的效率越高。

### 2.3 光强度对纳米 TiO<sub>2</sub> 光降解乙烯的影响

研究表明光强度与光源距离有关，因此实验通过调节光源与反应器的距离来改变光强度。不同光源距离对应的光强度大小可用紫外照度计进行测定，具体见表 1。光强度与乙烯降解率之间的关系见图 4。

表 1 光源距离对应的光照强度  
Tab.1 Light intensity corresponding to the light source distance

距离/cm	光照强度/(W·cm <sup>-2</sup> )
7	46.42
8.5	39.21
10	33.69
15	28
18	23.17

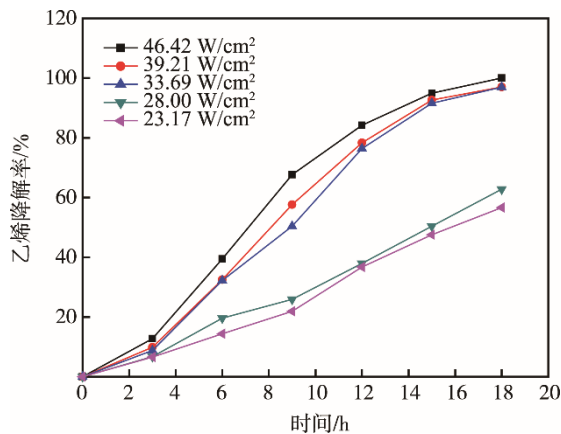


图 4 不同光强度下乙烯降解率随时间的变化  
Fig.4 Change of ethylene degradation rate with the time under different light intensities

由表 1 可知，光源距离越短，光强度越大，光强度随着光源距离的变化呈现出一定的规律性。由图 4 可知，光强度越高，纳米 TiO<sub>2</sub> 接收到的能量越多，产生的光子量越多<sup>[19]</sup>，进而分解的乙烯量越大。光强度对乙烯降解率的影响存在一个阈值，当光强度大于 28.00 W/cm<sup>2</sup> 时，乙烯降解率随光强度的增加急剧上升。此外，在较高光强度的照射下，乙烯的降解率随光照时间延长而逐渐增大，呈现先快后慢并逐渐趋于平缓的趋势。

### 2.4 乙烯初始浓度对纳米 TiO<sub>2</sub> 光降解乙烯的影响

实验测定了不同乙烯初始浓度（体积分数为 0.0005%~0.01%）的反应装置经波长为 254 nm，光强度为 33.96 W/cm<sup>2</sup> 的紫外光分别照射 10，20，30 min 后乙烯降解率的变化，结果见图 5。

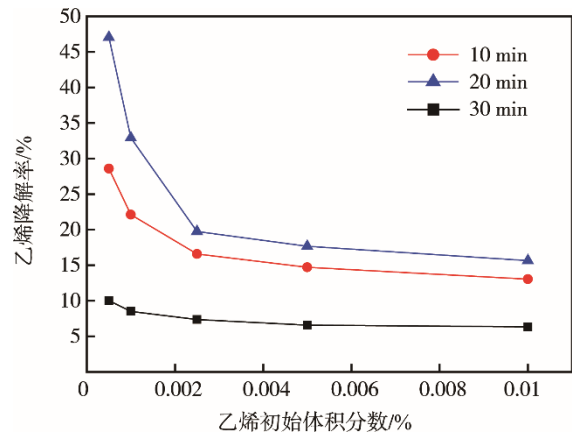


图 5 乙烯降解率随乙烯初始浓度的变化  
Fig.5 Changes of ethylene degradation rate with different initial ethylene concentration

从图 5 可以看出，在测试的 3 个时间段内，乙烯的初始浓度越低，降解速率越快；乙烯的降解率随着初始浓度的增大而降低并逐渐趋于稳定，与其他学者的研究结果相似<sup>[20—21]</sup>。纳米 TiO<sub>2</sub> 光降解乙烯的过程通常被认为是一个表面反应过程，与乙烯分子在纳米 TiO<sub>2</sub> 的表面吸附有关。当乙烯浓度较低时，纳米 TiO<sub>2</sub> 表面的活性反应位点充足，因而降解量较大，降解速率较快；随着乙烯浓度的逐渐升高，反应产物 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 量的逐渐增多，产物也会占据纳米 TiO<sub>2</sub> 的表面位点，与乙烯形成吸附竞争，减少乙烯在纳米 TiO<sub>2</sub> 表面的吸附量，致使乙烯的反应位点减少，降解率降低；当乙烯浓度升至一定程度后，反应位点达到饱和，此时乙烯浓度的进一步增加不再影响反应速率，乙烯降解率逐渐稳定并趋于平衡<sup>[22—23]</sup>。

### 2.5 纳米 TiO<sub>2</sub> 添加量对乙烯光降解的影响

纳米 TiO<sub>2</sub> 添加量与实际应用中的成本有关，在达到预期乙烯降解效果的前提下，纳米 TiO<sub>2</sub> 的添加量越少越好。为了研究纳米 TiO<sub>2</sub> 添加量对乙烯光降解的影响，在相同乙烯初始浓度、不同纳米 TiO<sub>2</sub> 添加量的实验条件下，探究了乙烯降解率随时间的变化关系，结果见图 6。

从图 6 可以看出，测试时间内纳米 TiO<sub>2</sub> 的添加量越多，乙烯降解率越大。当添加量一定时，乙烯降解率随着时间的延长先急速上升然后逐渐减缓最后趋于稳定。这表明一定时间内，随着添加量的增加，

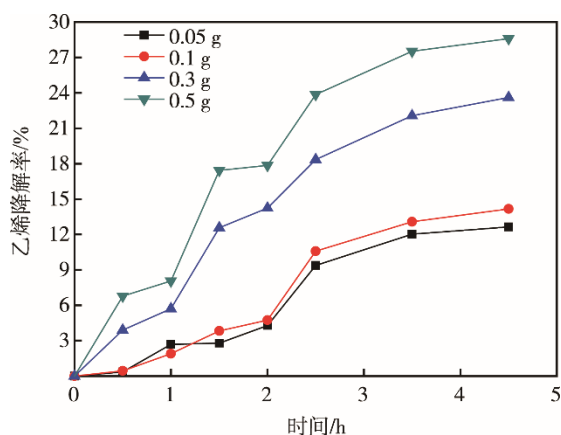


图6 纳米 TiO<sub>2</sub>添加量与乙烯降解率的关系

Fig.6 Relationship between the addition amount of Nano-TiO<sub>2</sub> and the degradation rate of ethylene

纳米 TiO<sub>2</sub> 在紫外光的照射下产生了更多的羟基自由基,增强了乙烯的分解,乙烯的降解率较大;随着时间的延长,反应器内的乙烯浓度降低,此时,过多的纳米 TiO<sub>2</sub> 颗粒不仅会遮蔽入射光的照射,且会对光进行散射,造成光能的损失,进而降低光子效率,因此乙烯的降解率逐渐趋于稳定。

### 3 结语

实验研究了紫外光波长、光强度、乙烯初始浓度和纳米 TiO<sub>2</sub> 添加量对乙烯降解效率的影响。实验结果如下所述。

1) 紫外光波长越短,纳米 TiO<sub>2</sub> 表面越容易生成光生电子空穴对,光催化反应速率越快,乙烯降解率越高;在3种紫外光源中,波长为254 nm的紫外光降解乙烯的效果最好。

2) 光源距离与光强度有关,光源距离越短,光强度越高,光子能量越高,纳米 TiO<sub>2</sub> 产生的活性自由基数量就越多,进而光催化能力越强,乙烯降解量越大。

3) 乙烯初始浓度越低,纳米 TiO<sub>2</sub> 表面的活性位点数量越充足,进而乙烯降解率越大;随着乙烯初始浓度的逐渐增大,活性位点逐渐饱和,乙烯降解率逐渐稳定。

4) 纳米 TiO<sub>2</sub> 的添加量越多,乙烯可获得的活性位点数量越多,降解率越大;当纳米 TiO<sub>2</sub> 添加量一定时,乙烯降解率随着反应时间的延长先急速上升后逐渐减缓最后趋于稳定。

#### 参考文献:

[1] 张唯一. 果蔬采后生理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1993.  
ZHANG Wei-yi, Postharvest Physiology of Fruits and Vegetables[M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 1993.

[2] 穆师洋, 胡文忠, 姜爱丽, 等. 乙烯的信号分子作用及其在采后果蔬生理代谢调控的研究进展[J]. 食品工业科技, 2015, 36(3): 375—378.  
MU Shi-yang, HU Wen-zhong, JIANG Ai-li, et al. Research Progress of Signaling Molecules of Ethylene and Its Physiological Metabolism Regulation in Fruits[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(3): 375—378.

[3] SALTVEIT M E. Effect of Ethylene on Quality of Fresh Fruits and Vegetables[J]. Postharvest Biology & Technology, 1999, 15(3): 279—292.

[4] KELLER N, DUCAMP M N, ROBERT D, et al. Ethylene Removal and Fresh Product Storage: a Challenge at the Frontiers of Chemistry. Toward an Approach by Photocatalytic Oxidation[J]. Chemical Reviews, 2013, 113(7): 5029—5070.

[5] 王燕. 纳米二氧化钛光催化性能的应用进展研究[J]. 广州化工, 2014, 42(11): 46—49.  
WANG Yan. Study on the Application Progress of Photocatalytic Performance of Nano-TiO<sub>2</sub>[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2014, 42(11): 46—49.

[6] WEN J, LI X, LIU W, et al. Photocatalysis Fundamentals and Surface Modification of TiO<sub>2</sub> Nanomaterials[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2015, 36(12): 2049—2070.

[7] LIU Y, LI Z, GREEN M, et al. Titanium Dioxide Nanomaterials for Photocatalysis[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(19): 3003—3061.

[8] OBEE T N, HAY S O. Effects of Moisture and Temperature on the Photooxidation of Ethylene on Titania[J]. Environmental Science & Technology, 1997, 31(7): 2034—2038.

[9] YAMAZAKI S, TANAKA S, TSUKAMOTO H. Kinetic Studies of Oxidation of Ethylene over a TiO<sub>2</sub>, Photocatalyst[J]. Journal of Photochemistry & Photobiology A: Chemistry, 1999, 121(1): 55—61.

[10] MARTINEZ-DIAZ M, MARTIN-DIAZ C, GALBALLY J, et al. Photocatalytic Reaction of TiO<sub>2</sub> to Decompose Ethylene in Fruit and Vegetables Storage[J]. Transactions of the Asae, 2003, 46(3): 725—730.

[11] 林兰钰, 胡春, 王震宇, 等. TiO<sub>2</sub>/多孔硅胶对乙烯光催化降解的研究[J]. 环境科学, 2004(4): 105—108.  
LIN Lan-yu, HU Chun, WANG Zhen-yu, et al. Study on Photocatalytic Degradation of Ethylene by TiO<sub>2</sub>/Porous Silica Gel[J]. Environmental Science, 2004(4): 105—108.

[12] 黄雅丽, 李旦振, 付贤智, 等. Gd/TiO<sub>2</sub> 气相光催化降解乙烯的动力学研究[J]. 稀土, 2007(6): 43—48.  
HUANG Ya-li, LI Dan-zhen, FU Xian-zhi, et al. Kinetics of Gd/TiO<sub>2</sub> Gas Phase Photocatalytic Degradation of Ethylene[J]. Rare Earths, 2007(6): 43—48.

[13] 郑森鸿, 叶盛英, 黄迅, 等. 利用 60Co- $\gamma$  射线辐照使 TiO<sub>2</sub> 改性后对乙烯的催化降解效果[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20): 286—292.

- ZHENG Sen-hong, YE Sheng-ying, HUANG Xun, et al. The Catalytic Degradation of Ethylene by Modification of TiO<sub>2</sub> with 60Co- $\gamma$  Ray Irradiation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(20): 286—292.
- [14] CHIARA M L V D, PAL S, LICCIULLI A, et al. Photocatalytic Degradation of Ethylene on Mesoporous TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> Nanocomposites: Effects on the Ripening of Mature Green Tomatoes[J]. Biosystems Engineering, 2015, 132: 61—70.
- [15] 张丽萍, 王久荣, 陈闻, 等. 气相色谱法测定大气中的 CO、CO<sub>2</sub> 以及低级烃类物质[J]. 分析测试学报, 2017, 36(9): 1119—1123.
- ZHANG Li-ping, WANG Jiu-rong, CHEN Wen, et al. Determination of CO, CO<sub>2</sub> and Lower Hydrocarbons in Atmosphere by Gas Chromatography[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2017, 36(9): 1119—1123.
- [16] 及雪良, 刘雪莹, 张喜春, 等. 气相色谱法速测叶用莴苣的乙烯释放量[J]. 中国农学通报, 2016, 32(22): 63—67.
- JI Xue-liang, LIU Xue-ying, ZHANG Xi-chun, et al. Study on the Ethylene Emission of Lettuce in Leaf by Gas Chromatography[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(22): 63—67.
- [17] 翟滨, 田晶, 徐龙权, 等. 用于食品保鲜的二氧化钛光催化体系中乙烯含量的分析[J]. 食品科学, 2004(7): 140—142.
- ZHAI Bin, TIAN Jing, XU Long-quan, et al. Analysis of Ethylene Content in Titanium Dioxide Photocatalytic System for Food Preservation[J]. Food Science, 2004(7): 140—142.
- [18] PATHAK N, CALEB O J, GEYER M, et al. Photocatalytic and Photochemical Oxidation of Ethylene: Potential for Storage of Fresh Produce—a Review[J]. Food & Bioprocess Technology, 2017: 982—1001.
- [19] LIN Y T, WENG C H, CHEN F Y. Key Operating Parameters Affecting Photocatalytic Activity of Visible-light-induced C-doped TiO<sub>2</sub> Catalyst for Ethylene Oxidation[J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 248: 175—183.
- [20] 叶盛英, 贺明书, 岑超平, 等. TiO<sub>2</sub> 纳米粒子气固相光催化降解乙烯初探[J]. 农业工程学报, 2005(5): 166—169.
- YE Sheng-ying, HE Ming-shu, CEN Chao-ping, et al. Preliminary Study on Photocatalytic Degradation of Ethylene by TiO<sub>2</sub> Nanoparticles in Gas-solid Phase[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005(5): 166—169.
- [21] EINAGA H, TOKURA J, TERAOKA Y, et al. Kinetic Analysis of TiO<sub>2</sub>-catalyzed Heterogeneous Photocatalytic Oxidation of Ethylene Using Computational Fluid Dynamics[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 263: 325—335.
- [22] LIN Y T, WENG C H, HSU H J, et al. Effect of Oxygen, Moisture, and Temperature on the Photo Oxidation of Ethylene on N-doped TiO<sub>2</sub> Catalyst[J]. Separation and Purification Technology, 2014, 134: 117—125.
- [23] LEE D J, PARK Y K, KIM S J, et al. Photocatalytic Destruction of Ethylene Using Microwave Discharge Electrodeless Lamp[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2015, 32(6), 1188—1193.