

三种光敏剂介导的光动力对水体中 8种多环芳烃的降解作用

卢娜, 李兆杰, 王志广, 唐庆娟, 薛长湖, 薛勇, 徐杰
(中国海洋大学食品科学与工程学院, 山东青岛 266003)

摘要: 为了探究不同光敏剂(姜黄素、核黄素、金丝桃素)介导的光动力对水体中多环芳烃的降解作用,以含有8种多环芳烃的水体为研究对象,在光敏剂浓度为10 μM,光照时间为15 min的条件下,采用光动力方法处理并通过同步荧光法测定水体中的各种多环芳烃。结果表明,姜黄素介导的光动力对多环芳烃的降解效果明显优于核黄素和金丝桃素介导的光动力组。经姜黄素光动力处理后,水体中的8种多环芳烃均发生一定程度的降解,其中,荧蒽和菲的降解率分别为77.07%和78.31%,苯并[k]荧蒽和蒽的降解率分别为80.10%和85.95%,苯并[a]芘、萘、苯并[a]蒽和葱的降解率达到95%以上。以上研究表明,与其他两种光敏剂相比,姜黄素介导的光动力对水溶液中的8种多环芳烃均具有显著的降解效果,为该技术在生活用水以及养殖水体污染治理方面的推广应用提供理论依据。

关键词: 多环芳烃; 光动力; 降解; 光敏剂; 同步荧光法

文章编号: 1673-9078(2021)04-79-86

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.4.0887

Degradation Effect of Three Photosensitizers-Mediated Photodynamic Technology on Eight Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water

LU Na, LI Zhao-jie, WANG Zhi-guang, TANG Qing-juan, XUE Chang-hu, XUE Yong, XU Jie
(College of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: This study aims to explore the degradation effect of different photosensitizers (curcumin, riboflavin, hypericin)-mediated photodynamic technology on polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in water. 8 PAHs mixed aqueous solution was taken as the research object. Under the condition of 10 μM photosensitizer concentration and 15min illumination time, the mixture was treated by photodynamic technology (PDT) and the PAHs were determined by synchronous fluorescence method. The results showed that the degradation of PAHs by curcumin-mediated photodynamic was significantly better than that of riboflavin and hypericin-mediated photodynamic groups. After photodynamic treatment of curcumin, 8 kinds of PAHs in the mixture were degraded to some extent. The degradation rates of fluoranthene and phenanthrene were 77.07% and 78.31 %, respectively. The degradation rates of benzo [k] fluoranthene and chrysene were 80.10% and 85.95%, respectively. The degradation rates of benzo [a] pyrene, naphthalene, benzo [a] anthracene and anthracene were more than 95%. Our research showed that compared with the other two photosensitizers, curcumin-mediated photodynamic had a significant effect on the degradation of 8 PAHs in aqueous solution, which provides a theoretical basis for the promotion and application of this technology in the pollution control of living and aquaculture water.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons; photodynamic treatment; degradation; photosensitizer; synchronous fluorescence method
引文格式:

卢娜,李兆杰,王志广,等.三种光敏剂介导的光动力对水体中8种多环芳烃的降解作用[J].现代食品科技,2021,37(4):79-86

LU Na, LI Zhao-jie, WANG Zhi-guang, et al. Degradation effect of three photosensitizers-mediated photodynamic technology on eight polycyclic aromatic hydrocarbons in water [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(4): 79-86

收稿日期: 2020-09-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1604605)

作者简介: 卢娜(1996-),女,硕士研究生,研究方向: 食品加工与安全

通讯作者: 唐庆娟(1971-),女,博士,教授,研究方向: 水产品质量控制

新技术和海洋食品分子营养学

多环芳烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)是指由两个或多个苯环缩合而成的碳氢化合物,具有较强的亲脂性和化学稳定性,广泛分布于水体、土壤和大气等环境中,属于典型持久性有机污染物(Persistent Organic Pollutants, POPs),具有致癌致

畸致突变等危害性^[1]。多环芳烃的来源包括化石燃料的不完全燃烧, 交通排放, 工业污水排放等, 近年来随着海上作业的增多, 溢油事故也成为 PAHs 的重要来源之一, 因此水环境中的多环芳烃污染问题也愈发严重^[2-4]。由于平时的生活用水以及食品工厂用水大多来自江河湖泊和地下水等, 经过沉淀消毒过滤等处理而来, 但是在处理过程中并未考虑到有机污染问题, 一旦水环境被污染, 就有潜在的致病风险。此外由于其极高的亲脂性和持久性, 养殖水体中的多环芳烃极易富集到水产品中, 尤其是牡蛎等贝类, 由于其自身活动范围小以及非选择性滤食的特点, 造成多环芳烃在体内的长期残留, 威胁到广大消费者的健康, 因此养殖水体的水源卫生安全问题至关重要^[5,6]。

近些年来, 随着水源污染问题的爆发以及人们安全环保意识的提高, 水源污染的控制也越来越成为人们关注的焦点。对于多环芳烃等有机污染物, 传统的处理方法主要包括物理方法、化学方法和生物降解方法^[7]。其中, 土壤和水环境中多环芳烃去除的主要途径是生物降解, 但是该方法只对四环以下的低分子量多环芳烃起作用, 而对于高环数多环芳烃的降解效果不佳, 并且对于食用水体来说具有一定的局限性^[8-11]。然而研究表明, 多环芳烃可以吸收紫外和可见光, 因此光降解可以通过氧化作用破坏多环芳烃, 从而达到降解目的^[12,13]。虽然这些方法都具有一定的降解效果, 但都存在一些弊端, 包括操作复杂繁琐、设备成本高、处理时间长、降解效率低、易产生毒副产物等^[7,14,15]。因此, 仍需探索高效经济的方法来处理生活及养殖水体中高毒性和难生化降解的多环芳烃, 以保证其食用安全性。

本研究所采用的光动力技术 (photodynamic technology, PDT) 最早应用在医学领域, 主要用于杀灭癌细胞和致病菌以及医药用品的消毒杀菌。其原理是经特定波长的光源照射, 无毒的光敏剂分子吸收光的能量从基态跃迁到激发态, 激发态的光敏剂将能量转移给氧分子, 生成单线态氧, 通过氧化作用破坏细胞结构, 从而达到杀灭微生物以及肿瘤细胞的目的, 具有创伤小、毒性低、选择性好、可重复治疗等优点^[16-18]。由于其灭菌原理与光降解多环芳烃原理均是通过氧化作用, 因此推测光动力技术对多环芳烃可能具有一定的降解效果。在光动力技术中, 最重要的因素之一是光敏剂, 光敏剂是一种能吸收光辐射能, 经激发发生光化学变化, 产生具有引发聚合能力的活性中间体物质, 目前已经发展了三代。其中本研究所采用的三种无毒光敏剂 (姜黄素、核黄素和金丝桃素) 都

是来源于中草药或植物提取物, 由于其良好的光敏活性而广泛应用于光动力杀菌领域^[19-21]。其中, 姜黄素在 200~230 nm 和 400~450 nm 处均有吸收峰, 其光降解产物主要是无毒的香草醛和阿魏酸, 不会产生毒副产物^[22,23]。金丝桃素作为一种新型的中草药光敏剂, 一般选用 590 nm 黄光作为激发光源, 具有选择性好、光敏期短、穿透能力强等优点, 已经在抗肿瘤方面取得显著的医学效果^[24]。大量研究表明, 在可见光及紫外光照射下, 核黄素能显著降低真菌和细菌等多种致病菌的存活率^[25]。

本研究以 8 种多环芳烃混合水溶液为研究对象, 通过三种光敏剂介导的光动力进行处理, 采用同步荧光法测定, 探究光动力对水溶液中多环芳烃的降解效果, 以期将光动力技术在生产生活用水以及水产养殖方面的应用奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

JL-420-590 多功能 LED 光源仪, 青岛建亮科技有限公司; f-7000 荧光分光光度计, 日立公司; Milli Q 超纯水系统, 美国 Millipore 公司; MD-200-1 干式氮吹仪, 浙江赛德仪器设备有限公司。

苯并[a]芘、萘、菲、蒽、苯并[a]蒽、苯并[k]荧蒽、蒽和荧蒽的混合标准溶液, 北京嘉世玉禾化工技术研究院 (浓度为 200 $\mu\text{g/mL}$); 多环芳烃储备液, 将标准混合液用乙腈稀释成浓度为 1 $\mu\text{g/mL}$ 的乙腈储备液, 于 -18 $^{\circ}\text{C}$ 保存备用。姜黄素, 河北天旭生物科技有限公司; 核黄素、金丝桃素, 西安佰斯特生物科技有限公司。姜黄素原液: 用食用乙醇溶解, 浓度为 20 mM; 核黄素和金丝桃素原液: 分别用超纯水溶解, 浓度均为 20 mM。

1.2 方法

1.2.1 标准曲线的绘制

分别吸取一定量的多环芳烃储备液, 氮吹至近干除去溶剂, 用超纯水分别定容至 100 mL, 即得到浓度为 1 ng/mL、5 ng/mL、10 ng/mL、20 ng/mL、50 ng/mL、100 ng/mL 的多环芳烃梯度稀释液。采用荧光分光光度计通过同步荧光法进行检测分析, 以 8 种多环芳烃浓度为横坐标, 以荧光强度为纵坐标绘制标准曲线。得到的多环芳烃标准曲线如图 1 所示, 8 种多环芳烃在 1.0~100.0 ng/mL 的范围内, 相对荧光强度和浓度之间呈现良好的线性关系。

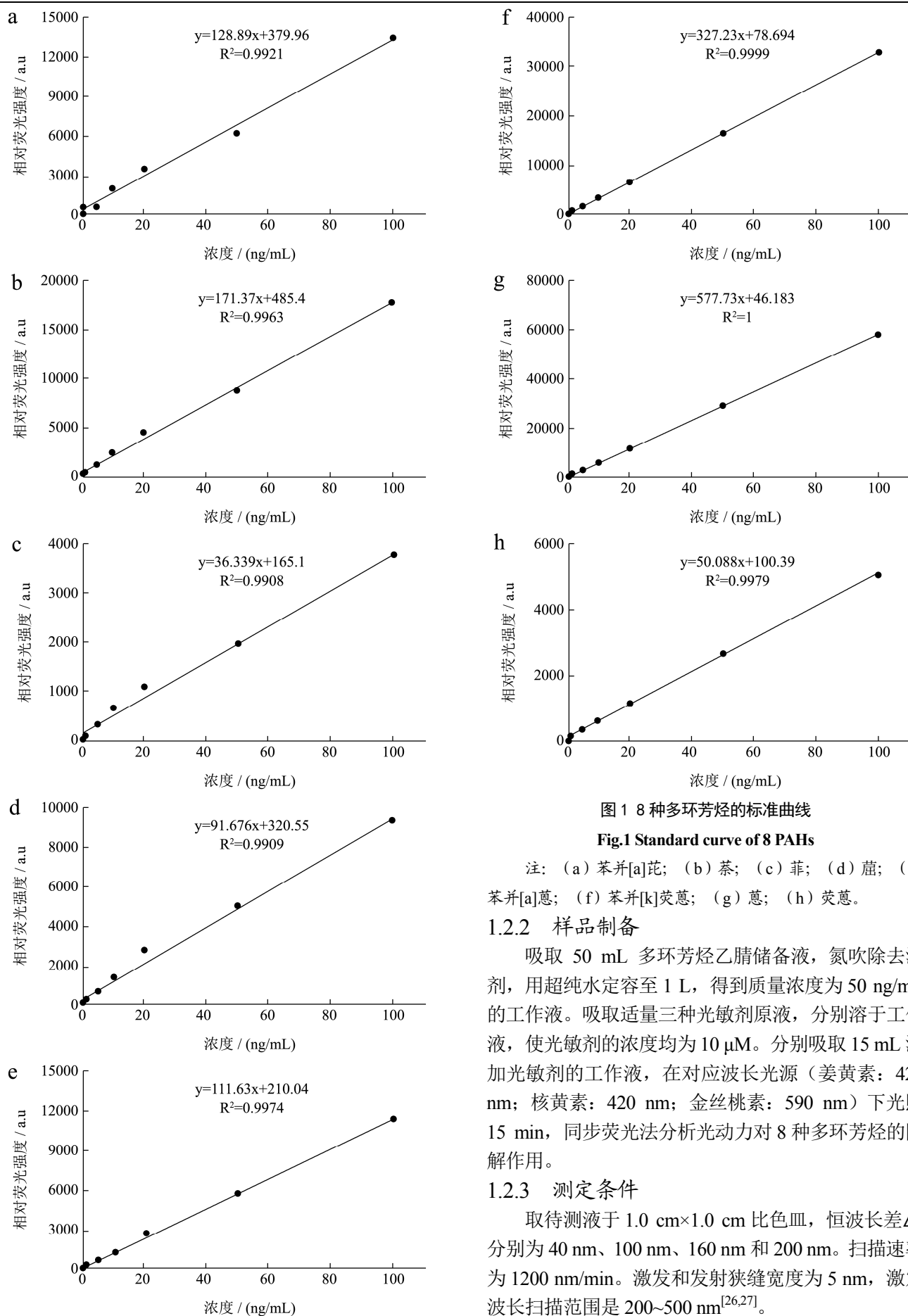


图1 8种多环芳烃的标准曲线

Fig.1 Standard curve of 8 PAHs

注：(a) 苯并[a]芘；(b) 蒽；(c) 菲；(d) 蒽；(e) 苯并[a]蒽；(f) 苯并[k]荧蒽；(g) 蒽；(h) 荧蒽。

1.2.2 样品制备

吸取 50 mL 多环芳烃乙腈储备液，氮吹除去溶剂，用超纯水定容至 1 L，得到质量浓度为 50 ng/mL 的工作液。吸取适量三种光敏剂原液，分别溶于工作液，使光敏剂的浓度均为 10 μM。分别吸取 15 mL 添加光敏剂的工作液，在对应波长光源（姜黄素：420 nm；核黄素：420 nm；金丝桃素：590 nm）下光照 15 min，同步荧光法分析光动力对 8 种多环芳烃的降解作用。

1.2.3 测定条件

取待测液于 1.0 cm×1.0 cm 比色皿，恒波长差Δλ 分别为 40 nm、100 nm、160 nm 和 200 nm。扫描速率为 1200 nm/min。激发和发射狭缝宽度为 5 nm，激发波长扫描范围是 200~500 nm^[26,27]。

1.3 数据分析

所有样品平行测定 3 次, 实验数据以 (Mean±SD) 表示, 采用 SPSS 20.0 统计软件进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA), 并比较其显著性, 以 $p < 0.05$ 表

示差异有统计学意义。作图采用 Origin 9.1 软件。

2 结果与分析

2.1 8 种多环芳烃的同步荧光光谱

表 1 8 种多环芳烃的波长差及特征峰

Table 1 Wavelength intervals ($\Delta\lambda$) and characteristic peaks of 8 PAHs				
序号	中文名称	英文名称	波长差 $\Delta\lambda$ /nm	特征峰/nm
1	苯并[a]芘	benzo[a]phrene (BaP)	40	360
2	萘	Naphthalene (Nap)	100	220.2
3	菲	Phenanthrene (Phe)	100	248
4	蒽	Chrysene (GHR)	100	263
5	苯并[a]蒽	benzo[a]anthracene (Baa)	100	286
6	苯并[k]荧蒽	benzo[k]fluoranthene (BkF)	100	308
7	蒽	Anthracene (Ant)	160	246
8	荧蒽	Fluoranthene (Fl)	200	286

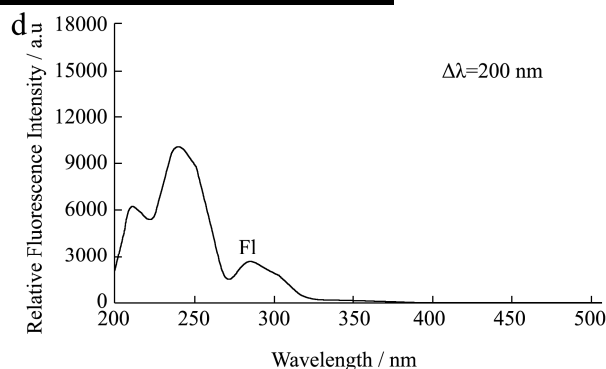
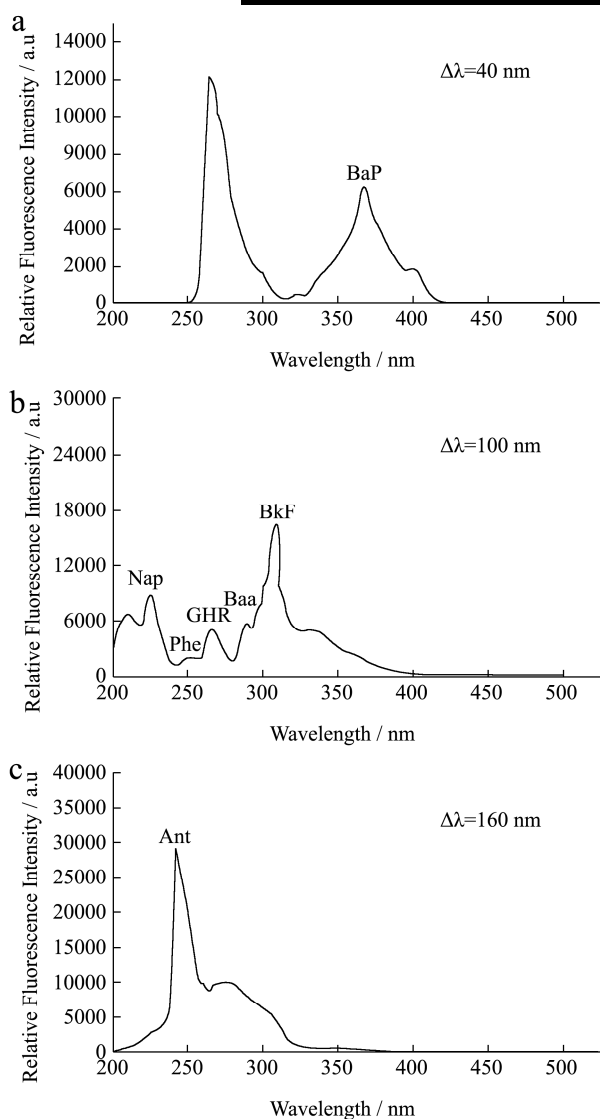


图 2 8 种多环芳烃的同步荧光光谱

Fig.2 Synchronous fluorescence spectra of 8 PAHs

首先采用同步荧光法测定混合物中的 8 种多环芳烃, 同步荧光法与普通荧光法的最大区别在于同时扫描激发波长和发射波长, 同步荧光法在扫描过程中激发波长和发射波长之间的差值是一个固定值 ($\Delta\lambda = \lambda_{em} - \lambda_{ex} = \text{常数}$), 常用于同时测定混合物中多组分 PAHs, 其优点包括高选择性、高灵敏度、抗干扰等, 能够简便有效地测定混合物中的 PAHs^[28]。图 2 表示 8 种多环芳烃混合物的同步荧光光谱图。从图中可以观察到, 在 4 个恒波长差条件下, 8 种多环芳烃能够被很好地区分开。多环芳烃的对应波长差及特征峰如表 1 所示, 当 $\Delta\lambda = 40$ nm 时, 苯并[a]芘的特征峰对应的激发波长为 360 nm; 当 $\Delta\lambda = 100$ nm 时, 萘、菲、蒽、苯并[a]蒽和苯并[k]荧蒽的特征峰分别位于 220.2、248、263、286 和 308 nm; 当 $\Delta\lambda = 160$ nm 时, 蒽的特征峰对应的激发波长为 246 nm; 当 $\Delta\lambda = 200$ nm 时, 荧蒽的特征峰位置位于 286 nm。因此, 通过同步荧光法可以

简便快捷地识别出 PAHs 混合物中的 8 种多环芳烃。宋广清等^[27]采用同步荧光法, 确定萘和菲的最优波长差, 当 $\Delta\lambda=100$ nm 时, 萘和菲的激发波长为 220.2 nm 和 248.8 nm。章汝平等^[26]建立多环芳烃混合液的同时步荧光法, 当 $\Delta\lambda=40$ nm 时, 苯并[a]芘的激发波长为 360

nm; 当 $\Delta\lambda=100$ nm 时, 菲、蒽、苯并[a]蒽和苯并[k]荧蒽的激发波长分别为 248、263、286 和 308 nm; 当 $\Delta\lambda=160$ nm 时, 蒽的激发波长为 246 nm; 当 $\Delta\lambda=200$ nm 时, 荧蒽的激发波长为 286 nm, 可简便快速地实现对多组分多环芳烃的定性定量测定。

表 2 光动力处理对 8 种多环芳烃的降解效果

Table 2 Degradation of 8 PAHs by photodynamic treatment

	各组多环芳烃含量/(ng/mL)			
	对照组	姜黄素光动力组	核黄素光动力组	金丝桃素光动力组
苯并[a]芘(BaP)	50.09±0.73 ^a	1.70±1.03 ^b	4.58±0.41 ^b	1.12±0.80 ^b
萘(Nap)	49.81±1.14 ^a	2.02±0.10 ^b	11.17±0.58 ^c	10.65±0.53 ^c
菲(Phe)	49.98±1.06 ^a	10.84±1.26 ^b	12.58±1.55 ^c	14.80±0.76 ^c
蒽(GHR)	49.87±1.07 ^a	7.01±0.84 ^b	18.01±0.49 ^c	20.76±1.18 ^c
苯并[a]蒽(Baa)	50.11±1.63 ^a	2.27±1.45 ^b	13.10±0.55 ^c	20.92±0.51 ^d
苯并[k]荧蒽(BkF)	49.89±1.98 ^a	9.93±1.09 ^b	5.87±1.39 ^{bc}	5.49±1.89 ^c
蒽(Ant)	50.02±1.70 ^a	2.31±0.66 ^b	4.27±0.71 ^b	3.88±1.03 ^b
荧蒽(Fl)	49.83±2.22 ^a	11.42±3.69 ^b	28.28±2.20 ^c	25.06±0.62 ^{bc}

注: 每种多环芳烃之间各组进行比较, 标有不同字母表示组间差异显著 ($p<0.05$), 相同字母代表组间没有显著性 ($p>0.05$)。

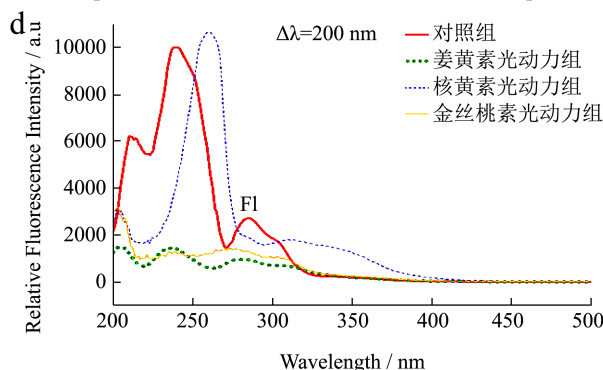
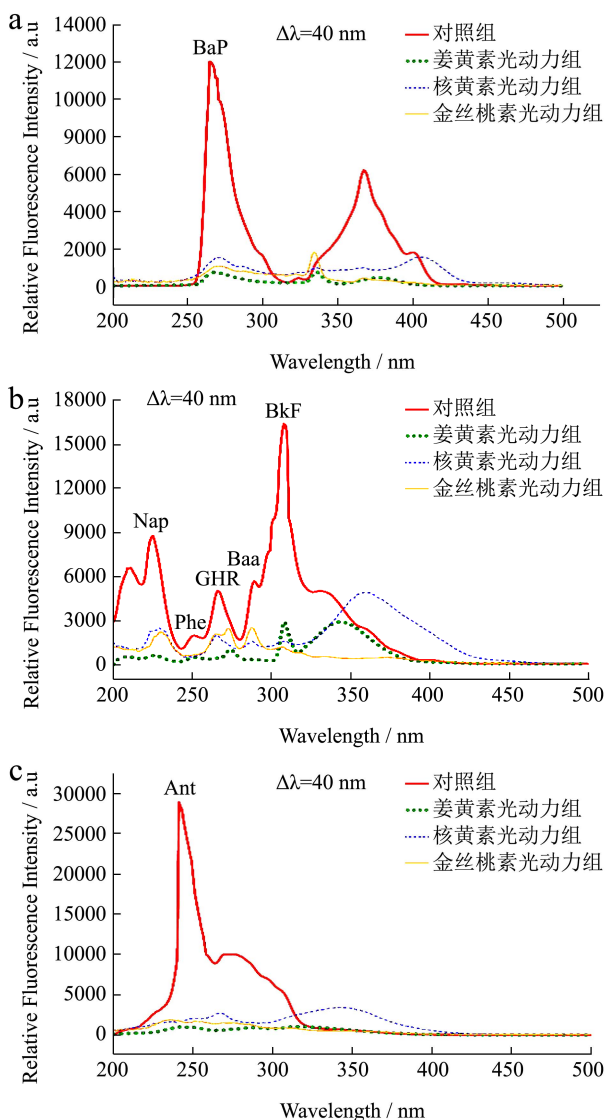


图 3 光动力处理后 8 种多环芳烃的同步荧光光谱图

Fig.3 Synchronous fluorescence spectra of 8 PAHs after photodynamic treatment

2.2 光动力处理对 8 种多环芳烃的降解效果

采用三种光敏剂(姜黄素、核黄素和金丝桃素)介导的光动力处理多环芳烃混合水溶液, 探究光动力对 8 种多环芳烃的降解效果, 得到的同步荧光光谱图如图 3 所示。可以发现, 与对照组相比, 经光动力处理后 8 种多环芳烃对应的相对荧光强度明显降低, 说明光动力对多环芳烃具有一定的降解效果。

通过各组多环芳烃对应的相对荧光强度, 对比标准曲线得出 8 种多环芳烃的质量浓度, 如表 2 所示。对于苯并[a]芘和苯并[k]荧蒽, 相比于姜黄素(苯并[a]芘: 1.70 ng/mL; 苯并[k]荧蒽: 9.93 ng/mL)和核黄素(苯并[a]芘: 4.58 ng/mL; 苯并[k]荧蒽: 5.87 ng/mL)介导的光动力, 金丝桃素介导的光动力(苯并[a]芘: 1.12 ng/mL; 苯并[k]荧蒽: 5.49 ng/mL)处理后剩余浓

度最低,降解效果最好。而对于萘、菲、蒽、苯并[a]蒽、蒽和荧蒽,姜黄素介导的光动力(萘: 2.02 ng/mL; 菲: 10.84 ng/mL; 蒽: 7.01 ng/mL; 苯并[a]蒽: 2.27 ng/mL; 蒽: 2.31 ng/mL; 荧蒽: 11.42 ng/mL)降解效果明显优于其他两种光敏剂。

为了更直观地看出三种光敏剂介导的光动力对 8 种多环芳烃的降解作用,计算求得各种多环芳烃的降解率,结果如图 4 所示。从图中可以观察到,与核黄素和金丝桃素介导的光动力相比,姜黄素介导的光动力处理后混合液中各种多环芳烃均能快速有效降解,其中苯并[a]蒽、萘、苯并[a]蒽和蒽的降解率高达 95% 以上,其余四种多环芳烃的降解率为 70%~90%,说明姜黄素介导的光动力对水溶液中的多环芳烃具有良好的降解效果。

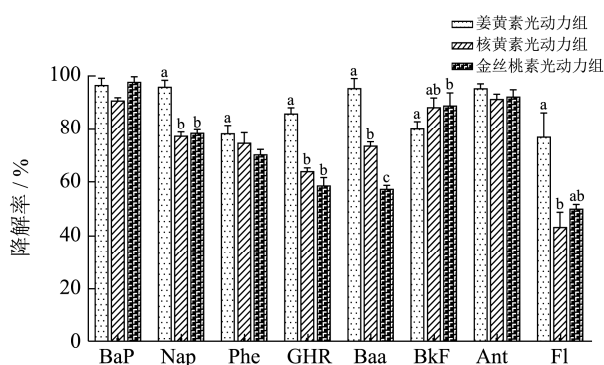


图 4 光动力处理对 8 种多环芳烃的降解率

Fig.4 Degradation rate of 8 PAHs by photodynamic treatment

注: 每种多环芳烃之间各组进行比较, 标有不同字母表示组间差异显著 ($p < 0.05$), 相同字母代表组间没有显著性 ($p > 0.05$)。

与光动力降解多环芳烃相似的是光催化氧化降解法,是指以某种物质为光催化剂,通过在光的作用下产生大量的活性氧物质,对多环芳烃进行氧化降解的过程^[15]。Pal 等^[29]以 TiO_2 薄膜为光催化剂,采用 125 W 的汞灯照射萘和蒽的饱和水溶液,经过紫外光照射 50 min 后,萘和蒽的降解率分别达到约 100% 和 80%。章豪等^[30]采用掺杂 1% Ca 的 TiO_2 光催化氧化降解污泥中的 9 种 PAHs,结果表明,处理 1.5 h 后,9 种 PAHs 都能够在一定程度上降解,其中苯并[a]蒽、蒽、苯并[a]蒽的降解率达到 98% 以上。虽然光催化氧化法对于多环芳烃的降解率较高,但是所需光照时间长。与之相比,光动力方法由于其中的光敏剂可以吸收光子的能量从基态转变为激发态,激发态的光敏剂将能量传递给氧,使其转变为单线态氧,从而达到快速降解多环芳烃的效果。而在本研究中,姜黄素介导的光动力处理 15 min 后,8 种多环芳烃均能发生不同程度的降解,降解效果显著且光照时间短。除此之

外,通过探究姜黄素光动力对牡蛎体内富集多环芳烃的降解效果,发现降解率在 20%~80% 之间,降解效果良好,进一步说明了该技术在水产养殖方面的应用具有广阔的发展前景(实验结果略)。

3 结论

3.1 对于 8 种多环芳烃混合水体,采用恒波长同步荧光法进行测定,当 $\Delta\lambda = 40$ nm、100 nm、160 nm 和 200 nm 时,能够清楚地将 8 种多环芳烃区分开。8 种多环芳烃在 1.0~100.0 ng/mL 的范围内,相对荧光强度和浓度之间线性关系良好。

3.2 采用三种光敏剂介导的光动力处理 8 种多环芳烃混合水体,发现对于苯并[a]蒽和苯并[k]荧蒽,金丝桃素降解效果最好,光照 15 min 时降解率分别高达 97.76% 和 88.98%。而对于其余 6 种多环芳烃,明显可以观察到姜黄素光动力处理后降解率更高(萘: 95.94%; 菲: 78.31%; 蒽: 85.95%; 苯并[a]蒽: 95.47%; 蒽: 95.39%; 荧蒽: 77.07%)。本研究的结果为光动力技术在生产生活用水以及养殖水体中多环芳烃降解方面的应用奠定理论基础,但还需要进一步研究光动力降解多环芳烃的机理以及降解产物的毒性。

参考文献

- [1] 杨发忠,颜阳,张泽志,等.多环芳烃研究进展[J].云南化工,2005,32(2):44-48
YANG Fa-zhong, YAN Yang, ZHANG Ze-zhi, et al. Research advance of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Yunnan Chemical Technology, 2005, 32(2): 44-48
- [2] 王连生.有机污染化学[M].高等教育出版社,2004
WANG Lian-sheng. Organic Pollution Chemistry [M]. Higher Education Press, 2004
- [3] 慕俊泽,张勇,彭景吓.多环芳烃光降解研究进展[J].安全与环境学报,2005,3:69-74
MU Jun-ze, ZHANG Yong, PENG Jing-xia. Advances in study on photolysis of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Journal of Safety and Environment, 2005, 3: 69-74
- [4] 刘芸,于维森,吕晓静,等.青岛市市售贝类中多环芳烃与多氯联苯的含量水平、组成特征及居民健康影响风险评估[J].现代预防医学,2018,45(23):4269-4272
LIU Yun, YU Wei-sen, LYU Xiao-jing, et al. Residues, distributions characteristic and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls of shellfish in Qingdao [J]. Modern Preventive Medicine, 2018, 45(23): 4269-4272

- [5] Yi W, Xiaohui J, Jianying H, et al. Trophic dilution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a marine food web from Bohai Bay, north China [J]. Pubmed, 2007, 41(9): 3109-3114
- [6] Baumard P, Budzinski H, Garrigues P, et al. Concentrations of PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons) in various marine organisms in relation to those in sediments and to trophic level [J]. Elsevier Ltd, 1998, 36(12): 951-960
- [7] 马虹. 油田采出水中多环芳烃的光催化氧化处理方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2012
MA Hong. Research on photocatalytic degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in oilfield produced water [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012
- [8] Meulenberg R, Rijnaarts H H M, Doddema H J, et al. Partially oxidized polycyclic aromatic hydrocarbons show an increased bioavailability and biodegradability [J]. Fems Microbiology Letters, 1997, 152(1): 45-49
- [9] 吕鑫, 孙延瑜, 闵军, 等. 微生物降解土壤中多环芳烃的研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2020, 48(4): 1-7
LYU Xin, SUN Yan-yu, MIN Jun, et al. Review on the microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil [J]. Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(4): 1-7
- [10] 徐莹, 魏欣, 李美. 地下水中多环芳烃有机污染物的微生物修复研究进展 [J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2019, 42(2): 71-73, 82
XU Ying, WEI Xin, LI Mei. Advances in bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon organic pollutant groundwater [J]. Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute, 2019, 42(2): 71-73, 82
- [11] 周子康. 细菌降解低分子量多环芳烃的研究进展 [J]. 生物工程学报, 2019, 35(11): 2069-2080
ZHOU Zi-kang. Progress in biodegradation of low molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2019, 35(11): 2069-2080
- [12] Nikolaou K, Masclat P, Mouvier G. Sources and chemical reactivity of polynuclear aromatic hydrocarbons in the atmosphere - a critical review [J]. Ence of the Total Environment, 1984, 32(2): 103-132
- [13] Dixon, D G, Greenberg, et al. Impacts of UV radiation and photomodification on the toxicity of PAHs to the higher plant *Lemna gibba* (duckweed) [J]. Environmental Toxicology & Chemistry, 1993, 12(6): 1067-1077
- [14] Ge X, Tian F, Wu Z, et al. Adsorption of naphthalene from aqueous solution on coal-based activated carbon modified by microwave induction: microwave power effects [J]. Elsevier B V, 2015, 91: 67-77
- [15] 刘金泉, 黄君礼, 季颖, 等. 环境中多环芳烃(PAHs)去除方法的研究 [J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2007, 23(2): 162-167
LIU Jin-quan, HUANG Jun-li, JI Ying, et al. Review on removal techniques of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in environment [J]. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Ence Edition), 2007, 23(2): 162-167
- [16] 林少玲, 黄晨樾, 朱子瑶, 等. 非热力光动力灭菌技术在食品安全中的研究进展 [J]. 中国食品学报, 2018, 18(7): 323-331
LIN Shao-ling, HUANG Chen-ying, ZHU Zi-yao, et al. Research progress of non-thermal photodynamic therapy on food safety [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(7): 323-331
- [17] Xu Z, Juan W, Chuanshan X, et al. Inactivation of microbes on fruit surfaces using photodynamic therapy and its influence on the postharvest shelf-life of fruits [J]. Food Science and Technology International, 2020, 26(8): 1082013220921330
- [18] Gong C, Li Y, Gao R, et al. Inactivation of specific spoilage organism (*Pseudomonas*) of sturgeon by curcumin-mediated photodynamic inactivation [J]. Photodiagnosis and Photodynamic Therapy, 2020, 31: 101827
- [19] Ran T, Fang Z, Qing-juan Tang, et al. Effects of curcumin-based photodynamic treatment on the storage quality of fresh-cut apples [J]. Food Chemistry, 2018, 274(FEB.15): 415-421
- [20] 王德选, 王万铁, 郑绿珍, 等. 金丝桃素介导的光动力学疗法对 K562 细胞活性与自噬的影响 [J]. 温州医科大学学报, 2020, 50(4): 285-289
WANG De-xuan, WANG Wan-tie, ZHENG Lv-zhen, et al. The effect of Hyp-PDT on K562 activity and autophagy pathway of leukemia cells cultured *in vitro* [J]. Journal of Wenzhou Medical University, 2020, 50(4): 285-289
- [21] 陆长元, 韩镇辉, 蔡喜臣, 等. 核黄素(维生素 B2)的光物理和光化学性质 [J]. 中国科学: 化学, 2000, 30(5): 428-435
LU Chang-yuan, HAN Zhen-hui, CAI Xi-chen, et al. Photophysical and photochemical properties of riboflavin (vitamin B2) [J]. Science in China, 2000, 30(5): 428-435
- [22] 许川山, Leung A W N. 中药姜黄素的光谱学特性研究 [J]. 激光杂志, 2005, 4: 86
XU Chuan-shan, Leung A W N. Study on optical spectrum properties of curcumin [J]. Laser Journal, 2005, 4: 86
- [23] 王雪梅, 陈利华, 施文婷. 姜黄素类化合物的光稳定性研究 [J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2012, 36(3): 73-78

- WANG Xue-mei, CHEN Li-hua, SHI Wen-ting. Study on the photo-stability of curcuminoid [J]. Journal of Anhui University (Natural Science Edition), 2012, 36(3): 73-78
- [24] 邵文丽,姚佳,张雪青,等.金丝桃素介导的光动力学疗法在肿瘤治疗中的应用研究[J].安徽农业科学,2016,44(31): 122-124,134
- SHAO Wen-li, YAO Jia, ZHANG Xue-qing, et al. Application research of photodynamic therapy mediated by hypericin for the treatment of tumor [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(31): 122-124, 134
- [25] 林以琳,邱建清,李世洋,等.核黄素介导的光动力技术的研究进展[J].食品工业科技,2020,41(6):332-337
- LIN Yi-ling, QIU Jian-qing, LI Shi-yang, et al. Research progress of riboflavin-mediated photodynamic technology [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(6): 332-337
- [26] 章汝平,何立芳.多环芳烃混合物的快速同步荧光光谱分析[J].分析科学学报,2008,24(4):437-440
- ZHANG Ru-ping, HE Li-fang. Constant-wavelength synchronous fluorescence spectroscopy for rapid analysis of polynuclear aromatic hydrocarbon mixtures [J]. Journal of Analytical Science, 2008, 24(4): 437-440
- [27] 宋广清,席宏波,周岳溪,等.同步荧光光谱法测定水中痕量
- 蔡和菲[J].光谱学与光谱分析,2012,32(7):1838-1841
- SONG Guang-qing, XI Hong-bo, ZHOU Yue-xi, et al. A method for determination of trace naphthalene and phenanthrene in water using constant-wavelength synchronous fluorescence spectrometry [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(7): 1838-1841
- [28] 施发军,詹丽萍.水体中多环芳烃混合物的快速同步荧光光谱分析[J].化学工程与装备,2013,10:153-156
- SHI Fa-jun, ZHAN Li-ping. Constant-wavelength synchronous fluorescence spectroscopy for rapid analysis of polynuclear aromatic hydrocarbon mixtures [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2013, 10: 153-156
- [29] Pal B, Sharon M. Photodegradation of polyaromatic hydrocarbons over thin film of TiO₂ nanoparticles: a study of intermediate photoproducts [J]. Elsevier BV, 2000, 160(2): 453-460
- [30] 章豪,杨挺,江潇潇,等.污泥中多环芳烃的光催化降解[J].浙江农业科学,2015,56(12):2039-2041
- ZHANG Hao, YANG Ting, JIANG Xiao-xiao, et al. Photocatalytic degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in sludge [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2015, 56(12): 2039-2041

(上接第 55 页)

- [31] 王元平.中长跑运动的能量供应特点与对策研究[J].青少年体育,2017,1:118-119
- WANG Yuan-ping. Research on characteristics and countermeasures of energy supply in middle and long distance running [J]. Youth Sport, 2017, 1: 118-119
- [32] Hsu Y, Huang W, Lin J, et al. Kefir supplementation modifies gut microbiota composition, reduces physical fatigue, and improves exercise performance in mice [J]. Nutrients, 2018, 10(7): 862
- [33] Shin N, Whon T W, Bae J. Proteobacteria: microbial signature of dysbiosis in gut microbiota [J]. Trends Biotechnol, 2015, 33(9): 496-503
- [34] 向岑,荣耀,迟明,等.菊粉生物学作用及机制研究进展[J].食品研究与开发,2020,41(19):212-218
- XIANG Cen, RONG Yao, CHI Ming, et al. Advances in research on biological activity and mechanisms of inulin [J]. Food Research and Development, 2020, 41(19): 212-218

(上接第 179 页)

- [22] ZHAO Yan, CHEN Zhang-yi, LI Jian-ke, et al. Formation mechanism of ovalbumin gel induced by alkali [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 61: 390-398
- [23] Totosaus A, Montejano J G, Salazar J A, et al. Review of physical and chemical protein-gel induction [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2002, 37(6): 589-601
- [24] Jackson M, Mantsch H H. The use and misuse of FTIR spectroscopy in the determination of protein structure [J]. Critical Reviews in Biochemistry, 2008, 30(2): 95-120