

## 水产品中微生物生物被膜形成机制与控制方法研究进展

蓝蔚青<sup>1,2,3,4</sup>, 巩涛硕<sup>1</sup>, 陈梦玲<sup>1</sup>, 王蒙<sup>1</sup>, 谢晶<sup>1,2,3,4\*</sup>

1(上海海洋大学 食品学院, 上海, 201306) 2(上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海, 201306)

3(上海冷链装备性能与节能评价专业技术服务平台, 上海, 201306);

4(上海海洋大学, 食品科学与工程国家级实验教学示范中心, 上海, 201306)

**摘 要** 生物被膜(biofilm, BF)是细菌在其生长过程中形成一种非游离状态的微生物细胞集合体, 属特定的群体结构。该文根据近年来微生物生物被膜的研究现状, 介绍了微生物生物被膜的形成过程, 系统阐述了生鲜与冷冻水产品中的微生物生物被膜现象, 通过对当前生物被膜的物理法、化学法与化学生物法等控制措施予以说明, 提出存在问题与解决办法, 并对微生物生物被膜控制技术的发展趋势予以展望。

**关键词** 水产品; 生物被膜; 形成机制; 控制措施; 研究进展

微生物生物被膜(biofilm, BF)为微生物在特定条件下形成的一种特殊群体结构, 是无柄微生物群落附着在各种载体上, 通过分泌多糖、纤维蛋白与脂质蛋白等胞外基质, 将载体包绕其中而形成的大量高度组织化、系统化的膜样聚合物<sup>[1]</sup>。微生物菌体被包裹在其自身分泌的胞外聚合基质(extracellular polymeric substances, EPS)中, 具有特定结构, 是微生物在生长过程中形成的一种非游离状态的微生物细胞集合体<sup>[2]</sup>。多糖、蛋白质、磷脂、磷壁酸与核酸等是EPS的主要组分<sup>[3]</sup>。相对于以浮游方式存在的微生物, 更多微生物以生物被膜形式存在<sup>[4]</sup>。其还包括原生动物、真菌以及多种生物复合而形成的生物被膜<sup>[5]</sup>。与浮游方式存在的微生物相比, 微生物为适应生存环境形成的生物被膜危害更大、抗性更强、抑制或消灭也更困难。本文介绍了微生物生物被膜的形成过程与水产品中微生物的生物被膜现象, 并对其控制措施予以说明, 提出相应的问题与解决方案, 以期为后期相关研究提供理论参考。

生物被膜中含有腐败菌与病原菌, 其增加了水产品后处理的污染和对公众健康的风险。目前, 在水产品中能形成生物被膜的常见微生物主要有沙门氏菌、嗜水气单胞菌、弧菌与单增李斯特菌等<sup>[6]</sup>。由于这

些微生物被膜的存在, 构成了世界范围内的食品安全威胁。因此, 控制水产品及其加工过程中的腐败菌和病原菌污染, 防止其生成生物被膜进而交叉污染水产品, 对控制一些食源性疾病的发生具有重要意义。其中, 细菌生物被膜的动态形成过程复杂, 包括初始细菌的附着粘附、群落形成、生物被膜的成熟与细菌的分散污染<sup>[7]</sup>。细菌的附着和粘附是生物被膜形成的第一阶段与关键步骤。在细胞能结合到表面前, 其表面通过吸附来自周围环境的分子而被调节。此外, 吸附粘附取决于正在进行的食品加工的类型, 可能在水产品产业中发现的有机物质(肌钙蛋白、原肌球蛋白和肌球蛋白), 其组成将不同于乳制品工业中表面上沉积的有机物质( $\alpha$ -酪蛋白、 $\beta$ -酪蛋白、 $\kappa$ -酪蛋白和 $\alpha$ -乳清蛋白), 从而影响细胞保留与后续生物膜的结构功能<sup>[8-10]</sup>。在生物被膜的成熟阶段, 微生物包裹其自身分泌的多聚糖基质中, 由扁平不均一结构变为高度组织化结构<sup>[11]</sup>。最后, 微生物细胞分散污染其他表面, 重复循环, 形成新的生物被膜, 这也是微生物生物被膜难以控制的主要原因。

## 1 水产品中存在的生物被膜现象

生鲜水产品含水量高、营养丰富, 其在贮藏与加工过程中极易受到污染, 滋生微生物, 形成微生物生物被膜, 导致其腐败, 这已成为水产品及加工品中存在的主要问题。

### 1.1 水产品原料

水产品原料自身带有微生物源, 当细菌在水产品中形成生物被膜时, 其会长时间存活, 并对多数抗菌

第一作者: 博士研究生, 高级工程师(谢晶教授为通讯作者, E-mail: jxie@shou.edu.cn)。

基金项目: 农业部海水鱼产业体系(CARS-47); 2016年上海市科技兴农重点攻关项目[沪农科攻字(2016)第1-1号]; 上海市科委平台能力建设项目(16DZ2280300); 上海市科委公共服务平台建设项目(17DZ2293400)

收稿日期: 2018-04-26, 改回日期: 2018-07-23

产品表现出抗性<sup>[12]</sup>。细菌群体中含有对抗菌产品敏感性降低的亚群体,其可通过适应,产生遗传抗性元件,形成生物被膜并获得更高抗性,微生物生物被膜特殊的三维生物结构是抗菌产品的天然屏障<sup>[13]</sup>。细菌生物被膜主要由微生物、微生物分泌的黏性物质和胞外多糖组成,其中微生物占比少于1/3。蛋白质、多糖、DNA、RNA与磷脂等生物大分子同细菌存在于生物被膜中,约占其总量的3%,另有97%的水分<sup>[14]</sup>。暴露于环境中的高浓度细菌与病毒可能形成生物被膜,并能长时间处于稳定状态。但当与环境和食物有关的因素给予这些生物被膜一定刺激时,其又回到浮游状态<sup>[15]</sup>。如嗜水气单胞菌已从螃蟹、鲫鱼与鲳鱼等水产养殖产品中分离出,该菌会引发食用人群产生败血症等疾病<sup>[16]</sup>。PANISELLO等<sup>[17]</sup>也关注了贝类和其他海产鱼类中污染的沙门氏菌形成生物被膜引起的食源性疾病。

## 1.2 水产品加工过程

在水产品加工过程中,主要污染源通常是由于水产品加工设备的清洁和消毒不当造成。水产环境中,沙门氏菌来源于带菌者的粪便污染、水产品养殖环境及生产过程中的一系列环节<sup>[18]</sup>。其中,THOMPSON等<sup>[19]</sup>报道了由于金枪鱼寿司卷的消费感染沙门氏菌,引起食物中毒的现象。食源性病原菌可在设备材料表面、地面、工厂天花板等表面形成微生物生物被膜。在产品表面也可能存在病原菌,进一步形成生物被膜。全球范围内,水产品传播的疾病主要由霍乱弧菌、副溶血性弧菌或创伤弧菌等引起。弧菌属中的副溶血性弧菌是主要食源性病原菌,其在亚洲国家尤为如此<sup>[20]</sup>。海产品在制造、处理和加工过程中会受到产毒或非产毒霍乱弧菌污染<sup>[21]</sup>。其中,单增李斯特菌在熏海鲜、虾、软体动物贝类等各种水产品中被检出,其可形成生物被膜,造成更大危害<sup>[22]</sup>。

## 2 水产品中微生物生物被膜的控制措施

为确保水产品安全,水产品生态系统的每一步都需采取相应措施对生物被膜加以控制。主要方法有物理法、化学法、化学生物学法等。

### 2.1 物理法

(1)高压处理:高压处理可通过破坏微生物生物被膜的结构,达到消毒和杀菌目的,一般可用于水产品加工处理。其中,莘似韵等<sup>[23]</sup>使用高于300 MPa的超高压处理从水产品中分离的单增李斯特菌生物被膜,发现有2株4b血清型细菌的生物被膜形成量

都有显著降低。高压处理在某些情况能使牡蛎中总活菌、乳酸菌、大肠菌群等数量减少约5个对数单位,400 MPa、600 s是杀灭牡蛎中总菌数的最佳条件<sup>[24]</sup>。从现有分析得知,超高压技术在水产品基础研究与产品项目开发上仍处于起步阶段,实际操作可配合酶处理与热加工等手段,拓展超高压技术在水产品加工中的使用领域<sup>[25]</sup>。

(2)超声波处理:超声波处理具有设备要求低、使用方便、处理迅速,且对原料及操作人员伤害极低等特点,在水产品加工业中应用前景广阔,现已逐渐应用于各类食品加工中。目前,超声波处理在消除细菌生物被膜方面应用广泛。相关报道显示,超声波处理能简单有效去除微生物生物被膜,使其风险最小化,且能提高产品的一致性与综合质量<sup>[26]</sup>。其中,黄静等<sup>[27]</sup>使用超声波处理120 s,能消除多数金黄色葡萄球菌形成的生物被膜,且易于控制,人为影响较小。尽管较低频率的超声波在降低生物被膜内的细菌存活活力方面较高频率更有效,但使用现有的超声波技术不能仅消除水产品加工过程中的微生物,因此可将超声波技术与其他处理技术相结合<sup>[28]</sup>。

### 2.2 化学法

(1)消毒剂:在水产品加工过程中消毒剂可减少细菌在非生物表面形成生物膜,其是清除细菌生物被膜的必要条件<sup>[29]</sup>。在水产品行业中,要有符合要求的清洁和消毒设施,使用消毒剂须安全有效、易于处理、无残留。常用消毒剂有臭氧、过氧化氢、氯、苛性碱、过氧乙酸、碘与异噻唑啉酮等。其中,李长青等<sup>[30]</sup>研究得出,邻苯二甲醛消毒剂对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、白色念珠菌与枯草杆菌黑色变种芽孢杀灭效果较好。但与浮游细胞相比,生物被膜对消毒剂的抗性更强。

(2)天然抗菌剂:从芳香族植物中提取的一些抗菌化合物天然安全,现已证明对浮游细菌具有良好的抗微生物活性<sup>[31]</sup>。如植物精油的次生代谢物具有抗微生物作用,其主要作用于微生物细胞质膜的脂质双层<sup>[32]</sup>。相关报道显示,肉桂精油处理可使水产品生产加工中不锈钢表面上的无固定细胞数量减少2.54个数量级,肉桂醛被证明能完全杀灭细菌或使其菌数明显减少,现已成为商业化学消毒剂的有效替代品<sup>[33]</sup>。

### 2.3 化学生物学法

(1)噬菌体:噬菌体在大自然中无处不在,是感染和裂解细菌的病毒,可控制霍乱弧菌、链球菌和大肠埃希氏菌等人类病原体,现已提议作为生物膜的控

制方法之一<sup>[34]</sup>。许多噬菌体都会产生解聚酶,通过EPS扩散,产生的解聚酶会水解生物被膜中的胞外聚合物,引发其破坏<sup>[35]</sup>。因此,需要进一步评估噬菌体在控制水产品传播的病原体方面的用途,改善水产品的安全性。但噬菌体的宿主范围很窄,因此噬菌体混合物或工程噬菌体可提供更好的解决方案。其中,SILLANKORVA等<sup>[36]</sup>研究了噬菌体Phi S1的特定裂解噬菌体作为荧光假单胞菌生物被膜控制剂的功效。发现其可感染浮游细胞和生物被膜,导致2种情况下生物量降低约85%。研究表明,单裂解性噬菌体可通过解聚酶介导作用,显著根除旧生物膜。应用P100噬菌体对单增李斯特菌的特异性生物防治也非常有效,与对照组相比,噬菌体P100在第0天和第10天均能使单增李斯特菌数减少2.5个对数单位<sup>[37]</sup>。然而,目前仍需进一步研究使用噬菌体来彻底根除病原体。噬菌体与抗生素联用能使生物膜根除程度有所增强,其证实了噬菌体可增强抗生素功效的推测<sup>[38]</sup>。

(2) 益生菌:益生菌为“活性微生物的给药量足以宿主带来健康益处”<sup>[39]</sup>。其菌株可作为传统化学灭菌剂的替代方式,通过竞争、排斥和置换,有效减少水产品中沙门氏菌、单增李斯特菌等病原菌生物被膜的形成。PETROVA等<sup>[40]</sup>研究发现益生菌菌株鼠李糖乳杆菌GG株的凝集素对各种病原体的生物被膜形成具有明显的抑制作用,其还能破坏一些致病性病原体的成熟生物被膜。预防性使用益生菌,可提高养殖水生动物的健康和畜牧性能,溶藻弧菌现已被用作许多厄瓜多尔虾孵化场的益生菌,孵化时间从每月约7 d减少到每年约21 d,而生产量增加了35%<sup>[41]</sup>。

(3) 酶:酶是对特定化学分子具有催化活性的蛋白质,在食品加工过程中去除微生物生物被膜效果显著。由于生物膜基质中的异质性,选择恰当的酶处理方式很有必要,使用几种不同酶的混合物能增加其对水产品中生物被膜的降解与消除<sup>[42]</sup>。相关学者在研究商业蛋白酶和淀粉酶对荧光假单胞菌形成的生物被膜的影响中发现,蛋白酶对荧光假单胞菌生物被膜EPS的降解效果较好,而淀粉酶的效果较差<sup>[43]</sup>。微生物生物被膜的去除和杀灭处理条件苛刻,其中以蛋白酶与多糖水解酶作用效果较好<sup>[44]</sup>。因此,根据安全无毒的特点,生物被膜的酶解控制技术可作为环保替代策略。

(4) 群体感应抑制剂:生物被膜中的微生物可通过信号分子进行交流,并使用群体感应优化其毒力因

子,提高其生存能力<sup>[45]</sup>。群体感应被广泛认为是调节微生物中共同行为特定基因表达的有效机制<sup>[46]</sup>。前人研究发现,20  $\mu\text{g/mL}$  北海苔藓虫中的次生代谢产物溴化生物碱就可引起微生物生物被膜信号分子的强度降低,阻断其生物被膜形成<sup>[47]</sup>。螺旋藻提取物等群体感应抑制剂对生物被膜的抑制也具有良好效果,对水产品中希瓦氏菌形成的生物被膜抑制率达77.05%<sup>[48]</sup>。群体感应可调节生物膜中微生物的基因表达,但使用群体感应抑制剂解决上述问题还有待深入研究。

### 3 前景与展望

与浮游微生物相比,微生物为适应生存环境形成的生物被膜危害更大,抑制或消灭也更困难。水产品中的微生物生物被膜构成了世界范围内的健康威胁,几乎都可引起食源性疾病,严重程度从轻度肠胃炎到危及生命的感染,预防生物被膜形成比治疗生物被膜更加有效。因此,需要进一步研究用以解决水产品中生物被膜的抑制和消除问题,最大限度减少水产品污染,提高其安全性。然而,目前还未仅使用一种方法可完全消除生物被膜而无副作用,仍须通过栅栏因子将多种处理方式优化组合,发挥其协同作用,获得更有效的处理效果。因此,研究人员需更好完善微生物生物被膜的控制技术,确保消费者在水产品生产、加工、贮藏与食用等方面的安全。

### 参 考 文 献

- [1] RITTMANN B E. Biofilms, active substrata, and me[J]. Water Research, 2017, 132:135–145.
- [2] ALEKSANDRA M, MAGDALENA A. Biofilm formation and microscopic analysis of biofilms formed by *Listeria monocytogenes* in a food processing context [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 84:65–73.
- [3] DONLAN R M. Biofilms: Microbial life on surfaces [J]. Emerging Infectious Diseases, 2002, 8(9):881–890.
- [4] 刘蕾,刘义,李平兰. 益生菌生物被膜的研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(9):214–219.
- [5] 邢盼盼,邓开野,李南薇. 金黄色葡萄球菌生物被膜在食品工业领域的研究进展[J]. 食品工业, 2012, 33(12):150–152.
- [6] IWAMOTO M, AYERS T, MAHON B E, et al. Epidemiology of seafood-associated infections in the United States [J]. Clinical Microbiology Reviews, 2010, 23(2):399–411.
- [7] ABDALLAH M, BENOLIEL C, DRIDER D, et al. Biofilm formation and persistence on abiotic surfaces in the context of food and medical environments[J]. Archives of

- Microbiology, 2014, 196(7):453–472.
- [8] MEYER R L, ARPANAEI A, PILLAI S, et al. Physico-chemical characterization of fish protein adlayers with bacteria repelling properties [J]. Colloids and Surfaces B Biointerfaces, 2013, 102(2):504–510.
  - [9] BARNES L M, LO M F, ADAMS M R, et al. Effect of milk proteins on adhesion of bacteria to stainless steel surfaces [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, 65(10):4 543–4 548.
  - [10] HINGSTON P A, STEA E C, KNÄCHEL S, et al. Role of initial contamination levels, biofilm maturity and presence of salt and fat on desiccation survival of *Listeria monocytogenes* on stainless steel surfaces [J]. Food Microbiology, 2013, 36(1):46–56.
  - [11] MIZAN M F, JANID I K, HA S D. Microbial biofilms in seafood: A food-hygiene challenge [J]. Food Microbiology, 2015, 49:41–55.
  - [12] JAHID I K, HA S D. A review of microbial biofilms of produce: Future challenge to food safety [J]. Food Science and Biotechnology, 2012, 21(2):299–316.
  - [13] 刘蕾, 桂萌, 武瑞赞, 等. LuxS/AI-2 型群体感应系统调控细菌生物被膜形成研究进展 [J]. 食品科学, 2016, 37(19):254–262.
  - [14] FISH K, OSBORN A M, BOXALL J B. Biofilm structures (EPS and bacterial communities) in drinking water distribution systems are conditioned by hydraulics and influence discoloration [J]. Science of the Total Environment, 2017(593–594):571–580.
  - [15] TAKAHASHI H, MIYA S, IGARASHI K, et al. Biofilm formation ability of *Listeria monocytogenes* isolates from raw ready-to-eat seafood [J]. Journal of Food Protection, 2009, 72(7):1 476–1 480.
  - [16] NIELSEN M E, HØI L, SCHMIDT A S, et al. Is *Aeromonas hydrophila* the dominant motile *Aeromonas* species that causes disease outbreaks in aquaculture production in the Zhejiang Province of China? [J]. Diseases of Aquatic Organisms, 2001, 46(1):23–29.
  - [17] PANISELLO P J, ROONEY R, QUANTICK P C, et al. Application of foodborne disease outbreak data in the development and maintenance of HACCP systems [J]. International Journal of Food Microbiology, 2000, 59(3):221–234.
  - [18] BERNBOM N, NG Y Y, PALUDAN-MÜLLER C, et al. Survival and growth of *Salmonella* and *Vibrio* in som-fak, a Thai low salt garlic containing fermented fish product [J]. International Journal of Food Microbiology, 2009, 134(3):223–229.
  - [19] THOMPSON C K, WANG Q, BAG S K, et al. Epidemiology and whole genome sequencing of an ongoing point-source *Salmonella* agona outbreak associated with sushi consumption in western Sydney, Australia 2015 [J]. Epidemiology and Infection, 2017, 145(10):2 062–2 071.
  - [20] XU Xiao-ke, CHENG Jian-heng, WU Qing-ping, et al. Prevalence, characterization, and antibiotic susceptibility of *Vibrio parahaemolyticus*, isolated from retail aquatic products in North China [J]. BMC Microbiology, 2016, 16(1):32–40.
  - [21] BLACKSTONE G M, NORDSTROM J L, BOWEN M D, et al. Use of a real time PCR assay for detection of the *ctxA* gene of *Vibrio cholerae* in an environmental survey of Mobile Bay [J]. Journal of Microbiological Methods, 2007, 68(2):254–259.
  - [22] JAMI M, GHANBARI M, ZUNABOVIC M, et al. *Listeria monocytogenes* in aquatic food products—A review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety, 2015, 13(5):798–813.
  - [23] 莘似韵, 孙晓红, 徐忆宁. 超高压对单增李斯特菌生物被膜形成的影响 [J]. 上海海洋大学学报, 2017, 26(2):294–300.
  - [24] BRIONES L S, REYES J E, TABILO-MUNIZAGA G E, et al. Microbial shelf-life extension of chilled Coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) and abalone (*Haliotis rufescens*) by high hydrostatic pressure treatment [J]. Food Control, 2010, 21(11):1 530–1 535.
  - [25] 徐娟, 张昭寰, 肖莉莉, 等. 食品工业中新型杀菌技术研究进展 [J]. 食品工业科技, 2015, 36(16):378–383.
  - [26] OULAHALLAGSIR N, MARTIALGROS A, BOISTIER E, et al. The development of an ultrasonic apparatus for the noninvasive and repeatable removal of fouling in food processing equipment [J]. Letters in Applied Microbiology, 2000, 30(1):47–52.
  - [27] 黄静, 韩北忠, 李春雷, 等. 超声波平板法检测金黄色葡萄球菌生物被膜的研究 [J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2005, 28(3):22–24.
  - [28] QIAN Z, SAGERS R D, PITT W G. The effect of ultrasonic frequency upon enhanced killing of *P. aeruginosa* biofilms [J]. Annals of Biomedical Engineering, 1997, 25(1):69–76.
  - [29] GRAM L, BAGGE-RAVN D, NG Y Y, et al. Influence of food soiling matrix on cleaning and disinfection efficiency on surface attached *Listeria monocytogenes* [J]. Food Control, 2007, 18(10):1 165–1 171.
  - [30] 李长青, 佟颖, 田佩瑶, 等. 邻苯二甲醛消毒剂杀菌性能及影响因素的研究 [J]. 中国消毒学杂志, 2006, 23(3):208–211.
  - [31] MERINO L, PROCURA F, TREJO F M, et al. Biofilm formation by *Salmonella* sp. in the poultry industry: Detection, control and eradication strategies [J]. Food Research International, 2017.
  - [32] OLIVEIRA M M M D, BRUGNERA D F, PICCOLI R H. Biofilms in the dairy industries: General aspects and the use of essential oils as a new control alternative [J]. 2013, 68(390):65–73.
  - [33] MMM D O, BRUGNERA D F, DO NASCIMENTO J A,

- et al. Cinnamon essential oil and cinnamaldehyde in the control of bacterial biofilms formed on stainless steel surfaces[J]. *European Food Research & Technology*, 2012, 234(5):821–832.
- [34] KUDVA I T, JELACIC S, TARR P I, et al. Biocontrol of *Escherichia coli* O157 with O157-specific bacteriophages[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, 65(9):3 767–3 773.
- [35] BRIANDET R, LACROIXGUEU P, RENAULT M, et al. Fluorescence correlation spectroscopy to study diffusion and reaction of bacteriophages inside biofilms[J]. *Applied & Environmental Microbiology*, 2008, 74(7):2 135–2 143.
- [36] SILLANKORVA S, OLIVEIRA R, VIEIRA M J, et al. Bacteriophage Phi S1 infection of *Pseudomonas fluorescens* planktonic cells versus biofilms[J]. *Biofouling*, 2004, 20(3):133–138.
- [37] ROSSI L P R, ALMEIDA R C C, LOPES L S, et al. Occurrence of *Listeria* spp. in Brazilian fresh sausage and control of *Listeria monocytogenes*, using bacteriophage P100[J]. *Food Control*, 2011, 22(6):954–958.
- [38] VERMA V, HARJAI K, CHHIBBER S. Structural changes induced by a lytic bacteriophage make ciprofloxacin effective against older biofilm of *Klebsiella pneumoniae* [J]. *Biofouling*, 2010, 26(6):729–737.
- [39] HILL C, GUARNER F, REID G, et al. Expert consensus document; The international scientific association for probiotics and prebiotics consensus statement on the scope and appropriate use of the term probiotic[J]. *Nature Reviews Gastroenterology and Hepatology*, 2014, 11(8):506–524.
- [40] PETROVA M I, IMHOLZ N C E, VERHOEVEN T L A, et al. Lectin-Like molecules of *Lactobacillus rhamnosus* GG inhibit pathogenic *Escherichia coli* and salmonella biofilm formation[J]. *Plos One*, 2016, 11(8):1–24.
- [41] VERSCHUERE L, ROMBAUT G, SORGELOOS P, et al. Probiotic bacteria as biological control agents in aquaculture[J]. *Microbiology & Molecular Biology Reviews*, 2000, 64(4):655–671.
- [42] BRIDIER A, BRIANDET R, THOMAS V, et al. Resistance of bacterial biofilms to disinfectants: A review[J]. *Biofouling*, 2011, 27(9):1 017–1 032.
- [43] MOLOBELA I P, CLOETE T E, BEUKES M. Protease and amylase enzymes for biofilm removal and degradation of extracellular polymeric substances (EPS) produced by *Pseudomonas fluorescens* bacteria[J]. *African Journal of Microbiology Research*, 2010, 4(14):1 515–1 524.
- [44] MEYER B. Approaches to prevention, removal and killing of biofilms[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2003, 51(4):249–253.
- [45] MONZON O, YU Y, LI Q L, et al. Quorum sensing autoinducers enhance biofilm formation and power production in a hypersaline microbial fuel cell[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, 109:222–227.
- [46] GONZÁLEZ J E, KESHAVAN N D. Messing with bacterial quorum sensing [J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2006, 70(4):859–875.
- [47] PETERS L, KÖNIG G M, WRIGHT A D, et al. Secondary metabolites of *Flustra foliacea* and their influence on bacteria [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, 69(6):3 469–3 475.
- [48] 曾惠,刘尊英,朱素芹,等. 钝顶螺旋藻提取物对细菌群体感应的抑制作用[J]. *食品科学*, 2012, 33(7):138–141.

## Research progress on mechanisms of microbial biofilm formation and its controlling methods in aquatic products

LAN Weiqing<sup>1, 2, 3, 4</sup>, GONG Taoshuo<sup>1</sup>, CHEN Mengling<sup>1</sup>, WANG Meng<sup>1</sup>, XIE Jing<sup>1, 2, 3, 4\*</sup>

1 (Shanghai Ocean University College of Food Science and Technology, Shanghai 201306, China) 2 (Shanghai Aquatic Products Processing and Storage Engineering Technology Research Center, Shanghai 201306, China) 3 (Shanghai Professional Technology Service Platform on Cold Chain Equipment Performance and Energy Saving Evaluation, Shanghai 201306, China) 4 (National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering (Shanghai Ocean University), Shanghai 201306, China)

**ABSTRACT** Biofilm, a specific population structure, is a non-free microbial cell aggregate formed when bacteria are growing. Based on recent research achievements on microbial biofilms, the forming process of microbial biofilm was introduced, the presence of microbial biofilm in both fresh and frozen aquatic products was reviewed. The current physical, chemical and chemobiological methods developed for controlling microbial biofilm formation were further described and the existing problems and solutions regarding the methods mentioned were proposed. The development of technology used to control microbial biofilm formation was also prospected.

**Key words** aquatic products; biofilm; forming mechanism; controlling methods; research progress