

# 氢氧化钠预处理对罗非鱼皮胶原蛋白自组装性的影响

黄鹏飞, 乔诗雅, 苗语涵, 俞灵珊, 闫鸣艳\*

青岛科技大学生物工程学院, 山东 青岛

收稿日期: 2026年5月5日; 录用日期: 2026年5月27日; 发布日期: 2026年6月9日

## 摘要

罗非鱼皮存在大量色素, 严重影响了胶原蛋白的品质, NaOH溶液预处理可有效去除杂质, 同时会影响胶原的自组装性。因此, 本研究分别以0.5、1.0和1.5 mol/L NaOH溶液对罗非鱼皮进行预处理, 采用胃蛋白酶法提取酶溶性胶原, 测定其得率及纯度; 通过衰减全反射傅里叶变换红外光谱、ANS荧光探针表征PSC结构与疏水性, 监测400 nm吸光度分析自组装动力学并计算自组装比率; 借助扫描电子显微镜表征PSC自组装体的微观结构。结果表明, 碱液预处理能够有效去除鱼皮中的色素并提升PSC的纯度, 但得率下降, 1.0 mol/L NaOH处理至脱色时, PSC的得率、疏水性及自组装性最优; 预处理时间延长会延缓PSC自组装, 使PSC自组装体的纤维更细、网络更致密。本研究结果表明, 1.0 mol/L NaOH预处理的罗非鱼皮胶原蛋白在食品和生物材料领域具有广阔的应用前景。

## 关键词

预处理, 胶原蛋白, 罗非鱼, 自组装

# Effect of Pretreatment with Sodium Hydroxide on Self-Assembly Properties of Collagen from Tilapia Skin

Pengfei Huang, Shiya Qiao, Yuhan Miao, Lingshan Yu, Mingyan Yan\*

College of Biological Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao Shandong

Received: May 5, 2026; accepted: May 27, 2026; published: June 9, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 黄鹏飞, 乔诗雅, 苗语涵, 俞灵珊, 闫鸣艳. 氢氧化钠预处理对罗非鱼皮胶原蛋白自组装性的影响[J]. 水产研究, 2026, 13(2): 111-121. DOI: 10.12677/ojfr.2026.132014

## Abstract

The abundant pigments present in tilapia skin severely affect the quality of collagen. Pigments can be effectively removed by NaOH solution pretreatment, though the self-assembly property of collagen is simultaneously affected. Therefore, tilapia skin was pretreated with 0.5, 1.0, and 1.5 mol/L NaOH solutions, respectively. Pepsin-solubilized collagen (PSC) was extracted by pepsin hydrolysis and purified by salting-out, and its yield and purity were determined. The structure and hydrophobicity of PSC were characterized by attenuated total reflection Fourier transform infrared spectroscopy and ANS fluorescent probe. The self-assembly kinetics was analyzed by monitoring absorbance at 400 nm, and the self-assembly ratio was calculated. The microstructure of PSC self-assemblies was observed by scanning electron microscopy. The results showed that pigments were effectively removed from fish skin by alkaline pretreatment, and the purity of PSC was increased, although the yield was decreased. When skin was pretreated with 1.0 mol/L NaOH until decolorization, the yield, hydrophobicity, and self-assembly performance of PSC were optimal. Prolonged pretreatment time delayed PSC self-assembly, resulting in finer fibers and a denser network. These findings indicate that tilapia skin collagen pretreated with 1.0 mol/L NaOH holds broad application prospects in the food and biomaterial fields.

## Keywords

Pretreatment, Collagen, Tilapia, Self-Assembly

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

胶原蛋白是动物体内分布最广泛的结构蛋白，其中I型胶原蛋白是含量最多的类型，占皮肤和骨骼中胶原总量的90%。它是由三条平行的左手螺旋多肽链缠绕形成的右手三螺旋结构。目前，I型胶原主要来源于牛、猪等陆生哺乳动物，而水产胶原因结构和性能与陆生胶原相似，且提取工艺简便、无宗教限制、无人畜共患病风险，已成为水产领域的研究热点[1]。罗非鱼是全球养殖量仅次于鲤鱼的鱼类，具有极高商业价值[2]。罗非鱼的生长周期短、蛋白质含量丰富。然而，在罗非鱼加工过程中，鱼皮等副产物大部分被丢弃，导致资源浪费与环境污染。从罗非鱼皮中提取的胶原蛋白因其卓越的生物相容性和可降解能力，在生物医药、化妆品及组织工程材料等领域具有重要的产业化开发价值[3]。

鱼皮胶原制备主要包括预处理和提取两步。常规方法以0.1 mol/L NaOH溶液进行预处理，以0.5 mol/L乙酸溶液提取[4]。但是与猪、牛皮不同，鱼皮中存在大量色素[5]，0.1 mol/L NaOH溶液预处理无法将其有效去除，而预处理是去除胶原中杂质的关键步骤，因此需深入研究NaOH溶液预处理条件，以从鱼皮中提取高品质胶原。

自组装是胶原的重要特性。在体内，I型胶原可通过自组装形成微纤维，进而聚集成胶原纤维[6]；在体外，具有三螺旋结构的胶原分子在中性条件下可模拟体内自组装形成纤维[7]。与球形纳米颗粒相比，高长径比的胶原纤维负载功能因子能力更强、体内循环时间更长，并且胶原纤维在细胞培养肉、食品包装、伤口敷料及药物载体等领域均具有广阔应用前景[8]。因此胶原自组装的调控研究备受关注。其受胶原来源、浓度、提取方法等多种因素影响。研究表明0.1 mol/L NaOH溶液碱预处理会延缓鲟鱼皮胶原原纤维的形成[9]，但是不同浓度NaOH溶液预处理对胶原自组装的影响缺乏系统研究。

本研究利用 0.5~1.5 mol/L NaOH 溶液预处理罗非鱼皮, 研究其对胶原结构和自组装性的影响。研究结果将为深入理解胶原自组装行为提供理论依据, 同时为水产胶原原纤维基材料在食品和生物材料领域的优化设计与应用提供实验参考。

## 2. 实验材料和方法

### 2.1. 材料与主要试剂

罗非鱼皮, 广东水产品加工厂。胃蛋白酶, 10,000 U/mg, 北京索尔博生物技术有限公司。I型胶原酶,  $\geq 125$  CDU/mg, 德国 BioFroxx 生物试剂公司。氢氧化钠、无水乙醇、1-苯胺基萘-8-磺酸、乙酸、氯化钠、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠, 国药集团化学试剂有限公司。

### 2.2. 主要仪器

真空冷冻干燥机, FD5 型, 北京金西盟仪器有限公司; 紫外-可见分光光度计, UV-6100S 型, 上海元析仪器有限公司; 衰减全反射傅里叶变换红外光谱仪, Nicolet 6700 型, 美国赛默飞世尔科技公司; 荧光分光光度计, FL970 型, 上海天美仪器有限公司; 扫描电子显微镜, JSM-6700F 型, 日本 JEOL 公司; 高速冷冻离心机, CT14RD II 型, 上海天美科学仪器有限公司。

### 2.3. 罗非鱼皮胶原的制备

罗非鱼皮胶原的制备参考前人方法并稍作改进[10]。将罗非鱼皮解冻后剪碎, 按照料液比 1:50 (w/v) 分别放入 0.5、1.0、1.5 mol/L NaOH 溶液中, 预处理时间如表 1。水洗至中性后, 按照料液比 1:50 (w/v) 用含 0.5% (w/w) 胃蛋白酶的 0.5 mol/L 乙酸溶液于 4℃ 下搅拌提取 48 h, 加入氯化钠使其终浓度为 0.9 mol/L, 10,000 r/min 离心 30 min 后收集沉淀, 透析、冷冻干燥得到酶促溶性胶原蛋白(PSC)。不同预处理条件下所得样品如表 1。

采用胶原蛋白检测试剂盒测定 PSC 的含量, 通过如下公式计算 PSC 的得率和纯度。

$$\text{Yield} = \frac{m_1}{m_2} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{Purity} = \frac{m_3}{m_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中  $m_1$  为冻干 PSC 的质量,  $m_2$  为鱼皮湿重,  $m_3$  为由试剂盒测定的 PSC 质量。

**Table 1.** NaOH solution concentration, pretreatment time, and sample abbreviations

**表 1.** NaOH 溶液浓度、预处理时间和样品简称

NaOH 溶液浓度/mol/L	预处理时间/min	样品
0.5	300	PSC0.5-1
	360	PSC0.5-2
	420	PSC0.5-3
1.0	60	PSC1.0-1
	90	PSC1.0-2
	120	PSC1.0-3
1.5	30	PSC1.5-1
	60	PSC1.5-2
	90	PSC1.5-3

## 2.4. 紫外 - 可见吸收光谱(UV-Vis)

将 PSC 溶解于 0.5 mol/L 乙酸溶液使其浓度为 1 mol/L, 以紫外 - 可见分光光度计在 190~600 nm 范围内扫描得 UV-Vis 光谱。

## 2.5. 衰减全反射傅里叶变换红外光谱(ATR-FTIR)

采用 ATR-FTIR 光谱仪对样品进行红外光谱采集, 扫描范围为 4000~600  $\text{cm}^{-1}$ , 扫描次数 64 次, 光谱分辨率 4  $\text{cm}^{-1}$ 。

## 2.6. 疏水性测定

采用 1-苯胺基萘-8-磺酸(ANS)荧光探针法测定 PSC 的疏水性。将 PSC 溶解于 0.5 mol/L 乙酸溶液, 配制成 1.0 mg/mL 的母液, 再依次稀释为 0.06、0.12、0.18、0.24、0.30 mol/L 的梯度溶液, 加入等体积 pH 7.4 的磷酸盐缓冲液(PBS), 调节 pH 至 7.4 后, 加入 30  $\mu\text{mol/L}$  的 ANS 溶液, 室温避光反应 1 h。采用荧光分光光度计测定荧光强度, 激发波长设为 380 nm, 发射波长扫描范围 200~600 nm, 狭缝宽度 5 nm, 扫描速率 1200 nm/min。以荧光强度对 PSC 浓度绘制线性曲线, 将曲线斜率定义为疏水性指数( $H_0$ )。

## 2.7. 自组装机动力学测定

将 PSC 溶解于 0.5 mol/L 乙酸溶液, 配制成 1.0 mol/L 的溶液, 冰浴条件下与等体积 40 mmol/L 的 PBS (pH 7.4)混合, 调节 pH 至 7.4 后置于 28 $^{\circ}\text{C}$  条件中, 采用紫外 - 可见分光光度计监测 400 nm 处吸光度, 以吸光度对时间的变化绘制自组装机动力学曲线。用准一阶动力学模型进行拟合[11]。

$$\ln \frac{A_e - A_t}{A_e - A_0} = -kt \quad (3)$$

式中  $A_e$ ,  $A_t$  和  $A_0$  分别为平衡时、 $t$  时刻和起始时刻的吸光度,  $k$  为速率常数。

## 2.8. 自组装比率测定

PSC 溶液自组装 24 h 后, 在 20,000 r/min 条件下离心 30 min, 采用考马斯亮蓝法测定上清液中的蛋白质含量, 自组装比率按如下公式计算。

$$\text{Self-assembly ratio} = \left(1 - \frac{C_1}{C_0}\right) \times 100\% \quad (4)$$

式中  $C_0$  和  $C_1$  分别为自组装前后溶液的蛋白质含量。

## 2.9. 扫描电子显微镜(SEM)

将冷冻干燥的 PSC 自组装体固定于载物台上, 经喷金处理后, 采用 SEM 在 10 kV 加速电压下观察其微观形貌, 利用 Nano Measurer 1.2 软件测定胶原纤维的直径。

## 2.10. 统计分析

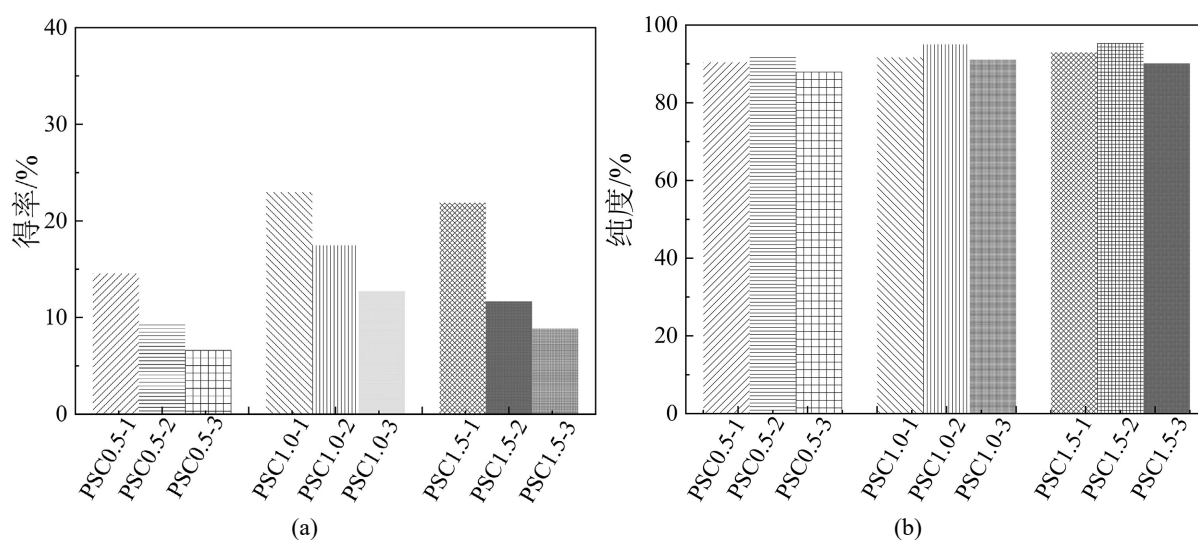
每组实验至少重复三次, 采用单因素方差分析进行统计学检验。不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

# 3. 实验结果与讨论

## 3.1. PSC 的得率和纯度

预实验表明, 在 25 $^{\circ}\text{C}$  条件下分别以 1.0 和 2.0 mol/L NaOH 溶液预处理罗非鱼皮时, 鱼皮在完全脱色

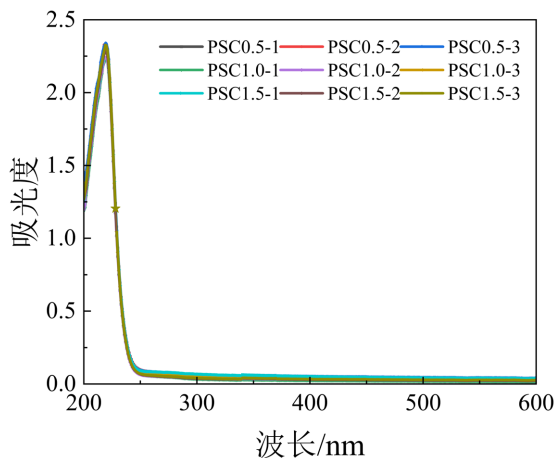
前即发生破损；将温度提升至 30℃时，色素可完全脱除且鱼皮保持完整，因此预处理温度设为 30℃。在实际工业生产中，降低碱液浓度可减少环境污染，缩短预处理时间可节约生产成本，因此本研究探讨了碱液浓度与预处理时间对罗非鱼皮 PSC 得率及纯度的影响。罗非鱼皮分别经 0.5、1.0 和 1.5 mol/L NaOH 溶液预处理 360、90 和 60 min 时，脱色完全，可见脱色时间与碱液浓度呈负相关。此时，1.0 mol/L NaOH 溶液预处理组 PSC 得率最高，可达 17.60% (图 1)，高于鲭鱼皮(8.10%) [12]和兔皮(9.40%) [13]。在相同 NaOH 溶液浓度下，随着预处理时间的延长，PSC 得率显著降低，可能是部分胶原纤维被破坏溶解所致。碱液预处理也显著影响了 PSC 的纯度。至完全脱色时，较高浓度碱液使得 PSC 的纯度增加，1.0 和 1.5 mol/L NaOH 溶液预处理后所得 PSC 的纯度分别为 95.04%和 95.35%，符合中国制药行业标准要求。0.5 mol/L NaOH 溶液组，预处理时间对 PSC 纯度没有显著影响；而在较高碱液浓度下，预处理时间较短则杂质去除不彻底，而预处理时间过长则会导致胶原流失。



**Figure 1.** Effects of pretreatment with NaOH solution on yield (a) and purity (b) of PSC

**图 1.** NaOH 溶液预处理对 PSC 的得率(a)和纯度(b)的影响

### 3.2. PSC 的 UV-Vis 光谱



**Figure 2.** Effects of pretreatment with NaOH solution on UV-Vis spectra of PSC

**图 2.** NaOH 溶液预处理对 PSC 的 UV-Vis 光谱的影响

NaOH 溶液预处理对 PSC 的 UV-Vis 光谱的影响如图 2。罗非鱼皮分别经 0.5、1.0 和 1.5 mol/L NaOH 溶液预处理后, PSC 在 220 nm 附近出现最大吸收峰, 这主要源于肽链中 C=O、-COOH 和 -CO-NH<sub>2</sub> 等基团中 C=O 的  $n \rightarrow \pi^*$  跃迁[11], 符合胶原的紫外吸收特征。一般来说, 蛋白质含有苯丙氨酸、色氨酸和酪氨酸等芳香族氨基酸, 因此会在 280 nm 附近表现吸收峰[14]。然而, 本实验胶原在此处均未发现明显的吸收峰, 表明在预处理过程中有效地去除了非胶原蛋白组分, 与 PSC 纯度显著提升是一致的。

### 3.3. PSC 的 ATR-FTIR 光谱

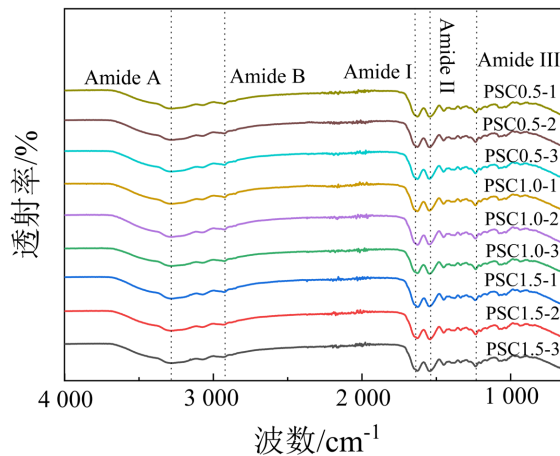


Figure 3. Effects of pretreatment with NaOH solution on ATR-FTIR spectra of PSC

图 3. NaOH 溶液预处理对 PSC 的 ATR-FTIR 光谱的影响

采用 ATR-FTIR 光谱对 PSC 的分子结构进行分析, 结果显示样品均出现酰胺 A、酰胺 B、I、II 和 III 共 5 个特征吸收峰(图 3), 分别对应 N-H 伸缩振动、CH<sub>2</sub> 不对称伸缩振动、多肽骨架 C=O 伸缩振动、N-H 弯曲与 C-N 伸缩耦合振动, 以及 C-N 拉伸与 N-H 变形的共同作用[15]。各样品 ATR-FTIR 谱图趋势相近, 峰位无显著差异。PSC 的三螺旋结构可通过酰胺 III 与 1450 cm<sup>-1</sup> 处吸收峰的透光率比值( $A_{III}/A_{1450}$ )表征[16], 本研究中所有样品该比值均大于 0.9, 表明经 0.5~1.5 mol/L NaOH 预处理后, 胶原三螺旋结构保持良好。

### 3.4. PSC 的表面疏水性

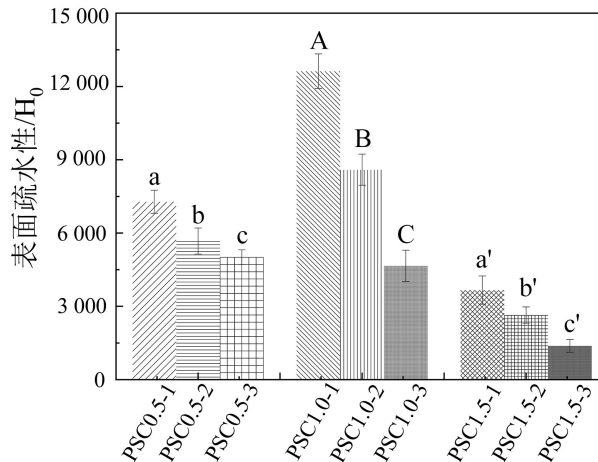


Figure 4. Effects of pretreatment with NaOH solution on surface hydrophobicity of PSC

图 4. NaOH 溶液预处理对 PSC 的表面疏水性的影响

在相同浓度的 NaOH 溶液中, PSC 的  $H_0$  随着时间的推移而降低(图 4), 该研究表明更多的亲水性基团(如氨基和羧基)得以暴露。鱼皮预处理至完全脱色时, 1.0 mol/L NaOH 组疏水性高于 0.5 mol/L 和 1.5 mol/L 组。这可能是由于碱浓度从 0.5 mol/L 升至 1.0 mol/L 时, 蛋白分子适度展开, 疏水基团暴露; 进一步提高至 1.5 mol/L 则可能使胶原结构重排, 疏水基团重新包裹, 导致疏水性下降[17]。以上结果表明, 不同浓度 NaOH 预处理会改变 PSC 的空间结构, 进而使其呈现出不同的自组装特性。

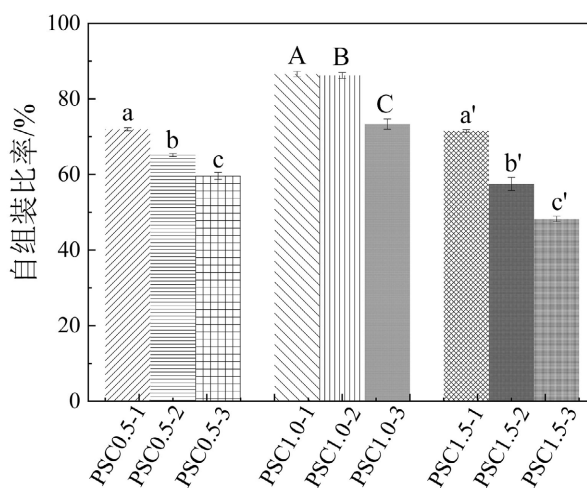
### 3.5. PSC 的自组装动力学

**Table 2.** Effects of pretreatment with NaOH solution on kinetic parameters of PSC self-assembly

**表 2.** PSC 自组装动力学参数

样品	滞后时间 <sup>①</sup> /min	生长时间 <sup>②</sup> /min	速率常数		
			滞后期	生长期	平衡期
PSC0.5-1	73.3	60.9	$1.9 \times 10^{-3}$	$29.7 \times 10^{-3}$	$0.7 \times 10^{-3}$
PSC0.5-2	91.7	141.6	$1.0 \times 10^{-3}$	$14.0 \times 10^{-3}$	$7.6 \times 10^{-3}$
PSC0.5-3	134.2	111.6	$0.5 \times 10^{-3}$	$13.9 \times 10^{-3}$	$8.9 \times 10^{-3}$
PSC1.0-1	43.3	32.5	$1.0 \times 10^{-3}$	$49.6 \times 10^{-3}$	$11.5 \times 10^{-3}$
PSC1.0-2	58.3	24.2	$1.6 \times 10^{-3}$	$30.1 \times 10^{-3}$	$11.9 \times 10^{-3}$
PSC1.0-3	65.8	45.0	$1.6 \times 10^{-3}$	$33.2 \times 10^{-3}$	$10.9 \times 10^{-3}$
PSC1.5-1	48.3	43.3	$0.9 \times 10^{-3}$	$37.0 \times 10^{-3}$	$15.0 \times 10^{-3}$
PSC1.5-2	87.5	73.3	$0.9 \times 10^{-3}$	$26.6 \times 10^{-3}$	$11.1 \times 10^{-3}$
PSC1.5-3	83.3	210	$0.05 \times 10^{-3}$	$7.6 \times 10^{-3}$	— <sup>③</sup>

①滞后时间代表了胶原蛋白自组装的开始, 定义为 S 形曲线中吸光度开始急剧上升的点; ②生长时间即 S 形曲线中吸光度上升至稳定状态的时间段; ③未见明显的自组装行为。



**Figure 5.** Effects of pretreatment with NaOH solution on self-assembly ratio of PSC

**图 5.** NaOH 溶液预处理对 PSC 的自组装比率的影响

胶原自组装可通过溶液浊度随时间的变化来反应[18]。经准一阶动力学模型分析, 自组装过程可分为滞后期(胶原单体自组装形成核心)、生长期(核心在长度与直径方向生长形成原纤维)和平衡期(原纤维达

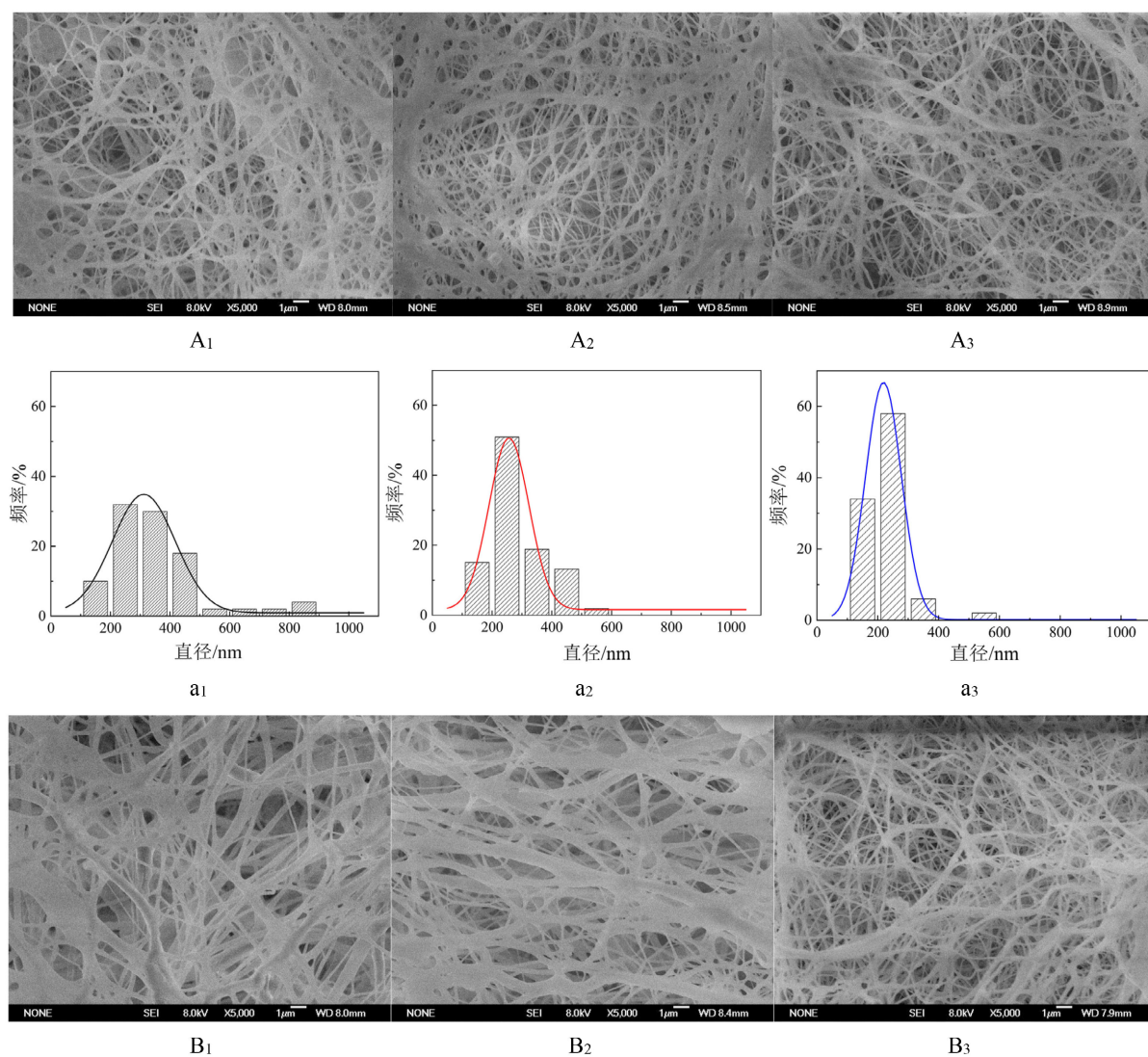
到饱和)三个阶段[6]。但 PSC1.5-3 在测定时间内未出现明显的平衡期,可能是其形成完整纤维网络需要更长时间。

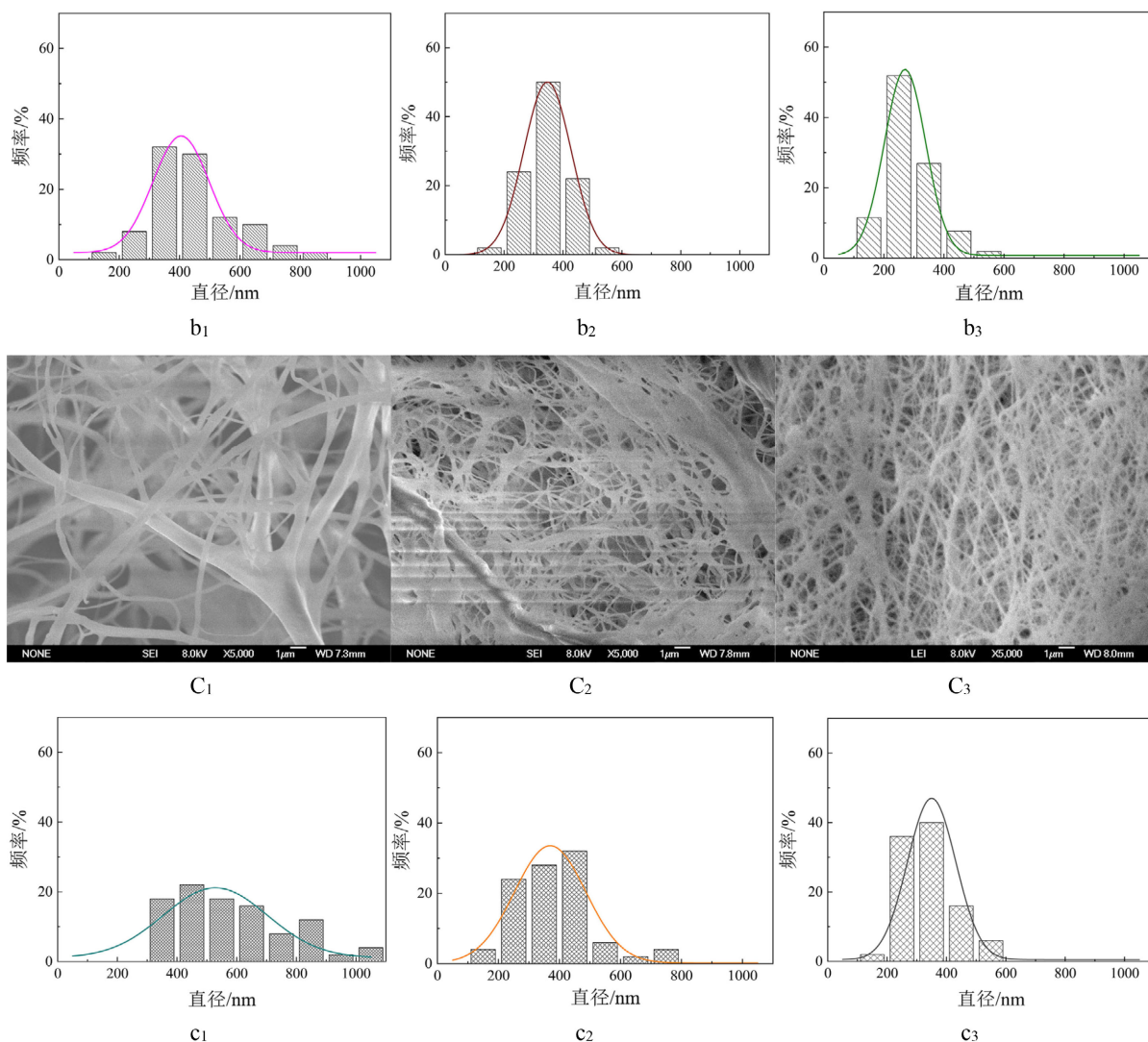
碱预处理对自组装动力学具有显著影响。相同 NaOH 浓度下,随着预处理时间延长,滞后期与生长期时间均有所延长(表 2),生长期的速率常数呈下降趋势。当鱼皮预处理至完全脱色时,1.0 mol/L NaOH 组滞后期与生长期更短、速率常数更高,表明该条件最有利于胶原自组装。

### 3.6. PSC 的自组装比率

当鱼皮分别用 1.0 和 1.5 mol/L 的 NaOH 溶液预处理至完全脱色时,PSC 自组装动力学曲线的终吸光度分别比 0.5 mol/L 的提高了 111.0%和 85.6%。前者的自组装比率为 86.20% (图 5),显著高于 0.5 mol/L 的 NaOH 溶液预处理时的 65.16%,因此 1.0 mol/L NaOH 溶液预处理表现出更高的吸光度是由于更多的胶原蛋白分子参与自组装。然而,1.5 mol/L NaOH 溶液预处理后的自组装比率仅为 57.50%,其较高的终吸光度可能与 SEM 显示的较大的胶原纤维有关。

### 3.7. PSC 自组装体的微观结构





**Figure 6.** SEM images ( $A_{1-3}$ ,  $B_{1-3}$ , and  $C_{1-3}$ ) and collagen fibril diameters ( $a_{1-3}$ ,  $b_{1-3}$ , and  $c_{1-3}$ ) of PSC self-assemblies. ( $A_{1-3}$  and  $a_{1-3}$ ) PSC0.5-1, PSC0.5-2 and PSC0.5-3, ( $B_{1-3}$  and  $b_{1-3}$ ) PSC1.0-1, PSC1.0-2 and PSC1.0-3, ( $C_{1-3}$  and  $c_{1-3}$ ) PSC1.5-1, PSC1.5-2 and PSC1.5-3

**图 6.** PSC 自组装体的 SEM 图像( $A_{1-3}$ ,  $B_{1-3}$ ,  $C_{1-3}$ )及胶原原纤维直径( $a_{1-3}$ ,  $b_{1-3}$ ,  $c_{1-3}$ )。(A<sub>1-3</sub>和 a<sub>1-3</sub>)PSC0.5-1, PSC0.5-2 和 PSC0.5-3, (B<sub>1-3</sub>和 b<sub>1-3</sub>)PSC1.0-1, PSC1.0-2 和 PSC1.0-3, (C<sub>1-3</sub>和 c<sub>1-3</sub>)PSC1.5-1, PSC1.5-2 和 PSC1.5-3

采用 SEM 观察 PSC 的微观结构。所有 PSC 均呈现出连通性良好的多孔纤维网状结构(图 6(A)~(C))。然而,碱预处理对胶原原纤维直径具有显著影响(图 6(a)~(c))。在相同 NaOH 浓度下,纤维直径随预处理时间延长逐渐减小。例如,与 PSC0.5-1 相比, PSC0.5-3 中纤维平均直径下降了 36.3%。当鱼皮预处理至完全脱色时,胶原原纤维平均直径与碱液浓度呈正相关;而在较低浓度碱液处理下,更容易得到直径分布均匀的纤维。

#### 4. 结论

综上所述,采用 0.5~1.5 mol/L NaOH 对罗非鱼皮进行改性预处理,可以调控其自组装行为。胶原自组装主要由分子间氢键以及静电相互作用共同驱动,最终形成具有多样结构的 PSC 自组装体。随着预处理时间延长, PSC 自组装体呈现出由更纤细的原纤维构成的致密网络。但 NaOH 浓度与预处理时间之间

存在交互作用。当鱼皮预处理至完全脱色时,预处理浓度可以调控PSC的自组装动力学。以上结果表明,改变鱼皮的NaOH预处理条件是调控PSC自组装的重要手段,本研究为罗非鱼皮胶原在食品和生物材料领域的应用提供了潜在可能性。

本研究未对PSC自组装体的凝胶强度、流变学特性等宏观力学性能以及生物相容性进行测定,无法全面评价PSC自组装体在生物医学领域的安全性及有效性。未来研究可系统评价改性胶原的凝胶强度、热稳定性及酶解抗性,并开展细胞培养及动物实验,验证其作为组织工程支架或药物载体的可行性。通过上述研究,有望推动罗非鱼皮胶原在食品和生物材料领域的高值化利用。

## 参考文献

- [1] Sun, Z., Ge, Y., Cai, X., Liu, Q., Yang, Z., Chen, X., *et al.* (2024) A Non-Covalent Binding Strategy for the Stabilization of Fish Collagen Triple Helices to Promote Its Applications. *Food Hydrocolloids*, **152**, Article 109896. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109896>
- [2] Chen, J., Shi, C., Xu, J., Wang, X. and Zhong, J. (2023) Correlation between Physicochemical Properties and Volatile Compound Profiles in Tilapia Muscles Subjected to Four Different Thermal Processing Techniques. *Food Chemistry: X*, **18**, Article 100748. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100748>
- [3] 刘亚美, 李子青, 谢丽萍, 等. 酶解罗非鱼皮胶原蛋白制备低分子抗冻肽的研究[J]. 广东化工, 2026, 53(1): 41-45.
- [4] An, X., Duan, S., Jiang, Z., Chen, S., Sun, W., Liu, X., *et al.* (2022) Role of Chlorogenic Acid and Procyanidin in the Modification of Self-Assembled Fibrillar Gel Prepared from Tilapia Collagen. *Polymer Degradation and Stability*, **206**, Article 110177. <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2022.110177>
- [5] 张军涛, 汪海波, 徐丽明. 水产胶原的制备工艺及自组装性能研究进展[J]. 皮革科学与工程, 2022, 32(6): 32-38.
- [6] Ahmad, M.I., Li, Y., Pan, J., Liu, F., Dai, H., Fu, Y., *et al.* (2024) Collagen and Gelatin: Structure, Properties, and Applications in Food Industry. *International Journal of Biological Macromolecules*, **254**, Article 128037. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128037>
- [7] Ding, C., Tian, M., Wang, Y., Cheng, K., Yi, Y. and Zhang, M. (2023) Governing the Aggregation of Type I Collagen Mediated through  $\beta$ -Cyclodextrin. *International Journal of Biological Macromolecules*, **240**, Article 124469. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124469>
- [8] Wang, Y., Chen, Y., Li, Y., Zuo, D., Huang, X., Tian, X., *et al.* (2025) Collagen as a Diversely Structural Biomaterial: From Assembly Strategies to Potential Applications in Food Industry. *Food Hydrocolloids*, **159**, Article 110694. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110694>
- [9] Meng, D., Tanaka, H., Kobayashi, T., Hatayama, H., Zhang, X., Ura, K., *et al.* (2019) The Effect of Alkaline Pretreatment on the Biochemical Characteristics and Fibril-Forming Abilities of Types I and II Collagen Extracted from Bester Sturgeon By-Products. *International Journal of Biological Macromolecules*, **131**, 572-580. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.091>
- [10] Yan, M., Jiang, X., Wang, G., Wang, A., Wang, X., Wang, X., *et al.* (2020) Preparation of Self-Assembled Collagen Fibrillar Gel from Tilapia Skin and Its Formation in Presence of Acidic Polysaccharides. *Carbohydrate Polymers*, **233**, Article 115831. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.115831>
- [11] Wang, Y., Zhang, L., Liao, W., Tong, Z., Yuan, F., Mao, L., *et al.* (2023) The Concentration-, Ph- and Temperature-Responsive Self-Assembly of Udenatured Type II Collagen: Kinetics, Thermodynamics, Nanostructure and Molecular Mechanism. *Food Hydrocolloids*, **137**, Article 108424. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108424>
- [12] Asaduzzaman, A.K.M., Getachew, A.T., Cho, Y., Park, J., Haq, M. and Chun, B. (2020) Characterization of Pepsin-Solubilised Collagen Recovered from Mackerel (*Scomber japonicus*) Bone and Skin Using Subcritical Water Hydrolysis. *International Journal of Biological Macromolecules*, **148**, 1290-1297. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.104>
- [13] Toniasso, D.P.W., Giacomelli da Silva, C., de Souza Brum Junior, B., Somacal, S., Emanuelli, T., Hashime Kubota, E., *et al.* (2022) Collagen Extracted from Rabbit: Meat and By-Products: Isolation and Physicochemical Assessment. *Food Research International*, **162**, Article 111967. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111967>
- [14] Pilkington, T.J. and Siemann, S. (2025) Simulation of Absorption Spectra of Native and Unfolded Proteins. *Analytical Biochemistry*, **701**, Article 115803. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2025.115803>
- [15] 斯金瑶, 童程杰, 陈荫, 等. 鮫鳕鱼骨胶原蛋白肽提取工艺优化及其体外抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2026, 47(6): 130-137.
- [16] Chen, C., Liu, F., Yu, Z., Ma, Y., Goff, H.D. and Zhong, F. (2020) Improvement in Physicochemical Properties of

- 
- Collagen Casings by Glutaraldehyde Cross-Linking and Drying Temperature Regulating. *Food Chemistry*, **318**, Article 126404. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126404>
- [17] Indriani, S., Sae-leaw, T., Benjakul, S., Hong Quan, T., Karnjanapratum, S. and Nalinanon, S. (2022) Impact of Different Ultrasound-Assisted Processes for Preparation of Collagen Hydrolysates from Asian Bullfrog Skin on Characteristics and Antioxidative Properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, **89**, Article 106163. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106163>
- [18] Wang, Y., Li, Y., Chen, Y., Huang, X., Zuo, D., Tian, X., *et al.* (2024) Insight into the Self-Assembly Process, Micro-rheological Properties and Microstructure of Acid-Soluble Collagen from Lamb Skin under Different Environmental Conditions. *Food Bioscience*, **61**, Article 104978. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104978>