矫春娜, 范维, 洪惠, 等. 冷冻许氏平鲉鱼片复合无磷保水剂的配方优化及保水效果研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(11): 272−279. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050204
JIAO Chunna, FAN Wei, HONG Hui, et al. Research on Formula Optimization and Water Retention Effect of Composite Phosphorus-free Water Retention Agent for Frozen *Sebastes schlegelii* Fillets[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(11): 272−279. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050204

· 工艺技术 ·

冷冻许氏平鲉鱼片复合无磷保水剂的配方优化及保水效果研究

矫春娜[1], 范　维[2], 洪　惠[2], 王腾腾[1], 刘　芳[1], 赵云苹[1], 张　健[1], 井月欣[1,*], 王共明[1,*]
（1.山东省海洋资源与环境研究院, 烟台市海珍品质量安全控制与精深加工重点实验室, 山东烟台 264006;
2.中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083）

摘　要: 目的：本文旨在开发一款绿色高效的复合无磷保水剂配方，以提升冷冻许氏平鲉鱼片的保水性。方法：以浸泡增重率、解冻损失率和蒸煮损失率为保水性评价指标，在单因素实验的基础上采用正交加权实验法得到最佳复合无磷保水剂配方。并对经最佳复合无磷保水剂配方处理的鱼片进行保水效果、质构特性、微观结构及感官品质分析。结果：复合无磷保水剂最佳配方组合为：2.5% 碳酸氢钠、2.0% 柠檬酸钠、1.5% 海藻糖。经该复合无磷保水剂处理后，许氏平鲉鱼片的浸泡增重率从 5.46% 增加至 19.2%，解冻损失率和蒸煮损失率分别从 9.23% 和 30.6% 降低至 1.28% 和 14.0%，在质构方面与经 3.0% 复合磷酸盐保水剂（焦磷酸钠:三聚磷酸钠:六偏磷酸钠=2:2:1）处理过的鱼片效果相当；同时，该配方有助于维持鱼片肌纤维的完整性，减少解冻后肌纤维结构的破坏；且能有效改善鱼片感官品质，避免了磷酸盐处理带来的感官负面影响。本研究开发的无磷复合保水剂配方证实了其替代传统磷酸盐的可行性，该成果为拓展无磷保水技术在许氏平鲉鱼制品加工领域的产业化应用提供了理论依据。

关键词: 许氏平鲉, 冷冻鱼片, 无磷保水剂, 保水性, 质构, 微观结构
中图分类号: TS254.4　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)11−0272−08
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050204
本文网刊:

Research on Formula Optimization and Water Retention Effect of Composite Phosphorus-free Water Retention Agent for Frozen *Sebastes schlegelii* Fillets

JIAO Chunna[1], FAN Wei[2], HONG Hui[2], WANG Tengteng[1], LIU Fang[1], ZHAO Yunping[1], ZHANG Jian[1], JING Yuexin[1,*], WANG Gongming[1,*]
（1.Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Yantai Key Laboratory of Quality and Safety Control and Deep Processing of Marine Food, Yantai 264006, China;
2.College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China）

Abstract: Objective: This study aimed to develop a green and efficient formula for a composite phosphorus-free water retention agent to enhance the water-holding capacity of frozen *Sebastes schlegelii* fillets. Methods: The optimal ratio was derived from the optimization method of orthogonal experiments based on one-way experiments, using the soaking weight

收稿日期: 2025−05−21
基金项目: 烟台市海珍品质量安全控制与精深加工重点实验室开放基金（QSCDP202405）; 东西部科技协作专项（津甘合作、鲁甘合作）（23CXNN0003）; 国家现代农业产业技术体系（CARS-47）。
作者简介: 矫春娜（1986−）, 女, 硕士, 工程师, 研究方向: 水产品加工及贮藏, E-mail: jcnnn@126.com。
*** 通信作者:** 井月欣（1987−）, 女, 硕士, 工程师, 研究方向: 食品科学, E-mail: jyx2013xin@163.com。
王共明（1988−）, 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 水产品深加工, E-mail: wgmsd105@163.com。

gain rate, thawing loss rate, and cooking loss rate as evaluation indices of water retention. This approach allowed for the determination of the optimal compound phosphorus-free water retaining agent formula. The water retention effect, texture characteristics, microstructure, and sensory quality of the fish fillets treated with the optimal compound non-phosphorus water retaining agent formula were analyzed. Results: The results indicated that the optimal combination of the formula consisted of 2.5% sodium bicarbonate, 2.0% sodium citrate, and 1.5% alginate. Following treatment with this compound phosphorus-free water retention agent, the soaking weight gain rate of *Sebastes schlegelii* fillets increased from 5.46% to 19.2%, while the thawing loss rate and cooking loss rate decreased from 9.23% and 30.6% to 1.28% and 14.0%, respectively. These results were comparable to those of fillets treated with the compound phosphate water retention agent in terms of texture and structure. Microstructural analysis revealed that this formula helped maintain the integrity of the muscle fibers in the fillets, reducing the destruction of muscle fibers after thawing, while also effectively improving sensory quality and mitigating the negative sensory impacts associated with phosphate treatment. The composite phosphorus-free water retention agent formula developed in this study demonstrated its feasibility as a replacement for traditional phosphates. This achievement provides a theoretical basis for the industrial application expansion of phosphorus-free water retention technology in the processing of *Sebastes schlegelii* products.

Key words: *Sebastes schlegelii*; frozen fish fillets; phosphorus-free water retention agent; water retention; texture; microstructure

许氏平鲉(*Sebastes schlegelii*)，俗称“黑头鱼”，属于鲉形目(Scorpaeniformes)、平鲉科(Sebastidae)、平鲉属(*Sebastes*)，是中国黄海、渤海和东海常见的海洋经济鱼类[1]。作为一种高蛋白、低脂肪的优质食用鱼类，其深受健康饮食消费者的青睐。当下，许氏平鲉主要通过鲜售方式进入市场[2]，其市场覆盖率有限。随着中国餐饮市场对高品质便捷食品需求的增加，许氏平鲉的肉质特性——细嫩无刺、形态规整、耐煮性强，使其成为加工成冷冻鱼片的优选原料。然而，在冷冻加工过程中，由于鱼肉蛋白容易发生变性，鱼肉保水性下降，在解冻和烹饪时出现水分流失、嫩度下降、外观粗糙等现象[3]，影响产品的风味和口感。这些劣变与鱼肉的保水能力密切相关，因此，通过提高鱼片的保水性可以有效改善冷冻对其造成的不良影响。

在目前的生产实践中，复合磷酸盐(如三聚磷酸盐、焦磷酸盐、六偏磷酸盐等磷酸盐组成的复合物)因其具有出色的保水效果和成本效益被广泛使用[4]。磷酸盐通过增加 pH、离子强度、螯合金属离子、盐溶性蛋白浓度、诱导更多的蛋白结构变化等，可以提高蒸煮得率，改善质构特性，延长货架期[5]。但过量使用会使食品产生不愉快的金属涩味，甚至会影响消费者健康。肾脏会通过滤过和重吸收来维持血磷平衡，长期过量摄入磷酸盐会加重肾脏的代谢负担；同时，过多的磷酸盐会与血钙结合，形成磷酸钙沉淀，增加结石风险，影响机体钙磷平衡等[5−8]。近年来，消费者对天然食品的偏好推动了清洁标签趋势的增长[9−10]，研究者们致力于开发由无磷盐类、糖类和蛋白类保水剂复配的无磷保水剂配方，以替代传统的复合磷酸盐类保水剂。

研究发现多种无磷保水剂复配可以产生增效作用。由 TG 酶、乳酸钠、柠檬酸钠和碳酸氢钠组成的复合无磷保水剂，能够有效提高冷冻罗非鱼片的保水效果[11]。通过复配碳酸氢钠、碳酸钠和柠檬酸钠得到的无磷保水剂配方可显著降低鲳鱼片的解冻损失率和蒸煮损失率[12]。通过复配 TG 酶、海藻糖、柠檬酸钠和碳酸氢钾得到的复合无磷保水剂，在提高金鲳鱼片的浸泡增重率、降低解冻损失率和蒸煮损失率、保持水分含量以及改善质构特性方面，均优于复合磷酸盐组[13]。由海藻糖、山梨糖醇和柠檬酸钠组成的复合无磷保水剂，能有效抑制大黄花鱼肉持水性的下降，并有效保持鱼肉质构特性[14]。

许氏平鲉肌肉致密、蛋白含量高，冷冻时更易出现蛋白变性、水分流失等问题。尽管已有用于其他鱼类的无磷保水剂报道，但鱼种间肌肉组成与结构存在差异，保水剂的效果也会有所不同，需要进一步优化现有无磷保水剂的配方，以适应许氏平鲉鱼片的特性。本研究以许氏平鲉为原料，选择碳酸氢钠、柠檬酸钠和海藻糖为保水剂，探究其对冷冻鱼片品质的影响，对三种无磷保水剂进行复配，通过正交试验优化得到最佳复合配方，并对其保水效果进行研究。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

鲜活许氏平鲉(每尾约 450~650 g)　购于山东省烟台市蓬莱区经海渔业中转仓；碳酸氢钠、柠檬酸钠、海藻糖、复合磷酸盐(焦磷酸钠、三聚磷酸钠和六偏磷酸钠质量比为 2∶2∶1)　食品级，河南高宝实业有限公司；Bouin 氏固定液、无水乙醇、二甲苯、中性树胶、石蜡　分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

Mettler Toledo 电子分析天平　美国 Ohaus 公司；BCD-272WDPD 冰箱　中国青岛海尔公司；DW-HL388 超低温冷冻储存箱　中科美菱低温科技有限责任公司；HH-4 电热恒温水浴锅　山东省烟台龙口市先科仪器公司；CT3 质构仪　美国 Brookfield 公司；TP1020 全自动组织脱水机、Histocentre2 石蜡包埋机、202 旋转式切片机　德国徕卡公司；BX53M 显微镜　仪景通光学科技(上海)有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 原料预处理及流程 选用鲜活的许氏平鲉, 敲击其头部致晕, 在头尾分别各划一刀, 放血 3~5 min。用刀刮去表面鳞片, 将头去掉, 挑开鱼肚子, 将内脏连带腹鳍一并去除。固定鱼胴体, 将剖刀自鳃盖后沿脊骨向尾部平行推进, 取鱼柳。将鱼柳用刀切成大小、形状相似的片状, 鱼片厚度为(5.00±1.00)mm。随后用提前预冷的冰水向一个方向缓慢漂洗鱼片 3 次, 至水质清澈鱼片发白后将鱼片捞出后沥干表面水分备用。

1.2.2 单因素实验 在预实验的基础上筛选出了对许氏平鲉鱼片保水效果较好的三种无磷保水剂: 碳酸氢钠、柠檬酸钠、海藻糖。配制质量分数分别为 1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0% 的碳酸氢钠溶液, 1.0%、2.0%、2.5%、3.0%、4.0% 的柠檬酸钠溶液, 0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5% 的海藻糖溶液以及 1%、2%、3%、4%、5% 的复合磷酸盐溶液, 均置于 4 ℃ 冰箱待用。在 4 ℃ 条件下, 按鱼片∶保水剂=1∶3(w/w)的比例将鱼片在保水剂中浸泡 2 h, 每隔 20 min 缓慢搅拌一次。鱼片浸泡完成后用滤纸吸干表面水分, 称重后装入自封袋中, 先于−80 ℃ 冰箱速冻 2 h, 然后置于−18 ℃ 条件下冻藏 10 d。通过测定鱼片的浸泡增重率、解冻损失率、蒸煮损失率, 考察不同浓度碳酸氢钠、柠檬酸钠、海藻糖以及复合磷酸盐对鱼片浸泡增重率、解冻损失率和蒸煮损失率的影响, 确定各自最适宜的浓度范围。

1.2.3 正交优化试验 在单因素实验的基础上, 以碳酸氢钠、柠檬酸钠、海藻糖三者最优添加量进行 $L_9(3^4)$正交试验。以鱼片的浸泡增重率、解冻损失率、蒸煮损失率为综合评价指标, 筛选出复合无磷保水剂的最佳添加量。因素与水平设计见表 1。

表 1 正交试验因素水平

Table 1 Orthogonal experimental factors and levels

水平	因素		
	A: 碳酸氢钠浓度(%)	B: 柠檬酸钠浓度(%)	C: 海藻糖浓度(%)
1	2.0	2.0	1.0
2	2.5	2.5	1.5
3	3.0	3.0	2.0

1.2.4 正交综合得分计算 采用多指标综合加权评分法评估不同配方的保水效果[15]。不同正交条件下的浸泡增重率、解冻损失率以及蒸煮损失率指标在进行 3 次平行实验后求取平均值, 再将平均值用以综合得分的计算。由于鱼片的浸泡增重率、解冻损失率和蒸煮损失率对鱼片保水效果的评定同样重要, 因此三者的加权系数均定为 10, 总分以 30 分计算。

综合得分=10×(浸泡增重率/浸泡增重率最大值)+10×(解冻损失率最小值/解冻损失率)+10×(蒸煮损失率最小值/蒸煮损失率)。

1.2.5 对比验证实验 将预处理好的鱼片均分为 3 组: 第一组为蒸馏水处理组(CK), 作为空白对照, 在 4 ℃ 下用蒸馏水浸泡鱼片 2 h; 第二组为复合磷酸盐处理组(P), 作为条件对照, 在 4 ℃ 下用 3% 复合磷酸盐浸泡处理鱼片 2 h; 第三组为复合无磷盐处理组(NP), 在 4 ℃ 下用正交得分最高组的复合无磷保水剂配方浸泡处理鱼片 2 h。浸泡后的样品经低温速冻后于−18 ℃ 冻藏, 冻藏时间为 10 d。

1.2.6 浸泡增重率的测定 将沥干表面水分的鱼片按照料液质量比 1∶3 的比例添加保水剂浸泡液, 于 4 ℃ 下浸泡 2 h, 每隔 20 min 缓慢搅拌翻动一次, 浸泡结束后用滤纸吸干表面水分, 按下式计算浸泡增重率:

$$浸泡增重率(\%)=\frac{A_2-A_1}{A_1}\times 100$$

式中, A_2 为鱼肉浸泡后的质量, g; A_1 为鱼肉原始质量, g。

1.2.7 解冻损失率的测定 将冻藏结束后的鱼片于 4 ℃ 下自然解冻 5 h, 用滤纸擦去表面水分后称重, 按下式计算解冻损失率:

$$解冻损失率(\%)=\frac{A_2-A_3}{A_2}\times 100$$

式中, A_2 为鱼肉浸泡后的质量, g; A_3 为鱼肉解冻后的质量, g。

1.2.8 蒸煮损失率的测定 将测定解冻损失后的样品装入自封袋中于 90 ℃ 煮 5 min, 冷却至室温 1 h, 用滤纸吸干样品表面水分后称重, 按下式计算蒸煮损失率:

$$蒸煮损失率(\%)=\frac{A_3-A_4}{A_3}\times 100$$

式中, A_3 为鱼肉解冻后的质量, g; A_4 为鱼肉蒸煮后的质量, g。

1.2.9 质构特性的测定 参照李红艳等[16] 的方法, 并稍作修改。测定前先将鱼肉样品置于 4 ℃ 下约 5 h 以消除冻藏低温的影响。使用质构仪对各组鱼肉各平行测定 6 次, 选用 TPA 模式测定。TPA 的检测参数: 探头型号 TA44, 直径 4 mm; 测试速度 1.00 mm/s; 触发点负载 5 g; 测试目标 3.0 mm; 样品压缩次数 2 次。测定的参数包括: 硬度、内聚性、弹性、胶着性、咀嚼性。

1.2.10 微观结构的观察 参考熊雅雯等[15] 的方法, 将解冻后的鱼肉切成 0.5 cm×0.5 cm×0.2 cm 的组织块, 用 Bouin 氏液固定 48 h, 经脱水、包埋、切片、HE 染色, 用中性树胶封片, 利用显微镜及成像系统对鱼片肌纤维进行观察。

1.2.11 感官评价 对不同保水剂处理后的鱼片进行感官评价, 感官评分时, 品评员首先对样品的气味和色泽进行评价。随后, 将样品置于沸水中煮制 30 s, 再对样品的口感和滋味进行品尝与评分。本研究选择 10 名具有一定经验的品评员, 采用 100 分评分法

表 2　感官评分标准

Table 2　Sensory score criteria

评价指标	0~5分	6~10分	11~15分	16~20分
色泽	色泽极差，明显变色	色泽暗淡，有一定变色	色泽较为自然，略有暗淡	色泽自然鲜亮，接近新鲜颜色
气味	香气极差，有明显异味	香气较弱，有轻微异味	香气较好，略有异味	香气浓郁自然，无异味
口感	口感极差，非常粗糙；无弹性，非常松软	嫩度一般，略显粗糙；弹性一般，略显松软	嫩度较好，口感适中；弹性较好，咬感适中	极其嫩滑，口感细腻；弹性十足，咬感强
滋味	滋味极差，有明显不良味道	滋味一般，能感知到某些不良味道	滋味较好，略有偏差	滋味鲜美，无苦涩或其他不良味道
可接受度	不接受，不愿再次食用	一般，无明显偏好	比较喜欢，可以接受	非常喜欢，愿意再次食用

对鱼片样品进行感官评价，标准如表 2 所示。品评员需综合考虑样品的外观、气味、滋味等方面因素，并给出相应评分，每项评分相加得到样品的总分，满分设定为 100 分，取平均值作为评定结果[17−18]。

1.3　数据处理

所有实验均重复 3 次，数据以平均值±标准差表示。采用 Microsoft Excel 2016 对数据进行整理并作图，SPSS 23.0 软件进行统计学分析，组间数据的显著性分析采用单因素方差分析（One-way ANOVA）中的邓肯（Duncan）多重比较，$P<0.05$ 表示数据具有显著差异。

2　结果与分析

2.1　单因素实验结果

2.1.1　碳酸氢钠对鱼片保水效果的影响　如图 1 所示，随着碳酸氢钠浓度的增加，许氏平鲉鱼片的浸泡增重率先显著上升（$P<0.05$）后趋于稳定。碳酸氢钠浓度在 2.5% 时，鱼片浸泡增重率达到最大值 18.70%，之后浸泡增重率增加不显著。碳酸氢钠的保水机制是其溶于水呈碱性，能够提高鱼肉 pH，使肌原纤维蛋白远离等电点，增强蛋白质间静电斥力，促进蛋白质溶解和结构展开，从而提高鱼肉对水分的吸收能力[19−20]。但当碳酸氢钠浓度进一步提升增至 3.0% 时，鱼片浸泡增重率不再增加，这可能是因为当蛋白质的溶解度和结构稳定性达到饱和状态时，继续增大碳酸氢钠浓度对鱼片保水性的提升作用有限。此外，

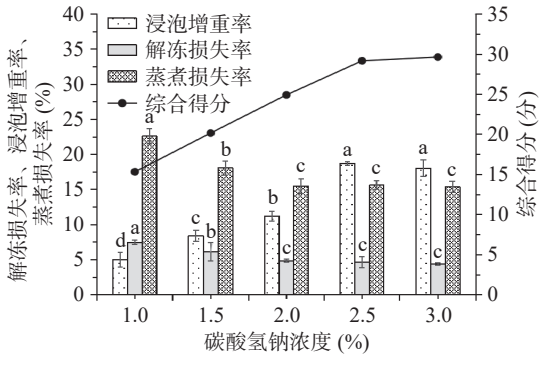


图 1　碳酸氢钠浓度对鱼片浸泡增重率、解冻损失率、蒸煮损失率和综合得分的影响

Fig.1　Effect of sodium bicarbonate concentration on soaking weight gain rate, thawing loss rate, cooking loss rate and overall composite score of fish fillets

注：不同字母表示差异显著（$P<0.05$）；图 2~图 4 同。

鱼片的解冻损失率和蒸煮损失率随碳酸氢钠浓度的增加均呈现降低趋势，但碳酸氢钠浓度 2%~3% 之间无显著性差异。这表明碳酸氢钠通过调节鱼肉 pH，有助于构建更稳定的蛋白质网络，从而减少解冻和蒸煮过程中的水分流失。本研究结果与王荣等[12]、赵改名等[21] 的研究相一致，充分证明了碳酸氢钠能够促使肌原纤维蛋白吸水膨胀，进而提升肉的持水能力并降低蒸煮损失。结合综合评分，选取碳酸氢钠浓度在 2.0%~3.0% 之间。

2.1.2　柠檬酸钠对鱼片保水效果的影响　研究表明，添加柠檬酸钠可以显著增加肉类的保水性，提高其凝胶强度，减少水分的丢失[22−23]。柠檬酸钠对许氏平鲉鱼片保水效果的影响如图 2 所示。以柠檬酸钠 2.5% 浓度为分界点，鱼片的浸泡增重率先上升而后趋于平稳，当柠檬酸钠浓度从 1.0% 增到 2.5% 时，浸泡增重率从 4.80% 显著增加至 9.97%（$P<0.05$）。其原因在于，柠檬酸钠是一种强碱弱酸盐，可以提高肌肉 pH 使肌肉蛋白质偏离等电点，且其高价阴离子通过增加肌肉体系的离子强度，使肌球蛋白溶解度提高[24]。另外，柠檬酸钠溶于水后电离出的柠檬酸根水解生成柠檬酸，柠檬酸对肌肉蛋白中的二价金属离子（例如 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Fe^{2+}等）具有良好的螯合能力，与其形成稳定的环状螯合物，最终形成均一、致密的三维网状结构，从而在一定浓度范围内提高其持水性[20]。在柠檬酸钠浓度从 1.0% 增高至 4.0% 的过程中，许氏平鲉鱼片的解冻损失率呈现先下降后趋于稳定的趋势，在柠檬酸钠浓度为 2.5% 时解冻损失率达到最低值，

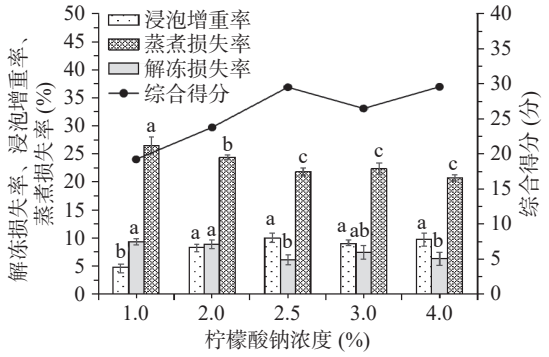


图 2　柠檬酸钠浓度对鱼片浸泡增重率、解冻损失率、蒸煮损失率和综合得分的影响

Fig.2　Effect of sodium citrate concentration on soaking weight gain rate, thawing loss rate, cooking loss rate and overall composite score of fish fillets

为 6.14%。其原因在于柠檬酸钠可以防止速冻过程中鱼肉组织形成大颗粒冰晶，减小了鱼肉细胞在解冻过程中的损伤，从而防止汁液的损失。蒸煮损失率随柠檬酸钠浓度的增加整体呈下降趋势。结合综合得分和生产成本，柠檬酸钠最佳浓度在 2.0%~3.0% 之间为宜。

2.1.3 海藻糖对鱼片保水效果的影响 海藻糖是一种非还原性二糖，它由两分子葡萄糖通过 1,1—糖苷键构成，具有低甜度、保水性、耐热性和耐酸性等特性[25−26]。由图 3 可知，海藻糖浓度从 0.5% 增加至 2.5% 的过程中，浸泡增重率呈现先增加后逐渐减小的趋势，在海藻糖添加量达到 1.0% 时浸泡增重率增至最高，为 7.75%。解冻损失率先下降后上升，在海藻糖浓度达到 2.0% 时解冻损失率降至最低值 5.64%。这是由于海藻糖结构中含有多个羟基和极性基团，可与周围环境水分子形成氢键，从而牢牢锁住水分，起到保水作用[27]，它还可以有效地保护蛋白质和细胞膜免受由各种胁迫条件（包括干燥、脱水、热、冷和氧化）引起的失活或变性[28]。蒸煮损失率在海藻糖浓度 2.0% 时降至最低值 24.98%。结合综合得分，选择海藻糖最佳浓度在 1.0%~2.0% 之间。

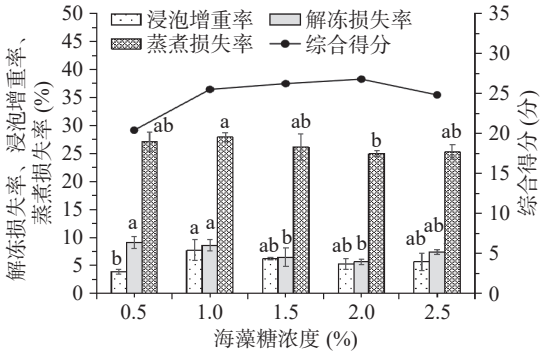


图 3 海藻糖浓度对鱼片浸泡增重率、解冻损失率、蒸煮损失率和综合得分的影响

Fig.3 Effect of alginate concentration on soaking weight gain rate, thawing loss rate, cooking loss rate and overall composite score of fish fillets

2.1.4 复合磷酸盐对鱼片保水效果的影响 不同浓度的复合磷酸盐处理许氏平鲉鱼片后，其浸泡增重率、解冻损失率、蒸煮损失率如图 4 所示。随着复合磷酸盐浓度的增大，鱼片浸泡增重率呈现先上升后下降的趋势。3.0% 浓度的复合磷酸盐能使鱼片增重率达到最高值 20.81%，而后增重率逐渐下降。磷酸盐可通过增加肉的离子强度，提高肉制品的 pH，螯合肌肉蛋白中的二价金属离子，解离肌球蛋白来提高肉的持水性[29]。然而当外界溶液浓度过高，鱼肉内外浓度差增大，细胞外的渗透压大于细胞内的渗透压时，细胞失去部分水分，蛋白结构被破坏，导致鱼片增重率变小。解冻损失率随复合磷酸盐浓度的提高，先急剧下降后趋于平缓，当添加量从 1% 升至 2% 时，解冻损失率由 8.38% 快速下降至 3.21%；当添加量从 2% 增加到 5% 时，解冻损失率由 3.21% 平缓下降至 1.58%，且 2%~5% 复合磷酸盐处理的鱼片，其解冻损失率没有显著性差异。蒸煮损失率随着复合磷酸盐浓度的增加整体呈下降趋势，由最初的 24.18% 降至 14.30%。综合分析，后续选择复合磷酸盐浓度为 3.0% 进行条件对照实验。

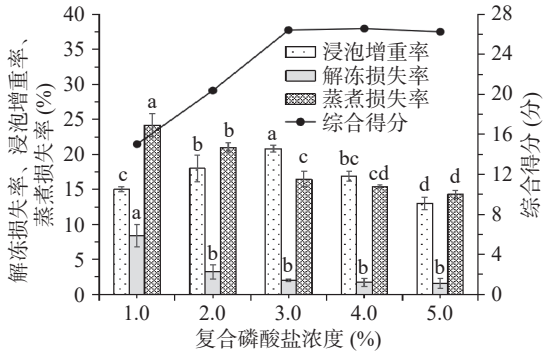


图 4 复合磷酸盐浓度对鱼片浸泡增重率、解冻损失率、蒸煮损失率和综合得分的影响

Fig.4 Effect of phosphate complex concentration on soaking weight gain rate, thawing loss rate, cooking loss rate and overall composite score of fish fillets

2.2 正交优化试验结果

正交试验结果见表 3。综合考虑产品的浸泡增重率、解冻损失率和蒸煮损失率，碳酸氢钠、柠檬酸钠、海藻糖这 3 个因素对许氏平鲉鱼片的保水性指标影响程度不同，通过综合得分衡量指标可以看出，影响大小依次为 B>A>C，即柠檬酸钠浓度>碳酸氢钠浓度>海藻糖浓度。故确定冷冻许氏平鲉鱼片复合无磷保水剂的最佳配方为 $A_2B_1C_2$，即碳酸氢钠浓度为 2.5%、柠檬酸钠浓度为 2.0%、海藻糖浓度为 1.5%。

表 3 正交试验结果

Table 3 Results of the orthogonal experiment

试验号		A 碳酸氢钠	B 柠檬酸钠	C 海藻糖	空白列	浸泡增重率 (%)	解冻损失率 (%)	蒸煮损失率 (%)	综合得分 (分)
1		1	1	1	1	13.4	1.26	12.9	26.9
2		1	2	2	2	14.2	1.96	15.0	22.4
3		1	3	3	3	15.5	1.65	15.9	23.8
4		2	1	2	3	19.2	1.28	14.0	29.0
5		2	2	3	1	16.9	1.36	14.3	27.0
6		2	3	1	2	17.0	1.90	15.4	23.8
7		3	1	3	2	19.3	2.27	13.6	25.0
8		3	2	1	3	18.4	1.95	15.0	24.6
9		3	3	2	1	17.0	1.66	14.2	25.5
综合得分	k_1	24.4	27.0	25.1					
	k_2	26.6	24.7	25.6					
	k_3	25.0	24.4	25.3					
	R	2.25	2.63	0.51					
主次顺序		B>A>C							
最优组合		$A_2B_1C_2$							

2.3 对比验证实验结果

2.3.1 保水效果对比 解冻损失率是衡量冷冻肉制

品在解冻过程中质量损失的一个重要指标，解冻损失率越低，说明解冻后产品的汁液、营养等成分流失越少，品质保持得越好；蒸煮损失率是衡量肉类在蒸煮过程中水分流失程度的指标，高的蒸煮损失率不仅使鱼肉的食用品质下降，同时影响鱼肉的外观，因此降低蒸煮损失率是提高肉品品质的关键。由表 4 可知，P 组和 NP 组的浸泡增重率、解冻损失率和蒸煮损失率三个指标均显著优于 CK 组（P<0..05），且 P 组和 NP 组之间无显著性差异。P 组和 NP 组的综合得分接近，且明显高于 CK 组。可见，复合无磷保水剂处理对冷冻许氏平鲉鱼片具有较优的保水效果，证明了其在提高保水性、代替复合磷酸盐上的应用潜力。

表 4　保水效果对比结果

Table 4　Comparative results of water retention effects

组别	浸泡增重率（%）	解冻损失率（%）	蒸煮损失率（%）	综合得分（分）
蒸馏水组（CK）	5.46±0.75^{b}	9.23±0.85^{a}	30.6±2.62^{a}	20.2
复合磷酸盐组（P）	20.9±1.54^{a}	1.44±0.17^{b}	15.6±1.36^{b}	29.1
复合无磷盐组（NP）	19.2±1.15^{a}	1.28±0.22^{b}	14.0±1.52^{b}	29.0

注：同列不同字母表示差异显著（P<0.05）；表5同。

2.3.2　质构特性对比　由表 5 可知，从硬度、胶着性和咀嚼性来看，P 组和 NP 组的鱼片间没有显著差异，均显著低于 CK 组（P<0.05），这说明保水剂的加入降低了鱼肉的硬度，并在冷冻贮藏过程中鱼肉依旧保持良好的质构特性。从弹性和内聚性来看，三组未见显著差异。因此，综合上述所有指标，经过由碳酸氢钠、柠檬酸钠和海藻糖组成的复合无磷保水剂配方有较好的保水性能，能显著改善解冻鱼肉的质构特性。

表 5　质构特性对比结果

Table 5　Comparative results of textural properties

组别	硬度（g）	内聚性	弹性（mm）	胶着性（g）	咀嚼性（mJ）
蒸馏水组（CK）	32.3±1.75^{a}	0.60±0.07^{a}	1.67±0.09^{a}	19.2±2.58^{a}	0.31±0.05^{a}
复合磷酸盐组（P）	21.8±1.94^{b}	0.62±0.07^{a}	1.69±0.18^{a}	13.6±2.22^{b}	0.23±0.06^{b}
复合无磷盐组（NP）	22.0±1.49^{b}	0.57±0.08^{a}	1.74±0.16^{a}	12.6±1.94^{b}	0.19±0.04^{b}

2.3.3　微观结构对比　由图 5 可以观察到鱼片肌肉微观组织结构在不同处理条件下的变化情况，图中红色的为肌纤维，白色包裹在肌纤维外层的为肌内膜[30]。新鲜鱼肉的肌纤维呈现出高度有序的条纹状结构，结构饱满，染色均匀，肌原纤维排列紧密。CK 组的微观组织结构形变最为严重，肌原纤维束断裂严重且排列非常杂乱，组织内出现不同程度的大孔洞和细胞损坏。从该组鱼片的纵切面和横切面都能发现，肌纤维束边缘染色较好，纤维中间由于受到冰晶的损伤形成了空洞而无法染色，这是由于冻结产生的冰晶导致肌纤维结构出现损伤，与 Jiang 等[31] 的发现相似。P 组和 NP 组相比于 CK 组，其肌肉组织结构更加完整，细胞间质可能更加紧密，肌纤维损伤较少，肌原纤维结构得到更好的保护，显示出较好的保水性。这是因为复合无磷保水剂配方提供了更好的保水效果，减少了解冻过程中的水分流失，保持了肌纤维的完整性。

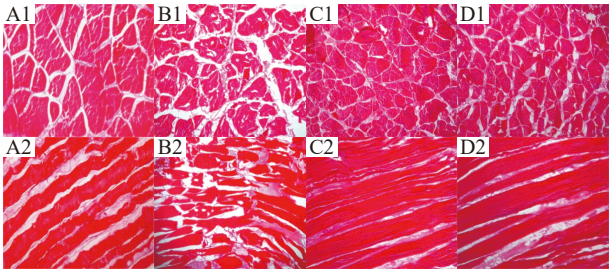


图 5　不同处理组冷冻鱼片微观组织图

Fig.5　Microstructural images of frozen fish fillets from different treatment groups

注：A：新鲜样品组（FS）；B：蒸馏水组（CK）；C：复合磷酸盐组（P）；D：复合无磷盐组（NP）；1：纵切面；2：横切面；图中物镜放大倍数为 5 倍，目镜 10 倍。

鱼片的微观结构与其肌肉品质密切相关[32]。鱼片在冻结与冻藏过程中，受到冰晶的损伤，对肌纤维挤压加剧导致纤维发生形变，是鱼肉组织结构劣变的主要原因。蒸馏水处理组由于没有保水剂的保护，冻藏过程中冰晶增大导致肌原纤维蛋白脱水变性，空间结构发生变化，这是造成图中大量空洞产生与肌纤维断裂的原因。从图中还可以看出，P 组和 NP 组的肌纤维间隙更小，肌原纤维完整度更高，这也与其弹性高于对照组（表 5）的结果相呼应。因此，复合无磷保水剂处理能抑制鱼片冻藏期间微观结构的劣变，可以代替复合磷酸盐。

2.3.4　感官评价对比　图 6 展示了 CK 组、NP 组和 P 组在色泽、气味、口感、滋味和可接受度五个感官指标上的表现。结果显示，CK 组在口感、气味、色泽方面的得分较低，表明其感官品质相对较差。P 组在口感方面表现较好，但气味稍逊。相比之下，NP 组在色泽和气味方面得分最高，口感和滋味也接近复合磷酸盐组，表明其综合感官品质优于其他处理组。由外观照片图 7 也能看出，CK 组鱼肉经过蒸煮后外观有明显裂开，质地粗糙，而经 NP 组处理的鱼

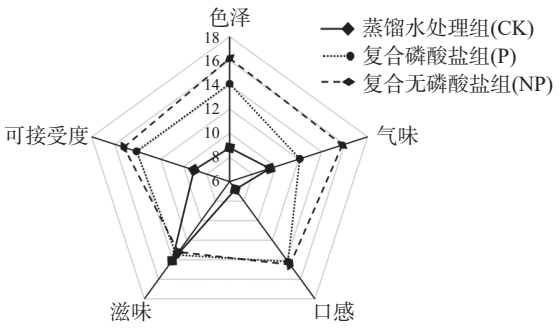


图 6　感官评分

Fig.6　Sensory evaluation

肉外观形态最完整，表面有光泽且无明显破损。总体来看，NP 组在总体接受度方面表现最佳，说明其在有效改善鱼片感官品质的同时，避免了磷酸盐处理带来的感官方面的负面影响。

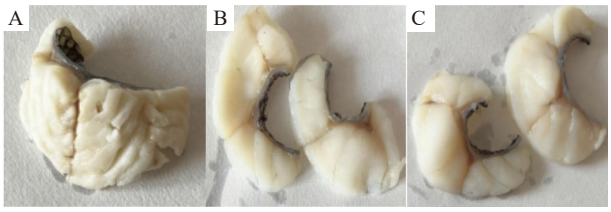


图 7 不同保水剂对鱼片蒸煮后外观的影响

Fig.7 Effect of different water retention agents on the appearance of fish fillets after steaming

注：A：蒸馏水处理组（CK）；B：复合磷酸盐组（P）；C：复合无磷盐组（NP）。

3 结论

本实验研究了不同浓度碳酸氢钠、柠檬酸钠和海藻糖对许氏平鲉鱼片保水性的影响。结果表明，碳酸氢钠、柠檬酸钠和海藻糖的添加可以不同程度提高鱼片的浸泡增重率，同时降低鱼片的解冻损失率和蒸煮损失率。当碳酸氢钠、柠檬酸钠和海藻糖以 2.5%、2.0% 和 1.5% 的比例复配时，形成的复合无磷保水剂对提升许氏平鲉鱼片的保水效果最优。经过该复合无磷保水剂处理的冷冻许氏平鲉鱼片，在品质上与复合磷酸盐组相比并无显著差异。此外，该保水剂还能有效减少鱼片在冻藏过程中肌肉结构的损伤，保持其原有肌纤维形态结构，且能有效避免磷酸盐处理带来的感官负面影响，具有良好的形态、气味、色泽、口感及接受程度。综上，本研究得到的复合无磷保水剂配方显示出了替代传统复合磷酸盐的潜力，对推动无磷保水剂在鱼肉加工中的应用具有重要意义。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 范维, 洪惠, 矫春娜, 等. 探索海洋的神秘宝藏——许氏平鲉[J]. 中国水产, 2024(12): 60−61. [FAN W, HONG H, JIAO C N, et al. Exploring the mysterious treasure of the ocean — *Sebastes schlegelii*[J]. China Fisheries, 2024(12): 60−61.]

[2] 宋祖德, 袁廷柱, 王学现. 山东省许氏平鲉产业链发展现状分析与对策建议[J]. 河北渔业, 2021(5): 16−17,24. [SONG Z D, YUAN T Z, WANG Y X. Analysis of the development status and countermeasure suggestions of the industrial chain of *Sebastes schlegelii* in Shandong Province[J]. Hebei Fisheries, 2021(5): 16−17,24.]

[3] LIU Zhenlei, YANG Wenge, WEI Huamao, et al. The mechanisms and applications of cryoprotectants in aquatic products: An overview[J]. Food Chemistry, 2023, 408: 135202.

[4] CORNET S H V, SNEL S J E, LESSCHEN J, et al. Enhancing the water holding capacity of model meat analogues through marinade composition[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 290: 110283.

[5] THANGAVELU K P, KERRY J P, TIWARI B K, et al. Novel processing technologies and ingredient strategies for the reduction of phosphate additives in processed meat[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 94: 43−53.

[6] NISHIME K, SUGIYAMA N, OKADA K. A new disease concept in the age of processed foods-phosphorus-burden disease; Including CKD-MBD concrete analysis and the way to solution[J]. Nutrients, 2021, 13(8): 2874.

[7] KURO-O M. A phosphate-centric paradigm for pathophysiology and therapy of chronic kidney disease[J]. Kidney International Supplements, 2013, 3(5): 420−426.

[8] VERVLOET M G, SEZER S, MASSY Z A, et al. The role of phosphate in kidney disease[J]. Nature Reviews Nephrology, 2017, 13(1): 27−38.

[9] ASIOLI D, ASCHEMANN-WITZEL J, CAPUTO V, et al. Making sense of the "clean label" trends: A review of consumer food choice behavior and discussion of industry implications[J]. Food Research International, 2017, 99: 58−71.

[10] 赵宏蕾, 常婧瑶, 刘美月, 等. 基于清洁标签理念的新型加工技术在低磷肉制品中应用的研究进展[J]. 肉类研究, 2021, 35(1): 83−91. [ZHAO Honglei, CHANG Jingyao, LIU Meiyue, et al. Recent development in the application of novel processing technologies based on the clean label concept in low phosphate meat products[J]. Meat Research, 2021, 35(1): 83−91.]

[11] 张晨芳, 钟秋平. 复合无磷保水剂对冷冻罗非鱼片保水效果的研究[J]. 食品工业, 2016, 37(10): 100−103. [ZHANG Chenfang, ZHONG Qiuping. Research on water-holding capacity of frozen tilapia fillets by compound non-phosphorous water-retention agent[J]. The Food Industry, 2016, 37(10): 100−103.]

[12] 王荣, 姜启兴, 刘秋宇, 等. 冷冻鲴鱼鱼排无磷保水剂配方的开发与优化[J]. 食品科技, 2020, 45(6): 322−327. [WANG Rong, JIANG Qixing, LIU Qiuyu, et al. Development and optimization of phosphate-free water retaining agent formula for frozen channel catfish fillet[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(6): 322−327.]

[13] 于淑池, 周海英. 复合无磷保水剂对冷冻金鲳鱼片的保水效果[J]. 食品工业, 2020, 41(1): 120−124. [YU Shuchi, ZHOU Haiying. The effect of compound phosphorus-free water retaining agent on frozen golden pompano fillets[J]. The Food Industry, 2020, 41(1): 120−124.]

[14] 王宁, 李亮, 毕凯媛, 等. 复合保水剂对冻藏大黄花鱼持水性及质构特性的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(9): 228−232,238. [WANG Ning, LI Liang, BI Kaiyuan, et al. The influence of composite water retention agent on the water retention and texture properties of the frozen large yellow croaker[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(9): 228−232,238.]

[15] 熊雅雯, 黄卉, 李来好, 等. 响应面法优化冷冻水煮罗非鱼片稳定剂配方[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(23): 225−234. [XIONG Yawen, HUANG Hui, LI Laihao, et al. Optimized stabilizer formulation of frozen boiled tilapia fillets by response surface methodology[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(23): 225−234.]

[16] 李红艳, 刘振鲁, 刘天红, 等. 凡纳滨对虾营养、滋味及质构特性分析与评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(8): 19−30. [LI Hongyan, LIU Zhenlu, LIU Tianhong, et al. Analysis and evaluation of nutrition, flavor and texture characteristics of *Penaeus van-*

namei cultured in salt fields[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(8): 19−30.]
[17] 吴丹, 曾文浩, 熊善柏, 等. 基于固相微萃取(SPME)和同时蒸馏萃取(SDE)分析大麦苗粉对白鲢鱼糜制品的去腥作用[J]. 现代食品科技, 2022, 38(3): 244−256. [WU Dan, ZENG Wenhao, XIONG Shanbai, et al. Analysis of the deodorization effect of barley green powder on silver carp surimi products by SPME and SDE[J]. Modern Food Science & Technology, 2022, 38(3): 244−256.]
[18] 鲍佳丽. 巴沙鱼片预调理食品加工关键技术研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2022. [BAO Jiali. Research on key technologies for processing pre-seasoned food products of *Pangasius bocourti* fillets[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2022.]
[19] LU Fei, KANG Zhuangli, WEI Lipeng, et al. Effect of sodium bicarbonate on gel properties and protein conformation of phosphorus-free chicken meat batters[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2021, 14(2): 102969.
[20] 赵宏蕾, 辛莹, 刘美月, 等. 柠檬酸钠协同碳酸氢钠替代磷酸盐对法兰克福香肠品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(10): 94−103. [ZHAO Honglei, XIN Ying, LIU Meiyue, et al. Effect of sodium citrate combined with sodium hydrogen carbonate on the quality of phosphate-free frankfurters[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(10): 94−103.]
[21] 赵改名, 孟子晴, 祝超智, 等. TG 酶、复合磷酸盐与碳酸氢钠对牛肉糜保水性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(8): 74−81,89. [ZHAO Gaiming, MENG Ziqing, ZHU Chaozhi, et al. Effects of TG enzyme, complex phosphate and sodium bicarbonate on water holding capacity of minced beef[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(8): 74−81,89.]
[22] 王梓棚, 张斌, 蒋洪安, 等. TG 与无磷保水剂对重组马肉品质特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(20): 42−52. [WANG Zipeng, ZHANG Bin, JIANG Hongan, et al. Effect of TG and phosphorus-free water retaining agents on quality characteristics of recombinant horse meat[J]. Food Research and Development, 2024, 45(20): 42−52.]
[23] 刘晓芳, 姜鹏飞, 杜晓平, 等. 离子强度对南极磷虾肉保水性及其肌原纤维蛋白特性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 64−74. [LIU Xiaofang, JIANG Pengfei, DU Xiaoping, et al. Effects of ionic strength on water-holding capacity and properties of myofibrillar protein of Antarctic krill meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(6): 64−74.]
[24] CHU Yanjiao, DENG Shanggui, LÜ Guancheng, et al. Improvement of gel quality of squid (*Dosidicus gigas*) meat by using sodium gluconate, sodium citrate, and sodium tartrate[J]. Foods, 2022, 11(2): 173.
[25] CHEN A Q, TAPIA H, GODDARD J M, et al. Trehalose and its applications in the food industry[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 21(6): 5004−5037.
[26] 高文倩, 邢雪羽, 胡炎华, 等. 海藻糖对水饺皮保水性及质构特性的改良[J]. 现代食品科技, 2020, 36(7): 235−241,281. [GAO Wenqian, XING Xueyu, HU Yanhua, et al. Improvement of trehalose on water retention and texture properties of dumpling wrapper[J]. Modern Food Science & Technology, 2020, 36(7): 235−241,281.]
[27] LI Yang, LI Caiming, BAN Xiaofeng, et al. Alleviative effect of short-clustered maltodextrin on the quality deterioration of frozen dough: Compared with trehalose and guar gum[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 118: 106791.
[28] ZHANG Bin, WU Haixiao, YANG Huicheng, et al. Cryoprotective roles of trehalose and alginate oligosaccharides during frozen storage of peeled shrimp (*Litopenaeus vannamei*)[J]. Food Chemistry, 2017, 228: 257−264.
[29] 冯慧. 多聚磷酸盐在冷冻罗非鱼肉中的水解以及水产品无磷保水剂的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008. [FENG Hui. Study of polyphosphate hydrolysis of frozen tilapia muscle and non-phosphate additive[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.]
[30] 王引兰, 王恒鹏, 孟祥忍. 低频超声辅助静态腌制对鸭肉水分分布及品质特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(2): 234−241. [WANG Yinlan, WANG Hengpeng, MENG Xiangren. Effect of low-frequency ultrasound-assisted static curing on water distribution and quality characteristics of duck meat[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(2): 234−241.]
[31] JIANG Q Q, NAKAZAWA N, HU Y Q, et al. Changes in quality properties and tissue histology of lightly salted tuna meat subjected to multiple freeze-thaw cycles[J]. Food Chemistry, 2019, 293: 178−186.
[32] 李桢桢, 尹明雨, 王红丽, 等. 水产品肌肉组织微观结构变化及其检测方法研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(9): 278−286. [LI Zhenzhen, YIN Mingyu, WANG Hongli, et al. Microstructural change of muscle tissues of aquatic products and methods for its detection: A review[J]. Food Science, 2023, 44(9): 278−286.]