

國立臺灣海洋大學食品科學系碩士班

專題討論書面報告

探討高靜水壓對肉類解凍品質之影響

任課老師：黃意真老師

宋文杰老師

指導教授：劉修銘老師

學號：11032039

學生：張洋愷(5143)

報告日期：110年12月15日

內容 40%	時間掌控 10%	表達能力 30%	投影片 10%	書面資料 10%

指導教授：_____ 老師

探討高靜水壓對肉類解凍品質之影響

張洋愷(5143)

2021/12/15

大綱

- 一、前言
- 二、冷凍保存前和解凍前高靜水壓在冷凍長鰭鮪魚中的應用
- 三、高靜水壓輔助解凍對於銀鯧理化特性的影響
- 四、高靜水壓輔助解凍處理豬肉對於保水能力、蛋白質變性和超微結構的變化
- 五、結論

摘要

高靜水壓處理(High Pressure Processing, HPP)是一種非熱加工的技術，可以用於縮短解凍所需要的時間，減少解凍重量的損失。本篇探討三種不同肉類在不同的壓力條件下肉質的變化與解凍損失的比較。長鰭鮪魚(*Thunnus alalunga*)冷凍保存前(Before Frozen Storage, BFS)使用高靜水壓分別在 200 MPa 6 分鐘和 600 MPa 0 分鐘處理，另外一組是解凍前(Before Thawing, BT)使用高靜水壓分別在 200 MPa 6 分鐘和 600 MPa 0 分鐘處理，45 天冷凍儲存後，解凍後分析解凍損失、顏色、質地、鹽溶性蛋白質和脂質氧化。結果顯示儲存 45 天後解凍前(BT)使用 HPP 的樣品解凍損失低於冷凍保存前(BFS)的，雖然使用 600 MPa 0 分鐘相比於 200 MPa 6 分鐘處理會有較少的解凍損失，但同時會導致有較高的 L^* 和 b^* 值且質地的硬度和咀嚼性會提高，因此解凍前(BT)使用 200 MPa 6 分鐘是最適合的條件。銀鯧(*Pampus argenteus*) HPP 輔助解凍分別在 100、150 和 200 MPa 與浸水解凍(water immersion thawing, WIT) 比較。HPP 輔助解凍顯著減少解凍時間、烹飪損失和總損失，在各條件中 100 MPa 有最好的保水能力，當壓力高於 150 MPa 時樣品的顏色有明顯變化，使用 HPP 輔助解凍的銀鯧有更好的質地和較少的脂質氧化，壓力使表面疏水性增加，同時 Ca^{2+} -ATPase 的活性會隨著壓力的增加而減少，在 100 MPa 時肌原纖維蛋白質的氧化明顯降低，因此使用 100 MPa 是銀鯧的最佳處理條件。豬肉使用 HPP 輔助解凍分別使用 70 MPa 35 分鐘、140 MPa 29 分鐘和 210 MPa 25 分鐘進行解凍，使用 20°C 流水解凍及 4°C 空氣解凍做為對照組，使用 140 MPa 解凍的豬肉比流水解凍有較少的解凍損失，使用 70 MPa 和 210 MPa 時的解凍損失則較多，蒸煮損失和蛋白質變性程度隨著壓力增加。綜合上述結果，高靜水壓輔助解凍可以有效減少解凍損失，具有應用於肉類解凍的潛力。

一、前言

高靜水壓輔助解凍是指通過在壓力下快速解凍樣品使冰晶變成水的狀態，當壓力增加到 207.5 MPa 時，熔點會下降到 -22°C 。(Cheftel *et al.*, 2006)。

高壓可以改變食品的功能特性，胺基酸、維生素和風味化合物不受高壓影響，蛋白質的非共價鍵會被改變，壓力對蛋白質的第三級和第四級結構有破壞性影響，壓力大於 200 MPa 會造成蛋白質展開和重新結合。壓力會引起聚集，硫醇基(SH)會氧化形成雙硫鍵(S-S)。(Puppo *et al.*, 2004)

壓力對蛋白質的第一級結構的影響不敏感。(Mozhaev *et al.*, 1996)

二、冷凍保存前和解凍前高靜水壓在冷凍長鰭鮪魚中的應用

經 HPP 處理的樣品在冷凍保存前(Before Frozen Storage, BFS)和解凍前(Before Thawing, BT)的解凍損失(圖 2)。使用 HPP 在 200 MPa 6 分鐘和 600 MPa 0 分鐘的解凍損失低於對照組，冷凍 45 天後解凍前(BT)使用 600 MPa 0 分鐘的解凍損失為 $1.0 \pm 0.1\%$ ，對照組是 $5.0 \pm 0.4\%$ ，解凍前(BT)使用 600 MPa 0 分鐘與對照組比較，解凍損失減少了 79.7%。肌肉蛋白質的變性是因為超過 200 MPa，所以產生變性和聚集會有更好的保水能力。冷凍保存 45 天後對照組增加 58.9%，冷凍保存前(BFS)使用 200 MPa 6 分鐘和冷凍保存前(BFS)使用 600 MPa 0 分鐘的樣品，解凍損失分別增加 39.3% 和 17.1%。使用 HPP 時溫度的增加及冷凍儲存時的溫度波動，將導致重新形成冰晶，這對解凍損失會產生負面影響。使用 HPP 解凍前(BT)比冷凍保存前(BFS)有較少的解凍損失。使用 HPP 在冷凍保存前(BFS)和解凍前(BT)長鰭鮪魚的顏色(圖 3)。在第 0 天冷凍儲存中，使用 HPP 在 200 MPa 6 分鐘時導致較高 L^* 值、 b^* 值和 ΔE 值相比於使用 HPP 冷凍保存前 (BFS) 的長鰭鮪魚。HPP 預處理使 L^* 值增加 (圖 3a)。壓力使肌原纖維變性導致 L^* 值增加。解凍前(BT)使用 600 MPa 0 分鐘比冷凍保存前(BFS)有較高的 L^* 值。解凍前(BT)使用 600 MPa 0 分鐘和冷凍保存前(BFS)的 L^* 值分別增加 8.6% 和 5.5%。與對照組相比解凍前(BT)使用 600 MPa 0 分鐘降低 a^* 值 (圖 3b)。冷凍 45 天後冷凍保存前(BFS)使用 600 MPa 0 分鐘 a^* 值低於對照組。與對照組相比冷凍保存前(BFS)使用 200 MPa 6 分鐘和解凍前(BT)的 a^* 值沒有明顯的變化，第 45 天的解凍前(BT)有較高的 a^* 值。HPP 對 a^* 值的影響是由於加工條件和魚種。所有 HPP 的都明顯的比對照組有較高 b^* 值 (圖 3c)。 b^* 值的變化可能是由於肌漿和肌原纖維蛋白的變性或脂質氧化，因為冷凍儲存而引起的變化僅在對照組表現明顯， b^* 值隨著冷凍儲存 0 到 45 天為 67.5%。所有 HPP 預處理的 ΔE 值均高於 10 個單位 (圖 3d) 冷凍保存前(BFS)使用 HPP 在 200 MPa 6 分鐘和解凍前沒有差異。解凍前(BT)使用 600 MPa 0 分鐘比冷凍保存前(BFS)有較高 ΔE 值。解凍前(BT)或冷凍保存前(BFS) 使用 HPP 在 200 MPa 6 分鐘和 600 MPa 0 分鐘在冷凍長鰭鮪魚與對照組相比顏色有明顯變化。使用 HPP 處理長鰭鮪魚的質地(圖 4)。硬度和咀嚼性在解凍前(BT)使用 200 MPa 6 分鐘的高於對照組的樣品，所有使用 600 MPa 0 分鐘的硬度有顯著增加相比於對照組的 (圖 4a)。解凍前(BT)使用 200 MPa 6 分鐘的硬度與對照組相比有顯著增加。第 0 天後冷凍儲存，解凍前(BT)

使用 200 MPa 6 分鐘的硬度比對照組多 39.8%，冷凍保存前(BFS)的差異不大。冷凍保存前(BFS)使用 200 MPa 6 分鐘比解凍前(BT)更好的保留長鰭鮭魚的硬度。壓力引起的硬度增加是因為肌原纖維蛋白的變性和聚集。肌肉的加壓會形成蛋白質凝膠和硬度的增加。硬度是由於冷凍儲存時內源性蛋白水解酶活性降低。在冷凍儲存 0 天後，使用 HPP 的長鰭鮭魚，僅在 200 MPa 6 分鐘有黏性差異高於對照組 52.3% (圖 4b)。在 HPP 的長鰭鮭魚中黏性與肌動蛋白和肌漿蛋白的展開有關。所有使用 HPP 在 600 MPa 0 分鐘的樣品都與對照組的黏性差不多。冷凍儲存 45 天後，冷凍保存前(BFS)使用 200 MPa 6 分鐘比解凍前(BT)有較高的黏性。所有使用 HPP 的樣品比對照組有較高的彈性 (圖 4c)。彈性在 200 MPa 6 分鐘比對照組高約 20%，使用 600 MPa 0 分鐘比對照組高約 15%。咀嚼性的變化方式與硬度相同 (圖 4d)，所有使用 HPP 的樣品都比對照組有較高的咀嚼性。壓力引起的彈性和咀嚼性的變化可能是由於肌動蛋白和肌漿蛋白的展開和形成氫鍵。所有使用 HPP 的與對照組相比都有顯著的質地變化。冷凍保存前(BFS)和解凍前(BT)使用 HPP 的長鰭鮭魚的鹽溶性蛋白質含量 (圖 5)。使用 HPP 的鹽溶性蛋白質含量比對照組低。肌原纖維蛋白質是主要影響蛋白質變性和鹽溶性蛋白質含量，長鰭鮭魚的顏色和質地變化可能與由壓力引起的肌肉蛋白質的變性有關，蛋白質的這些變化與靜電作用力和疏水性交互作用力與壓力有關，使用 HPP 樣品的鹽溶性蛋白質含量都比較低。與對照比較 HPP 預處理的肌原纖維蛋白質聚集程度更大，蛋白質變性引起的蛋白質凝膠化和聚集將更好的保留水分，使用 HPP 可以降低冷凍儲存後的損失。冷凍儲存 15 天後，冷凍保存前(BFS)使用 200 MPa 6 分鐘的鹽溶性蛋白質含量比解凍前(BT)低。冷凍保存前(BFS)和解凍前(BT)使用 HPP 的長鰭鮭魚的 TBARS 值 (圖 6)。冷凍儲存第 0 天時，使用 HPP 的對 TBARS 值沒有影響。對照組和冷凍保存前(BFS)使用 200 MPa 6 分鐘在冷凍儲存 45 天後解凍，冷凍保存前(BFS)使用 HPP 的長鰭鮭魚的 TBARS 值相似。冷凍保存 45 天後解凍前(BT)使用 200 MPa 6 分鐘的 TBARS 值明顯高於冷凍保存前(BFS)。脂質氧化取決於幾個因素，例如年齡、化學成分、脂肪分佈或處理方式。冷凍儲存中參與脂質水解的幾種酶的活性增加，以及越來越多的游離脂肪酸，可能導致脂質氧化加速，使用 HPP 可抑制脂質水解活性酶，從而減少脂質冷凍儲存期間的氧化。冷凍保存前(BFS)使用 HPP 的長鰭鮭魚，僅在 600 MPa 0 分鐘的 TBARS 值在冷凍 15 天後解凍顯示出略高於對照組。解凍前(BT)的 TBARS 值比對照組高，解凍前(BT)使用 200 MPa 6 分鐘 67.0% 更高和 600 MPa 0 分鐘高 78.1% 和 45 天高出 138.8%，解凍前(BT)的樣品相比於冷凍保存前(BFS)的有較高的 TBARS 值。解凍前(BT)使用 200 MPa 6 分鐘的 TBARS 值在冷凍保存 15 天和 45 天後分別增加 100.8% 和 51.1%。冷凍 45 天後，解凍前(BT)使用 600 MPa 0 分鐘的 TBARS 值比冷凍保存前(BFS)高出 170.1%。使用 HPP 可以抑制負責脂質的水解內源性酶活性，冷凍保存前(BFS)使用 HPP 比解凍前(BT)更能減少脂質氧化。

三、高靜水壓輔助解凍對於銀鯧理化特性的影響

冷凍銀鯧魚的浸水解凍(water immersion thawing, WIT)的代表性時間-溫度曲

線(圖 7)。解凍過程的時間為 16.67 ± 1.53 分鐘，高靜水壓輔助解凍(hydrostatic pressure-assisted thawing, HPAT) 分別使用 100、150 和 200 MPa。解凍時間在 20°C 浸水解凍(WIT)約為 66.67%、57.14% 和 50.00%，分別為 11.11 ± 1.02 、 9.52 ± 0.87 和 8.33 ± 0.76 分鐘。損失類型包括解凍損失、烹飪損失和總損失(表 1)，使用(HPAT)比(WIT)有顯著增加解凍損失。這些矛盾可能是由於樣品類型的多樣性造成的，包括種類、蛋白質類型、肌肉類型、質地、加工條件的差異、冷凍加壓速率、時間會影響使用(HPAT)的樣品。所有(HPAT)的樣品都顯示烹飪損失和總損失與(WIT)相比，使用(HPAT)能更有效維持魚肉的保水性。在 100 MPa 時有最低滴液損失與新鮮樣品的相似。冷凍過程明顯影響魚肉的保水力(WHC)，以及離心力的損失(圖 8)。銀鯧魚使用 100 MPa 解凍有最好的(WHC)。在高於 150 MPa 使用(HPAT)樣品的水分損失比(WIT)明顯更高。高於 150 MPa 時較高的失水可能是由於蛋白質變性，導致保水能力的改變。通過色差 ΔE 評估(表 2)，使用(HPAT)樣品的亮度 L^* 和 b^* 增加， a^* 有略微的增加。 L^* 是銀鯧肌肉隨著壓力的增加而變白。使用(HPAT)的樣品在高於 150 MPa 會變白和不透明，造成有煮熟的外觀。隨著壓力的升高，魚肌肉的白度增加，在 100 MPa 時解凍後的樣品的白度值與新鮮的相似。新鮮的銀鯧解凍樣品的質地分析(TPA)(表 3)。使用(HPAT)增加銀鯧魚的硬度、彈性、咀嚼性、黏性和回彈力與使用(WIT)的樣品相比。咀嚼性和黏性從 200 MPa 有顯著增加與使用(WIT)的樣品相比。這些變化可能與肌動蛋白和肌漿蛋白的展開、蛋白質之間相互作用力的增加，以及氫鍵形成和細胞損傷。使用(HPAT)可以改變解凍肉的質地，使其較硬且更有彈性，從而防止變軟。新鮮銀鯧魚的 pH 值為 7.21 ± 0.03 。使用(HPAT)的銀鯧魚的酸鹼度取決於壓力程度(圖 9)。隨著壓力的增加，使用(HPAT)樣品的 pH 值增加，在 200 MPa 有顯著增加相對於使用(WIT)的樣品，隨著壓力的增加 pH 值可能與蛋白質變性，而導致酸性基團減少。使用(HPAT)的銀鯧樣品 TBARS 值的變化(圖 10)。TBARS 的平均值新鮮樣品的濃度為 0.11 ± 0.00 mgMDA/kg，使用(WIT)的樣品顯著增強。所有使用(HPAT)的 TBARS 值略有增加。使用(HHP)造成肌肉的脂質氧化會因為品種、肌肉類型、施加的壓力程度和時間而異。使用高靜水壓輔助解凍和浸水解凍的羰基含量(圖 11a)，在解凍過程中有明顯的蛋白質氧化。使用(HPAT)的銀鯧的羰基含量取決於壓力程度，隨著壓力的增加，使用(HPAT)的樣品的羰基含量顯著增加。使用高靜水壓高於 150 MPa 時解凍與使用(WIT)的樣品相比有明顯的增加。羰基含量的增加是因為自由基的形成，肌纖維蛋白的氧化反應，形成異味，以及功能和營養價值降低。總硫醇基的含量(圖 11b)，在反應過程中很容易被氧化成二硫鍵。冷凍過程導致總硫醇基(T-SH)含量降低。新鮮肌肉的初始(T-SH)為 87.18 ± 1.16 nmol/mgprot。使用(WIT)樣品的(T-SH)含量顯著增加，降低至 65.97 ± 0.66 nmol/mgprot。使用(HPAT)的銀鯧肌肉肌原纖維蛋白的表面疏水性的變化(圖 12)。表面疏水性從 0.1 MPa 到 150 MPa 緩慢上升與新鮮的相比，在 200 MPa 時急劇上升。壓力大小與表面疏水性大小有顯著的正相關。胺基酸殘基在壓力下露出於蛋白質表面。壓力導致的疏水性可能是因為蛋白質的展開。使用

(HPAT)小於 150 MPa 銀鯧的肌原纖維蛋白的表面無明顯影響，與新鮮樣品相似。使用(HPAT)的樣品與新鮮樣品相比 Ca^{2+} -ATPase 的活性明顯降低(圖 13)。所有使用(HPAT)的樣品隨著壓力升高，而造成 Ca^{2+} -ATPase 活性明顯的下降，使用(HPAT)分別在 100、150 和 200 MPa 的活性分別為 53.21%、37.02%、17.11%， Ca^{2+} -ATPase 的活性取決於肌球蛋白的結構。

四、高靜水壓輔助解凍處理豬肉對於保水能力、蛋白質變性和超微結構的變化

使用 70 和 140 MPa 的解凍損失顯著低於 210 MPa 和流水解凍(表 4)。使用 210 MPa 保水能力下降，可能是因為高壓解凍導致肌肉組織損傷、肌肉收縮和肌原纖維蛋白聚集。高壓解凍豬肉的蒸煮損失明顯的高於空氣解凍和流水解凍，使用 140 和 210 MPa 的蒸煮損失為明顯的高於 70 MPa，解凍速度與肉類的烹飪損失沒有顯著關係。高壓處理後蒸煮損失減少，可能是因為高壓使肌原纖維蛋白親水基團露出，形成更多的氫鍵可以與水結合。使用 140 MPa 解凍豬肉的壓榨損失明顯大於其他組，可能肉類解凍損失較低有關，使用 140 MPa 解凍有較低的解凍損失將導致較高的初始重量，當施加外部壓力時，會導致更多的水分流失。壓榨失水沒有與冷凍和解凍速率有顯著相關。在 DSC 分析期間，肌球蛋白變性(57-60°C)、肌漿蛋白和膠原變性(66-67°C)和肌動蛋白變性(78-80°C)(圖 14)。加熱出現三個吸熱峰樣品的曲線，隨著壓力的增加，三種蛋白質的峰值開始趨於平穩，尤其是肌球蛋白和肌動蛋白的峰值，在 210 MPa 時幾乎消失。變性溫度代表蛋白質的穩定性，變性溫度的變化表示蛋白質的結構可能會改變。樣品中肌球蛋白的變性溫度 ($T_{\text{max}1}$) (表 5)，使用 210 MPa 的解凍顯著高於在 70 和 140 MPa 解凍，肌球蛋白的結構有很大的變化，可能形成新的結構。蛋白質變性和變性焓(ΔH)呈負相關，流水解凍和 70 MPa 解凍的總蛋白質變性焓值的沒有顯著的差異，這兩種解凍方式的解凍速度相似。總數變性焓值顯著降低，從 70 MPa 到 210 MPa 蛋白質變性程度急劇增加，在 210MPa 蛋白質變性程度最大，壓力增加會影響靜電力作用力和蛋白質的疏水性相互作用，以及氫鍵斷裂導致不可逆的蛋白質變性。在高壓解凍組的變性肌球蛋白的焓 ($\Delta H1$) 隨著壓力的增加而降低，隨著壓力的增加肌球蛋白變性更加強烈。70 MPa 解凍樣品和流水解凍之間的肌球蛋白變性焓 ($\Delta H1$) 沒有顯著差異，高壓解凍的肌漿蛋白和膠原蛋白的變性焓 ($\Delta H2$) 顯著低於對照組。肌漿蛋白和膠原蛋白的變性焓 70 和 140 MPa 沒有顯著差異，210MPa 有顯著差異。肌漿蛋白的變性從 0 到 140 MPa 沒有顯著差異。210 MPa 第二個峰變較寬，第三個峰消失，與其他組的峰有顯著差異。210 MPa 時肌動蛋白質的變性程度很大。經高壓處理的豬肉超微結構與空氣解凍和流水解凍樣品相比，高壓解凍有很大的變化(表 6)。高壓解凍組肌節明顯小於對照組，70 和 140 MPa 的肌小節收縮沒有明顯差異，但在 210 MPa 時肌小節收縮顯著增加。常溫的高壓處理會導致明顯的肌小節收縮，可能是高壓導致 ATP 酶的活性增加，加速 ATP 向 ADP 的轉化，導致粗細絲重疊，導致肌纖維收縮和肌小節長度的減少。對照組有肌原纖維的 H 區，70 MPa 組則不太清楚，140 和 210 MPa 幾乎完全消失(圖 15)。可能是由於 H 區的蛋白質隨著

壓力的增加而變性，210 MPa 的 I 區域更寬，周圍區域是白色的，可能是因為構成 I 區的蛋白質在高壓下變性，然後出現凝膠狀態。Z 線在大多數解凍組中線相對完整，可能與使用較低的壓力有關。210 MPa 的 Z 線比其他解凍組更厚，可能是由於蛋白質變性和聚集。

五、結論

雖然高靜水壓輔助解凍有助於減少解凍損失，但是會造成肉類的質地和顏色的變化，例如硬度、彈性。由於蛋白質變性會隨著壓力的增加而劇烈，所以加壓條件是依據肉類的品種、肌肉的類型去選擇適合的壓力。綜合上述結果，高靜水壓輔助解凍具有應用於肉類解凍的潛力。

參考資料

- Cartagena, L., Puértolas, E., &Marañón, I. M.** (2020). Application of High Pressure Processing After Freezing (Before Frozen Storage) or Before Thawing in Frozen Albacore Tuna (*Thunnus alalunga*). *Food and Bioprocess Technology*, *13*,1791–1800.
- Cheftel, J. C., Le´vy, J., &Dumay, E.** (2006). Pressure-Assisted Freezing And Thawing: Principles And Potential Applications.*Food Reviews International*,*16* ,453-483.
- Cui, Y., Xuan, X., Ling, J., Liao, X., Zhang, H., Shang, H., &Lin, X.** (2019). Effects of high hydrostatic pressure-assisted thawing on the physicochemical characteristics of silver pomfret (*Pampus argenteus*).*Food Science & Nutrition*, *10*,1002.
- Jia, F., Jing, Y., Dai, R., Li X., &Xu, B.** (2020). High-pressure thawing of pork: Water holding capacity, protein denaturation and ultrastructure.*Food Bioscience*,*38*,100688.
- Kim, H. Y., Kim S. H., Choi, M. J., Min, S. G., &Kwak, H. S.** (2008). The Effect of High Pressure–Low Temperature Treatment on Physicochemical Properties in Milk.*Journal of Dairy Science*,*91* ,4176-1482.
- Mozhaev, V. V.,Heremans, K., Frank, J., Masson, P., &Balny, C.** (1996). High Pressure Effects on Protein Structure and Function.*PROTEINS: Structure, Function, and Genetics*,*24* ,81-91.
- Puppo, C., Chapleau, N., Speroni, F., Lamballerie-Anton, M., Michel, F., Anon, C., & Anton M.** (2004). Physicochemical Modifications of High-Pressure-Treated Soybean Protein Isolates.*Journal of Agricultural and Food Chemistry*,*52* ,1564-1571.

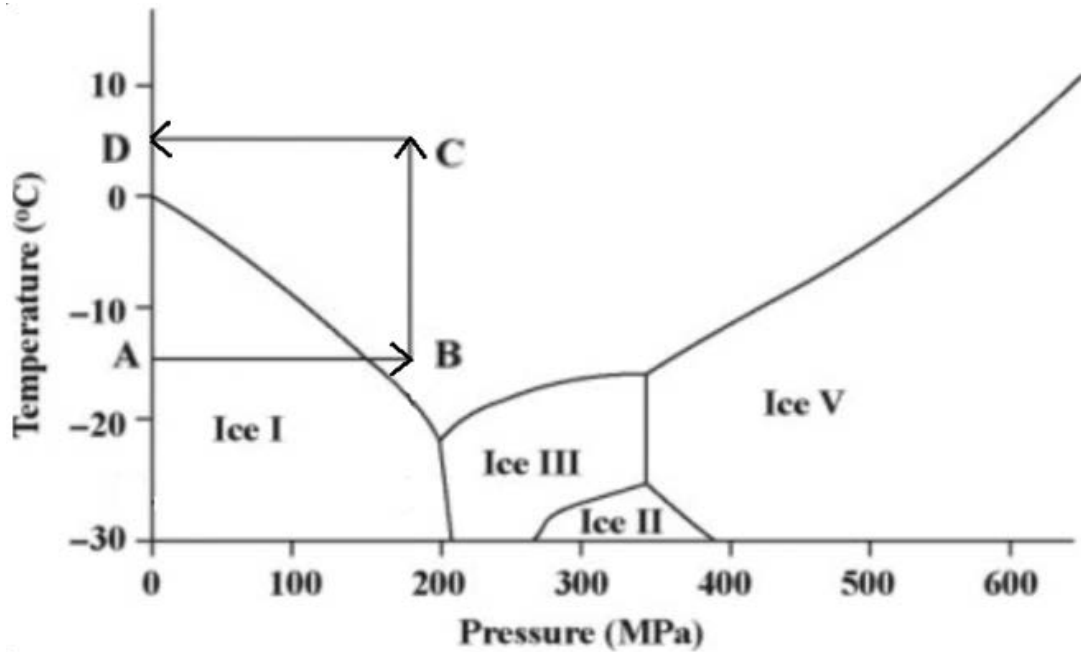


Fig. 1
Schematic paths on the phase diagram of water and ice in high-pressure domain (Kim *et al.*, 2008)

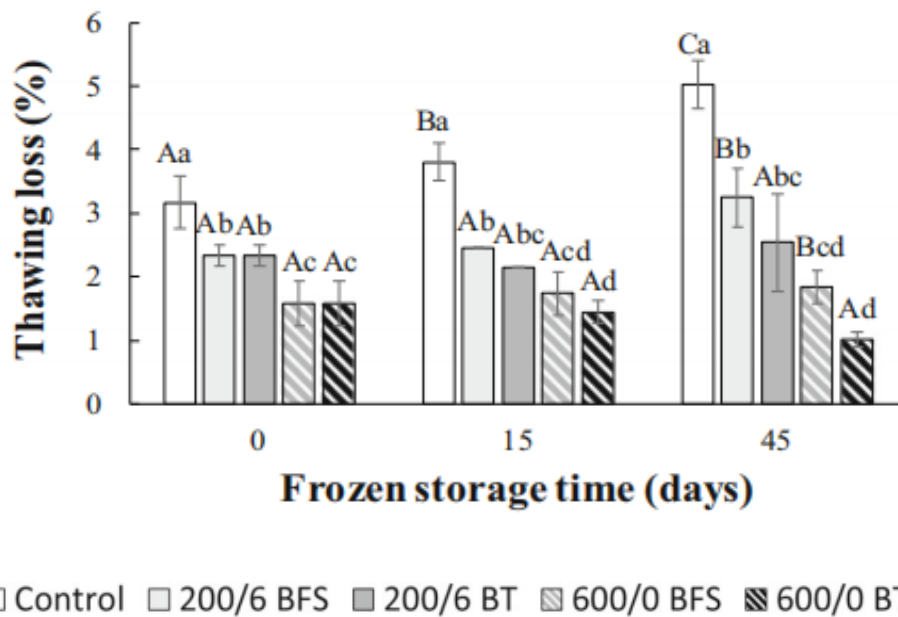


Fig. 2
Thawing loss of HPP-treated frozen albacore at 200 MPa for 6 min(200/6) and 600 MPa for 0 min (600/0) before frozen storage (BFS) and before thawing (BT). For each frozen storage time, different lowercase letters indicate significant differences ($p \leq 0.05$) as a result of the HPP pretreatment. For each HPP pretreatment, different capital letters indicate significant differences ($p \leq 0.05$) as a result of frozen storage time (Cartagena *et al.*, 2020)

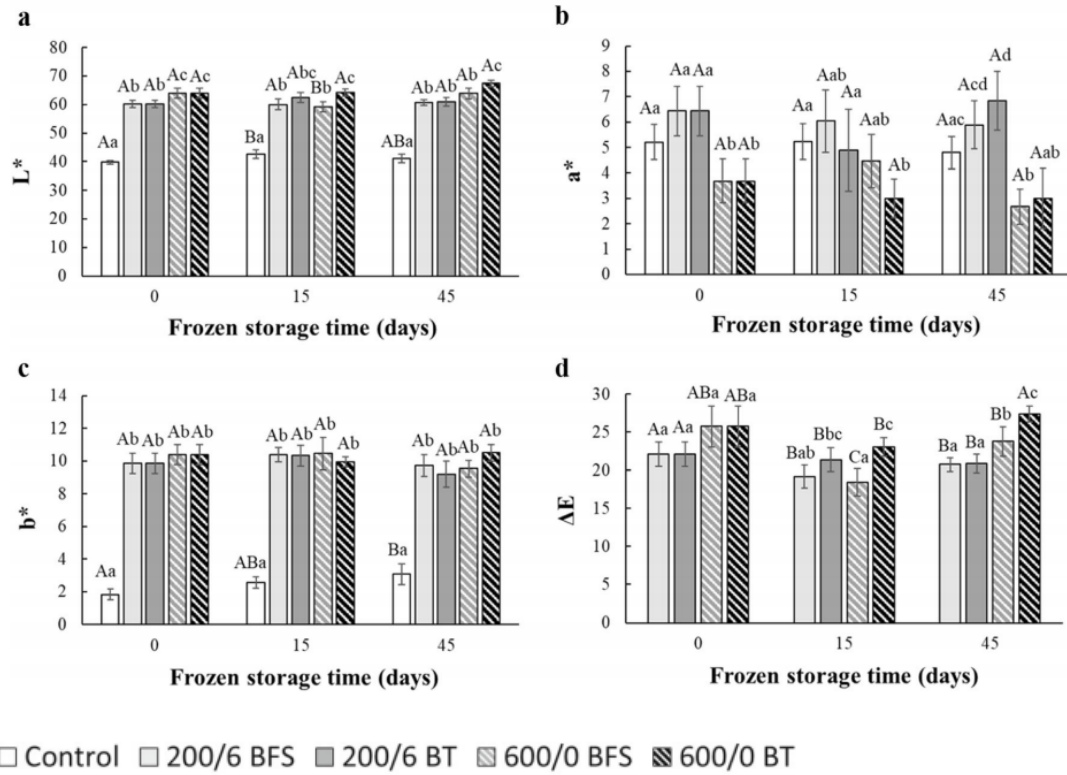


Fig. 3

L^* (a), a^* (b) and b^* (c) values, and total color difference (ΔE) (d) of HPP-treated frozen albacore at 200 MPa for 6 min (200/6) and 600 MPa for 0 min (600/0) before frozen storage (BFS) and before thawing (BT). For each frozen storage time, different lowercase letters indicate significant differences ($p \leq 0.05$) as a result of the HPP pretreatment. For each HPP pretreatment, different capital letters indicate significant differences ($p \leq 0.05$) as a result of frozen storage time (Cartagena *et al.*, 2020)

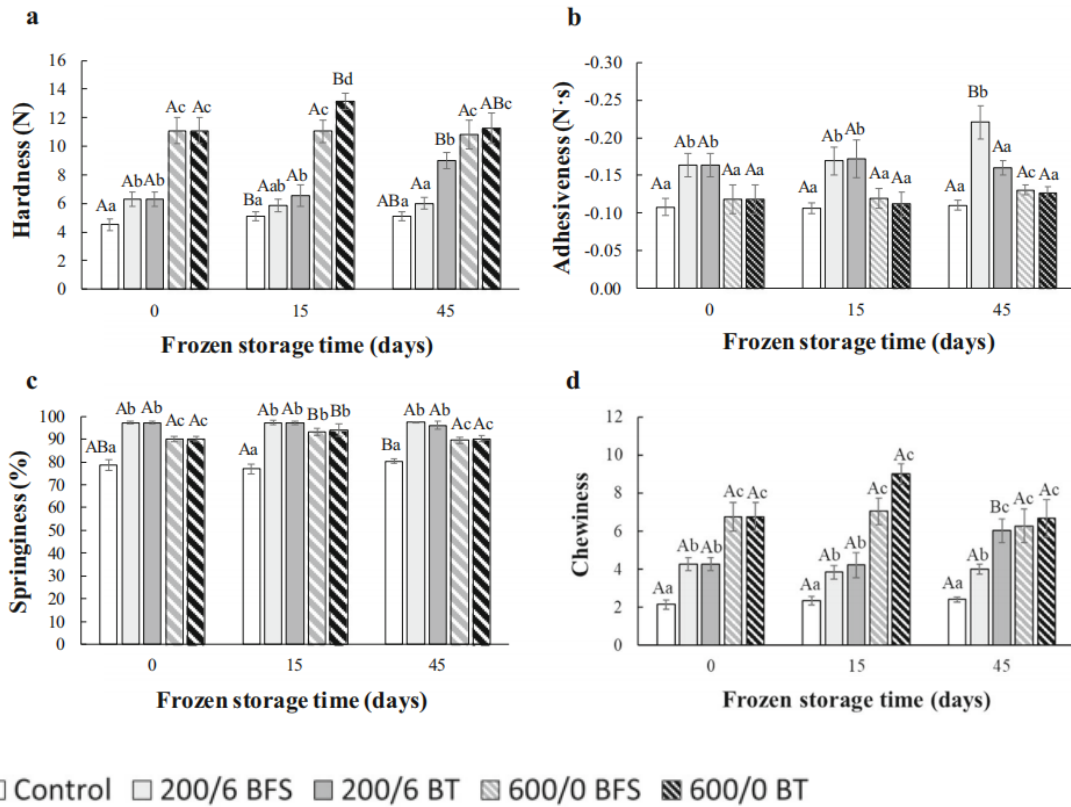
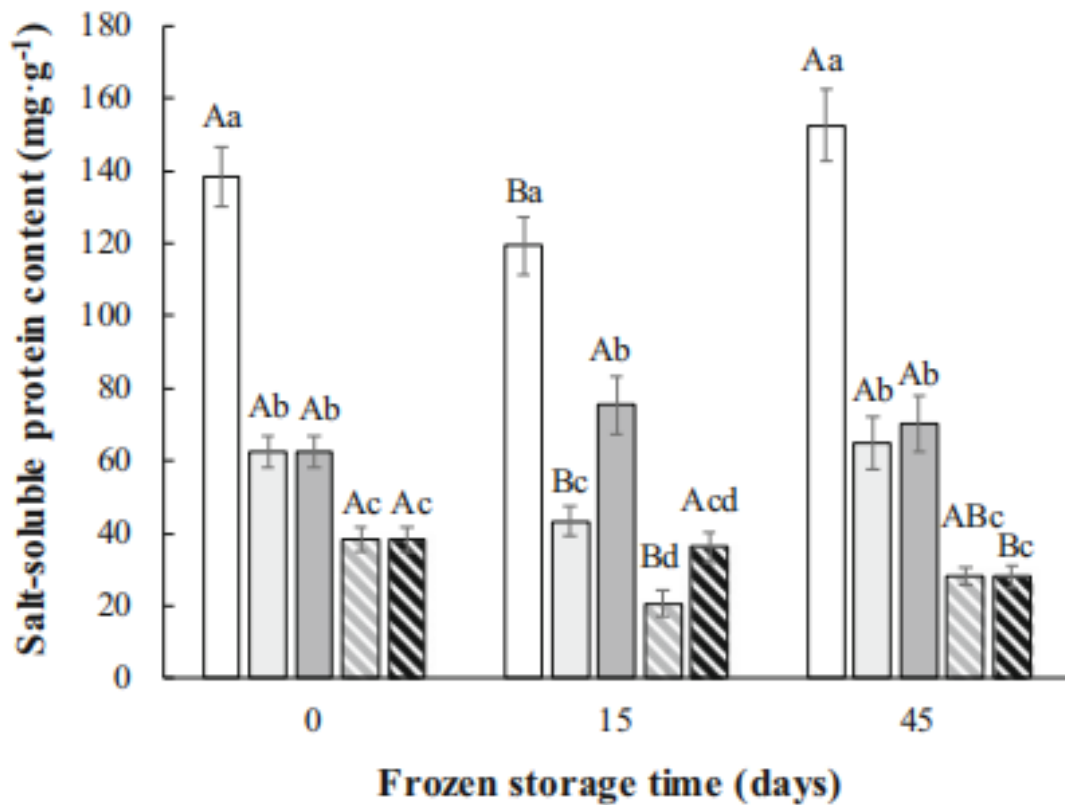


Fig. 4

Hardness (a), adhesiveness (b), springiness (c), and chewiness (d) of HPP-treated frozen albacore at 200 MPa for 6 min (200/6) and 600 MPa for 0 min (600/0) before frozen storage (BFS) and before thawing (BT). For each frozen storage time, different lowercase letters indicate significant differences ($p \leq 0.05$) as a result of the HPP pretreatment. For each HPP pretreatment, different capital letters indicate significant differences ($p \leq 0.05$) as a result of frozen storage time (Cartagena *et al.*, 2020)



□ Control □ 200/6 BFS ■ 200/6 BT ▨ 600/0 BFS ▩ 600/0 BT

Fig. 5

Salt-soluble protein content of HPP-treated frozen albacore at 200 MPa for 6 min (200/6) and 600 MPa for 0 min (600/0) before frozen storage (BFS) and before thawing (BT). For each frozen storage time, different lowercase letters indicate significant differences ($p \leq 0.05$) as a result of the HPP pretreatment. For each HPP pretreatment, different capital letters indicate significant differences ($p \leq 0.05$) as a result of frozen storage time (Cartagena *et al.*, 2020)

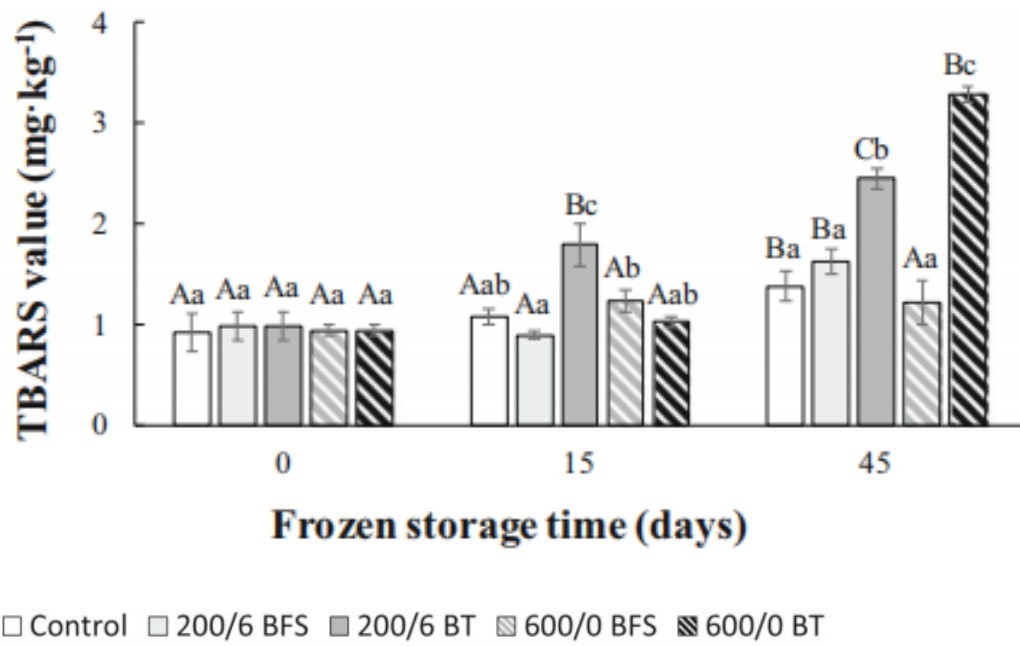


Fig. 6

TBARS values of HPP-treated frozen albacore at 200 MPa for 6 min (200/6) and 600 MPa for 0 min (600/0) before frozen storage (BFS) and before thawing (BT). For each frozen storage time, different lowercase letters indicate significant differences ($p \leq 0.05$) as a result of the HPP pretreatment. For each HPP pretreatment, different capital letters indicate significant differences ($p \leq 0.05$) as a result of frozen storage time (Cartagena *et al.*, 2020)

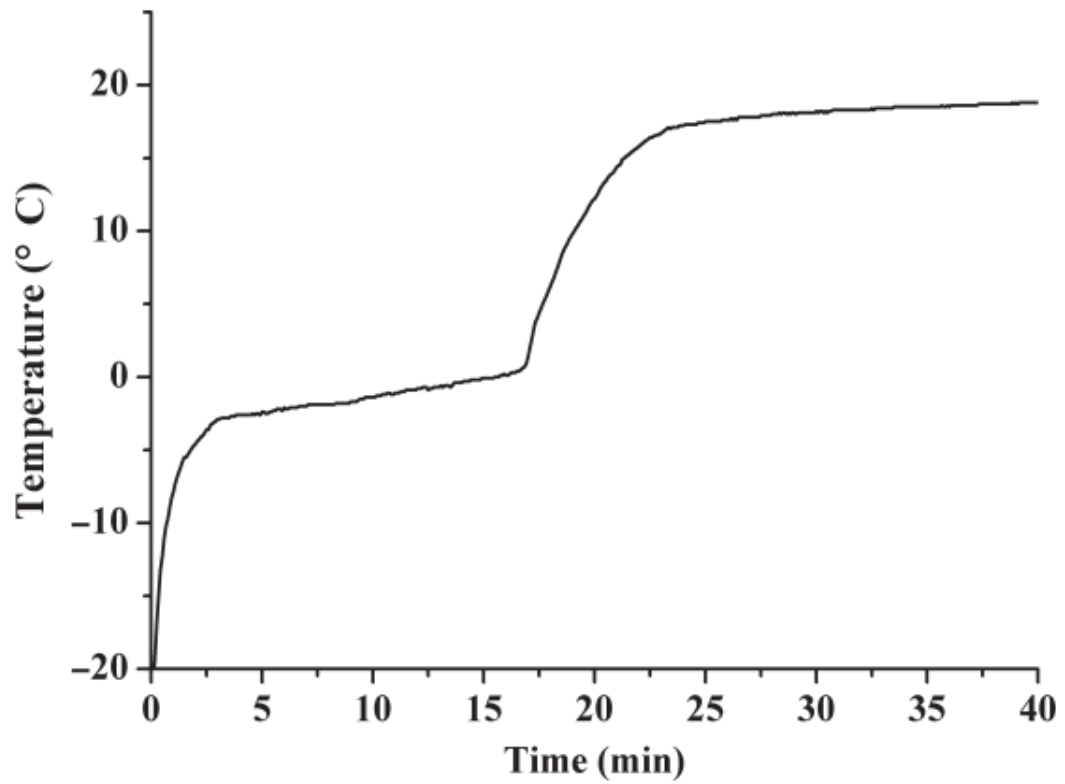


Fig.7
The representative time-temperature curve for WIT process of frozen silver pomfret (Cui *et al.*, 2019)

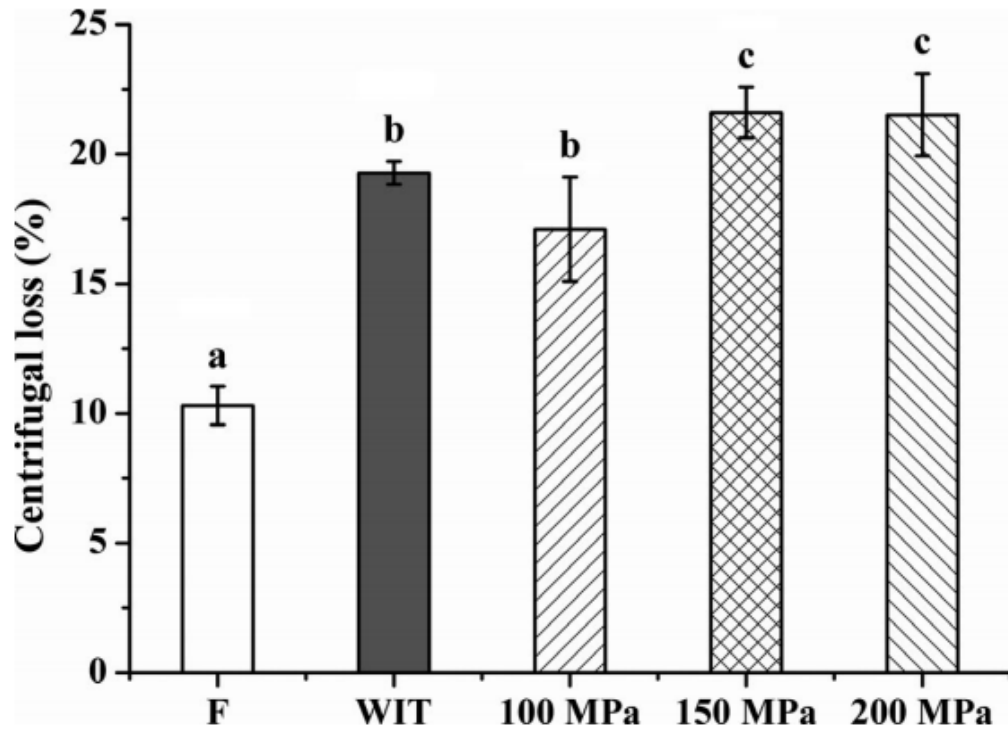


Fig. 8

Effects of HPAT on the water holding capacity of silver pomfret. Values followed by different superscripts indicate significant differences ($p < 0.05$) (Cui *et al.*, 2019)

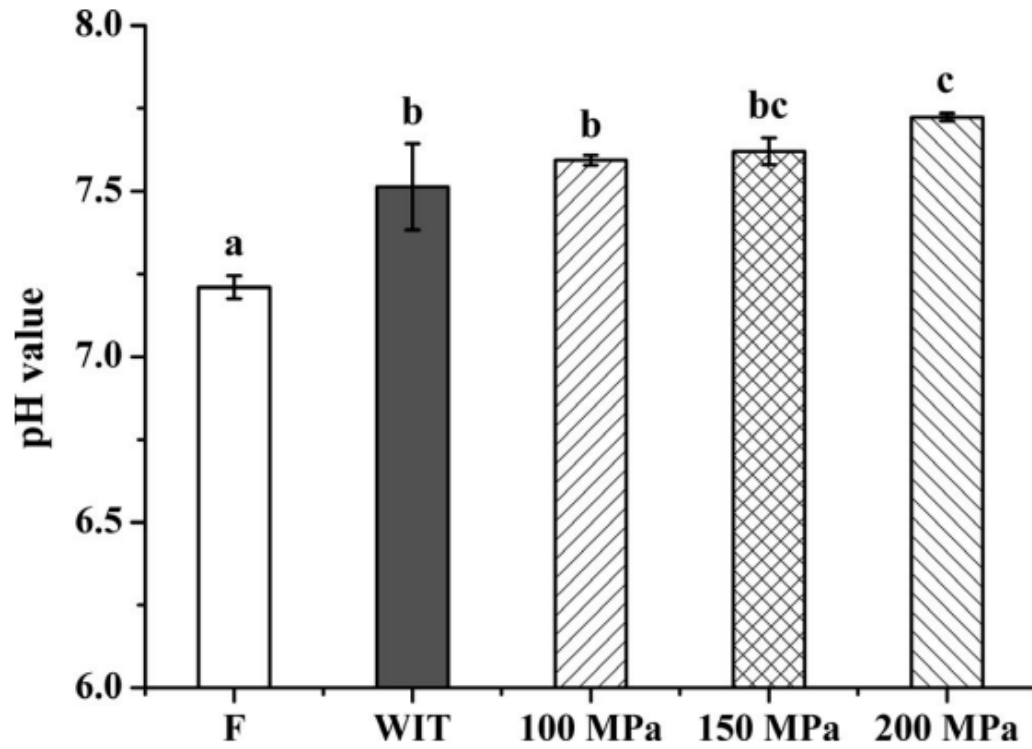


Fig. 9

Effects of HPAT on the pH values of silver pomfret. Values followed by different superscripts indicate significant differences ($p < 0.05$) (Cui *et al.*, 2019)

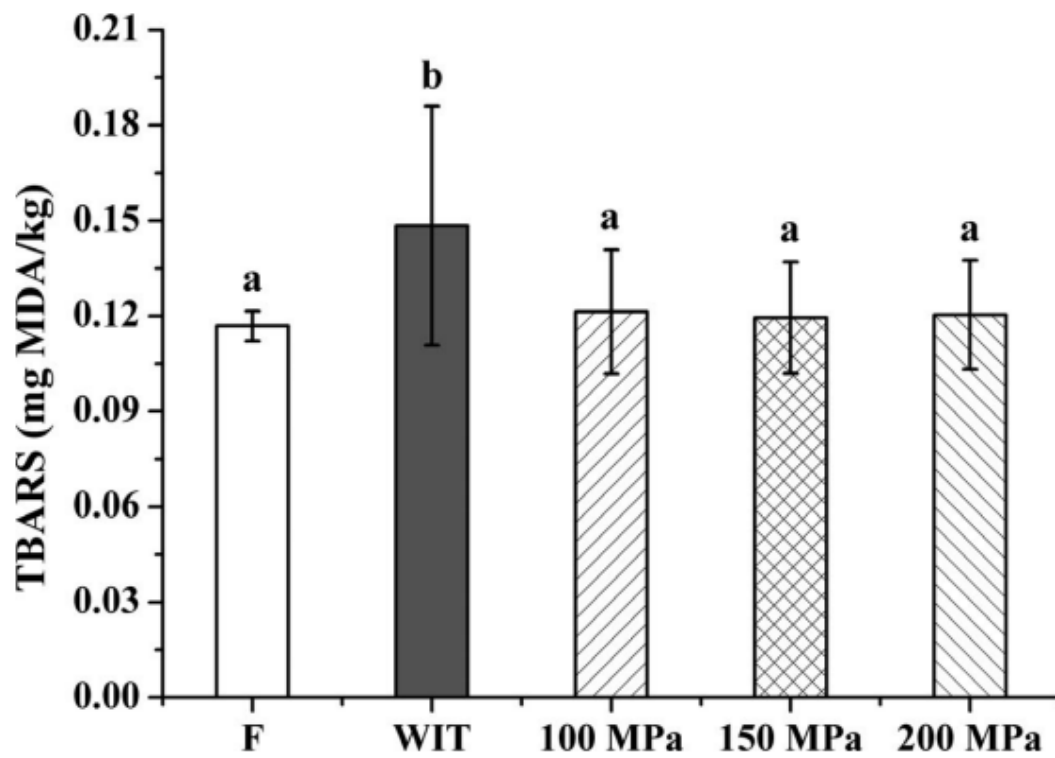


Fig. 10

Effects of HPAT on the lipid oxidation of silver pomfret. Values followed by different superscripts indicate significant differences ($p < 0.05$) (Cui *et al.*, 2019)

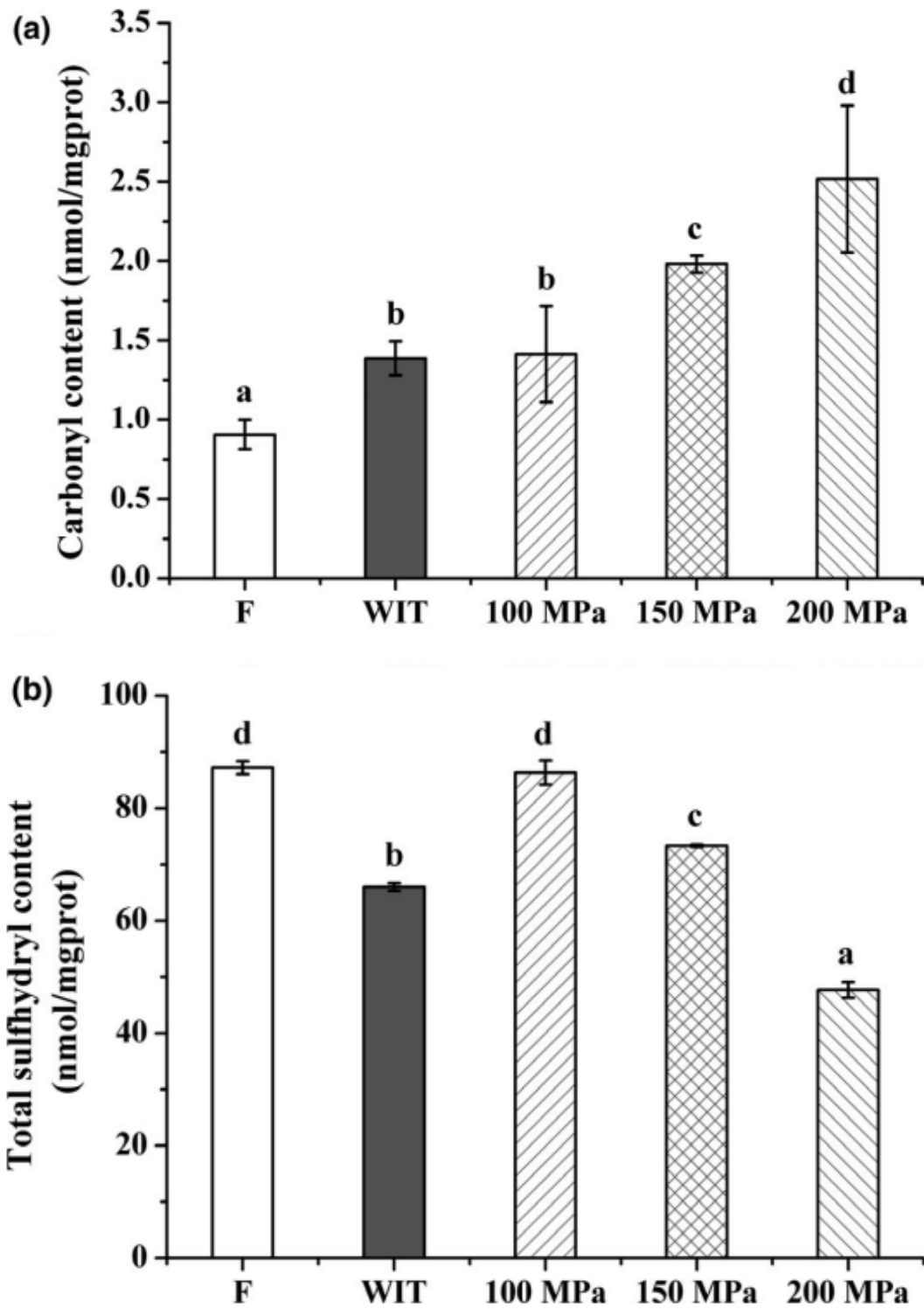


Fig. 11

Effects of HPAT on the (A) carbonyl and (B) total sulfhydryl contents of myofibrillar protein in silver pomfret. Values followed by different superscripts in each testing parameter indicate significant ($p < 0.05$) (Cui *et al.*, 2019)

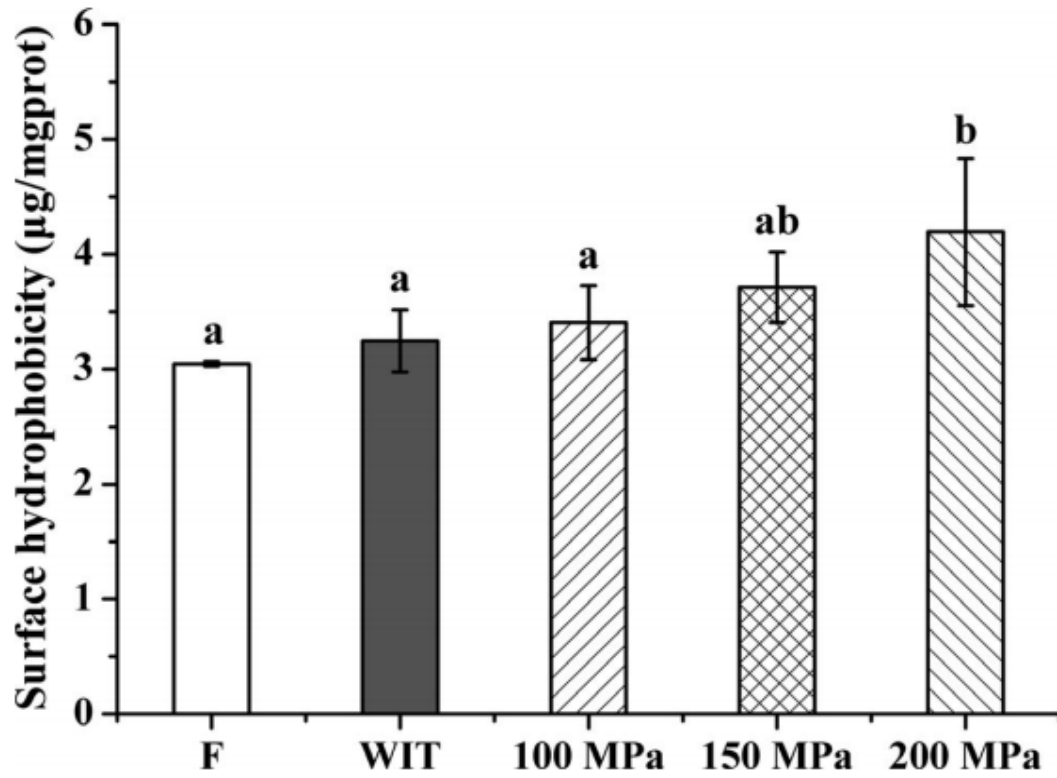


Fig. 12

Effects of HPAT on the surface hydrophobicity of myofibrillar protein in silver pomfret. Values followed by different superscripts indicate significant differences ($p < 0.05$) (Cui *et al.*, 2019)

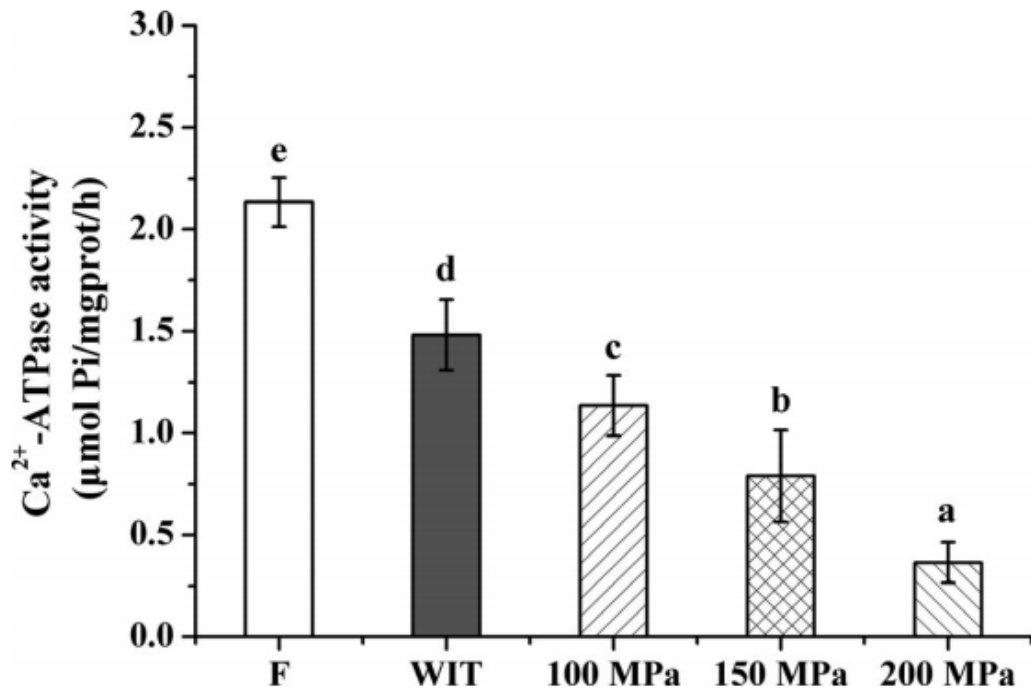


Fig. 13

Effects of HPAT on the Ca²⁺-ATPase activity of silver pomfret. Values followed by different superscripts indicate significant differences ($p < 0.05$) (Cui *et al.*, 2019)

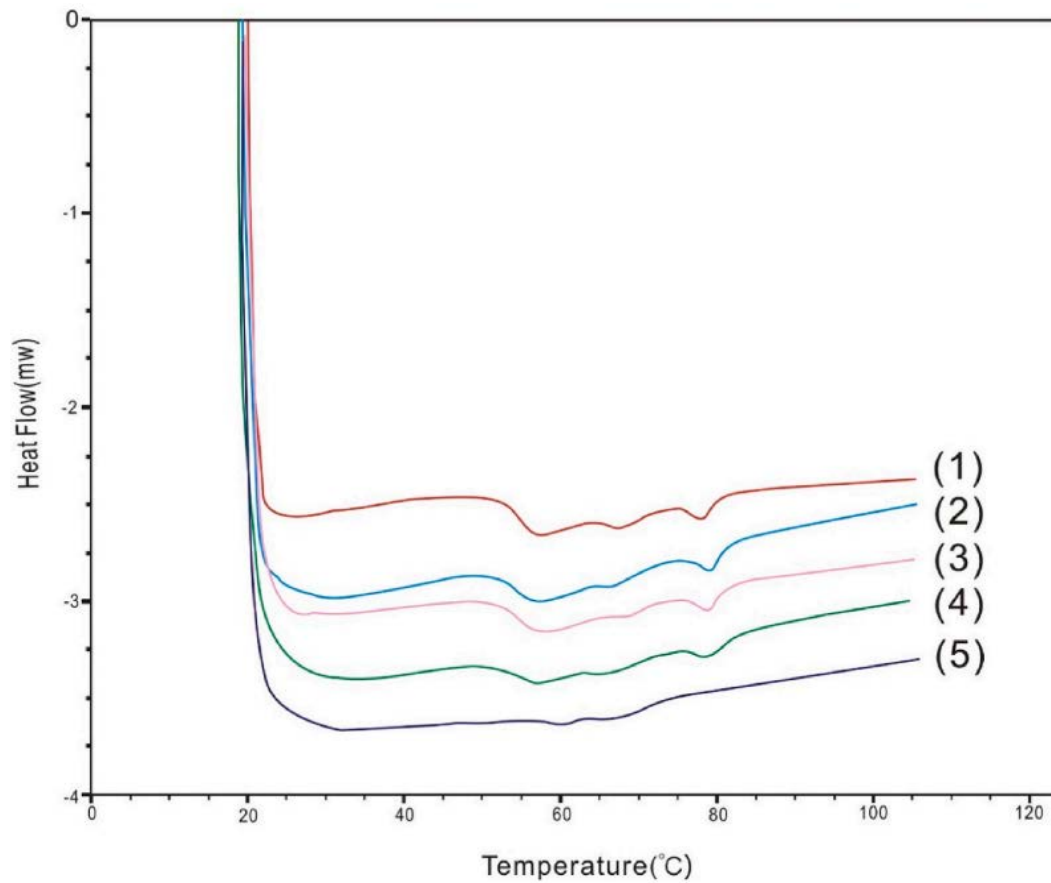


Fig. 14

Differential scanning calorimetry thermogram of PLD at different thawing methods. (1) air thawing, (2) atmospheric water thawing, (3) 70 MPa thawing, (4) 140 MPa thawing, (5) 210 MPa thawing. (Jia *et al.*, 2020)

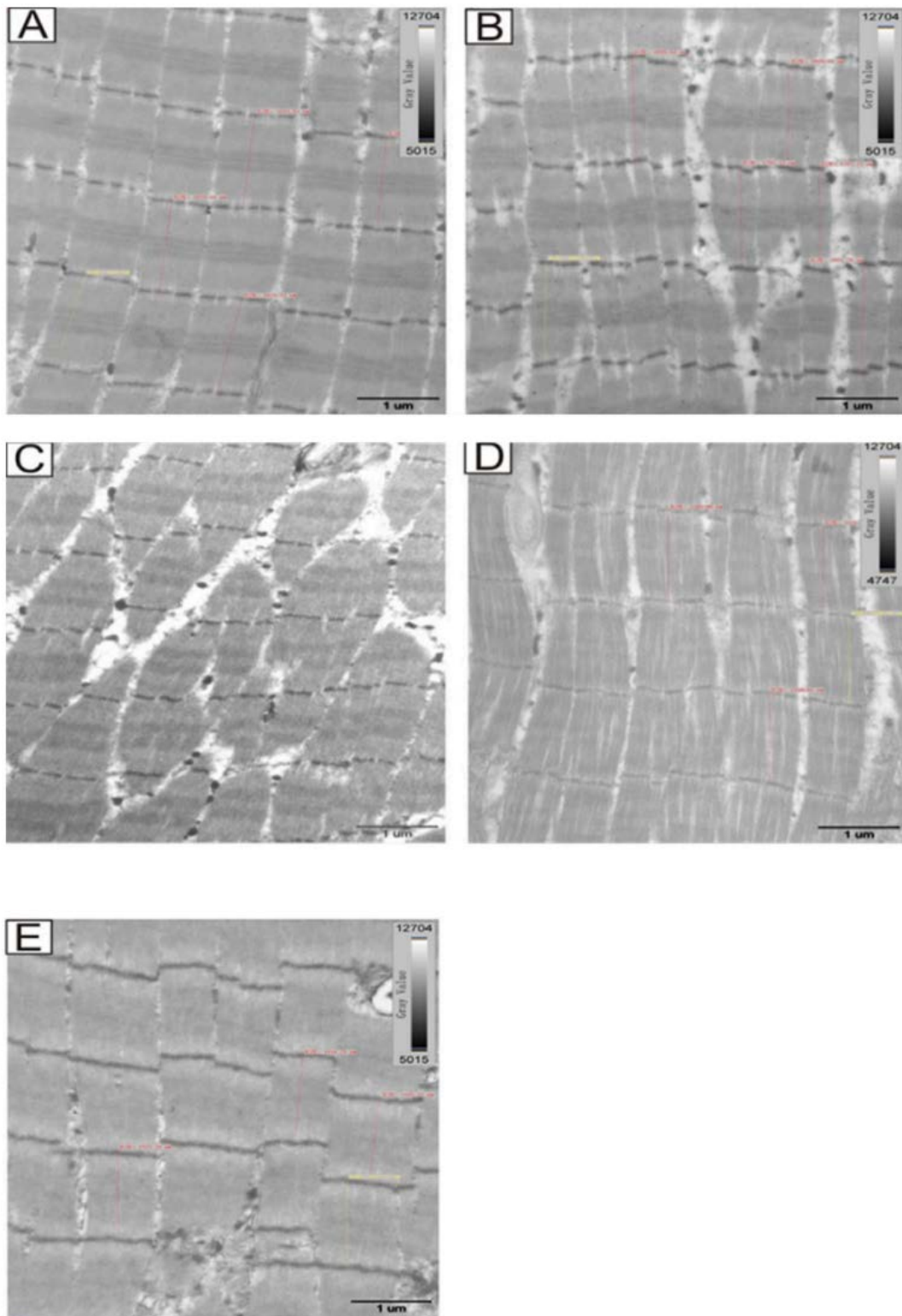


Fig. 15

Representative transmission electron micrographs showing changes in pork muscle ultrastructure at the different thawing methods. (A) Air thawing, (B) atmospheric water thawing, (C) 70 MPa thawing, (D) 140 MPa thawing, (E) 210 MPa thawing. (magnification: 25000×) (Jia *et al.*, 2020)

Table 1

Effects of high hydrostatic pressure-assisted thawing (HPAT) on the thawing loss, cooking loss, and total loss of silver pomfret (Cui *et al.*, 2019)

Thawing treatment	Thawing loss (%)	Cooking loss (%)	Total loss (%)
F		26.89 ± 0.16 ^a	26.89 ± 0.16 ^a
WIT	0.63 ± 0.11 ^a	32.77 ± 1.49 ^c	33.40 ± 1.38 ^c
100 MPa	0.76 ± 0.08 ^b	27.05 ± 1.82 ^a	27.82 ± 1.57 ^a
150 MPa	0.93 ± 0.07 ^c	28.61 ± 1.19 ^{ab}	29.54 ± 1.04 ^b
200 MPa	1.10 ± 0.09 ^d	29.81 ± 1.53 ^b	30.91 ± 1.35 ^b

Note. Values followed by different superscripts in the same column indicate significant differences ($p < 0.05$).

Table 2

Effects of HPAT on the color parameters of silver pomfret muscle (Cui *et al.*, 2019)

Thawing treatment	L*	a*	b*	WI	ΔE
F	52.94 ± 1.19 ^a	-2.58 ± 0.21 ^a	5.19 ± 0.96 ^a	52.57 ± 1.21 ^a	
WIT	55.71 ± 2.71 ^b	-1.60 ± 0.27 ^b	9.84 ± 0.99 ^b	54.58 ± 2.72 ^b	3.18 ± 0.48 ^b
100 MPa	54.63 ± 1.43 ^b	-2.37 ± 0.73 ^a	9.92 ± 1.16 ^b	53.50 ± 1.49 ^{ab}	2.45 ± 0.56 ^a
150 MPa	65.86 ± 1.16 ^c	-2.21 ± 0.27 ^a	10.58 ± 1.47 ^{bc}	64.14 ± 1.02 ^c	11.61 ± 0.64 ^c
200 MPa	67.00 ± 1.19 ^d	-1.35 ± 0.26 ^b	11.21 ± 2.25 ^c	65.06 ± 1.29 ^c	12.89 ± 0.87 ^d

Note. Values followed by different superscripts in the same column indicate significant differences ($p < 0.05$).

Table 3

Effects of HPAT on the TPA parameters of silver pomfret (Cui *et al.*, 2019)

Thawing treatment	Hardness (g)	Springiness	Chewiness (g)	Gumminess	Resilience (%)
F	1,061.9 ± 124.58 ^d	0.76 ± 0.07 ^a	633.33 ± 99.41 ^c	716.93 ± 105.33 ^c	0.42 ± 0.06 ^a
WIT	506.06 ± 98.32 ^a	0.83 ± 0.03 ^b	324.33 ± 67.75 ^a	403.75 ± 91.99 ^a	0.41 ± 0.07 ^a
100 MPa	568.94 ± 106.87 ^{ab}	0.83 ± 0.02 ^b	329.72 ± 75.67 ^a	400.82 ± 91.13 ^a	0.43 ± 0.03 ^a
150 MPa	673.19 ± 152.66 ^{bc}	0.85 ± 0.03 ^b	365.05 ± 72.10 ^a	421.41 ± 85.07 ^a	0.47 ± 0.04 ^b
200 MPa	740.66 ± 151.59 ^c	0.89 ± 0.03 ^c	450.47 ± 97.50 ^b	509.64 ± 103.94 ^b	0.47 ± 0.03 ^b

Note. Values followed by different superscripts in the same column indicate significant differences ($p < 0.05$).

Table 4

Effects of thawing methods on thawing loss, pressing loss and cooking loss of porcine longissimus dorsi (PLD). (Jia *et al.*, 2020)

Temperature (°C)	Pressure (MPa)	Thawing loss (%)	Pressing loss (%)	Cooking loss (%)
4	0.1	3.8 ± 0.2 ^b	33 ± 2 ^b	24 ± 1 ^b
20	0.1	4.9 ± 0.3 ^a	33 ± 1 ^b	24 ± 1 ^b
20	70	4.2 ± 0.1 ^b	34 ± 1 ^{a,b}	25.4 ± 0.3 ^b
20	140	3.8 ± 0.4 ^b	35.4 ± 0.1 ^a	26.6 ± 0.1 ^{a,b}
20	210	4.8 ± 0.2 ^a	32.9 ± 0.2 ^b	28 ± 1 ^a

Means within the same row with different superscript letters (a-b) are significantly different ($P < 0.05$).

Table 5

Effects of thawing methods on temperature and enthalpies of protein denaturation.
(Jia *et al.*, 2020)

Temperature (°C)	4	20	20	20	20
Pressure (MPa)	0.1	0.1	70	140	210
T_{max1}	57.2 ± 0.2 ^{b,c}	56.7 ± 0.5 ^c	58±1 ^b	57.1 ± 0.4 ^{b,c}	60.2 ± 0.1 ^a
ΔH_1	0.9 ± 0.1 ^a	0.48 ± 0.02 ^b	0.54 ± 0.04 ^b	0.29 ± 0.02 ^c	0.10 ± 0.02 ^d
T_{max2}	67.7 ± 0.1 ^a	66.7 ± 0.3 ^b	67±1 ^{a,b}	66.6 ± 0.3 ^b	67.7 ± 0.4 ^a
ΔH_2	0.19 ± 0.02 ^a	0.09 ± 0.01 ^c	0.03 ± 0.01 ^d	0.05 ± 0.01 ^d	0.13 ± 0.02 ^b
T_{max3}	77.8 ± 0.1 ^b	78.1 ± 0.2 ^{a,b}	78.5 ± 0.3 ^a	78.5 ± 0.4 ^a	–
ΔH_3	0.19 ±	0.20 ±	0.18 ±	0.18 ±	–
ΔH	0.01 ^{a,b} 1.3 ± 0.1 ^a	0.01 ^a 0.77 ± 0.03 ^b	0.01 ^b 0.76 ± 0.04 ^b	0.02 ^b 0.52 ± 0.02 ^c	0.22 ± 0.01 ^d

Values in the same column with different superscript letters (a–d) are significantly different ($P < 0.05$).

Table 6

Effects of thawing methods on sarcomere length.

(Jia *et al.*, 2020)

Temperature (°C)	Pressure (MPa)	Sarcomere length (μm)
4	0.1	1.64 ± 0.02 ^b
20	0.1	1.81 ± 0.01 ^a
20	70	1.57 ± 0.03 ^c
20	140	1.57 ± 0.01 ^c
20	210	1.51 ± 0.01 ^d

Values in the same column with different superscript letters (a–d) are significantly different ($P < 0.05$).

The sarcomere length was measured using a transmission electron microscope.