

# Laccase (漆酶) 技術概述：用於染料脫色、環境修復、堆肥腐殖化與食品加工的多銅氧化酵素

Enzymes.bio 研究團隊 · 紐西蘭威靈頓 · June 21, 2026

Laccase (漆酶) 是一類以氧氣作為終端電子受體的多銅氧化酵素，可氧化酚類、芳香胺與部分非酚類芳香化合物，並將氧還原為水。

在工業與環境應用中，Laccase 常被評估用於紡織染料脫色、廢水中酚類污染物轉化、木質素改質、堆肥腐殖化，以及食品與飲料中的多酚管理。

它的核心價值在於反應條件相對溫和、可降低強氧化化學品使用量，但實際效果仍高度依賴底物、pH、溫度、媒介體與製程整合方式。

## 什麼是 Laccase：一種以氧驅動的多銅氧化酵素

Laccase，中文常稱為「漆酶」，屬於藍色多銅氧化酵素 (blue multicopper oxidases) 家族。此類酵素廣泛存在於真菌、細菌、植物與部分昆蟲中，其中真菌來源 Laccase 因與木質素降解、酚類氧化及胞外分泌相關，長期被視為工業生物催化的重要候選酵素之一<sup>[1]</sup>。

從反應本質來看，Laccase 進行的是一電子氧化反應：底物先失去一個電子，形成自由基、自由基陽離子或後續氧化產物；酵素內部的銅中心則負責電子轉移，最後將分子氧還原為水。這使 Laccase 在概念上不同於需要過氧化氫作為氧化劑的過氧化酵素，因為它可直接利用空氣中的氧作為反應驅動力<sup>[2]</sup>。

Laccase 的底物範圍相當寬，常見反應對象包含酚類、多酚、芳香胺、部分染料分子、木質素衍生物，以及經媒介體輔助後可被間接氧化的非酚類化合物。這種廣泛底物譜解釋了為何 Laccase 同時出現在環境修復、紡織廢水處理、紙漿漂白、食品加工、感測器與生物材料改質等研究主題中<sup>[3]</sup>。

## 主要應用場景總覽

Laccase 的應用可大致分為兩類：一類是「去除或轉化不想要的有機分子」，例如染料、酚類污染物、某些藥物殘留或木質素衍生物；另一類是「利用氧化聚合或交聯改變材料性質」，例如食品多酚管理、木質纖維改質與有機廢棄物腐殖化<sup>[4]</sup>。

應用領域	主要目標	Laccase 的作用方式	實務價值	目前證據成熟度
紡織與染整廢水	染料脫色、降低色度負荷	氧化偶氮、蒽醌或其他芳香染料結構，促進斷裂、聚合或後續降解	可作為化學氧化或生物處理的輔助步驟	多篇綜述與應用研究支持 <sup>[5]</sup>
環境污染物處理	酚類、藥物、內分泌干擾物等轉化	直接氧化或透過媒介體產生可擴散氧化物種	有助於降低部分污染物濃度或毒性，但需確認副產物	研究活躍，固定化技術是重點 <sup>[6]</sup>
堆肥與有機廢棄物	促進腐殖化、改質木質素	氧化酚類與木質素片段，促進聚合與腐殖質形成	可改善畜禽糞肥或農業廢棄物穩定化	有針對堆肥機制的研究支持 <sup>[7]</sup>
食品與飲料加工	多酚調控、色澤與穩定性管理	氧化多酚，促進聚合、沉澱或降低反應性	可用於果汁、葡萄酒、啤酒等製程評估	食品生物技術文獻已有整理 <sup>[3]</sup>
木質素與生物材料	木質素改質、纖維表面活化	氧化酚羥基產生自由基，誘導交聯或解聚	有助於生質材料功能化	研究成熟但製程依用途而異 <sup>[1]</sup>
酵素固定化反應器	提高重複使用與穩定性	將 Laccase 固定於碳材、生物基材料或多孔載體	適合連續式或循環式水處理概念	多篇固定化綜述支持 <sup>[8]</sup>

## 催化機制：T1、T2、T3 銅中心如何把氧變成水

Laccase 的活性核心通常包含多個銅離子位點，常以 T1、T2 與 T3 銅中心描述。T1 銅位點多負責從底物接收電子；電子經由蛋白質內部路徑傳遞至由 T2/T3 銅組成的三核銅中心；三核銅中心再將氧分子逐步還原為水。整體上，四個一電子氧化事件可對應一個氧分子的四電子還原<sup>[2]</sup>。

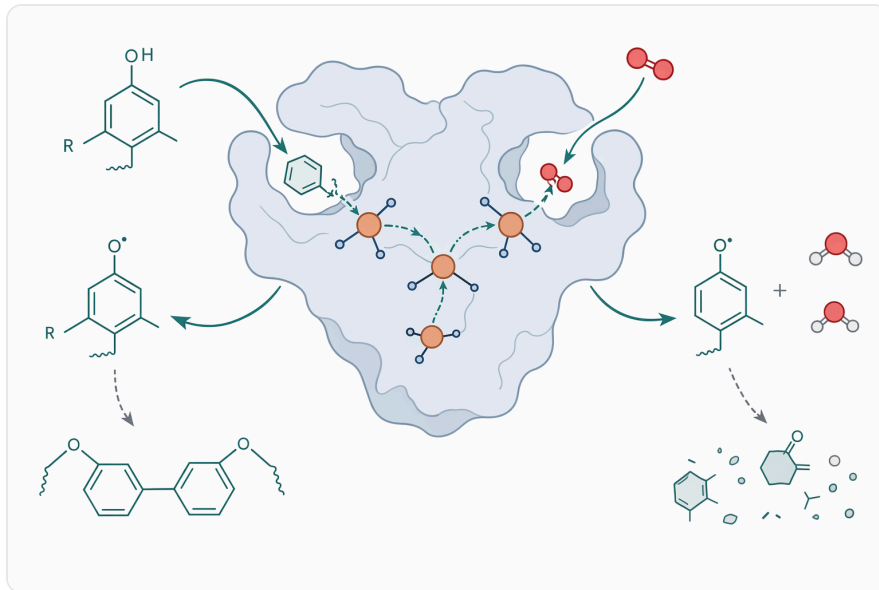


Figure 1. 漆酶催化酚類受質的單電子氧化，同時將氧氣還原為水。

對於酚類底物，Laccase 常先氧化酚羥基形成酚氧自由基。這些自由基可能進一步發生偶聯、聚合、斷裂或重排，因此同一個「氧化」動作在不同基質中可能導致完全不同的結果：在染料分子中可能造成發色團破壞；在食品多酚中可能造成聚合與沉澱；在木質素中則可能導致改質、交聯或部分解聚 [3]。

此機制也說明了 Laccase 的優勢與限制。優勢是反應條件相對溫和，且終端氧化劑是氧氣；限制則是底物必須能被酵素的氧化還原電位有效驅動，或必須透過其他小分子媒介體協助。若目標污染物的結構太穩定、體積太大或不易接近活性位點，單獨使用 Laccase 的效果可能有限 [9]。

## Laccase–mediator system：為何媒介體能擴大底物範圍

在許多應用中，Laccase 並不只靠「酵素直接碰到底物」來反應。所謂 Laccase–mediator system (LMS) 是指 Laccase 先氧化一個低分子媒介體，形成可擴散的自由基或氧化態中間體，再由該中間體氧化原本較難被 Laccase 直接處理的底物。這種間接氧化機制可擴大反應範圍，尤其常見於木質素改質、難降解染料與部分環境污染物處理研究 [6]。

媒介體的價值在於它能克服空間阻礙與氧化還原電位限制。例如木質素是高度複雜且不均質的芳香高分子，許多反應位點不容易直接進入酵素活性中心；媒介體被氧化後可在基質中擴散，進一步攻擊非酚類或較深層的結構。這也是 Laccase 在生質材料、紙漿與堆肥腐殖化研究中受到重視的原因之一 [7]。

不過，媒介體不是單純的「效果增強劑」。在實務上，媒介體可能帶來成本、殘留、副產物與合規性考量；不同媒介體也可能導致不同氧化路徑。因此，在食品、飼料或環境排放相關應用中，媒介體的選擇通常比單純提高反應速率更敏感，必須與最終用途、法規邊界及下游處理方式一起評估 [4]。

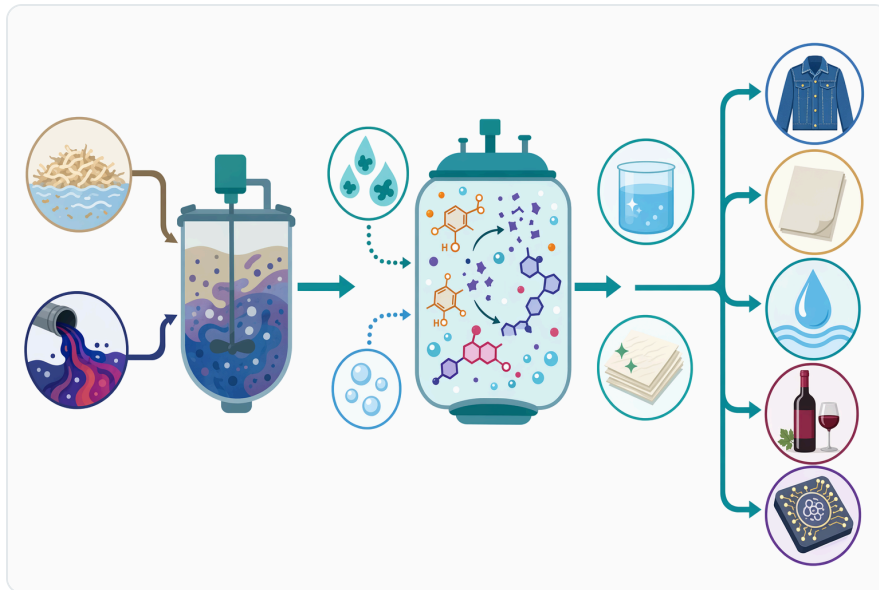


Figure 2. 工業用漆酶流程利用氧氣驅動的氧化反應，改質木質素、染料、酚類及其他芳香族化合物。

## 紡織染料與染整廢水：Laccase 用於脫色與污染負荷降低

紡織染料通常具有穩定的芳香環、偶氮鍵、蒽醌結構或其他發色團，因此傳統處理常需要化學氧化、吸附、混凝或生物處理的組合。Laccase 的角色不是取代所有廢水處理單元，而是透過氧化作用改變染料分子結構，使色度下降、可生物降解性改變，或讓後續處理更容易進行<sup>[5]</sup>。

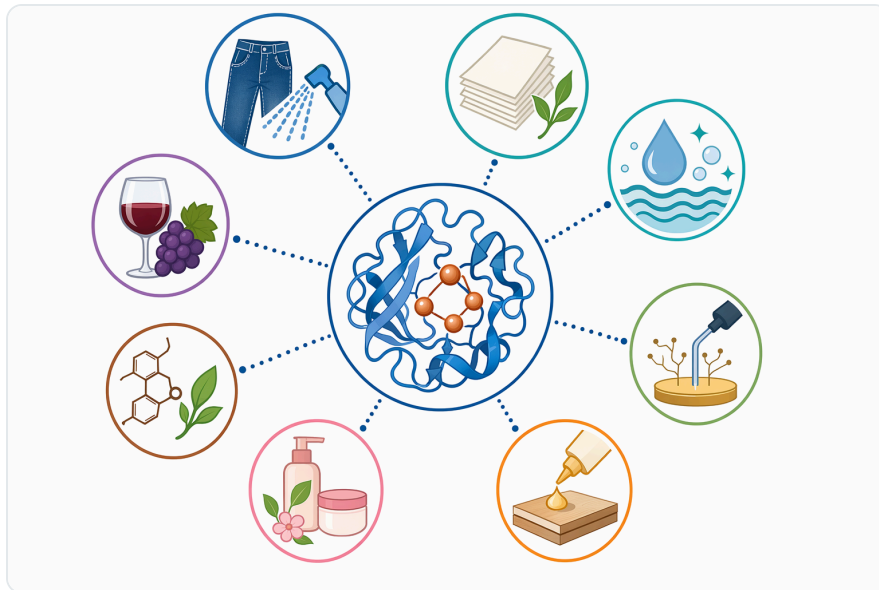
在偶氮染料處理方面，Laccase 可透過直接氧化或媒介體輔助破壞與顏色相關的共軛系統。近年綜述指出，Laccase 對多種類型偶氮染料具有脫色潛力，但效率會受染料結構、取代基、pH、溫度、鹽度與助劑干擾影響。因此，研究結果通常不能直接等同於所有染整廠廢水條件下的固定成效<sup>[5]</sup>。

也有研究探討將 Laccase 與電化學或物化程序結合，例如電混凝與 Laccase 介導處理的混合流程。這類整合概念的重點在於先透過物化程序降低懸浮物、色度或部分負荷，再利用酵素對殘餘有機色素進行選擇性氧化，藉此改善單一技術的限制<sup>[10]</sup>。

## 環境修復與廢水處理：從游離酵素到固定化 Laccase

在環境應用中，游離 Laccase 的主要挑戰包括操作穩定性、回收困難、對溫度與 pH 變動敏感，以及在真實廢水中可能受鹽類、金屬離子、表面活性劑或有機溶劑影響。為了改善這些限制，固定化 Laccase 成為近年研究重點之一<sup>[6]</sup>。

固定化可透過吸附、包埋、交聯、共價鍵結或與多孔載體結合等方式進行。其目的通常包括提高酵素在非理想條件下的穩定性、讓酵素可重複使用、降低流失，並使其更適合連續式反應器或填充床系統。碳材、奈米材料、生物基載體與複合材料都曾被用於 Laccase 固定化研究<sup>[8]</sup>。



**Figure 3.** 漆酶廣泛應用於紡織、紙漿與造紙、環境處理、食品與飲料加工，以及生物基材料等領域。

碳質載體受到關注，是因其具有高比表面積、吸附能力、導電性與可表面改質等特性。對染料、酚類或藥物污染物而言，載體本身可能先吸附污染物，再由固定化 Laccase 在局部環境中氧化轉化，形成「吸附—催化」的協同處理概念。不過，這類系統仍需注意載體成本、再生性、酵素失活與副產物管理<sup>[8]</sup>。

近年也有文獻強調以生物基材料固定化 Laccase，例如纖維素、殼聚糖、木質素衍生材料或其他可再生載體。這類策略的方向是降低固定化系統的環境足跡，使整體處理流程更符合綠色修復與循環材料概念<sup>[11]</sup>。

## 堆肥、畜禽糞肥與腐殖化：Laccase 如何參與有機質穩定化

在堆肥與有機廢棄物處理中，Laccase 與木質素降解及腐殖質形成密切相關。畜禽糞肥、秸稈、木屑與其他農業廢棄物常含有複雜有機質，其中木質素與酚類物質不易快速分解；Laccase 可催化這些芳香結構的氧化，促進自由基形成與後續聚合反應，進而參與腐殖化過程<sup>[7]</sup>。

腐殖化並非單純「分解越多越好」，而是有機分子經氧化、縮合與重組後形成較穩定、較高分子量的腐殖樣物質。Laccase 在此過程中的意義，是加速某些酚類與木質素片段轉化，使堆肥由容易腐敗的有機物逐步走向較穩定的腐殖結構。這對堆肥成熟度、氣味控制、碳穩定與農業利用價值都有潛在影響<sup>[7]</sup>。

然而，堆肥是高度複雜的微生物生態系統，Laccase 只是其中一環。溫度、水分、通氣、碳氮比、原料粒徑、微生物群落與金屬離子都會影響最終效果。因此，把 Laccase 應用於堆肥時，較合理的定位是作為促進特定氧化與腐殖化路徑的生物催化工具，而不是獨立決定堆肥品質的唯一因素<sup>[7]</sup>。

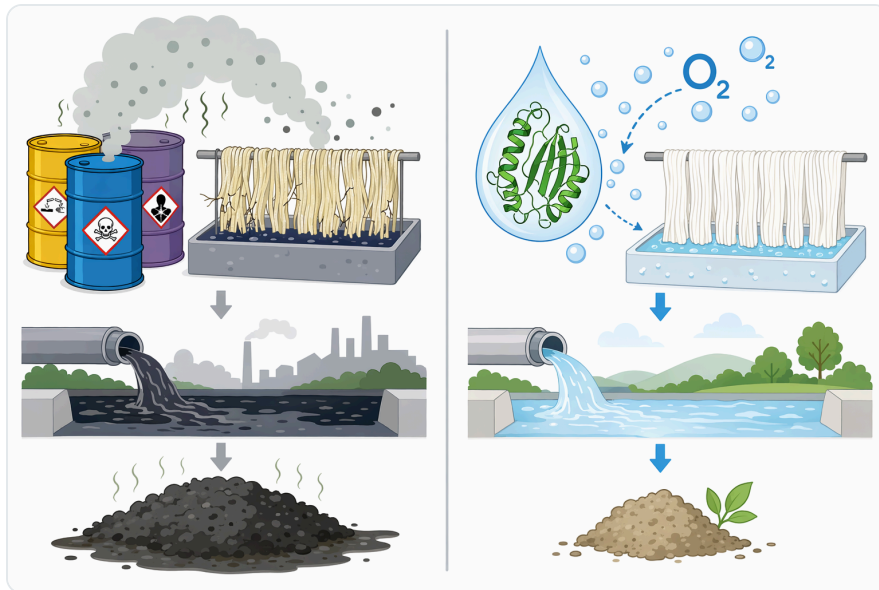


Figure 4. 相較於強烈的化學氧化法，漆酶處理可降低化學品負荷，同時選擇性氧化芳香族受質。

## 食品與飲料加工：多酚管理、澄清與色澤控制

Laccase 在食品工業中的討論多集中於多酚管理。果汁、葡萄酒、啤酒與植物性萃取液中常含有多酚，這些分子與色澤、澀感、褐變、氧化穩定性及濁度形成有關。Laccase 可氧化多酚，使其形成醌類中間體，再進一步聚合、交聯或與其他成分反應，進而改變澄清、過濾與儲存穩定性<sup>[3]</sup>。

在飲料製程中，這種反應可能帶來正面或負面效果。若目標是降低過量反應性多酚，Laccase 可協助促進聚合沉澱與後續去除；但若產品需要保留特定酚類香氣、抗氧化特性或色澤，過度氧化可能改變感官品質。因此，食品應用通常更重視「控制反應程度」，而非單純追求最大轉化率<sup>[3]</sup>。

除了飲料，Laccase 也被研究於烘焙、植物蛋白、可食性薄膜與食品成分交聯等方向。其機制通常與酚類氧化後形成交聯網絡有關，可能改變質地、持水性或結構穩定性。不過，食品用途必須同時考量原料來源、法規允許範圍、加工條件與最終產品標示要求，不宜將環境處理中的結果直接外推至食品製程<sup>[3]</sup>。

## 木質素、生質材料與纖維改質

Laccase 與木質素的關係是其最早受到工業關注的原因之一。木質素含有大量芳香結構與酚羥基，Laccase 可氧化這些位點並產生自由基，進而導致交聯、解聚或表面活化。不同反應條件下，Laccase 可能讓木質素更容易被後續處理，也可能促進木質素再聚合形成新材料特性<sup>[1]</sup>。

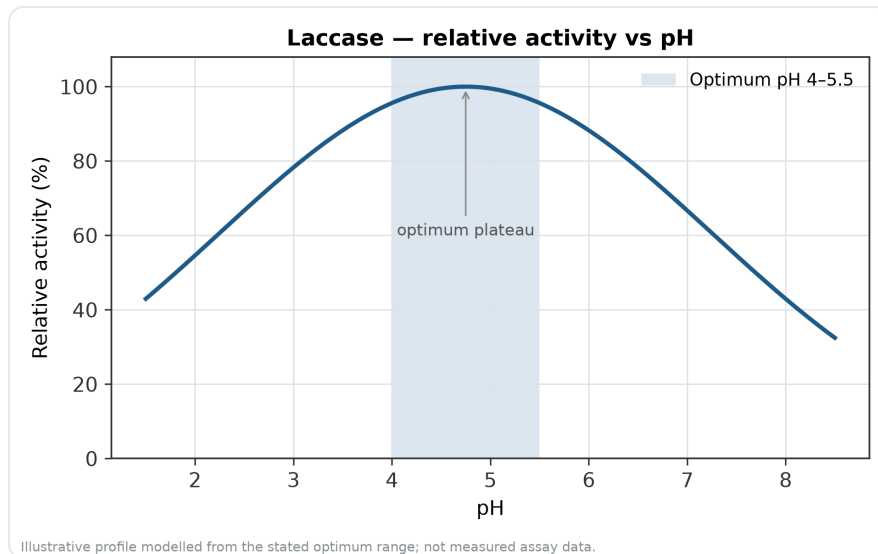


Figure 5. 漆酶相對活性隨 pH 值變化的關係，顯示其最佳活性平台位於 pH 4–5.5。

在紙漿與纖維相關應用中，Laccase 可被用於降低化學漂白負荷、改善纖維表面反應性或促進功能分子接枝。若結合媒介體，Laccase 對非酚式木質素結構的作用範圍可進一步擴大。不過，媒介體殘留、紙漿強度、白度、廢液性質與成本都會影響實際可行性<sup>[6]</sup>。

對生質材料而言，Laccase 的吸引力在於可在較溫和條件下啟動芳香聚合或交聯反應，減少部分化學活化步驟。這使它成為開發木質素基樹脂、生物基複合材料、纖維功能化與環境友善表面處理的研究工具之一<sup>[1]</sup>。

## 酵素固定化與操作穩定性：為何是產業化關鍵

Laccase 在文獻中常展現良好催化潛力，但從研究走向產業導入時，穩定性與可重複使用性往往成為關鍵。游離酵素在水中容易稀釋、流失或受抑制，若每批次都需重新添加，成本與控制難度會提高。固定化因此被視為提升 Laccase 工程可行性的核心策略之一<sup>[6]</sup>。

固定化後的 Laccase 可能展現較佳熱穩定性、pH 耐受性或儲存穩定性，但這並非必然結果。固定化材料可能遮蔽活性位點、造成擴散限制，或改變底物進入酵素的方式。因此，固定化系統的成功與否取決於酵素、載體、連結方式、目標底物與反應器設計之間的匹配<sup>[2]</sup>。

近年關於碳材料與生物基載體的研究，提供了兩種不同方向：碳材強調吸附、導電與高表面積；生物基材料則強調可再生、低環境負荷與與生物製程相容。對環境修復而言，理想系統通常不只是「酵素固定得住」，還要能在真實水體或廢水成分下維持可接受的轉化效率<sup>[11]</sup>。

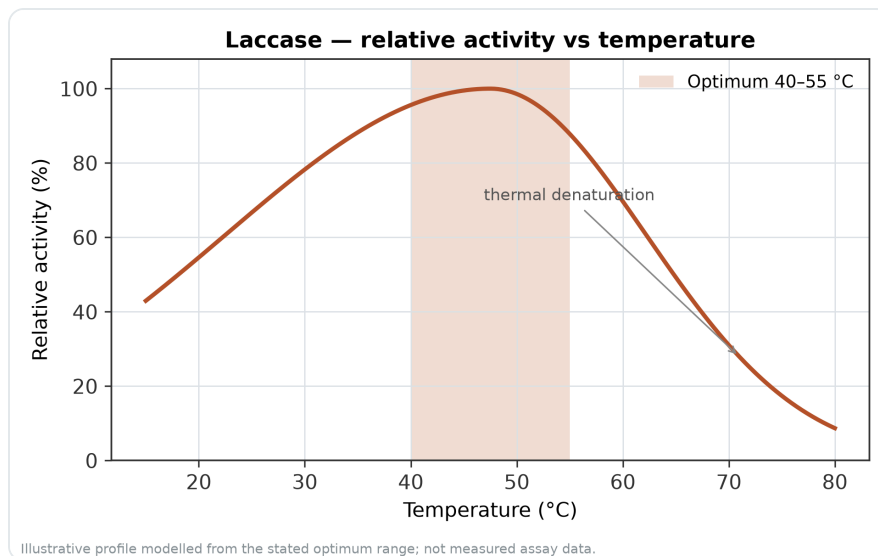


Figure 6. 漆酶相對活性隨溫度變化的關係；最佳溫度為 40–55 °C，且在超過最佳範圍後呈現典型的熱變性下降。

## 與 Laccase-like nanozyme 的差異：仿酵素不是同一種產品

近年文獻中常見「laccase-like activity」或「Laccase mimic」等說法，指的是某些金屬有機框架、單原子催化材料或奈米酵素展現類似 Laccase 的氧化活性。這些材料在感測、酚類污染物檢測與環境催化中受到關注，但它們並不是天然或微生物來源的 Laccase 蛋白質<sup>[12]</sup>。

例如，部分仿生金屬材料可催化酚類底物氧化，並被設計用於比色檢測或污染物降解；另有研究以單原子金屬奈米酵素建立類 Laccase 電化學感測平台。這些方向有助於理解 Laccase 活性中心的仿生設計，但在法規屬性、反應選擇性、生物降解性與製程整合上，與商用酵素並不相同<sup>[13]</sup>。

因此，在閱讀文獻或規劃應用時，應區分「真正的 Laccase 酵素」與「具 Laccase-like 活性的催化材料」。前者是蛋白質生物催化劑，通常受溫度、pH 與蛋白穩定性影響；後者多屬無機或複合催化材料，可能具較高耐受性，但也涉及材料殘留、回收與環境釋放問題<sup>[14]</sup>。

## 實務條件：pH、溫度、底物與基質干擾

Laccase 的效能高度依賴反應環境。不同來源 Laccase 的最適條件可能差異很大，且同一種酵素對不同底物也可能呈現不同反應表現。一般而言，pH 會影響底物電離狀態、酵素銅中心氧化還原行為與蛋白質穩定性；溫度則同時影響反應速率與失活速度<sup>[1]</sup>。

基質成分也很重要。真實染整廢水可能含鹽、界面活性劑、助染劑、螯合劑與多種染料；食品與飲料基質則含糖、有機酸、蛋白質、多酚與金屬離子；堆肥系統更包含固體顆粒、水分梯度與活躍微生物群落。這些因素都可能促進或抑制 Laccase 反應<sup>[4]</sup>。

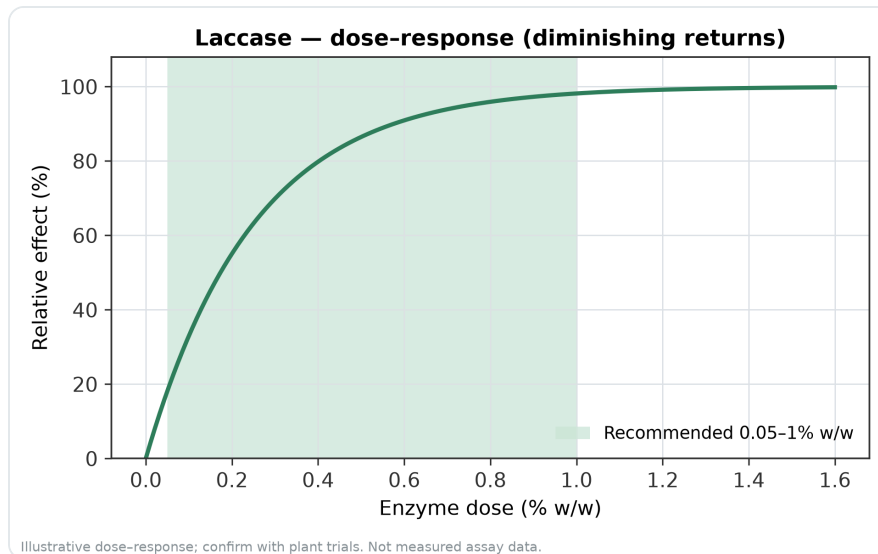


Figure 7. 漆酶在建議使用範圍 ( 0.05–1% w/w ) 內的示意性劑量反應。

因此，Laccase 的導入通常需要以目標基質為中心進行條件確認。重點不是在理想緩衝液中觀察到反應，而是確認在實際製程條件下，酵素是否能在合理時間內產生期望效果，且不造成難以處理的副產物、沉澱、色澤偏移或下游負荷增加<sup>[9]</sup>。

## 證據強度：哪些應用較成熟，哪些仍屬發展中

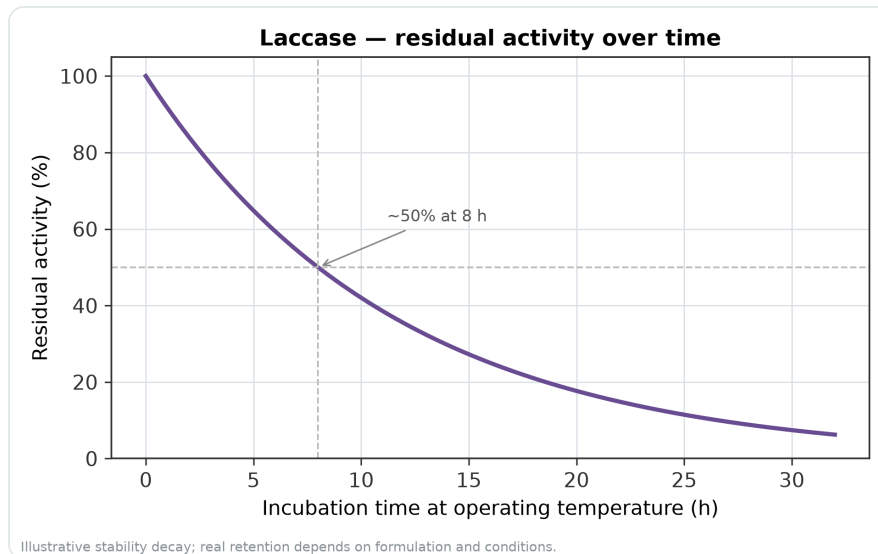
就證據成熟度而言，Laccase 的酵素機制、底物氧化特性、木質素相關反應與染料脫色能力已有大量研究與綜述支持。尤其在環境修復與染料處理領域，文獻已系統整理 Laccase 對不同染料與污染物的應用潛力，也指出固定化、媒介體與混合處理程序是提高可行性的主要方向<sup>[5]</sup>。

食品與飲料加工也有相當多討論，特別是多酚氧化、澄清、穩定化與材料交聯。然而，食品領域的判斷標準不只是轉化率，還包括感官品質、營養影響、製程一致性與法規適用性，因此通常需要比環境應用更嚴格地評估最終產品影響<sup>[3]</sup>。

相較之下，某些前沿應用仍需要謹慎解讀。例如以特殊來源 Laccase、工程化 Laccase 或 Laccase-like 材料處理特定微量污染物、建立即時感測器，或進行高選擇性化學合成，雖然研究發展快速，但距離一般工業現場大規模採用仍取決於成本、穩定性、法規與放大條件<sup>[15]</sup>。

## Enzymes.bio 的供應定位與文件取得方式

Enzymes.bio 作為線上酵素供應平台，提供 Laccase 相關產品以 1 kg 單位在線上購買，適合已有內部評估流程、希望取得商用包裝酵素進行製程開發或應用測試的 B2B 使用者。CoA 與 SDS 會隨訂單一併提供，便於企業內部進行文件歸檔、品管審閱與安全管理。



**Figure 8.** 漆酶熱穩定性衰減示意圖——在操作溫度下，殘餘活性隨時間下降。

需要明確的是，Laccase 的產業應用成效不應僅由產品名稱推定。即使同屬 Laccase，不同來源、配方型態與製程條件都可能造成表現差異。對使用端而言，較務實的做法是以自身基質、目標反應與下游要求為基準，評估 Laccase 是否能在既有流程中提供可量化的技術價值<sup>[1]</sup>。

## 結論：Laccase 的價值在於選擇性氧化，而非萬用降解

Laccase 是一種具有高度應用彈性的綠色生物催化劑，其核心能力是以氧氣驅動酚類與芳香化合物的一電子氧化反應。這個機制讓它在染料脫色、環境污染物轉化、木質素改質、堆肥腐殖化與食品多酚管理中具有實際研究基礎與產業探索價值<sup>[4]</sup>。

不過，Laccase 並不是所有有機污染物或所有食品加工問題的通用解法。它的效果取決於底物是否適合被氧化、基質是否抑制酵素、是否需要媒介體，以及氧化後產物是否符合製程與法規期待。特別是在真實廢水、複雜食品基質或固態堆肥系統中，製程整合能力往往與酵素本身活性同樣重要<sup>[6]</sup>。

對希望降低強氧化劑使用、提升環境友善度或導入生物催化步驟的企業而言，Laccase 是值得納入評估的酵素工具。它最適合被視為「可控制的氧化模組」：在合適條件下，能將氧氣轉化為具選擇性的化學轉化能力，並為廢水處理、材料改質與食品加工提供更溫和的技術路徑。

## 線上訂購 Laccase

以 1 kg 單位販售，現貨供應，可立即出貨。請直接於我們的線上商店下單並付款，我們將為您處理訂單。每筆訂單皆附分析證明書與安全資料表。

[購買 Laccase →](#)

## 參考文獻

依首次引用順序編號。所有來源皆為開放取用資料，並於發布時確認可連線；正文中的引用編號會連結至此。

1. Sodhi, A. S., Bhatia, S., & Batra, N. (2024). Laccase: Sustainable production strategies, heterologous expression and potential biotechnological applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 135745 .
2. Kyomuhimbo, H. D., & Brink, H. G. (2023). Applications and immobilization strategies of the copper-centred laccase enzyme; a review. *Heliyon*, 9.
3. Zhai, T., Wang, H., Dong, X., Wang, S., Xin, X., Du, J., Guan, Q., ... et al. (2024). Laccase: A Green Biocatalyst Offers Immense Potential for Food Industrial and Biotechnological Applications. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*.
4. Younus, H., Khan, M. A., Khan, A., & Alhumaydhi, F. (2025). Eco-Friendly Biocatalysts: Laccase Applications, Innovations, and Future Directions in Environmental Remediation. *Catalysts*.
5. Rajendran, S., Kalairaj, A., & Senthilvelan, T. (2024). A comprehensive review on enzymatic decolorization of various azo dyes using laccase for the abatement of industrial pollution. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15, 13079 - 13101.
6. Ren, D., Wang, Z., Jiang, S., Yu, H., Zhang, S., & Zhang, X. (2020). Recent environmental applications of and development prospects for immobilized laccase: a review. *Biotechnology & Genetic Engineering Reviews*, 36, 81 - 131.
7. Li, S., Sun, K., Latif, A., Si, Y., Gao, Y., & Huang, Q. (2022). Insights into the Applications of Extracellular Laccase-Aided Humification in Livestock Manure Composting. *Environmental Science and Technology*.
8. Adamian, Y., Lonappan, L., Alokpa, K., Agathos, S., & Cabana, H. (2021). Recent Developments in the Immobilization of Laccase on Carbonaceous Supports for Environmental Applications - A Critical Review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9.
9. Ba, S., & Kumar, V. V. (2017). Recent developments in the use of tyrosinase and laccase in environmental applications. *Critical Reviews in Biotechnology*, 37, 819 - 832.
10. Kalia, S., Dalvi, V., Nair, V., Samuchiwal, S., & Malik, A. (2023). Hybrid electrocoagulation and laccase mediated treatment for efficient decolorization of effluent generated from textile industries.

*Environmental Research*, 115868 .

11. Mehta, P., Peter, J. K., Kumar, A., Yadav, A. K., & Singh, R. (2025). From nature to applications: Laccase immobilization onto bio-based materials for eco-conscious environmental remediation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 142157 .
12. He, J., Li, J., Wang, Y., Wang, Y., & Wu, P. (2025). Recent Progress on the Rational Design of Laccase Mimics. *Chemistry - An Asian Journal*, e202401942 .
13. Li, Y., Dong, Y., Wang, R., Lin, Z., Lin, J., Ji, X., & Ye, B. (2024). Biomimetic Electrochemical Sensor Based on Single-Atom Nickel Laccase Nanoenzyme for Quercetin Detection. *Analytical Chemistry*.
14. Wei, W., Wang, H., Su, P., Song, J., & Yang, Y. (2025). Bioinspired Cu/Zn-ZIF nanozyme with excellent laccase-like activity for selective colorimetric detection of phenolic pollutants. *Talanta: The International Journal of Pure and Applied Analytical Chemistry*, 291, 127862 .
15. Liu, Z., Liu, L., Liu, Y., Wang, Y., & Yu, L. (2025). Recent Advances and Challenges in Biomolecule-Based Laccase Mimics for Environmental Applications. *Catalysts*.


## 聯絡 Enzymes.bio


對訂單有疑問嗎？我們的團隊很樂意協助。


電子郵件 [wholesale@enzymes.bio](mailto:wholesale@enzymes.bio)

電話 ( 美國 ) **+1 (507) 428-6057**

聯絡我們 →

 **400+** B2B 客戶

 **60+** 大學研究合作夥伴

 **54** 服務遍及全球

© 2026 Enzymes.bio · 工業與食品加工用酵素供應 · 非供人體食用或零售銷售。