

當消費者在挑選生鮮肉品或加工品時，通常會先以目視來觀察色澤、風味和質地。肉品品質的衰敗通常由許多因素造成，包括基因、屠宰前或後的不當操作、貯存或烹煮。然而，上述各種因素所造成最重要的影響之一是脂質氧化。藉由減少氧化作用所造成的負面影響，維生素 E 在肉品衰敗、色澤變化上扮演著重要角色。本文在簡介維生素 E 獨特的抗氧化功能、如何維持肉品品質、作用機制、用法及效益。

### 認識脂質氧化

脂質氧化會導致食物(包括肉品)衰敗和色澤改變。在肉品，動物屠宰後，當血液循環一旦停止和厭氧代謝啟動，就開始發生脂質氧化。

自由基的出現會催化脂肪氧化發生，而自由基來自於氧、氮、硫和氯本身帶有一或多個游離電子。氫氧化物和二氧化氮是含量最多的自由基，稱為活性氧類(Reactive Oxygen Species, ROS)或活性氮類(Reactive Nitrogen Species, RNS)。另外，過氧化氫雖然不是自由基，但對 DNA 具有強破壞力。活性氧和活性氮類是生理代謝的產物，在細胞正常運作時，其濃度不高(例如免疫系統中，吞噬細胞活化時)。當兩者超過極限濃度時，對於大分子物質(如，脂質、蛋白質和 DNA)會造成損害。除了自由基，其他物質也會促進脂質氧化，包括金屬離子(如，鐵和銅)為肌紅素和血紅素的組成份。

重要的是，脂質氧化是一種自動催化的連鎖反應，即氧化產生的物質又會再催化進一步的氧化發生。當連鎖反應啟動，會加快脂質氧化的速度。不飽和脂質最容易發生氧化，尤其是具有多個雙鍵者。磷脂質為細胞膜的成分，因含有大量的不飽和脂肪酸，對氧化也特別敏感。在肉品加工時，分切會破壞細胞膜，增加暴露在氧氣下的表面積，因而增加氧化的風險。另一個不利的因素是添加鹽，其為香腸製品常用的添加物。

### 脂質氧化對肉品品質的影響

#### 1. 異味產生：

脂質氧化會分解多元不飽和脂肪酸，使其變成揮發性短鏈物質，例如乙醛、酮類、醇類和酸。這些物質會產生異味，大大降低了消費者對肉品的接受度。在烹煮和後續貯存時，肉品中脂質氧化反應會加速，此現象稱作烹煮變味(warmed-over flavor)，為預煮肉品最大的疑慮。

#### 2. 膽固醇氧化：

膽固醇為細胞膜的成分。貯存時，鮮肉的膽固醇氧化產物(Cholesterol Oxidation Products, COPs)含量很低。當烹煮和輻射處理時，因自由基的增加會促進 COPs 產生，進而造成多元不飽和脂肪酸發生氧化。COPs 會對動物造成不良影響，例如動脈硬化、毒性、突變誘發和癌症誘發。

#### 3. 滴液損失(俗稱滴水)：

當死後僵直一發生，pH 值下降，肌凝蛋白變性，接著肌動球蛋白形成。此過程造成屠後的肌原纖維縮短，並促使肉品滲出水分。氧化反應會影響細胞膜做為半透膜的功能，會使細胞液滲漏和損失。例如，當生鮮豬肉冷藏時，滴液損失會增加，甚至使肉重減少 8~12%。

#### 4. 肌肉色素氧化：

購買肉品時，色澤是影響肉品外觀的主要因素。色澤的品質決定於肌肉色素(即肌紅蛋白)的化學狀態。肌紅蛋白以含二價鐵的氧合肌紅蛋白存在肌肉中，能產生櫻桃紅般的色澤。相反的，以含三價鐵的氧化肌紅蛋白存在時，會使肉色呈現紅褐色。當肉品貯存和展售時，因為氧合肌紅蛋白會氧化成氧化肌紅蛋白，導致肉色變成不美觀的

褐色。

## 抗氧化系統

生物體會發展出特有的抗氧化機制來對抗活性氧類。當抗氧化物存在時，生物體才能生存在富含氧氣的環境下。此機制被稱為抗氧化系統。抗氧化物的定義為'任一物質能延緩、預防或移除某一特定分子的氧化損傷'。

依據其關鍵特性，抗氧化物分為兩類：

1. 酵素類：超氧歧化酶、過氧化氫酶、谷胱甘肽還原酶、谷胱甘肽過氧化酶。
2. 非酵素類：谷胱甘肽、尿酸、維生素 C、beta-胡蘿蔔素、維生素 E。

依物理特性，抗氧化物又可分為以下兩類：

1. 水溶性：谷胱甘肽、尿酸、維生素 C。
2. 脂溶性：beta-胡蘿蔔素、維生素 E。

## 維生素 E 的化學性質與代謝

維生素 E 為一統稱，用來代表自然界中發現的八種脂溶性化合物，其中四種為生育三烯酚類(tocotrienol)，其餘為生育酚類(tocopherol)。這些化合物為異構物，彼此間在化學結構上有些許不同。生育酚類的利用效率較生育三烯酚類高，特別是 alpha-生育酚為最常見、活性最高的形式。飼糧中常用的維生素 E 為維生素 E 醋酸酯(all-rac alpha- tocopheryl acetate)，其特色為貯存、加工或通過消化道時的穩定性較佳。胰酯酶能迅速將維生素 E 醋酸酯分解成 alpha-生育酚，進而被小腸吸收。

在維生素 E 功能和營養需求的相關研究中，都是使用商業通用的維生素 E 醋酸酯。維生素 E 的代謝簡述如下：

1. 維生素 E 被小腸的上皮細胞吸收，經由乳糜微粒攜帶運輸。
2. 透過腸淋巴運輸至肝臟。
3. 肝細胞所分泌的 alpha-生育酚轉移蛋白將維生素 E 運送至一般循環系統。
4. 最後，維生素 E 會沉積於細胞膜和次細胞結構中，並發揮對抗磷脂過氧化的保護功能。

## 維生素 E 在抗氧化系統所扮演的角色

抗氧化系統由多種化合物共同運作、分布在不同的細胞、次細胞及細胞外的空間，並提供不同程度的防禦功能。每一種抗氧化物都有其特定的功能，並與其他物質以特定的方式發揮協同作用，彼此之間無法相互取代。

抗氧化系統基本上具有以下三種層級的防禦功能，

- 第一級：藉由抗氧化酵素，例如超氧歧化酶和谷胱甘肽過氧化酶，來預防自由基的形成。
- 第二級：以中斷自由基鏈鎖反應的抗氧化物(chain-breaking antioxidant)，例如維生素 E、beta-胡蘿蔔素、維生素 A、維生素 C 及尿酸，來對抗自由基產生。
- 第三級：由酵素，例如脂肪酵素、蛋白酵素、核酸酵素和各種轉移酵素，來修補或消除被自由基損害的分子。

因為維生素 E 位在細胞膜內，讓它能更有效率的保護極易氧化的多元不飽和脂肪酸，免於被活性氧類物質攻擊。相較於磷脂的含量，細胞膜內的維生素 E 含量較低。但已足以進行抗氧化作用，由於氧化的維生素 E 能轉換回活性態的維生素 E。此反應需協同其他抗氧化劑一同作用，如維生素 C 和/或胡蘿蔔素類物質。

維生素 E 在中斷自由基鏈鎖反應的功能上特別強又獨特，能阻止脂質過氧化物生成。但飼糧中維生素 E 需添加到較高劑量才具有預防脂質氧化的功能，此時維生素 E 不只是在進

行一般代謝功能，而是能沉積在細胞膜內。假如在動物屠宰後才添加維生素 E，維生素無法自然地透過生理代謝進入細胞膜內。

### 維生素 E 與肉品氧化穩定性的關係

許多研究都已證實維生素 E 在降低脂質氧化及改善肉質方面的機制和影響。維生素 E 也能改善細胞膜流動性，進而降低滴液損失。其在冷凍肉品的影響最為明顯，因為冰晶會穿破細胞膜而使細胞質液流失。

- **家禽**：最新在白肉雞的研究中指出，每公斤飼料添加 200 毫克維生素 E 能降低硫代巴比妥酸反應產物(Thiobarbituric Acid Reactive Substances, TBARS)- 此為脂質產生過氧化反應的產物- 約 84~88%。雞肉內氧化膽固醇化合物的含量能降低 50%。此外，飼料添加較高量的維生素 E 能降低二次氧化產物(例如乙醛和酮類)的含量約 50%。
- **豬**：在豬肉的氧化穩定性上，維生素 E 也有相似的改善效果。在豬隻飼糧添加 200 毫克(每公斤飼料)維生素 E 和 3%大豆油及牛油時，能發揮維生素 E 的抗氧化效果。曾有學者綜合了 1991~1998 年間 10 篇有關營養對豬肉品質影響的研究，結論指出**每公斤飼料含 100~200 毫克維生素 E 時能改善豬肉的氧化穩定性**。
- **牛**：曾有學者整合了有關添加維生素 E 對肌肉 alpha-生育酚含量、脂質氧化和肉色的影響，包含 13 篇在牛隻和 10 篇在豬隻的研究。結果發現，維生素 E 在牛肉的沉積速度較豬肉慢。當每公斤飼料含 200~500 毫克維生素 E 時，豬肉的 alpha-生育酚含量會達到飽和。在牛隻，至少要每天餵飼 1300 毫克維生素 E，連續餵飼 44 天，才能使牛肉 alpha-生育酚含量從每克肉 1.4 微克提高至 3.3 微克。當牛肉 alpha-生育酚含量大於每克肉 3 微克時，延緩氧化肌紅蛋白形成、肉色改變的功能達最大化。
- **統合分析(meta-analysis)**：2011 年學者運用統合分析的統計方法來更進一步確定維生素 E 對脂質氧化的正面效果。此研究統計了 10 篇有關脂質氧化和 13 篇有關維生素 E 沉積的報告，報告中均使用背最長肌作為試驗材料。此研究的目的主要在評估維生素 E 劑量、使用時間和屠後肌肉氧化過程之間的相互關係，建立了飼糧中維生素 E 與豬肉品質間的數量關係。維生素 E 在肌肉組織的最大累積量約每克組織含 6.4 毫克 alpha-生育酚。**每公斤飼料中至少含 100 毫克維生素 E 才能明顯降低脂質氧化，而組織中每多 1 毫克 alpha-生育酚能降低背最長肌的 TBARS 值 0.05 單位**。此外，脂質氧化在動物屠宰後 3~4 天內會漸漸增加，直到 10 天才趨於穩定。
- **改善豬肉色澤穩定度**：上述研究報告的作者們也同樣分析了飼糧中維生素 E 和貯存條件對豬肉色澤的影響。結果發現，紅色度和 alpha-生育酚的含量呈線性關係。貯存時，若豬肉中每多 1 毫克 alpha-生育酚能使紅色度提升 0.11 單位。總結此研究，添加維生素 E 能影響豬肉紅色度，但添加量須超過每公斤飼料 100 毫克，且在屠後 6 天時的差異較為明顯。
- **降低豬肉滴液損失**：另有一統合分析的研究報告在探討維生素 E 對豬肉保水性的影響。結果發現，若屠宰前，**豬隻 84~130 日齡時，飼糧中維生素 E 含量達每公斤飼料 200 毫克能改善豬肉保水性**。更高含量(750~1000mg)餵飼至少 45 天，能使豬肉組織含量拉高至低限為每克組織含 2.6 毫克 alpha-生育酚。

飼糧添加維生素 E(毫克/公斤飼料)	保水性改善比例(%)
100	10.1
200	30.5
大於 400	25.9

### 結論

肉品對脂質氧化的敏感度受肌肉內 alpha-生育酚含量和細胞膜磷脂質內的多元不飽和

脂肪酸含量所影響。維生素 E 的好處是能提升禽肉和豬肉的品質，因其在脂質環境下使細胞膜具有抗氧化力，且此功能已通過科學證實、商業測試和實際應用。維生素 E 的特性是經由消化、吸收後能沉積、貯存在肌肉中，因此是自然界中最有效的脂溶性、可中斷自由基連鎖反應的抗氧化物，且其保護細胞膜完整性的獨特功能，並無法被具有相似特性的其他物質或抗氧化物所取代。

資料來源：DSM Nutritional Products – 維生素 E 白皮書 (<http://ppt.cc/2mIXU>)