

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國小組 化學科

080216

海中的蒸蛋烤蛋塔

學校名稱：財團法人新北市私立聖心國民小學

作者： 小六 趙昀善 小六 劉庭瑄 小六 蔡禹澄 小六 林昕穎 小六 高于喆 小六 黃柏諺	指導老師： 嚴融怡
---	------------------

關鍵詞：梅納反應、魯米諾、鐵錯合物

作品名稱：海中的蒸蛋烤蛋塔

摘要

本研究發現食品施加鐵鹽與魯米諾檢測液的螢光反應可直接測定攝氏150度烘培環境下梅納反應是否明顯發生，這套方式將可有助於食品工廠針對梅納反應的快速檢測。而藉由孟塞爾比色帖的比對則可間接判別梅納反應褐化的程度。不同風味的梅納反應需要不同種類的蛋白質和醣類的參與，有時甚至需要多種反應物共同作用。

海洋當中鐵鹽有助於梅納反應的進行，並且可以產生鐵錯合物，這有助於沉積物當中鐵和碳的固定以及汙染物質的去除。淡水河河口與北海岸的表層環境因為有機質的累積以及水體中所攜帶的鐵質，因此或許有可能可以發生天然的梅納反應。但這些有待後續研究做更多的驗證。

壹、研究動機

我們是一群貪吃的小朋友，很喜歡烘焙與烤肉等食物的料理，總是很常關心每天的營養午餐要吃些什麼，也常常很喜歡和大人們詢問有關食品製作的問題。關於梅納反應我們最早是在學校圖書館的書籍當中看到的，後來自然老師也告訴了我們有關梅納反應的相關知識，然後我們還在吉娃斯科學小教室動畫當中看到了梅納反應的簡單介紹。由於梅納反應正是食物所以有各種不同風味和顏色的重要推手，所以我們覺得這個反應相當有趣，也非常重要，因為攸關食物好不好吃，厲害的廚師肯定很能從經驗中掌握梅納反應。去年，有同學從新聞介紹梅納反應的專題當中獲知原來梅納反應不是只發生在食物，更是也會發生在土壤與海床沉積物的重要反應，而且新聞當中還以自然界的烤蛋塔來形容梅納反應。這讓我們相當驚訝，原來梅納反應也和有機物在自然界當中的轉化有著密切的關係，而這當中甚至還牽涉到目前攸關氣候變遷的碳循環。這太有趣了，原來梅納反應不是只有在我們人類廚房中的烹飪過程才會發生，而是在土壤中、在海洋當中也會發生，所以海中也有烤蛋塔，而且是更大規模的烤蛋塔呢！那麼海洋當中的烤蛋塔會如何發生？它會有哪些可能的因素去影響反應的過程？是否有哪些因素其實從我們日常的烹調當中就能找到重要的線索呢？於是我們參考了一些文獻並且實際走訪了海邊之後，設計了一系列實驗來設法尋求解答。其中我們在走訪北海岸老梅沙灘過程中發現大量的鐵砂，讓我們覺得環境中那麼多的鐵，應該也有可能對海洋沉積環境中的梅納反應產生重要的影響，因此我們在研究過程當中也將鐵的相關作用列入重要的考慮因素了。

我們日常生活當中的食材都含有還原糖(如葡萄糖、果糖、麥芽糖和乳糖等)與胺基

酸，在高溫與低水分的環境下，會產生一連串複雜的化學反應形成褐色並帶有香味的梅納汀(melanoidin)，這就是梅納反應(Maillard reaction)，也稱為梅納褐變。褐變最常見的情形除了梅納反應，還有一種是焦糖化作用(Caramelization)，但焦糖化作用是只發生在醣類本身在焦化過程中的複雜反應總和；但梅納反應則必須要有還原糖和胺基酸的相互作用。而且梅納反應還會因為烹飪方式、不同的糖和蛋白質而產生不同的氣味和口感。就像洋蔥和奶油一起在小火當中持續加熱拌炒爆香過程所因為水分減少和溫度增高所產生的梅納反應，在滋味與香氣上就完全不同於烘焙咖啡、煎魚和烤蛋塔。

梅納反應通常發生在食物減少脫水時，對於一些肉類來說，梅納反應起始的肉品含水量須在30%~60%之間是效果最好的，一旦水分過多就會讓反應變差了，所以通常廚師會將肉的表面水分擦乾。梅納反應的最佳溫度是在攝氏138°C~179°C時，食物中的還原糖與胺基酸會發生阿馬道里重排(Amadori rearrangement)而聚合在一起；之後這個聚合的產物會依不同的條件往三條方向進行：第一是在酸性條件下使內部的醣類重新排列而產生類黑色素，並且產生類似焦糖的味道，這也是燒烤食材的顏色變深(褐變)的主要原因；第二是當在鹼性且溫度較低的條件下，發生 Strecker 降解，並產生含有氮環雜物的產物(像是肉類常產生的 pyrazine)，這類產物常有焦香、燒烤的味道，這個降解所產生的多種特殊醛也常構成食物獨特的香氣來源；第三是在鹼性環境且溫度較高的情形下，進行醣類裂解，然後在一系列反應下產生含氮的五環化合物像是 Thiazole，這是一種會產生咖啡香味的物質。梅納反應的主要產物梅納汀以及3500種以上的揮發性化合物，對食品的香氣塑造非常重要。不過胺基酸和醣類聚合時的產物雖然香但卻比較不易消化，並會降低原先食物的蛋白質和醣類的含量，加上梅納反應的產生過程如果拖長也容易讓食物在持續焦化的過程中產生丙烯醯胺(Acrylamide)，這是一種致癌物，攝入過量會對身體健康有害。(香港青年協會_創新科學中心，2022)(邱思魁，無日期)(國立清華大學、原金國際有限公司，2021)("阿馬道里重排", 2021)

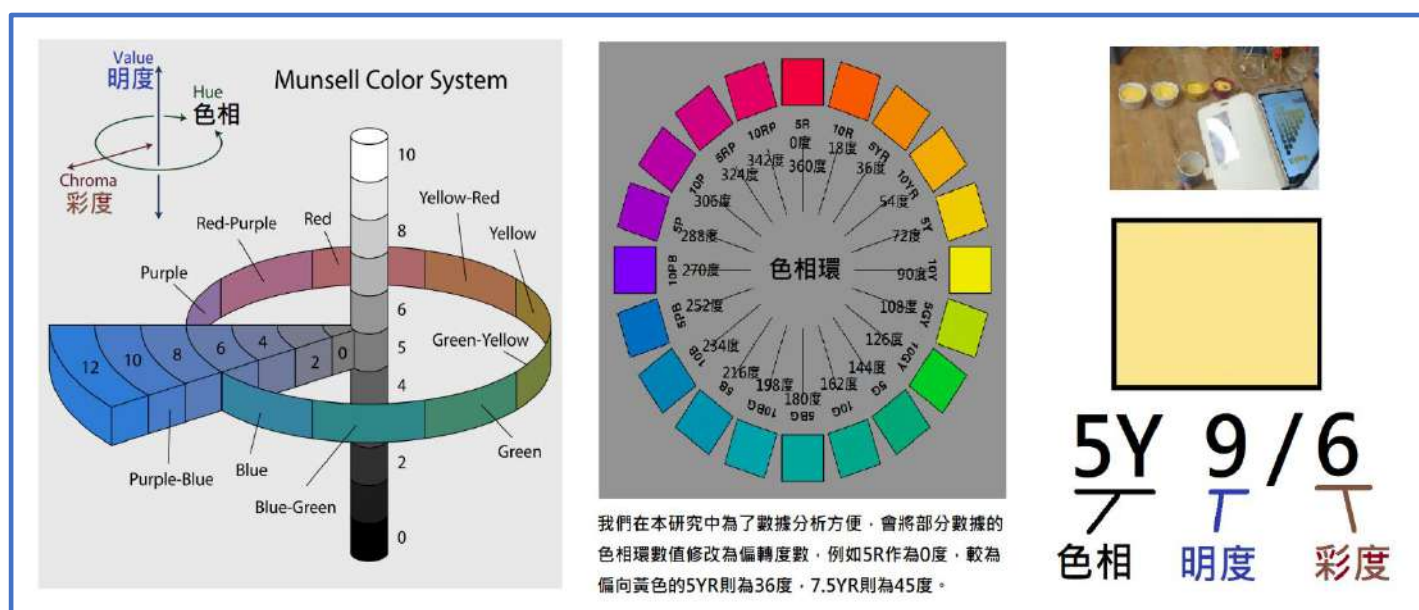
梅納反應是一種非酵素褐變，並不需要微生物的參與。除了食品化學，近幾年有科學家像是 Mu 等人在2022年發現梅納反應也發生在土壤堆肥過程，並且會促進有機物轉變成腐植酸，由於腐植酸較不易被分解且具穩定的構造，常可作為土壤長效性的肥料，也常是優良的土壤改良劑，以及有助於土壤碳匯等。因此近年來科學家很重視維持土壤中的腐植酸。Bahureksa 等人在2022年研究發現梅納反應也參與了森林野火燃燒下土壤有機質的重新組合，並影響後續生態系統恢復的情形，環境中的有機質其實是梅納反應重要的反應材料。

2023年由利茲大學的 Moore 研究團隊更發現梅納反應也發生在海洋底層，有助於穩定海洋中的有機質，將小分子轉化為更穩定、複雜的大分子聚合物，有利於海洋的固碳。海洋中的有機碳有很多來自其巨量的微生物，當它們死亡時殘體會沉入海底，但這時其他細菌會去試圖分解利用它們，並造成有機質的衰減與氧氣的損耗，同時還會形成二氧化碳釋放到海洋並最終進入到大氣中。但由於梅納反應的作用，可以讓較小的有機分子被轉化為較大、較複雜的分子而使得微生物更難分解，這有助於那些有機沉積物多儲存數萬年。每年梅納反應將大約400萬噸的有機碳封鎖在海床當中，有助於增加氧氣降低大氣中的二氧化碳比率，這甚至是地球得以發展出複雜生命型態的重要基礎。而當深海中鐵和錳的存在更有助於梅納反應速率提升數十倍。

雖然烤蛋塔不是我們喜歡吃的食物，事實上我們更愛吃炸雞或是烤肉，而蛋類製品對我們來說比較沒有吸引力；但是我們在比較過各類含蛋白食物當中，牛奶和雞蛋是相對來說成分比較單純並且操作比較能夠聚焦的素材；肉類感覺很複雜，一般肉類食品還會牽涉到醬料種類、醃製方法以及拍打方式等等；所以我們最終選擇牛奶和雞蛋作為主要實驗的素材，然後以製作蛋塔最核心的部位—布丁餡料作為我們主要實驗的活動。

由於我們想要探討自然界當中的梅納反應有哪些可能的因素會影響反應進行。在思考到海洋沉積環境時，我們的腦海一直浮現老梅海灘地上的鐵砂。那些鐵砂以及環境中可能提供的其他鐵質來源應該會影響梅納反應，但會是怎樣的影響方式呢？又是轉化為哪一類的鐵化合物才會影響到梅納反應？我們想到了鐵砂仍然要溶解後才比較會參與化學反應。我們查閱了海洋化學的相關資料，發現海洋沉積物當中佔有重要比重的亞鐵離子以及它的硫酸鹽—也就是硫酸亞鐵應該最有可能參與到海洋沉積物的梅納反應。地球上蠻大一部分的海水中有機質含量很高，而海床中也有很多有機物，亞鐵離子常會與海中各部位的有機質相互錯合；而硫酸鹽則是海床沉積物很重要的組成(宋金明等，2020)。海洋當中硫酸鹽還原相當具有主導性，既驅動整個硫循環，也帶動碳、氮、鐵、錳等元素的循環，並且對細胞和生態系統層面均具有重要的影響(Wasmund, K., Mußmann, M., Loy, A., 2017)。所以本次研究我們採用了硫酸亞鐵作為模擬海床中參與梅納反應的鐵鹽。另一方面，植物根部經常運用來吸收土壤中的鐵因此製造出來的檸檬酸鐵("檸檬酸鐵," 2022)，也有可能對於梅納反應有重要的影響。因為檸檬酸鐵是植物木質部很重要的存在形式(劉士平等，2011)。鐵被視為自然界最重要的微量元素之一，它在細菌、植物和哺乳動物的酶促過程中都發揮關鍵作用，而檸檬酸能夠協助鐵的穩定錯合；Gracheva 等人在2023年還曾進一步以分子磁性的變化來解析檸檬酸與鐵這類生物必需金屬的錯合

過程，檸檬酸能夠讓鐵具有生物可利用性的關鍵功能其實牽涉到一系列生物系統中複雜的檸檬酸鐵化學。所以我們覺得檸檬酸鐵是土壤環境中可能參與梅納反應的重要含鐵物質，而當陸地或海岸濕地植物的殘體(例如漂流木或是枯枝落葉)進入到海洋，同樣有可能會讓大量檸檬酸鐵進入到海洋當中而參與梅納反應。因此我們決定鎖定硫酸亞鐵與檸檬酸鐵這兩種鐵化合物作為實驗影響因子的探究素材。由於梅納反應除了牽涉到看不到的化學反應的進行，還牽涉到了顏色變化，我們在探討如何反映梅納作用的進行程度時，也在文獻閱讀的搜找中找到了相當有用的孟塞爾顏色系統(如圖一)，這個系統後來對我們的研究的過程有出乎意料的重要幫助。



圖一：孟塞爾顏色系統與顏色表示法(作者群整合繪製)(圖片引用修改自維基共享資源 <https://reurl.cc/70L995> 和 <https://reurl.cc/QRO11Z> 以及引用自 Torso-Verlag 線上產品手冊中的 <https://www.torso.de/media/products/Inhalt%20MunsellBookOfColorGlossy.pdf> 標準顏色)

貳、研究目的

藉由室內模擬實驗尋求梅納反應的簡易測定方式，並探討海水環境當中鹽類與含鐵化合物對梅納反應的影響。再透過野外觀察尋找海岸與河口可能潛在產生梅納反應的環境。

- 一、尋找簡易測定梅納反應的方法。
- 二、探究不同蛋白質所對梅納反應的影響。
- 三、以布丁模擬實驗探索海洋梅納反應當中海水鹽份、硫酸亞鹽和檸檬酸鐵的影響情形。

四、以布丁模擬實驗檢視自然界含鐵環境下梅納反應是否可能產生鐵錯合物。

五、檢視焦糖化作用與梅納反應的不同。

六、實際走訪野外觀察梅納反應潛在產生的環境。



圖二：研究工作情形(由作者群拍攝)。(A)牛奶加糖蒸煮與本氏液測試。(B)麟山鼻灘地鑽探與有機質觀察。(C)八里龍形水化學採樣分析。(D)正在以孟氏比色帖比對烤蛋塔顏色。(E)金山中角灣灘地鑽探與有機質觀察。(F)配製布丁液與鐵質添加物。(G)河口有機質觀察。(H)烤蛋塔試吃。

參、研究設備及器材

一、化學實驗器具與材料

(一) 酸鹼度(pH)：以 pH 筆測定室內實驗特定溶液和海水 pH 值。

(二) 總溶解固體含量(TDS)：以 TDS 筆測定水溶液所含物質總量(ppm, mg/L)的變化。

(三) 氧化還原電位(又稱氧化還原數值，ORP)：以鉑電極 ORP 筆分析，這個數值常能反映水域中氧化性有機物、營養鹽以及還原性物質(如氨氮、亞硝鹽)的變化。

(四) 水溫(°C)：同樣以 TDS 筆來測定。以作為化學反應或是野外環境的背景數據。

(五) 乳膠手套(用來操作氫氧化鈉相關的實驗)。

(六) 烤箱、托盤、電鍋與電鍋內鍋、鋼鍋、小量杯、茶匙、食鹽、黑糖(烤牛奶、蒸蛋與烤蛋塔實驗用)。

(七) 電子秤(用以秤取各類藥品與樣品)。

- (八)本氏液、加熱板(還原糖試驗所用)。
- (九)孟氏比色帖(電子版，以平板來呈現和對比化學反應的顏色變化)。
- (十)蛋塔外加鹽類模擬試驗藥品：檸檬酸鐵（經常作為植物根系吸取土壤鐵所製造出來的產物）("檸檬酸鐵," 2022)、硫酸亞鐵（海洋當中重要的鐵硫化合物型態）(宋金明等，2020)、海水素（用以模擬海水鹽分）、硫酸鎳(測試非鐵二價過渡金屬的魯米諾反應)、硝酸鐵(用來測試三價鐵魯米諾反應)、鐵粉(測試純鐵元素魯米諾反應)。
- (十一)雞蛋五盒、2公升牛奶三罐、紙杯一串數個、鍋子、打蛋器、矽膠刮刀、陶瓷布丁杯十五個、金屬過濾網(蒸蛋與蛋塔實驗使用)。
- (十二) 250ml 三角燒瓶六個、橡皮塞六個。
- (十三)德製 Vit-LabPP 定量量杯 1000ml (調配海水用)。
- (十四)1000ml、300ml、250ml、100ml 燒杯各三個。100ml、50ml、10ml 量筒各一個。
- (十五)刮杓兩個、B5白紙(作為秤量紙用)二十張。
- (十六)魯米諾、氫氧化鈉、以及3%雙氧水。噴霧罐、豬肝一份(進行魯米諾標準測試)、挖洞紙盒(當光害較強必要時運用於觀察魯米諾螢光)。
- (十七)砂糖、果糖、煉乳(蔗糖、乳糖與乳製品的混合物)作為布丁模擬實驗之用、長管打火機或火焰噴槍(焦糖實驗以及魯米諾測試使用)。
- (十八) 75%酒精(消毒用以及測試實驗方法使用)。小善存(測試實驗用)。

二、野外觀察紀錄

筆記本、中性筆、鉛筆、手機、筆電、生物圖鑑。

三、外採裝備

- (一)德製 Vit-LabPP 定量量杯1000ml (採水用)、土鑽(土壤調查形制的土鑽，用以鑽土觀察沙灘土層的有機質分布情形，以推論可能比較容易發生梅納反應的位置)。
- (二)寶特瓶2公升兩個(裝清水用來洗滌儀器和現場分析時的稀釋處理)、童軍繩(針對低潮位的拋杯採樣)。



圖三：初期試驗牛奶 TDS 測定(作者群拍攝)



圖四：初期試驗牛奶 ORP 測定(作者群拍攝)



圖五、室內模擬實驗情形(第一作者拍攝)。(A)以蒸蛋相近配料進行烤蛋塔測試(B)蒸蛋實驗前的打蛋以及本氏液變色實驗前置準備工作

肆、研究過程或方法

一、尋找簡易測定梅納反應的方法

在最初我們本來試著從兩個途徑去思考，第一個途徑是化學方法，由於梅納反應過程會損耗蛋白質與還原糖，所以如果我們可以從蛋白質的損耗情形或是還原糖的損耗情形兩者二擇一設法去抓出其中一類反應物的耗損量，應該就有辦法可以去簡易測定梅納反應。但是在先期文獻閱讀以及實驗方法搜找上卻陷入極大的瓶頸，因學術上準確測定蛋白質的儀器動輒牽涉到 HPLC 或是質譜儀之類的超昂貴儀器。而且我們即便是走訪醫院、檢驗單位以及化學檢驗公司等等也沒有詢問到那種可以速測蛋白質或胺基酸的方法。所以我們只好從蛋白質可能在反應中變性造成質量上的變動來設計一個酒精測定法，以及另一個則是各版本國中生物課本所常用於測定葡萄糖的本氏液測定法，我們參考了阿簡生物日記網頁的方法再做修改，想看看本氏液能否測定比正常生物實驗課更高溫的還原糖變化。初期實驗我們希望能夠在化學方法途徑上獲得成功，這樣就可以直接透過反應物變化量的關係去測定梅納反應了。不過後來測試發現原先預想的化學方式途徑都遭遇了艱困的失敗，所以才又從食品(反應物)加熱本身的顏色變化辨別方式去思考比較間接的測定方式。

(一) 酒精測定法

在這個測定法的測試過程當中，我們是以酒精來當作蛋白質變性沉澱的反應劑。理論上，如果是蒸牛奶或是烤牛奶，如果梅納反應消耗掉一些蛋白質，

那麼加熱前添加酒精測定 TDS 和加熱後添加酒精測定 TDS，後者一定會有數值上的下降。我們可以透過 TDS 數值下降的程度來判別梅納反應進行的情形。我們取100ml 牛奶，然後加入75%的酒精10ml，先測定初始添加酒精的數值。由於牛奶本身就有蛋白質和乳糖等物質可以進行梅納反應，等到加熱成為烤牛奶產生一定程度的梅納反應後，再測定一次 TDS。

(二) 本氏液法

本氏液會隨葡萄糖的濃度越高，而將顏色由藍轉綠再轉橘。在這個方法的測試當中，我們其中一位同學假設本氏液可以反映在烘烤過程中因為還原糖受梅納反應作用而減少的情形。我們首先製作了熱牛奶，以果糖分三個三角瓶分別以0, 6, 8 ml 加入到10ml 的熱牛奶，然後蒸煮放涼後，再將每個三角瓶加入20克重的本氏液，然後蓋上橡皮塞後拿去加熱。然後另一組則是直接在三個三角瓶當中加入20克重的本氏液和10ml 的室溫牛奶，然後分別在三個三角瓶當中加入0, 6, 8 ml 的果糖，之後再加熱5分鐘。原則上本氏液本身不會遇熱反應，而前面那一組一開始就有被梅納反應消耗掉還原糖，後面那一組應該會比前者顯現較深的顏色。而從顏色的改變中我們就可以得知梅納反應消耗掉的還原糖。

(三) 褐變觀察—孟塞爾比色帖對照法

這是在先前的兩個方法都失敗之後，我們後來參閱江芋豫等人2012年的梅納反應食品科學研究，以及查閱了色彩學相關的網頁資料後所設計的新方法。也就是直接運用梅納褐變所產生的顏色變化，透過孟塞爾比色帖的標準顏色來將布丁(反應物)的顏色變化賦予科學上的描述，這一顏色變化可以間接反映類黑色素的生成量，並且也可以間接觀察梅納反應褐變的程度。

二、探究不同蛋白質所對梅納反應的影響

(一) 蒸蛋製作與從蒸蛋到烤布丁的嘗試(如圖六)

1. 梅納反應與水分的多寡和溫度有密切的關係，我們測試了一般蒸蛋以及將水改變為牛奶以及果糖之後的差異。首先先打入七顆蛋，之後加入鹽兩茶匙，以及比蛋液多1.5倍的水，攪拌均勻之後放入電鍋中，電鍋以電鍋小量杯量四格水放入，然後按下開關蒸蛋，之後品嚐味道。
2. 再以另一個鍋子打入五顆蛋，之後加入鹽兩茶匙，將水改換為牛奶，加入果糖3ml，攪拌均勻後分裝放入布丁杯各八分滿。之後以攝氏150度預熱20分鐘，再烤30分鐘，之後品嚐味道。

(二) 純牛奶梅納

在紙杯中放入牛奶50ml 和黑糖，然後拿去蒸，蒸好後再看牛奶的變化；並品嚐。之後改換為烘烤的方式加熱同樣處理的牛奶，然後再比較其形態與風味。

三、以布丁模擬實驗探索海洋梅納反應當中海水鹽份、硫酸亞鹽和檸檬酸鐵的影響情形。接下來的實驗處理共分為煉乳(無鮮奶油)、煉乳、果糖與砂糖這四大組，並在當中再細分對照組以及有加入硫酸亞鐵、檸檬酸鐵與海水複合鹽(以海水素模擬海水處理)等不同的樣品，並進行後續比較。

(一) 煉乳無鮮奶油布丁液

將二顆全蛋打入鋼鍋中拌勻，再取70克重的煉乳和120ml 的牛奶攪拌均勻，過濾掉過多的泡沫。然後平均分裝入布丁杯八分滿。先將烤箱以150度預熱15分鐘。這時將布丁杯分為對照組(原味)、硫酸亞鐵處理(添加硫酸亞鐵0.1g)、檸檬酸處理(添加檸檬酸鐵0.1g)以及海水處理(添加海水素0.1g)，將各處理組的添加物都和布丁拌勻，然後放入烤箱中加熱45分鐘。取出布丁杯，觀察布丁表面、並將布丁挑開來觀察當中的顏色然後比對孟塞爾比色帖加以記錄，之後比較其氣味和顏色，非鐵類添加的布丁則可以品嚐比較味道。

(二) 煉乳鮮奶油布丁液

將二顆全蛋打入鋼鍋中拌勻，再取70克重的煉乳和120ml 的牛奶攪拌均勻，之後再加入鮮奶油120ml 調勻，過濾掉過多的泡沫。然後平均分裝入布丁杯八分滿。先將烤箱以150度預熱15分鐘。這時將布丁杯分為對照組(原味)、硫酸亞鐵處理(添加硫酸亞鐵0.1g)、檸檬酸處理(添加檸檬酸鐵0.1g)以及海水處理(添加海水素0.1g)，將各處理組的添加物都和布丁液拌勻，然後放入烤箱中加熱45分鐘。取出布丁杯，觀察布丁表面、並將布丁挑開來觀察當中的顏色然後比對孟塞爾比色帖加以記錄，之後比較其氣味和顏色，非鐵類添加的布丁則可以品嚐比較味道。

(三) 果糖鮮奶油布丁液

將二顆全蛋打入鋼鍋中拌勻，再取70克重的果糖和120ml 的牛奶攪拌均勻，之後再加入鮮奶油120ml 調勻，過濾掉過多的泡沫。然後平均分裝入布丁杯八分滿。先將烤箱以150度預熱15分鐘。這時將布丁杯分為對照組(原味)、硫酸亞鐵處理(添加硫酸亞鐵0.1g)、檸檬酸處理(添加檸檬酸鐵0.1g)以及海水處理(添加海水素0.1g)，將各處理組的添加物都和布丁液拌勻，然後放入烤箱中加熱45分鐘。

取出布丁杯，觀察布丁表面、並將布丁挑開來觀察當中的顏色然後比對孟塞爾比色帖加以記錄，之後比較其氣味和顏色，非鐵類添加的布丁則可以品嚐比較味道。

(四) 砂糖鮮奶油布丁液

將二顆全蛋打入鋼鍋中拌勻，再取70克重的砂糖和120ml 的牛奶攪拌均勻，之後再加入鮮奶油120ml 調勻，過濾掉過多的泡沫。然後平均分裝入布丁杯八分滿。先將烤箱以150度預熱15分鐘。這時將布丁杯分為對照組(原味)、硫酸亞鐵處理(添加硫酸亞鐵0.1g)、檸檬酸處理(添加檸檬酸鐵0.1g)以及海水處理(添加海水素0.1g)，將各處理組的添加物都和布丁液拌勻，然後放入烤箱中加熱45分鐘。取出布丁杯，觀察布丁表面、並將布丁挑開來觀察當中的顏色然後比對孟塞爾比色帖加以記錄，之後比較其氣味和顏色，非鐵類添加的布丁則可以品嚐比較味道。

四、以布丁模擬實驗檢視自然界含鐵環境下梅納反應是否可能產生鐵錯合物。

(一) 魯米諾檢測液配製(luminol 反應試劑與雙氧水溶液最初分開擺可以延長作用時間)：

1. 配製 luminol 反應試劑：先以0.4克氫氧化鈉溶於10ml 的水，再添加0.3克氫氧化鈉以及10ml 的水，之後以0.1克魯米諾一起溶於20ml 的水，分段溶解後再加入80ml 的水混合。
2. 配製雙氧水溶液：取30%試藥級雙氧水2ml，再添加98ml 的水混合。
3. 將 luminol 反應試劑和雙氧水溶液二者混合成的魯米諾檢測液先行測試豬肝血是否有藍色螢光反應以確認檢測液效果。

(二) 單純金屬鹽類發光測試：將魯米諾檢測液分別加入到本研究中所使用的各類金屬鹽類觀察是否能夠產生螢光反應。

(三) 含亞鐵布丁餡鐵錯合物測試實驗：將10ml 魯米諾檢測液倒入布丁模擬實驗各樣品，觀察布丁是否產生螢光，如果出現螢光，則代表具有鐵錯合物產生。

(四) 逐成實驗：以兩顆蛋加入鮮奶油120ml、牛奶120ml 分裝入布丁杯，之後再各自添加鐵粉0.1g、檸檬酸鐵0.1g、硫酸亞鐵0.1g 以及不添加任何鐵質的對照組。之後以先前模擬實驗相同的溫度條件烘烤，之後於烘烤過程的5分鐘、10分鐘、15分鐘、30分鐘、45分鐘、60分鐘，取出觀察布丁餡變色情形，並挖取一茶匙加入10ml 魯米諾檢測液觀察螢光產生情形。

(五) 含三價鐵、鎳離子布丁餡的錯合物測試：將布丁原料中的檸檬酸鐵與硫酸亞鐵

替換成硝酸鐵以及硫酸鎳，進行同樣的烘烤和魯米諾檢測液螢光測試。

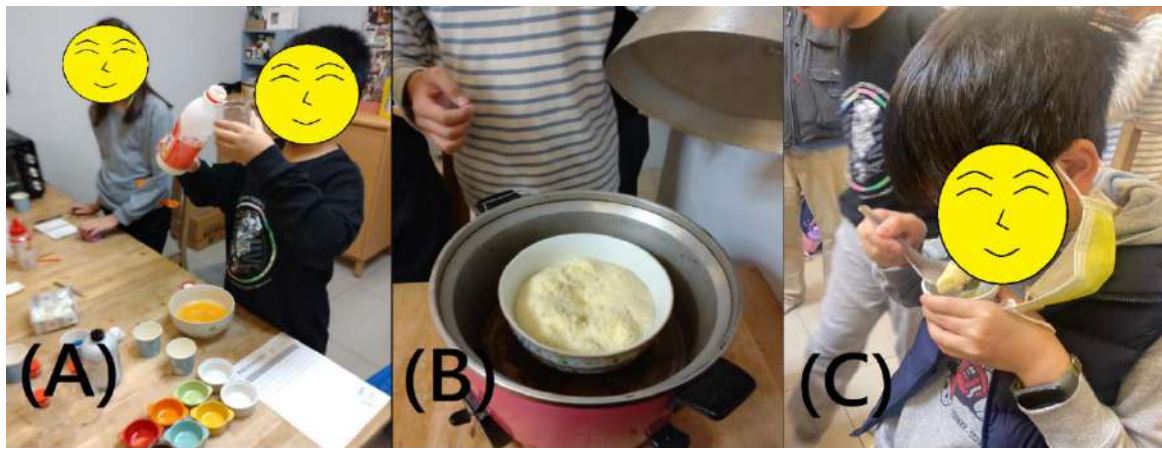
- (六) 布丁餡料外加金屬鹽類的錯合物測試：以單純布丁餡料樣品烘烤後，再各自添加1g 的硫酸亞鐵+10ml 魯米諾檢測液、1g 的硫酸鎳+10ml 魯米諾檢測液，之後觀察反應情形。

五、檢視焦糖化作用與梅納反應的不同

- (一) 布丁表面焦糖膠結測試：將先前布丁模擬實驗的各組布丁重製一份，並在每個布丁面上約灑上1~2公克的砂糖，再以火焰噴槍來回炙烤表面數秒來製作焦糖。再觀察焦糖膠結情形、顏色與物質型態等，同時針對非添加鐵鹽的布丁焦糖進行試吃。
- (二) 焦糖與鐵錯合試驗：在各布丁杯中分別加入以下幾種混合物攪拌均勻：1. 果糖75g 加入0.1g 檸檬酸鐵；2. 果糖75g 加入0.1g 硫酸亞鐵；3. 煉乳75g 加入0.1g 檸檬酸鐵；4. 煉乳75g 加入硫酸亞鐵0.1g；5. 果糖75g；6. 煉乳75g。然後烤箱以烤布丁相同條件攝氏150度預熱15分鐘，再將布丁杯各樣品以150度烘烤45分鐘。再以魯米諾檢測液測試螢光反應。這個反應主要探討在相同的布丁烘烤環境下，焦糖是否也會和鐵產生錯合反應。
- (三) 魯米諾其他測試：透過一些小測試進一步檢視魯米諾試劑在我們研究中的螢光反應實際參與者是哪些特定反應物。1.更高溫條件焦糖化作用與鐵化合物的錯合測試：先配製以下混合物：(1)硝酸鐵2g 加入砂糖2g 混勻。(2) 鐵粉2g 加入砂糖2g 混勻。(3) 小善存2g 加入果糖。再以打火機點燃，並加入魯米諾檢測液測試。2.魯米諾檢測液去除雙氧水試驗—在配製魯米諾檢測液時刻意不添加雙氧水，然後再以去除雙氧水的魯米諾進行先前所有的模擬實驗，看看是否能夠發光。

六、實際走訪海洋野外觀察梅納反應潛在產生的環境(如圖七)

- (一) 北海岸野外觀察與測定：測定北海岸麟山鼻、老梅綠石槽和金山中角灣的背景海水化學數值以及觀察境內有機質或有機殘體的分布情形，同時土鑽探看看沙灘較深的土層有無有機質，有機質是天然環境可以行使梅納反應最重要的關鍵。觀察有機質的分布將有助於推估梅納反應可能發生的局部區域。
- (二) 由於八里龍形地近淡水河主河道、基隆河出水口與二重疏洪道的三水匯流區，然後又靠近淡水河河口，這裡的水流繁複，較容易匯集淡水河河口附近各處的沉積物，因此以這裡作為海水數值測定以及觀察有機質的地方。



圖六：蒸蛋實驗(第二作者拍攝)——(A)初期牛奶取代水的蒸蛋測試。(B)蒸蛋。(C)品嘗比較。

伍、研究結果

一、尋找簡易測定梅納反應的方法

(一)酒精測定法

表一、牛奶的酒精添加結果(作者群製作)

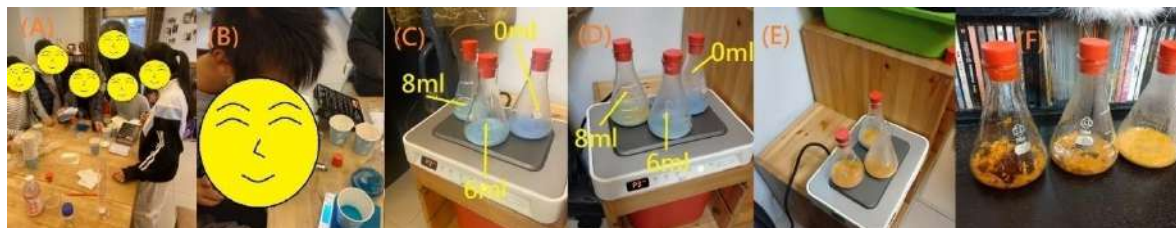
	原始數值	加入酒精後
TDS(ppm)	146	700
pH	6.75	6.77
ORP (mV)	169	158
溫度(°C)	21.4	22.4



圖七：外採樣區示意圖(作者群繪製)

初期試驗牛奶進行 TDS 和 ORP 等數值測定(如圖三、圖四)，顯示酒精的添加並不會造成溫度、ORP 和 pH 的大幅變動，而且溶液確實也產生沉澱，但是總溶解固體(TDS)並不如我們原先預估的數值整個掉下來，看起來酒精本身溶解所造成總溶解固體數值的增加還遠大於它所造成牛奶蛋白質變性沉澱所造成 TDS 下降的比率，我們覺得這和理論上的結果有差異。之後我們還是將牛奶加以加熱，但是加入酒精後的牛奶風味變得很奇怪，不太像原先未添加酒精的加熱牛奶會有一點點的焦糖味和某種乳香味，而是整個都是酒味以及其他的氣味物質，這顯示酒精在一定程度上應該是改變了牛奶本身的成分組成，因此干擾了梅納反應的結果，一個測定試劑最重要的就是不能干擾原先的反應進行，顯然酒精無法達成目標，我們宣布放棄了酒精。

(二)本氏液法

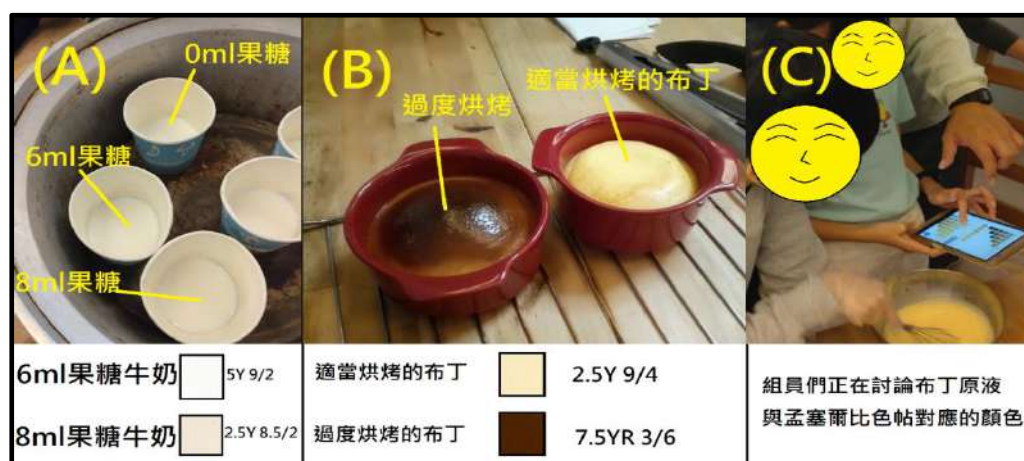


圖八：本氏液實驗(作者群拍攝)。(A)分裝牛奶和果糖。(B)本氏液秤重。(C)樣品初始加熱。(D)添加8ml 果糖的樣本開始變色。(E)樣本突然大量結塊。(F)最終結塊情形。

本氏液在與烤牛奶共同加熱的過程中，雖然不同果糖濃度的混合溶液確實在變色上會有一定程度的先後順序(添加果糖最大量的8ml 組最先產生橘色物質)，但是6ml 和 0ml 的變色差異不大，一直都是藍色；且樣本一到某一高溫就大量產生橘色塊狀物質，並且帶有焦糖味，之後塊狀物質會呈現不規則狀膠結在容器底部，顯然本氏液在加糖牛奶的加熱過程當中會受到牛奶本身加熱釋放的物質所影響並且結塊(可能是潛在釋放的糖類或其他可以與本氏液產生膠結的蛋白質)，而這樣的狀況是不利於定量測定梅納反應的。後來我們試驗了另一組沒有烤過的牛奶，結果也是如此，而且8ml 變色情形和其他糖量的變色差不多。所以我們最終放棄了本氏液的測定法。

(三) 褐變觀察—孟塞爾比色帖對照法

在酒精法和本氏液法都失敗之後，我們積極尋求其他的測定方式，後來發現梅納褐變所造成的顏色變化本身應該就可以作為測定的依據(如圖九)。



圖九：梅納褐變本身的顏色變化可運用於測定反應程度(作者群製作)。將顏色比對 Torso-Verlag 線上產品手冊中的標準孟塞爾顏色表，然後加以選取網頁最近似顏色的數值 <https://www.torso.de/media/products/Inhalt%20MunsellBookOfColorGlossy.pdf>(A)添加不同濃度果糖的牛奶蒸煮結果。(B)烘烤不同時間的布丁顏色變化。(C)組員在討論。

但顏色的描述常會因為每個人的敘述方式而非常主觀且沒有一個統一的規格，因此我們後來搜找了色彩學方面的資料，並選擇了在土壤調查、岩石學當中經常使用作為標準色彩的孟氏色帖(Munsell Color Chart，也就是孟塞爾顏色系統)。而這個色帖有電子版的範本或是商品手冊，我們便以網頁上的電子檔案來對褐變顏色進行核對與確認。褐變的顏色觀察非常需要依靠觀察者本身仔細的眼力，而且雖然孟塞爾比色帖的顏色相當豐富，但相對於自然界更為繁複的顏色變化而言也還是有某些顏色是沒有收錄進去的，這時便需要討論以最為相近顏色的編號來加以記錄。我們在實驗中發現若以孟塞爾顏色系統描述梅納褐變，那麼通常隨著褐變的加深，顏色的變化最初將會在色相上朝向黃色系的方向發展，但隨著越來越烤焦，又會朝向紅色系的方向發展，例如從適當烘烤的布丁(顏色趨近於2.5Y 9/4)到過度烘烤的布丁(顏色趨近於7.5YR 3/6)，色相便從比較偏向黃色系的2.5Y 轉變為比較偏向紅色系的7.5YR。而明度則會降低(9→4)，彩度則不一定，但是原則上彩度將會朝向增加的方向發展。

二、探究不同蛋白質所對梅納反應的影響



圖十：各種烘焙方式與味道的比較(第六作者拍攝)。(A)蒸牛奶試喝。(B)打蛋過程。(C)蛋液加水打勻後準備蒸蛋。(D)蒸蛋試吃。(E)未加鮮奶油烘烤出的布丁，風味還是比較偏向甜的蒸蛋。

在這一階段的實驗當中，我們確認特定的梅納反應其實是需要不同種類的蛋白質同時作用才能夠反應完全，就像我們如果僅使用牛奶、光是雞蛋或光是混合雞蛋與牛奶，都並沒有辦法製造出蛋塔內餡所需的梅納反應。少了雞蛋液的牛奶僅能夠製造出烤牛奶的少許口感變化；而如果只有雞蛋液和牛奶，即使加了含有與鮮奶油部分共通成分如牛奶脂肪的煉乳，也確實發生了梅納反應改變了反應物的色澤和結構，但是製作出來的烤布丁口感上仍然帶有濃厚的蒸蛋味道、挖起來的觸感上，也

並非一般的烤布丁。不過，若是牛奶與雞蛋液僅只混入鮮奶油，雖然烤出來的蛋塔布丁餡味道仍然比較淡，但是烤出來的風味會比少了鮮奶油的測試更貼近布丁一些，鮮奶油應該提供了烤布丁風味重要的蛋白質。

另一方面，即使是同樣的牛奶加糖，但是不同的烹飪方式，確實會製造出不一樣的風味，蒸牛奶和烤牛奶的味道就是不太一樣。雖然牛奶光是以蒸煮的方式就能夠製造出一點點鬆餅味的氣味(梅納反應還是有一些產生)，然而牛奶在烘烤過程的高溫並且水分更少的情形下會有更為顯著的梅納反應，產生更複雜的風味。我們發現黑糖的濃度如果偏高會在蒸煮牛奶的過程當中製造苦味，像是添加8ml 黑糖的牛奶在蒸煮後甜味會變差，變得和沒加糖的甜度差不多，並且產生苦味，很有可能那些產生甜度的分子都去製造苦味了。黑糖的主成分是蔗糖，蔗糖並不是會和蛋白質產生梅納反應的還原糖，然而當蔗糖和酸一起加熱時，將會分解成葡萄糖和果糖這兩種單糖分子(兩者都是葡萄糖)。這是一種「轉化糖」(invert sugar)的情形。果糖與葡萄糖共存時常會維持黏性液體的狀態而不易結晶。這時便可以參與梅納反應了。

而在後續的實驗過程中，從不同組烤布丁的顏色呈現我們也發現不同的還原糖(果糖、砂糖與煉乳)，同樣也會造成梅納反應有不一樣的產物呈現，這些差異會顯現在布丁餡料烤所呈現的風味和色澤。

三、以烤蛋塔模擬實驗探索海洋梅納反應當中海水鹽份、硫酸亞鹽和檸檬酸鐵的影響情形。

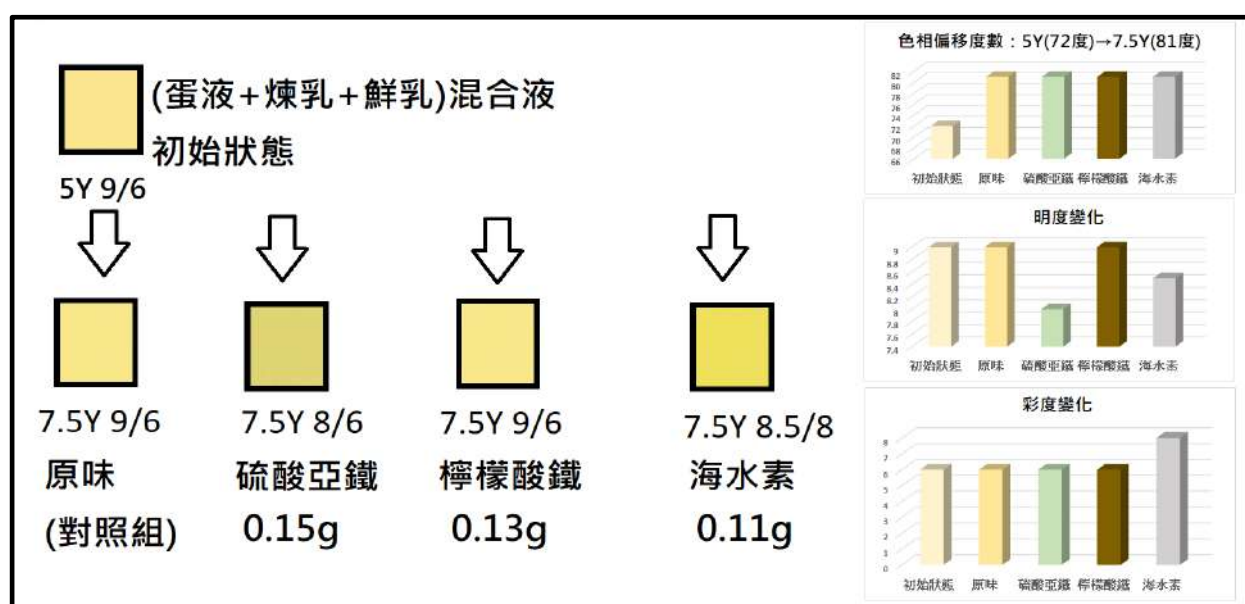


圖十一：鹽類添加實驗的過程(作者群拍攝)。(A)正在添加海鹽。(B)正在添加硫酸亞鐵。(C)正在添加檸檬酸鐵以及測定初始蛋液的化學數值。(D)將各處理蛋液拿去烘烤。(E)比對孟氏色帖。

(一)煉乳無鮮奶油布丁液

煉乳無鮮奶油布丁液是用煉乳加雞蛋再加牛奶所製作，比起先前以果糖加牛奶加

蛋糕的製作方式要更有一些布丁味，但整體風味仍然比較像甜的蒸蛋。我們發現要製作真正的布丁，鮮奶油仍是不可少的配料。這也顯示了每一種梅納反應實際上都是獨一無二的，這些梅納反應有些需要不同種的蛋白質加入或是不同種的還原糖加入，而這樣也因此讓烹飪的氣味與風味有極大的多樣性。我們在思索，當走出室內廚房而是在自然環境當中土壤與海洋的梅納反應也應該是非常多元的，尤其海洋與土壤當中的梅納反應還可發生在相對比較沒那麼高溫的環境，例如土壤肥料當中的梅納反應可以發生在有氧發酵嗜熱相期間（thermophilic phase, TP）的60.2°C並且產生腐植酸(Mu 等，2022)。



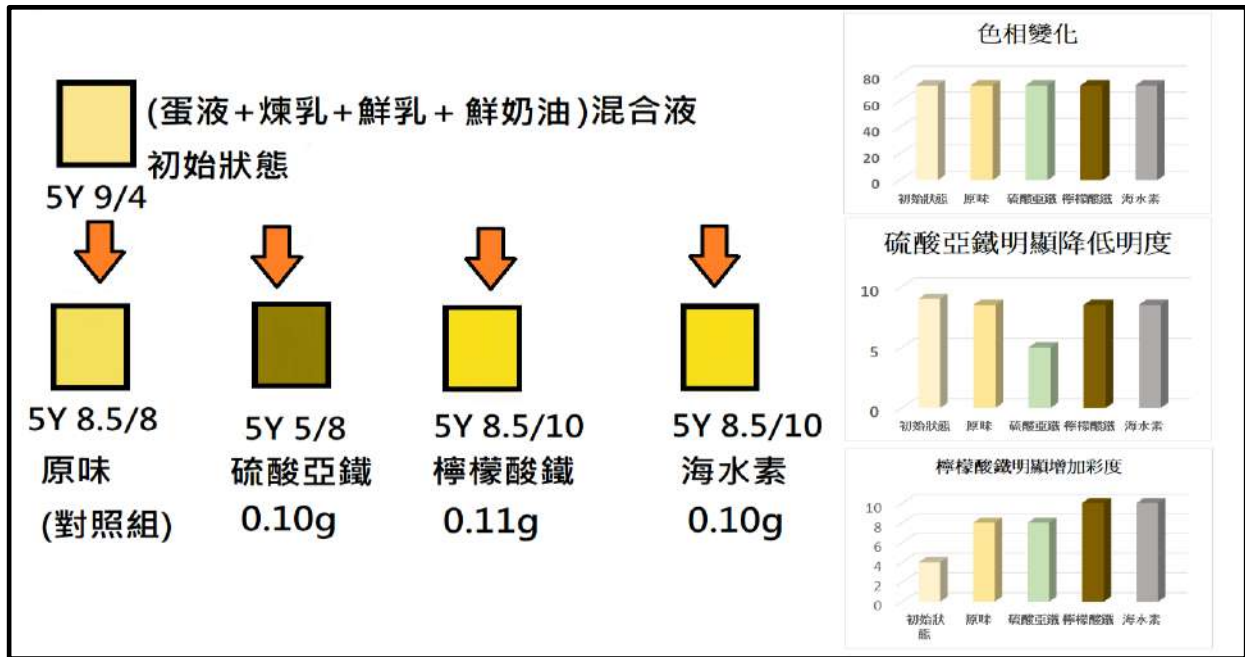
圖十二：蛋液+煉乳+鮮乳混合液的布丁實驗結果(作者群製作)，各顏色引用自 Torso-Verlag 線上產品手冊中的標準孟塞爾顏色 <https://reurl.cc/L4LGp9>。

我們的布丁變色情形如圖十二，可以發現雖然顏色變化沒有那麼明顯，但是經過梅納褐變之後，確實各樣本的顏色都加深了一些(色相明顯增加)。其中硫酸亞鐵和海水素比較明確可以增進布丁的褐變，使明度減少。海水素可讓彩度增加。

(二)煉乳鮮奶油布丁液

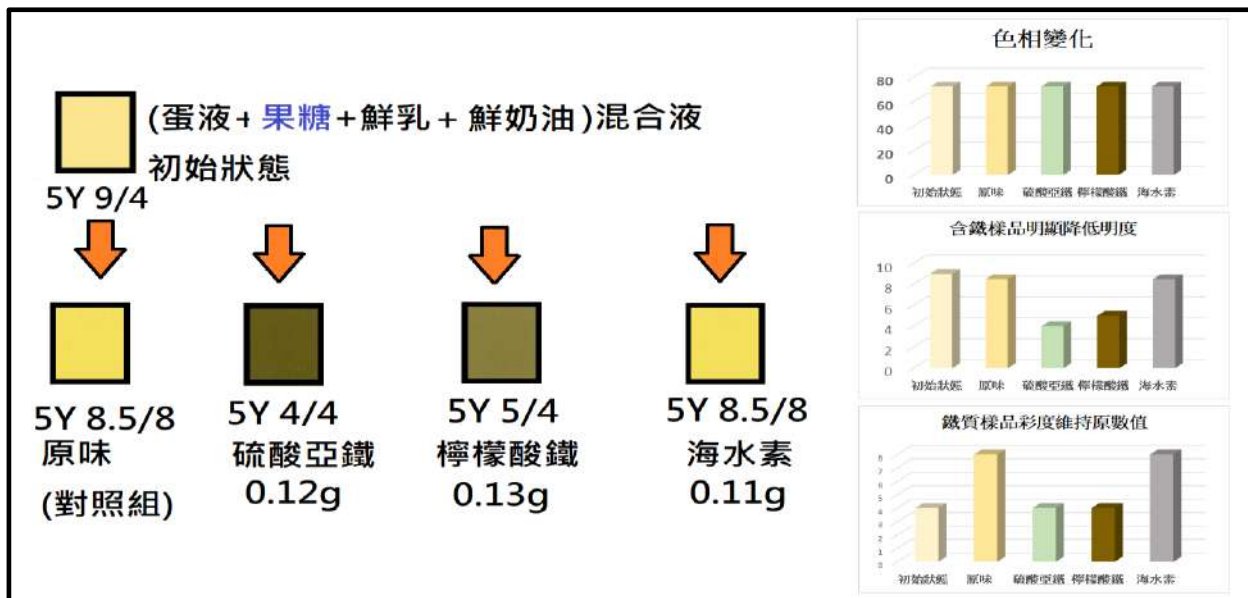
煉乳鮮奶油布丁液是真正第一個製作出標準布丁口感與氣味的配製方式。可以發現當鮮奶油加入之後，整個布丁的味道和氣味都變得更加豐富，並且也取代了一直以來前面幾次實驗的蒸蛋味。煉乳鮮奶油布丁液在梅納反應中的變色情形如圖十三，可以發現顏色變化比沒有加鮮奶油的情形明顯很多，在這組實驗當中，各樣品都明顯降低明度，尤其是硫酸亞鐵非常顯著以降低明度的方式增加布丁的褐變。各樣品均增加

了彩度，尤其是檸檬酸鐵與海水素。



圖十三：蛋液+煉乳+鮮乳+鮮奶油混合液的烤布丁實驗結果(作者群製作)，各顏色引用自 Torso-Verlag 線上產品手冊中的標準孟塞爾顏色 <https://reurl.cc/L4LGp9>。

(三)果糖鮮奶油蛋塔內餡布丁液

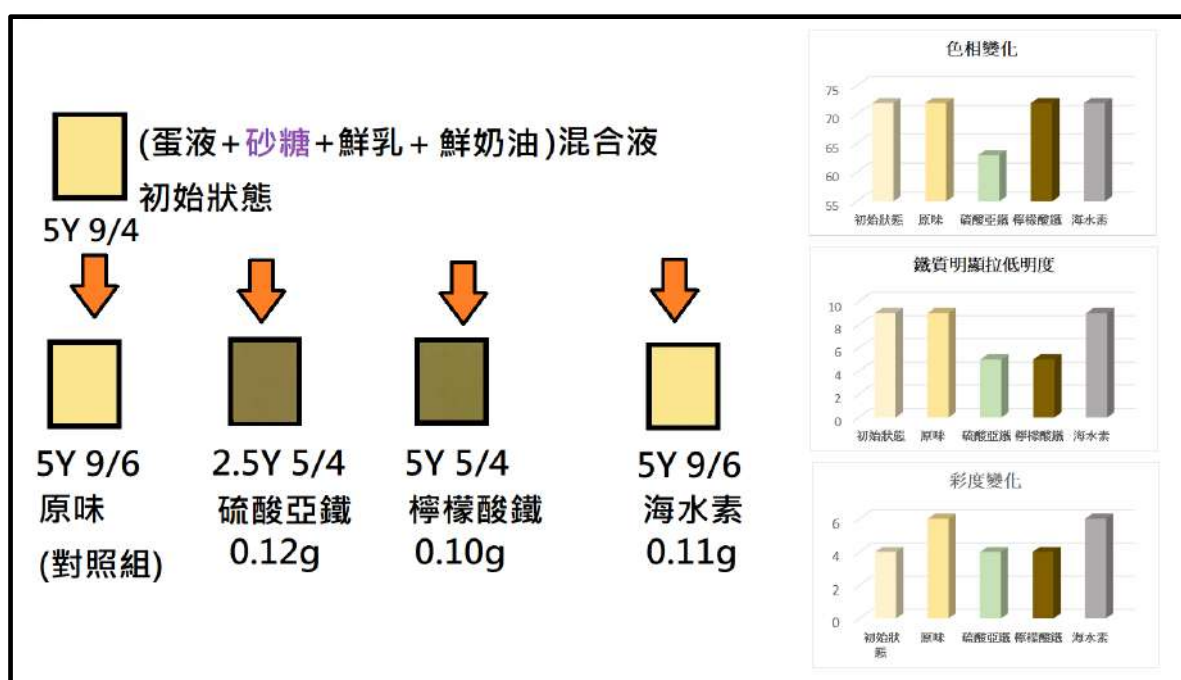


圖十四：蛋液+果糖+鮮乳+鮮奶油混合液的布丁實驗結果(作者群製作)，各顏色引用自 Torso-Verlag 線上產品手冊中的標準孟塞爾顏色 <https://reurl.cc/L4LGp9>

將煉乳鮮奶油布丁液中的煉乳替換為果糖後。實驗結果如圖十四。可以發現兩種鐵鹽的反應情形明顯增強了，雖然外層的布丁顏色和原味相似，但戳開內層布丁出現

很深顏色的斑塊，我們的圖片是採取內層餡料深色的部分來製作。在這組實驗添加檸檬酸鐵的樣本內陷顏色明顯加深很多，雖然添加檸檬酸鐵樣本的變色深度仍舊比硫酸亞鐵淺一點，但可以知道無論硫酸亞鐵和檸檬酸鐵在這項實驗都可大幅增進布丁的褐變，使得明度數值明顯下降。我們推測果糖是完整的純還原糖，不像煉乳中的成份還有砂糖(非還原糖，需要在加熱當中作轉換)以及其他的蛋白質等成分，真正的乳糖成分較低，所以梅納反應的進行會比較強一些。不過這組合鐵樣品的彩度則維持不變。

(四)砂糖鮮奶油布丁液



圖十五：蛋液+砂糖+鮮乳+鮮奶油混合液的布丁實驗結果(作者群製作)，各顏色引用自 Torso-Verlag 線上產品手冊中的標準孟塞爾顏色 <https://reurl.cc/LALGp9>。

以砂糖取代果糖的實驗結果如圖十五，可以發現砂糖的實驗結果並不如果糖明顯，雖然砂糖的糖份程度比煉乳精純，但砂糖的組成是蔗糖，蔗糖不是還原糖，仍需要經過一個轉化糖的程序。加上果糖是自然界糖度最高的糖，我們推測這是造成砂糖的梅納褐變沒有果糖明顯的原因。但無論如何，在這一組當中硫酸亞鐵和檸檬酸鐵仍舊很明顯加強了布丁樣本褐變的情形。

我們如果比較一下各組原始蛋液的化學測定，會發現煉乳當中甚至還有提供一部分的鐵質(雖然不多，可能來自於乳鐵蛋白或其他的微量鐵來源)，但是梅納褐變的反應情形仍然並不如果糖與砂糖組的結果，可見得還原糖的純度和糖度在梅納反應當中也是十分重要的。

表二、布丁模擬實驗不同醣類處理的原液比較圖(作者群製作)

各原始蛋液	煉乳 (無鮮奶油)	煉乳 (有鮮奶油)	果糖 (有鮮奶油)	砂糖 (有鮮奶油)
初始顏色	5Y 9/6	5Y 9/4	5Y 9/4	5Y 9/4
完成顏色	7.5Y 9/6	5Y 8.5/8	5Y 8.5/8	5Y 9/6
TDS(ppm)	545	1700	1320	1130
pH	7.22	7.12	8.37	7.30
ORP (mV)	217	288	283	277
鐵離子(ppm)	2	1	0	0
用蛋量(顆)	2	2	2	2
牛奶實測用量(ml)	120	120	120	120
鮮奶油實測用量(ml)	0	120	120	120
實驗組額外添加物				
海水素實測重量(g) (模擬海水滲入)	0.11	0.10	0.11	0.11
硫酸亞鐵實測量(g) (模擬硫酸亞鐵)	0.15	0.10	0.12	0.12
檸檬酸鐵實測量(g) (模擬檸檬酸鐵)	0.13	0.11	0.13	0.10

四、以布丁模擬實驗檢視自然界含鐵環境下梅納反應是否可能產生鐵錯合物



圖十六：以魯米諾螢光效應檢測鐵錯合物的情形(第二作者拍攝)。(A)將魯米諾檢測液加入到煉乳鮮奶油布丁組以及果糖鮮奶油布丁組的各樣本中，發現有添加硫酸亞鐵的樣本呈現明顯的藍色螢光，而添加檸檬酸鐵的樣本則只有微弱的螢光。(B)因此將兩組添加檸檬酸鐵發出微弱螢光的樣本擺入紙盒中。(C)發現無論是煉乳鮮奶油組或是果糖鮮奶油組，有添加檸檬酸鐵的樣本在暗處也都會呈現美麗的藍色螢光。

- (一) 單純金屬鹽類發光測試：我們確認了各金屬鹽類(如檸檬酸鐵、硫酸亞鐵等)在沒有其他反應物存在下均無法對魯米諾檢測液產生螢光反應。
- (二) 含亞鐵布丁餡鐵錯合物測試實驗：我們發現各組布丁當中只要有添加檸檬酸鐵和硫酸亞鐵的樣本在遭遇魯米諾檢測液時都會發出炫麗的藍色螢光(如圖十六、圖十

七)。就如同我們偵探卡通或電影當中所看到魯米諾反應所對血跡造成的藍色螢光一模一樣。一般血液當中含有的過氧化氫酶具有卟啉血紅素基團，能夠催化雙氧水當中的過氧化氫轉化為水和氧氣。因此如果在血跡上噴灑含有激發劑（雙氧水+鹼）的魯米諾試劑，雙氧水會被血液催化而產生氧分子，並且將魯米諾氧化進而產生藍色螢光。而血紅素基團其實是由四個亞基所組成，每個亞基再由一條肽鏈和一個血基質分子所結合。肽鏈會盤繞摺疊成球形，並將血基質分子包覆其中，而血基質分子則是一個具有卟啉結構的小分子，中心由4個氮原子透過配位鍵結合一個亞鐵離子(鄭永銘，2021)。因此並非每一種含鐵物質都能讓魯米諾發光，必須要有特殊的配位結構，類似血紅素的配位結構才行。



圖十七：砂糖鮮奶油布丁組當中鐵鹽添加樣本在梅納反應後加入魯米諾檢測液的情形(第四作者拍攝)。

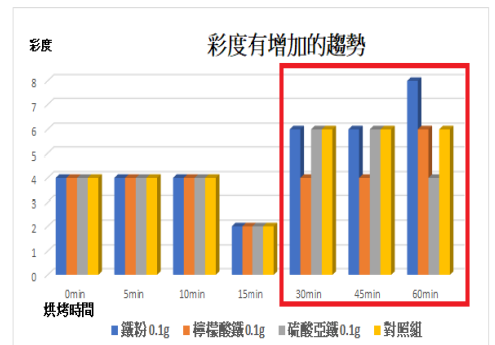
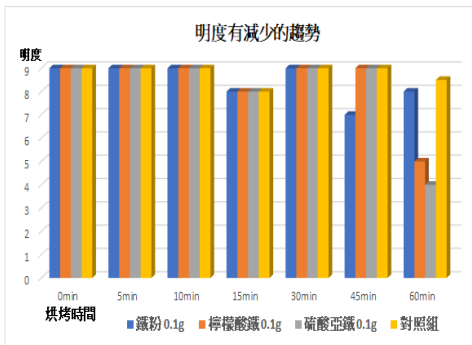
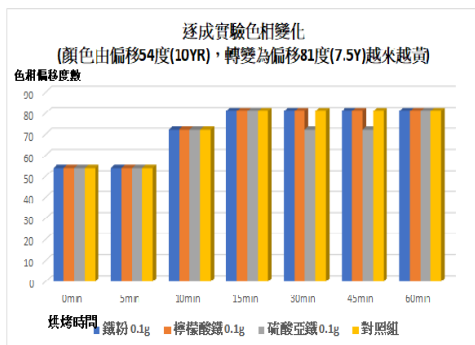
前人研究陳芯媛等人在2022年曾運用安素、富維他等確定以 Quantofix 鐵試紙可測出鐵離子的飲料樣品測試魯米諾試劑，但是魯米諾試劑並無法發光，而唯有豬肝血這類屬於生物性的鐵配位化合物(或稱為鐵錯合物)才能夠讓魯米諾發光。或是一般在中學科學示範實驗當中常用來取代動物血液，並具有鐵的八面體配位的赤血鹽(鐵氰化鉀)才能夠讓魯米諾發光(葉明蕙、楊水平)(維基百科)。而反觀乳製品、蔬菜汁與水果飲料中不是鐵錯合物形式的鐵則無法讓魯米諾發光(陳芯媛等人，2022)。因此，在我們的研究當中以實驗證實了海洋當中存量頗多的硫酸亞鐵以及一般植物和微生物常運用於釋放土壤不溶性鐵的檸檬酸鐵在進入到梅納反應當中均能夠產生類似血紅素血基質的鐵錯合物。

(三) 逐成實驗：由於梅納生成物和鐵質錯合產生的魯米諾螢光效應非常顯著，這讓我們想到如果是添加鐵的烤布丁進行魯米諾測試，或許以鐵質添加配合魯米諾的發光也可以做為測定梅納反應是否發生的重要指標，也就是利用亞鐵離子與梅納生成物明顯產生錯合的情形(可以用魯米諾反應來顯示)來斷定梅納反應已經發生了。我們因此設計了一個逐成實驗(實驗結果如表三、圖十八)。在實驗當中我們發現從布丁的色相和明度可知梅納反應大概在15分鐘已經逐漸開始，但是彩度真正較大的變化則是在30分鐘，這時候也剛好對應明顯的魯米諾螢光反應(鐵錯合物產生)。我們

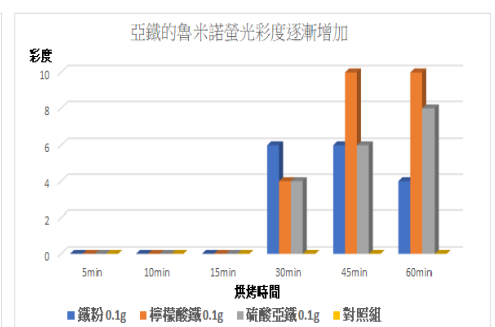
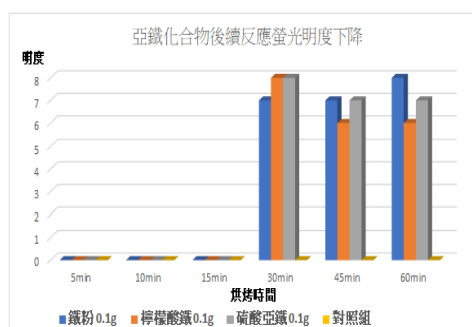
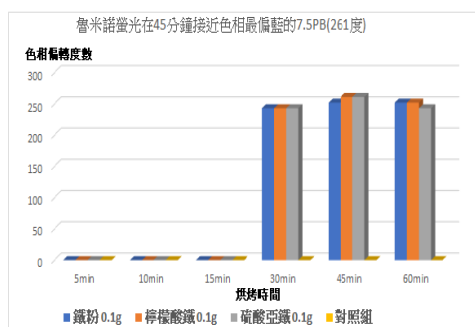
推論應該是梅納反應初期的產物並不够多，因此那些產物一直累積到足以和亞鐵離子產生錯合反應的30分鐘左右，這時才激發了魯米諾螢光。雖然十五分鐘時褐化已經開始，但是那時布丁的餡料還有大部分都沒有熟，30分鐘的布丁樣品則有2/3以上已經熟成硬化了，並且才真正開始有布丁的香味。因此從實驗的結果顯示魯米諾反應應該可以作為梅納反應是否明顯發生的重要指標。

表三、逐成實驗數據(作者群製作)

烘烤時間	5min	10min	15min	30min	45min	60min
梅納褐化反應的孟賽爾色帖紀錄						
鐵粉 0.1g	10YR 9/4	5Y 9/4	7.5Y 8/2	7.5Y 9/6	7.5Y 7/6	7.5Y 8/8
檸檬酸鐵 0.1g	10YR 9/4	5Y 9/4	7.5Y 8/2	7.5Y 9/4	7.5Y 9/4	7.5Y 5/6
硫酸亞鐵 0.1g	10YR 9/4	5Y 9/4	7.5Y 8/2	5Y 9/6	5Y 9/6	7.5Y 4/4
對照組	10YR 9/4	5Y 9/4	7.5Y 8/2	7.5Y 9/6	7.5Y 9/6	7.5Y 8.5/6
魯米諾螢光反應的孟賽爾色帖紀錄						
鐵粉 0.1g	0	0	0	2.5PB 7/6	5PB 7/6	5PB 8/4
檸檬酸鐵 0.1g	0	0	0	2.5PB 8/4	7.5PB 6/10	5PB 6/10
硫酸亞鐵 0.1g	0	0	0	2.5PB 8/4	7.5PB 7/6	2.5PB 7/8
對照組	0	0	0	0	0	0



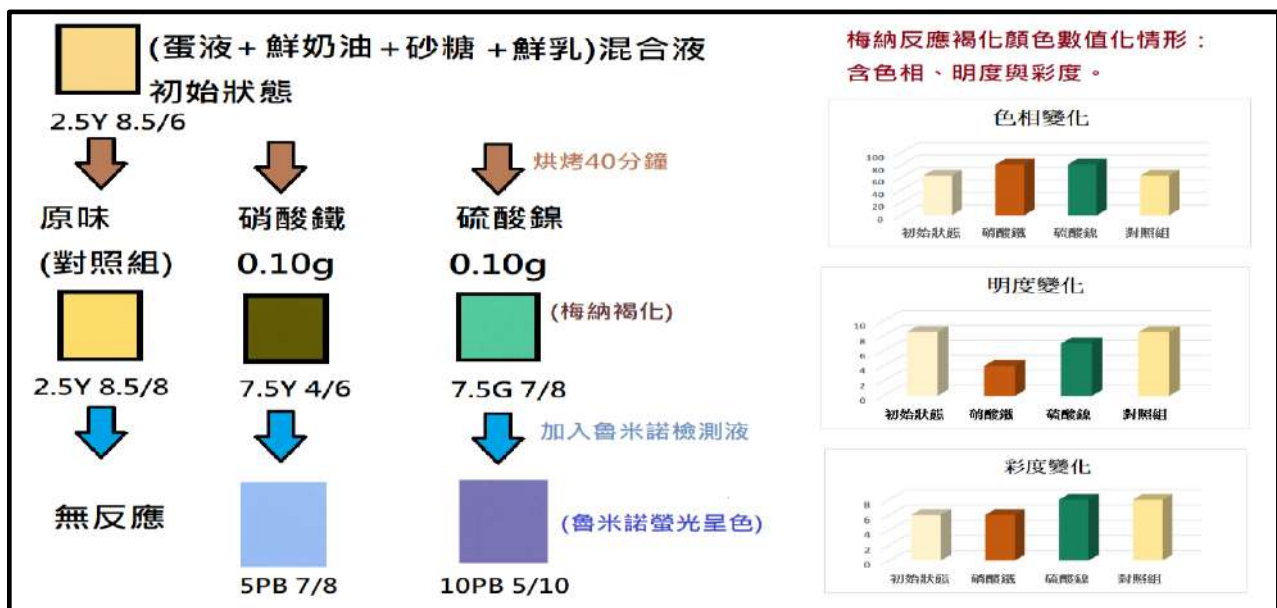
梅納反應的褐化顏色變化(依序為色相變化圖、明度變化圖與彩度變化圖)



魯米諾螢光反應顏色變化(依序為色相變化圖、明度變化圖與彩度變化圖)

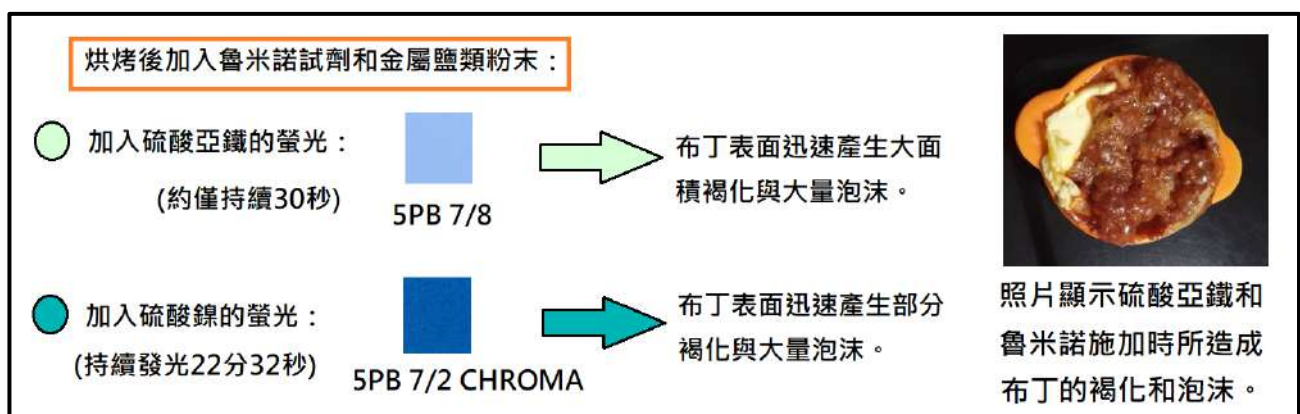
圖十八：逐成實驗中梅納反應與魯米諾反應顏色數值變化對應圖(作者群製作)

(四) 含三價鐵、鎳離子布丁餡的錯合物測試：我們發現三價鐵(硝酸鐵)與鎳離子(硫酸鎳)對布丁的褐化反應情形與亞鐵相似，也都能夠產生魯米諾反應的藍色螢光，但是鎳離子對於布丁有很強的染色作用(如圖十九)。



圖十九：硝酸鐵與硫酸鎳的梅納反應(作者群製作)。比色帖顏色引用自 Torso-Verlag 線上產品手冊中的標準孟塞爾顏色 <https://reurl.cc/L4LGp9>。

(五) 布丁餡料外加金屬鹽類的錯合物測試：在這個測試當中我們發現烤好的布丁餡另外再加入金屬鹽類和魯米諾檢測液也能迅速發生螢光反應以及進一步的劇烈褐化(如圖二十)。因此我們推估在食品工業上，或許也能透過鐵鎳之類的金屬鹽類配合魯米諾進行簡易的梅納反應檢測。另一方面，Taenzer 等人曾發現深海中的海綿和珊瑚經常產生大量活性氧(如同我們雙氧水的活性氧)，我們推估在自然界的海床當中，當經過梅納反應的有機物質，如果剛好周邊含有大量活性氧，然後又有富含金屬鹽類的深海熱液經過，應該也會產生類似我們實驗中所發現的劇烈褐化現象，並進一步組成更複雜的有機物質沉積下來。



圖二十：烘烤蛋塔布丁餡附加金屬鹽類和魯米諾檢測液的反應情形(作者群製作)。比色帖顏色引用自 Torso-Verlag 線上產品手冊中的標準孟塞爾顏色 <https://reurl.cc/L4LGp9>。

五、檢視焦糖化作用與梅納反應的不同



圖二十一：焦糖化作用實驗(作者群拍攝)。(A)以噴槍在布丁上製作焦糖。(B)布丁上灑上的砂糖逐漸變為焦糖。(C)焦糖與布丁的試吃。

- (一)布丁表面焦糖膠結測試：焦糖化產物和梅納產物雖然都呈現褐色，但是焦糖產物更偏向片狀膠結。香味上的比較，焦糖的氣味較具體而單一，不像梅納反應產物那樣有點像是複合性的香味。在以噴槍進行焦糖化作用過程中，焦糖並不容易和含鐵的布丁結合在一起。分層很明顯，比較容易分離。在噴槍火焰高溫的情形下，即使焦糖有沾附到布丁，但似乎較不容易與含鐵的布丁部位結合，後來以魯米諾檢測液倒入布丁杯也發現焦糖皮似乎並未有發光反應，顯然焦糖皮並未與布丁中的鐵結合。
- (二)焦糖與鐵錯合試驗：我們發現孟塞爾比色帖能夠清楚顯示烤布丁的梅納反應，但是不容易和焦糖化的褐化分離清楚，因此除了孟塞爾比色帖，應該要有一個更專一的測試方式能夠專門針對梅納反應。我們果糖與煉乳等醣類製品與金屬鹽類混合並將以製作布丁相同條件攝氏150度烘烤，之後進行魯米諾測試，發現全部樣品都不會有螢光反應，由於焦糖化反應在140度就會開始產生，因此這顯示至少在製作布丁這一溫度的條件下，魯米諾檢測液配合樣品中的鐵是可行的梅納指示劑。
- (三)魯米諾其他測試：包括硝酸鐵加入砂糖、鐵粉加入砂糖以及小善存加入果糖等混合粉末樣品在以火焰槍燃燒過程中倒入魯米諾檢測液時都會有短暫的藍色螢光出現，但是當燃燒超過一分鐘後再倒入魯米諾檢測液則不會有螢光。火焰槍溫度可到攝氏400度，我們推估在此溫度當中，應該讓焦糖化作用進一步生成更多其他活性物質能夠與鐵產生錯合，並且足以產生魯米諾螢光反應。由於確認高溫400度的極高溫焦糖化產物也會魯米諾與鐵鹽產生螢光，因此魯米諾和鐵鹽對於梅納反應的檢測並不適用於這樣的高溫。我們在所有的魯米諾測試當中只要去除雙氧水這個條件，就都不會有螢光反應產生，因此可以確認雙氧水當中的活性氧也是參與本研究各項魯米諾反應的要角，本研究的其他素材與環境當中都無法提供充分的活性氧參與反應。

六、實際走訪海洋野外觀察梅納反應潛在產生的環境



圖二十二：三處海域沙灘地的鑽探(作者群拍攝)。(A)麟山鼻鑽探。(B)麟山鼻挖到的含水層。(C)老梅鑽探。(D)金山中角灣鑽探。(E)金山中角灣挖到含水層。

表四、麟山鼻、老梅與金山中角灣沙灘土層鑽探觀察描述(作者群製作)

	麟山鼻	老梅石槽	金山中角灣
剖面情形	表面有不少生物殘體。很容易挖到硬石頭，碎石的分布非常廣泛，我們在土層較厚區域挖到30公分處出現含水層。	10公分生物有機質 20公分處發現鐵砂 30公分處回復一般砂 60公分挖到岩盤	表層有不少生物殘體，內層為較細質的砂粒。砂土很厚，超過60公分，我們在50公分左右挖到含水層。
可能產生梅納反應的位置	表層，因為帶有較多的生物殘體和貝類，砂土層則相對偏向石英和石礫等組成比較沒有有機質。部分潮池有分布生物有機質，會比灘地更有機會。	老梅遍地都是黑色鐵礦砂分布。老梅的有機質殘體主要也是在表層零星分布。	有部分少許生物殘體翻攪到20公分處。但是土層超過60公分主要仍為石英質的砂粒。金山中角灣可能產生梅納反應的區域應該也在表層。但表層的零星的有機殘體比較多。

無論麟山鼻、老梅或是金山中角灣灘地，有機質都過於分散，較沒有後層聚積的有機質，這對於梅納反應要形成比較不利(如表四)。但是灘地上仍然有從海浪沖上來的各類生物殘體例如烏賊骨、貝類屍體、魚類屍體以及藻類殘體等等，這些仍然有機會在一開始有機質分解釋放出胺基酸和醣類時進行梅納反應。尤其麟山鼻和老梅灘地上的鐵沙很多，附近有家長帶小孩在拿磁鐵吸引鐵沙來玩，水質當中也含有一定程度的鐵質，由於無論前人研究或是我們室內實驗當中都有發現鐵離子是有利於梅納反應的要件，因此我們推估北海岸的淺海潮間帶應該是有機會產生梅納反應的區域。淡水河灘地的有機質頗為豐富，加上紅樹林濕地的攔截，應該是更為可能可以發生野外梅納反應的地方。



圖二十三：水樣分析(作者群拍攝)。(A)分析鐵含量。(B)觀察灘地有機物質。(C)垂繩取水。

表五、水質平均表(作者群製作)

	八里龍形	麟山鼻藻礁	老梅石槽	金山中角灣
Fe (ppm)	1	2	1	1
pH	7.87	8.12	8.12	8.12
ORP	178	182	200	206
TDS	6142	21000	23200	18770
溫度°C	21.5	20	21	23

我們將八里龍形量測十次的平均值與三處海岸取水量測兩次的平均值整理如表五，淡水河有些時候的鐵離子可以達到2-3ppm，有時則為0ppm。淡水河河口至北海岸的表層環境由於具有有機質累積以及水域中鐵質的存在(尤其是淡水河口，我們曾有多次看到漂流的有機污泥，如圖二十三)，或許也有可能於表層環境的溫度適合時發生天然的梅納反應，這點也值得後續進一步研究。

陸、討論

一、尋找簡易測定梅納反應的方法

本氏液由於難以應對牛奶高溫後的變化，因此難以測量一般高溫食品料理時的梅納反應，而酒精會破壞風味直接影響梅納反應的結果，且數值也不如預期，也難以測定梅納反應的變化。最後我們是以食物熟成時的氣味、色澤的改變，並配合類黑色素產生量所造成的褐變所對應孟塞爾比色帖的標準顏色，這才得以確認可以使用孟塞爾比色帖來間接對應梅納反應的作用程度。在整個研究中，雖然個別樣品有所例外，但若以孟塞爾顏色系統描述梅納褐變，則大致會發現以下趨勢，在特定範圍的褐變當中，只要不是烤焦，色相上會越來越偏向黃色系方向偏移，而明度則會逐漸降低，彩度則大致會逐漸增加。

二、探究不同蛋白質所對梅納反應的影響

特定的梅納反應需要特定種類的蛋白質同時作用才能夠反應完全，就像烤蛋塔、布丁餡當中無論雞蛋液、牛奶與鮮奶油都是必要的混合原料，否則烤出來的成品無論風味、口感和觸感都不會是正常的成品。另一方面，不同的還原糖同樣也會造成梅納反應有不一樣的產物呈現，這些差異會顯現在布丁餡料烤出來的風味和色澤。

三、以布丁模擬實驗探索海洋梅納反應當中海水鹽份、硫酸亞鹽和檸檬酸鐵的影響情形

在我們的研究中顯示果糖相較於乳糖和砂糖，由於是純粹的還原糖，因此對於布丁梅納反應的效果是最好的。而從海水素模擬海水複合鹽份進入到有機物當中，對於梅納反應的影響不大，甚至會有些微的促進情形。而檸檬酸鐵與硫酸亞鐵均能促進梅納褐變的產生，使顏色加深。Ramonaityte 等人在2009年曾透過乳糖/甘氨酸模式溶液的熱處理研究發現銅離子、亞鐵離子和鋅離子的存在會影響反應物褐變的強度。其中亞鐵離子不管在20-100 mg/L 範圍當中的任一濃度都會加強褐變的顏色；而銅和鋅離子只有在較低濃度（分別為1和5 mg/L）下才會增進混合物的褐變，但褐變程度較高。而在高濃度的施加之下銅和鋅離子反而會抑制模型混合物的褐變情形。我們的研究顯然呼應了 Ramonaityte 等人的研究結果，因此無論是在土壤環境或是在海洋環境，當環境中有鐵鹽的存在時，便有利於梅納反應的進行。

四、以布丁模擬實驗檢視自然界含鐵環境下梅納反應是否可能產生鐵錯合物

Kim 等人在2021的研究曾發現食物當中的丙氨酸/葡萄糖混合物在110°C 兩小時的加熱梅納反應下容易和二價鐵產生錯合反應的現象。而在本次研究我們也確認了實驗中附加鐵離子能和布丁產生特定的鐵錯合物(和血紅素一樣都能促使魯米諾發光)。自然界的錯合物當中血紅素及葉綠素中的紫質環都屬於相類似的螯合劑。特定螯合劑的螯合作用也常會參與廢棄物或土壤等環境的重金屬去除過程，使有毒物質被帶走或是降低毒性等等。因此當環境中鐵不僅促進了梅納反應，並且也能因為梅納反應生成錯合物，將有可能進一步讓這類錯合物一方面因為較為複雜進而減緩有機碳被分解，有利於碳匯。甚至，部分錯合物還有機會能夠成為有助去除污染的螯合劑。另一方面，在我們的逐成實驗當中發現烤布丁餡與鐵鹽的混合原料在烘烤30分鐘時才出現較大的彩度數值增加，這時也剛好對應明顯的魯米諾螢光反應(鐵錯合物產生)。因此魯米諾檢測液與鐵鹽施加所造成布丁餡的螢光反應有機會設計作為食品工業上判別梅納反應是否發生的重要檢測方式。

五、檢視焦糖化作用與梅納反應的不同

焦糖化產物和梅納反應產物相比更偏向片狀膠結的薄片，香味上感覺也比較單

純。焦糖化作用在攝氏150度的烘培環境下並不容易和鐵產生錯合，也不容易產生魯米諾反應；但在400度高溫下則焦糖化產物仍然能和鐵鹽與魯米諾檢測液產生螢光反應。相對而言，無論是150度烘烤的布丁餡本身含有鐵鹽，或是一般純布丁餡烤熟後再添加鐵鹽或鎳鹽，這時透過魯米諾檢測液均可以產生明顯的螢光反應，其中鎳鹽的發光時間相當久，我們認為可能因為鎳的原子量比鐵大，可提供更多參與魯米諾反應的電子。綜合先前的實驗數據，我們推估在150度的溫度環境，魯米諾檢測液搭配金屬鐵鹽的螢光反應，應該可以進行梅納反應是否明顯發生的檢測依據。

六、實際走訪海洋野外觀察梅納反應潛在產生的環境

我們在野外環境中看到海洋潮間帶以及河流泥灘地的有機物分布，同時也偵測到鐵離子在水域當中的存在情形，由於鐵質是有助於梅納反應產生的。雖然我們現今還沒有找到測量野外有機質梅納反應的簡易方法，但是透過前人文獻已知梅納反應是有機會發生在土壤以及海床當中，這些在環境當中一直都會輸入進來的有機質以及穩定存在的鐵離子，未來應該會有機會促進梅納反應的生成，只是仍有待更好的技術將來去做細部的研究。

柒、結論

在這次的研究當中，我們發現了一些梅納反應的特點，或許可以有助於未來有關梅納探討的不同面向，我們將結果總結如下：

- 一、本氏液變色反應由於無法應對高溫下的試驗情形，酒精則是會使樣品的風味改變直接干擾梅納反應的發生，兩者均難以測量梅納反應。以孟塞爾比色帖透過對於褐變顏色(類黑色素產量)的比對可以間接測定梅納反應的作用情形，梅納反應常會使樣品顏色在色相趨於黃色系、明度變小與彩度變大等變化趨勢；但這套間接的方式如果要辨別梅納反應或是焦糖化作用仍需搭配食品的風味口感和產物型態等特徵。
- 二、特定的梅納反應具有其專一性，需要不同的蛋白質和不同的醣類，有時還需要多種蛋白質的共同作用。這也是某些食品風味為何獨門的重要原因。
- 三、海水複合鹽份進入到有機物當中對於梅納反應的影響不大，但仍會有些微的促進情形。而檸檬酸鐵與硫酸亞鐵均能促進梅納褐變的產生，因此無論是在土壤環境或是在海洋環境，當環境中有鐵鹽的存在時，便有利於梅納反應的進行。
- 四、梅納反應有助於鐵和有機物進一步產生鐵錯合物，這點有利於鐵和碳在沉積環境當

中的累積與碳匯的增進；另一方面，鐵錯合物的產生也可能有利於汙染環境的復育，值得後續進一步研究。

五、攝氏150度的糕餅烘培條件下，魯米諾檢測液搭配金屬鐵鹽的螢光反應，可作為食品工業原料中梅納反應是否明顯發生的重要速測方式，這是一個比孟塞爾比色法更直接且精準的方法。且這個檢測方式遠比一般實驗室採用層析法搭配質譜儀要便宜省時很多，可提供工業生產上的快速檢測。但這項檢測方式不適用於更高溫的環境，因為焦糖化產物在更高溫環境(如攝氏400度)也會與鐵鹽產生錯合並進一步與魯米諾檢測液發生螢光，因而足以干擾梅納反應的檢測。

六、淡水河河口至北海岸的表層環境由於具有有機質累積以及水域中鐵質的存在，或許有可能在表層環境發生天然的梅納反應，這點也值得後續進一步研究。

捌、參考資料及其他

- 一、 宋金明、李學剛、袁華茂、李寧(2020)。海洋生物地球化學。科學出版社。
- 二、 江芊豫、梁怡翎、黃晏玲(2012)。非蛋不可嗎?~以褐變反應機制尋找取代蛋黃液的最適配方。中華民國第 55 屆中小學科學展覽會。
- 三、 阿馬道里重排. (2021, November 29). In Wikipedia, the free encyclopedia. Retrieved February 1, 2024, from <https://reurl.cc/va41A1>
- 四、 阿簡生物日記(2007年9月27日)。本氏液做糖的檢定-精簡版。取自 https://achen.blogspot.com/2007/09/blog-post_27.html
- 五、 孟塞爾顏色系統. (2022, August 22). In Wikipedia, the free encyclopedia. Retrieved February 1, 2024, from <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%AD%9F%E5%A1%9E%E5%B0%94%E9%A2%9C%E8%89%B2%E7%B3%BB%E7%BB%9F>
- 六、 邱思魁(無日期)。食品風味學授課資料 第五章：加工引起的食品風味變化。國立臺灣海洋大學食品科學系。取自 https://fs.ntou.edu.tw/var/file/73/1073/attach/67/pta_30622_913786_66274.pdf
- 七、 歪角 色彩實驗室(2021年9月25日)。色彩可以用立體的來看？學術界的色彩體系霸主 Munsell 孟塞爾色彩體系 你不知道的色彩體系（上）| EP.002。基礎色彩課程。取自 <https://www.youtube.com/watch?v=qs1QV289awU>

- 八、 香港青年協會_創新科學中心(2022年3月14日)。「全民學 STEM」第六集—梅納反應。全民學 STEM。取自 <https://www.youtube.com/watch?v=7RGs0p3A4lo>
- 九、 泰宇文化授課橘網站(無日期)。魯米諾實驗。鑑識科學。取自 <https://reurl.cc/z14zZk>
- 十、 國立清華大學、原金國際有限公司(2021年4月13日)。吉娃斯科學小教室 | #19: 梅納反應 | 梅納褐變 | 胺基酸、糖類、類黑精、丙烯酸胺 | 兒童科普動畫 (繁體中文版)。EngineTV 原金動畫。取自 <https://www.youtube.com/watch?v=GAbbZwKfGBs>
- 十一、 陳芯媛、蔡昱瑪、朱奕潔 (2022)。探索淡水河八里龍形至北部沿海潮間帶的海水化學。新北市110學年度中小學科學展覽會作品。
- 十二、 張仲民(民76)。普通土壤學。臺北市：國立編譯館。茂昌圖書有限公司。
- 十三、 張振乾 (民106)。潮汐的呼喚—探索北海岸潮間帶。新北市：交通部觀光局北海岸及觀音山國家風景區管理處，社團法人台灣環境資訊協會。
- 十四、 葉明蕙、楊水平(2010年11月15日)。化學示範實驗：利用魯米諾偵測血液 (Using the Luminol Test to Detect Blood)。科學 Online。取自 <https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=14833>
- 十五、 詹森 (2018)。臺灣區域海洋學(二版)。國立臺灣大學出版中心。
- 十六、 劉士平、鄭錄慶、田偉、薛豔紅、壽惠霞(2011)。高等植物中鐵的代謝機制。植物生理學報(Plant Physiology Journal) 47, 10, 967-975。
- 十七、 鄭永銘(2021年3月6日)。犯罪偵察之血液偵測。跟著鄭大師玩科學。取自 <https://www.masters.tw/272134/chemiluminescence>
- 十八、 謝兆申、王明果(民84)。土壤調查技術手冊。國立中興大學土壤調查試驗中心。
- 十九、 檸檬酸鐵。(2022, November 16). In Wikipedia, the free encyclopedia. Retrieved February 1, 2024, from <https://reurl.cc/va4DOL>
- 二十、 Bahureksa, W., Young, R. B., McKenna, A. M., Chen, H., Thorn, K. A., Rosario-Ortiz, F. L. and Borch, T. (2022). Nitrogen Enrichment during Soil Organic Matter Burning and Molecular Evidence of Maillard Reactions. *Environ. Sci. Technol* 56, 7, 4597 – 4609. Retrieved from <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.1c06745>
- 二十一、 Gracheva, M., Klencsár, Z., Homonnay, Z. Solti, A. Péter, L. Machala, L., Novak, P., Kovács, k. (2023). Revealing the nuclearity of iron citrate complexes at biologically relevant conditions. *Biometals* <https://doi.org/10.1007/s10534-023-00562-1> .Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s10534-023-00562-1>

- 二十二、 Kim, E. S., Yaylayan, V. (2021). Identification of the Maillard reaction intermediates as divalent iron complexes in alanine/glucose/FeCl₂ model system using ESI/qTOF/MS/MS and isotope labelling technique. *Current Research in Food Science* 4, 287-294. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665927121000290>
- 二十三、 Moore, O. W., Curti, L., Woulds, C., Bradley, J. A., Babakhani, P., Mills, B. J. W., Homoky, W. B., Xiao, K., Bray, A. W., Fisher, B. J., Kazemian, M., Kaulich, B., Dale, A. W., Peacock, C. L. (2023). Long-term organic carbon preservation enhanced by iron and manganese. *Nature* 621, 312 – 317. Retrieved from <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06325-9>
- 二十四、 Mu, D., Qu, F., Zhu, Z., Wu, D., Qi, H., Mohamed, T. A., Liu, Y., Wei, Z. (2022). Effect of Maillard reaction on the formation of humic acid during thermophilic phase of aerobic fermentation. *Bioresource Technology* 357, 127362. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127362>
- 二十五、 Ramonaityte, D., Kersiene, M., Adams, A., Tehrani, K. A., Kimpe, N. D. (2009). The interaction of metal ions with Maillard reaction products in a lactose – glycine model system. *Food Research International* 42, 3, 331-336. DOI:10.1016/j.foodres.2008.12.008 .Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963996908002433>
- 二十六、 Taenzer, L., Wankel, S. D. Kapit, J., Pardis, W. A., Herrera, S., Auscavitch, S., Grabb, K. C., Cordes, E., Hansel, C. M.(2023). Corals and sponges are hotspots of reactive oxygen species in the deep sea. *PNAS Nexus* 2, 11, 398. Retrieved from <https://academic.oup.com/pnasnexus/article/2/11/pgad398/7420998?login=false>
- 二十七、 TORSO-VERLAG(2024). **THE MUNSELL BOOK OF COLOR (GLOSSY COLLECTION)**. Inhalt des Munsell Book of Color glossy, Scans von allen Ringbuchseiten. Retrieved from <https://reurl.cc/p34yo8>
- 二十八、 Wasmund, K., Mußmann, M., Loy, A. (2017). The life sulfuric: microbial ecology of sulfur cycling in marine sediments. *Environmental Microbiology Reports* 9, 4, 323 – 344 Retrieved from <https://ami-journals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/1758-2229.12538>

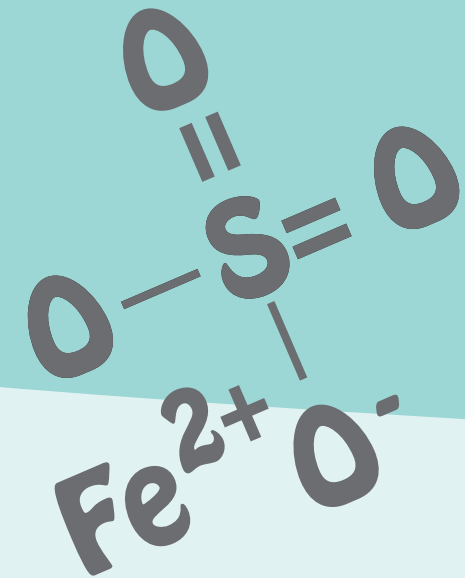
【評語】 080216

梅納反應 (Maillard Reaction) 是食品科學中極為重要的一個反應，不僅在食物烹飪中發揮重要作用，也在自然環境中對土壤與海洋沉積物的化學性質有著潛在的影響。本研究從學生對烘焙與烤肉的興趣出發，結合對梅納反應的好奇心，深入探討了梅納反應在不同環境中的應用與影響。這不僅有助於理解梅納反應在食品中的重要性，還揭示了其在環境化學中的潛在角色，具有多學科交叉研究的價值。

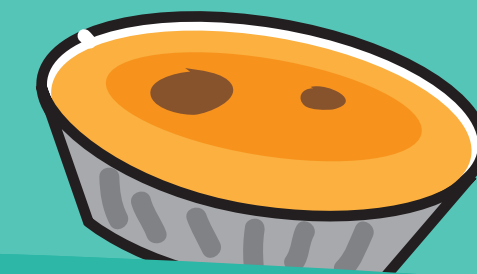
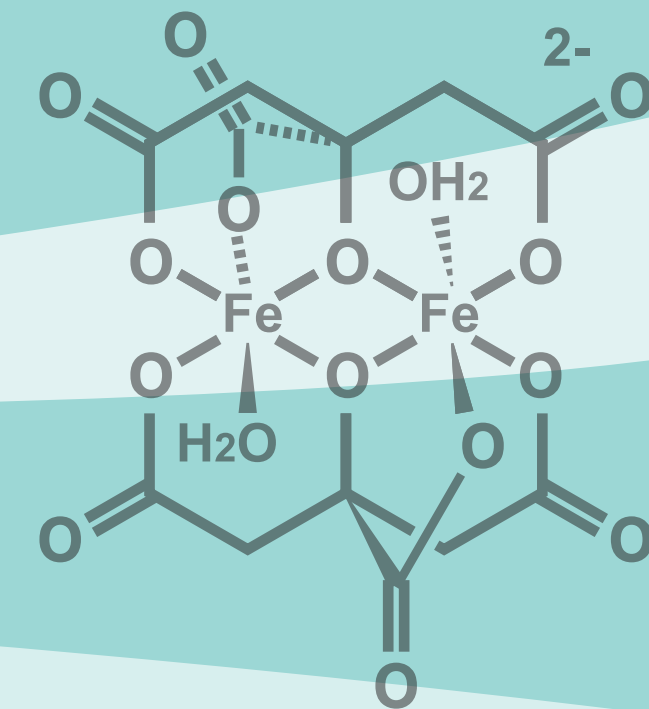
建議事項：

1. 模擬梅納反應實驗中，研究方法以目測法比對顏色帖，品嚐味道甜度等人為的直觀判斷缺乏科學方法的客觀性，也許可以使用薄層色譜 (TLC)，快速篩選和分析反應產物，觀察色譜板上的斑點變化。
2. 模擬海洋環境應考慮多種因素，包括 pH 值、鹽度、其他金屬離子和有機物的存在。僅添加硫酸亞鐵和檸檬酸鐵並不能完全模擬真實的海洋環境，可能影響實驗結果的生態相關性。

作品簡報



海中的铁蛋白塔



摘要

本研究發現食品施加鐵鹽與魯米諾檢測液的螢光反應可直接測定攝氏150度烘培環境下梅納反應是否明顯發生，不同風味的梅納反應需要不同種類的蛋白質和醣類的參與，有時甚至需要多種反應物共同作用。

海洋當中鐵鹽有助於梅納反應的進行，並且可以產生鐵錯合物，這有助於沉積物當中鐵和碳的固定以及汙染物質的去除。淡水河口與北海岸的表層環境因為有機質的累積以及水體中所攜帶的鐵質，因此或許有可能可以發生天然的梅納反應。但這些有待後續研究做更多的驗證。

貳、研究目的

- (一) 尋找簡易測定梅納反應的方法。
- (二) 探究不同蛋白質與醣類所對梅納反應的影響。
- (三) 以布丁模擬實驗探索海洋梅納反應當中海水鹽份、硫酸亞鐵和檸檬酸鐵的影響情形。
- (四) 檢視焦糖化作用與梅納反應的不同。
- (五) 以布丁模擬實驗檢視自然界含鐵環境下梅納反應是否可能產生鐵錯合物。
- (六) 實際走訪野外觀察梅納反應潛在產生的環境



圖一：研究工作情形。(A)麟山鼻灘地鑽探與有機質觀察。(B)以孟氏比色帖比對烤蛋塔顏色。(C)金山中角灣灘地鑽探與有機質觀察(D)烤蛋塔試吃。(照片由第一作者/指導老師拍攝)

參、研究設備及器材

一、化學實驗器具與材料

- (一) 酸鹼度(pH)
- (二) 總溶解固體含量(TDS)
- (三) 氧化還原電位(ORP)
- (四) 測鐵條
- (五) 烤箱、電鍋
- (六) 電子秤、本氏液、加熱板
- (七) 孟氏比色帖
- (八) 蛋塔外加模擬試驗藥品

檸檬酸鐵 - 經常作為植物根系吸取土壤鐵製造出來的產物

硫酸亞鐵 - 海洋當中重要的鐵硫化物型態

海水素 - 用以模擬海水鹽分

硫酸鎳 - 測試非鐵二價過渡金屬的魯米諾反應

硝酸鐵-用來測試三價鐵魯米諾反應、**鐵粉**(

測試純鐵元素魯米諾反應

(九) 雞蛋、牛奶、布丁杯

(十) 魯米諾、氫氧化鈉、3%雙氧水

(十一) 砂糖、果糖、煉乳(蔗糖、乳糖與乳製

品的混合物，作為布丁模擬實驗之用)、焦糖

用火焰噴槍

二、野外觀察紀錄

筆記本、筆電、生物圖鑑

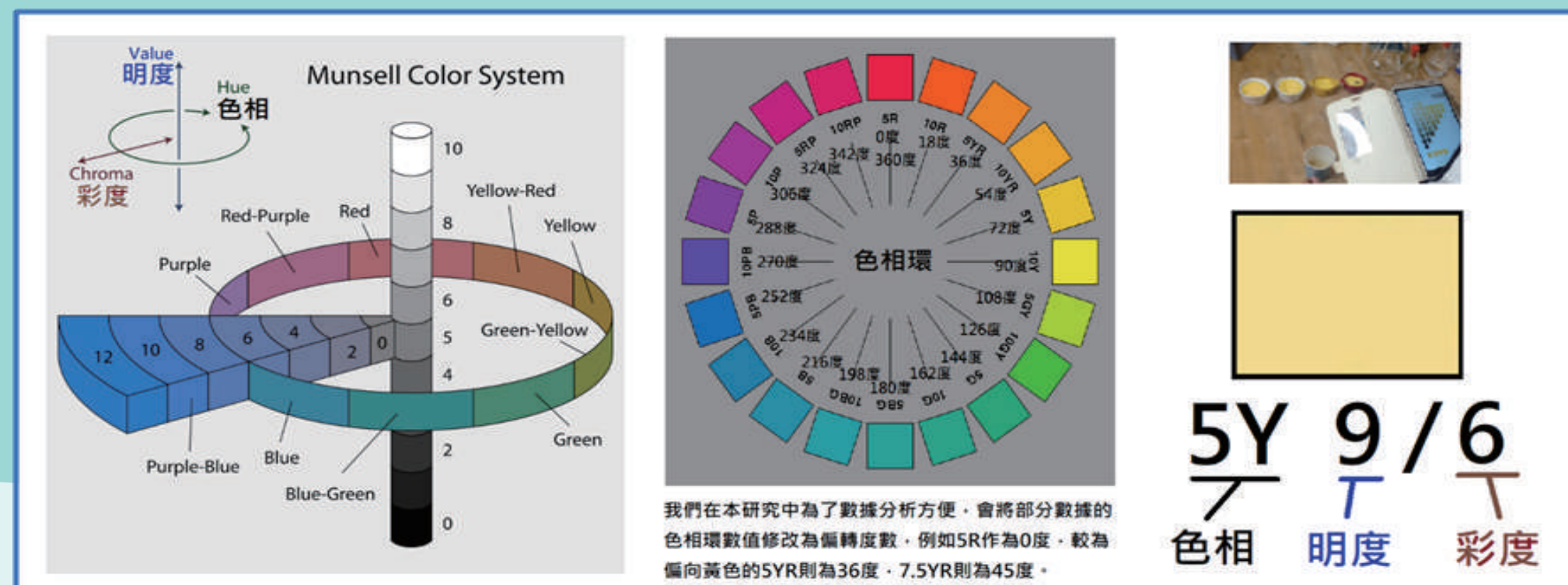
三、外採裝備

- (一) 德製Vit-LabPP定量量杯1000mL (採水用)、土鑽(土壤調查形制的土鑽，用以鑽土觀察沙灘土層的有機質分布情形，以推論可能比較容易發生梅納反應的位置)。
- (二) 寶特瓶2公升兩個(裝清水洗滌儀器)、童軍繩(低潮位的拋杯採樣)。

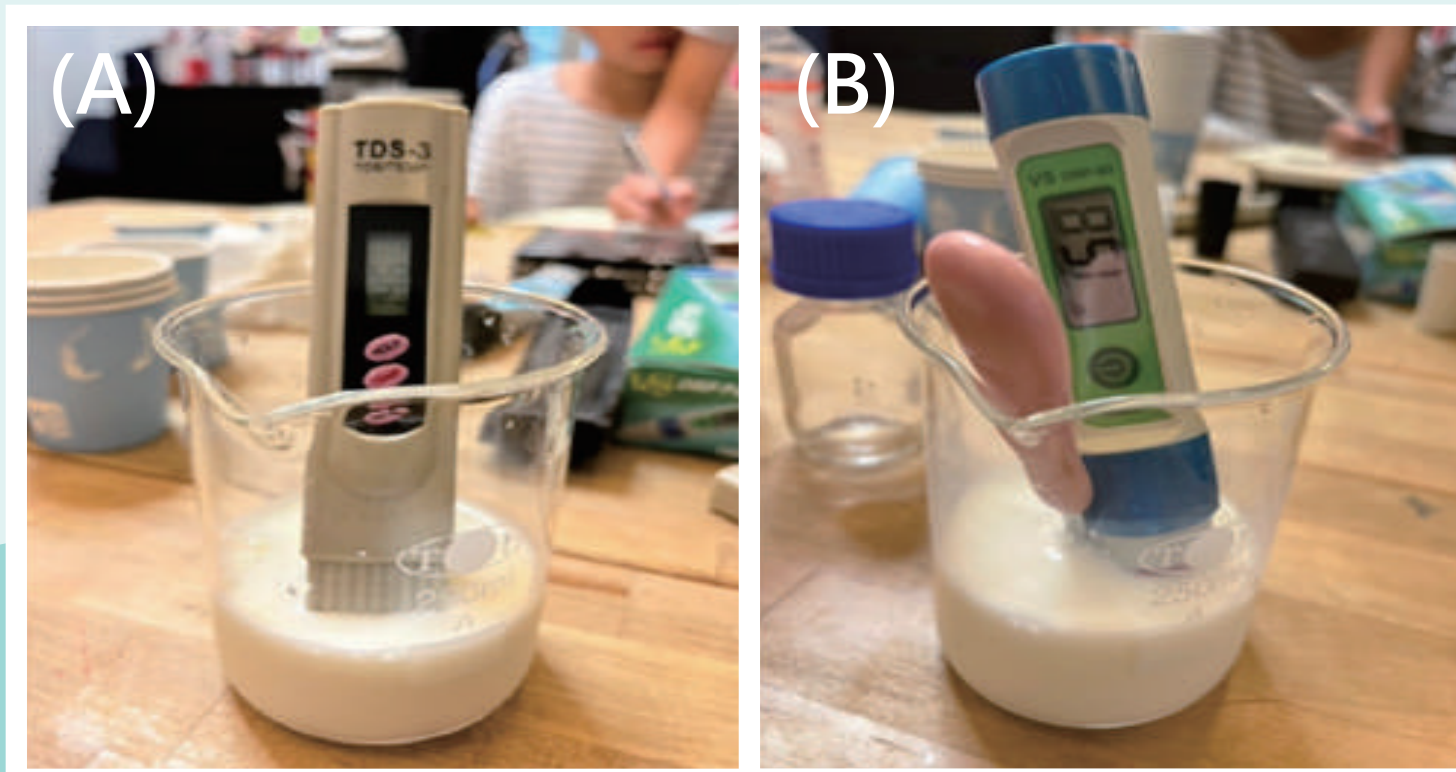
壹、研究背景

梅納反應是食物不同風味和顏色的重要推手；但它不僅僅發生在食物，近期科學家也發現它會發生在土壤與海床沉積物，並且牽動與氣候變遷有關的碳循環。因此海洋當中也一直在發生類似「烤蛋塔」的梅納反應。它有哪些影響的因素？可否從日常的烹調方法當中就找到重要線索呢？

梅納反應取決於還原糖與胺基酸在高溫下形成褐色物質與帶香味梅納的複雜反應，又稱為梅納褐變。但烹調過程另有一種焦糖化作用是只發生於醣類本身複雜焦化的過程。這兩者之間有怎樣的差異呢？

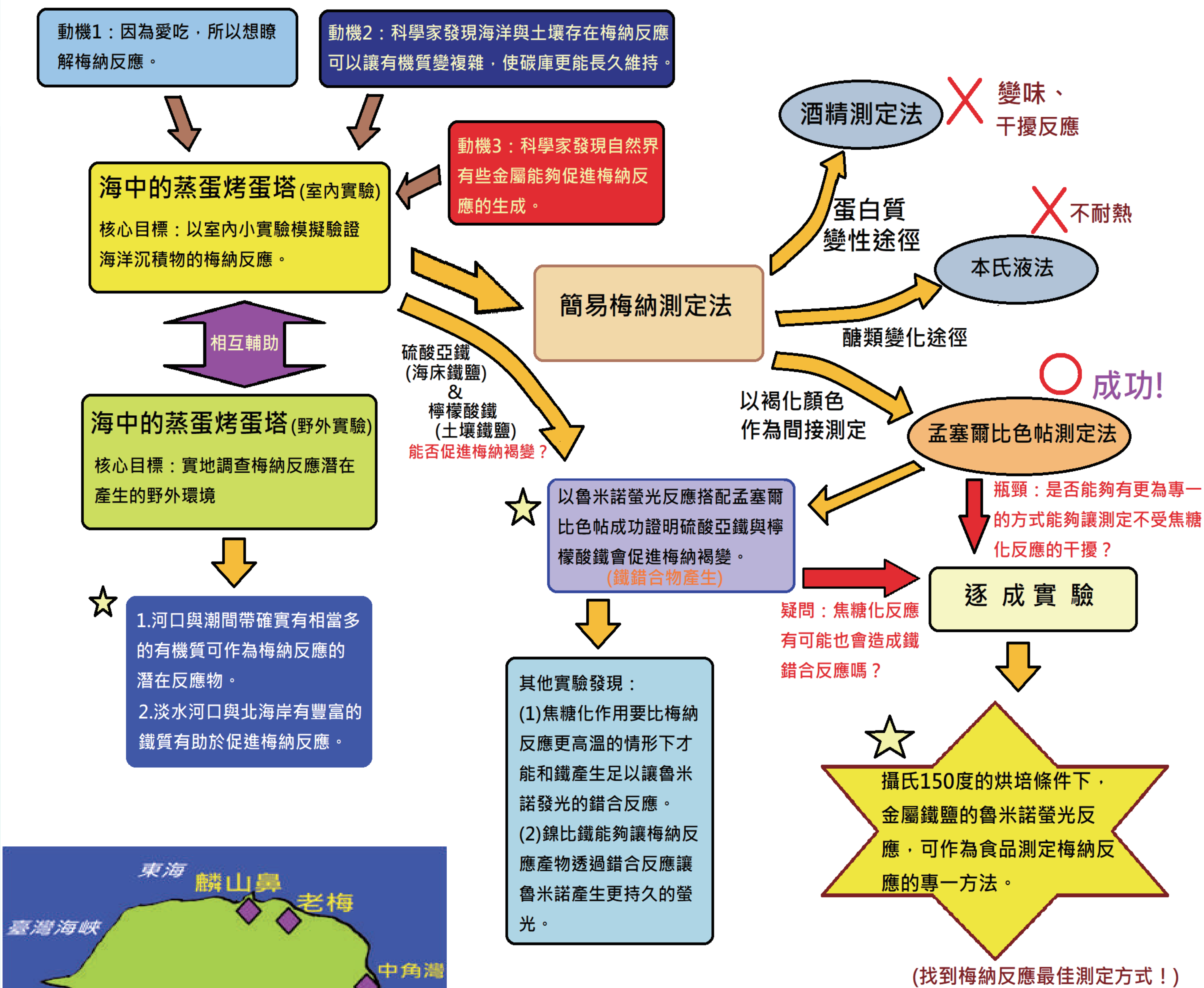


圖二：孟塞爾顏色系統與顏色表示法 (圖片引用修改自維基共享資源)



圖三：儀器檢測 (A)初期試驗牛奶TDS測定。(B)初期試驗牛奶ORP測定。(照片由第一作者/指導老師拍攝)

肆、研究過程與方法



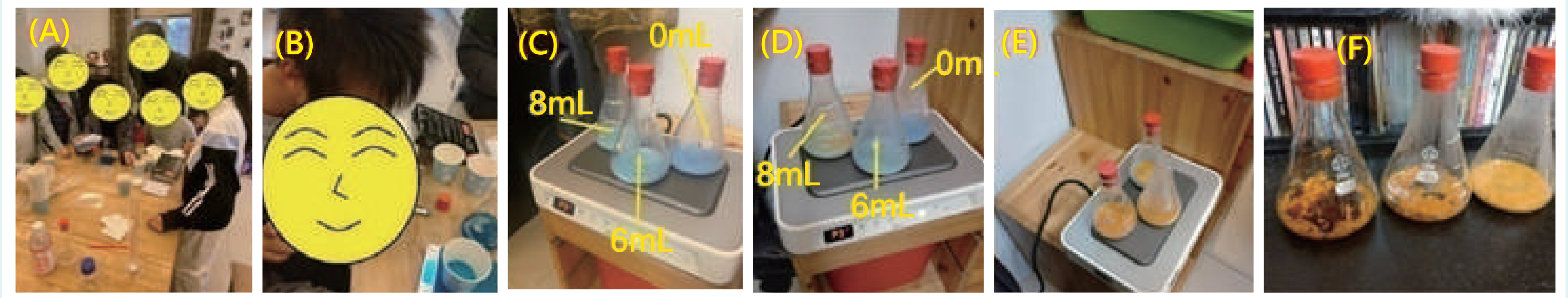
圖四：外採樣區示意圖 (作者群繪製)

圖五：研究過程流程圖 (作者群繪製)

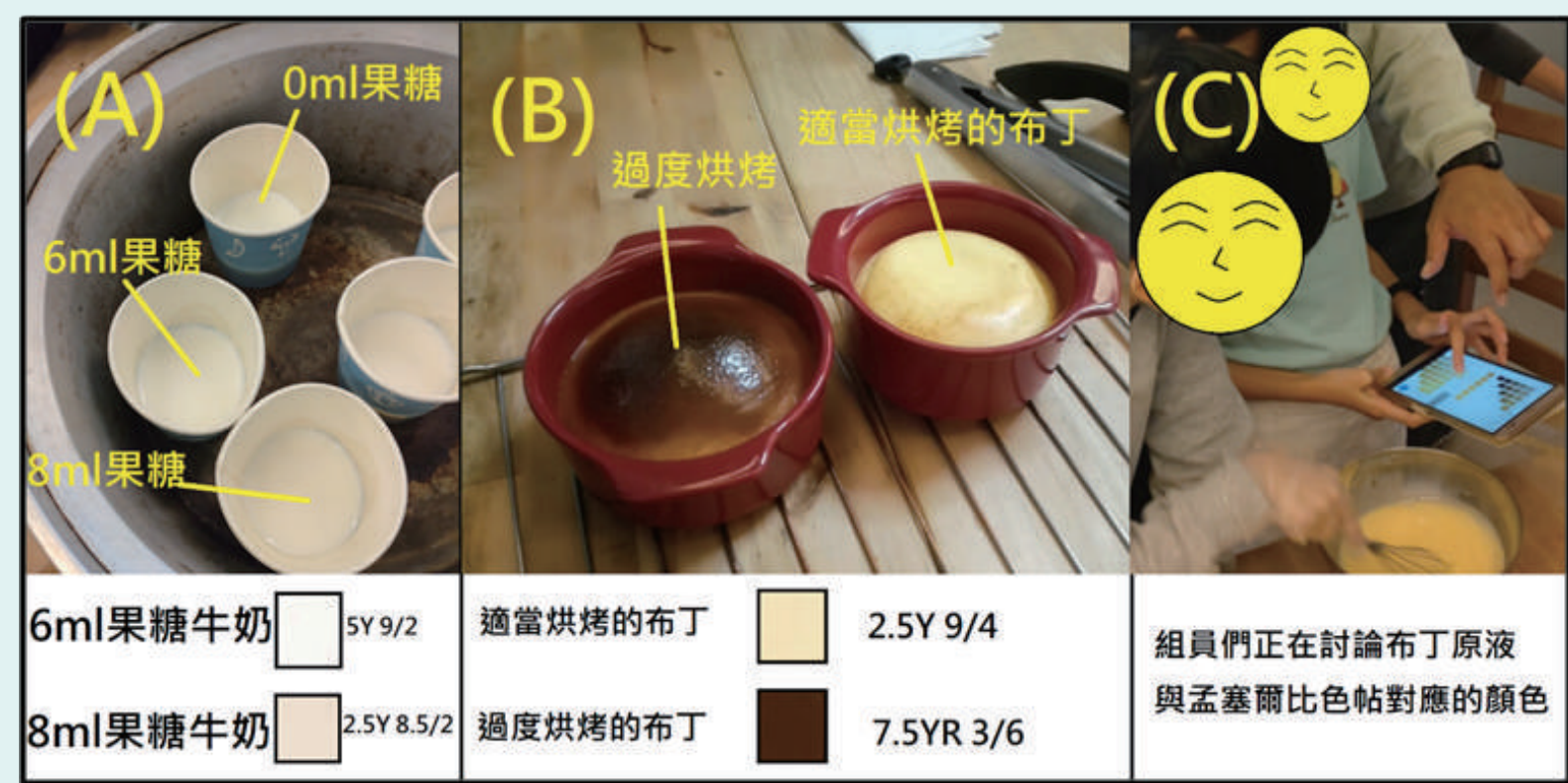
伍、結果與討論

表一、牛奶的酒精添加結果

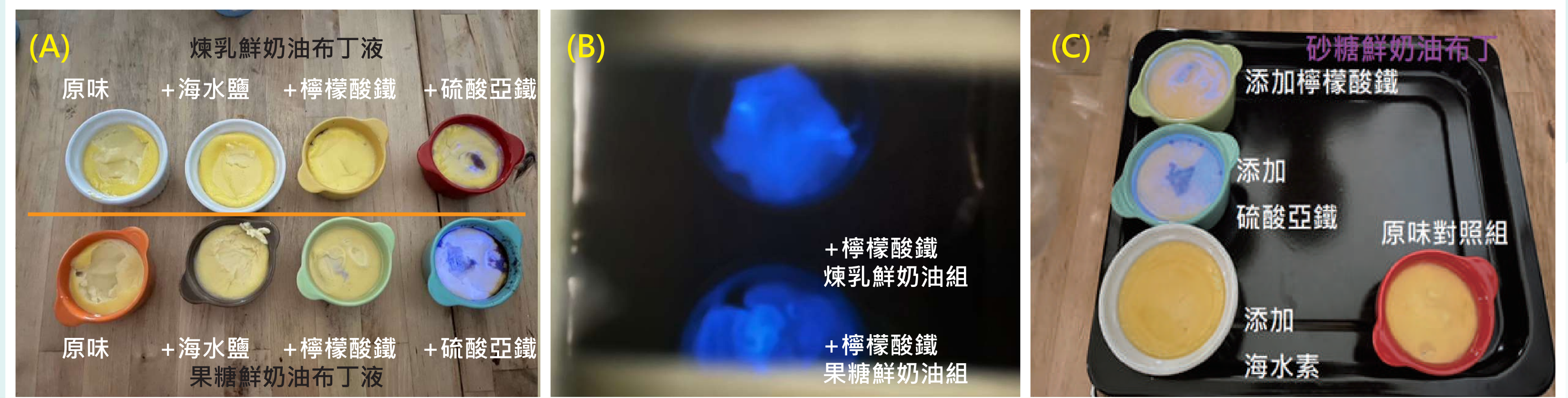
	原始數值	加入酒精後
TDS(ppm)	146	700
pH	6.75	6.77
ORP (mV)	169	158
溫度(°C)	21.4	22.4



圖六：本氏液實驗情形。(A)分裝牛奶和果糖。(B)本氏液秤重。(C)樣品初始加熱。(D)添加8mL果糖的樣本開始變色。(E)樣本突然大量結塊。(F)最終結塊情形。(照片由第一作者/指導老師拍攝)

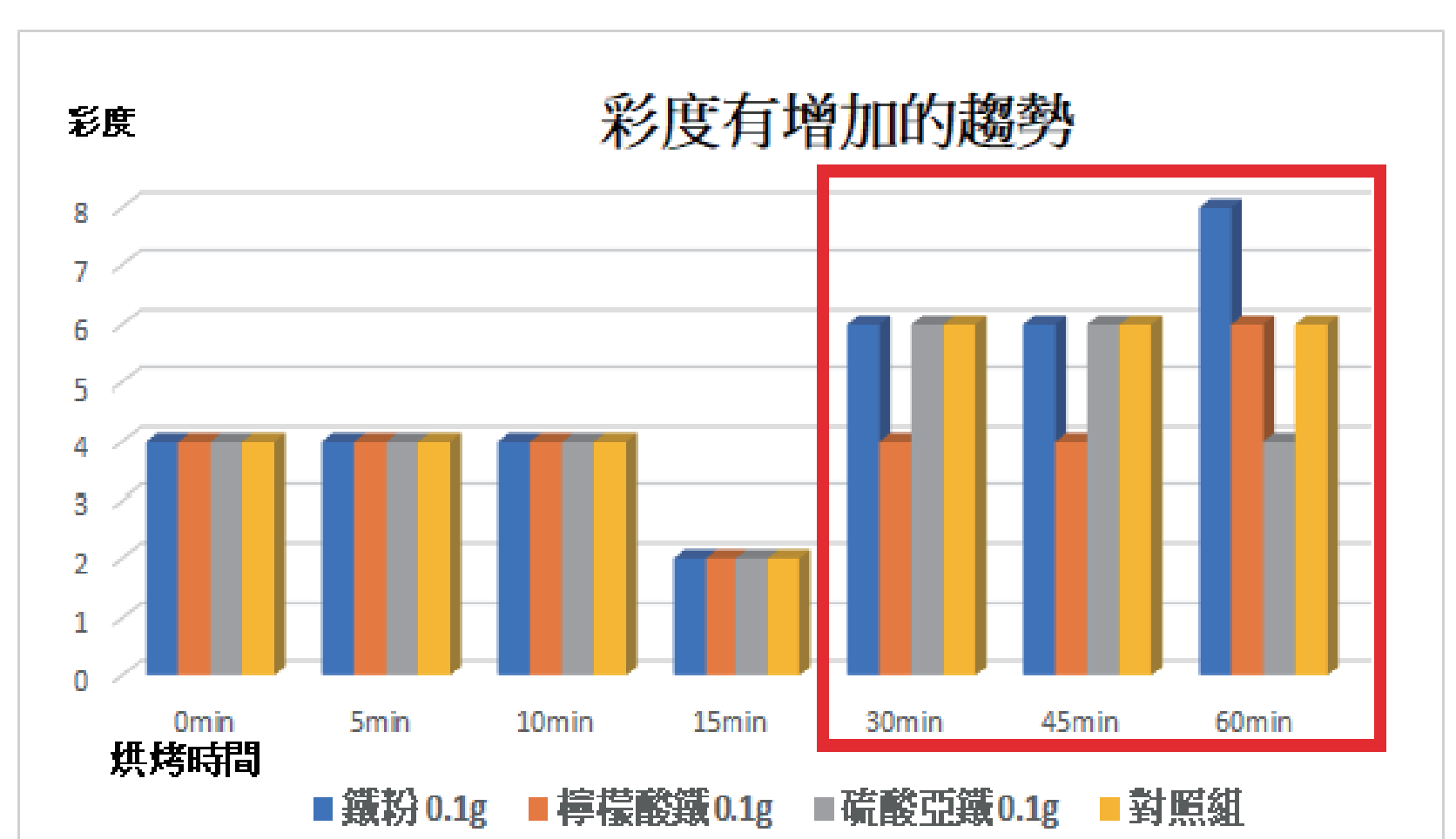
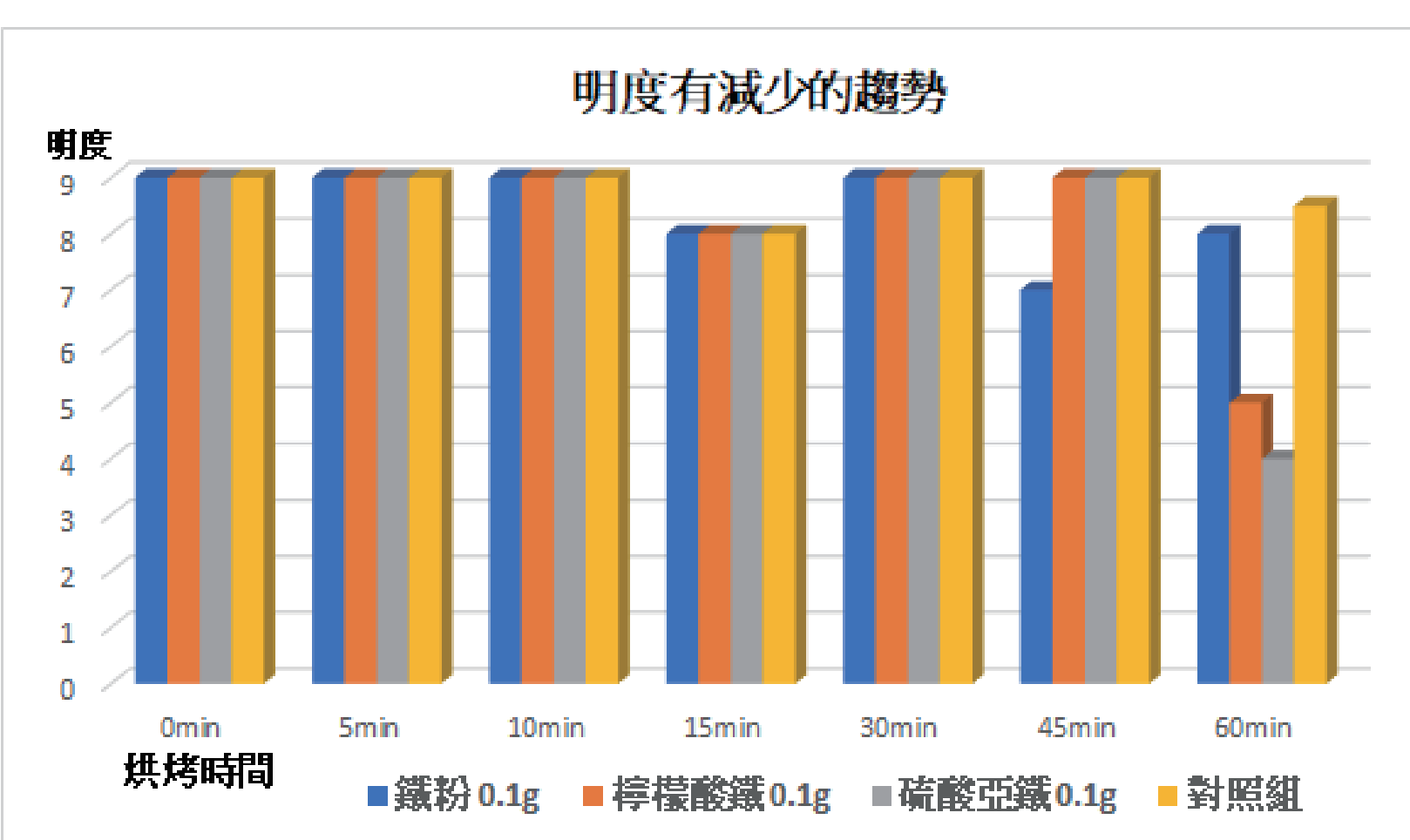
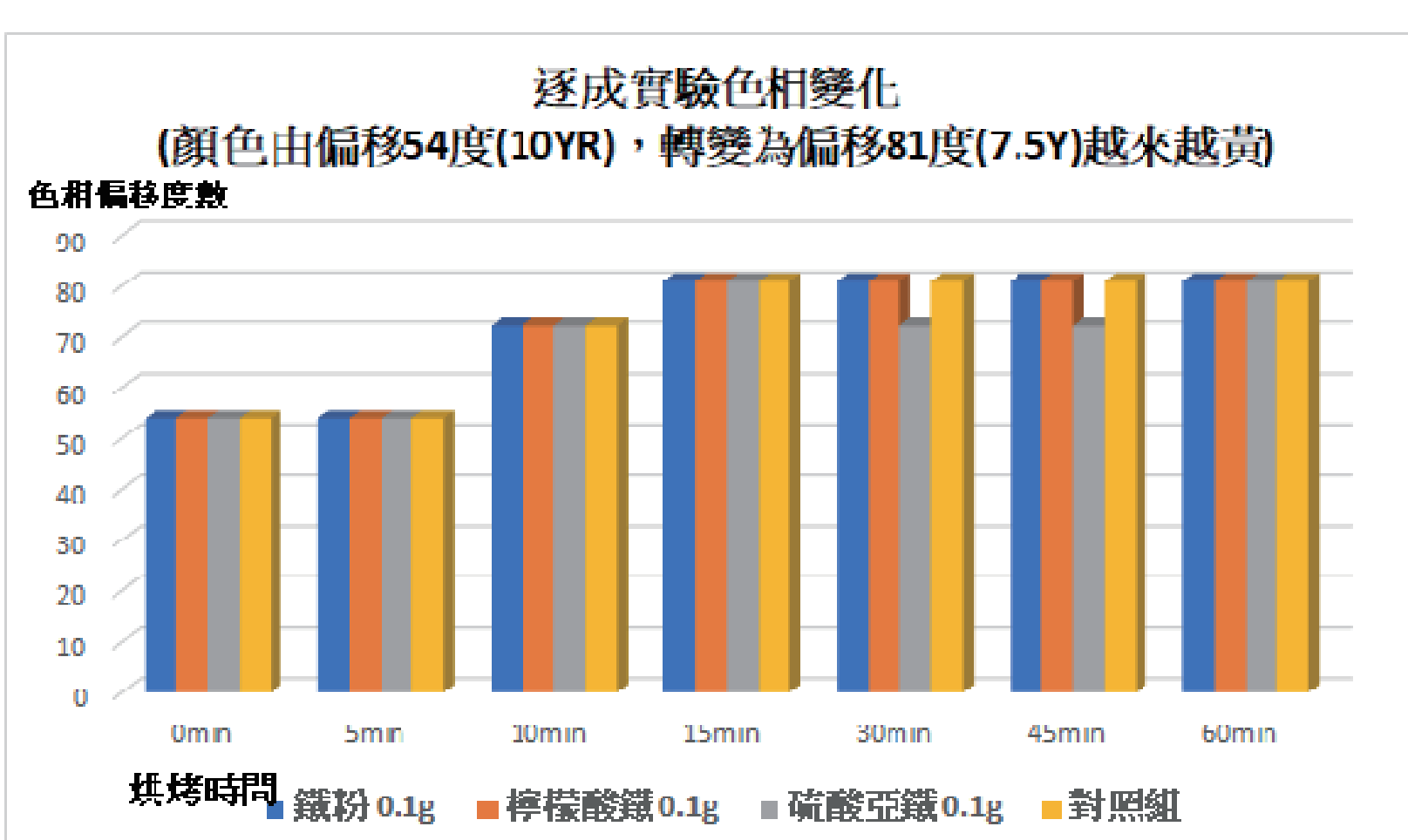


圖七：梅納褐變本身的顏色變化可運用於測定反應程度。將顏色比對Torso-Verlag線上產品手冊中的標準孟塞爾顏色表，選取網頁最近似顏色的數值(A)添加不同濃度果糖的牛奶蒸煮結果。(B)烘烤不同時間的布丁顏色變化。(C)組員在討論。(照片由作者群拍攝)

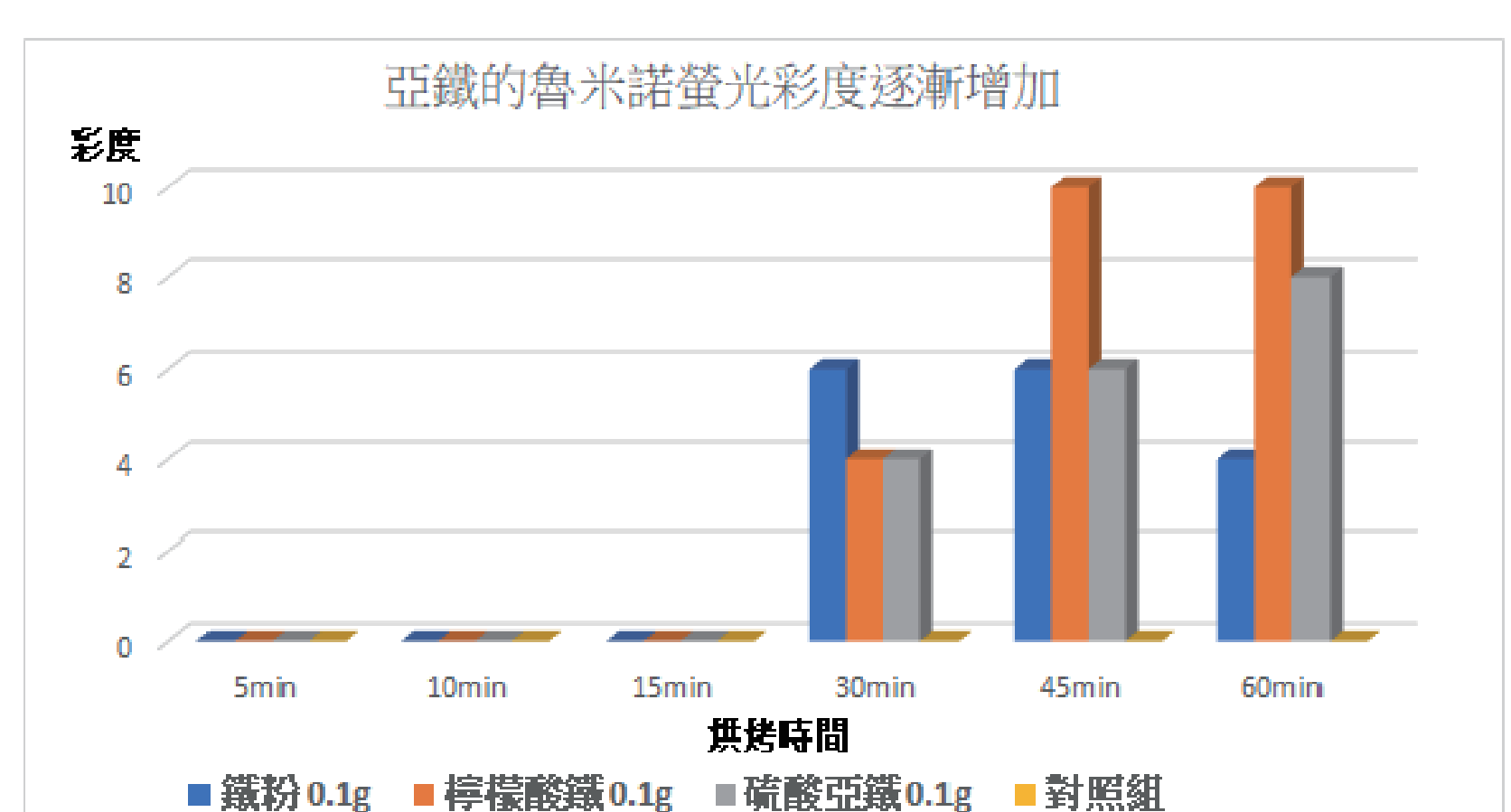
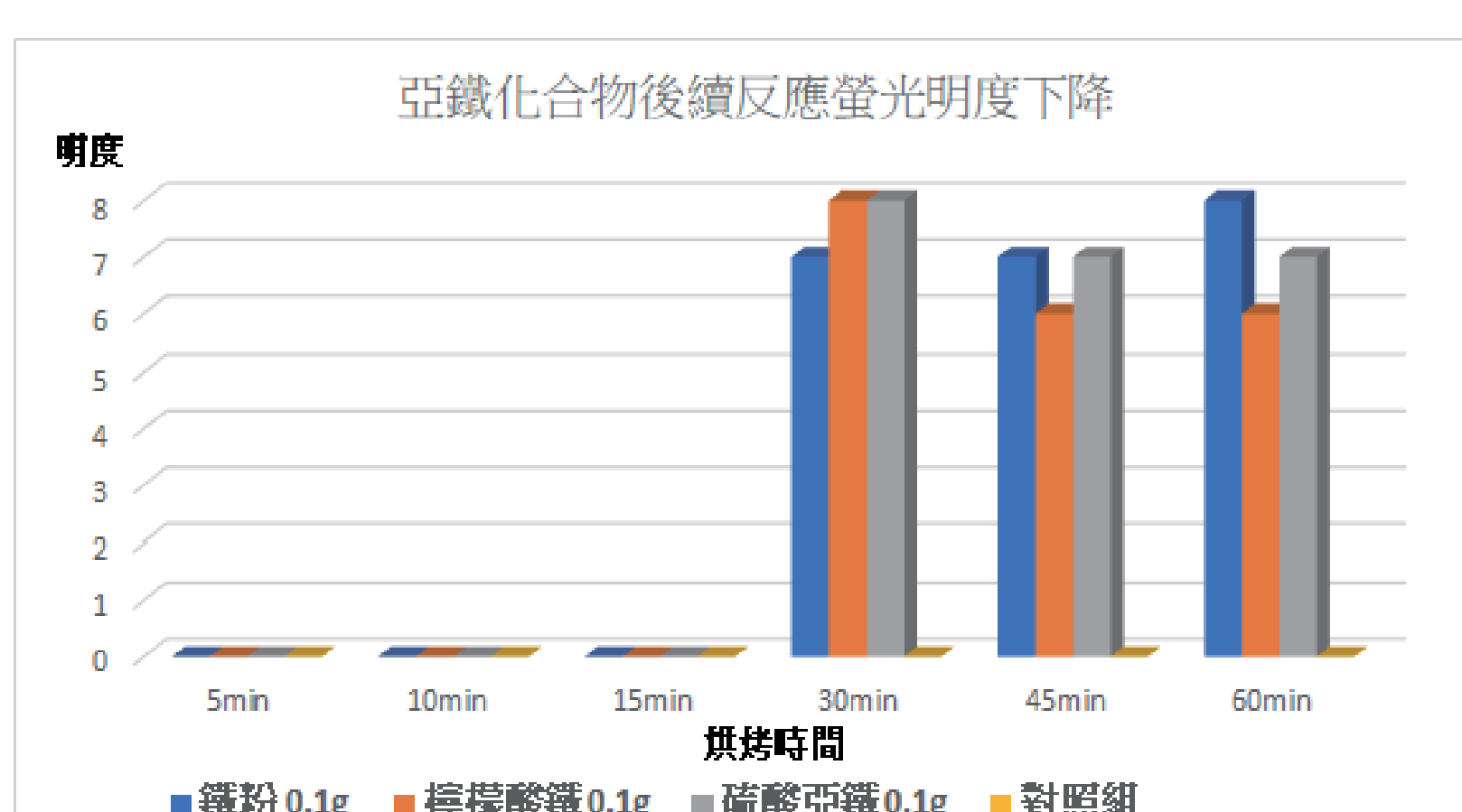
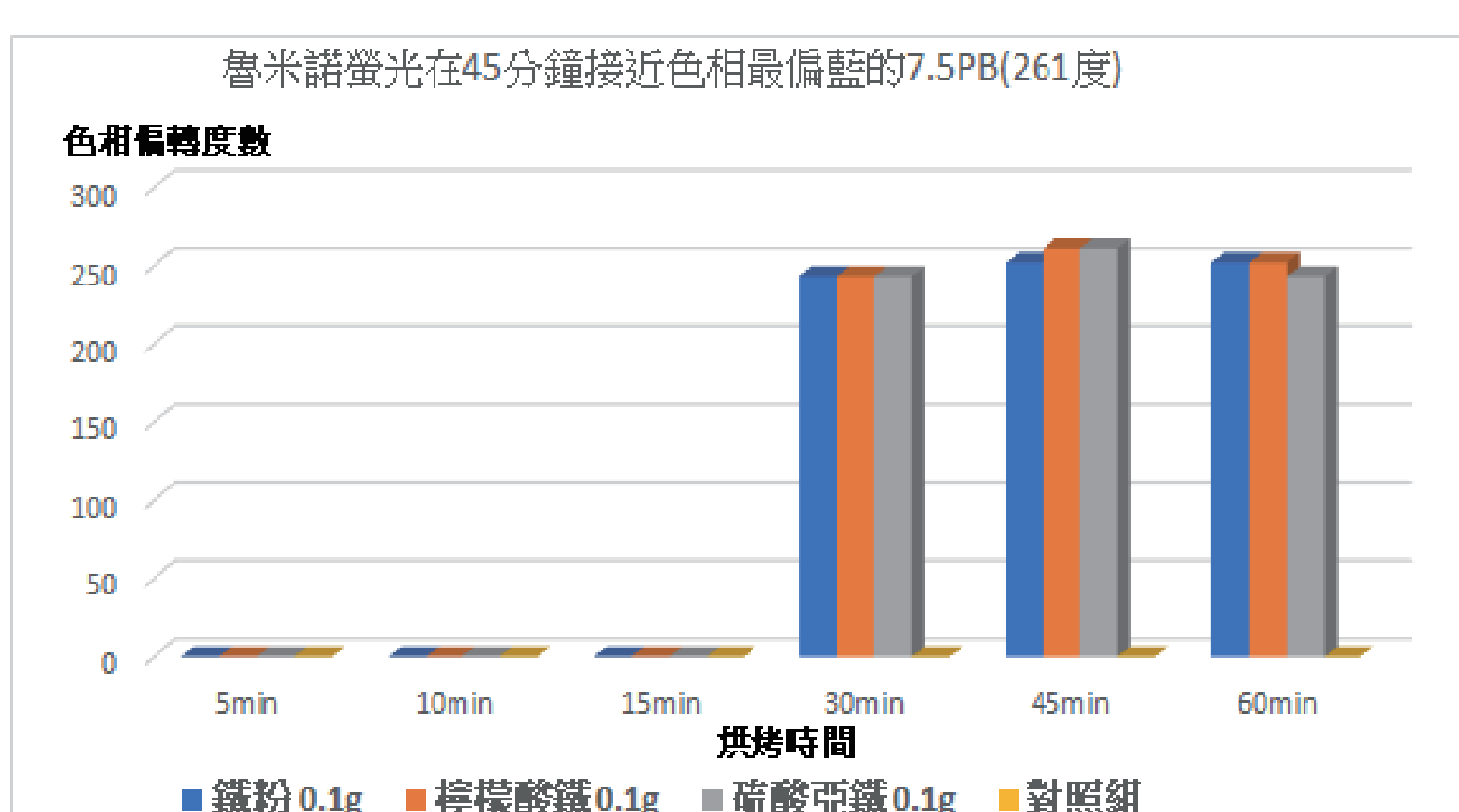


圖八：以魯米諾螢光效應檢測鐵錯合物的情形。(A)將魯米諾檢測液加入到煉乳鮮奶油布丁組以及果糖鮮奶油布丁組的各樣本中，發現有添加硫酸亞鐵的樣本呈現明顯的藍色螢光，而添加檸檬酸鐵的樣本則只有微弱的螢光。(B)因此將兩組添加檸檬酸鐵發出微弱螢光的樣本擺入紙盒中。(C)發現無論是煉乳鮮奶油組或是果糖鮮奶油組，有添加檸檬酸鐵的樣本在暗處也都呈現美麗的藍色螢光。(照片由作者群拍攝)

實驗過程與方法	各原始蛋液	煉乳 (無鮮奶油)	煉乳 (有鮮奶油)	果糖 (有鮮奶油)	砂糖 (有鮮奶油)
	初始顏色		5Y 9/6	5Y 9/4	5Y 9/4
完成顏色		7.5Y 9/6	5Y 8.5/8	5Y 8.5/8	5Y 9/6
TDS(ppm)		545	1700	1320	1130
pH		7.22	7.12	8.37	7.30
ORP (mV)		217	288	283	277
鐵離子(ppm)		2	1	0	0
用蛋量(顆)		2	2	2	2
牛奶實測用量(mL)		120	120	120	120
鮮奶油實測用量(mL)		0	120	120	120
實驗組額外添加物					
海水素實測重量(g) (模擬海水滲入)		0.11	0.10	0.11	0.11
硫酸亞鐵實測量(g) (模擬硫酸亞鐵)		0.15	0.10	0.12	0.12
檸檬酸鐵實測量(g) (模擬檸檬酸鐵)		0.13	0.11	0.13	0.10
研究結果	褐變反應				
	氣味&風味	像甜的蒸蛋	不再像蒸蛋，布丁味道和氣味都更豐富		
	觀察	較有布丁味，仍像甜蒸蛋，顏色變化不明顯。	有著布丁口感與香氣，硫酸亞鐵和海水素更為明確地增進褐變。	兩種鹽鐵反應明顯增強，布丁內出現深色斑塊，得知無論硫酸亞鐵和檸檬酸都可大幅增進布丁褐變。	實驗結果不如果糖組明顯，但硫酸亞鐵和檸檬酸仍舊加強了布丁樣本褐變情形。
	推測		煉乳成分中有砂糖，以及其他的蛋白質等成分，真正的乳糖成分較低	果糖是完整的純還原糖，所以梅納反應的進行會比較強	可能是因為砂糖組成是蔗糖，蔗糖非還原糖，需要經過轉化糖的程序



梅納反應的褐化顏色變化(依序為色相變化圖、明度變化圖與彩度變化圖)

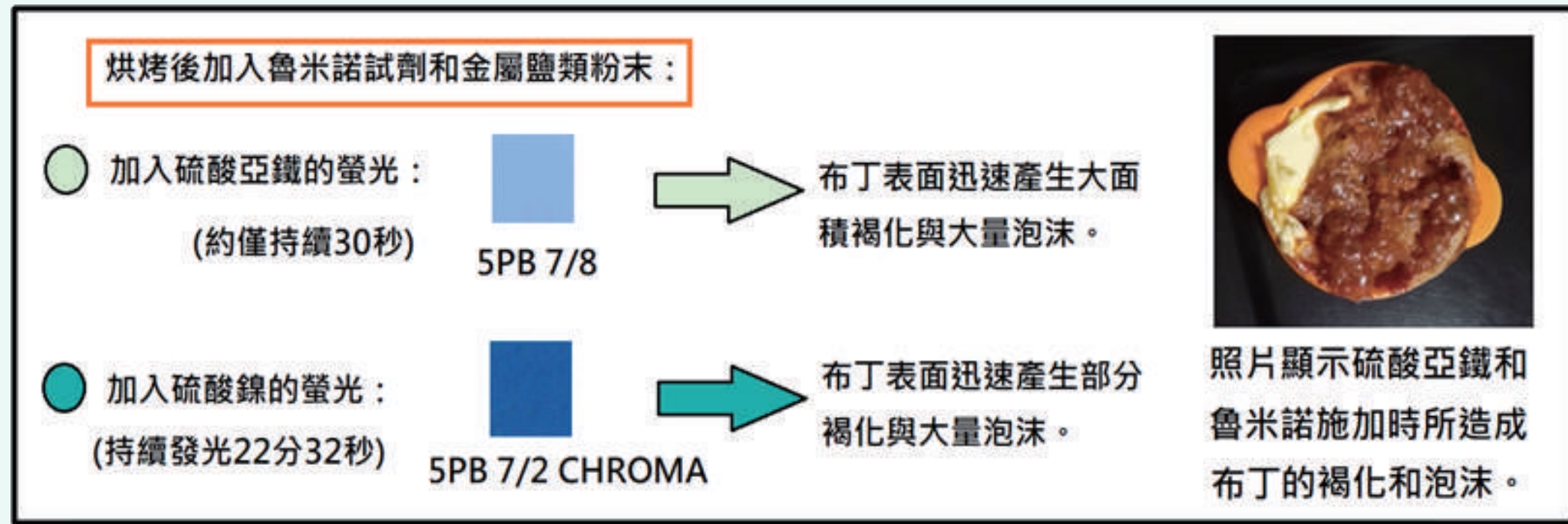


魯米諾螢光反應顏色變化(依序為色相變化圖、明度變化圖與彩度變化圖)

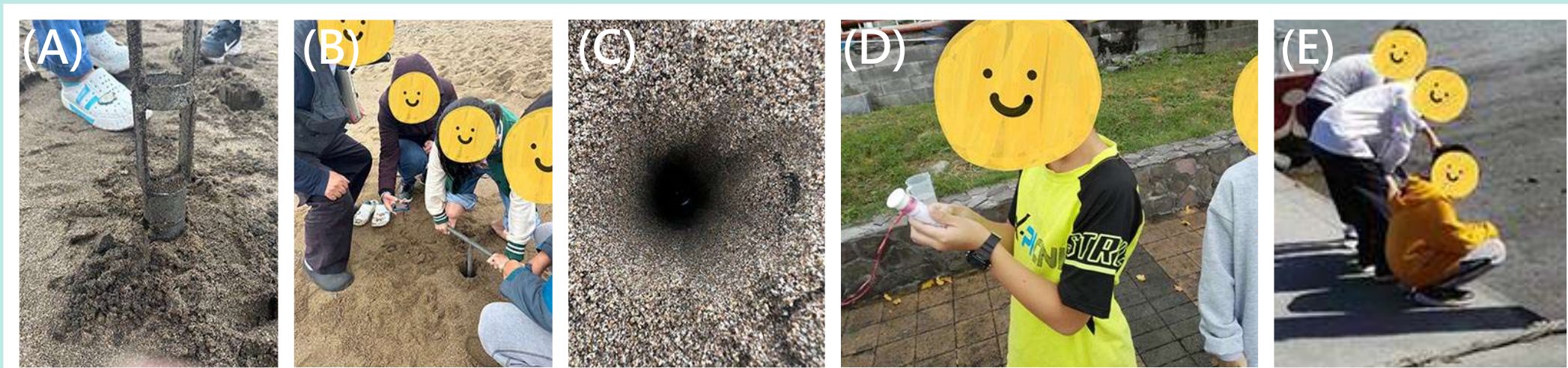
表三、逐成實驗數據

烘烤時間	5 min	10 min	15 min	30 min	45 min	60 min
梅納褐化反應的孟塞爾色帖紀錄						
鐵粉0.1g	10YR 9/4	5Y 9/4	7.5Y 8/2	7.5Y 9/6	7.5Y 7/6	7.5Y 8/8
檸檬酸鐵0.1g	10YR 9/4	5Y 9/4	7.5Y 8/2	7.5Y 9/4	7.5Y 9/4	7.5Y 5/6
硫酸亞鐵0.1g	10YR 9/4	5Y 9/4	7.5Y 8/2	5Y 9/6	5Y 9/6	7.5Y 4/4
對照組	10YR 9/4	5Y 9/4	7.5Y 8/2	7.5Y 9/6	7.5Y 9/6	7.5Y 8.5/6
魯米諾螢光反應的孟塞爾色帖紀錄						
鐵粉0.1g	0	0	0	2.5PB 7/6	5PB 7/6	5PB 8/4
檸檬酸鐵0.1g	0	0	0	2.5PB 8/4	7.5PB 6/10	5PB 6/10
硫酸亞鐵0.1g	0	0	0	2.5PB 8/4	7.5PB 7/10	2.5PB 7/8
對照組	0	0	0	0	0	0

布丁烘焙條件下若以純醣類取代布丁餡原料，則都只會有褐化而不會有魯米諾螢光



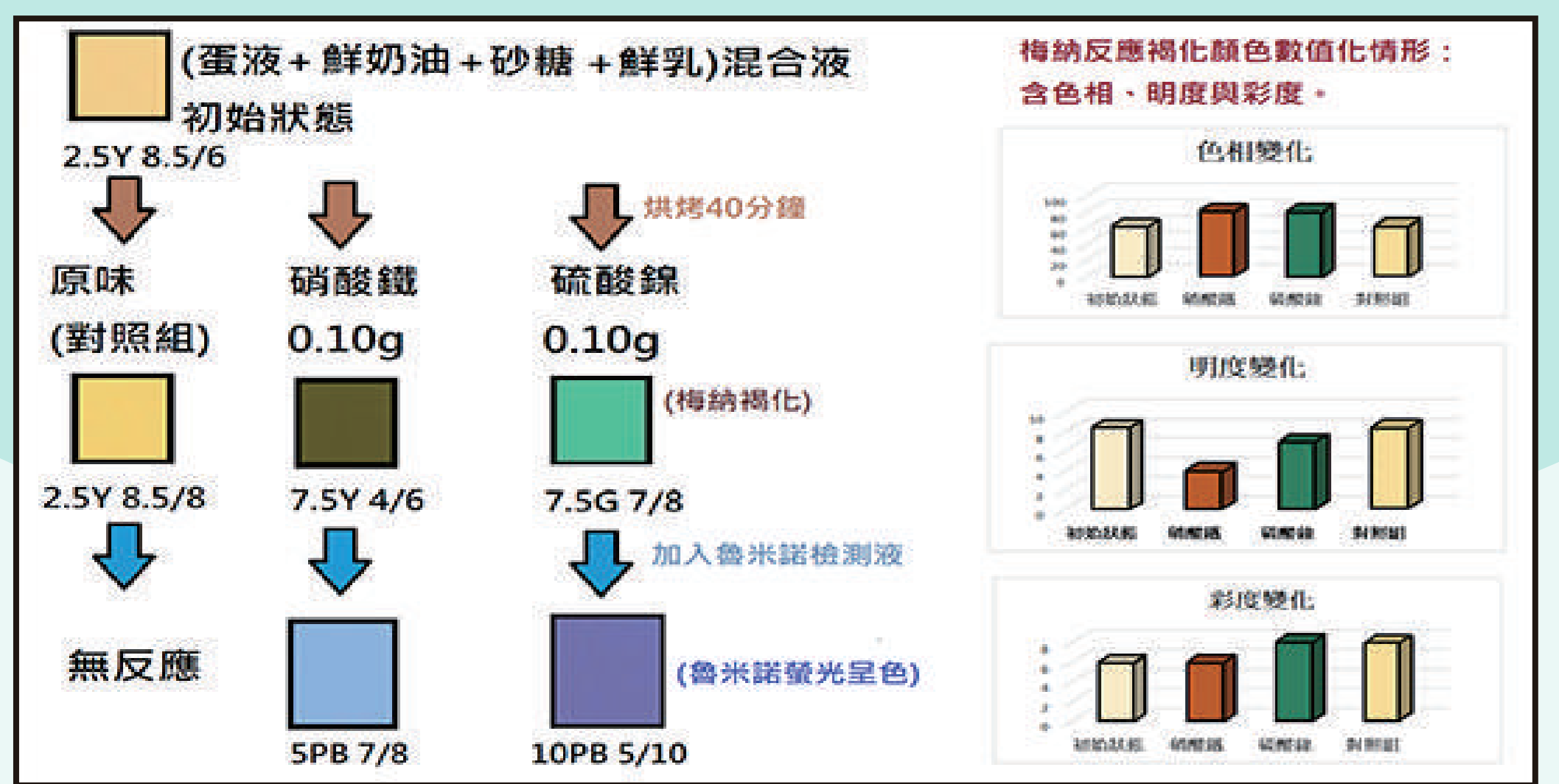
圖十二：烘烤蛋塔布丁餡附加金屬鹽類和魯米諾檢測液的反應情形。比色帖顏色引用自Torso-Verlag線上產品手冊中的標準孟塞爾顏色



圖十四：A老梅鑽探。(B)金山中角灣鑽探。(C)金山中角灣挖到含水層。(D)水樣分析情形。(E)觀察灘地有機物質。(照片由第一作者/指導老師拍攝)

表五、水質平均表

	八里龍形	麟山鼻藻礁	老梅石槽	金山中角灣
Fe (ppm)	1	2	1	1
pH	7.87	8.12	8.12	8.12
ORP	178	182	200	206
TDS	6142	21000	23200	18770
溫度°C	21.5	20.0	21.0	23.0



圖十一：硝酸鐵與硫酸鎳的梅納反應。比色帖顏色引用自Torso-Verlag線上產品手冊中的標準孟塞爾顏色(圖片由作者群繪製)



圖十三：焦糖化作用實驗。(A)以噴槍在布丁上製作焦糖，並發現焦糖化作用只有再噴槍溫度下才能與魯米諾反映。(B)布丁上灑上的砂糖逐漸變為焦糖。(C)焦糖與布丁的試吃。焦糖化作用只有在噴槍溫度下才能夠與魯米諾反應。(照片由第一作者/指導老師拍攝)

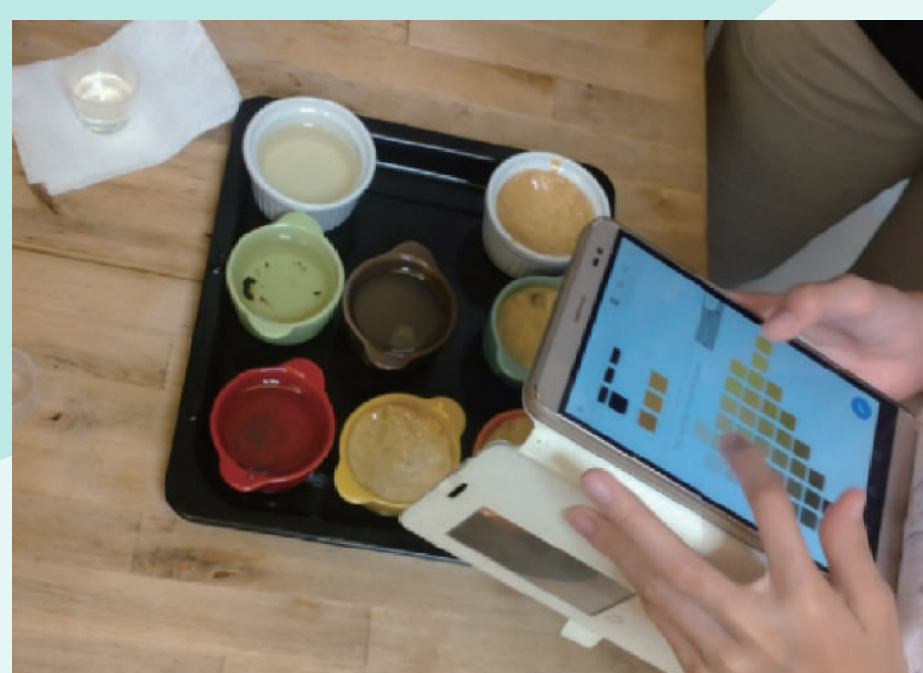
表四、麟山鼻、老梅與金山中角灣沙灘土層鑽探觀察描述

	麟山鼻	老梅石槽	金山中角灣
剖面情形	表面有不少生物殘體，很容易挖到硬石頭，碎石的分佈非常廣泛，我們在土層較厚區域發現30公分處出現含水層。	10公分生物有機質，20公分處發現鐵砂，30公分處回復一般砂。60公分挖到岩盤。	表層有不少生物殘體，內層為較細質的砂粒。砂土很厚，超過60公分，我們在50公分左右挖到含水層。
可能產生梅納反應的位置	表層，因為帶有較多的生物殘體和貝類，砂土層則相對偏向石英和石礫等組成比較沒有有機質。部分潮池有分布生物有機質，會比灘地更有機會。	老梅遍地都是黑色鐵礦砂分布。老梅的有機質殘體主要也是在表層零星分布。	有部分少許生物殘體翻攪到20公分處。但是土層超過60公分主要仍為石英質的砂粒。金山中角灣可能產生梅納反應的區域應該也在表層。但表層的零星的有機殘體比較多。

陸、結論

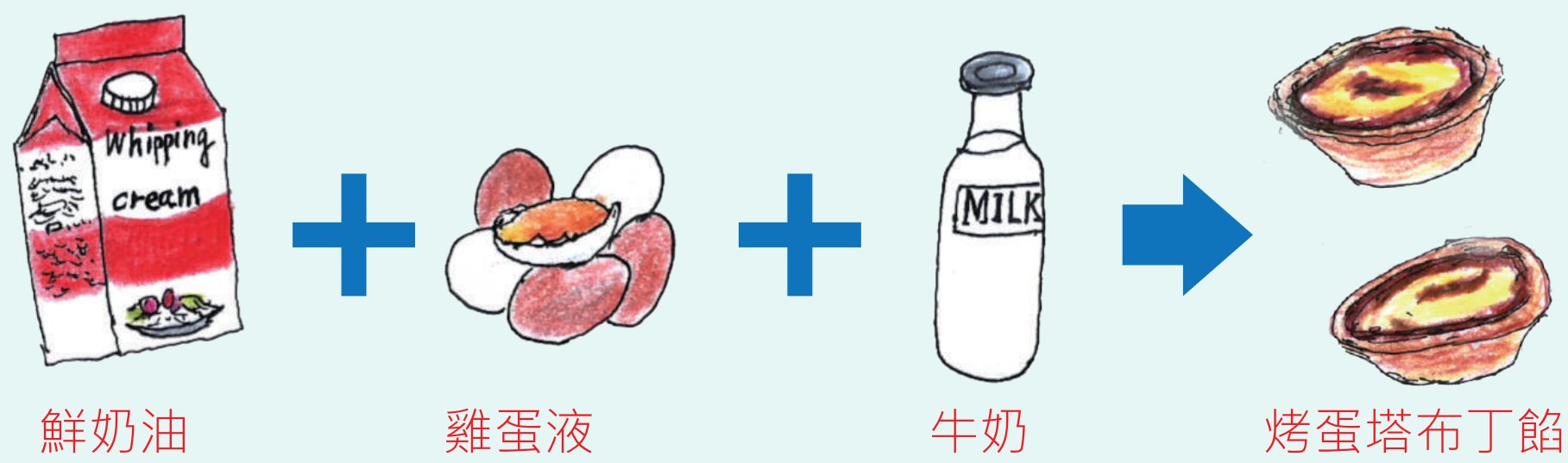
一、我們找到了梅納反應的簡易測定法

(一) 孟塞爾比色帖間接測定法透過比色帖的比對來測定食品加熱的梅納反應褐變程度，但這套方法須搭配風味口感與產物型態等情形進行比較，因為僅憑褐化的程度並無法區分梅納反應與焦糖化作用。



圖十五：比對褐變程度(照片由作者群拍攝)

二、梅納反應會有專一性



圖十七：結論說明圖(照片由作者群繪製)

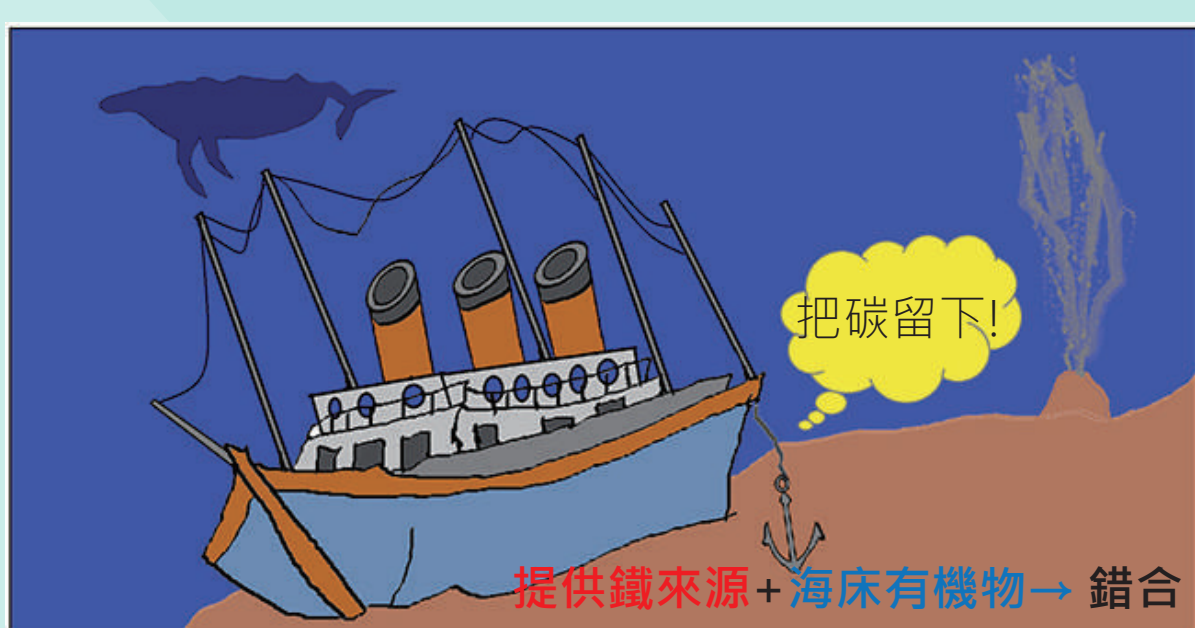
我們發現鮮奶油、雞蛋液和牛奶這三者缺一項都會使得蛋塔布丁餡不再具有原先獨特的風味。果糖反應較砂糖理想。

四、梅納與焦糖化的差異

- (一) 風味不同、焦糖化產物更像膠結物。
- (二) 焦糖化作用產物較不易與含鐵梅納反應產物結合在一起。
- (三) 焦糖化作用要在400°C以上才能夠與鐵質產生魯米諾螢光，梅納反應僅在150°C時就能和鐵質產生魯米諾螢光。

五、環境上的應用

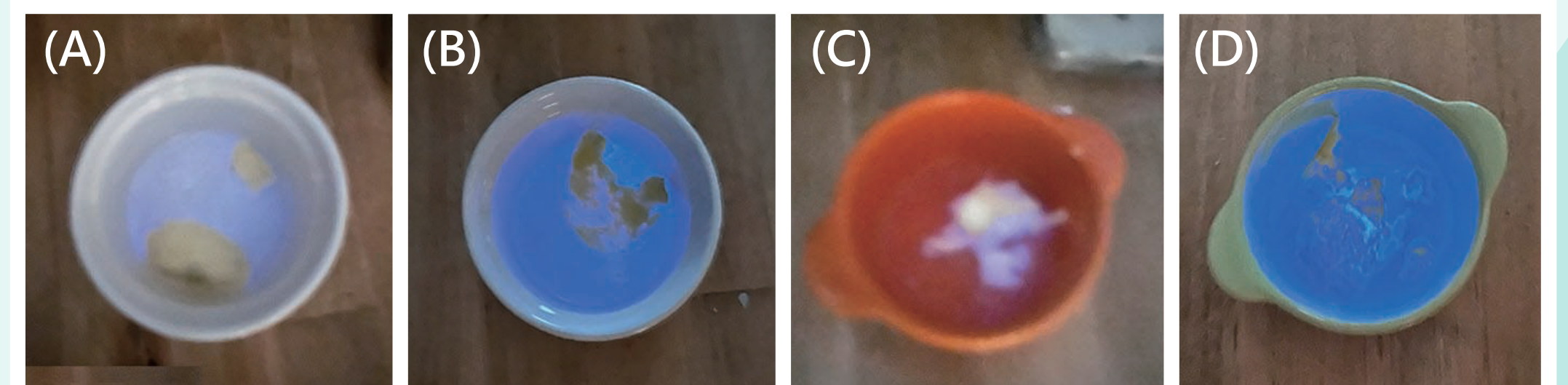
鐵鹽和有機物進一步產生鐵錯合物，有利於海洋碳匯的形成。海床額外施加鐵或許有助形成新的固碳區域。



圖十九：結論說明圖(照片由作者群繪製)

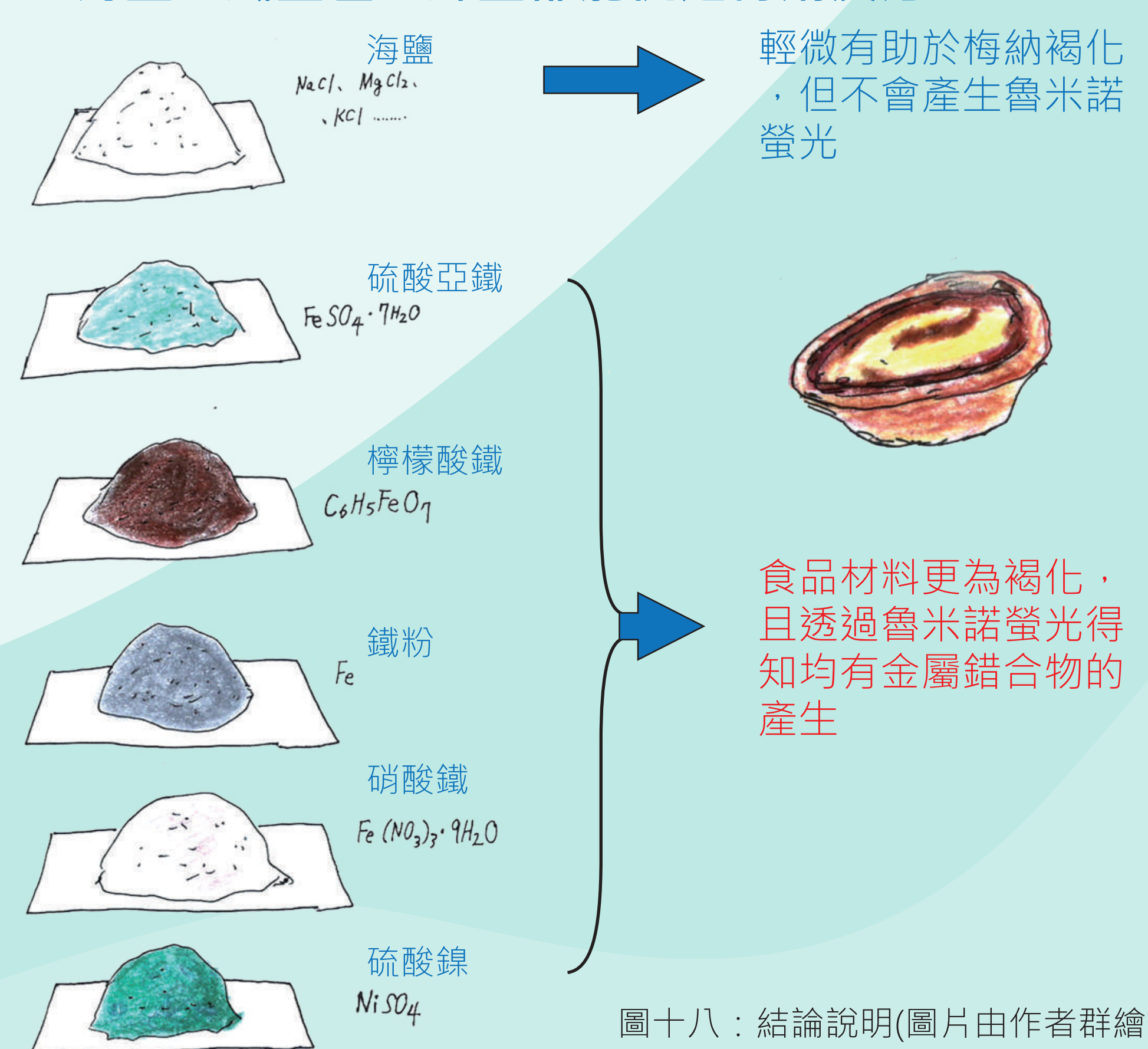
(二) 魯米諾 - 鐵鹽直接測定法

以魯米諾檢測液搭配金屬鐵鹽的螢光反應可以檢測梅納褐變是否已經明顯產生，這套方式在攝氏150度的烘焙條件可以專一檢測梅納褐變。



圖十六：A硫酸亞鐵30 min。B硫酸亞鐵60 min。檸檬酸鐵30 min。D檸檬酸鐵60 min。(照片由作者群拍攝)

三、海鹽、鐵鹽甚至鎳鹽都能促進梅納反應



圖十八：結論說明(圖片由作者群繪製)

六、天然的梅納潛在環境

北海岸有大量的鐵砂、淡水河口與北海岸海水經常含有鐵離子，河海沉積環境常常有不少有機物質，這些都可能是潛在的梅納反應生成環境。

捌、參考文獻資料

- 一、王子僑、吳昭儀、鄭湖翰、林怡瑄(2008)。「藻」也「碳」息--二氧化碳濃度對浮游藻類生存之影響。臺中縣立新光國民中學。中華民國第48屆中小學科學展覽會作品。
- 二、宋金明、李學剛、袁華茂、李寧(2020)。海洋生物地球化學。科學出版社。
- 三、江芊豫、梁怡翎、黃晏玲(2012)。非蛋不可嗎?~以褐變反應機制尋找取代蛋黃液的最適配方。中華民國第55屆中小學科學展覽會。
- 四、阿馬道里重排。(2021, November 29). In Wikipedia

- 五、阿簡生物日記(年9月27日)。本氏液做糖的檢定-精簡版。
- 六、孟塞爾顏色系統。(2022, August 22). In Wikipedia,
- 七、邱思魁(無日期)。食品風味學授課資料 第五章：加工引起的食品風味變化。國立臺灣海洋大學食品科學系。

(參考資料眾多，詳參報告書)