

高雄區農技報導

66期

固態堆肥之製作 與田間應用



行政院
農業委員會

高雄區農業改良場

編印

中華民國94年10月

固態堆肥之製作與田間應用

文·圖／蔡永暉、吳純宜[※]

前言

堆肥製造是一種化腐朽為神奇的技术。農業時代已累積相當多的操作知識，工業時代轉為企業化的量產技術，處理技術由簡易而複雜，製作時間由數月縮短成數星期。依技術之演變及發酵時間長短，可歸納成三種製造技術：傳統式、機械式及生物培養式。

所謂堆肥是指將有機物堆積，讓微生物在其中繁殖、代謝及消耗生質能源後，所得之殘留物。這些殘留物包括菌體、二次代謝產物及未分解轉化的質材，而這個過程則稱為堆肥化。堆肥化過程中理化性狀之變化，包括溫度上昇與下降、碳氮比逐漸減少、礦物質濃縮、pH值上升及容積減少等。綜合影響堆肥化之主要因素有微生物、養分、水分、pH值、溫度、氧氣、碳源、氮源及碳氮比等。

施用堆肥可以改良土壤，其主要功效有三種：(1)供應作物養分，(2)改善土壤理化性質，(3)活化土壤。這三種功效對作物之影響，依序發生。施用初期，堆肥以養分供應為主，後來土壤性質逐漸改善，並開始出現效果，最後土壤活性增強，甚至出現桿菌及抗藥能力。這三種功效對作物之影響，非常重要，特別是栽培管理已久的農田。

製作技術之演變

一、傳統式

以厭氧分解或自然通氣的分解為主，製作方法因地域、材料及氣候條件而略有差異。一般而言，有機質材均以層狀堆積，先鋪設碳源材料於底層，上面鋪放氮源材料，彼此交互堆積，至高度約150公分為止。每層厚度約15-30公分。最上層覆蓋泥土或布袋，以防止蒼蠅滋生及水分、養分、氣味揮發。為促進自然通風循環，有時堆肥底層會放置竹子或玉米桿，或者每隔45-60天翻堆一次。傳統式的特點是分解慢、溫度低、有臭氣味等，製作時間約6-8個月。

二、機械式

以好氧分解為主，利用粉碎機、攪拌機、翻堆機、送風機、發酵機等機械，依製

[※]高雄區農業改良場園藝分場 研究員兼主任 07-6613404
助理研究員 07-6622174#107

造規模及需求，各自組合。組合方式，可分為翻堆式、送風式、及混合式等三種。三種製造方式的原理大致相同，先將材料切細或粉碎，增加發酵的作用面積，其次是供應穩定的空氣及水分，促進發酵的作用速率，縮短製成時間，最後是產品的乾燥及包裝。翻堆式以攪拌或翻堆為主，約1-3天進行乙次，2-3星期即可腐熟完成。送風式以鼓風機送風為主，不需要額外的攪拌或翻堆；通風管的設計要達到風量充足及均勻分配原則，為了要達到送風要求，堆肥內部需要通氣結構或物質。混合式兼翻攪拌、翻堆及送風功能，效率更高，工作量更大，可組合成長條式、直立式或旋轉式等，每日處理量可高達數十公噸以上。

三、生物培養式

以培養特定好氧微生物或生物為主，促成好氧性分解。有效微生物的培養，因菌種不同，而有培養方式之差異，例如(1)EM菌(Effective Micro-organisms)，需先以菌源(1%)加糖蜜(4%)及水(95%)混合後，靜置增殖5-7天，接著將增殖液(1%)再加糖蜜(1%)及水(98%)再增殖一次，即可大量使用；(2)纖維分解菌(*Trichoderma harzianum*)，需先將菌種接種於固態基質，例如切細的稻草及氮源混合物中，調整含水量50%，增殖1-2星期後使用，增殖後的菌源，通常以0.5-1%的用量均勻加入堆肥資材中，資材以層狀式或混合式堆積。堆積1-2天後，溫度即上升至50-70°C，每1-2星期翻堆乙次，3-6星期後堆肥即可腐熟。另一種特殊培養的生物是蚯蚓，蚯蚓的種類很多，食物習性及耐熱性有明顯差異，平均飼養密度每立方公尺可達3萬隻，每天的食物約相當於蟲體重量。飼養過程中，不需要額外翻堆或通氣，先將蚯蚓置入含有機資材的容器中，於陰涼潮濕的環境下增殖。當有機資材全部消化後，形成蚓糞堆肥(vermicompost)，再將堆肥與蚯蚓分離，堆肥可立即施用於田間，而蚯蚓則可轉賣或移至其他培養容器中，再循環利用。由於蚯蚓的生長適溫約為20-30°C，如果溫度過低或過高，會引起冬眠或夏眠現象，甚至死亡。因此飼養過程中，需要注意避免產生高溫，並經常使用灑水系統，或採用較小較淺的容器，以達散熱效果。

有效操作指標

除了蚓糞堆肥外，一般堆肥製作的原理是利用微生物的分解，將有機資材降解，最後形成性質穩定的有機腐植質。因此，堆肥的製作技術，首重微生物族群的培養及其生活環境的調控。其製造效果好壞，主要依下列指標而定：

一、白色菌絲的位置(代表高溫、通氣及水量適中的快速分解)

由菌絲的發生位置，可以判斷堆肥內部環境的好壞。若菌絲僅發生於表層，則顯示堆肥內部環境不佳，無法滿足微生物的生長，需要採用改善措施，例如翻堆、通氣、控制水分或添加氮素材料…等。



▲ 白色圓標代表好氧及高溫發酵狀況

二、溫度的變化

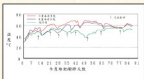
有機質材料堆堆積後，3-6天內溫度必須達到 60°C - 70°C ，否則就表示操作有問題，必須立即調整，直至堆肥內部各點溫度均達高溫為止。但需注意不得超過 80°C ，否則微生物將會大量死亡，甚至有引起火災的危險。如發現超過 80°C ，即應加強翻堆，以降低熱量或溫度。因此，準備1支長1公尺以上的溫度計，隨時監控，是必要的措施。



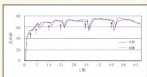
▲ 發酵3-6天後溫度應達 60°C - 70°C 以上



▲ 堆肥內部各點溫度差異過大，表示發酵不勻，有待改進



▲ 添加適量氧源後溫度會上升



▲ 改善翻堆時期(好氧!)後，快速達到高溫

三、水分的含量

含水量的多寡亦影響通氣量，並影響微生物增殖速率，最適宜的水分含量約50%，以手觸摸材料，有潮溼的感覺，但未達溼潤狀態，用力擠壓材料，水分略微從指縫間流出，但不會滴下來。若水分太多，有機質材分解緩慢，且會有臭味產生，可以添加乾細的質材，或者將材料攤開地面數日，俟含水量降低後再行堆積。堆積後的材料須加以覆蓋，防止水分經由表面蒸散。

其他重要的指標，例如腐熟後體積應減少1/3~1/2，顏色呈棕褐色，質地疏鬆，不結塊，聞起來有泥土芬香的氣息，酸鹼度趨於中性或偏微鹼性等。



▲ 顏色不均勻，顯示腐熟不佳，需要加以翻堆



▲ 腐熟堆肥顏色呈棕褐色且質地疏鬆

堆肥品質

一般市售堆肥品質差異極大，如表1所示。以銨態氮($\text{NH}_4\text{-N}$)含量為例，濃度範圍可能介於160~8600ppm之間，而一般作物根系對銨態氮的感受濃度約為200ppm以下。

若不了解堆肥性質，一律等量施用，將造成氮素養分不足，或是氮素的嚴重肥傷。因此，堆肥的施用技術，需要依堆肥性質而調整。此外，市售堆肥有部分重金屬含量超過國家堆肥標準，長期施用有不良影響，使用者宜加以注意，以免造成農地污染。堆肥的重金屬含量標準，各國的容許量如表2所示。農民如有需要購買優良國產堆肥，可上農委會農糧署網站(<http://www.afa.gov.tw>)農民專區/業者名冊下，參考當年優良品牌推薦名單。



▲ 各式各樣的商標堆肥

表1. 一般市售堆肥之化學性質

堆肥代號	pH(1:5)	EC(1:5) (mS/cm)	OM (%)	NH ₄ -N (mg/ml)	NO ₃ -N (mg/ml)	氮 (%)	磷 (%)	鉀 (%)	鈣 (%)	鎂 (%)
1	7.91	1.63	33	6022	335	2.24	2.78	2.95	9.88	1.41
5	6.35	2.31	76	985	349	1.39	1.23	1.25	1.24	0.73
6	7.06	2.29	25	190	1443	0.89	0.59	0.83	7.51	1.13
9	7.56	5.67	79	1207	1907	0.44	0.62	0.48	7.58	1.29
11	8.34	1.27	77	5444	254	2.67	1.59	1.15	5.14	1.23
16	8.68	5.74	99	7744	0	1.96	0.27	0.43	0.51	0.11
26	8.87	2.16	87	472	539	1.45	0.47	0.89	1.79	0.58
28	8.30	3.23	52	899	933	2.99	1.53	1.93	9.45	0.78
29	7.26	1.77	75	8636	33	3.28	1.51	0.74	5.18	0.37
AVG	7.71	4.28	53	1954	744	1.69	1.15	1.43	5.56	0.85

表2. 各國堆肥的重金屬含量標準(ppm)

國家	鎘	鉍	銅	汞	錳	鉛	鉻	砷
美國	2-25	1000	450-1000	5-10	50-200	100-250	500-2500	—
加拿大	3-4	50	60-100	0.1-0.5	60	150-500	500	10-20
荷蘭	1-2	50-200	25-300	0.2-2	10-50	65-200	75-900	5-25
瑞士	3	150	100	3	50	100	500	—
日本	5	1.5	—	2	—	3	—	50
韓國	5	—	—	2	—	150	—	50
台灣	5	150	100	2	25	150	500	50

製作過程與條件

一、材料處理

堆肥製作以選用安全無虞的材料為原則。有機廢棄物處理，常見的問題是材料粒徑太粗及含水量太高。粒徑太粗，通風好，但吸水率太低，發酵熱量容易散失，無法產生高溫分解菌。粒徑太細，保水性佳，但通氣不良，造成厭氧發酵，很容易產生異味。最適宜的粒徑為0.2-2.0mm，其孔隙度可達75%，液相達45%，最有利於進行發酵(表3)。材料最適宜的含水量為55%，若含水量太高，應添加乾燥材料。最常見的材料處理方式是切碎、粉碎、或假堆積等方式。

表3. 在濕潤狀態下不同粒徑材料之物理特性

材料粒徑	密度 (g/ml)	顆比重 (g/ml)	孔隙度 (%)	含水量 (%)	保水力 (%)	固相 (%)	液相 (%)	氣相 (%)
3-2mm	0.17	0.94	81.6	86.9	12.8	18.4	13.0	68.6
2-0.6mm	0.25	1.06	76.5	122.3	27.5	23.5	36.5	40.0
0.6-0.25mm	0.37	1.54	75.8	128.0	44.1	24.2	47.8	28.0
0.25-0.1mm	0.54	1.89	71.6	110.6	53.5	28.4	39.5	12.1
<0.1mm	0.65	2.08	68.9	100.3	69.9	31.9	64.7	4.3



▲ 樹枝粉碎機操作情形

二、碳氮比調整

農業有機廢棄物，依碳氮比(C/N)大小，可概分為碳源及氮源兩大類。碳氮比大於40為碳源，例如稻草、木屑、蔗渣、椰屑、花生殼、樹皮、紙渣等。碳氮比小於20為氮源，例如豆粕、肉骨粉、蝦殼、魚粉、豬糞、雞糞、牛糞、菜渣等。這兩類資材若直接施用於農田，易造成養分被微生物固定，使土壤局部缺氧，釋出酸性有毒物質，對作物根系及環境品質有不良影響。因此，最好的利用方式，是先將碳源與氮源以適當的比例混合，經過堆肥化處理，製成良質堆肥，再回歸土地。

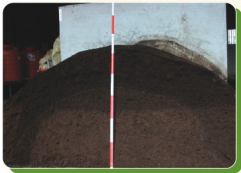
碳源促進硝化菌增殖，而氮源維持硝化菌的繁殖率，兩者缺一不可。若氮源不足，硝化菌將從環境中截取有效氮素，以合成本身生物有機氮，形成氮素的固定作用，造成堆肥中之氮素養分含量。因此，有機資材在進行堆肥化之前，兩者需先加以計算，調整混合物的碳氮比例，以適合硝化菌的增殖，及有效養分釋放。而調整後的混合材料，最適合的碳氮比為30-40。

茲舉例說明碳氮比計算方式如下。假設使用新鮮漚渣200公斤為氮源(含水量80%、含碳量45%、含氮量7.5%)，欲以稻草調整混合物碳氮比為30，請問需要多少稻草量(含水量20%、含碳量56%、含氮量0.4%)？依已知條件碳氮比為30，即[(漚渣碳+稻草碳)/(漚渣氮+稻草氮)]=30，代入數字得 $[200 \times (100-80)\% \times 45\%] + [\text{稻草量} \times (100-20)\% \times 56\%] / [200 \times (100-80)\% \times 7.5\%] + [\text{稻草量} \times (100-20)\% \times 0.4\%] = 30$ ，經計算後稻草量答案

為205公斤。

三、堆積

堆積材料的體積要適中，體積過小，發酵熱無法保持，溫度很快下降，不利於中高溫菌之生長，體積過大，通氣不良且操作不易。最適當的高度不要超過1.5公尺，其保熱性與通氣性良好，且適合於翻堆作業。材料堆積的方式，會影響發酵作用。一般以混合攪拌堆積最為理想，亦可以三明治方式逐層堆積，將碳素材料與氮素材料交互堆積，亦可獲得高品質堆肥。堆積場所以地面最為適當，最有利於水分調節及好氧發酵，不必特意做水泥地面的堆肥舍。發酵過程中有液體產生，應規劃集水管路要回收養分。高營養配方材料，發酵時會吸引蒼蠅取食產卵，可覆蓋透氣式麻布袋或其他透氣材料。



▲ 堆積高度不超過1.5公尺

四、發酵微生物

堆肥化的過程中，發酵微生物的營養與種類，會隨材料養分不同而逐漸變化。各種微生物的發酵能力，並不一致，但以中高溫的真菌及放線菌為最強。最先被分解的

是第一類材料，例如糖類、澱粉及蛋白質；其次為第二類材料，例如半纖維及纖維類，最後被分解的是油脂、膠質及木質素等。第一類材料的分解菌以真菌及細菌為主，其中有部分是病原性的真菌，分解完成後，微生物種類會轉換成以分解第二類材料為主的放線菌及細菌，其中有一部分是拮抗菌，之後再轉換成以分解第三類材料為主的孢子菌，一般以非病原性的真菌及細菌為主。另外，發酵時好氧或嫌氧、高溫或低溫、pH高或低之狀態不同，微生物種類也會產生改變。

有機質材通常含有豐富的發酵微生物，並不需要額外的接種，但有部分的材料，自然菌源不足，仍需加以接種，以確保發酵速率。因此，在發酵時可考慮添加混合菌源。菌源的種類很多，可購自商業產品，或者使用含微生物豐富的腐熟堆肥及肥沃園土。菌源的用量，均為材料重量的0.5%，可先行活化繁殖後，再與材料充分混合。據本場試驗顯示，有添加菌源的處理，可延長中高溫發酵期，並縮短發酵時間。此外，有部分農民為抑制病原性絲狀菌之繁殖，及促進放線菌的繁殖，特別添加蝦蟹殼粉，以加強堆肥的抗病能力。

五、加水與翻堆

有機材料混合時，需調整含水量，含水量以55%最適合於發酵微生物的繁殖。簡易的測定方法，可用手緊壓材料有水份滲出，但不會滴下。如有水份往下滴時，含水量已達70-80%。發酵過程中，因產生高溫，水份會持續蒸發，過度乾燥時，材料會形成膠結現象，造成發酵停止，此現象以堆肥槽中心點最容易發生，因此堆肥化過程中需要進行翻堆與加水。為延長翻堆與加水間距，材料堆積時，可用稻草或塑膠布罩加以覆蓋，促進水分回流，並保持溫度。通常於發酵初期每星期翻堆二次，二星期後每二星期翻堆一次即可。翻堆主要目的是讓外層的材料進入內部，同時調節水分，供應氧氣，繼續好氧發酵。經二次翻堆後，溫度通常會上升到70°C以上，並維持高溫，經第3-4次翻堆後，堆肥內部顏色均勻且轉變為褐色。翻堆次數多寡對堆肥養分含量有顯著影響(表4)。翻堆次數愈多，發酵時間愈短，硝態氮含量愈高，但全氮、銨態氮、有機碳等含量愈低。以養分含量觀之來看，過多的翻堆將造成氮素損耗。因此，適度的翻堆，可兼顧發酵反應及養分含量。另外，木質素含量高的材料，需堆積的時間愈久，因木質素顆粒內層不易分解完熟，必需等有害成分消失後才可使用。

表4 翻堆次數對堆肥養分含量之影響

翻堆次數	有機碳 (%)	全氮 (%)	碳氮比	硝態氮 (mg/g)	銨態氮 (mg/g)
0	47.9	1.63	29	1223	62
1	45.1	1.24	36	1054	123
7	41.9	1.13	36	65	336



▲ 堆肥可促進好氧分解

六、通風量

小型堆肥場除了藉由翻堆以補充空氣之外，平常因熱空氣上升，堆肥內部空氣可由側面或底部自然補充，並不需要額外的通氣設備，但大型堆肥場或高水份材料的堆肥場，則需要送風處理。不通氣堆肥場，材料中應有些許膠膠物質，例如粗糠、蔗渣、木屑、及稻草等，使空氣能充分進入內部。

通風設備可利用鼓風機或者利用通風管自然送風，利用鼓風機送風，空氣由槽底吹入，風量不宜太大，以免吹散熱能及水分，造成物質膠結無法分解。最適當的通風量每分鐘約為材料體積的2~5%。根據實際經驗，覆蓋塑膠布後，仍可做微感覺塑膠布飄動。翻堆期間，並不需要全程通氣，通常翻堆初期需要通氣，高溫期之後，可考慮停止通氣，並以自然空氣補充，以免降溫太快。除較最重要的第二及第三階段的分解期，使得堆肥化作用不完全，反而不利堆肥腐熟。

通風量大小對堆肥化學性質有極大差異(表5)。不通氣處理，因難氣發酵，有機碳無法順利分解成 CO_2 ，導致以酸性物質為最終產物，產品pH值偏低；而有機氮的分解產物為銨態氮，其含量可高達1000ppm以上。反之，通風量增加，堆肥pH值及硝態氮含量均遞增，而銨態氮含量則遞減。

表5 送風量對堆肥化學性質之影響

送風量	酸鹼度(1:5)	導電度(1:5) (mS/cm)	銨態氮 (mg/g)	硝態氮 (mg/g)
0%	7.20	1.30	1849	39
2%	7.90	0.91	368	45
4%	8.00	0.92	252	60
8%	8.10	0.93	213	70



▲ 使用透氣管情形

堆肥之應用

堆肥完熟後，因材料及腐解條件不同，產品有極顯著差異。其主要的利用方式有三種。(1)田間施用：整地時當基肥使用，或生育期間當追肥使用。(2)育苗介質：對於物理性質良好，養分含量適中之堆肥，可以直接當育苗介質使用。(3)栽培介質：大部分的堆肥養分含量偏高，對幼苗根系生長有抑制作用，但經過加高肥壤充物，例如泥炭土、稻殼、木屑及蔗渣等等，可調製成栽培介質。



▲ 堆肥可以調製成良好的育苗介質



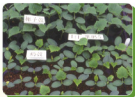
▲ 堆肥以3-5倍填充物調製，育苗效果最佳



▲ 堆肥介質調製不佳，引起根部肥傷



▲ 未腐熟堆肥，易引起肥傷、新葉黃化（如圖左）



▲ 以稻殼為填充物，育苗時容易導致生根不良

田間堆肥的施肥法，一般均當基肥使用，配合整地施入土中，當追肥使用之堆肥，一般均先條施再開溝覆土，亦有開溝後再條施者。另外，以不整地栽培時，可將堆肥覆蓋於畦面，這種施肥法，尚可抑制雜草生長。依據經驗，堆肥施入土中後，若堆肥腐熟度不佳，作物或雜草根系生長多數會受到抑制，因此，堆肥施用時，要注意腐熟度、施用位置與用量。

長期施用堆肥之影響

大部分農田均為單一作物，在栽培條件相同之下，土壤生態容易趨向簡單化，除了易導致固定的病蟲害之外，也容易出現土壤弱質化現象。因此，除了加強作物管理之外，施用堆肥可培育土壤，並誘發根圍有益微生物滋長，將有效防止土壤弱質化。

農田長期施用堆肥後，土壤性質會逐漸改變，首先，土壤pH值、EC值、鹽基飽和度、有機質含量及陽離子交換容量會緩慢增加，土壤團粒亦逐漸形成，促使土壤硬度及總體密度降低，而土質亦逐漸顯鬆容易耕翻。在有機物含量增加的情形下，土壤微生物呈多樣化，且大量繁殖，土壤活性增強，對有害物質的緩衝能力增加，可礦化的養分亦相對增加，對作物的增產效果逐漸顯現。此時期若田間管理得當，可增產約10-30%。



▲ 優良堆肥(左)比對照化肥區(右)作物生長較佳



▲ 東岡町堆肥(左)比對觀化肥區(右)作物生長較差



▲ 廣南分場的堆肥種類及用量試驗(2000年-迄今)

然而，若堆肥施用不當，長期下來，土壤性質亦將出現負面反應。例如柏樹堆肥施太多，造成EC值與磷素太高；石灰質雞糞堆肥施太多，造成pH值、EC值、磷、鉀、鈣、鎂含量太高；長期施用以稻草、雜草及落葉製成的植物堆肥，造成pH值偏酸及硝酸缺乏；豬糞堆肥長期施用，造成土壤重金屬含量太高；過量施用堆肥，造成土壤還原作用，缺氧毒害根系受損。當土壤中磷素含量多，鹽基飽和度高，pH值呈鹼性時，

正如同老年人，又肥胖又具高血壓般的危險，土壤生產力反而會較差。因此，時常監測土壤的理化性，可以了解施肥的偏失。通常，經過長期精心的土壤培育，健康農田的土壤性質範圍，pH值為中性約為6.5-7.5，飽和EC值約為0.2-0.6mS/cm，鹽基飽和度60-90%，鈣當量比6以下，鉀鈉當量比2以上，土壤密度以山中式硬度計測為10-20mm，粗孔隙率15%以下，重金屬含量符合農地標準。若土壤性質超過上述範圍，則需要進行土壤改良，特別是以養分平衡為主的施肥調整。

高雄區農業改良場橫向分場示範田，經長達12年的施用有機質肥料後，其土壤性質及蔬菜病害發生率，均有顯著的改善(表6、表7)。

表6.有機區連續施用堆肥12年對土壤化學性質之影響

處理	pH (1:1)	EC (飽和)	有機質 (%)	CEC ¹ (Cmol)	氮 (%)	磷 (mg/kg)	鉀 鈉 鈣			鉀 鈉 磷		
							----(Cmol/kg)----			----(mg/kg)----		
慣行區	6.47	0.46	2.23	7.14	1.16	107	0.17	4.44	0.61	3.49	2.00	4.50
新農區	7.48	0.66	2.55	8.00	1.54	143	0.31	8.02	0.98	1.27	2.19	8.00
有機區	7.52	0.86	3.32	10.92	1.91	198	0.34	11.63	1.14	2.49	4.06	12.22

表7.長期施用堆肥(有機區)對蔬菜病害發生之影響

處理	77年	79年	81年	82年	83年	80年	81年	82年	81年	82年	83年
	甘藍腐爛率%					茄果腐爛率%			大頭菜腐爛率%		
慣行區	37	18	45	0	10	23	56	25	2	3	24
新農區	28	22	48	0	6	14	29	18	1	2	23
有機區	8	11	38	0	1	9	13	5	0	3	20



▲ 長期施用堆肥，有機區甘藍產量優於慣行區與新農區



刊 名：高雄區農技報導
出版年月：94年10月
期 數：65期
篇 名：固態堆肥之製作與田間應用
作 者：蔡永謙 吳純宜
發行人：黃賢良
總編輯：李賢德
執行編輯：鄭文志
出版機關：行政院農業委員會高雄區農業改良場
地 址：屏東市民生路農華巷1號
網 址：<http://www.kdais.gov.tw>
電 話：08-7229461

印刷廠：美齊彩色印刷廠股份有限公司
地 址：高雄市三民區中華二路170號
電 話：07-3112195-9
傳 真：07-3112437
發行量：3000本
定 價：30元
發售處同：
國家書坊分經總店 02-25781515
五南文化廣場 04-22260330
GPI：2008200192
ISSN：1812-3023



GPI 2008200192
定價 新台幣30元