

國家海洋研究院
海洋廢棄物漂流追蹤

調查報告

中 華 民 國 1 1 0 年 1 1 月 3 0 日

目錄

摘要.....	i
1 第一章 前言.....	1-1
1.1 計畫目標.....	1-1
1.2 工作項目.....	1-1
1.3 工作項目及章節對照表.....	1-3
2 第二章 海洋廢棄物與河川輸送相關文獻蒐整分析.....	2-1
2.1 德國案例.....	2-2
2.2 以色列案例.....	2-3
2.3 印度恆河案例.....	2-5
3 第三章 實驗器材與方法.....	3-1
3.1 計畫執行場域比較與議題研析.....	3-1
3.2 漂流物製作、釋放與收回.....	3-3
3.2.1 以木製漂流物模擬海廢漂移之研究文獻回顧.....	3-3
3.2.2 設計製作低環境衝擊之木製漂流物.....	3-4
3.2.3 漂流浮標相關技術與應用案例.....	3-6
3.2.4 製作可自動回傳追蹤紀錄軌跡之漂流浮標.....	3-7
3.3 漂流物釋放與收回實驗.....	3-9
3.3.1 氣候因素分析.....	3-9
3.3.2 漂流物釋放.....	3-11
3.3.3 漂流物與浮標收回.....	3-18
3.4 漂流物蓄積調查.....	3-19
3.4.1 調查時間、位置與廢棄物分類方法.....	3-19
3.4.2 海岸或河岸人造垃圾量化方式.....	3-20
3.5 海岸垃圾快篩計量與空拍.....	3-24
4 第四章 實驗結果與討論.....	4-1
4.1 木製漂流物實驗結果.....	4-1
4.1.1 木製漂流物_釋放點位與漂流距離.....	4-2

4.2 定位發報浮標實驗結果.....	4-7
4.3 廢棄物蓄積調查結果.....	4-10
4.4 分析漂流物來源、輸送路徑與堆積成因.....	4-12
4.4.1 彙整天氣監測數據分析輸送路徑.....	4-12
4.4.2 高屏地區海岸垃圾來源分析.....	4-16
4.4.3 垃圾堆積熱區之成因與管理對策.....	4-19
4.4.4 實驗方法之改良與未來應用機會.....	4-20
第五章 調查報告.....	5-1
第六章 參考文獻.....	6-1
附件.....	附-1
附件一 評選委員意見與回覆.....	附-1
附件二 期末審查委員意見與回覆.....	附-5

圖目錄

圖2.2- 1 以色列釋放點地點.....	2-3
圖2.2- 2 以色列釋放的寶特瓶.....	2-4
圖2.2- 3 以色列施放寶特瓶與漂流回報位置.....	2-4
圖2.3- 1 具定位功能之漂流物外觀.....	2-5
圖2.3- 2 AB兩組之漂流軌跡.....	2-6
圖2.3- 3 木製漂流卡.....	2-6
圖3.2.1- 1 美國邁阿密大學CARTHE研究計畫釋放之環境友善漂流卡.....	3-3
圖3.2.2- 1 高屏地區民生廢棄物組成比例.....	3-5
圖3.2.2- 1 高屏地區民生廢棄物組成比例.....	3-5
圖3.3.2- 1 於河川出海口兩側劃設漂流物投放點.....	3-11
圖3.3.2- 2 2021/9/11-13高屏溪下游萬大大橋水位變化.....	3-13
圖3.3.2- 3 2021/9/26-28高屏溪下游萬大大橋水位變化.....	3-15
圖3.4.1- 1 漂流物蓄積量監測點位.....	3-19
圖3.4.2- 1 調查範圍示意圖.....	3-22
圖3.4.2- 2 穿越線拍照示意圖.....	3-23
圖3.4.2- 3 垃圾熱點拍照以利後續分析.....	3-23
圖4.1.1- 1 模擬計算漂流物移動距離.....	4-2
圖4.1.1- 2 降雨事件釋放後木製漂流物收回之件數與漂流距離.....	4-4
圖4.1.1- 3 非降雨事件釋放後木製漂流物收回之件數與漂流距離.....	4-4
圖4.1.1- 4 漂流物釋放點與攔淺收回相對位置.....	4-5
圖4.1.1- 5 厚型與薄型漂流物之攔淺分布位置.....	4-6
圖4.4.1- 1 實驗期間（9/10-10/14）高屏溪集水區雨量變化.....	4-13
圖4.4.1- 2 實驗期間（9/10-10/14）高屏溪口河川水位變化.....	4-14
圖4.4.1- 3 實驗期間（9/10-10/14）高屏地區潮汐高度變化.....	4-15
圖4.4.1- 4 實驗期間高屏溪口平均風向與風速變化	4-16
圖4.4.2- 1 海洋塑膠與微塑膠的來源.....	4-17

表目錄

表2.3- 1 印度恆河佈放漂流物資訊.....	2-5
表3.1- 1 台灣流域面積前15大河川與相關數據彙整.....	3-1
表3.1- 2 小琉球近年暴雨過後海岸與港口堆積垃圾.....	3-2
表3.2.2- 1 兩種不同厚度之木製漂流物與標記方式.....	3-5
表3.2.3- 1 四種漂流浮標主機之訊號接受與傳輸方案比較.....	3-6
表3.2.3- 2三種具有收發功能之研究浮標.....	3-7
表3.2.4- 1追蹤發報模組特性.....	3-8
表3.2.4- 2 本計畫製作之發報浮標規格.....	3-9
表3.3.1- 1臺灣各地區月累積雨量（單位：毫米）.....	3-10
表3.3.1- 2 本計畫可參考之氣象預測與監測資訊平台.....	3-10
表3.3.2- 1木製漂流物之實驗設計.....	3-12
表3.3.2- 2 釋放前後的調查工作規劃時間表.....	3-12
表3.3.2- 3 降雨事件漂流物釋放資訊紀錄.....	3-13
表3.3.2- 4 降雨事件漂流物釋放工作照片.....	3-14
表3.3.2- 5 非降雨事件漂流物釋放資訊紀錄.....	3-16
表3.3.2- 6 非降雨事件漂流物釋放工作照片.....	3-16
表3.3.3- 1 兩次漂流物釋放後之尋回作業日期.....	3-18
表3.3.3- 2 漂流物與浮標尋回工作照片.....	3-18
表3.4.1- 1 14類人造廢棄物與描述.....	3-20
表3.4.2- 1 調查基本單位與常見容器之體積轉換.....	3-21
表3.4.2- 2 台灣各地裝滿1個黑色大垃圾袋（80公升）海廢之樣態.....	3-21
表3.5- 1 垃圾快篩計量與空拍範圍.....	3-24
表4.1- 1 降雨事件釋放木製漂流物收回結果.....	4-1
表4.1- 2 非降雨事件釋放木製漂流物收回結果.....	4-1
表4.1.1- 1 不同狀態下，木製漂流物之漂流距離.....	4-3
表4.2- 1 發報浮標實驗結果.....	4-7
表4.2- 2 發報浮標漂流軌跡.....	4-8
表4.3- 1 北岸與南岸的垃圾量調查.....	4-10

表4.3- 2 降雨與非降雨事件之垃圾分佈.....	4-11
表4.4.1- 1 氣象數據、測站位置與來源網址.....	4-12
表4.4.2- 1 潛在陸地來源之廢棄物（翻譯自UNEP，2016）.....	4-17
表4.4.2- 2 潛在陸地來源之廢棄物.....	4-18
表4.4.4- 1 比較本研究與近年河川與岸際海廢輸送相關論文.....	4-20

摘要

本「110年度海洋廢棄物源與匯調查」案，為選定台灣西南部的主要河川－高屏溪，藉由降雨事件前後之漂流物釋放與收回實驗，以及調查河口兩側海岸廢棄物的垃圾量體、組成與分布，掌握河川排放廢棄物之輸送途徑與影響範圍。

本研究使用低環境衝擊之木製漂流物，模擬人造垃圾於河川中不同位置、不同降雨情形下進入水體後，漂流至岸邊所經歷的時間、移動的距離與擱淺的位置，並紀錄發報浮標之軌跡與氣象監測數據。結果顯示距離河口1與2公里釋放的木塊，平均漂流3天、2公里後擱淺，77.1%仍滯留在河道兩岸。釋放時河川流速與釋放後4天的風向變化可能是造成漂流物移動較遠或較快的原因。但漂流物的厚薄尺寸差異，與小規模降雨所造成之河川水位上升，似乎未明顯影響漂流物的輸送。本研究也發現，漂流物的擱淺熱點同時也是海岸廢棄物分佈熱點。針對上游可能的汙染來源分析後，執行團隊提出本實驗成果對極端氣候應變、環境教育推廣與政策發展的面向之應用機會。

In this “2021 the survey of source and sink of marine debris” research case, we set Gaoping River as the survey site. The drifts were released and recovered before and after the rainfall event. Besides, the research team conducted the investigation of the volume, composition and distribution of coastal debris on both sides of the estuary to understand the transportation path and influence scope of the waste discharged by the river.

This study uses wooden drifts with low environmental impact to simulate the time spent by man-made waste drifting to the shore after entering the water body at different locations in the river and under different rainfall conditions, the distance of transportation, and the location where it is stranded. In the meantime, the research team tracked the trajectory of the reporting drifter and weather monitoring data. The results showed that the wood drifters released 1 and 2 kilometers from the estuary ran aground after an average of 3 days and 2 kilometers, and 77.1% were still stranded on both sides of the river. The flow rate of the river at the time of release a

nd the change of the wind direction 4 days after the release may be the cause of the drifters moving far or faster. However, the difference in thickness and size of the drifters, and the increase in river water levels caused by small-scale rainfall, does not seem to significantly affect the transportation of drifters. This study also found that the stranding hotspots of drifters are also the hotspots of coastal debris distribution. After analyzing possible sources of pollution in the upstream, the team proposed the application opportunities of the results of this experiment for extreme climate response, environmental education promotion and policy development.

第一章 前言

1.1 計畫目標

海洋廢棄物，除了來自海洋相關活動，很大比例源自陸地河川的輸送。北美與歐洲之研究已顯示，當陸地上廢棄物未能有效集中而於環境中逸散，將透過降雨與地表逕流排放入海後再次堆積於鄰近之海岸地帶。因此，研究河口兩側海岸垃圾堆積情形與河川水位變化或集水區降雨事件之間的關聯性，成為海洋污染物質的源頭攔除之關鍵。

本案選定台灣西南部之一條主要河川，調查河口兩側海岸所累積之海洋廢棄物的垃圾量體、組成與分布，並透過降雨事件前後之漂流物釋放與收回實驗，掌握河川排放廢棄物之輸送途徑與影響範圍。

1.2 工作項目

(1) 海洋廢棄物與河川輸送相關文獻蒐整分析

彙整國內外關於河川廢棄物輸送至海洋的漂移機制、來源追蹤與影響衝擊之相關文獻。

(2) 於指定河川進行在地化實驗，其工作內容須包含但不限於以下內容

- 調查實測量化漂流數據，使用大量低環境衝擊之木製漂流物至少1000個，搭配至少5個可自動回傳追蹤紀錄軌跡之漂流浮標進行實驗，並於漂流物釋放後15日內進行至少5日之調查，進行漂流物位置分布紀錄與調查，其調查範圍應從釋放點河道至河口兩側各5公里內海岸。
- 調查廢棄物蓄積情況至少2次，於每次漂流物釋放後調查河口至上游1公里處之河道兩側、河口兩側5公里內海岸之人造垃圾量、類型與組成，其種類設定為日常生活常見之廢棄物，並分析垃圾類型與組成，統計包含量化垃圾之重量、數量及體積。

- 利用公開資訊數據之廢棄物、雨量、水位監測數據，探討廢棄物可能之來源、輸送路徑及形成垃圾堆積熱區之成因。

(3) 實驗執行時機

進行至少2次漂流物釋放實驗與記錄，一次須於降雨事件發生時進行，另一次為非降雨期間進行實驗作為對照比較。

(4) 調查報告

撰寫本案之調查報告，其內容包含但不限於中英文摘要、實驗內容、過程及調查結果等本案實驗數據之紀錄與分析，並整理精要文章，格式得參考國內學術期刊投稿之精要文章。

1.3 工作項目及章節對照表

工作內容	對應章節
(1) 海洋廢棄物與河川輸送相關文獻蒐整分析 彙整國內外關於河川廢棄物輸送至海洋的漂移機制、來源追蹤與影響衝擊之相關文獻。	第二章
(2) 指定河川進行在地化實驗，其工作內容須包含但不限於以下內容	第三章
<ul style="list-style-type: none"> ● 調查實測量化漂流數據，使用大量低環境衝擊之木製漂流物至少1000個，搭配至少5個可自動回傳追蹤紀錄軌跡之漂流浮標進行實驗，並於漂流物釋放後15日內進行至少5日之調查，進行漂流物位置分布紀錄與調查，其調查範圍應從釋放點河道至河口兩側各5公里內海岸。 ● 調查廢棄物蓄積情況至少2次，於每次漂流物釋放後調查河口至上游1公里處之河道兩側、河口兩側5公里內海岸之人造垃圾量、類型與組成，其種類設定為日常生活常見之廢棄物，並分析垃圾類型與組成，統計包含量化垃圾之重量、數量及體積。 ● 利用公開資訊數據之廢棄物、雨量、水位監測數據，探討廢棄物可能之來源、輸送路徑及形成垃圾堆積熱區之成因。 	3.3.2 3.4 第四章
(3) 實驗執行時機 進行至少2次漂流物釋放實驗與記錄，一次須於降雨事件發生時進行，另一次為非降雨期間進行實驗作為對照比較。	3.3.2
(4) 調查報告	第五章

第二章 海洋廢棄物與河川輸送相關文獻蒐整分析

世界各地的河流現在正成為塑膠污染的主要運輸通道，並將大量廢棄物排放到海洋中。過去的海洋學模型和使用虛擬浮標的數值模型，已被用來預測海洋環境中塑膠污染的移動和積累，但目前對於塑膠垃圾經由河流系統的運輸（transportation）與歸宿（fate）的理解，仍有很大的未知數。

2017年，荷蘭海洋吸塵器團隊（The Ocean Cleanup）透過廢棄物處理、人口密度與水利資訊等數據建置模型，估算出每年全球河川排放115至241萬噸塑膠垃圾入海，而74%排放集中在五月至十月。前20條排放最多塑膠垃圾入海的河流，大部分位於亞洲，占全球整體67%的排放量。排放量最多的122條河川，貢獻了超過全球海洋塑膠垃圾的九成；其中103條河川位於亞洲、8條位於非洲、8條位於中南美洲，與1條位於歐洲（Lebreton et al, 2017）。值得注意的是，台灣淡水河於此研究中名列第16名，未來可針對台灣河川輸送垃圾入海做更深入探討。

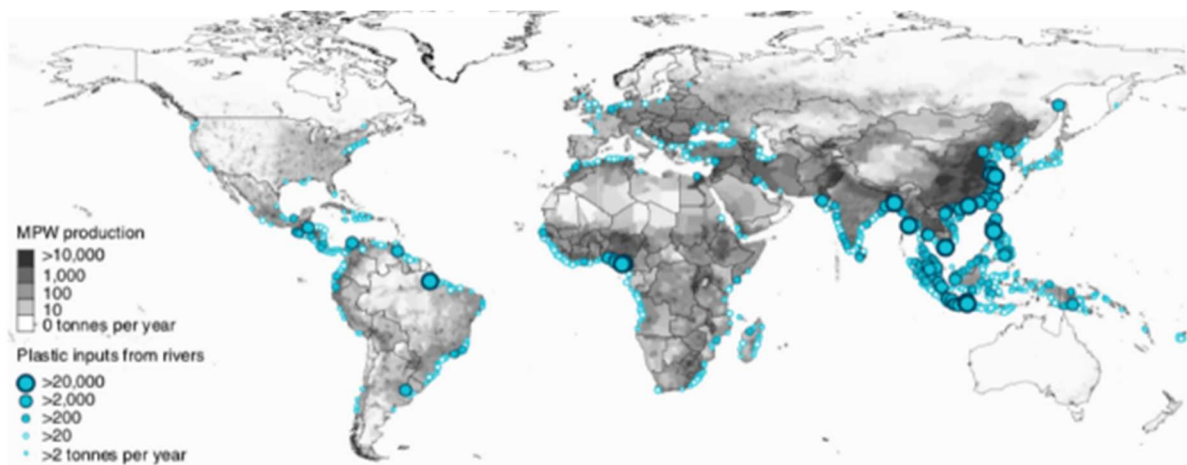


圖2- 1河川垃圾排放入海地圖（引用自Lebreton et al, 2017）

2.1 德國案例

為了更加認識垃圾污染，德國研究團隊藉由漂流浮標和數值模型以了解海洋垃圾的擴散，以辨別受污染影響的區域，並計畫後續的清理工作。德國研究團隊於2016年至2019年，分別於春、夏與秋三季，於河川與海上佈放約 63,000 個木製漂流物（如下圖2.1- 1），以評估德國灣沿岸、河流和近海來源漂浮垃圾的散佈和堆積情況。

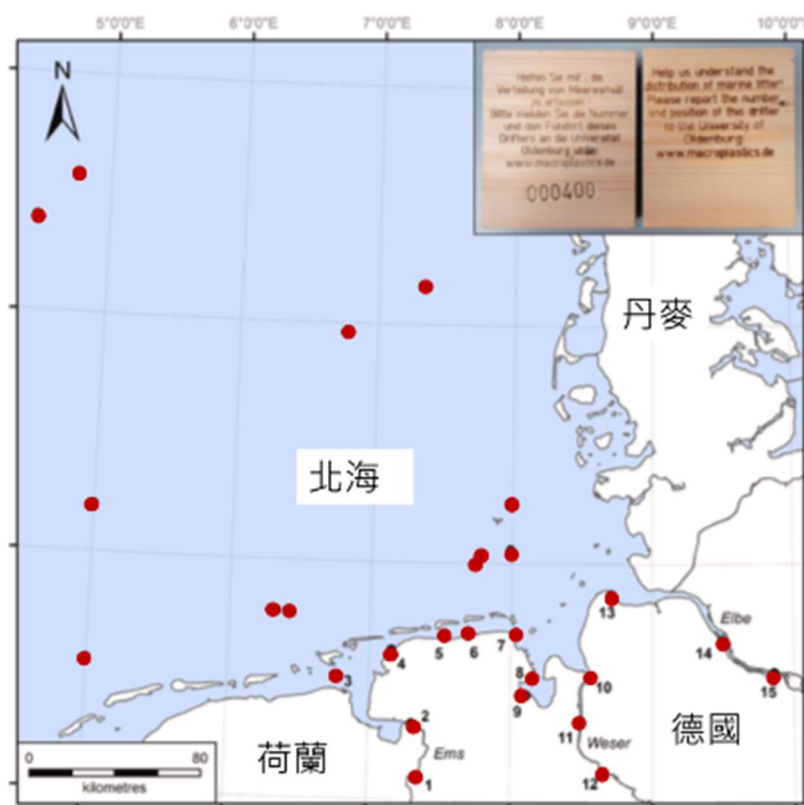


圖2.1- 1 德國漂流物佈放地圖（引用自Scho "neich-Argent & Freund，2020）

大多數漂流物（66.6%）沿下薩克森州海岸和埃姆斯河（Ems）、威瑟河（Weser）和艾北河（Elbe）在小於25公里範圍內首次被尋獲回報，76%的漂流物擱淺在小於50公里範圍內的鄰近海岸（如圖2.1- 2），證實沿海和河流垃圾主要污染鄰近的海岸線。來自沿海地區和河口附近釋放的漂流物分散較一致，在海岸施放的，只有13%是在超過100公里的海岸尋獲；而在河口施放的，有一半漂流距離為5至10公里，絕大多數（93%）在小於100公里內的海岸。而在海上佈放的漂流物則漂流較遠，有近三成約漂流100公里，近七成約漂流250公里，而有87%是少於500公里內被尋獲，最遠的甚至在幾天或幾週內到達斯堪地納維亞半島和英國（Scho "neich-Argent & Freund，2020）。

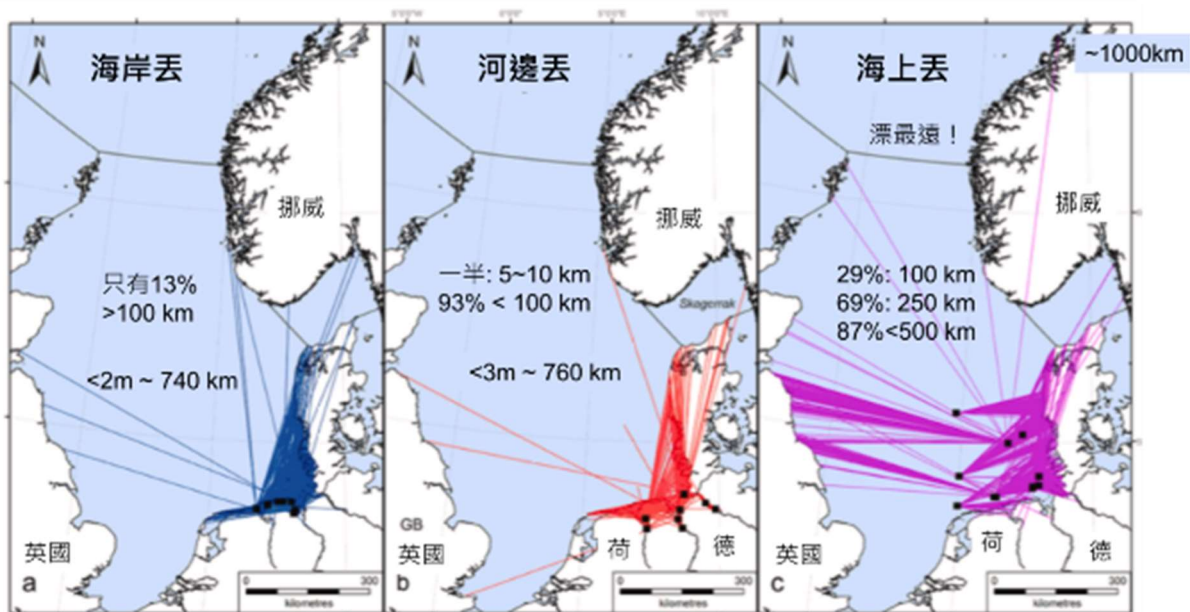


圖2.1- 2 不同地點佈放漂流物與回報地點（引用自Schooneich-Argent & Freund，2020，執行團隊加註與翻譯）

2.2 以色列案例

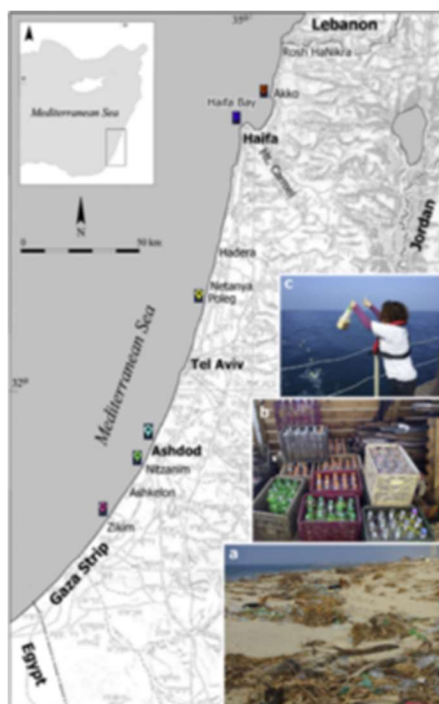


圖2.2- 1 以色列釋放點地點（引用自Pasternak et al., 2018）

以色列研究團隊在公民的參與下，在海岸與海上不同深度（5公尺深、10公尺深、15公尺深、20公尺深、30公尺深）釋放300個使用過的寶特瓶（圖2.2-1 以色列釋放點地點（引用自Pasternak et al., 2018）），以了解漂浮海洋垃圾出入以色列海岸的運輸機制。

此研究的目的，是利過實驗在海上釋放寶特瓶，來證實漂浮海洋垃圾進出以色列海岸的運輸模式。由於人口稠密的海岸線、沿海水域運輸的大量船隻與可忽略的潮汐流，地中海地區的海洋垃圾密度最大。此外，地中海是一個封閉



圖2.2- 2 以色列釋放的寶特瓶（引用自 Pasternak et al., 2018）

的盆地，通過直布羅陀海峽的水交換有限。先前美國學者艾布斯梅耶（Ebbesmeyer）曾以海上翻覆貨櫃流出的洗澡玩具（如黃色小鴨）與其他貨櫃商品來描繪洋流特性與估計海洋環流的漂流軌道時間，以色列團隊則以海濱最常見的垃圾類型－寶特瓶作為代表漂浮海洋垃圾。實驗設計為公民科學參與的試驗，民眾若在偏遠海岸見到釋放的寶特瓶可回報給研究團隊，並藉此增進公眾對海廢議題的認知（Pasternak et al., 2018）。

為了減低釋放寶特瓶對環境造成的影響，研究團隊收集300個使用過的瓶子，裝入三分之一的沙與一封回報指示的信（圖2.2- 2），並透過社群媒體宣傳此計畫，鼓勵民眾回報。在以色列南部海灘附近釋放的瓶子，在距離釋放點很短的距離和時間後重新擱淺於海灘。37%的寶特瓶在釋放後的1年9個月內被回報，在中部跟南部（圖2.2- 3 紫色與黃色點）丟的瓶子，91%在丟後3天尋獲；部分施放地點沒有回報任何寶特瓶。從三個地點所施放的 10 個寶特瓶，在距離施放點數十至數百公里的地方被回報。由於東地中海的表面流的方向是往西，因此只在東岸發現寶特瓶，也證實了長久以來人們說以色列是東地中海的海廢集中地。

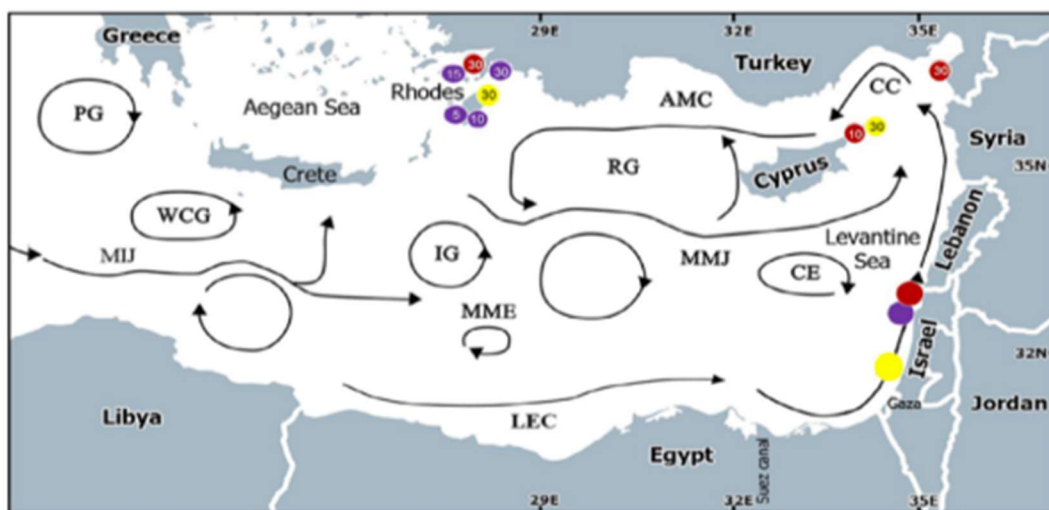


圖2.2- 3 以色列施放寶特瓶與漂流回報位置

2.3 印度恆河案例

由英國、美國與孟加拉學者組成的跨國研究團隊Duncan et al (2020)，以開源追蹤技術，在500毫升的寶特瓶內裝入GPS晶片，分別於季風前後在恆河與孟加拉灣施放。季風前在印度恆河施放10個，為A組；季風後於孟加拉境內恆河佈放12個、海上佈放3個，為B組（表2.3- 1）。A組平均漂流20天，平均漂流距離119公里，最遠的漂了609.9公里。B組在河流施放的與A組數據相似，平均漂流23天，平均距離112公里。而在海上施放的距離大幅增加，平均漂流42天，平均距離1212公里。在施放後 94 天內，追蹤的最遠距離為B組的其中1個寶特瓶，總計漂流了 2845 公里（圖2.3- 2右下d圖的B2）。

表2.3- 1 印度恆河佈放漂流物資訊

A組 季風前	印度	河10個	平均漂流20天 平均距離119公里 最遠的漂了609.9公里
B組 季風後	孟加拉	河12個、海 洋3個	河：平均漂流23天 平均距離112公里 海：平均漂流42天 平均距離1212公里

為了複製寶特瓶的真實運動模式，研究團隊考量形狀、大小、浮力等因素，設計和製造出裝設GPS標籤的寶特瓶（圖2.3- 1）。希望藉由開源技術，能提昇對於水文系統輸送塑膠污染的時空變異有更好的認識。同時，也希望定位標籤寶特瓶能作為刺激社會行為改變的有力工具，裨益科學為基礎的政策，並能藉此提昇公眾意識。

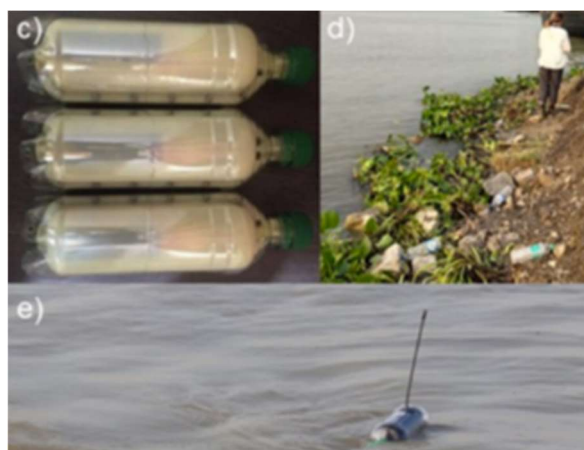


圖2.3- 1 具定位功能之漂流物外觀

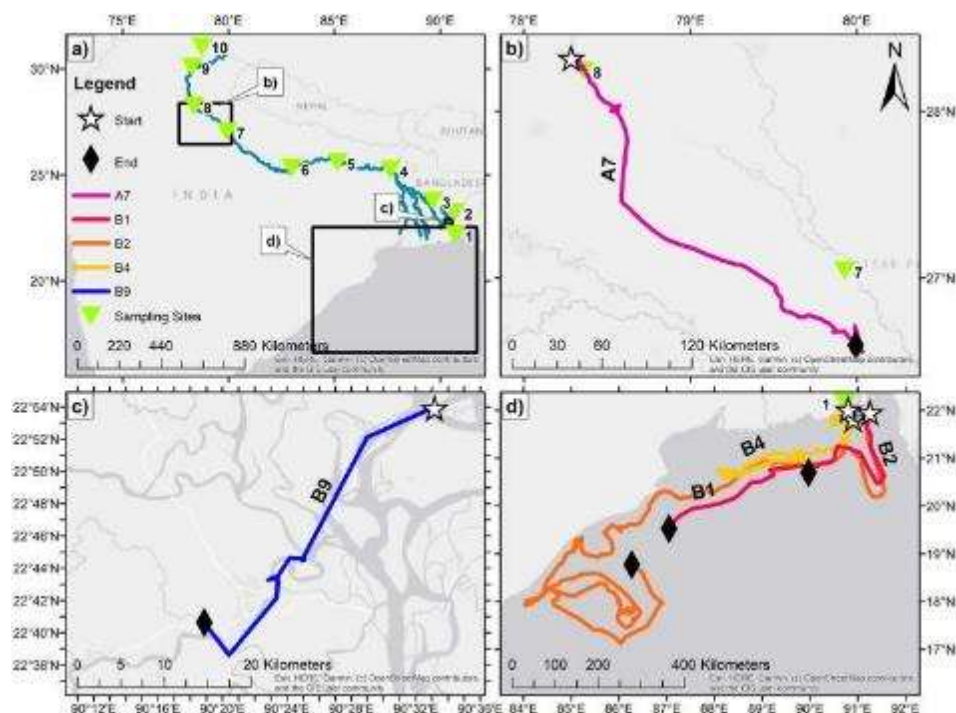


圖2.3- 2 AB兩組之漂流軌跡

另外，研究團隊也準備了3000個木製、生物可分解的「漂流卡」（圖2.3- 3），尺寸為長10公分、寬5公分，一面印有印度語、另一面則是孟加拉語。不過，由於沒有特別宣傳，也沒有搭配針對公眾的教育或活動指引，以致於雖然村民知道有這個施放漂流卡的活動，卻很少人有意願去河邊尋找與回報（National Geographic Society, 2021）。因此，若要提昇施放後的回報率，團隊建議特別針對公眾設計相關環境教育活動，也能增加民眾對於塑膠污染的公眾意識，成為寶貴的教育推廣機會。



圖2.3- 3 木製漂流卡

第三章 實驗器材與方法

3.1 計畫執行場域比較與議題研析

台灣本島河川以中央山脈為主要分水嶺，重要河川均有坡度陡、長度短、流量大等特性，其中中央列管河川（含跨縣市河川）之重要河川水系計有26條，彙整經濟部水利署公布各河川之水文數據如表3.1- 1，可得知高屏溪、濁水溪與淡水河為我國前三大河川，其中高屏溪由於流域面積最大，占台灣本島土地面積達9%，近五年之年均流量明顯高於其他河川。高屏溪主要集水區位於高雄市與屏東縣境內，縣市人口數合計近360萬人。唯一出海口亦位於兩縣市之交界，河口臨近台灣西南部人口稠密之高雄市林園區（人口約7萬）與屏東縣東港鎮（人口約5萬）等重要聚落。

表3.1- 1 台灣流域面積前15大河川與相關數據彙整

河川名稱	流域面積(平方公里)	主流長度(公里)	年流量 (百萬立方公尺)
高屏溪	3,256.90	171.00	8686
濁水溪	3,156.90	186.60	4910
淡水河	2,726.00	158.70	6711
烏溪	2,025.60	119.10	3490
秀姑巒溪	1,790.50	81.20	3563
卑南溪	1,603.20	84.40	2939
花蓮溪	1,507.10	57.30	3177
大甲溪	1,235.70	124.20	2016
曾文溪	1,176.60	138.50	1671
蘭陽溪	978.00	73.00	2531
大安溪	758.50	95.80	1245
北港溪	645.20	82.00	1570
頭前溪	565.90	63.00	713
後龍溪	536.60	58.30	710

*2015-2019近五年平均

數據來源：經濟部水利署，執行團隊製表

近年因氣候變遷，降雨強度越益強烈，短延時的強降雨經常順著溪水沖入下游和海岸。距離高屏溪與東港溪出海口約13.2公里的小琉球，成為河川下游經常受暴雨垃圾與漂流木所苦的小島。

如果颱風直撲台灣南部，高屏溪、東港溪河口淤積的垃圾，就會順著大量河水與海流沖向小琉球。高屏溪流域3,256平方公里、東港溪流域472平方公里，兩條河流的流域面積加起來是高雄、屏東面積的59%。兩條河流承載的污染與垃圾，進入台灣海峽後，直接衝擊面積只有6.8平方公里的小島-小琉球（公視，2018）。2018年7月西南氣流帶來豐沛雨水，大雨帶來的大量漂流木與垃圾隨高屏溪沖向小琉球，阻塞白沙觀光港（表3.1-2）。

2018年8月，小琉球才清完海灘和港口的大量漂流木，海灘上都還是這些還沒清完的雜物，遇上颱風等級的熱帶性低氣壓，來到高屏溪和東港溪上游，一樣是強降雨把沿線的雜物全都帶下，樹枝蘆葦與垃圾雜物再度包圍小琉球。今年6月初為春夏後的第一場雨，執行團隊隨即安排攝影人員紀錄小琉球海岸垃圾堆積狀況（表3.1-2）。

表3.1- 2 小琉球近年暴雨過後海岸與港口堆積垃圾

	
<p>2018年7月 小琉球白沙港塞滿漂流木 （圖片來源：自由時報）</p>	<p>2018年7月 小琉球花瓶岩 （圖片來源：島人工作室）</p>
	
<p>2018年8月 小琉球白沙港塞滿漂流木 （圖片來源：自由時報）</p>	<p>2018年8月 白沙港受竹木淤塞 （圖片來源：自由時報）</p>



2021年6月 小琉球漁埕沙灘堆積大量布袋蓮與竹木

從水文與人文等地理特性與歷史事件分析，高屏溪均具備我國首次執行河川廢棄物進入海洋系統研究之科學代表性，且海委會國海院設置於南部之高雄市，實驗數據成果或有機會供中央與地方攜手發展海廢管理政策參考依循。因此，本計畫選定以高屏溪出海口作為本計畫執行場域。

3.2 漂流物製作、釋放與收回

3.2.1 以木製漂流物模擬海廢漂移之研究文獻回顧

海洋廢棄物之源與匯（source and sink）為目前全球塑膠汙染研究之熱門領域，其中水表逕流與河川系統被認為扮演重要角色。近年許多研究透過施放實際尺寸之漂流物，進行收回紀錄，藉由分析釋放與收回時間與空間上的前後差異，重現河川廢棄物起始於不同來源（source）的漂流路線（transportation）與攔淺熱點（sink）。

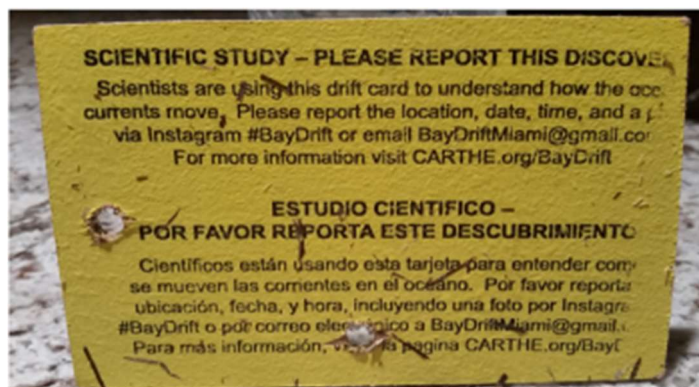


圖3.2.1- 1 美國邁阿密大學CARTHE研究計畫釋放之環境友善漂流卡（木製）

回顧近年國際6篇探討河川與近岸廢棄物漂流之研究論文，各篇研究人員依據其欲回答之問題與現場環境特性，設計不同材質或大小之漂流物，如美國邁阿密大學釋放的漂流卡（圖3.2.1- 1）。若以模擬海廢為研究目的，會使用浮力較大的木塊、厚木板或塑膠塊；若是模擬船舶油污，則會使用塑膠板或薄木片。釋放數量上亦會考量當地氣候因素、人力與經費資源。例如南非的研究僅針對當地一個潟湖之出海口探討潮汐與風向廢棄物漂流之影響，因此僅在河口單一地點，分別於退潮與漲潮時，釋放總數150件之三種不同浮力與風阻之漂流物，結果顯示廢棄物隨漲潮沿河道內上溯，但保麗龍因風阻較大而與另兩種材質分別堆積於不同熱點（Ryan & Perold, 2021）。

而Schöneich-Argent & Freund（2020）大範圍分析德國水系對北海之影響，因此規劃15個陸地釋放點與12個近海釋放點，並於一年內釋放三次、每次釋放約800件木製漂流物。由於總釋放數量達6萬多件，因此能更細緻探討不同空間與季節下廢棄物的漂流特性。

綜合以上論文之觀點，執行團隊匯整以木製漂流物進行實驗具有以下優點：

- （1）以天然可分解材質製作，降低海洋污染風險，不違背實驗道德與社會觀感。
- （2）相較於即時發報或軌跡紀錄裝置，較容易調整漂流物的外觀、浮力與風阻，可模擬某些類型之廢棄物漂流模式；且成本較低，可大量製作。
- （3）由於大量釋放可增加樣本回收數量，實驗設計上可規劃一個以上變數（如釋放點距離出海口位置、釋放時之潮汐等）。樣本數多時，也有機會觀察到更廣的範圍與更細緻的時空尺度下，擱淺時間、漂移距離、漂移速度、擱淺熱點等重要資訊。
- （4）搭配可追蹤漂流物之軌跡紀錄，精進既有表面漂流之數理模型。

3.2.2 設計製作低環境衝擊之木製漂流物

基於本計畫之目的在於觀測本島西南部廢棄物經由河川入海後之漂流與擱淺情形，依據自2018年至今於高雄市與屏東縣海岸海廢調查累積之數據（由執行計畫團隊自行蒐集），排除漁業相關海洋來源垃圾，此段海岸陸源性垃圾類型以塑膠瓶（38%）、玻璃瓶（27%）與免洗餐具（17%）為主（圖3.2.2- 1）。因此漂流物製作時應考量以上三類廢棄物之形狀、大小、浮力與風阻，以相仿之尺寸進行設計。

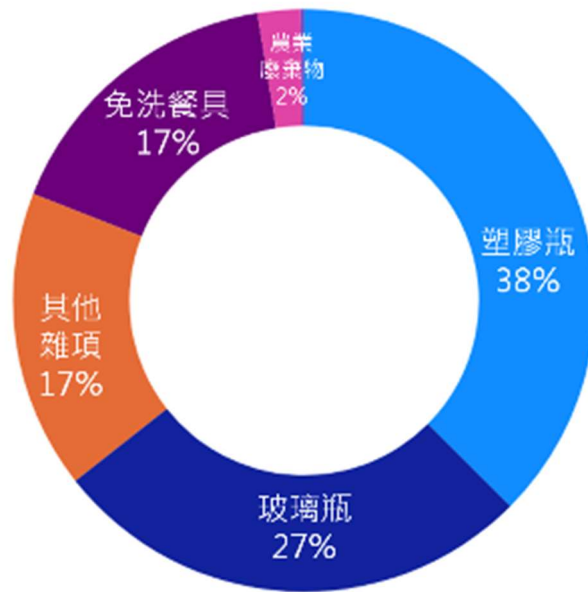


圖3.2.2- 1 高屏地區民生廢棄物組成比例

參考以上數據與國外文獻，執行團隊至木材加工廠以1.5公分與5公分兩種厚度之原木板製作低環境衝擊之木製漂流物，並裁切成15*10公分大小。兩款漂流物預計分別製作520件，合計1040件，以模擬不同尺寸廢棄物於河川與海洋中之漂流情形，詳細尺寸描述如表3.2.2- 1。由於實驗需分成兩次在4處不同地點進行釋放，為降低部分漂流物無法收回對海洋環境之影響，捨棄國外相似實驗以油漆或油性筆註記之作法，選擇使用的單純之電熱烙印於木料表面進行標記。

表3.2.2- 1 兩種不同厚度之木製漂流物與標記方式

漂流物	外觀照片 (左：厚； 右：薄)	長*寬* 高	體 積， 重量	大小或浮力相 似之常見海廢	水面最大 風阻面積	水面最小 風阻面積
木 製 漂 流物_薄		15*10* 1.5cm	225cm ³ , 92±11g (n=5)	小型食品包裝 袋、便當盒、 塑膠碗、紙杯 與PP飲料杯	5cm ²	3cm ²
木 製 漂 流物_厚		15*10*5 cm	750cm ³ , 334±7g (n=5)	小 包 餐 飲 垃 圾、塑膠或玻 璃飲料瓶罐、E PS飲料杯	42cm ²	28cm ²
以電熱烙印方式於木塊右上之1/4進行釋放點位標示，左下圖為5cm厚之木塊、右下						

圖為1.5cm厚之木片。第一次釋放(降雨事件)時標示單一個黑點，第二次釋放時(非降雨事件)時標示兩個黑點。



3.2.3 漂流浮標相關技術與應用案例

具備定位功能之電子漂流浮標常用於各類海氣象研究，可於固定時間間隔內紀錄當下位置資訊，將數據即時傳輸回接收站或儲存於本體內。本計畫需設計與製作五個具有紀錄軌跡與自動回傳功能之浮標，模擬人造廢棄物於河口漂流與擱淺之路線。在最重要的訊號收發模組方面，國內外參考文獻與目前可取得之技術與產品，依據座標擷取、資料傳輸、傳輸距離等面向分析如表3.2.3- 1。

表3.2.3- 1 四種漂流浮標主機之訊號接受與傳輸方案比較

方案	座標擷取方式	資料傳輸方式	訊號傳輸距離
方案一 	GPS	衛星通訊 (Globalstar或Iridium系統)	無限遠, 但可能受雲層阻擋
方案二 	GPS+AGPS	國內電信業者之3G/4G訊號	視周遭基地台分布而定
方案三 	GPS	ZigBee (2.4GHz/800MHz/900MHz)	數百公尺至數公里 (最遠約45公里), 需架設移動式基地台
方案四 	GPS	船舶用AIS通訊協定 (VHF 156-162MHz)	數公里至數十公里, 較適合寬廣無阻礙空間, 需架設固定式或移動式接收站

除了訊號之收發方式，設計漂流物時亦需要綜合考量外觀上水阻與風阻面積、重量與浮力、防水耐候、發訊間隔與電量消耗，並減少實驗結束後相關儀器對環境之影響，例如因故無法收回時減少產生新的海洋廢棄物。邁阿密大學Novelli等人（2017）曾嘗試以竹子與樺木夾板（birch plywood）製作發報漂流子以降低環境衝擊，但只能維持2周之漂流時間。該團隊之後採用生物可分解塑膠-聚羥基脂肪酸酯（Polyhydroxyalkanoates, PHA），以模具射出方式製造零件，上方固定市售戶外使用之衛星收發裝置（Globalstar - SPOT Trace），組合成可於海水中高度分解之海洋觀測浮漂（表3.2.3- 2左圖）。Jambeck（2021）則使用常見600ml寶特瓶之外型輪廓與搭配外接天線，設計可在河川淡水環境中實驗的浮標，以模擬塑膠廢棄物的漂流情形（表3.2.3- 2中圖）。加拿大多倫多大學Rochman的團隊則以將可密封之塑膠水壺內裝入市售衛星收發裝置，製成方便取出保養或充電的可重複使用浮標，並於北美安大略湖岸釋放追蹤（表3.2.3- 2右圖）。

表3.2.3- 2三種具有收發功能之研究浮標

		
<p>1. 以生分解塑膠PHA製作之衛星發報浮標</p>	<p>2. 模仿600cc寶特瓶外型之發報浮標</p>	<p>3. 以市售水壺作為防水外殼的發報浮標</p>

3.2.4 製作可自動回傳追蹤紀錄軌跡之漂流浮標

彙整以上國外研究報告資訊，並諮詢國內專家學者經驗後，同時考量高精度、長距離、遠端設定、低時間間隔、低耗能等面相，選定以國內廠商開發使用於車隊管理之商業用裝置為基礎，調整成適合本實驗之追蹤發報模組，相關特性數據整理於表3.2.4- 1。


表3.2.4- 1追蹤發報模組特性

外觀	
衛星接收	Cirotech Technology(太盟) PA018EA0068 GPS針式平板天線
定位方式	GPS+GLONASS 雙模式
資料傳輸	中華電信 4G LTE + FPC內置天線
電源供應	高容量16850鋰電池x2
座標回報模式	標準(移動時持續回報)、定時(0.5, 1, 2, 4, 8, 12, 24回報), 可遠端修改設定
電力管理	標準模式下(持續回報)每日移動6小時約3天, 省電模式下(間隔半日或一日回報)約可使用30天
資料管理與儀器設定平台	網頁與手機app均可, 雲端軌跡儲存60天
保護殼	橡膠墊圈、氣密防水設計

為模擬常見海廢外型，同時提高發報模組之防水耐候性，選定以市售容量1.2公升運動水瓶為防水外殼，瓶身與瓶蓋材質分別為PET與PP塑膠，瓶蓋內圈有矽膠環提供基本氣密功能。製作浮標時以緩衝材固定發報模組於水瓶中央，內外側以建築用矽膠填充後上蓋旋緊提供額外之防水。

執行團隊於9月13日降雨事件時，第一次釋放3組浮標後，發現可能由於吃水太淺，靠岸時不易擱淺，造成回收不易。因此以水、石膏與砂石混合後平鋪於防水殼瓶身一側，將浮標之重量由380克增加至1000克，明顯增加整體之吃水，調整後之浮標由於一側較重，讓發報模組在海浪與風的擾動下，兩端天線可長時間維持在水面以上之狀態，應有助於信號之接收與發送。兩次釋放浮標之外觀尺寸規格如表3.2.4-2

表3.2.4- 2 本計畫製作之發報浮標規格

發報浮標設計	發報浮標照片	長x寬, 體積	重量 (浮力)	水面最大風阻面積	水面最小風阻面積
第一次釋放 (製做2組)		21*9cm, 1398.9cm ³	382g	180.4cm ²	9.5cm ²
第二次釋放 (製作3組)		21*9cm, 1398.9cm ³	1000g	143.0cm ²	35.2cm ²

3.3 漂流物釋放與收回實驗

3.3.1 氣候因素分析

因人為丟棄或管理不佳等原因逸散於陸地環境中的廢棄物，在降雨後受到地表逕流沖刷與河岸水位上升等因素，以非點源污染的形式進入河川水系中漂浮，成為河川輸送之一部分。而河川之流量、流速、流向與剖面均可能影響水中輸送物質之移動與沉積。Schneider等人（2021）2020年於淡水河集水區進行之河岸垃圾之研究與Ryan&Perold（2021）於南非河川之研究，均顯示河川下游之感潮作用產生之來回推送，可能是減低河川廢棄物入海後漂移距離，甚至為河川引入海洋來源廢棄物的原因之一。

本計畫之執行包含2次漂流物釋放實驗與記錄，一次於降雨事件發生時進行，另一次為非降雨期間進行實驗作為對照比較。依據中央氣象局今年7月底公布之〈未來 3 個月的長期天氣展望〉，提及「9 月份西北太平洋上颱風活動仍舊活躍，颱風生成平均數有 5.1 個，侵臺平均數為 0.8 個。10 月份進入秋季，東北季風天氣型態轉趨明顯，天氣也漸轉涼，同時中南部進入氣候上的枯水期，降雨機會減少。」（中央氣象局，2021）相關歷史觀測數據亦顯示9月與10月為我國南部乾濕季明顯交界（表3.3.1- 1）。

表3.3.1- 1臺灣各地區月累積雨量（單位：毫米）

	8 月	9 月	10 月
南部地區 ^{註1}	240.7~545.1	82.5~199.7	1.8~55.5
高雄 ^{註2}	512.4	224.5	53.4
台南 ^{註2}	478.9	167.6	24.6

註1：資料來源：（中央氣象局，2021）

註2&3：資料來源為近30年氣候月平均

由於本計畫執行期間為2021年9月至12月，且部分漂流物釋放實驗需要於降雨事件發生後進行，但台灣西南部與高屏溪流域歷年9月與10月雨量有限。為把握難得之氣候狀態進行實驗，計畫團隊於9月初即製作整備相關儀器材料，透過多種氣象預測與監測平台（表3.3.1- 2）監控高屏地區之降雨事件之發生。當高屏溪上游集水區降雨發生導致水位上升後，在確保人員安全無虞的狀態下，即時至出海口相關點位進行漂流物與發報浮標之釋放。另一次非降雨事件之釋放，亦依據氣象預報晴朗無雨、河川水位穩定之時日於相同地點進行。為避免兩次施放之漂流物尋回時發生混淆，執行團隊在漂流物表面標示不同顏色或編號區隔。

表3.3.1- 2 本計畫可參考之氣象預測與監測資訊平台

資 料 類型	來源	時效性與資料解析度	補充資訊
天 氣 預測	氣象局定量降水 預報	全台未來12小時雨量地圖	
	氣象局豪大雨特 報	當日發布，解析度可達各縣 市行政區	標準為24小時累積雨量>8 0mm或時雨量>40mm
	天氣風險公司	高屏地區一周天氣預報	
	Windy.com	未來10天內每3小時雨量預 測與未來半日/1日/3日/5日 /10日累積雨量預測地圖	可選擇ECMWF（歐）、GFS （美）、ICON（德）三種 預測系統

實 際 觀測	氣象局觀測資料 查詢	各觀測站前一日每小時雨量 紀錄	
	水利署即時水文 資訊	各觀測站前20分鐘之雨量、 河川水位紀錄	可即時繪製比較水位/雨 量折線圖

3.3.2 漂流物釋放

1. 實驗設計

為考量多種環境因子之影響，增加數據之分析應用性，以分組、多因子的方式設計木製漂流物釋放與收回實驗，除了以優先關注之降雨/非降雨事件為主要變因，其他因子包含河岸左/右、距離出海口1公里/2公里、木製漂流物之厚/薄等三項較次要之變因，每次實驗時於每一點位分別釋放厚型與薄型漂流物各65件，兩次實驗合計共1,040件。

劃設投放漂流物點位時，考量降雨後之人員操作安全性，在距離河口2公里之點位挑選高屏溪最下游橋梁－雙園大橋之北向車道之外側人行道上，分別於主流河道正上方兩處間隔約110公尺之兩點（N1&S1）。距離河口1公里之點位，則選擇高雄市林園區靠近汕尾漁港與石化工業區之河道，為一排延伸至河道中之消波塊，以及靠近屏東縣新園鄉鹽埔漁港，與共和村魚塢之沙洲（N2&S2）。可參考圖3.3.2- 1，三角形為投放點，實線為尋回範圍。

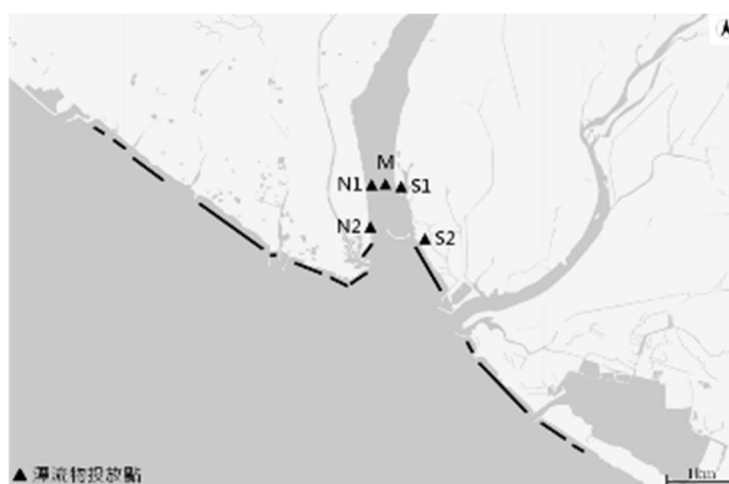


圖3.3.2- 1 於河川出海口兩側劃設漂流物投放點

每次釋放前後之相關工作如表3.3.2- 2，詳細工作包含：降雨預報監控、陸海氣象水文與觀測數據收集、浮標軌跡紀錄追蹤、木製漂流物尋回定位、海岸廢棄物組成與熱點調查等。

表3.3.2- 1木製漂流物之實驗設計

位置	釋放點位	距出海口 距離（公里）	座標	氣候事件(釋放數量)	
				厚型漂流物	薄型漂流物
北岸	N1_雙園大橋北	2	22.49833, 120.41649	降雨(65) 非降雨(65)	降雨(65) 非降雨(65)
	N2_汕尾	1	22.49845, 120.41756	降雨(65) 非降雨(65)	降雨(65) 非降雨(65)
南岸	S1_雙園大橋南	2	22.48523, 120.41789	降雨(65) 非降雨(65)	降雨(65) 非降雨(65)
	S2_鹽埔	1	22.48297, 120.42732	降雨(65) 非降雨(65)	降雨(65) 非降雨(65)

表3.3.2- 2釋放前後的調查工作規劃時間表

日數*	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
氣象水文紀錄	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
出海口釋放		V															
浮標軌跡追蹤		V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
木製漂流物尋回			V		V			V				V					V
海岸廢棄物調查			V (調查下游與河口兩岸共14測站1次)														

*相對日數以釋放日為第0日起計算

2. 降雨事件釋放實驗

2021年9月6日，強烈颱風璨樹於關島海域形成，彙整各方預報後評估將對高屏地區山區造成降雨，高屏溪下游最鄰近出海口之河川水位測站「萬大大橋」，於9月12日8點起，水位有明顯上漲，三條支流匯入之洪峰依序進入中下游河段，於9月13日16點漲至最高水位（如圖3.3.2- 2），符合本計畫中「降雨事件釋放」之執行條件。經過監測降雨量與河川水位變化，執行團隊備妥相關器材，並穿著個人安全防護裝備，包含安全頭盔與救生衣，於9月13日13:00進行釋放。釋放時相關數據與照片記錄如表3.3.2-3與表3.3.2-4。

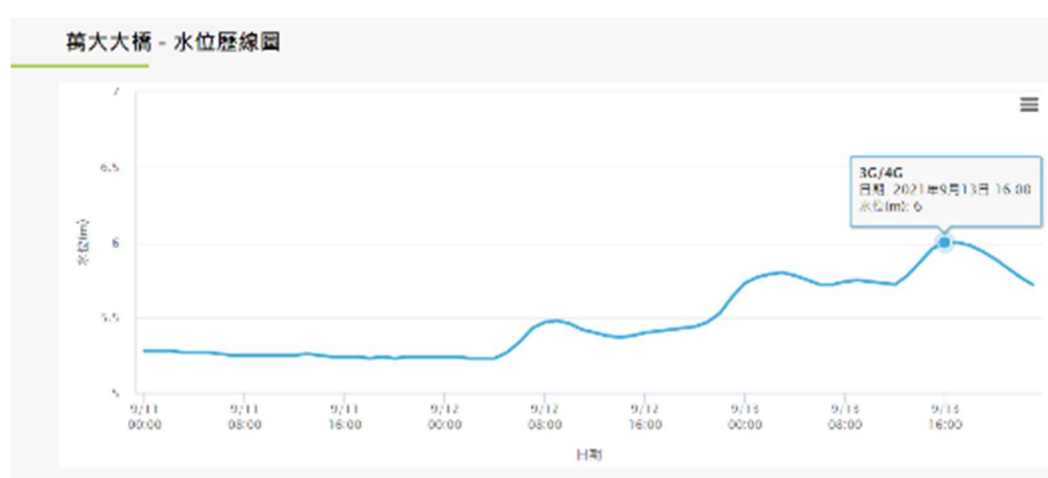


圖3.3.2- 2 2021/9/11-13高屏溪下游萬大大橋水位變化(來源:經濟部水利署水文資訊網)

表3.3.2- 3 降雨事件漂流物釋放資訊紀錄

釋放時間	2021/9/13 13:00-15:00
事件類型	降雨事件釋放
執行人員	顏寧、胡介申、徐季玄
累積雨量	當日上游累積雨量: 8.5mm
最高雨量	釋放前上游24小時累計最高雨量: 33mm
潮汐與潮差	小潮，實驗時自海平面+14cm開始退潮
風向與風速	東風轉西風，平均風速1.8m/s、最大陣風11.4m/s
木製漂流物	釋放520件（每處釋放厚、薄各65件，共4處釋放點）
衛星浮標	釋放2件（於雙園大橋上，高屏溪左右岸各釋放1件）

表3.3.2- 4 降雨事件漂流物释放工作照片





3. 非降雨事件釋放實驗

2021年9月底時，颱風璨樹帶來之降雨已趨平緩，高屏地區多日無明顯之降雨，合本計畫中「降雨事件釋放」之執行條件，因此於9月27日13:00進行釋放。釋放時相關數據與照片記錄如圖3.3.2-3、表3.3.2-5、表3.3.2-6。

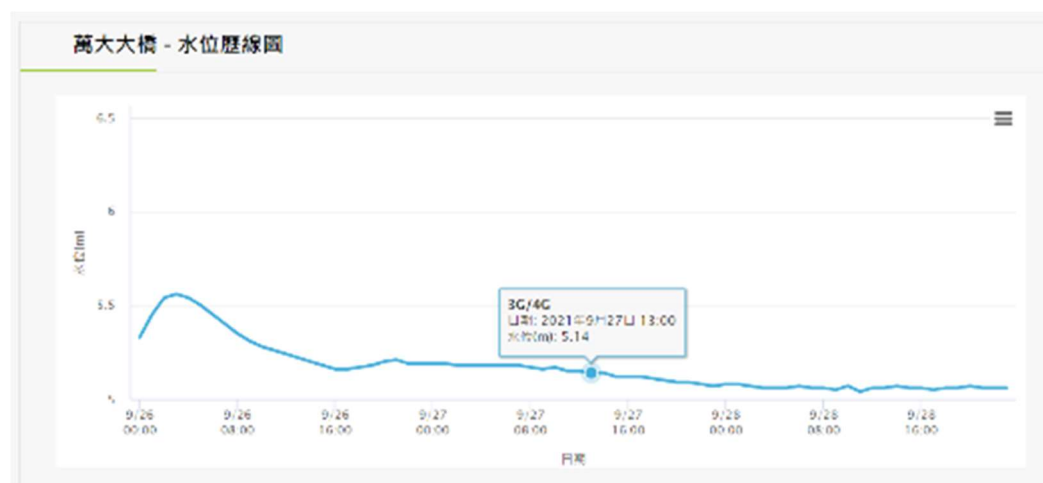


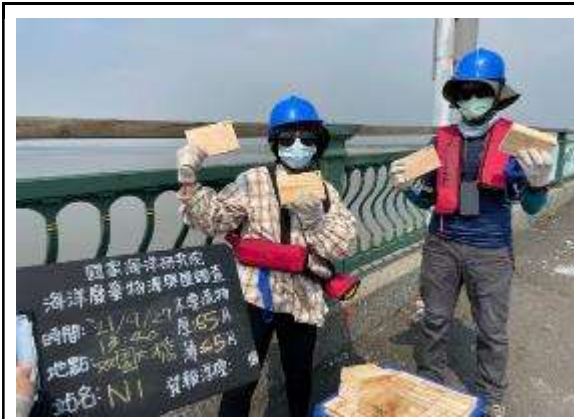
圖3.3.2- 3 2021/9/26-28高屏溪下游萬大大橋水位變化(來源:經濟部水利署水文資訊網)

表3.3.2- 5 非降雨事件漂流物釋放資訊紀錄

釋放時間	2021/9/27 13:00-15:00
事件類型	非降雨事件釋放
執行人員	顏寧、胡介申、徐季玄
累積雨量	當日上游累積雨量：0mm（六龜測站）
最高雨量	釋放前上游24小時累計最高雨量：0mm
潮汐與潮差	小潮，實驗時自海平面+10cm開始退潮
風向與風速	東北風轉西風，平均風速2.3m/s、最大陣風7.7m/s
木製漂流物	釋放520件（每處釋放厚、薄各65件，共4處釋放點）
衛星浮標	釋放3件（於雙園大橋上，出海口左右岸各釋放1件）

表3.3.2- 6 非降雨事件漂流物釋放工作照片





3.3.3 漂流物與浮標收回

高屏溪河口與兩側海岸之地形地貌包含泥灘、沙洲、紅樹林與蘆葦、人工海堤（消波塊）、離岸堤與港口設施。執行團隊現勘後，以廢棄物容易擱淺且易於撿拾的沙灘地形為主，捨棄海浪直接拍打之消波塊與垂直壁面之漁港為原則，於右岸（高雄市林園區）畫定6公里、左岸（屏東縣新園鄉與東港鎮）5.6公里範圍之河、海岸線為漂流物之收回範圍。藉由兩人一組於海岸線徒步之方式，尋回釋放之木製漂流物，並以智慧型手機內建之GPS晶片（精度約5公尺）與導航app，紀錄尋獲點位之座標。發報之GPS浮標之尋回作業，則視其回報漂流路徑與軌跡密切追蹤，當浮標回報之座標固定於海岸線時不變時，視為擱淺，並依據當地海岸型態攜帶適合之裝備前往收回。收回工作紀錄照片如表3.3.3-2

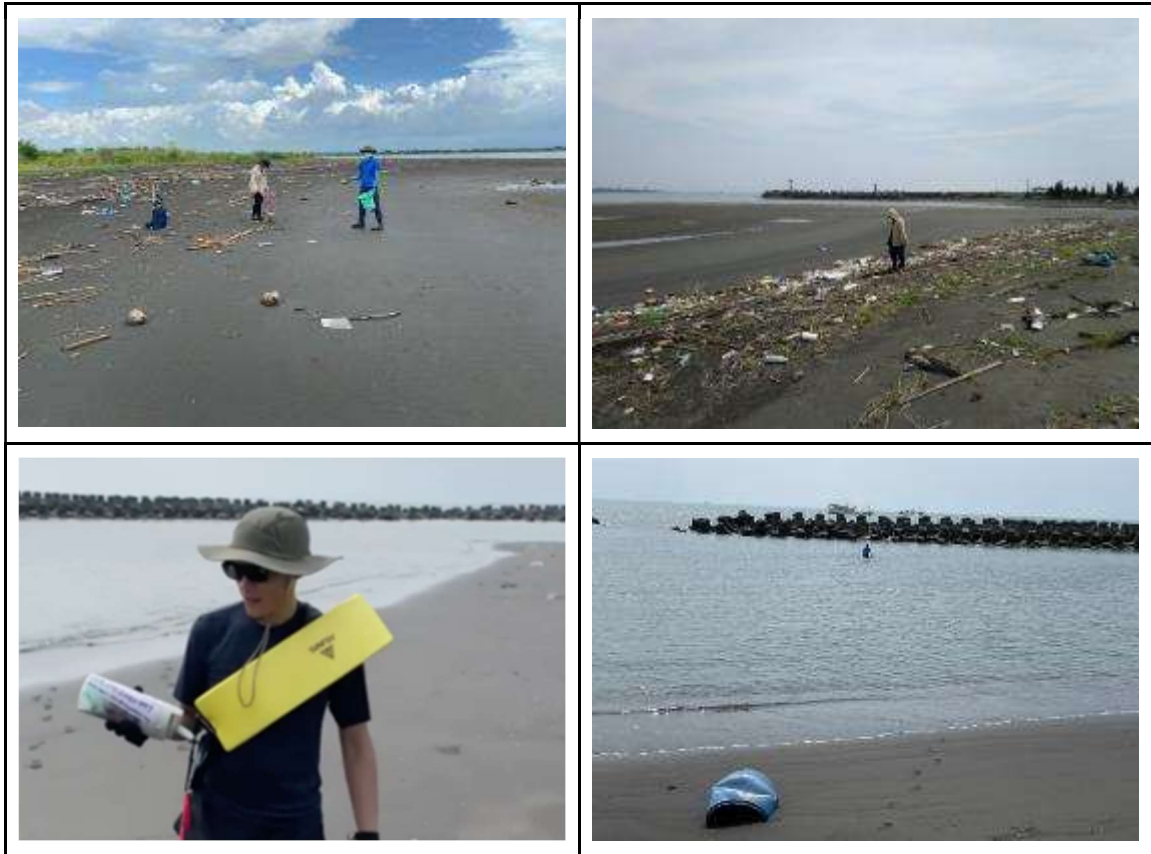
10月12日原訂為非降雨事件釋放後第15天尋回作業，但因受第18號圓規颱風影響，在評估風浪狀況與人員作業安全下，改至10月11日、13日與14日分段執行。

表3.3.3- 1 兩次漂流物釋放後之尋回作業日期

	釋放日(D0)	第1次尋回(D1)	第2次尋回(D3)	第3次尋回(D6)	第4次尋回(D10)	第5次尋回(D15)
降雨事件釋放	9/13	9/14	9/16	9/19	9/23	9/28
非降雨事件釋放	9/27	9/28	9/30	10/3	10/7	10/11、10/13、10/14

表3.3.3- 2 漂流物與浮標尋回工作照片





3.4 漂流物蓄積調查

3.4.1 調查時間、位置與廢棄物分類方法

計畫團隊於出海口之河道內側與河口兩岸，約間隔1公里設一個垃圾量測站，左右兩岸各7個測站，合計14站。於降雨與非降雨事件投放漂流物後5日內前往（圖3.4.1-1），共調查2次。

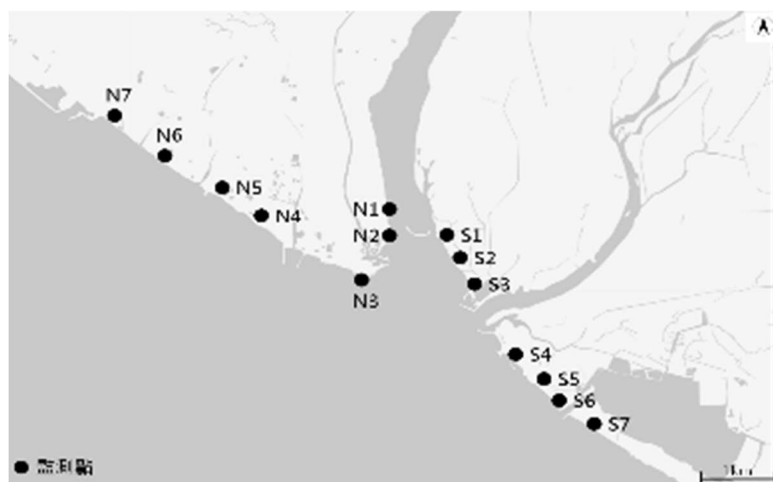


圖3.4.1- 1 漂流物蓄積量監測點位

各種海岸廢棄物樣式多變類型龐雜，需要分類簡化後方能有效記錄。執行團隊參考環保署（未發表資料）與民間團體（胡與顏，2019）研發之海岸垃圾快篩調查方法，將人造垃圾種類設定為14項常見廢棄物（表3.4.1- 1），並計算垃圾種類與組成比例，統計其重量、數量與體積。

表3.4.1- 1 14類人造廢棄物與描述

人造廢棄物分類	描述
A塑膠瓶	寶特瓶、蓋及其他液體的容器
B玻璃瓶	玻璃瓶與蓋
C免洗餐具	手搖飲料杯、吸管及免洗餐具
D塑膠袋	塑膠提袋及食物包裝袋
E鐵鋁罐	鐵罐與鋁罐
F抽菸相關	菸蒂、菸盒、打火機、檳榔盒
G紙類鋁箔包	廢紙、鋁箔包或利樂包
H漁網繩索	漁網與漁網用繩索
I發泡浮球	保麗龍浮球及碰墊
J硬塑膠浮球	硬質塑膠浮球
K釣魚相關	釣線、釣鉤、假餌、木蝦
L農業廢棄物	芭樂套袋及肥料袋
M營建廢棄物	水泥袋及鋼筋
N其他雜項	其它垃圾

3.4.2 海岸或河岸人造垃圾量化方式

1. 100公尺內垃圾體積

量測海岸廢棄物之量化資訊可使用數量、重量與體積，執行團隊於2018年導入由日韓研發而來的海岸快篩技術，目地在短時間內取得大尺度海廢分佈與污染物總量，整體而言「體積」是最快速且準確的量化資訊，參考日韓已學術發表之視覺計量的方

法，將計量設定為黑色大垃圾袋1袋80公升。為確保數據之準確，輔以實際物體如600毫升寶特瓶、2公升牛奶瓶作為海岸廢棄物的對照（表3.4.2-1）。

執行團隊成員過去至澎湖縣、連江縣、基隆市、新北市、高雄市、屏東縣等地之礁岩、沙灘、河口地形，進行實地檢拾與驗證，拍照紀錄不同尺寸各式海廢裝填滿一個黑色大垃圾袋（80公升）之樣態，證明此法能兼容臺灣大多數海岸環境（表3.4.2-2）。

表3.4.2- 1 調查基本單位與常見容器之體積轉換


	
<p>一袋80公升約等於30-35個市售HDPE鮮奶瓶</p>	<p>一袋80公升約等於85-95個PET寶特瓶</p>

表3.4.2- 2 台灣各地裝滿1個黑色大垃圾袋（80公升）海廢之樣態





有鑑於廢棄物於海岸線上分布的離散程度不一，海岸長度100公尺是國際上海岸廢棄物科學領域公認已具備代表性的最基本抽樣尺度。樣區寬度則是參考澳洲工研院CSIRO所建議之「海水延伸至海岸植被內一公尺」，做為調查寬度上下界線的統一標準，如圖3.4.2- 1。

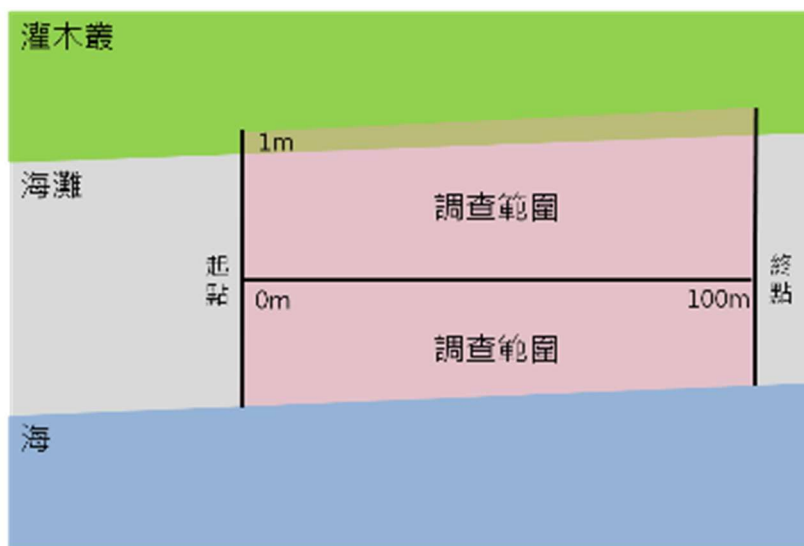


圖3.4.2- 1 調查範圍示意圖

為了解垃圾分布並清楚呈現海岸線況，調查員將拍攝樣區起點、35公尺處朝向起點、35公尺處朝向終點、70公尺處朝向起點、70公尺處朝向終點、終點共六張現場照片，紀錄海岸廢棄物的實際狀況。每張照片可清楚呈現垃圾解析度之上限約為20公尺，因此，執行團隊設計每35公尺朝向起點、朝向終點各拍攝一張照片，後續分析可將六張照片連續拼接，以得到最完整之穿越線數據（圖3.4.2- 2）。拍照時，照片上

緣盡量貼近海平面或地平線，盡可能減少天空與海水的畫面比例，而將畫面大部分呈現海岸廢棄物的狀況。

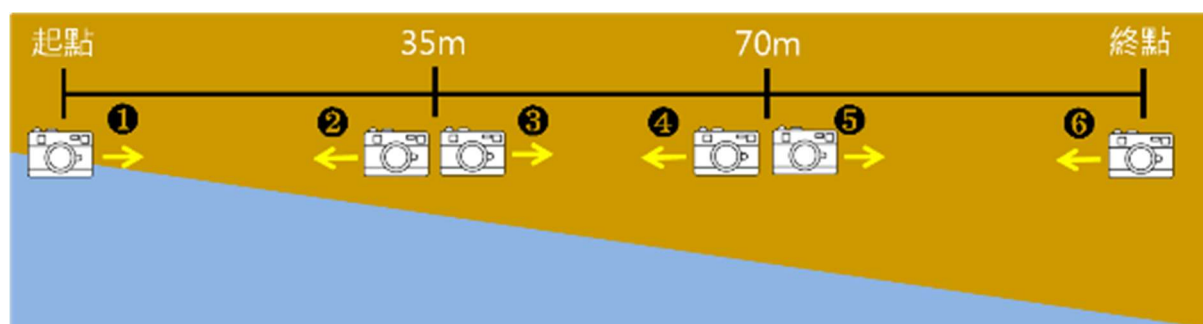


圖3.4.2- 2 穿越線拍照示意圖

2. 每1平方公尺熱點內垃圾件數

相較於100公尺垃圾快篩為較大尺度、以體積為單位之量化方式，「單位面積內垃圾熱點密度」可提供更詳細的組成比例、垃圾完整度、各項垃圾件數等資訊，以方便後續追蹤及分析。執行團隊設定每個觀測點位中挑選2處垃圾集中熱區，以口徑4分（半徑約1.4公分）PVC塑膠水管組裝成長1公尺、寬1公尺，面積1平方公尺之樣框，平放於垃圾上方，並盡可能以正射投影角度拍攝高畫質熱點照一張（圖3.4.2- 3），隨後於電腦中進行統計分析。

分析廢棄物種類與件數時使用計數器，按14類項目逐一計算數量（分類如表圖3.4.1- 1），隨後依據所計算之總數量，換算出個項目所佔百分比。原則上大塊、完整之垃圾計算為一件，為避免影響數據準確性，小於5公分的發泡浮球碎塊則不計算在內。



圖3.4.2- 3 垃圾熱點拍照以利後續分析

3.5 海岸垃圾快篩計量與空拍

為提供海岸廢棄物AI辨識訓練所需之動態影像，執行團隊於10月14日於高雄市林園區汕尾漁港附近之河口沙洲進行廢棄物之快篩調查與空拍影像紀錄(表3.5-1)。作法為先由海廢快篩調查經驗豐富之人員以目視定量之方式，計算100公尺海岸上之垃圾總體積與類型比例，再由專業無人機飛行員分別以5m、15m、20m(海拔高度)三種高度執行同範圍之空拍作業3次，影像以4K UHD高畫質紀錄。

以海岸快篩方式計算該處100公尺海岸線之人造垃圾數據如下：體積1,800公升、重量1,010.7公斤，垃圾類型組成分別為塑膠瓶罐262.8公斤、玻璃瓶436.2公斤、免洗餐具與飲料杯78.9公斤。以上資訊與影像可作為海廢AI辨識技術之訓練使用。

表3.5- 1 垃圾快篩計量與空拍範圍





快篩垃圾量之測線紀錄



空拍畫面截圖，拍攝高度依序為5公尺（左上）、15公尺（右上）、20公尺（左下）

第四章 實驗結果與討論

4.1 木製漂流物實驗結果

本計畫兩次漂流物釋放實驗總計施放木製漂流物1,040件，釋放後經過10次、每次約12公里海岸線之徒步尋回作業，共收回漂流物205件，整體回收率為19.7%。降雨與非降雨事件回收率分別為27.9%與11.5%，所有收回的漂流物中，厚型與薄型的比例為107：98，北岸與南岸收回之比例為91：114。擱淺時間方面，74.6%的漂流物在釋放後3天被尋獲收回，其餘25.4%則在第6至15天內被收回，整體而言，每件漂流物由釋放至擱淺之平均天數為4天（表4.1-1、表4.1-2）。

表4.1-1 降雨事件釋放木製漂流物收回結果

位置	釋放點位	收回比例		收回天數比例			收回地點（比例）	
		厚型	薄型	1-3天	6-15天	平均擱淺天數	北岸	南岸
北岸	N1_雙園大橋北	0	0	0%	0%	-	0%	0%
	N2_汕尾	41	45	83%	17%	3	88%	12%
南岸	S1_雙園大橋南	10	15	88%	12%	3	8%	92%
	S2_鹽埔	17	17	53%	47%	8	3%	97%

表4.1-2 非降雨事件釋放木製漂流物收回結果

位置	釋放點位	收回比例		收回天數比例			收回地點（比例）	
		厚型	薄型	1-3天	6-15天	平均擱淺天數	北岸	南岸
北岸	N1_雙園大橋北	0	2	0%	100%	14	50%	50%
	N2_汕尾	19	7	73%	27%	4	8%	92%
南岸	S1_雙園大橋南	11	11	77%	23%	4	14%	86%
	S2_鹽埔	7	3	60%	40%	4	0%	100%

*以釋放日隔天為第一天起計算，於第1、3、6、10、15天進行收回作業。

4.1.1 木製漂流物_釋放點位與漂流距離

1. 漂流距離計算方式

本計畫釋放漂流物地點位於河口兩側，考量高屏溪出海口附近有許多沙洲及港口，且漂流物必然透過水體移動，計算漂流物移動之最短漂流距離（以下簡稱「漂流距離」）時，首先計算釋放點與尋獲收回點兩點間直線距離，若最短連線需橫跨衛星圖層之陸地或港口海堤，則由釋放點先連線至天然或人造海岸外側之轉角處後，以直線接續連至上岸收回地點。下圖4.1.1- 1為以編號2-N2-177木塊為例，起點為N2，終點為汕尾海堤。本計劃由於範圍及數量尺度較小，為避免誤差，不考慮由起點直線連接至終點的計算方式。

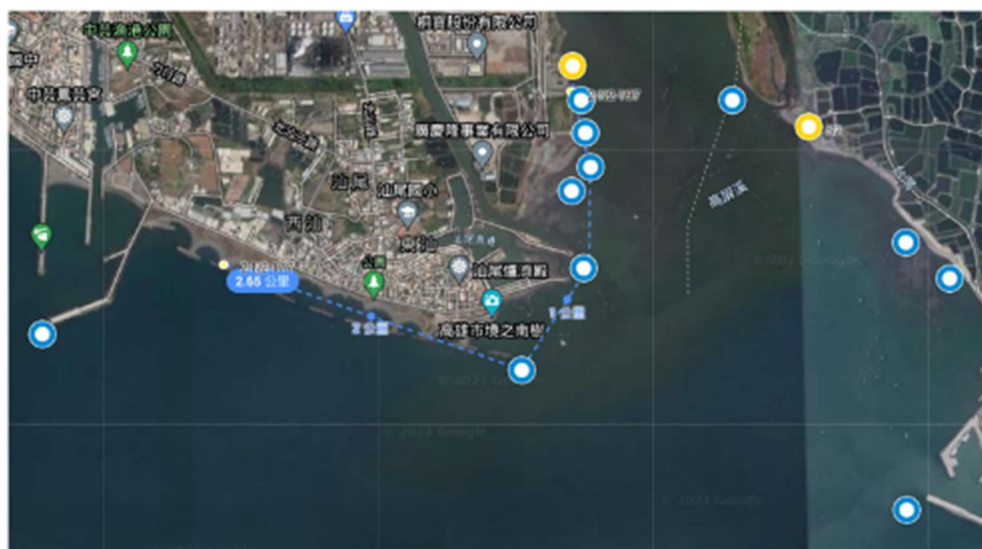


圖4.1.1- 1 模擬計算漂流物移動距離

2. 不同釋放點之漂流距離與漂流天數

分析兩次釋放後收回之205件木製漂流物，整體平均之漂流距離為2,024 ($\pm 1,899$) 公尺，降雨事件之平均漂流距離為1,343 ($\pm 1,453$) 公尺，非降雨事件之平均漂流距離為3,510 ($\pm 1,919$) 公尺。除降雨事件時N1釋放之漂流物由於無收回而無法計算漂流距離外，其餘3站均為非降雨事件的漂流距離較長。在漂流天數方面，整體平均漂流天數為2.9日，降雨事件之平均漂流天數為2.4日，非降雨事件之平均漂流天數為4.1日。

比較不同收回天數尋獲漂流物的數量與其平均漂流距離，可發現較短天數（釋放後第1-3天之間）收回之漂流距離較短，實驗後期（釋放後第6-15天）尋獲之漂流物之

移動距離較長，如表4.1.1- 1，前後差距介於0.1-1.0km。僅有非降雨時於N2釋放之漂流物例外，第1-3天收回之漂流距離（4.0km）略高於第6-15天（3.8km）。

表4.1.1- 1 不同狀態下，木製漂流物之漂流距離

位置	釋放點位	釋放時氣候	各釋放點至收回點之漂流距離 (km)	漂流距離依收回之時間點 (km, 平均值)	
			平均值 (最小值-最大值)	1-3天	6-15天
北岸	N1_雙園大橋北	降雨	-(-)	-	-
		非降雨	3.5 (1.6-5.4)	-	3.5
	N2_汕尾	降雨	1.1 (0.3-5.5)	1.2	1.0
		非降雨	4.0 (1.0-6.3)	4.0	3.8
南岸	S1_雙園大橋南	降雨	3.1 (2.3-6.4)	3.0	4.4
		非降雨	3.7 (1.6-7.7)	3.7	4.8
	S2_鹽埔	降雨	0.4 (0.01-1.5)	0.3	0.5
		非降雨	1.3 (0.02-5.8)	1.1	1.7

由於降雨事件釋放後，間隔2周後即執行非降雨事件之釋放，因此9/27-10/14進行非降雨事件之漂流物收回工作時，仍陸續零星拾獲前一次實驗釋放擱淺之漂流物，讓收回實驗得以由原先規劃之15日延長至30日，此期間內累計收回共15件。由圖4.1.1-22與圖4.1.1-3可得知降雨事件釋放之漂流物多數在一周內擱淺於河口兩側海岸。自第10日起，多數已不存在於此範圍內。位於圖4.1.1-2右側，第15-30日尋獲之漂流物之漂流距離未明顯增加，且變異性高，顯示部分漂流物可能多日持續滯留於釋放處附近之海岸或水面，在遭遇合適之潮汐或風向後移動至鄰近之調查範圍內被尋獲。80.1%未被尋獲的漂流物的主要可能之去向 (fate)，包含隨潮汐往上游移動後擱淺於河道中、擱淺於河口兩側6公里範圍外之海岸、仍在調查範圍內但未被發現、仍在海中或河中漂流。

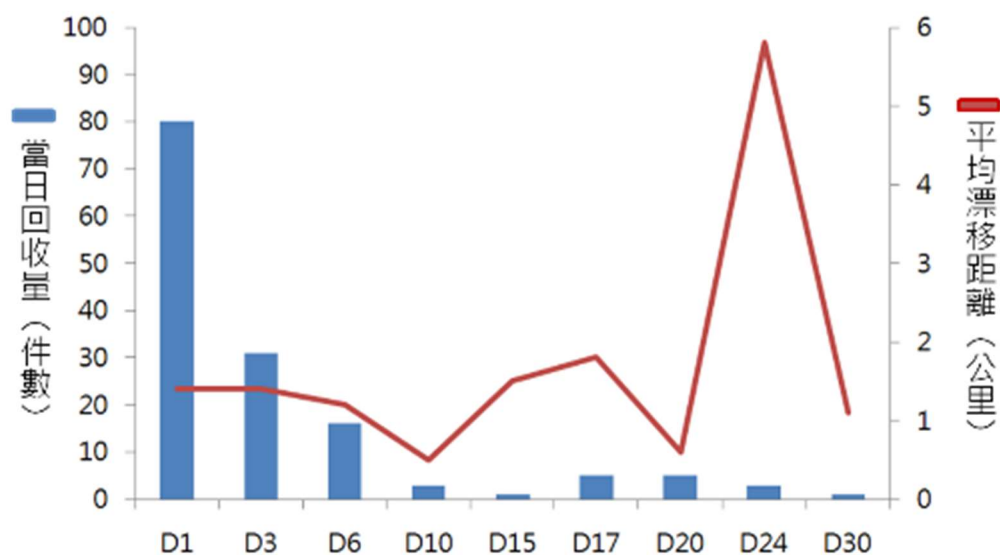


圖4.1.1- 2 降雨事件釋放後木製漂流物收回之件數與漂流距離

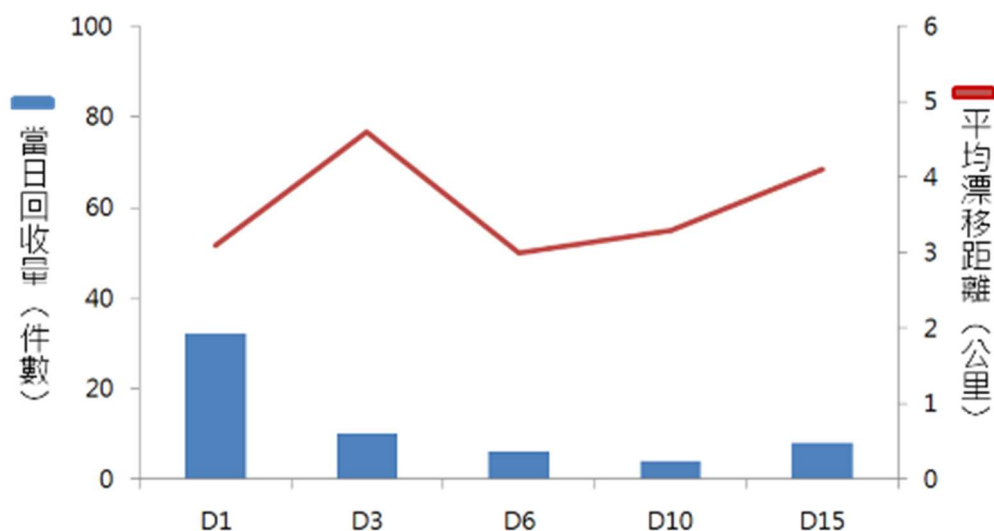


圖4.1.1- 3 非降雨事件釋放後木製漂流物收回之件數與漂流距離

3. 不同釋放點與河岸兩側堆積熱點

綜合兩次釋放實驗後收回之205件漂流物之主要擱淺分布範圍，可發現超過半數（77.1%）集中於出海口之河道兩側，僅有少數漂出河口後擱淺於兩側海岸（北岸5.9%、南岸18.0%），顯示一部分漂流物之移動範圍有所侷限。

下圖4.1.1-4，我們以同色之圓圈標示來自該釋放點漂流物之擱淺熱點範圍與收回的數量，探討不同釋放點之間的差異。收回點之顏色深淺顯示該漂流物收回時間之長短，淺色表示漂流之時間較短，於第1-3天尋獲；深色表示漂流天數較長，於第6-30天尋獲。

- (1) 【N1】位於距離河口2公里偏高雄側之河面正上方（雙園大橋上），降雨釋放之130件漂流物無一尋獲，非降雨事件釋放之130件亦僅尋獲2件，回收率為4點間最低。
- (2) 【S2】同樣位於雙園大橋上，但靠近屏東側之河面，兩次釋放均有明顯且重疊之攔淺熱區，整體尋獲之漂流物有55.3%集中南側之河道。
- (3) 【N2】位於距離河口1公里之高雄一側之消波塊上，降雨釋放時密集堆積於距離該釋放點僅400公尺同側之河道內，而非降雨時則多數越過高屏溪與東港溪口，漂至屏東東港一帶之海岸。
- (4) 【S2】位於距離河口1公里之屏東一側之沙洲，兩次釋放均有相似的攔淺熱點，90.1%分布於距離釋放點1.5公里內之同側河岸上（圖4.1.1- 4）。

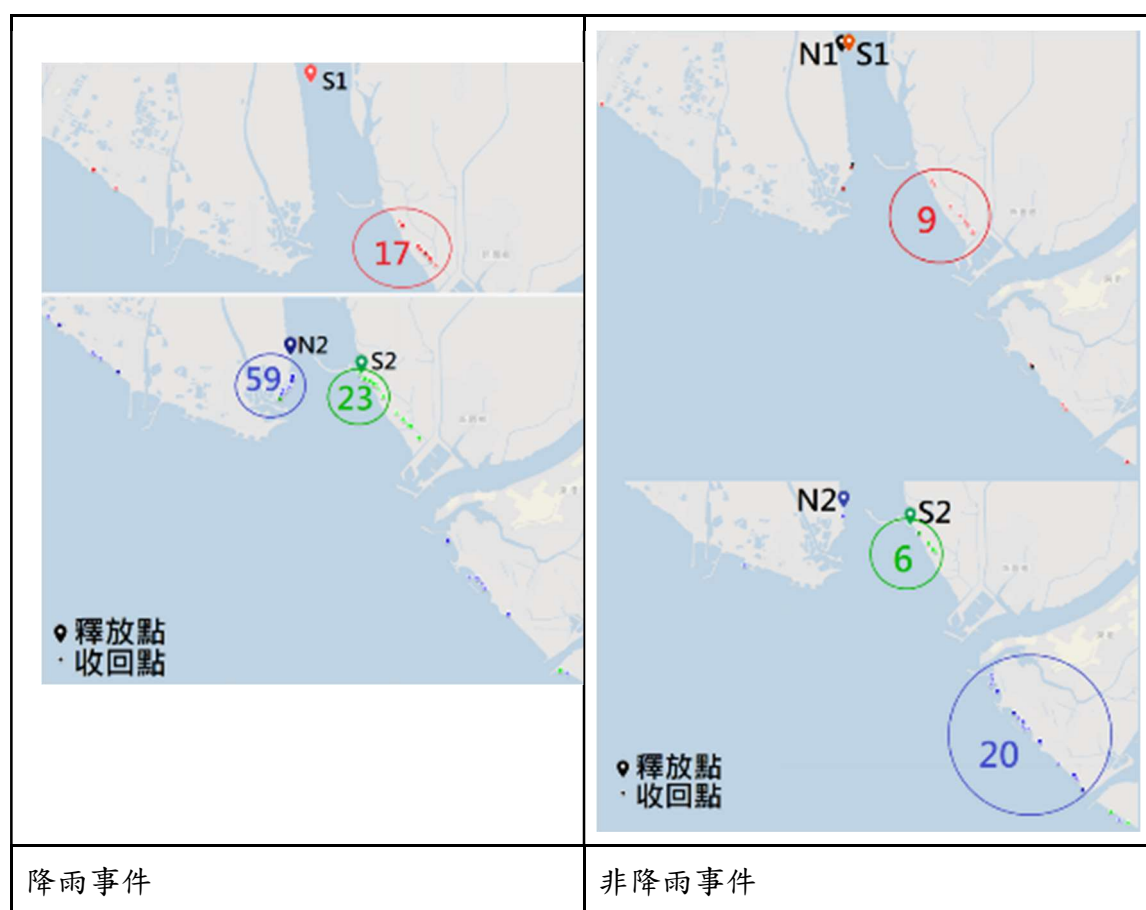


圖4.1.1- 4 漂流物釋放點與攔淺收回相對位置

4. 厚型與薄型漂流物之攔淺位置

在收回數量上，厚型（5cm）漂流物有107件，薄型（1.5cm）漂流物有98件。比較其收回位置，可發現河口兩岸與海岸均有，且分布範圍高度重疊，無顯著區別。從不同之釋放點、天候事件、漂流天數與漂流距離等變因切入，亦沒有明顯之差異（圖4.1.1- 5）。



圖4.1.1- 5 厚型與薄型漂流物之擱淺分布位置

4.2 定位發報浮標實驗結果

執行團隊於降雨事件至雙園大橋上投放N1與S1兩顆發報浮標，其中N1於24小時內即擱淺至恆春鎮合界海岸，移動距離69公里，S1投放12天後由於電力不足因此失去訊號，平均移動速度約為18公里/天，為N1移動速度之1/3（表4.2- 1、表4.2- 2）。

非降雨事件時，執行團隊於雙園大橋中間投放M，以及河口兩側投放N2與S2，其中M於橋下沙洲擱淺約4天，10/1大潮漲潮時將其沖出，隨後移動至楓港外海並失去訊號，若扣除擱淺時間，M的平均移動速度約為21公里/天。N2投放後一天內即擱淺至汕尾海堤，投放S2時吹西南風，因此僅漂流一小時便擱淺於原地（表4.2- 1、表4.2- 2）。

結果顯示，降雨及非降雨事件投放浮標移動距離與時間沒有顯著差異，然而於橋上投放之浮標能移動較長距離及較長時間（平均移動距離大於131公里，平均移動時間大於7天），於河口投放之浮標平均僅移動1.8公里，平均漂流13小時。推測可能原因為河川中央流速遠大於河口沿岸流速（表4.2- 1）。

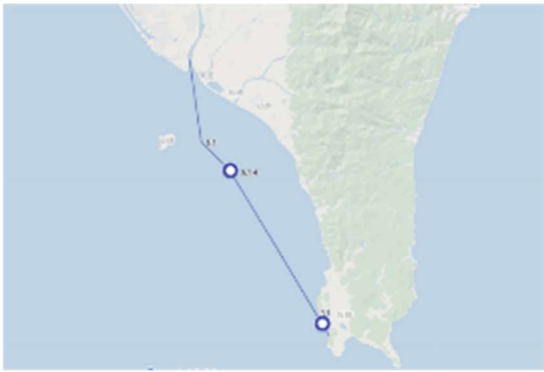
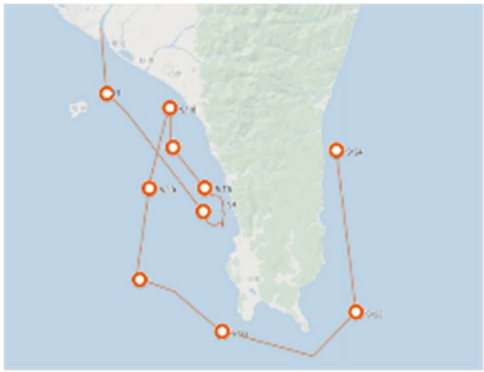

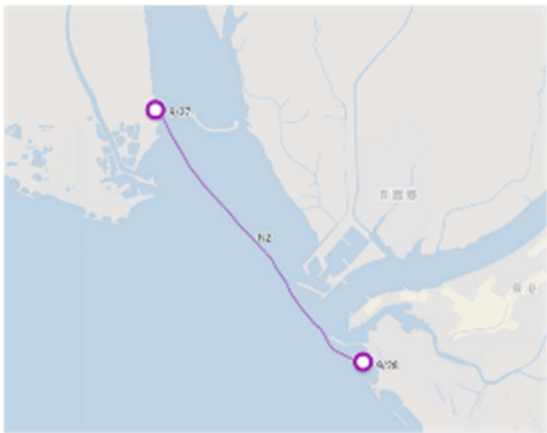
本次釋放之5組浮標中，漂流天數1天以上同時座標數據回傳較頻繁（30分鐘一筆）者僅有非降雨時釋放、編號M之浮標，依據氣象局潮汐漲退潮時間點與浮標座標後繪製軌跡繪製潮汐對浮漂移動方向之關係圖（紅色線段為漲潮時之移動軌跡、黑色線段為退潮），結果顯示10/2之大潮將卡在河道沙洲中10日之浮標M沖出河口。退潮時多往東南方向移動，但於漲潮時出現轉折，可能改隨潮流往北向海峽中央緩慢移動，顯示潮汐作用之影響（表4.2- 1）。

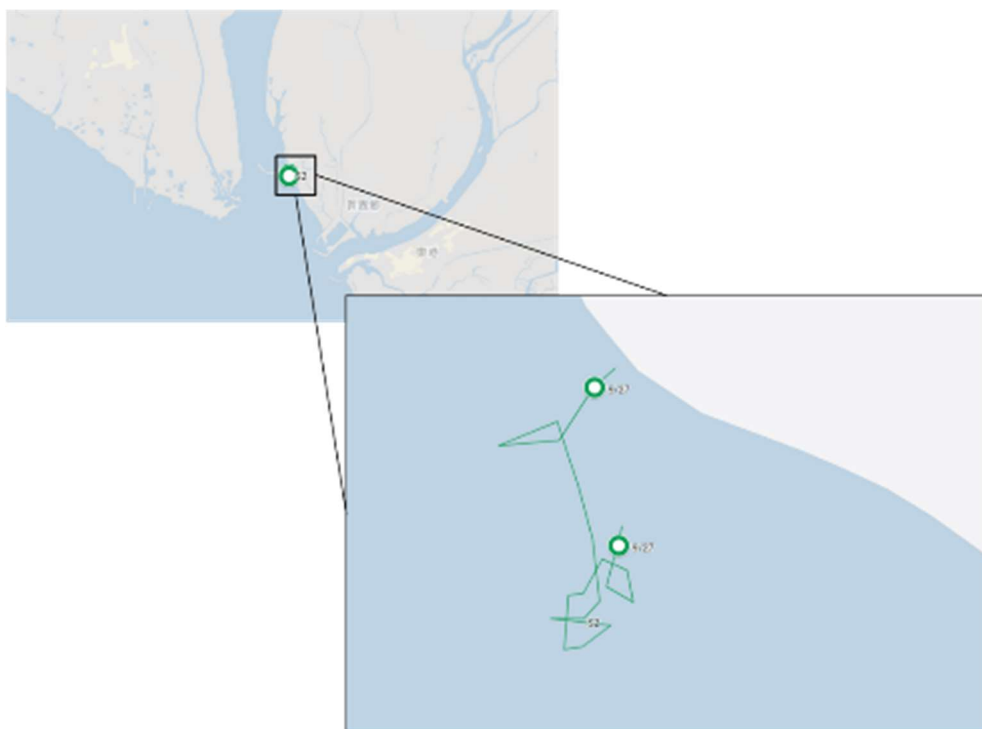
表4.2- 1 發報浮標實驗結果

釋放位置	釋放日期 實驗形式	擱淺/最後信號位 置與座標	漂流距離/天數	重量（克）
N1_雙園大 橋北	2021/9/13 降雨事件	擱淺於屏東縣恆春 鎮合界海岸 (21.949373, 120.7 12188)	69km/1天	380
S1_雙園大 橋南		漂流至屏東縣牡丹 鄉觀音鼻外海後失 去訊號 (22.236137, 120.9 18457)	220km/12天	380

M_雙園大橋中央	2021/9/27 非降雨事件	先擱淺於橋下沙洲，10天後因漲潮漂流至屏東縣楓港外海後失去訊號(22.171731, 120.508644)	105km/9天	1000
N2_汕尾		擱淺於東港漁港南側離岸堤(22.461881, 120.438636)	3.5km/1天	1000
S2_鹽埔		擱淺於新園鄉共和村沙灘(22.476875, 120.434082)	0.1km/1小時	1000

表4.2- 2 發報浮標漂流軌跡

	
發報浮標N1漂流69公里	發報浮標S1漂流220公里
	
發報浮標M漂流105公里	發報浮標N2漂流3.5公里



發報浮標S2漂流0.1公里



發報浮標M與潮汐之相關性分析（紅色：漲潮、灰色：退潮）

4.3 廢棄物蓄積調查結果

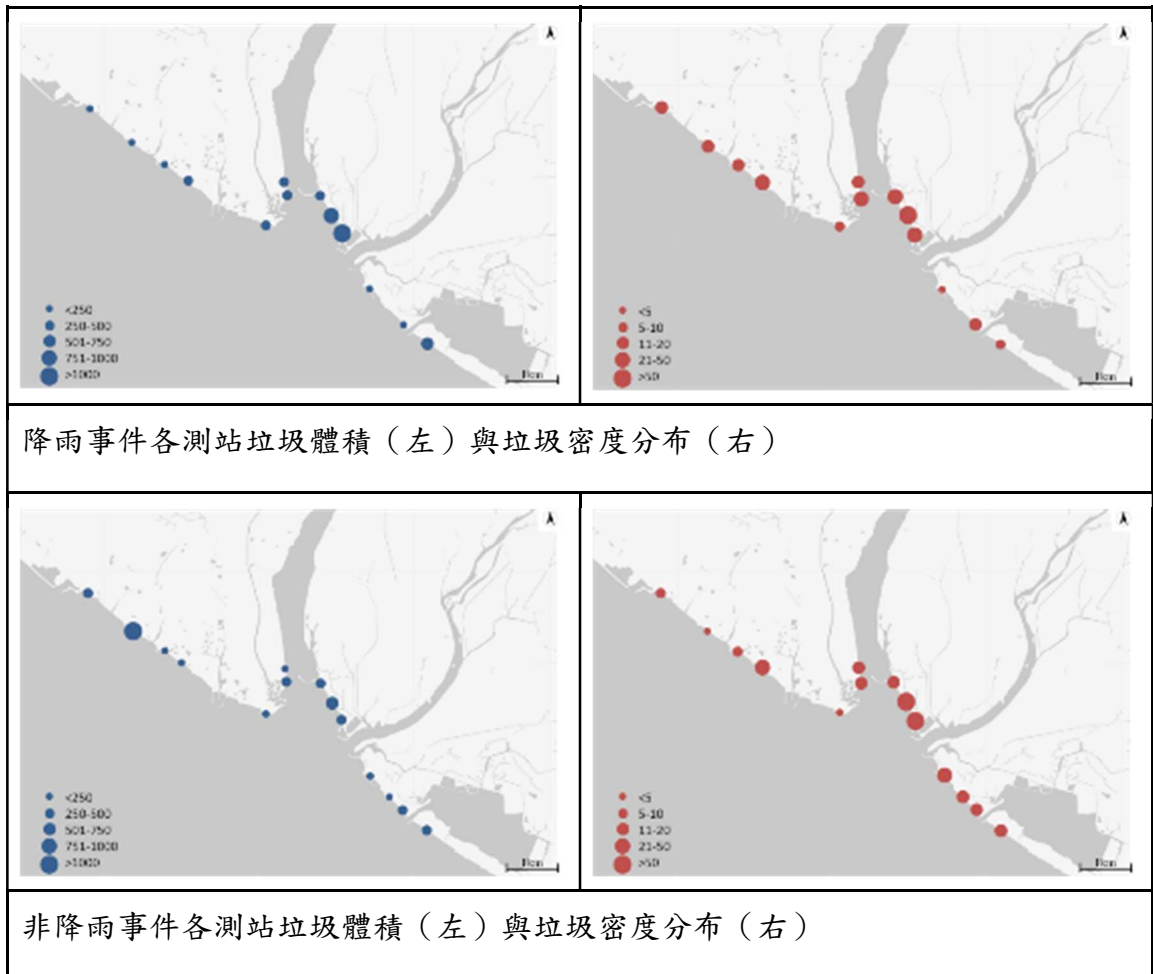
於降雨事件及非降雨事件投放浮標五天內調查海岸廢棄物蓄積狀況，總計調查兩次，每次調查為北岸7站，南岸7站，合計14站，其中每個點位間距約為1公里。在降雨事件及非降雨事件上，北岸與南岸之垃圾體積與垃圾重量皆有顯著差異，降雨事件的垃圾體積比非降雨事件多出35%。然而，垃圾密度（單位：件數/平方公尺）無法準確顯示垃圾量之差異，推測原因可能在於體積與數量上之差異。例如一塊大型發泡塑膠體積為80公升，然而件數僅能以1件計算。即使除去發泡塑膠等容易造成數量波動的廢棄物種類，僅計算塑膠瓶、餐具與玻璃瓶，似乎仍然無法精準顯示降雨前後垃圾量之差異（表4.3-1）。

兩次調查間隔之時間僅兩周，整體而言，不論降雨及非降雨事件中，屏東一側之河道皆為垃圾密度熱區，但在熱點分布位置上則略有不同，顯示兩周內同一處海岸之垃圾量即可能發生變化（表4.3-2）。若將降雨事件後之垃圾分佈與漂流物擱淺位置（圖4.1.1-4, 左圖）相較，可發現兩者熱點範圍高度重疊，均集中於屏東側河道；而非降雨事件之垃圾分佈與漂流物擱淺位置（圖4.1.1-4, 右圖）相較，分布熱點同樣以南側屏東端之河道為主，並往南延伸至東港一帶。

表4.3-1 北岸與南岸的垃圾量調查

		100m垃圾平均體積	100m垃圾平均重量	垃圾平均密度(件數/m ²)	塑膠瓶+餐具+玻璃瓶平均密度(件數/m ²)
北岸	降雨	320公升	37公斤	17.6	7.0
	非降雨	200公升	27公斤	12.1	4.7
南岸	降雨	547公升	55公斤	28.7	4.7
	非降雨	342公升	32公斤	34.3	10.6

表4.3- 2 降雨與非降雨事件之垃圾分佈



4.4 分析漂流物來源、輸送路徑與堆積成因

4.4.1 彙整天氣監測數據分析輸送路徑

表4.4.1- 1 氣象數據、測站位置與來源網址

數據類型	觀測站名(地理位置)	管理機關	來源
河川水位	旗山橋(旗山溪)	水利署	水文資訊網
	萬大橋(主流下游)		gweb.wra.gov.tw/Hydroinfo
即時潮位	東港(近出海口)	中央氣象局	中央氣象局 www.cwb.gov.tw/V8/C/M/OBS_Marine.html
風向	東港(近出海口)	中央氣象局	觀測資料查詢系統 e-service.cwb.gov.tw/HistoryDataQuery/
風速	東港(近出海口)	中央氣象局	
雨量	六龜(集水區內)	中央氣象局	

1. 雨量與流速

本研究之執行時間為2021/9/13至10/14，為期32天。彙整此日期內高屏溪上游之雨量紀錄，可發現除了9/13執行釋放實驗之前一日有較大之降雨，9/20至26之間由於午後對流旺盛，上游南橫地區山區亦有雷陣雨，而10/11起受颱風圓規影響，高屏山區亦有降雨（圖4.4.1- 1）。數波降雨亦造成高屏溪中游與下游河段水位上漲（圖3.3.2- 2、圖3.3.2- 3與圖4.4.1- 2），最大之漲幅變化於中游處約1.5公尺，在下游處約0.6公尺。水位上漲代表造成水量與流速之增加，連帶讓水中漂流物體之移動速度變快，亦可能會影響河口淡水舌（river plume）向外擴展，但本研究中非降雨事件漂流物之漂流距離（3.5km）反而較降雨事件的距離（1.3km）更長（表4.1.1- 1），推測可能之原因為：

（1）水位變化不足以影響漂流距離：

9月執行實驗時，高屏河流域已進入乾溼季轉換之時期，雨量明顯較同年8月低。8/7時由於盧碧颱風經過挾帶西南氣流影響，南橫山區多處雨量超過單日500毫米，下游萬大橋河川水位漲幅亦接近5公尺，相較之下9/12之單日降雨僅33毫米，水位漲幅僅半公尺。在流速與流量沒有大幅度增加的狀態下，沒有推送漂流物至較遠之海岸。

(2) 僅主流中流速最快的釋放點位受到影響：

若思考河道斷面型態與流速，N1與S1均位於河面正上方，由空照圖可觀察N1明顯為河道轉折侵蝕之凹岸，沿岸均有消波護堤工程；S1則靠近淤積之凸岸，退潮時裸露大片灘地，由此可知N1之水體流速應為4點中 fastest。比較9/13於N1與S1同時釋放之發報浮標，亦可發現N1之移動速度較快，隔日已漂至屏東枋山外海，而距離僅110公尺釋放之S2，很可能是因位於凸岸流速較慢，隔日僅仍位於與小琉球與東港之間（表4.2-2）。

搭配實驗數據，本次調查於下游河面正上方之釋放點N1共釋放260件漂流物，降雨事件釋放之130件完全未尋獲，僅尋獲非降雨事件釋放的2件，兩次實驗回收率均為最低，非常可能是因為降雨時N1快速的水流將130件漂流物輸送至河口兩側各6公里之外，造成無法估算漂流距離。而非降雨時流速較慢，因此得以尋獲2件（表4.1-1、表4.1-2）。

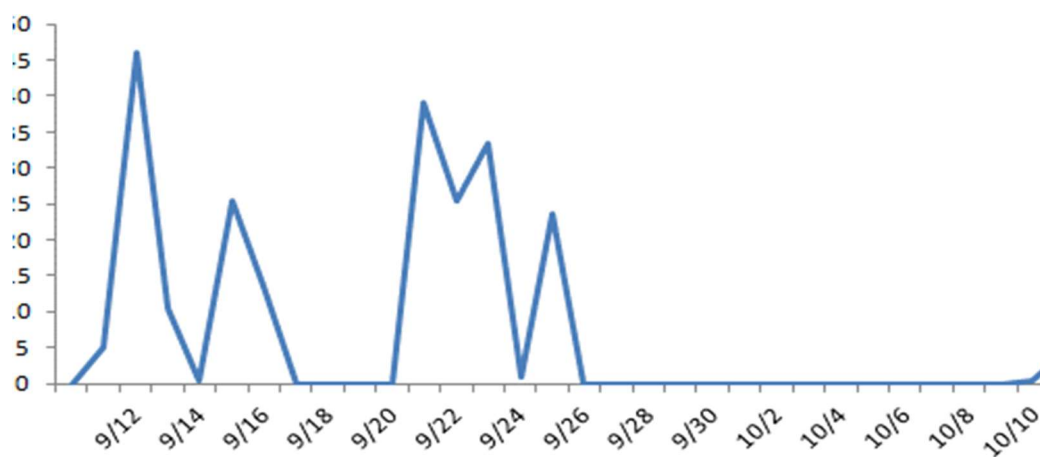


圖4.4.1-1 實驗期間（9/10-10/14）高屏溪集水區雨量變化（測站：六龜，單位：毫米）

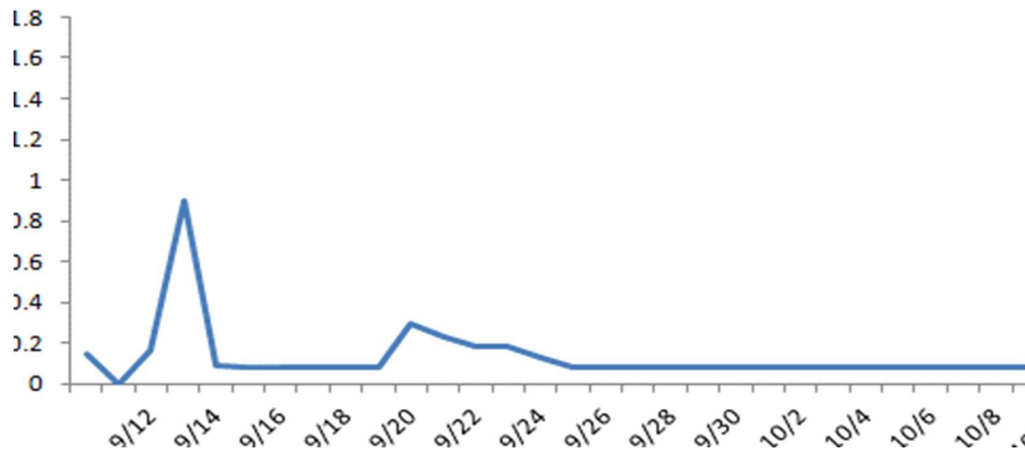


圖4.4.1- 2 實驗期間（9/10-10/14）高屏溪口河川水位變化（測站：旗山橋，單位：公尺）

2. 潮汐與風

比較執行期間之潮汐可發現，降雨事件後（9/13）之最高潮位每日逐漸降低，至非降雨事件後則轉變為逐漸升高（圖4.4.1- 3）。風向與風速方面，在攔淺量最大的實驗當天與往後1-3天，風向分別為東、東北、東北與南風（圖4.4.1- 4），且受到燄樹颱風從本島東海岸通過影響，西南海域為風速較弱之背風面，此東風與南風交替之特性可能讓於河道內移動較緩慢之漂流物向左右兩岸堆積，造成此次收回的漂流物中有73.1%滯留於兩側河岸（圖4.4.1- 4）。

非降雨事件時，遠方菲律賓海域雖有颱風電母生成，但高屏河口海域風速仍為輕風，僅介於1.9-2.3m/s之間。最大不同在於，實驗當天與往後1-3天風向分別為東北、西、東北與西風（圖4.4.1- 4），間斷吹送之西風可能讓漂流物持續往東移動，讓此次實驗90.0%收回的漂流物均滯留於屏東一側的河岸與河口外側海岸（圖4.1.1- 5）。

黃（2012）分析高屏溪口小尺度沖淡水（淡水舌，river plume）對陸源沉積物之影響時，發現流量低與流速較慢（0.16m/s）時，風驅流之流速可成達到2.9m/s，並解釋風如何影響此河淡水舌之擺動。相較於水體中之粒子，風對於水面上漂浮、具有風阻物體，例如本研究所使用的木製漂流物與浮標，輸送效率應更為明顯。

總結以上潮汐、風力與降雨之影響。逐漸降低的海水高度，加上較低之風速與往河道內推送之迎岸風，可能造成降雨事件時，於水流較緩的N2、S1與S2釋放之漂流物容易攔淺於河岸，造成河道兩側回收率較高，漂流天數與漂移距離均較短（2.4日；1342公尺）。非降雨事件時，西風將漂流物往東帶往屏東一側河道堆積，一部分則繼續

繞過河口，出海後擱淺於東港海岸，由於被水流與風帶往外海，造成回收率較低，但漂流天數與漂移距離均較長（4.1日；3510公尺）。而位於凹岸N1釋放之漂流物，參考發報浮標之軌跡，可能由於水流快速，漂流物隨淡水河（river plume）入海後，受到更大尺度之潮流或洋流影響漂向遠處，因而回收率最低（表4.1- 1、表4.1- 2與表4.1.1- 1）。

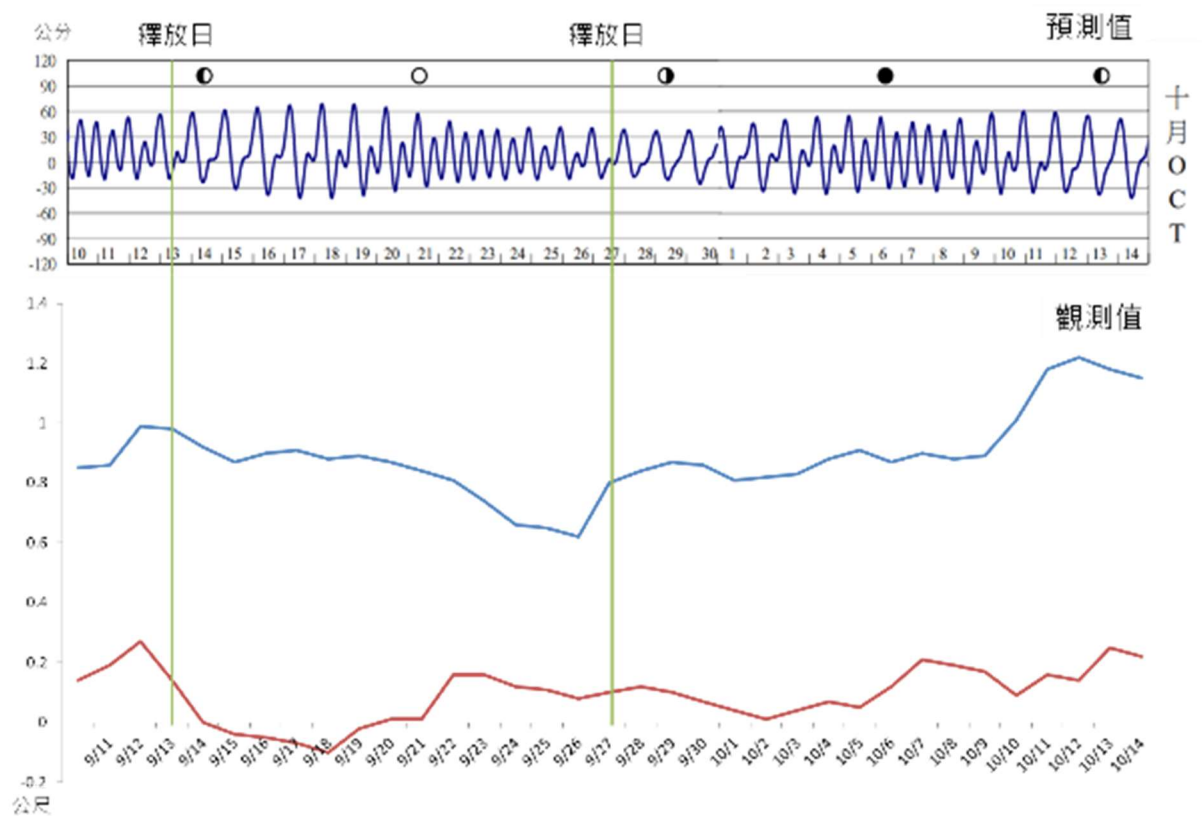


圖4.4.1- 3 實驗期間（9/10-10/14）高屏地區潮汐高度變化（測站：東港，單位：公尺）




































9/10	9/11	9/12	*9/13	9/14	9/15	9/16
2.5m/s 	1.5m/s 	5.6m/s 	1.8m/s 	2.1m/s 	2.2m/s 	2.3m/s 
9/17	9/18	9/19	9/20	9/21	9/22	9/23
2.2m/s 	2.0m/s 	2.0m/s 	1.9m/s 	1.9m/s 	2.0m/s 	2.1m/s 
9/24	6/25	9/26	*9/27	9/28	9/29	9/30
2.1m/s 	2.2m/s 	1.9m/s 	2.3m/s 	1.8m/s 	1.9m/s 	2.2m/s 
10/1	10/2	10/3	10/4	10/5	10/6	10/7
2.0m/s 	2.0m/s 	1.9m/s 	1.9m/s 	2.0m/s 	2.2m/s 	1.8m/s 
10/8	10/9	10/10	10/11	10/12	10/13	10/14
2.1m/s 	1.9m/s 	1.9m/s 	1.7m/s 	3.0m/s 	1.9m/s 	1.1m/s 

圖4.4.1- 4 實驗期間高屏溪口平均風向與風速變化 (*降雨釋放:9/13、非降雨釋放9/27，測站：東港)

4.4.2 高屏地區海岸垃圾來源分析

1. 陸地來源廢棄物進入海洋途徑

過去研究指出，大約八成的海洋垃圾來自陸地 (Jambeck et al., 2015)。但近來有越來越多研究質疑這個數字。在遠離陸地的開放水域裡，大部分的海洋塑膠垃圾來自漁業和其他航運相關活動 (例如Lebreton et al., 2018; Luna-Jorquera et al., 2019)。即使在大陸地區，透過海岸垃圾的調查也發現，海洋來源垃圾的比例超過20%，尤其是遠離城市中心的偏遠地區 (Whiting, 1998; Jang et al., 2014; Willis et al., 2017)。聯合國出版的指引將垃圾來源分為陸地 (橘色)、海洋 (藍色) 與境外 (綠色，如偏遠的島嶼)，陸地的河川排放和濱海遊憩、海洋的船舶排放與漁具丟失 (圖4.4.2- 1)。

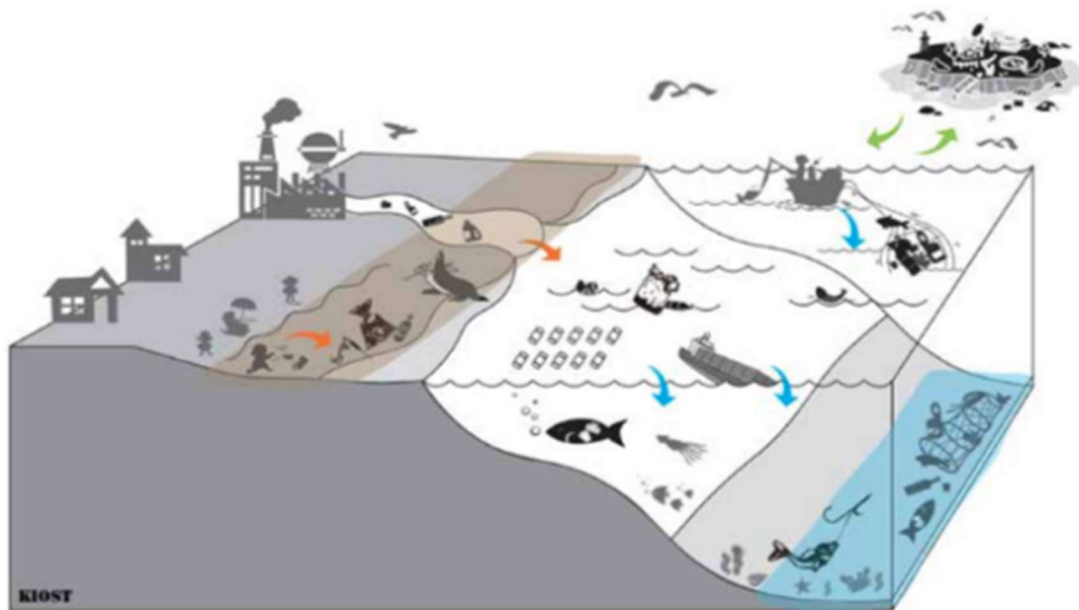


圖4.4.2- 1 海洋塑膠與微塑膠的來源（來源：Kershaw et al，2019）

現行大部分的消費商品都是線性經濟的模式，而從原物料、生產、使用到廢棄的產品生命週期各階段，都有可能流入海洋。茲整理各種可能進入海洋的陸地來源廢棄物類型與途徑如下表4.4.2- 1。

表4.4.2- 1 潛在陸地來源之廢棄物（翻譯自UNEP，2016）

類型	描述	進入途徑	相對重要性
零售/量販	包裝、家庭與消費者產品	河流、海岸	高
飲食	一次用包裝	河流、海岸	高
家庭	包裝、家庭與消費者產品	河流、海岸	高
旅遊	包裝、家庭與消費者產品	河流、海岸	高
塑膠回收	包裝、家庭與消費者產品	河流、海岸	中
營建	發泡塑膠、包裝	河流、海岸	低
農業	農用覆膜、盆、管	河流、海岸	低
陸域移動	使用後的車輛與輪胎	河流、海岸	低

再依照活動、行為模式或情境分別檢視陸地與海洋來源的廢棄物。陸地來源的活動包含岸際活動與河川排放，岸際活動則又包含觀光遊憩活動時所產生的垃圾、休閒釣魚的包裝和釣具裝備、惡意傾倒棄置，以及內陸的營建工程和農業，與海岸掩埋場所散逸的垃圾。海洋來源則有境外漂入與本地海洋活動，例如本地漁民丟失或棄置漁具、水產養殖廢棄物、船舶和航運廢棄物，以及漁港和商港所產生的廢棄物（表4.4.2-2）。

表4.4.2-2 潛在陸地來源之廢棄物

來源	境內/境外	可能來源活動、行為或情境
陸地	岸際活動	觀光遊憩、休閒釣魚、惡意傾倒、營建工程、農業、海岸掩埋
	河川排放	集水區內逸散垃圾，因豪大雨、颱風與逕流匯聚
海洋	境外漂入	他國陸源廢棄物、他國海洋來源廢棄物
	本地海洋活動	漁具丟失或棄置、水產養殖廢棄物、船舶/航運廢棄物、漁港/商港廢棄物

2. 高屏溪上游產業與可能廢棄物

高屏溪是台灣第二長河，長度僅次於濁水溪，主流河長171公里，流域面積達3256.90平方公里，流域面積與年均流量均為全台第一大河。高屏溪的主流荖濃溪，源流位於南投縣信義鄉南端，發源自玉山東峰，匯集自秀姑巒山及大水窟山的支流後，進入高雄市，流經梅山、桃源、寶來、六龜，與濁口溪匯集後，往西南流至里港，又與旗山溪合流後，才成為高屏溪。轉向南經經大樹、九曲堂、上寮、鯉魚山，於東汕流入台灣海峽，此河段長約38公里。

梅山、桃源、寶來與六龜區域主要為山林，寶來有部分茶園和農場，進入六龜後有小部分聚落與大面積農地，又以果園居多。屏東縣的高樹鄉、里港鄉，其土地使用以一般農業區為主，亦有少部分特定農業區。高屏溪進入里港後，左岸屏東側仍以農場居多，偶有零星工廠。右岸高雄側的大樹鄉，亦多農場和果園。下游左岸經屏東

市、萬丹鄉，土地使用以特定農業區為主，少部分鄉村區與工業區，最後於新園鄉出海。右岸則有高雄大發工業區與林園石化工業區。

總結上述，高屏溪上游荖濃溪與高屏河流域以農業為主要的土地利用，中下游則經人口較密集的屏東市，而亦有工業區，因此合理推測高屏溪可能廢棄物以農業廢棄物、民生與少部分工廠流出廢棄物為主要廢棄物類型。

4.4.3 垃圾堆積熱區之成因與管理對策

本研究為我國首次藉由低環境衝擊之漂流物模擬人造垃圾於河川中不同位置、不同天候下進入水體後，漂流至岸邊所經歷的時間、移動的距離與擱淺的位置。搭配發報浮標之軌跡與氣象監測數據，彙整為以下三項重點發現。

1. 垃圾由河岸進入水體後漂移之天數與範圍均相當有限

距離河口1-2公里釋放的木塊，20%在河口兩岸共12公里範圍內被尋獲。平均漂流3天後即擱淺於距離釋放點方圓2公里之範圍內，近八成仍位於河道之內，少部分出海後擱淺於河口兩岸共12公里範圍內。

2. 海岸髒亂位置與河川漂流物擱淺熱點重疊

漂流物擱淺之熱點，同時也是兩次調查當下垃圾量體（體積與重量）與件數密度最高之區域，不僅顯示以木塊具備模擬河川垃圾漂移之特性，也代表當地海岸髒亂熱點之海廢主要來源為河川上游之輸送與與河岸活動產生之廢棄物。由於漂流時間短，平均3天即擱淺，木塊釋放後當下與接續三天之風向，可能是影響堆積位置改變的主因，並可進一步解釋海岸之朝向角度與垃圾剛入海時之風向，可能是造成特定海岸的垃圾持續累積形成熱點或熱點隨時間移動之原因。

3. 流速快之河面仍可能將垃圾輸送至遠方

於流速較快點位釋放的木塊，其收回率最低。由快速移動之發報浮標與漂移軌跡，搭配地形地貌與河川斷面等資訊，以及80%未尋獲之漂流物，可推測高屏溪於乾溼季交替時的水體逕流，仍會攜帶相當比例之漂流垃圾進入海洋水體，並隨西南海域近岸之流場輸送，往南漂流至小琉球、恆春半島甚至是東部海岸，成為北太平洋漂浮之海洋廢棄物。

4.4.4 實驗方法之改良與未來應用機會

檢討實驗設計與執行過程，並參考相關文獻後，提出以下建議。

1. 提高漂流物回收率與改良發報浮標設計

由於漂流物之擱淺熱點集中於河口兩側2公里、擱淺時間集中於釋放後3天，顯示本研究設定之兩側各6公里海岸、15日之抽樣範圍已在空間與時間上合理涵蓋大多數母體分布範圍。但仍有約80%的漂流物不知去向，可能被調查人員遺漏或分布於更大範圍的河岸、海岸與海面。彙整2009年至今7篇與本研究相似之文獻，可發現許多區域性海域的研究，透過大量釋放與民眾參與回報，不僅回收率高，更可掌握漂移至數百公里外之漂流物數據（表4.4.4-1）。

未來建議可選擇增加釋放地點與釋放數量，更可以設計成近年熱門之公民科學計畫，邀請高雄屏東與恆春半島地區之民間保育團體、大專院校、海巡人員、地方政府清潔隊員、淨灘與海洋運動愛好者共同參與，透過簡單之上傳回報方式，預期將可以提高漂流物之回收率，延展實驗天數，更可以將實驗區域擴大至南台灣，以更大之尺度掌握河川與海廢之關聯性。

在定位發報浮標方面，鑒於漂流之範圍與天數均較預期更遠與更久，且有2組浮標釋放後因超出陸地4G基地台信號範圍而無法收回，建議未來嘗試開發以衛星通訊、發報周期可遠端調整之浮標，減少通訊死角並延長待機時間。

表4.4.4-1 比較本研究與近年河川與岸際海廢輸送相關論文

國家	釋放環境	漂流物釋放總數 (件)	回收率	公民參與 收回	最遠漂移距離	作者與發表年份
南非	河口	1400	80%	是	17km	Macleane et al., 2021
南非	河口、溼地	150	99%	否	僅100m	Ryan & Perold, 2021
德國	河道、河口與近岸	63,400	52%	是	750km	Schöneich-Argent & Freund, 2020

加拿大	內海與河口	5,856	35%	是	350km	Pawlowicz et al., 2019
以色列	近岸	600	37%	是	1276km	Pasternak et al., 2018
美國	河口與近岸	1,547	25%	是	約300km	Carson et al., 2013
巴西	近岸	220	12%	是	約10km	Leal, 2011
本研究						
台灣	河口	1040	20%	否	約8km	尚未發表

2. 極端氣候應變、環境教育推廣與政策發展

與2020年起在行政院向海致敬政策推動下，全台各地公私部門積極舉辦淨灘活動，維護國人可自在親海之乾淨場域。但近年極端氣候變化下，多次短延時強降雨與河川逕流造成局部海岸廢棄物突然氾濫成災與清理不暇，本研究顯示降雨與河川垃圾之輸送或有模式依循與預測，可進一步評估是否能對向海致敬政策中海岸垃圾的「緊急清」工作，提供具體之策略建議。

我國海廢問題是全球管理不佳垃圾逸入環境之問題縮影，汙染源頭之管理與減量同樣關鍵。目前各界對於我國海廢之源與匯掌握均相當有限，多數努力聚焦於問題末端之清理工作，本研究之結果可以從海洋水文學的角度切入，提供全國人民思考「藍色經濟、潔淨海洋，都源於乾淨河川」三者關聯的新觀念，並提供環保團體、環境教育者與學校教師一個新的教育體驗與在地守護概念。

本研究之場域與數據收集範圍涵蓋高雄市與屏東縣之流域、河川、海岸與海洋等空間，同時創新建構了高屏地區諸多河川、海岸與海洋管理機關，例如中央之海洋、水質保護與水利工程主管機關、地方之環保局與海洋局、風景區管理處與國家公園等，在「向海致敬」的基礎上，一個全新的「流域與海域共同經營管理」跨部門合作新契機。

第五章 調查報告

模擬漂浮廢棄物於河口之輸送與分布

胡介申¹、顏寧¹、徐季玄¹、楊文榮²、賴堅戊²、廖建明²

¹澄洋環境顧問

²國家海洋研究院海洋產業及工程研究中心

摘 要

海洋廢棄物受降雨、河川逕流、海洋及大氣動力作用影響，入海並進而漂移，使得海廢無法透過單一行政區域甚至單一國家能成功治理，相關溯源、追蹤或清理的工作，都較陸上的問題更為複雜與困難。本研究使用低環境衝擊之木製漂流物，模擬人造垃圾於河川中不同位置、不同降雨情形下進入水體後，漂流至岸邊所經歷的時間、移動的距離與擱淺的位置，並紀錄發報浮標之軌跡與氣象監測數據。結果顯示距離河口1與2公里釋放的木塊，平均漂流3天、2公里後擱淺，77.1%仍滯留在河道兩岸。釋放時河川流速與釋放後4天的風向變化可能是造成漂流物移動較遠或較快的原因。但漂流物的厚薄尺寸差異與小規模降雨所造成之河川水位上升，似乎未明顯影響漂流物的輸送。漂流物的擱淺熱點同時也是海岸廢棄物分佈熱點，針對上游可能的汙染來源分析後，也提出本實驗成果對極端氣候應變、環境教育推廣與政策發展的面向之應用機會。

關鍵詞：海洋廢棄物、源與匯、河川垃圾、漂流物追蹤

Simulate the transportation and distribution of drifters in the estuary

Chieh-Shen Hu¹, Ning Yen¹, Chi-Hsuan Hsu¹, Wen-Rong Yang², Jian-Wu Lai², Jian-Ming Liao²

¹ IndigoWaters Institute, Taiwan

² Marine Industry and Engineering Research Center, NAMR, Taiwan

ABSTRACT

Influenced by rainfall, river runoff, ocean and atmospheric dynamics, and transported through river to ocean, makes marine debris difficult to manage by a single administration institute or a country. The work of sourcing, tracking and cleaning of marine debris is more complicated and difficult than debris on the land. This study uses wooden drifts with low environmental impact to simulate the time spent by man-made waste drifting to the shore after entering the water body at different locations in the river and under different rainfall conditions, the distance of transportation, and the location where it is stranded. In the meantime, the research team tracked the trajectory of the reporting drifter and weather monitoring data. The results showed that the wood drifters released 1 and 2 kilometers from the estuary ran aground after an average of 3 days and 2 kilometers, and 77.1% were still stranded on both sides of the river. The flow rate of the river at the time of release and the change of the wind direction 4 days after the release may be the cause of the drifters moving far or faster. However, the difference in thickness and size of the drifters, and the increase in river water levels caused by small-scale rainfall, does not seem to significantly affect the transportation of drifters. This study also found that the stranding hotspots of drifters are also the hotspots of coastal debris distribution. After analyzing possible sources of pollution in the upstream, the team proposed the application opportunities of the results of this experiment for extreme climate response, environmental education promotion and policy development.

Keywords: Marine Debris, Source and Sink, Riverine Debris, Drifter Tracking

一、前言

世界各地的河流現在正成為塑膠污染的主要運輸通道，並將大量廢棄物排放到海洋中。過去的海洋學模型和使用虛擬浮標的數值模型，已被用來預測海洋環境中塑膠污染的移動和積累，但目前對於塑膠垃圾經由河流系統的運輸（transportation）與歸宿（fate）的理解，仍有很大的未知數。

2017年，荷蘭海洋吸塵器團隊（The Ocean Cleanup）透過廢棄物處理、人口密度與水利資訊等數據建置模型，估算出每年全球河川排放115至241萬噸塑膠垃圾入海，而74%排放集中在五月至十月。前20條排放最多塑膠垃圾入海的河流，大部分位於亞洲，占全球整體67%的排放量。排放量最多的122條河川，貢獻了超過全球海洋塑膠垃圾的九成；其中103條河川位於亞洲、8條位於非洲、8條位於中南美洲，與1條位於歐洲（Lebreton et al, 2017）。

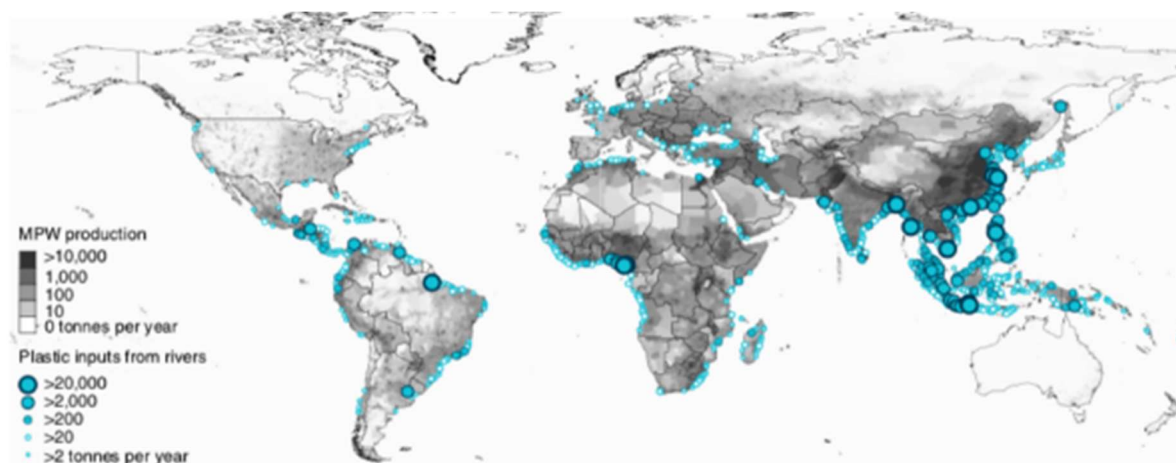


圖1 河川垃圾排放入海地圖（引用自Lebreton et al, 2017）

海洋廢棄物之源與匯（source and sink）為目前全球塑膠污染研究之熱門領域，其中水表逕流與河川系統被認為扮演重要角色。近年不同研究團隊，透過施放實際尺寸之漂流物，進行收回紀錄，藉由分析釋放與收回時間與空間上的前後差異，重現河川廢棄物起始於不同來源（source）的漂流路線（transportation）與攔淺熱點（sink）（Pasternak et al., 2018; Duncan et al., 2020; Schöneich-Argent & Freund, 2020; Ryan & Perold, 2021）。

二、 材料與方法

(一) 施放漂流物

本研究選定台灣流域面積最大的河川－高屏溪，於降雨事件前後之漂流物釋放與收回實驗，調查河口兩側海岸所累積之海洋廢棄物的垃圾量體、組成與分布，以掌握河川排放廢棄物之輸送途徑與影響範圍。我們參考國外研究，製作厚度1.5公分與5公分、長15公分寬10公分大小的木製漂流物各520件；以及5件追蹤發報的衛星浮標。於降雨與非降雨事件，分別於距離出海口1公里與2公里、河口之左岸與右岸施放（投放點如圖2），兩次實驗合計共施放1040件，細節如表1。

表1 漂流物施放細節

氣候條件	位置	地名	距出海口距離	施放數量		
				厚木製漂流物	薄木製漂流物	衛星發報浮標
降雨事件（9/13）	右岸（北）	雙園大橋北	2公里	65	65	1
		汕尾	1公里	65	65	
	左岸（南）	雙園大橋南	2公里	65	65	1
		鹽埔	1公里	65	65	
非降雨事件（9/27）	右岸（北）	雙園大橋北	2公里	65	65	
		汕尾	1公里	65	65	1
		雙園大橋南	2公里	65	65	1

	左岸 (南)	鹽埔	1公里	65	65	1
--	-----------	----	-----	----	----	---

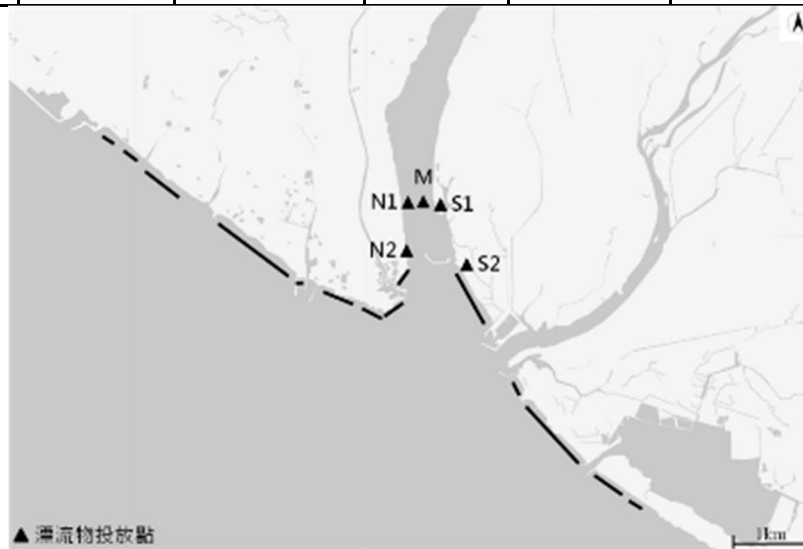


圖2 漂流物投放點

施放漂流物後，我們於高屏溪河口左右岸各約6公里範圍（圖2實線標示海岸），以徒步方式，分別在施放後第1、3、6、10與15日尋找收回漂流物與浮標。

（二）漂流物蓄積量調查

執行團隊於高屏溪出海口之河道內側與河口兩岸，約間隔1公里設一個漂流物蓄積量調查站（如下圖3），左右兩岸各7個測站，合計14站。我們於降雨與非降雨事件投放漂流物後5日內前往，共調查2次。



圖3 漂流物蓄積量調查測站點位

每個觀測點位，執行團隊挑選2處漂流物集中熱區，以長1公尺、寬1公尺，面積1平方公尺之樣框，平放於垃圾上方，盡可能以正射投影角度拍攝高畫質熱點照一張（圖4），隨後於電腦中進行人造垃圾的統計分析。



圖4 漂流物熱點拍照

分析人造種類與件數時使用計數器，按海岸垃圾常見的14類項目逐一計算數量（分類如表2），隨後依據所計算之總數量，換算出個項目所佔百分比。原則上大塊、完整之垃圾計算為一件，為避免影響數據準確性，小於5公分的發泡浮球碎塊則不計算在內。

表2 14類人造廢棄物與描述

人造廢棄物分類	描述
A塑膠瓶	寶特瓶、蓋及其他液體的容器
B玻璃瓶	玻璃瓶與蓋
C免洗餐具	手搖飲料杯、吸管及免洗餐具
D塑膠袋	塑膠提袋及食物包裝袋
E鐵鋁罐	鐵罐與鋁罐
F抽菸相關	菸蒂、菸盒、打火機、檳榔盒
G紙類鋁箔包	廢紙、鋁箔包或利樂包
H漁網繩索	漁網與漁網用繩索
I發泡浮球	保麗龍浮球及碰墊
J硬塑膠浮球	硬質塑膠浮球
K釣魚相關	釣線、釣鉤、假餌、木蝦
L農業廢棄物	芭樂套袋及肥料袋
M營建廢棄物	水泥袋及鋼筋
N其他雜項	其它垃圾

三、 調查結果與討論

(一) 木製漂流物實驗結果

本計畫兩次漂流物釋放實驗總計施放木製漂流物1040件，釋放後經過10次、每次約12公里海岸線之徒步尋回作業，共收回漂流物205件，整體回收率為19.7%。降雨與非降雨事件回收率分別為27.9%與11.5%，所有收回的漂流物中，厚型與薄型的比例為107：98，在北岸與南岸收回之比例為91：114。

擱淺時間方面，74.6%的漂流物在釋放後3天被尋獲收回，其餘25.4%則在第6至15天內被收回，整體而言，每件漂流物由釋放至擱淺之平均天數為3天。降雨事件釋放之漂流物多數在一周內擱淺於河口兩側海岸。

綜合兩次釋放實驗後收回之205件漂流物之主要擱淺分布範圍，可發現超過半數集中於出海口之河道兩側(77.1%)，僅有少數漂出河口後擱淺於兩側海岸(北岸5.9%/南岸18.0%)，顯示一部分漂流物之移動範圍有所侷限。

推測80.1%未被尋獲漂流物的主要可能之去向(fate)包含：隨潮汐往上游移動後擱淺於河道中、擱淺於河口兩側6公里範圍外之海岸、仍在調查範圍內但未被發現、仍在海中或河中漂流。

(二) 發報浮標實驗結果

執行團隊共投放5顆發報浮報，實驗結果如表3。結果顯示，降雨及非降雨事件投放浮標移動距離與時間沒有顯著差異，然而於橋上投放之浮標能移動較長距離及較長時間（平均移動距離大於131公里，平均移動時間大於7天），於河口投放之浮標平均僅移動1.8公里，平均漂流13小時。推測可能原因為河川中央流速遠大於河口沿岸流速。

表3 發報浮標實驗結果

釋放位置	釋放日期 實驗形式	擱淺/最後信號位置與座標	漂流距離/天數	重 量 (克)
N1_雙園大橋北	2021/9/13 降雨事件	擱淺於屏東縣恆春鎮合界海岸 (21.949373, 120.712188)	69km/1天	380
S1_雙園大橋南		漂流至屏東縣牡丹鄉觀音鼻外海後失去訊號 (22.236137, 120.918457)	220km/12天	380
M_雙園大橋中央	2021/9/27 非降雨事件	先擱淺於橋下沙洲，10天後因漲潮漂流至屏東縣楓港外海後失去訊號	105km/9天	1000

		(22.171731, 120.508644)		
N2_汕尾		擱淺於東港漁港南側離岸 (22.461881, 120.438636)	3.5km/1天	1000
S2_鹽埔		擱淺於新園鄉共和村沙灘 (22.476875, 120.434082)	0.1km/1小時	1000

(三) 漂流物蓄積量調查結果

執行團隊於降雨事件及非降雨事件投放浮標五天內，於河口左右岸7公里調查海岸廢棄物蓄積狀況，總計調查兩次。每個點位間距約為1公里，每次調查為北岸7站，南岸7站，合計14站。在降雨事件及非降雨事件上，北岸與南岸之垃圾體積與垃圾重量皆有顯著差異，降雨事件的垃圾體積比非降雨事件多出35%。

另外，不論降雨及非降雨事件中，南岸鹽埔海岸皆為垃圾密度熱區，推測可能原因為大量破碎發泡塑膠堆積於乾枯蘆葦叢上所致。

表4 北岸與南岸的垃圾量調查

		100m垃圾平均體積	100m垃圾平均重量	垃圾平均密度(件數/m ²)	塑膠瓶+餐具+玻璃瓶平均密度(件數/m ²)
北岸	降雨	320公升	37公斤	17.6	7.0
	非降雨	200公升	27公斤	12.1	4.7
南岸	降雨	547公升	55公斤	28.7	4.7
	非降雨	342公升	32公斤	34.3	10.6

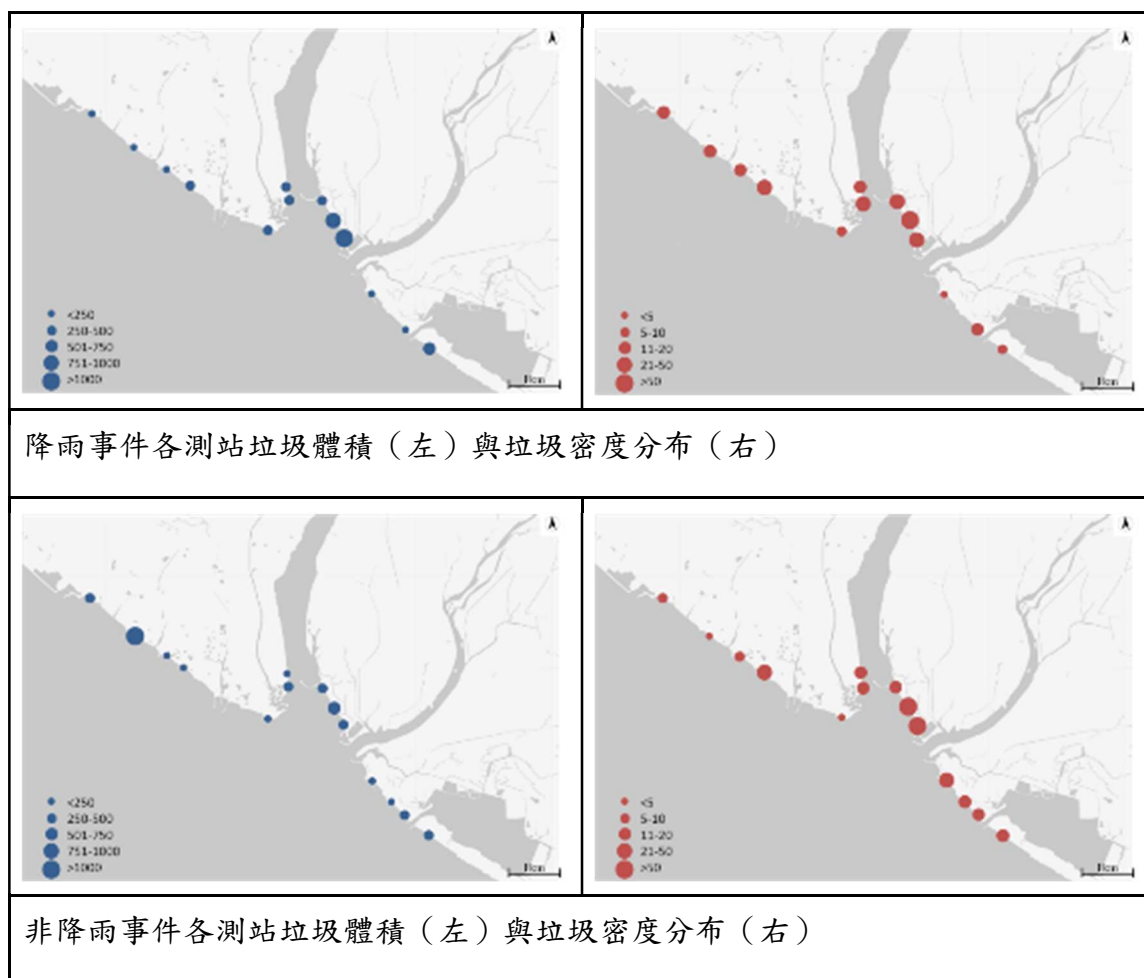


圖5 各測站垃圾體積與密度分布

(四) 分析與討論

綜合潮汐、風力與降雨之影響，逐漸降低的海水高度，加上較低之風速與往河道內推送之迎岸風，可能造成降雨事件時，於水流較緩的N2、S1與S2釋放之漂流物容易擱淺於河岸，造成河道兩側回收率較高，漂流天數與漂移距離均較短（2.4日；1342公尺）。非降雨事件時，西風將漂流物往東帶往屏東一側河道堆積，一部分則繼續繞過河口，出海後擱淺於東港海岸，由於被水流與風帶往外海，造成回收率較低，但漂流天數與漂移距離均較長（4.1日；3510公尺）。而位於凹岸N1釋放之漂流物，參考發報浮標之軌跡，可能由於水流快速，漂流物隨淡水舌（river plume）入海後，受到更大尺度之潮流或洋流影響漂向遠處，因而回收率最低

本研究為我國首次藉由低環境衝擊之漂流物模擬人造垃圾於河川中不同位置、不同天候下進入水體後，漂流至岸邊所經歷的時間、移動的距離與擱淺的位置。搭配發報浮標之軌跡與氣象監測數據，彙整為以下三項重點發現。

1. 垃圾由河岸進入水體後漂移之天數與範圍均相當有限
2. 海岸髒亂位置與河川漂流物擱淺熱點重疊
3. 流速快之河面仍可能將垃圾輸送至遠方

本研究建議，未來可提高漂流物回收率與改良發報浮標設計，增加釋放地點與釋放數量，更可以設計成近年熱門之公民科學計畫，邀請民眾共同參與。本研究之結果可以從海洋水文學的角度切入，提供全國人民思考「藍色經濟、潔淨海洋，都源於乾淨河川」三者關聯的新觀念，並提供環保團體、環境教育者與學校教師一個新的教育體驗與在地守護概念。

四、參考文獻

請參閱第七章

第六章 參考文獻

- Carson, H. S., Lamson, M. R., Nakashima, D., Toloumu, D., Hafner, J., Maximenko, N., & McC Dermid, K. J. (2013). Tracking the sources and sinks of local marine debris in Hawaii. *Marine environmental research*, 84, 76-83.
- Duncan EM, Davies A, Brooks A, Chowdhury GW, Godley BJ, Jambeck J, et al. (2020) Message in a bottle: Open source technology to track the movement of plastic pollution. *PLoS ONE* 15(12): e0242459. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242459>
- Jambeck, J.R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T.R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., Law, K.L., 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* 347, 768 – 771.
- Jang, Y., Lee, J., Hong, S., Lee, J., Shim, W., Song, Y., 2014. Sources of plastic marine debris on beaches of Korea: more from the ocean than the land. *Ocean Sci. J.* 49, 151 – 162.
- Kershaw, P., Turra, A., & Galgani, F. (2019). Guidelines for the Monitoring and Assessment of Plastic Litter in the Ocean. GESAMP reports and studies.
- Leal, R. F. (2011). The use of determinate drifters type “message in bottle” (MIB) on the evaluation of the origin of floatable marine debris (FMD) found at Praia de Piratininga, Niterói, RJ, SE Brazil. *Oceanografia e Políticas Públicas Santos, SP, Brasil – 2011*, 1-4.
- Lebreton, L. C., Van Der Zwet, J., Damsteeg, J. W., Slat, B., Andrady, A., & Reisser, J. (2017). River plastic emissions to the world’s oceans. *Nature communications*, 8(1), 1-10.
- Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F., Sainte-Rose, B., Aitken, J., Marthouse, R., Hajbane, S., Cunsolo, S., Schwarz, A., Levivier, A., Noble, K., Debeljak, P., Maral, H., Schoeneich-Argent, R., Brambini, R., Reisser, J., 2018. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Sci. Rep.* 8, 4666.
- Luna-Jorquera, G., Thiel, M., Portlitt-Toro, M., Dewitte, B., 2019. Marine protected areas invaded by floating anthropogenic litter: An example from the South Pacific. *Aquatic Conserv.: Mar. Freshw. Ecosyst.* 29, 245 – 259.
- National Geographic Society (2021) Sea to Source Methods Toolkit, Washington, DC.

- Novelli, G., Guigand, C. M., Cousin, C., Ryan, E. H., Laxague, N. J., Dai, H., ... & Özgökmen, T. M. (2017). A biodegradable surface drifter for ocean sampling on a massive scale. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 34(11), 2509-2532.
- Mississippi River Plastic Pollution Initiative and Mississippi River Bottle Tracking, (2021) <https://debristracker.org/mississippi>
- Pasternak, G., Zviely, D., Ariel, A., Spanier, E., & Ribic, C. A. (2018). Message in a bottle – The story of floating plastic in the eastern Mediterranean sea. *Waste Management*, 77, 67-77.
- Pawlowicz, R., Hannah, C., & Rosenberger, A. (2019). Lagrangian observations of estuarine residence times, dispersion, and trapping in the Salish Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 225, 106246.
- Ryan, P. G., & Perold, V. (2021). Limited dispersal of riverine litter onto nearby beaches during rainfall events. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 251, 107186.
- Schöneich-Argent, R. I., & Freund, H. (2020). Trashing our own “backyard” – Investigating dispersal and accumulation of floating litter from coastal, riverine, and offshore sources in the German Bight using a citizen science-based wooden drifter recapture approach. *Marine Environmental Research*, 162, 105115.
- Schneider, F., Kunz, A., Hu, C.-S., Yen, N., & Lin, H.-T. (2021). Rapid-Survey Methodology to Assess Litter Volumes along Large River Systems—A Case Study of the Tamsui River in Taiwan. *Sustainability*, 13(16), 8765. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/su13168765>
- U of T Trash Team, Tagging Trash in the Toronto Harbour (2021) <https://uofttrashteam.ca/taggingtrash/>
- UNEP (2016). Marine plastic debris and microplastics – Global lessons and research to inspire action and guide policy change. United Nations Environment Programme, Nairobi.
- Whiting, S.D., 1998. Types and sources of marine debris in Fog Bay, northern Australia. *Mar. Pollut. Bull.* 36, 904 – 910.
- Willis, K., Hardesty, B.D., Kriwoken, L., Wilcox, C., 2017. Differentiating littering, urban runoff and marine transport as sources of marine debris in coastal and estuarine environments. *Sci. Rep.* 7, 44479.

Maclean, K., Weideman, E. A., Perold, V., & Ryan, P. G. (2021). Buoyancy affects stranding rate and dispersal distance of floating litter entering the sea from river mouths. *Marine Pollution Bulletin*, 173, 113028.

公共電視我們的島 (2018) 小琉球。 <https://ourisland.pts.org.tw/content/3516>

胡介申、顏寧 (2019) 海岸廢棄物快篩調查指引。荒野保護協會。

中央氣象局 (2021) 中央氣象局長期天氣展望 (2021/7/31發佈)。中央氣象局。
https://www.cwb.gov.tw/Data/fcst_pdf/FW15.pdf (2021/8/15查閱)

黃聖峰 (2012)。高屏溪口小尺度沖淡水動力作用之研究。國立中山大學海洋地質及化學研究所碩士論文，高雄市。 取自 <https://hdl.handle.net/11296/mbyqk>

附件

附件一 評選委員意見與回覆

委員姓名	廖建明
審查意見	廠商答覆情形
1. 台灣海岸受潮汐影響劇烈，潮汐應考慮進去。	執行團隊將於期末報告分析時一併納入環境因素分析。
2. 漂流物的厚薄對垃圾的代表性？	依執行團隊先前於高屏縣市海岸調查發現，此地以塑膠瓶（38%）、玻璃瓶（27%）、其他類型塑膠（17%）與免洗塑膠（17%）為主要廢棄物類型，因此執行團隊考量形狀、大小、浮力與風阻，規畫厚漂流物來代表瓶罐、飲料杯與餐飲垃圾；薄漂流物來代表小型食品包裝袋、便當盒與飲料杯。

委員姓名	賴堅戊
審查意見	廠商答覆情形
1. 圖2.2.2-1，漂流物預期的回收率？回收率高低對於研究之影響？	依執行團隊文獻回顧結果，國外研究回收率的範圍介於12~99%，執行團隊初步估計回收率約在三四成。
2. 若在洪峰期間施放是否會影響人員安全？	執行團隊將以人員安全為優先考量。以執行團隊過去觀察，降雨事件後將有一段時間延遲，才會達洪峰期間，執行團隊目前規畫於橋樑上施放漂流物，人員安全應無虞。

3. 在河口施放是否會卡住？	本實驗目的在於模擬上游漂流而下之垃圾輸送，為避免岸際施放時短時間卡在岸邊樹叢，團隊目前規劃由最靠近出海口的雙園大橋靠海一側之人行道（距離出海口約2公里），依據橋下河面位置與水流狀態，分別選擇北岸與南岸各一點、流速較快處進行漂流物施放，應可避免短時間卡在岸邊的問題。
委員姓名	李傳宗
審查意見	廠商答覆情形
1. 指定河川為？	執行團隊規畫於高屏溪進行試驗。
2. 如果指定河川為高屏溪，此次調查與前實驗預期會有何差異？	執行團隊六月所進行的調查，針對的是降雨前後的垃圾量體與密度作紀錄，以及觀察降雨事件後，河川水位變化情形。該次調查的目的在於理解降雨後，降雨高峰與洪峰之間的時間差。 本此調查會依據先前觀察的結果，設計施放漂流物的時間。
3. 雨量不足的因應措施為何？	依先前氣象專家預測，今年入秋後應還會有颱風，執行團隊會盡早準備好實驗設備與器材，把握降雨事件進行。

委員姓名	陳沛宏
審查意見	廠商答覆情形
1. 請補上陳思穎學歷。	已補上
2. 請補充團隊分工。	已補上
3. 漂流物自購或自製期程是否趕得上雨季？	目前已採購相關漂流物與設備，9月11日前將準備妥當，預計秋颱或秋冬下雨時應能趕上。

4. 團隊是否具備專業分析能力，如海洋物理學？	執行團隊過去在海廢調查與分析擁有豐富經驗，亦有學術發表經歷，具備一定專業分析能力。洋流方面專業，執行團隊將諮詢與請教相關海洋物理學相關學者。
5. 期程應寫到12月	已補上

委員姓名	姜國正
審查意見	廠商答覆情形
1. 每一公里設調查點有何依據？台灣灘地較短是否適合？	<p>依執行團隊6月所做的前實驗發現，大雨過後絕大部分河川所沖刷下來的垃圾堆積在左右岸約5公里範圍內。考量該處環境為平緩沙岸加離岸堤，無太大差異，因此執行團隊採用系統抽樣的方式，每公里設置一調查點來進行。</p> <p>另執行團隊海岸垃圾調查的範圍，乃參考聯合國GESAMP小組與澳洲工研院所建議的範圍，長度為100公尺，寬度為高潮線至植栽內1公尺或至海堤等人造物為止。</p>
2. 請說明2017高屏溪之調查。	<p>2017年高屏溪的調查，為當時荒野保護協會參與澳洲工研院CSIRO全球尺度的跨國調查「全球散逸塑膠計畫」，參與國家還包括中國、南韓、南非、肯亞、斯里蘭卡，與越南。</p> <p>當時台灣的調查地點為高屏河流域，包含陸地、河岸、海岸以及海面總計95個站點。範圍涵蓋南橫到鵝鑾鼻，包括陸地、河岸、海岸的286條測線以及12個海面站點的36個拖網調查。</p>

	<p>河岸垃圾調查的部分，選定26處共78個樣區，共紀錄到2569件垃圾，相當於每公尺調查的河岸段平均有16.64件垃圾。磚塊磁磚是最常被紀錄，有639件占27.6%。其次是繩索與線繩213件，再來則是硬塑膠173件。而在東港溪河口則是單一測站最多垃圾量，發現許多家庭垃圾包棄置，以及許多線繩碎片。</p> <p>此調查結果已於今年於「Frontier」期刊發表。以往國際間估算海洋垃圾時，人口數常是作為評估垃圾生產的一項參考係數，假設某地人口多，垃圾也會多。但從七個國家實際調查的數據看來，人口數不一定直接影響垃圾的多寡。</p> <p>人口密度只能解釋很小一部分的變異，有其他更重要的因子影響著環境中垃圾的數量。相較之下土地利用方式、土地開發程度、道路型態等因子對垃圾的解釋能力更好。同時，在這7個涵蓋大緯度範圍的不同國家的數據之間也存在非常巨大的歧異，顯示僅憑藉各種國際組織公布的統計數值，例如各國濱海人口數目，來預測全球海洋塑膠排放量，可能是非常有風險、一廂情願的做法。</p>
3. 中央氣象局大雨標準？是否以大雨特報標準作為釋放依據？	<p>執行團隊規畫釋放時間除了參考氣象局大雨標準之外，會再搭配地區性的雨量預報、風向、水利署即時雨量與河川水位變化，綜合考量後作為釋放依據。</p>

附件二 期末審查委員意見與回覆

委員姓名	廖建明
審查意見	廠商答覆情形
潮汐變化對漂流物可能有重要影響，請說明釋放當時的潮汐數據。圖4.4.1-3的潮汐圖需要修改呈現方式。	謝謝委員指教，目前使用之潮汐數據為中央氣象局東港潮位站之每日高低潮觀測資料，已新增中央氣象局之歷史資料(潮汐預報折線圖)比對，並加以標示浮標與漂流物釋放之時間點(圖4.4.1-3)。
發報浮標漂到恆春半島或繞過半島進入東海岸，都是這個地區常見的流場現象。未來建立數值模型，才能做大範圍的預測	謝謝委員指教，未來如有機會進行後續實驗，將納入規劃。
不同點位釋放的木塊如何標示？	謝謝委員指教，為減少使用化學塗料，參考德國實驗做法，使用電熱烙印方式於木塊角落不同位置進行編碼，已於表3.2.2-1補充文字與照片說明。

委員姓名	余采倫
審查意見	廠商答覆情形
投放前後5天的潮汐變化?或許跟攔淺位置有關?	謝謝委員指教，目前使用之潮汐數據為中央氣象局東港潮位站之每日高低潮觀測資料，已新增中央氣象局之歷史資料(潮汐預報折線圖)比對，並加以標示浮標與漂流物釋放之時間點(圖4.4.1-3)。
很有趣的實驗結果，未來可以先做電腦模式預測，再前往海岸現場驗證與校正模式。	謝謝委員寶貴意見，未來如有機會進行後續實驗，將納入規劃。
為何選在河口1-2公里釋放，而不是更上游?	謝謝委員指教，於高屏溪下游現地場勘時發現距離出海口約2公里之雙園大橋往下游河岸段較無植被覆蓋且有沙洲地形，有助於漂流物尋回作業，此處往上游河岸以較高之灌木與無法接近之大片沙洲，視線遮蔽下不利於釋放與尋回作

	業。因此釋放點位選擇距出海口1公里之河岸與距2公里之橋上。
如何計算漂流天數？	木製漂流物於海岸被拾獲當日距離釋放日之間的天數即為漂流天數，因木塊可能在尋獲前數日即擱淺或經歷數次重覆擱淺，因此嚴格定義下此天數代表此木塊最長漂流之時間。
何時前往海廢密度測站進行調查？	於每次釋放後第1-5日之間於14測站進行調查，每站於100公尺海岸內分別收集一筆垃圾體積(公升/公尺)與3筆密度(件數/平方公尺)數據。
也許未來可以考慮在漲潮與退潮時分別前往釋放。或是不同風速時。把幾個重要的因子考慮進去。	謝謝委員寶貴意見，未來如有機會進行後續實驗，將納入規劃。
請說明未找到的800多個漂流物可能漂去哪裡。	800多件(80.1%)未被尋獲的漂流物的主要可能之去向(fate)，包含隨潮汐往上游移動後擱淺於河道中、擱淺於河口兩側6公里範圍外之海岸、仍在調查範圍內但未被發現、仍在海中或河中漂流。 本實驗規劃左右岸共約14公里的尋回範圍中地形環境多變，跨越汕尾、中芸、鹽埔與東港4個無法撿拾木塊之漁港設施(不納入14公里長度計算)。此區域亦有許多離岸堤設施，均可能造成漂流物擱淺但無法尋回。

委員姓名	賴堅戊
審查意見	廠商答覆情形
請提供木製漂流物的風阻資訊，並確認厚與薄木塊重量是否有誤。	謝謝委員指教，已置於淡水中漂浮並量測風阻面積數據，並於表3.2.2-1補充照片說明。確認報告中重量數據無誤，但薄型木片之厚度應為1.5cm(原誤植為1cm)、體積為225cm ³ ，(原誤植為150cm ³)，如此計算後2種木製漂流物之密度均相同為0.4g/cm ³ ，已於報告中訂正(表3.2.2-

	1)。
如果發報浮標的紀錄是每30分鐘一筆，也許可以跟潮汐做更小尺度的比較。	本次5組浮標中，漂流天數1天以上同時數據量較大(30分鐘一筆)者僅有非降雨時釋放、編號M之浮標，依據氣象局潮汐長退潮時間點與浮標座標後繪製軌跡。可看出浮標於退潮時多往東南方向移動，但於漲潮時出現轉折，可能改隨潮流往北向海峽中央緩慢移動(表4.2- 2)。
降雨是一個氣候現象，但可能不是影響攔淺位置的主要原因。	謝謝委員寶貴意見，未來如有機會進行後續實驗，將納入規劃。
風速、風向、潮汐、水位的各種觀測數據的來源與測站位置	謝謝委員指教，已將本計畫中使用之觀測數據之測站名稱、地理位置與數據來源等資訊彙整於表4.4.1-1。

委員姓名	楊文榮
審查意見	廠商答覆情形
請補充潮汐資訊。	謝謝委員指教，目前使用之潮汐數據為中央氣象局東港潮位站之每日高低潮觀測資料，已新增中央氣象局之歷史資料(潮汐預報折線圖)比對，並加以標示浮標與漂流物釋放之時間點(圖4.4.1-3)。
發報浮標的電子軌跡可以做更多分析。	本次5組浮標中，漂流天數1天以上同時數據量較大(30分鐘一筆)者僅有非降雨時釋放、編號M之浮標，依據氣象局潮汐長退潮時間點與浮標座標後繪製軌跡。可看出浮標於退潮時多往東南方向移動，但於漲潮時出現轉折，可能改隨潮流往北向海峽中央緩慢移動(表4.2- 2)。

委員姓名	陳建宏
審查意見	廠商答覆情形
如何確保尋找漂流物時不會遺漏？	<p>謝謝委員指教，尋回作業時採用2人一組，於退潮時一前一後的方式於海岸途步尋找，海岸線雖然寬廣，但多數漂流物乃受海水推送後擱淺於上一次漲潮形成之高潮線上，因此僅需搜索海水乾濕交界處即可。但仍有發生木塊被走在前面人員的遺漏，被同組後方人員拾獲的情形。</p>
漂流天數是否會有人操做的誤差？	<p>謝謝委員指教，本實驗規劃左右岸共約14公里的尋回範圍中，跨越約4個無法撿拾木塊之漁港設施(不納入14公里長度計算)。此區域亦有許多離岸堤設施，均可能造成部分漂流物擱淺但無法尋回。或是先擱淺於他處後，再因潮汐與風作用重回大海，又再次擱淺於他處後被尋獲。</p> <p>漂流天數為漂流物於海岸被拾獲當日距離釋放日之間的天數，因木塊可能在尋獲前數日即擱淺或經歷數次重覆擱淺，因此嚴格定義下此天數代表此木塊最長漂流之時間。</p>