

廢(污)水處理類

## 臺灣污水處理廠塑膠微粒之調查分析

顏佑庭\*、游勝傑\*\*、王雅玢\*\*\*、謝炎恭\*\*\*\*

### 摘 要

本研究於臺灣 6 間污水處理廠分析以了解塑膠微粒豐度及特性。根據分析結果及塑膠微粒多樣性指數與相關性分析以了解季節性影響及地區性差異。塑膠微粒豐度範圍為 17.6~136 個/公升 (n/L)，類型主要以碎片與纖維為主，白色為主要顏色，且白色塑膠微粒與纖維塑膠微粒具顯著相關，尺寸則以 500~5,000 $\mu\text{m}$  為主。塑膠微粒多樣性指數結果顯示，桃園北區水資源回收中心於夏季進流水有較複雜之特性組成，墾丁污水處理廠則於冬季進流水具較複雜之特性組成，龜山水資源回收中心因處理紡織業廢水使進流水塑膠微粒組成較為單一。相關性分析結果顯示，影響因子對塑膠微粒豐度影響程度由大至小為人均 GDP、人口、氣溫與降雨量；季節影響性分析，北部污水處理廠因冬季氣溫影響使冬季塑膠微粒豐度較高，其豐度差異分別為 109n/L、34.0n/L、1.3n/L 與 48.0n/L；南部墾丁污水處理廠因溫差變化不明顯且夏季用水量較高導致夏季塑膠微粒豐度較高，其豐度差異為 16.9n/L 與 13.4n/L。塑膠微粒豐度會隨污水處理廠日處理量增加而越高；於城市類型差異性分析中，污水處理廠所在區域 GDP 越高、人口越高，塑膠微粒污染風險越高，導致塑膠微粒豐度水平提升。於北部與南部污水處理廠之差異性分析顯示，臺灣北部與南部因氣候型態差異使塑膠微粒於不同季節呈現不同豐度水平。於旅遊區域差異性分析中，旅遊人口越高，塑膠微粒豐度將越高。

【關鍵字】塑膠微粒、污水處理廠、相關性分析、季節性影響、旅遊區域

---

*	中原大學環境工程學系	研究生
**	中原大學環境工程學系	教授
***	中原大學環境工程學系	教授
****	國家海洋研究院海洋生態及保育研究中心	助理研究員

# 一、前言

## 1.1 塑膠微粒

自工業時代發展以來，石油工業蓬勃發展，其中以石油為主要成分之塑膠被開發以來被各界廣泛應用。塑膠係由多種複合原料製成，因其具有低成本、耐用性和強度之特性被廣泛應用於各種產業，包括汽車工業、建築業、製造業、醫藥產業、航空業、包裝業及農業等。據統計，全球每年約製造與消費使用超過 3 億噸之塑膠，其中約有 10% 之塑膠廢棄物會經各種渠道最終進入海洋環境中，占所有海洋廢棄物之 60~80% (Kaposi et al., 2014)。

遭丟棄之塑膠製品因各種途徑遭破壞分解後，會變成非常細小的塑膠粒子，進而演變成對環境造成威脅的塑膠微粒。塑膠微粒 (MPs) 係粒徑小於 5 mm 之新興污染物，已在環境中被大量發現及檢測 (McCormick et al. 2014)，可分為初級塑膠微粒與次級塑膠微粒。

初級塑膠微粒係指其初始粒徑小於 5 mm 之塑膠微粒，如樹脂顆粒、研磨清潔劑之工業，以及被利用於家用以及洗沐用品或化妝品工業之塑膠柔珠；次級塑膠微粒則為物理作用與化學作用等使大型塑膠破碎形成塑膠碎片，抑或是風、浪等作用及紫外線熱輻射所降解而成之塑膠微粒，這些破碎行為可能會發生在製造與使用紡織品、油漆和輪胎等過程中被釋放至環境中，目前已在許多環境都可檢測出初級與次級塑膠微粒之存在，其被認為是造成環境污染和對生物產生危害之新興污染物。

此外，現今有超過 60% 之紡織品使用聚酯纖維等塑膠產品製造而成，這些紡織品在洗滌過程中將會產生大量塑膠纖維，在每次洗滌過程中，每件衣物可能釋放出多達 1,900 條纖維，每克紡織品中釋放的纖維重量可達 0.1 mg，這相當於每次洗滌過程中約有 0.01% 的洗滌材料損失，這些塑膠纖維將會經污水下水道進入污水處理廠。

迄今為止，過去大部分研究都集中於檢測海水、陸地環境及淡水中之塑膠微粒 (Hu et al. 2019)；作為塑膠微粒途徑之一的污水處理廠，係有其必要性調查與分析污水處理廠中之塑膠微粒，目前在國外污水處理廠被發現塑膠微粒已被分類為 5 種形

狀，分別為顆粒（小顆硬塊塑膠、球狀珠子、柔珠）、薄膜（非常薄之片狀塑膠）、發泡（海綿狀物質）、碎片（小型破碎塑膠）以及纖維（紡織品材質）。

### 1.2 塑膠微粒特性

塑膠微粒之物理特性包括其大小、密度、顏色、形狀，通常會使用顯微鏡目視研究分析，這些特性會對塑膠微粒在環境中之行為及對生物的危害程度產生重大影響（Chen et al. 2021）。

由於塑膠微粒之體積很小，其巨大之比表面積使其具有更多從環境中吸附重金屬物質、親水性和疏水性有機污染物之能力；其對於有機污染物之吸附行為已在世界上被確立，包括多環芳香烴（PAHs）、多氯聯苯（PCB）、二氯二苯三氯乙烷（DDTs）、六氯環己烷（HCHs）、有機磷酸酯（OPEs）、多溴二苯醚（PBDEs），雙酚類化合物等。其吸附行為會受到許多變因影響，如污染物之競爭以及水生生態環境之複雜性，其中鹽度、溫度、pH 值和離子強度等外部變因都可能會產生塑膠微粒吸附作用之影響。

此外，塑膠本身顆粒結晶度與粒徑等聚合物之特性也可能會影響塑膠微粒之吸附行為。除了吸附污染物外，塑膠之聚合物合成中還使用了數十種添加劑，如塑化劑、阻燃劑、抗氧化劑和色素等，這些用於製造塑膠的添加劑會隨著許多途徑轉移至塑膠表面上。以塑膠微粒作為載體進入環境之食物鏈轉移這些污染物，會對環境中之生物與人類產生健康危害風險（Liu et al., 2021）。

### 1.3 塑膠微粒健康危害風險

目前塑膠微粒在全球已經在許多海洋生物個體中被發現，有許多研究都顯示塑膠微粒對海洋生物之毒性影響，如海膽、貝類、螃蟹，以及魚類（Kaposi et al., 2014）等，均會對生物產生毒性影響。其主要之毒性機制為塑膠製品中之添加劑，以及因其巨大比表面積之吸附作用使塑膠微粒能夠吸附環境當中之重金屬、化合物以及有機污染物等（Liu et al, 2021）。

目前已有研究證實，塑膠微粒會造成從無脊椎動物到魚類之各種生物物種產生有害之影響；其對於生物之健康危害影響主要有物理損傷，小型無脊椎動物或浮游生物誤食塑膠微粒後，會造成體內器官堵塞以及損傷體內細胞組織，有研究顯示食入如聚乙烯 (PE)、聚丙烯 (PP)、聚苯乙烯 (PS)、聚酰胺 (PA) 和聚氯乙烯 (PVC) 等聚合物造成斑馬魚與底棲動物腺蟲之腸道絨毛開裂以及腸細胞分裂，以及造成金頭鯛肝臟損傷 (Capo et al., 2021)。

#### 1.4 污水處理廠之塑膠微粒

縱使現今大部分污水處理廠之去除率都能達到良好效果，但若無法量化其每日進流之塑膠微粒，將無法了解有多少塑膠微粒會被排放至環境當中，這些數據將影響塑膠微粒對該地區所產生之健康危害風險程度，以及對於該地區之環境產生污染。

目前全球不同地區之污水處理廠進流水中之塑膠微粒豐度 (Microplastic Abundances)，從 0.28 n/L 到 31,400 n/L 不等；放流水的豐度則為 0.01 到 297 n/L，每天約有  $5 \times 10^5$  至  $1.39 \times 10^{10}$  個塑膠微粒由污水處理廠排入水生環境當中 (Liu et al., 2021)，造成此巨大差異可能與研究中採用不同之採樣方法、前處理程序、樣品分析方式不同有關。

Üstün 等人針對土耳其布爾薩之污水處理廠調查，於該污水處理廠之進流水、放流水及其污泥採樣，結果顯示其進流水豐度平均為  $135.3 \pm 28.0$  n/L，放流水之平均豐度為  $8.5 \pm 4.7$  n/L，平均塑膠微粒去除率為 93.7 %；經過計算，每天排放至水生環境當中之塑膠微粒數量為 5.25 億個塑膠微粒，其年排放量為  $1.9 \times 10^{11}$  個塑膠微粒，從結果顯示，縱使污水處理廠對於塑膠微粒之去除率相當高，其每年排放至環境當中之數量還是非常可觀 (Üstün et al., 2022)。

此外，根據其研究結果，進流水中之塑膠微粒主要會累積於污泥當中；其污泥濃縮樣品與污泥餅中塑膠微粒豐度分別為  $17.9 \pm 2.3$  n/L 及  $8.5 \pm 4.7$  n/L，這些塑膠微粒會因沉澱機制於泥沙池與二沉池累積於迴流污泥當中，該污水處理水廠每天污泥處理量為 81.5 噸 / 天，換算下每年將於污泥中累積  $2.8 \times 10^{11}$  個 MPs，若無法妥善處理這些污

泥，將對環境造成二次污染。

根據 Liu 等人調查了全球 11 個國家共 38 間污水處理廠之塑膠微粒豐度與其特徵 (Liu et al., 2021)，發現塑膠微粒之豐度差異會與各種複雜因素如服務範圍人口、民生用水習慣以及廢水來源 (民生用水、工業用水) 有關；其研究統計，在民生用水污水處理廠中之塑膠微粒較低，範圍從  $0.28\sim 6.1\times 10^2$  n/L (平均值： $1.27\times 10^2$  n/L)，處理民生用水及工業用水之污水處理廠豐度則為  $1.6\sim 3.14\times 10^4$  n/L (平均值： $5.23\times 10^3$  n/L)；以服務人口來說，進流水之塑膠微粒豐度與人口數成正比，因此服務範圍內人口數越高之污水處理廠其進流水之塑膠微粒會較人口數低之污水處理廠高。

### 1.5 季節對污水處理廠塑膠微粒之影響

塑膠微粒之豐度將會隨季節與時間變化而產生變化 (Ben-David et al., 2020, Uogintè et al., 2022)，目前針對污水處理廠之塑膠微粒豐度仍相當有限，迄今為止，大部分針對污水處理廠之塑膠微粒研究其採樣期程為數天或數月，僅有 2 篇研究以全年採樣了解其研究範圍之污水處理廠塑膠微粒季節變化 (Ben-David et al., 2020, Uogintè et al., 2022)。

冬季較高之塑膠微粒豐度，可能反映出較高之洗滌行為及較高之地表逕流貢獻 (Ben-David et al., 2020)，該研究於冬季研究情形，由於該研究位置於以色列，其冬季為雨季，因降雨量大導致陸地逕流流速增加了約 45%，使入滲至污水下水道之塑膠微粒豐度提升，也為許多中東國家典型情況，且城市中心附近之河流也反映此種情形。在降雨季節時，塑膠微粒豐度水平較高，如韓國 Nakdong 河域於  $260\sim 1,410$  n/m<sup>3</sup> (旱季) 至  $210\sim 15,560$  n/m<sup>3</sup> (雨季)，而在 Ben-David 等人之研究指出，纖維為全年塑膠微粒分析中最主要之類型，在所有季節皆占超過 80%，顯示民生用水在污水中佔據主導地位。

另一研究指出 (Uogintè et al., 2022)，其季節性影響結果與 Ben-David 等人之研究相異，由於其研究位置係於歐洲立陶宛，其氣候型態與以色列有其差異性，因此該研究指出在冬季由於氣溫最低至攝氏負 20 度，大量降雪使塑膠微粒被冰封於地表，

不容易進入污水處理廠，以至於春季時因融冰導致春季為該研究塑膠微粒豐度最高之季節，其也指出長時間之降雨將導致春季塑膠微粒豐度提升。

綜合以上兩篇有關於污水處理廠季節性影響之研究可以發現，不同地區將導致塑膠微粒豐度在不同季節有不同變化，且降雨季節皆為塑膠微粒豐度最高之季節，而臺灣因位處亞熱帶地區及熱帶地區，其北部與南部之氣候型態也有差異性，因此更有其必要性瞭解北部與南部塑膠微粒豐度於不同季節是否存在影響。

## 二、研究架構與方法

### 2.1 實驗設計與步驟

本研究之實驗方法係按照上述相關研究之實驗方法進行修改與設計，實驗流程如圖 1 所示，本實驗以實驗設計法先根據研究所需設定篩選條件以選擇污水處理廠，後續按照採樣規劃與污水處理廠聯繫，並於 6 間污水處理廠之進流水與放流水進行夏季與冬季採樣，採樣過程將於現場進行現場過濾後帶回實驗室做後續前處理與分析；前處理過程主要使用 30% $H_2O_2$  進行消化程序並使用飽和 NaCl 溶液進行密度分離，以離心取上清液完成前處理步驟，後續樣品分析步驟使用顯微鏡目視分析各污水處理廠之夏季與冬季進流水與放流水之塑膠微粒豐度，並進行尺寸、類型及顏色之特性分析，將塑膠微粒類型分為碎片、顆粒、纖維、發泡及薄膜，尺寸分為 50~125  $\mu m$ 、125~250  $\mu m$ 、250~500  $\mu m$  及 500~5,000  $\mu m$ ；顏色分為黑色、白色、藍色、紅色、黃色、綠色、橘色及其它顏色，完成所有實驗後以相關性分析進行結果與討論。

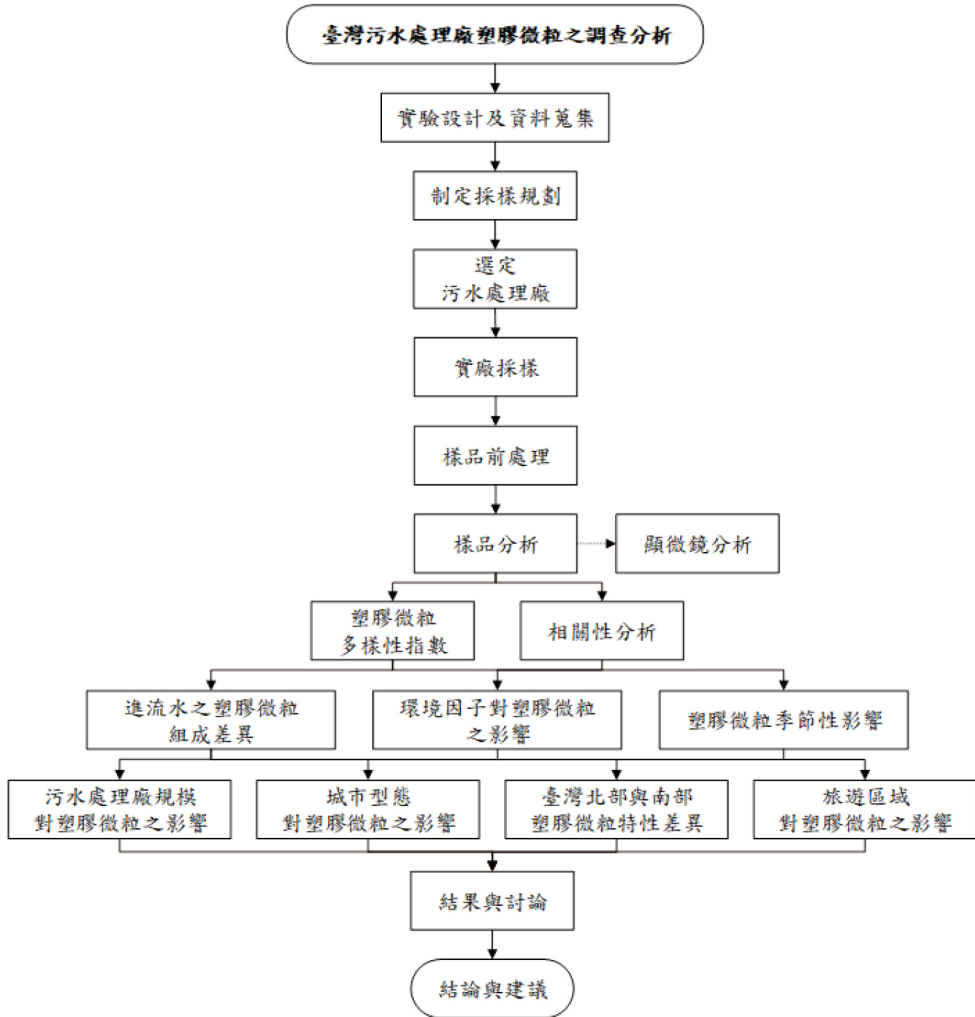


圖 1 研究架構圖

## 2.2 污水處理廠之選擇

本研究選定之北部大型污水處理廠為桃園北區水資源回收中心，中型污水處理廠為龜山水資源回收中心，以及位於旅遊區域之小型污水廠大溪水資源回收中心；南部大型污水處理廠則為鳳山水資源回收中心，中型污水處理廠為六塊厝污水處理廠，以及位於旅遊區域之小型墾丁污水處理廠。各廠主要服務範圍如表 1 所示。



表 1 污水處理廠處理量及其服務範圍

污水處理廠名稱	位置	平均日污水處理量 (CMD)	服務範圍
桃園北區水資源回收中心	桃園市蘆竹區	100,000	桃園南崁新市鎮計畫區、擴大桃園修訂計畫區
龜山水資源回收中心	桃園市龜山區	27,000	工三工業區、工四工業區與新市鎮之大崗里、公西里、文化里、大華里、大湖里、舊路里及樂善里村等地區
大溪水資源回收中心	桃園市大溪區	3,750	大溪區月眉里、田心里、一心里、興和里、福仁里等區域
鳳山水資源回收中心	高雄市鳳山區	109,600	鳳山區、部分鳥松區、部分大寮區及部分鳳山溪截流水
六塊厝水資源回收中心	屏東縣屏東市	50,000	屏東市
墾丁污水處理廠	屏東縣恆春鎮	2,000	墾丁大街兩側截流污水、大灣路用戶接管

### 2.3 採樣方法

本研究使用之採樣方法為抓樣法，係利用不銹鋼鐵桶於進流水及放流水採樣。於採樣過程中，利用不銹鋼鐵桶將採集到之水樣倒入不銹鋼濾網過濾器中過濾，其過濾器之尺寸根據先前相關研究設計其過濾尺寸，孔徑大小由大到小分別為 500  $\mu\text{m}$ 、250  $\mu\text{m}$ 、125  $\mu\text{m}$  以及 50  $\mu\text{m}$ 。

本研究於採樣點位採樣完成分層過濾後，將不銹鋼過濾器攜至水廠實驗室進行現場過濾，利用去離子水 (DI water) 配合抽氣泵浦將各層濾網上之樣品分別轉移至孔徑大小為 25  $\mu\text{m}$  之不銹鋼濾膜；為使採集之樣品充分轉移至濾膜當中，過濾過程當中需以 DI water 充分清洗過濾器及抽氣泵浦，完成過濾後將樣品帶回實驗室放入烘箱以 60  $^{\circ}\text{C}$  進行乾燥，以利進行後續前處理程序、顯微鏡目視分析，以及顯微紅外線光譜儀分析。

## 2.4 實驗步驟與分析

### 2.4.1 樣品前處理

收集之水樣根據先前相關研究之實驗方法設計以作為樣品前處理之方法。在室溫環境下加入 30% $H_2O_2$  將樣品從濾紙轉移到玻璃燒杯中，利用磁石攪拌器攪拌以消化樣品中之有機物，完成消化步驟後使用飽和氯化鈉 ( $NaCl$ , 1.48 g/mL) 進行密度分離步驟，再使用 25  $\mu m$  不銹鋼金屬濾膜將上清液以過濾設備完成前處理；過濾後在烘箱中以 60°C 乾燥樣品，乾燥後以目視檢查及微傅立葉轉換紅外光譜儀檢測不銹鋼金屬濾膜上是否存在殘留物。

### 2.4.2 樣品分析

完成前處理後之樣品以正金相顯微鏡 (ZoomKop HM-3200)，以數位影像攝影系統 (LeadView 6300AC)，並應用 ImageView 螢幕式軟體進行目視分析，其放大倍數可達 100 倍。判定原則係參考 Norén's 對塑膠微粒之鑑別標準，(1) 觀察到之塑膠微粒中無細胞或有機結構。(2) 纖維應具有相同之粗細，末端不逐漸變細，且具有三維彎曲 (不包括有機物)。(3) 白色與透明之塑膠微粒需以更高之放大倍數進行檢查以排除生物源。(4) 塑膠微粒之顏色必須清晰統一，並參考塑膠微粒識別指南。

在顯微鏡目視分析過程中，將以數據整理表格紀錄樣品中之塑膠微粒類型、尺寸及顏色，並使用 ImageView 螢幕式軟體之比例尺與截圖功能將具明顯特徵之塑膠微粒儲存至電腦中。

### 2.4.3 塑膠微粒多樣性指數

塑膠微粒多樣性指數之計算係基於辛普森多樣性指數 (Simpson diversity index) (Fang et al., 2021)，其是被用來評估樣品中塑膠微粒多樣性之指標，根據其樣品中塑膠微粒之不同特性之比例進行計算，其計算公式如下所示：

$$SDI = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

其中，S 為塑膠微粒種類之數量， $P_i$  為類別 i 中塑膠微粒於樣品中之比例，如塑膠微粒形狀比例，將樣品中之 5 種形狀比例依公式計算後即獲得該樣品之塑膠微粒形狀多樣性指數，其 SDI 最小值為 0，最大值為 1，SDI 指數越大其代表樣品中之塑膠微粒多樣性就越大，反之，其 SDI 值越接近 0 則表示其塑膠微粒多樣性越低。本研究參考林育仲等人 (2021) 之研究，以塑膠微粒尺寸 (SDIS)、顏色 (SDI<sub>c</sub>)、形狀 (SDI<sub>sh</sub>) 之多樣性指數綜合計算出塑膠微粒綜合多樣性指數 (microplastic diversity integrated index, MPDII) 以了解該污水處理廠其塑膠微粒特性之整體多樣性，其公式如下所示：

$$MPDII = (SDI_s \times SDI_c \times SDI_{sh})^{1/3}$$

MPDII 與 SDI 值相同，其範圍介於 0~1 之間，MPDII 指數越大其代表該污水處理廠樣品中之塑膠微粒綜合多樣性就越大；反之，其 MPDII 值越接近 0 則表示其塑膠微粒綜合多樣性越低。

#### 2.4.4 相關性指數

相關性分析 (Correlation Analysis) 係利用相關係數 (coefficient of correlation)，來評估兩個變數 X 和 Y 之間相關程度的方法。相關係數反映了這 2 個變數之間的線性關係和相關性的方向。

通常情況下，相關係數越大表示 2 個變數之間的關係越強而呈顯著相關；而相關係數越小則表示其關係越弱成非顯著相關。本研究使用了皮爾森積差相關分析 (Pearson Correlation) 來探討塑膠微粒豐度與其他因素之間的線性相關性。透過計算相關係數，可了解這些因素之間的關聯程度，r 值係數相關強度如表 2 所示：

表 2 相關係數強度

$ r  > 0.7$	高度相關
$0.7 >  r  > 0.4$	中度相關
$0.1 <  r  < 0.4$	低度相關
$ r  < 0.1$	微 / 無相關

### 2.4.5 預防樣品污染

為確保實驗過程中使樣品之背景污染降至最低，實驗人員需全程穿著針織布實驗衣和丁腈橡膠手套，並保持實驗區域之清潔。為避免受到空氣中之塑膠微粒污染樣品，實驗過程中將關閉實驗室所有窗戶。在實驗過程中，為確認塑膠微粒之前處理是否造成樣品中塑膠微粒之損失，以及為增加整體數據之可靠性，有進行回收率實驗之必要性。

於實驗過程中，由於空氣顆粒可能會影響樣品，所以每組實驗樣品於採樣與後續前處理及目視分析過程中，需放置空白樣品以扣除因空氣顆粒沉降所產生塑膠微粒數據誤差，其實驗之空白樣品包括相同載體，如不銹鋼金屬過濾膜以及去離子水；實驗過程中所有溶液需使用  $0.47 \mu\text{m}$  之玻璃纖維膜進行過濾，而所有玻璃器皿、過濾設備以及相關實驗用具，皆以中性洗劑清洗後使用去離子水沖洗以減少樣品污染之情形。

## 三、結果與討論

### 3.1 污水處理廠塑膠微粒豐度

本研究於臺灣夏季 7 月與冬季 12 月，在臺灣北部與南部之 6 間污水處理廠進行採樣，各污水處理廠均發現塑膠微粒之存在，其結果如表 3 所示。其中，桃園北區水資源回收中心之進流水塑膠微粒豐度為  $79.6 \pm 54.4 \text{ n/L}$ ，放流水塑膠微粒豐度為  $5.28 \pm 3.28 \text{ n/L}$ ；龜山水資源回收中心之進流水塑膠微粒豐度為  $119 \pm 17.5 \text{ n/L}$ ，放流水塑膠微粒豐度為  $4.21 \pm 0.01 \text{ n/L}$ ；大溪水資源回收中心之進流水塑膠微粒豐度為  $46.2 \pm 0.63 \text{ n/L}$ ，放流水塑膠微粒豐度為  $2.01 \pm 0.46 \text{ n/L}$ ；鳳山水資源回收中心進流水塑膠微粒豐度為  $41.6 \pm 24.0 \text{ n/L}$ ，放流水塑膠微粒豐度為  $3.29 \pm 0.13 \text{ n/L}$ ；六塊厝水資源回收中心之進流水塑膠微粒豐度為  $69.5 \pm 8.45 \text{ n/L}$ ，放流水塑膠微粒豐度為  $3.25 \pm 1.54 \text{ n/L}$ ；墾丁污水處理廠之進流水塑膠微粒豐度為  $40.6 \pm 6.69 \text{ n/L}$ ，放流水塑膠微粒豐度為  $5.80 \pm 0.90 \text{ n/L}$ 。由上述實驗分析結果可知，表示塑膠微粒廣泛存在於處理民生用水之污水處理廠。

為了解臺灣污水處理廠目前塑膠微粒污染之豐度水平，本研究將研究結果與全球其他針對污水處理廠塑膠微粒之研究做比較。本研究中污水處理廠與其他國家污水處理廠之塑膠微粒豐度比較如表 4 所示，本研究選定之 6 間污水處理廠其塑膠微粒豐度與芬蘭之污水處理廠相似 (61.0 n/L)，低於土耳其 (135.3±28.0 n/L)、中國 (126±14.0 n/L)，與英國 (2102.16 n/L) 之污水處理廠，而高於中國 (32.5±28.0 n/L)、西班牙 (3.78±0.48 n/L、12.4±2.70 n/L)；與日本 (19.2 n/L) 之污水處理廠，在與全球各地污水處理廠之塑膠微粒豐度進行比較後，可以發現臺灣污水處理廠之塑膠微粒豐度於全球污水處理廠屬於中等水平。

表 3 污水處理廠塑膠微粒豐度

污水處理廠名稱	MPs 豐度 (n/L)		
	進流水	放流水	去除率 (%)
桃園北區 水資源回收中心	79.6±54.4	5.28±3.28	92.84
龜山 水資源回收中心	119±17.5	4.21±0.01	96.38
大溪 水資源回收中心	46.2±0.63	2.01±0.46	95.66
鳳山 水資源回收中心	41.6±24.0	3.29±0.13	87.91
六塊厝 水資源回收中心	69.5±8.45	3.25±1.54	94.98
墾丁 污水處理廠	40.6±6.69	5.80±0.90	84.96

表 4 本研究與其他國家污水處理廠塑膠微粒豐度之比較

國家	污水處理廠 處理量 (CMD)	進流 MPs 豐度 (n/L)	放流 MPs 豐度 (n/L)	資料來源
土耳其	61,800	135.3±28.0	8.5±4.7	Üstün et al., (2022)
中國	10,000	32.5±1.0	5.0±0.4	Zhang et al., (2023)
西班牙	16,200	3.78±0.48	1.38±0.48	Bayo et al., (2021)

國家	污水處理廠處理量 (CMD)	進流 MPs 豐度 (n/L)	放流 MPs 豐度 (n/L)	資料來源
西班牙	35,000	12.43±2.70(GGR)	1.23±0.15	Bayo et al., (2020)
芬蘭	30,180	61	0.8	Salmi et al., (2021)
日本	200,000	19.16	5.15	Nakao et al., (2021)
英國	190,000	2,102.16	129.13	Cunsolo et al., (2021)
中國	600,000	126.0±14.0	30.6±7.8	Jiang et al., (2020)
桃園北區水資源回收中心	100,000	79.6±54.40	5.28±3.28	本研究
龜山水資源回收中心	27,000	118.95±17.45	4.21±0.01	本研究
大溪水資源回收中心	3,750	46.23±0.63	2.01±0.46	本研究
鳳山水資源回收中心	109,600	41.60±24.00	3.29±0.13	本研究
六塊厝水資源回收中心	50,000	69.45±8.45	3.25±1.54	本研究
墾丁污水處理廠	2,000	40.61±6.69	5.80±0.90	本研究

### 3.2 塑膠微粒特性分析

在本研究以目視分析所發現之塑膠微粒類型主要為碎片與纖維，其占有塑膠微粒類型比例為 21.2%~58.7% 與 37.7%~82.0%，其與其它相關文獻之結果相符（Ben-David et al., 2021、Liu et al., 2021），而各區域之污水處理廠其塑膠微粒形狀比例存在相異變化，如圖 2 所示。

本研究各污水處理廠之塑膠微粒顏色比例如圖 3 所示。桃園北區水資源回收中心其夏季塑膠微粒以藍色（25.8%）為主，其次為黃色（15.1%）；冬季則以白色（49.4%）為主，其次為藍色（16.3%）；龜山水資源回收中心夏季與冬季之塑膠微粒皆以白色（78.2%、80.5%）為主，其次也皆為橘色（8.87%、7.40%）；大溪水資源回收中心其

夏季與冬季塑膠微粒皆以白色 (37.9%、51.1%)，其次夏季為黃色 (29.5%)，冬季則為橘色 (17.8%)；鳳山水資源回收中心夏季與冬季之塑膠微粒皆以白色 (46.6%、61.5%)，其次夏季為黃色 (13.6%)，冬季則為橘色 (13.0%)；六塊厝水資源回收中心夏季與冬季皆以白色 (43.9%、44.0%) 為主，其次夏季為黃色 (17.3%)，冬季則為橘色 (28.1%)；墾丁污水處理廠其夏季與冬季皆以白色 (35.0%、43.9%) 為主，其次也皆為黃色 (14.7%、14.0%)。

而 6 間污水處理廠之塑膠微粒尺寸分布，雖各污水處理廠之塑膠微粒尺寸分布皆不一致，但仍以 500~5,000  $\mu\text{m}$  為主要塑膠微粒尺寸，其分布範圍為 14.7%~46.9% 如圖 4 所示。

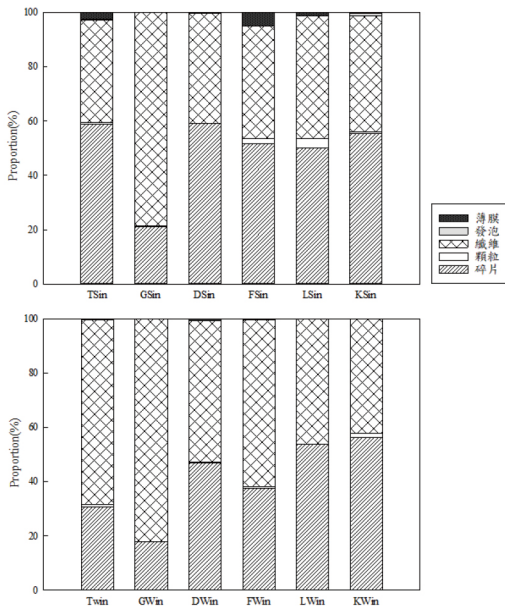


圖 2 塑膠微粒形狀百分比圖

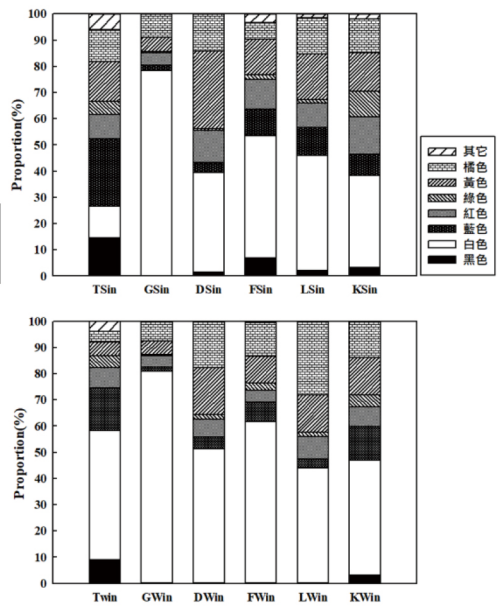


圖 3 塑膠微粒顏色百分比圖

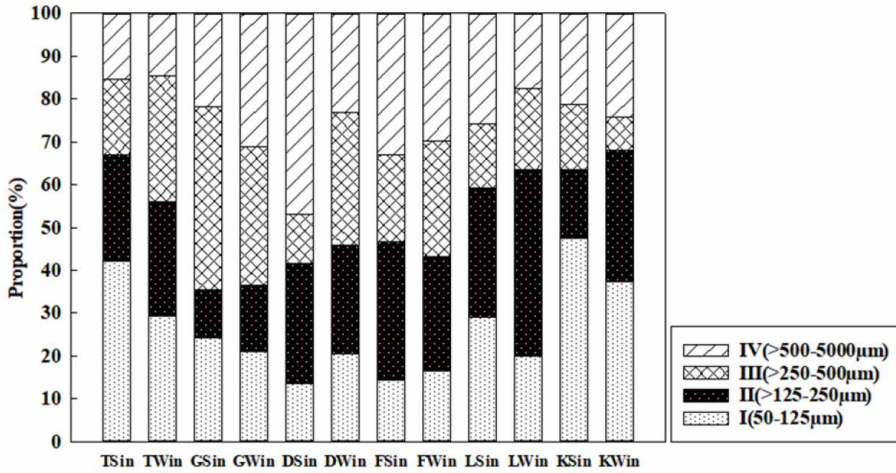


圖 4 污水處理廠塑膠微粒尺寸百分比

### 3.3 塑膠微粒多樣性指數

本研究以多樣性指數了解進流水中塑膠微粒組成之複雜程度，從多樣性指數計算結果如表 5 所示，龜山水資源回收中心因其系統收集範圍內之廢水來源特性，導致其 MPDII 值明顯低於其他污水處理廠（夏季 0.36 與冬季 0.32），表示該污水處理廠其所接收之污水來源較其他污水處理廠單一，而其他污水處理廠之計算結果顯示，因各污水處理廠因形狀、尺寸與顏色之多樣性指數有所差異，於夏季之 MPDII 值計算結果顯示，桃園北區水資源回收中心之 MPDII 值為最高（0.66），表示該污水處理廠進流水來源相對多元，但從 MPDII 值顯示，桃園北區水資源回收中心之 MPDII 值與鳳山水資源回收中心（0.64）、六塊厝水資源回收中心（0.63），以及墾丁污水處理廠（0.64）相似，表示此 4 家污水處理廠之塑膠微粒來源之複雜程度相似，而冬季之 MPDII 結果顯示，墾丁污水處理廠之 MPDII 值最高（0.61），但與大溪水資源回收中心（0.58）及六塊厝水資源回收中心（0.59）相似，表示於冬季，此 3 家污水處理廠塑膠微粒來源之複雜程度較為相似。在時空分布上，冬季之 MPDII 值均低於夏季之 MPDII 值，顯示此 6 家污水處理廠其夏季之塑膠微粒來源較為複雜與多元。



表 5 污水處理廠塑膠微粒豐度

污水處理廠名稱	污水處理廠之塑膠微粒多樣性指數							
	形狀多樣性 (SDIsh)		尺寸多樣性 (SDIs)		顏色多樣性 (SDIc)		MPDII	
	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季
桃園北區 水資源回收中心	0.51	0.44	0.71	0.74	0.85	0.71	0.66	0.56
龜山 水資源回收中心	0.34	0.30	0.70	0.73	0.37	0.34	0.36	0.32
大溪 水資源回收中心	0.49	0.51	0.67	0.74	0.73	0.67	0.60	0.58
鳳山 水資源回收中心	0.56	0.48	0.72	0.74	0.73	0.59	0.64	0.53
六塊厝 水資源回收中心	0.54	0.50	0.74	0.70	0.74	0.70	0.63	0.59
墾丁 污水處理廠	0.51	0.51	0.68	0.70	0.80	0.74	0.64	0.61

### 3.4 塑膠微粒豐度影響因子分析

#### 3.4.1 氣溫對塑膠微粒之影響

本研究根據選定之各污水處理廠其季節與塑膠微粒豐度進行相關性分析，相關性分析結果表示氣溫對塑膠微粒豐度呈現負中度相關 ( $r=-0.51$ ,  $p<0.05$ ) 如圖 5 所示，結果表示當氣溫越低，塑膠微粒豐度將提高，此分析結果也與文獻相符，根據相關研究顯示，氣溫降低將導致民生活動中有更多纖維塑膠微粒因洗滌行為由污水下水道之途徑進入污水處理廠 (Uoginté et al., 2022)，因此調查該污水處理廠位處區域之季節氣溫，也可以提供未來針對塑膠微粒污染之防治參考。

經氣候特性條件分析可以發現，北部污水處理廠因其氣候條件導致冬季低溫明顯低於南部區域，使北部冬季民生用水洗滌厚重衣物頻率增加，使冬季塑膠微粒豐度高於夏季，在圖中溫度為攝氏 15 度之範圍皆為北部污水處理廠之冬季塑膠微粒豐度，而南部區域因位處熱帶區域，其氣候條件導致全年無明顯冬季，且冬季日夜溫差明顯，導致冬季白天氣溫仍可高於 20°C，甚至於夏季時因高溫將使當地民生用水更傾向於夏季有較高之衣物更換及洗滌頻率，導致其夏季塑膠微粒豐度高於冬季，從圖中也可看

到南部污水處理廠冬季溫度約攝氏 20 度，但其塑膠微粒豐度並無高於夏季。

因此氣溫對塑膠微粒豐度影響之結果可以解釋為，當其氣候特色屬於亞熱帶氣候，於溫度較低之季節時，將使塑膠微粒豐度與氣溫呈負相關；當氣候特色屬於熱帶氣候並且位於氣溫較高之季節時，塑膠微粒豐度將與氣溫呈現正相關之情形。

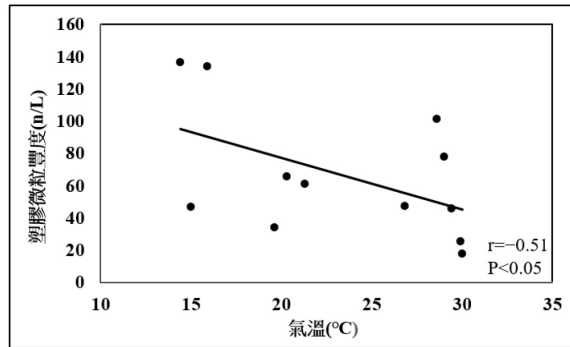


圖 5 溫度對塑膠微粒豐度之影響

### 3.4.2 降雨量對塑膠微粒之影響

本研究調查選定之污水處理廠所處地區之氣候型態，以及該地區於採樣當月之平均降雨量，以探討降雨量對污水處理廠中塑膠微粒之影響，塑膠微粒豐度在旱季和雨季將存在變化 (Uogintè et al., 2022)，其研究發現在雨季時因降雨導致環境中之塑膠微粒，會因雨水沖刷等因素而導致其由人孔進入污水下水道，使得雨季塑膠微粒豐度較旱季高；但於本研究之降雨量對塑膠微粒豐度相關性顯示，降雨量之多寡對於塑膠微粒豐度呈現低度相關 ( $r=0.29$ ,  $p<0.05$ ) 如圖 6 所示，從分析結果顯示，污水處理廠之塑膠微粒豐度無因為降雨量之多寡而產生顯著之影響，本研究判斷因數據為該地區之月平均降雨量且各地區之塑膠微粒豐度水平並不一致，因此需進一步調查採樣當週該地區之降雨情形，或由未來相關研究針對同一地區進行更全面之研究，以量化降雨量影響塑膠微粒豐度之程度。

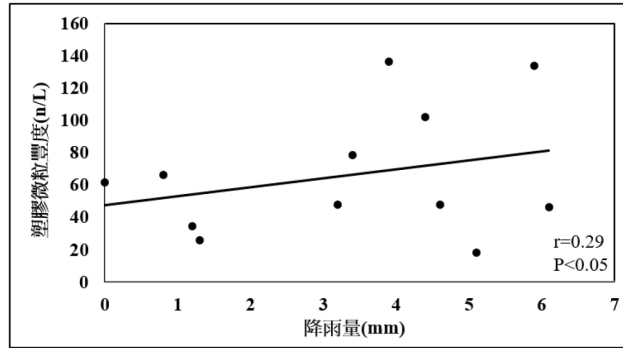


圖 6 降雨量對塑膠微粒豐度之影響

### 3.4.3 GDP 對塑膠微粒之影響

根據部分研究顯示，區域內之生產總值（GDP）對塑膠微粒豐度有顯著正相關之關係（Zhou et al., 2020），因 GDP 更高之城市區域表示該區域有更多企業以及工業，其中 GDP 所包含之產業為第一產業（如農業等）、第二產業（包括工業、製造業、紡織業與公共工程等）以及第三產業（包括金融業、教育相關產業以及服務業等），表示 GDP 越高之區域經濟發展程度更高以及更都市化，具有更多塑膠微粒來源，進而造成更多的塑膠微粒污染風險，且有文獻指出，第三產業之服務業相關產業為民生污水處理廠塑膠微粒主要來源（Zhang et al., 2021）。

本研究蒐集各區域之 GDP 數據與塑膠微粒豐度進行相關性分析，分析結果如圖 7 所示，顯示 GDP 對於塑膠微粒豐度具有高度相關（ $r=0.82$ ,  $p<0.05$ ），其結果說明 GDP 愈高之區域對於污水處理廠之塑膠微粒豐度呈現正相關，表示 GDP 愈高之區域，其民生用水中將含有更高之塑膠微粒，此結果不僅可以提供後續塑膠微粒污染防治參考外，更能夠以 GDP 初步了解國內塑膠微粒豐度較高之區域，提供後續相關研究針對塑膠微粒污染潛勢高之地區進行更進一步之研究。

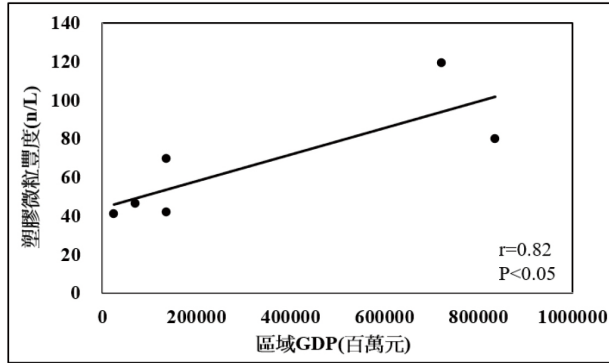


圖 7 區域 GDP 對塑膠微粒豐度之影響

#### 3.4.4 人口對塑膠微粒之影響

根據相關文獻表示，塑膠微粒豐度會與許多複雜因素如民生用水習慣、污水來源、氣候等因素有關 (Liu et al., 2021)，其中，服務範圍人口對塑膠微粒豐度也會產生影響 (Zhang et al., 2021)，因此本研究調查污水處理廠系統服務範圍內之人口與分析結果之塑膠微粒豐度進行相關性分析，分析結果顯示於本研究所選定之污水處理廠其系統服務範圍人口對塑膠微粒豐度之相關性呈現低度相關 ( $r=0.21$ ,  $p<0.05$ )，表示於本研究選定之污水處理廠中，人口數量對於塑膠微粒豐度並無明顯之相關性，其可能因污水系統收集範圍並不一致所導致。因此，本研究選取選定之污水處理廠除了系統收集範圍包含工業廢水之龜山水資源回收中心進行相關性分析，結果顯示人口對於塑膠微粒豐度如圖 8 所示呈現中度相關 ( $r=0.68$ ,  $p<0.05$ )，表示若民生污水處理廠之進流水來源僅為民生用水與截流河水，其塑膠微粒豐度將會與當地人口呈現正相關。

綜合以上 6 間污水處理廠之區域居住人口對塑膠微粒豐度之影響，可以了解到雖當地居住人口可評估塑膠微粒之豐度，其結果也與過去相關文獻相符，但因臺灣屬於地狹人稠之特性，在各行政區域面積並不大之情形下，加上許多工業、科技業集中設立，將吸引許多周遭地區民眾前往就業、就學以及旅遊活動等各種情形，且因周遭交通便捷，跨縣市就學、就業及旅遊等人口將影響整體塑膠微粒豐度之評估，此特性與

國外相關文獻相比係有其差異性，因此未來相關研究針對地區塑膠微粒污染風險評估時，應考量該區域之特性評估其流動人口，對於塑膠微粒豐度之評估將較為完整，且若根據人口進行評估時，也應考量該民生污水處理廠污水系統收集範圍，若其收集範圍包含工業廢水，將導致塑膠微粒豐度無法僅以人口進行評估。

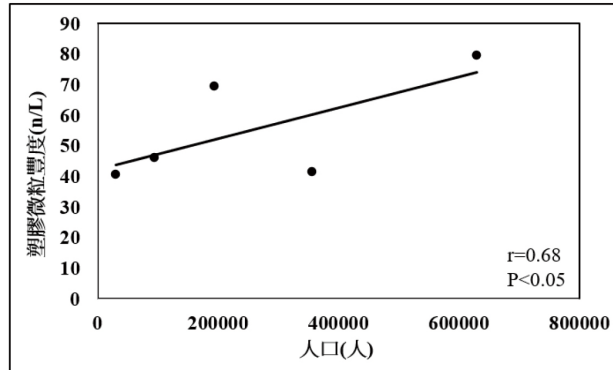


圖 8 居住人口對塑膠微粒豐度之影響

### 3.5 季節性影響分析

本研究選定之污水處理廠其塑膠微粒豐度會受到季節變化產生影響，而臺灣由於位處北回歸線通過之區域，以及因中央山脈阻隔導致臺灣北部與南部氣候特性呈現不同類型，因此本研究分別於臺灣北部與南部選定 3 間污水處理廠，以了解臺灣北部地區與南部地區之塑膠微粒特性差異，其研究結果如圖 9 所示。

於研究結果可以發現，對本研究所選定之污水處理廠呈現不同之影響程度，位於臺灣北部之桃園北區水資源回收中心、龜山水資源回收中心，以及大溪水資源回收中心之塑膠微粒豐度顯示，其因位處亞熱帶季風氣候，受東北季風影響導致冬季氣溫驟降且日夜溫差不明顯，也使該地區降雨日數高於夏季，在此情形之下，北部污水處理廠冬季用水量將因大量厚重紡織物之洗滌行為而高於夏季，使纖維塑膠微粒豐度高於夏季（桃園北區夏季 9.5 n/L、冬季 98.0 n/L；龜山夏季 79.8 n/L、冬季 112 n/L；大溪夏季 18.5 n/L、冬季 24.5 n/L），於塑膠微粒多樣性指數也發現，北部冬季塑膠微粒

來源因纖維狀塑膠微粒豐度較高導致其整體冬季塑膠微粒多樣性指數水平較南部污水處理廠低。

而臺灣南部由於位處熱帶季風氣候，夏季更為炎熱，且降雨大部分來自於夏季之梅雨、午後雷陣雨及颱風季節所帶來之降水；而冬季因中央山脈阻隔使東北季風對南部地區之影響較小，導致其冬季幾乎無降雨情形，且日夜溫差明顯，導致冬季白天氣溫仍可高於 20°C，甚至於夏季時因高溫，使當地民生用水更傾向於夏季有較高之衣物更換及洗滌頻率，導致六塊厝水資源回收中心與墾丁污水處理廠夏季之整體塑膠微粒豐度高於冬季（六塊厝夏季 77.9n/L、冬季 61.0n/L；墾丁夏季 47.3n/L、冬季 33.9n/L），而鳳山水資源回收中心雖結果顯示其冬季塑膠微粒豐度高於夏季，但是由於其污水收集範圍包含截流河水，其塑膠微粒豐度可能因截流河水之原因或因採樣之誤差，導致進流水中之塑膠微粒豐度呈現冬季大於夏季，但根據夏季塑膠微粒多樣性指數所示，鳳山水資源回收中心夏季塑膠微粒多樣性指數仍與墾丁污水處理廠相同為南部污水處理廠中最高（0.64），顯示其進流水組成複雜程度相同。綜合以上因素影響，雖桃園北區水資源回收中心為夏季塑膠微粒多樣性指數最高之污水處理廠，但整體而言仍以南部污水處理廠之塑膠微粒多樣性指數較高，表示南部污水處理廠夏季因氣溫、降雨量與用水量之原因導致進流水中之塑膠微粒組成較為複雜。

綜合以上針對冬季與夏季之季節性影響對臺灣北部與南部之差異性分析，臺灣北部其因季節性影響之變化程度較大，未來針對北部地區之污水處理廠進行塑膠微粒污染防治時，應考量其因季節所產生之變化，以完整評估該污水處理廠全年塑膠微粒豐度與類型之變化；而臺灣南部雖夏季與冬季因氣候型態使季節變化之影響性較北部小，但塑膠微粒多樣性指數顯示其進流水來源組成較北部複雜且多元，因此仍有進行塑膠微粒污染防治之必要性。

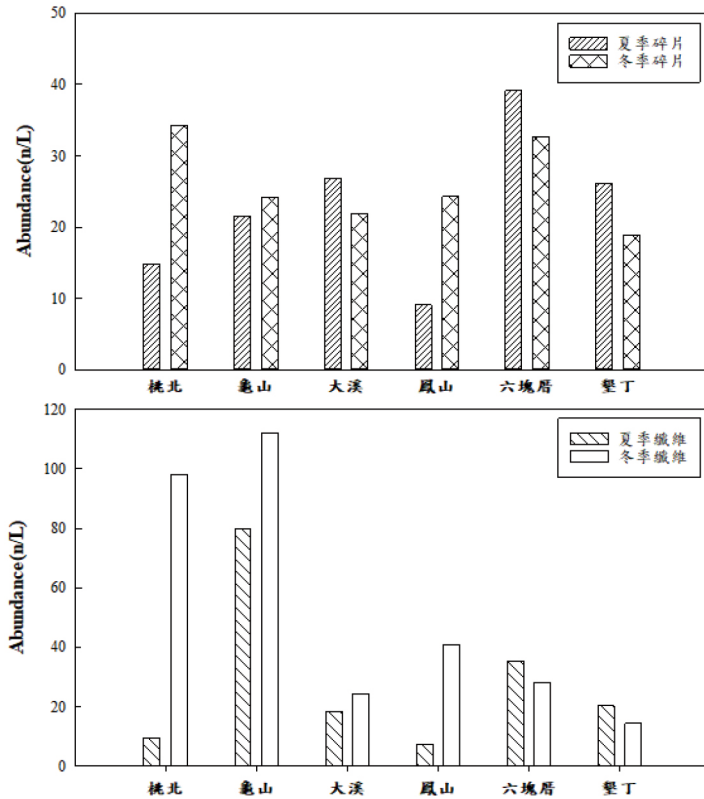


圖 9 污水處理廠碎片與纖維豐度季節差異

### 3.6 污水處理廠規模對塑膠微粒豐度之影響

本研究比較污水系統收集範圍僅收集民生用水之污水處理廠，仍可發現其塑膠微粒豐度水平大致上會因污水處理廠規模大小而產生變化，從圖 10 可以發現，塑膠微粒豐度大致上呈現越小型之污水處理廠其塑膠微粒豐度越低，大型污水處理廠之桃園北區水資源回收中心，其因大量進流水導致塑膠微粒豐度高於中型污水處理廠之六塊厝水資源回收中心，而大溪水資源回收中心以及墾丁污水處理廠因其進流量較少之因素導致塑膠微粒豐度水平較低，因此未來針對污水處理廠塑膠微粒污染防治，應優先考量大型污水處理廠以及污水系統收集範圍包含工業用水之污水處理廠。

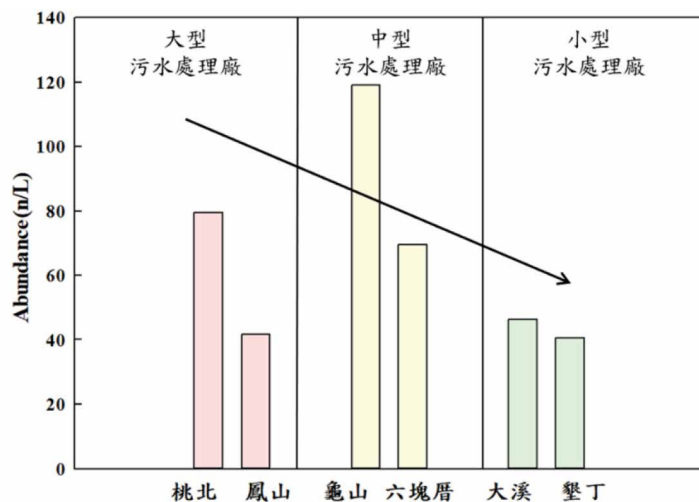


圖 10 污水處理廠規模與塑膠微粒豐度差異

### 3.7 旅遊地區之差異性分析

旅遊區域之污水處理廠因較密集之旅遊活動會使塑膠微粒豐度水平提升 (Zhang et al., 2021)，因此本研究於北部選取大溪水資源回收中心以及南部之墾丁污水處理廠，比較旅遊人口與塑膠微粒豐度變化，以瞭解旅遊人口是否影響塑膠微粒豐度。

根據大溪水資源回收中心與墾丁污水處理廠調查結果顯示，其與文獻相符 (Zhang et al., 2021)，顯示雖塑膠微粒豐度會因許多因素如氣候與降雨等之變化而產生影響，但旅遊人口變化對於位處旅遊區域之污水處理廠也會造成影響，大溪水資源回收中心因冬季之遊客人數較夏季高約 35,000 人，導致冬季塑膠微粒之豐度較夏季高 1.4 n/L；墾丁污水處理廠其遊客人數與塑膠微粒豐度變化結果與大溪水資源回收中心相同，其因夏季旅遊人口湧入，使夏季遊客人數較冬季高約 147,000 人，導致夏季塑膠微粒豐度較冬季高 13.4 n/L。因此未來針對相關位於旅遊區域之污水處理廠，應考量其旅遊人口變化對塑膠微粒產生之潛在污染風險，以評估其對塑膠微粒污染產生之影響。



## 四、結論與建議

### 4.1 結論

1. 塑膠微粒豐度範圍為 17.6~136 n/L；類型主要以碎片與纖維為主，其範圍為 21.2%~58.7% 與 37.7%~82.0%；白色為主要顏色，占有顏色百分比 11.9%~80.5%。
2. 塑膠微粒多樣性指數結果顯示桃園北區水資源回收中心於夏季進流水有較複雜之特性組成；墾丁污水處理廠則於冬季進流水具較複雜之特性組成；龜山水資源回收中心因處理工業用水使其進流水塑膠微粒組成較為單一。
3. 影響因子對塑膠微粒豐度影響程度由大至小為人均 GDP ( $r=0.91$ ) > 人口 ( $r=0.68$ ) > 氣溫 ( $r=-0.51$ ) > 降雨量 ( $r=0.29$ )。
4. 季節性影響分析顯示北部污水處理廠因低溫使冬季塑膠微粒豐度較高，南部因溫差不明顯以及夏季用水量大使夏季塑膠微粒豐度較高。
5. 污水處理廠規模對塑膠微粒豐度差異性分析顯示，塑膠微粒豐度會隨污水處理廠處理量增加而越高。
6. 旅遊區域之污水處理廠其塑膠微粒豐度與遊客人數呈正比，遊客人數越高，塑膠微粒豐度越高。

### 4.2 建議

1. 由於目前針對塑膠微粒分析尚無完整之採樣方法與前處理實驗流程，以及對塑膠微粒尺寸、顏色等特徵之明確規範，因此未來需建立一套針對塑膠微粒完整之分析方法，以使未來相關研究之比較更具參考價值。
2. 未來可針對更多污水處理廠進行採樣分析以瞭解臺灣整體污水處理廠中塑膠微粒豐度水平。
3. 未來可針對單一污水處理廠進行長期採樣以瞭解降雨量對塑膠微粒之影響。
4. 本研究以地區差異性分析，結果表示未來針對污水處理廠之塑膠微粒污染防治，應優先考量大型污水處理廠、污水系統收集範圍包含工業用水之污水處理廠，以及位處工商業高度發展之污水處理廠，且季節性影響分析顯示，需額外考量其因季節性變化而

產生之塑膠微粒豐度峰值變化。

5. 由於國內部分污水處理廠係位於旅遊區域，對於此類污水處理廠之塑膠微粒污染風險應考量其旅遊人口之變化，以了解旅遊人口對污水處理廠中塑膠微粒豐度之影響。

## 參考文獻

- 林育仲 (2021) , 台灣西南沿海沉積物塑膠微粒分布與組成, 國立高雄科技大學海洋環境工程系暨研究所碩士論文, p22。
- Bayo, J., Olmos, S., & López-Castellanos, J. (2020) . Microplastics in an urban wastewater treatment plant: The influence of physicochemical parameters and environmental factors. *Chemosphere*, 238.
- Bayo, J., Olmos, S., & López-Castellanos, J. (2021) . Assessment of microplastics in a municipal wastewater treatment plant with tertiary treatment: Removal efficiencies and loading per day into the environment. *Water (Switzerland)* , 13 ( 10 ) .
- Ben-David, E. A., Habibi, M., Haddad, E., Hasanin, M., Angel, D. L., Booth, A. M., & Sabbah, I. (2021) . Microplastic distributions in a domestic wastewater treatment plant: Removal efficiency, seasonal variation and influence of sampling technique. *Science of the Total Environment*, 752.
- Capó, X., Company, J. J., Alomar, C., Compa, M., Sureda, A., Grau, A., Hansjosten, B., López-Vázquez, J., Quintana, J. B., Rodil, R., & Deudero, S. (2021) . Long-term exposure to virgin and seawater exposed microplastic enriched-diet causes liver oxidative stress and inflammation in gilthead seabream *Sparus aurata*, Linnaeus 1758. *Science of the Total Environment*, 767.
- Chen, H. L., Selvam, S. B., Kang, & Ting, N., & Gibbins, C. N. (2021) . Microplastic pollution in freshwater systems in Southeast Asia: contamination levels, sources, and ecological impacts.

- Cunsolo, S., Williams, J., Hale, M., Read, D. S., & Couceiro, F. (2021) . Optimising sample preparation for FTIR-based microplastic analysis in wastewater and sludge samples: multiple digestions. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* (2021) 413:3789–3799
- Fang, Q., Niu, S., & Yu, J. (2021) . Characterising microplastic pollution in sediments from urban water systems using the diversity index. *Journal of Cleaner Production*, 318.
- Hidayaturrehman, H., & Lee, T. G. (2019) . A study on characteristics of microplastic in wastewater of South Korea: Identification, quantification, and fate of microplastics during treatment process. *Marine Pollution Bulletin*, 146, 696–702.
- Jiang, J., Wang, X., Ren, H., Cao, G., Xie, G., Xing, D., & Liu, B. (2020) . Investigation and fate of microplastics in wastewater and sludge filter cake from a wastewater treatment plant in China. *Science of the Total Environment*, 746.
- Kaposi, K. L., Mos, B., Kelaher, B. P., & Dworjanyn, S. A. (2014) . Ingestion of microplastic has limited impact on a marine larva. *Environmental Science and Technology*, 48 ( 3 ) , 1638–1645.
- Liu, W., Zhang, J., Liu, H., Guo, X., Zhang, X., Yao, X., Cao, Z., & Zhang, T. (2021) . A review of the removal of microplastics in global wastewater treatment plants: Characteristics and mechanisms. In *Environment International* (Vol. 146) . Elsevier Ltd.
- McCormick, A., Hoellein, T. J., Mason, S. A., Schluep, J., & Kelly, J. J. (2014) . Microplastic is an abundant and distinct microbial habitat in an urban river. *Environmental Science and Technology*, 48 ( 20 ) , 11863–11871.
- Nakao, S., Akita, K., Ozaki, A., Masumoto, K., & Okuda, T. (2021) . Circulation of fibrous microplastic (microfiber) in sewage and sewage sludge treatment processes.

Science of the Total Environment, 795.

Salmi, P., Ryymin, K., Karjalainen, A. K., Mikola, A., Uurasjärvi, E., & Talvitie, J. (2021) . Particle balance and return loops for microplastics in a tertiary-level wastewater treatment plant. *Water Science and Technology*, 84 ( 1 ) , 89–100.

Uogintė, I., Pleskytė, S., Pauraitė, J., & Lujanienė, G. (2022) . Seasonal variation and complex analysis of microplastic distribution in different WWTP treatment stages in Lithuania. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194 ( 11 ) .

Üstün, G. E., Bozdaş, K., & Can, T. (2022) . Abundance and characteristics of microplastics in an urban wastewater treatment plant in Turkey. *Environmental Pollution*, 310.

Zhang, L., Liu, J., Xie, Y., Zhong, S., & Gao, P. (2021) . Occurrence and removal of microplastics from wastewater treatment plants in a typical tourist city in China. *Journal of Cleaner Production*, 291.

Zhou, G., Wang, Q., Zhang, J., Li, Q., Wang, Y., Wang, M., & Huang, X. (2020) . Distribution and characteristics of microplastics in urban waters of seven cities in the Tuojiang River basin, China. *Environmental Research*, 189.