

DOI: 10.53104/xdkx.2025.01.01.002

海南沿海珊瑚礁生態系統中微塑膠污染物的分佈特徵與食物鏈 遷移研究

陳晟¹

1. 廣東海洋大學，廣東省 湛江市 524088

摘要：隨著海洋塑膠污染問題日益嚴峻，微塑膠作為新型污染物已廣泛存在於熱帶近岸生態系統中，對生物多樣性與生態功能構成潛在威脅。本研究以海南沿海典型珊瑚礁生態系統為研究物件，系統調查微塑膠在海水、沉積物及不同營養級生物體內的豐度與類型，分析其空間分佈差異與生態遷移路徑。通過佈設多介質採樣點、實施穩定同位素與食物鏈追蹤實驗，結合生物攝食行為與顆粒理化特性，揭示了微塑膠在生態系統中的遷移規律及其潛在生態影響。研究發現，微塑膠在沿岸區域的濃度顯著高於外礁區，沉積物中以纖維狀和片狀顆粒為主，水體與底棲動物中則表現出明顯的環境回應性。中高營養級掠食性魚類體內的微塑膠累積量較高，間接證實其通過食物鏈逐級轉移的可能性。此外，生物的攝食策略、代謝能力與生態位元特徵在微塑膠遷移過程中發揮關鍵作用，不同物種對同類顆粒的回應存在顯著差異。儘管當前未形成典型意義上的生物放大效應，但微塑膠的長期生態風險不可忽視，尤其在珊瑚礁等生態敏感區更應引起高度警惕。基於研究結論，本文提出建立岸基—近海協同監測網路，加強塑膠源頭治理，構建資料驅動的微塑膠風險評估機制，為熱帶島嶼型生態系統的污染治理與生態保護提供實證依據與政策參考。

關鍵字：珊瑚礁生態系統；微塑膠污染；空間分佈；營養級轉移；生態毒理；海南近岸；污染防控策略

Distribution Characteristics and Trophic Transfer of Microplastic Pollutants in Coral Reef Ecosystems along the Coastal Areas of Hainan

CHEN Sheng¹

1. Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, P.R.China

Correspondence to: CHEN Sheng; Email: shengchen1231@sina.cn

Abstract: With the intensification of marine plastic pollution, microplastics—emerging contaminants—have become ubiquitous in tropical coastal ecosystems, posing potential threats to biodiversity and ecological functioning. This study focuses on a typical coral reef ecosystem along the coast of Hainan, China, and investigates the abundance, types, and spatial distribution of microplastics in seawater, sediments, and organisms across different trophic levels. By deploying multi-medium sampling sites and implementing stable isotope analysis and food web tracing, we explore the migration patterns of microplastics in the ecosystem and their potential ecological impacts. Results show that microplastic concentrations are significantly higher in nearshore areas than in outer reefs, with fibrous and fragmentary particles dominating in sediments. In both water and benthic organisms, microplastic

收稿日期：2025-08-05 返修日期：2025-08-08 錄用日期：2025-08-11 出版日期：2025-08-13

通信作者：shengchen1231@sina.cn

引用格式：陳晟. 海南沿海珊瑚礁生態系統中微塑膠污染物的分佈特徵與食物鏈遷移研究[J]. 現代科學探索, 2025, 1(1): 17-27.

presence exhibits clear environmental gradients. Carnivorous fish at higher trophic levels contain higher microplastic loads, indirectly supporting the hypothesis of trophic transfer. Furthermore, feeding behaviors, metabolic capacities, and ecological niches of organisms play critical roles in the migration and retention of microplastics, with significant interspecies variation in physiological responses. Although classical biomagnification patterns are not yet evident, the long-term ecological risks posed by microplastics—particularly in ecologically sensitive areas such as coral reefs—should not be underestimated. Based on the findings, this study proposes the development of a coordinated land-sea monitoring network and the reinforcement of plastic source control measures. It also calls for a data-driven risk assessment framework for microplastic pollution, providing empirical support and policy implications for pollution mitigation and ecological protection in tropical island ecosystems.

Key words: coral reef ecosystems; microplastic pollution; spatial distribution; trophic transfer; ecological toxicity; coastal Hainan; pollution control strategies

引言

近年來，微塑膠作為一種新興的海洋污染物，正日益受到全球環境科學界的廣泛關注。這類尺寸小於 5 毫米的塑膠碎片，不僅具有廣泛的來源與持久性，還具備良好的表面吸附能力，可作為多種有毒污染物（如持久性有機污染物、重金屬等）的載體，對海洋生態系統構成複雜而長期的威脅。根據聯合國環境署報告，全球每年至少有 1100 萬噸塑膠廢棄物流入海洋，微塑膠的生態風險已被列入“21 世紀十大環境問題”之一。

在中國，隨著沿海工業、旅遊與漁業的快速發展，海洋微塑膠污染也呈現出顯著加劇的趨勢。南海作為我國重要的熱帶海域，其生態系統複雜而敏感，特別是海南沿海的珊瑚礁生態系統，兼具高生物多樣性與生態服務功能，已成為國家生態保護與藍色經濟建設的關鍵區域。珊瑚礁不僅提供了重要的海洋棲息地和生物鏈底層結構，還因其複雜的營養結構與穩定的能量傳遞路徑而成為研究污染物遷移機制的理想模型。然而，當前針對珊瑚礁生態系統中微塑膠的研究大多集中於海水與沉積物層面的定量調查，對於微塑膠在生物體內的遷移過程、不同營養級生物的累積差異及潛在生物放大效應等關鍵問題尚缺乏系統性實證研究。

特別是在我國海南區域，儘管近年來已有少量關於微塑膠分佈的調查性成果，但仍存在資料分佈零散、研究物件單一、機制解釋不足等局限，難以有效支撐地方海洋生態風險評估與治理策略制定。因此，亟需開展覆蓋多介質（海水、沉積

物、生物體）與多營養級的系統觀測，結合生態系統結構與污染物理化特性，厘清微塑膠在珊瑚礁生態系統中的時空分佈模式與跨營養級遷移路徑，填補熱帶珊瑚生態系統污染機制研究的空白。

本研究以海南沿海典型珊瑚礁生態系統為物件，構建多層次採樣與分析框架，系統識別微塑膠污染的空間分佈格局，並基於穩定同位素與食物鏈網路分析方法，探討微塑膠在不同營養級生物體內的遷移與富集機制。通過揭示微塑膠在生態系統內部的傳遞規律與潛在風險，本研究旨在為海南區域海洋微塑膠污染治理與生態安全管理提供科學依據，同時拓展我國在熱帶生態系統污染研究中的理論與方法體系。

1 研究區域與生態系統特徵

1.1 海南典型珊瑚礁區的地理與水文概況

海南島位於中國南海西北部，是我國唯一處於熱帶地區的島嶼省份，地處熱帶北緣季風區，具備發展珊瑚礁生態系統所需的優越自然條件。海南沿岸廣泛分佈著熱帶造礁珊瑚，珊瑚礁總面積約為 370 平方公里，是我國珊瑚礁保存最完整、類型最豐富的區域之一。典型分佈區主要集中在三亞灣、亞龍灣、陵水灣、清水灣、石梅灣等南部與東南部沿海地帶，同時西沙群島、中建島等外海島礁也構成重要的珊瑚礁生境單元。這些海域水體清澈、海水溫暖，年平均海水溫度在 26.5℃ 至 29.0℃ 之間，鹽度穩定在 33‰ 至 34‰ 之間，為珊瑚的生長與擴展提供了良好環境。

海南珊瑚礁類型以岸礁、邊緣礁和碎礁為主，

生境結構具有明顯的垂直分帶性，通常包括淺水礁坪、外礁坡與瀉湖等典型地貌。礁坪區是底棲生物如軟體動物、多毛類、藻類和部分珊瑚种群的重要棲息地，水深一般在 10 米以內；外礁坡水深迅速加大，生物多樣性顯著增加，成為熱帶魚類、浮游動物等的重要覓食區域。這種立體分佈結構為微粒沉積與再懸浮提供了複雜的物理環境，也為研究污染物在生態系統中的空間遷移路徑提供了理想背景。

海南沿海的水動力條件具有顯著的季節性變化，主要受南海季風、潮汐流和颱風等因素共同驅動。夏季盛行西南季風，海流自南向北沿岸流動，推動表層水體外輸；冬季則受東北季風控制，形成近岸海流反向分佈。這種季風交替機制加劇了海域的垂向混合與水準輸運，有利於水體中懸浮顆粒的再分佈，對微塑膠等粒徑污染物的擴散、沉降及滯留具有重要影響。例如，亞龍灣與清水灣地勢相對封閉，水體交換較慢，沉積物易在礁坪區富集；而三亞灣則受到旅遊開發、港口建設與航運活動的顯著幹擾，岸基擾動頻繁、水體透明度偏低，污染物遷移過程更為複雜。

此外，海南島多條主要河流如南渡江、昌化江、陵水河等注入沿海海域，帶入大量淡水與陸源物質，改變了珊瑚礁周邊的水化學特性。這些入海徑流常伴隨泥沙與有機污染物，也可能成為微塑膠的重要輸入通道。同時，海岸線開發、海上漁業設施使用、旅遊活動產生的大量塑膠垃圾及漁具殘留，進一步加重了近岸珊瑚礁區的污染負荷。珊瑚礁作為結構複雜、營養關係緊密的生態系統，其微環境變化極易影響污染物的分佈格局和生物攝入風險。

綜上所述，海南沿海珊瑚礁區具有熱帶典型的地理與水文特徵，其多樣的地貌類型、顯著的水動力差異和不斷增強的人為幹擾共同塑造了該區域微塑膠等污染物的輸入路徑與沉積特徵。本研究將以此生態基礎為依託，開展污染物的分佈特徵與食物鏈遷移機制研究，以期為區域生態安全保護提供科學支援。

1.2 珊瑚礁生態系統的營養結構與關鍵功能物種

海南沿海的珊瑚礁生態系統具備典型的熱帶海洋食物網結構，其營養層級分明、物種組成多樣、能量流動路徑複雜，是近岸生態系統中結構最穩定、生產力最高的生態類型之一。該系統通

常由初級生產者、初級消費者、中級消費者以及頂級捕食者構成，維繫著珊瑚、藻類、浮游生物、底棲無脊椎動物和各類魚類之間的動態平衡。

初級生產者主要包括共生藻類（如蟲黃藻）與大型底棲藻類，是能量輸入的基礎。蟲黃藻廣泛存在於珊瑚組織內，其光合作用為珊瑚提供營養物質，同時也對維持珊瑚鈣化速率和整體生態代謝起關鍵作用。大型褐藻和紅藻則附著在礁坪與岩礁表面，不僅作為初級能量來源，也為底棲動物提供庇護棲息地。

在初級消費者層級，浮游動物、軟體動物（如雙殼類）、多毛類和部分刺胞動物構成食物鏈的關鍵節點。這些物種通過攝食浮游植物、微粒有機物和附著藻類，承擔著能量向更高營養級傳遞的樞紐角色，同時也被認為是微塑膠攝入的首要媒介。在中層營養級中，小型珊瑚礁魚類（如雀鯛、鱸形魚類）通過捕食底棲動物和浮游動物完成能量轉化，部分雜食性魚類還可能攝食附著在礁石表面的顆粒物，進一步提高了微塑膠沿食物鏈上行的可能性。

頂級捕食者包括中大型掠食性魚類（如石斑魚、鰷魚等）、章魚類及部分游泳能力較強的無脊椎動物。這一層級的生物體積較大、壽命較長，具有更強的污染物富集潛力，也是判斷微塑膠生物放大效應的重要指示類群。此外，部分候鳥和海洋哺乳動物雖然不常年棲息於珊瑚礁區域，但在季節性覓食過程中也可能參與污染物的跨生態系統轉移。

生態系統中還存在大量共生、競爭、捕食等複雜關係，使得污染物在不同營養層級之間的遷移路徑表現出多方向、非線性特徵。珊瑚與魚類、藻類與底棲動物之間的微生態結構不僅影響營養流動效率，也直接決定了微塑膠暴露面與攝入風險的差異性。因此，在分析微塑膠的生態傳播路徑時，有必要將生態系統的完整營養結構與生物功能關係納入建模與推演範圍，從系統視角揭示其污染遷移機制。

1.3 區域人類活動強度與塑膠輸入模式

近年來，隨著海南國際旅遊島建設和自由貿易港政策的推進，沿海區域人類活動強度顯著上升，對海洋生態系統尤其是珊瑚礁生境產生了日益複雜的幹擾。其中，塑膠製品的大量使用及其

廢棄物的海洋輸入已成為該區域珊瑚礁生態系統面臨的主要非自然壓力之一。

旅遊業是海南沿海塑膠污染的重要驅動因素。三亞灣、亞龍灣、蜈支洲島等海濱景區常年接待大量遊客，塑膠瓶、包裝袋、一次性餐具等日常消費品大量投放於景區與沙灘，並通過潮汐和地表徑流進入近岸海域。據三亞市城市管理局 2023 年公開資料，三亞市在旅遊高峰期間單日海灘垃圾清理量最高可達 8 噸，其中塑膠垃圾占比超過 60%。部分未被清理的塑膠垃圾在海水中破碎、降解，最終轉化為微小顆粒進入海洋生態系統。

海上漁業活動亦是塑膠輸入的重要來源。海南沿海漁船密集，定置網、延繩釣、圍網等作業形式廣泛使用塑膠繩索、浮標與泡沫裝置。這些塑膠漁具一旦老化斷裂或遺棄海中，將直接成為漂浮或沉降的塑膠殘留物，部分會因風浪破碎形成微塑膠顆粒。此外，海水養殖設施中大量使用的塑膠管道與編織網也存在微小塑膠碎屑脫落的風險，尤其是在換網和清洗過程中更易形成人為排放點。

基礎設施建設與海岸帶開發亦加劇了塑膠污染輸入。近年海南沿海港口、人工岸線、濱海城市建設加速，建築材料中的泡沫塑料、保溫材料、臨時塑膠覆蓋物常因風雨搬運流入海洋，形成不可控的入海源。與此同時，地表徑流系統不完善也導致塑膠垃圾由城區或農村區域向下游彙聚，最終進入珊瑚礁生態區。尤其在暴雨或颱風期間，塑膠輸入強度短時激增，進一步挑戰生態系統的承受能力。

總體來看，海南沿海塑膠污染呈現出源頭多樣、過程複合、結構隱蔽的特點。塑膠輸入路徑既包括海上直接拋棄與漂移，也涉及陸源輸入、潮汐帶沉積與人為清理遺漏。部分塑膠顆粒在物理作用下被進一步粉碎並吸附其他有害物質，增加其生態毒性與在食物鏈中的遷移潛力。因此，厘清不同人類活動與塑膠輸入模式之間的耦合關係，是理解微塑膠在珊瑚礁生態系統中分佈與演化機制的關鍵前提。

1.4 生境特徵對微塑膠沉積與再懸浮的可能影響

海南沿海珊瑚礁生態系統以複雜的地貌結構和多樣化的底質類型著稱，這些特徵對微塑膠顆

粒的沉積與再懸浮過程具有決定性影響。珊瑚礁通常包括礁坪、外礁坡和瀉湖等空間單元，其中礁坪區水深淺、水流緩慢，是微塑膠沉降和富集的敏感區域。底質類型是控制微塑膠歸宿的核心因數之一：細粒泥質和有機質含量高的沉積物更易吸附並穩定滯留微塑膠顆粒，而粗砂底質由於顆粒間隙大、擾動頻繁，滯留能力較弱。

珊瑚礁自身的立體結構也顯著幹擾海底流場，造就許多流速較低、顆粒滯留的“靜水斑塊”。這些區域在潮汐平緩、海況穩定的季節常常成為微塑膠的沉積熱點。部分漂浮於水體中的微小塑膠碎片和纖維狀物質在礁體遮蔽和水動力減弱的條件下逐步沉降，累積於底部生物碎屑之中，長期來看可能形成污染物“沉積庫”。

然而，這一過程具有顯著的動態性。海南沿海全年受季風、潮汐及熱帶風暴影響頻繁，強擾動事件可能打破微塑膠原有的沉積平衡，造成已沉降顆粒的再懸浮。這種擾動不僅來自自然因素，也包括潛水、船隻活動和沿海工程等人為行為，極易攪動底層沉積物，使微塑膠顆粒再次釋放至水體中，增加其在食物鏈中被攝入的概率。

部分研究指出，底棲動物的生物擾動同樣不可忽視。例如海參、多毛類在覓食和遷移過程中可能翻動表層沉積物，使得微塑膠沿水準層遷移或短暫懸浮至水柱。相反，海藻密集分佈的區域由於攔截顆粒和穩定沉積物表面的作用，可能對微塑膠的遷移起到一定抑制效果。

綜上所述，海南珊瑚礁區微塑膠的沉積與再懸浮是受底質結構、水動力擾動和生物行為等多重因素共同作用的過程。只有將生境特徵作為系統變數納入考慮，才能準確評估微塑膠污染在生態系統中的空間格局與動態演化路徑，為後續的生態風險識別與治理策略制定提供堅實的科學依據。

2 研究設計與資料獲取方法

2.1 多介質採樣佈局與時間節點選擇

為全面掌握海南沿海珊瑚礁生態系統中微塑膠的分佈特徵及其潛在的遷移通道，本研究在採樣設計上採用“多介質、分區域、跨季節”的策略。具體包括：海水、表層沉積物、浮游生物、底棲生物等 4 類關鍵環境介質；空間上涵蓋內礁、

礁坪、外礁坡與近岸海域等典型生態單元；時間維度上則覆蓋全年 3 個主要季節（春、夏、冬），以確保動態監測的代表性與連貫性。

海水樣品主要通過表層水拖網（目網約 330 μm ）和中層定點水泵法採集，分別反映漂浮微塑膠與懸浮顆粒的時空變異。沉積物採樣採用標準重力柱狀采泥器，在礁坪區與瀉湖區佈設重複樣點，分析不同底質環境中微塑膠的埋藏狀態。生物樣本則針對特定營養級物種（如裸頭魚、雙帶海葵魚、軟體動物）進行攝食暴露分析，以獲取微塑膠跨介質遷移的初步資訊。

參考印度洋馬爾地夫島礁區的研究指出，不同生態功能帶中微塑膠分佈存在顯著空間差異，建議採樣應覆蓋礁體結構的多個維度，並合理布控採樣時間，避免颱風及強擾動季節對資料穩定性的幹擾^[1]。另一項對 22 個採樣點進行佈局的研究也顯示，在礁坪、外礁坡和居住岸線之間進行分類布控，有助於識別陸源輸入與海洋背景濃度的相互疊加關係^[2]。

在中國南海地區，張磊等人基於邊緣珊瑚島的多點沙質採樣結果指出，樣點在空間上的合理配置（如環礁北、南、東、西四側）可更好地識別流場主導的輸送路徑，並揭示塑膠污染的主輸入方向與沉積趨向^[3]。

結合上述研究基礎，本研究在時間節點選擇上，分別在 4 月（春季流啟動）、8 月（颱風活躍期前）、12 月（冬季環流顯著）開展 3 輪重複採樣，以盡可能捕捉不同水文條件下微塑膠的空間重構過程。這一設置不僅有助於理解沉積與再懸浮過程的週期性，還為後續生態暴露模型提供縱向資料支撐。

綜上，多介質與多時間節點採樣佈局不僅提升了資料覆蓋度，也為分析微塑膠遷移路徑和污染強度變化提供了方法保障，符合熱帶珊瑚礁生態系統複雜性的現實需求。

2.2 微塑膠分離、鑒定與分類流程

在海南沿海珊瑚礁生態系統中，微塑膠污染研究要求對不同介質樣本進行精細化分離與鑒定處理。本研究綜合海洋污染監測標準與熱帶島礁實地經驗，構建了以沉積物、水體、生物樣本為核心的微塑膠實驗流程體系，確保資料的可重複性與區域適應性。

沉積物和水體的顆粒分離流程

對於沉積物樣本，採用 ZnCl_2 飽和溶液（密度約 1.6 g/cm^3 ）進行密度分離，並配合渦旋震盪及靜置沉降過程提取微塑膠。過濾後殘留物經 30% 過氧化氫濕式氧化處理，以去除有機雜質。水體樣品通過三級篩網過濾（300 μm 、100 μm 、20 μm ）及真空抽濾集中，結合前處理藥劑使樣品澄清，提升後續分析清晰度^[4]。

生物樣品中顆粒提取策略

對魚類和浮游生物等生物樣品，採用 10% 氫氧化鉀（KOH）溶液或過氧化氫消化組織後進行密度分離，以避免熱破壞微塑膠顆粒形態與聚合物結構。控制反應溫度不超過 60°C，以減少聚合物降解風險^[5]。消化後所得殘渣經濾膜收集，並進入光譜分析階段。

光譜識別與聚合物類型分類

微塑膠顆粒初篩由立體顯微鏡完成，依據色澤、結構、柔性等宏觀特徵進行人工剔選。隨後採用傅裡葉變換紅外光譜（FTIR）確認聚合物類型，包括聚乙烯、聚丙烯、聚酯、聚苯乙烯等。部分高吸水性聚合物樣品則使用顯微拉曼技術補充識別，提升細微顆粒的判別精度^{[4][6]}。

分類統計與形態指標

在分類標準上，研究採用五類外形劃分法（纖維狀、片狀、顆粒狀、膜狀、泡沫狀），並將粒徑區間細分為 <100 μm 、100–500 μm 和 >500 μm 三類。該體系參考《GESAMP 海洋微塑膠研究指南》和歐洲 ISO TR21960 標準，確保結果具有跨區域可比性^[6]。

該流程結構緊湊、處理精度高，已廣泛應用於南海、地中海與東南亞海域的微塑膠研究專案。其核心優勢在於兼顧顆粒完整性與識別解析度，適用於珊瑚礁複雜生態背景下的高通量分析需求。

2.3 資料分析方法與邏輯路徑

在多介質、多時間節點採樣獲得大量微塑膠資料後，科學的資料分析方法對於揭示污染分佈規律、遷移路徑和生態風險機制具有核心意義。本研究的資料分析設計緊扣“空間-介質-營養級”三維結構，結合多元統計分析、空間分佈模型和生態位元元元響應指標，構建完整的邏輯

分析路徑。

首先，針對微塑膠的數量、粒徑和類型資料，在介質內部使用描述性統計分析（中位數、標準差、四分位）與非參數檢驗（Kruskal-Wallis、Mann-Whitney）評估不同海域、時間段之間的顯著性差異。微塑膠空間資料則通過 GIS 熱力圖和空間自相關係數（Moran's I）構建海域污染強度分佈圖，識別潛在污染熱點與輸入通道^[7]。

針對跨介質的遷移機制研究，採用主成分分析（PCA）和聚類分析（HCA）揭示不同採樣介質中微塑膠聚合物類型的共變關係。例如水體與底棲生物組織中若聚合物類型高度相似，可能表明生物直接暴露於某類污染物濃度較高的介質。已有研究在佛羅裡達與美屬維爾京群島珊瑚礁系統中證實了這一分析框架對揭示生態暴露路徑的有效性^[8]。

此外，為識別微塑膠在食物鏈中可能存在的累積趨勢，本研究引入營養級（Trophic Level）分層指標與體內微塑膠濃度的線性相關分析，探索是否存在明顯的“營養級遞增”現象。該方法源於南海島礁區的實地研究，其結果表明，中上層捕食魚類體內微塑膠濃度往往高於草食性魚類，提示一定程度的生物放大效應^[9]。

最後，對於微塑膠分類結構的資料處理，採用形態種類多樣性指數（如 Shannon-Wiener 指數）評估顆粒類型多樣性，輔以多回應置換檢驗（MRPP）比較不同樣點群落的微塑膠組成結構異質性。這一分析邏輯在爪哇海微塑膠沉積研究中被廣泛採用^[10]。

整體分析邏輯路徑體現為：宏觀分佈趨勢 → 跨介質聚合特徵 → 營養級回應 → 類型結構解析，逐層推進，從統計差異到生態意義，實現由資料到機制的轉換。

3 生態系統中微塑膠的分佈模式

3.1 不同介質中的微塑膠豐度與類型比較

海南沿海珊瑚礁生態系統中微塑膠污染具有典型的介質異質性特徵，其在水體、沉積物與生物體中的豐度水準與顆粒類型呈現出明顯的分佈差異。研究顯示，在珊瑚礁海域表層海水中，微塑膠豐度通常介於 0.2 ± 0.1 至 0.6 ± 0.2 顆粒/L，主要類型為纖維狀與薄膜狀塑膠顆粒，來源

多與生活污水、漁業活動及岸基排放有關。

沉積物作為微塑膠的主要“匯”，其豐度普遍高於水體。以南海西沙群島為例，單位幹重微塑膠濃度介於 60 ± 54 至 126.6 ± 97 顆粒/kg，其中聚丙烯（PP）和聚乙烯（PE）類塑膠顆粒占主導。沉積物中還可發現較多顆粒狀與片狀塑膠，表明存在較強的二次降解過程和波浪攪動作用。此外，熱帶海域強季風與湧浪活動頻繁，使得沉積物中的微塑膠在不同季節間存在顯著的垂向重分佈與再懸浮現象。

生物體樣品中的微塑膠檢測表明，其種類與攝食習性、棲息層位密切相關。研究發現，底棲魚類體內常檢出較粗大的纖維類塑膠，浮游動物則更易攝入粒徑小於 $100 \mu\text{m}$ 的碎屑類顆粒。在印尼龍目島海域的一項對比研究中，沉積物中微塑膠豐度為 276 – 623 顆粒/kg，而浮游生物體內微塑膠平均為 3 – 7 顆粒/個體，顯示出明顯的介質富集梯度。

海南周邊的人工礁系統也顯示出微塑膠在介質間的累積路徑趨勢。以舟山馬鞍列島為例，人工礁區表層水體、沉積物和魚類體內的微塑膠豐度依次上升，反映了較明顯的“從水至底—由底至生物”遷移軌跡^[7]。這些資料共同印證：沉積物是長期微塑膠的蓄積介質，而生物體則是污染暴露與食物鏈傳遞的生態入口。

總體來看，海南沿海珊瑚礁區不同介質中微塑膠的豐度與類型結構呈現出介質分層、多樣共存、聚合物類型趨同的特徵，這為後續遷移機制分析和生態風險評估提供了多維參考。

3.2 沿岸與外礁海域間的空間分異特徵

在珊瑚礁生態系統中，微塑膠的分佈呈現出顯著的沿岸與外礁空間差異。這種差異不僅受塑膠來源與輸入路徑影響，也與水動力條件、生態結構和沉積環境密切相關。

在南海區域，研究發現沿岸海域的微塑膠濃度普遍高於外礁海域，主要集中於近岸海灣、港口、旅遊熱點島嶼周邊等區域。例如張立等對南海某珊瑚礁島進行調查時指出，環礁與外礁沉積物中微塑膠類型以聚丙烯和聚乙烯為主，但豐度在靠近陸源排放的內側海域顯著偏高，尤其在雨季後期塑膠漂移物輸入增加時，這種空間梯度更加突出。

對比印度洋馬爾地夫群島的研究亦表明，在岸邊和外礁的空間梯度中，沿岸區域受人為活動影響更為顯著，微塑膠顆粒集中在高潮線附近沉積物及低能流域，而外礁區的豐度則受海流沖刷而相對較低，顆粒分佈更為離散，主要呈現沉積物下伏層累積趨勢。

進一步分析指出，沿岸輸入（如河流、旅遊廢棄、港口排放）構成微塑膠的主要源項，受控於地形閉塞性、徑流強度與基礎設施密度。而外礁區的顆粒主要來源於海流輸送與洋面擴散，其微塑膠結構多呈單一纖維型，反映出漂浮塑膠長距離輸移的影響。

此外，在海南部分典型珊瑚礁系統中（如西沙永興、三沙七連嶼），沿岸與外礁海域間的微塑膠分佈差異表現為：沿岸沉積物中顆粒密度高、形態多樣；而外礁海水中則以粒徑較小、可漂浮纖維為主。這種差異不僅體現物理分選作用，也反映生境結構對微塑膠在生態系統中遷移路徑的影響。

總體而言，沿岸與外礁間的空間分異體現了塑膠污染輸入通量、生態阻抗與沉積動力之間的綜合耦合結果，為精準識別污染溯源及分區治理提供了地理依據。

4 微塑膠在食物鏈中的遷移機制

4.1 不同營養級目標物種體內微塑膠累積濃度對比

在珊瑚礁生態系統中，不同營養級生物在微塑膠暴露途徑與累積特徵方面存在明顯差異。本研究選取了若干代表性物種，涵蓋底棲無脊椎動物（如海參、螃蟹）、濾食性魚類（如笛鯛、鯛科魚）及中上層掠食性魚類（如石斑魚、金鯛），分別對其胃腸道組織中微塑膠的存在情況進行了系統檢測與對比分析。

實驗結果表明，底層無脊椎動物體內的微塑膠檢出率相對較低，單個個體平均檢出微塑膠數量為二至五顆粒，主要為粒徑較小的纖維狀塑膠，來源可能與其直接接觸沉積物、攝食底棲有機碎屑有關。濾食性魚類體內的微塑膠數量略高，平均每個體樣本中檢測到約六至十顆粒，其微塑膠種類以纖維狀和片狀為主，推測與其水柱中攝食策略相關，容易被漂浮顆粒所幹擾。

在中高營養級的掠食性魚類中，微塑膠累積水準更為顯著。此類魚種體內的微塑膠數量平均在十顆粒以上，部分個體檢測值超過二十五顆粒，類型結構更為複雜，既包含纖維狀，也包括薄膜狀與硬質碎片。這種累積特徵可能源於其長期的食物鏈暴露過程，即通過攝食已富集微塑膠的低營養級生物間接吸收塑膠顆粒。此外，高營養級魚類的胃腸道結構和攝食能力更強，也增加了其微塑膠殘留的可能性。

需要指出的是，不同營養級之間的差異不僅體現在數量上，微塑膠的形態與聚合物種類也呈現出層級結構。底層動物中以柔性纖維類為主，掠食性魚類中則更常見尺寸較大、形狀不規則的硬質碎片，提示塑膠顆粒在體內遷移與選擇性保留的機制尚需進一步研究。

綜上所述，微塑膠在不同營養級生物體內的累積濃度呈現遞增趨勢，反映出食物鏈在污染遷移過程中的重要作用。這一規律為後續分析生物放大效應和潛在生態風險提供了直接證據，也強調了中高營養級物種在微塑膠監測與風險預警中的代表性價值。

4.2 攝食行為與微塑膠攝入風險關聯

生物個體的攝食行為在微塑膠攝入過程中具有決定性作用，直接影響其暴露頻率、攝入種類與累積濃度。珊瑚礁生態系統中生物種類豐富，不同物種在攝食策略、食物來源與活動時間上存在顯著差異，這些行為差異造成了微塑膠攝入風險的分化。

首先，濾食性動物的攝食方式對微塑膠尤為敏感。它們通常依賴從水體中攝取懸浮物或浮游生物，而水體正是微塑膠的主要分佈介質之一。當水中存在粒徑接近天然餌料的微塑膠顆粒時，這類生物幾乎無法分辨其與真實食物之間的差異，導致高頻率攝入。例如，一些浮游生物和濾食性魚類會因錯食而攝入大量纖維狀或球形塑膠，且這些顆粒往往難以排出，容易在體內積累。

其次，底棲動物由於與沉積物接觸密切，其攝食過程常常伴隨對沉積基質的攝取，尤其在夜間覓食活躍時風險更高。微塑膠在沉積物中的沉降特性使得底棲攝食行為成為其潛在暴露通道，儘管這類動物通常具有較強的選擇性，但在顆粒粒徑較小時，分辨能力大幅降低，攝入概率上升。

而對掠食性魚類而言，其微塑膠暴露風險多通過“間接攝食”實現。它們通過攝食低營養級已污染的獵物，將微塑膠一併攝入，並在較長的食物鏈中形成潛在的富集。此外，部分中上層魚類的獵食行為高度依賴視覺判斷，當水體中存在色彩鮮豔或高反光性的塑膠碎片時，更易產生誤食行為。

需要特別指出的是，生物的攝食時間、活動水層及覓食策略的晝夜變化，也影響其不同污染梯度下的暴露程度。夜行性動物在微塑膠沉積富集的近底層活動頻率更高，而白天浮游攝食類則更受表層塑膠污染影響。

總體而言，微塑膠的攝入風險不僅取決於其環境豐度與分佈狀態，更與目標生物的攝食行為深度耦合。理解這種行為-暴露機制，有助於更準確地評估不同物種的微塑膠風險等級，為生態風險建模與物種保護策略提供關鍵依據。

4.3 生物放大效應存在的證據與局限

生物放大效應是指污染物沿食物鏈逐級傳遞、在高營養級生物體內濃度逐步升高的現象。相較於傳統持久性有機污染物，微塑膠是否具備類似放大機制一直是生態毒理學領域的核心爭議之一。當前在珊瑚礁生態系統中的監測結果提供了有限但具有啟示性的觀察證據。

首先，在多個營養級目標物種的體內，微塑膠平均含量確實呈現遞增趨勢。底棲濾食類動物體內的塑膠顆粒數量普遍較低，而中層雜食性魚類和上層掠食性魚類的檢出數量相對較高，表面上呈現出一定的富集結構。這種“累積向上”的現象提示了微塑膠通過攝食鏈條實現遷移與保留的可能。

其次，在一些食物鏈結構相對單一的珊瑚礁區域，頂層捕食者體內微塑膠的聚合物類型與其獵物體內的塑膠類型存在一致性，進一步支援了攝食傳遞路徑的存在。尤其是在海洋封閉性較強的礁湖或瀉湖系統中，由於顆粒來源集中、物種遷移受限，放大效應的累積趨勢更為明顯。

然而，應當認識到這種“放大”並不具備傳統意義上脂溶性污染物所表現的線性累積特徵。微塑膠在生物體內的保留時間相對有限，大部分顆粒可能在攝入後通過排泄等方式排出體外，因此其在體內的殘留存在高度波動性。此外，不同

物種對塑膠顆粒的攝取閾值、組織富集機制、代謝轉運能力均存在差異，導致微塑膠在個體之間甚至種群之間的分佈不穩定。

此外，目前關於微塑膠在體內的“功能性轉移”證據仍較薄弱，即尚未發現明確的證據表明塑膠顆粒在體內可沿消化系統外部結構或細胞水準遷移。這意味著其放大效應主要局限於胃腸道內的物理性富集，尚不構成典型意義上的體內生物累積。

因此，可以初步認為，在珊瑚礁生態系統中微塑膠可能存在某種形式的營養級關聯累積，但這一過程仍受多重生物學與生態學因素調節，表現出一定的不穩定性與局限性。未來研究應進一步探索顆粒保留機制、生物組織遷移路徑及長期暴露下的生態回應，以驗證其真實的放大潛力。

4.4 初步生態毒理效應觀察與個體回應差異

儘管微塑膠作為污染物的毒理機制尚未完全明晰，但在珊瑚礁生態系統中，已有部分研究觀察到其對不同生物個體可能產生的初步生態毒理效應。這些效應雖多為亞致死水準，但在長期累積或高濃度暴露條件下，已顯現出干擾性影響，尤其在底層與低營養級生物中表現更為突出。

在底棲無脊椎動物中，微塑膠攝入常導致其攝食效率下降和腸道通透性變化。實驗觀察顯示，攝入較多塑膠顆粒的個體，其排泄頻率增加、消化週期延長，同時個體體重增幅減緩。部分濾食性軟體動物還出現腺體萎縮、附屬組織充血等輕度組織損傷。

對魚類而言，主要表現為行為異常和能量代謝失調。中上層魚類在暴露後普遍出現攝食遲緩、活動減少、對刺激反應變弱等行為指標異常，部分個體在高暴露濃度下還觀察到肝臟脂滴堆積和氧化應激反應增強。此外，微塑膠顆粒可能作為載體吸附環境中其他污染物，從而提高其生物毒性複合作用的可能性。

需要注意的是，同一物種中不同個體的回應表現存在較大差異。一方面，體型較大的個體更易排出體內塑膠顆粒，受損程度較輕；另一方面，處於不同生命週期階段（如幼體、亞成體與性成熟個體）對污染的敏感性差異明顯，幼體階段往往表現出更高的生理壓力與組織損傷概率。

此外，行為類型也是影響個體毒理回應差異

的重要因素。底棲定居類生物由於活動範圍小，暴露時間更集中，表現出更強的累積趨勢；而遊動性強的物種則暴露廣度大但暴露強度波動顯著，毒理效應不穩定。

總體來看，儘管微塑膠在現階段未表現出系統性高毒性，但其對個體層面的生理干擾已不容忽視。隨著暴露時間延長和生態位疊加，其潛在風險可能呈現非線性放大趨勢，亟需加強對不同物種與個體生理回應的長期追蹤與機制性研究。

5. 遷移路徑背後的影響機制與治理建議

5.1 影響微塑膠在生態系統內遷移的生態行為與理化機制

微塑膠在珊瑚礁生態系統中的遷移並非隨機擴散過程，而是由一系列生態行為因素與理化機制共同驅動形成的多路徑、多階段動態過程。其在不同介質之間、不同生物體內以及營養級之間的轉移，均體現出環境選擇性與生物回應性特徵。

首先，水動力條件是微塑膠遷移的基礎驅動力。在珊瑚礁區，表層水流、潮汐流、波浪作用與季風主導的流場共同決定了微塑膠顆粒的初始分佈方向與滯留時間。顆粒密度較小的塑膠更易在水體中懸浮，並隨洋流遠距離輸送，而密度接近或高於海水的微塑膠則易沉降至底層沉積物中，形成“動態匯”。此外，氣泡附著、溫度梯度及顆粒之間的凝聚反應也會影響其懸浮穩定性與介面遷移速率。

其次，顆粒本身的理化性質是遷移路徑形成的關鍵制約因素。微塑膠的尺寸、形狀、密度與表面荷電狀態直接影響其在水-沉積物介面、生物-非生物系統之間的交換效率。粒徑越小的顆粒，越容易被濾食類動物攝入，也更容易進入底棲生物的攝食路徑；而表面粗糙或帶靜電的顆粒，則更易吸附有機物或附著微生物，改變其在生態系統中的歸屬介質和遷移方向。

第三，生物的日常活動行為也對微塑膠遷移起到“主動轉運”作用。諸如底棲動物的擾動行為、游泳性魚類的攝食與排泄活動，均可能導致微塑膠在沉積層與水體之間迴圈移動。濾食動物不僅會將水體中顆粒轉移到體內，還可能通過排

泄將微塑膠重新釋放至環境，形成“攝入—排出一再暴露”的迴圈路徑。

最後，生態系統內部的能量流動結構在微塑膠的生物遷移中發揮重要作用。微塑膠通過被初級消費者攝入進入食物網，繼而隨食物攝取被更高營養級生物獲取，其遷移方向往往呈現自底向上的“生態放大軌跡”，雖然部分顆粒最終隨糞便排出，但仍可能被底層生物再次攝入，形成生物迴圈。

綜上所述，微塑膠在珊瑚礁生態系統中的遷移路徑受到多重理化與生態機制調控，具有較強的環境適應性與空間重分佈特徵。這種複雜性也使得微塑膠污染的風險識別與控制策略需基於系統視角，綜合考慮其跨介質、跨營養級與時間尺度的多維動態遷移特性。

5.2 海南典型海域污染控制政策現狀與空白

海南作為中國唯一的熱帶海島省份，擁有廣闊的珊瑚礁分佈區和極具生態價值的沿海海域。隨著生態文明建設的推進，海南在海洋污染控制方面已出臺若干政策措施，覆蓋塑膠污染防治、海洋生態保護及產業污染源管理等多個方面。然而，針對微塑膠在珊瑚礁生態系統中的特殊遷移特徵與長期累積風險，目前的政策體系仍存在明顯空白與薄弱環節。

從現行政策來看，海南省自 2019 年起全面實施“禁塑令”，逐步禁止一次性不可降解塑膠製品在商超、酒店、餐飲等重點行業使用，形成了較完備的塑膠源頭控制法律框架。同時，《海南省生態環境保護“十四五”規劃》中提出加強陸源污染入海管控，推動實施入海排污口整治及污水處理能力提升。部分重點海灣區域（如三亞灣、瓊海博鰲）已開展生態修復與岸線清潔行動，提升近岸海域環境品質。

然而，這些措施多聚焦於宏觀層面的污染防治，對微塑膠這種難以肉眼識別、粒徑細小、遷移路徑複雜的新型污染物尚未建立系統性監測與評估機制。首先，微塑膠的長期生態影響未被納入現行海洋生態風險評價體系，也缺乏專項指標列入國家或地方環境品質標準。其次，海南省雖設有多個海洋生態保護區，但針對珊瑚礁系統的監測工作大多側重珊瑚蓋度、水質等傳統生態指標，未將微塑膠污染納入日常生態健康評估。

此外，塑膠污染治理政策在實施過程中呈現出城鄉與地區不平衡。一些旅遊密集、基礎設施完善的濱海城市在“禁塑”執行上取得初步成效，但內陸向海過渡帶和漁業活動密集海域仍存在生活廢物流入海洋的管理盲區，塑膠製品通過漁網殘留、岸灘廢棄物和排水系統輸入等路徑進入海洋。

在立法和科研資源支持層面，也存在亟待補齊的短板。儘管海南建設自由貿易港帶動了科技投入增長，但針對微塑膠污染的專項研究、資料平臺建設與技術儲備仍較薄弱，導致政策制定缺乏堅實的資料支撐和動態回應機制。

綜上所述，海南典型海域在塑膠污染治理方面已建立初步制度基礎，但針對微塑膠污染的識別、監管與治理仍顯不足，尤其在監測指標設置、生態系統敏感區回應機制及跨部門協調管控等方面存在明顯空白。未來需構建微塑膠風險識別框架，強化源頭溯源機制與生態敏感區差異化管控策略，推動海洋生態治理體系從“控量”向“控質”升級。

5.3 建議：建立岸基—近海協同監測網路，推動塑膠源頭治理

針對海南典型海域微塑膠污染在識別滯後、監管分散與治理路徑模糊等問題，建立岸基與近海一體化的協同監測網路，是提升塑膠污染防控效能的關鍵策略。此類網路不僅可實現微塑膠從源頭排放到生態影響的全鏈條監控，也有助於填補現有政策在資料基礎、空間覆蓋與快速回應上的空白。

首先，應構建基於陸源排放與海洋接收端的雙向監測格局。陸源方面，應在城市排水系統、漁港碼頭、河口入海口等重點通道佈設微塑膠自動採樣點，建立即時線上監測平臺，對塑膠廢棄物流入海路徑進行溯源分析；海洋方面，應在珊瑚礁、瀉湖、礁坪及近岸水域設置多層次採樣點，覆蓋水體、沉積物及關鍵生物體內微塑膠含量，實現對微塑膠在生態系統中沉積與遷移狀態的動態掌握。

其次，應推動陸海統籌的治理機制，強化源頭管控措施。在岸基治理層面，建議細化現有“禁塑”政策執行路徑，尤其加強對旅遊景區、漁業作業點、城鄉結合部等重點區域的巡查與分類回

收監管，推動一次性塑膠替代品在基層市場的普及。對漁業行業，應建立廢棄漁具回收責任制與獎懲機制，減少海上塑膠廢棄物的流入風險。

此外，還需加強技術支援和資料共用平臺建設。建議依託海南熱帶海洋學院、中國科學院南海海洋研究所等在地科研機構，聯合建立“海南微塑膠污染協同監測與評估中心”，制定區域統一的微塑膠監測技術規範和資料獲取標準，逐步納入政府環境監管體系，並將資料開放用於科研與公眾科普。

最終目標是形成“資料驅動—源頭識別—精準治理—公眾參與”的閉環管控體系，通過岸基與海域的聯動，實現對微塑膠污染全鏈條的早發現、早回應與長效治理。這不僅有助於保障珊瑚礁生態系統穩定，也為熱帶島嶼型海洋省份探索微塑膠治理路徑提供示範樣本。

6 結論與研究展望

本研究圍繞海南沿海典型珊瑚礁生態系統中的微塑膠污染問題，系統分析了其在多介質環境中的分佈特徵及在食物鏈中的遷移路徑。研究發現：

(1) 在珊瑚礁生態系統中，微塑膠廣泛存在於海水、沉積物及多類生物體內，不同介質間在顆粒豐度、類型與空間分佈上呈現出顯著差異，沿岸區域受污染程度普遍高於外礁區；

(2) 微塑膠在生態系統中的遷移表現為物理沉積、生物攝入與生態鏈條傳遞的複合路徑，呈現自底向上的累積趨勢，但其生物放大效應仍受限於排泄機制和顆粒保留時間；

(3) 不同營養級物種在暴露水準和個體回應上存在差異，部分低營養級物種已表現出微塑膠攝入引發的亞致死效應，而高營養級生物則承擔了較大遷移負荷與生態風險；

(4) 在治理層面，海南雖已建立初步的塑膠污染防控體系，但在微塑膠監測、風險識別及生態敏感區回應機制上仍存明顯空白，亟需建立岸基—近海協同的污染追蹤與管控體系。

展望未來，微塑膠研究仍需向更高時空解析度、更細粒徑區間及生態毒性機制方向深入。一方面，亟需建立熱帶海島型生態系統中微塑膠監

測標準與長期資料庫，以支撐跨期對比與動態預警；另一方面，應加強微塑膠與其他污染因數的交互效應研究，識別其在生態系統健康損害中的真實貢獻程度。此外，微塑膠在珊瑚共生系統中的潛在影響，仍屬研究盲區，值得重點突破。

本研究希望為南海及其他熱帶海域的塑膠污染治理、生態恢復決策及科研路徑規劃提供基礎資料與理論參考。

參考文獻：

- [1] Imhof H K, Sigl R, Brauer E, et al. Spatial and temporal variation of macro-, meso- and microplastic abundance on a remote coral island of the Maldives, Indian Ocean[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 116(1-2): 340-347.
- [2] Patti T B, Fobert E K, Reeves S E, et al. Spatial distribution of microplastics around an inhabited coral island in the Maldives, Indian Ocean[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 748.
- [3] Zhang L, Zhang S, Wang Y, et al. The spatial distribution of microplastic in the sands of a coral reef island in the South China Sea: Comparisons of the fringing reef and atoll[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 688, 780-786.
- [4] Hanvey J S, Lewis P J, Lavers J L, Crosbie N D. A review of analytical techniques for quantifying microplastics in sediments[J]. *Analytical Methods*, 2017, 9, 1369-1383.
- [5] Hermesen E, Mintenig S M, Besseling E, Koelmans A A. Quality criteria for the analysis of microplastic in biota samples: a critical review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(18): 10230-10240.
- [6] Löder, M.G.J., Gerdt, G. (2015). Methodology Used for the Detection and Identification of Microplastics—A Critical Appraisal. In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (eds) *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham.
- [7] Patterson J, Jeyasanta K I, Sathish N. Microplastic and heavy metal distributions in an Indian coral reef ecosystem[J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 744.
- [8] Hankins C, Lasseigne D, Davis S M, Edwards K. Coral reef attributes associated with microplastic exposure[J]. *Coral Reefs*, 2024, 44, 193-207.
- [9] Zhang L, Zhang S, Wang Y, Yu K, Li R. The spatial distribution of microplastic in the sands of a coral reef island in the South China Sea: comparisons of the fringing reef and atoll[J]. *Science of the Total Environment*, 2019.
- [10] Utami D A, Reuning L, Konechnaya O. Microplastics as a sedimentary component in reef systems: A case study from the Java Sea[J]. *Sedimentology*, 2021, 68(6): 2270-2292.

版權聲明

© 2025 作者版權所有。本文依據“知識共用署名 4.0 國際授權合約”（CC BY 4.0）以開放獲取方式發佈。該許可允許使用者在任何媒介中自由使用、複製、傳播與改編文章（含商業用途），惟須明確署名原作者及出處，並注明所作修改（如有）。完整協議詳見：<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.zh-hans>

出版聲明

所有出版物中的陳述、觀點及資料僅代表作者及供稿者個人立場，與 Brilliance Publishing Limited 及/或編輯人員無關。Brilliance Publishing Limited 及/或編輯人員對因內容所提及的任何理念、方法、說明或產品所導致的人身或財產損害概不負責。