

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.04.016

波浪作用下弱惯性塑料颗粒的运动特征

舒颖^{1,2}, 冯曦^{1,2,3}, 白洋³, 李慧超¹, 倪兴也¹, 柳其岩¹, 王勇铭¹, 陈君¹

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098; 2. 海南省海洋地质调查研究院, 海南海口 570206;
3. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300354)

摘要: 为了解弱惯性塑料颗粒的近岸运动特征, 通过物理波浪水槽试验对比观察了漂浮态与沉底态中等尺寸球状塑料颗粒在有限水深规则波作用下的运动特征和不同波况及边界条件下的动态响应, 并基于运动量谱推求了沉底塑料颗粒在随机运动过程中产生的最大可能水平位移。结果表明: 漂浮塑料颗粒的运动规律基本符合二阶 Lagrangian 漂移理论; 沉底塑料颗粒的运动轨迹多呈现不规则性, 随机高频扰动占自身运动振幅的 20%; 最大可能位移随着入射波波周期的增大呈现先增大后收敛的趋势。

关键词: 弱惯性塑料颗粒; 波浪水槽试验; 二阶 Lagrangian 漂移理论; 小波变换

中图分类号: P731 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)04-0135-08

Motion characteristics of weakly inertial plastic particles under wave action

SHU Ying^{1,2}, FENG Xi^{1,2,3}, BAI Yang³, LI Huichao¹, NI Xingye¹, LIU Qiyan¹, WANG Yongming¹, CHEN Jun¹

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Hainan Geological Bureau Hainan Marine Geological Survey, Haikou 570206, China;

3. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

Abstract: To analyze the nearshore motion characteristics of weakly inertial plastic particles, physical wave flume experiments were conducted to observe and compare the motion characteristics of medium-sized spherical plastic particles in a floating state and bottom-lying state under the action of regular waves with limited water depth. In addition, the dynamic responses of these plastic particles under different wave conditions and boundary conditions were investigated. Based on the motion quantity spectrum, the maximum possible horizontal displacement of the plastic particles in the bottom-lying state during random motion was estimated. The experimental results show that the motion law of plastic particles in the floating state basically conforms to the second-order Lagrangian drift theory; the motion trajectories of plastic particles in the bottom-lying state are mostly irregular, and random high-frequency disturbances account for 20% of their motion amplitudes; the maximum possible horizontal displacement increases first and then converges with the increase in the incident wave period.

Key words: weakly inertial plastic particle; wave flume experiment; second-order Lagrangian drift theory; wavelet transform

近年来, 塑料垃圾作为海洋污染物之一, 侵入和破坏海洋生态系统的问题愈发严峻^[1], 全球每年有超过 1 100 万 t 的塑料垃圾进入海洋, 对海洋环境和生物多样性造成了严重威胁^[2]。其中直径小于 5 mm 的微塑料作为一种新型污染物多以悬移质为主^[3], 进入海水环境后与有机质产生各种絮凝作用^[4], 并主要通过被吞食的方式对海洋生物造成物理与毒性危害^[5]; 大型塑料垃圾中, 占比较高的柔性塑料垃圾, 如口罩、塑料袋, 对海洋生物构成的缠绕风险最大; 而介于大型和微塑料之间的塑料碎屑, 对海洋的危害以及产生过程^[6]和传播方式也在近年来逐渐受到关注^[7]。

近海区域的塑料物体运动主要受非线性波浪及波致流的影响。在海岸动力学研究中, 二阶 Stokes 漂移

基金项目: 海南省海洋地质资源与环境重点实验室开放课题项目(23-HNHYDZZYHJKF037); 水利工程智能建设与运维全国重点实验室开放基金项目(HESS-2403); 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室开放课题项目(YK223001-3)

作者简介: 舒颖(1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事近海水动力模拟研究。E-mail: 221303030014@hhu.edu.cn

通信作者: 冯曦(1987—), 女, 教授, 博士, 主要从事近海水动力模拟研究。E-mail: xifeng@hhu.edu.cn

引用本文: 舒颖, 冯曦, 白洋, 等. 波浪作用下弱惯性塑料颗粒的运动特征[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(4): 135-142.

SHU YING, FENG Xi, BAI Yang, et al. Motion characteristics of weakly inertial plastic particles under wave action[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(4): 135-142.

理论主要是通过波陡(波高与为波长的比值)为参数进行摄动展开,从而建立不同阶次的拉普拉斯控制方程和边界条件,以此求得不同阶次波浪水质点的速度势。由于非线性作用,波浪作用下的水质点运动轨迹不再封闭,历经整数倍周期后,产生净水平位移,称为 Stokes 漂移^[8],Stokes 漂移对海洋中漂浮物的输移扩散过程有着重要的作用^[9]。

对于不同的水深,Stokes 漂移对漂浮物输送距离的贡献也有所差异。在深水区,由于 Stokes 漂移相对风致漂移量级较小(在海洋中通常每秒只有几厘米),因此对于物质的输送作用较小^[10]。而在近岸有限水深区域,Stokes 漂移是物质输送的主要因素。此外,在近岸水域,由于底坡、护岸等要素的反射作用,还存在一定的欧拉回流,这种回流与 Stokes 漂移对于物质的输送作用相反。郁重等^[11]着重关注了近岸水域波、流同时存在的破波带内溶质的传输,由于沿岸流的作用,破波带内溶质主要在沿岸方向扩散,沿岸方向的对流作用是水体表面溶质扩散的主要动力因素。除了考虑波流对漂浮物运动轨迹的影响外,翁怡婵等^[12]进行漂移物运动轨迹示踪时,还考虑了水气交界面上由于风浪引起的湍流涡动所造成的随机漂移距离。

海洋塑料垃圾的分布及在波浪作用下的运动特性很大程度上受自身的密度和大小等属性的影响。目前海洋垃圾有海底沉降、海滩沉积、海洋漂浮 3 种存在形式^[13],密度小于水的塑料漂浮在海洋表层,密度大于水的塑料则易于下沉^[14]。由于生物膜的成长和附着,轻质海洋塑料颗粒密度不断增大,直至沉积至海底。此外,在海洋环境中,大型塑料物体会同时经历光化学降解、热降解和水解等化学降解,微生物和酶活性导致的生物降解,以及在波浪力、湍流等物理因素影响下的破碎与磨损,最终变成小尺寸的球形或类球状的塑料颗粒^[15]。

Eames^[16]和 Santamaria 等^[17]使用了波陡和 Stokes 数推求小型海洋碎屑的解析解。Eames^[16]认为弱惯性的小型海洋碎屑的漂移速度和沉降速度有关。Santamaria 等^[17]预测在波浪作用下,正浮力物体由于惯性力的作用漂移量会增加。尽管 Eames^[16]和 Santamaria 等^[17]在研究波浪对于海洋漂浮碎屑的输移作用时均考虑了物体的惯性,但两者的研究都仅针对悬浮在水中的海洋碎屑。Calvert 等^[18]探讨了漂浮物的 Stokes 漂移与水粒子的差异,尝试从球体淹没体积和浮力分量的角度诠释漂浮小球漂移速度大于表层水质点漂移速度的原因,但其理论解析解与物理模型试验数据并不一致。

关于海洋塑料颗粒在近岸传播过程的研究大多关注悬浮在海水中的微塑料颗粒,对于漂浮碎屑和沉积在海底的塑料颗粒关注较少^[19],而考虑惯性力的相关研究则多以大型海洋漂浮垃圾为研究对象。本文重点关注弱惯性塑料颗粒在有限水深规则波作用下的行为过程,采用物理波浪水槽试验探究了漂浮态和沉底态弱惯性塑料颗粒的运动规律,以期预测近岸区富集量较多的中尺度塑料碎屑的传播和富集过程提供参考。

1 试验方法

1.1 试验布置

试验水槽两侧为透明玻璃板,一端安装了液压式推板造波机,另一端布置了消浪网以消除反射。试验中以造波机所在位置静水面处为原点建立笛卡尔坐标系,横向(x 向)以波浪传播方向为正,垂向(z 向)以向上为正,如图 1 所示。试验模型按照重力相似原则设计,结合实验室的水槽属性、漂浮物尺寸、波要素等条件,采用正态模型,几何比尺 1 : 25。

波高采用 10 个电阻式浪高仪在不同的位置测量(通过多次平移测量(每次向左平移 0.1 m),获得空间上分辨率较高的数据,并进行波浪沿程谱分析),同时将直杆式流速仪(ADV)固定在观测区内,用于测量不同深度处的流速,并确保不干扰漂浮与沉底颗粒的投放和运动。ADV 所测量的流速位于探头下方 0.05 m 处,对于水的浑浊度要求相对较低,仪器灵敏度高,试验过程中采样频率为 25 Hz,通过控制信噪比及相关系数以保证采集数据的稳定性以及准确性。试验开始时,将漂浮物静止投放在 1 号与 2 号浪高仪之间的窗口中心。投放程序遵循试验准备阶段确定的最佳方案:进行漂浮塑料颗粒试验时,先启动造波机造波,待波形稳定后用夹钳将漂浮物贴着水面静止投放;进行沉底塑料颗粒试验时,先用夹钳将小球投放至水底,待水体稳定且小球静止后,开始造波。塑料球体运动过程中,在观察段使用单反相机进行拍摄(图 1),将每秒视频分帧成 30 张照片,而后基于深度学习的 YoloX 目标检测方法捕捉漂浮物的运动轨迹,将输出的像素坐标转换为塑料球体运动的实际坐标。

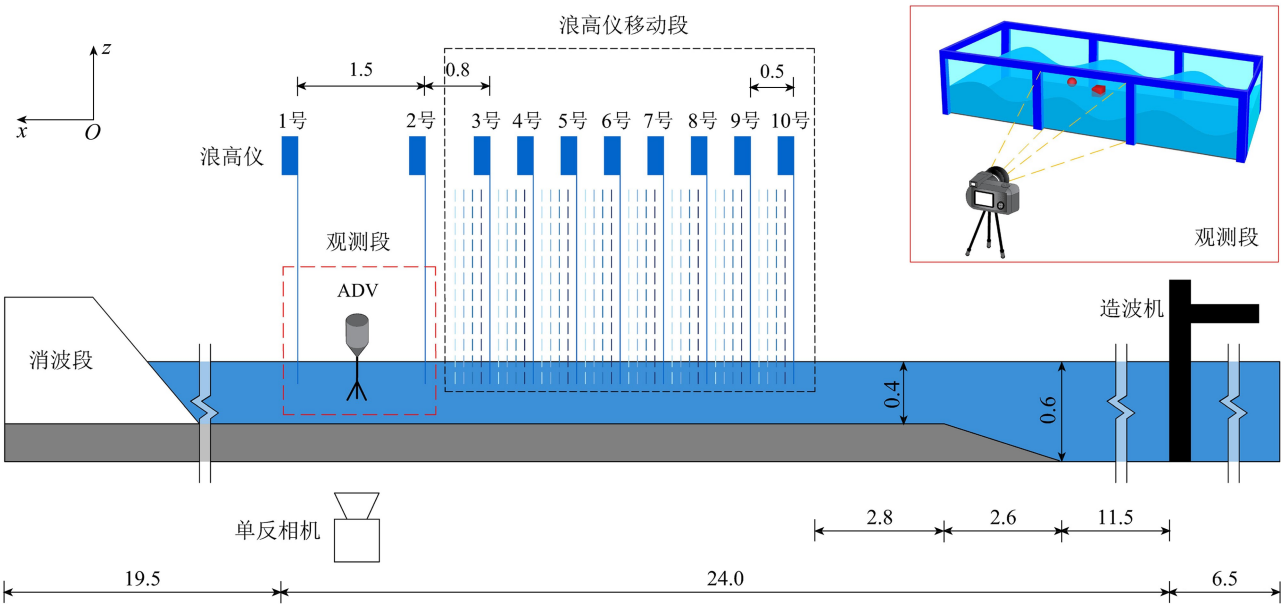


图 1 物理波浪水槽试验浪高仪布置及观测段拍摄示意图 (单位:m)

Fig. 1 Layout of wave height meters for physical wave flume experiments and observation section shooting (unit: m)

1.2 试验波况

试验水深设定为 0.4m,共设计了如表 1 所示的 4 种不同波浪波况(表中波高为 1 号和 2 号浪高仪之间(即观测段)的波高数据)。4 个波况的波浪特征参数(水深与波长的比值)位于 1/20~1/2 之间,属于有限水深波。依据波浪非线性理论,M1 的波陡大于 0.05,属于非线性波,其他 3 种波况属于线性波。试验使用的塑料球体分为密度小于水的 PP 材质和密度大于水的 POM 材质两种,每组试验重复 2 次。试验漂浮塑料属性如表 2 所示。

表 1 波浪水槽试验设计的波浪要素

Table 1 Designed wave elements for wave flume experiment

波况	水深/ m	波高/ m	波周 期/s	波长/ m	波速/ (m/s)	波陡	相对 波高	相对 水深
M1	0.4	0.060	0.75	0.873	1.16	0.069	0.15	2.880
M2	0.4	0.063	1.00	1.464	1.46	0.043	0.16	1.717
M3	0.4	0.064	1.50	2.616	1.74	0.024	0.16	0.961
M4	0.4	0.056	2.00	3.695	1.85	0.015	0.14	0.680

注:相对波高为波高与水深的比值,相对水深为波数与水深的乘积。

表 2 漂浮塑料属性

Table 2 Properties of plastics in floating state

漂浮物材质	形状	直径/m	相对密度	Stokes 数
PP	球体	0.012	0.84	0.0448
POM	球体	0.012	1.49	0.0655

注:相对密度为漂浮塑料密度与水密度的比值。

2 结果与分析

2.1 波面过程和波能谱

图 2(a)(b)为 1 号与 2 号浪高仪采集到的 M3 波况波面过程线(图中 H 为波高, t 为采集时间),图 2(c)为沿程波谱(图中 S_f 为波能密度, f 为频率),可见波浪沿程传播稳定。图 3 为对 2 号浪高仪采集的波面过程小波变换结果(图中 T 为波周期),可见波能分别

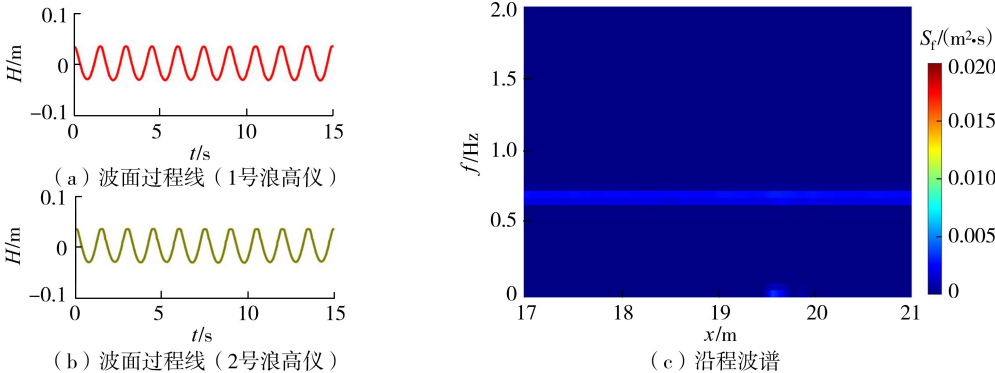


图 2 M3 波况下波浪水槽试验中的波面过程线与沿程波谱

Fig. 2 Wave surface process line and along-channel wave spectrum in wave flume experiment under M3 wave condition

在周期 0.75、1.0、1.5、2.0 s 时最集中,与试验所需波浪周期一致。另外,在 M3、M4 波况下,波浪产生了一定的倍频效应,但此信号相对微弱,未在置信区间内,产生的倍频波影响可以忽略。

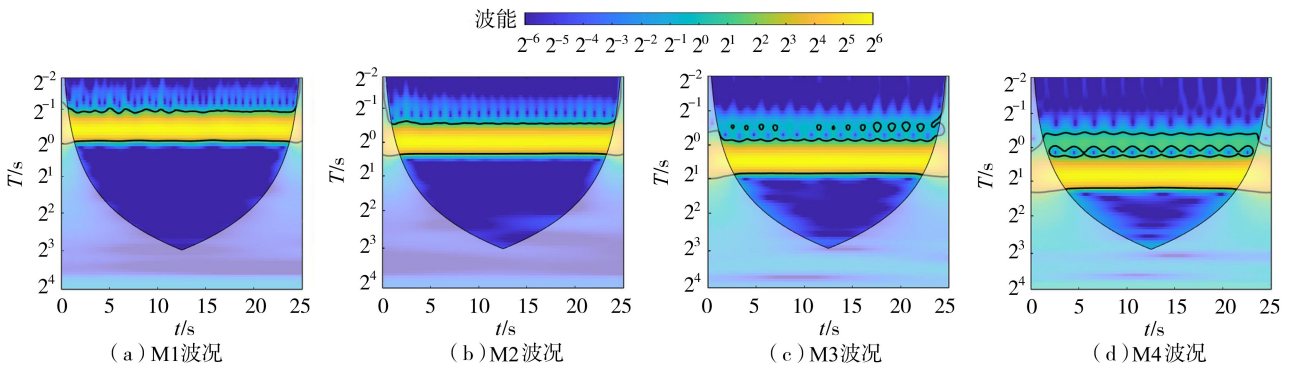


图 3 波面过程的小波变换结果

Fig. 3 Wavelet transform results of wave surface process

2.2 漂浮塑料小球的运移特征

图 4 为 4 种波况条件下,PP 小球经历 4 个波周期后所发生的位移情况,波浪的传播方向为自右向左。可以明显看出,随着入射波波陡的减小,从 M1 至 M4 波况波浪非线性特征变弱,PP 小球的净输送距离逐渐减小。

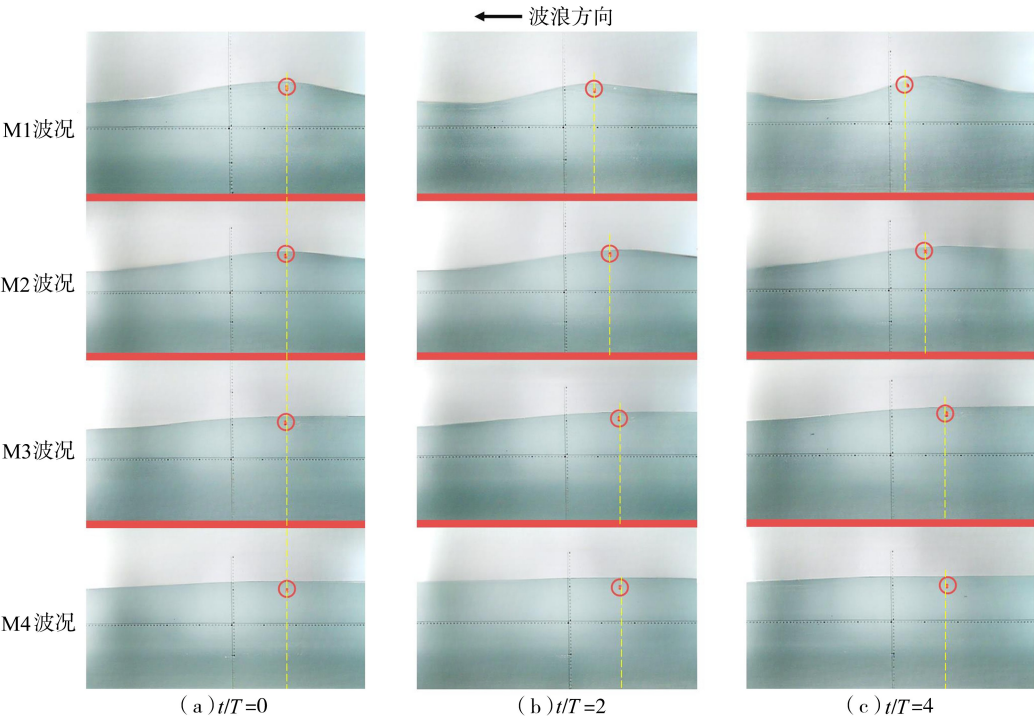


图 4 PP 小球在 4 种波况下的水平漂移量

Fig. 4 Horizontal drift amount of PP pellets under four wave conditions

由于 PP 小球的直径相对于水槽尺寸以及波长量级较小($<0.02L$, L 为波长),可类比于水质点来观察其运动特性。根据波陡范围,本文运用二阶 Stokes 漂移理论^[20]的水质点漂移速度对 PP 小球的运动轨迹进行分析;考虑到封闭水槽中的欧拉回流不可忽略,对应于实际情况中近岸地区波浪产生的岸壁反射,引用二阶 Lagrangian 理论下的水质点漂移速度,可近似为二阶 Stokes 漂移与欧拉回流的线性叠加^[21],将这两种理论自由表面水质点的解析解与 PP 小球的运动轨迹对比,结果如图 5 所示(图中 t_0 和 x_0 分别为轨迹的初始时间和水平初始位置, $t-t_0$ 为运动时间, $x-x_0$ 为运动距离)。

图 5 结果表明,PP 小球的漂移速度和净漂移距离均呈现出随波浪非线性增强而显著增大的趋势。与二阶 Stokes 漂移理论轨迹相比,PP 小球的水平漂移轨迹更接近于二阶 Lagrangian 水质点漂移轨迹。另外从图 5(a)可观察到,在波浪非线性最强的 M1 工况下,PP 小球运动轨迹与理论解析解之间存在的相位差较为

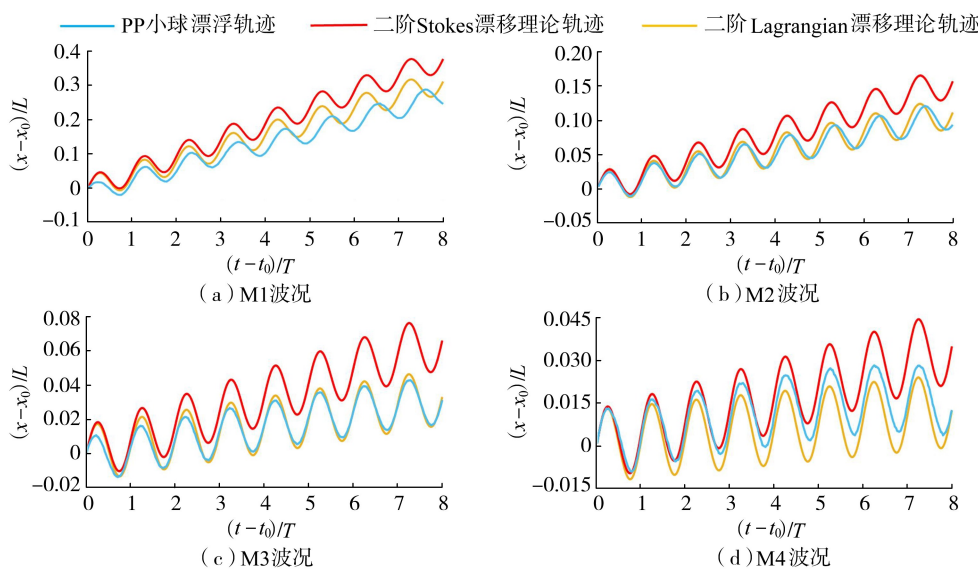


图 5 4 种波况下 PP 小球漂浮轨迹与理论轨迹的对比

Fig. 5 Comparison of floating trajectories of PP pellets under four wave conditions with theoretical trajectories

显著。推测可能原因是波浪作用的非线性越强,PP 小球周围的边界层流动特性可能越复杂。Lin 等^[22]研究表明,在波陡较大的波浪作用下,漂浮物周边的黏滞效应和湍流效应均可能加剧,并导致额外的阻力和升力效应,从而进一步增大水质点轨迹与漂浮物轨迹之间的差异。

2.3 沉底塑料小球的运移特征

图 6 为沉底 POM 小球和 PP 小球 8 个波周期的运动轨迹对比。相比于尺寸与形状相同的 PP 小球在波浪作用下规律性地向前移动,POM 小球的运动轨迹并未呈现明显的水平净输移趋势,且在 M1 和 M2 波况下(波长较短,波陡较大),POM 小球的运动轨迹周期性特征不明显。沉底和漂浮小球二者漂移量的差异原因是 POM 小球在水槽底部所受波浪作用远小于位于自由表面的 PP 小球。波浪的轨道速度和波压力随着水深增大呈指数规律递减。因此,在 M1 和 M2 波况下,由于相对水深较大,POM 小球受到的波浪作用力更小,而波浪作用力之外的其他干扰因素反而占主导作用。这可能与 POM 小球与水槽底部接触面不平整、水槽底有未能完全消除的波浪反射造成的回流现象等均相关。

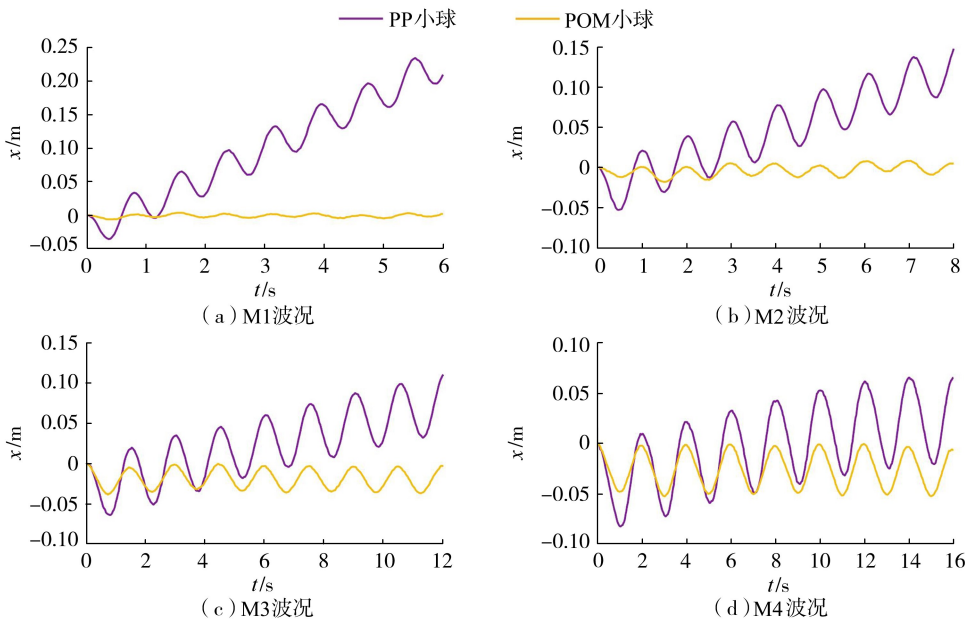


图 6 4 种波况下 PP 小球与 POM 小球运动轨迹对比

Fig. 6 Comparison of motion trajectories of PP pellets and POM pellets under four wave conditions

2.4 波浪非线性对漂浮塑料小球漂移速度的影响

表 3 为利用二阶 Stokes 和二阶 Lagrangian 漂移理论以及对波浪水槽试验数据处理后计算得出的 4 种波况的平均漂移速度,可以看出,每种波况下 PP 小球的漂移速度都比二阶 Stokes 水质点漂移速度小,表明 3 种波况的试验中水槽内均存在回流,并且随着波浪非线性增强而增强。基于水深平均的理论欧拉回流速度与实测回流速度相近,且趋势相仿。在波陡较大时,PP 小球的漂移量与漂移速度可以近似用考虑欧拉回流时的二阶 Lagrangian 漂移理论来计算和分析。

表 3 水质点漂移速度与试验结果对比					单位: m/s
Table 3 Comparison of water particle drift velocity with experimental results					unit: m/s
波况	二阶 Stokes 水质点 漂移速度	二阶 Lagrangian 水质点 漂移速度	实测 PP 小球平均 漂移速度	理论回流速度	实测回流速度
M1	0.055 0	0.045 0	0.042 0	0.009 5	0.012 0
M2	0.029 0	0.020 0	0.020 0	0.008 3	0.008 8
M3	0.014 0	0.007 2	0.009 6	0.007 2	0.004 8
M4	0.008 1	0.002 9	0.004 6	0.005 2	0.003 5

2.5 波浪周期对沉底塑料小球运动特性的影响

2.5.1 沉底小球在波浪作用下的运动特性

由于 POM 小球的运动轨迹显示出较大的不确定性,较难用理论公式描述,本文进一步使用谱分析方法分析 POM 小球的运动特征,具体步骤如下:采用 Lanczos 滤波过滤 POM 小球运动轨迹中的高频白噪声信号,以去除由水槽观测和视频处理等非物理因素造成的不确定性;采用 Morlet 小波分析方法^[23]对 POM 小球运动轨迹信号进行阐释^[24]。

图 7 为 4 种波况下 POM 小球运动轨迹的小波变换图,图中高亮部分表示能量集中区,可以看出 POM 小球主要在波浪频率附近摆动,运动的频率与波浪主频基本一致。此外,在 M3、M4 波况下,POM 小球高频部分的运动特征凸显,且呈现较为规律的、持续性的“牙状”特征,这可能与 M3 和 M4 波况下波长较长,波浪在浅水中触底,受底摩阻效应产生的倍频和高频波相关。倍频波对于 POM 小球的高频振荡也产生一定的影响,即便这种微弱的往复运动相比主频运动并未通过显著性检验。此外,4 种波况下 POM 小球均出现了低频运动,但这些高亮区在时间上的出现具有随机性,且在短波情况下(M1 波况)最为明显。该低频运动的周期在 1.5~3 s 之间,但与入射波波周期相差较大,且不持续,因此通过其肉眼观察和回顾拍摄视频,定性判断可能与 POM 小球在水槽底部受到底部不平整以及回流等因素而产生的非往复滚动甚至是侧向转动相关。

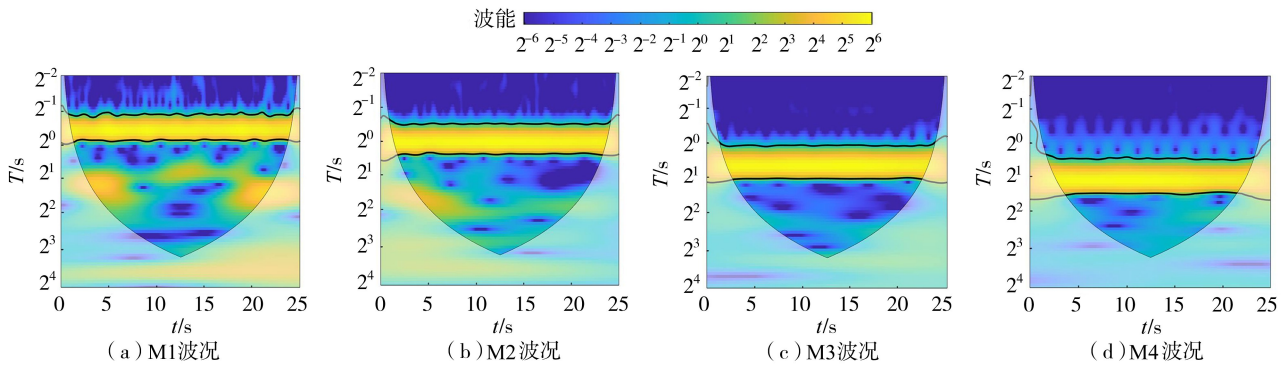


图 7 4 种波况下 POM 小球运动轨迹的小波分析

Fig. 7 Wavelet analysis of motion trajectories of POM pellets under four wave conditions

图 8 保留了小波变换结果中的主频高能量带,并将上下高低频位移余项进行分离。红色虚线框为保留的周期区间,框中的黑色虚线为该波况下的波周期。红框上下两部分分别为 POM 小球高频位移余项($s_{\text{高}}$)与低频位移余项($s_{\text{低}}$)。从 M1 波况至 M4 波况,随着波周期的增大,高频位移余项的振幅也显著增大,而低频位移余项呈现不规则波形。经计算,POM 小球在运动过程中,除与波况相对应的主体部分外,低频与高频的总位移余项占小球总位移的 20%,即随机扰动因素产生的沉底小球运动能量在其总运动能量中的占比可达 20%。

2.5.2 最大可能位移计算

为了进一步分析沉底塑料小球在波浪作用下的最大可能移动范围,本文参照 Wang^[25]的计算方法,基于

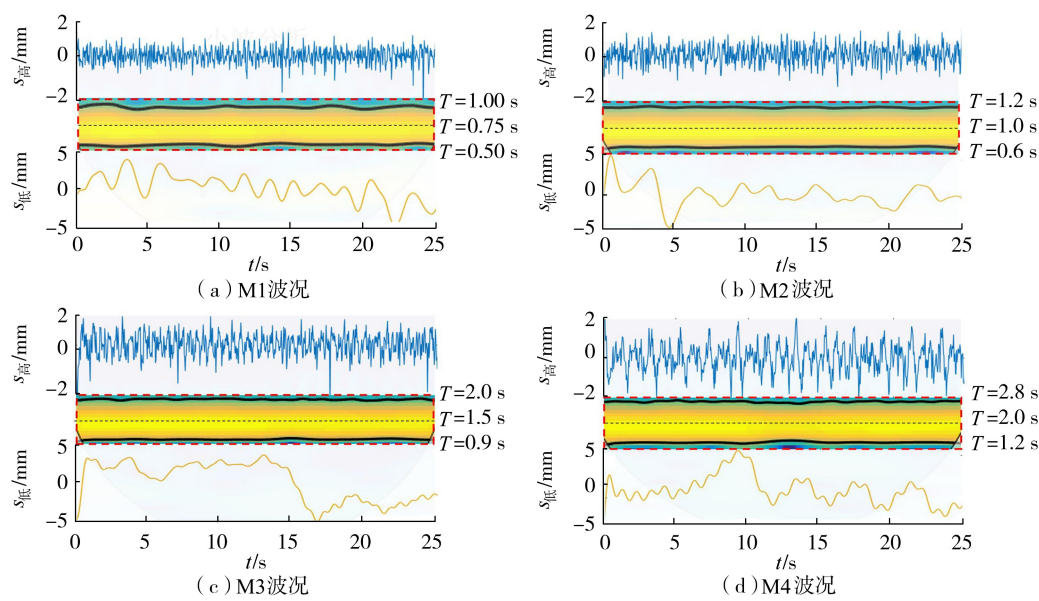


图 8 POM 小球运动轨迹的高低频位移余项

Fig. 8 High-frequency and low-frequency displacements reminder of motion trajectory of POM pellets

运动量谱推求了波浪作用下 POM 小球的 $s_{\max}$ 。图 9 为 4 种波况下 POM 小球的 $s_{\max}$ 。图中不同颜色的圆点代表了根据重复性试验数据计算出的最大可能位移数据点。在历经 16 个波周期后 ($t/T=16$) ,POM 小球的 $s_{\max}$ 在 3.5~4.8 cm 之间,为 3~4 倍的 POM 小球粒径。而计算得到的最大可能位移值也与波浪水槽试验观察到的实际位移值吻合。从图 9 看,和 PP 小球的净漂移态势不同,POM 小球的 $s_{\max}$ 从 M1~M4 波况呈现出单调递增而后逐渐收敛的趋势,即随着入射波波周期增大、波长增加、相对水深减小,最大可能位移反而增大。

3 结 论

- a. 漂浮塑料小球在非线性波浪作用下,入射波波周期越长,波浪的非线性越弱,漂移量越小。由于试验水槽中存在一定的回流,导致漂浮塑料小球与自由表面水质点运动理论轨迹之间存在误差。通过用欧拉回流理论值进行纠偏后,漂移运动轨迹较符合二阶 Lagrangian 漂移理论。
- b. 沉底塑料小球在弱非线性波浪作用下,运动轨迹大部分呈现不规则性,小波变换表明,其运动的主频率与波浪频率基本一致,但随机扰动因素产生的运动能量占比可达 20%。
- c. 基于运动量谱量化了沉底塑料小球受连续波浪作用在不平整海底偏离初始位置的最大可能位移。沉底塑料小球的往复运动幅度随着入射波波周期的增大呈现先增大后稳定的趋势。

参考文献:

[1] HIGUCHI C, ISOBE A. Reduction scenarios of plastic waste emission guided by the probability distribution model to avoid additional ocean plastic pollution by 2050s[J]. Marine Pollution Bulletin, 2024, 207: 116791.

[2] ALIJAGIC A, SULJEVIĆ D, FOČAK M, et al. The triple exposure nexus of microplastic particles, plastic-associated chemicals, and environmental pollutants from a human health perspective[J]. Environment International, 2024, 188: 108736.

[3] 王腾. 江苏近海微塑料污染特征、源解析及源排放研究[D]. 南京: 南京大学, 2019.

[4] WANG Teng, LI Baojie, ZOU Xinqing, et al. Emission of primary microplastics in mainland China: invisible but not negligible[J]. Water Research, 2019, 162: 214-224.

[5] 沈骁腾, 霍宏, 林明泽, 等. 有机质作用下微塑料颗粒絮凝机制研究[C]//第四届全国(海洋)环境微塑料污染与管控学术

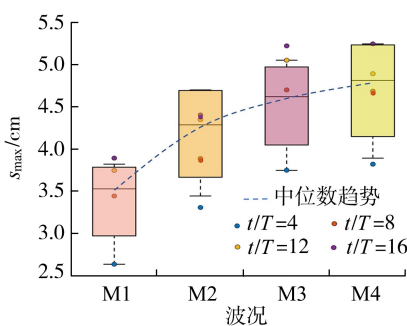


图 9 4 种波况下沉底小球的 $s_{\max}$

Fig. 9 Maximum possible displacement of pellets in bottom-lying state under four wave conditions

研讨会摘要集.上海:上海市海洋湖沼学会,2023:200.

[6] 骆永明,施华宏,涂晨,等. 环境中微塑料研究进展与展望[J]. 科学通报,2021,66(13):1547-1562. (LUO Yongming,SHI Huahong, TU Chen,et al. Research progresses and prospects of microplastics in the environment[J]. Chinese Science Bulletin, 2021,66(13): 1547-1562. (in Chinese))

[7] SU Lei SU,XIONG Xiong,ZHANG Yulan,et al. Global transportation of plastics and microplastics: a critical review of pathways and influences[J]. The Science of the Total Environment,2022,831:154884.

[8] STOKES G G. On the theory of oscillatory waves[J]. Transactions of the Cambridge Philosophical Society,1847,8:411-455.

[9] 王京富,陶爱峰,解淑亚,等. 中国邻近海域 Stokes 漂流速度分布特性研究[J/OL]. 河海大学学报(自然科学版),1-11 (2024-03-06). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1117.TV.20240304.1010.002.html>. (WANG Jingfu,TAO Aifeng,XIE Shuya,et al. Distribution characteristics study of the Stokes drift velocity in the China Seas and adjacent seas[J/OL]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 1-11 (2024-03-06). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1117.TV.20240304.1010.002.html>. (in Chinese))

[10] CALVERT R,WHITTAKER C,RABY A,et al. Laboratory study of the wave-induced mean flow and set-down in unidirectional surface gravity wave packets on finite water depth[J]. Physical Review Fluids,2019,4(11):114801.

[11] 郁重,任春平. 波流作用下破波带内污染物输移扩散试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):569-576. (YU Chong,REN Chunping. Experimental study on transport and diffusivity of pollutant under action of waves and currents in surf zone [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(6):569-576. (in Chinese))

[12] 翁怡婵,杨金湘,江毓武. 台湾海峡漂移物运动轨迹的数值模拟[J]. 厦门大学学报(自然科学版),2009,48(3):446-449. (WENG Yichan,YANG Jinxiang,JIANG Yuwu. Simulation of floater trajectory in Taiwan Strait[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science),2009,48(3):446-449. (in Chinese))

[13] ZHOU P,HUANG C G,FANG H D,et al. The abundance, composition and sources of marine debris in coastal seawaters or beaches around the northern South China Sea (China) [J]. Marine Pollution Bulletin,2011,62(9):1998-2007.

[14] HIDALGO-RUZ V,GUTOW L,THOMPSON R C, et al. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification[J]. Environmental Science & Technology,2012,46(6):3060-3075.

[15] OLUWOYE I, MACHUCA L L, HIGGINS S, et al. Degradation and lifetime prediction of plastics in subsea and offshore infrastructures[J]. Science of the Total Environment,2023,904:166719.

[16] EAMES I. Settling of particles beneath water waves[J]. Journal of Physical Oceanography,2008,38(12):2846-2853.

[17] SANTAMARIA F,BOFFETTA G,AFONSO M M,et al. Stokes drift for inertial particles transported by water aves[J]. Epl,2013,102(1):14003.

[18] CALVERT R,MCALLISTER M L,WHITTAKER C,et al. A mechanism for the increased wave-induced drift of floating marine litter[J]. Journal of Fluid Mechanics,2021,915:A73.

[19] ALSINA J M,JONGEDIJK C E,VAN SEBILLE E. Laboratory measurements of the wave-induced motion of plastic particles: influence of wave period, plastic size and plastic density [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2020, 125 (12): e2020JC016294.

[20] 曾诚,尹雨然,周婕,等. 基于二阶规则波模拟的数值波浪水槽优化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):33-40. (ZENG Cheng,YIN Yuran,ZHOU Jie,et al. Optimization of a numerical wave tank based on simulations of 2nd order regular waves[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(4):33-40. (in Chinese))

[21] LONGUET-HIGGINS M S. Mass transport in water waves[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences,1953,245:535-581.

[22] LIN P Z,ZHANG W Y. Numerical simulation of wave-induced laminar boundary layers[J]. Coastal Engineering,2008,55(5):400-408.

[23] GROSSMANN A,KRONLAND-MARTINET R,MORLET J. Reading and understanding continuous wavelet transforms[M]. Berlin:Springer,1989:2-20.

[24] MORLET J,ARENS G,FOURGEAU E,et al. Wave propagation and sampling theory (part II): sampling theory and complex waves[J]. Geophysics,1982,47(2):222-236.

[25] WANG Shengzhe. Analytical solutions for the dynamic analysis of a modular floating structure for urban expansion[J]. Ocean Engineering,2022,266:112878.