



# 岛礁珊瑚砂在水流中的拖曳力模型研究与数值模拟分析

院系：土木工程学院

项目成员：张皓钦、刘明靖

指导老师：黄林冲、赖正首

# 目录



1

研究内容

RESEARCH CONTENTS

2

项目进程

PROJECT PROGRESS

3

研究结论

RESEARCH CONCLUSION

4

经费使用情况

FUND USAGE STATUS



# 1

## 研究內容 RESEARCH CONTENT



## 一、研究背景

- 国内外对不规则颗粒拖曳力的研究较为有限
- 基础设施建设在岛礁地区日益增加，**岛礁珊瑚砂颗粒在水流中的拖曳力**成为关键的研究议题
- **流体动力学—离散单元法（CFD-DEM）**流固耦合理论，可以进行任意形状颗粒的数值模拟



## 二、研究内容

- 标准球体颗粒的沉降试验验证
- 珊瑚砂颗粒的沉降模拟、编写颗粒旋转、计算截面积和批量运行程序的脚本
- 珊瑚砂颗粒沉降试验结果的后处理
- 基于随机场理论的随机球谐系数虚拟珊瑚砂颗粒生成
- 基于球面沃洛诺伊采样法的球谐颗粒优化方法
- 基于颗粒的几何形态特征参数与沉降数值模拟数据进行相关性分析



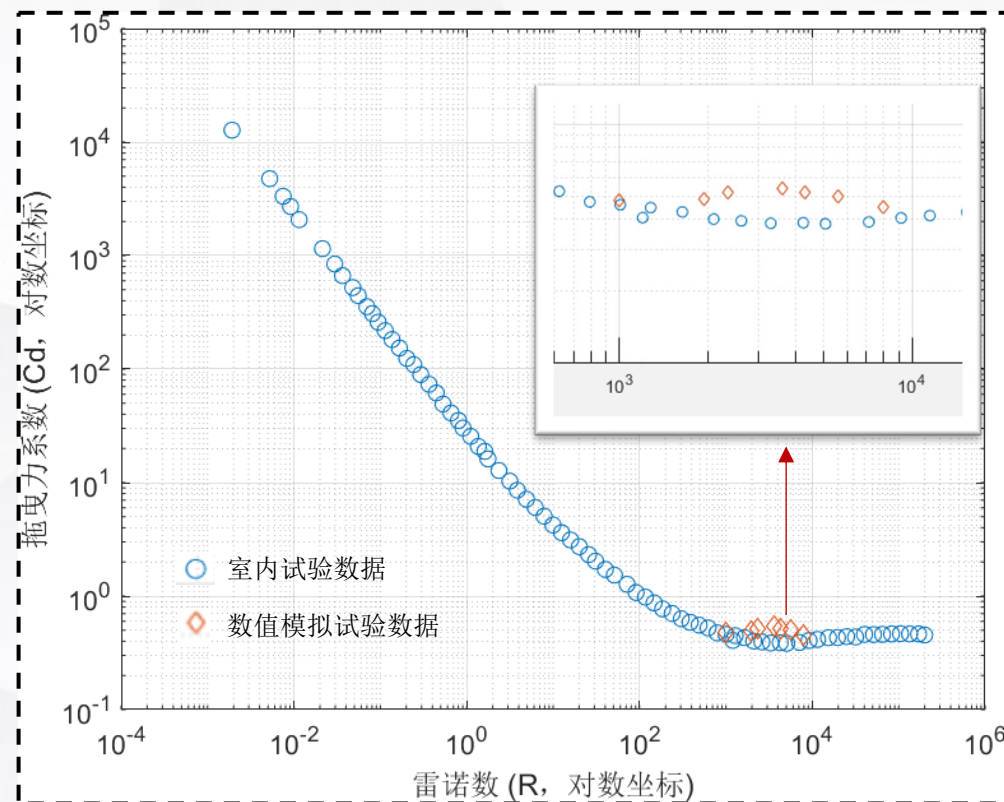
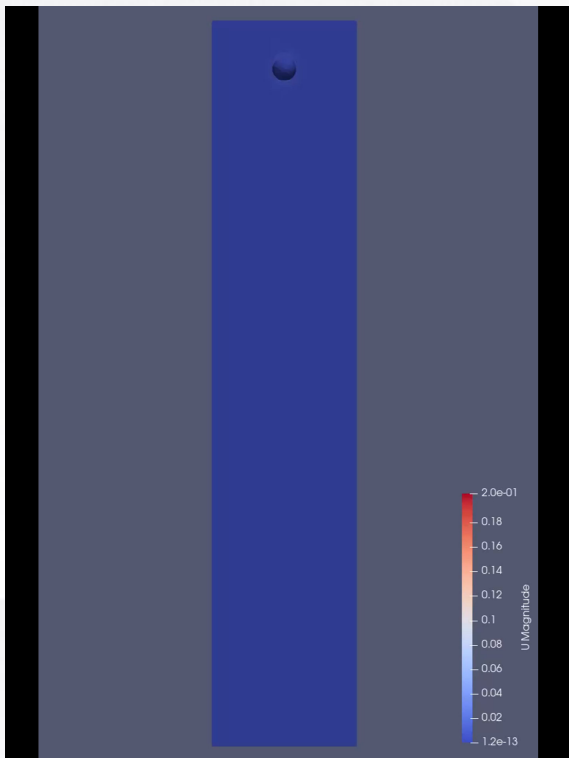
# 2

## 项目进程 RESEARCH PROGRESS



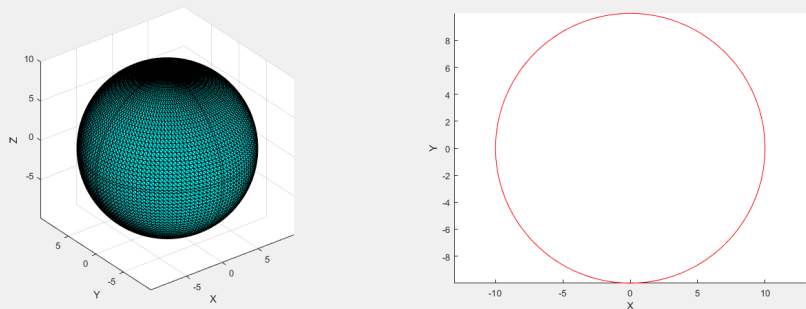
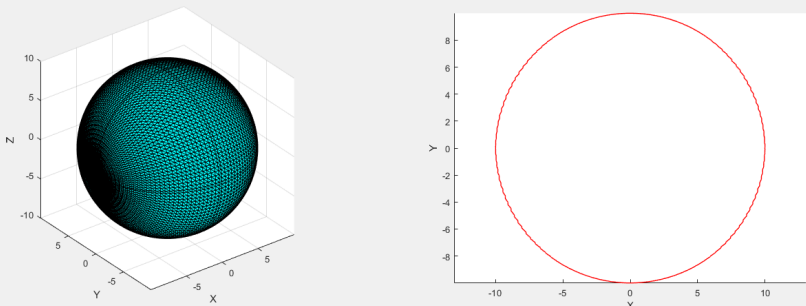
## 一、验证试验

- 改变流体的密度和粘度、球体的密度，获得多组拖曳力系数 ( $C_d$ ) 和雷诺数 ( $R$ ) 的数据点
- 与大量学者的物理试验数据对比，在  $1000 \leq R \leq 10000$  时拟合情况较好

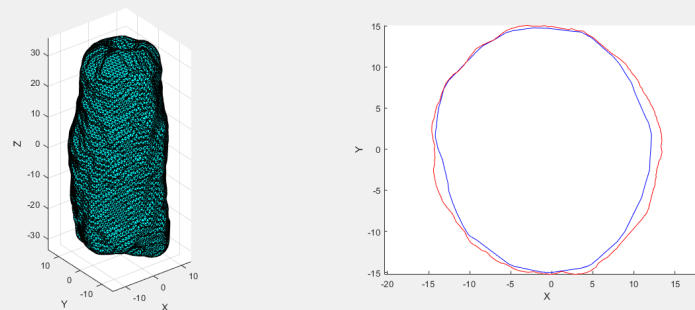
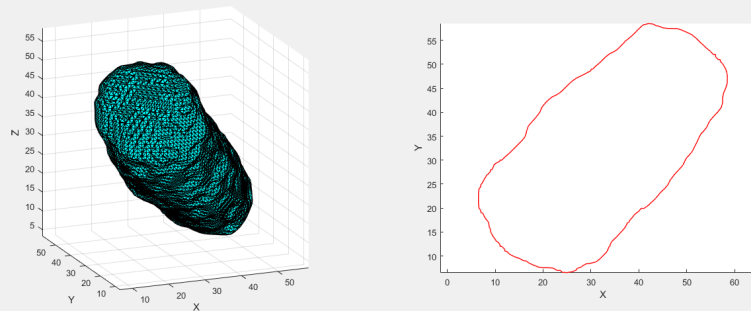


## 二、珊瑚砂沉降试验

- 编写MATLAB代码计算颗粒的投影面积、最大截面积
- 使用惯性张量的特征向量作为旋转矩阵，将模型旋转到标准方向



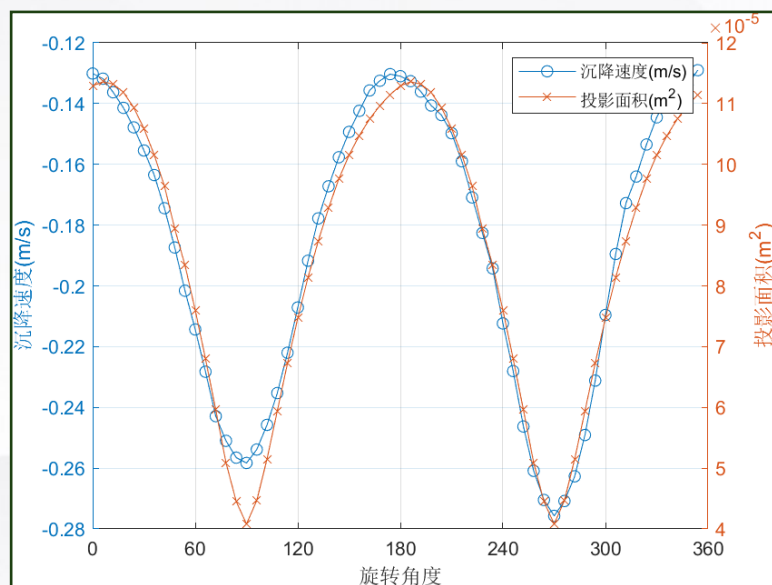
\*球形颗粒：投影面积和最大截面积



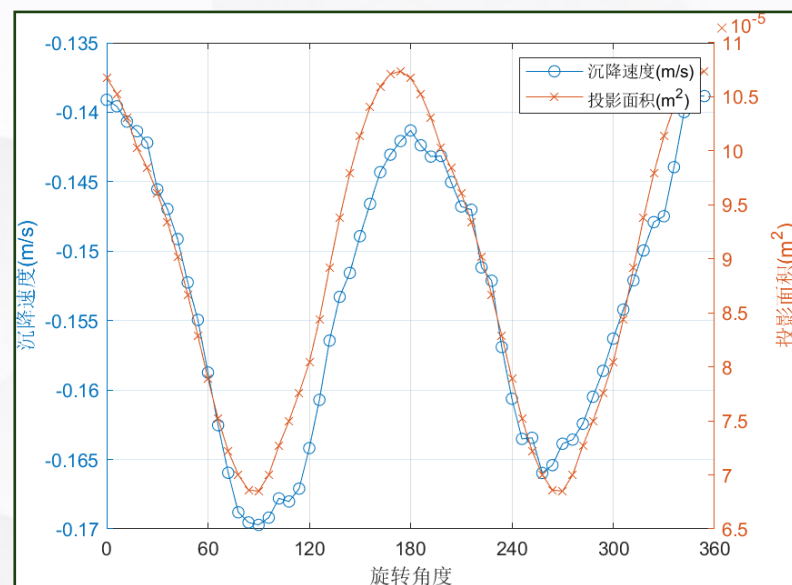
\*珊瑚砂颗粒：投影面积和最大截面积

## 二、珊瑚砂沉降试验

- 选取典型的块状和条状珊瑚砂颗粒，选定旋转轴每 $6^\circ$ 进行一次沉降模拟，共 $2*2*60=240$ 次
- 条状颗粒的沉降速度变化范围明显大于块状颗粒



\*条状颗粒：旋转角度-沉降速度和投影面积

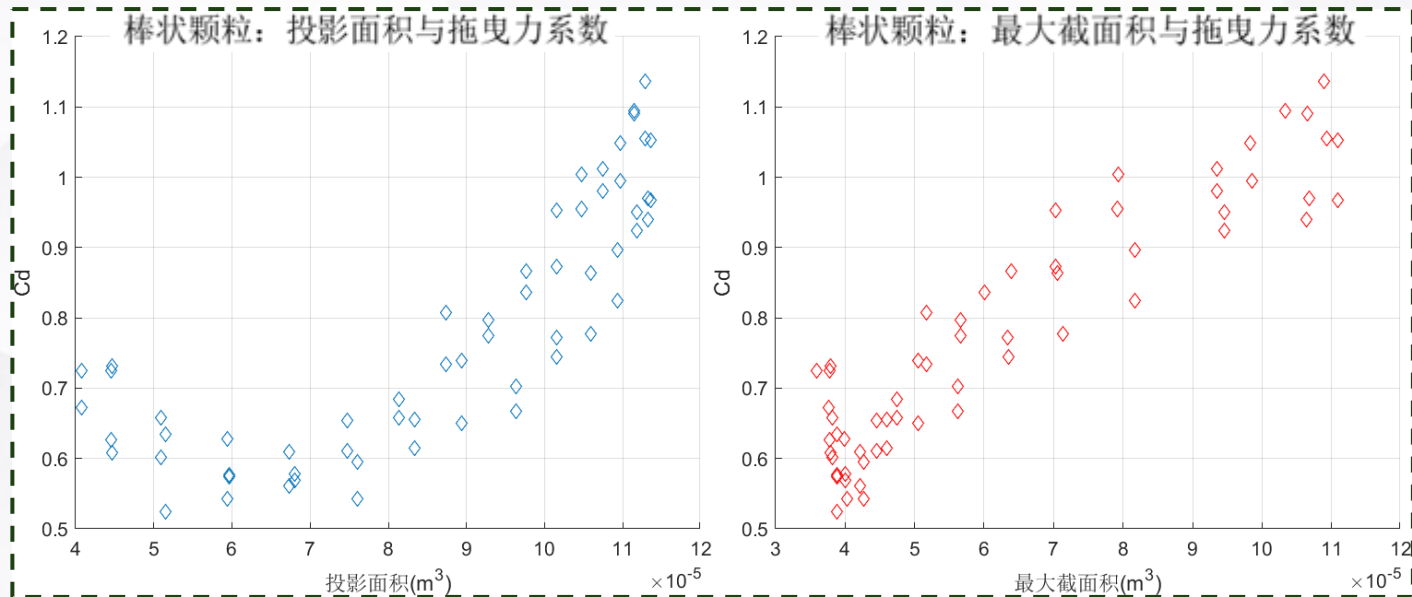
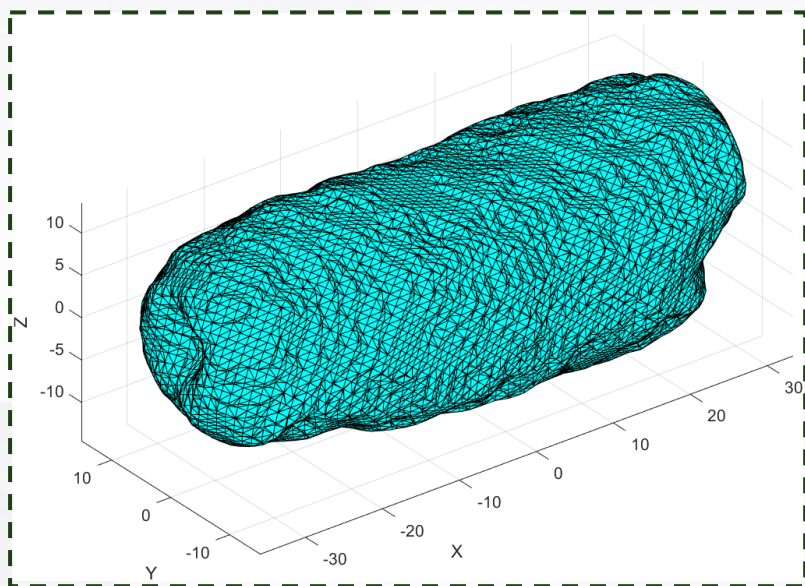


\*块状颗粒：旋转角度-沉降速度和投影面积

## 二、珊瑚砂沉降试验

结果显示：

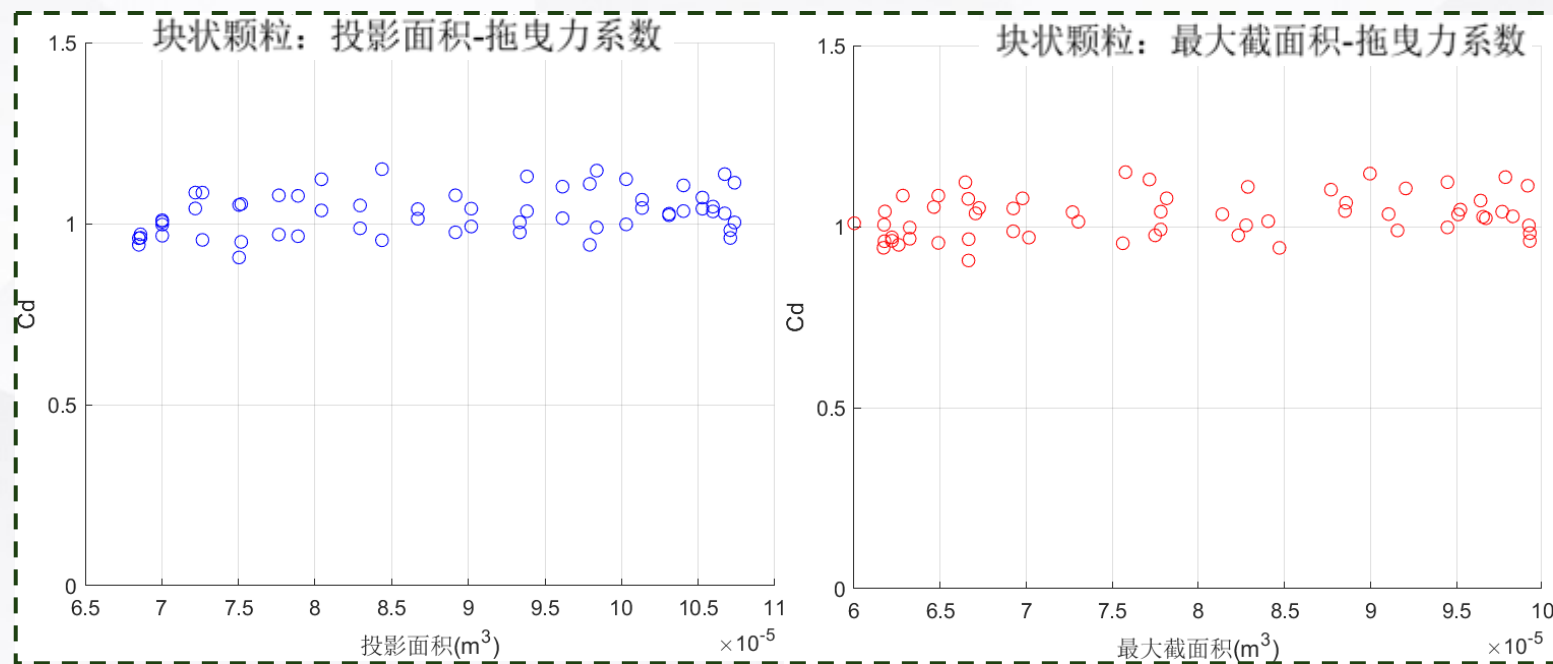
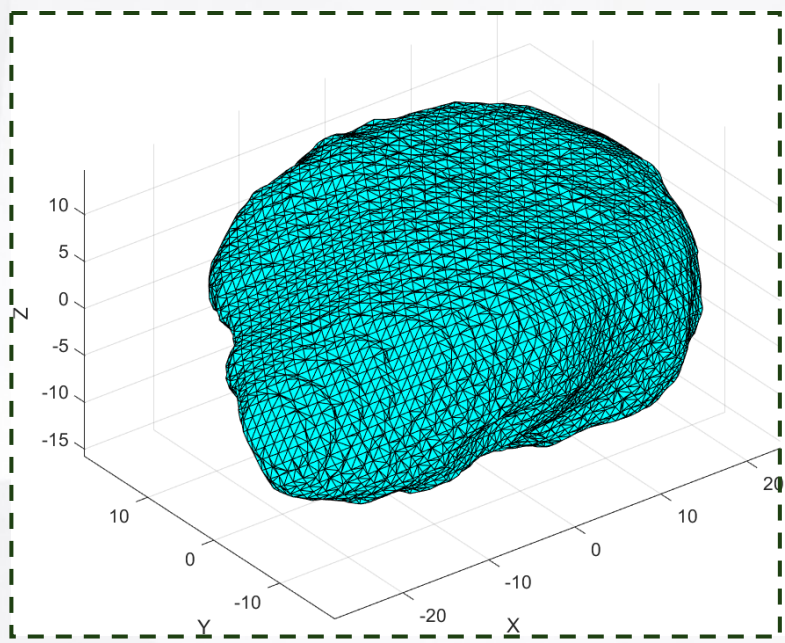
- 条状颗粒最大截面积与拖曳力系数的线性关系要好于投影面积一方，投影面积与拖曳力系数的关系可能更适合用对数关系描述
- 投影面积和最大截面积随旋转角度变化较大，因而拖曳力系数分布范围较大



## 二、珊瑚砂沉降试验

结果显示：

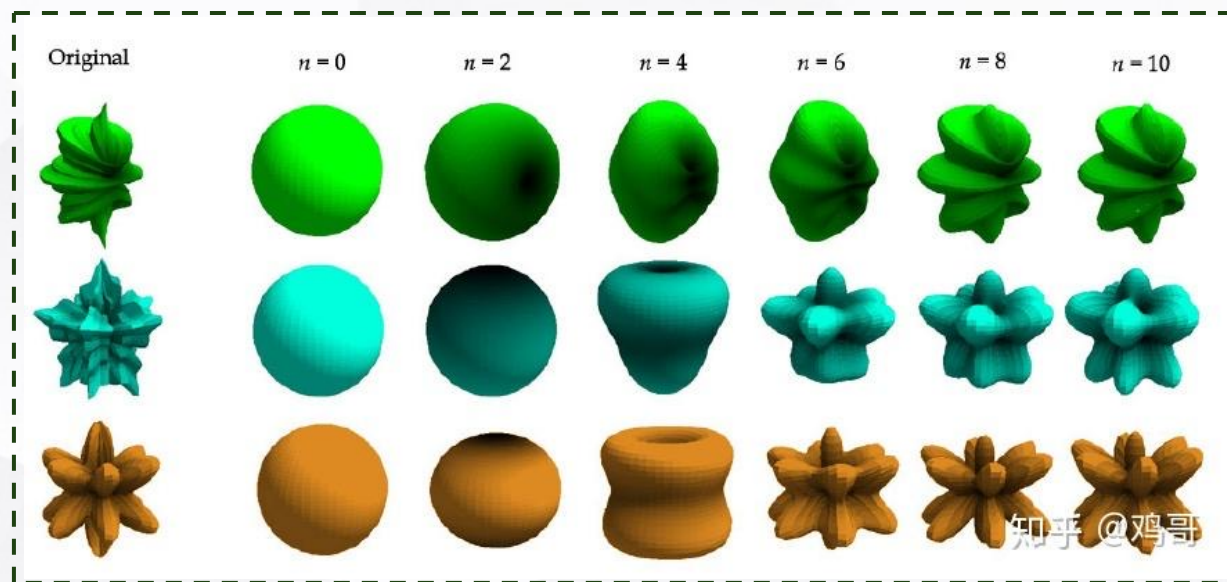
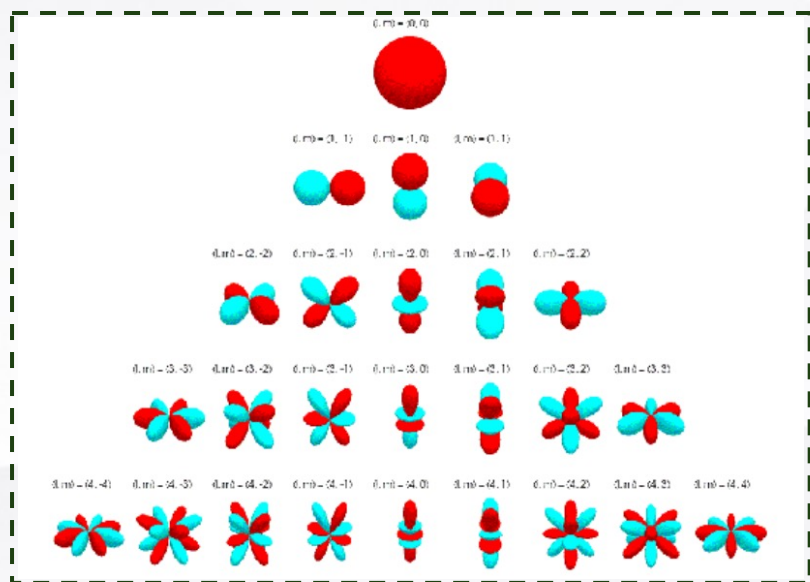
- 块状颗粒投影面积、最大截面积与拖曳力系数的线性关系程度接近，但变化趋势都不明显
- 与棒状颗粒相比，投影面积和最大截面积随旋转角度变化较小，因而拖曳力系数分布范围较小



### 三、珊瑚砂虚拟颗粒生成

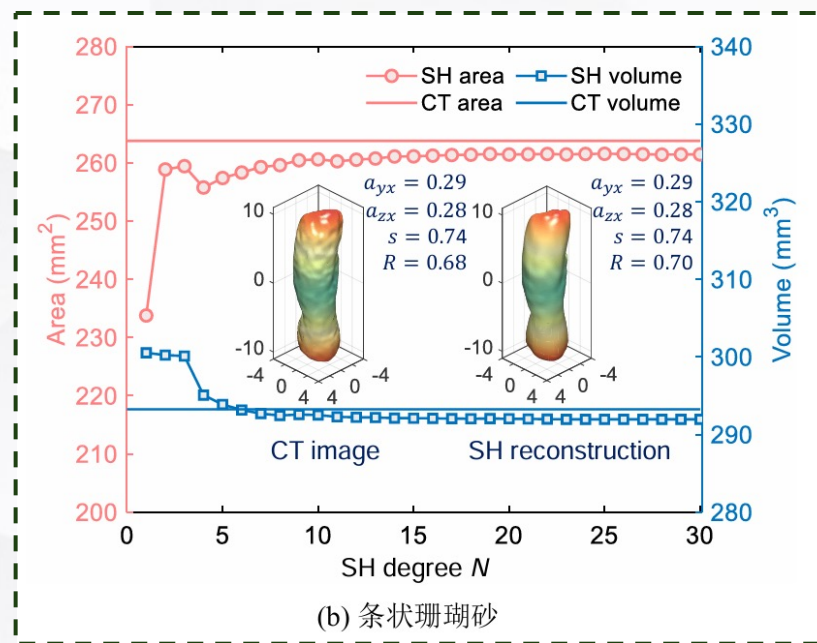
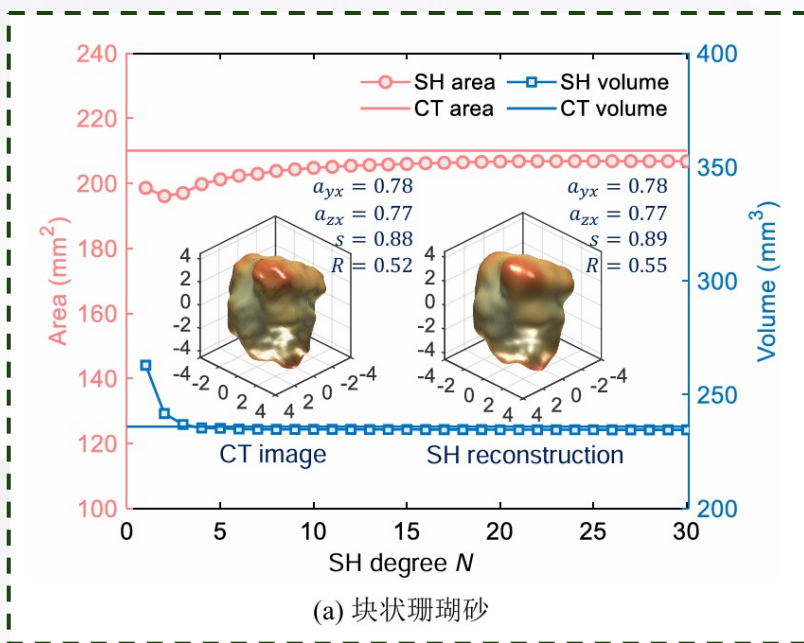
目的：

- 为了得到普适的统计规律，需要进行大量试验，真实珊瑚砂颗粒形态多样
- 真实颗粒扫描需要花费大量时间成本与经济成本



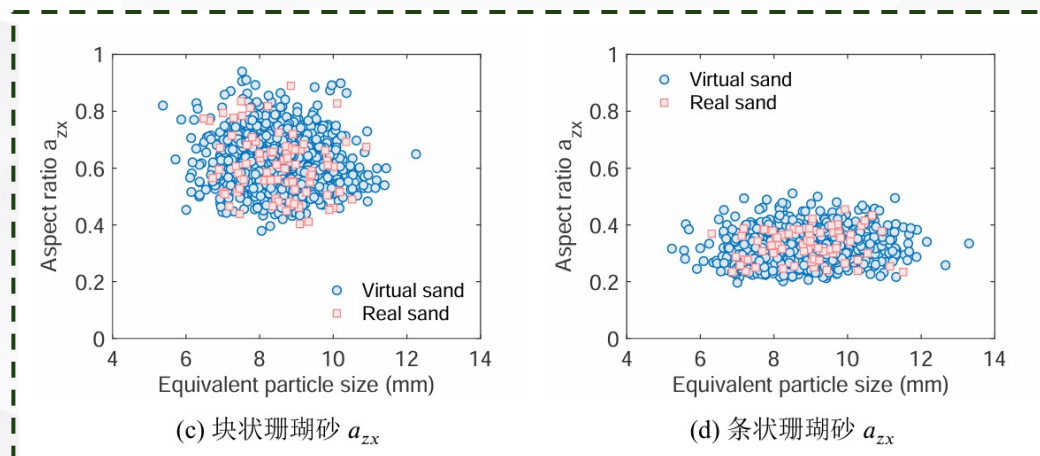
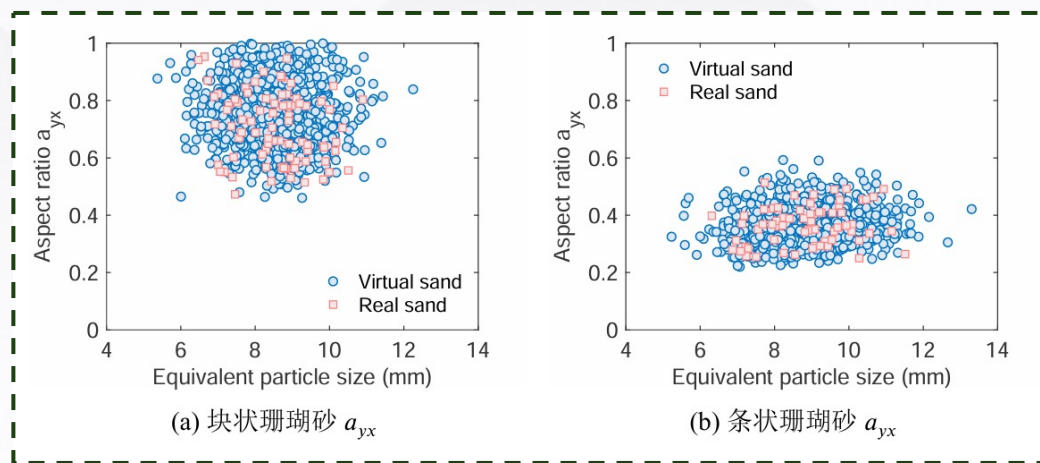
### 三、珊瑚砂虚拟颗粒生成

- 利用球谐函数重构了81个块状珊瑚砂、71个条状珊瑚砂的真实扫描模型
- 基于随机场理论，利用各球谐系数的方差与均值，随机生成了2000组10阶球谐系数
- 基于球面沃洛诺伊采样法，生成1997个可用于CFD-DEM模拟的虚拟颗粒模型



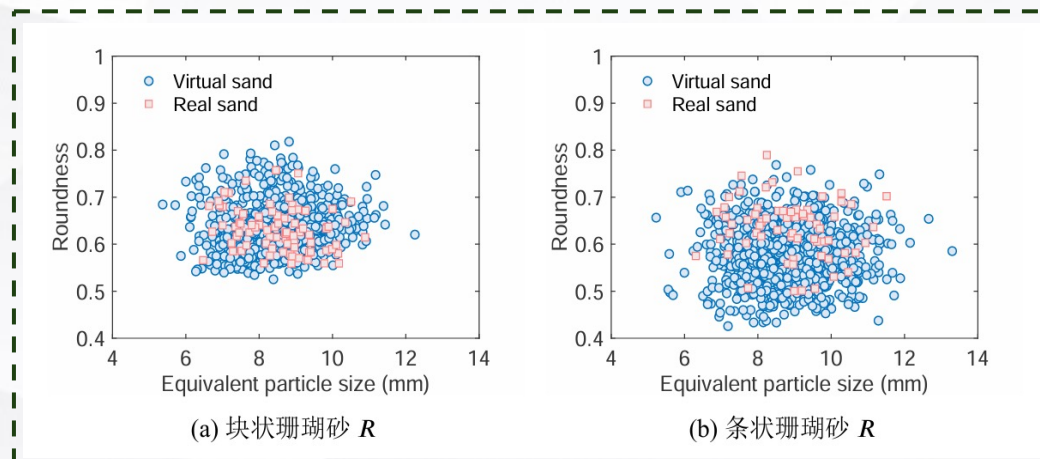
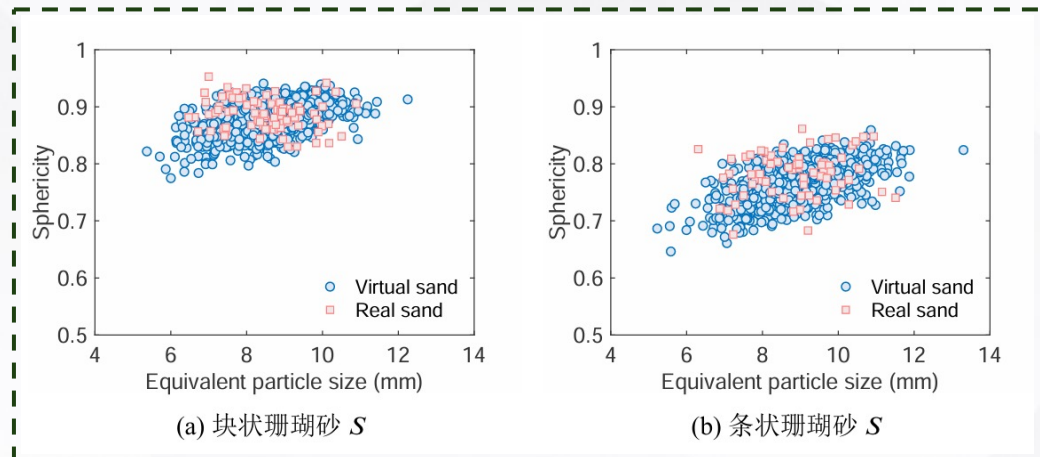
### 三、珊瑚砂虚拟颗粒生成

- 虚拟颗粒与真实颗粒几何参数对比：
- 长宽比、长细比分布范围接近
- 条状珊瑚砂颗粒的长宽比主要位于0.2~0.5的范围内，对应存在显著细长状。珊瑚砂颗粒长宽比的定量结果与其在视觉上观察到的形态特征相一致。



### 三、珊瑚砂虚拟颗粒生成

- 虚拟颗粒与真实颗粒几何参数对比：
- 球度和圆度分布范围接近
- 块状珊瑚砂颗粒的球度和圆度略大于条状珊瑚砂颗粒球度和圆度

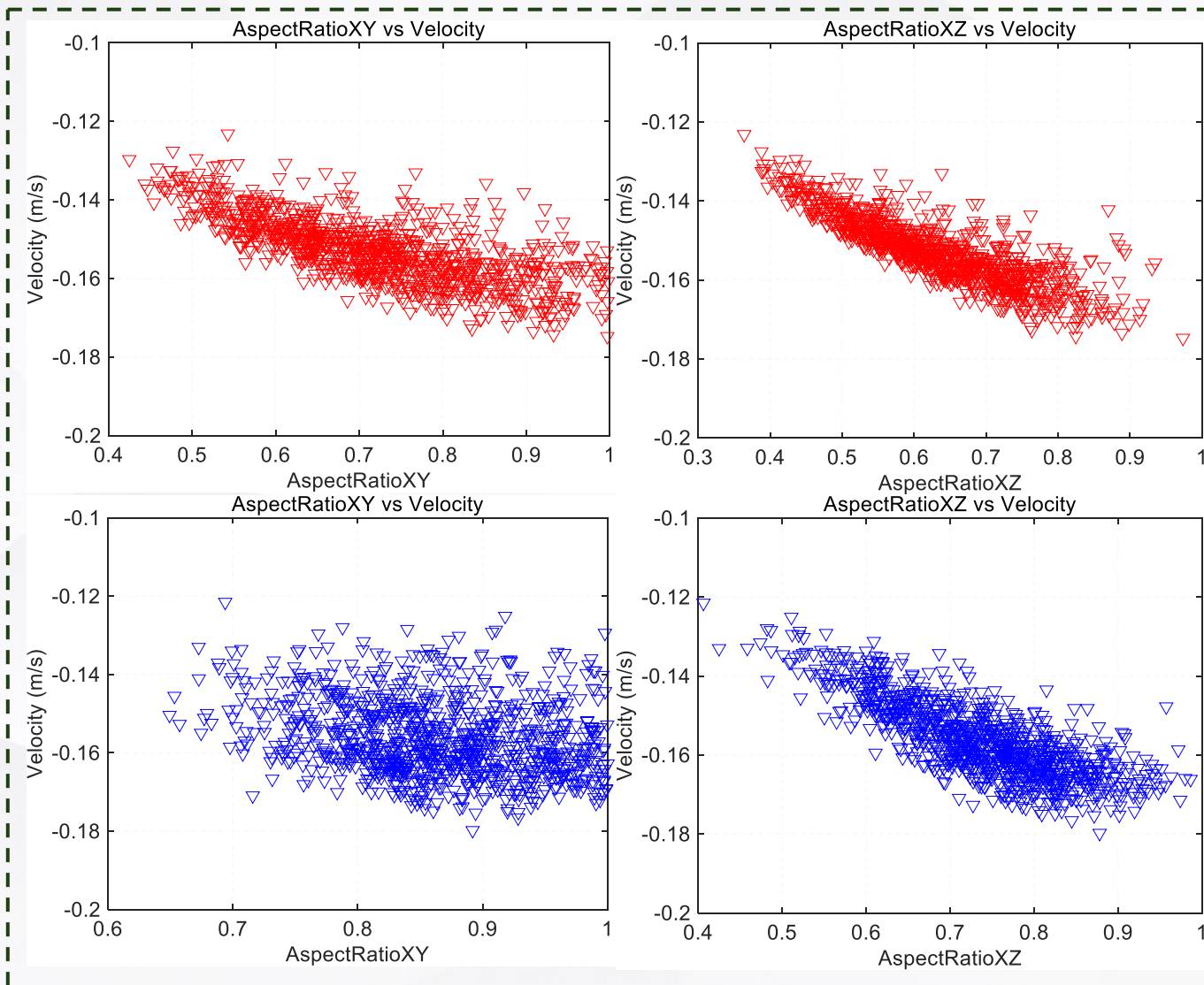


#### 四、批量进行虚拟珊瑚砂颗粒沉降数值模拟

- 进行1000组块状虚拟颗粒、997组条状虚拟颗粒的沉降试验
- 设定工况：
  - ◆ 流体密度 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 、动力粘度 $10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$
  - ◆ 颗粒密度 $1200\text{kg}/\text{m}^3$
  - ◆ 等效粒径 $0.01\text{m}$

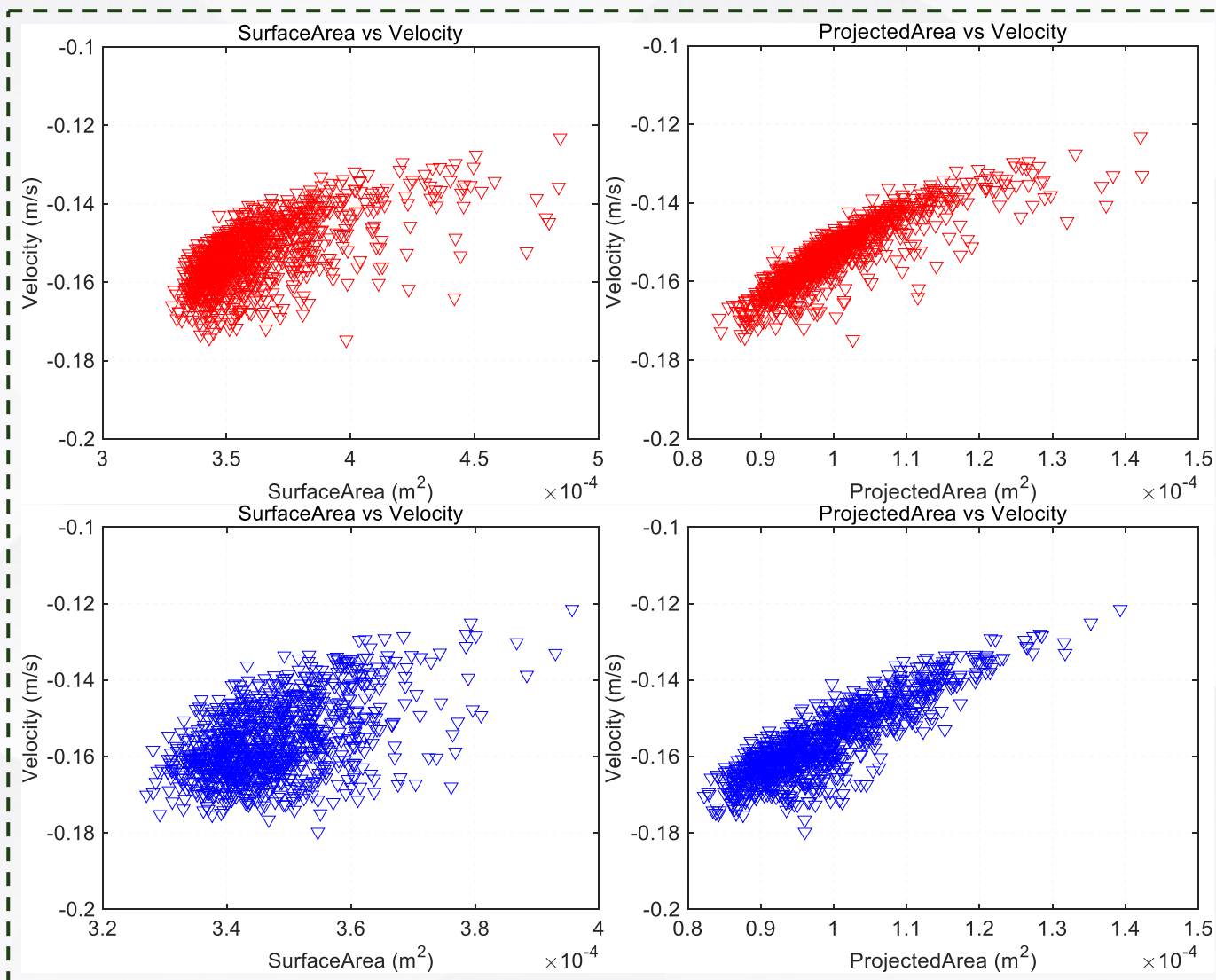
#### 四、批量进行虚拟珊瑚砂颗粒沉降数值模拟

- 长宽比（左） vs 速度
- 长细比（右） vs 速度
- 对于条状颗粒，其长宽比与长细比相近，且均与最终沉降速度有很强的线性关系
- 对于块状颗粒，其长细比与最终沉降速度的线性关系较长宽比更强



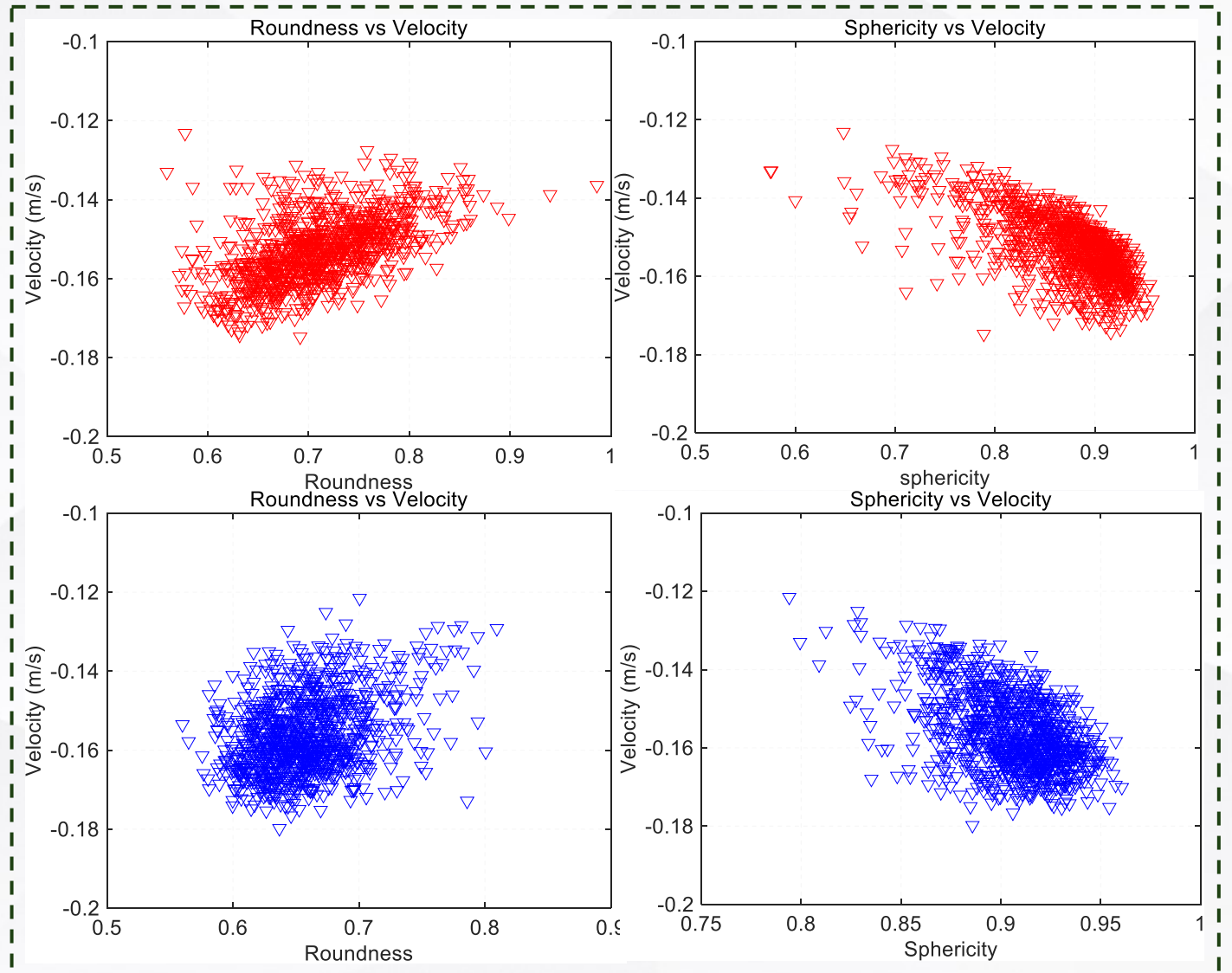
## 四、批量进行虚拟珊瑚砂颗粒沉降数值模拟

- 表面积（左） vs 速度
- 投影面积（右） vs 速度
- 对于条状和块状颗粒，其投影面积与速度的关系偏线性，且明显强于表面积与速度的关系



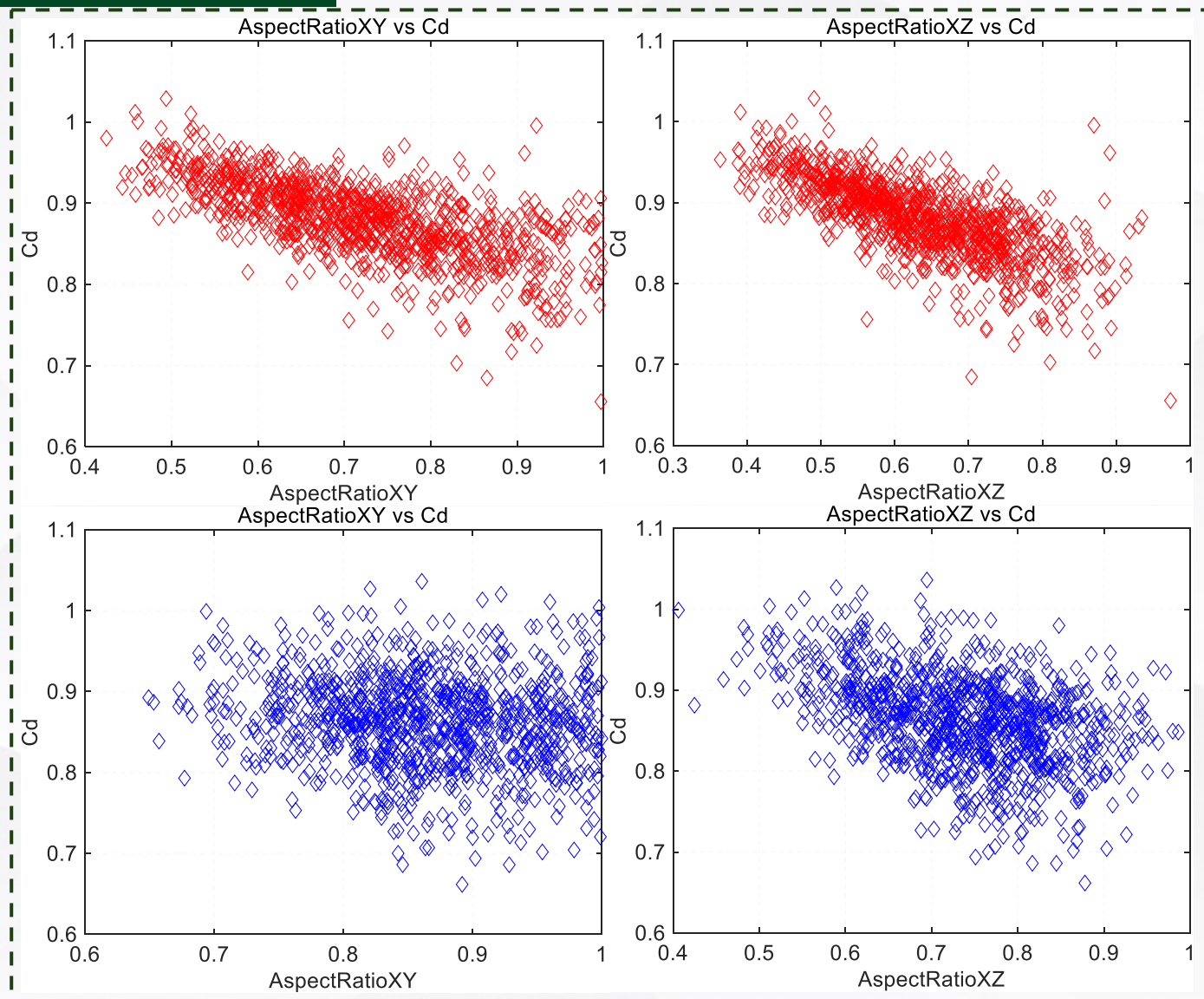
#### 四、批量进行虚拟珊瑚砂颗粒沉降数值模拟

- 圆度（左） vs 速度
- 球度（右） vs 速度
- 对于条状颗粒，其圆度与速度呈现较弱的线性关系，其球度与速度呈现较弱的对数关系
- 对于块状颗粒，圆度和球度在一个范围内呈发散状



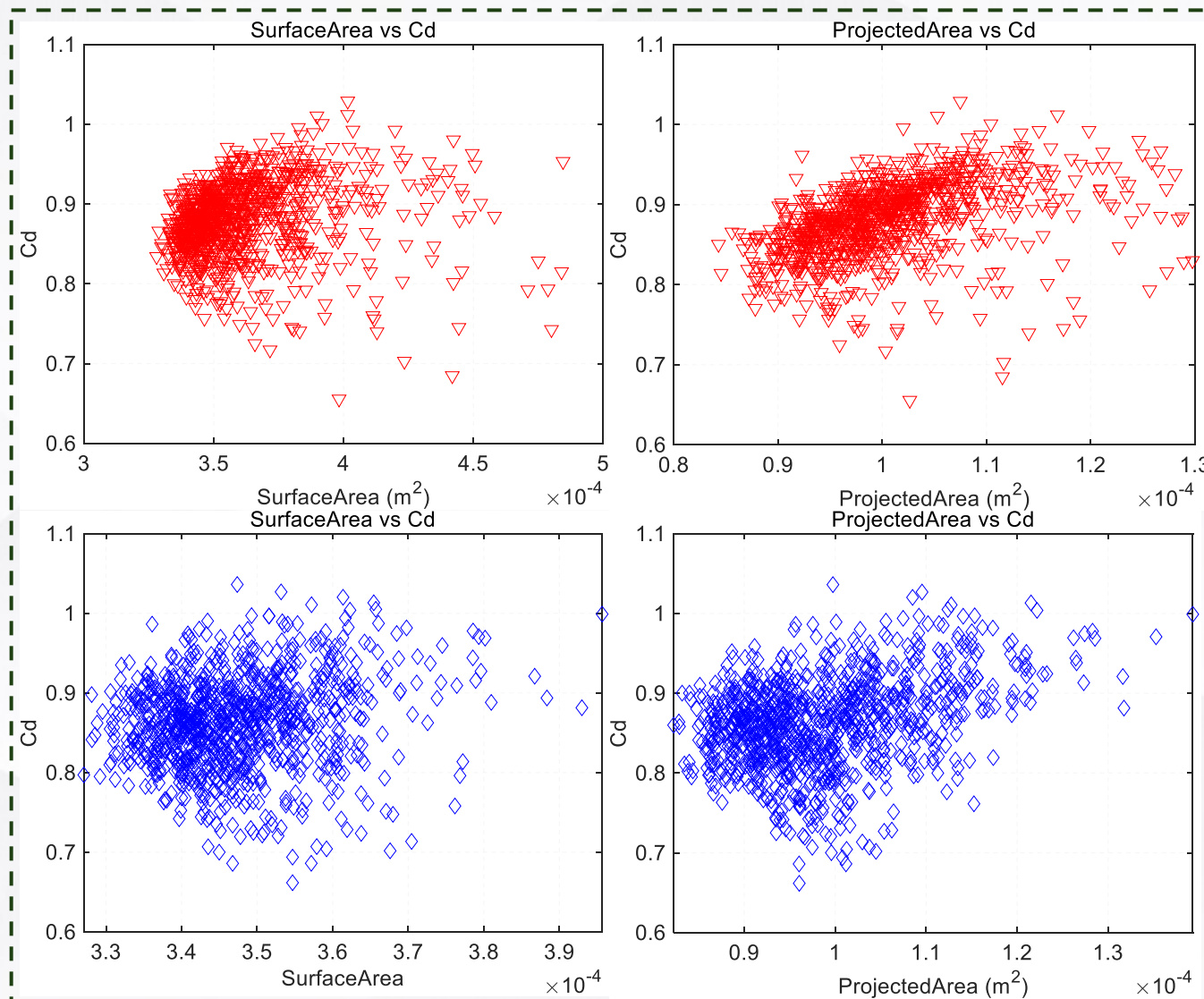
## 四、批量进行虚拟珊瑚砂颗粒沉降数值模拟

- 长宽比（左） vs 拖曳力系数
- 长细比（右） vs 拖曳力系数
- 对于条状颗粒，其长宽比、长细比与Cd呈现较强的线性关系
- 对于块状颗粒，其长宽比与Cd的线性关系不明显



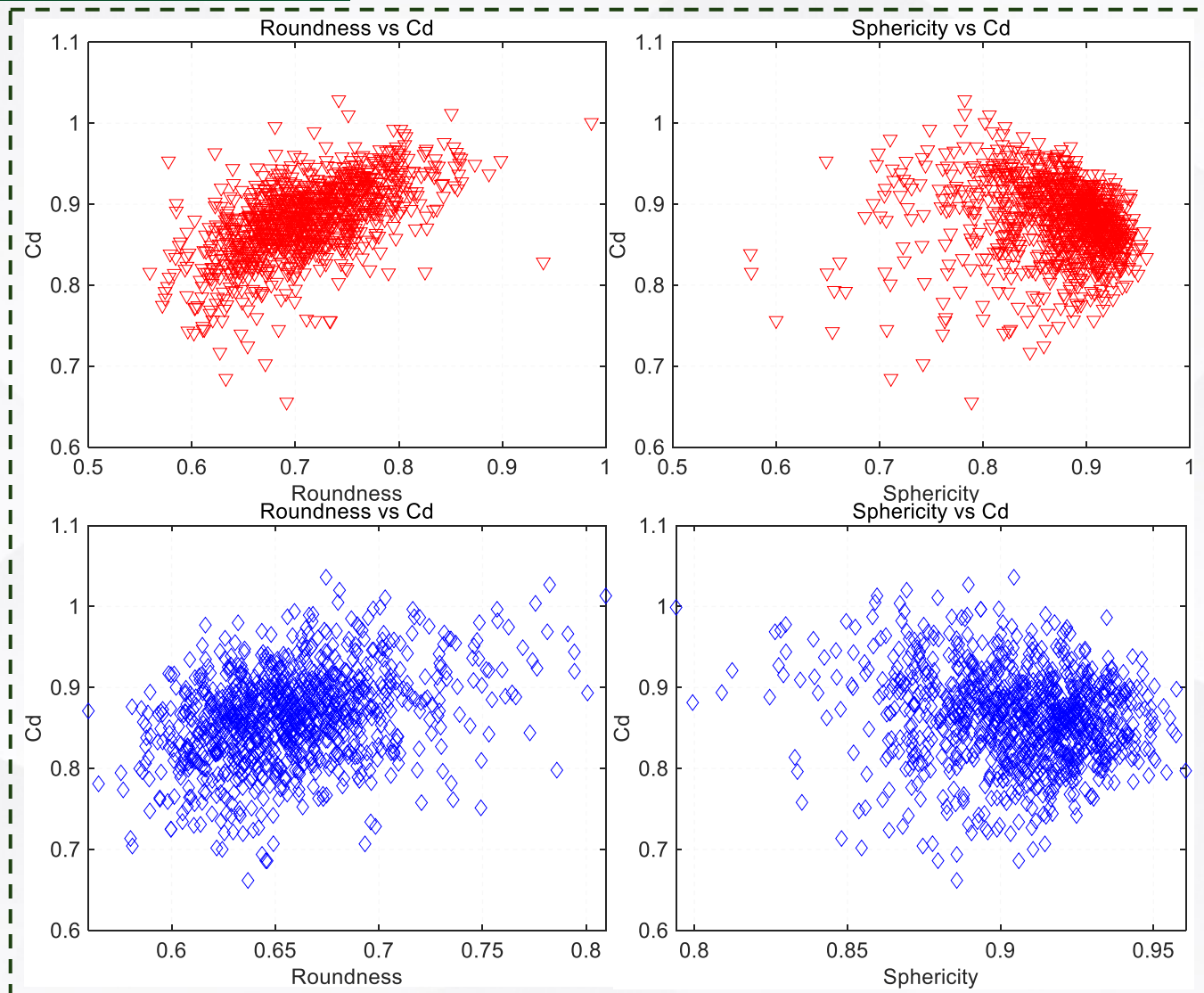
## 四、批量进行虚拟珊瑚砂颗粒沉降数值模拟

- 表面积（左） vs 拖曳力系数
- 投影面积（右） vs 拖曳力系数
- 对于条状颗粒，其表面积与Cd的统计规律呈放射状，投影面积与Cd呈较强的线性关系



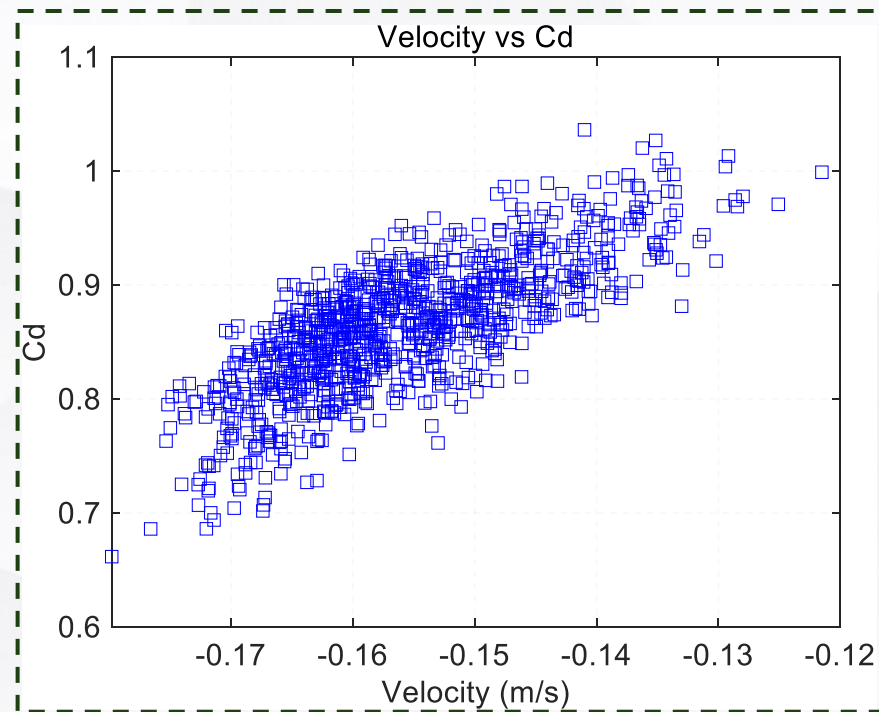
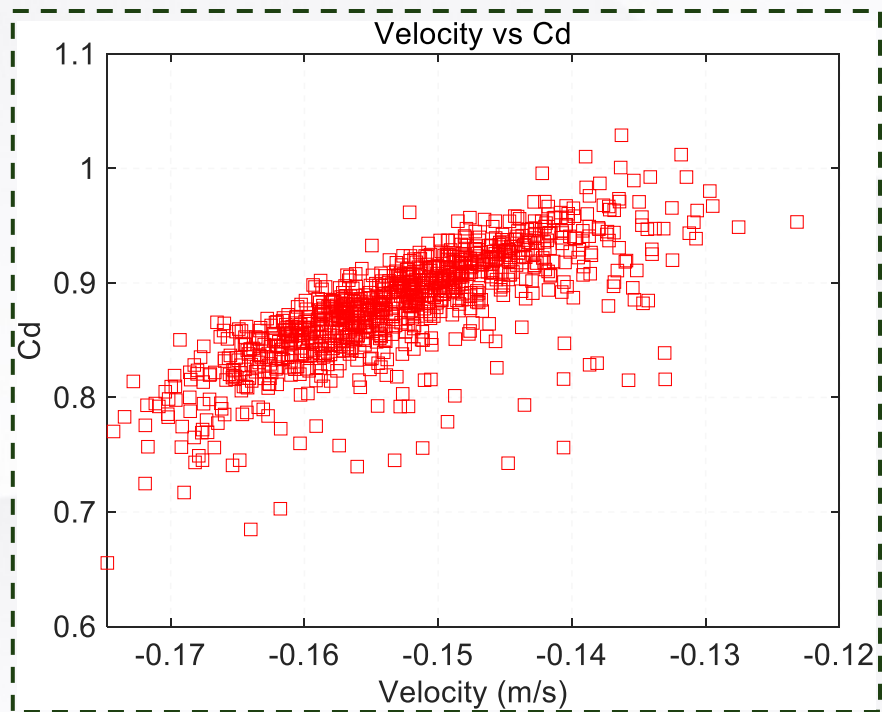
#### 四、批量进行虚拟珊瑚砂颗粒沉降数值模拟

- 圆度（左） vs 拖曳力系数
- 球度（右） vs 拖曳力系数
- 对于条状颗粒，其圆度与Cd呈现较强的线性关系，其球度与速度呈现与前述相似的放射状
- 对于块状颗粒，圆度和球度均在一个范围内呈发散状，无明显关系



#### 四、批量进行虚拟珊瑚砂颗粒沉降数值模拟

- 条状（左）与块状（右）颗粒的速度与拖曳力系数的关系明显
- 条状颗粒数据更集中，相关性更强





# 3

## 研究结论

RESERCH CONCLUSIONS



- 球谐系数阶数为10时，对颗粒的描述效果较好
- 球面沃洛诺伊采样点设为1000时，可以较好地权衡还原度和迭代耗时
- 颗粒沉降的动力学行为与颗粒几何形态参数呈现很强的相关性
- 总的来说，颗粒长宽比与长细比对于拖曳力系数与最终沉降速度的相关性最强
- 对于条状颗粒，投影面积、圆度更适于建立相关模型
- 对于块状颗粒，投影面积最适合建立相关模型，其他参数的影响还有待后期研究补充论证



# 4

## 经费使用情况

FUND USAGE STATUS



- 购置了两块用于搭建Linux环境的固态硬盘与系统安装U盘
- 购置了内存条，便于后期有关网格划分试验的进行
- 购置了流体力学相关书籍



**望各位批评指正**