

惯性颗粒对湍流非湍流界面特性影响的直接数值模拟研究

魏清清¹, 王萍¹, *¹兰州大学湍流颗粒研究中心, 兰州 73000

wping@lzu.edu.cn

介绍 Introduction

湍流/非湍流界面 (TNTI) 指的是流场中湍流区域和无旋流动区域的无规则边界, 其广泛存在于射流、尾流、混合层、湍流边界层等湍流流动中。现有发展边界层对湍流/非湍流界面特性 (TNTI) 影响的研究多集中在单相流, 而对发展边界层两相流的研究中更多集中于调制。对发展边界层中颗粒两相流湍流/非湍流界面特性的研究工作相对较少, 本文使用直接数值模拟探讨不同St数颗粒对湍流边界层TNTI的影响。

研究方法 Methods

数值模拟方法:

使用双向耦合对零压力湍流边界层进行直接数值模拟, 研究颗粒存在对TNTI的影响。雷诺数变化范围为 $Re_\theta = 300-1295$ 。流体控制方程为不可压缩流场无量纲控制方程。控制方程采用Kim et al. (2002)提出的隐式速度解耦过程的分步方法在时间上进行积分。在分块LU分解的基础上, 通过近似因式分解实现了速度-压力解耦和中间速度解耦 (Park & Sung 1995, 2001)。时间上采用Crank-Nicholson方法离散, 空间采用二阶交错网格中心差分格式进行求解。

将颗粒看做是刚性球体, 采用点力模型, 流场颗粒体积分数 $< 10^{-3}$ 为稀疏流, 不考虑颗粒间的碰撞。同时也不考虑重力对流场的影响。由于本文研究颗粒与流体的密度比远大于1, 压力梯度力, 附加质量力等其它力都可以被忽略, 拖曳力为主要的在颗粒上的力。颗粒下壁面完全反弹。在计算域中以出口边界层厚度 (单相流) 的高度位置以内随机释放颗粒。为保证颗粒体积分数一定, 当颗粒从流向出口边界出去时, 就在流向入口边界处引入相同数量的颗粒。

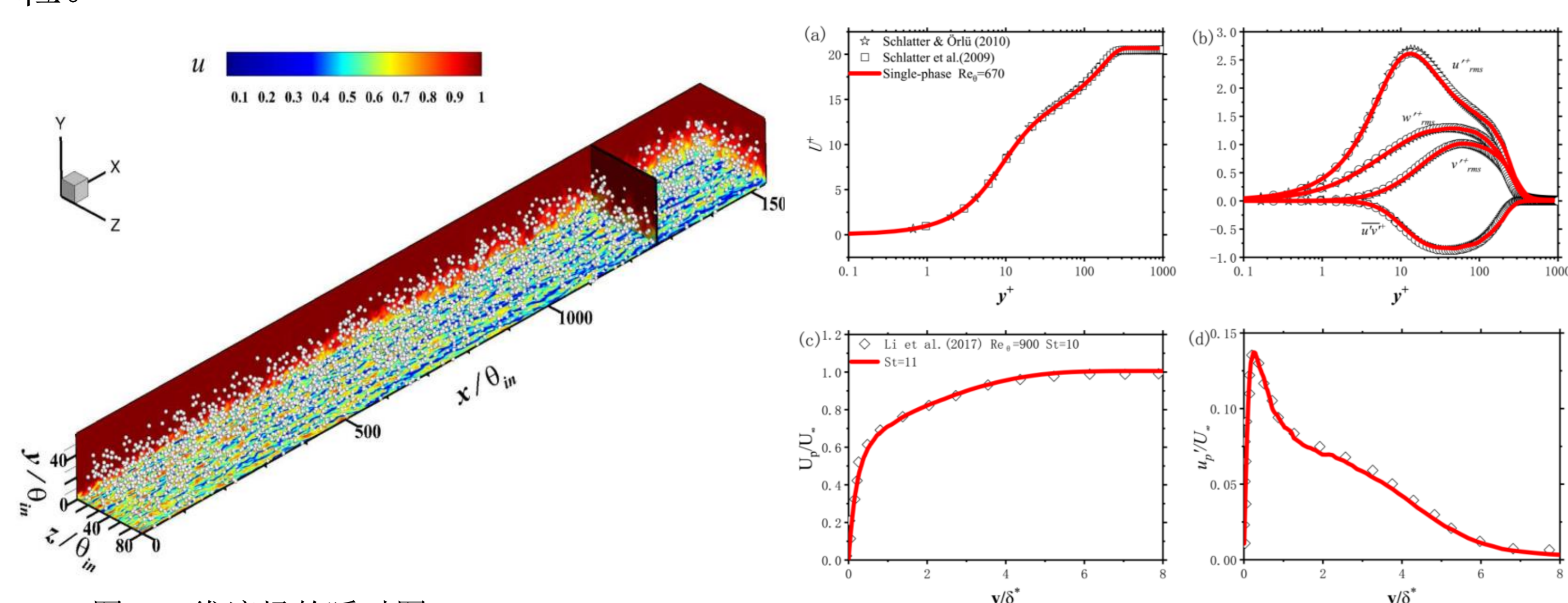


图: 三维流场的瞬时图

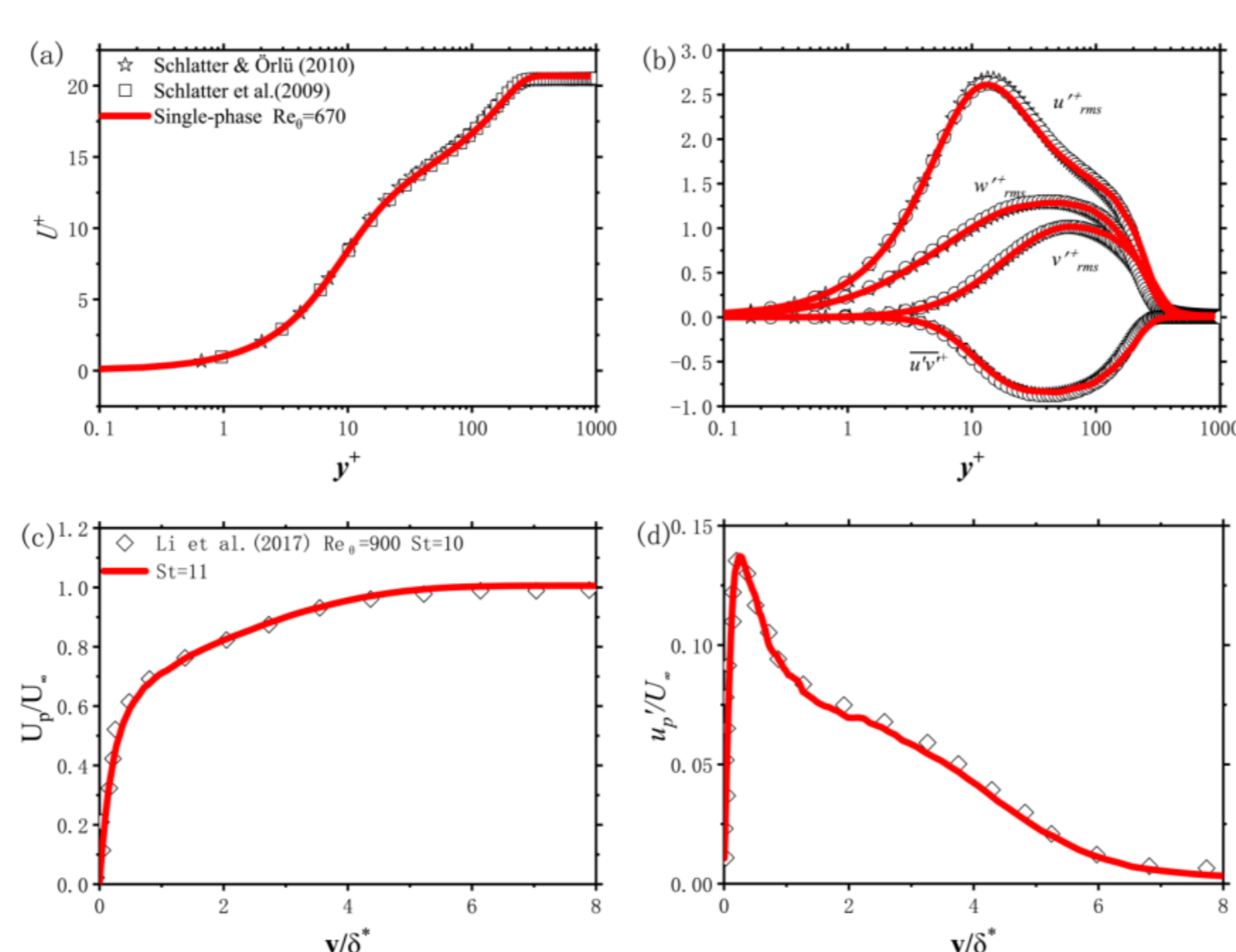
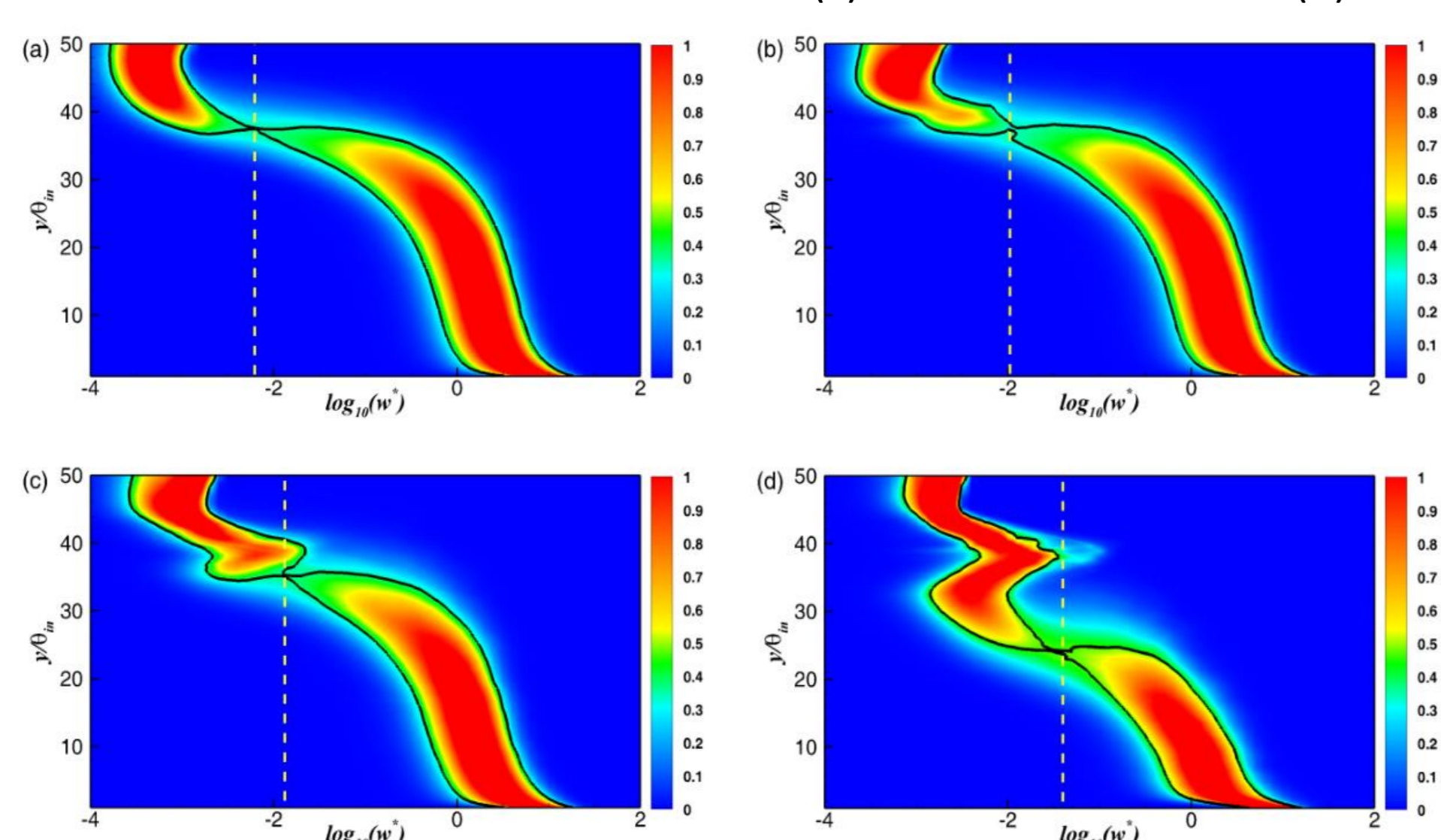


图: (a)平均流向速度和(b)湍流应力的剖面图。(c)颗粒平均流向速度和(d)颗粒流向脉动速度

图: $\log_{10} \omega^*$ 概率密度分布图。(a)单相流 (b)St=2 (c) St=11 (d) St=53

阈值检测:

湍流/非湍流界面通常采用流场中某个物理量的大小作为一个阈值来提取其等值面作为界面, 我们采用拟涡能阈值识别湍流/非湍流界面。 $\omega^* = \omega \frac{u\sqrt{\delta^+}}{u_\tau^2}$, 这与Borrell & Jiménez (2016)、Reza Jahanbakhshi(2021)采用的方法一致。

结论 Conclusions

模拟结果发现: 两相流中湍流非湍流界面 (TNTI) 的平均高度和界面的分形维数相比于单相的湍流发展边界层均有所降低, 同时通过对界面条件平均发现, TNTI界面附近, 颗粒的存在会使流向、垂向平均脉动速度及湍流强度在界面附近出现跳变现象。通过对三种不同St数下气固两相流中颗粒在TNTI界面附近分布的分析, 发现随着St数的增加, TNTI界面的平均高度和分形维度的降低越明显, 且界面跳变现象越显著。基于对TNTI界面附近颗粒的相对速度和体积分数的分析, 发现这种跳变现象分别是由于界面附近颗粒体积分数的下降和颗粒在界面附近的聚集所致。颗粒使得高低速大尺度结构与水平面的倾斜角度均变小, 同时高度变低, 尺度变大。颗粒的存在影响了外区大尺度结构, 从而影响了界面的几何性质。

结果/讨论 Results/Discussion

用拟涡能方法判断阈值发现界面高度 y_i 的概率密度函数并不是标准正态分布, 发现单相流中的 y_i 是正偏的, 使得pdf峰值位置低于 y_i 的平均值。颗粒的存在会影响界面高度 y_i 的概率密度函数。

随St数的增大界面的分形维数 D_f 降低, 颗粒使得以分形维数衡量的界面的复杂程度降低。此处获得的分形维数略小于高雷诺数TBL (de Silva et al. 2013) 的结果 (7/3), 这可能是由于当前雷诺数较低, 尺度分离不足。

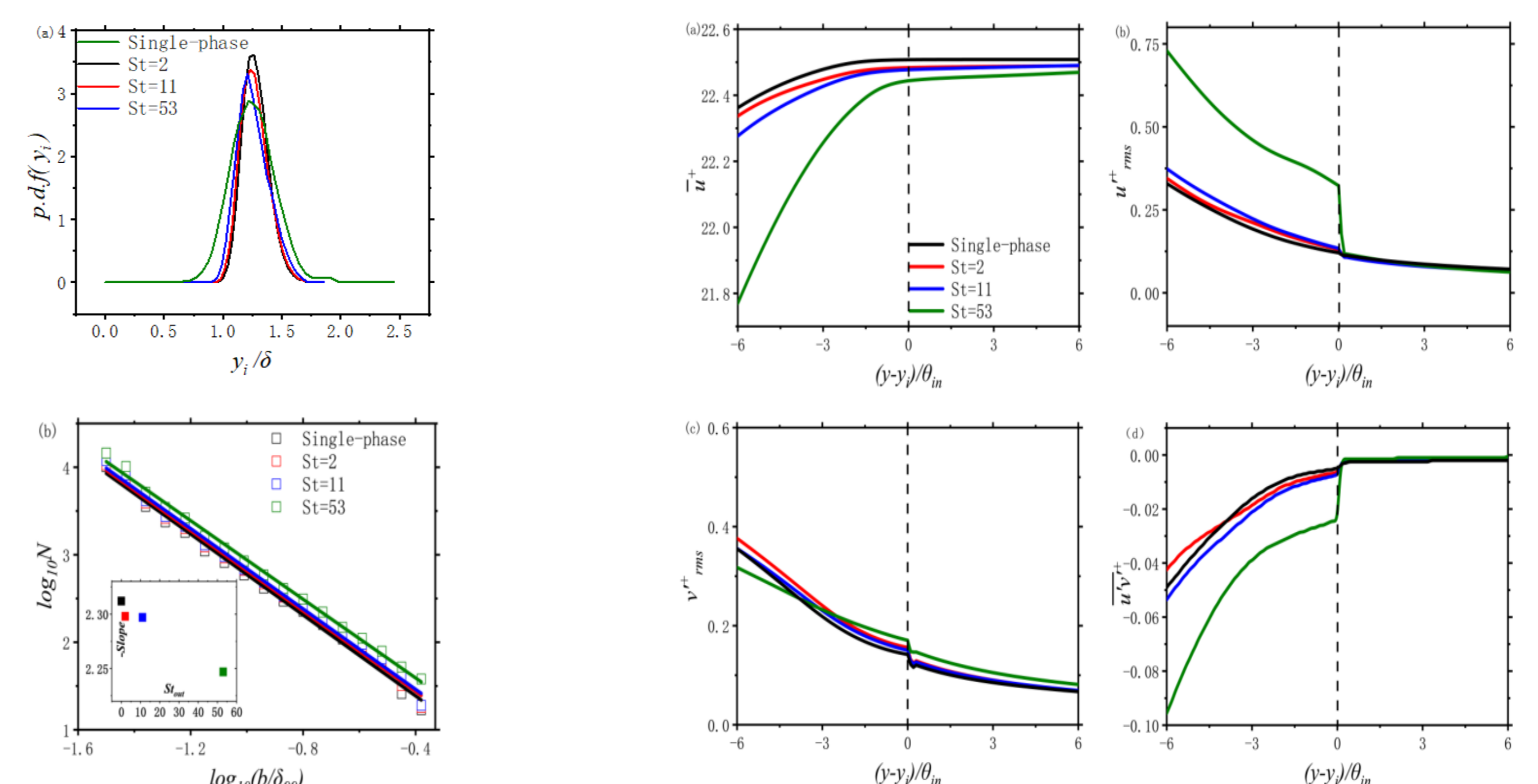


图: (a)界面高度的概率密度函数。(b)不同表面的分形维数。

图: 湍流应力的条件平均值

在T-NT界面附近, 流向、垂向平均速度及湍流强度都会降低。同时界面附近出现跳变现象。流向湍流强度和雷诺应力的跳变现象更显著。同时St数越大, 跳变现象越明显。

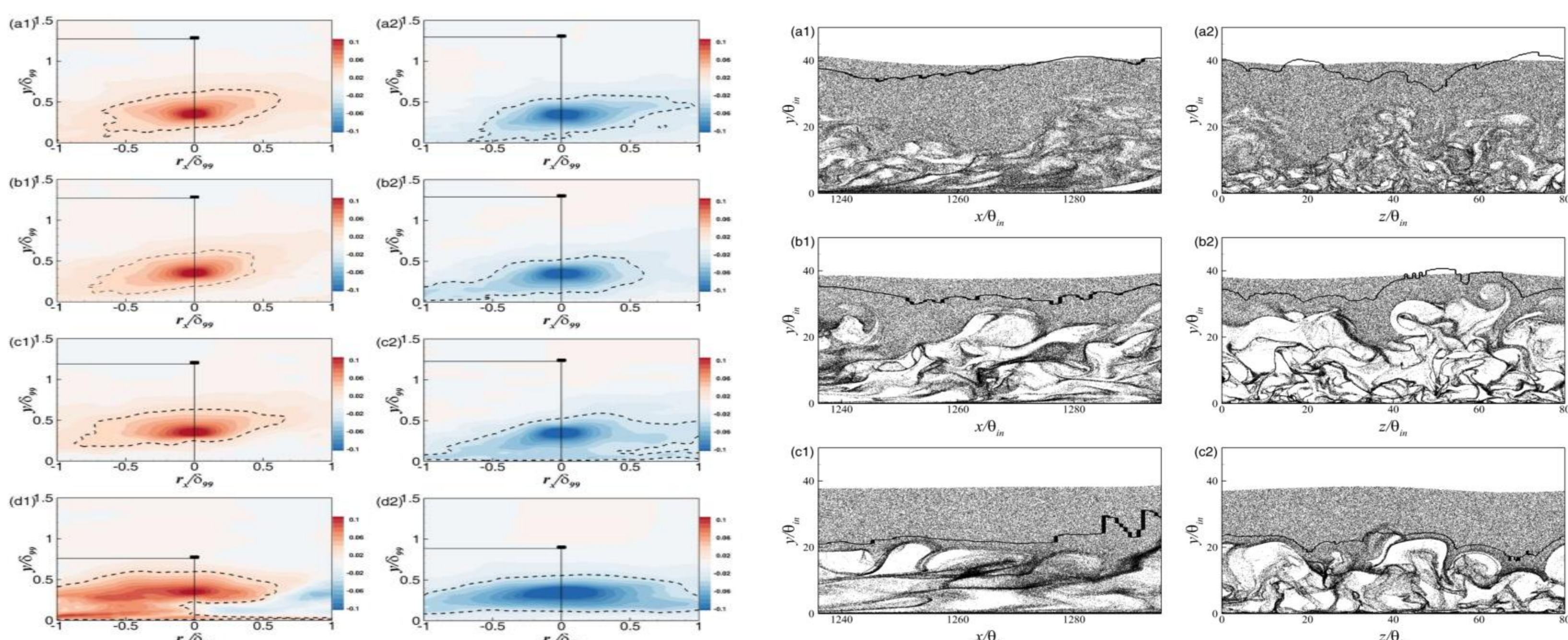


图: 基于高速和低速ISM核心的条件平均速度场

图: x-y平面和z-y平面瞬时颗粒的分布图和瞬时界面

随St数的增大, 高低速结构对应的界面高度都降低。界面的变化与高低速大尺度结构有关。颗粒的存在影响了外区大尺度结构, 从而影响了界面的性质。

当St=53时, 界面附近颗粒有明显的聚集现象。