

空间非均加热对Rayleigh-Bénard系统中湍流结构与传热特性的影响研究

赵超本 张义招 王伯福 吴建钊* 庄启亮* 周全*

上海大学力学与工程科学学院 上海市应用数学和力学研究所

*jianzhao_wu@shu.edu.cn; *klchong@shu.edu.cn; *qzhou@shu.edu.cn

介绍/亮点 Introduction/Highlight

本文以经典Rayleigh-Bénard(RB)系统为研究对象, 通过在下导板上施加一个正弦构型的温度驱动, 系统地研究了非均匀加热对流动结构和传热特性的影响。通过对模拟结果的分析, 我们发现在固定温度振幅的情况下, 正弦非均匀加热对湍流热对流的调制作用主要取决于波数的大小, 即小波数的时候在温度较高的波峰区域有大量的羽流生成促进了系统传热(以Nusselt数 Nu 为特征), 随着波数的增加, 增强效应减弱。当波数大于临界值时, 系统流动以及传热趋于经典的RB系统。通过理论分析, 我们提出了两个空间调制深度 δ_{k_1} , δ_{k_2} 用于刻画非均匀加热影响的主要区域。根据 δ_{k_1} , δ_{k_2} 与温度边界层 δ_{th} 的关系, 非均匀加热对RB系统的调制作用可以归纳为三个区域: (i) $\delta_k < \delta_{th}$ 经典RB流动区域, 此区间分均匀加热调制深度小于温度边界层厚度, 调制效应不穿透边界层, 对系统的流动结构和传热几乎没有影响; (ii) $\delta_{k_2} < \delta_{th} < \delta_{k_1}$ 部分调制区域, 此时热相位区域触发温度边界层产生大量羽流, 促进了系统传热; (iii) $\delta_{th} < \delta_{k_2}$ 完全调制区域, 冷相位低温区域开始影响对流, 从而改变 Nu 增强的趋势。

研究方法 Methods

基于Oberbeck-Boussinesq近似假设, Rayleigh-Bénard(RB)系统控制方程:

$$\partial_t \bar{\mathbf{u}} + (\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \bar{\mathbf{u}} = -\nabla p + \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \nabla^2 \bar{\mathbf{u}} + \theta \mathbf{e}_z,$$

$$\partial_t \theta + (\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \theta = \sqrt{\frac{1}{RaPr}} \nabla^2 \theta,$$

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} = 0$$

控制参数: $Ra = \frac{\alpha g \Delta H^3}{\nu \kappa}$ $Pr = \frac{\nu}{\kappa}$

响应参数: $Nu = \frac{(w\theta) - \kappa \partial_z \theta}{\kappa \Delta / H}$
 $Re = \frac{U_{rms} H}{\nu}$

通过在下导板上施加一个正弦构型的温度边界条件: $\theta_{bot}(x) = 1 + A \sin(2\pi kx + \varphi)$, 采用直接数值模拟(DNS)进行计算(二维采用谱元法Nek5000, 三维采用二阶精度有限差分)。本研究固定 $Pr=0.7$, 温度振幅 $A=1$ 。

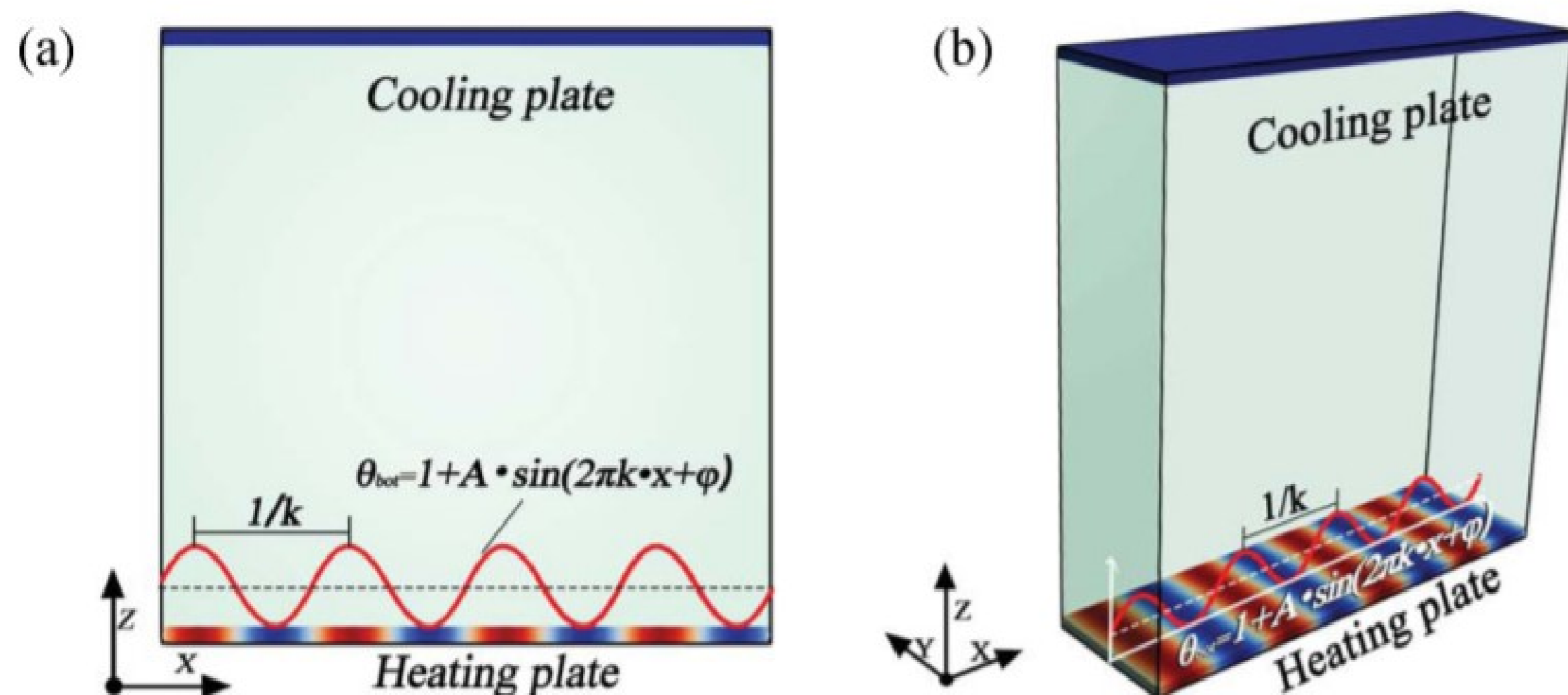
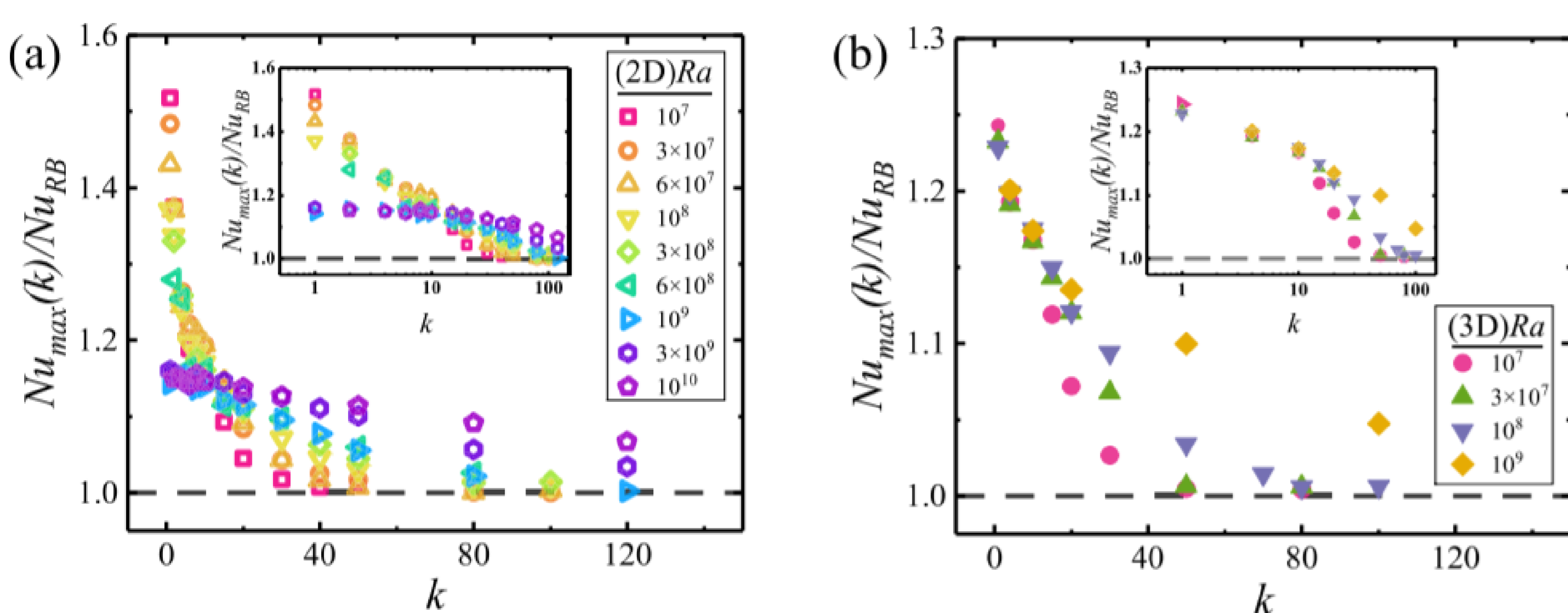


Figure 1: Sketches of the (a) 2D and (b) 3D convection cells with the coordinate systems.

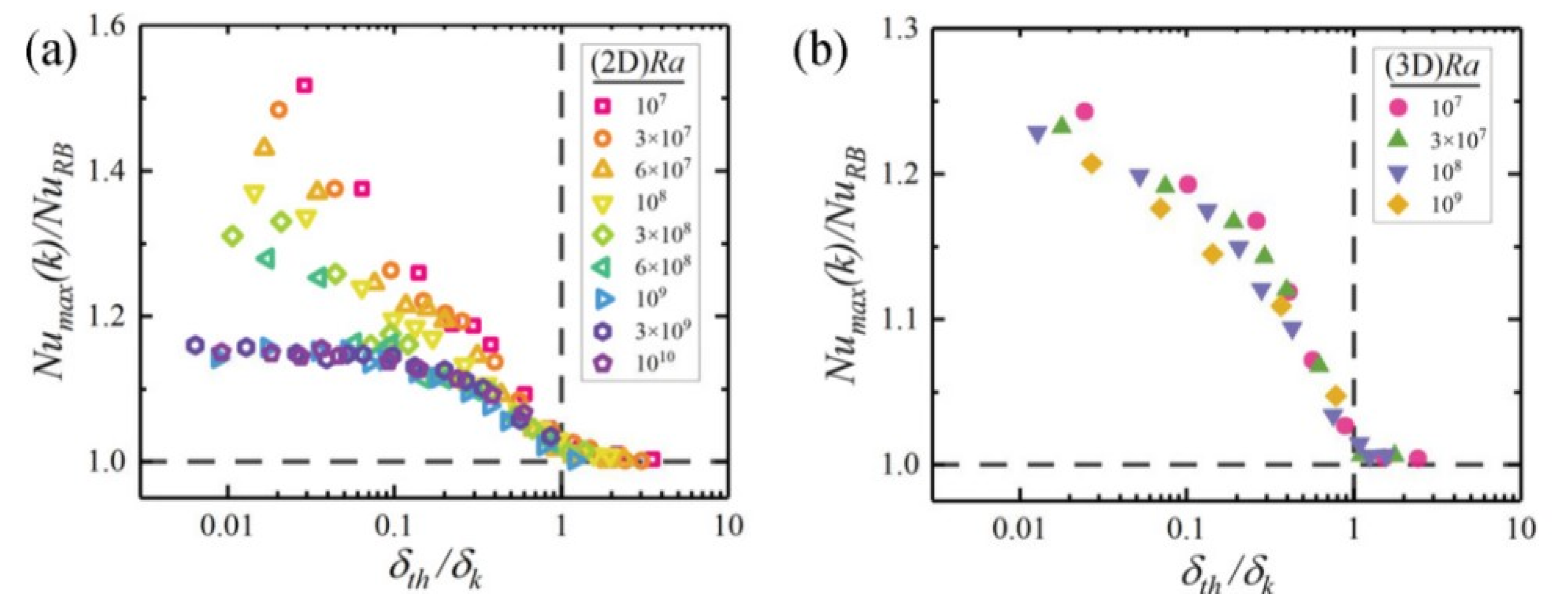
结果/讨论 Results/Discussion

Figure 2: Normalized Nusselt number $Nu_{max}(k)/Nu_{RB}$ vs heating wave number k for various Rayleigh numbers Ra in (a) 2D and (b) 3D cases. The insets show the corresponding semilogarithmic plots.

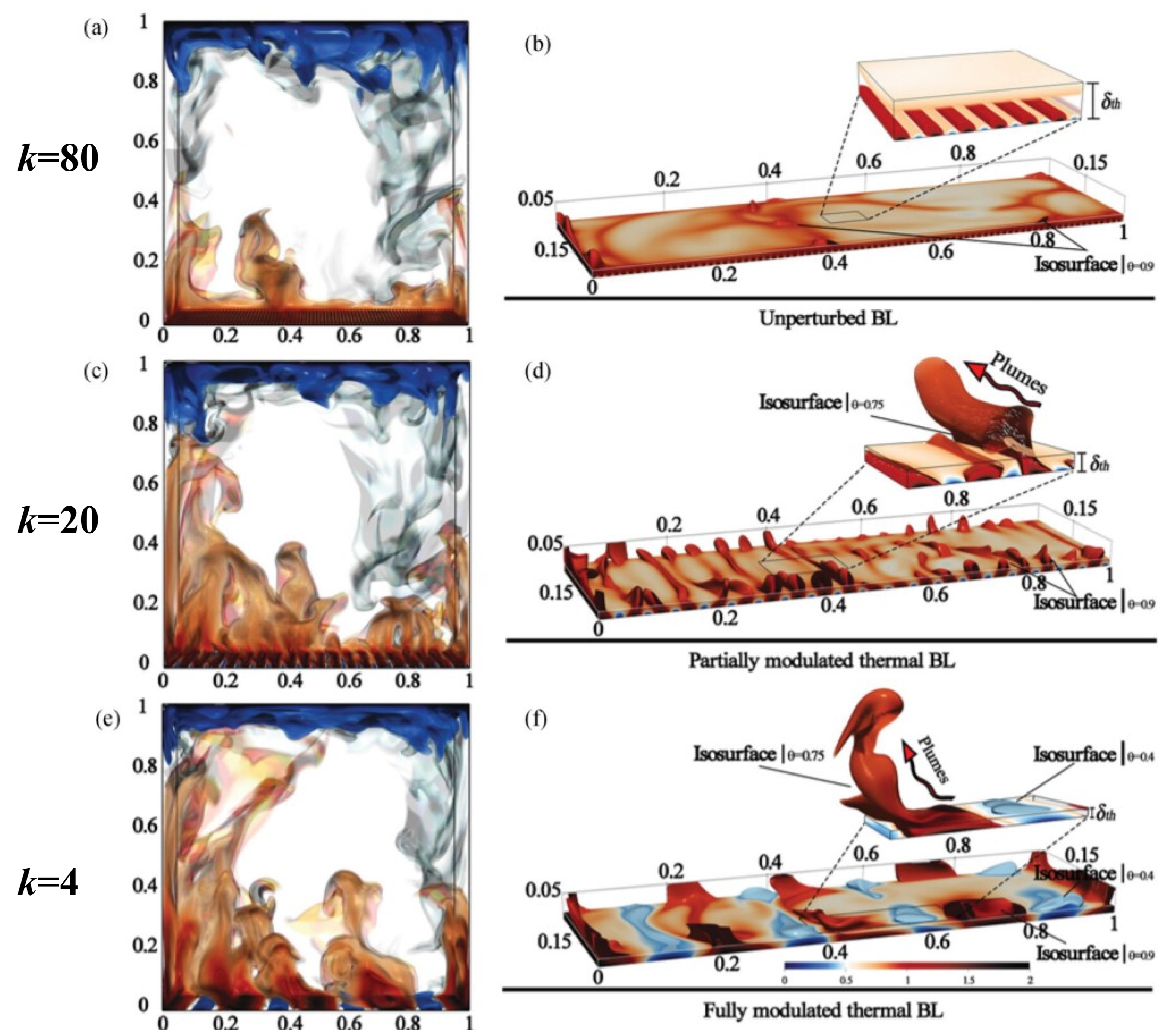
通过对模拟结果的分析, 我们发现在固定温度振幅的情况下, 正弦非均匀加热对湍流热对流的调制作用主要取决于波数的大小, 即小波数的时候在温度较高的波峰区域有大量的羽流生成促进了系统传热(以Nusselt数 Nu 为特征), 随着波数的增加, 增强效应减弱。当波数大于临界值时, 系统流动以及传热趋于经典的RB系统。

结论 Conclusions

通过对二维三维模拟结果的分析, 在固定温度振幅的情况下, 正弦非均匀加热对湍流热对流的调制作用系统流动以及传热趋于经典的RB系统。我们提出了两个空间调制深度 δ_{k_1} , δ_{k_2} 用于刻画非均匀加热影响的主要区域。根据 δ_{k_1} , δ_{k_2} 与温度边界层 δ_{th} 的关系, 非均匀加热对RB系统的调制作用可以归纳为三个区域: (i) $\delta_k < \delta_{th}$ 经典RB流动区域, 此区间分均匀加热调制深度小于温度边界层厚度, 调制效应不穿透边界层, 对系统的流动结构和传热几乎没有影响; (ii) $\delta_{k_2} < \delta_{th} < \delta_{k_1}$ 部分调制区域, 此时热相位区域触发温度边界层产生大量羽流, 促进了系统传热; (iii) $\delta_{th} < \delta_{k_2}$ 完全调制区域, 冷相位低温区域开始影响对流, 从而改变 Nu 增强的趋势。

Figure 3: Normalized Nusselt number $Nu_{max}(k)/Nu_{RB}$ vs δ_{th}/δ_k for various Rayleigh numbers Ra in (a) 2D and (b) 3D cases. The vertical dashed line represents $\delta_{th}/\delta_k = 1$, indicating the onset of Nu enhancement.

通过理论分析, 我们提出了两个空间调制深度 δ_{k_1} , δ_{k_2} 用于刻画非均匀加热影响的主要区域。根据 δ_{k_1} , δ_{k_2} 与温度边界层 δ_{th} 的关系, 非均匀加热对RB系统的调制作用可以归纳为三个区域: (i) $\delta_k < \delta_{th}$ 经典RB流动区域; (ii) $\delta_{k_2} < \delta_{th} < \delta_{k_1}$ 部分调制区域; (iii) $\delta_{th} < \delta_{k_2}$ 完全调制区域。

Figure 4: Instantaneous flow structures observed under three regimes with $k=80$ (a,b), $k=20$ (c,d) and $k=4$ (e,f).