

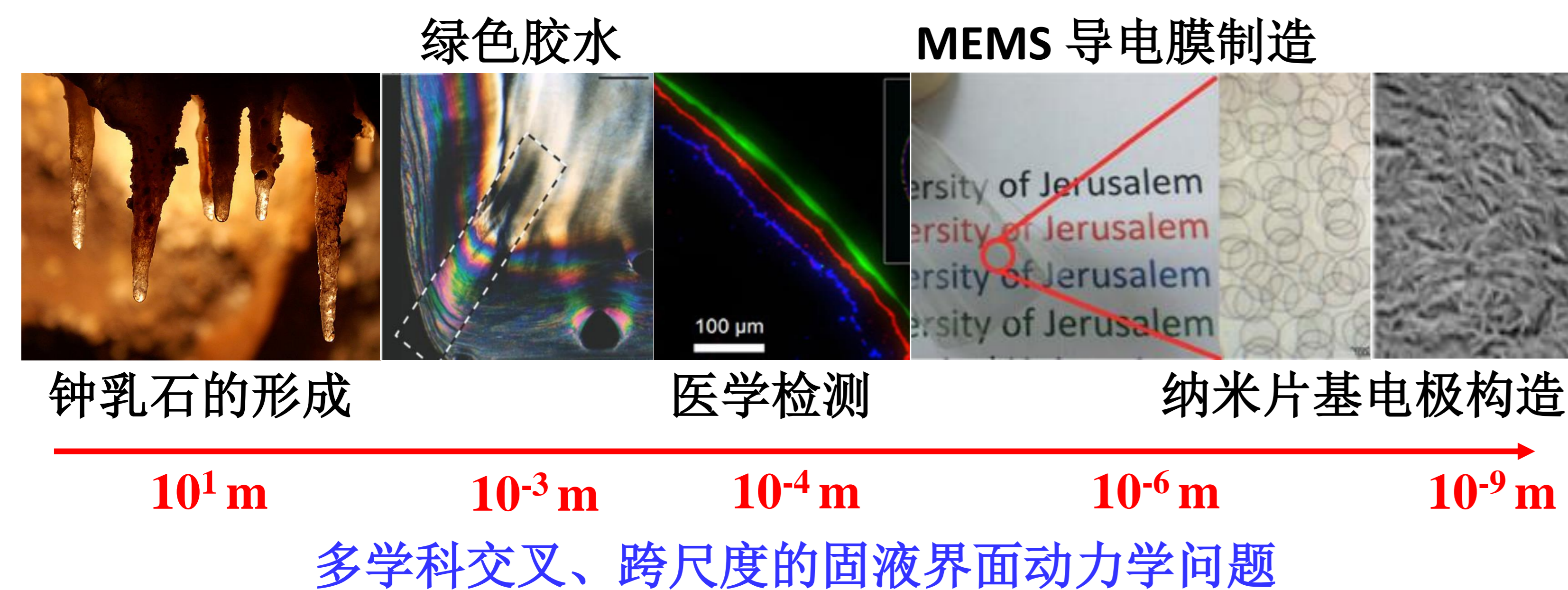
蒸发诱导及控制颗粒自组装行为研究

王富帅 袁泉子

中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室

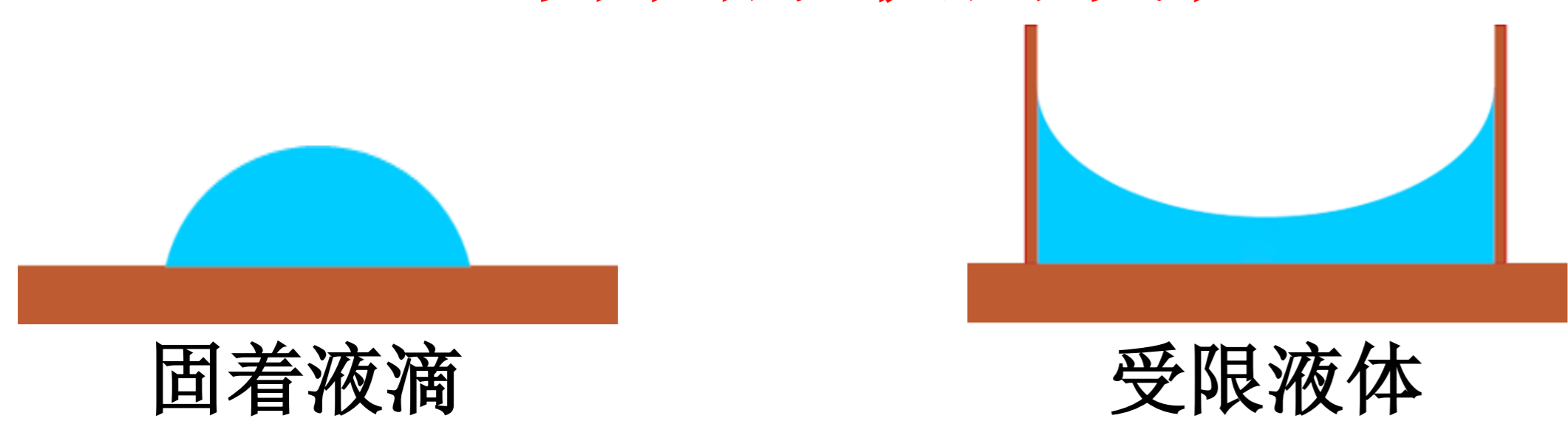
中国科学院大学 工程科学学院

研究背景



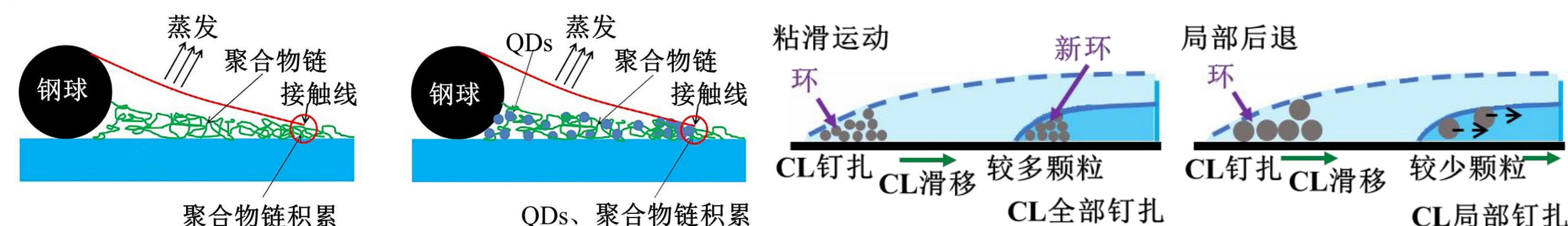
关键科学问题

界面形状的演化



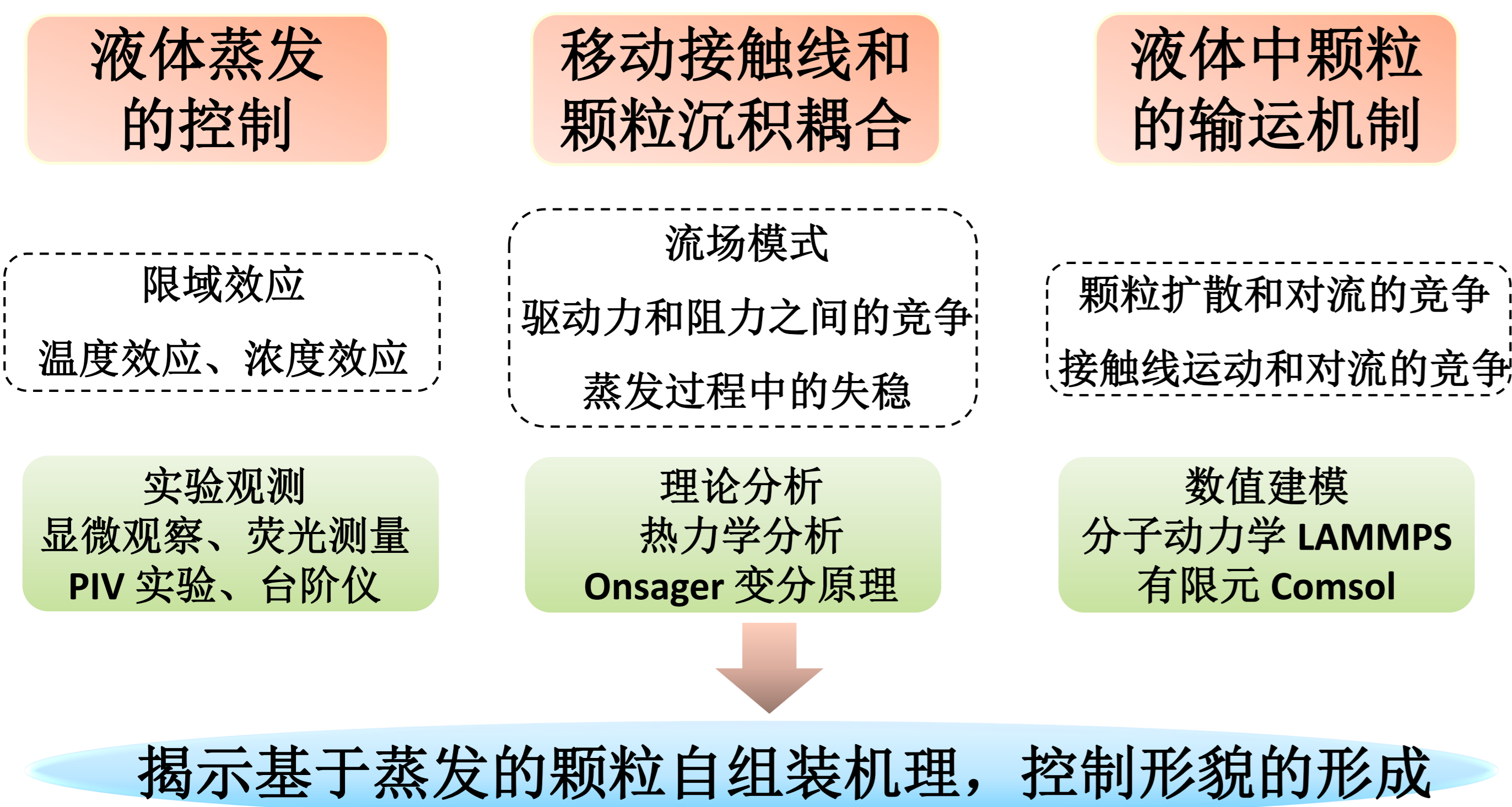
1. 固体基底曲率变化，会改变液气界面曲率；
2. 液体在固体表面润湿性不同，蒸发过程中会产生新的三相接触线；
3. 常接触面积蒸发模式下，导致新的“液滴蒸发悖论”

三相接触线的钉扎/解钉扎物理力学机制



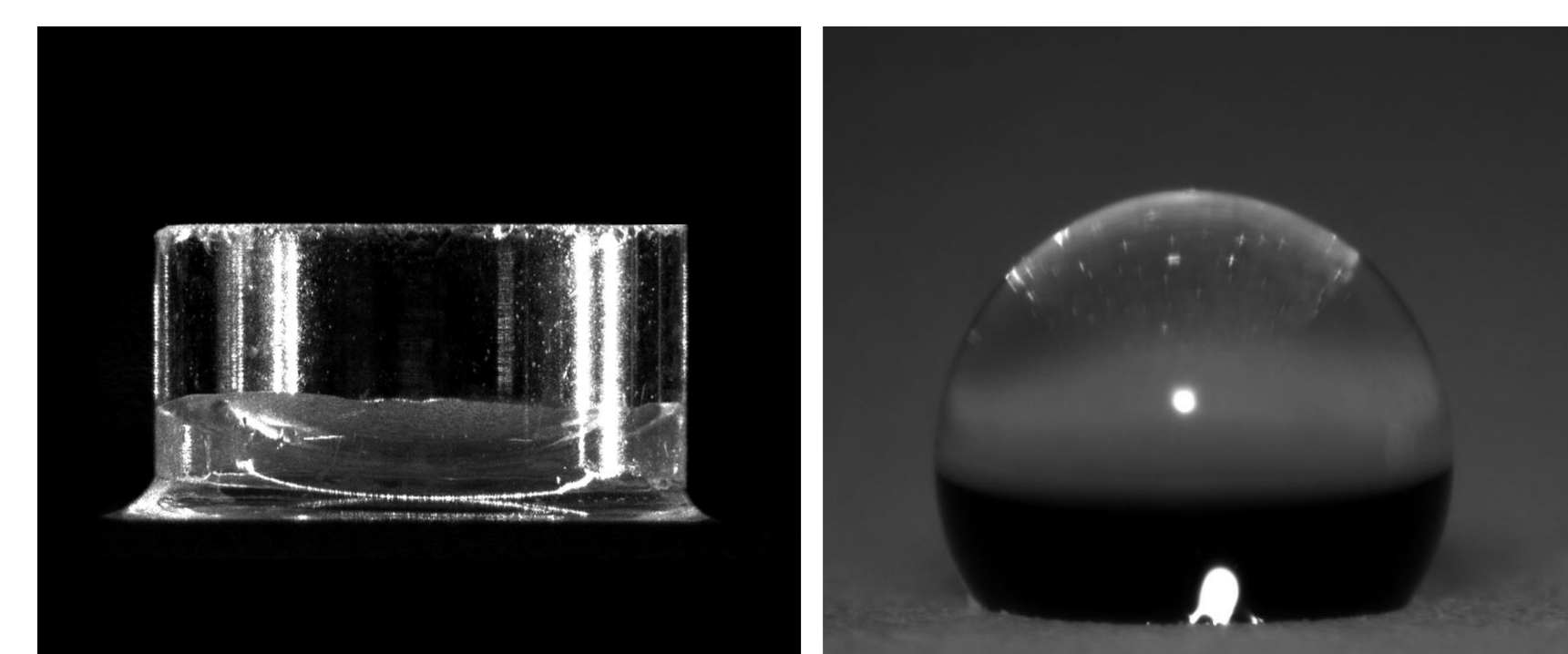
接触线处颗粒密度的增加会导致接触线运动受到更大的阻力，导致三相接触线全部钉扎/局部钉扎，失稳

研究内容及方法



研究进展

受限液体蒸发诱导颗粒自组装行为研究

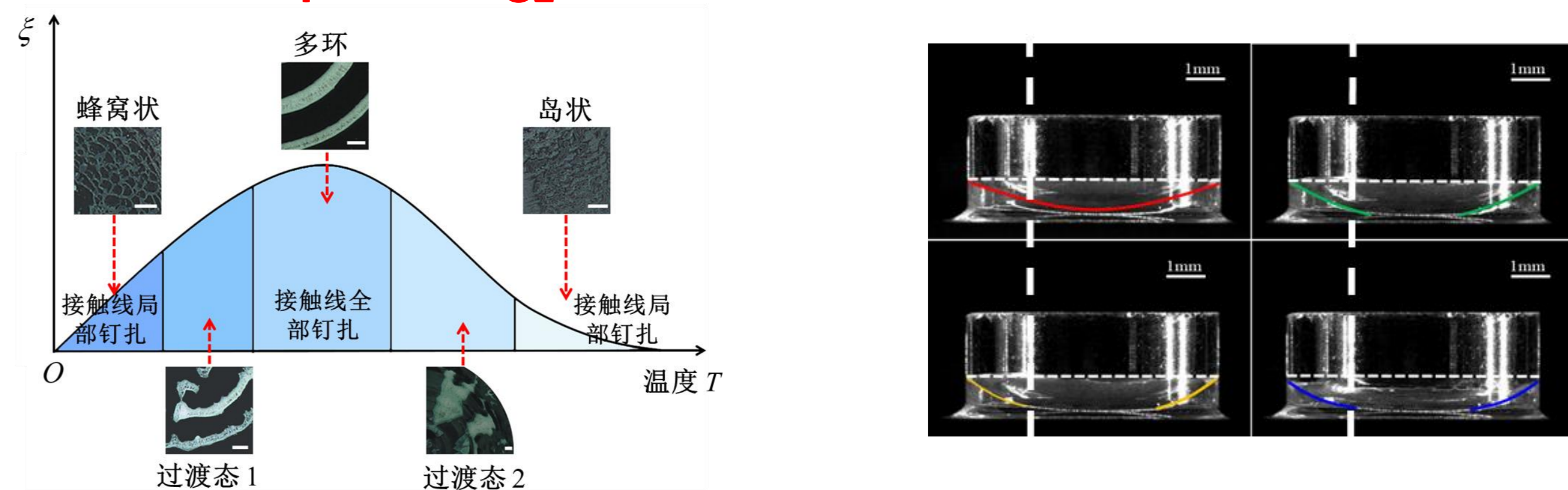


研究了含纳米颗粒、无机离子、有机聚合物的液体在受限空间中的自组装行为。

溶质@基底：

1. PS@石英圆柱管
2. NaCl+PAM@PTFE (自发形成受限空间)

U_p 和 U_{CL} 共同决定沉积形貌的转变



$$\xi = \frac{U_p}{U_{CL}} \frac{\text{颗粒沉积速率}}{\text{接触线移动速率}}$$

接触线“stick-slip”运动及颗粒在接触线处沉积导致多环形貌形成

Onsager 变分原理: $\frac{\partial \mathfrak{R}}{\partial \dot{R}} = 0, \mathfrak{R} = \Phi + \dot{F}$

能量耗散:

$$\Phi = \Phi_\eta + \Phi_\xi \begin{cases} \text{黏性耗散: } \Phi_\eta = \frac{1}{2} \int_R^{R_0} 2\pi r \frac{3\eta_v}{h} (r, t)^2 dr \\ \text{接触线耗散: } \Phi_\xi = \frac{1}{2} 2\pi R \xi_{cl} \dot{R}^2 = \pi R \xi_{cl} \dot{R}^2 \end{cases}$$

自由能 (界面能):

$$F = \gamma_{LV} A_{LV} + \gamma_{LS} A_{LS} - \gamma_{SV} A_{SV} + \gamma'_{LS} A'_{LS} - \gamma'_{SV} A'_{SV}$$

液体蒸发过程中的演化方程:

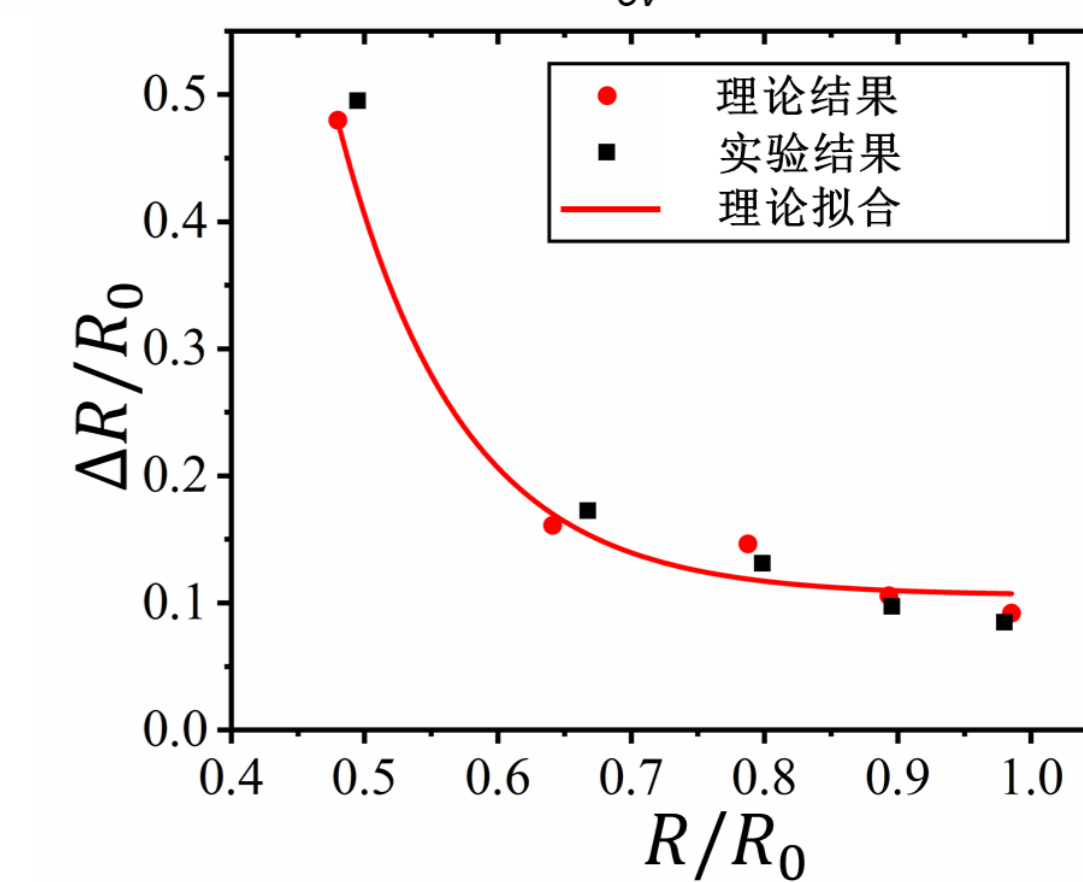
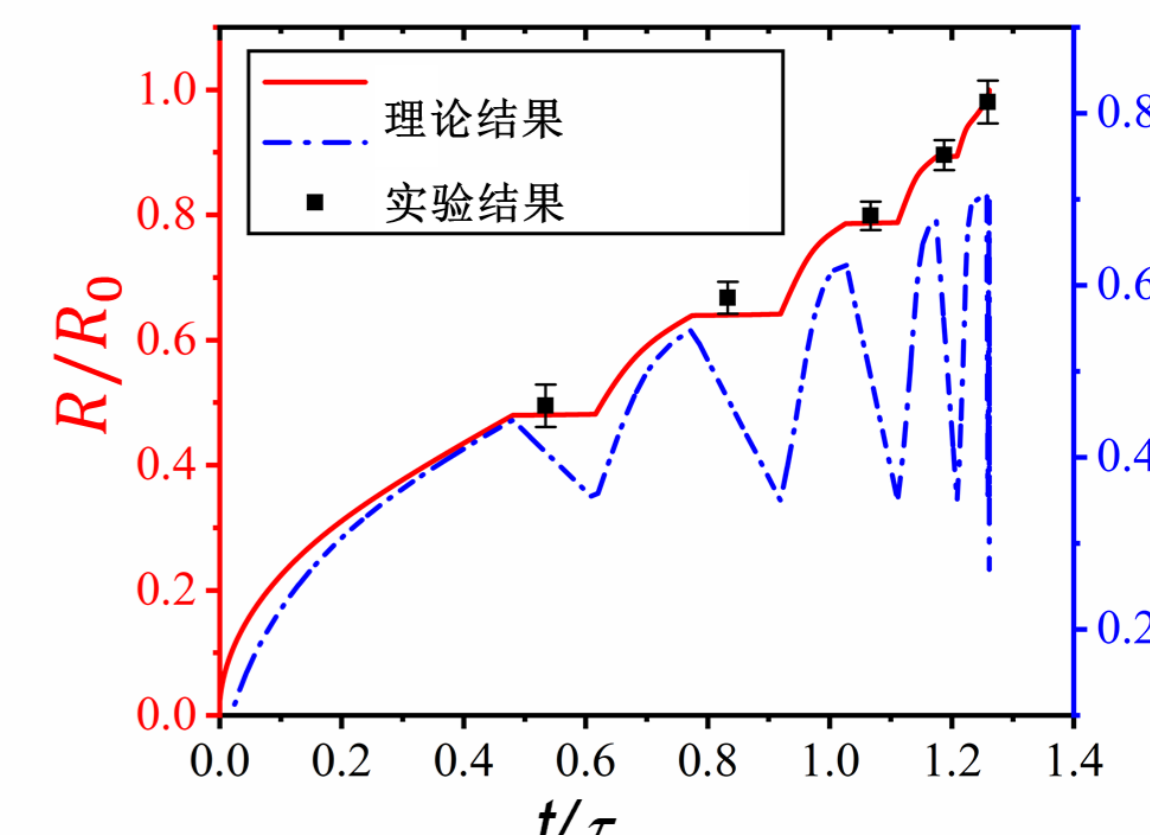
$$(1+k_{cl})\tau_{ev}\dot{R} = \frac{(R_0^2 - R^2)^{3/2} V_0}{4RR_0 V} \frac{\partial V_0^{1/3} [(\theta^2 - \theta_c^2) + (2R_0^2/R^2)\theta^2 + (R_0/R)\theta(\theta_c^2 - 2)]}{6Ck_{ev}\theta_c^2}$$

基底润湿性能，液体黏度等因素共同作用对接触线运动的影响

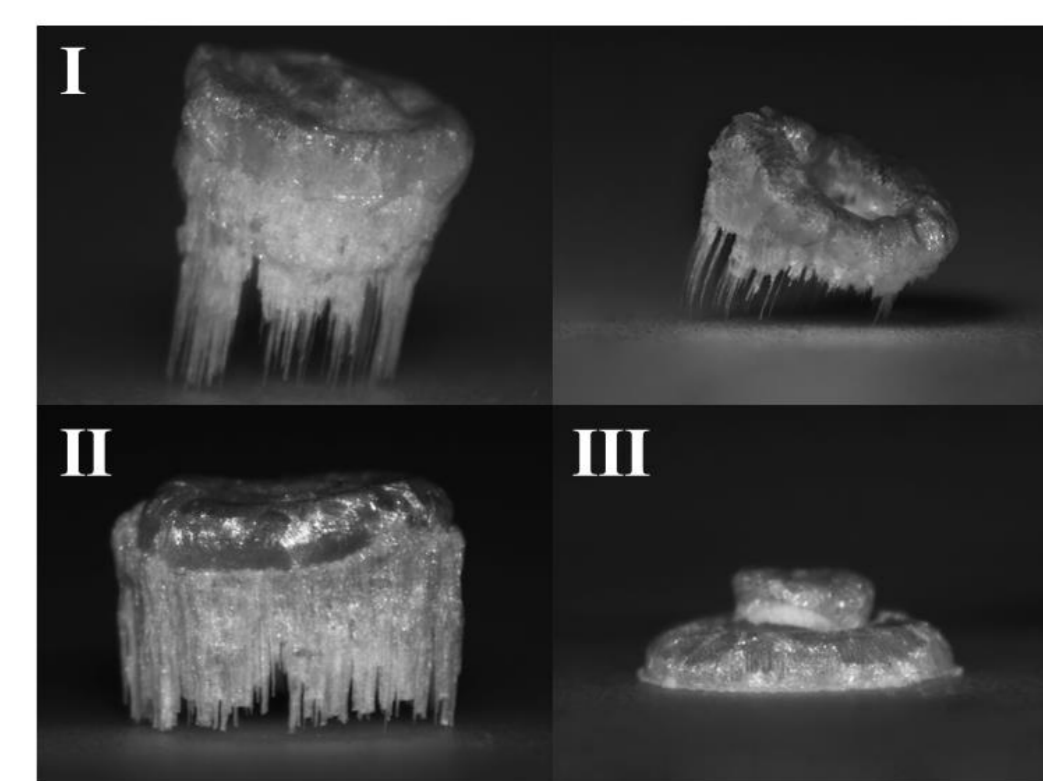
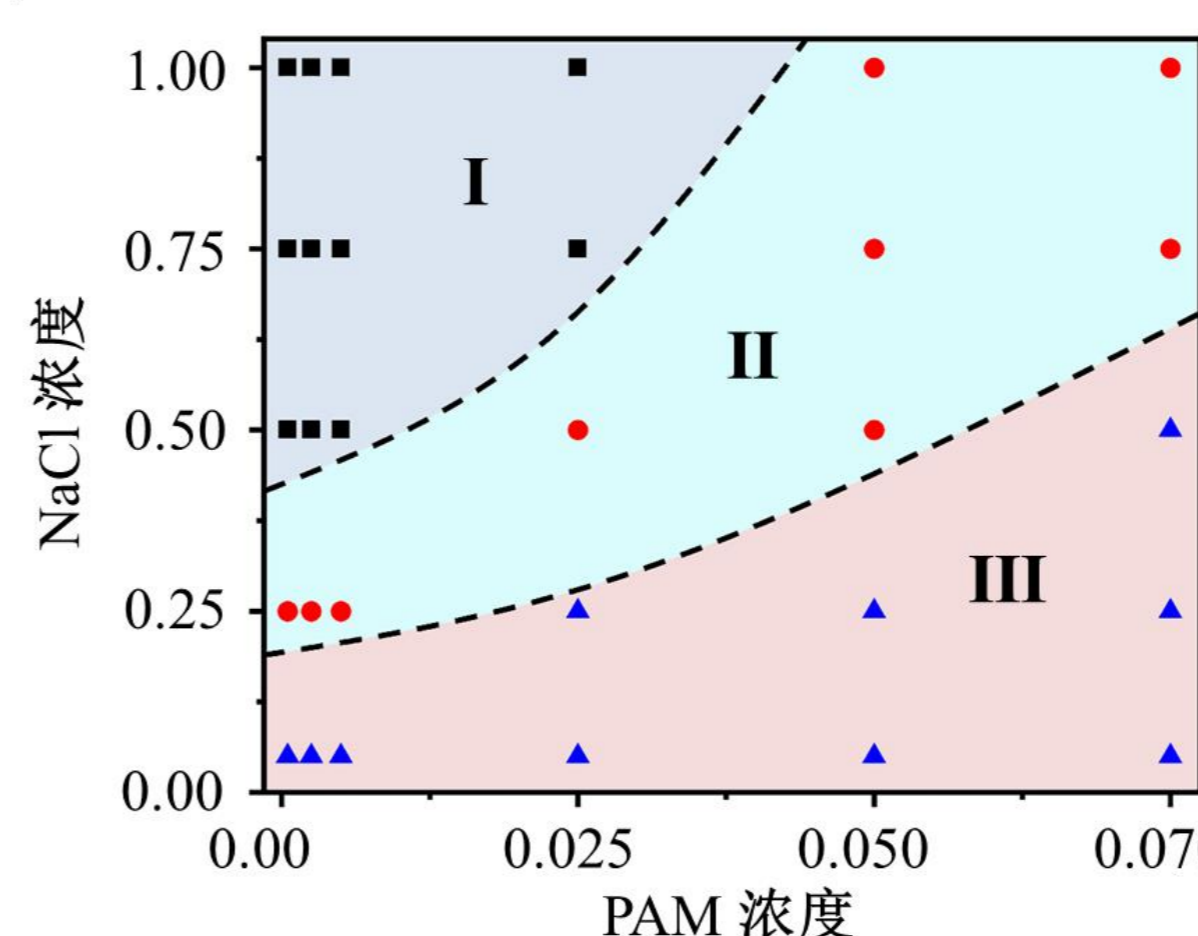
蒸发引起的接触线运动

不平衡的表面张力引起的接触线运动

理论重现实验



PAM 显著改变 NaCl 在疏水表面的沉积形貌



液滴的混合自由能决定形貌分区

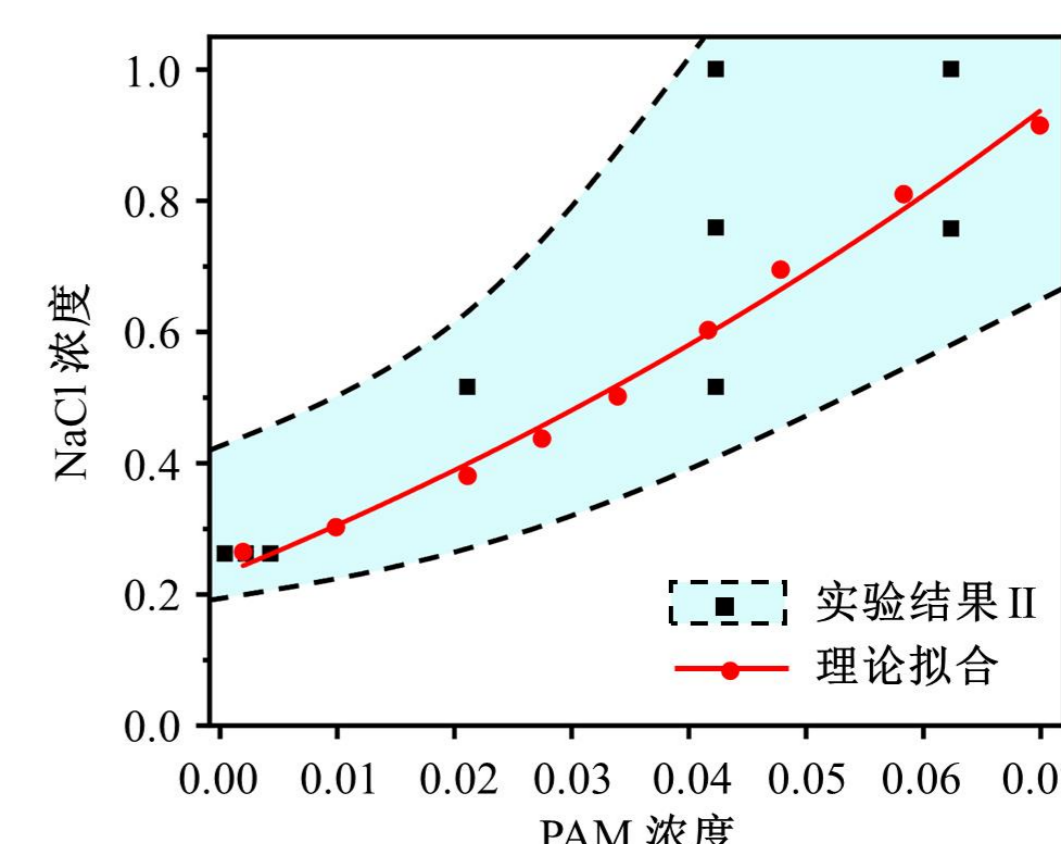
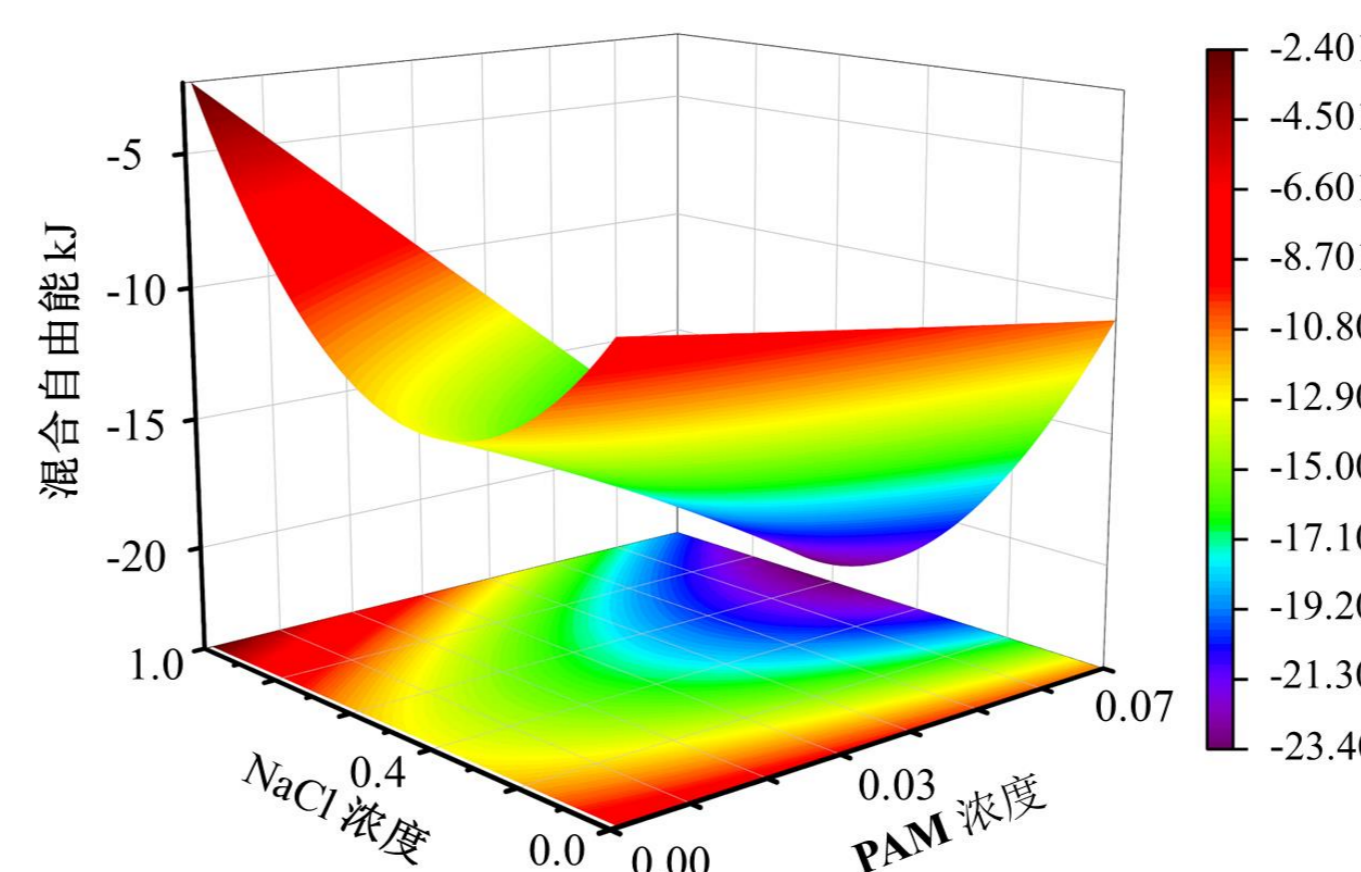
基于格点模型: 混合自由能 = 平均能量 + 熵的贡献

$$\bar{E} = \varepsilon_{11}\bar{N}_{11} + \varepsilon_{22}\bar{N}_{22} + \varepsilon_{33}\bar{N}_{33} + \varepsilon_{12}\bar{N}_{12} + \varepsilon_{13}\bar{N}_{13} + \varepsilon_{23}\bar{N}_{23}$$

$$= \frac{1}{2} z N_{tot} (C_1\phi_1^2 + C_2\phi_2^2 + 2C_3\phi_1\phi_2 + 2C_4\phi_1 + C_5\phi_2 + C_0)$$

混合自由能: kJ

$$S_{mix} = k_B \ln W = -k_B N_{tot} \left[\phi_1 \ln \phi_1 + (\phi_2/N) \ln \phi_2 + (1-\phi_1-\phi_2) \ln (1-\phi_1-\phi_2) \right]$$



研究结论

- 揭示了自组装机理，并建立了形貌分区图；
- 厘清了温度、浓度、限域效应等因素对形貌的影响；
- 阐明了无机溶液中添加少量水溶性有机物，可以改变接触线的运动模式；
- 发展了 Onsager 变分原理和格点模型，在理论上重现了实验现象。

资助项目

- 国家自然科学基金-优秀项目 “纳微系统中的固液界面动力学”
- 中国科学院先导项目B类子课题 “多场耦合下移动接触线的物理力学研究”