

平板膜浓差极化过程的有限元仿真分析

徐佩锋^{1,2}, 杨宁¹

1. 江苏大学, 电气与信息工程学院, 学府路301号, 镇江市, 江苏省, 212013
2. 江苏农林职业技术学院, 信息工程系, 文昌东路19号, 句容市, 江苏省, 212400

引言: 在 COMSOL Multiphysics® 中建立了平板膜组件模型, 使用预定义的自由和多孔介质流 (Free and Porous Media Flow) 多物理场接口描述开放通道中自由流体的流动和多孔介质区域的渗流运动, 使用稀物质传递 (Transport of Diluted Species) 接口考察悬浮液在自由流体区域和多孔介质区域的浓度分布, 充分利用 COMSOL Multiphysics® 中的函数、参数化扫描等强大的后处理功能, 实现了对仿真结果的可视化输出, 考察不同流速、颗粒粒径等对渗透通量、膜表面处浓度等的影响, 仿真结果与实验数据的相关系数达 0.971。

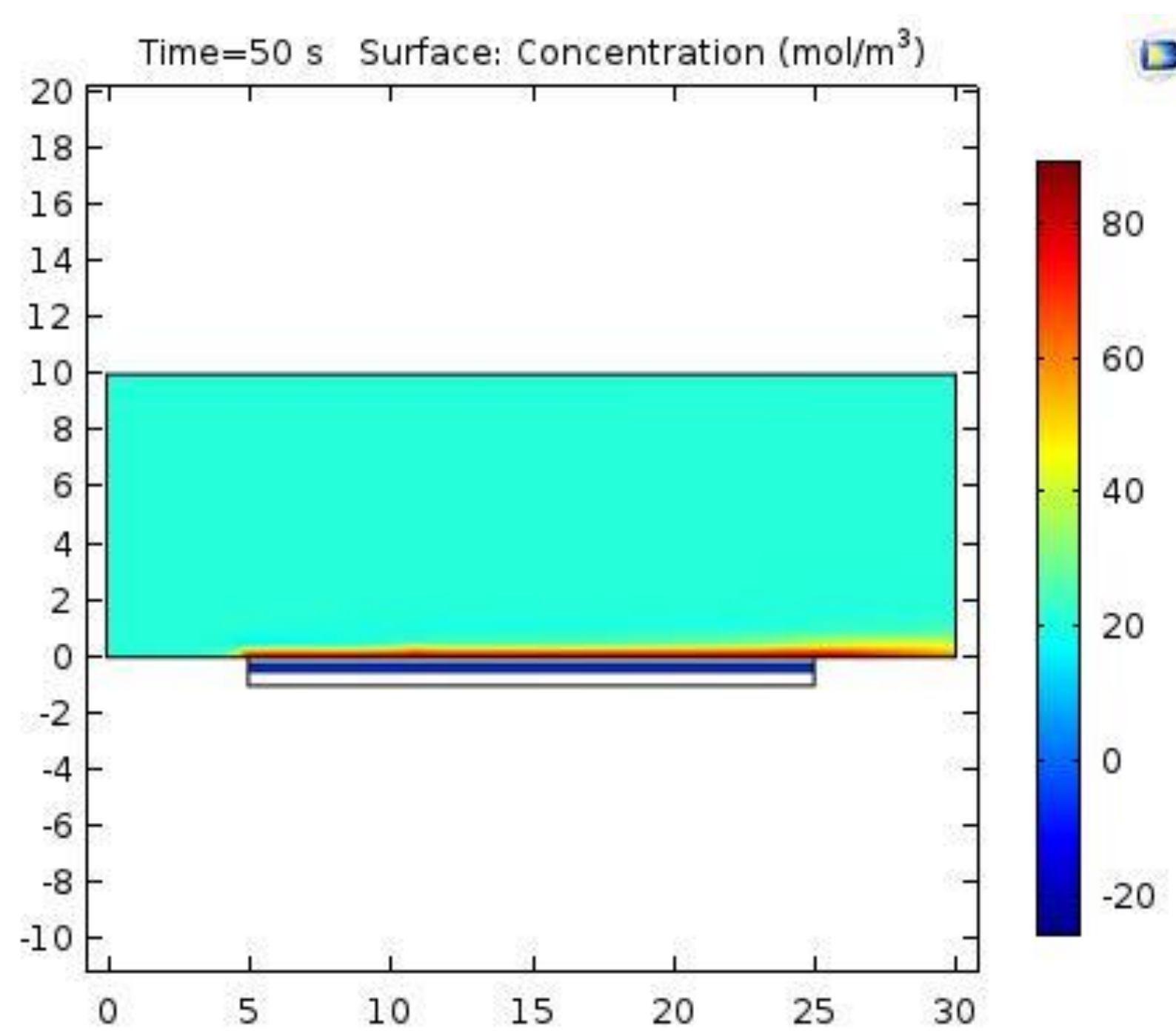


图 1. 浓差极化区域的浓度分布

计算方法: 开放通道中的自由流体的流动使用 Navier-Stokes 方程和连续性方程描述:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T)] + F\rho\nabla \cdot \mathbf{u} = \mathbf{0}$$

多孔介质区域的渗流运动使用带 Forchheimer 修正的 Brinkman 方程描述:

$$\frac{\rho}{\varepsilon_p} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{\mu}{k} \mathbf{u} = \nabla \cdot \left[-p\mathbf{I} + \frac{\mu}{\varepsilon_p} (\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) \right] - \frac{\rho\varepsilon_p C_f}{\sqrt{k}} \mathbf{u}|\mathbf{u}| \nabla \cdot \mathbf{u} = \mathbf{0}$$

悬浮液在自由流体区域和多孔介质区域的浓度分布, 使用 COMSOL Multiphysics® 的稀物质传递 (Transport of Diluted Species) 接口描述, 对流扩散方程为:

$$\frac{\rho}{\varepsilon_p} \frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (-D\nabla c) = R - \mathbf{u} \cdot \nabla c$$

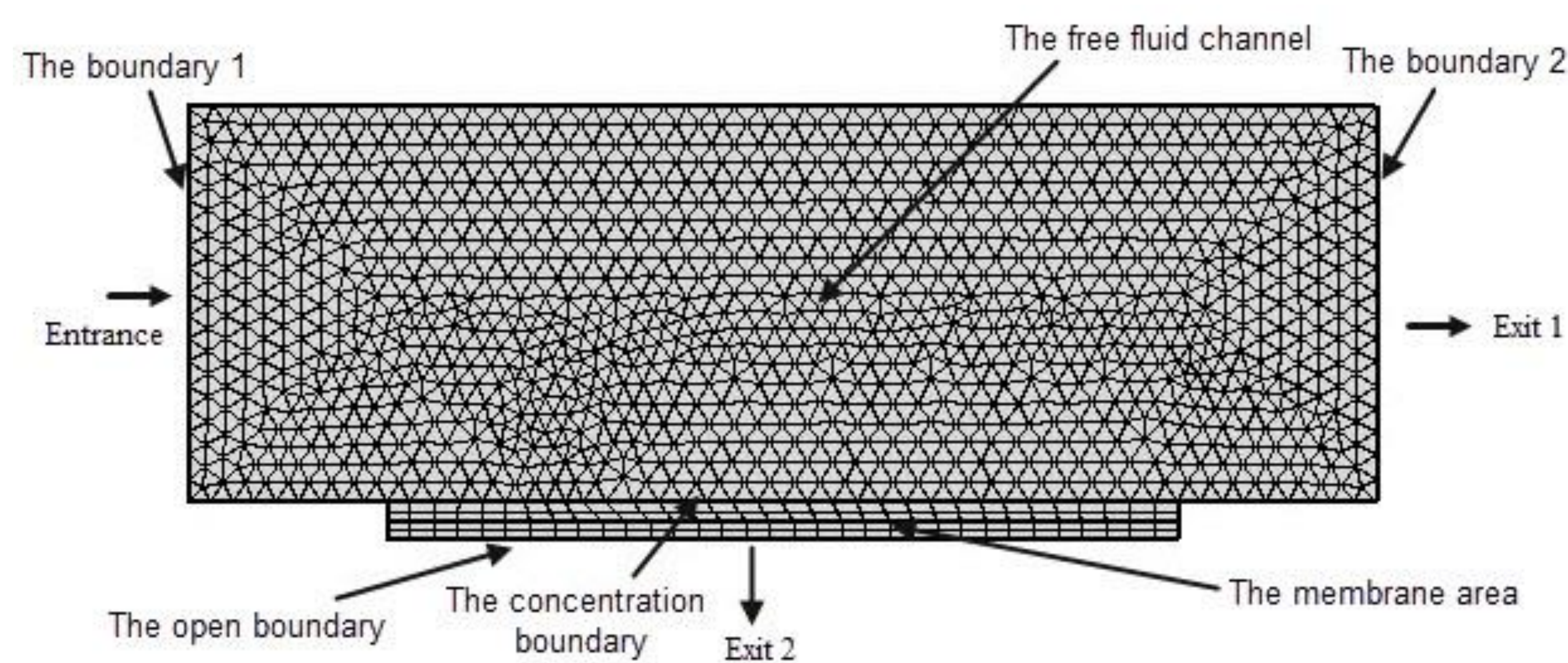


图 2. 膜组件模型及边界

结果: 膜分离过程中, 料液中颗粒物在膜上的吸附和沉积, 膜表面处浓度增加, 形成浓差极化区域, 并逐步形成滤饼层, 膜的渗透通量有一个快速增加、而后降低、然后稳定的过程, 如图 3 所示。硅颗粒粒径在 0.04μm 至 2μm 范围变化时, 膜表面处浓度值随着粒径的增加而减小, 如图 4 所示。当开放通道中料液的错流速度在 0.1cm/s 至 5cm/s 范围内变化时, 膜表面处浓度值随着流速的增加而减小。

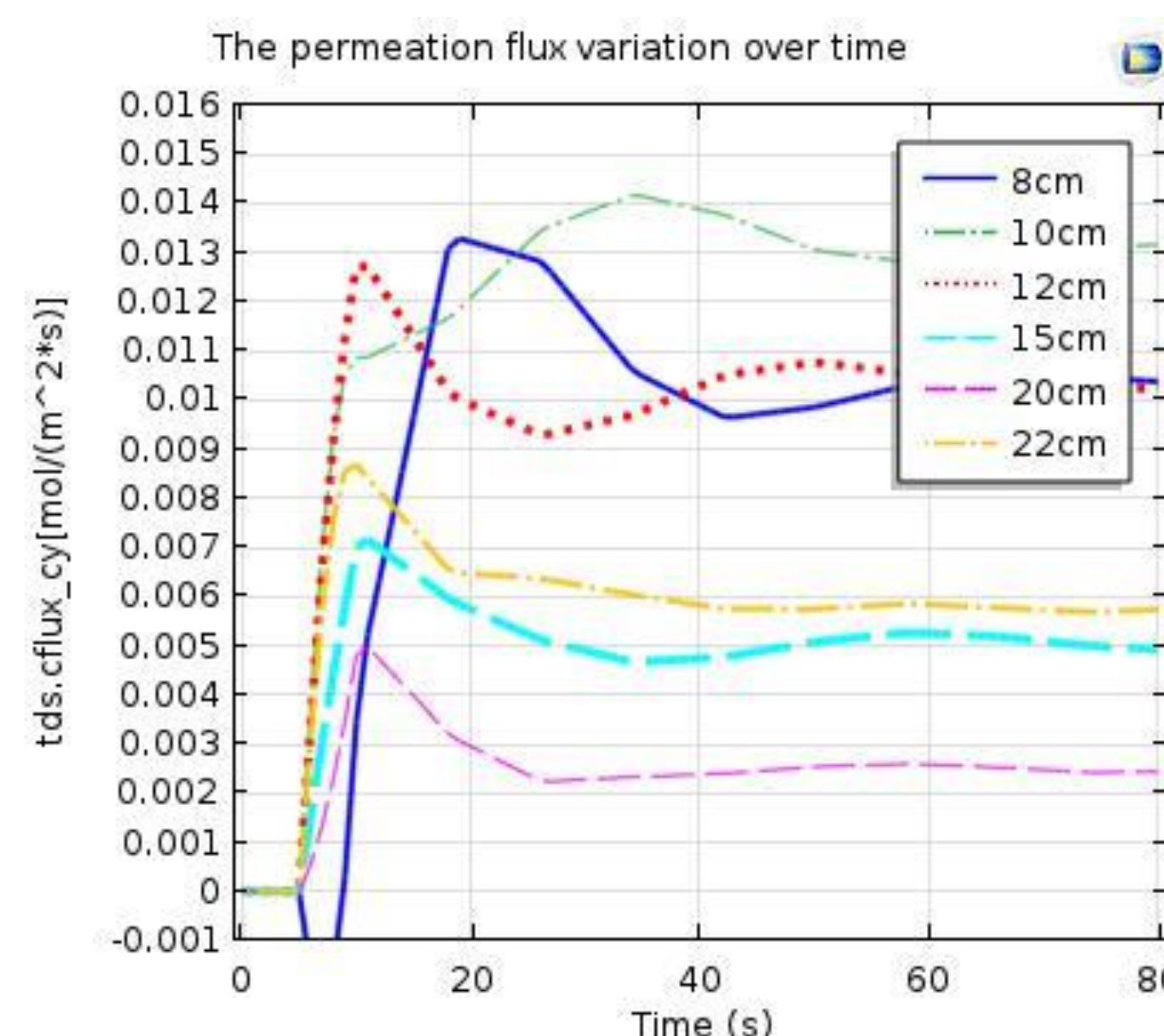


图 3. 沿膜表面x轴方向不同位置处通量随时间的变化

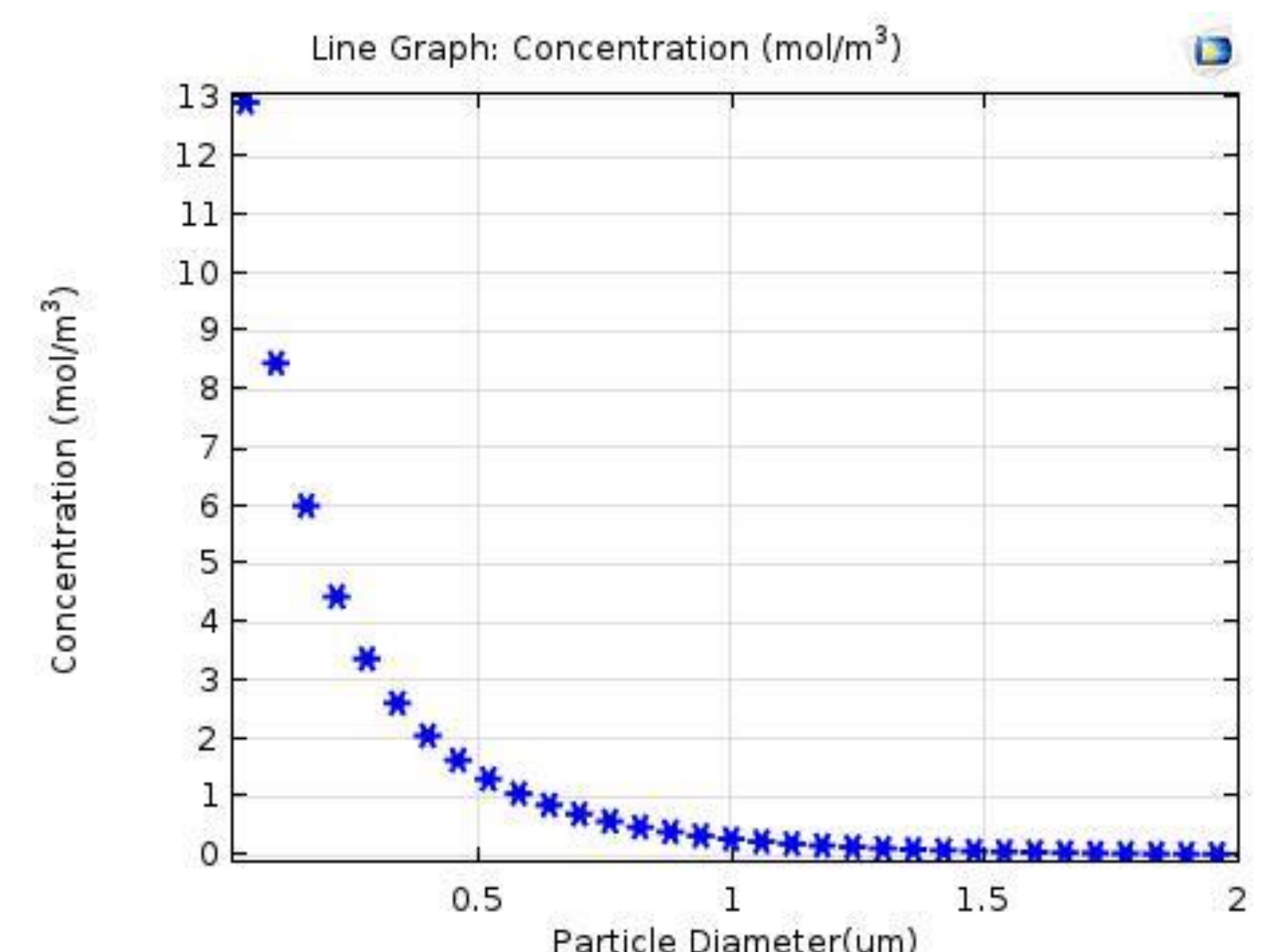


图 4. 膜表面处浓度随粒径大小的变化

t value	Pr(> t)	Adjusted R-squared	p-value
-10.24	1.28e-09	0.9408	1.386e-14
18.73	1.39e-14		

表 1. 相关分析参数值

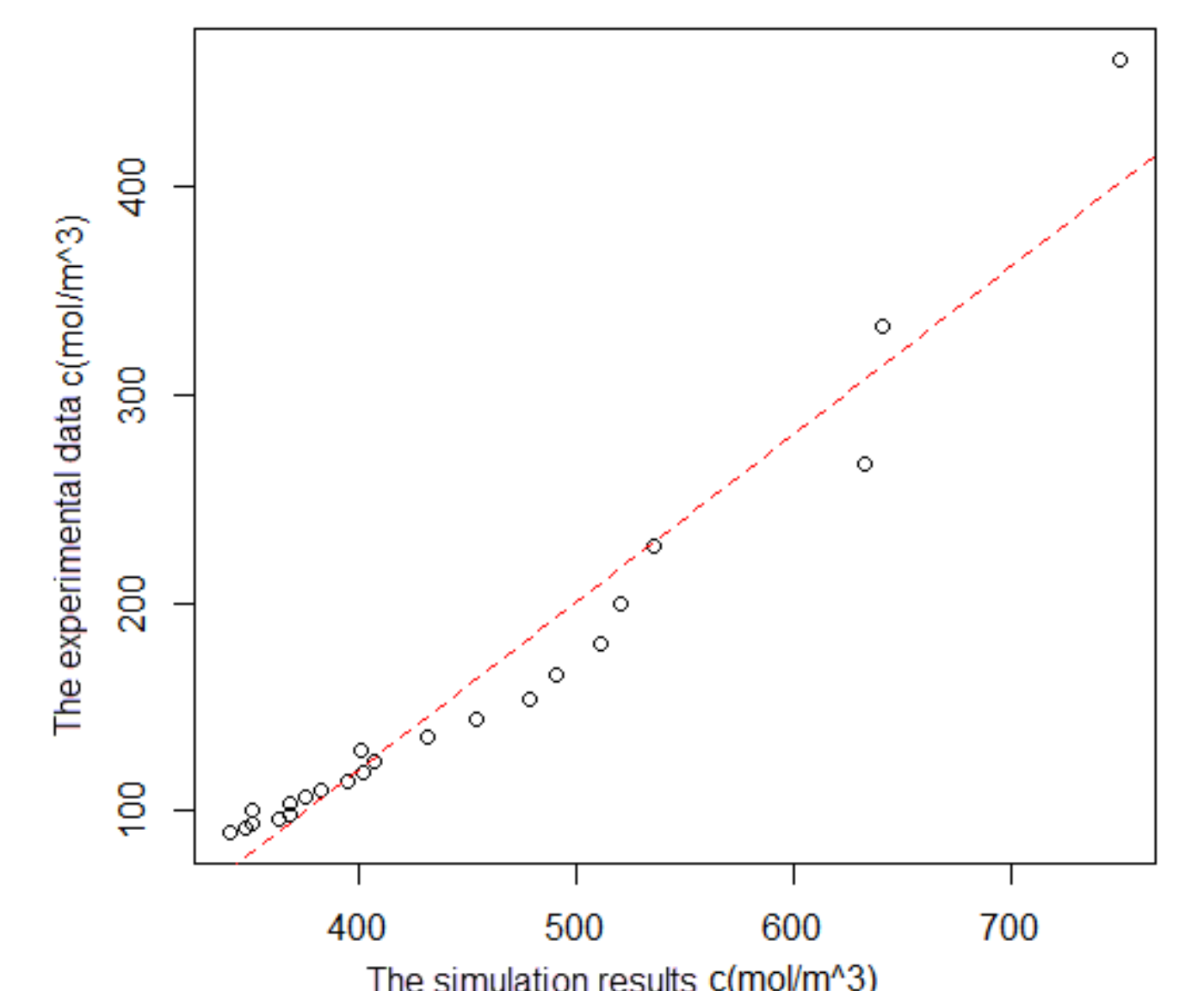


图 5. 膜表面处浓度分布仿真结果与实验数据的相关性分析

结论: 对仿真结果与文献中实验数据的相关性分析, 得到两者相关系数达到 0.971, 仿真结果与实验数据呈现正的线性关系, 为浓差极化及膜污染等问题的研究提供了一种快速有效的研究方法。

参考文献:

1. D. Rana, Surface Modification for Antifouling Membranes, Chemical Reviews, 110(4), 2448-2471 (2010)
2. Fimbres-Weihs. Review of 3D CFD modeling of flow and mass transfer in narrow spacer-filled channels in membrane modules. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 49(1): 759-781 (2010).
3. 宋卫臣, 高分子超滤膜表面活性层污染过程的数值模拟, 高分子材料科学与工程, 28(2), 179-182 (2012)
4. 王宇新, 超滤中膜表面的凝胶层浓度, 膜科学与技术, 11(1), 58-62 (1991)