

流体黏性对盐指型双扩散对流扩散通量影响的 试验研究

陈 铂^{1,2,3}, 徐孝勤^{1,2,3}, 黄筱云^{1,2}, 彭君可^{1,2,3}, 黄剑文^{1,2,3}

(1. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3. 湖南省环境保护河湖污染控制工程技术中心, 湖南 长沙 410114)

摘要:为研究盐指型双扩散对流过程中流体黏性对通量的影响,使用中间有移动挡板的试验水箱形成初始为静止状态的糖-盐双层系统,并通过调整糖、盐组分质量分数设计了一系列密度稳定比相同而流体黏性不同的试验工况,进行了双扩散对流扩散通量变化规律的试验研究。试验结果表明:流体黏性对盐指型双扩散对流扩散通量的影响不可忽略,在双扩散对流强度相同的条件下,试验流体黏性越大,盐指型双扩散对流扩散通量越小;当试验流体的运动黏滞系数均小于 $1.15\text{ mm}^2/\text{s}$ 时,糖和盐这两种组分跨界面的双扩散对流扩散通量随流体黏性增大而减小的趋势相近,当两种组分的质量分数持续增大时,盐溶液的黏性仍缓慢增大,而糖溶液的黏性迅速变大,此时糖组分的跨界面双扩散对流扩散通量仍会随糖溶液黏性的增大而减小,但盐组分的跨界面双扩散对流扩散通量不再变化;Stern数与流体黏性呈负相关关系。

关键词:糖-盐双层系统;双扩散对流;流体黏性;扩散通量;密度稳定比

中图分类号:O357.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)01-0016-07

Experimental study on effect of fluid viscosity on salt-finger double diffusion convection flux //CHEN Bo^{1,2,3}, XU Xiaolin^{1,2,3}, HUANG Xiaoyun^{1,2}, PENG Junke^{1,2,3}, HUANG Jianwen^{1,2,3} (1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3. Engineering and Technical Center of Hunan Provincial Environmental Protection for River-Lake Dredging Pollution Control, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to study the effect of fluid viscosity on the flux during salt-finger double diffusion convection, an experimental tank with a moving baffle plate in the middle was used. The sugar-salt double-layer system was formed and was initially stationary. The experimental study for double diffusion convection flux was carried out by adjusting the mass fractions of the sugar and salt components to obtain a series of experimental conditions with the same density stability ratio and different fluid viscosities. The experimental results show that the influence of fluid viscosity on the flux of salt-finger double diffusion convection could not be ignored. Under the condition of the same double diffusion convection intensity, the greater the viscosity of the experimental fluids, the smaller the fluxes for the salt-finger double diffusion convection. When the kinematic viscosity coefficients of experimental fluids are less than $1.15\text{ mm}^2/\text{s}$, double diffusion convective fluxes of sugar and salt decrease with the increase of the fluid viscosities. When the mass fractions of the two component continue to increase, the viscosity of the salt solution still increases slowly while the viscosity of the sugar solution increases rapidly. The flux of sugar component between the stratified interface still decreases with the increase of the sugar solution viscosity. However, the flux of the salt component does not change. The Stern number is negatively correlated with the viscosity of the fluid.

Key words: sugar-salt double-layer system; double diffusion convection; fluid viscosity; diffusion flux; density stability ratio

双扩散对流是一种常见的物理现象,存在于海洋学、大气物理学、地球物理学、生物流体力学以及

化学动力学等领域。自然界中,海水受温-盐共同作用产生的大洋环流、软流层在地壳中的运动、大气中

基金项目:湖南省自然科学基金项目(2021JJ30704);长沙市自然科学基金项目(kq2014102);湖南省环境保护河湖疏浚污染控制工程技术中心开放基金项目(EPD202101)

作者简介:陈铂(1978—),男,讲师,博士,主要从事环境流体力学研究。E-mail:chenbo@csust.edu.cn

热与污染物质的扩散都属于典型的双扩散对流现象。建筑物中热和水蒸气的传导、化学气体的沉积和干燥、晶体成长、金属固化、地下天然气化或人为气化和碳燃烧等工业生产过程也存在复杂的热与物质的双扩散对流^[1-6]。

双扩散对流系统的研究始于海洋学问题。20 世纪 60 年代, Stern^[7] 在研究海洋“盐喷泉”(salt fountain)时发现了双扩散对流现象。双扩散对流是海洋中物质垂直输运的一种重要形式, 包括盐指和双扩散阶梯两种情况, 当上层是高温高盐水, 下层是低温低盐水时, 会形成盐指, 多发生在热带和副热带海洋的密度跃层; 而当上层是低温低盐水, 下层是高温高盐水时, 容易生成双扩散阶梯, 多发生在极地温跃层和受地热影响的海底^[8-9]。双扩散盐指现象是由于上层高温高盐的中央水团与其下层来自高纬度冷而淡的水团相互浸入, 逐步形成稳定的分层, 这种稳定的分层本质是密度分层和温度分层。

Gregg^[10] 在对盐水入侵的微观结构观测中发现, 在上层温热盐水和下层冷淡水的交界面处双扩散对流过程最为活跃, 盐指现象也最为明显。马文驹^[11] 在研究双扩散对流效应引起的异重流时发现, 异重流交界面处的物质扩散量比纯分子扩散要大得多, 其主要为双扩散盐指效应引起的。Chen 等^[12-13] 在研究瞬时点源羽流在温度分层水体中的运动规律时发现, 羽流云团在分层界面会受到阻滞, 并在云团底部出现盐指型双扩散对流, 造成羽流云团垂向扩散通量和扩散范围的增加。Turner^[14] 测量了发生盐指现象交界面处的热和盐的垂向通量, 并将热和盐的垂向通量同交界面两侧的温度与盐度相关联, 证明了盐度垂向通量由于盐指现象的存在而显著增加。Turner^[15-16] 建议用密度稳定比 R_ρ 来表征双扩散对流强度, 并通过室内试验对双扩散阶梯界面的热通量作出推断, 确立了双扩散对流热通量公式, 即 4/3 热通量公式。

由于试验水体温度受环境温度影响难以控制, 经常使用糖-盐双组分进行双扩散对流试验研究^[17], 糖-盐双组分系统中, 盐的扩散速度是糖的 3 倍, 所以盐溶液对应的是海洋学上的淡水, 糖溶液对应的是热咸水。Griffiths 等^[18] 对糖-盐双组分系统分层界面的物质通量进行精确测量后发现, 糖通量和糖度间呈 4/3 指数关系。

在早期的试验中, Stern^[19] 在温-盐双扩散垂直对流试验中利用一系列合理的物理假设得到通量比关系; Howard 等^[20] 在试验中也获得相同的值。由于双扩散对流的特征是盐和热的不均匀垂直输送, 所以密度稳定比 R_ρ 和通量比的变化对双扩散对流效

率有重要影响。Turner^[14] 通过热-盐组分双扩散对流试验测得 $R_\rho > 2$ 时通量比为 0.56; Schmitt 等^[21-22] 在试验中得到通量比的范围为 0.4 ~ 0.7。这些试验受到了很多质疑, 因为测量时, 测量装置机械运动产生的扰动会增加额外的通量。Linden^[23] 使用热和糖进行了常规的分解试验, 发现通量比是恒定的 0.1, 远低于 Turner 的结果。Turner 等^[15, 24] 在进行糖-盐组分双扩散对流试验时, 发现 $R_\rho > 2$ 时, 通量比为 0.88 ~ 0.94。而 Polyakov 等^[25-26] 通过海洋中的观测得出经验公式, 得到的双扩散对流热通量与分子热传导公式的计算结果不在一个数量级, 其中的原因尚不明确, 有待进一步研究。

本文从试验研究入手, 结合理论分析, 研究糖-盐双组分静态密度分层水体中双扩散对流扩散通量的变化规律, 观测盐指型双扩散对流的形成和演化过程, 分析流体黏性对盐指型双扩散对流扩散通量的影响, 以期进一步了解和掌握盐指型双扩散对流扩散通量变化规律。

1 试验装置和试验方法

以往的研究通常使用淡水与热盐水组成的系统, 这一系统的组成符合双扩散对流的产生条件: 扩散慢的组分形成不稳定梯度, 扩散快的组分形成稳定梯度。但是这一系统研究极易受到环境的影响, 在试验中热水的热量损失过快, 令试验结果产生较大的偏差。

在自然界量化通量较为困难, 需要知道哪些因素影响盐指的生长。Turner^[14] 在试验中发现盐通量和热通量的大小只取决于穿过界面的盐度差和密度稳定比。本文试验选取的糖-盐双扩散系统通过测量试验前后分层流体的组分密度变化, 得到双扩散对流扩散通量值。

McDougall 等^[27] 将试验范围扩大到较低的密度稳定比, 发现密度稳定比越低, 通量越大; 当密度稳定比接近 1 时, 净密度通量随着盐指界面黏性和密度梯度乘积的无量纲比值(即 Stern 数)急剧增加。Schmitt^[21] 指出, 密度稳定比不同净密度通量会发生变化, Stern 数通常只适用于密度稳定比较小的盐指界面, $R_\rho \approx 2$ 时测得的 Stern 数接近 0.4。

在研究双扩散对流扩散通量时, 以往的学者都从密度稳定比入手, 发现密度稳定比越接近 1, 扩散通量越大。本文通过大量试验, 发现扩散通量不仅是由密度稳定比控制, 还和流体黏性有着密不可分的关系。因此, 本文在密度稳定比接近 1.0 ($R_\rho = 1.07$) 的条件下, 改变上下层溶液的黏性, 来探究流体黏性对扩散通量的具体影响。

试验采用中部带有活动挡板的矩形水箱,水箱长 2450 mm、宽 1020 mm、高 4325 mm,正常工作水深 4150 mm,挡板厚 10 mm,边壁为厚 6 mm 的单层透明玻璃,水箱密闭性良好。水箱中部带有可移动挡板,可以分离上下层流体,从而保证在试验开始前隔绝上下层流体。每次试验开始前控制好实验室的环境温度,根据表 1 配制试验用糖、盐溶液。试验需要先测量试验流体(清水、盐溶液和糖溶液)的密度、运动黏滞系数、电导率和温度,具体测量步骤如下:

a. 使用安东帕 DMA35 型密度计吸取待测溶液,将吸取的待测溶液挤出,重复 3 次润洗密度计测试管。重复测量待测溶液的密度,直到 3 个数据两两之间误差小于 1%,记录 3 个数据的平均值以及密度计上显示的待测溶液温度,最后彻底洗净密度计。

b. 使用吸球吸取待测溶液,挤入乌氏黏度计中,用吸球将乌氏黏度计中的溶液吸出,重复多次以达到润洗乌氏黏度计的目的。使用润洗后的乌氏黏度计测量待测溶液的运动黏滞系数,若 3 次结果两两之间误差小于 1%,记录 3 次结果的平均值。然后使用水银温度计测量待测溶液的温度,最后彻底洗净乌氏黏度计。

c. 将希希 HQ 系列便携式测定仪的电导率探头用清水洗净并擦干,使用电导率探头对待测溶液的电导率进行重复测量,直到电导率值两两之间误差小于 1%,取 3 次数据的平均值作为电导率值,并记录测定仪上显示的待测溶液温度,最后彻底洗净电导率探头。

原溶液各项物理性质测量完成后,开始试验。先打开中间挡板,在下层注入较重的盐溶液,关闭挡板,在上层缓慢注入较轻的糖溶液,注入溶液的同时测量注入溶液的体积。静置 2 min,调整摄像机直至试验区域全部在取景框内,开始录像并提示试验人员打开挡板并计时,到预定时间后(如 10 min 左右)提示试验人员关闭挡板,挡板完全关闭后结束计时。先使用虹吸管抽取上层溶液,打开挡板后抽取剩余

溶液。测量抽取的两部分溶液体积,分别搅拌均匀后测量试验后溶液的密度、电导率和温度,彻底清洗试验水箱。

试验通过电导率这一关键参数推导出试验中糖-盐溶液双扩散对流产生的通量。糖-盐溶液组成的双扩散系统中,在本文试验工况下糖溶液和水的电导率为 0.2 mS/cm 左右,而盐的电导率远远大于糖和水的电导率(150~1000 倍)。测量并记录试验前后上下层溶液的电导率,使用试验前的原溶液进行配比并进行分析后即可得到上层溶液进入下层溶液的体积和下层溶液进入上层溶液的体积,具体操作如下:以试验后上层(或下层)溶液的电导率为指标,采用糖、盐原溶液进行组分配制,以获取试验后上层(或下层)溶液中糖、盐原溶液的占比。例如测得工况 4 试验后下层溶液的电导率为 135.3 mS/cm,质量分数为 16.06% 糖原溶液的电导率为 0.1942 mS/cm,质量分数为 10% 盐原溶液的电导率为 148.8 mS/cm。表 2 为工况 4 试验后下层溶液的组分配制过程表,开始时在烧杯中加入 300 mL 盐原溶液和 30 mL 糖原溶液,充分混合后得到烧杯中混合溶液的电导率为 132 mS/cm,小于试验后下层溶液的电导率;继续向烧杯中加入 80 mL 盐原溶液,测得烧杯中混合溶液的电导率为 141.6 mS/cm,大于试验后下层溶液的电导率;继续向烧杯中加入 20 mL 糖原溶液,测得烧杯中混合溶液的电导率为 133.4 mS/cm,小于试验后下层溶液的电导率,继续添加少量盐原溶液,依此类推,直至混合溶液的电导率差异小于 1%,记录下每次配比加入的糖、盐原溶液体积,进行内插计算,即可得出上层糖溶液进入下层盐溶液的体积,进而计算出扩散通量。

为了明确流体黏性对盐指型双扩散对流扩散通量的具体影响,还需测量因试验水箱中部挡板开启和关闭时扰动产生的扰动通量及分子扩散产生的通量,需要进行清水与盐溶液(水-盐)、清水与糖溶液(水-糖)的对照组试验。将盐溶液注入水箱下层,关闭挡板,将清水注入上层,静置 2 min;打开挡板(同

表 1 试验工况

工况	水密度/ (g/cm ³)	盐溶液质量 分数/%	盐溶液密度/ (g/cm ³)	盐溶液运动黏滞 系数/(mm ² /s)	糖溶液质量 分数/%	糖溶液密度/ (g/cm ³)	糖溶液运动 黏滞系数/(mm ² /s)
1	0.9972	2	1.0116	1.1073	3.37	1.0105	1.0951
2	0.9975	4	1.0260	1.0376	6.65	1.0242	1.1796
3	0.9972	8	1.0544	1.0793	12.98	1.0496	1.3672
4	0.9971	10	1.0693	1.0906	16.06	1.0626	1.5067
5	0.9971	14	1.0990	1.1609	22.12	1.0891	1.8574
6	0.9973	16	1.1147	1.2120	25.12	1.1029	2.0828
7	0.9976	19	1.1381	1.2893	29.60	1.1242	2.5548
8	0.9974	21	1.1537	1.3772	32.55	1.1384	3.0197
9	0.9973	23	1.1700	1.4356	35.52	1.1530	3.5992

配比 次数	原溶液添加体积/mL		原溶液体积分数/%		混合溶液电导 率/(mS/cm)
	盐	糖	盐	糖	
1	300	30	90.91	9.09	132.0
2	80	0	92.68	7.32	141.6
3	0	20	88.37	11.63	133.4
4	60	0	89.80	10.20	136.2
5	0	3	89.25	10.75	135.1
6	7	0	89.40	10.60	135.3

时开始计时),到预定时间后关闭挡板(同时结束计时),分别抽取上下两层的溶液,并测量溶液的密度、电导率、温度和溶液体积;彻底清洗试验水箱并擦干;将糖溶液注入水箱下层,关闭挡板,将清水注入上层,静置2 min;打开挡板(同时开始计时),到预定时间后关闭挡板(同时结束计时),分别抽取上下两层的溶液,并测量溶液的密度、电导率、温度和溶液体积,最后彻底清洗试验水箱。

2 试验结果与分析

糖-盐双组分试验取密度稳定比为1.07,图1为拍摄到的糖-盐分层界面盐指现象,可以明显观察到上下两层分层界面处有手指状的图案相互扩散的现象。由于盐的扩散速率远快于糖的扩散速率,所以当上层液体的某一流体团有一微小的流体团向下运动时,该流体团即与所到达处的盐度相平衡,使该流团密度变得更大,促使其向下运动。另一方面,下部的某一流团有一微小的向上运动,则新位置处糖度较高,流体膨胀密度更小,促使其向上运动。这种局部上下运动形成盐指现象。穿过分层界面的组分溶液体积除了有双扩散对流扩散通量 Q_3 外,还有开合挡板扰动产生的通量 Q_1 和分子扩散产生的通量 Q_2 ,每次开合挡板要求轻缓,时间控制在40 s左右,故将扰动产生的通量视为瞬态值,与试验时间无关。定义通过分层界面组分溶液体积为 $V=Q_1+Q_2t+Q_3t$,其中 t 为试验时间, Q_1 、 Q_3 的大小和溶液黏性相关。

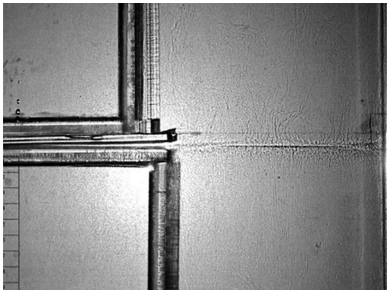


图1 试验中的盐指现象

使用糖溶液和盐溶液分别与清水进行对照组试验,对照组试验中仅有一种组分,不会出现双扩散对流。图2为对照组试验单组分溶液扩散入清水中的体积分数与Atwood数($A=(\rho_1-\rho_2)/(\rho_1+\rho_2)$,其中

ρ_1 为下层溶液密度, ρ_2 为上层溶液密度)的关系图。对照组试验中仅存在扰动通量 Q_1 和分子扩散通量 Q_2 ,其通量与双扩散对流试验的Atwood数成反比,由于不同试验组的密度稳定比相同,这就意味着Atwood数越大,糖、盐溶液的浓度越大,它们的黏性也越大。而糖、盐溶液试验中,下层糖、盐溶液的黏性越大,推拉挡板所产生的扰动影响也理应变小。由图2可知,糖、盐溶液的扰动扩散通量与流体黏性呈负相关关系,由此可以假定扰动扩散产生的通量和运动黏滞系数的关系为 $Q_1=c_1/\nu$,其中 c_1 为常数, ν 为运动黏滞系数。

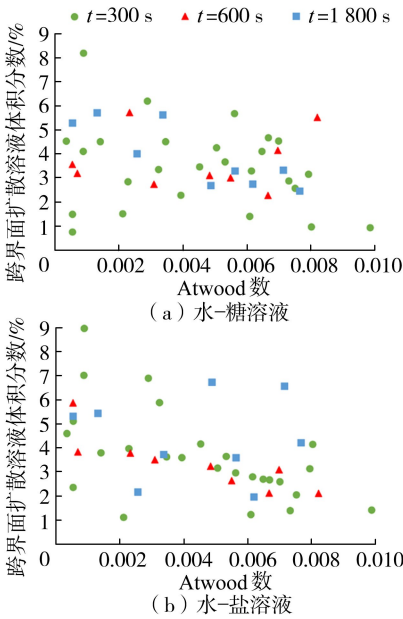


图2 对照组试验跨界面扩散溶液体积分数与Atwood数关系

根据菲克定律^[28],分子扩散通量的关系式为 $Q_2=-DdC/dz$,其中 C 为浓度, z 为垂向位置,负号意味着高浓度向低浓度扩散, D 为分子扩散系数。本试验上下两层溶液均匀,中间挡板厚度1 cm,挡板扰动会产生一个1 cm的薄层,其内部浓度梯度为 dC/dz ,即上下两均匀层浓度除以薄层厚度。

根据麦克斯韦-玻尔兹曼分布,认为流体中流体分子运动驱动内部溶质分子扩散,可以假定分子扩散系数与流体温度 T 遵循以下关系:

$$D \propto T^{\frac{3}{2}} \tag{1}$$

液体温度越高,扩散速度就越快。由此,可以假设在水-糖、水-盐试验中扰动扩散和分子扩散产生穿过分层界面组分溶液的总体积为

$$V = \frac{c_1}{\nu} - t c_2 T^{\frac{3}{2}} \frac{dC}{dz} \tag{2}$$

式中 c_2 为常数; t 为试验时间。通过二元回归分析可得系数 c_1 、 c_2 的值,且决定系数 R^2 较大,说明结果较好,具体数值见表3。

表 3 拟合结果

溶液	c_1	$c_2/10^{-7}$	R^2
水-糖	1.815	2.797	0.867
水-盐	1.626	2.042	0.888

为了验证扰动扩散通量和分子扩散通量在跨界面扩散溶液体积中的比重及方程的可行性,将试验数据代入式(2),式中 c_1 、 c_2 取拟合结果值,得到单组分对照组试验跨界面扩散溶液体积值,如图3所示。在水-糖、水-盐溶液中,分子扩散通量和扰动扩散通量各占一定比例,扰动扩散通量随着黏性的增大而减小,试验用时较少时,扰动扩散通量比分子扩散通量大很多。糖溶液分子扩散通量比盐溶液分子扩散通量大一些,这是浓度梯度不同引起的差异,浓度梯度越大,分子扩散通量越大。

在糖-盐双层系统中,盐的分子扩散率是糖的3倍,两种扩散率不同的流体会引起双扩散对流,而双扩散对流又会产生扩散通量。因此,糖-盐双层系统试验与水-糖、水-盐分层试验相比多了一项双扩散对流扩散通量。根据对照组试验数据可知糖溶液和盐溶液的扰动扩散体积和分子扩散体积。通过试验,测得了糖-盐双层系统的总扩散体积,用总扩散

体积减去预测的扰动扩散体积和分子扩散体积并除以分层界面面积和试验时间,可以得到糖、盐溶液的双扩散对流扩散通量,其结果如图4所示。在相同密度稳定比下,流体黏性越大,糖、盐组分产生的双扩散对流扩散通量整体呈减小趋势。

图5为每次试验中糖、盐溶液的运动黏滞系数关系,每组工况糖溶液与盐溶液的运动黏滞系数都在逐渐增大。而在糖溶液的运动黏滞系数大于 $1.15\text{ mm}^2/\text{s}$ 后,糖溶液的运动黏滞系数迅速增大,此时,糖溶液的运动黏滞系数增长速率远大于盐溶液的运动黏滞系数增长速率。在图4(a)中糖溶液运动黏滞系数增大的同时,糖溶液的扩散通量在逐渐减小;在图4(b)中盐溶液的运动黏滞系数在 $1\sim 1.15\text{ mm}^2/\text{s}$ 之间时,盐溶液的扩散通量规律与糖溶液相似,随着盐溶液运动黏滞系数的增大而减小。当试验流体的运动黏滞系数都大于 $1.15\text{ mm}^2/\text{s}$ 时,盐溶液的运动黏滞系数增长速率比糖溶液的运动黏滞系数增长速率慢很多,此时盐溶液的扩散通量基本不发生变化。

前人对影响盐指型双扩散对流扩散通量的因素做了许多研究,Stern提出当流体黏性和密度梯度乘

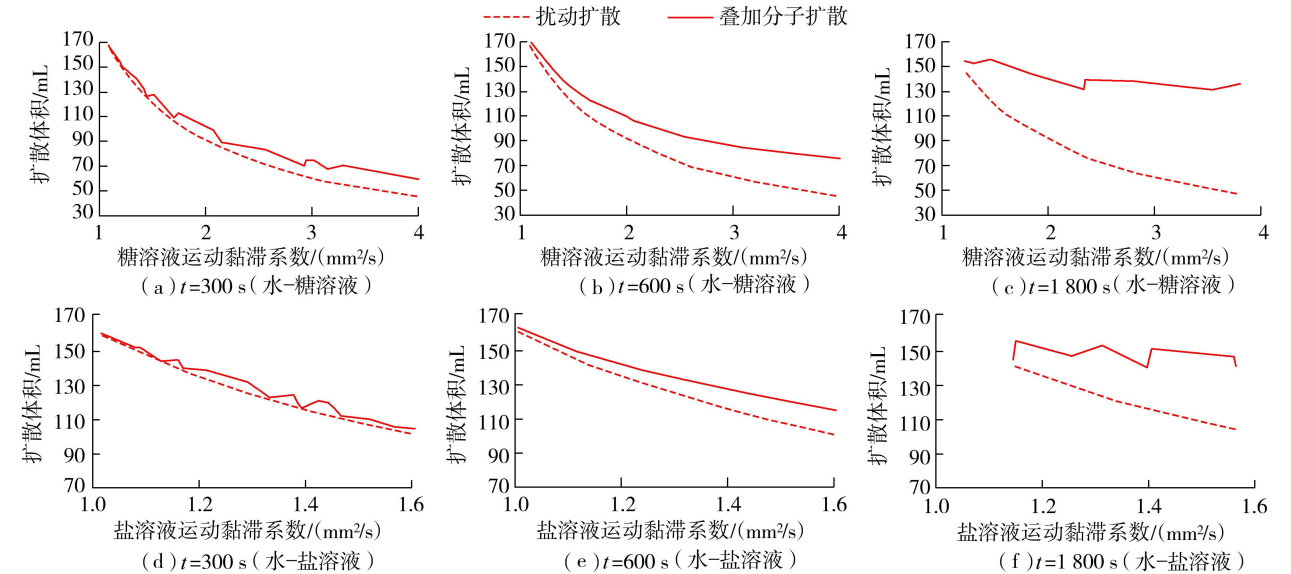


图 3 对照组试验扰动和分子扩散体积对比

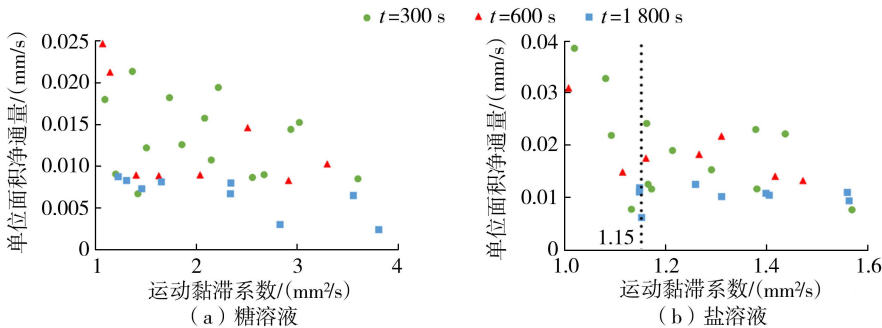


图 4 糖、盐溶液运动黏滞系数与双扩散对流扩散通量关系

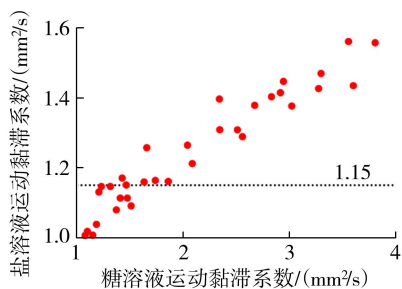


图5 各工况糖、盐溶液运动黏滞系数关系

积的无量纲比值 Stern 数趋近于 0 (分子是分母的高阶无穷小), 盐指的线性增长就会停止^[29]。对于密度稳定比较大时 ($R_\rho > 2$), 盐指不稳定性影响有限, 对物质的垂直输运没有显著影响。Stern 数通常只适用于低密度稳定比的盐指界面, 本文试验的密度稳定比较低, 且 Stern 数的分子和分母在一个数量级, 盐指的生长及扩散不会停止和失稳。在盐指界面可对 Stern 数进行计算分析, 图 6 展示了 $R_\rho = 1.07$ 时, Stern 数与流体黏性的关系, 可见 Stern 数与流体黏性呈负相关关系。

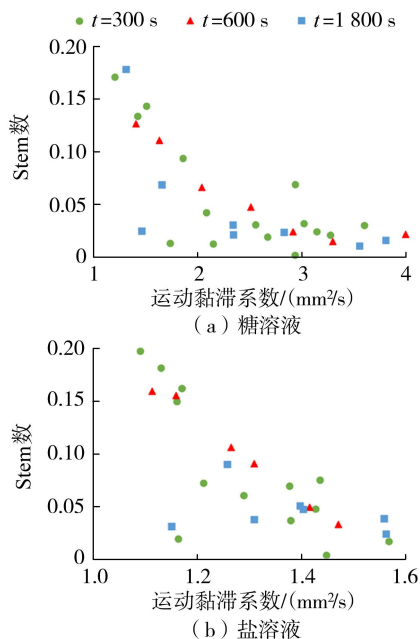


图6 Stern 数与流体运动黏滞系数关系

3 结 论

a. 流体黏性对盐指型双扩散对流扩散通量的影响不可忽略, 在双扩散对流强度相同的条件下, 试验流体黏性越大, 盐指型双扩散对流扩散通量越小。

b. 糖-盐双层系统中, 试验流体的黏性均较小时 (运动黏滞系数小于 $1.15 \text{ mm}^2/\text{s}$), 糖和盐这两种组分跨界面的双扩散对流扩散通量随流体黏性增大而减小的趋势相近; 当两种组分的质量分数持续增加时, 盐溶液的黏性仍缓慢增加, 而糖溶液的黏性迅

速增大, 此时糖组分的跨界面双扩散对流扩散通量仍会随糖溶液黏性增大而减小, 但盐组分的跨界面双扩散对流扩散通量不再变化。

c. 试验中糖-盐双层系统的密度稳定比接近 1, 为 $R_\rho = 1.07$, 此时观测到 Stern 数与流体黏性呈负相关关系。

参考文献:

- [1] LEE J, KANG S H, SON Y S. Experimental study of double-diffusive convection in a rotating annulus with lateral heating[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42(5): 821-832.
- [2] HUPPERT H E, TURNER J S. Ice blocks melting into a salinity gradient[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1980, 100(2): 367-384.
- [3] SPARKS R S J, HUPPERT H E, TURNER J S. The fluid dynamics of evolving magma chambers[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1984, 310(1514): 511-534.
- [4] CARLBERG T. The effect of convection upon off-eutectic composite growth of Al-Cu alloys[J]. Journal of Crystal Growth, 1984, 66(1): 106-120.
- [5] 鲍征宇. 双扩散对流理论简介及国外研究现状[J]. 地质科技情报, 1989, 8(4): 35-42. (BAO Zhengyu. Brief double-diffusive convection theory and its recent development abroad [J]. Geological Science and Technology Information, 1989, 8(4): 35-42. (in Chinese))
- [6] 崔冬, 何小燕, 杨海燕. 对流扩散方程数值耗散的定量研究方法[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(5): 8-11. (CUI Dong, HE Xiaoyan, YANG Haiyan. Quantitative research method of numerical dissipation levels of convective-diffusive equation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(5): 8-11. (in Chinese))
- [7] STERN M E. The "salt-fountain" and thermohaline convection[J]. Tellus, 1960, 12(2): 172-175.
- [8] RUDDICK B, GARGETT A E. Oceanic double-infusion: introduction[J]. Progress in Oceanography, 2003, 56(3/4): 381-393.
- [9] KELLEY D E, FERNANDO H J S, GARGETT A E, et al. The diffusive regime of double-diffusive convection[J]. Progress in Oceanography, 2003, 56(3/4): 461-481.
- [10] GREGG M C. Microstructure and intrusions in the California current[J]. Journal of Physical Oceanography, 1975, 5(2): 253-278.
- [11] 马文驹. 双扩散效应引起的异重流流动[J]. 力学学报, 1987, 19(增刊1): 30-37. (MA Wenju. A gravity current flow due to double-diffusive effects [J]. Acta Mechanica

Sinica,1987,19(Sup1):30-37. (in Chinese))

[12] CHEN Bo, LUO Lin, LI Jia, et al. Salt-fingering of pollutant vertical mixing in static thermal-stratified water [J]. Journal of Hydrodynamics,2010,22(3):430-437.

[13] 陈铂,彭梦辉,王华. 静态温度分层水体中点源羽流云团垂向运动规律[J]. 水利水电科技进展,2020,40(1):37-41. (CHEN Bo, PENG Menghui, WANG Hua. Vertical motion characteristics of thermal in static thermal-stratified water[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(1):37-41. (in Chinese))

[14] TURNER J S. Salt fingers across a density interface[J]. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts,1967,14(5):599-611.

[15] TURNER J S. The coupled turbulent transports of salt and and heat across a sharp density interface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,1965,8(5):759-767.

[16] TURNER J S. Buoyancy effects in fluids[M]. Cambridge: Cambridge University Press,1979.

[17] 张曦,郑凯. 糖盐双扩散对流系统的研究[J]. 物理与工程,2016,26(3):73-77. (ZHANG Xi, ZHENG Kai. Research of sugar and salt double diffusion convection system[J]. Physics and Engineering,2016,26(3):73-77. (in Chinese))

[18] GRIFFITHS R W, RUDDICK B R. Accurate fluxes across a salt-sugar finger interface deduced from direct density measurements[J]. Journal of Fluid Mechanics,1980,99(1):85-95.

[19] STERN M. Maximum buoyancy flux across a salt finger interface[J]. Journal of Marine Research,1976,34(1):95-110.

[20] HOWARD L N, VERONIS G. The salt-finger zone [J]. Journal of Fluid Mechanics,1987,183:1-23.

[21] SCHMITT R W. Flux measurements on salt fingers at an interface[J]. Journal of Marine Research,1979,37(3):419-436.

[22] TAYLOR J, BUCENS P. Laboratory experiments on the structure of salt fingers[J]. Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers,1989,36(11):1675-1704.

[23] LINDEN P F. On the structure of salt fingers[J]. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts,1973,20(4):325-340.

[24] LAMBERT R B, DEMENKOW J W. On the vertical transport due to fingers in double diffusive convection[J]. Journal of Fluid Mechanics,1972,54(4):627-640.

[25] POLYAKOV I V, PNYUSHKOV A V, REMBER R, et al. Mooring-based observations of double-diffusive staircases over the Laptev Sea slope [J]. Journal of Physical Oceanography,2012,42(1):95-109.

[26] SIREVAAG A, FER I. Vertical heat transfer in the Arctic Ocean: the role of double-diffusive mixing[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans,2012,117(C7):C07010.

[27] MCDOUGALL T J, TAYLOR J R. Flux measurements across a finger interface at low values of the stability ratio [J]. Journal of Marine Research,1984,42(1):1-14.

[28] 周从直,杨琴,龙向宇. 环境流体力学[M]. 重庆:重庆大学出版社,2010.

[29] RADKO T. Double-diffusive convection[M]. Cambridge: Cambridge University Press,2013.

(收稿日期:2023-01-26 编辑:俞云利)

(上接第15页)

[19] O'NEILL B C, TEBALDI C, VAN VUUREN D P, et al. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6 [J]. Geoscientific Model Development,2016,9(9):3461-3482.

[20] 张献志,汪向兰,王春青,等. 黄河源区气象水文序列突变点诊断[J]. 人民黄河,2020,42(11):22-26. (ZHANG Xianzhi, WANG Xianglan, WANG Chunqing, et al. Diagnosis of abrupt change point of the meteorological and hydrological series in the source area of the Yellow River [J]. Yellow River,2020,42(11):22-26. (in Chinese))

[21] 左其亭. 国家多层次生态健康保障体系构建[J]. 水利学报,2021,52(11):1347-1354. (ZUO Qiting. National multi-level guarantee system for the water ecological health [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2021,52(11):1347-1354. (in Chinese))

[22] 张京,金晓媚,张绪财,等. 格尔木河流域土壤湿度时空变化及其影响因素研究[J]. 水文地质工程地质,2019,46(2):66-73. (ZHANG Jing, JIN Xiaomei, ZHANG Xucai, et al. Spatial and temporal variations of soil moisture and its impact factors in the Golmud River Basin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2019,46(2):66-73. (in Chinese))

[23] 杨素英,孙凤华,马建中. 增暖背景下中国东北地区极端降水事件的演变特征[J]. 地理科学,2008,28(2):224-228. (YANG Suying, SUN Fenghua, MA Jianzhong. Evolvment of precipitation extremes in northeast China on the background of climate warming [J]. Scientia Geographica Sinica,2008,28(2):224-228. (in Chinese))

[24] 胡光伟,毛德华,李正最,等. 60年来洞庭湖区进出湖径流特征分析[J]. 地理科学,2014,34(1):89-96. (HU Guangwei, MAO Dehua, LI Zhengzui, et al. Analysis on the runoff characteristics in and out Dongting Lake in recent 60 years [J]. Scientia Geographica Sinica,2014,34(1):89-96. (in Chinese))

(收稿日期:2023-01-15 编辑:俞云利)