

双扩散对流中台阶结构的实验研究¹⁾

万伟^{*,†} 屈玲^{*,†} 周生启^{*,2)}

^{*}(中国科学院南海海洋研究所, 热带海洋环境国家重点实验室, 广州 510301)

[†](中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 线性层结的盐水系统在底部加热和顶部冷却时, 会产生明显的温盐台阶结构, 这是双扩散对流现象. 温盐台阶由界面和混合层组成. 温度垂向廓线的变化可以反映台阶的生成与合并. 根据盐水系统上下边界之间温差的变化, 系统演化过程分为两个阶段. 在温差增加阶段, 主要发现在已有台阶顶部生成新台阶, 而最下层台阶与其上层台阶发生合并过程. 在此阶段, 由于台阶的生成速率大于合并速率, 系统内台阶越来越多. 在温差减小阶段, 系统仅存在台阶的合并过程, 因此台阶数目越来越少. 最后, 系统内仅存在一个大尺度环流. 同时, 发现台阶的生成与合并过程虽然发生在局部区域, 但会影响到系统的其他区域. 例如, 由于最下层台阶的合并, 系统下边界的温度梯度发生明显变化. 实验中, 由于最下层台阶不断与其上层台阶合并, 最下层台阶厚度比其他台阶厚度大, 而其他台阶厚度变化不大. 最下层台阶厚度 (h) 随时间 (τ) 的变化满足 $h \sim \tau^{0.7}$ 的关系.

关键词 双扩散, 台阶, 温度场, 厚度

中图分类号: P731 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-13-230

引言

当流体介质系统包含两种 (或两种以上) 不同分子扩散率的物质, 并且这些物质的梯度对于流体密度梯度具有相反的贡献时, 就可能出现双扩散对流现象^[1]. 对于热盐系统, 热扩散率 $\kappa_T \approx 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, 而盐扩散率 $\kappa_S \approx 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. 同时, 系统温度升高时密度减小, 而系统盐度增加时密度增大. 因此, 热盐系统中可能出现双扩散对流现象.

虽然双扩散对流是一种小尺度湍流混合现象, 但是越来越多的海洋学家^[2-4] 认为双扩散对流过程对于大尺度热盐环流通量变化、海洋中水团相互作用和局地气候变化具有很重要的影响. 另外, 双扩散对流过程在海洋环流模式计算中^[5] 也有不可忽略的作用. Zhang^[5] 指出若考虑双扩散对流现象, 经向翻转环流强度将降低 22%. 一些海洋学家^[3] 认为双扩散过程能够驱动跨越等密面的混合, 进而影响不同水体的入侵作用, 导致侧向温盐通量变化.

目前, 密度比率 R_ρ 是表征双扩散对流现象是否稳定的参量之一^[4]. 其计算公式如下

$$R_\rho = \frac{\beta \partial S / \partial z_S}{\alpha \partial T / \partial z_T} \quad (1)$$

式中, $\partial T / \partial z_T$ 是温度界面的温度梯度, $\partial S / \partial z_S$ 是盐度界面的盐度梯度. α 和 β 分别是热膨胀系数和盐收缩系数. 一般情况下, 认为温度界面厚度 (z_T) 与盐度界面厚度 (z_S) 近似相等, 因此式 (1) 可简化为

$$R_\rho = \frac{\beta \Delta S}{\alpha \Delta T} \quad (2)$$

当密度比率 $R_\rho \geq 1$ 时, 双扩散对流现象会发生^[4]. 近些年, 通过高精度海洋温盐深剖面仪的现场测量, 在许多海域发现双扩散对流现象. 例如北冰洋的加拿大海盆^[6-8] 和欧亚海盆^[9-10] (如图 1 所示). 在内陆湖和陆间海也观测到该现象, 例如非洲的基伍湖^[11] 和连接印度洋和地中海的红海^[12]. 另外, 有研究表明在地壳内岩浆活动、大气中水汽作用和天体物理的行星运动中^[13], 双扩散对流现象也起着重要作用. 因此, 研究双扩散对流现象具有广泛的应用背景^[14-17].

双扩散现象有两种类型: 当层结流体的上边界为高温高盐、下边界为低温低盐的环境时, 系统会出现盐指; 相反, 当层结流体的上边界为低温低盐、下

2013-07-11 收到第 1 稿, 2013-09-17 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金 (41176027, 11072253), 广东省自然科学基金 (10251030101000000) 和国家重点基础研究发展计划 (2010CB950302) 资助项目.

2) 周生启, 研究员, 主要研究方向: 深海动力学过程、海洋中小尺度过程、海洋环流和海洋混合、湍流热对流. E-mail: sqzhou@scsio.ac.cn

边界为高温高盐的环境时,系统会出现扩散对流(亦称双扩散对流).本实验主要针对双扩散对流进行研究.在双扩散对流中,每层台阶(如图1所示)包括两部分:一部分为温度和盐度均匀的混合层;另一部分为温度和盐度梯度很大的界面.通常,混合层的厚度远大于界面的厚度.

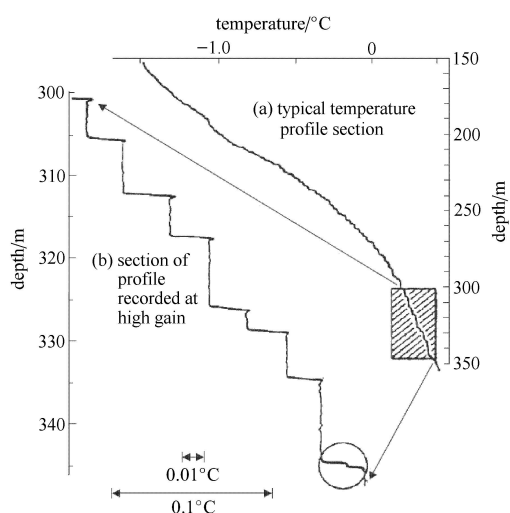


图1 北冰洋的温盐台阶结构^[6]

Fig. 1 Structure of the thermocline staircases in the Arctic Ocean^[6]

前人通过数值模拟^[18-20]和室内实验^[21-23]对双扩散对流现象的流动和传热规律进行了研究.最早,Turner^[21]实验研究了初始条件为线性层结、温度均匀的双扩散对流现象的演化规律.当下边界恒定供热和上边界绝热时,实验结果表明,最下层台阶厚度 h 与时间 t 的关系为 $h \sim t^{0.5}$.随后,Huppert和Linden^[22]在相似的实验条件下,进一步研究结果表明,最上层台阶的高度 z 与时间 t 的关系为 $z \sim t^{0.5}$.后来,Fernando^[2]通过实验研究发现最下层台阶发展到一个临界高度后,其厚度不再增长.

相比于过去的研究^[21-23],本实验不仅在底部提供恒定热通量,而且在顶部保持恒定温度,这种边界条件和海洋的情况更为接近.通过分析系统温度廓线和阴影图像,探究不同台阶的变化趋势,找出台阶发生合并过程的规律.另外,通过测量下导板温度,研究最下层台阶的合并过程对系统下边界温度信号的影响.同时,研究最下层台阶厚度随时间的变化,发现其变化关系遵循一定标度律.最后,总结本实验的研究结果.

1 实验装置与测量方法

本实验装置主要由3部分构成,包括上导板、

下导板和有机玻璃水槽(如图2所示).上下导板是表面镀镍的铜板.矩形对流水槽的内部尺寸为 $25.0\text{ cm} \times 7.4\text{ cm} \times 25.5\text{ cm}$ (长 \times 宽 \times 高),水槽壁厚为 0.8 cm .通过4根绝缘不锈钢杆,把水槽与上下导板集成在一起.上导板内部是中空的水腔,为确保实验过程中上导板温度恒定,水腔通过水管与恒温循环水冷机(Model: 9712, Polyscience, Inc.)相连.下导板内部放入硅胶电热片(Model: HR5473, Minco, Inc.),如图2所示.实验中通过给电热片输入恒定电压 U ,从而提供恒定热通量 $Q_0 = U^2/(RS)$,其中 R 是电热片的电阻值, S 是电热片的有效加热面积.在本实验中,热通量 Q_0 为 2177 W/m^2 .水冷机设定的恒定温度为 21°C .

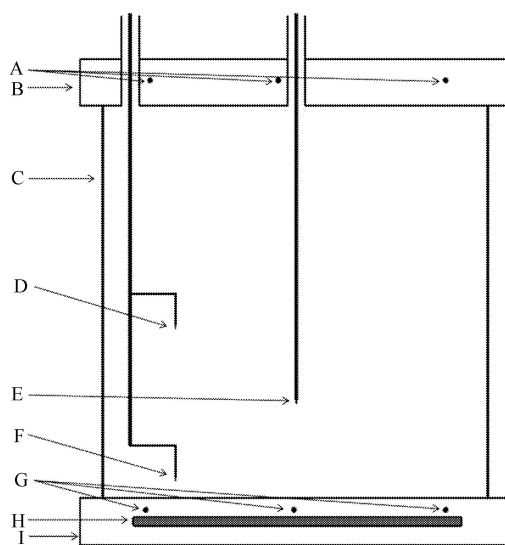


图2 实验水槽示意图. A和G分别是上导板和下导板的温度传感器插孔, B为上导板, C为有机玻璃水槽, I为下导板, D, E和F皆为温度探头, H为加热片

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental tank. A and G: The slots for inserting temperature probes, B: The top plate, C: The plexiglas tank, I: The bottom plate, D, E and F: Temperature sensors, H: The heater

在实验中,对上下导板的温度和水槽内流体温度进行测量.在上下导板内使用了热敏电阻温度传感器(Model: 44031, Omega Engineering, Inc.),在实验水槽内使用高灵敏度NTC热敏电阻传感器(Model: AB6E3-B05103J, Thermometrics, Inc.).如图2所示,温度探头E被固定在距下导板 33 mm 处.侧边的温度探头D和F可上下移动,它们由一根细金属杆(直径 1 mm)连接,两探头的间距为 140 mm .通过电动位移台(Model: MTS50/M-Z8, Thorlabs, Inc.)垂向匀速升降金属杆,从温度探头D和F得到温度廓线.电

动位移台的量程为 100 mm.

初始阶段, 流体系统温度 (26.9°C) 与室温保持一致. 为了获得线性密度层结的初始条件, 采取前人^[24-25]研究所使用的“双缸法”. 其基本过程如下: 选择 2 个底面积与实验水槽底面积均相等的水槽, 分别标为 A 槽和 B 槽. 在 A 槽注入盐溶液 (密度 ρ_A : 1029.5 kg/m³), B 槽注入相同体积的纯水 (密度 ρ_B : 995.0 kg/m³). 将 A 槽中的盐溶液注入 B 槽, 其流量 Φ_{AB} 通过蠕动泵 (Model: DDBT-201) 控制. 为了保证注入 B 槽的盐溶液和原有溶液充分混合, 使用了功率为 120 W 的机械搅拌器 (Model: GZ120). 同时把 B 槽中充分混合的溶液注入实验水槽, 其流量 Φ_{BC} 同样用蠕动泵 (Model: DDBT-201) 控制. 按照“双缸法”形成线性层结的条件^[24-25], 当本实验满足以下关系时

$$2\Phi_{AB} = \Phi_{BC} \quad (3)$$

实验水槽内溶液盐度为线性层结分布, 由于初始温度均匀, 因此, 初始密度分布也是线性层结. 本实验中, Φ_{AB} 为 0.108 g/s, Φ_{BC} 为 0.216 g/s.

A 槽和 B 槽溶液保持相等的初始高度 h_A 和 h_B , 为 16.7 cm. 根据线性密度层结的条件^[24-25], C 槽溶液初始的密度梯度应为: $d\rho/dz = (\rho_B - \rho_A)/(h_A + h_B) = -103.3 \text{ kg/m}^4$. 当重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, 参考密度 $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$, 由浮力频率公式, $N^2 = -\frac{g}{\rho_0} \left(\frac{d\rho}{dz} \right)$, 得到实验的初始浮力频率为 $N = 1.01 \text{ s}^{-1}$. 和前人^[21-22]的实验条件接近.

在实验过程中, 运用阴影成像法记录双扩散对流台阶的演化过程. 在实验水槽的一侧距离水槽约 3 m 处放置平行光源, 照亮水槽, 透射光线成像于另一侧的屏幕纸 (面积: $\sim 25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$), 分层图像用摄像机记录. 双扩散对流台阶阴影图像如图 3 所示, 系统中明显存在两个界面和两个混合层. 此时, 正在生成第 3 个混合层和第 3 个界面.

2 温度场的时空分布

2.1 上下导板温度随时间的变化

上下导板温度随时间的变化, 如图 4 所示. 其中, 横坐标 τ 代表无量纲时间, 其定义为

$$\tau = t/t_{T_{\max}} \quad (4)$$

式中, t 是实验经历的时间, $t_{T_{\max}}$ 是下导板温度达

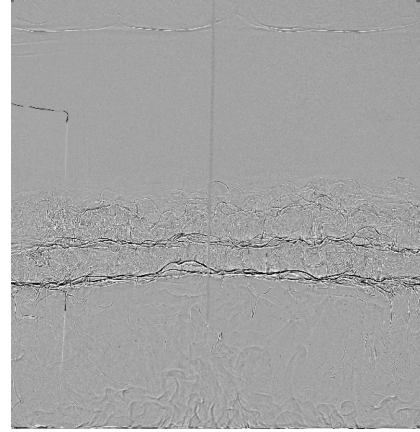


图 3 多层混合层和界面的阴影图像

Fig. 3 Shadowgraph image of a series of mixed layers and interfaces

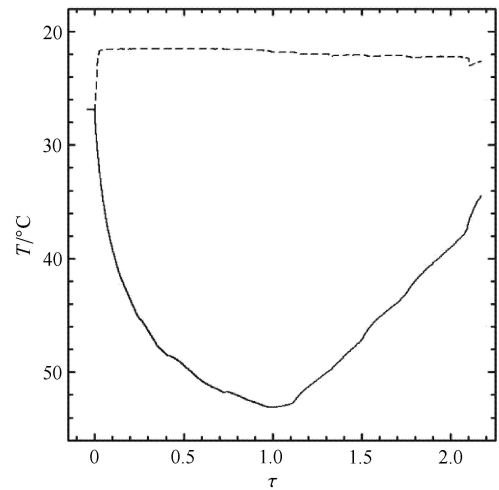


图 4 上下导板温度随时间的变化
(实线对应下导板, 虚线对应上导板)

Fig. 4 Time series of the temperature of the top and bottom plates
(solid line: bottom plate, dashed line: top plate)

到最大值的时刻. 在本实验中, 当下导板温度达到 $T_{\max} = 53.0^\circ\text{C}$ 时, 对应时间 $t_{T_{\max}} = 18724 \text{ s}$ (约 5.2 h), 整个实验过程的时间为 40650 s (约 11.3 h).

由图 4 可见, 在整个实验过程中, 上导板温度变化不明显, 仅在初始阶段有较大幅度的降温. 这说明水冷机的制冷效率对于本实验是足够的. 与上导板相比, 下导板温度变化很大. 开始, 下导板温度不断升高, 但升高的速率越来越慢, 当 $\tau = 1$ 时, 下导板温度达到最大, 之后下导板温度不断下降. 因为整个过程中上导板温度几乎不变, 下导板温度的变化反映了系统温差的变化. 根据系统温差的变化, 整个实验过程分为两个阶段: 当 $\tau < 1$ 时, 为系统温差增加阶段 (称为“TU”阶段); 当 $\tau > 1$ 时, 为系统温差减小阶段 (称为“TD”阶段).

2.2 双扩散温度台阶的空间结构

图 5 和图 6 分别为“TU”阶段和“TD”阶段的温度垂向廓线. 由于 D 和 F 温度探头的间距大于电动位移台的量程, 不能测量系统中部范围内 (高度为 97 mm~140 mm) 的温度.

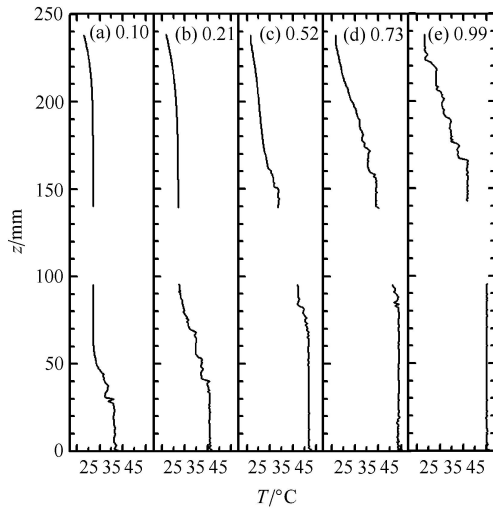


图 5 系统在“TU”阶段的温度垂向廓线
Fig. 5 Sequences of the vertical profiles of temperature in the “TU” stage

在“TU”阶段, 当 $\tau = 0$ 时, 系统中不存在台阶, 初始温度为 26.9°C . 当 $\tau = 0.10$ 时 (见图 5(a)), 系统下部生成 2 层台阶. 最下层台阶的厚度为 27 mm, 温度为 36.2°C . 系统中部温度保持不变. 当 $\tau = 0.21$ 时 (见图 5(b)), 由于在已有台阶顶部又生成新台阶, 系统下部共有 3 层台阶. 最下层台阶的厚度为 39 mm, 温度为 40.5°C . 系统中部温度仍保持不变. 根据阴影图像和温度廓线观测得知, 当 $\tau = 0.52$ 时 (见图 5(c)), 由于有多层台阶生成, 系统中下部共有 5 层台阶. 而最下层台阶与其相邻台阶发生合并, 其厚度也变厚为 76 mm, 温度为 46.4°C . 当 $\tau = 0.73$ 时 (见图 5(d)), 在已有台阶顶部又生成了一层新台阶, 系统中下部共有 6 层台阶. 最下层台阶的厚度为 98 mm, 温度为 48.8°C . 当 $\tau = 0.99$ 时 (见图 5(e)), 8 层台阶充满整个系统. 最下层台阶的厚度为 120 mm, 温度为 49.6°C . 在“TU”阶段, 系统中台阶数目不断增加. 随着时间的增加, 最下层台阶变化较大, 其厚度逐渐变厚. 同时, 由于下边界的持续供热, 最下层台阶的温度也逐渐升高. 随着时间的增加, 其他台阶的厚度变化不大 (变化范围为 2 cm~3 cm); 温度也在逐渐升高, 但不

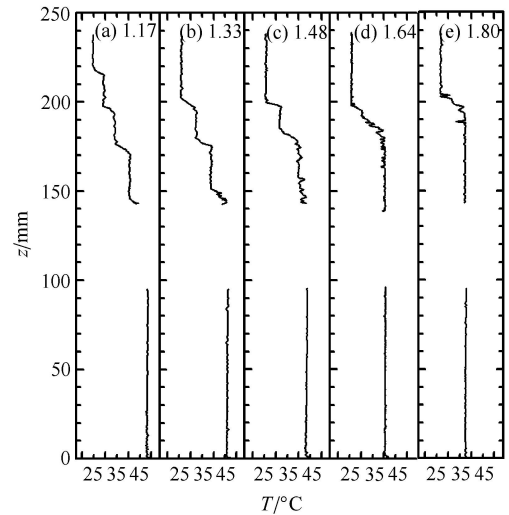


图 6 系统在“TD”阶段的温度垂向廓线
Fig. 6 Sequences of the vertical profiles of temperature in the “TD” stage

如最下层台阶升温显著.

在“TD”阶段, 系统中台阶数目逐渐减少, 最下层台阶温度逐渐降低, 但最下层台阶的厚度仍逐渐变厚. 例如, 当 $\tau = 1.17, 1.33, 1.48$ 和 1.64 时, 台阶数目分别为 5 层、4 层、3 层和 2 层; 最下层台阶温度分别为 $48^{\circ}\text{C}, 45^{\circ}\text{C}, 43^{\circ}$ 和 40°C ; 最下层台阶厚度分别为 142 mm, 145 mm, 178 mm 和 184 mm. 当 τ 进一步增大时, 台阶层数进一步减少. 通过阴影图像观测到, 当 $\tau \geq 2.1$ 时, 所有台阶消失, 仅存在一个充满整个系统的大尺度环流. 在此阶段, 随着时间的增加, 由于发生合并, 其他台阶的厚度不断增加; 受最下层台阶降温的影响, 这些台阶的温度也在逐渐降低.

综上所述, 在“TU”阶段, 系统出现了双扩散台阶的生成与合并过程. 由于生成快于合并, 台阶逐渐增多. 在“TD”阶段, 由于系统中无新台阶生成, 仅出现台阶合并, 台阶逐渐减少.

由上可见, 在双扩散对流的演化过程中, 台阶的生成和合并是其基本的动力过程. Radko^[25] 把台阶合并过程分为两类: H-merger 型和 B-merger 型. H-merger 型为下层台阶的界面向上迁移, 并与相邻上层台阶的界面合并为一个新界面, 由此得到新台阶. 而 B-merger 型为相邻的两层台阶之间的界面逐渐消失, 使其上下两侧的混合层合并为一个新的混合层, 由此得到一层新台阶. 可通过阴影图像观察到台阶合并过程并判别其合并类型. 最下层台阶和其上层台阶的合并在整个过程中主要是 H-merger 型, 但

在 $\tau = 1.33 \sim 1.48$ 的时间段内合并为 B-merger 型. 当 $\tau = 0.99 \sim 1.17$, 第 3 层和第 4 层台阶之间的合并, 以及第 5 层和第 6 层台阶之间的合并皆为 H-merger 型. 当 $\tau = 1.17 \sim 1.33$, 第 4 层和第 5 层台阶的合并为 B-merger 型. 因此, 在本实验中, 系统中台阶存在 H-merger 型和 B-merger 型的合并过程.

3 台阶的合并过程对下导板温度的影响

台阶合并过程发生时, 在系统的局部区域会出现界面消失. 这种局域事件是否会影响到整个系统? 下面拟通过分析下导板的温度变化, 研究其是否受到台阶合并过程的影响.

图 7 为下导板温度梯度随时间的变化. 如图所示, 下导板的温度梯度整体呈下降趋势, 梯度值从 0.006°C/s ($\tau = 0$) 下降到约 -0.002°C/s ($\tau = 2.23$), 在“TU”阶段, 基本为正值, 在“TD”阶段, 为负值. 除了整体下降趋势, 可以看到温度梯度出现 8 个极小值. 同时, 由阴影图像观测发现, 在温度梯度极小值所对应的时间, 最下层台阶与其相邻上层台阶发生合并. 由于下导板与最下层台阶通过下导板表面直接接触, 其温度变化趋势一致. 当台阶未合并时, 界面将两层相邻台阶的混合层分开. 在界面处热量主要以热传导的方式进行传输, 在混合层内热量主要以热对流的方式进行传输, 对比这两种热传输方式, 可知界面对热量的垂向传输具有阻碍作用. 当台阶合并时, 两者之间的界面消失, 热量以更快的速率传输到上层, 即热通量增加. 在下导板持续提供恒定

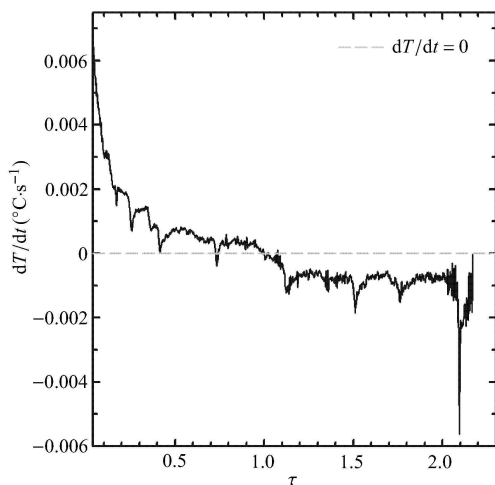


图 7 下导板温度梯度随时间的变化

Fig. 7 Temperature gradient of the bottom plate is plotted as a function of τ

热通量的情况下, 在“TU”阶段, 最下层台阶的温度逐渐升高, 当该台阶与上层台阶之间的热通量增加时, 用于使其升温的热量减少, 导致温度升高的速率减小, 温度梯度出现极小值; 在“TD”阶段, 最下层台阶的温度逐渐下降, 当界面消失时, 热通量增加, 最下层台阶以更快的速率失去热量, 其温度更快降低, 温度梯度出现极小值.

4 最下层台阶厚度随时间的变化

下导板提供给系统的热通量为 Q_0 , 若认为 Q_0 全部进入最下层台阶, 则下导板提供给最下层台阶的热通量 Q_1 为

$$Q_1 = Q_0 \quad (5)$$

此时若忽略系统的侧向散热, 最下层台阶的浮力通量 q_1 为

$$q_1 = \alpha g Q_1 / (\rho_0 C_p) \quad (6)$$

式中, α 为热膨胀系数, g 为重力加速度, ρ_0 为参考密度, C_p 为比热系数. 本实验中, $q_1 = 1.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^3$.

Turner^[21] 根据热盐守恒方程, 得出当第 2 层台阶未生成时, h 可由式 (7) 计算

$$h = C q_1^{1/2} N^{-1} t^{1/2} \quad (7)$$

式中, h 为最下层台阶厚度, C 为常数 (理论值为 $\sqrt{2}$, 但由于实验装置和条件不同, C 在 1.06~1.63 的范围内变化), t 为时间. 由式 (7), 可以从理论上得出 h 与 τ 的关系, 即 $h \sim \tau^{0.5}$ (如图 8 黑色虚线所示).

本实验中, 根据双扩散台阶温度廓线, 对 h 和 τ 线性拟合可得: $h \sim \tau^{0.7}$ (如图 8 灰色虚线所示). 由图 8 可见, 实测厚度小于理论厚度. 对于二者之间的差别, 分析可能有 3 个原因: (1) 在计算理论厚度时, 所用的热通量未考虑系统热通量的变化. 但实验中由于下导板需要吸收一定热量使其增温, 使提供给最下层台阶的热通量减小. 因此理论厚度偏大; (2) 在计算理论厚度时, 热膨胀系数 α 为固定值, 但在实验中, α 随温度变化而变化. 当温度从 20°C 变化到 60°C 时, α 变化约为 2 倍; (3) Turner^[21] 理论研究针对在第 2 层台阶出现之前最下层台阶厚度随时间的变化. 此阶段, 可以忽略通过最下层台阶顶部传输到上层系统的热量. 而在本实验中, 传输到上层系统的热量不可忽略, 这部分热量足以驱动上面多层

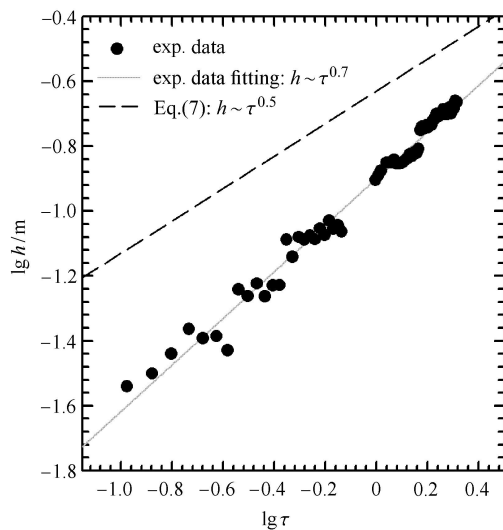


图 8 对数坐标系下, 最下层台阶厚度 (h) 随时间 (τ) 的变化关系. 灰色实线: 实验测量厚度拟合的标度律, 黑色虚线: 式 (7)

Fig. 8 The thickness of the lowest staircase (h) is plotted as a function of time (τ) in logarithmic scale. The gray solid line: the fitted scaling of the experimental data, the black dashed line: Eq.(7)

台阶的发展. 这 3 个原因都可能导致实测厚度小于理论厚度.

5 结 论

本文实验研究了线性层结盐水系统的双扩散对流演化过程. 在底部提供恒定热通量和顶部保持恒定温度条件下, 首先观测到系统下部生成多层由混合层和界面组成的台阶结构, 同时出现台阶合并过程. 当下导板温度接近最大值时, 温盐台阶充满了整个系统, 台阶数目最多 (8 层). 之后, 系统内无新台阶生成, 只发生台阶合并, 台阶数目逐渐减少. 最后系统内仅存在 1 个大尺度环流.

在实验过程中, 发现 H-merger 型和 B-merger 型的台阶合并过程均存在. 系统中最下层台阶的合并过程主要是 H-merger 型. 另外, 最下层台阶的合并过程会引起下导板的温度梯度出现极小值, 这表明系统内局部区域的突变事件, 会对其他区域造成影响.

本实验中, 最下层台阶厚度随时间变化的规律为 $h \sim \tau^{0.7}$. 最下层台阶的实测厚度小于理论厚度, 认为可能是因为在实验中下底板由于散热等影响提供给最下层台阶的热通量低于理论值, 热膨胀系数随温度也是变化的, 并且本实验研究了系统存在多层台阶的阶段, 此阶段一部分热通量通过最下层台阶顶部传输到上层系统. 这 3 个原因都可能导致实测

厚度小于理论厚度.

参 考 文 献

- 1 Turner JS. Buoyancy Effects in Fluids. Cambridge: Cambridge University Press, 1973
- 2 Fernando HJS. The formation of a layered structure when a stable salinity gradient is heated from below. *Journal of Fluid Mechanics*, 1987, 182: 525-541, doi: 10.1017/S0022112087002441
- 3 Ruddick B, Gargett AE. Oceanic double-diffusion Introduction. *Progress in Oceanography*, 2003, 56: 381-393, doi: 10.1016/S0079-6611(03)00086-7
- 4 Kelley DE, Fernando HJS, Gargett AE, et al. The diffusive regime of double-diffusive convection. *Progress in Oceanography*, 2003, 56: 461-481, doi: 10.1016/S0079-6611(03)00026-0
- 5 Zhang Jubao. Impacts of double-diffusive processes on the thermohaline circulation. [PhD Thesis] MIT, 1998
- 6 Neal, VT, Neshyba S, Denner W. Thermal stratification in the Arctic Ocean. *Science*, 1969, 166: 373-374, doi: 10.1126/science.166.3903.373
- 7 Turner JS. The melting of ice in the arctic ocean: The influence of double-diffusive transport of heat from below. *Journal of Physical Oceanography*, 2010, 40: 249-256, doi: 10.1175/2009JPO4279.1
- 8 赵倩, 赵进平. 加拿大海盆双扩散阶梯结构分布与热通量研究. *地球科学进展*, 2011, 26(2): 193-201 (Zhao Qian, Zhao Jinping. Distribution of double-diffusive staircase structure and heat flux in the Canadian Basin. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(2): 193-201 (in Chinese))
- 9 Sirevaag A, Fer I. Vertical heat transfer in the Arctic Ocean: The role of double diffusive mixing. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117: C07010, doi: 10.1029/2012JC007910
- 10 Polyakov IV, Pnyushkov A, Rember R, et al. Mooring-based observations of double-diffusive staircases over the laptev sea slope. *Journal of Physical Oceanography*, 2012, 42: 95-109, doi: 10.1175/2011JPO4606.1
- 11 Newman FC. Temperature steps in Lake Kivu: A bottom heated saline lake. *Journal of Physical Oceanography*, 1976, 6: 157-163, doi: 10.1175/1520-0485(1976)006<0157:TSILKA>2.0.CO;2
- 12 Swallow JC, Crease J. Hot salty water at the bottom of the red sea. *Nature*, 1965, 205: 165-166. doi:10.1038/205165a0
- 13 Huppert HE, Turner JS. Double-diffusive convection. *Journal of Fluid Mechanics*, 1981, 106: 299-329, doi: 10.1017/S0022112081001614
- 14 鲍征宇. 双扩散对流理论简介及国外研究现状. *地质科技情报*, 1989, 8(4): 35-42 (Bao Zhengyu. Brief double-diffusive convection theory and its recent development abroad. *Geological Science and Technology Information*, 1989, 8(4): 35-42 (in Chinese))
- 15 郑珺婷, 詹杰民. 双扩散对流系统问题的研究进展. *力学进展*, 2002, 32(3): 415-424 (Zheng Junting, Zhan Jiemin. A review on double-diffusive convection. *Advances in Mechanics*, 2002, 32(3): 415-424 (in Chinese))
- 16 李炜, 姜燕妮, 颜君毅等. 磁场对双扩散层热毛细对流的影响. *力学学报*, 2013, 44(3): 481-486 (Li Wei, Jiang Yanni, Yan Junyi, et al. Effect of magnetic field on thermocapillary convection in a

- double-diffusive liquid layer. *Chinese Journal of Theoretical Applied Mechanics*, 2012, 44(3): 481-486 (in Chinese)
- 17 Carmack EC, Williams WJ, Zimmermann SL, et al. The Arctic Ocean warms from below. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: L07604, doi: 10.1029/2012GL050890
- 18 Carpenter JR, Sommer T, Wüest A. Simulations of a double-diffusive interface in the diffusive convection regime. *Journal of Fluid Mechanics*, 2012, 711: 411-436, doi: 10.1017/jfm.2012.399
- 19 Flanagan JD, Lefler AS, Radko T. Heat transport through diffusive interfaces. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40: 1-5, doi: 10.1002/grl.50440
- 20 Lefler AS. Numerical modeling of the vertical heat transport through the diffusive layer of the Arctic Ocean. [Master Thesis]. Naval Postgraduate School, 2013
- 21 Turner JS. The behaviour of a stable salinity gradient heated from below. *Journal of Fluid Mechanics*, 1968, 33: 183-200, doi:10.1017/S0022112068002442
- 22 Huppert HE, Linden P. On heating a stable salinity gradient from below. *Journal of Fluid Mechanics*, 1979, 95: 431-464, doi: 10.1017/S0022112079001543
- 23 Marmorino GO, Caldwell DR. Heat and salt transport through a diffusive thermohaline interface. *Deep Sea Research*, 1976, 23: 59-67, doi: 10.1016/0011-7471(76)90808-1
- 24 Economidou M, Hunt GR. Density stratified environments: The double tank method. *Experiments in Fluids*, 2009, 46: 453-466, doi: 10.1007/s00348-008-0571-8
- 25 Oster G, Yamamoto M. Density gradient techniques. *Chemical Reviews*, 1963, 63: 257-268, doi: 10.1021/cr60223a003
- 26 Radko T. Mechanics of merging events for a series of layers in a stratified turbulent fluid. *Journal of Fluid Mechanics*, 2007, 577: 251-273, doi: 10.1017/S0022112007004703

(责任编辑: 刘希国)

LABORATORY STUDIES ON THE STAIRCASE STRUCTURE OF DOUBLE-DIFFUSIVE CONVECTION¹⁾

Wan Wei^{*,†} Qu Ling^{*,†} Zhou Shengqi^{*,2)}

^{*}(State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China)

[†](University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In the present study, the evolution of double-diffusive convection is explored in a linear stratified salt-water system, where the uniform heating is provided from below and the constant temperature is applied from above. By using the variances of vertical profiles of temperature and shadowgraph images, it is found that the generating and merging of the staircases occur during the experiment. Based on the temperature difference across the system, the whole evolution process can be divided into two stages. In the temperature difference increase stage, the generation of new staircase happens at the top of the old ones, while the merging event typically occurs between the lowest staircase and its overlaying one. The staircase number increases because that the generating rate of new staircase is faster than the merging rate. In the temperature difference decrease stage, the existing staircases disappear progressively. It is interesting that the bottom boundary of system can feel the happen of the merging events of the lowest staircase, which means that the dynamics process in the local region can have effect on the other regions of system. The thickness of the lowest staircase (h) is much thicker than those of others, and its temporal dependence is in the form of $h \sim \tau^{0.7}$, here τ is the dimensionless time.

Key words double diffusion, staircase, temperature field, thickness

Received 11 July 2013, revised 17 September 2013.

1) The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (41176027, 11072253), the Natural Science Foundation of Guangdong (10251030101000000) and the National Basic Research Program of China (2010CB950302).

2) Zhou Shengqi, researcher professor, research interests: flow dynamics in the deep ocean, small & meso-scale process in the ocean, oceanic circulation and ocean mixing, turbulent convection. E-mail: sqzhou@scsio.ac.cn