

水上光伏基座水体交换对影响因素的响应

蒋茗韬^{1,2,6}, 温梦丹¹, 虞丹君⁵, 刘修锦^{2,3}, 倪云林⁴

(1. 上海大学 力学与工程科学学院, 上海 200400; 2. 河北省海洋岸线生态修复与智慧海洋监测工程研究中心, 河北 秦皇岛 066000; 3. 河北省地质矿产勘查开发局第八地质大队, 河北 秦皇岛 066000; 4. 浙江海洋大学 海洋工程装备学院, 浙江 舟山 316022; 5. 舟山市生态环境保护技术中心, 浙江 舟山 316000; 6. 新加坡南洋理工大学 南洋水环境与水资源研究所环境工艺建模中心, 新加坡 637141)

摘要: 采用平面激光诱导荧光(PLIF)法对不同温差、水流速度、侧板开孔面积条件下水上光伏基座的水体交换进行观测。实验结果表明: 光伏基座滞留水体的质量与时间呈负指数关系, 原水体在基座内的滞留时间由温差、周边水流流速及基座侧板开孔率共同决定。在较小的温差下, 水流流速对基座内的水体交换影响显著。而当温差较大时, 增大基座侧板开孔率对促进基座内水体的交换更为有效。合理的底座开孔率不仅有助于基座内温水的直接稀释, 从开孔进入基座的水流也可进一步加强基座底部湍流层涡团的卷吸作用, 显著促进基座内的水体交换。

关键词: 平面激光诱导荧光(PLIF); 流速; 水体交换; 光伏模块基座

中图分类号: TV39; TK519

文献标志码: A

Response of Water Mass Exchange in Floating Photovoltaic Modules to Influencing Factors

JIANG Mingtao^{1,2,6}, WEN Mengdan¹, YU Danjun⁵, LIU Xiujin^{2,3}, NI Yunlin⁴

(1. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200400, China; 2. Marine Ecological Restoration and Smart Ocean Engineering Research Center of Hebei Province, Qinhuangdao 066000, China; 3. The Eighth Geological Brigade, Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, Qinhuangdao 066000, China; 4. College of Marine Engineering Equipment, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 5. Zhoushan Ecological Environment Protection Technology Center, Zhoushan 316000, China; 6. Environmental Process Modelling Centre (EPMC), Nanyang Environment and Water Research Institute (NEWRI), Singapore 637141, Singapore)

Abstract: The planar laser induced fluorescence (PLIF) method was employed to investigate the mass exchange

characteristics of water in floating photovoltaic modules. The impact of temperature difference, ambient flow velocity, and perforation rate were observed. The experimental results indicate that the dimensionless concentration of the original warm water in the module decreases exponentially over time, with the retention duration determined by the combined effects of temperature difference, flow velocity, and the perforation rate. Under small temperature differences, flow velocity has a significant impact on the mass exchange, while an increased perforation rate is more effective under large temperature differences. In addition to providing direct diluting effects, the water flow from the punching area was observed to enhance the large-scale circulations in the turbulent layer at the bottom of the base module, resulting in a significant improvement in overall mass exchange efficiency.

Keywords: planar laser induced fluorescence (PLIF); flow velocity; water exchange; photovoltaic module base

太阳能发电系统(Solar power system)是近年来能源研究的热点课题之一, 陆上光伏具有安装灵活、维护方便的特点, 近年来得到了较大的发展。但随着社会发展, 用地紧缺成为制约光伏产业发展的主要矛盾。相较于陆上光伏, 水上光伏可以最大限度的利用我国河川众多、水域面积大的特点, 从而缓解陆上光伏面临的用地资源紧缺压力^[1], 同时水上光伏不易受沙尘困扰, 水流带来的天然冷却特性也使其发电量比陆地高 5%~7%^[2]; 此外, 水上光伏可与其他周边产业结合, 组成“光伏+”模式来提高产业的商业附加价值, 如光伏构件对水面的覆盖可以有效减少水的蒸发和抑制藻类的繁殖^[3], 水上光伏下

收稿日期: 2023-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(42006143)

第一作者: 蒋茗韬, 讲师, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为环境流体力学。E-mail: mtjiang@shu.edu.cn

通信作者: 倪云林, 副教授, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为近岸水动力。E-mail: oceannyl@zjou.edu.cn



论文
拓展
介绍

方水域也可用于不喜光的特色鱼类养殖,并同时为鱼类养殖业供电。当然,水上光伏也有安装环境复杂^[4]、光伏构件质量要求较高、对水域生态产生潜在负面影响^[5]、维修难度大等缺点。但考虑其清洁能源的特性以及前述优点,水上光伏依然有着十分光明的前景。同时,发展水上甚至海上光伏,可以与西北风力发电以及海上风力发电一起组成中国特色电网体系,进一步减少对进口能源的依赖。

自2008年全球首个商业化水上光伏工程(20kWp)在美国落地起^[6],水上光伏产业在全球持续扩张。截至2019年5月,全球共落地的水上光伏项目超350个,累计装机容量超1.4GWp^[7]。Gorjian等^[8]推断水上光伏(Floating solar photovoltaic, FPV)技术未来将进一步飞速发展,安装成本进一步减少,预计到2024年,水上光伏累计装机容量将超4.1GWp。水上光伏系统可分为固定桩基光伏系统、水上光伏系统、水上平台光伏系统和水上薄膜光伏系统,其中水上平台光伏可以通过将光伏组件安装在一定高度的浮动平台上来避免波浪的直接作用,因此其目前发展为光伏产业的一种成熟方案^[9]。Hooper等^[10]指出现阶段淡水光伏项目发展迅猛,海洋光伏的应用将是水上光伏未来发展的重要方向,而水上光伏走向海洋必须解决其对水生态环境潜在威胁的问题,尤其是需要全面评估其对珊瑚礁等异常脆弱生态系统的影响。Goswami等^[11]对水上光伏的使用老化问题进行了分析,指出水上光伏模组的老化失效要快于陆上光伏,但其在减少水库水量蒸发损失和进一步减少碳排放方面更具优势。Refaai等^[12]通过对提高水上光伏系统盈利能力和效率的各种设计方案的讨论,认为更高的风速也可能是水上光伏具有更高发电效率的原因之一。Wang等^[9]简要介绍了海上固定桩基和浮动光伏系统的发展状况和面临的挑战。Shi等^[13]提出一种用于分析波浪作用下浮动光伏结构水弹性响应和易损区域的频域模型,对海上浮动光伏系统的水弹性响应进行了研究,分析了不同波浪作用下结构的位移和内力,加深了对海洋环境中浮动光伏结构水动力学的认识。

光伏板在光照条件下,其半导体与金属的联结部分会出现电位差,从而驱动电路中的电荷将太阳能转换为电能。目前光伏组件的光电转化效率大致为22%~25%,阳光中的其他部分能量则以热量形式耗散,这会导致光伏组件温度升高^[14]。较高的温度会增加半导体的导电性,使得电荷分布更趋于平衡,电场强度减小,导致发电效率降低。而水上环境

可以有效降低光伏板的温度、提高光伏组件的光电转换效率^[15]。然而,目前对水上光伏的研究大多针对光伏发电系统本身的材料及热性能研究^[16-17],较少涉及光伏系统的其他组件。Claus等^[18]提出了一种评估漂浮光伏系统结构的综合方法,从水动力和结构的角度关注风和波浪条件的影响,研究结果强调,在优化FPV配置时,需要考虑环境条件、结构方面和能源效率。因此,本文主要通过平面激光诱导荧光(PLIF)方法,研究水上光伏基座的水体交换特性,探讨基座周边水流流速、温差及开孔交换面积对于基座内水体交换的影响,为设计合理的水上光伏基座系统提供理论支持。合理的水上光伏基座设计可以促进基座与周边水体的交换,降低光伏板周边环境的温度,从而提高光伏系统的发电效率。

1 实验设计

实验在新加坡南洋理工大学南洋水环境与水资源研究所环境过程模拟中心(EPMC)实验室的拖曳水槽中进行。主要采用平面激光诱导荧光(PLIF)方法获取基座单元内水体的空间分布。有关PLIF实验过程的详细说明,可参见文献[19]。实验装置如图1所示,拖曳水槽下安装有双腔脉冲激光器(Dantec Dynamics, 4类Nd:Yag, 50~100Hz双激光器)以照亮基座模型中融有荧光剂的水体。水槽侧面为高速电荷耦合器(CCD)相机(Dantec Dynamics, SpeedSense 1040),该相机可以100帧·s⁻¹的采样率获取8位灰度图像,图像最大分辨率为2320像素×1726像素,相机获取的图像经校准数据库处理后转换为荧光剂的浓度分布图,以计算基座内水体与周边水体的交换率。相机镜头加装570nm低通滤波器,以排除杂光干扰。水槽周边的空间使用专用激光帷幕包围,营造全黑环境。PLIF的浓度值校准采用尺寸为0.40m(长)×0.05m(宽)×0.65m(高)的校准盒进行,其内放置带格栅有机玻璃板,格栅间距为2cm×2cm,用于校准物理尺度。单元体内的溶液在实验开始前预先配置,溶液使用温水和荧光染料(罗丹明B)配制而成。源溶液染料质量浓度 c_0 由荧光计(Turner Design 1200)测量。源溶液和环境水的温度由温度计(Anton Paar, MKT10)测定。拖曳水槽的尺寸为6.4m(长)×1.0m(宽)×0.7m(高),水槽的侧边和底部均采用透明玻璃制作。水槽中的自来水加注至0.4m水深。拖曳系统由中央控制计算机精确控制

和监控,可以模拟恒定流速($5\sim 150\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$)。

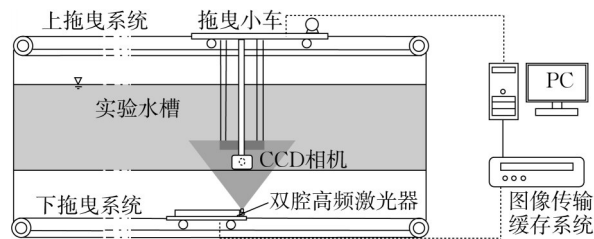


图1 拖曳水槽示意图

Fig. 1 Schematic diagram of current flume

水上光伏基座的设计需有大承重、易于组装、耐久、低成本等特点^[20]。一方面,基座需要为光伏板提供足够的浮力支撑,另一方面还需提供维护所需的走廊通道。在基座浮箱的设计上,法国太阳能电站开发商 Ciel & Terre International 公司提出了 Hydrelio 浮动平台^[7],其设计如图2所示。模块主要由主副浮箱组成,带有倾角的主浮箱主要为光伏平台提供所需的浮力,副浮箱主要用于连接主浮箱,并提供维护通道。其他光伏板供应商如 Sungrow 和日本的住友三井建设有限公司(SMCC)也采用了类似的设计(图3),SMCC设计的浮箱特点是外形更为规整,便于打包和运输。且浮箱内填充有聚苯乙烯泡沫,箱体即使损坏也不会下沉^[7]。其他浮动平台设计还有如西班牙 Isigenere 公司的 Isifloating 平台,其主要采用纯双浮箱设计,不同的是其主浮箱顶部封闭,并设有独立的维护单元。本文采用的实验模型原型为2018年获得 IStructE 新加坡结构奖、由新加坡住房与发展委员会(HDB)设计的专利浮动平台(PCT/SG2019/050220)^[21]。其主浮箱设计如图4所示,该浮动模块顶面设有凹凸纹,以提高浮箱的抗剪强度。浮子两侧有咬合齿,便于模块化组装,浮动模块之间的咬合齿采用塑料销连接固定,浮箱外形规则,易于运输、堆放和组装。模块拼接所成的光伏发电集群如图5所示,集群中的每个发电单元可由4到8个模块拼接而成,光伏板使用金属框架安装于模块上方。

本文采用的实验模型基于由4个浮动模块组成的单元原型进行设计,浮动基座模型总共包含4个基座单元(图6)。模型与真实浮动平台的比尺为1:10,其平面结构如图7所示,基座平面外部长度为300mm,内部长度为270mm。模型内部的4个单元尺寸相同,为150mm(长) \times 150mm(宽) \times 40mm(高)。图8为模型置于拖曳水槽中的模型实物图。考虑到常温以及小温差条件下辐射和热传导

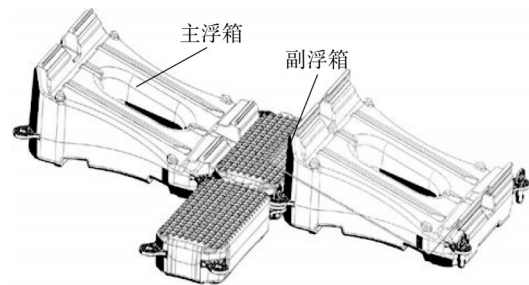


图2 Ciel & Terre International 设计的主副浮动模块^[5]

Fig. 2 Main and auxiliary floating modules designed by Ciel & Terre International^[5]



图3 三井建设(SMCC)设计的浮动平台^[7]

Fig. 3 Floating platform designed by SMCC^[7]

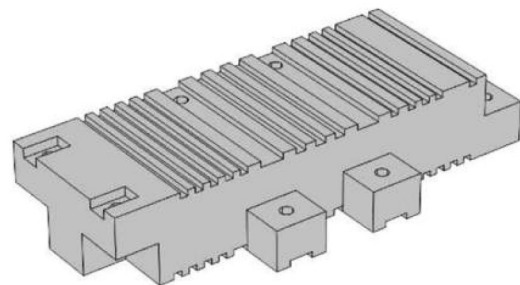


图4 新加坡HDB设计的主浮动模块^[21]

Fig. 4 Main floating module designed by Singapore HDB^[21]



图5 新加坡登格水库(Tengeh Reservoir)浮式光伏测试平台^[20]

Fig. 5 Floating solar test platform in Tengeh Reservoir, Singapore^[20]

的影响较为微弱,基座水体的热交换主要依靠传质的方式进行,因此实验中对冷热水交换的观测主要以观察水体质量交换的方式进行。基座内每个单元的侧边上设有3个间距相等的直径为10 mm的连接孔,用于观察基座开放面积对水体交换的影响,实验中通过开关连接孔可以得到不同的连通方案。为便于在实验过程中控制单元内的水温,基座底部设有一块可滑动的、尺寸为300 mm×300 mm的有机玻璃底板,用于密封模型的4个单元格。实验开始时,首先将插入底板的基座放入水中,并用特制的4分口漏斗向4个单元中同时注入含有 rhodamine-B 荧光剂的温水。将水注满后,观察单元体中电子温度

计的读数,当水温达到指定的温度时,开启拖曳系统,抽开底板使单元体内温水底部与环境水体接触。随后激发 PLIF 系统对水体交换进行观测。最后通过校准的数据库将图像的光强值转换为浓度值,并提取单元体内荧光染色剂浓度随时间变化的关系图。实验流速主要根据水域实测流速范围,通过弗劳德相似准则确定;温度则在实测的基座中水体可能产生的温差范围中选取。实验选取3种流速(20、30、50 mm·s⁻¹)、3种温差(2℃、4℃、7℃)和4种连通面积(完全隔断以及1、2或3个连接孔,开孔率分别为0、1.75%、3.50%及5.24%)共36组条件进行,表1为拖曳水槽中的实验条件列表。

表1 拖曳水槽试验条件

Tab.1 Experimental condition in current flume

编号	简写	温差/℃	速度/(mm·s ⁻¹)	连通孔数/个	侧板开孔率/%
C1	2D-CURRENT1-0H	2	20	0	0
C2	2D-CURRENT2-0H	2	30	0	0
C3	2D-CURRENT3-0H	2	50	0	0
C4	2D-CURRENT1-1H	2	20	1	1.75
C5	2D-CURRENT2-1H	2	30	1	1.75
C6	2D-CURRENT3-1H	2	50	1	1.75
C7	2D-CURRENT1-2H	2	20	2	3.50
C8	2D-CURRENT2-2H	2	30	2	3.50
C9	2D-CURRENT3-2H	2	50	2	3.50
C10	2D-CURRENT1-3H	2	20	3	5.24
C11	2D-CURRENT2-3H	2	30	3	5.24
C12	2D-CURRENT3-3H	2	50	3	5.24
C13	4D-CURRENT1-0H	4	20	0	0
C14	4D-CURRENT2-0H	4	30	0	0
C15	4D-CURRENT3-0H	4	50	0	0
C16	4D-CURRENT1-1H	4	20	1	1.75
C17	4D-CURRENT2-1H	4	30	1	1.75
C18	4D-CURRENT3-1H	4	50	1	1.75
C19	4D-CURRENT1-2H	4	20	2	3.50
C20	4D-CURRENT2-2H	4	30	2	3.50
C21	4D-CURRENT3-2H	4	50	2	3.50
C22	4D-CURRENT1-3H	4	20	3	5.24
C23	4D-CURRENT2-3H	4	30	3	5.24
C24	4D-CURRENT3-3H	4	50	3	5.24
C25	7D-CURRENT1-0H	7	20	0	0
C26	7D-CURRENT2-0H	7	30	0	0
C27	7D-CURRENT3-0H	7	50	0	0
C28	7D-CURRENT1-1H	7	20	1	1.75
C29	7D-CURRENT2-1H	7	30	1	1.75
C30	7D-CURRENT3-1H	7	50	1	1.75
C31	7D-CURRENT1-2H	7	20	2	3.50
C32	7D-CURRENT2-2H	7	30	2	3.50
C33	7D-CURRENT3-2H	7	50	2	3.50
C34	7D-CURRENT1-3H	7	20	3	5.24
C35	7D-CURRENT2-3H	7	30	3	5.24
C36	7D-CURRENT3-3H	7	50	3	5.24

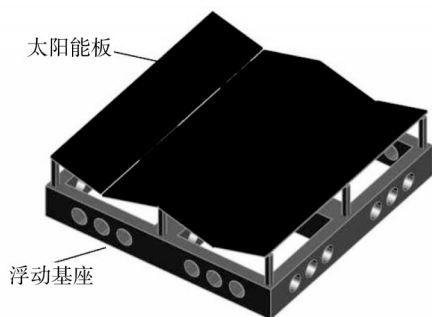


图6 浮式光伏发电平台模型

Fig. 6 Model of floating solar power generation platform

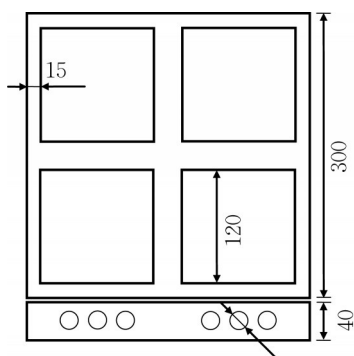


图7 四单元浮式基座示意(单位:mm)

Fig. 7 Diagram of floating base with four units (unit: mm)

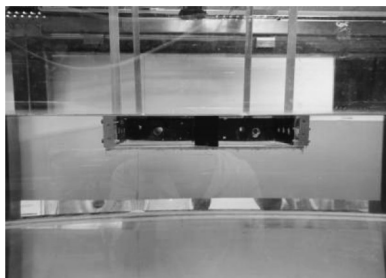


图8 拖曳水槽中的物理模型

Fig. 8 Physical model in current flume

2 结果与讨论

图9为 2°C 温差下不同流速(20 、 30 和 $50\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)及不同开孔率(0 、 1.75% 、 3.50% 和 5.24% ,分别对应 0 、 1 、 2 和 3 孔)下基座内原水体浓度的衰减曲线。由于拖曳小车在 50 s 左右经过水槽钢梁时相机被钢梁遮挡,导致图中出现部分数据缺失。由图9中实验C1—C3的数据可以看出,基座中温水的量纲为一浓度衰减速率随周边水流流速的增加而显著加快。在侧板开孔率为零(0 孔,完全隔断)的情况下,周边水体流速为 $20\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,基座内温水的量纲为一浓

度(c/c_0),在 100 s 后衰减了 50% ,而当流速增大至 $50\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 40 s 后基座内温水的量纲为一浓度衰减达 90% 以上。比较图5中的实验C1、C4、C7、C10曲线可以看出,在流速为 $20\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的情况下,侧板开孔率为零时, 100 s 后基座内温水的量纲为一浓度下降了 50% ;而当开孔率增加至 1.75% 、 3.50% 和 5.24% 时, 100 s 后基座内温水的量纲为一浓度分别为 45% 、 40% 和 16% ,表明开孔率的增大可以进一步加速基座中温水与外界水体的交换。基座内温水的 c/c_0 和时间 t 之间的关系可以用负指数函数表示,各实验条件下对应的函数关系见图9。各函数相关系数变化范围为 $0.85\sim 0.96$,说明基座内温水的量纲为一浓度衰减与负指数曲线吻合情况良好。

图10为 4°C 温差时不同流速及不同开孔率下基座内原温水浓度的衰减曲线。与 2°C 温差相比, 4°C 温差时不同流速下的基座内温水的量纲为一浓度衰减速率普遍变慢。在开孔率为零的情况下,外界水体流速为 $20\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,基座内温水的量纲为一浓度在 40 s 后衰减至 75% 。当流速增加至 $30\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $50\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 40 s 后基座内温水的量纲为一浓度分别下降为 50% 和 20% 。而 4°C 温差时开孔率的增加也会明显增强基座内水体的交换效率。比较图10中的实验C13、C16、C19、C22的数据可以看出,在流速为 $20\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的情况下, 100 s 后基座内温水的量纲为一浓度分别为 65% , 100 s 后示踪剂浓度下降了 85% 以上。图6是 c/c_0 和 t 间的拟合函数关系,其相关系数为 $0.59\sim 0.97$ 。

图11为 7°C 温差时不同流速及不同开孔率下基座内原水体的量纲为一浓度的衰减曲线。相比于 4°C 温差时基座内温水的量纲为一浓度衰减, 7°C 温差下基座内温水的量纲为一浓度衰减进一步变慢。当周边水流流速为 $20\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、开孔率为零时, 100 s 后基座内温水的量纲为一浓度下降至 80% 。而当流速增大至 $30\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $50\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,基座内温水的量纲为一浓度在 50 s 左右就已分别下降至 40% 和 20% 。比较图7中的实验C25、C28、C31、C34的数据可以看出,周边水流速度为 $20\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,侧板开孔率为 0 、 1.75% 、 3.50% 和 5.24% 时, 100 s 后对应的基座内温水浓度分别为 80% 、 70% 、 65% 、 60% ,在各开孔率条件下,基座内温水的量纲为一浓度衰减量较为接近。说明在该条件下开孔率的增加仍能促进基座内水体与周边水体的交换,但影响较为微弱。 7°C 温差时 c/c_0 和 t 之间的拟合函数关系的相关系数范围为 $0.56\sim 0.98$ 。

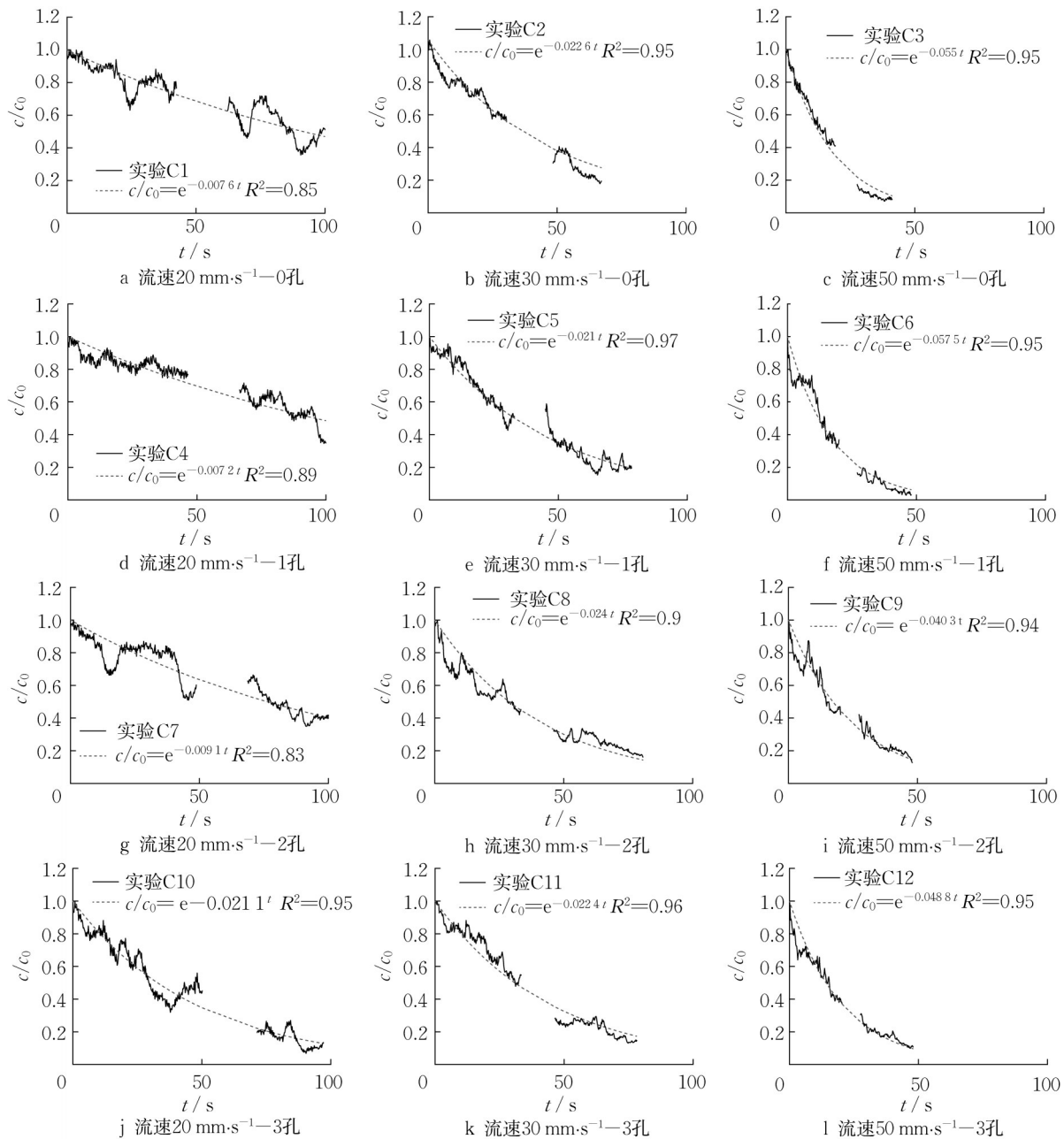


图9 2℃温差下不同水流流速和连通孔数下基座内温水的浓度衰减

Fig. 9 Concentration decay at different water flow velocities and open-pore exchange areas at a temperature difference of 2 °C

图12—14展示了不同温差、侧板开孔率及周边流速条件下100 s时基座中心截面上的温水的量纲为一浓度分布。从图12中实验C1—C3的数据可以看出,当温差为2℃时,基座中水体主要通过底部与周边水体进行交换。当开孔数为零时,基座下侧水体的湍流层中随水流形成较大尺度的涡团。当水流流速较小时,最大尺度的涡团主要出现在基座中部。随着流速增加,涡团结构变得更为清晰,大尺度涡团逐渐向下游移动。此时,涡团中温水所占的比例较低。而图8实验C4—C6的数据中,基座

底部湍流层的涡团位置也表现出类似的变化规律,不同的是在开孔率增加到1.75%后,湍流层涡团中温水的含量明显增加,说明从侧板开孔处进入的水流促进了底部涡团的对基座内水体的卷吸,增加了基座内的温水与周边水体的交换量。由图12中的C9和C12可以看出,在较高的周边水流流速下,基座右侧开孔位置处出现明显低浓度区域,表明此时有较强的外界水流通过开孔进入基座。值得注意的是,由于速度较高,且上方有水流从开孔进入,此时底部湍流层更为紊乱,大尺度涡团结构变得更为

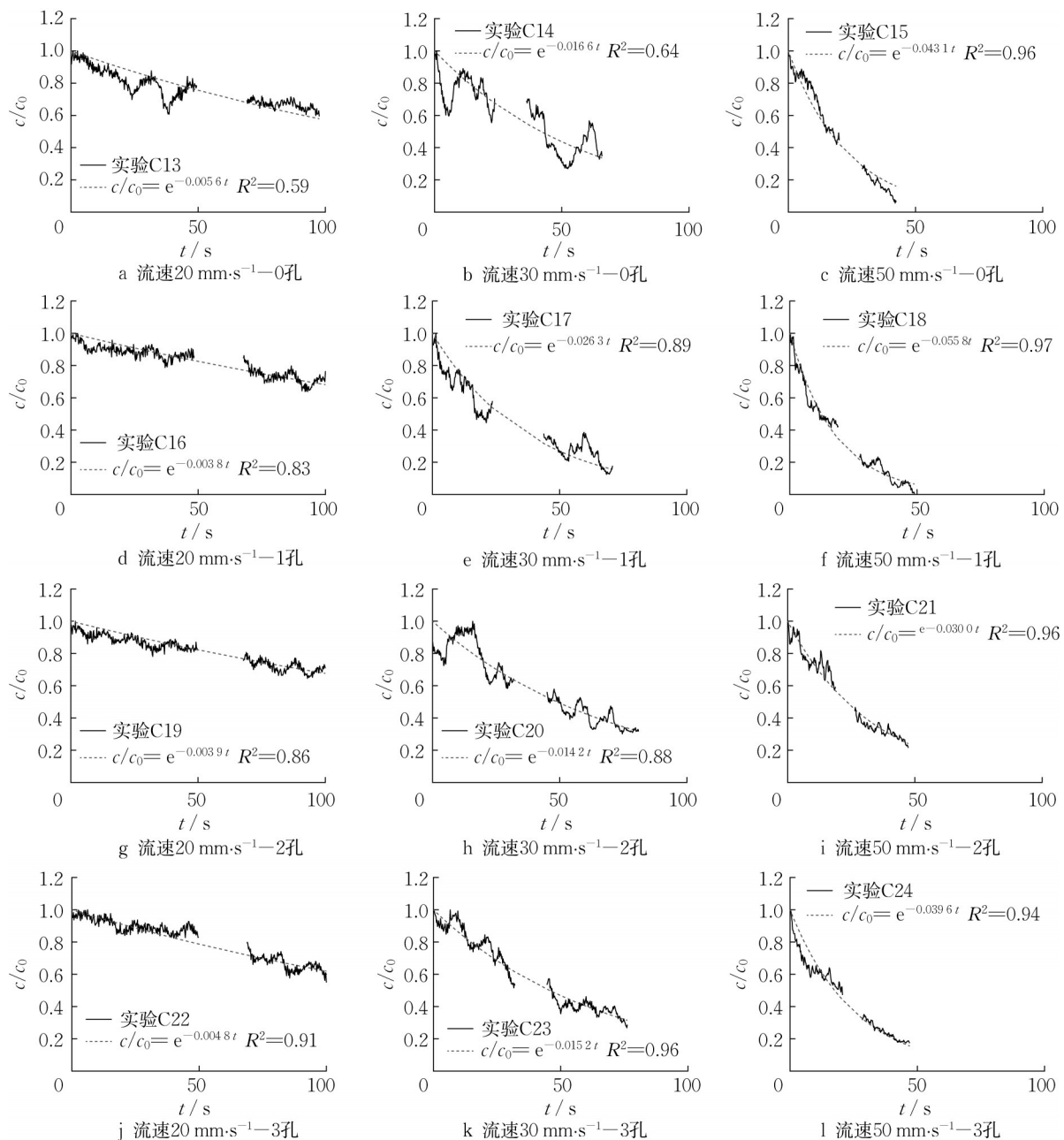


图10 4℃温差下不同水流流速和连通孔数下基座内温水的浓度衰减

Fig. 10 Concentration decay at different flow rates and open-pore exchange areas at a temperature difference of 4 °C

散乱,含温水浓度较高的水团被卷吸至外侧后迅速被水流带至下游。

图13为4℃温差下不同侧板开孔率及周边流速条件下100 s时基座中心截面上温水的量纲为一浓度分布。与2℃时温差的情况相比,4℃温差下的基座下侧的扩散层厚度变薄,但底部湍流层的涡团结构及分布依然与2℃时较为相似。由于温差更大,温水与周边水体的密度差变大,基座中的温水由于浮力影响更难进入下侧湍流层,在开孔率为零的情况下,即使流速增加至50 mm·s⁻¹,进入下侧的温水依

然有限。比较图13中的实验C15、C18、C21、C24的数据可以看出,在大流速情况下,开孔率对基座内水体交换的影响依然较为显著。水体主要受开孔进入的水流影响而进入下侧湍流层。

图14为7℃温差下不同侧板开孔率及周边流速条件下基座中心截面上温水的量纲为一浓度分布。相较于4℃温差,7℃温差下的基座下侧的扩散层厚度进一步变小。由于基座内温水所受的浮力进一步增加,低流速和不开孔条件下,基座内的温水较难进入下方水体。由图14中实验C25—C27的数据可以

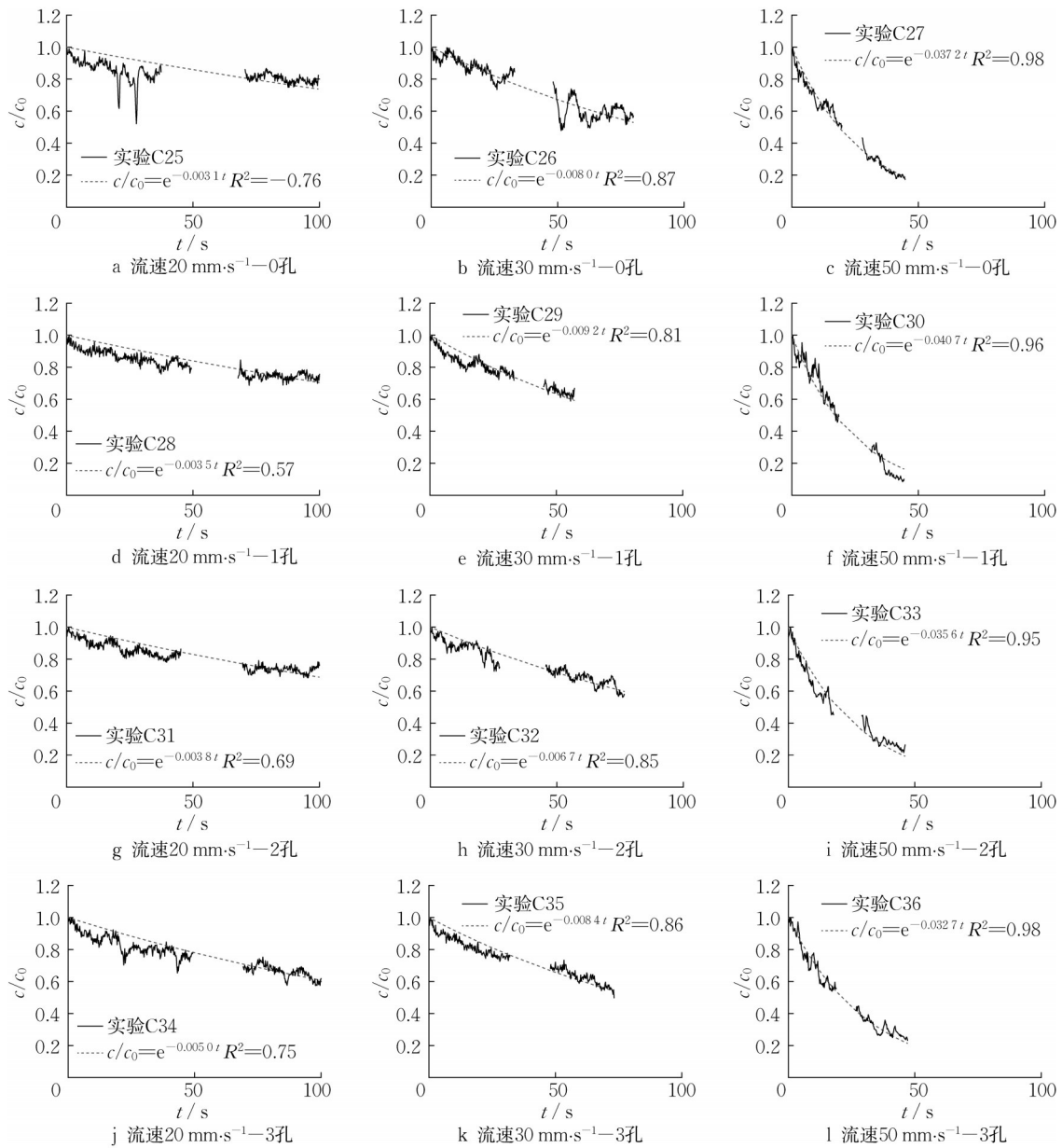


图 11 7℃温差下不同水流流速和连通孔数下基座内温水的浓度衰减

Fig. 11 Concentration decay at different water flow rates and open-pore exchange areas at a temperature difference of 7 °C

看出,下侧湍流卷吸层对基座内水体交换的影响有限,仅在高流速条件下有部分温水因受基座底部湍流层的卷吸作用而进入周边水体。比较图中实验C27、C30、C33、C36的数据可以看出,在较高水流速度的情况下,开孔率对基座单元内的水体交换仍有较好的促进作用。基座右侧近开孔处温水的量纲为一浓度出现明显的低值区域,随着开孔率的增加,进入底部湍流层的温水的量纲为一浓度增加较为明显。

为综合考虑各因素对光伏基座内水体交换的影响,采用量纲分析法对各因素的影响进行分析,根据

测量结果,基座内温水的量纲为一浓度随时间衰减的一般方程可表示为

$$c/c_0 = e^{-(t/T_R)} \quad (1)$$

式中: T_R 为水体滞留时间,即基座内水体中荧光剂的浓度 c 降至初始时荧光剂浓度 c_0 的 $1/e$ 所需的时间。根据影响基座水体交换的因素,滞留时间 T_R 的可由式(2)表达:

$$T_R = f\left(u, \frac{\Delta\rho}{\rho_0}, A_a, g, L, L_c, d_c\right) \quad (2)$$

式中: g 为重力加速度; u 为周边水流流速; ρ_0 为环境水的密度; $\Delta\rho$ 为模块内部水和环境水之间的初始密

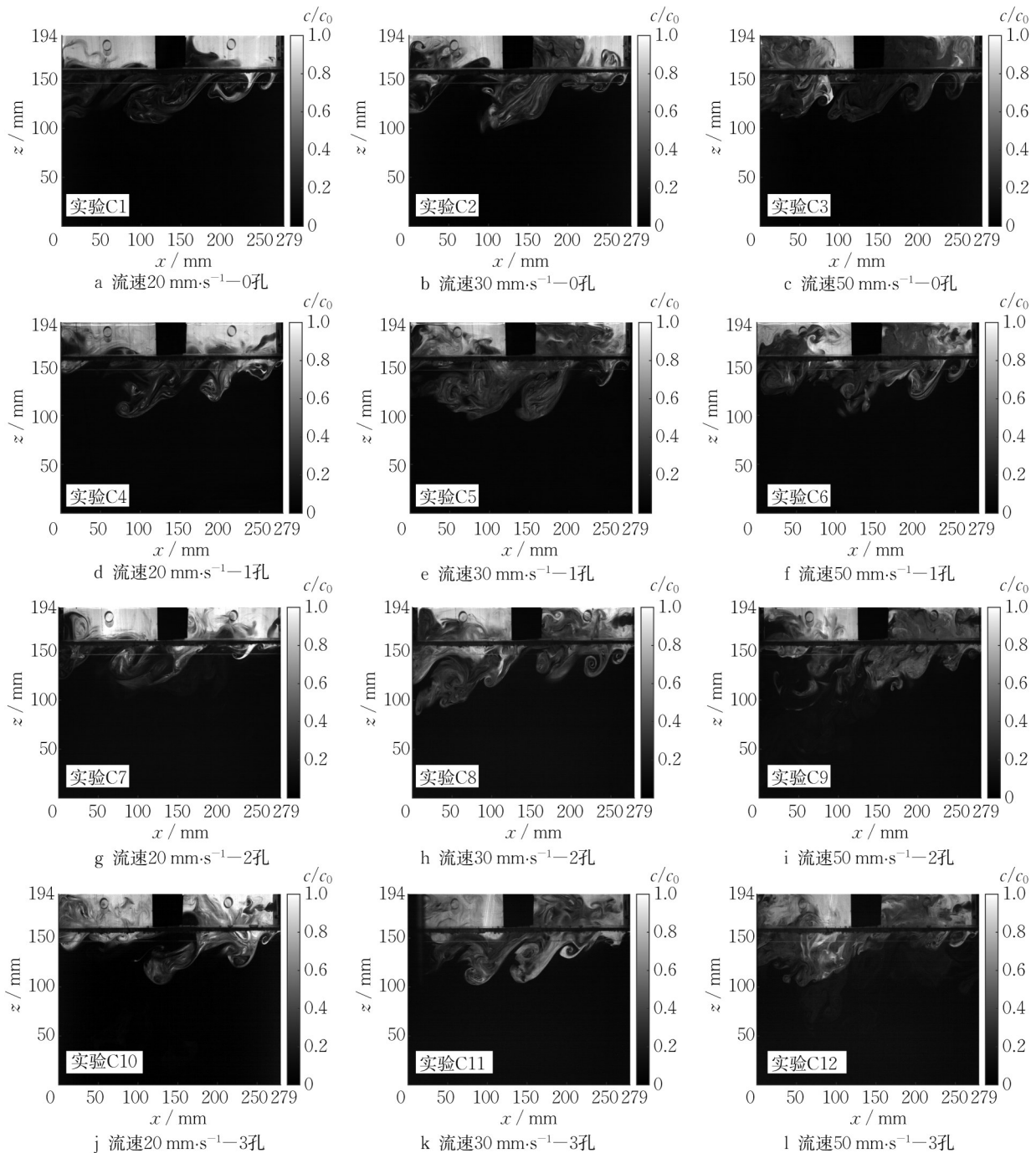


图12 2℃温差下不同水流流速和连通孔数下最大扩散层

Fig. 12 Maximum diffusion layer at different water flow rates and open-pore exchange areas at a temperature difference of 2 °C

度差。需要注意的是, $\frac{\Delta\rho}{\rho_0}$ 表示由水体分层效应引起的量纲为一密度差, 由于实验主要针对基座的纵截面开展, 因此忽略了分层效益在横向上的影响。 L 为基座特征长度, L_c 为基座单元内侧的宽度, d_c 为基座浸入周边水体的深度。使用 g 和 L 作为变量进行量纲分析, T_R 的表达式可进一步表示为

$$T_R = a_0 \left(\frac{L}{g} \right)^{1/2} (1 + A_a)^{a_1} \left(1 + \frac{u}{g^{1/2} L^{1/2}} \right)^{a_2} \left(1 + \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right)^{a_3} \left(\frac{d_c}{L} \right)^{a_4} \left(\frac{L_c}{L} \right)^{a_5} \quad (3)$$

由于本实验中所用基座尺度大小固定, 因此 d_c/L 和 L_c/L 为固定值, 因此式(3)可进一步简化为

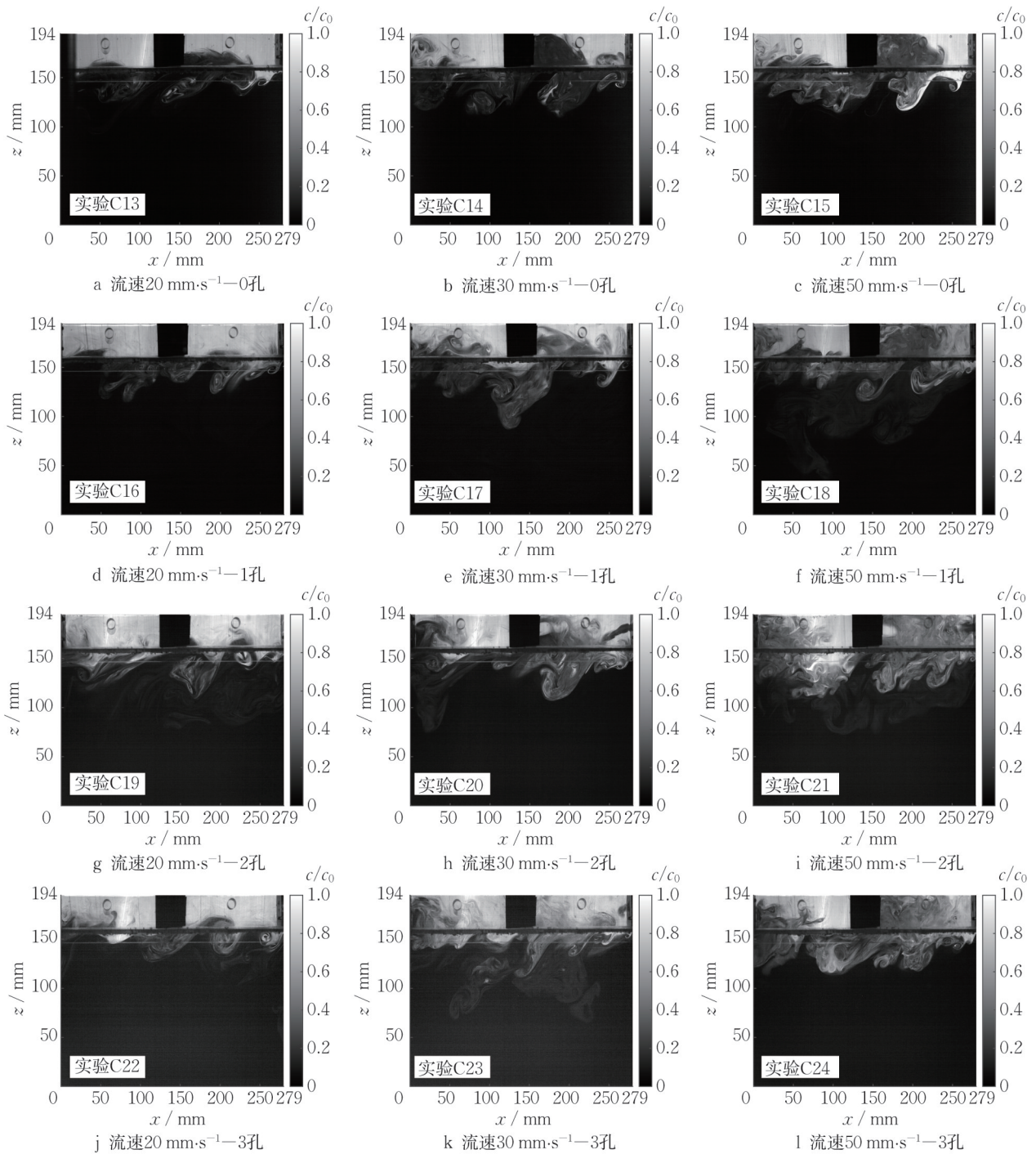


图13 4℃温差下不同水流流速和连通孔数下最大扩散层

Fig. 13 Maximum diffusion layer at different water flow velocities and open-pore exchange areas at a temperature difference of 4℃

$$T_R = C_c(1 + A_a)^{a_1} \left(1 + \frac{u}{g^{1/2}L^{1/2}}\right)^{a_2} \left(1 + \frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right)^{a_3} \quad (4)$$

式中： C_c 为常数。需要注意的是，由于实验是在无波浪影响下进行，因此公式仅适用于无波浪影响下纯水流、温差较小且基座尺度及入水深度固定的情况。

为确定式(4)中各系数的具体值，利用马夸特法分析36组水槽实验数据所得的结果，经过118次迭代计算，可最终确定式(4)中各中系数 C_c 、 a_1 、 a_2 和 a_3 的值分别为 7.3×10^2 、 -5.4 、 -8.8 和 -1.3×10^2 。温差差（相对密度）对基座内水体交换影响最大，其次是水流流速，开孔率对基座内水体交换的影响相对最小。

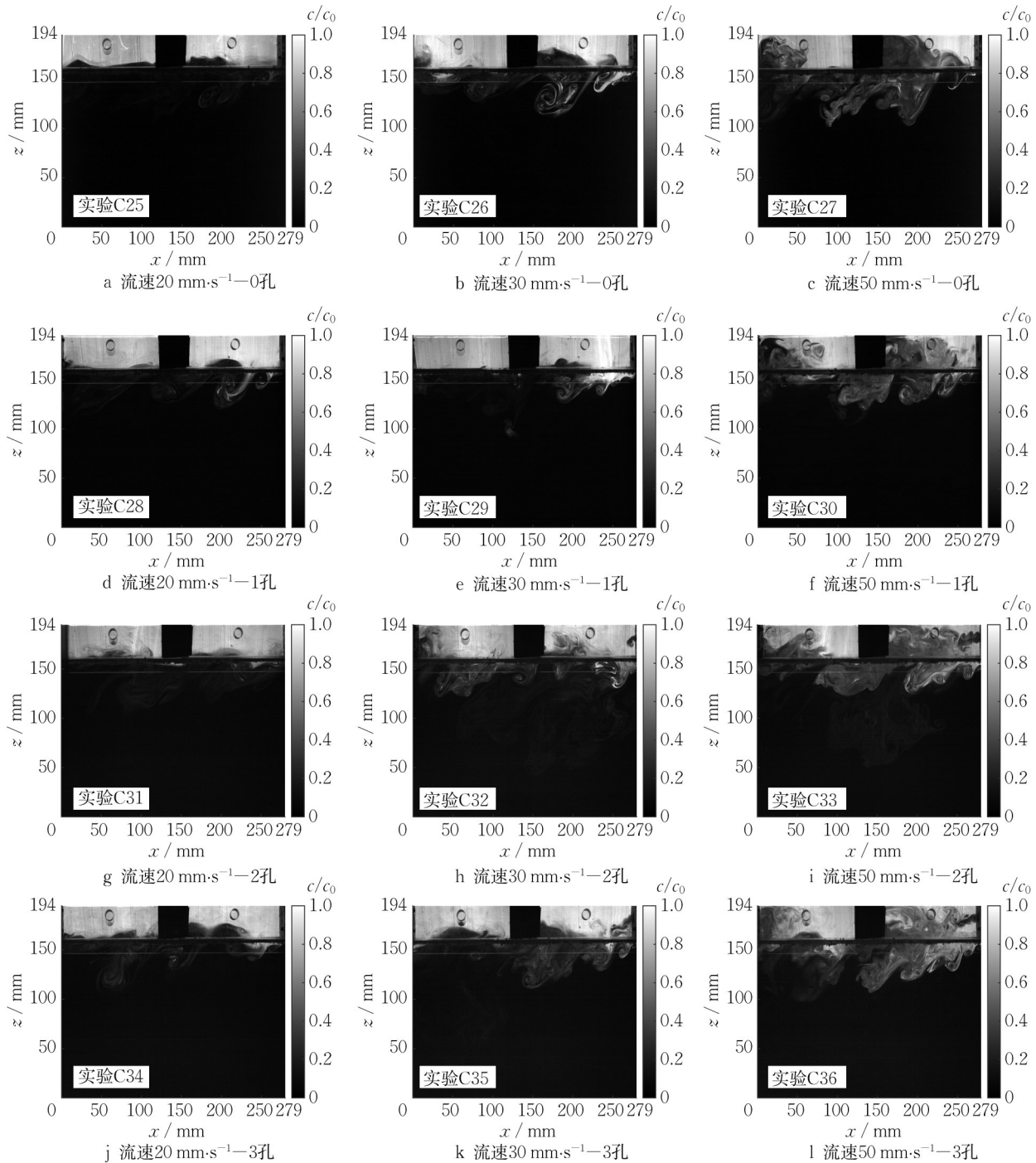


图 14 7°C温差下不同水流流速和连通孔数下最大扩散层

Fig. 14 Maximum diffusion layer at different water flow velocities and open-pore exchange areas at a temperature difference of 7 °C

3 结语

对水上光伏基座在不同温差、流速和侧板开孔条件下的水体交换进行观测。探讨了基座内水体交换与连通面积、温差和流速的关系。结论如下：

(1)基座内的水体滞留量与时间呈负指数关系，对滞留时间影响从高到低依次为温差、流速、开孔连

通面积。

(2)在较小的温差下，流速对基座内水体交换影响显著。而当温差较大时，流速对基座内水体交换影响有限，开孔率的影响则相对更为显著。因此，在光照较为强烈的地区，增大基座侧板开孔率是促进基座内水体交换的有效手段。

(3)在水流作用下，光伏基座下方湍流层的卷吸

是促进基座内水体交换的主要动力。而合理的开孔设计可以加强湍流层涡团的卷吸作用。因此在光伏基座的设计中可针对当地的水流条件,对开孔率及开孔布局进行合理设置,最大限度提高基座内水体与周边水体的交换效率。

作者贡献声明:

蒋茗韬:研究设计、实验及数据收集与分析,初稿撰写。

温梦丹:数据验证、论文修改与完善。

虞丹君:论文修改与优化。

刘修锦:数据分析与校对。

倪云林:整体协调、数据分析与优化。

参考文献:

- [1] ZHANG M, SCHREIER S. Review of wave interaction with continuous flexible floating structures [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 264: 112404. DOI: 10.1016/J.OCEANENG.2022.112404.
- [2] 孙杰. 水上光伏电站应用技术与解决方案[J]. *太阳能*, 2017, 278(6): 32. DOI: 10.19911/j.1003-0417.2017.06.009.
SUN Jie. Application of technology and solutions to waterborne photovoltaic power stations [J]. *Solar Energy*, 2017, 278(6): 32. DOI: 10.19911/j.1003-0417.2017.06.009.
- [3] KUMAR V A, RASHMITHA M, NARESH B, *et al.* Performance analysis of different photovoltaic technologies [C]// *International Conference on Advanced Electronic Systems (ICAES)*. Pilani: IEEE, 2013: 301-303.
- [4] 耿宝磊, 唐旭, 金瑞佳. 海上浮式光伏结构及其水动力问题研究展望[J]. *海洋工程*, 2024, 42(3): 190.
GENG Baolei, TANG Xu, JIN Ruijia. Outlook of research on offshore floating photovoltaic structures and their hydrodynamic problems [J]. *The Ocean Engineering*, 2024, 42(3): 190.
- [5] SHI W, YAN C, REN Z, *et al.* Review on the development of marine floating photovoltaic systems [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 286: 115560. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115560.
- [6] YOUSUF H, KHOKHAR M Q, ZAHID M A, *et al.* A review on floating photovoltaic technology (FPVT) [J]. *Current Photovoltaic Research*, 2020, 8(3): 67. DOI: 10.21218/CPR.2020.8.3.067
- [7] World Bank, Solar Energy Research Institute of Singapore (SERIS). *Where sun meets water: floating solar market report* [R]. Washington DC: World Bank, 2019.
- [8] GORJIAN S, SHARON H, EBADI H. Recent technical advancements, economics and environmental impacts of floating photovoltaic solar energy conversion systems [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 124285. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124285.
- [9] WANG J, LUND Peter D. Review of recent offshore photovoltaics development [J]. *Energies*, 2022, 15(20): 7462. DOI: 10.3390/en15207462.
- [10] HOOPER T, ARMSTRONG A, VLASWINKEL B. Environmental impacts and benefits of marine floating solar [J]. *Solar Energy*, 2021, 219: 11. DOI: 10.1016/j.solener.2020.10.010.
- [11] GOSWAMI A, SADHU P K. Degradation analysis and the impacts on feasibility study of floating solar photovoltaic systems [J]. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2021, 26: 100425. DOI: 10.1016/j.segan.2020.100425.
- [12] REFAAI M R A, DHANESH L, GANTHIA B P, *et al.* Design and implementation of a floating PV model to analyse the power generation [J]. *International Journal of Photoenergy*, 2022, 2022: 3891881. DOI: 10.1155/2022/3891881.
- [13] SHI Y, Wei Y, TAY Z Y, *et al.* Hydroelastic analysis of offshore floating photovoltaic based on frequency-domain model [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 289: 116213. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.116213
- [14] DUBEY S, SARVAIYA J N, SESHADRI B. Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world-a review [J]. *Energy Procedia*, 2013, 33: 311. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.05.072.
- [15] BELYAMIN B, FULAZZAKY M A. Influence of cooling water flow rate and temperature on the photovoltaic panel power [J]. *Energy, Ecology and Environment*, 2021, 30: 1. DOI: 10.1007/s40974-021-00223-4.
- [16] 刘艳峰, 李荟婷, 王登甲, 等. 太阳能集热系统过热影响因素分析 [J]. *太阳能学报*, 2021, 42(3): 463. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2018-1189.
LIU Yanfeng, LI Huiting, WANG Dengjia, *et al.* Analysis of factors influencing overheating in solar thermal collection systems [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2021, 42(3): 463. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2018-1189.
- [17] 宋子旭, 由世俊, 张欢, 等. 槽式太阳能新型腔式吸热器的热性能研究 [J]. *太阳能学报*, 2021, 42(3): 475. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.zwh-yutou-02.
SONG Zixu, YOU Shijun, ZHANG Huan, *et al.* Thermal performance study of a new type of cavity absorber for trough solar energy systems [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2021, 42(3): 475. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.zwh-yutou-02.
- [18] CLAUS R, MARIO L. A methodology to assess the dynamic response and the structural performance of floating photovoltaic systems [J]. *Solar Energy*, 2023, 262: 111826. DOI: 10.1016/j.solener.2023.111826.
- [19] LAW A W K, WANG H. Measurement of mixing processes with combined digital particle image velocimetry and planar laser induced fluorescence [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2000, 22(3): 213. DOI: 10.1016/S0894-1777(00)00029-7.
- [20] DAI J, ZHANG C, LIM H V, *et al.* Design and construction of floating modular photovoltaic system for water reservoirs [J]. *Energy*, 2020, 191: 116549. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116549.
- [21] SREE D, LAW A W K, PANG D S C, *et al.* Fluid-structural analysis of modular floating solar farms under wave motion [J]. *Solar Energy*, 2022, 233: 161. DOI: 10.1016/j.solener.2022.01.017.