

跃温层厚度对内波破坏水体分层特性的影响

孙 昕¹, 陈笑涵¹, 刘兴社¹, 成智文², 李 青²

(1. 西安建筑科技大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055;

2. 咸阳陶瓷研究设计院有限公司, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 为探求人工诱导内波混合技术在实际大水深分层湖泊水库中的应用效果, 采用自主研发的机械混合装置和分层水库物理模型, 开展不同跃温层厚度条件下内波破坏分层的中试研究. 机械混合装置出流形成水流循环, 在水体分层状态下, 出流动能转化为内波波能, 环流减弱但依旧存在, 在内波破坏水体分层过程中, 变温层与等温层的水温差别逐渐减小, 跃温层逐渐上移且厚度减小, 直至水体分层被完全破坏. 在跃温层温度梯度、水流扰动强度、水深均相同的条件下, 随着跃温层厚度的增加, 水体稳定系数增大, 临界层内波波能损失减小, 内波波幅和能流密度增加, 混合效率提高, 内波周期不变, 波速稍有减小. 实验说明内波混合水体技术应用于大水深水体中时将有更高的效率.

关键词: 内波; 破坏分层; 跃温层厚度; 波幅; 混合效率

中图分类号: X524

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)02-0275-06

Effects of pycnocline thickness on characteristics of destratification by internal waves

SUN Xin¹, CHEN Xiaohan¹, LIU Xingshe¹, CHENG Zhiwen², LI Qing²

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, MOE, Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055 China;

2. Xianyang Research & Design Institute of Ceramics, Shaanxi Xianyang 712000, China)

Abstract: To explore the effectiveness of destratification by artificially-induced internal waves in practical deep-water stratified lakes and reservoirs, destratification experiments under different pycnocline thickness conditions were performed with a self-designed mechanical mixing device in a physical model of stratified reservoir. The outflow of the mechanical mixing device formed the flow cycle. When water was stratified, the outflow kinetic energy was converted into the internal wave energy, and the circulation weakened but still existed. In the destratification process by internal waves, the temperature difference between the epilimnion and hypolimnion decreased gradually, and the pycnocline became thin slowly and was impelled upwards until stratified water environment was completely destroyed. Under the same conditions of the temperature gradient of pycnocline, flow disturbance intensity and water depth, as the pycnocline thickness increases, water stability coefficient increases; wave energy loss in critical layer reduces, the amplitude and wave energy of internal wave increase, the mixing efficiency increases, the internal wave period is constant, and the wave velocity decreases slightly. When applied to practical lakes and reservoirs, the outflow of mechanical mixing device can induce the internal waves to destroy the stratification with higher efficiency.

Key words: internal waves; destratification; pycnocline thickness; wave amplitude; mixing efficiency

当外源污染逐步得到控制时, 内源污染成为湖泊水库主要污染源^[1-3]. 破坏水体分层是控制内源污染的主要措施之一, 常用的破坏分层技术存在运行能耗高的问题^[4-5], 而利用水流扰动均可在分层水体中诱导产生内波, 并且内波破坏水温分层具有低耗能、高效率的显著优点^[6-7], 但在张奎臻等^[8]的实验研究中发现, 曝气产生的水体循环所

需能量大且对水体混合贡献相对较小, 仅有较少曝气能量转化为内波波能, 导致破坏分层能耗依然较大, 很有必要进一步研究新的内波诱导方式.

目前的内波研究主要集中在大水域里自然形成内波的观测分析^[9], 其次是在实验室采用两层或连续分层模型进行内波试验或模拟^[10]. 大型水体中跃温层厚度约为物理模型水体中的 100 倍, 水体

收稿日期: 2018-04-18

修改稿日期: 2019-03-12

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2016YFC0701001-02); 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2015KTCL-03-15)

第一作者: 孙 昕(1971—), 男, 博士, 教授, 主要从事水质污染控制与模拟研究. E-mail: xinsunn@163.com

分层结构的巨大差异将影响破坏水体分层技术的应用。近年来,分层结构差异对内波特性的影响正逐渐得到重视。Diamessis 等^[11]通过数值模拟,从折射的角度探究跃温层厚度对非线性内波的影响;Lu^[12]和 Cheng^[13]分析内波实验结果,均发现随跃温层厚度的变化,不论是上举型还是下沉型孤立内波,其物理特性(包括波形、波幅、波速与能量)均因密跃层厚度不同而异;但其实验过程中采用的密度梯度过大,且密跃层厚度与密度梯度同时改变,难以准确分析其中单一变量对内波特性的影响。

本实验采用自行研制的机械混合装置诱导内波,为深入了解水体混合过程,分别测定水体分层与不分层状态下的流场分布;探究跃温层厚度对内波及破坏分层特性的影响,为内波混合设备的放大设计和内波混合技术实际应用提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 模型水库

根据目前国内外进行内波试验的模型水工构筑物空间尺寸范围^[14-16],长 0.8~3.0 m,宽 0.15~0.8 m,高 0.2~0.5 m;本实验所用内波混合中试模型水库(图 1)的长、宽、高分别采用 2 m、0.6 m、1.2 m。在模型水库距库底 0.4 m 范围内,环向布置空调蒸发器铜管,利用空调主机和温控装置对库底水体冷却以形成 5℃左右的等温层,水库上中部水体受室温的影响,通过自然传热自上而下依次形成变温层和跃温层。

1.1.2 机械混合中试装置

本实验采用机械混合装置产生的间歇水平出流作为扰动源诱导内波。利用 JJ-1 型电动机驱动螺旋桨高速转动,提升下部等温层水体至装置顶部,经出流筒向下均匀配水至距库底 0.4~0.5 m 处的分开式出水闸门,再进入跃温层。采用 DT-2234A+型光电测速器校核电动机转速;通过 DJ-B04 型无限循环开关控制电动机的启停来实现水流循环。

采用 XMTH32 路巡检记录仪实时记录水体温度,共设置 29 个温度测量点;采用 UVP-DUO 流速仪测定水体流场,分别在水平和垂直向设置 7 条流速测量通道(图 1)。

1.2 实验方法

实验中初始水温分层结构参考实际水库稳定分层期水温结构。以黑河水库 8 月至 10 月的典型水温结构为例,等温层水温为 5~7℃,表层变温

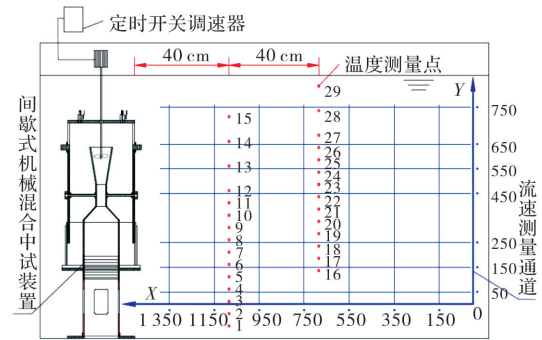


图 1 模型水库及温度和流速探头布置示意

Fig. 1 Diagram of pilot model reservoir and probe arrangements of measuring temperature and velocity

层水温受天气变化影响较大,温度范围为 16~23℃,表层和底部水温差在 10℃以上^[17]。由此确定如图 2 所示的 5 个水温结构,跃温层温度梯度分别为 0.40℃/cm、0.37℃/cm、0.28℃/cm、0.22℃/cm、0.17℃/cm。

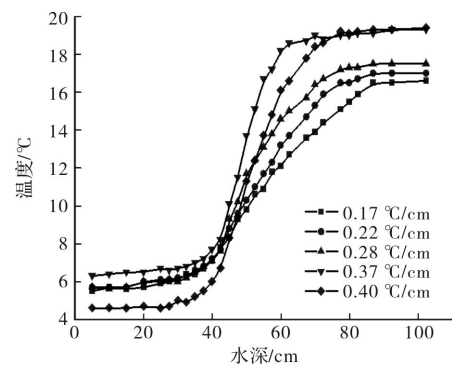


图 2 初始水温结构

Fig. 2 Initial water temperature structures

本实验中模型水库水深固定为 110 cm,机械混合装置出水口开口度为 10 cm×20 cm,电动机转速为 1 000 rpm,通过光电测速器保证转速误差在±2%以内,间歇运行总周期为 55 s,其中运行 10 s 和间断 45 s。在跃温层温度梯度为 0.40℃/cm、0.37℃/cm、0.28℃/cm、0.22℃/cm、0.17℃/cm 条件下诱导内波,测试不同断面和水深处的水温逐时变化,通过不同深度温度的变化计算内波特性参数^[1,8]。在装置运行工况不变的前提下,分别测定水库不分层和分层状态下流场各 5 组,计算得到平均流场图。

2 实验结果与分析

2.1 破坏水温分层过程

不同跃温层厚度条件下水流诱导内波破坏分层的过程基本相同,以跃温层整体上移为特征,与采用等温层曝气诱导内波混合水体时跃温层下潜趋势相反^[18]。以跃温层温度梯度 0.17℃/cm、

跃温层厚度 57.5 cm 为例, 简述机械混合装置间歇出流诱导内波混合的过程. 为更好地表现跃温层上下界面的变化, 绘制不同时刻水温剖面(图 3). 在人工诱导内波混合的前 20 min, 跃温层上界面从距库底 92.5 cm 处下移到距库底 90 cm 处, 温度从 16.5 °C 降低到 15.6 °C, 上界面下移幅度较小; 跃温层下界面从距库底 35 cm 处上移到距库底 57.5 cm 处, 温度从 6.4 °C 升高到 10.9 °C, 下界面上移幅度较大, 跃温层厚度从 57.5 cm 减小到 32.5 cm. 随着混合过程的进行, 跃温层上下界面温差减小速度逐渐减小, 从初始 20 分钟内的 0.055 °C/min 减小到 60~80 min 内的 0.035 °C/min, 速度减小 36.3%.

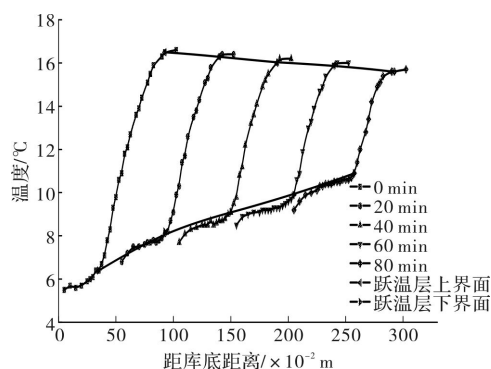


图3 0.17 °C/cm 温度梯度下混合过程中不同时刻的水温剖面

Fig. 3 Temperature profiles at various times of destratification under 0.17 °C/cm temperature gradient

从流场角度分析, 在水体不分层状态下, 受机械混合装置跃温层下界面处出流的影响. 模型水库水体流场呈现如图 4(a) 中的环流状态, 循环水流从出水口水平流出, 在池壁附近向上循环至水库表面时, 再转为向右流动; 在水体跃温层梯度为 0.17 °C/cm、跃温层厚度为 57.5 cm 条件下, 水库流场如图 4(b) 所示, 受约化重力的影响, 机械混合装置出水动能部分转化为内波的波能, 水库流场由环流主导转变为由内波波动主导, 水体环流虽然依旧存在, 但强度明显减弱^[18]. 在等温层曝气诱导内波混合过程中, 气弹上涌并在水体表面破碎释放能量, 形成循环水流, 将跃温层向下推动, 使跃温层呈现下潜趋势^[1,8]. 虽然两种混合均利用循环水流在跃温层下部诱导的内波, 但机械混合装置和等温层曝气装置产生的扰动源分别水平和垂直作用于跃温层, 导致两种条件下跃温层移动方向相反.

2.2 跃温层厚度对内波混合效率的影响

水体混合效率可通过水体完全混合所需时间

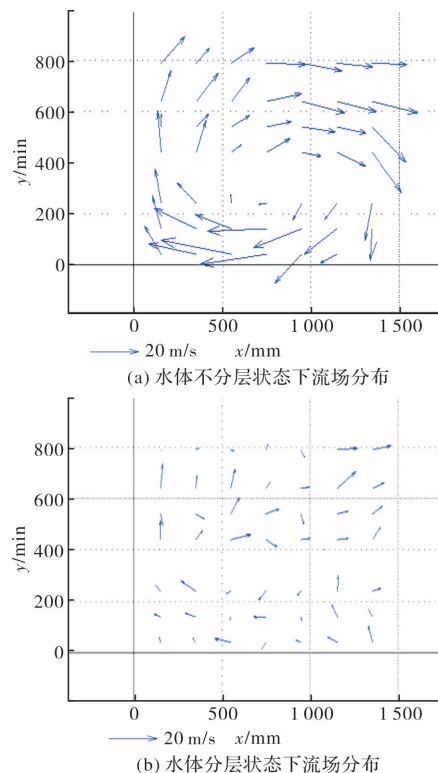


图4 机械混合装置运行时流场分布

Fig. 4 Flow field distribution during operation of mechanical mixing device

和跃温层上下界面温差减小速率有效反映, 前者反映整体混合效率, 后者反映某一时段的混合效率. 计算结果说明随着跃温层厚度的增加, 内波混合整体效率随之提高^[18]. 以温度梯度 0.17 °C/cm 下实验结果为例, 跃温层上下界面温差减小速率和完全混合时间如图 5 所示, 为突出表示初始状态下混合效率, 图中温差减小速率为前 10 分钟内的计算值. 当跃温层厚度从 37.5 cm 增加到 57.5 cm 时, 温差减小速率从 0.035 °C/min 增加到 0.062 °C/min (增加 77.14%) 完全混合所需时间则从 194 min 缓慢增加到 274 min (增加 41.2%). 根据文献[7], 在分层水库其他条件相同的情况下, 随着跃温层厚度的增加, 破坏分层所需的理论能量随之增加, 当跃温层厚度从 37.5 cm 逐渐增加到 57.5 cm 时, 破坏分层所需的能量增加 53.3%, 而实际破坏分层所需的时间仅增加 41.2%, 效率提高 8.6%. 在温度梯度 0.22~0.40 °C/cm 范围内, 随跃温层厚度的增加, 实际的完全混合所需时间的增幅小于完全混合所需理论能量的增幅, 内波混合整体效率也随跃温层厚度增加而提高, 效率提高范围为 2.8%~20.9%.

2.3 跃温层厚度对内波波幅的影响

内波波幅(A)是影响内波混合效率的主要因素. 当波幅增大时, 水体质点上下振动幅度增大,

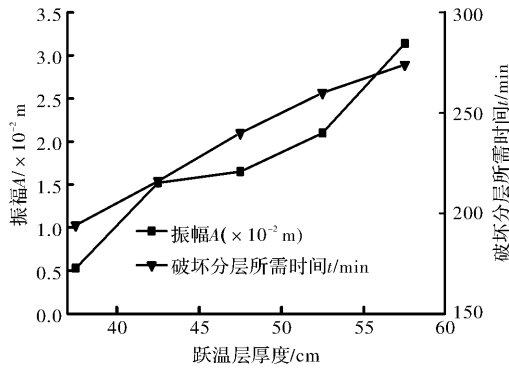


图5 不同跃温层厚度下温差减小速率和混合时间

Fig. 5 Temperature difference decrease rate and mixing times under different pycnocline thickness

破坏水温分层的能力增大, 水体混合效率提高. 内波波幅可通过“温度—时间”图像并结合这一时刻的“水深—温度”图像计算求得^[1,8], 图6表示在不同温度梯度下, 内波波幅均随跃温层厚度的增加而增大^[18]. 如当温度梯度为 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 时, 当跃温层厚度从 57.5 cm 减小到 37.5 cm 时, 波幅从 3.14 cm 减小到 0.53 cm ; 当温度梯度为 $0.40\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 时, 当跃温层厚度从 35 cm 减小到 22.5 cm 时, 波幅从 6.55 cm 减小到 2.67 cm .

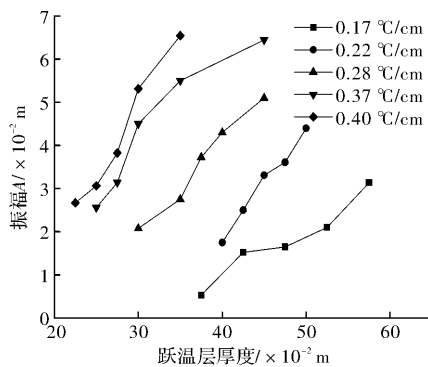


图6 不同跃温层厚度下内波的波幅

Fig. 6 The amplitude of internal wave under different pycnocline thickness

上述结果也可从水体稳定性角度加以分析. 在计算小型温度分层水体完全混合所需的能量时, Szyper^[19]将稳定系数 $S(\text{g} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2)$ 、重力加速度 $g(980\text{ cm}/\text{s}^2)$ 以及池塘面积 (cm^2) 相乘, 得到将分层水体重心提高到等温水体的理论高度所需的能量^[7]. 稳定系数越大, 水体离稳定状态相差能量越多, 水体稳定性越差, 越容易受到外界扰动而失去稳定. 将分层水体沿着水深方向均匀分为 n 层, 定义稳定系数 S 为

$$S = \frac{1}{A_0} \sum_{i=1}^n A_{zi} (z_i - z_g) (\rho_{zi} - \rho_m) \Delta z_i \quad (1)$$

式中: z_i 为测量点深度, cm ; Δz_i 为两测量点中点之间的距离, cm ; A_0 表示水体的表面积, cm^2 ;

A_{zi} 表示 z_i 深度处水体的面积, cm^2 ; z_g 表示水体完全混合后重心处的深度, cm ; ρ_{zi} 为 z_i 深度处水体的密度, g/cm^3 ; ρ_m 为水体完全混合后的密度, g/cm^3 ; V 为水体的体积. 在本实验中, 以温度梯度 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 为例, 以 5 cm 间隔将水体沿水深方向均分为 22 层, 测定相邻两层中间点水温, 计算不同跃温层厚度条件下的稳定系数(表1). 根据表1, 随跃温层厚度增大, 稳定系数增大, 故当水平出流扰动产生内波时, 内波波幅越大.

表1 不同跃温层厚度下水体稳定系数

Tab. 1 Water stability coefficient under different pycnocline thickness

跃温层厚度 /cm	57.5	52.5	47.5	42.5	37.5
稳定系数 / $\text{g} \cdot \text{cm} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.550	0.517	0.485	0.423	0.397

从内波波动力学角度而言^[20], 相比于自由表面波内部反射及充分的水平剪切, 当内波通过水平剪切流速等于内波相速的流体薄层时, 上传内波的波幅将迅速衰减, 这一层被称为临界层. 在临界层中内波群速垂向分量趋于零, 垂向能量转化为平均流的动量传输, 即为临界层吸收现象. 在上部变温层和底部等温层中, 水体浮力频率近似为零, 失去形成内波的必要条件, 水体环流占主导地位, 水平剪切流强于跃温层, 流速接近内波相速, 形成临界层. 当内波传至在跃温层界面处, 波能被临界层吸收. 当跃温层厚度小时, 能量损失大, 水体中波能减小, 波幅减小.

2.4 跃温层厚度对波速的影响

内波波速(u)的大小可以反映内波水平传播推动力大小, 波速(u)增大有利于内波向远处传播, 扩大内波破坏水温分层的影响范围, 提高水体整体混合效率. 根据水平两探头距离与内波通过所用时间, 可分别计算温度梯度 $0.17 \sim 0.40\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 范围内不同跃温层厚度条件下的内波波速.

根据图7所示结果, 随着跃温层厚度的逐渐增加, 内波波速逐渐减小^[18]. 如当温度梯度为 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 时, 当跃温层厚度从 57.5 cm 减小到 37.5 cm 时, 波速从 0.0234 m/s 增大到 0.0276 m/s ; 当温度梯度为 $0.40\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 时, 当跃温层厚度从 35 cm 减小到 22.5 cm 时, 振幅从 0.0205 m/s 增加到 0.0241 m/s . 究其原因, 当水平运动流体扰动跃温层产生内波时, 水平动能转换为内波质点上下振动的波能, 水平推动力减小, 内波传播速度

减小.

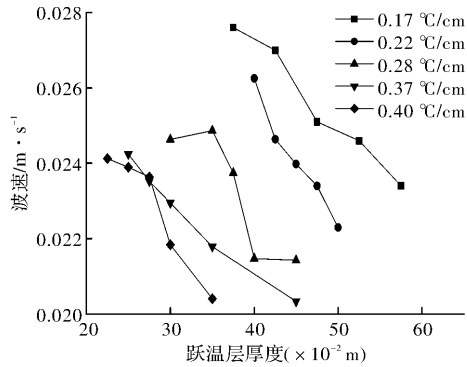


图 7 不同跃温层厚度下内波的波速

Fig. 7 The velocity of internal wave under different pycnocline thickness

2.5 跃温层厚度对内波周期的影响

周期(T)为相邻两波峰或波谷之间的时间差,可由“温度—时间”图像求得。通过计算分析得到不同跃温层厚度和温度梯度下的内波周期如表 2。当跃温层温度梯度分别为 0.17 °C/cm、0.28 °C/cm、0.40 °C/cm 时,内波平均周期分别为 55.1 s、55.3 s、54.9 s。由此可见,在本中试条件下,温度梯度和跃温层厚度的变化基本不影响内波周期,循环水流的扰动周期不变,诱导产生的内波周期也不变,且平均周期和总运行周期相同。

表 2 不同跃温层厚度下的内波周期

Tab. 2 The period of internal waves under different pycnocline thickness

跃温层 厚度/cm	内波周期/s		
	Grad T_1 =	Grad T_2 =	Grad T_3 =
	0.17 °C/cm	0.28 °C/cm	0.40 °C/cm
57.5	57.03	—	—
52.5	52.63	—	—
47.5	56.92	—	—
45.0	—	54.05	—
42.5	54.17	—	—
40.0	—	57.36	—
37.5	54.58	53.28	—
35.0	—	55.17	54.13
30.0	—	56.45	54.54
27.5	—	—	55.64
25.0	—	—	53.69
22.5	—	—	56.30

2.6 跃温层厚度对内波能流密度的影响

内波波能是内波的重要特性参数之一,可表征内波混合过程中破坏水体分层的输入能量大小。

当波能增大时能够输入的能量增大,水体混合效率提高。内波是一种机械波,可通过能流密度表示通过垂直波传播方向的单位面积的平均波能^[21],可由波动方程推导其计算公式。

$$I = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 u \quad (2)$$

其中: I 为能流密度, W/m^2 ; ρ 为介质密度, kg/m^3 ; A 为振幅, m ; $\omega = 2\pi/T$, T 为内波周期, s 。

按照公式 2 定量计算出温度梯度为 0.17 °C/cm、0.22 °C/cm、0.28 °C/cm、0.34 °C/cm、0.40 °C/cm 时,不同跃温层厚度下的内波能流密度(图 8)^[18]。在温度梯度为 0.17 °C/cm 条件下,当跃温层厚度从 57.5 cm 减小到 37.5 cm 时,能流密度从 $1.500 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ 减小到 $0.051 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$;在温度梯度为 0.40 °C/cm 条件下,当跃温层厚度从 35 cm 减小到 22.5 cm 时,能流密度从 $5.704 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ 减小到 $1.122 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ 。可见,在相同温度梯度下,内波的能流密度随跃温层厚度的增大而增大,因为能流密度的大小与内波振幅的平方成正比,随振幅增长,能流密度增长迅速。

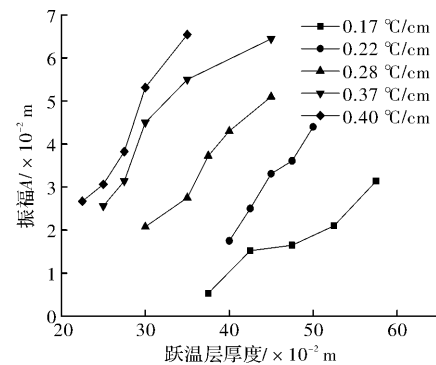


图 8 不同温度梯度下内波的能流密度

Fig. 8 The energy flow density of internal wave under different pycnocline thickness

3 结论

(1)在水体分层状态下,机械混合装置出流部分动能转化为内波波能,水体环流减弱但依旧存在;在内波破坏水体分层过程中,变温层与等温层的水温差逐渐减小,跃温层上移,直至水体分层被完全破坏。

(2)在温度梯度、扰动强度、水深均相同的条件下,随着跃温层厚度的增加,水体稳定系数增大、临界层上内波波能损失减小,内波周期不变,波速稍有减小,但内波波幅和能流密度增幅较大,混合效率提高。

(3)在温度梯度 0.17~0.40 °C/cm 及跃温层厚

度 37.5~57.5 cm 范围内,随跃温层厚度的增加,实际的完全混合所需时间的增幅小于完全混合所需理论能量的增幅,内波混合效率提高,效率提高范围为 2.8%~20.9%。内波混合更适应于跃温层厚度较大的分层湖泊水库。

参考文献 References

- [1] 孙昕,黄廷林. 湖泊水库水体污染控制[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,2013.
SUN Xin, HUANG Tinglin. Water pollution control of lakes and reservoirs [M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2013.
- [2] MÁRQUEZPACHECO H, HANSEN A M. Internal phosphorus load in a Mexican reservoir through sediment speciation analysis. [J]. Environmental Science & Pollution Research International, 2017, 24 (32): 24947-24952.
- [3] UPADHYAY S, BIERLEIN K A, LITTLE J C, et al. Mixing potential of a surface-mounted solar-powered water mixer (SWM) for controlling cyanobacterial blooms[J]. Ecological Engineering, 2013, 61(61): 245-250.
- [4] SUN X, LI X L, ZHANG M D, et al. Comparison of water-lifting aerator type for algae inhibition in stratified source water reservoirs[J]. Ecological Engineering, 2014, 73: 624-634.
- [5] LAWSON R, ANDERSON M A. Stratification and mixing in lake elsinore. California: An assessment of axial flow pumps for improving water quality in shallow eutrophic lake[J]. Water Research, 2007, 41 (19):4457-4467.
- [6] 孙昕,杨潘,解岳. 分层水环境曝气诱导形成内波的过程与特性[J]. 中国环境科学,2016,36(9):2658-2664.
SUN Xin, YANG Pan, XIE Yue. Process and characteristics of aeration-induced internal waves in stratified water environments. [J]. Chinese Environmental Science, 2016, 36 (9): 2658-2664.
- [7] 孙昕,叶丽丽,黄廷林,等. 破坏水库水温分层系统的能量效率估算:以金盆水库为例[J]. 中国环境科学, 2014,34(11):2781-2787.
SUN Xin, YE Lili, HUANG Tinglin, et al. Estimation of energy efficiency of a destratification system for reservoirs: a case study of Jinpen Reservoir; [J]. China Environmental Science, 2014,34(11):2781-2787.
- [8] 孙昕,张垚臻,陈笑涵,等. 分层水环境人工诱导内波的强化混合效果[J]. 中国环境科学,2017,37(8): 3019-3027.
SUN Xin, ZHANG Yaozhen, CHEN Xiaohan, et al. Enhanced mixing by artificially induced internal waves in stratified water environments [J]. Chinese Environmental Science, 2017, 37 (8): 3019-3027.
- [9] Mcphee-Shaw E. Boundary interior exchange: Reviewing the idea that internal-wave mixing enhances lateral dispersal near continental margins[J]. Deep-Sea Research Part II, 2015, 53(1):42-59.
- [10] BROUZEt C, SIBGATULLIN I N, SCOLAN H, et al. Internal wave attractors examined using laboratory experiments and 3D numerical simulations[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2016, 793:109-131.
- [11] DIAMESSIS P J, WUNSCH S, DELWICHE I, et al. Nonlinear generation of harmonics through the interaction of an internal wave beam with a model oceanic pycnocline[J]. Dynamics of Atmospheres & Oceans, 2014, 66(2):110-137.
- [12] LU Dianyu. Experimental Study on the effect of pycnocline thickness on Internal Solitary Wave evolution [D]. National Sun Yat-sen University, 2007.
- [13] CHENG M H, HSU R C. Effects of varying pycnocline thickness on interfacial wave generation and propagation[J]. Ocean Engineering, 2014, 88 (4): 34-45.
- [14] 黄鹏起,陈旭,孟静,等. 内孤立波破碎所致混合的实验研究[J]. 海洋与湖沼,2016,47(3):533-539.
HUANG Pengqi, CHEN Xu, MENG Jing, et al. An experimental study on mixing induced by internal solitary wave breaking [J]. Oceanologia et limnologia sinica, 2016, 47 (3): 533-539.
- [15] 苏梦,王彩霞,陈旭. 均匀流过地形生成内波的实验探究[J]. 海洋湖沼通报,2017,41(5):1-8.
SU Meng, WANG Caixia, CHEN Xu. Experimental Investigations on the Internal Waves Generated by Uniform Flow over Topography [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2017 ,41(5): 1-8.
- [16] BROUZET C, SIBGATULLIN I N, SCOLAN H, et al. Internal wave attractors examined using laboratory experiments and 3D numerical simulations[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2016, 793:109-131.
- [17] 邱二生. 黑河水库水质及藻类监测和水体分层研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学,2010.
QIU Ersheng. Research on Water Quality, Algae Monitoring and Thermal Stratification in Heihe Reservoir [D]. Xi'an:Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2010.
- [18] 陈笑涵. 间歇水流诱导形成内波及其破坏分层特性 [D]. 西安:西安建筑科技大学,2018.
CHEN Xiaohan. Characteristics of destratification and internal waves induced by intermittent water flow[D]. Xi'an:Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2018.
- [19] SZYPER J P. Comparison of three mixing devices in earthen culture ponds of four different surface areas [J]. Aquacultural Engineering, 1996,15(5):381-3
- [20] 徐肇廷. 海洋内波动力学 [M]. 北京:科学出版社,1999.
XU Zhaoting. Ocean internal wave dynamics [M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [21] 周越,张国锋. 对简谐波能量的讨论[J]. 大学物理, 2015, 34(10):15-16.
ZHOU Yue, ZHANG Guofeng. Discussion on the energy of simple harmonic wave [J]. college physics, 2015, 34 (10): 15-16.

(编辑 沈 波)