

三峡水库香溪河库湾水—气界面热交换过程及水体稳定性*

杨忠勇^{1,2}, 张亚超¹, 汤正阳^{3,4**}, 纪道斌^{1,2}, 崔玉洁¹, 李昌文¹, 吴家阳⁵

(1: 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002)

(2: 三峡大学三峡水库生态系统湖北省野外科学观测研究站, 宜昌 443002)

(3: 中国长江电力股份有限公司, 智慧长江与水电科学湖北省重点实验室, 宜昌 443000)

(4: 华中科技大学土木与水利工程学院, 武汉 430074)

(5: 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 武汉 430010)

摘要: 水库或湖泊的热分层结构是其动力与环境过程的重要研究方面, 虽然很多学者针对水体分层结构和演变机理开展了大量研究, 但水体通过水—气界面与大气进行热交换的过程, 各气象因子的贡献机理等研究成果还很缺乏。本文基于三峡水库香溪河库湾 2019 年 3 月—2020 年 2 月期间的水温、水位及气象等监测数据, 针对水—气界面热交换过程如何影响水温垂向结构及表层水体湍流混合作用开展研究。结果表明, (1) 香溪河水体年内呈高温期分层、低温期混合的基本特征, 高温期混合层深度小于 8 m, 低温期混合层深度超过 30 m。(2) 太阳短波辐射是香溪河水体的主要热源, 潜热通量和长波辐射是香溪河水体的主要冷源, 感热通量贡献极小。(3) 香溪河平均风速较弱, 约为 1.6 m/s, 主要通过增强潜热和感热通量的方式影响水体垂向稳定性结构特征, 其机械扰动作用较弱。(4) 表层水体湍能通量在高温期较低 ($10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}^3$ 量级), 此时水体处于分层状态, 风应力大概率主导表层水体湍流发育; 低温期表层水体湍能通量较高 ($10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}^3$ 量级), 此时潜热通量和长波辐射主导表层水体湍流发育。

关键词: 三峡水库; 香溪河库湾; 水—气界面热通量; 水体热分层; 风应力; 表层湍流

The air-water heat exchange and water vertical stability in the Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir*

Yang Zhongyong^{1,2}, Zhang Yachao¹, Tang Zhengyang^{3,4**}, Ji Daobin^{1,2}, Cui Yujie¹, Li Changwen¹ & Wu Jiayang⁵

(1: College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, P.R.China)

(2: Hubei Field Observation and Scientific Research Stations for Water Ecosystem in Three Gorges Reservoir, China Three Gorges University, Yichang 443002, P.R.China)

(3: Hubei Key Laboratory of Intelligent Yangtze and Hydroelectric Science, China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443000, P.R.China)

(4: School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, P.R.China)

(5: Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, P.R.China)

Abstract: The thermal stratification structure of a reservoir or a lake is important to its dynamics and environmental process. Although many scholars have studied this topic, a gap is still existed on the process of heat exchange in the air-water interface and the contribution mechanism of various meteorological factors. In this paper, based on the observation data of water temperature and meteorology from March 2019 to February 2020, in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir, we studied how the heat flux and wind stress affect the vertical structure of water temperature and the turbulent mixing. We have conclusions as following. (1) The Xiangxi River is char-

* 2022-06-29 收稿; 2022-10-12 收修改稿。

湖北省重点研发计划项目(2020BCA087)、国家自然科学基金项目(52079069, 52009066, 52009079)、智慧长江与水电科学湖北省重点实验室开放研究基金项目(ZH2102000109)、长江科学院开放研究基金项目(CKWV20221003/KY)和湖北省高校优秀中青年科技创新团队项目(T2021003)联合资助。

** 通信作者; E-mail: retom127@126.com。

acterized as stratification in high temperature period and mixing in low temperature period. The depth of mixing layers in high temperature period is less than 8 m and that in low temperature period is more than 30 m. (2) Solar short-wave radiation is the main heat source of Xiangxi Bay, while latent heat flux and long wave radiation are the main cold source. The contribution of sensible heat flux is quite small. (3) The wind speed in Xiangxi River region is weak, with an average value about 1.6 m/s, which influence the water vertical stability by enhancing latent heat and sensible heat flux strongly and mechanical disturbance effect weakly. (4) The turbulent energy flux of surface water is much lower in the high-temperature period ($10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}^3$ in magnitude), at which time the wind stress dominates the development of turbulence. The turbulent energy flux is quite high during low-temperature period ($10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}^3$ in magnitude), when the sensible heat flux and long wave radiation dominate the turbulence mixing.

Keywords: Three Gorges Reservoir; Xiangxi Bay; air-water heat process; stratification and mixing; wind shear stress; turbulent flux

水体垂向分层与混合结构对其物质和能量的迁移分布、水生生物环境构建等具有重要影响,是水库和湖泊动力与环境过程的重要研究方面^[1-2]。研究表明,在全球变暖背景下,表层水体热量的增加会增强水体稳定性,能够有效限制水体垂向混合,导致垂向物质交换减弱^[3-4],同时使温带湖泊深水水域广泛脱氧^[5-6],从而加剧生态问题的严重性。此前很多学者针对水温影响下水体的分层与混合结构及其演变过程开展了大量研究^[7-8],但水体究竟是如何通过水—气界面与大气进行热交换的,各种气象因子在其中的贡献机制如何等问题尚不清楚。为此,本文选取三峡水库典型支流香溪河库湾为例,针对气象强迫下水体分层与混合等稳定性特征开展研究,重点讨论风应力在其中的贡献机理,论文成果可丰富三峡水库及其支流水动力理论,为库区水动力与水生态环境管理提供参考依据。

水—气界面热通量是量化水体与大气热交换过程的物理量,对水体湍流混合、温度序列及垂向稳定性结构等水文和生态环境有重要影响^[9]。界面热交换模式主要包括太阳短波辐射、水体和大气长波辐射以及界面潜热和感热等形式^[10]。风应力产生的近表层混合、出入流影响的河口附近局部混合过程等也会对水体造成一定的影响^[11-12]。水面热交换能够影响垂向较大范围内水体的混合或分层作用,而风应力的影响一般局限在表层一定深度范围内^[13]。不过风应力的影响模式可分为两种,一种是通过机械扰动,促使表层局部混合^[14];另一种是通过增强潜热和感热通量,加大水体热交换速度^[15]。在气象强迫昼夜变化下,水体混合的日内变化特征明显,呈现日间分层、夜间混合的基本特点。太阳辐射和风是混合层深度发生日变化的主控因子^[16],日间强太阳辐射下的水体分层受风影响强烈,较浅的温跃层可能在强风应力下沉并使水体等温线产生空间倾斜,同时强风过程也会引起热通量和温度变化过程^[17-18]。深水湖泊中,夜间水体混合主要来自界面的负热通量驱动的对流,风对混合层的作用深度有限,仅加强近表层混合强度,几乎不影响混合层深度^[19]。然而浅水湖泊水柱稳定性较低,混合层深度在年尺度上可能表现为多循环模式,日间的强风和夜间的对流均有可能导致水柱完全混合^[20],且在日间强分层时,微风也可能导致混合的加深。由于太阳辐射和气温强烈的季节性变化,深水湖泊在年尺度上混合层深度一般呈现出冬季深、夏季浅、春秋过渡的基本模式,冬季以长波辐射为主的表层失热比风剪切产生更多湍能作用于水柱混和,而在夏季浅层结时,以潜热为主的低强度失热驱动的水体混合较弱^[14,21-22]。风应力的差异是水柱混合强度差异的重要影响因素,极端强风的出现可能会导致半混合水柱的突然混合^[23]。季节性的气象差异也能够使深水湖泊垂向混合存在日间浅温跃层和夜间较深季节性温跃层双重制约^[24],导致温暖时期水体吸热、高溶解氧被限制在水柱中上层,构成分层差异水环境^[25]。

香溪河库湾距离三峡水库坝首约 29 km,是近坝区最大的支流,香溪河每年都会暴发蓝藻、硅藻或甲藻水华,存在较为严重的水环境问题。研究表明,库湾混合层深度与真光层深度的比值是控制其藻量增殖与否的重要依据^[26]。因此近年来针对香溪河库湾在水温垂向分层结构和混合特征上产生了较多研究成果^[1,27-28]。由于香溪河在形态上比较顺直(图 1),回水区较短(约 32 km),库湾水体与干流水体温差显著,驱动的温差异流是支流水体发生垂向混合的重要动力因子^[1,7]。此外夏季时段河口较高含沙浓度水体和上游来流量也会显著影响水体的分层结构^[1]。近年来,为改善库区水华现状,三峡电站开始实时生态调水,通过调水有规律地抬升或降低库区干支流水位,达到增强干支流混合层深度的目的。Jin 等^[28]研究发现,香溪河气温与水体混合的负相关关系,水位波动与温跃层深度的正相关关系。不过这些成果大多从水动力的角

度探讨支流库湾的混合层深度变化特征及影响因素,近年来随着生态调度等措施的实施,支流库湾近河口区域的水华问题有所改善,但中上游区域的水华依然严重,这些区域动力较多,其混合特征更多受气象特征影响,因而研究成果较少。杨忠勇等^[15]基于2020年秋末冬初实测数据,分析了一次降温过程中气温和风应力在增强水体混合中的作用机制和贡献大小。然而在年内尺度上,不同月份或季节时期,各气象因子如何影响水体混合强度,目前研究还较少。本文基于2019年3月到2020年2月近一年野外监测获取的水柱温度、水深和气象数据,系统分析了香溪河库湾混合层深度的年内变化特征,并从热通量和风扰动角度探究了产生不同水体混合的物理原因,同时研究了热湍流和风生湍流的主导关系和变化特征。研究期间,量化了不同梯度风速下潜热、感热通量,发现了风速增大与正水气温差耦合下感热失热变弱的规律,从气象强迫角度解释了香溪河库湾水体稳定性年内变化的物理过程和贡献机制。

1 研究区域概况

三峡水库控制流域面积100万 km²,其水库范围上游始于重庆市朱沱镇,下游至宜昌市三斗坪镇,总长约660 km。三峡水库属于季调节水库,其蓄水位在145~175 m范围内波动,库区年均径流量约4510亿 m³,约占长江年总径流量(大通)的49%。香溪河是三峡水库库首的第一条大型支流,同时也是三峡水库在湖北省境内最大的支流(图1)。整个香溪河支流(30°57'~31°34'N, 110°25'~111°06'E)基本为南北走向,流域总面积达3099 km²,多年平均流量为40.18 m³/s^[29]。

香溪河库湾的水动力特性主要受上游来水和干流调节的影响,整个库湾常年存在分层异重流。异重流在河口的潜入深度主要受干支流温差、河口泥沙浓度等的影响,加上上游来流侵入特征,库湾异重流总共可分为10种环流模式^[27]。此外,香溪河库湾在三峡水库出库流量日调度模式影响下,还存在高频振荡波,其水位振幅约为0.06 m,流速振幅可达0.1 m/s,与异重流流速在一个量级^[30-31]。香溪河水体的垂向分层混合结构主要受气温、干流调节和上游入流等因素的影响,其中上游河段主要受气温影响,下游段主要受干流潜入水体的影响^[1]。总体说来,整个香溪河库湾水体呈夏季分层、冬季混合的稳定性特征,造就了香溪河库湾水体稳定性的年内单循环混合特征(即一年连续完全混合一次)。香溪河的日间分层-夜间混合特性与季节相关,一般发生在春末或秋末时段,其余时段并不显著^[15,32]。

2 材料与方法

2.1 数据来源

为研究香溪河库湾气象条件强迫下水体的垂向稳定性特征,于2019年3月20日至2020年2月29日在香溪河峡口站点开展为期一年的水文气象监测,主要监测指标包括水温、水位和气象数据。垂向剖面水温采用微型温度探头组成的温度链进行连续监测,温度探头的型号为RBR-solo3,监测频率为2 Hz,分辨率10⁻⁴℃。监测站点的水深在20~42 m之间波动,因此在垂向共布设2条温度链,其布置方式如图1所示。第1条温度链布置在表层10 m范围内,采用漂浮在水面的平台固定,温度探头在0~5 m深度范围内的间隔为0.25 m,在5~10 m范围内的间隔为1.0 m,共计26个温度探头。第2条温度链布置在底层24 m范围内,间隔均为2 m,共计13个温度探头。当坝前水位超过169 m时(约68天),上下两条温度链之间的区域采用线性插值补全。研究站点的水位数据来源于附近峡口站的水位监测结果,采用HOB0U20L-01水位计,其监测精度为0.2 cm,监测数据周期为5 min。气象数据来源于峡口站的自动气象站,主要监测指标包括太阳辐射、气温、相对湿度、风速、风向、大气压等数据,各项气象数据的采集周期均为1 h。由于气象站布置的相对高程为4.5 m,实际研究中采用对数公式将其首先转换为10 m风速后再使用。云覆盖率使用附近宜昌市秭归县气象站(ID57461)获取,输出周期3 h,实际研究中将其插值至1 h周期后再使用。

2.2 数据处理方法

为分析各气象因素影响下香溪河该站点附近一年内水温的垂向剖面特征和稳定性特征,首先根据水体温度(T)计算其密度(ρ)的垂向结构特征,参考 Millero and Poisson^[33]给出的计算公式:

$$\rho(z, T) = 999.842594 + 6.793952 \times 10^{-2}T - 9.095290 \times 10^{-3}T^2 + 1.001685 \times 10^{-4}T^3 - 1.120083 \times 10^{-6}T^4 + 6.536334 \times 10^{-9}T^5 \quad (1)$$

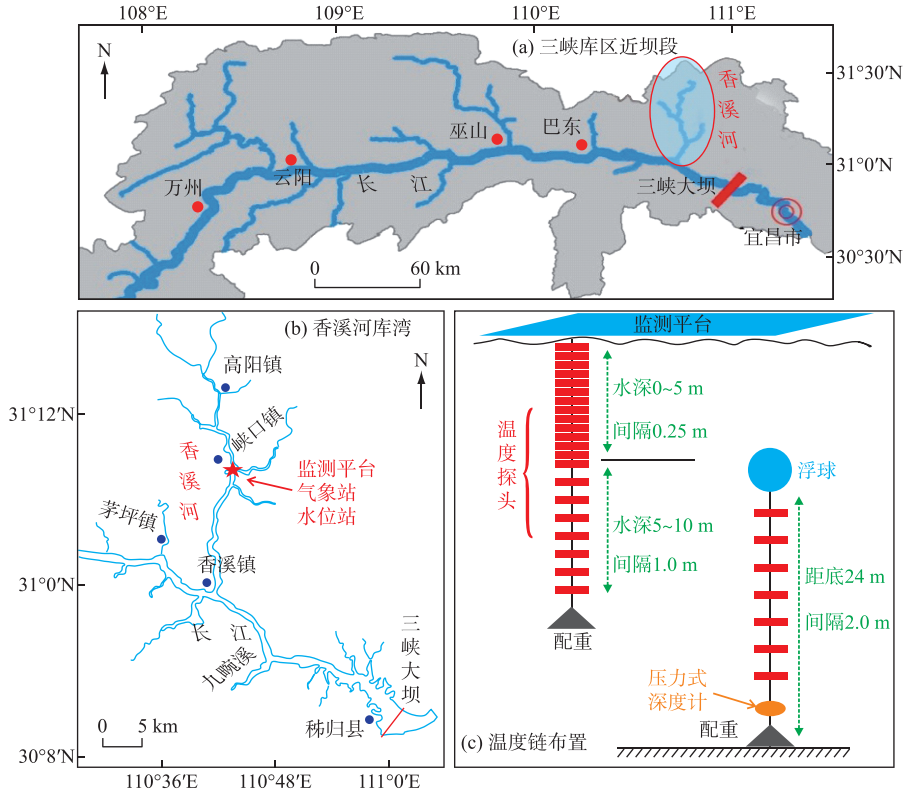


图1 香溪河库湾监测平台及温度链

Fig.1 Observation platform and temperature sensor profile in Xiangxi Bay

根据水体密度的垂向结构特征可以计算水体的浮力频率平方(N^2)和混合层深度(h_{mix}),用来衡量水体的垂向稳定性,其中 N^2 的计算公式为:

$$N^2 = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (2)$$

式中, $g=9.81 \text{ m/s}^2$ 为重力加速度, z 表示水深,垂直向上为正。垂向混合层深度(h_{mix})指水体表层正下方水温、密度随深度变化很小的准均匀区域,由于香溪河的水体密度差异主要受水温影响^[1],因此采用温差作为依据进行计算,参考 Gray 等^[34]的研究成果,本文取温差定值为 0.5°C 。

为将气象站监测得到的 4.5 m 高程处风速转换为 10 m 风速,采用 Amorcho 等^[35]建议的对数公式进行转换,其公式如下:

$$U_z = \frac{u_*}{\kappa} \ln(z/z_0) \quad (3)$$

式中, $z_0=0.01 \text{ m}$,为空气动力学粗糙度^[36], $\kappa=0.4$,为 von-Karman 常数。

此外,文中计算了各项热通量,分析了风应力对热通量的影响,最后从界面热交换过程、水体湍流混合、风应力驱动的界面摩擦系数等方面分别分析了各项热通量和风应力在其中的贡献大小和作用机制。水—气界面热通量一般可分为太阳短波辐射(SW)、界面长波辐射(LW)、感热通量(Q_s)和潜热通量(Q_e)4个部分。太阳短波辐射($SW, \text{W/m}^2$)是水柱主要热量来源,穿过水气界面的短波辐射表示为监测值(SW_{obs})与水面透射率的乘积^[37],即:

$$SW = (1 - A_s) SW_{\text{obs}} \quad (4)$$

式中, $A_s=0.03$,为水面反照率^[38]。

LW 可表示为吸收的大气长波辐射 ($LW_a = (1 - A_s) \varepsilon_a \sigma T_{ak}^4$) 和水体自身放出的长波辐射 ($LW_w = \varepsilon_w \sigma T_{wk}^4$) 之差^[37,39], 因此其表达式为:

$$LW = (1 - A_s) \varepsilon_a \sigma T_{ak}^4 - \varepsilon_w \sigma T_{wk}^4 \quad (5)$$

式中, ε_a 是有效大气发射率, 当云覆盖率 $C > 0.6$ 时, $\varepsilon_a = 0.87 - (0.175 - 29.92 \times 10^{-6} e_a) (1 - C) + 2.693 \times 10^{-5} e_a$, 当 $C \leq 0.6$ 时, $\varepsilon_a = 0.84 - (0.1 - 9.973 \times 10^{-6} e_a) (1 - C) + 3.491 \times 10^{-5} e_a$, 其中 $e_a = e_{sa} \cdot RH$ 表示实测水汽压, RH 是大气湿度, $e_{sa} = 10^{[(0.7859 + 0.03477T_s)/(1 + 0.00412T_s)]} \cdot f_{wa} \cdot 100$ 是饱和水汽压, $f_{wa} = 1 + 10^{-6} P_a (4.5 + 0.0006T_a^2)$ 是饱和水汽压校正项^[11], P_a 是标准大气压。 $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, 是 Stefan-Boltzmann 常数, $\varepsilon_w = 0.972$, 是水体长波辐射率, T_{ak} 和 T_{wk} 分别表示开尔文制气温和水温。

潜热通量 ($Q_E, \text{W}/\text{m}^2$) 计算公式为^[37]:

$$Q_E = -\rho_0 L_v E \quad (6)$$

式中, ρ_0 是表层水密度, 根据式(1)计算获得, L_v 是潜热系数, $E = 1 \times 10^{-5} [(4.4 + 1.82 U_{10})/L_v] (e_{sw} - e_a)$ 是蒸发率^[37], e_{sw} 是表层水温对应的饱和水汽压。

感热通量 ($Q_s, \text{W}/\text{m}^2$) 的计算公式为^[37,40]:

$$Q_s = 0.61 \times 10^{-3} P_a (T_{w0} - T_a) / (e_{sw} - e_a) Q_E \quad (7)$$

即 Q_s 与 Q_E 通过波文比相关。通过以上各项热通量, 可以计算水体净热通量 (Q_{net}) 和表面热收支 (Q_{SEB}) 两项关键指标。其中净热通量指示了水气热交换的总和; 表面热收支表示为长波辐射、潜热通量和感热通量之和, 整体上为负值, 是水体失热的总和, 也是水体混合的主要能量来源, 二者的计算方法参考 Branco and Torgersen^[13] 和 Henderson-Sellers^[37] 如下:

$$Q_{net} = SW + LW + Q_E + Q_s \quad (8)$$

$$Q_{SEB} = LW + Q_E + Q_s \quad (9)$$

采用水体湍流混合通量可衡量水体的垂向稳定性特征。水体湍能通量 ($F_q, \text{m}^3/\text{s}^3$) 主要包括风应力驱动的湍能通量 ($F_{qw} = 0.5 C_N^3 u_{*w}^3$) 和热通量驱动的湍能通量 ($F_{qh} = 0.5 w_*^3$) 两部分, 其计算公式参考 Augusto-Silva 等^[10] 和 MacIntyre 等^[11] 如下:

$$F_q = 0.5 (w_*^3 + C_N^3 u_{*w}^3) \quad (10)$$

式中, $C_N = 1.33$ 是与风致混合效率相关的经验系数, $u_{*w} = \sqrt{(\tau/\rho_0)}$ 是风扰动水体混合的摩擦速度 (m/s), 其中 $\tau = \rho_a C_D U_z^2$ 是风表面切应力, $\rho_a = 1.29 \text{ kg}/\text{m}^3$ 是大气密度, C_D 是阻力系数, 其值参考 Wüest and Lorke^[41] 取定, 当 $U_{10} > 3 \text{ m}/\text{s}$ 时, $C_D = 1.2 \times 10^{-3}$; 当 $U_{10} \leq 3 \text{ m}/\text{s}$ 时, $C_D = 0.0044 U_{10}^{-1.15}$ 。 $w_* = (-\beta h_{\text{mix}})^{1/3}$ 是水体失热下潜时的热对流速度 (m/s), $\beta = (g \alpha Q_{Anet}) / (\rho_0 C_{pw})$ 是表层浮力通量 ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$), 式中 $\alpha = 2.57 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$, 是热膨胀系数, $C_{pw} = 4179 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 是水的比热容; Q_{Anet} 是作用于水体表层并驱动垂向对流的有效净热通量, 由于太阳短波 (SW) 辐射具有穿透性, 仅约 55% 的 SW 被水体表层吸收^[20-21], 因此 $Q_{Anet} = 0.55SW + LW + Q_E + Q_s$ 。

3 研究结果

3.1 香溪河水体热结构特征分析

3.1.1 香溪河水文气象特征 香溪河主要的水文气象特征数据总结于图 2 中, 主要包括气温 (T_a)、表层水温 (T_{w0} , 表层往下第一个探头数据, 水深 0.25 m)、太阳短波辐射 (SW)、风速 (U_{10}) 等指标, 所有数据均为小时尺度。如图 2a 所示, 气温与表层水温在年尺度上的波动趋势基本一致, 最高值出现在 8 月中旬左右, 最低值出现在 1 月中旬, 其中表层水温的最低值出现时间滞后约 1 月。气温最高日均值约 33.2°C , 出现在 8 月 16 日, 表层水温最高日均值约 29.6°C , 同样出现在 8 月 16 日。气温在全年均表现出较强的日波动特征, 昼夜波动幅度大都是 10°C 以上, 然而表层水温的日波动幅度与季节显著相关。总体说来, 升温期 (3—8 月) 表层水温波动幅度较大, 降温期 (10—1 月) 波动幅度较小, 其中的原因除与较高的水体比热容相关外, 升温期水体分层显著, 表层水体稳定, 受气温影响强烈; 而降温期水体混合显著, 表层水体不稳定, 受中下层水体影响更强烈^[42]。降温期中下层水体热量对表层水体热量的补充也导致降温期表层水温一直高于气温, 而升温期表

层水温一直处于日均气温附近。

一年之中的太阳短波辐射强度变化随着季节比较显著,总体说来3—8月期间 SW 普遍较强,最高超过 700 W/m^2 ,且在8月强度较稳定并达到最高水平,日间6:00—18:00平均 SW 可达 311 W/m^2 。9月开始, SW 逐渐减弱,至次年1月达到全年最低水平,日间平均 SW 低至 134 W/m^2 。自2月起 SW 值开始回升,总体呈年内单循环变化特征。如图2c所示,香溪河 U_{10} 整体上不稳定,短期内会出现较大风速,甚至超过 10 m/s 。但 U_{10} 平均较小,日均风速超过 5.0 m/s 的不足15天,日均风速小于 3 m/s 的超过280天。

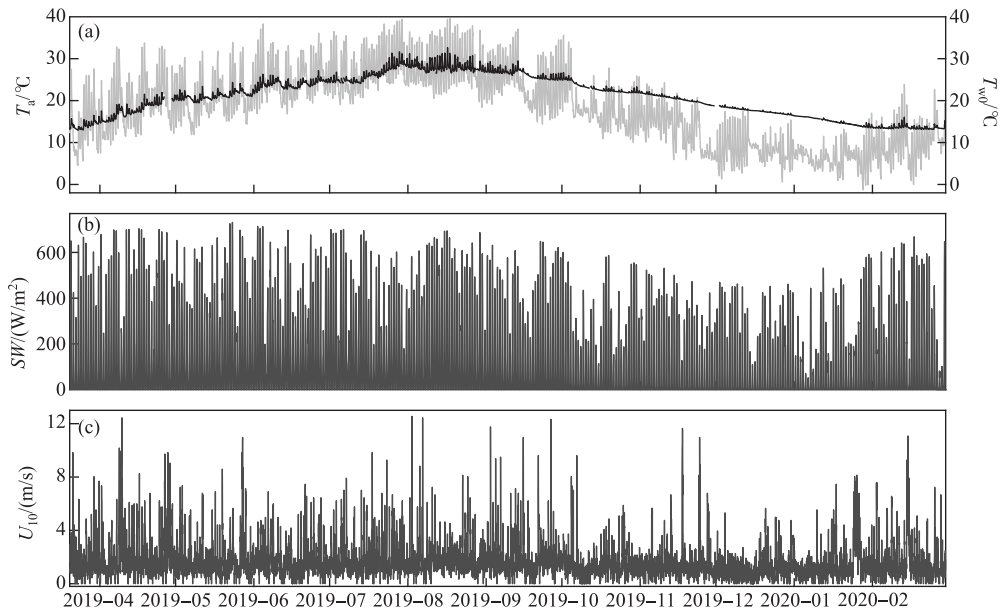


图2 香溪河年内气温与表层水温(a)、短波辐射(b)、10 m风速(c)的分布特征

Fig.2 Yearly variation of air temperature and surface water temperature (a), short wave radiation (b), wind speed (c) in Xiangxi Bay

3.1.2 香溪河水温垂向结构特征 香溪河年尺度上的水温垂向结构如图3所示,基本呈现夏季高温冬季低温的正常水温结构,底层升温滞后于表层大约一个月。根据垂向密度梯度,计算水体浮力频率平方(N^2)。从浮力频率垂向分布结构看,香溪河中下层水体绝大部分时间 N^2 值略大于0,处于弱分层状态;表层 N^2 值则在季节上和日内均存在显著的变化特征。首先在春、夏季表层 N^2 值显著大于0,特别是气温最高的7月底和8月初,该时段 N^2 值可超过 $2 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 。该时段内水体混合层深度也较小,大部分时间小于8 m,气温最高的7月底和8月初 h_{mix} 小于2 m。但在秋冬季表层甚至是中层水体出现大面积的负 N^2 值,而且该负 N^2 值呈断点式分布,表现出明显的昼夜变化特征。在垂向上, N^2 负值的波及范围可达20 m甚至是35 m,同期混合层深度值也超过40 m。也就是说香溪河冬季降温可造成约40~50 m水深范围的水体发生混合。不过混合层深度最大的12月—1月期间,近底层 N^2 值依然大于0,反而到了2020年2月后,底部 N^2 值才接近0,表明此时香溪河整个垂向水体均发生混合,从图2a中水温垂向结构图也可以看出这一点。

3.2 水气界面热通量及其驱动的湍流混合过程

根据前文分析的香溪河水体水文、气象和垂向稳定性特征,下面将根据热通量、热湍能通量等指标分析水—气界面热交换过程及其驱动的水体湍流混合过程,从气象影响下水体表层热变化的角度解释了香溪河库湾水体稳定性变化的物理原因。

3.2.1 水—气界面热通量 全年中 LW 基本为负(图4a红线),表明水体通过长波辐射释放的能量基本小于其吸收大气通过长波辐射注入的能量,即使是夏季气温高于水温的时候也是如此,其直接原因是大气的比辐射率小于水体的比辐射率。 Q_E 是指水体发生相变(如蒸发)过程中的热交换通量。在饱和水汽压差的制

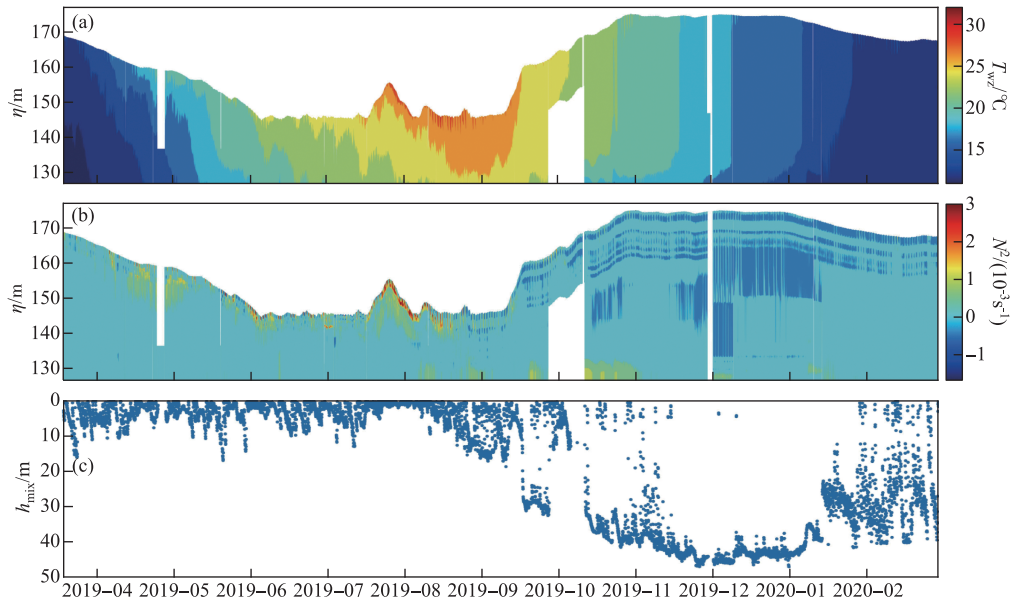


图3 香溪河年尺度上的水温垂向结构(a)、浮力频率平方 N^2 (b)和混合层深度(h_{mix}) (c)

Fig.3 Vertical structure of water temperature (a), square of buoyancy frequency(b) and mixing depth(c) on annual scale in Xiangxi Bay

约下, Q_E 几乎全年表现为失热(图 4a 黑线), 这是受到水气界面水汽压差和风速共同控制的结果^[43]。潜热通量的年波动也非常显著, 在 3—9 月高温期的值显著高于其余月份, 其中 9 月均值高达 -124.6 W/m^2 , 水体蒸发散热很强; 10 月至次年 2 月, Q_E 失热强度持续减弱。感热通量(Q_s)是水—气界面热传递强度, 直接受到水气温差的影响^[44]。当 $T_a < T_{w0}$ 时, 水体感热表现为失热, 促进水体混合, $T_a > T_{w0}$ 时, 表层水体感热表现为吸热, 起到抑制混合或加强分层的作用。一年之中 3—9 月的高温期内, Q_s 值正负交替, 日间水体吸热, 夜间水体放热; 其余月份由于水温恒高于气温, 水体全天候的感热通量一直小于 0。不过总体来说感热通量值较小, 3—7 月日间最高值不超过 180 W/m^2 , 均值仅约 10.0 W/m^2 左右; 1 月期间 Q_s 失热达到最强, 月均值为 -35.6 W/m^2 。事实上, Q_E 和 Q_s 的值除与温度相关外, 风速对二者也会起到显著影响。由于太阳 SW 全年均为正值, 且远大于式(8)中其余 3 项, 因此净辐射通量(Q_{net})日间基本为正值, 夜晚无太阳辐射时, $Q_{\text{net}} = Q_{\text{SEB}}$ 均为负值(图 4b)。

太阳辐射是水体升温的主要热源(图 4b), 感热通量在部分时段会加热水体, 但其值和贡献量都非常小。为分析不同时期水体失热的主要原因, 图 4c 中统计了 LW 、 Q_E 和 Q_s 对表面热收支(Q_{SEB})的贡献。分析结果表明, 一年中除温度极低的冬季(12—2 月), Q_E 的占比都是最大的, 即水体相变放热是香溪河水体失热的主要原因。冬季时段, 由于气温过低, 水体相变微弱, LW 所占比重略大于潜热通量。 Q_s 在气温较低(低于表层水温)的 9—2 月期间表现为放热, 在气温较高的 3—8 月表现为吸热(对 Q_{SEB} 的贡献为负), 不过 Q_s 的绝对值较小, 其贡献比最大不足 20%。

图 4d 中统计了一年之中各项热通量的时均值和标准差, 结果显示, 太阳短波辐射是该站点水域的主要热源, 贡献热量约为 144.8 W/m^2 , 需要注意的是此处计算的是平均值, 因此该值明显小于图 2b 中的短波辐射值, 因为 SW 在夜间为 0, 同时这也导致其标准差较大, 达 182.6 W/m^2 。长波辐射、潜热和感热通量均为负值, 其时均值和标准差分别约为 (-60.6 ± 31.7) 、 (-80.2 ± 50.2) 、 $(-9.8 \pm 26.3) \text{ W/m}^2$ 。感热通量由于在夏季气温较高时为正, 冬季水温较高时为负, 因此其均值较小, 标准差较大。对比各项可以看出, 该站点的净热通量均值约 -5.8 W/m^2 , 即该站点水面失热大于吸热, 其主要原因在于香溪河与长江干流存在水体和热量交换, 干流水体通过密度环流向支流库湾输送热^[45]。

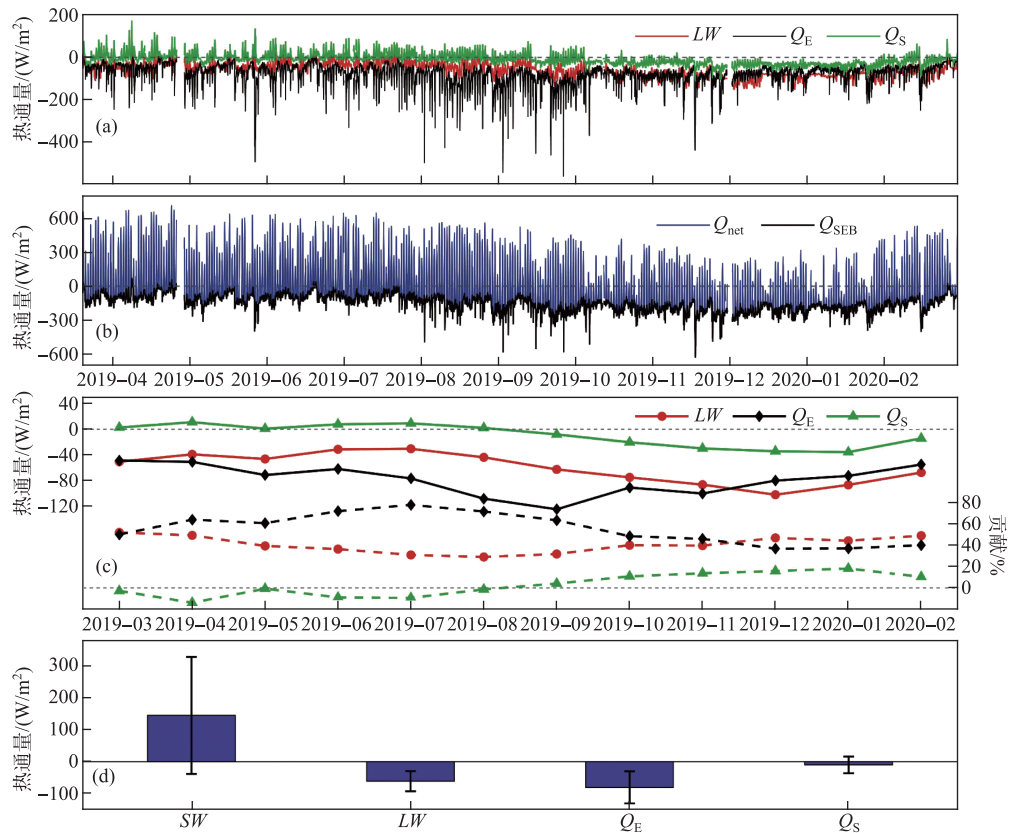


图4 水—气界面各项热通量(a)、净热通量 Q_{net} 与表面热通量收支 Q_{SEB} (b)、各项热通量贡献的年内变化特征(c)和各项热通量的平衡图(d)

Fig.4 Air-water heat flux (a), net heat flux and surface heat budget(b), contribution of each component to Q_{SEB} (c) and integrated energy budget in a year(d)

3.2.2 界面热通量驱动的湍流混合过程 热通量驱动的湍能通量($F_{qh} = 0.5w_*^3$)可拆分为短波辐射、长波辐射、潜热和感热通量四个部分(根据式(10)中 Q_{Anet} 拆分),其中后3项能够冷却表层水体,使之产生垂向湍流混合,本节中我们分别用 F_{qh}^{LW} 、 $F_{qh}^{Q_s}$ 、 $F_{qh}^{Q_e}$ 来表示各项热通量驱动的湍能通量,进而讨论各项通量在一年中不同时期的贡献大小。各项热通量驱动的湍能通量值如图5a所示,在一年内表现出显著高温期和低温期区别。从4—9月的较高水温期,表层水体比较稳定,各项湍能通量值均比较小,平均在 $10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}^3$ 量级上。然而从9—3月的低温期内,表层水体混合加强,各项湍能通量值较大,平均在 $10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}^3$ 量级上,较高温期大一个量级。其中感热通量驱动的湍能通量值明显最小,潜热通量和长波辐射驱动的湍能通量相差不大。

为进一步分析各项热通量驱动湍能强度的相对大小,图5b中显示了各项湍能通量的贡献比例,分别用 PL 、 PE 、 PS 表示长波辐射、潜热通量和感热通量驱动的湍能通量在这三者之和中的比值。结果显示,气温较高的5—11月期间潜热湍能贡献量 PE 贡献最大,最大贡献发生在8月,可达57.5%,长波辐射湍能贡献量 PL 仅次于 PE ,在35%~40%之间波动。在气温较低的12—3月期间,长波辐射湍能贡献量 PL 高于 PE ,不过 PL 的最大值仅约49.8%,发生在3月。感热湍能通量在整年内贡献都很小,在9.4%~19.1%之间波动。如果我们重点关注各项湍能通量值较大,气温较低的9—3月期间,长波辐射湍能通量和潜热湍能通量的贡献值 PL 和 PE 交替占优,其主要原因是9—12月期间,表层水温相对较高,水体蒸发较强,因此潜热通量及其驱动的湍能通量均略强于长波辐射,即 $PE > PL$; 12—3月期间当表层水温进一步降低后,表层水体蒸发减弱,水体降温的方式以长波辐射为主,因此长波辐射及其驱动的湍能通量均略强于潜热通量,即 $PE < PL$,而且这

一趋势变得更加稳定。

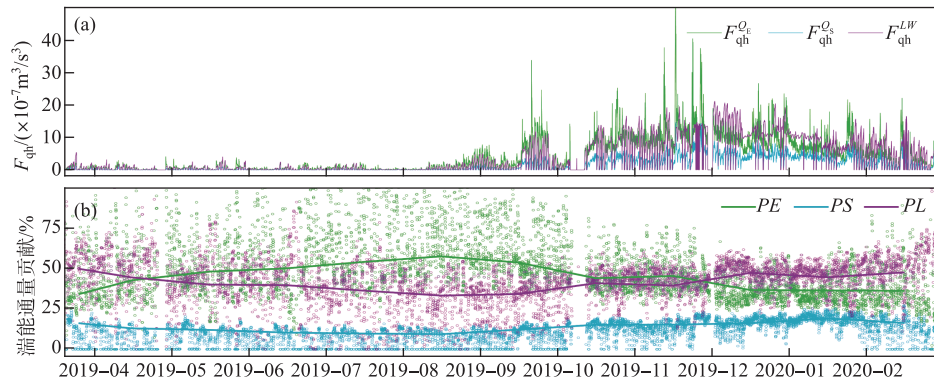


图 5 潜热、感热、长波辐射失热驱动的湍能通量(a)及其对总热湍能的贡献(b)

Fig.5 Turbulent energy (a) and contributions to F_{qh} (b) from latent heat, sensible heat and long wave radiation

3.3 风应力对热通量和水体湍流混合的影响特征

风应力对水体热量收支和水体稳定性的影响主要表现在两个方面,其一是通过不断交换水体表层以上的气体,从而增强潜热和感热通量;其二是通过机械扰动,增强近表层水体的垂向交换,加强表层水体的湍流过程。下面将通过量化不同风速梯度下潜热、感热通量分析风应力对潜热、感热通量的影响特征;通过量化热湍流与风生湍流的相对强度关系和年内变化过程,讨论风机械扰动对表层水体湍流混合过程的影响。

3.3.1 风应力对潜热、感热通量的影响 香溪河风速(U_{10})的频率分布和累计频率统计于图 6a 中,结果显示,香溪河风速大部分时间比较小,分布在 $[0, 2]$ 和 $[0, 3]$ m/s 的频率分别高达 75% 和 88% 以上,风速高于 5 m/s 的累积频率仅占约 6%,其中 U_{10} 在区间 $(1, 2]$ m/s 占比最高达 46.7%。不同风速梯度下香溪河 Q_E 和 Q_S 通量的结果如图 6b 所示,随着风速增加,潜热通量显著增强,表明潜热通量受风速的影响非常大。然而 Q_S 随着风速增加并非呈线性变化。当 $U_{10} < 3$ m/s 时,感热通量 $Q_S < 0$,这一般发生在夜间或上午风速较小的时段,此时水温一般也高于气温(图 6d)。当 $U_{10} > 3$ m/s 时,感热通量 $Q_S > 0$,这一般发生在下午风速较大的时段,此时水温一般也高于气温(图 6d)。不过,当 $U_{10} > 8$ m/s 时,感热通量值又回到 0 附近,表明这些时间段水气温度相差不大,而且此时 Q_S 值的波动范围极大,参考意义较小。

随着风速(U_{10})的增大,虽然 Q_E 会持续增强, Q_S 也表现出自己的变化趋势,但针对一年之中不同风速下二者对水体失热的总贡献值来说,较小风速情况下,即 $[0, 1]$ 和 $[1, 2]$ m/s 的贡献量最大(图 6c),因为这两种风速发生频率最高,而高风速情况发生频率偏低,维持时间短,对水体失热的贡献相对较小。需要说明的是,当 $U_{10} > 3$ m/s 时, $Q_S > 0$,这通常发生在下午气温高于水温的时段(图 6d),因此该情况下感热通量对水体失热的贡献为负。

3.3.2 风应力驱动的湍流 风应力通过机械扰动作用驱动表层水体发生湍流混合首先可直接采用摩擦速度(u_{*w})来衡量。为对比水体在界面热交换过程中发生的湍流混合,图 7a 和 7b 中显示了 w_* 和 u_{*w} 年内变化特征和二者的比值。 u_{*w} 在年尺度上总体比较稳定,主要受风速 U_{10} 的影响而发生波动,其值保持在 0.2 cm/s 附近(图 7a)。而 w_* 存在显著的昼夜变化特征,日间水体分层时, $Q_{A_{net}} > 0$,且 $\beta > 0$, 热通量是稳定分层力,不驱动垂向对流,即垂向对流速度 $w_* \sim 0$,夜间表层失热时,对流混合较强。在年尺度上 w_* 呈显著的高温期和低温期变化特征,3—8 月的高温期,水体分层较强, w_* 值较弱,平均仅约 0.6 cm/s,在很多时候甚至小于 u_{*w} (图 7a)。9 月后随着水体逐渐冷却,表层水体混合增强, w_* 值显著增强,平均超过 1.4 cm/s,并且显著高于 u_{*w} 。此时风应力驱动的湍流远不足表层水体的冷却效应。

u_{*w} 与 w_* 大小关系比值可以用来衡量风和对流对湍流产生的重要关系。Read 等^[46] 认为,当 $u_{*w}/w_* \geq 0.75$ 时,风剪切作用是 F_q 的较大来源,当 $u_{*w}/w_* < 0.75$ 时,对流主导 F_q 的产生。由图 7b 可知,3—7 月水体

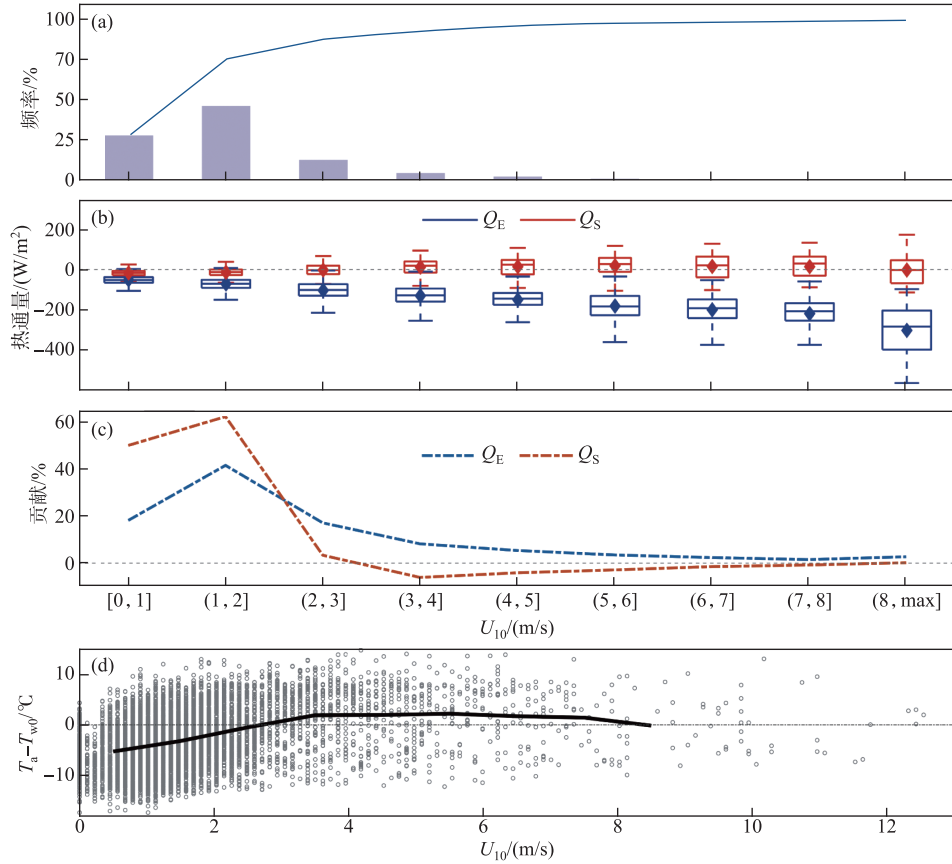


图 6 风速的频率分布 (a)、对 Q_E 和 Q_S 的影响 (b) 和各风速梯度下 Q_E 、 Q_S 对年总值的贡献 (c), 以及不同风速对应的水气温差 (d)

Fig.6 Accumulative frequency of wind speed (a), variation of Q_E and Q_S in response to wind speed (b) and their contribution in year scale (c), air-water temperature difference as a function of wind (d)

分层逐渐加强时, u_{*w}/w_* 月均值大于 0.5 且逐渐增大, 表明随着水体稳定性增强, 风对湍流的产生越来越重要, 但其比值的月均值始终不足 0.75, 只有少量的时间比值高于 0.75, 可以判断这些时间大概率发生在 w_* 较小的时候, 即水面热通量正负转换时, 垂向对流较弱, 较大的 u_{*w} 主导湍流。以上结果表明即使在水体分层较强时期, 风整体上对湍流产生不起主导作用, 但其作用明显, 不可忽视。8 月后 u_{*w}/w_* 急剧减小并在 12 月左右稳定在极小水平, 表明随着水体冷却混合的增强, 风对湍流产生的作用大大减弱, 强对流是湍流产生的绝对主导, 即在年尺度上水体强混和时期, 对流主导湍流的产生, 风的作用极其微弱。但值得注意的是, 上述结论只针对于对流存在的情况 (即 u_{*w}/w_* , 且 $w_* \neq 0$), 而当表层存在正浮力通量时, 不存在对流, 此时湍流仅由风主导驱动, 这种情况在 SW 较强的日间普遍存在。

通过风应力驱动的湍能通量 $F_{qw} = 0.5C_N^3 u_{*w}^3$ 和总湍能通量 F_q 以及二者的比值 $P_w = F_{qw}/F_q$ 可以进一步量化风对湍流产生的贡献机制。如图 7c 所示, 在年尺度上, 由于 w_* 的强烈变化, 高温分层时期的 F_q 值 ($10^{-8} \sim 10^{-7} m^3/s^3$) 要远小于低温混和时期的 F_q 值 ($10^{-7} \sim 10^{-6} m^3/s^3$)。 P_w 与 u_{*w}/w_* 在年内分布模式上有类似的趋势, 即在水体稳定分层期间, 风对总湍能有一定的贡献, 当对流存在时 (主要发生在夜间), 风生湍流仅有 18.5% 的时间贡献超过 50%, 月平均贡献在 30% 左右, 7 月分层最强时达 33.4%; 而随着水体混合增强, 风对总湍流作用迅速降低, 在水体强混和时期, 风对总湍能贡献甚至不足 3%, 几乎不起作用。需要说明的是, 由于图 7c 中考虑了 $w_* \neq 0$ 的情况, 因此 $P_w = 1$ 的情况普遍存在, 主要发生在有强太阳辐射的日间时段,

此时水体稳定分层,风驱动的湍流起完全主导作用。

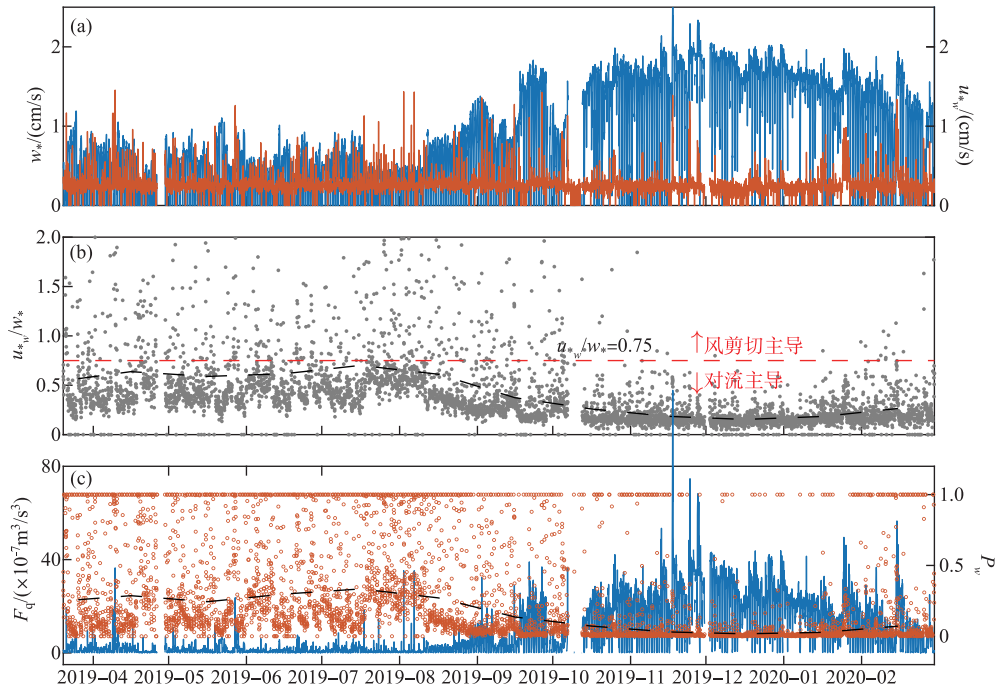


图7 冷却对流流速与摩擦速度的绝对值(a)和比值(b),以及二者驱动的湍能通量(c)

Fig.7 Value(a) and ratio(b) of w_w and u_w , and the turbulent energy induced by them(c)

4 研究结论

基于三峡水库典型支流香溪河库湾2019年3月—2020年2月期间的水温及气象数据,论文重点针对水-气界面热交换过程及其如何影响水体垂向稳定性特征和表层水体湍流混合过程,以及风应力在其中的影响机制三个方面开展研究,主要获得如下结论:

1) 香溪河水体呈显著的高温期(4—9月)分层,低温期(10—3月)混合的垂向结构特征,高温期混合层深度基本小于8 m,低温期混合层深度可超过30 m。

2) 太阳短波辐射是香溪河水体升温的主要热源,贡献的日间年均辐射量值约265 W/m²,潜热通量和长波辐射是香溪河水体失热降温的原因,其中潜热通量在气温较高的4—11月主导降温,其余月份长波辐射驱动的失热贡献略高于潜热通量;感热通量在高温期表现为吸热,低温期表现为失热,但贡献量均非常小。

3) 香溪河风速整体较低,88%的时间低于3 m/s,高于5.0 m/s的累积频率仅占约6%;风速呈典型的日波动特征,日平均风速一般在1.6 m/s左右;风应力对潜热通量有显著影响,随着风速增大,潜热驱动的水体失热持续增强,但风应力对感热通量的影响模式比较复杂,与水-气温差相关。

4) 表层水体湍能通量在高温分层期较低,在10⁻⁷ m³/s³量级上,此时风应力是表层水体湍流发育的主要动力。低温混合期提升至10⁻⁶ m³/s³量级,其中感热通量和长波辐射驱动的湍能通量贡献最大,此时风应力对表层湍流混合的贡献较小,不足10%。

5 参考文献

- [1] Ji DB, Liu DF, Yang ZJ *et al.* Hydrodynamic characteristics of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2010, **40**(1): 101-112. [纪道斌, 刘德富, 杨正健等. 三峡水库香溪河库湾水动力特性分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, **40**(1): 101-112.]

- [2] Zhang QW, Song LX, Ji DB *et al.* Relationship between water quality of Xiangxi River Reservoir and the algal blooms in non-return area in the Three Gorges Reservoir Area. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7): 3018-3026. [张庆文, 宋林旭, 纪道斌等. 香溪河库湾水质特征与非回水区水华响应关系. 中国环境科学, 2019, **39**(7): 3018-3026.]
- [3] Woolway RI, Merchant CJ. Worldwide alteration of lake mixing regimes in response to climate change. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(4): 271-276. DOI: 10.1038/s41561-019-0322-x.
- [4] Woolway RI, Jennings E, Shatwell T *et al.* Lake heatwaves under climate change. *Nature*, 2021, **589**(7842): 402-407. DOI: 10.1038/s41586-020-03119-1.
- [5] Zhang YL. Effect of climate warming on lake thermal and dissolved oxygen stratifications: A review. *Advances in Water Science*, 2015, **26**(1): 130-139. [张运林. 气候变暖对湖泊热力及溶解氧分层影响研究进展. 水科学进展, 2015, **26**(1): 130-139.]
- [6] Jane SF, Hansen GJA, Kraemer BM *et al.* Widespread deoxygenation of temperate lakes. *Nature*, 2021, **594**(7861): 66-70. DOI: 10.1038/s41586-021-03550-y.
- [7] Yang ZJ, Liu DF, Ji DB *et al.* Influence of the impounding process of the Three Gorges Reservoir up to water level 172.5 m on water eutrophication in the Xiangxi Bay. *Scientia Sinica: Technologica*, 2010, **40**(4): 358-369. [杨正健, 刘德富, 纪道斌等. 三峡水库 172.5m 蓄水过程对香溪河库湾水体富营养化的影响. 中国科学: 技术科学, 2010, **40**(4): 358-369.]
- [8] Chen YC, Zhu DJ, Li ZS. Projecting the impact of climatic warming on coldwater fish habitat in Lake Jingpo. *Scientia Sinica: Technologica*, 2015, **45**(10): 1035-1042. [陈永灿, 朱德军, 李钟顺. 气候变暖条件下镜泊湖冷水性鱼类栖息地的评价. 中国科学: 技术科学, 2015, **45**(10): 1035-1042.]
- [9] Sun SF, Yan JF, Xia N *et al.* Study on heat transfer between land surface and atmosphere. *Science in China: Series G: Physics, Mechanics & Astronomy*, 2008, **38**(6): 704-713. [孙菽芬, 颜金凤, 夏南等. 陆面水体与大气之间的热传输研究. 中国科学: G 辑: 物理学 力学 天文学, 2008, **38**(6): 704-713.]
- [10] Augusto-Silva PB, MacIntyre S, de Moraes Rudorff C *et al.* Stratification and mixing in large floodplain lakes along the lower Amazon River. *Journal of Great Lakes Research*, 2019, **45**(1): 61-72. DOI: 10.1016/j.jglr.2018.11.001.
- [11] MacIntyre S, Romero JR, Silsbe GM *et al.* Stratification and horizontal exchange in Lake Victoria, East Africa. *Limnology and Oceanography*, 2014, **59**(6): 1805-1838. DOI: 10.4319/lo.2014.59.6.1805.
- [12] Xie QK, Liu ZW, Chen YC *et al.* Observation and analysis of diurnal water temperature variation in Xiluodu Reservoir. *Advances in Water Science*, 2018, **29**(4): 523-536. [谢奇珂, 刘昭伟, 陈永灿等. 溪洛渡水库水温日变化的测量与分析. 水科学进展, 2018, **29**(4): 523-536.]
- [13] Branco BF, Torgersen T. Predicting the onset of thermal stratification in shallow inland waterbodies. *Aquatic Sciences*, 2009, **71**(1): 65-79. DOI: 10.1007/s00027-009-8063-3.
- [14] Abdulla CP, Alsaafani MA, Alraddadi TM *et al.* Mixed layer depth variability in the Red Sea. *Ocean Science*, 2018, **14**(4): 563-573. DOI: 10.5194/os-14-563-2018.
- [15] Yang ZY, Qian ML, Ji DB *et al.* Analysis on the vertical mixing structure of Xiangxi River during early winter. *China Environmental Science*, 2021, **41**(6): 2862-2870. [杨忠勇, 钱门亮, 纪道斌等. 香溪河初冬降温过程中垂向混合结构特征分析. 中国环境科学, 2021, **41**(6): 2862-2870.]
- [16] Su RMZ, Ma WQ, Ma YM *et al.* Investigation of thermal stratification and mixed layer depth in La'ang Co in the Tibetan Plateau. *J Lake Sci*, 2021, **33**(2): 550-560. DOI:10.18307/2021.0220. [苏荣明珠, 马伟强, 马耀明等. 青藏高原拉昂错热力分层和混合层深度变化特征观测. 湖泊科学, 2021, **33**(2): 550-560.]
- [17] Imberger J. The diurnal mixed layer1. *Limnology and Oceanography*, 1985, **30**(4): 737-770. DOI: 10.4319/lo.1985.30.4.0737.
- [18] Xu CS, Song XZ, Qi YQ. On the mechanisms behind diurnal variations in air-sea turbulent heat fluxes under different boundary layer stability. *Journal of Tropical Oceanography*, 2021, **40**(3): 57-68. [徐常三, 宋翔洲, 齐义泉. 不同边界层稳定性下海气湍流热通量日变化的前沿问题探讨. 热带海洋学报, 2021, **40**(3): 57-68.]
- [19] Czikowsky MJ, MacIntyre S, Tedford EW *et al.* Effects of wind and buoyancy on carbon dioxide distribution and air-water flux of a stratified temperate lake. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, **123**(8): 2305-2322. DOI: 10.1029/2017JG004209.
- [20] Yang PP, Xing ZK, Fong DA *et al.* Observations of vertical eddy diffusivities in a shallow tropical reservoir. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2015, **9**(3): 441-451. DOI: 10.1016/j.jher.2014.09.004.
- [21] Saber A, James DE, Hayes DF. Effects of seasonal fluctuations of surface heat flux and wind stress on mixing and vertical diffusivity of water column in deep lakes. *Advances in Water Resources*, 2018, **119**: 150-163. DOI: 10.1016/j.advwatres.2018.07.006.
- [22] Saber A, James DE, Hannoun IA. Effects of lake water level fluctuation due to drought and extreme winter precipitation on mixing and water quality of an alpine lake, case study: Lake Arrowhead, California. *Science of the Total Environment*, 2020, **714**: 136762. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136762.
- [23] Qin ZX, Gao ZW, Li J *et al.* Prediction of critical wind speed of sudden mixing in bay reservoir. *Water Resources Protection*, 2018, **34**(6): 76-81, 87. [秦志新, 高增文, 李静等. 海湾水库突然混合临界风速的预测. 水资源保护, 2018, **34**(6): 76-81, 87.]

- [24] Yang PP, Fong DA, Lo EYM *et al.* Vertical mixing in a shallow tropical reservoir. *Limnology*, 2019, **20**(3): 279-296. DOI: 10.1007/s10201-019-00577-z.
- [25] Wen G, Wang S, Cao RH *et al.* A review of the formation causes, ecological risks and water quality responses of metalimnetic oxygen minimum in lakes and reservoirs. *J Lake Sci*, 2022, **34**(3): 711-726. DOI:10.18307/2022.0301.[文刚, 王硕, 曹瑞华等. 湖库温跃层溶解氧最小值的形成原因、衍生的生态风险及控制研究进展. 湖泊科学, 2022, **34**(3): 711-726.]
- [26] Yang ZJ, Xu P, Liu DF *et al.* Hydrodynamic mechanisms underlying periodic algal blooms in the tributary bay of a subtropical reservoir. *Ecological Engineering*, 2018, **120**: 6-13. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2018.05.003.
- [27] Liu DF, Yang ZJ, Ji DB *et al.* A review on the mechanism and its controlling methods of the algal blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **47**(3): 443-454. [刘德富, 杨正健, 纪道斌等. 三峡水库支流库湾水华机理及其调控技术研究进展. 水利学报, 2016, **47**(3): 443-454.]
- [28] Jin JX, Wells SA, Liu DF *et al.* Effects of water level fluctuation on thermal stratification in a typical tributary bay of Three Gorges Reservoir, China. *Peer J*, 2019, **7**: e6925. DOI: 10.7717/peerj.6925.
- [29] Su QQ, Liu DF, Liu LB *et al.* Analysis of the nutrient supply of tributaries in the Three Gorges Reservoir during impounding period. *China Environmental Science*, 2018, **38**(10): 3925-3932. [苏青青, 刘德富, 刘绿波等. 三峡水库蓄水期支流水体营养盐来源估算. 中国环境科学, 2018, **38**(10): 3925-3932.]
- [30] Long LH, Ji DB, Yang ZY *et al.* Tributary oscillations generated by diurnal discharge regulation in Three Gorges Reservoir. *Environmental Research Letters*, 2020, **15**(8): 084011. DOI: 10.1088/1748-9326/ab8d80.
- [31] Xu H, Long LH, Ji DB *et al.* Study on characteristic of the flow oscillation in release and filling periods in the Xiangxi tributary of Three Gorges Reservoir. *Advances in Water Science*, 2022, **33**(2): 264-273. [徐慧, 龙良红, 纪道斌等. 三峡水库泄水-蓄水过程香溪河库湾水流振荡特性. 水科学进展, 2022, **33**(2): 264-273.]
- [32] Zhao XX, Ji DB, Long LH *et al.* Effect of water level fluctuation in flood season on thermal stratification and water quality in Xiangxi Bay. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, **40**(2): 31-41. [赵星星, 纪道斌, 龙良红等. 汛期水位波动对香溪河库湾热分层特性及水质的影响. 水力发电学报, 2021, **40**(2): 31-41.]
- [33] Millero FJ, Poisson A. International one-atmosphere equation of state of seawater. *Deep Sea Research Part A Oceanographic Research Papers*, 1981, **28**(6): 625-629. DOI: 10.1016/0198-0149(81)90122-9.
- [34] Gray E, Mackay EB, Elliott JA *et al.* Wide-spread inconsistency in estimation of lake mixed depth impacts interpretation of limnological processes. *Water Research*, 2020, **168**: 115136. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115136.
- [35] Amoroch J, DeVries JJ. A new evaluation of the wind stress coefficient over water surfaces. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1980, **85**(C1): 433-442. DOI: 10.1029/JC085iC01p00433.
- [36] Xiao W, Liu SD, Wang W *et al.* Transfer coefficients of momentum, heat and water vapour in the atmospheric surface layer of a large fresh-water lake. *Boundary-Layer Meteorology*, 2013, **148**(3): 479-494. DOI: 10.1007/s10546-013-9827-9.
- [37] Henderson-Sellers B. Calculating the surface energy balance for lake and reservoir modeling: A review. *Reviews of Geophysics*, 1986, **24**(3): 625-649. DOI: 10.1029/RG024i003p00625.
- [38] 邓云. 大型深水库的水温预测研究[学位论文]. 成都: 四川大学, 2003.
- [39] Gill AE. *Atmosphere—Ocean Dynamics*. New York: Academic Press, 1982.
- [40] Liu YB, Qiu GY, Zhang HS *et al.* Shifting from homogeneous to heterogeneous surfaces in estimating terrestrial evapotranspiration: Review and perspectives. *Science China: Earth Sciences*, 2022, **65**(2): 197-214. [刘元波, 邱国玉, 张宏昇等. 陆域蒸散的测算理论方法: 回顾与展望. 中国科学: 地球科学, 2022, **65**(2): 197-214.]
- [41] Wüest A, Lorke A. Small-scale hydrodynamics in lakes. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2003, **35**: 373-412. DOI: 10.1146/annurev.fluid.35.101101.161220.
- [42] Zhao XS, Wang SG, Li M *et al.* Energy flux measurements and environmental controls in summer over the Poyang Lake, China. *J Lake Sci*, 2014, **26**(6): 955-962. DOI:10.18307/2014.0619.[赵晓松, 王仕刚, 李梅等. 鄱阳湖夏季水热通量特征及环境要素影响分析. 湖泊科学, 2014, **26**(6): 955-962.]
- [43] Wang DD, Wang W, Liu SD *et al.* Characteristics of modelling hourly water surface evaporation in Lake Taihu and comparison of simulation results by three models. *J Lake Sci*, 2017, **29**(6): 1538-1550. DOI:10.18307/2017.0626.[王丹丹, 王伟, 刘寿东等. 太湖小时尺度水面蒸发特征及3种模型模拟效果对比. 湖泊科学, 2017, **29**(6): 1538-1550.]
- [44] Liu HZ, Feng JW, Sun JH *et al.* Eddy covariance measurements of water vapor and CO₂ fluxes above the Erhai Lake. *Scientia Sinica: Terrae*, 2014, **44**(11): 2527-2539. [刘辉志, 冯健武, 孙绩华等. 洱海湖气界面水汽和二氧化碳通量交换特征. 中国科学: 地球科学, 2014, **44**(11): 2527-2539.]
- [45] Zhao XX, Yang ZY, Ji DB *et al.* Meteorological forcing and hydrological connectivity together control the thermal regime of Xiangxi Bay, a tributary of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydrology*, 2022, **612**: 128276. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128276.
- [46] Read JS, Hamilton DP, Desai AR *et al.* Lake-size dependency of wind shear and convection as controls on gas exchange. *Geophysical Research Letters*, 2012, **39**(9): L09405. DOI: 10.1029/2012GL051886.