

大型浅水湖泊水体对流混合速率分析*

肖启涛^{1**}, 段洪涛¹, 张 弥², 刘寿东², 胡正华², 李旭辉²

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008)

(2: 南京信息工程大学大气环境中心, 南京 210044)

摘 要: 湖泊水体的对流混合是最基本的物理过程, 其能显著影响湖泊生态系统温室气体等循环, 但浅水湖泊水体对流混合的研究鲜有报道. 本研究基于太湖(面积 2400 km², 平均水深 1.9 m)中尺度通量网的原位、高频、连续和多点的观测数据, 分析该大型浅水湖泊水体对流混合速率 w^* 的时空特征. 结果表明太湖水体 w^* 的均值为 2.49 mm/s, 因太湖的风速、水温和辐射等物理参数无空间变化, w^* 也无明显的空间变化. 但是研究表明 w^* 呈现显著的昼夜变化和季节变化, 且昼夜变化幅度强于季节变化. 总体上夜间 w^* 是白天的 4 倍多, 冬季 w^* (均值 1.79 mm/s) 明显低于春季 (均值 2.42 mm/s)、夏季 (均值 2.91 mm/s) 和秋季 (均值 2.82 mm/s). 太湖 w^* 主要受风速和能量收支影响, 白天风速是主要驱动因子, 夜晚能量收支是主要驱动因子.

关键词: 对流混合; 浅水湖泊; 昼夜变化; 季节变化; 空间变化; 太湖

Waterside convective velocity in a large and shallow lake: A case of Lake Taihu*

XIAO Qitao^{1**}, DUAN Hongtao¹, ZHANG Mi², LIU Shoudong², HU Zhenghua² & LI Xuhui²

(1: Key Laboratory of Watershed Geographic Science, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(2: Yale-UIST Center on Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, P.R.China)

Abstract: Waterside convective controlling aquatic greenhouse gases cycle is a common physical process in lakes. However, the physical process was less studied in shallow lakes. This study investigated the waterside convective strength, which was expressed with a waterside convective velocity scale (w^*), in a large (area 2400 km²) and shallow (mean depth 1.9 m) lake based on *in-situ* high-frequency monitoring data. Results showed that the w^* with an annual mean value of 2.49 mm/s was relatively uniform in space. However, the w^* had an obvious diurnal variation, the value in nighttime was about four times higher than that in daytime. Meanwhile, the w^* varied seasonally, the peak value generally occurred in summer and lowest in winter. It should be noted that the diurnal variation of w^* was more significant compared to the seasonal variation. Our results also demonstrated that daytime w^* was driven by wind speed, and nighttime w^* was driven by energy budget.

Keywords: Waterside convective; shallow lake; diurnal variation; seasonal variation; spatial variation; Lake Taihu

大气温室气体(CO₂、CH₄和N₂O)浓度的持续升高导致全球出现以变暖为主的全球变化. 内陆湖泊等水体对气候变化特别敏感, 同时也是全球温室气体循环中的关键部分^[1-3]. 但目前评估水-气界面温室气体交换量存在很大的不确定性, 主要是由于水体温室气体的产生和排放是一个动态的、复杂的生物地球化学物理过程, 影响因子较多且存在较大的变化^[1,4]. 水体的上下对流混合是湖泊生态系统最基本的物理过程, 其

* 2019-11-19 收稿; 2020-01-06 收修稿稿.

国家自然科学基金项目(41801093)、教育部长江学者和创新团队发展计划项目(PCSIRT)、中国科学院南京地理与湖泊研究所交叉创新团队项目(NIGLAS2016TD01)和中国科学院南京地理与湖泊研究所引进人才启动项目(NIGLAS2019QD007)联合资助.

** 通信作者; E-mail: qitaotao@163.com.

能改变水体溶解温室气体浓度在垂直方向上的分布,进而影响湖泊生态系统与大气之间的温室气体交换量^[5-6]。研究表明水体对流混合的增加能够把大量富含温室气体的水体从水底输送到水表,显著增加湖泊水—气界面温室气体排放量^[7-9]。例如 Godwin 等^[10]研究发现水体在对流混流状态下其温室气体排放量要比无对流混合时要高出一个数量级。此外,湖—气模型研究表明,在考虑水体对流混合后,模型模拟的数值与观测值更加吻合^[11]。因此系统研究和分析湖泊水体对流混合速率的变化特征有助于理解湖泊温室气体等循环过程,减少湖泊温室气体收支估算的不确定性。

湖泊水体的对流混合驱动着生态系统的各种理化过程,例如水体对流混合也是引起溶解氧分布和营养盐释放等的关键动力因子^[12-13]。一般而言,湖泊水体因吸收热量出现稳定层结,水体上下对流混合较弱;湖泊水体输出热量引起上下层水体对流混合。对于深水湖泊,在秋、冬季节因辐射减弱水体开始向大气释放热量,出现对流混合^[14-16]。但浅水湖泊由于水体储热较小,湖气之间的热交换在日尺度上变化较大^[16-17],因此其水体对流混合可能存在相似的特征。深水湖库水体层结及其对流混合状态得到广泛关注^[13-15],但浅水湖泊(水深小于 3 m)水体对流混合状态的研究鲜有涉及。相关研究表明不同深度的湖泊,其水体对流混合的产生和维持机制不同^[12,18]。考虑到在全球和区域尺度上,浅水湖泊均分布较广泛^[19],例如在美国明尼苏达州 3254 个湖泊中,有 71% 湖泊是浅水湖泊^[20]。因此研究浅水湖泊水体对流混合状态不仅有助于理解湖泊的物理变化过程,同时也能加深我们对湖泊温室气体和其他理化参数(溶解氧和营养盐等)变化的认识。

太湖是典型的大型(面积 2400 km²)浅水(平均水深 1.9 m)富营养化湖泊,也是我国第三大淡水湖泊。受人为活动的影响,太湖污染物负荷输入水平较高,其温室气体动态变化已成为相关研究中所关注的热点问题^[21-24]。另外太湖北部蓝藻暴发频频出现,水质较差^[24-26],但东部湖区有大量沉水植被,水质较好^[27-28]。水质可影响湖体消光系数,改变太阳辐射在水体中的衰减,进而影响水体热力分层和对流混合等过程^[29]。本研究基于太湖中尺度通量网的原位、高频、连续和多点的观测数据^[21],明确太湖水体对流混合速率的时空特征,并探讨其影响因子,以期为今后浅水湖泊水—气界面温室气体循环等相关研究提供参考和借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究站点和观测仪器

本研究中的数据来自于太湖中尺度通量网的 5 个站点(图 1):平台山(PTS, 31.2323°N, 120.1086°E)、避风港(BFG, 31.1685°N, 120.3972°E)、大浦口(DPK, 31.2661°N, 119.9312°E)、小雷山(XLS, 30.9972°N, 120.1344°E)和梅梁湾(MLW, 31.4197°N, 120.2139°E)。5 个观测站点分别位于太湖不同的生物分区,有不同的富营养化类型、植被类型区和风浪区^[21,30]:PTS 站点位于开阔的湖心区,受人为活动影响较小;BFG 站点位于东部草型湖区,该区有大量的沉水植被;DPK 站点位于西北部的藻型湖区,该区严重富营养化;XLS 站点位于藻型和草型湖区过渡区;MLW 站点位于富营养化的北部湖岸区。5 个观测站点的平均水深分别为 2.8 m (PTS)、1.7 m (BFG)、2.5 m (DPK)、2.0 m (XLS)和 1.8 m (MLW)。

5 个观测平台主要的观测仪器有^[21,30]:(1) 涡度相关系统,由开放式红外气体分析仪(PTS/BFG/XLS/: EC150, Campbell Scientific Inc.; DPK/MLW: Licor 7500, LI-COR Inc.)和三维超声风速计(CSAT3, Campbell Scientific Inc.)组成,分别用于测量水汽/CO₂密度以及三维风速/超声虚温,采样频率为 10 Hz,由数据采集器(CR3000, Campbell Scientific Inc.)在线计算成半小时平均湍流通量(主要有感热通量和潜热通量等);(2) 四分量净辐射观测系统(CNR4, Kipp & Zonen B.V.),借助横臂延伸在观测平台外,观测向下和向上短波辐射、向下和向上长波辐射;(3) 小气候观测系统,由温湿度传感器(HMP155A, Vaisala Inc.)和风速风向传感器(05103, R.M. Young Company)组成,主要用于测量气温、湿度、风速等气象要素;(4) 水温梯度观测系统,由 5 个高灵敏温度传感器组成(109-L, Campbell Scientific Inc.),分别用于水下 20、50、100、150 cm 深度处水温观测和底泥温度观测;(5) 自动翻筒式雨量计(TE525-L, Campbell Scientific Inc.),用于降雨量观测。

1.2 研究方法

1.2.1 数据处理 使用 5 个站点 2014 年全年的观测数据,主要有:涡度通量数据(感热通量和潜热通量)、小气候观测的气温和风速数据、四分量净辐射仪观测的辐射数据以及水温梯度系统观测的数据。涡度通量数

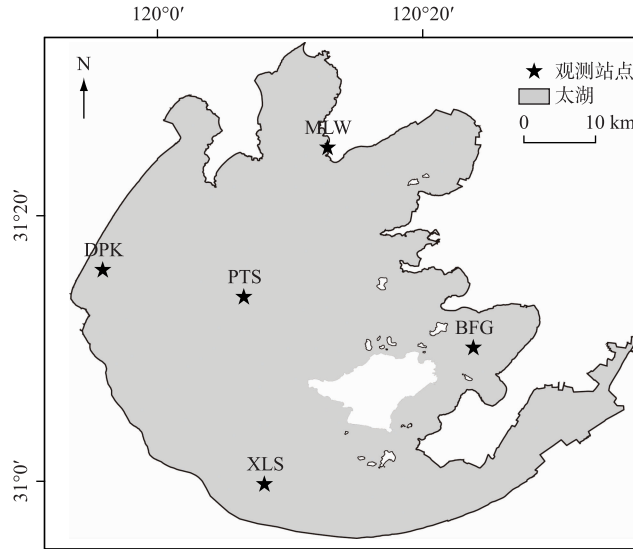


图1 太湖5个观测站点的示意

Fig.1 Distribution of the five study sites in Lake Taihu

据的后处理主要有:降水时刻野点的剔除、两次坐标旋转、超声虚温校正和空气密度脉动影响(WPL)校正. 另外剔除四分量辐射数据为负值的异常值,通过向下和向上短波辐射、向下和向上长波辐射的观测计算得到净辐射,基于向上长波辐射的观测计算得到水表温度. 根据水面粗糙度观测值和风速仪的观测高度,将参考高度处的风速计算成10 m高度处的风速^[17,22]. 数据处理的流程参考文献[31-32].

1.2.2 对流混合速率计算 水体对流混合速率 w^* 的计算公式为^[8,16]:

$$w^* = (\beta \cdot z)^{1/3} \quad (1)$$

式中, β 为水体的浮力通量(m^2/s^3); z 为混合层深度(m). 混合层的主要特征是水温或者密度随深度均匀分布,不同的研究有不同混合层的估算方法^[18],本研究根据水温梯度的观测,由Herb等^[33]确定的混合层深度的最优标准温差(0.4°C)得到,即以水面温度为初始参考温度,当某层水温与初始参考温度的差值小于标准温差时,则判定这两层为温度均匀区,详细的计算流程可参考赵巧华等著作^[12].

水体的浮力通量 β 计算公式为^[34-35]:

$$\beta = -\frac{g \cdot a \cdot Q_e}{\rho_w \cdot C_p} \quad (2)$$

式中, g 为重力加速度(m/s^2); a 为 $t^\circ\text{C}$ 时水体热力扩张系数($a = 1.6 \times 10^{-5} + 9.6 \times 10^{-6} t$); C_p 为水体定压比热容($C_p = 4200 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$); ρ_w 为水体密度(kg/m^3); Q_e 为水表热通量(W/m^2),其计算公式为:

$$Q_e = R_n - H - \lambda E \quad (3)$$

式中, R_n 为净辐射(W/m^2),由四分量净辐射观测系统观测的向下和向上短波辐射、向下和向上长波辐射计算得到; H 为感热通量(W/m^2), λE 为潜热通量(W/m^2),均可由涡度相关系统直接观测得到. 根据MacIntyre等^[5]和Read等^[36]的研究,当 $Q_e < 0$ 为负值时,湖泊加热大气时,水体输出能量出现对流混合;当 $Q_e > 0$ 为正值时,大气加热湖泊,水体稳定层结.

1.3 数据分析

观测数据的时间步长均为半小时,根据分析需要计算成日均值、月均值和年均值等. 采用SPSS软件统计分析观测数据以及计算得出的数据,根据One-way ANOVA分析比较不同数据组的差异,使用LSD (Least-significant difference)方法检验其差异是否显著($P = 0.05$),采用Spearman相关分析数据间的线性相关性.

2 结果与分析

2.1 基本(微)气象要素时空变化

热量和风力驱动着湖泊水体的上下对流混合. 基于太湖 5 个观测通量站点的连续高频原位观测, 量化太湖净辐射、水表热通量、湖面温度与气温差值($T_s - T_a$)以及风速的日变化特征(图 2). 由图可知, 5 个站点的净辐射和水表热通量均呈现显著的单峰型日变化表征, 其变化范围分别为 $45 \sim 450$ 和 $-110 \sim 373 \text{ W/m}^2$, 峰值均出现在 11:00—13:00 之间. 夜间因没有太阳辐射以及向上长波大于大气逆辐射, 净辐射为负值, 且水表热通量也为负值, 表明水体向外输出能量, 白天净辐射为正值, 水体吸收热量. 除 MLW 站点外, $T_s - T_a$ 在其余 4 个站点(PTS、BFG、DPK 和 XLS)均呈现出相同的变化特征, 即峰值出现正午 12:00 左右, 谷值出现在下午 19:00 左右. MLW 站点位于岸边, 其气温变化曲线与陆地气温接近, 要提前于水体上方气温变化^[37], 进而可能导致 MLW 站点的 $T_s - T_a$ 与其余 4 个湖泊站点有相位差. PTS 站点和 MLW 站点的观测数据表明, 风速具有显著日变化特征, 但变化趋势相反: MLW 站点的风速在夜间低于白天, 但 PTS 站点的风速在夜间高于白天.

观测数据表明太湖 5 个站点间的净辐射无显著的空间差异($P > 0.05$), 其年均值分别为 91.36 W/m^2 (PTS)、 88.86 W/m^2 (BFG)、 87.91 W/m^2 (DPK)、 85.53 W/m^2 (XLS) 和 85.81 W/m^2 (MLW). 与净辐射类似, 太湖水表热通量(图 2b)在 5 个观测站点之间也无显著的空间差异($P > 0.05$). MLW 站点因受周边陆地影响较多, 其风速要明显偏低(图 1d). 太湖 5 个站点 10 m 高度处风速的年均值分别为 4.80 m/s (PTS)、 4.53 m/s (BFG)、 4.50 m/s (DPK)、 4.47 m/s (XLS) 和 2.97 m/s (MLW), 除 MLW 站点风速较低外, 其余站点的风速也无显著的空间变化($P > 0.05$). 此外, 观测数据也表明太湖 5 个站点的水温也无明显的空间变化($P > 0.05$), 其年均值分别为 17.54°C (PTS)、 17.77°C (BFG)、 17.32°C (DPK)、 17.63°C (XLS) 和 17.99°C (MLW).

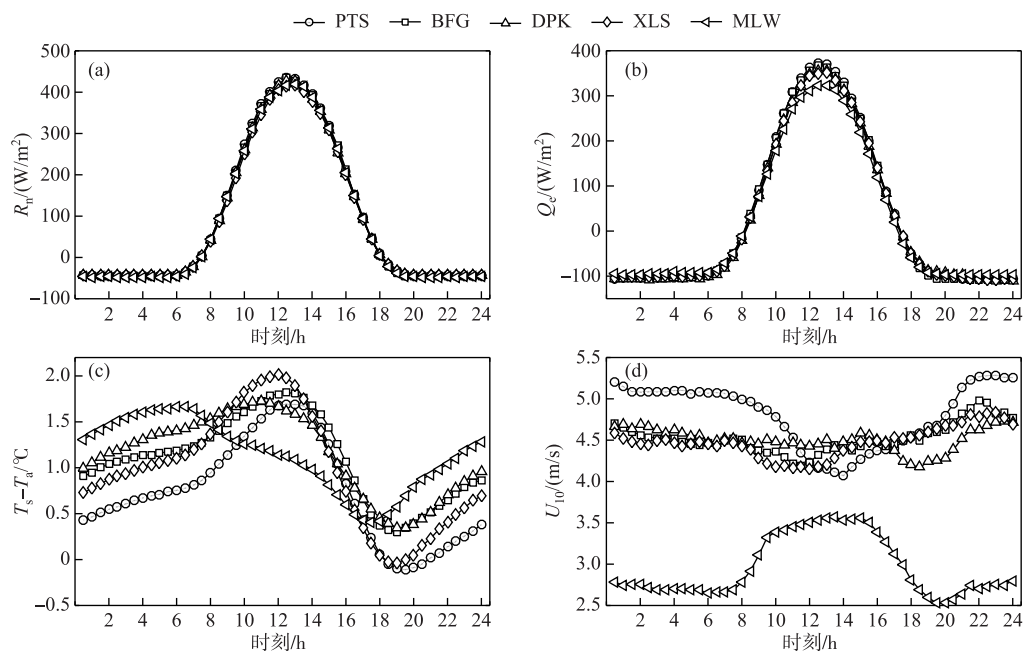


图 2 观测期间 5 个站点净辐射(R_n , a)、水表热通量(Q_e , b)、湖面温度与气温差值($T_s - T_a$, c)以及风速(U_{10} , d)的昼夜变化

Fig.2 Diurnal variation of R_n (a), Q_e (b), the temperature difference between lake and air ($T_s - T_a$, c), and wind speed (d) during measurement period at the five sites

图3给出了太湖5个站点净辐射、湖面温度、 $T_s - T_a$ 以及风速的季节变化. 由图可知,不同月份的净辐射、湖面温度、 $T_s - T_a$ 在5个站点之间的大小和变化特征高度一致. 季节变化特征以PTS站点为例,净辐射在夏季最高,春季和秋季次之,净辐射在春夏秋冬四季的均值分别为119.56、124.28、79.88和40.54 W/m^2 . 湖水温度与净辐射的季节变化特征类似,其季节平均值分别16.94 $^{\circ}\text{C}$ (春季)、26.88 $^{\circ}\text{C}$ (夏季)、20.15 $^{\circ}\text{C}$ (秋季)和6.35 $^{\circ}\text{C}$ (冬季). 整体上, $T_s - T_a$ 也呈现出季节变化:夏季最高(平均值为0.96 $^{\circ}\text{C}$),春季(平均值为0.61 $^{\circ}\text{C}$)和秋季次之(平均值为0.85 $^{\circ}\text{C}$),冬季最低(平均值为0.52 $^{\circ}\text{C}$). 除MLW站点的风速较低外,其余观测站点风速的季节变化特征均不明显. 以PTS站点为例,其10 m高度处风速在春夏秋冬四季的均值分别为5.09、4.53、4.89和4.70 m/s . 另外MLW站点的10 m高度处风速在春夏秋冬四季的均值分别为3.19、2.58、2.92和3.18 m/s . 太湖年均风速为4.58 m/s ,在季节间无显著的差异($P > 0.05$).

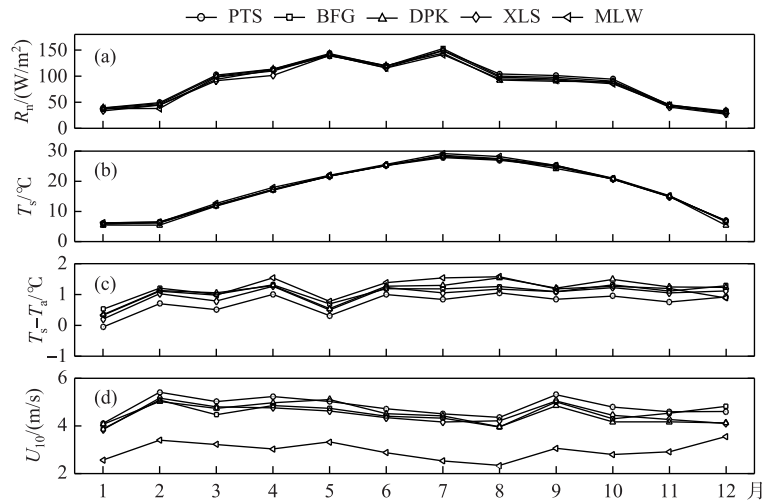


图3 观测期间5个站点净辐射 R_n (a)、湖面温度 T_s (b)、湖面温度与气温的差值 $T_s - T_a$ (c) 以及风速 U_{10} (d)的季节变化

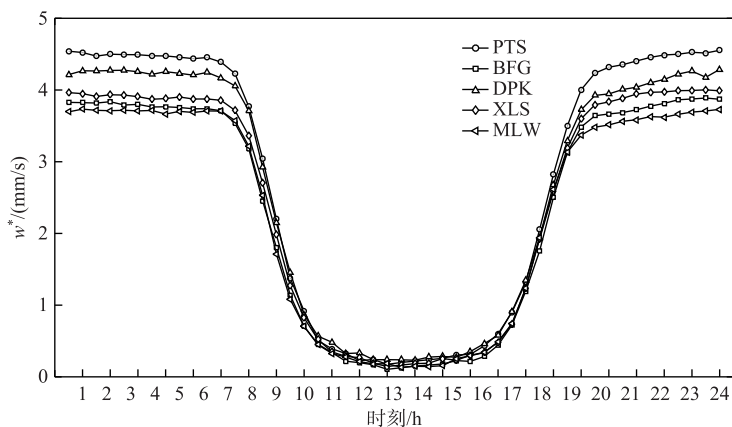
Fig.3 Seasonal variation of R_n (a), T_s (b), the temperature difference between lake and air $T_s - T_a$ (c), and wind speed (d) during measurement period at the five sites

2.2 不同站点 w^* 的日变化

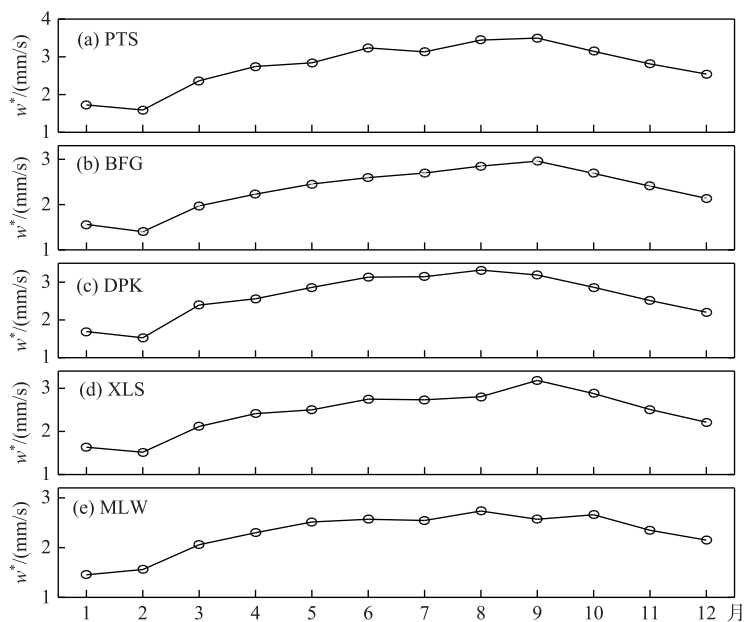
由图4可知,太湖水体的 w^* 具有显著的昼夜变化特征,且5个站点的 w^* 呈现出相同的变化趋势. 以PTS站点为例,夜间(18:00至次日6:00)水体 w^* 值是白天(6:00—18:00)的4倍多. 早上6:00和下午16:00是 w^* 变化的拐点时间,6:00过后,水体开始接收辐射,吸收热量, w^* 开始显著降低,到11:00左右,此时净辐射和水表热通量达到峰值时, w^* 达到最低值,并保持较稳定的趋势,但16:00过后,净辐射和水表热通量开始转向负值,水体开始“丢失”热量, w^* 开始显著升高,到19:00达到较高水平,并基本保持不变. 观测数据表明,5个观测站点间的 w^* 均值在白天差异不明显($P > 0.05$),但在夜间具有明显的差异($P < 0.01$). 白天 w^* 的均值分别为1.10 mm/s (PTS)、0.91 mm/s (BFG)、1.09 mm/s (DPK)、0.99 mm/s (XLS)和0.94 mm/s (MLW),对应夜间的均值分别为4.43、3.76、4.16、3.90和3.65 mm/s . 将5个观测站点的数据进行平均,可得到太湖白天时刻 w^* 均值为1.00 mm/s ,夜间均值为3.98 mm/s .

2.3 不同站点 w^* 的季节变化

由图5可知,5个站点的 w^* 呈现相同的季节变化特征. 在月均尺度上,PTS站点的 w^* 变化范围为1.59~3.50 mm/s , BFG站点的 w^* 变化范围为1.40~2.96 mm/s , DPK站点的 w^* 变化范围为1.53~3.32 mm/s , XLS站点的 w^* 变化范围为1.52~3.18 mm/s , MLW站点的 w^* 变化范围为1.45~2.74 mm/s . 其中,PTS、BFG和XLS站点月均 w^* 的最高值出现在9月,DPK和MLW站点的月均 w^* 的最高值出现在8月,除MLW站点外,其他站点的月均 w^* 的最低值均出现在2月. 总体上, w^* 在夏季最高,冬季最低. 其中,PTS站点的 w^* 在春夏

图 4 太湖 5 个观测站点 w^* 的昼夜变化Fig.4 Diurnal variation of w^* at the five sites in Lake Taihu

秋冬四季的均值分别为 2.65、3.27、3.15 和 1.95 mm/s; BFG 站点的 w^* 在春夏秋冬四季的均值分别为 2.21、2.71、2.68 和 1.70 mm/s; DPK 站点的 w^* 在春夏秋冬四季的均值分别为 2.60、3.20、2.85 和 1.80 mm/s; XLS 站点的 w^* 在春夏秋冬四季的均值分别为 2.34、2.76、2.85 和 1.78 mm/s; MLW 站点的 w^* 在春夏秋冬四季的均值分别为 2.29、2.61、2.52 和 1.72 mm/s. 将 5 个观测点位的数据进行平均,可得到太湖整体的 w^* 值为 2.49 mm/s, 其春夏秋冬四季的平均值分别为 2.42、2.91、2.82 和 1.79 mm/s. 冬季太湖 w^* 值显著 ($P < 0.05$) 低于其他三季.

图 5 太湖 5 个站点 w^* 的季节变化特征Fig.5 Seasonal variation of w^* at five sites in Lake Taihu

2.4 w^* 的影响因子

本研究结果表明,太湖水体 w^* 与风速以及 $T_s - T_a$ 显著相关(图 6 和表 1). 风速大小可反映风力扰动情

况, $T_s - T_a$ 表征水体热量收支情况, 差值为正值表明热量从水体输向大气, 水体散失热量, 反之水体吸收热量. 以 PTS 站点为例, 逐日 w^* 与 10 m 高度处的风速 (U_{10}) 呈显著正相关, 但该关系在白天比夜间更加显著, 表明白天较高的风速可显著搅动太湖水体, 提高水体 w^* 值; 逐日 w^* 也与 $T_s - T_a$ 呈显著正相关, 但与风速相反, 该关系在夜间比白天更加显著.

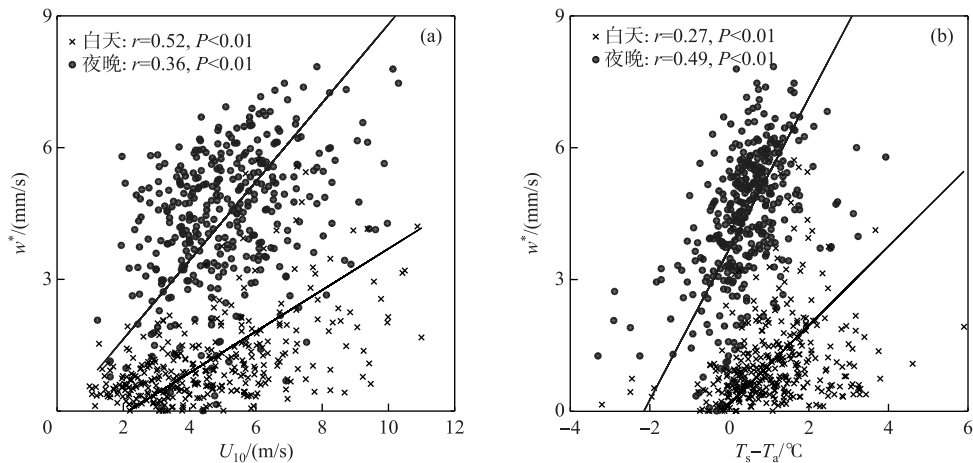


图 6 太湖逐日 w^* 与风速 U_{10} (a) 和湖面温度与气温差值 $T_s - T_a$ (b) 的相关性 (以 PTS 站点为例)

Fig.6 Correlations between daily w^* and wind speed (a), the temperature difference between lake and air (b) based on the measurements at PTS site in Lake Taihu

表 1 也表明其余 4 个站点的 w^* 也有相同的结果, 即夜间的 w^* 主要受湖面温度与气温差值驱动, 白天的 w^* 主要受风速驱动. 风速和温度 (包括水温和气温等) 是易观测的环境因子, 且风速和温度等也是驱动湖泊生态系统物质和能量循环的重要物理因子, 本研究结果表明, 风速和温度是有效的预测因子, 可很好的预测太湖水体的对流混合速率.

3 讨论

水体上下对流混合速率是引起湖泊生态系统各种理化过程变化的主要动力驱动因素, 在国内外的相关研究中受到广泛关注^[8,10,14-15]. 基于野外连续高频原位的观测数据, 本研究结果表明太湖 5 个观测站 w^* 的年均值分别为 2.76 mm/s (PTS)、2.33 mm/s (BFG)、2.62 mm/s (DPK)、2.44 mm/s (XLS) 和 2.29 mm/s (MLW), 整体上 MLW 和 BFG 两个站点 w^* 值较低. MLW 站点离陆地较近, 受周边陆地影响较多, 其较低的风速可能是导致该站点 w^* 较低的主要原因. BFG 站点位于太湖沉水植被区, 已有研究表明沉水植被不仅增加湖体消光系数, 影响能量收支, 并且也增加湖水上下交换的阻力, 进而减少水体上下对流混合交换速率^[29]. 统计分析发现, 总体上太湖 5 个站点间的 w^* 无显著差异 ($P > 0.05$), 表明在该大型浅水湖泊, 水体对流混合速率无显著的空间变化. 尽管相关研究表明不同湖泊间水体 w^* 值变化较大^[36, 38], 但本研究表明, 在同一个湖泊中, 因风速、净辐射和水深等无梯度变化, 其 w^* 可能也无显著的空间变化. 但是在夜间, 太湖 w^* 表现出空间变化, PTS 站点的 w^* 最大, 这可能是由两方面原因所致: 一方面 PTS 站点位于开阔湖区, 其夜间风速要高于其他站点 (图 2d), 风生流引起水体上下对流混合^[18]; 另一方面, PTS 站点的水深高于其他站点, 其在白天能存

表 1 4 个站点 (BFG、DPK、XLS 和 MLW) 逐日 w^* 与风速 (U_{10}) 以及湖面温度与气温差值 ($T_s - T_a$) 的相关性

Tab.1 Correlations between daily w^* and wind speed, the temperature difference between lake and air based on the measurements at BFG, DPK, XLS and MLW sites

站点	U_{10}		$T_s - T_a$	
	白天	夜晚	白天	夜晚
BFG	0.49 **	0.30 **	0.26 **	0.47 **
DPK	0.42 **	0.31 **	0.36 **	0.44 **
XLS	0.53 **	0.36 **	0.31 **	0.45 **
MLW	0.46 **	0.25 **	0.35 **	0.50 **

** 表示相关性的显著水平为 $P < 0.01$.

储更多的热量^[17],导致夜晚可能输出更多能量,引发水体形成强烈对流混合。

受能量收支季节变化的影响,湖泊水体 w^* 往往也呈现出季节变化^[13-14]。本研究表明,太湖水体 w^* 在夏季最高,秋季和春季次之,冬季最低。统计分析也表明太湖冬季水体 w^* 值 ($P < 0.05$) 显著低于其他季节。太湖风速在春夏秋冬四季无显著的变化,表明 w^* 的季节变化与风速无关。但是太湖的能量收支呈现出显著的季节变化,其季节变趋势与 w^* 的季节变化高度吻合(图 3a 和图 5)。此外,太湖 $T_s - T_a$ 在冬季也显著 ($P < 0.05$) 低于其他季节。鉴于能量收支和 $T_s - T_a$ 是驱动 w^* 的关键因子,因此太湖水体 w^* 的季节变化特征主要受能量收支驱动。全球湖泊 w^* 一般具有显著的季节变化^[36],尽管本研究表明太湖水体 w^* 也具有季节变化,但其变化幅度要远低于昼夜变化(图 2)。这可能是由于太湖水体在白天吸收热量,但因太湖水体较浅,水体储热能力较低,在夜晚导致大量能量输出到大气中,水体结构失稳,形成强烈的上下对流混合^[16-17]。

本研究表明在太湖,热力和风动力是水体对流混合速率的主要驱动因子。热力的作用机制是,当水体吸收获取热量时,一般是表层水体获得热量较深层水体高,导致表层水体升温快于深层,从而表层水体密度低于深层水体,水体从上到下形成分层^[12],对流混合被削弱;反之,水体加热大气热量散失时,表层降温比深层快,导致水体形成失稳结构,对流混合增强^[5,36]。观测数据表明,太湖在夜晚水表面热通量为负值,表明水体散失热量,因此水体对流混合速率较高,且夜间的 w^* 与能量收支呈现显著正相关关系(图 6 和表 1)。同时,尽管白天湖泊水体因吸热出现分层弱对流混合现象,但因太湖是一个浅水湖泊,该层结不稳定易受风动力影响。相关研究表明,当风速低于 1 m/s 时,太湖才会出现极稳定的层结^[29]。太湖的年均风速约为 4.58 m/s,且大部分情况下大于 1 m/s,因此太湖在白天吸收能量时也会出现对流混合,且主要受风速驱动(图 6a)。因此,高风速可打破太湖水体的层结,引起湍流混合^[18]。

总体上太湖水体 w^* 在日尺度上的变化范围为 0~7.85 mm/s,均值为 2.49 mm/s,与瑞典一个浅水湖泊的观测结果相似^[8]。太湖水体 w^* 强烈的时间变化特征可能会导致其水体温室气体等发生相应的变化,例如已有研究表明在昼夜尺度上, w^* 的变化导致水体 CO_2 排放呈现出明显的变化,即在夜间水体因“丢失”能量, w^* 比较高,促使湖泊底部富含 CO_2 和 CH_4 气体的水体输送到水表,增加水体向大气排放 CO_2 和 CH_4 等温室气体^[8,10,39]。同时,也有研究表明在白天水体无能量“丢失”时,因风力扰动引起的水体对流混合,也可显著增加水体温室气体的排放^[40]。受全球变暖的影响,湖泊水体吸收更多的热量,导致在全球尺度上湖泊水体的对流混合速率呈现下降的趋势^[13,41]。此外,观测数据也表明风速在近几十年呈现显著下降的趋势^[42-43]。因此,后续研究亟需开展水体对流混合速率对其温室气体等物质循环的影响,以期明确在未来气候变化情景下水体温室气体等响应特征。

4 结论

- 1) 观测数据表明,太湖的风速、水温和辐射等物理参数无空间变化,但具有明显的昼夜变化和季节变化特征。
- 2) 太湖水体 w^* 总体上无空间变化,但呈现出显著的昼夜变化和季节变化,且昼夜变化幅度要强度季节变化。
- 3) 太湖水体 w^* 的均值为 2.49 mm/s,白天主要受风力扰动影响,夜晚主要受能量收支影响。

5 参考文献

- [1] Raymond PA, Hartmann J, Lauerwald R *et al.* Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature*, 2013, **503** (7476): 355-359. DOI: 10.1038/nature12760.
- [2] Bastviken D, Tranvik LJ, Downing JA *et al.* Freshwater methane emissions offset the continental carbon sink. *Science*, 2011, **331**(6013): 50. DOI: 10.1126/science.1196808.
- [3] Soued C, Del Giorgio P, Maranger R. Nitrous oxide sinks and emissions in boreal aquatic networks in Québec. *Nature Geoscience*, 2016, **9**(2): 116-120. DOI: 10.1038/NGEO2611.
- [4] Hasler CT, Butman D, Jeffrey JD *et al.* Freshwater biota and rising $p\text{CO}_2$. *Ecology Letters*, 2016, **19**(1): 98-108. DOI: 10.1111/ele.12549.
- [5] Macintyre S, Jonsson A, Jansson M *et al.* Buoyancy flux, turbulence, and the gas transfer coefficient in a stratified lake.

- Geophysical Research Letters*, 2010, **37**(24): L24604. DOI: 10.1029/2010GL044164.
- [6] Eugster W, Kling G, Jonas T *et al.* CO₂ exchange between air and water in an Arctic Alaskan and midlatitude Swiss lake: Importance of convective mixing. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(D12). DOI: 10.1029/2002JD002653.
- [7] Podgrajsek E, Sahlée E, Rutgersson A. Diurnal cycle of lake methane flux. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014, **119**(3): 236-248. DOI: 10.1002/2013JG002327.
- [8] Podgrajsek E, Sahlée E, Rutgersson A. Diel cycle of lake-air CO₂ flux from a shallow lake and the impact of waterside convection on the transfer velocity. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, **120**(1): 29-38. DOI: 10.1002/2014JG002781.
- [9] Rutgersson A, Smedman A. Enhanced air-sea CO₂ transfer due to water-side convection. *Journal of Marine Systems*, 2010, **80**(1/2): 125-134. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2009.11.004.
- [10] Godwin CM, Mcnamara PJ, Markfort CD. Evening methane emission pulses from a boreal wetland correspond to convective mixing in hollows. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, **118**: 994-1005. DOI: 10.1002/jgrg.20082.
- [11] Yan JF, Li Q, Xia N *et al.* Investigation of heat exchange model and parameter sensibility between the atmosphere and lake. *J Lake Sci*, 2007, **19**(6): 735-743. DOI: 10.18307/2007.0617. [颜金凤, 李倩, 夏南等. 湖-气热传输模型及参数敏感性研究. 湖泊科学, 2007, **19**(6): 735-743.]
- [12] Zhao QH, Sun JH. The variation features of the surface mixed layer depth in Erhai Lake and Taihu Lake in spring and autumn and their mechanism analyses. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(3): 1-9. DOI: 10.7498/aps.62.039203. [赵巧华, 孙绩华. 夏秋两季洱海、太湖表层混合层的深度变化特征及其机理分析. 物理学报, 2013, **62**(3): 1-9.]
- [13] Zhang YL. Effect of climate warming on lake thermal and dissolved oxygen stratifications: A review. *Advance 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.]
- [14] Zeng MZ, Huang TL, Qiu XP *et al.* Seasonal stratification and the response of water quality of a temperature reservoir-Zhoucun Reservoir in north of China. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1338-1344. [曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏等. 我国北方温带水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性. 环境科学, 2016, **37**(4): 1338-1344.]
- [15] Dong CY, Yu ZM, Wu ZX *et al.* Study on seasonal characteristics of thermal stratification in lacustrine zone of Lake Qiandao. *Environmental Science*, 2013, **34**(7): 2574-2581. [董春颖, 虞左明, 吴志旭等. 千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究. 环境科学, 2013, **34**(7): 2574-2581.]
- [16] Xiao QT, Zhang M, Hu ZH *et al.* Estimation of gas transfer velocity between water-air interface in a large lake based on different models: A case study of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2018, **30**(3): 790-801. DOI: 10.18307/2018.0321. [肖启涛, 张弥, 胡正华等. 基于不同模型的大型湖泊水-气界面气体传输速率估算. 湖泊科学, 2018, **30**(3): 790-801.]
- [17] Deng B, Liu S, Xiao W *et al.* Evaluation of the CLM4 lake model at a large and shallow freshwater lake. *Journal of Hydrometeorology*, 2013, **14**(2): 636-649. DOI: 10.1175/JHM-D-12-067.1.
- [18] Yang Y, Wang Y, Zhang Z *et al.* Diurnal and seasonal variations of thermal stratification and vertical mixing in a shallow fresh water lake. *Journal of Meteorological Research*, 2018, **32**(2): 219-232. DOI: 10.1007/s13351-018-7099-5.
- [19] Verpoorter C, Kutser T, Seekell DA *et al.* A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery. *Geophysical Research Letters*, 2014, **41**(18): 6396-6402. DOI: 10.1002/2014GL060641.
- [20] Radomski P, Perleberg D. Application of a versatile aquatic macrophyte integrity index for Minnesota lakes. *Ecological Indicators*, 2012, **20**: 252-268. DOI: 10.1016/j.ecolind.2012.02.012.
- [21] Lee X, Liu S, Xiao W *et al.* The Taihu Eddy Flux Network: An observational program on energy, water, and greenhouse gas fluxes of a large freshwater Lake. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, **95**(10): 1583-1594. DOI: 10.1175/BAMS-D-13-00136.1.
- [22] Xiao QT. Study on greenhouse gases (CO₂, CH₄, and N₂O) fluxes of water-air interface in Lake Taihu [Dissertation]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2014. [肖启涛. 太湖水-气界面温室气体 (CO₂, CH₄, N₂O) 通量研究[学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.]
- [23] Xiao W, Liu S, Li H *et al.* A flux-gradient system for simultaneous measurement of the CH₄, CO₂, and H₂O fluxes at a lake-air interface. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(24): 14490-14498. DOI: 10.1021/es5033713.
- [24] Xiao Q, Zhang M, Hu Z *et al.* Spatial variations of methane emission in a large shallow eutrophic lake in subtropical cli-

- mate. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2017, **122**(7): 1597-1614. DOI: 10.1002/2017JG003805.
- [25] Xiao Q, Xu X, Zhang M *et al.* Coregulation of nitrous oxide emissions by nitrogen and temperature in China's third largest freshwater lake (Lake Taihu). *Limnology and Oceanography*, 2019, **64**: 1070-1086. DOI: 10.1002/lno.11098
- [26] Duan HT, Ma RH, Xu XF *et al.* Two-decade reconstruction of algal blooms in China's Lake Taihu. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(10): 3522-3528. DOI: 10.1021/es8031852.
- [27] Zhang M, Xiao Q, Zhang Z *et al.* Methane flux dynamics in a submerged aquatic vegetation zone in a subtropical lake. *Science of the Total Environment*, 2019, **672**: 400-409. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.466.
- [28] Zhao K, Zhou YF, Jiang ZL *et al.* Changes of aquatic vegetation in Lake Taihu since 1960s. *J Lake Sci*, 2017, **29**(2): 351-362. DOI: 10.18307/2017.0211. [赵凯, 周彦锋, 蒋兆林等. 1960年以来太湖水生植被演变. 湖泊科学, 2017, **29**(2): 351-362.]
- [29] Cheng X, Wang YW, Hu C *et al.* The lake-air exchange simulation of a lake model over eastern Taihu Lake based on the E-ε turbulent kinetic energy closure thermodynamic process. *Acta Meteorologica Sinica*, 2016, **74**(4): 633-645. DOI: 10.11676/qxxb2016.043. [程昕, 王咏薇, 胡诚等. 应用E-ε湍流动能闭合湖泊热力学过程模型对东太湖湖-气交换的模拟. 气象学报, 2016, **74**(4): 633-645.]
- [30] Xiao QT. Spatial pattern of CH₄ flux and its impact factors analysis in Lake Taihu [Dissertation]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2017. [肖启涛. 太湖CH₄通量的空间格局及影响因子分析[学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.]
- [31] Wang W. Energy budget at Lake Taihu and its response to climate change [Dissertation]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2014. [王伟. 太湖能量收支及其对气候变化的响应[学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.]
- [32] Lee X, Massman WJ. A perspective on thirty years of the Webb, Pearman and Leuning density corrections. *Boundary-Layer Meteorology*, 2011, **139**(1): 37-59. DOI 10.1007/s10546-010-9575-z.
- [33] Herb WR, Stefan HG. Dynamics of vertical mixing in a shallow lake with submersed macrophytes. *Water Resources Research*, 2005, **41**(2): W02023. DOI: 10.1029/2003WR002613.
- [34] Imberger J. The diurnal mixed layer. *Limnology and Oceanography*, 1985, **30**(4): 737-770.
- [35] Jeffery CD, Woolf DK, Robinson IS *et al.* One-dimensional modelling of convective CO₂ exchange in the Tropical Atlantic. *Ocean Modelling*, 2007, **19**(3/4): 161-182. DOI: 10.1016/j.ocemod.2007.07.003.
- [36] 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.
- [37] Cao ZD. Research on transfer coefficients of momentum, heat, and water vapor in Lake Taihu [Dissertation]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2016. [曹正达. 太湖水-气界面动量和水热交换系数研究[学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.]
- [38] Woolway RI, Verburg P, Lenters JD *et al.* Geographic and temporal variations in turbulent heat loss from lakes: A global analysis across 45 lakes. *Limnology and Oceanography*, 2018, **63**(6): 2436-2449. DOI: 10.1002/lno.10950.
- [39] Aberg J, Jansson M, Jonsson A. Importance of water temperature and thermal stratification dynamics for temporal variation of surface water CO₂ in a boreal lake. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2010, **115**: G02024. DOI: 10.1029/2009JG001085.
- [40] 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*, 2017, **123**(8): 2305-2322. DOI: 10.1029/2017JG004209.
- [41] Woolway RI, Merchant CJ. Worldwide alteration of lake mixing regimes in response to climate change. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(4). DOI: 10.1038/s41561-019-0322-x.
- [42] Bichet A, Wild M, Folini D *et al.* Causes for decadal variations of wind speed over land: Sensitivity studies with a global climate model. *Geophysical Research Letters*, 2012, **39**: L11701. DOI: 10.1029/2012GL051685.
- [43] Deng JM, Paerl HW, Qin BQ *et al.* Climatically-modulated decline in wind speed may strongly affect eutrophication in shallow lakes. *Science of the Total Environment*, 2018, **645**: 1361-1370. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.208.