

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.05.013

水环境涡动相关通量观测技术的实现与应用

张袁宁¹, 孙博闻¹, 高学平¹, 郭晓雪¹, 刘 畅², 刘晓波²

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350;

2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要:为了给沉积物-水界面通量的原位长效观测研究提供技术支撑, 对水环境涡动相关技术的实现路径和应用方向进行了系统梳理。回顾了水环境涡动相关技术的发展历程并对比分析了其技术特征, 从理论基础、系统构建和数据处理三方面介绍了该技术的实现方法, 并总结了该技术的应用方向和目前面临的挑战。水环境涡动相关技术具有底质适用类型多样、不干扰沉积物结构、测量足迹大且时间精度高等特点, 适用于河流、湖泊、水库、海湾及深海等环境的沉积物-水界面通量观测, 能够为水体环境修复、生态系统代谢评估及潜流交换等研究提供支持。

关键词: 涡动相关; 水环境通量; 沉积物-水界面; 原位非侵入; 测量足迹

中图分类号: X-1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2021)05-0081-08

Realization and application of aquatic eddy correlation flux observation technique // ZHANG Yuanning¹, SUN Bowen¹, GAO Xueping¹, GUO Xiaoxue¹, LIU Chang², LIU Xiaobo² (1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to provide technical support for in-situ long-term observation researches of sediment-water interface fluxes, realization and application of the aquatic eddy correlation technique were systematically arranged. The development history and technical characteristics of the aquatic eddy correlation technique were reviewed. The technical methodology was introduced from the aspects of theoretical basis, system construction and data processings and the application direction and current challenges of this technique were summarized. The aquatic eddy correlation technique could be applied to different sediment types while does not interfere with their structure and it has the characteristics of large measurement footprint and high resolution. Therefore, this technique is suitable for sediment-water interface flux observation in various environments such as rivers, lakes, reservoirs, bays and deep oceans, which could further provide supports for studies on water environment restoration, ecosystem metabolism assessment and hyporheic exchange.

Key words: eddy correlation; aquatic fluxes; sediment-water interface; in-situ and noninvasive; measurement footprint

沉积物-水界面 (sediment-water interface, SWI) 是沉积物与其上覆水之间具有一定立体尺度的界面^[1]。物质在该界面附近活跃地发生着迁移、转化、吸附、解吸、扩散、掩埋和生物扰动等一系列物理化学及生物反应, 从而影响着水环境的整体功能与生态安全, 也使得沉积物-水界面成为陆地表层系统中最重要界面之一^[2-3]。因此, 开展沉积物-水界面处溶解氧、温室气体、营养物和污染物等物质质量

乃至能量、动量的通量观测, 对于评估底栖生态环境、控制水体内部污染和研究水环境生物地球化学循环过程都具有重要意义。

涡动相关技术 (eddy correlation technique) 是一种兴起于微气象领域的通量观测方法, 如今也被用于测量沉积物-水界面通量且取得了较好的实践效果。但是, 目前国内关于水环境涡动相关技术的应用和研究还比较少, 也没有能够同时满足原位、长

基金项目: 国家自然科学基金 (51609166); 国家重点研发计划 (2018YFC0407902, 2016YFC0401701); 天津市研究生科研创新项目 (2020YJSS080)

作者简介: 张袁宁 (1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为环境水力学。E-mail: ynzhang19@tju.edu.cn

通信作者: 孙博闻 (1987—), 男, 副教授, 博士, 主要从事环境水力学研究。E-mail: bwsun@tju.edu.cn

期、非侵入等通量观测需求的其他技术。有鉴于此,本文在回顾水环境涡动相关技术的发展历史并总结其技术特点的基础上,重点介绍了该技术的具体实施途径,梳理了其应用领域及今后的发展方向,以期水环境涡动相关通量观测技术的推广应用提供参考。

1 发展历史与技术特点

早在 20 世纪 40 年代末, Montgomery 等^[4-6]便提出了用于测量大气与其下垫面之间物质能量交换通量的涡动相关技术, 又称涡动协方差技术 (eddy covariance technique)。在理论提出之初, 观测仪器的局限阻碍了该技术的实施, 直至超声风速仪和气体分析仪问世^[7]。从 20 世纪 80 年代开始, 涡动相关技术陆续被用于测量大气相关界面的 CO₂ 和水热等通量^[8-11]; 在长期的实践对比中, 该技术也被认为是国内外微气象通量观测领域最为可靠的方法之一^[12]。时至今日, 涡动相关观测不仅是一种科学研究活动, 更成了一种常规的气象观测手段, 世界各地建立起了大气涡动相关网络以实现观测数据的共享。

2003 年, Berg 等^[13]首次将涡动相关技术移植到水环境通量观测领域, 通过声学多普勒流速仪 (acoustic doppler velocimetry, ADV) 和 Clark 型溶解氧微电极搭建了测量沉积物-水界面氧通量的涡动相关系统并验证了其可靠性。而后, Berg 等^[14-15]通过数值模拟进一步夯实了该技术的理论基础, 同时 Donis 等^[16-19]通过室内水槽试验完善了该技术的应用细节并探讨了界面通量对各类环境因子的响应关

系。如今, 涡动相关技术已被用于河流、湖泊、水库、海滩和深海等水环境的沉积物-水界面通量观测^[20-24]。

除水环境涡动相关技术外, 目前测量沉积物-水界面通量的方法还有实验室培养技术 (laboratory core incubation)、底栖培养室技术 (benthic chamber)、微电极剖面技术 (micro-profiling) 和平面光极技术 (planar optode) 等^[14, 25-29], 主要技术特性对比见表 1。总的来说, 涡动相关技术因其将观测点布置于沉积物-水界面上方而具备非侵入式观测的显著优点^[13], 又具有测量范围广和时间精度高等特点^[15], 能够对传统方法难以适用的高渗透性砂质底泥和生长水栖植物的坚硬底质进行长期观测^[30]。但是, 该技术对数据处理方法提出了较高的要求, 且可测量的通量类型受到传感器性能发展的限制。

2 涡动相关技术的基础理论

涡动相关技术要求观测点位于对数层内^[31], 如图 1 所示。该区域内溶质的湍流扩散远大于分子扩散^[1], 因此对实际环境做出以下简化^[12]: ①溶质在控制流体内进行稳态扩散, 即符合菲克第一定律; ②观测点与沉积物-水界面之间没有任何溶质的源或汇; ③观测点来流方向有足够长的水平均匀下垫面。将上述假设代入流体任意组分的动量守恒方程中, 引入雷诺平均并采用调整仪器安装位置、进行坐标旋转处理等方法使得垂向时均流速为零, 从而得到涡动相关技术的通量计算公式:

$$F_{\zeta} = w'c' \tag{1}$$

式中: F_{ζ} 为溶质 ζ 在界面处的通量, mmol/(m² · d);

表 1 常见沉积物-水界面通量观测技术特性对比

Table 1 Technical characteristics comparison of several measurement methods for benthic fluxes

测量技术	开展方式	成熟度	干扰性	底质适用性	测量精度	测量能力
实验室培养	实验室	成熟	侵入性	沉积物	h ~ d	平面二维, 覆盖培养皿范围 (如 0.006 m ² ^[26])
底栖培养室	原位	成熟	侵入性	非渗透性沉积物	h ~ d	平面二维, 覆盖培养室范围 (通常为 0.04 ~ 0.5 m ² ^[27])
微电极剖面	原位	较成熟	侵入性	非渗透性沉积物	h	垂向一维, 测量范围取决于推进器进程 (如 40 mm ^[28])
涡动相关	原位	较成熟	非侵入	沉积物或坚硬底质	min	平面二维, 测量来流方向类椭圆区域 (如 10 ~ 100 m ² ^[14])
平面光极	原位	发展中	侵入性	沉积物	d	立面二维, 范围取决于光极大小 (如 9 × 10 ⁻⁴ m ² ^[29])

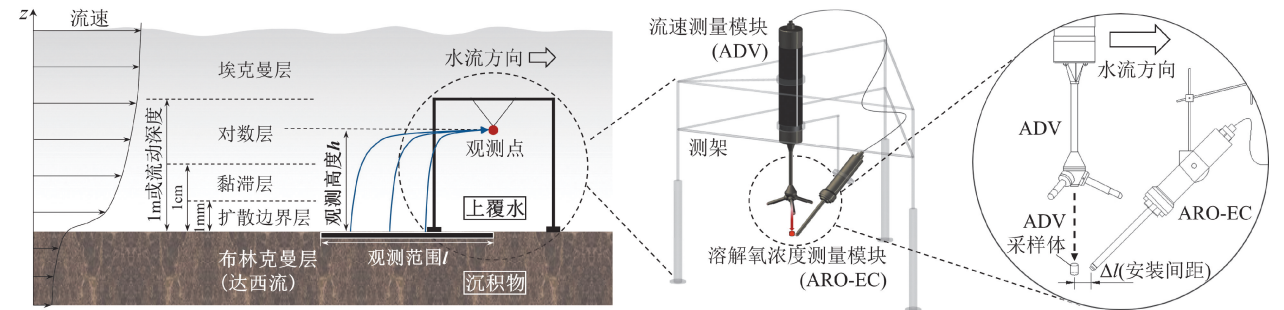


图 1 水底边界层的空间结构及氧通量涡动相关系统示意图

Fig. 1 Structure of benthic boundary layer and an eddy correlation facility for oxygen flux measurement

w' 为垂向流速 w 的雷诺分解脉动值, m/s ; c' 为溶质浓度 c 的雷诺分解脉动值, mmol/L 。可见溶质 ζ 的扩散通量等于该溶质浓度和垂向流速的协方差, 这种协方差在以垂向运输为主的边界层中代表了涡动(湍流)扩散, 因此该方法被称作“涡动相关技术”。但是, 结合恰当的数据处理方法, 该技术能够测量由水流运动引起的任何溶质输移, 无论这种水流运动是不是湍流^[32]。若将该式中的溶质浓度 c (质量) 理解为热量或动量, 还可以将该技术推广应用至能量和动量的通量观测, 本文主要针对质量通量进行阐述。

另一方面, 涡动相关技术测量的湍动时间序列可以视为大范围内不同空间尺度(频率或波数)的涡旋的叠加。泰勒冻结假说认为湍流在经过固定观测点时性质不会发生显著变化, 由此可以建立起湍动时间尺度与空间尺度的关系。对涡动相关观测的两信号 χ_w 和 χ_c 作协谱 C_{wc} , 则协谱在整个频率(f)范围上的积分等于信号的协方差, 有:

$$F_{\zeta} = \int_0^{\infty} C_{wc}(f) df \quad (2)$$

该式即为涡动相关技术在频域上的通量计算表达式。同时, Kolmogorov 提出湍流功率谱在惯性子区内符合“ $-5/3$ ”幂次律, 即功率谱密度与波数的 $-5/3$ 次方成正比; 利用该规律可以进行湍流特征检查, 也可以求解湍动能耗散率进而计算涡动相关通量^[33]。

值得注意的是, 涡动相关技术的测量结果反映了其观测点来流方向一定区域内界面通量的平均大小。通常定义对观测点所测通量的贡献达某一比例(如 90%)的最小沉积物区域为测量足迹(footprint), 涡动相关测量足迹通常为一沿水流方向对称的类椭圆区域, 90% 测量足迹的面积可达 $10 \sim 100 \text{ m}^2$ 。足迹形状大小与水深、沉积物粗糙度等环境条件和观测点距沉积物的布设高度相关^[14], 分析涡动足迹对评判数据质量和检验观测点代表性具有重要意义。若考虑水平均一的下垫面, 可根据扩散积分方程将观测通量表达为通量源强分布函数和通量足迹函数的二重积分^[34], 其中通量足迹函数表示下垫面上某点对所测通量贡献的比率。确定足迹函数是一项具有挑战性的工作, 目前应用的方法包括解析模型、拉格朗日随机颗粒分散模型、大涡模拟和整体平均闭合模型等^[35]。

3 涡动相关系统的构建方法

3.1 涡动观测系统的构成

涡动观测系统主要由流速测量模块、浓度测量

模块和辅助设施构成, 其中流速湍动测量通常采用 ADV, 浓度湍动测量设备则因待测通量而异。目前国内采用的涡动观测系统通常由以下设备组成:

a. ADV。ADV 基于声学多普勒原理进行高频三维流速测量(部分产品可达 128 Hz), 兼测水温、水深、倾角和方位角等物理量。ADV 通过中央传感器发射超声波脉冲, 当声波遇到水中悬浮颗粒被反射回时, 被均匀布置在中央传感器周围的 $2 \sim 4$ 个探头接收。ADV 测量的是位于中央传感器下方 $5 \sim 18 \text{ cm}$ 处一直径和高度均约 1 cm 的圆柱状水体的流速, 该仪器不适宜用于悬浮颗粒稀少的低浊度或静水环境^[36]。

b. Clark 型微电极。该类型微电极因最早由 L. C. Clark 研制而得名, 具有针端细(约 $10 \mu\text{m}$)和响应快(90% 响应时间 $t_{90\%} < 0.2 \text{ s}$)等显著优势^[37]。工作时, 气体从其尖端扩散进入后与阴极发生反应产生电流, 电流信号经放大后与校正的标准曲线对比可得到气体浓度值^[29]。因此, Clark 型微电极在观测过程中消耗了待测气体。目前市面在售微电极的可测指标包括 O_2 、 H_2S 、 NO 和 pH 值等, 可用于构建多通量涡动观测系统, 但大多数微电极由玻璃制作, 其保证使用寿命较短, 难以实现长期原位观测。

c. 高鲁棒性传感器。为长期连续开展原位涡动相关观测, 可用高鲁棒性溶质浓度传感器代替 Clark 型微电极。例如, ARO-EC 是一款基于荧光寿命法的温氧传感器, 不消耗待测气体也不引起信号漂移, 且以钛为材质, 可满足野外长期工作的需要^[38]; Hu 等^[32]设计了 FACT 传感器进行荧光性溶解有机物的涡动相关观测, 同时可测量水温与盐度等指标。由于无须放大信号, 高鲁棒性传感器与 ADV 的整合往往更为容易, 但该类传感器也具备体积较大、通量测量类型较少等不足。

d. 辅助设备。涡动相关观测通常还需要测架、电缆、数据采集器及通信模块等辅助设备。部分传感器能由 ADV 控制并通过其提供的虚拟通道进行数据输出, 从而实现流速和溶质浓度的同步观测; 但当外接传感器较多或需要对观测信号进行放大时, 则需另配数据采集器。

3.2 传感器的选用要求

涡动相关技术需要同步高频测量水流速度湍动和溶质浓度湍动, 因此其观测仪器一般需满足测量频率与响应时间、测量精度与灵敏度、探头尺寸与采样范围三方面的要求。

a. 测量频率与响应时间。高频观测是涡动相关技术的主要特征之一, 其传感器应具有足够高的测量频率以捕捉对通量有贡献的最小尺度(最高频

率)湍动。分别对典型弱湍动水环境(如深海底部流速约为 2 cm/s)和强湍动水环境(如陆架海底部流速约为 20 cm/s)进行估算,可知湍流存在的最小时间尺度通常为 0.2 ~ 7.4 s,即 5 ~ 0.1 Hz,因此涡动传感器的最高观测频率不应低于该值^[37],且越强的湍动环境需要越高的观测频率。响应时间表征了传感器对外界环境改变的反应速度,由于湍流通量主要由大尺度涡旋携带,通常认为 $t_{90\%} < 0.2$ s 的传感器可满足涡动相关观测要求^[39]。

b. 测量精度与灵敏度。涡动观测仪器的测量精度应与其所测物理量的湍动尺度相匹配。流速湍动尺度与湍流发育程度相关,在充分发展的湍流环境中,通常以摩擦流速量化流速湍动;浓度湍动尺度还与其物质浓度梯度有关,可以根据给定的通量数值和流速湍动尺度进行估计^[37]。一般来说,提升传感器灵敏度是提高测量精度的方法之一,但过高的灵敏度将产生噪声进而降低涡动观测的数据质量并延长涡动观测的时段长度。

c. 探头尺寸与采样范围。为减小对水流运动及 ADV 声波信号的干扰,溶质浓度测量仪器的探头尺寸应尽可能小,否则将使传感器安装间距增大、数据处理难度增加,甚至使得该系统不宜应用于强湍动水环境。此外,为捕捉与湍流通量相关的最小尺度涡动,理想溶质浓度测量仪器的采样范围应小于柯氏长度,即湍流存在的最小空间尺度;但实际上 ADV 的圆柱体采样范围通常相对更大,甚至超过柯氏长度,因此溶质浓度测量仪器的采样范围通常不是组建涡动观测系统的限制条件。

3.3 系统的空间布置

a. 传感器安装间距。ADV 与溶质浓度测量仪器测量同一涡旋,因此两者的采样区域理论上需完全重合。但是,浓度测量探头的物理结构会干扰水流状态及 ADV 声波信号,因此两者之间应保持一定的水平距离,即安装间距 Δl (图 1),而这种空间布置错位导致的测量误差将在数据处理过程中通过时滞修正进行校正。一般来说,浓度测量探头与 ADV 应沿水流方向布置,且探头位于 ADV 采样体的下游^[16],两者间距不超过 10 倍柯氏长度,否则容易造成通量低估。不同尺寸的探头所需的安装间距不等,可通过分析 ADV 观测信号的信噪比进行确定,如 ADV 与 Clark 型微电极之间的安装间距通常小于 1 cm,而与 ARO-EC 传感器探头之间的安装间距应为 1 ~ 2 cm。

b. 观测点布置高度。观测点布置高度是指 ADV 采样体或浓度测量探头与沉积物-水界面之间的距离,即观测高度 h (图 1)。一般来说,沉积物-水

界面附近物质浓度梯度较大,因此当观测点布设较低时传感器更容易观测到浓度湍动。观测高度在一定程度上决定了涡动相关观测的足迹范围,通常取 8 ~ 80 cm^[15],实际布置时应视环境水深、水动力条件、下垫面异质性等因素而定。

4 涡动观测数据的计算处理

涡动相关技术对观测数据的计算处理提出了较高要求。目前微气象领域已经出现一批较成熟的数据处理软件如 EddyPro、EddyRE、Alteddy 和 TK2/3 等,但水环境应用领域的相关软件较少,可用的主要有 SOHFEA 系列程序包^[40]。一般来说,水环境涡动观测数据的计算包括数据预处理、协方差计算和数据后处理 3 个流程。

4.1 数据预处理

a. 时段分割。为减小传感器信号漂移及平流对通量计算结果的影响,需要选择合适的观测时段长度,或将观测数据按照合适的时段长度进行分割。时段长度决定了观测涡旋的最大尺度(最低频率),因此时段分割的本质是低频信号截止,即令待计算数据尽可能包含湍流信号但不含平流信号。水环境涡动相关观测通常取时段长度为 10 ~ 20 min^[15],可通过拱形测试或方差分析确定^[37,41]。

b. 数据检查。为保证数据可靠,需要进行野点剔除、阈值过滤和数据插补等预处理工作。野点是仪器受到外界干扰或内部误差影响而记录到的持续时间短、变化幅度大的信号,可基于统计学方法或近邻、聚类、分类等算法进行检测^[42]。阈值过滤即根据仪器诊断标志或各参量物理限值来剔除异常数据,阈值的选取需综合考虑昼夜节律和季节更替等环境因素。剔除异常观测值后可使用均值插补和多重插补等方法进行补值,还可适当对数据进行降频处理以过滤观测数据中的环境噪声。

c. 坐标旋转。坐标旋转即将流速矢量从仪器坐标系变换到自然坐标系,使得垂向流速时均值为零且水流主流沿仪器布设方向,从而满足涡动相关技术的理论要求。当 ADV 中轴线与下垫面不完全垂直时,湍流通量的不同分量之间会交叉干扰,即造成倾斜误差,动量通量对倾斜误差尤其敏感。目前进行坐标旋转的方法包括二次旋转法、三次旋转法和平面拟合法,其中二次旋转法使用较多^[43]。

4.2 协方差计算

a. 湍动计算。湍动序列等于观测序列减去时均值,但时均值通常表现出一定的变化(倾斜)趋势,因此需通过整体平均法、线性去倾法和滑动平均法等方法进行“去倾修正”。一般来说,整体平均法

易造成通量高估^[44],而滑动平均法在较小的滑动窗口里取平均弥补了整体平均的不足,但过小的窗口则会造成通量低估。滑动窗口需要覆盖对湍流通量有贡献的最小尺度涡旋,可以逐步增大窗口长度并同步试算通量,取通量结果变化平稳时的窗口长度为正式计算的滑动窗口长度^[19]。

b. 时滞修正。涡动观测系统的传感器之间存在安装间距,因此它们的测量结果沿水流方向存在一定的时间滞后,各传感器响应时间不同也会造成类似误差^[45]。时滞值理论上等于水流流经传感器安装间距的时间与各传感器响应时间差之和^[19]。由于时滞修正的本质在于将不同传感器的观测序列在时间上对齐,故实际计算时通常逐步移动一观测序列并进行互相关分析,取最大绝对互相关值对应的移动时间为时滞修正值^[37]。

c. 高频修正。部分传感器因响应时间过长而易导致通量估计结果偏低,此时需要对其高频区观测结果进行补偿。通常在频域或波数域内乘以函数进行修正,例如考虑一组由快速响应 ADV(其响应时间可以忽略)和普通浓度传感器(其响应时间不可忽略)组成的涡动观测系统,一种可行的修正函数为 $H_{uc}^2(f) = [1 + (2\pi f\tau_c)^2]^{-1}$,其中 H_{uc}^2 为传递函数, f 为频率, τ_c 为浓度传感器响应时间的 $1/e$ 倍^[46-47]。若考虑两个传感器的响应时间,修正公式将更为复杂,可通过理论推导或实验对比确定^[48-49]。

d. 通量计算。经上述步骤处理后可通过计算协方差得到湍流通量随时间的变化,通常将累积的物质交换量对时段长度取平均得到代表该时段特征的时均通量。若物质交换量对时间表现出较好的线性累积趋势,则意味着该时段内环境条件较为稳定,时均通量代表性较强。

4.3 数据后处理

a. 质量评价。涡动数据的质量评价包括湍流谱特征分析、湍流平稳性检验、湍流发展充分性检验等方面以及基于部分检验指标的综合质量评价。目前水环境领域涡动相关观测结果的质量评价还处于起步阶段,既要考虑传感器的测量误差,也要考虑实际观测对涡动相关理论假设的满足程度。

b. 足迹分析。涡动相关理论要求观测下垫面水平均匀,而足迹分析可以用来评价地形异质性对涡动观测的影响,即实际观测对假设条件的偏离程度,因此也是涡动数据质量评价的重要环节和步骤,被称作湍流空间代表性检验。进一步地,足迹分析可以将数据质量与地形属性联系起来,绘制出数据质量的空间变化图;理论上,涡动足迹能将任何观测物理量(标量和通量)与地形相联系,实现观测数据

的空间结构可视化^[50]。

5 涡动相关技术的应用与挑战

5.1 水环境涡动相关技术的应用方向

a. 水体环境修复。沉积物-水界面各类通量在水体富营养化、重金属及有机污染等灾害事件中扮演着重要角色,对于受污染水体的水质修复具有重要意义。例如,溶解氧通量直接关系着界面氧化还原条件和生化反应进程,在一定程度上决定了污染物在界面处的转换方向,且不同污染物对氧通量表现出不同的源汇规律^[51-52]。同时,探究沉积物-水界面通量对流速、水深、浓度、pH 值和光照等环境因子的响应规律,有利于完善数值模拟的边界条件,提升水质模型预测结果的准确性。当前也有学者开始尝试借助深度信念网络等机器学习方法开展湍流通量的空间升尺度研究,即将有限足迹的涡动相关观测结果外推到整个研究区域,获得区域上连续的界面通量分布情况^[53]。

b. 生态系统代谢评估。在利用涡动相关技术测量溶解氧通量的同时记录环境光合有效辐射强度,可定量分析底栖生态系统群落的代谢强度和能量收支。考虑一日内总氧通量等于光合作用生成量与呼吸作用消耗量之和,则可由光照时长计算总初级生产力及净生态系统代谢^[54]。进一步地,结合生态学模型可建立代谢强度与环境因子之间的关系,例如,根据光合辐射强度曲线^[55]可以得到光合作用速率与光合辐射强度之间的双曲正切模型,从而通过拟合观测数据得到最大底栖产氧速率等特征量;呼吸作用相比之下较为复杂,它包括有机物的分解以及 NH_4^+ 、 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 H_2S 和 FeS 分解产物的氧化或腐化过程,可将其简化为对底部流速的线性模型^[56]。

c. 潜流交换研究。若将温度或电导率视作“物质浓度”并进行测量,则可通过涡动相关技术计算沉积物-水界面的温盐通量,而这种通量常常受潜流交换的驱动^[57-59]。潜流交换大多以平流的形式进行,其速度通常远小于水底边界层流速,因而其垂向交换由湍流扩散主导,即适用于涡动相关技术;但是,涡动相关观测只能用于两侧水体温盐状态不同的情况。根据热通量和盐通量均可推求控制体内的潜流通量^[60-61],两者互为参考,可为寻找沿海地区非点源物质的运输路径提供支持,并对环境管理决策提供依据。

d. 其他固-液界面的应用。除了沉积物-水界面,涡动相关技术也可用于冰-水界面及其他固-液界面的通量观测。当光照条件适宜时,微小藻类通

常聚集在冰-水界面附近^[62],既通过光合作用为封闭水环境供氧,也为表层鱼类提供食物并在大量聚集后下沉为底层群落提供生存机会^[63]。因此,该技术也被用于研究冰-水界面的群落代谢及其对冰体温度和光照强度等环境因素的响应,但在放置观测系统时需要颠倒安装并考虑冰层的发育情况^[64]。此外,通过分析各类通量可研究表层水体中碳和营养物等关键物质的生物地球化学转化过程,为来年开春后的水质控制提供参考。

5.2 水环境涡动相关技术面临的挑战

a. 原理限制——不符合理想的应用环境。实际观测环境偏离技术原理要求的问题可能限制涡动相关技术的应用,需要针对性地提出解决方法。例如,对于不能视作均质下垫面的河床,可以适当增大观测高度从而令各异质源区释放的物质经历足够长的路径达到充分混合;对于不能忽略分子扩散的低流速环境,可以尝试结合微电极剖面技术进行扩散模式识别;对于难以确定主流的风生流环境,可以在观测系统上增加水翼使其自适应水流方向或设计机动装置以主动调姿。

b. 仪器限制——不适应多通量长效观测。理论上,涡动相关技术能够测量沉积物-水界面包括能量、动量和各类物质质量在内的多类型通量,但目前能够原位观测的水质指标有限,且部分指标在技术上难以提升观测频率,从而限制了该技术在通量观测类型上的扩展。同时,为实现原位长效观测,传感器需具有高鲁棒性,能够抵御恶劣且多变的野外环境,同时避免藻类附着等问题。尽管如此,近年来专水环境涡动相关技术开发的传感器正逐渐上市,结合外部供电和数传设备的涡动相关系统能够实现连续6个月的温氧通量原位观测,该技术具有原位长效开展多通量观测的潜力。

c. 计算限制——难以规范数据处理流程。目前水环境涡动相关观测数据的处理并没有统一的流程或方法,滑动窗口长度和时滞移动时间等参量的确定在一定程度上带有主观因素,这为长时段观测数据的批量处理带来了困难,且降低了不同研究数据之间的可交流性。但近期 Bluteau 等^[33]学者提出了通过识别耗散率以计算协方差的惯性耗散法,该方法颠覆了传统的计算路径,避免了计算参量的主观选取,甚至在一定程度上突破了涡动相关技术对传感器的依赖和受流速环境的限制。虽然这一计算方法还未得到广泛应用,但仍是今后涡动数据处理技术的发展方向或质量评价的分析依据。

6 结 语

涡动相关技术自其从微气象领域移植到水环境

领域以来,已成功用于开展沉积物-水界面通量的原位、长效、非侵入式观测,并展现出测量范围广、时间精度高和对不同底质适应性良好等优势,为河流、湖泊、水库、海岸和深海等环境的沉积物-水界面通量评估提供了新的选择。目前,水环境涡动相关技术已被应用于水利工程、湖沼科学和环境科学等领域,为水体水质修复、生态系统代谢评估、潜流交换速率测量和冰-水界面通量观测等研究方向提供了可靠的技术支撑。

水环境涡动相关技术具有其理论适用条件,并对传感器性能和数据处理方法提出了较高的要求。目前,该技术主要推荐用于下垫面水平均匀、动力条件较强和存在明显主流方向的水环境,且大多用于测量沉积物-水界面的溶解氧通量,这些因素在一定程度上限制了涡动相关技术的推广与应用。计算涡动相关通量时,需要修正由于仪器安装带来的误差、识别对湍流通量有贡献的多尺度涡旋并从观测数据中准确分离出湍动序列,但目前并没有统一的计算方法及流程,且质量评价、足迹分析等后处理技术仍有待进一步研发。

经过近20年的发展与实践,涡动相关技术已经成为一项适合于开展沉积物-水界面通量原位观测的可靠技术。未来随着涡动传感器的开发、机械调姿功能的增加及数值模拟和湍流信号处理方法的进步,水环境涡动相关技术将有较为广阔的应用空间。

参考文献:

- [1] 雷沛,张洪,王超,等. 沉积物水界面污染物迁移扩散的研究进展[J]. 湖泊科学,2018,30(6):1489-1508. (LEI Pei, ZHANG Hong, WANG Chao, et al. Migration and diffusion for pollutants across the sediment-water interface in lakes:a review[J]. Journal of Lake Science,2018,30(6):1489-1508. (in Chinese))
- [2] 范成新. 湖泊沉积物-水界面研究进展与展望[J]. 湖泊科学,2019,31(5):1191-1218. (FAN Chengxin. Advances and prospect in sediment-water interface of lakes:a review[J]. Journal of Lake Science,2019,31(5):1191-1218. (in Chinese))
- [3] 王汗,燕文明,宋兰兰,等. 摇蚊幼虫扰动对沉积物-水界面结构特征的影响[J]. 水资源保护,2017,33(5):177-182. (WANG Han, YAN Wenming, SONG Lanlan, et al. Bioturbation effects of chironomus plumosus on structural characteristics of sediment-water interface[J]. Water Resources Protection,2017,33(5):177-182. (in Chinese))
- [4] MONTGOMERY R B. Vertical eddy flux of heat in the atmosphere[J]. Journal of the Atmospheric Sciences,1948,5(6):265-274.

- [5] SWINBANK W C. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere [J]. *Journal of Meteorology*, 1951, 3 (8) : 135-145.
- [6] OBUKHOV A M. Characteristics of the micro-structure of the wind in the surface layer of the atmosphere [J]. *Geofizika*, 1951, 3 : 49-68.
- [7] FOKEN T, NAPPO C J. *Micrometeorology* [M]. New York : Springer, 2008.
- [8] DESJARDINS R L. Carbon dioxide budget of maize [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1985, 36 (1) : 29-41.
- [9] VERMA S B, KIM J, CLEMENT R J. Carbon dioxide, water vapor and sensible heat fluxes over a tallgrass prairie [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1989, 46 (1/2) : 53-67.
- [10] WILSON K B, MEYERS T P. The spatial variability of energy and carbon dioxide fluxes at the floor of a deciduous forest [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 98 (3) : 443-473.
- [11] 王介民, 刘晓虎, 祁永强. 应用涡旋相关方法对戈壁地区湍流输送特征的初步研究 [J]. *高原气象*, 1990, 9 (2) : 120-129. (WANG Jiemin, LIU Xiaohu, QI Yongqiang. Preliminary study of turbulence transfer characteristics in gobi area with an eddy correlation technique [J]. *Plateau Meteorology*, 1990, 9 (2) : 120-129. (in Chinese))
- [12] 沈艳, 刘允芬, 王堰. 应用涡动相关法计算水热、CO₂通量的国内外进展概况 [J]. *南京气象学院学报*, 2005, 28 (4) : 129-136. (SHEN Yan, LIU Yunfen, WANG Yan. Advances in applying the eddy-covariance technique to calculate heat, moisture and CO₂ flux [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2005, 28 (4) : 129-136. (in Chinese))
- [13] BERG P, RØY H, JANSSENF, et al. Oxygen uptake by aquatic sediments measured with a novel non-invasive eddy-correlation technique [J]. *Marine Ecology Progress*, 2003, 261 : 75-83.
- [14] BERG P, RØY H, WIBERG P L. Eddy correlation flux measurements: the sediment surface area that contributes to the flux [J]. *Limnology and Oceanography*, 2007, 52 (4) : 1672-1684.
- [15] RHEUBAN J E, BERG P. The effects of spatial and temporal variability at the sediment surface on aquatic eddy correlation flux measurements [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2013, 11 (7) : 351-359.
- [16] DONIS D, HOLTAPPELS M, NOSS C, et al. An assessment of the precision and confidence of aquatic eddy correlation measurements [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2015, 32 (3) : 642-655.
- [17] REIMERS C E, ÖZKAN HH T, ALBRIGHT A T, et al. Microelectrode velocity effects and aquatic eddy covariance measurements under waves [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2016, 33 (2) : 263-282.
- [18] 郑阳华, 邹浩东, 何强, 等. 水动力条件对沉积物-水界面氧通量的影响 [J]. *湖泊科学*, 2018, 30 (6) : 1552-1559. (ZHENG Yanghua, ZOU Haodong, HE Qiang, et al. Influence of hydrodynamic conditions on the oxygen flux of sediment-water interface [J]. *Journal of Lake Science*, 2018, 30 (6) : 1552-1559. (in Chinese))
- [19] 高学平, 郭晓雪, 孙博闻, 等. 基于涡动相关法的沉积物-水界面氧通量与水动力条件响应关系 [J]. *水利学报*, 2020, 51 (3) : 315-325. (GAO Xueping, GUO Xiaoxue, SUN Bowen, et al. Relationship between oxygen flux of sediment-water interface and hydrodynamic conditions based on eddy correlation method [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51 (3) : 315-325. (in Chinese))
- [20] MURNIATI E, GEISSLER S, LORKE A. Short-term and seasonal variability of oxygen fluxes at the sediment-water interface in a riverine lake [J]. *Aquatic Encees*, 2015, 77 (2) : 183-196.
- [21] MCGINNIS D F, BERG P, BRAND A, et al. Measurements of eddy correlation oxygen fluxes in shallow freshwaters: towards routine applications and analysis [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35 (4) : 1-5.
- [22] KOOPMANS D J, BERG P. Stream oxygen flux and metabolism determined with the open water and aquatic eddy covariance techniques [J]. *Limnology and Oceanography*, 2015, 60 (4) : 1344-1355.
- [23] RODIL I F, ATTARD K M, NORKKO J, et al. Towards a sampling design for characterizing habitat-specific benthic biodiversity related to oxygen flux dynamics using aquatic eddy covariance [J]. *Plos One*, 2019, 14 (2) : e211673.
- [24] DE FROE E, ROVELLI L, GLUD R N, et al. Benthic oxygen and nitrogen exchange on a cold-water coral reef in the North-East Atlantic Ocean [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6 : 1-13.
- [25] 崔尚公, 于新生, 赵广涛, 等. 海底边界层溶解氧通量原位观测技术方法研究 [J]. *海洋技术学报*, 2017, 36 (2) : 122-131. (CUI Shangong, YU Xinsheng, ZHAO Guangtao, et al. Research on the in-situ observation methods for dissolved oxygen flux in the benthic boundary layer [J]. *Journal of Ocean Technology*, 2017, 36 (2) : 122-131. (in Chinese))
- [26] 古小治, 张启超, 孙淑云, 等. 富氧-缺氧过程对氧气分布及交换过程影响 [J]. *中国环境科学*, 2015, 35 (5) : 1495-1501. (GU Xiaozhi, ZHANG Qichao, SUN Shuyun, et al. Influence of anaerobic and aerobic processes on bottom oxygen dynamic and exchange process across sediment water interface [J]. *Chinese Environmental Science*, 2015, 35 (5) : 1495-1501. (in Chinese))
- [27] TENGBERG A, HALL P O J, ANDERSSON U, et al. Intercalibration of benthic flux chambers: II. hydrodynamic

- characterization and flux comparisons of 14 different designs [J]. *Marine Chemistry*, 2005, 94(1/2/3/4): 147-173.
- [28] 潘延鑫,冯绍元,罗纳,等. 典型盐碱地改良区农田排水沟水体与底泥界面氧通量研究[J]. *水利学报*, 2019, 50(7): 835-843. (PAN Yanxin, FENG Shaoyuan, LUO Wan, et al. Experimental studies on the oxygen flux across the sediment-water interface in drainage ditches of saline water [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(7): 835-843. (in Chinese))
- [29] 姜子可,于新生,靳卫卫. 雨滴对水-气界面溶解氧与pH扩散影响的平面光极观测方法[J]. *海洋学报*, 2018, 40(7): 134-142. (JIANG Zike, YU Xinsheng, JIN Weiwei. Planar optode observation method for the effect of raindrop on dissolved oxygen and pH diffusion of air-water interface [J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(7): 134-142. (in Chinese))
- [30] GLUD R N, BERG P, HUME A, et al. Benthic O_2 exchange across hard-bottom substrates quantified by eddy correlation in a sub-Arctic fjord [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2010, 417: 1-12.
- [31] BOUDREAU B P, JØRGENSEN B B. The benthic boundary layer: transport processes and biogeochemistry [M]. New York: Oxford University Press, 2001.
- [32] HU I H, HEMOND H F. A multi-function sensor for eddy correlation measurements of benthic flux [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(3): 1509-1526.
- [33] BLUTEAU C E, IVEY G N, DONIS D, et al. Determining near-bottom fluxes of passive tracers in aquatic environments [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45: 2716-2725.
- [34] LECLERC M Y, THURTELL G W. Footprint prediction of scalar fluxes using a markovian analysis [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1990, 52(3): 247-258.
- [35] LECLERC M Y, THOMAS F. Footprints in micrometeorology and ecology [M]. New York: Springer, 2014.
- [36] POINDEXTER C M, RUSSELLO P J, VARIANO E A. Acoustic doppler velocimeter-induced acoustic streaming and its implications for measurement [J]. *Experiments in Fluids*, 2011, 50(5): 1429-1442.
- [37] LORRAI C, MCGINNIS D F, BERG P, et al. Application of oxygen eddy correlation in aquatic systems [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, 27(9): 1533-1546.
- [38] BERG P, KOOPMANS D J, HUETTEL M, et al. A new robust oxygen-temperature sensor for aquatic eddy covariance measurements [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2016, 14(3): 151-167.
- [39] MCGINNIS D F, SOMMER S, LORKE A, et al. Quantifying tidally driven benthic oxygen exchange across permeable sediments: an aquatic eddy correlation study [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(10): 6918-6932.
- [40] ZHANG Y, SUN B, JU W, et al. Eddy correlation measurements of benthic oxygen fluxes in a stratified and operated reservoir [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 595: 126007.
- [41] FOKEN T, ONCLEY S. Workshop on instrumental and methodical problems of land surface flux measurements [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1995, 76(7): 1191-1224.
- [42] HAN J W, KAMBER M, PEI J. Data mining: concepts and techniques [M]. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2012.
- [43] WILCZAK J M, ONCLEY S P, STAGE S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99(1): 127-150.
- [44] RANNIK Ü, VESALA T. Autoregressive filtering versus linear detrending in estimation of fluxes by the eddy covariance method [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1999, 91(2): 259-280.
- [45] BERG P, REIMERS C E, ROSMAN JH, et al. Technical note: time lag correction of aquatic eddy covariance data measured in the presence of waves [J]. *Biogeosciences Discussions*, 2015, 12(11): 8395-8427.
- [46] EUGSTER W, SENN W. A cospectral correction model for measurement of turbulent NO_2 flux [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1995, 74(4): 321-340.
- [47] GREGG MC. Uncertainties and limitations in measuring ϵ and χ [J]. *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, 1997, 16(11): 1483-1490.
- [48] MASSMAN W J, IBROM A. Attenuation of concentration fluctuations of water vapor and other trace gases in turbulent tube flow [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2008, 8(3): 9819-9853.
- [49] LIGNE A D, HEINESCH B, AUBINET M. New transfer functions for correcting turbulent water vapour fluxes [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2010, 137: 205-221.
- [50] GÖCKEDEM. Quality control of CarboEurope flux data [J]. *Biogeosciences Discussions*, 2008, 5(2): 433-450.
- [51] 张笛,田鑫,吴师. 南淝河污染通量解析与治理[J]. *水资源保护*, 2020, 36(5): 99-103. (ZHANG Di, TIAN Xin, WU Shi. Analysis of pollution flux in the Nanfeihe river and its treatment [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(5): 99-103. (in Chinese))
- [52] YAN C, ZENG L, CHEF, et al. High-resolution characterization of arsenic mobility and its correlation to labile iron and manganese in sediments of a shallow eutrophic lake in China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(5): 2093-2106.
- [53] 孙义博. 机载涡动相关区域湍流水热通量观测方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.