

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.03.11

太湖波浪特征参数反演计算

姜 龙^{1,2}, 李一平^{1,2}, 王文才^{2,3}, 杜 薇⁴, 王建威⁵

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 3. 环境保护部华南环境科学研究所, 广东 广州 510655;

4. 环境保护部环境科学研究所, 江苏 南京 210042; 5. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014)

摘要:为研究声学多普勒流速仪(acoustic doppler velocimetry, ADV)测量的流速与水压数据在湖泊波浪特征参数反演中的适用性,在太湖梅梁湖和湖心区两个区域进行野外观测,利用预处理后的水压和流速数据进行傅里叶变换和转换获得表面波浪谱,取截断频率为0.03~0.5 Hz对表面波浪谱进行反演计算。结果表明,梅梁湾5月和湖心7月使用水压数据反演得到的有效波高分别为0.454 m、0.187 m,有效波周期分别为2.82 s、2.56 s;使用ADV流速数据反演计算得到的有效波高分别为0.451 m、0.181 m,有效波周期分别为2.82 s、2.62 s;与使用压力式方向波潮仪测得的有效波高(0.461 m、0.180 m)和有效波周期(2.77 s、2.60 s)非常接近且变化趋势基本相同,可见ADV的水压和流速数据可用来进行湖泊的波浪的计算。

关键词:波浪特征;波谱分析;反演计算;声学多普勒流速仪;压力式方向波潮仪;太湖

中图分类号:X143

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2018)03-0068-07

Inversion calculation of wave characteristics parameters in Taihu Lake

JIANG Long^{1,2}, LI Yiping^{1,2}, WANG Wencai^{2,3}, DU Wei⁴, WANG Jianwei⁵

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development of Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University,

Nanjing 210098, China; 3. South China Institute of Environmental Science, Guangzhou 510655, China;

4. Nanjing Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China;

5. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to study the application of the data of velocity and water pressure measured by acoustic doppler velocimeter (ADV) in the inversion calculation of wave characteristics parameters, field observations in two sites in Taihu Lake were carried out, and the data of water pressure and velocity after preprocessing were Fourier transformed to obtain surface wave spectra, taking the truncation frequency of 0.03~0.5 Hz to have inversion calculation. The results showed that the effective wave heights obtained from the inversion calculation of water pressure data of May in Meiliang Bay and of July in lake heart were 0.454 m, 0.187 m, respectively, and the effective wave periods of which were 2.82 s, 2.56 s, respectively. The effective wave heights of May in Meiliang Bay and of July in lake heart calculated by using ADV velocity data were 0.451 m, 0.181 m respectively, and the effective wave periods of which were 2.82 s, 2.62 s, respectively, which is very close to the effective wave height (0.461 m, 0.18 m) and effective wave period (2.77 s, 2.60 s) obtained by DWR, and the change trend is basically the same. Accordingly, ADV pressure and velocity data can be used for the lake wave calculation.

Key words: wave characteristics; spectral analysis; inversion calculation; acoustic doppler velocimeter; Taihu Lake

基金项目:国家自然科学基金(51579061,51579071);创新研究群体科学基金(51421006);国家重点研发计划资助(2016YFC0401703)

作者简介:姜龙(1993—),男,硕士研究生,研究方向为湖泊富营养化及水环境数学模型。E-mail: ziyamubo@hhu.edu.cn

通信作者:李一平,教授,博士生导师。E-mail: liyiping@hhu.edu.cn

波浪作为水体中影响水动力的重要因素,对于水体中污染物迁移、底泥再悬浮和输运以及湖泊富营养化都有着不可忽略的影响。目前有大量波浪观测的研究,包括室内实验、模型模拟和野外监测3个主要方向。其中室内实验主要是在各种水槽中进行,通过人工造波机产生波浪进行观测,如李一平等^[1]使用室内水槽研究了水生植物对波浪削减作用。模型模拟主要是使用各种经验、半经验公式对波浪在水体中的影响进行量化,目前使用较为广泛的波浪模型为第3代浅海波浪数值模型(simulating wave nearshore, SWAN),由荷兰 Delft 大学土木工程系开发,国内谢友鸽等^[2]基于 SWAN 模型对东沙岛海域的有效波高进行了模拟和分析。由于室内实验不能很好地反映自然界水体的波浪特征,因此波浪的野外观测数据作为模型模拟中使用的经验公式的基础十分重要。目前波浪野外观测主要集中在河口和海洋中,但对于湖泊,尤其是像太湖这类易受风浪影响而水动力复杂的大型浅水湖泊,其波浪野外观测也十分必要。

传统的压力测波法根据仪器上高灵敏度和高分辨率的压力传感器测量的水下压力的变化来计算相应的波浪特征。本次野外观测中使用的 Midas 生产的方向式波潮仪(directional wave record, DWR),可实时输出各种波要素的统计特征,但存在着以下问题:①仪器笨重,运输不便;②野外条件无法提供稳定的电源,使用电池会导致供电时间不足;③DWR 的工作模式有限制,无法连续高频测量。而声学多普勒流速仪(acoustic doppler velocimetry, ADV)利用多普勒原理,能够同时高精度、高分辨率地捕捉水体中的流速与水压变动信息,目前作为研究紊流、泥沙特性的先进测量仪器被广泛应用于海洋、河口和湖泊等水体^[3],为反演波浪信息提供了可能。Bola 等^[4-5]在河口的研究也表明此种方法是可行的。目前国内仅发现芦军等^[6]在潮滩上使用此方法对波浪进行了计算,而利用 ADV 在湖泊中进行波浪特征参数反演的未见报道。笔者在河口海洋中压力测波法研究的基础上,利用野外观测原始数据对 ADV 观测数据进行波浪参数的反演计算,并对其在湖泊中的实用性和有效性进行分析讨论。

1 研究区域概况

太湖(119°52'E ~ 122°36'E, 30°55'N ~ 31°32'N)是中国第三大浅水湖泊,总面积2338 km²,平均水深为1.9 m,最大水深为2.6 m。太湖流域夏季主导风向是东南风,冬季主导风向是西北风,平均风速

3.5 ~ 5.0 m/s^[7]。作为一个典型的大型浅水湖泊,底泥再悬浮和营养盐释放过程都与太湖风浪密切相关,因此研究波浪特征对于分析太湖水体水动力和水质都十分重要^[9]。本文选择梅梁湾和湖心作为研究地点进行野外观测,获得原始数据(图1)。2014年5月21日08:30至5月29日08:30在梅梁湾的拖山进行观测,观测期间平均水深为2.7 m,平均波高为0.254 m。2014年7月22—31日在湖心区平台山进行观测,观测期间平均水深为3.15 m,平均波高为0.263 m。

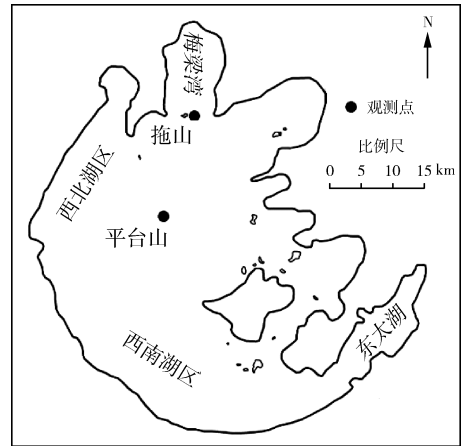


图1 研究区域

2 研究方法

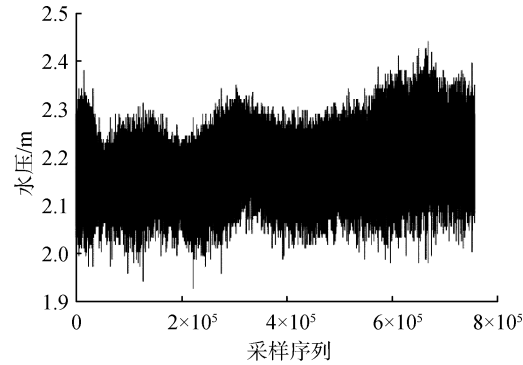
2.1 野外观测仪器配置

现场观测运用 SonTek 公司生产的 ADV ocean, 5 MHz。它可以通过声学方法直接测量三维流速,具有水流干扰小、精度高、操作方便、无须率定和后处理功能强等特点,有较好的应用前景^[10]。仪器放置在距离湖底5 cm的底边界层处,对三维流速和回声强度进行同步测量,监测频率为10 Hz。波浪观测使用 MIDAS 公司生产的 DWR,它是目前功能最强大的波浪记录仪之一,基于线性波理论的测量分析方法可实时输出各种波要素的统计特征。压力式方向波潮仪放置在水表以下95 cm处,监测频次分别为5 min/次(梅梁湾的梅山)和14 min/次(湖心区的平台山)。

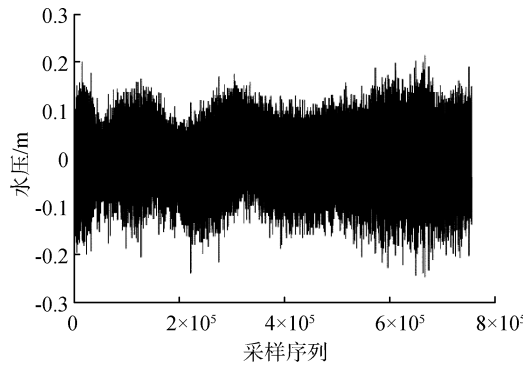
2.2 ADV 数据预处理

ADV 虽然具有采样频率高、采样点小和水流干扰小的特点,但同时也容易受到水体气泡、大颗粒悬浮物以及边界回声强度和脉动强度等外界环境因素的干扰,导致测量信号的信噪比下降^[10]。当实际的测量值超出预设范围时,可能会导致数据失真,出现明显的异常值或毛刺点^[11],因此对 ADV 数据序列进行质量检测是十分必要的。一般认为,当测量数据相关性系数小于70%或信噪比小于5 dB时,认为

数据质量较差,应舍弃^[12]。而实际情况中,信噪比和相关系数较低有可能是水流的紊动等因素造成的,剔除低相关系数或信噪比低的实测数据可能会影响基于 ADV 测量值脉动量的能谱计算。在观测期太湖风浪相对较小,测量数据超出预设范围的不多,其中信噪比小于 5 dB 的基本没有,而相关性系数小于 70% 的数据只占 0.03% 左右,并且通过与未剔除的计算结果对比发现,其对最终结果的影响很小,因此采用性噪比和相关系数预处理 ADV 数据后得到用来反演计算表面波谱的数据(图 2(a))。ADV 原始压力数据由于测点深度的不同而存在静压的影响,流速数据也受到湖流的影响存在平均流速的基值,因此在进行波浪特征参数计算之前,必须对原始数据进行中心化。同时由于 ADV 数据中趋势项的存在会使谱变形,甚至可能导致低频时的谱估计失真,因此也需要对数据进行消除趋势项处理^[13]。笔者采用将数据减去其均值的方法,使原始序列转变成均值为零的序列,采用多项式最小二乘法消除趋势项,处理后的数据如图 2(b)。



(a) 异常值剔除后水压数据



(b) 中心化和去趋势化后水压数据

图 2 原始数据

2.3 波浪参数计算方法

波浪可视为由一系列不同频率、不同振幅和不同随机初位相的余弦波迭加而成,因此可以基于 ADV 数据使用快速傅里叶变换方法和转换函数得到波浪能谱。首先对 ADV 测量得到的压力和流

速数据进行预处理后,使用快速傅里叶变换方法得到对应的压力能谱 $S_p(f)$ 和水平方向上的流速能谱 $S_u(f)$ 。

$$S_p(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} (2 |A_{T,p}(f)|^2 / T) \quad (1)$$

$$S_u(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} (2 |A_{T,u}(f)|^2 / T) \quad (2)$$

式中: $A_{T,p}(f)$, $A_{T,u}(f)$ 分别为时域 ADV 压力和流速信号经过快速傅里叶变换后得到的频域数据; f 为波浪频率; T 为周期。

根据线性波理论将压力能谱和水平流速能谱转化为表面波谱^[14]。

$$S_{s,p}(f) = \left\{ \frac{\cosh(kd)}{\cosh[k(d+Z)]} \right\}^2 \frac{S_p(f)}{\rho^2 g^2} \quad (3)$$

$$S_{s,u}(f) = \left\{ \frac{\sinh(kd)}{\cosh[k(d+Z)]} \right\}^2 \frac{S_u(f)}{f^2} \quad (4)$$

其中 $k = 2\pi/L$, $\omega = 2\pi f$, $\omega^2 = gk \tanh(kd)$

式中: $S_{s,p}(f)$ 和 $S_{s,u}(f)$ 分别为压力和水平流速的表面波谱; d 为水深; g 为当地重力加速度; k 为波数; L 为波长; ρ 为水密度; ω 为波浪角频率。

由于式(1)中的 $\rho^2 g^2$ 已经被考虑在 ADV 输出的压力数据中,因此实际计算时直接使用 ADV 输出的数据代替压力数据进行转换即可。

有效波是为了衡量波浪重要特征提出的概念,对于描述水体受风浪的影响过程非常重要,将波列中的波高从大到小依次排列,其中最大的 1/3 部分波高的平均值称为有效波高,这部分波对应的平均波周期为有效波周期^[15]。在谱分析中,一般使用谱矩来描述谱的分布,因此定义表面波谱的 n 阶谱矩 m_n 如下:

$$m_n = \int_0^\infty f^n S_s(f) df \quad (5)$$

表面波高遵循瑞利分布的假设,因此,有效波高可以用表面波谱的零阶谱矩^[5]来表示:

$$H_s = 4 \sqrt{m_0} \quad (6)$$

同样也可以通过表面波谱计算波周期参数,波平均周期 T_m 为

$$T_m = m_0 / m_1 \quad (7)$$

根据李瑞丽^[16]在波浪谱中关于周期的研究结果,有效波周期 T_s 与平均波周期 T_m 存在着相应的拟合关系:

$$T_s = 1.164 T_m \quad (8)$$

这与笔者在梅梁湾和湖心使用 DWR 测量值中平均周期和有效波周期的拟合关系较为接近

$$T_s = 1.14 T_m \quad (9)$$

因此,可使用式(7)和式(9)计算波浪的有效波周期。

3 结果与讨论

3.1 截断频率的确定

由于在水体传递过程中波浪信号强度的衰减不可避免,尤其是高频信号的衰减更加明显。图3(a)是根据梅梁湾5月22日22:00至23日12:00的压力数据获得的特征压力谱,可以发现波浪的频率主要集中在0.5 Hz以下,当频率大于0.5 Hz时,波浪信号几乎衰减为0。将特征压力谱转换为表面波谱后,虽然波浪信号的衰减作用得到了补偿,但同时也使得表面波谱在高频部分的信号迅速增加。如图3(b)所示,当频率在1.0 Hz左右时,表面波谱密度在4000 m²·s以上,造成了数据失真,因此需要设置截断频率对高频信号的失真数据进行筛除。

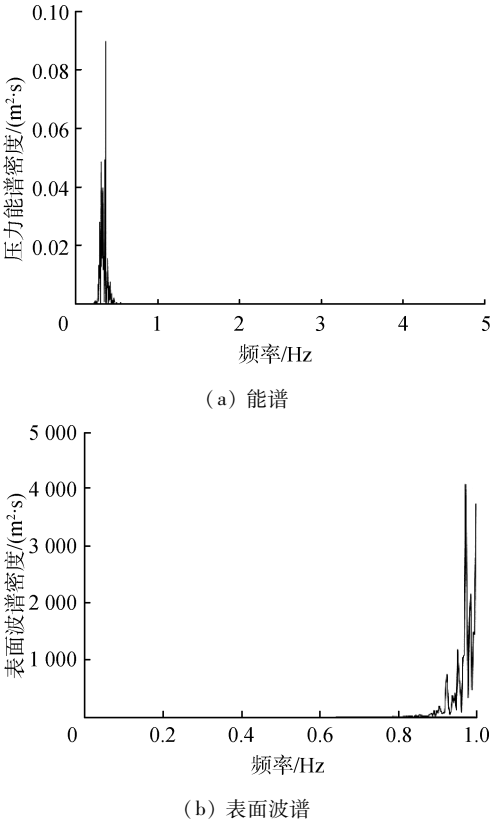


图3 ADV压力数据转换得到的能谱、表面波谱

目前研究者在不同的水体中使用了许多方法确定截断频率:

a. Gordon 等^[14]在近岸浅水区利用 ADV 测量波浪时,取传递函数为定值 200。在本次监测中水深对应的高频截断频率分别为 0.56 Hz(梅梁湾,水深 2.7 m)和 0.51 Hz(湖心,水深 3.15 m)。

b. Wiberg 等^[17]使用式(10)计算高频截断频率:

$$f_{\max} = 1/2 \sqrt{g/\pi d} \tag{10}$$

在本次监测中根据式(10)得到的截断频率分别为 0.54 Hz(梅梁湾)和 0.5 Hz(湖心)。

c. 陈子桑等^[18]在海滩破波带使用式(11)计算截断频率:

$$f_{\max} = 1/2 \sqrt{g/\pi h_p} \tag{11}$$

式中: h_p 为仪器所在深度。在本次监测中根据式(11)得到的截断频率分别为 0.54 Hz(梅梁湾)和 0.5 Hz(湖心)。

d. Macvean 等^[5]在泥质的潮滩使用 ADV 观测波浪特征时,使用的是固定的频率 0.5 Hz。

e. 芦军等^[6]在长江口南汇边滩的波浪观测得到的波浪特征与太湖的较为接近,他们采用的截断频率为 0.03 ~ 0.5 Hz。

对比发现,采用上述方法得到的高频截断频率较为接近,大多在 0.5 Hz 左右。由于研究的波浪周期一般在 30 s 以下,因此低频截断设为 0.03 Hz,并且对比不同低频截断频率的能谱发现,其对结果的影响非常小。综合以上的考虑,本文通过表面波谱计算有效波高、波周期的截断频率定为 0.03 ~ 0.5 Hz。

3.2 基于压力能谱的波浪特征参数反演

对 ADV 测得的压力数据去中心化和去趋势化后,通过傅里叶变换得到压力特征谱,再使用传递函数转换后得到表面波浪谱。根据设置的截断频率对高频失真数据进行筛除后得到用于计算表面波浪特征的波浪谱(图4)。由图4可以发现表面波谱在频率为 0.3 ~ 0.4 Hz 的时候密度较大,平均密度约为 0.1 m²·s。

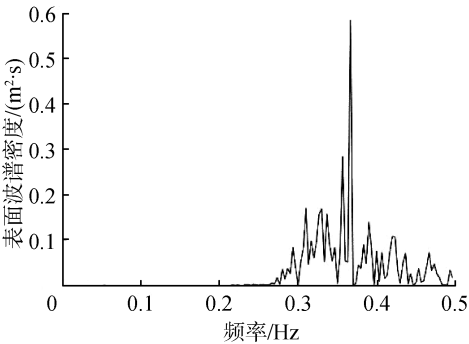
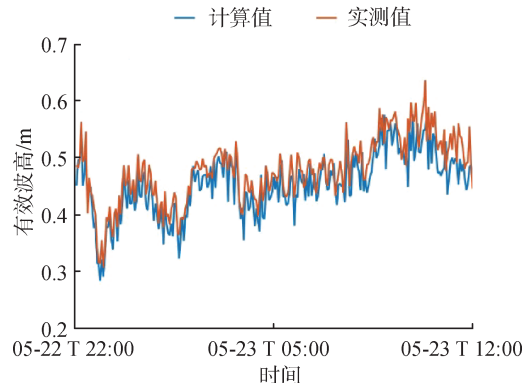


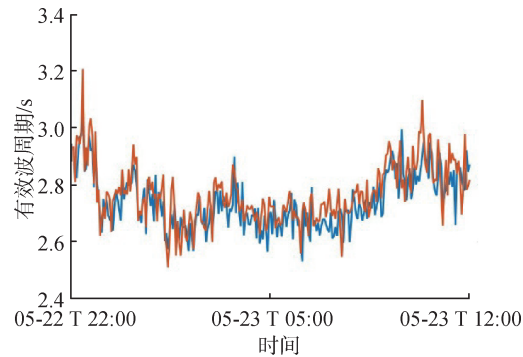
图4 设置取截断频率后的表面波谱

5月在梅梁湾观测期间通过两种不同方式得到的每5分钟的波浪特征参数见图5(a)、(b)。由图5(a)、(b)中可知,在观测期计算得到的平均有效波高为0.454 m,有效波周期为2.82 s,而使用DWR方向式波潮仪获得的有效波高为0.461 m,有效波周期为2.77 s,两者的变化趋势基本相同,相对误差十分小。使用7月的监测数据进行计算,结果见图5(c)、(d)。由图5(c)、(d)可见,观测期平均有效波高为0.187 m,有效波周期为2.56 s,与波潮仪观测数值(有效波高为0.180 m,有效波周期为2.60 s)

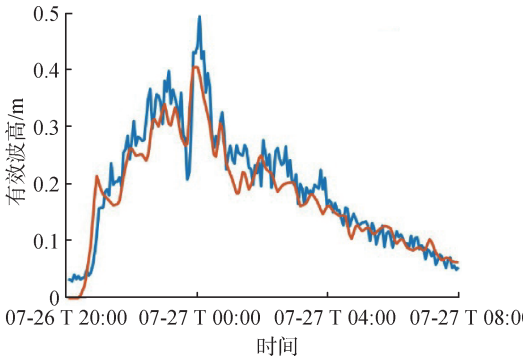
也十分接近,而且两者的变化趋势基本相同,相对误差较小,虽然波周期的变化范围偏大,但仍在可接受范围内(图 5(d))。因此,这种由 ADV 计算波浪参数的精度在大部分的情况下是足够的,适用于太湖等这样的风浪较明显的湖泊中波浪的参数测量。



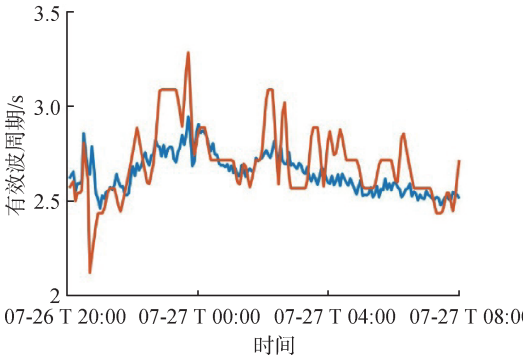
(a) 梅梁湾有效波高



(b) 梅梁湾有效波周期



(c) 湖心有效波高

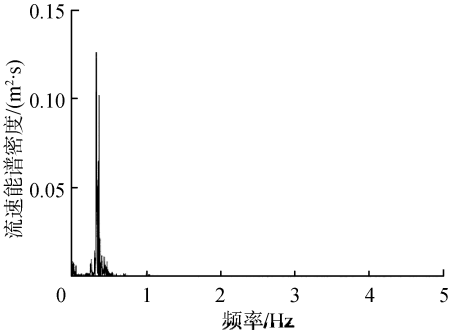


(d) 湖心有效波周期

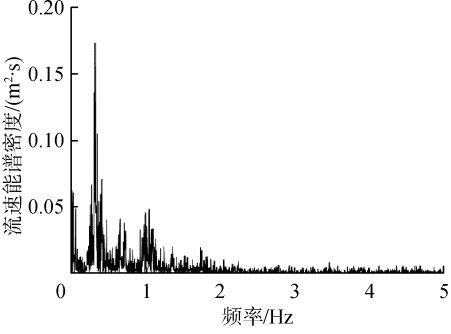
图 5 基于水压的反演结果与 DWR 实测值对比

3.3 基于流速能谱的波浪特征参数反演

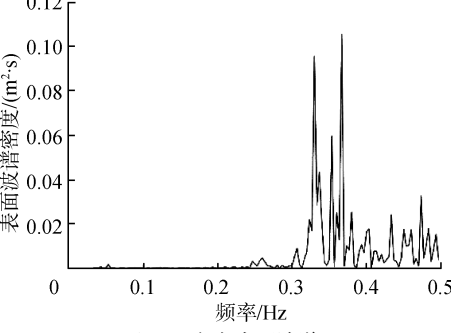
虽然可以通过 ADV 的压力数据进行表面波浪特征的反演,并且精度良好,但是大部分情况下 ADV 测量的是流速数据。对太湖这样的大型浅水湖泊,平均流速较小,而由风浪作用引起的水下的波动流速较大。因此,对于只测量流速的情况,也可以通过对流速数据进行去中心化和去趋势化等预处理,经过傅里叶变换得到 X 方向和 Y 方向的流速密度能谱(图 6(a)、(b)),同时经过传递函数转换后可以得到 X 方向和 Y 方向的表面波谱(图 6(c)、(d))。



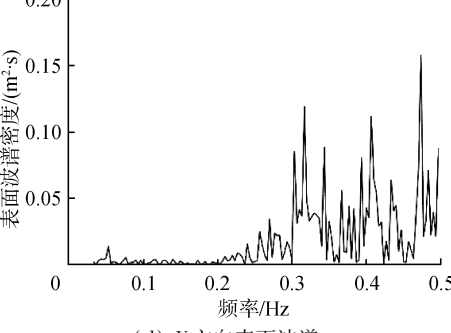
(a) X 方向流速密度能谱



(b) Y 方向流速密度能谱



(c) X 方向表面波谱



(d) Y 方向表面波谱

图 6 基于 ADV 流速数据转换的能谱和表面波谱

根据设置的截断频率对高频失真数据进行筛选得到用于计算表面波浪特征的波浪谱。流速能谱的峰值频率在 0.3 ~ 0.4 Hz,与压力能谱非常接近,说明流速数据的波动变化也可以较好地反映波浪的周期特征。由流速谱转换得到的表面波谱的叠加后平均值为 0.1 左右,也与由压力能谱得到的表面波谱相近,说明使用流速数据计算波高等波浪参数是可行的。

图 7 为观测期间通过 ADV 流速计算得到的每 5 分钟的波浪特征参数及 DWR 方向式波潮仪测量值对比图。从图 7 中可以非常明显地发现,在两个不同区域有效波高和有效波周期随时间的变化趋势与波潮仪观测数值十分接近。计算得到的平均有效波高分别为 0.451 m、0.181 m,有效波周期为 2.82 s、2.62 s,相对波潮仪实测值误差较小(有效波高分别为 0.461 m、0.180 m,有效波周期分别为 2.77 s、2.60 s)。7 月波周期的计算值和实测值的总体的误差虽然在可接受范围内,但是从图 7(d)中可以看到实测值变化较大,这主要可能是测量频率较低的原因。综合以上的对比发现,由 ADV 流速数据得到表面波谱并计算波浪特征参数的方法适用于类似太湖这样风浪主导水动力情况的湖泊。

对比两种计算方法在两个不同湖区得到的有效波高和有效波周期结果,发现两者的相对误差都较小,均在 5% 以内(表 1)。其中压力反演方法与 DWR 压力测波的原理是相同的,因此,得到的结果也较接近,而实际情况下,由于仪器和其他条件限制,部分 ADV 只测量了流速数据,因此流速反演方法更具有实际意义,可以发现这种方法得到的结果误差也较小,具备在湖泊中的使用价值。

表 1 两种反演计算方法在梅梁湾和湖心的结果及误差

湖区	计算方法	有效波高/ m	相对误差/ %	有效波 周期/s	相对误差/ %
梅梁湾 (5 月)	压力反演	0.454	1.52	2.82	1.81
	流速反演	0.451	2.17	2.82	1.81
湖心区 (7 月)	压力反演	0.187	3.89	2.56	1.54
	流速反演	0.181	0.56	2.62	0.77

4 结 语

本文基于线性波理论,利用 ADV 水压和流速数据进行傅里叶变换和转换获得表面波浪谱,使用截断频率为 0.03 ~ 0.5 Hz 对波浪特征参数进行反演计算。结果显示,5 月梅梁湾和 7 月湖心使用水压数据反演计算得到的有效波高为 0.454 m、0.187 m,有效波周期为 2.82 s、2.56 s。使用流速数据反演计算得到的有效波高为 0.451 m、0.181 m,有效波周期为 2.82 s、2.62 s。与使用压力式方向波潮仪 DWR 测量得到的有效波高(0.461 m、0.180 m)和有效波周期(2.77 s、2.60 s)非常接近且变化趋势基本相同。可见 ADV 的水压和流速数据可以用来进行湖泊的波浪观测,为研究波流联合作用下沉积物运输和污染物迁移的水动力学特征提供数据基础。

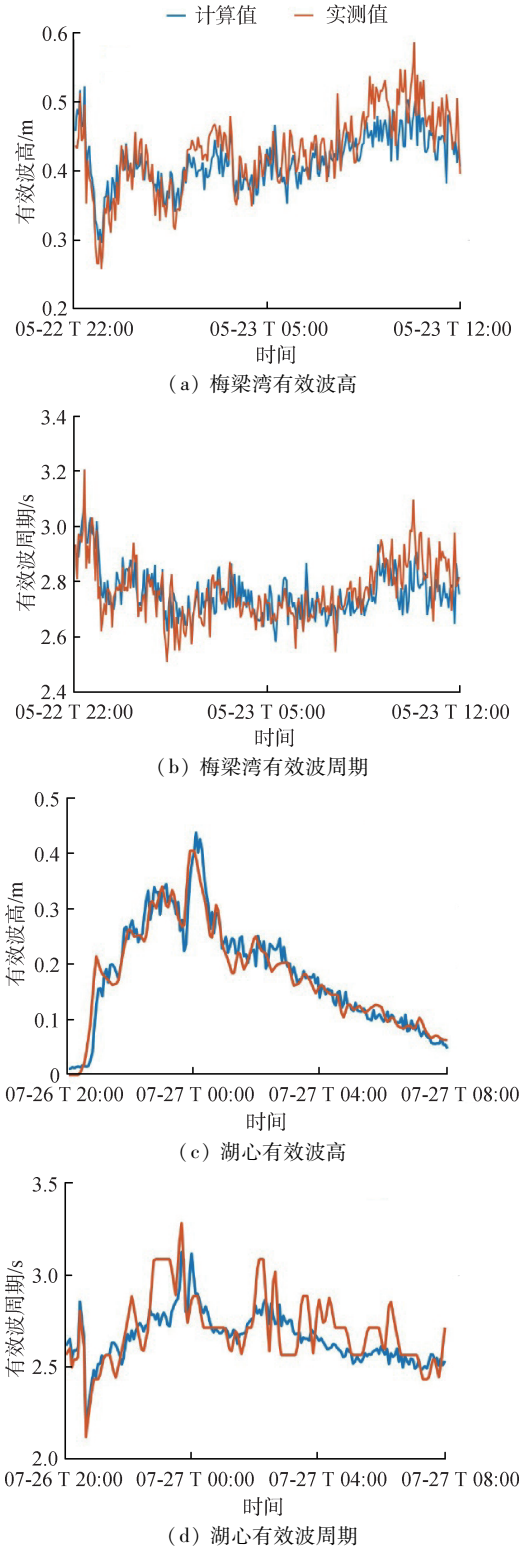


图 7 基于流速数据的反演结果与 DWR 实测值对比

参考文献:

- [1] LI Yiping, ANIM D O, WANG Ying, et al. An open-channel flume study of flow characteristics through a combined layer of submerged and emerged flexible vegetation[J]. *Ecohydrology*, 2014, 7(2): 633-647.
- [2] 谢友鸽, 郭金运, 朱金山, 等. 基于 SWAN 模型的东沙岛海域有效波高模拟与分析[J]. *山东科技大学学报 (自然科学版)*, 2016(3): 17-24. (XIE Youge, GUO Jinyun, ZHU Jinshan, et al. Simulation and analysis of significant wave height over seas of Dongsha island base on SWAN model[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology*, 2016(3): 17-24 (in Chinese))
- [3] GAO Xiaomeng, LI Yiping, TANG Chunyan, et al. Using ADV for suspended sediment concentration and settling velocity measurements in large shallow lakes [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(3): 2675-2684.
- [4] OS R B, SOUZA A. Measuring hydrodynamics and sediment transport processes in the Dee Estuary[J]. *Earth System Science Data Discussions*, 2010, 3(1): 157-165.
- [5] MACVEAN L J, LACY J R. Interactions between waves, sediment, and turbulence on a shallow estuarine mudflat [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(3): 1534-1553.
- [6] 芦军, 范代读, 涂俊彪, 等. 海滩上应用 ADV 进行波浪观测与特征参数计算[J]. *海洋通报*, 2016(5): 523-531. (LU Jun, FAN Daidu, TU Junbiao, et al. Application of ADV in the tidal flat to observe wave processes and calculate their characteristic parameters [J]. *Marine Science Bulletin*, 2016(5): 523-531 (in Chinese))
- [7] 王建威, 李一平, 罗澈葱, 等. 太湖风生流垂向切变规律的原位观测[J]. *水资源保护*, 2016, 32(6): 98-103. (WANG Jianwei, LI Yiping, LUO Liancong, et al. Field observation of vertical shear of wind-driven current in Taihu Lake [J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(6): 98-103. (in Chinese))
- [8] 徐瑞忠, 陆雪林, 盛根明, 等. 风浪对浅水湖泊水质的影响机制[J]. *水资源保护*, 2016, 32(3): 117-120. (XU Ruizhong, LU Xuelin, SHENG Genming, et al. Influencing mechanism of wind waves on water quality in shallow lake [J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(3): 117-120 (in Chinese))
- [9] 唐洪武, 肖洋, 陈玛丽, 等. 声学多普勒流速仪自动测量和分析系统[J]. *计算机测量与控制*, 2003(9): 651-654. (TANG Hongwu, XIAO Yang, CHEN Mali, et al. Acoustic-doppler velocimeter automatic measuring and analyzing system[J]. *Computer Measurement & Control*, 2003(9): 651-654 (in Chinese))
- [10] FUGATE D C, FRIEDRICHS C T. Determining concentration and fall velocity of estuarine particle populations using ADV, OBS and LISST[J]. *Continental Shelf Research*, 2002, 22(11/12/13): 1867-1886.
- [11] 鲁远征, 吴加学, 刘欢. 河口底边界层湍流观测后处理技术方法分析[J]. *海洋学报*, 2012, 34(5): 39-49. (LU Yuanzheng, WU Jiaxue, LIU Huan. An integrated post-processing technique for turbulent flow in estuarine boundary layer [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(5): 39-49. (in Chinese))
- [12] CHANSON H, TREVETHAN M, AOKI S I. Acoustic Doppler velocimetry (ADV) in small estuary: field experience and signal post-processing [J]. *Flow Measurement & Instrumentation*, 2008, 19(5): 307-313.
- [13] 李志强, 陈子桑, 李志龙. 近岸带波浪传播过程中波性质的统计对比分析[J]. *广东海洋大学学报*, 2010, 30(4): 43-47. (LI Zhiqiang, CHEN Zishen, LI Zhilong. Statistical analysis and comparison on wave characteristics during wave propagating in nearshore zone [J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2010, 30(4): 43-47. (in Chinese))
- [14] GORDON L, LOHRMANN A. Near-shore doppler current meter wave spectra[J]. *Oceans*, 2001(1): 273.
- [15] BASCO D R. Water wave mechanics for engineers and scientists [J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 1991, 66(24): 490-491.
- [16] 李瑞丽. 海浪周期关系的研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2007(2): 13-18. (LI Ruili. On the relationships of various wind wave period [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2007(2): 13-18. (in Chinese))
- [17] WIBERG P L, SHERWOOD C R. Calculating wave-generated bottom orbital velocities from surface-wave parameters[J]. *Computers & Geosciences*, 2008, 34(10): 1243-1262.
- [18] 陈子桑, 李志强, 李志龙, 等. 海滩碎波带波性质的统计对比分析[J]. *中山大学学报 (自然科学版)*, 2002(6): 86-90. (CHEN Zishen, LI Zhiqiang, LI Zhilong, et al. Propagation of the Complex Cracks in Rocks Without Water Pressure [J]. *Journal of Sun Yat-sen University*, 2002(06): 86-90 (in Chinese))

(收稿日期: 2017-07-07 编辑: 徐娟)

