

挟沙水流紊动通量的实验研究

林 鹏, 陈 立

(武汉大学水利水电学院, 教育部水沙科学重点实验室, 国家电力公司工程泥沙重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 利用 MicroADV 的声强衰减与泥沙浓度的关系, 提供一种无接触测量含沙量浓度的方法; 同时根据连续采样得到脉动的泥沙浓度, 对这种脉动浓度进行了初步分析并根据得到脉动浓度, 初步定量地研究了紊动扩散通量大小及其平衡关系。

关键词: MicroADV; 通量; 小波分析; 紊动扩散

中图分类号: TV 143⁺.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2002)02-0153-06

长期以来在对泥沙的悬浮机理的研究中, 紊动扩散理论一直占有主导地位, 紊动扩散即水流脉动的垂向脉动速度对颗粒的作用力, 泥沙颗粒正是在这种力的作用下克服颗粒的自身的重力作用而悬浮。刘大有^[1] (1992) 进一步提出是随机运动导致颗粒的悬浮, 这种随机运动包括分子运动和水流的紊动扩散。

由于测量手段的限制, 直接定量研究挟沙水流的紊动扩散和泥沙悬浮的成果较少。Jim. Best(1998) 用 PDA 测得了瞬时的泥沙浓度^[2], SHENC (1999) 利用 APFP 的实测资料, 首次定量的分析紊动扩散通量与重力沉降的平衡关系^[3]。

声强的衰减与泥沙浓度有定量的关系^[4], 通过采样率定可以定量的确定其关系式, 文献 [5] 中建立了超声波的声强与泥沙浓度的定量关系。本文将在此基础上, 通过室内水槽试验, 研究紊动扩散通量大小及其与泥沙冲淤的内在联系。

1 实验参数及脉动浓度的获取

流速采用 Sontek 提供的 MicroADV, 它操作简单方便, 能准确、快速地测量清水及低浓度挟沙水流的三维流场, 实验设备及 MicroADV 在挟沙水流中的应用见文献[5]。实验参数见表 1。图 1 是用两种不同的泥沙级配通过采样率定而建立的声强与浓度的经验曲线, 显然, 不同的级配及泥沙性质, 其关系也不尽相同。因此, 在实验前, 必须根据所选定的泥沙建立类似的经验关系。由于近壁区是推移质与悬移质交换区域, 水流大部分能量也在此区间耗散, 同时, 近壁区的水流结构是泥沙起动和悬浮的主要动力, 因此, 本文的研究集中于水流的近壁区。

收稿日期: 2001-04-02; 修订日期: 2001-05-10

基金项目: 国家自然科学基金 (50079018); 霍英东青年教师基金 (71070); 高等学校骨干教师资助计划资助

作者简介: 林 鹏 (1976-), 男, 四川绵阳人, 武汉大学水利水电学院在读硕士生, 主要从事挟沙水流紊动结构研究。

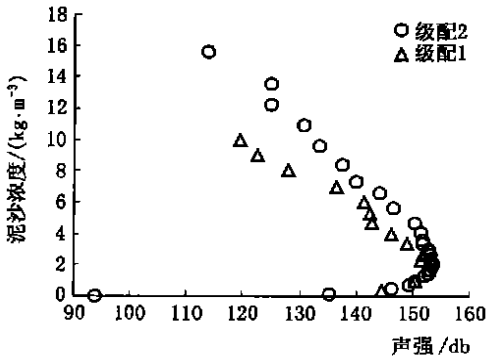


图1 泥沙浓度和声强的关系

Fig.1 Relationship between backscattered signal strength and sediment concentration.

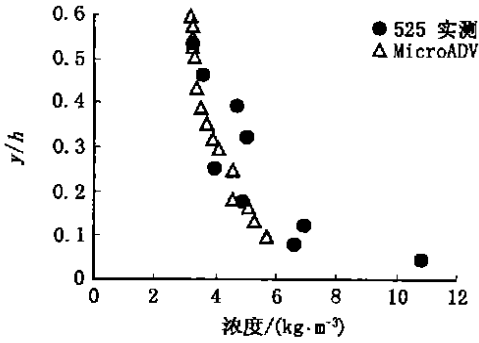


图2 采样实测浓度与MicroADV测量浓度对比

Fig.2 Sediment concentration acquired by the MicroADV and the sample

MicroADV 对每一测点都连续的记录其速度和声强, 这样我们可以由该点处声强和浓度的关系(图1)来测量该点的含沙量浓度。在525测次见表1中得到的泥沙浓度分布如图2, MicroADV 测量的浓度与实际采样的误差在5%~10%, 在低含沙水流中, 实际采样测量浓度自身也存在较大的误差(包括取样及称重的误差)。由于传统的采样测量不仅对流场有较大的干扰, 而且只能测量一段时间内的平均浓度, 它不能揭示浓度变化的脉动过程, 而MicroADV 提供一种无接触测量泥沙浓度的方法, 同时可以连续采样而得到的泥沙浓度的瞬时脉动。图3是525测次中MicroADV 测得的平均流速与对数公式, 两者符合较好。

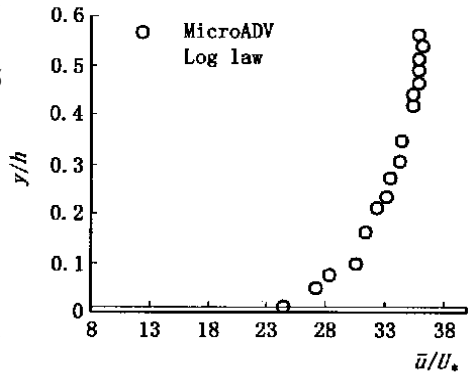


图3 实测平均流速与对数公式比较

Fig.3 Comparison of the mean profiles in sediment laden flow and the Log law.

表1 挟沙水流的实验参数

Table 1 Parameter of experiments in sediment laden flow

系列	流量 l ($L \cdot s^{-1}$)	水深 l / cm	比降 l / 10^{-3}	温度 l / $^{\circ}C$	U_{pj} l ($cm \cdot s^{-1}$)	含沙浓度 l ($kg \cdot m^{-3}$)	摩阻流速 l ($cm \cdot s^{-1}$)
525	37.6	14.61	1	27	51.4	6.2	3.78
531	59.6	17.5	1	25	68.6	5.5	3.14
6041	23.8	11.9	1	24	40	4.8	3.41
6042	23.8	11.94	1	24.5	40	4.4	3.41

2 脉动浓度的特性分析

进一步分析浓度的脉动特性, 任取525测次中位于 $y/h = 0.31$ 一点处对应的脉动浓度和流速(图4), 其脉动浓度信号及脉动流速信号的傅立叶变换结果如图5, 浓度频谱与水流的频谱

在高频部分都具有较好的线形关系（湍流谱标度率，标度指数为 $-5/3$ ）。

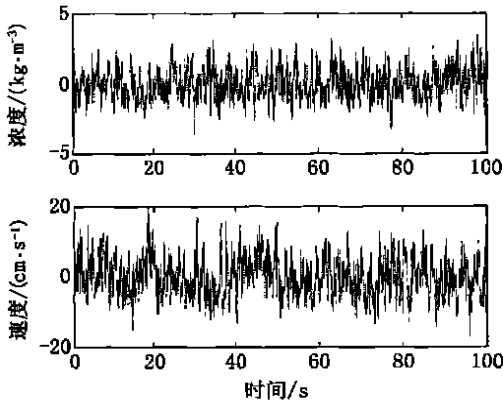


图 4 浓度脉动信号和流速脉动信号

Fig. 4 Fluctuation of concentration and velocity in sediment laden flow

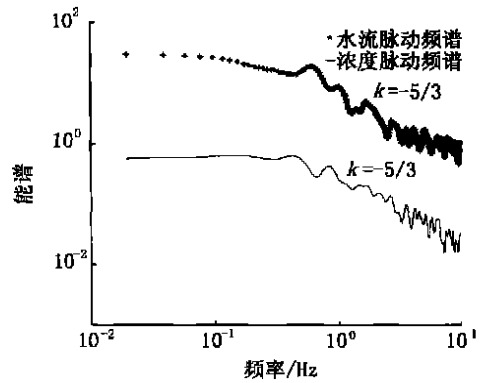


图 5 浓度脉动频谱和流速脉动频谱

Fig. 5 Energy spectrum of the concentration fluctuation

小波分析具有将各种混杂在一起的不同频率的信号分解成不同频率块的功能，它能揭示隐藏在信号中的微观结构。采用 Db3 小波对该点的浓度脉动信号进行一维连续小波变换，其系数的灰度图如图 6，在低的放大倍数下，信号只含有几个频率的成分，随着放大倍数的提高，所含的频率成分增加，显示复杂的分叉结构^[6]，与文献[7]的挟沙水流流速脉动的小波分析的结论基本一致。

浓度的脉动与水流的脉动息息相关，MicroADV 测量的浓度脉动信号与流速的脉动信号在微观上有较好的一致性，为我们理解“水流挟沙”提供了微观的基础。

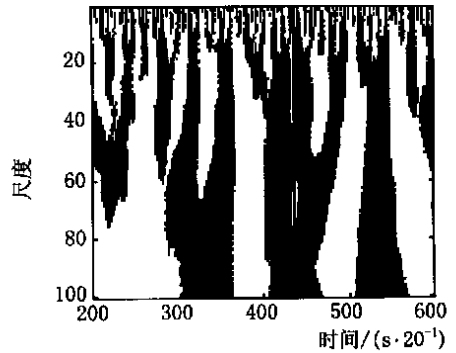


图 6 浓度脉动小波变化系数灰度

Fig. 6 Successive forkings of wave let and the velocity fluctuation coefficient

3 紊动扩散通量的实验研究

根据紊动扩散理论，在二维均匀恒定平衡的水流中其

$$\overline{u'c'} = 0 \tag{1}$$

$$\overline{c'v_s} - \overline{c'w'} = 0 \tag{2}$$

式中 v_s 为泥沙的沉速； \bar{c} 为该点的平均浓度； c' 为瞬时泥沙浓度； w' 为液体的垂向瞬时流速。

SHENC (1999) 用 APFP (根据超声声强与浓度的关系) 测量挟沙水流脉动流速和脉动浓度，并定量的分析了扩散通量 $\overline{u'c'}$ 和 $\overline{c'w'}$ 的大小。下面根据 MicroADV 在 525 测次中测得的脉动浓度 c' ，进一步分析式(1)、(2)。

纵向通量 $\overline{c'u'}$ 分布如图 7，在沿水深的较长距离内， $\overline{c'u'}$ 为小于零（扩散作用向下），其绝

对值的变化趋势为在近壁区较小，然后逐渐增加，在 y/h 近似为 0.1 达到最大，然后又逐渐减小，在离壁面较远时， $\overline{c'u}$ 可能大于零（扩散方向向上）。与 SHENC 的实验结果基本一致，用水流的猝发的上卷和俯冲来解释纵向的紊动扩散通量为负的原因。但是， $\overline{c'u}$ 可能大于零与 SHENC 略有不同，得到 $\overline{c'u}$ 总是负值。

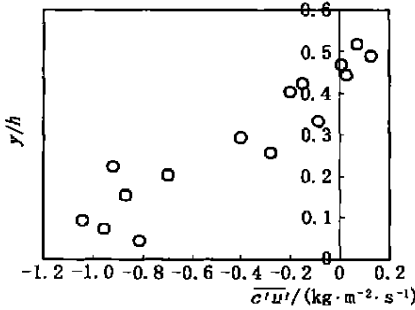


图7 泥沙纵向通量
Fig. 7 Longitudinal flux

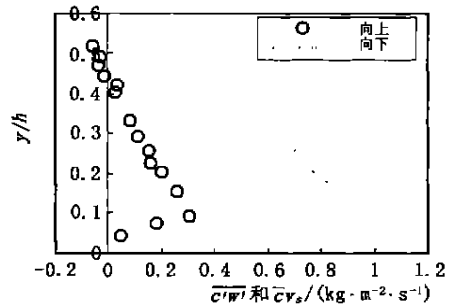


图8 向上(圆圈)和向下(虚线)通量
Fig. 8 Upward flux and downward flux $\overline{c'v_s}$

垂直向上的紊动扩散通量 $\overline{c'w'}$ 的沿水深分布如图 8 所示，它表示水流的紊动扩散作用而使泥沙向上输移的净通量。在近壁区，其值较小，然后逐渐增大，任在 y/h 近似为 0.1 达到最大，然后又逐渐减小。这种变化趋势与水流的紊动强度变化的趋势基本一致。在近壁区，由于边壁对紊动的制约，也制约了紊动扩散作用，使向上的净通量较小；在离壁面某一位置处，由于水流的紊动强度最大，相应地，其向上的净通量也达到最大值，然后逐渐减小。在远离壁面的某一位置，向上的紊动扩散通量的值可能小于 0，这一点也与 SHENC 不同，他得到 $\overline{c'w'}$ 总是大于零。显然，在重力作用下的净通量 $\overline{c'v_s}$ 应该是向下的。进一步比较向上通量和向下通量（图 8，泥沙中值粒径 0.065， $v_s = 0.19$ cm/s），向下的通量远较向上的通量大，特别是在近壁区，矛盾更加突出，向下的通量最大，而与之平衡的紊动扩散作用最小。

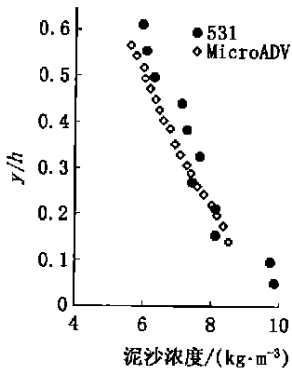


图9 实测浓度与 ADV 测量浓度分布
Fig. 9 Sediment concentration got by the sample measured and by MicroADV

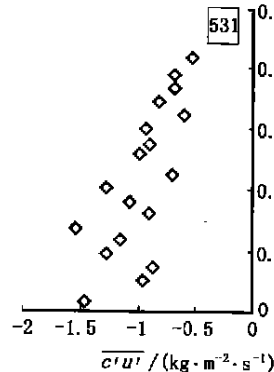


图10 纵向紊动通量
Fig. 10 Longitudinal flux $\overline{c'u'}$

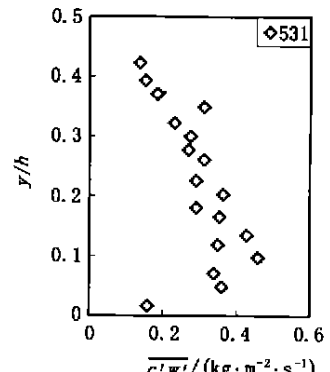


图11 垂向紊动通量
Fig. 11 Upward Flux $\overline{c'w'}$

为进一步了解这种紊动扩散的通量的变化，在另一组水流 531 测次的实验条件下比较通量

变化，图 9 是 531 测次实测含沙浓度分布和由 MicroADV 估测的浓度分布。图 10、图 11 分别为纵向紊动扩散通量和垂向扩散通量，与 SHENC (1999)、525 测次的结论基本一致。

4 输沙不平衡对紊动通量的影响

为了深刻揭示泥沙的紊动扩散通量与河床冲淤的关系，选取一组输沙不平衡下的实测资料进行比较。在河床的冲淤变化的过程中，其上下净通量的变化应与河床的变化一致，也就是说当河床处于淤积状态时，向下的通量应该较大；反之，向上的通量较大。选取 604 实验系列（见表 1）进行验证，实验保持流量、比降不变，由于初始含沙量较大，开始循环后，泥沙开始逐渐淤积，6041 测次是在水流基本稳定，但河床处于淤积过程中测量的；继续循环水流，6042 测次是在基本达到冲淤平衡后测量的。

这里，主要比较在从输沙不平衡到平衡的过程中，其通量的变化（图 12），在床面处于平衡状态时的垂向紊动扩散通量作用显著大于处于淤积状态时的紊动扩散通量，正是这种向下的净通量导致泥沙的落淤；平衡状态下的纵向通量的绝对值 $|\overline{c'u'}|$ 也大于冲刷状态的纵向通量 $|\overline{c'u'}|$ （图 13）。

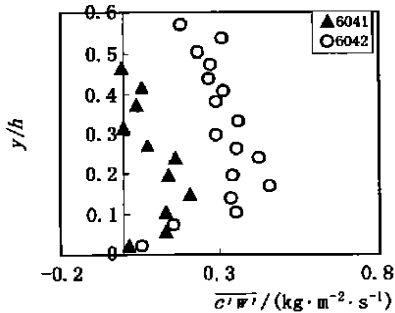


图 12 纵向紊动通量

Fig 12 Horizontal flux

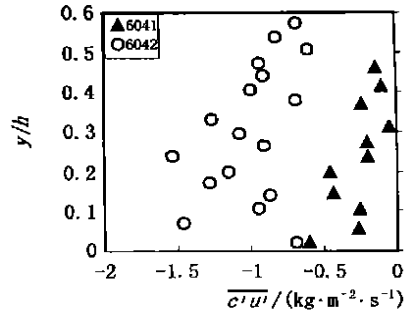


图 13 垂向紊动通量

Fig 13 Up ward flux

同时比较了 6041、6042 测次的平均流速和紊动强度，都没有明显的变化，可见紊动扩散通量的显著变化并不是由于流场强度的变化所致。

5 结 语

- (1) 利用声强与泥沙的浓度的关系，MicroADV 可以测量泥沙浓度，这提供一种无接触测量泥沙浓度的方法，同时，可以连续采样而得到瞬时浓度脉动。
- (2) 对泥沙的浓度脉动特性进行初步分析，基本与流速的脉动特性一致。
- (3) 定量的比较向上通量 $\overline{c'w'}$ 及纵向通量 $\overline{c'u'}$ 及其平衡关系以及床面处于输沙平衡和不平衡下的通量的变化。

参考文献:

- [1] 刘大有. 关于颗粒悬浮机理和悬浮功的讨论[J]. 力学学报, 1999, (11): 661– 670.
- [2] Jim Best, Sean Bennett. Turbulence modulation and particle velocity over flat sand beds at low transports[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(12): 1118– 1129.
- [3] SHENC. Application of an acoustic particle flux in particle laden open channel flow[J]. Journal of Hydraulic Research, 1999, 137: 407– 419.
- [4] Admiral DM, M H Garcia Laboratory measurement of suspended sediment concentration using an acoustic concentration profiler(ACP)[J]. Experimental in Fluids 2000, 28: 116– 127.
- [5] 林 鹏, 陈 立. MicroADV 及其在挟沙水流中的应用研究[A]. 第四届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集[C]. 成都: 四川大学出版社, 2000, 10: 393– 398.
- [6] 胡 非. 大气边界层湍流涡旋结构的小波分解[J]. 气候与环境研究, 1998, (2): 97– 105.
- [7] 林 鹏, 陈 立. 挟沙水流脉动特性的小波分析研究[J]. 水科学进展, 2001, 12(4): 450– 454.
- [8] 陆继东, 等. 流化床中瞬时颗粒浓度信号的小波分析[J]. 工程热物理学报, 2000, (3): 261– 264.

Experimental study on the turbulence flux in sediment-laden flow^{*}

LIN Peng, CHEN Li

(Key Lab. of Science of Water and Sediment of Ministry of Education, Key lab. of Sedimentation Engineering of State Power Corporation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The laboratory calibration were used to determine the relationship between backscattered signal strength and sediment concentration. A non-intrusively way of concentration measurement was introduced, and the inner fluctuation of concentration was analyzed rudimentarily. Finally, according to the fluctuation concentration acquired by MicroADV, the equilibrium of upward flux and downward flux were compared quantitatively.

Key words: MicroADV; flux; wavelet; turbulence diffusion

* The project is supported by National Natural Science Fund of China(No. 50079018), Fok Ying Tung Education Foundation(71070) and Foundation for University Key Teacher by the Ministry of Education.