

# 基于在线监测的江河入海径流量计算方法研究与应用——以辽河口为例

杨永俊<sup>1,2</sup>, 胡展铭<sup>1,2</sup>, 林忠胜<sup>1,2</sup>, 王玉<sup>1</sup>

(1.国家海洋环境监测中心, 辽宁大连 116023; 2.近岸海域生态环境重点实验室, 辽宁大连 116023)

**摘要:**随着入海流量在线监测技术的兴起, 本文从流量在线监测技术原理和步骤出发, 对入海流量在线监测的主要技术环节进行了梳理, 给出了综合、全面的江河入海径流量流程化计算方案, 并将其应用到了辽河入海径流量计算实例中。本文的研究为江河污染物排海量的准确估算和入海流量在线监测技术的推广提供了支持。

**关键词:**在线监测; 入海径流量; 代表流速

中图分类号: 文献标识码:A 文章编号: 1007-6336(\$article\_year)00-0001-05

## Research and application of river runoff calculation method based on on-line monitoring—a case study in Liaohe river

YANG Yong-Jun<sup>1,2</sup>, HU Zhan-ming<sup>1,2</sup>, LIN Zhong-sheng<sup>1,2</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>

(1.National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China; 2.Key Laboratory for Ecological Environment in Coastal Areas, State Oceanic Administration, Dalian 116023, China)

**Abstract:** With the rise of river inflow on-line monitoring technology, this paper studies the main technical links of on-line monitoring of inflow into the sea based on the principle and steps of on-line monitoring technology. We suggest a comprehensive and all-round streamlined calculation scheme of rivers runoff into the seas. The method was applied to calculate the example in Liao River inflow. This study provides support for the popularization of on-line monitoring technology of inflow into the sea and the accurate estimation of pollutant discharge from rivers.

**Key words:** on-line monitoring; river runoff into the sea; representative velocity

相关研究表明, 海洋污染物约 70%~80% 来自于陆域区域, 其中绝大部分经河口输运入海<sup>[1-3]</sup>。江河污染物入海量究竟是多少, 这个问题一直困扰着海洋工作者。江河污染物入海径流量取决于其入海径流量和水质数据(即污染物浓度), 其中入海径流量是关键影响因素。入海江河河口段受潮流的往复运动和径流的叠加影响, 流速、流向和水位随潮汐涨落不断变化, 其流量无

法通过水位流量关系由水位观测资料间接推算, 所有的流量资料必须依赖实测获得。目前以丰水期、枯水期、平水期的瞬时监测为主的传统流量监测方式的时间分辨率明显不足, 据此估算得到的入海径流量和污染物排海量结果偏差必然非常大<sup>[4-5]</sup>。

与传统流量监测方式相比, 在线监测具有自动化、实时性、连续性等多方面的显著优势。随

收稿日期: 2019-01-08, 修订日期: 2019-05-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC1401202); 国家海洋环境监测中心博士启动基金(2017-A-04)

作者简介: 杨永俊(1985-), 男, 山东聊城人, 硕士, 主要研究方向为水污染物总量控制, E-mail: yjyang@nmemc.org.cn

通讯作者: 胡展铭, 男, 主要研究方向为海洋环境监测技术, E-mail: zmhu@nmemc.org.cn

着入海流量在线监测方式的兴起,在这种方式下如何获得江河入海径流量是一个亟待解决的问题。国内外学者从不同的角度对流量在线监测相关技术方法进行了研究,但大都是零零散散针对某一具体技术环节,比如郭红丽等<sup>[6]</sup>提出了寻找流量测验断面平均流速的代表性垂线流速的方法;王发君等<sup>[7]</sup>给出了五种形式代表流速关系回归模型;朱巧云等<sup>[8]</sup>建立了长江河口徐六泾水文站浮标 ADCP 结合平台 ADCP 测流系统的代表流速关系模型;陈志高等<sup>[9]</sup>针对大型感潮河段,提出了基于双垂线组合的流量实时估计方法;叶敏<sup>[10]</sup>、韦立新等<sup>[11]</sup>采用一元或多元线性回归分析模型给出了监测断面在线流量的估算方法。

目前的相关研究虽然在一定程度上解决了流量在线监测过程中的某些技术问题,但往往未涉及到径流量的计算,也未给出综合的、全面的江河入海径流量计算方案。针对这一问题,本文从流量在线监测技术(适用于坐底式、浮标式和岸基式监测平台)原理和步骤出发,系统性地给出了基于在线监测技术的江河入海径流量综合性计算方案,该方案简单易操作,便于推广应用,并将其应用到了辽河入海径流量计算实例中。

## 1 材料与方 法

### 1.1 流量在线监测步骤流程

流量在线监测是指采用仪器设备对计算流量所需的要素(流速、流向、水位等)进行自动化连续监测,并将数据实时传输至终端接收器的一种监测方式。目前,国内外最常用的江河流量在线监测方法是代表流速法。代表流速法也称指标流速法,指根据监测断面平均流速与断面代表流速之间对应关系(即代表流速关系),通过监测断面代表流速来推算断面平均流速,然后根据流速面积法计算断面流量,进而计算断面入海径流量。该方法主要步骤为:1)确定监测断面位置;2)进行大断面测量<sup>[12]</sup>,获取详细的断面地形数据;3)确定代表流速监测位置,布放在线监测仪器;4)进行断面平均流速、代表流速和水位的同步比测,根据比测数据建立断面代表流速和平均流速之间的对应关系(即代表流速关系),并定

期对该关系进行率定<sup>[13]</sup>;5)在线监测断面代表流速和 水位,由代表流速值和代表流速关系推算断面平均流速,由断面水位和大断面测量数据计算断面面积;6)断面平均流速与对应的断面过水面积乘积即为实时断面流量;7)断面流量与对应监测时间间隔乘积的累加即为入海径流量。江河入海流量在线监测详细流程见 图 1。

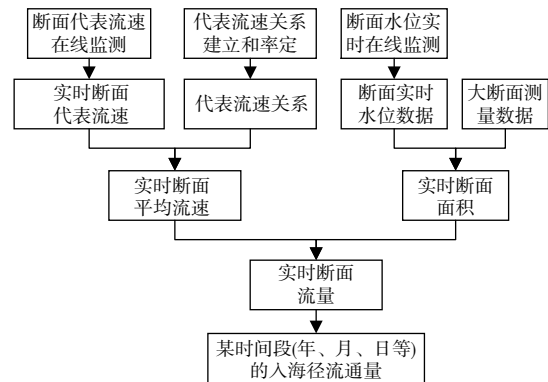


图 1 江河入海流量在线监测流程

Fig. 1 The on-line monitoring process of river inflow into the sea

根据代表流速监测方式的不同,代表流速法可分为四种,即代表点测流法、代表垂线测流法、代表层测流法和组合式测流法<sup>[14]</sup>。其中代表点测流法主要指采用流速计对流量测量断面上一个或多个代表点的流速进行测量;代表垂线测流法主要指采用定点式声学多普勒流速剖面仪(以下简称 ADCP)对流量测量断面上一条或多条代表垂线进行流速测量;代表层测流法主要指采用水平式 ADCP(H-ADCP)对流量测量断面上的一个或多个代表流层进行测量;组合式测流法是以上两种或三种方法的组合。

### 1.2 数据处理

流量在线监测数据的处理主要包括四方面的内容:异常数据判别与处理、数据连续性检验、数据相关性检验、数据插补。异常数据判别与处理通常采用阈值法,即通过对已有国内外海洋观测资料进行统计分析<sup>[15]</sup>或通过构建数值模型模拟计算出不同情况下(季节、天气、海况等)数据最大可能阈值区间,如果数据不在阈值区间内,则该深度单元数据为异常数据,应予以剔除。数据连续性检验包括时间连续性检验和空

间连续性检验, 分别指同一测点相邻监测时间(时间相近)的数据和同一时间相邻测量单元(空间相近)的数据应具有连续性, 数据差值应在一定范围内, 如果流速突变大于 50 cm/s 或垂直流速突变大于 40 cm/s 或东、北分量速度突变大于 40 cm/s, 此深度单元数据错误<sup>[16]</sup>, 应予以剔除。数据相关性检验是指同一测点测流数据与水位数据应具有相关性, 通常情况下涨潮时水位逐渐升高, 流向指向上游, 流速先增大后减小, 落潮时水位逐渐降低, 流向指向下游, 流速先增大后减小, 如果监测数据不符合这种相关性, 则数据存疑, 可通过绘制流速、水位关系线来进一步判断。数据插补是指采用数据插值方法对剔除的数据、缺测的数据进行插补, 保证数据时空的完整性。

对于垂向 ADCP 测流数据还需要对其上下盲区的流速数据进行插补, 陈志高等<sup>[9]</sup>给出其上下盲区流速插补方法, 见公式(1)和公式(2):

$$V_T = \frac{D_c(H^{b+1} - z_2^{b+1})}{(H - z_2)(z_2^{b+1} - z_1^{b+1})} \sum_{j=1}^n u_j \quad (1)$$

$$V_B = \frac{D_c z_1^{b+1}}{z_1(z_2^{b+1} - z_1^{b+1})} \sum_{j=1}^n u_j \quad (2)$$

式中:  $V_T$  为上盲区流速(cm/s);  $V_B$  为下盲区流速(cm/s);  $D_c$  为测速单元长度(m);  $H$  为 ADCP 实测水深, 单位为米(m);  $z_1$  为河底至离河底最近处有效单元下边界的距离(m);  $z_2$  为河底至第一个单元上边界的距离(m);  $b$  为经验常数(通常取  $b=1/6$ );  $n$  为测速单元数量;  $j$  为测速单元序号;  $u_j$  为第  $j$  层实测流速(cm/s)。

### 1.3 入海径流量计算方法

#### (1) 代表流速计算

科学合理的选取代表性垂线或流层, 提高代表流速的代表性和准确性, 对提高入海流量在线监测的准确度至关重要。目前尚无明确的代表性垂线(或流层)选取的理论方法, 往往采用试验性方法(也是本文采用的方法), 即采用走航 ADCP 对不同典型水情下的断面流速分布情况进行调查, 获取一定量的样本数据, 依次分析某一条或多条垂线(或流层)平均流速和断面平均流速的关系, 选取关系最为稳定, 偏差最小的作为监测断面的代表性垂线(或流层), 若只选取一条代表

性垂线往往选在监测断面中泓位置。某代表垂线(或流层)对应的代表流速计算方法见公式(3):

$$V_i = \sum_{j=1}^m (a_{ij} v_{ij}) \quad (3)$$

式中:  $V_i$  为第  $i$  个代表流速(cm/s);  $i$  为代表垂线(或流层)序号;  $m$  为代表垂线(或流层)中流速测点数量;  $j$  为代表垂线(或流层)中流速测点序号;  $v_{ij}$  为第  $i$  个代表垂线(或流层)中的第  $j$  个测点的流速(cm/s);  $a_{ij}$  为  $v_{ij}$  对应的权重(权重之和为 1, 通常情况下可取  $a_{ij}=1/m$ )。

#### (2) 断面平均流速计算

要计算断面平均流速, 首先需要构建代表流速关系模型。代表流速关系模型的建立通常采用代表流速与走航 ADCP 流量监测相结合的模式(也是本文采用的方法), 即: 以代表流速连续在线监测为基础, 以走航 ADCP 进行大、中、小潮等不同典型时期连续 25 小时的断面平均流速同步监测作为率定资料, 采用回归分析方法建立断面平均流速和相应代表流速之间的对应关系。最常见的代表流速关系模型是线性模型, 可通过建立一元或多元线性回归模型, 揭示不同指标流速与断面平均流速之间的关系, 因此断面平均流速通常可由公式(4)计算得到:

$$V_M = \sum_{i=1}^n a_i V_i + C \quad (4)$$

式中:  $V_M$  为断面平均流速(cm/s);  $V_i$  为第  $i$  个代表流速(cm/s);  $n$  为代表流速数量;  $a_i$  为代表流速  $V_i$  的回归系数;  $C$  为常数。

#### (3) 断面面积计算

根据大断面测量得到的断面详细地形数据(即断面岸边距和河底高程对应数据)和实时水位数据, 通过公式(5)、(6)、(7)可计算得到断面面积:

$$A = \sum_{i=1}^n A_i \quad (5)$$

$$A_i = \frac{d_{i-1} + d_i}{2} b_i \quad (6)$$

$$d_i = d_{hi} + (h_1 - h_2) \quad (7)$$

式中:  $A$  为断面面积( $m^2$ );  $n$  为大断面测量时设置的测深垂线数量;  $A_i$  为第  $i$  部分面积( $m^2$ );  $d_i$  为第  $i$  条垂线的实际水深(m, 若  $d_i \leq 0$ , 则  $A_i = 0$ );

$b_i$  为大断面测量时第  $i$  部分断面宽 (m);  $d_{hi}$  为大断面测量时第  $i$  条垂线的水深 (m);  $h_1$  为当前水位值 (m);  $h_2$  为大断面测量时对应的水位值 (m)。

#### (4) 断面流量计算

断面流量是断面面积和断面平均流速的乘积。将断面平均流速转换为河向流速(上游流向下游为正,反之为负),则断面流量计算方法见公式(8):

$$Q = 10^{-2} \times V_M A \quad (8)$$

其中:  $Q$  为断面流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ , 当  $Q > 0$  时自上游流向下游, 当  $Q < 0$  时自下游流向上游),  $V_M$  为断面平均流速 ( $\text{cm}/\text{s}$ ),  $A$  为断面面积 ( $\text{m}^2$ )。

#### (5) 入海径流量

某时段内的入海径流量为该时段内江河入海的总水体体积, 应为该时段内断面流量与对应监测时间间隔乘积的累加, 计算方法见公式(9):

$$W = \sum_{i=1}^n Q_i t_i \quad (9)$$

式中:  $W$  为径流量 ( $\text{m}^3$ , 当  $W > 0$  时为入海径流量, 当  $W < 0$  时为入河海水量),  $n$  为监测得到的断面流量数据个数,  $i$  为断面流量数据序号,  $Q_i$  为依次测得的断面流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $t_i$  为两次流量监测的相隔时间 (s)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 应用环境特点

辽河入海流量在线监测断面位于辽河盘锦段盘锦市大洼县新兴镇, 距离辽河入海口约 30 km, 受潮汐影响明显, 流速、水位、盐度等日变化显著。该断面通常水位下水面宽约 200 m, 潮差约 2 m, 涨潮历时 3~4 h, 落潮历时约 8~9 h, 实测盐度最大 11, 具有典型非恒定往复流特征。通过大断面调查, 监测断面地形条件复杂、断面不规则、水深变化较大, 平均水深较浅, 且水平和垂向流速变化复杂。现阶段仅在监测断面的上布设了一条代表垂线, 采用定点坐底式 ADCP (FlowQuest 1000 k, 安装于海床基上) 实时监测断面代表流速和水位, 其采样间隔为 10 min, 单元长度 0.25 m, 仪器盲区为 0.4 m, 换能器离底约 0.5 m。

### 2.2 代表流速关系建立

2017 年平水期的小潮期采用船载走航 ADCP (RDI 瑞江 1200 KHz), 进行了连续 25 h 的代表流速关系率定作业, 每小时一个测回, 每个测回在坐底 ADCP 采样前 5 分钟开始, 每测回历时约 10 min, 共 50 个测次, 得到 50 组断面平均流速和代表流速对应系列值, 并采用一元线性回归分析建立了断面代表流速关系见图 2:

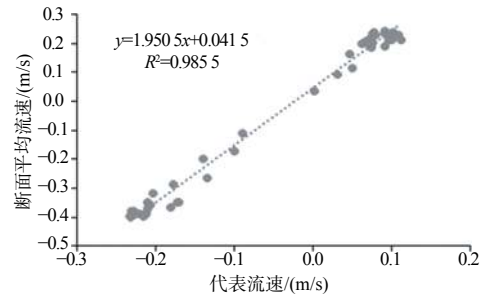


图 2 代表流速关系

Fig. 2 The relationship diagram of the representative velocity

### 2.3 入海径流量计算

以辽河口 2017 年监测数据为例, 采用本文给出的方法, 通过数据处理、代表流速计算、断面平均流速计算、断面面积计算等步骤, 计算得到了连续 15 d (10 min 一组数据) 的入海流量变化情况 (见图 3), 进而由公式 9 计算可得该时段的入海径流量为  $201276768 \text{ m}^3$ 。

由图 3 可知, 由于受上游径流和下游潮流的叠加影响流量变化不稳定, 落潮时流量为正值, 涨潮时流量有正有负 (当径流作用大于潮流作用时为正值, 反之为负值), 在涨潮的中间时刻往往会出现流量极小值, 因为此时张潮流最大。这些数据特征都符合感潮河段流量和水位数据的变化规律。

## 3 结论

(1) 本文从流量在线监测技术原理和步骤出发, 对入海径流量在线监测的主要技术环节进行了研究, 包括监测位置选取、代表流速关系建立与率定, 以及代表流速、断面平均流速、断面面积、断面流量和入海径流量计算等内容, 系统性地给出了江河入海径流量流程化计算方法。

(2) 基于本文给出的计算方法, 对辽河入海径流量进行了计算, 通过应用进一步说明了本



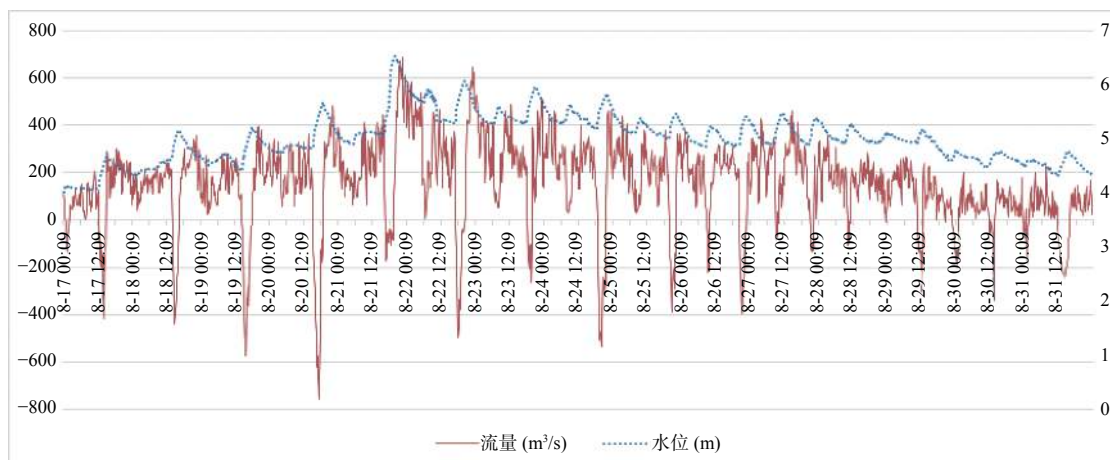


图3 入海流量和水位变化

Fig. 3 The data change of river inflow into the sea and water level

文给出的计算方法流程化强、易于实现、便于推广。本文的研究成果为更准确的估算江河污染物排海量提供了支持,对入海流量在线监测技术的推广、污染物排海总量控制制度的顺利实施和海洋生态文明建设具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 王辉, 栾维新, 康敏捷. 辽河流域社会经济活动的COD污染负荷[J]. 地理研究, 2013, 32(10): 1802-1813.
- [2] 晋春虹, 李兆冉, 盛彦清. 环渤海河流COD入海通量及其对渤海海域COD总量的贡献[J]. 中国环境科学, 2016, 36(6): 1835-1842.
- [3] 王修林, 崔正国, 李克强, 等. 渤海COD入海通量估算及其分配容量优化研究[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(5): 497-500.
- [4] 杜迎燕, 宋政峰, 赵德友. 潮流量推算方法及其误差的初步分析[J]. 水文, 2015, 35(5): 65-69.
- [5] 宋政峰, 杜迎燕. 对潮流量测验误差控制的探讨[J]. 水文, 2014, 34(1): 35-38, 90.
- [6] 郭红丽, 谢悦波, 胡健伟, 等. 水文站在线流量测验方法初探[J]. 水文, 2018, 38(1): 41-45.
- [7] 王发君, 黄河宁. H-ADCP流量在线监测指标流速法定线软件“定线通”介绍与应用[J]. 水文, 2007, 27(4): 63-65, 44.
- [8] 朱巧云, 高健, 刘桂平, 等. 长江河口段徐六泾水文站潮流量整编代表线法研究[J]. 水文, 2008, 28(4): 61-64.
- [9] 陈志高, 王真祥, 王胜平. 大型感潮河段流量实时估计方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(4): 785-792.
- [10] 叶敏, 黄双喜, 周波. 潮流量在线监测方法与实践研究[J]. 人民长江, 2006, 37(11): 54-56.
- [11] 韦立新, 蒋建平, 曹贯中. 基于ADCP实时指标流速的感潮段断面流量计算[J]. 人民长江, 2016, 47(1): 27-30.
- [12] 谭良, 叶德旭, 樊乾和, 等. 厄瓜多尔水文站大断面测量方法概述[J]. 水利水电快报, 2019, 40(2): 22-25.
- [13] 曾雅立, 张伟革, 樊丽娜, 等. 宜昌站H-ADCP流量关系率定及应用[J]. 水利水电快报, 2019, 40(2): 14-16, 25.
- [14] 胡展铭, 杨永俊, 林忠胜, 等. 江河入海径流量监测技术研究[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(6): 934-940.
- [15] 杨扬, 苗庆生, 韦广昊, 等. 海洋站观测资料的质量控制方法及其应用[J]. 海洋开发与管理, 2017, 34(10): 109-113.
- [16] 杨锦坤, 相文玺, 韦广昊, 等. 走航ADCP数据处理与质量控制方法研究[J]. 海洋通报, 2009, 28(6): 101-105.