

# 黄河山东段悬移质含沙量场的建立与分析

刘畅<sup>1</sup>, 刘强<sup>2</sup>, 孟宪静<sup>1</sup>

(1. 黄河水利委员会山东水文水资源局, 山东 济南 250100; 2. 山东省水文中心, 山东 济南 250002)

**【摘要】**黄河下游山东河段的悬移质含沙量分布规律较为复杂,对泥沙测验造成较大困难。选取孙口水文站、利津水文站作为黄河山东段宽浅型河段和窄深型河段的代表性水文站,基于各水文站的悬移质泥沙测验长系列历史资料,采用三次样条插值方法建立测站测验断面悬移质含沙量场,运用 mesh 函数绘制含沙量场三维分布图,基于含沙量场物理意义推求测线含沙量计算公式,直观、准确地分析各测次测验断面含沙量分布规律,为黄河山东段悬移质泥沙测验方式优化提供水文基础理论支撑。

**【关键词】**含沙量场; 三维分布图; 黄河山东段; 悬移质

**【中图分类号】** TV14

**【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1009-6159(2025)-09-0005-05

## Analysis on the Establishment of Suspended Sediment Concentration Field in the Shandong Section of the Yellow River

LIU Chang<sup>1</sup>, LIU Qiang<sup>2</sup>, MENG Xianjing<sup>1</sup>

(1. Hydrology and Water Resources Bureau of Shandong Province, Yellow River Conservancy Commission, Jinan 250100, China;

2. Hydrology Center of Shandong Province, Jinan, Shandong 250002, China)

**Abstract:** The distribution law of suspended sediment concentration in the Shandong section of the lower reach of Yellow River is relatively complex, causing great difficulties for sediment measurement. Taking the Sunkou and Lijin Hydrological Stations as representative for wide-shallow and narrow-deep river sections separately in the Shandong section of the Yellow River, this paper establishes a suspended sediment concentration field for the station's measurement section. Using the cubic spline interpolation method based on the long-series historical data of suspended sediment measurement at each hydrological station, it draws a three-dimensional distribution map of the sediment concentration field using the mesh function, and derives a calculation formula for the sediment concentration of the measurement line based on the physical meaning of the sediment concentration field. It analyzes the distribution law of sediment concentration in each measurement section intuitively and accurately, providing a hydrological theoretical basis for optimizing the suspended sediment measurement methods in the Shandong section of the Yellow River.

**Key words:** Sediment concentration field; Three-dimensional distribution map; Shandong section of the Yellow River; Suspended sediment

黄河下游山东河段的流速场复杂多变,受此影响,悬移质含沙量分布规律也较为复杂<sup>[1]</sup>。一方面,黄河山东测区的泥沙测验成果具有重要的应用价值和研究意义;另一方面,复杂的泥沙分布规律和监测环境对泥沙测验造成较大困难。传统的泥沙测验方式主要采用采样器进行多线或多点的采样,工作耗时较长,劳动强度较大,安全性系数偏低。为解决以上问题,需在黄河山东段悬

移质泥沙分布规律研究的基础上,推进泥沙测验方式的优化。

本文研究对象为河道测验断面的悬移质含沙量场,通过建立测验断面的悬移质含沙量场并绘制三维分布图,立体、直观、准确地分析含沙量分布规律,可为悬移质泥沙测验方式优化提供水

收稿日期: 2025-05-22

作者简介: 刘畅(1992—),女,工程师

文基础理论支撑。

### 1 测验资料选取

选取黄河山东段近期河势变化相对较小、河段特性具有代表性的 2 处泥沙测验一类站(孙口水文站、利津水文站)作为示例对象,对其悬移质输沙率精测的原始资料进行分析。其中,孙口水文站测验河段为宽浅型河道,利津水文站测验河段为窄深型河道<sup>[2]</sup>。

为保障资料系列的一致性,选取 2002—2022 年的悬移质输沙率选点法资料进行分析。其中,孙口水文站共收集 26 个测次,测验时间分布在 2003—2022 年间的 17 个不同年份,断面平均含沙量范围在 1.78~43.3 kg/m<sup>3</sup>;利津水文站共收集 30 个测次,测验时间分布在 2003—2022 年间的 18 个不同年份,断面平均含沙量范围在 0.937~63.2 kg/m<sup>3</sup>。上述测验资料的时间跨度及测次分布可满足长系列资料分析的要求,覆盖了不同含沙量级;各测次包含多种不同的断面水深情况,但测验断面形态整体基本稳定。

对各测次原始测验资料进行处理,提取逐条测线逐个测点的起点距、水深、含沙量数据并按顺序整理为统一格式。其中,对于使用五点法进行选点测验的垂线,水面测点的位置为水深 0.1 m 处,河底测点的位置为河底向上 0.1 m 处。

### 2 含沙量场建立

#### 2.1 含沙量场的概念

“场”在物理学中可表示物体在空间中的分

布情况。含沙量场作为一种标量场,可以看作一种浓度场,其物理意义是水体空间中各位置点的泥沙含量。本文仅针对测站测验断面的含沙量场分布情况,因此在确定场的空间范围时,可将水体空间的三维立体问题简化为测验断面的二维平面问题进行处理。

场是用位置函数来表征的,含沙量场的方程可定义为常见的标量函数:

$$C_s = F(x, y, z) \tag{1}$$

式中: $C_s$  为某空间位置点的含沙量; $x, y, z$  为水体空间中三个方向的坐标数值。

本文将水体空间简化为测验断面,因此可精简一个变量,将含沙量场方程简化为:

$$C_s = F(x, y) \tag{2}$$

式中: $C_s$  为测验断面某位置点的含沙量; $x$  为起点距; $y$  为水深。

根据起点距和水深的数值,可定位至测验断面中的某处具体位置。每处位置均有含沙量数值的唯一解,可与起点距、水深的数值组合建立关系,即式(2)所示的测验断面含沙量场方程。

#### 2.2 插值方法选择

在悬移质输沙率选点法精测原始测验数据中提取出多条垂线上多个测点的含沙量数据,由于每个测次的含沙量测点数量远不足以建立测验断面的含沙量场,因此需利用 griddata 函数<sup>[3]</sup>在不规则的数据点上进行插值。griddata 函数支持多种二维插值方法的选择,常用的二维插值方法见表 1。

由表 1 可知,建立测验断面含沙量场时需保

表 1 二维插值方法对比表

方法名称	方法描述	特点及适用性
线性插值(linear)	基于三角剖分的线性插值	适用于大部分情况,计算较快,在不规则数据点上表现良好;但对于数据的非线性特征可能效果不佳。
最近邻插值(nearest)	基于三角剖分的最近邻点插值	适用于数据点分布较密集的情况;但插值结果可能较粗糙。
三次样条插值(cubic)	基于三角剖分的三次插值	适用于平滑数据,对非线性特征具有较好的适应性;但计算相对较慢。
Vandermonde 插值(v4)	双调和样条插值	和其他方法不同,该插值不是基于三角剖分;但对于不规则分布的数据,可能效果不如其他插值方法。

障较高的数据精度,且含沙量场分布为平滑变化,因此,选择三次样条插值<sup>[4]</sup>作为建立含沙量场的插值方法,操作可行、结果合理,在数据插值过程中也同步达到了数据平滑处理的效果。

#### 2.3 插值边界与步长设定

由于输沙率精测资料中的含沙量测验原始

数据点的位置均与实际水面、河底的位置有一定距离,若将插值结果扩展至全断面范围内,在水面、河底位置的含沙量数值外延结果会出现较为明显的不合理性。在进行含沙量场插值时,应预先设定插值边界范围,并在测验断面上裁剪出进行插值的面积范围。

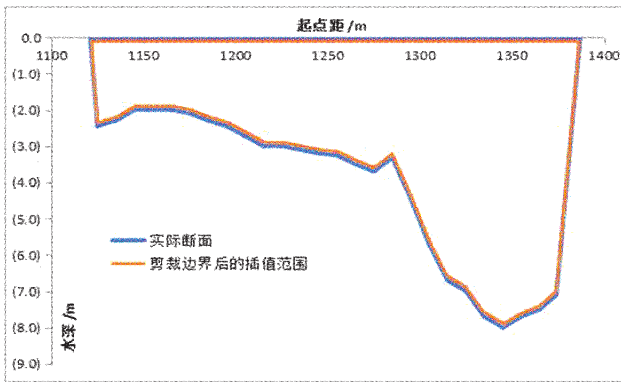


图1 剪裁边界后的插值范围示意图

将测验断面含沙量场插值边界设定为:水面以下 0.1 m、河床以上 0.1 m。裁剪边界后的插值范围如图 1 所示,可有效覆盖实际断面中的绝大部分面积。

孙口水文站、利津水文站输沙率测次的水面宽范围分别为 376~504 m、250~344 m;最大水深范围分别为 1.90~5.3 m、3.85~7.1 m。结合各站测验断面的实测水面宽、最大水深数据,对保障测线优选精度、尽可能节约算力进行综合考虑后,将测验断面含沙量场横向插值步长(起点距步长)设定为 1 m,纵向插值步长(水深步长)设定为 0.01 m。

对某次悬移质输沙率精测的原始测验资料进行处理后,基于各实测点的起点距  $x$ 、水深  $y$ 、含沙量数据,采用三次样条插值方法,按照间隔 1 m 的横向步长和间隔 0.01 m 的纵向步长,对该测次水道断面裁剪出的边界范围内的各个位置点  $(x_i, y_i)$  进行含沙量插值,得到该测次的断面含沙量场方程  $C_s = F(x, y)$ 。该方程为离散型函数,但  $\Delta x$  和  $\Delta y$  很小,仅为 1 和 0.01,因此,可以认为插值结果已密集覆盖至边界范围内整个区域。

### 3 含沙量场三维分布图绘制

以起点距为  $x$  轴、水深为  $y$  轴、含沙量为  $z$  轴,建立三维直角坐标系。对于逐个测次,将全部实测含沙量三维坐标点  $(x_i, y_i, C_{si})$  及  $C_s = F(x, y)$  的三维曲面绘制在坐标系中,得到该测次的含沙量场分布图。运用 mesh 函数进行三维曲面网格图绘制,其优点是可以较好地实现数据在三维空间的可视化。

以孙口水文站 2003 年 9 月 16 日的输沙率测次为例,其测验断面含沙量场分布如图 2 所

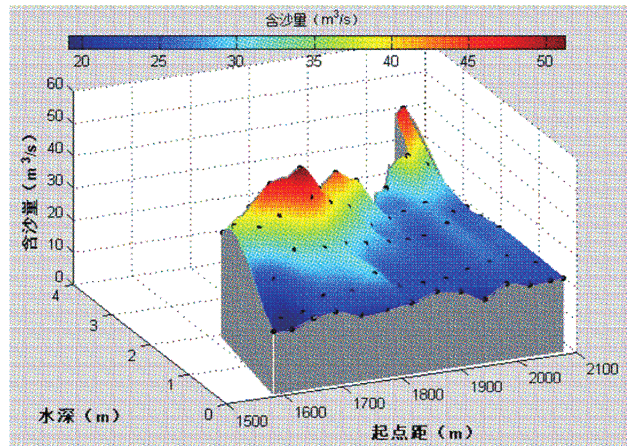


图2 孙口水文站含沙量场分布图(2003年9月16日测次)

示。图中高低起伏的平滑曲面表示含沙量场;曲面网格的尺寸为起点距方向 1 m、水深方向 0.01 m,各网格交界处即为内插后的三维坐标点;曲面上的黑色点位为输沙率测验的原始测点。

该测次的断面面积为 1 110 m<sup>2</sup>,水面宽为 500 m,平均水深为 2.22 m,最大水深为 3.50 m,断面形态为宽浅型断面,右侧有较为明显的一处深槽;共布设 12 条取样垂线、60 个实测取样点,在进行内插后,共有 100 270 个三维坐标点。该测次的断面平均含沙量为 27.5 kg/m<sup>3</sup>,各测点的含沙量范围为 19.3~51.3 kg/m<sup>3</sup>,较大含沙量区域位于断面左侧底部和右侧深槽底部,断面中侧底部和全部较浅水层的含沙量较小。

## 4 含沙量场分布规律分析

### 4.1 基于含沙量场的计算方法

1) 断面平均含沙量计算方法。根据含沙量场三维立体图,可用垂直于水平面方向的竖直帷幕(即图 2 中的灰色铅垂面),将含沙量场曲面  $C_s = 0$  与水平面进行封闭包围,形成具有一定体积的含沙量块体。根据含沙量场方程  $C_s = F(x, y)$  可知,断面平均含沙量可用积分形式表示为:

$$\bar{C}_s = \frac{\iint F(x, y) dx dy}{\int y_m(x) dx} \quad (3)$$

式中: $\bar{C}_s$  为断面平均含沙量, kg/m<sup>3</sup>,在三维立体图中表示含沙量块体在  $z$  轴方向的平均高度;

$\iint F(x, y) dx dy$  为含沙量场方程对起点距  $x$ 、水深

$y$  的二重积分,  $\text{kg/m}$ , 在三维立体图中表示含沙量块体的体积;  $y_m(x)$  为断面各处最大水深与起点距的相关关系方程;  $\int y_m(x) dx$  为  $y_m(x)$  方程对起点距  $x$  的积分,  $\text{m}^2$ , 即测验断面面积, 在三维立体图中表示含沙量块体在  $C_s=0$  的水平面上的投影面积。

若  $C_s=F(x,y)$  为离散型方程, 当  $x$  方向和  $y$  方向的步长足够小时, 连续型的积分计算式(3)可近似转换为离散型的求和计算式:

$$\bar{C}_s = \frac{\iint F(x,y) dx dy}{\int y_m(x) dx} \approx \frac{\sum_1^n F(x,y) \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{\sum_1^n \Delta x \cdot \Delta y} \quad (4)$$

式中:  $n$  为含沙量场曲面中内插后的三维坐标点的数量;  $\Delta x$  为起点距步长, 取值为  $1 \text{ m}$ ;  $\Delta y$  为水深步长, 取值为  $0.01 \text{ m}$ 。

相对于整个测验断面的水面宽和水深而言,  $\Delta x$  和  $\Delta y$  足够小, 且三维坐标点的数量  $n$  足够多, 因此式(4)成立。由于  $\Delta x$  和  $\Delta y$  均为定值, 式(4)可进一步简化为:

$$\bar{C}_s \approx [\sum_1^n F(x,y)]/n \quad (5)$$

可见, 对含沙量场曲面中内插后的各个三维坐标点的含沙量数值  $C_s$  进行算术平均, 可求得断面平均含沙量。

2) 垂线平均含沙量计算方法。在含沙量场三维立体图中, 可用垂直于  $xOy$  水平面方向的铅垂面  $x=x^*$  对含沙量块体进行切割, 形成一个垂直于  $x$  轴方向的封闭切割面。基于该切割面, 可利用下式进行代表性垂线  $x=x^*$  的测线平均含沙量计算:

$$\begin{aligned} \bar{C}_s(x^*) &= \frac{\int F(x^*, y) dy}{y_m(x^*)} \approx \frac{\sum_1^n F(x^*, y) \cdot \Delta y}{y_m(x^*)} \\ &= \frac{\sum_1^n F(x^*, y)}{n} \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $\bar{C}_s(x^*)$  为代表性垂线  $x=x^*$  的测线平均含沙量,  $\text{kg/m}^3$ , 在三维立体图中表示封闭切割面在  $z$  轴方向的平均高度;  $\int F(x^*, y) dy$  为当时  $x=x^*$

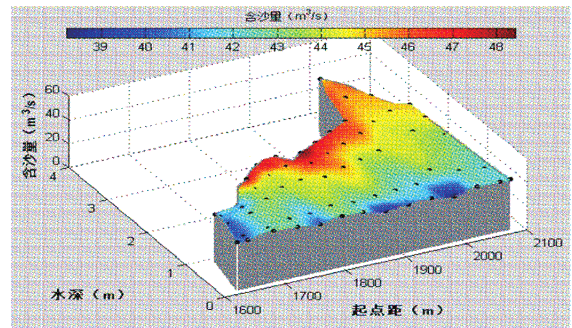
含沙量场方程对水深  $y$  的积分,  $\text{kg/m}^2$ , 在三维立体图中表示封闭切割面的面积;  $y_m(x^*)$  为当时  $x=x^*$  时的垂线水深,  $\text{m}$ , 在三维立体图中表示封闭切割面在  $y$  轴方向的长度;  $n$  为含沙量场内插后在垂线  $x=x^*$  上的三维坐标点的数量; 其余各变量的意义同上文。

可见, 对含沙量场内插后在垂线  $x=x^*$  上的各个三维坐标点的含沙量数值  $C_s$  进行算术平均, 可求得垂线平均含沙量。

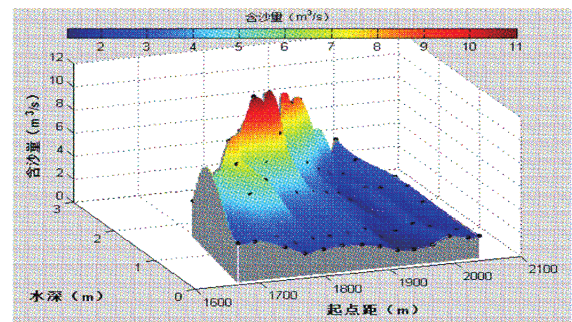
水层平均含沙量计算方法同上。

#### 4.2 孙口水文站含沙量场分布规律分析

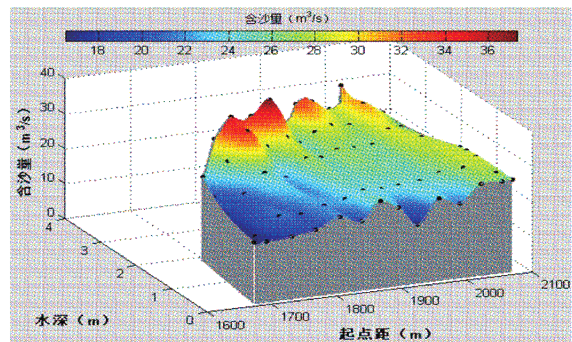
依次绘制孙口水文站 26 个测次的悬移质含沙量场(以 3 个典型测次为例, 如图 3 所示), 并逐个分析每测次的含沙量场分布规律。



(a) 2008 年 7 月 6 日测次



(b) 2016 年 7 月 26 日测次



(c) 2021 年 7 月 9 日测次

图 3 孙口水文站典型测次含沙量场分布图

孙口水文站 26 个测次的含沙量场分布情况不完全相同,在断面左右侧深槽底部或较平整的全断面底部均有出现较大含沙量的集中分布,但各测次均呈现出含沙量从河底到水面急速下降的特点,符合宽浅型河段的一般规律。

#### 4.3 利津水文站含沙量场分布规律分析

依次绘制利津水文站 30 个测次的悬移质含沙量场(以 4 个典型测次为例,如图 4 所示),并逐个分析每测次的含沙量场分布规律。

利津水文站 30 个测次的含沙量场分布情况均符合由河底向水面递减的一般性规律,但各测次的含沙量场分布特点不完全相同:较大含沙量集中分布的区域有时位于断面中侧底部,有时位于全断面底部;有时各水层含沙量由下向上逐渐较缓递减,有时深水层含沙量较其他水层显著偏大。造成含沙量场不同分布特点的原因主要是各测次水流流态及断面流速分布特征不完全一致。

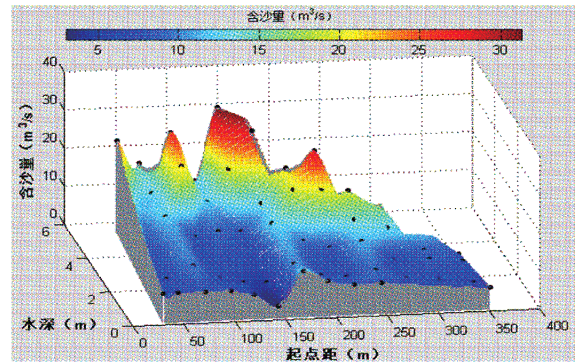
## 5 结语

为开展黄河山东段悬移质泥沙分布规律分析,可引入“场”的概念,基于三次样条插值方法建立测站测验断面悬移质含沙量场,利用 mesh 函数绘制含沙量场三维分布图,并基于三维含沙量场的物理意义推求测线平均含沙量计算方法。通过多角度剖析三维立体图、定量分析测线平均含沙量,可更加全面、准确地总结测站测验断面悬移质泥沙分布规律。

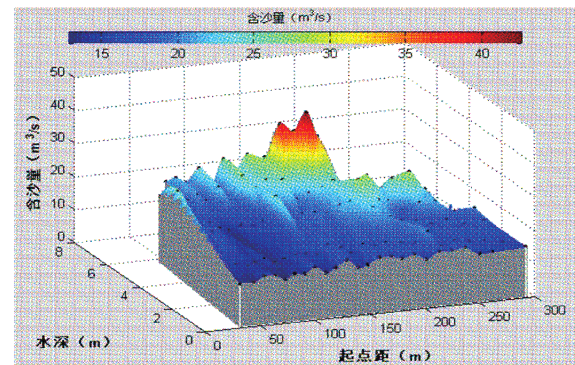
采用基于含沙量场物理意义的计算公式进一步定量分析测线含沙量分布规律,可为精简悬移质泥沙测线、优化泥沙测验方式提供有效的水文基础理论支撑,有助于提升泥沙测验效率、降低劳动强度,推动泥沙测验现代化进程。

#### 参考文献

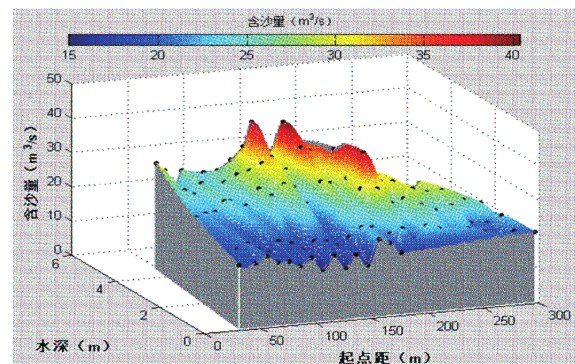
- [1] 吴国威,曹兵.黄河下游山东段泥沙输移沿程演变规律分析[J].山东水利,2018(2):38-39.
- [2] 邢西金,邓家兴,狄俊明.黄河下游入海把口站利津水文站水文特性分析[J].内蒙古水利,2020(4):41-42.
- [3] 骆丽华,覃辉.Matlab 程序设计与 GPS 高程拟合中的应用[J].地理空间信息,2015,13(1):99-101,104.
- [4] 程朋欢.数据拟合与数据插值在缺失信息补充中的精度分析[J].测绘与空间地理信息,2022,45(12):127-129.



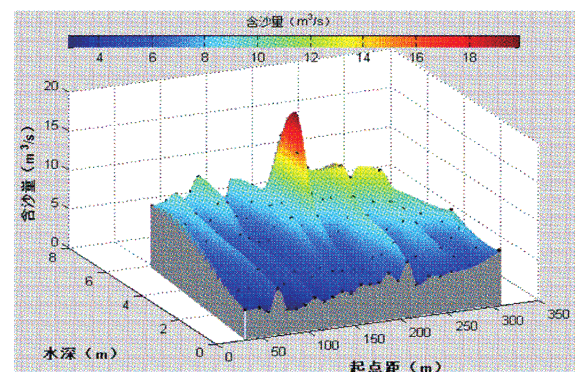
(a)2011年7月1日测次



(b)2018年7月17日测次



(c)2020年7月14日测次



(d)2021年7月7日测次

图4 利津水文站典型测次含沙量场分布图

(责任编辑 赵其芬)