

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2023.02.004

引用格式:孔令莹,徐远志,赵贵章,等.基于多种方法联合反演的河床岩性结构特征研究[J].华东地质,2023,44(2):150-159.  
(KONG L Y,XU Y Z,ZHAO G Z,et al. Study on the structural characteristics of riverbed lithology based on the joint inversion of multiple methods[J].East China Geology, 2023, 44(2):150-159.)

## 基于多种方法联合反演的河床岩性结构特征研究

孔令莹<sup>1</sup>,徐远志<sup>2</sup>,赵贵章<sup>1,3</sup>,刘文辉<sup>1</sup>,谢思敏<sup>1</sup>

(1.华北水利水电大学,河南 郑州 450046;

2.山东省水利科学研究院,山东 济南 250013;

3.黄河流域水资源高效利用省部共建协同创新中心,河南 郑州 450046)

**摘要:**河床结构探测是研究河水-地下水转化过程的关键,复杂河床结构探测过程中,单一物探方法通常精度不高。本文采用多普勒声学流速仪、地质雷达法、高密度电阻率法相结合,在淮北平原典型工作区进行河床形态和沉积物分布特征探测,构建了完整的联合反演河床岩性结构特征的技术体系,取得了较好的识别效果。结果表明:新汴河节制闸上游呈“蝶形”,河床结构均匀,底泥厚度变化范围小;下游河床形态受分水坝影响起伏较大,河床形态不平整,底泥厚度为0.8~1 m;涡河处河道形态呈半椭圆形,且底泥两岸薄中间厚。韩村剖面受抽砂干扰严重,河床出现中间高两侧低的情况,底泥分布不均匀;两河口断面下存在弱透水层(粉质黏土),下方为承压含水层,其潜水含水层分布不均匀。实践证明,多种技术联合反演在河床形态探测上能够相互印证,提高成果解译的可靠性和准确性,为河水-地下水转化研究提供支撑。

**关键词:**河床结构;多普勒流速仪;地质雷达;高密度电阻率法;淮北平原

**中图分类号:**P33

**文献标识码:**A

**文章编号:**2096-1871(2023)02-150-10

地下水-地表水间相互作用是自然界水循环的重要环节,河流作为地表水的重要组成部分与地下水之间存在不可忽视的水力联系和频繁的交互作用<sup>[1]</sup>。近年来随着自然因素变化和人类活动影响,河流与地下水的转化日趋复杂,特别是河床结构对河流-地下水转化的影响是不容忽视的<sup>[2]</sup>。河床结构往往复杂难以直观观测,在特殊的地质地理环境下,河流的河床结构埋深有时达到几十甚至几百米,因此有必要研究和探讨河床结构的准确探测。

目前,已有大量学者开展了河床结构探测研究。例如,张明林等<sup>[3]</sup>使用急流水上钻探法对金沙江白鹤滩水电站的河道情况进行研究,确保了水电站工程地质勘测工作的顺利完成。李志威等<sup>[4]</sup>提出

表征河床结构的4个新量纲及其计算方法,使用计算参数表征河段纵剖面特征。STEELMAN C M等<sup>[5]</sup>使用探地雷达探测了加拿大埃拉莫萨河的河流地层信息,了解了浅层基岩含水层内地质边界和岩溶特征,识别出河道沉积物下的岩溶特征。WUNDERLICH T等<sup>[6]</sup>对意大利西部的河流淤积河床进行电阻率层析成像反演,结果表明加入对地下结构和电阻率约束的方法构建的地下模型与实际吻合良好。然而,单一物探方法通常精度不高<sup>[7]</sup>,单数算法在统计和计算过程中较为繁琐。因此,如何对河床结构进行快速、准确的探测,是目前急需解决的问题。

本文提出使用多普勒声学流速仪、高密度电阻率法、地质雷达等多种技术手段联合探测河床淤积

\* 收稿日期:2022-05-28 修订日期:2022-10-14 责任编辑:袁静

**基金项目:**水文学资源与水利工程科学国家重点实验室“‘一带一路’水与可持续发展科技基金(编号:2021490511)”、宁夏财政厅(编号:6400201901273)项目联合资助。

**第一作者简介:**孔令莹,1998年生,女,硕士研究生,主要从事水文地质方面的研究。Email:klyyy559@163.com。

**通信作者简介:**赵贵章,1975年生,男,副教授,博士,主要从事水文地质方面的研究。Email:zhaoguizhang@ncwu.edu.cn。

层结构,查明河流两侧地下水含水层分布特征,河床底泥空间分布及厚度,形成基于多种技术联合的河床淤积层分布探测技术方法,为平原河网地区河流沉积物、两侧漫滩含水层空间结构以及潜流带转化构建物理模型提供重要支撑,对地表水与地下水转化研究具有重要意义。

## 1 研究区概况

本文在淮北平原选择典型工作区进行高密度电阻率法测量、瞬变电磁、地质雷达和多普勒测量

工作。该地区地形微有起伏,土地利用类型以农田用地和农村宅基地为主。

典型工作区一位于涡河亳州段,位置如图1(a)所示。在涡河选取三个典型剖面进行测量工作,分别为小田庄剖面(b)、韩村剖面(c)、两河口剖面(d)。其中,小田庄剖面为人工修整过的河道;韩村剖面为自然河道,有人工抽砂情况;两河口剖面为惠济河和涡河交汇口,河流水文条件复杂。典型工作区二位于新汴河宿州段东(图2),在节制闸上游和下游选取典型剖面进行探测。

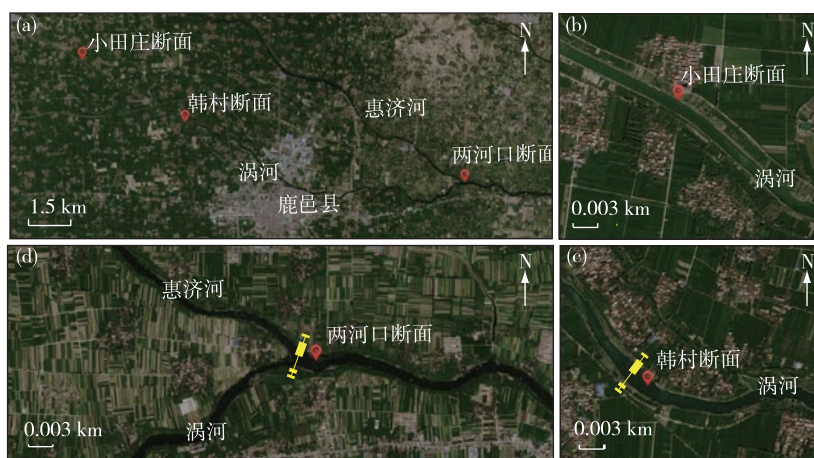


图1 涡河工作区典型剖面位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the location of typical section in Guohe work area



图2 新汴河工作区典型剖面位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the location of typical section in Xinbianhe work area

## 2 研究方法

本文采用多种技术手段开展探测河床沉积物结构研究,首先用声学多普勒流速剖面仪测定河流

断面形态,再根据测得的形态变化利用不同频率的探地雷达通过点测和连续测量方式,在水下开展河床底泥沉积规律的探测,并利用高密度电阻率法反演得到河床沉积物的分布特征。

## 2.1 多普勒流速剖面仪探测技术

声学多普勒流速剖面仪 (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP) 是通过探头向水体发射声脉冲, 水中随水体运动的悬浮颗粒将声脉冲散射使散射脉冲频率发生变化, 根据频率变化计算得到水流的流速和流向<sup>[8]</sup>, 具有响应速度快、效率高、定位灵活等优点<sup>[9]</sup>, 广泛应用于河流断面形状变化监测、流速流量变化、河段床面稳定性分析等方面。唐明等<sup>[10]</sup>通过使用双频多普勒流速剖面仪对长江口多个河段进行观测, 对河段稳定性进行对比分析。梁贵生等<sup>[11]</sup>将多普勒流速仪应用于截流工程中, 对河床断面形状变化进行监测, 并分析河道流量、分流比等水文要素。但对于部分测验条件复杂的河道, 含沙量较大、受影响因素较多, 有时会出现信号失真现象, 因此单独使用 ADCP 进行河流断面形状监测存在局限性<sup>[11]</sup>。本研究在动态河流上开展河床底部形态探测, 将 ADCP 放置于船侧随船移动而向前探测。

## 2.2 地质雷达探测技术

地质雷达是通过高频电磁波技术对地下地质体进行探测的物探设备, 其原理是将高频电磁波通过地面发射天线射入地下, 遇到地下介质后电磁波发生反射被反射天线接受, 通过发射与反射信号的时间差计算地下介质的距离, 来准确获得地下介质的大小和位置。武桂芝等<sup>[12]</sup>在黄河郑州花园口河段使用阵列地质雷达系统对河道进行探测, 提出了对于河道堤坝疏松、富水空洞塌陷等隐患的评估方法。韩佳明等<sup>[13]</sup>通过分析地质雷达电磁波接收情况, 对西安市某工地的地下空洞开展探测工作, 对方形空洞的成像规律进行了分析归纳。大量实践表明, 在实际水利水电、地质勘察中, 地质雷达可以缩短勘察周期, 大量减少钻探工作量<sup>[14]</sup>。由于地质雷达连续测量深度仅有 2.5 m, 本次将地质雷达主机放置于渔船上, 在船尾处设置升降装置以调节地质雷达连接线高度, 配合 400 MHz、100 MHz 天线完成水下关键点测量和水面连续测量(图 3)。

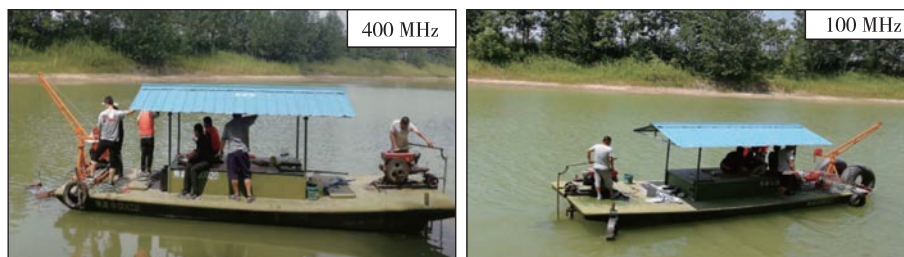


图 3 不同频率的探地雷达天线工作示意图

Fig. 3 The operation of ground penetrating radar antennas with different frequencies

## 2.3 高密度电阻率法探测技术

高密度电阻率法是一种以介质导电性差异为基础的物理探测手段, 通过一次性完成电极布设, 调节极距改变测量深度, 采用直流或交流电法完成对地下电性结构的采集<sup>[15-16]</sup>。其优点在于可以一次性获取大量数据, 快速判别地下介质的分布范围, 因此实际勘察中结合高密度电阻率法可以对地下介质进行精确识别<sup>[17-18]</sup>。肖敬瑞等<sup>[19]</sup>使用高密度电阻率法对人工湿地堵塞区域进行探测和定位。郑志龙等<sup>[20]</sup>采用高密度电阻率法对某高速公路隧道岩溶发育情况进行探测。由于在水上进行高密度电阻率法探测的特殊性, 本次在水面上架设钢丝绳辅助布线, 将电缆绑定在钢丝绳上, 同时放置两个 A 型铁架用于支撑钢丝绳和电极线来调节电极高度, 以确保电极高度一致

(图 4)。测量时根据位置设置电极间距, 测量剖面过长时采用滚动测量方式。



图 4 高密度电阻率法野外测量工作示意图

Fig. 4 Field survey by high-density resistivity method



为了避免单一物探方法的局限性,实现对河床底部沉积物分布规律的探测,本文在常用物探方法基础上,综合采用高密度电阻率法、地质雷达探测法、声学多普勒流速仪法构建以下

技术体系,完成对河流水文特征及河床形态探测技术、水面点测和连续测量的工程物探技术、河床沉积物岩性识别技术,具体技术路线如图 5 所示。

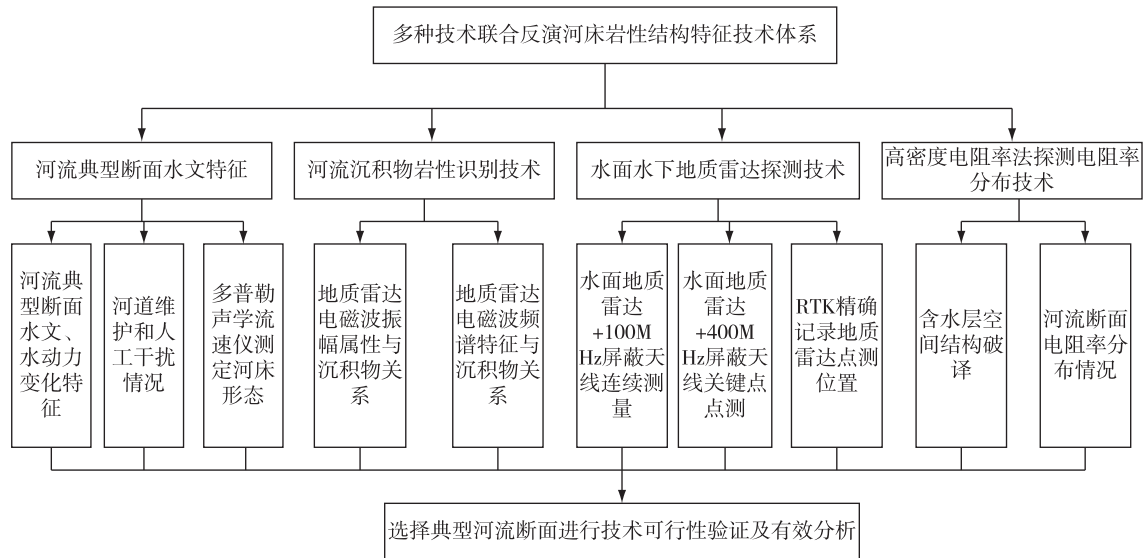


图 5 技术路线图

Fig. 5 Technical scheme

### 3 数据处理及成果解译

#### 3.1 多普勒流速剖面仪测定河流的水文特征

利用多普勒声学流速仪在典型工作区新汴河东节制闸对上游和下游断面进行探测,河流上、下游断面形态结果如图 6 所示。

新汴河东节制闸上游多普勒探测长度为 220 m,

河床形态呈现典型的“蝶形”,水面最大深度为 3.5 m,底部呈水平状(图 6(a))。新汴河东节制闸下游多普勒探测长度为 170 m,河床形态整体上较起伏,水面平均深度为 1.8 m,河床底部局部起伏比较大,与下游流速较大有关,其中在 120~170 m,河床最大深度达到 5 m,此区域为上游闸门提水通道(图 6(b))。

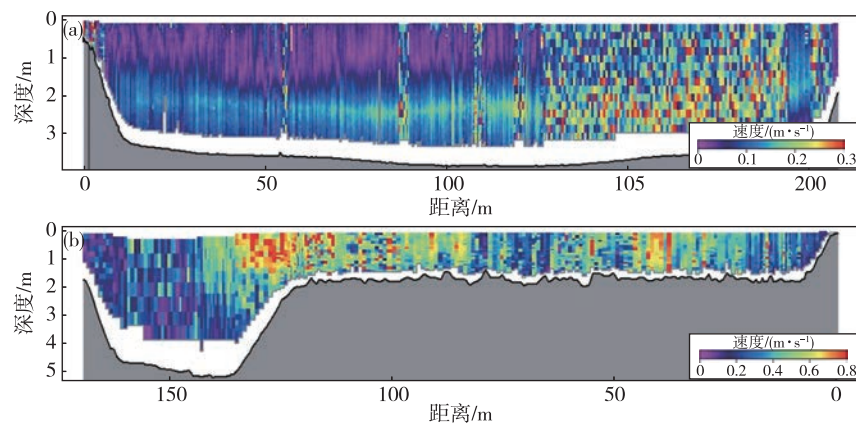


图 6 新汴河东节制闸上游(a)、下游(b)河床多普勒仪探测剖面形态图

Fig. 6 Section morphology of the riverbed detected by Doppler on the upper(a) and lower(b) reaches of Xinbianhe East Control Gate

### 3.2 地质雷达点测反演河床底部沉积物分布特征

利用地质雷达配合 400 MHz 天线对涡河工作区韩村剖面河床底部沉积物进行探测,获取河流断面不同位置的地质雷达电磁波数据,并对数据进行处理来消除或压制干扰,突出有效信号,此过程需进行多次调试对比。首先对扫描数据编辑,删除直达波,确保有效信号与实际信号一致后进

行地质雷达数据合并、漂移化处理;然后将处理后数据采用不同滤波方式除去干扰波,在异常波突显后采用希伯特变化解译出相位、频率特征和振幅的变化情况;再根据反演信息建立正演模型分析不同地层信息及异常情况。经以上步骤处理后,绘制韩村断面涡河河床沉积物厚度分布特征(图 7)。

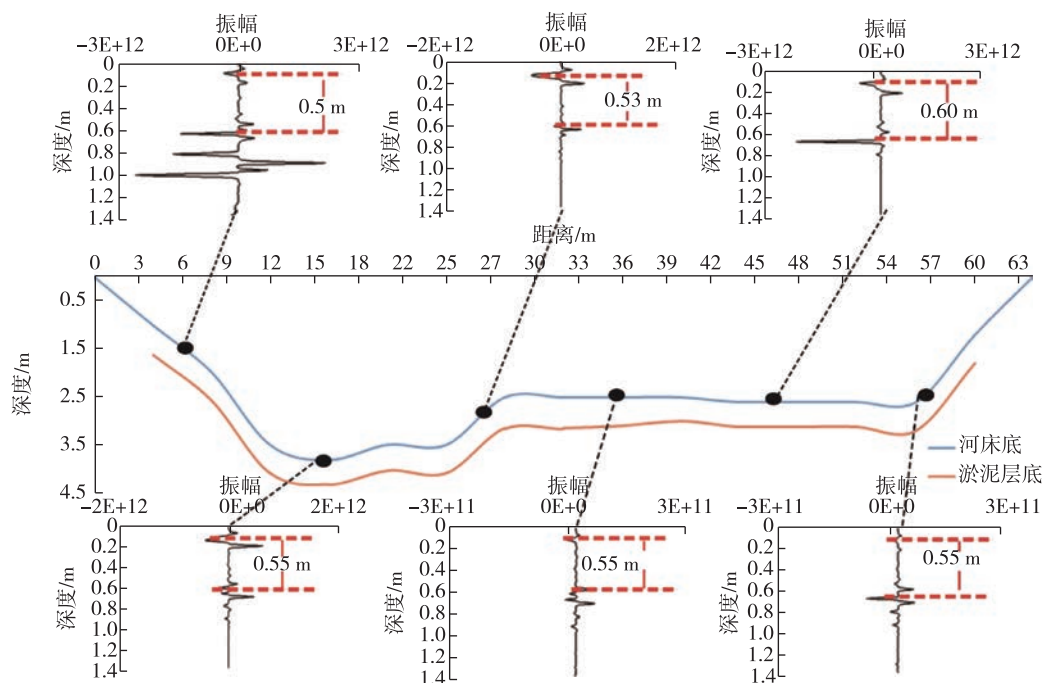


图 7 涡河韩村断面地质雷达点测反演涡河河床底部沉积物分布特征

Fig. 7 The distribution characteristics of sediments in the Guohe riverbed inverted by the geological radar point measurement in the Hancun section, Guohe River

利用所构建的河流沉积物岩性界面识别技术应用于小田庄、两河口剖面,其河床沉积物厚度分布特征如图 8 所示。

### 3.3 地质雷达连续测量的河床底部沉积物探测

在涡河工作区利用 100 MHz 天线进行地质雷达探测,结果如图 9 所示。经调查该河段经过人工整修,河道形态呈半椭圆形;该断面的底泥厚度分布不均,两岸薄中间厚,厚度约为 0.8 m;雷达反射波在靠左岸位置出现异常,推断为河道抽砂影响底泥分布。

对韩村剖面进行地质雷达连续测量,结果如图 10 所示,经调查该河段为抽砂河段,受人类干扰严重导致河床形态出现中间高两侧低的情况,使河床底泥分布出现不均现象,底泥厚度最大值为 1.2 m;由于天线原因最大测深为 2.5 m,故部分河道的底

泥未探出。

### 3.4 高密度电阻率法反演新汴河上下游电阻率分布特征

在新汴河上游、下游剖面分别布设两条测线,使用 EDJMD-1 型多功能数字直流电法仪进行数据采集,采集后对数据进行质量评价以保证反演电阻率准确性。利用均方根相对误差公式进行质量检查,公式为

$$m = \pm \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\rho_{si} - \rho'_{si}}{\bar{\rho}_{si}} \right)^2}, \quad (1)$$

式中,  $\rho_{si}$  为第  $i$  个极距原始观测数据;  $\rho'_{si}$  为第  $i$  个极距的检查观测数据;  $\bar{\rho}_{si}$  为  $\rho_{si}$  与  $\rho'_{si}$  的平均值;  $n$  为统计计算数据量。

经计算,新汴河河道均方根相对误差  $< 3\%$ ,表明采集数据质量可靠。将数据中畸变点剔除,

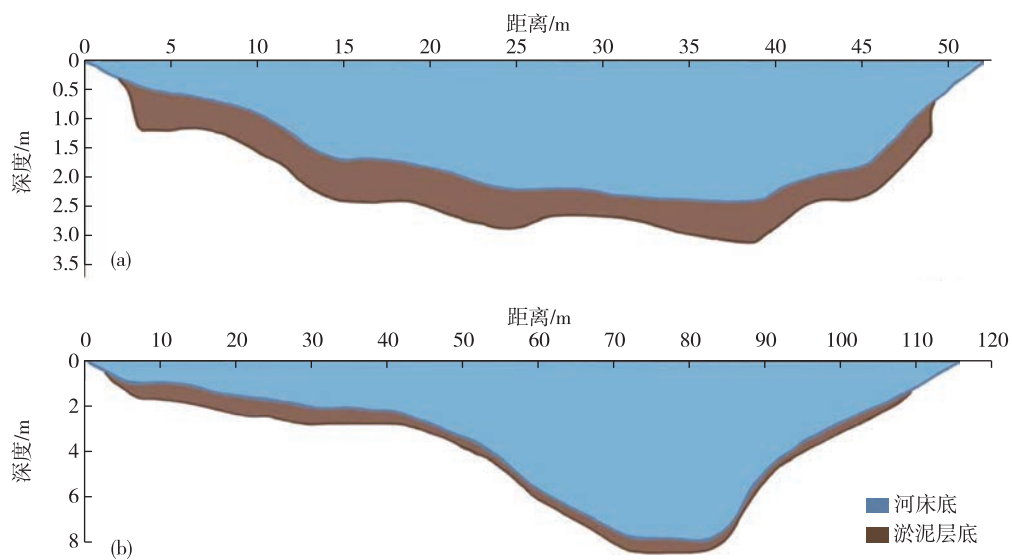


图 8 小田庄(a)、两河口(b)剖面河床沉积物分布特征

Fig. 8 Distribution of riverbed sediments in the Xiaotianzhuang(a) and Lianghekou(b) sections

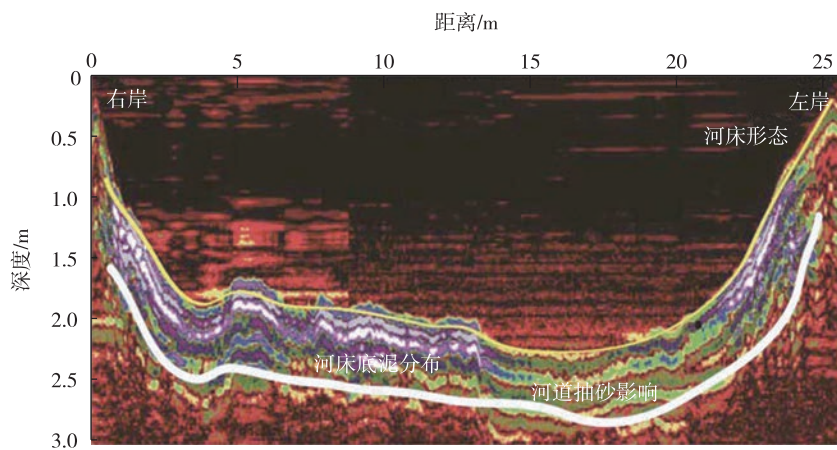


图 9 涡河小田庄剖面底泥分布规律

Fig. 9 Distribution of sediments in Xiaotianzhuang section, Guohe River

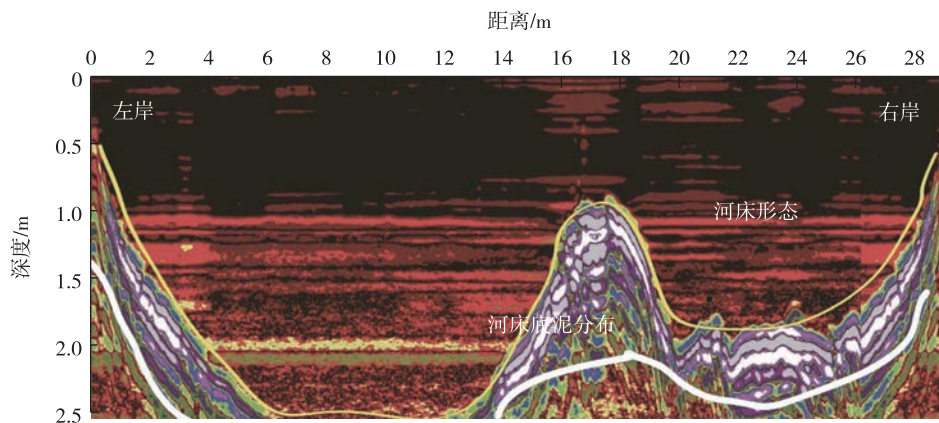


图 10 涡河韩村剖面底泥分布规律

Fig. 10 Distribution of sediments in Hancun section, Guohe River



并使用 RES2DINV 反演软件对有效数据进行反演。该软件可以进行含有地形的自动反演,工作区河面高度一致,河岸处地形坡度 $<15^{\circ}$ ,地形起

伏较小,为使反演结果更加精确,选择带地形的反演方法,多次调试反演参数后获得结果如图 11 所示。

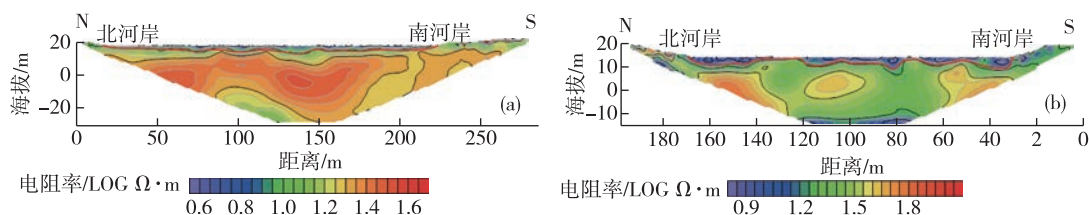


图 11 新汴河东节制闸上游(a)、下游(b)电阻率等值线图

Fig. 11 The resistivity contour map of the upper(a) and lower(b) reaches of Xinbianhe East Control Gate

由图 11(a)可知,上游河床深度变化程度较小,深度最大为 3.5 m,河床形态平整;河床结构均匀,分层明显,这与多普勒流速仪探测结果一致。由图 11(b)可知,下游河床深度上分布不均匀,北岸至南岸 120 m 范围内河床深度较浅,平均深度为 1.8 m。在河流分水坝(120~140 m)两侧河床深度明显增大,分水坝北侧河床深度达到 5 m。浅河床处底泥厚度约 0.8 m,深河床处底泥厚度 1 m 左右,河床底部不平整且起伏较大,河床结构分层不明显。与多普勒流速仪、地质雷达探测结果相对应,推测河床分布不均匀是河流下游河面窄、水

流速度大造成的。

### 3.5 基于高密度电阻率法多种探测方案的精确解译含水层空间结构

在涡河工作区两河口断面通过水力联系、电法勘探等方法,获取地下介质的电阻率特征,从宏观角度分析河流与浅层地下水之间关系。在两河口断面距离河岸 15 m 左右的位置布置高密度测线,为了提高探测精度,设置 4 种探测方案,即固定高密度主机,设置电极极距分别为 6 m(测深 108 m)、3 m(测深 54 m)、1 m(测深 18 m)、0.5 m(测深 9 m)。绘制高密度电阻率法解译成果图(图 12)。

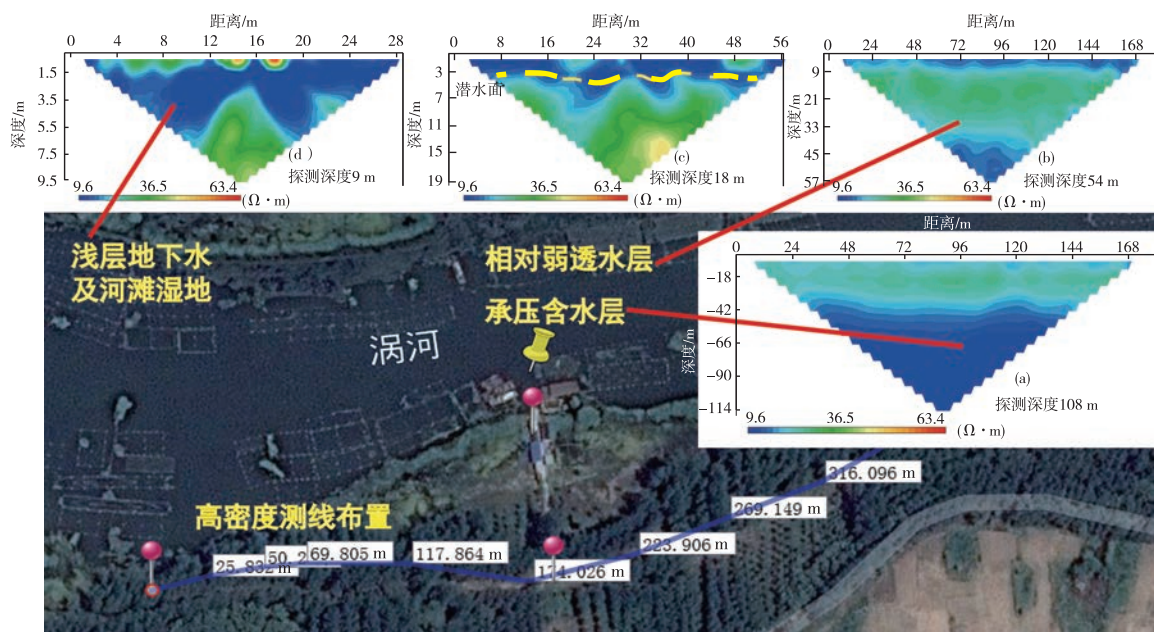


图 12 涡河两河口高密度电阻率法多种探测方案解译成果图

Fig. 12 Interpretation of various high-density resistivity method schemes in the Lianghekou section, Guohe River

通常情况下,低电阻率表示含水率较高的区域、含水层或其他具有低阻性质的岩矿体,高电阻率区域则一般为基岩或孔隙度小含水率低的地层或岩体。根据以往工作区探测情况和所收集到的资料,淮北地区第四系松散层粘性土与砂层在电性上存在较大差异,粘性土视电阻率为  $8 \sim 15 \Omega \cdot \text{m}$ ,砂性土视电阻率为  $20 \sim 30 \Omega \cdot \text{m}$ ,这是通过视电阻率法圈定含水层位置的物理基础。由图 12(a)可知:该剖面上在  $30 \sim 48 \text{ m}$  存在一组弱透水层,为粉质黏土,在其下为承压含水层;由图 12(b)解译结果能够准确地探测该弱透水层的位置在  $33 \text{ m}$  左右;利用极距  $1 \text{ m}$ 、测深  $18 \text{ m}$  的探测方案确定潜水面的位置(图 12(c)),根据河水位可以判读地下水与河流之间的转化关系;根据图 12(d)能够判读低阻区潜水含水层分布的不均匀性,以及地表导致电阻率变化的原因,在  $6 \text{ m}$  位置有湿地导致地表电阻率偏低,在  $14 \text{ m}$  的位置由于修建水泥路导致地表电阻率偏高。

综上所述,设置不同的探测方案不仅能从宏观上认识河床底部岩性特征,更能精确地分辨潜水和承压水的位置,为研究河流与浅层地下水、中深层地下水之间关系提供依据。

#### 4 结论

(1)构建了多种技术联合反演河床岩性结构特征的技术体系,通过多普勒声学探测、地质雷达测量,结合高密度电阻率法,反演河床沉积物的分布特征,为后续河流-地下水转化研究提供重要参数支撑。

(2)新汴河东节制闸上游河床形态呈现典型的“蝶形”,水面最大深度为  $3.5 \text{ m}$ ,河床底整体平整,底泥厚度变化范围小;下游河床形态整体上起伏较大,从南岸至北岸的  $120 \text{ m}$  处,河床深度较浅,从  $120 \sim 170 \text{ m}$  河床深度剧增。节制闸下游河床底部的较大起伏与闸下河流流速快、河流冲刷强度大有关。

(3)将地质雷达水下典型点测量和水面连续测量相结合可以绘制得到剖面底泥分布规律。涡河小田庄断面河道形态呈半椭圆形,且底泥两岸薄中间厚。韩村剖面河床中间高两侧低,底泥分布不均。根据高密度电法探测结果,韩村断面浅部地下水与涡河存在水力联系。两河口断面下存在弱透水层,下方为承压含水层。

#### 参考文献

- [1] 王文科,李俊亭,王钊,等. 河流与地下水关系的演化及若干科学问题[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(2): 231-238.  
WANG W K, LI J T, WANG Z, et al. Evolution of the relationship between river and groundwater and several scientific problems [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(2): 231-238.
- [2] 李国礼,周锴锬,张庆,等. 地表水与地下水联合数值模拟系统在阜阳市水资源优化管理中的应用[J]. 华东地质, 2018, 39(3): 234-240.  
LI G L, ZHOU K E, ZHANG Q, et al. The application of a joint numerical simulation system of surface water and groundwater in optimized management of Fuyang water resources [J]. East China Geology, 2018, 39(3): 234-240.
- [3] 张明林,周光辉,洪炉,等. 金沙江白鹤滩水电站急流水上钻探方法的研究及应用[J]. 工程勘察, 2008 (S1): 187-193.  
ZHANG M L, ZHOU G H, HONG L, et al. Research and application of water drilling method for rapids in Baihetan Hydropower Station of Jinsha River [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2008 (S1): 187-193.
- [4] 李志威,颜旭,潘保柱,等. 山区河流河床结构表征新方法[J]. 水科学进展, 2018, 29(6): 799-809.  
LI Z W, YAN X, PAN B Z, et al. A new method of calculating riverbed structure in mountain streams [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(6): 799-809.
- [5] STEELMAN C M, KENNEDY C S, PARKER B L. Geophysical conceptualization of a fractured sedimentary bedrock riverbed using ground-penetrating radar and induced electrical conductivity[J]. Journal of Hydrology, 2015, 521: 433-446.
- [6] WUNDERLICH T, FISCHER P, WILKEN D, et al. Constraining electric resistivity tomography by direct push electric conductivity logs and vibracores: An exemplary study of the Fiume Morto silted riverbed (Ostia Antica, western Italy) [J]. Geophysics, 2018, 83(3): B87-B103.
- [7] 冯彦东,杨军. 综合物探方法在河床深厚覆盖层勘探中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(2): 208-211.  
FENG Y D, YANG J. Application of comprehensive geophysical method to deep overburden layer



- exploration in river bed[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2009, 6(2): 208-211.
- [8] 徐文晓. 长江河口北港北汊河势演变及动力沉积特征分析[D]. 上海:华东师范大学, 2016.
- XU W X. Analysis of river regime evolution and dynamic sediment for the north inlet of North Channel in the Changjiang estuary [D]. Shanghai: East China Normal University, 2016.
- [9] 汪胜波, 姬光荣, 杨光兵, 等. 宽带声学多普勒流速剖面仪信号中心频率估计[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2013, 43(2): 87-92.
- WANG S B, JI G R, YANG G B, et al. Center frequency estimation of broadband ADCP signal[J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(2): 87-92.
- [10] 唐明, 程和琴, 陈钢, 等. 基于 ADCP 的长江口感潮河段床面稳定性分析[J]. 泥沙研究, 2020, 45(1): 37-44.
- TANG M, CHENG H Q, CHEN G, et al. Stability analysis of bed in tidal river sections of Yangtze Estuary based on ADCP[J]. Journal of Sediment Research, 2020, 45(1): 37-44.
- [11] 梁贵生, 谢永勇, 宁鑫. ADCP 在黄河游荡型河道截流工程中的应用[J]. 人民黄河, 2018, 40(10): 17-19.
- LIANG G S, XIE Y Y, NING X. Application of ADCP in the Interception Project in the Wandering Channel of the Yellow River[J]. Yellow River, 2018, 40(10): 17-19.
- [12] 武桂芝, 张宝森, 李春江, 等. 阵列地质雷达在黄河堤防隐患探测中的应用[J]. 人民黄河, 2020, 42(8): 113-116.
- WU G Z, ZHANG B S, LI C J, et al. Application of array geological radar to the detection of hidden dangers in the Yellow River dyke [J]. Yellow River, 2020, 42(8): 113-116.
- [13] 韩佳明, 牛宇凯, 刘明明, 等. 地下方形空洞地质雷达成像机理研究[J]. 物探与化探, 2022, 46(3): 685-692.
- HAN J M, NIU Y K, LIU M M, et al. Ground penetratin radar imaging mechanisms of underground square cavities[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(3): 685-692.
- [14] 田原. 地质雷达在水电工程中的应用[J]. 勘察科学技术, 1998(4): 56-59.
- TIAN Y. Application of Georadar in Hydroelectric Projects[J]. Site Investigation Science and Technology, 1998(4): 56-59.
- [15] 刘文辉, 赵贵章, 陈世仲, 等. 基于高密度电阻率法的河床结构特征研究: 以宿州新汴河为例[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(5): 59-65.
- LIU W H, ZHAO G Z, CHEN S Z, et al. Structural characteristics of riverbed based on high density electrical method-a case of the New Bian-he River in Suzhou [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42(5): 59-65.
- [16] 姜月华, 吴吉春, 李云, 等. 高密度电法在城市地下水和土壤有机污染调查中的应用[J]. 华东地质, 2021, 42(1): 1-8.
- JIANG Y H, WU J C, LI Y. et al. The application of high-density resistivity method in organic pollution survey of groundwater and soil of cities[J]. East China Geology, 2021, 42(1): 1-8.
- [17] WU G J, YANG G L, TAN H B. Mapping coalmine goaf using transient electromagnetic method and high density resistivity method in Ordos City, China[J]. Geodesy and Geodynamics, 2016, 7(5): 340-347.
- [18] 崔玉贵, 姜月华, 刘林, 等. 高密度电法在江西于都黄麟地区地热勘查中的应用[J]. 华东地质, 2020, 41(4): 368-374.
- CUI Y G, JIANG Y H, LIU L, et al. Application of high-density resistivity method in geothermal exploration in Huanglin area of Yudu County, Jiangxi Province[J]. East China Geology, 2020, 41(4): 368-374.
- [19] 肖敬瑞, 丁彦礼, 刘良, 等. 地面高密度电阻率法在人工湿地堵塞区域探测研究[J]. 工程地球物理学报, 2022, 19(2): 183-191.
- XIAO J R, DING Y L, LIU L, et al. Study on detection of blocked area of constructed wetland by ground high density resistivity method[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2022, 19(2): 183-191.
- [20] 郑志龙, 陈洋, 王丽君, 等. 高密度电法在某高速公路岩溶隧道探测中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(S2): 912-917, 924.
- ZHENG Z L, CHEN Y, WANG L J. et al. Application of high density electrical method in karst tunnel detection of a highway[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(S2): 912-917, 924.

## Study on the structural characteristics of riverbed lithology based on the joint inversion of multiple methods

KONG Lingying<sup>1</sup>, XU Yuanzhi<sup>2</sup>, ZHAO Guizhang<sup>1,3</sup>, LIU Wenhui<sup>1</sup>, XIE Simin<sup>1</sup>

(1. *North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, Henan, China;*

2. *Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan 250013, Shandong, China;*

3. *Collaborative Innovation Center for Efficient Utilization of Water Resources, Zhengzhou 450046, Henan, China*)

**Abstract:** The detection of riverbed structure is the key to study river-groundwater transformation. Single physical exploration method is usually of low accuracy in the detection of complex riverbed structure. This study jointly adopt Doppler acoustic velocity meter, geological radar and high-density resistivity method to investigate riverbed morphology and detect sediments distribution characteristics in the typical working area of Huaibei Plain. A complete technical system of joint inversion of riverbed lithological structure characteristics is accordingly constructed, achieving a good identification effect. The results show that: the upstream of the Xinbianhe River control gate is “butterfly-shaped” with uniform riverbed structure and small variation of sediment thickness. The shape of downstream riverbed fluctuated greatly under the influence of the sub-dam, with the sediment thickness of 0.8~1 m. The channel of Guohe River is semi-oval in shape, and the bottom mud is thin on both sides but thick in the middle. Seriously disturbed by sand pumping, the riverbed in Hancun section is high in the middle and low on both sides, resulting in uneven distribution of sediment. There is a weak permeable layer (silty clay) between Lianghekou section and a confined aquifer, and the local phreatic aquifer distributes unevenly. The practice has proved that the joint inversion of various techniques can corroborate mutually in riverbed morphology detection and improve the reliability and accuracy of results interpretation, providing support for the study of river-groundwater transformation.

**Key words:** riverbed structure; Doppler current meter; geological radar; high-density resistivity method; Huaibei Plain