



中国农村水利水电
China Rural Water and Hydropower
ISSN 1007-2284, CN 42-1419/TV

《中国农村水利水电》网络首发论文

题目： 基于哨兵 2 号与面深模型的小清河水深反演方法研究
作者： 曾雪涛，张艳军，宋圆馨，王逸凡，刘鑫宇
网络首发日期： 2023-12-13
引用格式： 曾雪涛，张艳军，宋圆馨，王逸凡，刘鑫宇. 基于哨兵 2 号与面深模型的小清河水深反演方法研究[J/OL]. 中国农村水利水电.
<https://link.cnki.net/urlid/42.1419.TV.20231213.0930.006>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于哨兵 2 号与面深模型的小清河水深反演方法研究

曾雪涛¹，张艳军*¹，宋圆馨¹，王逸凡¹，刘鑫宇¹

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室，湖北 武汉 430072)

摘要：利用卫星遥感技术反演水深是快速获取广域水深信息的重要手段。然而，水体中底质、广泛存在的泥沙等悬浮物质、叶绿素等水色影响物质导致传统光学卫星影像反演精度较低。为减小水色物质对水深反演精度的影响，基于数学模型与哨兵 2 号遥感影像，在分析不同断面类型河道水深与水面面积数学模型的基础上，提出了一种能够克服水色物质影响的水深反演方法。该方法通过对河道断面进行概化并分类，推导出河道面深模型，结合哨兵 2 号遥感影像确定数学模型中相关参数，得出可直接通过水面面积计算水深的表达式，可最大程度减小水色对遥感影像反演水深的影响。将其应用于小清河，该方法在黄台桥与石村水文站的水深反演绝对误差平均值分别为 0.03 米与 0.23 米，反演结果较为可靠。实验结果表明，本文提出的方法水深反演精度较高，不受水体水色的影响，可基于卫星遥感技术快速获取水体水深信息，有推广应用价值。

关键词：遥感；水面面积；水深；小清河

中图分类号： TP 79；TV 211 **文献标识码：** A

基金项目：水利卫星星座运控与运用关键技术 (SKS-2022164)；长江电力水利卫星星座建设咨询 (2423211005)

作者简介：曾雪涛(2001-)，女，硕士研究生，水文水资源。E-mail: 2018302060036@whu.edu.cn。

通讯作者：张艳军(1982-)，男，教授，博士，水文水环境。E-mail: zhangyj1015@whu.edu.cn。

Research on water depth inversion method of Xiaoqing River based on Sentinel-2 and surface depth model

ZENG Xue-tao¹, ZHANG Yan-jun^{*1}, SONG Yuan-xin¹, WANG Yi-fan¹, LIU Xin-yu¹

(1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China;)

Abstract: Utilizing satellite remote sensing technology for the retrieval of water depth is a crucial method for acquiring comprehensive water depth information over large areas. However, traditional optical satellite images often suffer from low inversion accuracy due to various factors, including the presence of sediments, suspended particles, and chlorophyll in the water. These constituents alter the color and turbidity of the water, making it challenging to accurately estimate water depth through remote sensing techniques. To mitigate the influence of these water color materials on the accuracy of water depth inversion, a novel approach was proposed, centered around a mathematical model and the use of Sentinel-2 remote sensing imagery. This approach involves analyzing the mathematical relationships between water depth and the surface area of different types of water channels. This method deduces the river surface depth model by generalizing and classifying the river section. It combines the Sentinel-2 remote sensing images to determine the relevant parameters in the mathematical model, and derives an expression that can directly calculate the water depth from the water surface area, which can minimize the influence of water color on water depth retrieval from remote sensing images. To validate the effectiveness of this approach, it was applied to the Xiaoqing River, and the results were compared with ground-truth data. The average absolute error in water depth inversion at two hydrographic stations, Huangtaiqiao and Shicun, was found to be 0.03 meters and 0.23 meters, respectively. These results demonstrate a significant improvement in the accuracy of water depth estimation. The method proves to be more reliable in areas with varying water color and turbidity, as it is not significantly influenced by these factors. In summary, the experimental results highlight the potential of this method for accurately and rapidly obtaining water depth information through satellite remote sensing technology. Its ability to reduce the impact of water color on water depth retrieval makes it a valuable tool for widespread application in environmental monitoring, resource management, and other fields that rely on accurate water depth data. This innovation opens new avenues for remote sensing-based water depth assessment with high precision and reliability.

Key words: remote sensing; water surface area; water depth; Xiaoqing River

0 引言

传统的河流水深测定方法包括测深杆法、测深锤法以及回声测深仪法等，测深杆与测深锤在实际测深过程中通常被结合使用，该方法受水深、流速以及天气条件等因素的影响，误差较大。回声测深仪法在静水、清水中的测量结果比较可靠，在含沙量较高的河流中测量精度显著降低^[1]。此外，传统方法测量水深成本高且耗时，并且覆盖范围相对较低^[2]，随着科技的发展与时代的进步，已无法满足现代观测需求。

近年来，卫星遥感技术飞速发展，数据不断丰富，光学遥感水深反演模型逐渐成为研究热点。光学水深遥感始于 20 世纪 60 年代，光学传感器所接收的光辐射主要有三部分：水—气界面的反射辐射、水体的后向散射辐射和水底的反射辐射，分离卫星遥感影像中的信息可得出水深^[3]。相关模型主要包括理论解析模型、半理论半经验模型与统计模型三种，均得到了广泛研究和运用^[4]。理论解析模型基于水光场辐射传输方程，建立光学遥感接收到的辐亮度与水深和底质反射的解析表达式，进而通过表达式解算出水深。Lyzenga 等^[5]利用双层流近似假设，简化经典辐射方程并忽略水体内部反射效应得到了水深反演的理论解析模型。但是该模型计算过程较为繁杂，且模型所需参数难以获取，受水体内部物质影响较大，故其发展和应用受到很多限制^[6]。半理论半经验模型的理论基础为光辐射能在水中的衰减特性，其中对数线性模型应用最为广泛。单波段对数线性模型又称简单衰减模型，Benny^[7]根据光辐射通量沿水深按指数衰减这一规律，通过回归分析得出相关参数，提出了一种单波段反演水深的算法，但该模型基于水体与水底均均质这一假设条件，与实际情况不符，水深反演精度较低。Paredes 等^[8]假设 2 个波段在不同底质类型上的反射率保持不变，建立了双波段对数线性模型，一定程度上减小了底质变化对水深探测的影响。通过引入权重系数将双波段对数线性模型推广至多波段，进一步减小了底质的影响，提升了水深反演精度。曹瑞雪等人^[9]以双子礁与黄河口水域为研究区，使用 Landsat TM 数据，采用单波段、双波段、多波段对数线性模型进行水深反演，发现测深精度主要与水体有关，地形与底质的影响居其次。许海蓬等人^[10]使用 SPOT 影像对雷州湾水深进行反演，发现在不同的水深范围内，反演精度的水色主要影响因子有所不同。统计模型根据遥感图像辐射亮度值与实测水深

之间的统计关系得到水深反演模型，未考虑水深遥感的物理机制，表达式主要有幂函数、对数函数和线性模型^[11]。人工神经网络是统计模型中的一种特殊形式^[12]，该模型输入有单波段与多波段组合，也可以考虑悬浮物泥沙和叶绿素等环境影响因子反演水深^[13]，但影响水深反演的水色因子众多，难以在模型中完全体现。张鹰等人^[14]采用动量BP神经网络模型对长江口水深进行反演，浅水区平均相对误差为16.7%，深水区为15.5%。樊彦国等人^[15]使用Landsat影像，使用BP神经网络进行水深反演，发现在遥感水深反演问题上，BP神经网络模型效果优于传统线性模型。

学者们对水深反演的研究受水色因子的制约。首先由于不同水体所含物质不同，在可见光波段有不同的衰减系数，导致模型内部与衰减相关的系数具有特殊性，尤其是对于河流，不同时期水体所含物质变化较大，导致模型不具备普适性。其次是当水体较为浑浊时，衰减系数增大，所能探测的深度减小，且当水体浑浊程度增加到一定程度时，水体中悬浮粒子的向后反射分量大于水底反射分量，此时传感器无法接收到水底部反射信息^[16]，导致现有方法在泥沙等水色因子浓度较大的情况下失灵。

为解决上述问题，本文从概化河道断面形状出发，利用遥感水面面积提取不受水色物质影响这一特性，建立水面面积与水深相关关系，称其为面深模型，推导出一般断面河道可进行数值求解的面深模型，结合水文站实测水位与遥感获取的水面面积数据，反演得出水深。

1 研究区域概况

小清河流域位于山东省鲁北平原南部，地理坐标为东经116°50'~118°45'，北纬36°15'~37°20'，流域面积10433 km²，是济南市重要防洪除涝河道，流域概况如图1。小清河干流发源于济南市区四大泉群，自西向东流经济南市、邹平市、淄博市、潍坊市，于寿光市羊口镇注入莱洲湾，全长229 km。小清河是鲁中地区一条重要的排水河道，兼顾两岸农田灌溉、内河航运，具有海、河联运等多种功能的河道。

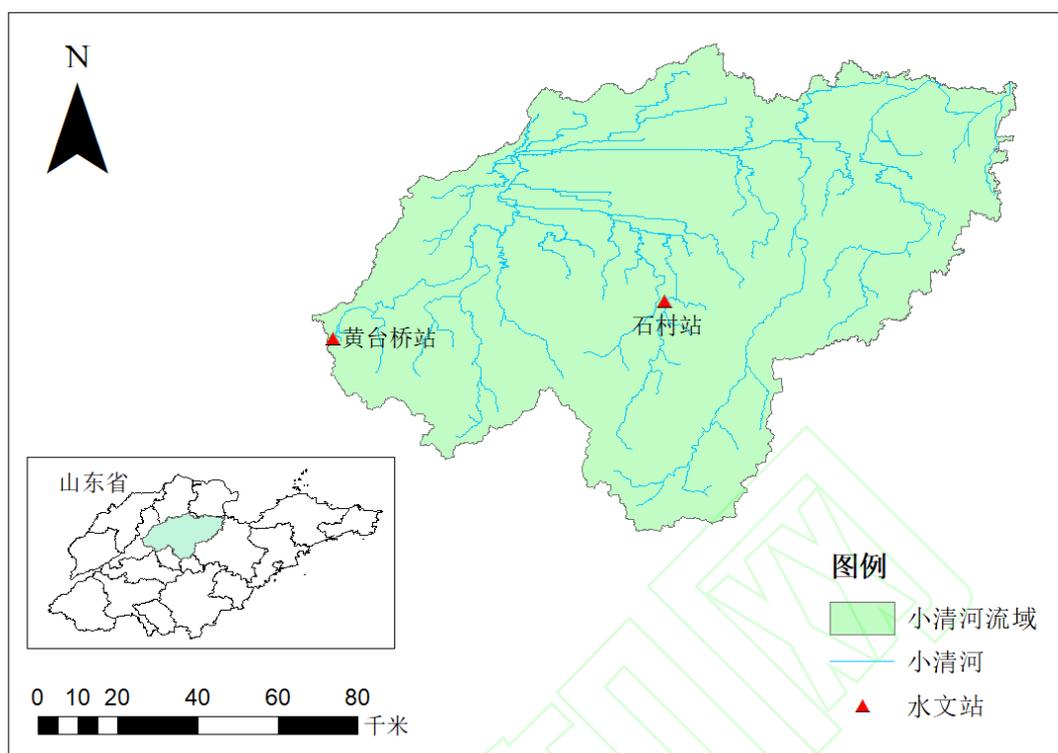


图 1 流域概况图

Fig.1 River basin overview map

小清河水体污染较为严重，悬浮物含量较高。自上个世纪 70 年代开始，伴随着经济快速发展，工业废水、生活污水及地表径流大量排入小清河，使其受到严重污染^[17]。沿河有化工、建材、有色金属等排污企业 800 多家，1996 年日均排污量高达 85.5 万吨，远远超过小清河河水的自净能力，导致水质恶化，水中污染物质成分复杂^[18]。从空间上来看，小清河中游到入海口的污染物浓度含量呈增大趋势，且下游污染物含量严重超标^[19]。

黄台桥站与石村站分别为小清河上中游与中下游的分界。黄台桥水文站位于济南市历城区华山镇前进桥，地理位置为东经 117°04'、北纬 36°44'，控制流域面积 321 km²，是小清河干流上的省级重点水文站，由于小清河黄台桥以上水域属济南市景观河道，并受下游控制闸影响，水位流量关系不稳定。石村水文站位于东营市广饶县石村镇东辛桥，地理位置为东经 118°23'、北纬 37°12'，为小清河最下游干流控制站，距河口 52 km，控制流域面积 6717 km²，石村站位于平原地区，水系复杂，上游多水利工程，受上游水库蓄水、闸门开放水影响较大。

2 方法

对河道进行概化,由一般断面推导至梯形、三角形断面,得出面深模型。根据一般河道可离散为多个三角形与梯形河道这一特性,在未知河道断面形状情况下,可与遥感结合进行数值求解,得出一般河道面深模型。面深模型中存在边坡系数与河道底宽两个未知数,利用最枯时期遥感影像提取水面面积与河长作比得出河道底宽;在面深模型中引入河底高程,将其转化为水位-水面面积数学模型,利用遥感提取水面面积与水文站实测水位数据得出水位-水面面积系统统计模型,假设统计模型与相应面深模型具有一致性,解算出边坡系数。

2.1 河道面深模型

本文采用演绎推理^[20],推导一般情况河道面深模型,再由一般到特殊,得出梯形断面、三角形断面面深模型的计算方法。对一般断面进行离散化,得出在未知断面数据情况下可与遥感结合得出水深值的面深模型。

2.1.1 一般河道

对于一般河道,立体图如图 2,河道断面如图 3,此时河道断面面积为断面位置与水深的函数,假设沿河流方向为 x 轴,设断面面积为 $A_1(H, x)$,河流长度为 L ,河面面积为 A ,水深为 H ,此时以断面面积为底、河长为高计算出河道中的水体体积如式(1)所示。

$$V = \int_0^L A_1(H, x) dx \quad (1)$$

式中: $A_1(H, x)$ 为过水断面面积,为流程 x 以及水深 H 的函数, m^2 ; x 为流程, m ; L 为河道长度, m ; V 为河道中水体体积, m^3 。

同时以水面面积为底、水深为高进行体积计算,假设两侧剩余三角形面积分别为 $A_2(H, x)$ 与 $A_3(H, x)$,则此时河道中水体体积表达式如式(2)。

$$V = AH - \int_0^L A_2(H, x) dx - \int_0^L A_3(H, x) dx \quad (2)$$

式中: A 为水面面积, m^2 ; H 为水深, m ; $A_2(H, x)$ 、 $A_3(H, x)$ 为两侧三角形面积,为流程 x 以及水深 H 的函数, m^2 。

根据同一时刻河道中水体体积相等这一原理,联立式(1)与式(2)得到水面面积-水深数学模型如式(3)。

$$A = (\int_0^L A_1(H, x)dx + \int_0^L (A_2(H, x) + A_3(H, x))dx)/H \quad (3)$$

再由式(4)便可以得出一般河道面深模型。

$$Z = Z_0 + H \quad (4)$$

式中： Z 为水位， m ； Z_0 为槽底高程， m 。

式(3)中需要已知断面形状才能得出面深模型，但是在实际应用中，断面数据获取较为困难，因此需要对该形式进行变换。任何不规则断面离散后均可等价若干梯形断面与三角形断面的叠加。因此，先推求特殊情况梯形与三角形断面的面深模型，再对一般河道分段建立面深模型。

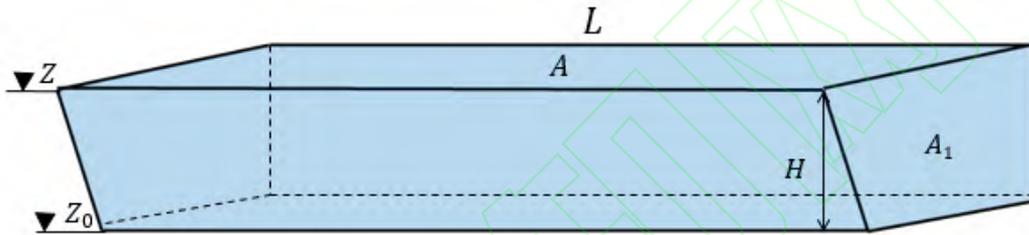


图 2 河道立体图

Fig.2 Three-dimensional map of the river

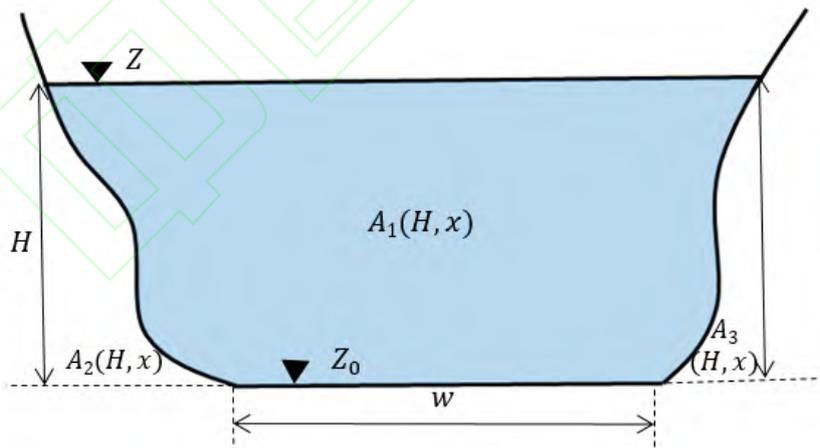


图 3 一般河道断面图

Fig.3 General river cross section

2.1.2 梯形、三角形断面河道

把河道简化为棱柱型河道，如图 4(a)所示，假设河道底宽为 w ，边坡系数为 m ，此时 $A_1(H, x)$ 如式(5)，若梯形断面两侧边坡系数不一致，取其均值作为该等

腰梯形边坡系数 m ，三角形断面同理。

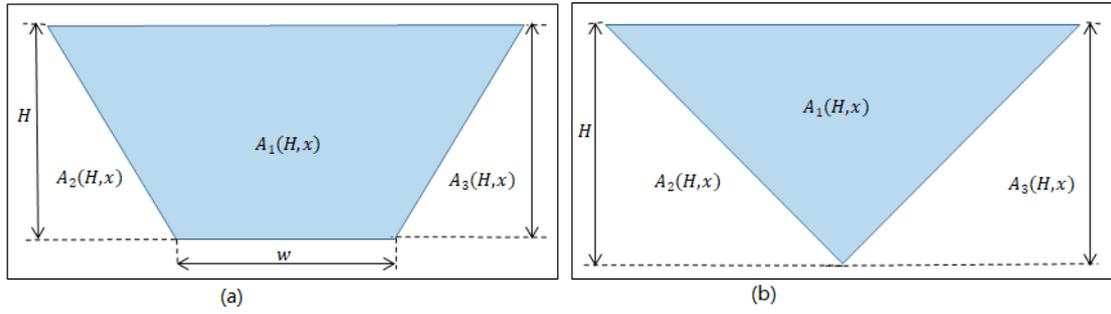


图 4 不同河道类型断面图
Fig.4 Cross section of special river type

$$A_1(H, x) = (w + mH)H \quad (5)$$

式中： w 为河道底宽， m ； m 为河道边坡系数，无量纲。

式(3)中 $A_2(H, x)$ 与 $A_3(H, x)$ 的表达式如式(6)。

$$A_2(H, x) = A_3(H, x) = \frac{1}{2}HmH \quad (6)$$

联立式(5)、式(6)与式(3)并化简得出梯形断面河道面深模型如式(7)。

$$H = \frac{A-wL}{2mL} \quad (7)$$

联立式(7)与式(4)得出梯形断面河道水位-水面面积数学模型如式(8)。

$$Z = \frac{A}{2mL} - \frac{w}{2m} + Z_0 \quad (8)$$

若河道为三角形河道，如图 4(b)，此时式(7)中的河道底宽 w 为零，三角形河道的面深模型如式(9)。

$$H = \frac{A}{2mL} \quad (9)$$

同时水位-水面面积数学模型变为式(10)。

$$Z = \frac{A}{2mL} + Z_0 \quad (10)$$

2.1.3 一般河道离散化数学模型

为便于一般河道求解水深，对一般断面河道进行离散化处理，将其分割为 $n-1$ 个梯形断面与一个三角形断面如图 5 所示，将河道断面分割为 n 部分，设从下至上第 i 部分的最大水深值为 H_i 、水面宽度为 w_i 、左右岸边坡系数分别为 m_i^1

与 m_i^2 ，基于此对一般河道进行分段化推导面深模型，将式(3)转化为式(11)。

$$\begin{cases} H = \frac{A}{(m_1^1+m_1^2)L} & 0 \leq A \leq w_1L \\ H = H_1 + \frac{A-w_1L}{(m_2^1+m_2^2)L} & w_1L \leq A \leq w_2L \\ \vdots & \vdots \\ H = \sum_{i=1}^{n-1} H_i + \frac{A-w_{n-1}L}{(m_n^1+m_n^2)L} & w_{n-1}L \leq A \leq w_nL \end{cases} \quad (11)$$

式中： H 为水深， m ； A 为水面面积， m^2 ； m_i^1 为第 i 部分左岸边坡系数，无量纲； m_i^2 为第 i 部分右岸边坡系数，无量纲； L 为河长， m ； w_i 为第 i 部分顶部河面宽度， m 。

式(11)中将左右岸边坡系数取其平均值作为平均边坡系数，便与式(7)与式(9)一致，因此利用该方法进行水深反演时，非等腰梯形、三角形可作为等腰图形处理。

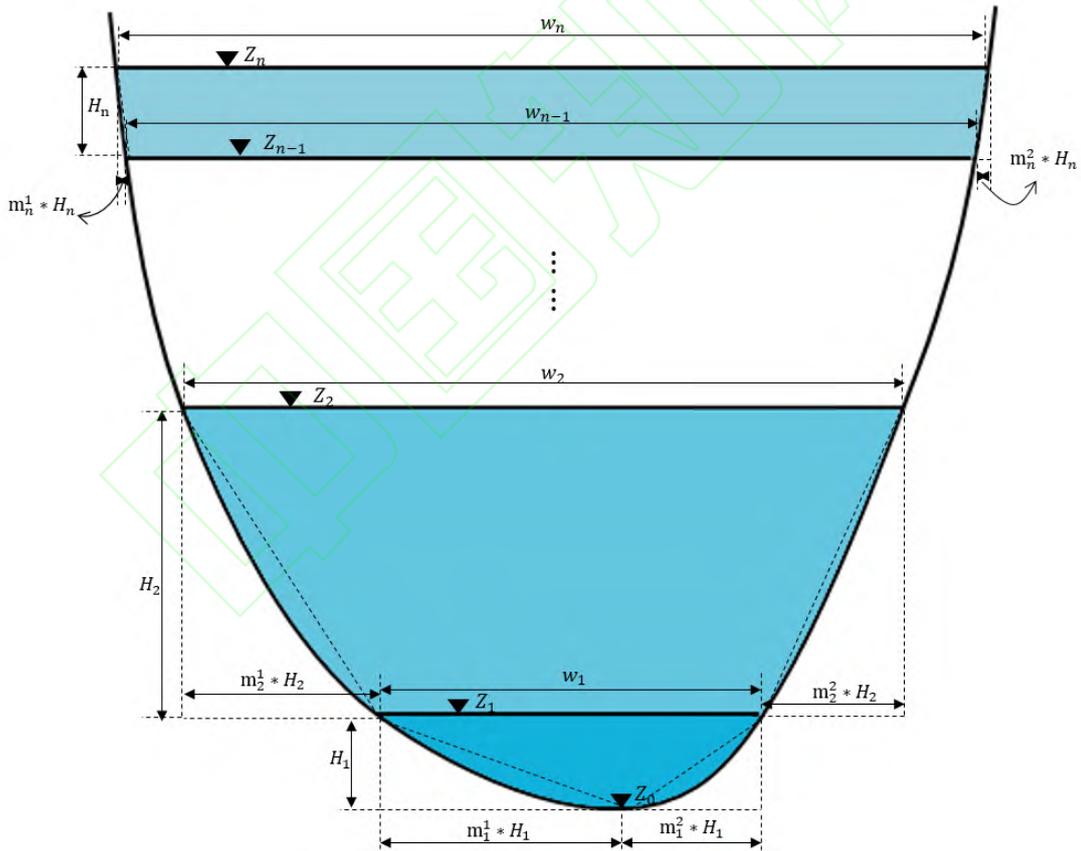


图 5 一般断面分段示意图

Fig.5 Schematic diagram of a general section

2.2 两站遥感水位-水面面积模型

2.2.1 水体提取原理

不同地物具有不同的反射特性，水面反射性质显著区别于其他地物，因此可利用光学遥感进行水体提取。水体的反射波段主要集中于蓝绿波段，其他波段吸收率很强，尤其是近红外波段、短红外波段有强烈的吸收带^[21]，而植被和土壤在这两个波段吸收能量较少，反射率较高，使得水体在这两个波段与植被、土壤有明显区别^[22]。

2.2.2 遥感提取水体方法

光学遥感影像的水体提取方法分别为阈值法、分类法与其他方法。其中阈值法包括单波段阈值法与多波段阈值法；多波段阈值法包括归一化差异水体指数法、谱间关系法、植被指数法等；分类法包括决策树法、监督分类法、面向对象法等；其他方法包括深度学习、混元分解、GIS、光谱匹配、BP神经网络、MRF法等^[23]。兼顾水面面积提取的简便程度与准确性，本文采用归一化差异进行水体提取。

归一化差异水体指数法^[23]（NDWI）的原理为水体的反射强度从可见光到短波红外波段逐渐减弱，在近红外与短波红外波段范围内水体的吸收强度达到最大，产生的反射非常少，而植被的反射率在近红外波段却很强，因此对绿光波段与近红外波段进行比值运算可以对植被起到抑制效果，为了突出影像中的水体信息，可以用可见光波段与近红外波段来运算构成 NDWI，计算公式如式(12)。

$$NDWI = (G - NIR) / (G + NIR) \quad (12)$$

式中： G 为可见光绿光波段， NIR 为近红外波段。

2.2.3 遥感水位-水面面积统计模型

哨兵 2 号由两颗相同的卫星 A（Sentinel-2A）与 B（Sentinel-2B）组成，两颗星互补重访周期为 5 天。哨兵 2 号每颗卫星都搭载相同的多光谱影像仪（Multi-spectral instrument, MSI），可拍摄涵盖可见光、近红外与短红外共计 13 波段的遥感影像，其波段简介如表 1。本文采用 10 米分辨率的蓝光、绿光、红光与近红外 4 个波段进行相关计算。

表 1 哨兵 2 号波段简介表

Tab.1 Sentinel-2 band introduction table

波段	名称	波长(μm)	分辨率(m)
Band1-Coastal aerosol	超蓝	0.443	60
Bnad2-Blue	蓝光	0.49	10
Band3-Green	绿光	0.56	10
Band4-Red	红光	0.665	10
Band5-Vegetation Red Edge	近红外	0.705	20
Band6-Vegetation Red Edge	近红外	0.74	20
Band7-Vegetation Red Edge	近红外	0.783	20
Band8-NIR	近红外	0.842	10
Band8A-Vegetation Red Edge	近红外	0.865	20
Band9-Water vapour	短红外	0.945	60
Band10-SWIR-Circus	短红外	1.375	60
Band11-SWIIR	短红外	1.61	20
Band12-SWIR	短红外	2.19	20

本文基于 70 景哨兵 2 号遥感影像，分别提取以小清河济南市兰芝北路至还乡中路河段为代表的黄台桥站、东营市东何村至寨村河段为代表的石村站裁剪区水面面积，两站裁剪区小清河水体边界淹没频率图如图 6。结合水文站 2019-2022 年实测水位数据，建立小清河黄台桥站、石村站水位-水面面积统计关系各类拟合曲线，见表 2 及表 3。不同关系曲线的拟合结果见图 7 及图 8。从表中可以看出，线性模型相关系数达 0.8 以上，已能较好的反映出水位与水面面积的相关关系，多项式与线性模型相比并未体现出巨大优势，为使计算简便，本文采用线性模型进行计算。

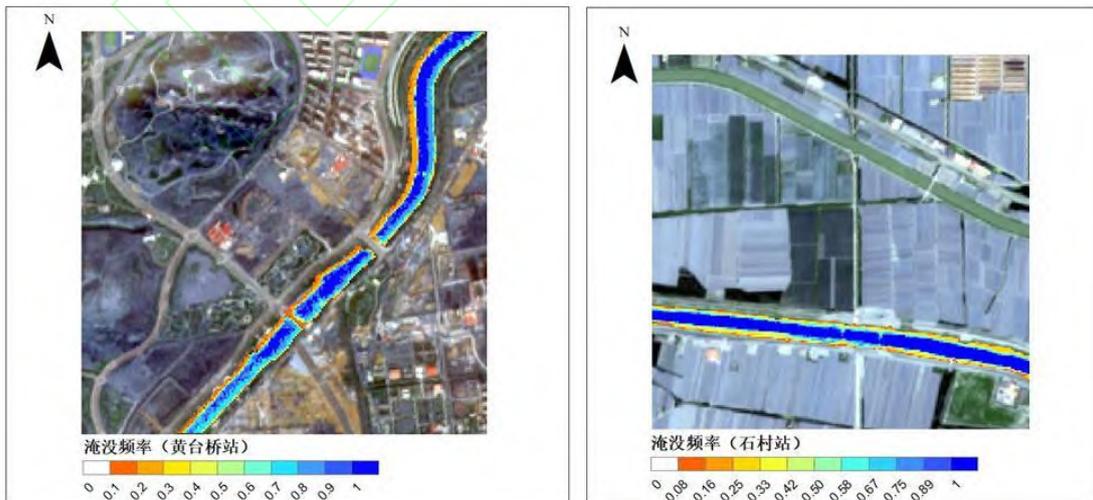


图 6 裁剪区域水体边界淹没范围频率图

Fig.6 Frequency map of inundation range at water body boundary in cropped area

表 2 归一化差异水体指数法黄台桥站拟合公式汇总表

Tab.2 Summary table of fitting formula of Huangtaiqiao station by normalized difference water index method

类型	公式	R^2
线性	$Z = 7 \times 10^{-6}A + 22.472$	0.876
对数	$Z = 1.6045\ln(A) + 4.3716$	0.872
二次多项式	$Z = 2 \times 10^{-11}A^2 - 2 \times 10^{-6}A + 23.453$	0.878
三次多项式	$Z = 10^{-15}A^3 - 9 \times 10^{-10}A^2 + 0.0002A + 8.8279$	0.880
四次多项式	$Z = -5 \times 10^{-19}A^4 + 4 \times 10^{-13}A^3 - 10^{-7}A^2 + 0.02A - 1059.3$	0.912
幂函数	$Z = 10.626A^{0.0666}$	0.8733
指数函数	$Z = 22.526e^{3 \times 10^{-7}A}$	0.877

表 3 归一化差异水体指数法石村站模型汇总表

Tab.3 Summary table of fitting formula of Shicun station by normalized difference water index method

模型	公式	R^2
线性	$Z = 2 \times 10^{-5}A - 1.5292$	0.956
指数	$Z = 0.3437e^{9 \times 10^{-6}A}$	0.947
对数	$Z = 3.4946\ln(A) - 40.262$	0.912
二次多项式	$Z = 4 \times 10^{-11}A^2 + 2 \times 10^{-6}A + 0.0426$	0.967
三次多项式	$Z = -4 \times 10^{-16}A^3 + 3 \times 10^{-10}A^2 - 5 \times 10^{-5}A + 2.9878$	0.971
幂函数	$Z = 2 \times 10^{-9}A^{1.7145}$	0.950

黄台桥站遥感得出的水位-水面面积统计模型线性关系如式(13)。

$$Z = 7 \times 10^{-6}A + 22.472 \quad (13)$$

式中： Z 为水位，m； A 为水面面积， m^2 。

石村站遥感得出的水位-水面面积统计模型线性关系如式(14)。

$$Z = 2 \times 10^{-5}A - 1.5292 \quad (14)$$

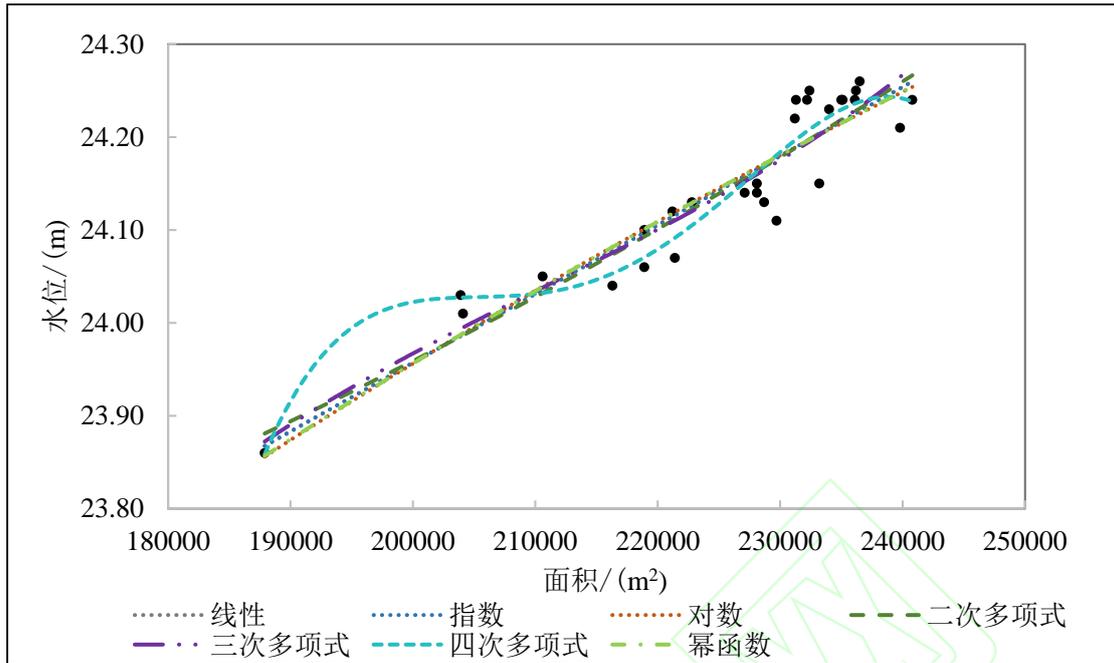


图 7 黄台桥站归一化差异水体指数法拟合结果对比图

Fig.7 Comparison chart of fitting results of normalized difference water index method at Huangtaiqiao Station

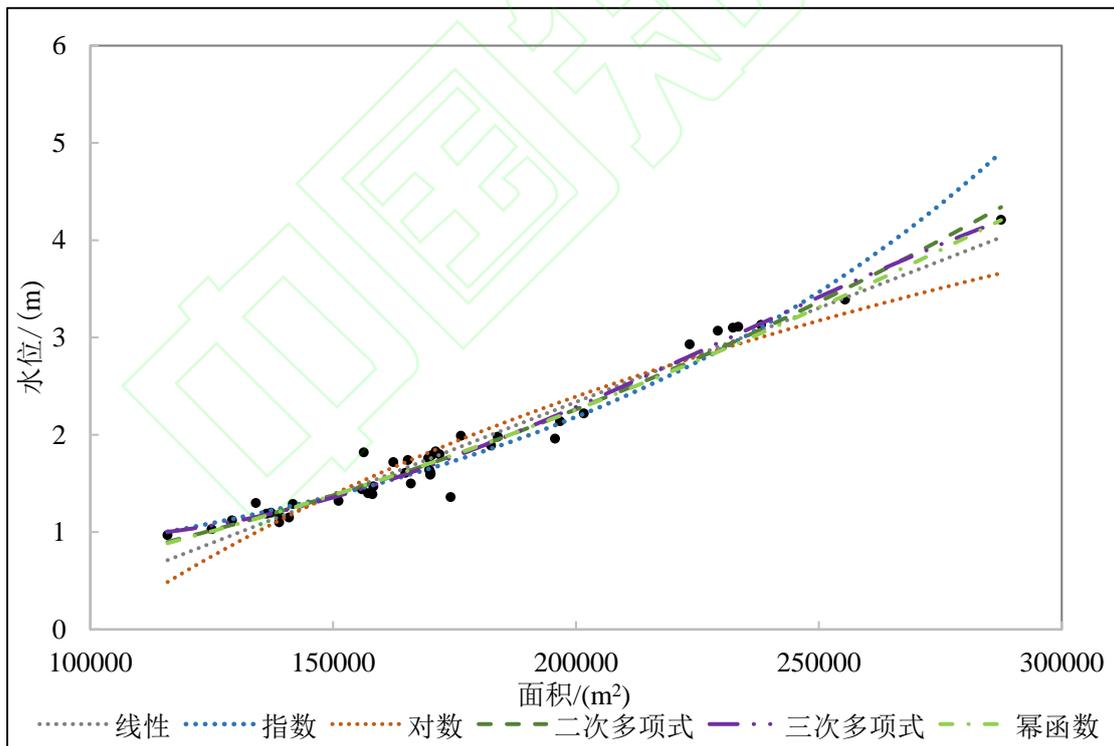


图 8 石村站归一化差异水体指数法拟合结果对比图

Fig.8 Comparison chart of fitting results of normalized difference water index method at Shicun Station

2.3 两站水深反演及结果分析

由遥感图像得黄台桥站与石村站裁剪区域河道长度分别为 2500、2040m。选取枯水期的遥感影像，利用该遥感影像的水面面积与河长的比值来近似得出式(8)中河道底宽 w 。求得黄台桥站、石村站河道底宽分别为 75.16、56.81m。假设由理论推导的水位-水面面积数学模型与遥感统计模型具有一致性，式(8)中的线性部分 $\frac{1}{2mL}$ 与两站遥感统计模型中相应部分相等，解出边坡系数 m ，黄台桥站边坡系数 m 为 26.946，石村站边坡系数 m 为 12.678。将得出的边坡系数带入式(7)，得出黄台桥站、石村站对应水深-水面面积表达式分别如式(15)与式(16)。

$$H = \frac{A-187900}{134730} \quad (15)$$

$$H = \frac{A-115892.4}{51726.24} \quad (16)$$

由于缺乏实测水深数据，本文采用 2020 年 9 月至 2022 年 3 月小清河黄台桥站与石村站的水位数据，并以遥感影像提取水面面积最小时刻对应水位作为槽底高程基准值计算得出概化水深。结合式(15)、式(16)与 2.2 中遥感所得水面面积，反演黄台桥站与石村站的水深。

反演结果如图 9 至图 10 所示，两站平均绝对误差见表 4。从反演结果中可看出黄台桥站反演水深绝对误差平均值为 0.03m，石村站为 0.23m，两站反演效果较好。

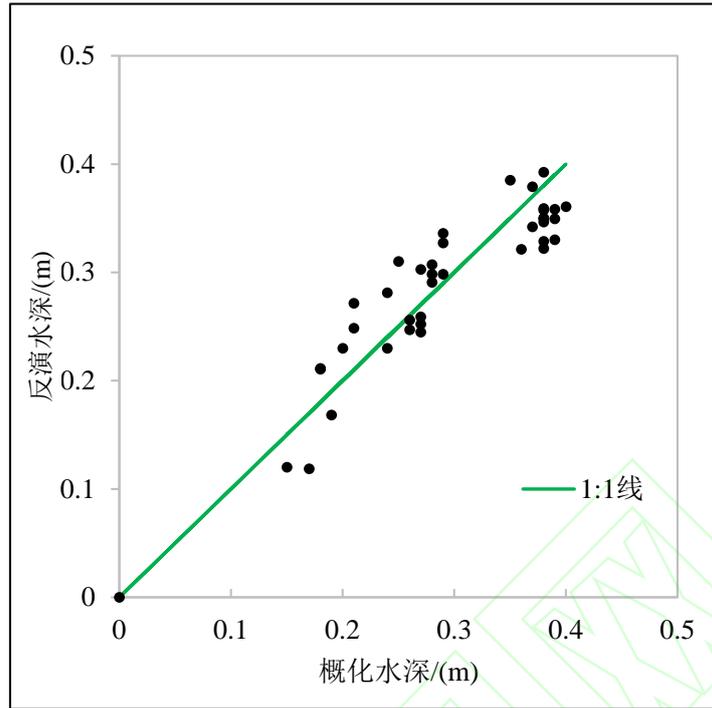


图 9 黄台桥站反演水深与概化水深对比图

Fig.9 Comparison chart of simulated water depth and generalized water depth at Huangtaiqiao station

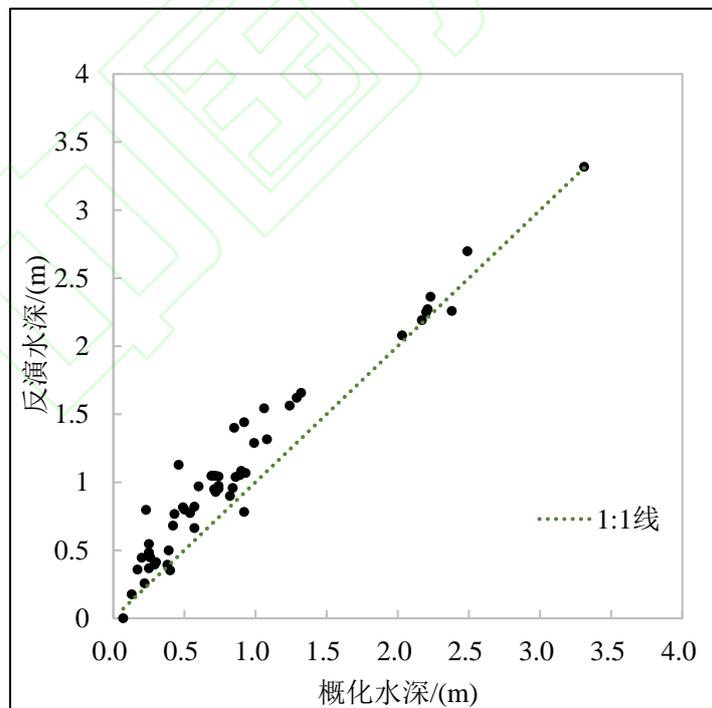


图 10 石村站反演水深与概化水深对比图

Fig.10 Comparison chart of simulated water depth and generalized water depth at Shicun Station

表 4 两站平均绝对误差

Tab.4 Mean absolute errors of two stations

站点名称	模拟水深绝对误差均值(m)
黄台桥站	0.03
石村站	0.23

3 结论

(1) 本文提出了一种基于面深模型与遥感的水深反演方法，解决了水深反演精度受水色物质影响较大这一问题。采用水面面积与水深建立相关关系，克服了水色物质对水深反演带来影响。该方法与常规的运用波段反演水深相比更为简便与普适。

(2) 本文以小清河黄台桥站与石村站为研究区域，结合遥感统计模型得出了面深模型中所需参数，得出了小清河黄台桥站、石村站的水深-水面面积关系表达式，分别为 $H = \frac{A-187900}{134730}$ 与 $H = \frac{A-115892.4}{51726.24}$ 。

(3) 本文对黄台桥站、石村站水深进行了反演，黄台桥站与石村站水深反演效果较好，黄台桥站修正后绝对误差均值为 0.03 米，石村站绝对误差均值为 0.23 米。

4 展望

(1) 本文反演水深为某一河段平均水深，能够提供关于水体状态和水文过程的有用信息，在实际工作中有极大的使用价值。在洪水预测与管理中，可以使用面平均水深来评估在不同降雨条件下河流是否会泛滥以及泛滥的程度；此外，在水质监测方面，由于水体体积与河流平均水深有关，可将面平均水深用于计算河流的水体体积，从而更准确地估计水质参数的浓度；另外在水电站设计中，平均水深是重要参数之一，影响着水电站的水库容量、发电量等因素。

(2) 文中河道断面的概化存在误差。文中对于一般断面河道，将其等价多个梯形断面与三角形断面，导致等效断面与真实断面间存在误差。在实际应用中，在遥感数据样本量足够大的情况下，该误差可尽可能的减小。具体方法为使用遥感影像提取水面面积与地面水文站、SAR 提供水位数据绘于散点图中，

识别各突变点, 即可对河道段面进行分割, 当分段足够稠密、间隔足够小时, 等效断面可以无限逼近真实断面, 使河道断面概化带来误差不断减小。

参考文献

- [1] 王复明, 尚向阳, 钟燕辉. 探地雷达在河流水深探测中的应用研究[J]. 人民黄河, 2008, 30(4): 17-18.
WANG F M, SHNAG X Y, ZHONG Y H. Study on Application of Ground Detecting Radar to the Detection of River Flow Depth[J]. YELLOW RIVER, 2008, 30(4): 17-18.
- [2] 纪茜. 基于遥感影像的水深反演方法研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
JI Q. Research on water depth inversion method of multispectral remote sensing image[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.
- [3] 王艳姣. 基于悬浮泥沙影响的水深遥感方法研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2006.
WANG Y J. Application of Remote Sensing Technology to Map Water Depth by Weakening the Influence of Suspended Sediment[D]. Nanjing, Jiangsu: Nanjing Normal University, 2006.
- [4] 马毅, 张杰, 张靖宇, 等. 浅海水深光学遥感研究进展[J]. 海洋科学进展, 2018, 36(3): 331-351.
MA Y, ZHANG J, ZHANG J Y, et al. Progress in Shallow Water Depth Mapping From Optical Remote Sensing[J]. ADVANCE IN MARINE SCIENCE, 2018, 36(3): 331-351.
- [5] LYZENGA D R. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features[J]. Applied Optics, 1978, 17(3): 379.
- [6] 孟然. 基于遥感影像的水深反演方法研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
MENG R. Research on water depth inversion method based on Remote Sensing image[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022.
- [7] BENNY A H, Dawson G J. Satellite imagery as an aid to bathymetric charting in the red sea[J]. The Cartographic Journal, 2013, 20(1).
- [8] PAREDES J M, SPERO R E. Water depth mapping from passive remote sensing data under a generalized ratio assumption.[J]. Applied optics, 1983, 22(8).
- [9] 曹瑞雪, 张杰, 孟俊敏. 利用TM图像数据计算海水深度模型——以双子礁和黄河口水域为例[C]//中国青岛:第十四届全国遥感技术学术交流会, 2003:74-79.
CAO R X, ZHANG J, MENG J M. Using TM image data to calculate the sea depth model——taking Shuangzi Reef and the Yellow River Estuary as an example[C]//Remote Sensing Professional Committee. Selected Papers of the 14th National Remote Sensing Technology Academic Exchange Conference. Ocean Press, 2003:74-79.
- [10] 许海蓬, 马毅, 梁建, 等. 基于半经验模型的水深反演及不同水深范围的误差分析[J]. 海岸工程, 2014, 33(1): 19-25.
XU H P, MA Y, LIANG J et al. Bathymetry Inversion Based on Semi-Empirical Model and Error Analysis of Different Water Depth Ranges[J]. Coastal Engineering, 2014, 33(1): 19-25.
- [11] 张东, 张鹰, 王文. 统计相关水深遥感模式的建立[J]. 河海大学学报, 1998(6): 98-102.
ZHANG D, ZHANG Y, WANG W. Establishment of statistical correlation water depth

- remote sensing model[J]. JOURNAL OF HOHAI UNIVERSITY, 1998(6):98-102.
- [12] HOPFIELD J J, TANK D W. "neural" computation of decisions in optimization problems[J]. Biological Cybernetics, 1985, 52(3): 141-152.[J].
- [13] 梁志诚, 黄文骞, 杨杨, 等. 基于神经网络技术的多因子遥感水深反演模型[J]. 测绘工程, 2012, 21(4): 17-21.
LIANG Z C, HUANG W Q, YANG Y, et al. Study of the water depth retrieval based on artificial neural network[J]. ENGINEERING OF SURVERYING AND MAPPING, 2012,21(4):17-21.
- [14] 徐升, 张鹰. 长江口水域多光谱遥感水深反演模型研究[J]. 地理与地理信息科学, 2006(3): 48-52.
XU S, ZHANG Y. Research on multispectral remote sensing water depth retrieval model in Yangtze River Estuary[J]. Geography and Geo-Information Science, 2006(3):48-52.
- [15] 樊彦国, 刘金霞. 基于神经网络技术的遥感水深反演模型研究[J]. 海洋测绘, 2015, 35(4): 20-23.
FAN Y G, LIU J X. Water Depth Remote Sensing Retrieval Model Based on Artificial Neural Network Techniques[J]. HYDROGRAPHIC SURVERYING AND CHARTING, 2015, 35(4): 20-23.
- [16] 庞治国, 李琳, 潘世兵. 乌苏里江水深遥感反演[J]. 中国科学:信息科学, 2011, 41(S1): 187-192.
PANG Z G, LI L, PAN S B. Remote sensing inversion of water depth in Wusuli River[J]. Chinese Science: Information Science, 2011,41(S1):187-192.
- [17] 代雪静, 姜腾龙, 刘杨, 等. 近二十年小清河济南段污染状况及其趋势分析[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(1): 143-150.
DAI X J, JIANG T L, LIU Y, et al. Pollution status and trend analysis of Xiaoqing river in Jinan section in recent 20 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(1): 143-150.
- [18] 许家昂, 李福生, 陈英民, 等. 小清河干流悬浮物的放射性水平[J]. 中国辐射卫生, 2001(2): 81-82.
XU J A, LI F S, CHEN Y M, et al. The radioactive level of suspended solids in the main stream of Xiaoqing River[J]. Chin J Radiol Health, 2001(2):81-82.
- [19] 孙好芬, 王安琪, 郭玉超, 等. 小清河中下游水质初步调查[J]. 山东化工, 2018, 47(22): 175-177.
SUN H F, WANG A Q, GUO Y C, et al. Preliminary Investigation of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Xiaoqing River[J]. SHANDONG CHEMICALINDUSTRY, 2018, 47(22): 175-177.
- [20] 林玉慈. 论演绎与归纳推理在实践活动中的应用[J]. 学术交流, 2018(6): 52-57.
LIN Y C. On the application of deductive and inductive reasoning in practical activities[J]. Academic Exchange, 2018(6):52-57.
- [21] 邓开元, 任超. 多光谱光学遥感影像水体提取模型[J]. 测绘学报, 2021, 50(10): 1370-1379.
DENG K Y, REN C. Water extraction model of multispectral optical remote sensing image[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021,50(10):1370-1379.
- [22] 都金康, 黄永胜, 冯学智, 等. SPOT卫星影像的水体提取方法及分类研究[J]. 遥感学报, 2012, 16(4): 715-722.

2001, 5(3): 214-219.

DU J K, HUANG Y S, FENG X Z, et al. Study on Water Bodies Extraction and Classification from SPOT Image[J]. JOURNAL OF REMOTE SENSING, 2001, 5(3): 214-219.

[23] 苏龙飞, 李振轩, 高飞, 等. 遥感影像水体提取研究综述[J]. 国土资源遥感, 2021, 33(1): 9-19.

SU L F, LI Z X, GAO F, et al. A review of water body extraction from remote sensing images[J]. REMOTE SENSING FOR LAND & RESOURCES, 2021,33(1):9-19.

