

基于 Landsat-9 影像的 云龙湖水深反演研究

任中杰, 万永智, 王 伟, 王继龙, 宋银燕, 张方方

(江苏省水文水资源勘测局徐州分局, 江苏 徐州 221000)

摘要: 基于 Landsat-9 多光谱及全色影像, 以云龙湖东湖为研究区域进行水深反演研究。为选取能够有效提高影像空间分辨率且能保持水深波段相关性的融合方法, 对多种影像融合方法进行了对比分析; 对最佳水深反演波段及反演因子进行了探索, 进而构建了多种反演模型, 并利用实测水深数据进行了精度评价。结果表明, SFIM 融合算法对水深相关性保持性最好, 最佳水深反演波段为 B5 波段, 最佳反演因子为 B5+B6, 相关系数均较高, 指数、傅里叶、高斯、多项式等多种水深反演模型中最优反演模型为基于最小绝对残差拟合的二次多项式模型, 精度评价决定系数为 0.7149, 均方根误差为 0.094 m。研究结果旨在为云龙湖水库水量调度及生态水位保障提供重要参考。

关键词: Landsat-9; 水深遥感; 水深反演; SFIM; LAR; 云龙湖

中图分类号: TV211.2

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2023)10-0051-0005

Inversion study of Yunlong Lake water depth based on Landsat-9 images

REN Zhongjie, WAN Yongzhi, WANG Wei, WANG Jilong,

SONG Yinyan, ZHANG Fangfang

(Xuzhou Branche of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Xuzhou 221000, China)

Abstract: Based on Landsat-9 multispectral and panchromatic imagery, a study on water depth inversion was conducted with the east lake of Yunlong Lake as the study area. To select the fusion method that can effectively improve the spatial resolution while maintain water depth-wave band correlation, a variety of image fusion methods were analyzed and compared. The optimum water depth inversion band and inversion factors are explored, and a variety of inversion models are constructed, and the accuracy is evaluated by using the measured water depth data. The results show that the SFIM fusion algorithm has the best ability to maintain the correlation of water depth. The best water depth inversion band is B5 band, the best inversion factor is B5+B6, and the correlation coefficients are all high. Among the water depth inversion models, such as index, Fourier, Gaussian and polynomial, the optimal inversion model is the quadratic polynomial model based on the least absolute residual (LAR) fit. The determination coefficient of precision evaluation is 0.7149, and the root-mean-square error (RMSE) is 0.094 m. The research results provide an important reference for the water dispatch and safeguards for the ecological water level at Yunlong Lake Reservoir.

Key words: Landsat-9; remote sensing of water depth; water depth inversion; SFIM; LAR; Yunlong Lake

收稿日期: 2023-08-31

作者简介: 任中杰(1994—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 614279868@qq.com

水深以及水下地形测量是水文研究及生产活动中的重要领域之一,传统测量方法主要以人工方式进行长序列大范围观测,耗费大量人力物力、成本较高。面对大范围水域,作业时间跨度较高,河道湖泊的水量调度及水位实时变化均会影响水深数据的真实性及精度,不能反映水域真实情况。受限于自然条件,部分区域船舶难以进入,也形成了监测空白地带。

随着遥感技术的快速发展,遥感影像成本低、覆盖面积广且具有较高空间分辨率、时间分辨率,逐渐被广泛应用于资源调查、环境监测、灾害预警、区域时空演变等领域^[1]。其中多光谱影像是通过多光谱电磁波,获取目标地物丰富的光谱信息,因此被广泛应用于水深反演领域。遥感反演水深是指利用遥感数据,依据可测参数值去反推水深值的水深量测方法^[2],主要分为3类:理论解析法、半理论半经验法和统计相关法。较为常用的是统计相关法,需要大量实测数据支撑,但不需要分析和研究水体内部的光学参数,只考虑数据之间的相关映射关系^[3]。李经纬等^[4]通过对比不同大气校正方法对水深因子相关性的影响,判断研究区域适宜的大气校正模型;赵顺利等^[5]基于OLI影像,利用最佳水深因子OLI-4波段建立了水深模型,对错戳龙错盐湖进行水深反演;吴忠强等^[6]利用G-S变换对landsat-8影像的多光谱波段及全色波段进行融合,提高了空间分辨率,基于融合后的影像进行水深反演。

影响水深反演精度的因素主要以水体悬浮物质、水体底质、水深反演因子为主。而水深反演因子的空间尺度取决于遥感影像的空间分辨率。影像融合能够有效提高影像的空间分辨率,但目前尚未有针对影像融合方法与水深因子相关性的研究,同时基于最新的Landsat-9影像进行水深反演研究,尚未在云龙湖地区开展过。本文基于Landsat-9影像,通过影像融合提高了空间分辨率,构建水深反演模型,确定了该区域的最佳水深反演模型。

1 研究区概况及数据处理

1.1 研究区概况

云龙湖位于江苏省徐州市泉山区,是著名的国家5A级景区。其东靠云龙山,西依韩山、天齐山。南偎泉山、珠山。三面环山,一面临城。云龙湖以湖中路为界,东湖周长约8.1 km,西湖长约7 km,全

湖周长约12 km,水面面积约6 km^{2[7]}。

云龙湖水库是奎河源头,集水面积60 km²,总库容3 323万 m³,是一座以城市防洪为主,兼有灌溉、养殖、景观、旅游开发等综合利用功能的中型水库。对云龙湖水库进行水深反演研究具有重要的现实意义。

本文以云龙湖东湖水上世界以南水面区域作为研究区域(拐点坐标分别为1号点117.1549°、34.2412°,2号点117.1666°、34.2394°,3号点117.1582°、34.2298°,4号点117.1497°、34.2324°,5号点117.1502°、34.2349°,6号点117.1479°、34.2384°),面积约1.3 km²。

1.2 影像数据来源

Landsat-9 是美国陆地卫星计划(Landsat)的第九颗卫星,2021年9月发射,每隔16d对地球进行一次成像,与Landsat-8存在8d的偏移。相较于Landsat8的12位量化及可识别4 096种色调,Landsat-9具有更高的辐射分辨率(14位量化),可以识别16 384种色调,同时具有更优的信噪比。Landsat-9共有11个波段,波段简介见表1。

表1 Landsat-9 波段简介

波段号	波段名称	波段范围/ μm	分辨率/m
Band1	可见光	0.43~0.45	30
Band2	可见光	0.45~0.51	30
Band3	可见光	0.53~0.59	30
Band4	红色	0.64~0.67	30
Band5	近红外	0.85~0.88	30
Band6	SWIR 1	1.57~1.65	30
Band7	SWIR 2	2.11~2.29	30
Band8	全色	0.50~0.68	15
Band9	卷云	1.36~1.38	30
Band10	TIRS 1	10.6~11.19	100
Band11	TIRS 2	11.5~12.51	100

为避免水位变化的影响,本文选取了与实测作业时间基本一致的Landsat-9影像数据,产品号为LC09_L1TP_121036_20221107_20221129_02_T1。数据来源于空天院遥感数据服务系统(<http://eds.ceode.ac.cn/nuds/test>)。研究区域影像清晰,无云。对影像进行预处理,主要包括几何校正、影像裁切。

1.3 实测数据获取及处理

本文根据研究区域形状,大致东西方向布设测量航线56条,各航线间隔25 m。将布设的航线导入

到测深仪导航软件中。将高频测深仪中海达 HD-27T、华测 GPS X90 固定在船边沿,保持测杆垂直水面。将记录间距设置为 10 m,按照导航软件的指示驾驶船只按航线方向行进,软件自动记录所在位置和水深。水位数据来源于云龙湖水文阁水位站现有水尺观测的每日水位数据。采集数据期间,云龙湖水位稳定在 32.65 m,风力为东南风 2 级。

对测得的水深数据进行检查,剔除异常值。由于 Landsat-9 多光谱影像分辨率为 30 m,岸边区域存在混合像元,影响水深精度,因此对岸边实测点进行剔除。从 8 392 个点位中挑选出 765 个点位作为训练样本数据,另挑出 661 个点位作为检验样本数据,挑选原则为点位均匀分布,具有足够代表性,训练样本和检验样本无重叠点位。

2 水深反演模型建立

2.1 水深因子确定

2.1.1 单波段相关性

选取 Landsat-9 影像中多光谱数据 B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7 共 7 个波段,将像元灰度值提取至点位与训练样本水深进行相关性分析。由于影像空间分辨率为 30 m,同一个像元对应多个实测点,像元中心值不能反映像元区域内部水下地形的差异性,因此采用双线性内插法计算点位对应的灰度值,结果显示,相较于像元中心值,水深相关性有一定提升。

表2 波段灰度值与水深相关系数

波段	相关系数 (双线性内插)	相关系数 (像元中心值)
B1	-0.1573	-0.1413
B2	-0.2305	-0.2222
B3	-0.2581	-0.2654
B4	-0.4176	-0.4176
B5	-0.6670	-0.6616
B6	-0.6442	-0.6307
B7	-0.5873	-0.5615

从表 2 可以看出,相关系数绝对值较高的波段为 B5、B6、B7。理论上,透水波段应为蓝、绿波段,相关系数最高,但仅建立在水质较清且水底反射率较高的前提下。由于不同水体的泥沙含量、叶绿素浓度各有不同,所以与水深相关系数较高的波段也会有所差异,这种现象被称为“红移”^[8]。

2.1.2 影像融合

Landsat-9 多光谱影像每个像元对应 900 m² 的水域面积,将多光谱及全色影像进行融合,能够获得高空间分辨率的多光谱影像,能有效降低像元尺度,能细致反映水下地形变化。本文选用多种融合方法,对融合影像进行相关性分析,选择水深相关系数最高的融合方法。

常用的融合方法有: Brovey、Gram-Schmidt、HSV、NNDiffuse、Pansharp、PCA、SFIM 融合方法等^[9]。其中, Brovey、HSV、SFIM 对波段数存在限制,因此,仅选择相关系数较高的 B5、B6、B7 波段参与融合。对融合结果进行相关性分析,结果如表 3 所示。

从表 3 可知,相较于原始影像, SFIM 融合方法相关性保持较好,各波段没有明显降低,虽然有一定的光谱信息损失,但有效提高了影像空间分辨率;其次是 NNDiffuse 融合方法,仅 B5 波段相关性保持较好,其他融合方法均明显降低了水深相关性。故本文采用 SFIM 融合方法对 B5、B6、B7 以及全色波段 B8 进行融合。

2.1.3 水深因子确定

研究表明,单波段模型水深反演精度远不如多波段模型^[10],且用对数因子做比值可以进一步提高数据相关性。本文尝试用对数因子、对数比值因子、比值因子等多种组合进行相关性分析,寻求最佳水深因子,分析结果如表 3 所示,仅列出相关系数较高的 4 项,如表 4 所示。相关系数较高的 4 个水深因子均包含 B5 波段,其中 B5+B6 相关系数最高,相较于 B5 波段有一定的提升。

2.2 水深反演模型构建

基于最佳水深因子 B5+B6 进行回归性分析,分为指数回归、傅里叶回归、高斯回归、多项式回归(1 次、2 次)。

从表 5 可以看出,反演模型决定系数均较差,一方面是由于湖泊水体悬浮物相较于清澈海域较多,导致波谱红移,影响反演精度,另一方面是由于影像空间分辨率仍然很低,通过影像融合将像元对应水域面积 900 m² 降低至 225 m², 仍然不能真实反映水下地形变化起伏情况,实测水深数据平均 250 m² 采集一个点位,但很难保证点位处于像元中心值,因此出现较多异常值。常规多项式拟合一般采用最小二乘法(LSM),使残差平方和极小,计算简便,然而稳健性(抗粗差性)较差。为了避免异常值对反演模型的影响,采用最小绝对残差(LAR)对数据

表3 不同融合方法水深相关系数

方法	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Brovey	—				-0.5478	-0.2228	-0.1156
Gram-Schmidt	-0.0606	-0.1786	-0.2421	-0.4130	-0.5898	-0.3431	-0.1673
HSV					-0.6345	-0.5187	-0.3787
NNDiffuse	-0.0506	-0.1817	-0.2219	-0.3969	-0.6343	-0.4979	-0.3261
Pansharp	-0.0787	-0.1776	-0.2354	-0.3766	-0.5265	-0.2126	-0.1021
PCA	-0.2157	-0.2510	-0.2676	-0.3601	-0.5294	-0.3126	-0.2879
SFIM					-0.6658	-0.6147	-0.522

表4 水深因子相关系数

水深因子	相关系数
B5+B6	-0.670
lnB5+lnB6	-0.669
lnB5*lnB6	-0.669
lnB5	-0.665

表5 水深反演模型

回归方式	决定系数(R^2)
Exponential(指数)	0.4481
Fourier(傅立叶函数)	0.4690
Gaussian(高斯函数)	0.4489
Polynomial(多项式函数)	0.448(1次)、0.449(2次)

进行拟合,最优拟合结果见图1。

RMSE 仅为 0.0253 m,且决定系数显著提升。
反演模型公式为

$$f(x)=p_1x^2+p_2x+p_3$$
 (1)

式中, p_1 为-1.564e-06; p_2 为0.03792; p_3 为-227.1。

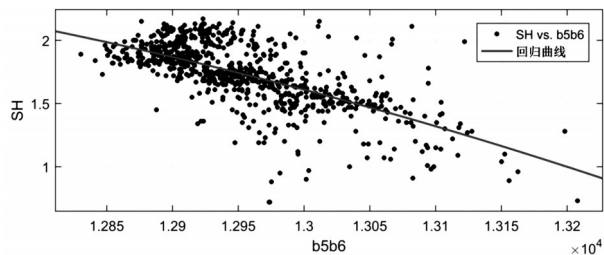


图1 二次多项式LAR拟合



图2 水深反演灰度图

表6 反演模型精度

反演模型	SSE	R^2	RMSE / m
二次多项式	0.4884	0.9901	0.0253

3 水深反演结果及精度检验

3.1 云龙湖水深反演

通过水深反演模型进行波段运算得到水深反演灰度图,见图2。

3.2 精度评价

利用未参与水深反演模型计算的661个实测水

深点作为验证组,对反演模型进行精度评价。反演组(FYZ)和实测组(SCZ)回归,如图3所示。

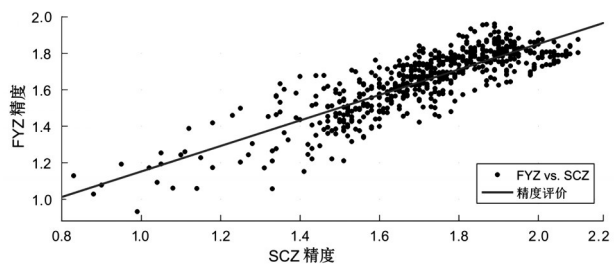


图3 反演组与实测组线性回归

从图3及表7可以看出,基于最优水深因子B5+B6的水深反演模型反演组与实测组具有相关性。RMSE小于0.1 m,得益于湖底地形起伏波动不大,

降低了反演误差。从定性角度看,虽然总体精度不高,但在一定程度上真实反映了水下地形,湖南路一侧及荷风岛区域水深较浅,东湖中部区域水深较深,符合实际情况。

表7 水深因子相关系数

R^2	Adjusted R ²	RMSE / m	SSE
0.7154	0.7149	0.094	5.144

4 结 语

本文基于 Landsat-9 影像的多光谱及全色波段,结合实测水深数据进行对比分析,确定了适用于云龙区东湖南部区域水深反演的最佳影像融合方法为 SFIM 融合算法,该算法能够在有效降低水深反演像元尺度的情况下较好保持影像光谱信息。确定了 Landsat-9 影像水深相关性最高的波段为 B5,最佳水深因子为 B5+B6,并建立了多种水深反演模型,效果最好的反演模型为基于最小绝对残差(LAR)的二次多项式模型。

采用实测水深数据进行反演精度评价,结果表明反演结果能应用于实际,影像获取难度低、计算简单,弥补了人工观测的不足。但从评价结果看,反演精度有限,空间分辨率较低,反演模型受湖泊水质因素及水位变化影响较大,最佳水深因子及反演模型随时可能变化,后续有必要针对反演模型适用性开展进一步研究。

参考文献:

[1] 吴峰云. 基于 GF-1 和 MODIS 数据融合的鄱阳湖区域水

稻空间分布提取[D]. 武汉:华中农业大学,2017.
[2] 张磊,牟献友,冀鸿兰,等. 基于多波段遥感数据的库区水深反演研究[J]. 水利学报,2018,49(5):639-647.
[3] 邵帅. 基于高分卫星数据的浅海水深反演技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019.
[4] 李经纬,杨红,王春峰. 基于 Landsat -8 卫星的江苏北部近岸海域水深遥感反演研究[J]. 海洋湖沼通报,2022,44(6):23-31.
[5] 赵顺利,王建萍,王云飞. 基于 OLI 遥感影像的错截龙错盐湖水深反演研究[J]. 盐湖研究,2016,24(1):8-14.
[6] 吴忠强,毛志华,王正. 基于多源影像融合去云的水深遥感反演研究——以哨兵-2A 和资源三号为例[J]. 测绘与空间地理信息,2019,42(11):12-16.
[7] 潘凌潇. 小南湖磷的形态分布特征及沉积物生物可利用磷的预测研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2014.
[8] 刘善伟. 浅海水深遥感反演与海岸线判绘方法及其系统集成研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2011.
[9] 陈敏强. 深度卷积神经网络超分重建技术驱动的卫星遥感影像融合研究[D]. 南昌:东华理工大学,2019.
[10] 张艳红,李丽丽,郭花利,等. 基于多光谱遥感的扎龙湿地湖泊水深反演研究[J]. 湿地科学,2016,14(4):477-483.
[11] 张晓斌,周俊杰,陈熙,等. 2013—2018 年东洞庭湖水域面积变化遥感监测与分析[J]. 人民长江,2022,53(增刊1):21-24.
[12] 王喆,连炎清,李晓娜,等. 基于机器学习的泸灞河水质参数遥感反演研究[J]. 人民长江,2022,53(9):13-18.
[13] 张宏建,周健,皇甫款. 基于 OLI 数据的信阳市境内淮河流域水质遥感反演[J]. 人民长江,2021,52(12):47-53.
[14] 沈蔚,孟然,栾奎峰,等. 4 种遥感水深反演机器学习模型的比较[J]. 海洋测绘,2022,42(5):68-71.
[15] 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.