

基于 Sentinel-2A MSI 数据的水体信息提取算法对比研究

张磊¹, 韩秀珍^{2***}, 翁富忠^{3*}, 丘仲锋^{1**}

¹南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏 南京 210044;

²国家卫星气象中心, 北京 100081;

³中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

摘要 地表水体信息的准确提取对于水资源规划管理与相关灾害监测等具有重要意义。以 Sentinel-2A MSI 影像为研究数据, 基于 10 种典型光谱波段指数算法对鄱阳湖周边区域的水体进行了提取, 并以结合目视解译的 synthetic aperture radar (SAR) 影像水体识别结果作为真值进行了对比分析。实验结果表明: 归一化差异水体指数、高斯归一化差异水体指数、伪归一化差异水体指数的识别效果最好, 平均 F1-score 超过 95%, 且阈值稳定程度较高; 改进的归一化差异水体指数适用于城镇区域的水体提取; 组合水体指数在水田以及河流区域识别效果较好; 增强型水体指数、阴影水体指数均适用于山区, 其中增强型水体指数在城镇区域也具备适用性; 修订型归一化差异水体指数仅适用于针对大面积水体的识别; 面向阴影的自动化水体指数能够有效剔除地形阴影造成的干扰, 而非面向阴影的自动化水体指数的整体表现相对较差。

关键词 遥感; 水体识别; 水体指数; 算法对比; Sentinel-2A MSI

中图分类号 TP751

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1228007

Comparison of Water Information Extraction Algorithms Based on Sentinel-2A MSI Data

Zhang Lei¹, Han Xiuzhen^{2***}, Weng Fuzhong^{3*}, Qiu Zhongfeng^{1**}

¹*School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;*

²*National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China;*

³*State Key Laboratory of Hazardous Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

Abstract Accurate extraction of surface water information is important for water resource planning and management and related disaster monitoring. Herein, using Sentinel-2A MSI images as the research data, the water body around Poyang Lake was extracted based on 10 typical spectral band index algorithms and the water body recognition results of synthetic aperture radar images combined with visual interpretation were compared and analyzed as the true value. The experimental results demonstrate that the recognition effect of the normalized, Gaussian normalized, and pseudo normalized difference water body indexes is the best. The average F1-score is greater than 95%, and the threshold stability is high. An improved normalized difference water body index is

收稿日期: 2021-09-03; 修回日期: 2021-09-13; 录用日期: 2021-09-23

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1506501)、国家卫星气象中心山洪地质灾害防治气象保障工程 2020 年建设项目 (IN_JS_2020041)

通信作者: *wengfz@cma.gov.cn; **zhongfeng.qiu@nuist.edu.cn; ***hanxz@cma.gov.cn

suitable for water extraction in urban areas. The combined water body index has good recognition effect in paddy fields and river areas. The enhanced water body and shadow water body indices are applicable to mountainous areas. The enhanced water body index is also applicable in urban areas. The revised normalized difference water body index is only applicable to the identification of large-area water bodies. A shadow-oriented automatic water index can effectively eliminate the interference caused by terrain shadows. However, the overall performance of a nonshadow oriented automatic water index is relatively poor.

Key words remote sensing; water body identification; water index; algorithm contrast; Sentinel-2A MSI

1 引言

水资源是地球生态系统的重要组成部分,更是生物繁衍生息的基础。我国人均水资源占有量不到世界平均水平的 25%,并且正面临着污染持续加重的问题,当前水资源已经成为了制约社会经济发展和生态文明建设的重要因素之一^[1]。卫星遥感技术具有宏观、动态、准实时的优势,在自然资源调查、灾害防治等领域得到了广泛应用。利用遥感资料快速精确地提取地表水体信息,对于水资源的规划管理以及相关自然灾害的监测工作具有重要意义^[2]。

清澈水体对于电磁波的反射主要集中在可见光波段,反射率一般不超过 10%,且随着波长的增大逐渐降低。从近红外波段开始,水体的吸收率显著高于其他地物,这一波谱特征是利用遥感数据进行水体提取工作的基础^[3]。目前基于光谱特征分析的水体提取算法主要有单波段阈值法、谱间关系法及水体指数法等。单波段阈值法依据水体在近红外波段表现出的强吸收率来进行水体识别,原理简单易行,但在地物类型丰富的区域,单波段阈值法的提取结果中往往混杂着较多噪声^[4]。谱间关系法借助地物在不同波段的光谱差异将水体与其他地物区分开来,相较于单波段阈值法,其稳定性和精度均有所提升,是后期水体指数法的雏形^[5-6]。水体指数法通过分析水体与光谱值之间的关系构建数学模型,并设定相应阈值来进行水体识别工作,是目前应用最广泛的水体提取算法。McFeeters^[7]参考归一化差异植被指数(NDVI)的构建原理,基于 Landsat TM 数据的绿光及近红外波段构建了归一化差异水体指数(NDWI),该指数模型能够放大水体在绿光波段的强反射及近红外波段的强吸收特征,最大化地将水体与背景地物区分开来。

自然界的水体背景环境复杂多变,单一的水体指数法无法同时满足多种背景条件下的水体识别,后续研究者根据不同的背景条件对指数模型进行

了一系列改进。在对城镇水体提取的实验中,徐涵秋^[8]利用中红外波段替换了 NDWI 的近红外波段,构建了改进的归一化差异水体指数(MNDWI),MNDWI 不仅能够用于植被密集区域,在城镇范围内的水体提取也取得了较好的效果。莫伟华等^[9]提出了混合水体指数模型(CIWI),CIWI 明显增强了水体与城镇的分离度,实现了水体信息的有效提取。闫需等^[10]基于对半干旱地区水体与背景地物光谱特征的分析,提出了增强型水体指数(EWI),EWI 结合 GIS 技术能够有效抑制半干旱区域的土壤和植被噪声。曹荣龙等^[11]基于 TM 影像的红光和短波红外波段构建了修订型归一化差异水体指数(RNDWI),RNDWI 有效减少了混合像元及山体阴影造成的影响。沈占峰等^[12]提出了 Gauss 归一化差异水体指数(GNDWI)用于提取河流水体,GNDWI 在尽可能减少冰雪、山体阴影干扰的情况下保证了河流提取结果的完整性。面对背景地物复杂、包含大量地形阴影的情况,Feyisa 等^[13]构建了自动水体提取指数 AWEI(AWEI),其中 AWEI_{sh} 用于阴影为主要干扰因素时的水体提取,而 AWEI_{nsh} 则更适用于去除城市背景中暗表面建筑的干扰。针对部分高分辨率影像红外波段较少的问题,周艺等^[14]基于对绿波段的修正,构建了无需中红外波段的伪归一化差异水体指数(FNDWI),FNDWI 显著提升了城镇建筑用地与河流水体的可分离性。在山区水体提取的实验中,陈文倩等^[15]构建了阴影水体指数(SWI),SWI 结合决策树算法有效消除了积雪和裸土的干扰。

当前面向水体提取的波段指数算法大多基于 Landsat TM/ETM+ 影像进行开发,这些算法是否能够有效移植到其他光学传感器影像有待考证;另外,基于不同背景地物条件构建的算法对于具体区域的适用性也需要实践来检验。基于此,本文以鄱阳湖周边水域为研究对象,对 10 种水体指数算法的应用效果进行了探究。

2 研究数据及方法

2.1 研究区域概况

鄱阳湖位于江西省北部,是我国第 1 大淡水湖,同时也是世界自然基金会划定的全球重要生态区,在调节长江水位、涵养水源、改善当地气候和维护周边地区生态平衡等方面都起着巨大的作用。联通赣、信、抚、修、饶五河之水,湖畔山峦起伏,东部沿岸多沼泽滩涂,地势平缓,分布着乡镇和水田。

2.2 研究数据

所使用数据为鄱阳湖区域 Sentinel-2A MSI 影像,成像时间为 2021 年 5 月 1 日,云量小于 25%,数据来源为欧洲航天局 Sentinel 科学数据中心官网。相较于最高分辨率为 30 m 的 Landsat 系列卫星, Sentinel-2A MSI 数据的空间分辨率最高可达 10 m,影像中的地物信息更加丰富,具备针对小型水体的识别能力。对于 2019 年以后的 Sentinel-2 影像,官网直接提供了经过辐射定标和大气校正的 L2A 级地表反射率数据。目前多数波段指数基于 Landsat TM/ETM+ 影像构建, TM/ETM+ 的 B1~B5、B7 在 Sentinel-2A MSI 中均有对应波段存在,表明算法可移植到 MSI 影像中使用。

Synthetic aperture radar (SAR) 具有一定穿云透雨的能力,本实验组使用一景 Sentinel-1A IW GRDH 数据进行精度验证,其空间分辨率为 10 m,成像于 2021 年 4 月 28 日,与 Sentinel-2A 数据存在 3 天时间差,但该时间段前后鄱阳湖流域无明显降水,因此认为水面积变化可忽略。

2.3 研究方法

本实验研究流程如图 1 所示,选取山区、湖泊、城镇、水田以及河流 5 种典型地理环境进行研究。首先对 MSI 影像进行波段选择、裁剪等处理,在此基础上,计算出 NDWI 等 10 种水体指数,使用最大类间方差算法 (Otsu) 得到每种水体指数在不同背景环境中的最佳分割阈值,从而完成水体提取工作。Otsu 算法 (图 2) 常用于图像二值分类任务,通过计算最大类间方差确定分割阈值,将影像划分为前景和背景两部分^[16]。

对 SAR 影像进行轨道校正、辐射定标、相干斑滤波、地形校正、影像配准等操作,基于双极化水体指数 (SDWI) 得到初步水体提取结果,并结合目视解译进一步优化,绘制出水体边界^[17]。

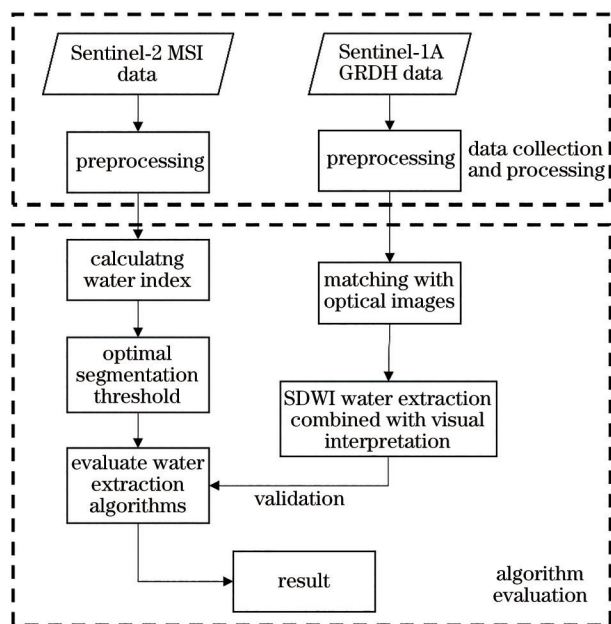


图 1 技术路线图

Fig. 1 Technology roadmap

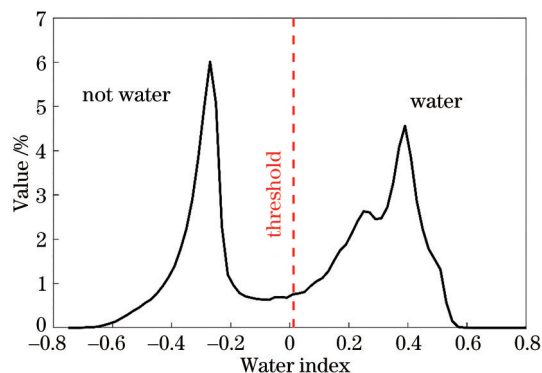


图 2 基于 Otsu 确定最佳分割阈值示意图 (虚线横坐标所示)
Fig. 2 Schematic diagram of determining optimal segmentation threshold based on Otsu (shown by dotted abscissa)

$$I_{SDWI} = \ln(10 \times \sigma_{VV} \times \sigma_{VH}), \quad (1)$$

式中: σ_{VV} 和 σ_{VH} 分别表示 Sentinel-1A 的两种极化影像的后向散射系数。

2.3.1 归一化差异水体指数

$$I_{NDWI} = \frac{R_G - R_{NIR}}{R_G + R_{NIR}}, \quad (2)$$

式中: R_G 和 R_{NIR} 分别表示水体在绿光波段和近红外波段的反射率。NDWI 是基于 Landsat TM 数据构建的。水体在绿光波段反射率高、近红外波段反射率低, NDWI 通过放大这一特征来将水体与植被、裸土等其他地物进行区分。

2.3.2 改进的归一化差异水体指数

$$I_{\text{MNDWI}} = \frac{R_G - R_{\text{MIR}}}{R_G + R_{\text{MIR}}}, \quad (3)$$

式中: R_{MIR} 表示水体在中红外波段的反射率。MNDWI 基于 Landsat TM 数据构建, 且在 NDWI 的基础上进行了改进, 用中红外波段替换了模型中的近红外波段, 在城镇区域水体提取精度有所提高, 同时还能捕捉到诸如悬浮物分布、水质变化等细微信息。

2.3.3 组合水体指数

$$\begin{cases} I_{\text{CIWI}} = I_{\text{NDVI}} + \frac{R_{\text{NIR}}}{R_{\text{NIR}}} \\ I_{\text{NDVI}} = \frac{R_R - R_{\text{NIR}}}{R_R + R_{\text{NIR}}} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: R_R 表示水体在红光波段的反射率; R_{NIR} 表示水体在近红外波段反射率的均值。CIWI 基于 MODIS 数据构建, 组合了 NDVI 和近红外波段, 增强了水体与云层、植被和城镇地物的区分, 将城镇地物、云层维持在高值区, 植被保持在中值区, 从而将占据低值区的水体识别出来。

2.3.4 增强型水体指数

$$I_{\text{EWI}} = \frac{R_G - R_{\text{NIR}} - R_{\text{MIR}}}{R_G + R_{\text{NIR}} + R_{\text{MIR}}}, \quad (5)$$

EWI 基于 Landsat ETM+ 数据构建。针对半干旱区域水体与背景地物在光谱特征上的差异, EWI 同时结合近红外和中红外波段信息, 进一步扩大了水体在强反射和弱反射波段的差距, 使地物湿度信息得到最大程度增强。EWI 能够有效抑制背景噪声, 实现针对半干旱水系的提取。

2.3.5 修订型归一化差异水体指数

$$I_{\text{RNDWI}} = \frac{R_{\text{SWIR}} - R_R}{R_{\text{SWIR}} + R_R}, \quad (6)$$

式中: R_{SWIR} 表示水体在短波红外波段的反射率。RNDWI 基于 Landsat TM 数据构建。水体在红外波段反射率极低, 而土壤在红外波段保持着较高的反射率, RNDWI 通过放大水体在红光和短波红外波段的差异, 能够削弱水陆混合像元及山体阴影的影响。

2.3.6 高斯归一化差异水体指数

$$I_{\text{GNDWI}} = \frac{I_{\text{NDWI}} - I_{\text{NDWI}}}{\sigma_{\text{NDWI}}}, \quad (7)$$

式中: I_{NDWI} 表示所有像元的 NDWI 均值; σ_{NDWI} 表示所有像元的 NDWI 标准差。GNDWI 基于 Landsat ETM+ 数据构建, 河流在影像上表现为不规则的长

线条状, 并且可能存在改道、断流的现象, 导致其提取难度大于湖泊。GNDWI 在 NDWI 的基础上进行高斯归一化处理, 能够保留细小水体提取的连续性。

2.3.7 自动化水体提取指数

$$I_{\text{AWEI}_{\text{sh}}} = 4 \times (R_G - R_{\text{MIR}}) - 0.25 \times R_{\text{NIR}} + 2.75 \times R_{\text{SWIR}}, \quad (8)$$

$$I_{\text{AWEI}_{\text{sh}}} = R_B + 2.5 \times R_G - 1.5 \times (R_{\text{NIR}} + R_{\text{MIR}}) + 0.25 \times R_{\text{SWIR}}, \quad (9)$$

式中: R_B 表示水体在短波红外波段的反射率。AWEI 基于 Landsat TM 数据构建, 能够自动抑制阴影以及其他地物噪声的干扰, 其中 AWEI_{sh} 引入蓝光波段进行修正, 适用于干扰信息主要为阴影时的场景, 而干扰信息为冰雪等高反射率地物时应使用 AWEI_{sh} 进行水体识别。

2.3.8 伪归一化差异水体指数

$$\begin{cases} I_{\text{FNDWI}} = \frac{F_{\text{green}} - R_{\text{NIR}}}{F_{\text{green}} + R_{\text{NIR}}} \\ F_{\text{green}} = R_G + S(C_{\text{NIR}} - R_{\text{NIR}}) \end{cases}, \quad (10)$$

式中: F_{green} 为基于近红外波段进行亮度修正后的伪绿波段的反射率; S 表示修正幅度; C_{NIR} 为近红外波段对水体和人工建筑的倾向性界定阈值。FNDWI 基于北京一号卫星多光谱相机数据构建, S 取 1, C_{NIR} 取 40^[14]。FNDWI 无需借助中红外波段的信息, 意味着其在波段数量较少的高分辨率传感器上也具有进行水体识别工作的能力。

2.3.9 阴影水体指数

$$I_{\text{SWI}} = R_B + R_G - R_{\text{NIR}}. \quad (11)$$

SWI 是基于高分一号卫星多光谱相机数据构建的。水体在蓝绿波段的反射率下降较为缓慢, 而阴影的反射率在蓝绿波段下降稍快, SWI 通过近红外波段的反射率信息区分暗地物与亮地物, 再结合绿光和蓝光波段反射率信息将水体提取出来。

2.4 精度验证指标

采用 F1-score 来验证各水体指数模型分类结果的准确度, 并通过虚警率 (false alarm) 和漏检率 (missing alarm) 表征分类结果中存在的误差。F1-score 是查准率 (precision) 和查全率 (recall) 的调和平均数, 常作为二分类图像提取工作中的精度评价指标, 能够衡量针对单类目标的提取效果^[18]。F1-score 基于混淆矩阵构建, 混淆矩阵定义如表 1 所示^[19]。

查准率表示预测为水体的结果之中真值为水

表 1 混淆矩阵
Table 1 Confusion matrix

True value	Predicted value	
	Positive	Negative
Positive	True positive (TP)	False negative (FN)
Negative	False positive (FP)	True negative (TN)

体像元的比例,查全率表示真值为水体的像元中被正确分类为水体的比例,其计算公式分别为

$$R_{\text{precision}} = \frac{N_{\text{TP}}}{N_{\text{TP}} + N_{\text{FP}}}, \quad (12)$$

$$R_{\text{recall}} = \frac{N_{\text{TP}}}{N_{\text{TP}} + N_{\text{FN}}}. \quad (13)$$

查准率和查全率是一对矛盾的评价指标,一般查准率较高时,查全率会偏低;而查准率较低时,查全率往往偏高。F1-score 综合了查准率和查全率的评价结果,在尽可能提高两个指标的同时尽量缩小二者之间的差距。F1-score 取值范围从 0 到 100%,数值越高表示分类效果越好,其计算公式为

$$S_{\text{F1-score}} = 2 \times \frac{R_{\text{precision}} \times R_{\text{recall}}}{R_{\text{precision}} + R_{\text{recall}}}. \quad (14)$$

虚警率和漏检率用于衡量分类结果错误的程度,同样是一对相互矛盾的指标。虚警率代表分类为水体的结果中被误判的像元比例,因此虚警率较低的情况下,分类结果比较保守,大量混合像元被归类为非水体,造成漏检率偏高;漏检率反映了分类结果中被误判为非水体的像元比例,在保证漏检率较低的情况下,必然有大量混合像元被归类为水体,使得虚警率提高。二者计算公式为

$$R_{\text{false alarm}} = \frac{N_{\text{FP}}}{N_{\text{TP}} + N_{\text{FP}}}, \quad (15)$$

$$R_{\text{dismissal alarm}} = \frac{N_{\text{FN}}}{N_{\text{TP}} + N_{\text{FN}}}. \quad (16)$$

3 分析与讨论

3.1 基于各指数模型的水体提取结果

分别应用 10 种水体指数对 5 种典型地理环境下的水体进行提取,效果如图 3 所示。图 3 第 1 列为山区水体提取结果,其中主要干扰因素为山体植被阴影及裸土。从目视效果来看,除了 CIWI 和 AWEI_{nsh} 将部分地形阴影与低反射率的裸土错误识别为水体以外,其他 8 种指数模型的水体提取结果完整,且噪声信号较少。图 3 第 2 列为湖泊区域水体提取结果,由于该区域水体连续性强,水陆边界明确,各指数的提取结果相对一致,主要分歧点在

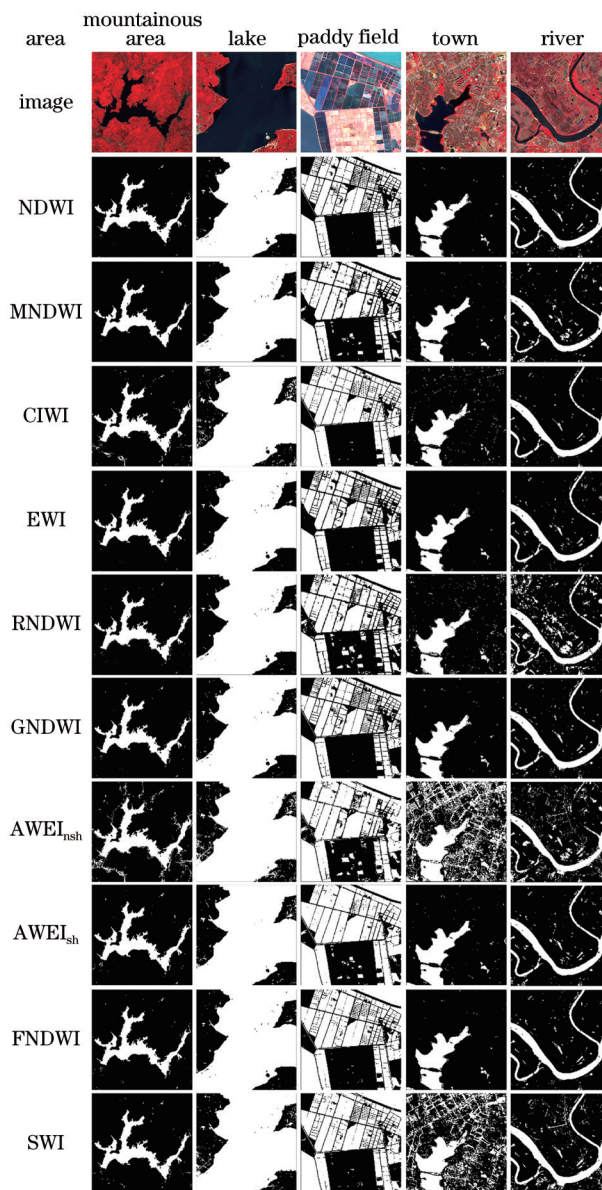


图 3 10 种波段指数在不同实验区的提取效果对比
Fig. 3 Comparison of extraction effects of 10 band index in different experimental areas

于陆地上的小型水体。图 3 第 3 列为水田区域,该区域的水体形状规则,水深较小,并且存在大量水陆边界,其中 MNDWI、RNDWI、AWEI_{nsh}、AWEI_{sh} 将部分低反射率地表识别为水体,其余指数提取结果较为统一。图 3 第 4 列为城镇区域,干扰信号主要来自低反射率的人工用地、建筑阴影及小型城市污水。对比之下,AWEI_{nsh} 和 SWI 出现了相对严重的误差,将大量人工用地、建筑阴影等低反射率地表识别为水体。图 3 第 5 列为河流区域,从识别结果来看,RNDWI 和 AWEI_{nsh} 噪声信号较多,且 AWEI_{nsh} 在河流窄细区域出现了断流现象。

3.2 精度验证结果

以基于 SAR 数据 SDWI 识别并结合目视解译得到的水体真值进行精度验证, 5 种地理环境下水体识别结果的 F1-score、虚警率和漏检率分别如图 4 和图 5 所示, 其中山区[图 4(a)]地势起伏较大, 水体面积较大、连续性强。各指数借助红外波段的信息有效剔除了地形植被阴影的干扰, 除了 AWEI_{nsh} 外, F1-score 均在 90% 以上。从[图 5(a)]来看: AWEI_{nsh} 的漏检现象较少, 分类误差主要来自于虚警现象, 这表示 AWEI_{nsh} 将大量疑似像元错误归类为水体, 影响了整体精度; MNDWI 则相反, 虚警率接近 0, 漏检率超过了 10%, 表明 MNDWI 的判断标准相对较严苛; 整体表现较好的是 FNDWI 和 SWI, 同时保持了较低的虚警率和漏检率。

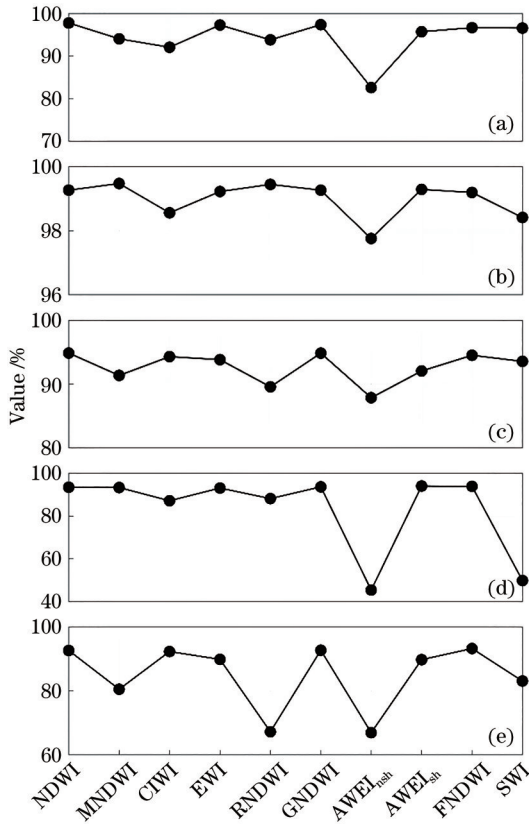


图 4 不同区域水体指数水体识别结果的 F1-score。

(a) 山区; (b) 湖泊; (c) 水田; (d) 城镇; (e) 河流

Fig. 4 F1-score of water identification results of all water index in different areas. (a) Mountain; (b) lake; (c) paddy field; (d) town; (e) river

与山区类似, 湖泊区域[图 4(b)]的水体连续性同样较强, 并且水体空间分布更加均匀、水陆边界清晰, 因此各指数识别结果的一致性显著, 整体 F1-score 较高, 均在 97% 以上, 与目视结果相对应。受

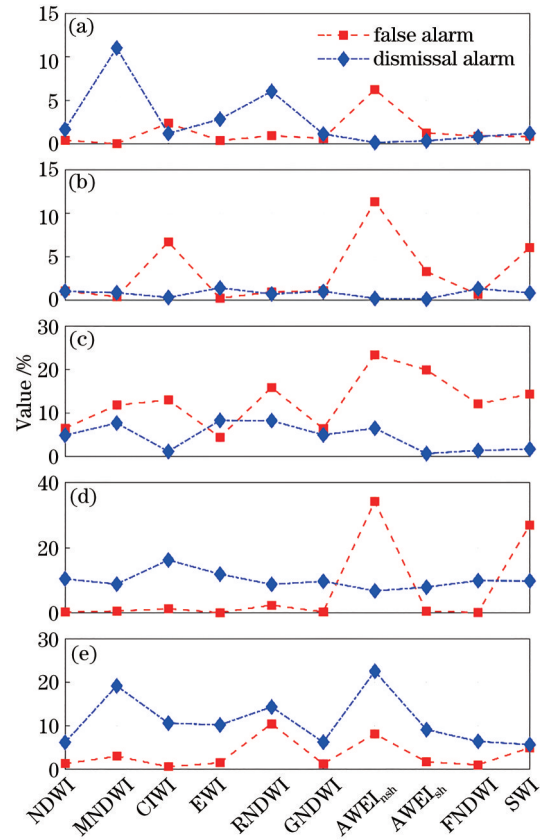


图 5 不同区域水体指数水体识别结果的虚警率和漏检率。

(a) 山区; (b) 湖泊; (c) 水田; (d) 城镇; (e) 河流

Fig. 5 False alarm rate and dismissal alarm rate of water identification results of all water index in different areas. (a) Mountain; (b) lake; (c) paddy field; (d) town; (e) river

到陆地小型水体的影响(图 3), CIWI、AWEI_{nsh} 和 SWI 的虚警现象相对突出[图 5(b)]。由于水体面积占比大, 漏检误差整体较小。RNDWI 和 GNDWI 的漏检及虚警误差控制效果最好。

水田区域[图 4(c)]各指数的 F1-score 均在 85% 以上, 影响分类准确度的主要因素是占比较大的水陆混合像元。从[图 5(c)]来看: 整体虚警现象相对严重, AWEI_{nsh} 和 AWEI_{sh} 虚警率超过了 20%; CIWI、AWEI_{sh}、FNDWI 和 SWI 的漏检误差较小, 但虚警误差偏高; NDWI 和 GNDWI 综合误差最小, 一定程度上表明二者针对水陆混合像元具有较好的处理能力。

城镇区域[图 4(d)]包含大量的人工用地以及建筑物阴影, 水体分布较为破碎, 且水体成分复杂。AWEI_{nsh} 和 SWI 的 F1-score 低至 50% 以下, 结合[图 5(d)]中二者虚警误差均超过 20% 可以看出, 这两种指数不适用于城镇地区的水体提取。其余指

数的 F1-score 均在 80% 以上,虚警误差接近 0,综合误差最小的指数是 AWEI_{nsh},与目视结果一致。

河流区域水体狭长连续,水陆边界一般较平滑;在卫星影像中,河道较窄的流域容易给水体识别工作造成困难,[图 4(e)]表明 RNDWI 和 AWEI_{nsh} 对河流区域的水体适用性相对较差;MNDWI 和 SWI 表现优于前两者,其余 6 种指数一致性较好,F1-score 均达到了 90%。NDWI、FNDWI 的综合误差较小,RNDWI 和 AWEI_{nsh} 误差相对高一些[图 5(e)]。

所有波段指数在不同地理环境下的平均精度及误差如图 6 所示。NDWI、GNDWI 和 FNDWI 三种指数模型在不同地物背景条件下展现出了较好的适用性,平均 F1-score 均超过 95% [图 6(a)],且平均误差控制在 5% 以内 [图 6(b)]。因此在涉及地物背景复杂多变的大范围水体识别工作中,应优先考虑使用这 3 种指数模型。相较之下,AWEI_{nsh} 和 SWI 两种指数模型由于虚警现象突出 [图 6(b)],平均 F1-score 较低 [图 6(a)],其中 SWI 的虚警误差主要来自于水田区域的水陆混合像元 [图 5(c)] 以及城镇区域的暗地表 [图 5(d)];AWEI_{nsh} 在 5 种地理背景下的水体识别效果都存在明显的误差,从式 (8) 来看,AWEI_{nsh} 模型中的 3 个系数基于 Landsat 5 TM 数据构建,因此直接将其迁移到 Sentinel-2A MSI 数据上需要考虑重新对其进行率定,这可能是其误差

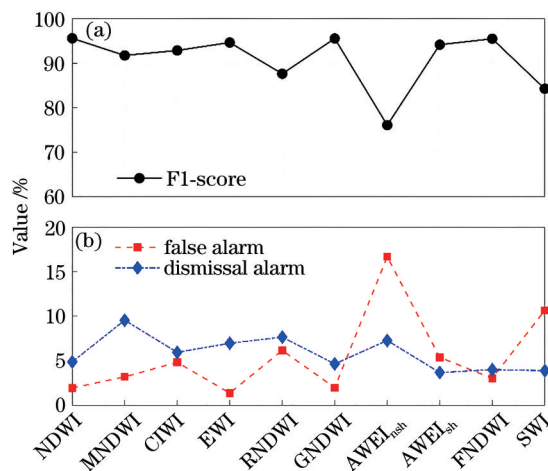


图 6 各指数在不同区域的平均精度指标。(a) F1-score; (b) 虚警率和漏检率

Fig. 6 Average accuracy indexes of each model in different regions. (a) F1-Score; (b) false alarm rate and dismissal alarm rate

产生的原因。

3.3 水陆边界识别效果

水陆边界区域是水体提取工作中的难点,如何获得水陆边界的准确位置是众多水体识别工作中亟须解决的问题^[20]。水田区域中存在着大量的规则水体与田垄,能够验证各水体指数处理水陆边界的能力。本实验组选取其中水陆边界密集部分作为研究区域,10 种水体指数的识别效果如图 7 所示,各指数

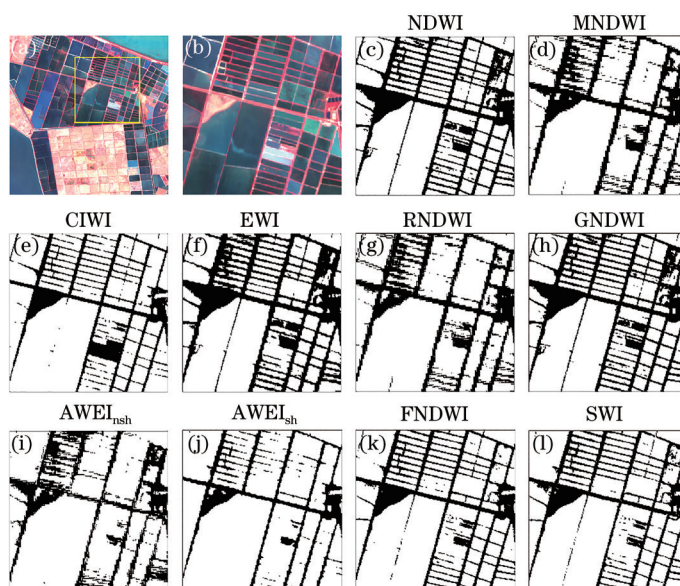


图 7 各指数针对水陆边界的识别效果展示。(a) 水田区域,矩形框为主要研究区域;(b) 研究区域假彩色合成图;(c)~(l) 各指数模型对应的水体识别结果

Fig. 7 Display of recognition effect of each index for land and water boundary. (a) Paddy field area, rectangular box as main research area; (b) false color composite map of research area; (c)-(l) water body recognition results corresponding to each index model

在水陆混合区域的识别精度如图 8 所示。NDWI 和 GNDWI 提取得到的水体边界完整,轮廓光滑清晰[图 7(c)、(h)],F1-score 在 90% 以上[图 8(a)],虚警率[图 8(b)]和漏检率[图 8(c)]也相对较低,表明二者具备良好的水陆边界检测能力。EWI、CIWI、

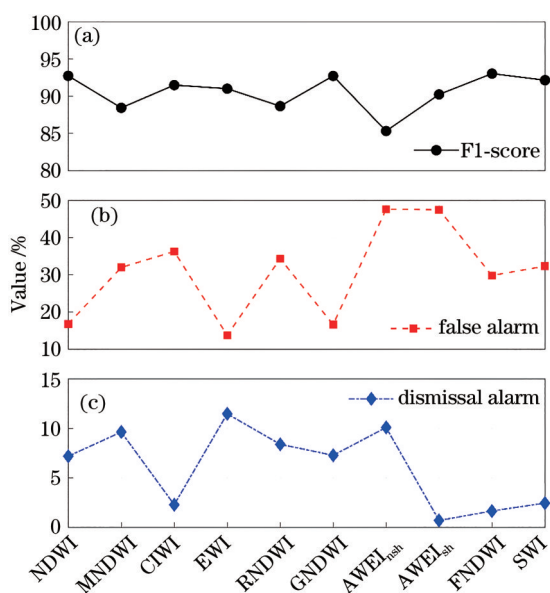


图 8 各指数在水陆混合区域的识别精度。(a) F1-score; (b)虚警率;(c)漏检率

Fig. 8 Identification accuracy of each index in mixed area of land and water. (a) F1-score; (b) false alarm rate; (c) dismissal alarm rate

FNDWI 和 SWI 的识别结果中,部分宽度较小的田垄出现不连续现象[图 7(e)、(f)、(k)、(l)],虚警率或漏检率其中一项偏高[图 8(b)、(c)],因此水陆边界检测效果略逊于前两者。MNDWI、RNDWI、AWEI_{nsh} 和 AWEI_{sh} 的识别结果中,水陆边界不连续现象较为突出,且轮廓较为粗糙[图 7(d)、(g)、(i)、(j)],导致 F1-score 相对较低[图 8(a)],表明这 4 种水体指数针对水陆边界的检测能力有待进一步提升。

3.4 阈值稳定程度

在不同地理条件下的水体识别研究中,波段指数模型的阈值会随着背景地物信息的差异而产生变化。在面对大范围的水体提取任务时,选定的指数模型阈值需要最大程度上满足各种地理背景中的水体提取工作,因此对各指数模型阈值的稳定程度进行了考查。10 种指数模型由 Otsu 算法计算得到的阈值如表 2 所示。NDWI、MNDWI、EWI 和 RNDWI 模型的阈值标准差较小,CIWI、GNDWI 和 FNDWI 模型的阈值标准差同样小于 1,表明这些模型的阈值稳定程度较高,几乎不需要根据不同地理背景进行调整即可达到较好的识别效果。AWEI_{nsh}、AWEI_{sh} 和 SWI 模型由于没有做归一化处理[式(8)、(9)、(11)],所以阈值波动较大,单一阈值在大范围的水体识别工作中,分类效果会大打折扣。

表 2 指数模型阈值及标准差

Table 2 Threshold and standard deviation of water index model

Area	NDWI	MNDWI	CIWI	EWI	RNDWI	GNDWI	AWEI _{nsh}	AWEI _{sh}	FNDWI	SWI
Mountain	-0.11	0.11	0.24	-0.44	-0.03	1.23	458.06	-2108.45	-1.89	231.58
Lake	-0.08	0.08	1.34	-0.27	-0.11	-0.48	362.13	-1911.47	-0.49	255.20
Paddy field	0.01	0.16	0.68	-0.21	-0.24	-0.10	1268.90	-835.45	-1.45	256.27
Town	0	0	0.06	-0.293	-0.039	0.925	782.24	-152.43	-0.92	352.14
River	-0.09	0.05	0.03	-0.38	-0.05	0.92	1163.51	-363.34	-1.22	259.38
Standard deviation	0.05	0.05	0.49	0.08	0.08	0.66	363.52	797.73	0.47	41.81

4 种常见地物的反射率随 Sentinel-2A MSI 的波段变化情况如图 9 所示,其中植被存在两个反射峰,分别位于 B3(绿波段)以及 B6~B9(红边波段),红边波段开始反射率的陡然上升是植被最明显的光谱特征。人工建筑和裸土的光谱特征相对更接近,不同之处在于从 B6 开始,人工建筑的反射率明显高于裸土。水体在 B3 反射率最高,可达到 0.14,之后随着波长的增加反射率缓慢降低,这是水体区别于其他地物的特征。NDWI 使用 B3 和 B8(近红外)两个波段,能够有效剔除植被的影响,但由于裸土在

这两个波段的反射率也比较接近,因此给 NDWI 带来了一定的干扰。MNDWI 将 B8 替换为 B11(中红外),能够有效剔除建筑物的干扰,但同时削弱了植被的区分度。CIWI 由 B4(红波段)和 B8 构成,首先能够有效去除植被信息,再依据 B8 波段水体反射率显著小于裸土和建筑,从而识别出水体信息。EWI 将 NDWI 中的 B8 替换为 B8 与 B11 之和,这两个波段为建筑的两个反射峰,相比反射率呈缓慢下降趋势的水体,建筑得以有效区分。RNDWI 由 B4 和 B12 两个波段构成,虽然水体在红外波段反射率随

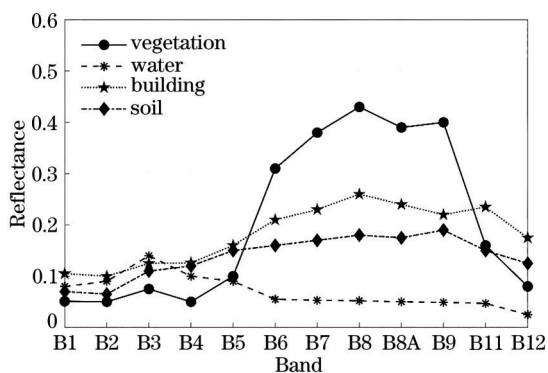


图9 不同地物反射率随 Sentinel-2A MSI 波段变化情况
Fig. 9 Variation of reflectance of different land features with Sentinel-2A MSI band

波长降低,但 B12 波段植被、建筑和裸土的反射率都较低,因此仅靠这两个波段很难将水体有效提取出来,这也是 RNDWI 在 5 个实验区中均表现较差的原因。GNDWI 在 NDWI 的基础上进行高斯归一化,因此识别效果接近 NDWI,在实验中表现较突出。AWEI_{nsh} 和 AWEI_{sh} 涉及了 B2、B3、B8、B11 和 B12 共 5 个波段,相较其他水体指数,利用了更多的光谱信息意味着更加复杂的比重系数,其中面向非阴影干扰的 AWEI_{sh} 在实验中展现了较好的适用性,借助红外和可见光波段的信息将水体从建筑噪声中提取出来。根据式(8),AWEI_{nsh} 首先试图通过放大 B3 与 B11 之间的差异,再借助水体在 B8 和 B12 的低反射率来将其提取出来。从图 9 可以看出,植被和裸土在 B3 和 B11 两个波段处的反射率相对比较接近,给水体识别造成了困难,因此 AWEI_{nsh} 在识别效果上与其他指数有所差距。FNDWI 首先结合 B3 和 B8 构建了一个伪绿波段 F_{green} 用于替换 NDWI 中的绿波段,进一步利用了水体在这两个波段处表现出来的差异。SWI 使用 B2、B3、B8 三个波段,综合了可见光与近红外波段的信息,这是其能够在山区展现出高准确度的基础。

总体而言,在受到地形阴影干扰时,FNDWI 模型表现最佳;对于连续性较强的大面积水体(如湖泊),RNDWI 和 GNDWI 模型误差最小;在人工水田区域中,NDWI 和 GNDWI 模型具备最优的水陆混合像元处理能力;AWEI_{sh} 模型能够很好地抑制城镇中大量低反射率人工建筑及阴影带来的噪声;针对狭长蜿蜒的河流,FNDWI 和 GNDWI 模型的提取结果最完整。在大范围的水体提取研究中,综合考虑识别精度和阈值稳定性,NDWI、GNDWI 和 FNDWI 模型适用性最广泛。

4 结 论

基于 Sentinel-2A MSI 数据资料并以鄱阳湖区域为研究对象,对比分析了 NDWI、MNDWI、CIWI、EWI、RNDWI、GNDWI、AWEI_{nsh}、AWEI_{sh}、FNDWI 和 SWI 共 10 种波段指数模型的水体提取效果,并结合目视解译的 SDWI SAR 影像水体识别结果作为真值进行了精度验证。总体来看,NDWI、GNDWI 和 FNDWI 模型适用场景广泛,在面对山区、湖泊区域、水田、城镇以及河流区域进行水体提取时平均 F1-score 都超过 95%,并且阈值相对稳定,因此在大范围水体提取任务中可优先考虑使用。其中 NDWI 和 GNDWI 在水陆边界区也能够达到较好的检测效果。MNDWI 模型在针对城镇区域的水体提取中展现出优势,F1-score 达到 92%。CIWI 适用于水田以及河流区域的实体识别。EWI、SWI 模型在干扰信息为地形阴影的山区适用性较强,同时 EWI 还能够有效抑制城镇区域中低反射率地表带来的干扰。RNDWI 模型适用于面积较大的湖泊区域,在其他地理背景下的水体识别效果还有待改进。两种自动化水体指数中,AWEI_{sh} 表现优于 AWEI_{nsh},能够有效去除山区、城镇中的阴影噪声。

值得注意的是,研究过程中只使用了 Sentinel-2A MSI 数据,并且没有对各指数模型的系数重新进行率定,因此诸如 AWEI_{nsh} 这样具有多个系数的模型效果可能会受到影响。除此之外,研究仅选取了 5 种典型地理条件对算法模型进行评估,相对于更加复杂多变的水体背景环境,仍然存在一定局限性。在后续研究工作中,应考虑针对一些算法模型加以改进,并在更多的地理条件下开展算法评估工作。

随着卫星遥感技术的发展,卫星传感器的时空分辨率以及光谱分辨率会越来越高,如何充分利用遥感影像的这些优势,进一步提高水体识别的准确度和效率还需要更多研究。针对高光谱分辨率的数据,AWEI 提供了参考,综合利用多波段信息,捕捉并放大水体在不同波段展现出的特征,从而提高识别精度。此外,高空间分辨率影像呈现出丰富的纹理及语义特征,但通常只有可见光和近红外波段(如高分 2 号)。在水体指数法使用受限的情况下,可借助机器学习算法强大的特征提取能力完成水体识别^[21]。SAR 影像空间分辨率较低且常伴随着

噪声现象,但不受恶劣气象条件影响,可在浅水以及云层遮挡区域提供有价值的信息,如何有效结合 SAR 与光学影像实现水体提取也是今后研究的方向^[22]。

参 考 文 献

- [1] 张秀玲. 生态文明视域下我国水资源管理实践思路探索[J]. 山西农经, 2021(7): 117-118.
Zhang X L. Exploration of water resources management practice in China from the perspective of ecological civilization[J]. Shanxi Agricultural Economy, 2021(7): 117-118.
- [2] Wan L, Liu M, Wang F, et al. Automatic extraction of flood inundation areas from SAR images: a case study of Jilin, China during the 2017 flood disaster [J]. International Journal of Remote Sensing, 2019, 40(13): 5050-5077.
- [3] 李丹, 吴保生, 陈博伟, 等. 基于卫星遥感的水体信息提取研究进展与展望[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(2): 147-161.
Li D, Wu B S, Chen B W, et al. Review of water body information extraction based on satellite remote sensing[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2020, 60(2): 147-161.
- [4] Rundquist D C, Lawson M P, Queen L P, et al. The relationship between summer-season rainfall events and lake-surface area[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1987, 23(3): 493-508.
- [5] Moeller-Jensen L. Knowledge-based classification of an urban area using texture and context information in Landsat-TM imagery[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1990, 56: 899-904.
- [6] 汪金花, 张永彬, 孔改红. 谱间关系法在水体特征提取中的应用[J]. 矿山测量, 2004(4): 30-32.
Wang J H, Zhang Y B, Kong G H. Application of spectral relation method in water feature extraction [J]. Mine Surveying, 2004(4): 30-32.
- [7] McFeeters S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [8] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
Xu H Q. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI) [J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(5): 589-595.
- [9] 莫伟华, 孙涵, 钟仕全, 等. MODIS 水体指数模型(CIWI)研究及其应用[J]. 遥感信息, 2007, 22(5): 16-21, 104.
Mo W H, Sun H, Zhong S Q, et al. Research on the CIWI model and its application[J]. Remote Sensing Information, 2007, 22(5): 16-21, 104.
- [10] 闫需, 张友静, 张元. 利用增强型水体指数(EWI)和 GIS 去噪音技术提取半干旱地区水系信息的研究[J]. 遥感信息, 2007, 22(6): 62-67.
Yan P, Zhang Y J, Zhang Y. A study on information extraction of water system in semi-arid regions with the enhanced water index(EWI) and GIS based noise remove techniques[J]. Remote Sensing Information, 2007, 22(6): 62-67.
- [11] 曹荣龙, 李存军, 刘良云, 等. 基于水体指数的密云水库面积提取及变化监测[J]. 测绘科学, 2008, 33(2): 158-160.
Cao R L, Li C J, Liu L Y, et al. Extracting Miyun reservoir's water area and monitoring its change based on a revised normalized different water index [J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, 33(2): 158-160.
- [12] 沈占锋, 夏列钢, 李均力, 等. 采用高斯归一化水体指数实现遥感影像河流的精确提取[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(4): 421-428.
Shen Z F, Xia L G, Li J L, et al. Automatic and high-precision extraction of rivers from remotely sensed images with Gaussian normalized water index [J]. Journal of Image and Graphics, 2013, 18(4): 421-428.
- [13] Feyisa G L, Meilby H, Fensholt R, et al. Automated Water Extraction Index: a new technique for surface water mapping using Landsat imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140: 23-35.
- [14] 周艺, 谢光磊, 王世新, 等. 利用伪归一化差异水体指数提取城镇周边细小河流信息[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(1): 102-107.
Zhou Y, Xie G L, Wang S X, et al. Information extraction of thin rivers around built-up lands with false NDWI[J]. Journal of Geo-Information Science, 2014, 16(1): 102-107.
- [15] 陈文倩, 丁建丽, 李艳华, 等. 基于国产 GF-1 遥感影像的水体提取方法[J]. 资源科学, 2015, 37(6): 1166-1172.
Chen W Q, Ding J L, Li Y H, et al. Extraction of water information based on China-made GF-1 remote

- sense image[J]. Resources Science, 2015, 37(6): 1166-1172.
- [16] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [17] 贾诗超, 薛东剑, 李成绕, 等. 基于 Sentinel-1 数据的水体信息提取方法研究[J]. 人民长江, 2019, 50(2): 213-217.
Jia S C, Xue D J, Li C R, et al. Study on new method for water area information extraction based on Sentinel-1 data[J]. Yangtze River, 2019, 50(2): 213-217.
- [18] 李潇凡, 王胜强, 翁轩, 等. 基于 UNet 深度学习算法的东海大型漂浮藻类遥感监测[J]. 光学学报, 2021, 41(2): 0201002.
Li X F, Wang S Q, Weng X, et al. Remote sensing of floating macroalgae blooms in the East China Sea based on UNet deep learning model[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0201002.
- [19] Fawcett T. An introduction to ROC analysis[J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(8): 861-874.
- [20] 刘鑫. 基于灰度形态学和图像分割的河口水边线提取[J]. 地理空间信息, 2016, 14(12): 9, 72-74, 79.
Liu X. Waterline extraction of estuary based on gray morphology and image segmentation methods[J]. Geospatial Information, 2016, 14(12): 9, 72-74, 79.
- [21] 张琪, 杨桂芹, 王小鹏. 结合引力模型的模糊聚类遥感图像水体分割算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(14): 1410016.
Zhang Q, Yang G Q, Wang X P. Fuzzy clustering remote sensing image water segmentation algorithm combined with gravity model[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(14): 1410016.
- [22] 何洁, 陈欣. 基于非线性相关信息熵的 SAR 图像多分辨率选择及目标识别[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(22): 221020.
He J, Chen X. Multi-resolution selection of SAR images and target recognition based on nonlinear correlation information entropy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(22): 221020.