doi: 10.6046/zrzyyg.2021205
引用格式: 韦嫦,付波霖,覃娇玲,等.基于多时相 Sentinel-1A 的沼泽湿地水面时空动态变化监测[J].自然资源遥感,2022,34(2):251-260.(Wei C,Fu B L,Qin J L,et al. Monitoring of spatial-temporal dynamic changes in water surface in marshes based on multi-temporal Sentinel-1A data[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2022,34(2):251-260.)

基于多时相 Sentinel-1A 的沼泽湿地水面时空动态变化监测

韦 嫦, 付波霖, 覃娇玲, 王雅南, 陈智瀚, 刘 兵
(桂林理工大学测绘地理信息学院,桂林 541000)

摘要: 水是形成和维系湿地生态系统的重要因子,监测湿地水面积变化对湿地保护研究具有重要意义。以 2018—2019 年逐月的 Sentinel-1A 卫星数据为数据源,计算扎龙湿地年内和年际的合成孔径雷达(synthetic aperture Radar,SAR)后向散射系数(σ^0)和相干系数(μ^0)影像,根据彩色光学影像水体贴近程度赋予权重并构建提取湿地水面 σ^0 与 μ^0 的加权影像,通过阈值分割法、随机森林算法提取湿地水体,实现湿地水域面积的动态变化监测,探究湿地水域年内和年际变化规律。结果表明: 基于随机森林算法的水体提取精度最高,代表月份平均差值绝对值为 6.69 km^2,基于 μ^0 影像使用阈值分割方法的分类精度最低,平均差值绝对值为 13.07 km^2; 整体趋势上,扎龙湿地水域面积年内有明显的季节性变化,春末夏初时水域面积在 1 300~1 600 km^2 浮动,夏末秋始时水域面积在 700~900 km^2 浮动; 年际水域面积会随着气候、温度等条件差异有不同变化,2019 年 10 月、11 月因降水量大湿地水域面积比 2018 年多出约 1 050 km^2,基于有效数据计算,总体上 2019 年比 2018 年水域面积多出约 550 km^2。

关键词: 湿地水面年内年际变化; Sentinel-1A; 后向散射系数; 相干系数; 阈值分割
中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)02-0251-10

0 引言

湿地是位于陆生生态系统和水生生态系统之间的至关重要的过渡地带,它有着贮蓄水量、调节气候、保护环境和保护生物多样性等重要作用,是世界上最有价值的自然资源之一[1-2]。水是湿地三要素之一,是维持湿地的主要因素[3]。由于人类活动过程中长期忽视对地球环境的保护,地球生态环境逐渐恶化,水循环系统遭到破坏,全球湿地萎缩和功能退化成为突出问题[4]。因此,为了防止湿地进一步流失,更好地管理和保护现有的湿地资源,有必要研究湿地水域变化,监测其年内、年际变化。

目前国内外湿地水体遥感提取方式主要有以下 3 种: ①基于传统光学遥感图像的遥感技术,通过构造波段间的光谱关系提取水体[5]。如甄佳宁[6]使用 Landsat 系列卫星影像对长春湿地采取不同的水体指数和阈值分割法提取水体信息; Jin 等[7]利用 Landsat 时间序列影像监测德尔马瓦半岛的湿地水位淹没动态,增进对湿地的了解并确保生态系统服务的可持续性。不足之处是光学遥感图像的遥感技术受云雨天气等条件限制,对监测湿地水域年内变化影响颇大[8]。②基于微波遥感图像的遥感技术,通过合成孔径雷达(synthetic aperture Radar,SAR)后向散射系数(σ^0)、干涉相干系数(μ^0),构建 SAR 影像数据集提取水体信息。徐怡波[9]基于多时相 ENVISAT 卫星影像分析水体的后向散射系数特征,采用阈值分割的方法提取水体,实现对水面变化信息的监测; 付波霖等[10]利用多频率、多时相 SAR 影像,采用合成孔径雷达差分干涉测量技术(interferometric synthetic aperture Radar,InSAR),构建沼泽水位变化监测模型,探究了不同时相沼泽湿地干涉相干性的差异。不足之处是使用单一的 σ^0 或单一的 μ^0 方式有一定的局限性。③基于微波和

收稿日期: 2021-06-30; **修订日期:** 2022-03-17
基金项目: 国家自然科学基金项目"基于主被动遥感的沼泽植被群丛时空分布与水文情势耦合研究"(编号: 41801071)、广西自然科学基金项目"基于主被动遥感的北部湾红树林群丛时空分布与水文情势耦合研究"(编号: 2018GXNSFBA281015)、广西科技计划项目(编号: 桂科 AD20159037)、桂林理工大学科研启动基金资助项目(编号: GUTQDJJ2017096)和广西八桂学者团队专项经费联合资助。
第一作者: 韦 嫦(1997-),女,硕士研究生,研究方向为遥感与地理信息集成应用。Email: 1056930549@qq.com。
通信作者: 付波霖(1988-),男,副教授,研究方向为湿地主被动遥感。Email: fbl2012@126.com。

光学遥感图像的融合,利用 2 种传感器的互补性提取水体信息[11]。关韵桐[12]利用多时相 Sentinel－1 雷达影像为主数据源,以 Sentinel－2 和 Landsat8 OLI 光学影像为辅数据源,将光学影像计算出的归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)分类,根据雷达影像数据分析了 σ^0 与雷达参数之间的关系,利用反演模型对大山包高原湿地进行土壤水分反演,获取了土壤的水分分布状况,根据实测数据验证了反演结果的准确性; Mizuochia 等[13]使用 AMSR 系列、MODIS 和 Landsat 卫星数据,开发并评估了基于查找表的时空数据融合方法,并将其应用于半纳米比亚的干旱季节性湿地,结果表明时间序列图能准确地描述湿地的季节变化和年际变化。综上,目前缺乏整合长时间序列的微波遥感影像的后向散射系数影像和干涉相干系数影像方法,构建多源遥感数据集来检测湿地水域面积动态变化方面的研究。

本文以东北扎龙国家级自然保护区作为研究区,以 2018—2019 年 Sentinel－1A 卫星影像数据作为主数据源,辅以 Sentinel－2A 卫星影像数据,提取保护区年内和年际的 SAR 后向散射系数和干涉相干系数,构建湿地水面积提取 SAR 影像数据集,利用机器学习算法构建沼泽湿地水面动态变化监测模型,实现扎龙湿地水域面积的动态变化监测,探究湿地水域年内和年际变化规律。

1　研究区概况和数据源

1.1　研究区概况

扎龙湿地(图 1)位于黑龙江省松嫩平原西部的

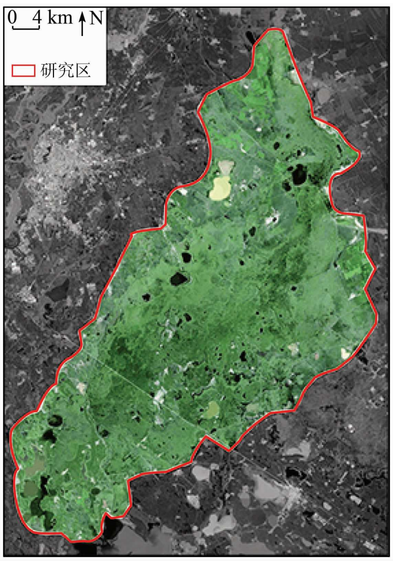


图 1　研究区地理位置

(底图为 Sentinel－2A 影像,其中研究区真彩色影像波段组合为 B4(R),B3(G),B2(B))

Fig. 1　Geographical location of the study area

乌裕尔河下游,地理坐标为 E123°47′～124°37′, N46°52′～47°32′,边界平面呈现不规则橄榄形,湿地南北约 80.6 km,东西约 58.0 km,总面积约为 2 100 km^2,是面积排名亚洲第一、世界第四的国家湿地生态系统保护区,也是世界上面积最大的芦苇湿地,它于 1987 年内被国务院批准为国家级自然保护区[14－15]。多年来扎龙湿地面临水资源短缺、水位下降、资源枯竭、面积分解等问题,严重影响了湿地的生态环境健康,甚至影响了当地经济和社会的可持续发展。

1.2　数据源及数据预处理

本论文使用的数据主要为 Sentinel－1A 和 Sentinel－2A 数据,其中以 Sentinel－1A 的 VV 极化数据为主要实验数据,Sentinel－2A 多光谱影像辅以验证水体提取精度,在欧洲航天局官网(https: //scihub. copernicus. eu/)中公开获取。具体获取了东北扎龙国家级自然保护区 2018—2019 年 Sentinel－1A 数据逐月的 IW 模式的单视复数影像,在研究区和时间段内,总共获取了 44 景 Sentinel－1A 影像,为了验证本论文实验精度,获取了 4 景空间分辨率为 10 m 的 Sentinel－2A 影像,具体影像日期如表 1 所示。

表 1　影像数据具体信息

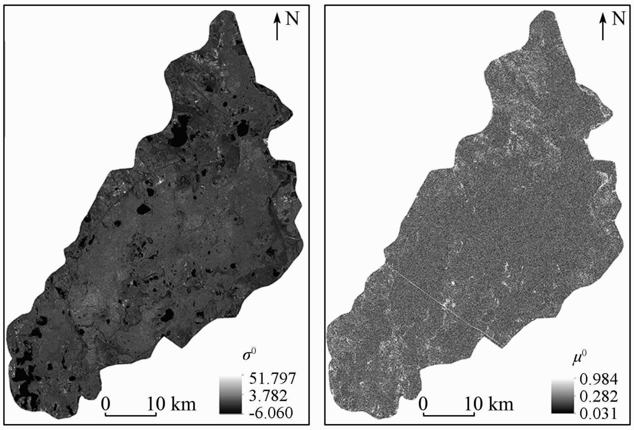
Tab. 1　Image data specific information

月份	2018 年 Sentinel－1A	2019 年 Sentinel－1A	2019 年 Sentinel－2A
1 月	11 日、23 日	18 日、30 日	—
2 月	4 日、16 日	11 日、23 日	—
3 月	12 日、24 日	7 日、19 日	30 日
4 月	5 日、17 日	12 日、24 日	—
5 月	11 日、23 日	18 日、30 日	—
6 月	16 日、28 日	—	—
7 月	10 日、22 日	17 日、29 日	—
8 月	3 日、15 日	10 日、22 日	27 日
9 月	8 日、20 日	—	—
10 月	14 日、26 日	9 日、21 日	26 日
11 月	7 日、19 日	2 日、21 日	—
12 月	13 日、25 日	8 日、20 日	25 日

2　研究方法

本文主要利用 SNAP 软件对多时序 Sentinel－1 卫星数据进行一系列预处理,主要包括热噪声去除、辐射定标(将数字像素值转换为后向散射系数)、条带修复(去除条带噪声)、滤波处理(Define Lee 滤波)、多视处理(距离向视数设为 4)、斜距转地距及地理编码获取 UTM WGS 1984 投影坐标系的 σ^0 数据,如图 2(a)所示; 经过应用轨道文件(获取准确的卫星位置和速度信息)、影像配准(将主影像和辅

影像进行配准获取2个时相影像相融合的新影像)、增强光谱多样性(校正条带的距离和方位向)、干涉条纹图的相干系数提取(对原始图像参数赋予相干系数)、条带修复、多视处理(距离向视数设为4)、地形校正和影像裁剪获取μ^0数据,如图2(b)所示。本文选择每个月靠近月中的VV极化Sentinel－1A/B影像提取研究区σ^0数据,选择每个月2景VV极化的Sentinel－1A/B影像计算逐月的μ^0数据。



(a) σ^0　　(b) μ^0

图2　2019年8月数据预处理示例图

Fig. 2　Example graph of data preprocessing in August 2019

本文总体技术方案如图3所示。第一部分为预处理模块,对原始Sentinel－1A卫星影像数据经过热噪声去除、辐射定标等预处理过程,获取研究区σ^0影像;经过应用轨道文件、影像配准等预处理过程获取研究区μ^0影像;经过波段运算方法加权研究区σ^0影像和μ^0影像获取新的加权影像。第二部分为数据处理模块,将第一部分预处理模块得到的3种类型影像对照彩色光学影像找到水体大致位置,使用阈值分割法确定最佳阈值分割参数提取湿地水体,逐月计算提取的湿地水体面积,获取水位动态信息。第三部分为数据分析模块,对所得影像数据基础建立湿地水面积提取SAR影像数据集,使用随机森林算法对多源遥感数据集进行湿地水体和非水体分类,计算水体面积,获取水位动态信息。第四部分为精度验证模块,对所的结果进行定量分析,探究湿地水域年内年际变化规律,验证精度。

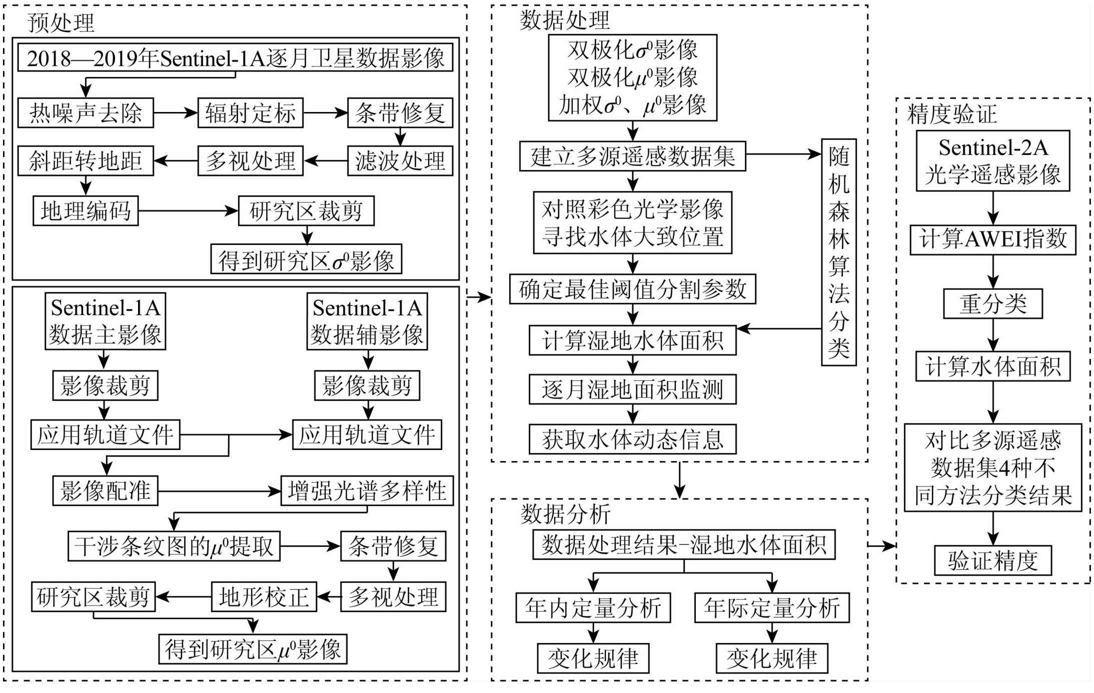


图3　技术路线图

Fig. 3　Technology roadmap

2.1　基于σ^0的湿地水体提取

光在水体中传播时会发生散射,入射能量与表面相互作用后,再辐射向各个方向,其中散射光沿入射方向相反方向的散射的过程称为后向散射,它也是雷达接收机接收到的散射,通常以σ^0表示[16]。

σ^0是水体的固有光学量,水体在微波范围内的σ^0较低,雷达波的吸收相对完整,在雷达图像上呈现较暗的黑色区域,水体和非水体边界明显,可通过阈值分割等多种方法轻易将水体和其他地物区分开。其中,σ^0是体散射函数$\beta(\theta)$的散射角θ对后向半球的积分,在数学上定义表达式为:

$$\sigma^0 = 2\pi\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi}\beta(\theta)\sin\theta\mathrm{d}\theta = 2\pi\lambda(\theta)\beta(\theta)\ , \qquad (1)$$

式中$\lambda(\theta)$为σ^0与体散射函数关系的常数,该常数用于此研究领域近似恒定。

本文在ENVI中实现阈值分割湿地水体提取。阈值分割是一种操作简易且效率高的图像分割方法,该方法使用一个或多个阈值来分割图像的灰度级,并且在相同阈值范围内的灰度值将被识别为相

同类型的地物。本文将 σ^0 设为 $F(x,y)$，以某个灰度范围 $[k_1,k_2]$ 作为阈值范围进行分割，分割后生成的图像为 $f(x,y)$，在阈值范围内的像素全部更改为 1，其他像素均更改为 0，即划分灰度级后的图像为二值图，在数学上定义为：

$$f(x,y)=\begin{cases}1 & k_1 \leq F(x,y) \leq k_2 \\ 0 & \text{其他}\end{cases} 。\quad (2)$$

2.2 基于 μ^0 的湿地水体提取

μ^0 是描述 2 幅单视复数影像相干程度高低的参数，即地物 2 次拍摄的差异，该系数可以表明某些理化特征，因此可以用作辅助地物判别的独立参数。由于水体的 μ^0 值为 0，故在图上水体呈现暗黑色，极易于区分水体和其他地物。对于单视复数影像，使用 SNAP 的相干变化检测处理方法来生成地理编码的相干系数图，干涉测量的相干系数介于 0 ~ 1 之间（0 表示不相干，1 表示完全相干），假定 s_1 和 s_2 分别为同一分辨率的一定时间间隔内获取的 2 幅影像，则 μ^0 在数学上定义表达式为：

$$\mu^0=\frac{|\langle s_1 s_2^* \rangle|}{\sqrt{(\langle s_1 s_1^* \rangle \langle s_2 s_2^* \rangle)}} ，\quad (3)$$

式中：μ^0 为相干系数；s^* 为 s 的共轭复数；s_1 和 s_2 为经过预处理的相干系数影像。

本文在 ENVI 软件中对 μ^0 数据进行阈值分割，将图像二值化，输出水体的栅格文件，计算水体面积。由于湿地水域的相干系数值会明显低于周围地物，水体在 μ^0 数据上表现出的灰度值明显偏低，因此很好选定最佳阈值参数对水体进行提取。

2.3 基于加权 σ^0 和 μ^0 的湿地水体提取

单一的 σ^0 和 μ^0 数据提取水体都分别具有各自优势，同时也存在各自的局限性。本文利用波段运算将二者分别赋予权重叠加融合，便可取得继承二者特性的加权 σ^0 和 μ^0 数据的新影像数据。权重的赋予是根据奥维地图 2018 年、2019 年的高空间分辨率历史光学遥感影像来验证单一的 σ^0 和单一的 μ^0 提取水体精度进行权重划分，如 σ^0 影像提取水体效果更佳，则权重愈大，反之愈小。

目前，加权 σ^0 和 μ^0 数据可以通过 ENVI 进行波段之间的运算实现。波段运算是遥感信息提取的重要方法之一，是基于研究对象的多光谱波段反射特性，选择合适的波段进行运算，目的是增加对象与背景的差异[17]。

本文在 ENVI 软件中对新影像采用阈值分割法提取湿地水体，通过计算像元数和像元大小的关系即可获知湿地水域面积，如表 2 所示。

表 2 2018 年加权 σ^0 和 μ^0 数据波段运算公式及阈值参数

Tab. 2 Calculation formulas and threshold parameters of weighted σ^0 and μ^0 data bands in 2018

代表月份	加权影像	水体提取阈值分割范围
2018 年 3 月	$0.8\sigma^0+0.2\mu^0$	[0.001,0.180]
2018 年 8 月	$0.5\sigma^0+0.5\mu^0$	[0.010,0.085]
2018 年 10 月	$0.7\sigma^0+0.3\mu^0$	[0.005,0.155]
2018 年 12 月	$0.6\sigma^0+0.4\mu^0$	[0.006,0.250]

2.4 基于随机森林算法的湿地水体提取

随机森林是一种新颖的、极其灵活的机器学习算法，通过集成学习的思想将多棵决策树集成，其中每棵决策树都是一个分类器，即对于一个输入样本，N 棵树都将具有 N 个分类结果。随机森林将集成的全部分类结果进行随机而有放回的抽样，通过投票机制，最终输出投票最多的类别，该分类方法在目前所有分类的算法中，具有非常高的准确率[18]。

本文将经过处理的 Sentinel－1A 构建湿地水面积提取 SAR 影像数据集，其数据构成如表 3 所示，波段组成示例图如图 4 所示。每个数据集由 5 个波段组成，对其进行湿地水体提取，采用 ENVI 的拓展模块随机森林分类器绘制训练样本和预测变量的随机子集，由于决策树数目过少会导致分类误差大，过大则会导致随机森林构建时间过

表 3 2019 年 10 月多源数据集参数及选取 ROI 样本信息

Tab. 3 Multi－source data set parameters and selected ROI sample information in October 2019

SAR 影像数据集参数	类型	样本数/棵	决策树/棵
VV 极化的 σ^0 数据(波段 1)、VH 极化的 σ^0 数据(波段 2)、VV 极化的 μ^0 数据(波段 3)、VH 极化的 μ^0 数据(波段 4)、VV 极化的加权 σ^0、μ^0 数据(波段 5)	水体	100	1 000
	非水体	100	1 000

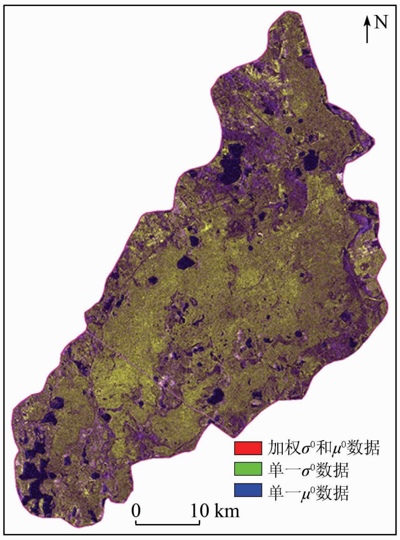


图 4 扎龙湿地彩色影像示例

Fig. 4 Example of color image of Zhalong Wetland

长,故本文生成1 000 棵决策树形成整体分类,表 3 中展示 2019 年 10 月 SAR 影像数据集对照奥维地图彩色光学影像选取的地表真实感兴趣区域(region of interest,ROI)样本信息,选取水体和非水体样本数各 100 个(70% 为训练样本,30% 为验证样本)。

2.5 基于 Sentinel -2 的湿地水体提取

自动化水体提取指数(automated water extraction index,AWEI)是一种可以提高包括阴影和暗表面在内的区域的分类精度的指数[19]。由于 AWEI 方程通过应用强制非水像素低于 0 和水像素高于 0 的系数来提高水和非水像素的可分离性,可以采用默认的 0 阈值来自动客观地提取水体,而不采用人为选取的主观最佳阈值[20]。表达式为:

$$AWEInsh = 4(\rho_G - \rho_M) - (0.25\rho_N + 2.75\rho_S) \quad , \tag{4}$$

$$AWEIsh = \rho_B + 0.25\rho_G - 1.5(\rho_N + \rho_M) - 0.25\rho_S \quad , \tag{5}$$

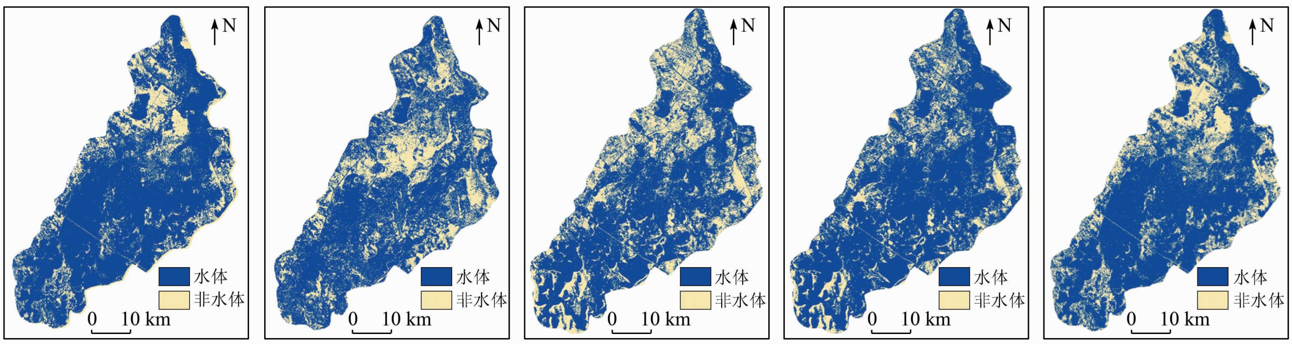
式中: ρ_G为绿光波段; ρ_B 为蓝光波段; ρ_N为近红外波段; ρ_M为中红外波段; ρ_S为热红外波段; *AWEInsh* 为没有阴影下提取的自动化水体提取指数; *AWEIsh* 为阴影下提取的自动化水体提取指数。

本文在 ENVI 中通过波段运算计算光学影像数据获取 AWEI 指数影像,将其作为本论文湿地水体提取基准,通过阈值分割获取水体信息,分析验证前文 4 种基于不同处理方法得到的影像数据的水体提取精度。

3 扎龙湿地水域面积时空动态变化定量分析

3.1 基于 Sentinel -2 的水域面积验证

本文选取了 2019 年的 3 月、8 月、10 月和 12 月的 Sentinel -2A 卫星的影像进行水体提取方法对比实验,通过计算 Sentine -2A 影像数据获取 4 个月份的 AWEI 指数,以研究区 AWEI 数据作为本文湿地水体提取基准,分析验证前文 4 种基于不同处理方法得到的影像数据的水体提取精度。结果图如图 5 所示。



(a) 基于 AWEI 数据(阈值分割法)　(b) 基于 σ^0数据(阈值分割法)　(c) 基于 μ^0数据(阈值分割法)　(d) 基于加权 σ^0与 μ^0数据(阈值分割法)　(e) 基于多源 SAR 影像数据集(RF 分类法)

图 5 2019 年 12 月基于各数据的阈值分割法、RF 分类法获取的扎龙湿地水体分布对比图

Fig. 5 Comparison of water distribution in Zhalong Wetland obtained by threshold segmentation method and RF classification method based on each data in December 2019

表 4 为 2019 年 4 期不同方法水体提取面积对比。可以得知,随机森林算法的分类精度最高; 其次为基于加权 σ^0与 μ^0影像使用阈值分割方法的分类精度; 再是基于 σ^0影像使用阈值分割方法的分类精度; 最后是基于 μ^0影像使用阈值分割方法的分类精度。

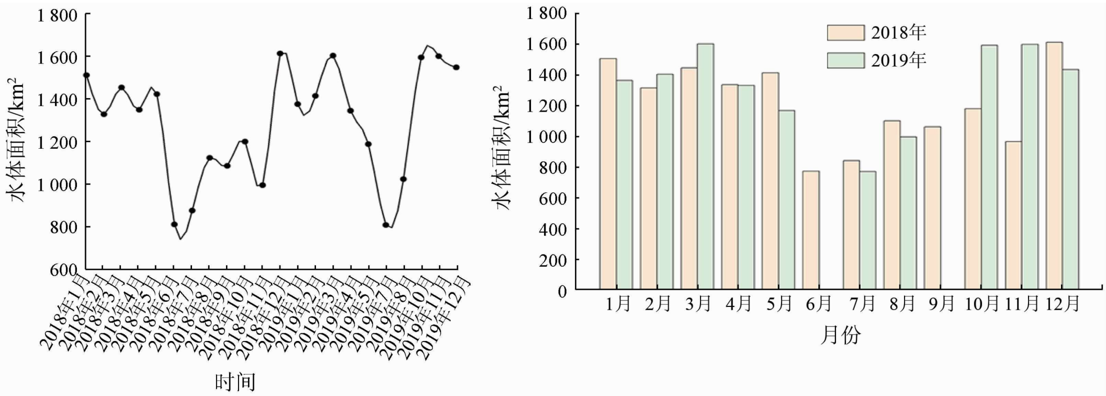
表 4 2019 年基于不同处理方法得到的数据的水体提取结果比较

Tab. 4 Comparison of water body extraction results based on data obtained by different processing methods in 2019 (km^2)

数据	2019 年 3 月		2019 年 8 月		2019 年 10 月		2019 年 12 月	
	面积	差值	面积	差值	面积	差值	面积	差值
AWEI 数据	1 580.91	—	984.74	—	1 605.67	—	1 423.34	—
σ^0数据	1 598.70	17.79	994.15	9.41	1 590.14	-15.53	1 432.09	8.75
μ^0数据	1 561.70	-19.21	990.74	6.00	1 619.00	13.33	1 409.57	-13.77
加权 σ^0和 μ^0数据	1 566.53	-14.38	996.37	11.63	1 613.01	7.34	1 434.72	11.38
RF 分类结果图	1 575.27	-5.64	979.91	-4.83	1 610.59	4.92	1 411.98	-11.36

3.2 基于 σ^0 的扎龙湿地水域面积时空动态变化定量分析

通过阈值分割法对 σ^0 数据进行水体提取,阈值设定范围在 0 ~ 0.01。利用 2018—2019 年逐月的 Sentinel - 1A 影像提取的扎龙湿地水域面积如表 4 所示,变化趋势如图 6 所示。



(a) 水域面积年内变化曲线 (b) 水域面积年际变化对比柱状图

图 6 基于 σ^0 数据提取的扎龙湿地水域面积变化趋势图(阈值分割法)

Fig. 6 Variation trend map of Zhalong Wetland water area based on σ^0 data extraction (threshold segmentation method)

3.2.1 扎龙湿地年内水域面积动态变化分析

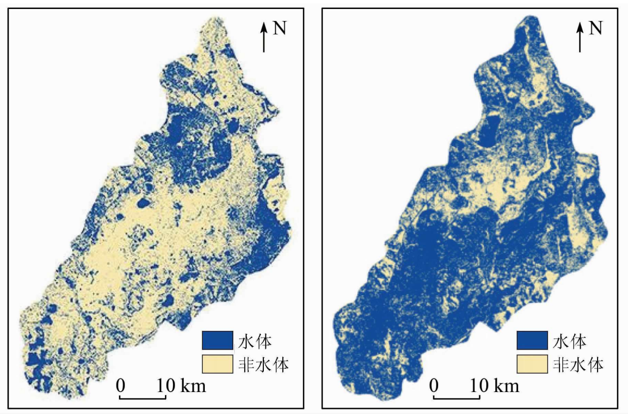
结合图 6(a)及表 5 可知,2018 年 1 月,扎龙湿地水域面积为 1 503.50 km^2,2018 年 2—5 月,湿地面积没有明显的变化,基本在 1 400 km^{2}左右,呈轻微波动性状态。从 6 月份开始,湿地水域面积发生巨大变化,6 月份面积陡降至年内最低谷 770.51 km^2,较上个月下降约 640 km^2,下降了 45.39%。7—11 月份整体上稍有回升,平均面积约为 1 027 km^2,其中,7 月份水域面积增幅较小,仅增至 839.16 km^2。8 月份增幅较大,增至 1 098.05 km^2,9 月份湿地水域面积呈现出略微的下降,降至 1 059.18 km^2,10 月份水域面积有些许回升,升至 1 177.69 km^2,11 月份又降至 964.1 km^2,12 月份水域面积快速回升至 1 609.32 km^2,这个阶段为 2018 年湿地水域面积增长速度最快的时期,达到年内最高峰,相比于年内最低的 6 月份,增加了 108.86%。

表 5 2018—2019 年基于 σ^0 数据提取的扎龙湿地水域面积(阈值分割法)

Tab. 5 Water area of Zhalong Wetland extracted from σ^0 data from 2018 to 2019 (threshold segmentation method) (km^2)

月份	2018 年水体面积	2019 年水体面积	年际差值
1 月	1 503.50	1 361.28	-142.22
2 月	1 311.79	1 401.55	89.76
3 月	1 442.78	1 598.70	155.92
4 月	1 333.78	1 329.30	-4.48
5 月	1 410.17	1 165.58	-244.59
6 月	770.51	—	—
7 月	839.16	768.11	-71.05
8 月	1 098.05	994.15	-103.9
9 月	1 059.18	—	—
10 月	1 177.69	1 590.14	412.45
11 月	964.10	1 595.90	631.8
12 月	1 609.32	1 432.09	-177.23

2019 年 1 月,扎龙湿地水域面积为 1 361.28 km^2,2 月份面积相对稳定,有少许回升达 1 401.55 km^2,3 月份持续上升至 1 598.70 km^2。4—7 月水域面积急剧下降,7 月份降至年内最低谷,仅有 768.11 km^2,与年内最高峰的 3 月份相比,7 月份下降 830.59 km^2,下降了 51.95%,如图 7(a)所示。8—12 月整体呈高速度增长趋势,10 月之时水域面积已达 1 590.14 km^2,11 月份与 10 月相比较为稳定,,12 月份呈现出略微下降趋势,降至 1 541.74 km^2,如图 7(b)所示。



(a) 2019 年 7 月 (b) 2019 年 12 月

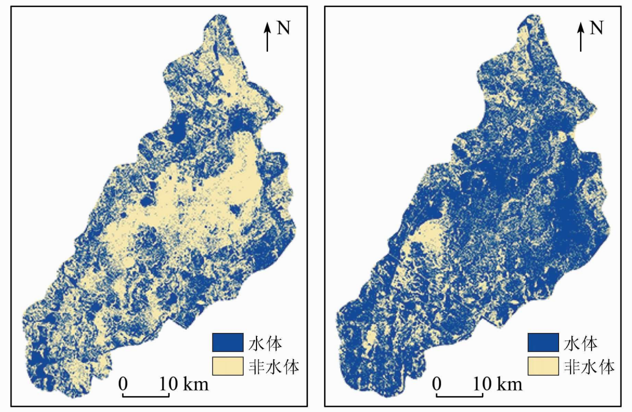
图 7 2019 年年内扎龙湿地水体变化对比示例图

Fig. 7 An example map of the comparison of water changes in the Neizhalong Wetland in 2019

3.2.2 扎龙湿地年际水域面积动态变化分析

结合图 6(b)及表 5 可知,2018 年湿地水域面积与 2019 年相比,1 月份 2018 年多出了 142.22 km^2,而与之相反,2 月份 2019 年多出了 89.76 km^2,同样的 3 月份中 2019 年的明显较多,多出了 155.92 km^2,4

月份则表现出相对持平状态,仅差 4.48 km^2。5 月份、7 月份和 8 月份 2018 年比 2019 年分别多出 244.59 km^2,71.05 km^2 和 103.9 km^2,10 月份呈现反转,2019 年多出了 412.45 km^2。11 月份出现了年际差别最大的峰值,2019 年水域面积多出了 631.8 km^2,如图 8 所示。最后 12 月份时 2018 年比 2019 年稍多 177.23 km^2。



(a) 2018 年 11 月　　(b) 2019 年 11 月

图 8　扎龙湿地年际水体变化对比示例图

Fig. 8　An example of the comparison of interannual water changes in Zhalong Wetland

据有效数据,2018 年扎龙湿地月平均水体面积为 1 269.03 km^2,2019 年扎龙湿地月平均水体面积为 1 334.65 km^2。总体上看,2019 年扎龙湿地水量比 2018 年更为充足。可以看出,虽然扎龙湿地水域面积有明显的季节性变化,但每年都有其变化的特征,会随着降雨量、温度及人为补水等多种因素而出现独特的现象。

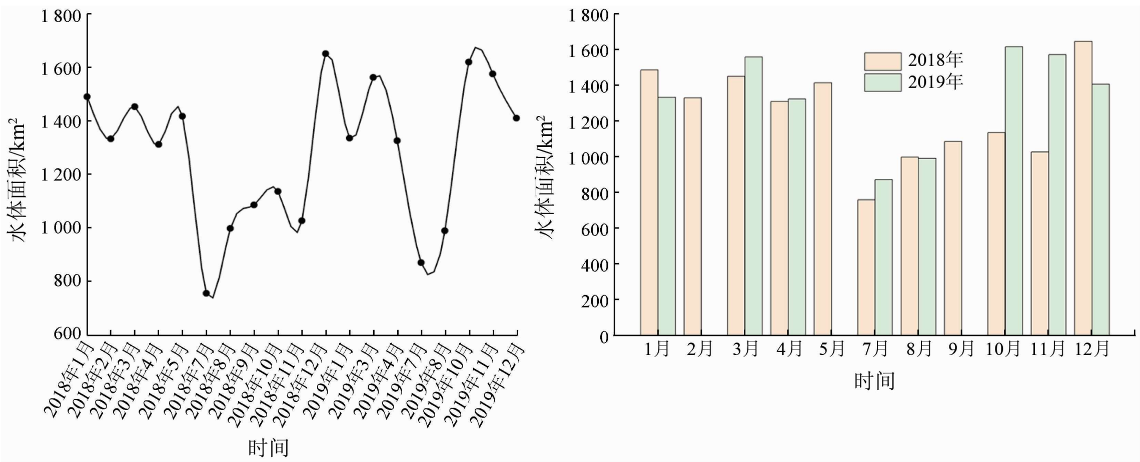
3.3　基于 μ^0 的扎龙湿地水域面积时空动态变化定量分析

通过阈值分割法对 μ^0 数据进行水体提取,阈值设定范围在 0 ~ 1。获取 2018—2019 年扎龙湿地逐月水域面积如表 6 所示,变化趋势如图 9 所示。

表 6　2018—2019 年基于 μ^0 数据提取的扎龙湿地水体面积(阈值分割法)

Tab. 6　Zhalong wetland water body area extracted based on μ^0 data from 2018 to 2019 (threshold segmentation method)　　(km^2)

月份	2018 年水体面积	2019 年水体面积	年际差值
1 月	1 490.04	1 335.07	－154.97
2 月	1 332.42	—	—
3 月	1 452.73	1 561.70	108.97
4 月	1 311.78	1 325.67	13.89
5 月	1 416.75	—	—
6 月	—	—	—
7 月	756.98	871.37	114.39
8 月	998.82	990.74	－8.08
9 月	1 086.31	—	—
10 月	1 136.89	1 619.00	482.11
11 月	1 027.91	1 575.05	547.14
12 月	1 649.70	1 409.57	－240.13



(a) 水域面积年内变化曲线　　(b) 水域面积年际变化对比柱状图

图 9　基于 μ^0 数据提取的扎龙湿地水域面积变化趋势图(阈值分割法)

Fig. 9　Change trend map of Zhalong wetland water area based on μ^0 data extraction (threshold segmentation method)

3.3.1　扎龙湿地年内水域面积动态变化分析

结合图 9(a)及表 6 可知,2018 年 1—5 月扎龙湿地水域面积呈"W"型波动起伏变化,大致在 1 300 ~ 1 500 km^2 范围间浮动,平均面积约为 1 400 km^2。7 月则呈现出 2018 年年内最低谷,降至 756.98 km^2,与 5 月相比,湿地水域面积发生巨大变化,减少了约 660 km^2。8—10 月水域面积持续缓慢回升,其中 8 月份回升幅度最大,升至 998.82 km^2, 11 月份面积降至 1 027.91 km^2,12 月份面积急速上升至 1 649.70 km^2,为年内水体面积最高峰,与面积最少的 7 月份相差了 892.72 km^2,增加了 117.93%。

2019 年 1 月,扎龙湿地水域面积为 1 335.07 km^2,3 月份面积呈现上升趋势,升至 1 561.70 km^2。4—7 月份总体面积呈下降趋势,4 月份降至 1 325.67 km^2,

7 月份降至 2019 年年内最低,仅有 871.37 km²。8—11 月扎龙湿地水域面积则呈现出高速状态,8 月份湿地水域面积缓慢回升至 990.74 km²,10 月份湿地水域面积呈现急速上升状态,升至 1 649.70 km²,为年内水域面积最高峰,同时年内水域面积最高峰的 10 月份与最低谷的 7 月份相比,面积增加了 747.63 km²,增加了 85.80%。11 月份与 10 月相比较为稳定,仅呈现出略微下降趋势,降至 1 575.05 km²,12 月份持续下降至 1 409.57 km²。

3.3.2 扎龙湿地年际水域面积动态变化分析

结合图 9(b)及表 6 可知,2018 年湿地水域面积与 2019 年相比,1 月份 2018 年多出了 154.97 km²,3 月份中 2019 年多出了 108.97 km²,4 月份则表现出相对持平状态。7 月份 2019 年多出了 114.39 km²,8 月份两年年表现出相对持平状态,2018 年仅比 2019 年多出 8.08 km²。10 月份呈现较大的反转,2019 年比 2018 年湿地水域面积多出了 482.11 km²。11 月份出现了 2 a 之间差别最大的峰值,2019 年比多出 547.14 km²。12 月份产生反转,由于 2018 年 12 月份水域面积增加较大而 2019 年 12 月份水域面积又略有减少,导致 2018 年比 2019 年多出了 240.13 km²。

总体上看,2019 年扎龙湿地水量比 2018 年更为充足,计算有效数据,2019 年扎龙湿地水域面积比 2018 年多出约 863.32 km²,根据调查,了解到 2019 年秋季东北的部分地区连续受暴雨侵袭而致洪水灾害,故 2019 年的秋季水量异乎 2018 年水量。

3.4 基于加权 σ^0 和 μ^0 的扎龙湿地水域面积时空动态变化定量分析

将通过加权 σ^0 和 μ^0 影像数据得出新的加权影像数据使用阈值分割法提取水体,利用 2018 年 3 月、8 月、10 月、12 月及 2019 年同期的影像提取的湿地水域面积如表 7 所示,变化趋势如图 10 所示。

由图 10 及表 7 可知,2018 年 3 月扎龙湿地水域面积为 1 461.76 km²。8 月份面积下降至 1 052.46 km²,与 3 月份对比差值巨大,达 409.3 km²。到 10 月份面积升至 1 167.33 km²,12 月升到了高峰,达 1 628.46 km²。2019 年 3 月扎龙湿地水域面积为 1 566.53 km²,8

表 7 基于加权 σ^0 与 μ^0 数据提取的水体面积(阈值分割法)

Tab. 7 Water body area extracted based on weighted σ^0 and μ^0 data (threshold segmentation method) (km²)

代表月份	2018 年	2019 年
3 月	1 461.76	1 566.53
8 月	1 052.46	996.37
10 月	1 167.33	1 613.01
12 月	1 628.46	1 434.72

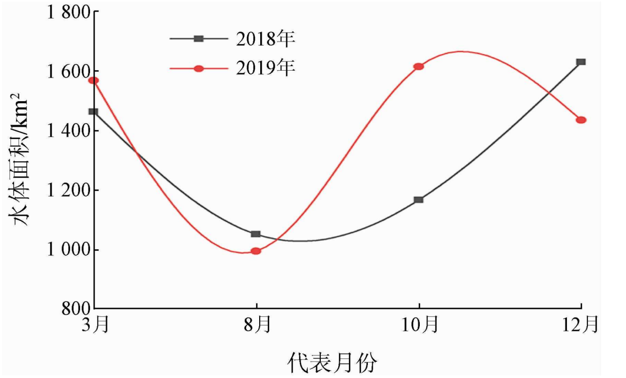


图 10 扎龙湿地基于加权 σ^0 与 μ^0 数据提取的年际水体面积折线图(阈值分割法)

Fig. 10 The inter – annual water body area ectracted based on the weighted σ^0 and μ^0 data in Zhalong Wetland (threshold segmentation method)

月份降至 996.37 km²,10 月升至 1 613.01 km²,与 8 月差值 616.64 km²,12 月份降至 1 434.72 km²。

整体上看,扎龙湿地在 10 月份的 2 个时期水域面积表现出了较为明显的差异,2019 年比 2018 年多出了约为 445 km²。其次变化较大的为 12 月,自 10 月水域面积骤增后 2019 年 12 月呈现出来了较大的降幅,降至 1 434.72 km²。

3.5 基于随机森林算法的扎龙湿地水域面积时空动态变化定量分析

选中 2018 年 3 月、8 月、10 月、12 月及 2019 年同期的影像,通过随机森林算法对多源遥感数据集提取的湿地水域面积如表 8 所示。

表 8 扎龙湿地基于随机森林算法提取水体面积

Tab. 8 Extraction of water area in Zhalong wetland based on random forest algorithm (km²)

代表月份	2018 年湿地水体面积	2019 年湿地水体面积
3 月	1 461.64	1 575.27
8 月	954.93	979.91
10 月	1 187.23	1 610.59
12 月	1 598.43	1 407.98

由表 8 可知,2018 年 3 月扎龙湿地水域面积为 1 461.64 km²,2018 年 8 月水域降至 954.93 km²,落差达 506.71 km²。2018 年 10 月扎龙湿地水域面积稍有回升,升至 1 187.23 km²,2018 年 12 月升到了高峰,比 2018 年春季的 3 月仍多出 136.79 km²,达 1 598.43 km²,且此时与较为干旱的 8 月相比多出了 643.5 km²。2019 年 3 月扎龙湿地水域面积为 1 575.27 km²,2019 年 8 月水域面积又降到低谷,降至 979.91 km²,下降了 37.79%。2019 年 10 月,水域面积回升至丰水期,升至 1 610.59 km²,12 月不升反降,面积降至 1 407.98 km²。2 a 皆呈现出的丰水期–枯水期–丰水期的变化趋势,其中 10 月份差异最大,2019 年 10 月比 2018 年 10 月多出了约 425 km²。

4 结语

本论文利用 Sentinel－1A 的 σ^0 和 μ^0 影像,通过阈值分割法和随机森林算法提取扎龙湿地 2018—2019 年逐月的水体信息,并对结果进行年内年际变化定量分析,获取具体研究结论如下:

1)通过使用 Sentinel－2A 的 AWEI 指数数据的辅助验证,得出结论: RF 算法的分类精度最高,平均差值绝对值为 6.69km^2; 其次为基于加权 σ^0 与 μ^0 影像使用阈值分割方法的分类精度,平均差值绝对值为 11.2 km^2; 再是基于 σ^0 影像使用阈值分割方法的分类精度,平均差值绝对值为 12.87 km^2; 最后是基于 μ^0 影像使用阈值分割方法的分类精度,该方法精度最低,平均差值绝对值为 13.07 km^2。

2)扎龙湿地年内变化: 水域面积变化规律和季节有很大关系,春季水域面积在 1 300 ~ 1 600 km^2 浮动,夏季在 700 ~ 1 000 km^2 浮动,秋季在 900 ~ 1 200 km^2 浮动,冬季在 1 300 ~ 1 600 km^2 浮动。

3)扎龙湿地年际变化: 总体上看,2019 年扎龙湿地水量比 2018 年更充足,因 2019 年秋季受暴雨侵袭,故 10 月和 11 月份扎龙湿地水域面积比 2018 年多出 1 044.25 km^2。扎龙湿地水体面积每年皆整体上呈现丰水－枯水－丰水的变化规律,其中不同年份又各自具有独特的水体积变化现象。

参考文献(References):

[1] 马 玥. 基于多源遥感信息综合的湿地土地覆被分类研究[D]. 长春:吉林大学,2018.
Ma Y. Land cover classification of wetland based on multi－source remote sensing[D]. Changchun: Jilin University, 2018.

[2] 张 鹏. 大庆市湿地动态变化分析[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2018.
Zhang P. Dynamic change analysis of Daqing wetland[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018.

[3] 刘 言. 湿地水文连通机理与模式分析——以莫莫格国家级自然保护区为例[D]. 长春:吉林大学,2020.
Liu Y. Mechanism and pattern analysis of wetland hydrological connectivity:Taking Momoge National Natural as an example[D]. Changchun: Jilin University, 2020.

[4] 王前进,王希群,陆诗雷,等. 生态补偿的经济学理论基础及中国的实践[J]. 林业经济,2019,41(1):3－23.
Wang Q J,Wang X Q,Lu S L,et al. The basis of economic theory on the ecological compensation and its practice in China[J]. Forestry Economy,2019,41(1): 3－23.

[5] 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 (Natural Science Edition),2020,60(2):147－161.

[6] 甄佳宁. 基于多时相遥感的长春湿地动态变化研究[D]. 长春:吉林大学,2016.
Zhen J N. The research of wetland dynamic change in Changchun based on multi－temporal remote sensing[D]. Changchun: Jilin University,2016.

[7] Jin H R,Huang C Q,Megan W L,et al. Monitoring of wetland inundation dynamics in the Delmarva Peninsula using Landsat time－series imagery from 1985 to 2011[J]. Remote Sensing of Environment,2017,190:26－41.

[8] 常文涛,陈 欢,常伟纲. 结合时间序列 Sentinel－1 数据和面向对象的湿地信息提取方法[J]. 北京测绘,2020,34(3):365－370.
Chang W T,Chen H,Chang W G. Time series Sentinel－1 data and object－oriented wetland information extraction method[J]. Beijing Surveying and Mapping,2020,34(3):365－370.

[9] 徐怡波. 基于 ENVISAT ASAR 数据的洞庭湖湿地遥感监测研究[D]. 南京:南京林业大学,2010.
Xu Y B. Study on the remote sensing monitoring of wetland in the Dongting Lake using ENVISAT ASAR data[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University,2010.

[10] 付波霖,蓝斐芜,邓腾芳,等. 基于 DInSAR 的洪河国家级自然保护区沼泽水位相对变化量监测研究[J]. 湿地科学,2021,19(1):27－39.
Fu B L,Lan F W,Deng T F,et al. Monitoring of relative variation of water level of marshes in Honghe National Nature Reserve using DInSAR technique[J]. Wetland Science,2021,19(1): 27－39.

[11] 贺广均. 联合 SAR 与光学遥感数据的山区积雪识别研究[D]. 南京:南京大学,2015.
He G J. Snow recognition in mountain areas based on SAR and optical remote sensing data[D]. Nanjing: Nanjing University,2015.

[12] 关韵桐. 基于 SAR 与光学数据的高原湿地土壤水分反演研究[D]. 昆明:云南师范大学,2019.
Guan Y T. Inversion of soil moisture in plateau wetland based on SAR and optical data[D]. Kunming: Yunnan Normal University,2019.

[13] Mizuochia H,Hiyama T,Ohta T,et al. Development and evaluation of a lookup－table－based approach to data fusion for seasonal wetlands monitoring: An integrated use of AMSR series,MODIS,and Landsat[J]. Remote Sensing of Environment,2017,199: 370－388.

[14] 常文涛,王 浩,宁晓刚,等. 融合 Sentinel－2 红边波段和 Sentinel－1 雷达波段影像的扎龙湿地信息提取[J]. 湿地科学,2020,18(1):10－19.
Chang W T,Wang H,Ning X G,et al. Extraction of Zhalong wetlands information based on images of Sentinel－2 red－edge bands and Sentinel－1 Radar bands[J]. Wetland Science,2020,18(1): 10－19.

[15] 李 哲,宫兆宁,刘先林,等. 基于面向对象多端元混解模型的植被覆盖度反演及其时空分布研究[J]. 遥感技术与应用,2018,33(6):1149－1158.
Li Z,Gong Z N,Liu X L,et al. Vegetation coverage retrieval and spatio－temporal distribution based on object－oriented multi－

terminal mixed model[J]. Remote Sensing Technology and Application,2018,33(6):1149 - 1158.

[16] 刘 瑶,余自强,范杰平,等. 鄱阳湖丰水期水体后向散射特性研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版),2019,53(2):283 - 289.
Liu Y,Yu Z Q,Fan J P,et al. The characters of backscattering coefficient during flood period in Poyang Lake[J]. Journal of Central China Normal University (Natural Science Edition),2019,53(2):283 - 289.

[17] 贾亮亮,汪小钦,王 峰. 基于波段运算和纹理特征的高分一号多光谱数据云检测[J]. 遥感信息,2018,33(5):62 - 68.
Jia L L,Wang X Q,Wang F. Cloud detection based on band operation texture feature for GF - 1 multispectral data[J]. Remote Sensing Information,2018,33(5):62 - 68.

[18] 王 婕. 基于分类导向的三维联合头部姿态估计与人脸关键点定位[D]. 合肥:中国科学技术大学,2017.
Wang J. Joint 3D head pose and face landmarks regression based on classification - guided method[D]. Hefei: University of Science and Technology of China,2017.

[19] Gudina L F,Henrik M,Rasmus F,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.

[20] 王一帆,徐涵秋. 基于客观阈值与随机森林 Gini 指标的水体遥感指数对比[J]. 遥感技术与应用,2020,35(5):1089 - 1098.
Wang Y F,Xu H Q. Comparison of remote sensing water indices based on objective threshold value and the random forest gini coefficient[J]. Remote Sensing Technology and Application,2020,35(5):1089 - 1098.

Monitoring of spatial - temporal dynamic changes in water surface in marshes based on multi - temporal Sentinel - 1A data

WEI Chang, FU Bolin, QIN Jiaoling, WANG Yanan, CHEN Zhihan, LIU Bing

(*College of Geomatics and Geoinformation*, *Guilin University of Technology*, *Guilin* 541000, *China*)

Abstract: Water is an important factor in the formation and maintenance of wetland ecosystems. Monitoring the changes in the water area of wetlands is of great significance for wetland conservation. Taking Sentinel - 1A data from 2018 to 2019 as the data source, this study calculated the intra - and inter - annual synthetic aperture radar (SAR) backscattering coefficient (σ^0) and coherence coefficient (μ^0) images of the Zhalong Wetland. Then, this study assigned weights according to the proximity to water bodies of color optical images and extracted the weighted images of σ^0 and μ^0. Finally, this study extracted the wetland water bodies using the threshold segmentation method and random forest algorithm. The purpose is to monitor the dynamic variations in the wetland water area and explore the intra - and inter - annual variation rules of the wetland water body. The results are as follows. The random forest algorithm yielded the highest extraction accuracy of water bodies, with an absolute value of the mean difference of representative months was 6.69 km^2. The threshold segmentation method based on μ^0 images yielded the lowest classification accuracy of water bodies, with an absolute value of the mean difference of 13.07 km^2. Overall, the intra - annual water area of the Zhalong Wetland showed significant seasonal variations during 2018—2019. The water area fluctuated in the ranges of 1 300 ~ 1 600 km^2 during late spring and early summer and 700 ~ 900 km^2 during late summer and early autumn. The inter - annual water area varied with conditions such as climate and temperature. In particular, the wetland water area in October and November 2019 was approximately 1 050 km^2 greater than that in 2018 due to large amounts of rainfall. As shown by the calculation based on effective data, the water area in 2019 was about 550 km^2 greater than that in 2018 in the Zhalong Wetland.

Keywords: intra - and inter - annual variations of wetland water surface; Sentinel - 1A; backscattering coefficient; coherence coefficient; threshold segmentation

(责任编辑: 张 仙)