

doi: 10. 6046/gtzyyg. 2020170

引用格式: 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 remote sensing image water extraction [J]. Remote Sensing for Land and Resources ,2021,33(1):9-19.)

遥感影像水体提取研究综述

苏龙飞,李振轩,高飞,余敏

(合肥工业大学土木与水利工程学院,合肥 230000)

摘要:水是非常重要的资源,是一切人类与生物得以生存和发展的重要物质基础,水体提取便于了解现有的水资源概况,有助于对水资源合理的规划及治理,对人类的生活及社会活动具有重大影响。传统的人工方法费时费力,利用卫星遥感数据进行水体位置、面积、形状和河宽等水体参数的信息提取,已经成为一种快速获取水体参数的有效方法和手段。在广泛文献调研的基础上,阐述遥感影像水体提取的基本思想及其发展历程,对学者在水体提取的基本方法和现状进行较全面的综述,分析各种方法的优缺点,说明当前水体提取存在的问题和研究前景,使读者直观了解这一领域并为其研究提供一定思路。

关键词: 水体提取; 水体指数; 阈值法; 面向对象; 雷达

中图法分类号: P 237 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2021)01-0009-11

0 引言

水是非常重要的资源,对人们生活、生产等方面发挥着重要作用。快速准确地获取水体信息及其分布对于国家资源管理、规划发展、灾害快速评估等方面具有重要意义^[1]。随着技术的发展,遥感影像在水体提取方面的作用日渐明显^[2]。

遥感影像主要利用水体在不同波段上与其他地物之间的光谱差异来进行水体提取。经过各国研究者几十年的共同努力,水体的提取方法层出不穷,为了对水体提取方法有一个较为全面的了解,在参考国内外大量文献的基础上,本文基于光学影像及雷达影像详细阐述不同时间段水体提取的发展过程,从原理出发阐述不同方法进行水体提取的优劣势、适用范围及提取效果。通过横向及纵向对比水体提取方法,深入了解水体提取方法之间的差异性、互补性,分析当下存在的问题,希望能够更加直观地了解这一领域的研究进展。

1 发展与现状

遥感水体提取的发展历经了几十年,经历了从目视解译,到光谱特征提取,自动分类再到光谱与空间

信息结合等多个阶段^[3],水体提取经历了从最初只能利用人工目视辨别的方法,到以半自动化为主的光谱、纹理和空间等信息的提取,再到目前热门研究的基于深度学习的全自动化水体高精度提取,提取的方法层出不穷,总体目标基本实现水体的高精度自动提取。

2010 年之前的水体提取受限于遥感技术与影像质量的影响,只能进行简单基于像素波段间的计算,周成虎等^[4]在 TM 影像中发现水体具有灰度值 $TM2 + TM3 > TM4 + TM5$ 的谱间特征,Mcfeeters 根据植被指数的构建原理,基于 TM 影像利用绿光波段和近红外波段构建了归一化差异水体指数(normalized difference water index,NDWI)^[5],自水体指数的创建以来,阈值法的水体提取迎来了井喷时期,各种针对不同条件的水体指数方法层出不穷,成为水体提取的主要方法,期间随着计算机技术的发展,以阈值法为基础基于机器学习的决策树和支持向量机(support vector machine,SVM)方法陆续应用到水体提取中。

随着近 10 a 三高遥感数据的出现以及水体遥感定量与反演研究的深入,面向对象的技术逐步发展起来,2010 年之后面向对象的水体提取开始迅速发展,使得水体提取精度更高。崔齐等^[6]提出一种基于面向对象的矢量约束来实现高空间分辨率遥感影像水体提取的方法,该方法能够准确提取细小水体信息。传统的阈值法提取精度有限,而且受影像质量及外界

收稿日期: 2020-06-15; 修订日期: 2020-08-18

基金项目: 2018 年安徽省测绘科技专项资金资助项目“3S 支持下引江济淮工程生态环境监测”(编号: CHZX201801)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目“多源遥感影像变化检测研究”(编号: JZ2019HGBZ0148)共同资助。

第一作者: 苏龙飞(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向为遥感影像信息提取。Email: 2357090110@qq.com。

通信作者: 李振轩(1991-),男,博士,讲师,主要研究方向为遥感影像信息提取、变化检测。Email: zxli2019@hfut.edu.cn。

条件影响较大,面向对象的出现很好地克服这一点,抗噪性强,随着影像空间分辨率提高,影像地物的细微特征变得更加清晰,通过纹理信息及其空间信息的结合运用,水体提取精度也更高。

从 2015 年开始水体提取的研究越来越广泛,其他技术相继出现,其中具有代表性的主要基于主动式雷达影像的水体提取及基于机器学习的深度学习方法在水体中的应用,光学影像在水体识别时受云层和阴影的影响较大,SAR 图像由其主动性特点在浅水和阴影区域可以提供有价值的信息,所以利用结合雷达数据的优势能够有助于水体的提取。半自动化的技术手段日益成熟,由此在机器学习衍生下的深度学习,运用于人脑的运转体制,自动学习知识进行全自动水体提取,已成为当下研究的热门。

遥感影像及地形的复杂性导致很难有一种方法适用所有的影像,不同的影像数据需要用到不同的方法,在以阈值法和分类器法为主要水体提取基础下,应用较多的如基于机器学习的 BP 神经网络和马尔科

夫随机场模型、基于 RS 与 GIS 结合的水体提取模型、基于监督分类的光谱匹配方法等,这些方法主要针对特殊地形或精度要求偏高的区域,算法的可泛化性较低,这些方法穿插在水体提取研究进程中。

2 水体提取分类依据及基础

2.1 水体提取分类依据

水体提取的方法很多,很多学者也进行了分类,大体上有一个分类框架,主要是基于光学影像的分类,比如王航等^[7]将水体提取分成3类,分别是基于阈值法、分类器法和自动化法;李丹等^[8]更深一步进行总结,引入近些年发展火热的基于雷达影像数据的水体提取,总体而言,水体提取主要以光学影像信息为主,雷达影像是近些年发展起来并迅速应用到水体提取的领域之中,基于此在该分类基础上从数据源角度下细化具体的提取方法及应用领域,具体的分类方法如图 1 所示。

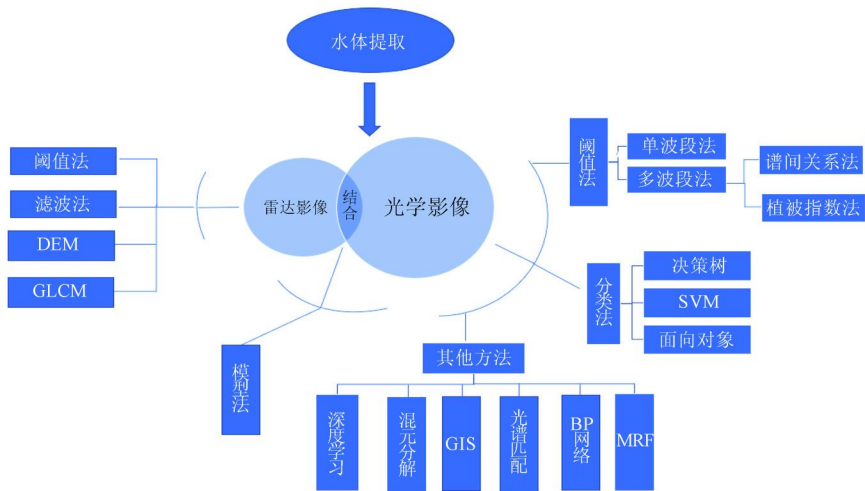


Fig. 1 Classification of water extraction methods

2.2 水体提取基础

卫星遥感影像是基于不同地物对电磁波的不同反应及地物本身的热辐射信息产生,江河湖泊的水一般不是纯净水,主要由透射入水的光与水中叶绿素、泥沙、水深及其热特征等相互作用的结果,所以水体一般在遥感影像上呈现为绿色的^[7]。基于上述原理,水体在光谱反应上一般在蓝绿光波段吸收率较低,其他波段尤其是红外波段吸收率很高,而植被和土壤在这 2 个波段吸收的能量较小,反射率较高,这使得水体在这 2 个波段与植被和土壤有明显区别^[9]。因此在遥感中常利用近红外波段构建模型提取水体信息,水体在电磁波各波谱段上反映的特征是利用遥感技术提取水体的基础^[10]。典型的

地物光谱特征曲线如图 2 所示。

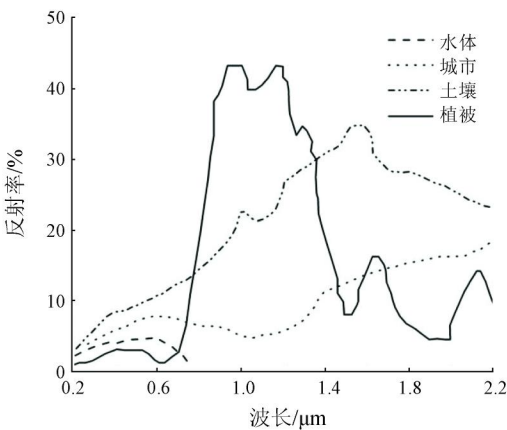


图 2 典型地物的光谱特征曲线^[5]

Fig. 2 Spectral characteristic curves of typical features^[5]

3 水体提取方法

3.1 基于光学影像的水体提取

3.1.1 阈值法

阈值法也称为模型分类法,通过分析水体光谱特征曲线选择合适的波段构建模型,在模型处理基础上选择合适的阈值分离水体,阈值法又可分为单波段法和多波段法,其中多波段法还可分为谱间关系法和水体指数法。

1)单波段法。早期遥感影像的水体提取主要基于单波段法,利用水体在近红外或中红外波段强烈吸收特征来识别水体信息。Frazier 等^[11]分别利用 TM4, TM5 和 TM7 波段采用阈值法进行澳大利亚 Wagga 湖的水体进行提取,结果表明 TM5 提取效果更好;毕海芸等^[12]采用 TM 影像,通过对比单波段法、多波段谱间关系法和水体指数法 3 种方法,确定单波段法一般适用于地势平坦、背景简单的地区。但单波段法已逐渐被多波段法取代,大部分研究都是融合单波段法和多波段法协同提取水体信息。

2)多波段法。遥感影像不单只有一个波段,早期的影像,比如 Landsat 系列影像都具有至少 4 个波段,利用不同波段之间的相互关系进行水体提取比单一波段的提取效果更好,基于多个波段的水体提取方法占据水体提取的主要地位,主要分为谱间关系法和水体指数法。

谱间关系法主要通过分析地物在遥感影像原始波段,或者原始波段转换得到的特征波段的光谱特征曲线,构建逻辑判断规则来提取水体。周成虎等^[4]基于 TM 影像分析发现水体具有灰度值 $TM2 + TM3 > TM4 + TM5$ 的谱间特征,从而实现水体信息提取;汪金花等^[13]利用唐山地区影像分析构建了谱间关系和比值模型 $(TM2 + TM3) - (TM4 + TM5) > 0$ 且 $TM4/TM2 < 0.9$ 来提取水体信息,能够一定程度抑制阴影和建筑区的影响,对细小河流的提取效果不太好,比较适合山区水体的提取;都金康等^[10]通过试验得出,多波段谱间关系法比较适合地形起伏较小的地区,对阴影比较敏感,对谱间关系法进行修正和补充才能使其更好地适用于山地区域。

单波段法与谱间关系法受限比较多,因此, Mcfeeters^[5]利用 TM 影像在绿光波段和近红外波段构建了 NDWI,它能够很好抑制植被信息,同时削弱了土壤、建筑物和阴影的影响,突出水体信息。水体指数法通过分析水体光谱特征选取与水体识别密切相关的波段,构建不同的水体指数模型并给定相应的阈值,实现对水体信息的提取。目前,多波段法中水体指数法的应用频次最高。然而,不同的背景信息对水体提取精确性的影响不同,NDWI 不能很好地适合所有的现实状态。在此基础上,后面的研究学者根据不同的背景地物,结合水体光谱特征,提出了多种相关的水体指数,表 1 按照时间发展总结的常用水体指数提取方法。

表 1 几种常用的水体指数及其模型
Tab. 1 Several commonly used water body indexes and their models

植被指数	模型公式 ^①	特点
归一化差异水体指数(NDWI)	$NDWI = (G - NIR) / (G + NIR)$	能够抑制植被信息,突出水体;对建筑物和土壤的分离有一定影响;受冰雪、薄云和山体阴影影响较大,适用于地势平坦地区
归一化差异水体指数(NDWI3) ^[14]	$NDWI3 = (NIR - MIR) / (NIR + MIR)$	在城镇区域应用较好;受山体阴影影响较大
改进的归一化差异水体指数(MNDWI) ^[15]	$MNDWI = (G - MIR) / (G + MIR)$	能够较好地去除居民地和土壤等影响,突出水体;受阴影影响较大
增强水体指数(EWI) ^[16]	$EWI = (G - NIR - SWIR) / (G + NIR + SWIR)$	能够抑制居民地、土壤和植被等噪声;易受到阴影及浅滩的影响;适合半干旱地区的水体提取
新型水体指数(NWI) ^[17]	$NWI = [B - (NIR + MIR + FIR)] / [B + NIR + MIR + FIR]$	能够较好地地区分水体和阴影、土壤和建筑物的影响,受噪声影响较小,普遍适用于一般地区,且提取精度较高
修订归一化差异水体指数(RNDWI) ^[18]	$RNDWI = (SWIR - R) / (SWIR + R)$	能削弱混合像元和山体阴影的影响,较好地提取水陆边界;一般适用于山区等地形起伏较大地区
Gauss 归一化差异水体指数(GNDWI) ^[19]	$GNDWI_{i,j} = NDWI_{i,j} - NDWI' / \sigma$	针对线状河流水体的精确提取,可较好地保留水体的完整性;受云和阴影的影响较大,需要用到高程信息,实现过程相对比较麻烦,但提取精度较高
自动水体提取指数 AWEInsh, (AWEIsh) ^[20]	$AWEInsh = 4(\rho_G - \rho_{SWIR1}) - (0.25\rho_{NIR} + 2.75\rho_{SWIR2})$ $AWEIsh = \rho_B + 2.5\rho_G - 1.5(\rho_{NIR} + \rho_{SWIR1}) - 0.25\rho_{SWIR2}$	能够抑制地形阴影和暗表面;受冰雪等高反射表面影响较大

(续表)

植被指数	模型公式 ^①	特点
伪归一化水体差异指数 FNDWI ^[21]	$FNDWI = (FG - NIR) / (FG + NIR)$	较好地区分水体与建筑物,易受冰雪、薄云和山体阴影影响,不适用于山区等地形起伏较大区域
阴影水体指数 SWI ^[22]	$SWI = B + G - NIR$	较好地区分水体和阴影,能削弱积雪和山体裸地的影响,适用于山区的水体提取

①: $R, G, B, NIR, SWIR, MIR, FIR$ 分别为红光、绿光、蓝光、近红外、短波红外、中红外、远红外像元值; $GNDWI_{i,j}$ 为点 (i, j) 处的 Gauss 归一化水体指数; $NDWI_{i,j}$ 为点 (i, j) 处的归一化差异水体指数; $NDWI'$ 为影像所有像元的 NDWI 均值; σ 为影像所有像元的 NDWI 标准差; ρ 代表反射率; FG 为构建的伪绿波段,具体公式参考文献[21]。

3.1.2 分类器法

随着信息时代飞速发展,遥感数据向高空间分辨率影像发展,传统的单波段阈值法和多波段阈值法主要基于中低空间分辨率影像,对边缘部分提取不准确,不适用于细小水体信息的提取,从而影响水体提取的精度。高空间分辨率卫星影像具有丰富的空间及纹理信息,研究者们通过结合光谱、空间和纹理等特征构建了影像分类提取的方法,能够进行更精细的水体信息提取。目前水体提取中采用机器学习方法主要有 SVM 法、决策树法和面向对象法,其中以面向对象法应用最广。

1)SVM 法。SVM 分类法是一种建立在统计学习理论基础上的机器学习方法^[23]。在样本量较少的情况下,也能获得良好的分类结果^[24]。SVM 方法性能主要取决于核函数类型的选择和核函数参数的设置^[25]。基于上述理论知识,段秋亚等^[26]在鄱阳湖区选取 2 块不同尺度和复杂度的 GF-1 卫星影像,分别采用 SVM、面向对象法和水体指数法进行水体提取,结果表明 SVM 的提取精度最高;Paul 等^[27]的研究表明,即使标记样本数量较少,SVM 分类方法也能较好地 从遥感影像中提取水体信息;张德军等^[28]基于 GF-1 数据利用 SVM 进行三峡库区水体提取,发现 SVM 总体精度良好,但是在细节方面,如河流边界、细小图版处理不好,需要结合其他方法一起处理。

2)决策树法。决策树分类是一种基于空间数据挖掘和知识发现的分类方法^[29],通过不同的分类属性实现数据的分类。其算法的关键是分类属性的选择,最著名的算法是 ID3 系列,主要包括 ID3, C4.5, C5.0 这 3 个版本^[30]。决策树法分类规则结构简单、直观、容易理解,易于后期修正,能够有效抑制训练样本噪声,并有效解决影像数据属性缺失问题^[31]。都金康等^[10]利用 SPOT4 影像,采用决策树模型结合阈值和形状指数有效去除了水中的阴影;陈超等^[32]基于面向灾后的水体,利用决策树模型,在影像分割的基础上,结合影像的空间、几何、光谱及纹理信息,有效提取灾后复杂的水体。

3)面向对象法。传统基于像元的分类方法得到的提取信息比较细碎,而且因为影像分辨率的问题,边缘区域混合像元往往会导致提取不准确。根

据一些学者的研究表明^[33-34]在可见光—近红外范围内,水体的光谱特性与水面粗糙度或纹理有关,高分影像的出现,使得水体提取可以兼顾到水面纹理信息,使目标从像素层次上升到对象层次^[35]。影像分割是面向对象分类的关键^[36],面向对象法通过各种分割算法使同质像元组成大小不同的对象,从而实现以对象为单元的影像信息提取^[37]。易康软件是现有最常用的分割软件,其中多尺度分割算法是现今面向对象最常用的分割方法。毛莹莹等^[38]采用 Sentinel-2 数据,通过结合 NDWI 和面向对象方法,选择了山区和城区影像分别进行水体信息提取,结果表明面向对象的提取精度更高。在城市区域的水体提取中水体受阴影的干扰较大,徐涛等^[39]在进行多尺度分割后,结合了光谱信息和空间拓扑关系较好地区分了城市的阴影和水体;王俊海等^[40]在利用简单的光谱信息、形状信息的基础下结合纹理信息很好区分了城市阴影对水体影响。细小水体的精确提取是水体提取的难点,崔齐等^[6]提出一种基于面向对象技术的矢量约束实现高空间分辨率遥感影像水体提取的方法,该方法不仅能有效抑制建筑物和地物阴影等的影响,而且可以准确提取细小水体信息。

面向对象方法水体提取与传统的基于像元的阈值法相比精度更高,具有良好的抗噪能力,能够利用更加丰富的空间及纹理信息,使得水体提取的精度更高。

3.1.3 其他方法

水体提取的方法除了上述传统的方法,还有不少学者在这基础上探索研究了一些新的方法,这些方法对于某些区域或者不同传感器的影像提取的效果更好,精度更高。主要包括基于 GIS 技术、混合像元分解、BP 神经网络、MRF 随机场、光谱角匹配及深度学习的方法,其中以深度学习为主,是近年来的研究热门。

1)基于 GIS 技术辅助。阈值法和分类器法在背景地物简单,水体物化构成相对一致的大面积水域、河流、湖泊已初步实现快速自动提取,然而现实中,多数水体非纯净水,无法进行阈值法和分类器法的自动提取。借助于 ArcGIS 软件水文分析模块生

成水系图,利用空间分析缓冲区工具在河道两侧进行缓冲扩张,形成河流提取目标区域,利用“全局-局部”^[41]方法进行水体提取能有效改善这一问题。Sui 等^[42]借助于 GIS 技术整合了初始水体提取、迭代分割、变化检测 3 个模块,实现了水体提取过程的自动化;杨旭等^[43]基于 RS 与 GIS 技术,利用 NDWI 并结合波段信息提取了流域主干河流和面状水域。结合 GIS 实现水体的提取有助于实现水体的自动化提取进程,提高水体提取精度。

2) 基于混合像元分解。水体反射率光谱由于是多种水质参数综合作用的结果,本质上是一种混合光谱。现有的水体提取方法大多以像元为基础,中低空间分辨率的影像受混合像元干扰较大,影响水体提取精度,所以深入像元内部,从亚像元的角度提取水体,有助于水体提取精度的提升。王铭^[44]基于东北地区混合像元分解的方法有效提取了该区域水体,对于细小河流水体的提取精度相较于传统方法有了明显的提高,但是过程计算更复杂一点;孔美美^[45]利用 FCLS 混合像元分解法实现了杏林湾水库的提取及变化检测,提取精度更高,适用于水库水体的提取。

3) 基于 BP 神经网络。人工神经网络 (artificial neural network, ANN), 由于其非线性、容错性、自适应性等特征,近年来在遥感领域中得到了广泛的应用。其中采用误差反向传播算法训练的 BP 神经网络最为常用,并且在影像分类以及模式识别等领域表现出了较好的性能。杨文亮等^[46]在 TM 影像中利用 BP 神经网络结合 4 个特征信息在不设置阈值的情况下实现较高精度水体信息提取;王知音^[47]利用 BP 神经网络综合提取水体的各种特征,对于大面积水体、河流及浅水区有较好的提取效果。

4) 基于 MRF 随机场。近年来,基于 MRF 模型的图像分割算法广泛运用于各种目标与背景分界不清晰、前景背景相似等情况复杂的图像中提取目标。适合水体边缘与水体边界交界处存在浅滩、水坑等混杂区域的水体提取。李士进等^[48]针对阈值法和分类器法在水陆边界提取不够精确、易产生误提取和漏提取等问题,提出一种基于混合特征空间与 MRF 模型图像分割算法的水体提取新算法,该方法通过实验表明能够自动对周边环境复杂的水库水体信息进行较高精度的提取;唐德可等^[49]基于 SAR 数据有效利用 MRF 模型通过实验实现了洪涝受灾区域的快速、精确水体提取。

5) 基于光谱角匹配。高光谱遥感的发展及其所具有的波段众多、光谱精细的独特特征,为专题信息提取开辟了一个新的有力途径。光谱角匹配法主

要是依据地物光谱曲线的差异来进行地物分类,是监督分类的一种。齐庆超等^[50]分别利用水体指数法和波段关系提取和光谱角匹配算法对黄河小浪底水库周边区域进行水体提取,实验结果表明光谱角匹配法受阴影影响较小提取精度在 99% 以上;张伟等^[51]提出了一种改进光谱角匹配的水体信息提取方法,实验对比分析了该方法与传统方法的水体信息提取结果,结果表明,该方法相较传统方法在区分水体与云阴影表现良好,水体提取精度较高。

6) 基于深度学习。采用遥感数据提取水体信息已有很多方法,这些方法的适用性并不强,自动化程度不高。深度学习作为近几年高新技术最突出的代表,自 2006 年, Hinton 团队在科学杂志上公开发表相关研究内容后,便在各行业引起广泛关注^[52]。深度学习方法具有强大的特征表达能力、可以通过深度神经网络结构自动从数据中提取特征学习等独特优势^[53],是实现水体的全自动提取的关键。基于传统方法的水体提取逐渐向基于机器学习和深度学习方向发展,一些学者做了一些研究^[54-55],其中以深度卷积神经网络为主。王雪等^[56]分别运用构建的全卷积神经网络模型及传统的阈值法和基于图论的 GrabCut 算法进行水体提取试验,结果表明,全卷积神经网络模型比传统的阈值法和基于图论的 GrabCut 算法提取水体自动化程度更高、适用性及提取精度更好;梁泽毓^[57]基于多元遥感数据下的深度学习方法,完成了长江安徽段的水体提取,实现了水体的全自动化提取。

3.2 基于雷达遥感数据提取方法

SAR 图像虽然具有空间分辨率较低和噪声较多的特点,但是在浅水和阴影区域可以提供有价值的信息。所以利用雷达数据的优势能够有助于水体的提取。目前,基于雷达遥感数据的水体信息提取方法以灰度阈值分割法、基于 DEM 数据滤波法和基于灰度共生矩阵纹理信息的方法居多。

1) 阈值法。阈值法是雷达影像水体提取比较常用的一种方法。SAR 图像的灰度阈值分割法是依据表面近似平滑的水体在 SAR 图像中散射值低、表现为暗区的特点,通过阈值将影像分为水体与非水体的二值图。目前应用较多的灰度阈值分割法主要包括最大类间方差算法、熵阈值法及双峰直方图法等。曹云刚等^[58]利用 ASAR 数据,基于阈值的方法实现了水体的提取;申邵洪等^[59]提出了一种基于 KI 算法的水面信息自动变化检测方法,快速准确地提取出水体信息;李景刚等^[60]设计了改进的最大类间方差阈值法进行实验,结果表明,改进方法确定的最优阈值比双峰法和 Otsu 法提取出来的水体

信息精度更高。

2) 基于 DEM 数据。当 SAR 图像所对应的区域为多山地区时, 由于地形的原因会在 SAR 图像上产生地形阴影, 用阈值法进行水体提取这些阴影也会被当作水体提取出来。因此利用 DEM 模拟 SAR 并依据阴影亮度值低的特征, 从模拟 SAR 图像中将阴影提取出来, 就可以剔除水体中的阴影部分。杨存建等^[61]结合 SAR 和 DEM 数据消除了水体中阴影, 实现了洪水的半自动提取; Hong 等^[62]结合 SAR、光学影像和 DEM 数据提高了水体信息提取的精度。

3) 基于滤波法。针对相干斑噪声在水体提取中的影响, 滤波法是目前应用比较多且有效的方法。主要以基于小波变换和形态学滤波为主, 应用不同的滤波算法来抑制 SAR 图像的斑点噪声, 进而提高水体的提取效率和精度。王栋等^[63]从灰度数学形态学基本运算入手, 构成一种序列非线性滤波模型可以有效提取 SAR 图像中低亮度目标区域的水体区域; Klemenja 等^[64]结合形态学滤波和监督分类方法, 自动选择训练样本提取河网, 结果表明在不需要任何额外用户输入的前提下, 该方法可以应用于不同的数据集。但是, 基于小波变换和各种算法得到的水体边缘线不够连续光滑, 而且形态学滤波由于形态结构元素的存在会引起边缘特征的误差, 检测精度较低。

4) 基于灰度共生矩阵。随着 SAR 图像空间分辨率的不断提高, SAR 图像亮度范围扩大, 且纹理结构信息更加丰富。描述纹理特征的方法以灰度共生矩阵 GLCM 的应用最为广泛, 主要是基于灰度共生矩阵提取纹理特征, 建立多维特征空间, 通过样本采集, 可以减弱 SAR 图像的斑点噪声, 使分类结果的“椒盐现象”明显减少, 提高了水体的提取精度。Lyu 等^[65]结合灰度共生矩阵与 SVM 来提取水体目标区域, 与传统的阈值法相比, 该方法能更好地区分水域和其他地形; 胡德勇等^[66]基于纹理信息以及 SVM 分类研究了单波段单极化 SAR 图像水体和居民地信息提取方法准确地提取了水体和居民地信息。但是, 基于灰度共生矩阵提取纹理信息的计算量很大, 灰度量化导致损失大量的纹理信息, 纹理提取的窗口大小也需要不断调试。

3.3 光学与雷达遥感数据结合的提取方法

光学影像具有高空间分辨率和丰富的光谱信息, 但是在水体识别时受云层和阴影的影响较大, 而 SAR 图像其主动性探测的特性在浅水和阴影区域可以提供有价值的信息, 对于光学影像提取比较困难的地方可以进行优势的互补。近些年一些研究者通过结合 SAR 和光学遥感影像, 或者辅助 DEM 等

信息, 大体上利用光学遥感进行水体的粗提取, 在粗提取基础上利用雷达影像结合 DEM 数据进行水体的精细提取, 构建相应的模型来实现对水体的提取。Zeng 等^[67]利用光学影像和 SAR 影像结合实现了水体提取; Irwin 等^[68]建立 SAR、光学遥感影像和机载激光雷达 3 个数据集的融合分类模型, 通过最小化单个数据集模型之间的差异实现水体的高精度提取。

对于阴影区域较多或精细化的水体提取, 利用光学影像结合 SAR 影像的水体提取是一个可行而且精度较高的方法, 目前这类方法虽然研究比较少, 但是随着 SAR 影像的普及和分辨率的提高, 对于 SAR 影像关于水体提取的研究将会成为热门的研究方向。

4 水体提取的比较分析

4.1 横向比较

4.1.1 光学遥感水体提取的比较

1) 阈值法与分类器法的比较。传统的水体指数法、多波段谱间关系法大部分是基于包含中红外、短波红外波段的中低空间分辨率遥感影像构建的, 受影像质量及提取方法的影响, 对水陆分界比较明显的湖泊及较大河流干流的水体提取有比较好的效果, 但是对细小水体的提取效果一般较差。对于高空间分辨率遥感影像的水体信息提取, 一般不包含中红外和短波红外波段, 更多的是采用 SVM、决策树法和面向对象法, 这些方法利用了高分影像中的光谱、形状和纹理等影像信息, 提取的精度相对于阈值法来说更高。虽然 SVM 提取精度较高, 但是提取结果受样本影响; 决策树法受冰雪和薄云影响不大, 但是受山体阴影影响较大; 面向对象法受分割阈值和分类准则的影响较大, 经验性较强。

总体而言, 阈值法具有操作简单、实现容易、适用性较强的特性, 一般适用于地势平坦、背景简单大区域的中低空间分辨率水体提取, 具有快速实现水体提取的优点, 在生产中应用较多, 但是对于细小水体的提取效果不太理想, 分类器法具有应用广泛, 提取精度高但实现过程相对复杂的特点, 主要应用在高分影像, 能够有效利用其丰富的空间及纹理信息, 研究者们通过结合光谱、空间和纹理等特征构建了影像分类提取的方法, 能够进行更精细的水体信息提取。

2) 传统方法与其他方法的比较。传统方法主要是阈值法和分类器法, 这些方法的发展比较成熟、应用比较广泛、适用性也比较强, 但是对于特殊地

区、影像或精度要求比较高的情况下,传统方法不一定能达到水体提取要求,本文所阐述的其他方法主要是针对不同地区或者不同影像数据产生的条件型算法,算法的实现速度效率相对于传统方法较慢,在某些条件下或者对提取精度有很高要求下进行相应的方法应用,在实际的生产生活中应用较少,主要应用在科研领域,这些方法的适用性较差,算法的实现过程较复杂、效率不如传统方法高。

4.1.2 雷达影像的水体提取比较

随着 SAR 图像近些年的快速发展,分辨率的提高,基于 SAR 图像的水体提取日益增多,整体来说阈值法的优点是速度快、原理简单、适用于低噪声、图幅较小的平坦地区 SAR 图像的水体提取。滤波法是目前应用比较多且有效的方法,可以较好地抑制 SAR 图像的斑点噪声,进而提高水体的提取效率和精度,相比较阈值法实现过程复杂一点。上述方法对于阴影的抵抗能力较弱,利用 DEM 模拟 SAR 图像,能够有效剔除水体中的阴影,所以 DEM 在山区地区的水体提取有着非常重要的作用。纹理灰度共生矩阵结合水体本身的纹理信息以及水体的一些几何信息等,减少其他地物对水体信息提取的干扰。使分类结果的“椒盐现象”明显减少,提高了水体的提取精度,但是相应方法的实现及提取的效率会下降,适合用于水体精度较高,细小水体及河流较多的水体提取。

4.2 纵向对比

从成像特点来看,光学影像与雷达影像呈现互补的现象,光学影像具有高空间分辨率和丰富的光谱信息,但是在水体识别时受云层和阴影的影响较大。而 SAR 图像虽然具有较低的空间分辨率和较多的噪声,但是其主动性探测的特性会在浅水和阴影区域提供有价值的信息。在雷达数据的水体信息提取方法中,大多数是为提取大面积水体的中低空间分辨率图像开发的,高空间分辨率雷达影像尚不成熟,提取的方法较少。光学影像的水体提取发展成熟,一般能够找到适用于各种影像及地形的的方法,应用较多且精度较高,雷达影像进行水体提取方法比较单一,研究的深度较浅,主要作为一种辅助手段。

对于大面积精度要求不高的水体区域,2 种数据的提取各有优点,前者提取方法更多,应用范围更广,受影像质量影响相对较小,后者在具有浅水和非山区阴影水体区域提取精度更高,但受限于影像质量影响较大,一般适用于平坦地形;在精细化水体提取领域,一般需要利用更高空间分辨率的影像,前者在分类器法和其他方法中都具有不同的应用,提取精度较高,后者受限于基础建设影响在高空间分

辨率影像发展较慢,主要利用灰度共生矩阵进行提取需要花费大量时间,精度一般低于前者,如何利用雷达进行高空间分辨率高精度提取水体是现阶段的研究热点。

4.3 问题展望

1) 对于面状水体不仅提取方法众多,提取精度也好,而且自动化也比较容易,中低空间分辨率影像就可以实现,但是对于线状河流,尤其是河流支流,比较难以提取,需要更高空间分辨率影像,但是高空间分辨率数据获取比较困难,处理较难。如何快速获得高空间分辨率影像及融合中高空间分辨率多源遥感影像提升细小水体的提取精度,是未来的研究方向之一^[69]

2) 随着信息时代的飞速发展,水体提取的自动化程度其实并不高,传统方法需要在人工干预下进行半自动化的水体提取,近年来基于机器学习的深度学习具有无需人工干预,模仿人脑的运行机制,充分运用深度学习方法是实现水体全自动提取的关键。

3) 基于卫星遥感技术各种水体信息提取的结果精度至关重要,虽然说现在有一些默认的精度评定的方法,通常以人工解译的水体作为真值,采用 ENVI, ERDAS 和易康等专业软件,从漏提率、误提率^[22]、提取精度^[70]、水体与城镇的区分度 (division degree, DD)^[69]、Kappa 系数、制图精度、用户精度等参数^[71]评价提取结果的准确程度。这些方法没有形成统一的评价标准,不利于各种方法之间的对比。制定统一的评价标准,规范数据质量评价体系,将会是水体提取方法走向成熟、走向实用的标志。

4) 对雷达数据的水体信息提取方法,大多数方法是针对大面积应用的中低空间分辨率图像开发的,对于高空间分辨率图像和要求非常准确的水体提取并不适用。对于容易受阴影影响的区域比如山区、城市建筑物,会导致水体提取精度严重下降。如何充分利用雷达影像来进行广泛的水体提取是接下来研究的重点。

5) 随着遥感影像空间分辨率的提高,对于光学影像的水体提取发展相对比较缓慢,主要还是以传统基于阈值法和分类器法的水体提取为主,其他方法的实用性及普遍性不高,对于雷达、DEM 和光学遥感数据等多源遥感数据源,如何充分融合雷达等多源遥感数据源,综合阈值法、面向对象和深度学习等技术方法,充分利用光学和雷达遥感的光谱、空间、时间等多维大数据信息,进行复杂地形区域水体信息的提取将是接下来研究的一个重点。

6) 图像阈值分割一直是一个难题,比如水体指

数的阈值确定,面向对象的多尺度分割中尺度的确定,虽然有很多算法可以快速地获取阈值,但是往往需要人工的判断,效果针对不同的实验地区、不同的方法会有区别,现在大多数的阈值确定还采用的是人工试错法,这种方法不仅效率低,而且不准确。因此,最优阈值自动获取方法,将成为日后研究的重点。

5 结 论

水是一切人类与生物得以生存和发展的重要物质基础,水体提取便于了解现有的水资源概况,有助于对水资源合理的规划及治理,对人类的生活及社会活动具有重大影响。通过阐述基于不同数据源的水体提取方法,分析各种方法的优缺点,分析当前水体提取存在的问题和研究前景,不难发现水体的提取相对其他地物的提取较简单,水体提取目前还是以光谱信息为主,在高空间分辨率影像中利用纹理及空间等信息较少,如何高精度自动化提取水体是近些年研究的关键。现阶段雷达影像的发展促进了水体提取的发展,但是雷达影像局限性较大,主要作为一种辅助手段,不适应于高空间分辨率影像,雷达影像与光学影像融合进行优势互补将会成为水体提取的新方向。随着科技的不断发展,基于高空间、高光谱和高时间分辨率的遥感数据实现水体信息的快速、准确、大范围提取,同时建立起良好适用性,服务于人们生产生活中各行各业,已经成为水体信息提取研究的发展趋势,通过本文的总结希望能够引起更多研究者了解学习这一领域的研究。对进行大范围、系统化和精细化的水体信息提取,实现水体的全自动化提取研究提供了一定的思路。

参考文献 (References):

[1] Yang C J, Wei Y M, Wang S Y, et al. Extracting the flood extent from satellite SAR image with the support of topographic data [C]//Proceedings of 2001 International Conferences on Info-Tech and Info-Net, 2001.

[2] 许杰玉,赵晓飞,吕春英,等.星云湖流域水环境污染特征分析与综合整治研究[C]//中国环境科学学会会议论文,2015.

Xu J Y, Zhao X F, Lyu C Y, et al. Analysis of water environmental pollution characteristics and comprehensive remediation in Xingyun Lake Basin[C]//Annual Meeting of Chinese Society for Environmental Sciences, 2015.

[3] 杜云艳,周成虎.水体的遥感信息自动提取方法[J].遥感学报,1998,2(4):264-269.

Du Y Y, Zhou C H. Automatically extracting remote sensing information of water bodies [J]. Journal of Remote Sensing, 1998, 2 (4): 264-269.

[4] 周成虎,骆剑承,杨晓梅.遥感影像地学理解与分析[M].北京:科学出版社,1999.

Zhou C H, Luo J C, Yang X M. Remote sensing image geoscience understanding and analysis [M]. Beijing: Science Press, 1999.

[5] 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.

[6] 崔齐,王杰,汪闽,等.矢量约束的面向对象高分遥感影像水体提取[J].遥感信息,2018,33(4):115-121.

Cui Q, Wang J, Wang M, et al. Water extraction from high-resolution remote sensing imagery based on vector data constraint and object-based image analysis [J]. Remote Sensing Information, 2018, 33(4): 115-121.

[7] 王航,秦奋.遥感影像水体提取研究综述[J].测绘科学,2018,43(5):23-32.

Wang H, Qin F. Summary of the research on water body extraction and application from remote sensing image [J]. Surveying and Mapping Science, 2018, 43(5): 23-32.

[8] 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,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, 2020, 60(2): 147-161.

[9] 马延辉,林辉,孙华,等.基于CIWI模型的水体信息提取研究[J].中国水土保持,2009(5):41-43.

Ma Y H, Lin H, Sun H, et al. Research on water information extraction based on CIWI model [J]. Soil and Water Conservation in China, 2009(5): 41-43.

[10] 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,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.

[11] Frazier P S, Page K J. Water body detection and delineation with Landsat TM data [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2000, 66(12): 1461-1467.

[12] 毕海芸,王思远,曾江源,等.基于TM影像的几种常用水体提取方法的比较和分析[J].遥感信息,2012,27(5):77-82.

Bi H Y, Wang S Y, Zeng J Y, et al. Comparison and analysis of several common water extraction methods based on TM image [J]. Remote Sensing Information, 2012, 27(5): 77-82.

[13] 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 relationship method in water feature extraction [J]. Mine Surveying, 2004 (4): 30-32.

[14] Ouma Y O, Tateishi R. A water index for rapid mapping of shoreline changes of five East African Rift Valley Lakes: An empirical analysis using Landsat TM and ETM+ data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(15): 3153-3181.

[15] 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.

- [16] 丁 凤. 一种基于遥感数据快速提取水体信息的新方法[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(2): 167–171.
Ding F. A new method for fast information extraction of water bodies using remotely sensed data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2009, 24(2): 167–171.
- [17] 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]. Surveying and Mapping Science, 2008, 33(2): 158–160.
- [18] 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(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(6): 62–67.
- [19] 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]. Chinese Journal of Images and Graphics, 2013, 18(4): 421–428.
- [20] Feyisa G L, Meilb Y 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.
- [21] 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 Earth Information Science, 2014, 16(1): 102–107.
- [22] 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 J, 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.
- [23] Vapnik V N. The nature of statistical learning theory [M]. New York: Springer Verlag, 2000, 37(3): 988–999.
- [24] Vapnik V N. A novel view of statistical learning theory [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1999, 10(5): 988–999.
- [25] Roli F, Fumera G. Support vector machines for remote sensing image classification [C]// Image and Signal Processing for Remote Sensing VI, 2001: 160–166.
- [26] 段秋亚, 孟令奎, 樊志伟, 等. GF-1 卫星影像水体信息提取方法的适用性研究[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(4): 79–84. doi:10.6046/gtzyyg.2015.04.13.
Duan Q Y, Meng L K, Fan Z W, et al. Applicability of the water information extraction method based on GF-1 image[J]. Remote Sensing of Land Resources, 2015, 27(4): 79–84. doi:10.6046/gtzyyg.2015.04.13.
- [27] Paul A, Tripathi I D, Dutta D. Application and comparison of advanced supervised classifiers in extraction of water bodies from remote sensing images [J]. Sustainable Water Resources Management, 2018, 4(4): 905–919.
- [28] 张德军, 杨世琦, 王永前, 等. 基于GF-1数据的三峡库区水体信息精细化提取[J]. 人民长江, 2019, 50(9): 233–239.
Zhang D J, Yang S Q, Wang Y Q, et al. Refined water body information extraction of Three Gorges Reservoir by using GF-1 satellite data[J]. People's Yangtze River, 2019, 50(9): 233–239.
- [29] Li D, Cheng T. KDG knowledge discovery from GIS: Reconsideration on the use of KDD in intelligent GIS [Z]. 1994.
- [30] Quinlan J R. Simplifying decision trees [J]. International Journal of Man Machine Studies, 1999, 27(3): 221–234.
- [31] 沙占江, 曾永年, 马海州, 等. 遥感和GIS支持下的龙羊峡库区土地沙漠化动态研究[J]. 中国沙漠, 2000, 20(1): 51–54.
Sha Z J, Zeng Y N, Ma H Z, et al. Dynamic monitoring of desertification with RS and GIS in Longyangxia Reservoir Area [J]. China Desert, 2000, 20(1): 51–54.
- [32] 陈 超, 傅姣琪, 随欣欣, 等. 面向灾后水体遥感信息提取的知识决策树构建及应用[J]. 遥感学报, 2018, 22(5): 792–801.
Chen C, Fu J Q, Sui X X, et al. Construction and application of knowledge decision tree after a disaster for water body information extraction from remote sensing images [J]. Journal of Remote Sensing, 2018, 22(5): 792–801.
- [33] Tehrany M S, Pradhan B, Jebur M N. Remote sensing data reveals ecoenvironmental changes in urban areas of Klang valley, Malaysia: Contribution from object based analysis [J]. Indian Society of Remote Sensing, 2013, 41(4): 1–11.
- [34] Cheng Q, Chen J F. Research on the extraction method of land cover information in southern coastal land of Hangzhou bay based on GF-1 image [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(2): 350–360.
- [35] Yu Q. Object based detail edge vegetation mapping using high spatial resolution imagery [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2006, 72(7): 799–811.
- [36] 张真鲜. 新疆特克斯河流域生态环境遥感监测与评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2001.
Zhang Z X. Eco-environmental monitoring and evaluation of Tekes Watershed in Xinjiang using remote sensing images [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2001.
- [37] 吴小娟, 肖晨超, 崔振营, 等. "高分二号"卫星数据面向对象的海岸线提取法[J]. 航天返回与遥感, 2015, 36(4): 84–92.
Wu X J, Xiao C C, Cui Z Y, et al. Coastline extraction based on object-oriented method using GF-2 satellite data [J]. Space Return and Remote Sensing, 2015, 36(4): 84–92.
- [38] 毛莹莹, 陈友飞. 基于面向对象法的Landsat8影像山区细小水体提取方法[J]. 亚热带资源与环境学报, 2015, 10(4): 86–92.
Mao Y Y, Chen Y F. An object-oriented method based on the extraction of fine water from Landsat8 image mountains [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2015, 10(4): 86–92.
- [39] 徐 涛, 谭宗坤, 闫小平. 面向对象的都市水体信息提取方法[J]. 地理空间信息, 2010, 8(3): 64–66.
Xu T, Tan Z K, Yan X P. Extraction techniques of urban water bodies based on object-oriented [J]. Geospatial Information, 2010, 8(3): 64–66.

- [40] 王俊海,阮仁宗,柴颖,等. 基于高分二号的面向对象城市水体信息提取[J]. 地理空间信息,2018,16(9):34-40.
Wang J H, Ruan R Z, Chai Y, et al. Object-oriented urban water information extraction based on GF-2[J]. Geospatial Information, 2018, 16(9):34-40.
- [41] 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(5):15-23.
Mo W H, Sun H, Zhong S Q, et al. Research on the CIWI model and its application[J]. Remote Sensing Information, 2007(5):15-23.
- [42] Sui H G, Chen G, L. An automatic integrated image segmentation, registration and change detection method for water body extraction using HSR images and GIS data[J]. International Archives of the Photo Grammetry, Remote Sensing and Spatial, 2013, 40(7):237-242.
- [43] 杨旭,陈建国,程潭武,等. 基于 RS 与 GIS 技术的数字流域水体信息的提取[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(4):81-86.
Yang X, Chen J G, Cheng T W, et al. The extraction of digital watershed water body information based on GIS and RS[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(4):81-86.
- [44] 王铭. 基于混合像元分解的东北地区时令水体提取及变化监测[D]. 长春:中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所),2017.
Wang M. The temporary water bodies extraction and monitoring in northeast China through spectral mixture analysis[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Northeast Geography and Agro-Ecology, Chinese Academy of Sciences), 2017.
- [45] 孔美美. 基于混合像元分解的水体提取及变化监测研究[D]. 泉州:华侨大学,2016.
Kong M M. Reservoir surface water extraction and monitoring based on pixel unmixing[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2016.
- [46] 杨文亮,杨敏华,祁洪霞. 利用 BP 神经网络提取 TM 影像水体[J]. 测绘科学,2012,32(1):148-150.
Yang W L, Yang M H, Qi H X. Water body extracting from TM image based on BPNN[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 32(1):148-150.
- [47] 王知音. 基于机器学习的遥感图像水体提取研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2016.
Wang Z Y. Research on water body extraction from remote sensing image based on machine learning[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2016.
- [48] 李士进,王声特. 基于混合特征空间 MRF (Markov Random Filed) 模型的高分辨率遥感影像水体提取[J]. 南京师大学报, 2017, 40(1):13-19.
Li S J, Wang S T. A new algorithm based on hybrid feature space MRF (Markov random filed) model for water information extraction from high resolution remote sensing imagery[J]. Journal of Nanjing Normal University, 2017, 40(1):13-19.
- [49] 唐德可,王峰,王宏琦. 基于马尔科夫分割的单极化 SAR 数据洪涝水体检测方法[J]. 电子与信息学报,2019,41(3):619-625.
Tang D K, Wang F, Wang H Q. Single-polarization SAR data flood water detection method based on Markov segmentation[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2019, 41(3):619-625.
- [50] 齐庆超,张小磊,金江峰,等. 基于光谱角匹配算法的水体信息提取研究[J]. 测绘与空间地理信息,2016,39(2):93-96.
Qi Q C, Zhang X L, Jin J F, et al. Water extraction based on spectral angle matching algorithm[J]. Mapping and Spatial Geographic Information, 2016, 39(2):93-96.
- [51] 张伟,赵理君,郑柯,等. 一种改进光谱角匹配的水体信息提取方法[J]. 测绘通报,2017(10):34-38.
Zhang W, Zhao L J, Zheng K, et al. An improved method for water information extraction using MSAM[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(10):34-38.
- [52] Hinton G E, Osindero S, Teh Y W. A fast learning algorithm for deep belief nets[J]. Neural Computation, 2006, 18(7):1527.
- [53] 杜敬. 基于深度学习的湖泊湿地信息提取及时空演变特征研究[D]. 上海:华东理工大学,2017.
Du J. Deep learning based extraction and spatial-temporal evolution of lake wetland[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2017.
- [54] Långkvist M, Kiselev A, Alirezaie M, et al. Classification and segmentation of satellite orthoimagery using convolutional neural network[J]. Remote Sensing, 2016, 8(4):329.
- [55] 赵文,杜生. 学习多尺度、更深层次的遥感分类方法[J]. 摄影与遥感学报,2016(113):155-165.
Zhao W, Du S. Learning multi-scale and deeper remote sensing classification methods[J]. Journal of Photography and Remote Sensing, 2016(113):155-165.
- [56] 王雪,隋立春,钟棉卿,等. 全卷积神经网络用于遥感影像水体提取[J]. 测绘通报,2018(6):41-45.
Wang X, Sui L C, Zhong M Q, et al. Fully convolution neural networks for water extraction of remote sensing images[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(6):41-45.
- [57] 梁泽毓. 基于深度学习的多元遥感水体信息提取方法及其应用研究[D]. 合肥:安徽大学,2019.
Liang Z Y. Research on water information extraction method of multi-source remote sensing based on deep learning and its application[D]. Hefei: Anhui University, 2019.
- [58] 曹云刚,刘闯. EnviSat ASAR 数据在水情监测中的应用[J]. 地理与地理信息科学,2006,22(2):13-15.
Cao Y G, Liu C. Study on flood monitoring using EnviSat ASAR data[J]. Geography and Geographic Information Science, 2006, 22(2):13-15.
- [59] 申邵洪,谭德宝,陈蓓青. 基于 KI 算法的多时相 ASAR 影像水面信息变化监测[J]. 长江科学院院报,2008,25(2):29-32.
Shen S H, Tan D B, Chen B Q. Change detection of water surface in multitemporal ASAR images based on KI algorithm[J]. Journal of Changjiang Academy of Sciences, 2008, 25(2):29-32.
- [60] 李景刚,黄诗峰,李纪人. EnviSAT 卫星先进合成孔径雷达数据水体提取研究——改进的最大类间方差阈值法[J]. 自然灾害学报,2010,19(3):139-145.
Li J G, Huang S F, Li J R. Research on extraction of water body from EnviSAT ASAR images: A modified Otsu threshold method[J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(3):139-145.
- [61] 杨存建,魏一鸣,王思远,等. 基于 DEM 的 SAR 图像洪水水体的提取[J]. 自然灾害学报,2002,11(3):121-125.

Yang C J, Wei Y M, Wang S Y, et al. Extracting the flood extent from SAR imagery on basis of DEM [J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11 (3) : 121 – 125.

[62] Hong S, Jang H, Kim N, et al. Water area extraction using RADAR-SAT SAR imagery combined with Landsat imagery and terrain information [J]. Sensors, 2015, 15 (3) : 6652 – 6667.

[63] 王 栋, 陈映鹰, 秦 平. SAR 影像水体目标提取的序列非线性波波方法 [J]. 同济大学学报, 2009, 5 (13) : 234 – 236.

Wang D, Chen Y Y, Qin P. Method for water object extraction in SAR imagery based on sequential nonlinear filtering [J]. Journal of Tongji University, 2009, 5 (13) : 234 – 236.

[64] Klemenja K S, Waske B, Valero S, et al. Automatic detection of rivers in high resolution SAR data [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2012, 5 (5) : 1364 – 1372.

[65] Lyu W T, Yu Q Z, Yu W X. Water extraction in SAR images using GLCM and support vector machine [C] // International Conference on Signal Processing, 2010 : 740 – 743.

[66] 胡德勇, 李 京, 陈云浩, 等. 单波段单极化 SAR 图像水体和居民地信息提取方法研究 [J]. 中国图象图形学报, 2008, 13 (2) : 257 – 263.

Hu D Y, Li J, Chen Y H, et al. Water and settlement area extraction from single-band, single-polarization SAR images based on SVM method [J]. Chinese Journal of Graphic Images, 2008, 13 (2) : 257 – 263.

[67] Zeng C Q, Wang J F, Huang X D, et al. Urban water body detection from the combination of high resolution optical and SAR images [C] // Proceedings of 2015 Joint Urban Remote Sensing Event. Lausanne, Switzerland, 2015.

[68] Irwin K, Beaulne D, Braun A, et al. Fusion of SAR, optical imagery and airborne LiDAR for surface water detection [J]. Remote Sensing, 2017, 9 (9) : 890.

[69] 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.

[70] 申文明, 王文杰, 罗海江, 等. 基于决策树分类技术的遥感影像分类方法研究 [J]. 遥感技术与应用, 2007, 22 (3) : 333 – 338.

Shen W M, Wang W J, Luo H J, et al. Classification methods of remote sensing image based on decision tree technologies [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2007, 22 (3) : 333 – 338.

[71] Hinton G E, Salakhutdinov R R. Reducing the dimensionality of data with neural networks [J]. Science, 2006, 313 (5786) : 504 – 507.

A review of remote sensing image water extraction

SU Longfei, LI Zhengxuan, GAO Fei, YU Min

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230000, China)

Abstract: Water is a very important resource, and it is an important material basis for the survival and development of all human beings and organisms. Water extraction can result to easily understand the general situation of existing water resources, thus being conducive to the rational planning and management of water resources and having a significant impact on human life and social activities. Traditional artificial methods are time-consuming and laborious, and therefore satellite remote sensing data is now used to extract water parameters such as water position, area, shape and river width, which has become an effective method and means to obtain water parameters quickly. On the basis of extensive literature research, this paper illustrates the basic ideas of water extraction of remote sensing image and its development course as well as the basic method and current situation of water extraction performed by experts, and makes a comprehensive review and analysis of the advantages and disadvantages of various methods so as to explain the problems of water extraction and research prospect, make the readers understand the situation of this field and provide some ideas for the study in this field.

Keywords: water extraction; water index; threshold value method; object oriented; Radar

(责任编辑: 陈 理)