

Sentinel 时序影像的长江流域地表水体提取

刘宇晨^{1,2}, 高永年³

1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 流域地理学重点实验室, 南京 210008;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 河海大学 地球科学与工程学院, 南京 211100

摘要: 传统水体提取算法大多基于某一时期单景遥感影像, 无法表现出水体随着时间和空间高度可变的特性, 虽然国内外已出现部分时序水体数据产品, 但其空间分辨率及水体边界的精度仍无法满足一些研究和应用的需要。本文以地表环境复杂的长江流域为研究区, 基于 GEE (Google Earth Engine) 云平台, 使用 Sentinel-2 MSI 年内长时序影像集结合像元的“时间特征”, 提出一种在大尺度环境下更具普适性、可操作性且效果更好的高精度水体提取算法, 即基于时序影像数据结合多指数和“时间特征”并融合 DEM 的算法。该算法选择自动提取水体指数 (AWEI)、改进型归一化差值水体指数 (MNDWI)、归一化植被指数 (NDVI) 和增强型植被指数 (EVI) 进行多指数逻辑组合来提取水体; 同时利用 NIR 波段反射率值和 SRTM 数字高程模型生成的坡度数据集来辅助抑制高反射率噪声和阴影噪声。通过目视解译采取验证样本点进行全流域水体精度验证, 正确提取率达 96% 以上; 在亚像元层面进行精度评估, 混合边缘像元占像元总数的 3.37%, 错分误差 0.46%, 漏分误差 0.21%, 表明本文算法对混合像元具有较好的抑制效果; 对比传统基于光谱特征的 NDWI、MNDWI 水体指数, 多指数结合时间特征的算法在抑制阴影噪声方面效果更佳; 对比现有部分水体数据产品, 本文算法在一定程度上既能保证水体区域整体的完整性, 也保留了水体的局部细节, 在细小水体的提取上具有一定优势。由长江流域水体遥感提取结果可得, 流域内水体空间分布不均, 且各水体类型时空变化特征明显, 2017 年—2020 年永久性水体增加的 67.41% 是由季节性水体转化而来, 季节性水体与非水体之间的相互转化最为显著, 季节性水体增加的 74.64% 是由非水体转化而来, 同时季节性水体减少的 56.25% 转化为了非水体。实验结果表明: 本研究算法在提取不同时空位置 and 不同环境下的水体具有一定的普适意义, 可有效避免水体与其他地物混合造成的“同物异谱”和“同谱异物”现象, 同时对复杂背景噪声有着良好的抑制作用, 具有较高的准确度和精度。

关键词: GEE, Sentinel-2, 水体遥感提取, 时间特征, 多指数组合, 阴影噪声

引用格式: 刘宇晨, 高永年. 2022. Sentinel 时序影像的长江流域地表水体提取. 遥感学报, 26(2): 358-372

Liu Y C and Gao Y N. 2022. Surface water extraction in Yangtze River Basin based on sentinel time series image. National Remote Sensing Bulletin, 26(2): 358-372 [DOI: 10.11834/jrs.20211287]

1 引言

地表水体时空分布数据是水资源合理配置、水资源跨流域调度、水生态保护修复、水污染防治、水灾害监测评估及局部地区气候调节的基础。近年来, 遥感已成为快速准确地获取地表水体信息的重要手段, 利用遥感影像提取地表水体信息的常用方法大致可分为 3 类, 即基于波段组合的水体提取方法、基于机器学习的水体提取方法和面向对象的水体提取方法。基于波段组合

的水体提取方法最为常用, 其又可分为单波段阈值法 (Jupp 等, 1985; Moëller-Jensen, 1990; 陆家驹和李士鸿, 1992)、多波段谱间关系法 (Barton 和 Bathols, 1989; 陈华芳等, 2004; 颜梅春, 2005; 王国华等, 2020) 和水体指数法 (McFeeters, 1996; 徐涵秋, 2005; Feyisa 等, 2014) 等; 其中水体指数法因其简单、快速的特点, 应用最为广泛。自 2015 年 Sentinel-2 卫星发射以来, 越来越多的学者开始尝试用 Sentinel 遥感影像作为数据源开展水体提取研究, 制作出更精细化的水体产品,

收稿日期: 2021-05-12; 预印本: 2021-11-02

基金项目: 国家中央高校基本科研业务费专项资金资助(编号: B210201035); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(编号: 2017ZX07203002-02)

第一作者简介: 刘宇晨, 1997 年生, 男, 硕士研究生, 研究方向为水体遥感智能提取。E-mail: liuyuchen191@mails.ucas.ac.cn

通信作者简介: 高永年, 1977 年生, 男, 教授, 研究方向为流域遥感。E-mail: yngao@hhu.edu.cn

采用的方法也是多种多样,如MNDWI水体指数法(Du等,2016)、面向对象方法(Kaplan和Avdan,2017)、SVM机器学习算法(Wang等,2018)、MNDWI和AWEI水体指数法(Yang等,2018)、基于规则的超像元方法(RBSP)(Yang等,2020b)等。

虽然各国学者已提出了一系列水体提取模型,但水体提取精度在反射率较低的暗表面噪声地区不高的问题仍未解决,其原因主要是冰雪、云层阴影、建筑阴影、山体阴影和植被等非水体地物与水体在某些波段有着极为相似的反射特性,易与水体产生混淆,从而导致水体提取精度下降。且大多数细小水体常被复杂环境所包围(Soti等,2009),例如城市建筑、植被、山体以及它们投射的阴影,极易形成混合像元,导致水和其他地物之间的类别混淆以及水体的光谱变化。仅凭借单一水体指数(NDWI、MNDWI等),往往无法确保在大区域环境下的水体提取效果。

另外,国内外目前已有的水体数据产品主要包括30 m空间分辨率的JRC全球水体数据(Pekel等,2016)和10 m空间分辨率的FROM-GLC10全球土地覆盖数据(Gong等,2019)等。虽然JRC水体产品包含积水频率、水体类型分类等一系列数据,但其空间分辨率仅为30 m;FROM-GLC10数据中水体的空间分辨率虽然达到了10 m,但其不包含积水频率、永久性水体和季节性水体等要素。空间分辨率高、涵盖要素较多的水体数据产品仍然缺乏,距离流域水体的精细化管理仍存在一定差距。

因此,本文的主要目标是基于10 m空间分辨率的Sentinel遥感影像数据提取高精度的长江流域地表水体及其积水频率,以及区分永久性水体和季节性水体,为实现这一目标,需要探索寻找一个更为有效的方法。通过国内外文献综述发现已有方法在消除和降低大空间区域尺度地形阴影、建筑阴影和船舶等噪声影响方面仍存在较大的提升空间(Sun等,2019;王国华等,2020;Yang等,2020b;谷鑫志等,2019);另外,谷歌地球引擎GEE(Google Earth Engine)在高时空分辨率、大尺度、长时序水体提取方面具有显著优势(Li等,2020;Yang等,2020a;Deng等,2019)。因此,本文的主要研究目标是研发一种适用于GEE平台Sentinel遥感影像的简单易操作、提取精度较高、适用于不同地表环境下的大空间区域水体快速提

取方法,并实现长江流域的水体提取。

2 研究区与数据

2.1 研究区概况

长江流域介于 $24^{\circ}30'N$ — $35^{\circ}45'N$, $90^{\circ}33'E$ — $122^{\circ}25'E$,面积达180万 km^2 。长江流域水资源丰富、河网密集、水系众多,支流约有7000余条。流域内地势西高东低,南北高中间低,海拔高差6000余m,地貌类型复杂多样,上游主要以山地、高原为主,中下游地区主要以丘陵、盆地、平原为主(图1),流域内特别是中下游地区城市密集。

2.2 数据及其来源

(1) Sentinel遥感影像。以Sentinel-2多光谱遥感影像为主要数据源,上游少量缺失区域采用Sentinel-1 SAR影像弥补。共选取2017年—2020年Sentinel-2影像23184幅,Sentinel-1影像1364幅(图2)。本研究使用的Sentinel-2 MSI影像波段为Blue、Green、NIR、SWIR1、SWIR2,对应的空间分辨率分别为10 m、10 m、10 m、20 m和20 m,并将20 m空间分辨率波段重采样至10 m。

(2) SRTM数字高程数据。采用来自美国国家航空航天局NASA提供的SRTM DEM数据(Farr等,2007),其空间分辨率为30 m,主要用于生成坡度数据集并辅助消除阴影噪声。

(3) 其他数据。主要包括CGLS全球土地覆盖数据集(Buchhorn等,2020)、JRC全球水体数据(Pekel等,2016)和FROM-GLC10全球土地覆盖数据(Gong等,2019)。CGLS数据集主要用于生成水体与非水体样本的散点密度图,确定水体提取阈值;JRC数据主要用于Sentinel-1影像弥补Sentinel-2影像缺失地区水体时的最大水体范围限制和噪声消除并与本研究水体提取结果做对比分析;FROM-GLC10数据中的水体分布数据主要用于与本研究水体提取结果进行对比分析。

3 基于时序影像的水体提取算法

3.1 技术路线

本研究技术路线如图3所示,首先基于GEE云平台对Sentinel-2影像集进行去云及云阴影处理;然后根据多指数算术组合的水体提取规则,综合Sentinel-1影像、坡度数据集和近红外波段的辅助

识别, 得到每个像元位置上的积水频率 WF (Water Frequency) 值; 最后根据阈值的划分, 将水体分为永久性水体、季节性水体和临时性水体。

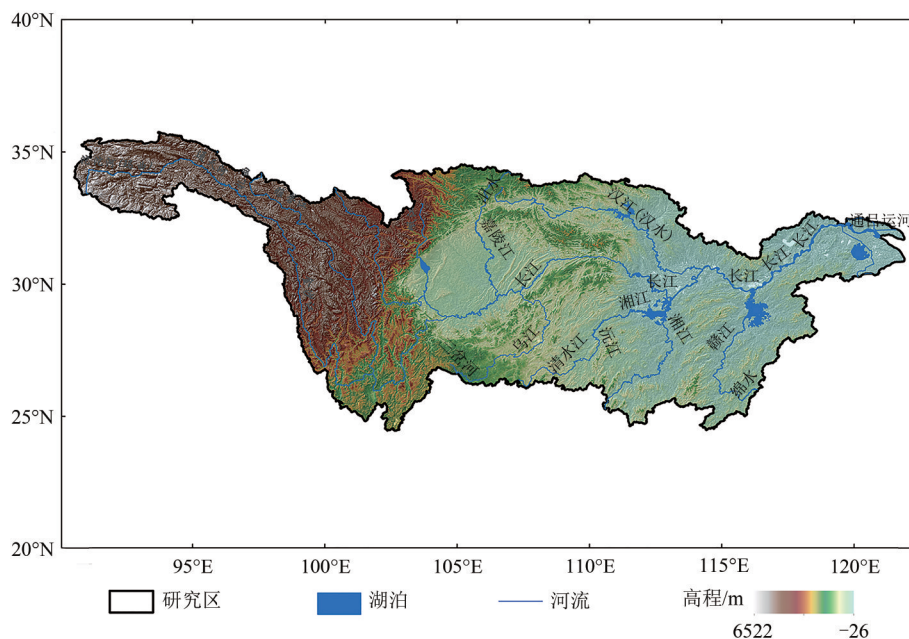
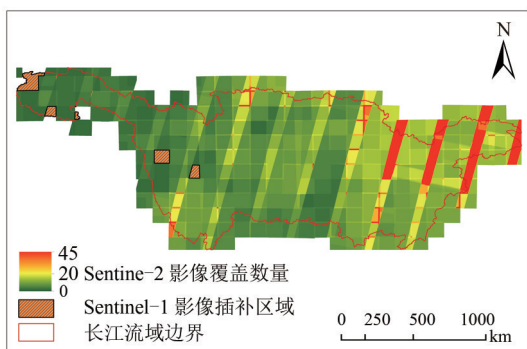
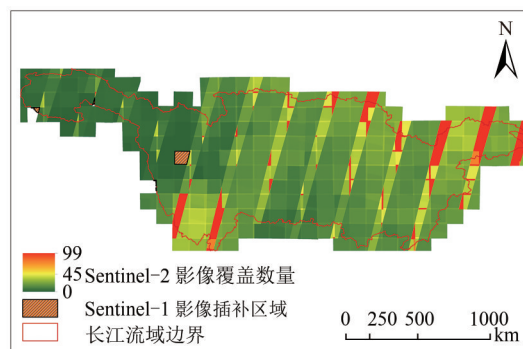


图1 长江流域位置及其地形分布

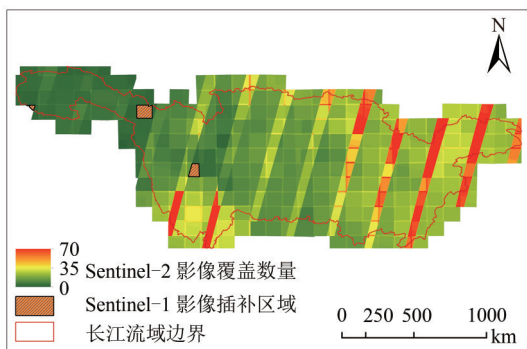
Fig.1 The location and topographic distribution of the Yangtze River Basin



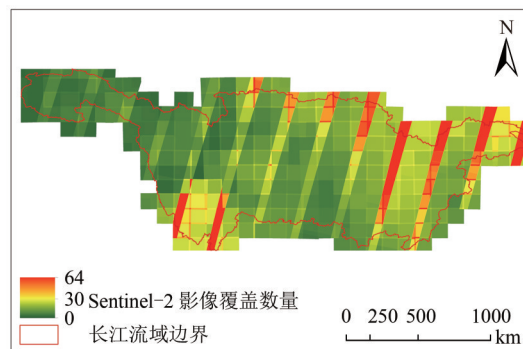
(a) 2017年Sentinel-2影像覆盖与Sentinel-1影像插补分布
(a) Sentinel-2 image coverage distribution and Sentinel-1 image interpolation distribution in 2017



(b) 2018年Sentinel-2影像覆盖与Sentinel-1影像插补分布
(b) Sentinel-2 image coverage distribution and Sentinel-1 image interpolation distribution in 2018



(c) 2019年Sentinel-2影像覆盖与Sentinel-1影像插补分布
(c) Sentinel-2 image coverage distribution and Sentinel-1 image interpolation distribution in 2019



(d) 2020年Sentinel-2影像覆盖分布
(d) Sentinel-2 image coverage distribution in 2020

图2 Sentinel-2 MSI影像数量及其缺失区域Sentinel-1 SAR影像插补分布

Fig.2 The number of Sentinel-2 MSI images and the interpolation distribution of Sentinel-1 SAR images in missing regions

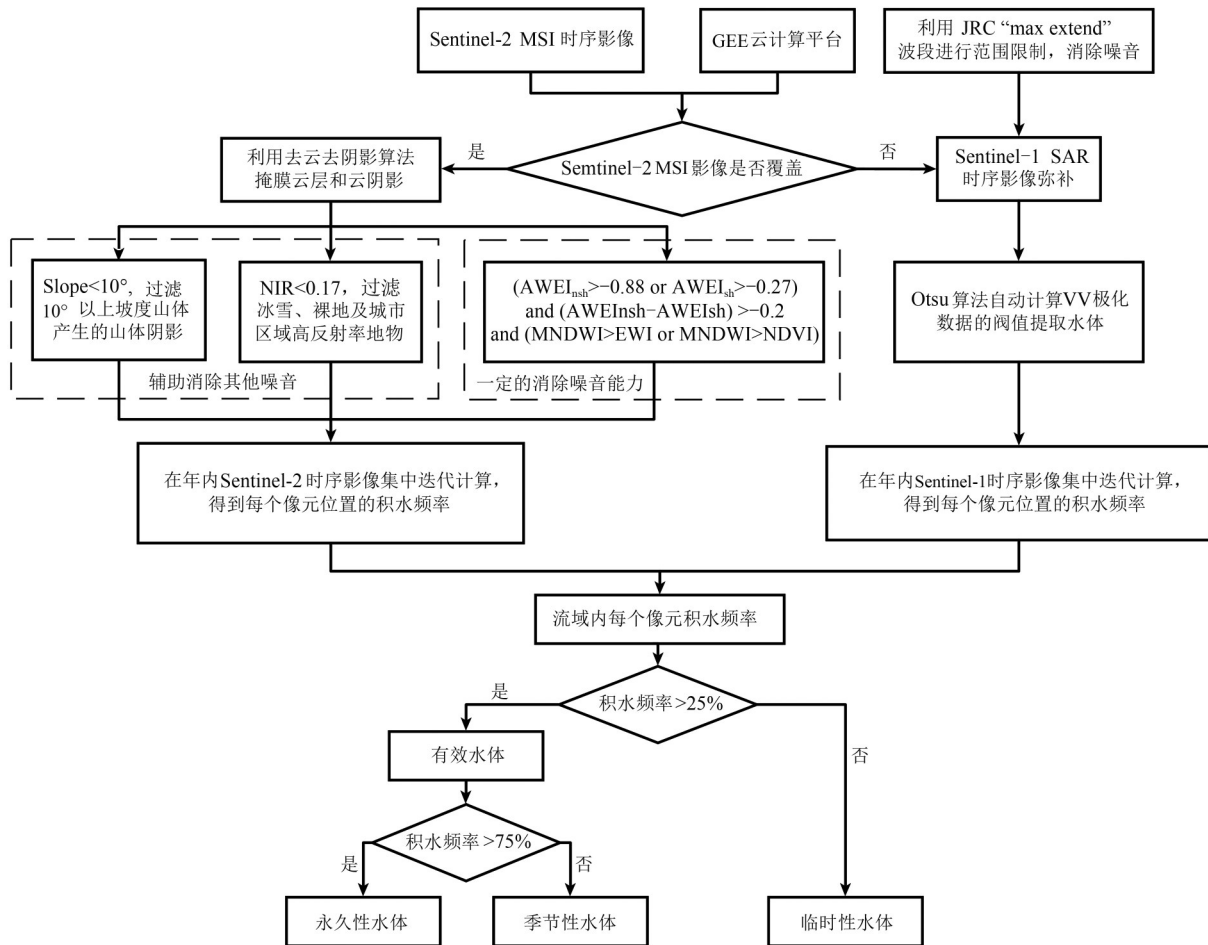


图3 长江流域地表水体提取技术流程图

Fig.3 The technique flow chart of surface water bodies extraction in the Yangtze River Basin

3.2 遥感影像去云及云阴影的预处理

为有效降低云和云阴影检测中遗漏错误带来的影响，利用 GEE Sentinel-2 影像的 ‘QA60’ 波段去除 Opaque clouds 不透明云层和 Cirrus clouds 卷云云层，基于每幅影像的太阳几何角和高度角属性，根据几何学算法判断云层阴影出现的位置，并将云层阴影产生的暗像元进行掩膜（d’Andrimont 等，2018）。

3.3 水体提取指数选择

水体反射率低，在遥感影像中易与阴影、植被等混淆，基于极少数波段（如 NDWI、MNDWI 等指数）的算法在水体识别时精度往往受到一定限制（Sun 等，2019；王国华 等，2020）。因此，本研究综合选择自动提取水体指数 AWEI（Feyisa 等，2014）、改进型归一化差值水体指数 MNDWI（Xu，2006）、增强型植被指数 EVI（Huete 等，2002）、归一化植被指数 NDVI（Rouse 等，1974）来对水

体和非水体进行区分。AWEI 指数根据不同类型区域产生误差的噪声来源差异分为 $AWEI_{nsh}$ 和 $AWEI_{sh}$ ； $AWEI_{nsh}$ 能有效消除城市背景区域的深色建筑表面非水像元，即适用于阴影不是主要噪声的情况； $AWEI_{sh}$ 主要适用于阴影是主要噪声的区域。

阴影不是主要噪声：

$$AWEI_{nsh} = 4 \times (\text{Green} - \text{SWIR1}) - (0.25 \times \text{NIR} + 2.75 \times \text{SWIR2}) \quad (1)$$

阴影是主要噪声：

$$AWEI_{sh} = \text{Blue} + 2.5 \times \text{Green} - 1.5 \times (\text{NIR} + \text{SWIR1}) - 0.25 \times \text{SWIR2} \quad (2)$$

式中，Blue、Green、NIR、SWIR1、SWIR2 分别为 Sentinel-2 影像中的 2、3、8、11、12 波段。AWEI 选择该 5 个波段的主要原因是：在许多情况下，水在波段 NIR、SWIR1 和 SWIR2 吸收了几乎所有的入射辐射，并在波段 Blue 和 Green 之间获得相对较高的反射率（Lillesand 等，2015）。模型系数数值主要采用迭代方法确定，以最大限度地提高具有

低反射率特征的水、暗表面和其他非水地物的可分性，全球范围内的丹麦、瑞士、埃塞俄比亚、南非、新西兰、挪威和中国等不同环境条件下的案例实验均表明 AWEI 提取水体具有较好的准确性和稳健性 (Feyisa 等, 2014)。

3.4 指数阈值确定

本研究在 Zou 等 (2018) 和 Deng 等 (2019) 提出的算法思路基础上，利用 CGLS 全球土地覆盖

数据集分层自动随机抽样 (Li 等, 2020)，基于 Sentinel-2 影像和谷歌地球高分辨率影像目视剔除明显错误的样本点后，共得到水体样本点 22779 个，建筑、冰雪、林地、耕地、沙地、草地 6 类非水体样本点 41393 个，生成水体与非水体的散点密度图 (图 4)，水体样本分布越集中的区域表示其水体阈值更具普适性，得到 $(AWEI_{nsh} - AWEI_{sh}) > -0.2$ 且 $(MNDWI > EVI$ 或 $MNDWI > NDVI)$ 的水体识别规则。

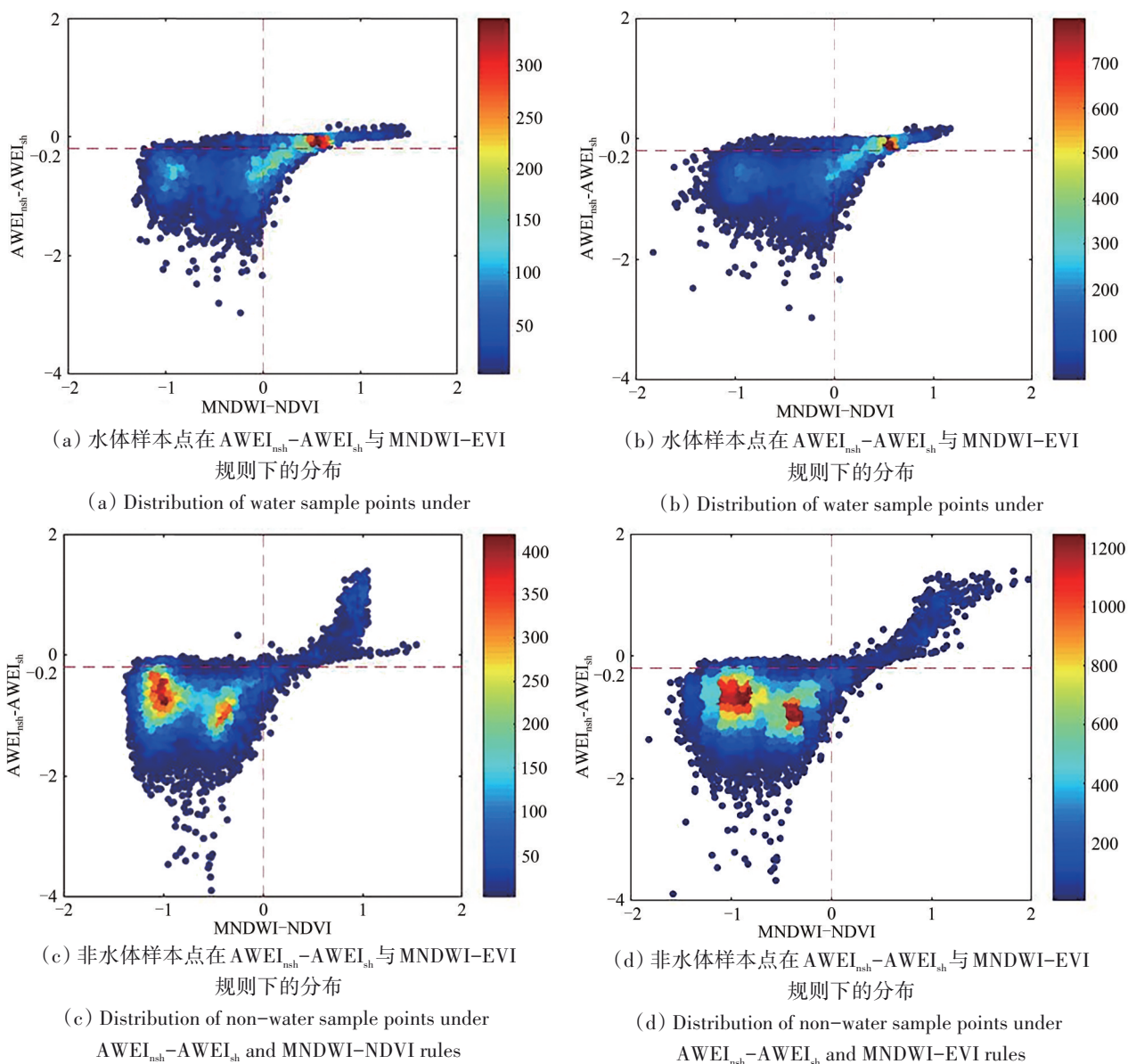


图4 水体与非水体样本点的散点密度

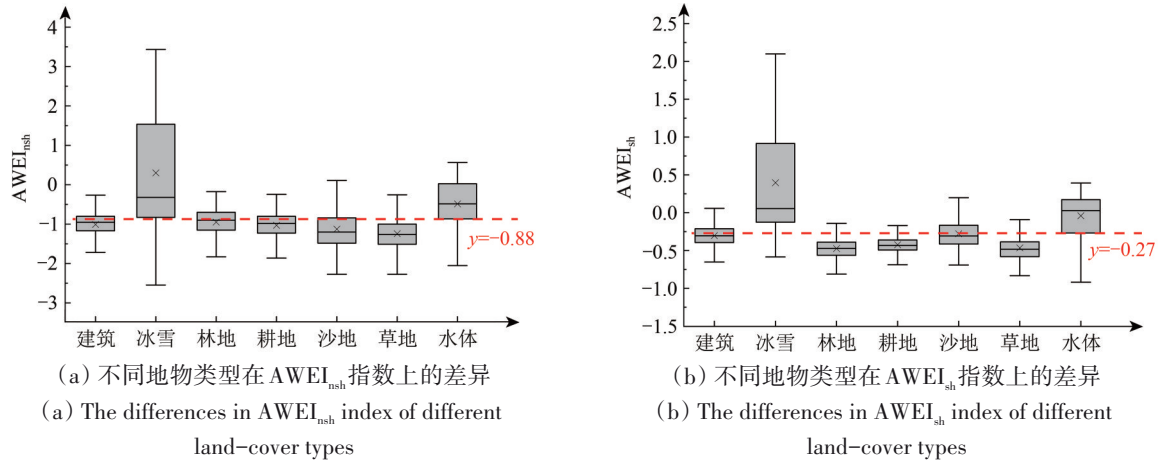
Fig.4 The scatter density of water and non-water sample points

通过对比水体与其他地物在 $AWEI_{nsh}$ 和 $AWEI_{sh}$ 指数上的特征差异，发现除冰雪外，水体与其他

地物有着良好的可分离性，当同时满足 $AWEI_{nsh} > -0.88$ 或 $AWEI_{sh} > -0.27$ 时 (图 5)，抑制混合像元和

阴影噪声的效果更佳。最终得到一个新的基于 Sentinel-2 影像集的多指数水体提取阈值和规则，

即 $(AWEI_{nsh} > -0.88 \text{ 或 } AWEI_{sh} > -0.27)$ 且 $(AWEI_{nsh} - AWEI_{sh}) > -0.2$ 且 $(MNDWI > EVI \text{ 或 } MNDWI > NDVI)$ 。



■ 25%—75% | 1.5IQR内的范围 — 中位数 × 均值

图5 不同地物类型在 $AWEI_{nsh}$ 与 $AWEI_{sh}$ 指数上的差异

Fig.5 The differences in $AWEI_{nsh}$ and $AWEI_{sh}$ of different land-cover types

3.5 噪声去除

本研究水体提取中的噪声主要指城市区域的建筑阴影、丘陵山地区的地形阴影，以及航道河流中的船舶、浑浊河流中的泥沙和富营养化湖泊中的植被噪声等。这些噪声的一个显著共有特点是，随着时间的变化，噪声反映到遥感影像上的形态也会发生明显改变。因此，选择时序影像消除此类噪声。

在时序影像的基础上，进一步采用SRTM数字高程模型生成坡度数据集提升地形阴影剔除效果。由于SRTM数据空间分辨率为30 m，为尽可能减少因空间分辨率不统一带来的误差，防止错误剔除过多位于坡度较大地区的高山湖泊、河流等水体。本文将坡度大于 10° 的像元定义为阴影噪声进行剔除，坡度小于 10° 的阴影噪声则通过积水频率阈值和算法进行剔除，该方法可最大限度地保证水体信息的完整性。为进一步消除冰雪和部分城市建筑区高反射率地物被错误识别为水体的影响，使用近红外波段(NIR)辅助剔除反射率大于0.17的高反射率噪声(Li等, 2020)，最终得到全年水体信息。

3.6 基于积水频率的水域识别

积水频率定义为在一段时间内任一像元位置识别为水体的次数与该像元被良好观测(未被云、云阴影和冰雪覆盖)的总次数比值(Deng等, 2019)。计算公式如下：

$$WF = \frac{\sum_{n=1}^T S}{T} \times 100\% \quad (3)$$

式中， T 表示某年某一像元位置被有效观测的总次数； S 表示该像元位置类型的二值变量，水体值为1，非水体为0。基于该年每个像元位置的 WF 值，将水体类型划分为永久性水体($WF > 75\%$)、季节性水体($25\% < WF \leq 75\%$)和临时性水体($WF < 25\%$) (Deng等, 2019)。本文只考虑季节性水体与永久性水体，并将积水频率大于25%的像元定义为全年有效水体。积水频率计算原理如图6所示。

对于图2所示的Sentinel-2 MSI影像缺失区域，基于Sentinel-1 SAR数据采用OTSU自动阈值法(Otsu, 1979)得到水体阈值。由于Sentinel-1 SAR无法利用NIR波段消除冰雪噪声，选择使用JRC数据中“max extend”波段作为范围限定，消除冰雪及阴影噪声的影响。为尽可能减少因空间分辨率不匹配导致水体信息的遗漏，通过形态学方法将“max extend”波段向外膨胀10 m。在最终的限定边界中，利用Sentinel-1影像结合本文方法对缺失部分进行水体提取。

基于2017年—2020年的年尺度影像集分别提取出2017年—2020年积水频率值大于75%、大于25%且小于等于75%的像元，即得到各年季节性水体和永久性水体(图7)。

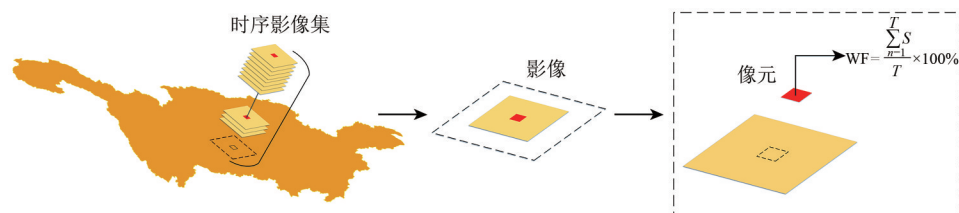


图6 积水频率计算原理

Fig.6 The principle of water frequency calculation

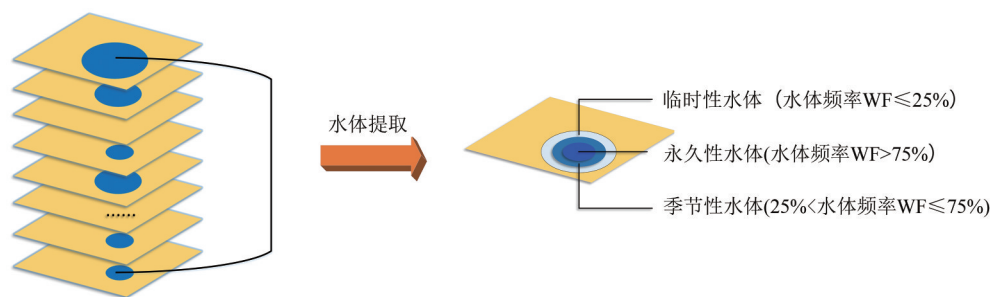


图7 利用积水频率提取季节性水体和永久性水体

Fig.7 Extraction of seasonal water bodies and permanent water bodies using water frequency

4 结果分析

4.1 精度评价

(1) 总体精度。为了更加细致地定量评价水体的提取精度，依据不同水体类型分别采取河流、湖泊、水库、坑塘、水渠、养殖水面、景观湖等水体验证样本点，进行精度验证时将坑塘、水渠、养殖水面、景观湖等细小水体 (Jiang 等, 2014) 归为一类。基于谷歌地球高空间分辨率影像人工目视解译共采集水体验证样本点 2322 个，剔除明显未达到全年有效水体标准的样本点，真值样本个数为 2208 个，正确提取 2140 个，真实提取率达 96.92%，其中细小水体的提取率达 95.85% (表 1)。

表 1 水体提取结果精度评价

Table 1 The accuracy evaluation of water extraction results

水体样本类型	样本个数	真值样本个数	正确样本个数	真实提取率/%
河流	724	677	655	96.75
湖泊	428	419	414	98.81
水库	540	533	516	96.81
坑塘、水渠、养殖水面、景观湖等小水体	630	579	555	95.85
合计	2322	2208	2140	96.92

在河流样本中，由于部分河段宽度较小，受混合像元干扰或积水频率未能达到有效水体标准等原因，这部分水体信息被算法剔除导致河流断流。在湖泊和水库样本中，受 SRTM 数据限制，水体中心会产生坡度较大的异常值；10 m 的水体边缘与 30 m 空间分辨率的坡度数据表现为“水体与坡度”的混合像元，这是利用坡度阈值辅助消除阴影噪声的主要误差来源。在坑塘、水渠等样本中，未正确提取的原因是由于细小水体的时空变化快；在进行水体采样时，往往是基于某一固定拍摄时期的影像进行采样，而多数小水体的积水频率值过低，未达到全年有效水体标准，这类验证样本的“真值”误差是未正确提取的主要原因。同时，水渠等细小水体其宽度往往较小，不足 2 个像元的沟渠、河流在影像上表现为混合像元，导致该类型水体的提取结果存在较大的不确定性 (图 8)。

(2) 亚像元尺度精度。选取长江流域下游的程店水库部分区域作为案例区，基于 2 m 分辨率影像目视解译水陆边界，进行亚像元精度评估，评估指标主要为亚像元层面的遗漏和错分误差 (Feyisa 等, 2014)。在混合边缘像元中，基于图 9 将水体占比大于 50% 的像素定义为水体，反之定义为非水体。根据统计，案例区像元总数为 6352 个，混合像元 214 个，占像元总数的 3.37%。纯水体像

元6138个，占总数的96.63%。混合像元中，水体占比大于50%的个数为161个，占混合像元总数的

75.23%。错分误差0.46%，漏分误差0.21%。表明该算法在抑制混合像元方面具有较优的效果。

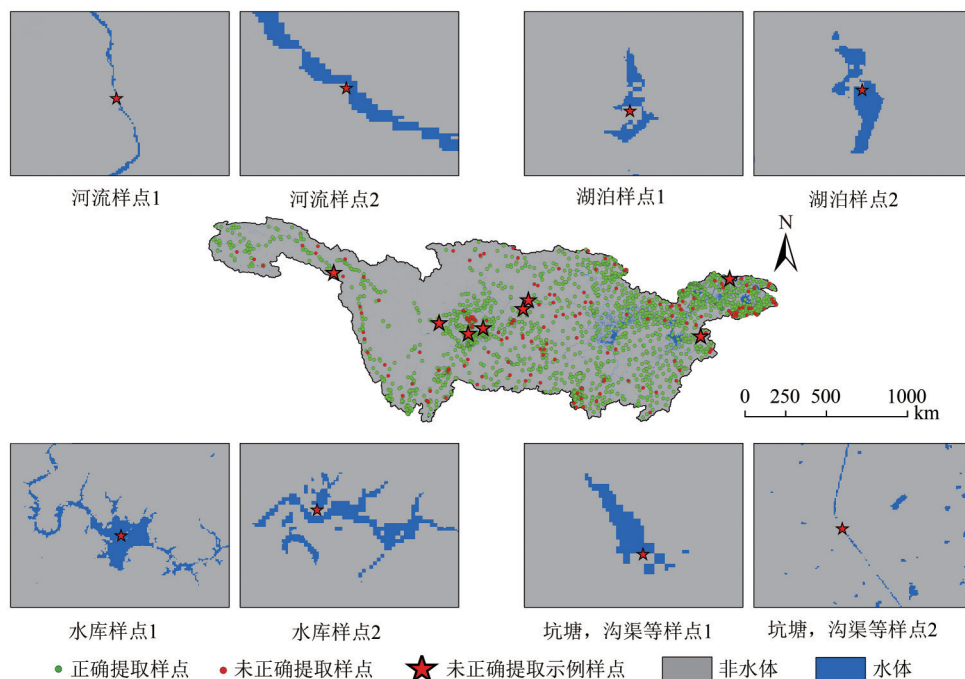


图8 长江流域水体提取结果精度验证局部放大图

Fig.8 Validation of partial enlargement map of water extraction results in the Yangtze River Basin

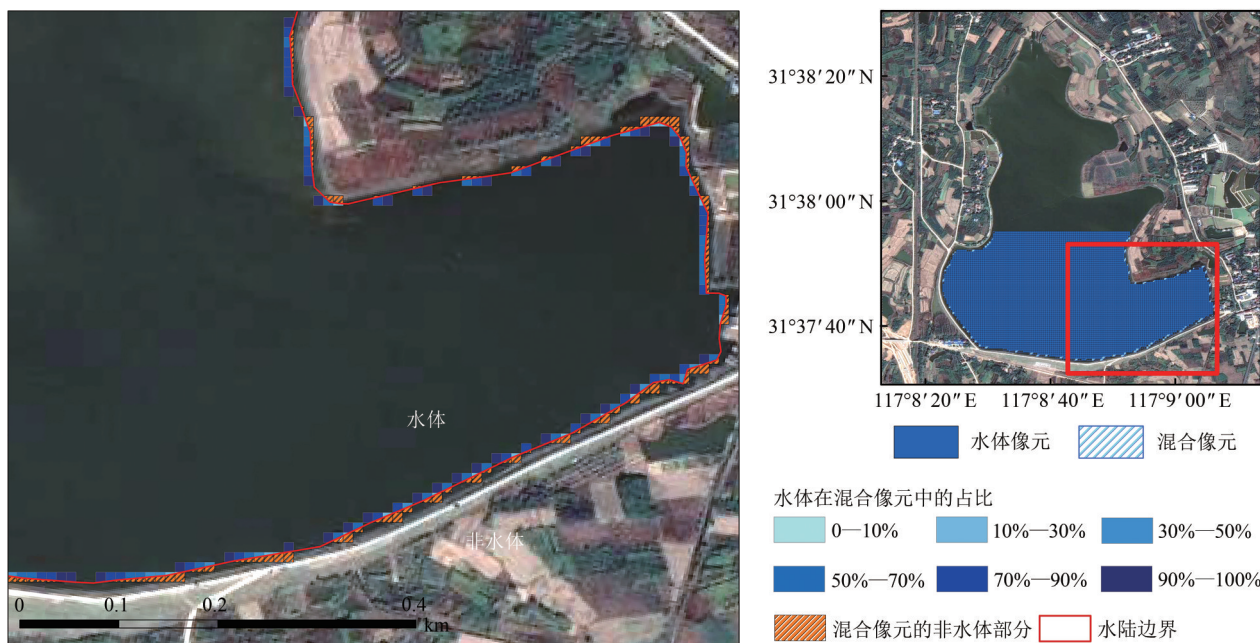


图9 水体在水陆边缘混合像元中的占比

Fig.9 The proportion of water in the mixed pixels on the edge of land and water

4.2 不同方法提取效果对比

选择建筑与山地阴影噪声较多的重庆西南部

城市高层建筑群区域和东北部山区作为案例区，比较5种方法（Du等，2016；Wang等，2018）

(表2)的提取效果,其中,地区一(城市案例区, 29°30'N, 106°30'E)和地区二(山区案例区, 31°5'N, 109°55'E)真实水体像元验证样本分别为15100个和68828个。结果表明,本文方法在控制水体错分率和像元匹配度方面相较于其他算法有

着明显的优势,但在漏分率上略低于其他方法(表2),原因是本研究中结合多指数的水体提取算法相较于单一指数在消除水陆边界混合像元方面的效果更为优越,剔除了大多数明显分类错误的混合像元。

表2 不同水体提取算法误差统计

Table 2 The error statistics of different water extraction algorithms

地区	算法	错分率/%	漏分率/%	像元匹配度/%	地区	算法	错分率/%	漏分率/%	像元匹配度/%
地区一 (城市案例区)	本研究算法	15.31	1.74	84.60	地区二 (山区案例区)	本研究算法	0.55	5.74	99.45
	NDWI	37.76	0.64	62.16		NDWI	3.00	4.89	97.00
	MNDWI	33.39	0.31	66.53		MNDWI	4.65	7.19	95.35
	NDWI+时间特征	29.60	1.28	70.30		NDWI+时间特征	17.63	4.64	82.35
	MNDWI+时间特征	26.40	1.52	73.54		MNDWI+时间特征	24.50	6.48	75.47

“NDWI/MNDWI+时间特征”的方法在提取城市区域的水体时效果较好,在山区利用“单幅影像+NDWI/MNDWI水体指数+经验阈值”提取效果好(图10)。本研究提出的基于时序影像结合多指数和“时间特征”的算法相较于传统的“单景影像+经验阈值”算法在城市区域和山区剔除阴影噪声方面更具优越性,且单景影像或合成影像在不

同地区的水体阈值往往差异较大,难以确定具有普适性的阈值。在高层建筑群中,受楼层过高或楼层间距过小等因素影响,导致区域内部分像元常年被阴影所覆盖,本研究算法仍无法做到将建筑阴影噪声完全消除;但相较于传统水体提取算法的精度在反射率较低的暗表面噪声地区不高问题已有非常明显的改善。

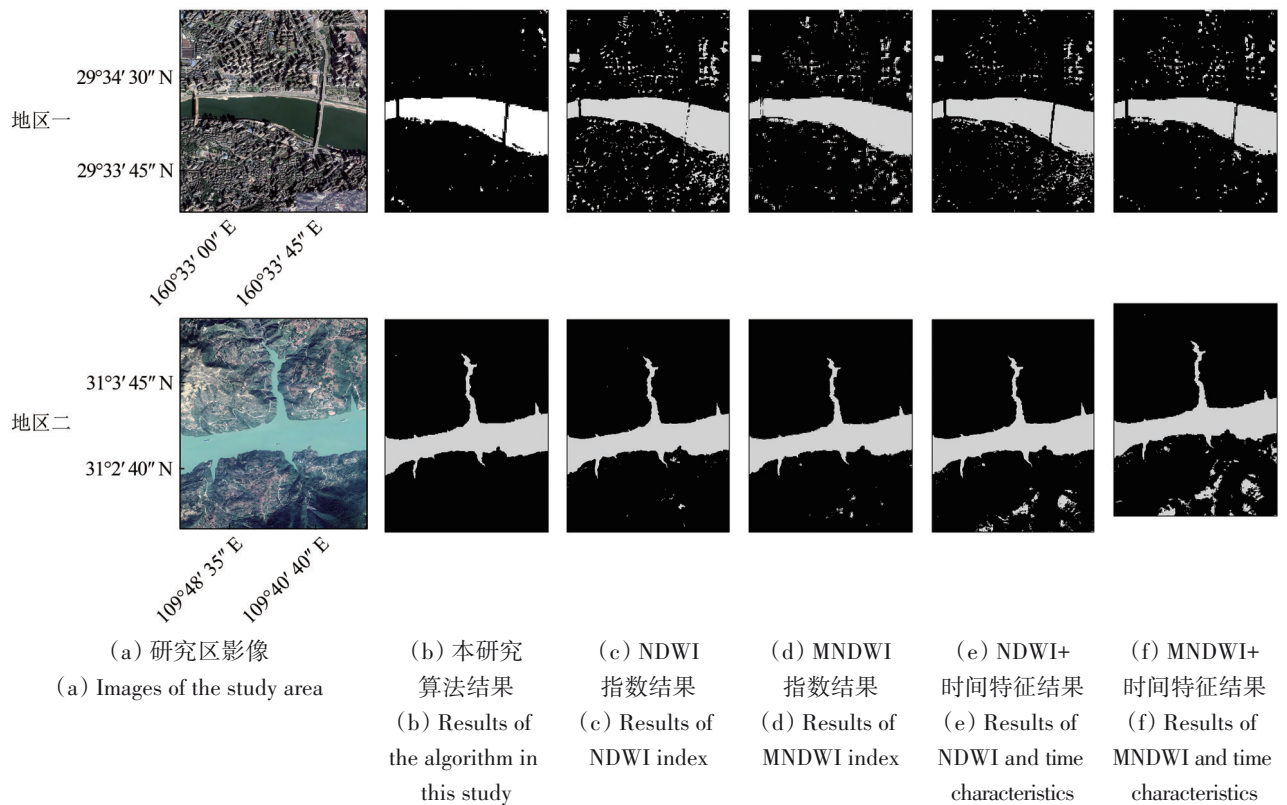


图10 不同水体提取算法结果对比

Fig.10 The comparison of results of different water extraction algorithms

4.3 不同水体产品效果对比

以玉树藏族自治州治多县、重庆市、岳阳市、苏州市作为典型案例区，选择2017年JRC全球水体数据与FROM-GLC10全球土地覆盖分类产品中

的水体进行对比分析（图11）。从图11和表3可以看出，本研究较JRC产品和FROM-GLC10产品提取出了更多水体，水体面积平均增加了8.11%和25.76%。

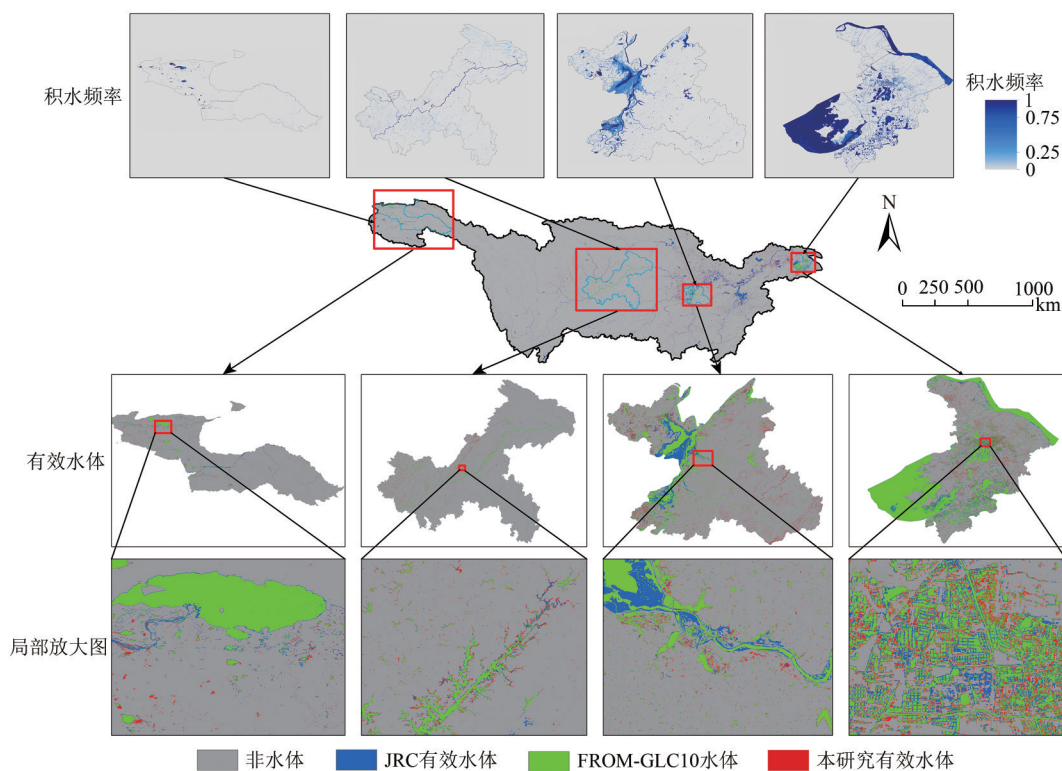


图11 不同水体产品结果对比

Fig.11 The comparison of results of different water products

表3 不同水体产品面积对比

Table 3 The area comparison of different water products

地区	本研究水体面积/km ²	JRC产品水体面积/km ²	FROM-GLC10产品水体面积/km ²	较JRC产品面积增加率/%	较FROM-GLC10产品面积增加率/%
治多县	5349.20	5061.93	4232.80	5.68	26.38
重庆市	1660.34	1351.62	1494.34	22.84	11.11
岳阳市	2429.46	2264.22	1594.92	7.30	52.32
苏州市	3743.83	3516.18	3306.91	6.47	13.21

大型水体（如大型河流、湖泊和水库等）和细小水体（如坑塘、水渠、养殖水面等）（Jiang等，2014）进一步采样验证的精度分析结果表明（表4），在治多县、重庆市、岳阳市和苏州市4个案例区，相较于JRC和FROM-GLC10产品，本研究在大型水体和细小水体的提取效果上均有明显的优势。JRC数据细小水体提取率低于本研究是由于其空间分辨率为30 m，会遗漏许多细小水体，河网也存在明显的不连续分布。FROM-GLC10产品由于其水体结果是静态的，无法体现出季节性水体分布，导致遗漏部分季节性水体。

4.4 长江流域水体提取结果

2017年—2020年，长江流域平均有效水体总面积为61054.55 km²，平均永久性水体总面积为35942.49 km²，平均季节性水体总面积为25112.05 km²，平均永久性水体面积占平均有效水体面积的58.87%，其中2018年有效水体面积最小，2020年有效水体面积最大（表5）。长江流域地表水体表现出明显的空间分布不均匀，水体分布由东南向西北递减（图12），其中流域内地表水体主要分布在中下游地区。如鄱阳湖流域、洞庭湖流域、太

湖流域和长江干流水系的水体面积在2017年—2020年，与全流域水体总面积的年均占比达76.37%。有效水体总面积表现为：东部地区>中部地区>西部地区。

表4 不同产品中大型水体与细小水体的提取效果评价
Table 4 Evaluation of extraction effect of large water and small water in different product

地区	本研究大型水体提取率	本研究细小水体提取率	JRC大型水体提取率	JRC细小水体提取率	FROM-GLC10大型水体提取率	FROM-GLC10细小水体提取率
治多县	96.10	95.39	89.61	78.80	62.34	53.92
重庆市	97.84	96.41	45.41	4.04	90.81	71.75
岳阳市	97.53	97.64	83.33	25.00	94.44	81.60
苏州市	96.06	95.93	74.80	18.10	90.55	47.96

表5 2017年—2020年长江流域不同类型地表水体面积
Table 5 The area of different types of surface water bodies from 2017 to 2020 in the Yangtze River Basin

年份/年	本研究季节性水体总面积/km ²	本研究永久性水体总面积/km ²	本研究有效水体总面积/km ²
2017	23137.30	36515.25	59652.55
2018	23031.75	34880.36	57912.11
2019	24257.78	34246.93	58504.71
2020	30021.38	38127.43	68148.81

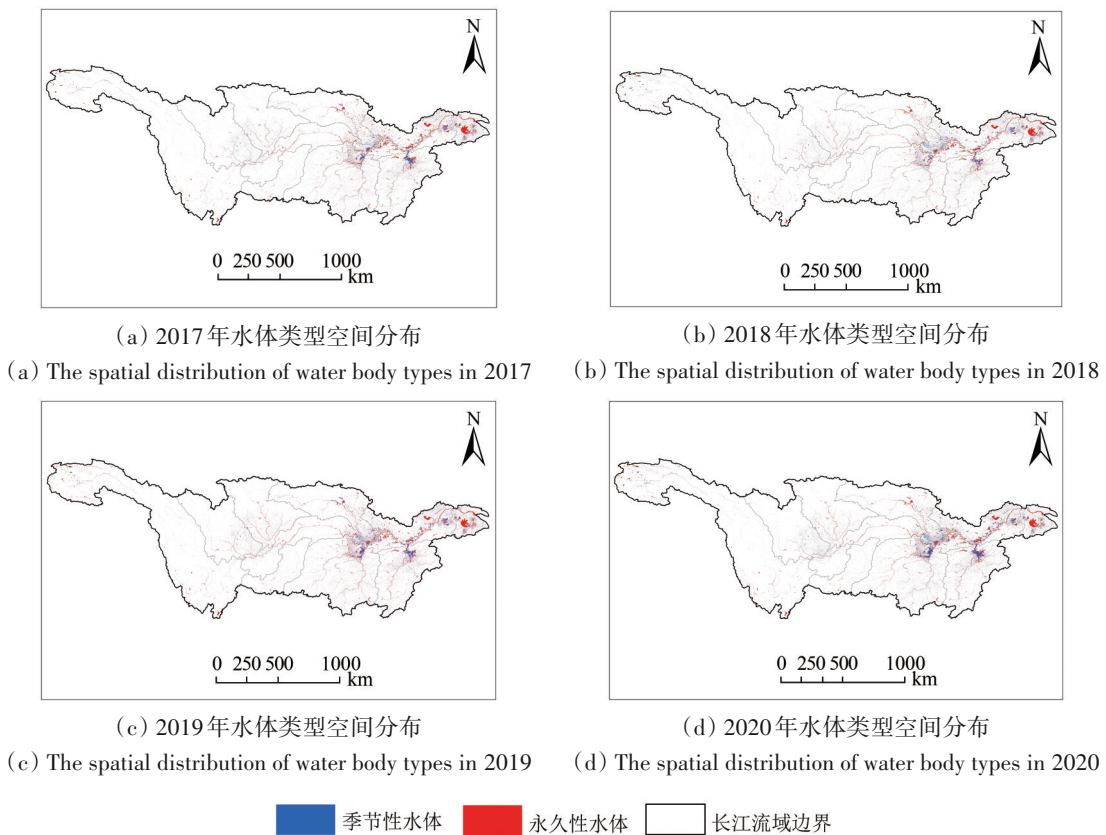


图12 2017年—2020年长江流域不同地表水体类型空间分布

Fig.12 The spatial distribution of different types of surface water bodies from 2017 to 2020 in the Yangtze River Basin

从年际变化看，长江流域2017年—2020年长江流域各水体类型面积总体呈上升趋势，下游上

升趋势大于中下游地区，上游地区地表水面积变化不明显。季节性水体总面积增加了29.75%，永

久性水体总面积增加了4.42%，有效水体总面积增加了14.24%。

2017年—2020年间，不同类型水体面积变化存在较大差异（图13、图14），主要表现为以下几个特征：（1）季节性水体增长较快，由非水体转化为季节性水体的面积为13403.86 km²，由非水体转化为永久性水体的面积相对较低，为2343.07 km²。（2）季节性水体与永久性水体之间的转化相对稳定，由永久性水体转化为季节性水体4555.05 km²，由季

节性水体转化为永久性水体4845.78 km²。（3）水体面积减少的部分，主要是季节性水体向非水体的转化，为6229.04 km²；而永久性水体的波动性较小，转化为非水体的面积为1021.55 km²。（4）永久性水体增加部分的67.41%是由季节性水体转化而来。季节性水体与非水体之间的转化最为常见，季节性水体增加的74.64%是由非水体转化而来，同时季节性水体减少的56.25%转化为了非水体。

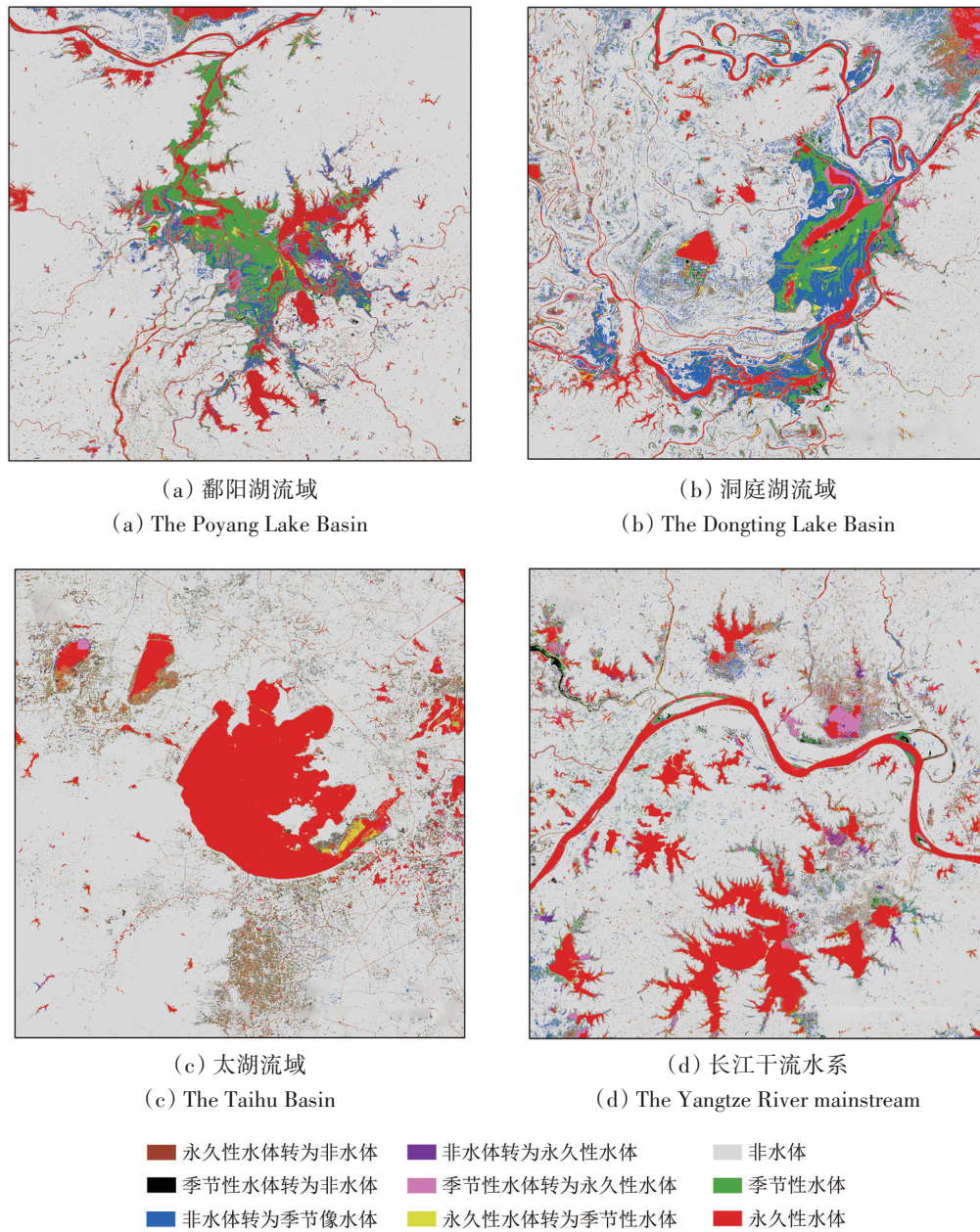


图13 2017年—2020年长江流域不同类型地表水体空间转化
Fig.13 The spatial conversion of different types of surface water from 2017 to 2020 in the Yangtze River Basin

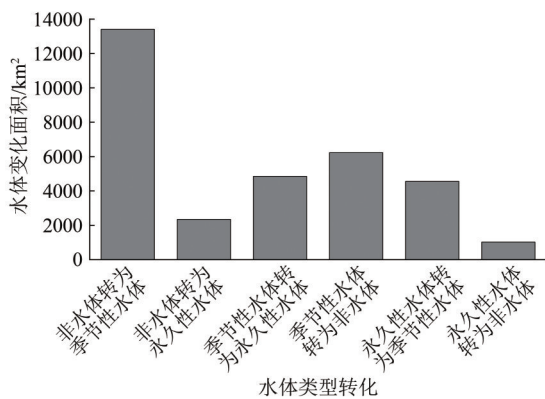


图 14 2017年—2020年长江流域地表水体转化

Fig.14 The conversion of surface water bodies from 2017 to 2020 in the Yangtze River Basin

5 结论

本研究基于GEE平台和多源数据,提出了一个结合像元时间特征的大尺度、长时序的多指数组合水体提取方法,对长江流域进行了地表水体遥感提取,主要结论如下:

(1) 基于大量水体和非水体样本生成散点密度图确定水体阈值,有效避免了人为确定阈值的偶然性和随机性。最大程度地减小了因水体光谱多样性、形态多样性和季节变化因素产生的误差,使得大尺度、长时序的水体提取更具普适性。

(2) 由于不同水体类型的形态、光谱和时空变化等特征差异明显,本文根据不同水体类型定量评估了水体识别精度,且总体提取率达96.92%,包括细小水体在内的不同类型水体均有较好的提取效果。亚像元精度评估表明本文算法能够在一定程度上消除水陆边界混合像元的影响。

(3) 选用城市高层建筑群地区和山区,对比传统水体提取算法在建筑阴影和地形阴影噪声环境下水体提取的有效性。本文算法得到的水体边界更为精确,能显著消除建筑阴影和山体阴影的影响,表明该方法较其他单一水体指数在消除噪声干扰方面具有一定优势。相较于部分现有水体数据产品,本文方法在水体提取面积和细小水体提取率上有着不同程度的提升,得到的水体结果更为精细。

(4) 长江流域地表水体在空间分布上表现出明显的不均匀性,鄱阳湖流域、洞庭湖流域、太湖流域和长江干流水系的年均水体面积占全流域水体总面积的76.37%。不同水体类型在年际和年

内上也有着显著的时空变化。永久性水体的增加主要是由季节性水体转化而来,占67.41%。季节性水体与非水体之间的相互转化最为明显,季节性水体增加的74.46%是由非水体转化而来,减少部分的56.25%转化成了非水体。

参考文献(References)

- Barton I J and Bathols J M. 1989. Monitoring floods with AVHRR. *Remote Sensing of Environment*, 30(1): 89-94 [DOI: 10.1016/0034-4257(89)90050-3]
- Buchhorn M, Lesiv M, Tsendbazar N E, Herold M, Bertels L and Smets B. 2020. Copernicus global land cover layers—collection 2. *Remote Sensing*, 12(6): 1044 [DOI: 10.3390/rs12061044]
- Chen H F, Wang J L, Chen Z, Yang L and Xi W J. 2004. Comparison of water extraction methods in Mountainous Plateau region from TM image. *Remote Sensing Technology and Application*, 19(6): 479-484 (陈华芳, 王金亮, 陈忠, 杨柳, 席武俊. 2004. 山地高原地区TM影像水体信息提取方法比较——以香格里拉县部分地区为例. *遥感技术与应用*, 19(6): 479-484) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-0323.2004.06.009]
- D'Andrimont R, Lemoine G and Van der Velde M. 2018. Targeted grassland monitoring at parcel level using sentinels, street-level images and field observations. *Remote Sensing*, 10(8): 1300 [DOI: 10.3390/rs10081300]
- Deng Y, Jiang W G, Tang Z H, Ling Z Y and Wu Z F. 2019. Long-term changes of open-surface water bodies in the Yangtze River Basin based on the google earth engine cloud platform. *Remote Sensing*, 11(19):2213 [DOI: 10.3390/rs11192213]
- Du Y, Zhang Y H, Ling F, Wang Q M, Li W B and Li X D. 2016. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. *Remote Sensing*, 8(4): 354 [DOI: 10.3390/rs8040354]
- Farr T G, Rosen P A, Caro E, Crippen R, Duren R, Hensley S, Kobrick M, Paller M, Rodriguez E, Roth L, Seal D, Shaffer S, Shimada J, Umland J, Werner M, Oskin M, Burbank D and Alsdorf D. 2007. The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2): (RG2004) [DOI: 10.1029/2005RG000183]
- Feyisa G L, Meilby H, Fensholt R and Proud S R. 2014. Automated water extraction index: a new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140: 23-35 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.029]
- Gong P, Liu H, Zhang M N, Li C C, Wang J, Huang H B, Clinton N, Ji L Y, Li W Y, Bai Y Q, Chen B, Xu B, Zhu Z L, Yuan C, Ping Suen H, Guo J, Xu N, Li W J, Zhao Y Y, Yang J, Yu C Q, Wang X, Fu H H, Yu L, Dronova I, Hui F M, Cheng X, Shi X L, Xiao F J, Liu Q F and Song L C. 2019. Stable classification with limited sam-

- ple: transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017. *Science Bulletin*, 64(6): 370-373 [DOI: 10.1016/j.scib.2019.03.002]
- Gu X Z, Zeng Q W, Shen H, Chen E X, Zhao L, Yu F and Tu K. 2019. Study on water information extraction using domestic GF-3 image. *International Journal of Remote Sensing*, 23(3): 555-566 (谷鑫志, 曾庆伟, 谌华, 陈尔学, 赵磊, 于飞, 涂宽. 2019. 高分三号影像水体信息提取. *遥感学报*, 23(3): 555-566) [DOI: 10.11834/jrs.20198171]
- Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez E P, Gao X and Ferreira L G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1/2): 195-213 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2]
- Jiang H, Feng M, Zhu Y Q, Lu N, Huang J X and Xiao T. 2014. An automated method for extracting rivers and lakes from Landsat imagery. *Remote Sensing*, 6(6): 5067-5089 [DOI: 10.3390/rs6065067]
- Jupp D L B, Mayo K K, Kuchler D A, Claasen D V R, Kenchington R A and Guerin P R. 1985. Remote sensing for planning and managing the great barrier reef of Australia. *Photogrammetria*, 40(1): 21-42 [DOI: 10.1016/0031-8663(85)90043-2]
- Kaplan G and Avdan U. 2017. Object-based water body extraction model using Sentinel-2 satellite imagery. *European Journal of Remote Sensing*, 50(1): 137-143 [DOI: 10.1080/22797254.2017.1297540]
- Li Y, Niu Z G, Xu Z Y and Yan X. 2020. Construction of high spatial-temporal water body dataset in China based on sentinel-1 archives and GEE. *Remote Sensing*, 12(15): 2413 [DOI: 10.3390/rs12152413]
- Lillesand T M, Kiefer R W and Chipman J W. 2015. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 7th ed. Hoboken: John Wiley and Sons.
- Lu J J and Li S H. 1992. Improvement of the techniques for distinguishing water bodies from TM Data. *National Remote Sensing Bulletin*, 7(1): 17-23 (陆家驹, 李士鸿. 1992. TM资料水体识别技术的改进. *环境遥感*, 7(1): 17-23)
- McFeeters S K. 1996. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7): 1425-1432 [DOI: 10.1080/01431169608948714]
- Moëller-Jensen L. 1990. Knowledge-based classification of an urban area using texture and context information in Landsat-TM imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56(6): 899-904
- Otsu N. 1979. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1): 62-66 [DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076]
- Pekel J F, Cottam A, Gorelick N and Belward A S. 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633): 418-422 [DOI: 10.1038/nature20584]
- Rouse Jr J W, Haas R H, Schell J A and Deering D W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS//Proceedings of 3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Greenbelt: NASA: 309
- Soti V, Tran A, Bailly J S, Puech C, Lo Seen D and Bégué A. 2009. Assessing optical earth observation systems for mapping and monitoring temporary ponds in arid areas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 11(5): 344-351 [DOI: 10.1016/j.jag.2009.05.005]
- Sun G Y, Huang H, Weng Q H, Zhang A Z, Jia X P, Ren J C, Sun L and Chen X L. 2019. Combinational shadow index for building shadow extraction in urban areas from sentinel-2A MSI imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 78: 53-65 [DOI: 10.1016/j.jag.2019.01.012]
- Wang G H, Pei L, Du Q Y and Li X. 2020. Spectral relation method for water body extraction from ZY-3 imagery. *Remote Sensing Information*, 35(3): 117-121 (王国华, 裴亮, 杜全叶, 李旋. 2020. 针对资源三号卫星影像水体提取的谱间关系法. *遥感信息*, 35(3): 117-121) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2020.03.016]
- Wang Z F, Liu J G, Li J B and Zhang D D. 2018. Multi-spectral water index (MuWI): a native 10-m multi-spectral water index for accurate water mapping on Sentinel-2. *Remote Sensing*, 10(10): 1643 [DOI: 10.3390/rs10101643]
- Xu H Q. 2005. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI). *Journal of Remote Sensing*, 9(5): 589-595 (徐涵秋. 2005. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究. *遥感学报*, 9(5): 589-595)
- Xu H Q. 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14): 3025-3033 [DOI: 10.1080/01431160600589179]
- Yan M C. 2005. Extraction of information about water area change in Nanjing City in the past ten years based on TM data. *Water Resources Protection*, 21(6): 31-33 (颜梅春. 2005. 基于TM数据的水域变化信息提取研究. *水资源保护*, 21(6): 31-33) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2005.06.008]
- Yang X C, Chen Y and Wang J Z. 2020a. Combined use of Sentinel-2 and Landsat 8 to monitor water surface area dynamics using Google Earth Engine. *Remote Sensing Letters*, 11(7): 687-696 [DOI: 10.1080/2150704x.2020.1757780]
- Yang X C, Qin Q M, Grussenmeyer P and Koehl M. 2018. Urban surface water body detection with suppressed built-up noise based on water indices from Sentinel-2 MSI imagery. *Remote Sensing of Environment*, 219: 259-270 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.09.016]
- Yang X C, Qin Q M, Yésou H, Ledauphin T, Koehl M, Grussenmeyer P and Zhu Z. 2020b. Monthly estimation of the surface water extent in France at a 10-m resolution using Sentinel-2 data. *Remote Sensing of Environment*, 244: 111803 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111803]
- Zou Z H, Xiao X M, Dong J W, Qin Y W, Doughty R B, Menarguez M A, Zhang G L and Wang J. 2018. Divergent trends of open-surface water body area in the contiguous United States from 1984 to 2016. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(15): 3810-3815 [DOI: 10.1073/pnas.1719275115]

Surface water extraction in Yangtze River Basin based on sentinel time series image

LIU Yuchen^{1,2}, GAO Yongnian³

1. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China

Abstract: Traditional water extraction algorithms are mostly based on single-scene remote sensing image of a certain period and cannot show the highly variable characteristics of water bodies over time and space. Although some time series water products have appeared in China and abroad, their spatial resolution and water boundary accuracy still cannot meet the needs of some studies and applications. This paper takes the Yangtze River Basin with complex surface environment as the research area based on the Google Earth Engine (GEE) cloud platform. The Sentinel-2 MSI annual long time series image sets are combined with the “temporal characteristics” of pixels, and a high-precision water extraction algorithm with more universality, operability, and better effect in large-scale environment is proposed. Specifically, an algorithm based on time series image data is combined with multi-index and “temporal characteristic” fusion Digital Elevation Model (DEM). This algorithm selects automated water extraction index, Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), normalized difference vegetation index, and enhanced vegetation index for multi-index logical combination to extract water bodies. Near-infrared band reflectivity value and slope data set generated by SRTM DEM are used to assist in suppressing high reflectivity noise and shadow noise. The accuracy of water bodies in the whole basin is verified with the validation sample points, and the correct extraction rate is more than 96% through visual interpretation. The accuracy evaluation at the subpixel level shows that the mixed edge pixels account for 3.37% of the total pixels, the misclassification error is 0.46%, and the omission error is 0.21%, indicating that the proposed algorithm has a good inhibitory effect on the mixed pixels. Compared with the traditional NDWI and MNDWI water index based on spectral characteristics, the multi-index combined with temporal characteristic algorithm has better effect in suppressing shadow noise. Compared with some existing water products, the proposed algorithm can ensure the integrity of the whole water area and retain the local details of the water body. It has certain advantages in the extraction of small water bodies. Results of the remote sensing extraction of water bodies in the Yangtze River Basin show that the spatial distribution of water bodies in the basin is uneven, and the temporal and spatial changes in various water body types are obvious. From 2017 to 2020, 67.41% of the increase in permanent water bodies is transformed from seasonal water bodies, and the mutual conversion between seasonal water bodies and nonwater bodies is the most obvious. In addition, 74.64% of the increase in seasonal water bodies is converted from nonwater bodies, and 56.25% of the decrease in seasonal water bodies is converted to nonwater bodies. Experimental results show that the proposed algorithm has a certain universal importance in extracting water bodies in different spatiotemporal locations and different environments and can effectively avoid the phenomenon of “the same objects with different spectra” and “the same spectra with different objects” caused by the mixing of water and other ground objects. This algorithm has a good inhibitory effect on complex background noise and has high accuracy and precision.

Key words: Google Earth Engine(GEE), Sentinel-2, remote sensing extraction of water bodies, temporal characteristics, multi-index combination, shadow noise

Supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. B210201035); National Water Pollution Control and Treatment Science and Technology Major Special Project (No. 2017ZX07203002-02)