

Sentinel-2 遥感图像的细小水体提取

吴庆双¹, 汪明秀^{1,2}, 申茜², 姚月², 李俊生², 张方方², 周亚明³

1. 安徽师范大学 地理与旅游学院, 芜湖 241000;
2. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;
3. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094

摘要: 基于卫星遥感的水体提取算法对面积较大的水体效果较好, 应用于细小水体时受混合像元、异物同谱等因素影响, 容易出现误判。Sentinel-2 卫星多光谱遥感数据空间分辨率为 10 m、20 m、60 m, 双星时间分辨率 5 d, 时间和空间分辨率较高, 因此本文采用了 Sentinel-2 绿光波段 (560 nm)、红边波段 (705 nm)、近红外波段 (842 nm、865 nm) 和短波红外波段 (2190 nm) 的遥感反射率, 提出了一种植被红边水体指数算法 RWI (Vegetation Red Edge based Water Index)。对比分析了植被、阴影、建筑物、混合像元、裸土、水体 6 种地物的归一化遥感反射率, 从机理上解释了为什么 RWI 比其他水体指数具有更好的提取细小水体的效果。本文对比了常用的几种水体提取算法, 包括改进的归一化差异水体指数 MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index)、多波段水体指数 MBWI (Multi-Band Water Index)、自动水提取指数 AWEI (Automated Water Extraction Index), 以人工目视解译的水体结果为准, 对比以上几种算法得到的水体提取结果, 得出 RWI、MNDWI、MBWI、AWEI_{sh}、AWEI_{ns} 的面积提取差异分别为 3.6%、4.2%、12.2%、8.8%、19.8%。从结果可以看出 RWI 算法精度最高。从影像提取结果来看, 本文提出的 RWI 算法提取的水体边界效果更佳, 而且能够一定程度上消除山体 and 建筑物阴影、云阴影以及混合像元的影响。同时, 在 2016-01—2018-12 时间范围内筛选选取了共 43 景无云的 Sentinel-2 影像, 利用本文提出的算法对雄安新区、神东矿区、永城矿区 3 个区域的细小水体分布开展了多时相分析。观察后发现每个时相的结果均十分良好, 细小水体的边界区分度较高, 基本没有错提、漏提, 算法具有良好的适用性和稳定性。

关键词: 水体提取, 水体指数, 细小水体, Sentinel-2, RWI, MNDWI, MBWI, AWEI

引用格式: 吴庆双, 汪明秀, 申茜, 姚月, 李俊生, 张方方, 周亚明. 2022. Sentinel-2 遥感图像的细小水体提取. 遥感学报, 26(4): 781-794

Wu Q S, Wang M X, Shen Q, Yao Y, Li J S, Zhang F F and Zhou Y M. 2022. Small water body extraction method based on Sentinel-2 satellite multi-spectral remote sensing image. National Remote Sensing Bulletin, 26(4): 781-794 [DOI: 10.11834/jrs.20229340]

1 引言

目前使用遥感影像提取水体的算法很多, 一般而言, 这些方法大致可以分为单波段法 (杨莹等, 2010; Lu 等, 2011)、谱间关系法 (殷青军和杨英莲, 2005; 杨明华, 2008)、影像分类法 (陈杰, 2010) 和水体指数法等几个类别, 其中水体指数法被研究人员广泛采用。国内外较有影响力的水体指数算法主要包括以下几种: 归一化差异

水体指数 NDWI (Normalized Difference Water Index), 削弱了植被土壤等非水体因素的影响, 其在一般的大型湖库水体提取上卓有成效, 但在城区的水体提取中仍包含大量的干扰信息 (McFeeters, 1996)。改进的归一化差异水体指数 MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) 是在 NDWI 方法的基础上, 利用 Landsat TM 短波红外 (TM5) 代替近红外波段 (TM4) 提出的, MNDWI 能够削弱土壤和建筑物的影响, 对于城区的建筑

收稿日期: 2019-10-24; 预印本: 2020-03-17

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 41571361); 国家重点研发计划 (编号: 2017YFB0503902); 中科院战略性先导科技专项 (编号: XDA23040102)

第一作者简介: 吴庆双, 研究方向为 GIS 应用于遥感分析。E-mail: wuqing@ahnu.edu.cn

通信作者简介: 申茜, 研究方向为内陆水环境遥感, 黑臭水体遥感。E-mail: shenqian@nadi.ac.cn

物阴影的去处也有较好的效果(徐涵秋, 2005)。水体指数 WI_{2006} (Water Index) 利用 Landsat 7 ETM+ 影像的每个波段的自然对数来反映反射系数和相互作用条件, 并用来对覆盖横跨澳大利亚东部的湿地进行提取(Danaher和Collett, 2006)。增强型水体指数EWI (Enhanced Water Index) 是利用TM影像的绿光波段(TM2) 近红外波段(TM4) 和中红外波段(TM5) 构建的, 并使用此方法提取了半干旱地区的水系信息, 该指数的创建忽略了大气因素的影响(闫霏等, 2007)。分析增强型水体指数EWI的创建过程, 验证了无论遥感影像是否经过大气校正, 都能很好地对水体进行提取(徐涵秋, 2008)。修正的归一化差异水体指数RNDWI (Revised Normalized Difference Water Index) 是在分析水体、植被和土壤3种地物类型光谱特性的基础上构建的, 能够剔除山体阴影的影响, 而且利用该指数能够准确地提取密云水库水陆边界(曹荣龙等, 2008)。新型水体指数NWI (New Water Index) 是结合水体在近红外和中红外波段同时具有强吸收的特点提出的, NWI可以部分消除由太阳高度角、地形、阴影和大气条件等带来的影响, 其精度很高(丁凤, 2009)。新型水体指数NEW是利用TM/ETM+影像的蓝绿波段(TM1) 和中红外波段(TM7) 构造的波段比值算法, 该指数不但能够很好提取自然水体, 还可以消除地形差异的影响, 从而解决了水体信息中含有阴影的问题(肖艳芳等, 2010)。自动水体提取指数AWEI是基于TM影像数据提出的, AWEI的主要目标是通过波段间相减、相加以及给波段赋予不同的系数来达到将水体和非水体像元进行最大程度分离的目的, 经过验证AWEI在提取水体信息方面比MNDWI具有更高的精度(Feyisa等, 2014)。水体指数 WI_{2015} (Water Index) 是在 WI_{2006} 的基础上提出的一个新的基于线性判别分析的水体提取算法, 该指数用线性判别分析分类LDAC (Liner Discriminant Analysis Classification) 确定最佳分割训练区类别的系数, 提高了分类精度(Fisher等, 2016)。多波段水体指数MBWI (Multi-Band Water Index), 能够削弱山区阴影和建筑物暗像元的影响, 同时能够减轻由于太阳条件变化而产生的季节性影响(Wang等, 2018; 王小标等, 2018)。

目前也有部分学者, 基于Sentinel-2数据对

水体提取算法进行了研究。Du等(2016)基于Sentinel-2数据和全色锐化方法, 使用NDWI和MNDWI分别对威尼斯海岸进行了水体提取, 结果表明与10 m NDWI和20 m MNDWI相比, 10 m MNDWI可用于提取更准确的水体图。Wang等(2018)基于Sentinel-2数据, 提出一种新的多光谱水体指数(Multi-Spectral Water Index), 该方法能够生成10 m分辨率的水体图像, 具有较高精度。Yang等(2018)基于Sentinel-2数据, 针对城市水体计算MNDWI和AWEI后, 使用CEM (Constrained Energy Minimization) 目标检测算法去除噪声, 提高了水体提取的精度。王大钊等(2019)以鄱阳湖为研究区, 基于Sentinel-2和Landsat 8 OLI数据分别使用NDWI、MNDWI、AWEI、 WI_{2015} 等4种水体指数提取水体, 并使用目视解译结果对水体提取结果进行精度验证, 表明AWEI和WI精度最高。

洪亮等(2019)针对传统FCM聚类算法的不足, 基于高分二号影像提出一种可变邻域的区域FCM聚类算法。同时证明了该算法具有较高的水体提取精度, 城市地表水体边界既具有较好的区域完整性又保持了局部细节, 同时对城市地表水体复杂背景噪声具有较好的抑制作用, 有效减少传统FCM聚类算法的“胡椒盐”现象。

同时, 目前已有的针对大中型水体提取的算法较多, 提取对象多为面积较大的水体, 包括大中型湖库和大型河流等, 缺乏提取细小水体的算法。细小水体之所以提取难度较大, 主要是由于其十分容易受到混合像元的影响。

目前对于遥感影像上的细小水体并没有约定俗成的定义, Jiang等(2014)将细小水体定义为影像中像元表观宽度小于或者等于3个像元的狭小水体。从水体遥感分类的角度, 用像元数度量自然水体的细小比较合适, 便于建立的水体指数和遥感提取方法的普适性。本文将细小水体定义为影像中像元表观宽度大于等于5个像元且小于等于15个像元的细小河流或水塘。本文选取了以细小水体为主的区域作为研究区, 寻求一种基于Sentinel-2影像的专门针对细小水体的水体提取算法。但是为了让该算法不仅适用于细小水体, 而且也适用于大型水体, 本文在算法检验和评价时没有特意区分细小水体和其他水体, 而是整体评价了水体提取结果。

2 数据源与研究区

2.1 研究区

本文选取的研究区分别是雄安新区、神东矿区、永城矿区以及于桥水库。雄安新区位于河北省保定市境内, 经纬度在 $38^{\circ}43'N-39^{\circ}12'N$, $115^{\circ}42'E-116^{\circ}24'E$; 神东矿区是神府东胜矿区的简称, 现为中国最大的井工煤矿开采地, 位于陕西省榆林市神木市, 经纬度在 $38^{\circ}46'N-39^{\circ}44'N$, $109^{\circ}49'E-111^{\circ}06'E$; 永城矿区是中国6大无烟煤基地之一, 位于河南省永城市, 经纬度在 $116^{\circ}19'N-116^{\circ}26'N$, $33^{\circ}57'E-34^{\circ}02'E$; 于桥水库是国家重点大型水库之一, 属于大型水体, 水体提取相对容易, 位于天津市蓟州区, 经纬度在 $40^{\circ}00'N-$

$40^{\circ}06'N$, $117^{\circ}25'E-117^{\circ}44'E$ 。具体位置如图1所示。本文将细小水体定义为影像中像元表观宽度大于等于5个像元且小于等于15个像元的细小河流或水塘。本文选取的雄安新区以及两个煤炭矿区内的地表水体多为很小的坑塘和细长的河流, 在Sentinel-2影像上像元表观宽度小于15个像元的地表水体占主体。雄安新区内的地表水体以白洋淀为主体, 白洋淀区被划分为众多大大小小的水塘, 同时分布着交错的细小航道, 导致水体细小破碎, 水体边界不易区分。随着神东矿区以及永城矿区煤炭开采规模逐步扩大, 因采煤引起的地面塌陷、地表裂缝增加, 形成大大小小的水坑, 同时矿区内因为洗煤、炼煤等建造了许多储水池, 因此矿区内的水体细小破碎, 水体提取困难。

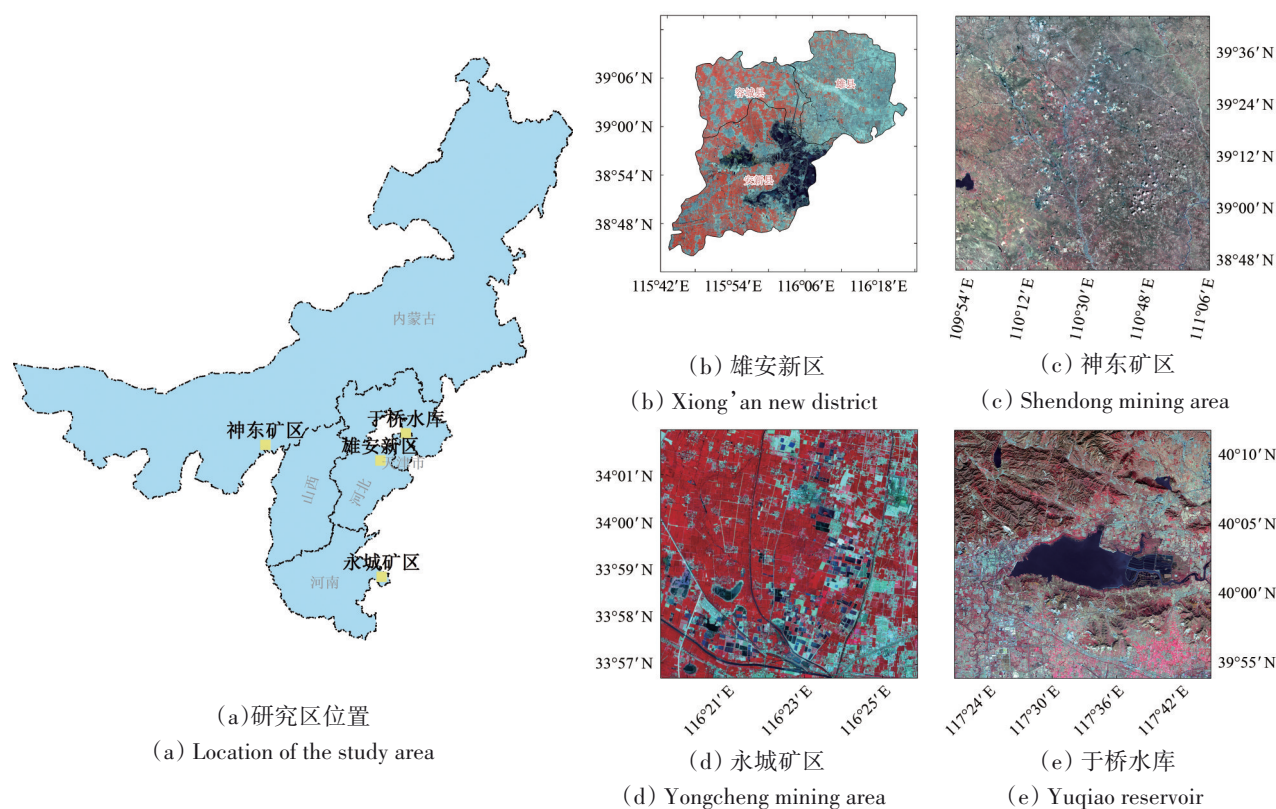


图1 研究区示意图(RGB:8,4,3)
Fig. 1 Study area schematic (RGB:8,4,3)

2.2 遥感数据

Sentinel-2 卫星多光谱遥感数据空间分辨率为 10 m、20 m、60 m, 双星时间分辨率 5 d, 时间和空间分辨率较高, Sentinel-2 共有 13 个波段, 其中波段绿光波段中心波长 560 nm、红边波段中心波长 705 nm、近红外波段中心波长有两个分别为

842 nm 和 865 nm、短波红外波段中心波长 2190 nm (ESA, 2015)。

选择雄安新区、神东矿区、永城矿区 2016 年、2017 年、2018 年春夏秋 3 季 Sentinel-2 影像进行水体提取研究, 其中, 春季为 4—5 月, 夏季为 6—8 月, 秋季为 9—10 月。由于雄安新区在 3 景

Sentinel-2 影像交界处, 使用欧空局推荐的哨兵数据应用平台 (Sentinel Application Platform, 简称 SNAP, 版本 6.0.0) 对同一天的影像进行镶嵌; 神东矿区、永城矿区和于桥水库能够被 1 景影像覆盖, 不需要镶嵌。于桥水库仅仅选择 2018-11-01 1 景影像。共选择了 43 景影像。所有影像均在 SNAP 环境下基于 Sen2cor 插件 (版本 2.5.5) 进行大气校正, 得到地表反射率, 除以 π , 近似计算得到遥感反射率 R_{rs} 图像。使用 SNAP 平台提供的重采样算法, 将空间分辨率是 20 m (705 nm、865 nm) 和 60 m (2190 nm) 的波段, 都重采样到 10 m 分辨率。具体的影像选取如表 1 所示。

表 1 影像选取时间表

Table 1 Xiong'an new district image selection schedule				
区域	季节	2016年 (月-日)	2017年 (月-日)	2018年 (月-日)
雄安新区	春	5-13	4-18	5-23
	夏	6-22	6-27	6-12
	秋	10-10	10-05	10-05
神东矿区	春	4-29	5-24	5-24
	夏	8-07	6-13	6-13, 8-22
永城矿区	秋	—	—	10-06
	春	—	5-25	4-25
	夏	8-28	7-24	6-14
	秋	9-17	9-22	10-02

3 方法

3.1 方法提出

本文提出了一种新的水体指数 RWI, 专门用于 Sentinel-2 提取细小水体, 使用大气校正后的遥感反射率作为输入, 公式为

$$RWI = \frac{(R_{rs}(560) + R_{rs}(705)) - (R_{rs}(842) + R_{rs}(865) + R_{rs}(2190))}{R_{rs}(560) + R_{rs}(705) + R_{rs}(842) + R_{rs}(865) + R_{rs}(2190)} = \frac{R_{rs}^*(560) + R_{rs}^*(705) - (R_{rs}^*(842) + R_{rs}^*(865) + R_{rs}^*(2190))}{R_{rs}^*(560) + R_{rs}^*(705) + R_{rs}^*(842) + R_{rs}^*(865) + R_{rs}^*(2190)} \quad (1)$$

式中, RWI 为新建的水体指数。 $R_{rs}(560)$ 、 $R_{rs}(705)$ 、 $R_{rs}(842)$ 、 $R_{rs}(865)$ 、 $R_{rs}(2190)$ 分别为 Sentinel-2 第 3、5、8、8A 和 12 波段的遥感反射率, R_{rs}^* 归一化处理后的遥感反射率。本文提出的水体指数采用波段比值的形式, 即采用了归一化处理, 可以一定程度消除背景值的影响。

为了分析 RWI 指数为什么可以将水体从各种典型地物中区分出来, 这里需要先对不同典型地物遥感反射率做归一化处理。首先在 Sentinel-2 影像上分别选取水体、建筑物、植被、混合像元、阴影、裸土各均匀区域的 50 个像元, 对遥感反射率分别取均值作为该地物的遥感反射率, 然后除以各波段的总和, 输出归一化的遥感反射率 R_{rs}^* 。对比 6 种地物在对应第 3、5、8、8A、12 波段上的 R_{rs}^* 如图 2 所示。

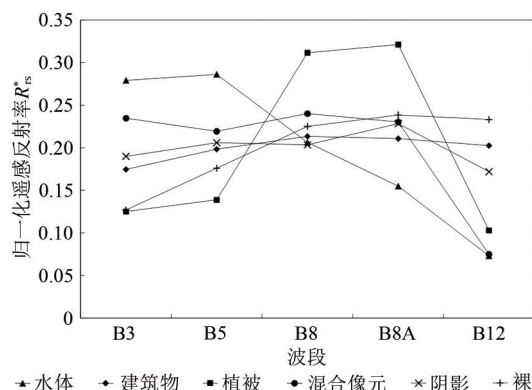


图 2 6 种地物的归一化遥感反射率 (以雄安新区 Sentinel-2 影像为例)

Fig. 2 Normalized remote sensing reflectance of six kinds of features (Taking the Sentinel 2 image of Xiong'an New District as an example)

B5 (705 nm) 和 B8A (865 nm) 波段是 Sentinel-2 数据具有的特殊波段。可以看出, 作为被减数的 B5 波段, 水体的 R_{rs}^* 明显高于其他 5 种地物, 数值约高 30%。作为减数的 B8A 波段, 水体的 R_{rs}^* 明显低于其他 5 种地物, 数值约低 20%。此外, 水体的 R_{rs}^* 也明显高于其他 5 种地物的 B3 波段也作为了被减数, 水体的 R_{rs}^* 也明显低于其他 5 种地物的 B12 波段也作为了减数, 而 B12 波段建筑物和裸土的 R_{rs}^* 很高, 更是放大了这种差异。虽然, B8 波段 R_{rs}^* 差异不如其他 4 个波段那么大, 但是水体的 R_{rs}^* 仍低于其他 5 种地物, 因此也作为了减数。综上, 水体对应的 RWI 明显大于其他地物对应的 RWI。

虽然从图 2 中显示, 水体的 RWI 为正数, 但是水体具有复杂多样性, 实际上水体的 RWI 结果有正数也有负数, 但是水体的 RWI 值仍会比其他各种地物大。

RWI 相比其他两种常见的水体指数 NDWI 和 MNDWI 的优势, 也可以从图 2 得出。

NDWI 是 McFeeters (1996) 提出的水体指数,

公式为

$$NDWI = \frac{\text{band3} - \text{band8}}{\text{band3} + \text{band8}} \quad (2)$$

式中, NDWI 为归一化差异水体指数, band3、band8 原使用 TM 的第 2 和第 4 波段的地表反射率作为输入, 在本文中 band3、band8 分别为 Sentinel-2 第 3 波段和第 8 波段的遥感反射率。

从以上分析可以看出, RWI 采用了 5 个特征波段, 而 NDWI 仅仅采用了这 5 个特征波段中的两个, 即 R_{rs}^* 差异较大的 B3 波段和 R_{rs}^* 差异相对较小的 B8 波段, 因此 B3 波段的 R_{rs}^* 与 B8 的差值, 必然比不上 $(B3+B5)-(B8+B8A+B12)$ 的差值所形成的水体与其他地物如此大的差异。

MNDWI 是徐涵秋在 NDWI 方法的基础上改进的水体指数, 能够削弱土壤和建筑物的影响, 对于城区的建筑物阴影的去除也有较好的效果。公式为

$$MNDWI = \frac{\text{band3} - \text{band11}}{\text{band3} + \text{band11}} \quad (3)$$

式中, MNDWI 为改进的归一化差异水体指数, band3、band11 原使用 TM/ETM+ 的第 2 和第 5 波段的地表反射率作为输入, 在本文中 band3、band11 分别为 Sentinel-2 第 3 波段和第 11 波段的遥感反射率。从以上分析可以看出, MNDWI 采用了 R_{rs}^* 差异较大的 B3 波段, 和一个短波红外波段, 共 2 个特征波段。MNDWI 的水体提取效果应该会比 NDWI 更好, 但是仍然会比 RWI 方法差。

需要注意的是, 对于浑浊水体, 705 nm 的反射率比较高, 尤其是富营养化水体, 705 nm 附近会有一个反射峰, 如图 2 所示。对于清洁水体, B5 (705 nm) 处的遥感反射率相对浑浊水体会降低, 会使得图 2 中 B5 (705 nm) 波段水体的 R_{rs}^* 容易与其他地物发生混淆, 从而略微降低水体提取精度。因此, 理论上来说本文提出的 RWI 方法对于浑浊水体的效果更好, 对于清洁水体的效果会略差。由于本文选取的研究区为雄安新区和两个矿区, 3 个区域内的地表水体均不属于清洁水体, 因此本文未对浑浊水体和清洁水体提取效果进行比较。

3.2 阈值选择

统计了多期 (20 多期) 的影像提取结果, 总结给出了区分水体和其他地物的阈值范围大致在 $-0.2-0$ 。

一般来说, 为了确定最优阈值, 需要人工反

复调整, 尽量做到在提取出大部分水体的同时减少其他区域的误识别, 保证最佳的分割效果。举例来说, 以 2018 年雄安新区春夏秋冬四季影像的阈值选择为例, 春季影像使用 RWI 方法进行水体提取时直方图会出现双峰, 水体阈值在第二峰后, 在 -0.2 左右。夏季和秋季直方图均为单峰, 水体阈值同样在峰后, 夏季阈值在 -0.16 左右, 秋季阈值在 -0.09 左右。其他研究区的阈值选择方法都与雄安新区相似。

但是考虑到 RWI 水体提取算法的后续应用, 本文实现了阈值的自动选取, 提高了运算效率。首先对 RWI 影像进行非监督分类 (ISODATA), 分类后对各个类别的均值进行判别, 如果某个类别大于其他所有类别, 则该类别被判为水体提取结果, 避免了人为确定阈值的偶然性和随机性 (吉红霞等, 2015)。如图 3 所示。

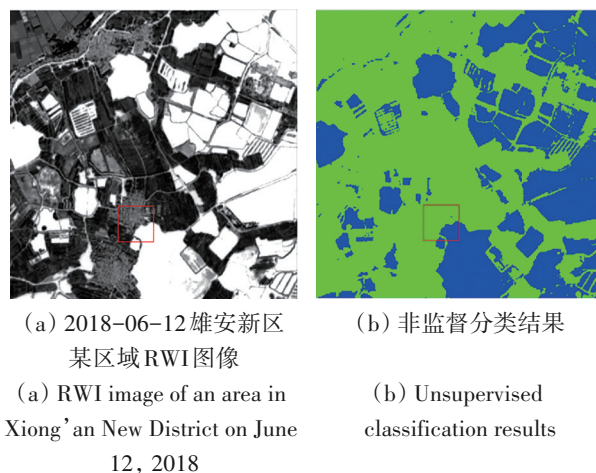


图 3 非监督分类水体自动提取结果

Fig. 3 Results of automatic extraction of water bodies by unsupervised classification

3.3 4 种水体提取方法

本文拟对比 RWI 和 4 种常用的水体提取方法, 分别是 MNDWI、MBWI、AWEInsh、AWEIsh。虽然 NDWI 也是最常见的水体提取方法, 但是它的水体提取效果明显较 MNDWI 差, 因此本文仅列出了 MNDWI 方法的结果。在采用 4 种方法时都以大气校正后的遥感反射率作为输入。

MNDWI 在 3.1 节已有详细的介绍。MBWI 是 Wang 等提出的多波段水体指数, 能够削弱山区阴影和建筑物暗像元的影响, 同时能够减轻由于太阳条件变化而产生的季节性影响。公式为

$$MBWI = 2 \cdot \text{band3} - \text{band4} - \text{band8A} - \text{band11} - \text{band12} \quad (4)$$

式中, MBWI为多波段水体指数, band3、band4、band8A、band11、band12原使用Landsat 8 OLI数据的第3、4、5、6、7波段的地表反射率作为输入, 在本文中band3、band4、band8A、band11、band12分别为Sentinel-2第3、4、8A、11、12波段的遥感反射率。

AWEI是Feyisa等提出的自动水提取指数, 该指数能够在存在各种环境噪声的情况下始终如一地提高水的提取精度, 同时提供稳定的阈值, 提高了包括阴影和黑暗表面的区域的分类准确性。公式为

$$AWEI_{\text{no-sh}} = 4 \cdot (\text{band3} - \text{band11}) - (0.25 \cdot \text{band8} + 2.75 \times \text{band12}) \quad (5)$$

$$AWEI_{\text{sh}} = \text{band2} + 2.5 \times \text{band3} - 1.5 \cdot (\text{band8} + \text{band11}) - 0.25 \times \text{band12} \quad (6)$$

式中, $AWEI_{\text{no-sh}}$ 和 $AWEI_{\text{sh}}$ 为自动水体提取指数的两种形式, band1、band2、band3、band8、band11、band12, 原使用Landsat 5 TM数据的第1、2、4、5、7波段的地表反射率作为输入, band1、band2、band3、band8、band11、band12分别为Sentinel-2的第1、2、3、8、11、12波段的遥感反射率。 $AWEI_{\text{no-sh}}$ 适用于没有阴影的场景, 而 $AWEI_{\text{sh}}$ 则是为了进一步剔除 $AWEI_{\text{no-sh}}$ 提取结果中易与水体信息混淆的阴影, 适用于阴影较多的场景, 但是 $AWEI_{\text{sh}}$ 会将高反射率的表面, 如冰、雪、反光屋顶等识别为水。

3.4 精度评价指标

为了定量分析几种水体提取方法的精度, 使用如下的误差分析公式为

$$\lambda = \frac{|t_0 - t_i|}{t_0} \times 100 \quad (7)$$

式中, λ 为误差结果, t_0 为人工目视解译得到的面积, t_i 为水体提取算法得到的面积。

针对RWI水体指数结合非监督分类得到的水体提取结果, 在非监督分类后, 结合人工目视解译的精确水体进行精度评价, 精度评价指标包括制图精度、用户精度、总体精度、Kappa系数4个指标, 公式表达式如下:

$$\text{制图精度: } p_{Aj} = \frac{p_{jj}}{p_{+j}} \quad (8)$$

$$\text{用户精度: } p_{ui} = \frac{p_{ii}}{p_{i+}} \quad (9)$$

$$\text{总体精度: } p_c = \sum_{k=1}^n \frac{p_{kk}}{p} \quad (10)$$

Kappa系数为

$$Kappa = \frac{p \sum_{i=1}^n p_{ii} - \sum_{i=1}^n (p_{i+} p_{+i})}{p^2 - \sum_{i=1}^n (p_{i+} p_{+i})} \quad (11)$$

式中, p_{Aj} 表示制图精度, p_{Bj} 表示分类数据类型中第 j 类和实测数据类型第 j 类所占的组成成分, p_{+j} 表示实际观测的第 j 类的总和; p_{ui} 表示用户精度, p_{ii} 表示分类数据类型中第 i 类和实测数据类型第 i 类所占的组成成分, p_{i+} 表示分类所得到的第 i 类的总和; p_c 表示总体精度, p_{kk} 表示分类数据类型中第 k 类和实测数据类型第 k 类所占的组成成分, 其中 k 为1- n , n 为总的类别数, p 为样本总数; $Kappa$ 为Kappa系数, p_{ii} 表示实际观测的第 i 类的总和。

4 结果

4.1 精度验证

为了定量评价细小水体提取的精度, 选取雄安新区部分区域作为精度验证区, 如图4所示。

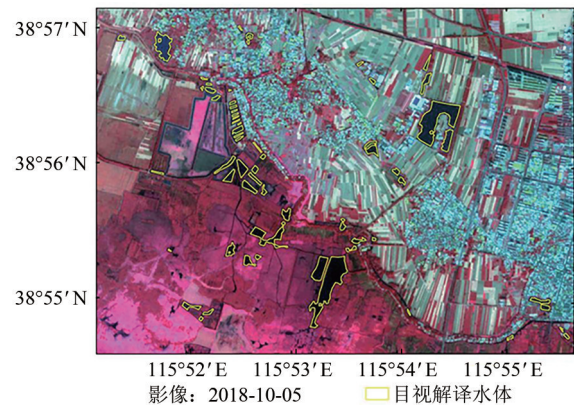


图4 选定的验证范围和目视解译结果(RGB:8,4,3)
Fig. 4 Selected verification range and visual interpretation results

首先, 人工目视解译出水体分布斑块, 作为检验的真值。目视解译得到的精确水体面积为759721.1 m²。在精度验证的区域内, RWI、MNDWI、MBWI、 $AWEI_{\text{sh}}$ 、 $AWEI_{\text{no-sh}}$ 的面积提取差异分别为3.6%、4.2%、12.2%、8.8%、19.8%, RWI方法得到的面积最接近真值, 误差最小。

使用RWI水体指数结合非监督分类分类得到

水体和非水体两类, 具体的制图精度、用户精度、总体精度、Kappa 系数 4 个指标统计如表 2 所示。从表中可以看出, RWI 方法的各项指标均比其他方法更高, 分类精度更高。

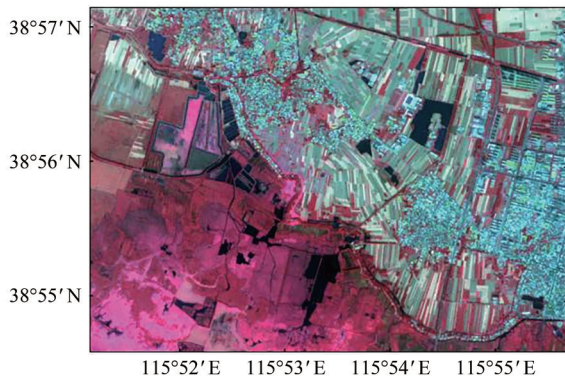
表 2 分类精度表
Table 2 Classification accuracy table

指数	制图精度 (水体)/%	用户精度 (水体)/%	总体 精度/%	Kappa 系数
RWI	94.19	86.58	99.19	0.94
MNDWI	91.89	80.93	98.93	0.90
MBWI	92.31	71.96	96.77	0.88
AWEI _{sh}	93.91	69.20	96.37	0.85
AWEI _{nsh}	91.66	63.86	95.54	0.76

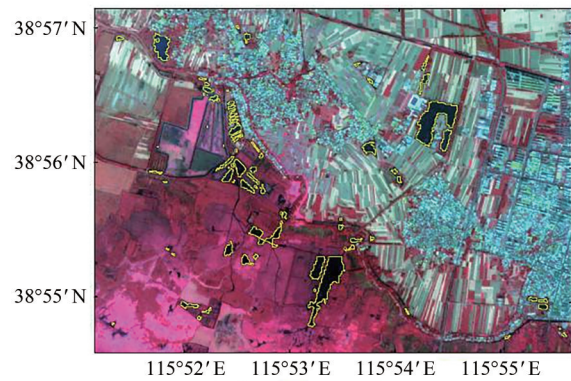
4.2 5 种方法提取水体结果对比

以雄安新区精度验证区为例, Sentinel-2 标准

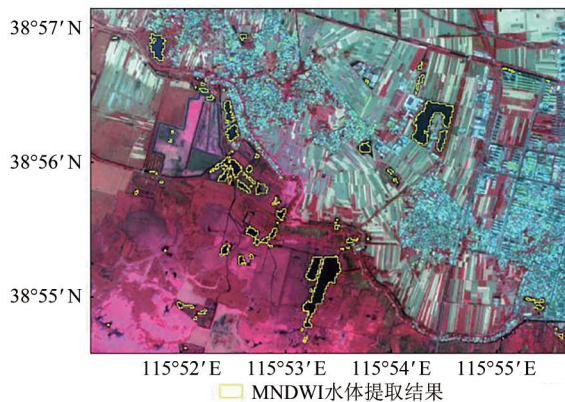
假彩色影像 (图 5 (a)) 和 4 种水体提取方法的提取结果如图 5 所示。MNDWI 水体指数虽然对建筑物的阴影的去处有较好的效果, 但对水体边界的识别不够精确, 并且会将水体和水草混合像元错误识别为水体, 效果如图 5 (c) 所示。MBWI 水体指数提取的水体结果较真实结果偏小, 效果如图 5 (d) 所示。AWEI_{nsh} 无法有效地去除城市建筑物阴影, AWEI_{sh} 会将水体和水草的混合像元识别为水体, 效果如图 5 (e) 和 5 (f) 所示。图 5 中红色椭圆形区域内水体提取结果可以看出 RWI 方法在去除建筑物阴影上的优势, 图 5 中红色矩形区域内水体提取结果可以看出 RWI 方法对细小水体的水体边界有较好的区分度, 图 5 中红色菱形区域内的水体提取结果可以看出 RWI 方法能够去除水体周边的混合像元。



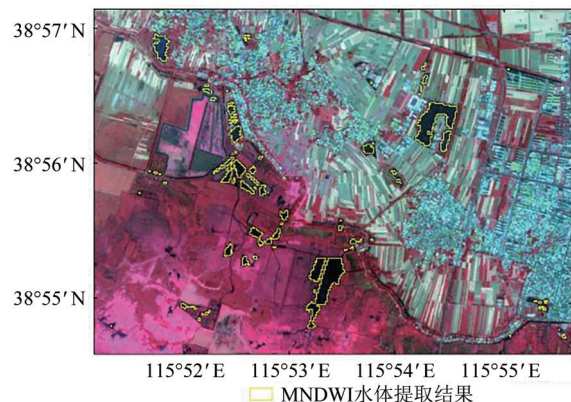
(a) 局部的 Sentinel-2 原始影像 (RGB: 8, 4, 3)
(a) Partial sentinel-2 original image



(b) RWI 水体指数 (RGB: 8, 4, 3)
(b) RWI water body index



(c) MNDWI 水体指数 (RGB: 8, 4, 3)
(c) MNDWI water body index



(d) MBWI 水体指数 (RGB: 8, 4, 3)
(d) MBWI water body index

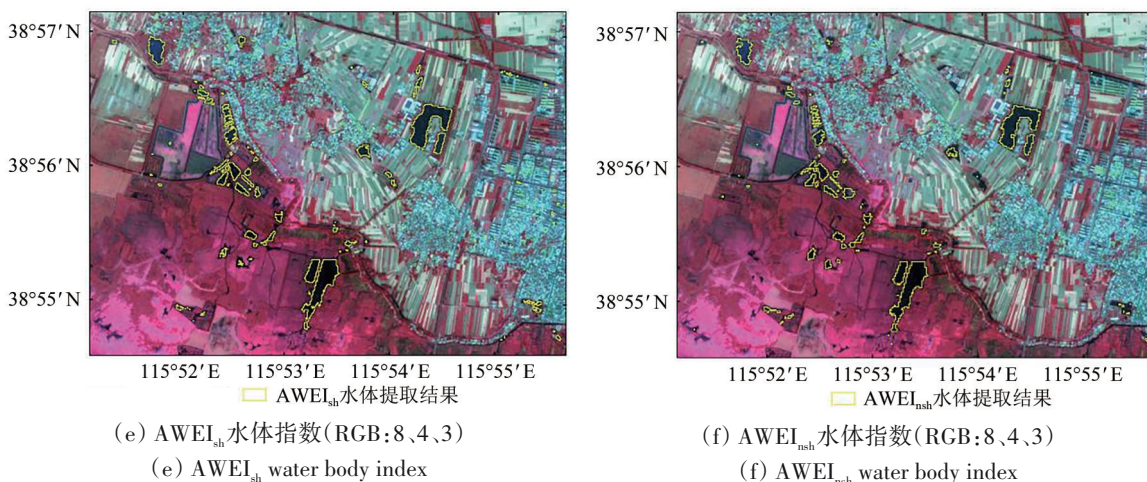


图5 雄安新区局部水体提取结果图(2018-10-15)

Fig. 5 Map of local water body extraction results in Xiong'an New District (2018-10-15)

4.3 大型水体提取结果

将现有的其他水体指数用于提取大型水体时,效果都较好。这里为了表明RWI算法与其他算法一样,在大型水体提取时同样具有良好的适用性,将天津于桥水库作为大型水体提取示例。于桥水库水体稳定、均一、面积较大,水体提取相对容易。因此仅对2018-11-01 1景影像进行水体提取。水体提取结果如图6所示。从图6可以看出,本文提出的RWI水体提取算法在大型水体也同样具有较好的适用性,从右上角放大图上可以看出,水体提取的边界轮廓非常良好,表明RWI算法对细小水体和大型水体的边界均具有良好的提取效果。

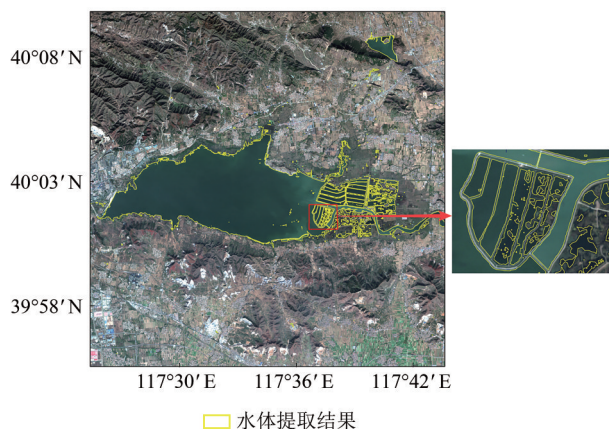


图6 于桥水库水体提取结果(RGB:4,3,2)

Fig. 6 Yuqiao Reservoir water body extraction results

4.4 多研究区多时相的水体提取结果

雄安新区因为水体细小破碎,且水体和水草的混合像元较多;神东矿区影像面积较大,水体同样细小破碎,属于矿区水体;永城矿区面积较小,水体多为人工修建的蓄水池,蓄水池均为较小的水体,对影像的分辨率要求极高。为了验证RWI算法的适用性和稳定性,本文对雄安新区、神东矿区和永城矿区多个时相的影像进行水体提取,得到的结果如图7、8、9所示,列出了每个时相影像对应的水体总面积。

通过仔细观察多研究区多时相的水体提取结果的细节,发现每个时相的结果均十分良好,细小水体的边界区分度较高,基本没有错提、漏提,水体提取效果均较好。RWI水体指数的适用性和稳定性良好。

由图7可以看出,雄安新区水体为春季水体面积最大,夏季次之,秋季最小,因为雄安新区春季水草未大面积生长,白洋淀大部分区域为纯水体像元;夏季白洋淀水草疯长,水体与水草混合像元众多,混合像元不会被识别为水体,水体面积大幅减少;秋季水草最茂盛,水体面积略有减少。神东矿区和永城矿区水体面积无较大变化,因为神东矿区和永城矿区水体多为小型坑塘,水量变化十分稳定。但是对比2018-06-14和2018-10-02永城矿区的水体提取结果可以看出,有一个较大的水塘出现,水体面积增加,如图9(g)和9(h)所示。

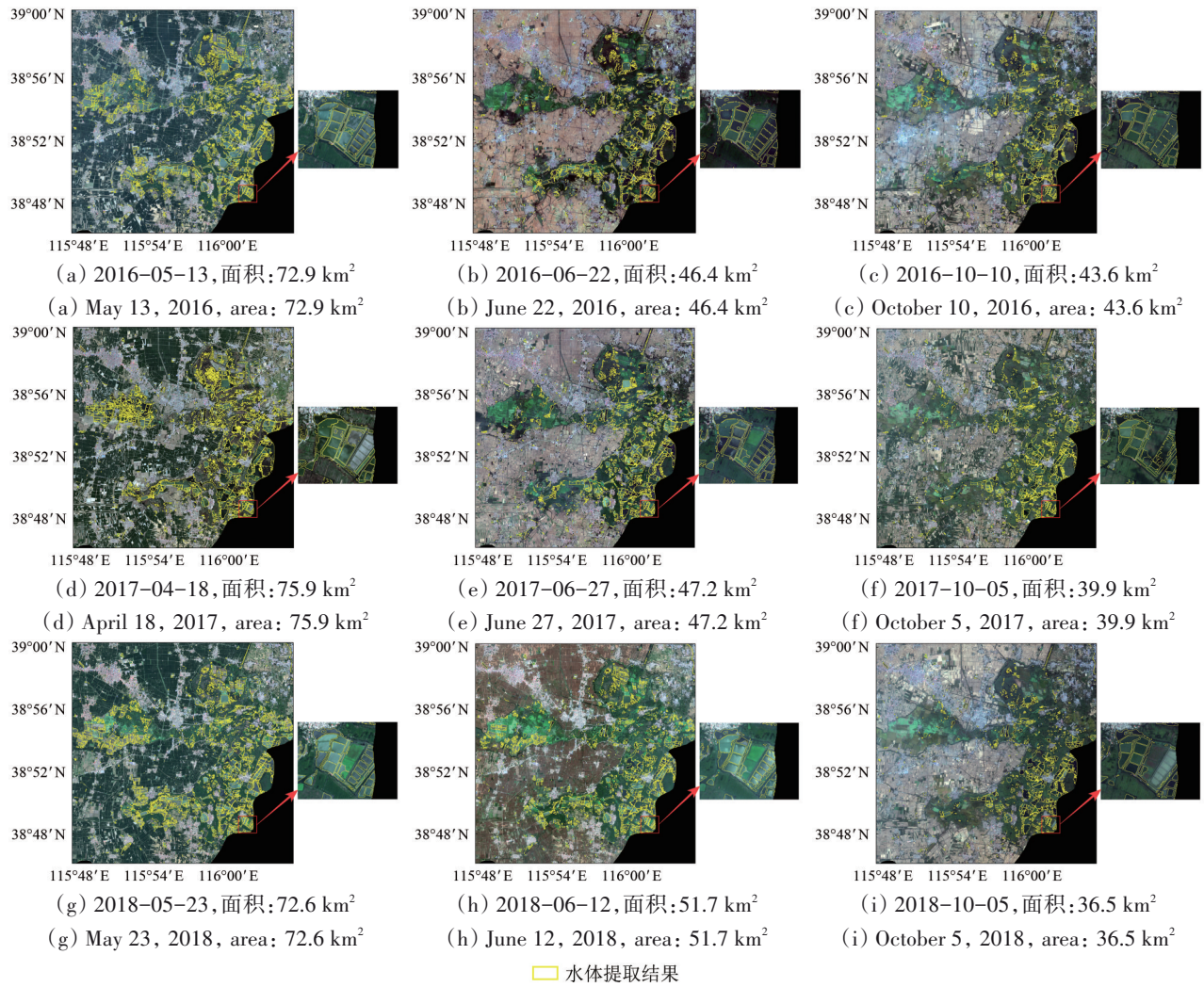
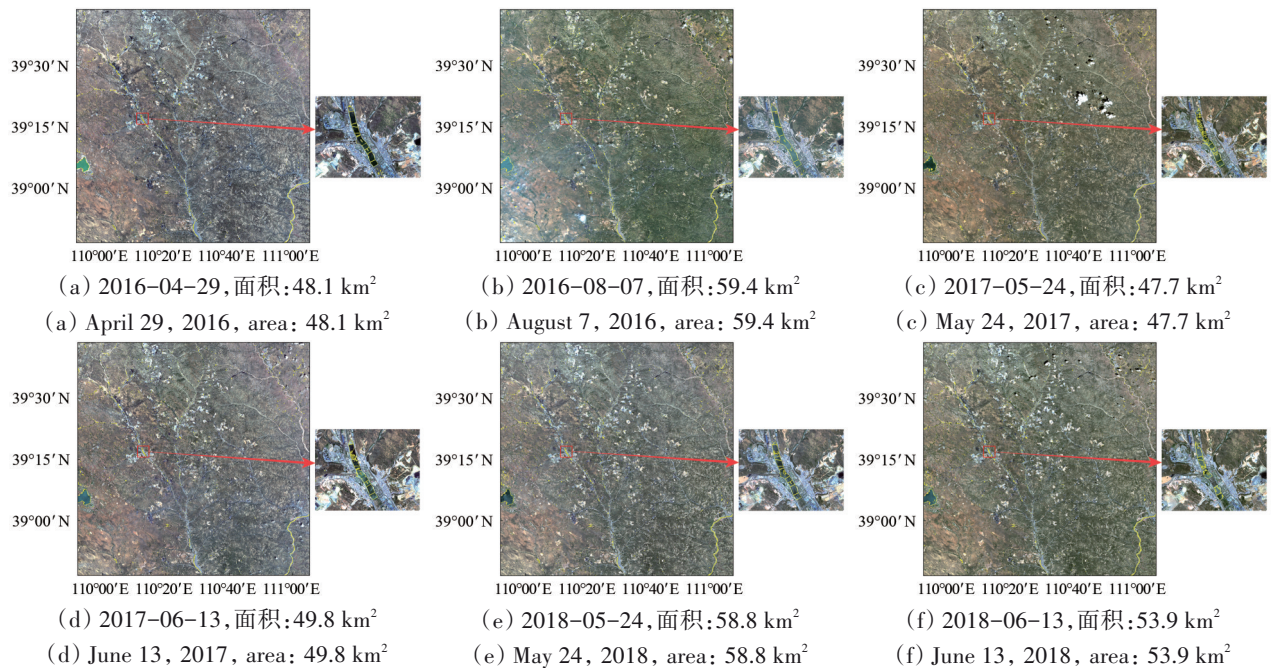


图7 雄安新区多时相水体提取结果(图上右上角矩形框是局部放大后的水体提取结果)

Fig. 7 Multi-phase water extraction results in Xiong'an New District (The rectangular frame in the upper right corner of the figure is the result of partial enlargement of water extraction)



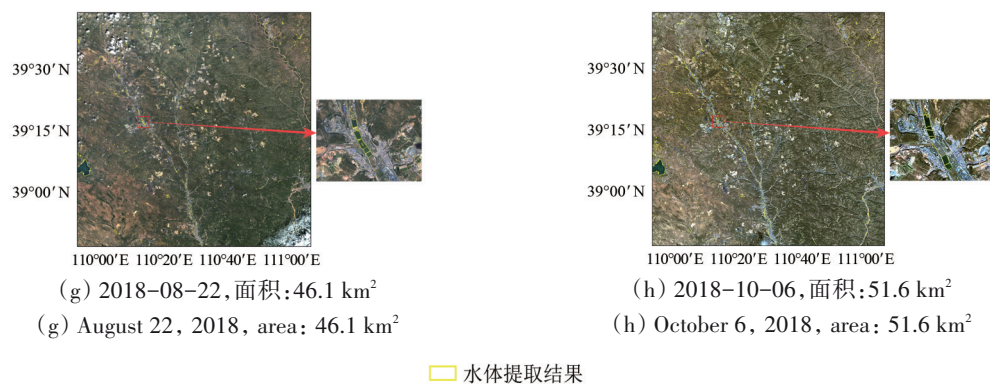


图8 神东矿区多时相水体提取结果(图上右上角矩形框是局部放大后的水体提取结果)

Fig. 8 Multi-phase water extraction results in Shendong mining area (The rectangular frame in the upper right corner of the figure is the result of partial enlargement of water extraction)

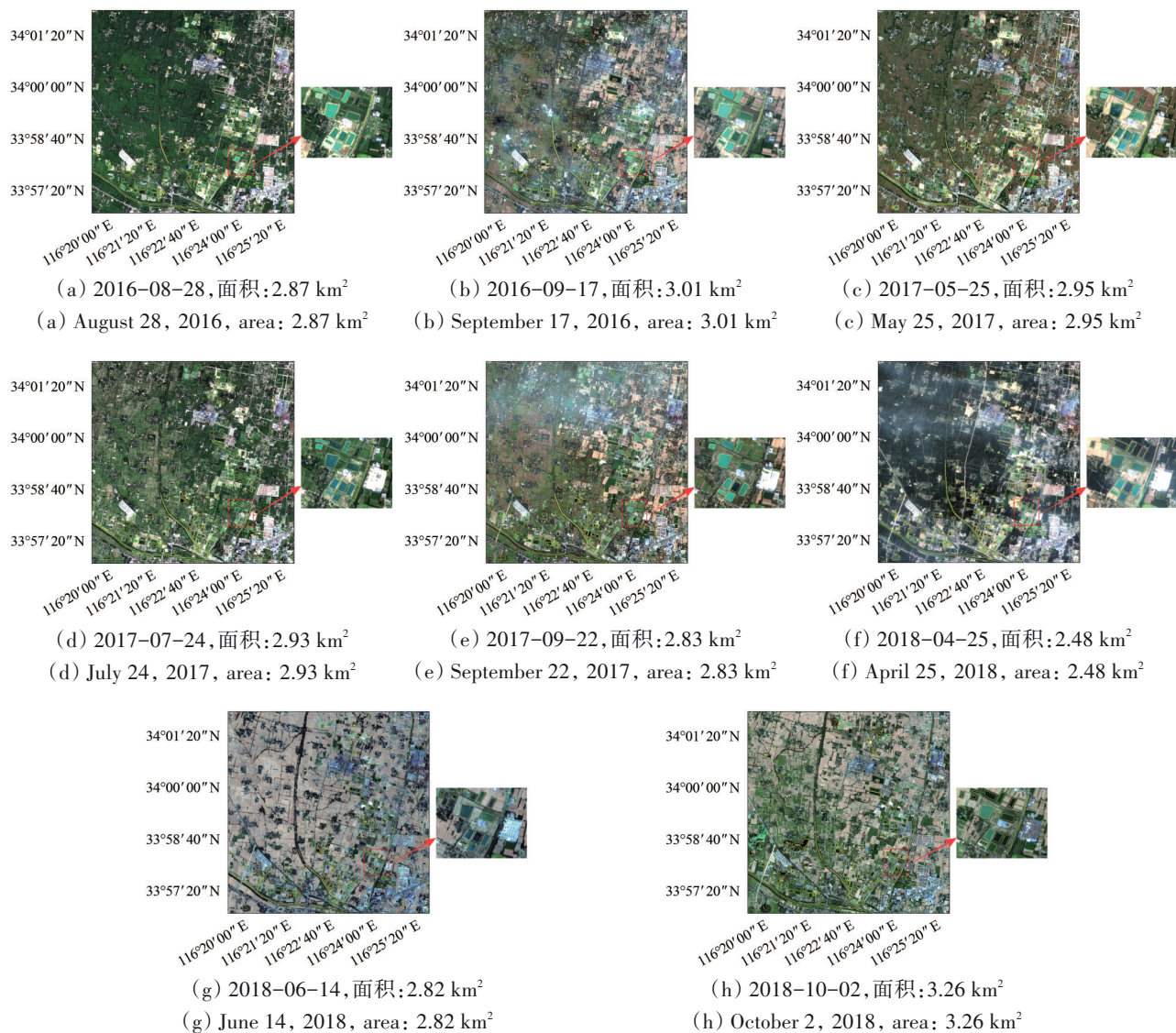


图9 永城矿区多时相水体提取结果(图上左上角矩形框是局部放大后的水体提取结果)

Fig. 9 Multi-phase water extraction results in Yongcheng mining area (The rectangular frame in the upper left corner of the figure is the result of partial enlargement of water extraction)

5 讨论

5.1 云阴影影响

RWI 水体指数能够在精确提取水体的前提下,一定程度上消除云和云阴影的影响。神东矿区 2017-05-24 和 2018-08-22 影像为有云影像,2017-05-24 水体提取结果如图 10 (a) 所示,2018-08-22 水体提取结果如图 10 (b) 所示。两幅

图中下方区域为局部放大的水体提取结果,整景影像的波段组合为真彩色(4、3、2),放大区域的影像波段组合为标准假彩色(8、4、3)。由图可以看出,RWI 水体指数在有较厚云层和云阴影的影像上的水体提取总体具有较好的效果。观察图 10 (c) 和 10 (d) 中对应的红色矩形区域,发现 RWI 水体提取方法不会将云和云阴影误判为水体,同时能够将云旁边的细小水体识别出来。

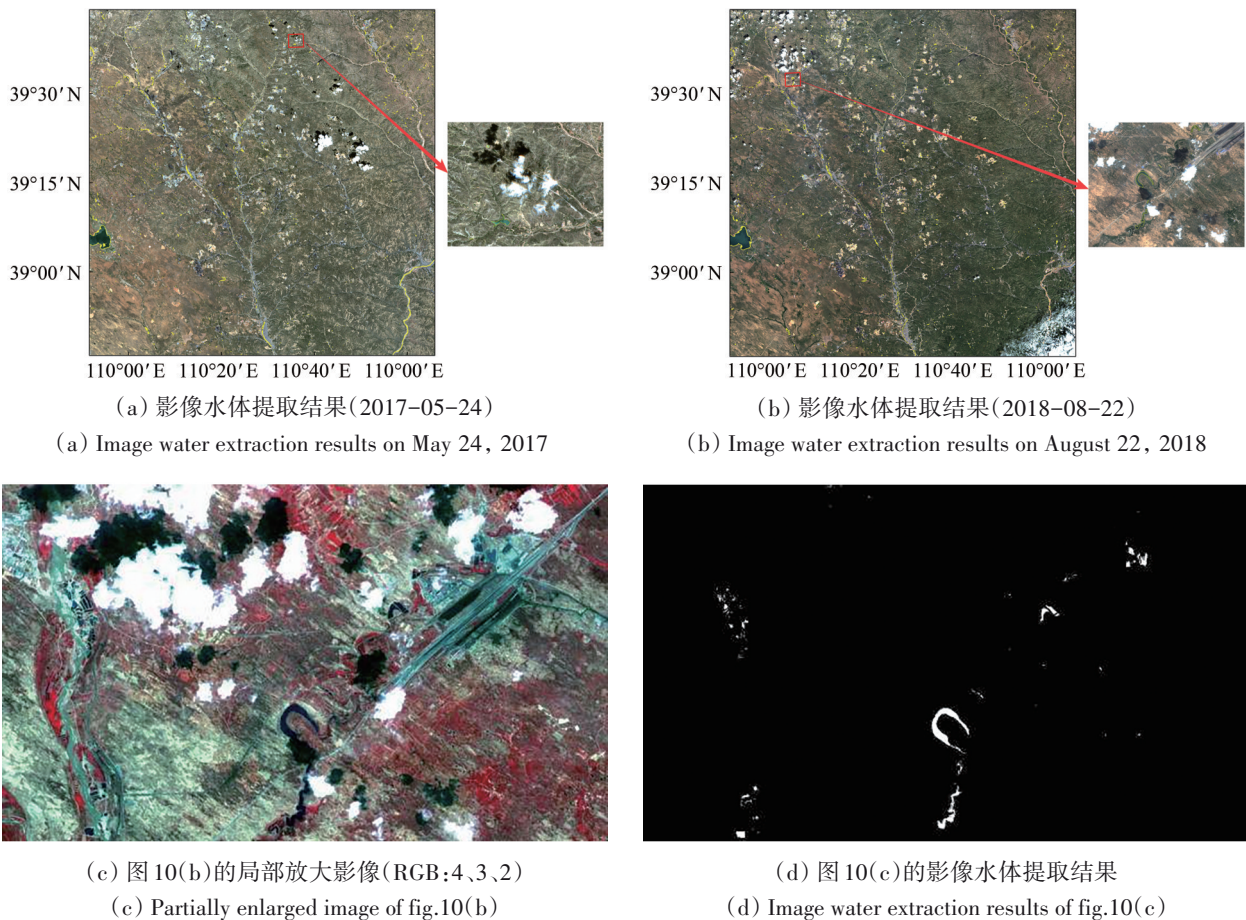


图 10 神东矿区厚云区域水体提取结果

Fig. 10 Water extraction results in thick cloud region of Shendong mining area

5.2 邻近效应影响

RWI 水体提取算法对水体边界有较好的提取效果,如图 11 所示。图 11 (a) 为 2018-10-05 雄安新区部分区域 Sentinel-2 的标准假彩色影像,图 11 (b)、图 11 (a) 中红色矩形区域内的 Google 影像,图 11 的 (c)、(d)、(e)、(f)、(g) 为图 11 (a) 中红色矩形区域内 RWI、MNDWI、MBWI、

AWEL_{sh}、AWEL_{msl} 等方法的水体提取结果。从图中可以看出,红色矩形内是 11 个较小的水塘,RWI 能够将区域中的小水塘很好地提取出来,与其他几种方法相比,RWI 方法提取的小水体边界明显,能够将小水体周围的混合像元有效剔除,得到的水体更加精确。

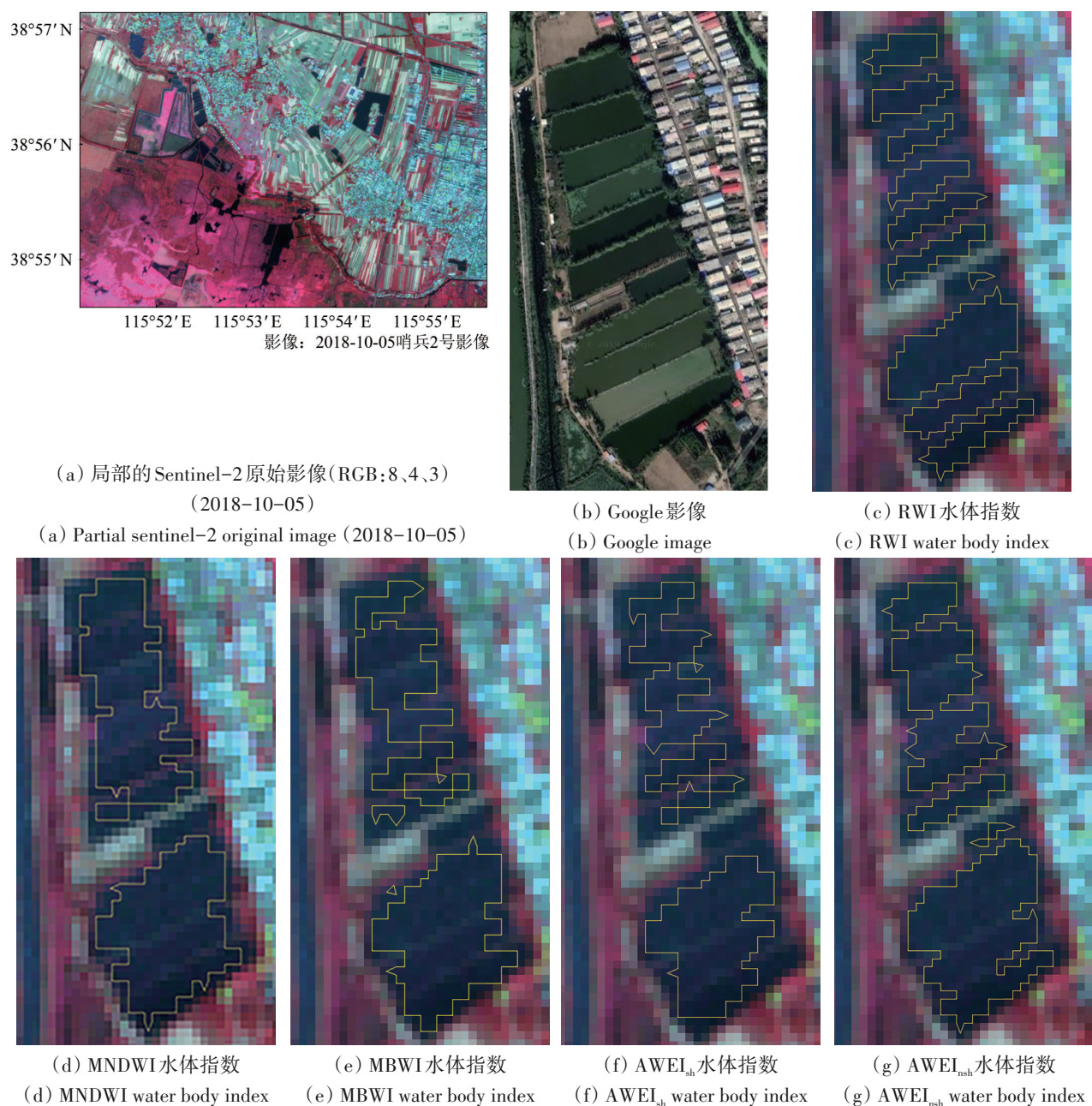


图11 水体提取边界效果对比图

Fig. 11 Water body extraction boundary effect comparison chart

6 结 论

本文从十分难以提取的细小水体入手,以雄安新区、神东矿区、永城矿区、于桥水库为研究区,基于Sentinel-2卫星数据提出了一种新的水体指数RWI用于水体提取,本文主要进行了以下几个方面的研究:

(1) 对比分析了6种地物的 R_n^* ,从机理上解释了为什么RWI比其他水体指数具有更好的提取细小水体的效果。

(2) 将本文提出的RWI水体提取算法与4种水体提取算法进行对比,以人工目视解译的水体结果为准,评价五种水体提取算法,得到RWI、MNDWI、MBWI、 $AWEI_{sh}$ 、 $AWEI_{nsh}$ 的水体面积误差分别为3.6%、4.2%、12.2%、8.8%、19.8%,本文提出的RWI方法误差最小。

(3) 定性对比了RWI方法和其他4种方法,得出本文提出的RWI水体提取算法具有一定的优势,能够一定程度上消除水体边界处和水体中的混合像元的影响,提取的水体边界效果更佳,能

够显著消除建筑物阴影和云阴影的影响。

(4) 基于 Sentinel-2 影像时空分辨率的优势, 本文提出的 RWI 水体提取算法能够准确快速地将细小水体提取出来, 相比 Landsat 影像 30 m 空间分辨率的水体提取结果, Sentinel-2 数据 10 m 空间分辨率的水体提取结果将更加精细。

(5) 对 4 个研究区进行了水体提取, 其中于桥水库属于大型水体, 进行了单期的水体提取, 结果表明本文提出的 RWI 水体提取算法在大型水体也同样具有较好的适用性。对雄安新区、神东矿区、永城矿区分别进行了多时相的水体提取, 发现每个时相的结果均十分良好, 细小水体的边界区分度较高, 基本没有错提、漏提, 结果表明本算法具有良好的适用性和稳定性。

参考文献(References)

- Cao R L, Li C J, Liu L Y, Wang J H and Yan G J. 2008. Extracting Miyun reservoir's water area and monitoring its change based on a revised normalized difference water index. *Science of Surveying and Mapping*, 33(2): 158-160 (曹荣龙, 李存军, 刘良云, 王纪华, 阎广建. 2008. 基于水体指数的密云水库面积提取及变化监测. *测绘科学*, 33(2): 158-160) [DOI: 10.3771/j.issn.1009-2307.2008.02.054]
- Chen J. 2010. Study on Object-based Classification of High-resolution Remote Sensing Imagery. Changsha: Central South University (陈杰. 2010. 高分辨率遥感影像面向对象分类方法研究. 长沙: 中南大学)
- Danaher T and Collett L. 2006. Development optimisation and multi-temporal application of a simple Landsat based water index//Proceedings of the 13th Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference. Canberra: Spatial Sciences Institute
- Ding F. 2009. Study on information extraction of water body with a new water index (NWI). *Science of Surveying and Mapping*, 34(4): 155-157 (丁凤. 2009. 基于新型水体指数(NWI)进行水体信息提取的实验研究. *测绘科学*, 34(4): 155-157)
- 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]
- European Space Agency. 2015. ESA standard document[S/OL]. (2015-07-24) [2020-01-08]. https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook (欧洲航天局. 2015. ESA 标准文件[S/OL]. (2015-07-24)[2020-01-08]. https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook)
- 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]
- Fisher A, Flood N and Danaher T. 2016. Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. *Remote Sensing of Environment*, 175: 167-182 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.055]
- Hong L, Huang Y J, Yang K, Peng S Y and Xu Q L. 2019. Study on urban surface water extraction from heterogeneous environments using GF-2 remotely sensed images. *Journal of Remote Sensing*, 23(5): 871-882 (洪亮, 黄雅君, 杨昆, 彭双云, 许泉立. 2019. 复杂环境下高分二号遥感影像的城市地表水体提取. *遥感学报*, 23(5): 871-882) [DOI: 10.11834/jrs.20198064]
- Ji H X, Fan X W, Wu G P and Liu Y B. 2015. Accuracy comparison and analysis of methods for water area extraction of discrete lakes. *Journal of Lake Sciences*, 27(2): 327-334 (吉红霞, 范兴旺, 吴桂平, 刘元波. 2015. 离散型湖泊水体提取方法精度对比分析. *湖泊科学*, 27(2): 327-334) [DOI: 10.18307/2015.0218]
- 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]
- Lu S L, Wu B F, Yan N N and Wang H. 2011. Water body mapping method with HJ-1A/B satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(3): 428-434 [DOI: 10.1016/j.jag.2010.09.006]
- 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]
- Wang D Z, Wang S M and Huang C. 2019. Comparison of Sentinel-2 imagery with Landsat8 imagery for surface water extraction using four common water indexes. *Remote Sensing for Land and Resources*, 31(3): 157-165 (王大钊, 王思梦, 黄昌. 2019. Sentinel-2 和 Landsat8 影像的四种常用水体指数地表水体提取对比. *国土资源遥感*, 31(3): 157-165) [DOI: 10.6046/gtzyyg.2019.03.20]
- Wang X B, Xie S P and Du J K. 2018. Water index formulation and its effectiveness research on the complicated surface water surroundings. *Journal of Remote Sensing*, 22(2): 360-372 (王小标, 谢顺平, 都金康. 2018. 水体指数构建及其在复杂环境下有效性研究. *遥感学报*, 22(2): 360-372) [DOI: 10.11834/jrs.20186463]
- Wang X B, Xie S P, Zhang X L, Chen C, Guo H, Du J K and Duan Z. 2018a. A robust Multi-Band Water Index (MBWI) for automated extraction of surface water from Landsat 8 OLI imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 68: 73-91 [DOI: 10.1016/j.jag.2018.01.018]
- Wang Z F, Liu J G, Li J B and Zhang D D. 2018b. 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]
- Xiao Y F, Zhao W J and Zhu L. 2010. A study on information extraction of water body using band1 and band7 of TM imagery. *Science of Surveying and Mapping*, 35(5): 226-227, 216 (肖艳芳, 赵文吉, 朱琳. 2010. 利用 TM 影像 Band1 与 Band7 提取水体信息. *测绘科学*, 35(5): 226-227, 216) [DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2010.05.083]
- 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) [DOI: 10.11834/jrs.20050586]

- Xu H Q. 2008. Comment on the enhanced water index (EWI): a discussion on the creation of a water index. *Geo-Information Science*, 10(6): 776-780 (徐涵秋. 2008. 从增强型水体指数分析遥感水体指数的创建. *地球信息科学*, 10(6): 776-780) [DOI: 10.3969/j.issn.1560-8999.2008.06.016]
- Yan P, Zhang Y J and Zhang Y. 2007. A study on information extraction of water system in semi-arid regions with the enhanced water index (EWI) and GIS based noise remove techniques. *Remote Sensing Information*, (6): 62-67 (闫霏, 张友静, 张元. 2007. 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. *遥感信息*, (6): 62-67) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2007.06.015]
- 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 Y and Ruan R Z. 2010. Extraction of plain lake water body based on TM imagery. *Remote Sensing Information*, (3): 60-64 (杨莹, 阮仁宗. 2010. 基于TM影像的平原湖泊水体信息提取的研究. *遥感信息*, (3): 60-64) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2010.03.013]
- Yin Q J and Yang Y L. 2005. Remote sensing monitoring of lake Qinghai based on EOS/MODIS Data. *Journal of Lake Sciences*, 17(4): 356-360 (殷青军, 杨英莲. 2005. 基于EOS/MODIS数据的青海湖遥感监测. *湖泊科学*, 17(4): 356-360) [DOI: 10.18307/2005.0413]
- Zhang M H. 2008. Extracting water-body information with improved medal of spectral relationship in a higher mountain area. *Geography and Geo-Information Science*, 24(2): 14-16, 22 (张明华. 2008. 用改进的谱间关系模型提取极高山地区水体信息. *地理与地理信息科学*, 24(2): 14-16, 22)

Small water body extraction method based on Sentinel-2 satellite multi-spectral remote sensing image

WU Qingshuang¹, WANG Mingxiu^{1,2}, SHEN Qian², YAO Yue², LI Junsheng², ZHANG Fangfang², ZHOU Yaming³

1. College of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China;

2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

3. Ministry of Ecology and Environment Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Beijing 100094, China

Abstract: The water body extraction algorithm based on satellite remote sensing is mainly aimed at large- and medium-sized lakes or large rivers. When applied to small water bodies, misjudging often occurs. The multi-spectral remote sensing data of the Sentinel 2 satellite has a spatial resolution of 10, 20, and 60 meters; a dual-star time resolution of 5 days; and a high temporal and spatial resolution. Therefore, this paper uses the sentinel-2 green light band (560 nm), red-edge band (705 nm), near-infrared band (842 nm, 865 nm), and short wave-infrared band (2190 nm) for remote sensing reflectance. A new water index algorithm (red edge-based water index, RWI for short) is proposed for the extraction of fine water. The normalized remote sensing reflectance of vegetation, shadow, building, mixed pixel, bare soil, and water body is compared and analyzed. The mechanism explains why RWI has a better effect of extracting fine water bodies compared with other water body indexes. To quantitatively evaluate the advantages of the RWI water body extraction algorithm proposed in this paper, this paper compares several current water body extraction algorithms, including the improved normalized difference water index MNDWI (modified normalized difference water index), multi-band water body index MBWI (multi-band water index), and AWEI (automatic water extraction index). The water body extraction results obtained by several algorithms and the area statistics of the artificial water interpretation of the water body results are calculated using the error formula to obtain RWI. The errors of MNDWI, MBWI, AWEI_{sh}, and AWEI_{nsh} are 3.6%, 4.2%, 12.2%, 8.8%, and 19.8%, respectively. Results show that the RWI algorithm has the highest accuracy. At the same time, through analysis, the advantages and disadvantages of several water extraction results are quantitatively evaluated. From the results of image extraction, this paper proposes that the water boundary extraction method extracted by the RWI water body extraction algorithm is better, and it can eliminate mountains, building shadows, and clouds. The effect of shadows can eliminate the effects of mixed pixels.

At the same time, this paper carried out multi-temporal water extraction in Xiong'an New District, Shendong Mining Area, and Yongcheng Mining Area. In the time range from January 2016 to December 2018, a total of 43 Sentinel-2 images without clouds were screened, and the small broken water bodies in the three areas of Xiong'an New District, Shendong Mining Area, and Yongcheng Mining Area were selected by the algorithm proposed in this paper. The distribution carried out multi-temporal analysis. Results from statistical area analysis indicate that Xiong'an New District has the largest water body area in spring, followed by summer and autumn. No significant change in water area was observed in the Shendong and Yongcheng mining areas. After careful observation, the results of each phase are very good, the boundary of the small water body is highly differentiated, and no data are misleading or missing, and the algorithm has good applicability and stability.

Key words: water extraction, water body index, small water body, Sentinel-2, RWI, MNDWI, MBWI, AWEI

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41571361); National Key Research and Development Program (No. 2017YFB0503902); Chinese Academy of Sciences Strategic Pilot Project (No.XDA23040102)