

多源高分辨率卫星影像监测黑臭水体的适用性研究

王茹¹, 申茜², 彭红春¹, 姚月², 李俊生², 汪明秀², 史佳睿¹,
徐雯婷³

1. 江苏海洋大学 海洋技术与测绘学院, 连云港 222005;

2. 中国科学院空天信息创新研究院 数字地球实验室, 北京 100094;

3. 东华理工大学 测绘工程学院, 南昌 330105

摘要: 高分辨率卫星的幅宽一般很小, 受云雨和轨道回访周期影响, 单颗卫星的短时段内覆盖能力有限, 因此, 单一高分辨率卫星常常无法满足一定时段内的黑臭水体监测需求, 需要多源卫星协同监测黑臭水体。为了分析多源高分辨率影像对黑臭水体遥感监测的适用性, 本文基于地物光谱仪实测的水体遥感反射率数据, 以GeoEye-1、WorldView-2、北京二号(DMC3)、高景一号SV1(SuperView-1)以及GF-PMS系列(GF-1/1B/1C/1D、GF-2、GF-6)传感器波段进行等效计算, 结果表明: (1) 采用反射率比值模型——BOI(Black and Odorous water Index)模型, GeoEye-1、WorldView-2、SuperView-1和GF-1/1B/1C/1D/2/6影像识别黑臭水体正确率均较高, 分别为89.5%、89.5%、92.1%和92.1%。(2) BOI模型不适用于DMC3, 这里采用了归一化水体指数NDWI ≤ 0.55 判别黑臭水体, 识别正确率为89.5%。(3) BOI模型应用于仅有的2景同步卫星影像——GF-2影像, 经实测数据验证, 识别精度为83.3%, 精度较高。针对通州区内的某重叠区, 2016年—2021年10颗多源卫星影像协同观测的结果一致性较好, 表明了多源遥感影像监测黑臭水体的适用性较好。综合考虑卫星影像空间分辨率和采购成本, 给出了合理的协同观测建议。

关键词: 遥感, 多源高分辨率影像, 黑臭水体监测, 适用性, BOI

引用格式: 王茹, 申茜, 彭红春, 姚月, 李俊生, 汪明秀, 史佳睿, 徐雯婷. 2022. 多源高分辨率卫星影像监测黑臭水体的适用性研究. 遥感学报, 26(1): 179-192

Wang R, Shen Q, Peng H C, Yao Y, Li J S, Wang M X, Shi J R and Xu W T. 2022. Study on the applicability of multi-source high-resolution satellite images for monitoring black and odorous water body. National Remote Sensing Bulletin, 26(1): 179-192 [DOI: 10.11834/jrs.20220479]

1 引言

由于经济的快速发展, 大量的生活和工厂污水被排放到城市河道中, 导致城市河道变黑变臭, 最终形成城市黑臭水体(中华人民共和国住房和城乡建设部和中华人民共和国环境保护部, 2015; 白慧文等, 2019)。黑臭水体现象的出现对人类的基本生活造成威胁(申茜等, 2017), 成为目前亟需解决的问题。传统的黑臭水体地面监测方式耗时耗力, 遥感手段以其低成本、范围广、速度快等优势, 逐渐替代传统的地面监测。而黑臭水体监测是

黑臭水体监督和治理的前提(胡森等, 2017), 因此, 黑臭水体遥感监测具有十分重要的科学价值和现实意义。

早期, 一些学者基于现场数据和海洋水色遥感数据, 在春季长江入海口发现了一个黑水区(Bai等, 2009), 使用了Landsat 8 OLI和Sentinel-2 MSI影像通过水质参数识别黑湖问题(Kutser等, 2016; 李旭文等, 2012), 他们的研究表明遥感技术在识别污染的黑湖方面是有用的(Nichol, 1993; Zhao等, 2013), 随着高分辨率影像的发展, 目前, 黑臭水体遥感监测主要采用高空间分

收稿日期: 2020-11-06; 预印本: 2021-05-08

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2021YFB3901101); 国家自然科学基金(编号:41571361); 天津科技计划项目智能制造专项(编号:Tianjin-IMP-2018-2)

第一作者简介: 王茹, 1995年生, 女, 硕士研究生, 研究方向为水环境遥感。E-mail: 1059134050@qq.com

通信作者简介: 申茜, 1981年生, 女, 副研究员, 研究方向为水环境遥感与黑臭水体遥感、内陆水体水质参数遥感反演。E-mail: shenqian@

aircas.ac.cn

分辨率影像, 主要利用国产的GF-2、GF-1、北京二号、美国的PlanetScope卫星影像以及高光谱机载CASI影像数据, 对某些城市黑臭水体进行监测, 包括北京、重庆、南京、钦州、太原、深圳、沈阳等, 而黑臭水体监测方法大致可分为两类, 一类是基于黑臭水体的遥感反射率光谱与一般水体反射率光谱特征差异, 构建光谱指数阈值分割模型, 包括利用绿光波段遥感反射率的单波段阈值、蓝、绿波段差值、红、绿波段比值, 以及色度值构建了黑臭水体遥感识别算法(温爽等, 2018), 对南京主城区进行黑臭提取; 基于GF-1 PMS和GF-2 PMS影像, 利用城市黑臭水体反射率光谱在绿光—红光波段变化比一般水体平缓的特点, 提出基于反射率光谱指数BOI (Black and Odorous water Index)的黑臭水体识别模型(姚月等, 2019), 并应用于沈阳; 基于实测等效数据值, 利用CIE颜色纯度算法提取城市黑臭水体, 并将该算法应用于沈阳和北京的GF-2 PMS影像, 具有较好的识别精度(Shen等, 2019); 基于机载高光谱CASI图像数据, 提出一种可以有效消除阴影和植被影像的黑臭水体模型(Huang和Zheng, 2019); 基于钦州PlanetScope影像的蓝、绿、红、近红波段, 构建归一化黑臭水体指数法—NDBWI(姚焕玫等, 2019); 基于GF-1 PMS卫星水体清洁指数(WCI)的太原市黑臭水体模型(李佳琦等, 2019); 基于GF-1 PMS数据对比4种模型在深圳市的适用性(张雪等, 2019)等; 为了有效识别城市黑臭水体, 另一类是通过水质参数的反演评价城市黑臭水体, 如靳海霞等(2017)反演北京河段的叶绿素a浓度、悬浮物浓度、透明度及综合营养状态指数, 并利用综合营养状态指数评价黑臭程度。由此可见, 利用多源影像大范围监测黑臭水体的研究很少。

目前的相关研究都是利用某一种高分辨率卫星监测某个城市的黑臭水体。但是, 一般高分辨率卫星幅宽较小, 单颗卫星覆盖能力比较差。因此, 无法满足一定时段内的黑臭水体监测需求。有必要联合多源卫星监测黑臭水体。但是, 卫星遥感器的空间分辨率、波段设置等方面都存在差异, 因此在黑臭水体监测方法和效果上也会存在不同。目前, 还缺乏这方面的系统性研究。

因此, 为了满足一定时段内的黑臭水体监测要求, 本文将从高分辨率卫星传感器波段设置、

黑臭水体识别模型、卫星影像成本等方面分析多源遥感影像监测黑臭水体的适用性, 为多源卫星影像监测全国范围黑臭水体提供应用参考和借鉴。

2 数据

2.1 多源高分辨率卫星影像数据

选取国内外常用的全色波段分辨率在2 m以内高分辨率遥感影像作为数据源, 通过人工目视解译, 剔除受云和太阳耀光影响较大的图像, 保留高质量的遥感影像。主要选取了2017年—2020年高质量的GeoEye-1、WorldView-2、北京二号(DMC3)、高景一号SV1(SuperView-1)以及GF-PMS系列(GF-1/1B/1C/1D、GF-2、GF-6)卫星影像(表1)。

表1 多源高分辨率遥感影像使用情况

Table 1 Usage of multi-source high-resolution remote sensing images

卫星影像 获取时间	卫星类型	卫星影像 数量/景	覆盖城市
2017-05-20	GeoEye-1	1	北京
2017-09-22	Superview-1	1	
2017-09-19	WorldView-2	1	
2019-06-24	DMC3	1	
2019-07-12	GF-1	1	
2018-09-05	GF-2	2	
2019-09-18	GF-6	1	
2019-09-24	GF-1B	1	
2019-10-21	GF-1D	1	
2020-03-11	GF-1C	1	

为了对比多源卫星影像传感器设置的差异性, 从空间分辨率、波段设置、光谱响应函数等方面介绍多源卫星影像的异同点。

(1) 空间分辨率。一般地, 空间分辨率越高, 获取的信息越详尽。目前国产卫星往往同时搭载了全色和多光谱传感器(孙伟伟等, 2020), 多源卫星影像的全色和多光谱波段空间分辨率如表2所示。

(2) 波段设置。GeoEye-1、DMC3、SV1以及GF系列影像均设置了4个波段, 分别为蓝、绿、红、近红波段; WorldView-2影像设置了8个波段, 即深蓝、蓝、绿、黄色、红、红边、2个近红外波段。

(3) 光谱响应函数。在相同的观测条件下, 光谱响应函数的差异会导致不同传感器观测到的地

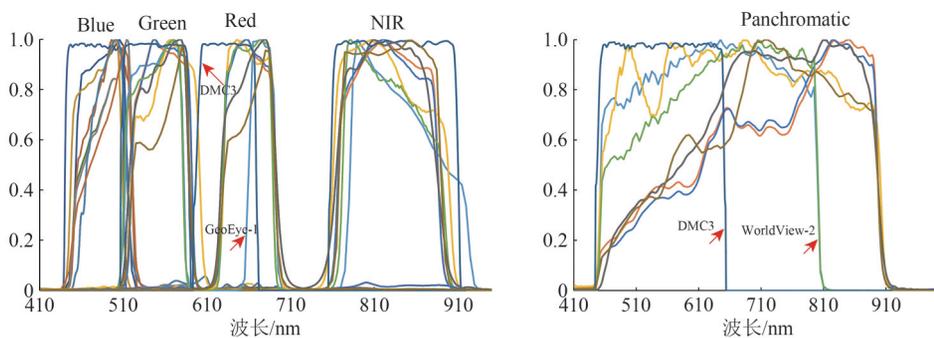
物反射率不同。如图 1，多源卫星影像在蓝光波段、绿光波段和近红波段的光谱响应函数基本一致，在红光和全色谱段存在差异。图 1 (a) 中，DMC3 影像的红光波段的光谱响应函数与其他多源

卫星影像存在差异，主要是位置差异，GeoEye-1 的红光波段光谱响应宽度小于其他多源卫星传感器；图 1 (b) 中，DMC3 卫星和 WorldView-2 卫星的全色波段光谱响应宽度小于其他遥感卫星。

表 2 多源卫星影像空间分辨率对比

Table 2 Comparison of spatial resolution of multi-source satellites remote sensing images

波段	卫星类型						
	GeoEye-1	WorldView-2	DMC3	SuperView-1	GF-1/1B/1C/1D	GF-2	GF-6
Blue	0.45—0.51 (1.65)	0.45—0.51 (1.85)	0.44—0.51 (3.2)	0.45—0.52 (2)	0.45—0.52 (8)	0.45—0.52 (4)	0.45—0.52 (8)
Green	0.51—0.58 (1.65)	0.51—0.58 (1.85)	0.51—0.59 (3.2)	0.52—0.59 (2)	0.52—0.59 (8)	0.52—0.59 (4)	0.52—0.6 (8)
Red	0.655—0.69 (1.65)	0.63—0.69 (1.85)	0.6—0.67(3.2)	0.63—0.69 (2)	0.63—0.69 (8)	0.63—0.69 (4)	0.63—0.69 (8)
NIR	0.77—0.89 (1.65)	0.77—0.895 (1.85)	0.76—0.91 (3.2)	0.77—0.89 (2)	0.77—0.89 (8)	0.77—0.89 (4)	0.76—0.89 (8)
波段范围/ μm (分辨率/m)							
Coast		0.4—0.45 (1.85)					
Yellow		0.585—0.625 (1.85)					
Red-Edge		0.705—0.745 (1.85)					
NIR-2		0.86—0.104 (1.85)					
Panchromatic	0.45—0.8 (0.41)	0.45—0.104 (0.46)	0.45—0.65 (0.8)	0.45—0.89 (0.5)	0.45—0.9 (2)	0.45—0.9 (1)	0.45—0.9 (2)



(a) Comparison of spectral response functions of multi-spectral bands (b) Comparison of spectral response functions of panchromatic bands

— Geoeye-1 — GF-1 PMS — SuperView-1 — DMC3 — GF-1C
 — GF-2 PMS — GF-6 PMS — Worldview-2 — GF-1B — GF-1D

图 1 多源卫星影像光谱响应函数

Fig. 1 The spectral response function of the multi-source sensor images

2.2 实测数据

实测光谱数据的获取是使用 ASDFiledSpec®3 便携式地物光谱仪，基于“表面法”进行水面反射率光谱测量 (唐军武 等, 2004)。对每个采样点，

测量了水体上行辐亮度 $L_u(\lambda)$ 、天空光下行辐亮度 $L_{sky}(\lambda)$ 以及参考板的辐亮度数据 $L_p(\lambda)$ ，通过 Mobley (1999) 等提出的公式计算遥感反射率，同时，采集的水样点使用塞氏盘测量透明度，氧化还

原电位 ORP (mV) 和溶解氧 DO (mg/L) 由哈希 HQ30D 便携式溶解氧测定仪测量, 氨氮 (mg/L) 由哈纳 HI96733 氨氮测定仪测量。

结合《城市黑臭水体整治工作指南》(中华人民共和国住房和城乡建设部和中华人民共和国环境保护部, 2015) 中透明度 (cm)、溶解氧 (mg/L)、氧化还原电位 (mV) 和氨氮 (mg/L) 等特征指标 (表 3), 判断采样点水体类型。

2016-08-28、2017-09-20、2018-09-05、2019-09-16 和 2019-09-18 在北京市分别开展了 5 次野外水面试验, 共采集了 54 组黑臭水体, 39 组一般水

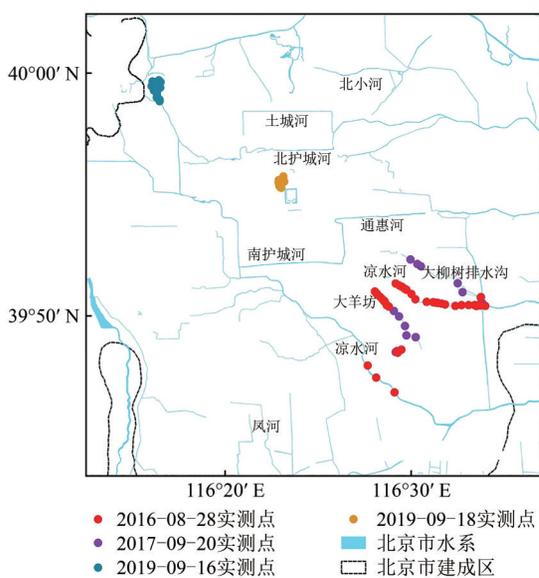
体 (图 2 (a)); 2016-09-19—20 和 2016-10-09 在沈阳市分别开展了两次野外水面试验, 共采集了 47 组黑臭水体, 27 组一般水体 (图 2 (b))。

表 3 城市黑臭水体判别标准

Table 3 The criteria for determination of urban black and odorous water

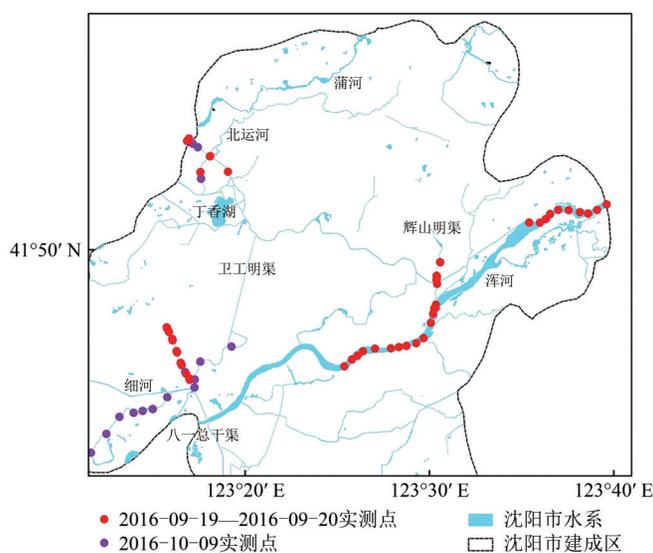
特征指标	轻度黑臭	重度黑臭
透明度/cm	10 [*] —25	<10 [*]
溶解氧/(mg/L)	0.2—2.0	<0.2
氧化还原电位/mV	-200—50	<-200
氨氮/(mg/L)	8.0—15	>15

注: *表示水深不足 25 m 时, 该指标按水深的 40% 取值。



(a) 2016年—2019年北京市实测点位分布图

(a) Distribution map of measured points in Beijing from 2016 to 2019



(b) 2016年沈阳市实测点位分布图

(b) Distribution map of measured points in Shenyang in 2016

图2 北京市和沈阳市实测点位分布图

Fig. 2 Distribution map of measured points in Beijing and Shenyang

其中 2019-09-05 GF-2 在北京同步过境, 当天共采集了 12 个采样点 (3 组黑臭水体, 9 组一般水体) 的数据。

3 方法

为了对比多源卫星影像监测黑臭水体的适用性, 首先, 基于实测光谱数据, 利用卫星影像的光谱响应函数, 将实测水面反射率等效为卫星影像上各个波段的遥感反射率。然后, 基于等效的反射率数据, 确定黑臭水体识别模型阈值, 并进行精度评价, 最后, 基于多源影像对示范区进行应用。具体的模型适用性研究的流程如图 3。

3.1 基于实测水面光谱的的黑臭水体监测方法和对比

(1) 基于实测光谱的多源卫星波段等效。利用多源遥感影像的光谱响应函数, 将实测水体反射率模拟等效为多源卫星影像上的各个波段的反射率 $R_{rs,eq}$, 计算公式如下:

$$R_{rs,eq} = \frac{\int R_{rs}(\lambda) f_{SRF}(\lambda) F_0(\lambda) d(\lambda)}{\int f_{SRF}(\lambda) F_0(\lambda) d(\lambda)} \quad (1)$$

式中, $R_{rs,eq}$ 为卫星波段等效反射率; $R_{rs}(\lambda)$ 为实测的遥感反射率; $f_{SRF}(\lambda)$ 为卫星的光谱响应函数; $F_0(\lambda)$ 为大气层外太阳辐照度 (中国资源卫星应用中心, 2016)。

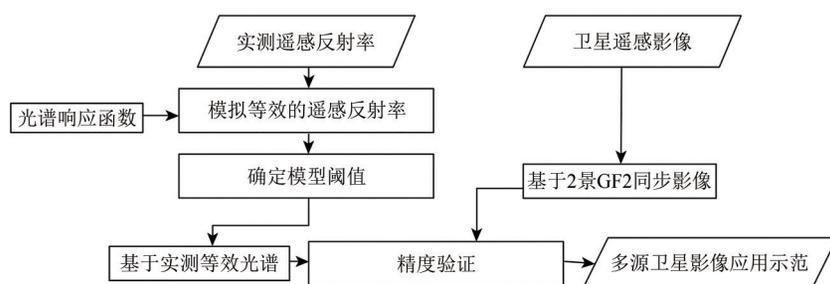


图3 模型适用性方法研究技术流程图

Fig. 3 Technical flow chart of model applicability method research

(2) 基于波段等效光谱的黑臭水体识别模型。采用姚月等 (2019) 等提出的 BOI (Black and Odorous water Index) 模型, 计算等效数据的 BOI 值。BOI 模型计算公式如下:

$$BOI = \frac{R_{rs}(G) - R_{rs}(R)}{R_{rs}(B) + R_{rs}(G) + R_{rs}(R)} \leq T \quad (2)$$

式中, $R_{rs}(B)$ 为蓝光波段的遥感反射率, $R_{rs}(G)$ 为绿光波段的遥感反射率, $R_{rs}(R)$ 为红光波段的遥感反射率, T 为阈值。

(3) 基于波段等效光谱的黑臭水体识别评价。为了确定模型阈值, 将获取的 155 组实测数据 (98 组

黑臭水体, 57 组一般水体) 经过等效计算, 随机筛选出 3/4 组实测数据 (74 组黑臭水体, 43 组一般水体) 进行模型阈值的确定, 剩余的 1/4 组实测数据 (14 组一般水体, 24 组黑臭水体) 用于检验模型阈值的精度。2018-09-05 同步采集的 12 个采样点 (3 组黑臭水体, 9 组一般水体) 将用于大气校正精度评价。

基于等效的遥感反射率, 如表 4 所示, 采用整体识别正确率、黑臭水体错分率、黑臭水体漏分率、一般水体错分率和一般水体漏分率评价模型阈值的可靠性。

表 4 各精度评价公式

Table 4 Each accuracy evaluation formula

精度	整体识别正确率	黑臭水体错分率	黑臭水体漏分率	一般水体错分率	一般水体漏分率
公式	$A = \frac{M}{N} \times 100\%$	$P0 = \frac{n_1}{n_2}$	$P1 = \frac{n_3}{n_4}$	$P2 = \frac{n_5}{n_6}$	$P3 = \frac{n_7}{n_8}$

注: N 表示验证样点总数, M 表示采用模型后识别正确的样本个数, n_1 表示黑臭水体识别错误数, n_2 表示黑臭水体识别总数, n_3 表示黑臭水体漏分率, n_4 表示黑臭水体实际总数, n_5 表示一般识别错误数, n_6 表示一般水体识别总数, n_7 表示一般水体漏分率, n_8 表示一般水体实际总数。

3.2 基于卫星影像的黑臭水体识别方法和对比

(1) 多源卫星影像预处理。为了准确对比多源遥感数据之间的差异, 利用多源卫星影像监测黑臭水体时, 采用相同的预处理步骤。预处理步骤主要包括图像融合、几何精校正、大气校正以及利用水体中心线法提取河流矢量。

首先利用像素刻刀处理软件对全色和多光谱影像进行融合 (像素刻刀高分卫星处理软件, 2018), 然后利用参考影像自动提取控制点, 同时在影像重叠区提取连接点, 并在 SRTM DEM 数据的辅助下进行区域网平差, 完成几何精校正 (Long 等, 2016)。

最后进行大气校正, 基于辐射传输模型进行卫星遥感影像精确大气校正时, 需要卫星传感器进行了精确的辐射定标。但是对于高分辨率卫星

来说, 主要用途是目视解译和分类识别, 卫星数据提供方对于辐射定标往往不够重视, 导致辐射定标的精度不能够满足精确大气校正的要求。此外, 基于辐射传输模型的大气校正一般还需要短波红外波段来反演气溶胶, 这也是常有的高分辨率卫星所不具备的; 而且, 多光谱波段与全色波段融合之后, 光谱会发生变化, 再应用于基于辐射传输模型的大气校正会存在问题。综上, 基于辐射传输模型的大气校正方法很难应用于融合的高分辨率卫星。为了解决这些问题, 本文采用相对辐射归一化的方法进行大气校正 (郭丽峰等, 2009)。其核心原理和操作步骤如下: (1) 找到一种辐射定标比较精确、具有短波红外波段、空间分辨率相对较高的卫星遥感数据作为参考数据, 本文选择具有 10 m 分辨率的 Sentinel-2 MSI; (2) 对于

一景待处理的高分辨率卫星影像，找到与其时间相近的 Sentinel-2 MSI，基于辐射传输大气校正方法计算得到 Sentinel-2 MSI 图像的地表反射率；(3) 假设 Sentinel-2 MSI 图像中有一些地物（如建筑物屋顶、道路、裸土等）的反射率与待处理高分辨率图像的同一个地物反射率是近似不变的，将 Sentinel-2 MSI 图像的反射率赋给待处理高分辨率图像的地物；(4) 利用待处理高分辨率地物的反射率和对应的 DN 值，进行线性拟合，得到 DN 值与反射率的线性关系；(5) 将得到的线性关系，应用于待处理高分辨率图像全图 DN 值，得到反射率，其中，将输出的地表反射率影像除以 π ，忽略天空光影响，最终近似得到水体的遥感反射率。

(2) 大气校正评价。将获取的北京市 2018-09-05 的 12 组实测遥感反射率和对应的 2 景同步 GF-2 遥感影像，利用均方根误差 RMSE (Root Mean Square Error) 和平均相对误差 MRE (Mean Relative Error) 两个指标评价大气校正精度，各指标计算公式如下：

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (P_i - A_i)^2} \quad (3)$$

$$\text{MRE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_i - A_i}{P_i} \right| \times 100\% \quad (4)$$

式中， P_i 为实测遥感反射率， A_i 为大气校正后卫星影像的遥感反射率， n 为采样点个数。

(3) 多源卫星影像黑臭水体识别评价。将确定的阈值应用于 2 景星一地同步的 GF-2 影像，利用同步采集的 12 个采样点，采用上述 5 个精度评价指标进行精度评价，并且选取高质量多源卫星影像对北京通州区的某一重叠区域进行示范应用。

4 结果与讨论

4.1 基于实测水面反射率光谱等效的模型阈值确定和精度评价

4.1.1 黑臭水体识别模型阈值的确定

利用随机筛选出的 117 个采样点 (3/4 的样本点) (74 组黑臭水体, 43 组一般水体) 确定黑臭识别模型阈值。如图 4 所示, GeoEye-1、WorldView-2、SV1 和高分系列影像上一般水体与黑臭水体的 BOI 值有很明显的分界限, 黑臭水体与一般水体的 BOI 值多数在一定的范围内: 黑臭水体 BOI 值范围为 -0.068 — 0.051 , 一般水体范围为 0.057 — 0.25 , 最终确定阈值 $T=0.05$ 区分黑臭水体和一般水体。而 DMC3 影像的一般水体和黑臭水体 BOI 值没有明显的分界, 对 BOI 模型不适用。

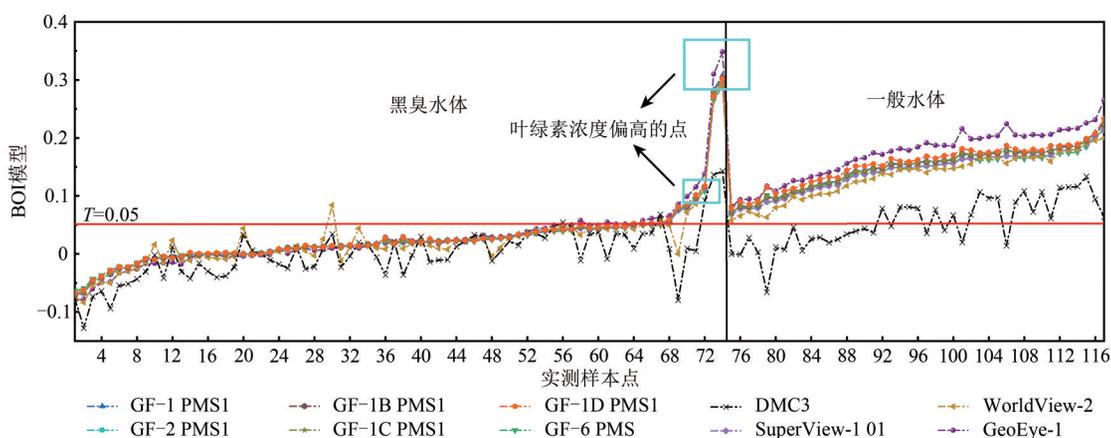


图 4 多源卫星影像实测等效数据 BOI 模型阈值确定

Fig. 4 Threshold determination of BOI model for measured equivalent data of Multi-source Satellite Images

在模型阈值的确定过程中, 存在黑臭水体 BOI 值明显高于一般水体的情况, 如图 4 蓝框所示的 4 个样本点, 根据现场测量指标和水体周围环境判别 4 个样点均属于典型的黑臭点, 由于这 4 个点的叶绿素浓度很高, 而叶绿素 a 在 675 nm 附近有个强吸收, 导致红波段的遥感反射率偏低, 计算的

BOI 值会偏高, 从而导致黑臭水体误判为普通水体。既是黑臭水体、叶绿素浓度又高的河流, 在缺水型的北方城市中很少见, 本文主要研究的是缺水型、非浑浊的城市黑臭水体, 故采取 $T=0.05$ 的阈值虽然会带来一些误差, 不过这种影响相对比较小, 而且对于波段比较少的高分辨率卫星来

说暂时也没有更好的解决办法。

GF-1/1B/1C/1D/2的PMS1和PMS2传感器等效计算值基本相同，故图4中仅对比各卫星的PMS1传感器等效的BOI值折线图；高景一号的4颗星则采用01星代表。

对于不适用BOI模型的DMC3影像，采用归一化水体指数NDWI (Normalized Difference Water Index) 识别黑臭的方法 (McFeeters, 1996; Liu等, 2017)，计算公式如下：

$$NDWI = \frac{R_{rs}(\text{Green}) - R_{rs}(\text{NIR})}{R_{rs}(\text{Green}) + R_{rs}(\text{NIR})} \leq N \quad (5)$$

式中， $R_{rs}(\text{Green})$ 和 $R_{rs}(\text{NIR})$ 为DMC3影像的绿波段和红波段的遥感反射率。

针对DMC3影像，黑臭水体NDWI范围在-0.51—0.53，一般水体范围为0.037—0.85 (图5)，故选取 $N=0.55$ 作为判别一般水体和黑臭水体的阈值。阈值 $N=0.55$ 虽然会带来一些误差，不过误差相对较小。

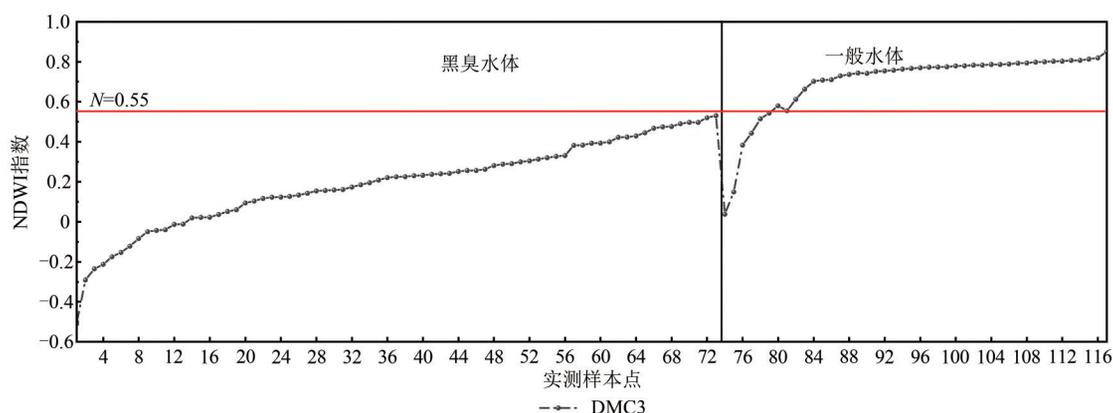


图5 DMC3影像等效数据的NDWI指数阈值的确定

Fig. 5 Determination of NDWI index threshold of DMC3 image equivalent data

4.1.2 黑臭水体识别精度评价

针对GeoEye-1、WorldView-2、SV1和GF系列影像，利用38组实测数据 (1/4样本点) (14组一般水体，24组黑臭水体)，基于5个精度评价指标评价BOI=0.05的阈值精度。如图6，GF系列和SuperView-1影像3组黑臭水体被误判为一般水体；GeoEye-1和WorldView-2影像4组黑臭水体点被误判为一般水体。如表5所示，整体识别正确率均较高，黑臭水体和一般水体的错分率、漏分率都较低，表明多源卫星影像的模拟等效数据是可以用来以一定的精度识别黑臭水体。

针对DMC3影像，使用上述38组实测数据评价阈值 $N=0.55$ 的精度，共有4组误判点 (图7)，其中1组黑臭水体点被误判为一般水体，3组一般水体点被误判为黑臭水体，识别正确率达到89.5%；黑臭水体错分率、黑臭水体漏分率、一般水体的错分率、一般水体漏分率分别为11.5%、4.1%、8.3%、21.4%。表明基于DMC3影像模拟等效数据使用NDWI指数识别黑臭水体是可行的 (Liu等, 2017)。

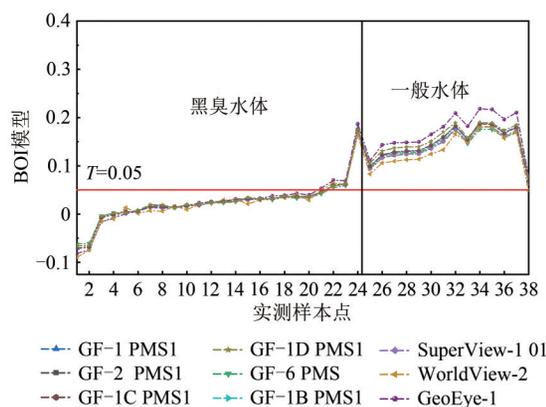


图6 多源卫星影像实测等效数据BOI阈值精度评价

Fig. 6 Accuracy evaluation of BOI threshold for measured equivalent data of multi-source satellite images

4.2 基于卫星影像的黑臭水体识别结果评价

4.2.1 大气校正精度评价

利用北京市2018-09-05的12组实测遥感反射率和GF-2影像上对应点位的遥感反射率，进行定量评价 (图8)。得到蓝 (Band1)、绿 (Band2)、红 (Band3) 的MRE分别为30.6%、22.5%、33%。

RMSE 分别为 0.0008 sr^{-1} 、 0.0013 sr^{-1} 、 0.0012 sr^{-1} ，表明相对辐射归一化大气校正方法能够有效消除实测反射率值与大气校正后的遥感反射率值接近，气溶胶等影响。

表5 多源卫星影像实测等效数据的精度评价统计

Table 5 Accuracy evaluation statistics of measured equivalent data of multi-source satellite images

精度/%	GeoEye-1	WorldView-2	SV1	GF-1/1B/1C/1D	GF-2	GF-6
整体识别正确率	89.5	89.5	92.1	92.1	92.1	92.1
黑臭水体错分率	0	0	0	0	0	0
黑臭水体漏分率	16.7	16.7	12.5	12.5	12.5	12.5
一般水体错分率	22.2	22.2	17.6	17.6	17.6	17.6
一般水体漏分率	0	0	0	0	0	0

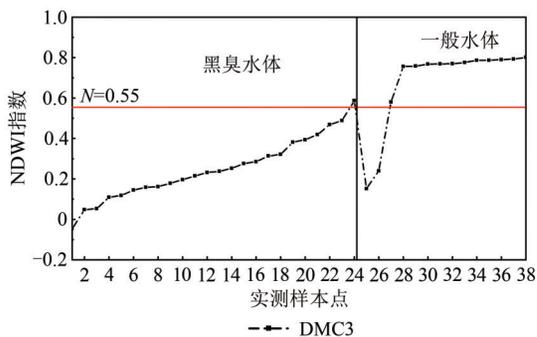


图7 DMC3 影像等效数据NDWI指数阈值的精度评价
Fig. 7 The accuracy evaluation of the NDWI index threshold of DMC3 image equivalent data

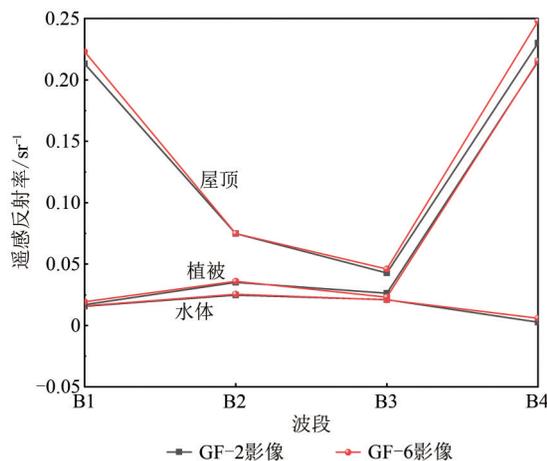


图9 大气校正后的GF-2与GF-6影像遥感反射率对比
Fig. 9 Comparison of remote sensing reflectance of GF-2 and GF-6 images of atmospheric correction

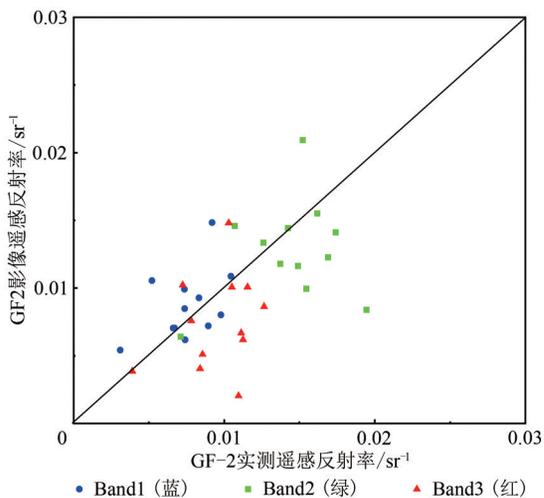


图8 GF-2影像遥感反射率与实测遥感反射率对比
Fig. 8 Comparison of remote sensing reflectance of GF-2 image and measured data

利用相同的参考影像，对2019-06-06同时过境的GF-2和GF-6影像进行大气校正，对比不同地物的遥感反射率，发现GF-2与GF-6影像上屋顶、植被和水体的遥感反射率数值接近，波形近似。大气校正后的卫星影像可用于黑臭水体识别。

4.2.2 黑臭水体识别评价

(1) 基于2景同步GF-2影像BOI模型的精度验证。首先将BOI=0.05应用于2018-09-05同时过境的2景GF-2影像，进行黑臭水体识别，然后利用同步采集的12个采样点，包括中坝河上3组黑臭水体，温榆河、通惠河和通惠河灌渠上共9组一般水体。通惠河上2个一般水体被误判为黑臭水体(图10)，采用5种指标评价其识别精度，识别正确率为83.3%，黑臭水体错分率和一般水体漏分率分别为40%、22.2%，黑臭水体漏分率和一般水体的错分率为0，总体精度较高。

根据同步影像的精度评价，发现一般水体和黑臭水体的错分率和漏分率较低，黑臭识别精度在应用中可以得到保证。

(2) 基于多源卫星影像的模型应用。为了进一步证明BOI模型和NDWI模型识别黑臭水体的可靠性，将阈值 $T=0.05$ 和 $N=0.55$ 应用于适用的多源

影像，在应用黑臭水体模型后，目视剔除一些受阴影和邻近效应因素导致的混合像元；并通过目视解译得到水草或水华矢量。

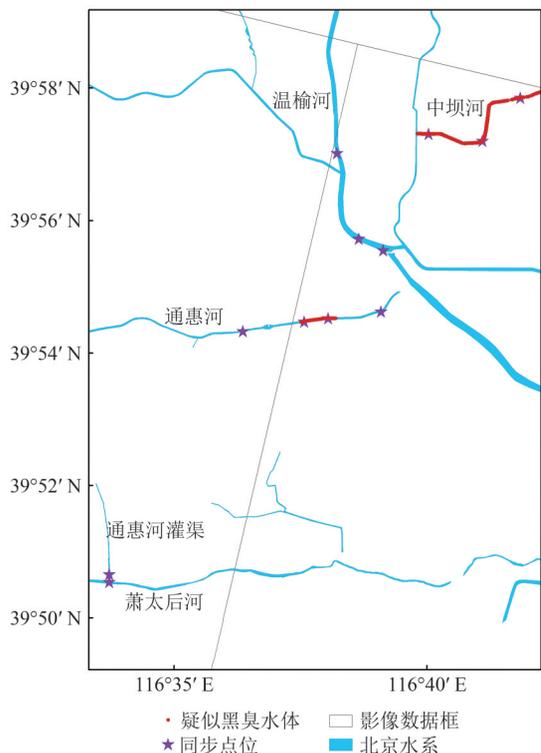


图 10 基于同步 GF-2 影像的北京黑臭水体识别结果
Fig. 10 The recognition result of black-odor water based on synchronized GF-2 images

利用 10 景北京区域的多源遥感影像（表 1）监测黑臭水体，结果如图 11 所示。针对重叠区域内潮白河和七级村河，分析 2017-05—2020-03 两河的黑臭水体变化情况，可见潮白河一直为一般水体，2017-05-20 七级村河存在疑似黑臭水体。此后七级村河无疑似黑臭水体。

在政府的积极治理下，2017-11 七级村河完成整治（七级河及西和路边沟黑臭水体治理工程，2017）。根据遥感协同监测结果显示：2017-09 前（图 11），七级村河河面上存在疑似黑臭水体、水草或水华现象。2017-09 之后（图 11），河面已无黑臭现象，仅存在少量水草或水华。2018-09-05 在七级村河上获取了 2 组同步实测点位，经检验四参数（透明度、溶解氧、氧化还原点位、氨氮）值分别为：（40 cm、13.45 mg/L、205 mV、3.8 mg/L），（43 cm、9.62 mg/L、226.4 mV、2.6 mg/L）均符合一般水体的指标。表明遥感监测结果不仅与实际治理情况相符，而且符合实测结果，证实了多源

遥感影像监测黑臭水体的适用性和可靠性。

4.3 多源高分辨率遥感影像监测黑臭水体适用性分析

4.3.1 多源高分辨率遥感影像传感器差异性分析

为了研究多源遥感影像监测城市黑臭水体的适用性，从空间分辨率、光谱响应函数和黑臭水体识别模型阈值的确定进行分析。

对比分析空间分辨率差异导致的黑臭水体识别差异，利用 2019-06-06 同时过境、不同分辨率的 GF-2 和 GF-6 影像提取同一区域的黑臭水体，发现对于较窄的河道来说，较高空间分辨率的 GF-2 影像能获取更多的有效水体像元，可以有效监测黑臭水体；而相对较低分辨率的 GF-6 影像水面存在大量混合像元，黑臭水体无法识别（图 12（a）、图 12（b））。因此，监测较狭窄河道的黑臭水体时，优先选择较高分辨率的遥感影像（如 GeoEye-1、WorldView-2、SV1 和 GF-2 等）。

对比光谱响应函数差异导致的黑臭水体识别差异，选择时间接近而光谱响应函数差异较大的 DMC3（2019-06-24）和 GF-1（2019-07-12）影像，并将分辨率较高的 DMC3 影像重采样为与 GF-1 相同的分辨率，对选取的北京萧太后河河段（一般水体）计算 BOI 值，对比识别结果（图 13），发现 GF-1 影像可以正确识别水体类型，DMC3 影像的识别结果出现一般水体和黑臭水体，对于河段水体类型无法判别，并且 BOI 模型是基于 GF-1、GF-2 影像构建的（姚月等，2019），因此，光谱像函数差异较大的 DMC3 影像不适用 BOI 模型，需要选用其他的黑臭水体识别模型。

通过模型阈值的确定，发现 GeoEye-1、WorldView-2、SuperView-1 和高分系列影像可以应用同一 BOI 模型阈值识别黑臭水体；而 DMC3 影像更适用于 NDWI 指数；基于模拟等效和同步影像数据，分别对确定的 BOI 阈值和 NDWI 阈值进行了精度评价，发现确定的阈值可以很好的识别一般水体和黑臭水体，整体识别正确率较高。

4.3.2 多源遥感影像成本分析

在黑臭水体监测过程中，需要综合考虑影像成本（表 6）和城市河道宽度。进行水体提取时，当影像上河流宽度为 5 个像元时，除去左右各 2 个像元受邻近效应影响，中间像元更可能是纯水像

元, 一般认为大于5个像元宽度可以看清河流, 即 GeoEye-1 影像能够监测的最窄河道宽度为 2.05 m, WorldView-2 和 SV1 影像分别为 2.3 m 和 2.5 m,

DMC3 和 GF-2 影像均为 4 m, GF-1/1B/1C/1D/6 影像全都为 10 m。

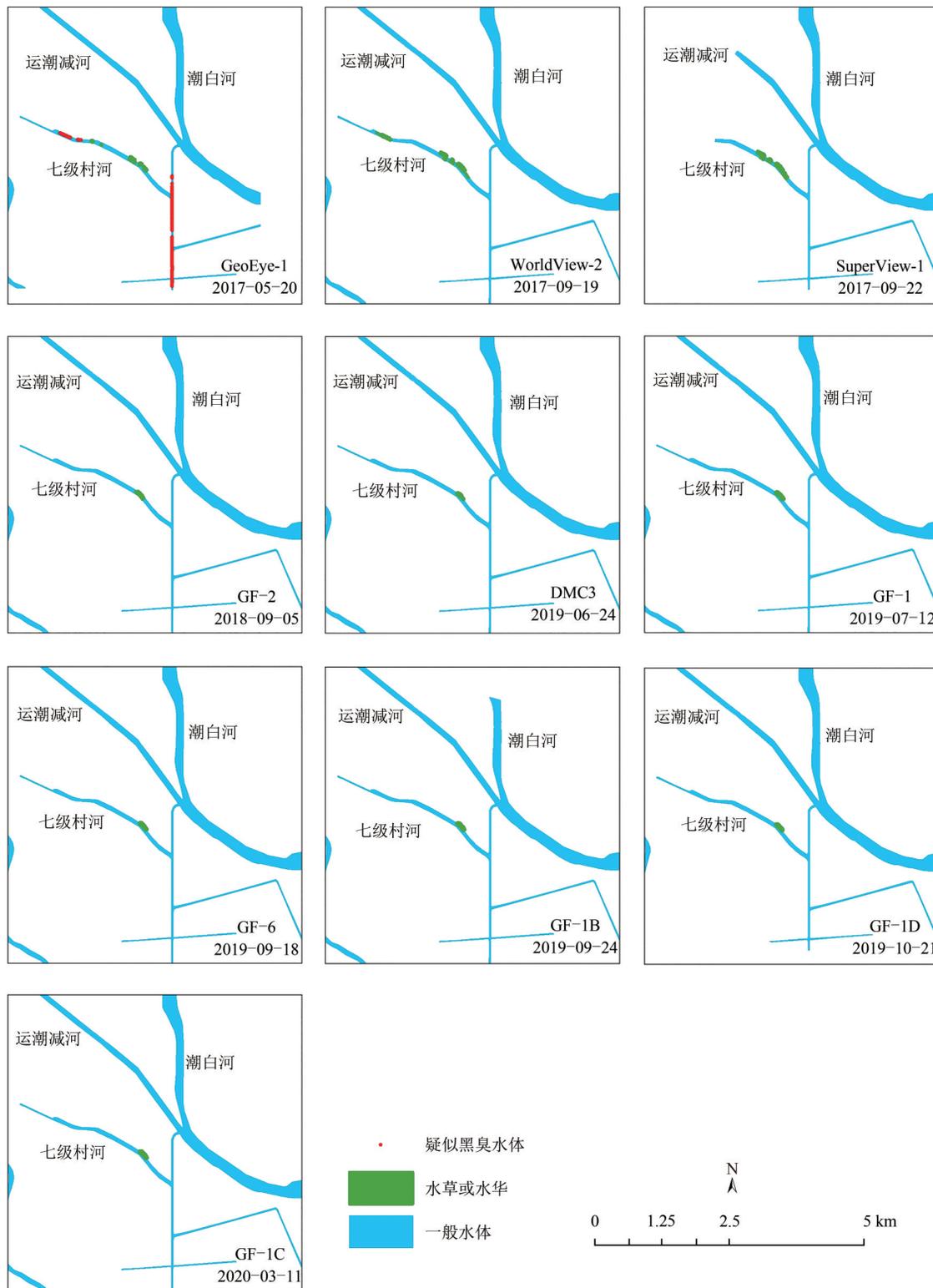


图 11 多源遥感影像黑臭水体遥感识别分布图

Fig. 11 Distribution map of black and odorous water body identified by multi-source remote sensing images

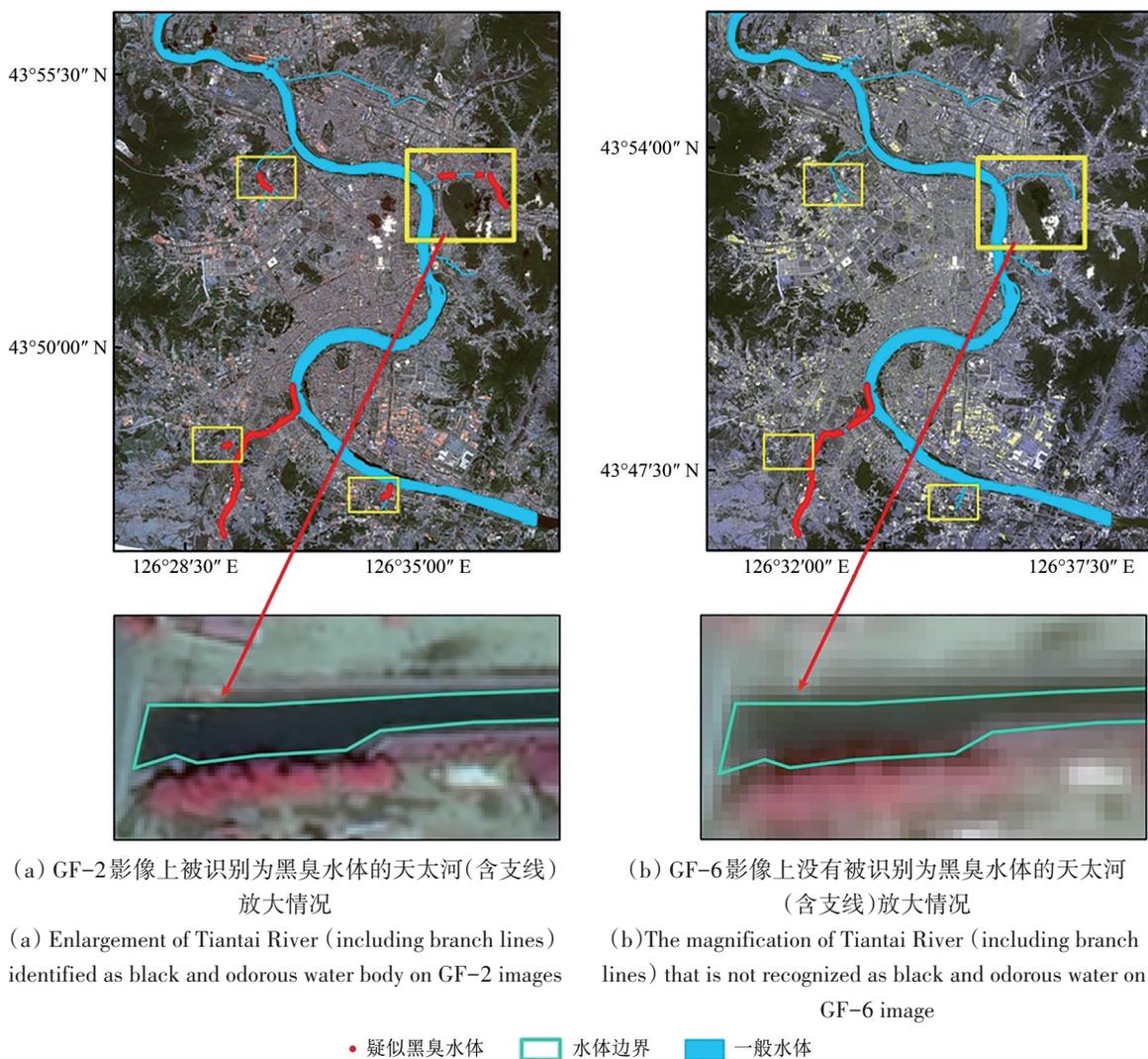


图 12 同一河流利用不同空间分辨率影像识别黑臭水体结果不一样

Fig. 12 The same river uses different spatial resolution images to identify black and odorous water bodies with different results

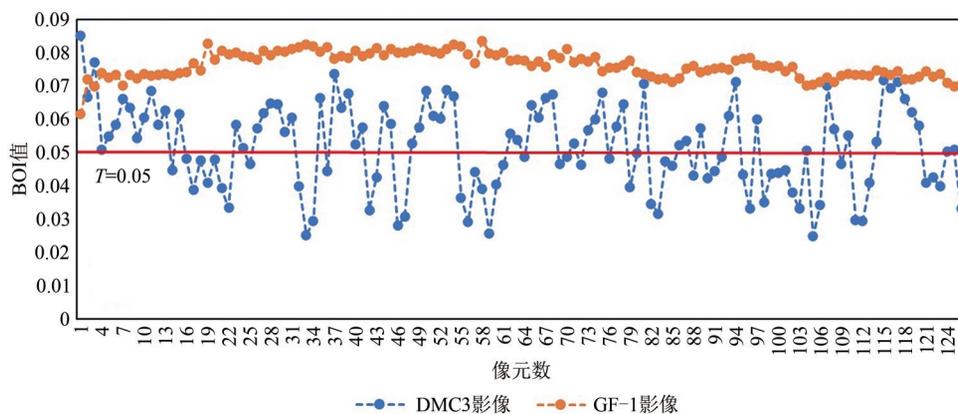


图 13 GF-1 和 DMC3 不同光谱响应函数导致的识别结果差异性对比

Fig. 13 Difference comparison of recognition results caused by different spectral response functions of GF-1 and DMC3

根据上述，建议联合多源卫星影像监测黑臭水体，可分为两种情况来选用影像：(1) 当河道宽度大约在 2—10 m，选取 GF-2、SV1 或者 DMC3 影像作为常规监测影像，GeoEye-1、WorldView-2 影

像为补充数据源；(2) 当河道宽度大于 10 m，建议选用 GF-1 或者 GF-6 影像作为常规监测影像，补充数据源依次为 GF-2、SV1、DMC3、GF-1B/1C/1D、GeoEye-1、WorldView-2 影像。

表6 多源遥感影像购买价格对比
Table 6 Comparison of purchase prices of multi-source remote sensing images

卫星影像	存档影像	编程影像	最小起订面积
GF-1	+		整景(32.5 km×32.5 km)
GF-1B/1C/1D	+-		整景(60 km×60 km)
GF-2	++	—	整景(23.5 km×23.5 km)
GF-6	++		整景(90 km×90 km)
DMC3	+++	++++	
SuperView-1	++++-	+++++	存档:25 km ²
GeoEye-1	++++++	++++++	编程:100 km ²
WorldView-2	++++++	++++++	

注:因为购买数据量不同,各个影像价格方面会出现偏差,本文不便出现具体价格。表5中的“笔画数”越多代表购买价格越贵,此表仅供参考,不作为最终的标准价格。

5 结论

本文针对多源高分辨率卫星影像,研究不同传感器对于黑臭水体遥感监测的适用性,得出以下几点结论:

(1) 光谱响应函数的差异(主要位置差异),会导致多源影像间遥感反射率值不同,从而无法利用同一模型进行黑臭水体识别。因此,GeoEye-1、WorldView-2、SuperView-1和GF系列影像适用于BOI模型;而DMC3影像更适用于NDWI模型。

(2) 精准的大气校正,是保证黑臭水体识别精度的前提,通过对相对辐射归一化的大气校正,经过星地同步匹配检验,蓝(Band1)、绿(Band2)、红(Band3)的MRE分别为30.6%、22.5%、33%,具有较好的精度,适用于高分辨率卫星影像融合后的大气校正。

(4) 利用10颗多源卫星联合监测了北京潮白河和七级村河的黑臭水体,并与相关数据进行交叉验证,证明具有较好的精度和一致性。

(5) 综合考虑卫星影像的空间分辨率和影像购买成本,给出多源卫星影像协同监测的建议:(1)当河流宽度在2—10 m时,选取GF-2、SV1或者DMC3影像作为常规遥感影像,GeoEye-1、WorldView-2影像作为补充;(2)当河流宽度大于10 m时,选择GF-1或者GF-6影像作为常规遥感影像,补充数据源依次为GF-2、SV1、DMC3、GF-1B/1C/1D、GeoEye-1、WorldView-2影像。

参考文献(References)

Bai H W, Qiu Y Z, Li Q J, Zhang T and Yang L Q. 2019. Discussion on

water environment management mechanism based on river chief system in Beijing. *Beijing Water*, (2): 39-45 (白慧文, 邱彦昭, 李其军, 张彤, 杨兰琴. 2019. 基于河长制的北京市水环境管理体制分析. *北京水务*, (2): 39-45) [DOI: 10.19671/j.1673-4637.2019.02.010]

Bai Y, He X Q, Pan D L, Zhu Q K and Gong F. 2009. The black water around the Changjiang (Yangtze) Estuary in the spring of 2003. *Acta Oceanologica Sinica*, 28(4): 23-31 [DOI: 10.3969/j.issn.0253-505X.2009.04.004]

Black and smelly water treatment project for the Qijicun river and Xihe roadside ditch [EB/OL]. (2017-04-16) [2020-08-20]. <https://www.meipian.cn/l3q7vap> (七级河及西和路边沟黑臭水体治理工程[EB/OL]. (2017-04-16) [2020-08-20]. <https://www.meipian.cn/l3q7vap>)

China Centre for Resource Satellite Data and Application. 2016. Calibration[EB/OL]. (2016-10-10) [2020-08-20]. <http://www.cresda.com/CN/Downloads/dbcs/10506.shtml> (中国资源卫星应用中心. 2016. 2016年国产陆地观测卫星外场绝对辐射定标系数[EB/OL]. (2016-10-10) [2020-8-20]. <http://www.cresda.com/CN/Downloads/dbcs/10506.shtml>)

Guo L F, Gao X H, Kang J and Meng X Q. 2009. Application of the pseudo-invariant feature in normalization process of the remote sensing images. *Remote Sensing Technology and Application*, 24(5): 588-595 (郭丽峰, 高小红, 亢健, 孟小前. 2009. 伪不变特征法在遥感影像归一化处理中的应用. *遥感技术与应用*, 24(5): 588-595) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2009.5.588]

Hu M, Zhang N, Wang L J and Peng Y Y. 2017. Remote sensing monitoring of black smelly water controlling by multi-source data. *Environment and Development*, 29(9): 159-161 (胡森, 张宁, 王罗娟, 彭彦彦. 2017. 多源数据对黑臭水体整治的遥感监测. *环境与发展*, 29(9): 159-161) [DOI: 10.16647/j.cnki.cn15-1369/X.2017.09.092]

Huang Z Q and Zheng J C. Extraction of black and odorous water based on aerial Hyperspectral CASI image//Proceedings of IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Yokohama: IEEE [DOI: 10.1109/IGARSS.

- 2019.8898314]
- Jin H X and Pan J. 2017. Urban black-odor water body remote sensing monitoring based on GF-2 satellite data fusion. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 34(04): 107-117 (靳海霞, 潘健. 2017. 基于高分二号卫星融合数据的城镇黑臭水体遥感监测研究. *国土资源科技管理*, 34(04): 107-117) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-4210.2017.04.013]
- Kutser T, Paavel B, Verpoorter C, Ligi M, Soomets T, Toming K and Casal G. 2016. Remote sensing of black lakes and using 810 nm reflectance peak for retrieving water quality parameters of optically complex waters. *Remote Sensing*, 8(6): 497 [DOI: 10.3390/rs8060497]
- Li J Q, Li J G, Zhu L, Shen Q, Dai H Y and Zhu Y F. 2019. Remote sensing identification and validation of urban black and odorous water in Taiyuan city. *Journal of Remote Sensing*, 23(4): 773-784 (李佳琦, 李家国, 朱利, 申茜, 戴华阳, 朱云芳. 2019. 太原市黑臭水体遥感识别与地面验证. *遥感学报*, 23(4): 773-784) [DOI: 10.11834/jrs.20197292]
- Li X W, Niu Z C, Jiang S and Jin Y. 2012. Remote sensing monitoring of black color water blooms in Lake Taihu based on HT satellite CCD data. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 4(3): 1-9 (李旭文, 牛志春, 姜晟, 金焰. 2012. 环境卫星 CCD 影像在太湖湖泛暗色水团监测中的应用. *环境监控与预警*, 4(3): 1-9) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-6732.2012.03.001]
- Liu F, Chen T, He J J, Wen Q, Qiao Y X, Wu W B and Wang Z Y. 2017. The research on extraction method of black-odor water body based on TripletSat constellation remote sensing data//Proceedings of the 38th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 2017). New Delhi: [s.n.]
- Long T F, Jiao W L, He G J and Zhang Z M. 2016. A fast and reliable matching method for automated Georeferencing of remotely-sensed imagery. *Remote Sensing*, 8(1): 56 [DOI: 10.3390/rs8010056]
- 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]
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China and Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. 2015. Urban blackodor water remediation work guide[EB/OL]. [2020-08-20]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201509/t20150911_224828.html (中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国环境保护部. 2015. 住房城乡建设部 环境保护部关于印发城市黑臭水体整治工作指南的通知[EB/OL]. [2020-08-20]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201509/t20150911_224828.html)
- Mobley C D. 1999. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. *Applied Optics*, 38(36): 7442-7455 [DOI: 10.1364/AO.38.007442]
- Nichol J E. 1993. Remote sensing of tropical blackwater rivers: a method for environmental water quality analysis. *Applied Geography*, 13(2): 153-168 [DOI: 10.1016/0143-6228(93)90056-7]
- Pixel-Knife GF Satellite Processing Software. 2018. Image sharpening [EB/OL]. (2018-03-15) [2020-08-20]. <https://www.zybuluo.com/novachen/note/426294> (像素刻刀高分卫星处理软件. 2018. 基于全参考高分二号卫星图像融合质量评价[EB/OL]. (2018-03-15)[2020-08-20]. <https://www.zybuluo.com/novachen/note/426294>)
- Shen Q, Yao Y, Li J S, Zhang F F, Wang S L, Wu Y H, Ye H P and Zhang B. 2019. A CIE color purity algorithm to detect black and odorous water in urban rivers using high-resolution Multispectral Remote Sensing Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(9): 6577-6590 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2907283]
- Shen Q, Zhu L and Cao H Y. 2017. Remote sensing monitoring and screening for urban black and odorous water body: a review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 28(10): 3433-3439 (申茜, 朱利, 曹红业. 2017. 城市黑臭水体遥感监测与筛查研究进展. *应用生态学报*, 28(10): 3433-3439) [DOI: 10.13287/j.1001-9332.201710.033]
- Sun W W, Yang G, Chen C, Chang M H, Huang K, Meng X Z and Liu L Y. 2020. Development status and literature analysis of China's earth observation remote sensing satellites. *Journal of Remote Sensing*, 24(5): 479-510 (孙伟伟, 杨刚, 陈超, 常明会, 黄可, 孟祥珍, 刘良云. 2020. 中国地球观测遥感卫星发展现状及文献分析. *遥感学报*, 24(5): 479-510) [DOI: 10.11834/jrs.20209464]
- Tang J W, Tian G L, Wang X Y, Wang X M and Song Q J. 2004. The methods of water spectra measurement and analysis I: above-water method. *Journal of Remote Sensing*, 8(1): 37-44 (唐军武, 田国良, 汪小勇, 王晓梅, 宋庆君. 2004. 水体光谱测量与分析 I: 水面上测量法. *遥感学报*, 8(1): 37-44) [DOI: 10.11834/jrs.20040106]
- Wen S, Wang Q, Li Y M, Zhu L, Lü H, Lei S H, Ding X L and Miao S. 2018. Remote sensing identification of urban black-odor water bodies based on high-resolution images: a case study in Nanjing. *Environmental Science*, 39(1): 57-67 (温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁潇蕾, 苗松. 2018. 基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例. *环境科学*, 39(1): 57-67) [DOI: 10.13227/j.hjck.201703264]
- Yao H M, Lu Y N and Gong Z Q. 2019. Remote sensing identification of urban black and odorous water body based on PlanetScope images: A case study in Qinzhou, Guangxi. *Environmental Engineering*, 37(10):35-43 (姚焕玫, 卢燕南, 龚倩清. 2019. 基于 PlanetScope 影像的广西钦州市黑臭水体识别方法研究. *环境工程*, 37(10): 35-43) [DOI: 10.13205/j.hjgc.201910006]
- Yao Y, Shen Q, Zhu L, Gao H J, Cao H Y, Han H, Sun J G and Li J S. 2019. Remote sensing identification of urban black-odor water bodies in Shenyang city based on GF-2 image. *Journal of Remote Sensing*, 23(2): 230-242 (姚月, 申茜, 朱利, 高红杰, 曹红业, 韩惠, 孙建国, 李俊生. 2019. 高分二号的沈阳市黑臭水体遥感识别. *遥感学报*, 23(2): 230-242) [DOI: 10.11834/jrs.20197482]
- Zhao J, Hu C M, Lapointe B, Melo N, Johns E M and Smith R H. 2013. Satellite-observed black water events off southwest Florida: implications for coral reef health in the Florida keys national ma-

rine sanctuary. *Remote Sensing*, 5(1): 415-431 [DOI: 10.3390/rs5010415]
 Zhang X, Lai J B, Li J G, Wang L, Zhu L and Chen Y J. 2019. Remote sensing recognition of black-odor waterbodies in Shenzhen city

based on GF-1 satellite. *Science Technology and Engineering*, 19(04): 268-274 (张雪, 赖积保, 李家国, 王力, 朱利, 陈宜金. 2019. 基于高分一号影像的深圳市黑臭水体遥感识别. *科学技术与工程*, 19(04): 268-274) [DOI: CNKI:SUN:KXJS.0.2019-04-044]

Study on the applicability of multi-source high-resolution satellite images for monitoring black and odorous water body

WANG Ru¹, SHEN Qian², PENG Hongchun¹, YAO Yue², LI Junsheng², WANG Mingxiu², SHI Jiarui¹, XU Wenting³

1. School of Marine Technology and Geomatics, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China;

2. Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

3. Faculty of Geomatics, East China University of Technology, Nanchang 330105, China

Abstract: The width of high-resolution satellite is generally very small. Affected by cloud and rain and orbital return visit cycle, the coverage capacity of a single satellite is limited in a short period of time. Therefore, A single high-resolution satellite is often unable to meet the needs of black and odorous water monitoring in a certain period of time, and multi-source satellites are needed to monitor black and odorous water. In order to analyze the applicability of multi-source high-resolution image to the remote sensing monitoring of black and odorous water, based on the water remote sensing reflectance data measured by the surface object spectrometer, the equivalent calculation was carried out with GeoEye-1, WorldView-2, DMC3, SuperView-1 (SV1) and GF-PMS series (GF-1/1B/1C/1D, GF-2, GF-6) sensor bands.

Take the multi-source sensor remote sensing images as the research object. First compared the GeoEye-1, WorldView-2, DMC3, SuperView (SV1) and GF-PMS series (GF-1/1B/1C/1D, GF-2, GF-6) image spatial resolution, spectral response function, and band Settings; then, based on the BOI (Black and Odorous Water Index) recognition model, the applicability of multi-source sensor image monitoring is analyzed with the same threshold value, and a new model is proposed for DMC3 which is not suitable for BOI model, and the high-quality multi-source images are selected and applied; Finally, some suggestions are put forward for cooperative monitoring of black and smelly water with multi-source sensor remote sensing image.

The research results show that: (1) It is found that GeoEye-1, WorldView-2, SuperView-1 and GF-1/1B/1C/1D/2/6 images can use the same threshold for black and odorous water Monitoring, with good identification accuracy; The normalized differential water body index (NDWI) for DMC3 can effectively identify the general water body and the black and smelly water body. (2) High quality multi-source images were selected with the threshold of BOI=0.05 and NDWI=0.55 for the application of black and smelly water monitoring. It was found that the collaboration of multi-source remote sensing images could provide continuous supervision for river water quality monitoring. (3) In the process of black smelly water monitoring, comprehensive consider price and spatial resolution image, when the river width in 2—10 meters, select GF-2, SV1 or DMC3 image as a conventional remote sensing image, GeoEye-1, WorldView-2 images as a supplement; When most of the river width is more than 10 meters, GF-1 or GF-6 images are selected as conventional remote sensing images, and the supplementary data sources are GF-2, SV1, DMC3, GF-1B/1C/1D, Geoeye-1, and WorldView-2 images, respectively.

Key words: multi-source image, black-odor water monitoring, applicability, BOI, threshold

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB3901101); National Natural Science Foundation of China (No. 41571361); Tianjin Science and Technology Plan Project Intelligent Manufacturing Special Project (No. Tianjin-IMP-2018-2)