

doi:10.3969/j.issn.1009-4210.2017.04.013

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

靳海霞¹, 潘 健²

(1.山西农业大学 信息学院,山西 太谷 030800;

2.中国地质大学(北京)土地科学技术学院,北京 100083)

摘 要:为研究通过卫星遥感手段监测城镇黑臭水体位置分布的可行性,利用高分二号卫星融合影像数据对北京市城镇水体进行水体岸线提取和水质参数反演。水质参数包括叶绿素 a、悬浮物浓度、透明度和营养化指数。基于水体岸线提取结果和反演的各类水质参数的指数分布图,结合预先设定的水体黑臭程度遥感判别指标,对北京市 9 处水体河段水质进行综合遥感判读,辅以实地调查验证。研究表明,利用高分二号卫星融合影像能够很好的识别城镇区域内宽度较窄的河道岸线,并判定水面浮萍的存在,定量反演出的水体单位面积内悬浮物浓度、透明度和营养状态指数能够反映水体的黑臭程度,各河段水体黑臭程度的遥感判别结果与官方公布的结果基本一致。

关键词:高分二号;影像融合;黑臭水体;透明度;富营养化

中图分类号:P407.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-4210-(2017)04-107-11

Urban Black-Odor Water Body Remote Sensing Monitoring Based on GF-2 Satellite Data Fusion

JIN Hai-xia¹, PAN Jian²

(1.College of Information,Shanxi Agricultural University,Taigu 030800,China;

2.School of Land Science and Technology,China University of Geosciences,Beijing 100083,China)

Abstract:To study the feasibility of monitoring the position of the urban black smelly water distribution by means of satellite remote sensing,there using of GF-2 image fusion data

收稿日期:2017-06-12;改回日期:2017-07-07

基金项目:国家自然科学基金项目(41571508);中央高校基本科研业务费项目(2-9-2015-173)

作者简介:靳海霞(1988-),女,助教,从事土地利用与生态重建研究工作。E-mail:jinhaixia503@163.com

通信作者:潘 健(1990-),男,博士生,从事工矿区土地复垦与生态恢复研究工作。E-mail:panjian_cugb@163.com

extract coastline and inversion water quality parameters for Beijing urban water body. Water quality parameters including chlorophyll a, suspended solids concentration, transparency and eutrophication index. Based on the coastline extraction result and inversion of all kinds of water quality parameters of the index distribution, combined with the preset water black smelly degree index of remote sensing, 9 places of the river water quality in Beijing are for remote sensing interpretation, complemented by field investigation verification. The results show that GF-2 satellite image fusion can well identify the narrow width of the river coastline of cities and towns, and determines the presence of water duckweed. Quantitative inversion of water per unit area of suspended solids concentration, transparency and nutritional status index can reflect the extent of black-odor water body, and the results of each river water black-odor sensing the degree of discrimination and official results are basically the same.

Key words: GF-2; Image fusion; black-odor water; transparency; eutrophication index

根据住房和城乡建设部发布的《城市黑臭水体整治工作指南》，城市黑臭水体是城市内不良水体的统称，该种水体具有令人不悦的色彩和（或）散发令人不适的气息。城市黑臭水体不但给普通民众带来了极差的感官体验，也直接影响了普通民众的生产生活。《国务院关于印发水污染防治行动计划的通知》（国发〔2015〕17号）提出“到2020年，地级及以上城市建成区黑臭水体均控制在10%以内，到2030年，城市建成区黑臭水体总体得到消除”。城市黑臭水体监测是城市黑臭水体整治的先导要素和前置条件。水体采样和化学分析是通常水质监测的手段，但其需要消耗大量的人力、物力和财力，且监测周期较长，无法满足大面积而紧迫的水质监测要求。因为低成本、大范围、短周期动态监测的特点，遥感技术在城市黑臭水体监测中具备优势^[1]。

国外对黑臭水体监测的研究较早，提出多样且深入的研究方法。Slonecker等提出光谱方法、解译方法和建模方法^[2]。Brabec

等归纳总结了20世纪70年代到80年代的4种黑臭水体评估研究方法^[3]：使用求积仪在航空影像上手工测量黑臭水体表面面积；计算航空相片上格网交集的数量；影像分类的方法；通过区域城市化的百分比间接估算黑臭水体的覆盖范围。20世纪90年代以来，随着遥感数据的普遍使用，很多国外学者进行了对于黑臭水体监测的大批遥感研讨和探究，从卫星影像中定量提取目标地物的各种先进措施被用来估测黑臭水体。其中基于像元的分类方法曾在长时间内占据主要位置，借助黑臭水体的光谱信息并联合其位置、纹理、阴影和图型等特征，采用马氏距离法、最大似然分类、平行管道法、ISODATA法及K-means法等传统的分类器进行黑臭水体的自动提取^[4-5]。因为受到影像空间分辨率的限制，黑臭水体与其他土地覆盖类型的混合问题凸显出来。为了处理混合像元问题，基于亚像元级别的水体提取方法得到了迅速发展，主要包括多元回归模型法、光谱混合分解法、人工神经网络法、分解回归树法^[6]。国

内应用遥感技术进行黑臭水体提取和监测,最开始也是通过目视解译,后来发展为决策树法、线性分解法,以及基于对象进行多尺度分割,最新的研究方向是运用遥感数据反演水质参数,再根据水质参数建立黑臭水体评价模型^[7-11]。例如吴传庆等考虑到我国水体富营养化评价指标的可行性及内部相互关系,利用叶绿素 a 和悬浮物浓度两个指标构建评估模型,该方法能很好的实现湖泊富营养化状态评估^[12]。He 等利用 Landsat 5 的 TM 数据,反演北京官厅水库的藻类含量、悬浊度、化学需氧量及溶解性磷等水质参数,并对反演模型的科学性进行了验证^[13]。徐祎凡等联合实测水面光谱信息和水质参数,基于环境一号卫星 CCD 数据构建评估模型,对内陆水体不同时期的污染状态进行了评价^[14]。

以前因遥感数据的空间分辨率较低,城镇水体面积小,宽度窄,并且影像光谱特征易受周边环境影响,很难进行遥感定量监测。随着传感器的空间分辨率逐步提高,诸如 IKONOS、Quick Bird 等高分辨率影像的大批获取和普遍应用,高分辨率卫星在水环境动态监测方面具备良好的利用前景。Lu 和 Weng 基于 IKONOS 影像对决策树和线性光谱混合两种方法在城市黑臭水体提取中的优劣进行了剖析对照^[15]。Roeck 等使用 IKONOS 影像对多层次分类和非层次分类方法在黑臭水体估算中的精度进行了客观比较^[16]。Xian 等将高分辨率卫星影像和无人机影像结合起来,有效提取出美国西雅图、拉斯维加斯、坦帕湾 3 个城市的黑臭水体^[17]。王俊松等基于 QuickBird 影像在昆明市主城区提取黑臭水体表面,并进行主成分分析

和假彩色合成,利用传统的监督分类得到了城市黑臭水体信息^[18]。高分二号(GF-2)卫星于 2014 年 8 月 19 日成功发射,搭载有两台高分辨率相机,是我国自主研制的首颗具备高定位精度、亚米级空间分辨率和快速姿态机动能力等特点的民用光学遥感卫星,有效提升了我国卫星综合观测能力,为水环境动态监测提供了新的数据源。基于 GF-2 卫星影像融合数据,本文对北京市城镇水体的叶绿素 a 浓度、悬浮物浓度、透明度和综合富营养化指数进行反演,结合预先设定的水体黑臭程度遥感判别指标,对研究的河段水质进行评价和分析。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域概况

2016 年 2 月,北京市水务局发布了北京市建成区第二批黑臭水体名单,包括 7 个行政区域 37 条河段。选取第二批黑臭水体治理名单中位于大兴区的 7 条河段(北小龙河、大羊坊沟、小龙河、大龙河、新风河、老凤河、葆李沟),以及不在名单中的 2 条河段(洋河、永定河引水渠南支)进行实验。

1.2 数据及其预处理

实验中使用的是 2015 年 9 月获取的 GF-2 PMS2 L1A 级数据,数据包含优于 1 m 分辨率的全色影像,4 m 分辨率多光谱影像。影像无云掩盖,图像品质较好。GF-2 卫星有效载荷技术指标如表 1 所示。

实验中对于 GF-2 数据预处理包括正射校正、图像裁剪、辐射定标、大气校正、影像融合及水体信息提取。

(1)正射校正是基于元数据中包含的 RPC 信息,分别对多光谱和全色数据进行正

射校正处理。

表 1 GF-2 卫星有效载荷技术指标

参数	1 m 分辨率全色/4 m 分辨率多光谱相机	
光谱范围	全色	0.45~0.90 μm
		0.45~0.52 μm
	多光谱	0.52~0.59 μm
		0.63~0.69 μm
		0.77~0.89 μm
空间分辨率	全色	1 m
	多光谱	4 m
幅宽	45 km(2 台相机组合)	
重访周期(侧摆时)	5 天	
覆盖周期(不侧摆)	69 天	

(2)辐射定标是使用绝对定标系数将卫星图像 DN 值转换为辐亮度图像,转换公式如下:

$$L_e(\lambda) = Gain \cdot DN + Offset \quad (1)$$

式中: $L_e(\lambda)$ 为转换后辐亮度,单位为 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$; DN 为卫星载荷观测值; $Gain$ 为定标斜率,单位为 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$; $Offset$ 为绝对定标系数偏移量,单位为 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ 。实验中采用中国资源卫星应用中心发布的 2015 年 GF-2 PMS2 传感器外场绝对辐射定标系数(表 2)进行辐射定标。

表 2 2015 年 GF-2 PMS2 外场绝对辐射定标系数

传感器	B1		B2		B3		B4	
	Gain	Offset	Gain	Offset	Gain	Offset	Gain	Offset
GF-2 PMS2	0.1761		0.1843		0.1677		0.183	

(3)影像融合选用 Gram-Schmidt 方法进行处理,该方法能保持融合前后影像光谱信息的一致性,是一种高保真的遥感影像融合方法。融合后的影像既具备多光谱特征,又有较高的空间分辨率。

(4)若要计算研究区域的水质参数模型,

需对研究河道进行岸线提取。基于水体在近红外波段处的强吸收性,而土壤和植被在该波段范围内强反射的特点,将 GF-2 近红外波段作为单波段处理,设定阈值,快速提取研究区域内的疑似水体信息。但单波段阈值法易受城镇建筑用地及阴影影响,通过构建阴影指数,结合人工解译,去除建筑用地、阴影等干扰信息,准确提取出河道的岸线边界。

2 方法与原理

使用遥感数据反演水质参数一般采用分析法、经验法和半经验法^[19]。分析法依据辐射传输模型,经过遥感测得的反射率计算水体吸收系数与后向散射系数的比值,构建与水体各组分的特征系数、后向散射系数关系,反演水质参数。经验法通过遥感测量值与地面监测的水质参数浓度间的统计关系计算水质参数。半经验法使用已知的水质参数光谱特征,将已有信息与统计模型相结合反演水质参数,是目前最常用的方法。近年来,还有一些新的研究方法,例如神经网络方法、遗传算法等被引入到水质参数反演研究中,使用较多的为神经网络方法。神经网络模型在具备大容量记忆能力、高速计算能力、容错能力及学习能力等长处,但训练算法、神经元个数、网络层数及激活函数的选择等多种要素都会影响模型在水环境评估中的精确度及适用性^[20]。

由于缺少研究区域实测水面数据,本文不能依据实测数据构建水质参数反演模型。但 GF-2 PMS 与 GF-1 WFV 具有相似的波段设置,本文参考前人应用 GF-1 WFV 数据反演水质参数的研究^[21],反演研究区域的叶绿素 a 浓度、悬浮物浓度、透明度及综合营

养状态指数等水质参数,并通过综合营养状态指数评价城市水体黑臭程度。

(1)叶绿素 a 浓度反演模型:

$$C_{chl-a} = 4.089 (b4/b3)^2 - 0.746 (b4/b3) + 29.733 \quad (2)$$

式中: C_{chl-a} 为叶绿素 a 的浓度,单位为 $mg \cdot m^{-3}$; $b3$ 和 $b4$ 分别为 GF-2 PMS2 影像经过融合后的第 3 波段和第 4 波段图像像元亮度值。

(2)悬浮物浓度反演模型:

$$C_{TSS} = 119.62 (b3/b2)^{6.0823} \quad (3)$$

式中: C_{TSS} 为总悬浮物浓度,单位为 $mg \cdot L^{-1}$, $b2$ 和 $b3$ 分别为 GF-2 PMS2 影像经过融合后的第 2 波段和第 3 波段图像像元亮度值。

(3)透明度反演模型:

$$Z_{sd} = 284.15 C_{TSS}^{-0.67} \quad (4)$$

式中: Z_{sd} 为透明度,单位为 cm ; C_{TSS} 为总悬浮物浓度。

(4)水体黑臭程度遥感判别指标。缺氧和富营养为水体黑臭的主要原因^[22],通过评价水体富营养化程度,可间接评估水体的黑臭程度。其中基于叶绿素 a 和透明度的营养状态指数估算模型如下:

$$TLL_{chl-a} = 2.5 + 10.86 \ln C_{chl-a} \quad (5)$$

$$TLL_{sd} = 51.18 - 19.4 \ln Z_{sd} \quad (6)$$

式中: TLL_{chl-a} 为叶绿素 a 营养状态指数; TLL_{sd} 为透明度营养状态指数。

考虑到叶绿素 a 浓度过高或透明度过低,均会引起水质恶化。计算出两种营养状态指数后分别对数值进行归一化处理,便于观察营养状态指数分布情况。然后针对每一像素点,取两种营养状态指数的最大值作为该像素点的最终营养状态指数 (TLL_{max})。结合对多个水体的 TLL_{max} 值域范围分析,采用自然断裂点法设定水体黑臭程度阈值,评判指标见表 3。

表 3 水体黑臭程度分级

TLL_{max}	黑臭级别
<0.64	无黑臭
0.64~0.72	轻度黑臭
>0.72	重度黑臭

3 结果与分析

3.1 叶绿素 a 浓度

利用叶绿素 a 浓度反演模型,得到研究区域的叶绿素 a 浓度分布图(图 1)及统计结果(表 4),由于篇幅有限,这里仅列举其中两处水体的水质参数反演结果。

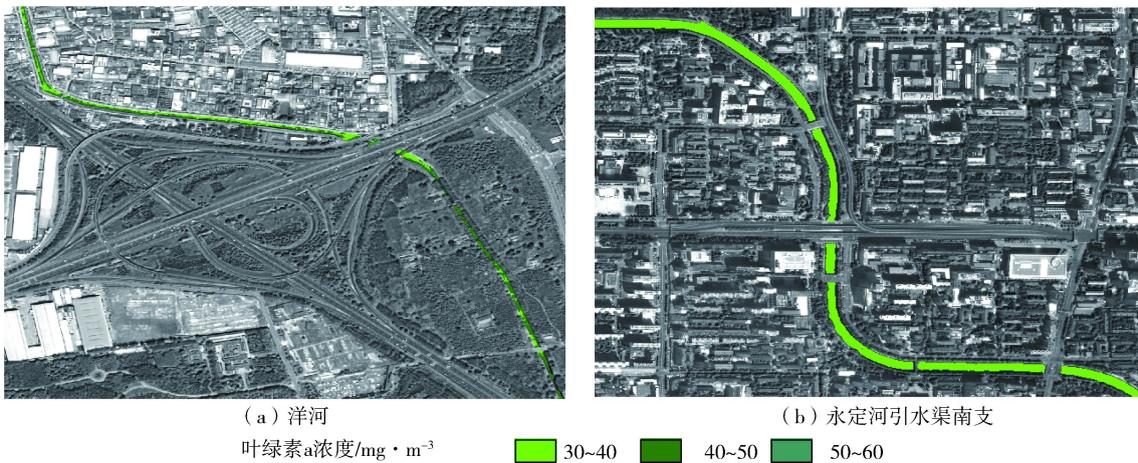
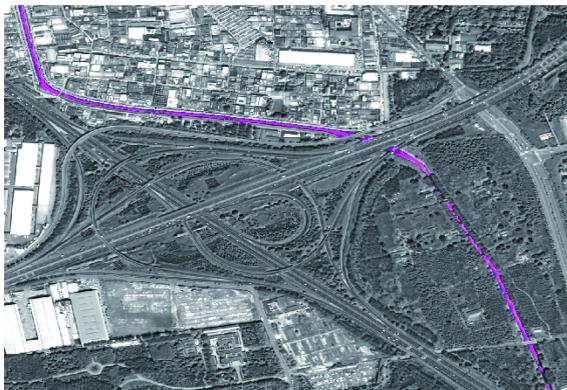


图 1 叶绿素 a 浓度空间分布

表 4 叶绿素 a 浓度统计结果

河流名称	叶绿素 a 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$		
	最大值	最小值	平均值
洋河	57.178	31.601	39.251
永定河引水渠南支	36.597	31.596	32.984

由图 1 及表 4 可以看出,永定河引水渠南支叶绿素 a 浓度分布较均匀,研究区域内的整条河道呈现 $30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的颜色,平均叶绿素 a 浓度为 $32.984 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。



(a) 洋河



(b) 永定河引水渠南支

悬浮物浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 0~10 10~20 20~40 40~80 80~140

图 2 悬浮物浓度分布

表 5 悬浮物浓度统计结果

河流名称	悬浮物浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		
	最大值	最小值	平均值
洋河	136.354	3.684	26.611
永定河引水渠南支	22.973	1.639	6.969

从图 2 可以看出,对于单条河段而言,接近河岸处悬浮物浓度要大于河面中心浓度。永定河引水渠南支表现的尤为明显,河面中心的悬浮物浓度基本小于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而大部分河岸的悬浮物浓度在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内,总体的悬浮物浓度平均值为 $6.969 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

洋河的悬浮物浓度值范围较大,对于整条河道而言,河道北段浓度值较大,基本在 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \sim 140 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内。

相比于永定河引水渠南支的叶绿素 a 浓度分布情况,洋河的叶绿素 a 浓度分布变化较大,河段两端叶绿素 a 浓度值相对较大,中段南岸浓度值大于北岸,平均叶绿素 a 浓度值为 $39.251 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

3.2 悬浮物浓度

利用悬浮物浓度反演模型得到研究区域悬浮物浓度分布图(图 2)及统计结果(表 5)。

3.3 透明度

利用透明度反演模型得到研究区域透明度分布图(图 3)及统计结果(表 6)。

永定河引水渠南支的透明度平均值为 79.548 cm ,河段两端的透明度值较中间较低。洋河的透明度平均值为 34.830 cm ,其中河道北段透明度值较小,基本在 $0 \text{ cm} \sim 40 \text{ cm}$ 的范围内。从研究区域的透明度空间分布来看,透明度与悬浮物浓度呈负相关,悬浮物浓度越大的河段,其透明度反而越小。

3.4 综合富营养化指数

按照营养状态评价模型计算研究区域内的叶绿素 a 营养状态指数及透明度营养状态指数,归一化后取最大值,然后根据表 3 评判

每一像素点的水体黑臭程度,营养状态指数分布结果见图 4~5,统计结果见表 7。对于同一研究区域,两种营养状态指数值域有一

定差别,但整体趋势较一致。研究区域内的洋河南段水体黑臭较严重,永定河引水渠南支整体无黑臭,水质正常。

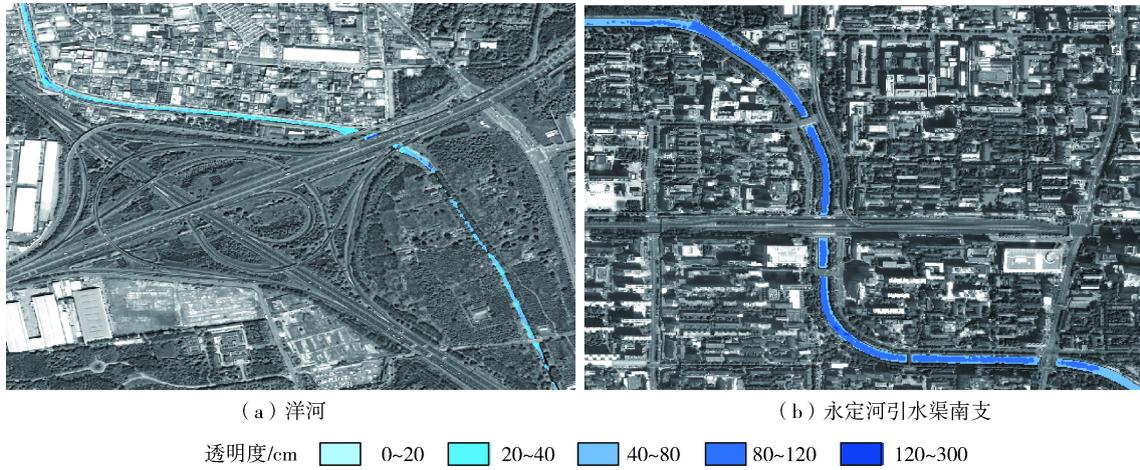


图 3 透明度空间分布

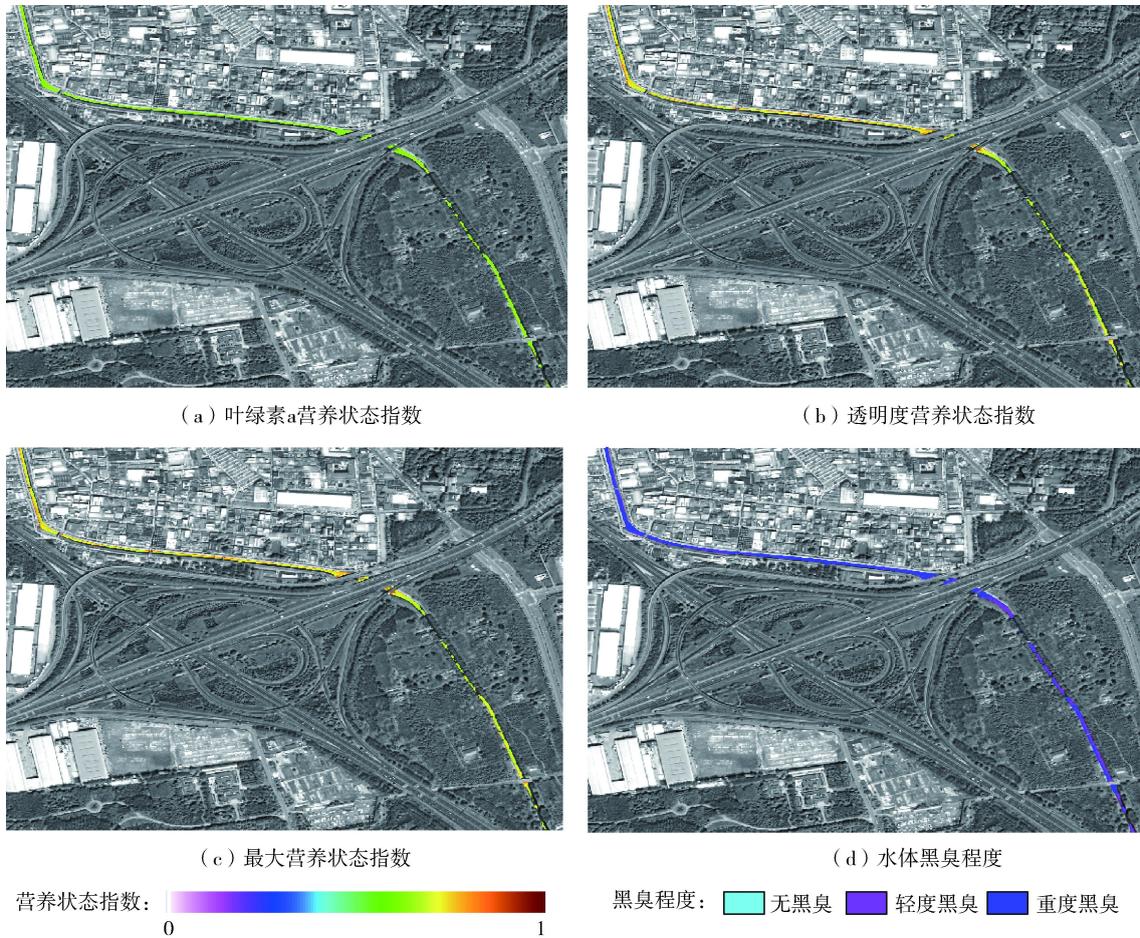


图 4 洋河营养状态指数及水体黑臭程度分布情况

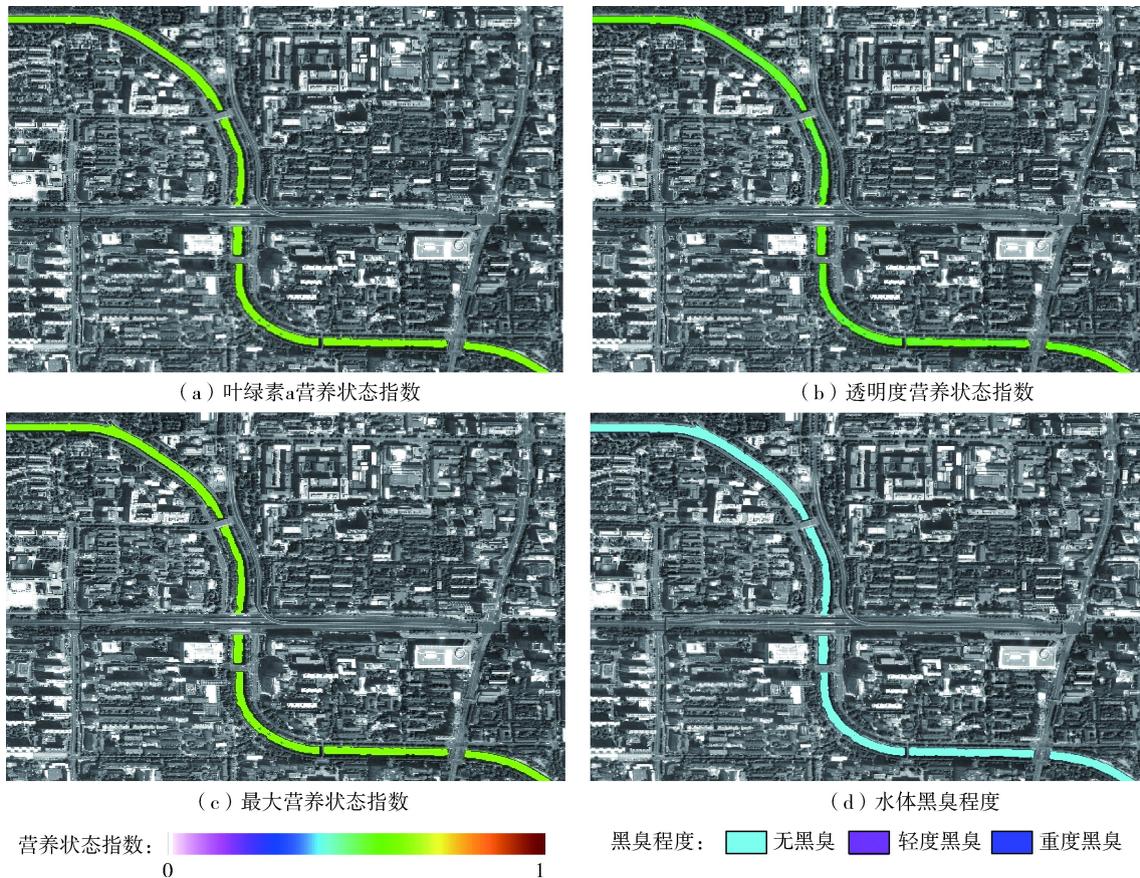


图 5 永定河引水渠南支营养状态指数及水体黑臭程度分布情况

表 6 研究区域透明度统计结果

河流名称	研究区域透明度/cm		
	最大值	最小值	平均值
洋河	118.603	10.552	34.830
永定河引水渠南支	204.036	34.7968	79.548

表 7 营养状态指数统计值

河流名称	指数	最大值	最小值	平均值
洋河	叶绿素 a 营养状态指数	0.689	0.625	0.648
	透明度营养状态指数	0.948	0.479	0.724
	最大营养状态指数	0.948	0.625	0.726
永定河引水渠南支	叶绿素 a 营养状态指数	0.640	0.625	0.630
	透明度营养状态指数	0.717	0.373	0.558
	最大营养状态指数	0.717	0.625	0.630

为了进一步了解研究区域内河道水质的具体分布情况,为黑臭水体治理工作提供辅助决策,将研究区域内的河道按照一定的长度(约 500 m)进行分段,计算每一分段水体

的最大营养化状态指数的平均值,进而分析每段的黑臭程度,结果见图 6。研究区域内的洋河前两段(自西向东计数)水体属于重度黑臭,第三段水体为轻度黑臭,永定河 5 段水体最大营养化状态指数的平均值均在 0.64 以下,无黑臭,属于正常水体。

3.5 实验结果验证与分析

3.5.1 实地调研结果

为了验证上述实验结果,2016 年 3 月 16 日上午 11 点左右,对研究区域内的洋河进行了实地调研,调研拍摄位置见图 7。该区域在 GF2 卫星影像上有一些反映:彩红外合成显示时,可看出水体区域有一定的光谱反射。实际调研拍摄位置处,水体颜色接近深灰色,沿岸趋近于黑色,有刺鼻气味,黑臭严重,与

上述实验结果相一致。

3.5.2 实验结果分析

基于 2015 年 9 月拍摄的 GF-2 卫星系列影像,选取市水务局公布的第二批黑臭水体治理名单中大兴区的 6 条河段以及对应区

域内部分正常河段,进行岸线提取和水质参数反演实验。结合设定的水体黑臭程度遥感判别指标,评价水体黑臭程度。将实验结果与水务局公布的结果及实地外业调查结果进行了比较、统计,结果见表 8。

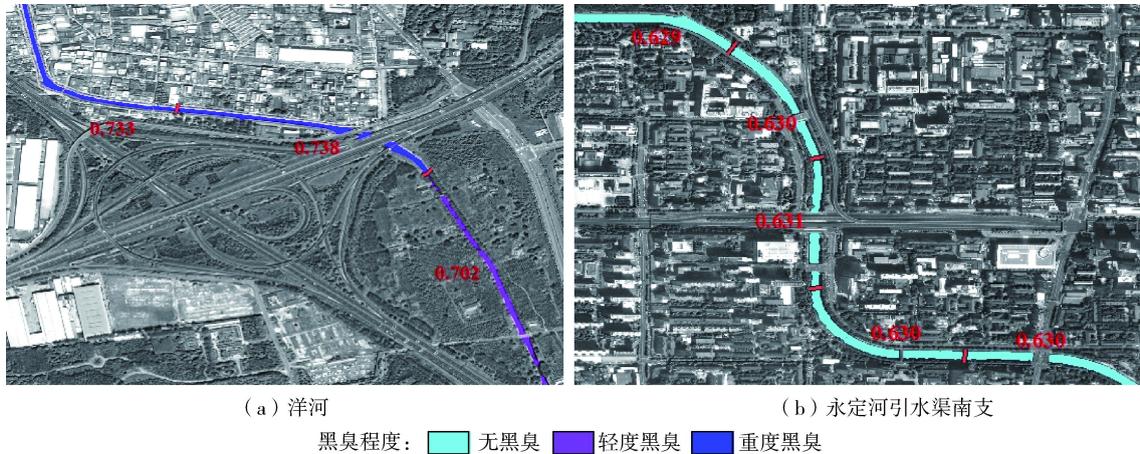


图 6 分段水体黑臭程度分布

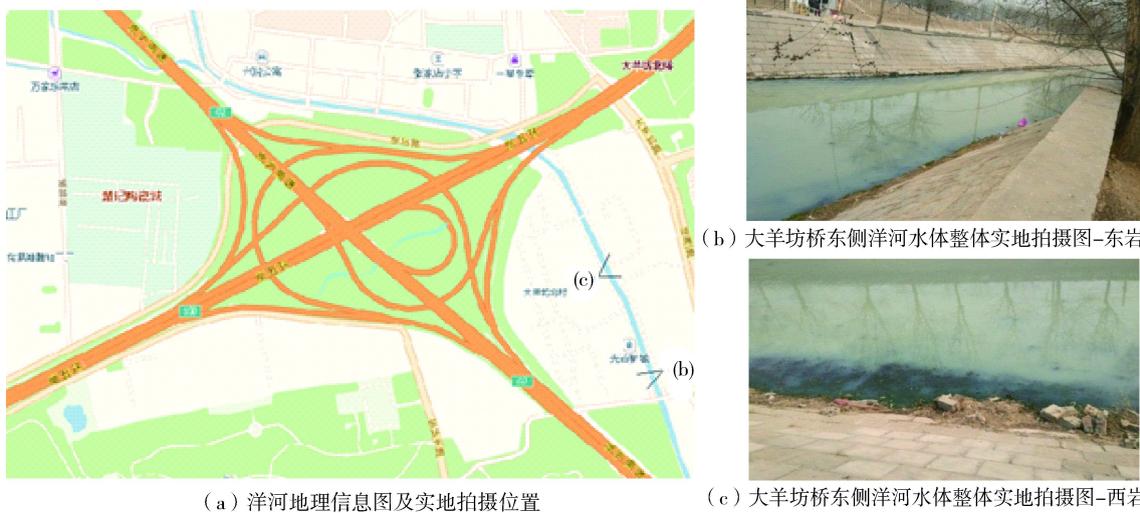


图 7 大羊坊桥东侧洋河水体水质调查

表 8 水质监测实验结果统计

地理位置描述	河流名称	GF2 影像观测时间	叶绿素 a 营养状态指数平均值	透明度营养状态指数平均值	遥感监测结果	实地调研结果	水务局公布结果
益丰园小区北区南门—槐房村西北侧	北小龙河	2015-09-03 中午	0.731	0.702	重度	重度	重度
大羊坊桥下—京沪高速下入暗涵	大羊坊沟	2015-09-02 中午	0.744	0.695	重度	重度	重度
大羊坊桥东侧	洋河	2015-09-02 中午	0.648	0.724	重度	重度	无
大兴沥青厂小龙河桥—西庄段	小龙河	2015-09-03 中午	0.713	0.726	重度	重度	重度

续表 8

地理位置描述	河流名称	GF2 影像观测时间	叶绿素 a 营养状态指数平均值	透明度营养状态指数平均值	遥感监测结果	实地调研结果	水务局公布结果
大龙河辛店桥—前大营段	大龙河	2015-09-03 中午	0.643	0.697	轻度	重度	重度
新风河京开新风河桥—四海支流入新风河口下游 200 米	新风河	2015-09-02 中午	0.701	0.683	轻度	重度	轻度
老凤河北兴路—老凤河入新风河段	老凤河	2015-09-03 中午	0.687	0.739	重度	重度	重度
陈留庄—欣美街和宏康路交汇处	葆李沟	2015-09-03 中午	0.696	0.740	重度	重度	重度
木樨地北—育民小学	永定河引水渠南支	2015-09-03 中午	0.630	0.558	正常	正常	无

由表 8 统计结果可知,实验结果与市水务局公布的黑臭水体信息基本一致。大羊坊桥东侧水体—洋河未在水务局公布的黑臭水体名单中,但经实验及实地调研,研究范围内的河段同样存在重度黑臭问题。此外,部分河段实验结果与公布结果不一致,应由于水务局调研存在遗漏,遥感影像获取和调研时间不一致,部分水体区域过窄,影像无法识别等原因引起。由如上实验可知,遥感作为城镇黑臭水体监测的辅助手段,可以更加客观地反映水体水质的部分真实情况,可作为实地调研、居民举报等黑臭水体确认方式的有力补充。

4 结论与讨论

(1)利用官方公布的结果及实地调研数据对实验结果进行验证表明,基于 GF-2 卫星融合影像提取城镇水体岸线,并反演叶绿素 a 浓度、悬浮物浓度、透明度及综合富营养化指数等水质参数,开展城镇水体黑臭程度遥感判别工作具有适用性和可行性。

(2)随着水质逐渐富营养化,黑臭程度的加深,其在红、近红外波段的反射率会略有升高。且北京市内黑臭水体中往往伴有浮萍的产生,使水体叶绿素含量较正常水体明显提

高,对于近红外波段具有强反射特征,可以辅助识别水体的黑臭情况。

(3)影像融合方法的选择、大气校正误差、水体边界提取误差及水体周边地物光谱影响等因素,均会对水质参数反演精度形成一定程度的影响。为了得到更加精确的水质监测结果,需要在模型反演前做更加精细的数据预处理及研究。

(4)由于缺少水质参数的水面实测数据,借助于现有水质参数反演模型验证了基于 GF-2 融合影像进行城镇水体遥感监测的可行性。日后,可结合影像数据开展同步水面观测实验,更加客观地评价水体富营养化及黑臭程度。

参考文献:

[1]王彦飞,李云梅,吕恒,等.环境一号卫星高光谱遥感数据的内陆水质监测适宜性——以巢湖为例[J].湖泊科学,2011,23(5):789-795.

[2]SLONECKER E T, JENNINGS D B, GAROFALO D. Remote sensing of impervious surfaces: A review [J]. Remote Sensing Reviews, 2001, 20(3): 227-255.

[3]BRABEC E. Impervious Surfaces and Water Quality: A review of current literature and its implications for watershed planning [J].

- Journal of Planning Literature, 2002, 16(4): 499-514.
- [4] MINHE J, JOHN R. JENSEN. Effectiveness of subpixel analysis in detecting and quantifying urban imperviousness from Landsat thematic mapper imagery [J]. Geocarto International, 2000, 14(4): 33-41.
- [5] SMALL C. Estimation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis [J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 22(22): 299-307.
- [6] FLANAGAN M, CIVCO D L. Subpixel impervious surface mapping [C]. Proceedings of the 2001 ASPRS Annual Convention, St. Louis, MO, 2001.
- [7] 姜红梅, 任立良, 安如, 等. 基于土地利用与地表覆盖遥感信息的洪水过程模拟 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(2): 131-135.
- [8] 马雪梅, 雷秀丽, 李希峰, 等. 基于数据挖掘技术的流域不透水面及变化信息提取 [J]. 测绘通报, 2007(12): 34-37.
- [9] 岳文泽, 吴次芳. 基于混合光谱分解的城市不透水面分布估算 [J]. 遥感学报, 2007, 11(6): 914-922.
- [10] 周纪, 陈云浩, 张锦水, 等. 北京城市不透水层覆盖度遥感估算 [J]. 国土资源遥感, 2007, (3): 13-17.
- [11] 孙志英, 赵彦锋, 陈杰, 等. 面向对象分类在城市地表不可透水性提取中的应用 [J]. 地理科学, 2007, 27(6): 837-842.
- [12] 吴传庆, 盖嘉翔, 王桥, 等. 湖泊富营养化遥感评价模型的建立方法 [J]. 中国环境监测, 2011, 27(5): 77-82.
- [13] HE W, CHEN S, LIU X, et al. Water quality monitoring in slightly-polluted inland water body through remote sensing-A case study in Guanting Reservoir, Beijing, China [J]. Frontiers of Environmental Science and Engineering in China, 2008, 2(2): 163-171.
- [14] 徐祎凡, 李云梅, 王桥, 等. 基于环境一号卫星多光谱影像数据的三湖一库富营养化状态评价 [J]. 环境科学学报, 2011, 31(1): 81-93.
- [15] LU D, WENG Q. Extraction of urban impervious surfaces from an IKONOS image [J]. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(5): 1297-1311.
- [16] ROECK T D, VOORDE T V D, CANTERS F. Full hierarchic versus non-hierarchic classification approaches for mapping sealed surfaces at the rural-urban fringe using high-resolution satellite data [J]. Sensors, 2009, 9(1): 22-45.
- [17] XIAN G. Satellite remotely-sensed land surface parameters and their climatic effects for three metropolitan regions [J]. Advances in Space Research, 2008, 41(11): 1861-1869.
- [18] 王俊松, 杨逢乐, 贺彬, 等. 利用 QuickBird 影像提取城市不透水率的研究 [J]. 遥感信息, 2008, (3): 69-73.
- [19] 祝令亚. 湖泊水质遥感监测与评价方法研究 [D]. 东莞: 中国科学院遥感应用研究所, 2006.
- [20] 肖潇, 徐坚, 赵登忠, 等. 汉江中下游典型河段水环境遥感评价 [J]. 长江科学院院报, 2016, 33(1): 31-37.
- [21] 朱利, 李云梅, 赵少华, 等. 基于 GF-1 号卫星 WFV 数据的太湖水质遥感监测 [J]. 国土资源与遥感, 2015, 27(1): 113-120.
- [22] 刘莹. 巢湖蓝藻富营养化监测与预警优化研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.