引 用 格 式:CHEN Zhenghua,LAN Sixiang,ZHANG Jinshui,*et al*.Reviews of remote sensing monitoring of urban black and odorous water[J].Remote Sensing Technology and Application,2025,40(4):909-922.[陈正华,兰思香,张锦水,等.城市黑臭水体遥感监测的研究现状与展望[J].遥感技术与应用,2025,40(4):909-922.]
DOI:10.11873/j.issn.1004-0323.2025.4.0909

城市黑臭水体遥感监测的研究现状与展望

陈正华[1],兰思香[1],张锦水[2],张 威[1],李华德[1],赵丽芳[3]
(1.广西大学 海洋学院,广西 南宁 530004;
2.北京师范大学 遥感科学国家重点实验室,北京 100875;
3.中国科学院空天信息创新研究院,北京 100094)

摘要:黑臭水体是一种极端的水污染现象,是许多城市普遍存在的问题,严重影响人居生活的幸福感、获得感。因此,解决城市黑臭水体问题迫在眉睫。科学监测水体黑臭情况是城市黑臭水体整治工作的第一步,为后续治理评估提供准确的整治对象。相对于传统的地面监测手段,遥感是一种更有效发现黑臭水体的方式,能更大范围、更快速连续地识别出水体黑臭区域并及时全面地展示黑臭水体时空演变过程。系统回顾了城市黑臭水体遥感监测的主要研究进展,首先,简要介绍了黑臭水体概况,总结了城市黑臭水体的遥感特征以及常用数据源。其次,详细探讨了城市黑臭水体遥感识别和分级的方法,并对比分析了各方法的适用性和优缺点。最后,总结了当前城市黑臭水体遥感研究现状以及不足之处,并展望了未来的发展方向。旨在为相关研究提供借鉴与思考,为黑臭水体长效治理提供更好的决策支持。

关 键 词:黑臭水体;遥感监测;识别分级;遥感特征;数据源
中图分类号:X832;TP79 **文献标志码**:A **文章编号**:1004-0323(2025)04-0909-14

1 引 言

黑臭水体整治是水污染防治的重要方向,《水污染防治行动计划》明确提出“到2030年,城市建成区黑臭水体总体得到消除”的工作目标[1]。为了实现这个目标,全国各个城市纷纷开展了黑臭水体整治环境保护专项行动。黑臭水体可以按监管区域类型分为城市黑臭水体和农村黑臭水体。城市黑臭水体的概念是在2015年9月住房城乡建设部颁布的《城市黑臭水体整治工作指南》(以下简称《指南》)中首次明确提出:它是指城市建成区内,呈现令人不悦的颜色和(或)散发令人不适气味的水体。这是从地理空间范围、颜色和气味三方面定性给出的定义,《指南》还从透明度(SD)、溶解氧(DO,Dissolved Oxygen)、氧化还原电位(ORP,Oxidation-reduction Potential)和氨氮(NH_3-N)4项水质指标上定量将黑臭水体细分为“轻度黑臭”和“重度黑臭”两个级别,具体如表1所示[2]。在城市黑臭水体概念提出之前,早期比较类似的研究主要是针对近岸海洋、内陆湖泊、河口中的“黑水团”或“湖泛”现象的遥感监测[3-6]。在此之前,我国对黑臭水体的监管与研究几乎处于空白状态,很多黑臭水体无历史监

表1 黑臭水体污染程度分级标准[2]

Table 1 Black and odorous water pollution degree classification standard

特征指标(单位)	轻度黑臭	重度黑臭
透明度/cm	25~10*	<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

收稿日期:2024-11-16;**修订日期**:2025-03-28
基金项目:国家重点研发计划(2021YFB3900505)资助。
作者简介:陈正华,副教授,主要从事环境遥感与海洋遥感研究。E-mail: chen.zhenghua@163.com

测资料。自此之后，研究界开始广泛关注黑臭水体，并对黑臭水体和“黑水团”进行区分，国内学者开始在各城市展开黑臭水体的实地调查，系统性研究黑臭水体的形成机理[7-8]、光学特性[9-11]、遥感识别算法[12-17]、遥感分级模型[18-19]等内容。随着城市黑臭水体的整治不断取得成效，生态环境部于2019年开始进一步推动农村黑臭水体治理工作，并在《农村黑臭水体治理工作指南(试行)》中定义了农村黑臭水体的概念。由于农村黑臭水体遥感监测刚刚起步[20-21]，已有研究多是以城市黑臭水体为对象来开展，因此本文主要是综述城市黑臭水体遥感监测相关研究。

黑臭水体成因复杂、影响因素众多，大多为细小沟渠，面积小且分布散的特点使其监测较为困难。传统的黑臭水体监测方式主要通过现场调查或问卷调查，识别定级方式通常是采取现场原位测定水质或实验室分析水样，传统方法的局限性和工作量大，往往需要耗费大量的人力、物力、财力和时间，还极易受到气候和水文条件的限制，且只能以点代面对部分河段的水质参数进行监测。遥感技术作为地面监测手段的重要补充，具有低成本、高效率、大范围、多时相、长时序、大面积同步观测的优点。因此，遥感技术在黑臭水体监测研究中极具优势，可以从宏观层面客观把握黑臭水体空间分布、污染状况、治理成效等，有利于快速全面地掌握黑臭水体时空演变过程、揭示污染源的迁移规律[22-23]。

目前，关于城市黑臭水体遥感监测的系统性综述还不够全面，已有综述只是单一总结了城市黑臭水体遥感监测急需解决的问题、关键技术或识别算法，而缺少对遥感特征、适用数据源的归纳分析，以及缺少对不同识别分级模型的优缺点和适用性的对比总结。因此，本研究在IEEE Xplore、Science Direct、Google Scholar、Web of Science、中国知网等数据库中，使用“黑臭水体”“遥感”“black and odorous water”“remote sensing”等关键词筛选了2017年以来的多篇文章形成本综述。从城市黑臭水体概念被提出后，各年文章发表情况总体呈增加趋势(图1)，研究的关键词主要为“黑臭水体”、“遥感识别”和“高分二号”等(图2)。

2 城市黑臭水体遥感特征

城市黑臭水体可以通过水体颜色、次生环境、

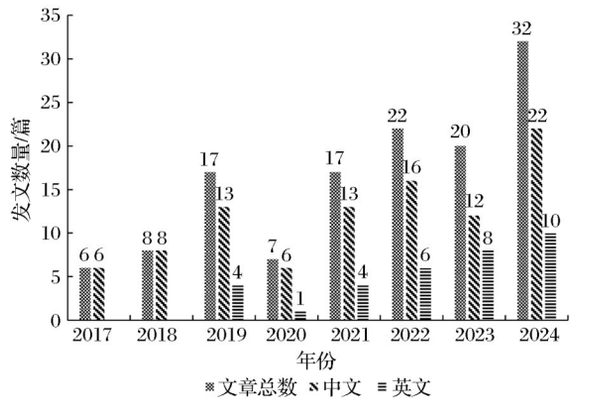


图1 相关研究文章发表情况

Fig.1 Publication of relevant research articles

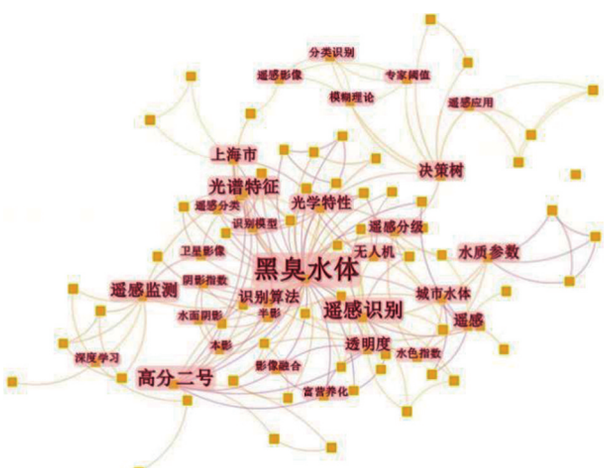


图2 主要关键词共现图

Fig.2 Main keyword co-occurrence map

河道淤塞、岸边垃圾堆放等解译标志结合光谱指数来共同识别[24]。其中，城市黑臭水体的水体颜色和遥感光谱是遥感解译黑臭水体的主要特征标志[12]。

2.1 颜色特征

水体颜色是最直观最有效的水体特征[25]，可通过目视初步解译。在真彩色影像中，正常水体多呈绿色、深绿色，而黑臭水体则呈黑色、灰黑色、灰绿色、褐色。图3为2016年10月和2020年4月南宁市水塘江与邕江交汇处的GF-2号影像，目视可清晰看出图3(a)中2016年水塘江水体颜色为浑浊暗淡的灰黑色，而邕江水体为绿色。经修整河道综合治理后，2020年水塘江水体有所改善呈淡绿色。水体色调差异可辅助在影像上定性识别出疑似黑臭水体，通过观察真彩色影像可以人工目视解译出颜色明显异常的黑臭水体[25]。

2.2 光谱特征

与颜色特征不同，水体的光学特性可以定量地表达和测算，包括表观光学特性和固有光学特性，

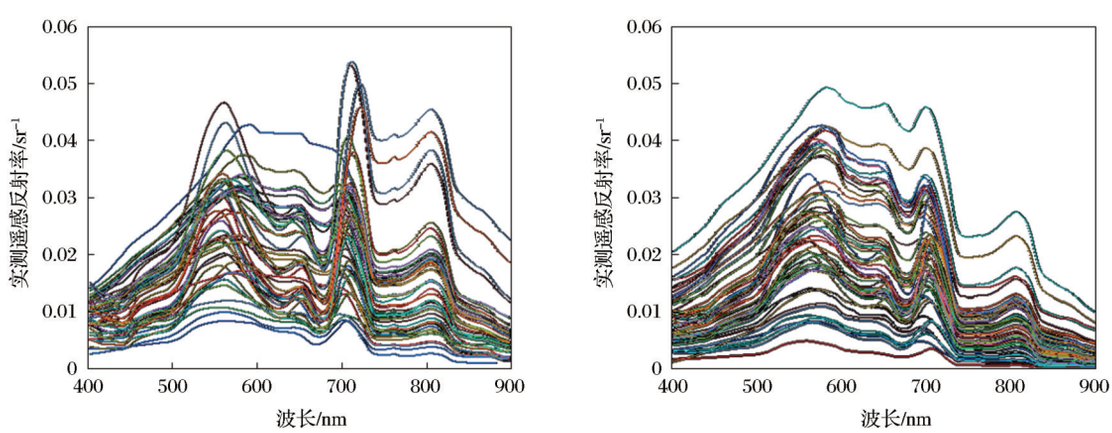
(a) 2016年黑臭水体　　(b) 2020年正常水体

图 3　GF-2影像的颜色特征

Fig.3　Color characteristics of GF-2 images of black and odorous water in 2016 and normal water in 2020

两种光学特性是光学遥感反演水质参数的研究基础[26],不同水体因其物质组分浓度的变化而呈现不同的光谱特征。水体固有光学量(包括吸收系数和后向散射系数)需要通过实验室分析获得,其特性不随入射光场的分布与强度的变化而变化[26-27]。水体表观光学量(包括遥感反射率)可以通过现场测量或者遥感手段获得,其特性随着外界光场的变化而变化[28-29]。固有光学量与叶绿素a(Chl-a)、总悬浮物(TSM, Total Suspended Matter)和有色可溶性有机物(CDOM, Chromophoric Dissolved Organic Matter)等水质参数存在半解析关系,而表观光学量与水质参数之间存在经验或半经验关系,因而固有光学量在表观光学量与水质参数之间起到关键变量作用[27-30]。城市黑臭水体的总颗粒物吸收系数、非色素颗粒物吸收系数和CDOM吸收系数总体上都高于正常水体[9,31]。例如,在特征波长440 nm处,黑臭水体的CDOM吸收系数的平均值比正常水体的高出1.7倍左右[9]。在一定条件下,可用以上几项水体指标来区分黑臭水体和正常水体,指标浓度高出特征值的被认为是黑臭水体。但该结论具有局限性,有研究发现有些叶绿素a浓度较低,但是水体悬浮泥沙含量很高的河段并不属于黑臭水体[32-33]。因此,针对在近红外波段同样具有高反射率但不属于黑臭水体的浑浊水体,这些指标能否正确反映黑臭水体特征有待商榷。

城市黑臭水体遥感识别可以通过分析黑臭水体与正常水体的实测遥感反射率或卫星遥感反射率的差异来构建模型,如图4为黑臭水体与正常水体的实测遥感反射率,将其经过归一化处理和波段拟合后可转换为等效的卫星遥感反射率[34-35],如图5所示。由卫星遥感反射率可知,大部分黑臭水体在蓝光波段到红光波段范围内的遥感反射率比正常水体更为平缓,在蓝光波段范围的黑臭水体反射率一般略低于正常水体,在绿光波段550 nm处正常水体反射率略高于大部分黑臭水体,且反射峰比黑臭水体的明显;红光波段和近红外波段范围的黑臭水



(a) 黑臭水体　　(b) 正常水体

图 4　实测遥感反射率[35]

Fig.4　Remote sensing reflectance of black and odorous water and normal water[35]

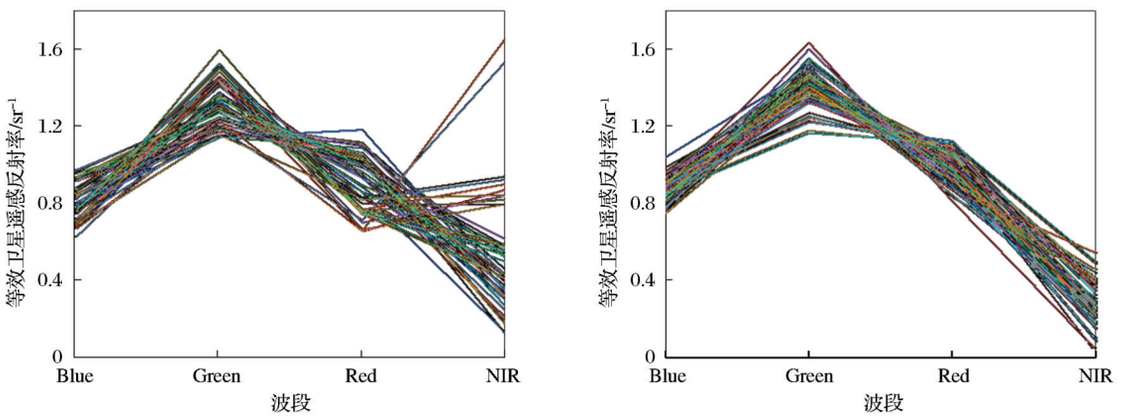


图 5 等效卫星遥感反射率[35]

Fig.5 Equivalent satellite remote sensing reflectance of black and odorous water and normal water[35]

体的反射率上升且明显高于正常水体。总体来看，不论是实测遥感反射率还是卫星遥感反射率，黑臭水体在可见光波段范围内的光谱曲线与正常水体均存在一定的差异，根据上述这些光谱特征可以有效识别出城市黑臭水体。但是由于影响黑臭水体光谱特征变化的总颗粒物、非色素颗粒物和CDOM浓度的不同，不同类别的黑臭水体呈现出的光谱特征也会有所差异，在进行黑臭水体遥感精细化监测时，不能将所有黑臭水体一概而论，需要进一步分类研究以及注意区分高浑浊水体。

3 城市黑臭水体遥感识别常用的数据源

高空间分辨率影像是研究黑臭水体最重要的数据源，为城市黑臭水体遥感监测提供了重要的数据支撑。国产GF系列和其他小型低轨卫星（如高景一号、吉林一号等）的快速发展为使用高分辨率影像监测黑臭水体提供了可能[36]。目前，城市黑臭水体遥感识别分级使用的数据源主要有GF-PMS系列、Planet Scope等，各卫星参数详见表2。其中，使用频率最高的是国产GF-2数据，其亚米级的空间分辨率能够更精细识别城市黑臭水体。Wei等[37-38]的研究证明了利用GF系列影像监测城市黑臭水体非常有效。王茹等[39]的研究中，基于GeoEye-1、WorldView-2、SuperView-1、GF-1、GF-2、GF-6、BJ-2（DMC3）影像识别黑臭水体的正确率均在89.5%以上，证明了多源高分辨率影像监测黑臭水

表 2 多源卫星影像参数对比表

Table 2 Multi-source satellite image parameter comparison table

序号	卫星类型	分辨率/m		幅宽	重访周	识别像元	光谱范围/μm					参考文献
		全色	多光谱	/km	期/天	尺度/个	蓝波段	绿波段	红波段	近红外	全色	
1	GF-2 PMS	1	4	45	5	≥5	0.45～0.52	0.52～0.59	0.63～0.69	0.77～0.89	0.45～0.9	[13,15,19,32,43-44]
2	GF-1 PMS	2	8	60	4	≥5	0.45～0.52	0.52～0.59	0.63～0.69	0.77～0.89	0.45～0.9	[12,45-46]
3	GF-6 PMS	2	8	≥90	4	≥5	0.45～0.52	0.52～0.6	0.63～0.69	0.76～0.89	0.45～0.9	[37,47-48]
4	BJ-2 DMC3	0.8	3.2	24	1	≥5	0.44～0.51	0.51～0.59	0.6～0.67	0.79～0.91	0.45～0.65	[39,49]
5	ZY-3	2.1	5.8	50	5	≥5	0.45～0.52	0.52～0.59	0.63～0.69	0.77～0.89	0.45～0.8	[49]
6	SuperView-1	0.2	2	12	2	≥5	0.45～0.52	0.52～0.59	0.63～0.69	0.77～0.89	0.45～0.89	[39,49]
7	GeoEye-1	0.41	1.65	15.2	≤3	≥5	0.45～0.51	0.51～0.58	0.655～0.69	0.78～0.92	0.45～0.8	[39]
8	WorldView-2	0.46	1.8	16.4	1.1	≥5	0.45～0.51	0.51～0.58	0.63～0.69	0.77～0.895	0.45～1.04	[39]
9	Planet Scope	/	3	24×16	1～2	≥5	0.455～0.515	0.5～0.59	0.59～0.67	0.78～0.86	/	[14,18]
10	Sentinel-2	/	10	290	5	≥5	0.458～0.523	0.543～0.578	0.65～0.68	0.785～0.90	/	[50-51]
11	Landsat-8	15	30	185	16	≥5	0.45～0.515	0.525～0.6	0.63～0.68	0.845～0.885	0.5～0.68	[52]

注：识别像元尺度是指不同数据源可识别黑臭水体的宽度范围。WorldView－2、Sentinel－2、Landsat－8只列出了可见光蓝绿红和近红外波段，完整波段请查询官网。WorldView－2（https://resources.maxar.com/data－sheets/worldview－2/）；Sentinel－2（https://scihub.copernicus.eu/）；Landsat－8（https://earthexplorer.usgs.gov/）

体有较好的适用性。随着无人机技术的发展,利用无人机影像来分析城市黑臭水体的研究逐渐增多,无人机影像也成为研究黑臭水体的重要数据源。买日阿巴等[40-42]通过无人机搭载多光谱或高光谱传感器获取高分辨率影像来识别城市黑臭水体,实现了无人机对城市黑臭水体的实时监管。

无论是来自卫星平台还是无人机载的影像,在城市黑臭水体遥感监测应用方面都取得了较好效果。目前,城市黑臭水体监测应用的影像多为光学多光谱或高光谱影像,极少应用雷达影像识别城市黑臭水体的研究,这与黑臭水体细小、纹理特征不明显,以及雷达影像分辨率不高、不能穿透水面,一般是获取水表粗糙度信息的特点相关。

4　城市黑臭水体遥感识别方法

目前,基于遥感的城市黑臭水体研究主要是利用城市黑臭水体的光谱特性和图像特征,大多研究集中于400~700 nm 的可见光波段。经总结分析,可以归纳为光谱指数法、水体色度法、水质参数法3种典型方法以及决策树、深度学习等综合方法。

4.1　基于特征波段的光谱指数法

基于特征波段的光谱指数法是利用城市黑臭水体不同组分的吸收特性或水体表观反射率的差异构建识别模型,即将黑臭水体和正常水体的反射率最强波段和最弱波段根据光谱值的特征规律进行线性组合,增强两者之间的区分度,在影像上使两者的亮度值有明显区别[45]。基于特征波段的光谱指数法是目前最常用的城市黑臭水体遥感识别方法,不少研究者提出了不同的算法模型。如温爽等[13]基于GF-2号影像构建的绿波段单波段阈值法、蓝绿波段差值指数DBWI(Difference Black-odorous Water Index)以及红绿波段比值的归一化黑臭水体指数NDBWI(Normalized Difference Black-odorous Water Index)有效识别了南京市主城区黑臭水体的空间分布,其中DBWI和NDBWI受到更多研究者的认可。经对比不同的算法模型,Yu等[53-54]认为NDBWI识别正确率更高更稳定,而胡国庆等[43,46]的研究则发现DBWI对深圳、芜湖的黑臭水体识别精度最高。在NDBWI的基础上,姚月等[15]引入了蓝波段的反射率构建BOI(Black and Odorous water Index)来识别沈阳市黑臭水体,同样取得较好的识别效果。韩文聪等[32]的研究也证明了BOI、NDBWI两种算法的识别结果均可靠。除了上述模型之外,纪纲[45]提出的HCI1和HCI2模型对城市黑臭水体的分类精度均达90%以上,黄祺宇等[48]经对比多种识别算法也发现HCI1在杭州市的适用性最好。姚焕玫等[14]基于Planet Scope影像提出的近红外单波段阈值法、HI、EHI、NDBWI在钦州市主城区黑臭水体识别中,NDBWI的正确率最高。李佳琦等[12]提出的水体清洁指数WCI(Water Cleanliness Index)在太原市黑臭水体的识别精度也高达92.86%。更多的研究模型详见表3,该表总结了当前研究中常见的城市黑臭水体光谱指数判别模型。若要将这些模型应用到其他城市,还需要根据不同研究区的环境情况对模型阈值进行修正,例如,蒋宇雯等[44]将NDBWI应用到南宁、高黎等[47]将BOI应用到广州时,均对阈值进行了重新验证,并取得了较好的结果,这也进一步验证了这两种指数的可靠性和适用性。

高分影像的分类极易受到阴影干扰,对于城市环境中黑臭水体也是如此。为了减少阴影对水体提取的影响,许佳峰等[55]利用无人机高光谱信息构建了城市黑臭水体的河面阴影指数(RSSI, River Surface Shadow Index),该阴影指数能突出显示阴影与水体的差异。黑臭水体相对正常水体而言更容易受阴影影响,对此,Wu等[56]提出了一种从复杂的城市环境中消除阴影效应提取城市黑臭水体的BOW检测模型,有效区分了黑臭水体、正常水体和阴影,这对城市黑臭水体监测的准确性提供了有力帮助。关于利用特征波段对城市黑臭水体识别的研究,不同地方的研究方法和效果不一,还没有一个绝对普适的方法,但是综合来看,DBWI、NDBWI、BOI 3种方法的使用频率最高、效果最好,对这些指数的阈值稳定性、结果正确性以及地区适用性,还需要进一步验证,以求获得一个更高效稳定的城市黑臭水体判别模型。

4.2　基于水体色度识别法

色度法是根据水体组分的差异而显示出不同颜色的特点,参照国际照明委员会(CIE, International Commission on Illumination)规定的CIE-XYZ标准颜色系统,分析城市黑臭水体颜色的主波长来定量表征城市黑臭水体。黑臭水体与正常水体的纯度具有一定的差异,通常黑臭水体的纯度小于正常水体,因此纯度可以作为识别黑臭水体的一项指标[36,60]。曹红业[27]是较早通过色度来识别城市黑臭水体的学者之一,其根据颜色指数与水质参数共变

表 3 黑臭水体光谱指数判别模型

Table 3 Discrimination model for spectral indices of black and odorous water

序号	指数	判别模型公式	阈值	正确率	实验影像	实验地点	参考文献
1	Green	$N_1 \leqslant R_{rs}(Green) \leqslant N_2$	N_1=0; N_2=0.019	50%	GF-2	南京	[13]
2	NIR	$N_1 \leqslant R_{rs}(NIR)$	N_1=0.12	35.71%	Planet Scope	钦州	[14]
3	DBWI	$N_1 \leqslant R_{rs}(Green) - R_{rs}(Blue) \leqslant N_2$	N_1=0; N_2=0.003 6	75%	GF-2	南京	[13]
4	HCI1	$N_1 \leqslant R_{rs}(Red) + R_{rs}(NIR) - R_{rs}(Blue)$	N_1=0.85	95.37%	GF-2/GF-1	北京	[45]
5	HCI2	$N_1 \leqslant R_{rs}(Red) + R_{rs}(NIR) - R_{rs}(Green)$	N_1=0.87	93.80%	GF-2/GF-1	北京	[45]
6	BOW	$(R_{rs}(Green) - R_{rs}(Blue)) \times (R_{rs}(Green) - R_{rs}(NIR)) \leqslant N_1$	N_1=0.1	85.7%	GF-2	南京	[56]
7	NDBWI	$N_1 \leqslant \frac{R_{rs}(Green) - R_{rs}(Red)}{R_{rs}(Green) + R_{rs}(Red)} \leqslant N_2$	N_1=0.06;N_2=0.115	100%	GF-2	南京	[13]
8	BOI	$N_1 \leqslant \frac{R_{rs}(Green) - R_{rs}(Red)}{R_{rs}(Blue) + R_{rs}(Green) + R_{rs}(Red)} \leqslant N_2$	N_1=0; N_2=0.065	100%	GF-2	沈阳	[15]
9	UBOW	$N_1 \leqslant \frac{R_{rs}(Green) - R_{rs}(Red)}{R_{rs}(Blue) + R_{rs}(Green) + R_{rs}(Red)} \leqslant N_2$	N_1=0.04; N_2=0.07	81%	GF-2	北京	[57]
10	HI	$\frac{R_{rs}(Green) - R_{rs}(Blue)}{R_{rs}(Green) + R_{rs}(Blue)} \leqslant N_1$	N_1=0.065	57.14%	Planet Scope	钦州	[14]
11	NDBWI	$\frac{R_{rs}(Blue) + R_{rs}(Green) + R_{rs}(Red) - R_{rs}(NIR)}{R_{rs}(Blue) + R_{rs}(Green) + R_{rs}(Red) + R_{rs}(NIR)} \leqslant N_1$	N_1=0.45	92.86%	Planet Scope	钦州	[14]
12	BOWI	$\frac{R_{rs}(Green)}{R_{rs}(Blue) + R_{rs}(Red)} \leqslant N_1$	N_1=0.65	100%	Sentinel-2	广州	[58]
13	HCI3	$N_1 \leqslant \frac{R_{rs}(Red) + R_{rs}(NIR) - R_{rs}(Blue)}{R_{rs}(Red) + R_{rs}(NIR) + R_{rs}(Blue)}$	N_1=0.4	89.05%	GF-2/GF-1	北京	[45]
14	HCI4	$N_1 \leqslant \frac{R_{rs}(Red) + R_{rs}(NIR) - R_{rs}(Green)}{R_{rs}(Red) + R_{rs}(NIR) + R_{rs}(Green)}$	N_1=0.45	85.42%	GF-2/GF-1	北京	[45]
15	WCI	$N_1 \leqslant \frac{\left\lvert \frac{(R_{rs}(Green) - R_{rs}(Blue))}{(\lambda_G - \lambda_B)} \right\rvert}{\left\lvert \frac{(R_{rs}(Red) - R_{rs}(Green))}{(\lambda_R - \lambda_G)} \right\rvert} \leqslant N_2$	N_1=0; N_2=1	92.86%	GF-1	太原	[12]
16	BOCI	$N_1 \leqslant \frac{R_{rs}(Green) - R'_{rs}(Green)}{R_{rs}(Red)} \leqslant N_2$ $R'_{rs}(Green) = R_{rs}(Blue) + \frac{(R_{rs}(Red) - R_{rs}(Blue)) \times (\lambda_G - \lambda_B)}{\lambda_R - \lambda_B}$	N_1=0.12; N_2=0.26	87.18%	GF-2/ZY-3 /BJ-2/SV-1	沈阳	[19]
17	BOIM	$N_1 \leqslant \frac{R_{rs}(Red) - R'_{rs}(Green)}{R_{rs}(Red) + R'_{rs}(Green)} \leqslant N_2$ $R'_{rs}(Green) = R_{rs}(Blue) + \frac{(R_{rs}(Red) - R_{rs}(Blue)) \times (\lambda_G - \lambda_B)}{\lambda_R - \lambda_B}$	N_1=0.014; N_2=0.122	87.88%	GF-2	哈尔滨	[59]

注：R_{rs}(Blue)、R_{rs}(Green)、R_{rs}(Red)、R_{rs}(NIR)分别表示蓝、绿、红和近红外波段的光谱反射率；N_1、N_2为阈值常数；λ为中心波段，λ_B = 485 nm，λ_G = 555 nm，λ_R = 660 nm

规律，提出了一种基于实测遥感反射率的颜色饱和度算法，有效识别出了北京的黑臭水体和正常水体。

由于水体中物质组分的不同，水体呈现丰富的颜色，若没有对城市黑臭水体的水色进行细分，可能会导致色度法的分类效果不佳，例如温爽等[13-14]通过色度法来识别城市黑臭水体时分类精度不如基于特征波段的识别方法。为了准确区分黑臭水体与非黑臭水体的颜色，李玲玲等[18,61]构建了水体的色系图谱，将黑臭与非黑臭水体大致归为灰色系、绿色系和黄色系3类，并参照国际标准劳拉比色卡建立了水体色度分级表(图6)，其中黑色系代表黑臭水体、绿色系和黄色系代表非黑臭水体。Shen等[36]根据水体颜色和遥感反射率的差异将采集到的黑臭水体样本分为灰白色和灰黑色两组，基于GF-2影像计算水体颜色纯度和色度角，经对比基线高度法、红绿波段比值法发现色度法对此类黑臭水体识别效果最好。水体色度法对于颜色明显异

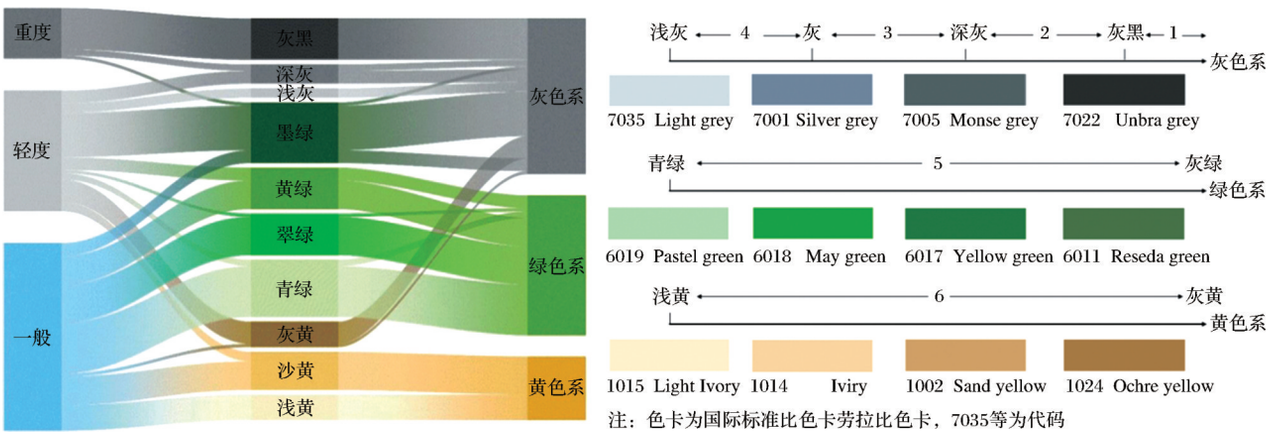


图 6　黑臭程度与水色的对应关系图[18,61]

Fig.6　The corresponding relationship between black odor degree and water color[18,61]

常的黑臭水体具有较好的识别效果,但是无法将一些呈现墨绿色或灰黄色的黑臭水体从正常水体中区分出来[60]。单靠色度一项指标难以应用到不同的研究场景中,需要结合其他指标来提高色度法的适用性和分类精度。有研究发现采用色度与透明度相结合的方法比仅根据色度或透明度来识别城市黑臭水体的效果更理想[31,60];还有研究证明了色度法结合饱和度法、角度法也可以提高城市黑臭水体的识别精度[34]。

4.3　基于典型水质参数识别法

基于典型水质参数识别法是通过分析水体的光学特性以及水体组分的反射和吸收光谱特性建立模型反演水质参数,探究典型水质参数或遥感影像波段组合与城市黑臭水体评价指标间的关系,进而构建城市黑臭水体识别模型。Zhou等[62]根据《指南》的评估指标采用偏最小二乘法(PLS, Partial Least Squares)提出了一种连续黑臭水体指数CBOWI(Continuous Black and Odorous Water Index)分类黑臭水体以及定量污染程度并在保定的应用中取得了较好效果。由于DO、ORP、和NH_3-N属于不能直接作用于水体的吸收散射特性的化学水质指标,其与遥感影像的反演关系很难直接建立,因此除了《指南》中的4项指标以外,一些研究会增加其他水质指标辅助分析,例如叶绿素a(Chl-a)[32,63]、总悬浮物(TSM, Total Suspended Matter)[32,63]、化学需氧量(COD, Chemical Oxygen Demand)[64,65]、总氮(TN, Total Nitrogen)、总磷(TP, Total Nitrogen)[65]、水温[41]、酸碱度(pH)、表观污染指数(SPI, Surface Pollution Index)[2]等,部分典型水质参数遥感反演模型如表4所示。

其中,城市黑臭水体研究中使用较多的典型水质参数是Chl-a、TSM和透明度(SD)等能够改变水体吸收、散射特征的光学水质指标。遥感定量反演出的悬浮物浓度、透明度和营养状态指数能够有效反映水体的黑臭程度[63]。韩文聪等[32]基于GF-2影像建立的Chl-a浓度、TSM和透明度水体指标反演模型,有效提取了研究区的黑臭水体,但在透明度和Chl-a浓度低、悬浮泥沙含量高的河段容易被误判为黑臭水体,若是根据两种水质指标都高的结果来综合判断黑臭水体会更为合理。对于DO、COD、和NH_3-N等化学水质指标,一般需要先将其与光学水质参数建立联系,再间接与水体遥感反射率建立联系,或者直接利用回归方程模拟生化性参数与遥感反射率建立联系[35]。例如,顾佳艳等[64]经分析多种水质指标与遥感反射率的相关性,发现Chl-a和COD可作为上海市黑臭水体反演的最佳特征指标。赵倩[65]基于水质实测数据与GF-2影像反演的DO、

表 4　典型水质参数遥感反演模型

Table 4　Remote sensing inversion model of typical water quality parameters

水质参数	反演模型公式	参考文献
Chl-a	$4.089\times(b_4/b_3)^2-0.746\times(b_4/b_3)+29.733$	[63,66]
Chl-a	$208.39\times\left(\frac{b_4-b_3}{b_4+b_3}\right)^2+256.99\times\left(\frac{b_4-b_3}{b_4+b_3}\right)+95.477$	[35]
TSS	$119.62\times(b_3/b_2)^{6.0823}$	[63,66]
SD	$C_{SD}=284.15\times C_{TSS}^{-0.67}$	[63,66]
CODcr	$34.038\times\left(\frac{b_3-b_4}{b_3+b_4}\right)^2-64.448\times\left(\frac{b_3-b_4}{b_3+b_4}\right)+43.441$	[35]
COD	$(b_3/b_2-0.5777)/0.007$	[65]
DO	$15.73229-30.80257\times(b_2+b_3)$	[65]
NH_3-N	$(b_3/b_2-0.661)/0.07$	[65]

注:b_2、b_3、b_4分别为GF-2号影像的绿波段、红波段、近红外波段

NH_3-N、TP、COD等水质指标提出的一种城市黑臭水体评价模型B-OWQI(Black and Odorous Water Quality Index)在广州取得了较好结果。由此可见,SD、DO、ORP、NH_3-N、Chl-a、TSM、TP、水温等指标均可应用在城市黑臭水体监测的实际研究中。利用水质参数来识别城市黑臭水体是一种重要手段,且水质参数数值可以准确定量黑臭水体污染程度,这对城市黑臭水体分级具有重要意义。

4.4 决策树法

上述3种传统遥感方法操作容易、计算量小、实现简单,但是这些方法也存在不足。一方面,这些方法大多都需要实地采样并依赖于经验阈值做分类,极易受到人为主观因素的影响。因此,这些算法模型不能直接迁移到其他区域使用,往往需要结合实际重新判定阈值。另一方面,大部分方法只是利用影像的单一特征识别城市黑臭水体,尽管城市黑臭水体可以根据其光谱特征进行分类,但有些黑臭水体样本点的光谱特征与普通水体相似,阈值容易存在模糊区间,很难使用单一特征对其进行区分。针对上述问题,有研究融合多种特征指标来识别黑臭水体。例如,曹云等[67]基于GF-2影像分别计算影像的BOI和NDBWI值,采用面向对象的最优特征选择搜索算法确定黑臭水体与正常水体的4个分离特征,利用K-mean算法进行多特征聚类分析有效识别出城市黑臭水体。

除此之外,更多的研究是通过构建决策树模型融合多种特征来提取出城市黑臭水体。例如,Zhao等[50,68]基于Sentinel-2影像和CART(Classification and Regression Tree)模糊决策树算法来改进城市黑臭水体的遥感识别模型,利用多个典型黑臭水体指标(如BD、WCI、BOI和HI)构建多特征模糊决策树分类算法来识别廊坊市黑臭水体总体分布和局部聚集特征,实现了较高的准确率。此外,王晨[68]还对该决策树分类模型进行了迁移验证,在通州区获得了80%的识别准确率。除了CART决策树,ID3决策树也可以为建立多特征分类器提供可靠的方法。董旭鑫等[51,69]以蓝、绿、红波段之间的差和作为特征组合建立了ID3决策树,并通过计算模糊隶属度来确定分类结果,分类精度达84.78%。由于这些研究使用的Sentinel-2影像最高精度只有10 m,对于一些更为细小的黑臭水体难以区分,在未来应使用精度更高的影像进一步研究。不过这些研究仍然充分证明了决策树方法在城市黑臭水体的遥感识别方面具有较好的表现,其融合多特征的特性能够使城市黑臭水体识别更具科学性,但是如何选择稳定的识别特征也是决策树方法需要重点考虑的。

4.5 深度学习法

深度学习是近年新兴的研究领域,其目标是通过构建多层网络模型,利用复杂的网络参数将浅层特征转化为深层特征,从而实现对样本数据的自动学习和内在规律的解析[70]。在城市黑臭水体的遥感识别中,传统遥感识别方法在实际应用中流程繁琐、适用范围小、泛化性差。深度学习方法,特别是卷积神经网络,提供了一种可能解决这些问题的途径,它能够更好地利用原始数据本身的特征,挖掘出城市黑臭水体分类所需的条件。除了传统算法所用到的光谱特征,深度学习方法还能利用到城市黑臭水体的河道宽度、形态差异等特征[71]。胡国庆[71]基于GF-2影像分析了芜湖市黑臭水体的年际动态变化特征,在构建迁移模型中得到了最佳网络结构"Inception-V3_7a",且在特征融合实验中,发现DBWI的加入对于帮助网络模型识别城市黑臭水体效果最佳,并得到了最佳特征融合数据集"RGB+DBWI",其准确率和召回率分别是0.914 3、0.932 4。邵琥翔等[72]基于GF-2影像构建了PSPNet和U-Net深度学习模型来提取廊坊市的黑臭水体,其研究结果表明,选择"RGB+NIR+NDVI+NDBWI"的融合指标作为输入组合可以提供最丰富的特征信息并减少数据冗余,引入注意力机制的U-Net网络模型在城市黑臭水体提取方面表现最佳。此外,还有Huang等[73]基于U-Net构建的BDNet、Zheng等[74]基于FCN构建的FANet均对城市黑臭水体图像分割表现出优异性能。

深度学习方法虽然在城市黑臭水体遥感监测方面取得一定成效,但仍然有许多值得进一步探索和发展的领域,例如特征选择、网络构建等。通过不断优化和创新深度学习模型,结合多源数据和综合分析方法,引入更多的样本数据和丰富的特征表示,以使深度学习模型可以更好地捕捉到城市黑臭水体的复杂特征和变化模式,从而提高识别精度和可靠性。

4.6 城市黑臭水体遥感识别方法对比分析

上述5种类型的方法在城市黑臭水体监测中各有其适用的场景和优缺点,本研究从水体复杂情况、操作难易程度、效率高低、准确度等方面来进行对比分析(表5)。综合来看,光谱指数法和水体色

表 5　城市黑臭水体识别方法优缺点

Table 5　The advantages and disadvantages of urban black and odorous water identification methods

方法	适用性	优点	缺点
光谱指数法	适用于简单的水体类型分类	简单易行、计算量小;易于理解和应用;可以快速获取黑臭水体的大致位置和分布;成本较低。	依赖经验阈值,主观因素影响大;对于复杂的水体环境、混杂的光谱信息,识别精度较低。
水体色度法	适用于颜色变化较为显著的情况	颜色直观,可以快速判断色彩异常的水体,初步评估的水质情况。	受光照条件影响,难以处理光照变化较大的情况;只能对颜色明显变化的水体有效;不能准确判断黑臭程度和污染源。
水质参数法	适用于需要定量水体污染程度的情况	能够提供定量的水质信息和较准确的水质参数估计;更精确地全面评估水体污染程度。	部分水质参数的反演模型构建困难;需要实地采样和分析,耗时耗力;对数据要求较高。
决策树	可融合多种特征,适用于实现复杂水体的分类	适应能力强,可以处理多个特征之间的复杂关系;人为因素和噪声影响小,具有一定的自动化和可解释性。	需要事先建立训练数据集,对于复杂情况可能需要更多的训练样本;模型的构建依赖选择特征的质量,否则容易出现过拟合问题。
深度学习	适用于复杂情况下的黑臭水体分割和分类	可以从大量数据中学习复杂的特征表示;具有较高的自动化和预测准确性。	需要大量的标注数据进行训练,对计算资源要求较高。

度法适合快速初步判断,水质参数识别法可以提供定量的水质信息,决策树和深度学习则在更复杂情况下能够提供较高的分类精度。

5　城市黑臭水体遥感分级方法

《指南》上给出了判定城市黑臭水体级别的方法,判断某检测点的黑臭程度可以通过分析该点的4项水质指标(SD、DO、ORP和NH_3-N)来确定,其中1项指标有60%以上的检测数据或不少于2项指标有30%以上的检测数据达到“重度黑臭”级别的,该检测点认定为“重度黑臭”,否则可认定为“轻度黑臭”。连续3个以上检测点被认定为“重度黑臭”的,检测点之间的区域认定为“重度黑臭”;水体60%以上的检测点被认定为“重度黑臭”的,整个水体认定为“重度黑臭”[2]。《指南》定级城市黑臭水体的方法虽然较为精准,但是需要花费大量时间和人力。目前关于利用遥感直接对城市黑臭水体进行强度分级的研究较少,大多研究只停留在黑臭水体的识别层面,未能进一步对识别出的城市黑臭水体进行强度分级。

在已有的城市黑臭水体遥感分级研究中,七珂珂等[19,49]基于提出的黑臭水体遥感分级指数BOCI(Black and Odorous water Classification Index)具有更高的黑臭水体分级精度,何红术[75]将该模型分别应用到青岛的黑臭水体识别中时,识别结果与真实结果之间吻合程度均获得了较高的一致性。虽然BOCI模型在以上研究中取得了较好的识别效果,但由于引起水体黑臭的原因复杂多样,不同地区的黑臭水体类型存在差异性,因此该模型在其他城市应用的适用性、阈值稳定性以及识别精度有待进一步验证[19]。除了BOCI之外,还有Zhang等[57]提出的UBOW(Urban Black-Odor Water)模型,以及李玲玲等[18,61]基于水体色度构建的决策树模型均有效识别出了研究区的重度黑臭水体、轻度黑臭水体和非黑臭水体。

由于当前分级研究中采用的分级指标单一,且分级方法同识别方法一样,均存在需要人为确定阈值、同谱异物、自动化程度低、利用的遥感特征单一等问题。因此,分级时容易存在误判情况,将重度黑臭错分为轻度黑臭。为了更好地分级黑臭水体,未来的研究还需要同识别方法一起不断探索和引入新的模型和算法,不断改进以提高准确性和适用性。

6　结　语

城市黑臭水体已经成为许多城市普遍存在的环境污染问题,严重影响和损害群众健康和切身利益。因此,消除城市黑臭水体对提升人居环境质量具有重要意义。遥感技术凭其独特的优势,提供了一种更有效发现黑臭水体的方式,在城市黑臭水体的监测和治理中发挥着重要作用。针对城市黑臭水体遥感监测这一问题,本研究分析总结了当前城市黑臭水体遥感监测的识别特征、适用数据源、识别与分级方法及其优缺点和适用性等内容,旨在帮助相关研究者对该领域有更全面的了解。

总的来看,由于城市黑臭水体细小的特点,国产高分系列数据,特别是具有亚米级分辨率的GF-2数据是城市黑臭水体遥感监测研究中最适用的数

据源。在识别特征方面,城市黑臭水体在可见光波段具有特征光谱,在550~700 nm范围内的光谱曲线与正常水体存在明显差异,据此可以区分出大部分呈现灰黑色的黑臭水体,但是在近红外波段的光谱差异,黑臭水体易与悬浮泥沙含量高但不属于黑臭水体的浑浊水体混淆。由于水体的表观光学特性受到水体组分以及入射光场的影响,可能会使部分轻度黑臭水体与重度黑臭水体的光谱差异较小,从而影响到遥感识别分级的精度。

当前的城市黑臭水体遥感监测方法均具有一定的可行性,研究使用最多的是基于特征波段的光谱指数法,该方法简单有效,可以快速初步判断出黑臭水体区域。其中DBWI、NDBWI、BOI、BOCI等指数使用频率最高,并被验证在多个区域均具有良好的识别效果,决策树与深度学习方法也多基于这些较稳定的特征来进一步构建模型。光谱指数法、水体色度法和水质参数法这3种典型方法均涉及到阈值判定,深受人为主观影响,若将其迁移到其他地区或其他卫星影像应用时还需要进一步重新验证阈值,决策树与深度学习方法因其能融合多种特征实现对城市黑臭水体细微特征的自动学习和解析,可以更高效率识别分级复杂情况下的城市黑臭水体。

7 展 望

尽管城市黑臭水体遥感监测的研究已经取得不少成果,但是仍存在一些不足之处有待改进,本文从以下5个方面进行展望:

(1)精准分类及定义。黑臭水体种类多,成因复杂。从形成的时间尺度上看,既有短期突发性的水污染导致的,也有长期水体富营养化导致的。根据《指南》的定义,呈现令人不悦的颜色和(或)散发令人不适气味的水体都被视为黑臭水体。在遥感研究中,不同类型的水体呈现的不同颜色和光谱会对研究造成较大影响,甚至有些黑臭水体表面存在的浮萍、水华等覆盖物也会改变研究结果。因此,集合不同研究区更多类型的水体,建立黑臭水体样本数据库,精准细分黑臭水体种类,丰富黑臭水体光谱数据库,有利于研究更具针对性。

(2)多尺度挖掘遥感特征。目前关于城市黑臭水体遥感监测的研究主要使用光谱特征构建模型,缺少其他尺度的特征研究。未来研究需要解析基于变化检测的遥感敏感性特征与黑臭水体周边环境的相互关系,例如水体形态、次生环境等,融合多尺度像元级、结构级、对象级、场景级等敏感性特征指标进行黑臭水体遥感监测。

(3)光学/雷达协同监测。目前对城市黑臭水体的遥感研究主要为光学遥感,雷达遥感在该领域的应用还较为有限。雷达可以提供关于地表特征和物质构成的微观信息,对于监测水体表面存在垃圾、浮萍等辅助标志的黑臭水体具有一定潜力。随着对黑臭水体认识的深入和技术的发展,黑臭水体的研究除了使用多光谱影像和高光谱影像,还可以进一步探索雷达影像等其他数据源对具有不同表面特征的黑臭水体的监测潜力。

(4)多源光学卫星协同监测。由于黑臭水体细小的特点,在选择影像时往往采用高空间分辨率影像,而高空间分辨率卫星的幅宽一般很小,且容易受云雨和轨道回访周期的影响,单颗卫星的短时段内覆盖能力有限。因此,单一高空间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,需要多源光学卫星协同监测黑臭水体。

(5)天空地联合监测。黑臭水体监测的地面、无人机和卫星遥感方法各有其优缺点。现场原位测定方法能够获得更精确的结果,但其操作复杂且耗费时间和资源。相比之下,遥感方法更为高效,可以覆盖广阔的区域并提供大量数据,但卫星遥感的准确性和时效性可能受到天气等因素限制,可以将无人机遥感数据作为补充。因此,为了更精准高效地监测黑臭水体,更好地推进黑臭水体整治,需要充分将现场测定方法的精确性和无人机及卫星遥感方法的高效性结合起来,以获得更全面、准确和高效的数据,为黑臭水体环境整治提供更可靠的依据和决策支持。

参考文献(References):

[1] The State Council of the People's Republic of China. the Action Plan for the Prevention and Control of Water Pollution. [EB/OL]. 2015-04-02.[国务院.水污染防治行动计划[EB/OL]. 2015-04-02. https://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content_9613.htm]

[2] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Guidelines for the Remediation of Urban Black and Odorous Water Bodies[EB/OL].2015-08-28.[住房城乡建设部.城市黑臭水体整治工作指南[EB/OL]. 2015-08-28. https://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201509/t20150911_224828.html]

[3] HU C M, HACKETT K E, CALLAHAN M K, *et al*. The 2002 ocean color anomaly in the Florida bight: A cause of local coral reef decline [J]. Geophysical Research Letters,

2003, 30(3):511-514. DOI: 10.1029/2002GL016479

[4] KUTSER T, PAAVEL B, VERPOORTER C, *et al*. Remote sensing of black lakes and using 810 nm reflectance peak for retrieving water quality parameters of optically complex waters[J]. Remote Sensing, 2016, 8(6): 497. DOI: 10.3390/rs8060497

[5] KUTSER T, TRANVIK L, PIERSON D C. Variations in colored dissolved organic matter between boreal lakes studied by satellite remote sensing[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2009, 3(1): 33538. DOI: 10.1117/1.3184437

[6] ZHAO J, HU C M, LAPOINTE B, *et al*. Satellite-observed black water events off southwest Florida: Implications for coral reef health in the Florida keys national marine sanctuary[J]. Remote Sensing, 2013, 5(1): 415-431. DOI: 10.3390/rs5010415

[7] FENG Qiang, YI Jing, LIU Shumin, *et al*. The pollution situation, treatment techniques and countermeasures of urban black and odors water in China[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(8): 82-88.[冯强, 易境, 刘书敏, 等. 城市黑臭水体污染现状、治理技术与对策[J]. 环境工程, 2020, 38(8): 82-88.]

[8] WANG Xu, WANG Yonggang, SUN Changhong, *et al*. Formation mechanism and assessment method for urban black and odorous water body: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(4): 1331-1340.[王旭, 王永刚, 孙长虹, 等. 城市黑臭水体形成机理与评价方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1331-1340.]

[9] DING Xiaolei, LI Yunmei, LÜ Heng , *et al*. Analysis of absorption characteristics of urban black-odor water[J]. Environmental Science, 2018, 39(10): 4519-4529.[丁潇蕾, 李云梅, 吕恒, 等. 城市黑臭水体的吸收特性分析[J]. 环境科学, 2018, 39(10): 4519-4529.]

[10] LÜ Chunjian, GAO Hongjie, LI Xiaojie, *et al*. DOM components and optical properties of black-odorous rivers in Shenyang city, China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(3): 559-568.[吕纯剑, 高红杰, 李晓洁, 等. 沈阳市黑臭水体溶解性有机物组分及其光学特征[J]. 环境工程学报, 2019, 13(3): 559-568.]

[11] ZHU Wenfei, LI Xiaojie, LIU Changfeng, *et al*. Analysis of DOM ultraviolet spectrum characteristics of surface water in black and odorous water body of Shenyang city, China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(3): 569-576.[朱文飞, 李晓洁, 刘长风, 等. 沈阳市黑臭水体表层水DOM紫外光谱特征分析[J]. 环境工程学报, 2019, 13(3): 569-576.]

[12] LI Jiaqi, LI Jiaguo, ZHU Li, *et al*. Remote sensing identification and validation of urban black and odorous water in Taiyuan city[J]. Journal of Remote Sensing, 2019, 23(4): 773-784.[李佳琦, 李家国, 朱利, 等. 太原市黑臭水体遥感识别与地面验证[J]. 遥感学报, 2019, 23(4): 773-784.]

[13] WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yunmei, *et al*. Remote sensing identification of urban black-odor water bodies based on high-resolution images: A case study in Nanjing[J]. Environmental Science, 2018, 39(1): 57-67.[温爽, 王桥, 李云梅, 等. 基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例[J]. 环境科学, 2018, 39(1): 57-67.]

[14] YAO Huanmei, LU Yannan, GONG Zhuqing. Remote sensing identification of urban black and odorous water body based on PlanetScope images: A case study in Qinzhou, Guangxi[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(10): 35-43.[姚焕玫, 卢燕南, 龚祝清. 基于PlanetScope影像的广西钦州市黑臭水体识别方法研究[J]. 环境工程, 2019, 37(10): 35-43.]

[15] YAO Yue, SHEN Qian, ZHU Li, *et al*. Remote sensing identification of urban black-odor water bodies in Shenyang city based on GF-2 image[J]. Journal of Remote Sensing, 2019, 23(2): 230-242.[姚月, 申茜, 朱利, 等. 高分二号的沈阳市黑臭水体遥感识别[J]. 遥感学报, 2019, 23(2): 230-242.]

[16] ZHANG Chun, GE Yi, REN Yue, *et al*. Semantic segmentation of rural black and odorous water body based on improved Deeplabv3+ network with remote sensing images[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023, 38(6): 1433-1444.[张淳, 葛毅, 任越, 等. 基于优化的DeeplabV^{3+}网络和高分影像分割浮萍型农村黑臭水体[J]. 遥感技术与应用, 2023, 38(6): 1433-1444.]

[17] LIU Bing, LI Tianhong. Research on remote sensing identification methods of urban black and odorous water bodies with Gaofen images[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2024, 32(2): 314-330.[刘冰, 李天宏. 基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别方法研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 32(2): 314-330.]

[18] LI Lingling, LI Yunmei, LÜ Heng , *et al*. Remote sensing classification of urban black-odor water based on decision tree[J]. Environmental Science, 2020, 41(11): 5060-5072.[李玲玲, 李云梅, 吕恒, 等. 基于决策树的城市黑臭水体遥感分级[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 5060-5072.]

[19] QI Keke, SHEN Qian, LUO Xiaojun, *et al*. Remote sensing classification and recognition of black and odorous water in Shenyang based on GF-2 image[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(2): 424-434.[七珂珂, 申茜, 罗小军, 等. 基于GF-2影像的沈阳市黑臭水体遥感分级识别[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(2): 424-434.]

[20] FU Li, LIU Ge, SONG Kaishan, *et al*. Research on optical characterization and remote sensing identification of typical black and odorous water in rural areas[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2024, 39(5): 1064-1074.[付丽, 刘阁, 宋开山, 等. 典型农村区域黑臭水体光学特性分析与遥感识别研究[J]. 遥感技术与应用, 2024, 39(5): 1064-1074.]

[21] ZHANG Baodong, WANG Biao, WU Yanlan, *et al*. Analysis and identification of characteristics of rural black and odorous water bodies in Anhui Province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2024, 33(8): 1257-1268.[张宝东, 王彪, 吴艳兰, 等. 安徽省农村黑臭水体特征分析及识别[J]. 生态环境学报, 2024, 33(8): 1257-1268.]

[22] WANG Qiao, ZHU Li. Urban black and odorous water monitoring technique and application using remote sensing[M]. Beijing: China Environmental Publishing Group, 2018.[王桥, 朱利. 城市黑臭水体遥感监测技术与应用示范[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2018.]

[23] ZHANG Bing, LI Junsheng, SHEN Qian, *et al*. Recent research progress on long time series and large scale optical remote sensing of inland water[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 37-52.[张兵, 李俊生, 申茜, 等. 长时序大范围内陆水体光学遥感研究进展[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 37-52.]

[24] SUN Yongbin, LU Huixiong, LI Qiliang, *et al*. A high-resolution remote sensing identification method for small, black and odorous water bodies coordinated by "algorithm-flag"[J]. Journal of Geo-Information Science, 2024, 26(12): 2788-2804.[孙永彬, 卢辉雄, 李启亮, 等."算法-标志"协同的小微黑臭水体高分遥感识别方法[J]. 地球信息科学学报, 2024, 26(12): 2788-2804.]

[25] CAO Jianing.Research on remote sensing interpretation algorithm of black and odorous water based on fuzzy decision tree [D]. Langfang: North China Institute of Aerospace Engineering, 2021.[曹佳宁. 基于模糊决策树的黑臭水体遥感解译算法研究[D]. 廊坊: 北华航天工业学院, 2021.]

[26] LI Xiaojie. Pollutant characteristics and remote sensing identification of typical black and odorous water bodies in Shenyang [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.[李晓洁. 沈阳市典型黑臭水体污染物特征研究与遥感识别[D]. 西安: 长安大学, 2018.]

[27] CAO Hongye. Study on analysis of optical properties and remote sensing identifiable models of black and malodorous water in typical cities in China[D]. Chengdu: Southwest Jiao-Tong University, 2017.[曹红业. 中国典型城市黑臭水体光学特性分析及遥感识别模型研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.]

[28] GORDON H R, WANG M. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: A preliminary algorithm[J]. Applied Optics, 1994, 33(3): 443-452. DOI: 10.1364/AO.33.000443

[29] MOBLEY C. Light and Water: Radiative transfer in natural waters [M]. New York: Academic Press, 1994.

[30] ZOU Lei. Measurement and application of inherent and polarized optical properties in inland water [D].Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.[邹雷. 内陆水体固有光学特性及偏振特性的测量与应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.]

[31] FU Li, GUO Wenwen, SONG Kaishan, *et al*. Remote sensing identification of black and odorous water bodies in Changchun City in 2020[J]. Wetland Science, 2022, 20(4): 537-547.[付丽, 郭雯雯, 宋开山, 等. 2020年长春市黑臭水体遥感识别研究[J]. 湿地科学, 2022, 20(4): 537-547.]

[32] HAN Wencong, ZHANG Xiaoyu, CHEN Jiaxing, *et al*. Remote sensing monitoring of urban black and odorous water based on GF-2 image[J].Environmental Ecology,2021,3(1): 63-71.[韩文聪,张霄宇,陈嘉星,等. 基于高分二号影像的城镇黑臭水体遥感监测[J]. 环境生态学,2021,3(1):63-71.]

[33] WANG Xiaochen, YANG Xingzhong, LÜ Binbin , *et al*. Community structure of the phytoplankton and its relationship with environmental factors in lower reaches of the Yellow River[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(18): 9819-9821.[王晓臣, 杨兴中, 吕彬彬, 等. 黄河下游浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(18): 9819-9821.]

[34] GU Jiayan, HE Guofu, ZHAN Linghua, *et al*. Spectrum characteristics analysis of black and odorous waters in Shanghai and study of remote sensing recognition[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(1): 70-79.[顾佳艳, 何国富, 占玲骅, 等. 上海市黑臭水体光谱特征分析及遥感识别方法探究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(1): 70-79.]

[35] ZHAN Linghua. Study on recognition models of urban black and odorous water bodies based on optical characteristics[D]. Shanghai: East China Normal University, 2019.[占玲骅. 基于光学特性的城市黑臭水体识别模型研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.]

[36] SHEN Q, YAO Y, LI J S, *et al*. A CIE color purity algorithm to detect black and odorous water in urban rivers using high-resolution multispectral remote sensing images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(9): 6577-6590. DOI: 10.1109/TGRS.2019.2907283

[37] WEI C F, ZHENG Q Y, SHANG Y H, *et al*. Black and odorous water monitoring by using GF series remote sensing data[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics). IEEE, 2021: 1-6. DOI: 10.1109/agro-geoinformatics50104.2021.9530312

[38] LI Jiaqi, DAI Huayang, LI Jiaguo, *et al*. Remote sensing identification of heavily polluted water in urban areas[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(5): 54-58.[李佳琦, 戴华阳, 李家国, 等. 城区重度污染水体遥感识别研究[J]. 测绘通报, 2018(5): 54-58.]

[39] WANG Ru, SHEN Qian, PENG Hongchun, *et al*. Study on the applicability of multi-source high-resolution satellite images for monitoring black and odorous water body[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(1): 179-192.[王茹, 申茜, 彭红春, 等. 多源高分辨率卫星影像监测黑臭水体的适用性研究[J]. 遥感学报, 2022, 26(1): 179-192.]

[40] TURSUN Marhaba, LIU Zhenyu, ZHAO Wenjing, *et al*. Recognition of urban black and odorous water by UAV hyperspectral remote sensing[J]. Journal of South-Central Minzu University (Natural Science Edition), 2022, 41(6): 668-675.[买日阿巴·吐尔逊, 刘振宇, 赵文静, 等. 城市黑臭水体的无人机高光谱遥感识别[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2022, 41(6): 668-675.]

[41] WEI L F, HUANG C, WANG Z X, *et al*. Monitoring of urban black-odor water based on nemerow index and gradient boosting decision tree regression using UAV-borne hyperspectral imagery [J]. Remote Sensing, 2019, 11(20): 2402. DOI: 10.3390/rs11202402

[42] CHENG Xin, XU Jie, LI Yunmei, *et al*. Discrimination method of unmanned aerial vehicle hyperspectral for the types of pollution sources of black-odor rivers in cities[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2024, 28(8): 1914-1926.[成鑫, 徐杰, 李云梅, 等. 城市黑臭河流污染源类型的无人机高光谱判别[J]. 遥感学报, 2024, 28(8): 1914-1926.]

[43] HU Guoqing, CHEN Donghua, LIU Congfang, *et al*. Dynamic monitoring of urban black-odor water bodies based on GF-2 image [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2021, 33(1): 30-37.[胡国庆, 陈冬花, 刘聪芳, 等. 基于高分二号的城市黑臭水体动态监测[J]. 国土资源遥感, 2021, 33(1): 30-37.]

[44] JIANG Yuwen, ZHOU Ning, ZHOU Yanyan, *et al*. Research on remote sensing monitoring of urban black and odorous water[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(S1): 98-104.[蒋宇雯, 周宁, 周艳艳, 等. 城市黑臭水体遥感动态监测方法研究[J]. 测绘通报, 2019(S1): 98-104.]

[45] JI Gang. Research and application on black and odorous water body by remote sensing [D]. Lanzhou: Lanzhou JiaoTong University, 2017.[纪刚. 基于遥感的黑臭水体识别方法研究及应用[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.]

[46] ZHANG Xue, LAI Jibao, LI Jiaguo, *et al*. Remote sensing recognition of black-odor waterbodies in Shenzhen City based on GF-1 satellite[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(4): 268-274.[张雪, 赖积保, 李家国, 等. 基于高分一号影像的深圳市黑臭水体遥感识别[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(4): 268-274.]

[47] GAO Li, ZHANG Lulu, YE Mai, *et al*. Remote sensing recognition of black-odor waterbodies in Guangzhou City based on GF-6 image[J]. Environmental Ecology, 2021, 3(5): 13-18.[高黎, 张路路, 叶脉, 等. 基于GF-6影像的广州市建成区黑臭水体遥感识别[J]. 环境生态学, 2021, 3(5): 13-18.]

[48] HUANG Qiyu, XIAO Han, YU Zhifeng, *et al*. Remote sensing identification of black-odorous water in Hangzhou based on GF-6 images[J]. Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition), 2022, 21(5): 542-552.[黄祺宇, 肖晗, 于之锋, 等. 基于高分六号影像的杭州市黑臭水体遥感识别研究[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2022, 21(5): 542-552.]

[49] QI Keke. Remote sensing classification and recognition of urban black and odorous water based on multi-source high-resolution images[D]. Chengdu: Southwest JiaoTong University, 2019.[七珂珂. 基于多源高分影像的城市黑臭水体遥感分级识别[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.]

[50] ZHAO Q C, DONG X X, LI G H, *et al*. Classification and regression tree models for remote recognition of black and odorous water bodies based on sensor networks[J]. Scientific Programming, 2022, 2022(1): 7390098. DOI: 10.1155/2022/7390098

[51] DONG Xuxin, ZHAO Qichao, LI Jiaguo, *et al*. Construction and application of CART model for remote sensing recognition of black and odorous water[J]. Remote Sensing Information, 2022, 37(5): 63-69.[董旭鑫, 赵起超, 李家国, 等. 黑臭水体遥感识别CART模型构建与应用[J]. 遥感信息, 2022, 37(5): 63-69.]

[52] CHEN Shuai. Remote sensing recognition of black and odorous water bodies based on Landsat-8 images[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2021.[陈帅. 基于Landsat-8影像的黑臭水体遥感识别[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2021.]

[53] YU Z F, HUANG Q Y, PENG X X, *et al*. Comparative study on recognition models of black-odorous water in Hangzhou based on GF-2 satellite data[J]. Sensors, 2022, 22(12): 4593. DOI: 10.3390/s22124593

[54] ZHANG Ling. Urban black and odorous water recognition principle and accuracy evaluation method based on remote sensing satellite image[J]. China-Arab States Science and Technology Forum, 2020(7): 151-153.[张玲. 基于遥感卫星影像技术的城市黑臭水体识别原理及精度评价方法[J]. 中阿科技论坛(中英阿文), 2020(7): 151-153.]

[55] XU Jiafeng, LI Yunmei, XU Jie, *et al*. Adaptive threshold for surface shadow detection of black and odor water[J]. Journal of Geo-Information Science, 2020, 22(10): 1959-1970.[许佳峰, 李云梅, 徐杰, 等. 黑臭水体水面阴影提取的自适应阈值算法研究[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(10): 1959-1970.]

[56] WU T X, LI M Y, WANG S D, *et al*. Urban black-odor water remote sensing mapping based on shadow removal: A case study in Nanjing[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 9584-9596.

[57] ZHANG Q, WANG B W, WANG S F, *et al*. Urban black-odor water body dynamic analysis with high-resolution remote sensing image[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 344(1): 012149. DOI: 10.1088/1755-1315/344/1/012149

[58] LI Wenqiang, HAN Liusheng. Remote sensing identification of black and odor water body in Guangzhou based on Sentinel-2A[J]. Science and Technology & Innovation, 2023(3): 44-48.[李文强, 韩留生. 基于Sentinel-2A的广州市黑臭水体遥感识别[J]. 科技与创新, 2023(3): 44-48.]

[59] ZHANG Ningning. Dynamic monitoring and evaluation of black and odorous water body in Harbin based on GF-2[D]. Harbin: Harbin Normal University, 2022.[张宁宁. 基于GF-2的哈尔滨市黑臭水体动态监测与评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2022.]

[60] GUO Wenwen. Research on the optical characteristics and remote sensing recognition of black and odorous water bodies in Changchun city[D]. Liaocheng: Liaocheng University, 2021.[郭雯雯. 长春市黑臭水体光学特性与遥感识别研究[D]. 聊城: 聊城大学, 2021.]

[61] LI Lingling. Study on remote sensing classification method of urban black and odorous water based on water color classification[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2021.[李玲玲. 基于水色分类的城市河流黑臭遥感分级方法研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2021.]

[62] ZHOU X Y, HUANG Z Q, WAN Y C, *et al*. A new method for continuous monitoring of black and odorous water body using evaluation parameters: A case study in Baoding[J]. Remote Sensing, 2022, 14(2): 374. DOI: 10.3390/rs14020374

[63] JIN Haixia, PAN Jian. Urban black-odor water body remote sensing monitoring based on GF-2 satellite data fusion[J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 2017, 34(4): 107-117.[靳海霞, 潘健. 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[J]. 国土资源科技管理, 2017, 34(4): 107-117.]

[64] GU Jiayan, HE Guofu, ZHAN Linghua, *et al*. Construction of retrieval model for characteristic water quality indicators of black and odorous water in Shanghai based on hyperspectral remote sensing[J]. Environmental Pollution & Control, 2022, 44(8): 1030-1034.[顾佳艳, 何国富, 占玲骅, 等. 基于高光谱遥感的上海市黑臭水体特征水质指标反演模型构建[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(8): 1030-1034.]

[65] ZHAO Qian. Evaluation model construction and pollution source traceability of black and odorous water body in Guangzhou[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2021.[赵倩. 广州市黑臭水体评价模型构建及污染溯源研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2021.]]

[66] ZHU Li, LI Yunmei, ZHAO Shaohua, *et al*. Remote sensing monitoring of Taihu Lake water quality by using GF-1 satellite WFV data[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2015, 27(1): 113-120.[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]. 国土资源遥感, 2015, 27(1): 113-120.]

[67] CAO Yun, HANG Xin, GAO Yi, *et al*. Remote sensing monitoring of urban black and odorous water bodies using GF-2 images: Taking the main urban area of Nanjing as an exam-

ple[J]. Sichuan Environment, 2023, 42(1): 208-217.[曹云, 杭鑫, 高艺, 等. 利用高分二号影像对城市黑臭水体遥感监测——以南京市主城区为例[J]. 四川环境, 2023, 42(1): 208-217.]

[68] WANG Chen. Research on remote sensing image recognition of black and odorous water based on fuzzy decision tree algorithm [D]. Langfang: North China Institute of Aerospace Engineering, 2022.[王晨. 廊坊市黑臭水体光谱特征与时空分布分析[D]. 廊坊: 北华航天工业学院, 2022.]

[69] DONG Xuxin. Research on remote sensing image recognition of black and smelly water based on fuzzy decision tree algorithm [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2022.[董旭鑫. 基于模糊决策树算法黑臭水体遥感影像识别研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2022.]

[70] YASRAB R, ZHANG J C, SMYTH P, *et al*. Predicting plant growth from time-series data using deep learning[J]. Remote Sensing, 2021, 13(3): 331. DOI: 10.3390/rs13030331

[71] HU Guoqing. Research on remote sensing monitoring of black-odor water bodies based on deep learning[D]. Wuhu: Anhui Normal University, 2021.[胡国庆. 基于深度学习的黑臭水体遥感监测研究[D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2021.]

[72] SHAO Huxiang, DING Feng, YANG Jian, *et al*. Model of extracting remotely-sensed information of black and odorous water based on deep learning[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(4): 156-162.[邵琥翔, 丁凤, 杨健, 等. 基于深度学习的黑臭水体遥感信息提取模型[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(4): 156-162.]

[73] HUANG J J, XU J D, CHONG Q P, *et al*. Black and odorous water detection of remote sensing images based on improved deep learning[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2023, 49(1): 1-14. DOI: 10.1080/07038992.2023.2237591

[74] ZHENG G Z, ZHAO Y Y, PAN Z X, *et al*. Fanet: A deep learning framework for black and odorous water extraction[J]. European Journal of Remote Sensing, 2023, 56 (1): 22340771-16. DOI: 10.1080/22797254.2023.2234077

[75] HE Hongshu. Urban black and odorous water body recognition based on improved U-Net network remote sensing semantic segmentation [D]. Beijing: Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2020.[何红术. 基于改进U-Net网络遥感语义分割的城市黑臭水体识别——以青岛地区为例[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院空天信息创新研究院), 2020.]

Reviews of Remote Sensing Monitoring of Urban Black and Odorous Water

CHEN Zhenghua[1], LAN Sixiang[1], ZHANG Jinshui[2], ZHANG Wei[1], LI Huade[1], ZHAO Lifang[3]

(1.*School of Marine Sciences, Guangxi University, Nanning* 530004, *China*;
2.*State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*;
3.*Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100094, *China*)

Abstract: Black and odorous water is an extreme water pollution phenomenon that is a common problem in many cities, seriously affecting the well-being and satisfaction of residents. Therefore, addressing the issue of urban black and odorous water is urgent. Scientifically monitoring the urban black and odorous condition of water is the first step in the remediation of black and odorous water, providing accurate targets for subsequent assessment. Compared to traditional ground-based monitoring methods, remote sensing is a more effective way to discover black and odorous water, allowing for a wider and more rapid identification of black and odorous water areas and timely comprehensive representation of the spatiotemporal evolution of black and odorous water. This paper reviews the main research advances in remote sensing monitoring of urban black and odorous water. First, it briefly introduces the overview of black and odorous water, summarizes the remote sensing feature, and common data sources for urban black and odorous water. Second, it discusses in detail the methods for remote sensing identification and classification of urban black and odorous water and compares the applicability and advantages and disadvantages of each method. Finally, it summarizes the current status of remote sensing research on urban black and odorous water and its shortcomings and looks forward to future development directions. The aim is to provide reference and thinking for related research and better decision support for the long-term management of black and odorous water.

Key words: Black and odorous water; Remote sensing monitoring; Identification and classification; Remote sensing feature; Data sources