

卢辉雄, 李启亮, 薛庆, 等. 基于高分二号遥感数据的黑臭水体识别和氨氮反演研究[J]. 世界核地质科学, 2025, 42(2): 360-373. doi: 10.3969/j.issn.1672-0636.2025.02.011

LU Huixiong, LI Qiliang, XUE Qing, et al. Identification of black odorous water bodies and  $\text{NH}_3\text{-N}$  inversion study based on Gaofen-2 remote sensing data[J]. World Nuclear Geoscience, 2025, 42(2): 360-373 (in Chinese).

## 基于高分二号遥感数据的黑臭水体识别和氨氮反演研究

卢辉雄<sup>1,3,4</sup>, 李启亮<sup>2</sup>, 薛庆<sup>1,3</sup>, 张策<sup>1,3</sup>, 孙永彬<sup>1,3</sup>, 韩少飞<sup>1</sup>, 牛海威<sup>1</sup>

- 核工业航测遥感中心, 河北 石家庄 050002
- 河北航遥科技有限公司, 河北 石家庄 050002
- 河北省航空探测与遥感技术重点实验室, 河北 石家庄 050002
- 中核三维地理信息工程技术研究中心, 河北 石家庄 050002

**摘要** 随着政府部门在水污染防治工作上的不断推进, 水环境出现了大幅改善, 但在工业区、畜禽养殖场等污染源附近的水体仍然容易反黑反臭, 如何识别这些因污水排放导致氨氮含量超标的黑臭水体是迫切需要解决的问题。本次研究以收集的30处氨氮超标的黑臭水体为样本, 提出一种基于高分二号遥感数据的黑臭水体识别和氨氮反演方法, 通过组合多种黑臭水体波段比值识别算法和多种阈值分割算法, 获得适用于研究区的黑臭水体识别组合算法并对研究区进行黑臭水体识别, 分析各波段比值算法因子和氨氮实测值的相关性, 对识别的黑臭水体中氨氮含量进行反演, 获得氨氮的空间分布图以发现疑似排污点位置。结果表明: 1) BOCI、WCI、FUI和e4共4种算法, 对黑臭水体和一般水体的可分离度较高, BOCI-OSTU和BOCI-平均值两种算法组合在预测集样本上分割效果最好, BOCI在各阈值算法中发挥最为稳定; 2) BOCI-OSTU、BOCI-平均值和WCI-最小值对黑臭水体的识别效果相对较好; 3) 在识别到黑臭水体后, BOI和G-R算法与实测氨氮值的相关性最高, 决定系数分别是0.6和0.58, 能较好地解释实测氨氮值的变化, 可作为反演氨氮的因子; 4) 利用BOI算法对研究区内的3条沟渠进行氨氮反演, 获得氨氮空间分布图, 给出疑似排污位置。因此, 该技术可为政府部门提供高效的黑臭水体排查服务, 为生态环境监测提供技术支持。

**关键词** 黑臭水体; 高分二号遥感数据; 氨氮; 波段比值; 阈值

中图分类号 TP79 文献标志码 A 文章编号 1672-0636 (2025) 02-0360-14

## Identification of black odorous water bodies and $\text{NH}_3\text{-N}$ inversion study based on Gaofen-2 remote sensing data

LU Huixiong<sup>1, 3, 4</sup>, LI Qiliang<sup>2</sup>, XUE Qing<sup>1, 3</sup>, ZHANG Ce<sup>1, 3</sup>, SUN Yongbin<sup>1, 3</sup>, HAN Shaofei<sup>1</sup>, NIU Haiwei<sup>1</sup>

1 Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, China

2 Hebei Airborne Survey and Remote Sensing Technology Co., Shijiazhuang 050002, China

3 Key Laboratory of Airborne Survey and Remote Sensing, Shijiazhuang 050002, China

4 CNCN Engineering Research Center of 3D Geographic Information, Shijiazhuang 050002, China

**基金项目:** 河北省航空探测与遥感技术重点实验室科研项目“基于高分遥感的黑臭水体研究”(编号: 202418)

**收稿日期:** 2024-12-31 **改回日期:** 2025-02-21

**第一作者:** 卢辉雄, 男, 1988年生, 高级工程师, 主要从事遥感技术应用研究。E-mail: 1551310706@qq.com

Supported by Research on Black and Odorous Waters Based on High-Resolution Remote Sensing (No.202418)

**Received date:** 2024-12-31 **revised date:** 2025-02-21

**First author:** LU Huixiong, male, born in 1988, senior engineer, focusing on remote sensing technology and application. E-mail: 1551310706@qq.com

**Abstract:** With the continuous promotion of government departments in water pollution prevention and control, the water environment has seen a substantial improvement, but the water bodies near pollution sources such as industrial zones and livestock and poultry farms are still prone to be black and odorous. How to identify these black stinking water bodies with excessive ammonia and nitrogen content is an urgent problem. 30 black stinky water bodies with excessive ammonia nitrogen were collected and assayed to study the identification inversion method for Gaofen-2 remote sensing data. By combining multiple band ratio and threshold segmentation algorithms, a combination algorithms applicable to the study area was obtained to identify the stinky water body and black stinky water by the correlating band ratio and the measured ammonia nitrogen. With the combination algorithms, ammonia nitrogen content of black smelly water bodies was inverted to identify the spatial distribution so as to discover the suspected sewage point position. The results were showed as the following: 1) BOCI, WCI, FUI and e4 algorithms had a high separability between black smelly water bodies and general water bodies, the mean value combination of BOCI-OSTU and BOCI had the best segmentation effect on the samples of the prediction set while BOCI played the most stable role among the threshold algorithms; 2) BOCI-OSTU, BOCI-mean value and WCI-Minimum are relatively effective in identifying black stinking water bodies; 3) the BOI and G-R algorithms have the highest correlation of measured ammonia nitrogen values to the decision coefficients at 0.6 and 0.58 respectively; 4) The ammonia nitrogen inversion was performed on three ditches within the study area using the BOI algorithm, and the ammonia nitrogen spatial distribution maps were obtained to present the suspected discharge locations. Therefore, this technique can provide efficient black stinky water body investigation service for government departments and technical support for ecological environment improvement.

**Keywords:** black odorous waters; Gaofen-2 remote sensing data; ammonia nitrogen; band ratio; thresholds

黑臭水体作为一种极端的水体污染现象,指的是在水体中呈现出令人不悦的颜色和(或)散发出令人不适气味的统称<sup>[1]</sup>。随着政府部门在水污染防治工作上的不断推进,水环境出现了大幅改善,但在工业区、畜禽养殖场等污染源附近的水体仍然容易反黑反臭,该类黑臭水体由于粪污和工业污水的排入导致氨氮含量超标,不仅影响景观和生态环境,而且对居民健康和生活质量也造成了严重影响。

传统水质调查手段多以地面调查为主,难以实现大范围地区黑臭水体的识别和水质参数的空间数据获取。高分辨率影像由于兼具宏观与微观的特性<sup>[2]</sup>,具有丰富的空间信息、明显的地物形状和轮廓结构<sup>[3]</sup>,因此配合实地调查可有效解决上述问题。黑臭水体识别中利用波段比值算法进行识别的研究较为广泛,如归一化黑臭水体指数、水体清洁指数<sup>[4]</sup>,归一化黑臭水体指数<sup>[5]</sup>,黑臭水体归一化比值模型<sup>[6]</sup>,黑臭水体增强指数,归一化黑臭水体指数<sup>[7]</sup>,城

市黑臭水体分级指数<sup>[8]</sup>,基准高度法<sup>[9]</sup>,黑臭水体识别模型,黑臭水体多光谱遥感指数<sup>[10]</sup>,黑臭水体图像反射率指数<sup>[11]</sup>,以及基于CIE色度空间和福莱尔比色表<sup>[12]</sup>的方法,这些算法在推动黑臭水体识别技术发展中发挥重要作用。但这些研究存在以下几个问题:1)大部分算法需要手动设置阈值,在大范围地区难以快速应用,且阈值选取过渡依赖样本;2)对影响黑臭水体形成的最重要参数氨氮反演关注较少。

氨氮含量是判断水体黑臭程度的关键指标。目前,国内外通常采用中分辨率遥感影像作为水体水质反演的数据源,如吴奇等利用Landsat-8遥感影像对河流总氮和氨氮水质指标进行了反演<sup>[13]</sup>,莫锦英等利用Sentinel-2遥感影像对养殖池的氨氮进行了反演<sup>[14]</sup>,这些方法对较大面积的河流湖泊效果显著,但对黑臭水体频发的较窄河流沟渠作用有限。近年来,随着低空经济的大力发展,无人机影像也成为了水体水质反演的重要数据源,何炜琪等利用无人机影像对城市河道进行了氨氮反演<sup>[15]</sup>,徐

晓军等利用无人机影像对湖泊总磷、氨氮和叶绿素 a 浓度进行了反演<sup>[16]</sup>,无人机影像分辨率高,但影像获取范围有限,难以应用到省、市等大范围的黑臭水体识别中。

国产高分卫星数据对比中分辨率卫星能识别更小的水体,同时比无人机影像具备更广的识别区域,非常适宜应用在大范围黑臭水体识别与氨氮反演应用中,但相关应用较少。吴迪等利用高分二号遥感数据对河流水质进行了反演<sup>[17]</sup>,但该研究仅给出了定性的反演结果。Xi Zhu 等利用高分一号遥感数据对河网的氨氮、总磷等水质参数进行了反演<sup>[18]</sup>。

本文提出一种基于高分二号遥感数据的黑臭水体识别和氨氮反演方法,应用多种黑臭水体波段比值识别算法和多种阈值分割算法,评价“识别-阈值”组合算法在研究区黑臭水体识别的适用性,建立适用于高分二号遥感数据的研究区黑臭水体识别最优组合算法;通过分析各波段比值算法因子和氨氮实测值的相关性,定量反演黑臭水体中的氨氮含量,综合黑臭水体识别与氨氮反演结果排查与找出研究区疑似排污企业,为相关部门的执法与决策提供数据支撑。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据源

基于 2024 年 5 月至 10 月的 14 景高分二号遥感数据,对河北省环渤海地区的黑臭水体进行遥感综合识别和野外核查。收集到氨氮超标的黑臭水体点位共 102 处,调查时使用“目测+水质检测+无人机拍照”的方式,在野外使用纳氏试剂分光光度法<sup>[19]</sup>测量水体中氨氮(NH<sub>3</sub>-N)含量,测量过程严格遵守氨氮检测仪(LH-M900)操作规范。为了确保样本的一致性,首先排除基于冬季影像识别的黑臭水体点位,其次为了减少因时间因素造成的误差,排除氨氮测量时间和影像拍摄时间两者时间基线较长的点位,将剩余的氨氮含量高于 8 mg×L<sup>-1</sup>的 30 处黑臭水体作为样本。另外从影像中的大型水库、城市公园水体和蓝绿色河流水体内部,随机收集 50 处点位作为非黑臭水体及一般水体样本(图 1)。

### 1.2 黑臭水体光谱特性

黑臭水体在光谱反射率上与一般水体显著差异,特别是可见光和近红外波段。黑臭水体的光谱曲线在 550 nm 至 700 nm 范围内较为平缓<sup>[4]</sup>,与一般水体的光谱曲线区别明显,由水体中的有机物和悬浮颗粒对光的吸收作用较强引起<sup>[2]</sup>。相反,在红光波段和近红外波段,黑臭水体的反射率相对较高,与悬浮颗粒物、有机物的后向散射作用增强有关(图 2)。此外,悬浮泥沙浓度增加会导致水体反射峰向 600 nm 以上的长波方向移动,是黑臭水体的普遍现象。

高分二号卫星影像由 0.8 m 空间分辨率的全色波段和 3.2 m 空间分辨率的多光谱波段组成,涵盖了蓝(491 nm)、绿(555 nm)、红(665 nm)和近红外(821 nm)4 个光谱范围,具有较高的空间分辨率和丰富的光谱信息<sup>[3]</sup>,同时与黑臭水体的关键光谱特征波段高度匹配,能够有效捕捉黑臭水体的光谱特征,是黑臭水体遥感识别的理想数据源。

### 1.3 黑臭水体识别算法

本文选择适用于高分二号遥感数据的 15 种黑臭水体波段比值算法(表 1)与 6 种阈值分割算法(表 2)进行组合,对“识别-阈值”组合算法结果进行适用性评价,旨在找出黑臭水体识别的最优算法组合。

### 1.4 黑臭水体氨氮反演算法

对能够反映氨氮容量变化的多个波段比值算法因子进行 Pearson 相关性分析和广义线性模型分析,检验相关要素与氨氮实测值的相关性,确定能够反映氨氮容量变化的显著算法因子。Pearson 计算公式如式(1):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

式(1)中: $r$ —相关系数; $x_i$ —氨氮实测值; $\bar{X}$ —氨氮实测数据平均值; $y_i$ —波段比值算法值; $\bar{Y}$ —波段比值算法结果平均值。

根据上述结果使用回归分析建立波段比值算法与氨氮容量的关系,建立回归方程,根据遥感影像值计算波段比值算法进而反演氨氮容量。

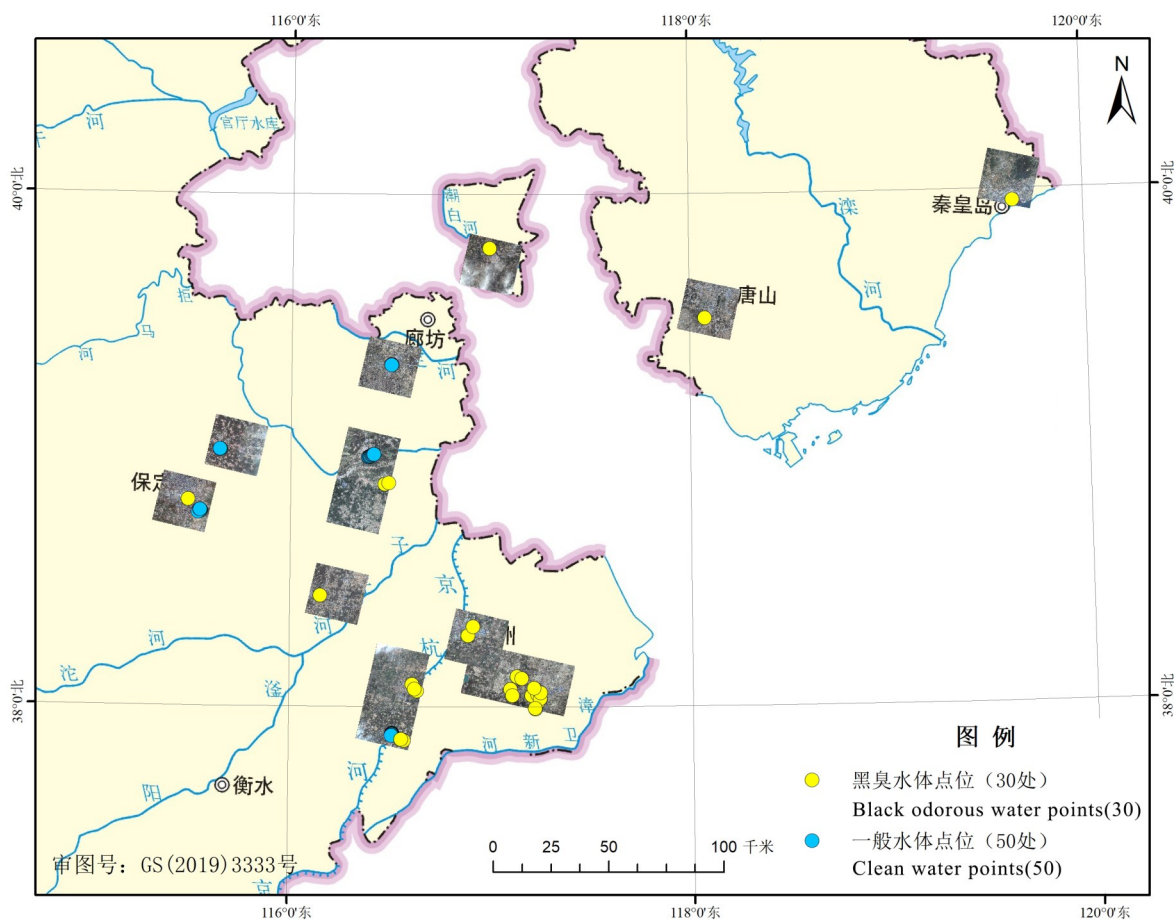


图1 黑臭水体和一般水体样本点分布位置图(据审图号:GS(2019)3333号)

Fig. 1 Sample distribution of black odorous water bodies and general water bodies

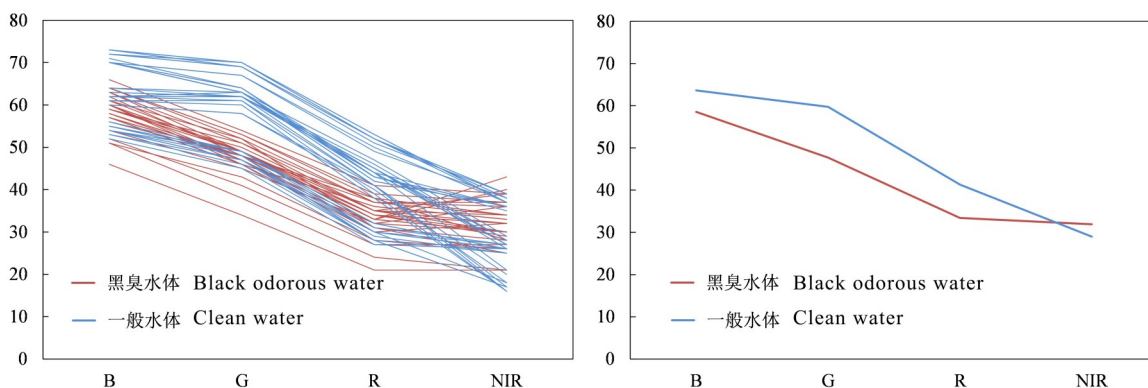


图2 黑臭水体样本和一般水体样本光谱曲线图

Fig. 2 Spectral curves of black and odorous water samples and general water samples

### 1.5 适用性评价

首先采用欧氏距离(ED)评价各黑臭水体波段比值算法中黑臭水体和一般水体的可分离度(公式2);之后选取可分离度最高的6种黑臭水体波段比值算法,与6种阈值分割算法进行组合,形成“识别-阈值”的组合算法;最后采

用F1 Score精度评价指标来验证“识别-阈值”组合算法对黑臭水体和一般水体自动分类结果的准确度(公式3)。

欧氏距离(ED)计算公式如式(2),欧氏距离越大,代表2个类别间的可分性越强,反之,则表示可分性越弱<sup>[20]</sup>,:

表 1 黑臭水体波段比值算法表

Table 1 Algorithm list of band ratio for black odorous water bodies

算法名称	简称	公式	作者/年份	参考文献
归一化黑臭水体指数 水体清洁指数	WCI	$\frac{(G - B)/(\lambda_G - \lambda_B)}{(R - B)/(\lambda_R - \lambda_G)}$	李佳琦, 2017	[2]
归一化黑臭水体指数	G-R	$\frac{G - R}{G + R}$	温爽, 2018	[3]
黑臭水体归一化比值模型	BOI	$\frac{G - R}{B + G + R}$	姚月, 2018	[4]
黑臭水体增强指数	EHI	$\frac{NIR + R - B}{NIR + R + B}$	姚焕玫, 2019	[5]
归一化黑臭水体指数	NDBWI	$\frac{B + G + R - NIR}{B + G + R + NIR}$	姚焕玫, 2019	[5]
城市黑臭水体分级指数	BOCI	$\left( G - \left( B + \frac{(R - B) * (\lambda_G - \lambda_B)}{\lambda_R - \lambda_B} \right) \right) / R$	七珂珂, 2019	[6]
基准高度法	BH	$\left( G - \left( B + \frac{(R - B) * (\lambda_G - \lambda_B)}{\lambda_R - \lambda_B} \right) \right)$	Qian Shen, 2019	[7]
黑臭水体识别模型	BOIM	$\frac{R - \left( B + \frac{(R - B) * (\lambda_G - \lambda_B)}{\lambda_R - \lambda_B} \right)}{R + \left( B + \frac{(R - B) * (\lambda_G - \lambda_B)}{\lambda_R - \lambda_B} \right)}$	张宁宁, 2022	[8]
黑臭水体多光谱遥感指数	BOMRI	$\left( B + \frac{NIR - B}{\lambda_{NIR} - \lambda_B} * (\lambda_R - \lambda_B) \right) / R$	张宁宁, 2022	[8]
黑臭水体图像反射率指数	BIR	$\frac{(NIR - R)/(\lambda_{NIR} - \lambda_R)}{(G - R)/(\lambda_R - \lambda_G)}$	刘冰, 2024	[9]
CIE 色度空间和福莱尔比色表	Forel-Ule Scale	ARCTAN2(y - 0.333 3x - 0.333 3)	NOVOA S, 2013	[10]
e1	e1	NIR/G	刘冰, 2024	[9]
e2	e2	(NIR - R)/(NIR + R)	刘冰, 2024	[9]
e3	e3	$\frac{NIR - R}{G + R + NIR}$	刘冰, 2024	[9]
e4	e4	$\frac{NIR + B - R}{B + G + R + NIR}$	刘冰, 2024	[9]

注:  $\lambda_B$ 、 $\lambda_G$ 、 $\lambda_R$ 和 $\lambda_{NIR}$ 分别为蓝、绿、红和近红外波段的中心波长, 对于GF-2影像,  $\lambda_B=491$  nm,  $\lambda_G=555$  nm,  $\lambda_R=665$  nm,  $\lambda_{NIR}=821$ nm, x和y表示CIE色度坐标。

表 2 黑臭水体阈值分割算法表

Table 2 Algorithm list of threshold for odorous water bodies

算法名称	公式	说明
原始阈值		各算法默认原始阈值
Otsu	$\sigma_B^2 = \omega_0 \cdot \omega_1 \cdot (\mu_0 - \mu_1)^2$ $t = \arg \max_t \{ \sigma_B^2 \}$	式中: $\omega_0$ 和 $\omega_1$ 分别是前景和背景的像素概率; $\mu_0$ 和 $\mu_1$ 分别是前景和背景的灰度均值; $t$ —选择使类间方差最大的阈值
平均值	$t = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} i \cdot p(i)$	式中: $p(i)$ —灰度级 <i>i</i> 的概率; $L$ —灰度级总数
最小交叉熵	$H(t) = \sum_{i=0}^t i \cdot h_i \cdot \ln \frac{i}{u_0(t)} + \sum_{i=t+1}^{L-1} i \cdot h_i \cdot \ln \frac{i}{u_b(t)}$ $t = \arg \min_{0 \leq t \leq L-1} \{ H(t) \}$	式中: $h_i$ —灰度级 <i>i</i> 的直方图值; $u_0(t)$ 和 $u_b(t)$ 分别是前景和背景均值。
最小值	$t = \arg \min_{0 \leq t \leq L-1} \{ h(t) \}$	式中: $h(t)$ —直方图的值
三角形	$t = \frac{L-1}{2} - \frac{\sum_{i=0}^{L-1} \left( i - \frac{L-1}{2} \right) \cdot h(i)}{\sum_{i=0}^{L-1} h(i)}$	式中: $h(i)$ —直方图的值; $L$ —灰度级总数

$$ED = \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2} \quad (2)$$

式(2)中:  $i$ —类别;  $N$ —类别总数; 当计算类内距离时,  $X_i$ —某一类别对应的黑臭水体识别算法值;  $Y_i$ —该类别对应的黑臭水体识别算法值均值, 当计算类间距离时,  $X_i$ —黑臭水体类别对应的算法结果均值,  $Y_i$ —一般水体类别对应的算法结果均值。

F1 Score 公式如式(3), 通过查准率( $P_1$ )、查全率( $P_2$ )综合计算得到:

$$\begin{cases} P_1 = \frac{TP}{TP + FP} \times 100\% \\ P_2 = \frac{TP}{TP + FN} \times 100\% \\ F1 = \frac{2 \times P_1 \times P_2}{P_1 + P_2} \times 100\% \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中:  $TP$ —组合算法识别为黑臭水体且实际为黑臭水体的数量;  $FP$ —组合算法识别为黑臭水体但实际为非黑臭水体的数量;  $FN$ —组合算法识别为一般水体但实际为黑臭水体的数量。

## 2 结果分析

### 2.1 黑臭水体识别算法适用性评价

#### 2.1.1 黑臭水体识别算法可分离度评价

通过欧式距离评估各算法对黑臭水体和一般水体的可分离度(表3)结果显示, BOCI、WCI、FUI 和 e4 四种算法在黑臭水体和一般水体的区分上表现出较高的可分离度, 其他 11 种算法在该场景中可分尤其 BOCI 算法在所有评价指标中表现最为出色, 表明其对黑臭水体和一般水体的区分能力较强。

#### 2.1.2 “识别-阈值”组合算法适用性评价

本文对表3中排名前6位的波段比值算法(BOCI、WCI、FUI、e4、BOMRI 和 BIR)分别应用 OSTU 算法、最小值法、平均值法、三角形法、最小交叉熵法和各算法定义的原始阈值进行阈值分割(图3)和 F1 Score 精度评价(表4)。

表4结果显示, BOCI-OSTU 和 BOCI-平均值两种算法组合在预测集上分割效果最好, F1

表3 黑臭水体波段比值算法欧式距离表

Table 3 Euclidean distance of band ratio algorithm for black odorous water

波段比值算法	欧式距离 (ED)	排名 (Rank)	波段比值算法	欧式距离 (ED)	排名 (Rank)
BOCI	0.62	1	e2	0.27	9
WCI	0.53	2	NDBWI	0.26	10
FUI	0.52	3	BOIM	0.18	11
e4	0.45	4	BOI	0.10	12
BOMRI	0.29	5	G-R	0.04	13
BIR	0.28	6	EHI	0.03	14
e1	0.28	7	BH	0.02	15
e3	0.27	8			

表4 黑臭水体“识别-阈值”组合算法准确率评价表

Table 4 Accuracy evaluation of the “Identification Threshold” combination algorithm for black odorous water

阈值算法	波段比值算法	F1 Score (F1)	排名 (Rank)
原始阈值	WCI	0	34
	e4	0.78	14
	BOCI	0.55	33
	BIR	0	34
	FUI	0.95	3
	BOMRI	0	34

表 2 (续)

阈值算法	波段比值算法	F1 Score (F1)	排名 (Rank)
最小交叉熵	WCI	0.71	24
	e4	0.69	29
	BOCI	0.93	5
	BIR	0.71	24
	FUI	0.71	24
	BOMRI	0.72	19
OSTU	WCI	0.73	17
	e4	0.75	15
	BOCI	1	1
	BIR	0.72	19
	FUI	0.72	19
	BOMRI	0.71	24
三角形	WCI	0.59	31
	e4	0.8	12
	BOCI	0.81	8
	BIR	0.81	8
	FUI	0.81	8
	BOMRI	0.75	15
最小值	WCI	0.95	3
	e4	0.56	32
	BOCI	0.93	5
	BIR	0.71	24
	FUI	0.63	30
	BOMRI	0.72	19
平均值	WCI	0.87	7
	e4	0.79	13
	BOCI	1	1
	BIR	0.73	17
	FUI	0.81	8
	BOMRI	0.72	19

Score 均达到 100 % ,表明 BOCI 算法在结合 OSTU 和平均值法时,能够有效地识别黑臭水体,具有较高的鲁棒性和准确性。FUI 算法的原始阈值在预测集仍然有很好的分割效果,e4 和 BOCI 算法的原始阈值在研究区效果一般,WCI、BIR 和 BOMRI 算法的原始阈值在研究区不具备可分性;FUI-原始阈值、WCI-最小值、BOCI-最小交叉熵和 BOCI-最小值算法组合也达到很好的分割效果。

本研究针对高分二号遥感数据,采用表 3 中排名前 6 位的黑臭水体波段比值算法,对研究区内工业区附近的沟渠内黑臭水体进行识别(图 4)。BOCI-OSTU、BOCI-平均值和 WCI-最小值对黑臭水体的识别效果相对较好,分类

边界处较平滑,不存在明显的数值跳跃和“椒盐”现象;FUI-原始阈值存在黑臭水体的过度识别问题,将 EW 向沿村庄分布的沟渠、酒厂附近的清洁沟渠和公园水体错分为黑臭水体,这可能与水体水草较多导致水体呈灰黑色导致,或基于水色的原始阈值并不具备很好的大范围适用性,虽在预测集中精度较高,但研究区结果显示仍需根据地区进行阈值调整;BOCI-最小交叉熵和 BOCI-最小值对黑臭水体的识别效果相对较差,分类边界处较粗糙,黑臭水体内存有明显的数值跳跃和“椒盐”现象,存在黑臭水体过少识别问题。以上结果符合野外核查时黑臭水体的分布规律,检验该方法的精度和可靠性。

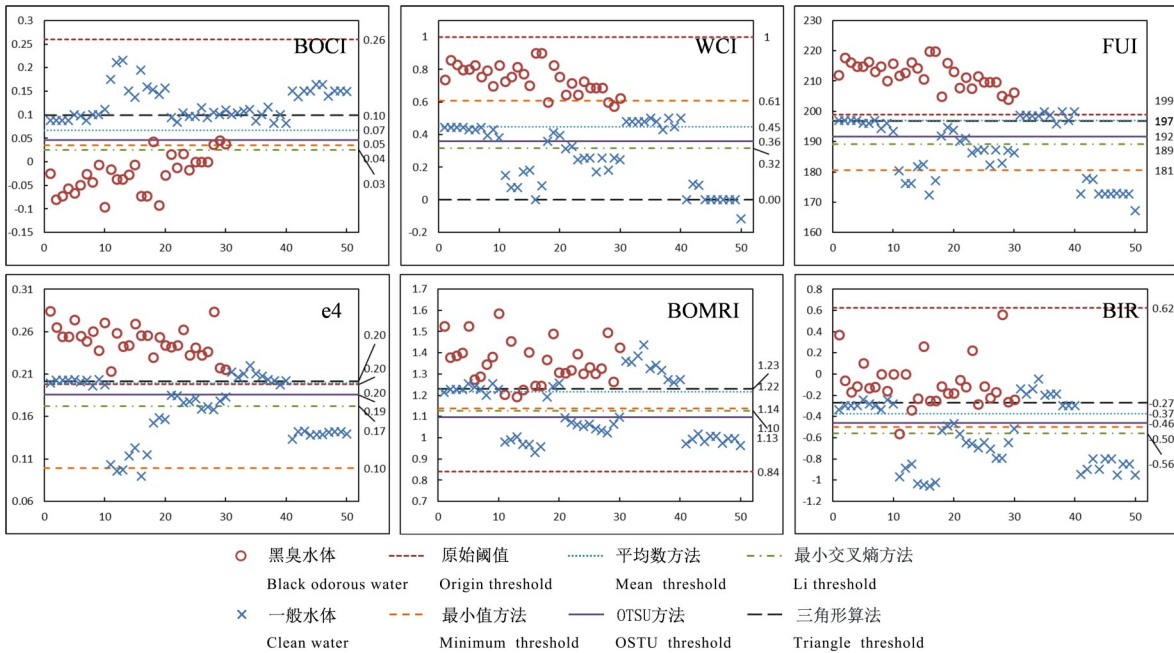


图 3 “识别-阈值”组合算法散点图

Fig. 3 Scatter plot of the “Identification Threshold” combination algorithm

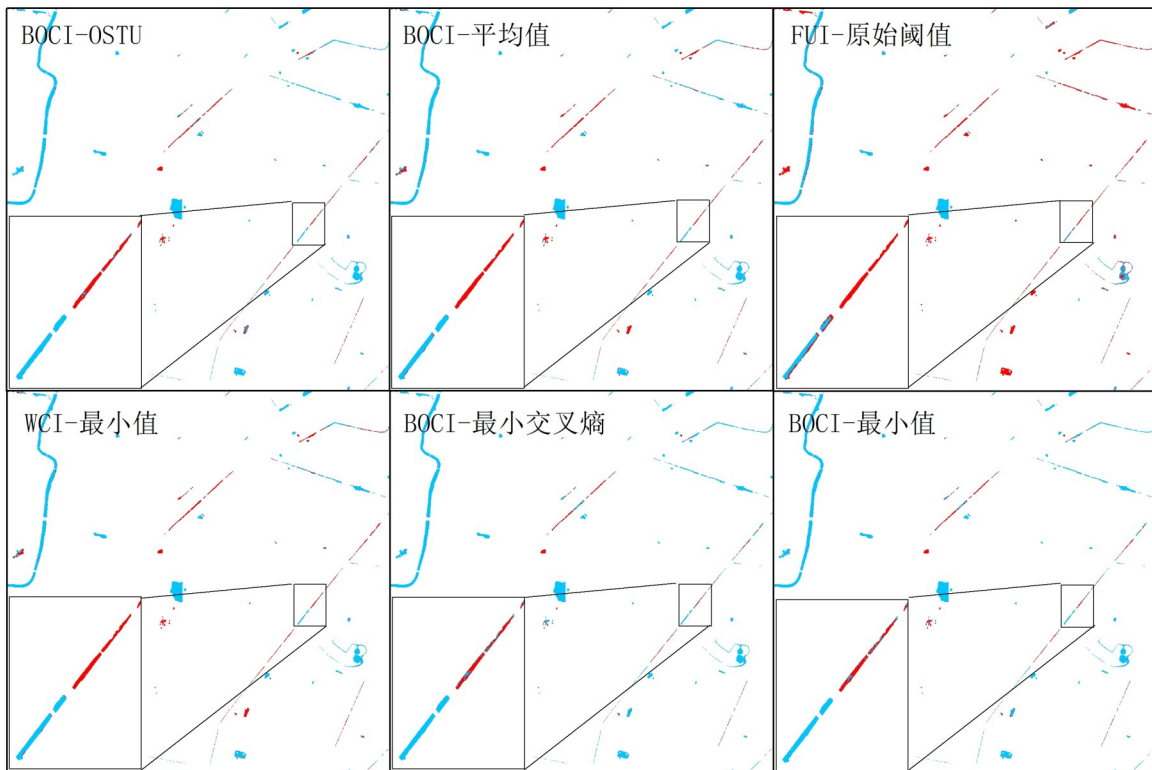


图 4 多算法检测某地疑似黑臭水体空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution map of multi algorithm detection for suspected black odorous water

## 2.2 氨氮反演模型构建

### 2.2.1 相关性分析

利用多数投票法将前述 6 种黑臭水体波段

比值算法结果按照众数进行计算,将 4 种及 4 种以上算法认为属于黑臭水体的像素作为最终的疑似黑臭水体分布范围。对能够反映氨

氮容量变化的多个波段比值算法因子进行 Pearson 相关性分析(图 5), 检验相关要素与氨氮实测值的相关性。

结果显示: BOI、G-R、BOMRI、WCI、Pe、EHI 和 BOIM7 个算法的结果概率小于显著性水

平 0.05, BOI 和 G-R 算法与实测氨氮值的相关性最高, 相关系数分别为 0.78 和 0.76, 这表明 BOI 和 G-R 算法能够较好地解释实测氨氮值的变化, 适合作为氨氮反演的因子。

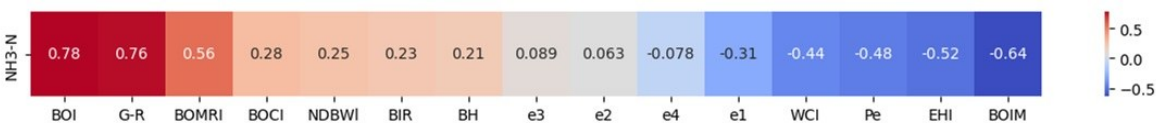


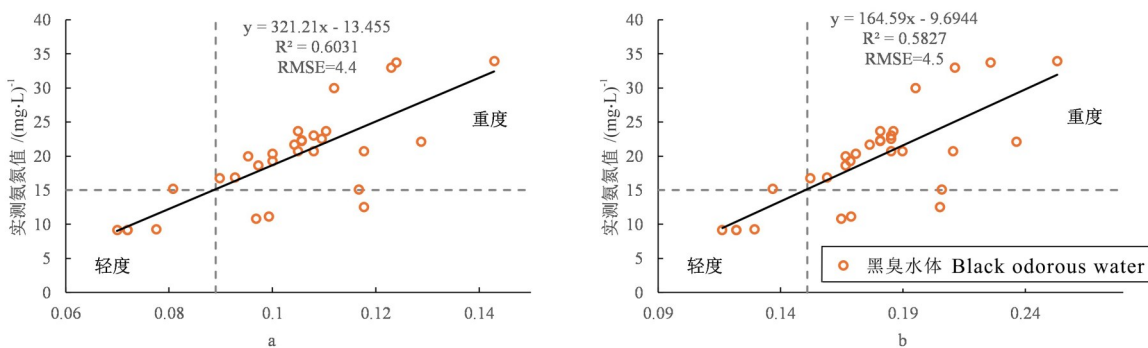
图 5 实测氨氮值与多算法因子相关性图

Fig. 5 Correlation diagram between measured ammonia nitrogen value and multi algorithm factors

2.2.2 回归模型建立

基于 BOI 和 G-R 算法, 建立回归模型, 对研究区内的黑臭水体进行氨氮含量反演, 并通

过实地测量的氨氮数据对模型进行验证。并分别与氨氮值进行回归分析, 计算决定系数(图 6)。



a—BOI算法; b—G-R算法。

a—BOI algorithm value; b—G-R algorithm value.

图 6 实测氨氮值与波段比值算法的散点图

Fig. 6 The scatter plot of measured ammonia nitrogen value and band ratio value

结果显示: BOI 算法决定系数较高, 能较好地解释氨氮值的变化, G-R 算法决定系数较 BOI 算法低, 与 BOI 相差较小。黑臭水体识别中适应性较高的 BOCI 算法, 在反演过程中与氨氮的相关性较低, 表明该算法更适用于从黑臭水体和一般水体混杂样本, 将黑臭水体提取出来; 而 BOI 与 G-R 算法更适用于从黑臭水体样本中反演出氨氮含量。

2.3 氨氮反演结果与验证

针对 2024 年 5 月 1 日高分二号遥感数据, 采用 BOI 算法对研究区内的 3 条沟渠进行氨氮反演, 获得氨氮空间分布图(图 7)。图 7a1、7b1 和 7c1 为影像底图, 图 7a2、7b2 和 7c2 为叠加 BOI 算法产生的氨氮预测值。

图 7a1 显示沟渠呈深灰色和暗紫色。中部和西南侧部分沟渠段由于东岸生长高大树木, 产生的阴影使河面形成斑杂灰黑色块, 导致氨氮值较高, 属于噪声部分, 东北端氨氮值较高(图 7a2), 水体未受到阴影影响, 表明污水排放企业可能位于氨氮值较高的沟渠东北端附近; 黑臭水体 a 点处野外实测氨氮含量  $10.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 反演氨氮含量  $17.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 可能受水体中树木阴影影响造成反演含量较高, 野外照片(图 8a)显示该沟渠水体呈灰黑色, 有刺激性气味。

图 7b1 显示沟渠呈暗紫色和深绿色。东段位于村庄附近, 图 7b2 显示东段东侧氨氮值较西侧更高, 表明污水排放位置可能位于东段东侧小桥处, 中段和西南段氨氮值较高, 西南段

非污染部分河流呈浅绿色, 污染段和非污染段相连同属一条沟渠, 但污染程度截然相反, 污染段沟渠水体因封闭不流通导致氨氮浓度较高, 污水排放位置可能位于沟渠中部; 黑臭水体 b 点处野外实测氨氮含量  $20.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 反演氨氮含量  $17.81 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 野外照片(图 8b)显示该沟渠水体呈灰黄色, 有轻微刺激性气味, 一般水体 b 点处实测氨氮含量  $3.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 小于轻度黑臭水体标准, 野外照片(图 8c)显示水体呈浅绿色。

图 7c2 显示该段沟渠呈黑色, 与西侧清洁河段水体的绿色形成鲜明对比, 该段氨氮值较前两条沟渠更高, 西侧与河流连接段氨氮值较低, 沟渠流入河流处未见明显污染扩散痕迹, 表明该段沟渠封闭且污水来源于东侧工厂。黑臭水体 c 点处野外实测氨氮含量  $33.96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 反演氨氮含量  $31.29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 由图 7c2 可知, 西侧沟渠氨氮含量较点处更高, 野外照片(图 8d)显示该沟渠水体呈灰黄色, 有刺激性气味。



图 7 氨氮预测值空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution map of predicted ammonia nitrogen values

### 3 讨论

#### 3.1 结合人工判识黑臭水体的必要性

黑臭水体的自动识别结果仍需结合遥感影像进行进一步的环境分析与综合判别。氨氮容量高的黑臭水体与污染源存在较强的联系, 工业区、畜禽养殖场和城乡结合部的小型作坊(图 9), 是产生氨氮污染的强污染源, 当

遥感影像上的这些地区周围存在颜色发黑的沟渠、河流或坑塘时, 且自动识别结果也认为其属于黑臭水体时, 该水体应当重点关注。城市公园和城区内较宽河流两岸是产生氨氮污染的弱污染源, 当遥感影像上的这些地区水体经自动识别认为其属于黑臭水体时, 应谨慎对待自动识别结果, 特别存在较多的数值跳跃和“椒盐”现象时, 可能不属于黑臭水体。



a—图 7a2 中的黑臭水体 a；b—图 7b2 中的黑臭水体 b；c—图 7b2 中的一般水体 b；d—图 7c2 中的黑臭水体 c。

图 8 黑臭水体和一般水体野外照片

Fig. 8 Photos of black odorous water and general water



图 9 工业区、畜禽养殖场和小型作坊黑臭水体遥感影像特征

Fig. 9 Remote sensing image of black and odorous water bodies in industrial zones , poultry farms and small workshops

### 3.2 氨氮反演与测量条件分析

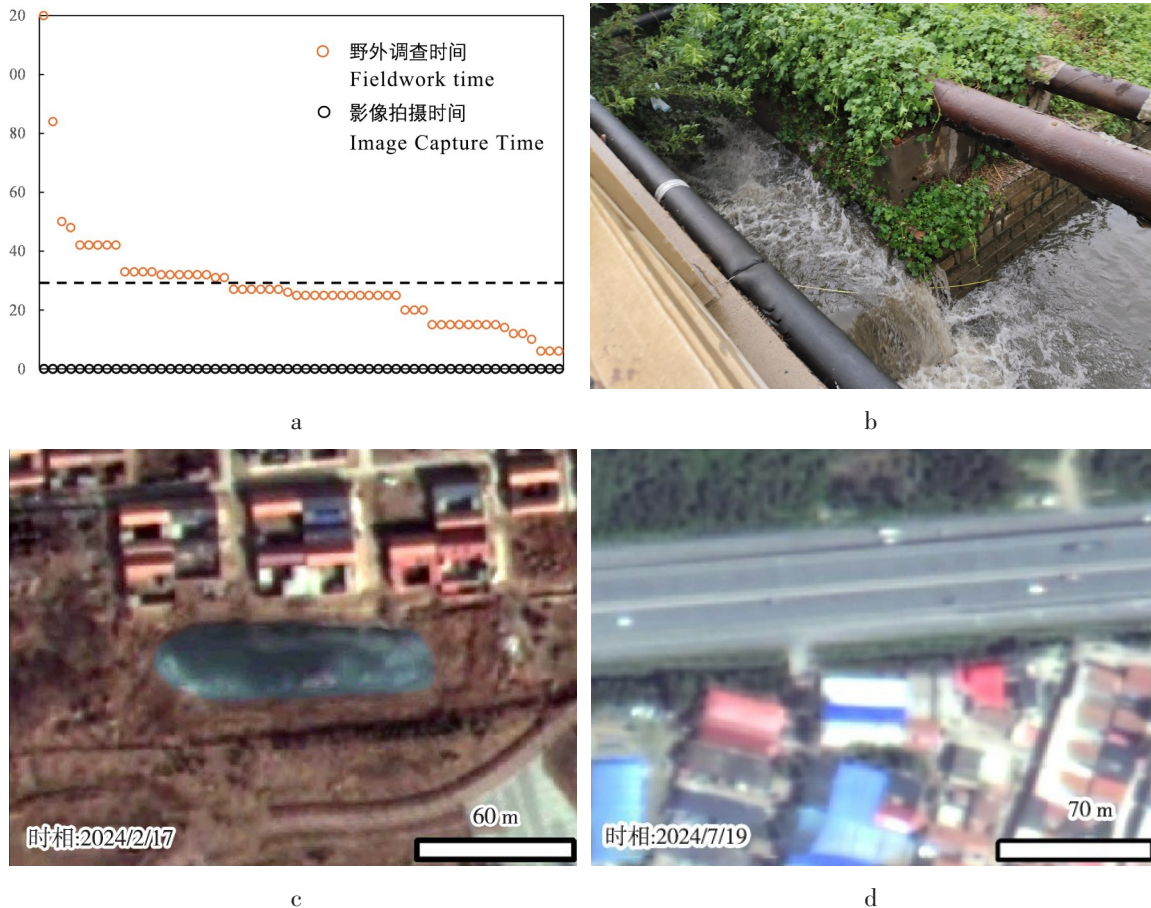
在人为未加干预治理的自然条件下,水中的氨氮降解速度相对较慢,特别是坑塘和封闭的沟渠段氨氮容量随时间的变化较小,这也为大面积范围高分影像反演氨氮提供了可能。因此,氨氮反演应选择氨氮测量时间和影像拍

摄时间两者时间基线较短的点位,尽量减少因时间因素造成的氨氮降解带来的反演误差(图 10a)。但工业污水排放存在突发性和偶然性,因此在氨氮与多因素相关分析过程中,剔除了个别异常值,这些异常值是由于调查时污水正在排放或排放不久(图 10b),氨氮容量处于非

常高的水平,与遥感影像拍摄时间期间不同,水质发生了突变。

冬季遥感影像中的水体疑似存在结冰状态(图 10c),与夏秋季节水体状态不同,因此将依靠

冬季影像筛查的黑臭水体点位剔除。部分前期筛查出的黑臭水体点位位于非常狭窄的沟渠(图 10d),在高分二号遥感影像上水体部分存在混合像元问题,因此将该类黑臭水体点位也剔除。



a—时间间隔统计图; b—降雨期间排污野外照片; c—冬季黑臭水体影像图; d—狭窄黑臭水体影像图。

图 10 氨氮误差反演案例

Fig. 10 Case study of NH<sub>3</sub>-N error inversion

### 4 结 论

本文提出了一种基于高分二号遥感数据的黑臭水体识别和氨氮反演方法,经优选得到适用于研究区的黑臭水体识别组合算法,利用该组合算法对研究区进行黑臭水体识别,对识别到的黑臭水体进行了氨氮含量反演,经分析研究形成如下结论。

1)BOCI、WCI、FUI 和 e4 共 4 种算法,对黑臭水体和一般水体的可分离度显著较高,BOCI-OSTU 和 BOCI-平均值两种算法组合在预测集样本上分割效果最好,准确率均达到 100%,F1 Score 平均值为 93.36%,BOCI 算法

更适用于从黑臭一般混杂的水体样本中将黑臭水体提取出来,BOCI-OSTU、BOCI-平均值和 WCI-最小值 3 种组合算法对研究区黑臭水体的识别效果较好。

2)在识别到黑臭水体后,BOI 和 G-R 算法与实测氨氮值的相关性最高,决定系数分别是 0.6 和 0.58,能较好地解释实测氨氮值的变化,BOI 与 G-R 算法更适用于从黑臭水体样本中反演出氨氮含量。

3)利用 BOI 算法对研究区内的 3 条沟渠进行氨氮反演,获得氨氮空间分布图,给出疑似排污位置,该技术可为政府部门提供高效的黑臭水体排查服务,为生态环境监测提供技术支持。

## 参考文献

- 住房和城乡建设部,环境保护部.城市黑臭水体整治工作指南[EB/OL]. [2022-06-17]. [http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201509/t20150911\\_224828.html](http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201509/t20150911_224828.html) Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Ministry of Environmental Protection. Guidelines for remediation of urban black smelly water bodies [EB/OL]. [2022-06-17]. [http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201509/t20150911\\_224828.html](http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201509/t20150911_224828.html)
- 魏本赞,张策,张恩,等.基于WorldView-2高分影像信息增强及提取在卡而却卡地区遥感调查中的应用[J].世界核地质科学,2024,41(5):1013-1022.  
WEI Benzhan, ZHANG Ce, ZHANG En, et al. Application of information enhancement and extraction based on WorldView-2 high-resolution imagery in remote sensing survey of Kachchoka area[J]. World Nuclear Geoscience, 2024, 41(5): 1013-1022 (in Chinese).
- 吴文欢,于宏,赵英俊,等.基于面向对象的高分辨率遥感影像目标信息提取[J].世界核地质科学,2016,33(2):91-95.  
WU Wenhuan, YU Hong, ZHAO Yingjun, et al. Object-oriented target information extraction based on high-resolution remote sensing images[J]. World Nuclear Geoscience, 2016, 33(2): 91-95 (in Chinese).
- 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.  
LI Jiaqi, LI Jianguo, 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 (in Chinese).
- 温爽.基于GF-2影像的城市黑臭水体遥感识别[D].南京:南京师范大学,2018.  
WEN Shuang. Remote sensing identification of urban black odour water bodies based on GF-2 imagery [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2018 (in Chinese).
- 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.  
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 (in Chinese).
- 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.  
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 (in Chinese).
- 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].重庆:西南交通大学,2019.  
QI Keke. Remote sensing graded identification of urban black odour water bodies based on multi-source high resolution imagery [D]. Chongqing: Southwest Jiaotong University, 2019 (in Chinese).
- Shen Q, Yao Y, Li J, 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.
- 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.  
ZHANG Ningning. Dynamic monitoring and evaluation of black odour water bodies in Harbin based on GF-2 [D]. Harbin: Harbin Normal University, 2022.
- 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.  
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 (in Chinese).
- Novoa S, Wernand, M R van der Woerd H J. The Forel-Ule scale revisited spectrally: Preparation protocol, transmission measurements and chromaticity [J]. Journal of the European Optical Society-Rapid Publications, 2013: 8.
- 吴奇,宫福征,白伟桦,等.太子河干流总氮与氨氮水质参数反演及时空变化研究[J].生态与农村环境学报,2024,40(8):1017-1028.  
WU Qi, GONG Fuzheng, BAI Weihua, et al. Study on the Inversion and spatio-temporal variations of total nitrogen and ammonia nitrogen water quality parameters in the mainstream of Taizi River [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024, 40(8): 1017-1028 (in Chinese).
- 莫锦英,田义超,王家乐,等.基于机器学习的养殖池-红树林-海洋复合生态系统氨氮遥感反演[J].环境科学学报,2024,44(11):415-429.

- MO Jinying, TIAN Yichao, WANG Jiale, et al. Remote sensing inversion of ammonia nitrogen in a farm pond-mangrove-marine composite ecosystem based on machine learning [J]. *Journal of Environmental Science*, 2024, 44(11):415-429 (in Chinese).
- 15 何炜琪,吴志杰,王紫安.基于无人机多光谱影像的城市河道水质反演[J].*环境监测管理与技术*, 2024, 36(5):51-55.
- HE Weiqi, WU Zhijie, WANG Zian. Inversion of urban river water quality based on UAV multispectral imagery [J]. *Environmental Monitoring Management and Technology*, 2024, 36(5):51-55 (in Chinese).
- 16 徐晓军,魏小岛,程佩璋,等.天空地一体立体网络的水质遥感监测及其溯源初探——以淀山湖为例[J].*环境监控与预警*, 2024, 16(6):8-14.
- XU Xiaojun, WEI Xiaodao, CHENG Peixuan, et al. Stereoscopic network monitoring for water quality integration of satellite, UAV, and ship observations: A case study of Dianshan Lake [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2024, 16(6):8-14 (in Chinese).
- 17 吴迪,于文金,谢涛.高分二号卫星数据在粤港澳大湾区水体有机污染监测中的应用[J].*热带地理*, 2020, 40(4):675-683.
- WU Di, YU Wenjin, XIE Tao. Application of GF-2 satellite data for monitoring organic pollution delivered to water bodies in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Tropical Geography*, 2020, 40(4):675-683 (in Chinese).
- 18 Zhu X, Wen Y, Li X, et al. Remote sensing inversion of typical water quality parameters of a complex river network: A case study of Qidong's Rivers [J]. *Sustainability*, 2023, 15(8):6948.
- 19 环境保护部.水质氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法:HJ 535—2009[S].北京:中国标准出版社,2009.
- Ministry of Environmental Protection. Determination of ammoniacal nitrogen in water by nano reagent spectrophotometric method: HJ 535—2009 [S]. Beijing:China Standards Press, 2009 (in Chinese).
- 20 Carvalho Junior, Lucio Honorio de Soares, Machadogon Alves L F, et al. Disestesia peri-incisional apos reconstruo do ligamento cruzado anterior com tero central do tendo patelar [J]. *Revista Brasileira De Ortopedia*, 2011, 46(1):37-39.
- 21 Ostu N. A threshold selection method from gray-histogram [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1):62-66.
- 22 Glasbey C A. An analysis of histogram-based thresholding algorithms [C]//CVGIP: Graphical Models and Image Processing, 1993(55):532-537.
- 23 Li C H, Lee C K. Minimum cross entropy thresholding [J]. *Pattern Recognition*, 1993, 26(4):617-625.
- 24 Zack G W, Rogers W E, Latt S A. Automatic measurement of sister chromatid exchange frequency [J]. *Journal of Histochemistry and Cytochemistry*, 1977, 25(7):741-753.