

doi: 10.19926/j.cnki.issn.1674-232X.2022.05.014

基于高分六号影像的杭州市黑臭水体遥感识别研究

黄祺宇¹, 肖 晗², 于之锋^{1,3}, 周 斌^{1,3}, 彭晓雪¹, 袁小红^{1,3}

(1. 杭州师范大学遥感与地球科学研究院, 浙江 杭州 311121; 2. 武汉大学遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079;
3. 浙江省城市湿地与区域变化研究重点实验室, 浙江 杭州 311121)

摘 要: 及时准确地识别城市中存在的黑臭水体对治理城市黑臭水体具有重要价值. 本文应用并对比了单波段法、比值法、差值法和两种黑臭水体模型判别指数法(HCI1、HCI2)共 5 种城市黑臭水体识别算法在杭州市的适用性. 结果表明, 5 种算法能不同程度地识别黑臭水体, 波段差值方法对正常水体的识别精度最高(88.5%), HCI1 方法对黑臭水体识别精度最高(94.4%), 但所有算法均存在误判现象, 有待后续改善.

关键词: 高分六号; 黑臭水体; 杭州; 遥感识别; 算法对比

中图分类号: TP751

文献标志码: A

文章编号: 1674-232X(2022)05-0542-11

城市黑臭水体是指城市建成区内呈现令人不悦的颜色和散发令人不适气味的水体^[1]. 城市黑臭水体不仅对城市水环境造成恶劣影响, 而且损害居民身体健康, 降低生活品质^[2]. 我国政府针对城市黑臭水体采取了一系列措施, 其中快速准确地获取城市黑臭水体的时空分布是及时治理黑臭水体或阻止正常水体黑臭化的关键. 黑臭水体时空分布信息来源于城市水体监测, 相比人工巡航采样结合实验室化学分析, 遥感监测城市黑臭水体速度更快、范围更大且时效性更强, 已被世界各地用作长期监测城市黑臭水体的主要技术手段^[3]. 随着我国遥感与卫星技术的不断革新突破, 高分(GF)系列、资源(ZY)系列等卫星的陆续发射及其数据应用的推广, 许多国产高分辨率卫星影像已经能够支持并实现对城市细小、零碎河流的观测, 提高了城市黑臭水体的监测精度^[4].

在对既定研究区黑臭水体识别应用方面, 国内外已经建立并验证诸多适用性强且精度高的定量化监测评价模型. Bai 等^[5]基于 SeaWiFS 卫星的原位数据和海洋颜色遥感数据, 监测到长江河口存在黑水区域并解释了其异常光学; Leif 等^[6]利用 Landsat 影像反演了美国明尼苏达州各个区位湖泊的透明度, 证实了从遥感影像中可以获得时间和空间全覆盖的水质特征. Zou 等^[7]通过对典型黑臭水聚集区分析, 开发了基于 DN 值和研究区域方差的黑臭水聚集区经验检索算法并证明其精度. 此外, 有部分学者基于某一城市的黑臭水体构建影像监测算法, 利用实测水体光谱结合遥感影像, 分析黑臭水体与一般水体的光谱差异, 再通过波段组合构建黑臭水体判别模型. 例如, 温爽等^[8]分析了南京地区的黑臭水体光谱与一般水体光谱的特征区别, 构建了基于高分二号影像的单波段阈值、差值、比值、色度值的黑臭识别模型. 胡国庆等^[9]基于

收稿日期: 2021-12-09

修回日期: 2022-02-13

基金项目: 杭州市科技计划引导项目(20201231Y071); 浙江省大学生科技创新活动计划(新苗人才计划)项目(2025C5152010130).

通信作者: 袁小红(1984—), 女, 研究实习员, 硕士, 主要从事环境遥感研究. E-mail: yuanxh@hznu.edu.cn

高分二号,利用单波段阈值法、波段差值法、归一化指数法、斜率指数法对安徽省芜湖市城市黑臭水现状进行识别.纪刚^[10]基于高分一号和高分二号卫星影像,构建了北京市黑臭水体识别系列模型(HeiChou Identification, HCI).曹红业^[11]综合多个城市各类水体的固有光学量、表观光学量和水质参数特性,提出了基于实测遥感反射率的饱和度法和光谱指数法.张雪等^[12]基于高分一号卫星,利用单波段法、差值法、比值法、HCI1和HCI2算法对深圳市黑臭水体进行识别.韩文聪等^[13]基于高分二号,使用营养状态指数、归一化黑臭水体指数(normalized difference black-odorous water index, NDBWI)、反射率光谱指数(black-odorous water index, BOI)3种方法对浙江省宁海县进行疑似黑臭水体的判读和识别,取得较好成果;姚月等^[14]使用高分二号卫星影像,基于遥感反射率、瑞利散射校正反射率遥感识别沈阳市黑臭水体,取得较好的识别精度.

目前,遥感水色识别方法及城市黑臭水体识别模型虽在实际应用中具有较高的精度,但仍存在不足,如何选定最优阈值或自动化提取水体是各算法模型需要克服的重大难题之一^[15].不仅如此,算法应用于不同卫星影像的反演效果不尽相同,将算法移植至其他研究区或应用于其他卫星影像的反演效果仍有待检验.本研究基于高分六号卫星影像,利用杭州市城区实测黑臭水体光谱,应用5种黑臭水体识别模型并进行精度检验,探究每种黑臭水体识别算法在杭州地区的适用性.

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

杭州市区河道纵横交错、河网密布,共有河道1400余条,主城区内河道461条^[16].依照浙江省制定的黑臭河标准和地表水环境质量标准,杭州市在开展“五水共治”之前有348条垃圾河和黑臭河,在纳入监测范围的1334条河道中,劣V类水河道约占40%,主城区劣V类河道占河道总数的2/3以上^[17].目前,主要河道已基本消除了黑臭,但由于历史因素,加上杭州河道数量众多,市区范围内河道仍存在漏测、“复黑”、富营养化等潜在风险,水质亟待改善^[18].

1.2 数据采集

2019年3月23日—24日,对杭州市拱墅区后横港河、陶家圩,西湖区族滨漾、西行河、余杭塘河、十字港桥,余杭区蓬桥河港、红卫港,滨江区陆家水潭、永久河、傅家峙河、善庆庄横河,共12条河道展开黑臭水体的野外实地测量.测量时,每条河道选择上、中、下游3部分至少一个样本点,并且要求该样本点能代表较大面积河段的水质,在遇到有明显水质变化的河段时增加采样,最终共选择了62个样本点:余杭区点簇7个样点,拱墅区点簇7个样点,西湖区从左至右,从上至下点簇分别为4个、7个、5个、7个、5个样点,滨江区从左至右,从上至下点簇分别为4个、7个、5个、4个样点(图1).

水体光谱数据采集时,使用手持式光谱仪(analytical spectral devices, ASD)和30%反射率的标准板,依据水面以上测量法^[19]获取各站点的水体光谱数据,剔除各观测点中偏差较大的异常光谱,计算剩余光谱数据的水体遥感反射率.溶解氧与氧化电位采用多参数水质仪获取,依照水质仪操作步骤^[20],设定待测水质参数后,开启自动测量模式获取相应水质参数信息.使用透明度仪测量水体的透明度信息,取2次测定平均值作为水体透明度值.

$$R_{rs} = \frac{(L_u - \rho_t \times L_{sky}) \times \rho_p}{\pi \times L_p}, \quad (1)$$

式中, R_{rs} 为遥感反射率, L_u 、 L_{sky} 、 L_p 分别为光谱仪面向水体、天空和灰板时的辐亮度测量信号, ρ_p 为灰板反射率, ρ_t 为菲涅尔反射率.依据测站点的风速设置 ρ_t 的数值,平静水面可取 $\rho_t=0.022$;在5 m/s左右风速下, ρ_t 可取0.025.

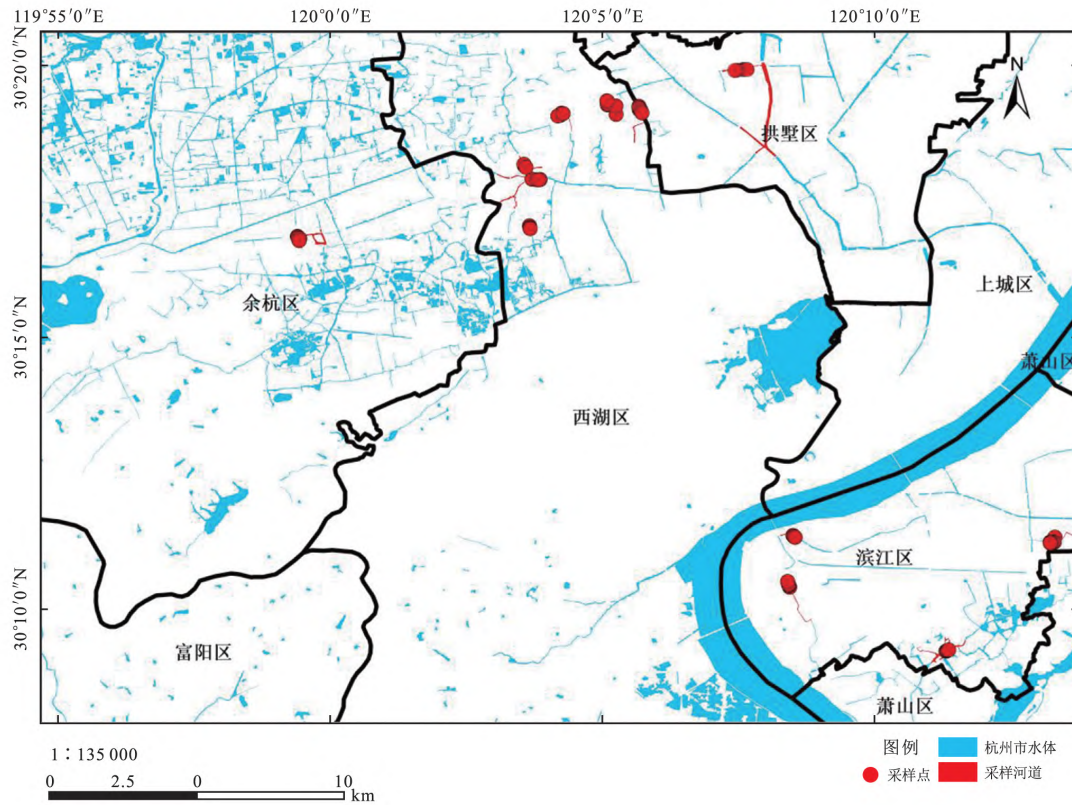


图 1 实测水体点位分布

Fig. 1 Point distribution of measured water body

1.3 高分六号影像处理

本文使用最贴近实测日期的可用影像数据(2019年3月12日的两幅高分六号影像数据),数据来源于中国资源卫星应用中心,影像无云覆盖,可用于杭州市黑臭水体的识别.利用ENVI软件对高分六号影像进行数据预处理,包括正射校正、辐射定标、大气校正等.大气校正采用FLAASH大气校正模块,由于高分六号缺少大气校正气溶胶反演相应的波段^[21-22],因此不采用气溶胶反演.为减少建筑物高亮部分对水体识别的影响,对影像进行水体掩膜,使用NCWI^[23]提取影像水体部分,并对感兴趣区(region of interest, ROD)进行细节修正排除建筑物高亮部分,保留细小水体,剔除混合像元.

2 城市黑臭水体遥感识别算法

2.1 黑臭水体光谱特征分析

依据曹红业^[11]提出的新黑臭水体判别指标(以下简称新指标),对一般水体与黑臭水体进行判别.新指标基于《城市黑臭水体整治工作指南》^[24](以下简称旧指标)且更加成熟:溶解氧(dissolved oxygen, DO)水平由2 mg/L提升至3.5 mg/L,氧化还原电位(oxidation reduction potential, ORP)由50 mV提升至60 mV,氨氮水平由8 mg/L降至6 mg/L.

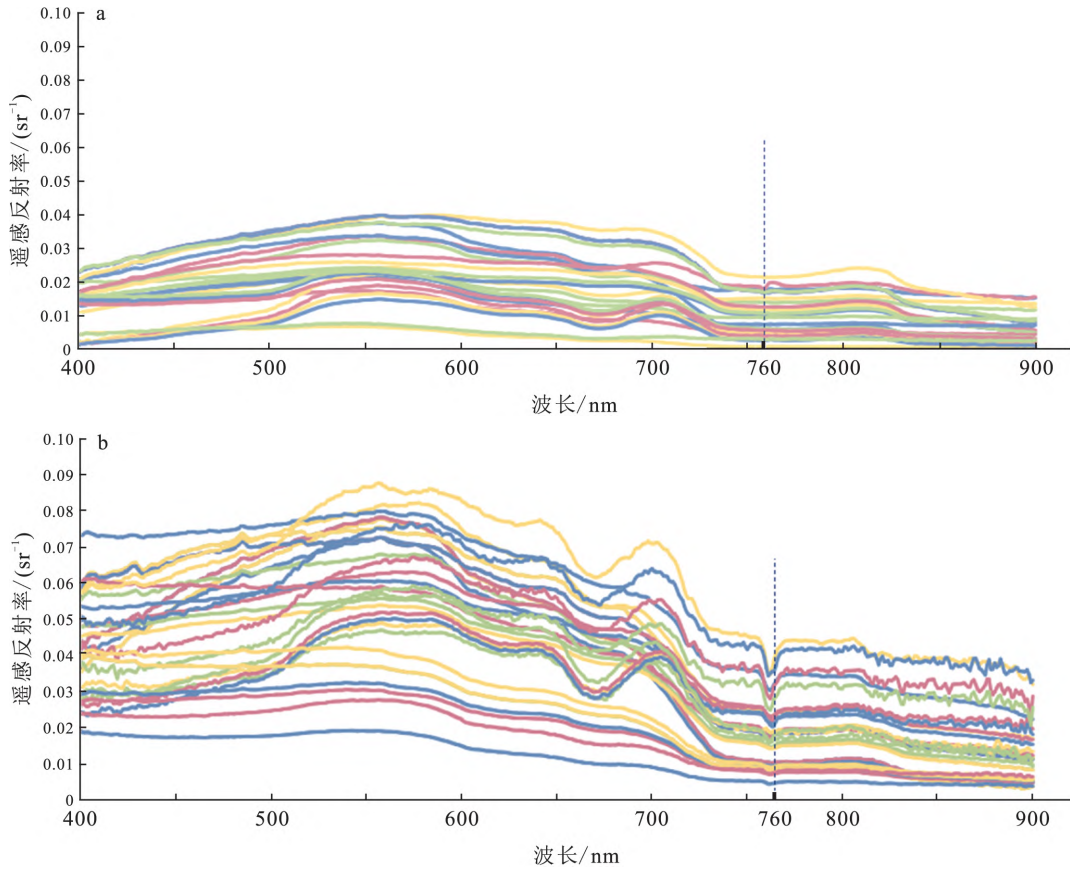
依照城市黑臭水体判别标准中新指标(表1),根据各采样点的氨氮水平、透明度、溶解氧水平、氧化还原电位,判别各采样点处水体是否为黑臭水体.最终62个样本点的数据中,黑臭水体样36个、正常水体样26个.依据分类结果对正常河段和黑臭河段的样本点光谱数据进行处理,计算得到遥感反射率,绘制光谱曲线(图2),对比分析黑臭水体与正常水体的光谱特征.

表 1 城市黑臭水体判别标准^[12]

Tab. 1 Discrimination standard of urban black-odorous water body

特征指标	旧指标下判别黑臭	新指标下判别黑臭
透明度/cm	<25*	<25*
溶解氧/(mg/L)	<2	<3.5
氧化还原电位/mV	<50	<60
氨氮/(mg/L)	>8	>6

注: * 水深不足 25 cm 时,该指标按水深的 40%取值.



a:黑臭水体; b:正常水体.

图 2 实测水体光谱

Fig. 2 Measured water spectrum

在波长 400~550 nm 范围内,黑臭水体与正常水体的遥感反射率数值均上升,但黑臭水体的整体上升趋势更加平缓. 大部分黑臭水体含氧量低,藻类植物数量少,因此相较于正常水体,其 670 nm 附近吸收谷不明显,700 nm 附近反射峰不明显^[25]. 此外,760 nm 处正常水体具有明显的液态水特征(吸收形成的吸收谷),而黑臭水体无该特征. 总体而言,杭州黑臭水体的遥感反射率($<0.038 \text{ sr}^{-1}$)低于正常水体的遥感反射率. 永久河与十字港桥水体清澈,受水底河床干扰,其遥感反射率较低. 杭州黑臭水体的遥感反射率走势较正常水体平缓,波峰波谷不明显,数值与正常水体有明显的分界阈值. 利用高分六号光谱响应函数和野外实际测量计算得到的水体遥感反射率均值可生成高分六号模拟结果,对比图 3 显示,高分六号影像大大缩减了水体的光谱特征细节差异^[26]. 在斜率与数值上,正常水体与黑臭水体存在较大差异,这与余佳龙等^[17]研究结果一致. 因此,利用高分六号监测黑臭水体时可通过构建蓝光、绿光、红光和近红外波段的相关算法识别黑臭水体.

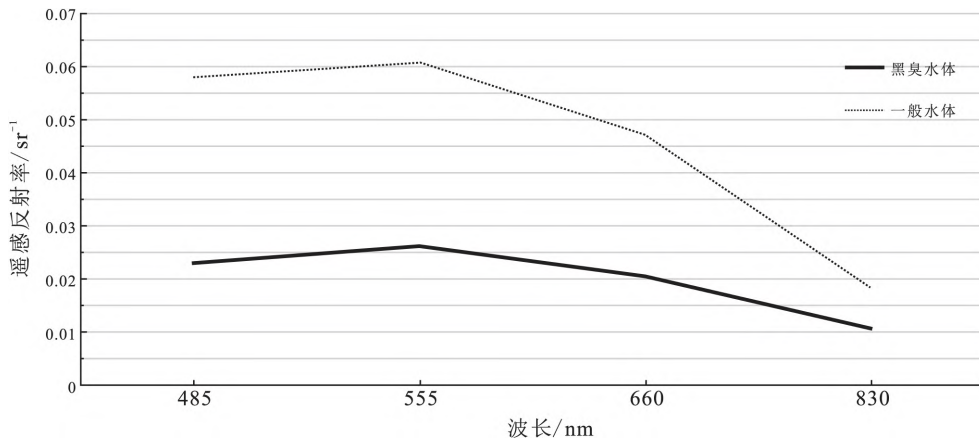


图3 基于两类水体反射率均值的高分六号模拟结果

Fig. 3 Simulated average reflectivity of two kinds of water body multi-spectrum of GF-6

利用采样点的光谱数据建立单波段法、差值法、比值法、HCI1、HCI2^[10,12,27] 5 种黑臭水体识别算法,对基于高分六号影像的黑臭水体识别算法的精度进行验证和对比分析. 由于不同地区的地理位置和水质环境等具有差异,不同城市的正常水体和黑臭水体的光谱有差异^[12]. 因此,上述黑臭水体识别算法虽在某一地区能有效区分黑臭水体和正常水体,但在不同地区应用时识别精度易受影响,故需修正提取算法的阈值,并进行精度评价^[28-29]. 从高分六号模拟结果中,随机筛选出 15 个黑臭水体样本和 10 个正常水体样本,对算法的阈值进行修正. 如图 4 所示,红线处为表 2 所列的水体区分阈值, R_R 为红光波段、 R_G 为绿光波段、 R_B 为蓝光波段、 R_N 为近红外波段, $N1$ 、 $N2$ 、 $N3$ 、 $N4$ 、 $N5$ 、 $N6$ 分别为各方法中使用到的阈值.

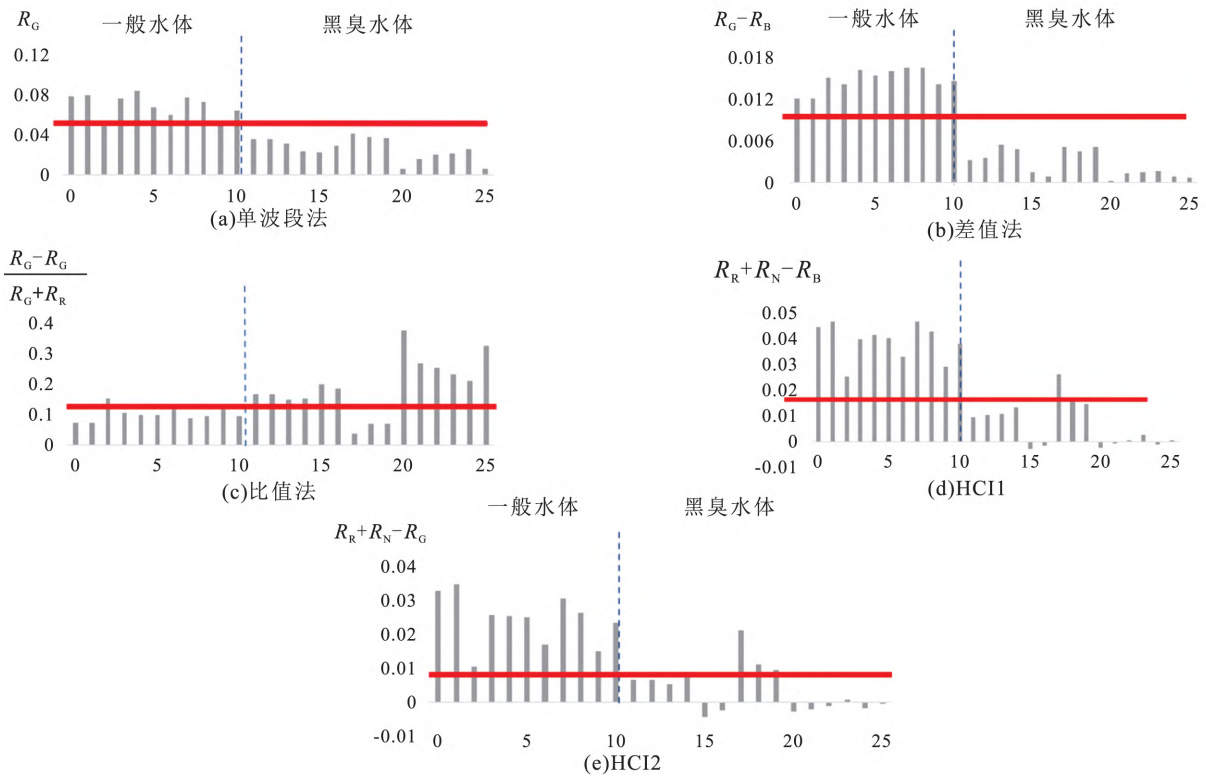


图4 各算法建模样点

Fig. 4 Modeling sample points of each algorithm

表 2 各算法阈值修正结果

Tab. 2 Threshold correction results of each algorithm

算法	公式	阈值
单波段法	$0 \leq R_G \leq N1$	$N1 = 0.042$
差值法	$0 \leq R_G - R_B \leq N2$	$N2 = 0.0082$
比值法	$N3 \leq \frac{R_G - R_R}{R_G + R_R} \leq N4$	$N3 = 0.135$ $N4 = 0.260$
HCI1	$0 \leq R_R + R_N - R_B \leq N5$	$N5 = 0.0165$
HCI2	$0 \leq R_R + R_N - R_G \leq N6$	$N6 = 0.098$

2.2 精度分析

将表 2 中的 5 种黑臭水体识别算法应用于经过处理的高分六号影像,提取影像中的黑臭水体.根据与卫星同步的实测水体进行精度评价,评价指标采用识别正确率,结果如表 3 所示.

$$\text{识别正确率} = \frac{M}{N} \times 100\%, \quad (2)$$

式中, N 为该水体类别中总样本个数, M 为应用判别模型后识别正确的样本个数.

表 3 黑臭水体的影像提取算法识别正确率

Tab. 3 Correct recognition rate of image extraction algorithm for black-odorous water body

算法	正常水体正确	正常水体正确	黑臭水体正确	黑臭水体正确	错分数/个	错分率/%
	识别数/个	识别率/%	识别数/个	识别率/%		
单波段法	21	80.8	28	77.8	13	21.0
差值法	23	88.5	30	83.3	9	14.5
比值法	18	69.2	32	88.9	12	19.4
HCI1	20	76.9	34	94.4	8	12.9
HCI2	19	73.1	29	80.6	14	22.6

注:验证数据为全部有效样本数据,正常水体样本数据 26 个、黑臭水体样本数据 36 个.

结果表明,5 种识别算法中,比值法和 HCI2 方法的精度较低,且各类算法将正常水体错分为黑臭水体的现象较为普遍,可能原因如下:

1) 杭州地区部分水体水质较好、水体透明度高、水体光谱吸收强、水体反射率值较低,在水体识别时易被错分为黑臭水体.如永久河水质较好,水体反射率反而较低,且在绿光和红光波段上反射率值较为接近,因而在比值法和 HCI2 中的区分度较差.水体很浅而导致底泥影响水体光谱特性较大的情况,在水体提取阶段已被剔除,因此不需考虑底泥光谱信息导致的误判.

2) 在测量的黑臭水体中,善庆庄横河的水体表面存在严重油污,油污遮盖水体表面导致水体遥感反射率偏高,因此该水体易被错分为正常水体.

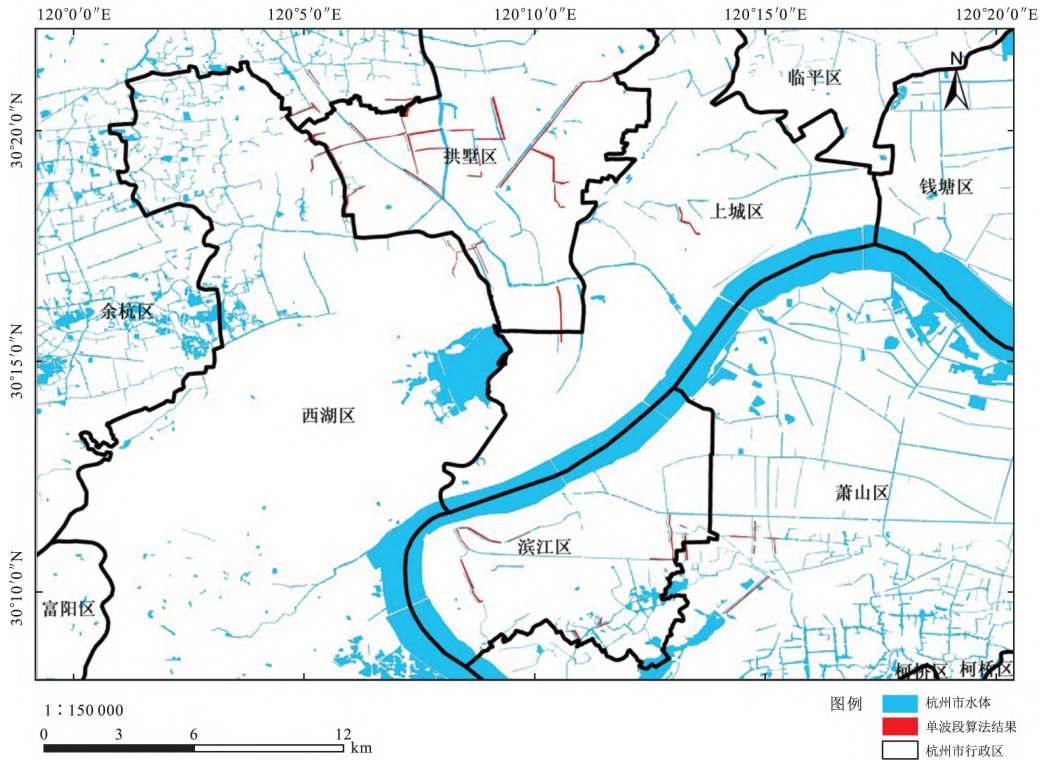
3) 进行大气校正时,由于高分六号影像不存在大气校正气溶胶反演相应的波段,大气校正结果可能与实际情况存在一定偏差.

4) 杭州市长期以来积极开展水体的清洁工作,在实际测量时也发现有清洁人员在对水体中的异物进行清除,影像成像时间与实际测量时间具有一定时间间隔,可能存在短时间内水体遥感反射率发生变化的情况,导致数据误差.

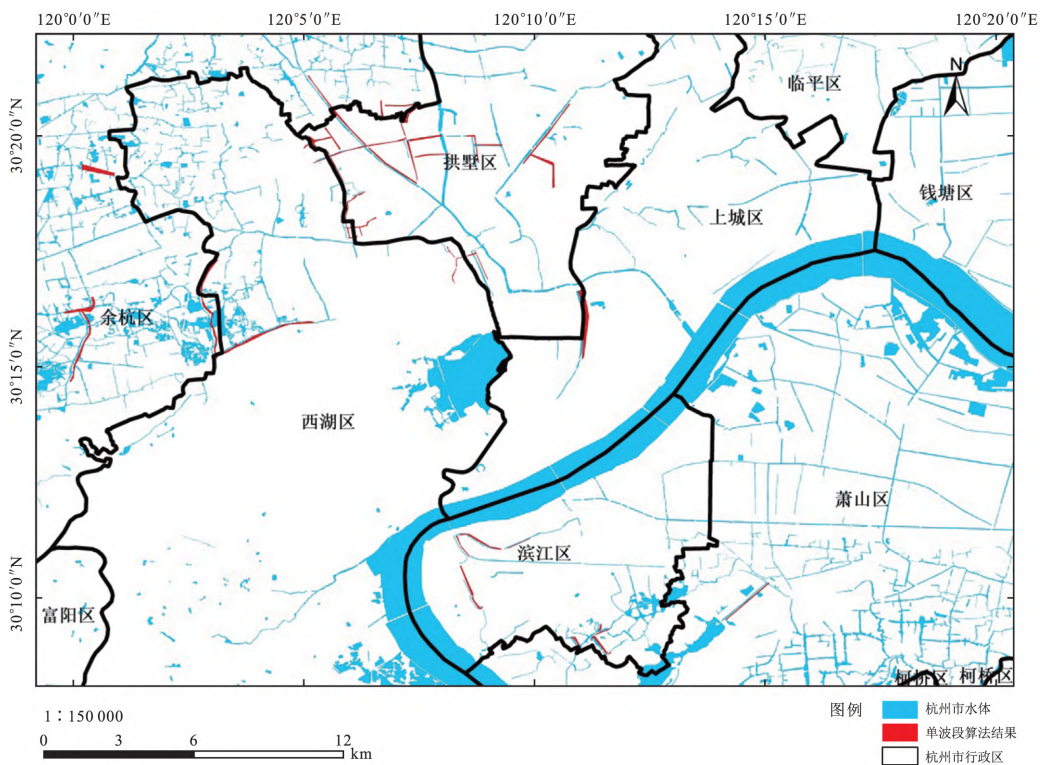
在 5 种识别算法中,波段差值方法识别正常水体的正确率相对较高,正常水体识别正确点位为 23 个,识别正确率达 88.5%. HCI1 方法识别黑臭水体的正确率较高,黑臭水体识别正确点位为 34 个,识别正确率达 94.4%.

采用不同算法提取的黑臭水体如图 5 所示.结果显示,单波段法提取出黑臭河段 13 条,总长度 97.30 km;波段差值法提取出黑臭河段 17 条,总长度 124.433 km;波段比值法提取出黑臭河段 13 条,总长度

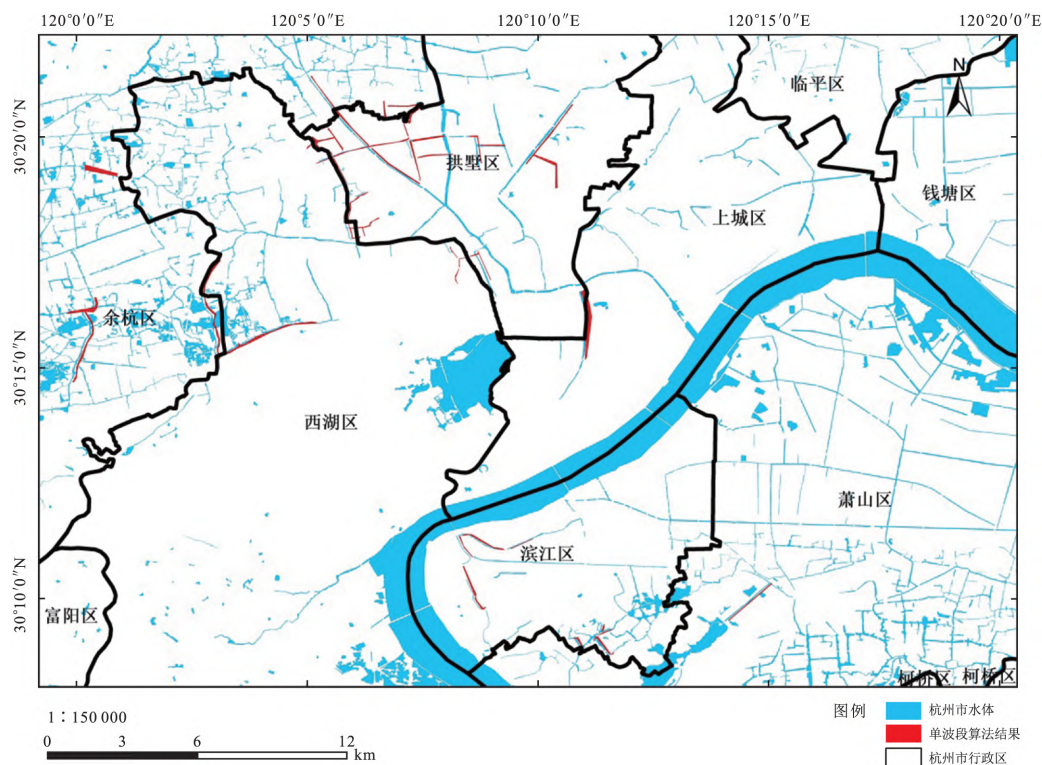
89.194 km;3 种算法在提取拱墅区黑臭水体时基本一致,提取上城区、滨江区和萧山区黑臭水体时有较小差异,提取余杭区黑臭水体差异较大.



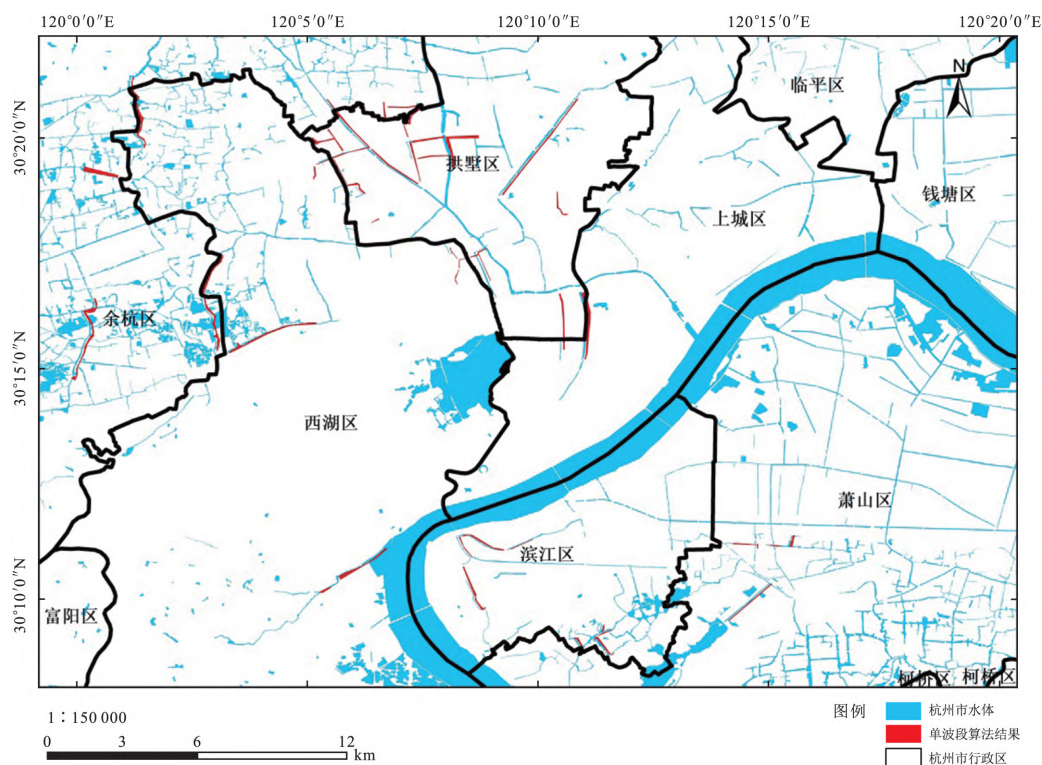
(a) 单波段法



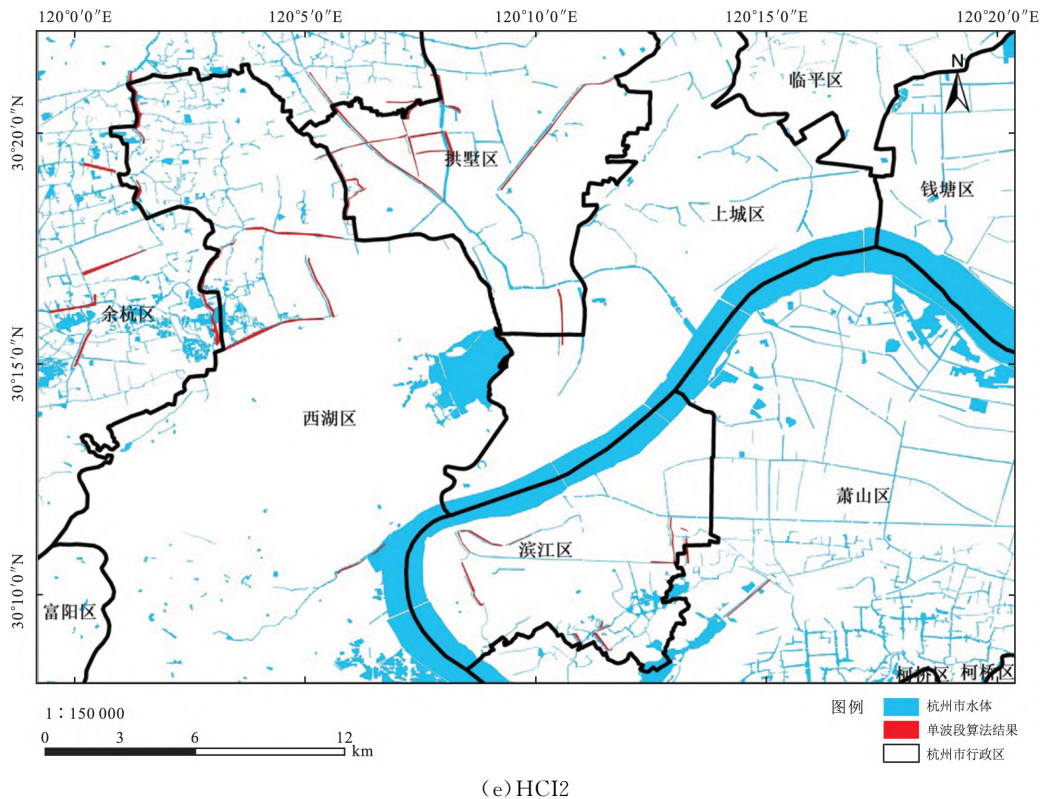
(b) 差值法



(c) 比值法



(d) HCl1



(e) HCI2

图 5 黑臭水体提取结果

Fig. 5 Extraction results of black-odorous water

2.3 5 种算法适用性分析与评价

1) 单波段法: 单波段算法最大的优势在于运算快、所需数据量少, 并且具有较高的正常水体识别精度, 但对黑臭水体识别精度明显不如另外 4 种算法, 在以精度为目的的反演情况下不推荐使用。在随机抽样调查城市河道水质或判别中大型城市湖泊等水体时, 单波段法可以对黑臭水体进行快速定性。

2) 差值法: 差值法对于黑臭水体识别精度处于中等水平, 差值法可将正常水体与黑臭水体光谱特征差异放大。另外, 差值法在识别正常水体时正确率最高, 可以通过同一水体在时间序列上的差异来监测整治进度。

3) 比值法: 比值法对黑臭水体的正确识别率较高, 达 88.9%, 仅次于 HCI1 法。但其错分现象最为严重, 推测原因可能与清澈水体在红光、绿光波段反射率差距不大有较大关联, 因此不建议在识别少数几处黑臭水体时使用。

4) HCI1 法: HCI1 法对黑臭水体识别正确率最高, 达 94.4%, 基本可以满足对黑臭水体的精确监测要求。因此在需要准确识别城市中所有黑臭水体时, HCI1 法为最佳算法。

5) HCI2 法: HCI2 法对于黑臭水体和正常水体识别准确度均较差, 且错分率较高, 对于实际监测城市黑臭水体的价值不如其他 4 种。总体而言不推荐使用该方法进行黑臭水体遥感识别。

3 结论与展望

基于高分六号影像以及现有的黑臭水体识别算法, 对杭州市黑臭水体识别算法的适用性进行探究。依据实测的杭州市黑臭水体与正常水体的光谱数据, 对各算法进行阈值修正, 并进行精度验证, 得到以下结论:

1) 与正常水体相比, 杭州市黑臭水体反射率相对平缓且数值较低, 但西湖、西溪湿地等较为清洁的湖泊水体因光谱吸收强、反射率低, 易被识别为黑臭水体。

2) 现有黑臭水体算法对基于高分六号的黑臭水体识别均有一定的应用价值, 大部分算法模型对黑臭

水体与正常水体均有较高的识别准确率。

3)对差值法或 HCI1 法进一步优化,有可能按黑臭程度对黑臭水体进行分级识别,为城市黑臭水整治提供更多科学依据。

4)基于高分六号影像反演识别城市黑臭水体的 5 种方法中,单波段法效率高、速度快;HCI1 法对黑臭水体识别精度最高;差值法对正常水体识别精度最高。

另外,后续还需改进高分六号影像的大气校正,提高对黑臭水体的识别精度,对黑臭水体识别精度较高的 HCI1 方法和差值法进行进一步研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 陈帅,赵文玉,廖中平. 黑臭水体遥感识别研究进展[J]. 国土资源遥感,2021,33(1):20-29.
- [4] 申茜,朱利,曹红业. 城市黑臭水体遥感监测与筛查研究进展[J]. 应用生态学报,2017,28(10):3433-3439.
- [5] 何贤强,唐军武,白雁等. 2003 年春季长江口海域黑水现象研究[J]. 海洋学报,2009,28(4):23-31.
- [6] LEIF G O, MARVIN E B, PATRICK L B. A 20-year Landsat water clarity census of Minnesota's 10,000 lakes[J]. Remote Sensing of Environment,2007,112(11):4086-4097.
- [7] ZOU L, ZHANG B, LI J, et al. A study on retrieval algorithm of black water aggregation in Taihu Lake based on HJ-1 satellite images [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2014,17(1):012100.
- [8] 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.
- [9] 胡国庆,陈冬花,刘聪芳,等. 基于高分二号的城镇黑臭水体动态监测[J]. 国土资源遥感,2021,33(1):30-37.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 王正,杜军,王超,等. 城市水体信息光学遥感提取方法研究进展报告[J]. 华中师范大学学报(自然科学版),2021,55(4):620-629.
- [16] 涂焯楠,仲玉芳,范华,等. 杭州典型城市河道污染特征及差异性分析评价[J]. 环境科学与技术,2016,39(S1):360-365.
- [17] 余佳龙,余晓燕,戴海炎. 杭州市黑臭河治理长效管理问题与对策[J]. 现代农业科技,2017(20):161-163.
- [18] 陆瑛,魏俊,蒋征波,等. 杭州市市区河道水环境改善的宏观策略分析[J]. 环境科学与技术,2016,39(S1):334-337.
- [19] 唐军武,田国良,汪小勇,等. 水体光谱测量与分析 I:水面以上测量法[J]. 遥感学报,2004(1):37-44.
- [20] 郭心顺,袁志伟. 多参数水质仪在海洋调查中的应用和质量控制[J]. 海洋技术,2008(3):115-117.
- [21] ZHANG M, TANG J, DONG Q, et al. Atmospheric correction of HJ-1 CCD imagery over turbid lake waters. [J]. Optics express, 2014,22(7):7906-7924.
- [22] 孙林,于会泳,傅俏燕,等. 地表反射率产品支持的 GF-1PMS 气溶胶光学厚度反演及大气校正[J]. 遥感学报,2016,20(2):216-228.
- [23] 邹橙,杨学志,董张玉,等. 基于 GF-2 遥感影像的一种快速水体信息提取方法[J]. 图学学报,2019,40(1):99-104.
- [24] 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[S/OL]. (2015-9-11)[2022-2-9] https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/tzgg/201509/20150911_224828.html.
- [25] 疏小舟,尹球,匡定波. 内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系[J]. 遥感学报,2000(1):41-45.
- [26] 丘仲锋,崔廷伟,何宜军. 基于水体光谱特性的赤潮分布信息 MODIS 遥感提取[J]. 光谱学与光谱分析,2011,31(8):2233-2237.
- [27] 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.
- [28] 杨永刚,崔宁博,胡笑涛,等. 中国三大灌区参考作物蒸散量温度法模型的修订与适应性评价[J]. 中国农业气象,2018,39(6):357-369.
- [29] 李晨,崔宁博,冯禹,等. 四川省不同区域参考作物蒸散量计算方法的适用性评价[J]. 农业工程学报,2016,32(4):127-134.

