

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2006~2015年北京市不同地区 O ₃ 浓度变化	王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀 (1)
南京北郊黑碳气溶胶的来源解析	肖思略, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺, 吕睿, 沙丹丹 (9)
电镀厂周边大气 PM ₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价	赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦 (18)
广西玉林市大气 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中有机碳和元素碳污染特征分析	黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽 (27)
青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征	张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹 (38)
大气环境分区管理: 以广东省为例	杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波 (49)
基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例	温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁萧蕾, 苗松 (57)
基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐 δ ¹⁵ N 和 δ ¹⁸ O 模拟	王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊 (68)
程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策	陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男 (77)
陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途 (89)
天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价	张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛 (99)
西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响	王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌肖 (109)
北京市地下水有机氯和有机磷农药健康风险评价	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (117)
黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险	姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛 (123)
淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征	周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁 (130)
磷酸盐对铁锰复合氧化膜去除地表水中氨氮的影响	卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚 (137)
K ₂ S ₂ O ₈ 强化 g-C ₃ N ₄ 薄膜电极光电催化降解 Cu(CN) ₂ ⁻ 并同步回收 Cu	党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭 (145)
以 HKUST-1 为模板制备铜氧化物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B	蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬 (152)
氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能	马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚 (161)
铁锰泥除砷颗粒吸附剂对 As(V) 的吸附去除	曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰 (170)
水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态	马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛 (179)
阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响	任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭 (187)
典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征	赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里 (195)
水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响	许雯佳, 成小英 (202)
环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性	戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军 (212)
AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟	曹特特, 王林, 李咏梅 (219)
磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦 (227)
碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (232)
容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响	吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良 (239)
DNBF-O ₃ -GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物	钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞 (247)
交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (256)
纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响	周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民 (263)
高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用	韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪 (269)
浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析	刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建 (276)
去除城市生活污泥中有机络合态金属强化其厌氧生物制气	卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎 (284)
污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价	王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华 (292)
初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH ₄ 和 N ₂ O 通量日变化特征	杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川 (300)
3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响	武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰 (310)
有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N ₂ O 排放的影响	侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰 (321)
拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: ¹³ C-CO ₂ 脉冲标记	陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (331)
陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征	兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial (339)
不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窈君, 王向前, 刘扬 (348)
秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响	徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成 (355)
县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估	李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标 (363)
基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测	曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春峰, 金志丰, 朱雁 (371)
沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析	李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊 (379)
磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤	赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥 (389)
控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响	封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华 (399)
典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异	李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (406)
松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征	张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶 (415)
硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响	代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰 (422)
长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响	王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水 (430)
海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较	张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈烨, 付璐璐, 王勋功 (438)
鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系	袁丽娟, 廖旦根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛 (450)
畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征	张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁 (460)
烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧灰性质的影响	章骅, 于思源, 邵立明, 何晶晶 (467)

基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别:以南京为例

温爽¹, 王桥², 李云梅^{1*}, 朱利², 吕恒¹, 雷少华¹, 丁潇蕾¹, 苗松¹

(1. 南京师范大学江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023; 2. 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100029)

摘要: 城市黑臭水体的遥感识别对于黑臭水体的监测、治理有着重要作用. 2016 年对南京城市河段进行了地面调查, 并在沙洲西河、秃尾河、玄武湖、金川河设置了 55 个样点, 采集水样分析水质参数并同步测量水面光谱. 在此基础上, 利用绿波段遥感反射率的单波段阈值、蓝、绿波段差值、红、绿波段比值, 以及色度值, 分别构建了基于 GF-2 影像的城市黑臭水体遥感识别算法, 并分析南京市主城区黑臭水体的空间分布和环境特点. 结果表明: ①和其他类型水体相比, 城市黑臭水体遥感反射率最低, 在整个可见光范围峰谷不突出, 而且在 400~550 nm 范围光谱斜率最小; ②采用地面同步调查结果检验, 比值算法的识别精度最高, 对城市河道黑臭水体的识别更准确; ③利用比值法对 2016 年 11 月 3 日的 GF-2 影像进行计算, 共提取研究区黑臭河段 11 条, 总长度 40.7 km, 总面积 0.749 km². 黑臭河段分布具有范围广且不连续的特征, 集中分布于各城区人口密集的区域; 水体发生黑臭主要受到生活污水、工业废水、断头浜的影响.

关键词: 南京; 城市黑臭水体; 光谱特征; 识别算法; 高分二号

中图分类号: X122; X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0057-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201703264

Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images: A Case Study in Nanjing

WEN Shuang¹, WANG Qiao², LI Yun-mei^{1*}, ZHU Li², LÜ Heng¹, LEI Shao-hua¹, DING Xiao-lei¹, MIAO Song¹

(1. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Satellite Environment Application Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100029, China)

Abstract: The identification of urban black-odor water bodies plays an important role in monitoring and controlling black-odor water bodies. In 2016, a ground survey was conducted on the urban reach of Nanjing, and 55 samples from the West Shazhou River, Tuwei River, Xuanwu Lake, and Jinchuan River were obtained. The spectral characteristics of urban black-odor water bodies and other water bodies were analyzed. Recognition algorithms for GF-2 data were proposed in order to analyze the spatial distribution and environmental factors of urban black-odor water bodies. These algorithms were single-band thresholds based on reflectance of the green band, the difference between the blue band and green band, the ratio of the green band and red band, and the chromaticity value. The results indicate that: ① compared with other types of water, the urban black-odor water has the smallest spectral slope in the range of 400-500 nm and lowest reflectivity, and the peaks and valleys are not prominent in the whole visible range; ② based on the verification, the accuracy of the ratio algorithm is the highest; and ③ using the ratio algorithm to calculate the GF-2 data of November 3, 2016, a total of 11 black river sections are identified. The entire length is 40.7 km, and the area is 0.749 km². The black-odor water sections are distributed over a wide range but are not continuous, and they are concentrated in the densely populated areas. Domestic sewage, industrial waste water, and broken river channel are the main reasons.

Key words: Nanjing; urban black-odor water bodies; spectra characteristics; recognition algorithm; GF-2

城市黑臭水体是指城市建成区内, 呈现令人不悦的颜色和(或)散发令人不适气味的水体的统称^[1]. 所谓“黑臭”是水体有机污染的一种极端现象^[2], 是由于水体缺氧、有机物腐败而造成的, 已经成为我国许多大中城市共同存在的环境污染问题^[3-6]. 目前国内外对城市黑臭水体的研究多集中于黑臭形成机制^[7-13]、水质评价方法与指标构建^[14-16]、生态修复等方面^[17-22]. 对城市黑臭水体的识别, 则主要采取资料收集、实地考察、野外监

测与评价指标相结合的方法. 水体黑臭的常见评价指标有温度、色度、化学耗氧量(COD 或高锰酸盐指数)、5 日生化需氧量(BOD₅)、氨氮(NH₄⁺-N)、溶解氧(DO)、总氮(TN)、硫酸还原菌数、臭阈值(TO)等^[23-27].

收稿日期: 2017-03-30; 修订日期: 2017-07-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YF0503902); 国家自然科学基金项目(41671340)

作者简介: 温爽(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境遥感监测, E-mail: 1575255910@qq.com

* 通信作者, E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn

城市黑臭水体通常分布范围较广,河宽一般较窄,易受到两岸环境(居民点、建筑工地、工厂)影响;水流速度较小,水面多漂浮树叶等杂质,常出现“断头”现象。由于城市河道水面通常低于路面,且设有护栏,因此常规的地面采样监测不易采集河道中心水质信息,难以全面划定黑臭水体分布范围,增加监测难度。遥感技术以其宏观、大面积同步观测以及持续观测的特点,为城市水体的监测提供了一种新的技术手段。万风年等^[28]建立 ETM + 遥感影像的可见光波段及其组合与电导率(EC)、氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)等水质参数的回归方程,模型精度较高,较好地反映了浙江温瑞塘河水质参数空间分布情况。姚俊等^[29]解译了苏州河 3 个不同时相的彩红外遥感影像和热红外遥感影像信息,分析了苏州河水体污染的状况和历史原因。马跃良等^[30]利用 TM 影像数据对珠江广州河段水环境质量中的水质污染进行监测研究,并建立了水质污染遥感预测模型。目前的研究主要针对水质参数进行,还没有提出有效地黑臭水体识别的方法。

随着高分遥感技术的发展,大量的城市高空间分辨率遥感数据为城市黑臭水体监测提供了数据保障,但是其模型方法的研究还十分欠缺。基于此,本研究针对南京市主城区河流开展野外实验,对比分析黑臭水体和正常水体的光谱差异,构建基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别方法,以期黑臭河道监管提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区及采样点分布

南京位于江苏省西南部(北纬 $31^\circ 14' \sim 32^\circ 37'$, 东经 $118^\circ 22' \sim 119^\circ 14'$),长江下游,市域总面积 $6\,587\text{ km}^2$ ^[31],是江苏省省会。南京水域面积达 11% 以上,有秦淮河、金川河、玄武湖、莫愁湖、百家湖、石臼湖、固城湖、金牛湖等大小河流湖泊。其中,城市内河是城市人居环境中重要组成部分,近年来随着城市化进程的不断加剧,大量生活污水等直接排入河流,导致水体发黑发臭。

2016 年的 1 月 19 日、4 月 10 日、11 月 3 日对南京城市河道开展地面调查,记录黑臭河段位置,并分别采集沙洲西河、秃尾河及玄武湖、金川河样点共 55 个进行水面光谱测量和水质分析。其中,沙洲西河和玄武湖样点共计 18 个,均属于正常水体。秃尾河位于浦口区,蜿蜒流经天润城和旭日上城,河宽 15 ~ 30 m,是一条断头河,水面呈现深墨绿色,悬浮

大量黑色絮状物,腥臭味明显^[32~34]。因此共采集秃尾河样点 29 个,属于黑臭水体。此外,金川河样点共 8 个,包含黑臭水体和正常水体,采样时间与所获取遥感影像时间同步。野外实验采样点分布如图 1 所示。

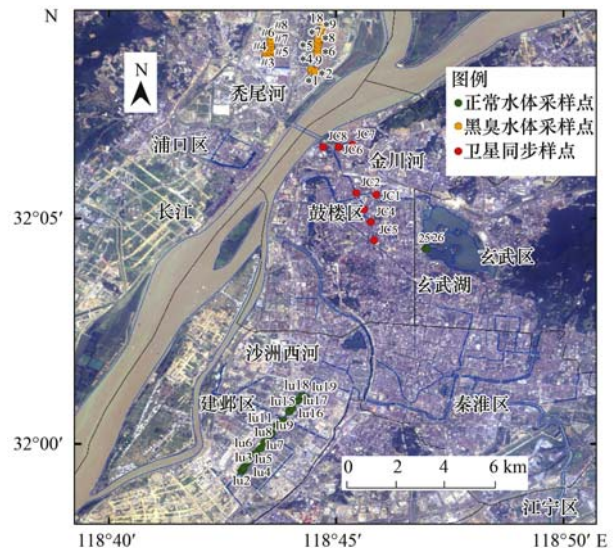


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling points

此外,为了与其它类型水体进行对比,还收集了南京夹江(29 个样点)的野外实测遥感反射率数据。南京夹江水体叶绿素浓度低,悬浮泥沙含量相对较高。

1.2 数据采集与测量方法

实验观测包括室外实验和室内实验两部分。室外实验包括遥感反射率、透明度、溶解氧、氧化还原电位的测量和水样采集,同时记录样点经纬度等信息。

水面光谱数据测量使用美国 ASD 公司生产的 ASD FieldSpec Pro 便携式光谱辐射计,其波段范围是 350 ~ 1 050 nm。首先将仪器探头垂直对准灰板中心,避免阴影、杂散光,测量标准灰板的辐亮度(L_p);然后背对太阳方向,仪器与水面法线方向的夹角为 $30^\circ \sim 45^\circ$,在避开太阳直射反射、忽略或避开水面泡沫的情况下,所测得水体辐亮度为 L_{sw} ;将仪器向上旋转 90° 对准天空测量辐亮度(L_{sky});最后再垂直对准灰板测量标准灰板的辐亮度。每个采样点都需要测量 10 条以上光谱信息。水面光谱数据按照唐军武等^[35]介绍的方法换算成水面遥感反射率。

用塞氏盘进行透明度的测量。手握卷尺缓慢释放绳子,将塞氏盘垂直沉入水中,当盘中黑白色刚好

看不清楚时记录标尺读数,即为透明度值. 数值以厘米为单位,反复观察 2~3 次确保读数稳定性.

溶解氧(DO)、氧化还原电位测量分别采用溶解氧检测仪(YSI550A)、笔式 OPT 计(CT-8022). 仪器使用之前需要用标准液进行校正,测量时将探头完全没入水中,待读数稳定记录数值;每个采样点测量完毕使用高纯水将探头冲洗干净以备下次使用.

本研究依据透明度、溶解氧、氧化还原电位这 3 项指标判断水体是否黑臭,具体判别标准如表 1 所示.

表 1 城市黑臭水体判别标准

Table 1 Classification standard for the degree of pollution in urban black-odor water bodies

特征指标	黑臭水体
透明度/cm	0~25
溶解氧/mg·L ⁻¹	0~2.0
氧化还原电位/mV	<50

1.3 高分影像数据及预处理

采用 2016 年 11 月 3 日的 GF-2 遥感影像进行南京黑臭水体遥感识别,影像覆盖鼓楼区、玄武区、秦淮区、建邺区以及浦口区部分区域,地面采集样点中有 8 个同步实测样点.

GF-2 多光谱数据空间分辨率 4 m,该数据共 4 个波段,波长范围分别为 450~520、520~590、630~690 和 770~890 nm,中心波长分别为 514、546、656 和 822 nm.

利用 ENVI 软件对影像进行正射校正、辐射定标、大气校正等操作. 大气校正采用 ENVI 自带 FLAASH 大气校正模块. 利用 11 月 3 日在金川河实测的水面遥感反射率与大气校正结果进行对比,通过比较大气校正后数据和实测光谱数据的差异来评价大气校正精度. 由于 5 号采样点受岸边植被影响较大,光谱特征与植被较相似,因此不参与精度评价. 将与卫星数据同步的 7 个样点实测遥感反射率通过光谱响应函数拟合至 GF-2 传感器 4 个波段,并与大气校正后的遥感反射率进行对比. 大气校正值和实测值在可见光波段的 MAPE 分别为 31.73%、12.33%、17.76%,RMSE 分别为 0.004 3、0.002 9、0.003 0 sr⁻¹ (图 2).

2 黑臭水体遥感识别模型构建

2.1 黑臭水体光谱特征分析

为了判别城市黑臭水体的光谱特征,将所采集

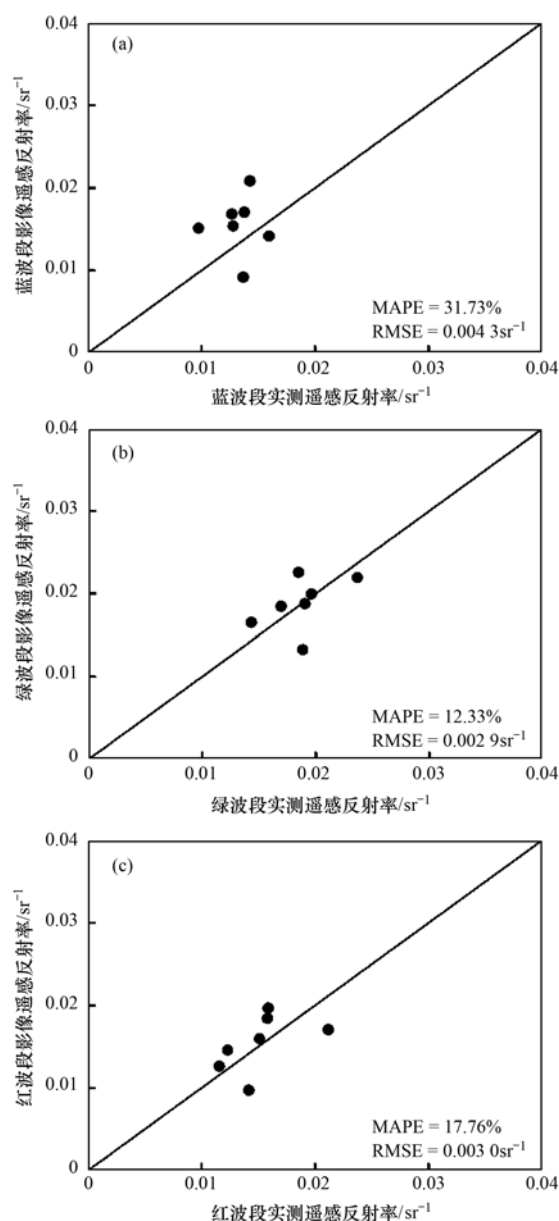


图 2 大气校正结果

Fig. 2 Results of the atmospheric correction

的南京市黑臭水体、正常水体与南京夹江饮用水源地水体(2014 年 10 月实测)等野外实验采集的光谱数据进行对比,分析黑臭水体和不同类型水体的光谱差异. 如图 3 所示,城市黑臭水体的遥感反射率的数值和光谱斜率与其他类型水体有明显的区别.

城市黑臭水体在 400~900 nm 波段遥感反射率值整体低于 0.025 sr⁻¹,其平均值在三类水体中最小,和夹江平均遥感反射率相差最大[图 3(d)]. 在 400~550 nm 波段范围,黑臭水体遥感反射率随波长增加上升缓慢,其它水体的光谱曲线在该波段范围斜率较大[图 3(b)、3(c)]; 在 550~580 nm 波段范围,黑臭水体遥感反射率出现峰值,波峰宽度大

于其他类型水体,但值最低,形状最为平缓;黑臭水体由于水体溶解氧含量低,导致水体藻含量少,在 620 nm 没有明显吸收谷,在 700 nm 附近没有明显的反射峰。

总体而言,城市黑臭水体遥感反射率最低,在 550 ~ 700 nm 范围内整体走势很平缓,虽然具有波动变化,但是峰谷不突出。黑臭水体光谱所表现出的这种特征可以作为其遥感识别的重要依据。图 3 (e) 给出了针对 GF-2 传感器波段设置的不同类型实测水体光谱信息。对比图 3(d) 和图 3(e),可以看出 GF-2 的宽波段设置大大缩减了光谱信息^[36],使得黑臭水体和其他类型水体光谱特征的差异变小,但仍然可以体现出不同类别水体的明显差异。例如,GF-2 影像的第二波段(中心波长 546 nm)对应水体 550 ~ 580 nm 出现的峰值,但是黑臭水体的值最低;此外,由于黑臭水体遥感反射率较低且在可见光范围变化平缓,因此光谱值在 GF-2 影像一、二波段和二、三波段数值的差异小于其它水体,且光谱斜率最小。这些差异,为从高分影像建模提取黑臭水体提供了物理基础。

2.2 城市黑臭水体识别算法

利用地面实测遥感反射率拟合为 GF-2 影像的多光谱数据,进行黑臭水体识别建模。其中,除了与卫星同步的 8 个样点数据外,其它样点数据均参与建模。基于 2.1 节的分析,提出单波段阈值法、波段差值法、波段比值法和色度法进行城市黑臭水体提取。

2.2.1 单波段阈值法

城市黑臭水体遥感反射率整体低于其它水体,在 550 nm 附近即 GF-2 影像第二波段与其它水体的差异相对较高。因此利用这一波段遥感反射率值提取城市黑臭水体,算法如式(1)。

$$0 \leq R_{rs}(\text{Green}) \leq N \quad (1)$$

式中, $R_{rs}(\text{Green})$ 为 GF-2 影像第二波段大气校正后遥感反射率值, N 为常数。

图 4 为各样点 $R_{rs}(\text{Green})$ 值,选取 $N = 0.019 \text{ sr}^{-1}$ 作为判别一般水体和黑臭水体的阈值。

2.2.2 波段差值法

由于城市黑臭水体遥感反射率值在 480 ~ 550 nm 上升缓慢,在 550 nm 附近出现的波峰较宽且值最低。具体在 GF-2 影像上的表现为在可见光蓝绿波段,南京夹江水体光谱斜率最高,城市正常水体次之,而城市黑臭水体最低。由此,可以利用蓝绿波段的遥感反射率差值来判断是否是城市黑臭水体,算

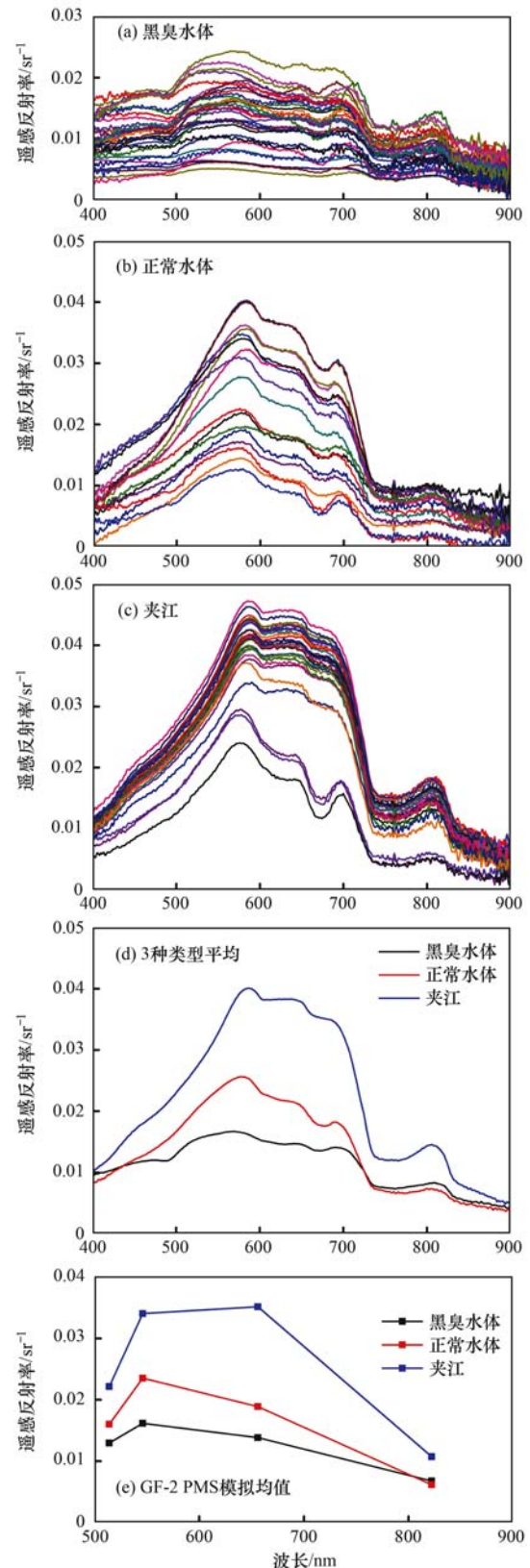
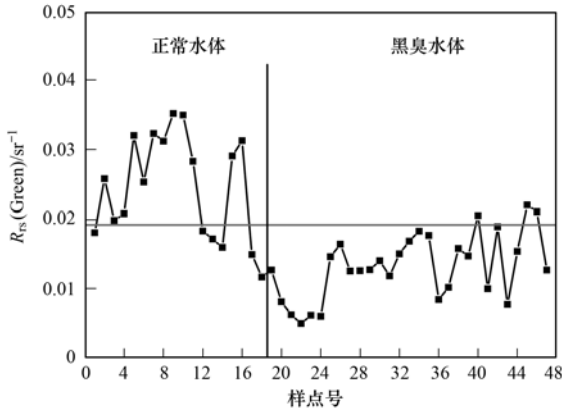


图 3 3 种类型水体遥感反射率光谱、均值及 GF2 PMS2 模拟结果
Fig. 3 Reflectance spectra and average results of three types of water bodies, and simulation results of GF2 PMS2

图4 建模样点 $R_{rs}(\text{Green})$ 值Fig. 4 Green band $R_{rs}(\lambda)$ value of the modeling points

法如式(2).

$$0 \leq R_{rs}(\text{Green}) - R_{rs}(\text{Blue}) \leq N \quad (2)$$

式中, $R_{rs}(\text{Blue})$ 和 $R_{rs}(\text{Green})$ 分别为 GF-2 影像第一、二波段大气校正后遥感反射率值, N 为常数.

图5为建模样点蓝绿波段遥感反射率差值, 选取 $N = 0.0036 \text{ sr}^{-1}$ 作为判别一般水体和黑臭水体的阈值.

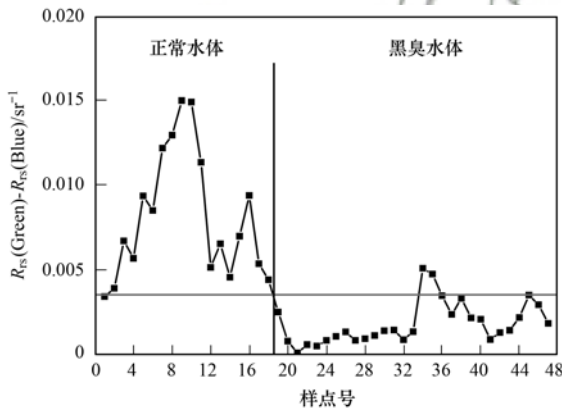


图5 建模样点蓝绿波段遥感反射率差值

Fig. 5 Difference between $R_{rs}(\lambda)$ values of the blue band and green band of the modeling points

2.2.3 波段比值法

城市黑臭水体在 550 ~ 700 nm 范围内光谱曲线变化最为平缓, 斜率最低. GF-2 影像对应此光谱范围的绿、红波段, 中心波长分别为 546 nm 和 656 nm, 很好地体现出城市黑臭水体这一光谱特征. 从图3(e)可以看出, 城市正常水体在此波段范围光谱斜率同样较低, 但是其具有较高的遥感反射率值. 因此, 选择这两个波段组合的遥感反射率差、和的比值来识别城市黑臭水体. 算法如式(3).

$$N_1 \leq \frac{R_{rs}(\text{Green}) - R_{rs}(\text{Red})}{R_{rs}(\text{Green}) + R_{rs}(\text{Red})} \leq N_2 \quad (3)$$

式中, $R_{rs}(\text{Green})$ 和 $R_{rs}(\text{Red})$ 分别为 GF-2 影像第二、三波段大气校正后遥感反射率值, N_1 、 N_2 为常数.

图6为建模样点红绿波段比值, 选取 $N_1 = 0.06 \text{ sr}^{-1}$ 、 $N_2 = 0.115 \text{ sr}^{-1}$ 作为判别一般水体和黑臭水体的阈值.

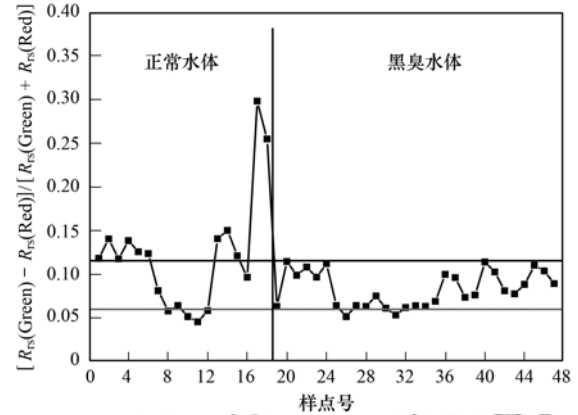


图6 建模样点红绿波段遥感反射率比值

Fig. 6 Ratio of $R_{rs}(\lambda)$ values of the green band and red band of the modeling points

2.2.4 色度法

野外调查发现, 黑臭水体反射率较低, 在视觉中具有直观的体现. 此外, 已有国内外学者运用色度方法, 直观且定量地反映湖泊水色变化规律^[37~40]. 因此, 尝试建立色度指标进行黑臭水体识别.

本研究根据色度计算公式^[41], 将 GF-2 影像红、绿、蓝波段分别作为 R、G、B 代入公式计算, 得到 CIE 坐标系统中表征水体颜色的主波长. 根据图7建模样点计算结果, 城市黑臭水体对应波长范围为 528 ~ 540 nm. 其余波段范围分别对应不同颜色(图8), 其中 490 ~ 528 nm 主要呈现蓝色; 540 ~ 560 nm 范围呈现绿色, 和城市河道的正常水体的颜

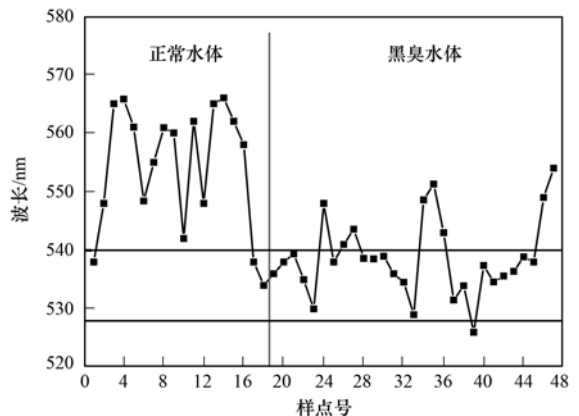


图7 建模样点 CIE 坐标主波长

Fig. 7 Main wavelength of the CIE coordinates of the modeling points

色最接近; 560 ~ 576 nm 范围代表颜色为黄色, 主要体现在秦淮河等较为浑浊的水体.

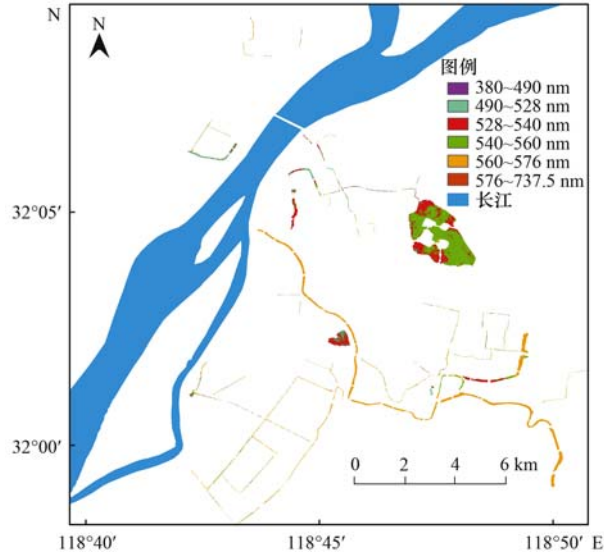


图 8 色度法计算结果

Fig. 8 Calculation results from the chroma method

2.3 精度评价

采用验证样点识别的正确率对算法精度进行评价, 由式(4)计算.

识别正确率 = $\frac{N_{\text{正确识别}}}{N_{\text{总数}}} \times 100\%$ (4)

式中, $N_{\text{正确识别}}$ 表示识别结果和实际情况一致的样点数目, $N_{\text{总数}}$ 为验证样点总数.

3 结果与讨论

将以上方法应用于 2016 年 11 月 3 日 GF-2 PMS2 影像, 提取出南京主城区黑臭水体, 如图 9 所示. 卫星过境当天野外同步实验采集的 8 个样点 (图 1) 水质参数如表 2 所示. JC1、JC2 位于金川河泵站附近水流交汇处, 流速大, 河岸宽, 居民点较少, 透明度和溶解氧含量较高 (表 1 和表 2), 水体黑臭现象不明显, 是正常水体. JC8 位于长江入江口处,

河宽大概 20 m, 附近居民点较少, 无排污口, 水体颜色正常, 无臭味, 透明度和溶解氧含量高 (表 1 和表 2), 是正常水体. JC3 ~ JC7 位于城市狭窄河道, 河水流经多处居民小区, 沿岸有数个排污口, 水质极差, 水体颜色变深, 呈现墨绿色, 近岸则闻到刺鼻臭味; 透明度低于 30 cm, 溶解氧含量低于 0.4 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 1 和表 2), 是典型城市黑臭水体. 利用这 8 个样点对黑臭水体遥感识别效果进行评价.

表 2 2016 年 11 月金川河采样点水质参数

Table 2 Water quality parameters for samples from the Jinchuan River in November 2016

样点号	透明度 /cm	溶解氧 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	氧化还原电位 /mV	黑臭情况
JC1	50	1.26	59	正常
JC2	70	3.95	109	正常
JC3	20	0.36	-161	黑臭
JC4	30	0.11	-139	黑臭
JC5	10	0.12	-133	黑臭
JC6	20	0.23	-174	黑臭
JC7	30	0.12	-144	黑臭
JC8	80	5.14	319	正常

3.1 不同算法识别精度对比

基于 2.2 节所构建的算法, 对南京市部分城区黑臭水体进行识别. 由于长江是含沙量大且比较浑浊的水体, 不存在黑臭现象, 和黑臭水体的光谱特征差异显著, 在遥感影像上和其他类型水体颜色相差大, 因此将其单独划分为一类. 在遥感影像上选取金川河流域采集的 8 个卫星同步样点对算法识别精度进行评价.

3.1.1 单波段算法

根据表 3, 单波段法对黑臭识别结果和实际情况一致的是 JC1、JC4、JC5、JC6 所在河段. 根据 2.3 节精度评价方法, 算法识别正确率为 50%. 图 9 (a) 红色部分是单波段法识别的城市黑臭水体分布范围.

表 3 不同算法验证样点取值及识别结果

Table 3 Value and recognition results of the verification points by the different algorithms

样点号	单波段法		差值法		比值法		色度法		实际黑臭情况
	计算结果 / sr^{-1}	识别结果	计算结果 / sr^{-1}	识别结果	计算结果 / sr^{-1}	识别结果	计算结果 /nm	识别结果	
JC1	0.019 5	正常	0.001 4	黑臭	0.133 2	正常	542	正常	正常
JC2	0.018 5	黑臭	0.003 1	黑臭	0.117 5	正常	545	正常	正常
JC3	0.022 6	正常	0.001 7	黑臭	0.068 6	黑臭	535	黑臭	黑臭
JC4	0.018 8	黑臭	0.001 9	黑臭	0.080 6	黑臭	552	正常	黑臭
JC5	0.010 4	黑臭	0.001 1	黑臭	0.077 2	黑臭	548	正常	黑臭
JC6	0.015 9	黑臭	0.001 8	黑臭	0.114 9	黑臭	554	正常	黑臭
JC7	0.019 9	正常	0.002 9	黑臭	0.069 8	黑臭	557	正常	黑臭
JC8	0.013 3	黑臭	0.004 1	正常	0.153 6	正常	536	黑臭	正常

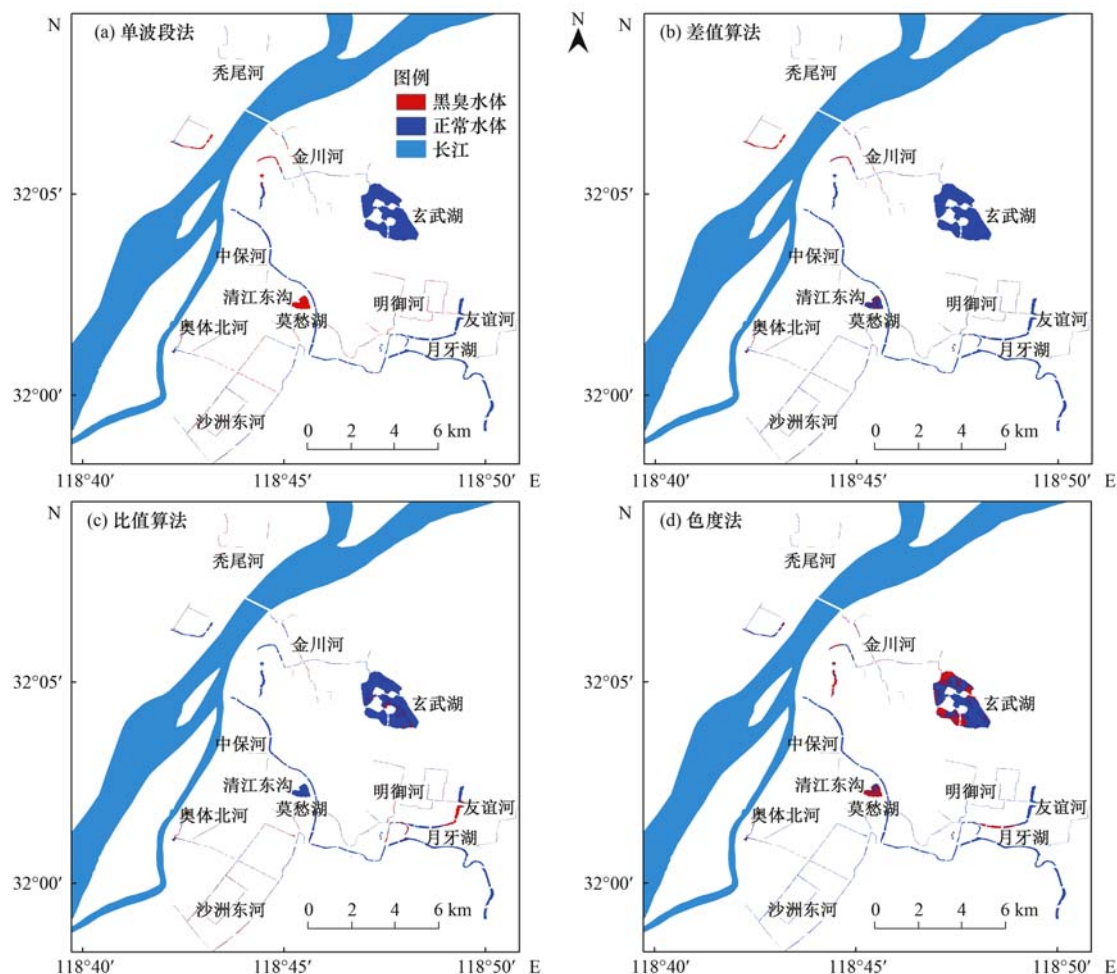


图9 不同算法黑臭水体识别结果

Fig. 9 Recognition results of the black-odor water bodies by the different algorithms

3.1.2 差值算法

根据表3,差值算法对黑臭识别结果和实际情况一致的是JC3、JC4、JC5、JC6、JC7、JC8所在河段,识别正确率为75%。图9(b)红色部分是差值算法识别出的城市黑臭水体分布范围。

3.1.3 比值算法

根据表3,比值算法对8个样点所在河段的识别结果与实际情况一致,识别正确率达到100%。图9(c)红色部分是比值法识别的城市黑臭水体分布范围。

3.1.4 色度法

根据表3,色度法识别正确的是JC1、JC2、JC3,识别正确率为37.5%。图9(d)红色部分是色度法识别的城市黑臭水体分布范围。

3.2 算法识别误差原因及适用性分析

3.2.1 不同算法识别误差原因分析

从图9可以看出,算法识别误差主要表现为将城市湖泊正常水体错分为黑臭水体。单波段法和差

值算法将莫愁湖识别为黑臭水体,识别正确率最高的比值算法也将玄武湖部分区域识别为黑臭水体,而色度法将两者均识别为黑臭水体。通过野外调查,莫愁湖和玄武湖水质较为清洁,为正常水体,并未出现黑臭。对上述错分现象进行分析,主要原因如下。

(1)光谱存在重叠部分。城市湖泊水质较好,由于水体吸收较强,遥感反射率值很低,在影像上呈现暗像元的特征。图10为实测玄武湖和部分黑臭水体光谱曲线以及模拟至GF-2传感器上的结果。从中可以看出,两种水体的遥感反射率值非常低,在400~700 nm范围有较多的重叠。在GF-2数据第2波段遥感反射率值十分接近,因此运用单波段法不能将两者明显区分;运用比值法计算时,通过波段组合,两者值域也存在重叠的部分。因此,玄武湖等正常水体和黑臭水体在运用单波段法、比值法进行计算时,可能出现错分现象。

(2)水色相似。色度法可以直观反映不同地物

的颜色差别,但有些河段受排放污染物的影响水色差异大,出现墨绿、灰黑色等(图 11),与玄武湖、莫愁湖等正常水体颜色相似;此外,GF-2 影像 4 个波段中心波长和 CIE 标准色度系统不能完全对应,也可能导致计算结果存在一定偏差。因此色度法对城

市黑臭水体的识别精度低。

(3)对 GF-2 遥感影像第 1 波段的大气校正效果较差[图 2(a)],因此在运用 1、2 波段的差值进行计算时,容易将部分正常水体错分为黑臭水体,产生较大误差。

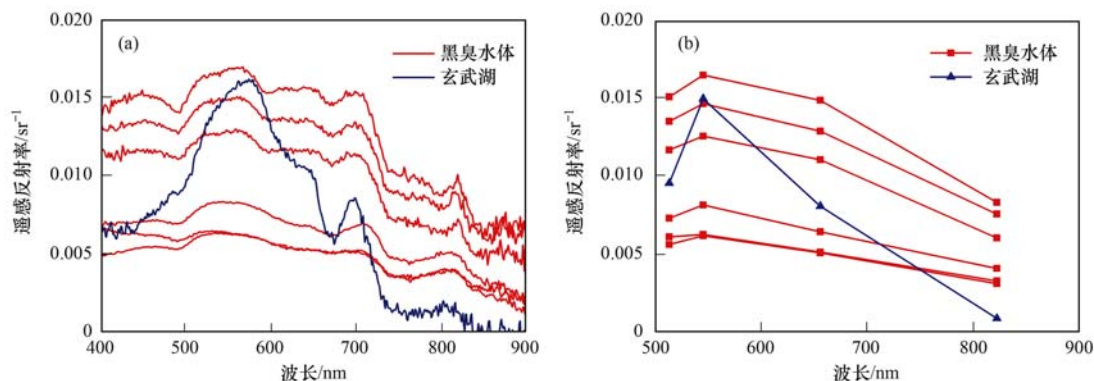


图 10 光谱曲线对比

Fig. 10 Comparisons of spectral analyses

3.2.2 算法适用性分析

综合上述的分析,比值算法识别精度最高。比值算法基于城市黑臭水体和正常水体在 550 ~ 650 nm 范围内光谱差异而建立,通过 GF-2 影像绿、红波段遥感反射率差、和的比值计算求得,具有理论依据,简单易于操作。比值算法对于城市黑臭河段的识别正确率最高,可以准确地区分城市河道的黑臭水体和正常水体。但是由于城市内部大型清洁湖泊遥感反射率较低,计算结果值域存在重叠,因此运用比值算法计算容易将其划分为黑臭水体。因此,比值算法不适用于区分城市河道黑臭水体和城市内部非常清洁的大型湖泊。

3.3 南京主城区黑臭水体空间分布

3.3.1 南京主城区黑臭水体空间分布

利用比值算法提取研究区黑臭水体,识别出黑臭河段 11 条,总长度 40.7 km,总面积 0.749 km²,分别为金川河、中保河、清江东沟、明御河、月牙湖、友谊河玄武段、友谊河秦淮段、沙洲东河、奥体北河、秃尾河东支、西支。从图 9(c)可以看出,黑臭河段分布范围广且不连续,集中分布在南京市各城区人口密集的区域,其空间分布如下。

(1)金川河流域位于鼓楼区北部,清江东沟、中保河位于南部;明御河、月牙湖位于秦淮区北部;友谊河流经玄武区和秦淮区,分别为友谊河玄武段和友谊河秦淮段;沙洲东河、奥体北河均位于建邺区中部;秃尾河东支、西支黑臭河段位于浦口区北部。

(2)不同河段黑臭情况不同。鼓楼区金川河黑臭河段主要位于中支上游部分,下游流入长江的河段水色正常;友谊河出现黑臭的河段位于上游玄武区;而浦口区北部秃尾河段靠近长江的部分水色正常,其余部分河段则出现黑臭现象。

3.3.2 黑臭河段形成的环境因素分析

针对提取的黑臭河段,对其周边环境影响因素进行分析如下。

(1)人口密集区生活污水排放。例如金川河中支上游[图 11(a)]、清江东沟、明御河等河段,流经居民小区、菜市场等地,生活污水大量排放,有机污染物分解消耗大量溶解氧造成水体缺氧,引起水体发黑发臭;此外有机物富集在水体表面形成有机物膜破坏正常水体界面的交换,加剧水体黑臭现象。

(2)河岸建筑工地、化工厂等的影响。例如建邺区沙洲东河附近有一处建筑工地,污水排放进入河流,水体浑浊发黑发臭[图 11(b)];江宁区莱茵达路附近有大量工业园,工厂废水排放进入河流,不仅使得水体颜色异常,通常呈现乳白色[图 11(c)],而且散发刺激性气味。

(3)断头浜水体。由于城市发展遗留问题以及管理不善,导致城市河段常出现“断头”现象,形成断头浜。断头浜水体由于水动力不足,造成河道淤泥增多,底泥中堆积的污染物释放到水体导致河流发黑发臭。例如鼓楼区北部金陵新村附近的一条重度黑臭河段,距离居民小区仅两米的距离,水体几乎不流动,散发恶臭[图 11(d)]。



图 11 典型城市黑臭水体

Fig. 11 Typical urban black-odor water bodies

4 结论

(1) 和城市正常水体、夹江相比, 城市黑臭水体遥感反射率最低, 在整个可见光范围峰谷不突出, 而且在 $400 \sim 550 \text{ nm}$ 范围光谱斜率最小。

(2) 利用 GF-2 影像, 基于第 1、2、3、4 波段, 分别建立了单波段算法、差值算法、比值算法和色度法识别黑臭水体。采用地面同步调查结果检验, 比值算法的识别精度最高, 对城市河道黑臭水体的识别结果更准确。

(3) 黑臭河段分布具有范围广且不连续的特征, 集中分布于各城区人口密集的区域; 水体发生黑臭主要受到生活污水、工业废水、断头浜等因素影响。

致谢: 感谢城市黑臭水体野外实验的参与者郑

著彬、杜成功、王旭东、毕顺、吴志明, 室内实验数据分析参与者牟蒙、张思敏、王艳楠、金琦、时蕾。感谢南京地理与湖泊研究所对部分实验数据的测量。

参考文献:

- [1] 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]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201509/t20150911_224828.html, 2015-08-28.
- [2] 阮仁良, 黄长缨. 苏州河水水质黑臭评价方法和标准的探讨 [J]. 上海水务, 2002, 18(3): 32-36.
- [3] 于玉彬, 黄勇. 城市河流黑臭原因及机理的研究进展 [J]. 环境科技, 2010, 23(S2): 111-114.
Yu Y B, Huang Y. Review of reason and mechanism of black and stink in urban rivers [J]. Environmental Science and Technology, 2010, 23(S2): 111-114.
- [4] 杨阳, 马小雪, 商翔. 温州市温瑞塘河水体黑臭评价 [J]. 浙江农业科学, 2012, 53(4): 566-569.
- [5] Bai Y, He X Q, Pan D L, et al. The black water around the

- Changjiang (Yangtze) Estuary in the spring of 2003[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, **28**(4): 23-31.
- [6] Duan H T, Ma R H, Loisel S A, *et al.* Optical characterization of black water blooms in eutrophic waters[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **482-483**: 174-183.
- [7] Song Y, Müller G. Sediment-water interactions in anoxic freshwater sediments[J]. *Lecture Notes in Earth Sciences*, Berlin Springer Verlag, 1999, **45**(10): 879-880.
- [8] Wood S, Williams S T, White W R, *et al.* Factors influencing geosmin production by a streptomycete and their relevance to the occurrence of earthy taints in reservoirs[J]. *Water Science and Technology*, 1983, **15**(6-7): 191-198.
- [9] 卢信, 冯紫艳, 商景阁, 等. 不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物(VOSCs)产生机制研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3152-3159.
- Lu X, Feng Z Y, Shang J G, *et al.* Black water bloom induced by different types of organic matters and forming mechanisms of major odorous compounds[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3152-3159.
- [10] Song S K, Shon Z H, Kim Y K, *et al.* Characteristics of malodor pollutants and aromatic VOCs around an urban valley in Korea[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **157**(1-4): 259-275.
- [11] Peter A, Köster O, Schildknecht A, *et al.* Occurrence of dissolved and particle-bound taste and odor compounds in Swiss lake waters[J]. *Water Research*, 2009, **43**(8): 2191-2200.
- [12] 孙淑云, 古小治, 张启超, 等. 水草腐烂引发的黑臭水体应急处置技术研究[J]. *湖泊科学*, 2016, **28**(3): 485-493.
- Sun S Y, Gu X Z, Zhang Q C, *et al.* Research on an emergency treatment technology for black-odor water caused by macrophytes decaying[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, **28**(3): 485-493.
- [13] Kutovaya O A, Watson S B. Development and application of a molecular assay to detect and monitor geosmin-producing cyanobacteria and actinomycetes in the Great Lakes[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, **40**(2): 404-414.
- [14] 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.
- Wang X, Wang Y G, Sun C H, *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.
- [15] 刘建福, 陈敬雄, 辜时有. 城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1264-1271.
- Liu J F, Chen J X, Gu S Y. Air microbial pollution and health risk of urban black odorous water[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1264-1271.
- [16] 郝英群, 张璘, 孙成, 等. 江苏省城市河流黑臭评价标准研究[J]. *环境科技*, 2013, **26**(6): 46-50.
- Hao Y Q, Zhang L, Sun C, *et al.* Study on evaluation standard for malodorous and black urban rivers in Jiangsu[J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, **26**(6): 46-50.
- [17] 胡荣梅, 鞠华. 苏南太湖地区主要城市水环境污染综合防治研究(下)[J]. *环境科学*, 1986, **7**(5): 14-23, 94.
- Hu R M, Ju H. Studies on comprehensive prevention and control of water pollution among main cities in the Tai lake region, South of Jiangsu province[J]. *Environmental Science*, 1986, **7**(5): 14-23, 94.
- [18] 傅翔宇, 李亚峰, 王群. 城市黑臭河道治理方法的研究与应用现状[J]. *建筑与预算*, 2016, (4): 37-41.
- [19] 李骏飞, 杨磊三, 周炜峙. 海绵城市与黑臭水体治理共同建设途径探讨[J]. *中国给水排水*, 2016, **32**(24): 35-38.
- Li J F, Yang L S, Zhou W Z. Discussion on common construction of sponge city and malodorous black river treatment project[J]. *China Water & Wastewater*, 2016, **32**(24): 35-38.
- [20] 叶维丽, 刘雅玲, 王强, 等. 城市黑臭水体治理思路初探——以山东省胶州市跃进河—如意湖流域为例[J]. *环境污染与防治*, 2016, **38**(7): 88-92.
- Ye W L, Liu Y L, Wang Q, *et al.* Discussion on the governance of city black smelly water: an example of Yuejinriver—Ruyilake basin in Jiaozhoucity of Shandong province[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2016, **38**(7): 88-92.
- [21] 赵越, 姚瑞华, 徐敏, 等. 我国城市黑臭水体治理实践及思路探讨[J]. *环境保护*, 2015, **43**(13): 27-29.
- Zhao Y, Yao R H, Xu M, *et al.* Study on the practice and route of combating urban black-and-malodorous water body[J]. *Environmental Protection*, 2015, **43**(13): 27-29.
- [22] 张列宇, 王浩, 李国文, 等. 城市黑臭水体治理技术及其发展趋势[J]. *环境保护*, 2017, **45**(5): 62-65.
- Zhang L Y, Wang H, Li G W, *et al.* Management technology and development trend for urban black and odorous water body[J]. *Environmental Protection*, 2017, **45**(5): 62-65.
- [23] 刘成, 胡湛波, 郝晓明, 等. 城市河道黑臭评价模型研究进展[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2011, (1): 43-54.
- Liu C, Hu Z B, Hao X M, *et al.* Progress in the development of black-odour prediction models for urban rivers[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2011, (1): 43-54.
- [24] 李继洲, 牛城, 嵇浩然, 等. 南京城区典型河道水体黑臭现状评价[J]. *徐州工程学院学报(自然科学版)*, 2013, **28**(2): 53-56.
- Li J Z, Niu C, Ji H R, *et al.* Malodorous circumstances assessment of representative river water in Nanjing city[J]. *Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2013, **28**(2): 53-56.
- [25] 魏文龙, 荆红卫, 徐谦, 等. 北京市城市河道水体发黑分级评价方法[J]. *环境化学*, 2016, **35**(7): 1532-1539.
- Wei W L, Jing H W, Xu Q, *et al.* Grading assessment methods of urban creek's blackening in Beijing[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(7): 1532-1539.
- [26] Sugiura N, Utsumi M, Wei B, *et al.* Assessment for the complicated occurrence of nuisance odours from phytoplankton and environmental factors in a eutrophic lake[J]. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 2004, **9**(3-4): 195-201.
- [27] Dzialowski A R, Smith V H, Huggins D G, *et al.* Development of predictive models for geosmin-related taste and odor in Kansas, USA, drinking water reservoirs[J]. *Water Research*, 2009, **43**(11): 2829-2840.
- [28] 万风年, 纪晓亮, 朱元励, 等. 应用遥感监测城市水体水质研究[J]. *浙江农业科学*, 2013, **54**(3): 349-355.
- [29] 姚俊, 曾祥福, 益建芳. 遥感技术在上海苏州河水污染监测

- 中的应用[J]. 影像技术, 2003, **15**(2): 3-7, 12.
- Yao J, Zeng X F, Yi J F. Using remote sensing technology to monitor water pollution of Shanghai Suzhou river [J]. Image Technology, 2003, **15**(2): 3-7, 12.
- [30] 马跃良, 王云鹏, 贾桂梅. 珠江广州河段水体污染的遥感监测应用研究[J]. 重庆环境科学, 2003, **25**(3): 13-16.
- Ma Y L, Wang Y P, Jia G M. Application of remote sensing in monitoring water pollution in Guangzhou section of the Pearl river [J]. Chongqing Environmental Science, 2003, **25**(3): 13-16.
- [31] 南京市统计局. 南京市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013-2014.
- [32] 龙虎网. 秃尾巴河耗资千万整治无效果回应: 明年年底改善[EB/OL]. <http://news.longhoo.net/2016/04/27/27961.html>, 2016-04-19.
- [33] 新浪新闻. 居民投诉数年, 秃尾巴河何时能消除黑臭?[EB/OL]. <http://news.sina.com.cn/o/2016-08-15/doc-ifxunpy9572848.shtml>, 2016-08-15.
- [34] 南京网络问政. 关于天润城附近的秃尾巴河的治理[EB/OL]. <http://www.njbbs.gov.cn/read.php?tid=1230482>, 2016-12-13.
- [35] 唐军武, 田国良, 汪小勇, 等. 水体光谱测量与分析 I: 水面上测量法[J]. 遥感学报, 2004, **8**(1): 37-44.
- Tang J W, Tian G L, Wang X Y, *et al.* The methods of water spectra measurement and analysis I: above-water method[J]. Journal of Remote Sensing, 2004, **8**(1): 37-44.
- [36] 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.
- Qiu Z F, Cui T W, He Y J. Retrieve of red tide distributions from MODIS data based on the characteristics of water spectrum [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, **31**(8): 2233-2237.
- [37] Gallegos C L. Optical water quality of a blackwater river estuary: the Lower St. Johns river, Florida, USA[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2005, **63**(1-2): 57-72.
- [38] 李佐琛, 段洪涛, 张玉超, 等. 藻源型湖泛发生过程水色变化规律[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(2): 524-532.
- Li Z C, Duan H T, Zhang Y C, *et al.* Variations in optical properties and water color during the formation of black bloom waters: a laboratory experiment [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(2): 524-532.
- [39] Wang S L, Li J S, Shen Q, *et al.* MODIS-based radiometric color extraction and classification of inland water with the fore-lake scale: a case study of lake Taihu [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, **8**(2): 907-918.
- [40] Bukata R P, Pozdnyakov D V, Jerome J H, *et al.* Validation of a radiometric color model applicable to optically complex water bodies[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, **77**(2): 165-172.
- [41] Pozdnyakov D V, Kondratyev K Y, Bukata R P, *et al.* Numerical modelling of natural water colour: implications for remote sensing and limnological studies[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, **19**(10): 1913-1932.

CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i>	(1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i>	(9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i>	(18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i>	(27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i>	(49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i>	(57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i>	(68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i>	(77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i>	(89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i>	(109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorous Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i>	(117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i>	(123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i>	(130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i>	(137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i>	(145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i>	(152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i>	(161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i>	(170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i>	(179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i>	(187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i>	(195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i>	(202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i>	(212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i>	(219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i>	(232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i>	(239)
Combined Process of DNB-F-O ₃ -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i>	(247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i>	(256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i>	(269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i>	(276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i>	(284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i>	(292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i>	(300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i>	(310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i>	(321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i>	(331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i>	(339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i>	(348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i>	(355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i>	(363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i>	(371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i>	(389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i>	(399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i>	(406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapigou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i>	(415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i>	(422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i>	(438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i>	(450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i>	(460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i>	(467)