

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.11
第41卷 第11期

目次

中国工业源挥发性有机物排放清单	梁小明, 孙西勃, 徐建铁, 叶代启, 陈来国 (4767)
中国水泥排放清单及分布特征	汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 郭静, 王鹏, 翟文慧, 崔维庚, 汪寿阳, 李时蓓, 董广霞 (4776)
环境空气 PM _{2.5} 化学组分监测数据审核指标的建立: 以长三角地区为例	张哲, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 郭会琴, 王红丽, 楼晟荣, 陶士康, 陈长虹 (4786)
南京江北新区大气颗粒物化学组分的粒径分布特征	张毓秀, 于兴娜, 刘偲嘉, 安俊琳, 张程 (4803)
郑州市 PM _{2.5} 化学组分的季节变化特征及来源解析	张剑飞, 姜楠, 段时光, 孙有昌, 郝祺, 张瑞芹 (4813)
山西大学城 PM _{2.5} 中元素特征、来源及健康风险评估	李雪梅, 牟玲, 田妹, 郑利荣, 李杨勇 (4825)
2000~2019 年中国 PM _{2.5} 时空演化特征	夏晓圣, 汪军红, 宋伟东, 程先富 (4832)
北京地区偏南风 and 偏东风条件下污染特征差异	尹晓梅, 乔林, 朱晓婉, 郭恒, 刘湘雪, 熊亚军 (4844)
基于天气背景天津大气污染输送特征分析	蔡子颖, 杨旭, 韩素芹, 姚青, 刘敬乐 (4855)
基于天气分型的上甸子大气本底站臭氧污染气象条件	吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 朱晓婉, 董璠 (4864)
基于环境空气中 VOCs 在线监测数据精准识别化工园区 VOCs 排放源	孙佳宁, 谢绍东 (4874)
芜湖市大气挥发性有机物污染特征、大气反应活性及源解析	高亢, 章慧, 刘梦迪, 赵晓宇, 吴婷, 贾其娜 (4885)
密云水库上游白河地表水质对不同空间尺度景观格局特征的响应	张微微, 李晓娜, 王超, 赵春桥, 史瑞双 (4895)
北京密云水库流域水体夏季 DOC 和 DIC 质量浓度及同位素组成初探	陈吉吉, 郭婧, 徐苏士, 陶蕾, 荆红卫 (4905)
2009~2018 年太湖湖泛强度变化及其影响因素	辛华荣, 朱广伟, 王雪松, 李骏, 陆隽 (4914)
雷州半岛岭北地区地下水水文地球化学特征	张宏鑫, 吴亚, 罗炜宇, 陈雯, 刘怀庆 (4924)
基于多环境介质氮素和同位素的滦平盆地地下水硝酸盐来源示踪	孙厚云, 卫晓锋, 贾凤超, 李多杰, 李健, 李霞, 殷志强 (4936)
会仙岩溶湿地水体金属元素分布与健康风险评价	李军, 邹胜章, 梁永平, 林永生, 周长松, 赵一 (4948)
太白山自然保护区水体 CDOM 吸收与三维荧光特征	张文浩, 赵铎霖, 王晓毓, 郝强州, 李喜梅, 高鹏程 (4958)
强降雨对平原河网区入湖河道氮、磷影响	连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海 (4970)
长江流域淡水生态系统内分泌干扰物、药物和个人护理品的风险排序	苏超, 崔严 (4981)
嘉兴市城市河网区多环芳烃污染源解析及生态风险评价	杨延梅, 赵航晨, 孟睿, 何连生, 赵昊, 杜士林, 丁婷婷 (4989)
污水处理厂对漓江桂林市城区河段淡水生物中微塑料累积的影响	谢元汕, 张清科, 张滴杉, 钟山, 刘俊勇, 侯晓映, 王华, 冯静培, 梁祖鸿, 陈舞阳 (4999)
村镇生活污水处理设施抗生素浓度分布规律	卢亚楠, 郭雅妮, 王坤, 陆伟东, 王拓, 柴玉峰, 柳蒙蒙, 钟慧, 陈梅雪, 魏源送 (5008)
冬季小流域水体微生物多样性及影响因素	朱金山, 秦海兰, 孙启耀, 王宝珍, 高润霞, 郭锐利, 李武斌 (5016)
水库热分层沉积物中有机物特性及对好氧反硝化细菌脱氮的影响	王彤, 文刚, 黄廷林, 司凡, 王晨旭, 路林超, 林薇 (5027)
长三角地区 MBBR 泥膜复合污水厂低温季节微生物多样性分析	韩文杰, 吴迪, 周家中, 何强, 阚渝姣 (5037)
类群划分方法对南亚热带水库夏季浮游植物群落与环境响应关系的影响	郭芳, 顾继光, 赵剑, 余华章, 肖利娟 (5050)
基于决策树的城市黑臭水体遥感分级	李玲玲, 李云梅, 吕恒, 徐杰, 杨子谦, 毕顺, 许佳峰 (5060)
纳米零价铁强化微生物电催化-厌氧膜生物组合反应器抗膜污染能力及其调控机制	潘阳, 牛承鑫, 支忠祥, 王建辉, 陆雪琴, 戴金鑫, 甄广印, 孙彤彤, 康娜英 (5073)
温度和基质浓度对厌氧氨氧化工艺中 N ₂ O 释放的影响	王丝可, 于恒, 左剑恶 (5082)
以污泥发酵液与尾水混合液为补给碳源的 A ² /O 污染物去除特性	荣懿, 邵劲博, 于优城, 石炬, 金鹏康 (5089)
不同停曝比对连续流亚硝化颗粒污泥运行的影响	张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清 (5097)
中温厌氧消化与高温厌氧消化对污泥重金属风险及稳定性的影响	田中科, 王芬, 闫钊 (5106)
基于 PMF 模型及地统计的土壤重金属健康风险定量评价	韩琳, 徐夕博 (5114)
再开发利用工业场地土壤重金属含量分布及生态风险	沈城, 刘馥雯, 吴健, 黄沈发, 王敏, 黄波涛 (5125)
有机改性蒙脱土对苯的吸附机制和影响因子	侯静雯, 施维林, 高娟 (5133)
硫酸亚铁和硝酸铁施用对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响	李义纯, 陈勇, 唐明灯, 李林峰, 林晓扬, 王艳红, 许迪豪, 艾绍英 (5143)
叶用油菜和孔雀草间作对植物生长和镉累积的影响	闫秀秀, 徐应明, 王林, 陶雪莹, 孙约兵, 梁学峰 (5151)
重金属固定细菌调控土壤铁氧化物阻控小麦 Cd 吸收效应	王晓宇, 韩辉 (5160)
油-稻轮作模式下修复材料对土壤铜修复的持续性影响	赵颖颖, 李虹川, 胡宏祥, 薛中俊, 刘娜, 吴孟君 (5168)
氮肥使用对北方夏玉米季氨挥发的影响	张薇, 倪邦, 许秀春, 杨轩, 孟凡乔 (5176)
生物炭影响下土壤呼吸温度敏感性及其细菌群落结构的变化	曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 黄洋 (5185)
铜尾矿白羊草重金属含量对叶际和根际真菌群落的影响	贾彤, 郭婷艳, 王瑞宏, 柴宝峰 (5193)
典型水环境微生物源异嗅物研究进展	张海涵, 苗雨甜, 黄廷林, 刘凯文, 刘祥, 黄鑫, 杨尚业, 司凡, 李程遥 (5201)
广告: 国家微生物科学数据中心	(前插)
《环境科学》征订启事 (4785) 《环境科学》征稿简则 (4947) 信息 (5015, 5124, 5132)	

基于决策树的城市黑臭水体遥感分级

李玲玲¹, 李云梅^{1,2*}, 吕恒¹, 徐杰¹, 杨子谦¹, 毕顺¹, 许佳峰¹

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023; 2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023)

摘要: 水体黑臭程度遥感监测是了解城市水质现状和综合评价城市水环境治理效果的重要手段. 以南京、常州、无锡和扬州为研究区, 共采集 171 个样点, 同步测量水质参数和光学参数, 分析黑臭水体与一般水体的水色和光学特征, 构建决策树模型进行重度黑臭水体、轻度黑臭水体和非黑臭水体(记为一般水体)识别. 结果表明: ①根据色度可将水体分为 1~6 类水体, 其中, 类型 1~4 为黑臭水体, 分别为灰黑色、深灰色、灰色和浅灰色水体, 类型 5 和类型 6 水体为一般水体, 分别为绿色系和黄色系水体; ②类型 1 水体的非色素颗粒物和有色可溶性有机物含量高, 但色素颗粒物的吸收并不占主导, 类型 2 和 5 水体的吸收以色素颗粒物吸收占主导, 类型 3、4 和 6 水体的吸收以非色素颗粒物吸收占主导; ③根据六类水体的反射光谱差异用黑臭水体差值指数(difference of black-odorous water index, DBWI)、三波段面积水体指数(green-red-nir area water index, G-R-NIR AWI)、绿光波段反射率和归一化黑臭水体指数(normalized difference black-odorous water index, NDBWI)构建的水体分类识别决策树, 能够有效识别出重、轻度黑臭水体和一般水体; ④将决策树模型应用于 2019 年 4 月 9 日扬州的 PlanetScope 影像上, 并利用 10 个同步过境点进行验证, 整体识别精度达到 80.00%, K 值达到 0.67. 通过水色分类后的城市水体分级模型方法, 可推广应用于类似的水体, 为黑臭水体监管提供技术方法.

关键词: 城市黑臭水体; 遥感分级; 决策树; 光学特性; PlanetScope 卫星影像

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)11-5060-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202003266

Remote Sensing Classification of Urban Black-odor Water Based on Decision Tree

LI Ling-ling¹, LI Yun-mei^{1,2*}, LÜ Heng¹, XU Jie¹, YANG Zi-qian¹, BI Shun¹, XU Jia-feng¹

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Education Ministry, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

Abstract: Remote sensing monitoring of black-odor water is an important method for understanding the current status of urban water quality, and comprehensively evaluating the effect of urban water environment treatment. A total of 171 samples were collected in Nanjing, Changzhou, Wuxi, and Yangzhou cities and water quality parameters and optical parameters were measured simultaneously. Based on the analysis of the water color and optical characteristics of the black-odor water and non-black-odor water (denoted as general water), a decision tree was constructed to identify the severe, mild black-odor water, and general water as green and yellow water. The results found that: ①According to the water color, the water bodies can be divided into six types. Among them, type 1 to 4 water bodies are black-odor water, which are gray black, dark gray, gray, and light gray water, respectively, and type 5 and 6 water bodies are general water, which are green and yellow water, respectively; ②Type 1 water body contains high contents of non-pigmented particulate matter and colored dissolved organic matter (CDOM), however, the absorption of pigmented particulate matter is not dominant. Type 2 and 5 water bodies are dominated by pigmented particulate matter. Type 3, 4, and 6 water bodies are dominated by non-pigmented particulate matter; ③After water color classification, and according to the differences of the reflection spectrums of the six types of water bodies, the difference of black-odorous water index (DBWI), green-red-nir area water index (G-R-NIR AWI), the green band reflectance and the normalized difference black-odorous water index (NDBWI) were used to construct a decision tree to identify the severe, mild black-odor water, and general water; ④The decision tree was applied to the PlanetScope satellite image of Yangzhou City on April 9, 2019, and 10 synchronous sampling points were used for verification. The overall recognition accuracy reached 80.00%, and the K value reached 0.67. The urban water classification model, after water color classification, can be applied to other similar water bodies, and provides a technical method for the supervision of black-odor water bodies.

Key words: urban black-odor water body; remote sensing classification; decision tree; optical characteristics; PlanetScope satellite image

城市水环境是城市生态环境的重要组成部分. 然而, 城市河流污染问题日趋严重, 许多城市河流出现了常年性或季节性的黑臭现象^[1]. 水体黑臭是水体有机污染的一种极端现象, 是水体极端污染状态表现形式. 现有的研究表明, 城市黑臭水体产生的主

收稿日期: 2020-03-26; 修订日期: 2020-05-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0503902); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07302003)

作者简介: 李玲玲(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水色遥感, E-mail: leell0408@foxmail.com

* 通信作者, E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn

要原因是由于水中的藻类和细菌的新陈代谢以及人类向水体中过度排放有机物引起的^[2]. 住房和城乡建设部发布的《城市黑臭水体整治工作指南》^[3]定义城市黑臭水体为城市建成区内, 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. 为了控制和治理这种严重的水污染情况, 2015 年 4 月 2 日国务院颁发了《水污染防治行动计划》(“水十条”)明确指出, 到 2030 年全国城市建成区黑臭水体总体得到消除. 持续、有效的黑臭水体监测, 是进行黑臭水体整治的前提. 常规的黑臭水体监测不连续, 不能全面反映整个城市黑臭水体水质实际状况, 不利于城市黑臭水体的识别与对黑臭程度的评价. 而卫星遥感监测其宏观性、动态性和科学性的特点, 为城市水环境的监测提供了新的解决思路与方法^[4].

早期国内外学者更多地专注于黑臭水体形成机制^[5-11]、评价^[12-18]和治理^[19-27], 往后开始关注黑臭水体的光学特性^[28-31]. 目前国内诸多学者利用遥感技术, 已经开展了黑臭水体遥感识别的研究^[32-41]. 曹红业^[4]分析了重度黑臭、轻度黑臭和一般水体的固有光学量、表观光学量和水质参数特性, 并提出了基于黑臭水体光谱特征的饱和度法和光谱指数模型. 温爽等^[34]构建了基于 GF-2 影像的城市黑臭水体遥感识别算法, 包括单波段法、差值法、比值法和色度法, 并认为比值法识别精度最高. 姚月等^[35]利用沈阳市光谱数据分析了黑臭水体与一般水体的光谱特征, 提出基于反射率光谱的黑臭水体指数, 并基于 GF-2 影像进行识别精度评价. 李佳琦等^[36]通过分析黑臭水体形成机制和实验数据, 从光谱特征上构建反映水体清洁程度的光谱指数, 综合光谱指数和解译标志共同进行黑臭水体遥感识别. 姚焕玫等^[37]基于 PlanetScope 影像, 提出近红外单波段阈值法、黑臭水体差比值指数法、黑臭水体增强指数法和归一化黑臭水体指数法以及基于色度法的饱和度识别算法, 其中归一化黑臭水体指数法识别正确率最高. 占玲骅^[38]基于同步实测数据、GF-2 影像以及水质参数, 发现采用色度法和饱和度法难以确定区分阈值, 最终采用“角度-比值组合法”进行了黑臭水体识别.

目前构建的模型, 大部分只能进行黑臭水体识别, 而无法区分黑臭程度. 然而在黑臭水体治理过程的监管中, 及时掌握水体的黑臭程度是十分有必要的. 对黑臭水体进行分级可以揭示河流水体的黑臭程度, 使管理者能正确、全面地掌握水质的动态变化过程, 为针对不同黑臭程度的河流采取不同治理措施提供决策帮助.

此外, 各个研究区的地理位置、气候条件以及污染源不同, 导致产生黑臭的原因不同, 致使黑臭水体的颜色、光谱等都具有显著差异. 因此, 在某一研究区建立的模型, 很难推广应用于其他区域, 为了提高模型的适用性, 本研究拟首先对城市水色进行分类, 针对重度黑臭水体、轻度黑臭水体以及一般水体的光谱特征, 建立黑臭水体识别与分级的决策树模型, 并将模型应用于高空间分辨率卫星数据. 本研究提出的模型方法, 可推广应用于类似的水体, 以期为黑臭水体监管提供技术方法.

1 材料与方法

1.1 研究区及样点分布

研究区为南京、常州、无锡和扬州(图 1), 这 4 个城市地处江苏省的中、南部地区, 水网密集, 且有长江横贯东西. 此外, 它们皆是长三角中心城市, 位于上海经济圈、南京都市圈和苏锡常都市圈双重辐射区, 经济发达. 但随着经济的急剧发展和城镇化进程的发展, 城市河流黑臭现象十分严峻. 这不仅影响周边居民的生活和健康, 也制约了经济的发展. 本研究于 2017~2019 年在上述城市开展了地面实验, 共调查了 171 个样点, 其中黑臭样点 83 个, 一般水体样点 88 个, 样点分布如图 1 所示. 其中 104 个样点用于建模, 57 个样点用于模型评价, 10 个样点为卫星数据同步的验证数据.

1.2 地面实验数据

在野外首先对采样点进行反射光谱测量, 其次对透明度、溶解氧和氧化还原电位等参数进行现场测量^[34], 同时采集水样放于低温冷藏箱, 并尽快送至实验室测量悬浮物、叶绿素 a (chlorophyll a, Chla)、可溶性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC)、总氮 (total nitrogen, TN)、总磷 (total phosphorus, TP)、硫化物和氨氮的浓度, 以及颗粒物和有色可溶性有机物 (colored dissolved organic matter, CDOM) 的吸收系数.

黑臭水体判别结合现场感官感受以及文献^[3]规定的水质指标(透明度、溶解氧、氧化还原电位和氨氮), 采样点的黑臭程度分别为重度黑臭、轻度黑臭和非黑臭(一般).

1.3 高分影像数据

本研究将构建的模型应用于扬州 2019 年 4 月 19 日 PlanetScope 卫星数据. 该数据多光谱空间分辨率达 3 m, 共 4 个波段, 中心波长分别为 487、542、631 和 813 nm. PlanetScope 现有在轨卫星共 132 颗, 是全球最大的卫星星座, 可实现每天监测全球一次, 相较于其他高分辨率数据, 具备更高频次的重

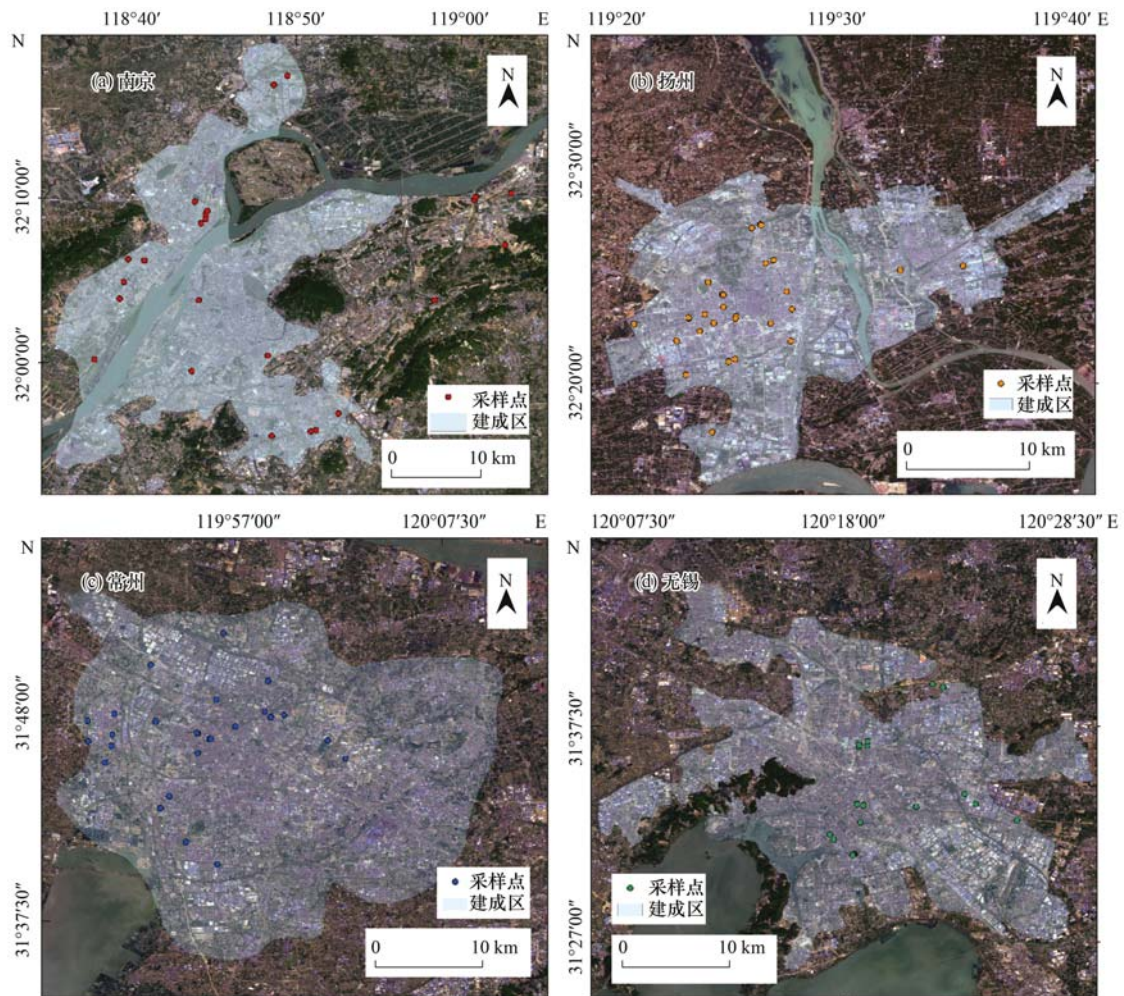


图1 研究区样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling points in the study area

访,有利于对城市黑臭水体进行动态监测。

2 结果与讨论

2.1 基于水色分类的黑臭水体分级决策树构建

2.1.1 不同黑臭程度水体的水质参数的差异分析

根据野外调查结果,对不同黑臭程度水体的水质参数进行分析(图2)。重度黑臭水体在透明度、溶解氧、氧化还原电位、氨氮、总氮、总磷、硫化物和可溶性有机碳等水质参数中可以明显地区别于轻度黑臭水体与一般水体。其中,硫化物与黑臭程度的关系最为密切,水体黑臭程度越高,硫化物浓度越高。重度黑臭水体含有的硫化物[图2(g)]浓度均值(5.60 ± 2.14) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 大约是轻度黑臭水体的8倍,一般水体的25倍。轻度黑臭水体与一般水体的Chla[图2(h)]浓度变化范围都较大,分别为 $1.75 \sim 346.33 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.26 \sim 373.43 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,但重度黑臭水体的Chla浓度却较低,为 $4.30 \sim 63.01 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,这和李晓洁等^[39]的研究相似,表明Chla浓度与水体的不同黑臭程度的关系较为复杂,不是简单的线性关系。重度黑臭水体中Chla浓度不仅与总

氮、总磷浓度有关,可能还受其他一些浓度较高的物质影响,受藻类生长或死亡的影响。

一般而言,轻度黑臭水体与一般水体的水质参数较接近(图2),这也是黑臭水体与一般水体难以区分的重要因素之一。

2.1.2 水体组分对不同黑臭程度水体总吸收贡献的差异分析

为了考察引起黑臭水体反射光谱差异的光学机制,对水体组分(色素颗粒物、非色素颗粒物和CDOM)为总吸收系数贡献变化的关系进行分析。由于纯水的吸收是固定的,因此本节中所指的总吸收不包含纯水的吸收。图3为440 nm处3种水体组分对总吸收的贡献,在重度黑臭水体中,所有样点分散在非色素颗粒物和CDOM占主导的区域,说明重度黑臭水体中非色素颗粒物和CDOM含量高。此外,轻度黑臭水体与一般水体都是既有色素颗粒物吸收占主导的,也有非色素颗粒物吸收占主导的,但轻度黑臭水体CDOM对总吸收的贡献率整体较重度黑臭水体偏低,较一般水体偏高,这与丁潇蕾等^[28]的研究结论较为一致。

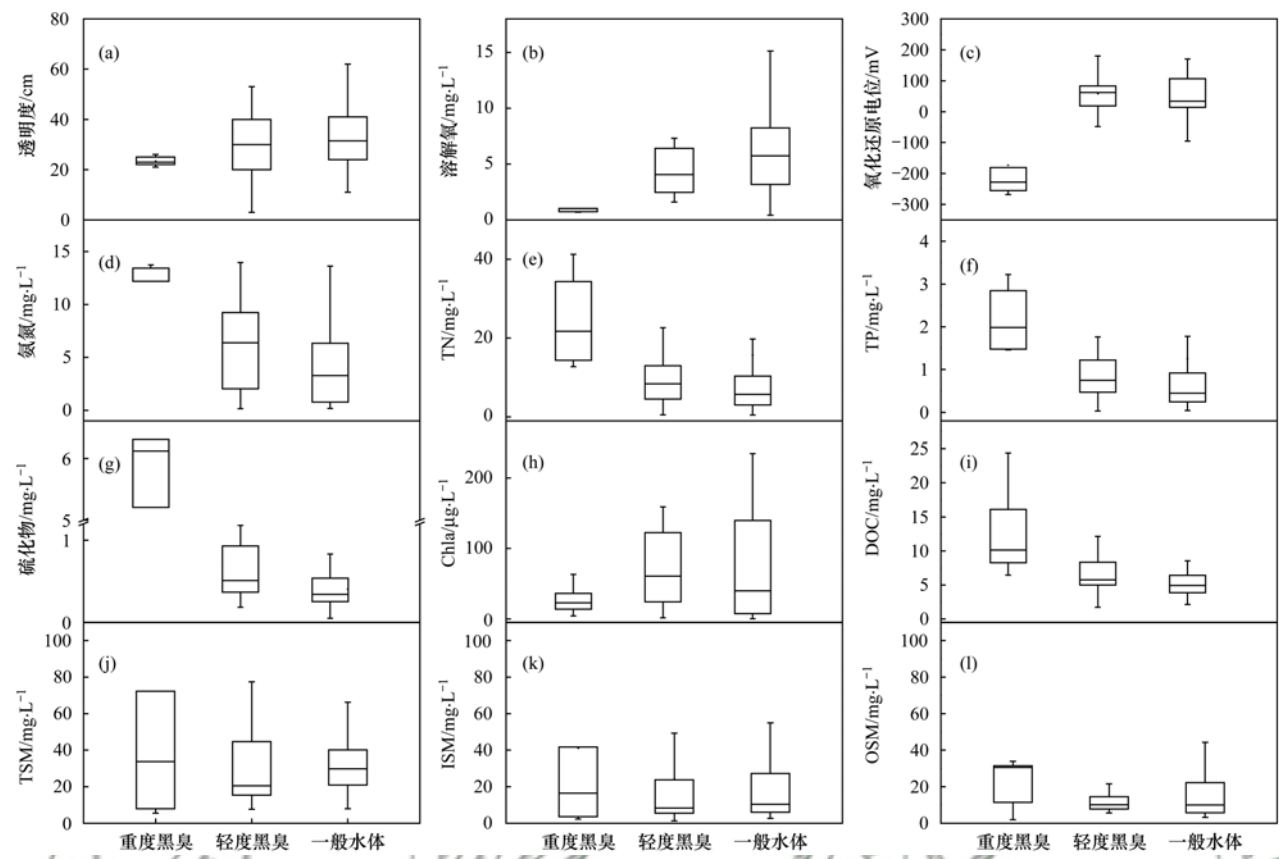


图 2 不同黑臭程度水体水质参数箱型图

Fig. 2 Box diagram of water quality parameters in different degrees of black-odor

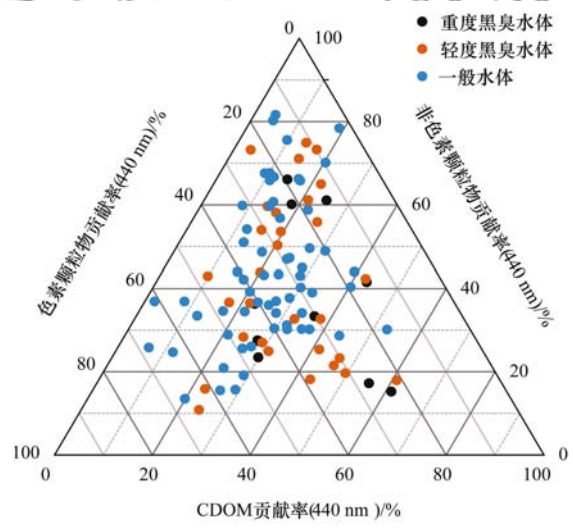


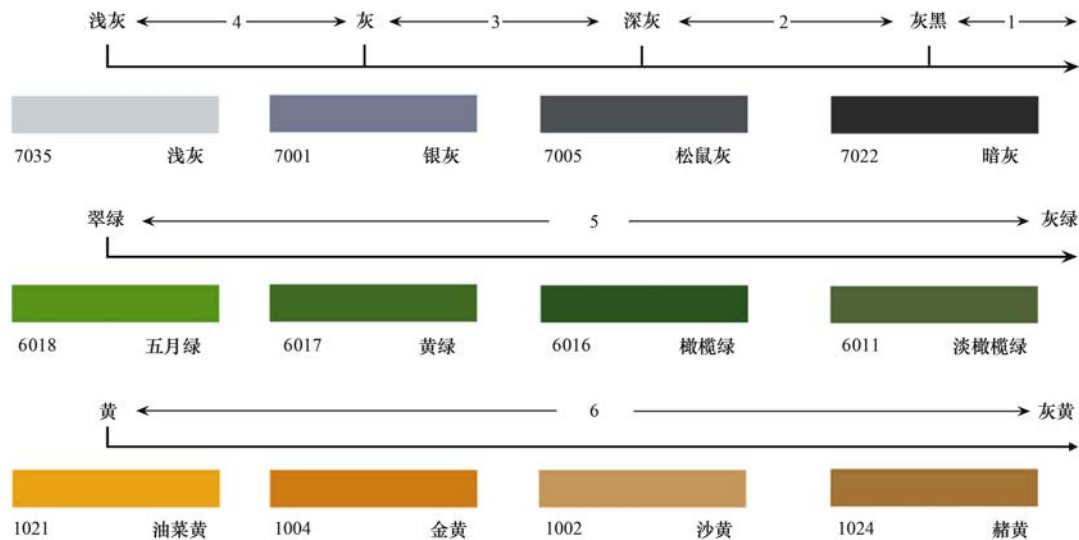
图 3 各组分对不同黑臭程度水体总吸收的贡献

Fig. 3 Contribution of each component to the total absorption of water in different degrees of black-odor

从图 3 看出,黑臭水体与一般水体中,水体组分对总吸收的贡献差异不明显. 然而,野外调查表明,不同水体具有较大的水色差异:一般而言,黑臭程度越严重,水体颜色越黑;悬浮物浓度越高,水体颜色越黄;水体中浮游植物越多,水体颜色越绿. 轻度黑臭水体的颜色不仅有灰黑色,还有墨绿色、灰黄色和浅灰色等,一般水体的颜色有黄色和绿色等,但相比

于黑臭水体更为清澈. 此外,野外调查发现,墨绿色的轻度黑臭水体与绿色的一般水体的遥感反射率十分相似,这也正是利用遥感反射率识别黑臭水体时二者容易混淆的原因之一. 通过水质分析可以看出,墨绿色的轻度黑臭水体中掺杂了硫化铁(FeS)和硫化锰(MnS)等黑灰色物质,使得较绿色的一般水体浑浊. 综上,水体中物质组成的吸收、散射变化,从视觉上反映为直观的水色变化,从光谱上则决定了水面遥感反射率的特征^[42, 43],因此,通过对水体进行水色分类,再探讨其光学特征,能够更好地揭示不同种类黑臭水体的反射波谱的差异.

为了寻找能够更清晰地呈现黑臭水体与一般水体差异的光学特征,为黑臭水体识别与分级模型构建提供依据,在此,对所有样点数据的颜色特征进行分析,并参照国际标准劳拉比色卡,定义了城市河流水体的 3 种颜色系列(图 4):灰色系、绿色系以及黄色系. 灰色系代表黑臭水体,绿色系和黄色系代表一般水体. 其中,灰色系又分为 1~4 级,1 级是重度黑臭水体,2~4 级是轻度黑臭水体,所有的黑臭归到 1~4 级内,不管颜色是偏绿色或者偏黄色,只要是黑臭水体,按照黑臭水体黑的程度归到灰色系中,这个色系只包含黑臭程度的信息,是为了避免同为偏绿色或者偏黄色的黑臭水体和一般水体会混合在一



色卡为国际标准比色卡劳拉比色卡, 7035 等为代码

图 4 水体色度分级表

Fig. 4 Water color classification table

起. 对应地, 水体按色度一共分为 6 类, 即类型 1 水体(灰黑色)、类型 2 水体(深灰色)、类型 3 水体(灰色)、类型 4 水体(浅灰色)、类型 5 水体(绿色系)和类型 6 水体(黄色系).

分类后水体组分对总吸收系数的贡献率可以清晰地分为 2 大类(除去类型 1 水体, 因为在图 3 中类型 1 水体已经易区分于其他类型水体), 如图 5 所示, 类型 2 和 5 水体的吸收是以色素颗粒物吸收占主导, 类型 3、4 和 6 水体的吸收是以非色素颗粒物吸收占主导的.

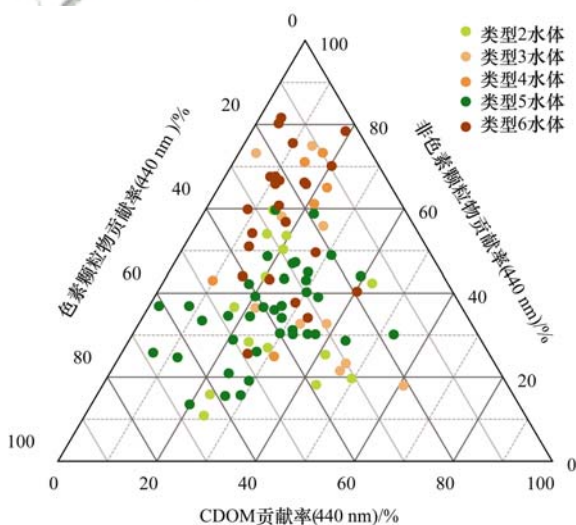


图 5 各水体组分对类型 2~6 水体总吸收的贡献

Fig. 5 Contribution of each component to the total absorption of water in type 2-6 water bodies

2.1.3 基于水色分类的黑臭水体光谱特征提取与决策树构建

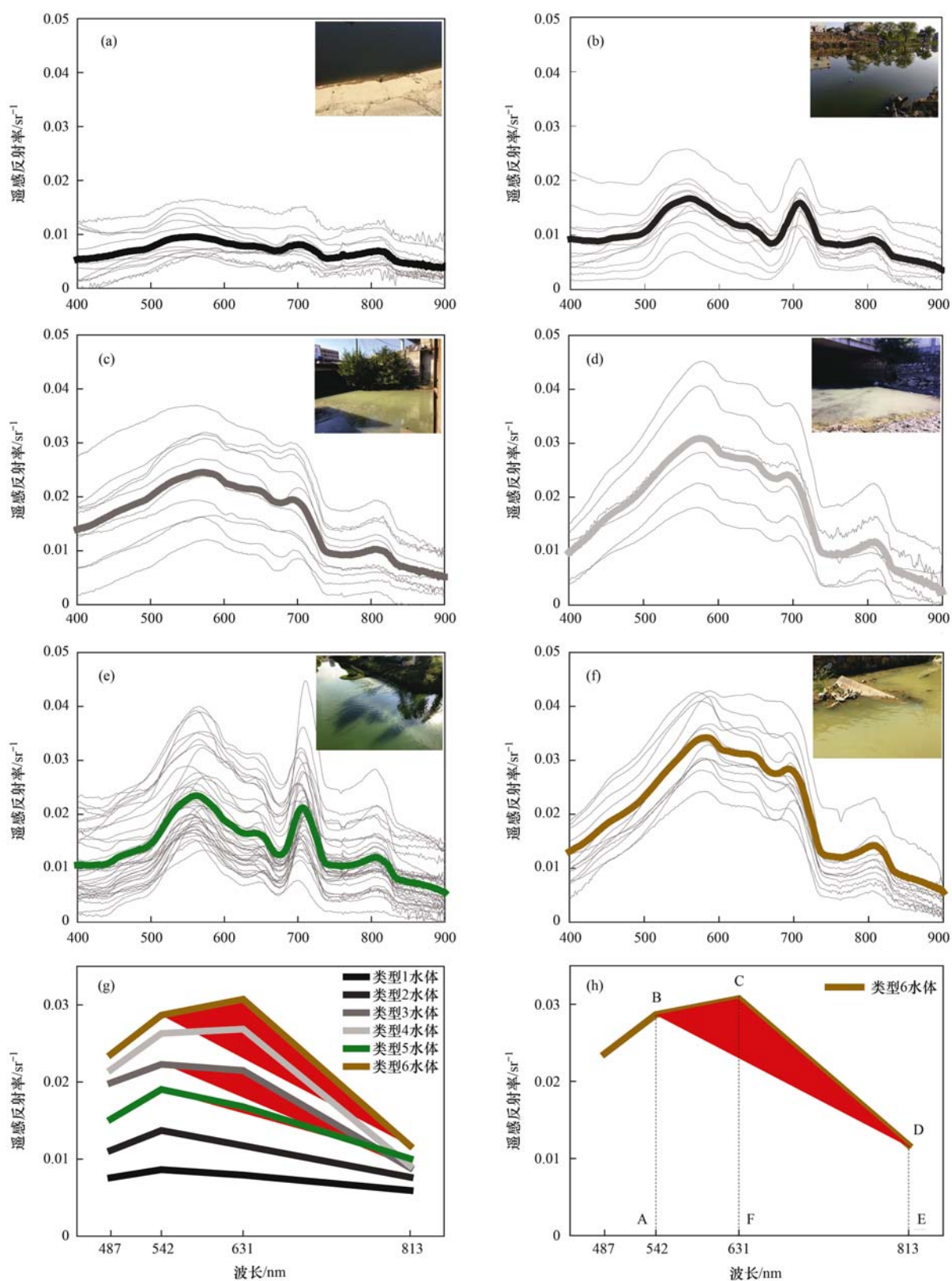
图 6(a)~6(f) 显示了 6 类水体的水面反射率的实测光谱, 图 6(g) 为参照 PlanetScope 数据的

谱响应函数经过波段积分转换为卫星波段等效反射率的光谱曲线. 图 6(g) 显示出类型 1 水体与其他几类水体的等效反射率光谱曲线(光谱曲线)有明显的区别, 在 487~813 nm 波长范围内整体走势非常平缓, 虽具有波动变化, 但波峰波谷不突出. 类型 1 水体在蓝光波段和绿光波段的反射率差值明显区别于其他几种类型水体, 因此, 参考温爽等^[44]的研究, 利用黑臭水体差值指数(difference of black-odorous water index, DBWI), 即蓝绿波段反射率的差值, 来区分类别 1 水体和其他类型水体, 阈值选取如图 7(a)所示, 即当 $DBWI < 0.0015 \text{ sr}^{-1}$ 时, 水体被判别为类型 1 水体; 当 $DBWI \geq 0.0015 \text{ sr}^{-1}$ 时, 水体被判别为其他类型水体.

此外, 不同类型水体的反射率光谱曲线在 542、631 和 813 nm 处围成的三角形面积, 即三波段面积水体指数(green-red-nir area water index, G-R-NIR AWI)大小也有显著差异[图 6(g)红色区域]: 以色素颗粒物主导的水体类型(类型 2 和 5 水体)G-R-NIR AWI 小, 接近于 0, 而以非色素颗粒物主导的水体类型(类型 3、4 和 6 水体)G-R-NIR AWI 大. 因此, 以 G-R-NIR AWI 为指标, 对除了类型 1 的其它水体类型进行进一步细分. G-R-NIR AWI 的计算方法[图 6(h)]为梯形 ABCF 与梯形 FCDE 的和与梯形 ABDE 的差, 具体见下式.

$$G-R-NIR AWI = 1/2[\Delta\lambda_1(R_{rsRed} - R_{rsNir}) + \Delta\lambda_2(R_{rsRed} - R_{rsGreen})]$$

式中, $R_{rsGreen}$ 、 R_{rsRed} 和 R_{rsNir} 分别为遥感影像绿、红和近红外波段大气校正后遥感反射率值. $\Delta\lambda_1$ 为红光波段与绿光波段中心波长的差值, $\Delta\lambda_2$ 为近红外与



(a) ~ (f) 依次代表类型 1~6 水体, 类型 1 为重度黑臭水体, 类型 2~4 为轻度黑臭水体, 类型 5 和 6 为一般水体, 粗线为各类水体的反射率光谱均值, (g) 为各类水体模拟到 PlanetScope 传感器上的等效遥感反射率, 红色区域为不同类型水体的反射率光谱曲线在 542、631 和 813 nm 处围成的三角形面积 (以类型 3、5 和 6 为例), (h) 为三波段面积指数 (即红色区域) 的计算方法

图 6 城市黑臭水体与一般水体的反射率光谱

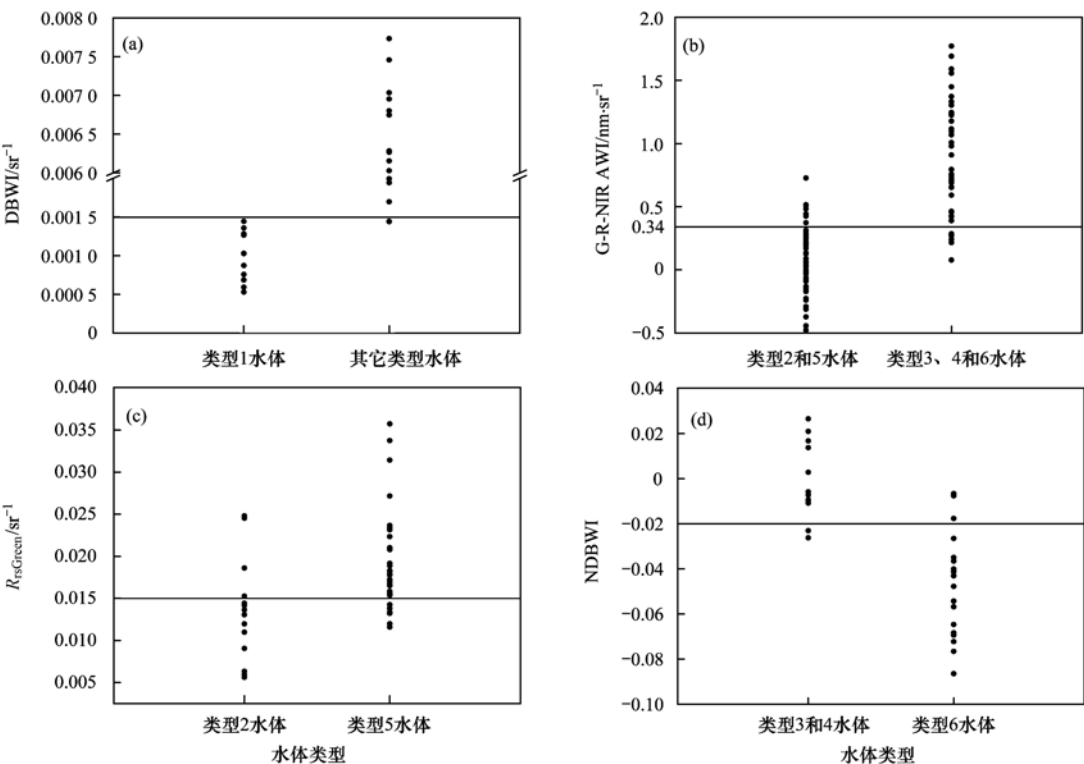
Fig. 6 Reflectance spectra of urban black-odor water and general water

红光波段中心波长的差值, G-R-NIR AWI 单位为 $\text{nm} \cdot \text{sr}^{-1}$. G-R-NIR AWI 阈值选取如图 7(b) 所示,

即当 G-R-NIR AWI $< 0.34 \text{ nm} \cdot \text{sr}^{-1}$ 时, 水体被判别为类型 2 和 5 水体; 当 G-R-NIR AWI ≥ 0.34

nm·sr⁻¹时,水体被判别为类型3、4和6水体。

类型2和5水体的光谱曲线形态相似[图6(g)],但类型5水体的整体反射率大于类型2水体,所以对这2类水体的区分采用单波段反射率阈值法^[44],即用绿光波段的反射率($R_{rsGreen}$)来区分类型2和5水体. 阈值选取如图7(c)所示,即当 $R_{rsGreen} < 0.015\text{ sr}^{-1}$ 时,水体被判别为类型2水体;当 $R_{rsGreen} \geq 0.015\text{ sr}^{-1}$ 时,水体被判别为类型5水体。



图内线表示阈值

图7 模型阈值选取

Fig. 7 Model threshold selection

综上,基于 PlanetScope 数据对城市黑臭水体进行分类的决策树如图8所示。

2.2 模型精度评价

使用57个独立实测点来评价决策树模型的精度,模型的精度评价使用混淆矩阵来表示,如表1所示. 其中包含了5个不同的误差评价指标,分别为整体正确识别率,黑臭水体错分率,黑臭水体漏分率,正常水体错分率,正常水体漏分率和 Kappa 系数(K 值),表2为决策树模型的精度评价结果。

2.2.1 整体正确识别率

整体正确识别率是指所有分类正确的样点与总样点个数的比值,它能直接反映分类正确的比例,公式如下:

$$P_1 = (a + e + i) / (a + b + c + d + e + f + g + h + i)$$

在类型3、4和6水体中[图6(g)],类型6水体的光谱曲线在542~631 nm范围内斜率较类型3和4水体大,因此,利用归一化黑臭水体指数(normalized difference black-odorous water index, NDBWI),即在绿光波段和红光波段的反射率差、和的比值,区分类型6水体与类型3和4水体,阈值选取如图7(d)所示,即当 $NDBWI \geq -0.02$ 时,水体被判别为类型3和4水体;当 $NDBWI < -0.02$ 时,水体被判别为类型6水体。

表1 黑臭水体分级混淆矩阵

Table 1 Black-odor water classification confusion matrix			
识别	实际		
	一般水体	轻度黑臭水体	重度黑臭水体
一般水体	$a^{1)}$	b	c
轻度黑臭水体	d	e	f
重度黑臭水体	g	h	i

1) a 表示实际在地面为一般水体在影像上也被识别为一般水体的样点个数,依此类推

2.2.2 一般水体错分率

一般水体错分率是指分类后被划为一般水体实际上为轻度黑臭水体和重度黑臭水体的概率,公式如下:

$$P_2 = (b + c) / (a + b + c)$$

2.2.3 一般水体漏分率

一般水体漏分率是指实际为一般水体被错误地分到轻度黑臭水体和重度黑臭水体的概率,公式

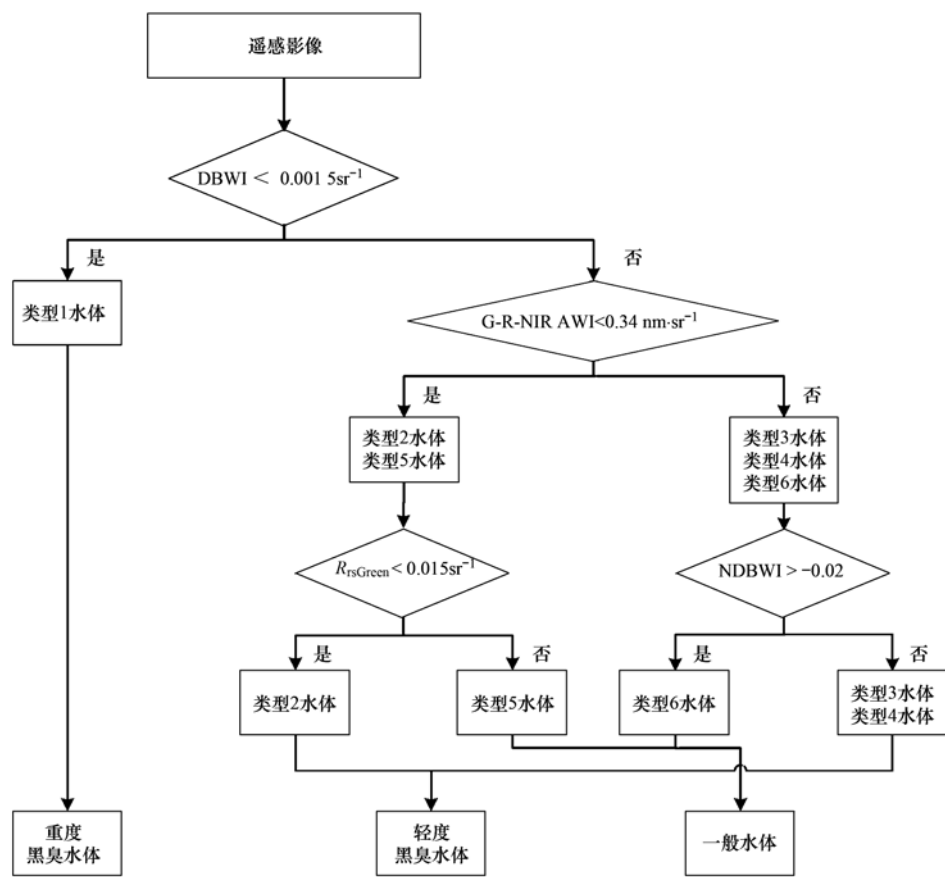


图8 黑臭水体识别与分级决策树

Fig. 8 Black-odor water body identification and classification decision tree

表2 模型精度评价结果

Table 2 Model accuracy evaluation results

评价指标	K 值	整体精度 /%	一般水体		轻度黑臭水体		重度黑臭水体	
			错分率/%	漏分率/%	错分率/%	漏分率/%	错分率/%	漏分率/%
评价结果	0.63	75.40	22.20	30.00	36.40	30.00	11.80	11.80

如下：

$$P_3 = (d + g)/(a + d + g)$$

2.2.4 轻度黑臭水体错分率

轻度黑臭水体错分率是指分类后被划为轻度黑臭水体实际上为重度黑臭水体和一般水体的概率，公式如下：

$$P_4 = (d + f)/(d + e + f)$$

2.2.5 轻度黑臭水体漏分率

轻度黑臭水体漏分率是指实际为轻度黑臭水体被错误地分到重度黑臭水体和一般水体的概率，公式为：

$$P_5 = (b + h)/(b + e + h)$$

2.2.6 重度黑臭水体错分率

重度黑臭水体错分率是指分类后被划为重度黑臭水体实际上为轻度黑臭水体和一般水体的概率，公式如下：

$$P_6 = (g + h)/(g + h + i)$$

2.2.7 重度黑臭水体漏分率

重度黑臭水体漏分率是指实际为重度黑臭水体被错误地分到轻度黑臭水体和一般水体的概率，公式如下：

$$P_7 = (c + f)/(c + f + i)$$

2.2.8 K值的计算

K值是一种衡量分类精度的指标，用于数据的一致性检验^[45]。由于在实际的分类中，各个类别的样本数量往往不太平衡，模型容易偏向数量大的类别。因此所谓一致性检验就是模型预测结果和实际分类结果是否一致。K值的计算是基于混淆矩阵的，取值为-1~1之间，通常大于0(表3)。计算公式如下：

$$\begin{aligned} A &= (a + b + c) \times (a + d + g) + (d + e + f) \times \\ &\quad (b + e + h) + (g + h + i) \times (c + f + i) \\ B &= a + b + c + d + e + f + g + h + i \\ C &= (a + e + i) \\ K &= (B \times C - A)/(B^2 - A) \end{aligned}$$

式中, A 为某一类别真实像元总数与该类中被分类像元总数之积后对所有类别求和的结果, B 为整个混淆矩阵元素之和, C 为对角线元素之和.

表 3 K 值与一致性

K 值	一致性
<0.00	很差
$0.00 \sim 0.20$	差
$0.20 \sim 0.40$	一般
$0.40 \sim 0.60$	好
$0.60 \sim 0.80$	很好
$0.80 \sim 1.00$	极好

根据表 2 和表 3 的模型精度评价结果, 整体识别精度达 75.40%, K 值达 0.63, 说明数据具有较高的一致性且模型识别精度较高. 对上述错分漏分现象进行分析, 认为主要是由于光谱重叠造成: 错分率和漏分率较高的是轻度黑臭水体与一般水体, 主要是由于类型 2 水体 (轻度黑臭水体) 与类型 5 水体 (绿色系的一般水体), 类型 3 和 4 水体 (轻度黑臭水体) 与类型 6 水体 (黄色系的一般水体) 的光谱形状非常相似, 且重叠区域较大, 使得一部分样点难以区分, 未来需增加这些类型的观测数据, 提高算法精度.

2.3 基于高分影像的黑臭水体识别与分级

2.3.1 PlanetScope 影像预处理

将 2.1.3 节构建的模型应用于卫星影像需要先

进行大气校正获得水面遥感反射率. 本研究获取的 PlanetScope 影像是 L3B 级别的数据产品, 已经过辐射定标和正射校正, 因此本研究只需要进行大气校正, 采用去瑞利散射的方法进行大气校正并计算水面反射率 R_{rc} , 算法原理参见文献[46], 算法中需要如水汽总量、臭氧总量等大气参数, 利用同日获取的海陆颜色仪 (ocean and land colour instrument, OLCI) 数据自带的辅助数据集提取.

为了考察大气校正的效果, 利用卫星数据获取地面观测的水面反射率 R_{rs} 与影像对应点位瑞利散射校正后的反射率 R_{rc} 进行对比 (图 9), R_{rs} 与 R_{rc} 二者具有较好的相关性, R^2 高于 0.65, 说明可以利用 R_{rc} 进行黑臭分级. 由于校正后的影像数据依然包含一定的大气信息, 与地面光谱仪观测的水面反射率存在一定差距, 因此, 结合地面调查观测结果, 根据 2.1.3 节的方法, 对各指标阈值进行了重新率定: DBWI 的阈值为 0.0006 sr^{-1} , G-R-NIR AWI 的阈值为 $-1.05\text{ nm}\cdot\text{sr}^{-1}$, $R_{rs\text{Green}}$ 的阈值为 0.025 sr^{-1} , NDBWI 的阈值为 0.02.

2.3.2 星地同步验证结果

将构建的决策树模型应用于 2019 年 4 月 9 日扬州的 PlanetScope 影像上, 识别重度黑臭水体、轻度黑臭水体和一般水体, 结果如图 10 所示.

与卫星过境当日地面同步过境 ($\pm 3\text{ h}$ 内) 的 10

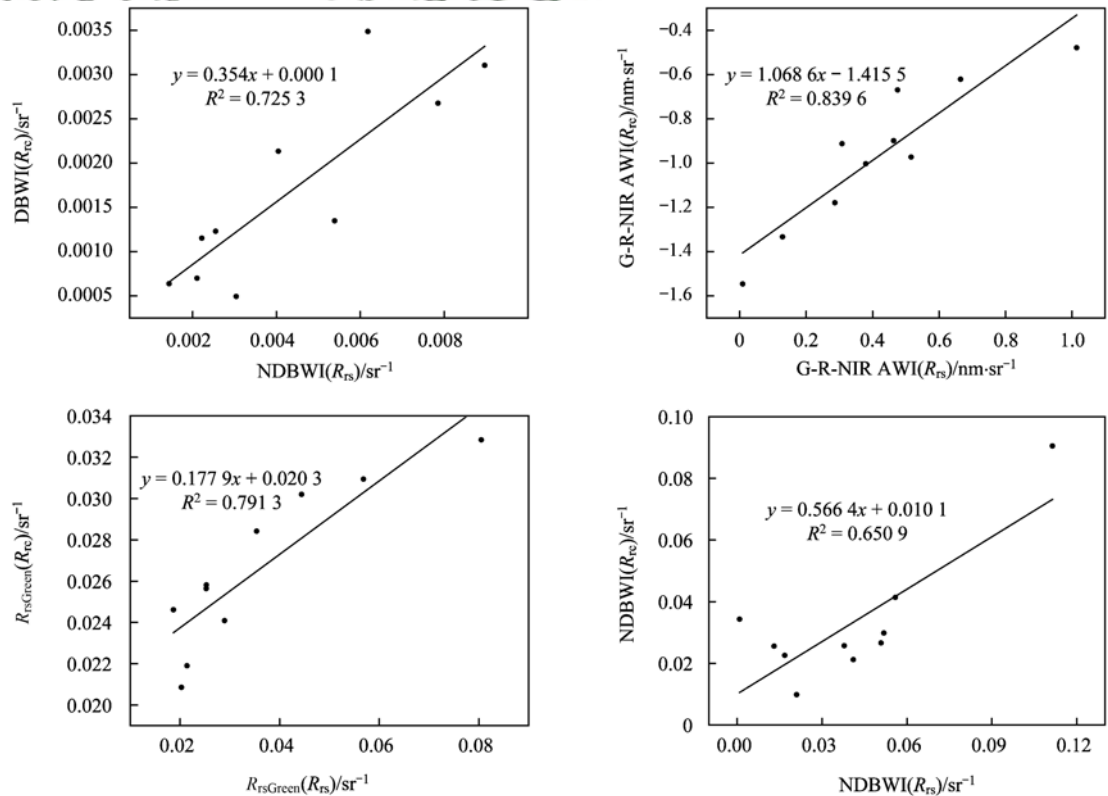


图 9 瑞利散射校正 R_{rc} 与地面同步观测 R_{rs} 的相关性

Fig. 9 Correlation between Rayleigh scattering correction R_{rc} and ground synchronous observation R_{rs}

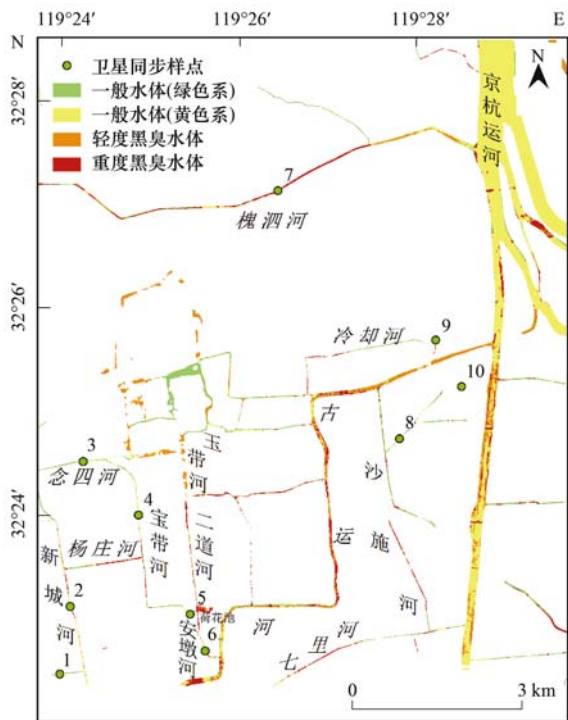


图 10 2019 年 4 月 17 日扬州市黑臭水体分级
Fig. 10 Classification of black-odor waters and general waters in Yangzhou City on April 17, 2019

个采样点对比结果如表 4 所示,整体识别精度达到 80.00%, K 值达到 0.67,重度黑臭水体错分率和漏分率均为 0%,说明重度黑臭水体识别效果最好,轻度黑臭水体漏分率为 0%,错分率为 40.00%,部分一般水体被误分为轻度黑臭水体,说明轻度黑臭水体与一般水体容易混淆。

2.3.3 扬州主城区黑臭水体空间分布

利用决策树提取研究区黑臭水体,识别出黑臭河段 12 条,河段总长度 47.03 km,分别为槐泗河、冷却河、念四河、新城河、杨庄河、宝带河、玉带河、二道河、安墩河、古运河、沙施河和七里河。从图 10 中可以看出,重度黑臭河段、轻度黑臭河段分布范围广且不连续,重度、轻度黑臭河段长度如表 5 所示。

图 10 中所有的黑臭河段均处于扬州的建成区,是扬州人口密集的区域。基本上整个建成区所有的河流都有黑臭河段,但不同河段黑臭情况不同:黑臭水体主要分布在河宽较窄的河段,尤其是流经化工厂和建筑施工现场的河段,容易产生轻度、重度黑臭水体,如冷却河、念四河、杨庄河东支、古运河南支、沙施河南支和玉带河东支;流经居民区的河段也易

表 4 2019 年 4 月 17 日星地同步验证结果

Table 4 Results of satellite to ground synchronization verification on April 17, 2019

样点号	透明度/cm	溶解氧/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	氧化还原电位/mV	氨氮/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	识别结果	实际结果
1	80	6.80	192.0	0.786	一般	一般
2	43	4.20	197.0	1.662	一般	一般
3	36	6.40	15.5	1.826	轻度	轻度
4	20	6.20	18.3	5.157	轻度	轻度
5	25	5.60	39.0	6.392	轻度	轻度
6	56	6.60	158.0	8.924	轻度	一般
7	20	1.26	-128.0	3.984	重度	重度
8	26	6.58	177.0	1.857	轻度	一般
9	5	1.91	128.0	1.993	一般	一般
10	20	40.00	130.0	0.475	一般	一般

表 5 研究区重度、轻度黑臭河段长度统计/km

Table 5 Statistics of the lengths of severe and mild black-odor river in the study area/km

序号	河段名称	河段总长度	重度黑臭河段长度	轻度黑臭河段长度
1	槐泗河	11.05	3.34	0.66
2	冷却河	2.97	0.46	0.09
3	念四河	1.74	0.00	0.47
4	新城河	6.27	0.56	1.46
5	杨庄河	1.37	0.78	0.07
6	宝带河	3.90	0.42	0.83
7	玉带河	1.71	0.49	0.08
8	二道河	1.90	1.01	0.33
9	安墩河	0.97	0.30	0.40
10	古运河	8.65	2.06	1.54
11	沙施河	2.91	0.47	0.00
12	七里河	3.58	1.61	0.50

发生轻度黑臭水体,如新城河南支、宝带河南支(流经大学城宿舍区)、二道河北支、安墩河南支和七里河西支。而位于郊外,受人为干扰活动较少的河流,几乎没有黑臭,如槐泗河下游河段流入京杭运河后水色正常。

2.3.4 黑臭河段形成的环境因素分析

针对决策树识别出的黑臭河段,分析其周边环境特点如下。

(1)居民区等人口密集区的生活污水排放 例如宝带河[图 11(a)]等河段,流经居民区、商业区等地,生活污水大量排放,生活污水中含有大量有机物污染物,有机污染物入河是造成水体黑臭现象的主要原因之一^[15]。其在分解过程中消耗大量的溶解氧,造成水体缺氧,厌氧微生物大量繁殖并分解有机

物产生大量致黑致臭物质。

(2)河段附近有建筑工地、施工现场或者化工厂 例如念四河[图 11(b)]等河段,念四河附近有一处建筑工地,污水排入河流,使得水体颜色发灰。往往这些建筑工地或者工厂排入较高温度的工业冷却水,导致局部甚至整个水体水温升高。水体中微生物在适宜水温下发生强烈的活动,致使水体中的大

量有机物分解,降低溶解氧^[15]。

(3)河宽较窄、河道硬化、水动力不足 水动力学条件不足、水循环不畅也是引起河道水体黑臭的原因之一,诸如河道水量不足、流速低缓以及河道硬质化等都有可能致河道黑臭^[15]。例如新盛路新盛花园[图 11(c)]的一条重度黑臭河段,流速缓慢,散发恶臭,排污口有白色物质排入。



(a)宝带河; (b)念四河; (c)新盛路新盛花园

图 11 城市黑臭水体现场及其环境

Fig. 11 Urban black-odor water scene and its environment

3 结论

(1)对水体组分(色素颗粒物、非色素颗粒物和 CDOM)为总吸收系数贡献变化的关系进行分析:重度黑臭水体中非色素颗粒物、CDOM 含量高,轻度黑臭水体与一般水体都是既有色素颗粒物吸收占主导的,也有非色素颗粒物吸收占主导的,但轻度黑臭水体 CDOM 对总吸收的贡献率整体较重度黑臭水体偏低,较一般水体偏高。

(2)黑臭水体与一般水体来源复杂,根据水体色度将各类水体进行分类,分别为类型 1~6 水体,分析其光谱曲线特征,选取 DBWI 指数、G-R-NIR AWI 指数、绿光波段反射率和 NDBWI 指数为指标,构建水体类型决策树识别模型,能够识别重、轻度黑臭水体和一般水体(绿色系和黄色系)。

(3)将构建的决策树模型应用于 2019 年 4 月 9 日扬州的 PlanetScope 影像上,提取重度黑臭水体、轻度黑臭水体和一般水体(绿色系和黄色系)。利用 10 个同步过境采样点进行验证,最终整体识别精度达到 80.00%,K 值达到 0.67。针对决策树识别出的黑臭河段,分析其环境特点,认为黑臭水体的形成主要受人口密集区的生活污水、河段附近工业废水排放,以及河宽较窄,河道硬化,水动力不足等因素影响。

致谢:感谢南京师范大学水色遥感团队为收集城市黑臭水体光谱和水质参数付出的努力。

参考文献:

- [1] 陈玉辉. 典型城市黑臭河道治理后的富营养化分析与预测研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.
Chen Y H. Analysis and prediction of eutrophication of typical urban malodorous-black river after treating[D]. Shanghai: East China Normal University, 2013.
- [2] Lazaro T R. Urban hydrology: a multidisciplinary perspective [M]. Michigan: Ann Arbor Science Publishers, 1979.
- [3] 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.
- [4] 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.
Cao H Y. Study on analysis of optical properties and remote sensing identifiable models of black and malodorous water in typical cities in China [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [5] 罗纪旦, 方柏容. 黄浦江水体黑臭问题研究[J]. 上海环境科学, 1983, (5): 6-8.
- [6] 骆梦文. 黄浦江水体黑臭的由来[J]. 上海环境科学, 1986, (5): 37, 31.
- [7] 应太林, 张国莹, 吴芯芯. 苏州河水体黑臭机理及底质再悬浮对水体的影响[J]. 上海环境科学, 1997, 16(1): 23-26.
Ying T L, Zhang G Y, Wu X X. The mechanism of blackening and stink and effects of resuspended sediments on Suzhou creek water quality[J]. Shanghai Environmental Sciences, 1997, 16(1): 23-26.
- [8] 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.
- [9] Cao J X, Sun Q, Zhao D H, et al. A critical review of the appearance of black-odorous waterbodies in China and treatment

- methods [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **385**: 121511.
- [10] 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.
- [11] Romano A H. Sediment-water interactions in anoxic freshwater sediment [J]. *Water Science Technology*, 1963, (8): 159-162.
- [12] 程江, 吴阿娜, 车越, 等. 平原河网地区水体黑臭预测评价关键指标研究[J]. *中国给水排水*, 2006, **22**(9): 18-22.
Cheng J, Wu E N, Che Y, *et al.* Study on key indicators for judging black and odorous water in area of plain river system [J]. *China Water & Wastewater*, 2006, **22**(9): 18-22.
- [13] 骆梦文. 环境恶臭评价[J]. *环境工程*, 1988, **6**(4): 53-56.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 魏文龙, 荆红卫, 华蕾, 等. 北京市城市河道水体黑臭分级评价研究[J]. *环境科学与技术*, 2016, **39**(S2): 407-412.
Wei W L, Jing H W, Hua L, *et al.* Studies on grading assessment methods of urban smelly creeks blackening and odors in Beijing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **39**(S2): 407-412.
- [17] 杨阳, 马小雪, 商栩. 温州市温瑞塘河水体黑臭评价[J]. *浙江农业科学*, 2012, (4): 566-569.
- [18] 周文瑞. 汾河太原城区段河流黑臭问题研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2006.
Zhou W R. Study on black and stink issue of Fen River in Taiyuan City zone [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2006.
- [19] 宫璐璐. 黑臭水体形成原因与治理技术研究[J]. *科学技术创新*, 2019, (23): 96-97.
- [20] 贾雪梅, 刘智强, 毛鹏, 等. 典型苏南地区黑臭水体成因分析及治理对策的探讨——以常州市罗溪镇为例[J]. *绿色科技*, 2018, (6): 33-35.
Jia X M, Liu Z Q, Mao K, *et al.* A discussion on the causes and the countermeasures of the black-odor rivers in the typical south of Jiangsu area [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2018, (6): 33-35.
- [21] 宁梓洁, 王鑫. 黑臭水体治理技术研究进展[J]. *环境工程*, 2018, **36**(8): 26-29, 73.
Ning Z J, Wang X. Overview of the black-odorous waters treatment technologies [J]. *Environmental Engineering*, 2018, **36**(8): 26-29, 73.
- [22] 徐敏, 姚瑞华, 宋玲玲, 等. 我国城市水体黑臭治理的基本思路研究[J]. *中国环境管理*, 2015, **7**(2): 74-78.
Xu M, Yao R H, Song L L, *et al.* Primary exploration of general plan of the urban black-odor river treatment in China [J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2015, **7**(2): 74-78.
- [23] 徐响. 城市雨源型季节性黑臭水体治理对策研究[J]. *环境与发展*, 2019, **31**(1): 23-24.
Xu X. Treatment countermeasures for seasonal and rain source-type urban malodorous black river [J]. *Environment and Development*, 2019, **31**(1): 23-24.
- [24] 张建军. 滨江城市水体污染的典型特征及保护对策[J]. *江苏环境科技*, 2006, **19**(5): 43-45.
Zhang J J. Protection countermeasures and typical characteristic of water body pollution of cities along the Yangzi River [J]. *Jiangsu Environmental Science and Technology*, 2006, **19**(5): 43-45.
- [25] 张倩, 郝坤. 黑臭水体产生的原因及治理技术[J]. *智能城市*, 2018, **4**(17): 118-119.
- [26] 仇启强, 王立权. 黑龙江省黑臭水体治理的实践探讨[J]. *科学技术创新*, 2019, (19): 171-172.
- [27] 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.
- [28] 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.
Ding X L, Li Y M, Lü H, *et al.* Analysis of absorption characteristics of urban black-odor water [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4519-4529.
- [29] 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.
- [30] 张思敏, 李云梅, 王桥, 等. 富营养化水体中黑水团的吸收及反射特性分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3402-3412.
Zhang S M, Li Y M, Wang Q, *et al.* Absorption and reflection characteristics of black water blooms in the eutrophic water [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3402-3412.
- [31] 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.
- [32] 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.
Ji G. Research and application on black and odorous water body by remote sensing [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.
- [33] 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.
- [34] Jin H X, Pan J. 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.
- [35] 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.
Wen S, Wang Q, Li Y M, *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.
- [36] 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 Y, Shen Q, Zhu L, *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.
- [37] 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 J Q, Li J G, Zhu L, *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.
- [37] 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 H M, Lu Y N, Gong Z Q. 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.
- [38] 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.
- Zhan L Y. Study on recognition models of urban black and odorous water bodies based on optical characteristics [J]. Shanghai: East China Normal University, 2019.
- [39] 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.
- Li X J. Pollutant characteristics and remote sensing identification of typical black and odorous water bodies in Shenyang [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [40] 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**: 6577-6590.
- [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.
- [42] Wang S L, Li J S, Shen Q, *et al.* MODIS-based radiometric color extraction and classification of inland water with the Forel-Ule 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.
- [43] Wang S L, Li J S, Zhang B, *et al.* Trophic state assessment of global inland waters using a MODIS-derived Forel-Ule index[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, **217**: 444-460.
- [44] 温爽. 基于 GF-2 影像的城市黑臭水体遥感识别——以南京市为例[D]. 南京: 南京师范大学, 2018.
- Wen S. Remote sensing recognition of urban black and odorous water bodies based on GF-2 Images — a case study in Nanjing [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2018.
- [45] Tang W, Hu J, Zhang H, *et al.* Kappa coefficient: a popular measure of rater agreement[J]. Shanghai Archives of Psychiatry, 2015, **27**(1): 62-67.
- [46] Chen X R, Shang S L, Lee Z P, *et al.* High-frequency observation of floating algae from AHI on Himawari-8 [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, **227**: 151-161.



CONTENTS

Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, XU Jian-tie, <i>et al.</i> (4767)
Contribution of Emissions from Cement to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (4776)
Audit Indicators and Suggested Ranges for Data Validation of Chemical Components in Ambient PM _{2.5} : A Case Study of the Yangtze River Delta	 ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (4786)
Size Distribution of Particulate Chemical Components in Nanjing Jiangbei New Area	ZHANG Yu-xiu, YU Xing-na, LIU Si-jia, <i>et al.</i> (4803)
Seasonal Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhengzhou	ZHANG Jian-fei, JIANG Nan, DUAN Shi-guang, <i>et al.</i> (4813)
Characteristics, Sources, and Health Risks of Elements in PM _{2.5} in Shanxi University Town	LI Xue-mei, MU Ling, TIAN Mei, <i>et al.</i> (4825)
Spatio-temporal Evolution of PM _{2.5} Concentration During 2000-2019 in China	XIA Xiao-sheng, WANG Jun-hong, SONG Wei-dong, <i>et al.</i> (4832)
Differences in Pollution Characteristics Under the Southerly and Easterly Wind in Beijing	YIN Xiao-mei, QIAO Lin, ZHU Xiao-wan, <i>et al.</i> (4844)
Transport Characteristics of Air Pollution in Tianjin Based on Weather Background	CAI Zi-ying, YAN Xu, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4855)
Influence of Meteorological Conditions on Ozone Pollution at Shangdianzi Station Based on Weather Classification	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4864)
Accurate Identification of Ambient VOCs Emission Sources in an Industrial Park Using On-Line Monitoring Data	SUN Jia-ning, XIE Shao-dong (4874)
Characteristics, Atmospheric Reactivity, and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Wuhu	GAO Kang, ZHANG Hui, LIU Meng-di, <i>et al.</i> (4885)
Water Quality Response to Landscape Pattern at Different Spatial Scales in Baihe River in the Upper Reaches of the Miyun Reservoir ...	ZHANG Wei-wei, LI Xiao-na, WANG Chao, <i>et al.</i> (4895)
Concentration and Carbon Isotope Composition of DOC and DIC in the Miyun Reservoir Watershed in Summer	CHEN Ji-ji, GUO Jing, XU Su-shi, <i>et al.</i> (4905)
Variation and Driving Factors of Black Water Event Intensity in Lake Taihu During 2009 to 2018	XIN Hua-rong, ZHU Guang-wei, WANG Xue-song, <i>et al.</i> (4914)
Hydrogeochemical Investigations of Groundwater in the Lingbei Area, Leizhou Peninsula	ZHANG Hong-xin, WU Ya, LUO Wei-yu, <i>et al.</i> (4924)
Source of Groundwater Nitrate in Luanping Basin Based on Multi-environment Media Nitrogen Cycle and Isotopes	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, JIA Feng-chao, <i>et al.</i> (4936)
Metal Distributions and Human Health Risk Assessments on Waters in the Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, LIANG Yong-ping, <i>et al.</i> (4948)
Absorption and Three Dimensional Fluorescence Spectra of CDOM in the Water of the Taibaishan Nature Reserve	ZHANG Wen-hao, ZHAO Duo-lin, WANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (4958)
Effect of Heavy Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Concentrations in Rivers at River-net Plain	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4970)
Risk Ranking of Endocrine Disrupting Compounds, Pharmaceuticals, and Personal Care Products in the Aquatic Environment of the Yangtze River Basin	SU Chao, CUI Yan (4981)
Sources and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Jiaxing River Network	YANG Yan-mei, ZHAO Hang-chen, MENG Rui, <i>et al.</i> (4989)
Impact of a Sewage Treatment Plant on the Accumulation of Microplastics in Freshwater Organisms in the Lijiang River of the Guilin Urban Section	 XIE Yuan-shan, ZHANG Qing-ke, ZHANG Li-shan, <i>et al.</i> (4999)
Distribution of Antibiotic Concentration in Domestic Wastewater Treatment Facilities in Villages and Towns	LU Ya-nan, GUO Ya-ni, WANG Kun, <i>et al.</i> (5008)
Microbial Diversity and Influencing Factors in a Small Watershed in Winter	ZHU Jin-shan, QIN Hai-lan, SUN Qi-yao, <i>et al.</i> (5016)
Characteristics of Organic Matter in Sediments During the Thermal Stratification of a Reservoir and Effects on an Aerobic Denitrifier	WANG Tong, WEN Gang, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5027)
Microbial Diversity Analysis of WWTPs Based on Hybrid-MBBR Process in a Low Temperature Season in the Yangtze River Delta	HAN Wen-jie, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (5037)
Effects of Phytoplankton Classifications on the Relationship Between Phytoplankton Community and Environment in Summer Subtropical Reservoirs, Southern China	 GUO Fang, GU Ji-Guang, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (5050)
Remote Sensing Classification of Urban Black-odor Water Based on Decision Tree	LI Ling-ling, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (5060)
Enhanced Membrane Anti-fouling Ability of Anaerobic Membrane Bioreactor Equipped with Bio-electrochemical System Using Nano-zero-valent Iron and Its Regulation Mechanism	 PAN Yang, NIU Cheng-xin, ZHI Zhong-xiang, <i>et al.</i> (5073)
Effects of Temperature and Substrate Concentration on N ₂ O Release of ANAMMOX Process	WANG Si-ke, YU Heng, ZUO Jian-e (5082)
Characteristics of Nutrient Removal in a Pilot-scale A ² /O with Mixture of Sludge Fermentation Liquor and Tail Water as External Carbon Source	 RONG Yi, SHAO Jin-bo, YU You-cheng, <i>et al.</i> (5089)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Operation of a Continuous-Flow Reactor with Partial Nitrification Granules	 ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i> (5097)
Effects of Mesophilic Anaerobic Digestion and Thermophilic Anaerobic Digestion on the Risk and Stability of Heavy Metals in Sludge	TIAN Zhong-ke, WANG Fen, YAN Zhao (5106)
Quantitative Evaluation of Human Health Risk of Heavy Metals in Soils Based on Positive Matrix Factorization Model and Geo-statistics	HAN Lin, XU Xi-bo (5114)
Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in the Soil of Redevelopment Industrial Sites	SHEN Cheng, LIU Fu-wen, WU Jian, <i>et al.</i> (5125)
Investigating Adsorption of Naphthalene to Organo-Modified Montmorillonites and Influencing Factors	HOU Jing-wen, SHI Wei-lin, GAO Juan (5133)
Effects of Ferrous Sulfate and Ferric Nitrate on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, CHEN Yong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (5143)
Effects of Intercropping of <i>Brassica chinensis</i> L. and <i>Tagetes patula</i> L. on the Growth and Cadmium Accumulation of Plants	YAN Xiu-xiu, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (5151)
Effects of Heavy Metal-immobilizing Bacteria on Reducing Wheat Uptake Cd by Regulation Soil Iron Oxides	WANG Xiao-yu, HAN Hui (5160)
Sustained Effects of Remediation Materials on Soil Copper Remediation Under Oil-Rice Rotation	ZHAO Ying-ying, LI Hong-chuan, HU Hong-xiang, <i>et al.</i> (5168)
Impacts of Nitrogen Application on Ammonia Volatilization During Maize Season in Northern China	ZHANG Wei, NI Bang, XU Xiu-chun, <i>et al.</i> (5176)
Effect of Biochar on Changes of the Temperature Sensitivity of Soil Respiration and Bacterial Community Structure	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (5185)
Effects of Heavy Metal Contents on Phyllosphere and Rhizosphere Fungal Communities for <i>Bathriochloa ischaemum</i> in Copper Tailings Area	 JIA Tong, GUO Ting-yan, WANG Rui-hong, <i>et al.</i> (5193)
Advances in Microbe-Derived Taste and Odor Compounds in Typical Aquatic Ecosystems	ZHANG Hai-han, MIAO Yu-tian, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5201)