

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法

杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年5月

第42卷 第5期
Vol.42 No.5

目次

北京冬季 PM _{2.5} 中有机气溶胶的化学特征和来源解析	徐楠, 王甜甜, 李晓, 唐荣志, 郭松, 胡敏 (2101)
北京地区 2019 年 2~3 月供暖结束后两次污染过程特征分析	尹晓梅, 蒲维维, 王继康, 刘湘雪, 乔林 (2110)
北京 2019 年冬季一次典型霾污染特征与成因分析	廉涵阳, 杨欣, 张普, 陈义珍, 杨小阳, 赵好希, 何友江, 赵丹婷 (2121)
青岛沿海地区夏季和冬季新粒子生成特征对比	孙悦, 朱玉姣, 孟赫, 刘兵, 刘玉虹, 董灿, 姚小红, 王文兴, 薛丽坤 (2133)
太原市城乡居民采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价	黄浩, 徐子琪, 严俊霞, 赵秀阁, 王丹璐 (2143)
西安市新装修公共场所空气污染物浓度分析及健康风险评价	范洁, 樊灏, 沈振兴, 党文鹏, 郑伟, 王志华, 付毅 (2153)
超低排放典型燃烧源颗粒物及水溶性离子排放水平与特征	胡月琪, 王铮, 郭建辉, 冯亚君, 丁萌萌, 颜旭 (2159)
合肥市夏季大气颗粒物中微生物群落的高通量测序分析	姜少毅, 孙博文, 代海涛, 王润芳, 马大卫, 朱仁斌 (2169)
郑州市细颗粒物时空差异及管控措施影响	董喆, 袁明浩, 苏方成, 张剑飞, 孙佳葆, 张瑞芹 (2179)
2016~2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析	钱悦, 许彬, 夏玲君, 陈燕玲, 邓力琛, 王欢, 张根 (2190)
天山北坡城市群气溶胶光学特性时空分布特征	张喆, 王建丽, 王瑾杰, 陈香月, 刘兴涛, 阿提干·吾斯曼 (2202)
基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法	杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺 (2213)
太湖水体 Chl-a 预测模型 ARIMA 的构建及应用优化	李娜, 李勇, 冯家成, 单雅洁, 钱佳宁 (2223)
松花湖水空间差异及富营养化空间自相关分析	丁洋, 赵进勇, 张晶, 付意成, 彭文启, 陈渠昌, 李艳艳 (2232)
会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价	朱丹尼, 邹胜章, 李军, 樊连杰, 赵一, 谢浩, 朱天龙, 潘民强, 徐利 (2240)
京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素	程中华, 邓义祥, 卓小可, 代丹, 于涛 (2251)
次降雨过程中不同土地利用配置对径流中氮流失的影响	罗义峰, 陈方鑫, 周豪, 龙翼, 严冬春, 谭文浩, 李丹丹, 陈晓燕 (2260)
碳氮同位素解析典型岩溶流域地下水中硝酸盐来源与归趋	任坤, 潘晓东, 梁嘉鹏, 彭聪, 曾洁 (2268)
冰封状态下里湖冰-水中浮游细菌群落结构差异	李文宝, 杨旭, 田雅楠, 杜蕾 (2276)
城市再生水河道沉积物细菌群落空间变化分析: 以京津冀北运河为例	邱莹, 靳燕, 苏振华, 邱琰茗, 赵栋梁, 郭道宇 (2287)
太湖春夏两季反硝化与厌氧氨氧化速率的空间差异及其影响因素	赵锋, 许海, 詹旭, 朱广伟, 郭宇龙, 康丽娟, 朱梦圆 (2296)
三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系	陈莎, 谢青, 付梅, 江韬, 王永敏, 王定勇 (2303)
铁硫改性生物炭去除水中的磷	桑倩倩, 王芳君, 赵元添, 周强, 蔡雨麒, 邓颖, 田文清, 陈永志, 马娟 (2313)
钢渣对水体中磷的去除性能及机制解析	罗晓, 张峻搏, 何磊, 杨雪晶, 吕鹏翼 (2324)
BS-18 两性修饰膨润土对四环素和诺氟沙星复合污染的吸附	王新欣, 孟昭福, 刘欣, 王腾, 胡啸龙, 孙秀贤 (2334)
Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ 复合光催化剂的制备及其可见光催化性能	高闯闯, 刘海成, 孟无霜, 郝双玲, 薛婷婷, 陈国栋, Joseph Acquah (2343)
可见光驱动下罗丹明 B 自活化过硫酸盐降解双酚 A	张怡晨, 白雪, 石娟, 金鹏康 (2353)
铁钛共掺杂氧化铝诱导表面双反应中心催化臭氧氧化去除水中污染物	张帆, 宋阳, 胡春, 吕来 (2360)
硫化铁铜双金属复合材料的制备及除铬机制	屈敏, 王源, 陈辉霞, 王兴润, 徐红彬 (2370)
电催化-生物电化学耦合系统处理青霉素废水的机制	曲有鹏, 吕江维, 董跃, 冯玉杰, 张杰 (2378)
缺氧/好氧交替连续流的生活污水好氧颗粒污泥运行及污染物去除机制	李冬, 杨敬畏, 李悦, 李帅, 张诗睿, 王文强, 张杰 (2385)
反硝化除磷污泥聚集体内原位除磷活性及有机物浓度的影响	吕永涛, 姜晓童, 徒彦, 王旭东, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (2396)
基于臭氧旁路处理的污泥原位减量技术工艺	薛冰, 刘宾寒, 韦婷婷, 王先恺, 陈思思, 董滨 (2402)
活性炭对城市有机固废厌氧消化过程抗生素抗性基因行为特征的影响	马佳莹, 王盼亮, 汪冰寒, 苏应龙, 谢冰 (2413)
6 种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制	凌宇, 闫国凯, 王海燕, 董伟羊, 王欢, 常洋, 李丛宇 (2422)
中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素	李成, 王让会, 李兆哲, 徐扬 (2432)
不同水分条件和微生物生物量水平下水稻土有机碳矿化及其影响因子特征	刘琪, 李宇虹, 李哲, 魏晓梦, 祝贞科, 吴金水, 葛体达 (2440)
青藏高原林地土壤的氮转化特征及其影响因素分析: 以祁连山和藏东南地区为例	何芳, 张丽梅, 申聪聪, 陈金全, 刘四义 (2449)
基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价	胡梦琨, 李春艳, 李娜娜, 吉天琪, 郑登友 (2457)
长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响	夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 张文学, 蓝贤瑾, 刘秀梅, 刘佳, 刘光荣, 李祖章, 王萍 (2469)
川南山区土壤与农作物重金属特征及成因	韩伟, 王成文, 彭敏, 王乔林, 杨帆, 徐仁廷 (2480)
宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价	杨帆, 罗红雪, 钟艳霞, 王幼奇, 白一茹 (2490)
重金属钝化剂阻控生菜 Cd 吸收的功能稳定性和适用性	庞发虎, 吴雪姣, 孔雪菲, 曾宪, 王晓宇, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉 (2502)
典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响	张雨婷, 田应兵, 黄道友, 张泉, 许超, 朱捍华, 朱奇宏 (2512)
油茶果壳改性生物炭吸附性能及其耦合淹水对土壤 Cd 形态影响	蔡彤, 杜辉辉, 刘孝利, 铁柏清, 杨宇 (2522)
土地利用变化对松花江下游湿地土壤真菌群落结构及功能的影响	徐飞, 张拓, 怀宝东, 隋文志, 杨雪 (2531)
渔业复垦塌陷地抗生素抗性基因与微生物群落	程森, 路平, 冯启言 (2541)
3 种常用除草剂对细菌抗生素耐药性的影响	李曦, 廖汉鹏, 崔鹏, 白玉丹, 刘晨, 文畅, 周顺桂 (2550)
污水再生利用微生物控制标准及其制定方法探讨	陈卓, 崔琦, 曹可凡, 陆韻, 巫寅虎, 胡洪营 (2558)
《环境科学》征订启事 (2439) 《环境科学》征稿简则 (2479) 信息 (2152, 2231, 2286)	

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法

杨子谦¹, 刘怀庆¹, 吕恒^{1*}, 李云梅¹, 朱利², 周亚明², 李玲玲¹, 毕顺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. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100029)

摘要: 城市水体是城市生态系统中的重要组成部分, 为此, 针对城市水体提出了一种基于国产高分影像的水环境遥感综合评价方法. 在 2017~2019 年间的南京、无锡、常州和扬州市等城市多次水体采样工作的基础上, 分析了城市水体光谱特征与水质参数的相应关系. 基于国际标准的色度转换模型和 FUI (forel-ule index) 水色指数, 构建了基于高分二号 (GF-2) 影像的适用于城市水体的 U-FUI (urban forel-ule index) 水色指数, 实现了城市水体的遥感分级, 独立的验证数据表明分级模型的识别正确率可达 72%. 结果表明, 根据 U-FUI 水色指数可以将城市水体有效地分为 U-FUI I~U-FUI VI 共 6 级水体, 依次分别代表水色呈蓝色、浅绿色、深绿色、黄色、黄棕色以及灰黑色的水体. 其中, U-FUI 的 I 级水体水质较好而在城市水体中少有分布, U-FUI 的 II 和 III 级水体具有较高的叶绿素 a 浓度, U-FUI 的 IV 和 V 级水体的总悬浮物浓度和无机悬浮物浓度相对较高, U-FUI 的 VI 级水体水质较差且水质参数与各级水体均有较大差异. 同时, 将该方法成功地应用于 2018 年 4 月 9 日南京市 GF-2 影像, 结果显示南京市水体以 U-FUI II~U-FUI IV 级水体为主, U-FUI 的 I 级、V 级和 VI 级水体在城市中的分布相对较少, 空间分布特征与同期原位采样结果一致.

关键词: 城市水体; 水色指数; 高分二号; 遥感分级; 水质参数

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)05-2213-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202008285

Comprehensive Classification Method of Urban Water by Remote Sensing Based on High-Resolution Images

YANG Zi-qian¹, LIU Huai-qing¹, LÜ Heng^{1*}, LI Yun-mei¹, ZHU Li², ZHOU Ya-ming², LI Ling-ling¹, BI Shun¹

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

Abstract: Urban water is a significant part of the urban ecosystem. Therefore, a comprehensive evaluation method of the water environment was proposed based on domestic high-resolution images. The relationships between the spectral characteristics and water quality parameters of urban water were analyzed based on sampling in Nanjing, Wuxi, Changzhou, and Yangzhou from 2017 to 2019. An index named the U-FUI (urban Forel-Ule index) suitable for urban water based on GF-2 images was proposed to achieve the classification of urban water on the basis of the international standard chroma conversion model and the Forel-Ule index. Independent verification data showed that the recognition accuracy of the classification model could reach 72%. The results indicated that urban water can be classified into six classes from I to VI, which represent water colors of blue, light green, dark green, yellow, yellowish brown, and dark grey, respectively, according to the U-FUI. Among them, the water quality of U-FUI I water is good, but is rarely distributed in urban water. The concentrations of chlorophyll-a in U-FUI II-III water are higher than those of the other classes; the concentrations of total suspended solids, particularly inorganic suspended solids, of U-FUI IV-V water are higher than those of the other classes; and the water quality of U-FUI VI water is poor and the water quality parameters are different from those of the other classes. Meanwhile, the method was successfully applied to the GF-2 image of Nanjing on April 9, 2018. The results showed that the urban water in Nanjing is mainly composed of U-FUI II-IV water, whereas the distribution of U-FUI I, V, and VI water is lower in the city. The spatial distribution characteristics were consistent with the results of in-situ sampling in the same period.

Key words: urban water; water color index; GF-2; remote sensing classification; water quality parameters

城市水体是城市生态系统中的重要组成部分^[1]. 随着城市化进程的不断推进, 人口的急剧增加以及工业的迅速发展, 城市流域产生的污染负荷逐渐增加, 造成水体水质下降, 削弱了水体的景观功能并对居民的生活造成一定影响^[2], 因此对城市水体的宏观监测和有效地水质评估尤为重要. 但传统的人工监测方法费时费力且无法反映城市水环境的整体情况, 而遥感技术具有大面积同步观测、多时相、综合性、对比性以及一定的经济效益等优势, 可

弥补传统监测方法中的不足, 从而为城市水体的监测提供便利和技术支持.

现有的研究主要是基于水体的物理化学指标即从水体水质的角度对城市水体进行评估和分级, 常

收稿日期: 2020-08-28; 修订日期: 2020-11-16

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07302003); 国家自然科学基金项目 (42071299)

作者简介: 杨子谦 (1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水色遥感, E-mail: njnuyzq1996@163.com

* 通信作者, E-mail: Heng. Lyu@njnu.edu.cn

见的如指数评价法^[3,4]、模糊评价法^[5,6]以及结合遥感技术开展城市水体中黑臭水体识别的方法^[7~9]。但获取水体理化指标需要通过实地的检测或室内分析仪器的测量,工作繁琐且难以直观了解城市水环境状况。而水色作为水体水质的直观体现,水质的差异会令城市水体呈现出不同的水色,且水体颜色与人的感官有直接的联系,作为水体中重要的光学特征,其变化与水体组分息息相关,已有学者对水体颜色参量的研究表明,基于遥感技术获得的水体颜色具有表征水质的潜力^[10~13]。

2012 年欧洲学者通过测量 FU (forel-ule) 比色计中从蓝绿色到黄棕色的 21 种水色水体的透射光谱,得到每种水体颜色在国际照明委员会 CIE (International Commission on Illumination) 色度系统中的色度坐标,构建了基于多光谱遥感数据的 FUI (forel-ule index) 水色指数,用于表征水体颜色和水体信息^[14,15]。目前已有研究表明,FUI 水色指数可以指示水体的叶绿素和透明度从而用于监测水质信息^[16~19];还可以应用于大型内陆水体以及湖库以监测其营养状态和浑浊程度^[20,21]。基于 FUI 指数对水体颜色的量化与水质状态的指示可以降低水体监测的成本。但该技术目前只在海洋、近岸水体和大中型的内陆湖库水体得到了成功地应用,能否将该技术直接应用于光学环境复杂的城市水体,还需要进

一步的验证。

因此,本文拟采用国际标准的色度转换模型,基于样本数据的水体光学特征差异,参考 FUI 指数量化水体颜色的方法并与高分二号 (GF-2) 遥感数据相结合,构建适用于城市水体的遥感分级模型,以期在城市水体的遥感综合评价提供新的方法。

1 材料与方法

1.1 研究区与采样点分布

2017~2019 年在南京、无锡、常州和扬州市进行了多次的城市水体调查和采样工作,收集到含多种水色信息的城市水体实测样点共 145 个。现场记录样点位置和水体信息,测量数据并采集水样,采样点的分布如图 1 所示。

南京市位于江苏省西南部,地处长江下游中部地区($118^{\circ}22'E \sim 119^{\circ}14'E, 31^{\circ}14'N \sim 32^{\circ}37'N$),水域面积达总面积的 11% 以上,城市建成区范围内有大小河道湖泊 120 余处,包括秦淮河、金川河、玄武湖和莫愁湖等。

扬州市位于江苏省中部,地处长江北岸及江淮平原南端($119^{\circ}01'E \sim 119^{\circ}54'E, 32^{\circ}15'N \sim 33^{\circ}25'N$)。扬州市内水域面积约 1 735 km²,占总面积的 26.3%,城区内主要河流有玉带河、七里河、沙施河和保代河等。

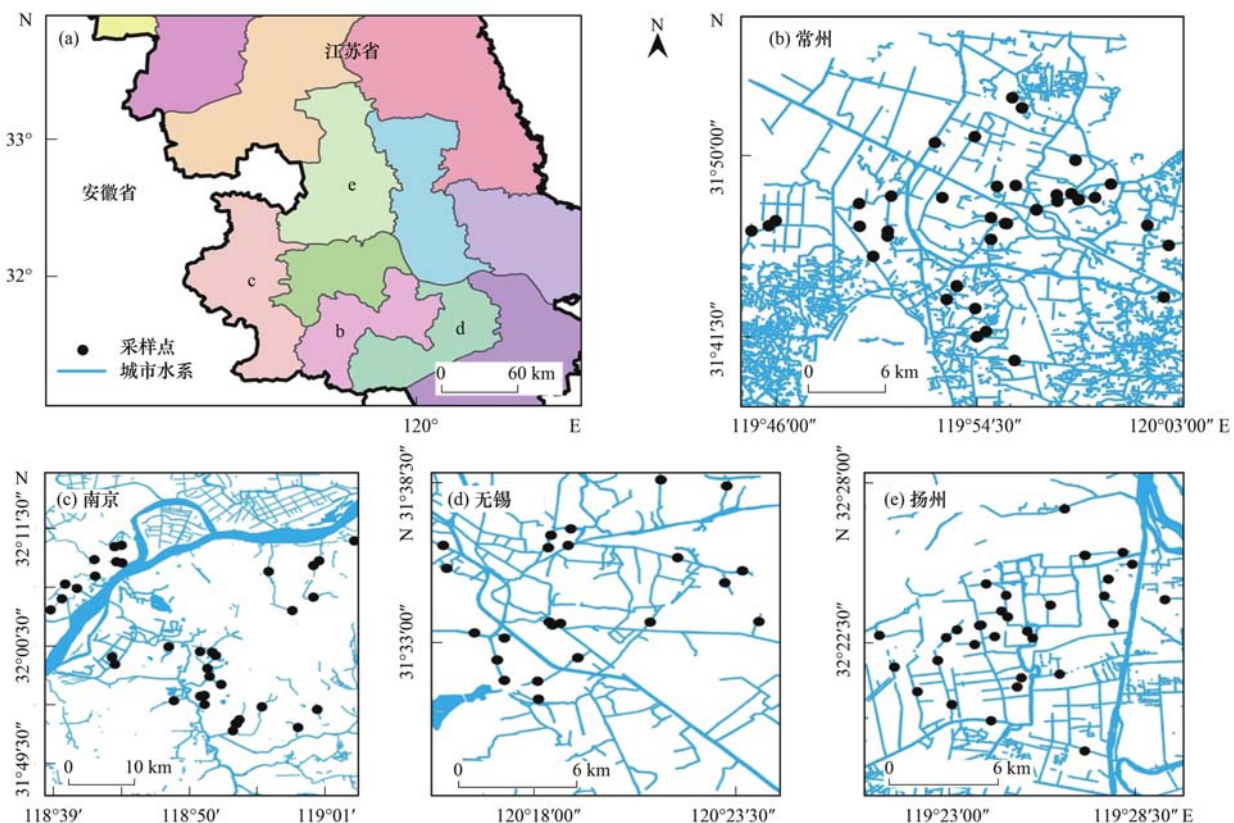


图 1 研究区采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling points in the study area

无锡市位于江苏省南部,地处长江三角洲平原(119°31'E~120°36'E,31°07'N~32°02'N).北倚长江,南滨太湖,京杭大运河从中穿过,且无锡市内水网密集,市区以京杭大运河为中轴构成河网水系,并通达江湖.

常州市位于江苏省南部,同样地处长江三角洲平原(119°08'E~120°12'E,31°09'N~32°04'N).城区内有大小河流湖泊1 000余处,包括溇湖和京杭运河等,水系较为丰富.

1.2 实测数据

本研究的实测数据通过室外实验和室内实验两个部分获取,首先在室外完成水样的采集,测量水面光谱数据和部分水质参数:透明度(secchi disk depth, SD)、溶解氧(dissolved oxygen, DO)和氧化还原电位等,同时记录实验点位的经纬度以及周边环境信息.而后将水样于低温环境下保存带回实验

室测量其余参数.实验室分析测量的参数主要包括:总悬浮物(total suspended matter, TSM)、无机悬浮物(inorganic suspended matter, ISM)、有机悬浮物(organic suspended matter, OSM)、叶绿素a(chlorophyll a, Chla)、溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)、总磷(total phosphorus, TP)、总氮(total nitrogen, TN)、氨氮、硫化物以及颗粒物和有色可溶性有机物(colored dissolved organic matter, CDOM)吸收系数^[22~25].

为科学而准确地判别水体颜色,参考国际标色卡——劳尔色卡^[26],设计制作了适用于城市水体原位水色判别的色度分级表.该表将水体颜色分为3个颜色系,各颜色系中包含多个色度等级并给出了几种人眼易于区分的参考色:浅灰色至灰黑色的灰色系、翠绿色至灰绿色的绿色系和浅黄色至灰黄色的黄色系,如图2所示.

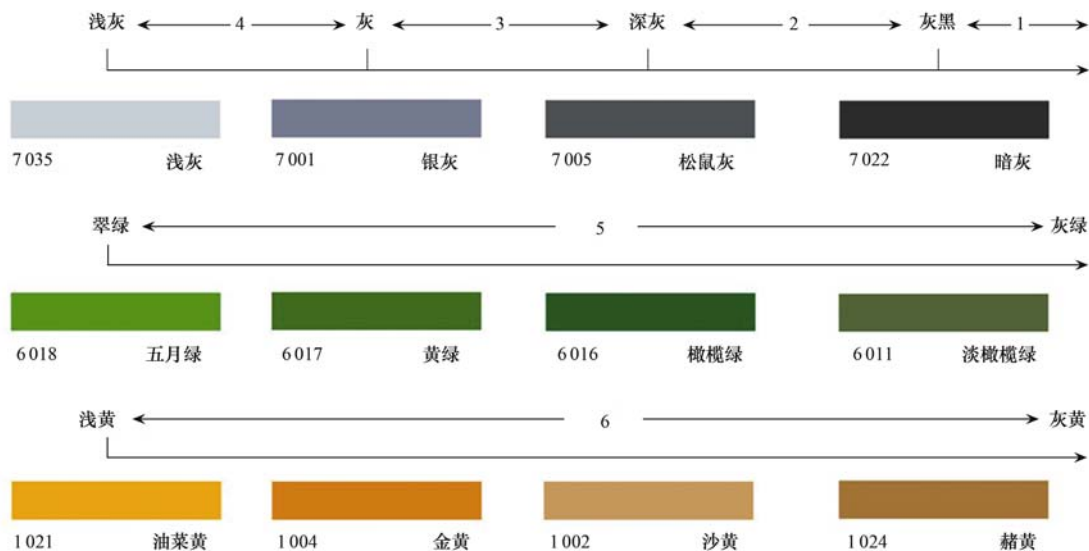


图2 水体色度分级
Fig. 2 Water color classification table

在进行水体颜色判定时,观察者需手持色度分级表在距离观测水面1~2 m处,参考该表判断水体水色应该归为哪一颜色系,将判别的水色代码记录在水体信息内,而后拍摄8张以上的现场照片,照片要求同时包含色度分级表和观测水面.此外,观察者需避开阳光直射,选择与测量水体光谱相同的观测几何完成水色判读,同时避开水面阴影区域和水面漂浮物如浮萍等以完成水色判读.

为避免人为判读的主观性,要求多人(至少三名专业人员)协同作业进行水色判读,若专业人员的判读结果存在分歧,则另请多名专业人员根据拍摄的现场照片进行分析判读,最大程度减少人为因素造成的水色判别差异.

野外实测水体光谱数据使用美国分析光谱仪器

公司生产的ASD FieldSpec Pro便携式光谱辐射计基于“表面法”测量^[27].在剔除天空光的反射信息后,得到遥感反射率(R_{rs}).

$$R_{rs} = \frac{L_w}{E_d(0^+)} = \frac{(S_{sw} - r \times S_{sky}) \times \rho_p}{\pi \times S_p} \quad (1)$$

式中, L_w 为离水辐亮度, $E_d(0^+)$ 为水面以上总的入射辐照度, r 为气-水界面对天空光的反射率, S_{sw} 、 S_{sky} 和 S_p 分别为光谱仪面向水体、天空和标准板时的测量信号码值, ρ_p 为生产商所提供的标准板的反射率^[28].

1.3 高分影像数据及预处理

为实现城市水体的遥感分级,本研究选用2018年4月9日的GF-2号遥感影像,影像覆盖了南京市主要的城市水体且成像时间与地面实测数据最为

接近.

影像由 4 个波段组成,分别为蓝波段(0.45 ~ 0.52 μm)、绿波段(0.52 ~ 0.59 μm)、红波段(0.45 ~ 0.69 μm)和近红外波段(0.77 ~ 0.89 μm). GF-2 号卫星搭载有两台高空间分辨率的相机,分别是分辨率为 1 m 的全色相机和分辨率为 4 m 的多光谱相机,它是我国目前空间分辨率最高的民用陆地观测卫星,对城市水体的遥感监测有重要的意义.

GF-2 号卫星影像的预处理采用 ENVI 5.3 遥感影像处理平台完成,预处理过程包括:正射校正、研究区裁剪、辐射定标和大气校正等.为保证研究的准确性,本研究采用人机交互的方式确定城市水体的

边界,进而完成遥感影像的水体提取.

2 城市水体水色遥感分级模型

2.1 U-FUI 城市水体水色分级指数

为实现水体颜色的统一量化,本研究基于国际照明委员会(CIE)规定的一套标准颜色系统——CIE-XYZ 颜色系统^[29]并结合 GF-2 影像的 3 个可见光波段用来定量表征颜色,同时参考文献[14 ~ 19]提出的色度角 α ,构建了适用于城市水体遥感分级的 U-FUI(urban forel-ule index)水色指数,根据水体水色信息完成城市水体的遥感分级,分级的具体方法如图 3 所示.

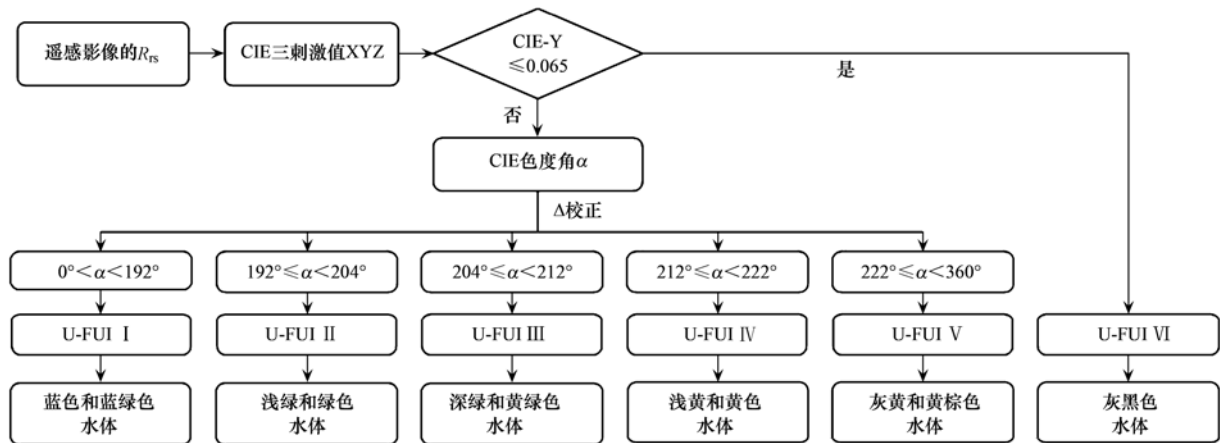


图 3 基于 U-FUI 水色指数的城市水体水色分级方法

Fig. 3 Classification method of urban water color based on the U-FUI water color index

本研究利用 GF-2 卫星的光谱响应函数将各水色水体的实测 R_{rs} 经过波段积分转换为卫星波段等效反射率,通过等效反射率计算各水色水体对应的色度角 α 值并参考校正拟合公式[式(2)]^[14]完成色度角的偏差 Δ 校正,校正后色度角与实测高光谱积分结果比较散点图如图 4 所示,经 Δ 校正后计算的各水体色度角 α 的均方根误差 RMSE 为 6.88°, 平均绝对百分比误差 MAPE 为 2.35%.

$$\Delta = -41.6b^5 + 358.97b^4 - 1164b^3 + 1714.2b^2 - 1086b + 237.06 \quad (2)$$

其中, $b = \alpha/100$.

图 5 展示了各类水色水体色度角 α 值的分布情况,结果显示,城市水体的色度角 α 值整体上呈现由浅绿色水体至黄棕色水体逐渐增大的趋势,尽管这几类水色水体的色度角 α 分布虽有波动变化,但不同类别水体的变化范围有明显的差异,因此分别选取色度角 α 为 192°、204°、212°和 222°作为判别阈值,分别表征水色由浅绿色至黄棕色间的 4 类水体.

从图 5 中可以看出,灰白色和灰黑色水体的色

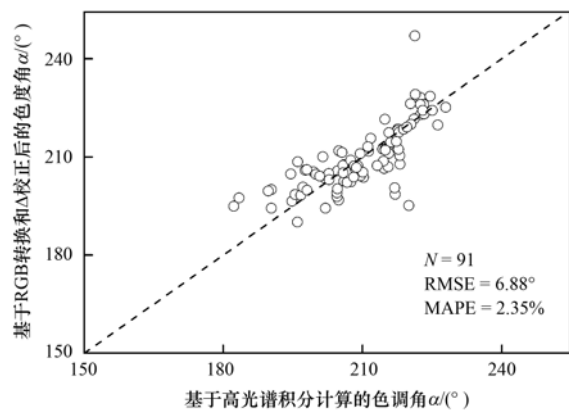


图 4 基于 Δ 校正的色度角 α 与基于高光谱积分计算的色度角 α 比较

Fig. 4 Comparison of the chromaticity angle α based on Δ correction and hyperspectral integral calculation

度角 α 值的范围与其余几类水色水体无显著差异,这是由于该类水体水色所处的灰色系并不属于彩色系的范畴内,灰色系表征的是介于白色和黑色之间,即一种亮度的概念.但 CIE-xy 二维色度图分布的都是可见光范围内的颜色,其中未保留有关光谱强度或亮度的信息,连续的光谱(白色或灰色)均会被投

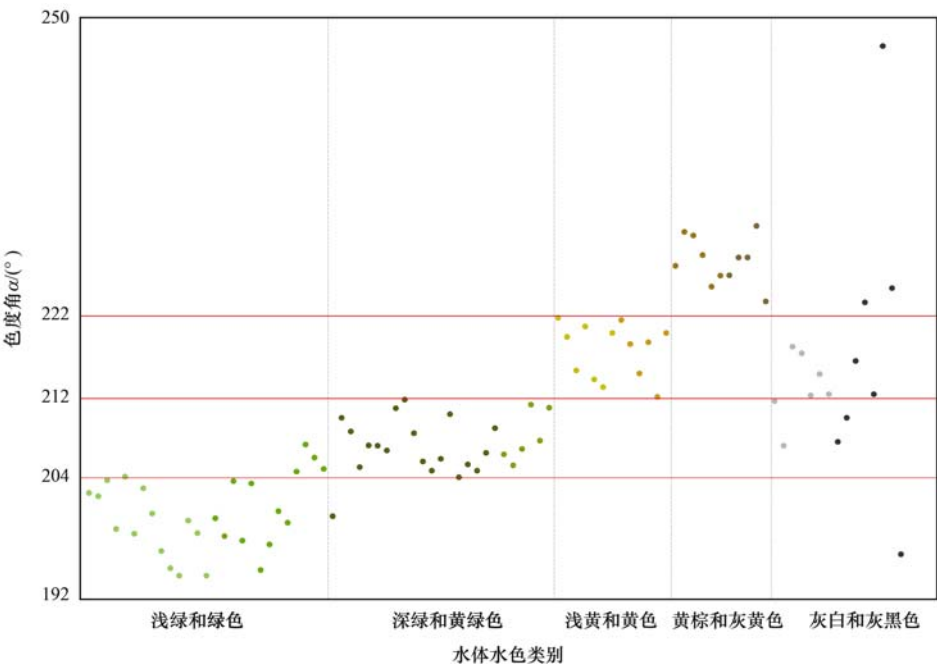


图5 各水色水体色度角 α 值的分布

Fig. 5 Distribution of the chromaticity angle values in water bodies with different water colors

影至 $(x,y)=(1/3,1/3)$ ^[30]. 因此,本文分析了与光的亮度成比例的 CIE-Y 刺激值在各类水色水体中的大小分布,如图 6 所示. 结果表明,灰黑色的水体由于水色较暗,呈现出的亮度也相应较低,其 CIE-Y 刺激值的大小明显低于其他水色水体,因此首先选取 CIE-Y=0.065 先将灰黑色水体从各水色的城市水体中判别出来,进而根据色度角 α 的值判别出其他水色水体.

此外,由于本研究的采样点均选取的是城市水体中的河流水体以及水域面积较小的坑塘,并未包

含水质特别好的水体. 因此,本研究参考相关研究以及 CIE-xy 色度图^[30,31],利用色度角 $\alpha < 192^\circ$ 作为判定标准,表征水色呈蓝色或蓝绿色的清洁水体.

2.2 精度评价

本研究利用包含 54 个独立实测数据集的样本评价基于 U-FUI 水色指数的城市水体遥感分级方法的精度,采用识别正确率的方法进行精度评价,计算方法如公式(3)所示,表 1 为精度评价的结果.

识别正确率 = $N_{\text{识别正确样点}}/N_{\text{总样点}} \times 100\%$ (3)
式中, $N_{\text{识别正确样点}}$ 代表分级结果与实测水色情况一致的样点数, $N_{\text{总样点}}$ 代表参与精度评价的总样点数.

精度评价结果如表 1 所示,基于 U-FUI 水色指数的城市水体分级整体的精度达 72.22%,总体的分级效果较好. 但 U-FUI II 级(浅绿、绿色水体)和 III 级水体(深绿、黄绿色水体)的识别正确率相较于其他几级水体较低,这可能是由于水体中藻类的大量生长会影响对水体颜色的判断. 此外,城市水体中 U-FUI 的 IV、V 和 VI 级水体(黄色系和灰黑色的水体)的数据相对较少,未来会收集更多该类水色水体的数据以完善基于 U-FUI 水色指数的城市水体水色分级算法.

2.3 基于 GF-2 影像的城市水体遥感分级结果

将 2.1 节构建的基于 U-FUI 水色指数的城市水

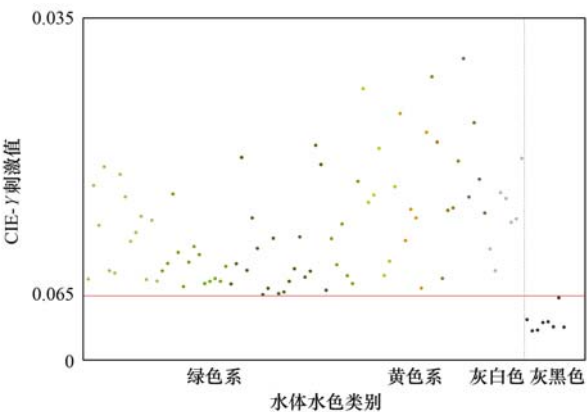


图6 各水色水体 CIE-Y 刺激值大小分布

Fig. 6 Distribution of the CIE-Y stimulation values in water bodies with different water colors

表 1 基于 U-FUI 水色指数的城市水体遥感分级精度评价

Table 1 Accuracy evaluation of urban water classification based on the U-FUI water color index

项目	U-FUI II	U-FUI III	U-FUI IV	U-FUI V	U-FUI VI	总验证样点
样点个数	19	21	8	4	2	54
识别正确率/%	68.42	66.67	87.50	75.00	100	72.22

体遥感分级模型应用于南京市 2018 年 4 月 9 日的 GF-2 PMS2 遥感影像上,计算城市水体的水色分布情况,结果如图 7 所示. 影像结果显示,南京市内城市水体以 U-FUI II 级~U-FUI IV 级水体为主,即城区内水体表观水色多为浅绿色、绿色、深绿色、黄绿色、浅黄色和黄色. 部分的湖泊水体以及河宽较宽的河流水体像元(如月牙湖公园段)被识别为 U-FUI I 级水体,U-FUI 的 V 级与 VI 级水体则在城区内有零星分布.

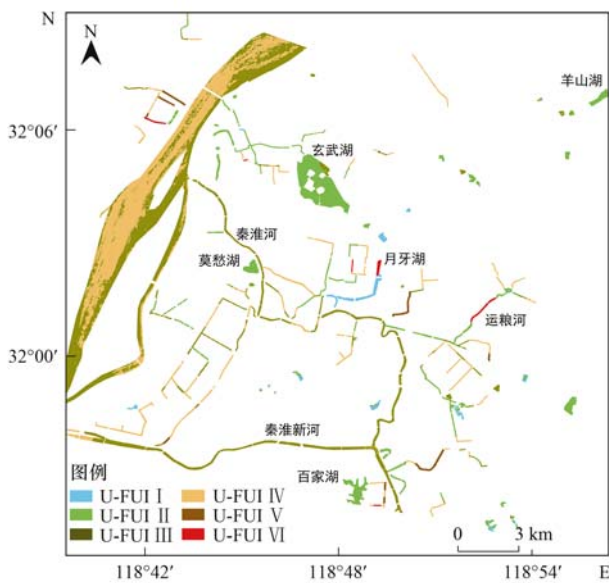


图 7 南京市城市水体分级结果

Fig. 7 Classification results of urban water in Nanjing

选用最接近制图影像成像时间的原位调查数据(2018 年 4 月 19 日),将影像计算的结果与实地调查得到的水色数据进行比对,结果如表 2 所示,3 个验证点均识别正确.

表 2 南京市城市水体分级精度验证结果

Table 2 Validation results of the urban water classification accuracy in Nanjing

样点编号	原位水体水色	影像分级结果 (U-FUI 等级)	是否识别正确
1	浅绿色	II	正确
2	深绿色	III	正确
3	黄色	IV	正确

从影像的分级结果来看,部分 U-FUI 的 I 级与 VI 级水体像元出现错分的现象(如月牙湖),分析可能是由于 U-FUI I 级水体多为水面较宽阔的河流或景观水体,水体较为清洁,对光线的吸收作用较强导致水体的亮度较弱,从而部分水体像元的 CIE-Y 刺激值大小也相对较低而被错分为 U-FUI VI 级水体. 在今后的研究中,将增加较为清洁的城市水体数据,以进一步提高城市水体水色分级算法的精度.

3 讨论

3.1 不同水色等级水体的水质参数特征

本文主要分析了不同水色等级水体的水质参数特征,主要包括影响水体光学特性的透明度(SD)、叶绿素(Chla)和总悬浮物(TSM)等 5 种参数以及影响水体水质的溶解氧(DO)、氧化还原电位(Eh)和硫化物等 7 种水质化学参数,图 8 为不同水色等级水体水质参数的箱型图.

图 8 的结果显示,指示水色为浅绿色和深绿色的 U-FUI II 级和 U-FUI III 级水体的 Chla 浓度整体上远高于 IV~VI 级水体,其对应的 Chla 浓度均值分别为 $(103.69 \pm 78.16) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(127.77 \pm 124.68) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,约为 IV~VI 级水体的 2~3 倍. 指示水色为黄色和黄棕色的 U-FUI IV 级和 U-FUI V 级水体的 TSM 浓度整体上高于 II~IV 级水体. 从平均值来看,水色呈黄棕色和灰黑色的 U-FUI V 级和 U-FUI VI 级水体的 TSM 浓度均值最高,分别为 $(57.35 \pm 37.53) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(56.06 \pm 49.23) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,约为 II 级和 III 级水体的两倍,同时浅黄色的 IV 级水体的 TSM 浓度均值为 $(38.78 \pm 22.23) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,也明显高于 II 级和 III 级水体. 此外,对比各级水体中的 ISM 与 OSM 浓度,发现 U-FUI 的 IV 级和 V 级水体中的 ISM 浓度均值 $[(27.98 \pm 23.02) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(40.37 \pm 37.15) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}]$ 显著高于 OSM 的浓度均值 $[(10.8 \pm 6.89) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(16.98 \pm 11.76) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}]$,而 II 级、III 级和 VI 级水体中的 ISM 与 OSM 浓度相近,无显著差异. 表明水体中 Chla 和 ISM 浓度的高低可能会在一定程度上导致水体呈现出绿色系或黄色系的水色.

通过对比 U-FUI VI 级水体与其他几级水体的水质参数,发现水色呈灰黑色的 U-FUI VI 级水体的氨氮、硫化物、溶解性有机碳、总氮和总磷的浓度显著高于 II~V 级水体,同时其溶解氧浓度和氧化还原电位则显著低于 II~V 级水体. 通过文献[32]发现 U-FUI VI 级水体的水质较差,达到了其中重度黑臭水体的判别标准.

3.2 不同水色等级水体的固有光学量特征

由于水体固有光学量不受入射光场影响,而只与水体组分及其光学特性相关^[33],若水体组分发生变化则会影响水体的固有光学特性,进而影响水体的表观光学特性^[34]. 因此,本研究对比分析了 U-FUI II 级~U-FUI VI 级水体的固有光学量,主要包括总颗粒物吸收系数(a_p)、色素颗粒物吸收系数(a_{ph})、非色素颗粒物吸收系数(a_{nph})和有色可溶性有机物(CDOM)的吸收系数(a_g),图 9 为各吸收系

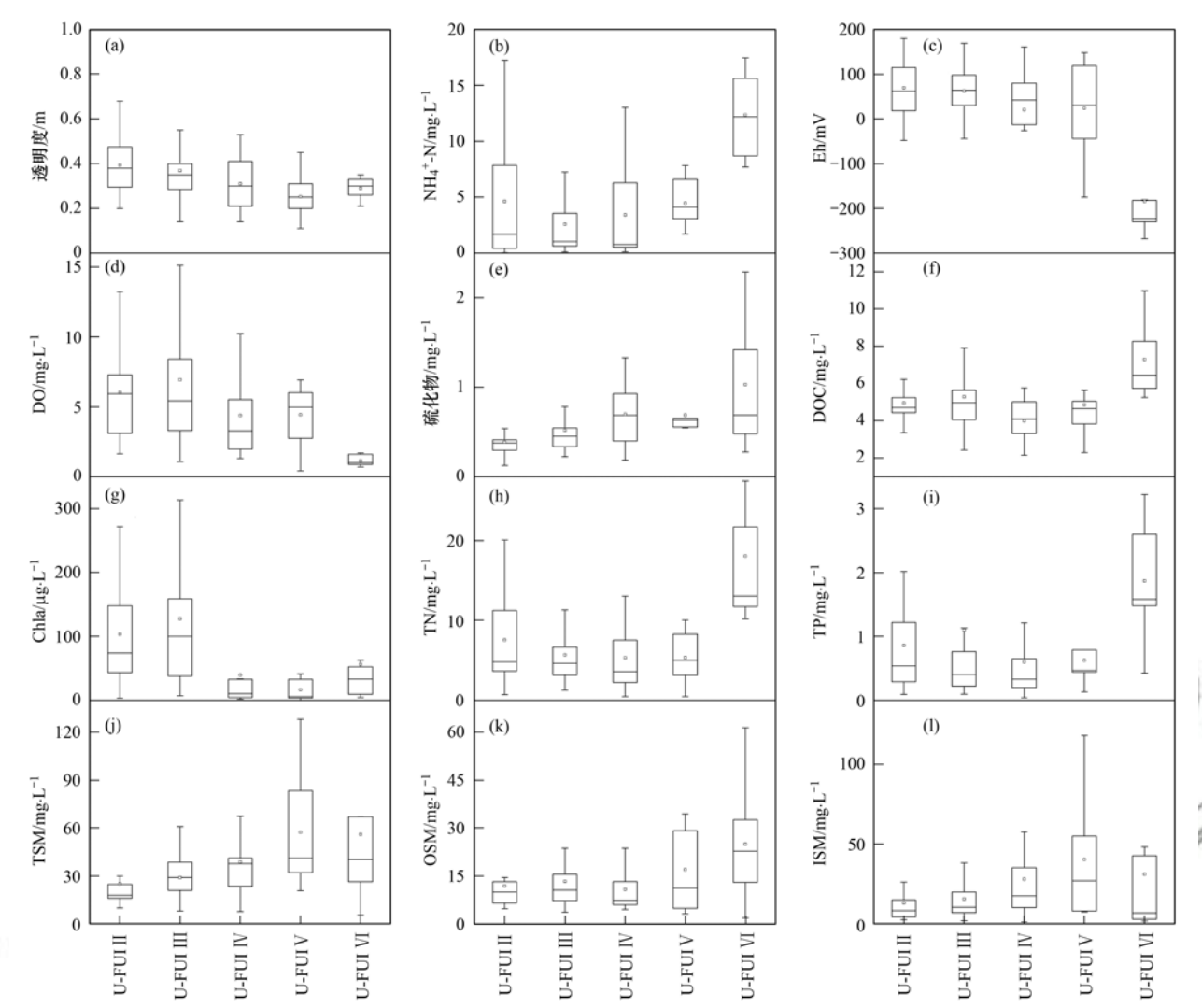


图 8 U-FUI II级~U-FUI VI级水体的水质参数箱型图

Fig. 8 Box diagram of the water quality parameters of U-FUI II - VI water bodies

数均值的曲线图,表 3 给出了 440 nm 处各吸收系数的平均值和标准差。

结果显示,U-FUI 的 II 级、III 级、IV 级和 VI 级水体间的总颗粒物吸收系数和非色素颗粒物吸收系数无明显差异,但 U-FUI V 级水体在 440 nm 处的总吸收系数均值 $[(8.41 \pm 4.97) \text{ m}^{-1}]$ 和非色素吸收系数均值 $[(6.52 \pm 4.11) \text{ m}^{-1}]$ 均显著大于其余 4 级水体,约为其余 4 级水体的 2~3 倍。有研究表明^[35],陆源物质是水体中非色素颗粒物的主要来源且通常与总悬浮物 and 无机悬浮物浓度相关。相关性分析结果表明, $a_{\text{nap}}(440)$ 与 TSM、ISM 呈现较强的相关性,相关系数分别达到 0.55 和 0.56; $a_{\text{nap}}(440)$ 则与 OSM 和 Chla 无明显相关性,相关系数分别为 0.101 和 -0.14。进一步表明水体中的悬浮物且主要是无机悬浮物可能是影响城市水体水色变黄的主要因素。

色素颗粒物吸收系数的曲线通常在 440 nm 左右和 675 nm 左右呈现出两处吸收峰,且蓝光波段处

的峰值一般要高于红光波段处。图 9(b)显示 U-FUI 的 II 级和 III 级水体色素颗粒物吸收系数曲线的双峰相比于 IV 级、V 级和 VI 级水体更为明显,且以 675 nm 处的吸收峰最为突出,II 级和 III 级水体在 440 nm 处的平均值分别为 $(2.05 \pm 1.19) \text{ m}^{-1}$ 和 $(2.42 \pm 3.41) \text{ m}^{-1}$,均高于其余 3 级水体。有研究表明^[36],Chla 的含量影响着两处吸收峰的大小,且 675 nm 处的吸收峰主要受 Chla 的影响而 440 nm 处的吸收峰则还受其他色素的作用,进一步表明了水体中的 Chla 浓度是影响城市水体水色变绿的主要因素。

CDOM 是水体中重要的光吸收物质^[37],图 9(d)显示 U-FUI VI 级水体的 CDOM 吸收系数曲线整体高于其余 4 级水体,对比 U-FUI 的 II 级~VI 级水体在 440 nm 处的 CDOM 吸收系数(表 3),U-FUI VI 级水体的 $a_{\text{g}}(440)$ 均值 $(2.69 \pm 1.89) \text{ m}^{-1}$ 显著高于其他 4 级水体,约为其他 4 级水体的 2 倍。有研究表明^[38],水体中 CDOM 的高吸收会导致水体呈现出灰黑色的水色,例如湖泊水体中的“湖泛”现象主要就

是受水体中 CDOM 含量变化的影响. 同时, 笔者发现 $a_g(440)$ 与 OSM、DOC 呈现较强的相关性, 相关系数分别达到 0.54 和 0.64, $a_g(440)$ 与 Chla 的相关性则较弱, 相关系数仅为 0.23, 而 $a_g(440)$ 与 TSM 和 ISM 无明显相关性. 表明水体中较高的 CDOM 浓度可能是城市水体水色致黑的因素之一.

表 3 U-FUI II 级 ~ U-FUI VI 级水体各固有光学量的吸收系数 (平均值和标准差) / m^{-1}

吸收系数	水色等级				
	U-FUI II	U-FUI III	U-FUI IV	U-FUI V	U-FUI VI
$a_p(440)$	4.00 ± 1.82	4.43 ± 3.60	3.05 ± 1.17	8.41 ± 4.97	4.34 ± 2.18
$a_{ph}(440)$	2.05 ± 1.19	2.42 ± 3.41	0.97 ± 0.62	1.89 ± 1.30	1.72 ± 1.10
$a_{nap}(440)$	1.95 ± 1.38	1.91 ± 0.62	2.04 ± 1.06	6.52 ± 4.11	2.63 ± 1.81
$a_g(440)$	1.25 ± 0.64	1.29 ± 0.61	0.93 ± 0.47	0.97 ± 0.48	2.69 ± 1.89

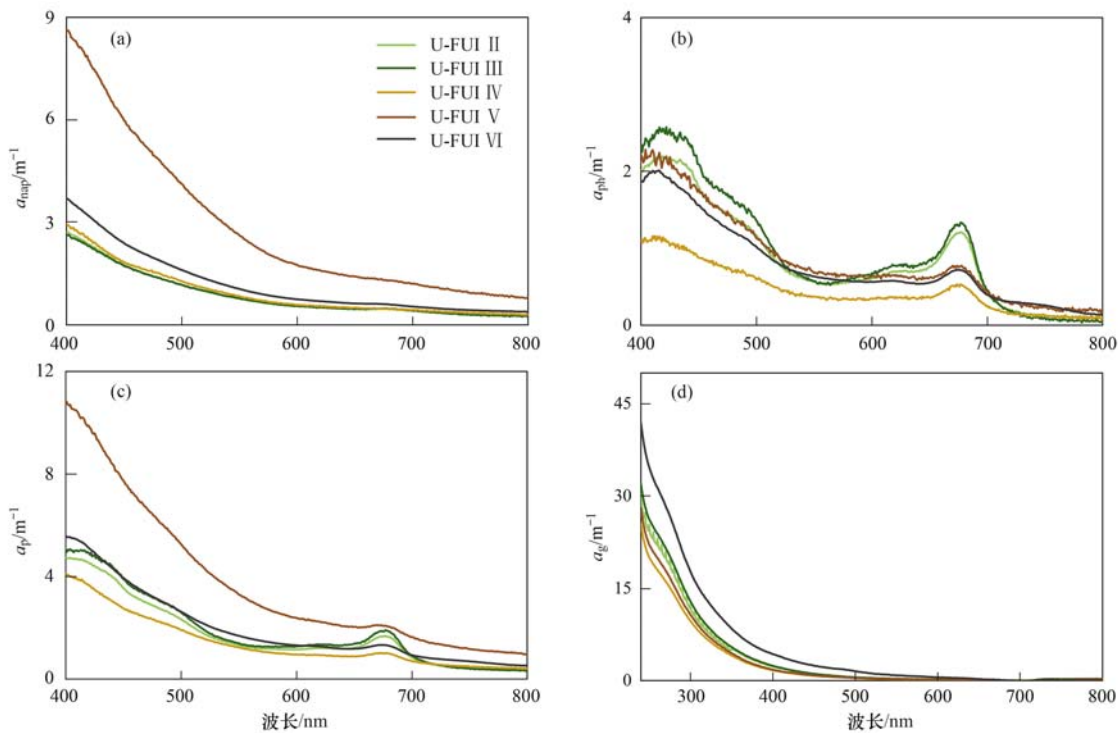


图 9 U-FUI II 级 ~ U-FUI VI 级水体各固有光学量吸收系数均值的曲线

Fig. 9 Curves of the average absorption coefficient of each inherent optical property in U-FUI II - VI water bodies

4 结论

(1) 本研究在大量野外原位测量的基础上, 基于国产高分影像的波段设置, 利用 CIE 色度转换模型并参考 FUI 水色指数构建了基于 GF-2 影像的适用于城市水体遥感分级的 U-FUI 水色指数, 能够完成对城市水体水色的定量分级, 将城市水体分为代表不同水色的 U-FUI I ~ U-FUI VI 共 6 级水体. 独立数据集的精度评价结果显示, 整体的分级精度达到 72.22%. 通过比较各 U-FUI 水色级别城市水体的水质参数和固有光学量, 表明 U-FUI 的 II 级和 III 级水体具有较高的叶绿素 a 浓度; U-FUI 的 IV 级和 V 级水体的总悬浮物浓度和无机悬浮物浓度相对较高; U-FUI VI 级水体水质较差且伴随有黑臭现象发生, 该类水体的 DO 含量和 Eh 值显著较低, 同时水体中伴随着较高浓度的氨氮、TN、TP、DOC、CDOM

以及硫化物.

(2) 本方法被成功地应用于南京市的城市水体分级, 结果显示南京市的城市水体以 U-FUI II 级 ~ U-FUI IV 级水体为主, I、V 和 VI 级水体在城市中分布相对较少. 但影像上 U-FUI VI 级水体和 U-FUI I 级水体会出现一定的错分现象.

致谢: 感谢南京师范大学水色遥感团队全体成员在野外采样和室内分析中的辛苦付出.

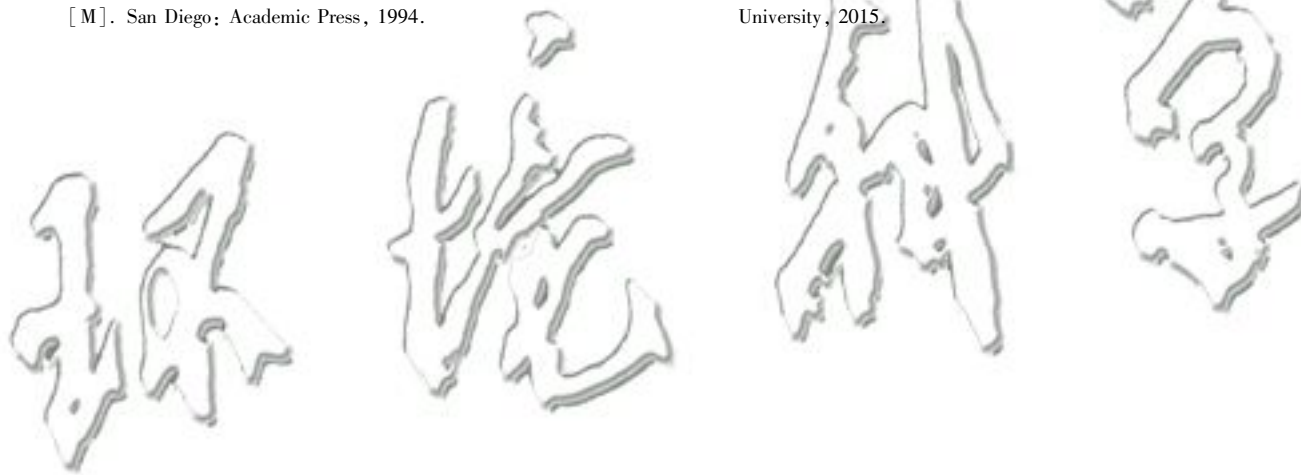
参考文献:

[1] 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.

[2] 陈鸣, 潘杨, 黄勇. 吸收光谱法表征城市景观水体表观污染的方法优化[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2013, 26(4): 1-6.

- Chen M, Pan Y, Huang Y. Optimizing absorption spectrometry characterization for apparent pollution of urban water[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Engineering and Technology), 2013, **26**(4): 1-6.
- [3] 谭渝峰, 张琪, 朱莎, 等. 基于简单建模与因子分析的湖泊水质评价[J]. 生态与农村环境学报, 2015, **31**(3): 432-439.
- Tan Y F, Zhang Q, Zhu S, *et al.* Study on lake water quality assessment based on simple modeling and factor analysis[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, **31**(3): 432-439.
- [4] 孙涛, 张妙仙, 李苗苗, 等. 基于对应分析法和综合污染指数法的水质评价[J]. 环境科学与技术, 2014, **37**(4): 185-190.
- Sun T, Zhang M X, Li M M, *et al.* River water quality evaluation based on correspondence analysis and comprehensive pollution index method [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **37**(4): 185-190.
- [5] 杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 等. 基于模糊综合评判法的洮河水环境质量评价[J]. 环境科学与技术, 2016, **39**(S1): 380-386, 392.
- Yang H, Zhang G Z, Yang X N, *et al.* Comprehensive evaluation on water environment quality of the tao river based on fuzzy comprehensive method [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **39**(S1): 380-386, 392.
- [6] 尚佰晓, 吕子楠, 李杰年, 等. 基于模糊综合评价法与单因子指数评价法的水质评价[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2013, **23**(5): 1-4.
- Shang B X, Lv Z N, Li J N, *et al.* Application of fuzzy mathematics and single factor index in water quality evaluation [J]. Journal of Hebei University of Environmental Engineering, 2013, **23**(5): 1-4.
- [7] 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, Sheng 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): 230-42.
- [8] 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.
- [9] 温爽, 王桥, 李青梅, 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.
- [10] Jaquet J, Zand B. Colour analysis of inland waters using Landsat TM data[J]. ESA SP, 1989, **1102**: 57-67.
- [11] Bukata R P, Jerome J H, Kondratyev K Y, *et al.* Modelling the radiometric color of inland waters: Implications to a) remote sensing and b) limnological color scales [J]. Journal of Great Lakes Research, 1997, **23**(3): 254-269.
- [12] Bukata R P, Jerome J H, Kondratyev K Y, *et al.* Modelling the radiometric color of Inland Waters: Implications to a) Remote sensing and b) Limnological color scales [J]. Journal of Great Lakes Research, 1997, **23**(3): 254-269.
- [13] Alföldi T T, Munday Jr J C. Water quality analysis by digital chromaticity mapping of Landsat data [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 1978, **4**(2): 108-126.
- [14] 王胜蕾. 基于水色指数的大范围长时序湖库水质遥感监测研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2018.
- Wang S L. Large-scale and long-time water quality remote sensing monitoring over lakes based on water color index [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS), 2018.
- [15] 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**, doi: 10.2971/jeos.2013.13057.
- [16] Wang S L, Lee Z, Shang S L, *et al.* Deriving inherent optical properties from classical water color measurements: Forel-Ule index and Secchi disk depth [J]. Optics Express, 2019, **27**(5): 7642-7655.
- [17] Wernand M R, Hommersom A, Van Der Woerd H J. MERIS-based ocean colour classification with the discrete Forel-Ule scale [J]. Ocean Science, 2012, **9**(3): 477-487.
- [18] Wernand M R, Van Der Woerd H J. Spectral analysis of the Forel-Ule ocean colour comparator scale [J]. Journal of the European Optical Society: Rapid Publications, 2010, **5**, doi: 10.2971/jeos.2010.10014s.
- [19] 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.
- [20] Pitarch J, Van Der Woerd H J, Brewin R J W, *et al.* Optical properties of Forel-Ule water types deduced from 15 years of global satellite ocean color observations [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, **231**, doi: 10.1016/j.rse.2019.111249.
- [21] Li J S, Wang S L, Wu Y H, *et al.* MODIS observations of water color of the largest 10 lakes in China between 2000 and 2012 [J]. International Journal of Digital Earth, 2016, **9**(8): 788-805.
- [22] 金筱青, 周慧. 过硫酸钾-钼锑抗分光光度法测定地表水中总磷的若干影响因素 [J]. 环境监测管理与技术, 2002, **14**(1): 38.
- [23] 陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨 [J]. 湖泊科学, 2006, **18**(5): 550-552.
- Chen Y W, Chen K N, Hu Y H. Discussion on possible error for phytoplankton chlorophyll-a concentration analysis using hot-ethanol extraction method [J]. Journal of Lake Sciences, 2006, **18**(5): 550-552.
- [24] Mitchell B G. Algorithms for determining the absorption coefficient for aquatic particulates using the quantitative filter technique [A]. In: Proceedings of SPIE 1302, Ocean Optics X [C]. Orlando, FL: SPIE, 1990. 137-148.
- [25] Ma R, Tang J, Dai J. Bio - optical model with optimal parameter suitable for Taihu Lake in water colour remote sensing [J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, **27**(19): 4305-4328.
- [26] 樊森. 劳尔色卡: 色彩缔造非凡——访劳尔(RAL)董事会主席兼首席执行官 Wolf D. Karl 博士 [J]. 中国涂料, 2011, **26**(10): 67-68.
- Fan S. RAL Color Card: color creating the excellence—visiting Doc. Wolf D. Karl, Chairman of the Board and chief executive officer of RAL [J]. China Coatings, 2011, **26**(10): 67-68.
- [27] 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, **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.
- [28] 李云梅, 王桥, 黄家柱, 等. 太湖水体光学特性及水色遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [29] CIE. Commission internationale de l'éclairage proceedings, 1931[M]. Cambridge: Cambridge University, 1932.
- [30] Jackson T, Sathyendranath S, Mélin F. An improved optical classification scheme for the Ocean Colour Essential Climate Variable and its applications [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, **203**: 152-161.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] Mobley C D. Light and water: radiative transfer in natural waters[M]. San Diego: Academic Press, 1994.
- [34] 李素菊. 利用分析方法建立湖泊光学水质参数反演算法研究——以安徽巢湖为例[D]. 北京: 北京大学, 2003.
- [35] 张运林, 秦伯强, 杨龙元. 太湖梅梁湾水体悬浮颗粒物和CDOM的吸收特性[J]. 生态学报, 2006, **26**(12): 3969-3979.
- Zhang Y L, Qin B Q, Yang L Y. Spectral absorption coefficients of particulate matter and chromophoric dissolved organic matter in Meiliang Bay of Lake Taihu[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, **26**(12): 3969-3979.
- [36] Lohrenz S E, Weidemann A D, Tuel M. Phytoplankton spectral absorption as influenced by community size structure and pigment composition[J]. Journal of Plankton Research, 2003, **25**(1): 35-61.
- [37] Stedmon C A, Markager S, Kaas H. Optical properties and signatures of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in danish coastal waters[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2000, **51**(2): 267-278.
- [38] 李佐琛. 藻源型湖泛过程水体光学特性及水色变化研究[D]. 西安: 西北大学, 2015.
- Li Z C. Variations in optical properties and water color during the formation of black bloom waters [D]. Xi'an: Northwest University, 2015.



CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Atmospheric PM _{2.5} in Winter in Beijing	XU Nan, WANG Tian-tian, LI Xiao, <i>et al.</i> (2101)
Characteristics of Two Pollution Episodes Before and After City Heating in Beijing from February to March of 2019	YIN Xiao-mei, PU Wei-wei, WANG Ji-kang, <i>et al.</i> (2110)
Analysis of Characteristics and Causes of a Typical Haze Pollution in Beijing in the Winter of 2019	LIAN Han-yang, YANG Xin, ZHANG Pu, <i>et al.</i> (2121)
New Particle Formation Events in Summer and Winter in the Coastal Atmosphere in Qingdao, China	SUN Yue, ZHU Yu-jiao, MENG He, <i>et al.</i> (2133)
Characteristics of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Evaluation of Indoor Dust from Urban and Rural Areas in Taiyuan City During the Heating Season	HUANG Hao, XU Zi-qi, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (2143)
Concentration Analysis and Health Risk Assessment of Air Pollutants in Newly Decorated Public Places in Xi'an	FAN Jie, FAN Hao, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (2153)
Emission Concentration and Characteristics of Particulate Matter and Water-Soluble Ions in Exhaust Gas of Typical Combustion Sources with Ultra-Low Emission	HU Yue-qi, WANG Zheng, GUO Jian-hui, <i>et al.</i> (2159)
High-Throughput Sequencing Analysis of Microbial Communities in Summertime Atmospheric Particulate Matter in Hefei City	JIANG Shao-yi, SUN Bo-wen, DAI Hai-tao, <i>et al.</i> (2169)
Spatiotemporal Variations in Fine Particulate Matter and the Impact of Air Quality Control in Zhengzhou	DONG Zhe, YUAN Ming-hao, SU Fang-cheng, <i>et al.</i> (2179)
Characteristics of Ozone Pollution and Relationships with Meteorological Factors in Jiangxi Province	QIAN Yue, XU Bin, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (2190)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Aerosol Optical Properties in Urban Agglomerations on the North Slope of the Tianshan Mountains	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie, <i>et al.</i> (2202)
Comprehensive Classification Method of Urban Water by Remote Sensing Based on High-Resolution Images	YANG Zi-qian, LIU Huai-qing, LÜ Heng, <i>et al.</i> (2213)
Construction and Application Optimization of the Chl-a Forecast Model ARIMA for Lake Taihu	LI Na, LI Yong, FENG Jia-cheng, <i>et al.</i> (2223)
Spatial Differences in Water Quality and Spatial Autocorrelation Analysis of Eutrophication in Songhua Lake	DING Yang, ZHAO Jin-yong, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2232)
Pollution and Irrigation Applicability of Surface Water from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	ZHU Dan-ni, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (2240)
Changes in Water Chemistry and Driving Factors in the Middle and Lower Reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	CHENG Zhong-hua, DENG Yi-xiang, ZHUO Xiao-ke, <i>et al.</i> (2251)
Effects of Different Land Use Practices on Nitrogen Loss from Runoff During Rainfall Events	LUO Yi-feng, CHEN Fang-xin, ZHOU Hao, <i>et al.</i> (2260)
Sources and Fate of Nitrate in Groundwater in a Typical Karst Basin: Insights from Carbon, Nitrogen, and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LIANG Jia-peng, <i>et al.</i> (2268)
Changes in the Bacterioplankton Community Between "Ice" and "Water" in the Frozen Dali Lake	LI Wen-bao, YANG Xu, TIAN Ya-nan, <i>et al.</i> (2276)
Analysis of the Spatial Changes in Bacterial Communities in Urban Reclaimed Water Channel Sediments; A Case Study of the North Canal River	QIU Ying, JIN Yan, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (2287)
Spatial Differences and Influencing Factors of Denitrification and ANAMMOX Rates in Spring and Summer in Lake Taihu	ZHAO Feng, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2296)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Typical Tributary Reservoir in the Three Gorges Reservoir Region	CHEN Sha, XIE Qing, FU Mei, <i>et al.</i> (2303)
Application of Iron and Sulfate-Modified Biochar in Phosphorus Removal from Water	SANG Qian-qian, WANG Fang-jun, ZHAO Yuan-tian, <i>et al.</i> (2313)
Analysis of the Performance and Mechanism of Phosphorus Removal in Water by Steel Slag	LUO Xiao, ZHANG Jun-bo, HE Lei, <i>et al.</i> (2324)
Adsorption of BS-18 Amphotically Modified Bentonite to Tetracycline and Norfloxacin Combined Pollutants	WANG Xin-xin, MENG Zhao-fu, LIU Xin, <i>et al.</i> (2334)
Preparation of Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ Composite Photocatalysts and Their Visible Light Photocatalytic Performance	GAO Chuang-chuang, LIU Hai-cheng, MENG Wu-shuang, <i>et al.</i> (2343)
Activation of Permonosulfate by Rhodamine B for BPA Degradation Under Visible Light Irradiation	ZHANG Yi-chen, BAI Xue, SHI Juan, <i>et al.</i> (2353)
Fe-Ti Co-Doped Alumina-Induced Surface Dual Reaction Center for Catalytic Ozonation to Remove Pollutants from Water	ZHANG Fan, SONG Yang, HU Chun, <i>et al.</i> (2360)
Preparation of Sulfidated Copper-Iron Bimetallic Compositing Material and Its Mechanism for Chromium Removal	QU Min, WANG Yuan, CHEN Hui-xia, <i>et al.</i> (2370)
Mechanisms of Penicillin Wastewater Treatment by Coupled Electrocatalytic and Bioelectrochemical Systems	QU You-peng, LÜ Jiang-wei, DONG Yue, <i>et al.</i> (2378)
Aerobic Granular Sludge Operation and Nutrient Removal Mechanism from Domestic Sewage in an Anaerobic/Aerobic Alternating Continuous Flow System	LI Dong, YANG Jing-wei, LI Yue, <i>et al.</i> (2385)
In-situ Phosphorus Removal Activity and Impact of the Organic Matter Concentration on Denitrifying Phosphorus Removal in Sludge Aggregates	LÜ Yong-tao, JIANG Xiao-tong, TU Yan, <i>et al.</i> (2396)
In-situ Sludge Reduction Technology Based on Ozonation	XUE Bing, LIU Bin-han, WEI Ting-ting, <i>et al.</i> (2402)
Effects of Activated Carbon on the Fate of Antibiotic Resistance Genes During Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste	MA Jia-ying, WANG Pan-liang, WANG Bing-han, <i>et al.</i> (2413)
Release Mechanisms of Carbon Source and Dissolved Organic Matter of Six Agricultural Wastes in the Initial Stage	LING Yu, YAN Guo-kai, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2422)
Spatial Differentiation of Soil Organic Carbon Density and Influencing Factors in Typical Croplands of China	LI Cheng, WANG Rang-hui, LI Zhao-zhe, <i>et al.</i> (2432)
Characteristics of Paddy Soil Organic Carbon Mineralization and Influencing Factors Under Different Water Conditions and Microbial Biomass Levels	LIU Qi, LI Yu-hong, LI Zhe, <i>et al.</i> (2440)
Analysis of Nitrogen Transformation Characteristics and Influencing Factors of Forestland Soil in the Qinghai-Tibet Plateau; A Case Study of the Qilian Mountains and Southeast Tibet	HE Fang, ZHANG Li-mei, SHEN Cong-cong, <i>et al.</i> (2449)
Using the Matter-Element Extension Model to Assess Heavy Metal Pollution in Topsoil in Parks in the Main District Park of Lanzhou City	HU Meng-jun, LI Chun-yan, LI Na-na, <i>et al.</i> (2457)
Effects of Long-Term Application of Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Heavy Metals and Their Availability in Reddish Paddy Soil	XIA Wen-jian, ZHANG Li-fang, LIU Zeng-bing, <i>et al.</i> (2469)
Characteristics and Origins of Heavy Metals in Soil and Crops in Mountain Area of Southern Sichuan	HAN Wei, WANG Cheng-wen, PENG Min, <i>et al.</i> (2480)
Spatial Distribution Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Topsoil PAHs in the Core Area of the Ningdong Energy and Chemical Industry Base	YANG Fan, LUO Hong-xue, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (2490)
Functional Stability and Applicability of Heavy Metal Passivators in Reducing Cd Uptake by Lettuce	PANG Fa-hu, WU Xue-jiao, KONG Xue-fei, <i>et al.</i> (2502)
Effects of Water Management on Cadmium Accumulation by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Growing in Typical Paddy Soil	ZHANG Yu-ting, TIAN Ying-bing, HUANG Dao-you, <i>et al.</i> (2512)
Adsorption Properties of Oiltea Camellia Shell-Modified Biochar and Effects of Coupled Waterlogging on Soil Cd Morphology	CAI Tong, DU Hui-hui, LIU Xiao-li, <i>et al.</i> (2522)
Effects of Land Use Changes on Soil Fungal Community Structure and Function in the Riparian Wetland Along the Downstream of the Songhua River	XU Fei, ZHANG Tuo, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (2531)
Distribution of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in a Fishery Reclamation Mining Subsidence Area	CHENG Sen, LU Ping, FENG Qi-yan (2541)
Effects of Three Commonly Used Herbicides on Bacterial Antibiotic Resistance	LI Xi, LIAO Han-peng, CUI Peng, <i>et al.</i> (2550)
Discussion of Microbial Control Standards of Water Reclamation and Formulation Methods	CHEN Zhuo, CUI Qi, CAO Ke-fan, <i>et al.</i> (2558)