Urban black and odorous water
monitoring technique and application
using remote sensing

城市黑臭水体遥感监测技术与应用示范



王 桥 朱 利 等/著

中国环境出版集团

城市黑臭水体遥感监测技术与应用示范

王 桥　朱 利　等/著

中国环境出版集团·北京

图书在版编目（CIP）数据

城市黑臭水体遥感监测技术与应用示范/王桥等著.
—北京：中国环境出版集团，2018.12
ISBN 978-7-5111-3841-5

Ⅰ. ①城… Ⅱ. ①王… Ⅲ. ①遥感技术—应用—城市污水—水污染防治 Ⅳ. ①X703.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 218038 号

出 版 人	武德凯
责任编辑	丁莞歆
责任校对	任 丽
封面设计	岳 帅

出版发行	中国环境出版集团 （100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号） 网 址：http://www.cesp.com.cn 电子邮箱：bjgl@cesp.com.cn 联系电话：010-67112765（编辑管理部） 010-67175507（环境科学分社） 发行热线：010-67125803，010-67113405（传真）
印 刷	北京中科印刷有限公司
经 销	各地新华书店
版 次	2018 年 12 月第 1 版
印 次	2018 年 12 月第 1 次印刷
开 本	787×1092 1/16
印 张	12.75
字 数	220 千字
定 价	60.00 元

【版权所有。未经许可，请勿翻印、转载，违者必究。】
如有缺页、破损、倒装等印装质量问题，请寄回本社更换

《城市黑臭水体遥感监测技术与应用示范》

贡献作者

（按姓氏笔画排序）

丁元芳　丁潇蕾　王　桥　王雪蕾　申　茜

吕　恒　朱云芳　朱　利　朱学练　李云梅

李旭文　李佳琦　李家国　吴传庆　吴志明

张永红　侍　昊　周亚明　孟　斌　姚　月

程　乾　温　爽

感谢国家重点研发计划：城乡生态环境综合监测空间信息服务及应用示范项目“城镇水体水质高分遥感与地面协同监测关键技术研究课题”（课题编号：2017YFB0503902）和“十三五”水专项：国家水环境监测监控及流域水环境大数据平台构建关键技术研究项目“城市水环境遥感监管及定量评估关键技术研究课题”（课题编号：2017ZX07302003）联合资助支持。

前　言

随着我国经济发展和城市化进程的加快，城市水环境呈现出局部恶化的趋势，特别是城市黑臭水体问题日益突出，引起了全社会的广泛关注。目前黑臭水体整治已经被正式列入地方政府水污染防治的主要任务，成为我国水环境保护的重点工作。如何科学认识黑臭水体的形成机理及其变化特征，实现黑臭水体的高效监管，是城市黑臭水体整治工作的基础，也是当前我国城市水环境保护面临的重大课题。

与基于地面布点采样的物理或化学分析监测方法相比，卫星遥感监测具有范围广、频率高、成本低、时效好等优势，是对传统水环境监测方法的重要补充。针对我国大范围城市黑臭水体监测、评估和管理的迫切需求，本书作者们在王桥研究员的带领下，率先在我国开展了城市黑臭水体遥感识别方法及应用研究，先后在华北地区、西北地区、东北地区、华东地区、长江中下游地区、东南地区等不同区域的典型城市进行了黑臭水体星地同步观测试验，系统获取了不同区域城市黑臭水体的水表、水质、水体、近地面、大气和光谱等相关参数，将水体透明度、溶解氧、氧化还原电位以及氨氮浓度等重要水质参数转换成黑臭程度指数，成功构建了城市黑臭水体遥感监测、分级与评估模型，并在 20 多个典型城市开展实际应用，实现了城市黑臭水体大规模遥感监测、定量分级和整治情况综合评估。

本书作为上述工作的技术总结，系统阐述了城市黑臭水体遥感监测高分辨率卫星数据处理、星地同步试验的过程和方法，揭示了与黑臭水体相关生物化学参数的光学特征、城市黑臭水体表观光学特征和固有光学特征，开展了黑臭水体吸收特性的影响因素分析，提出了基于经验算法、色度指标、人工智能方法的城市黑臭水体遥感识别方法，建立了基于半分析算法的城市黑臭水体定量分级模型，初步形成了一整套城市黑臭水体遥感监测技术流程和操作规范，并给出了多个典型城市黑臭水体遥感监测、治理成效评估的具体应用实例，表明了所建立的城市黑臭水体遥感监测方法的实用性

和有效性。相信本书的出版将为我国城市黑臭水体监管和水污染防治提供新的技术手段，为我国水环境遥感监管研究与应用提供有价值的参考。

全书共分为6章，内容由浅入深，逐步引入黑臭水体遥感监测涉及的不同方面和处理层次。第1章总体概述了当前黑臭水体的现状与研究进展、涉及的基本概念，高分辨率遥感在黑臭水体监测中的优势与发展，常用的高分辨率传感器以及遥感监测黑臭水体的总体技术框架；第2章简要介绍了高分辨率遥感数据预处理的内容，包括几何校正、大气校正、城市建成区提取、城市水系提取等；第3章详细介绍了星地同步试验点位设计，参数测量的原理、设备、方法、注意事项，测量数据的处理过程与结果以及试验数据集案例等；第4章系统阐述了城市黑臭水体的生物光学特征，包括水质参数特征、表观光学特征、固有光学特征，分析了黑臭水体吸收特性的影响因素，如颗粒物吸收特性、CDOM吸收特性；第5章重点论述了黑臭水体遥感识别和定量分级方法，从不同算法原理、算法精度分析、算法适用性分析等方面详细论述了基于经验算法、色度指标、人工智能方法、半分析算法等角度建立的不同的遥感识别模型；第6章从黑臭水体遥感监测在各地区的应用层面，举例介绍了华北地区、东北地区、西北地区、长江中下游地区、华东地区、东南地区某些城市黑臭水体的概况、过程及监管结果。

本书的出版凝聚了黑臭水体遥感监测研究团队多年的心血，第1章概论由王桥、朱利、吴传庆、申茜撰写，第2章由李家国、朱云芳、李佳琦撰写，第3章由申茜、朱利、姚月、朱学练撰写，第4章由李云梅、吕恒、王雪蕾、丁潇蕾、温爽撰写，第5章由吕恒、李云梅、丁潇蕾、吴志明撰写，第6章由朱利、侍昊、申茜、李家国、周亚明、孟斌、丁元芳、温爽撰写。张永红负责全书的统稿与修订，朱利负责全书的核稿。在此感谢所有参与数据处理与定点试验的人员，特别感谢李旭文、程乾等老师在研究过程中给予的指导，同时本书的第4章、第5章部分内容是丁潇蕾、温爽硕士毕业论文的重要组成部分。

本书力求全面又准确地介绍黑臭水体遥感监测的基本原理、方法、过程及结果，但由于水平有限，疏漏和不足之处敬请批评指正。

作者

2018年8月于北京

目 录

1 概论 / 1

1.1 主要背景 / 1

1.2 高分辨率遥感在黑臭水体监管应用中的优势 / 3

1.3 城市黑臭水体遥感常用的高分辨率传感器简介 / 6

1.4 国内外主要研究进展 / 19

1.5 遥感监测黑臭水体的总体技术框架 / 24

参考文献 / 25

2 高分辨率遥感数据预处理 / 26

2.1 高分辨率遥感数据几何校正 / 26

2.2 高分辨率数据大气校正 / 27

2.3 基于高分辨率数据的建成区提取 / 30

2.4 基于高分辨率数据的城市水系提取 / 32

参考文献 / 38

3 城市黑臭水体地面调查星地同步试验 / 40

3.1 试验设计 / 40

3.2 参数测量及数据处理 / 41

3.3 东北某城市试验方案示例 / 63

参考文献 / 69

4 城市黑臭水体生物光学特征 / 70

4.1 城市黑臭水体水质参数特征 / 70
4.2 城市黑臭水体表观光学特征 / 72
4.3 城市黑臭水体固有光学特征 / 75
4.4 黑臭水体吸收特性的影响因素分析 / 79
参考文献 / 81

5 城市黑臭水体遥感识别与定量分级方法 / 82

5.1 基于经验算法的黑臭水体遥感识别 / 82
5.2 基于色度指标的黑臭水体遥感识别 / 88
5.3 基于人工智能方法的黑臭水体遥感识别 / 95
5.4 基于半分析算法的黑臭水体遥感分级 / 103
参考文献 / 115

6 基于高分辨率影像的城市黑臭水体遥感监测应用示范 / 117

6.1 华北某城市黑臭水体遥感监管应用示范 / 117
6.2 东北某城市黑臭水体遥感监管应用示范 / 128
6.3 长江中下游某城市黑臭水体遥感监管应用示范 / 139
6.4 华东某城市黑臭水体遥感监管应用示范 / 156
6.5 西北某城市黑臭水体遥感监管应用示范 / 167
6.6 东南某城市黑臭水体遥感监管应用示范 / 175

图目录

图 1-1　高分一号卫星飞行状态　/ 6
图 1-2　高分二号卫星飞行状态　/ 7
图 1-3　资源三号卫星运行状态　/ 8
图 1-4　北京二号卫星运行状态　/ 9
图 1-5　吉林一号卫星　/ 10
图 1-6　高景一号卫星　/ 11
图 1-7　珠海一号卫星　/ 12
图 1-8　WorldView-1 卫星　/ 13
图 1-9　QuickBird 卫星运行状态　/ 15
图 1-10　PLANET 卫星　/ 16
图 1-11　SPOT-5 卫星运行状态　/ 16
图 1-12　无人机遥感系统组成　/ 17
图 1-13　无人机遥感　/ 18
图 1-14　城市黑臭水体遥感监测体系　/ 24
图 2-1　大气校正效果比对　/ 30
图 2-2　上海市建成区提取结果　/ 32
图 2-3　尺度为 100 的影像分割效果　/ 33
图 2-4　尺度为 150 的影像分割效果　/ 33
图 2-5　尺度为 200 的影像分割效果　/ 34
图 2-6　基于面向对象用 Ratio NIR 提取水体效果　/ 35

图 2-7　基于面向对象用 Max.diff 提取水体效果　/ 35
图 2-8　四种方法水体提取结果　/ 36
图 2-9　深圳市水域分布　/ 37
图 2-10　深圳市建成区水域分布　/ 38
图 3-1　ASD 光谱仪　/ 42
图 3-2　设置仪器参数窗口　/ 43
图 3-3　光谱数据处理流程　/ 44
图 3-4　错误光谱数据剔除　/ 45
图 3-5　遥感反射率汇总　/ 46
图 3-6　遥感反射率特征曲线　/ 46
图 3-7　透明度测量工具　/ 47
图 3-8　溶解氧仪　/ 48
图 3-9　氧化还原电位测量仪器　/ 49
图 3-10　HI96715 型氨氮微电脑测定仪　/ 49
图 3-11　MICROTOPS II 型手持便携式太阳光度计　/ 50
图 3-12　卫星图像预处理流程　/ 62
图 3-13　东北某城市浑河试验点布设　/ 64
图 3-14　东北某城市建成区黑臭水体试验点布设　/ 65
图 3-15　东北某城市黑臭水体实测遥感反射率　/ 67
图 3-16　东北某城市黑臭水体照片编号示例　/ 68
图 3-17　东北某城市实际采样点位　/ 69
图 4-1　不同水体的光谱曲线　/ 74
图 4-2　黑臭水体（a）与非黑臭水体（b）总颗粒物吸收系数光谱曲线　/ 76
图 4-3　黑臭水体（a）与非黑臭水体（b）色素颗粒物吸收系数光谱曲线　/ 77
图 4-4　黑臭水体（a）与非黑臭水体（b）非色素颗粒物吸收系数光谱曲线　/ 78
图 4-5　黑臭水体（a）与非黑臭水体（b）CDOM 吸收系数光谱曲线　/ 78

图 5-1　基于经验算法的黑臭水体遥感识别流程　/ 83
图 5-2　建模样点 R_{rs}（绿）值　/ 84
图 5-3　建模样点绿、红波段遥感反射率比值　/ 84
图 5-4　光谱曲线对比　/ 87
图 5-5　RGB 颜色空间　/ 88
图 5-6　CMY 颜色空间　/ 89
图 5-7　HSV 颜色空间　/ 89
图 5-8　建模样点 CIE 坐标主波长　/ 93
图 5-9　深度学习模仿人脑机理示意图　/ 96
图 5-10　神经网络模型　/ 98
图 5-11　基于特征波段组合的深度学习算法流程　/ 99
图 5-12　三类水体（a～c）及平均色素颗粒物吸收（a_{ph}）光谱曲线（d）　/ 104
图 5-13　三类水体（a～c）及平均非色素颗粒物吸收（a_d）光谱曲线（d）　/ 105
图 5-14　三类水体（a～c）及平均 CDOM 吸收（a_g）光谱曲线（d）　/ 106
图 5-15　黑臭水体的非色素颗粒物、色素颗粒物、CDOM 吸收和纯水对总吸收（a_t）的贡献率　/ 107
图 5-16　黑臭水体与非黑臭水体 440 nm 处吸收系数百分比　/ 108
图 5-17　不同黑臭级别水体 S_d 值的箱型图　/ 109
图 5-18　不同黑臭级别水体 K_d 值的箱型图　/ 110
图 5-19　不同黑臭级别水体 S_g 值的箱型图　/ 111
图 5-20　不同黑臭级别水体 K_g 值的箱型图　/ 111
图 5-21　区分不同级别黑臭水体　/ 112
图 5-22　吸收系数反演流程　/ 114
图 5-23　2016 年某市黑臭河流分布情况　/ 115
图 6-1　城市建成区遥感提取技术流程数据源选取　/ 118
图 6-2　华北某市建成区边界（2015 年）　/ 119
图 6-3　建成区水域识别技术路线　/ 121
图 6-4　华北某市建成区水域分布　/ 122

图 6-5　华北某市建成区黑臭水体分布　/ 123
图 6-6　黑臭河段整治工程监测结果　/ 128
图 6-7　东北某城市统计黑臭水体分布　/ 129
图 6-8　东北某城市黑臭水体现场试验点位　/ 130
图 6-9　东北某城市建成区边界　/ 131
图 6-10　水域边界提取　/ 132
图 6-11　基于遥感识别的疑似黑臭水体分布　/ 133
图 6-12　2016 年 6 月黑臭水体地面验证试验点分布　/ 133
图 6-13　地方统计与遥感识别实地验证河段分布　/ 134
图 6-14　重点河段 1　2016 年 10 月 10 日现场试验点位及照片　/ 136
图 6-15　重点河段 1　2017 年 10 月 24 日现场照片　/ 136
图 6-16　重点河段 2　2017 年 6 月 18 日现场调查点位及照片　/ 138
图 6-17　重点河段 3　2017 年 6 月 18 日现场调查点位及照片　/ 139
图 6-18　长江中下游地区某市建成区边界　/ 141
图 6-19　长江中下游地区某市水系分布　/ 142
图 6-20　黑臭水体和正常水体光谱 GF-2 PMS 模拟结果　/ 143
图 6-21　基于遥感识别的长江中下游地区某市疑似黑臭水体分布　/ 143
图 6-22　2016 年 4 月地面验证试验调查点分布　/ 144
图 6-23　长江中下游某市地方统计与遥感识别实地验证河段分布　/ 145
图 6-24　重点监管河段分布　/ 148
图 6-25　重点督办河段 1　/ 151
图 6-26　重点督办河段 2　/ 151
图 6-27　重点督办河段 3　/ 152
图 6-28　重点督办河段 4（2017 年 7 月 20 日）　/ 152
图 6-29　重点督办河段 5　/ 153
图 6-30　重点督办河段 6　/ 153
图 6-31　长江中下游地区某市黑臭水体识别结果　/ 155
图 6-32　市建成区　/ 157
图 6-33　市建成区水系分布　/ 158
图 6-34　基于遥感识别的疑似黑臭水体分布　/ 159

图 6-35　2016 年 6 月黑臭水体地面验证试验点分布　/ 159
图 6-36　地方统计与遥感识别实地验证河段分布　/ 160
图 6-37　典型河段 1　/ 161
图 6-38　典型河段 2　/ 161
图 6-39　典型河段 3　/ 162
图 6-40　典型河段 4　/ 162
图 6-41　典型河段 5　/ 162
图 6-42　典型河段 6　/ 163
图 6-43　黑臭水体整治进展专题（2017 年第一季度）　/ 165
图 6-44　黑臭水体整治进展专题（2017 年第二季度）　/ 167
图 6-45　市建成区　/ 169
图 6-46　市建成区水域分布　/ 170
图 6-47　基于遥感识别的西北某市疑似黑臭水体分布　/ 170
图 6-48　2016 年 6 月西北某市黑臭水体地面验证试验点分布　/ 171
图 6-49　遥感识别黑臭河段实地验证结果　/ 172
图 6-50　典型河段 1　/ 173
图 6-51　典型河段 2　/ 173
图 6-52　典型河段 3　/ 174
图 6-53　典型河段 4　/ 174
图 6-54　典型河段 5　/ 174
图 6-55　东南某市统计黑臭水体空间分布　/ 176
图 6-56　东南某市建成区分布　/ 177
图 6-57　东南某市建成区水系分布　/ 177
图 6-58　基于遥感识别的东南某市疑似黑臭水体分布　/ 178
图 6-59　验证点分布　/ 179
图 6-60　东南某市疑似黑臭水体分布　/ 180
图 6-61　航空摄影测量空中三角测量加密结果　/ 181
图 6-62　东南某市 11 号河流 DSM　/ 182
图 6-63　东南某市 11 号河流正射影像　/ 182
图 6-64　东南某市河流 NDVI　/ 182

表目录

表 1-1　高分一号卫星相关参数统计　/ 7
表 1-2　高分二号卫星相关参数统计　/ 7
表 1-3　资源三号卫星相关参数统计　/ 8
表 1-4　资源三号 02 卫星相关参数统计　/ 9
表 1-5　北京二号卫星相关参数统计　/ 10
表 1-6　吉林一号光学 A 卫星相关参数统计　/ 11
表 1-7　高景一号卫星相关参数统计　/ 11
表 1-8　珠海一号卫星相关参数统计　/ 12
表 1-9　WorldView-1 卫星相关参数统计　/ 13
表 1-10　WorldView-2 卫星相关参数统计　/ 13
表 1-11　WorldView-3 卫星相关参数统计　/ 14
表 1-12　QuickBird 卫星相关参数统计　/ 15
表 1-13　PLANET 卫星相关参数统计　/ 16
表 1-14　SPOT-5 卫星相关参数统计　/ 17
表 2-1　四种方法水体提取精度　/ 36
表 3-1　野外试验参数采集统计　/ 40
表 3-2　室内试验参数采集统计　/ 41
表 3-3　试验仪器及负责人统计　/ 65
表 3-4　2016 年 9 月卫星过境时间　/ 66
表 3-5　试验日程安排　/ 67

表 4-1　2016—2017 年城市黑臭水体与非黑臭水体的光学水质参数　/ 70
表 4-2　2016—2017 年城市黑臭水体与非黑臭水体的生物化学水质参数　/ 72
表 4-3　7 号、10 号、28 号点的水质参数　/ 76
表 4-4　颗粒物吸收系数与悬浮物、叶绿素 a 浓度之间的相关关系　/ 79
表 4-5　黑臭水体与非黑臭水体 CDOM 特性分析　/ 81
表 5-1　2016 年 11 月某河段采样点水质参数　/ 86
表 5-2　单波段与比值法验证样点取值及识别结果　/ 86
表 5-3　色度法验证样点取值及识别结果　/ 94
表 5-4　深度学习算法部分验证样点实测及模型识别结果　/ 103
表 5-5　不同黑臭级水体的 S_d 值　/ 109
表 5-6　不同黑臭级水体的 K 值　/ 109
表 5-7　黑臭水体与非黑臭水体 CDOM 的 S_g 值分析　/ 110
表 6-1　7 条疑似黑臭水体名单　/ 134
表 6-2　重点河段 1　2016 年 10 月 10 日现场调查统计　/ 135
表 6-3　重点河段 1　2017 年 10 月 24 日现场调查统计　/ 136
表 6-4　重点河段 2　2017 年 6 月 18 日现场调查统计　/ 137
表 6-5　重点河段 3　2017 年 6 月 18 日现场调查统计　/ 138
表 6-6　黑臭河段实地验证结果　/ 145
表 6-7　重点监管河段工程整治概况　/ 147
表 6-8　黑臭水体工程治理遥感解译标志　/ 149
表 6-9　疑似黑臭水体名单　/ 160
表 6-10　第一季度黑臭水体遥感监督结果　/ 164
表 6-11　第二季度黑臭水体遥感监督结果　/ 165
表 6-12　疑似黑臭水体名单　/ 172
表 6-13　东南某市黑臭水体分布　/ 175
表 6-14　基于实地验证的东南某市疑似黑臭水体名单　/ 179

1 概论

1.1 主要背景

在城市发展进程中，工业、农业和生活产生的废水、污水使城市水体受到严重污染、不再清澈，甚至颜色发黑并散发恶臭。城市河流由于靠近城市或流经城市内部，利用程度高，承受城市污水、流域冲刷雨水的排入，同时受到周围城市的城市化进程和人类活动的巨大影响，因此其污染程度重于普通河流。我国92%的城镇面临水污染的威胁，许多城市的水体出现了常年性或季节性的黑臭现象。根据住房和城乡建设部与原环境保护部联合发布的全国城市黑臭水体整治信息显示（http：//www.hcstzz.com/），我国295个地级及以上城市共有2 100条黑臭水体。全国城市水体黑臭程度的加剧成为制约我国社会、经济发展，影响我国生态安全的重大环境问题。

黑臭现象的产生在很大程度上削减了水体对该区域的经济、文化、生态环境效益的贡献，极大地降低了周边居民的幸福感，严重影响了居民的生活品质和身心健康，制约了当地的发展。从生态环境方面看，黑臭水体易使城市河流生态系统功能丧失，并造成一定区域的生态失衡，有的甚至造成长期的危害，致使生态环境难以恢复。此外，治理黑臭水体、恢复生态环境需要投入大量资金，给整个社会造成重大经济损失。从社会环境方面看，城市水体严重受污损坏了城市形象，限制了河流观光旅游的开发和周边环境升值的空间。城市黑臭水体问题积聚易引起社会混乱，引发社会纠纷，造成政府公信力下降。同时，上下游跨区域黑臭事件往往导致下游地区的经济和生态受损，上下游地区在黑臭水体治理方面因各自利益难以达成协商一致，易引发官司纠纷和冲突。

针对黑臭水体引发的严重的生态环境和社会环境问题，国务院2015年4月2日颁布了《水污染防治行动计划》（国发〔2015〕17号）（以下简称“水十条”），明确指出：城市黑臭水体整治的责任主体是城市人民政府，并由住房和城乡建设部牵头，会同环境保护部、水利部、农业部等部委指导地方落实。“水十条”提出了城市黑臭水体的治理