

黑臭水体 遥感监测技术及应用

杨骥 周成虎 李勇 韩留生 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

黑臭水体 遥感监测技术及应用

杨骥 周成虎 李勇 韩留生 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书建立了一套可遥感的黑臭水体指标体系,提出了一种新的黑臭水体综合指数评价模型,分析了各项水质参数的相关性及其黑臭水体光谱特性,构建了水质参数反演模型。以广州市流溪河与东江(广州段)为研究对象,基于OLI遥感影像,实现了城市复杂环境下的水体信息的自动提取与黑臭水体的综合评价。本书具体内容包括:黑臭水体成因、机理分析、遥感理论与研究进展;以广州市53条河流/河涌的1200个监测点数据为基础,进行了数据采集、光谱数据处理,建立了黑臭水体水质评价体系和水质参数遥感反演模型;基于OLI卫星影像进行黑臭水体监测、数据提取及水质反演与评价。

本书可供环境工程、市政工程等领域的工程技术人员、科研人员和管理人员参考,也可供高等学校相关专业师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

黑臭水体遥感监测技术及应用 / 杨骥等著. -- 北京:
中国水利水电出版社, 2018. 7
ISBN 978-7-5170-6650-7

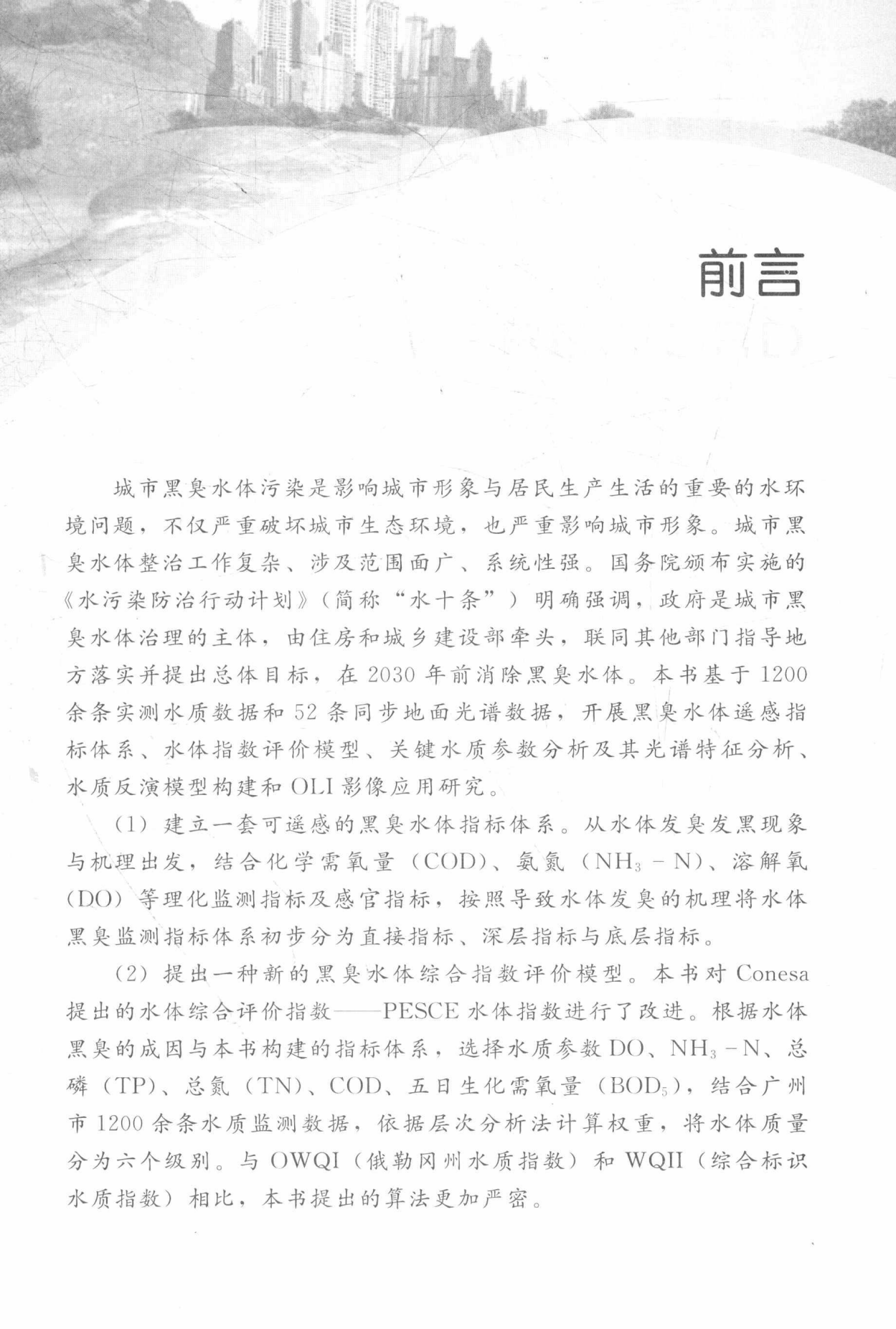
I. ①黑… II. ①杨… III. ①遥感技术—应用—城市
污水—水污染防治 IV. ①X703.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第165401号

书 名	黑臭水体遥感监测技术及应用 HEICHOU SHUITI YAOGAN JIANCE JISHU JI YINGYONG
作 者	杨骥 周成虎 李勇 韩留生 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市密东印刷有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 7.75印张 143千字
版 次	2018年7月第1版 2018年7月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	36.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



前言

城市黑臭水体污染是影响城市形象与居民生产生活的重要的水环境问题，不仅严重破坏城市生态环境，也严重影响城市形象。城市黑臭水体整治工作复杂、涉及范围面广、系统性强。国务院颁布实施的《水污染防治行动计划》（简称“水十条”）明确强调，政府是城市黑臭水体治理的主体，由住房和城乡建设部牵头，联同其他部门指导地方落实并提出总体目标，在 2030 年前消除黑臭水体。本书基于 1200 余条实测水质数据和 52 条同步地面光谱数据，开展黑臭水体遥感指标体系、水体指数评价模型、关键水质参数分析及其光谱特征分析、水质反演模型构建和 OLI 影像应用研究。

（1）建立一套可遥感的黑臭水体指标体系。从水体发臭发黑现象与机理出发，结合化学需氧量（COD）、氨氮（ $\text{NH}_3 - \text{N}$ ）、溶解氧（DO）等理化监测指标及感官指标，按照导致水体发臭的机理将水体黑臭监测指标体系初步分为直接指标、深层指标与底层指标。

（2）提出一种新的黑臭水体综合指数评价模型。本书对 Conesa 提出的水体综合评价指数——PESCE 水体指数进行了改进。根据水体黑臭的成因与本书构建的指标体系，选择水质参数 DO、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、总磷（TP）、总氮（TN）、COD、五日生化需氧量（ BOD_5 ），结合广州市 1200 余条水质监测数据，依据层次分析法计算权重，将水体质量分为六个级别。与 OWQI（俄勒冈州水质指数）和 WQII（综合标识水质指数）相比，本书提出的算法更加严密。

(3) 分析了各项水质参数的相关性。结果表明：①DO与TN、TP、COD、BOD₅、NH₃-N呈负指数相关，且相关性达到显著水平，说明DO较低是多种物质综合作用所导致，而不是某项物质单独作用的结果；②TN与NH₃-N、TP、COD、BOD₅之间存在较高的线性相关，说明实验区排放的工业废水与生活污水会同时导致这5种水质参数指标升高；③DO与TN、TP、COD、BOD₅、NH₃-N的呈负相关，且相关性达到显著水平，说明实验区两条黑臭水体周边工业废水、生活污水的排放导致TN、TP、COD、BOD₅、NH₃-N浓度过高，并大量消耗水中的溶解氧，从而导致水体黑臭。

(4) 分析了黑臭水体光谱特性。结果表明：①重度黑臭水体与轻度黑臭水体的光谱特征相似，但重度黑臭水体的反射率总体低于轻度黑臭水体。②当TSS浓度过高时(>100mg/L)，TSS的光谱特征有两个明显反射峰，并向黄、红波段偏移，出现在580~710nm和810nm附近。TSS的特征起主导作用，抑制了关键黑臭水质参数的光谱特征。因此，当TSS浓度大于100mg/L时，不适宜用遥感研究水体的黑臭信息。③归一化处理、包络线去除、一阶微分处理、比值差值处理能够消除部分背景的影响，放大与突出水质参数光谱特征，提高水质参数与各种光谱的相关性。

(5) 利用地面采集的52条光谱数据，构建了黑臭水体关键水质参数反演模型。5种水质参数(TN、TP、NH₃-N、COD、BOD₅)的DR(597nm)、ER(600nm)的单波段模型显著性较高，为最优模型。BR(580nm, 650nm)、CR(550nm, 650nm)、E-BR(580nm, 650nm)、E-CR(550nm, 650nm)、N-BR(580nm, 650nm)、N-CR(550nm, 650nm)的最优波段组合主要呈负指数模型，模型效果较好；DO的原始光谱、NR、DR、ER的最优波段分别在567nm、760nm、420nm、600nm处，其中NR(760nm)、ER(600nm)模型显著性系数较高，主要呈对数模型，模型效果较好。DO的原始光谱波段比值最优组合为BR(650nm, 750nm)、CR(680nm, 750nm)，模型主要呈对数形式，模型的确定系数 $R^2=0.958$ ，显著性系数较高。

(6) 针对城市水体与道路、建筑物、阴影等易于混分以及遥感水

体提取结果不连续,存在斑点问题,本书以广州市流溪河与东江(广州段)为研究对象,基于OLI遥感影像,采用本书新提出的CWI(城市水体指数法),实现城市复杂环境下的水体信息的自动提取。与单通道算法、MNDWI(改进的归一化差异水体指数)算法、SVM算法及光谱角度算法的水体提取结果进行对比分析,结果表明:SVM算法出现大量斑点;MNDWI算法、光谱角度算法与单通道算法斑点较少,但水体提取结果不连续,部分河道漏分。本书提出的算法能够克服山体阴影、道路、建筑物等影响,实现城市污染水体以及一般水体连续、准确提取。

(7) 基于OLI影像的黑臭水体监测。基于重采样的光谱,对6种水质参数模型进行校正,模型具有较高的精度,能够适用于OLI影像水质参数的反演。基于以上模型对流溪河、东江水体的TSS、TN、TP、COD、BOD₅、NH₃-N等关键水质参数反演运算及空间制图,并对水体黑臭情况进行了评价。验证结果表明,遥感反演的结果与实际水质结果一致。

在本书的写作过程中,广州地理研究所陈水森研究员为研究工作提出了宝贵意见,潘屹峰、陈修治、苏泳娴、王重洋、李丹、姜浩、刘尉、杨传训、徐朝朝、张晨、黄浩玲、杨炎帮等为实验研究开展提供了支持,广州市水务部门为实验野外采样工作提供了大量帮助,并从实际工作经验出发为本次实验提出建议,得到了广东省“珠江人才计划”引进创新创业团队项目(2016ZT06D336)、广东省科学院实施创新驱动发展能力建设专项(2016GDASRC-0211、2017GDASCX-0101、2018GDASCX-0101)、广东省科技计划项目(2017010117008、2017B030314138)、广州市科技计划项目(201806010106、201604016047)、广州市水务科技项目(MZSK-2016-01、SW-2018-001)的资助,在此一并表示感谢!

限于笔者水平和写作时间,书中内容未免挂一漏万,错误纰漏在所难免,切望广大读者批评指正。

作者

2018年5月

目录

前言

第 1 章	概述	1
1.1	研究背景	1
1.2	黑臭水体成因及机理	2
1.3	水质遥感理论基础	6
1.4	黑臭水体监测进展	7
1.5	研究目的	12
1.6	研究内容	12
1.7	技术路线	13
第 2 章	研究区域介绍及野外实验	14
2.1	广州市水质概况	14
2.2	实验数据采集	15
2.3	光谱数据处理	29
第 3 章	黑臭水体机理与水质评价	33
3.1	黑臭机理与指标评价体系	33
3.2	水体指数评价方法	35
3.3	广州市河涌黑臭水质评价	44
3.4	本章小结	51
第 4 章	黑臭水体关键水质参数遥感反演	52
4.1	水质遥感反演方法	52
4.2	黑臭水体光谱特征分析	54
4.3	原始光谱相关性分析	58
4.4	归一化光谱相关性分析	62
4.5	包络线去除光谱相关性分析	65

4.6	一阶导数微分光谱相关性分析	68
4.7	水质参数反演模型构建	71
4.8	精度评价	75
4.9	本章小结	77
第 5 章	基于 OLI 卫星影像的黑臭水体监测	79
5.1	水体提取	79
5.2	关键黑臭参数水质反演实验	90
5.3	本章小结	97
第 6 章	结论与展望	99
6.1	结论	99
6.2	创新点	102
6.3	展望	102
参考文献		104

第 1 章

概 述

1.1 研究背景

城市黑臭水体污染是影响城市形象与居民生产生活的重要水环境问题，不仅严重破坏城市生态环境，也严重影响城市形象。城市黑臭水体整治工作复杂、涉及范围广、系统性强。国务院颁布实施的《水污染防治行动计划》（简称“水十条”）明确强调，政府是城市黑臭水体治理的主体，由住房和城乡建设部牵头，联同其他部门指导地方落实并提出总体目标，在 2030 年前消除黑臭水体。

住房和城乡建设部、环境保护部印发的《城市黑臭水体整治工作指南》对黑臭水体的定义如下：一是空间范围，黑臭水体必须是在城市中的水体，即会对居民正常生产生活造成影响的污染水体；二是颜色，黑臭水体的颜色会令人感到不悦，如发黑等非正常水体颜色；三是气味，黑臭水体会让人感到不适的刺激性气味。

截至 2018 年 3 月 1 日，全国认定的黑臭水体共有 2100 条，已完成治理的有 1120 条，正在治理中的有 790 条，正在进行方案制定中的有 190 条。全国黑臭水体中，南方多于北方，呈现出经济越发达、城市发展越快的地方水体黑臭越严重。广东省共有黑臭水体 243 条，位居全国首位，安徽、湖南、山东、江苏、湖北等省黑臭水体数量居前。

2016 年 12 月，中共中央办公厅、国务院办公厅印发的《关于全面推行河长制的意见》中提到，“加强水环境治理，加大黑臭水体治理力度”，实行一河一策。目前，城市黑臭水体治理工作正在有序推进，各地按照要求进行黑臭水体排查，落实相关责任人，明确达标期限，根据黑臭水体状况，按照“一河一策”

着手实施治理。如广州市共排查出重点污染河涌 187 条,均已列明治理期限,并按照计划进行治疗。

水体中生物的新陈代谢以及人为过度污染排放是引发城市水体黑臭的主要因素。随着社会工业化、城市化结构的扩大升级,环境基础设施建设日渐不足,导致城市水体污染程度不断加强,水体中 COD、TN、TP 等污染物浓度超标,河流水体污染严重并出现黑臭。由于城市黑臭水体成因复杂,造成水体黑臭的污染源包括畜禽养殖、农林施肥、工业废水、垃圾堆放、生活污水等多种,如何有效地对城市黑臭水体进行监测与治理,成为目前亟待解决的主要问题。

目前,城市黑臭水体的监测与评价主要依靠地面监测的方式,分为人工采样与在线采样两种方式。人工采样成本较高,效率低下;在线采样设备安装复杂,采购与维护价格较高,且只能实现部分水质参数的实时自动监测。同时,地面监测通常获取某时段某个段面的水环境信息,是一种以点代面的方式,获取的水质数据在空间上无法实现连续分布。因此,地面监测对于整条河流来说,具有一定的局限性,尤其在面对实时性要求较高或者流域面积较大的情况。近年来,遥感技术为河湖水环境监测提供了新的解决思路与方法,成为地面监测手段的有效补充。相对于地面监测,遥感技术可获取河流在空间上、时间上连续部分的水环境信息,范围广、效率高,可从宏观上掌握黑臭水体空间特征,并有利于及时、全面掌握黑臭水体的时空演变过程;同时,也可以对河流水质状况在时间维度与空间维护上的变化进行监测。相对于传统的、耗费大量人力、物力的人工监测,遥感技术的优势在于其低成本、高效率、大范围的动态监测。

本书通过地面水质检测与光谱采样,从城市黑臭水体的遥感响应机理出发,研究黑臭水体机理与水质评价体系;分析黑臭水体水质特征与光谱特征,建立黑臭水体视觉识别模型与光谱水质反演模型;研究基于遥感的黑臭水体提取与评价模型,尝试对城市黑臭水体进行遥感识别与分级,并对模型进行适用性评价,以期为城市黑臭水体的监测与治理提供理论与技术支撑。

1.2 黑臭水体成因及机理

1.2.1 黑臭水体定义标准

《城市黑臭水体整治工作指南》对黑臭水体进行了定义。另外,也从水质指标上,对黑臭水体的关键水质参数标准进行了定义,将黑臭水体分为轻度黑臭和重度黑臭两个级别,具体见表 1.1。

表 1.1

城市黑臭水体污染程度分级标准

特征指标	轻度黑臭	重度黑臭
透明度/cm ³	25~10 ^①	<10 ^①
溶解氧/(mg/L)	0.2~2.0	<0.2
氧化还原电位/mV	-200~50	<-200
氨氮/(mg/L)	8.0~15	>15

① 水深不足 25cm 时, 该指标按水深的 40%取值。

1.2.2 黑臭水体污染源

(1) 日益严重的有机污染是水体黑臭的根本原因。随着我国人口逐渐向城市转移, 城市人口大幅增长, 但城市污水处理设施建设的进展落后于不断扩大的城市规模, 造成对生活污水等的处理能力不足; 城市建成区的污水管网由于使用年限较长, 容易发生管网渗漏的情况; 同时, 部分城市工业企业废水处理能力较弱, 甚至存在工业废水直排现象。以上情况会造成含有有机污染物的大量生活污水未经处理直接排入城市河道中, 是城市黑臭水体形成的主要外源污染。有机污染物是来源于生活污水、工业废水中含有的糖、蛋白质、氨基酸、油脂等的有机碳污染物、有机氮污染物以及含磷化合物, 这些有机物的分解消耗大量的溶解氧, 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, 从而引起水体发黑发臭。

(2) 河床底泥再悬浮是水体黑臭的关键因素。底泥污染是城市黑臭水体形成的内源污染物。底泥污染物形成的基础是大量藻类死亡后的沉降, 长期的堆积以及水中其他污染成分的聚积, 通过沉降和吸附作用沉积在淤泥中, 经过人为活动、水流冲击以及水生物影响, 扰动河床沉积底泥, 使得孔隙水与底泥上吸附的污染颗粒物产生交叉污染, 导致水体黑臭。蓝藻类与放线菌的厌氧分解使底泥产生易挥发异味气体, 从而导致水体发臭。底泥的主要污染成分 FeS 、 MnS 在致黑中也扮演着重要角色。

(3) 水体热污染是城市黑臭水体形成的环境因子。水体热污染的主要来源是未经处理的工业废水、生活污水以及餐饮废水直接入河, 导致水体温度上升, 损害水体生态系统。在适宜水温下, 放线菌快速繁殖, 使有机物分解消耗大量的溶解氧, 厌氧环境下的有机物发生厌氧分解, 驱动黑臭水体形成。此外, 水体温度与微生物的活动频率成正比, 与溶解氧含量成反比, 这也是黑臭水体更易于发生在夏季的原因。

(4) 水循环动力不足是城市黑臭水体形成的驱动条件。由于河道淤积、水利工程节流等导致水体流速缓慢、流量不足、河道水流不畅等水动力条件不足,

致使水体中藻类繁殖加速，是水体黑臭的原因之一。此外，河道的硬质化以及人为渠道化，使得水体与河道土壤难以发生交互，从而影响污染物的正常循环，打破水环境生态平衡。城市人口的不断增加，使得水资源日益紧张，从而导致河流水量不足，改变了河流特征，破坏水环境循环，导致水体黑臭。

1.2.3 水体的致黑机理

水体的致黑机理主要有两个方面：①以固态形式存在的不溶性物质或吸附于悬浮颗粒上的污染物质；②有色且溶于水的腐殖质类有机化合物。罗纪旦等的研究发现，悬浮颗粒中的致黑物质如腐殖酸等是导致水体发黑的直接因素。

水体发黑主要与悬浮颗粒中腐殖酸和富里酸密切相关。万宇翹等在苏州河开展实验，通过测定关键氧化还原电位等指标，发现铁、锰、硫等化合物通过腐殖酸和富里酸吸附在悬浮物上，指出这是水体发黑的主要原因。丁琦等也通过实验证明上述观点，认为悬浮物吸附硫化铁从而导致水体发黑。卢信等认为，有机物浓度到达一定指标后，即可对水体产生致黑作用。而且他通过实验发现，有机物容易使水体发黑或颜色变深，且有机硫化物更容易加快水体发黑。由此可见，铁、硫及其化合物是水体致黑的主要因素。

铁(Fe)在水中的形态转化过程如图 1.1 所示。水体中分为三个层，氧化带、活性反应带、厌氧带，但在存在有机污染的水体中，溶解氧降低，以上三个层形成的良性循环体系被破坏，第二层活性反应带缩小，第三层厌氧带扩大。在厌氧环境中，Fe 与 H_2S 发生化学作用形成 FeS ，铁元素的正常循环被破坏。

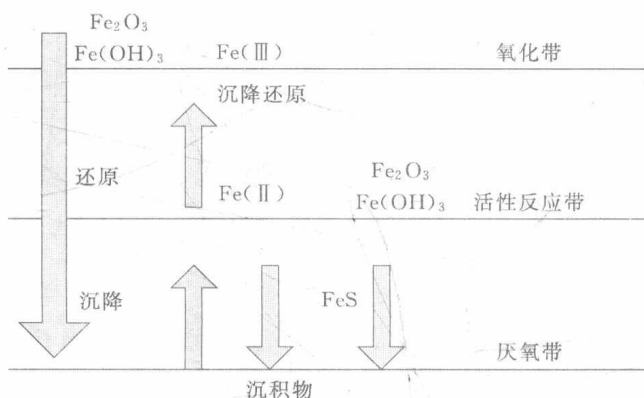


图 1.1 铁(Fe)在水中的形态转化过程

硫元素(S)在水中的形态转化过程如图 1.2 所示。与 Fe 的转换过程相似，在有机污染的水体中，溶解氧降低形成厌氧环境，有机物中的 S 分解，经过化

学反应形成 H_2S , H_2S 继续氧化消耗溶解氧, 直至溶解氧耗尽。 H_2S 继而与 Fe^{2+} 发生化学反应形成黑色的沉积物 FeS , 导致水体发黑。

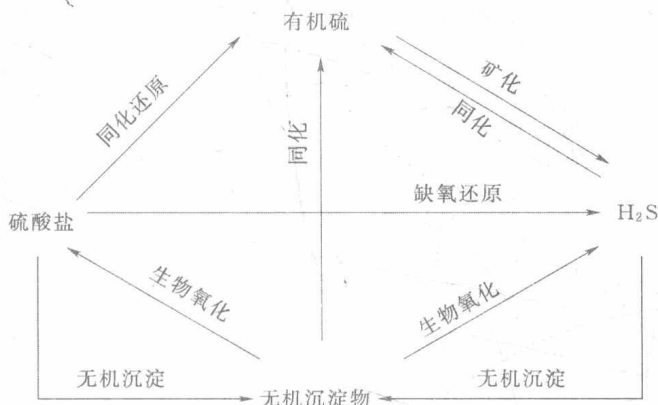


图 1.2 硫元素 (S) 在水中的形态转化过程

1.2.4 水体的致臭机理

水体的致臭机理主要有以下三个方面:

(1) 有机污染严重的水体中, 有机物好氧分解消耗大量溶解氧, 形成厌氧状态的水体。在此状态下, 有机物厌氧分解产生易挥发的刺激性气体, 是水体发臭的主要原因。

(2) 挥发性有机硫化物 (VOSC) 是主要的致臭物质。有机硫化物在水体致臭中扮演重要作用。此外, 腐殖质的分解产生硫氨基酸, 进而产生游离氨和硫醚类化合物, 也是水体致臭的因素之一。

(3) 有机污染严重的厌氧状态水体中, 放线菌和藻类的分解产生醇类异臭物质。因此, 有学者认为, 大量的放线菌和藻类是水体臭味化合物的主要来源, 进而导致水体发臭。

综上所述, 城市水体出现黑臭主要与有机污染导致的水体缺氧、富营养化以及底泥污染有关。水体变黑的主要原因是: ①水体中的铁、锰等金属离子在缺氧、厌氧条件下与水体的硫离子形成硫化物, 吸附在悬浮颗粒上或以固态形式存在; ②有色且溶于水的腐殖质类有机化合物导致水体变黑; ③污染物通过沉降或吸附作用存在河底淤泥中, 在一定条件下从底泥中释放从而导致水体发黑。水体变臭的主要原因是: ①大量有机物分解消耗水中溶解氧, 当溶解氧低于一定阈值后, 有机物发生厌氧分解, 产生硫化氢、氨气等易挥发的小分子化合物; ②营养物质过量导致藻类大量繁殖, 其死亡后分解会产生刺激性气体。此外, 水体流动性变小和水温升高也是造成水体黑臭的重要原因。

1.3 水质遥感理论基础

1.3.1 水体光学特征概念

水体光学特征常用的物理量包括表观光学量 (Apparent Optical Properties, 简称 AOPs) 和固有光学量 (Inherent Optical Properties, 简称 IOPs)。AOPs 包括离水辐射亮度 L_{sw} 、归一化离水辐射亮度 L_{wn} 、辐射照度比 (或漫反射比) $R(0^-) = E_u(0^-)/E_d(0^-)$ 、遥感反射比 $Rrs = L_{sw}/E_d(0^+)$ 等, 特点是会随着光照条件变化而发生改变。IOPs 包括有吸收系数、散射系数、光衰减系数等, 特点是不受入射光场条件的影响, 但会受水体成分及其光学特征的影响。

1.3.2 水质参数光谱特征

不同物质拥有不同的光谱特征, 水体的光谱特征由水的物质组成决定。以纯净水体为例, 当波长小于 600nm 时, 可见光反射率较低, 并且在红外波段的反射率呈现逐渐减小的趋势。但当水中存在其他物质时, 水体的光谱特征会受到散射作用和吸收作用的影响, 会随着水体水质参数的不同而发生变化。

总悬浮物 (TSS) 的浓度、类型、大小都会影响水体光谱特征。在 380~1000nm 的可见光与近红外波段, TSS 的特征是其浓度与反射率成正比, 并且反射峰所在的波段随着浓度的增加, 向长波方向移动。研究发现, 当波长为 700~900nm 时, TSS 浓度具有非常明显的光谱特征, 并且随着颗粒物的大小而发生规律性变化, 与其成反比。

叶绿素 a (Chl-a) 的光谱特征研究是重要的水质遥感反演研究内容之一, 是判断水体富营养化的基本指标。当波长为 400~700nm 时, Chl-a 的光谱曲线会出现非常明显的峰谷特征。在波长 450nm 附近, 会出现一个吸收谷, 并且在波长 400~500nm 内, Chl-a 浓度与反射率成反比关系; 吸收谷的最低点出现在波长 520nm 附近, 当波长大于 520nm 时, 反射率与 Chl-a 浓度成正比; 在波长 550nm 附近, 光谱曲线出现反射峰特征, Chl-a 浓度与反射峰值成正比; 在波长 680nm 附近, 由于浮游植物吸收作用, 使其出现荧光峰。

1.3.3 水质遥感辐射传输方程

在辐射传输的过程中, 电磁波信息经过大气散射、水体后向散射、水面镜面反射和下垫面反射后传递到光谱传感器中。电磁波与水体的相互作用如图 1.3 所示。水体后向散射会随着水质参数浓度的变化而发生规律性变化, 是水质遥感的理论基础, 因此, 水体后向散射是水质遥感的主要信息来源; 水面镜面反

射可通过设定传感器的观测角度降低其影响。大气纠正是水质遥感的重要前提，因为光谱传感器接收的太阳辐射主要由大气因素产生。

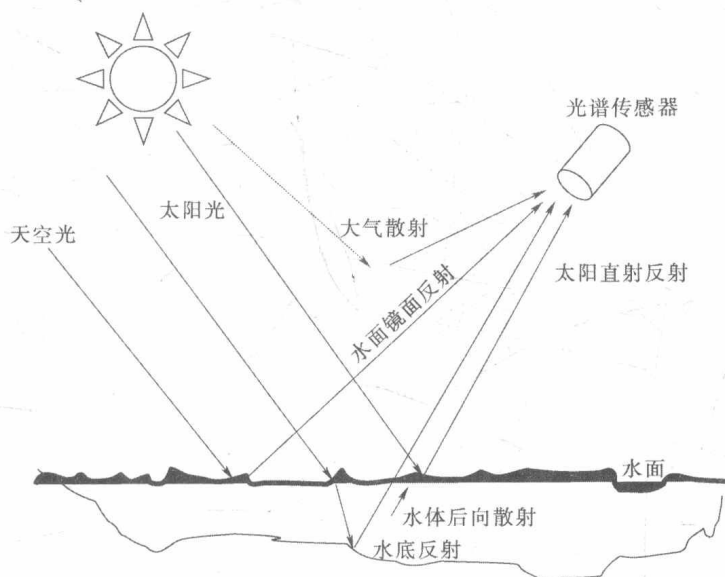


图 1.3 电磁波与水体的相互作用

1.4 黑臭水体监测进展

1.4.1 水质评价指数研究进展

国外关于水质评价指数的研究始于 20 世纪 20 年代，科学家与工程师用数学模型模拟水体污染物的迁移。如今，这些模型被学者们逐步完善并用于为水质问题提供解决方案。比较常见的水质评价指数包括美国国家卫生基金会 (National Sanitation Foundation) 提出的 NSFQI 水质指数、美国俄勒冈州提出的 OWQI 水质指数，加拿大环保理事会 (Canadian Council of Ministers of the Environment) 提出的 CWQI 水质指数，评价的水质参数主要包括 DO、粪大肠菌群、pH、BOD₅、硝酸盐、总磷、温度、浊度、总固体。有学者对以上几种评价方法做出比较，CWQI 的评价方法最为严厉，其次为 OWQI，而 NSFQI 水质指数评分与前两者相比分数较高。由美国耶鲁环境法律与政策中心和国际地球科学信息网络中心发布的 2008 环境指数 (EPI) 中也包括了水质指数 (WATQI)，主要基于 5 种常见的质量参数：溶解氧、电导率，pH、总氮和总磷浓度。国外对不同种类的水体，开展了大量关于水质评价模型的研究，为本书基于可遥感的水质参数，建立黑臭水体水质评价体系奠定了基础。

国内关于水体评价的研究主要是基于地面点的水质监测数据与水体感官指标建立水体评价模型,常用的评价方法包括单因子、综合因子、神经网络等。徐祖信等提出了单因子水质指数模型,该指数的优点是可以标识水体等级、水质等综合信息。通过该指数,一方面可按国家标准对水体类别定性评价;另一方面也可以在定位同一类型的水体中比较其在具体某个参数指标上的差异。但这种方法也存在不足,李鹏章等通过研究表明,大多数基于单因子的水质评价研究都在不同的地区和流域开展,采用的评价方法与评价指标也各有不同,因此使得判别标准也存在差异。通过采用分析与比较,证实该方法的普适性较差,用于不同河流的水质评价正确率较低。因此,有学者开展综合水质标识指数研究。徐祖信等基于单因子水质标识指数提出了综合水质标识指数法,应用于上海市河流水质评价中,并取得了较好效果,该模型的提出也为我国河湖水体黑臭判别准则奠定了理论基础。刘璐瑶等提出一种可同时定性与定量评价水质的模型。该方法可弥补单因子指数模型的不足,可直观展示河湖综合水质。该方法的优点是可避免由于部分水质参数不达标从而否定整体水质的情况,具有较好的河湖评价综合性与合理性。因此,该方法常用于同一条河流不同断面水质以及不同河流水质的评价、比较与分析。

在黑臭水体评价方面,方宇翹通过计算臭阈值与 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 DO 等参数关系,从而构建黑臭水体指数模型,该指数模型将黑臭水体分为多个等级,并已经实际运用在了上海市的水质评价工作之中。郝英群等基于综合水质识别指数与有机物综合污染指数对城市河流进行黑臭识别,并建立了一种适用于城市河流黑臭评价方法,在江苏省的黑臭水体评价工作中取得较好应用。由于黑臭水体评价的指标与各水质指标之间的关系是复杂的,不能用简单的线性关系进行指示,因此需要建立评价指标与各项水质指标之间的非线性关系。与多元线性回归模型类似,多元非线性回归模型通过检测水质指标与污染程度的相关性建立模型。Jr 等在美国佛罗里达州多个湖泊中建立实时水质监测系统,基于大量水质数据建立了 Chl-a 、TP、TN 的多元非线性回归模型。目前国内使用非线性回归模型多用来评价湖泊、水库,近年来也有部分学者采用此模型对河道黑臭开展研究。魏文龙等通过分析黑臭水体成因,建立了 4 级指标体系,并在《城市黑臭水体整治工作指南》的黑臭分级基础上,进一步将黑臭水体细化为 4 个等级:非黑臭、轻度黑臭、中度黑臭与重度黑臭。张晶尧等结合黑臭成因的不确定性以及复杂性,应用商权赋权法确定各个评价指标的权重,同时考虑到不同水期污染程度不同的问题,建立了熵权的物元可拓模型,在丹河、晋城河应用,采用的指标包括 BOD_5 、COD、DO、TP 等,该方法可避免人为因素的影响。郝晓明等基于河道断面水质采样检测的有机污染数据 (COD、DO、

$\text{NH}_3 - \text{N}$) 与无机污染数据 (Fe 、 Mn)，建立水体黑臭多元线性评价模型。通过验证，发现该模型可较好地对广西某河流的水体黑臭程度进行评价，同时为建立该河流黑臭预警系统提供理论依据。Sugiura 等研究通过人工神经网络技术 (ANN) 与多元线性回归法 (MLR) 的对比，得出水体黑臭因素与水环境指标之间呈现非线性关系的结论，并且认为 ANN 比 MLR 更适合对水体黑臭进行评价与预测。徐明德等认为河流黑臭的模型是非线性的，成因复杂导致现象模糊。因此，他提出一种结合 BP 神经网络隶属度函数的评价模型，模拟黑臭水体关键因子之间的复杂关系，直观评价水质。相对于其他模型，该模型具有更好的科学基础。刘璐瑶等对常见的几种水质评价方法进行分析、比较，发现模糊综合评价法、内梅罗污染指数法等虽然具有量化表达结果、合理进行评价、直观反映程度等优点，但综合水质标识指数法以其同时定性与定量评价的优点，在这三种模型中最适合用于黑臭水体评价。

1.4.2 水质遥感研究进展

传统的水质遥感主要是对河湖边界提取以及流域环境监测，从 20 世纪 70 年代开始，水质遥感的研究逐渐被学者关注。伴随着对水体物质光谱特征研究的日益成熟，以及遥感传感器技术的不断提升，空间分辨率与光谱分辨率逐步提高，水质遥感已经从以往的定性研究发展为现在的定量研究；水质遥感的范围也逐渐从传统的水色三要素 [TSS、有色可溶性有机物 (CDOM)、 $\text{Chl} - \text{a}$] 发展到如今更多的综合污染指标 (TP、TN、COD、BOD、DO、 $\text{NH}_3 - \text{N}$)。

国外方面，研究人员利用 Modis、Meris、GOCI、Landsat 等卫星影像开展 TSS、CDOM、 $\text{Chl} - \text{a}$ 浓度的遥感研究，通过经验和半经验水质反演模型，可较好地对河湖水质进行分级以及定量反演大范围水质参数浓度。20 世纪 90 年代，我国研究人员最早利用卫星遥感影像结合同步地面采样建立了太湖水质参数遥感模型，对太湖的水污染进行评价、分析以及预测。不同于以往的断面监测，遥感方法通过在空间上连续的水质反演图像，发现太湖部分水域已出现严重的富营养化。这次研究采用的方法包括单波段模型、多波段模型以及主成分分析模型等。研究结果表明，以上方法可用于水质遥感反演。此外，研究人员在珠江口、抚仙湖、红枫湖、流溪河等多个研究区域开展相关研究，取得了较好的进展。

随着遥感技术的发展，高光谱分辨率遥感方面的研究成为近期研究的热点。高光谱遥感技术的逐步突破，使之成为研究人员对地观测的重要手段。现有的高光谱传感器可分为成像光谱仪和非成像光谱仪。已有研究人员采用非成像光谱仪对南四湖、百花湖、淀山湖等的 $\text{Chl} - \text{a}$ 、TP、TN、SD、COD、TSS 等水