



黑臭水体 防治技术及应用

蒋克彬 李元 刘鑫 编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

黑臭水体防治技术及应用

蒋克彬 李 元 刘 鑫 编



中国石化出版社

内 容 提 要

本书内容紧紧围绕《水污染防治行动计划》(“水十条”)对黑臭水体的治理要求、当前国家以及各地出台的相关治理技术与技术规范、标准编写,共分为十章,对黑臭水体的概念、有关防治技术和工程案例做了较系统的介绍。具体介绍了黑臭水体成因与机理、黑臭水体评价指标与判断方法、黑臭水体环境综合整治效果评估等;黑臭水体治理技术路线和防治技术措施;生物膜、人工湿地、稳定塘、土地处理、人工浮床等污水治理常用的技术措施;水体生态修复技术;与黑臭水体有关的治理与管理措施案例等。

本书第一、二章对黑臭水体的概念、整治效果评估、治理工艺与技术进行了较全面的概述,可供各级河流治理管理部门的人员阅读学习;后面各章是对防治技术及应用的具体介绍,主要供从事黑臭水体污染防治工作的技术人员阅读参考;本书也可用作高校相关专业老师与学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

黑臭水体防治技术及应用 / 蒋克彬, 李元, 刘鑫编.
—北京: 中国石化出版社, 2016. 10
ISBN 978-7-5114-4274-1

I. ①黑… II. ①蒋… ②李… ③刘… III. ①水污染
防治—研究②污水处理—研究 IV. ①X52②X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 222369 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 26.5 印张 669 千字

2016 年 10 月第 1 版 2016 年 10 月第 1 次印刷

定价:90.00 元

前言

河流、湖泊等地表水体，作为水资源的一个重要载体，是地球上水分循环的重要路径，对物质、能量的传递与输送起着重要作用。因其暴露在地表，取用方便，成为人类可依赖的最主要的淡水资源和可更新的能源。在生态系统中，河流水体发挥着排水、分流、蓄水、防洪、防涝、渗补地下水、蒸发缓解热岛效应、滋润净化空气等作用；在社会经济建设中，河流水体承担着供应水源、保护环境、旅游娱乐、交通运输、渔业等各项功能。

在国内，上海的苏州河从1920年起就开始出现季节性水体黑臭现象。从20世纪80年代开始，河流黑臭的现象在经济相对发达的地区开始普遍出现，如珠江广州段、松花江哈尔滨段、沈阳市城区河段、深圳市城区河段、南京市内外秦淮河、无锡市区河道、常州市运河及其河流、上海市中心城区中小河段等。近几十年以来，随着我国城镇化和工业化步伐的加快，废水排放量的激增造成河流湖泊黑臭现象愈发严重。根据环境保护部环境规划院的统计数据，2013年，北京市有93条河涉及V类水体，劣于V类的河长952km，占44%；浙江省垃圾河、黑臭河共计12000km，约占总长度的10%；江苏省城市黑臭水体约占河道总数的20%，黑臭河道COD平均浓度70mg/L， $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均浓度8.5mg/L，高于地表水V类标准值；广州市环保局公布了该市50条河涌水质情况，其中39条水质劣于V类。胶州市全市60%的城市水体监测断面水质为劣V类，主要污染因子以TP、COD、 BOD_5 和TN(湖库)为主。根据《2014年中国环境状况公报》，对全国423条主要河流、62座重点湖泊(水库)的968个国控地表水监测断面(点位)开展了水质监测，其中V类、劣V类水质断面分别占6.8%、9.2%，主要污染指标为COD、TP和 BOD_5 。春季、夏季和秋季，全海域劣于第IV类海水水质标准的海域面积分别为52280 km^2 、41140 km^2 和57360 km^2 ，主要分布在辽东湾、渤海湾、莱州湾、长江口、杭州湾、浙江沿岸、珠江口等近岸海域。全国近岸海域301个国控监测点中，劣于第IV类海水水质占18.6%，主要污染指标为无机氮和活性磷酸盐。黑臭水体的存在不仅影响景观，还会引起人们的不悦，危及人们的生命健康，甚至成为制约我国社会、经济发展，影响生态安全的重大环境问题，治理黑臭势在必行。

2015年4月16日，国务院发布《水污染防治行动计划》(“水十条”)，提出了黑臭水体整治目标，要求到2020年，地级及以上城市黑臭水体均控制在10%以内，到2030年，城市建成区黑臭水体总体得到消除。黑臭水体整治已成各地各级政府环境综合整治工作的重要内容。然而，由于黑臭水体成因复杂，影响因素繁多，整治工作涉及水利、生态与环保、园林绿化、动植物、微生物、管理等多个专业以及住建、国土、规划、环保、水务、城管、农业等多个部门，是当前水污染防治工作中的难点。尽管我国目前黑臭水体治理过程中的科技、资金逐步在提高，管理措施逐步在完善，但区域性的水体黑臭现象治理效果仍待提高。从以往各地开展的河流环境综合整治工作来看，存在诸多困难和问题。有的整治注重排涝、景观功能的打造，却忽略了生态功能的修复；有的整治注重美花、绿化、亮化，却忽略了控源截污；也有的整治注重工程的实施，却忽略了后期的长效管护，导致水环境质量改善不明显，整治效果不能充分发挥。因此，黑臭水体整治，必须有全盘的观点、综合的措施、长效的机

制，否则难以达效。

本书是紧紧围绕“水十条”对黑臭水体的治理要求、当前国家以及各地出台的相关治理技术与技术规范、标准，参考有关专家学者的文献，结合作者所在区域城市在黑臭河道治理上的探索与具体实践编写而成的。为方便河流治理管理部门的人员阅读学习，在第二章中对有关治理工艺与技术进行了较全面的概述，同时在后面的章节中对第二章相关技术的具体内容继续进行了详细的阐述，便于相关技术人员阅读参考。

本书由蒋克彬、李元和刘鑫编写，具体为李元编写第一、二、三章；蒋克彬编写第四、五、六、七章；刘鑫编写第八、九、十章。由于编者水平有限，书中会存在错误或不准确的地方，敬请读者以及行业专家给予斧正！

在编写过程中，我们参考引用了同行技术人员公开发表的有关文献与技术资料，在此向他们表示衷心的感谢！

目 录

第一章 黑臭水体概述	(1)
一、水环境质量标准及有关指标	(1)
二、水体缺氧的有关因素	(4)
三、黑臭水体形成的机理	(6)
四、黑臭水体的定义、危害及类型	(12)
五、黑臭水体评价指标与判断方法	(14)
六、黑臭水体综合整治存在的问题	(17)
七、黑臭水体环境综合整治效果评估	(18)
第二章 黑臭水体治理技术与措施介绍	(22)
一、黑臭水体治理技术路线、原则与措施	(22)
二、控源、截污与治污	(23)
三、水体疏浚	(36)
四、综合调水与水体补水、活水	(42)
五、人工浮床	(44)
六、人工增氧	(45)
七、生物膜	(52)
八、人工湿地	(60)
九、稳定塘	(61)
十、土地处理系统	(62)
十一、膜生物反应器	(63)
十二、水体生态恢复措施	(69)
十三、其他技术	(74)
十四、有关行政管理措施	(75)
第三章 生物膜技术	(78)
第一节 填料	(78)
一、悬挂式填料	(78)
二、悬浮填料	(81)
三、蜂窝填料	(84)
四、填料的选用	(87)
五、生物填料的发展方向	(87)
第二节 生物接触氧化法	(88)
一、生物接触氧化法的形式	(88)
二、生物接触氧化池的构造	(89)
三、生物接触氧化法的主要特点	(91)

四、生物接触氧化法的基本工艺流程	(91)
五、生物接触氧化池的设计	(91)
第三节 曝气生物滤池	(95)
一、曝气生物滤池的类型与特点	(95)
二、曝气生物滤池的构造与设计	(96)
三、滤池容积负荷	(99)
四、工艺流程及选择	(99)
五、设计参数	(101)
六、应用	(102)
第四节 生物流化床	(106)
一、两相流化床	(106)
二、三相生物流化床	(107)
三、内循环好氧生物流化床	(108)
第五节 生物转盘	(112)
一、生物转盘的组成	(113)
二、生物转盘系统的特征	(114)
三、生物转盘设计	(115)
四、生物转盘工程实例	(115)
五、生物转盘的进展和应用	(116)
第六节 生物滤池	(117)
一、生物滤池的分类	(117)
二、生物滤池的机理	(118)
三、生物滤池系统的功能设计	(121)
四、生物滤池的运行及其经验	(122)
五、几种不同生物滤池	(122)
第四章 人工湿地	(132)
第一节 人工湿地的分类、构造及特点	(132)
一、人工湿地的分类	(132)
二、人工湿地的基本构造	(135)
三、人工湿地的基本特点	(144)
第二节 人工湿地场地系统工艺与技术参数	(146)
一、一般规定	(146)
二、工艺流程的选择	(146)
三、设计的一般要求与步骤	(147)
四、表面流人工湿地	(147)
五、水平潜流型人工湿地	(148)
六、垂直潜流型人工湿地	(149)
七、人工湿地的运行管理	(153)
第三节 人工湿地技术的应用	(154)
一、国外人工湿地工程的应用	(154)

二、人工湿地在国内的有关应用	(157)
第四节 人工湿地设计实例	(160)
一、芦苇湿地	(160)
二、垂直潜流生态湿地处理小区污水	(162)
第五章 稳定塘	(166)
第一节 稳定塘的特点、类型	(166)
一、特点	(166)
二、类型	(166)
第二节 稳定塘介绍	(167)
一、厌氧塘	(167)
二、兼性塘	(170)
三、好氧塘	(172)
四、曝气塘	(174)
第三节 稳定塘塘体与附属设施要求	(175)
一、塘体	(175)
二、附属设施	(176)
第四节 稳定塘的设计与工程实例	(177)
一、工艺的选择	(177)
二、工艺的设计	(177)
三、昆明大清河稳定塘案例	(178)
四、征润州污水稳定塘案例	(179)
第六章 土地处理系统	(182)
第一节 土地处理系统分类	(182)
一、地表漫流	(182)
二、快速渗滤	(182)
三、慢速渗滤	(185)
四、地下渗滤处理系统	(187)
第二节 土地处理系统水质净化的原理	(188)
第三节 土地处理系统工艺设计参数与要求	(189)
一、地表漫流	(189)
二、快速渗滤(RI)	(194)
三、慢速渗滤	(199)
四、地下渗滤系统	(200)
第四节 土地处理工艺处理污水案例	(202)
一、土壤毛细管渗滤	(202)
二、污水绿地利用型土壤毛细管渗滤沟的设计	(203)
三、生活污水土壤毛细管渗滤的处理与回用	(205)
第七章 人工浮床	(208)
第一节 人工浮床的原理、特点、功能及应用	(208)
一、原理	(208)

二、特点	(209)
三、功能与应用范围	(209)
第二节 人工浮床的类型、结构及组成	(210)
一、人工浮床类型	(210)
二、人工浮床的结构与组成	(213)
第三节 浮床植物的遴选、驯养、栽植与养护	(216)
一、植物的遴选	(216)
二、植物对水体环境的适应性与污染抗逆性	(216)
三、植物的适用性驯养	(217)
四、植物的栽植与养护	(220)
第四节 人工浮床的设计与应用	(222)
一、设计	(222)
二、应用	(224)
第八章 河流形态保持、基底及岸(坡)修复技术	(228)
第一节 河流生态系统及其修复	(228)
一、河流生态系统的结构与功能	(228)
二、河流生态系统受损的主要原因	(229)
三、河流生态系统修复的有关理论	(229)
四、河流生态系统修复的目标与内容	(232)
五、河流生态系统的原则与方法	(233)
六、河流生态系统的恢复方法	(233)
七、河流生态系统恢复的发展历史与难点	(234)
第二节 河流形态保持、基底及岸坡修复技术概述	(235)
一、河流有关结构介绍	(235)
二、生态修复工程总体设计要求	(236)
第三节 河流形态的保持	(237)
一、一般要求	(237)
二、河段类型划分	(237)
三、形态保持技术重点和相关要求	(238)
第四节 河流岸(坡)生态修复技术	(243)
一、河流护岸(坡)的现状及存在的问题	(243)
二、生态岸(坡)的概念与功能	(244)
三、岸(坡)生境修复设计要求	(244)
四、生态岸(坡)构造型式	(245)
第五节 生态岸(坡)具体工程	(248)
一、具体形式及应用	(248)
二、有关生态岸(坡)材料介绍	(264)
第六节 河流缓冲带构建技术	(267)
一、河流缓冲带构建及布置要求	(267)
二、缓冲带构建技术	(268)

三、缓冲带的植物种类配置与栽种要求	(268)
四、缓冲带景观设计要求	(272)
第七节 河流生态多样性的修复措施	(272)
一、水生植物群落多样性修复技术	(272)
二、沉水植物优势种定植技术	(277)
三、水生动物群落多样性修复技术	(278)
第八节 国外河流形态保持、基底及岸坡修复技术与案例	(279)
一、国外河流生态修复技术	(279)
二、多自然型河流治理(日本)	(280)
第九节 生态整治措施的维护与管理	(286)
第九章 湖滨带生态修复与生态保护	(290)
第一节 湖滨带生态修复	(290)
一、湖滨带生态修复概述	(290)
二、湖滨带生态环境的调查与问题的诊断	(293)
三、湖滨带生态修复总体设计	(294)
四、湖滨带生态修复工艺	(297)
五、湖滨带生态修复工程维护管理	(305)
六、湖滨带生态恢复案例	(305)
第二节 湖泊生态的保护	(309)
一、湖泊流域的污染防治	(309)
二、湖泊流域生态修复与保护	(310)
第十章 水污染生态治理工程案例	(312)
第一节 国外农村生活污水有关治理措施介绍	(312)
一、日本农村生活污水处理措施	(312)
二、法国的蚯蚓生态滤池	(319)
三、“LIVING MACHINE”生态处理系统	(320)
四、其他	(321)
第二节 国内农村生活污水处理有关示范工程	(322)
一、厌氧+人工湿地处理工艺	(322)
二、多工艺组合处理措施	(324)
三、多组合工艺设计需要注意的问题	(332)
四、地下土壤渗滤系统	(335)
五、其他分散式处理技术	(337)
六、各类工艺设计参数汇总	(338)
第三节 污水处理厂尾水深度处理生态工程案例	(338)
一、平阴污水处理厂尾水人工湿地处理	(338)
二、无锡城北污水处理厂尾水深度处理	(339)
三、观澜河综合整治工程	(341)
四、复合垂直流人工湿地处理污水处理厂尾水	(343)
五、东莞生态园燕岭湿地深度处理工程	(344)
六、东汶河人工湿地工程	(345)

七、南坑河人工湿地工程	(346)
八、抚仙湖马料河人工湿地污水处理工程	(347)
九、深圳白泥坑人工湿地	(347)
十、东阳江流域制药废水深度处理	(348)
第四节 城市雨水径流污染控制技术与案例	(349)
一、城市雨水径流污染与治理基本情况	(349)
二、德国治理降雨的技术	(352)
三、城市雨水径流污染的控制与消减技术	(355)
四、人工过滤系统案例	(361)
五、植草沟的设计与案例	(363)
第五节 城市景观水体修复工程	(368)
一、深圳洪湖公园景观水体改善工程	(368)
二、杭州长桥溪公园的水生态修复和水生植物造景	(370)
三、梦清园景观水体生态净化系统示范工程	(374)
第六节 湖泊富营养化控制生态工程	(376)
一、湖泊富营养化形成的因素	(376)
二、湖泊富营养治理与控制策略	(377)
三、水体富营养化与藻类的治理措施	(378)
四、水体富营养化的生物修复目标	(381)
五、富营养化水体生态修复工程案例	(381)
六、玉溪市九溪人工湿地污水处理工程	(385)
第七节 区域面源污染综合整治生态工程	(385)
一、农村面源污染治理	(385)
二、水体污染强化净化前置库工程	(388)
三、太湖流域面源污染控制的前置库系统	(389)
第八节 国内黑臭水体综合整治工程案例	(394)
一、长港河道综合整治工程	(395)
二、中塘河支流黑臭河道治理	(398)
三、凤凰河二沟的治理	(400)
四、上海市	(401)
第九节 国外黑臭水体治理措施	(404)
一、国外黑臭的治理标准与污染控制技术排放管理体系	(404)
二、国外治理黑臭的措施	(406)
第十节 国外河流流域整治和管理经验	(407)
一、莱茵河	(407)
二、泰晤士河	(409)
三、塞纳河-诺曼底流域	(410)
四、法国巴黎塞纳河	(411)
五、德国埃姆舍河	(412)
六、河流管理的新理念	(413)

第一章 黑臭水体概述

一、水环境质量标准及有关指标

(一) 水环境质量标准

1. 定义

水环境质量标准是指为防治水污染,保护地表水水质,保障人体健康,维护良好的生态系统而对水体中污染物或其他物质的最高容许浓度所作的规定。水环境质量直接关系到人类的生存和发展,是制定污染物排放标准的根据,也是确定排污行为是否造成水体污染及是否应当承担法律责任的根据,是国家水环境法规的重要组成部分。

2. 分类

按照水体类型,水环境质量标准可分为《地面水环境质量标准》《地下水环境质量标准》和《海水环境质量标准》;按照水资源的用途,可分为《生活饮用水水质标准》《渔业用水水质标准》《农业用水水质标准》《景观娱乐用水水质标准》和各种工业用水水质标准等;按照制定的权限,可分为国家水环境质量标准和地方水环境质量标准,如省、自治区、直辖市人民政府可以对《地表水环境质量标准》(GB 3838)中未规定的项目,制定地方补充标准,地方补充标准不得与《地表水环境质量标准》(GB 3838)相矛盾,并报国务院环境保护部门备案。标准中规定的Ⅴ类水主要适用于农业用水区及一般景观要求水域,与黑臭水体有关的是《地面水环境质量标准》(GB 3838)中Ⅴ类以及更差的水质。

3. 作用

水环境质量标准有如下作用:

- ① 是水环境规划定量化的依据。
- ② 是水质评价的准绳。
- ③ 是水质管理的技术基础。
- ④ 是提高水环境质量的重要手段。

(二) 有关水质指标

水质指标是用以评价一般淡水水域、海水水域特性的重要参数,可以根据这些参数对水质的类型进行分类,对水体质量进行判断和综合评价。水质指标包括水质物理指标、化学指标和生物学指标,已形成比较完整的指标体系。

1. 物理指标

物理指标包括温度、悬浮物、臭味、透明度、色度等,它们均与水体黑臭有关。

(1) 温度

温度是最常用的物理指标之一,水的许多物理特性以及在水中进行的化学和生物过程都与温度有关。《地表水环境质量标准》(GB 3838)给出的温度要求是:人为造成的环境水温变化应限制在周平均最大温升 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ 、周平均最大温降 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 。温度与水体黑臭的发生有关,有学者给出的结论是:水体温度低于 8°C 和高于 35°C 时,河流一般不产生黑臭,因为在这个温度段内放线菌分解有机污染物,产生乔司咪等恶臭物质的活动受到抑制;在 25°C 时,放线菌

的繁殖达到峰值，水体的发臭程度达到最大。此外，水温的升高会加快水体中的微生物和藻类残体分解，加快有机物及氨氮的降解速度，加速溶解氧消耗，加剧水体黑臭现象的发生。

(2) 悬浮物

水中悬浮物含量是衡量水污染程度的指标之一。悬浮物指悬浮在水中的固体物质，包括不溶于水中的无机物、有机物及泥沙、黏土、微生物等。悬浮物是造成水体浑浊的主要原因，水体中的有机悬浮物沉积后易厌氧发酵，使水质恶化。

(3) 嗅味

被污染的水体往往具有异常的气味，用鼻闻到的称为嗅，口尝到的称为味。根据水中的嗅味可以大概推测水中所含杂质和有害成分，如水体因藻类繁生或有机物污染而产生的鱼腥及霉烂气味。目前对嗅与味尚无完全客观的标准和检测的仪器，日本学者合田健提出以臭气浓度及臭气强度指数来度量水质的嗅觉属性，其中臭气浓度(TO)= $200/a$ ，式中的 a 为感觉到臭气的最小水样量(mL)，在给水处理的标准中，要求 TO 值低于3~5；臭气强度指数(PO)是指被测水样稀释到没有臭气为止时，以百分率表示的稀释倍数。 PO 与 TO 通常具有如式(1-1)所示的关系。

$$PO = \lg TO / \lg 2 \quad (1-1)$$

(4) 透明度

把某一面白色或黑白相间的圆盘作为观察对象，透过水层俯视圆盘并调节圆盘深度至恰能看到为止，此时圆盘所在深度位置称为透明度，单位是m。透明度是表示水体透明程度的指标，它与浑浊度都能表明水中杂质对透过光线的阻碍程度，但意义是相反的。水一般清澈透明，若水中含有铁盐或亚铁盐，与空气接触后就可能产生 $Fe(OH)_3$ 等物质，使水呈棕黄色浑浊状态。

(5) 色度

色度是一种感官性指标，是对天然水或处理后的各种水进行颜色定量测定时的指标。水的色度是饮用水水质的重要指标之一，这主要是由于色度会引起人视觉感官的不良反应，并可以使水在饮用时有不愉快的味道，并产生厌恶心理。

纯净的水是无色的，当水中含有大量的杂质时，水就会产生颜色。天然水经常显示出浅黄、浅褐或黄绿等不同的颜色，这是由于溶于水的腐殖质、有机物或无机物质所造成的。另外，当水体受到工业废水的污染时也会呈现不同的颜色，这些颜色分为真色与表色。真色是由于水中溶解性物质引起的，也就是除去水中悬浮物后的颜色；表色是没有除去水中悬浮物时产生的颜色。色度的测定可以采用铂钴标准比色法，单位是倍。

2. 化学指标

(1) 非专一性指标

非专一性指标包括pH、氯化-还原电位等。其中pH会影响水体中生物的生长环境、物质的溶解与沉淀。《地表水环境质量标准》(GB 3838)给出的水体pH标准为6~9。氧化还原电位就是用来反映水体中所有物质表现出来的宏观氧化-还原性，氧化还原电位越高，氧化性越强，电位越低，氧化性越弱；电位为正表示水显示出一定的氧化性，水质较好；为负说明水显示出还原性，水质已经被污染。

(2) 无机物指标

包括氨氮(NH_3-N)、硝酸盐、亚硝酸盐、总磷(TP)、硫化物、氟化物、有毒金属、有毒重金属等。当水体中N、P等浓度较高时会造成水体富营养化的形成。

① $\text{NH}_3\text{-N}$ 。

$\text{NH}_3\text{-N}$ 是水体中无机氮的主要存在形式,通常主要以 NH_4^+ 离子状态存在,并包括未电离的氨水合物($\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), NH_3 与 NH_4^+ 在水中可以相互转化,但它们是性质不同的两类物质。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 是水体中的营养物质,也是水体中的主要耗氧污染物,对鱼类及某些水生生物有毒害。在高温季节以及有机腐败物积蓄较多的水体中, $\text{NH}_3\text{-N}$ 等有害物质的含量与作用会相应增加。用一般的化学分析方法(奈氏试剂法)测定出的水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量,实际上是离子氨(NH_4^+)和分子氨(NH_3)二者含量的总和,这主要取决于水的 pH 和温度。pH 增加, NH_3 的比率增大, pH 接近 10 时,几乎以 NH_3 的形式存在;水温升高, NH_3 也会稍有增加。

氨水合物($\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)能通过生物的表面渗入体内,渗入的数量决定于水及生物体液 pH 的差异。 NH_3 总是从 pH 高的一边渗入到 pH 低的一边。如 NH_3 从组织液中排出,这是正常的生理排泄现象;相反,若鱼类等生物长期生活在 NH_3 含量较高的水体中,不利于体内氮废物的排泄,若 NH_3 从水体渗入组织液内,就会形成血氨中毒。

《城市黑臭水体整治工作指南》中将黑臭水体细分为“轻度黑臭”和“重度黑臭”两级。其中水体 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度在 8~15mg/L 时为轻度黑臭,大于 15mg/L 时为重度黑臭。

② TP。

TP 是水体中 P 元素的总含量。水中的 P 可以单质磷、正磷酸盐、缩合磷酸盐、焦磷酸盐、偏磷酸盐和有机团结合的磷酸盐等形式存在,其主要来源为生活污水、化肥、有机磷农药及洗涤剂所用的磷酸盐增洁剂等。

水体中的 P 是藻类生长需要的一种关键元素,过量 P 的存在是水体发生富营养化和海湾出现赤潮的主要原因。藻类的异常生长能使水道阻塞,鱼类生存空间缩小,水体生色,透明度降低,其分泌物又能引起水臭、破坏水生生态平衡。1970 年,日本琵琶湖等封闭水域出现水藻疯长、鱼类死亡现象,研究发现是由于水中磷酸盐含量超过正常值所致。20 世纪 80 年代,国内南京玄武湖、武汉东湖、江苏太湖、安徽巢湖、杭州西湖和昆明滇池等都出现了富营养化现象,水体中 P 含量超标严重。2007 年无锡水危机事件是由于蓝藻大规模暴发而引发的次生灾害“湖泛”(也称黑臭)造成的,造成了无锡贡湖水厂取水口水质恶化,进而发生自来水停产,致使市民多日无饮用水供应。“湖泛”发生时最明显的感官现象就是水体发黑,并伴有刺激性异味的气泡产生,水体中的氧化还原电位急剧下降,溶解氧趋于 0。“湖泛”的出现往往与过高的有机负荷和较高的气温联系在一起,当湖泊富营养化水体在藻类大量暴发、积聚和死亡后,大量有机残体在适合的环境条件下厌气分解,会造成水体严重缺氧变黑,并释放出恶臭的硫化氢和二甲基硫醚类物质,其中二甲基三硫醚(DMTS)浓度可高达 11399ng/L。此外,主要致臭物的种类及含量还可能随“湖泛”持续的时间变化而有所变化。

此外,重金属污染物如铅、汞、铬、镉、砷等对生物有急性或慢性的毒性,产生味道及影响水体外观,并且降低水体的自净能力。

(3) 非专一性有机物指标

包括总耗氧量(TOD)、化学需氧量(COD)、高锰酸钾指数(COD_{Mn})、生化需氧量(BOD)、总有机碳(TOC)等;水中有机物含量高时会直接导致水体产生黑臭现象,如含硫有机物能使水体在 7~13 天变黑,并使水体散发出恶臭味。

(4) 溶解性气体

溶解性气体主要是指溶解氧(DO),水体黑臭主要是水体 DO 不足造成的。DO 是维持水

体生态环境动态平衡的重要环境因子,也是维持水生生物生存的必备条件,并参与部分物质转化。DO 浓度能够反映出水体受到的污染程度,特别是有机物的污染程度,是衡量水体水质的重要指标之一。在标准情况下,水体中饱和 DO 为 9mg/L。在比较清洁的水体中,DO 一般在 7.5mg/L 以上;当 DO 大于 6mg/L 时,水体处于有氧状态,有机物降解和氨氧化速率显著增加,水体具有自净能力。当 DO 在 5mg/L 以下时,各种浮游生物不能生存,大多数鱼类则要求 DO 在 4mg/L 以上;当 DO 为 3~5mg/L 时,水体中有机污染物和氨氮含量一般也会超过地表水 V 类标准,呈现有色有味状态,但有水生生物存在;好氧微生物生存的先决条件是 DO 应保持在 2~5mg/L 之间;当 DO 在 2mg/L 以下时,通常称该水体低氧或缺氧,DO 为 0 时被称为无氧。在以污水处理厂为主要水源的地区如海河流域,来水中部分生物为难以降解的有机物,BOD 接近 0,COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 即使通过自净,也难以达到地表水 V 类标准的要求。

3. 生物指标

包括细菌总数、大肠菌群、藻类等。当 N、P 等营养物质大量进入湖泊、河口、海湾等缓流水体的情况下,会引起藻类迅速繁殖而产生水华(赤潮)现象,造成水质恶化,鱼类及其他生物死亡现象的发生。

二、水体缺氧的有关因素

国内水体黑臭现象最早出现在上海苏州河,随后南京的秦淮河、苏州的外城河、武汉的黄孝河和宁波的内河等均出现不同程度的黑臭现象。近年来,黑臭水体的范围和程度不断加剧,全国大部分城市河段中,流经繁华区域的水体绝大部分受到不同程度的污染,尤其是各大流域的二级与三级支流的黑臭问题更加突出,且劣化程度逐年提高。如 2014 年国家环境质量状况公报的数据表明,淮河干流水质全年都在 IV 类水以上,主要支流的劣 V 类水体超过 23%;各大水系中,海河的劣 V 类水质程度最高,干流劣 V 类达 37%、支流劣 V 类达 44%。水体黑臭现象的产生与 DO 不足有关,引起水体 DO 不足的因素主要集中在以下几个方面。

1. 外源污染物消耗水中氧气

大量外源性污染物的进入水体是河道黑臭的主要原因。工业废水、生活污水和垃圾、畜禽粪便、农田化肥及各种重金属等都会引起水体黑臭。进入水体中的污染物主要以溶解态、悬浮态存在,如糖类、氨基酸、蛋白质、油脂等污染物,这些物质在微生物作用下分解成 CO_2 、 H_2O 等小分子,此过程需要消耗大量的氧,从而引起水质恶化和黑臭。当水体中受到有机碳、有机氮以及 P 的污染时,无论水体中是否有充分的溶解氧,在合适的水温下都会被微生物所降解,排放出不同种类的发臭物质,引起水体不同程度黑臭。造成污染的有关外因无外乎以下因素:

① 截污治污设施建设滞后于城市开发建设,排污量大且集中。这是造成水体黑臭的最直接原因之一。快速城镇化带来大量的人口聚集和工业的发展,有的地方工业污水经一般简单处理后和生活污水直接排入城市河道,加上大量垃圾堆积在河道两岸,直接造成水体的污染。即使是经济发达、污水治理水平较高的北京,以清河为例,近年来清河污水处理厂一直在扩建过程中,但清河两岸人口的增长快速,目前仍有 10 万 t/d 以上的污水未经处理直排入河内。

② 污水管网设施不健全。“十二五”以来,我国大规模建设污水处理厂设施,但在污水管网建设方面相对滞后。美国 2002 年城市排水管网密度平均在 $15\text{km}/\text{km}^2$ 以上,日本 2004

年城市排水管道密度平均达到了 20~30km/km²以上，我国 2014 年统计的城市排水管道密度数据为 11.19km/km²，差距很明显。有些城镇建成区尚存污水收集系统空白地区，尤其是一些城中村、农夹居地区；同时，管网质量不高，存在雨污不分流，错接、漏接、混接现象，导致生活污水混入雨水管网排入河道。

③ 水体生态流量不足或者无天然径流。我国水资源开发利用强度加大，不合理的水资源调度和水电开发对生态环境影响突出，中小河流断流现象十分普遍。全国 657 个城市中有 300 多个属于联合国人居环境署评价标准中的“严重缺水”和“缺水”城市。在北方地区，河道流量少，或者是干涸的河流，仅有污水处理厂尾水排放的水体无法满足水体功能要求。在南方的河网水系中，支河多为断头浜。断头浜导致水流不畅，调蓄、输水能力较差，缺少活水措施，水流不畅，水体自净能力较差。

④ 地表径流冲击负荷较大。在国内，有的老城区排水管道系统仍采用合流制，晴天主要输送城市污水，雨天则输送雨污混合污水，当暴雨雨量超过合流管道的设计能力时，过量的雨污混合污水就从合流管道的溢流设施或排水泵站溢流至城市水体中，直接导致水体水质急剧变差。一般情况下，当河流的径污比小于 8：1 时，河水就会污染严重，发生黑臭现象。

⑤ 水体周边脏、乱、差问题严重，城市滨水地带被大量占用，尤其是老城区和城乡结合部的水体，违章建筑物多，小型服务业多而杂乱，大量棚户区和单位无序分割占用，污水和垃圾直排入河道。

2. 底泥以及底质的再悬浮

水体污染不仅仅是其水质受到严重污染，而且其底泥的污染也非常严重。底泥是排入水体中各种污染的主要归属之一，有研究指出，在一些污染水体中，底泥中污染物的释放量与外源污染的总量相当。大量污染严重的底泥在物理、化学和生物等一系列作用下，吸附在底泥颗粒上的污染物与孔隙水发生交换，从而向水中释放污染物，造成水体二次污染，导致水体常年黑臭。底泥中 N、P 的释放会引起水体富营养化，底泥厌氧反应造成大量黑臭底泥上浮是水体黑臭的直接原因；大量的底泥也为微生物提供了繁殖的温床，在这些微生物中，放线菌和蓝藻类被认为对水体致臭的贡献最大。沉积在河床底部的污泥，由于水流的冲刷、人为活动扰动以及生物活动，均能引起底泥再悬浮。悬浮于水流中的底泥颗粒本身对水体也起着致黑的作用。应太林等对不同扰动下底泥再悬浮对苏州河黑臭的影响研究中，认为随着扰动速度的增加可以加剧河流水质的黑臭程度。表 1-1 给出了搅动速度、DO、NH₃-N、COD_{Mn}、硫离子、亚铁离子与黑臭指数的关系。

表 1-1 不同搅动速度下底泥再悬浮对水体黑臭的影响

搅拌速度/ (r/min)	底泥搅动状况	DO/ (mg/L)	NH ₃ -N/ (mg/L)	COD _{Mn} / (mg/L)	S ²⁻ / (mg/L)	Fe ²⁺ / (mg/L)	黑臭指数
500	无悬浮污泥	3.8	3.83	30.4	15.3	8.4	45
750	细颗粒开始悬浮	3.1	42.1	46.7	18.5	10.1	55
1000	部分搅起	2.7	48.7	50.1	0.1	11.4	68
1200	全部搅起	2.1	52.3	58.3	24.36	13.1	80
1500	全部搅起	1.8	60.2	61.2	29.5	15.2	98

3. 热污染

水温是促进水体发臭的一个重要因素。水体热污染是指现代工业生产和生活中排放的废

热所造成的水体环境污染，火力发电厂、核电站和钢铁厂冷却系统排出的热水以及石油、化工、造纸等工厂排出的生产性废水中均含有大量废热。这些废热排入水体之后，会使水温升高，引起水体的溶解氧减少、有些毒物毒性的提高，造成鱼类不能繁殖或死亡，导致水体生态环境的退化、恶化。

4. 不利的水动力条件

水动力条件对污染物的迁移、扩散也起着关键性的作用。不利的水动力条件在湖泊富营养化及藻华爆发的过程中起着决定性的作用。而对于各种断头河、束水段，其流速缓慢或者几乎不流动，流向、流态呈现随机性变化，水体之间的交换紊乱，汇流复杂，会严重影响水体的循环，减小水网的水环境容量，使得水体自净能力减弱，水体复氧能力衰退，引发水体水质恶化。对于感潮河网地区，每天的潮涨潮落使污水受潮流顶托长时间回荡，停留在河道中无法顺利排出，容易产生缺氧造成反复污染，同时从上游挟带的泥沙及各种垃圾就在内河床中沉淀下来，经过日积月累的淤积后较易产生黑臭现象。

5. 其他

(1) 上游的污染源

上游的污染源对下游的水体有两方面的影响：一是受污染的河道无法通过引用清水来进行恢复；二是已经治理好的河道可能会再次被上游来水所污染，会加剧城市河道的黑臭程度。典型的大区域有上海、淮河流域等。

(2) 水系结构不合理

由于城市发展、市政建设或其他历史原因，存在许多断头浜和淤塞河段，水系不能完全沟通。另外，许多排污口和排污沟的存在使相当多的河道水系结构复杂，治理难度加大。

(3) 水体功能被异化

由于历史原因，一些大城市的老城区采用合流制或排水管网严重老化，形成雨污混流，加上城市人口增速快，排水管网建设跟不上等原因，使城市周边的部分河道水体功能变化为接纳污水、雨水的通道。

三、黑臭水体形成的机理

黑臭的主要原因是有机污染物过量排入水体，研究表明，有机物浓度只要达到一定负荷水平(1.0g/L)就会对水体有致黑作用；有机污染物在微生物的作用下得到降解，同时消耗掉水体中的DO，使水体中的DO浓度降低甚至完全消失；水体中N、P物质含量过高也会引起水体发黑发臭；水体黑臭现象除与水体中的有机污染物(包括腐殖质)、DO、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、微生物有关外，还与硫、铁等有密切关系。黑臭水体的有关研究表明，复氧与耗氧失衡导致水相和沉积相氧化还原环境变化，造成铁、硫化化合物的化学、生物转化机制及其产物的变化，从而会导致水体产生黑臭现象。

(一) 有机物

水中有机物种类繁多，按其在水中分散度的大小可分为颗粒状有机物和溶解性有机物；按对水环境的污染方式和水质环境的影响，可分为好氧性有机物和有毒有机物两大类；按结构复杂程度和产生方式可分为腐殖质类和非腐殖质类有机物。

1. 按分散状态分

(1) 颗粒状有机物

以颗粒物形状存在的有机物称为颗粒状有机物。在水质分析中，一般将颗粒直径平均大