

×



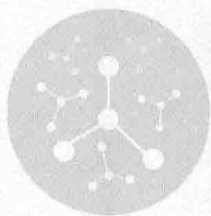
# 城市排污河水环境 及生物修复技术

非  
外  
借

李亚男 著



化学工业出版社



# 城市排污河水环境 及生物修复技术

李亚男 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书将城市排污河道作为城市生态复合系统的子系统,通过水质试验监测确定主要控制的氮、磷营养盐和有机污染物排放强度、时空分布特征及污染水平,解析氮、磷营养盐和有机污染物的污染情况,提出氮磷营养盐和有机污染物的控制方法与途径,以及区域内主要污染物减排途径调控策略。本书还对城市排污河道及重点污染源附近沉积物中重金属、有机质的污染状况进行全面分析评价,并针对排污河道疏浚底泥,进行了多种生物修复技术的对比实验研究,最终提出适合该排污河道复合污染沉积物的生物修复技术。

本书适合于环境工程、环境科学、给排水科学与工程和城市规划等相关专业的高校师生、科研人员阅读参考,对城市河湖水生态系统建设和水环境管理具有重要参考价值,对拓宽视野、丰富知识结构、培养具有跨学科或专业交叉渗透知识结构的人才具有重要作用。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

城市排污河水环境及生物修复技术/李亚男著. —北京:化学工业出版社,2018.3  
ISBN 978-7-122-31465-9

I. ①城… II. ①李… III. ①城市-排污河-水环境-生态恢复-研究 IV. ①X522②X143

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 018196 号

---

责任编辑:徐娟  
责任校对:宋玮

装帧设计:刘丽华

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)  
印刷:北京京华铭诚工贸有限公司  
装订:北京瑞隆泰达装订有限公司  
710mm×1000mm 1/16 印张9½ 字数175千字  
2018年5月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究



河流是城市生态复合系统的重要组成部分，随着社会经济及城市建设的发展，城市河道空间及其结构被大规模、广泛地人工改造，改变了城市河流系统的自然连通性、生态多样性，影响了水体的水环境自净能力，导致城市河湖功能日益萎缩。尤其是随着入河污染物的增加，一些城市河流变为城市的排污河道，致使城市河流水质污染，城市水环境不断恶化，城市河湖水生态系统日益退化，进而影响了城市社会经济的可持续发展，成为当今全球性的生态环境问题。为了实现城市河湖水生态系统的良性循环以及城市社会经济的可持续发展，城市河湖水生态系统修复成为目前我国城市水环境综合治理的重要内容。

本书将城市排污河道作为城市生态复合系统的子系统，也作为渤海湾污染的重要陆源污染源，一方面从排污河道水体入手，通过一年三期的水质试验监测，确定主要控制的氮、磷营养盐和有机污染物排放强度、时空分布特征及污染水平，结合区域优先控制污染物清单和重点污染源以及现场和历史资料调研，解析氮、磷营养盐和有机污染物的污染情况，同时提出一些具体的、针对性的氮磷营养盐和有机污染物的控制方法与途径，以及区域内主要污染物减排限排途径调控策略。另一方面从排污河道沉积物入手，对城市排污河道及重点污染源附近底泥中重金属、有机质的污染状况进行全面分析评价；并针对排污河道疏浚底泥，进行了多种生物修复技术的对比试验研究，最终提出适合该排污河道复合污染沉积物的生物修复技术。

本书内容包含了笔者以及课题组近年来的研究成果，内容具有连续性和系统性。这些研究工作先后得到了焦化污染土壤的微生物修复（山西省自然科学基金青年基金项目，编号 2015021119）、异养硝化-好氧反硝化苯酚降解功能菌株的代谢特性研究（国家自然科学基金青年基金项目，编号 51408396）、异养硝化-好氧反硝化菌脱氮同时降解苯酚机制研究（山西省高等学校科技创新项目，编号 2016146）、*Diphorobacter* 细菌基于关键酶基因的同步硝化反硝化机制研究（山西省

回国留学人员科研资助项目，编号 2016-034)、菠菜对农田土壤中镉的吸收及对食物链上段人类的潜在危险(广东省科技计划项目，编号 2017B030314092)的支持。此外，在本书编写的过程中，受到了岳秀萍博士、王国英博士、马小丽博士、王孝维博士、刘吉明博士、周爱娟博士、汪素芳博士、赵博玮博士的帮助，在此表示衷心的感谢。同时也要感谢研究生王艺霏、王建伟、刘瑾、付婧怡、段志辉、栗婧、张静、陶艳对书稿的校核。

本书对城市河湖水生态系统建设和水环境管理具有重要参考价值，以期给给排水科学与工程、环境工程、环境科学和城市规划等相关专业的相关工程技术人员、科研人员以及管理人员提供支持。

李亚男

2017年12月

**第1章 绪论** 001

- 1.1 城市河流污染 ..... 001
  - 1.1.1 我国城市河流水环境现状及趋势 ..... 001
  - 1.1.2 城市河流水体污染来源 ..... 002
  - 1.1.3 城市河流水体污染物 ..... 004
  - 1.1.4 主要研究方法与研究现状 ..... 005
- 1.2 城市河流底泥污染修复技术 ..... 010
- 1.3 生物修复技术 ..... 012
  - 1.3.1 植物修复技术及研究现状 ..... 012
  - 1.3.2 植物修复辅助措施及研究现状 ..... 014
  - 1.3.3 厌氧微生物修复技术及研究现状 ..... 017

**第2章 南排污河的水环境现状及水质评价** 020

- 2.1 南排污河概况 ..... 020
  - 2.1.1 南排污河现状 ..... 020
  - 2.1.2 南排污河面临的主要问题 ..... 020
  - 2.1.3 主要污染源分析 ..... 021
- 2.2 水质监测资料 ..... 024
  - 2.2.1 采样区域和样品采集 ..... 024
  - 2.2.2 样品分析 ..... 025
- 2.3 水质监测结果 ..... 027
  - 2.3.1 数据统计方法 ..... 027
  - 2.3.2 排污河污染物的时空分布特征 ..... 028
- 2.4 南排污河水质评价 ..... 032
  - 2.4.1 水质评价标准的确定 ..... 032
  - 2.4.2 水质评价方法的选择 ..... 033

2.4.3	改进的主成分分析法的水质评价结果	038
2.4.4	与其他评价方法的比较	042
2.5	水中污染物间的相关关系分析	044
2.5.1	相关关系分析	044
2.5.2	水中污染物间的相关关系分析	045
2.6	南排污河水污染控制方法	045
2.7	本章小结	046

### 第3章 北排污河的水环境现状及水质评价

048

3.1	北排污河概况	048
3.1.1	北排污河现状	048
3.1.2	主要污染源分析	048
3.2	水质监测资料	050
3.2.1	采样区域和样品采集	050
3.2.2	样品分析	051
3.3	水质监测结果	052
3.3.1	数据统计方法	052
3.3.2	排污河污染物的时空分布特征	052
3.4	北排污河水质评价	056
3.4.1	水质评价标准的确定	056
3.4.2	改进的主成分分析法的水质评价结果	057
3.4.3	与其他评价方法的比较	062
3.4.4	两种评价方法的比较	064
3.5	水中污染物间的相关关系分析	064
3.5.1	线性相关与回归分析	064
3.5.2	一元多重回归模型	065
3.5.3	水中污染物间的相关关系分析	065
3.6	北排污河水污染控制方法	070
3.7	本章小结	070

### 第4章 南排污河沉积物中污染物风险及生物有效性

072

4.1	材料与方法	072
4.1.1	采样区域和样品采集	072

4.1.2	样品分析	73
4.1.3	沉积物污染评价方法	075
4.2	河道沉积物污染状况分析	077
4.2.1	重金属累积水平	077
4.2.2	重金属毒性水平	079
4.2.3	重金属的形态分布及有效性	079
4.2.4	重金属与其他污染物的相关性	081
4.3	重点污染源污染特征分析	082
4.3.1	剖面分布	082
4.3.2	化学形态分析	083
4.4	本章小结	085

## 第5章 重金属有机物复合污染沉积物异位生物修复技术

087

5.1	试验材料	088
5.1.1	供试沉积物	088
5.1.2	植株的选择	088
5.1.3	供试微生物菌群	089
5.2	试验方法	089
5.2.1	盆栽试验	089
5.2.2	样品分析	090
5.3	结果与讨论	091
5.3.1	沉积物变化	091
5.3.2	植物对重金属的吸收和累积	112
5.4	本章小结	119

## 第6章 有机污染物的厌氧微生物修复技术

121

6.1	甲苯和苯甲酸厌氧代谢	121
6.1.1	代谢路径	121
6.1.2	<i>bamA</i> 在环境中的应用和研究方法	124
6.2	材料与方法	125
6.2.1	甲苯和苯甲酸降解富集菌液的建立	125
6.2.2	样品采集和化学分析	126
6.2.3	DNA 的提取	126



6.2.4	16Sr RNA 基因分析 .....	126
6.2.5	<i>bamA</i> 基因分析 .....	127
6.3	结果与讨论 .....	128
6.3.1	富集菌液观察 .....	128
6.3.2	微生物菌群结构分析 .....	129
6.3.3	<i>bamA</i> 基因多样性分析 .....	131
6.3.4	讨论 .....	136
6.4	本章小结 .....	137

## 参考文献

1. 王明远, 王明远, 王明远. 木料堆场微生物群落结构及其多样性分析. 环境科学, 2008, 29(12): 2100-2105.

2. 王明远, 王明远, 王明远. 木料堆场微生物群落结构及其多样性分析. 环境科学, 2008, 29(12): 2100-2105.

3. 王明远, 王明远, 王明远. 木料堆场微生物群落结构及其多样性分析. 环境科学, 2008, 29(12): 2100-2105.

4. 王明远, 王明远, 王明远. 木料堆场微生物群落结构及其多样性分析. 环境科学, 2008, 29(12): 2100-2105.

5. 王明远, 王明远, 王明远. 木料堆场微生物群落结构及其多样性分析. 环境科学, 2008, 29(12): 2100-2105.

6. 王明远, 王明远, 王明远. 木料堆场微生物群落结构及其多样性分析. 环境科学, 2008, 29(12): 2100-2105.

7. 王明远, 王明远, 王明远. 木料堆场微生物群落结构及其多样性分析. 环境科学, 2008, 29(12): 2100-2105.

8. 王明远, 王明远, 王明远. 木料堆场微生物群落结构及其多样性分析. 环境科学, 2008, 29(12): 2100-2105.

9. 王明远, 王明远, 王明远. 木料堆场微生物群落结构及其多样性分析. 环境科学, 2008, 29(12): 2100-2105.

10. 王明远, 王明远, 王明远. 木料堆场微生物群落结构及其多样性分析. 环境科学, 2008, 29(12): 2100-2105.

11. 王明远, 王明远, 王明远. 木料堆场微生物群落结构及其多样性分析. 环境科学, 2008, 29(12): 2100-2105.

12. 王明远, 王明远, 王明远. 木料堆场微生物群落结构及其多样性分析. 环境科学, 2008, 29(12): 2100-2105.

13. 王明远, 王明远, 王明远. 木料堆场微生物群落结构及其多样性分析. 环境科学, 2008, 29(12): 2100-2105.

14. 王明远, 王明远, 王明远. 木料堆场微生物群落结构及其多样性分析. 环境科学, 2008, 29(12): 2100-2105.

15. 王明远, 王明远, 王明远. 木料堆场微生物群落结构及其多样性分析. 环境科学, 2008, 29(12): 2100-2105.

16. 王明远, 王明远, 王明远. 木料堆场微生物群落结构及其多样性分析. 环境科学, 2008, 29(12): 2100-2105.

17. 王明远, 王明远, 王明远. 木料堆场微生物群落结构及其多样性分析. 环境科学, 2008, 29(12): 2100-2105.

18. 王明远, 王明远, 王明远. 木料堆场微生物群落结构及其多样性分析. 环境科学, 2008, 29(12): 2100-2105.

19. 王明远, 王明远, 王明远. 木料堆场微生物群落结构及其多样性分析. 环境科学, 2008, 29(12): 2100-2105.

20. 王明远, 王明远, 王明远. 木料堆场微生物群落结构及其多样性分析. 环境科学, 2008, 29(12): 2100-2105.

# 第1章

## 绪论

城市河流是城市水环境的重要组成部分，河湖水系统的污染防治和保护是城市水环境治理工作的重要内容。全面了解城市水环境系统的组成、功能、现状和发展趋势是科学、有效开展城市河湖水污染防治与水环境保护的前提和基础。

城市水环境系统由水的自然循环系统和社会循环系统组成，由于人为的因素城市水环境系统比天然水环境情况显得更为复杂。在水的社会循环过程中，除了部分水量消耗外，主要发生的是水质变化过程。随着城市化进程的加快，人类对自然水资源的利用不断加大，在城市化过程中，城市河流的自然水环境系统不断地受到干扰，使其结构发生变化，从而影响到它原有的功能。

### 1.1 城市河流污染

#### 1.1.1 我国城市河流水环境现状及趋势

一般认为，河流指地表上具有相当水量且常年或季节性流动的天然水流；而对于城市河流，有学者认为是指发源于城区或流经城市区域的河流或河流段，也包括一些历史上虽属人工开挖，但经多年演化已具有自然河流特点的运河、渠系。城市河流水环境涵盖了城市中的线状水体（自然河流、人工渠道、护城河）及其构成的水循环空间。城市河流是我国水环境的重要组成部分，也是城市居民生活、生产的重要水资源，在社会经济发展中发挥着巨大的作用。城市河流水环境与城市的发展及人居环境的改善有着密切的关系，它同时是城市景观的灵魂和历史文化的载体，也是城市风韵和灵气之所在。城市河流水环境在不同时期有不同的组成，其功能也有相应的转变。

(1) 在开发利用初期即工业化时期，城市河流水环境由河道、水域和河滨空间组成，其功能是防洪、排水、渔业和运输。

(2) 在污染控制和水质恢复期，城市河流水环境由河道、水域和河滨空间组

成,其功能是防洪、排水、渔业、运输和水质调节。

(3) 在综合规划治理和可持续利用期,城市河流水环境由河道、水域、河滨空间、生物和河岸周边环境组成,其功能是防洪、给水排水、渔业、运输、水质调节、保持生物和景观多样性、承载历史文化和城市人文自然情感。

近年来我国城市河流随着城市迅速发展而出现一系列环境问题。目前,全国80%以上的城市河流受到污染。据全国2222个监测站的统计(2006年),在138个城市河段中符合Ⅱ、Ⅲ类水质标准的仅占23%,超过Ⅴ类水质的占到38%。我国城市河流及景观水体普遍出现水污与生态退化等问题,突出表现为水质恶化乃至黑臭、水生态严重退化甚至破坏、堤岸人工化和河流形态几何化、城市水灾频发、河流景观极大伤害。归纳起来,我国城市河流所面临的主要环境问题如下。

(1) 随着城市化步伐的加快,大量工业废水、生活污水不经处理直接排放(或未达标排放)到城市河流中,致使水质污染严重,COD、BOD、氨氮、总氮和总磷等超标。城市河流水质污染导致河流水体及其两岸的生物多样性下降,城市河流自净能力及生态功能逐渐丧失,城市河流的基本功能受到损害。

(2) 片面地追求功能,城市河流水面减少,河道硬化、渠化导致河流水环境的生态及环境功能破坏。另外,由于城市河流水质恶化,很多城市将河流覆盖变为地下暗河。

## 1.1.2 城市河流水体污染来源

水体污染日趋复杂,就污染的类型和形成机制大致可以分为以下几类。

### 1.1.2.1 点源污染

水环境中的点源污染指有固定的排放位置进行污染物集中排放的污染源,目前主要包括城市生物污水处理厂排放的尾水和工业废水。

生活污水排放量大、污染物负荷高,是我国城市水环境受纳水体中污染物的重要来源。目前,我国城市生活污水处理厂的管网配套不健全,存在生活污水直接排放现象,这一问题在河网城市的老城区中尤为多见;二是生活污水处理厂处理后达标排放,但城市水环境依然作为排放尾水的最终受纳水体,仍接纳较多的负荷污染物,污水处理厂的达标排放尾水作为城市水环境的新污染点源问题已经引起重视。

工业废水污染物浓度高,由于受到产品、原料、工艺流程和操作条件等多种因素的影响,工业废水中所含的污染物质成分极为复杂,部分工业废水中有机有毒污染物和重金属含量较高。与生活污水相比,工业废水对水环境的影响大,对水环境生态破坏的作用也更为明显。

### 1.1.2.2 非点源污染

非点源污染即向环境中排放且非连续的扩散过程,而且不能由一般的污水处理方法获得水质改善的排污源。长期以来,点源治理一直被作为水污染治理中的主要方向。但实践表明,单纯控制点源污染一些水体仍然受到非点源的污染。据美国、日本等国家报道,即使点源污染得到全面控制,江河的水质达标率也仅为65%,湖泊的水质达标率为42%,海域水质达标率为78%。城市水环境受到非点源污染的问题已经收到各国的普遍重视,非点源管理与处理技术研究也成为业内研究的热点问题。目前我国城市非点源污染主要包括地表径流污染和近郊农业的面源污染。

城市地表径流产生的雨污水成分复杂,且具有季节性变化的特点;另外随着城市规模的扩大和交通运输的增加,城市径流量和污染物含量也随之增加。在城市水环境中,除了城市地表径流外,其他如郊区的农业面源、禽畜养殖以及河网城市的水产养殖等也是造成其污染的来源。在美国,农田径流使全国64%的河流、57%的湖泊受到污染;我国富营养化湖泊中50%以上磷、氮的污染负荷来自农业。

### 1.1.2.3 内源污染

底泥是河湖水生态系统的重要组成部分。营养盐、难降解有机物等污染物通过大气沉降、废水排放、雨水淋溶与冲刷进入水体,最后沉积到河底,并逐渐富集,使底泥受到污染。因此,底泥是河湖有机质、营养盐等污染物的积蓄库,被认为是城市河湖内源污染的主要来源。

底泥中污染物在物理、化学和生物的作用下,在底泥中发生复杂的变化,继而向水体释放污染物,对水生生态构成威胁乃至破坏。富营养化越严重的河水,水体在外源性磷、氮污染被截断后,底泥中营养盐的释放持续发挥作用,使水体仍保持富营养化状态。因为底泥中的营养盐与水体保持动态平衡,当水体污染源得到一定控制后,氮、磷就主要来自底泥的释放,所以底泥中营养盐的释放是造成内源负荷的直接原因。重金属可以通过各种途径进入环境,参与土壤-水体-生物系统的循环,当环境条件发生变化时,也极易再次进入水体,成为二次污染源。

### 1.1.2.4 城市固体废物污染

随着社会的不断进步和经济的迅猛发展,国内固体废物的产生量正在逐年增加。城市固体废物产生量和成分的多变性、不均匀性以及环境污染的严重性,构成当今城市固体废物的主要特点。与废水和废气相比,固体废物具有污染物的富集终态和污染源头的双重作用,如在环境污染治理中很多污染物通过收集、浓缩、转化、最终成为固体废物。这些“终态”物质中浓度的有害成分在长期自然

因素的作用下，又会渗入大气、土壤和水体中，成为它们的污染源头。

固体废物对水体的污染有直接污染和间接污染两种途径。把水体作为固体废物的接纳体，向水体中直接倾倒废物，从而导致水体的直接污染。固体废物在堆放和填埋过程中，经发酵和雨水淋滤、冲刷以及地表水和地下水的浸泡等会产生渗滤液；渗滤液通过岩土层向下渗透，污染物沿地下水流扩散或者进入江河湖泊，对周围水环境带来严重污染和危害，即间接污染。渗滤液具有污染物组成复杂、污染强度高、污染持续时间长、水量变化大、水质波动性和水质场地性等特点。

### 1.1.3 城市河流水体污染物

据估计，全世界各城市地区每年排入水体的工业废水和生活污水达 5000 亿吨以上，造成各种类型的河流水体污染，主要包括有机物污染、重金属污染、酸碱污染、病毒细菌污染等。

有机污染物是指以碳水化合物、蛋白质、氨基酸和脂肪等形式存在的天然有机物质以及某些其他可生物降解的人工合成有机物质为组成的污染物。有机物又因其污染后果分需氧污染物、植物营养物、酚类化合物等类型。需氧污染物是指生活污水和工业废水中的碳水化合物、蛋白质、脂肪和木质素等有机化合物，其在分解过程中需要消耗水中的溶解氧，从而降低水体的自净能力。植物营养物主要来自生活污水的粪便以及含磷洗涤剂、化肥、农药，它们能引起水体的富营养化。酚类化合物主要来自冶金、炼焦、塑料、石化等行业的工业废水，酚有毒性，可使人和水生动物慢性中毒。

沉积物中有机质在沉积物环境化学及污染迁移释放中扮演着重要角色。有机质矿化消耗大量氧气，释放出碳、氮、磷、硫等营养物质，造成水体富营养化。例如，Gachter 为降低两个富营养化湖水中的磷浓度，向湖底曝气 10 年，但由于湖底富集的大量有机质矿化，使其未达到预期效果。有机质通过吸附、络合等方式对沉积物中重金属及有毒有机化合物的环境迁移行为起决定作用。Tack 通过研究水体氧化时沉积物重金属的移动性，发现沉积物有机物的矿化分解可能会导致重金属活性增加。Warren 通过研究沙质、富铁氧化物、富有机质沉积物中铜对水稻萌芽的影响，发现有机质控制了沉积物中铜的生物可给性。此外，有机质矿化产生的二氧化碳、甲烷及挥发性卤代烃能破坏臭氧层气体。对沉积物中有机质的研究表明，再悬浮是有机质迁移的主要途径。而有机质的矿化主要受到污染状况、固化程度以及沉积厚度的影响，且呈负相关关系。

重金属污染指工业企业排放的含重金属的工业废水造成的污染。重金属一般以天然浓度广泛存在于自然界中。但由于人类对重金属的开采、冶炼、加工及商业制造活动日益增多，造成重金属如铅、汞、镉、钴等进入大气、水、土壤中，



引起严重的环境污染。危害较大的重金属有铜、锌、镉、铬、汞、砷、铅等。

重金属含量超标虽然不会改变水体的外观和气味,但对动植物的危害巨大。例如,日本的水俣病就是因为烧碱制造工业排放的废水中含有汞,在经生物作用变成有机汞后造成的;又如骨痛病是由炼锌工业和镉电镀工业所排放的镉所致。汽车尾气排放的铅经大气扩散等过程进入环境中,造成目前地表铅浓度显著提高,致使近代人体内铅的吸收量比原始人增加了约100倍,损害了人体健康。

重金属以各种形态分布在水体、底泥及生物体中,表现出不同的环境地球化学行为和毒性特征,其毒性危害与污染特点在于:天然水中,只要有微量浓度即可产生毒性效应,其毒性和稳定性取决于其存在形态,而且随水环境条件而改变;微生物不仅不能降解重金属,相反地,某些重金属在微生物的作用下可转化为毒性更强的金属有机化合物;生物体从环境中摄取的重金属,可经过食物链的生物放大作用逐级在较高的生物体内成千百倍地富集;重金属可通过多种途径进入人体,不易排出,逐渐积累,从而导致急、慢性疾病或产生远期危害。

沉积物中重金属污染物具有隐蔽性、长期性和不可逆性等特点。最主要的是重金属不能被微生物降解(某些重金属在微生物的作用下可转化为毒性更强的金属有机化合物),只能以各种形态分布在水体、底泥及生物体中,表现出不同的环境地球化学行为和毒性特征,或以不同的价态,在水、沉积物和生物之间迁移、转化、分散、富集。因此,重金属污染一旦形成,就很难在短期内消除。

## 1.1.4 主要研究方法及研究现状

### 1.1.4.1 国内外河流水质研究现状

河流环境质量评价工作已有多年的历史。最初水质的优劣是通过水的色泽、味、嗅、浑浊度等感官性状来认识评定的,自从西方工业革命以后,人口大量向城市集中,排入河流、湖泊等地表水体的生活污水量剧增,由于未采取任何处理措施,污水中的病原菌大量繁殖,水质卫生状况严重恶化,导致19世纪末至20世纪初,在英国伦敦、德国汉堡等地大规模霍乱流行,使成千上万人丧生,从而引起对水卫生学的重视,因此,除增加了生化需氧量和化学需氧量外,又提出了大肠菌群和细菌总数等卫生学指标作为水质评价参数。

第二次世界大战后,随着工业迅速发展,大量污染物随工业废水进入水体,严重危害水生生物生存和人类健康。因此,水质评价参数中引入了重金属、农药和有机化合物等有毒、有害物质指标。自20世纪70年代以来,随着水体富营养化研究的深入,磷、氮等被列为湖泊、水库、河口等的重要评价指标。

从评价方法来看,最初的水质评价方法仅凭感官性状指标进行描述性评价,后来,采用了化学指标和生物指标,进行一定程度的定量评价,R. K. Horton提出了水质评价的质量指数法(QI),标志着水质现状评价工作的开始。此后,国

外许多环境科学家研究和构造出各种环境指数,用以表明各种不同的环境要素的环境污染状况。比较有代表性的水环境质量指数有:美国布朗水质指数 WQI,美国内梅罗水质污染指数 PI,英国罗斯水质指数,意大利帕梯水质指标,苏联依库拉里水质指数等。在东欧和苏联/俄罗斯,多数学者在评价时既考虑物理、化学指标,还考虑生物指标,使水质现状评价更加全面、科学。我国也提出了一些方法,例如,在北京西郊环境质量评价时提出了迭加型指数法,在南京城区环境质量综合评价研究中提出了加权均值指数法,在图们江水系污染与水质资源保护研究时提出了均值型指数法。

从环境评价发展的历程来看,20世纪60年代中末期,对环境污染主要采取以“治”为主的方针,相应的环境评价工作是以现状评价为主。从60年代末开始,进入防治结合以“防”为主的环境污染综合防治阶段。这一阶段的环境评价工作以预测评价为主,开展环境影响评价。

日本从20世纪50~60年代以来经济发展迅速,经济密度大,污染负荷重,在出现一系列公害事件后,开始重视环境污染防治与环境评价工作。日本的环境质量评价的一个重要特点就是把评价与污染控制紧密结合起来,先后提出多种控制方式,例如早期的浓度控制方式,后来的总量控制方式和按变化的排放量分配控制方式等。1972年起,日本把环境影响评价作为一项重要的政策来实施,在评价内容上,不仅包括对自然环境的影响,还包括对社会和经济带来的影响。

东欧与苏联/俄罗斯从20世纪70年代开始环境质量评价,主要侧重于河流和地理的评价,苏联在伏尔加河、顿河、莫斯科河建立了河流污染平衡模式,许多学者强调,评价时不仅要考虑物理、化学指标,还要考虑生物学指标。捷克斯洛伐克在70年代中期就进行了全国的环境质量评价工作,并出版了一套比例尺为1:50万的彩色环境质量图。捷克斯洛伐克、波兰还开展了旅游地的环境评价研究。东欧各国与美国、日本、西欧各国在环境质量评价方面的学术交流及双边协作也十分活跃,美苏/俄、日苏/俄等国都有定期的专题讨论会,并出版相应的会议纪要。例如,美国和苏联/俄罗斯从1975年开始举行两年一次的城市环境质量问题讨论会,主要讨论“现代与未来的城市环境问题”。

我国的环境质量评价工作是20世纪70年代逐步发展起来的,大体上经过了四个阶段:初步尝试阶段、广泛探索阶段、全面发展阶段和环境影响评价阶段。

在初期仅限于城市或小范围区域的现状评价。如北京西郊环境质量评价、官厅水库环境质量评价等。之后开展了像北京官厅水库、松花江、图们江、白洋淀、湘江、杭州西湖、武昌东湖、昆明滇池、太湖、东海海域及南海海域等水环境的专题质量评价工作。

从环境质量评价的应用理论来看,20世纪80年代以前,国内外进行的环境质量分析与评价的理论基础是基于随机性的概率论和数理统计;基本方法主要为

综合指数评价法、概率统计评价法、主分量分析评价法等。

主分量分析法,也称主因子分析法(含主成分分析法)是从研究相关矩阵内部的依赖关系出发,把一些错综复杂的变量归结为少数几个综合因子的一种多变量统计分析方法。这个概念起源于20世纪初的Karl Pearson和Charles Spearman,一开始主要用于对认知测验变量的组织、结构的分析上,目的是借助提取出的公因子来代表不同的性格特征和行为取向,从而解释人类的行为和能力。早期的主因子分析都采用零碎的、个别近似的方法,1967年哈尔曼(Harman)的《现代因子分析》一书的问世,加上Hotelling和Larley等分别从统计角度来处理整个分析过程,主因子分析才真正作为一个比较严格的数学和统计学的理论而得到广泛应用。如Perona研究了西班牙阿柏契(Alberche)河河流水质指标特征及其时空变化特征,Rajesh Reghunath用因子分析和聚类分析对印度的地下水水质进行了研究,W. Zhu对河流沉积物中的稀有元素的分布及类型进行了研究。近几年,Nicolaos Lambrakis运用多元统计方法中的因子分析对水化学及水环境的各种参数进行分析,揭示了 $\text{NO}_3^-$ 离子在水体中的分布特征。

但环境信息除了具有随机性外,还具有模糊性、灰色性和不相容性等不确定性特征。此外,环境评价问题实质上就是决策问题,而决策是需要考虑优化的。自20世纪80年代兴起和发展起来的模糊集理论、灰色系统理论、物元可拓集、集对分析、粗集理论、投影寻踪技术、人工神经网络、遗传算法和蚁群算法等不确定性问题的新理论和新技术正是用于处理具有模糊性、灰色性、不相容性等不确定性问题的新理论和新技术。将这些新理论和新技术引进到环境科学中,应用于环境质量评价,使环境质量评价过程更体现为数学模型化和最优化,使评价理论和方法更具有科学性和先进性,使评价结果更具合理性和精确性,从而开辟了环境质量评价的新途径。

现在,水质评价成为几乎所有综合环境质量评价中不可残缺的重要内容。目前我国已经建立了一支有专家和技术人员为主力的环境评价队伍,许多高等院校开设了环境评价课程,在评价方法和理论方面做了许多探讨研究,无论从广度还是深度方面均有很大的进展。

#### 1.1.4.2 国内外河流底泥研究现状

近年来,人们对沉积物中重金属有害物质的污染研究已经从总量和单质分析转移到形态分析,并从单纯的表面环境污染转向更深层的污染源迁移转化规律的研究。1979年,加拿大学者Tessier等首先提出了土壤中重金属的五步分级提取法,将土壤重金属分为可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化态、有机硫化物结合态和残渣态。最易被生物吸收的是离子交换态;其次是在pH值变化时较易重新释放进入水体的碳酸盐结合态;铁锰氧化物结合态,在环境变化时会部分释放,对生物有潜在有效性;有机-硫化物结合态不易被生物吸收利用;残渣态主要来

源于天然矿物,稳定存在于矿物晶格里,对生物无效应,所以也称惰性态。

随后国内外学者相继开展了对重金属形态的研究,包括后来使用的三步提取法(BCR法)、六步连续提取法(Forstner法)及针对不同沉积物特征的连续萃取法等。在沉积物中,重金属以各种不同的化学形态存在,表现出了不同的与化学反应、迁移性、生物有效性以及毒性有关的物理化学特性。研究显示,重金属在环境中的生物可利用性和毒性受它们在环境中存在形态的影响很大,而与总量没有很好的相关性。此外,也可通过分析元素形态分布特征来判别污染物的自然或人为来源。可见,重金属各形态的含量也是了解重金属对生态环境、生物地质化学转化性和其最终命运的重要指标。因此,除了对重金属总量进行比较外,有必要结合重金属形态分布进行污染水平和生物有效性分析,以便为沉积物后期的修复措施提供理论依据。

目前,国内外评价河流沉积物重金属污染的方法很多,普遍采用的有传统的地累积指数法、潜在生态风险指数法、沉积物富集系数法、污染负荷指数法、脸谱图法、次生相富集系数法等,也有新的地累积指数法、海洋沉积物污染指数法、平均沉积物质量基准系数法等(表1-1)。

表 1-1 沉积物污染评价方法对比

评价方法	优点	缺点
地累积指数法	综合考虑了人为活动对环境的影响和由于自然成岩作用对背景值的影响	依据重金属总量进行评价,仅可了解污染程度,难以区分污染物自然来源和人为来源,难以反映重金属的化学活性和生物可利用性
潜在生态风险指数法	综合考虑了重金属的毒性、敏感性以及背景值的区域差异,体现沉积物污染对生态环境的风险效应	仅适合对大区域范围内不同源沉积物间进行评价比较;确定毒性加权系数时带有主观性
沉积物富集系数法	对沉积物粒度进行校正,回避了由于黏土含量的不同而造成重金属浓度差别	不能反映重金属自然来源和人为来源、化学活性和生物可利用性
污染负荷指数法	由评价区域的多种重金属成分共同构成,可对任意给定的区域进行定量判断	未考虑不同污染源引起的背景值差异
脸谱图法	在一张图上可直观反映各元素的量值及人类活动对污染区域的影响程度	表达较为烦琐
次生相富集系数法	扣除母岩控制作用,客观反映人类活动对污染区域的影响程度	未用国家标准来对比度量,不能确定人类所能接受的污染物浓度水平
新的地累积指数法	依照沉积物的粒径,使用不同背景参照,已应用于河口沉积物中	需要对沉积物进行粒径分类
海洋沉积物污染指数法	针对性强,结果更准确	需要大量的计算(主成分分析)
平均沉积物质量基准系数法	较简单,易于量化、模型化,结合重金属形态分布特征,可很好反映沉积物的污染来源和背景值差异	建立在3个基本经验假设基础上,未考虑“硬度”和环境pH值的影响,使结果具有某些不确定性和误差