

| 水处理科学与技术·典藏版 15 |

水质研究方法

胡洪营 黄晶晶 孙 艳 吴乾元 等 著



科学出版社

水处理科学与技术·典藏版 15

水质研究方法

胡洪营 黄晶晶 孙 艳 吴乾元 等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书旨在为研究人员提供一本实用的、反映研究前沿和发展方向的水质研究方法指导书。本书围绕掌握污染物浓度水平、解析组分特征、评价水质安全、预测水质潜能等水质研究的四大类目的,在系统总结水质指标体系的基础上,针对常规水质指标、有机组分特征、有毒有害化学和生物污染物、水质安全性和稳定性指标,系统阐述了指标的含义和意义、典型条件下的指标取值范围和水质要求、测定方法和典型研究案例;总结了面向处理工艺选择的污水处理特性评价方法和消毒研究方法;介绍了水质研究思路、实验设计方法、数据获取方法、数据解析和解读方法以及表征方法;特别注重“水质安全”和“水质转化特性”研究,具有显著的特色。

本书内容系统性强,兼具前沿性、学术性和实用性,可供污水处理与再生利用、饮用水供水等领域的教师、科研和工程技术人员以及环境科学与工程、给水排水工程和相关专业本科生、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水处理科学与技术:典藏版/曲久辉,任南琪,彭永臻,等编著.—北京:科学出版社,2017.1

ISBN 978-7-03-051235-2

I. ①水… II. ①曲… ②任… ③彭… III. ①水处理 IV. ①TU991.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第305492号

责任编辑:杨震 刘冉 刘志巧 / 责任校对:张小霞 李影
责任印制:张倩 / 封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年1月第一版 开本:720×1000 1/16

2017年1月第一次印刷 印张:41

字数:820 000

定价:3980.00元(全25册)

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

水是人类社会和经济发展的**重要战略资源**，是“**生命之源、生产之要、生态之基**”。水的质量，即水质，决定水的价值，被污染的水不但失去了利用价值，还会带来各种危害。保障水质安全是关系到人类健康、生态安全和社会经济可持续健康发展的重大课题。近年来，水质污染日益复杂，对水质安全保障不断带来新的挑战。仅关注水质标准中规定的指标并不能全面掌握和深入理解水的质量特性或污染特征，深入开展水质研究，科学、客观评价和掌握水中化学与生物组分特征及其浓度水平和转化特性，是保障水质安全和确定处理工艺的前提和基础。

本书旨在为研究人员，特别是环境科学与工程、给水排水及相关专业的研究生和科研工作者提供一本实用的、反映水质研究领域前沿和发展方向的水质研究方法指导书，而不是水质检测方法的参考书。本书试图为回答在水质研究实践中，经常遇到的以下典型问题提供解决思路和方法指导：①测定哪些指标？测定这些指标的意义是什么？②选择哪种测定方法？③如何保证和判断水质监测数据的可靠性？④如何进行数据解析和表征？⑤如何解读和挖掘水质数据的价值？⑥如何评价污水的处理特性和选择处理工艺等。

通过系统分析和梳理，本书将水质研究目的分为掌握污染物浓度水平、解析组分特征、评价水质安全和预测水质潜能四种类型，在系统总结水质指标和研究方法体系的基础上，针对常规水质指标、有机组分特征、有毒有害化学和生物污染物、水质安全性和稳定性指标，系统阐述了指标的含义和意义、典型条件下的指标取值范围和水质要求、测定方法和典型研究案例；总结了面向处理工艺选择的污水处理特性评价方法和消毒研究方法；同时注重水质“研究方法学”，包括水质研究思路、实验设计方法、数据获取方法、数据解析和解读方法以及表征方法等的介绍。

在本书编写过程中始终坚持学术性、前沿性和系统性原则，力图系统梳理和凝练水质研究的新理念、新指标、新方法和新技术等最新研究成果，特别突出“水质安全”和“水质转化特性”研究，具有显著的特色。在写作和表现方式上，通过使用大量的图、表、数据和案例，力图提高内容的可读性和实用性。

本书是作者及其研究组近 20 年来从事再生水安全高效利用理论与技术研究成果的结晶，也是多年来作者对水质研究思考、探索和实践的总结。本书的主要研究成果是在国家自然科学基金委员会杰出青年基金项目、重点项目和面上项目，科技部科技支撑课题和“863”课题以及“水体污染控制与治理”国家重大科技专项课题的支持下完成的。在此表示感谢！

全书由胡洪营策划并主持撰写,各章的主要撰写人员还有:第2章,李昂;第3章,孙艳;第4章,孙艳;第5章,张天元、朱树峰;第6章,巫寅虎;第7章,张天元;第8章,庄林岚;第9章,唐鑫;第10章,唐鑫、赵欣;第11章,唐鑫;第12章,赵欣、陶益;第13章,吴乾元;第14章,吴乾元、黄璜、孙艳;第15章,吴乾元、黄璜;第16章,吴乾元、汤芳、杜烨、杨扬;第17章,吴乾元;第18章,黄晶晶、庞宇辰、吴乾元;第19章,庞宇辰、黄晶晶;第20章,黄晶晶、黄璜;第21章,黄晶晶、巫寅虎;第22章,孙艳;第23章,赵欣;第24章,李晴;第25章,巫寅虎;第26章,杨扬、唐鑫、黄璜;第27章,庄林岚;第28章,汤芳;第29章,黄晶晶;第30章,张逢;第31章,庞宇辰;第32章,孙艳、张逢。

另外,孙艳、黄晶晶、巫寅虎、庄林岚、李晴、田贵朋和王文龙为统稿、校稿做了大量的工作;孙艳、庄林岚和巫寅虎参与了图表绘制工作;姜晓华参与了书稿格式和文字修改工作;孙艳参与了缩略词的编辑工作。同时特别感谢科学出版社编辑杨震、刘冉、刘志巧的辛勤工作,确保了本书的顺利出版。

受作者水平所限,书中难免存在不足和疏漏之处,希望读者指正。



2014年8月于清华园

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 水质研究的重要性和意义	1
1.2 污染物种类	2
1.3 污染物的基本特点	3
1.4 水质研究的目的及研究方法	5
1.5 水质指标	9
1.6 水质研究发展趋势.....	16
参考文献	17
第 2 章 感官和物理性状及其研究方法	19
2.1 感官指标及其意义.....	19
2.2 悬浮固体和浊度.....	19
2.3 色度.....	27
2.4 臭和味.....	29
2.5 温度.....	31
参考文献	38
第 3 章 无机物综合指标及其研究方法	40
3.1 pH 值	40
3.2 酸度.....	47
3.3 碱度.....	49
3.4 硬度.....	50
3.5 电导率.....	54
3.6 溶解性总固体.....	56
3.7 溶解氧.....	59
参考文献	62
第 4 章 非金属无机离子和化合物及其研究方法	63
4.1 硫化物.....	63
4.2 硫酸盐.....	65
4.3 亚硫酸盐.....	66
4.4 氯化物.....	67

4.5	余氯	69
4.6	溴酸盐	75
4.7	碘化物	76
4.8	氟化物	76
4.9	氰化物	78
	参考文献	80
第5章	氮及其研究方法	82
5.1	氮元素及其意义	82
5.2	总氮	84
5.3	凯氏氮	86
5.4	有机氮	86
5.5	氨氮	87
5.6	硝酸盐氮	92
5.7	亚硝酸盐氮	94
5.8	氮元素典型研究案例	95
	参考文献	97
第6章	磷及其研究方法	98
6.1	磷的形态及其相互转化	98
6.2	总磷	100
6.3	溶解性正磷酸盐	107
6.4	细胞内的磷及其形态	107
6.5	三磷酸腺苷(ATP)	108
6.6	有机磷	112
	参考文献	113
第7章	微量重金属及其研究方法	115
7.1	重金属及其危害性	115
7.2	重金属的浓度范围	117
7.3	重金属的测定方法	120
7.4	重金属形态/价态分析方法	122
7.5	重金属的生物促进效应及其研究方法	123
7.6	重金属的生物毒性及其研究方法	125
	参考文献	128
第8章	有机化合物常规综合指标及其研究方法	130
8.1	有机化合物常规综合指标及其意义	130
8.2	生化需氧量(BOD)	130

8.3	化学需氧量(COD)	135
8.4	总需氧量(TOD)	142
8.5	BOD、COD、TOD 之间的关系	143
8.6	总有机碳(TOC)	145
8.7	总有机卤化物(TOX)及可吸附有机卤化物(AOX)	147
8.8	其他总有机物综合指标	149
8.9	不同有机物综合指标之间的关系	150
	参考文献	151
第 9 章	有机污染物光谱特征分析方法	153
9.1	有机物光谱特征及其意义	153
9.2	紫外-可见吸收光谱特性分析	153
9.3	红外光谱特性分析	162
9.4	荧光光谱特性分析	168
	参考文献	177
第 10 章	溶解性有机组分分离与解析方法	180
10.1	溶解性有机组分的定义与类型	180
10.2	溶解性有机组分中典型物质的检测方法	186
10.3	溶解性有机组分的树脂组分分离	188
10.4	DOM 凝胶排阻色谱分析	193
10.5	超滤膜过滤组分分离法	197
10.6	应用研究案例:臭氧氧化中再生水 DOM 凝胶排阻色谱分析	201
	参考文献	203
第 11 章	溶解性有机组分指纹分析与综合表征方法	205
11.1	DOM 树脂组分分离特性表征	205
11.2	DOM 各组分凝胶排阻色谱分析	208
11.3	DOM 指纹分析方法	208
11.4	DOM 指纹图应用案例	212
	参考文献	213
第 12 章	致嗅致色物质及其研究方法	215
12.1	致嗅致色物质及其意义	215
12.2	致嗅物质	215
12.3	致色物质	225
	参考文献	226
第 13 章	微量有机污染物浓缩与分析方法	228
13.1	微量有机污染物指标及其意义	228

13.2	微量有机污染物的样品前处理方法	229
13.3	微量有机污染物测定方法	237
13.4	研究数据解析方法	244
	参考文献	247
第 14 章	持久性有机污染物与新兴污染物及其研究方法	248
14.1	持久性有机污染物	248
14.2	多环芳烃	256
14.3	内分泌干扰物	258
14.4	药品和个人护理品	266
	参考文献	274
第 15 章	典型消毒副产物及其研究方法	276
15.1	消毒副产物类别与危害	276
15.2	消毒副产物标准	278
15.3	消毒副产物检测方法	279
15.4	消毒副产物研究案例	285
	参考文献	288
第 16 章	综合生物毒性及其研究方法	290
16.1	综合生物毒性及其意义	290
16.2	综合生物毒性标准和水质要求	291
16.3	综合生物毒性测定方法	293
16.4	综合生物毒性数据解析方法	303
16.5	综合生物毒性研究案例	307
	参考文献	313
第 17 章	毒性因子识别方法	315
17.1	毒性因子控制的必要性	315
17.2	基于毒性因子控制的水质安全性管理体系	315
17.3	毒性因子识别方法	316
17.4	毒性因子控制途径	322
17.5	毒性因子识别研究案例	324
	参考文献	327
第 18 章	常见病原微生物及其研究方法	329
18.1	生物指标及其分类	329
18.2	动物性病毒	330
18.3	铜绿假单胞菌	335
18.4	产气荚膜梭菌	337

18.5	沙门氏菌	340
18.6	隐孢子虫与贾第鞭毛虫	341
	参考文献	346
第 19 章	病原指示微生物及其研究方法	350
19.1	病原指示微生物指标及其意义	350
19.2	噬菌体	350
19.3	细菌总数	357
19.4	大肠菌群与粪大肠菌群	360
19.5	埃希氏大肠杆菌	369
19.6	粪链球菌	371
	参考文献	373
第 20 章	新兴生物指标与细胞特征组分及其研究方法	376
20.1	抗生素抗性菌	376
20.2	抗生素抗性基因	385
20.3	内毒素	388
	参考文献	397
第 21 章	微生物浓度与群落结构及其研究方法	400
21.1	细菌浓度	400
21.2	微藻浓度	404
21.3	醌指纹	407
21.4	群落代谢特性	414
	参考文献	418
第 22 章	化学稳定性及其研究方法	420
22.1	化学稳定性及其意义	420
22.2	化学稳定性判别方法	421
22.3	化学稳定性水质标准和水质要求	432
22.4	典型案例	435
	参考文献	439
第 23 章	生物稳定性及其研究方法	441
23.1	生物稳定性及其意义	441
23.2	生物稳定性的测定方法	442
23.3	保障水质生物稳定性的控制目标	454
23.4	典型条件下的水质生物稳定性	455
23.5	生物稳定性研究案例	458
	参考文献	459

第 24 章 余氯衰减特性及其研究方法	463
24.1 余氯衰减特性研究方法	463
24.2 研究案例	470
参考文献	473
第 25 章 藻类生长潜力及其研究方法	475
25.1 藻类生长潜力及其控制要求	475
25.2 藻类生长潜力的测定方法	481
25.3 藻类生长潜力研究设计与数据解析方法	483
参考文献	487
第 26 章 有毒有害化合物生成潜能及其研究方法	489
26.1 有毒有害化合物生成潜能的概念及其研究意义	489
26.2 氯消毒副产物生成潜能	495
26.3 氯消毒生物毒性生成潜能	501
参考文献	510
第 27 章 化学污染物处理特性及其研究方法	512
27.1 处理特性的定义及其意义	512
27.2 特征污染物(组分)识别与评价方法	514
27.3 无机污染物的沉淀去除特性	517
27.4 有机污染物的混凝去除特性	520
27.5 污染物的过滤去除特性	523
27.6 污染物的生物处理特性	525
27.7 污染物的吸附去除特性	529
27.8 污染物的氧化分解特性	531
参考文献	536
第 28 章 膜污染潜力及其评价方法	538
28.1 膜污染潜力评价及其意义	538
28.2 膜结垢潜力预测方法	540
28.3 有机物物理性污堵预测方法	542
28.4 膜生物污染预测方法	546
28.5 RO 膜污染评价实验方法	547
28.6 膜解剖方法	548
参考文献	550
第 29 章 氯消毒试验研究方法	551
29.1 氯消毒及其特点	551
29.2 氯消毒试验设计	552

29.3	氯消毒影响因素	557
29.4	氯消毒研究案例	562
29.5	二氧化氯消毒试验研究方法	563
	参考文献	567
第30章	臭氧消毒研究方法	569
30.1	臭氧消毒及其特点	569
30.2	臭氧消毒试验设计	570
30.3	臭氧消毒系统性能评价指标	573
30.4	臭氧消毒剂量设计与确定	577
30.5	臭氧消毒效果的影响因素	579
30.6	臭氧消毒研究案例	585
	参考文献	586
第31章	紫外线消毒及其研究方法	589
31.1	紫外线消毒及其特点	589
31.2	紫外线消毒用紫外灯及其特点	590
31.3	紫外线消毒试验方法	592
31.4	紫外线消毒效果影响因素	603
31.5	紫外线照射后微生物的复活现象及其研究方法	606
31.6	紫外线消毒试验案例	612
	参考文献	613
第32章	水质研究实验设计与数据解析表征	616
32.1	水质研究实验设计	616
32.2	数据的可靠性和合理性	618
32.3	水质数据解析与表征	620
	参考文献	632
	主要缩略词	633

第 1 章 绪 论

1.1 水质研究的重要性和意义

水是人类社会和经济发展的关键战略资源，是“生命之源、生产之要、生态之基”。和能源不同，水资源具有不可替代性，但具有可循环利用性。水的质量即水质是决定水的性状、性能(可利用性)和安全性的根本因素(图 1.1)，水质污染会显著影响水的利用价值和用途。保障水质安全是关系到人类健康、生态安全和社会经济可持续健康发展的重大课题。深入开展水质研究，科学、客观评价和系统掌握水中的化学与生物组分特征及其浓度水平和转化特性，是保障水质安全的前提和基础。



图 1.1 水的性状、性能和安全性与水质的关系示例

根据性质和属性不同，水中的化学组分可分为污染物(如重金属、有毒有害有机污染物等)、天然组分和功能组分(有益组分)等。根据不同的情景、不同的用途和不同的水质要求，这三种组分之间的属性会发生转化。本书主要关注水中的污染物及其不良效应和毒害作用。

特定条件下的水中有益组分，在条件发生变化时就会成为污染物。当饮料、粥、汤中的有机营养物质进入水道、池塘或河流之后就变成了有机污染物，在日常生活中应避免这类事情的发生，以免造成污染。另外，有益组分或物质的浓度超过一定水平之后就成为污染物。氮、磷是植物营养物质，在水体中保持一定的浓度有利于浮游植物的生长和鱼类的繁殖，浓度过低会导致水体生产力下降，不利于健康

生态系统的维系,但是其浓度超过一定水平之后,就会导致水体富营养化,成为污染物。

对于不同的用途,水质标准的制定原则和标准限值也不尽相同。对于某些指标,饮用水的标准不一定是最高标准。例如,硝酸氮的地下水标准一般是 20 mg/L,但此浓度水平在湖泊中就会引起富营养化,因此在湖泊水质标准中,氮的浓度标准应比饮用水更严格。

近年来,水质污染类型日益复杂,对水质评价不断提出新要求,水质评价方法发展迅速,研究不断深入。在常规水质指标的基础上,系统梳理和凝结水质研究的新理念、新指标、新方法和新技术等研究成果,并将其推广应用到水质研究实践,对不断深化水质研究、深入认识水的“质量属性”、“水质安全性”和“水质转化特性”具有十分重要的理论意义、学术价值和实用价值。

1.2 污染物种类

水中的污染物包括微生物、化学污染物和放射性物质。热也是一种污染形式,但不是本书讨论的重点。根据目的和视角的不同,水中污染物的分类也不尽相同(图 1.2)。

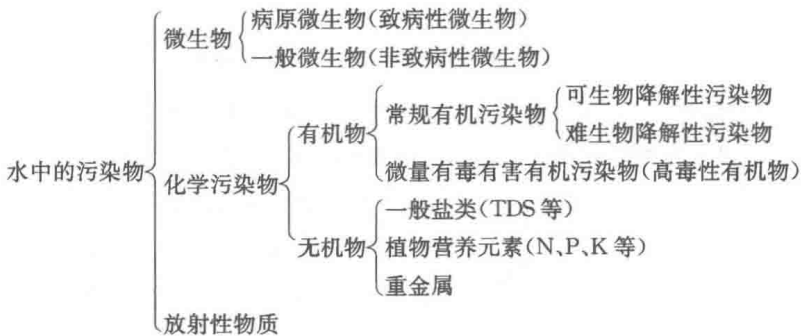


图 1.2 水中的污染物分类示例

水中的微生物,根据其是否具有致病性,可以分为致病性(包括条件致病性)微生物和非致病性微生物。水中的细菌,根据是否对抗生素具有抗性,可分为抗性菌和非抗性菌等。

水中的化学污染物,根据其分子结构,可分为无机污染物和有机污染物。有机污染物,根据其浓度和生物毒性,可分为常规有机污染物和微量有毒有害有机污染物;根据生物降解难易程度,又可分为可生物降解性污染物和难生物降解性污染物;根据能否被活性炭吸附等又可分为易吸附污染物和难吸附污染物等。总之,可以根据需要和特定的目的,对污染物进行分类。有机污染物中还包括微生物细胞、非溶解性物质等。

根据物理形态,水中的污染物可分为悬浮固体(SS)、胶体性物质和溶解性物质(图 1.3)。值得注意的是,关于溶解性物质,根据定义和测定方法的不同,其覆盖范围也不同。例如,在污水处理领域,一般将通过微孔直径为 $0.45\ \mu\text{m}$ 过滤膜的物质视为溶解性物质,但是有时也会使用微孔直径为 $0.22\ \mu\text{m}$ 的过滤膜。悬浮固体中常包含微生物细胞等。

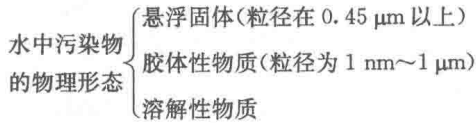


图 1.3 水中污染物的物理形态

1.3 污染物的基本特点

水中特别是污水中的污染物具有种类多、理化性质多样、浓度分布广、形态复杂以及生物效应和组分间相互影响机制复杂等特点。

1. 种类多,理化性质多样

水中的污染物是一种混合物,具有不同理化性质的多种污染物共存是其最基本的特点,在水质研究中应特别注意这一特点。水的性状、性能和安全性是这些污染物和组分共同作用的结果,测定单一或有限的污染物往往不能掌握水质状况。

2. 浓度分布广,赋存形态复杂

无论是饮用水还是污水,不同污染物的浓度水平会有显著的差异。这种差异,也是水质研究中需要特别关注的问题。特别是常量组分对微量污染物的毒理学特性、吸附特性、生物利用性和化学分解性的影响不容忽视。

图 1.4 为城市污水处理厂二级出水中不同污染物的浓度分布及其生态风险水平。从图中可以看出,不同的污染物或组分,其浓度在几 ng/L 到数千 mg/L 之间,分布跨度达 9 个数量级。总溶解性固体(TDS)的浓度最高可达数千 mg/L ,内分泌干扰物(EDCs)的浓度水平在 ng/L 量级。

图 1.4 所示的生态风险主要是指该污染物对水生生物的毒性效应,浓度低的有机污染物,其生态风险往往比浓度高的 COD 还要大。因此,近年来,微量有毒有害有机污染物的生态安全及其控制备受关注,成为环境领域的研究热点。在微量有毒有害污染物的毒性效应、氧化分解、吸附去除特性等研究中,应特别注意高浓度常规污染组分的影响。

另外,特别值得一提的是,氮磷等植物营养物质本身对水生生物的毒性效应并

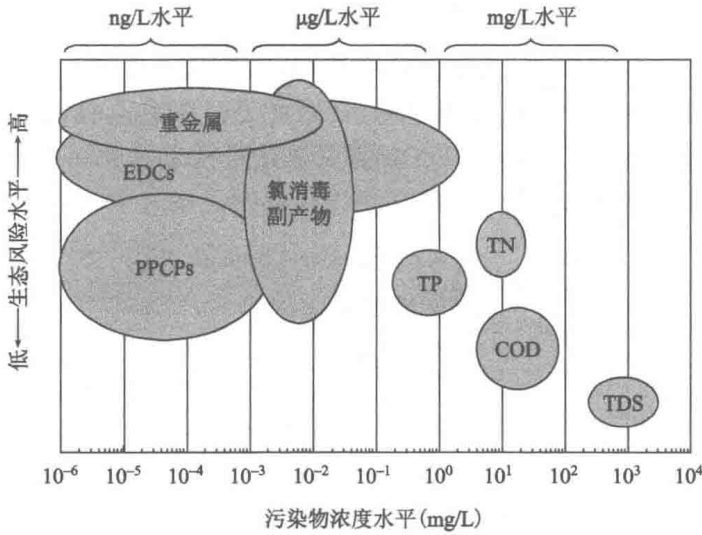


图 1.4 城市污水二级出水中污染物的浓度分布及其生态风险水平

不高,但是这些营养物质超过一定浓度时会引起藻类的大量生长繁殖,导致水华暴发,带来生态破坏。这种情况下,其生态风险水平显著升高。水体中氮磷浓度水平的要求等见本书第 5 章和第 6 章。

图 1.5 为城市污水处理厂二级出水中典型微生物的浓度分布及其健康水平。从图中可以看出,二级出水中不同微生物的浓度跨度达每升 10 个数量级。细菌总数的浓度最高,达 10⁷ 个/L 水平,其健康风险不高,但是对水质稳定性以及浊度、色度、嗅味等感官指标的影响不容忽视。轮状病毒、肠道病毒和隐孢子虫的浓度水平很低,但其感染性和致病性很高,属于值得高度关注的高风险病原微生物。在水

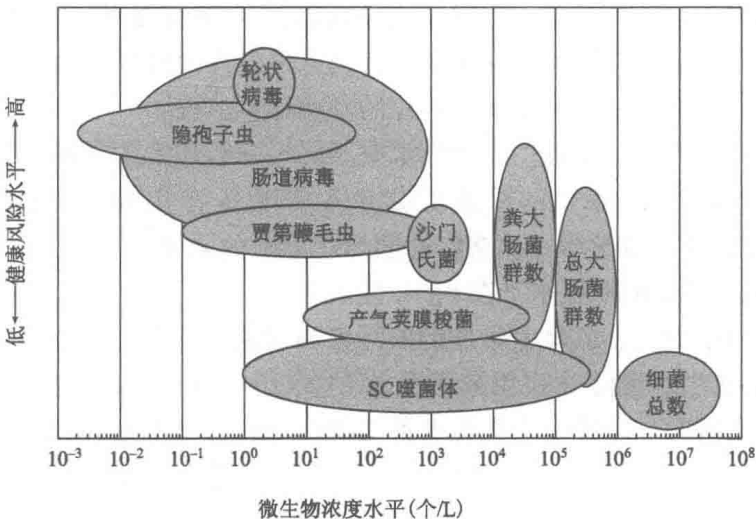


图 1.5 城市污水二级出水中微生物的浓度分布及其健康风险水平

质生物风险研究过程中,需要同时关注不同微生物的健康风险水平和浓度水平。

另外,污染物特别是微量污染物在水中可能以溶解态,也可能以附着态(吸附在SS上或微生物细胞中)存在;可能以自由态存在,也有可能以结合态存在。污染物的赋存形态不同,其毒理学特性和去除特性也会不同。

3. 生物效应和组分间相互影响机制复杂

水对生物的效应,是多种污染物共同作用的结果,不同污染物间会存在拮抗作用、促进作用等复杂的相互作用现象。因此,在水质毒性研究中,生物毒性测定结果与水中某一个(类)化学指标或有限数量的污染物浓度之间往往不存在相关性。这种现象,在水和污水消毒副产物的研究中非常普遍。

水中典型消毒副产物,如三氯甲烷、卤乙酸等的浓度,与水的遗传毒性、内分泌干扰性等的测定结果之间并不存在相关性。也就是说,典型消毒副产物的减少,并不意味着水质生物毒性的降低。很容易理解,测定水中特定消毒副产物的浓度,难以预测水的综合生物毒性。

水中不同组分之间存在复杂的相互作用关系,这种现象在消毒、化学氧化处理和储存、输配过程中更为突出。水中不同组分之间的相互作用会影响消毒效果和消毒副产物的生成、化学氧化的效果和产物的种类以及水质稳定性。

1.4 水质研究的目的及研究方法

水质研究的目的很多,总体可归纳为掌握水中不同组分(污染物)的浓度水平、解析组分特征、评价水质安全(包括水的可利用性)、预测水质转化潜能四大类(图1.6)。

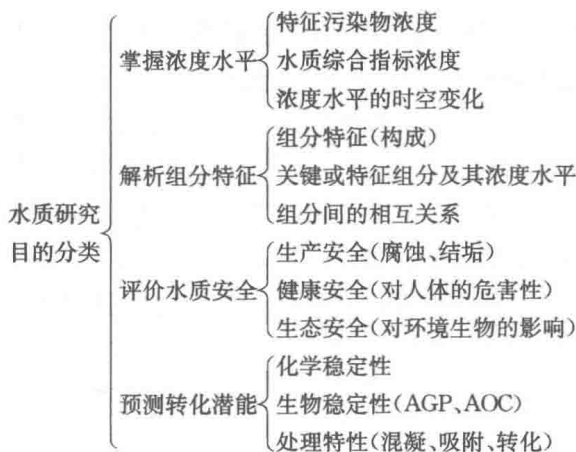


图 1.6 水质研究目的分类