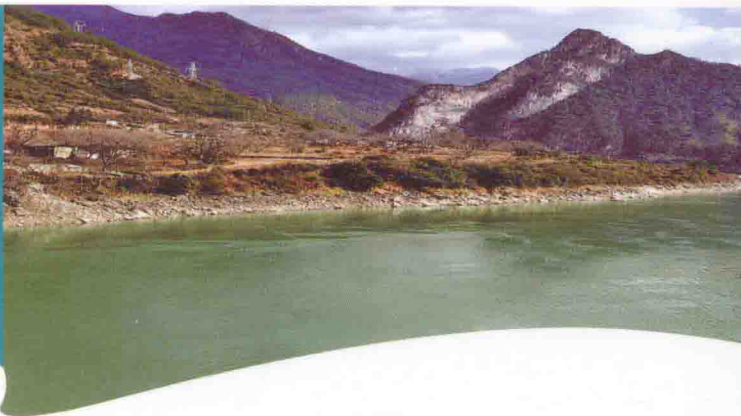


# 水处理工程 (上册)

王光辉  
王学刚 编



**WATER TREATMENT ENGINEERING**

中国环境出版社

普通高等教育规划教材

# 水 处 理 工 程

(上册)

王光辉 王学刚 编

中国环境出版社·北京

## 图书在版编目 (CIP) 数据

水处理工程. 上/王光辉, 王学刚编. —北京: 中国环境出版社, 2015.1

普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-5111-2063-2

I. ①水… II. ①王… ②王… III. ①水处理—高等学校—教材 IV. ①TU991.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 197413 号

出版人 王新程  
责任编辑 黄晓燕  
文字编辑 赵楠婕  
责任校对 唐丽虹  
封面设计 宋 瑞

---

出版发行 中国环境出版社  
(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](mailto:bjgl@cesp.com.cn)  
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)  
010-67112735 (环评与监察图书出版中心)  
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 2015 年 1 月第 1 版  
印 次 2015 年 1 月第 1 次印刷  
开 本 787×960 1/16  
印 张 25.75  
字 数 500 千字  
定 价 35.00 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

# 前 言

随着国民经济的迅猛发展、人民生活水平的逐步提高、工业化和城市化步伐的加快，用水量和污水排放量显著增加，淡水资源的短缺和水环境污染问题日益突出，全面深入地了解 and 掌握水处理技术，解决我国面临的水环境污染问题，已成为环境工程技术人员的重要历史使命。同时，水环境污染问题又促进了水处理工程技术的发展，特别是其他有关学科（如生物、材料、物理、化学、化工等）近年来的发展，为水处理工程技术的发展注入了新的活力，提供了丰富的素材，使水处理工程技术更多地体现出多学科交叉与集成的边缘性特点。

根据原水及污（废）水各自水质特征、使用目的与处理方法的差异，水处理工程学科已形成给水处理和排水处理两个分支，并在不断发展和完善之中。本书考虑水处理技术领域内的给水处理和排水处理在理论、方法等方面的共性，以处理水质为目标，以处理方法为主线，将长期使用的给水处理和排水处理两个体系的主要内容进行了有机整合。在保证基本概念、基本理论、基本技术方法和工艺要求的同时，充分注意吸收国内外水处理工程的新理论、新技术和新工艺，反映了现代水处理工程学科的发展趋势。

本书内容主要包括水的物理处理、化学处理、物化处理和生物处理等，在编写时基本上按照处理单元所采用方法的不同编排章节，且各章节具有相对独立性。全书重点反映各处理方法的基本概念、基本原理、设计计算以及实际应用等内容，使本书的体系具有结构合理、内容新颖、丰富完整等特点。为理论联系实际，便于学生深入理解书中的内容，除给出处理单元技术的应用实例之外，还给出了一定的计算例题、习题和思考题，以培养学生的基本专业素质、工程的基本思维方法和分析解决实际问题能力。

本书是高等学校环境科学与工程专业的本科生的教材，亦可供从事水污染治理

工程技术人员和有关管理人员使用, 还可供参加国家注册环保工程师资格考试的有关人员参考。

本教材分为上、下两册, 上册含 1~5 章, 下册含 6~12 章。各篇、章编写的具体分工是: 王光辉编写第一篇第 1 章、第 2 章; 第二篇第 3 章、第 4 章、第 5 章。王学刚编写第三篇第 6 章、第 7 章、第 8 章、第 9 章、第 10 章、第 11 章、第 12 章。最后由王光辉统稿、定稿。

在编写过程参阅了大量近年来出版的水处理文献资料, 得到了有关专家的指导与支持, 许多专家对全书提出宝贵意见, 同时本书的出版还得到了江西省环境工程特色专业和水处理工程精品课程、水处理工程资源共享课程和环境工程专业综合改革试点等建设项目的资助, 在此一并表示感谢。

由于编者水平有限, 书中的不足之处在所难免, 敬请读者批评指正。

编 者

2013 年 8 月 1 日

# 目 录

## 第一篇 总 论

第 1 章 水资源与水环境污染.....	3
1.1 水资源循环与分布特征.....	3
1.2 水环境污染 .....	7
1.3 水质指标与水质标准.....	17
【习题与思考题】 .....	31
第 2 章 水体自净与水环境保护.....	33
2.1 水体的自净作用 .....	33
2.2 水体水质模型 .....	38
2.3 水环境保护 .....	46
2.4 废水处理基本方法与系统.....	56
【习题与思考题】 .....	60

## 第二篇 物理、化学及物理化学处理理论与技术

第 3 章 废水的物理处理.....	65
3.1 筛滤 .....	65
3.2 调节池 .....	75
3.3 废水的沉淀处理 .....	81
3.4 沉砂池 .....	94
3.5 沉淀池 .....	104
3.6 废水的隔油和破乳处理.....	127
3.7 废水的过滤处理 .....	131
3.8 废水的离心分离和磁力分离处理.....	142
【习题与思考题】 .....	151

---

<b>第 4 章 废水的化学处理</b> .....	154
4.1 废水的中和处理 .....	154
4.2 废水的化学沉淀处理.....	164
4.3 废水的氧化与还原处理.....	173
4.4 废水的电解处理 .....	186
4.5 废水的高级氧化处理.....	192
4.6 消毒 .....	247
<b>【习题与思考题】</b> .....	259
<b>第 5 章 废水的物理化学处理</b> .....	261
5.1 混凝处理 .....	261
5.2 气浮处理 .....	288
5.3 吸附处理 .....	311
5.4 离子交换 .....	331
5.5 萃取处理 .....	341
5.6 膜分离技术 .....	351
5.7 热过程法 .....	386
5.8 吹脱和汽提 .....	397
<b>【习题与思考题】</b> .....	404
<b>参考文献</b> .....	405

# 第一篇

---

## 总 论





# 第 1 章 水资源与水环境污染

水是地球上最宝贵的一种自然资源，维系人类的生命活动和一切社会活动，是人类社会前进和发展不可缺少的因素。近年来，由于世界人口增长和社会经济的发展，人类的用水量急剧增加，原有的清洁水资源受到人类活动的污染，使地球上的水资源日益紧张，水污染和水资源短缺已成为当今人类面临的最严峻的挑战之一。因此，保护环境、控制水污染已成为全世界关注的热点。

## 1.1 水资源循环与分布特征

### 1.1.1 水资源定义

“水资源”（water resource）一词很久以前已经出现，随着时代的进步其内涵也不断丰富和发展。《大不列颠大百科全书》将水资源解释为：“全部自然界任何形态的水，包括气态水、液态水和固态水的总量”，为水资源赋予十分广泛的含义。实际上，资源的本质特性就是体现其“可利用性”。因此，不能被人类利用的就不能称为资源。基于此，1963年英国的《水资源法》把水资源定义为：“地球上具有足够数量的可用水。”这一概念比《大不列颠大百科全书》的定义赋予水资源更为明确的含义，强调了其在数量上的可用性。

联合国教科文组织（UNESCO）和世界气象组织（WMO）共同制定的《水资源评价活动——国家评价手册》中，定义水资源为：“可以利用或有可能被利用的水源，具有足够数量和可用的质量，并能在某一地点为满足某种用途而可被利用。”这一定义的核心主要包括两个方面，其一应有足够的数量；其二是强调了水资源的质量。有“量”无“质”或有“质”无“量”均不能称之为水资源。这一定义比英国《水资源法》中水资源的定义具有更为明确的含义，不仅考虑了水的数量，同时其必须具备质量的可利用性。

### 1.1.2 水资源的特征

水是自然界的重要组成物质,是环境中最活跃的元素。它不停地运动着,积极参与自然环境中的一系列物理、化学和生物的过程。水作为一种资源被我们利用具有如下特征。

#### (1) 资源的循环性

水资源与其他固体资源的本质区别在于其所具有的流动性,它是在循环中的一种动态资源,具有循环性。水循环系统是一个庞大的天然水资源系统,水资源在开采利用后,能得到大气降水的补给,处在不断地开采、补给和消耗、恢复的循环之中,可以不断地满足人类利用和生态平衡的需要。

#### (2) 储量的有限性

水资源处在不断的消耗和补充过程中,在某种意义上水资源具有“取之不尽”的特点,恢复性强。可实际上全球淡水资源的储量是十分有限的。全球的淡水资源仅占全球总水量的 2.5%,且淡水资源的大部分储存在极地冰帽和冰川中,真正能够被人类直接利用的淡水资源仅占全球总水量的 0.796%左右。水循环过程是无限的,水资源的储量是有限的,并非用之不尽、取之不竭。

#### (3) 分布的不均匀性

水资源在自然界中具有一定的时间和空间分布。时空分布的不均匀性是水资源的又一特性。全球水资源的分布不均,表现为大洋洲的径流模数为  $51.0 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$ ,澳大利亚仅为  $1.3 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$ ,亚洲为  $10.5 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$ ,最高的和最低的相差数倍或数十倍。

#### (4) 利用的多样性

水资源是被人类在生产和生活活动中广泛利用的资源,不仅广泛应用于农业、工业和生活,还用于发电、水运、水产、旅游和环境改造。在各种不同的用途中,有的则是非消耗性或是消耗很小的用水,而且这些用途对水质的要求各不相同。这是能使水资源一水多用、充分发挥其综合效益的有利条件。

#### (5) 利害的两重性

水资源与其他固体矿产资源相比,另一个最大区别是:水资源具有造福人类、又可危害人类生存的两重性。水资源质量适宜且时空分布均匀,将为区域经济发展、自然环境的良性循环和人类社会进步作出巨大贡献。水量过多容易造成洪水泛滥,内涝渍水;水量过少容易形成干旱、盐渍化等自然灾害。

### 1.1.3 地球上水的分布

地球表面大部分为蓝色的海洋所覆盖。海洋面积约占地球总表面积的 70%以

它的平均深度大约为 3 800 m。因此海洋可以看做一个浩瀚的“水库”，地球上的水约有 97% 储存在这里，其余 3% 左右的水则分别存在于大气、地球表面和地表以下的地壳中。

地球上水的总量很大，据估计约有 14 亿  $\text{km}^3$  之多。但是它的分布很不均衡。从表 1-1 所列的联合国 1977 年的资料来看，人类生命活动所必需的淡水却很有限，在占总量不到 3% 的淡水中，又有 3/4 存在于冰川和冰帽之中。大多数的大冰块又集中在南北两极，限于现有的经济、技术能力，目前还极少被利用。对人类生活和生产活动关系密切而又比较容易被开发利用的淡水储量约为 400 万  $\text{km}^3$ ，仅占地球总水量的 0.3%，而这部分淡水在陆地上的分布也很不均匀。

表 1-1 地球上的水量分布

水的类型	水量/万 $\text{km}^3$	所占比例/%
海洋水	133 800	96.54
冰川与永久积雪	2 406.41	1.74
地下水	2 340	1.69
永冻层中冰	30	0.02
湖泊水	17.64	0.013
土壤水	1.65	0.001 2
大气水	1.29	0.000 9
沼泽水	1.15	0.000 8
河流水	0.212	0.000 2
生物体内水	0.112	0.000 1
总量	138 598.46	100.00

#### 1.1.4 水的循环

水的循环分为自然循环和社会循环两种。

##### (1) 自然循环

由自然力促成的水循环，称为水的自然循环。自然界中的水并不是静止不动的。它们在太阳能的作用下，通过海洋、湖泊、河流等广大水面以及土壤表面、植物茎叶的蒸发和蒸腾形成水汽，上升到空气中凝结为云，在大气环流（风）的推动下运移到各处。在适当的条件下又以雨、雪等形式降落下来。这些降落下来的水分，在陆地上分成两路：一路在地面上汇集成江河湖泊，称为地表径流；另一路渗入地下，称为地下径流。这两路水流有时相互交流转换，最后注入海洋。

这种海洋→内陆→海洋的循环，称为大循环。那些在小的自然地理区域内的

循环,称为小循环。生物体内的水,也进行着吸收→蒸腾或蒸发→吸收的内外循环。自然循环的模式如图 1-1 所示。

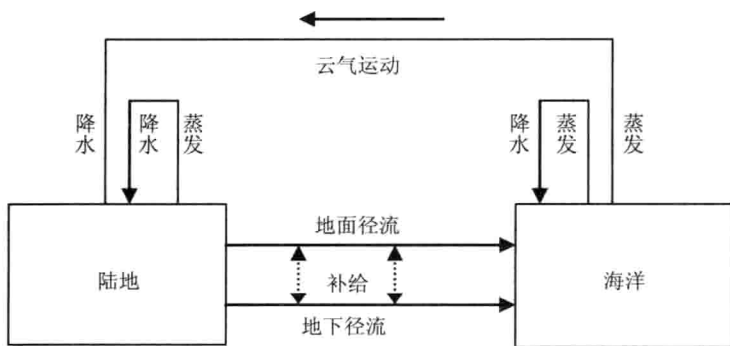


图 1-1 水的自然循环

## (2) 社会循环

由人的社会需要而促成的循环,称为水的社会循环。它是直接为人们的生活和生产服务的。取之自然而直接供生活和生产(特别是工业生产)使用的水,称为给水;使用后因丧失原有使用价值而废弃外排的水,称为废水。为保证给水能满足用户的使用要求(水量、水质和水压)而采取的整套工程设施,称为给水工程。为保证废水(有时也包括部分雨水)能安全排放或再用而采取的整套工程设施,称为排水工程。给水工程和排水工程构成了水的社会循环(图 1-2)。完善的给水系统和排水系统是现代城市和工业区所必须具备的基础条件。

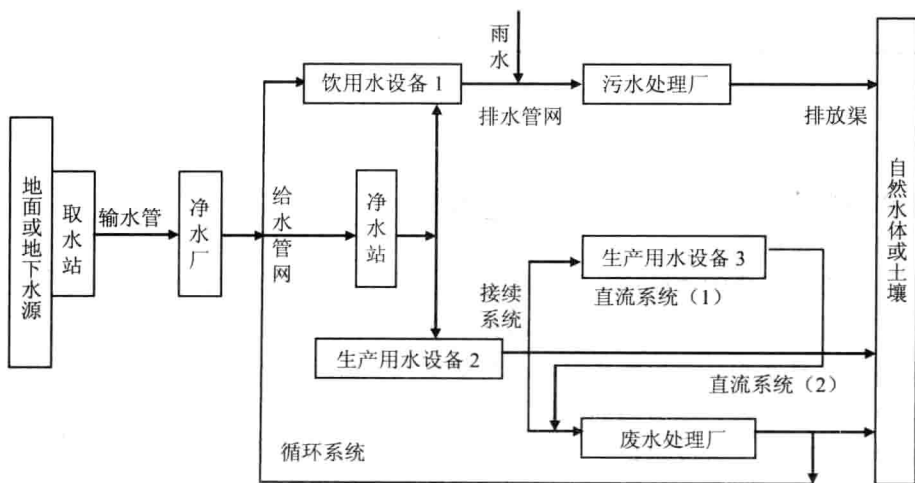


图 1-2 水的社会循环

## 1.2 水环境污染

### 1.2.1 水环境污染基本概念

水环境指河流、湖泊、沼泽、水库、地下水、冰川和海洋的总称。水在自然循环中，不可避免地会混入许多杂质，如细菌、藻类及原生动物、泥沙、黏土、溶胶、盐类（钙、镁、钠、铁等）以及气体等物质。水环境污染是指气体、固体污染物和废水污染物进入水体中，导致水体的物理特征、化学特征和生物特征发生不良变化，破坏了水体固有的生态平衡和正常功能的现象。

人是目前自然界污染的主要制造者。人类对水的使用主要是生活用水、工业用水及农业灌溉用水。大部分水在使用过程中会混入各类无机物和有机物，细菌、病毒等致病微生物和重金属类等污染物质。在社会发展的初期，排放的废水经过清洁水体的稀释和自然净化作用变污为清，成为人类可以循环利用的水资源。随着社会经济发展的规模越来越大，人口的不断增长，废水越来越多，水质越来越复杂，大量废水源源不断地排入水体（江、河、湖、海和地下水），使水体有限的自然净化功能不能适应，水环境受到严重污染，对人体健康、工农业生产和人类社会的持续发展带来了极大的危害。污染物进入水体的主要途径有：工业生产过程中的废水排放；城、镇人口集中区域的生活污水；使用农药、化肥的农田排水及水土流失；大气中所含污染物，随降水进入地表水体；固体废物堆放场地因雨水冲刷、渗漏及抛入水体所造成的污染等。

### 1.2.2 水环境污染的危害

水环境污染造成的危害是多方面的，包括对公共事业、工业生产、农业生产、人体健康、水资源、耕地及旅游资源的危害等。其对人类危害的主要表现在如下几方面。

#### （1）对人体健康的危害

水环境污染对人体健康的危害最为严重，特别是水中的重金属、有害有毒有机污染物及致病菌和病毒等。表 1-2 列举出若干重金属及无机有毒物质的污染危害及其在饮用水中的最高允许浓度。表 1-3 列出 20 种有毒化合物对人体健康的危害和对环境的影响。

表 1-2 重金属及无机有毒物质污染的危害及其在饮用水中的最高浓度

有毒物质	在水中的存在形态	污染危害	饮用水中最高允许浓度/(mg/L)
汞	$\text{Hg}^{2+}$ $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ (甲基汞)	引起人体和动物大脑损害、神经失控、手足痉挛 (如日本的“水俣病”)	汞: 0.000 5~0.001 甲基汞: 检不出
镉	$\text{Cd}^{2+}$	引起骨骼变脆, 能取代骨骼中的钙, 使骨骼松张, 疼痛难忍 (如日本的“痛痛病”) 能导致肝、肾及肺的病变	0.01
铅	$\text{Pb}^{2+}$	毒害神经系统和造血系统使人精神迟钝、贫血。初患时牙齿上会出现浅黑线	0.05
铬	$\text{CrO}_4^{2-}$ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ (六价铬)	能引起皮肤溃疡、贫血、肾炎等疾病, 六价铬有致癌作用	0.05
砷	$\text{AsO}_3^{3-}$ (三价砷)	毒害细胞代谢系统, 使之紊乱, 造成肠胃失常, 肾衰竭	0.05
氰化物	$\text{CN}^-$	造成呼吸困难、细胞缺氧, 严重时窒息致死	0.05

表 1-3 20 种有毒化合物对人体健康和环境的影响

序号	有毒化合物	对人体健康的影响	对环境的影响
1	艾氏剂/狄氏剂	对心血管有损害; 震颤, 痉挛、肾炎	对水生生物有害, 破坏鸟类和鱼类繁殖能力
2	砷	对心血管有损害; 胎儿致畸; 呕吐, 破坏肝和肾功能	对豆种植物有害
3	苯	对心血管有损害; 贫血; 骨髓炎	对一些鱼和无脊椎动物有害
4	双合铜系-(2-乙基-己基) 酞酸酯	对心血管有损害; 胎儿致畸; 破坏神经中枢功能	使鸟蛋壳变薄; 对鱼类有损害
5	镉	对心血管有损害; 胎儿致畸; 致癌、肾功能障碍、高血压、动脉硬化、软骨病等	对鱼类有害
6	四氯化碳 ( $\text{CCl}_4$ )	对心血管有损害; 破坏肝肾功能; 心脏病	破坏臭氧
7	三氯甲烷	损害心血管; 破坏肝肾功能	破坏臭氧
8	铜	刺激肠胃, 破坏肝功能	对鱼类有害
9	氰化物	剧毒	使鱼死亡, 妨碍鱼生长、发育
10	二氯二苯三氯乙烷	损害心血管; 胎儿致畸; 震颤, 痉挛, 肾炎	破坏鸟类和鱼类繁殖能力
11	二丁基酞酸酯	破坏神经中枢功能	使鸟蛋壳变薄; 对鱼类有损害

序号	有毒化合物	对人体健康的影响	对环境的影响
12	铅	对心血管有损害；胎儿致畸；痉挛、贫血；破坏脑、肾功能	对农作物和家禽有害
13	汞	水俣病、破坏肝肾功能；胎儿致畸	破坏鱼类繁殖能力，妨碍鱼的生长乃至死亡
14	镍	对心血管有影响；对肠胃及中枢系统有害	妨碍水产类繁殖
15	多氯联苯（PCBs）	对心血管有损害；胎儿致畸；呕吐，腹部疼痛；短时间失明	破坏哺乳类动物的肝功能，破坏鸟类肾功能，蛋壳变薄，使鱼失去繁殖能力
16	苯酚		破坏水生生物繁殖
17	锡		对水生生物有毒害作用
18	四氯乙烯	对心血管有影响；影响中枢功能	破坏臭氧
19	甲苯	对心血管有影响	对水生生物有影响
20	氯苯	对心血管有损害；胎儿致畸等	破坏浮游生物繁殖；妨碍鸟类和鱼类的繁殖

世界卫生组织（WHO）认为，已知疾病中约 80% 都与水污染有关系。许多疾病通过水体媒介传播。如：① 肠道传染病，包括阿米巴痢疾、细菌性痢疾、病毒性肝炎、伤寒、霍乱及小儿麻痹症等；② 肠道寄生虫病，如蛔虫、蛲虫、滴虫、绦虫等；③ 皮肤病，如皮疹、黄水疮、癣等；④ 红眼病；⑤ 钩端螺旋体病；⑥ 血吸虫病等。由于病毒广泛存在于各种受污染水体中，对人体健康的危害十分严重。很多化学药品及重金属污染生活用水会使人们多发心血管病、肝硬化、癌症等。20 世纪五六十年代以来，世界发生过数十起严重的水污染事件，例如日本暴发的“水俣病”和“痛痛病”。

### （2）影响工农业生产

有些工业部门，如电子工业、食品工业对水质要求较高，水中有杂质，会使产品质量受到影响。某些化学反应也会由水中的杂质而引发，使产品质量受到影响，废水中的某些有害物质还会腐蚀工厂的设备和设施。废水中的有害物质，不但使土质恶化，还会使农作物及森林、草原植被受损或死亡。如锌浓度 0.1~1.0 mg/L 时即会对作物产生危害，5 mg/L 使作物致毒，3 mg/L 对柑橘有害。

### （3）干扰自然界的生态系统

水环境污染引起生态系统紊乱。如废水中的重金属、杀虫剂、石油及有机物对江河湖海的污染会使鱼类大面积死亡。1980 年，英国泰晤士河就因水污染而使水生生物基本灭绝。水体受污染后，会对生态系统造成很大危害，严重时会使水体生态平衡破坏、物质循环终止、水生生物因急性或慢性中毒而死亡。



### 1.2.3 废水的分类与特征

废水的排放是造成水环境污染的主要原因。废水可以有多种分类方法,根据污浊程度,可分为净废水(如冷却水)和污水(如洗涤水)。根据废水的来源,可分为生活污水和工业废水两大类,又将城镇生活污水和工业废水的混合废水统称为城市污水。按污染物化学类别,可分为无机废水和有机废水。根据毒物的种类不同,可分为含酸废水、含氰废水、含酚废水等,以表明主要毒物,但并不意味着某种毒物是唯一的污染物或含量最多。此外,还可按工业行业或生产工艺命名来分,如电镀废水、造纸废水、皮革废水、印染废水等。

废水的主要来源与特征如下。

#### (1) 生活污水

生活污水是人们日常生活中排放出来的废水。它是从住户、公共设施(饭店、宾馆、影剧院、体育场、机关、学校、商店等)和工厂的厨房、卫生间、浴室及洗衣房等生活设施中排出的粪便水、洗澡水、衣物洗涤水、冲洗水和餐饮排水等。生活污水中通常含有泥沙、粪尿、油脂、皂液、果核、纸屑和食物屑、病菌和其他杂物等。每人每天生活中产生的污染物平均为:70 g COD、35 g BOD<sub>5</sub>、20 g TN、8 g NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、4 g P(2 g 洗涤、2 g 排泄)。生活污水的水量及水质均会随季节而有所变化,一般夏季用水量多、废水浓度低,冬季量少质浓。春末夏初天晴时洗涤水增多,洗涤剂含量倍增,水质波动大,往往会对污水处理厂曝气池带来泡沫等一系列运行问题。生活污水以有机污染物为主,可生化性较好,但随着饮食结构的改变,尤其是治病的新药层出不穷,部分随排泄物进入生活污水,使其成分趋于复杂,并对处理效果带来一定的影响。

#### (2) 工业废水

指工业生产过程中的废水,它来自工厂的生产车间与厂矿。工业生产用水中除一小部分被真正耗去外(如食品工业等),绝大多数工业用水仅仅是作为洗涤、冷却、地面冲洗等用,因此工业废水中主要夹带了生产过程中所耗用的原料,生产反应的中间体、产物或副产物等。由于各种工业生产的品种、工艺、原材料、使用设备和用水条件等的不同,工业废水的性质千差万别。有些行业的工业生产存在季节性的变化,废水量及水质变化幅度很大。特别是化工、制药行业排放的废水以有机污染物为主,往往含有有毒有害物质、重金属及酸、碱、盐等。有些工业生产中工艺残液的瞬时排放,其污染负荷的冲击往往会危及处理系统的正常运行。相比较于生活污水,工业废水水质水量差异大,通常具有浓度高、难降解、毒性大等特征。比如印染废水的色度很深,感官刺激强烈。工业废水不易通过一种通用技术或工艺来处理,往往要求对其进行多种工艺的联合处理方能达到预期