

第 1 章 废水的产生及其环境效应

水是地球表面最主要的天然组成物质，水是生命的源泉，是人类社会最重要的自然资源，它已成为现代文明社会的血液；水还是自然环境中最活跃的地质作用营力，山河壮丽，万木葱郁，芳草萋萋，皆水之功；生命从水中诞生，古人傍水而居，市井文化开始了人类的都市文明，水利农业使人类首次富足，至今仍需 80% 的水资源滋养农业；水维系着生命，滋润着空气，滋养着植被，清洁着人类，洗涤着文明，维持着生态平衡，水使整个世界充满无限生机与活力。

随着现代人类社会的快速发展，除了具有重要的资源属性外，水已具有了同等重要的环境属性、社会属性和经济属性。水资源的日益短缺和人类污染对水质的严重威胁，使水已成为新世纪的主题，“珍惜我们的生命之源”已成为新世纪的最强音。

水一直洗涤着人类的身体、生活和社会，现代社会大规模多样化的用水产生的大量废水流向原野和江河湖海，使水资源和水环境遭受严重的污染和破坏，使本已面临严重水荒的现代人临江受渴。废水的任意排放，既浪费了资源，又污染了水源，破坏了生态平衡，恶化了人类的生存环境，加剧了水资源的日益紧张。

如何处理废水和人类垃圾一直是倍受污染之苦的现代社会和人们深思的问题，经过近一个世纪的艰苦探索，人类已经找到了解决废水问题的有效途径，那就是节约用水、清洁生产和废水的资源化利用，其中废水的资源化利用将成为人类最终处置废水和解决水污染问题的主要途径，废水的利用程度和水平将成为 21 世纪社会发展和社会文明的重要指标之一。

1.1 水资源开发利用与社会经济发展

水作为人类社会最重要的自然资源广泛地使用于能源开发、生产资料、生活资料、优化环境和维持生态繁育与生态平衡方面。水作为资源的基本特征包括水量和水质两个方面，不可分割，水量是指水体中蕴藏的水的数量多少，当水量的丰度能够满足最基本的利用和开发需求时，才能体现出其资源特性；水质是指水与其中所含所有物质及其物理化学特质，对于所有可能的用水目的适用性和重要性的综合特征。没有量的质和没有质的量都没有资源意义。

1.1.1 自然界的水与水资源

1.1.1.1 自然界的水

水是地球上分布最广的自然物质，它作为地球上较轻的物质，在几十亿年的重力分异过程中集中分布于地球的表面，在逐渐趋冷的地表环境中以液态和固态形式存在，覆盖着地球表面的 70.8%。就其水量而言，若将所有的水均匀分布于地表，地球表面的平均水深将达到 2 800m，其总量约为 13.86 亿 km^3 ，其中海水占 96.5%，地下水占 1.71%，冰雪水占 1.74%，河湖水仅占 0.014%，其中淡水只占总水量的 2.527%（表 1-1）。

就全球的总水量而言，全球人均可占有 2.3 亿 m^3 ，但由于水质、分布、技术和经济因素的限制，目前对海水、深层地下淡水、极地及山地冰雪固态淡水、盐湖水等仍不能被直接开发利用，人力可及的淡水资源储量约占地球总水量的十万分之三^[1]，人均不足 1 万 m^3 。

表 1-1 自然界水的分布

水体类型	总水量/km ³	比例/%	淡水量/km ³	比例/%
海水	1 338 000 000	96.50	0	0
冰雪水	24 064 100	1.74	24 364 100	68.70
地下水	23 716 500	1.71	10 846 500	30.96
湖泊水	176 400	0.013	91 000	0.26
沼泽水	11 470	0.0008	11 470	0.033
河流水	2 120	0.0002	2 120	0.006
大气水	12 900	0.001	12 900	0.037
生物水	1 120	0.0001	1 120	0.0032
总计	1 385 984 610	100	35 329 210	100

不仅如此，由于淡水资源在时间和空间上的分布极不均匀，在时空分布上可以控制、在技术经济上允许的可利用淡水资源就更为有限了。

1.1.1.2 自然界的水循环

水在海洋、大气和陆地之间永不停息地运动称为水循环。依水循环的范围不同可将其分为两种类型，一是海洋与陆地之间全球范围的水分运动，称为大循环或海陆循环，它是陆地水资源形成和赋存的基本条件，是海洋向陆地输送水分的主要作用；二是仅发生在海洋或陆地范围内的水分运动，称为小循环，其中内陆循环是陆地水分自交替运动的主要作用，它可以增加陆地水资源的动储量。自然界水分的循环和运动是陆地淡水资源形成、存在和永续利用的基本条件。

自然界水分的循环和运动，取决于下列 4 个方面的自然因素和作用。水的相态变化特性和液态水与水气的流动性是自然水循环的前提条件，在地表常温下水可以发生三相态的相互转化，使水的运动和海陆传输成为可能；太阳辐射热和地球引力对水的热力和重力效应是水分循环运动的源动力，它们为水的运动提供了不竭的能量，使水得以吸热而飞升，失热而凝坠；空气的流动和大气环流的方向和强度影响着水分运动的方向和强度，影响着降水的分布及其特征和气象万千的气候现象；地表形态、地表地质结构、土壤的类型和性状、植被的发育特征等自然环境条件影响着降水与表流的下渗及地表与地下径流的运动和转化过程。这些因素的综合作用，控制着自然界水分的循环、运动、分布、赋存和转化的基本特征，从而决定了水资源的时空分布和利用条件。

在各种自然因素作用下，自然界的水分循环主要通过以下几种方式进行。

(1) 水的蒸发作用 在太阳热力作用下，各种自然水体及土壤和生物体中的水分产生汽化进入大气层中的过程统称为蒸发作用，它是海水、地下水和低位地表水获得能量并向高位运移的主要作用，是海洋向陆地进行水分传输的必要条件，是大循环和陆地淡水形成的主要作用。

(2) 水汽流动 由于太阳热力作用的变化和区域差别产生大范围的空气流动和大气中水汽压力差产生的渗透，是水汽流动的两种主要作用。湿润的海风将海水蒸发形成的大量水分源源不断地送往大陆，是自然界水分大范围循环的关键环节；季风和大气环流是水分异地传输的主要载体，是海洋向陆地传输水分的唯一途径。

(3) 凝结与降水过程 大气中的水汽在水分增加或温度降低时达到饱和，便以大气中的各种颗粒物或尘粒为凝结核而产生凝结作用，并以雨、雪、冰、霜、露、雾等形式的水粒降落地表而形成降水。只有降水才使来自海洋和异地的水分最终转化为陆地水，它是陆地淡水资源形成的主要途径和唯一方式，降水的丰匮决定了陆地水资源的数量和质量特征。

(4) 地表径流 在降水过程中, 由于地形及地表岩土性状等自然条件的影响, 降水的一部分在地表蓄满或超渗的情况下形成地表面流, 经过区域汇流形成河流或湖泊等地表水体, 并在重力作用下从高处流向低处, 最终汇入海洋或封闭湖泊形成地表径流, 河流是主要的地表径流水体, 也是人类主要的水源水体。

(5) 水的下渗和地下径流 降水的另一部分通过岩土层空隙系统渗入地下并在岩土层中缓慢运动形成地下径流, 地下径流或与地表径流相互转换最终流入海洋, 或在岩土层中长期滞流形成地下水体, 成为陆地水资源又一重要赋存形式。

1.1.1.3 水资源及其分布特征

陆地上的水由于处在积极的水循环过程中, 才使其具有宝贵的可更新水资源特征, 陆地河槽、湖盆及地下含水层中储存的水是很有限的, 而其循环更新的强度和数量却使水体永续存在, 为水资源的持续利用创造了条件。陆地上各种水体, 如降水、地表河湖、地下水库及山地冰雪层等都是水循环过程中的调节器, 其水资源丰度应以其更新能力或调节的强度和数量来衡量。全球每年约有 57.7万 km^3 的水参与水循环。大气水约 8 天可更新一次, 河川水约 16 天更新一次, 湖泊水要需 16 年才可更新一次, 浅层地下水则需要数月或数年, 山地冰川则需要 1 600 年才能更新一次。对于人类控制的可用水资源量的确定, 至今仍以地表水和浅层地下水的可更新量来计算, 即水文年内的总水资源量 (表 1-2)。

表 1-2 全球水量平衡估算

区 域	面积/ 10^8 km^2	水平衡项	水量/ 10^4 km^3	区 域	面积/ 10^8 km^2	水平衡项	水量/ 10^4 km^3
海 洋	3.61	蒸发量	50.5	外流陆区	0.32	出流量	4.7
		降水量	45.8	内流陆区		蒸发量	0.9
		入流量	4.7			降水量	0.9
外流陆区	1.17	蒸发量	6.3	全 球	5.10	蒸发量	57.7
		降水量	11.0			降水量	57.7

陆地上的淡水资源由于受纬度、海缘地域、地形、大气环流特征、地质环境及区域气候等因素的综合影响, 区域水资源在时间和空间上的分布极不均匀。泰国曼谷的年平均降水量为 $4\ 122 \text{mm}$, 而非洲的撒哈拉大沙漠及中国的塔里木盆地的腹地几乎不降水。降水量的多少决定了区域水循环的交替强度和区域水资源的丰匱, 有些缘海地区降水充沛, 陆地水资源极其丰富, 甚至饱受洪涝之苦; 而许多陆内地区降水稀少, 气候干旱, 水资源极缺, 甚至生物绝迹, 沙海茫茫, 因此水资源在空间区域上的分布极不均衡, 对人类社会和经济的发展具有决定性的影响。另一方面, 水资源的分布在时程上也存在很大的差异, 尤其是降水及其直接转化的地表径流在时程分布上变化很大, 年降水量变差系数 C_v 在相对干旱的地区可达 0.7 以上, 最大年降水量与最小年降水量之比 K_p 可大于 10, 日最大最小降水量比值甚至大于 100。河流年径流变差系数 C_v 在一些地区可达 $1.0 \sim 1.5$ 。时间和空间上的分布不均, 极不利于水资源的持续利用, 暴雨及洪水期洪涝成灾, 大量的可用优质水难以调节利用, 而旱季和枯水期严重缺水反成旱灾和水荒。地域的水资源分布与用水地区需水的矛盾也大幅度地增加了水资源的开发成本, 甚至有大量的水资源因遥不可及而白白流逝。

1.1.2 世界与中国的水资源状况

1.1.2.1 世界水资源总量

在全世界陆地上分布的可更新的水资源量为 4.7万 km^3 , 从地表径流和地下径流的形式产出, 约占全球总水量的十万分之三点四, 1971 年人均占有 1.29万 m^3 , 2000 年人均占有

0.78 万 m^3 。由于水资源时空分布上的局限和技术经济条件的限制，能被人们利用的水量还不到五分之一，如美国的水资源利用率为 17.6%，中国为 17.8%。全世界可利用水资源总量及其地区分布见表 1-3^[1]。

表 1-3 世界可利用水资源总量

地区	水量/ km^3	比例/%	面积/ $10^3 km^2$	径流模数/ $LS^{-1}(km^2)^{-1}$	(1971)人口/ 10^6	人均水量/ $10^3 m^3 \cdot a^{-1}$
亚洲	14 410	31	43 475	10.5	2 162	6.7
欧洲	3 210	7	10 500	9.7	654	4.9
北美洲	8 200	17	24 200	10.7	327	25.1
南美洲	11 760	25	17 800	21.0	185	63.6
非洲	4 570	10	30 120	4.8	290	15.8
大洋洲	2 388	5	8 950	52.54	19.8	314.4
南极洲	2 310	5	13 980	5.2	0	—
全世界	46 848	100	149 000	10.0	3 637	12.9

1.1.2.2 中国的水资源状况

中国的水资源总量为 28 124.4 亿 m^3 ，其中多年平均地表径流量为 27 115 亿 m^3 ，年均地下水资源量为 8 288 亿 m^3 ，除去重复计算量 7 279 亿 m^3 ，2000 年人均水资源占有量仅 2 163 m^3 ，约占世界人均水资源量 7 808 m^3 的 27.7%，水资源相当贫乏（表 1-4）^[2]。

表 1-4 中国水资源总量及其分布

流域分区	地表水资源量 $/10^8 m^3$	地下水资源量 $/10^8 m^3$	重复计算量 $/10^8 m^3$	水资源总量 $/10^8 m^3$	产水模数 $/10^4 m^3 \cdot km^{-2}$
东北诸河	1 652.9	624.9	349.3	1 928.5	15.45
海河	287.8	265.2	131.8	421.2	13.24
淮河	741.3	393.0	173.4	960.9	29.19
黄河	661.5	405.8	323.6	743.7	9.36
长江	9 513.0	2 464.2	2 363.9	9 613.3	53.16
华南诸河	4 685.0	1 115.5	1 092.4	4 708.1	81.08
东南诸河	2 557.0	613.1	578.4	2 591.7	108.08
西南诸河	5 853.1	1 543.8	1 543.8	5 853.1	68.75
内陆诸河	1 163.7	862.2	722.0	1 303.9	3.86
北方区	4 507.2	2 551.1	1 700.1	5 358.2	8.83
南方区	22 608.1	5 736.6	5 578.8	22 766.2	65.41
全国	27 115.3	8 287.7	7 278.6	28 124.4	29.46

由于受自然条件的影响，中国水资源的分布在空间上极不均衡。全国平均降水量为 648mm，而北方地区年降水量不足 400mm 的干旱半干旱地区面积占国土总面积的 47%；小于 200mm 降水量的地区面积占国土总面积的 29%，只占全国降水总量的 5.3%；占国土面积 63.5% 的北方地区只拥有全国水资源总量的 19%，产水模数只有南方地区的 13.5%。

中国水资源在时间上的分布也极不均衡。在广大的北方和西部地区，降水多集中于一年的 6~9 月份，约占年降水总量的 70% 以上，而其他季节降水稀少，气候干旱。年际变化也非常明显，北方地区的降水量年际变化有时相差 5~8 倍以上，淮河年径流量极值比 K_a 可达 19.5。

水资源在区域和时程上分布的极不均衡，不仅严重影响水资源的持续利用，加剧缺水地区水资源的紧缺状况，大幅度地增加异域调水和水资源工程调节的困难和成本，甚至频发大面积的水旱灾害，对水资源的合理利用和社会经济的可持续发展极为不利。

1.1.3 人类用水的历史

1.1.3.1 依水为生

在漫长的人类启蒙时期，人们以狩猎和采撷野果为食，其生存的命脉就是水。狩猎者蛰伏在河流或水坑附近的树林和草丛中，等待着捕杀或擒获前来饮水的野生动物，水源被当作吸引猎物和群猎最安全、最有效的食物来源。原始人类傍水而居，从最原始的方式直接获取饮食水源，无数古人类生活的遗迹都分布在水边的山洞或谷地，这种依水而居、逐水而徙的生活方式延续了无数个世纪，直到人们发现了利用土地栽培植物为止。

人们在平坦开阔的农地上耕作，可能远离了天然的水坑和河岸，但是，相对群居的小村落和聚居区的选择无疑是以可靠的流泉和水井为前提，半农半牧的部落社会和经济活动仍然是依水为生。

1.1.3.2 历史的转折

古人从狩猎、采集和放牧的生活方式逐渐被固定在农地上来从事耕种，一个关键的因素使人类历史发生了重大的转折，进入了一个全新的富裕的阶段，那就是灌溉。人们发现泉流和引水灌溉可以极大地提高粮食产量和农业生产的稳定性，从此，人类从仅能维持生存走向了出现粮食剩余的首次富裕。社会的分工、生活品的贸易、社会组织形式和真正的文化活动开始产生。

在距今五千至一万年的新石器时代，古老中国的仰韶文化时期，黄河流域及西北地区的许多河谷和近河地带，先民们即在肥沃的河谷土地上从事农业种植和专养家畜，山西夏县的西阴村遗址面积近半个平方公里。人们有石刀、石斧、骨锄、骨针、石纺车从事种植、缝纫、纺织、陶器制作等多种农业生产活动，谷物已成为重要的食物，社会分工已相当明显和多样化。引水灌溉已是农业发展的重要条件，乃至有专门的部落首长管理农业和水利。舜举八恺使主管后土，地平天成；舜陶于河滨；“卑宫室而尽力乎沟洫。禹，吾无闲然矣！”（论语·泰伯）；伯益凿井；仪狄作酒。这些都说明远古的中国先民引水凿井，从事农业使生产力明显提高，并有余粮作酒的史实。

至四千年前的夏初，社会发展已进入私有制，“今大道即陷，天下为家”，“城郭沟池以为固，礼义以为纪，以正君臣，”废“禅让”立“小康”（礼记·礼运），古人在发展引水灌溉的基础上，已能引水设沟池以固城邑。至三千年前的周代，农田灌溉已经成为有系统的群众性工程，沟洫制度已使田野中分布着不同等级渠道形成的灌溉系统。东周秦汉以晚，芍陂灌溉工程、引漳十二渠、都江堰、郑国渠、邗沟、灵渠等大型的农业灌溉和水运工程相继建成，大者灌地数百万亩，长者贯通两大水系；许多古代工程至今发挥着巨大的作用，泽被中华两千余年，在中国社会经济的发展中起着重要的推动作用。之后的各个历史时期，中国的水利事业方兴未艾，长盛不衰，水利工程的利用功能不断扩展，以农业灌溉、航运、城市供水为直接功用的水资源开发利用推动着农业的发展、社会生产力的提高、城市的形成和都市化、科学技术的进步和社会经济文化的全面发展，历史学家们将其概括为“水力文化”。

凿井取水灌溉在中国也有五千多年的历史，新疆人在干旱的内陆地区发明了科学的坎儿井取水技术，用于灌溉和供水。

1.1.4 现代社会对水的需求

人类社会发展到16世纪的近代，西方国家先后兴起工业革命，科学技术和社会生产力空前发展，工业区和城市规模迅速扩大，社会生产和都市生活对水资源的需求也迅速膨胀，水资源利用的功能也不断增加，人类社会进入需水型社会。同时，用水量的不断增加，使人

们几近掠夺式地索取水资源，并随意地排放用过的弃水，未顾及或不愿正视水资源和水环境的自然特性，相继产生了水源枯竭、水质污染、土壤盐渍化、地面沉降乃至城市洪水、气候异常和生态退化等环境问题，水资源的不足和人类对水的需求之间的矛盾成为现代社会可持续发展的更具影响力的主动因素，更深刻地影响着人类社会发展的历程。

1.1.4.1 水资源的主要用途

现代社会中水的用途随着人类社会经济活动快速地多样化而日益广泛，除传统的农业灌溉和生活饮用以外，还有各种方式的工业用水、城市供水、畜禽用水、牧草灌溉、林业繁育、生态及环境用水、水力发电、航运、渔业、工程及河道冲淤等。此外，大规模的蓄、引水和调水工程的水资源利用不仅具有多功能用途，还具有水资源时空分布调控、改变区域生态与水环境特征、改变水质、旅游及景观水体和区域生态环境保育等特殊功能。其中农业用水仍然是最主要和用水量最大的用水部门。

在天然水资源日益短缺，水环境污染日益严重的情况下，人类废水的资源化利用及水资源的重复利用也具有日益重要的经济、社会、环境和资源意义。

1.1.4.2 水资源开发利用现状

中国水资源的南北分布及流域环境条件差别较大，水资源开发利用程度和各行业用水量相差较大。中国 1980 年一些流域实际用水情况和 2000 年水资源供需情况见表 1-5 和表 1-6^[3]。

表 1-5 中国 1980 年实际用水情况 (水量 / 10⁸m³)

流域分区	地表水 供水量	地下水 供水量	供水 总量	工业用 水量	城镇生活 用水量	灌溉用 水量	农业人畜 用水量	其他农业 用水量	农业用水 总量
东北诸河	269.78	84.86	354.64	63.86	9.47	244.41	11.57	24.41	280.39
海河	179.50	202.44	381.94	48.69	10.72	309.91	14.97	0.59	324.47
淮河	402.33	128.93	531.26	38.42	5.30	454.61	27.20	5.73	487.54
黄河	273.96	84.81	358.37	27.93	6.03	314.35	10.05	1.0	324.40
长江	1 286.25	67.02	1 353.27	208.76	22.34	1 044.65	74.84	2.68	1 122.17
华南诸河	653.40	6.12	659.52	45.86	9.47	551.24	53.82	0.25	605.31
东南诸河	188.05	5.09	193.14	16.03	2.14	166.14	8.84	—	174.97
西南诸河	39.46	0.67	40.13	0.74	0.22	39.47	3.49	—	42.96
内陆诸河	520.53	39.52	560.05	7.03	2.02	532.55	7.84	9.29	549.68
北方区	1 614.10	540.16	2 154.26	185.93	33.52	1 854.81	71.73	40.02	1 966.48
南方区	2 167.16	78.90	2 246.06	271.39	34.17	1 801.52	140.77	2.93	1 945.41
全国	3 813.26	619.06	4 432.32	457.32	67.69	3 656.33	212.62	42.95	3 911.89
占总用水量/%				10.3	1.5	82.5	4.7	1.0	88.2

表 1-6 中国 2000 年水资源供需情况 (P=75%) 水量/10⁸m³)

流域分区	可供水量	地表水可 供水量	地下水可 供水量	工业需 水量	城镇生活 需水量	农业需 水量	需水总量	缺水 量
东北诸河	677.93	491.71	186.22	173.90	30.47	535.06	739.43	61.50
海河	399.29	223.68	175.61	100.15	22.87	399.56	522.58	123.29
淮河	745.78	585.28	160.50	144.31	19.48	659.80	823.59	77.81
黄河	409.97	320.09	89.88	78.70	10.63	343.09	432.42	22.45
长江	2 437.93	2 362.17	75.76	578.10	99.39	1 839.56	2 517.05	79.12
华南诸河	953.87	949.77	4.10	128.03	25.16	840.10	993.29	39.42
东南诸河	324.59	314.54	10.05	67.49	5.90	272.79	346.18	21.59
西南诸河	65.92	65.25	0.67	3.80	1.10	63.93	68.83	2.92
内陆诸河	662.69	548.00	114.69	27.70	3.97	649.12	680.79	18.10
北方区	2 895.65	2 168.76	726.90	524.76	87.42	2 558.66	3 170.84	275.19
南方区	3 782.32	3 691.73	90.58	777.42	131.55	3 016.38	3 925.35	143.03
全国	6 677.97	5 860.49	817.48	1 302.18	218.97	5 575.04	7 096.19	418.22
占总需水量/%				18.3	3.1	78.6	100	

1980年中国的用水结构为农业用水量 3 911.89 亿 m³，占总用水量的 88.2%，其中农林牧等灌溉用水量达 3 656.23 亿 m³，占总用水量的 82.5% 农业人畜饮水和其他农业用水分别占 4.7%和 1.0%，工业用水和城镇生活用水分别占 10.3%和 1.5%。到 2000 年，这一用水结构发生了明显的变化，农业需水量 2000 年达 5 575.04 亿 m³，较 1980 年增加水量 1 663.15 亿 m³，增加了 42.5%，但农业需水占总需水量的 78.2%，下降了 9.6%；工业需水量从 1980 年的 457.32 亿 m³，上升到 1 302.18 亿 m³，上升了 1.85 倍，占总需水量的比例也上升为 18.3%；城镇生活用水量也上升了 2.2 倍，占总用水量的比例也上升了 1 倍多。

1980 年中国的水资源开发利用工程提供的水量为 4 432.32 亿 m³，其中地表水供水量达 3 813.26 亿 m³，占总供水量的 86%，地下水占 14%。到 2000 年，新增投资 672 亿元进行开发工程、节水和挖潜改造，可新增供水量 1 943 亿 m³，可供水总量为 6 677.97 亿 m³，2000 年仍缺水 418.22 亿 m³，其中北方地区缺水严重，缺水量达 296.14 亿 m³，缺水率达 9.3%，其中辽河流域和海河流域分别缺水 21%和 23.3%。水源不足已成为社会经济发展的主要制约因素。

1.1.4.3 水资源开发利用中存在的主要问题

在水资源开发利用的过程中，由于需水量的快速增长，人类凭借水是取之不尽的错误认识和日益先进的科学技术手段，几近掠夺式地索取水资源，江河断流，地下水持续下降，甚至地面沉降，海水倒灌。同时，大量的人类废物和废水自然排放挥之于水，严重地污染了天然淡水资源，不仅加剧了可用水资源的短缺，还对水体、土壤、大气及生态环境产生了严重的污染和破坏，对人类的经济、社会、生活和健康产生了多方面的不利影响。

(1) 水体污染 在工业发展的初期，人们只顾发展生产、追求利益，忽视了工业三废对环境的影响而自然排放废水、废气和废物，不可避免地产生了水体和环境的污染，发达国家无一例外地经历过先污染后治理的发展历程。污染的空气、发臭的河流和遍地的垃圾成为现代社会发展初期的历史景象，中国近几十年也在经历这一历史时期，并已产生了严重的危害，现在已初步进入治理期。中国目前日排放污水已近 1.7 亿 t，其中 80% 以上未经任何处理即直接排入水体，使江河湖库及近海海域普遍受到污染，城镇和工业区及其附近地区的地下水也普遍遭受污染。2001 年东海已发生 28 次大规模红潮，污染面积最大达 8 千多 km²。1980 年中国各流域废水排放情况见表 1-7^[4]。

表 1-7 中国各流域废水排放情况 (废水量/10⁴t·d⁻¹)

流域分区	工业废水	生活废水	废水总量	占总量比例/%	污径比/%
黑龙江	398.3	62.6	460.9	5.3	1.4
辽 河	606.4	100.9	707.3	8.2	5.3
海 滦 河	828.0	182.1	1 010.1	11.7	12.8
黄 河	406.6	89.7	496.3	5.7	2.7
淮 河	578.2	120.3	698.5	8.1	3.4
长 江	2 919.6	649.4	3 569.0	41.1	1.4
华南诸河	866.9	142.5	1 009.4	11.7	0.8
东南诸河	460.4	90.2	500.6	6.4	1.0
西南诸河	24.2	3.5	27.7	0.3	0.02
内陆诸河	68.6	35.3	103.9	1.2	0.3
北方区	2 886.1	590.5	3 476.6	40.3	
南方区	4 271.1	885.6	5 156.7	59.7	
全 国	7 157.2	1 476.1	8 633.3	100	

经济发达的长江、海滦河流域和珠江流域废水排放量较大，分别为全国废水总量的41.1%、11.7%和11.7%。而污染较为严重的流域依次为海滦河、辽河和淮河流域，污径比分别为12.8%、5.3%和3.4%。1980年，根据水质有机物综合评价和五项毒物（汞、铬、酚、氰化物、砷）综合评价结果，中国河流水质评价中，有33.6%的河长水质符合饮用水水质要求，主要是河渠及上游河段；水质不符合农业灌溉要求的河长为10.9%，污染较重的河段主要为大、中城市及其附近水体和中下游河段。1995年，全国废水排放总量为365亿t，北方地区已有70%以上的河段为劣Ⅳ类水质。2001年，全国废水排放总量达620亿t，比1980年的315亿t几乎翻了一倍，综合水质评估80%的河段水质为劣Ⅳ类，仅能用于灌溉用水，表明水体污染依然在加剧。

(2) 水源枯竭 在大中城市及工业区的集中供水源地区，尤其是以地下水作为水源的地区，大规模超强度开采常常产生地下水位的持续快速下降，使含水层形成疏干性消耗的同时，开发利用成本也在迅速上升。在特定的水文环境条件下，可产生地下水水质污染、地面塌陷、区域沉降及海水或劣质水层侵染等相关环境危害，进一步加剧了水源枯竭效应。即使在地表水源区，由于需水区水资源和水环境的严重污染以及近距离供水强度的不足，远距离高成本地开发新水源也势在必行。八水绕长安的西安市，由于地下水资源枯竭和污染伴随地面沉降，渭河等近效河流水质污染及近距离河流水量不足，每年有70多亿m³的地表径流绕城而过，西安却备受水荒之苦。40多年前就已规划70km以外的黑河引水工程，甚至计划远引100km以外的石头河水以补用水之不足。江城武汉以长江为重要的供水水源，近年来常因枯水期水质恶化而暂停使用。地处水乡泽国的杭州、宁波、嘉兴等地近年也因超强度开采地下水而产生快速地面沉降。华北平原及京津地区的地下水资源丰富，快速增加的水资源需求也使这一地区成为严重水源不足的地区。水源枯竭严重地制约了缺水地区的社会发展。

(3) 生态环境恶化 在人类以惊人的力量和速度开发利用自然资源和水资源的时候，大江大河被拦腰截流，大规模深层优质地下水的持续开采，其在发电、防洪、供水等方面的福祉可谓巨大。但是，超强度的人类开发使水文系统、自然环境和生态系统产生了严重的干扰甚至破坏。江河断流、水质污染、水土流失加剧、气候异常、旱涝灾害频发、湖泊萎缩和水质咸化、土地退化和沙漠化加剧、地面沉降、海水倒灌、次生盐渍化、陆地水生生态环境破坏和物种灭绝、近海红潮频发等人为灾害层出不穷，不仅严重地威胁着水资源的持续利用，也极大地威胁着人类自身的生存环境安全。这些人为的环境和生态灾害，都直接或间接地起因于人们对水资源的不合理开发和利用，并对社会经济的可持续发展产生严重的影响。

1.2 废水的排放与利用

对现代城市而言，在其生存与发展的过程中存在着许多问题，如人口的膨胀、财政的紧张、拥挤的交通、污浊的空气甚至棘手的民族与宗教问题等等，“但是对城市的生存影响最大的问题有两个：一个是如何获得足够的水量供应城市使用；另一个问题是如何处理使用过的水”^[5]。废水的排放和利用是城市的健康发展所面临的重大问题，也是现代化社会可持续发展所面临的重大问题。

1.2.1 废水的产生

水被用于人类的各种生活和生产活动中，水的资源特性和水的使用方式存在着很大的差别，产生的废水也就存在着不同的物质特性和资源化性状。依水的用途可分为生活用水和工

业用水两大类。生活用水又可分为饮食用水和清洁用水两大类；工业用水又可分为原料用水、工艺用水、生产过程用水、锅炉用水和冷却用水。

(1) 生活用水 生活用水与人体健康直接相关，其水质要求较高，对感官性状、一般化学指标、毒理性指标、细菌学指标和放射性指标均提出明确标准。在水资源紧缺但经济实力较强的一些国家和地区的生活用水采用分质供水时，饮食用水要求高而清洁用水水质要求可相对较低，如日本的某些城市已将城市径流蓄存并用于生活及城市清洁用水。生活用水中饮食用水产生的废水以人粪尿为主要污染物质，在中国农村历来以农家肥的土粪或水粪形式蓄存并直接用于农作物施肥，除地面径流以面源方式进入水体产生有机污染外，一般不直接形成废水污染物；而城市和集中给排水生活区的生活用水则以生活废水形式与家庭生活清洁用水一起排放；清洁用水中使用了大量的各类清洁剂，大多属于有机合成洗涤剂类污染物 P、Cl、油及苯类等有机物。

(2) 工业用水 工业用水的使用方式不同，工业性质多样，从生产过程中进入水的废弃物和淋失物种类繁多，性质各异，污染负荷和废水水质差异较大。对于原料用水，如食品、医药及化工等许多行业用水，水被作为工业原料广泛参与生产的内在过程并构成最终产品的组成或介质，原料水的水质要求通常相当于或优于饮用水水质标准，医药产品的某些用水要求则更高。因水的溶解性能可使绝大多数种类的生产原料及其变相物质进入废水中，产生生产原料的损失和浪费而形成污染物。工艺用水在生产过程中不要求进入最终产品，但水作为介质或广泛参与同生产原料的相互作用，水质对产品质量影响很大，水中的杂质可进入产品形成残留物，而原料物质也不可避免地残留于废水中形成污染物，如造纸、纺织品、印染、人造化纤工业及有机合成和制糖等轻工业和化工工业行业用水。

生产过程用水主要是生产过程中的洗涤和清洁用水，如原料、中间产品、产品及生产设施和场地的清洁和洗涤用水；输送用水，如原料及废料的送配和输排过程用水。生产过程用水除特殊工艺外对用水水质要求不高，但原料物质及废料物质在生产过程中可大量进入水中形成污染物。

锅炉用水的要求因锅炉的类型和使用安全要求对硬度、碱度、溶解氧、侵蚀性及皂化物质要求较高，而锅炉用水除成垢作用加药处理和除垢过程改变水质外，其出水一般不产生废水污染物。

冷却用水是以降低生产过程中各种系统的设备、物料及工作环境的温度为主要目的，冷却用水的水质要求低温、硬度及溶解盐量小、侵蚀性气体及悬浮物少、热环境下不滋生生物和微生物等。冷却过程除分散物料淋水冷却时可能产生物料化学淋失产生污染物，一般只改变冷却水本身物化性状而不产生新的污染物质。

1.2.2 废水的排放

人类生活废水的传统排放方式就是水粪坑，至今这种水粪坑仍然是广大农村和分散居民生活废水的主要排放方式，并且作为农用有机粪肥的积肥方式。出于环境卫生和能源利用的考虑，有些地方的水粪坑逐渐归并成较大的化肥池、污水池或沼气池，从分散蓄存过渡为一定规模的废水排放汇集蓄存方式。对于城市的生活废水排放，在公元前 6 世纪的古罗马城，已建成了最早的城市污水排放渠道系统，并采用了岩石衬砌防渗和城市径流冲污的集中排废方式，最终排入台伯河；这种早期的城市废水排放系统，在公元初的维也纳和雅典也被使用，最终的排放场所都是附近的河流。而在更多的古老城市中缺乏这种废水排放系统，仅采用粪挑和粪车外运城中的生活废水，乃至清末的紫禁城还是如此。

工业革命和城市的快速发展产生的大量废水要求建立大规模的供水和排水设施，真正的工业废水大量产生并与生活废水混合排放，工业发达的许多城市的排水系统相继建成并不断扩建以适应集中排废的需要。直到 20 世纪初，发达城市及经济区附近的水域和地下水普遍遭到严重污染而危及城市供水安全，以及许多城市因供水不洁和水污染造成的疾病困扰，始建城市污水处理厂和完善排污系统。新德里在 1938 年建立了第一座污水处理厂，维也纳至 1951 年才建立城市污水处理厂，并使陆续后建的污水处理厂肩负着使“褐色的多瑙河”重现“蓝色的多瑙河”的责任。此前城市废水虽然通过有效的城市排水系统进行排放，但废水水质未被彻底改善，并直接排向天然水体，应属于自然排放方式，水生流行性疾病的发生和城市环境的污染及附近水体水质的恶化是这种自然排放方式的严重危害。伦敦、新德里、巴黎及维也纳等大城市都曾经历过这种自然排放方式的严重危害。

最近的 50~60 年，城市废水的排放逐渐从自然排放过渡为控制性排放。控制性废水排放是在流域或区域环境保护规划和城市环境保护规划的指导下，对污染源、污染物和废水排放量实行总量控制，以确保环境目标的废水排放方式。废水从工业生产的最初来源地——车间就实行达标排放，集中的废水排放口或污水处理厂的出水均应实施控制排放以确保水体水质和环境质量不致恶化。然而，因经济条件、政府和民众的环境意识、企业的功利行为及环境法规的阶段性等诸多因素的影响，废水的控制排放至今未能有效地遏制水环境恶化的趋势。中国的废水排放和水环境保护现状不容乐观，例如陕西关中排入渭河 6.2 亿 m^3/a 的城镇废水综合达标率仅 54.8%^[6]，处理率还不到 1/5，COD（化学需氧量）和 SS（悬浮固体）的规划削减率分别达 56.1% 和 60.8%。中国 1997 年废水排放总量为 416 亿 m^3 ，80% 以上未经任何处理直接排入水域^[7]，大多数的市县级城镇没有废水处理厂，废水仍自然排放，中央政府对淮河、太湖等水域实施了限期达标排放的“零点行动”，但初期规划水质目标较低。因此，我国的废水控制排放目标的实现还任重而道远。

1.2.3 废水的利用

集中排放的城市废水的利用，早在公元前的雅典就已开始了废水灌溉的历史，16 世纪在德国也使用废水灌溉农田，19 世纪初在英国出现有目的地利用土地处理废水和污泥，19 世纪末美国也利用市政废水进行灌溉，并在 20 世纪初实行处理废水灌溉，我国现有污灌农田 140 万 hm^2 ，主要分布在相对缺水的北方地区。

废水灌溉是迄今为止最主要的废水利用方式，其主要目的是解决缺水地区的农田需水，直接利用废水中的植物营养成分和利用土地处理废水中的大量污染物。我国的废水土地利用还不足 5%，废水利用量约 15 亿 m^3 ，近几年因土壤、农作物和地下水污染等负效应增加，利用率有所降低。而在美国加利福尼亚的许多农灌区，经过严格处理的城市废水，通过有效的贮存和配水系统灌溉粮食作物、牧草、园林及其他经济作物，图奥卢米（Tuolumne）地区处理的废水还可用于牲畜饮用；德国的布伦瑞克（Braunschweig）和美国加州的圣劳莎（Santa Rosa）还成功地利用喷灌系统进行废水灌溉，费雷斯诺（Fresno）还将所有的处理废水渗补地下水^[8]，这些都取得了良好的经济效益和环境效益。

中国是水资源短缺的国家，尤其是北方地区，缺水已成为国民经济发展的主要制约因素；一方面在各地区各部门缺水严重，另一方面大量的废水自然排放使本已短缺的水资源又遭受严重的污染，进一步加剧了水资源紧张，要解决水资源严重不足和水环境污染加剧的问题，废水的农业资源化利用无疑是一条有效而前景广阔的途径，它既能满足农业水肥要求，又有效地减少排污，防止污染，保护水资源、水环境与生态环境。

1.3 废水的物质特征

1.3.1 废水的分类

因水的使用功能不同，所以水在使用过程中所产生的水质变革差异很大，废水的物质特征和资源化性状也不尽相同。按水的用途通常将废水分为生活废水、工业废水和城市废水。

(1) 生活废水 是指单纯的生活用水产生的废水，如居民区和生活社区排放的废水。

(2) 工业废水 是指各生产部门、各工业行业生产过程中形成的废水，因生产过程和产品种类不同水质差别很大，可分为化工废水、造纸废水、采矿废水、冶金废水等相应的工业行业类型。

(3) 城市废水 通常是指生活废水、市政废水、工业废水和城市径流混合排放的废水，因城市的经济结构、规模、城市排水系统的分区分质汇流特征的不同，其水质和复杂性也不同。

依废水的特质主要污染物类别不同可划分如下。

(1) 耗氧有机物废水；

(2) 无机毒物废水；

(3) 有机毒物废水；

(4) 含重金属废水；

(5) 植物营养质废水；

(6) 病原微生物废水；

(7) 放射性废水；

(8) 含油废水；

(9) 高温废水；

(10) 侵蚀性废水；

(11) 染色废水；

(12) 混浊废水；

(13) 挥发性致臭废水。

依废水的处理深度不同还可划分如下。

(1) 废水原水；

(2) 一级处理废水；

(3) 二级处理废水；

(4) 三级处理废水；

(5) 深度处理废水。

1.3.2 废水的物质组成

在废水的资源化利用和水污染控制中，废水的物质组成是最主要的水质特征，其资源化利用价值及其对排放环境的污染危害都取决于废水的物质组成。废水的物质种类繁多，性质各异，通称为污染物，其在废水中的含量及性状可用相应的水质指标来表征，如 COD、BOD₅（生物化学需氧量）、菌度、pH 值及各种污染物浓度等。

废水中的各种污染物质来源于不同类型的废水产生过程中，生活废水中主要含有大量的悬浮物，有机物及 N、P、K 等植物营养物质，同时也滋生大量的细菌，生活用化学品中的有害有毒物质还有酚、砷、氰化物、汞、镉等。表 1-8 为我国若干城市生活废水水质变化情况。

表 1-8 若干城市生活废水水质变化幅度

pH 值	BOD ₅ /mg · L ⁻¹	化学耗氧量 /COD/mg · L ⁻¹	悬浮物 /mg · L ⁻¹	NH ₃ -N /mg · L ⁻¹	P /mg · L ⁻¹	K /mg · L ⁻¹
7.1~7.7	100~400	250~1 000	50~330	15~59	30~34.6	17.7~22

工业废水的成分非常复杂，废水水质决定于生产行业、工业原料、生产工艺及技术方法类别与水平，特定的工业废水水质及其复杂程度只能由工业行业及其生产过程的污染物来源确定。工业废水中主要有害物质的来源参见表 1-9。

表 1-9 工业废水中污染物质的主要来源

有害物质	主要排放行业
游离氯	造纸、织物漂白
氨	煤气、焦化、化工
氰化物	电镀、焦化、煤气、有机玻璃、金属加工
氟化物	玻璃制品、半导体元件
硫化物	皮革、染料、炼油、煤气、橡胶
六价铬化合物	电镀、化工颜料、合金制造、冶炼、制革
铅及其化合物	电池、油漆化工、冶炼、铝再生、矿山
汞及其化合物	电解食盐、炸药、医用仪表、汞精炼、矿山
镉及其化合物	有色金属冶炼、电镀、化工、特种玻璃
砷及其化合物	矿石处理、农药、化肥、玻璃、涂料
有机磷化合物	农药
酚	煤气、焦化、炼油、合成树脂
酸	化工、钢铁、铜及金属酸洗、矿山
碱	化学纤维、制碱、造纸
醛	合成树脂、生物制药、合成橡胶、合成纤维
油	炼油、皮革、毛纺、食品加工、防腐
亚硫酸盐	纸浆、粘胶纤维
放射性物质	原子能、放射性同位素、医疗

1.3.3 废水的水质特征

废水的污染物种类繁多，尤其是工业废水的水质特征相当复杂，其污染物负荷和成分复杂性远大于生活废水，我国工业废水与生活废水的总排放量比约为 5 : 1，其污染负荷比可达几十至几千比一。表 1 10 列出了英国的生活废水和几种工业废水的排放量比较。

表 1-10 生活废水与工业废水排放量比较

污染源	生物化学需氧量 BOD ₅	固体悬浮物
生活废水	1	1
制革工业废水	24~48	40~80
罐头工业废水	8~800	3~440
纺织工业废水	0.4~360	130~580
造纸工业废水	16~1 330	6 100

生活废水主要产生于人口高度集中的城镇，其废水的来源主要为生活清洁用水，其中固体物质含量不足 1%，主要为各种无机盐类、耗氧有机物、病原微生物和洗涤剂类物质。因含有大量的 N、P、S 等成分，在厌氧条件下分解可产生硫化氢、硫醇、粪臭素及各种发臭基因等恶臭物质。新鲜的生活废水呈灰色，固体有机物质未分解时几乎没有臭味，并有溶解氧存在。随着水中有机物质的腐解变质，溶解氧耗尽消失并产生厌氧分解，释放出硫化氢等

各类还原性挥发性恶臭物质，形成深色或黑色的腐化废水。美国未经处理的生活废水测算的平均组分见表 1-11。

生活废水的典型组分 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

组 分	无机物	有机物	总浓度	BOD ₅
可沉降固体	40	100	140	55
不可沉降固体	25	70	95	65
溶解性固体	210	210	420	10
总固体	275	380	655	
氮	12	20	32	
磷	5	3	8	

工业废水具有成分复杂、排放量大、分布面广、毒性大、净化和处理较难的基本特征，其物质特征与生活废水明显不同。主要污染物中悬浮物含量可达 $100 \sim 3000 \text{mg/L}$ ，生化需氧量 BOD₅ 变化于 $200 \sim 50000 \text{mg/L}$ ，COD 更高，可达 120000mg/L 以上，pH 值变化范围更大，最高可达 13，味精厂废水酸度最低可达 $0.5 \sim 1.5$ ，总 N 可达 2030mg/L ；工业废水中常含有低沸点的挥发性物质，如汽油、苯类、丙酮、乙醇、甲醇、石油类等，在大量排放时可形成“燃烧的河流”；工业废水中常含有多种有毒物和有害物质，如酚、氰、农药、染料、重金属及放射性物质等。主要工业污染源所排放废水的水质特征见表 1-12。

表 1-12 主要工业污染源所排放的主要污染物及废水水质特征

工业部门	主要工业污染源	废水中主要污染物	废水水质特点
火电	火力发电	冷却水热，冲灰水中粉煤灰	热，悬浮物高，水量很大
核电	核电站	冷却水热，放射性废水	热 放射性，水量大
钢铁冶炼	选矿、烧结、炼焦、炼铁、炼钢、轧钢	酚、氰化物、硫化物、氨水、多环芳烃、吡啶、焦油、砷、铁粉、煤粉、酸性洗涤水、冷却水热	COD 较高，毒性较强，水量很大
有色冶金	选矿、烧结、冶炼、电解、精炼	氰化物、氟化物、B、Mn、Cu、Zn、Pb、Cd、Ge 等，酸性废水，冷却水热，放射性	含金属成分高，可能含放射性，废水偏酸性
化学	肥料、纤维、橡胶、塑料、制药、树脂、油漆、农药、洗涤剂、炸药、燃料、染料	酸、碱、盐、氰化物、酚、苯、醇、醛、酮、油、氰仿、氯苯、氰乙烯、有机氯农药、有机磷农药、洗涤剂、多氯联苯、Hg、Cd、As 等，硝基化合物，胺基化合物等	BOD 高，COD 高，pH 值变化大，含盐量高，毒性强成分复杂
石油化工	炼油、蒸馏、裂解、催化、合成	油、酚、硫、氰化物	COD 高，成分复杂，毒性较强，水量大
纺织印染	棉、毛、丝纺、针织、印染	染料、酸、碱、硫化物、纤维悬浮物、洗涤剂	五颜六色，毒性强，pH 值变化大
制革	皮革、皮毛、人造革	硫酸、碱、盐、硫化物、甲酸、醛、有机物、As、Cr、S	盐量高，BOD、COD 高，恶臭，水量大
造纸	纸浆、造纸	黑液、碱、木质素、悬浮物、硫化物、砷	黑液中木质素含量高，碱性强，恶臭，水量大
食品	肉、油、乳、水果、水产加工	病原微生物、有机物、油脂	BOD 高，致病菌高，恶臭，水量大
机械制造	铸、锻、金属加工、热处理、喷漆、电镀	酸、氰化物、镉、铬、镍、铜、锌、油类、氯化钡、苯	重金属含量高，酸性强，分散
电子仪表	电子原料、电讯器材、仪器仪表	酸、氰化物、汞、镉、铬、镍、铜	重金属含量高，酸性强，水量小
建筑材料	石棉、玻璃、耐火材料、窑业、其他建筑材料	石棉、无机悬浮物	石棉、悬浮物高
采矿	煤、磷、金属、放射性	酚、硫、煤粉、酸、氟、磷、重金属、放射性	成分复杂，悬浮物高
采油	油、天然气	油	油含量高，事故排放形成灾害

1.4 废水的环境效应

自古以来，废水一直以自然方式排向坑塘、田野、河湖或海洋中，人们很少去主动地考虑废水对人类自身和环境会造成什么样的危害和不良影响，这在以生活废水为主要构成的前工业时期，废水中不含有各种有害有毒成分，废水的集中排放量和排放强度很低，远未超出环境的净化能力，确实不存在明显的危害。然而，现代工业的集约化和数以万计的人工污染物以点源方式产生的大量废水，高强度地排向环境和水体，远远超出了自然环境的自净能力，对自然生态和环境确实产生了严重的毒损和破坏，危及人类自身的经济、生活活动和健康，其环境效应非常广泛，产生了许多典型的水污染危害。

1.4.1 废水的排放环境

废水排放的外部环境主要包括土壤环境、水环境和生态环境三个子系统，各环境系统具有不同的环境特征和环境容量。

1.4.1.1 土壤环境

土壤是陆地表面能生长植物的松散岩石层，它是由各类岩石风化和成土作用形成的具有肥力的物质层，是人类和生物赖以生存的物质基础。土壤的本质属性是具有肥力，它能为植物提供必需的水分和养分，土壤层是有机物和无机物相互联系与转化的主要环境，由于自然和人为因素，不同环境条件下的土壤特性存在着很大的差异，从而形成不同的土壤类型。

土壤主要由矿物质颗粒、有机物质、生物体以及水分和空隙空间组成，是固、液、气三相物质的综合体。其矿物质来源于母岩和成土母质，主要是各种颗粒形态的矿物晶体或岩屑，其固体矿物质成分占总重量的 90% 以上，砂粒占 50%~70%，黏土占 30%~50%。有机质可占土壤组分的 1%~10%，包括碳水化合物、蛋白质、木质素、有机酸及含 N、P、K、S 的普通有机物；还有大量的腐殖质，腐殖质常具有电荷、吸附性和缓冲性能。土壤中一般含有一定量的结合水和毛细水分且溶有多种气体、无机溶质和有机质，储存、调节和供给植物所需的各种无机和有机营养物质。

土壤还具有良好的空隙性状和化学性能，为植物根系发育、涵蓄水分、分解物质、传输养分和气体交换创造条件。

土壤具有吸收、转化、传输和分解各种无机成分和有机物质的物理化学和生物化学性能，因此也具有吸纳外来有害物质并将其无害化的能力，被称为土壤的自净能力。在土壤环境系统各要素间的平衡不被破坏的条件下，不导致作物和土壤污染所允许容纳污染物的最大负荷量称为土壤的环境容量。以浓度单位表示的土壤环境年容量为

$$W_a = K(W_s - B) \quad (1-1)$$

式中 W_a ——土壤环境年容量， $\mu\text{g/g}$ ；

K ——净化率，%；

W_s ——土壤环境标准， $\mu\text{g/g}$ ；

B ——土壤环境背景值， $\mu\text{g/g}$

1.4.1.2 水环境

水环境是地球上分布的各种水体以及与其密切相关的诸环境要素，如河床、海岸、植被、土壤等的综合体系，是自然环境的基本子系统，是人类赖以生存和发展的重要场所和资源，也是受人类干扰和破坏最严重的环境系统。水环境依其分布特征可分为地表水环境和地下水环境，地表水环境包括河流、湖泊、沼泽、水库、池塘和海洋等水体系统；地下水环境

包括浅层地下水和深层地下水系统。

地表水体中的河流和径流型湖泊具有水流速度大、水交替强烈和更新周期短的水文特点；而闭流型湖泊、水库和沼泽则水流速度小或不流动，水更新周期长和水交替非常缓慢；海洋则具有水体体积巨大，水流动荡式运动、水交替极弱、水体物化环境垂向分层显著和水质盐度很高的水文环境特点。地表水体底积物质、生物和边界环境要素之间存在着密切的水力和物质联系，同时水的交替和循环又使地表水体与地下水、大气环境、土壤环境和人类社会之间发生着广泛而强烈的水量和物质交换，表现为各水体或环境系统之间的水量补排关系和污染物传输等作用。地表水体中的生物群落尤其是微生物对水中物质及污染物的迁移和转化有着重要的影响。

地下水环境由地下水和复杂的含水介质及其环境条件组成，具有水运动缓慢、更替极弱、水流分散和水与介质物质物能关系密切的特点，因埋藏深度不同其水力和环境条件也差异较大，浅层水或潜水层就具有较好的水力条件、开放性和交替条件。

水体中水的运动、稀释、化学反应、生物作用、吸附沉降和迁移可以使进入水体环境中的污染物浓度降低或无害化，称之为水体的自净作用。水体在自身组成与结构、水质和使用功能不受影响的条件下，可以通过自净作用承纳一定量的外来污染物，其数量称为水环境容量，其浓度单位表达式为：

$$E = (C_N - C_0) + KC_N Q \quad (1-2)$$

式中 E ——水环境容量， g ；

Q ——流量或体积， m^3/a ；

K ——净化率 $\% / a$ ；

C_N 、 C_0 ——环境标准和背景值， $\mu g/g$ 。

1.4.1.3 生态环境

生态环境系统是由生物群落和相关生存环境要素组成的自然综合体系；生态系统具有与环境相适应的特定的生物结构、生物多样性、物质和能量循环模式；任何可以定义的生物群落与其生存环境组成的体系都可视为一个生态系统。

生态环境系统的生物群落具有相对稳定的时空分布和营养结构，由无机生存环境要素与生产者、消费者和还原者组成物质和能量流动的特定结构模式。在自然条件下，生态环境在自我调节和外环境因素的相互作用中发生着稳定性不断增加、结构功能不断改变和自调节能力不断增强的生态演替过程，它是一个有方向和有规律的动态平衡发展过程。当生态环境中的物种的侵入或损伤、环境要素剧变和外部因素的强烈干扰超出了其自调节能力，生态环境系统的结构、功能及稳定性就遭到破坏，即产生生态平衡的破坏，生态学上称这种自调节能力的极限值为生态系统的阈值。对于污染物而言其阈值可用生态环境容量来表征，它是由生态环境的净化物质质量来确定的，可表示为：

$$Q = Brt + GKt \quad (1-3)$$

式中 Q ——研究生态环境单元的环境容量， $kg \cdot h^{-1}$ ；

t ——时间， h ；

B ——单元生物量， kg ；

r ——生物净化系数， $mg \cdot kg^{-1} h^{-1}$ ；

G ——非生物介质质量， kg ；

K ——介质的物理化学净化系数， $mg \cdot kg^{-1} h^{-1}$ 。

进入生态系统的污染物质，由于物理化学和生物的分解和无害化等净化作用，使污染物不断减少的能力用净化系数来表示，即对生态环境而言，纳污量不能超过其净化系数，才能保持生态系统的平衡，否则将产生污染物在生态环境中的逐渐积累，最终破坏生物多样性和生态平衡。

在生态环境中有两个以人类生活和生产活动为中心的综合生态环境系统，即城市生态系统和农业生态系统，其环境特征具有显著的社会环境属性，人在这种生态环境系统中具有优势生物种群和强烈的外部干扰因素的双重身份，既是生态环境保护的主体，也是污染物和干扰力的发生源，因此，人类社会对自然环境的保护就是保护人类自身及其生存环境。

1.4.2 废水的水环境效应

废水中含有大量的有毒有害物质，如果不加控制地排放，势必造成不良的环境效应。迄今为至，水环境一直是废水主要的和最终的排放环境，水环境污染已产生了普遍的环境危害，最主要的表现是水质恶化，水产品产量和品质下降。

1.4.2.1 水质恶化

废水中的大量污染物进入水体，超过水体的环境容量，最直接的影响就是水质污染，使水的使用价值降低或者丧失，对区域水资源的利用可能产生严重的影响，其中地表水质污染最为严重。废水中的有机物、微生物、悬浮物、无机盐、有机毒物和重金属元素对水的各种使用功能都可产生相应的功能危害。如病原微生物和有毒有害物质会导致人体致癌和致病；酸性可腐蚀输水管材；高硬度水可使纺织品和纸产品质量下降，并能引起锅炉快速积垢甚至爆炸；钠盐可引起植物的生理性干旱等等。当水中相应的污染物接近或超过各种用水功能的水质标准时，水的使用功能和使用价值就会降低或丧失，严重影响各行业的可用水量。河流水质污染使许多城市和地区丧失了主要的饮用水源、城市水源、工业水源甚至灌溉用水水源，加剧了本来就不足的水资源紧张局势。西安市临渭河长期缺水，武汉市枯水期长江水源中断等都是水质恶化的结果，水质恶化影响人体健康的现象就更为普遍。2001年中国废水排放总量620亿t，使80%的河段水质丧失了饮用和工业用水功能而仅能用于灌溉用水，比废水排放量416亿t的1997年河流水质劣Ⅲ类比例增加了9%，水质恶化成为废水排放量主要的环境效应。

1.4.2.2 水产品的产量和品质下降

水体污染对水产养殖业及捕捞业的影响也非常严重。陆地水体的普遍污染使许多水域或河段物种退化甚至生物绝迹成为死亡水域；污染物排入海洋使近海水域污染加重，海产品减少，赤潮频发，水产品质量下降。著名的日本水俣事件，就是水体中的污染物汞在水产品体内积累并甲基化使其毒性增加，人食用后产生食物中毒。中国在近海和湖泊中实行休渔期制度也是防止水产品产量持续减少的对策之一。

除了水中有毒有害污染物对水生生物的危害而影响其产量和品质之外，水体富营养化污染也对水生生物的生存条件产生严重威胁，植物营养物质可使水中的细菌和植物微生物大量繁殖，传播水生动物疾病，有机物的大量分解使水体缺氧，都严重危害水生动物和鱼类的正常繁育，甚至使吸氧动物窒息死亡，还可导致水体还原性反应产生污染物及水中物质的还原态含量增加，加剧水质的恶化。

此外，废水的水环境效应还有地下水质的普遍污染、湖泊和水库的富营养化加速水体淤积和衰亡、水体生态系统的破坏、水质污染和水环境危害制约经济和社会发展所产生的巨大经济损失等。

1.4.3 废水的土壤环境效应

缺乏科学管理的废水灌溉、废水的土地处理方法以及废水排放渠系的渗漏都可发生土壤环境的污染，从而产生危害性的土壤环境效应。

(1) 重金属污染破坏土壤肥力 重金属对土壤微生物有明显毒理性质，可使大多数有益微生物数量和活性减退，妨碍土壤养分的生物转化。如固 N 菌和硝化菌对重金属很敏感，Cr、Ni、Cu、Zn、B、Cd 等都对土壤特性和作物生长存在不良影响。有些重金属可在土壤和植物体中积累，降低土壤活性和农产品质量。在各类工业废水中常含有较高的重金属污染负荷，其土壤污染危害明显大于生活废水。

(2) 酸、碱、盐类影响土壤性状 一般情况下，酸、碱、盐类污染物进入土壤环境，对土壤的物理化学性状有不利影响。pH 值小于 6.5 或大于 8.5 可使大多数作物生长产生危害；Na⁺ 及高含盐量还会引起土壤胶体分散，团粒结构破坏，透气性、渗透性和持水性变差，不利于营养和水分的传输。

(3) 有机污染物对土壤环境的影响 大部分耗氧有机物通过化学、光化学和生物化学分解作用能快速降解和无害化，还可为土壤提供 N、P、K、S 及有机营养物质，增加土壤肥力；而石油、多环烃、多氯联苯、酚类、硝基化的有机污染物及化学农药等难降解有机物可抑制作物生长和产生植物毒损。

1.4.4 废水的生态效应

废水对生态系统的污染效应，主要表现在对生命体的影响和对生存环境的改变两个方面。水污染对生态系统的危害程度，主要取决于污染物的毒性和浓度、生物的抗性和适应性、污染对生物生存环境条件改变的性质和强度以及生态系统的稳定性。

(1) 污染物的毒性 对生物有较大毒理作用的污染物主要是金属和有机毒性化合物，通常也作为环境污染优先污染物。金属的毒性一般是还原态离子、脂溶性有机金属络合物和有机金属化合物较大。金属的毒性主要是金属离子与生物体大分子中的活性点位结合或发生离子代换，改变和破坏生物活性大分子正常的生理和代谢功能，使生物体表现中毒征象甚至死亡。主要的毒性金属的潜在毒性顺序见表 1-13^[8]。

表 1-13 金属潜在毒性的顺序

顺序	元素	沸点°K	元素	离子化电压	°K/V	结果	变更的主要理由
1	Hg	630	Hg	10.44	Hg	Hg	
2	Cd	1 038	Zn	9.39	Cd	Cd	
3	Zn	1 180	Au	9.23	Zn	Pb	Pb 的挥发性 ↑
4	Yb	1 467	Ir	9.1	Sb	Cr	CrO ₃ 的挥发性 ↑
5	Tl	1 730	Pt	9.0	Yb	Tl	Tl ⁺ 安定 ↑
6	Bi	1 833	Cd	8.99	Bi	Sb	
7	Eu	1 870	Os	8.7	Pb	Os	OSO ₄ 的沸点 ↑
8	Pb	2 013	Sb	8.64	Pb	Zn	生命元素活性 ↓
9	Sb	2 023	Pd	8.34	Tl	Mn	
10	Sm	2 064	W	7.98	Mn	Ag	
11	Tm	2 220	Ge	7.90	Ag	Ni	平面四配位 ↑
12	Mn	2 235	Tn	7.89	Au	Au	
13	In	2 354	Re	7.88	Sn	Sn	
14	Ag	2 485	Fe	7.87	Tm	Bi	Bi ³⁺ ↓
15	Sr	2 543	Co	7.86	Cu	Cu	
16	Au	2 676	Cu	7.72	Bu	Fe	平面四配位 ↑
17	Dy	2 835	Ni	7.64	Fe	Pd	
18	Cu	2 840	Ag	7.58	Ge	V	V ₂ O ₅ 的挥发性 ↑
19	Cr	2 945	Rh	7.46	Ni	Ge	
20	Ho	2 968	Mn	7.44	Co	Co	