

# 第一章 绪 论

## 第一节 全球水资源简况

水是人类及一切生物赖以生存的必不可少的物质基础，同时也是工农业生产、社会经济发展和生态环境改善不可替代的极为宝贵的自然资源。水既是人体组成的基本要素，又是新陈代谢的主要介质。每人每天至少需要 2~2.5 L 水，一般需要 5 L 水。若考虑到卫生方面的要求，每人每天需水量远不止这个数字。据统计，在发展中国家，城乡每人每天平均用水量在 40~350 L 之间；在发达国家，一些现代化城市每人每天平均用水量高达 600~830 L 之间。可以说，没有水就没有生命，更没有社会的进步和繁荣。水是人类一切文明之源。

从数量上看，地球上的水量是非常丰富的。地球 71% 的面积被水覆盖，水的总量估计为  $1.39 \times 10^{10}$  亿  $m^3$ ，其中海洋水体约占 97.41% 冰帽和冰河水体约占 1.984% 地下水约占 0.592% 湖泊水体约占 0.007% 土壤水体约占 0.005% 大气中水蒸气约占 0.001% 河流水体约占 0.0001% 生物体中水约占 0.0001%。但这些水体中淡水总量仅为  $0.036 \times 10^{10}$  亿  $m^3$  除冰川和冰帽外，可利用的淡水总量不到全球总储水量的 1%。这部分淡水与人类的关系最为密切，具有极其重要的社会、经济和环境价值。虽然淡水在较长时间内可以保持平衡，但在一定时间、空间范围内，它的数量却是有限的，并不像有些人想象的那样可以取之不尽，用之不竭。从未来的发展趋势看，由于社会对水的需求不断增加，而自然界所能提供的可利用的水资源又有一定限度，突出的供需矛盾使水资源已成为社会经济发展的重要制约因素。近年来，由于全球人口增长和社会经济发展，需水量增长速度惊人，用水的浪费和水资源的污染，使水资源日益短缺。种种迹象表明，水的问题已经成为严重的社会问题。1992 年初有 156 个国家代表参加的“世界水资源与环境大会”提出了警告：“水资源短缺已成为当今人类面临的最严峻挑战之一。至本世纪末及 21 世纪初 此种情况更令人忧虑”。2000 年 3 月 17 日国际水问题联合会在荷兰召开了“世界水问题论坛”会议，就水的安全性问题进一步向人们提出警告，各国政府提出了明确的行动纲领。

20 世纪 60 年代后期和 20 世纪 70 年代初期，非洲撒哈拉地区发生大干旱，造成了非洲大饥荒 美国 1976~1977 年大旱及 1988 年北美大旱，影响波及美国 60% 的县 使人们对水资源的问题有了深切认识。目前，印度、中国耗用水量分别达到最大可利用量和安全极限量的 70%。阿拉伯地区 22 个地处沙漠的国家，水资源利用率已超达 85%。埃及和以色列基本上已使用了可以利用的全部水资源量。据联合国预测，水将成为本世纪最有争议的城市问题。全世界将有 10 多亿人得不到清洁的饮用水，17 亿人缺乏起码的公共卫生用水。水量短缺严重，供需矛盾尖锐将是全球水资源的主要表现之一。

一方面水资源日益短缺，而另一方面水资源浪费现象又特别严重。统计结果表明，从 1900~1975 年，世界人口大约翻了一番，年用水量则由约  $4 \times 10^{11} m^3$  增加到  $3 \times 10^{12} m^3$  增长

了约 6.5 倍；其中农业用水约增加了 5 倍；城市生活用水约增长 12 倍；工业用水约增加了 20 倍。特别是从 20 世纪 60 年代开始，由于城市人口的增长、耗水量大的新兴工业的建立，全世界用水量增长约 1 倍。农业灌溉一直采用粗放式的漫灌方式，严重浪费水资源。随着社会、经济、技术和城市化的发展，排放到环境中的污染物量日益增多，造成水体污染日益严重。水资源污染造成的“水质型缺水”加剧了水资源短缺的矛盾，加剧了居民生活用水的紧张和不安全性。

## 第二节 我国水资源概况

### 一、我国水资源总量

我国水资源总量约为 28124 亿  $m^3$ ，其中河川年平均总径流量约 27115 亿  $m^3$ ，排在世界第六位，继巴西 69500 亿  $m^3$ 、前苏联 65400 亿  $m^3$ 、美国 30560 亿  $m^3$ 、加拿大 29114 亿  $m^3$  和印尼 28113 亿  $m^3$  之后。但我国人均占有水资源量并不丰富，河川年径流量仅为 2327  $m^3$ ，相当于世界人均占有量的 1/4，美国人均占有量的 1/6，前苏联人均占有量的 1/8。世界人均占有年径流量最高的国家是加拿大，人均占有年径流量高达 14.93 万  $m^3$ /人，是我国人均占有年径流量的近 64 倍。我国人均占有年径流量在世界 149 个国家中，为世界人均水资源缺乏的 13 个国家之一。由于我国受所处地理位置、气候、降水、地形、地貌等自然条件以及人口、耕地与矿产资源分布的影响，水资源具有与众不同的特点。

### 二、我国水资源的特征

#### （一）空间分布特征

##### 1. 降水、河流分布的不均性

我国水资源空间分布的特征主要表现为：降水和河川径流的地区分布不均，水土资源组合很不平衡。北方水资源贫乏，南方水资源较丰富，南北相差悬殊。长江及其以南地区的流域面积占全国总面积的 36.5%，却拥有占全国 80.9% 的水资源总量。西北内陆地区及额尔齐斯河流域面积占全国的 63.5%，拥有的水资源量仅占全国的 4.6%。按面积平均，北方的水资源量均低于全国平均水平。据水利部水资源调查评价估算，我国各省、自治区和直辖市的水资源量最多的是西藏、四川、云南和广西等省区，每年拥有的水资源量均在 1800 亿  $m^3$  以上；宁夏、天津、上海、北京、山西、河北和甘肃等省市，每年拥有的水资源量均在 280 亿  $m^3$  以下；宁夏最低，年水资源量仅 10 亿  $m^3$ 。

##### 2. 地下水资源分布的不均匀性

作为水资源的重要组成部分的地下水资源量的分布，受地形及其主要补给来源——降水量的制约。我国是一个地域辽阔、地形复杂、多山分布的国家，山丘区约占全国面积的 69%，平原和盆地约占 31%。地形特点是西高东低，山脉纵横交织，构成了我国地形的基本骨架。东西向排列的昆仑山——秦岭山脉，成为我国南北方的分界线，对地下水资源量的区域分布产生了深刻影响。正是地形上、降水上的分布差异性，使我国不仅在地表水资源上表现为南多北少的局面，而且地下水资源仍具有南方丰富、北方贫乏的空间分布特征。占全国总面积 60% 的北方地区，地下水天然资源量约 260  $km^3/a$ ，约占全国地下水天然资源量的 30%，而北方地下水开采资源约 140  $km^3/a$ ，占全国地下水开采量的 49%。特别是占全国约

1/3 面积的西北地区，水资源量仅有  $220\text{km}^3/\text{a}$  只占全国的 8%，地下水天然资源量和开采资源量分别为  $110\text{km}^3/\text{a}$  和  $30\text{km}^3/\text{a}$ ，均占全国地下水天然资源量和开采资源量的 13%。而东南及中南地区，面积仅占全国的 13% 但水资源量占全国的 38% 地下水天然资源量和开采资源量分别为  $260\text{km}^3/\text{a}$  和  $26\text{km}^3/\text{a}$ ，均约占全国地下水天然资源量和开采资源量的 30%。南、北地区在地下水资源量上的差异十分明显。

## （二）时间分布特征

我国水资源受降水影响，其时间分布具有年内、年际变化大，枯水年和丰水年连续发生的特点。许多河流发生过 3~8 年的连丰、连枯期，如黄河在 1922~1932 年连续 11 年枯水，1943~1951 年连续 9 年丰水。我国最大年降水量与最小年降水量之间相差悬殊。南方地区最大年降水量一般是最小年降水量的 2~4 倍，北方地区则达 3~6 倍。长江以南地区由南往北雨季为 3~6 月至 4~7 月，降水量占全年的 50%~60%。长江以北地区雨季为 6~9 月，降水量占全年的 70%~80%。水资源年际变化大，年内分配不均，不仅是我国经常发生季节性缺水，而且是许多河流发生灾难性水环境问题的原因。水资源的上述特点，导致我国国土的大部分地区都出现水资源短缺和水环境问题，并成为制约 21 世纪中国社会经济持续发展的重要因素之一。因此，认识我国水资源特点，有效地加以调控和保护，以促进水资源与人口、社会、经济和环境的协调发展，是解决 21 世纪我国水问题的关键。

## （三）水资源与人口、耕地分布不匹配的特征

我国水资源空间上分布的不平衡性与全国的人口和耕地分布上的差异性，构成了水资源与人口和耕地不匹配的基本特征。

### 1. 水资源与人口组合特征

北方地区人口占全国总人口的 2/5 强，但水资源占有量不足全国水资源总量的 1/5，南方地区人口占全国的 3/5，而水资源量为全国的 4/5，北方地区人均水资源拥有量为  $1127\text{m}^3$  仅为南方地区人均的 1/3。在全国人均水量不足  $1000\text{m}^3$  的 10 个省区中，北方地区即占了 8 个，而且主要集中在华北区；在全国人均水量超过  $2000\text{m}^3$  的 13 个省区中，南方地区占了 10 个，而北方地区只有 3 个，人均水量在  $1000\sim 2000\text{m}^3$  的 6 个省区中，南、北两方各有 3 个。北方地区的华北区人口稠密，其人口占全国的 26%，但水资源量仅占全国的 6%，人均水量仅为  $556\text{m}^3$ ，是西北区的 1/5，是东北区的 1/3 强，不足全国人均的 1/4。因此，该区目前已成为全国缺水最严重地区之一；南方地区的西南区人口不足全国的 20%，而水资源量却占全国的 46%，全区人均水量高达  $5722\text{m}^3$ ，是华北区的 10 倍。

### 2. 水资源与耕地组合特征

北方地区耕地面积占全国耕地面积的 3/5，而水资源总量仅占全国的 1/5，南方地区耕地面积占全国的 2/5，而水资源量却占全国的 4/5。南方地区耕地每公顷水量为  $28695\text{m}^3$ ，而北方地区只有  $9465\text{m}^3$ ，前者是后者的 3 倍。在全国耕地每公顷水量不足  $1500\text{m}^3$  的 15 个省区中，北方地区占了 13 个；耕地每公顷水量超过  $30000\text{m}^3$  的 11 个省区中，北方地区仅有 1 个，耕地每公顷水量为  $15000\sim 30000\text{m}^3$  的有 3 个省区，北方地区占了 1 个。由上所述，我国水资源与人口和耕地组合状况很不理想。尤其是北方地区耕地多和人口稠密，而水资源占有量低，同时稠密的人口和社会经济发展带来大量的污染物造成有限的水资源质量下降。可见水是我国许多地区今后社会经济可持续发展的主要制约因素，应全面深入开展水资源优化

配置和水资源保护规划的研究工作。

### 第三节 我国面临的主要水资源问题

根据我国 21 世纪社会经济发展总目标和水资源供求发展态势，我国今后将面临着以下主要水资源问题。

#### 1. 水资源供求矛盾进一步加剧

由于人口持续增长和经济高速发展，工农业和人民生活用水将持续增加，使目前存在的水资源供求矛盾更趋激化。其主要表现在：一是供求总量更加不平衡，需水量增长速度超过可供水量的增长速度，供水状况趋于恶化；二是北方地区和沿海工业发达地区等地域性水资源供求矛盾日趋恶化，将严重制约社会经济的发展；三是巨大的人口压力对发展耕地灌溉事业提出更加紧迫的要求，而工业城市将是增加用水量的主要部门。部门用水矛盾更加尖锐。据预测 到下世纪 30 年代在需水量实现零增长之前，全国需水总量将可能达到 7000 亿  $m^3$ ，比目前需水量要增加 2000 亿  $m^3$  左右，平均每年需增加可供水量近 100 亿  $m^3$  这需要投入庞大的资金，要解决一系列复杂的社会环境问题，可见任务之艰巨。

#### 2. 水资源浪费与用水效益问题

我国目前水资源浪费严重，用水效益低下，大大加剧了全国性水的供需矛盾。据统计，目前农业灌溉缺水 300 亿  $m^3$  左右 工业、城市缺水约 58 亿  $m^3$ 。在 600 余座城市中有 300 多座城市缺水，较严重缺水的有 110 多座，年损失产值 1600 亿元，并不同程度影响城市居民生活。可是，目前各用水部门较普遍存在浪费现象，水资源未能得到有效合理地利用，用水效益不高。农业用水效益低下，渠灌区水的利用率仅 0.4~0.5 农民仍然习惯于大水漫灌 新的节水灌溉技术推广进度缓慢。目前全世界灌溉面积中，滴、喷灌面积已占总灌溉面积 1/10，而我国至 1990 年只发展到 66.67 万  $hm^2$  仅占总灌溉面积的 1.4% 左右。近年来 节水灌溉技术推广力度较大，但所占比例仍然较低。不少学者研究指出，我国现在农业用水，如果能积极采取有效节水措施，可望节约用水量近 1000 亿  $m^3$  潜力十分巨大。

工业用水仍然浪费严重。我国正处在工业化初期阶段，大量工业生产设备陈旧，生产工艺落后。工业结构中新兴技术产业比重低，加上管理水平低，因此绝大多数地区工业单位产品耗水率高于先进国家的数倍甚至十余倍。水的重复利用率也低得多，全国只有青岛、大连、北京、天津、西安等缺水城市的水重复利用率达到 70% 以上 大批城市在 30%~50% 之间，而日本、美国、前苏联等在 20 世纪 80 年代用水的重复利用率均在 75% 以上。如果我国工业用水效率能达到上述国家的水平，工业用水紧张局面可以得到一定程度的缓和。

目前城市生活水平因各种条件限制，尚处于较低水平，人均日用水量仅达到 180L 左右 县、镇人均日用水量更低 只有 50~60L 左右，但还是存在相当程度的浪费现象。因此城市生活用水也有节约的潜力。随着将来城市规模的进一步扩大，城市生活节水对缓解城市供水矛盾更具有重大意义。

#### 3. 水环境进一步恶化的趋势尚未遏制

出现水资源紧张局面，除当地水资源短缺和供水工程供水能力不能满足需水要求外，水资源受到严重污染而不能继续作为供水水源也是重要原因。目前，全国污水排放量达到数百

亿吨,80%污水未经处理就直接排入江河湖海。全国90%以上的城市水环境恶化,城市所在附近的河流或河段已多成为排污沟渠。城市地区的地表水和地下水水质已严重恶化。随着乡镇企业的快速发展,使水质污染不断向广大农村蔓延。严重的水质污染问题,不仅使水资源无法利用,也使农产品受到污染,影响人民健康。在过去地区间存在水源分配的矛盾尚未得到很好解决的情况下,现在又增加了地区间排放污水的矛盾,增加了地区间的社会冲突和社会不安定因素。为了保证我国社会经济持续发展,我们必须把水资源保护放在重要地位。

#### 4. 水资源管理面临艰巨任务

与先进国家相比较,我国水资源管理水平落后,水利工程的“重建轻管”现象依然未得到扭转。尽管国家颁布了《水法》等有关法律法规,但因部门间利益、地区间利益冲突,各种保护主义盛行,又缺乏行之有效的法律实施细则,致使水管理工作进展缓慢。因此,要强化水资源系统管理,克服部门保护主义和分散管理与多头管理的弊端,对地表水、地下水和空中水、给水和排水、供水和需水由一个管理机构实行统一全面管理。通过管理提高用水效益,缓解我国水资源供求矛盾,以确保社会、经济、环境的协调发展,奠定社会经济持续发展的物质基础。

## 第二章 水资源质量保护

### 第一节 水污染及水体自净

#### 一、水体污染物及其危害和来源

##### (一) 水体中的主要污染物及危害

水资源质量保护中，研究的水体污染物质主要有十一大类：

##### 1. 需氧有机物质

需氧有机物质包括碳水化合物、蛋白质、油脂、氨基酸、脂肪酸、脂类等有机物质。这些物质在被水体中微生物分解过程中，要消耗水中的溶解氧，故而被称为需氧有机物质。水中有机物的种类繁多，成分复杂，可被水中微生物降解的程度也不一样。水质检测中常以总有机碳(TOC)、总需氧量(TOD)两项参数表示水中溶解性有机物的总量。而参数生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)是表示水中可被生物降解的有机物数量；化学需氧量(COD)是用不同氧化剂在规定的条件下测定水中可被氧化的物质需氧量的总和。需氧有机物质可造成水体溶解氧亏缺，影响鱼类和其他水生生物生长，甚至威胁其生存。水中溶解氧耗尽后，有机物将转入厌氧分解，产生硫化氢、氨和硫醇等难闻气味，水色变黑、水质恶化，除了厌氧微生物之外，其他生物都不能生存。

水中需氧有机物来源广、数量大、污染也较严重。生活污水和造纸厂、石油、化工、食品等工业废水含有大量的有机物，其中需氧有机物尤多。

##### 2. 植物营养物

所谓植物营养物主要是指氮、磷、钾、硫及其化合物。由于水体接纳了含有大量能刺激植物生物生长的氮、磷的生活废水以及某些工业废水和农田排水。含有大量氮、磷的废水进入水体后，在微生物的作用下，分解为可供水中藻类吸收利用的形式，因而藻类大量繁殖，成为水体中的优势种群。水面因而呈现不同的颜色，成为“水华”。溶解氧变化很大，上层处于过饱和状态；中层处于缺氧状态；底层则处于厌氧状态，这对鱼类生长都是不利的。水体中溶解性气体过饱和，其分压就会增加，严重时可引起鱼体循环系统中的溶解气体从血液中逸出形成气栓，阻碍血液流通，使鱼类死亡。这是水生生物的“气泡病”。此外，藻类会堵塞鱼鳃，影响鱼类呼吸。因此，随着水体营养化程度的加剧，鱼产量逐渐减小，在藻类大量繁殖季节，会出现大批死鱼的现象。

藻类死亡后，沉入水底，在厌氧条件下腐烂、分解，又将氮、磷等植物重新释放进入水中，再给藻类利用。这样周而复始，形成了氮、磷等植物营养物质在水体内部的物质循环，使植物营养物质长期保存在水体中。所以缓流水体一旦出现富营养化，即使切断外界营养物质的来源，水体还是很难恢复，这是水体富营养化的重要特征。

### 3. 重金属

水资源质量保护中研究的重金属主要指汞、镉、铅、铬以及非金属砷等生物毒性显著的重元素，通常将这五种重元素称为“五毒物质”。重金属污染物质最主要的特征是：在水中不能被微生物降解，而只能发生各种形态之间的相互转化，以及分散和富集的过程。

汞为“五毒”之首，受到汞污染后的水体，一部分由于挥发而进入大气，大部分则沉降进入底泥。底泥中的汞，不论呈何种形态，都会直接或间接地在微生物作用下转化为甲基汞或二甲基汞。二甲基汞可溶解于水，因此又从底泥回到水中。水中生物摄入的二甲基汞，可在体内积累，并通过食物链不断富集。受汞污染的水体中的鱼体内，甲基汞浓度可比水中高达万倍。通过挥发、溶解、甲基化、沉降、降水冲洗等作用，汞在大气、土壤与水三者之间不断进行交换和转移。

汞蒸气有高度扩散性、较大脂溶性，可经呼吸道进入人体，主要在脑和肾中蓄积。慢性汞中毒的主要临床症状是神经性头疼、头晕、肢体麻木和疼痛、肌肉震颤、运动失调等。吸入大量汞蒸气会出现急性汞中毒，其症状为肝炎、肾炎、蛋白尿、血尿和尿毒症等。

水体中镉的主要来源是铅锌矿废水和有关工业排放的废水。水中镉干扰水生脊椎动物的新陈代谢，使肠道吸收铁能力减低，破坏红细胞，引起贫血症。此外，镉在植物生长过程中产生毒害作用。

水体中的铅主要来源于冶炼、制造和使用铅制品的工矿企业向水体排放的废水和废渣，尤其以有色金属的冶炼过程排放的为多。

铅是对人体有害的元素。由饮水、食物经消化道进入人体。进入体内的铅绝大部分形成不容性的磷酸铅沉积于骨骼中。当人生病或不适时，血液中酸碱失去平衡，骨骼中铅可再变为可溶性磷酸氢铅，进入血液，引起内源性铅中毒，受害器官主要是骨髓造血系统和神经系统，出现贫血等一系列症状。

水体中铬的主要来源是冶炼、耐火材料、电镀、制革、颜料和化工等工矿企业排出的“三废”。

铬是人体必需的微量元素，参与体内的脂类代谢和胆固醇分解与排泄。但三价铬和六价铬都对人体有毒，通常认为六价铬的毒性比三价铬约高 100 倍。铬进入体内易在肺内蓄积，有致畸性和致癌性，此外，还可引起皮肤溃疡、鼻穿孔等。

砷进入人体可在各组织、器官特别易在毛发、指甲中蓄积引起慢性砷中毒。

砷的毒性作用主要是  $As^{3+}$  与人体细胞中酶系统的结合，使细胞代谢失调，营养发生障碍，对神经细胞的危害最大。 $As^{3+}$  还能通过血液循环，作用与毛细血管壁，使其通透性增大，麻痹毛细血管，造成组织营养障碍，产生急性或慢性中毒。慢性砷中毒有消化系统症状（食欲不振、胃痛、恶心、肝肿大）神经系统症状（神经衰弱症状、多发性神经炎）和皮肤病等。其中尤其以皮肤病变突出，主要表现为皮肤色素高度沉着和皮肤高度角质化，发生龟裂性溃疡，有时可恶变成皮肤原位癌。急性砷中毒一般是由误食砷化物所致。砷化氢是剧毒气体，是一种溶血性毒物，人体吸收后，严重者全身呈青铜色，鼻出血，甚至全身出血，最终因尿毒症而死亡。砷还有致癌作用，能引起皮肤癌。是否能够引起肺癌和肝癌，尚未通过动物实验得到证实。砷对动物有致畸作用，对人体是否也有同样的作用尚待证实。

#### 4 农药

农药是防治对人类和植物的病虫害的有效药物，在农牧业的增产、采收和保存以及人类传染病的预防和控制等方面都起很大的作用。一般所谓农药包括有许多种类：除了最常见的杀虫剂外，还有除锈剂、灭真菌剂、熏剂和灭鼠剂等。造成环境污染并对人体有害的农药主要是一些有机氯农药和含铅、砷、汞等重金属制剂，以及某些除锈剂。

农药对人体健康影响很大。它主要是通过食物进入人体，在脂肪和肝脏中积累，从而影响正常的生理活动。它对人体的危害主要是对神经系统的影响、致癌作用、对肝脏的影响、诱发突变及慢性中毒。另外，农药对害虫的天敌和其他益虫、益鸟也有杀伤作用。施用农药还会使害虫产生抗药性，因而增加用药的次数和数量，更加重了对环境污染和危害。

#### 5. 石油类

石油及其制品是水体重要污染物质之一，港口、河口和近海等水域中的石油污染更为突出。近年来，因人类活动，全世界每年排入海洋的石油及制品可高达数百万吨至上千万吨，约占世界石油总产量的5%。其中通过河流排入海洋的废油约有500万t，船舶排放和事故溢油约150万t，海底油田泄漏和井喷事故排放约100万t。另外，逸入大气中的石油烃每年约有400万t，它最后下沉到地球表面。

水体油污染主要是炼油和石油化学工业排放的含油废水、运油车、船和意外事件的溢油及清洗废水、海上采油等造成的。压舱水含油率为1%，洗船水含油率达3%。这是内河港湾上面经常覆盖大量油膜之原因。

石油及其制品进入水体之后，可发生复杂的物理和化学变化，如扩展、蒸发，溶解、卤化、光化学氧化，不易氧化分解的形成沥青块而沉入水底。

石油污染给环境带来严重的后果，这不仅是因为石油的各种成分都有一定的毒性，而且因为它具有破坏生物的正常生活环境，造成生物机能障碍的物理作用。

#### 6. 酚类

酚是一类含苯环化合物，可分单元酚，多元酚；也可按其性质分为挥发性酚和非挥发性酚。

水中酚类主要来源是炼焦、钢铁、有机合成、化工、煤气、染料、制药、造纸、印染以及防腐剂制造等工业排出的废水。目前酚类是水体的第一位污染物，所以人们对酚类污染很重视。

水体中的酚类的主要净化途径有：分解、挥发、化学氧化、生物化学氧化等，其中以生物化学氧化为主。

酚虽然易被分解，但水体中酚负荷超量时亦造成水污染。水体低浓度酚影响鱼类生殖回游，仅0.1~0.2mg/L时，鱼肉就有异味，降低食用价值；浓度高时可使鱼类大量死亡，甚至绝迹。

酚类属于高毒类，为细胞原浆毒物。低浓度能使蛋白质变性，高浓度能使蛋白质沉淀，对各种细胞有直接损害，对皮肤和粘膜有强烈腐蚀作用，苯酚（石炭酸）是常用的杀菌、消毒的药剂。长期饮用被酚污染的水源，可引起头昏、出疹、瘙痒、贫血及各种神经系统症状，甚至中毒。

#### 7. 氰化物

氰化物分两类：一类为无机氰，如氢氰酸及其盐类如氰化钠、氰化钾等；一类为有机氰或

腈 如丙烯、乙腈等。氰化物在工业中应用广泛 但由于它有剧毒 因而其污染问题引起人们高度的重视。

氰离子的一个重要特点是容易与某金属形成络合物，可按照络合物形成体的化合价和它的配位数组成不同类型的氰络合物。腈是烃基与氰基的碳原子相连接的化合物。在常温下 低碳数的是液体 高碳数的是固体。腈有特殊的臭味 毒性比氢氰酸 HCN 低得多。

氰化物多数是人工制造的 但也有少量存在与天然物质中 如苦杏仁、琵琶仁、桃仁、木薯和白果等。污染水体的主要来源为化工、冶金、炼焦、电镀和选矿等工业废水。这些废水除含有大量氰化物外，往往还含有酚类、重金属或其他污染物，其危害往往也不亚于氰化物。

天然水中不含氰化物 如有发现 即属污染。水体中的氰化物不仅可被稀释 也可被水解生成氢氰酸，然后挥发进入大气，水中的氰化物也就逐渐消失。

氰化物是剧毒物质。它对鱼类及其他水生生物的危害较大，水中氰化物含量折合成氰离子 浓度达  $0.04\sim 0.1\text{mg/L}$  时，能使鱼类致死。对浮游生物和甲壳类生物的氰离子最大容许浓度为  $0.01\text{mg/L}$ 。氰化物在水中 对鱼类的毒性还与水的 pH 值、溶解氧及其他金属离子的存在有关。此外，含氰废水还会造成农业减产，牲畜死亡。

简单的氰化物经口、呼吸道或皮肤进入人体内极易被吸收，氰化物进入胃内，在胃酸的作用下 立即水解为氢氰酸而被吸收 进入血液。细胞色素氧化酶的  $\text{Fe}^{3+}$  与血液中的氰离子结合 生成氰化高铁细胞色素氧化酶 使  $\text{Fe}^{3+}$  丧失传递电子的能力，造成呼吸链中断而使细胞窒息死亡。由于呼吸中枢对组织缺氧特别敏感 急性氰中毒的病人 主要为呼吸困难 继而可出现痉挛，呼吸衰竭往往是致死的主要原因。

#### 8. 热

热污染是指人类产生的一种过剩能量排入水体，使水体升温影响水生态系统结构的变化，造成水质恶化的一种污染。水体热污染主要来源于工业冷却水。其中以动力工业为主，其次为冶金、化工、石油、造纸和机械工业。据美国统计 动力工业冷却水量占全国工业冷却水量的 80% 以上。

水体热污染的直接效应是使水中溶解氧发生显著变化。核电站冷却水常常导致受纳水体溶解性气体过饱和，从而使鱼类等水生生物患气泡病。美国皮尔哥里姆核电厂热冷却水使受纳水渠总溶解性气体饱和度常常高于 120%，使油鲱患气泡病。更为常见的是随水温升高 水中溶解氧下降 对水生生物也是一种威胁。

水温升高，水中化学反应和生化反应速率也随之提高，许多有毒物质的毒性增强，如氰化物、重金属离子 水体热污染可使水生生物群落、种群结构发生剧烈变化 有的消失 有的发展 如  $20^{\circ}\text{C}$  的河流中，硅藻为优势种； $30^{\circ}\text{C}$  时就转变成绿藻为优势种； $35\sim 40^{\circ}\text{C}$  时蓝藻就大量繁殖起来。如果水温在短时间升高  $5^{\circ}\text{C}$  左右，鱼类生活受到威胁，甚至死亡。

随着世界能源消耗不断增加，热污染问题也将日益严重。遗憾的是目前对此尚未引起足够的重视。

#### 9. 酸碱及一般无机盐类

酸性废水主要来自矿山排水、冶金、金属加工酸洗废水和酸雨等。碱性废水主要来自碱法造纸、人造纤维、制碱、制革等工业废水。酸、碱废水彼此中和 可产生各种盐类 它们分别与地表物质反应也能生成一般无机盐类，所以酸和碱的污染，也伴随着无机盐类污染。

酸、碱废水破坏水体的自然缓冲作用，消灭或抑制细菌及微生物的生长，妨碍水体的自净功能，腐蚀管道和船舶。酸碱污染不仅能改变水体的 pH 值，而且可大大增加水中的一般无机盐类和水的硬度。

#### 10. 放射性物质

放射性物质在化工、冶金、医学、农业等行业使用，并随污水排入水体，形成放射性污染。污染水体的最危险的放射性物质有铯-90，铯-137 等，这些物质半衰期长，化学性能与组成人体的主要元素钙、钾相似，经水和食物进入人体后，能在一定部位积累，增加对人体的放射性辐照，可引起遗传变异或癌症。

#### 11. 病原微生物和致癌物

水体中病原微生物主要来自生活污水、医院废水、制革、屠宰、洗毛等工业废水，以及牧畜污水。病原微生物有三类：病菌即可引起疾病的细菌，如大肠杆菌、痢疾杆菌等；病毒一般没有细胞结构，但有遗传、变异、共生、干扰生命现象的作用，如麻疹、流行性感音等；寄生虫即动物寄生物的总称，如疟原虫、血吸虫等。病原微生物是水体污染中主要的污染物。

根据流行病学调查结果认为，人类癌症的 80%~90%是由化学物质、病毒和放射性物质等环境因素引起的，其中以化学物质为主。目前已知有上千种化学致癌物质，这些化学致癌物质一般分为三大类：多环芳烃、杂环化合物和芳香胺类。至少有 20 多种多环芳烃有致癌作用，苯并芘(a)是其中最具有代表性的，它能引起皮肤癌和肺癌等。黄曲霉素是黄曲霉的一种代谢产物，有强致癌性，可引起肝癌等，它是一种杂环化合物。芳香胺中有  $\alpha$ -萘胺、 $\beta$ -萘胺、联苯胺等可引起肝癌、膀胱癌等。

水中致癌物质来源很广。如多环芳烃来自焦化厂、煤气厂、石油精炼厂。大气中的致癌物质通过降水、降尘进入水体。一些工业废水，如石棉开采、金属冶炼等将致癌化合物排入水体，特别是人工合成高分子物质，进入水体后，危害水生生物。据报道，鱼类中的突变率很高，癌变率也高，这些都值得注意。

### (二) 水体污染物质的主要来源

造成天然水体污染的原因是多方面的，其主要原因有以下几个方面：

#### 1. 工业废水

工矿企业生产过程的每个环节都有可能产生废水，即所谓工业废水。其特点是：量大、种类繁多、成分复杂、毒性强，并且净化和处理均较困难。其中钢铁、焦化和炼油厂排出含酚类化合物与氰化物，化工、化纤、化肥、农药、制革和造纸等工厂排出的砷、汞、铬、农药等有害有毒物质，印染、造纸、制碱、矿山开采等工矿企业排出各种有色、异味、油类、泡沫和漂浮物的废水，动力工业排出的高温冷却水能恶化水体的物理性质（水温升高、颜色异常、异味、水体感官特性变化等）。

工业废水是目前世界范围内水污染的主要污染源。

#### 2. 农田排水

工厂生产了大量的杀虫剂、杀菌剂、除锈剂和化肥以及农家肥等，专供农田、森林使用。这些物质被使用后除被生物吸收、挥发、分解之外，大部分残留在农田的土壤和水中，然后随农田排水和地表径流进入水体，造成污染。挥发进入大气中的有机物质、植物营养物（氮、磷）、农药等主要来源于农田排水。从长江水质监测实践中得知，在雨季和农田耕作繁忙季节

中，长江水中的有机氯农药含量往往上升，约为枯水期和农闲时节的二倍之多。

### 3. 城市污水

城市污水包括：生活污水、工业废水和降水初期的城市地表径流。城市每日排出大量污水，其成分复杂，主要是病原微生物、需氧有机物、植物营养物（氮、磷）和悬浮物等。

随着城市的发展，城市污水的演变可分为 3 个阶段，即病原污染期、水体恶臭期、新污染期。

(1) 在病原污染期中，城市污水主要成分生活污水，它含有大量病原微生物，排入水体后往往引起大规模传染病的蔓延。

(2) 在水体恶臭期中，随着城市工业的发展和人口的集中，城市排水体制不能适应城市发展的需要，一些工业废水和地面径流排入城市污水管道中，使城市污水量和成分不断地增加和复杂，特别是可进行生物降解的有机物大量增加，造成水体缺氧，水生生物绝迹。这是水体恶臭期的状况。

(3) 在新污染期中，由于工业高度发展，城市污水体系中的工业废水量进一步增加，且成分更趋复杂。其中不断增加的人工合成有机物的生物降解性很差，一般的二级污水处理不能除去。这类污水给污水处理、水资源保护提出了新的研究课题。

### 4. 大气降落物

大气中的污染物主要来自矿物燃料和工业生产。前者燃烧时产生二氧化硫、氮氧化物、碳氧化物、碳氢化合物和烟尘等。后者随所用原料而异，在生产过程中，随不同环节而排放出不同的有害、有毒气体和固体物质（粉尘）。常见的有氟化物和各种金属及其化合物。农药使用中，也会飞散进入大气中。其次是这些污染物在阳光和催化剂作用下，还会互相发生各种光化反应，生产新的污染物。

大气污染的种类很多，成分复杂，有水溶性成分和不溶性成分、无机物和有机物等。它们可以自然降落和（或）在降雨过程中，溶解于水和被降水携带至地面水体中，造成水体污染。如世界上许多湖泊酸化，致使水生系统遭受破坏，就是由于大气中酸性污染物溶于水中生产酸性降水造成的，已引起了各国的注意。

### 5. 工业废渣和城市垃圾

工业生产所产生的固体废弃物随着工业发展日益增多，其中以冶金、煤炭、火力发电等的工业排放量最大。一些工矿企业把这类工业废弃物随意堆积于河滩、湖边、海滨或者直接倾入水中，这些工业废弃物中均含有大量易溶于水的物质和在水中会发生转化进入水体的物质，从而造成水体的污染。

城市垃圾包括居民的生活垃圾，商业垃圾和市政维修管理产生的垃圾。一些城市将城市垃圾堆积水边，任水流冲洗，造成水体污染。据统计，中国城镇居民平均每人每天排出垃圾量约为一公斤。城市垃圾随意倾倒水中或堆积水边，造成水体病原菌、需氧有机物等污染是不容忽视的。

### （三）水体污染源类型

凡能排放污染物的来源和场所均称为污染源；凡排出或释放的污染物能引起水污染的污染源为水体污染源。污染物从污染源排放口排放或释放后，便进入污染物传输路径向自然界传输，并开始与共存的复杂组分相互作用。如污染物由工厂经工厂排污口排入城市下水

道，然后注入江河等天然水体，则该工厂为污染源，城市下水道则是污染物的第一传输路径，下水道注入江河排污口，而该江河是纳污的天然水体也是第二传输路径。如工厂将污染物直接排入江河天然水体，则工厂排污口就是入江河排污口，而该江河便直接是污染物传输路径。因而，所谓污染源调查和污染源治理，就是调查和治理这些首次排放或释放污染物的来源和场所（如工厂）。

迄今为止，尚未见有最佳的或统一的污染源分类方法。因分类原则不同，污染源所属类型也各异。

#### 1. 按污染物的成因分类

污染源可分为自然污染源和人为污染源两大类。由自然因素引起水污染的来源和场所，如特殊的地质条件（矿藏）、森林地带、爆发的火山等，为自然污染源。由人类的社会、经济活动所形成的污染源称为人为污染源。由于目前人类还很难对许多自然力实行强有力的控制。因此，自然污染源也处于难于控制的局面。但是，自然污染源对水体的污染影响比人为污染源小得多。人为污染源产生污染的频率高、数量大、种类多、危害深，是造成污染的主要原因。因此，是我们控制的重点。

#### 2. 按污染源排放的污染物属性分类

可分成物理污染源、化学污染源和生物污染源等数种。物理污染源排放或释放的主要污染物有热能、放射性物质和悬浮物等；生物污染源是医院等部门将细菌、病毒、寄生虫等排入水体；化学污染源所占的比重最大，所排放的污染物种类也最多，涉及的面又最广。它们所排放的污染物有许多已经构成对人类严重的威胁。大规模现代化的经济组合，造成生产的集中和多样化。因此，一个污染源可能排放多种属性的污染物，如一个工厂可能同时释放热能和排放化学污染物，应视为物理污染源兼化学污染源。

#### 3. 按污染源的空间分布分类

可分为点源和非点污染源。点污染源具有确定的空间位置，非点污染源则否。

#### 4. 按污染源排放污染物在时间上的分布特征分类

可分为连续排放污染源、间断排放污染源和瞬时排放污染源等数种。尽管有的污染源连续的排放污染物，但其排放的污染物的种类与数量在时间分布上仍不均匀，故可分为连续均匀性排放污染源与连续非均匀性排放污染源两类。瞬时排放污染源多为事故性排放污染物的场所或设施等。其发生的频率可能较低，但一旦发生事故，就会在极短的时间内将大量的污染物排入水体，其迅雷不及掩耳之势往往使人们开始觉察已经造成了不可估量的损失，所以绝不可因其发生频率低而掉以轻心。

#### 5. 按产生污染物的行业性质分类

可分成工业污染源、农业污染源、交通污染源和生活污水污染源等数种。工业污染源是目前造成我国水污染的最主要污染源，这是因为工业部门种类繁多，污染物的数量多、种类多、毒性差异大、废水处理净化难度大，而对环境的危害也大。

#### 6. 按水污染源的有否移动性分类

可分为固定污染源和移动污染源。由固定点向江、河、湖、库等水体排放污水的为固定污染源，而船舶等常为移动污染源。

## 7. 按接纳水体分类

可分降雨、地表水和地下水的污染源等数种。例如降雨最常见的污染为酸雨，引起酸雨的污染源即为降雨的污染源；能引起河流、湖泊、水库或海水等水体污染者为地表水的污染源；能引起地下水污染者为地下水的污染源。

### 二、污染物在水体中的自净及其规律

#### (一) 水体污染过程

废水或污染物进入水体后，立即产生两个相互关联的过程：一是水体污染过程，二是水体自净过程。水体污染的发生、发展，要视这两个过程进行的强度而定。这两个过程进行的强度与污染物性质、污染源大小和接纳水体三方面及其相互作用机制有关。为了阐述方便，先概述水体污染与自净过程，然后分别论述各自的机制。

##### 1. 水体污染与自净过程概述

一条河流从源头流出，流量虽小而水质清澈甘甜。在其流向远方的过程中，穿过山谷原野、丘陵平原，流经城市村庄、工厂农村，沿途汇聚小溪小河，接纳各类工业废水、农田排水和城镇生活污水，流量越来越大，水质也相应变化。诸如：水面漂浮着闪亮的油膜、泡沫和漂浮物，水色有时呈黄褐色、有时呈黑色、黄色或红色；水的气味有时带泥土气味，有时有夹杂着霉烂臭味、鱼腥味，甚至是难闻而又说不出的刺鼻的气味；水温有时异常升高……凡此种种，都是可凭感官察觉到的水质变化，这就是水体的感官物理性状恶化。水体还有另外一类的水质恶化——化学性质恶化，要用化学分析手段才能鉴别出来。象酚、氰、砷、汞、铬、镉、铅、农药等各种有机、无机的化学物质一旦进入水体，就使水中含量升高，有时大大超过地面水质标准。

有些人工合成的有机物，如农药中的 DDT、六六六、洗涤剂以及多氯联苯等，虽说在水中溶解量有限，含量很低，然而这类物质能经过食物链传递而被生物富集，在生物体内达到惊人的数量。这类物质是人工合成的，其中多数很难被生物降解。

在废水注入河流的同时，其中各种污染成分也要经受水体的物理、化学和生物等作用，使污染成分不断地受到稀释、扩散、分解破坏或沉入水底，其结果是使水中溶解性污染物浓度下降，最后又恢复到污染前的状况。

对于接纳废水的某一局部水域来说，其污染与自净过程与一条河流大致相似。废水进入水体后，污染与自净过程就同时开始。距排放口较近的水域，污染过程是主要的，表现为水质恶化，形成严重污染区；而在相邻的下游水域，自净过程得到加强，污染过程减弱，表现为水质有所好转（相对严重污染水域而言），形成中度至轻度污染区域；在轻度污染区域之下的水域，自净过程是主要的，表现为废水或污染物经水体物理、化学或生物作用，污染物质或被稀释或被分解或被沉淀，水质恢复到正常状态。

##### 2. 水体污染特征

在水体污染过程中，产生如下一系列的水质恶化特征：

1) 水体中理化因素恶化，使大多数水生生物不能生存。例如： $\text{pH}$  值过低或过高 ( $\text{pH} < 6.5$  或  $\text{pH} \geq 8.5$ )；溶解氧下降至大多数生物不能忍受的水平，甚至耗尽有机物进行厌氧分解，水体变黑发臭；酚、氰、砷有毒、有害物质在水中浓度上升，达到杀死一切水生生物的水平；水中氮、磷等植物营养增加，加速水体富营养化过程等。

2) 水体被污染后, 某些物质, 如三价铬变成六价铬; 五价砷变成三价砷; 无机汞经生物作用生产甲基汞等, 都使毒性加强。另一物质, 如重金属、难分解的有机物质等, 与水体理化条件改变而沉入水底, 变成潜在的次生污染源或被底栖生物捕食或富集, 进入食物链。象六六六、DDT 之类的有机氯农药, 在水中的浓度虽很低, 并不威胁到生物的生存, 但它能通过食物链传递被生物富集到惊人的数量, 对人体健康构成危害。

3) 水体被污染后, 一些生物被消灭了, 另一些生物逃避了, 构成单一的生物区系。这样的生物群落结构很脆弱, 往往经不起外来压力的冲击, 生态系统平衡易遭破坏。

### 3. 水污染机制

水污染机制十分复杂, 有物理、物理化学、化学、生物及生物化学等基本作用及其综合作用。在某种具体条件下, 往往以某种或几种作用为主。

(1) 物理作用。废水或污染物进入水体后, 在水力与自身力量的作用下 (或这两种力的综合作用), 迅速扩大在水中所占的空间, 这就是物理作用, 在这个过程中, 污染物只是改变其在水中的分布范围。随着分布范围扩大, 污染物在水中浓度相应降低, 但其化学组成和性质不发生变化。

1) 水流紊动作用。废水进入流动的水体后, 在两种水流剪切力的作用下, 沿着水体流动方向, 迅速在纵、横和竖三个方向扩散, 特别是在水流速度较大时, 这种紊动作用很强, 能使废水或污染物迅速扩大范围。水体流动将污染物向下游推移或搬运。用罗丹明 B 在玻璃模型水槽中进行室内废水扩散试验, 试验中清楚地观察到, 具有一定初始动量的废水进入流动水体后, 由于水流的紊动, 废水沿纵、横、竖 3 个方向扩展, 并且呈云团状在水体中滚动与扩散, 经过一段流程后, 整个水体染上红色。

2) 污染物的分子扩散作用。向静止水体排放废水, 在排放口的一定范围内, 废水借助自身的初始动量, 在水体中紊动扩散。但在距离排污口较远之处, 废水失去了初始动量, 此时, 废水主要依靠分子扩散作用扩大污染范围。

3) 水流的冲刷作用。沉淀在水体底部的沉积物, 因水流速度变大, 冲刷力量增强, 可被冲刷而再次进入水中。

总之, 影响水污染过程的物理作用的主要因素有: 污染物的物理特性; 紊流的纵向、横向、竖向扩散尺度和强度; 水体的边界条件等。

(2) 物理化学作用。水体含有各种各样的胶体, 如硅、铅、铁等氢氧化物以及复杂的次生粘土矿物和以腐殖质为主的有机胶体, 此外, 还有不少悬浮物。当污染物进入水体随水流迁移时, 它与水中胶体之间通过吸附—解吸、溶胶—凝聚等作用进行物质交换, 水体因此发生污染或自净过程。有关吸附与解吸等, 参看本节后面论述的“水体自净过程”。

(3) 化学作用。污染物进入水体后, 除随水流一起迁移外, 还因介质条件的变化, 在各成分之间以及与水体各种化学成分之间发生化学作用。如酸化和碱化—中和、氧化—还原、分解—化合、沉淀—溶解等化学过程。导致污染物在水体中污染空间的扩大。

1) 酸化和碱化。含有大量酸性或碱性物质的废水进入水体后, 很快破坏了水体的缓冲系统, 水中 pH 值随即发生显著地变化, 其值可能达到小于 3 或大于 10。此外, 酸性或碱性废水相应地与水体中碱性或酸性物质发生中和作用或复合分解反应, 产生新的盐类, 使水体遭受新的污染。

大多数金属元素在强酸性条件环境中，形成易溶性化合物，有利于元素的迁移。在偏酸性和酸性环境（pH 值小于 7）条件下，便于钙、锶、钡、镭、铜、锌、三价铬、二价铁、二价锰和二价镍的迁移；在碱性水（pH 值大于 7）中，六价铬、硒、五价钒、砷易于迁移。因而，以上环境作用扩大了污染的范围。

2) 氧化—还原作用。含有强氧化剂或还原剂的废水进入水体后，一方面增加水体中氧化性或还原性物质；另一方面又急剧地改变水体中原各元素的原子或离子间的氧化还原的动态平衡，使水体中的变价元素之间发生氧化—还原过程。如在氧化条件下， $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Cr}^{6+}$  其毒性增强。许多金属离子以氧化态进入水体，易随水迁移和被生物吸收累积，在还原条件下，有机物分解产生有毒还原性硫化氢， $\text{As}^{5+} \rightarrow \text{As}^{3+}$  其毒性增强。因此，污染水体的氧化与还原作用对污染物质的迁移、转化和存在形式等有重要影响。

(4) 生物作用。生物作用是指进入水体中的污染物，通过生物的作用而扩大其在水体中的污染空间或范围，使污染物毒性增强，或使污染物在水环境中发生富集的现象。

1) 生物分解作用。废水中的有机物或某些矿物成分在生物作用下进行的分解作用称为生物分解作用。这种作用随水体中溶解的多寡而分为好气分解和嫌气分解。

好气分解：含碳有机物质在溶解氧富裕条件下，完全氧化生产二氧化碳和水，含氮和含磷有机物质的好氧分解结果，使水中累积了大量为植物所吸收利用的氮磷，为水体富营养化提供了条件；含硫有机物质的好气分解生成硫酸盐或硫代硫酸盐。

嫌气分解：有机物在缺氧条件下经嫌气性细菌作用，产生大量恶臭性还原物，如甲烷、氨、硫醇、硫化氢等（即常见的有机物腐败现象）称为嫌气分解。地球上有机物通过腐败作用释放硫化氢，每年约有  $11.2 \times 10^7$  吨。硫化氢是与氰化物具有同等毒性水平的物质。

水中含 0.1ppm 硫化氢，可影响鱼苗生长和鱼卵的存活，0.5ppm 产生恶臭，超过 0.5~1.0 ppm 硫化氢，对成鱼有严重危害。

2) 生物转化作用。某些元素在生物作用下，发生形态和价态的变化，转变为毒性较强的物质。汞的甲基化就是这类过程中最典型的例子。

震惊世界的日本水俣病就是水体受汞污染后，汞的甲基化而造成的。这是因为甲基汞易降解，易被生物吸收和在脑中积累，造成神经系统中毒。

3) 生物富集作用。指生物或处于同一营养级的生物种群，从周围环境中浓缩某种元素或难分解有机物的现象。经生物富集作用，生物体内的元素或难分解有机物的含量大大超过水体中的浓度，富集作用可通过生物积累和生物放大两过程实现。

## (二) 水体自净过程

水体自净的定义有广义和狭义两种：广义的定义指受污染的水体经过水中物理、化学与生物作用，使污染物的浓度降低，并恢复到污染前的水平；狭义的定义指水体中的微生物氧化分解有机物而使水体得以净化的过程。

影响水体自净过程的因素很多，其中主要的因素有：接纳水体的地形、水文条件、微生物种类与数量、水温、复氧能力（风力、风向、水体紊动状况）以及水体和污染物的组成与污染物浓度等。

### 1. 水体自净过程的特征

废水或污染物一旦进入水体后，就开始了自净过程。该过程由弱到强，直至趋于恒定，使

水质逐渐恢复到正常水平。全过程的特征是：

1) 进入水体中的污染物，在连续自净过程中，总的趋势是浓度下降。

2) 大多数有毒污染物经各种物理、化学和生物作用，转变为低毒或无毒的化合物。如有毒的有机氯除草剂，在微生物的作用下，经历了复杂的分解过程，最终分解为无毒的二氧化碳、水和氯根。又如氰化物可被氧化为无毒的二氧化碳和硝酸根（或氨）。

3) 重金属一类的污染物，从溶解状态变为不溶性化合物，沉淀后进入底泥。

4) 复杂的有机物，如碳水化合物、脂肪和蛋白质等，不论在溶解氧富裕或缺氧条件下，都能被利用和分解。先降解为较简单有机物，再进一步分解为二氧化碳和水。

5) 不稳定的污染物在自净过程中转变为稳定的化合物。如氨转变为亚硝酸盐，再氧化为硝酸盐。

6) 在自净过程的初期，水中溶解氧数量急剧下降，到达最低点后又缓慢上升，逐渐恢复到正常水平。

7) 进入水体的大量污染物，如果是有毒的，则生物难以栖息，不逃避就要死亡，水中生物种类和个体数量就要随之大量减少。随着自净过程的进行，有毒物质浓度或数量下降，生物种类和个体数量也就逐渐随之回升，最终趋于正常的生物分布。

## 2. 水体自净机制

水体自净机制包括沉淀、稀释、混合等物理作用，氧化还原、分解化合、吸附凝聚等化学和物理化学作用；生物和生物化学作用等。各种作用相互影响、同时发生并相互交织进行。一般地说，物理与生物化学作用在水体自净中占有重要的位置。

(1) 物理净化作用。废水或污染物进入水体后，立即受到水体的稀释与混合作用，继而是吸附、凝聚或生成不溶性物质而沉入水底，从而使水质得到改善。

1) 稀释与混合。所谓稀释，就是废（污）水中的高浓度污染物，由于清洁水的稀释作用，使其浓度降低。可用稀释比表示废水的稀释效果或稀释程度。就河流来说，稀释比即参与混合稀释的河水流量与废水流量之比，又称径污比。很明显，河水流量越大，其稀释比也越大，废水能得到较为充分的稀释，稀释效果也就越好。

在大多数情况下，稀释与混合是不可分离的两个过程，由混合作用得以稀释，由稀释而促进混合。

稀释效果有相当一部分应归之于混合作用，当然，混合也可由温度梯度、风力等因素引起。

2) 沉淀。废水不仅含有各种大小不同的颗粒物，而且还含有大量的溶解物质。当废（污）水进入水体时，颗粒物首先沉降，较细颗粒物也陆续下降进入底泥中。由于沉淀作用，水质得到某种程度的改善。因为在沉淀过程中，不仅悬浮颗粒状污染物进入底质中，而且这些颗粒物具有一定吸附能力，吸附了一定数量的可溶性污染物，使之随颗粒污染物一起沉入底泥中。

颗粒状污染物进入底泥后，水体得以澄清，水质也得到改善。沉入底质的污染物也许从此埋入底质中，但也有可能因水流流速加快和发生紊动而被冲起，再次悬浮水中；还有可能被底栖生物摄取，进入食物链；颗粒状的有机碎屑更有可能被底泥中的微生物分解成为黑色的泥状物质。

3) 吸附和凝聚。吸附作用是指水中的污染物被固体(如悬浮性的矿物成分、粘土、泥沙或有机碎屑等)吸附,并随同固相一起迁移或沉淀。

吸附作用是天然水体中普遍存在的现象。由于它的存在,水与悬浮物之间发生物质交换。吸附有多种形式,最重要而又普遍的有三种类型,即物理吸附、交换吸附和化学吸附。实际上,几种吸附作用在水体中常常是同时发生的,它们使污染物在界面上浓集。由于水体理化条件的变化胶体遭到破坏或不稳定,胶体颗粒会凝结并生成较大的颗粒,然后在重力的作用下,沉淀为絮凝物。

(2) 化学净化作用。由于进入水中的污染物与水体组分之间发生化学作用,致使污染物浓度降低或毒性丧失的现象,称为化学净化作用。其中包括污染物的分解与化合、氧化与还原、酸碱反应等。

1) 分解与化合。酚、氰是废水中常见的污染物,除因挥发进入大气外,还易在水中发生分解与化合反应。酚在 pH 值较高时与钠生产苯酚钠,氰化物在酸性条件下易分解而释放氢氰酸,后者经挥发而进入大气中。重金属离子可与阴离子或阴离子团发生化合反应,生成难溶性重金属盐类而沉淀,如硫化汞、硫化镉以及重金属硫酸盐和磷酸盐等。

2) 酸碱反应。天然水体的 pH 值一直维持在 6.3~8.5 之间,但在受酸或碱污染时, pH 值有可能低于 6.5 或高于 8.5。污染物在水中的自净过程,无论是物理、化学或生物的,均受 pH 值的影响。水体的 pH 值过高或过低,就会破坏水体的稳定,从而使胶体吸附性能大受损害。我国南方河流水体多呈酸性,使某污染物易生成沉淀物。例如砷和硒在 pH 值小于 7 时,水中溶解量低于 1 ppb;而 pH 值升高时,铜的溶解量降低。镍在碱性水体中,易生成氢氧化镍而沉淀。在水体自净过程中起主导作用的生物和化学作用,更受到 pH 值的制约,因为一切微生物都只能在一定的 pH 值环境中生存,过酸过碱对生物、生化过程都是不利的。

3) 氧化与还原。关于氧化与还原反应在水体自净过程的作用,请参照有关资料和有关文献。

(3) 生物净化过程。进入水中的污染物经各类生物的生理生化作用,或被分解,或转变为无毒或低毒物质的过程,称为生物净化过程。如芦苇能分解酚类,每 100g 鲜芦苇在 24h 内可分解酚 8mg。污水的二级处理作用,实际上就是生物净化。

1) 生物分解作用。水中微型生物参与水中各种各样的生物化学作用,其中最具代表性的是有机物的生物化学分解,即常说的生化需氧量(BOD)变化。

悬浮和溶解性的有机物质,在溶解氧充足时,被好氧性微生物氧化分解为简单的、稳定的无机物,如二氧化碳、水、氨和磷酸盐等,并把氨转化为硝酸盐,使水体净化。在这一过程中,要消耗一定的溶解氧, BOD 用以表示在这一过程中消耗的氧量。氧消耗越多,说明水中有机物越多,因此 BOD 可以表示水中有机物的多寡。

2) 生物转化作用。水中某些有毒污染物在生物作用下,可转变为无毒或低毒的化合物。这方面的例子很多,如水中某些微生物(极毛杆菌,类极毛杆菌等)不仅有很高的耐汞能力,而且能将二价汞( $Hg^{2+}$ )还原为元素汞( $Hg^0$ ),元素汞易挥发,促进水中汞的净化;又如砷对水生生物有毒害作用,但在水中硝化细菌的作用下,经两个步骤被氧化为无毒的亚硝酸盐和硝酸盐。

3) 生物富集作用。许多水生生物能从水中吸收污染物,贮藏于体内,使水中污染物浓度