

# 污水与雨水处理低碳化、资源化，融入生态文明建设中

王宝贞<sup>1</sup> 王琳<sup>2</sup> 王丽<sup>1</sup> 刘硕<sup>3</sup> 金文标<sup>1</sup> 李继<sup>1</sup>

(1、哈尔滨工业大学；2. 中国海洋大学；3. 哈尔滨师范大学)

十八届三中全会发表的全面深化改革的决定，将生态文明建设纳入中国特色社会主义事业五位一体总布局，而且在五大方面的深化改革和建设中起支持和保证作用；

要进行生态文明体制和制度的建设，首先要抛弃过去粗放的经济和社会发展模式，高能耗、高资源消耗和高碳排放，以及由此造成环境严重污染、生态恶化和局部破坏，使之难以持续发展，为此必须走资源和能源节约、低碳和循环经济的环境友好和生态良好的发展模式。

作为城市基础设施和环境保护设施的城镇污水和雨水管网、处理与再生系统，也要融入生态文明建设中，以实现：

- 污水和雨水处理资源化，实现其处理、净化、回收再用与循环；
- 污水处理产生的污泥减量化、无害化和资源化（有机肥料、土壤改良剂或燃料）；
- 城镇污水与雨水管网能真正起到保证城镇公共卫生和防止雨水的洪涝灾害。

现在全球气候极端异常，去年“海燕”台风在亚洲的肆虐，造成上万人的死亡和失踪；北美近日的极端严寒，使 1.4 亿美国人受灾。大气层温室气体过多，是造成这些灾难的主要原因之一。因此，竭力减少 CO<sub>2</sub> 等温室气体的排放，是全球人类的共同责任；我国作为全球温室气体排放数一数二的大国，更应义不容辞，更好地彰显负责任大国形象，从各方面想方设法减少温室气体排放量，为全人类的可持续生存和发展作出贡献。我们水环境工程尤其是污水处理界，也应为此做出一份贡献。

## 1、现在通用污水处理工程与技术的主要缺陷

活性污泥法和生物膜法，是当前世界上大中城市最通用的污水处理技术；从全球宏观环境看，其最大的缺陷是，在去除有机污染物（以 COD、BOD<sub>5</sub>、TOC 等计量）和营养污染物的同时，产生当量的温室气体 CO<sub>2</sub>；前面打跑了狼，后面又来了虎！除去现有的污染物，又产生了新的污染物，而且后者比前者更厉害！

如气候异常、气温上升、冰山和雪峰融化、海平面上升，正在愈益严重地威胁人类的生存，后患无穷！

我国如 14 亿人口普及活性污泥工艺处理厂，则由污水处理产生的 CO<sub>2</sub>年总量高达 2200 万吨-2500 万吨；全世界 70 亿人口都普及这些处理技术，将年产和排放 1.1 亿吨-1.25 亿吨 CO<sub>2</sub>。

【按照大中城市人均污水 BOD<sub>5</sub> 含量 60g/人·日，小城镇和农村人均污水 40gBOD<sub>5</sub>/人·日；城市人口 7 亿，镇和农村人口 7 亿；每去除 1kgBOD<sub>5</sub>产生 0.93kgCO<sub>2</sub>，每去除 1kgCOD 产生 0.56kgCO<sub>2</sub> 计算；以乙醇作底物进行物质转化当量计算的】

如果再考虑工业废水处理产生和排放的 CO<sub>2</sub>，则数量将翻番，即达到 2 亿吨 CO<sub>2</sub>/年以上。我们必须在污水处理上研发和推广能够同时去除 COD 和 CO<sub>2</sub> 的低碳的和环境友好处理技术，以实际行动进行本行业的生态文明建设。

## 2、我国污水处理的现状

截至 2012 年 9 月底，全国设市城市和县，累计建成城镇污水处理厂 3272 座，处理能力达到 1.40 亿立方米/日。在 657 个设市城市中，已有 642 个城市建有污水处理厂，占设市城市总数的 97.7%。全国城镇污水处理厂累计处理水量 109.28 亿立方米，累计削减化学需氧量（COD）总量 259.84 万吨。如果全国污水处理总能力 1.4 亿 m<sup>3</sup>/日满负荷运行，则全年处理污水量可达到 510 亿 m<sup>3</sup>污水。这说明，我国现有的污水处理厂实际运行的有效污水处理率很低，现在处理的污水总量为 109 亿 m<sup>3</sup>/年，仅为污水处理厂处理总能力的 21%！这还说明，按照现在污水处理厂总处理能力，不只消减 260 万吨/年 COD，而且如果满负荷运行，能够消减 1215 万吨/年 COD，由此产生和排放的 CO<sub>2</sub> 为 680 万吨。【按照乙醇做底物的化学平衡式计算，每去除 1 吨 COD 产生 0.56 吨 CO<sub>2</sub>；每去除 1 吨 BOD<sub>5</sub>产生 0.93 吨 CO<sub>2</sub>】

采用活性污泥工艺的污水处理系统，在去除有机物（COD、BOD）的同时，产生大量的剩余污泥（约为去除 BOD<sub>5</sub>的 0.6-0.7 或 COD 的 0.2~0.3。它们最后生物降解后也产生当量的温室气体 CO<sub>2</sub>或甲烷（CH<sub>4</sub>），相应产生约 272 万吨 CO<sub>2</sub>；总共产生和排放 952 万吨 CO<sub>2</sub>。

随着城镇化建设和新农保村建设，污水处理普及全国市、县、镇和村，如全部采用活性污泥工艺，污水处理总能力至少为 2 亿 m<sup>3</sup>/日，相应每年污水和污泥处理处置所产生的 CO<sub>2</sub>产生-排放总量将达到 1360 万吨。如果再考虑到工业废水

处理所产生和排放的 CO<sub>2</sub> 总量与生活污水的排放量按 1:1 计算，则为 1360 万吨 CO<sub>2</sub>，生活污水和工业废水用活性污泥工艺处理每年将产生和排放的 CO<sub>2</sub> 总量将达到 2720 万吨。全世界普及污水活性污泥工艺处理，则每年的 CO<sub>2</sub> 排放总量将达到 1.3 亿吨以上。这是很大的温室气体排放源之一，必须予以消减。

### 3、国际污水与雨水处理发展方向

国际上污水处理的发展方向是无害化、资源化、分散化。2000 年斯德哥尔摩世界水大会中对过去上百年的城市污水和雨水管网和处理设施等进行了反思，一改过去对污水和雨水所采取消极的观念，明确提出，将污水和雨水都作为水资源予以收集、处理、再生和利用，并实现水循环；将污水称为“绿色水资源”，将雨水称为“蓝色水资源”。这是因为城镇雨水径流，其污染较轻，远比污水容易处理和再生，更容易实现雨水资源化；即使饮用，也易于被人们接受。我国西北严重缺水地区，就是用水窖收集雨水作为其唯一的饮用水源。

为了更有效和经济地实现污水处理资源化，将污水的集中处理系统改变为分散处理系统，即污水处理的分散化（Decentralization）。排水管网和处理厂分散化的优点是，可就地收集、处理、再生与利用，减少大量的污水和雨水管道和提升泵站，为此节省大量基建投资和运行费，也易于实现污水处理的资源化；

### 4、我国污水处理存在的问题

#### 4.1 污水处理技术偏爱采用最新但不成熟的工艺

我国新建、扩建和升级改造的污水处理厂，大都紧跟欧美研发的最新工艺，采用活性污泥法的各种改进工艺，现在又盛行曝气生物滤池工艺。照搬照抄，无所创新，而且片面学习，对污水处理工艺尤其是最新工艺特别偏爱，外国不敢采用的最新工艺都在中国推广应用。有些新建的污水处理厂，由于没有认真考虑当地污水水质的实际情况，盲目采用国外的处理技术，导致水土不服，处理效果不好；例如，德国研发的 AB 工艺，最适用于超负荷运行的污水处理厂的改造，以及进水浓度高的新建污水处理厂。但是，有些污水处理厂的进水浓度很低，BOD<sub>5</sub> 仅为 100mg/L 上下，运行起来，大马拉小车，无法正常运行，只好不用 A 段。只用 B 段运行，造成浪费。UNITANK 工艺，作为研发国家的比利时，采用此工艺的污水处理厂并不多，应用此技术的的污水处理厂最大处理能力仅为 4 万 m<sup>3</sup>/d。该国专家认为该方法运行不稳定，出水水质不好。但是，在中国已建造了 10 余座

UNITANK 工艺处理厂，处理规模 10 万~40 万 m<sup>3</sup>/d。批序式活性污泥法（SBR）工艺在我国广为应用，但是到美国考察污水处理厂，几乎没有应用 SBR 的污水处理厂，美国同行普遍认为这种污水处理技术难以控制稳定运行，需采用高度的自动化运行控制系统。

这些新建、扩建和升级改造的污水处理厂，许多运行并不理想。难以保证长期稳定运行。我国目前已经建成的污水处理厂的总处理能力，达到了 1.4 亿 m<sup>3</sup>/d，如全年满负荷稳定运行，能够处理污水总量达 510 亿 m<sup>3</sup>/d，而现在仅处理了 109 亿 m<sup>3</sup>/d，仅发挥其处理能力的 21%，实在太低！

#### 4.2 对污泥处理与处置非常落后，二次污染严重

我国污水处理厂具有世界最先进的污水处理设施，但是缺少国际先进的污泥处理设施。跟发达国家的污水处理厂相比，污水处理差距不大，但是污泥处理则相差悬殊。因此，我国许多污水处理厂的污泥因为没有有效地处理，如脱水和干化，往往难以应用和处置，如在垃圾填埋场填埋，一些垃圾填埋场因为脱水污泥含水率过高（77%~80%），难以进行安全填埋，降雨时容易渗出造成填埋场大面积污染；有时厌氧发酵产生大量的 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 等气体，而发生爆炸或污泥喷涌，影响填埋场安全。有些污水处理厂则委托小的私营环保公司负责处置污泥，肆意偷排乱放，造成严重地二次污染。

美国所有污水处理厂的污泥都称为“生物固体”（Biosolid），经脱水和烘干后，广泛地用于农田、果园和林场作有机肥料；或用作城镇绿地和高尔夫球场的土壤改良剂。例如，世界最大的污水处理厂-芝加哥 Stickney 污水处理厂（处理规模 480 万 m<sup>3</sup>/d），其污水处理产生的污泥经浓缩-脱水后，一部分被驳船沿河运到下游 200km 外的饲料基地作为有机肥促进饲料生长和增产；另一部分则作为土壤改良剂作新建高尔夫球场的垫层（0.3m~0.5m），其上在铺垫球场表层 0.1~0.2mm。每个高尔夫球场的污泥用量高达 100 万 m<sup>3</sup>。美国第二大污水处理厂波士顿污水处理厂（340 万 m<sup>3</sup>/d），1997 年生产 13700 吨的干化颗粒污泥（产自 640,000 吨的脱水污泥），这些干化生物固体颗粒，送往德克萨斯和佛罗里达等州作为农田和果园的有机肥料。欧洲丹麦、法国、挪威和西班牙等国污泥用作农田有机肥料达到其总量的 50% 以上；英国、瑞典、瑞士等国污泥用于农田做有机肥的比例达到 40% 以上；欧洲各国污泥用于农田的平均占总量 36%。欧洲一些

污水处理厂将污泥脱水烘干制成干污泥颗粒，既可作为有机肥料，也可用作燃料。德国将原来东德的褐煤气化厂改造成污泥热解制造甲醇，用作汽车燃料，已有数万辆汽车使用由此制造的甲醇做燃料。

我国污水处理厂现在最大的难题是污泥处理与处置，距实现无害化、减量化和资源化仍相距甚远。我国许多城市污水处理厂处理的污水主要是生活污水，其污泥重金属含量不高，符合我国农业有机肥料的质量标准，但是只有很少的脱水污泥用于农田施肥。一些城市热衷于污泥焚烧处理，由于我国污泥热值较低，焚烧温度只能达到 800-900° C，致使恶臭扩散和产生大量二恶因和呋喃等致癌物质，严重影响附近居民健康与安全。此外还产生和排放大量的 CO<sub>2</sub>。这不是环境友好和生态良好的污泥处理方法。

今后应在生态文明体制或制度的指引和规定下，鼓励研发和推广应用多种多样的污泥无害化、减量化和资源化的技术，实现污泥处理与处置的低碳化、无害化、资源化和生态化。

#### **4.3 我国对城镇雨水无害化和资源化极其忽视和极其落后**

我国对城镇雨水的收集、输送、处理、无害化和资源化极其忽视，逢雨必涝必淹，街道成河，车毁人亡，损失惨重，至今仍无有效地应对措施。

德国是世界上雨水利用最先进的国家，不仅在居住小区、独居庭园和大型建筑物进行雨水收集与利用，其河流域的水资源开发和水环境保护，也极其重视雨水的汇集、处理、净化与回收利用。以德国鲁尔河管理协会（Ruhrverband: Ruhr River Association）为例，为了解决鲁尔河作为整个鲁尔区 500 万人的饮用和工业用水水源，鲁尔河协会对鲁尔河流域的水量和水质进行两方面的管理和控制：在其干流和支流的上游和中游建造了 14 座大、中、小型水库，其中上亿 m<sup>3</sup> 的大型水库 3 座，年总有效储水量 4.2 亿 m<sup>3</sup>。

此外，不仅建造了 72 座城镇污水处理厂，总处理污水量 100 万 m<sup>3</sup>/d，其出水水质达到相当于我国的 1 级 A 标准排入鲁尔河，还建造了 549 座雨水径流处理厂（2008 年）（见图 7），采用雨水沉淀池、雨水净化塘和地表径流人工湿地进行处理。净化后雨水水质达到德国地表水质 2-3 级标准，排入鲁尔河作为其饮用水和工业用水补给水源。

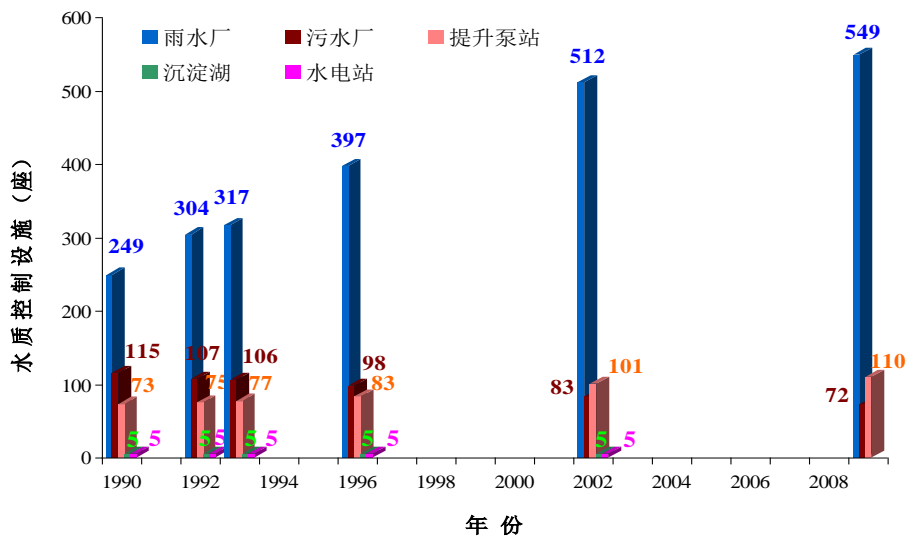


图1 德国鲁尔河管理协会所辖污水处理厂和雨水处理厂发展趋势图

德国和欧洲其他发达国家以及北美国家都对雨水径流收集、净化与利用给予重视,无论是合流制下水道的溢流出水(Combined Sewerage Overflow, 简写CSO),还是分流制的雨水管道的雨水径流,都予以收集、处理与利用,用作水资源。这与我国片面理解与实施的“分流制”有很大的不同:我们只管分流制中污水管道中的生活污水和工业废水处理,而对雨水管道,只管收集与排放,而根本不予以处理与资源化利用。由于我国城市大气污染和地面污染都较严重,其雨水径流污染比国外严重得多,其雨水径流中SS、COD、BOD<sub>5</sub>、氮、磷、石油类、重金属等都比国外城市雨水径流高几倍至十几倍。致使我国许多城市,即使污水处理厂的污水处理普及率高达90%以上,由于未经处理的雨水径流携带大量污染物的排入附近水体,导致城市水体污染没有得到根本的改善。我国许多大城市有这样的现象,平时河水相当洁净,但是一旦降雨,河道中垃圾漂浮,惨不忍睹。



A: 接纳雨水径流时照片



B: 刚建成时照片

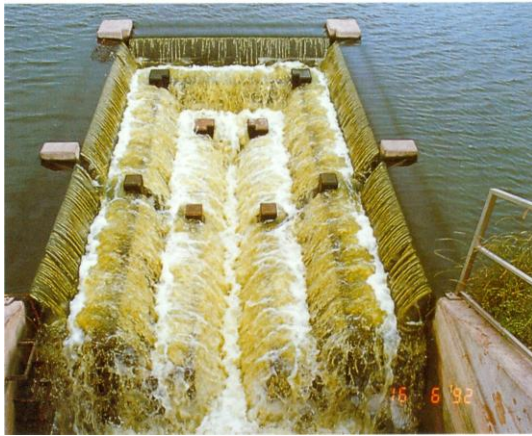


图 C 雨水沉淀池出水的多级跌水曝气池



图 D 雨水净化塘与天鹅

图 2 德国鲁尔河某一雨水处理系统（雨水沉淀池-跌水曝气槽-雨水净化塘）

我国不仅在大中城市推行活性污泥工艺，在小城市和镇也推行活性污泥工艺，许多小型处理厂由于经济和技术等原因而不能正常运行。而欧美的小城镇早已不用活性污泥法，现在主要采用稳定塘、人工湿地和土地处理系统。

在三中全会精神的指导下，在思想和观念上来一次革命，既要认真学习外人的先进技术和经验，与我国的实际情况相结合，更要有开拓创新的精神。不能老是跟在外人后面亦步亦趋，我们要发扬中华民族的勇于进取和开拓创新的精神，敢为人先，在污水处理方面创出一条新路：低碳和生态处理新途径。

## 5 国外中小城市污水处理现状与发展趋向

美、英、法、德等发达国家，其中小城市或社区污水处理采用的主要技术，是塘、人工湿地和土地处理，而不是活性污泥法。美国 50~60 年代曾在小城市和社区推广活性污泥法处理技术，建造了一些规模几千  $\text{m}^3/\text{d}$ ~几万  $\text{m}^3/\text{d}$  的活性污泥法处理厂，但是由于处理规模小，运行不稳定且处理效果差而停运关闭。

污水处理塘和净化塘，在北美和欧洲非常普及，是其小城镇和农村应用最多的污水处理技术；美国污水处理塘（稳定塘）11,000 余座，法国 3000 余座，德国 3000 余座，仅其巴伐利亚州就有 1500 余座。

人工湿地在欧洲 6000 余处（2000 年），美国 1100 余处，主要用于做污水二级处理的深度净化单元；

塘和人工湿地是雨水径流最有效的处理与再生技术，也是许多工业废水（尤其难降解的废水）和农业废水的有效处理技术；

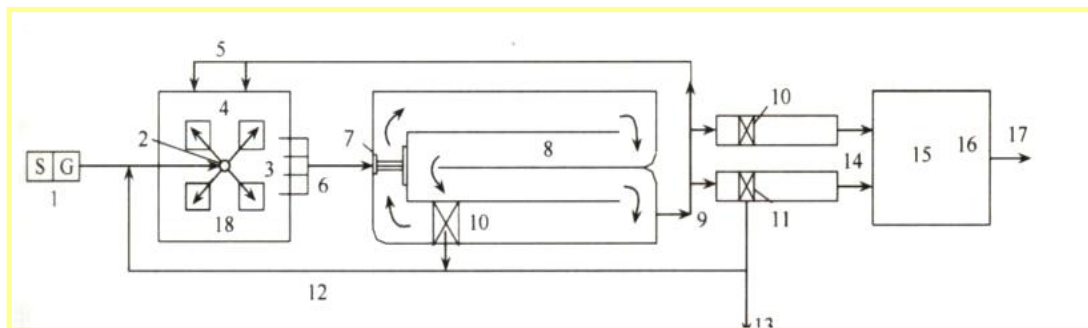


塘中藻类和湿地的水生植物，都能将污水处理中生物降解产物  $\text{CO}_2$  以及无机营养盐，如  $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$  等摄取，并参与其光合过程，由此去除了  $\text{CO}_2$  而产生了初生态氧，使附近环境增加了氧气。

因此，塘、人工湿地和土地处理都是污水处理与再生的低碳（除碳增氧）的环境友好处理技术。

### 5.1 国际先进的污水处理塘系统

美国和欧洲，对污水处理塘系统进行了大量的研发和工程实践，其发展方向是高负荷、高效、工程化和景观化。美国中小城镇和社区，稳定塘（Stabilization Ponds）已成为其主要的污水处理技术，美国全国总污水量的 25% 是由稳定塘来处理的。其最通用的稳定塘处理系统为：污水经预处理后进入曝气塘处理以去除大部分 COD 和  $\text{BOD}_5$ ，然后进入净化塘作进一步净化，以使最后出水达标排放。但是，这种处理系统出水往往含有过量的藻类使 SS 和  $\text{BOD}_5$  超标。因此研发和应用了各种改进的污水处理塘工艺。其中最先进的当首推美国加州大学（伯克利）William J. Oswald 教授所研发的先进组合塘系统（Advanced Integrated Pond Systems, 简写 AIPS），它是由塘底带有污泥发酵坑的高效兼性塘、装有搅拌机以



使藻类呈悬浮状态的高负荷藻类塘、藻类沉淀塘和熟化塘 4 种单元塘组合而成。

图 3 美国先进组合塘污水处理流程

1 格栅和沉砂池；2 配水井；3 污泥发酵坑；4 高效兼性塘；5 充氧水回流；6 低水位出水；7 旋转桨板混合机；8 高负荷悬浮藻类塘；9 高水位出水；10 沉淀塘藻类沉积坑；11 藻类沉淀塘；12 沉淀藻回流；13 藻回收；14 低水位出水；15 熟化塘；16 高水位出水；17 出水用于灌溉葡萄园或农田；18 曝气机

先进组合塘的优点是：

- 多为土石结构工程，造价低，其基建单价仅为常规二级处理（活性污泥工艺处理厂）的 50%；
- 运行费用低廉，仅为常规污水处理厂运行费的 20%~30%；



- 在第一级塘（曝气兼性塘）底部的污泥发酵坑中，以 UASB 的方式将流入其中的污水的 BOD<sub>5</sub> 厌氧降解去除 70%；
- 在第二级塘（高负荷藻类塘）中，通过桨板转动搅拌使藻类处于悬浮状态，并通过其光合作用摄取生物降解产物 CO<sub>2</sub> 并产生氧气，其能耗仅为鼓风机曝气产氧能耗的 1/20。实现了节能和低碳，亦即在其中大量的藻类通过其光合作用，既去除了 CO<sub>2</sub>，又低能耗地产生了大量的氧，供好氧菌氧化降解有机污染物；
- 通过曝气兼性塘及其底部的污泥发酵坑中进行的水解、酸化、甲烷发酵等过程，污泥由固体转化成液态和气态产物，从而大幅度消减；该处理系统（Saint Helina WWTP）连续运行 30 年而未曾排放污泥，可称为污泥零排放污水处理系统。
- 最后出水灌溉附近的葡萄园，为葡萄树提供水和肥料（C、N、P）；经土壤过滤的净化水补充地下水，实现水循环和营养物循环。

这是一种环境友好和生态改善的污水处理与再生技术。

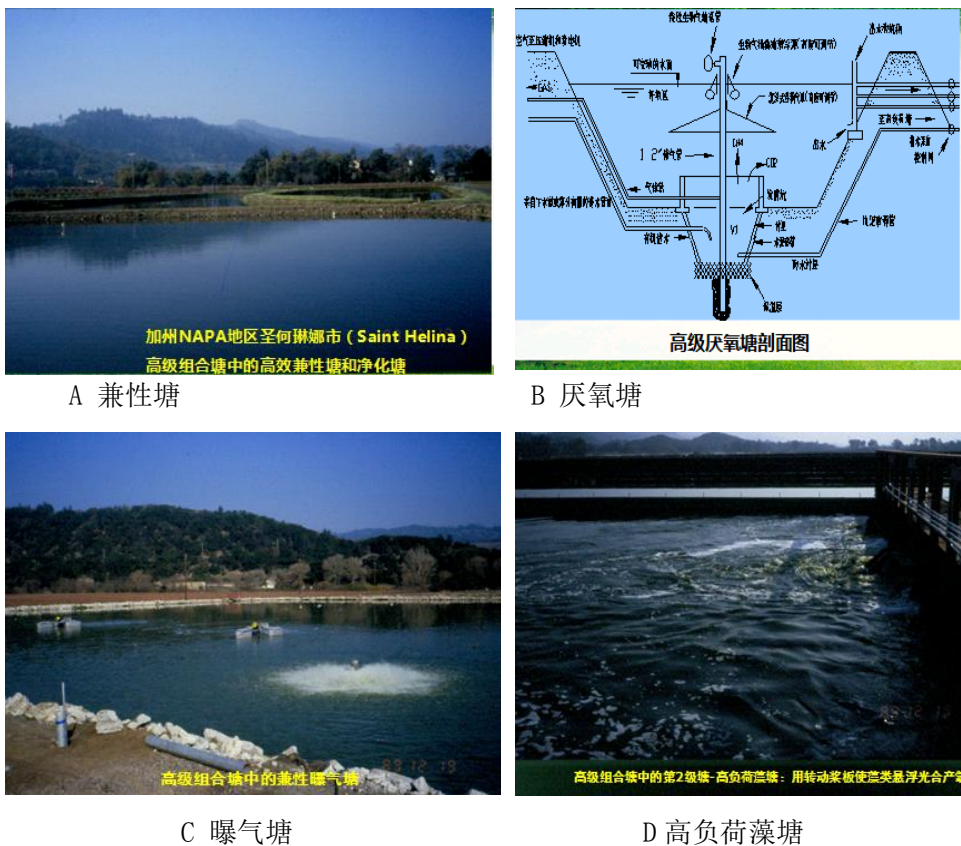


图 4 美国加州 NAPA 地区 Saint Helina 市污水先进组合塘照片

## 5.2 德国氧化塘

在德国，塘经常作为大中城市常规二级污水处理厂中的后续处理(深度净化)单元，即最后净化塘，通常由 2~5 个单塘串联而成，对二级出水做深度净化和做杀灭病原菌和病毒之用。鲁尔河管理协会所属的污水处理厂，大都在其污水处理厂二级处理后设置 2~5 个串联净化塘，以确保其良好的出水水质，其出水水质一般为：TSS 2~5mg/L，BOD<sub>5</sub> 0.5~3mg/L，COD 30~40mg/L，NH<sub>3</sub>-N 0.1~0.2mg/L，TP 0.2~0.5mg/L，细菌总数≤1000cfu/mL，大肠菌总数≤100cfu/100mL。细菌总数去除率高达 (5~6) log，或 99.999%~99.9999%。

小城镇和农村为了节省建设和运行成本，污水处理直接采用多级塘串联处理系统，如：预处理→曝气塘→净化塘（多塘串联），或：预处理→沉淀兼性塘→净化塘；

对于雨水径流，通常采用水力旋流除泥沙池→地表径流人工湿地→净化塘处理工艺，雨水净化效果更好。



图 5 德国二级处理后净化塘



图 6 德国二级处理后净化塘平面布置图



图 7 德国 Bochum-Olbachtal WWTP 集净化塘

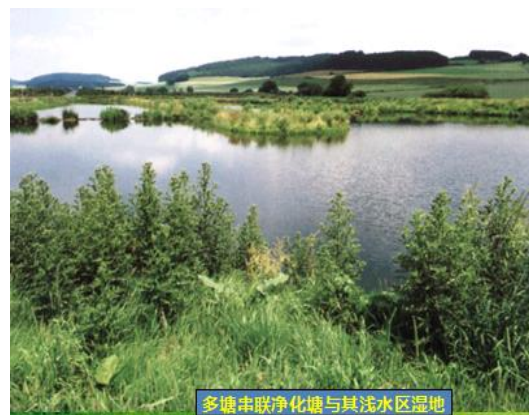


图 8 德国人工湿地-净化塘

德国氧化塘设计、建造和运行的非常好，其主要特点是工程化、自然化、生态化

和景观化。二级处理后的多级净化塘，通常设计成浅水区人工湿地与塘组成的复合体，其进水和出水以及各个单元塘间的过水设施设计和建造的非常科学合理，保证进水均匀地流经各个塘，使塘的容积得到充分利用，并达到高的净化效率。

各个塘之间的过水设计成堤顶溢流过水，其上种植芦苇和蒲草，既保证均匀过水，有保证进一步去除污染物。有的塘中间设计和建成一个小岛，其上设置人工鸟巢，为它们提供避风雨的栖息场所。有些净化塘还放养一些观赏性鱼类如红鲤，用于扑食进入塘中的悬浮活性污泥絮粒和浮萍等。塘水清澈透明、水禽（野鸭、天鹅等）光顾，周围绿树成荫，鲜花野草遍地，构成靓丽的生态景观，附近居民多来跑步、散步，成为良好的休闲场所。

### 5.3 国外人工湿地

#### 5.3.1 法国人工湿地

法国小镇和农村，广泛应用人工湿地或与净化塘组合污水处理工艺。在湿地工艺设计中，法国人工湿地多采用2级串联垂直潜流人工湿地，这样的设计的优点是污水处理效率高，出水水质好。

法国人工湿的水力学设计科学合理，其进水/布水系统能够保证在整个湿地表面布水均匀；其排水系统能保证来水能均匀地形成从上向下流动的潜流形式，使污水与湿地滤床和植物根系均匀和充分接触，并达到高效处理；通风进气和排气系统设计合理，能保证湿地有足够的氧量供进行微生物氧化降解污水中的有机物；

在寒冷地区，或靠近居民区很近的人工湿地，一般设计有顶盖，近似我国的塑料大棚，并设置通风过滤装置；即起到冬季保温的作用，又实现对空气中污染物和气味的有效控制。附图 13 为法国人工湿地复合塘系统图。

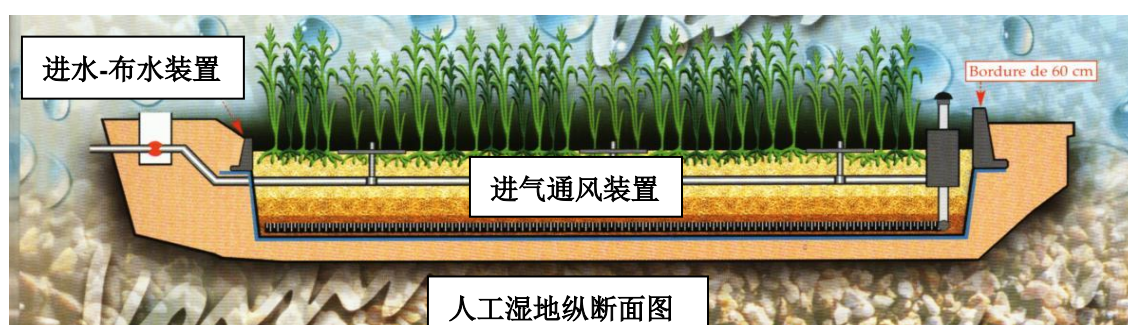


图 A 芦苇湿地



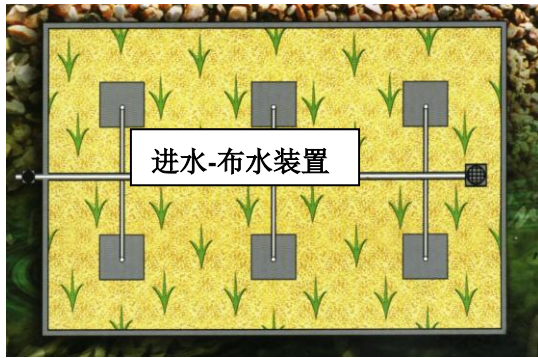


图 B 人工湿地进水-布水系统

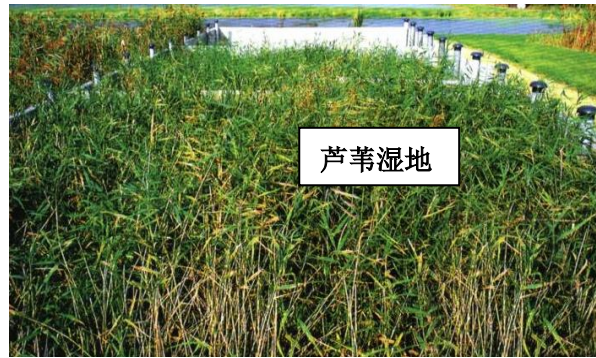
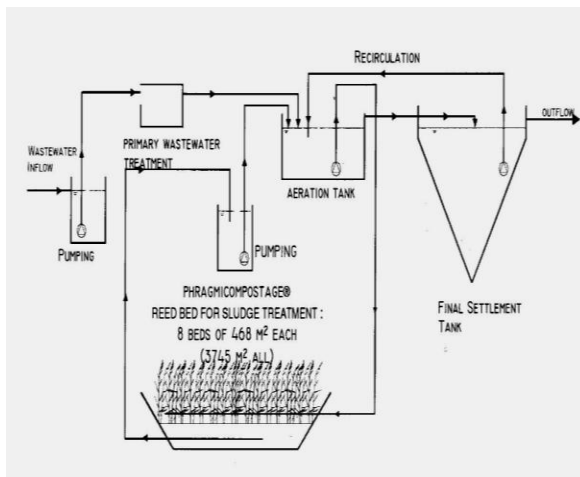


图 C 垂直流人工湿地滤床

图 9 法国污水处理人工湿地示意图

法国 Phragmifilter 型潜流芦苇床人工湿地，不仅能处理生活污水、多种工业废水和雨水径流，还能有效地处理污泥，成为 Phragmicompostage (污泥堆肥芦苇床)。图所示为接受处理能力为 13000 当量人口的污水处理厂排出的剩余活性污泥的干化与堆肥芦苇床。



Reed beds for sludge treatment



图 10 法国污泥处理（脱水、干化和堆肥）芦苇湿地示意图

在污水处理过程中，需要时即可将剩余活性污泥排入污泥干化堆肥芦苇床上，通过芦苇的蒸腾和滤床的渗滤使污泥脱水和干燥。污泥通过芦苇根系的吸收和叶片的蒸腾能去除其含水量的 50%（在夏季）。通过通风进气充氧能使污泥稳定和矿化，并消除臭味。最后产品为固体含率 30% 的污泥堆肥，它只需 10 年清除一次。一座服务人口 13000 的污水处理厂，用此法处理污泥所需的芦苇床共 8 块，每块 468m<sup>2</sup>，共需 3745m<sup>2</sup>。

### 5.3.2 美国高负荷和高效新型人工湿地

美国 LMS 公司将他们研发的活生机械处理系统 (Living Machine systems)，

即高负荷和高效二级人工湿地系统，用于处理美国城市大型建筑物的污水，其出水再经精滤和 UV+氯化消毒后符合再生水水质标准，用于冲厕和浇灌绿地，而且其人工湿地上种植的观赏性植物，构成了建筑物内外的景观，并与建筑美学和景观美学优化结合。

这一大胆的创新尝试，获得圆满成功，并已成为美国最佳绿色建筑物（greenest building in the US）的关键贡献因素之一。

活生（机器）处理系统(LMS)最大的创新之处，是研发了一种高负荷和高效的新型人工湿地，即潮汐式人工湿地(Tidal CW)，其中装填粗大的填料滤层和快速的排水系统，以保证它以涨潮(注满水)-退潮(排空水)的方式一天完成多次(12次)的涨(满)-落(空)循环过程。这种人工湿地一天经历十余次好氧-缺氧交替过程，并以这种方式进行高效的曝气充氧，使污水流经填料颗粒表面时其上附着生长的生物膜能高效地降解有机物和转化营养物，并能有效地进行硝化(好氧环境)和反硝化(缺氧环境)；

由于它一天通过十余次涨-落循环，能达到高强度的曝气充氧量，其一天的总曝气充氧量为有机物氧化降解和硝化的需氧量的 10 倍左右，因此能有效地氧化降解和消除由 H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>-N 和硫醇等产生的臭气，并使其处于稳定状态。因此，可以将其设置在大型建筑物的大厅内作为景观设施。

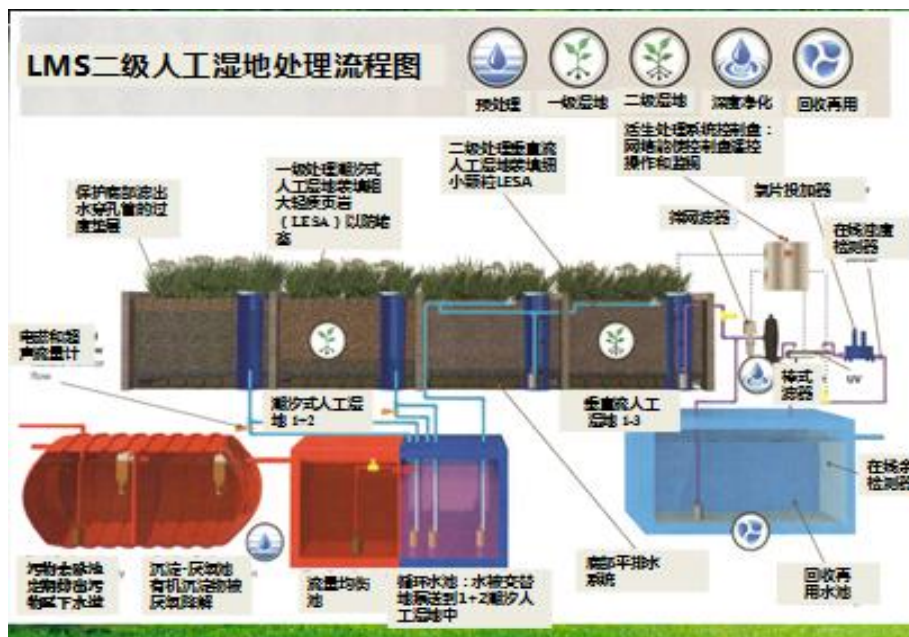


图 11 新型二级人工湿地及后续深度净化-消毒处理流程示意图

波特兰港务局大楼的活生处理系统



波特兰港务局原来有 2 座办公大楼，一座位于波特兰市中心区，另一座靠近机场。港口决定将其合并成一座联合办公大楼。早在规划阶段 ZGF 建筑公司征求了波特兰港务局负责人的意见以尽量了解其文化信息，以利于设计构思。

以 LMS 为主体的污水生态景观处理与建筑学的优化结合要领：

- 4 座潮汐式人工湿地池，建在该港口新总部大楼的大厅中，其余的 2 座潮流式人工湿地池和作为二级深度处理的 4 座垂直流人工湿地池则建在该大楼的外面，构成特色景观；

- 楼内和楼外的人工湿地池，其材料和种植的植物均与该项目的建筑学和景观建筑学相协调，以达到该建筑物要求的美观效果；

- 从周围看，该建筑物设计和建造得像个船体，使来访者和员工们感到好像停车在甲板上。



图 A 波特兰港务局大楼



图 B 大楼内部一楼大厅内的让人工湿地

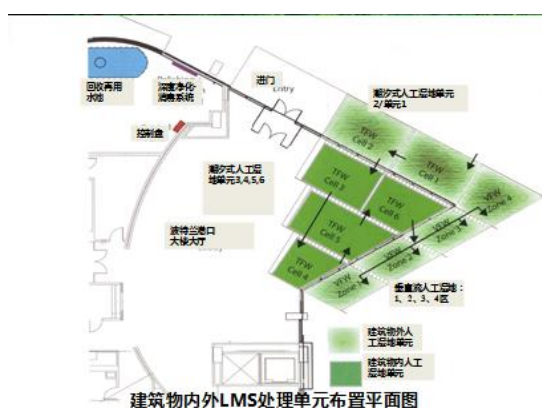


图 C 新型人工湿地污水再生系统平面布置图

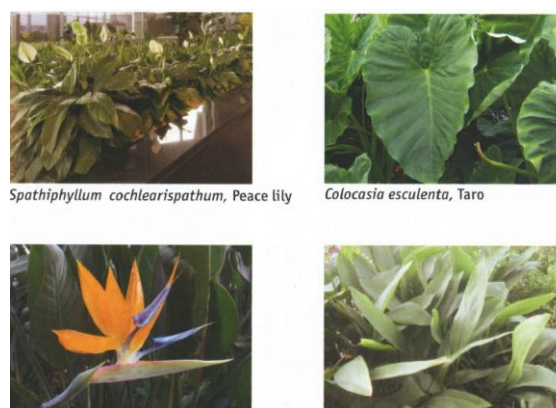


图 D 人工湿地上种植的景观植物

图 12 美国波特兰港务局大楼新型人工湿地污水再生处理设施

预处理污水进入初次沉淀池中，其中较大悬浮颗粒沉淀下来，并沉积于底部，用设置在污泥坑的污泥泵将其排入附近的下水道中。油脂等则漂浮于水面上



形成浮渣 (scum)，用设置在水面上的浮渣撇除器将其撇除并输送到附近下水道中。

其澄清区的出水，靠重力流进入流量均衡池（或称调节池）。

在初次沉淀池中未沉淀的固体颗粒通过水解、酸化等过程分解成细小颗粒；它们和溶解的有机物和无机物随初沉污水进入活生处理系统（2 级串联人工湿地）中进行同化处理。

第一级人工湿地系统，由 6 座潮汐式人工湿地池组成，他们借助于其填料的表面上和其空隙中附着生长的微生物群落及由此形成的生物膜去除水中污染物。这些生物膜在污水流经填料表面时将其中的有机物和营养物氧化降解和同化。

第二级人工湿地系统，由 4 座并联的垂直流人工湿地组成，这些深度净化的垂直流人工湿地，能够去除所有的剩余有机物、氨氮和 TSS。深度净化湿地是浅层和循环回流的垂直流人工湿地。其最后出水非常清洁，只需要稍加最后处理和消毒便可再用。

深度净化的垂直流人工湿地出水，用泵输送到滤筒过滤器（Cartridge Filter）；滤出水再进入 UV+氯化消毒设备。精滤是必须的，否则浊度较大的水影响 UV 消毒的效率。

在线的浊度计、UV 穿透率计和余氯检测器，保证了最后产水持续达到了再用水质标准。由表 1 可见，该生态处理系统的实际运行效果高于设计值。

表 1 波特兰港务局大楼新型人工湿地处理污水效果一览表

参数 (mg/L)	设计进水值	实测进水值	设计出水值	实测出水值
BOD5	140	190	<10	1.0
TSS	55	55	<10	2.1
TKN	90	160	<10	2.2
浊度 (NTU)	-	-	<2.0	0.6

这种高效人工湿地处理系统，还应用于美国几座中学和大学的校园内，用于处理其污水并再生回用。在校园设计、建造和运行的 LMS 处理系统，由平流式、潮汐式和垂直流三种形式的湿地组合或其中 2 种形式组合。



A 温室外的湿地系统



B 温室内的湿地系统

图 13 美国学校校园内新型高效人工湿地温室

校园的 LMS 活生处理系统，有意识地将其关键部分，如潮汐式人工湿地建在温室中，为师生们提供了生物学、生态学、化学和环境科学等课程的示范基地和实验室。

这种 LMS 处理系统，不仅能高效地处理污水，还能高效地处理和净化从校园建筑的屋顶上收集的雨水，经净化后 100%地用于冲洗校园内的厕所和浇洒绿地；

LMS 校园污水和雨水径流处理系统，其人工湿地出水清澈透明，可用以建成景观湖和池塘，使校园增加一些靓丽的景点。

该 LMS 生态处理系统比常规处理系统，基建投资低、运行费低、低碳、低能耗，环境友好和生态改善，是校园、居民小区、村镇等污水处理与再生利用的最佳选择之一。

#### 5.4 美国土地处理系统 (Land Treatment Systems)

它是全年性的污水处理与利用系统，与季节性的污水灌溉系统不同，在作物非生长季节，仍然对污水进行处理或贮存，以防对水环境的污染。

土地处理系统，是一种污水再生和利用方式，最后实现水循环。污水用于农田灌溉的过程中，通过土壤的物理、化学和生物化学的过程，以及农作物根系吸

收等机理，将污水进一步净化，使最后出水（土壤渗滤水）达到很高的水质，相当于三级处理出水水质，可用于补充日益短缺的地下水。

美国土地处理系统，广泛地应用于中小城市和社区的污水处理，通常与曝气塘-净化塘-储存塘联用，即净化塘出水用于灌溉农田，为其提供农作物生长所需的水分和肥分，促进其生长和增产。

冬季不灌溉时，土地处理系统中塘系统仍然运行，对污水进行处理和储存。储存塘需设计和建造得有足够的容积，以储存冬季曝气塘出水，以备来年农田灌溉用。

#### 5.4.1 美国密歇根州 Mukegon 县污水土地处理系统

该县在 50 年代建造了 4 座活性污泥法污水处理厂，由于运行不稳定，出水水质达不到排放标准，最后决定废弃。该县最后决定改用土地处理系统处理该县的污水。

处理流程：原生污水→**预处理**→**三塘串联曝气塘**→**沉淀塘**→**储存塘**→**投氯消毒**→**农田灌溉**→渗滤出水，补充地下水层或地表水体

#### 曝气塘与储存塘

原生污水流量为 10.2 万 m<sup>3</sup>/d，进入 3 个面积 3.6ha，容积各为 160,000m<sup>3</sup> 的曝气塘中，每个塘中装有 3 台 50 马力的搅拌混合机和 12 台 60 马力的曝气机。

实际运行经验证明，可以适当减少所需的曝气量和能耗。为此通常采用这样的曝气方式：在第一级塘中应用 8 台曝气机，第二级塘中应用 4 台曝气机。

在每个塘中的逗留时间为 1.5d，冬季在曝气塘中曝气处理之后，出水流入储存塘；在夏季，曝气塘出水既可以进入储存塘，也可进入 3.2 ha 表面积的沉淀塘，然后进行农田灌溉，共有 2 个储存塘，每个 344 ha 水表面积，其总储存容积为 1895 万 m<sup>3</sup>，相当于半年的贮水容积。

#### 最后消毒：

在处理污水灌溉农田之前，先流入处置塘，在流入灌溉渠（输水至泵站）之前进行投氯消毒以符合卫生标准。

#### 农田灌溉

处理污水通过埋设的石棉水泥管分配到灌溉机械的中心点。根据位置的不同，其工作压力为  $(2.1\sim 4.9) \times 10^5 \text{Pa}$ 。灌溉机械被设计成带有下向式低压喷嘴

的喷灌机，共有 54 座喷灌装置，分别布设在园形农田块(面积 14~56 公顷)。

在 2160 公顷农田中有 1800 公顷种植玉米，每周灌溉污水 10cm(1000m<sup>3</sup>/公顷)，另外 360 公顷土地种植牧草，在这 2160 公顷的农田上灌溉的污水量为 0~250cm 以上。灌溉期为 4 月中旬至 11 月，在耕地、种植、作物生长和收割等期间，将污水储存于储存塘中。收获玉米 6000kg/公顷。

### 渗排水系统

在灌溉田上设置渗、排水管和排水井，由此形成渗排水系统，它们将喷灌到农田上的污水湿土壤层的渗滤水收集起来排入附近的水体。

表 2 美国密歇根州 Muskegon 县土地处理系统处理效果

水质参数 (mg/L)	进水	曝气塘出水	存储塘出水	农田灌溉渗滤水
BOD <sub>5</sub>	205	81	13	3
COD	545	375	118	28
SS	249	144	20	7
TP	2.4	2.4	1.4	0.05
NH <sub>4</sub> -N	6.1	4.1	2.4	0.6
NO <sub>3</sub> -N		0.1	7.1	1.9
Zn	0.57	0.41	0.11	0.07
大肠杆菌 (个/100ml)	>10 <sup>6</sup>	>10 <sup>6</sup>	>10 <sup>3</sup>	>10 <sup>2</sup>

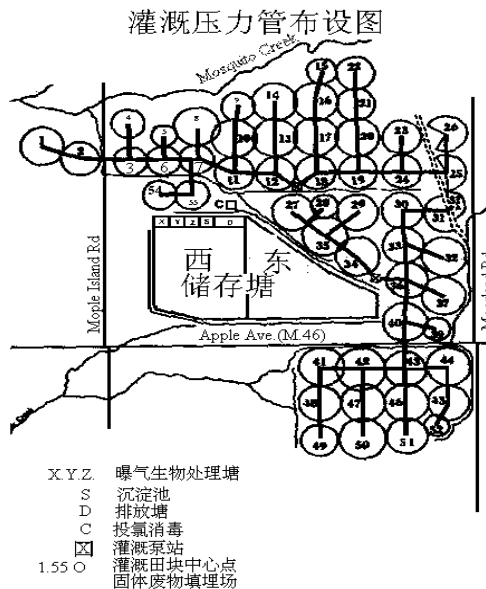


图 14 美国密歇根州 Muskegon 县土地处理系统平面图

曝气塘-沉淀塘-储存塘-农田灌溉的串联的土地处理系统，对污水处理达到极高的处理效率，农田渗滤水水质极好，其平均值 SS=7mg/L，BOD<sub>5</sub>=3mg/L，TP 0.05mg/L，NH<sub>4</sub>-N 0.6mg/L，NO<sub>3</sub>-N 1.9mg/L，大肠杆菌总数 ≤10<sup>2</sup>/100mL。可

以安全地补给地下水，或排入附近地表水体。土地处理已成为美国污水再生的主要技术之一，主要用于中小城市和社区。

#### 5.4.2 澳大利亚墨尔本市 Werribee 农场土地处理系统

该处理系统服务该市的中心区，西区和北区，接收和处理全市污水的 65%。墨尔本市西部排水总干管，将 47 万 m<sup>3</sup>/d 的污水（工业废水占 70%）送至该市中心西南，距离 35km 的 Werribee 农场中，现在改称为 Werribee Complex，即 Werribee 污水综合处理厂，污水在其中进行土地和塘系统处理。

Werribee 农场，接受澳大利亚第二大城市墨尔本市的 2/3 的污水量，并在该农场进行土地和塘处理；土地处理采用 2 种方式：土地过滤和牧草过滤。

##### 土地过滤系统 (Land filtration System)

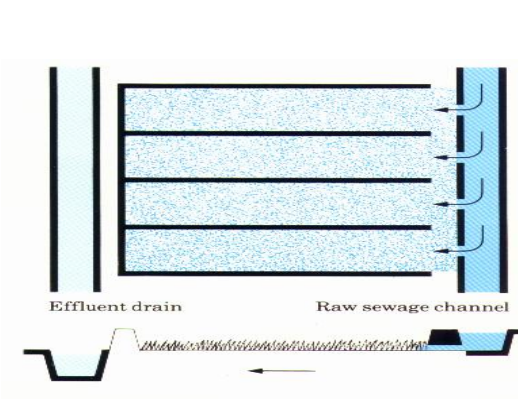


图 15 土地过滤示意图

图 16 土地处理进水干渠和配水支渠

由围堤筑成的矩形田块：

长 × 宽 = 180m × 10m

- 污水从配水系统中进入其中，从高端往低端流动，经土壤过滤得到净化。
- 灌溉方式：每轮（周期）21 天，其中灌水 2 天，晒干 5 天，放牧 14 天。
- 灌溉污水 50% 损失于蒸发、作物蒸腾和渗入地下。
- 共使用 3973 公顷土地，每年处理污水 3500 万 m<sup>3</sup>（约 9.6 万 m<sup>3</sup>/d）；
- 处理效果比牧草过滤系统好。

##### 牧草过滤系统 (Grass Filtration System)



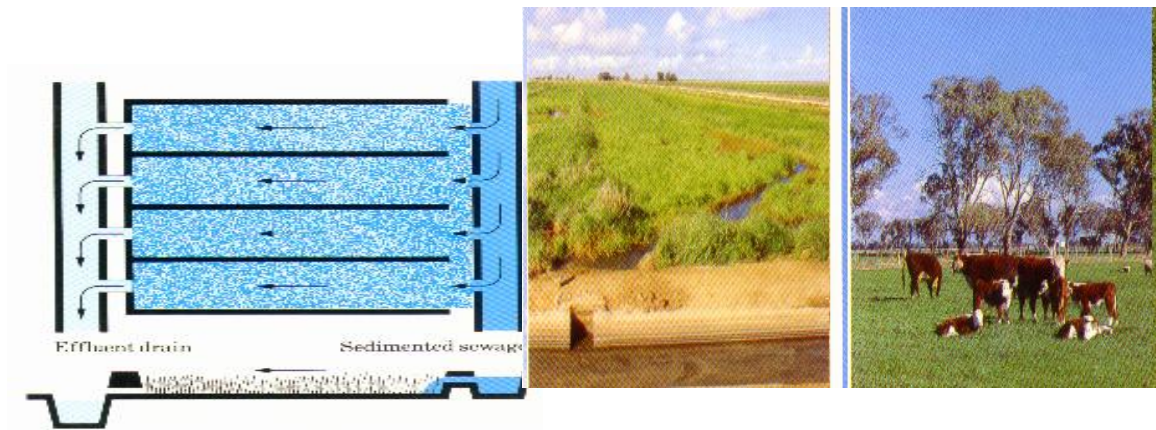
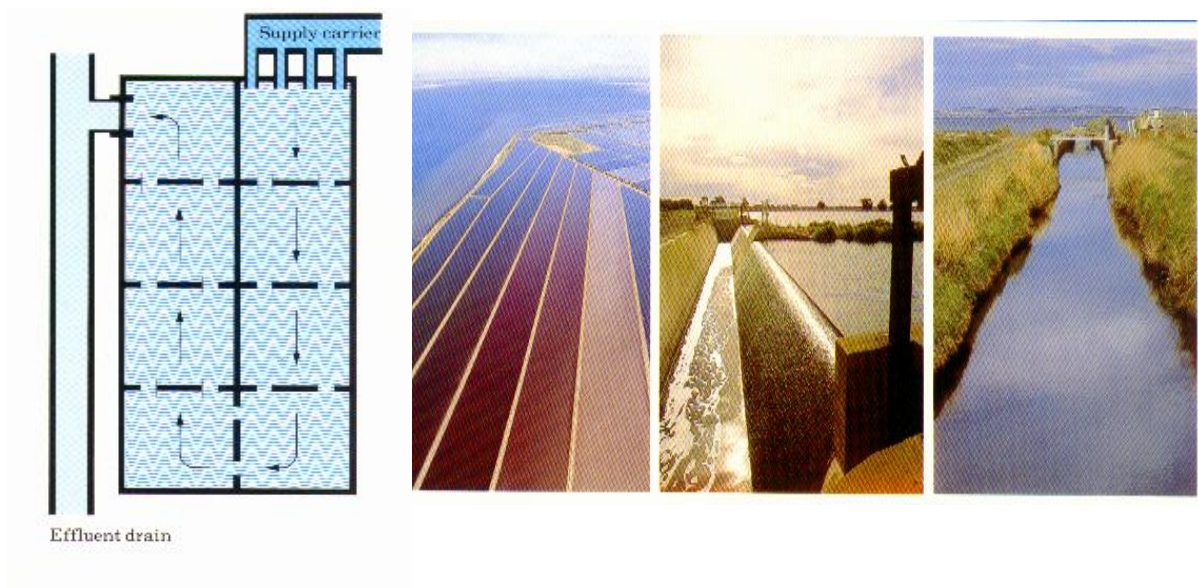


图 17 牧草过滤系统示意图

图 18 牧草过滤场及其上放牧的牛群

在牧草过滤中，沉淀污水以低滤速连续流过种有意大利黑麦草的有一定坡度的田块。水流经田块的时间 36-48 小时。污水流经牧草时，SS 被过滤截留，有机物被附着生长在牧草茎叶上的生物膜去除。共占用土地 1516 公顷，每年处理污水 4200 万  $m^3$ ，约 11.5 万  $m^3/d$ ；牧草过滤结束后，土地变干，种子落地，便可放牛、羊进去吃草。

#### 厌氧塘-曝气净化塘的多级串联塘系统



A 塘系统平面布置图

B 塘系统照片

图 19 塘系统照片 (B) 及 平面布置示意图 (A)

用于处理日高峰流量和雨季流量。污水以重力流流入，每个处理系列由 8-12 个单塘组成的串联塘系统。每组塘系统中的第一个塘深 2m，为厌氧塘，其余的深 1m，为曝气塘和净化塘。塘系统占地面积 1504 公顷，每年处理 9002 万  $m^3$  污



水，平均日处理量为：23.3 万 m<sup>3</sup>/d（冬季），27.3 万 m<sup>3</sup>/d（夏季）。



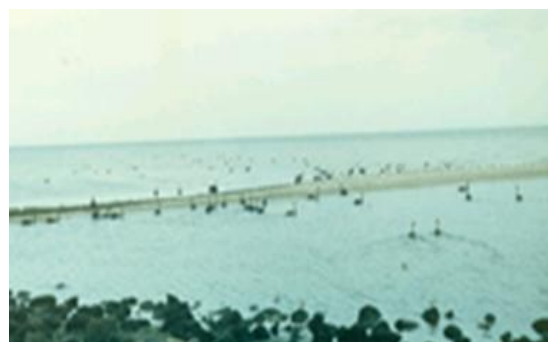
A 放牛牧场



B 曝气塘及曝气机



C 净化塘排水口



D 净化塘中的天鹅

图 20 澳大利亚墨尔本（Melbourne）市 Werribee 农场污水土地与塘处理照片

### Werribee 农场土地处理系统效益

#### 经济收益：

原来无污水灌溉牧场时，每英亩（约合 6 亩地）牧场仅能饲养 1 头牛，污水灌溉后，牧草生长繁茂，每英亩可饲养 6 头牛。每年生产和销售菜牛 6500 头。每年收羊毛 300 包，销售羊 3 万头。牛羊的主要作用是起割草机的作用；也实现了的经济效益，真正实现了污水处理资源化和生态化。

#### 环境效益：

处理后的污水进入 Philis 海湾，创建了很好的生态环境，鸟类多达 200 余种；该污水处理农场，遍地野草和兔子，构成良好的自然生态环境。

## 6 国内外大城市污水处理现状

现在国内外大中城市仍然普遍应用活性污泥法污水处理技术，最新一代的生物膜工艺也有增多应用的趋势。现在应用的活性污泥和生物膜法都需要同时能去

除有机物（COD 和 BOD）和营养物如氮、磷。国外一些国家如欧盟尤其是英、德、瑞典、挪威等，对出水排入淡水水体（淡水湖、水库和河流）和排入海中采用不同的营养物排放标准；由于淡水水体的限制性营养物为磷，因此，对排入淡水水体尤其是湖泊的污水处理厂出水对磷规定了严格的排放标准，如北欧要求出水 TP 浓度  $\leq 0.2\text{mg/L}$ ，而对氨氮和总氮没有严格要求。因此，北欧的一些出水排入湖泊的污水处理厂，并不应用活性污泥工艺或生物膜工艺，而是采用化学絮凝沉淀处理后附加微絮凝接触过滤处理：

原生污水 → 预处理 → 化学混凝-絮凝混合反应池 → 凝絮沉淀池 → (出水 TP  $\leq 1\text{mg/L}$ ) → 微絮凝接触过滤池 → 出水 TP  $\leq 0.2\text{mg/L}$ 。

海水中限制性营养物为氮而不是磷，因此，英国对出水排海的污水处理厂仅对出水的氨氮和总氮制定排放标准，对磷无限制，因此，这些污水处理厂只采用 A0 好氧缺氧的硝化-反硝化工艺。

表 3 北京奥林匹克湖水质 3 次检测一览表

采样时间	温度 ℃	透明度 m	F <sup>-</sup> mg/L	As mg/L	COD mg/L	SS mg/L	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N mg/L	电导率	LAS
2007-5-16	22.2	1.4	0.51	0.00068	20.1		<b>8.86</b>	1017	0.14
2007-5-22	19.8	0.50					<b>8.88</b>	1005	
2007-6-5	25.3	0.4	0.8	0.0008	26.6	32		993	0.76
采样时间	BOD mg/L	DO mg/L	H <sub>2</sub> S mg/L	Chla mg/L	TN mg/L	TP mg/L	pH	总高锰酸 盐指数 mg/L	大肠 菌群
2007-5-16		5.3	<0.005	0.00136	<b>21.3</b>	<b>0.031</b>	8.3	5.6	150
2007-5-22		8.16		0.00136	<b>19.4</b>	<b>0.021</b>	8.7	5.4	
2007-6-5	3.3	6.9	0.031	0.00819	<b>19.9</b>	<b>0.01</b> 控制水华	8.5	4.8	

我国对所有污水处理厂都采用统一的排放标准，无论出水排入淡水水体或海水，都对氮和磷执行严格的排放标准。这样的出水排放标准适用于污水再生厂，即污水经处理后不外排，而再生利用。但是，如果再生水用于河道和湖泊的生态景观补给水，则无需对总氮和氨氮采取如此严格的限制。以北京奥林匹克湖为例，再生水只要控制 TP 0.02mg/L（平均值），即使 TN 达到 20mg/L 和 NH<sub>3</sub>-N 达到 8.8mg/L，湖水仍能保持清澈透明。见表 4

表 4 德国城市污水处理厂污染物排放标准

污水厂规模 (原水 BOD <sub>5</sub> 总量)	COD (mg/L)	BOD <sub>5</sub> (mg/L)	NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	污水处理量 (m <sup>3</sup> /d)
1 级: BOD <sub>5</sub> 总量 60kg/d	150	40	-	-	-	1,000
2 级: BOD <sub>5</sub> 总量 0-300kg/d	110	25	-	-	-	1,000~5,000
3 级: BOD <sub>5</sub> 300-600	90	20	10	-	-	5,000~1 万
4 级: BOD <sub>5</sub> 600-6000kg/d	90	20	10	18	1	1 万~10 万
5 级: BOD <sub>5</sub> >6000kg/d	75	15	10	13	0.5	10 万以上

德国对不同规模污水处理厂制定和施行不同的出水排放标准, 规模越大的制定和施行的排放标准越严格, 而对小型污水处理厂, 则制定和施行较宽松的排放标准, 如处理规模为 1000~5000m<sup>3</sup>/d 的污水处理厂, 对氨氮、总氮和总磷无排放标准; 对 5000-10000m<sup>3</sup>/d 的污水处理厂, 只规定出水氨氮排放标准 10mg/L, 而对出水总氮和总磷则无规定; 对于处理规模 1 万~10 万 m<sup>3</sup>/d 污水处理厂, 则对出水氨氮、总氮和总磷都规定有排放标准, 分别是 10mg/L, 18mg/L 和 1mg/L; 对于处理规模大于 10 万 m<sup>3</sup>/d 的污水处理厂, 这 3 个水质参数的排放标准更加严格, 分别为: 10mg/L、13mg/L 和 0.5mg/L。

我国现在制定和实施的城镇污水处理厂出水污染物排放标准, 无论是排入淡水水体或海水, 无论处理规模大小, 都执行一个非常严格的标准, 对于一些小型污水处理厂实在是勉为其难, 实际运行中往往达不到要求的出水排放标准。德国根据不同规模制定和施行不同的出水排放标准, 是科学合理的和实事求是的, 值得在我国修改或重新制定污水处理厂出水水质标准时参考和借鉴。

### 6.1 低碳、高负荷和高效城镇污水处理技术-污水处理技术的主要发展趋势

大城市和特大城市土地资源日趋短缺, 新建、扩建和升级改造的污水处理厂越来越难找到足够的地面来建造或扩建污水处理厂。例如深圳市, 2006 年计划新建 2 座大型污水处理厂, 一座是布吉河污水处理厂, 处理规模 20 万 m<sup>3</sup>/d, 而可用的土地面积只有 2.9 公顷; 而采用常规或改进的活性污泥工艺的污水处理厂的占地面积通常需要 0.3~0.5 公顷/万 (m<sup>3</sup>/d) 污水, 为此至少需要 5~6 公顷的土地。因此只能采用更高负荷的处理工艺-生物膜移动床工艺 (MBBR HYBAS), 处理流程为: 原生污水→预处理→预缺氧/厌氧/缺氧/好氧移动式 AS-BF 复合生物处理池

(MBBR HYBAS 工艺) → **双层沉淀池** → 出水水质设计达到一级 A 排放标准。

## 6.2 生物膜-活性污泥复合式移动生物膜床工艺的优缺点

这种处理工艺系统，是由挪威科技大学 (Odengard 教授) 与 Kaldnes A/S 公司联合研发的。已在城市污水、食品、屠宰、酿酒、渗滤液等废水和受污染水体处理中得到越来越多应用；它因能以比活性污泥 (AS) 工艺更高的水力负荷率和有机负荷率运行，能更高效地处理污水，特别适用于土地面积小用活性污泥工艺布置不下的新建或扩建污水处理厂，也可用它对现有超负荷运行的活性污泥工艺污水处理厂进行升级改造。

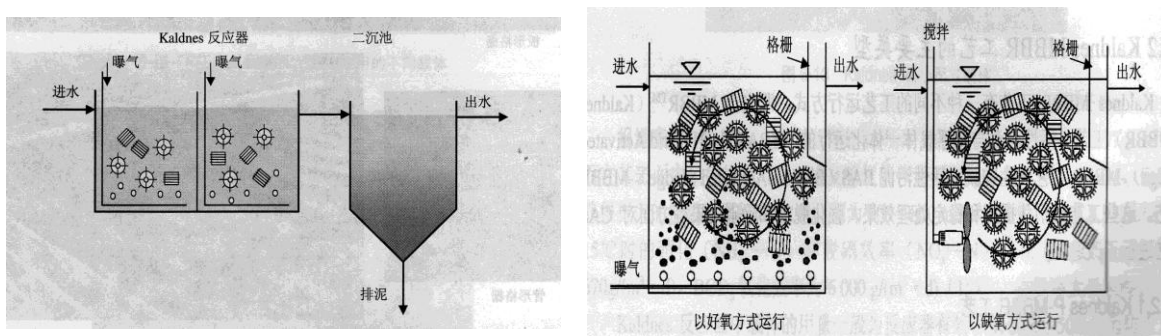
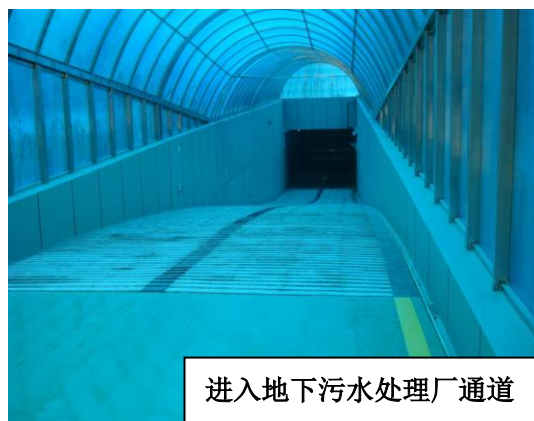


图 21 MBBR 工作示意图：左图-处理流程示意图；右图-横断面塑料环填料旋流

MBBR 生物处理池中塑料环填料表面上附着生长的生物膜，为一微型硝化-反硝反应器，可在其表面进行硝化，而在内层在缺氧环境下进行反硝化，要求的反硝化率不高时，无需内回流。



左图：双层沉淀池

右图：沉砂池

图 22 深圳市布吉河污水处理厂 (20 万吨日, MBBR-HYBAS 工艺, 地下)

这种处理工艺系统简单，但比活性污泥系统具有更大的比生物量，能更高效

地去除 COD 和 BOD<sub>5</sub>，也能高效地进行硝化和部分反硝化。

由于在填料环上的生物膜内层进行缺氧水解酸化和厌氧甲烷发酵，使生物膜固体转化成液体和气体产物，如挥发性脂肪酸、氨基酸、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 等，使生物固体（污泥）减少。此外，由于在生物膜中存在较长食物链（菌藻-原生动物-后生动物，通过逐营养级扑食作用使剩余污泥量减少。但是，其污泥减量远没有固定生物膜工艺那么少，仅能使剩余污泥减量 50%左右，而后者能使剩余污泥量减少 80%~90%，或者仅为活性污泥工艺剩余污泥量的 1/10~1/5。

设置预缺氧段（前置缺氧段）、厌氧段、缺氧段和好氧段，以及设置内回流和活性污泥回流等设施的 MBBR HYBAS 处理系统，能高效地处理污水，广谱地去除各种污染物，使出水达到 GB18918-2002 的 1A 排放标准；

MBBR-HYBAS 处理系统产生的剩余污泥，大都是脱落的生物膜，具有良好的沉淀效能，SVI 小。

MBBR-HYBAS 生物处理池中，在塑料环上的生物膜具有良好的微环境，生物膜对其中的细菌群落有良好的保护作用，能在低水温下有效地降解有机物和营养物；例如，某企业的有机污水处理设施，有原来的生物转盘改造成 MBBR-HYBAS 工艺，不仅提高了其处理效能，而且大大提高了其抗冲击负荷。当温度低于 8℃ 时，有机物和氨氮的去除率分别达到 73%和 72%。

### 6.3 曝气生物滤池

法国研发的曝气生物滤池（Biological Aerated Filters, BAF）应用最多的是 Biostyr 和 Biofor。BIOSTYR 曝气生物滤池的构造图如图 23 所示，它由聚苯乙烯颗粒做填料，以上向流膨胀床方式运行。由于其比重<1，填料颗粒会随出水流失，因此，在其上部设置阻拦截留筛网和支撑。BIOFOR 采用陶土颗粒做填料，比重>1，也以上向流运行，其滤料截留筛网集支撑层设置在下部。

#### 6.3.1 法国巴黎 BAF 工艺 Colombes 污水处理厂

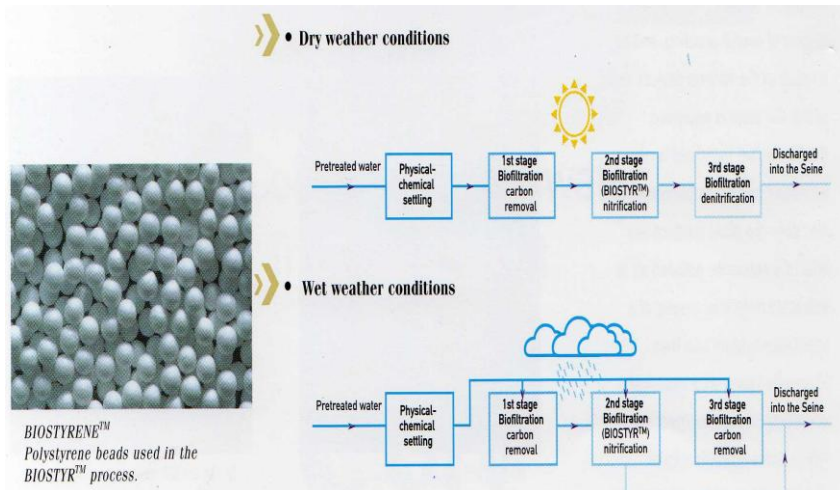


图 23 法国巴黎 Colonges 污水处理厂旱季和雨季污水处理流程示意图

旱季：Actiflo 强化混凝絮凝处理后 3 级 BAF 串联处理：Biofor 除碳有机物-Biostyr 硝化-Biofor 反硝化； 雨季：Actiflo 强化混凝絮凝处理后 3 级 BAF 并联处理

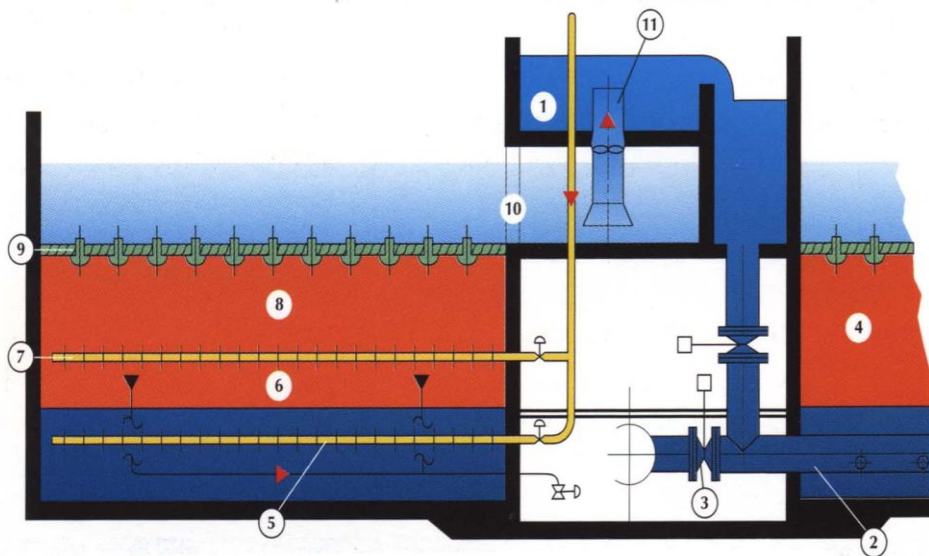


图 24 Biostyr 工艺示意图

1.进水管； 2.滤池进水和排泥管道； 3.反冲洗阀； 4.滤料； 5.空气冲洗管道； 6.非曝气区； 7.工艺曝气管道； 8.曝气过滤区； 9.带滤帽的支撑板； 10.处理水的贮存/与排出区； 11.循环泵





图 25 法国巴黎塞和中心 Colombes 无数处理厂

（占地 4 公顷，处理能力：旱季 26 万 m<sup>3</sup>/d。雨季：78 万 m<sup>3</sup>/d.

法国巴黎塞纳河中心 Colombes 污水处理厂，是设计、建造和运行最成功的曝气生物滤池（BAF）系统。它由 BIOFOR 和 BIOSTYR 两种型式 BAF 组成 3 段串联的处理系统（旱季），用以去除含碳有机物和硝化与反硝化去除氨氮和总氮，以及前置强化化学沉淀除磷。雨季则 3 组 BAF 并联运行，其处理雨污混合水流量达到旱季流量（污水流量）的 3~4 倍，即 72 万~96 万 m<sup>3</sup>/d，仍能达到与接近旱季的处理效果。

曝气生物滤池（BAF）的最大优点是占地面积小，巴黎 Colombes 污水处理厂，由于 BAF 工艺和加重凝絮化学沉淀工艺（Actiflo），其旱季设计污水处理能力 24 万 m<sup>3</sup>/d，雨季雨污混合水设计处理能力 72 万~96 万 m<sup>3</sup>/d；其比占地面积：旱季为 0.17 公顷/万 m<sup>3</sup>/d，雨季则仅为 0.04 公顷/万 m<sup>3</sup>/d。这比活性污泥工艺污水处理厂占地要小得多，此外，后者难以有效处理雨季稀释的雨污混合水，为此德国的合流制 AS 工艺污水处理厂只能取截流倍数 n=1，致使合流制下水道雨季大量的溢流水需要另行处理。

但是，曝气生物滤池的缺点也很突出，即能耗大，资源消耗也大，如化学沉淀需要大量的化学药剂和反硝化需要消耗甲醇等。因此，从节能、节约资源和低碳等方面比较，它不如 BF-AS 复合生物处理工艺好。

### 6.3.2 深圳横岭 BAF 工艺污水处理厂

横岭污水处理厂采用曝气生物滤池（BAF）工艺，其处理流程是：预处理→混凝-絮凝反应-斜管沉淀池→曝气生物滤池（BIOFOR）→出水排入龙岗河。



图 A：混凝-絮凝-斜管沉淀池



图 B：凝絮上翻与池面壅水



图 C：一组生物曝气滤池（BAF）



图 D：运行中的曝气生物滤池

图 26 深圳市横岭污水处理厂（处理规模：40 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ，占地面积：4.7 公顷，BAF 工艺）

我国一些采用 BAF 工艺污水处理厂，包括这座 BAF 处理厂，都没有法国 Colombes 污水处理厂设计、建造和运行得科学与合理。该厂中曝气生物滤池运行良好，但是其前处理斜管沉淀池运行不理想，斜管中生成大量的生物膜使许多斜管堵塞，导致局部斜管超负荷大流速出水，由于阻力过大发生壅水，使池面水位上升，淹没溢流堰。这必然影响后续的 BAF 正常运行。

如果采用法国研发和应用的投加细沙的加重凝絮斜板沉淀池 Actiflo（HRT=30min），或者采用斜板取代斜管，且采用宽板间空隙如 8~10cm，以及采用硫酸亚铁与高锰酸钾做絮凝剂进行氧化还原反应形成密实较重的凝絮，会显著改善化学沉淀效果而不致发生严重堵塞。

#### 6.4 FB-AS 固定式生物膜复合生物处理工艺（HYFBAS）

我们研发的固定式生物膜-活性污泥（FB-AS）复合生物处理系统（HYFBAS），在其复合生物处理池中，同时存在附着生长在载体上生物膜和处于悬浮状态的活

性污泥，池中具有高的生物总量，在 5~20g/L 之间（取决于进水 BOD 浓度），具有高的处理负荷率；此外，它能实现 HRT（水力停留时间）、SRT（活性污泥停留时间）和 BRT（生物膜停留时间）的彼此分离，因此能在很短的水力停留时间（3~4h）内同时高效地去除有机物、氮和磷。

跟悬浮的活性污泥和移动式生物膜相比，固定式生物膜载体填料，为细菌（包括硝化菌和反硝化菌）、原生动物和后生动物的生长繁殖创造了最舒适的生存环境。因此，通过生物膜中进行的同步硝化-反硝化能在很短时间内有效地去除氨氮和总氮；活性污泥的循环回流，经历厌氧-好氧的交替环境，或者预缺氧-厌氧与好氧环境的交替循环，也能有效地强化生物除磷；

在固定生物膜中形成较长的食物链网，对细菌和藻类的扑食作用，以及通过厌氧和缺氧环境的水解、酸化和甲烷发酵，使污泥固体转化为液态和气态产物，使该系统产生的的剩余污泥量很少，仅为活性污泥系统的 1/10~1/5，甚至更少。

#### 6.4.1 山东省东阿县污水处理厂处理厂

该县污水处理厂采用以固定生物膜(FB)为主体的 FB-AS 复合生物处理工艺，设计处理能力 4 万 m<sup>3</sup>/d，处理流程为：

原生污水→粗-细格栅-曝气沉砂池→复合生物处理池→后沉池→2 塘串联净化塘→出水跌水曝气→厂外大净化景观塘→最后出水，多年稳定地达到一级 A 排放标准。



A 复合生物曝气池



B 二沉池





C 厂外净化塘



B 场内净化塘

图 27 山东省东阿县污水处理厂

该污水处理厂由于精心设计、建造和运行，运行一直稳定，处理效果多年稳定地达到一级 A 排放标准（详见上表），被评为山东省县级模范污水处理厂。

表 5 山东省东阿县污水处理厂运行效果一览表

m <sup>3</sup> /d		COD (mg/L)	BOD (mg/L)	SS (mg/L)	NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	TP (mg/L)	TN (mg/L)
进水	最高值	651	260	400	50.9	4.5	58.9
	最低值	150	69	40	25	1.4	36.2
	平均值	320	126	105	35	1.85	40.5
后沉池 出水	最高值	55	18	35	30	3.65	27.8
	最低值	16	10	10	6.7	0.45	12.7
	平均值	45	6.6	12	8	0.50	12.5
带一沉 池系统 出水	最高值	40	11	12	6	0.9	20.2
	最低值	15	3	2.5	0.98	0.86	7.3
	平均值	20	2.5	6.6	1.2	0.12	8.5
去除率 %	最高值	95.5	95	97.4	88.2	80	69
	最低值	80.12	88.5	86.9	79.8	70.6	59.8
	平均值	90	95.7	96.2	93.5	92.6	80

#### 6.4.2 深圳布吉河水水质净化厂 10 万 m<sup>3</sup>/d 强化固定复合生物处理系统 (EHYFBAS)

强化复合生物处理工艺 (EHYFBAS: Enhanced HYbrid Fixed Biofilm-Activated Sludge) 具有高浓度生物量 (biomass 20~50g/L) 和很短的水力停留时间 (3~4h)，其中既存在附着生长在载体上的固定生物膜，也存在悬浮的活性污泥。

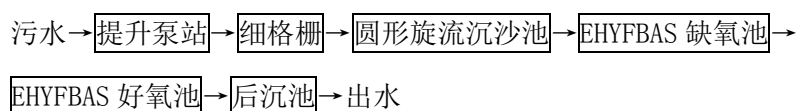
这种强化复合生物处理系统，能够实现 3 个 RT 的彼此分离，即水力停留时间 (HRT)、活性污泥停留时间 (SRT) 和生物膜停留时间 (BRT) 的彼此分离；通过调整各自适宜的停留时间，如 HRT = 3 ~ 4 h，SRT = 3 ~ 5 d 和 BRT = 15 ~ 20 d，由于分别为聚磷菌、硝化菌、反硝化菌和有机物去除菌创造了良

好的生存和繁殖环境，使该系统能够在最短时间内同时高效地去除 C O D、B O D<sub>5</sub>、T N、N H<sub>3</sub>-N 和 T P 等污染物；

通过间歇式曝气运行方式（如 1~2h 曝气 2h 停止曝气的反复交替运行），能有效地控制后生动物的过量繁殖，维持正常的食物链各营养级生物量的平衡；采用较低曝气强度使复合生物处理池中的 DO<4mg/L, 最好 2~3mg/L, 也能控制后生物过量繁殖；此外，易于发生短程硝化与反硝化；

往强化复合生物处理池中投加适量的硅藻精土（改性硅藻土）或其他化学除磷剂，能显著改善沉淀效率、提高除磷效率和提高剩余污泥的脱水效率。

污水处理流程：



污泥处理流程：

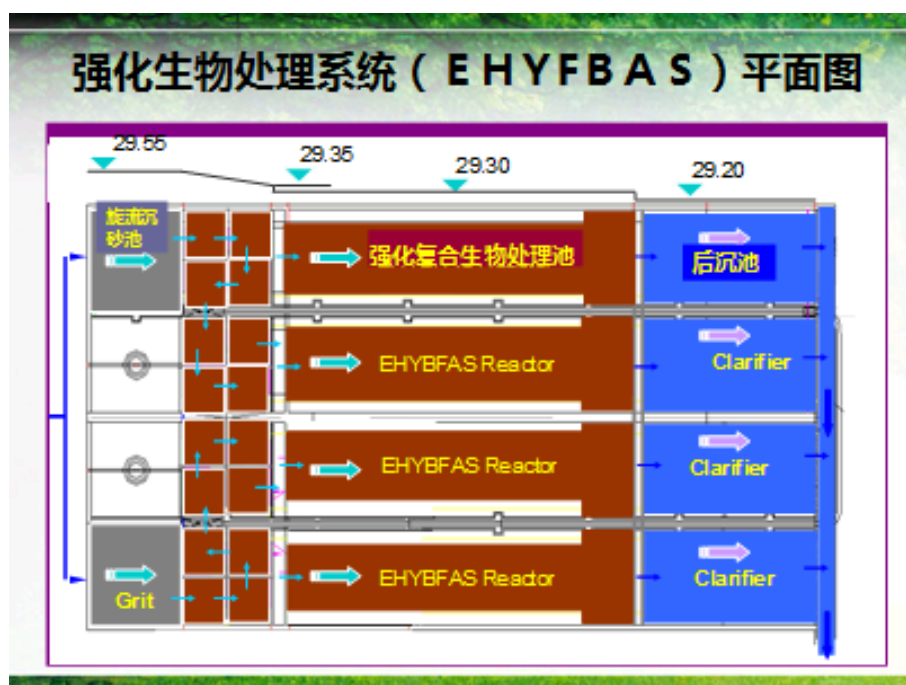
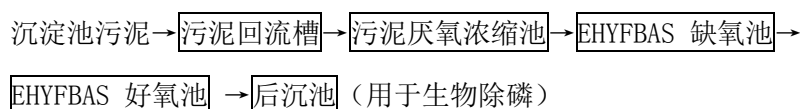
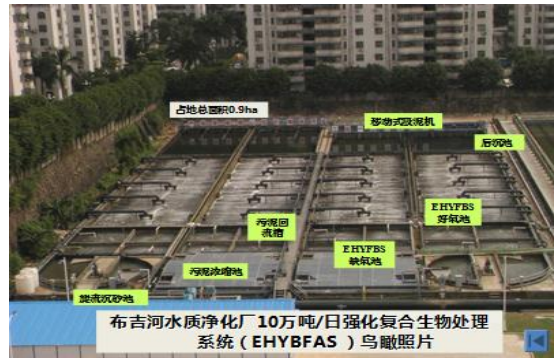


图 28 深圳市布吉河水水质净化厂强化复合生物处理系统平面布置图



A 曝气池缺氧段



B 复合生物处理系统图



C 曝气段



D 曝气池及后沉池

图 29 圳市布吉河水水质净化厂复合生物处理系统

固定填料为微生物（包括藻、菌、原生动物和后生动物）的生长和繁殖提供了优越的环境，尤其是后生动物，在环境条件适宜时能够大量繁殖；它们会过量扑食细菌和原生动物，尤其是世代时间长繁殖缓慢的硝化菌，导致硝化效率降低，出水氨氮不达标。

试验发现，在  $DO > 4\text{mg/L}$  时，后生动物如颤蚓、线虫等会过量繁殖，扑食过量的细菌和原生动物，导致食物链破坏，使固定生物膜处理池中处理效果下降。

防止后生动物过量繁殖的措施：

- 在固定生物膜处理池中进行间歇式曝气，使填料上的后生动物的生存环境处于好氧-缺氧状态交替变化状态，抑制了其繁殖，可使其保持适宜的数量，以保障各类细菌包括硝化菌的正常生长和增殖；

- 进行低强度曝气，使处理池水的  $DO < 4\text{mg/L}$ ，最好  $2\sim 3\text{mg/L}$ 。

该处理系统是在原来临时性处理构筑物(强化一级化学沉淀处理)改建而成，因陋就简，很不理想。即使如此，在复合生物处理池  $HRT=3\text{h}$  和后沉池  $HRT$  仅  $1\text{h}$



的运行条件下,大部分时间一直维持稳定运行,出水稳定地达到一级 B 排放标准。HYFBAS 好氧池进水口处投加适量的硅藻精土(改性硅藻土)10~20mg/L,能显著提高除磷效率,使出水 TP 达到 0.2~0.5mg/L,SS 30~40mg/L, BOD<sub>5</sub> 5~10mg/L, COD 40~50mg/L。

## 6.5 膜生物反应器(MBR)污水处理厂

膜生物反应器(MBR)工艺污水处理厂,以其处理流程短。占地面积小和处理效率高,其出水达到再生水质可做多种应用而越来越受重视。北美一些污水再生水厂采用以 MBR 和反渗透(RO)为主体的系统,其处理再生流程为:

原生污水→**预处理**→**MBR 池**→**反渗透(RO)池**→回注地下水层作为饮用水源补给水。

MBR 在我国的应用从上世纪 90 年代初的 20m<sup>3</sup>/d 至几百 m<sup>3</sup>/d 处理规模用于大型建筑物或小区的中水(再生水)设备,到本世纪初期北京为迎接奥运会急需改善城市水环境,作为污水重要再生技术之一的 MBR 获得大规模的迅速发展。随着北京清河和北小河再生水厂的建成和投产运行以及作为奥林匹克湖和附近河流的生态景观补给水源取得获得显著地环境效益和社会效益,并起到示范带头作用。现在许多城市都在设计和建造 MBR 污水再生厂,规模从几万 m<sup>3</sup>/d 到几十万 m<sup>3</sup>/d。在十余座已经运行的城市污水再生厂中,设计、建造和运行最合理的当属广州市京溪地下净水厂(10 万 m<sup>3</sup>/d),其地上建造了一座园林式公园,其中的景观湖由 MBR 再生水补给。

该净水厂的 MBR 污水再生流程为:

原生污水→**细格栅**→**曝气沉沙池**→**转筒式特细格栅**→**改进 A<sup>2</sup>/O 生物处理池**→**MBR 池**→**UV 辐射消毒**→出水排入附近河涌做生态景观用水

在改进 A<sup>2</sup>/O 生物处理池和膜池的 HRT 分别为 5.8h 和 1.6h, MLSS 5~7 和 6~8g/L, 污泥负荷: 0.07~0.1kgBOD<sub>5</sub>/kg MLSS 和污泥龄(SRT) 15~20d 的运行条件下,出水水质优良,平均值: COD 9.7mg/L, BOD<sub>5</sub> 1.7mg/L, SS 0.5mg/L, TN 11.9mg/L, TP 0.2mg/L, 细菌总数<1000cfu/L, 和粪便大肠菌总数<1000cfu/L。出水水质优于一级 A 排放标准,达到地表水环境质量 IV~III 标准,可用作城市水体生态景观用水。



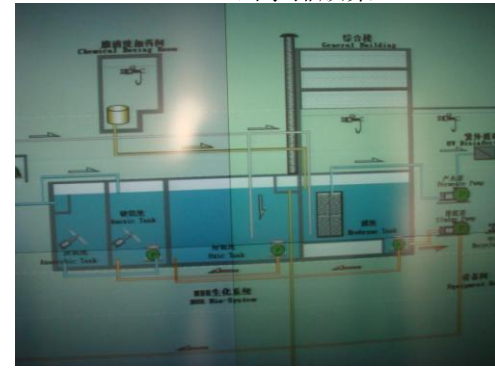
A 地上园林



B 出水排放渠



C 地下地下 A<sup>2</sup>/O-MBR 池



D 处理流程

图 30 广州市京溪地下 MBR 工艺净水厂 (10 万 m<sup>3</sup>/d, 占地 1.8ha)

这座 MBR 污水再生厂 (净水厂), 无论从设计、建造和运行各方面评价, 都是国际先进的大规模 MBR 净水厂之一。其最大优点是其处理系统和流程精简, 污水经完整的预处理之后, 直接进行 A<sup>2</sup>/O-MBR 处理, 再经 UV 辐照消毒, 其出水就达到地表水环境质量 IV 类标准, 可有做城市水体的生态景观水源之一。

但是, 仍有需要继续改进和完善之处:

- 现在的 A<sup>2</sup>/O-MBR 生物处理池的 HRT 仍然偏大, 为了节省占地面积需要加深池深至 7m。增加了施工难度和基建投资。如果在 A<sup>2</sup>/O 生物处理池中装填比表面积大的软性生物膜载体填料, 可大幅度增加生物量, MLSS 可高达 15~20g/L, HRT 可缩短至 4h。

- 污泥脱水改用板框压滤机, 德国鲁尔和管理协会的集中式污泥处理中心, 全部采用装卸全部自动板框压滤机, 脱水污泥滤饼的固含率和含水率各为 50%; 广州大坦沙污水处理厂污泥脱水也采用了板框压滤机, 其脱水污泥滤饼的固含率达到 45%~50%。其体积仅为含水率 78~80%污泥的 1/3 左右。无论是用作农田、林场或绿化带有机肥料, 或是垃圾填埋, 其运输和处置都更方便、经济和有效。

## 7 低碳、节能和资源化的污水生态处理系统

生态塘的工作原理示意图如图 32 所示。在塘中存在着分解者生物如细菌和真菌、生产者生物如藻类和其他水生植物和消费者生物如原生动物、后生动物、浮游动物、底栖动物、鱼、鸭、鹅、野生水禽等，它们构成多条食物链并分工合作，对污水和沉淀污泥中的有机污染物进行分解、同化和转化，最后转化成水生作物如芦苇、芦笋、莲藕和水产如鱼、虾、蟹、鸭、鹅等作为资源回收，同时污水转变成清水予以回收利用和实现水循环；沉淀污泥转变成气体如  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{H}_2$  等而逸入大气，以及转化成液体和溶解性物质如  $\text{CO}_2$ 、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  等，它们作为无机营养盐参与藻类和其他水生植物的光合作用而转化成其新细胞和新机体；后者作为食料被上一营养级的动物捕食而转化成浮游动物或底栖动物的新细胞和新机体；后者在作为更上一营养级动物捕食而转化成鱼、蟹或鸭的新细胞和新机体。由此可见，在组合生态塘系统中，污泥中的肥料成分全都转化成溶解性无机营养盐而促进藻类、其他水生植物的生长和繁殖，它们通过食物链的逐级迁移转化促进浮游动物、底栖动物和鱼、鸭等的生长而实现污泥的资源化处理 and 处置。有机污泥能够实现 100% 转化成气体和液体产物而消失。为此组合生态塘能够连续运行 20 年~30 年而从不排出污泥。

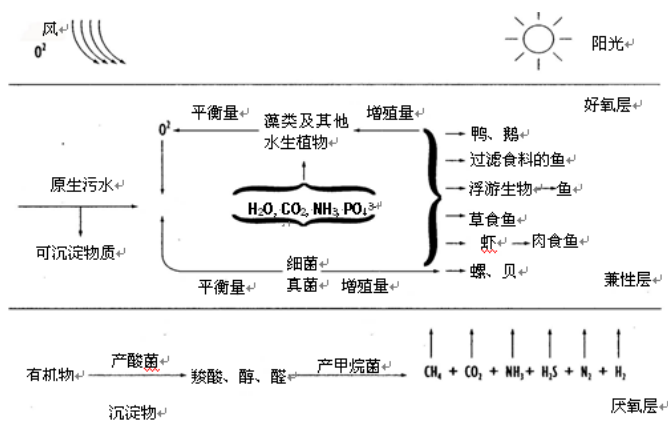


图 31 污水处理生态塘工作原理示意图

## 7.1 大庆青肯泡石化废水生态塘处理系统

### (1) 青肯泡石化废水处理系统概况

青肯泡石化废水生态处理系统位于安达市与肇东市交界处，主要处理大庆石化公司经活性污泥工艺处理后的乙烯生产废水和该厂区内的生活污水，该生态塘处理系统占地 2500 公顷，其设计处理能力为 10 万吨/日，其总水力停留时间 (HRT) 约为一年。

青肯泡石化废水生态处理系统建于 1984 年，由厌氧塘、兼氧塘、好氧塘、芦苇湿地和冬季储存塘五部分组成。石化废水生态处理系统的工艺流程及地理位置如图 34 所示，图 32 和 33 为该生态处理系统厌氧塘和芦苇湿地的照片。来自大庆石化公司的二级出水（厂内活性污泥处理厂出水）经 #1 和 #3 泵站增压后，经过 28km 长的排污管线首先进入青肯泡生态处理系统的厌氧塘，厌氧塘共设两组，并联运行，每塘长×宽为 500m×109m，塘深为 4.5m，污水停留时间约为 4.5d。厌氧塘出水经穿孔溢流管收集后进入兼氧塘。兼氧塘也为两组并联运行，每塘长×宽为 500m×109m，塘深为 4.5m，污水停留时间约为 4.5d。兼氧塘的出水经溢流堰和计量堰流入好氧塘，好氧塘占地面积为 2450ha，在好氧塘的中段和末段有较大面积（约 500—600 ha）天然生长的芦苇湿地，整个生态处理系统实行冬储夏排，11 月中旬至 5 月底停留 224d，5 月底提闸放水，停留 52d，最大放水流量 4.0m<sup>3</sup>/s（34.56 万 m<sup>3</sup>/d）。

## （2）青肯泡生态塘系统的运行效果

青肯泡石化废水生态处理系统，主要接纳经活性污泥工艺处理后的乙烯厂生产废水和该厂区内的生活污水二级出水。由于厂内设计、建造和运行的活性污泥工艺污水处理厂运行效果差，出水超标很多，根据作者建议在厂外青肯泡划出 2500ha（25km<sup>2</sup>）设计建造多级塘做补充处理使出水达标排放。根据对青肯泡生态处理系统水质的监测，青肯泡所接纳污水中的 COD 80.1~202.4 mg/L，SS 59.25~286 mg/L，BOD<sub>5</sub> 23.2~62.6mg/L，氨氮 14.8~24.15 mg/L，苯酚 0.27~1.11 mg/L，硫化物 0.01~0.9 mg/L，TP 0.5~2.6mg/L。经过青肯泡生态系统的处理后，



图 32 青肯泡石化废水处理生态塘厌氧塘 图 33 青肯泡石化废水处理生态塘湿地  
最终排放口处的出水水质可达到 COD 38.4~103.4 mg/L，SS 10~79.24 mg/L，BOD<sub>5</sub> 3.13~8.6mg/L，氨氮 2.8~14 mg/L，苯酚 0.003~0.01mg/L，硫化物<0.01



mg/L, TP 0.15~0.4mg/L。各构筑物中污染物浓度变化范围详见表 6。

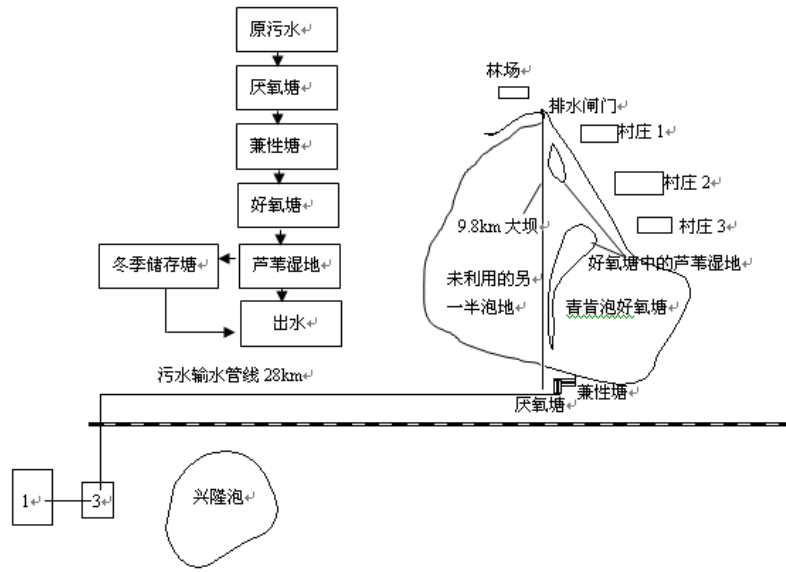


图 34 肯泡生态处理系统位置及流程图

表 6 大庆石化废水处理系统各构筑物中污染物浓度变化范围详表

水质指标 (mg/L)	厌氧塘进水	兼性塘进水	好氧塘进水	好氧塘出水
SS	559.25-286	446-222.1	336-202.5	10-79.24 (32.5)
COD	80.1-202.4	90.2-136.1	57.4-115.4	338.4-103.4(64.3)
BOD <sub>5</sub>	23.2-62.6	11.75-31.2	6.4-24.2	3.13-8.6(4.8)
NH <sub>4</sub> -N	14.8-24.15	15.1-26.87	12.3-22.6	2.8-14 (5.6)
NO <sub>2</sub> -N	<0.05-0.9	<0.05-0.9	<0.05-0.6	<0.05(0.03)
NO <sub>3</sub> -N	0.18-5.0	0.15-4.2	0.41-3.6	0.2-3.62(1.6)
硫酸盐	424.7-625	308.8-726	477.2-849	315-464.1(378.4)
TP	0.5-2.6	0.4-3.2	0.5-1.2	0.153-0.4(0.25)
TN	17.01-43.9	21.9-59.4	14.89-46.3	7.9-11.5(9.3)
LAS	3.864	5.032	4.113	1.21-2.22(1.57)
pH	7.78-7.89	7.61-7.75	7.35-7.92	8.10-8.24(8.16)
挥发酚	0.27-1.11	0.08-1.06	0.02-0.05	0.003-0.01(0.0050)
可溶性固体	1138-1752	1017-1536	1065-1568	1688-1872(1768)
F <sup>-</sup>	0.8-4.48	0.8-3.3	0.9-4.66	0.8-5.03(2.18)
S <sup>2-</sup>	<0.01-0.9	<0.01-0.7	<0.01-0.56	<0.01

该多级塘-湿地生态处理系统具有明显的污染物去除效果,尤其是在夏季温暖季节(5-10月份),最后出水水质达到国家污水综合排放一级标准;其余月份大都达到二级和接近二级排放标准。温暖季节贮存塘水质良好,水草繁茂,水中自然生长多种鱼类;因为在这一生态系统中有丰盛的食物而吸引了众多的鸟类,构成生机盎然的生态系统。好氧塘和湿地附近农村村民在其中放养上万只鸭、鹅,它们以水中浮萍(鸭草)、浮游动物如轮虫、水蚤等为食料;村民打捞鸭草和水蚤喂养数万只鸡。鸡鸭鹅蛋蛋黄都成红色,做菜味香可口,非人工饲养鸡蛋可比。

但是,这一多级塘-湿地处理系统,其设计和建造都非常粗陋,其运行工况远未达到最佳效果。即使如此,在大庆石化公司所属的5座污水处理厂(包括普通活性污泥工艺、纯氧曝气活性污泥工艺等)中,以它的运行效果最好和最稳定,而且自1985年建成运行至今28年来曾未排出污泥一次。厌氧塘中的沉积污泥全部水解、酸化转变成液体中间产物,以及甲烷发酵将其转化成气体如 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 等最终产物而消失。这是典型的污泥零排放污水处理系统。

## 7.2 山东省东营市污水处理与利用生态工程

山东省东营市位于黄河三角洲,是新兴的石油和盐化工工业城市,是胜利油田所在地。该市严重缺水,随着黄河断流日数的逐年增加和来水量的逐年减少,以及该市经济的持续增长、城市建设的不断扩大和人口的增长,水资源供需之间的矛盾将更趋尖锐,水成为该市经济发展的制约因素。因此污水处理必须与回收再用相结合,将污水作为一种再生的水资源来处理,将其作为辅助的水资源来开发利用。结合当地水产养殖,种植荷藕、芦苇、水稻、小麦、蔬菜等经验,利用该市大量的盐碱荒废土地建造了污水处理与利用生态工程,并将污水灌入塘中或灌溉农田,就能将土地中的盐碱压下去,将其变成良田,获得水产和农产品的好收成,若再做进一步处理,如过滤等,还可用做工业冷却水、市政用水、生活杂用水等。通过对四处污水处理工程厂址的对比,最后选定了胜利油田原来的第七农场,建立东营污水处理与利用生态工程。该农场原来引黄河水进行水产养殖,种稻及灌溉其他农作物,已建有水库、养鱼塘、稻田、麦田等。近年来因黄河断流天数剧增,如97年超过200天,难以保证农业用水,致使该农场废弃。但水库、养鱼塘、农田等都保存良好。将污水引入该农场,并将水库改造成处理塘系统,用以处理污水,然后将净化的污水依次进行养鱼、种藕、种苇等多级综合利

用，不仅能收获鱼、藕、芦苇等产品，而且污水又得到了进一步的净化。

### (1) 概况

该生态塘系统的平面布置示于图 36。

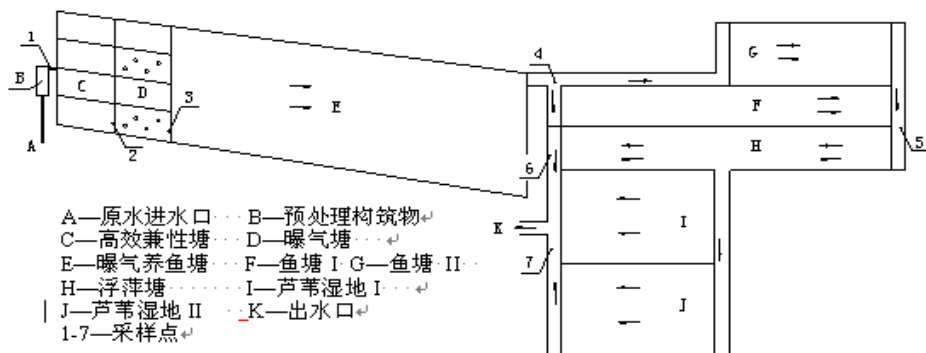


图 35 山东省东营市污水生态处理工程平面图



图 36 合兼性塘（塘底与污泥发酵坑、塘中有填料）



图 37 曝气塘



图 38 曝气养鱼塘



图 39 芦苇湿地及其塘区

### (2) 处理流程及设计参数

该污水处理与利用生态工程的流程为：原生污水→**格栅**→**平流沉砂池**→**复合兼性塘**→**曝气塘**→**曝气养鱼塘**→**养鱼塘**→**浮萍塘**→**芦苇湿地**→**人工湖或水库**→

农田灌溉或排入水体。该生态塘单元的主要设计参数见表 7。

表 7 东营生态塘单元的主要设计参数

塘单元	表面积 (ha)	HRT (d)	水深 (m)	备注
高级兼性塘	3.5	1.5	4	塘底部有发酵坑, 塘内水面下 0.3m 处装填生物载体层 1m
曝气塘	3.5	1.3	3.6	表面曝气器 16 个 (2.2kw)
曝气养鱼塘	29	10.6	3.4	表面曝气器 16 个 (2.2kw) + 喷水器 8 个
养鱼塘	12.2	2.4	2.0	覆草土提
浮萍塘	7.6	0.8	1.0	覆草土提
芦苇塘	35.2	1.8	0.5	覆草土提

### (3) 运行效果

东营生态处理塘设计处理规模为 10 万 m<sup>3</sup>/d, 在该系统中高效复合兼性塘、曝气塘和曝气养鱼塘为主要处理塘系统, 其中复合兼塘负责去除大部分 (50%以上) 有机污染物、难降解有机污染物和去除重金属, 同时使污泥进行厌氧消化和减量。

表 8 东营多级塘—湿地处理系统运行效果详表 2001. 1-2003. 10

水质指标	2001	2002	2003
BOD <sub>5</sub>			
进水 (mg/l)	39.7±7.83	49.3±22.5	46.8±9.82
出水 (mg/l)	10.9±8.77	6.44±4.58	4.67±0.51
去除率 (%)	72.54±9.71	89.2±5.3	90.0±9.74
COD <sub>Cr</sub>			
进水 (mg/l)	130.3±15.0	143.9±85.9	172.1±75.1
出水 (mg/l)	46.4±3.6	42.8±6.7	41.6±6.1
去除率 (%)	64.5±10.1	70.2±18.6	75.8±17.2
NH <sub>3</sub> -N			
进水 (mg/l)	15.37±4.34	17.6±5.98	21.78±10.03
出水 (mg/l)	9.38±4.74	7.95±2.36	7.12±3.59
去除率 (%)	42.07±24.99	54.83±23.9	67.31±21.7
TP			
进水 (mg/l)	1.73±0.51	1.98±0.45	2.11±0.91
出水 (mg/l)	0.57±0.47	0.94±0.27	0.86±0.18
去除率 (%)	67.05±17.3	52.28±23.14	59.23±22.01
TSS			
进水 (mg/l)	69.9±5.74	59.93±33.8	71.8±26.7
出水 (mg/l)	18.01±8.71	9.12±5.12	8.53±0.79
去除率 (%)	60.33±15.94	84.78±7.30	88.2±12.1

曝气塘是将厌氧塘出水中的中间产物以及剩余的 BOD 和 COD 进行强化的氧化降解, 同时在同化过程中产生活性污泥凝絮, 其出水进入其后的曝气养鱼塘, 通过养鱼将其捕食消耗, 而不必进行剩余污泥的处理。



曝气养鱼塘出水,即使冬季也达到排放标准。其出水在温暖季节流入养鱼塘,通过养殖适量的鱼,在其中通过藻菌共生系统的作用,产生藻类及浮游动物,供鱼作饵料,通过鱼的捕食消耗而使污水得到进一步净化;同时鱼的排泄物也增加了污染,其出水进入浮萍塘,鱼的粪便等排泄物沉入塘底作为底肥,使浮萍增长,同时使污水得到净化。最后浮萍塘出水进入苇塘,芦苇具有很强的和广谱的净化效果,其淹没于水中的茎、叶、根是微生物附着生长的活载体,在其上形成生物膜,能对水中剩余的有机物进行有效的生物氧化降解;芦苇的根、茎通过吸收能有效地去除重金属和盐类,因此其出水水质良好,出水 TSS、BOD<sub>5</sub>和 COD 分别达到 5~10mg/L, 5~10mg/L 和 20~30mg/L。

表 8 所示为 2001 年到 2003 年组合式塘-湿地系统对于各项水质指标的去除效果。在该组合生态系统运行的初期,富含营养物质和有机物的沉淀物并没有形成,系统中水生生物的密度和活性也较低,这就使微生物和藻类数量和活性较低,因此对各项参数的去除效果并不是十分理想。随着整个系统中的生物种群和生物量不断增加和成熟,该系统的处理效果也随之提高。该多级塘-人工湿地处理系统有很高的细菌和大肠菌的去除效率,其细菌总数和大肠菌总数的去除率分别大于 99.99% (>4log) 和 99.9% (>3log)。

该塘-人工湿地处理系统比大庆石化废水塘-湿地处理系统设计和建造的更为先进和合理。在兼性塘的底部设置了污泥发酵坑,使沉积污泥在其中进行水解、酸化和甲烷发酵,以使污泥消解。在兼性塘水面下 0.3m 装填 2m 厚的生物膜载体填料;底部污泥水解、酸化和发酵产生的 H<sub>2</sub>S、硫醇等恶臭气体上升到生物膜填料区便被氧化降解成硫酸盐而脱除臭味。因此,在该塘处理系统中,包括在兼性塘区基本无臭味。

该多级塘-人工湿地处理系统自 2000 年 10 月份建成运行 10 年来曾未排出污泥。污泥中的有机物和营养物全部通过水解和酸化转化成溶解的营养盐,如 CO<sub>2</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>等,它们参与藻类和其他水生植物的光合作用而转变成后者新细胞和新机体;然后在食物链中进行从下向上逐营养级的迁移、转化,最后以鱼、鸭等形式收获实现污水处理资源化。该污水处理厂在养鱼塘中试验养殖鱼苗成功,并主要养殖大量鱼苗出售,获得年收益数十万元。这是典型的污泥零排放并实现污水和污泥处理资源化的污水处理技术。

### 7.3 临淄污水处理再生系统

二级处理出水→1级垂直流人工湿地→2级平流人工湿地→净化景观湖→出水至地下水层的渗滤水，达到地表水环境质量 III 类标准

临淄污水处理厂处理厂中的污水，经活性污泥工艺二级处理和沙滤后，出水经第一道拦沙坝分水槽分水，进入一级人工湿地，然后流入出水分布槽流入二级人工湿地。最后经第二道拦沙坝跌水流入河道蓄水工程（净化景观湖）；另外结合混凝土岸墙的修建，沿左岸大堤设置 1.2×1.6 钢筋砼排污箱涵，可将污水处理厂发生意外事故时未处理的污水直接排放到河道蓄水工程远端下游。

#### 污水再生利用—人工湖景观用水和地下水补充

在河道左岸橡胶坝下游，设一集水池，利用橡胶坝泵站，将溢出橡胶坝排入下游的水扬入河道蓄水工程，通过地层渗滤补充地下水，或送入农灌渠道，进行农田灌溉，实现水资源的循环利用。

#### 一级人工湿地

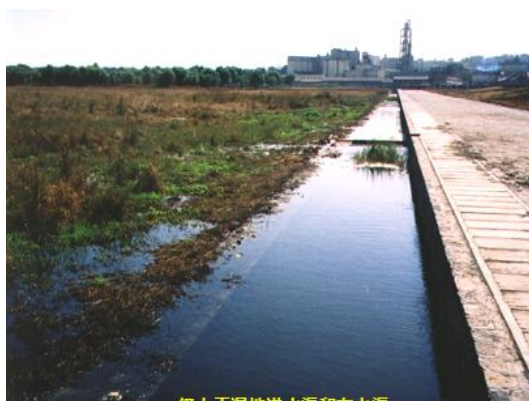
宽 400m，平均长度 500m，总面积 20.0 万 m<sup>2</sup>，水深 1.46m，有效容积为 29.2 万 m<sup>3</sup>。利用第一道拦沙坝布水。

水力停留时间为 29.2/2=14.6d，BOD<sub>5</sub>表面负荷 12kg/（10<sup>4</sup>m<sup>2</sup>/d），流量 2 万 m<sup>3</sup>/d，参照国内已建成的深度处理塘运行参数，BOD<sub>5</sub>去除率 30%，COD 去除率 15%，SS 去除率为 15%。

#### 二级湿地系统

水面长 1.84km，水面宽度 400~500m，水面面积达 77.7 万 m<sup>2</sup>，拦河闸前水深 3.7m，上游拦沙坝处水深 2.1m，平均水深为 2.73m，有效容积为 212.89 万 m<sup>3</sup>。

在 309 国道淄河大桥两侧布置 6 处喷泉。



A 一级人工湿地进水布水槽



B 一级人工湿地



C 人工湿地围堰

D 二级人工湿地

图 40 山东省淄博市临淄区二级出水人工湿地-净化景观湖生态净化系统照片

水力停留时间为 106.5d,  $BOD_5$  表面负荷  $1.45\text{kg}/(10^4\text{m}^2/\text{d})$ , 流量  $20000\text{m}^3/\text{d}$ ,  $BOD_5$  去除率 30%, COD 去除率 15%, SS 去除率为 15%。

### 净化景观湖

人工湖总蓄水量为  $242.26\text{万 m}^3$ ; 总水面面积  $97.7\text{万 m}^2$ ; 人工湖呈梯级布置。上游第一道拦沙坝处水深 1.46m, 第一级水面正常水位 50.0m, 平均水深 1.46m, 蓄水量为  $29.2\text{万 m}^3$ ; 第二级水面正常蓄水位 49.0m, 橡胶坝前水深 3.7m, 平均水深为 2.73m, 蓄水量为  $213.06\text{万 m}^3$ 。

临淄污水处理厂经生物处理（二级处理）-沙滤池过滤处理后，其出水达到 1 级 A 排放标准。

该出水进入二级串联人工湿地（垂直/水平复合潜流式人工湿地→地表径流/水平潜流复合式人工湿地）出水达到地表水环境质量 IV 类标准（GB3838-2002）。

其出水进入人工湖（最后净化湖）作进一步净化处理，其出水达到地表水环境质量 IV-III 类标准。

表 9 临淄淄河人工湿地地 1、2 级出水水质分析结果一览表

**临淄淄河人工湿地1、2级出水一览表  
(2004.5.31-2004.8.23)**

项目	COD				NH <sub>3</sub> -N				TP			
	污水厂 进水	污水厂 出水	一级曝 气池	二级曝 气池	污水厂 进水	污水厂 出水	一级曝 气池	二级曝 气池	污水厂 进水	污水厂 出水	一级曝 气池	二级曝 气池
2004.5.31	410	26	23	30	43	8	0.8	0.5	3.7	0.4	0.2	0.06
2004.6.3	520	40	33	29	35	6.3	0.4	0.32	2.6	0.3	0.043	0.007
2004.6.8	440	42	40	34	38	6.7	0.5	0.4	3.5	0.5	0.15	0.12
2004.6.15	390	35	34	31	35	6	0.9	0.62	4.5	0.6	0.08	0.02
2004.6.17	453	41	32	25	39	4.0	0.6	0.5	3.3	0.5	0.18	0.1
2004.6.28	468	48	40	31	41	5.1	1.0	0.5	3.1	0.2	0.09	0.06
2004.7.9	590	55	48	38	42	7.6	0.3	-	4.8	0.4	0.1	0.12
2004.7.14	493	44.7	38	40	52	8	0.9	0.4	4.4	0.2	0.07	0.08
2004.7.16	399	33.3	29	26.5	42	7.5	0.7	0.53	3.	0.6	0.12	0.01
2004.7.19	428	28	23	21	46	9.1	0.8	0.37	549	0.4	0.16	0.12
2004.7.23	387	46	39	28	48	7.8	0.65	0.3	5	0.3	0.06	0.07
2004.7.26	286	34	28	24	59	10	0.43	0.5	3.6	0.2	0.14	0.03
2004.7.30	340	33	29	25	54	10.2	-	-	4.6	0.6	0.1	0.09
2004.8.2	385	50	39	38	62	8.6	0.6	0.4	4.8	0.5	0.34	0.04
2004.8.6	438	47	40	31	59	9.7	0.8	0.5	54	0.48	0.19	0.07
2004.8.11	468	50	42	32	52	7.3	1.0	0.7	34	0.3	0.05	0.03
2004.8.12	357	38	32	25	40	6	0.7	0.6	44	0.4	0.17	0.08
2004.8.18	416	29	25	22	45	5.3	0.6	0.4	38	0.5	0.38	0.05
2004.8.23	330	25	22	19	49	6.5	0.8	0.55	41	0.2	0.21	0.04

该人工湖的地下渗滤水，其水质达到地表水环境质量 III 类标准，可安全地渗入地下水层补给地下水。

该湿地及人工湖成为环境优美的景观地带，从原来的垃圾堆放场变成优美的生态景观地区，使当地地价上涨十几倍，即将建成环境优美的居住小区。

#### 7.4、江西省鹰潭市城市污水处理高效组合塘系统

鹰潭市污水处理厂，因为用地、基建投资和运行费用有限等因素，决定采用高负荷和高效组合生态塘系统。其设计污水处理能力为 5 万 m<sup>3</sup>/d, 占地面积 70 亩，建有粗格栅-污水提升泵房、细格栅-曝气沉砂池、高效复合厌氧-兼性塘、复合曝气塘、沉淀塘和复合净化塘；还建有污泥脱水机房等。

各个塘单元参数如下：

高效复合厌氧塘：HRT =17h；有效容积： 3.54 万 m<sup>3</sup>

高效复合曝气塘：HRT =43.2h；有效容积： 9 万 m<sup>3</sup>



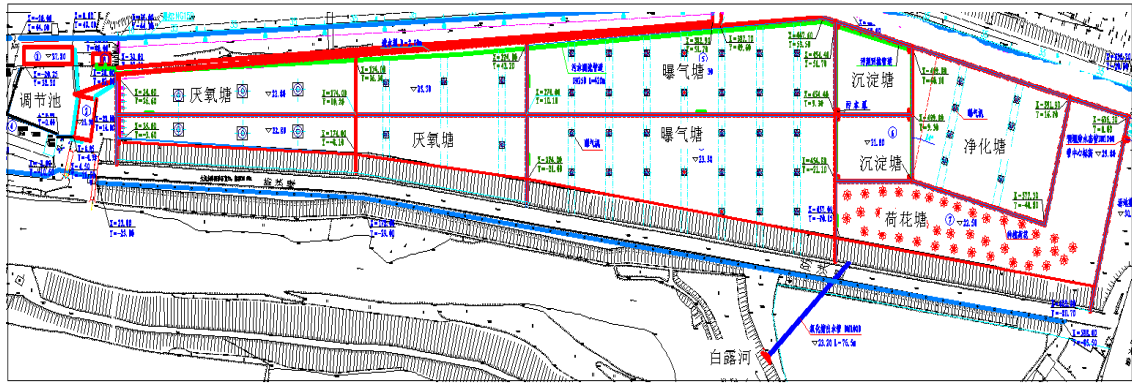


图 41 鹰潭市污水处理生态组合塘系统总平面图

沉淀塘：HRT=9.12h；有效容积：1.9 万 m<sup>3</sup>；

高效复合净化塘：HRT=15.4h；有效容积：3.2 m<sup>3</sup>。

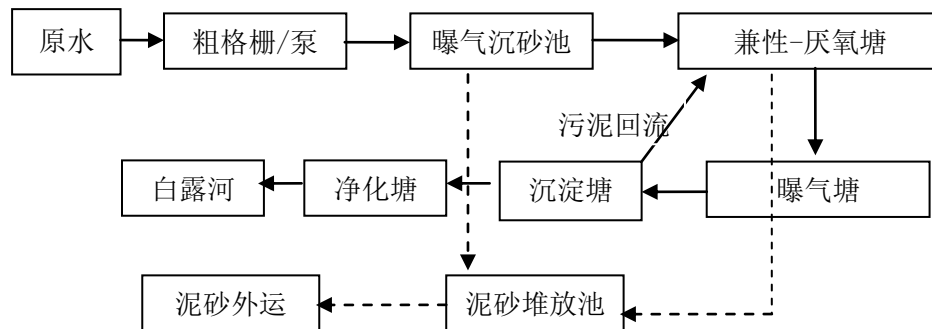


图 42 生态组合塘流程图

高效组合塘全部单元中都布设了仿生水草辫带式软性填料，利用其超细纤维形成的巨大比表面积能高效大量地吸附和捕集悬浮物并形成大量的生物膜，采用不锈钢丝固定。辫带布设的排、行间距均为 5m。并在曝气塘中的非填料区安装潜水曝气机，为填料上的微生物和悬浮的微生物活动提供所需的氧气。厌氧塘布设潜水搅拌机，保证污泥呈悬浮态并与污水混合均匀。

处理流程简介如下：沿该市污水总干管流入的城市污水，经粗格栅截留去除大颗粒的污染物进入集水池；其中污水由潜污泵提升，经细格栅以去除细小固体污物后进入曝气沉砂池，经曝气沉砂除去浮渣和沙粒；出水流入高效复合塘的兼性（前段为预缺氧段）-厌氧塘，其底部设有的污泥发酵坑，接受和集聚沉淀的污泥，污泥在其中进行厌氧水解、酸化和甲烷发酵，使污泥固体转化成挥发性脂肪酸等液体和 CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 等气体，实现污泥固体的大幅度减量。这

是该系统连续运行 3 年而曾未排泥的主要原因。厌氧塘出水进入复合曝气塘，同时由于各排曝气机较长距离布设，使曝气塘中沿途存在好氧-缺氧-好氧-缺氧...多个处理段，致使发生好氧硝化-缺氧反硝化等多次脱氮过程。由此得以有效地去除氨氮和总氮。曝气塘出水进入沉淀塘后，其脱落的生物膜在其中沉淀；沉淀污泥用污泥回流泵输送回厌氧塘的前端中，进行消解转化，最后使污泥消失。沉淀塘出水进入净化塘中，在其中进行深度净化好氧除磷，使出水水质达到 GB18918-2002 的 1A 标准。

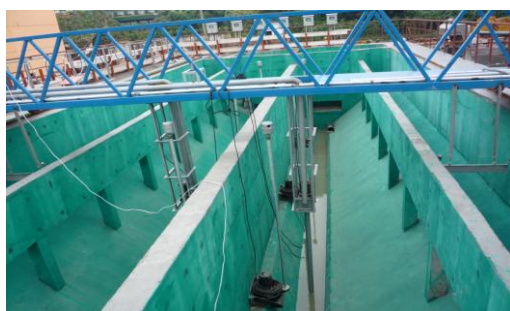


图 43 曝气沉沙-浮渣池



图 44 复合曝气塘中的填料与曝气机



图 45 沉淀塘及其中的污泥回流泵

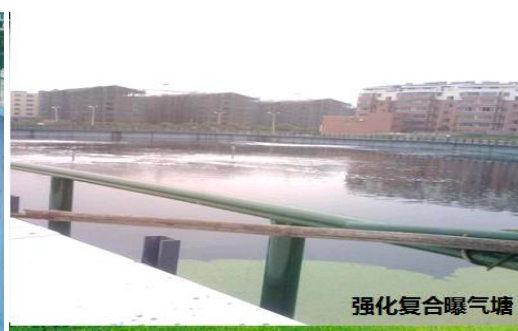


图 46 运行中的复合曝气塘

该城市污水处理组合生态塘系统，是作者们最新设计和指导建造和运行的最先进的组合生态塘系统，其总水力停留时间（THRT）仅为 3.5 天，比大庆石化废水处理塘-湿地系统 THRT=700 余天，和山东省东营市城市污水处理塘-人工湿地

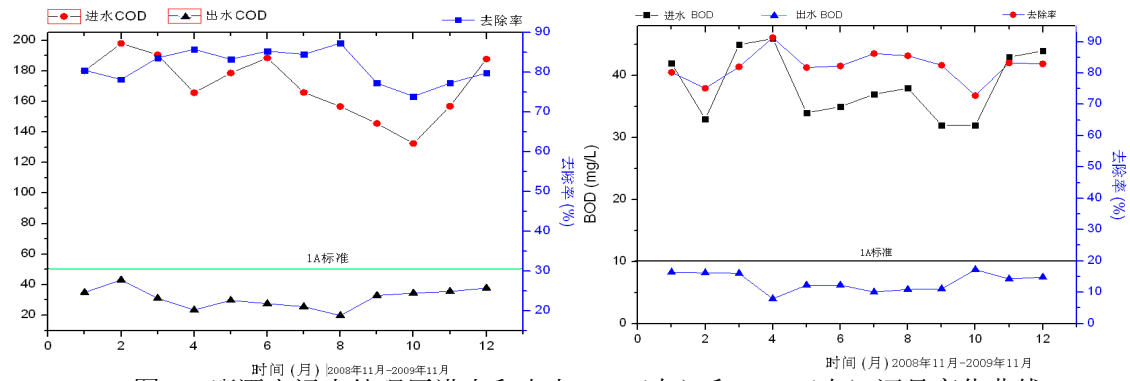


图 47 鹰潭市污水处理厂进水和出水 COD（左）和 BOD<sub>5</sub>（右）逐月变化曲线

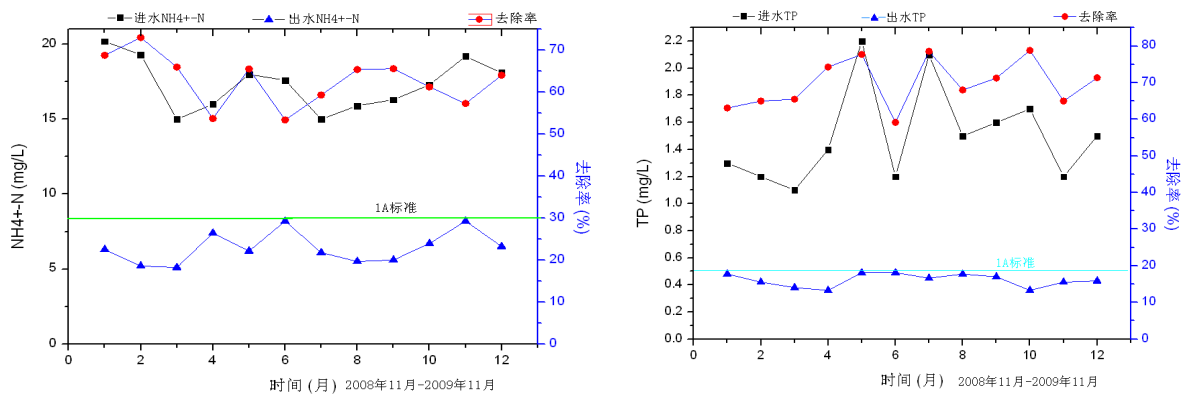


图 48 鹰潭市污水处理厂进水和出水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N（左）和 TP（右）逐月变化曲线

系统 THRT=18.4 天处理效率都高，其主要原因是设计先进合理，采取了多项强化措施，如建造完善的预处理设施（粗、细格栅和曝气沉砂池），用以去除污水中的无机杂粒，杜绝其在后续处理单元中的沉积和淤塞；装填高效填料增加生物量、生物多样性和生物活性；沉淀塘污泥回流进行生物除磷；曝气塘中曝气机较长间距布设形成多段好氧-缺氧区段，提高硝化-反硝化去除氨氮和总氮效率；以及净化塘中放养适量鱼类捕食多余的生物絮体、藻类和水草，以保证高质量的出水。

### 7.5 高效组合生态塘系统与国外先进组合塘对比

鹰潭市 5 万 m<sup>3</sup>/d 污水处理厂，采用高负荷和高效复合生态塘系统，由于采取了多项强化措施，如装填比表面积大的合成纤维编制的卷发式辫带软性填料，使各个单元塘中的生物量，比普通塘的生物量高达 100~400 倍；尤其是一些附着生长的微生物的数量和种属数目显著增加，不仅有各种细菌和藻类，还存在多种原生动物和后生动物，有时在曝气塘、沉淀塘和净化塘中还有鱼、虾、螺、蟹等，由此形成更丰富的生物群落和更长的食物链，如藻类和细菌→原生动物→后生动物→杂食性鱼类；微型藻类→滤食性鱼类；水草→草食鱼（如草鱼、鳊鱼）；水草→鹅、鸭、野生水禽；藻类→螺→底栖动物等，由此形成以多条食物链为主体

的生态处理系统。它以太阳能（日光辐照）为初始能源，促进进入塘中的污水中的有机物和营养物分解，形成最后产物  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{PO}_4^{3-}$  等；藻类通过光和作用吸收  $\text{CO}_2$  和氮、磷等无机化合物，形成藻类和其他水生植物的新细胞和新个体，同时释放出初生态氧；它们作为食料逐级向较高营养级进行物质和能量的迁移和转化，最后污水中的有机物和营养物转化成芦苇、莲藕、鱼、鸭等而被回收，同时污水也被净化成清水也被回收再用。

此外，在厌氧-兼性塘中安装搅拌机使污泥发酵坑中的厌氧活性污泥与进入污水进行均匀混合与反应；在复合兼性塘和复合曝气塘中安装曝气机以增加塘中的溶解氧数量，促进好氧生物降解与同化；在沉淀塘安装污泥回流泵，使其中沉寂的污泥被抽送回流至厌氧塘底部污泥发酵坑中，进行强化生物除磷；以及在净化塘中放养适量的滤食性和杂食性鱼类如鲢鱼、鲫鱼和红鲤等，对过量藻类、浮萍、水草和后生动物（水蚤、轮虫等）予以扑食，维持水生态系统平衡与稳定，大幅度提高了该污水生态处理系统的水力负荷、有机负荷和显著缩短了总水力停留时间，如仅为 3.5 天，这比任何国内外已运行的塘系统 HRT 都短的多，美国在加州 NAPA 地区的 Saint Helina 市的先进组合塘系统（AIPS）的总 HRT 约为 15 天。其它污水处理塘系统大都是 20~30 天。德国污水处理厂中二级处理后的净化塘，其总水力停留时间也为 10~15 天。

现在国内外的污水处理塘系统（不包括常规二级处理+净化塘系统），即使总 HRT 为 20~30 天，很少有最后出水达到 1 级 A 排放标准的实例。但是，作者们设计和指导建成和运行的鹰潭市污水处理厂采用的高效复合生态塘系统，连续 3 年运行，最后出水稳定地达到 1 级 A 排放标准（GB18918-2002），而且连续运行 3 年曾未排放污泥，实现了多年污泥零排放。

该污水处理复合生态塘系统比常规活性污泥工艺系统具有如下优点：

- 基建投资省，仅为后者的 70%~80%；
- 节约电耗，每处理  $1\text{m}^3$  污水电耗仅为 0.05kwh，而后者则需要 0.15~0.20kwh；
- 运行费低廉，仅为 0.1 元/ $\text{m}^3$  处理污水；
- 低碳处理工艺，能够同时去除 COD、 $\text{BOD}_5$  和  $\text{CO}_2$ ，而后者是高碳工艺，在去除 COD、 $\text{BOD}_5$  等的同时，产生大量的  $\text{CO}_2$ ；



- 污泥产量很少，能够连续运行多年不排放污泥，而后者剩余污泥量很大，其处理与处置需要付出大量的基建投资和运行费。
- 运行简易且稳定可靠，5万 m<sup>3</sup>/d 的污水复合生态塘系统，只需要十余人管理运行即可，而相同规模的活性污泥工艺系统，则需要 40~50 人管理运行人员。

## 8 我国城乡污水处理与再生发展方向

研发和推广应用低碳、节能和资源化的污水处理与再生技术，即研究开发和推广应用既能去除有机和营养污染物（COD、BOD、N、P），也能同时去除温室气体（CO<sub>2</sub>和 CH<sub>4</sub>）的环境友好和生态改善技术。

### 8.1 我国大城市污水处理与再生发展方向

在大城市和特大城市，研发和推广应用占地面积最小和处理效率最高的强化复合生物处理技术，或预处理-MBR 工艺，最好建在地下，在其地面上建造运动场或休闲场所；并将节省出来的其余土地面积，建造以人工湿地和净化景观塘为主体的生态景观公园。

在特大城市和大城市推荐采用如下几种生物复合处理系统和流程：

- 预处理污水 → **固定生物膜为主的 HYFBAS A<sup>2</sup>/O 池** → **宽间距斜板沉淀池** → （建在地下：HRT 分别为 3~4h 和 0.7~1.0h） → **人工湿地** → **净化景观湖** → 出水排入附近水体做生态景观用，建在地上，与生态公园建设结合；

↓ -----出水回流---- ↑

- 预处理污水 → **复合厌氧池** → **HYFBAS 缺氧-好氧池** → **斜板沉淀池** → **曝气生物滤池** → 出水

↑ -----污泥回流----- ↓

→ **湿地-景观湖生态公园** → 附近水体做生态景观补水

- 预处理污水 → **固定生物膜为主的 HYFBAS A<sup>2</sup>/O 池** → **MBR 膜池** → （建在地下：HRT=3h，HRT=1.0~1.5h） → **以湿地和景观湖为主的生态公园** → 出水排入附近水体做生态景观用

采用上述处理系统与流程的优点：

- 节能、节约资源（化学药剂、混凝剂等）、低碳和资源化，可实现水循环；
- 占地面积最小，就污水处理与再生系统而言，比占地面积仅为 0.1 公顷万/m<sup>3</sup>/d。

- 剩余污泥产量和排放量最小， $Y=0.2 \rightarrow 0.3 \text{gMLVSS}/\Delta \text{BOD}_5$ ，仅为活性污泥工艺系统的 1/3~1/2。

应当指出，能够同时去除有机物和  $\text{CO}_2$  的处理再生技术最为理想，而节能的处理再生技术也是低碳的。因为我国现在电能 80% 来自燃煤的火力发电。节能就意味着节省燃煤和减少  $\text{CO}_2$  的排放量。每燃烧 1 吨标准煤，产生二氧化碳 2.6 吨。每发 1 度电需要消耗煤 0.5 千克，每节省 1 度(1KWh)电，可减少  $\text{CO}_2$  排放量 1.3kg。

10 万吨/d 污水处理厂，如从常规活性污泥法系统改为强化复合生物处理系统，从每处理  $1\text{m}^3$  污水耗电 0.2KWh，降至 0.05KWh，则全年节省电耗： $100,000 \times 365 \times 0.15=5,475,000\text{KWh}$ ，减少  $\text{CO}_2$  排放量= $5,475,000\text{KWh} \times 1.3=7117500\text{kg}$ ，或 7117 吨  $\text{CO}_2$ 。全国污水处理总量 1.4 亿  $\text{m}^3/\text{d}$ 。则全年减少的  $\text{CO}_2$  排放总量约 1000 万吨。

## 8.2 我国中小城镇的污水处理技术发展方向

美、德、法、英等发达国家在中小城市和社区，其污水处理与再生设施，主要应用塘、人工湿地和土地处理等技术，我国过去应用活性污泥和生物膜技术，并不如在大城市那么成功。其主要原因是中小城镇，污水处理规模小，其水量和水质波动很大，难以维持稳定和高效的运行。此外，不仅基建投资大，而且能耗大，技术力量薄弱，运行费用贵，经济和技术上难以支持长期运行，实际上正常运行的为数较少。我国现在污水处理总能力达到 1.4 亿  $\text{m}^3/\text{d}$ ，或 510 亿  $\text{m}^3/\text{年}$ ，而实际上处理的总水量仅 109 亿  $\text{m}^3/\text{年}$ ，有效利用率仅 21%。其中原因之一就是小型活性污泥法污水处理厂实际运行率很低；还有一些新建的污水处理厂，跟污水管网建设不同步，建成后接不上污水管道而闲置。此外，活性污泥法污水处理厂，其运行对冲冲击负荷和有毒害污染物特别敏感，容易使活性污泥恶化变坏而不能正常运行，需要停运，排空所有池中污水和变坏活性污泥，重新放入正常污水和投加正常活性污泥菌种曝气培养，需要 1、2 天时间才能达到正常水力负荷和有机负荷运行。一年可能如此反复多次。这就是为什么该工艺只适用于大型污水处理厂（10 万  $\text{m}^3/\text{d}$  及以上）的原因。上述发达国家在上世纪 50~60 年代已经历过这样的教训，因此改辕易辙，才改用稳定塘（或氧化塘）、人工湿地和土地处理系统。

我国中小城镇污水处理与再生技术的发展趋势是：低碳化、资源化、生态

景观化。推荐的具体污水处理系统为：

- 高负荷常规处理（部分处理）与后续的人工湿地、塘、郊区农田、林场灌溉相结合的处理系统。
- 完善雨水管网系统和建造雨水净化再生厂，尽量收集雨水径流并予以处理、净化和再生利用，作为主要水资源之一。
- 建设污水再生和雨水再生的生态景观公园，为居民提供景观优美、氧气充足的修生养息和锻炼的好场所；
- 污水处理产生的污泥，最好送入厌氧塘-兼性塘-净化塘-湿地系统中，经水解酸化转化成液态和气态产物，如  $\text{CO}_2$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_x^-$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  等，它们被水中藻类和水生植物摄取，参与其光合过程，并释放出氧气；污泥大幅度减量的同时，形成以净化景观塘（湖）与人工湿地为主体的生态公园。

在我国西北地区，在土壤贫瘠的黄土和沙漠地带，城市污水采用以生态塘、人工湿地以及附近绿化造林的综合生态修复工程，多年运行后可使当地大面积的贫瘠土地和沙漠改善，形成环境优美和生态良好的沃土绿洲，为黄土高原和沙漠的生态修复和改善作出积极的贡献。值得尝试，必有惊喜的收获。

### 8.3 我国村镇和农村污水处理发展方向：

- 污水处理与农业利用相结合，污水处理与村镇生态景观环境改善相结合。
- 污水与雨水主要处理技术：养鸭鹅塘、养鱼塘、人工湿地、净化景观塘与农田、林场灌溉优化组合处理与再生系统。
- 清塘污泥做有机肥料施于农田、林场、苗圃等做底肥。
- 新建农村和新建小城镇，可建设集中的污水和雨水管网和处理再生系统，与生态景观公园建设相结合，作为生态文明建设的组成单元。

## 9 我国西北地区污水处理与再生的设想

我国西北地区是沙漠和黄土高原集中分布地区，全国沙漠总面积约 130 万  $\text{km}^2$ ，黄土高原总面积约 40 万  $\text{km}^2$ ，大都在该地区，是生态恶化和脆弱地区，难以支持经济和社会的持续发展，也难以改善当地居民的恶劣和贫困落后的生存环境。因此，西北地区的发展，首先要进行生态环境的改善。城镇污水和雨水以及工业废水，都可用于该地区的生态修复和改善，为其经济和社会发展和人类居住环境的改善作出重要贡献。

污水、雨水（径流）和工业废水，是水和有机物、营养物等的混合物，可为沙漠、沙土地和黄土地提供水分和肥料，改善其土质，提高其水分、有机质和腐殖质的含量，使贫瘠土地变成肥沃土地和改善其生态环境。为此，可用污水、雨水径流和工业废水建成人工湿地、树林和草地组成的生态绿洲。在该地区污水、雨水和工业废水应作为水资源和营养物资源予以充分利用。污水只需做必要的预处理即可，即将其中的有机物和营养物转化成易于被水生植物、树木和草吸收的形态即可，如形成  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  等。

污水、雨水径流和工业废水用于建立人工湿地、树林和绿地的处理与利用流程：  
污水→预处理（粗细格栅-曝气沉砂池）→厌氧-兼性塘→曝气塘→地表径流人工湿地→净化景观湖→出水灌溉树林和绿地→渗滤水补充地下水。

根据我们的实践经验，10 万  $\text{m}^3/\text{d}$  的污水处理利用生态工程，可以建造 1000 公顷的人工湿地和景观湖；沿其周围建有树林和草地组合的绿化带。按照年水力负荷率为：5000 $\text{m}^3/\text{公顷}$ （相当于年降雨量为 500mm），则可建造的树林绿化带总面积为：

$$F = (10 \text{ 万} \times 365) / 0.5 = 7300 \text{ 公顷，或 } 73\text{km}^2。$$

这只是旱季污水流量，雨季雨水径流（无论是分流制排水系统还是合流制排水系统）也被汇集和输送至该污水和雨水处理利用生态工程中予以利用，其年雨水径流总量至少为污水流量的 50%，这样实际上可建造的树林-草地绿化带可达到 100 $\text{km}^2$ 。

为此可建造里外3层次的生态绿洲：最内层为污水-雨水生态处理与利用工程，即塘、人工湿地与景观湖组成的10 $\text{km}^2$ 湿地区，其外围为草地，其上种植牧草，如大力士草种 苏丹草 高丹草、墨西哥玉米草、多年生黑麦草、紫花苜蓿、美国菊苣等。其上放牧牛、羊、马群等；其最外层则为林区，种植乔木和灌木，经济树木与观赏净化树木相结合。乔木树种种植银杏、垂柳、枣树、胡桃、山杏、塔松、樟子松、侧柏、白杨等；灌木可种植柠条、沙柳、柺柳、沙棘、扬柴、紫穗槐、沙枣、枸杞等。

这一生态绿洲具有很大的生态环境效益，我国对湿地的实际检测确定，每  $\text{km}^2$  沼泽湿地能年均吸收1.4万吨  $\text{CO}_2$ 和释放出1万吨  $\text{O}_2$ 。而污水处理和利用形成的人工湿地由于有充分的肥分和水分，芦苇等湿地植物生长茂盛，远比自然湿



地的生物量大，即 $10\text{km}^2$ 污水和雨水涵养的人工湿地至少可年吸收14万吨  $\text{CO}_2$  和10万吨  $\text{O}_2$ 。

每公顷树林每天可吸收1吨  $\text{CO}_2$ 和释放0.75吨  $\text{O}_2$ 。每公顷树林每年可吸收365吨  $\text{CO}_2$ 和释放274吨  $\text{O}_2$ 。每  $\text{km}^2$ 树林可吸收36500吨  $\text{CO}_2$ 和释放27400吨  $\text{O}_2$ 。草地吸收  $\text{CO}_2$ 和释放  $\text{O}_2$ 的数量仅为树林的1/5。因此，按 $50\text{km}^2$ 草地和 $50\text{km}^2$ 树林计算，则树林-草地年均吸收的  $\text{CO}_2$ 总量为： $1.2 \times 50 \times 36500 = 2,190,000$ 吨，约2.2万吨  $\text{CO}_2$ ；释放的年均  $\text{O}_2$ 量为： $1.2 \times 50 \times 27400 = 1644000$ 吨，约1.6万吨  $\text{O}_2$ 。

这一10万吨日的污水处理利用生态工程建造的人工湿地-草地-树林复合生态绿洲每年可吸收 $14+2.2=16.2$ 万吨  $\text{CO}_2$ ，和释放出 $10+1.6=11.6$ 万吨  $\text{O}_2$ 。

现在西北地区约有总人口1.5亿，按人均日用水量100L/人.日计算，日排水量1500万  $\text{m}^3/\text{d}$ ，则有污水和雨水生态处理与利用工程科建造树林-草地绿化区的总面积为：

$Q_t = 100 \times 150,000,000 / 1000 = 15,000,000\text{m}^3$  (1500万  $\text{m}^3$ )，亦即可以建造10万  $\text{m}^3/\text{d}$  污水处理利用生态工程150处，由此建成150处占地面积110 $\text{km}^2$ 的湿地-草地-树林复合绿洲，共可建造总面积达 $150 \times 110 = 16500\text{km}^2$  (1.65万  $\text{km}^2$ )的湿地-草地-树林复合生态绿洲，年均共可吸收 $150 \times 16.2 = 2430$ 万吨  $\text{CO}_2$ 和年均共可释放出 $150 \times 11.6 = 1740$ 万吨  $\text{O}_2$ 。

如果再考虑将该地区成分和性质跟生活污水相同或近似的工业废水，也用于生态绿洲的建设，则将建造的生态绿洲的总面积将达到3万  $\text{km}^2$ ，年均吸收的 $\text{CO}_2$ 总量即那个超过4000余万吨，释放氧气3000余万吨。这是很可观的碳汇基地，也将显著改善当地的生态系统和改善人居环境。也将为我国今后重点发展地区的经济与社会发展和生态文明建设作出重要贡献。

## 结束语

党的十八届三中全会发出全面深化改革尤其是生态文明建设的号召，全党和全国人民正在积极行动起来，各行各业的人们以开拓创新的精神和奋勇争先的实际行动，正在各自领域不断做出改革创新的业绩。我们城市排水工程和污水处理界，也应紧跟全面深化改革的形势，在思想和观念上来一次深化改革和革命，

冲破以往的思想禁锢，抛弃过去简单地照搬照抄外人的已有技术和经验，代之以继承和发扬我国在城市排水和污水处理方面的优良传统与科学地学习国外先进技术经验相结合，研发和应用适应我国国情尤其是生态文明建设需求的污水和雨水处理再生新技术。

900 多年前宋代刘彝做的赣州福寿沟排水工程，至今运行正常保证了赣州市大雨和暴雨时安然无恙，避免了像其他城市那样受到洪涝灾害，其建造的排水系统的设计思路 and 理念极其周密和完善，如污水与雨水统一收集、输送、储存、净化和排放组成的支管、干管和总渠、雨污水净化塘与储存塘、城墙中的单向排水闸门等，即使现在发达国家的城市排水系统的设计思路也无非如此。可以说，中国城市完整的排水系统（合流制）早在 900 多年前就已建成并成功运行。可惜这一成功经验没有被继承和发展，而如今只能向 19 世纪才建成完整城市排水系统的欧美学习。

2000 余年前在珠江三角洲发展起来桑基鱼塘、果基鱼塘、蔗基鱼塘和稻基鱼塘，既是典型的资源循环型的生态农业，又是在太阳能作为起始能源的推动下，人畜粪便和农田、果园、桑田和稻田的废弃物与鱼塘的底泥之间进行物质和能量相互交换、传递与转化，以使农作物、果蔬和渔产皆丰收。这些成功经验和实践已经普遍推广应用到全国各地的生态农业和生态畜牧业的建设中。但是，在城镇污水处理中却少有借鉴和实践。遗憾地是，我国丰富的生态鱼塘经验，外国人比我们重视的多。例如，美国加州大学 Berkeley 分校的 W. J. Oswald 教授，被誉为“世界塘之父”，三次来中国交流和参观城市污水处理与利用的生态塘系统后，主动提出将他研发的先进组合塘系统（AIPS）与中国的生态养鱼塘结合起来，来解决多余藻类的去除和利用问题。我国塘处理污水的成功经验被美、德、法、英等发达国家引用、改进和发展，成为他们中小城市的主要污水处理技术。我们却背道而驰，在小城镇和村镇推广应用活性污泥发技术，而国外早在 50~60 年前已验证其不可行而放弃。

我国遇到的问题跟其他国家有许多不同和特殊的地方，例如东部沿海地区城市、人口、工业和经济密集，可用土地资源和水资源日趋短缺，需要研发和应用最高负荷和最高效的污水处理与再生技术；西北地区沙漠、黄土和沙土面积巨大，需要进行生态修复和改善，为其今后持续发展打好基础。

我们既要科学地学习国外的成功经验，又要继承和发扬我国自己的成功技术和经验。今后，要更多地学习国外城市的完善的污水和雨水管网技术，雨水再生资源化技术和经验，污泥的无害化、减量化和资源化的技术等经验。近年来国外污水和雨水处理再生与生态景观改善和美化环境的技术，也值得学习。

但是我们更要继承和发扬中华民族的原创精神，孔子、孟子、老子、孙子等诸子百家的论著与思想，中医中药，武术，中国诗词歌赋，书法绘画，四大发明等，都独树一帜，原创独到，构成中华文化的精华。我们在城市污水处理方面也会有所作为，我们已经研发和实际应用了国际上负荷最高、处理效果最好、最节能和占地面积最小的强化复合生物处理技术；设计、建成和运行了世界上最大和最先进的地下 MBR 污水再生和地面景观相结合的完美工程；研发和实际应用了负荷最高、HRT 最短、占地面积最小的和低碳、节能、资源化的高效组合生态处理系统；以及二级处理出水的二级人工湿地与净化景观湖高效净化与景观相结合的生态再生系统等，均进入国际先进之林。只要解放思想，敢于和善于开拓创新，一定会有更多的城乡污水和雨水的低碳和资源化处理再生的新思路、新概念和新技术出现，并引领污水处理的新方向和新途径：节能、低碳、资源化和生态化，为我国生态文明建设充实内涵和增添光彩，也为全球减少温室气体和创建人类生存的安全环境做出应有的贡献。