

电力行业节水

新技术新方法 with 资源控制

实务全书

主编：李明



中国电力科学出版社



第九篇

电厂节约用水实例

第一章 电厂中水回用实例

第一节 日本回用水工程实例

1. 日本芝山住宅区污水处理系统

(1) 流程及设施 日本芝山住宅区的污水处理设施是日本典型的住宅区污水处理工程实例。区内污水采用活性污泥法和混凝法处理。处理后出水的 75%~80% 排放, 20%~25% 经过臭氧氧化、活性炭吸附和消毒后作为污水回用。污水处理回用以芝山西区部分住户(约 3220 人)为对象, 主要用作冲洗厕所、洗涤用水、清扫用水和小池小河补充水, 规定每人每天 50L, 161m³/a 为污水处理量, 其流程见图 1。该污水装置设有监测设备, 当污水水质达不到要求时, 会启动活性炭吸附设备, 活性炭罐根据压头损失实行自动反冲洗和手动反冲洗二种方式, 反冲洗水返回到调节池, 消毒采用加氯, 其投加量根据设置在污水池出口的余氯测定仪所发出的信号自动调整。在污水受水池设自来水管, 当蓄水深度降至低水位以下时报警器发出报警, 这时自动或手动注入自来水。污水受水池加盖板和入孔, 并安装通气管和溢流管。

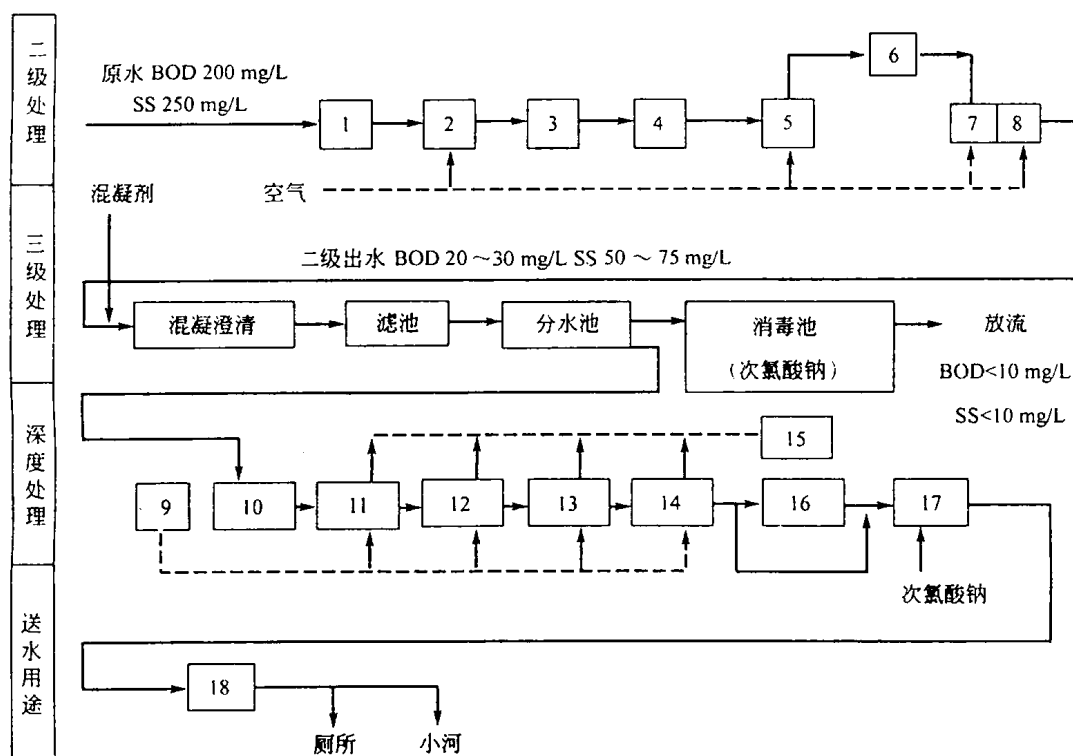


图 1 日本芝山住宅区的污水处理流程

- 1—格栅池; 2—曝气沉砂池; 3—破碎机; 4—泵池; 5—调节池; 6—流量计;
7—曝气池; 8—澄清池; 9—臭氧发生器; 10—前反应; 11, 12, 13—主反应;
14—脱臭氧; 15—尾气吸收塔; 16—活性炭吸附设备; 17—消毒池; 18—受水池

芝山住宅区的污水处理回用设施，包括二级处理设施、三级处理设施、污泥处理设施及污水处理设施。

二级处理设施处理对象的计划人口为 4700 人（居民 888 户，高中一所，小学一所，幼儿园一所及其他），其污水排放方式为合流制，计划小时最大水量为 149m³，用延时曝气法进行处理。其中流量调节池为 255m³（计划小时平均污水量为 5h 水量），曝气池为 494m³（2 池并列），曝气时间是 16~24h，送气量为 15.7~17.4m³/min，BOD 容积负荷为 0.25kg/(m³·d) BOD-SS 负荷为 0.075kg/(kg·d)，沉淀池体积为 185m³，表面积负荷约 17m³/(m²·h)，沉淀时间 3.5h，采用间歇式集中排泥。

三级处理设施包括：混凝设备；pH 调节仪（以控制絮凝反应的 pH 值为 6.3 左右）；化学沉淀池 [沉淀池的表面负荷为 0.8m³/(m²·h)，停留时间为 3.5h，污泥产量为 60kg/m³]；反冲水池和消毒池。

污泥处理设施包括污泥浓缩池、污泥储留池、污泥脱水机和泥渣斗等。

生活小区的污水输送设备大致有以下几部分：送水泵、气压柜之类的压送机器，室外配管及卫生陶瓷，水池、小河送水及循环的设备。

小区的室内外配管与上水管（铸铁管）相区别。污水引水管采用聚乙烯管 50A（污水处理设施→污水受水池）；室外配水管为耐腐蚀钢管 65~125A，内壁涂环氧树脂；室内配水管为耐腐蚀钢管 20~60A，内壁涂环氧树脂；小河循环设备用耐腐蚀钢管 200A，内壁涂环氧树脂；室内配管处于住宅楼最底层地板下面，在各层的厕所内外露；设备机械类有卫生陶瓷、阀门、水表等，均比照上水设备设置。利用污水在住宅区内修筑工小河，可美化居住环境。污水从小河上游经过水坝和浅滩，自然流入下游的水池中。

(2) 建设费及运行管理费

①建设费 污水处理系统的处理、回用设施包括污水处理设施，建筑室外及室内配水管设施，污水受水池和送水设施。这些设施的总工程费约 8011875 美元（美元折日元按 1:120 计）。其中，污水设施所需费用为 1356875 美元，占总工程费的 16.9%。见表 1

表 1 日本芝山住宅区污水处理回用设施建设费用

设施名称	工程费/美元	百分率/%	备注
污水处理工程	706342	52.0	臭氧反应设备，水池检测设备，消毒，活性炭设备、电器设备
住宅室内配管工程	146183	10.8	建筑物室内双重配管费用
住宅室外配管工程	30457	22.4	建筑物室外双重配管费用
污水受水池工程	199783	14.8	污水受水池、送水设备、电器设备
合计	1356875	100.0	

从污水处理回用设施建设费用明细表可知，污水处理建设费用占污水处理回用设施总工程费用的 52%，室内双重配管约占 10%，室外双重配管约占 20%，污水受水池约占 15%。另外，这些设施费用在总工程费用中所占的比率约为 16.8%，见表 2

表 2 日本芝山住宅区污水处理厂工程费

总工程费 (A) /美元	污水工程费 (B) /美元	比率 (B/A × 100) /%
4194458	312175	16.8

污水配管工程费见表 3 所示, 它约占全部卫生设备工程费 (室内外上水、污水配管, 市内排水管及便器的总费用) 的 16.4%。

表 3 污水配管工程费

总工程费 (A) /美元		污水工程费 (B) /美元	比率 (B/A × 100) /%
室内	2136892	146183	6.85
室外	606192	304567	50.2
合计	2741583	450750	16.4

受水池及送水设备工程费见表 4 所示, 约占总工程费的 28.8%。这些建筑费, 折成所需费用见表 5 所示。污水处理设施及各种工程费用见表 6 所示。

表 4 受水池及送水设备工程费

总工程费 (A) /美元	污水工程费 (B) /美元	比率 (B/A × 100) /%
390000	112142	28.8

表 5 污水处理回用设施的每户建设费

名称	污水处理设施	室内配套管	室外配套管	受水池及送水设备	合计
建设费/ (美元/户)	295	165	343	225	1028

表 6 污水处理设施及污水处理设施工程明细表/美元

项目	分类	污染处理设施			深度处理设施
		二级处理设施	三级处理设施	合计	
主体工程		819142	100255	919397	4462
机械设备		1101808	535208	1637016	493325
电器设备		17067	56583	73650	59358
发电设备		130250	4317	134567	45317
管理实施		399000	13950	412950	103875
合计		2620917	867912	3488829	706342

②运行管理费 污水设施的平均运行管理费用见表 7 所示。

表 7 水处理设施及污水处理设施工程明细表/美元

项目		金额	
		深度处理设施	
变动费用	电力费	制水	0.315
		给水	0.073
		合计	0.388
		药品费	0.018
固定费用	用水费		0.008
	消耗品费	臭氧发生器	0.009
		臭氧浓度计	0.015
		TOC 计	0.025
		浊度计	0.010
		活性炭	0.030
		合计	0.097
受水池清扫费		0.009	
杂用费 (变动费 + 3% 固定费)		0.009	
总计		0.521	

2. 日本电器株式会社

日本电器株式会社 (NEC) 办公大楼高 180m, 包括地上 43 层和地下 4 层, 总面积 145100m²。其污水处理装置流程见图 2, 1992 年出水情况见表 8。平均用水为上水 559m³/d, 杂用水 92m³/d (含雨水), 回收率约为 14%, 节约费用 8.125 万美元。该处理工艺与回用技术, 针对高层大楼杂排水的特性, 采用 20 世纪 90 年代的超滤与活性炭吸附为主的先进技术, 流程简单, 占地面积小, 处理出水水质好, 适宜作高级办公大楼内的生活杂用水。尽管费用偏高一些, 仍是符合日本国情的。

表 8 NEC 大楼污水处理出水情况

项目	计划值	1992 年 9 月 5 日实测值	1992 年 11 月 7 日实测值	项目	计划值	1992 年 9 月 5 日实测值	1992 年 11 月 7 日实测值
pH 值	5.8~8.6	7.7	7.15	浊度/NTU	< 10	< 1	1
水温/℃	< 40	32.0	20.5	色度/度	< 30	2	-
BOD/ (mg/L)	< 10	7.1	-	电导率/ (μS/cm)	< 700	-	283
COD/ (mg/L)	< 20	< 2.7	0.4	大肠杆菌数/ (个/ml)	< 10	-	-
SS/ (mg/L)	< 5	< 1.3	-				

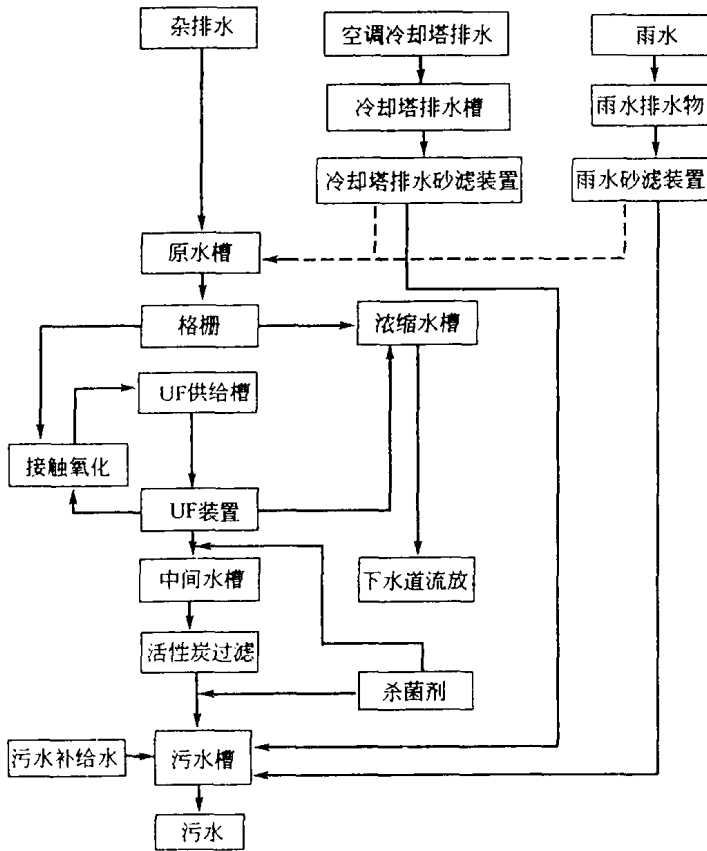


图2 NEC大楼污水处理流程（夏季）

3. 东京落合污水处理厂和多摩川污水处理厂

东京落合污水处理厂1964年建成投产，原水为东京新宿副都心地区的城市污水，处理规模 4.5×10^5 /d。1984年，污水深度处理工程建成投产，全部污水经过深度处理后回用，其中 8000 m^3 /d的再生水供给新宿区的建筑杂用水，其余用于神田川的景观河道用水。落合污水厂的处理流程见图3。

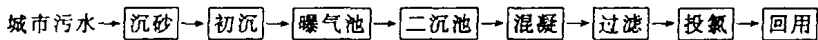


图3 落合污水厂的处理流程

深度处理以过滤工艺为核心，滤池过滤面积 68 m^2 /个，共计33个，过滤采用上流式。落合污水处理厂出水水质达到日本建设省1990年技术指标标准，见表9。

表9 落合污水处理厂出水指标

项目	水质基准	项目	水质基准
大肠菌群数/ (个/ml)	< 10	臭味	没有不快感
余氯	保持	pH值	5.8~8.6
外观	没有不快感		

东京多摩川上游污水处理厂1978年5月建成投产，处理能力为 $1.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ /d。1984年

深度处理工艺开始运转，再生水回用于景观河道补充水。其深度处理工艺流程见图 4。

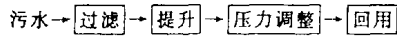


图 4 东京多摩川上游污水处理厂深度处理工艺流程

多摩川上游污水处理厂的再生水主要回用于野火止、玉川及河道景观补充水。野火止河流作为生活用水和灌溉用水水源已有 300 多年的历史。但由于缺水断流，1973 年停止了水田灌溉。1984 年 8 月 21 日，多摩川上游污水处理厂开始每天输送 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的深度处理再生水 ($\text{BOD} < 8 \text{ mg/L}$)，使野火止河道得到恢复。1986 年 8 月 27 日开始向玉川每天输送 $1.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的再生水，1989 年 3 月 29 日开始向千川每天输送 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的再生水，使两河道得到复活。

4. 膜生物反应器在中水道的应用

(1) 工程概况 中水道系统开发利用主要是将厨房排水、洗浴排水集中处理，然后作为厕所冲洗水再利用，日本在 1980 年前已有不少应用实例。1993 年日本建立了一座 $114 \text{ m}^3/\text{d}$ 的中水处理工程，它是 MBR 应用范例之一。

(2) 设计原始资料 这是由高浓度活性污泥与 UF 法组成的 MBR 法。其主要技术参数：MLSS 为 $10800 \sim 12000 \text{ mg/L}$ ，MLVSS 为 $9300 \sim 10600 \text{ mg/L}$ ，滞留时间为 $1.5 \sim 2.0 \text{ h}$ ，BOD 负荷为 $0.79 \sim 1.42 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ，所用 UF 膜孔径为 10 nm ，MWCOD 20000，为聚丙烯腈平板膜组件。

(3) 工艺流程及主要设备 MBR 是好氧高浓度活性污泥法和 UF 膜组件组合而成的，其原理流程如图 5 所示。

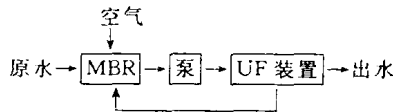


图 5 膜好氧生物反应器

MBR 用于中水处理的工艺流程为

原水 → 格栅 → 调节池 (预曝气) → 潜水泵 → 格栅 → UF 装置 → 泵 → 反应池 → 中水贮存池。

该系统主要特点：高浓度生物曝气与 UF 结合，可省去二沉池，布置紧凑，可实现无人管理。由于废水中有机物可全部分解为无剩余活性污泥，占地面积小，处理能力为 $100 \text{ m}^3/\text{d}$ 的设施占地仅为 70 m^2 ，UF 可除去悬浮固体、胶体及细菌等。

日立工厂建设公司采用高浓度活性污泥法及旋转式平板型 UF 器组合而成的 MBR，可以使膜表面的污泥得到搅拌，可控制膜的污染和堵塞，因此可长时间运转，并能大幅度降低耗电量。

(4) 运行情况 在日本已有 50 多个建筑场所使用 MBR，西欧也有不少的工程应用 MBR。

本工程运行期间对出水取样分析，结果见表 10 所示。

表 10 运行期间 MBR 出水的水质数据/ (mg/L)

项目	原水 (计划值)	原水 (实测值)	MBR 出水	活性炭出水
BOD	130	21 ~ 90 (60) ^①	< 1	< 1
COD	65	14 ~ 41 (33)	2 ~ 4 (3)	< 1
SS	150	13 ~ 82 (60)	ND	ND

① () 内为平均值。

运行一年后,膜两侧压差仍稳定,MBR 出水仍清澈透明,其水质见表 11 所示。此外,整个装置与高尔夫俱乐部的优美景观相协调,没有外突出部分,全部为地下式钢筋混凝土结构。

表 11 MBR 出水水质分析数据

项目	MBR 出水	用水标准		项目	MBR 出水	用水标准	
		冲厕	空调			冲厕	空调
pH 值	7.5	5.8 ~ 9.0	-	ABS/ (mg/L)	0.82	< 1	< 1
浊度/NTU	< 1	< 30	< 10	Cl ⁻ (mg/L)	48.4	< 400	< 300
色度/度	5	< 50	-	总硬度/ (mg/)	74.0	< 500	< 300
SS/ (mg/L)	0	< 30	< 10	NH ₄ ⁺ - N/ (mg/L)	0	< 200	< 20
BOD/ (mg/L)	1.8	< 20	< 10	PO ₄ ³⁻ / (mg/L)	0	< 0.5	-
COD (mg/L)	7.4	< 40	< 20	菌落群/ (个/mL)	0	< 300	-

5. 下水的高级处理

(1) 工程概况 废水处理中一般是将膜技术与絮凝沉降、气浮和生物处理等技术组合起来应用。絮凝沉降需要根据水质控制絮凝剂投量,生物处理时的处理效果常受温度、浓度等因素影响,水质较难保持稳定。膜法不受水质变化影响,且可去除溶解性物质,工艺极其简单,膜法水处理已进入实用化阶段,正在大规模推广和应用。

(2) 设计原始资料 日本第一套使用 RO 技术的大型试验装置于 1994 ~ 1995 年在日本千叶县花见川下水处理场完成了实际运转试验。

原水 (二级处理后的城市污水) 水质:

TDS	349.2mg/L	COD _{Mn}	9.48mg/L
电导率	697.41μS/cm	BOD	3.7mg/L

经 RO 处理后达到自来水标准。

产水能力 210m³/d。

(3) 工艺流程及主要设备 日本千叶下水的高级处理流程如图 6 所示。

①预处理 经二级处理的城市污水为原水,先加入 NaClO 消毒,再加 PAC 絮凝剂,凝絮后经气浮和砂滤。为达到 RO 的进水要求,还需经保安过滤器。

②RO 系统 由高压泵将预处理后的原水送进 I 段 RO, I 段 RO 浓水再进入 II 段 RO 设备再浓缩,以提高水的回收率。

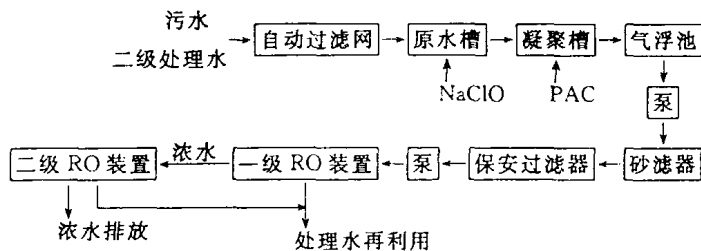


图6 日本千叶下水高级处理流程

处理原水 $260\text{m}^3/\text{h}$ ，产水 $210\text{m}^3/\text{h}$ ，浓水 $50\text{m}^3/\text{d}$ ，水回收率 80% 。

为保证 RO 系统正常运行，设有化学清洗系统，运行中定期对 RO 膜进行化学清洗。

(4) 运行情况 经本系统处理后，RO 产水水质达到自来水标准。RO 装置实现了自动连续运行，RO 出水水质见表 12 所示。

表 12 RO 出水水质分析结果 (平均值) / (mg/L)

项目	原水 (二级处理后污水)	RO 进水	RO 出水	去除率/%	水质标准
SS	4.2	<0.4	<0.4	-	-
TDS	349.2	395.7	219.2	44.6	<500

6. 澳大利亚 Eraring 发电厂用 RO 法从废水中制备锅炉补给水

(1) 工程概况 Eraring 发电厂是澳大利亚的大型发电厂之一，并且是发电能力为 $4 \sim 660\text{MW}$ 的燃煤发电厂，每日耗水量为 4000m^3 ，由饮水厂供给。为了节约用水，发电厂将经过二级处理后的废水，用 RO 法深度处理后，一部分作工厂除尘用水，另一部分再经离子交换处理后作为锅炉补给水。

(2) 设计原始资料 以市政排水经二级处理（即生化处理）后作为发电厂生产用水的原水，经 RO 处理后用于生产。该厂 1995 年 3 月投入运行，开始生产水量为 $63\text{m}^3/\text{h}$ ，以后又扩大到 $168\text{m}^3/\text{h}$ 。

(3) 工艺流程及主要设备 Eraring 发电厂水处理流程如图 7 所示。

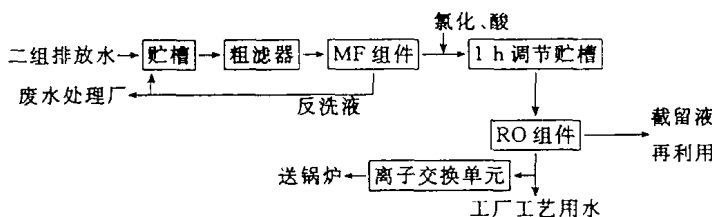


图7 Eraring 发电厂水处理流程示意

第二节 国内工程实例

一、北京高碑店污水回用工程

北京市人均水资源占有量仅 300m^3 左右，为全国人均水资源占有量的 $1/8$ ，世界人均水资源占有量的 $1/32$ ，是一个严重缺水的城市。为了实现北京市国民经济可持续发展战略，

缓解北京市面临的 21 世纪城市发展和可利用水资源的矛盾，北京市政府决定开发城市污水资源作为城市第二水源，启动污水回用建设工程。

高碑店污水处理厂的污水回用工程于 1999 年被列入北京市政府《关于北京市环境污染治理目标与对策》十大研究课题，并于 2000 年被列入北京市重点工程。1999 年 3~8 月完成该工程项目的前期研究工作并完成了可行性研究，1999 年 10 月完成该工程项目立项和审批。2000 年 1 月完成该工程的初步设计和审批工作，2 月完成施工图设计，4 月开始施工，10 月完成工程验收和试运行工作，并于当年正式启用。该工程是高碑店污水处理厂二级出水提升用于河道取水的工业用水，替代清洁水源，改善河道景观，并将部分二级出水经深度处理后用于市政杂用（如道路喷洒，绿地浇灌等），替代自来水，达到城市污水资源化和改善河道水质的目的。

高碑店污水处理厂是目前我国最大的污水处理厂，一期工程于 1993 年 10 月 24 日竣工投产，一期工程的处理能力 $5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ 。二期工程于 2000 年年底竣工投产。目前处理能力为 $1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ 。高碑店污水处理厂采用前置缺氧段活性污泥法工艺。在污水回用工程建设前，高碑店污水处理厂的二级出水直接排入通惠河下游，除每年 $5.5 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{d}$ 用于农业灌溉外，剩余每年超过 $3 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{d}$ 的出水没有得到利用。北京市政府为缓解北京市水资源紧张状况，决定将高碑店污水处理厂处理量的一半，即 $5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ 的污水进行回用，主要用于工业冷却、景观河道、城市绿化和公园用水及城市环境喷洒公路用水等。

由于高碑店污水处理厂出水中氮和磷的含量较高，直接影响回用水水质，因此对高碑店污水处理厂一期工程（ $5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ ）进行了技术改造，改造工作主要包括曝气池改造和污泥处理系统的改造。原曝气的 1/12 为厌氧区，其余为好氧区，改造后将原池 2/9 为缺氧区及厌氧区（水力停留时间共为 2h），其中进水端分出一停留时间为 15min 的强化吸附区。其余仍为好氧区（水力停留时间 7.25h）。原污泥系统中剩余污泥泵入初沉池，其混合污泥再进入污泥浓缩池浓缩消化脱水，因浓缩污泥池停留时间太长（3d），厌氧状态下，磷又被释放出来，通过上清液回到污水中，因此达不到除磷的目的。改造后，原有浓缩池改为浓缩酸化池，浓缩酸化池上清液作为碳源排入污水处理系统；将消化池上清液和脱水机房滤液及冲洗水收集后进行化学除磷。

高碑店污水处理厂一期改造工程分为两步进行。第一步改造后，出水水质优于北京市第一热电厂冷却水取水水源高碑店湖的水质，出水中 BOD、COD、总磷和氨氮分别达到 10mg/L、40mg/L、1.0mg/L 和 10mg/L。第二步改造后，污水处理厂 $5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ 的出水满足高碑店湖 IV 类水体的水质要求。

高碑店污水处理厂二期工程中直接设计了污水回用处理区，将二级出水再进行深度处理，处理后出水用于绿化、脱水机房冲洗水、景观用水及喷洒用水等。高碑店污水处理厂二期污水回用处理区处理能力为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，二级出水指标为 $\text{BOD} < 20\text{mg/L}$ 、 $\text{SS} < 30\text{mg/L}$ ，经污水回用处理区处理后的出水水质指标为 $\text{BOD} < 10\text{mg/L}$ 、 $\text{SS} < 10\text{mg/L}$ 。污水回用处理工艺是将二级出水用泵提升至加药间，在加药间通过加药泵将混凝剂加入进水管中，水药混合后在反应池进行充分混合絮凝，到达沉淀池后进行絮体沉淀，实现泥水分离的目的，沉淀污泥通过定期排泥而被排走。在滤池中通过砂滤将水中的 SS 进一步去除，滤后水进入清水池，通过泵送至各用水点。该污水回用处理工艺流程如图 8 所示。

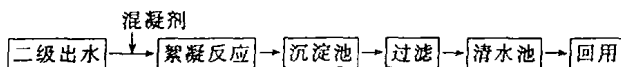


图8 污水回用处理工艺流程

华能北京热电厂位于北京东南郊，总装机为 770MW，是北京市政府和华能国际电力开发公司共同建设的国家重点工程。华能北京热电厂的工业供水包括两部分。一是锅炉补给水系统，水源选自顺义县城北潮白河的向阳闸，经深度除盐处理，以高纯水做锅炉的补充水。二是汽轮机凝气器循环冷却系统的补充水。为了节约北京市的水资源，华能北京热电厂在设计时选用了高碑店污水处理厂的二级出水为水源，经深度处理后用于循环冷却补充水，其深度处理工艺流程见图 9。

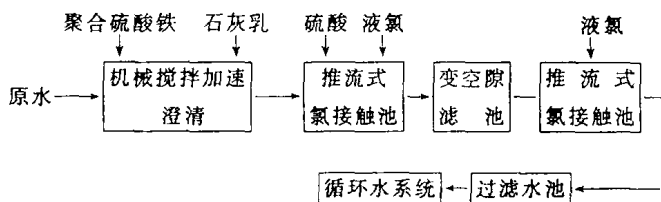


图9 深度处理工艺流程

二级污水深度处理系统于 2000 年 6 月改造完成后正式投入使用，净化能力约为 $2.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，其中 95% 用于循环水系统的补水，5% 供应输煤系统冲洗和绿化、冲厕等用水。表 13 为二级污水深度处理系统的净化效果。

表 13 二级污水处理系统的净化效果

项目	原水	澄清池出水	滤池出水	项目	原水	澄清池出水	滤池出水
pH 值	7.12	10.52	6.88	$\text{As}^{3-} / (\text{mg/L})$	0.002		0.003
SS/ (mg/L)	11.95		<1	$\text{SiO}_3^{2-} / (\text{mg/L})$	13.52	9.52	9.02
$\text{COD}_C / (\text{mg/L})$	41.08		19.78	$\text{Fe}^{2+} / (\text{mg/L})$	1.06	0.42	0.68
$\text{BOD}_5 / (\text{mg/L})$	9.13		1.91	$\text{Al}^{3+} / (\text{mg/L})$	14.80	7.40	0.50
硬度/ (mmol/L)	5.60	3.92	4.20	$\text{Cu}^{2+} / (\text{mg/L})$	0.53	0.054	0.026
碱度/ (mmol/L)	3.70	1.70	0.60	$\text{Ca}^{2+} / (\text{mg/L})$	76.15	64.13	63.33
$\text{Cl}^- / (\text{mg/L})$	146.00	141.00	146.00	$\text{Na}^+ / (\text{mg/L})$	76.00	88.00	81.00
$\text{SO}_4^{2-} / (\text{mg/L})$	153.00		194.00	$\text{S}^{2-} / (\text{mg/L})$	0.46		
浊度/NTU	2.06	0.61	0.18	$\text{NH}_4^+ / (\text{mg/L})$	1.39	1.17	0.52
含盐量/ (mg/L)	773.00		792.00	$\text{PO}_4^{3-} / (\text{mg/L})$	10.00	0.15	0.20
$\text{F}^- / (\text{mg/L})$	0.38						

二、大连市污水回用工程

大连市是全国严重缺水城市之一，人均淡水资源不足 200 m^3 ，只是全国人均水平的 7%，缺水已经成为制约大连经济发展的重要因素，严重影响了城市居民的生活。因此污水回用在

大连得到了极大的重视，污水回用技术的发展水平和应用情况也处于国内领先地位。1991年，大连市已建成规模为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的污水回用示范工程，此后陆续建设了几个污水回用工程，将大连市污水处理厂的二级出水经深度处理后形成再生回用水，供全市的园林绿化、建筑施工、市政杂用、办公楼冲厕等用水以及市内几家工厂的工业冷却补充用水。

大连市春柳河水质净化厂是我国第一个污水回用示范工程。它是在大连市春柳污水处理厂基础上增加三级处理建成的。此工程由中国市政东北设计研究院设计，1989年开始设计，施工，1991年建成，1992年正式投产使用。示范工程的主要内容为完善城市污水处理厂原有的二级处理系统，新建深度处理设施，铺设输水管道，用户厂内管路改造，设置用户水质改善与监控系统。示范工程的深度处理设计规模为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，处理工艺为混凝（澄清）-过滤-消毒工艺，回用流程如图 10 所示。

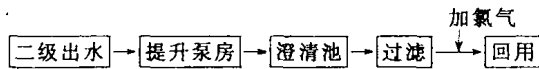


图 10 深度处理回用流程图

示范工程采用澄清池代替沉淀池，澄清池为两座圆形钢筋混凝土构筑物。运行时，为保证良好的泥渣回流层，必要时投入一定量的黄泥。当澄清池回流泥渣层不良时，可加聚丙烯酰胺进行助凝。示范工程采用四座双阀虹吸滤池，滤速较给水处理低，滤池工作稳定，没有出现沙粒之间挂膜堵塞现象。清水池用于蓄备处理后的再生水，以供工厂用水调节，滤池反冲及加氯杀菌用水。投氯杀菌是为保证再生水微生物指标达到原化工部循环用水指标要求，否则微生物黏泥会堵塞输水管道、工厂冷却塔和换热设备。投氯量按余氯量 $0.5 \sim 1.0 \text{ mg/L}$ 控制，接触时间不少于 0.5 h 。示范工程的深度处理工艺运行稳定可靠，回用水水质达标率较高，各工序处理效率见表 14。

表 14 大连市春柳污水处理厂各工序处理效果

项目	去除率/%			出水水质/(mg/L)	项目	去除率/%			出水水质/(mg/L)
	澄清	过滤	综合			澄清	过滤	综合	
浊度/NTU	62	33	75	4	总磷	50	28	64	6
BOD ₅	37	48	73	5	SS	10	80	82	0.1
COD _{Cr}	25	20	39	39	铁			62	
总氮			21	0.9					

目前大连春柳污水处理厂的回用水已成功地应用于煤气厂冷却用水、焦化厂冷却用水、印染厂工艺用水等方面，取得了显著的社会效益和经济效益。该回用工程处理水量为 $5000 \text{ m}^3/\text{d}$ ，其中 $2000 \text{ m}^3/\text{d}$ 供给红星化工厂回用于生产工艺和设备直流及循环冷却水； $1500 \text{ m}^3/\text{d}$ 供给煤气二厂，用于洗焦水和废水生化处理系统稀释水和循环冷却补充水； $1500 \text{ m}^3/\text{d}$ 供给造船厂、热电厂、橡胶三厂作为基建消防和冷却用水。

大连春柳污水厂污水回用工程总投资为 350 万元，其中包括深度处理设施以及 1.5 km 的回用管道。按规模 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 计，单位投资为 350 元/ m^3 （水）。而大连市引碧工程单位投资则为 1052 元/ m^3 （水），回用工程的基建投资是远距离引水的 $1/3$ 。大连春柳污水厂再生

水的运行成本（不包括前段生物二级处理）为 0.25 元/m³（水），大连引碧的自来水成本为 1.485 元/m³（水），再生水成本只是它的 1/6。1995 年，大连市春柳污水厂再生水的价格 0.48 元/m³（水），而大连市工业水价为 1.5 元/m³（水），因此用户每一立方米水可节约 1.02 元。再生水厂直接效益为每生产 1m³ 水可取得利润 0.23 元/m³（水）。可见大连市的污水回用工程不仅可以解决城市水资源缺乏问题，而且可产生巨大的经济效益。

近几年大连市污水回用发展迅猛，市内几大污水处理厂纷纷进行了污水回用工程建设。1992 年大连市政府立项，决定利用世界银行贷款对春柳河污水处理厂进行改造。大连春柳河污水处理厂经过增容改造后，将向甘井子工业区提供 8 × 10⁴ m³/d 的回用水，目前深度处理工程，管道铺设和用户受水工程准备工作正在紧张进行。大连马栏河污水处理厂也是利用世行贷款建设的，规模为 12 × 10⁴ m³/d，处理后一次性达到回用标准，目前已建设运行，回用管道也已部分建成。大连市付家庄污水厂是以市场化模式运作建成的，处理规模 1 × 10⁴ m³/d，现已建成投产，其出水主要用于滨海路中西段、森林动物园及付家庄区域的绿化浇灌。大连市开发区污水处理一厂和二厂的污水回用建设工程正处于设计阶段。

三、北京结核病医院污水回用示范工程

(1) 基本情况

北京结核病医院现有病床 578 张，全院职工 563 人，日供水量 600 ~ 700m³。污水先作二级生物处理，再经深度处理后回用于医院，处理流程见图 11。

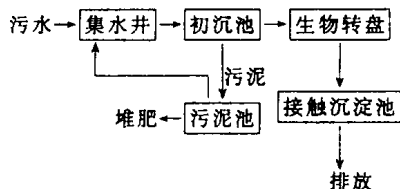


图 11 医院污水二级处理流程

(2) 水量与水质

①污水小时变化 $k_h = 2.6$ ，每小时排水量约 14t。

②原污水水质：BOD = 50 ~ 80mg/L，COD_{Cr} = 140 ~ 160mg/L，SS = 50 ~ 100mg/L，大肠菌值 10⁶ ~ 10⁷ 个/ml，细菌总数 10⁵ ~ 10⁶ 个/ml。

③二级出水水质：二级出水水质一般为 BOD = 10 ~ 20mg/L，COD_{Cr} = 40 ~ 50mg/L，SS = 30 ~ 40mg/L，NH₄⁺ - N = 4 ~ 10mg/L，大肠菌数 < 500 个/L，总余氯 6 ~ 8mg/L，符合我国医院污水排放标准。

(3) 深度处理工艺

①处理工艺的选择 当二级出水 COD_{Cr} = 64.6mg/L 时，悬浮状态 (> 1μm)，COD_{Cr} 比值约为 34.4%。据前面提到的研究结果推测，该站二级出水经混凝沉淀过滤处理即可达到北京污水回用标准。

②设计流程 如图 12 所示。

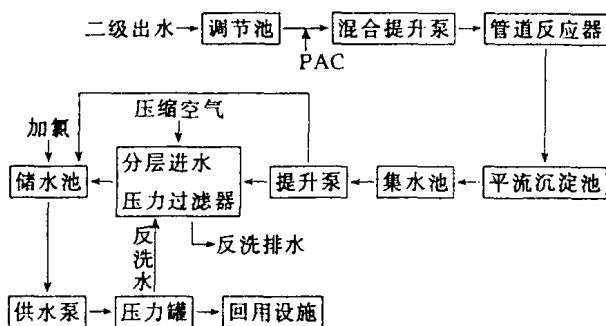


图 12 医院二级出水深度处理流程

对主要污染物质的去除见表 15，稳定运行期间污水水质见表 16，常见消毒效果见表 17，过滤效果见 18，污水处理成本见表 19。

表 15 深度处理水质

分析项目	水样名称	二级出水	混凝沉淀后出水	滤后出水
	分析结果			
色度/度		35	25	20
pH 值		7.44	7.24	7.38
总盐 / (mg/L)		304	261	256
总碱度 (CaCO ₃) / (mg/L)		159	144	150
氯化物 (Cl ⁻) / (mg/L)		42.1	56.1	56.1
硫酸盐 (SO ₄ ²⁻) / (mg/L)		11.7	15.5	18.5
磷酸盐 (PO ₄ ³⁻) / (mg/L)		7.75	1.16	0.41
氨盐 (N) / (mg/L)		9.2	11.2	9.4
硝酸盐 (N) / (mg/L)		6.20	5.92	5.47
亚硝酸盐 (N) / (mg/L)		0.442	0.472	0.442
总硬度 (CaCO ₃) / (mg/L)		137	133	134
化学耗氧量 / (mg/L)		41.7	18.4	16.7
生化需氧量 (5d, 20℃) / (mg/L)		14.1	4.5	6.5
余氯 / (mg/L)		2	< 0.05	< 0.05
合成洗涤剂 / (mg/L)		0.3	0.2	0.1

表 16 污水示范工程测定结果

项目	pH 值		色度/度		BOD/ (mg/L)		COD/ (mg/L)		浊度/NTU	
	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水
8月15日	7.26	7.31	30	10	13.25	5.2	45.50	20.7	11	1
8月16日	7.35	7.05	35	15	30.5	16.4	44.23	27.02	6	0
8月17日	7.24	74.18	40	15	-	-	36	13.1	6	1
8月18日	7.13	7.19	30	10	12.4	3.6	33.5	12.53	5	0
8月19日	7.25	7.16	25	10	-	-	82.1	16.4	7	0
8月20日	7.18	7.44	30	10	15.2	1.6	122.4	26.28	8	1
8月21日	7.40	7.86	30	10	16.5	2.0	82.3	25.2	9	1
8月22日	7.26	7.31	20	10	-	-	61.2	27.13	10	1

表 17 常见消毒效果

加氯量 / (mg/L)	游离性余氯 / (mg/L)	大肠菌值 / (个/L)	加氯量 / (mg/L)	游离性余氯 / (mg/L)	大肠菌值 / (个/L)
5	0.5	70	10	1.1	4
7	0.7	52	12	1.9	<3
8	0.8	4	15	2.9	<3

表 18 过滤周期与处理效果

滤速/ (m/h)	工作周期	浊度/ (NTU)			COD/ (mg/L)			截污量/ (kg/m ³)
		进水平均	出水平均	去除率/%	进水平均	出水平均	去除率/%	
6	48	6.5	0.38	94.2	-	-	-	1.96
6	57	6.7	0.5	92.5	25.01	17.55	29.8	2.36
6	48	7.3	0.21	97.1	28.96	22.79	21.3	2.27

表 19 污水处理成本分析

项目		单价	用量	成本/ (元/t)	占总成本/%
药费	PAC	0.43 元/kg	84g/t 水	0.036	21.7
	液氯	0.35 元/kg	6g/t 水	0.002	1.2
电费	直接	0.085 元/ (kW.h)	0.41g/t 水	0.035	21.1
	间接	7.5 元/ (kW.d)	12kW	0.015	9.0
小计				0.088	53.0
基建投资折旧		3240 元/a		0.014	8.4