

5

官厅水库永定河入库口黑土洼湿地系统示范工程

项目位置：官厅水库永定河入库口（河北怀来县月亮岛园艺场附近）

项目规模：总面积115万m²，设计年处理水量8800万m³。

竣工时间：2004年完成一期工程建设，2007年完成全部工程建设。

5.1 项目基本情况

5.1.1 项目概况

官厅水库是新中国成立后修建的第一座大型水库，位于河北省张家口市怀来县和北京市延庆县界内，是北京市重要地表饮用水水源地之一。受上游污染影响，1997年官厅水库被迫退出首都饮用水供水系统。为了修复官厅水库流域水生态环境，改善官厅水库水质，2000年起，在北京市科委、北京市发改委、科技部、水利部以及德国勃兰登堡州经济部大力支持下，由北京市水务局组织、北京市水

科学技术研究院负责开展了“官厅水库流域水质改善总体技术方案研究”、“官厅水库流域水质改善关键技术研究”、“中德合作官厅水库流域水生态环境综合治理工程示范”等项目研究，并于2003年至2007年，开展了“黑土洼湿地系统示范工程”建设，在官厅水库永定河入库口通过人工湿地技术净化入库污染，改善入库水质。工程主要特性见表1。

表1 黑土洼湿地系统示范工程特性表 单位：mg/L

项目	单位	数量
湿地系统正常运行设计库水位	m	476.0
永定河引水最高库水位	m	476.5
人工湿地运行最高库水位	m	476.5
人工湿地防洪最高库水位	m	477.5
永定河设计引水流量	m ³ /s	4.0
泵站设计扬水流量	m ³ /s	0.16~0.8
黑土洼稳定塘设计处理流量	m ³ /s	4.0
人工湿地工程设计处理流量	m ³ /s	0.16~0.8
湿地系统设计运行年限	年	10
工程正常引水期永定河流量范围	m ³ /s	0~20

5.1.2 水文气象、水质

项目区多年平均气温为 9.4°C ，冬季（12月~次年2月）月平均气温为 $-7.7\sim-4.4^{\circ}\text{C}$ ，极端最低气温 -23.3°C 。

根据1992~2002年水库八号桥处水质分析结果，当河道流量大于 $20\text{m}^3/\text{s}$ 时，河道水质明显好转，各月水质中11月至来年3月的枯水期（也即低温期），水质最差，为劣V类。而5、10月份的平水期（也即常温期）及6、7、8、9月份的汛期（也即高温期）水质明显好于前者，但也仍为劣V类。

永定河入库径流分析结果说明，自80年代以来，永定河入库流量明显减少。其中：1980~1999年间小于 $4.0\text{m}^3/\text{s}$ 的累积发生频率为22.6%，小于 $20\text{m}^3/\text{s}$ 的累积发生频率为84.7%，20年间平均入库流量为 $12.3\text{m}^3/\text{s}$ 。若扣除 $20\text{m}^3/\text{s}$ 以上流量，则旬平均入库流量为 $8.2\text{m}^3/\text{s}$ 。

对官厅水库多年库水位变化分析结果表明，官厅水库库水位在476m以上的发生频率较为稳定。库水位在476.0m、476.5m、478.5m以下的累积发生频率分别为75.19%、82.3%和98.7%。1980年8月31日库水位达到历年最高水位478.81m。

5.1.3 场地条件及工程选址

综合考虑来水高含沙、高程影响、工程造价及运行费用等因素，结合入库口周边地形，经方案比选，确定黑土洼库湾作为人工湿地前置沉沙兼氧化塘、月亮岛南侧现有水库滩地作为人工湿地场址。

5.2 问题与需求分析

（1）实施《21世纪初期首都水资源可持续利用规划》的重要组成部分

面对严峻的水资源问题，水利部和北京市联合永定河上游省份于2000年提出《21世纪初首都水资源可持续利用规划》，明确提出“稳定密云，挽救官厅”。作为流域规划的重要组成部分，本工程在官厅水库永定河入库口采取生态工程措施，既是对永定河上游污染治理的补充，也是控制入库污染、进一步削减入库污染物总量的一个有效措施，是挽救官厅的一个重要组成部分。

（2）恢复三家店饮用水水源的一个关键环节

现状永定河入库受污染水体在经官厅水库及官厅山峡自净作用之后，到三家店仍难以达到饮用水水源标准，本工程对入库口高污染水体进行生态工程处理，将在一定程度上削减入库污染物总量，是下游三家店恢复饮用水水源功能工程规划的关键环节。

（3）改善官厅库区周边环境，促进当地经济发展

该项工程将改善官厅水库水质，促进其生态环境的良性循环。工程建成后，将大大提高当地旅游资源价值及其它相关产业价值，为当地的经济发展到起到良好的促进作用。

（4）示范研究北方低温地区水体生态修复的关键技术，为推广应用提供技术支撑

在北方低温地区，利用生态工程进行水质改善，虽有一些试验实例，但进行较大规模的工程建设尚少见报道，特别在官厅地区这种水文气象及土壤条件均相当恶劣的地区进行水处理生态工程建设，其技术难度显而易见。本示范工程是按工程规模进行实地示范研究，探索在北方低温多沙地区建设水处理生态工程的技术解决方案，为在这种恶劣环境地区建设水处理生态工程提供技术支撑，从而为这些地区的生态和水体修复提供借鉴，起到推广应用的示范作用。

5.3 工程任务与规模

5.3.1 工程任务

本示范工程的主要目的是探索在北方低温地区建设人工湿地系统以处理河道微污染水体关键技术，同时，该工程肩负着最大限度地处理永定河直接进入官厅水库的受污染水体、削减入库污染物总量的工程任务。

5.3.2 工程规模

（1）规模

黑土洼湿地系统由稳定塘、人工构造湿地和退水塘构成，总面积 $115\text{万}\text{m}^2$ ，设计年处理水量 $8800\text{万}\text{m}^3$ 。

（2）设计引水流量及泥沙

工程设计引水流量为 $4.0\text{m}^3/\text{s}$ ，工程正常运行期河道流量范围为 $0\sim 20\text{m}^3/\text{s}$ ，当河道流量超过 $20\text{m}^3/\text{s}$ 时，停止引

水。设计平均引水含沙量 $2.0\text{kg}/\text{m}^3$ 。人工湿地设计处理黑土洼稳定塘出水 $0.16\sim 0.8\text{m}^3/\text{s}$ 。黑土洼稳定塘设计淤积年限为10年，人工湿地系统设计运行年限为10年。

(3) 水质设计参数

永定河八号桥处的水质受季节影响明显，其丰水期、平水期、枯水期的水质状况不同，以枯水期的水质最差，与之相对应，这三个水文期与高温期、常温期及低温期相吻合。设计选定永定河引水水质指标如表2：

表2 永定河引水水质设计指标 单位：mg/L

	BOD ₅	COD _{Mn}	TP	TN	NH ₃ -N
低温期设计值	25.4	17.0	0.5	19.7	12.3
常温期设计值	16.4	10.2	0.5	9.2	4.5

参照国内外相关工程的水质处理效果并考虑工程区的水文气象、水质特性及湿地出水用途，设计中以污染物去除率为衡量目标，湿地系统各项水质指标的设计去除率见表3。

表3 湿地系统各项水质指标设计去除率 (%)

		BOD ₅	COD _{Mn}	TP	TN	NH ₃ -N
黑土洼综	低温	20	20	40	20	35
合稳定塘	常温	35	25	45	35	56
潜流人	低温	55	35	35	20	50
工湿地	常温	70	40	55	35	75

本示范工程是我国北方低温地区建设大规模生态水处理工程的首例，其准确运行参数由工程运行调控。

5.4 工程设计

5.4.1 工程总体布置

工程等别设定为V等。引水闸，引水方涵，提水泵站，输水管线及湿地围堤等主要建筑物，参照V级建筑物设计。

黑土洼湿地系统示范工程位于官厅水库永定河入库口附近，该工程充分利用黑土洼库湾及月亮岛南侧滩地，构建由稳定塘、人工构造湿地和退水塘构成的人工湿地系统，旁侧分流净化永定河受污染入库来水，设计将官厅水库上游严重污染的劣V类来水引入黑土洼稳定塘，经初步净化后，一部分水直接入库，另一部分再经人工湿地进行深度处理，其出水可达III~V类地表水标准。工程总面积115万m²，设计年处理水量8800万m³，主要工程内容包括：

永定河引水工程、黑土洼溢流坝加高工程、黑土洼稳定塘工程、人工湿地引水暗涵及扬水泵站工程、人工湿地工程五部分。其总体布置详见图1。



图1 黑土洼湿地系统示范工程平面布置图

5.4.2 永定河引水工程

永定河引水工程位于黑土洼沟西北端，与永定河主槽距离最近处。该部分工程由起壅水作用的永定河溢流坝（70m）、位于永定河滩地上的进口引水明渠（46m）、引水节制闸1座、穿越月亮岛的混凝土引水方涵（331m）、以及出口明渠（131m）组成。设计引水流量 $4\text{m}^3/\text{s}$ ，引水方涵尺寸为2孔 $2\text{m}\times 2\text{m}$ 。

5.4.3 黑土洼溢流坝加高工程

黑土洼溢流坝由原有的堆石坝改造而成，设计加高2m，由474m增加至476m，设计溢流坝上下游边坡均为1:2，顶宽2m。为保证冬季下泄 $3.4\sim 4.0\text{m}^3/\text{s}$ 水量，在坝顶预留两组共8孔木制简易闸门，单孔宽1m，深0.8m。

5.4.4 黑土洼稳定塘工程

黑土洼稳定塘工程是在由黑土洼溢流坝围成的封闭区域内建设水质净化强化措施，沉淀和初步净化永定河高浓度来水。工程包括由周边浅水区及滨水滩地构成的库滨带，深水区水面由浮水植物构成的浮水植物带，及用于分区的柔性隔膜。当稳定塘蓄水达到476m高程时，水面面积为 84万m^2 ，库容 264万m^3 ，塘内最大水深约6.2m。黑土洼稳定塘设计处理永定河来水 $4\text{m}^3/\text{s}$ 。黑土洼稳定塘设计有机负荷 $125.8\text{kgBOD}_5/(\text{100m}^2\cdot \text{d})$ ，水力停留时间约7.6天。

5.4.5 人工湿地引水暗涵及泵站工程

人工湿地引水暗涵及泵站工程包括引水暗涵、泵站及管理厂区工程。引水暗涵长约446m，连接黑土洼稳定塘和泵站，水流自黑土洼稳定塘自流进入泵站后再扬水进入人工湿地。泵站设计引水流量 $0.16\sim 0.8\text{m}^3/\text{s}$ 。

5.4.6 人工湿地

人工湿地为本工程的主要部分，位于月亮岛南侧水库滩地上，通过围堤与水库隔离，围堤与月亮岛南侧陡坎围地 16.0万m^2 （240亩），其中潜流湿地（含四个区，采用两种不同结构模式）面积约 7.3万m^2 （110亩），表流湿地面积约 9.3万m^2 （140亩），深度处理黑土洼稳定塘出水 $0.16\sim 0.8\text{m}^3/\text{s}$ 流量。



图2 黑土洼人工湿地工程平面布置图

(1) 潜流湿地IV区工程设计

潜流湿地IV区设计为两个模块，即砂滤模块、湿地模块。

湿地主配水井分水进入潜流湿地IV区砂滤池。砂滤池采取中心分流式，由装有不同粒径砾石的石笼组合而成。砂滤池底部铺设无纺布，排水将通过砂滤池两边埋设的排水管（DN300）排出。其工艺流程为：

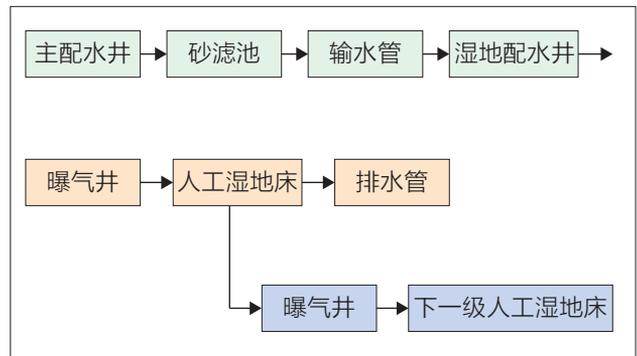


图3 潜流湿地工艺流程图

湿地系统可串联或并联运行。水流经过砂滤池过滤后并联进入湿地单元配水井，再直接进入湿地单元或经曝气井曝气进入湿地单元。典型湿地单元长44m、宽24m、深1.7m、有效深度1.2m，边坡1:1.5，湿地底部坡度为0.2%。湿地床布水花管和集水花管采用DN300PVC管，分别埋于湿地床首末端。湿地填料采用20~40mm的砾料，底部铺 $250\text{g}/\text{m}^2$ 土工布。湿地单元植物为芦苇和香蒲。

湿地运行中通过曝气井安装曝气设备进行间歇曝气。曝气井长2m、宽2m、深5m。

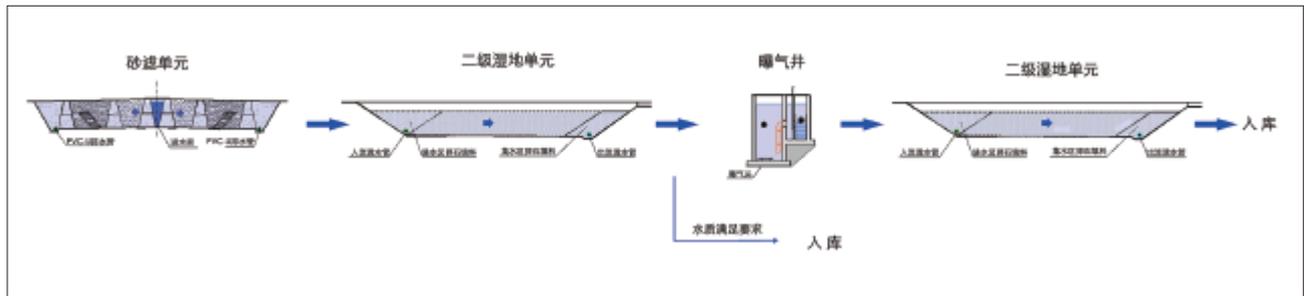


图4 潜流湿地IV区典型单元纵断面图

(2) 潜流湿地 I、II、III 区工程设计

潜流湿地 I 区共设6个并联试验单元，各单元的工艺流程基本相同。水流由布水暗渠依次进入挺水植物塘、一级植物碎石床、水生生物塘、二级植物碎石床、砂滤池最后排入退水管。其各单元工艺流程为：

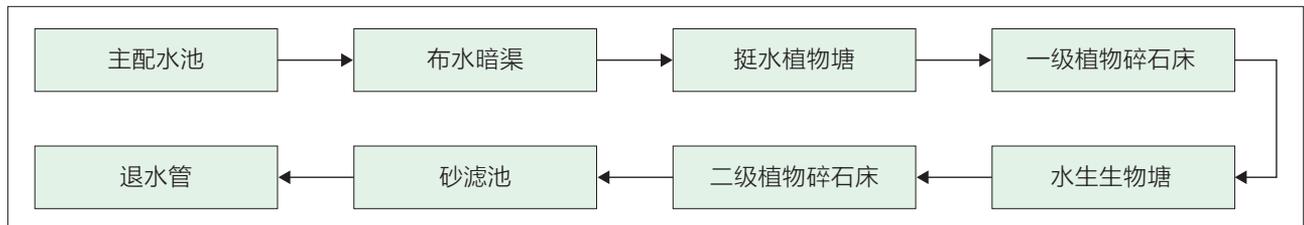


图5 潜流湿地各单元工艺流程图

湿地单元的典型工艺尺寸为：

挺水植物塘：30m × 15m × 1.3m（指宽 × 长 × 深，下同）

一级植物碎石床：30m × 30m × (1.2~1.5m)底坡1%

水生生物塘：30m × 30m × 2.0m

二级植物碎石床：30m × 30m × (1.2~1.5m)底坡1%

砂滤池：30m × 8m × 1.2m

潜流湿地 I 区六个单元中两个单元为上述尺寸，另四个单元宽度为15m，其它尺寸同上。

碎石床填料为20~40mm为主的碎石料，砂滤池填料为1.2~5mm的石屑。

最大水力负荷为1.02m³/m²/d，水流在湿地单元内总停留时间为19.01小时。正常运行水力负荷为0.58m³/m²/d，水流在湿地单元内总停留时间为34.26小时。

挺水植物塘栽种类芦苇等挺水高等植物；一级植物碎石床以芦苇、香蒲为主；水生生物塘种植水葫芦、大漂等浮水植物；二级植物碎石床以当地香蒲、芦苇等水生植物为主；砂滤池种植芦苇或香蒲。

潜流湿地 II、III 区设计与潜流湿地 I 区典型单元模式相同,仅把尾部砂滤池改为退水明渠。

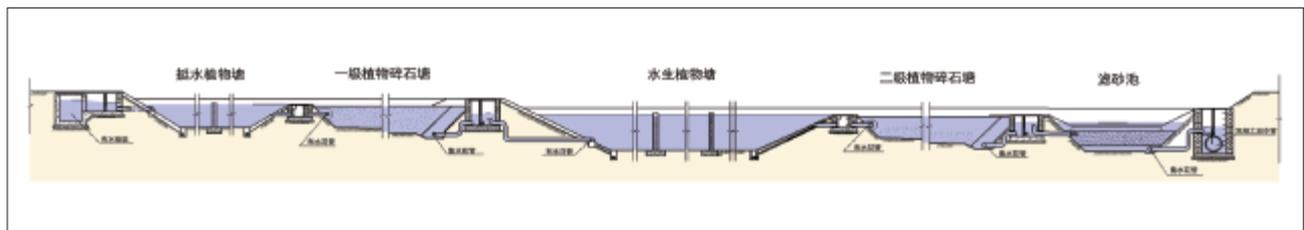


图6 黑土洼湿地设计图

(3) 表流湿地工程设计

表流湿地位于潜流湿地右侧，水源由潜流湿地地区布水暗涵引入。该表流湿地含三个并联“S”型生物沟渠、和生物塘及末端渗滤单元构成，并在各不同部位配置不同的生物，使水流沿程处于不同的生化环境中。设计其工艺流程为：

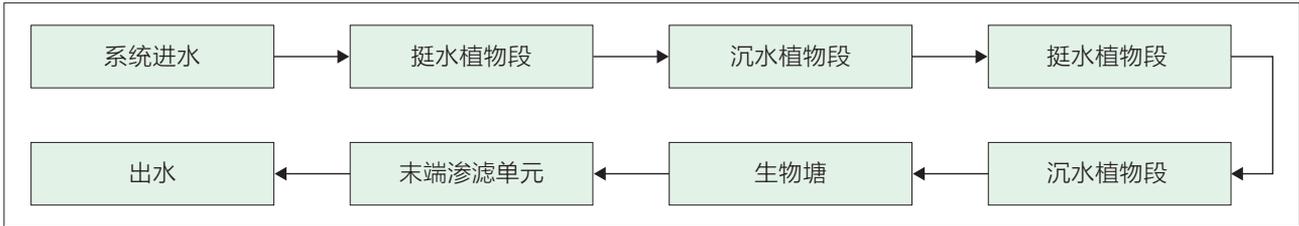


图7 表流湿地工艺流程图

5.4.7 退水塘

湿地退水塘是在潜流湿地围堤外滩地，利用退水沟及取土坑，形成表流湿地进一步净化水质，特别为冬季潜流湿地退水的进一步净化提供条件。

5.4.8 运行管理

湿地运行管理要求为：

(1) 水位管理

种植期养苗，床面淹水宜控制在5~10cm。水深超过20cm将造成植物呼吸困难死苗，水深过浅则碎石床高温烧苗。

①正常运行期，水平流水位宜位于床面以下5~10cm，垂直流水位可淹没床面5~10cm或按设计要求控制水位。

②水位调节：湿地床水位可常年维持在同一高程，各个季节无需调整不同水位。水位调节管可采用简易活套管，不同长度更换使用，不须无级调节设计。

(2) 植物管理

- ①及时割除攀援植物、控制其生长
- ②严禁水位过低造成植物根部缺水
- ③通过淹没保苗的方式控制野草生长
- ④冬季无须收割植物

(3) 冬季运行

黑土洼湿地实践证明，在芦苇保留的运行条件下，冬季可基本保持湿地床中前部不冻结，保温效果显著。同时控制以下运行要点：

- ①中下部引水，水流不间断；
- ②潜流运行；

③冬季芦杆不收割、苇叶无需清理，但应注意防火；

④若间歇流运行，则应采用短间隔，白天落干晚上淹没；

5.5 建成效果

工程于2004年11月开始试运行，2005年4月起进入正常运行阶段。运行期间稳定塘进水流量约为0.98~4.36 m³/s，面积水力负荷约0.1~0.4 m³/m²/d，潜流人工湿地区面积水力负荷约0.3~0.8 m³/m²/d。



图8 建成效果

5.5.1 工程造价及运行管理费

黑土洼湿地系统示范工程直接工程费2867.89万元。人工潜流湿地每平米工程直接费150~190元(2003年造价)。若不计黑土洼稳定塘效益,湿地系统直接工程投资折合日处理量吨水投资为422元/吨水/天,综合运行管理费为0.075元/吨水,其中电费占0.021元/吨水。相对同等污染处理能力的原水生化技术净化厂,其工程投资仅为1/3~1/4,运行费为1/10。

5.5.2 水质净化效果

实测分析表明,多年平均状态下,黑土洼湿地系统年均处理2.73m³/s基流量,污染削减效率见表4,COD_{Mn}、BOD₅、NH₃-N、T-N和T-P去除率分别为34.9%、54.2%、41.4%、33.9%和53.1%。

表4 黑土洼湿地系统入库污染物总量削减率

系统进水量 (m ³ /s)	入库污染物总量削减率(%)				
	COD _{Mn}	BOD ₅	NH ₃ -N	T-N	T-P
2.7	34.9	54.2	41.4	33.9	53.1

潜流湿地水质净化效果监测表明,湿地对BOD₅净化效果良好、且对温度变化影响不敏感,出水指标基本达到地表水Ⅰ类标准;在碳源含量较低的来水条件下,常温期湿地对总氮的去除率仍高达70%左右,低温对总氮去除有着较明显影响,但其去除率也可达到20%左右,低温影响期为11月至翌年3月;常温期总磷去除率约为30%~55%,低温期特别是3、4月份总磷净化效率偏低,可能与微生物活性有关。

对黑土洼稳定塘监测表明,对于低污染来水,稳定塘对总氮、总磷及氨氮具有良好的净化效果,在实测水力停留时间约19.95天条件下,常温期氨氮去除率可达75%以上,总氮去除率可达44%,总磷可达53%;低温期氨氮、总氮、总磷去除率分别达到25%、15%、25%;但稳定塘对低浓度BOD₅、COD_{Mn}的净化效果有限。

5.5.3 生态环境改善

黑土洼湿地系统位于官厅水库库滨滩地上,湿地工程建设前,该地为植被稀少、风沙侵蚀严重、受到当地百姓违章垦植的沙滩地,湿地系统建成后,仅两年间,其湿地生态系统发生了巨大改善。

稳定塘、人工湿地塘、植物碎石床、表流湿地及退水塘在人工种植和自然发展下,湿地系统的生物及生境多样

性得到有效恢复。

5.5.4 社会效益

该项目的圆满实施,在国内起到良好的推广示范作用,并大大提高我国在湿地水质净化方面的技术水平,对国内类似地区的湖泊污染治理也产生重要影响。

该工程实施,加之上游污染协同治理,使官厅水库水质恢复到地表水Ⅳ类,官厅山峡水质达到地表水Ⅱ类,官厅水库恢复为北京市备用水源地,有效缓解北京市水资源紧缺状况。

此外,工程建设为科普教育、试验研究提供了良好平台,每年接待大量学生和社会单位考察调研。