

重庆市环境保护局办公室

渝环办〔2017〕672号

重庆市环境保护局办公室 关于印发《重庆市湖库生态修复适宜技术 选择指南（2017版）》的通知

各区县（自治县）、经开区环保局，两江新区环保分局，各有关单位：

为加强对我市开展湖库生态修复工作中适宜技术的选择指导，进一步改善水环境质量，市环保局组织编制了《重庆市湖库生态修复适宜技术选择指南（2017版）》，现予以印发，供参考。

重庆市环境保护局办公室

2017年12月29日

重庆市湖库生态修复适宜技术选择指南

(2017 版)

重庆市环境保护局

2017 年 12 月

目 录

前 言	III
第一章 总则.....	1
1.1 编制目的.....	1
1.2 适用范围.....	1
1.3 基本原则.....	1
1.4 工作流程.....	2
1.5 术路线图.....	3
第二章 术语及定义.....	4
2.1 生境.....	4
2.2 地表径流.....	4
2.3 水生植物.....	4
2.4 挺水植物.....	4
2.5 浮水植物.....	4
2.6 沉水植物.....	4
2.7 生态治理.....	5
2.8 生态恢复.....	5
第三章 水体功能区划分与水质标准.....	6
3.1 山地城市湖库特点.....	6
3.2 水环境功能区划分.....	6
3.3 水质标准.....	6
第四章 湖库生态修复适宜技术.....	10
4.1 点源污染控制技术.....	10
4.2 面源污染控制技术.....	12
4.3 内源污染治理技术.....	24
4.4 水体自净能力恢复与生态修复技术.....	31
第五章 湖库管理与长效保持.....	47
5.1 管理主体.....	47
5.2 管理原则.....	47

5.3 管理措施.....	47
第六章 湖库水环境生态修复案例.....	50
6.1 重庆园博园龙景湖水环境综合治理工程.....	50
6.2 重庆互联网产业园山林沟大塘治理工程.....	58
6.3 重庆北部新区八一水库生态修复工程.....	61
6.4 重庆渝北区双龙湖生态修复工程.....	65
6.5 云南玉溪抚仙湖人工湿地修复工程.....	68
6.6 无锡蠡湖水环境综合整治工程.....	71
6.7 昆山傀儡湖水环境综合整治工程.....	72
6.8 案例汇总表.....	75
附录 1	77
附录 2	79

前 言

为加强重庆城市湖库污染防治，指导污染防治技术选择，促进湖库水环境质量改善，制定本技术选择指南。

本技术选择指南在对重庆市水体现场调研及水质监测的基础上，结合包括《重庆主城面源污染控制集成技术指南》、《重庆新建城区健康水系统构建技术导则》、《水生态基础设施规划技术导则》等水体污染控制方面的技术成果，并根据国内外水体综合整治的成功案例编制而成，可作为环境保护行政主管部门、环保技术服务单位和其他相关单位开展湖库污染治理技术选择与应用的参考技术资料。

本技术选择指南由重庆市环境保护局组织编制，将结合湖库污染治理技术发展和应用情况适时修订。

本技术选择指南编制单位：重庆大学。

本技术选择指南主要起草人：何强、古励、石敬华、孙通、任杨、李莉、李果、李明星、王聪、薛蕊、徐建、姜鑫。

第一章 总则

1.1 编制目的

为系统整合重庆市湖库生态修复适宜技术，指导重庆地区城市湖库的水环境治理、水环境质量提升、水生生态系统恢复等工作，特编制本技术指南，为重庆地区的湖库湖库水环境治理工作提供支撑。

1.2 适用范围

本指南适用于重庆地区及西南地区的城市湖库水体。重庆及其西南地区属于山地城市，山地城市地形地质条件较为复杂，地形坡度大，地表径流流速大，人类生活、活动亦沿河/湖分布，面源污染裹挟的污染物负荷大。同时山地河湖贯通格局较多，湖泊上游多有小溪沟汇入；西南地区经济相对落后，市政设施建设、管理及维护不佳，导致入湖点源污染众多，对水质影响明显。

1.3 基本原则

根据区域的自然环境特点、水体特征、人文社会环境条件和区域经济发展水平，综合考虑湖泊周边用地布局、污染输入类型和水体自净能力，提出适合重庆市湖库生态修复适宜技术体系。

(1) 明确目标，整体规划。综合分析湖泊水环境问题和水污染特征，合理制定水质目标，针对性提出治理任务，制定可行的总体方案和具体工作计划。

(2) 因地制宜，综合治理。结合湖库水质特征、污染现状以及未来城市规划，明确水体功能定位和水质目标，综合应用点源、面源、内源污染控制和生态修复与水体水质保障等措施，提出治理措施和任务布局。

(3) 协调同步，多管齐下。坚持政府主导，鼓励多渠道融资，与当地社会经济发展相协调，与各行业部门的计划、规划相协调。

(4) 分类分区，控制重点。根据不同水体的特征，综合考虑区段内点、面源污染、内源释放等水体污染的特点。优先考虑污染控制的重点区域，划分控制单元，实行分类分区控制。

(5) 负荷削减，目标控制。在水体环境容量核算的基础上，确定水质控制

关键约束性指标和重点控制区域，进行水污染负荷分配。在湖库沿线（含上游来水）污染减排核算和分配的基础上，实现污染治理从目标总量控制向基于控制单元水质目标的总量控制转变。

（6）强化监督，公众参与。强化全过程监督，建立湖库水体水质监测、预警应对机制。鼓励公众参与，接受社会监督。

1.4 工作流程

1.4.1 湖库水环境问题诊断

水环境问题诊断是湖库生态修复的基础。基于湖库水质和沉积物分析结果，结合污染物负荷来源解析，诊断湖库的水环境现状、问题和原因，为科学制定治理方案提供依据。诊断过程包括三部分，首先是水质现状分析，即通过对常规水质指标监测数据，明确主要的水质超标因子和超标程度；其次为排放源分析，以湖泊集水范围内（含上游流域）自然地理、经济社会以及土地利用等资料为基础，综合分析污染排放源。最后，以上述分析为基础，确定主控水质指标，为污染治理方案的制定奠定基础。

1.4.2 重点单元划分及削减负荷估算

基于水环境问题诊断结果，根据主要污染来源和负荷状况，划分重点治理单元，并开展削减负荷计算，治理任务布局等工作。首先根据水质目标，水文数据，计算湖库环境容量，对实际的污染负荷进行核算。其次，对比水环境负荷容量和实际污染负荷排放量，明确需要削减的负荷量，根据点源、面源及内源的污染情况确定重点的负荷削减对象。最后，以污染负荷贡献为基础，对重点控制单元进行负荷削减量核算。

1.4.3 治理措施布局

治理措施布局是湖库治理的核心。依据点源、面源及内源的负荷削量分配结果，进行治理任务措施的总体布局，并结合湖库的特点，适当的布置部分水体自净能力提升技术。

1.5 术路线图

重庆市湖库生态修复适宜技术实施技术路线如图 1-1 所示。

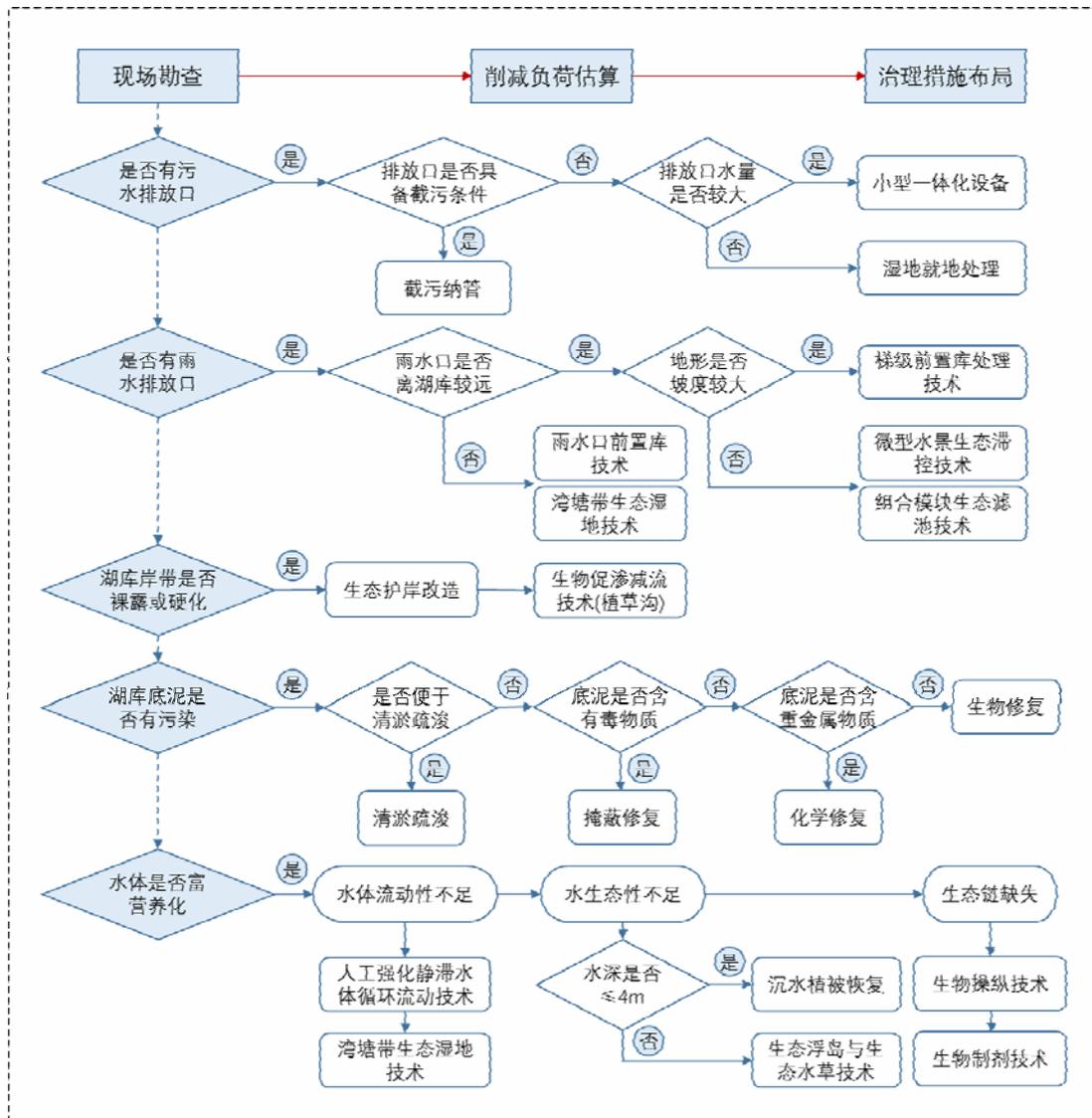


图1-1 技术路线图

第二章 术语及定义

2.1 生境

指生物的个体、种群或群落生活地域的环境，包括必需的生存条件和其他对生物起作用的生态因素；湖库治理中主要包括影响水体生物生长的水文、流速、水深、底质、护岸形态等环境要素。

2.2 地表径流

指降雨抵达地面后，除去下渗到土壤成为地下水的部分。地表径流沿着不同路径汇入河流、湖泊。

2.3 水生植物

指整个或部分植物体如地下部分长期生活在水环境中的植物，可分为沉水植物、浮叶植物、漂浮植物和挺水植物。

2.4 挺水植物

是指下部或基部沉于水中，根或地茎扎入泥中生长，茎、叶挺出水面的水生植物。代表物种有：荷花、芦苇、香蒲、美人蕉、风车草、茭白等。

2.5 浮水植物

是指根附着在底泥或其他基质上，无明显的地上茎或茎细弱不能直立，叶片漂浮在水面的水生植物。代表物种有：菱角、芡实、睡莲、萍蓬草、荇菜等。

2.6 沉水植物

是指植物体全部位于水层下的营固着生活的水生植物。整个植株沉入水中，茎生于泥中，叶多为狭长或丝状，根通常不发达或退化。代表物种有：苦草、黑藻、金鱼藻、狐尾藻等。

2.7 生态治理

包括任何对于生态系统的重建、改良、改进、修补、更新、再植过程，这些过程应符合生态系统的基本法则或者要求的。

2.8 生态恢复

是指在遵循自然规律的前提下，利用生态系统的自我恢复能力，通过减轻或消除人为干扰压力，辅以适当的人工引导措施，协助退化的、受损的、被破坏的生态系统逐步恢复到近于它受干扰前的自然状况，或使生态系统向良性循环方向发展的操作及管理过程。

第三章 水体功能区划分与水质标准

3.1 山地城市湖库特点

重庆市属山地城市，山地地形和地貌特征显著，水土流失问题突出，洪涝和干旱频发，水体污染因素较多。与此同时，山地城市湖库库容较小，生态系统物种单一，水体自净能力弱。与平原城市相比，山地城市地面坡度起伏大、平均气温高、日照少、雨季长、湿度大、云雾多、霜雪少、蒸发量和空气湿度大、风速小，受降雨径流影响大，加之山地城市年降雨径流对地表的冲刷作用通常超过平原城市，导致进入山地城市湖、库水环境的污染负荷量高于平原城市湖库。

3.2 水环境功能区划分

水环境功能区划是指为确保水资源的可持续利用，使水环境得到有效的保护而确定的功能划分。

根据水环境功能区划，可将水域主要划分为自然保护区、饮用水源保护区、渔业用水区、工业用水区、农业用水区和景观娱乐用水区。

3.3 水质标准

3.3.1 地表水环境质量标准

根据地表水环境质量标准（GB 3838-2002）。标准依据地表水水域环境功能和保护目标，按功能高低依次划分为五类，见下表3-1。

表3-1 水域功能和标准分类

水质标准	水质用途
I类	主要适用于源头水、国家自然保护区
II类	主要适用于集中式生活饮用水地表水源地一级保护区、珍稀水生生物栖息地、鱼虾类产卵场、仔稚幼鱼的索饵场等
III类	主要适用于集中式生活饮用水地表水源地二级保护区、鱼虾类越冬场、洄游通道、水产养殖区等渔业水域及游泳区
IV类	主要适用于一般工业用水区及人体非直接接触的娱乐用水区
V类	主要适用于农业用水区及一般景观要求水域

水质标准项目的拟定一般包括高锰酸盐指数、COD、总磷（TP）、总氮（TN），也可以包括常规指标 pH、溶解氧（DO）。其基本项目标准限值见下表 3-2:

表3-2 基本项目标准限值

项目	分类	I类	II类	III类	IV类	V类
		6~9				
pH 值（无量纲）		6~9				
溶解氧（DO）	≤	饱和率 90% 或（7.5）	6	5	3	2
高锰酸盐指数	≤	2	4	6	10	15
化学需氧量（COD）	≤	15	15	20	30	40
氨氮（NH ₃ -N）	≤	0.15	0.5	1.0	1.5	2.0
总磷（以 P 计）	≤	0.02 (湖库 0.01)	0.1 (湖库 0.025)	0.2 (湖库 0.05)	0.3 (湖库 0.1)	0.4 (湖库 0.2)
总氮（湖、库以 N 计）	≤	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0

3.3.2 湖库水质目标的确认

(1) 湖库的确认

山地区域地形起伏，河流在发育过程中，易利用坑塘区域形成相对静滞水面，另一方面，河道的水利设施建设，也易形成滞缓区域。由于湖库和河流在水质考核指标上的不同，因此，如何甄别湖库，明确其水质指标，是湖库生态

修复的基础。通常认为，湖库有一定的蓄水量、与下游河道不能进行水体交换、对水生鱼类有阻断。同时，在水质指标的考核上，还应针对湖库特征，增加叶绿素 a (chl_a)、透明度 (SD) 及蓝绿藻密度等指标。

(2) 湖库水质目标的确认

水环境功能区划明确了对象水域的水质管理目标。若对象水域已有相应功能，治理目标应结合已有的水质管理目标；当对象湖库功能尚不明确，应在征得主管部门的意见的基础上，以景观娱乐用水对待，合理选择Ⅳ类或Ⅴ类水体作为水环境治理目标。

3.3.3 水体营养状态评价

水体营养状态评价，是通过与湖泊营养状态有关的一系列指标及指标间的相互关系，对湖泊的营养状态作出准确的判断。目前我国湖泊营养化评价的基本方法主要有综合营养状态指数 (TLI)、卡尔森营养状态指数 (TSI)、营养度指数法和评分法，其中综合营养状态指数法 (TLI) 应用最为普遍。

(1) 富营养化状况评价方法

综合营养状态指数法 (TLI)：

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m w_j \cdot TLI(j)$$

式中：TLI (Σ) ——综合营养状态指数；

w_j ——第 j 种参数的营养状态指数的相关权重；

TLI (j) ——代表第 j 种参数的营养状态指数。

以 chl_a 作为基准参数，则第 j 种参数的归一化的相关权重计算公式为：

$$w_j = \frac{r_{ij}^2}{\sum_{j=1}^m r_{ij}^2}$$

式中： r_{ij} ——第 j 种参数与基准参数 chl_a 的相关系数；

m ——评价参数的个数。

湖泊 (水库) 的 chl_a 与其它参数之间的相关关系 r_{ij} 及 r_{ij}^2 见下表 3-3。

表 3-3 中国湖泊 (水库) 部分参数与 chl_a 的相关关系 r_{ij} 及 r_{ij}^2 值

参数	chl _a	TP	TN	SD	COD _{Mn}
r_{ij}	1	0.84	0.82	-0.83	0.83

r_{ij}^2	1	0.7056	0.6724	0.6889	0.6889
------------	---	--------	--------	--------	--------

营养状态指数计算公式为：

$$(1) \text{ TLI (chl}_a) = 10 (2.5 + 1.086 \ln \text{chl}_a)$$

$$(2) \text{ TLI (TP)} = 10 (9.436 + 1.624 \ln \text{TP})$$

$$(3) \text{ TLI (TN)} = 10 (5.453 + 1.694 \ln \text{TN})$$

$$(4) \text{ TLI (SD)} = 10 (5.118 - 1.94 \ln \text{SD})$$

$$(5) \text{ TLI (COD}_{Mn}) = 10 (0.109 + 2.661 \ln \text{COD})$$

式中：叶绿素 (chl_a) 单位为 mg/m³，透明度 SD 单位为 m；其它指标单位均为 mg/L。

(2) 水体营养状态分级

采用 0~100 的一系列连续数字对湖泊营养状态进行分级，在同一营养状态下，指数值越高，其营养程度越重，具体分级见下表 3-4：

表3-4 湖泊（水库）营养状态分级

综合营养状态指数	营养程度
$\text{TLI}(\Sigma) < 30$	贫营养(Oligotropher)
$30 \leq \text{TLI}(\Sigma) \leq 50$	中营养(Mesotropher)
$\text{TLI}(\Sigma) > 50$	富营养(Eutropher)
$50 < \text{TLI}(\Sigma) < 60$	轻度富营养(Light eutropher)
$60 < \text{TLI}(\Sigma) \leq 70$	中度富营养(Middle eutropher)
$\text{TLI}(\Sigma) > 70$	重度富营养(Hyper eutropher)

第四章 湖库生态修复适宜技术

4.1 点源污染控制技术

点源污染是集中在一点或一个小区域内的污染源，排放污染物的种类、浓度、时间相对稳定。由于污染物集中在小范围内高强度排放，故对湖库排放口周边水域影响较大。

通常对水环境造成影响的点源污染为生活污水、分流制雨水管道旱季排水（多由管道错接、漏损导致）和合流制污水排口，另外湖库周围的工矿企业或家庭作坊也会散布排放废水。根据污染源的污染特征，选择合适的污水处理方式和治理技术。常用的有截污纳管、小型一体化处理设备处理和人工湿地就地处理，考虑截污纳管的工程性较强，适宜于各类点源污染的控制，且国家有强制性规范，此处不予阐述。

4.1.1 人工湿地就地处理

适用范围：主要适用于暂时不具备截污条件的小型污染源，或污染源水量较小、来水污染相对较轻，经简单的就地处理即可达标排放的污染源（含初期雨水）。



图4-1 湿地就地处理示意图

技术要点：在来水周边区域建造生态湿地，将所排放污水有控制的投配入湿地，利用土壤、人工介质、植物、微生物的物理、化学、生物协同作用，对污水

进行就地处理。湿地通常可采用碎石/砾石做基底，种植耐污型砾石基生长挺水或湿生植物，充分利用植物截流吸收的能力，实现对来水的净化。湿地处理的优点在于湿地处理系统具有基建投资和运转费用低、无需处理污泥的优点。同时，湿地景观可与周边景观有效融合，增加观赏价值。

湿地设计可参考《人工湿地污水处理工程技术规范 HJ 2005-2010》。

在植被选择上，宜采用本地物种，推荐选用耐寒能力强、可安全越冬的西伯利亚鸢尾、风车草、黄菖蒲和花叶芦竹等，种植密度参见附录。

对常绿的西伯利亚鸢尾、黄菖蒲、风车草和花叶芦竹等耐寒湿地植被，视植被生长密度合理开展植物的收割，建议收割周期为每 10 个月 1 次；对耐寒能力一般，冬季枯萎的湿地植物，建议在每年 1 月份开展收割，以备来年生长。

限制因素：采用湿地作为小型点源污染排放的末端处理，应在考虑接纳湖库纳污能力的基础上，合理设定湿地出口水质目标，并以此确定湿地面积。湿地处理所需的面积较大，而山地城市湖泊可用地往往不足，应结合现实地形情况，通过梯级化改造的方式，构建湿地处理系统。同时，湿地的管理维护是保证湿地处理效率的重要环节，湿地内填料易出现堵塞情况，需要定期（视堵塞情况）对填料进行翻动和清理。

4.1.2 小型一体化污水处理设备

适用范围：适用于湖库集水区内短期无法实现截污纳管的污水排放口，通过选用适宜的小型一体化污水处理设备，对污废水进行就地处理，去除污水中的污染物，也可用于突发性水体污染事件的应急处理。

技术要点：污水处理一体化设备集成程度高，占地面积小，停留时间相对较短，可以快速去除污水中污染物。设备自动化程度高，维护和维修简单。建议采用小型污水处理一体化设备作为临时处理设施，解决当前湖库集水区内部分片区的污水直排问题，后期仍应积极建设市政管线，将现有污水统一截流纳管后进入城市污水收集处理系统。

设计参数：

污水处理一体化设备应该根据水质处理要求和现场场地条件综合考虑，选择合适的型号。现有市场的一体化设备的主要技术形式主要包括生化处理和物化处理两类。生化处理设备又可分为生物滤池、膜生物反应器、生物转盘技术三类；

物化处理设备主要包括絮凝沉淀、微絮凝过滤、超磁分离过滤等，技术核心为物理化学分离。现有的物化处理设备以去除水中的胶体悬浮颗粒为主要对象，部分药剂对水中磷酸盐有一定的去除效果，但无法实现对水中各类型氮的去除。各类以生化为核心的处理设备对水中 COD 的去除效果均较为明显，但对水中氮磷的去除仍较为有限。以生物接触氧化为核心的生物滤池、生物转盘技术对水中的氮有一定的去除，以膜分离为核心的膜生物反应器对氮仅有微量的去除，对水中总磷的去除较为有限。

限制因素：市场设备良莠不齐，选择难度大；后期运行需要持续的费用和人力投入，同时需要专业的运行维护和现场管理。

一体化处理设备对水中氮、磷营养盐的去除，尤其是氮的去除效果普遍有限。当接纳水体为静滞湖体时，易出现氮的积累，诱发接纳水体的富营养化。因此，一体化处理设备仅是污水截污的辅助手段，在有条件截污、泵站提升入城市管网的情况下，应尽可能避免使用一体化处理设备。

4.2 面源污染控制技术

山地城市湖库集水区内地形坡度较大，降雨汇流时间短，地表冲刷严重，随着地表径流汇入湖库中的污染物也是重要的外源负荷输入。面源污染主要来自于旱季地表、屋面的污物，在降雨期径流的冲刷作用下，经雨水管道进入水体，导致了水体的污染。城市面源污染源区段控制技术主要包括集水区地表的清扫和下渗化改造，使得地表的径流系数减小，减少降雨期的产流量和产污；迁移段控制技术，主要针对地表径流在流动过程中，利用植草沟、雨水塘、下渗绿地等渗滤、滞控措施对径流进行拦蓄、下渗等处理；汇处理技术主要针对径流在汇入接纳水体的终端处理技术，被用于地表径流的末端污染控制。在面源污染控制措施中，需对源-迁移-汇技术进行综合布局，以保证对城市面源污染的最大限度的削减。

根据单向措施/技术在处理链中的分布与对地表径流量、水质控制潜在作用与表现，表 4-2 总结了目前应用比较广泛的城市面源污染控制措施，供湖库面源污染控制措施选择提供参考。在现有技术的基础上，筛选并罗列了部分适用于山地城市面源污染控制的控制技术。其中山地城市地表径流源区生物促渗减流技术；用于面源污染迁移段控制的技术主要有大坡度道路径流路肩带渗滤技术、道侧绿地滞控技术、组合模块式大坡度径流控制滤池系统和微型水景滞存技术；用

于面源污染汇处理的技术主要为径流入湖强化侧向流生物滤池净化技术、湖库雨水口梯级调蓄池处理技术。各技术介绍如下。

表4-1 城市面源污染控制技术水量、水质控制功能与环境效益/选择矩阵

技术	特征/功能	处理链适宜性			水量控制				水质控制						环境效益		
		源控制	迁移控制	汇控制	入渗	传输	滞留	收集	物理沉淀	过滤	吸附	生物降解	化学沉淀	植物吸收	硝化作用	景观	舒适度
绿色屋顶	屋面种植，减少地表径流	◆							◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	⊗	◆
透水铺装	使雨水、地表径流渗透到亚表层基质或土壤	◆			◆		◆		◆	◆					⊗	⊗	⊗
过滤带	植被过滤带排放不透水地表径流的同时起到过滤颗粒污染物的作用	◆			⊗	⊗	⊗		◆	◆	◆	◆			⊗	⊗	⊗
促渗设施	促渗沟或渠，收集地表径流，并使其渗透到深层土壤	◆			◆	⊗	◆		◆	◆	◆						
生物滞留	植被洼地收集、处理地表径流，可设置入渗功能	◆	◆		◆		◆		◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
植草沟	植草性浅沟或渠道，收集、传输地表径流，径流可入渗，植被可过滤颗粒态污染物		◆		⊗	◆	◆		◆	◆	◆	◆	⊗		⊗	⊗	⊗
砂滤	利用砂床过滤颗粒态污染物		◆	◆			◆		◆	◆	◆	◆					
水塘	收集、储存、处理地表径流，具有一定水位，岸边生长挺水、水生植物		◆	◆	⊗		◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
生态滤池	以砂为主要介质种植植物，过滤污染物		◆	◆			◆		◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	
湿地	种植水生植物，减缓径流流速，削减和过滤径流		◆	◆	⊗	⊗	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆

◆高/主要过程；⊗有时，决定于设计

4.21 山地城市湖库集水区生物促渗减流技术

适用范围：生物促渗减流技术适合以分散的、小规模的形式在湖库集水区范围内处理地表径流，可同景观绿地结合，利用景观绿地管理地表径流。生物促渗减流技术可提高汇入湖库中的径流水质。

技术要点：山地城市湖库集水区生物促渗减流技术主要利用湖库集水区范围内的景观绿地滞留、促渗不透水地表产生的径流，在减少地表径流的同时，控制不透水地表初期径流污染。生物促渗减流设施是由 0.7~1m 深的砂质壤土或壤质砂土及其种植其上的植物组成，用以不透水地面产生的径流，在径流渗透过程中，通过沉淀、过滤、吸附以及生物过程达到对地表径流的滞留与净化作用。（技术详细组成见附图）。生物促渗减流技术主要作用为通过暂时的填注蓄水和向深层土壤入渗，地表径流中的污染物经沉淀与基质过滤、吸附而去除。植被可以种植草坪或灌丛，植物不仅能够起到过滤和滞留地表径流的作用，而且根系发达的草本有利于促进地表径流的入渗。当亚表层土壤渗透率较低时，通过在草坪底部布置碎石层，暂时滞留径流，给径流提供继续向深层土壤入渗的时间，过多的径流可通过在碎石层设置开孔排水管，排放至市政雨水管网。

植被是的复杂地质条件下源区促渗技术的重要组成部分，不仅对地表径流起着过滤与蒸腾的作用，而且发达根系植物的选择具有促进地表径流入渗的能力，另外对污染物的去除也发挥着重要的作用。选择植物时应该遵循乡土种、根系发达、耐淹耐旱以及景观性等原则。

限制因素：不适合在地下水位较浅或底部为岩层结构的地区使用。

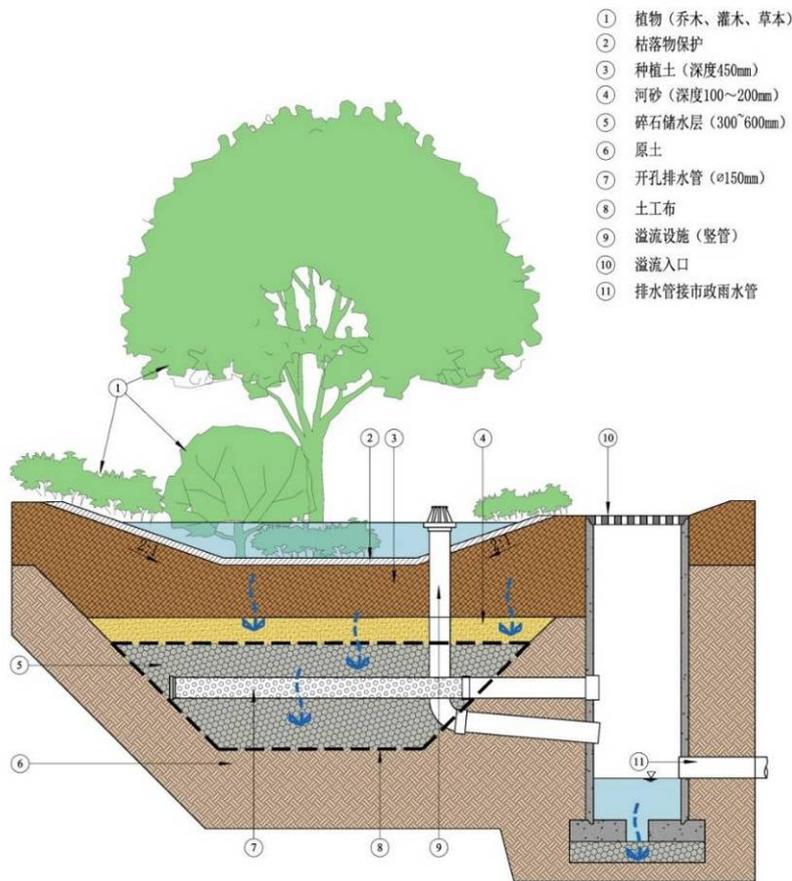


图4-2 山地城市湖库集水区生物促渗减流技术

4.2.3 山地城市湖库集水区大坡度道路径流路肩带渗滤技术

适用范围: 路肩带渗滤设施可应用在湖库集水区内地表径流源区及其传输途径中,可局部代替传统的雨水口和排水管网。路肩带渗滤设施同时具有净化地表径流水质与传输排放高强度降雨径流的作用。底部开孔排水管溢流的设置可应用于不同渗透能力土壤的地区。可在山地城市应用,通过梯级堰的设置可在 10% 坡度地区应用。

技术要点: 山地城市大坡度道路径流路肩带渗滤技术是由植草沟与渗透渠结合形成。梯级渗滤系统主要包括路肩带片流进水、植被过滤区、滞留渗滤区、梯级堰以及溢流排放设施。其中滞留渗滤区又包括滞水空间、植物层、种植基质层、过滤层、储排水层。城市道路产生的地表径流通过路肩带分散排入植被过滤区。地表径流经过植被过滤区沉淀、过滤后,汇集到滞留渗滤区。地表径流在下渗的过程中,污染物主通过沉淀与基质过滤、吸附而去除。滞留渗滤区底部的碎石储

排水层，暂时滞留地表径流，给径流提供时间继续向深层土壤入渗，过多的径流可通过在碎石层布置开孔集排水管排放。梯级渗滤系统对道路地表径流起到滞留渗滤作用，又可以承担地表径流的排放功能。梯级堰的设置使该系统可应用在坡度达 10% 的地区，适合处理山地城市大坡度道路地表径流。滞留渗滤区的设置使该系统在减少地表径流的同时，可改善汇入湖库的径流水质。

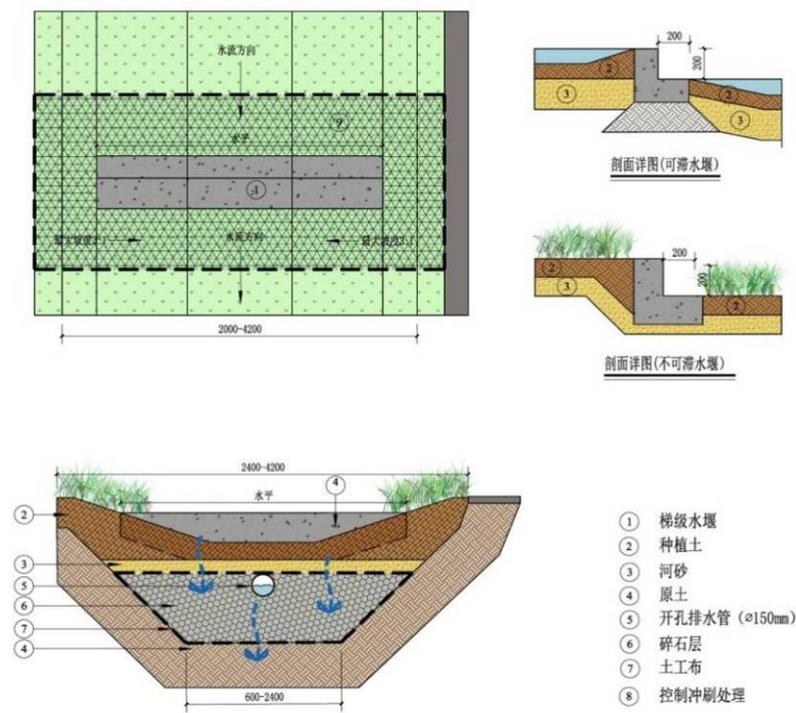


图4-3 山地城市湖库集水区大坡度道路径流路肩带渗滤技术

限制因素：不适合在地下水位较浅的地区使用。

4.2.4 山地城市湖库集水区地表径流控制组合模块生态滤池技术

适用范围：生态滤池技术适合以分散的、小规模的形式在湖库集水区处理城市地表径流，同景观绿地结合，利用景观绿地管理地表径流，也可大规模的应用在较大汇水单元内。

技术要点：组合模块式大坡度径流控制生态滤池系统是传统砂滤与人工湿地的结合，是具有底部排水系统的砂砾床暴雨径流过滤设施，砂砾床的顶部可以种植耐水淹的植物。组合模块式大坡度径流控制生态滤池系统主要用于处理汇入湖库的初期重污染径流，目标污染物主要为 TSS 以及其他颗粒态污染物 (N、P)，在过滤速率较高的条件下，可满足暴雨径流污染的控制要求。对地表径流水质的

处理机理主要为沉淀、过滤和生物转化。当发生降雨时，截流的地表径流进入生态滤池沉淀室，随后径流潜流进入三级砂床，填满砂床的空隙，最后由垂直开孔集水管收集排放。除了通过基质沉淀、过滤和吸附等作用直接去除污染物外，水生或湿生植物的种植，通过茎和根向根区输送氧，从而使根区附近变为好氧环境，有利于有机物的好氧分解，而在远离处形成缺氧、厌氧环境，使床体中呈现连续的好、缺、厌氧环境，促进硝化、反硝化反应连续进行，因此极有利于 N 的去除。此外植物可通过吸收地表径流中的 N 和 P 而将污染物去除。在植物配置方面，宜选择高大禾草类草本植物须芒草和玉带草。

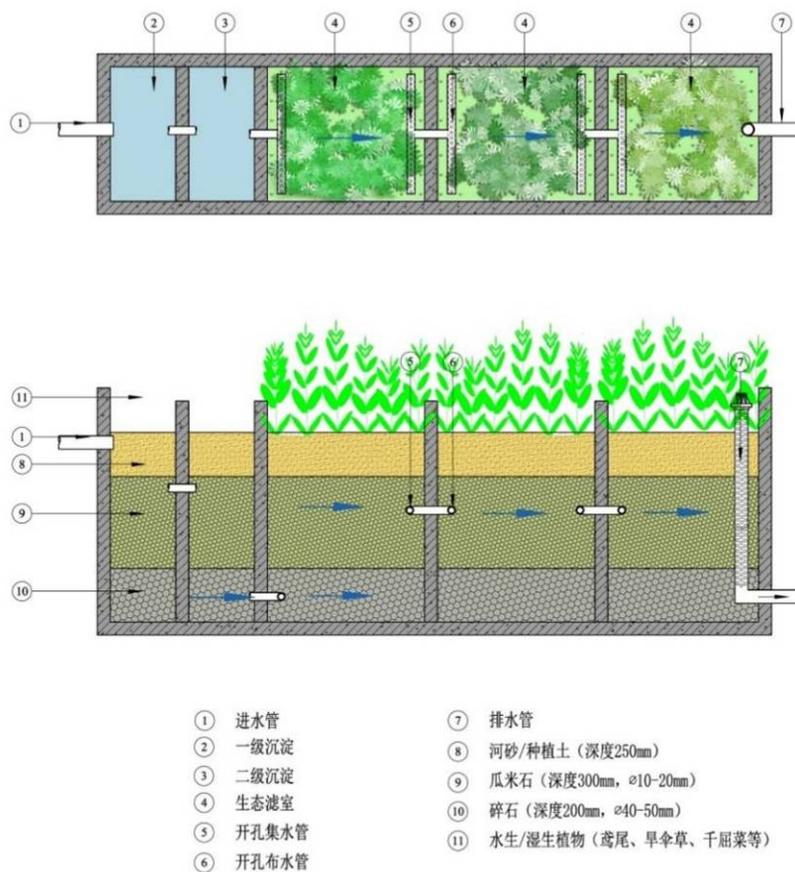


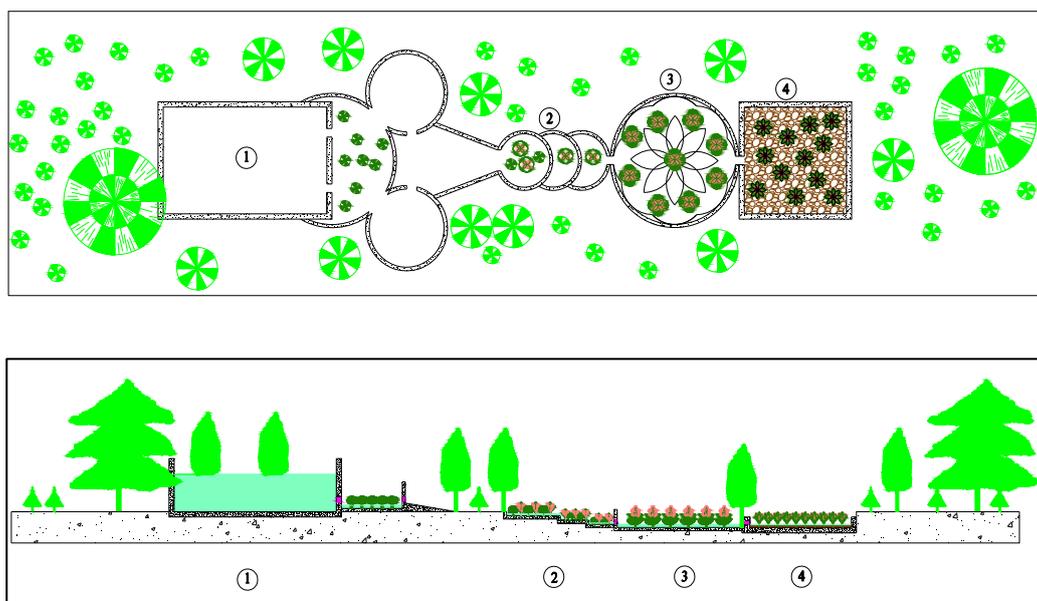
图4-4 山地城市湖库集水区地表径流控制组合模块生态滤池技术

4.2.5 山地城市湖库集水区地表径流微型水景生态滞控技术

适用范围：微型水景生态技术作为处理地表径流的重要手段，可与景观公园结合处理汇入湖库的地表径流。不仅可以起到调蓄雨水的作用还可削弱降雨径流

初期效应对湖库水体的影响。

技术要点：微型水景生态技术，简称微型水景，作为人工湿地的一种重要形式，是以净化地表径流为主，同时也能兼顾处理其他污水的一种注重景观化的湿地工艺模式，它一般有一级以上的工艺流程组合而成，每级工艺的占地面积一般在 100m^2 以内，不大于 200m^2 ，能够与所在场地的降雨状况相适应。通过建造系列微型水景，融合植物吸收、基质吸附、微生物降解，搭配曝气增氧等环节。以此捕获降雨、截流径流，并能在一定的水力停留时间内滞存雨水，或是直接滞存排入的污水，通过水景中植物、基质（土壤或其他天然、人工填料）、微生物等因素的共同作用对径流起到一定的净化作用。随后利用周边的天然或是人工设计的景观路线将处理后的水流输送到临近的排洪沟渠排入接纳水体。经过如上处理过程，可有效缓解入湖初期雨水的污染。



①蓄水池②叠水净化池③景观滤池④澄净卵石生态池

图4-5 山地城市湖库集水区地表径流微型水景生态滞控技术

4.2.6 山地城市湖库雨水口梯级调蓄池处理技术

适用范围：雨水口梯级调蓄池适用于山地湖库岸际水深较深 ($\geq 4\text{m}$)，湖岸坡度较大（放坡比大于 $1/1$ ），有较多的雨水（雨污混排水）进入的区域。可减少进入湖体的降雨径流城市面源污染，尤可用于含砂量大、颗粒态污染物多的初期

汇流雨水的处理。

技术要点：雨水口梯级调蓄通常由3部分组成，分别为调蓄系统、溢流系统和净化系统，一定区域的地表径流在经过汇流后由管道输送进入梯级调蓄池，初期雨水被收纳调蓄后，后期相对洁净的雨水管来水由溢流系统溢流进入湖体。由于山地城市湖库往往面临着岸坡陡、岸边水深较大的问题，通过设置雨水口梯级调蓄池，利用调蓄池的两级顶板，在陡岸地区形成平坦的干区和浅水区域，均可用于营造湿地系统。雨季的溢流出水经过调蓄池低区顶板上的浅水区湿地处理净化后再进入湖体。存贮在雨水调蓄池中的初期雨水，在经调蓄池预沉降后，在旱季期，利用布设在调蓄池内部的提升泵，提升至高区顶板上的人工湿地，处理后跌水进入低区浅水湿地，经两级净化后最终进入湖体。实现了雨水口的径流污染控制。

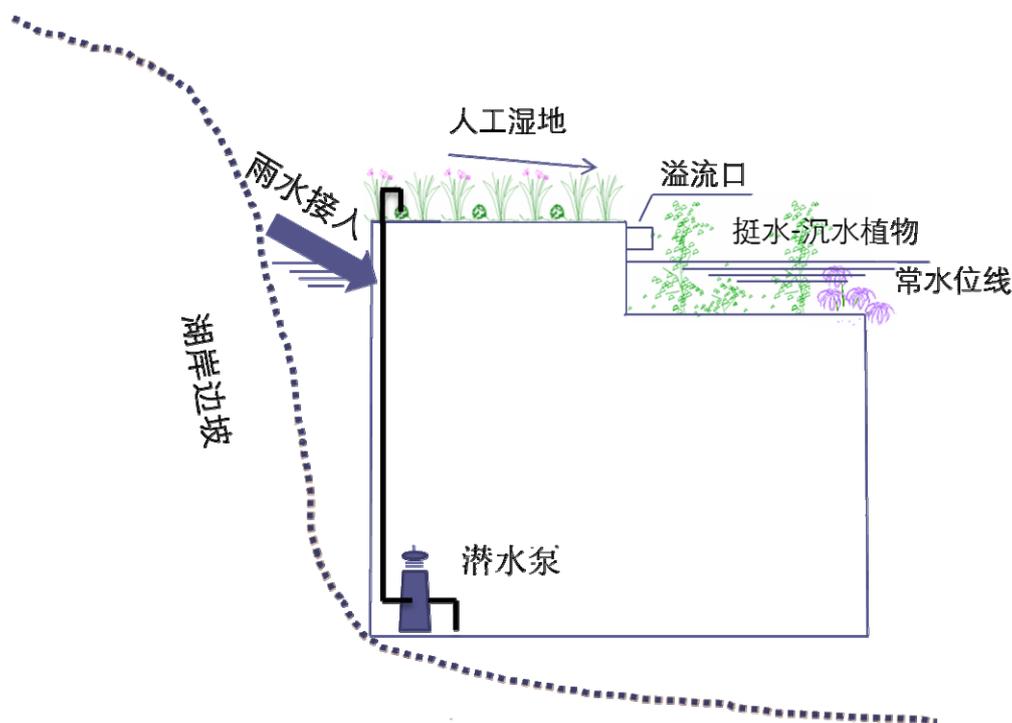


图4-6 山地城市湖库雨水口梯级调蓄池处理技术

雨水口梯级调蓄池具有沉降并处理初期雨水中颗粒态/溶解态有机物的效果，建造成本高、处理效果较好。

限制因素：前置库后期的管理维护较复杂，需要随着季节的交替对库内的水生植物进行收割和移栽，对调蓄池内开展清淤工作，对底部潜水泵进行维护。

4.2.7 面源污染控制技术比选

在针对重庆市湖库面源污染进行控制技术选择时，应当首先分析湖库周边的地质地形条件，根据面源污染物削减类型和目标，综合应用面源污染的源头段、迁移段及汇集段控制技术；针对山地城市特殊地形，选择相适应的控制技术；在水量、水质、生态等控制目标、规划合理的建设占地面积、工程建设总投资等条件下，灵活选择面源污染控制技术。

针对重庆市湖库特点，面源污染控制技术比选如表 4-2 所示。

表4-2 山地城市面源污染控制技术比选一览表

技术	特征/功能	适用条件	处理链适宜性			功能					机制	主要去除目标污染物	处置方式		经济性		景观效果
			源控制	迁移控制	汇控制	入渗	收集	滞留	净化	转输			分散	相对集中	建造费用	维护费用	
山地城市湖库集水区生物促渗减流技术	主要利用湖库集水区范围内的景观绿地滞留、促渗不透水地表产生的径流,在减少地表径流的同时,控制不透水地表初期径流污染	湖库岸带裸露、硬化	◆			◆	⊗	◆	◆	◆	入渗、沉淀、过滤和吸附	TSS、TN、TP	◆		中	中	好
山地城市湖库集水区大坡度道路径流路肩带渗滤技术	由植草沟与渗透渠结合形成,同时具有净化地表径流水质与传输排放高强度降雨径流的作用	湖库集水区不透水地面坡度较大		◆		⊗	◆	◆	◆		沉淀、过滤和吸附	TSS、TN、TP	(◆	高	中	一般
山地城市湖库集水区地表径流控制组合模块生态滤池技术	是传统砂滤与人工湿地的结合,是具有底部排水系统的砂砾床暴雨径流过滤设施,砂砾床的顶部可以种植耐水淹的植物	地形平缓、坡度不大,存在有雨水集水口		◆		◆	◆	◆	◆	◆	沉淀、过滤、吸附、生物转化和植物吸收	TSS、TN、TP	◆	◆	高	高	好

技术	特征/功能	适用条件	处理链适宜性			功能					机制	主要去除目标污染物	处置方式		经济性		景观效果
			源控制	迁移控制	汇控制	入渗	收集	滞留	净化	转输			分散	相对集中	建造费用	维护费用	
山地城市湖库集水区地表径流微型水景生态滞控技术	作为人工湿地的一种重要形式,是以净化地表径流为主,同时也能兼顾处理其他污水的一种注重景观化的湿地工艺模式	地形平缓、坡度不大,存在有雨水集水口,有足够的建设面积		◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	沉淀、吸附、生物转化和植物吸收	TSS、TN、TP、COD		◆	高	中	好
山地城市湖库梯级前置库处理技术	集中化处理湖库集水区内初期雨水所带来的面源污染,可显著减缓山地城市由于坡度大而形成的雨水水量大、流速急而造成的冲刷效应	地形坡度较大,存在有雨水集水口		◆	◆	⊗	◆	⊗	◆	◆	过滤、吸附、生物转化和植物吸收	TSS、TN、TP		◆	高	高	一般

◆高/主要过程; ⊗有时, 决定于设计

4.3 内源污染治理技术

内源污染由湖库底泥的污染物释放组成,底泥释放主要有三类,即营养元素、重金属和难降解有机物。

经各种途径进入水体的 N、P 等营养元素,相当部分沉积到底泥中。水生植物的生长会吸收部分营养成分,其余大部分仍与水体保持动态平衡。当水体污染源得到一定控制后, N、P 则可能主要来自底泥向上覆水的释放,严重时可造成水体富营养化。重金属通过吸附、络合、沉淀等作用而沉积到底泥中,同时与水相保持一定的动态平衡。当环境条件发生变化时,重金属极易再次进入水体,成为二次污染源。PAH、PCBs 等有机物,由于疏水性强,难降解,在底泥中大量积累。通过生物富集作用,有毒有机物可以在生物体内达到较高的水平,从而产生较强的毒害作用,通过食物链还可能危害到人类。

4.3.1 清淤疏浚

适用范围: 适用于所有底泥受到污染的水体,尤其是黑臭水体底泥污染物的清理,可快速降低受污染黑臭水体的内源污染负荷,避免其他治理措施实施后,底泥污染物向水体释放。



图4-6 水力冲挖清淤示意图



图4-7 生态清淤示意图

技术要点：清淤疏浚一般可分为两种形式：第一种为干床疏浚，即将湖库水抽/放干，采用挖机或人工开展底泥挖掘，使用机械或人工力量清除湖底表面黑泥。第二种为环保清淤，通过 GPS 定位精确水下吸泥。疏浚污泥污染物浓度较高，需要进行脱水处理和处置。底泥的处理必须考虑到防止对水体和土壤的二次污染。对污染较重的疏浚污泥，必须采取物化、生物方法进行预处理。常用的有颗粒分离、化学凝聚等。清淤前，需做好底泥污染调查，明确疏浚范围和疏浚深度；根据当地气候和降雨特征，合理选择底泥清淤季节。

(1) 干床疏浚又可分为干挖清淤和水力冲挖清淤两种工艺。

干挖清淤：作业区水排干后，大多数情况采用挖掘机进行开挖，挖出的淤泥直接由渣土车外运或者放置于岸上的临时堆放点。倘若河塘有一定宽度时，施工区域和储泥堆放点之间出现距离，需要有中转设备将淤泥转运到岸上的储存堆放点。堆放点需配有污泥脱水设备，经处理后淤泥可正式外运，清液收集或处理后回流湖库。干挖清淤的优点是清淤彻底，质量易于保证而且对于设备、技术要求不高，淤泥易于后续处理。

水力冲挖清淤：采用水力冲挖机组的高压水枪冲刷底泥，将底泥扰动成泥浆，流动的泥浆汇集到事先设置好的低洼区，由泥泵吸取、管道输送，将泥浆输送至岸上的堆场或集浆池内，堆放点配有污泥脱水设备。水力冲挖具有机具简单，输送方便，施工成本低等优点，但该方法形成的泥浆浓度低，为后续的脱水处理增加了负荷。

一般而言，干床疏浚具有施工状况直观、质量易于保证等优点，也容易应对清淤对象中含有大型、复杂淤积物（垃圾、石块等）的情况。但排干湖泊/水库水增加了临时围堰施工的成本，同时湖泊、水库只能在非汛期进行施工，工期受到一定限制，施工过程易受天气影响，并容易对湖泊、水库边坡和底栖生态系统造成一定影响。

（2）环保清淤

目前，世界上多采用环保疏浚的方法清除污染底泥。理想的环保疏浚工程应该达到基本清除污染物，使悬浮状态的污染物最少、悬浮颗粒的数量控制在规定范围内与超挖量最小以免伤及原生土等效果。

目前最为理想的环保疏浚设备是带环保绞刀头的绞吸式挖泥船，非常适用于内陆的湖泊、水库的淤泥的开挖输送，以达到环保疏浚的目的。

环保清淤施工原则

①排泥场围堰、退水口按照工程实施要求进行修筑，主要是保证围堰边坡的稳定。边坡的设计力求在边坡的稳定与经济之间选择一种合理的平衡，按照边坡工程设计的基本原则进行。

②环保绞吸式挖泥船适宜清淤厚度 30~50cm；分区、分条开挖，避免漏挖、欠挖。

③开挖遵循由近至远(排距)的原则，根据堆场的建设进度，合理安排施工设备进场时间及开挖区域。

④以生态清淤为目的，注重成效，重视对挖掘工艺和措施的选择设计。

限制因素：需合理控制疏浚深度，过深容易破坏河底水生生态，过浅不能彻底清除底泥污染物；高温季节疏浚后容易导致形成黑色块状漂泥；底泥运输和处理处置难度较大，存在二次污染风险，需要按规定安全处理处置。

（3）清淤疏浚中的二次污染防治

干挖清淤、水力冲挖清淤和生态清淤均采用机械、人工的方式清除水体底部淤泥，在清除淤泥的同时，也需要通过脱水设备对高含水率的淤泥进行脱水处理，脱水过程所产生的清液水中含有机物的浓度较高，峰值水量大，若不及时处理，会对环境造成新的污染。

在对清淤疏浚过程中所产生的脱水清液，在有条件的情况下，应采用水泵抽提的方式，进入市政管网进行处理。若抽排有问题，可考虑采用絮凝-沉淀方法

进行应急处理，以削减脱水清液中部分污染负荷，减少其对湖体的二次污染。

(4) 淤泥的处置

淤泥的去向是河湖底泥清淤的重要环节，甚至可直接影响清淤工程的进行周期。淤泥的去向通常包括填埋场填埋、淤泥和其他有机质堆肥制营养土、淤泥固化做建材等。

淤泥脱水后，含固率大于 20%后，可进入城市垃圾填埋场进行填埋处理，但需要和填埋场进行协调并征得其同意，且需要交纳一定的处置费用。

河湖淤泥中的黑泥层部分有机质丰富，氮磷含量高，若对其进行有序利用，可变废为宝，实现淤泥的资源化回收利用。淤泥可与其他有机质（园林废渣、秸秆、蘑菇渣等农业废弃物）共同进行好氧堆肥，实现黑泥层中有机物的腐熟化，形成营养土产品，用于后续的流域园林绿化。但堆肥需要一定的场地，相对恒定的温度，有用地的需求。

河湖淤泥中的灰（黄）泥层，可采取固化的方式，通过投加硅酸钠、膨润土、煤渣等黏合剂，对其进行固定处理，固化处理后的灰（黄）泥强度增加，可用于固坡、堤岸、道路基础等方面的建设。

4.3.2 掩蔽修复

适用范围：含有毒物质污染底泥，且清淤疏浚有难度，可有效阻止底泥中有毒有害污染物进入水体。

技术要点：底泥掩蔽技术也可或称为底泥覆盖技术，指在污染的底泥上放置覆盖物，使污染底泥与水体间隔离，以阻止底泥污染物向水体中迁移的一种方法。其采用的覆盖物主要有清洁的底泥、沙、砾石或一些复杂的人造地基材料等。掩蔽修复工程造价低。

相关案例：国外对污染严重的底泥，已多次采用了掩蔽技术，许多已取得了显著的效果，其中比较成功的掩蔽工程例见下表。

表4-3 原位掩蔽工程实例

工程位置	污染物	场地条件	掩蔽设计	施工方法
日本 Kihama Inner 湖	营养物	3700m ²	细沙 5 和 20cm 厚	
日本 Akanoi 海湾	营养物	20000m ²	细沙 20cm 厚	

工程位置	污染物	场地条件	掩蔽设计	施工方法
华盛顿 Denny 海湾	PA II, PCBs	靠岸 1.2hm ² , 深 6-18m	0.79m 厚的砂性沉积物	用驳船撒布

限制因素：加入覆盖物，抬高了水体河底，使水体库容变小，同时对底栖生物有较强破坏力，可能影响整个底栖生态系统，而且寻找大量的清洁覆盖物也并非易事。

4.3.4 生物修复

适用范围：生物修复适合于面积较大、底泥污染负荷较低，水质相对良好，周边难以开展清淤疏浚的水体的修复。

技术要点：生物修复是利用生物体，降解环境污染物，消除或降低其毒性的过程。生物修复分为工程修复和自然修复 2 类，前者是利用加入生物生长所需营养来提高生物活性或添加实验室培养的具有特殊亲合性的微生物来加快环境修复。后者是利用底泥环境中原有生物，在自然条件下进行生物修复。具体操作方法有生物通气法、生物注气法和生物冲淋法等。

生物修复按其主体可分为植物修复、微生物修复和动物修复。种植水生植物，利用其根茎控制底泥中营养物释放的是植物修复的主要方式，且由于根系周围渗出液的存在，为微生物提供了栖息环境。植物在生长过程中能较方便的带走部分营养物。微生物修复技术是利用天然的或经驯化的微生物通过氧化、还原、水解作用等将有机污染物降解成 CO₂ 和 H₂，或转化成其他无害物质。采用人工驯化、固定化微生物和转基因工程菌能够成功降解底泥中的有机污染物。当水域或附近水域的水环境功能为饮用水水源时，从生物安全的角度考虑，应避免使用微生物修复技术。动物修复即采用生物操纵的方式，通过投放底栖动物，包括螺丝、贝类、虾类等，形成完善的底栖生物群落，增强生物群落对湖库底泥的滤食作用，减少淤泥中有机质成分，提高水体透明度，改善水质。

限制因素：生物修复法面临着外源生物投加，生物生长受底泥环境、土著微生物的影响，有时难以达到预期效果的问题。而且对于污染严重的水域培养或繁殖微生物具有较大困难。

4.3.5 化学修复

适用范围：一般适用于底质污染较重的非人体直接接触水体，对受到重金属污染的底质效果更好，根据底质污染类型及污染量确定合适的化学药剂，达到事半功倍的效果。

技术要点：其本质原理是利用化学试剂和底泥中的离子发生基本的化学反应，使其转变为无毒无害的化学形态存在于水体中。添加的水处理化学品包括石灰、二氧化碳、硫酸、氯气、磷酸盐等简单的无机化合物，也包括硫酸铜、PAM 絮凝剂等结构复杂的化学药剂。

相关案例：在对加拿大 Hamilton 港受油和其他有机化合物（尤其是 PAHs）污染底泥的实验室研究表明，在保持底泥缺氧状态的情况下，投加硝酸钙和有机调理剂与底泥混合，197 天后底泥中有 78% 的油和 68% 的 PAHs 被微生物降解。在现场中试研究中利用加拿大国家研究所开发的管道设备向底泥层投加氧化剂，投加药剂共 4 次：第一次，3.6 吨 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ；第二次，50 天后 3.89 吨 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ；第三次，六个月后 6 吨 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ；第四次，四个月，5 吨 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 和有机调理剂。四次加药后，测试表明：57% 的油和 48% 的 PAHs 被生物降解。此外，所有游离的 H_2S 均被降解，但酸性挥发性硫化物（AVS）却难以被 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 氧化。监测表明，由于投加药剂而造成的底泥再悬浮有限，不会对水体构成危害。加拿大国家水研究所在中试研究的基础上，预估原地处理受污染底泥的费用仅约等于“疏浚+隔离处置场处置”工艺费用的 20%。

限制因素：对药剂投加量需经计算后严格控制，避免产生二次污染，产生公共安全隐患。

4.3.6 内源污染治理技术比选

确定控制技术前需要先进行湖泊内源污染的估算，同时明确对水质造成影响的污染物沉积层厚度，然后结合内源污染负荷、底泥污染类型、工程投资、湖库地形条件等因素灵活选择内源污染控制技术。目前湖库内源污染治理普遍采用清淤疏浚技术，效果也最为明显，同时，根据湖库类型、内源污染物释放机制还可以采取其他一些措施。

内源治理技术比选如表 4-4 所示。

表4-3 内源污染治理技术比选一览表

技术	特征/功能	适用条件	机制	内源污染控制综合效果	对重金属污染物的去除	对底栖生态系统的破坏	二次污染的可能性	工程周期	施工难度	工程投资
清淤疏浚	采用人力或吸泥设备直接将底泥收集转移，污染物直接排除	适用于所有底泥受到污染的水体	物理作用	●	◎	◎	◎	◎	◎	●
掩蔽修复	在污染的底泥上放置覆盖物，使污染底泥与水体间隔离，以阻止底泥污染物向水体中迁移	底泥中含有毒物质	物理作用	◎	◎	●	◎	◎	◎	○
生物修复	利用生物体，降解环境污染物，消除或降低其毒性	面积较大、底泥污染负荷较低，且难以开展清淤疏浚	生物作用	◎	○	○	◎	◎	◎	◎
化学修复	利用化学试剂和底泥中的离子发生基本的化学反应，使其转变为无毒无害的化学形态存在于水体中	底泥中含重金属	化学作用	◎	●	○	◎	○	○	○

注： ●——强 ◎——较强 ○——弱或很小

4.4 水体自净能力恢复与生态修复技术

4.4.1 湾塘带生态湿地技术

适用范围：适用于水质浑浊、污染相对严重的湖库浅水区域，如受污染的湖湾、浅滩等易于布置工程措施的待治理区域，通常水深小于 1 m，往往为降雨径流的汇水通道末端，湖体岸线坡度通常小于 10 度。



图4-8 湾塘带生态湿地示意图

技术要点：湖湾区水体往往具备流动性较差、参与水体循环较少的特点，水体水质自净能力弱。同时湖湾区通常为径流汇聚区，其受污染相对明显。另一方面，湖湾浅水区水体深度往往适宜种植水生植物且易于布置工程措施。因此，在有条件的情形下，考虑将湖湾区改造成具有较强净化水质能力的生态湿地，以强化处理来水，提升湖湾区的水体自净能力。库湾湿地可在一定的长宽比及底面有坡度的洼地中，由土壤和填料（如卵石等）混合组成填料床，湖水可以在床体的填料缝隙中曲折流动或在床体表面流动。在床体的表面种植具有处理性能好、成活率高的水生植物，如芦苇、风车草、香蒲、美人蕉、茭白等，形成独特的植物

生态环境，对水体进行净化。湿地中植物的选择参见附录。

技术方法：湾塘带生态湿地建设初期应清除湾塘原有的淤泥所积累的氮磷、重金属等污染物以及表面自然垃圾，在坡度较缓区域通过铺设一定量的卵石并提供种植土以便种植芦苇、风车草、香蒲、美人蕉等具有水处理功能的挺水及沉水植物，通过植物和微生物的自然降解作用净化受污染的水体，湿地前可设置具有配水功能的木桩栅栏，可以稳定湿地种植床，防止种植床内填料的流失以及植被受到破坏，同时可将湖水进行合理分配。植物的选用以常年生长兼具景观效果为佳。

限制因素：植物生存养护期应注意对枯死植物的清理及收割，防止植物死亡对水体造成的二次污染。植被收割频率参见 4.1.1。

4.4.2 人工强化静滞水体循环流动技术

适用范围：适用于处理水体循环流动性较差，受污染相对严重的封闭水体，对藻类繁殖较快、富营养化较严重的水体有一定的效果。



图4-9 提水式曝气机



图4-10 景观喷泉示意图



图4-11 水下推流器示意图

技术要点：人工强化静滞水体循环流动技术主要分为3种，分别为提水式曝气机、景观喷泉以及水下推流器。提水式曝气机是一种不需水泵、管道的造景、净水喷泉，是一种快速增氧系统，与传统的叶轮式增氧机相比，增氧效果好，经济、轻便，而且具有优美的造型和独特的造景功效，它的特点是能迅速增加水中溶解氧，推动池水循环，有效防止死水腐败问题，并且体积小、易安装、重量轻，便于操作；结构紧凑，维修极为方便；高性能、低损耗，具有节能低耗优点。景观喷泉通过对水体的扰动效果及混合作用，能够一定程度上抑制表层水体藻类增长，增加湖泊中下层溶解氧浓度。水下推流器可快速有效改善水提静滞区域水体的流动性，为抑制小面积范围的藻类富集生长提供有利条件。

技术方法：提水型曝气机主要由专用潜水电动机叶轮、浮筒、浮筒底座、电缆等所组成，采用不锈钢耐腐材料，能在多种不同的水体介质中可靠工作。浮筒放置在水表面上工作区域的水深不得小于 0.60m，自然泥底水域安装叶轮时其到水面的距离可根据用户对增氧量的要求和喷泉形状的要求来自由调节。提水型喷泉的服务面积通常为 8-10 m 半径/kw。

水下推流器主要由支撑架、底座、挡板、推流装置组成，根据湖泊的边岸条件，可选择固定式或潜水式，固定式需要挡板固定在湖库底部或边壁，底座支架支撑推流装置，潜水式需要浮筒连接推流装置，并用牵引钢丝固定，水下推流器的安装深度不得大于 3 m。水下推流器的服务面积通常为 5-8 m 半径扇形/kw。

限制因素：自然湖泊边壁条件较为复杂，对流速流态产生一定影响，同时，风力会导致水体波动，影响推流器对水体正常的推动作用及景观喷泉对水体的充氧作用；由于湖库水质具有季节性变化的特点，也会影响到对水体的作用，需要相应调节运行参数。技术措施为动力设施，运行费用偏高。

4.4.3 生态浮岛技术

适用范围：当水体水域较大，且湖体浅水区域较少，缺乏建设湾塘湿地和水中森林的建设条件时，可采用生态浮岛技术。



图4-12 生态浮岛示意图

技术要点：生态浮岛技术是指用于水域范围的无土种植技术，通过引入生物工程技术在湖面内净化水质，美化环境，同时改善水域内的生态体系。生态浮岛主要是通过植物的根系来达到净化水体的效果，浮岛植物的根系一方面可以吸收和吸附水中的含氮、磷物质；另一方面根系可以分泌部分酶类促进水中有机物的降解；并且，根系与微生物可形成相互协同效应，共同降解水中的营养盐类。除净化污染水质，防止水华外，人工浮床还为高等水生动植物及鸟类提供了良好的栖息地，有利于增加水体生物多样性，促进生态恢复。

技术方法：生态浮岛的结构有矩形、圆形、弧形等，按水和植物是否接触可以分为湿式与干式两种类型，浮岛载体可选择 PVC 管、泡沫、竹子、木头等，浮岛上选用的植物主要有千屈菜、菖蒲、鸢尾、美人蕉、铜钱草等。在部分城市湖库的治理中，也可采用无载体的浮岛形式，直接采用菱角、芡实、水白菜等漂浮生植被形成生态浮岛，浮岛外可用浮材圈围，避免浮叶植物的随意飘散。



图4-13 含载体生态浮床



图4-14 不含载体生态浮床

含载体生态浮岛的单体面积一般为 $2\sim 5\text{ m}^2$ ，浮岛通常覆盖水面面积需达到 20%~30%方可产生一定的净化效果。

限制因素：生物浮岛上的植物需进行适时的收割和更新，在天气较冷的区域，部分植物需重新种植；由于人工浮岛受建设宽度影响，在植被生长茂盛后难以靠近或抵达制定浮床浮块开展维护工作，导致后期浮床内部植被生长旺盛，难以抵近维护，植被在内部生长、腐烂，易造成二次污染。在部分区域，浮岛往往建设在有来水污染的区域，用于控制来水污染。因此，浮岛中往往混有污水中的垃圾、纸屑、塑料袋等，若不及时清理，易发生积累，导致对观感的影响。

4.4.4 人工水草技术

适用范围：当水体水域较大，且湖体浅水区域较少，缺乏建设湾塘湿地和水下森林的建设条件，可采用人工水草技术。



图4-15 生态水草示意图

技术要点：人工水草是用高分子材料符合而成，仿水草枝叶，能在水中自由飘动，形成上中下立体结构层，具有多孔结构、高比表面积；微生物富集于人工水草表面，形成“好氧-兼氧-厌氧”复合结构的微环境，实现硝化和反硝化作用。人工水草按其结构形态主要分为生态基、生物填料及碳素纤维草三种类型。生态基是一种新型、高效的生态载体，具有高比表面积和高负荷的特点，可吸附水中各种水生生物到其表面，随着时间的推移生态基表面会附着生长微生物和藻类，对富营养化水体起到生物过滤和生物转换的作用，并且附着在生态基上的微生物相非常丰富，主要由细菌、真菌、藻类、原生动物和后生动物等构成复杂的生态系统；生物填料具有亲水、亲油等作用，兼有储氧功能，同时能够挂膜，提高氧的转移速率和利用率；碳素纤维生态草具有高度的生物亲和性而会产生活性生物膜，可直接固定在水体之中。

技术方法：人工水草生物填料可选择辫式生物填料、弹性填料、悬浮填料等。辫式填料主要有亲水、亲油、切割气泡的作用，兼有储氧功能，下端固定在湖底，

上端呈自由漂游状态；立体弹性填料将具有亲水、吸附、抗热氧的材料以丝条工艺穿插固着在耐腐/高强度的中心绳上，立体均匀排列丝条，制成悬挂式立体弹性填料单体，在服务水域立体全方位均匀舒展布满。

人工水草适宜水深范较广，建议用量宜 $1.5\sim 2.5\text{m}^2/\text{m}^3$ 。在部分水深较大的湖泊治理中，可悬垂于生态浮床底部。

限制因素：在实际应用中常常由于水体的流动导致纤维多纠缠成束，人工水草表面积减少；虽然价格低廉，但是材料的强度和耐久性不够，使用一定时间后需要更换。

4.4.4 生态护岸改造技术

适用范围：适用于湖库各类护岸的改造，用于增加湖库岸线的生态性。

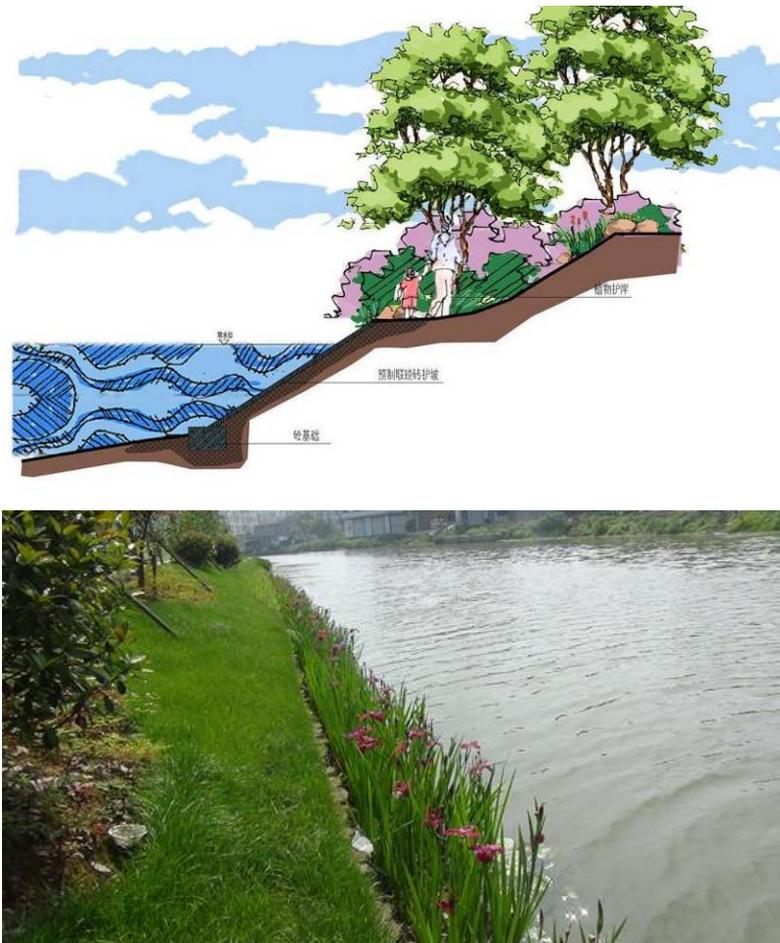


图4-16 生态护岸示意图

技术要点：生态护岸是指恢复后的自然河岸或具有自然河岸“可渗透性”的人工护岸，将护岸由过去的混凝土结构改造成为能使水体和土体、水和生物相互涵

养, 适合生命栖息和繁殖的仿自然状态的护岸。它拥有渗透性的自然底质与湖岸基底, 可以充分保证河/湖岸与水体之间的水分交换和调节功能。一方面, 在湖库丰水期, 湖水向护岸外的地下水层渗透储存; 枯水期, 地下水通过护岸反渗入湖, 起着滞洪补枯、调节水位的作用。另外, 生态护岸上的大量植被也有涵养水分的作用。同时, 生态护岸与岸边绿地、树林之间形成水面、绿地网络, 增强岸边动植物栖息地的连续性, 形成稳定、丰富的生态系统。另一方面, 生态护岸可以增强水体的自净功能, 改善湖泊水质, 护岸上种植于水中菖蒲、芦苇等水生植物, 能从水中吸收无机盐类营养物, 其庞大的根系还是大量微生物吸附的好介质, 有利于水质净化。生态护岸不仅可以与周围环境形成相协调的河道景观, 而且可以通过保护和建立丰富的生态系统使湖水清澈见底、鱼虾洄游、水草茂盛的自然生态景观, 为人们的休闲、娱乐提供了良好的场所。

具体改造方式主要有: 多孔性人工材料修复、水生植物修复、栏栅阶梯护岸修复、景观型多级阶梯式人工湿地护岸修复技术等。

技术方法: 多孔性人工材料修复技术主要利用石笼网将生态多孔介质和生物砌块固定于原混凝土护岸上, 或清除部分护岸材料, 将石笼固定于护岸内, 在生态多孔介质的植物定植孔上种植挺水植物或部分沉水植物, 内置毛细过滤带集水系统, 每隔一段距离设置集水井, 保证水系的混合、传质和交流。

水生植物护岸是在湖泊沿岸边种植芦苇、香蒲、灯心草、再力花等水生植物, 利用其根、茎、叶系统在岸线形成保护性岸边带, 消除水流能量, 保护岸坡, 促进泥砂的沉淀。

栏栅阶梯护岸可利用各种废弃木材和其他木质材料, 逐级在岸坡上设置栅栏, 栅栏以上的坡面种植草坪植物, 与木质台阶形成阶梯状的护岸形式。

景观型多级阶梯式人工湿地护岸是以无砂混凝土桩板或无砂混凝土槽为主要构件, 在岸坡上逐级设置而成的护岸形式。通过桩板与岸坡之间夹格或无砂混凝土内填充土壤、砂石、净水填料等物质, 并从低到高依次种植挺水植物和灌木, 从而形成岸边多级人工湿地系统。可种植菱草、芦苇和灌木等植物, 呈现出阶梯式绿色景观。

设计参数: 生态护岸改造技术设计参数详参见《河湖生态护岸工程技术导则》

限制因素: 部分硬质岸带改造技术的投资成本较高, 对原护岸的破坏和重建规模大, 技术要求较严格。

4.4.5 沉水植物恢复与水下森林构建技术

适用范围：适用于水深较浅的湖库，可用于湖库截污后的水质长期保持以及城市湖库的富营养化治理。



图4-17 沉水植物示意图

技术要点：沉水植物是水生态系统建立和运行的基础。通过底泥土壤改善，创造合适沉水植物生长的良好环境，种植沉水植物，通过沉水植物生长构成的“水下森林”，可以大幅度降低水体氨氮，吸收水中的营养盐，竞争养分和光照，抑制了藻类生长，避免水体富营养化；同时，为水生动物提供庇护所，食物和产卵环境，从而构建起生态链平衡系统，使得流动或封闭的水体保持长年清澈透底。

“水下森林”主要是通过同化作用、营养竞争、絮凝沉淀、化感作用以及其他生态功能达到净化水质目的。所使用的植物大多为带状或丝状，如苦草、金鱼藻、狐尾藻、黑藻等。该项生态修复技术可使水体主要富营养指标达到国家《地表水环境质量标准》III-IV类水质标准，利用沉水植物构建的水下生态系统具有低碳

环保、生态可持续、景观打造的优点，前景广阔。

技术方法：沉水植物物种的选择应以当地土著物种为主，限制外来物种，否则可能造成难以估测的生态失衡问题和培养难度。物种的选择应保证多样性，单一的物种的沉水植物群落难以维持稳定的生态系统。沉水植物恢复技术可分为自然恢复和人工恢复。自然恢复是沉水植物恢复的基本方法，湖泊底泥中的沉水植物的繁殖体，可以存在相当长的时间，当水湖泊的透光性良好，条件合适的情况下，沉水植物可以自然恢复，但由于自然恢复缓慢，应当采用人工恢复的方式加以促进，提高水体恢复效率。采用人工方法进行沉水植物修复，应当首先进行局部试验，选择适合的植物种群，然后进行推广，当生长达到一定的规模就可以迅速繁殖、自然生长。

沉水植物的初始种植密度参见附录。

对于单生、复生的水生植物可根据竣工验收的时间、土壤肥力等适当降低密度。一般而言，距验收时间越长、土壤肥力越好，施工密度越小。

限制因素：“水下森林”的构建不适宜水深较深的湖库，且施工前期对受污染水体的底泥有一定要求，重庆地区相当部分湖泊水深较深，沉水植被的种植仅可在浅水区域开展（ $<4.0\text{ m}$ ），同时需防备鱼类及福寿螺对沉水植被的啃咬。若在湖体中局部片区种植，建议设置小网眼围网，避免体型较大食草鱼类的啃咬。

4.4.6 水生动物生态恢复与生物操纵技术

适用范围：水生动物生态恢复与生物操纵技术可广泛应用于水体水质的长效保持，适用于新挖湖泊、清淤后湖泊等底栖生态不完善的水体，通过底栖生态系统的恢复与构建，持续去除水体污染物，改善生态环境和景观。



图4-18 水生动物生态恢复示意图

技术要点：底栖生物是水生生态系统中重要组成部分，在水生生态系统中占有十分重要的地位，是湖泊水生动物以及重要水产生物的优质饵料，在湖泊生产力、水生系统和底栖系统耦合、水体能量通量以及水体食物网中均起重要作用，滤食性底栖动物对水体中的净化作用更为重要。水生动物的多样性，使它们在水中相互依存，与水生植物相互依赖、相互作用，形成了生态平衡，同时也不断地消耗和降解水体中的有机物质，维持湖泊的正常生态系统。通过生物操纵，快速构建水体底栖生态系统，发挥底栖生物在水质改善和生态群落和生境调节中的作用。

生物操纵技术即是通过调整生物群落结构的方式减少藻类生物量来改善水质，主要原理是调整鱼群结构、保护和发展大型滤食性浮游动物、从而控制藻类的过量生长，调整的方法为控制底食性鱼类的发展，在合适的时间放置一定的鱼类、蚌类和贝类到水体中，使其在水中生长，以藻类和淤泥为食，可达到净化水质的作用，使整个食物网适合于浮游动物或鱼类自身对藻类的觅食和消耗，如利用浮游植物食性鱼类（如鲢鱼、鳙鱼等）直接牧食藻类等。

技术方法：水生动物生态恢复技术主要方法为因地制宜地投放鱼虫、红蚯蚓等水中微生物和河蚌、黄蚬、螺丝（避免投放福寿螺）等底栖动物并促使其生长繁殖；同时放养鲢鱼、鳙鱼等鱼类，逐步地建设和修补水中生物链，形成生物多

样性。

生物操纵技术主要通过循环放养和重复养殖，鱼可深入到湖区各部，调控湖泊中生物之间的食物链关系，降低藻类现有量，再通过成鱼捕捞，取走水体中的营养物质。

在投加量方面，螺类，贝类一般以 5~10 个/m² 投加，杂食性虾类和小型杂食性蟹类以 5~30 个/m³ 的密度投放。

限制因素：不同种类的底栖生物对环境条件的适应性及对污染等不利因素的耐受力 and 敏感程度不同，需对水体污染情况进行分析，因地制宜投放适合的底栖生物。生物种类、数量、密度需要严格控制，防止出现生物爆发或生物死亡的现象，尤其滤食性鱼类的数量难以控制。

4.4.7 生物制剂修复技术

适用范围：生物制剂修复技术适用于截污完成的封闭水体的应急处理，可较快重建水体的菌落结构，促进水体水质的改善。

技术要点：生物制剂是指从自然界筛选的优势菌种或者通过基因组合技术而生产出的高效菌种，或是将目标菌群经过工业化生产扩繁后，利用多孔的物质作为吸附剂（如草炭、蛭石），吸附菌体的发酵液加工制成的活菌制剂，其中还针对性的添加了酶制剂、营养物质和矿物盐。生物制剂中的微生物种群以硝化细菌、芽孢杆菌为主。通过生物制剂的投加，可使水体中的微生物数量快速增加，通过微生物的自我分裂繁殖，分解有机物和吸收水体中的氨态氮、硫化氢、亚硝酸盐等有害物质，提升水体透明度。

技术方法：生物制剂恢复技术主要方法是通过购买生物制剂，视湖底淤泥和水质情况，每月使用 2~4 次。将生物制剂按一定比例稀释并存放 2 小时，库边和浅水区域可直接泼洒；深水区利用高压空气将底泥翻至上层时泼洒。生物制剂通常仅为应急工程使用。

限制因素：生物制剂恢复方法见效快，但作用期短，不能长久维持。复合菌剂的组成复杂多样，其中的微生物更容易受到群体结构和环境因素（温度）的影响，导致生物制剂的稳定性下降；投加生物制剂时应考虑受污染水体对生物存活的适宜性。

4.4.8 体外循环透析处理技术

适用范围：适用于污染负荷相对较高、水体感官差、水质因子波动较大的湖库水体，以及湖库污染的应急处理。

技术要点：外循环透析处理技术是采用泵提升的方式将湖体湖水引入一体化处理设备或生态处理设施中进行净化的技术方式。与水体透析技术相结合的一体化设备通常包括超磁分离、混凝过滤以及曝气生物滤池等方式，其中超磁透析技术具有占地少、运行费用低、处理效果好等优点，能够有效削减悬浮物及藻类的特点。可用于体外循环透析的生态处理设施包括人工（生态）湿地、面源污染控制的植物下渗处理系统、潭链系统等，可根据处理水体水量需求以及临近区域的生态处理设施灵活应用，通过体外透析处理，有利于水质中营养盐的去除，有助于恢复湖体健康。

限制因素：体外循环透析处理技术综合了泵站提升和处理设施两部分，泵站提升能耗较高，管理与维护的难度相对较大。

4.4.9 生态修复技术比选

生态修复技术是对在人类活动影响下受到破坏的湖库自然生态系统进行恢复与重建的过程，因此，在进行生态修复技术选择时，首先应明确湖库生态受损的位置、程度及原因，在维持湖库原有功能的基础上，以生态调节为主，进行合理的技术方案选择；生态修复周期较长，应当兼顾修复技术的总体布局与分期实施。

湖库生态修复技术的比选如表 4-6 所示。

表4-6 生态修复技术水量、水质控制功能与环境效益/选择矩阵

技术	特征/功能	适用条件	功能				机制	污染物去除率	处置方式		经济性		景观效果
			增加溶解氧	净化水体	提高自净能力	增加生态性			分散	相对集中	建造费用	维护费用	
生态湿地	通过植物和微生物的自然降解作用净化受污染的水体	湖库水质浑浊、污染较重、水体流动性差的浅水区域	◎	●	○	●	沉淀、过滤、吸附、微生物降解和植物吸收	20%-40%	√	√	中	中	好
人工强化静滞水体循环流动	通过提水式曝气机、景观喷泉或水下推流器增加水中溶解氧，推动池水循环，抑制表层水体藻类增长，有效防止死水腐败问题	湖库水体流动性差、富营养化严重、污染严重	●	◎	○	●	改善水体溶解氧，为微生物降解提供条件	-	√	-	中	高	一般
生态浮岛与生态水草技术	通过植物的根系净化水体；人工水草附着的微生物和藻类，对富营养化水体起到生物过滤和生物转换的作用	水生态性不足、富营养化严重	◎	◎	○	◎	植物吸收、微生物降解	10%~20%	√	-	高	中	好
生态护岸改造	将硬质护岸改造为自然护岸或仿自然护岸，充分保证河/湖岸与水体之间的水分交换和调节功能，同时增强水体的自净功能，改善湖泊水质	岸坡裸露、水生态性不足	○	●	○	●	下渗、吸附、植物吸收、微生物降解	5%~10%	-	√	高	低	好
沉水植物恢复与水下森林构建	通过种植沉水植物，增加水中溶解氧，抑制藻类生长，避免水体富营养化	湖库水质较差、水生态性不足、植物与生物链缺失	◎	●	●	●	植物吸收、微生物降解	40%~80%	√	√	中	中	好

技术	特征/功能	适用条件	功能				机制	污染物去除率	处置方式		经济性		景观效果
			增加溶解氧	净化水体	提高自净能力	增加生态性			分散	相对集中	建造费用	维护费用	
外循环透析处理技术	将污染水体引入水体透析装置进行净化	湖库水体污染负荷较高、水质因子波动较大	○	●	◎	◎	絮凝、沉淀、过滤	30%~40%	√	-	高	高	一般

注： ●——强 ◎——较强 ○——弱或很小

第五章 湖库管理与长效保持

5.1 管理主体

各湖泊水系应有明确的管理主体，以便针对性的开展维护管理工作。

湖泊的管理主体包括：政府主管部门、企业管理部门及个人。在后期的管理维护中，各管理主体可自行管理或委托第三方开展湖泊管理，政府主管部门应负责监督和水质考核。

5.2 管理原则

(1) 明确管理对象，编制标准化管理手册。针对各湖泊的设施布局和环境特点，编制管理手册，做到一湖一策，管理实现标准化。

(2) 明确管理重点，合理管理频率。根据不同水体的环境特征及所处时期，明确需管理的重点区域，并对管理频率进行重点约束。

(3) 明确管理人员，开展技能培训。根据设施、构筑物管理的难易程度，明确管理人员，对管理人员开展技能培训，保证其对设施、构筑物的认识，使其了解其基本原理，能应对设施运行中的多种问题。

5.3 管理措施

5.3.1 水域管理

水域管理主要针对水域本身，主要包括水面洁净度保持、水生动物投放与捕捞、水生菌剂的投放以及相关的水域应急处理。

(1) 清漂清渣

定期打捞水面漂浮物。湖面每天至少巡视 1 次，发现漂浮物或枯死浮水植物及时打捞，保证湖面干净整洁无漂浮物；

湖湾区易出现漂浮油渍，运行维护人员应保持水库水面无油污，建议对湖湾区油渍的清洁频率不低于 1 次/周。

(2) 鱼类投放与捕捞

水库生态治理主要投放滤食性鱼类，即花白鲢。在治理前期投放花白鲢总量为每亩 200 尾，比例为 2: 8，鱼苗的规格应在 0.25 至 0.5 公斤，中后期视捕捞情况逐年减少投放量，不论回捕多少，必须保证上规格花白鲢的库存量不少于每

亩 100 尾。中后期花白鲢比例可逐年上升，直至比例反为 8: 2。

(3) 蚌螺投放

在水体中放养蚌螺类动物，通过其摄食的过滤作用，达到控制浮游植物的目的。螺类建议投放品种为铜锈环棱螺，规格为直径 2-3 cm，每年按照 10-20 kg/10000 m² 水面面积投放；蚌类建议投放品种为褶纹冠蚌，规格为直径 5-8 cm，每年按照 15-20 kg/10000m² 水面面积投放。蚌螺投放区域应为湖湾浅水区，以保证其存活率。

(4) 菌种投放

菌种投放管理措施同 4.4.7 中的生物制剂修复技术。通过菌种/生物制剂的不断投加，保证湖泊的水体保持较高的透明度。建议投加频率为每 15-20 天使用 1 次，全库均匀泼洒，具体播撒量视菌剂类型和浓度而定。

(5) 应急处理（石灰播撒）

封闭湖泊易在温度、光照合适的情况下，出现蓝藻聚集生长的情况，应积极开展控制。通过向湖面投加石灰的方式，改变湖泊表层 pH，并降低表层水体 TP 浓度，营造不易于藻类生存的环境。石灰的投加量推荐为 30-50 kg/10000m² 水面面积，投加频率视现场情况而定。

5.3.2 生态设施管理

生态设施主要包括各类湿地、水面的生态浮岛及湖泊浅水区的沉水植被，主要包括对植被生长情况的监控与管理。

(1) 生态湿地及生态浮岛

建议每周巡查各类湿地的生长状况 1 次，注意湿地植物的倒伏、随意繁殖和枯死，及时拔除周围杂草；为抑制过度生长和繁殖，可按期进行人工修剪，若出现枯萎情况，需及时补种，保证其生长密度；冬季温度低于 10℃ 时即进行植被收割，以保障植被次年的生长。

在重庆地区，福寿螺对湿地植物的影响较大，福寿螺啃食湿地植被的茎叶，导致部分植被的枯萎。可考虑适量投放青鱼控制福寿螺数量，投放密度为 40-50 尾/10000 m² 水面。

生态浮岛的底部基质多为塑料，易受光照破损毁坏，应每月巡查生态浮岛的种植基质情况，若发现损毁及时更换。

(3) 沉水植被

建议每周巡查沉水植被的生长状况 1 次，注意沉水植被的退化和过度繁殖。为抑制沉水植物的过度生长和繁殖，可按期进行人工修剪。若出现沉水植被的退化情况，应在考虑该沉水植被在湖泊的适宜性的基础上，开展补种措施，以保证其生长密度。冬季低温时，部分沉水植被无法正常越冬，补种部分冬季生长型沉水植物，以保障冬季的植被数量。

5.3.3 水质监管与湖库档案建设

(1) 建立完善技术档案机制

维修养护档案应按照维修养护要求，分类建立维修养护科目，定期整理归档，建立年度维修养护的生产统计、设施完好状况档案；

所有运行管理都必须按规定做好记录，并按技术管理要求建立档案。

水库技术档案应实施信息化管理。

(2) 组织协调机制

监督部门应充分发挥在水库维护和管理工作中统一指挥、组织调度、督促检查的职能作用，加强对水库日常维护管理工作的统筹、协调和调度。相关部门要在主管部门统筹协调下，认真履行水库维护管理工作职能，加强沟通协作，相互配合，有效衔接，努力形成整体合力。

(3) 监督检查考核机制

监督部门要制定维护管理工作评价考核办法，充分利用城市管理监督信息化平台，及时发现问题，监督指挥解决问题。

(4) 重大、突发问题处理机制

主管部门负责组织应急指挥中心、相关职能部门、作业实施单位及街道办事处参加，成立重大、突发水环境问题处理领导小组；建立应急处置工作制度、制定应急预案，负责全水库重大、突发问题的统筹协调和工作。

(5) 水库环境管理维护情况通报机制

主管部门指挥中心要充分利用城市监督管理信息资源，对水库日常管理中发生的问题及时查明责任、分析原因、督促解决。

第六章 湖库水环境生态修复案例

6.1 重庆园博园龙景湖水环境综合治理工程

6.1.1 项目简介

重庆园博园位于重庆市北部新区龙景湖片区核心，占地 2.2 km²，其中水体面积为 0.53 km²，是一个集自然景观、人文景观、休闲娱乐、科普教育为一体的超大型城市生态公园。作为重庆市重大工程项目，园博园龙景湖水库水质要求达到地表水环境质量 IV 类标准，使之成为高品质的生态旅游观光和休闲景区，成为永不凋谢的园林盛会。

园博园龙景湖是典型的河道型水库，其上游汇入河流（赵家溪和龙景沟）均为典型的山地城市河流。由于山地城市自身的特点，龙景湖水库水位较深（20~30 m），换水周期长（约 2.5 年），其水源补给主要为降雨径流。因此，控制流域内降雨径流面源污染是龙景湖水质保持的核心。

园博园内龙景湖主要有赵家溪和龙景沟两条汇入河流（图 5.1-1）。赵家溪发源于重庆北部新区人和街道重光村，经黄桥、黄茅坪、花沟、葫芦、花朝等村，流经渝北区悦来镇汇入嘉陵江，流域面积约 6.86 km²。龙景沟发源于经开区翠云街道花朝村，流经葫芦村，在花沟村汇入赵家溪，流域面积约 2.8 km²，为园博园的建设提供了足够的管理用水和丰富的景观用水。

龙景湖由大坝拦截蓄水形成，设计常水位标高为 306 m，建成后水面总面积约 0.67 km²，在园博园规划区内约 0.53 km²。龙景湖大坝上游常水位标高为 306.00 m，死水位为 296.00 m，拦河坝设计洪水频率为 10 年一遇，相应洪峰流量 183m³/s。30 年一遇设计洪水位为 307.45 m，300 年一遇校核洪水位为 308.06 m，相应洪峰流量为 302 m³/s。总库容为 663 万 m³，调节库容为 425 万 m³，龙景湖大坝上游汇水面积约 11.8 km²，取汇水面积上的径流系数为 0.3，则龙景湖大坝上游汇水面积上每年约能收集 407.3 万 m³ 的雨水。龙景湖大坝上游淹没的面积约为 0.65 km²，则龙景湖大坝上游水面年蒸发水量约为 59.28 万 m³。

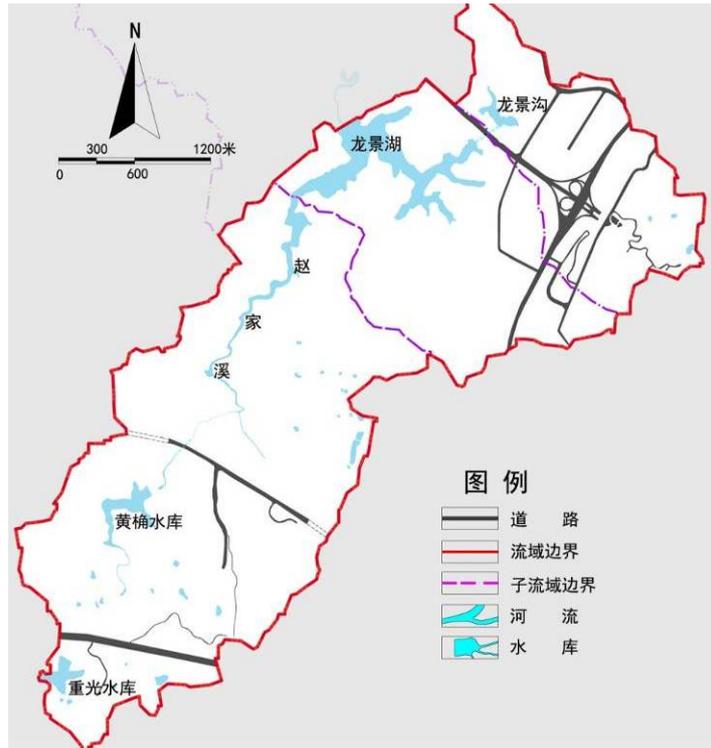


图6.1 龙景湖及其上游区域水系图

6.1.2 应用技术

(1) 山地城市面源污染控制技术

山地城市面源污染控制工程（又称江南园湿地花园治污工程）位于重庆园博园内部江南园片区，主要服务对象为江南园湖湾上游流域的城市面源污染。园博园位于龙景湖片区洼地，周边分布有较多不透水地表，尤其是江南园附近毗邻重庆力帆汽车停车场等工厂企业。本着快排快泄的雨水管网设置原则，园博园园区周边的雨水通过市政雨水管网进入园博园园区。通过流域集水区解析，园博园江南园湖湾区域的集水服务总面积约为 55 ha，其中不透水地表面积约占总面积的 80%，尤其是园博园江南园周边停车站内洗车、修车等业务频繁，大量的含油污地表径流随沟渠和管道系统进入江南园库湾区，导致江南园库湾底泥中油污污染严重。根据计算，江南园库湾的城市面源污染输入占入园面源污染负荷输入的 36%。为了解决此处严重的面源污染问题，削减从江南园园区上游输入的重污染雨水径流。2013 年 10 月，山地城市面源污染控制集成技术示范工程正式启动前期设计，由于 2014 年 6 月开展建设，2014 年 12 月土建工程全部完成，次年 3 月植物全部补种完成，正式建成使用。



图6-2 山地城市面源污染控制集成技术示范工程俯瞰图

重庆园博园江南园湿地花园总占地 15055 m²，有效设施面积 12109 m²，其中水域面积 3594 平方米，包括 3 个缓冲池，3 个常水位池，12 个水生植物池和 2 条植草沟。设施建设成本 370 万元，合计建设单价 220-300 元/m²。工程通过因地制宜的园林景观设计并融合①山地城市特细砂源区面源污染控制技术、②复杂地质条件下源区促渗技术、③大坡度道路径流路肩带渗滤技术、④道侧绿地滞控技术、⑤组合模块式大坡度径流控制滤池系统和⑥微型水景滞存技术、⑦径流入湖强化侧向流生物滤池净化技术 7 项城市面源污染控制技术。通过干/湿塘接纳雨水径流、旱季混入雨水管道的少量污水，通过填料、土壤、湿塘等多种形式对来水中的污染物进行渗滤净化处理，保证进入江南园库湾的雨水水质达到 IV 类水质标准，有效解决上游片区的地表径流污染问题，保障进入龙景湖的径流水质。

在江南园湿地中，城市地表径流污染主要通过以下流程得以滞留、净化：

①来自园博园江南园外围上游的地表径流，经雨水边沟进入园博园内部，首先进入接纳雨水径流的径流沉淀消能池，沉淀消能池也具备一定的下渗功能，径流经沉淀消能池处理后，水流速度减缓，部分泥沙也得到沉淀。随后进入下一渗滤或滞蓄环节进行处理。

②部分经消能和预沉淀的地表径流的雨水进入组合模块式大坡度径流控制滤池系统进行进一步渗滤处理，部分进入微型水景系统进行滞存处理。在微型水景系统和模块式大坡度径流控制滤池系统的选择上，可视实际地形坡度和用地条件而定。

组合模块式大坡度径流控制滤池系统主要用山地城市地形起伏较大的区域，对来水进行深度过滤，为后续清洁径流的利用提供基础；

微型水景系统主要起到对径流的滞留，同时利用水景中植物、基质（土壤或其他天然、人工填料）、微生物等的共同作用对径流起到一定的净化作用。

③地表径流在大坡度径流控制滤池系统处理后，水质得到改善，进入微型水景系统，为园区水景提供补水，同时利用微型水景系统对来水进行滞存，避免峰值径流直接进入龙景湖。

④当降雨历时过长或降雨强度过大时，进入微型水景系统的雨水量超过微型水景的设计调蓄容量后，微型水景系统将出现溢流，溢流出水进入以减流促渗为主的大坡度道路径流路肩带渗滤区或复杂地质条件下源区促渗区，通过快速下渗方式削减径流量，同时回补地下水，通过地下径流进入龙景湖。

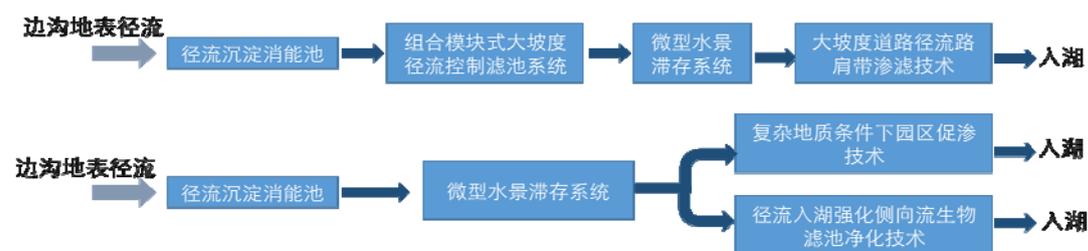


图6-3 山地城市面源污染控制集成技术示范工程雨水处理流程图

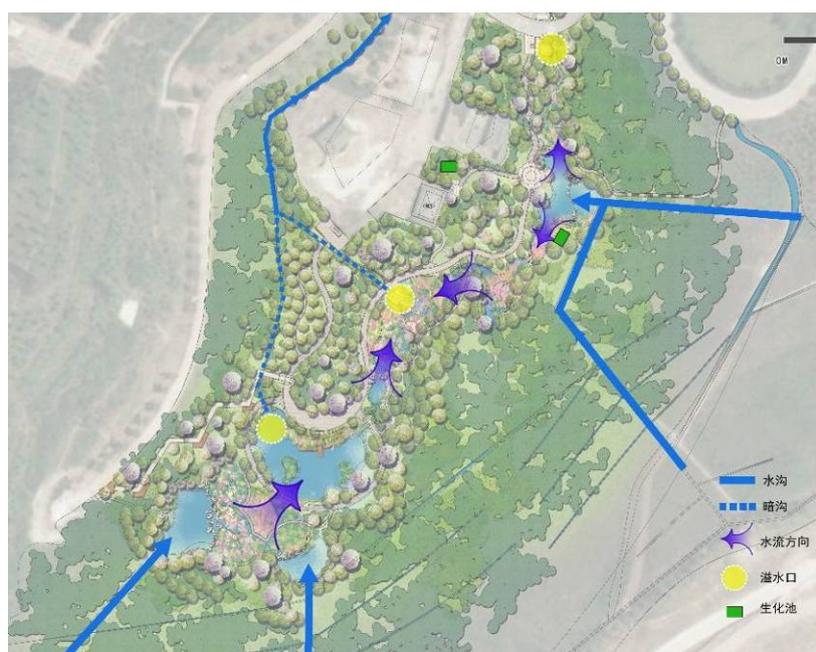


图6-4 山地城市面源污染控制集成技术示范工程雨水流向图



图6-5 山地城市面源污染控制集成技术示范工程现场俯瞰图

工程设施完成后，有效控制了上游集水区内的旱季散排废水的污染问题。雨污管错接，污水错排入雨水收集管线，在城市区域是高概率事件，园博园以前也深受此扰。设施建设完成后，即使在旱季有少量散排污水进入，也可通过雨水消能池、雨水渗滤池对其进行拦截、渗滤处理，有效的减少了因旱季散排污水对湖水的污染。

有效的削减了区内的城市面源。由于上游由大面积的停车场、工厂厂区，降雨径流的初期污染严重，径流中往往携带着大量的油污进入管内排水边沟。随着设施的建设完成，当降雨强度较小时，全部雨水均可得到渗滤净化。当降雨雨强较大时，也可有效处理初期重污染径流，实现洁净径流入湖。根据降雨期的实测数据，地表以下 1 m 的渗滤水的水质 TP 平均为 0.068 mg/l，TN 1.23 mg/l。

有效的削减了外排雨水量。由于区内综合采用了消能、渗滤、滞蓄等设施，对雨水量的削减效果明显，基本上做到小雨、中雨时设施出口无可见径流排放，暴雨期设施出口径流流量减少 89-96%，大暴雨期设施出口径流流量减少 76-82%，表明设施有效的渗滤/滞蓄了雨水，有效的回补了地下水。

(2) 人工强化静滞水体循环流动技术

针对园博园湖湾为流动性很差的封闭缓流水体，水生态系统单一、水体环

境容量小、自净能力差等问题，实施了湖湾死水区人工强化水体循环流动工程，通过在底部建立推进系统，通过潜水推流器的运行强化死水区的水体流动，提高湖湾死水区流速，改善湖湾内水动力条件，避免湖湾区出现水质恶化的情况。

相关技术参数：潜水推流器的型号为 QJB5/12-615/3-480/S，叶轮直径 620mm，功率 5kw，额定电流 12A，转速 480r/min，轴向推力 1300N，重量 184Kg；推流器安装深度为水下 2.0m。设施建设成本 12 万元（不含线路费），服务面积 400 m²。

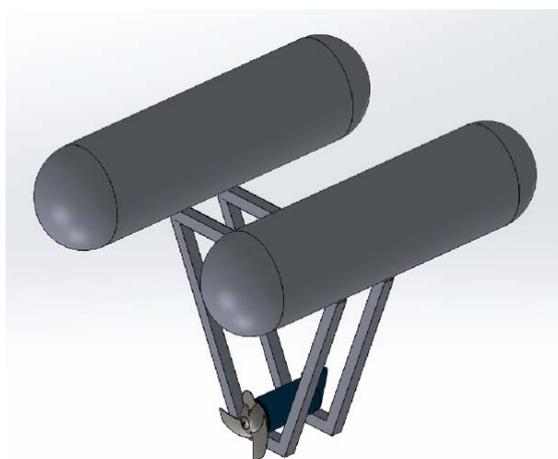


图6-6 湖湾死水区人工强化水体循环流动示范工程设备安装示意图



图6-7 回水区人工强化富氧示范工程图

同时，针对园博园龙景湖湖湾区水体富营养化严重、水体溶解氧浓度低、溶解氧分层严重的问题，在园博园听雨桥湖湾开展了湖湾水体人工强化富氧工程建设，在湖湾区建立了用于富氧曝气用的喷泉，喷泉分为不同的吸水深度和喷头形成。

相关技术参数如下：

①喷泉设计形式采用直线狭长型配管方式，喷泉总长 40m，主管道上装有 DN25（1 寸）万向直流喷头 100 个，喷头间距为 40cm；

②喷泉共有潜水泵 5 台，漂浮式水箱 10 个，喷泉控制设备一套，包括时控装置和喷泉启停设备；

③喷泉潜水泵功率 5.5KW，流量 100m³/h，扬程 12m。喷泉泵的启停通过控制箱的自动控制系统实现，控制箱安装有时控开关，分别控制 5 台泵的启停，且可以控制喷泉连续或间歇运行，其中 1 台潜水泵吸水深度可作调节；

④夏季，建议喷泉高度为 1m 和 5m 时，综合考虑能耗，选择喷泉高度 1m；秋冬季最佳的喷水高度为 5m（万向直流喷头）和 1.5m（礼花喷头）；

⑤喷泉吸水口在水下 7 m；

⑥喷泉在夏季的运行方式为：9:00~11:00，13:00~17:00 两个时间段里开启，其他时间关闭；在冬季的运行方式为：上午 9:00~11:30 和下午 15:00~18:00 开启。

⑦喷泉设施建设成本 9 万元，功率 5.5kw，服务面积 5000 m²。



图6-8 湖湾水体人工强化富氧（喷泉）示范工程

（3）生态浮岛及生态水草技术

针对园博园龙景湖秋亭桥湖湾水体流动性差，水体富营养化严重的问题，开展了生态浮岛及生态水草工程建设，在湖湾区建立了大面积的生态浮岛，浮岛采用了较为少见的椰棕作为软性浮床基底，同时在浮床基质底部挂装生态水草。

除此之外，在湖湾底部设置了若干生态沉箱（内部悬挂生态水草），利用沉箱中填料和生态草的作用，促进库湾区微生物群落的形成。工程于 2014 年 6 月施工完毕，并运行至今。目前，秋亭桥湖湾的水质已得到了一定的改善，水体透明度明显增加。

相关参数：

- ①浮床基质为亲水性好，耐腐蚀的椰棕，密度为 0.78 kg/m^3 ；
- ②浮床植物选择净化能力强、根系发达、景观品质高的当地品种，包括美人蕉、菖蒲、旱伞草，种植密度为 16 株/m^2 ，种植量为 2400 株
- ③生态草设置密度为 1 根/2m^3 ，设计区域总设置量为 800 根。
- ④浮床建设成本为 $200\text{-}300 \text{ 元/m}^2$ ，具体视浮床和材质和植物而定。所用生态草为日本进口，单根价格为 160-180 元。

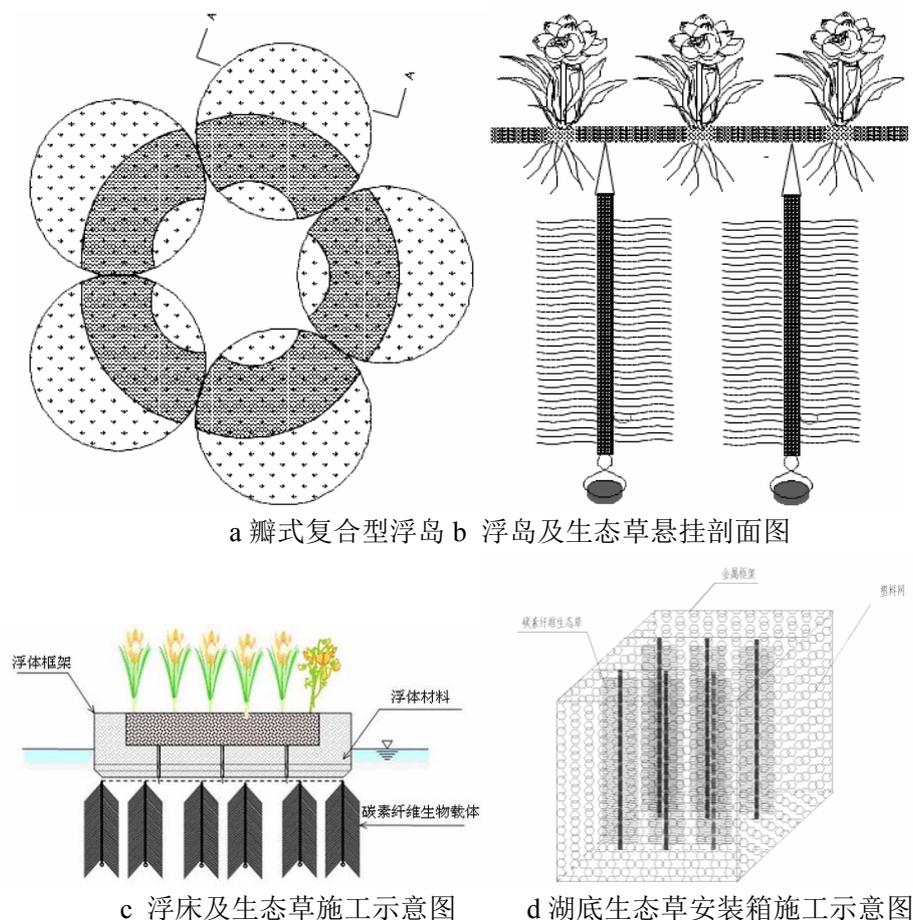


图 6-9 浮床及人工水草工程示意图



图6-10 浮床及人工水草工程（底部可见沉箱）

6.2 重庆互联网产业园山林沟大塘治理工程

6.2.1 项目简介

山林沟大塘位于重庆北部新区大竹林片区，该湖库容 100000 立方米（最大库容），面积 14000 m²。由于山林沟大塘水系周边正处于高强度的开发伴随人类活动过程，土地开发及近年来对湖岸的人工整备，导致消落带原有植被的破坏，代之以各种杂草形成的植被类型，其生态功能比之森林或者灌丛大大降低。目前，山林沟大塘处于干枯状态，生态系统破坏严重，严重威胁着未来山林沟大塘水体生态环境平衡。

针对山林沟大塘存在的城市道路雨水污染严重的问题，应用了包括雨水前置库强化收集处理技术、面源污染汇控制技术，针对山林沟大塘周边产业园屋面和道路雨水污染严重的问题，主要应用了生态绿地和园区下渗等多项 LID 技术，同时在湖库浅水区应用了包括水下推进、强化富氧、生态操纵等水体水质保障技术措施。

6.2.2应用技术

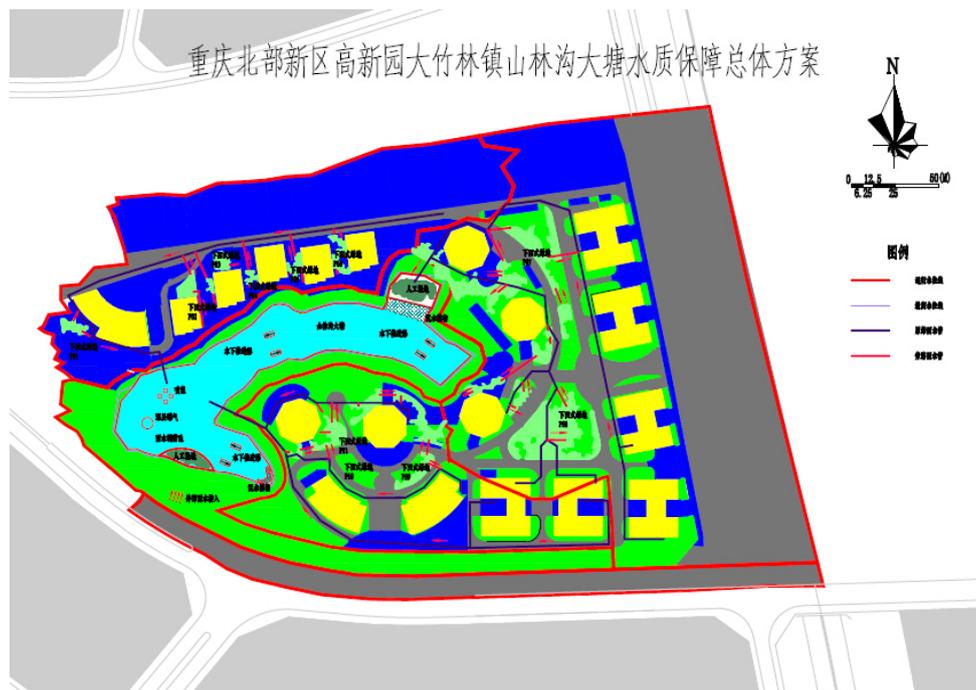


图 6-11 山林沟大塘水质保障总体方案设计图



图6-12 山林沟大塘工程措施实景图（梯级雨水前置库强化收集处理技术）

（1）梯级雨水前置库强化收集处理技术

针对山林沟大塘周边雨水排放导致的初期雨水污染的问题，在湖泊截污的基础上，考虑山林沟大塘水深较深（平均 8m），岸坡较陡的实际地形，对来自金开大道西段道路的初期雨水进行收集、沉淀与强化处理。

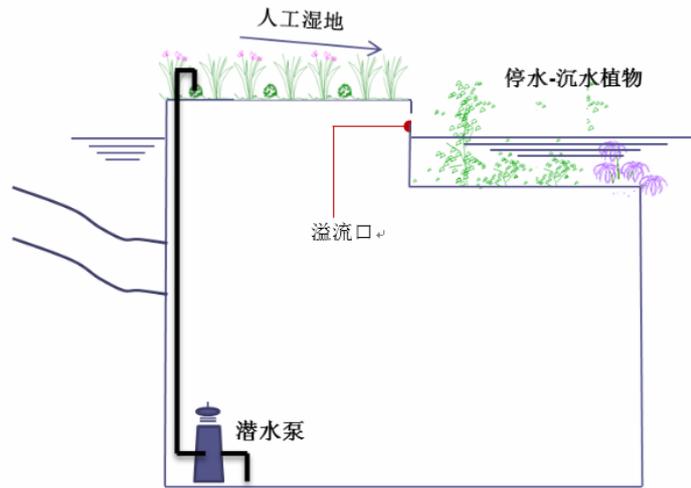


图6-13 梯级雨水前置库强化收集处理技术

来水经梯级雨水前置库前的跌水瀑布跌水处理后，强化了来水的溶解氧浓度，随后进入梯级雨水前置库。前置库为 L 型，建于水中，形成了一片浅水区域和一片滨岸区域。滨岸区域建设为处理用人工湿地，浅水区域构建挺水-沉水植物区，将原有陡直的护岸变为了具有功能和生态功能兼具的生态滨岸区域。初期雨水收集后，过多的后期雨水经溢流口溢流进入湖体。所收集的初期雨水，在旱季时，通过前置库底部的潜污泵提升至梯级雨水前置库顶部的人工湿地进行处理后，跌水进入挺水-沉水植物种植区进行二次处理，最终保证清洁的雨水进入湖体。该梯级雨水前置库容积 600 m^3 ，建设成本为 40-60 万元，折合单价为 670-1000 元/ m^3 。



图6-14 梯级雨水前置库强化收集处理技术暴雨期溢流

(2) 集水区面源污染控制技术

产业园区内部面源污染控制主要利用园区内部绿地，综合利用生物促渗减流、组合模块式生态滤池等面源污染控制技术措施，实现园区内雨水就近处理，保证园区内清洁径流进入湖体。根据入湖雨水管道，可划分为3个主要集水流域范围，根据不同集水流域范围的用地情况灵活处理，分别估算各集水单元的污染负荷，考虑利用集水单元附近绿地，建设相应的雨水处理设施，让雨水经土地渗滤、植物吸收等一系列生态净化流程后缓流进入湖。生态带建设结合苗木种植，成本约为120-170元/m²。



图6-15 山林沟大塘集水区生物促渗减流技术

6.3 重庆北部新区八一水库生态修复工程

6.3.1 项目简介

重庆北部新区八一水库位于人和街道、天湖美镇社区，属嘉陵江水系，水库水面面积约4.2万m²，水库最深水深7.3m，库容12.5万m³。



图6-16 八一水库区位图

八一水库治理工程由 2015 年 12 月开展，该工程重点为对八一水库来水的水质控制，通过生态梯田净化、水上森林强化、水陆生态交错带、沉水植物强化和兼性生物净化等综合措施，对八一水库来水进行强化处理，保障进入水库水质稳定的优于IV类。同时，在湖体表面通过设置水体兴波系统，利用机械作用保持表层水面的持续波动，避免藻类的持续生长。



图6-17 八一水库水环境整治提升工艺流程图

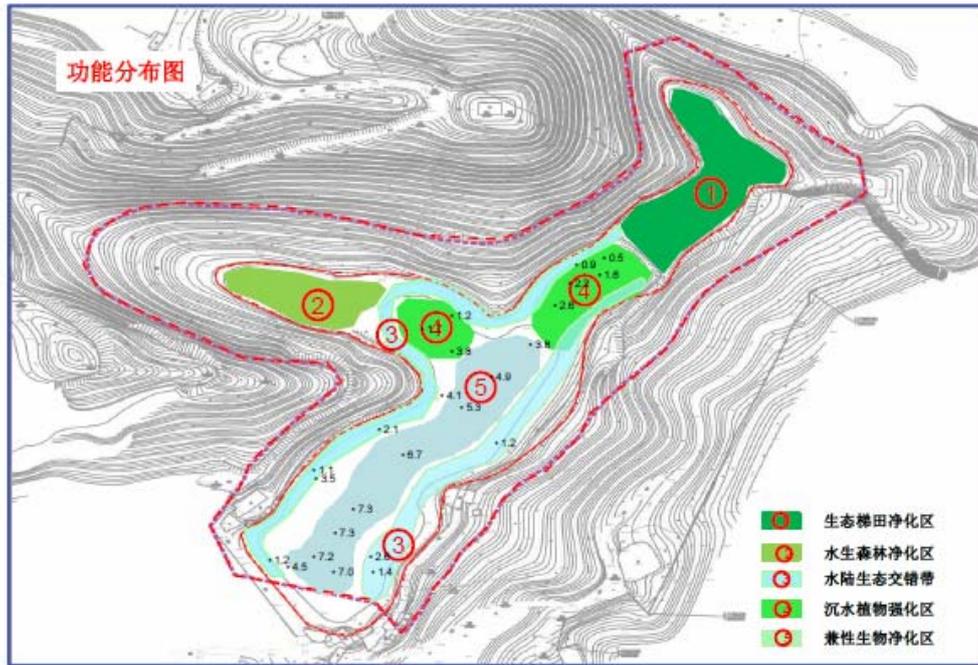


图6-18 八一水库水环境整治提升工程布局图

6.3.2 应用技术

(1) 来水梯级湿地处理技术（人工湿地就地处理技术）

八一水库来水主要来自于其东北侧的照母山山系，由于水库呈纺锤型，其东北角具有较大的空地可用于来水的净化处理，因此，针对主要入库来水，设置生态梯田、水上森林等湿地处理措施，对来水进行深度处理，保障洁净源水进入湖体。

1) 生态梯田净化区：

通过构建梯田形貌，形成“旱田--水田”组合的生态梯田系统，种植高植物密度的挺水植物，确保外来水与梯田土壤、填料和植物充分接触，增加水力停留时间。梯田净化区采用沸石为主要填料，利用填料粗糙的表面，促进微生物在填料表面的生长，增强系统的生物量，强化其对来水营养物质的去除。

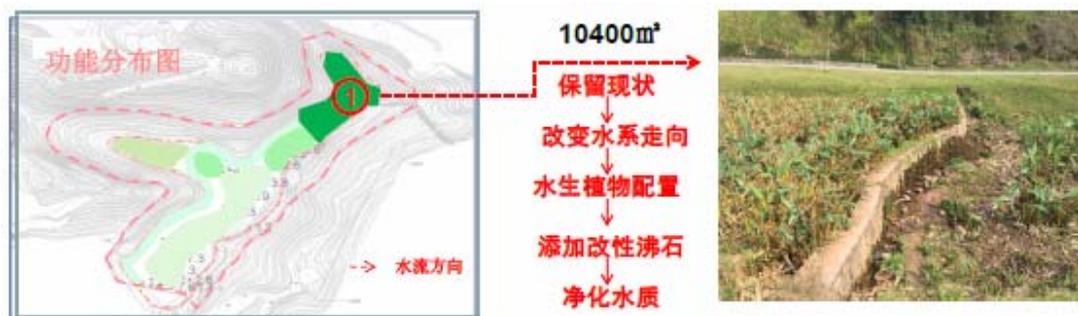


图 6-19 生态梯田净化区工程布局图

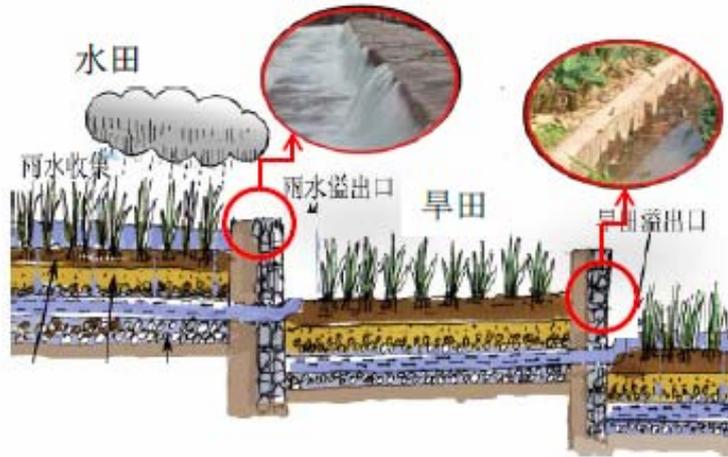


图6-20 生态梯田净化区设计意向图

2) 水上森林净化区:

在前期生态梯田净化的基础上，利用水杉、池杉等高大乔木，营造灌-乔搭配的景观，此处填料基质仍为改性沸石填料，利用沸石的吸附性能与离子交换性质和植物根系的共同作用进一步去水体除污染物，净化水质。



图 6-21 水上森林净化区工程布局图

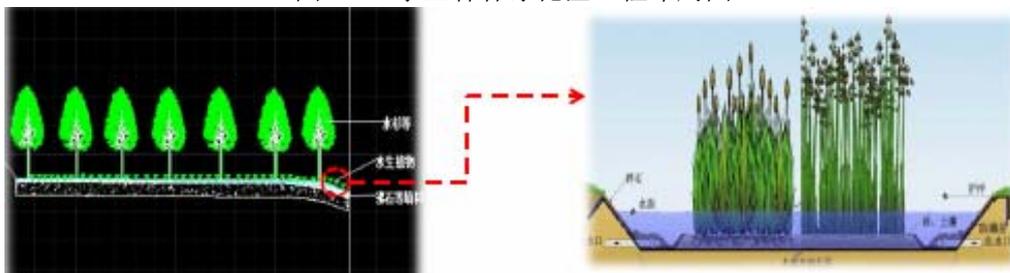


图6-22 水上森林净化区设计意向图

(2) 人工强化静滞水体循环流动技术

由于八一水库库容和水面面积相对较小，水环境容量小，生态系统脆弱，为避免适宜温度下的藻类爆发问题，在湖心建设有水面兴波系统 1 套，通过电机

的持续运行，产生振动，促进湖体表层出现微小波浪，加大了表层水体的流动速度，为藻类的聚集生长营造了不利的环境，可从一定程度上避免藻类的聚集生长。

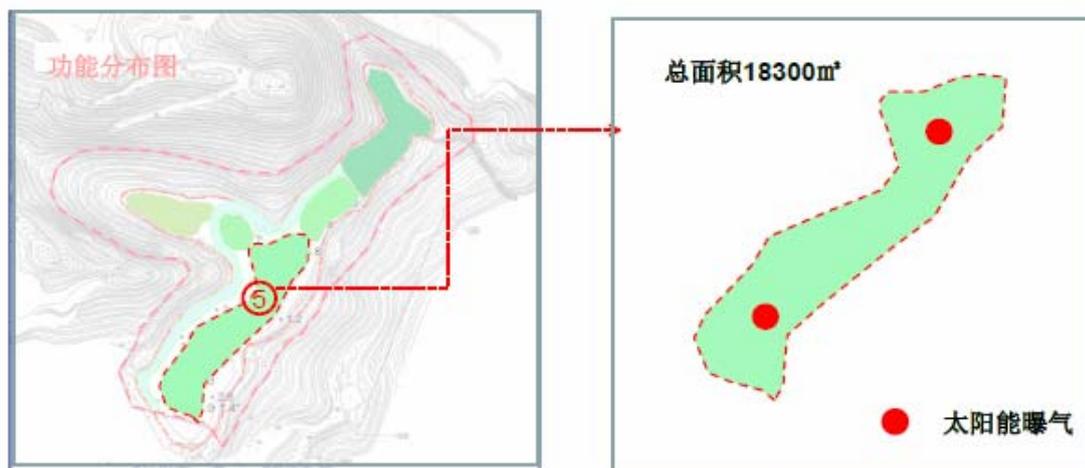


图6-23 水面兴波系统工程布局图

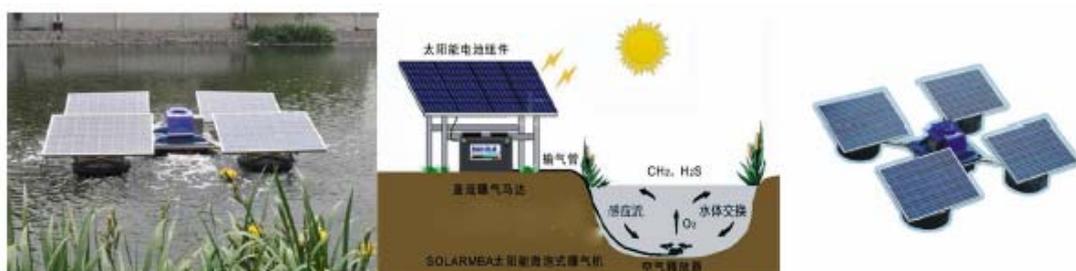


图6-24 水面兴波系统运行现状图

6.4 重庆渝北区双龙湖生态修复工程

6.4.1 项目简介

双龙湖位于渝北区双龙街道城区，集雨面积 1.35 km²，设计总库容为 96.0 万 m³，有效库容 74.0 万 m³，库面 17 hm²，平均水深 4.4m（最深处 13 m，最浅处 1 m），属浅水型城市湖泊，是两路城区环境和风貌的核心组成部分，具有极重要的生态服务功能。但双龙湖集雨面积小，汇水量小，交换水量少，环境容量小，调节能力弱，抗污染能力较低，容易发生富营养化，生态系统较脆弱。

双龙湖作为渝北城区最大的水体，在治理前水体发臭，特别是夏天，水体气味较大，主要污染物为 TN 和 TP，属于 V 类或劣 V 类水质。自各项措施施工完成以来，水中 TN 和 TP 含量大幅度降低。各项污染控制指标比治理前有显著

降低: COD_{Cr} 消减约 61% , $\text{NH}_3\text{-N}$ 消减约 65% , TN 消减约 70% , TP 消减约 89%, 双龙湖水体达到国家规定的《地表水环境质量标准》中IV类水质标准, 在较短时间内基本上实现了双龙湖水体的综合整治目标。



图6-25 双龙湖及周边地形图

为了改善双龙湖的富营养化状况, 采用了湖底生态清淤、复氧措施和底层排水措施等工程措施, 以及边坡护理、一体化浮岛技术、人工湿地技术和水生动物操纵等生态修复技术。

6.4.2 应用技术

(1) 生态护岸改造技术

双龙湖周围现有的临水植物以毛竹、阔叶落叶树木为主。季节更替, 落叶漂浮到水面, 遇风吹后, 会在湖湾形成一层厚厚的膜, 不仅破坏景观, 而且大量落叶在水里腐烂后会成为二次污染源。考虑到强化水土保持功能, 防止面源污染和美化景观, 用固土强根的柳树逐步代替毛竹和阔叶落叶树。双龙湖周边护坡总面积达 5000 m^2 左右。



图6-26 双龙湖岸边逐步栽种的柳树

(2) 生态浮岛技术

根据双龙湖的形态及污染源现状，在双龙湖的湖中心、王家湾提污站、暨华中内湖和个别污染源排污口处分别建设一个可移动一体化浮岛，总面积近 6000 m²。浮岛上种植大漂、水蕹菜等水生植物，可以定期进行打捞，底部挂生物膜和蚌、螺等水生动物，利用水生植物、水生动物、水生微生物 3 大类生物联合作用，可以更加有效地去除湖水中的营养盐，减少水体中的藻类数量，达到净化水体的作用。在其余主要湖湾，沿湖边布设了简易浮床，总面积 4000 m²左右。湖水中的营养盐经过水生植物吸收得到去除，增加了营养盐去除的途径。



图6-27 双龙湖一体化生态浮岛

(3) 水生动物操纵技术

鱼类和蚌、螺等生物具有遏制蓝藻、减轻水体富营养化和净化水质的目的。为了增加浮游生物种群和生物量，提高除藻能力，通过计算，在湖中放养了 80000 尾左右的鲢鱼和鳙鱼以及 50000 只左右的贝壳类动物如河蚌、螺蛳。



图6-28 重庆双龙湖现状图

6.5 云南玉溪抚仙湖人工湿地修复工程

6.5.1 项目简介

抚仙湖位于云南省玉溪市境内，面积 212km²，蓄积水量 189.3 亿 m³，占全省湖泊水资源蓄水总量的 65.7%，平均每年有将近 1 亿 m³ 的富余水量，水质良好，既是滇中地区最大的淡水水源，又是著名的风景旅游胜地。

抚仙湖环湖公路以下的乡村居住人口密集，居民年排放生活污水近百万吨。由于地处湖滨带，这些生活污水未经任何处理便流入抚仙湖，造成对抚仙湖水体的直接污染。同时，湖滨带附近的宾馆、度假村等旅游设施共计 80 余座，年排放污水约 200 万 t，携带有 TN49.4t、TP9.2t，对于抚仙湖的水质保护目标来说仍然是不可忽视的氮、磷污染源。水质监测资料表明，在旅游设施和居民比较集中的地段，湖水已经受到明显的污染，氮、磷含量达到Ⅲ类标准。

抚仙湖几乎所有的天然湖滨湿地都已经被开垦，甚至局部地段的沙梁也被开挖，湖滨带农田土质多为沙质，保水、固肥能力差，所施化肥大部分流失进入抚仙湖形成污染。在抚仙湖西岸，还有围垦湖滩湿地建造鱼塘和水田的现象，这不

仅破坏了天然湖滩湿地的自然净化能力，而且还形成了新的污染源。



图6-29 抚仙湖及周边地形图

6.5.2 应用技术

(1) 人工湿地就地处理技术

为了恢复抚仙湖的滨岸带的生态缓冲功能，应用了复合人工湿地技术，包括窑泥沟和马料河 2 处人工湿地。

1) 抚仙湖窑泥沟人工湿地

抚仙湖窑泥沟人工湿地位于抚仙湖北岸，占地面积 2.2hm^2 ，设计深度处理能力 $1\text{万 m}^3/\text{d}$ ，初级处理（拦污、沉砂）能力为 $5\text{万 m}^3/\text{d}$ ，主要接纳抚仙湖北岸污染最为严重的窑泥沟及与之相邻的农灌沟入湖污水，窑泥沟年入湖水量 442万 m^3 ，来水包括上游澄江县城市生活污水、县城污水处理厂排水、沿途 13 个村庄的生活污水和农田径流形成的混合污水，采用拦污栅—沉淀池—生物氧化塘—潜流湿地—表流湿地的复合型人工湿地工艺流程，该湿地于 2001 年 11 月建成运行，工程吨水建设投资 191 元（不含租地费），吨水处理运行费 0.10 元左右，不使用化学药剂，主要产物可二次利用，并利用原有湖滩地的自然高差实现无能耗自流运行。

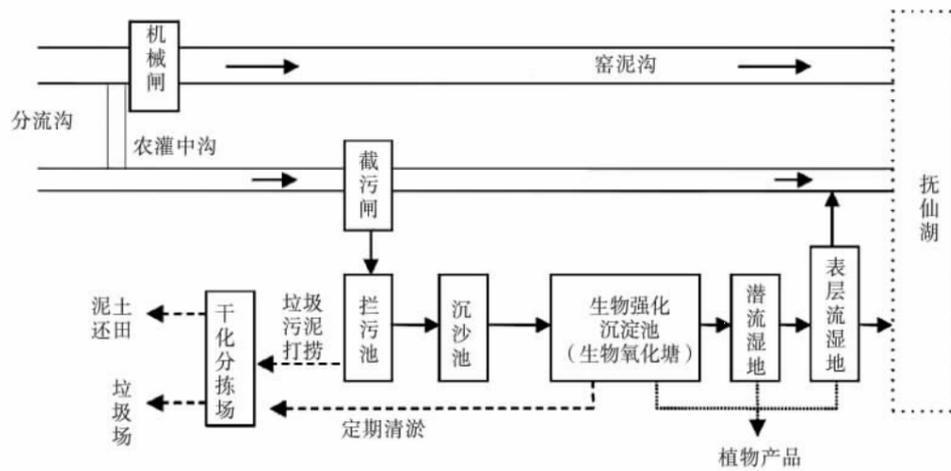


图6-30 抚仙湖窑泥沟复合人工湿地流程图

工程运行结果表明，COD、BOD、SS、TN、TP 的去除率分别为 50%、33%、93%、44%、37%，明显削减了窑泥沟入湖污染负荷。

2) 抚仙湖马料河人工湿地

抚仙湖马料河人工湿地位于抚仙湖北岸，占地面积 1.99hm²，工程投资 333.5 万元（含征地费），设计深度处理能力 1.5~2 万 m³/d，初级净化（拦污、沉砂）能力 5 万 m³/d，主要处理抚仙湖北岸马料河流域的农业面源及村落污水，采用独创的复合型人工湿地自流净化工艺，工艺流程为拦污栅—沉淀池—生物氧化塘—潜流湿地—表流湿地。

运行结果表明，COD、BOD、SS、TN、TP 去除率分别为 42%、6%、88%、60%、54%。

表6-1 抚仙湖人工湿地工艺及实际运行状况

人工湿地名称	水力负荷 (m ³ /m ² ·d)	流量 (m ³ /d)	工艺及实际运行状况
窑泥沟湿地	0.746	7000	拦污栅、氧化沉淀塘、宽型布水潜流、表流湿地；出水 TP、TN 超 V 标准，波动大、碎石床稳定运行约 1a
马料河湿地	0.386	7000	拦污栅、氧化沉淀塘、潜流、方型布水表流湿地；出水达 IV 标准，碎石床稳定运行超过 2a

6.6 无锡蠡湖水环境综合整治工程

6.6.1 项目简介

蠡湖原名五里湖，又名漆湖或小五湖，后因湖面形状如一只葫芦瓢，所以又名蠡湖。蠡湖位于无锡西南，是太湖伸入无锡的内湖，水域面积 8.6km²，东南经十里长广溪连通太湖，以中部横卧湖面长 300 多米的宝界桥为界，分为东蠡湖和西蠡湖。蠡湖早年被实施大面积围湖造田，湖底大量积聚淤泥，水容量减少，降低了水体的自净能力，据相关资料分析，蠡湖湖底淤泥中，总磷、总氮、有机质含量高于太湖其他湖区的数倍，加之接纳入湖河道的大量污水，湖水水质常年劣于 V 类。



图6-31 蠡湖及周边地形图

根据蠡湖污染状况，制定了“清淤、截污、调水、修复生态”的思路，全面实施生态清淤、污水截流、退渔还湖、动力换水、生态修复、湖岸整治和环湖林带建设六大工程。

6.6.2 应用技术

(1) 水生动物生态恢复与生物操纵技术

工程采用先种植挺水植物和浮叶植物吸收湖中的氮、磷，提高水的透明度、透明度；再种植沉水植物过滤、改善水质；同时放养鱼、螺蛳等对水进行生物净化。2003 年至今，无锡市已经在西蠡湖区域种植各种沉水、挺水、浮水植物 500

多万株，沉水植物种子 138kg，投放螺、蚬、蚌等 50 多吨，鲢、鳙鱼苗 16 万尾，修复面积达 98.18 万 m²。根据相关检测数据，西蠡湖区域水质改善明显，生物多样性得到较好恢复。

(2) 生态护岸改造技术

该技术主要以湖岸整治和环湖林带建设工程为主。结合湖岸整治，积极调整农业种植结构，并投资建设环湖生态林带，作为蠡湖的涵养林。2002 年以来，无锡市累积搬迁沿湖企业 289 家、拆迁建筑 35.6 万 m²，住宅 1860 户、拆迁建筑 32.1 万 m²，建设环湖生态林 331.4 万 m²。2004 年以来，蠡湖地区完成了环湖路一侧约 9km 长、142hm² 沿湖绿化带及湖岸整治，完成渤公岛生态公园、渔父岛、蠡湖之光、蠡湖广场、蠡湖公园等景观建设及西蠡湖沿湖岸线山体的亮化。蠡湖逐渐成为江苏省内最大的开放式免费大公园和夜公园。工程的顺利实施，有效控制了农业面源污染、工业废水污染和生活污水污染，其生态效益正在逐步显现。



图6-32 蠡湖现状图

目前，蠡湖水溶解氧和氨氮指数均处于 I 类水平，高锰酸盐指数达到了 III 类水质标准，总氮和总磷指数处于 III 类至 IV 类水平，富营养化指数呈总体下降趋势。

6.7 昆山傀儡湖水环境综合整治工程

6.7.1 项目简介

江苏省昆山市地处苏州市域东南部、上海与苏州之间，傀儡湖是昆山市唯一饮用水源，湖面总面积 673 万 m²，平均需水量 2200 万 m³，承担着市域范围

内 100 万 m^3/d 饮用水的原水供给。昆山市域以沪宁铁路为界，南部为淀泖水系，北部为阳澄水系。傀儡湖西纳上游阳澄湖来水，阳澄湖水质直接影响傀儡湖水源地水质，同时，傀儡湖的周边环境及入湖河道均会对傀儡湖水环境产生影响。傀儡湖主要受到工业污染源污染、农药化肥造成的农业面源污染、畜禽养殖场污染源污染、水产养殖污染等。



图6-33 傀儡湖及周边地形图

6.7.2 应用技术

(1) 水生动物生态恢复与生物操纵技术

利用生物操纵技术进行以水环境治理为目标的湖区生态修复，包括沿岸挺水植物、湖区沉水、浮叶植物的种植，以及贝、螺类底栖动物和滤食性鲢、鳙鱼的放养。通过恢复傀儡湖区的生物多样性促进其健康生态系统的建立，利用水生植物、浮游动物和鱼类的净化功能，削减水体中的营养物质并有效控制有毒藻类水华的爆发，改善原水水质。

(2) 引水生态修复技术

全面实施傀儡湖水源地生态修复与重建工程，包括搬迁沿岸工厂农宅、退窑（塘、网）还湖、拆除堤埂围堰、清除湖底淤泥、修筑还湖沿河大堤、封闭隔断水源地、建造引水箱涵、营造人工湿地、种植防护林带、实行生态养殖等生态修复综合措施。傀儡湖 39 条入湖支流被切断；沿湖建成 18km 长的大堤防护林，种植面积约 8.6 万 m^2 ；累积建成 13km 环湖湿地、水生植物面积超过 13 m^2 ；为

提高傀儡湖进水量，增强傀儡湖北区水体流动性，2004 年投入 2500 万元在阳澄湖与傀儡湖之间建成一条全长 1450m 的箱涵引水渠道。



图6-34 傀儡湖现状

经过湖区清淤、浚深和退窑、退塘、退网环湖工程，傀儡湖面积扩大了 57.7%，需水量提高到 2200 多万 m^3 ，是过去的 2.5 倍。通过傀儡湖水源地全封闭管理，建立湖边人工湿地建设、环湖大堤绿化和抛石护坡四大工程，傀儡湖水质明显得到改善，湖体水质明显优于上游阳澄湖进水口水质，大部分水质指标达到 II~III 类标准。

6.8 案例汇总表

表6-2 案例汇总表

案例名称	对象湖泊特点	应用技术		建设/运行成本	建设时间
重庆园博园龙景湖水环境综合治理工程	河道型水库,上游汇入区面源污染严重;水库水位较深,换水周期长,主要水源补给为降雨径流	面源污染控制类	山地城市特细砂源区面源污染控制技术 复杂地质条件下源区促渗技术 大坡度道路径流路肩带渗滤技术 道侧绿地滞控技术 组合模块式大坡度径流控制滤池系统 微型水景滞存技术 径流入湖强化侧向流生物滤池净化技术	建设面积 15055m ² 建设成本 220-300 元/m ² 运行成本6万/年	2011 年
		水体自净能力恢复类	人工强化静滞水体循环流动技术	服务水域面积 400 m ² 建设成本 12 万元 运行成本主要为电费消耗	
		生态修复类	生态浮岛及生态水草技术	浮床建设成本 200-300 元/m ² 生态草为进口产品,单根价格 160-180 元;运行成本 3 万/年	
重庆互联网产业园山林沟大塘治理工程	周边楼盘开发严重,道路雨水径流污染是主要污染来源	面源污染控制类	梯级雨水前置库强化收集处理技术	容积 600 m ³ ,建设成本为 40-60 万元,折合单价为 670-1000 元/m ³	2012 年
			生物促渗减流、组合模块式生态滤池	技术结合景观绿化,建设成本约为 120-170 元/m ² 。	

案例名称	对象湖泊特点	应用技术		建设/运行成本	建设时间
重庆北部新区八一水库生态修复工程	着重控制水库来水水质,保障进入水库水质稳定的优于IV类	面源污染控制类	来水梯级湿地处理技术	建设面积 2400 m ² , 建设成本 240-450 元, 视坡度及被种类有所浮动	2015 年
		水体自净能力恢复类	人工强化静滞水体循环流动技术、	设备成本 6-10 万, 运行成本主要运行电费	
重庆渝北区双龙湖生态修复工程	周边开发严重, 污染入湖严重, 湖泊生态系统脆弱, 易发藻华	水体自净能力恢复与生态修复类	生态护岸改造技术	/	2003 年
			生态浮岛技术	浮床建设成本 200-300 元/m ²	
			水生动物操纵技术	主要为鱼苗购买和捕捞费用	
云南玉溪抚仙湖人工湿地修复工程	抚仙湖周边居民生活污水直排严重; 天然湿地被破坏, 水土流失现象严重; 新建鱼塘和水田加剧了水质恶化	水体自净能力恢复与生态修复类	人工湿地就地处理技术	/	2003 年
无锡蠡湖水环境综合整治工程	水容量小, 水体自净能力差; 上游来水水质差	水体自净能力恢复与生态修复类	水生动物生态恢复与生物操纵技术、生态护岸改造技术	/	2004 年
昆山傀儡湖水环境综合整治工程	受工业污染、面源污染严重	水体自净能力恢复与生态修复类	水生动物生态恢复与生物操纵技术、引水生态修复技术、	/	

附录 1

常用水生植物适宜水深、最佳水深以及适应基质一览表

植物类型	植物名称	适宜水深范围, cm	建议初始种植密度, m ²	适应生长基质	耐寒情况
挺水	荷花	10-100	1-2 支	泥土	冬季休眠
挺水或湿生	鸢尾	0-35	20-30 芽	泥土、碎石	耐寒性好
挺水或湿生	菖蒲	0-35	35-50 芽	泥土、碎石	冬季休眠
挺水或湿生	香蒲	0-35	10-15 株	泥土、碎石	冬季休眠
挺水	茭白	0-35	10-15 株	泥土	冬季休眠
挺水或湿生	美人蕉	0-20	10-15 株	泥土、碎石	冬季休眠
挺水	再力花	0-50	30-40 芽	泥土、碎石	冬季休眠
挺水或湿生	千屈菜	0-35	10-15 株	泥土	冬季休眠
挺水或湿生	风车草	0-30	40-50 芽	泥土、碎石	耐寒性较好
挺水	梭鱼草	0-30	15-20 芽	泥土	冬季休眠
挺水	纸莎草	0-30	40-50 芽	泥土	冬季休眠
挺水	水葱	0-40	40-50 芽	泥土、碎石	冬季休眠
挺水	慈姑	0-30	10-15 株	泥土	冬季休眠
挺水或湿生	水芋、野芋	0-20	10-15 株	泥土	冬季休眠
湿生	海芋	0-10	2-3 株	泥土	冬季休眠
挺水或湿生	芦苇、花叶芦苇	0-40	20-30 芽	泥土	冬季休眠
挺水或湿生	芦竹、花叶芦竹	0-30	20-30 芽	泥土、碎石	冬季休眠
浮叶	睡莲	20-100	3-4 头	泥土	冬季休眠
浮叶	萍蓬草	20-100	3-4 头	泥土	冬季休眠
浮叶	王莲	30-150	小于 1 株	泥土	保温过冬
浮叶	芡实	30-150	小于 1 株	泥土	冬季休眠
浮叶	荇菜	20-100	15-25 芽	泥土	冬季休眠
浮叶	莼菜	20-100	15-25 芽	泥土	冬季休眠
浮叶	水鳖	5-无限	10-20 单株	水培	耐寒性一般
浮叶	菱角	5-无限	8-10 株	水培	冬季休眠

植物类型	植物名称	适宜水深范围, cm	建议初始种植密度, m ²	适应生长基质	耐寒情况
浮叶	粉绿狐尾藻	5-无限	15-20 株	水培	冬季休眠
浮叶	空心菜	5-无限	15-20 株	水培	冬季死亡
沉水	金鱼藻	30-200	30-40 芽	泥土	
沉水	苦草	30-150	15-25 株	泥土	冬季休眠腐烂
沉水	眼子菜	30-200	30-40 芽	泥土	冬季休眠腐烂
沉水	黑藻	30-200	30-40 芽	泥土	冬季休眠腐烂
沉水	大沮草	30-200	30-40 芽	泥土	耐寒性好, 夏季休眠
沉水	伊乐藻	30-150	30-40 芽	泥土	耐寒性好, 夏季休眠
沉水	狐尾藻	30-200	30-40 芽	泥土	耐寒性较好, 冬季休眠

附录 2

常用植物照片

植物类型	植物名称	照片
挺水	荷花	
挺水或湿生	鸢尾	
挺水或湿生	菖蒲	

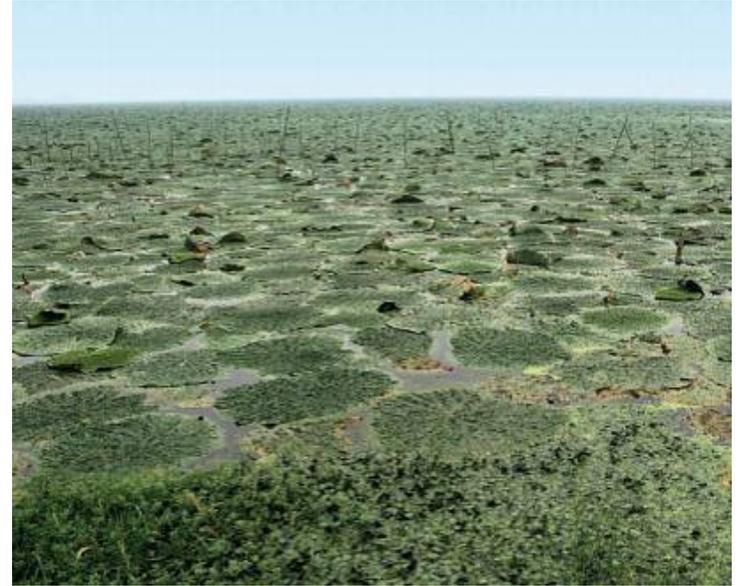
植物类型	植物名称	照片
挺水或湿生	香蒲	
挺水或湿生	茭白	
挺水或湿生	美人蕉	

植物类型	植物名称	照片
挺水	再力花	
挺水或湿生	千屈菜	
挺水或湿生	风车草	

植物类型	植物名称	照片
挺水	梭鱼草	
挺水	纸莎草	
挺水	水葱	

植物类型	植物名称	照片
挺水	慈姑	
挺水或湿生	水芋、野芋	
湿生	海芋	

植物类型	植物名称	照片
挺水或湿生	芦苇、花叶芦苇	
挺水或湿生	芦竹、花叶芦竹	
浮叶	睡莲	

植物类型	植物名称	照片
浮叶	萍蓬草	
浮叶	王莲	
浮叶	芡实	

植物类型	植物名称	照片
浮叶	荇菜	
浮叶	莼菜	
浮叶	水鳖	

植物类型	植物名称	照片
浮叶	菱角	
浮叶	粉绿狐尾藻	
浮叶	空心菜	

植物类型	植物名称	照片
沉水	金鱼藻	
沉水	苦草	
沉水	眼子菜	

植物类型	植物名称	照片
沉水	沮草	
沉水	黑藻	
沉水	伊乐藻	

植物类型	植物名称	照片
沉水	狐尾藻	