



圆明园水系统生态修复

项目位置：海淀区圆明园遗址公园
项目规模：水生态修复区面积40公顷。
竣工时间：2007年至今

9.1 圆明园水生态基本情况

9.1.1 水系现状

圆明园坐落于北京西郊，占地350万m²，现有水面面积约121万m²，由绮春园、长春园和圆明园三个园组成。由于北京地区水资源的严重短缺，城市河湖景观用水极度紧缺，加之北京市地下水位显著下降，圆明园原有的地表、地下水补充水源丧失。圆明园作为“三山五园”的重要节点，为了保证圆明园的生态持续发展，2007年10月起，圆明园开始使用清河再生水作为补给水源，有效解决了水资源需求难题。

表1 圆明园现状水域分布

所属园区	园区内水域	面积m ²
圆明园	福海	281677
	福海南岸河道	6927
	方湖胜境	20439
	九州前湖	8060
	九州后湖	42889
	万方安和	14164
	长春仙馆	4698
	茹古含今	5907
	天然图画内湖	4517
	坦坦荡荡	4408
	曲院风荷	20000

长春园	西长河	20000
	九州周边河道	21149
	北部其他河湖	40000
	北长河	45000
	荷花区	43156
	海岳开襟	69338
	狮子林	30012
	得胜概	58760
	玉玲珑馆	20671
	小有天园	12646
	如园	47263
	方河	5000
	其他河道	5560
绮春园	松风萝月	34938
	鉴碧亭	31945
	凤麟洲	42676
	其他河道	7853
	小南园	60000
	101中学	12448

再生水补给圆明园后，水系基本呈现自西北向东南方向流动，由进水口紫碧山房向南分为两股水流，经福海，最后汇入圆明园水系最低处的长春园，基本无外排（图1）。

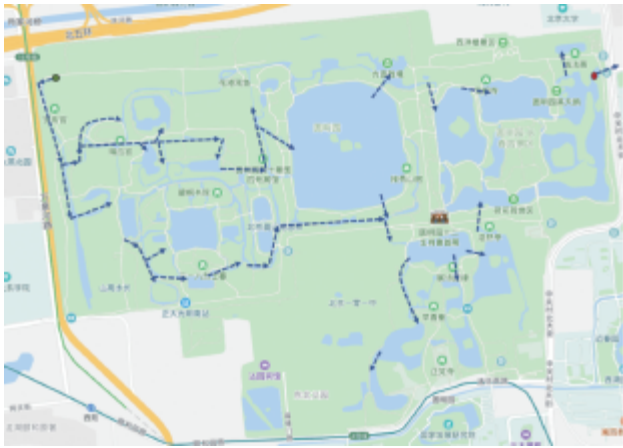


图1 圆明园现状水系流向图



图2 圆明园生态修复区分布示意图

9.1.2 水生态修复情况

近年来圆明园周边地区城市化建设加快，南北两侧的万泉河及小清河河道都经过硬化处理，圆明园地区的潜土层得不到有效补充。尤其1999年以后，北京连续干旱，缺水成为圆明园最大的水环境问题。为保证圆明园水资源的可持续利用，2007年底，圆明园开始使用清河再生水厂的再生水作为景观用水，有效解决了圆明园的用水难题。但再生水中由于氮、磷含量较高，夏季高温极易引发水华爆发，使得圆明园河湖水环境面临巨大风险。尤其对于再生水作为唯一景观用水水源的圆明园而言，再生水资源的安全利用与水环境保护治理是圆明园生态修复工作中的重要工作。主要生态修复项目及其进程如下：

（1）2007年，实施了“应用食藻虫控藻引导圆明园水生态修复”项目。利用食藻虫吞噬藻类，并建植沉水植物，沉水植物净化水体的同时形成植物蛋白，鱼、虾、螺、贝等水生动物通过摄食把植物蛋白转变为动物蛋白，通过捕捞将进入水体的营养物转移上岸，达到净化水体的目的。项目先后完成了圆明园凤麟洲、玉玲珑馆水域生态环境改善，水体透明度达1.5~2m，主要水质指标（总氮、总磷、铵氮、化学需氧量）达到地表水Ⅲ~Ⅳ类，终年无水华发生。

（2）2008年，在鉴碧亭、方河等水域扩大生态修复范围，取得良好效果。通过生态修复项目的实施，初步建立了一套适于封闭水体生态修复技术方案。

（3）2009年，相继在松风萝月、如园继续实施了生

态修复项目。

总体来说，圆明园管理处水生态修复方法采用沉水植物型表流湿地生态修复措施，修复面积约占总水面面积的三分之一（分布见图2）。

9.1.3 运行管理现状

圆明园水体水生态景观维护，以水生植物的养护为主，定期对生长过旺的沉水植物、挺水植物进行割控清捞。沉水植物生长期，大约每20天割控清捞1次，保持0.5~1m深水面，水草收割时不得连根拔起；挺水植物（主要为荷花）每年在入冬前收割1次，将水面以上全部进行收割。随时打捞水面漂浮物。

除此以外，还采取以下措施：（1）严格管制污染源，加强河湖水体管理。整修驳岸边坡，加强生物防控，临水处建立植被带，拦截地表径流，阻止岸上有机物随雨水入湖；杜绝施用化肥，全部改用微生物有机肥，对岸边植物的病虫害治理，全部使用低毒低残留农药；改造排污设施，杜绝污水直排入湖。（2）以船只扰动等物理措施，增强水体循环。（3）加强水环境日常巡查与管理。每天巡查全园水环境，对各水域水质情况、水面保洁、水生动植物生长情况进行检查，特别是6~10月高温季节里，严密监控水华的发生情况。

北京市圆明园管理处历经十多年摸索，成功形成了一套以沉水植物为主的再生水补给缓滞水体水环境生态维护技术模式，为我市再生水利用与水生态环境维护提供了有

益借鉴。

9.2 水环境生态维护方式

9.2.1 水系连通

目前，圆明园水系由清河再生水厂提供景观用水，补水水质满足北京市地标B标准（氨氮、总磷、COD、BOD₅满足地表水Ⅳ，总氮小于15mg/L），年再生水补给约为900万m³。

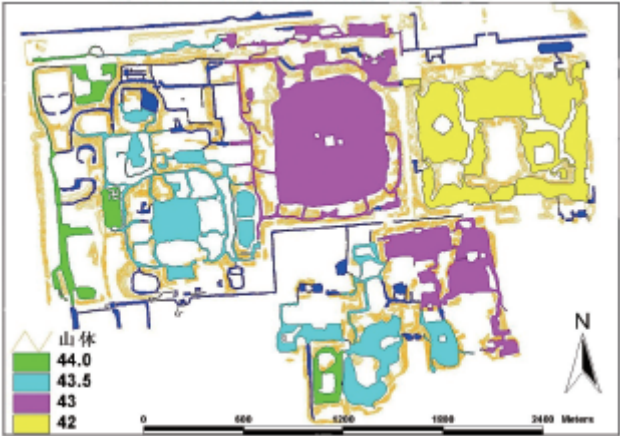


图3 圆明园水系标高

2017年9月20日，现场测试圆明园水体流速及断面面积，计算出圆明园水体流量，水流路径及流量，如图4所示。

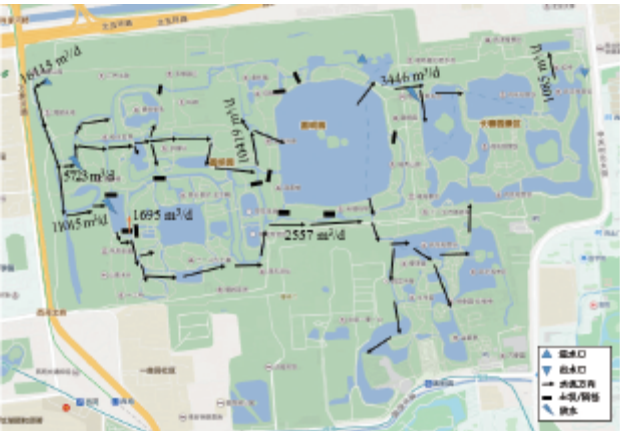


图4 圆明园水流方向及流量示意图

进水口紫碧山房，所测得的水体流量约为16115 m³/d，大部分水量通过跌水流至万方安和，跌水处流量约为11015m³/d，之后进入福海和廓然大公的水量总和约为10419m³/d，这其中大部分水量应该进入了福海，从福海

流入长春园区域的水量约为3446m³/d，还有一部分水从福海流入绮春园，之后再由绮春园进入长春园，但目前这部分水量相对较小。长春园为圆明园水系最低处，水流汇集于此，基本无外排。整个园区水系能够形成一个较为完善的连通体系，未出现大面积“死水区”。

9.2.2 生态修复措施

圆明园水域面积较广，主要生态修复措施是构建了以沉水植物为主、鱼类为辅的水生生态系统，利用食物链维持生态平衡，增强水环境自净能力，保证水域水质提升与维护。主要措施包括为：一是种植以苦草为主、轮叶黑藻为辅的水生植物，覆盖度约为40%；二是控制草食性鱼类的繁殖，适当投放黑鱼等肉食性鱼类。通过沉水植物种植，抑制水华藻类生长，同时通过水生植物的收割及水体自然净化、削减营养物质。

表2 圆明园生态修复区分布

区域	面积（m ² ）	面积小计（m ² ）
西长河	20000	
万方安和	14164	
九州前湖	8060	
九州后湖	42889	
九州周边河道	21149	
长春仙馆	4698	
圆明园	160695	
茹古含今	5907	
天然图画内湖	4517	
坦坦荡荡	4408	
曲院风荷	20000	
福海南岸河道	6927	
廓然大公	4276	
廓然大公西河道	3700	
如园	47263	
长春园	72934	
方河	5000	
玉玲珑馆	20671	
松风萝月	34938	
绮春园	109559	
鉴碧亭	31945	
凤麟洲	42676	

圆明园的生态修复机理为以沉水植物抑制水华藻类生长，以黑鱼控制草食性鱼类破坏，并通过人工收割控制水生植物过量生长，环环相扣。基于自平衡的生态系统，水域水质由进口处的TN11.3mg/l、TP0.21mg/l逐渐削减为出口处的TN0.72mg/l、TP0.06mg/l，实现了再生水由IV类水质向III类提升的完成，依靠湖区自然水生态系统的良性循环实现了再生水的水质净化与富营养化控制，是“用生态的办法解决生态的问题”的有力实践。已完成修复的水域基本达到预期治理目标，水质主要指标达到地表水III~IV类。

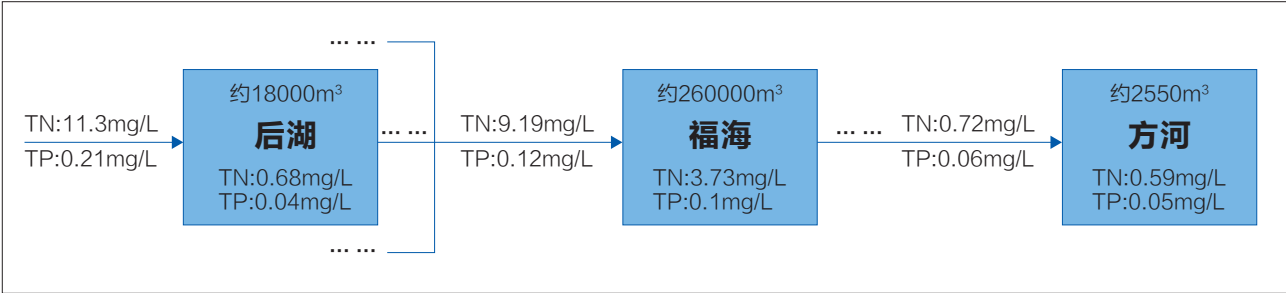


图5 不同氮磷浓度进入各水域后情况分析

9.2.3 运行管控措施

园内不同水体的水生植物在不同季节优势种群也不同。每年4月至5月间，以菹草为主；6月至10月间，观赏区以荷花为主，生态修复区以苦草、黑藻、眼子菜为主，未修复区以野生狐尾藻、大茨藻为主，岸边浅水区分布芦苇、千屈菜等挺水植物。

圆明园水生植物量巨大。圆明园补水水质及水深非常适合沉水植物生长，沉水植物在改善水质的同时，其巨大的生物量也对园区水生态管理带来负担，据统计，沉水植物在生长旺盛期每天可增长4~6cm，园区每年沉水植物的生长量约达湿重2400吨。

圆明园管理处对水生态维护形成了常态化管理制度。针对圆明园水生态特点，在不断摸索改进中，圆明园管理处制定了一套常态化管理制度。通过招投标确定水生态维护单位，要求日常随时打捞漂浮物，并且要求每年4月至10月，根据沉水植物的生长情况，在沉水植物即将出露水面时开始割除，每次仅割除一半高度，平均每月收割水草1至2次，确保水草不出露水面。水下保留的沉水植物可为鱼类生活和繁殖保留栖息环境，并可维持水质净化功能。

沉水植物收割管控主要有以下三方面优势：

一是适度收割有利于维护生态平衡。沉水植物快速生长并出露水面后，占据上层生态位，造成遮光效应，抑制了下层植物的光合作用，影响荷花、苦草等夏季水生植物的生长；同时还会造成水中缺氧，容易引起鱼类等水生动



图6 圆明园日常管护现状

物死亡；过量的沉水植物不仅占据了其它水生动植物生长空间，甚至影响鸟类的觅食（已观测到水禽69种），造成生态链破坏。另外，园区水生植物种植以观赏性的荷花、睡莲和促进水生态修复的苦草等为主，严格控制草食性鱼类繁殖，因此主要通过人工收割管控水草。

二是适度收割有利于移除污染物，避免二次污染。菹草等沉水植物均有各自生长周期，4~5月为菹草生长旺盛期，若不收割，将逐渐死亡腐烂，造成水体二次污染。圆明园水深和水质适宜沉水植物生长，每月水草生长量约达400吨湿重，年水草生长量约达2400吨，若不及时收割管控，不仅难以持续改善水质，还会造成光合作用新生成的有机污染释放。

三是适度收割有利于维持清新明亮的公园水生态景观

观。圆明园目前良好的水生态景观源于其精细化的管控维护，保洁人员的不间断打捞和收割维持了沉水植物的适量生态空间，有效抑制了水华藻类的暴发，同时又为鱼类及其它生物提供了必要生活空间，保障了水体景观的清洁、水体清澈、水生动物自由游弋。此外，目前柳絮飞扬，与出露水面的沉水植物交织也将严重影响水生态景观。

9.3 圆明园水环境维护效果

9.3.1 修复措施水华防控效果显著

对比修复区和未修复区，修复区内叶绿素a含量均小于6mg/m³，显著低于未修复区的50mg/m³浓度，相应也抑制了水体中COD的增长。修复区内水体清澈见底，透明度可达1.2m以上，与之相比，无修复区水体浑浊，感官效果差，效果对比见图7所示。



图7 圆明园水生态景观维护效果及对比

9.3.2 沿程氮磷营养物显著削减

从圆明园西部入水口（紫碧山房）到东部水系末端（长春园），氨氮、总氮、总磷、COD的去除效果见图36所示。其中氨氮、总氮、总磷浓度在末端去除率分别达到19.58%、93.63%、73.17%；COD浓度在福海区域上升至38mg/L，主要由于福海游船相对较多，且未实施生态修复措施，藻类繁殖，COD浓度升高。

9.3.3 形成良好的水生态景观

园内水生动物约120种，水禽约30种，生态修复区水体清澈见底，透明度超过1.2m，水生态景观良好。水生生物品种多样，其中包括挺水植物：荷花、芦苇、鸢尾、慈姑、千屈菜等；沉水植物：苦草、轮叶黑藻、小茨藻、龙须眼子菜、金鱼藻等；黑鱼、青虾、青螺等水生动物在修复区也有投放。

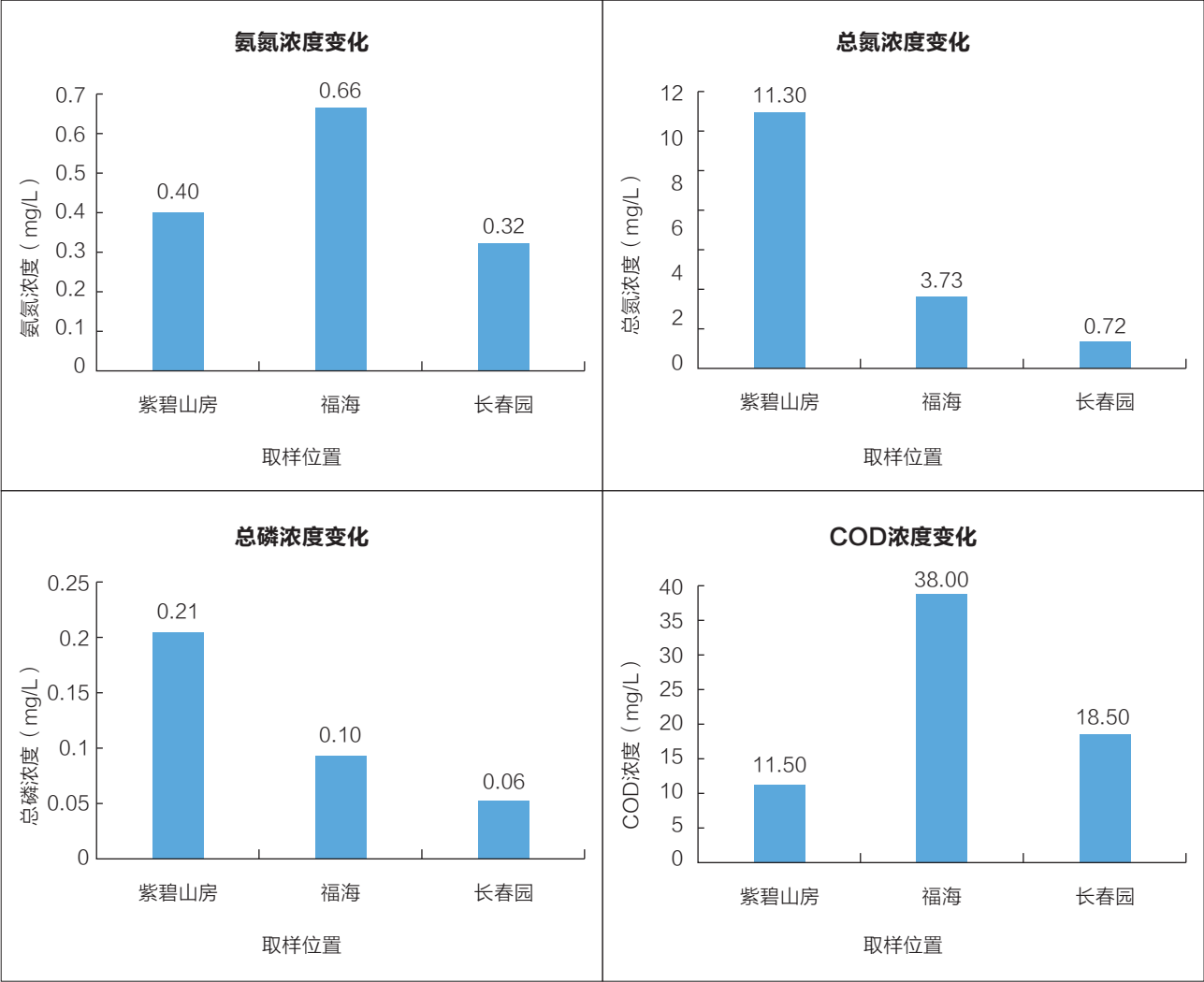


图8 圆明园水质改善效果



图9 圆明园水生态景观

9.4 主要经验总结

（1）圆明园通过生物科学配置，构建了以沉水植物为主、鱼类为辅的水生生态系统，利用食物链维持生态平衡，增强水环境自净能力，保证水域水质提升与维护。

（2）圆明园水生态系统中高效利用并发挥了沉水植物的水质净化作用，使其通过化感作用抑制藻类、控制富营养化，改善水体感官指标，并同化吸收氮磷。

圆明园主要种植的沉水植物包括水鳖科的苦草、黑藻、伊乐藻和眼子菜科的光叶眼子菜等，均具有化感抑藻效应，能够显著抑制藻类生长，提高透明度、营造了清澈见底的水景观。沉水植物自身对N、P的吸收能力相对有限，但沉水植物能够为微生物和悬浮物提供巨大的表面附着载体，通过微生物促进了硝化反硝化作用、提高N的削减，通过悬浮物的吸附、增强对P的去除，再通过对沉水植物的定期收割，可实现对水域氮、磷的直接移除。

（3）定期收割沉水植物对水质维护有重要作用。研究和实践证明沉水植物的死亡腐烂会对水质造成破坏，沉水植物在生长阶段的定期收割一方面可以促进沉水植物再生长，吸收更多的氮磷，将氮磷以植物体的形式从水中提取出，另一方面可以防止沉水植物自然死亡腐烂造成水质二次污染，从而达到控制水体富营养化的目的。

（4）精细化管理维护对水生态系统及其水质净化效果保持具有重要作用。圆明园管理处建立制度、系统开展水生植物选配（苦草为主）、鱼类放养（草鱼控草，黑鱼控草鱼）、水草定期清捞（控草）等一系列系统性措施，以精细化的水环境管理与维护成功维护了水生态稳定，保持了水体生态环境的优良水质和景观效果。