

双碳环境下水利行业低碳试点工作的探索

——以南水北调团城湖调节池园区气候友好型区域建设为例

周爽英 宋焕芝 张倩 刘阳 赵梦杰

北京市水利工程管理中心 北京 100195

摘要: 在“碳达峰、碳中和”战略背景下,水利行业亟需探索低碳化发展路径。本文以南水北调团城湖调节池园区为例,研究水利工程低碳试点建设的主要途径与实施策略。通过分析调节池园区的碳汇(如水体植被固碳、沉积物封存)与碳源(如泵站能耗、电力排放),提出气候友好型园区的优化措施,包括低碳能源系统的构建、气候友好型建设路径的探索等。量化园区低碳改造的减排潜力,并总结可推广的“水-能-碳”协同管理模式,为水利行业落实“双碳”目标提供实践参考。

关键词: 碳达峰碳中和;水利工程;低碳试点;调节池;气候友好型园区

在全球气候变化背景下,人类活动对自然环境的改造日益加剧,气候变暖已成为最严峻的挑战之一。作为温室效应的主要成因,CO₂等温室气体的排放控制已成为全球共识。^[1]2020年9月,中国向世界作出“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”的庄严承诺,彰显了大国担当。

水利行业作为国民经济的重要基础设施,在实现“双碳”目标中肩负着特殊使命。其在防洪减灾、供水灌溉、生态保护等领域发挥着不可替代的作用,同时也面临着独特的碳排放挑战。南水北调工程作为国家战略基础性基础设施,其低碳化转型具有重要的示范意义。

本文以南水北调团城湖调节池园区气候友好型区域建设为例,贯彻落实《北京市“十四五”时期低碳试点工作方案》等文件精神,立足南水北调团城湖调节池园区功能定位,积极推进区域应对极端天气和“双碳”目标实施工作,着力构建气候适应型基础设施体系,提升园区应对极端天气能力,打造调节池园区气候友好型区域试点。通过本文论述,以期水利行业从业者及管理者开拓思路,在碳达峰、碳中和进程中贡献力量,促进水利行业在社会低碳发展道路上取得新的成就。

一、团城湖调节池园区碳足迹追寻

“碳足迹”(Carbon Footprint)是从生命周期的角度出发,分析全生命周期或者与活动直接和间接相关的碳

排放过程^[2]。碳足迹分析方法从生命周期的视角分析碳排放的整个过程,可以深度分析碳排放的本质过程,从源头上指定科学合理的碳减排计划。这就涉及碳源与碳汇两个主要的概念:

(一)碳排放源解析

碳源(Carbon Source)是指自然界中向大气释放碳的母体,是向大气释放CO₂的过程、活动和机制,既有来自自然界,也来自人类生产和生活过程。水利工程在温室气体排放主要可分为直接排放、间接排放和隐含碳三大类。

直接排放主要来源于工程运营过程中的现场排放,包括水体甲烷(CH₄)释放和柴油发电机备用电源的燃烧排放。其中,水库、调节池等静水环境在厌氧条件下会促进有机质分解,产生CH₄,其全球增温潜势(GWP)是CO₂的28-36倍,成为水利工程重要的直接排放源。^[3]此外,柴油发电机作为应急电源,在运行时会直接排放CO₂、氮氧化物(NO_x)等气体,尤其在电网不稳定或检修期间贡献显著排放量。

间接排放则主要来自外购电力消耗,尤其是泵站和监控系统的长期运行依赖电网供电。以北京电网为例,其2024年碳排放因子为0.604kg CO₂/kWh,这意味着园区每消耗1度电即间接产生0.604kg CO₂排放。泵站作为水利工程的核心耗电单元,可占总电力消耗的60%以上,是间接排放的控制重点。^[4]

隐含碳涉及建筑材料全生命周期的碳排放,包括混凝土护岸、闸门等设施的原材料生产、运输及施工过程。

作者简介: 周爽英(1976.12)汉族,女,浙江金华人,高级工程师,本科学历,研究方向:水利工程能源管理。

这类碳排放虽发生在工程建设和供应链上游，但作为“锁定碳”直接影响项目的全周期碳足迹。

综上，水利工程的碳减排需统筹管控直接排放（如优化水体氧环境减少CH₄）、降低间接排放（推广光伏替代电网供电）、减少隐含碳（采用低碳建材和装配式施工），形成多路径协同的降碳体系。

（二）园区碳汇评估

碳汇（Carbon Sink）是指自然界中碳的寄载体。碳汇主要指绿色植物吸收并储存CO₂储能力，增加碳汇主要采用固碳技术，固碳分为生物固碳和物理固碳。生物固碳是利用植物光合作用，通过控制碳通量以提供生态系统的碳吸收和碳储存能力，是固定大气中CO₂最便宜且副作用最少得方法。物理固碳是将CO₂长期储存在开采过的油气井、煤层和深海里。

1. 水域面积的固碳能力

团城湖调节池工程是北京市南水北调配套工程的重要组成部分，是保证城市供水安全，充分、可靠利用南水北调来水的关键工程，调节池连接密云、南水北调两大水源，工程的主要任务是供水和调蓄，总占地面积67万m²，其中水面面积33万m²，绿化、道路、广场、管理设施等占地面积34万m²。调节池调蓄容积127万m³，总容积162万m³。

水域（如湖泊、水库、湿地、河流等）在全球碳循环中扮演着重要角色，既能排放温室气体（如CO₂、CH₄），也能通过生物固碳和沉积封存形成碳汇。IPCC（政府间气候变化专门委员会）在2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands（《2006年IPCC国家温室气体清单指南补充文件：湿地（2013年）》）和2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories（《2006年IPCC国家温室气体清单指南2019年修订版》）中提供了系统的测算方法。水域碳汇能力主要来自以下两个过程：

1.1 植物光合固碳（短期碳汇）

沉水植物、浮叶植物、挺水植物（如芦苇、香蒲）通过光合作用吸收CO₂，并将其转化为有机碳。

固碳速率：

温带淡水湿地：1-3吨碳/公顷·年

热带红树林：5-12吨碳/公顷·年（IPCC 2019）

1.2 沉积物长期封存（长期碳汇）

死亡的植物、藻类、有机碎屑沉入水底，在缺氧环

境下缓慢分解，部分碳被永久埋藏。

沉积速率：

浅水湖泊：0.5-2吨碳/公顷·年

深水水库：1-3吨碳/公顷·年（IPCC 2013）

1.3 典型水域碳汇能力对比

水域类型	年固碳量 (吨碳/公顷·年)	主要碳汇机制
温带湖泊	1-3	沉水植物+底泥沉积
热带红树林	5-12	高生产力植被+快速沉积
人工湿地	2-6	芦苇/香蒲吸收+人工调控沉积
深水水库	0.5-2	藻类沉降+底层缺氧封存

（数据来源：IPCC 2013 湿地指南+2019 修订版）

团城湖调节池水域面积33公顷，按温带浅水湖泊/调节1.5吨碳/公顷·年（取中间值）取值，总固碳量：

$$[33 \text{ 公顷} \times 1.5 \text{ 吨碳/公顷} \cdot \text{年}] = \boxed{49.5 \text{ 吨碳/年}}$$

二、气候友好型建设路径与具体措施

（一）低碳能源系统构建

1. 可再生能源，太阳能光伏项目

认真贯彻落实国务院《2030年前碳达峰行动方案的通知》要求，积极推进园区新型基础设施用能结构优化工作。通过创新应用“光伏+储能”等新型能源供应模式，着力提升能源利用效率。团城湖调节池园区内，重点实施环湖路光伏照明系统建设，采用智能化离网逆控一体机系统，实现日间光伏直供照明与蓄电池储能、夜间蓄电池优先供电的自动切换运行模式，并在电力不足时智能接入市电补充。该工程主要保障环湖路路灯及巡视照明用电需求，经测算年均可实现节约4万千瓦时，有效降低了园区碳排放强度，为水利工程绿色低碳运行提供了示范案例。

2. 清洁能源，节能增效减排

根据北京市环境保护局和北京市质量技术监督局联合发布的《锅炉大气污染物排放标准》DB11/139—2015氮氧化物排放要求，对原有2台排放不符合北京市环保要求的锅炉进行改造，改造后氮氧化物小于30毫克/立方米。

同时，完成团城湖调节池水面作业船只、路面清洁车、绿化割草机等能源改造；广泛动员职工绿色出行，园区内工作用车采用电动车、自行车代替燃油车。

3. 主动购买绿电，实施零碳排放

积极响应公共机构绿色低碳转型要求，按照管理处

25年1月份签署《北京市电力零售市场购售电合同》约定，主动购买绿色电力。中国现在采用区域电网基准线排放因子（逐年更新），绿色电力证书（GEC），购买后可声明碳排放因子为0，所以调节池区域因采用绿电供电，每年可减排CO₂数百吨。

（二）资源循环体系

1. 绿化废弃物循环利用

将修剪下来园林废弃物，根据剪枝的大小和材质的不同，一部分经粉碎发酵，作为绿化有机肥料，另外作为防尘保墒、固土节水护坡、制作汀步及景观小品等，实现年产约300t的绿化废弃物，全部资源化生态循环利用。

2. 水资源循环利用

团城湖调节池区域内使用的办公、生活用水设备、器具均为节水型，用水计量器具已全部采取远传水表方式进行管理。注重非常规水源利用，如直饮机产生的尾水回用于日常保洁，锅炉冷凝水回用于绿化。全方位进行节水、惜水、爱水行动。

多措并举推进园区绿化节水工作。在植物配置方面，优选麦冬草、结缕草等节水耐旱型植物品种，从源头上降低绿化用水需求。灌溉方面科学采用微喷带、滴灌管等高效节水灌溉设施，实现精准定点灌溉。同时，积极推进智慧化灌溉系统，在重点区域安装土壤气象监测站，通过加装无线网关和电磁阀接收器等智能化设备，构建基于物联网技术的智能灌溉控制系统。

（三）区域气候适应性体系

调节池至2024年底，绿化面积29万平方米，乔木2万余株，灌木9万余株，草坪5万平方米，绿化覆盖率100%，水域面积33万m²，广阔的水域面积与丰富的植被为调节池区域带来应对和适应极端天气的影响，减少脆弱性，提升恢复力。具体情况如下：

1. 丰富生物多样性

贯彻生态保护理念，采取系统性措施完善园区生态系统建设。一是着力构建完整生态链，通过科学配置食源植物，营造多样化栖息环境，满足野生动物觅食、栖息和繁殖需求，逐步形成稳定的食物网络；二是创新生态设施建设，利用绿化废弃物资源化处理产物，科学设置人工鸟巢、本杰土堆等生态设施，有效提升生物多样性；三是科学划定生态保育区，实施分区管控，最大限度减少人为干扰；四是推进有机废弃物循环利用，对枯枝落叶等易降解材料进行规范堆肥处理，所得有机质用于土壤改良，促进植被健康生长。通过上述措施，园区

逐步形成了结构完整、功能完善、自我调节能力强的生态系统，生态金字塔各营养级生物种类和数量持续增加，调节池现有植物种类170余种，鸟类39种，鱼类36种，生态系统稳定性显著提升。

2. 生态保护与修复

管理处在园区绿化工作中，坚持生态优先原则，科学筛选“乡土、长寿、抗逆、食源”等适生树种，通过乔灌草藤立体配置，优化植物群落结构。采取林间透光疏伐等技术手段，逐步构建混交、复层、异龄的稳定植物群落体系，提升生态系统多样性。在病虫害防治方面，优先采用物理防治和生物防治等绿色防控手段，最大限度减少化学药剂使用。通过系统性生态修复措施，着力打造结构稳定、功能完善的园区生态系统。

3. 韧性基础设施建设

贯彻落实海绵城市建设理念，科学推进调节池区域雨水资源化利用工程。通过系统性土地集约利用，统筹建设雨水集蓄设施体系：一是构建鱼鳞坑、植草沟、下沉式绿地等生态设施，增强绿地雨水涵养与消纳功能；二是改造提升雨水收集口设施，配套沉淀过滤系统实现雨水回收利用。同时，创新开展海绵园区建设实践，在调节池周边道路等重点区域，综合运用“渗、滞、蓄、用”等技术措施，全面提升园区雨水径流控制与资源化利用水平，着力打造具有示范意义的水弹性园区。

根据IPCC湿地碳汇测算方法和中国林业碳汇计量标准，调节池因为绿化数量，年固碳量计算如下（参考《中国林业碳汇方法学》）：

乔木固碳——阔叶乔木（如柳树、杨树）：5-10 kg 碳/株·年；

灌木固碳——低矮灌木如冬青、黄杨：0.5-2 kg 碳/株·年；

草坪固碳——年固碳量（冷季型草坪草）：0.5-1.5 吨碳/公顷·年。

（四）协同管理创新和宣传科普体系

1. 碳普惠机制的设计

碳普惠通过激励大家小规模低碳行为，量化其减排贡献并赋予经济价值的机制。其核心目标：

行为引导：推动日常生活场景（如交通、消费、能源使用）的低碳转型；

公平性：让非控排主体（如个人、家庭）参与碳市场；

可持续性：建立“减排量-收益-再减排”的正向循环。

2. 科普宣传基地

依托爱国主义教育、水情教育基地及科普教育基地平台，加大节水节能宣传教育工作，2024年对外接待各类参观人员约1万人。管理处多次开展专题培训、讲座

节能能效宣传活动，加强宣传教育力度，突出宣传亮点。

三、能效强度与减碳效益

团城湖调节池工程是北京市南水北调配套工程的重要组成部分，调水是其主营业务，2023年6月团城湖调节池至第九水厂输水工程（二期）开始运行，单位调水量能耗强度如下：

	2022年	2023年	2024年	备注
年用电量 (MWh)	817.445	1102.976	1114.812	
年度CO2排放量 (吨)	493.737	666.198	673.346	排放因子 0.604tCO ₂ /MWh
年度综合能耗 (吨标准煤tce)	1004.640	1355.558	1370.104	参考折标准煤系数 0.1229kgce/kwh
年度调水量 (万m ³)	857.96	13705.64	33122.97	
单位调水量能耗 (千克标准煤/m ³)	0.1171	0.0099	0.0041	
单位调水量CO2排放量 (千克CO ₂ /m ³)	0.0575	0.0049	0.0020	

四、结论与展望

团城湖调节池工程通过“光伏+泵站+湿地碳汇”的协同设计，证明了水利工程完全可以从传统的高耗能设施转变为净零碳甚至负碳系统。未来水利工程应全面融入“双碳”战略，将碳排放管理贯穿规划、建设、运维全生命周期。水利工程的碳汇潜力（如湿地固碳、植被吸收）应使其从“成本中心”转变为“价值创造节点”。水利工程水域管理和热岛缓解措施，凸显了水利工程在应对极端气候中的关键作用。未来可构建“数字孪生+气候预测”的智慧水利系统，通过实时监测水文、气象及碳排放数据，实现精准调度。

团城湖调节池园区气候友好型区域试点为水利行业指明了“绿色化、智慧化、低碳化”的转型路径。面对

气候变化挑战，未来水利工程必须超越单一功能，成为支撑生态安全与低碳发展的系统性基础设施。

参考文献

- [1] 吴兑：《温室气体与温室效应》，气象出版社，2003年版，第20页。
- [2] 王微，林剑艺，崔胜辉，吝涛：《碳足迹分析方法研究综述》，《环境科学与技术》2010年第7期。
- [3] 《2019年湿地补充指南》（2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories）第七章；世界资源研究所（WRI）《温室气体核算体系》（GHG Protocol，2023）第2.3节
- [4] 《中国水利统计年鉴2021》（水利部编）第四章