

# 一池碧水将重现彩云之南

## 水专项助力滇池水质企稳向好



被誉为“高原明珠”的滇池，是云贵高原上最大的湖泊，面积300多平方公里，是我国第六大淡水湖。曾经风光秀丽，景色迷人的“五百里滇池”，从上世纪中期开始，逐渐从可以淘米洗菜演变成几乎“鱼虾绝代”，成为了当地居民最大的心结。让滇池恢复昔日的美丽容颜，不仅是国家和当地政府的目標，也是当地民众乃至全国人民的一大心愿。

事实上，经过多年持续不懈的努力，滇池水质已有所改善，外源污染已得到一定控制，但其富营养化状态尚未得到根本性扭转。滇池生态系统依然受损严重，水生植物面积萎缩，周年性蓝藻水华暴发，水体透

明度较低，沉积物氮磷污染严重且释放量与释放风险较大，水污染防治形势仍不容乐观。

如何进一步推进滇池治理，持续改善滇池水质是“十二五”滇池水污染防治需要解决的重要问题。研究表明，伴随外源入湖污染负荷积累，湖泊内部形成了主要来自沉积物释放和藻类等生物代谢产生的负荷，是与外源负荷相对应的内源负荷，即内负荷。因此，湖泊富营养化治理不仅需要重视削减外源负荷，同时也需要加强内负荷的控制。

基于此，水专项“滇池流域水环境综合整治与水体修复技术及

工程示范项目”立足滇池全湖，设立了“滇池水体内负荷控制与水质综合改善技术研究及工程示范”课题，针对滇池内负荷持续增加，生态风险较大等问题，研究内负荷特征及其对水体污染的影响，确定内负荷对水污染的贡献，以藻源和泥源内负荷为重点，突破内负荷控制与水质改善关键技术，提出内负荷综合控制技术方案；研发和集成内负荷控制与水质改善综合技术，选择滇池外海和草海典型区域，开展内负荷控制工程示范，支撑滇池治理六大工程之一的内源污染控制工程，控制滇池内负荷和改善水质。

## 开拓治理新思路 创新研发新技术

伴随外源治理的逐步推进，内负荷控制已被认为是滇池水污染及富营养化治理的重点之一。水专项针对滇池蓝藻常年生物量大、营养物浓度高、风浪大、藻源和泥源内负荷对水污染贡献大等关键问

题，重点考虑高效消浪、挡藻、除藻、控藻抑藻、防止底泥悬浮并削减泥源内负荷，进而增加水体透明度，恢复湖泊生态系统等关键技术难点。课题组研发集成了包括大型富营养化湖泊重点区域水华蓝藻

快速削减和生态修复技术；高效抑藻、减污立体生态空间构建技术；以及大水域高效消浪滞藻与减污漂浮植物控养等技术在内的滇池内负荷综合控制成套技术，并获得多项专利。

## 深入研究内负荷 转变湖泊治理重点

针对富营养化湖泊的治理，外源污染控制曾经一直是首要任务。但伴随外源污染初步得到控制，来自湖泊内部的污染负荷，即内负荷控制逐渐成为治理的重点。据了解，湖泊内负荷是外源长期输入及湖泊富营养化发展的结果，在外源污染逐步得到控制的情况下，内源污染物的累积、释放和转化过程将成为制约富营养化湖泊水质进一步改善和防止蓝藻水华暴发的重要因素。

课题组研究认为，受湖泊沉积物氮磷累积、藻类增殖、泥-藻互动及水环境条件变化等因素影响，由沉积物-水-生物界面内循环过程产生，以溶解态生物有效性形式存在，并对藻类水华产生直接影响的湖泊水体内源污染净增量，即可被称为湖泊内负荷，主要包括藻源性内负荷和泥源性内负荷两部分。对于富营养化较严重的湖泊，与外源污染负荷相对应，内负荷也是驱动湖泊水质下降和水生态系统退化的重要因素。湖泊内负荷的产生主要来自两方面：一是沉积物，严重富营养化湖泊沉积物释放氮磷等是影响水质的重要因素，特别是在外源逐渐得到控制的情况下，来自于沉积物的内负荷对湖泊水质的影响日益受到关注；二是浮游藻类，特别是藻类水华暴发期间，大量藻类代谢及死亡可向水体释放相当数量的氮磷等营养盐，与外源输入的营养盐类似，可为藻类水华发生和持续提供营养条件。

湖泊富营养化及藻类水华形成机制主要与水-陆、水-气和沉积物-水三大界面强烈的物质交换和环境

条件变化密切相关。研究表明，水-陆界面有机氮入湖污染负荷贡献可达总氮入湖负荷的30%~50%，而有机磷入湖负荷可达总磷入湖负荷的15%~70%；水-气界面有机磷入湖污染负荷贡献可达干湿沉降总氮、总磷入湖负荷量的20%~40%；水-沉积物界面有机磷入湖负荷可达其总氮和总磷入湖负荷的30%~40%以上。课题组在国、内外已有的富营养化过程与机制等研究成果基础上，以有机氮磷界面过程、有机磷定量及生物有效性综合表征为突破点，从内负荷研究需要回答的科学问题和内负荷控制技术等方面，深化了湖泊内负荷理论，建立了内负荷定量、来源、组成及监测与评估方法。

课题组以重度富营养化湖泊（滇池）和富营养化初期湖泊（洱海）为例，通过碳氮稳定同位素和有机质光谱特征解析，揭示了湖泊内负荷来源演变及内外污染源贡献，从沉积年代鉴定、沉积通量、累积量、累积速率及沉积物氮磷形态历史演变等角度阐明了湖泊内负荷形成的累积机制；从沉积物-水界面、颗粒物（藻）-水界面氮磷的释放特征及其与介质性质及环境因子间的关系等角度阐明了湖泊内负荷形成的释放机制；从溶解性有机磷界面过程、生物有效性表征及对藻类水华影响等角度阐明了湖泊内负荷形成的周转机制；从生态系统历史演变与内负荷产生之间的关系角度阐明了湖泊内负荷形成的生态因子驱动机制。综合考虑入湖外源污染负荷与内负荷间的动态响应关系，量化了内负荷对湖泊水污染

贡献。展望了湖泊内负荷概念及理论在水质目标管理、水生态管理、制定湖泊营养物基准、修订湖泊富营养化标准及湖泊污染治理与治理等领域的支撑作用。

基于对滇池水质和水华形势的认识，课题组提出了滇池内负荷控制理念，即“内、外共生污染源”的直接控制理念；食藻动物的投放和其他控藻工程必须高度集中于蓝藻易于集聚和可能率先暴发的“热点区域”，加强冬季控藻，减少藻华种源。

在滇池藻源内负荷控制方面，充分利用经典和非经典生物操纵技术的协同作用，进一步加大对蓝藻水华作为“内、外共生污染源”的直接控制力度；食藻动物的投放和其他控藻工程必须高度集中于蓝藻易于集聚和可能率先暴发的“热点区域”，加强冬季控藻，减少藻华种源。

在滇池泥源内负荷控制方面，应采取分区、分级和分期控制与治理策略。针对草海、主要入湖口和典型湖泊等沉积物有机质较高、氮磷污染较为严重的区域，建议优先治理，采取以环保疏浚为主，配合生态修复的工程措施，面积约29km<sup>2</sup>；针对有机质污染较轻，但沉积物氮磷释放量较高的区域，建议中期治理，采取原位钝化、生态覆膜与生态修复相结合的工程措施，面积共计46km<sup>2</sup>；针对沉积物有机质、氮磷含量和释放量均较低，有水生植被分布，且水体透明度有望提高的区域，建议中长期治理，采取以水生植被修复为主的工程措施，面积共计27km<sup>2</sup>。

【针对大型富营养化湖泊藻华聚集区和生态敏感区难以在短期高效除藻的问题，基于区域气象、水文、蓝藻时空分布系统观测及实验，研发形成了大型富营养化湖泊重点区域水华蓝藻快速削减和生态修复技术】课题组发明了一种新型的蓝藻高效导流富集技术和装置，利用自然风力和风向将大范围蓝藻通过纳藻门汇集到一个面积仅占整个目标控制区域约1%的局部区域内，使之得到30倍以上的富集浓缩并利于上浮，大幅度提高了收集和去除效率，突破了富营养化大型湖泊蓝藻早期控制和水华暴发后高效去除的技术瓶颈。其创新在于蓝藻水华暴发前，尤其是在经过冬季低温后刚开始增殖阶段，可使大水域低浓度蓝藻及时得到富集浓缩和清除，为实现早期控制发挥着关键作用；在蓝藻水华暴发后，也可大幅度提高蓝藻物理清除效率，对藻源内负荷控制具有重要作用，为水生态修复创造了条件。课题组还研发提出了一种大型富营养化湖泊水景区的快速生态恢复方法，由挡藻消浪、排藻提质和种植恢复3个密不可分的子系统构成，使大型富营养化湖泊在其整体水质尚未得到明显改善之前，可率先控制局部水景区的蓝藻水华，恢复其生态系统，改善景观效果，突破了“藻窝子”区域景观生态修复中经常面临的藻源内负荷过高、透明度过低的困境。

【针对滇池泥源内负荷高，释放风险大等问题，研发陶粒、砾石改性新型工程材料和筛选适合水生植物，研发形成了滇池泥源内负荷原位控制新技术，全面支撑了滇池泥源内负荷控制及水质改善目标的实现】泥源内负荷控制工程材料研发取得重要进展，利用对底泥具有钝化作用的人工改性材料或天然材料，在底泥表层建立一个隔离层，一方面增强受污染底泥的稳固性，另一方面钝化底泥沉积物，减少其中氮磷等的释放。课题研究表明，改性的陶粒、砾石添加沸石、聚合氯化铝和铁盐等助剂，经煅烧、造孔等工程技术措施，可形成高性能底泥沉积物中氮磷原位固定和去除材料。与原材料相比，陶粒改性材料对可生物利用性磷酸盐的去除率提高了4倍以上，对有机磷的去除率提高了数十倍。铁盐和煅烧改性砾石对低浓度磷的去除率提高了6倍，而对高浓度磷的去除率提高了3倍以上。

课题研究突破了基于水生植物修复的泥源内负荷控制技术，针对滇池水生植被严重退化、内负荷控制力下降，高污染底泥条件下水生植被难以自然修复等问题，基于滇池泥源内负荷特征及水生植被现状，通过控制区域优选，水生植物优选，水生植物/工程材料联合控制等措施，研发形成了基于水生植物修复泥源内负荷综合控制技术，支撑了滇池内负荷控制与水生态修复目标。

依据水生植物修复和泥源内负荷控制技术的可行性原则，课题组还提出了滇池全湖泥源内负荷控制分区方案及控制措施，通过国内外泥源内负荷控制相关技术对比分析，确定了泥源内负荷工程技术评估方法和技术集成方法，进而分析了各分区污染物特点，提出了相应的控制措施。

【针对滇池蓝藻密度高，透明度低，沉水植物短期内难以恢复生长，食藻生物贫乏，蓝藻生物控制难度大等难题，基于生态位理论和种间竞争理论，突破了旨在抢占蓝藻生存空间和资源空间，同时具有较强净化功能，由表层生态浮床、亚表层“生态水母”型种植模块、岸边挺水植物和底部生态覆膜组成的立体生态空间构建技术】课题组研发了大水域水体亚表层生态“水母”型种植模块构建技术，采用可根据水体透明度调节位置的“生态水母”型结构种植水生植物，在水体亚表层空间竞争治理区提供蓝藻所需营养盐、生存空间等资源，同时为微生物提供了附着表面，为浮游动物提供了栖息空间，为发挥生物控藻作用创造了条件，为水体自然水生植物恢复开辟了生态窗口。

为减少底泥悬浮和营养物释放，课题组采用自主研发的以新型多层膜结构为主体的生态覆膜技术，对底泥污染物进行吸附、固定、矿化，可有效减少泥源内负荷释放量11%~15%，并可构建有利于沉水植物恢复的生态环境条件。这一泥源内负荷原位控制技术，通过在污染底泥表面铺设新型多层生物覆膜，使污染底泥与上层水体隔离，从而阻止底泥污染物向水体迁移。生物覆膜通过覆盖层，将污染底泥与上层水体物理性隔离，可稳固污染底泥，防止其再悬浮或迁移；同时，通过覆盖物材料的吸附作用，有效削减污染底泥污染物进入上层水体。课题研究表明，生物覆膜能有效防止底泥中的氮磷进入水体，对水质有明显改善作用。

【针对大型富营养化湖泊风浪大，蓝藻漂移频繁，水生植物难以生存等问题，在系统研究大水面漂浮植物生长影响因子的基础上，通过现场实验和技术示范，研发形成了用于大水域高效消浪滞藻与减污的漂浮植物控养技术】课题组研发形成了大风浪条件下漂浮性水生植物控养技术，其创新在于构建了大水面抗风浪、防逃逸漂浮植物控养围栏设施，筛选并确定了多层次内负荷综合控制技术与结构，解决了大风浪开阔水域漂浮植物的逃逸问题，确保漂浮植物在控制水域安全生长。研发形成了漂浮水生植物蓝藻拦截及风浪削减技术，这一技术解决了大水域、大风浪条件下低成本构建具有高效滞藻和消浪功能的非永久性结构的难题；通过4种不同型式消浪滞藻带现场观测，发现不同型式和宽度的消浪滞藻带其消浪和滞藻效果在不同风浪大小条件下具有明显差异，由“钢桩+网片+泡沫浮球+100m宽水葫芦带”组成的消浪滞藻带在大风浪条件下，仍具有显著消浪滞藻作用，可有效拦截蓝藻和削减风浪。

## 积极开展工程示范 确保技术行之有效

针对滇池内负荷控制的迫切技术需求，验证本课题研发的各项控藻、减负技术及其协同作用的综合效果，课题组选择了滇池藻源内负荷控制最具挑战性的外海北岸0.25km<sup>2</sup>水域实施了滇池水体内负荷综合控制技术示范工程。

这一技术示范整合了课题研发的6项关键技术，即滇池集聚区蓝藻物理阻隔与富集技术、滇池典型区域水面蓝藻物理过滤清除新技术、水生植物藻源内负荷控制技术、水体表层生态浮床藻源内负荷控制技术、水体亚表层生态“水母”藻源内负荷控制技术，及原位钝化、生态覆膜等泥源内负荷原位控制技术。各项技术之间通过时间和空间上的巧妙设计和搭配，既充分发挥了各单项技术的作用，又产生了非常好的系统协同增益作用，形成了对高原湖泊内负荷自上而下，由外向内全方位的系统控制。示范工程显示，半年后湖泊水体透明度提高50cm，藻类生物量下降80%，内

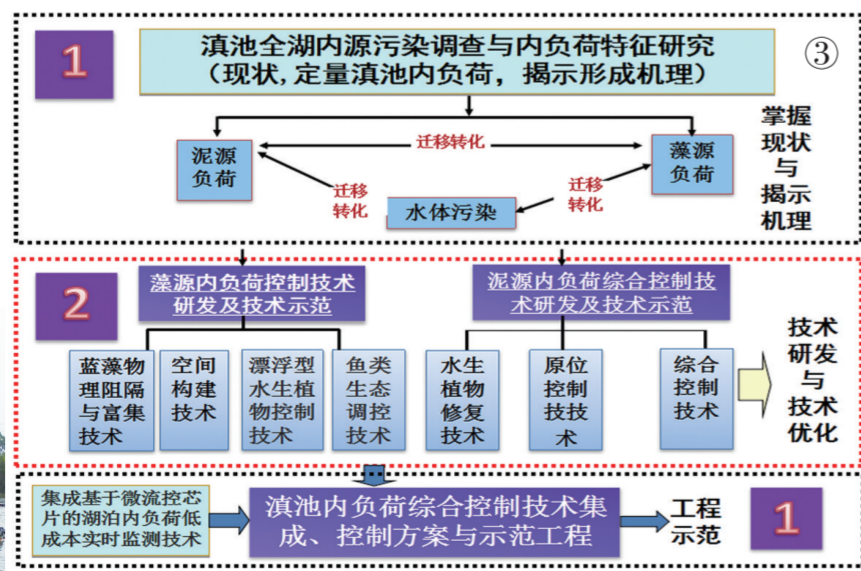
负荷削减30%，水质改善明显，解决了滇池因长年蓝藻水华暴发所造成的生态敏感区域近岸水域水华藻类堆积严重、水体透明度极低及水体景观效果较差等问题，首次验证了多层次内负荷综合控制技术对近岸水域水质改善的实际效果，为控制滇池水体内负荷，支撑滇池水质企稳向好提供了技术支撑和实现路径。

结合昆明市滇池治理的实际需要，课题组在滇池外海北岸2km<sup>2</sup>水域还开展了藻源内负荷物理阻隔与富集技术工程示范。工程由排藻箱、蓝藻物理阻隔与导流围隔（线）、蓝藻导流富集小区等构成，实现了盘龙江口蓝藻阻截导流围隔区内外部透明度提高20cm，藻细胞密度减少40%，藻源内负荷削减15%，导流富集区蓝藻富集率提高30倍以上，近岸区水域水环境质量明显改善，支撑了滇池外海蓝藻高效清除。其中箱涵排藻技术还在草海得到推广应用，蓝

藻清除技术在玉溪市云湖也得到推广应用。在滇池草海实施了规模达1km<sup>2</sup>的“生态空间构建技术”示范工程，由岸边浅水区挺水植物群落带、外部深水区水葫芦与大藻漂浮植物小区以及生态浮床与生态“水母”型种植模块混合小区等构成；水体透明度增加47cm，水体NH<sub>4</sub>-N和TP含量分别降低58.8%和37.3%以上，达到预期目标。

与现有相关技术比较，本课题研发的成套技术，不但内负荷控制和水质改善效果更为显著，而且整套系统抗污染负荷和抗风浪冲击能力更强，使用寿命和运营成本更佳；相关技术已被昆明市政府采纳，应用于滇池草海生态修复方案，支撑草海生态修复工程。本课题研究技术不但为滇池实施内负荷控制和生态修复提供强有力的技术支撑和工程经验，也为云南乃至全国类似湖泊治理提供了有益借鉴。

邢飞龙 课题组



### 图片说明

- 图①：滇池远眺  
图②：草海生态空间构建示范工程  
图③：课题总体设计思路  
图④：蓝藻富集门施工现场

