

## 水源与饮用水保障

张昊泽, 黄会斐, 高凯拓, 等. 流域水资源和生态环境综合治理启示——千岛湖及新安江流域案例[J]. 净水技术, 2024, 43(3):61-67,91.

ZHANG H Z, HUANG H F, GAO K T, et al. Implications of comprehensive management of water resources and ecological environment in river basin: Case of Qiandaohu Lake and Xin'anjiang Basin[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(3):61-67,91.

## 流域水资源和生态环境综合治理启示——千岛湖及新安江流域案例

张昊泽<sup>1</sup>, 黄会斐<sup>2</sup>, 高凯拓<sup>3</sup>, 郭 帅<sup>1</sup>, 刘冰心<sup>1</sup>, 周佳恒<sup>1,\*</sup>

(1. 浙江工业大学土木工程学院, 浙江杭州 310023; 2. 浙江省城乡规划设计研究院, 浙江杭州 310030; 3. 聚光科技<杭州>股份有限公司, 浙江杭州 310012)

**摘要** 流域生态综合治理对推动流域生态文明建设具有重要意义。文章基于浙江千岛湖及新安江流域水资源与生态环境保护项目, 对其在流域水环境综合治理中获得的成果及经验进行总结, 并对后续流域生态综合治理提出建议。研究表明, 项目采用 SWAT 模型进行污染特征识别, 明确了主要污染形式及来源, 给出了针对性生态修复意见, 提高了综合治理效率。进而以小流域治理为单元, 通过农业面源污染控制、森林生态系统修复、水资源管理等工作修复了流域生态系统。同时, 基于《新安江流域水环境补偿协议》及千岛湖水基金, 构建了多元化的流域生态补偿机制, 为全国生态补偿体系贡献了浙江经验。

**关键词** 新安江 千岛湖 流域生态综合治理 生态补偿 综合规划

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)03-0061-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.03.007

## Implications of Comprehensive Management of Water Resources and Ecological Environment in River Basin: Case of Qiandaohu Lake and Xin'anjiang Basin

ZHANG Haoze<sup>1</sup>, HUANG Huifei<sup>2</sup>, GAO Kaituo<sup>3</sup>, GUO Shuai<sup>1</sup>, LIU Bingxin<sup>1</sup>, ZHOU Jiaheng<sup>1,\*</sup>

(1. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Zhejiang Institute of Urban and Rural Planning and Design, Hangzhou 310030, China;

3. Focused Photonics <Hangzhou> Inc., Hangzhou 310012, China)

**Abstract** The comprehensive management of river basin ecology is of great significance in promoting the construction of river basin ecological civilization. Based on the Zhejiang Qiandaohu Lake and Xin'anjiang Basin water resources and ecological environment protection project, this paper summarized the achievements and experience in the comprehensive management of water environment in the basin, and put forward suggestions for the subsequent comprehensive management of basin ecology. The study revealed that by using SWAT model to identify the pollution characteristics, the main forms and sources of pollution were identified, which offered specific pollution treatment suggestions, promoting the efficiency of comprehensive management of river basin. Agricultural non-point source pollution control, forest ecosystem restoration, water resources management and other work to restore the watershed ecosystem was applied in small watershed unit. Meanwhile, based on the *Xin'anjiang Basin Water Environment Compensation Agreement* and Qiandaohu Lake water fund, a diversified basin ecological compensation mechanism was established, contributing Zhejiang's experience to the national ecological compensation system.

[收稿日期] 2023-03-09

[基金项目] 浙江省重点研发项目(2021C03024); 浙江省自然科学基金项目(LY22E090006)

[作者简介] 张昊泽(1998—), 男, 硕士, 主要从事市政工程研究, E-mail: 924095682@qq.com。

[通信作者] 周佳恒, E-mail: zjhfhf@163.com。

**Keywords** Xin'anjiang Qiandaohu Lake comprehensive management of river basin ecology ecological compensation integrated planning

流域生态综合治理是在流域范围内,以治理水资源为主要目标,综合运用水资源调控、水环境保护、水资源开发利用、水资源保护、水资源管理等技术手段,实现水资源的有效利用和环境保护的综合治理。近年来,太湖流域、滇池流域等都开展了流域生态综合治理,不仅修复了流域水环境及周边生态环境,还带动了绿色产业的发展<sup>[1-2]</sup>。对治理案例分析发现,虽然我国流域生态治理取得了显著的成效,但也陆续暴露出存在的问题:传统治理形式对生态环境工作重点及关键问题把握不足,治理效能有待加强;人与自然和谐相处理念落实得不够,可持续发展能力有待提高;政策的引导作用不强,难以有效调动群众主观能动性;补偿及绩效考核等机制不完善,治理积极性及效率存在提升空间<sup>[3-4]</sup>。研究认为,这些问题制约了流域生态环境治理效能及可持续性,如何从技术支持、政策优化、成果评价等方面探索解决流域生态环境治理的新思路、新模式,具有重要的理论和实际意义。

论文基于浙江千岛湖及新安江流域水资源与生态环境保护项目,从技术、机制、经济等多角度入手,系统分析、总结开展流域水资源和生态环境综合治理过程中的经验,以期提高我国流域治理和生态环境保护的有效性和可持续性。

## 1 项目背景

### 1.1 千岛湖与新安江流域

#### 1.1.1 流域自然概况

新安江为钱塘江的正源,源头自徽州(今黄山市)和今江西婺源的浙源乡境内,新安江东入浙江省,经淳安,最终和兰江在建德汇入钱塘江。新安江干流长为 373 km,流域面积为 11 674 km<sup>2</sup>,平均流量约为 166 m<sup>3</sup>/s。作为华东地区水生态安全的重要支柱,新安江终年可保证在地表Ⅲ类水标准以上,是国内水质最佳的河流水系之一(图 1)。

千岛湖作为浙江省最广阔的淡水湖,其包括 1 000 余个面积大于 2 500 m<sup>2</sup> 的岛屿,上游的新安江水系汇入钱塘江,最后注入东海。千岛湖集水面积为 10 442 km<sup>2</sup>,水库面积为 567.40 km<sup>2</sup>,平均水深为 34 m,最大水深为 97 m。湖区洪水位为 108 m,最大库容为 216.26 亿 m<sup>3</sup>,正常库容为 178.4 亿 m<sup>3</sup>。



图 1 千岛湖与新安江流域

Fig. 1 Qiandaohu Lake and Xin'anjiang Basin

千岛湖集 25 条大小溪流、河川汇集,其中以新安江来水量最多,占千岛湖总来水量的 57%。而位于浙江省内的各条入库河流(武强溪、中洲、进贤溪、百亩畈等)占千岛湖来水量的 43%<sup>[5]</sup>。

#### 1.1.2 流域环境概况

千岛湖及新安江流域具有优异的自然资源,有效带动了周边城市经济发展。但近年来的发展强调经济建设而对自然保护重视不足,产生了一系列环境问题。监测数据表明,千岛湖水体富营养化程度在不断加剧,2001 年—2006 年为贫营养状态,而 2007 年—2015 年已均为中营养状态,且营养状况指数均在 30 以上,湖水透明度总体上呈缓慢下降趋势。农业污染是千岛湖及新安江流域污染排放主要来源,其占总氮的 60%和总磷的 81%。同时,千岛湖流域林相较为单一,其森林大多由人工针叶林组成,生物多样性及森林生态系统的恢复能力不佳<sup>[6]</sup>。此外,流域区域经济发展不平衡,部分地区供水设施建设相对滞后,存在水质性及资源性缺水问题。由此可见,对千岛湖及新安江流域的水资源与生态环境进行综合治理具有现实意义<sup>[7]</sup>。

#### 1.2 项目由来

针对千岛湖及新安江上游流域日趋严峻的水环境问题,2013 年 12 月国家制定了《千岛湖及新安江上游流域水资源与生态环境保护综合规划》(简称为《综合规划》),该规划提出到 2020 年,千岛湖主要水质指标稳定保持在 I ~ II 类,营养状态持续改善,主要入湖河流及其支流水质在 2015 年基础上进一步提高。这表明对千岛湖及新安江流域水资源与生态环境保护已上升为国家战略。

浙江省于 2018 年以《综合规划》为依据,启动了浙江千岛湖及新安江流域水资源与生态保护项目。项目通过农业面源污染治理、林业生态修复、农村饮水安全提升等工程进行流域水资源与生态环境综合治理。

## 2 项目实施与成效

为解决千岛湖及新安江流域面临的主要问题,浙江千岛湖及新安江流域水资源与生态保护项目从流域综合治理提升、水资源管理提升和机构能力建设、项目管理与绩效考核 3 个方面入手,其治理内容涵盖生态环境综合治理、森林生态系统修复、水资源管理、生态补偿及绩效考核机制建立等多个专业领域,以期提高千岛湖及新安江流域治理和生态环境保护的有效性和可持续性。

### 2.1 流域生态环境综合治理

#### 2.1.1 重点控制区域划分

为提高生态环境治理效能,项目基于水文 SWAT(soil and water assessment tool, SWAT) 模型,在治理前期对重点流域进行污染特征识别,以期明确主要污染形式及来源。通过考察重点区域地形地

质、土壤、用地类型、天气等变量,利用 SWAT 模型对目标流域内氮、磷、农药及泥沙等污染物迁移转化进行了模拟<sup>[8]</sup>。基于污染物分布强度,明确流域内重点控制区域范围及地块类型,提出针对性的综合治理建议。

以大同溪为例,其位于建德市千岛湖流域南部,水系总面积约为 144 km<sup>2</sup>。水系内无主要工业点源和大型集中式养殖点。治理前总氮平均浓度指标处于 IV~V 类,总磷浓度指标处于 I~II 类。其地形相对平坦,坡度在 15° 以下的平地占 41%, 25° 以上的坡地面积占比 30% 左右。由于不同利用类型的土地,其营养物强度具有差异,例如水田、旱地、茶园等农业用地与森林相比,具有更高的污染贡献和污染强度。项目基于卫星遥感对大同溪水系土地利用情况进行分析,结果显示其森林覆盖率约为 53%。农业以水田为主,其占地约为 32%。经济作物以桑树、果树及茶园为主,占地约为 10%。项目在此基础上采用水文 SWAT 模型模拟,获得了大同溪水系中总氮、总磷及泥沙流失强度空间分布(图 2)。

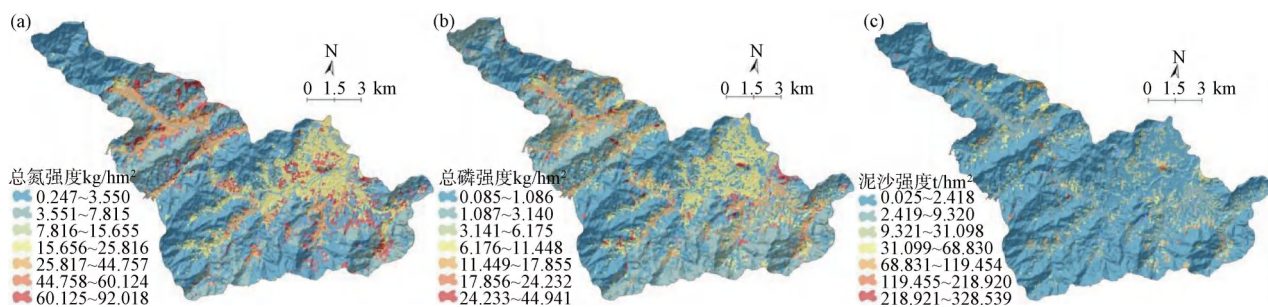


图 2 大同溪水系总氮、总磷及泥沙强度空间分布

Fig. 2 Spatial Distribution of TN, TP and Sediment Intensity in Datong Creek River System

在此基础上,根据污染物强度确定大同溪流域内的重点控制区域。划分后的重点控制区域分别占总氮、总磷及泥沙负荷总量的 51.7%、48.7% 及 36.4%。其地块类型以农业用地为主,占流域农业用地总面积的 46.8% (图 3)。研究认为,通过 SWAT 模型模拟流域污染分布,项目明确了流域重点控制区域范围及土地类型,识别了流域治理关键问题,在此基础上给出了针对性生态修复意见,如:施用有机肥或缓释肥,从源头上减少农业用地污染物的产生;植被缓冲带有效地对污染物进行拦截、吸收、转化和分解,减少污染物进入收纳水体等,提高了综合治理效率。

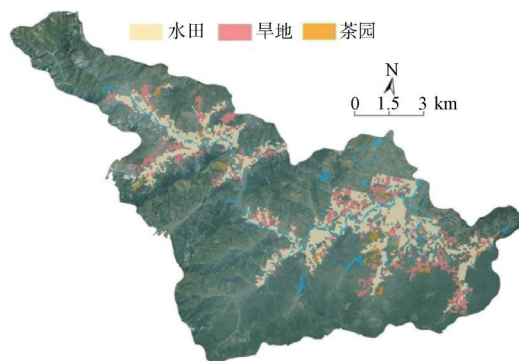


图 3 大同溪水系重点控制区域范围及土地类型

Fig. 3 Key Control Area and Land Type Distribution of Datong Creek River System

### 2.1.2 农业面源污染控制

研究<sup>[9]</sup>指出,农业面源污染是地表水污染的主要来源,有超过 50% 的氮和磷的排放来自农业活动。种植过程中过量使用的化肥和农药会随径流进入湖体,造成水体污染。研究发现,2015 年约有 10 460 t 的  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  和 930 t 氨氮排放进千岛湖和新安江流域,其中农业排放的总氮和总磷约占排放总量的 70%。项目对农业面源污染进行控制,通过土壤肥力诊断指导施肥,以有机肥、配方肥替代传统化肥,提高施肥效率,减少化肥使用。

以淳安县为例,项目联合农业农村局、淳安县财政局、淳安县林业局,对淳安县 142 家单位 30 000 亩(1 亩  $\approx$  666.67  $\text{m}^2$ ) 果园开展农业面源污染防治工作,在鼓励单位采用有机肥和配方肥的同时,基于土壤肥力测定明确最佳施肥量,提高施肥效率。同时,项目在政策管控的基础上,对农户及相关工作人员开展农业面源污染治理项目培训,通过技术人员讲解面源污染形成机理、化学除草剂等农药对生态系统危害、测土配方施肥的科学意义等知识,提高农户对有机肥及配方肥的接受度,并强化了项目相关人员的工作水平,提升了群众的主观能动性。

项目实施期间淳安县化肥、农药使用量较项目评估时基线值减少 10 646 t 和 248.16 t,分别减少约 23.3% 和 25.6%。同时,项目通过回收和安全处置废弃农药容器的方式,降低农药对地表水污染。截至 2021 年 12 月 31 日,累计回收废弃农化容器 184.3 t,废弃农药包装回收率达到 90% 以上。由于项目的贡献和政府的支持,淳安县被评为“2020 全国绿色农业十佳发展范例”。

### 2.1.3 森林生态系统修复

千岛湖周围山林广泛分布马尾松人工林,现有马尾松纯林共 105 万亩,但林相结构单一,不利于森林可持续经营。马尾松人工林存在松毛虫周期性危害,以及潜在的松材线虫病威胁,而一旦遭遇虫害就会导致严重的林木死亡、景观衰败,生态功能退化<sup>[7]</sup>。同时,集中连片的针叶人工林容易发生土壤退化,降低森林生态功能。项目采用间伐抚育、人工造林等手段,结合综合病虫害管理(integrated pest management, IPM),采用环境改善、物理防治和化学防治多手段组合实现森林生态系统治理。

以淳安县为例,针对森林群落演替的复杂性,通过合理补植、优化混交比例及混交方式来改善单一

林分问题。对于原有针叶纯林,通过补植耐荫树种、改善阔叶幼树生长条件等方式,加速现有针叶纯林正向演替,形成稳定的针阔混交森林群落。对于原有芒秆林地,采用补种木荷、银杏等乔木树种,形成郁闭幼树林冠层,减少林地阳光抑制芒秆生长。同时在交通便利的芒秆山地区,根据农户意愿种植油茶、香榧、山核桃、杨梅等经济作物,充分恢复生态环境功能,并为村集体和农户提供经济收入,提高了农户参与积极性及主动性。项目实施过程中 60% 以上的农户参与了林相改造项目。

项目实施期间,淳安县 2018 年共计完成森林修复工程面积 17 018 亩,其中抚育间伐面积为 10 701 亩,抚育间伐补植面积为 2 194 亩,直接补植面积为 1 963 亩,人工造林面积为 2 160 亩。2019 年完成建设面积共 31 559 亩,其中间伐抚育 16 644 亩,抚育间伐补植 5 180 亩,直接补植 3 756 亩,人工造林 3 946 亩。单一林相正在逐步向多样化、多结构的森林景观恢复转变,有助于减少径流,增强土壤蓄水能力,减少洪水风险和森林火灾发生率。

## 2.2 水资源管理

项目前期调研指出,流域内水资源管理及综合利用存在不足。以淳安县为例,其农村供水存在水质性缺水和资源性缺水的问题。淳安县的分散式供水工程数量居多,城市水厂和农村水厂数量少。在净水工艺方面,城市水厂均采用常规处理工艺,大量分散供水工程以简易处理设备净水为主,存在水质风险。从水质监管来看,仅城市水厂和一家乡镇水厂能做到水质自检,水质监管能力相对薄弱。同时,淳安给水系统 96.2% 的供水设施以彩溪沟(河道)作为水源,受降水影响较大,供水水量保障存在一定风险。

项目总投资共 3.5 亿元,建设 8 个新建水厂供水项目和 8 个现状水厂管网延伸项目。服务范围包括淳安县枫树岭镇、大墅镇、安阳乡、里商乡、威坪镇等 18 个乡镇,共包含 188 个行政村、6.23 万户,设计服务人口共 21.81 万人,最高日总用水量为 3.76 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,设计供水总规模为 3.84 万  $\text{m}^3/\text{d}$ 。项目实施期间,农村水质性缺水及资源性缺水问题得到解决,饮用水提升工程取得了良好的进展。

## 2.3 流域生态补偿机制建立

流域生态补偿是指当不同行政地区在利用流域生态资源发展过程中,由流域中的“生态收益者”对

“生态保护者”给予一定补偿。对实施生态保护的流域地区居民,为补偿其环境保护资金投入及丧失的发展机会,生态环境收益方会给予经济性、技术性 & 政策性支持作为补偿<sup>[10]</sup>。常见的经济性补偿方式包括财政转移支付、建立补偿基金、水权交易等。

有效的流域生态补偿机制能促进上下游不同行政区域形成联动机制,协同改善流域生态环境质量,实现不同地区、不同利益群体的和谐发展。但在实践过程中,流域生态补偿仍存在利益群体间关系复杂,生态补偿主体模糊,权责不明晰;缺乏明确且具有可操作性的流域生态补偿的运行机制,补偿标准科学性不足;生态补偿方式相对单一、市场化及公众参与度不高等问题<sup>[11]</sup>。如何明确生态补偿主体,完善流域生态补偿机制,以多元化的形式进行生态补偿是现有研究的重点。

### 2.3.1 浙皖两省跨省流域生态补偿机制

自浙皖两省在 2012 年正式签订《新安江流域水环境补偿协议》,共建流域上下游生态补偿资金以来,已建立了以水质考核为主兼顾产业、人才补偿的多维度补偿方案,用于新安江流域环境整治和生态保护。2023 年—2025 年,浙江省每年出资 8 亿~12 亿元、安徽省每年出资 8 亿元,补偿资金总额共 16 亿~20 亿元。2026 年—2035 年双方出资额度和比例根据协商结果动态调整。在实施流域生态补偿的过程中,浙皖两省共同确立了生态补偿考核指标,并明确了补偿资金的分配方式。项目生态补偿考核与资金分配由断面水质补偿指数  $P$  值与产业和人才补偿指数  $M$  值共同决定。

#### (1) 断面水质补偿指数

断面水质补偿指数  $P$  值按照《地表水环境质量标准》,以高锰酸盐指数、氨氮、总氮、总磷 4 项考核指标和常年年均浓度值为基本限值,测算补偿指数,并基于此实行分档补助。根据《新安江流域水环境补偿试点实施方案》,补偿指数  $P$  值测算公式如式(1)。

$$P = K_0 \times \sum_{i=1}^4 k_i \frac{C_i}{C_{io}} \quad (1)$$

其中: $P$ ——断面的补偿指数;

$K_0$ ——水质稳定指数,考虑降雨径流等自然变化因素,取值 0.9;

$k_i$ ——指标权重系数,高锰酸盐指数、氨

氮、总氮、总磷分别为 0.22、0.22、0.28、0.28;

$C_i$ ——某项指标的年均质量浓度(高锰酸盐、氨氮、总氮、总磷),mg/L;

$C_{io}$ ——某项指标的基本限值(高锰酸盐、氨氮、总氮、总磷),mg/L。

根据国控街口断面补偿指数  $P$  值,浙皖两省调整补偿资金出资额度如下:若  $P < 0.95$ ,补偿资金安徽出资 8 亿,浙江出资 12 亿,共 20 亿;若  $0.95 < P \leq 1.00$ ,安徽出资 8 亿,浙江出资 10 亿,共 18 亿;若  $P > 1.00$  或新安江流域安徽省界内出现重大水污染事故(以生态环境部界定为准),安徽出资 8 亿,浙江出资 8 亿,共 16 亿。

#### (2) 产业和人才补偿指数

产业和人才补偿指数  $M$  值结合了试验重点区和试验协同区,试验重点区计算主要针对绿色食品加工、生物医药与大健康、电子信息、节能环保、文化旅游五大主导产业,试验协同区计算主要针对区内全部三次产业,以区内全社会单位能耗国内生产总值(GDP)和五大主导产业的高新技术企业数量、研发(R&D)人员总量、劳动生产率为考核指标。基于上一年统计数据为基本限值,测算补偿指数,并基于此实行分档补助。产业和人才补偿指数测算如式(2)~式(3)。

$$M_{重} = \sum_{i=1}^4 k_{重i} \frac{M_{重i}}{M_{重io}} \quad (2)$$

$$M_{协} = \sum_{i=1}^4 k_{协i} \frac{M_{协i}}{M_{协io}} \quad (3)$$

其中: $M_{重}$ ——产业的补偿指数;

$M_{协}$ ——人才的补偿指数;

$k_{重i}$ ——产业补偿指标权重系数,全社会单位能耗 GDP、高新技术企业数量、R&D 人员总量、劳动生产率分别为 0.3、0.3、0.2、0.2;

$M_{重i}$ ——产业补偿某项指标的年均值(全社会单位能耗 GDP、高新技术企业数量、R&D 人员总量、劳动生产率);

$M_{重io}$ ——产业补偿某项指标的基本限值(全社会单位能耗 GDP、高新技术企业数量、R&D 人员总量、劳动生产率);

$k_{协i}$ ——人才补偿指标权重系数,全社会

单位能耗 GDP、高新技术企业数量、R&D 人员总量、劳动生产率分别为 0.3、0.3、0.2、0.2;

$M_{\text{补}i}$ ——人才补偿某项指标的年值(全社会单位能耗 GDP、高新技术企业数量、R&D 人员总量、劳动生产率);

$M_{\text{补}io}$ ——人才补偿某项指标的基本限值(全社会单位能耗 GDP、高新技术企业数量、R&D 人员总量、劳动生产率)。

试验重点区和试验协同区的补偿指数加权测算出实际产业和人才补偿指数的  $M$  值,测算补偿指数,并基于此实行分档补助。计算如式(4)。

$$M = M_{\text{重}} \times 0.8 + M_{\text{协}} \times 0.2 \quad (4)$$

根据安徽省内试验重点区和试验协同区  $M$  值大小,浙皖动态分配全部补偿资金:若  $M > 1.3$ ,拨付 75% 补偿资金给安徽省,拨付 25% 补偿资金给浙江省;若  $1.0 < M \leq 1.3$ ,拨付 80% 补偿资金给安徽省,拨付 20% 补偿资金给浙江省;若  $M \leq 1$ ,拨付 85% 补偿资金给安徽省,拨付 15% 补偿资金给浙江省。

这笔补偿资金将用于上下游生态保护、环境治理、产业优化升级等领域,兼顾上游突发不可抗力环境事件对下游造成污染的赔偿,调动各方参与流域生态保护的积极性。研究发现,随着浙皖两省生态补偿机制的制定与实施,安徽省的生态环境保护力度明显增大,在两轮试点后,新安江出境水质考核指标全部达标,表明生态补偿机制有效促进了上下游对流域的协同保护,改善了生态环境质量。

### 2.3.2 世行项目生态补偿机制

浙江千岛湖及新安江流域水资源与生态保护项

目同时采用国内与国际金融组织合作的形式,通过世界银行和大自然保护协会(TNC)及多家公益基金会合作,在千岛湖及新安江流域生态保护项目区域内建立了用于生态补偿的千岛湖水基金。该基金采用流域下游用水者向流域上游水资源保护者及非营利性机构提供补偿资金的方式,协同改善及保护生态系统。同时,下游用水者还可通过水环境改善进行获利,实现了一定程度的生态补偿机制的市场化运行。

该基金在示范水稻田中采用精准施肥结合绿肥使用,取代了 10% 的化肥,有效降低了 30%~40% 的氮磷流失风险,同时实现稻谷增产 11.8%。示范茶园的覆盖措施有效减少了径流中 57.31% 的总磷和 44.03% 的总氮,并提升土壤肥力。通过生态沟渠建设,将径流中  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、总氮及总磷分别降低了 15% 以上,有效净化农田退水,并提高了生物多样性,实现了对上游水资源和水生态的保护。同时,该基金通过农产品研发、生产和品牌打造,在示范茶园设立了“千岛清泉”品牌,通过有机农产品的销售及推广,以多元化的形式进行生态补偿,为示范项目农户带来平均 800 元/亩增收,提高了公众在生态补偿中的参与度。

### 2.4 绩效考评制度构建

完善的绩效考评制度能全方位考核项目的进度和质量,作为项目的成效评估的重要标准,同时可以为流域治理提供数据支撑。为了全面正确地评估项目实施的绩效,项目实施中采用主要污染物减量目标作为实施绩效考核指标,考核指标包括:项目实施之后的总氮排放减少量、项目实施之后的总磷排放减少量、水土流失的减少量、获得清洁饮用水的农村人口增量等目标参数(表 1)。

表 1 项目目标指标

Tab. 1 Objective Index of the Project

| 指标参数              | 基线值                      | 相对于基准值的标值     |               |        |         |         |         |
|-------------------|--------------------------|---------------|---------------|--------|---------|---------|---------|
|                   |                          | 第一年           | 第二年           | 第三年    | 第四年     | 第五年     | 第六年     |
| 氮进入水体的减少量         | 基线将在项目开始的第一年(2018年),进行检测 | 2%            | 7%            | 13%    | 18%     | 22%     | 25%     |
| 磷进入水体的减少量         | 基线将在项目开始的第一年(2018年),进行检测 | 2%            | 9%            | 16%    | 21%     | 26%     | 30%     |
| 土壤流失的减少量          | 基线将在项目开始的第一年(2018年),进行检测 | N/A(检测从第四年开始) | N/A(检测从第四年开始) | 10%    | 15%     | 18%     | 20%     |
| 项目中获得清洁饮用水的人口增量/人 | 0                        | 0             | 63 278        | 86 310 | 161 019 | 200 181 | 218 056 |

同时,为了确保项目实施的有效性,本项目细化了不同阶段的具体绩效指标,包括:项目范围内少用的杀虫剂(t/a)、项目范围内减少的磷消耗量(t/a)、项目范围内减少的氮消耗量(t/a)等,并对指标进行动态考核。绩效考评制度的构建对确保项目实施的质量与进度发挥了重要的作用。

### 3 结论和建议

流域水环境综合治理对推动流域生态文明建设具有重要意义。本文基于浙江千岛湖及新安江流域水资源与生态环境保护项目,对其在流域水环境综合治理中获得的成果及经验进行总结。研究指出,项目采用综合性治理措施,以小流域治理为单元,通过农业面源污染控制、森林生态系统修复、水资源管理等工作修复了流域生态系统。同时构建了科学合理的流域生态补偿机制,为全国生态补偿体系贡献了浙江经验。

为更好地协调上下游流域生态、社会及经济关系,提高流域治理和生态环境保护的有效性和可持续性,研究对流域生态综合治理提出如下建议:(1)在流域水环境综合治理中应不断优化综合治理方式,合理运用模型模拟等科学手段,识别治理重点及关键问题,提高治理效率;(2)应充分发挥群众主观能动性,在政策调控的基础上,采用宣传、经济补偿等手段提高群众对生态治理的认同度及参与度,落实人与自然和谐相处理念;(3)明确生态补偿主体,完善流域生态补偿机制,以多元化的形式进行生态补偿,提高流域上下游综合治理积极性;(4)构建合理的绩效考评制度,提高项目质量,评估项目实施成效。

### 参考文献

- [ 1 ] 朱威,周小平,蔡杰.太湖流域水环境综合治理及其启示[J].水资源保护,2016,32(3):149-152.  
ZHU W, ZHOU X P, CAI J. Lessons from comprehensive management of water environment in Taihu Basin [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3): 149-152.
- [ 2 ] 何佳,徐晓梅,杨艳,等.滇池水环境综合治理成效与存在问题[J].湖泊科学,2015,27(2):195-199.  
HE J, XU X M, YANG Y, et al. Problems and effects of comprehensive management of water environment in Lake Dianchi [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(2): 195-199.
- [ 3 ] 郑晓,郑垂勇,冯云飞.基于生态文明的流域治理模式与路径研究[J].南京社会科学,2014(4):75-79.  
ZHENG X, ZHENG C Y, FENG Y F. Governance models and paths of watershed based on ecological civilization [J]. Nanjing Social Sciences, 2014(4): 75-79.
- [ 4 ] 胡熠.我国流域治理机制创新的目标模式与政策含义——以闽江流域为例[J].学术研究,2012(1):49-54.  
HU Y. The Goal model and policy implications of watershed governance mechanism innovation in China: A case study of the Minjiang River Basin [J]. Academic Research, 2012(1): 49-54.
- [ 5 ] 国家发展和改革委员会.千岛湖及新安江上游流域水资源与生态环境保护综合规划[EB/OL].(2014-01-14)[2023-03-09].<https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201401/W020190905497736408027.pdf>.  
National Development and Reform Commission. Comprehensive plan for water resources and ecological environment protection of Qiandao Lake and the upper reaches of Xin'an River Basin [EB/OL]. (2014-01-14) [2023-03-09]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201401/W020190905497736408027.pdf>.
- [ 6 ] 徐高福.基于生态美学理念的森林经营研究——以浙江千岛湖为例[J].林业调查规划,2022,47(5):137-140.  
XU G F. Forest management based on ecological aesthetics concept——A case study of Qiandao Lake in Zhejiang Province [J]. Forestry Survey and Planning, 2022, 47(5): 137-140.
- [ 7 ] 景守武,张捷.跨省流域横向生态补偿与城市水环境全要素生产率——以浙皖新安江流域为例[J].城市问题,2023(1):89-99.  
JING S W, ZHANG J. Trans-provincial basin horizontal ecological compensation and total factor productivity of urban water environment: Take the Xin'an River basin in Zhejiang and Anhui Province as an example [J]. Urban Problems, 2023(1): 89-99.
- [ 8 ] 李奇伟.我国流域横向生态补偿制度的建设实施与完善建议[J].环境保护,2020,48(17):27-33.  
LI Q W. The construction of horizontal ecological compensation system of watershed in China and suggestions for improvement [J]. Environmental Protection, 2020, 48(17): 27-33.
- [ 9 ] 宋晓萌.对流域生态补偿机制、河长制应用的经验总结和问题思考——以新安江流域为例[J].长江技术经济,2020,4(s1):1-2.  
SONG X M. Experience summary and problems thinking on the application of ecological compensation mechanism and river chief system in river basins —— Taking Xin'an River Basin as an example [J]. Technology and Economy of Changjiang, 2020, 4(s1): 1-2.
- [ 10 ] 赵煜,王珊.中国流域生态补偿研究综述[J].河南工业大学学报(社会科学版),2021,37(5):9-18.  
ZHAO Y, WANG S. Summary of research on watershed ecological compensation in China [J]. Journal of Henan University of Technology (Social Science Edition), 2021, 37(5): 9-18.

(下转第91页)

- [21] 项邦东, 赵海青, 张文杰. 间歇性曝气对陶瓷平板膜生物工艺处理效果的影响 [J]. 水处理技术, 2017, 43(5): 89-91. XIANG B D, ZHAO H Q, ZHANG W J. Study on the effects of intermission aeration on ceramic-membrane bioreactor process [J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(5): 89-91.
- [22] WENTZEL M C, UBISI M F, LAKAY M T, et al. Incorporation of inorganic material in anoxic/aerobic-activated sludge system mixed liquor [J]. Water Research, 2002, 36(20): 5074-5082.
- [23] 邹联沛, 王国平, 董煜, 等. SRT 对膜生物反应器出水水质的影响及其控制途径的研究 [J]. 水处理技术, 2005(4): 70-73. ZOU L P, WANG G P, DONG Y, et al. Effect of sludge retention time on effluent water quality study of its control method [J]. Technology of Water Treatment, 2005(4): 70-73.
- [24] 藏莉莉, 官章琴. 进水 C/N 比对 MBR 污泥微生物产物的特性影响 [J]. 净水技术, 2018, 37(s1): 82-86, 105. ZANG L L, GUAN Z Q. Influence of feedwater C/N ratio on characteristics of microbial products in MBR [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(s1): 82-86, 105.
- [25] 朱开贞, 吴启威, 张传义. 厌氧/好氧双膜—双污泥工艺膜污染特性 [J]. 水处理技术, 2021, 47(12): 120-123. ZHU K Z, WU Q W, ZHANG C Y. Study on the characteristics of membrane fouling in double MBRs based two-sludge process [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(12): 120-123.
- [26] 曾天续, 马娇, 党鸿钟, 等. 好氧颗粒污泥造粒过程中 EPS 及脱氮除碳性能研究 [J]. 长江科学院院报, 2022, 32(11): 71-76. ZENG T X, MA J, DANG H Z, et al. EPS and nitrogen and carbon removal performance during aerobic granular sludge granulation [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 32(11): 71-76.
- [27] 李博涵, 李岩然, 戎慧敏, 等. 活性炭对海水养殖废水处理中动态膜污染的控制过程与作用机制研究 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(1): 103-110. LI B H, LI K R, RONG H M. Study on the control process and mechanism of activated carbon on dynamic membrane pollution in mariculture wastewater treatment [J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(1): 103-110.
- [28] 孙凤. MBR 脱氮除磷工艺中关键酶活性的研究 [D]. 长春: 吉林建筑大学, 2021. SUN F. Study on key enzyme activities in MBR nitrogen and phosphorus removal process [D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2021.
- [29] OEHMEN A, SAUNDERS A M, VIVES M T, et al. Competition between polyphosphate and glycogen accumulating organisms in enhanced biological phosphorus removal systems with acetate and propionate as carbon sources [J]. Journal of biotechnology, 2006, 123(1): 22-32.
- [30] 唐霁旭, 王志伟, 马金星, 等. 454 高通量焦磷酸测序法鉴定膜生物反应器膜污染优势菌种 [J]. 微生物学通报, 2014, 41(2): 391-398. TANG J X, WANG Z W, MA J X, et al. Identifying predominant strains causing membrane biofouling by using 454 high-throughput pyrosequencing [J]. Microbiology China, 2014, 41(2): 391-398.
- [31] SOTTO R D, HO J, LEE W, et al. Discriminating activated sludge flocs from biofilm microbial communities in a novel pilot-scale reciprocation MBR using high-throughput 16S rRNA gene sequencing [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 217: 268-277. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.03.081.
- [32] 尤章超, 王德兵, 王巧英, 等. MBR 污水处理工艺长期运行中的膜强化清洗方式 [J]. 净水技术, 2022, 41(2): 75-80. YOU Z C, WANG D B, WANG Q Y, et al. Enhanced membrane cleaning method of MBR wastewater treatment process during long-term operation [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(2): 75-80.
- [33] 邱川. 壳聚糖耦合四氧化三铁( $Fe_3O_4/CS$ )对减缓 MBR 膜污染速率的应用研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017. QIU C. Application of  $Fe_3O_4$  coated with chitosan ( $Fe_3O_4/CS$ ) to alleviate the fouling rate of MBR membrane [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017.
- [34] SUN D, LIU S S. Comparison study on membrane fouling by various sludge fractions with long solid retention time in membrane bioreactor [J]. Membrane Water Treatment, 2013, 4(3): 175-189.

(上接第 67 页)

- [11] 杨耀红, 刘盈, 代静, 等. 黄河流域生态补偿现状及科学问题 [J]. 华北水利水电大学学报(社会科学版), 2022, 38(3): 20-27. YANG Y H, LIU Y, DAI J, et al. Current situation and scientific problems of ecological compensation in the Yellow River Basin [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Social Science Edition), 2022, 38(3): 20-27.