

城市静态小水体生态修复措施与生态服务价值评估研究

熊文^{1,2}, 孙晓玉¹, 黄羽^{1,2}

(1. 湖北工业大学, 湖北 武汉 430068;

2. 湖北工业大学 河湖生态修复及藻类利用湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068)

摘要:城市静态小水体污染是城市环境污染的重要问题之一。针对城市静态小水体的特点,依据稳态转换理论和生物操纵理论,形成适应于城市静态小水体的生态修复措施,并运用于武汉市青山区倒口湖水生态修复工程。工程实施后湖水水质得到明显改善,其中,水体透明度由0.2~0.4 m提高至1.0~1.5 m,溶解氧浓度由1.82~2.35 mg/L上升至5.21~6.28 mg/L, COD_{Mn}浓度由14.96~16.3 mg/L降低至3.56~5.01 mg/L, TN浓度由2.61~2.99 mg/L降至1.27~1.6 mg/L, TP浓度由0.43~0.62 mg/L降至0.06~0.12 mg/L。进一步对倒口湖水生态系统的供给、调节、文化以及支持4方面的服务价值进行评估,通过对水生态系统服务价值评价指标计算得出,工程实施前后水生态系统服务价值分别为299.34万元和645.62万元,新增服务价值346.28万元。在增量价值中固碳释氧、净化水质指标占比最大,表明在水生系统动植物的协同作用下,倒口湖的水质条件得到明显改善。

关键词:城市静态小水体;清水稳态水生态系统;生态修复;生态服务价值评估

中图分类号:X171.4, X826 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2020)02-0029-07

城市静态小水体作为城市滨水空间的重要组成部分,对城市发展和市民生活具有重要意义。相较于大型湖泊、水库水体,城市静态小水体生境主要有以下特点:1)补给水源水质差,如地表径流补水中携带有大量泥沙及污染物、城市污水处理尾水补水含有营养物质高(钟登杰等,2019);2)水体自净能力低,缺乏有利的水文及生物条件加速污染物氧化分解(郭迎庆,2005);3)底质抗干扰能力弱,沉积物-水界面易受到风浪、鱼及人类等外界因素的扰动影响,造成水体悬浮物增多(年跃刚等,2006;王锦旗等,2012;莫家勇等,2016)。城市静态小水体的以上特点导致水体富营养化严重,易爆发水华,甚至黑臭,严重影响水体景观及其生态服务功能。

目前,已有多种技术应用于城市静态小水体生态修复。郝良等介绍了引水、除藻、种植水生植物及产业结构调整的城市静态水体生态修复方法(郝良等,2016)。刘用凯等在景观湖泊水体综合整治中提出了截污控源、清淤疏浚、生态补水、水动力恢复、保持生态流量的综合型技术路线(Scheffer M, 1990;

刘用凯,2009)。徐晶等针对城市景观水体外源污染和内源污染提出补水水源控制、雨水污染控制、强化水体自然净化、建立生物净化生态系统等措施(徐晶等,2010)。前人在城市静态小水体的生态修复研究中,技术层面上未能很好解决沉积物悬浮问题;原理层面上更多是注重污染物质转移及去除,缺乏以食物网为基础的经典与非经典生物操纵理论支撑及湖泊水生态系统稳态转换理论指导,水体治理效果难以保证或治理好后的效果难以长效维持(秦伯强,2007)。此外,随着人们思想认识提升,如何通过生态修复构建人与自然和谐发展的城市水环境,需要更加科学、客观和准确的生态修复评价方法(吴丹丹等,2009)。目前生态修复效果评价还未统一,现行评价方法存在指标选取不足、修复评价单一及缺乏监测工作等问题(张文慧等,2015),且在用于评价城市静态小水体生态修复效果时,评价结果无法体现生态修复前后水体的社会与生态效益变化。

为此,本文从城市静态小水体的特点出发,基于湖泊水生态系统稳态转换及生物操纵理论,耦合控源截污、内源控制、水动力恢复、水生态系统构建及长效管理等技术,形成了针对城市静态小水体的水生态修复措施,并指导武汉市青山区倒口湖水生态修复工程,同时提出基于生态系统服务价值的城市静态小水体生态修复效果评价指标体系,从水体供给服务、调节服务、文化服务和支撑服务四个方面对生态修复效果进行评价。

收稿日期:2019-09-29

基金项目:广东省水利科技创新项目(2017-12)。

作者简介:熊文,男,教授,主要从事于长江经济带生态环境保护与修复方面的研究。E-mail:751525983@qq.com

通信作者:黄羽,男,博士,主要从事河湖生态系统修复技术方向研究。E-mail:huangyu@hbut.edu.cn

表 1 水生动物投放参数

Tab.1 Release parameters of aquatic animals

序 号	动物 名称	服务范围/ m ²	数量/ kg	序 号	动物 名称	服务范围/ m ²	数量/ kg
1	田螺	28000	50.40	5	鳊鱼	28000	65.00
2	河蚌	28000	35.00	6	锦鲤	28000	17.36
3	河虾	28000	42.00	7	乌鳢	28000	3.36
4	鲢鱼	28000	112.00		合计	168000	325.12

1.2.5 长效管理机制建立 工程实施后,需要基于生态系统固有规律与外部干扰对水生态系统进行长效管理,这是维持水体健康的重要措施。根据倒口湖水生态系统特点,制定了涵盖日常管理工作、动植物群落管理以及应急处理等方面的长效管理机制。明确了水面及排口清理、水质监测、设备检修管理等日常巡检工作以及监控动植物种群数、结构,以确保生态系统的稳定。

2 材料与方 法

2.1 样品采集与处理

在 2018 年 8 月(生态修复前)、2019 年 7 月(生态修复后)以及 2019 年 8 月(生态修复后)对倒口湖 5 个区域进行采样监测,采样点布置如图 2 所示。在采样现场对水体透明度、溶解氧进行测定,采样后分别对 COD_{Mn}、TN、TP 进行分析测定,各指标检测方法如表 2。

表 2 各指标检测方法

Tab.2 Analytical method for each water quality parameter

分析项目	检测方法	方法来源
透明度	塞氏盘法	SL 87-1994
DO	YSI 便携式多参数水质分析仪	GB11893-89
COD _{Mn}	高锰酸盐指数	GB11892-89
TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	GB11894-89
TP	钼酸铵分光光度法	GB11893-89

2.2 价值评估

《千年生态系统评估》中将水生态系统服务划分为供给服务、调节服务、文化服务和支持服务(Millennium, 2005),结合倒口湖的实际情况,在服务内容下细分为水资源供给、调蓄洪水、气候调节、净化水质、固碳释氧、休闲娱乐、科研教育和生物多样性保护 8 个子项评价指标,各评价指标计算方法见表 3(宋晓薇等, 2019; 欧阳志云等, 2004; 胥晓燕, 2012),在公式中各评估参数主要来源于周文昌、曹生奎、相晨、谢高地等文献中(周文昌等, 2019; 曹生奎等, 2013; 相晨等, 2019; 谢高地等, 2003),以及倒口湖的工程数据。式(1)为倒口湖生态系统服务价值计算公式。其中, V 总为生态服务总价值; V_i 为各类服务价值。

$$V = \sum V_i \tag{1}$$

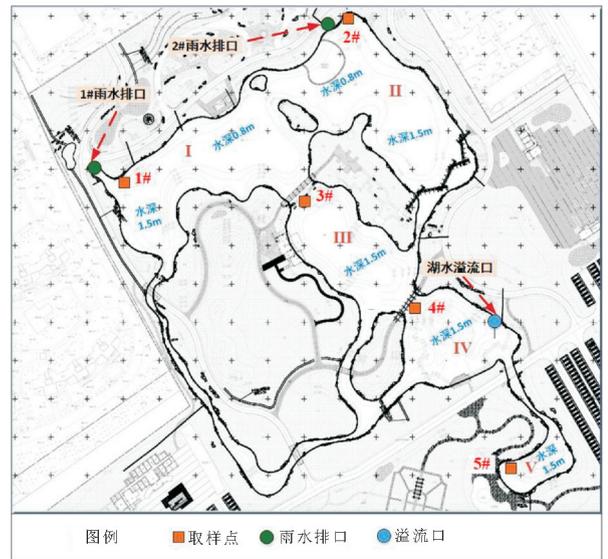


图 2 倒口湖水水质监测布点

Fig.2 Location of the water quality monitoring sites in Daokou Lake

表 3 水生态系统服务价值评价指标计算方法

Tab.3 Value evaluation method of aquatic ecosystem service index

服务类型	评价指标	公式	评价方法
供给服务	水资源供给	蓄水量	市场价值法
调节服务	调蓄洪水	可调蓄水量 水库建设单价	影子工程法
	气候调节	增加空气湿度价值+降低温度价值	替代工程法
	净化水质	水量 污水处理成本	恢复成本法
	固碳释氧	固碳释氧量×固碳释氧价格	碳税法 and 造林成本法
文化服务	休闲娱乐	水面面积 单位面积水生态系统休闲娱乐价值	成果参照法
	科研教育	水面面积 单位面积水生态系统的科研教育价值	成果参照法
支持服务	生物多样性保护	水面面积 单位面积水生态系统的生物多样性价值	成果参照法

3 结果与分析

3.1 水体透明度变化

倒口湖水体透明度见图3。2018年8月倒口湖生态修复工程实施前水体非常浑浊,水体透明度在0.2~0.4 m,通过内源污染控制工程设计的组合滤料对沉积物的抑制,2019年7月1#~5#监测点的透明度达到0.8~1.4 m,水体基本清澈见底。2019年8月监测表明1#~5#监测点的透明度在1.0~1.5 m。

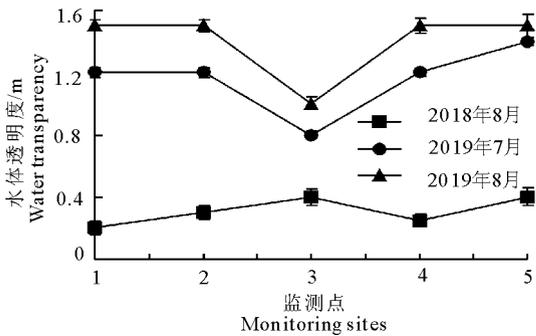


图3 倒口湖水生态修复工程实施前后水体透明度变化
Fig.3 Variation of Secchi depth (SD) clarity before and after ecological restoration of Daokou Lake

3.2 水体溶解氧变化

倒口湖水体溶解氧见图4。2018年8月倒口湖生态修复工程实施前,1#~5#监测点溶解氧在1.82~2.35 mg/L,低于《地表水环境质量标准》IV类规定的3 mg/L标准值,通过曝气机提高水体水动力,2018年7月1#~5#监测点的溶解氧浓度分别升高至5.13、5.36、5.24、5.16、5.07 mg/L,水中溶解氧浓度明显升高。2019年8月监测表明,5个监测点的溶解氧浓度在5.21~6.28 mg/L,达到《地表水环境质量标准》III类标准。

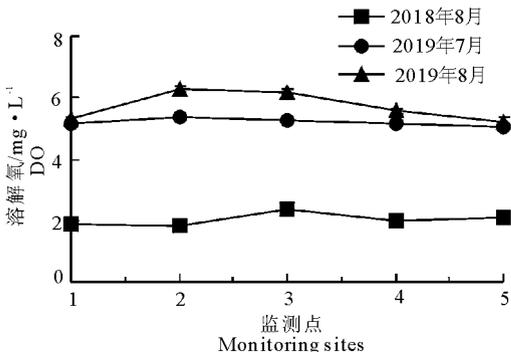


图4 倒口湖水生态修复工程实施前后水体溶解氧变化
Fig.4 Variation of DO before and after aquatic ecological restoration in Daokou Lake

3.3 水体 COD_{Mn}变化

倒口湖水体 COD_{Mn}见图5。2018年8月倒口湖生态修复工程实施前,1#~5#监测点 COD_{Mn}浓度在14.96~16.3 mg/L,达到《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》V类、劣V类水体要求,湖水水质较差。通过初期雨水净化以及水生态系统构建,2019年7月1#~5#采样点水质分别达到4.13、6.36、4.85、5.28及5.27 mg/L,湖水 COD_{Mn}浓度明显下降。2019年8月监测表明,1#~5#点位 COD_{Mn}分别降至3.56、5.01、3.77、4.03及4.71 mg/L,湖水 COD_{Mn}浓度总体达到《地表水环境质量标准》中III类水体要求。

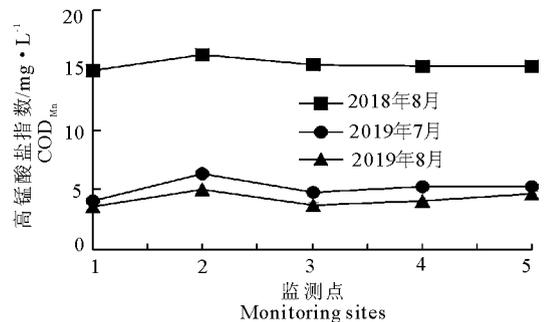


图5 倒口湖水生态修复工程实施前后水质 COD_{Mn}变化
Fig.5 Variation of COD_{Mn} before and after aquatic ecological restoration in Daokou Lake

3.4 水体 TN变化

倒口湖水体 TN见图6。工程实施前倒口湖水体 TN浓度在2.61~2.99 mg/L,超过《地表水环境质量标准》V类规定的2 mg/L标准值,实施生态修复后,水中 TN浓度明显降低,排口附近1#、2#点 TN浓度分别降低至1.38、1.28 mg/L,去除率达到50%。2019年8月监测表明,1#~5#采样点 TN浓度分别为1.29、1.27、1.42、1.46及1.6 mg/L,优于《地表水环境质量标准》IV类标准。

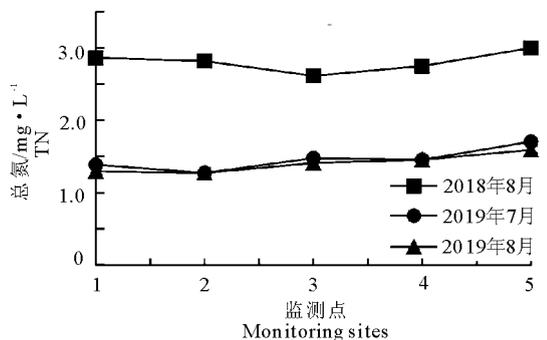


图6 倒口湖水生态修复工程实施前后水质 TN变化
Fig.6 Variation of TN before and after aquatic ecological restoration in Daokou Lake

3.5 水体 TP 的变化

项目实施前倒口湖水体中 TP 浓度如图 7。其中,在 1#、2# 排口附近 TP 浓度分别为 0.62、0.61 mg/L,浅水区域 3#、5# 的 TP 浓度分别为 0.53、0.5 mg/L,深水区 4# 浓度为 0.43 mg/L。实施生态修复后,1#、2#、3#、4#、5# 采样点 TP 浓度分别降至 0.12、0.09、0.1、0.06 及 0.1 mg/L,去除率达到 83%,水质达到《地表水环境质量标准》Ⅳ类标准。

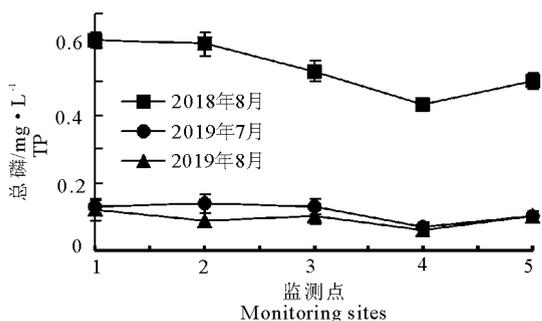


图 7 倒口湖水生态修复工程实施前后水质 TP 变化

Fig.7 Variation of TP before and after aquatic ecological restoration in Daokou Lake

3.6 倒口湖水生态系统服务价值变化

倒口湖水生态修复工程实施前后水生态系统服务价值变化如表 4。工程实施前水生态系统服务价值为 299.34 万元,当水生态修复工程完成后价值上升至 645.62 万元,增加了 346.28 万元。各评价指标增量按大小分别为:固碳释氧>净化水质>水资源供给>休闲娱乐>科研教育>生物多样性保护。从服务类型来看,不仅生态系统调节服务的价值增加了 332.56 万元,供给服务、文化服务和支持服务的价值分别增加了 6.17、5.55 和 2 万元。

表 4 实施倒口湖水生态修复工程后水生态系统服务价值增量

Tab.4 Increment of aquatic ecosystem service value in Daokou Lake after aquatic ecological restoration

服务功能	评价指标	生态服务价值/万元		生态服务价值增量/万元
		工程前	工程后	
供给服务	水资源供给	0	6.17	6.17
	调蓄洪水	0.60	0.60	0
调节服务	气候调节	298.74	298.74	0
	净化水质	0	53.83	53.83
	固碳释氧	0	278.73	278.73
文化服务	休闲娱乐	0	2.87	2.87
	科研教育	0	2.68	2.68
支持服务	生物多样性保护	0	2.00	2.00
总计		299.34	645.62	346.28

4 讨论

本文基于生物操纵理论和稳态转化理论(吴振斌等,2001;杨凤娟等,2016;种云霄,2005;秦伯强等,2005),围绕外源污染控制、内源污染控制、水动力改善、水生态系统构建及长效管理五个方面选用生态修复技术,生态修复后倒口湖水水质情况得到明显改善。在 2019 年 8 月进一步对项目进行跟踪监测评价以判断水生系统的稳定性,分析结果表明,通过工程的实施,水体透明度由 0.2~0.4 m 提高至 1.0~1.5 m,水体溶解氧由生态修复前的《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》Ⅴ类、劣Ⅴ类水质达到Ⅲ类标准,COD_{Mn}、TN、TP 去除率分别达到了 73%、50%及 83%,MOD_{Mn}由生态修复前的Ⅴ类、劣Ⅴ类水质达到Ⅲ类标准要求,TN、TP 均由劣Ⅴ类水质达到Ⅳ类标准要求,表明通过水生态系统自净作用使水质持续发生改善。同时也发现 TN 浓度的降低不明显,可能是由于水体较浅,在水力复氧和植物光合作用下使水中溶氧较高,微生物种群以发生硝化反应的好氧微生物为主,而抑制了反硝化作用。

倒口湖水生态修复工程实施前,湖水水质差难以回用,水中植物几乎不存在,生态系统破坏严重,生态服务价值均体现为调节服务。其中,受到水域面积以及气象条件的影响造成水汽蒸发对气候调节占整个调节服务价值的 99.8%。水生生态系统构建后,倒口湖生态服务价值上升了 346.28 万元,调节服务价值、供给服务、文化服务以及支持服务的价值分别占生态服务价值的 97.8%、1%、0.9%及 0.3%,倒口湖生态服务功能得到拓展。水生植物的光合作用及对水质改善,增加了水生态系统固碳释氧和净化水质的功能,表现为调节服务价值的增加。同时水质提升和环境的改善,使倒口湖雨洪公园的休闲娱乐、科研教育以及生物多样性保护功能得以体现。说明倒口湖水生态修复工程不仅改善了倒口湖水水质,还有效的提升了整个湖区的环境质量,具有较好的生态、环境及社会效益。

参考文献

- 曹生奎,曹广超,陈克龙,等,2013. 青海湖湖泊水生态系统服务功能的使用价值评估[J]. 生态经济,(9): 163-167, 180.
- 郭迎庆,2005. 城市景观水体的污染控制和修复技术[J]. 环境科学与技术,(S1): 148-150.
- 郝良,张吉祥,2016. 城市静态水体改善方法研究[J]. 现代园艺,(2): 161-162.

- 刘用凯,2009. 景观湖泊水体综合整治技术研究——以福州西湖综合整治提升水体水质为例[J]. 海峡科学, (3): 9-12.
- 莫家勇,钟萍,刘正文,2016. 生态修复对浅水湖泊沉积物磷形态特征及湖水磷浓度的影响[J]. 应用与环境生物学报,22(2): 150-155.
- 年跃刚,宋英伟,李英杰,等,2006. 富营养化浅水湖泊稳态转换理论与生态恢复探讨[J]. 环境科学研究, (1): 69-72.
- 欧阳志云,赵同谦,王效科,等,2004. 水生态服务功能分析及其间接价值评价[J]. 生态学报, (10): 2091-2099.
- 秦伯强,2007. 湖泊生态恢复的基本原理与实现[J]. 生态学报, (11): 4848-4858.
- 秦伯强,高光,胡维平,等,2005. 浅水湖泊生态系统恢复的理论与实践思考[J]. 湖泊科学, (1): 11-18.
- 宋晓薇,赵侣璇,谢祎敏,等,2019. 湖泊生态系统服务功能价值估算及保护对策研究[J]. 环境科学与管理,44(1): 162-166.
- 王锦旗,郑有飞,王国祥,2012. 城市小型湖泊生态修复方式探讨[J]. 环境污染与防治,34(4): 112-115.
- 吴丹丹,蔡运龙,2009. 中国生态恢复效果评价研究综述[J]. 地理科学进展, (4): 144-150.
- 吴振斌,邱东茹,贺锋,等,2001. 水生植物对富营养水体水质净化作用研究[J]. 武汉植物学研究, (4): 38-42.
- 相晨,严力蛟,韩轶才,等,2019. 千岛湖生态系统服务价值评估[J]. 应用生态学报,30(11): 1-12.
- 谢高地,鲁春霞,冷允法,等,2003. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, (2): 189-196.
- 胥晓燕,2012. 重庆主城区湖泊湿地生态价值评估案例研究[D]. 重庆: 重庆师范大学.
- 徐晶,朱民,2010. 城市景观水体富营养化及其控制[J]. 环境科学与管理,35(7): 154-156.
- 杨凤娟,蒋任飞,饶伟民,等,2016. 沉水植物在富营养化浅水湖泊修复中的生态机理[J]. 安徽农业科学,44(26): 66-69.
- 张文慧,胡小贞,许秋瑾,等,2015. 湖泊生态修复评价研究进展[J]. 环境工程技术学报, (6): 545-550.
- 钟登杰,张湖川,李林澄,等,2019. 城市初期雨水污染及处理措施综述[J]. 环境污染与防治,41(2): 99-105.
- 种云霄,2005. 利用沉水植物治理水体富营养化[J]. 广州环境科学, (3): 43-45.
- 周文昌,史玉虎,潘磊,等,2019. 2017年武汉东湖湿地生态系统最终服务价值评估[J]. 湿地科学, (3): 60-65.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystem and Human Well-being: Synthesis [M]. Washington D. C.: Island Press.
- Scheffer Marten, 1990. Multiplicity of stable states in freshwater systems[J]. Hydrobiologia, 200-201(1): 475-486.

(责任编辑 张俊友 郑金秀)

Assessment of an Ecosystem Restoration Project and Evaluation of Ecosystem Services for a Small Urban Lake in Wuhan, China

XIONG Wen^{1,2}, SUN Xiao-yu¹, HUANG Yu^{1,2}

(1.Hubei University of Technology, Wuhan 430068,P.R.China;

2.Key Laboratory of Ecological Remediation of Lakes and Rivers and Algal Utilization of Hubei Province, Hubei University of Technology, Wuhan 430068,P.R.China)

Abstract: Pollution of small urban lakes is an important issue in urban environments. Daokou Lake is located in the Qingshan District of Wuhan City and, after sediment dredging and a water connection project in 2016, has a water area of 28 814 m². Surface runoff is the primary source of water for Daokou Lake, resulting in high turbidity and problematic hydrodynamics. In this study we assessed an ecological restoration project on Daokou Lake that was developed based on the characteristics of the lake, regime shift theory and biomanipulation. The project involved controlling exogenous and endogenous pollution, improving the hydrodynamics, restoring the ecosystem and a plan for effective long-term management. The project began in August 2018 and was completed in July 2019, with continuing follow-up inspections. Water quality parameters were monitored before and after the project and included Secchi depth water clarity (SD), dissolved oxygen (DO), chemical oxygen demand (COD_{Mn}), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP). Water quality in Daokou Lake improved significantly after the project: SD increased from 0.2 – 0.4 m to 1.0 – 1.5 m, DO increased from 1.82 – 2.35 mg/L to 5.21 – 6.28 mg/L, COD_{Mn} decreased from 14.96 – 16.3 mg/L to 3.56 – 5.01 mg/L, TN decreased from 2.61 – 2.99 mg/L to 1.27 – 1.6 mg/L and TP decreased from 0.43 – 0.62 mg/L to 0.06 – 0.12 mg/L. The improvement in water quality was attributed to the synergistic action of the plants and animals in Daokou Lake in response to pollution reduction. The ecosystem services provided by Daokou Lake were also evaluated, including water supply and regulation, cultural value and ecological services (fixing carbon, supplying oxygen and purifying water). The estimated value of ecosystem services was 2.99 million yuan before the project and 6.45 million yuan after the project, an increase of 3.46 million yuan. Carbon fixation and water purification accounted for the largest proportion of the ecosystem service value. The Daokou Lake project significantly improved water quality while more than doubling the value of ecosystem services.

Key words: urban small static water bodies; stable aquatic ecosystem in clear water; ecological restoration; assessment of ecological service values