

文章编号: 1674 - 5566(2011)03 - 0457 - 05

圆明园景观水体生态修复过程中水质变化的初步研究

彭自然¹, 何文辉¹, 高佳慧¹, 于亚男²

(1. 上海海洋大学 农业部水产种质资源与养殖生态重点开放实验室, 上海 201306; 2. 北京市海淀区圆明园管理处, 北京 100084)

摘要:生态修复技术在水体环境治理中日益受到广泛关注。通过投放食藻虫控藻,提高水体透明度,继而采取以恢复沉水植被为重点的一系列生态修复措施,修复富营养化景观水体的食藻虫控藻引导水域生态修复工程技术得到应用和发展。在以再生水补给条件下,圆明园凤麟洲于2007年9月至11月,方河、鉴碧亭、玉玲珑馆3个景观水体于2008年4月至6月分别实施了食藻虫控藻引导的水域生态修复工程。对生态修复过程中与实施后水质状况进行监测,结果表明,浊度、化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素a(Chla)等主要水质指标均有极大改善。修复后,水体浊度仅为1~2NTU,COD为6~11 mg/L,TN为0.28~0.98 mg/L,TP为0.019~0.044 mg/L,Chla为2.1~8.5 mg/m³。与修复前相比,浊度、COD、TN、TP分别下降了74%~99%、63%~87%、77%~85%、77%~85%,水质从V-劣V类改善为II-III类。

研究亮点:同步监测了应用食藻虫控藻引导水域生态修复工程技术修复圆明园4个景观水体过程中浊度、化学需氧量、总氮、总磷等主要水质指标的变化情况,直接阐明该生态修复工程技术治理富营养化景观水体的效果。

关键词:生态修复;食藻虫;水质;圆明园

中图分类号:S 912

文献标志码:A

圆明园地处北京市海淀区,该地区地下水位低,渗漏严重,需补水以维持湖泊所需水量。但由于该地区淡水资源相对缺乏,因此圆明园景观用水引自清河污水处理厂的再生水。再生水通常含有丰富的氮、磷营养物质,以其作为景观补水极易造成富营养化,导致水华^[1]。同时,圆明园原有景观水体水质较差,不同程度地存在富营养化现象,急需开展水域生态修复。在各类景观修复方法中,生态修复技术越来越受到青睐^[2-7]。

2007年9月开始,先后对圆明园鉴碧亭、凤麟洲、玉玲珑馆和方河4个景观水体实施了以大型溞(*Daphnia magna*)控藻引导的水域生态修复工程。该工程采用大型溞下文称食藻虫控藻引导水域生态修复技术,通过食藻虫摄食藻类改善水体修复条件,人工栽种修复沉水植被,并遵循生态学原理加以调控,最终建立起自净力强的、

高度稳定的生态系统。本文研究了工程过程中水质变化规律,为探讨生态修复机理和指导生态修复实践提供参考。

1 材料与方法

1.1 生态修复工程

于2007年9月至2008年5月在圆明园4个封闭水体实施食藻虫控藻引导生态修复工程,凤麟洲施工期为2007年9月至11月,方河、鉴碧亭、玉玲珑水体施工期为2008年4月至6月。主要工程措施为:(1)施工初期投放食藻虫控藻,降低浮游植物含量,提高水体透明度;(2)栽培菹草、皱边眼子菜、篦齿眼子菜、竹叶眼子菜、小黑藻、苦草等沉水植物,配植水竹、水葱、菖蒲、千屈菜等观赏挺水植物;(3)放养乌鳢、鳊鱼、溪虾、河蚌、环棱螺等水生动物,投放光合细菌、硝化菌等有益微生物;(4)生态结构调整与后期维护。

收稿日期: 2010-11-22 修回日期: 2011-01-05

基金项目: 北京市海淀区科技项目(K20090161);上海市教育委员会重点学科建设项目(J50701)

作者简介: 彭自然(1978—),男,讲师,硕士,研究方向为水域生态修复。E-mail: zrpeng@shou.edu.cn

通讯作者: 何文辉, E-mail: whhe@shou.edu.cn

1.2 站点布设

配合工程施工进度,从2007年9月开始监测凤麟洲水域,2008年4月开始监测鉴碧亭、玉玲珑馆、方河水域,持续至2008年10月,平均监测每周1次,冰封期末监测。鉴碧亭水域面积32 000 m²,凤麟洲水域面积42 000 m²,各设5个采样点;玉玲珑馆水域面积21 000 m²,方河水域面积6 000 m²,各设4个采样点,位置见图1。

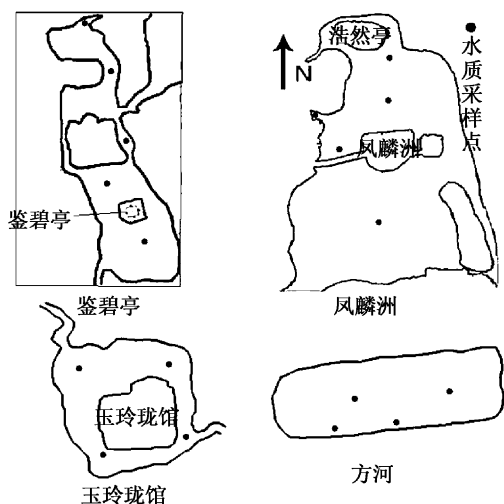


图1 采样点分布示意图

Fig. 1 Distribution map of sampling points

1.3 监测方法

监测项目和方法为:浊度采用分光光度法(GB/T 13200-1991);化学需氧量(COD)采用重铬酸盐法(GB11914-1989);氨氮(NH₃-N)测定采用纳氏试剂比色法(GB/T 7479-1987);亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)测定采用分光光度法(GB/T 7493-1987);硝酸盐氮(NO₃⁻-N)测定采用酚二磺酸分光光度法(GB/T 7480-1987);总氮(TN)测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB/T 11894-1989);溶解性磷酸盐磷(PO₄³⁻-P)测定采用钼锑抗分光光度法^[4];总磷(TP)测定采用钼酸铵分光光度法(GB/T 11893-1989);叶绿素 a(Chla)测定采用分光光度法^[8]。

2 结果与讨论

2.1 浊度

对于无机悬浮物少的景观水体,浊度在一定程度上代表藻类含量,是水质的一个重要指标之一。2007年9月至2008年10月圆明园修复工程水体浊度变化如图2所示。修复前,2007年9月凤

麟洲水体浊度为19 NTU;2008年3月,玉玲珑馆、鉴碧亭和方河浊度分别为12、10和7 NTU。历时3个月的修复工程完成后,4个水体的浊度各自降为10、5、4、4 NTU。冰封期末受冰雪消融影响,凤麟洲浊度曾一度上升至23 NTU,之后迅速降低。2008年9月为5 NTU,比2007年9月下降了74%。至2008年10月,凤麟洲、玉玲珑馆、鉴碧亭、方河水体浊度为1、2、1、2 NTU。

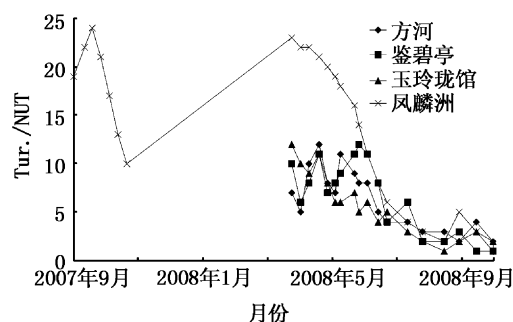


图2 圆明园生态修复过程中水体浊度变化

Fig. 2 Changes in water turbidity during the ecological restoration of Garden of Yuanmingyuan

2.2 COD_{Cr}

2007年9月至2008年10月圆明园水体COD_{Cr}浓度变化如图3所示。修复前,水体COD_{Cr}较高,凤麟洲为43 mg/L(2007年9月),方河、鉴碧亭、玉玲珑馆分别为32、32、30 mg/L(2008年4月),为IV-劣V类水质。至2008年10月,4个水体COD_{Cr}浓度为6、9、8、11 mg/L,达到I类水质标准,与修复前相比分别降低了87.0%、71.9%、75.0%、63.3%。

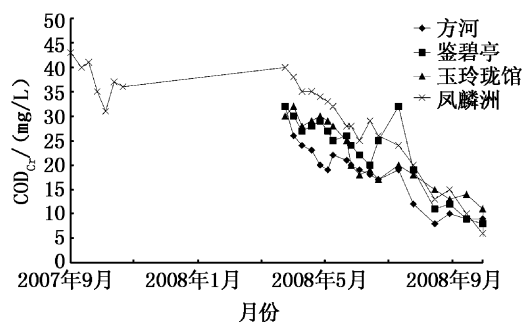


图3 圆明园生态修复过程中水体COD_{Cr}变化

Fig. 3 Changes in COD_{Cr} concentration during the ecological restoration of Garden of Yuanmingyuan

2.3 氮

2007年9月至2008年10月圆明园水体NH₃-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N浓度变化分别如图4-

图 6 所示。修复工程实施后,凤麟洲氨氮浓度从 0.87 mg/L(2007 年 9 月)降至 0.53 mg/L(2007 年 10 月),修复当年就降低了 39%;至 2008 年 10 月降低了 66%(0.11 mg/L),效果明显。2008 年 4 月,方河、鉴碧亭和玉玲珑馆 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为 0.63、1.45 和 0.67 mg/L,属 IV - V 类水质;修复后 3 个水体 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度分别降低 68%、85% 和 66%,水质改善为 II - III 类。同样,生态修复后,方河、鉴碧亭、玉玲珑馆和凤麟洲水体的 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度比修复前分别降低了 92%、97%、97% 和 96%(图 5); $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度分别降低了 80%、45%、63% 和 80%(图 6)。可见,生态修复降低无机氮浓度的效果显著。

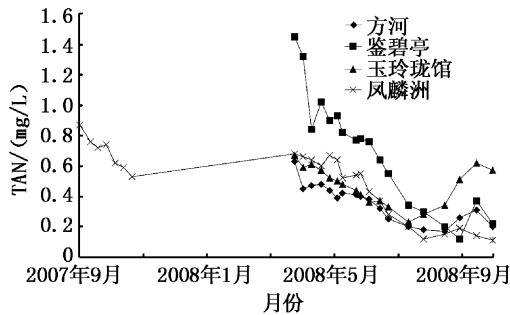


图 4 圆明园生态修复过程中水体氨氮浓度变化
Fig.4 Changes in TAN concentration during the ecological restoration of Garden of Yuanmingyuan

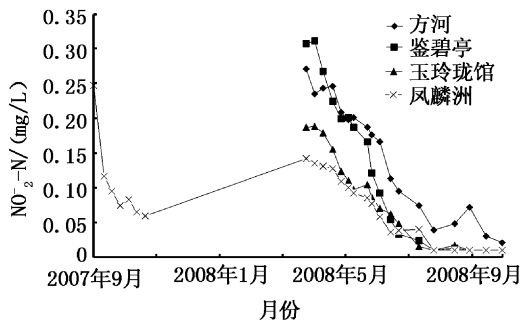


图 5 圆明园生态修复过程中水体亚硝酸盐氮浓度变化
Fig.5 Changes in $\text{NO}_2^- \text{-N}$ concentration during the ecological restoration of Garden of Yuanmingyuan

修复工程对总氮的去除效果同样显著(图 7)。从 2007 年 9 月(修复前)至 2008 年 10 月(修复后),凤麟洲 TN 降低 85%,为 0.28 mg/L;2008 年 3 月(修复前)至 10 月(修复后),方河、鉴碧亭和玉玲珑馆 TN 浓度分别降低 82%、78% 和 77%,为 0.98、0.62 和 0.96 mg/L,水质从劣 V 类改善为 II - III 类。

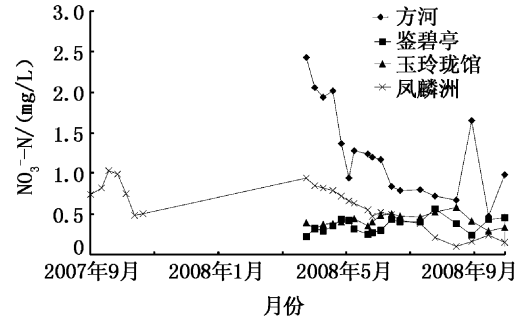


图 6 圆明园生态修复过程中水体硝酸盐氮浓度变化
Fig.6 Changes in $\text{NO}_3^- \text{-N}$ concentration during the ecological restoration of Garden of Yuanmingyuan

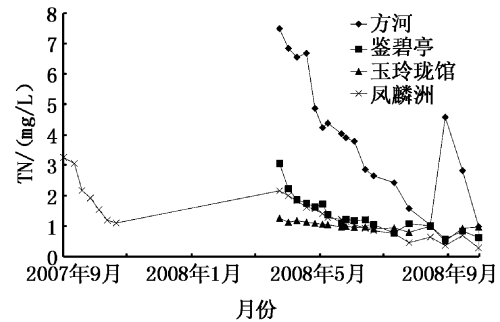


图 7 圆明园生态修复过程中水体总氮浓度变化
Fig.7 Changes in TN concentration during the ecological restoration of Garden of Yuanmingyuan

2.4 磷

生态修复后(2008 年 10 月),方河、鉴碧亭和玉玲珑馆 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 浓度比修复前(2008 年 2 月)分别降低了 93.2%、87.6% 和 90.6%,凤麟洲也比修复前(2007 年 9 月)降低了 90.2%(图 8)。2008 年 10 月,方河、鉴碧亭、玉玲珑馆和凤麟洲 TP 浓度则分别为 0.025、0.044、0.019 和 0.021 mg/L,比修复前降低了 82.2%、78.2%、77.5% 和 85.2%(图 9),水质从 IV - 劣 V 类改善为 II - III 类。

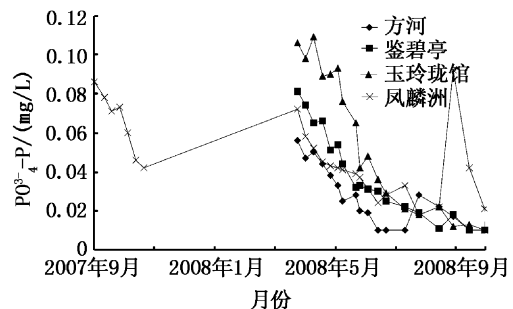


图 8 圆明园生态修复过程中水体活性磷浓度变化
Fig.8 Change of water SRP during the ecological restoration of Garden of Yuanmingyuan

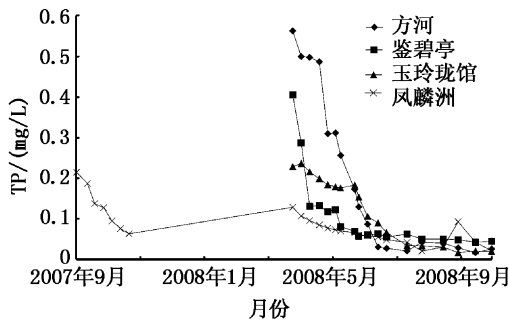


图9 圆明园生态修复过程中水体总磷浓度变化
Fig.9 Changes in TP conc. during the ecological restoration of Garden of Yuanmingyuan

2.5 叶绿素 a

叶绿素 a 是指示水体浮游植物含量和初级生产力的重要指标。2007 年 9 月至 2008 年 10 月圆明园水体叶绿素 a 浓度变化如图 10。修复后, 凤麟洲、方河、鉴碧亭和玉玲珑馆叶绿素 a 浓度降低了 94.0%、67.8%、83.1% 和 93.5%。即使在藻类易发季节, 圆明园水体依然水质稳定, 水清见底, 未出现水华。

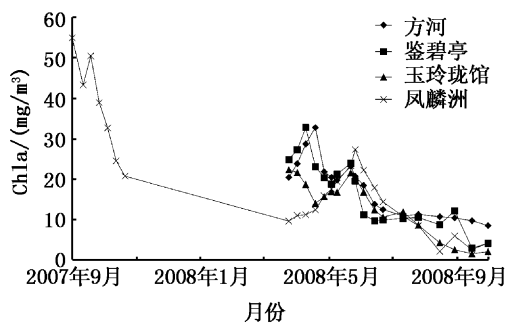


图10 圆明园生态修复过程中水体叶绿素 a 浓度变化
Fig.10 Changes in Chla during the ecological restoration of Garden of Yuanmingyuan

2.6 生态修复过程中水质变化

食藻虫控藻引导生态修复系统是一种综合生物治理技术, 通过食藻虫控藻和水生植被修复主导生态修复, 通过优化营养结构, 构建功能完善的生态系统, 增强其自身调节能力, 实现持续稳定的修复效果, 同时美化水下自然景观。一般认为, 富营养化主要由氮磷含量过高引起, 其中含磷化合物的溶解性和迁移能力比含氮化合物低, 补给量及补给速率小, 故磷往往成为淡水水体初级生产力的限制因素。藻类吸收有效磷与有效氮的比例为 $P/N = 1:16 \sim 1:15$, 控制藻类关

键在于降低磷浓度^[9-10]。

修复前, 圆明园水体 N、P 含量高, TN、TP 分别为 1.26 ~ 7.49 mg/L、0.214 ~ 0.563 mg/L, COD_{Cr} 为 30 ~ 43 mg/L, Chla 为 20.4 ~ 54.8 mg/m³, 水体中藻类含量较多。修复初期, 首先投加食藻虫大量摄食水体中藻类, 将其快速消化去除, 透明度迅速提高, 浊度下降 78% ~ 99%, 为水下沉水植被的种植创造条件。续而引种经选育的高效率沉水植被, 吸收氮磷营养物质, TN、TP 浓度急剧下降, 降幅达 77% ~ 85%。再逐步引入挺水和浮叶植物、浮游动物、鱼虾类、螺贝类和有益微生物群, 构建健全的食物链, 营养元素在营养级中流动通畅, 氮磷浓度进一步下降。至修复后期, TN 为 0.28 ~ 0.98 mg/L, TP 为 0.019 ~ 0.044 mg/L, COD 为 6 ~ 11 mg/L, Chla 为 2.1 ~ 8.5 mg/m³, 完全达到 III 类水标准, 符合景观用水要求。沉水植被大面积覆盖, 水体从藻型转化为草型, 景观生态系统趋于稳定。

可见, 在食藻虫控藻引导生态修复中, 食藻虫控藻是整个修复过程的前提和基础, 而恢复沉水植被的自净能力应是生态修复的重点^[11]。一方面, 通过种植高等水生植物强化氮磷从水体向生物体转移环节, 另一方面通过食藻虫将累积在藻类中的氮磷转移到浮游动物, 形成“水体-高等水生植物或藻类-浮游动物-滤食性或草食性动物-肉食性动物-微生物”循环模式, 延长了氮磷循环途径, 使得循环畅通无阻, 富余氮磷通过产品形式输出, 从而有效治理富营养化。

参考文献:

- [1] 王鹤立, 陈雷. 再生水回用于景观水体的水质标准探讨[J]. 中国给水排水, 2001, 17(12): 31-35.
- [2] 郭迎庆. 城市景观水体的污染控制和修复技术[J]. 环境科学技术, 2005, 28(6): 148-150.
- [3] 陈小峰, 刘从玉, 柴夏, 等. 水生生态系统构建技术在改善景观水质中的应用[J]. 污染防治技术, 2008, 21(1): 44-47.
- [4] 范志峰, 李平, 王丽卿, 等. 复合型人工湿地系统在农业面源污染水处理上的应用[J]. 上海海洋大学学报, 2010, 19(2): 259-264.
- [5] 张建强, 虞晓峰, 王世刚. 水体生态修复工程在开发区河道管理中的应用[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2010, 22(3): 17-18, 21.
- [6] 朱亮, 苗伟红, 严莹. 河流湖泊水体生物-生态修复技术评述[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005(1): 20-23.
- [7] 廖文根, 杜强, 谭洪武, 等. 水生态修复技术应用现状及发

- 展趋势[J]. 中国水利,2006(17):25-28.
- [8] 国家环保部. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [9] DOWNING J A, MCCAULEY E. The nitrogen: phosphorus relationship in lakes [J]. *Limnology and Oceanography*, 1992,37(5):936-945.
- [10] GUILDFORD S J, HECKY R E. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: Is there a common relationship? [J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45(6):1213-1223.
- [11] 何文辉,彭自然,何培民,等. 食藻虫控藻引导景观水体生态修复系统的构建与应用[C]//建设世博会美好水环境研讨会会议论文集,上海,2009:54-59.

Change of water quality during the ecological restoration in the Garden of Yuanmingyuan

PENG Zi-ran¹, HE Wen-hui¹, GAO Jia-hui¹, YU Ya-nan²

(1. Key Laboratory of Aquatic Genetic Resources and Aquacultural Ecology Certificated by the Ministry of Agriculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Yuanmingyuan Management Office, Haidian District, Beijing 100084, China)

Abstract: Ecological restoration of water environment is in the increasingly widespread concern. Aquatic ecological restoration engineering technology guided by algae-eating daphnia controlling algae was applied to improve water clarity by input algae-eating daphnia, then taking such planting submerged aquatic vegetation as the focus of a series of ecological restoration measures to rehabilitate eutrophication landscape water. In reclaimed water supply conditions, the landscape water-bodies of the Yuanmingyuan implementation projects of aquatic ecological restoration were guided by algae-eating daphnia controlling algae. In Fanghe, Jianbiting, and Yulinglongguan during April to June 2008, and Fenglingzhou during September to November, 2007, water quality monitoring was carried out during and after the restoration. The result indicates that the main indexes such as turbidity, COD, TN, TP and Chla were improved greatly. After restoration, they were 1-2NTU, 6-11 mg/L, 0.28-0.98 mg/L, 0.019-0.044 mg/L, 2.1-8.5 mg/m³ respectively. Compared with before the restoration, the four indicators mentioned above decreased 74%-99%, 63%-87%, 77%-85%, 77%-85% respectively, and the water quality was II-III grade compared with V grade before restoration.

Key words: aquatic ecosystem restoration; algae-eating daphnia; water quality; the Garden of Yuanmingyuan