

## 小流域水污染治理示范工程——杭州长桥溪的生态修复\*

吴芝瑛, 陈 鋈

(杭州市西湖水域管理处, 杭州 310002)

**摘 要:** 长桥溪是杭州西湖上游四大溪流之一。长桥溪生态修复工程利用长桥溪流域的微地貌和水动力作用, 通过地理式污水处理系统与人工湿地相结合的方法, 将污水处理工艺与景观园林紧密结合, 综合运用物理、化学、生物等手段对长桥溪流域内污水进行处理, 从而减少该溪向西湖的污染物排放。工程经过两年运行, 2006 年其入湖湖水的 TP、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度分别降至  $0.067 \pm 0.041 \text{ mg/L}$ 、 $3.54 \pm 1.23 \text{ mg/L}$ 、 $0.59 \pm 0.46 \text{ mg/L}$  和  $2.11 \pm 0.38 \text{ mg/L}$ , 较 2003 年依次降低了 88.5%、68.8%、89.1% 和 68.0%。

**关键词:** 长桥溪; 地理式污水处理; 人工湿地; 生态修复; 杭州西湖

### Demonstration project of water pollution treatment in small watershed: ecological remediation of Changqiao Stream, West Lake, Hangzhou

WU Zhiying & CHEN Jun

(Administrative Division of Water Area of the West Lake, Hangzhou 310002, P.R.China)

**Abstract:** Changqiao Stream is one of the four upper streams of West Lake. The ecological remediation of Changqiao Stream creatively integrated sewage disposal technique and landscape garden. Via underground sewage disposal system and artificial wetland, sewage in catchment of Changqiao Stream was disposed physically, chemically and biologically, so as to reduce the pollutant discharge into West Lake. After two years running, the concentration of TP, TN,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  were reduced to  $0.067 \pm 0.041 \text{ mg/L}$ ,  $3.54 \pm 1.23 \text{ mg/L}$ ,  $0.59 \pm 0.46 \text{ mg/L}$  and  $2.11 \pm 0.38 \text{ mg/L}$  respectively in 2006, decreasing by 88.5%, 68.8%, 89.1% and 68.0% compared with 2003.

**Keywords:** Chaoqiao Stream; underground sewage disposal system; artificial wetland; ecological remediation; West Lake

西湖是国际著名的城市风景旅游湖泊。西湖流域内旅游经济发达、人口稠密, 水环境问题日益严峻。据调查, 入湖溪流的水质不佳是西湖水质恶化的主要原因, 长桥溪是西湖上游四大溪流之一, 其中又以长桥溪的污染最为严重<sup>[1]</sup>。为改善长桥溪流域的水质状况, 杭州市于 2004 年 6-12 月实施了长桥溪水生态修复工程, 对该流域进行综合整治。

### 1 长桥溪流域概况

长桥溪流域地处亚热带季风气候区, 温暖湿润, 雨量充沛。长桥溪水系面积约  $1.83 \text{ km}^2$ , 河道坡度 37.50%, 径流系数 50.1%, 自南向北流向, 分东西两条支流。东侧支流沿玉皇山前山路旁沟渠流淌; 西侧支流沿阔石板路贯穿阔石板农居点; 两支流在南路南侧汇水后经长桥流入西湖。流域内居发区和林田地混杂, 产生的点源和非点源污染均较为严重。自上个世纪 90 年代以来, 长桥溪溪床垃圾成堆、蚊蝇孳生、臭气熏天, 随着长桥溪流域人口的增加, 水污染问题日趋严重。据统计, 2004 年总居住人口(本地居民和暂住人口)已达 6158 人, 2004 年长桥溪总排污量平均约达  $25182.6 \text{ t/月}$ 。长桥溪流域生态环境遭到较为严重的破坏, 2003 年生物多样性调查仅发现 16 科的 20 种植物, 且多为小草本植物; 上游溪中以水芹为绝对

\* 2007-04-12 收稿; 2007-07-31 收修改稿。吴芝瑛, 女, 1963 年生, 高级工程师。



图 1 长桥溪流域分布  
Fig.1 Map of Changqiao Stream

优势种, 岸边是数种小草本植物构成的植被层; 下游阔石板段溪中以菹草形成单一的优势种群.

长桥溪流入西湖的水常年为地表水劣 V 类水质<sup>①</sup>, 长桥溪入湖口 TN、TP 浓度分别达 9.02mg/L 和 0.364mg/L. 2003 年展开的西湖湖西综合保护工程, 对西湖上游的赤山溪、龙泓涧和金沙涧流域环境进行了整治, 大部分居民的生活污水纳入了市政污水主干, 而长桥流域由于其地形特点和居民分布的复杂性, 尚不具备将生活污水进行市政纳管的条件<sup>[2]</sup>.

长桥溪生态修复工程于 2004 年 6 月动工, 同年 12 月竣工. 范围南至玉皇山脚, 慈云岭, 北端接入西湖, 西侧与南山村居民点阔石板路毗邻, 东接玉皇山路, 占地约 5.4hm<sup>2</sup>. 地块呈南北方向狭长约 600m, 东西方向较窄, 平均约 90m(图 1).

### 2 长桥溪生态修复工程概况

长桥溪生态修复工程将流域内的污水收集起来, 汇入埋式污水处理系统进行净化处理, 出水流入园区南端的初级人工湿地, 经多级跌水, 进入公园北端的二级人工湿地, 最后汇入西湖. 通过物理、化学、生物、生态等手段, 净化了长桥流域居民生活污水, 拦截了污染物质流入西湖, 将曾经污染严重的长桥流域建成了如今风景如画的长桥溪生态公园.

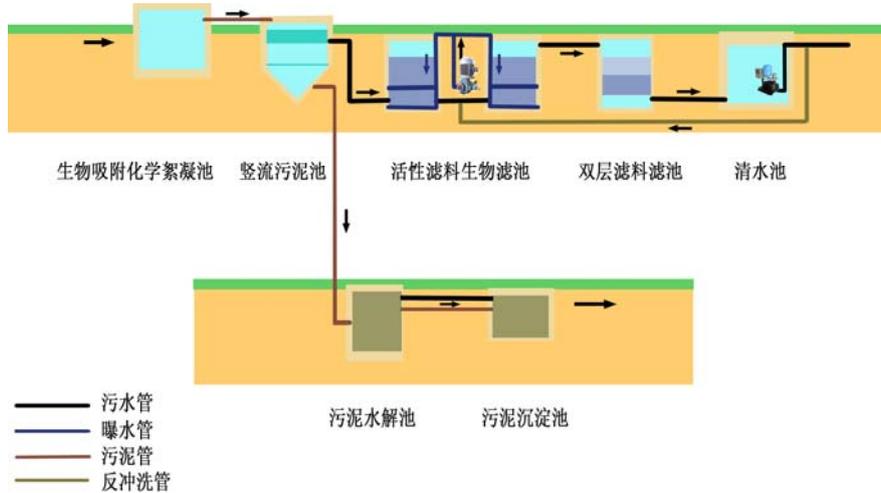


图 2 埋式污水处理系统流程  
Fig.2 Underground Sewage Disposal System processing flow

#### 2.1 埋式污水处理系统

流域内的污水收集后通过重力作用输送至地处下游的水质调节池, 该池容量约 1000m<sup>3</sup>, 污染程度不同的污水在此中和后通过泵输送到上游的位于地表下 7m 处的污水处理系统(图 2). 在该净化系统里, 污水先进入一级强化絮凝池, 再到竖流沉淀池, 除去大部分的磷, 然后进入高效曝气生物滤池, 最后到双层滤料滤池, 去除污水中的氮并进一步除磷. 目前日处理量约 1000-1500m<sup>3</sup>, 雨季可达 3000m<sup>3</sup>. 该处理系统运行管理简便, 节省能耗, 处理成本约为 0.91 元/t.

① 盛海燕. 湖西湿地生态环境调查及水生态修复的研究. 2006.

与常见的敞开式污水处理系统不同,长桥溪生态修复工程采用了地理式污水处理系统.其主体部分建造在地下,大大降低了处理过程中产生的噪音和臭味对环境的影响;而地上部分建设创造性地与园林造景结合,其上方建造了一座观景亭,与周围景观融为一体.这一设计在国内尚属首次.

## 2.2 人工湿地系统

经地下水污水处理系统处理后的再生水进入地表人工湿地系统.根据水生态修复的需要,综合考虑水面面积、水体深度、停留时间等多种因素确定采用湿地系统中的自由水面湿地系统(敞流型).该系统是向地面布水,维持一定厚度水层,水流呈推流式前进,形成一层地表水流,并从地表流出.地块纵向有坡度,底部不封闭,原貌不扰动,只需地表稍加人工平整.水体在流动过程中与土壤、植物,特别与地表根垫层及节根上生物膜相接触,通过物理、化学、物理-化学及生物反应而得到净化.据此,流域内的水系按照湿地串联系统的原理及要求设计水深和水体形式,该系统从南至北包括初级人工湿地,经过滚水坝流入二、三级人工湿地.初级人工湿地水深约40cm,水景以漫滩为主,配置挺水植物和浮叶植物,初级人工湿地既是景观水系的源头,又初步吸收、利用、降解水体中的污染物质;经多级滚水坝曝气、充氧,水体含氧量增加,更具活力;二、三级人工湿地水深约40-90cm,水生植物配置以沉水植物为主,对流入的水进行进一步的深化处理.

人工湿地的植物物种选择参考湖西湿地植物调查结果以及国内外水生生态修复资料,根据长桥溪流域内的水文地貌等条件进行设计,遵循适地适种原则,选择适应当地气候、地形和人文景观条件,耐污能力强,净化能力强,并具有一定观赏价值的植物.同时,在植物选择中考虑了水生植物的生活史以及植物群落演替规律,使得湿地内一年四季均有水生植物覆盖,四季美景交替变化.挺水植物主要选择了水毛茛(*Scirpus triangulatus* Roxb.)、黄菖蒲(*Iris pseudacorus* Linn.)、再力花(*Thalia dealbata* Fraser)、芦竹(*Arundo donax* Linn.)、芦苇(*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.)、千屈菜(*Lythrum salicaria* Linn.)、野茭白(*Zizania aquatica* Linn.)、香蒲(*Typha orientalis* Presl)、水竹(*Phyllostachys heteroclada* Oliver)、泽泻(*Alisma plantago-aquatica* Linn.)、慈姑(*Sagittaria trifolia* Linn. var. *sinensis* (Sims) Makino)、石菖蒲(*Acorus tatarinowii* Schott)、荷花(*Nelumbo nucifera*)等品种,浮水植物有睡莲(*Nymphaea tetragona* Georgi),沉水植物选择了黑藻(*Hydrilla verticillata* (Linn. F.) Royle)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum* Linn.)、苦草(*Vallisneria spiralis* (Lour) Hara)、菹草(*Potamogeton crispus* Linn.)、狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum* Linn.)等.根据不同植物的特性,种植时从南到北即从初级人工湿地(图3)、多级滚水坝到二、三级人工湿地分别配置挺水、浮叶和沉水植物.

## 3 长桥溪生态修复工程效果评价

### 3.1 地理式污水处理系统进出水水质变化

2005年9月-2006年12月的连续监测(图4)显示,污水处理系统进水的TP、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 浓度都较高,分别为 $0.228\pm 0.032\text{mg/L}$ 、 $14.30\pm 5.33\text{mg/L}$ 、 $7.50\pm 2.25\text{mg/L}$ 和 $5.86\pm 2.37\text{mg/L}$ ,经地理式污水处理系统后,各项指标均大幅度下降,依次降至 $0.028\pm 0.012\text{mg/L}$ 、 $1.07\pm 0.58\text{mg/L}$ 、 $0.14\pm 0.12\text{mg/L}$ 和 $1.81\pm 0.38\text{mg/L}$ ,降幅分别达87.7%、92.5%、98.1%和69.1%.可见,地理式污水处理系统有效降低了污水中的氮、磷含量.

污水经地理式污水处理系统处理后进入人工湿地,即长桥溪生态公园地表,同步对其进行了监测,其TP、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 浓度分别为 $0.032\pm 0.010\text{mg/L}$ 、 $2.44\pm 0.87\text{mg/L}$ 、 $0.28\pm 0.23\text{mg/L}$ 和 $2.07\pm 0.40\text{mg/L}$ ,与地理式污水处理系统的出水无显著差异( $p>0.05$ ).从数据分析看,公园地表水的相应指标比污水处理系统出水均有一定增加,尤其是氮含量.这是由于水体在入西湖前,接受一支从玉皇沉淀池出来的含氮量相对较高的水,使湿地中水氮的含量相应增加,另外大气沉降、地表径流等也产生一定的影响.

### 3.2 整治前后长桥溪入西湖水质变化

对2003-2006年长桥溪入西湖水的TP、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 监测结果(图5)表明,各项指标总体呈现出逐年降低的趋势.生态修复工程竣工前(2003-2004年)TP、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的浓度均较高,全部超出了《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)的V类标准限值;整治后(2005-2006年)水质明显好转,

与 2003、2004 年相比, TP、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 COD<sub>Mn</sub> 均表现出极显著的下降( $p < 0.01$ ). 至 2006 年, TP、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 COD<sub>Mn</sub> 浓度分别降至  $0.067 \pm 0.041 \text{ mg/L}$ 、 $3.54 \pm 1.23 \text{ mg/L}$ 、 $0.59 \pm 0.46 \text{ mg/L}$  和  $2.11 \pm 0.38 \text{ mg/L}$ , 相比 2003 年依次降低了 88.5%、68.8%、89.1% 和 68.0%. 其中 COD<sub>Mn</sub> 达到《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) I 类标准, TP 达到 II 类标准, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 达到 III 类标准.

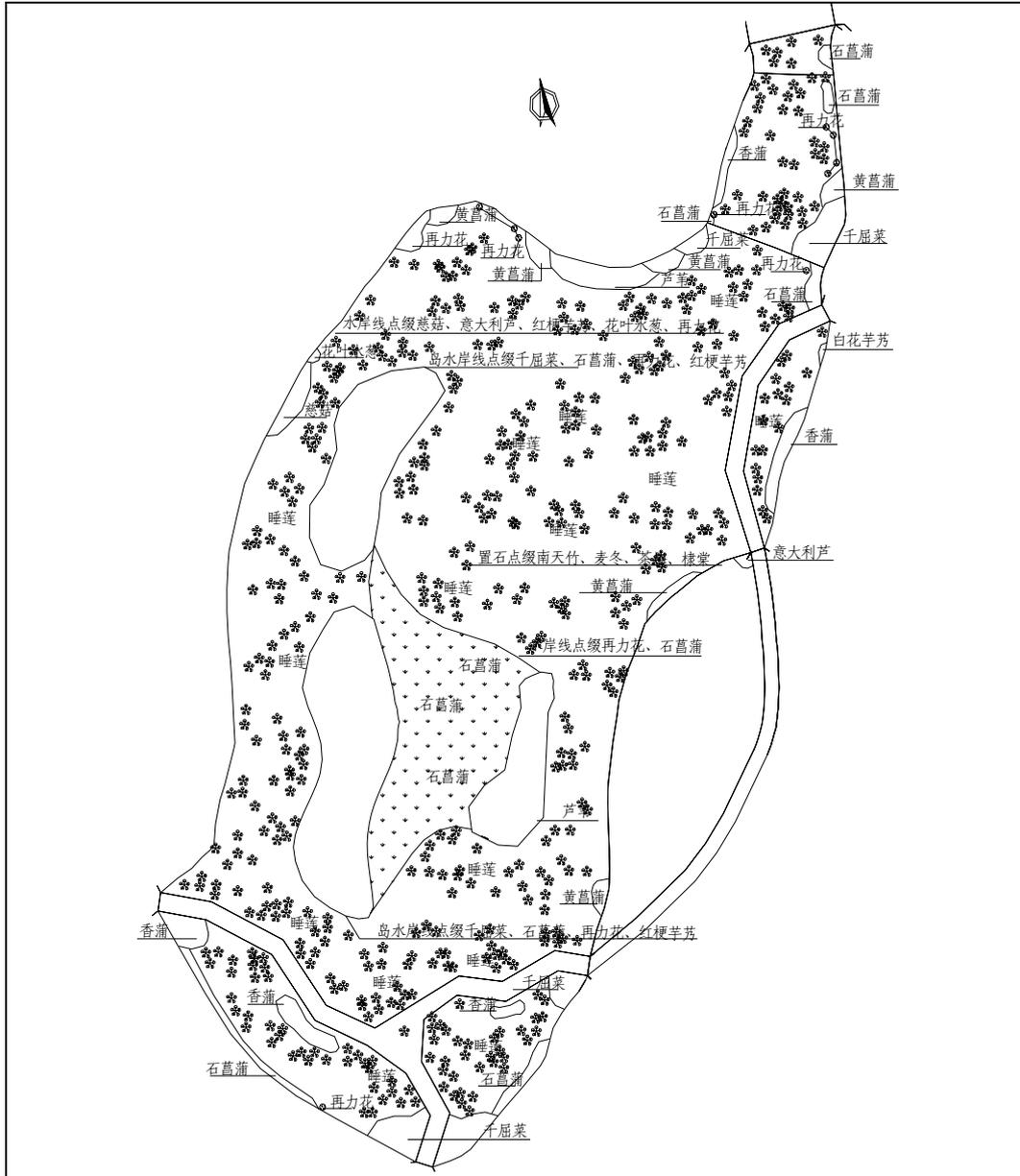


图 3 初级人工湿地水生植物配置

Fig.3 Distribution of wetland plants

长期运行结果表明, 通过地理式污水处理系统与人工湿地相结合的手段, 长桥溪入湖水质得到了较大的改善. 地理式污水处理系统大大降低了生活污水中的氮、磷含量, 人工湿地除对前处理系统产生的

再生水进一步净化, 并对大气沉降、地表径流带入的污染物进行净化. 同时, 增加了水体中溶解氧, 从2004年的5.9mg/L增至2006年的9.2mg/L, 大大提高了水体的活力, 从而为生物的生长、代谢以及污染物的降解提供了更为有利的环境.

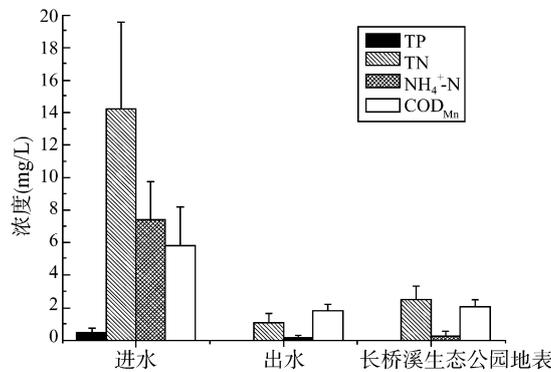


图4 地理式污水处理系统进出水及长桥溪生态公园地表 TP、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 COD<sub>Mn</sub> 比较  
 Fig. 4 TP, TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and COD<sub>Mn</sub> concentration comparison of underground sewage disposal system incoming/outcoming water and Changqiao Ecological Park Surface Water

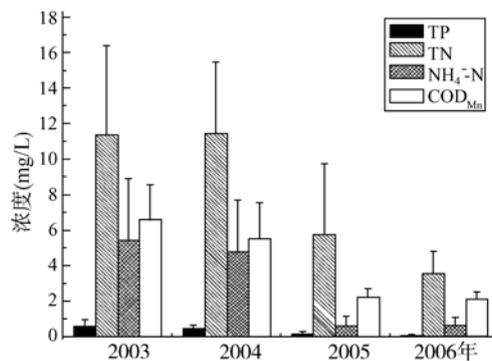


图5 2003-2006年长桥溪入湖湖水 TP、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 COD<sub>Mn</sub> 变化  
 Fig.5 TP, TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and COD<sub>Mn</sub> concentration changes of water from Changqiao Stream to West Lake from 2003 to 2006

### 3.3 生态及景观效应评价

通过水生生态修复工程, 目前长桥溪生态公园内水体中已形成了以由黑藻、金鱼藻、苦草、菹草、狐尾藻等组成的沉水植物和以睡莲为主的浮水植物群落. 这些水生生物的茎叶表面吸收水体中的营养盐, 根从底泥中获取营养盐, 其光合过程中可以不断向水体释放大量的氧气, 促进有机污染物和无机还原物的氧化分解, 促进和维护底泥表层成为氧化态的氧化层, 抵制内负荷的释放, 改善了水体理化环境, 有利于水生态系统的恢复. 另外, 由以挺水植物水毛茛、黄菖蒲、再力花、花叶芦竹、芦竹、芦苇、千屈菜、旱伞竹、银芦、野刀茅、野茭白、香蒲、水竹、泽泻、意大利芦、慈姑、石菖蒲、荷花等为主构建的水陆交错带具有明显的边缘效应, 是生物圈中重要的生态过渡带<sup>[3]</sup>, 具有对水陆生态系统的物流、能流、信息流和生物流发挥过滤器和屏障作用的缓冲带功能, 保持生物多样性并提供野生动植物栖息地(生境)以及其它特殊地的保护功能, 稳定湖岸、控制土壤侵蚀的护岸功能, 提供丰富的资源、多用途的娱乐场所和舒适的环境等经济美学价值. 健康的水陆交错带的构建不仅有助于长桥溪水生生态系统的恢复, 还能为游客带来美好的景观效果.

相比国内其他的生态修复工程<sup>[4-8]</sup>, 净化功能区与园林景观紧密结合是长桥溪生态修复工程的重要特色. 地理式污水处理系统上方建造了观景亭, 而人工湿地更是建设成为公园的主要景点, 依次为“落颖池”(初级人工湿地)、“挹清池”(多级曝气)、“浣碧池”(二、三级人工湿地)、“濯缨池”(山洪水沉砂池区). 池岸采用草坡延伸入水, 既增添景效又可防止水流冲刷泥土, 对污水也有一定的自净功能. 这些景点从南往北串起一条天然过滤线, 使溪水更具生态净化作用. 同时合理建设了宣传画廊、木亭、路亭、园门、公厕、值班室、管理房等建筑, 既生动地展示了水生态修复流程, 让游人了解污水处理和生态净化的全过程, 又能欣赏园林景观美景.

#### 4 结语

长桥溪生态修复工程的实施对该流域内的环境改善取得了明显的成效:

(1) 利用长桥溪流域的微地貌和水动力作用, 通过物理、化学、生物、生态等手段综合处理流域内污水, 入湖水质得到了明显改善, 2006 年主要污染物 TP、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度分别降至  $0.067 \pm 0.041 \text{mg/L}$ 、 $3.54 \pm 1.23 \text{mg/L}$ 、 $0.59 \pm 0.46 \text{mg/L}$  和  $2.11 \pm 0.38 \text{mg/L}$ , 较 2003 年依次降低了 88.5%、68.8%、89.1%和 68.0%.

(2) 由乔灌木、湿生植物、挺水植物和沉水植物共同组成的面积约为  $44,455 \text{m}^2$  的湿地生态系统的构建, 提高了长桥溪水生态公园的生物多样性, 促进了湿地生态系统的稳定.

(3) 改善了长桥溪原来脏乱差的面貌, 使之成为集生态、观赏、休闲、科普教育和水生态修复示范为一体的新型公园.

近年来, 在日益剧烈的人类活动影响下, 城市及周边地区天然水体极易受到污染和富营养化的威胁. 天然水体遭破坏以后, 恢复到健康的水生态系统往往需要长期、不懈的努力<sup>[9]</sup>. 长桥溪生态修复工程在小流域水污染整治的领域内作出了较为成功的尝试, 其技术、经验对其它小流域乃至更大范围的水环境治理具有重要的借鉴意义, 其污染治理与景观相结合的理念也为城市水体污染整治提供了新的思路.

#### 5 参考文献

- [1] 陆莹. 入湖溪流对西湖富营养化的影响调查. 环境监测管理与技术, 2000, 12(增刊): 31-32.
- [2] 陈琳. 城市湖泊型风景区水环境的综合治理. 城乡建设, 2006, (6): 49-50.
- [3] Peterjohn WT, Correll DL. Nutrient dynamics on an agricultural watershed: Observations on the roles of a riparian forest. *Ecology*, 1984, 65: 1466-1475.
- [4] 尹澄清, 毛战坡. 用生态工程技术控制农村非点源水污染. 应用生态学报, 2002, 13(2): 229-232.
- [5] 王庆安, 任勇, 钱骏等. 人工湿地塘床系统净化地表水的试验研究. 四川环境, 2000, 19(1): 9-15.
- [6] 王国祥, 濮培民, 张圣照等. 人工复合生态系统对太湖局部水域水质的净化作用. 中国环境科学, 1998, 18(5): 410-414.
- [7] 屠清瑛, 章永泰, 杨贤智. 北京什刹海生态修复试验工程. 湖泊科学, 2004, 16(1): 61-66.
- [8] 黄时达, 王庆安, 钱骏等. 从成都市活水公园看人工湿地系统处理工艺. 四川环境, 2000, 19(2): 8-12.
- [9] 濮培民, 王国祥, 李正魁等. 健康水生态系统的退化及其修复——理论、技术及应用. 湖泊科学, 2001, 13(3): 193-203.