

滇池流域城区河道污染治理技术体系建立及工程应用

金竹静^{1,2}, 李金花², 张春敏¹, 杨逢乐¹, 赵海光¹, 周保学², 叶海³

(1. 云南省环境科学研究院, 云南 昆明 650034; 2. 上海交通大学 环境科学与工程学院, 上海 200240; 3. 环境保护部 南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042)

摘要: 昆明市主城区是滇池外源污染最严重的区域,截污工程的实施使点源污染得到了有效控制,但城市面源对入湖污染负荷的贡献率在逐年上升,城区河道成为城市面源汇入滇池的主要途径。针对污染现状,提出“岸带立体控污、沿程梯级减污”的城区河道污染治理技术体系,对治理空间缺乏、生态系统不健康的城区河道进行改造。通过最大程度地拦截入河的污染负荷,改善城区河道的生态环境,达到最终减少入湖污染负荷的目的。该技术方法在主城区污染负荷最为严重的新运粮河和新宝象河得到了良好的应用,两条河道的拦截工程对入河的氮、磷和 COD 拦截率均大于 30%,原位减污工程对氮、磷和 COD 的削减率均大于 10%。结果表明,该技术体系能够很好地指导不同情况下城区河道的修复,可为今后其他城区河道的治理提供有力的技术支撑。

关键词: 滇池; 城区河道; 岸带拦截; 沿程减污

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)06-0100-06

Construction and Engineering Application of Pollution Control Technology System for Urban River in Dianchi Watershed

JIN Zhu-jing^{1,2}, LI Jin-hua², ZHANG Chun-min¹, YANG Feng-le¹,
ZHAO Hai-guang¹, ZHOU Bao-xue², YE Hai³

(1. Yunnan Institute of Environmental Science, Kunming 650034, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 3. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

Abstract: The urban area of Kunming is the most serious area of external pollution in Dianchi watershed. The point source pollution has been effectively controlled after implementation of sewage interception project, but the contribution of urban non-point source (NPS) pollution load is increasing year by year. Urban river carries most of the urban NPS pollutants and merges into Dianchi Lake. In this situation, technology system including riparian interception and riverbed pollutant reduction was established for restoring the urban rivers with narrow space and unhealthy ecosystem, so as to reduce the pollution load of the lake through interception of pollution load into the river and improve the ecological environment of urban river channel. The technology was applied in Xinyunliang River and Xinbaoxiang River which were seriously polluted in the urban area. The interception rates of nitrogen, phosphorus and COD in the interception project were greater than 30%, and the reduction rates of nitrogen, phosphorus and COD in the in-situ project were more than 10%. The results show that the system can be used to guide

the restoration of urban river in different conditions, and it could provide technical support for other urban river governance in the future.

Key words: Dianchi Lake; urban river; riparian interception; riverbed pollutant reduction

昆明市主城区位于滇池北岸和东北岸,流域内流经城区的河道有20多条,是对滇池外源污染最严重的区域。2014年该区域入湖COD、TN、TP量分别占滇池流域入湖污染物总量的58%、70%和45%^[1]。“十一五”期间,滇池流域河道综合整治工作全面开展,环湖截污、沿河截污干管建设完成,城区点源污水收集率达到90%以上,污水直接入河的情况基本杜绝。随着城镇化的加速,建设用地不断扩张,城市面源对入湖污染负荷的贡献率逐年上升,已经成为入湖污染的主要来源。城市面源产生的入湖污染负荷成为TN的第三大污染源,在TP污染负荷的比例中也达到了4.33%,特别对于COD的贡献已经占到了45%。昆明市开展的环湖截污工程在很大程度上起到了截污治污的作用,但是对于城市面源在非优化的工况下实际处理率仅为4.42%^[2]。城区河道是城市面源污染汇入滇池最主要的途径。因此,城市面源直接入河带入滇池的污染负荷仍不容小觑。

由于城区河道位于城市中心地带,人口密度较大,周边道路车流量较大,城市面源成为入湖河流最主要的,也是最难以控制的污染源。一方面城区河道为了防洪安全性,多数被修建成了“三面光”的河床,自身生态修复能力几乎完全丧失;另一方面城区河道处于城市建成区,许多河道治理措施,如拆除混凝土河道、重建深潭浅滩、恢复被裁弯取直的河道等大型工程措施都无法使用^[3]。因此,如何改造城区河道,最大程度地减少城市面源污染入湖,成为了一个技术难点。

本研究根据城区河道现状特征,提出了“岸带立体控污、沿程梯级减污”的城区河道污染治理技术体系。岸带立体控污充分利用河岸的所有空间,包括道路边的绿化表层空间、河道的缓坡驳岸空间、河岸的下层空间以及硬化直立驳岸空间,并结合适宜的岸带拦截技术,最大程度地减少污染物入河量;沿程梯级减污利用河床空间并结合适宜的“三面光”河床生境改造技术,提升河道的自净能力,使得污染物浓度在河床内逐步降低。从“十一五”末期开始,就在滇池流域城区污染负荷最为严重的区域,

北岸的新运粮河进行了工程应用;“十二五”期间,在东北岸新宝象河进行了工程应用。开展工程应用的两条河流,是滇池流域具有代表性的河流,城区段既有相似性,又存在差异性。根据该技术体系,因地制宜地选用了不同技术进行实地工程应用,结果显示两条河道的拦截工程对入河的氮、磷和COD拦截率均大于30%,原位减污工程对氮、磷和COD的削减率均大于10%。

1 城区河道污染治理技术

城区河道治理技术体系思路见图1。

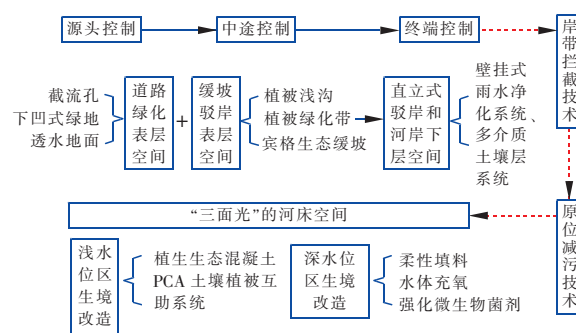


图1 城区河道治理技术体系思路

Fig. 1 Diagram of technical system of urban river treatment

1.1 岸带拦截技术

城区河道的河岸带是污染物入河的最后屏障,充分利用河岸空间,能够有效地削减入河污染负荷。根据现状特征,可利用的空间包括河道绿化带、驳岸、堤岸以及河岸的下层空间,以此为基础,构建立体的拦截系统。岸带拦截技术依据从城市面源污染的产生到入河距离的不同,可分为源头分散控制技术、中途控制技术和终端控制技术。

① 源头分散控制技术

在污染源发生地采取措施将污染物截留下来,避免污染物在降雨径流的输送过程中溶解和扩散。该控制措施可通过降低水流的流动速度,延长水流时间,对降雨径流进行拦截、消纳、渗透,减轻后续处理系统的污染处理负荷和负荷波动,对入河的面源污染负荷起到了一定的削减作用。技术措施主要包括截流孔、下凹式绿地、透水铺装,主要利用道路边的绿化带以及非机动车道路的表层空间削减入河污染负荷。

② 中途控制技术

中途控制是对地表径流进行过程拦截,使用与河道紧邻的表层绿化空间和缓坡驳岸表层空间。主要的技术措施有:渗滤沟(植被浅沟)、河岸植被绿化带、宾格生态缓坡等。

③ 终端控制技术

终端控制是城市面源污染最后入河的控制技术,利用硬化直立式驳岸空间和河岸下层空间。硬化直立式驳岸防控技术主要针对道路直排入河的雨水口,采用壁挂式雨水净化技术进行污染物拦截。河岸下层空间的利用主要针对有组织排放的雨水口溢流进行处理,以多介质土壤层系统(MSL)为核心的立体岸带面源防控技术,进行调蓄、沉淀、过滤,强化净化溢流雨水。

1.2 原位减污技术

城区河道的治理最为缺乏的就是治理空间,不似城郊区域河道附近具有水塘、空地等可以采用旁路的方式,将河水引出采用强化处理的技术手段,也不似河口区域具有宽敞的湿地区域,可对河水进行深度净化,城区河道最大的空间就是河床,并且城区河道多修建成了“三面光”,导致河道的自净能力破坏、生态功能难以恢复,因此修复城区河道的生态功能、提高其自净能力是沿程梯级减污技术的关键。根据河水水位的深浅不同,提出了浅水位区生境改造技术和深水区生境改造技术。

浅水位区河水水深 <50 cm,在旱季常常会出现河床裸露的情况。针对这种特征,可使用植生生态混凝土、PCA土壤植被互助系统等改造河床底部,增加水生植物和微生物的附着空间;深水位区河水水深 >1 m,该区域水流流速较缓,适宜采用水体充氧、柔性填料等技术改善河道的生态环境。

2 工程应用实例

城区河道污染治理技术在滇池流域新运粮河和新宝象河的城区段逐步开展了工程应用。新运粮河位于滇池北岸汇入草海,是西山区的主要防洪、排涝河道,也是进入草海水量最大、输入污染物量最多的河流^[4]。新宝象河位于滇池东北岸汇入外海,是滇池流域“古六河”之一,流域面积为 440 km^2 ,南北跨度近 30 km ,约占整个滇池流域的 10.3% ,是滇池流域第二大入湖河流^[5]。根据滇池流域规划分区的研究显示,两条河流所处的区域都是城市面源污染较重的区域^[6],如图2所示。



图2 区域位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of regional position

2.1 新运粮河工程应用效果

城区河道治理技术体系首先在新运粮河进行工程化应用。新运粮河城区段从人民西路至石材城段,长为 2.0 km ,宽为 8 m ,平均水深为 1.5 m ,呈“三面光”矩形河床;后段进入石材城后因河道综合整治改造成梯形河道断面,长为 0.5 km ,宽为 20 m ,平均水深为 1.5 m ,两岸用宾格护坡。

2.1.1 新运粮河拦截工程

① 源头控制工程

针对城市道路面源,利用道路绿化带作为处理空间,在新运粮河流域的主干道华苑路建设路面径流处理示范工程。示范段长为 $1\,200\text{ m}$,宽约 50 m ,区域汇水面积为 $60\,000\text{ m}^2$,最大处理雨量按一年一遇情况下达 $2\,042\text{ m}^3$ 。建设低于路面绿化带 $4\,000\text{ m}^2$ 及地表径流截流孔 120 组,将雨季地表径流截流至绿化带。示范效果显示,地表径流量减少近 60% 以上,对TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD和SS去除率分别达 43% 、 52% 、 34% 、 37% 和 43% ,如图3所示。

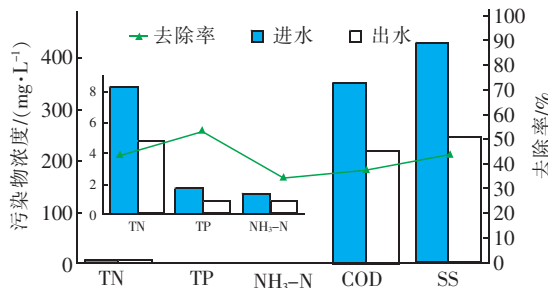


图3 城区面源散排控制示范工程效果分析

Fig. 3 Effect of scatter urban non-point controlling demonstration project

② 中途控制工程

针对河道两岸直接入河的散排城市面源,在人民西路与兴苑路之间新运粮河河段建设长约 800 m 、宽为 $8\sim 10\text{ m}$ 的植被过滤带,面积约 $9\,000\text{ m}^2$ 。

通过降雨采样结果分析,植被过滤带对初期雨水地表径流中的 TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD 和 SS 的去除率分别达到 53%、35%、49%、72% 和 45%,河岸植被过滤、拦截效果显著,如图 4 所示。

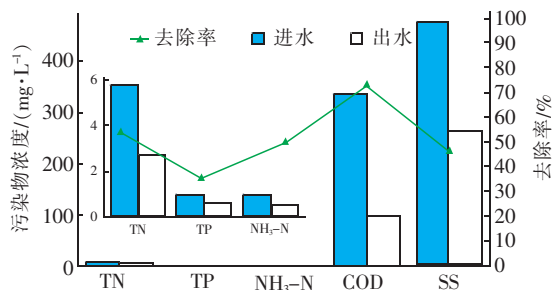


图4 城区面源植被过滤带示范工程效果分析

Fig. 4 Effect of vegetation filtration demonstration project

③ 终端控制工程

针对河岸有组织排放雨水口,采用自主研发的多级渗滤(MSL)系统^[7-9],利用河岸下层空间对溢流雨水进行处理。示范工程占地面积为 400 m²,深约 3 m,处理汇水区面积为 10 990 m²,最大处理雨量一年一遇情况下达 304 m³。示范工程充分利用岸堤下层空间,建设了埋式的面源处理系统,具有占地面积小、处理效果好、运行管理简单的特点,对 TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD 和 SS 去除率分别达到 54%、57%、72%、40% 和 71%,如图 5 所示。

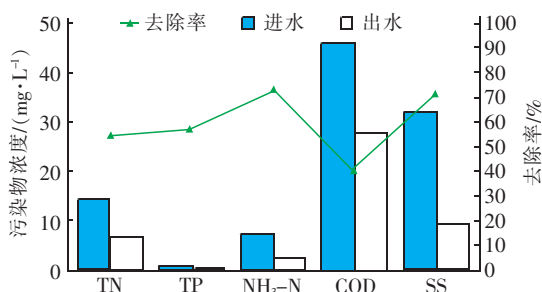


图5 岸堤立体处理示范工程效果分析

Fig. 5 Effect of river bank sublayer demonstration project

2.1.2 新运粮河原位净化工程

以河流自有“腔体”为处理空间,开展了河道原位沿程梯级减污工程示范。在该示范工程中综合应用了河道原位强化脱氮技术,筛选了不影响泄洪及生物膜快速恢复的生物填料,自行研发了太阳能高效低耗曝气技术等。示范工程处理规模达 2×10^4 m³/d,非雨季进、出水断面透明度提高约 40 cm 以上,对 TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD、BOD₅ 和 SS 去除率分

别达到 17.2%、60.5%、53.2%、43.7%、44% 和 43%,如图 6 所示。示范工程不占用土地,运行期间不影响河道的行洪安全,能够实现河水的全年全天候运行处理,并具有较好的耐冲击负荷,在雨洪过后生物膜及处理效率能快速恢复。

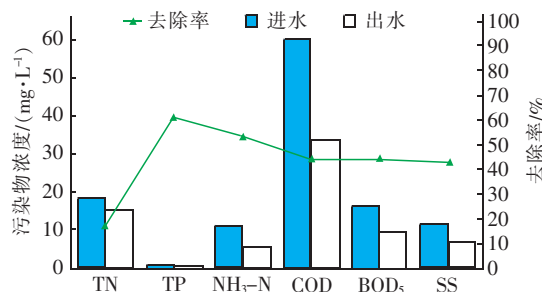


图6 新运粮河原位净化示范工程效果分析

Fig. 6 Effect of in-situ purification engineering in

Xinyunliang River

2.2 新宝象河工程应用效果分析

城区河道污染治理技术在新运粮河进行了工程示范,应用效果证明该技术体系能够较好地指导城区河道的生态环境改善。新宝象河城区段从昆洛路至广福路,河道呈矩形“三面光”,河道长为 3 km,宽为 20 m,部分河段两岸有绿化带,从彩云北路至广福路段河岸无绿化带。昆洛路至彩云北路段河水较少,水深平均仅为 0.3 m,旱季时会出现河床裸露的现象,彩云北路以下河水平均深度为 1.5 m。新宝象河位于官渡古镇人口密集区,沿河道路云秀路车流量较大,河堤不能施工导致下层治理空间无法使用,道路过于拥挤甚至河岸没有放置曝气设备的位置,与新运粮河相比,更加缺乏污染治理的有效空间。

2.2.1 新宝象河拦截工程

① 植被浅沟工程效果

针对道路散排雨水,在彩云北路以南的河岸绿化带修建植被浅沟,从路缘石开孔将初期雨水引入进行过滤,绿化带能够有效地缓解雨水的冲刷作用,对颗粒态污染物具有很强的拦截作用。

雨季城市道路初期雨水水质变化较大,污染物浓度较高,植被浅沟工程能够减少污染物的入河量。植被浅沟平均进水 TN 为 9.0 mg/L、TP 为 0.976 mg/L、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 1.54 mg/L、COD 为 67.4 mg/L、BOD₅ 为 21.9 mg/L、SS 为 408 mg/L。通过植被浅沟的拦截作用,进入河道的水质明显改善。根据雨

季的效果进行分析,植被浅沟对 TN、TP、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、COD、 BOD_5 和 SS 去除率分别达到 75%、64%、64%、54%、52% 和 89%,如图 7 所示。

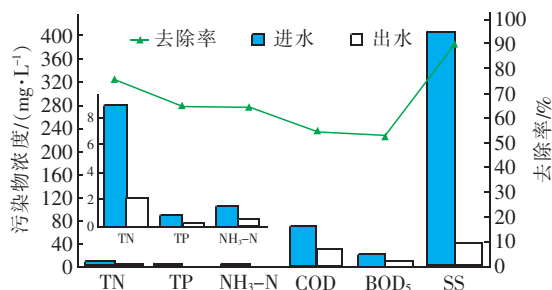


图7 植被浅沟示范工程效果分析

Fig. 7 Effect of vegetation filtration demonstration project

② 壁挂式雨水净化工程效果

由于新宝象河城区河道呈“三面光”，且有多个直接从道路入河的散排雨水口，因此，仅能利用硬化直立式驳岸空间对散排入河雨水进行治理。壁挂式雨水净化装置是根据现状特点自行研发的具有自主知识产权的技术。将其安装于新宝象河城区河岸的雨水口，针对直接入河的城市散排雨污水进行拦截净化。进水 TN 浓度为 5.4 mg/L，TP 浓度为 0.77 mg/L， $\text{NH}_3 - \text{N}$ 浓度为 1.56 mg/L，COD 浓度为 62.8 mg/L， BOD_5 浓度为 17.1 mg/L，SS 浓度为 218 mg/L。壁挂式雨水净化工程对进入新宝象河的道路散排雨污水净化效果显著（见图 8），能够在“三面光”的河道边，最大程度地减少入河污染负荷。根据水质监测分析，壁挂式雨水净化工程对 TN、TP、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、COD、 BOD_5 和 SS 去除率分别达到 36%、56%、44%、48%、42% 和 69%。

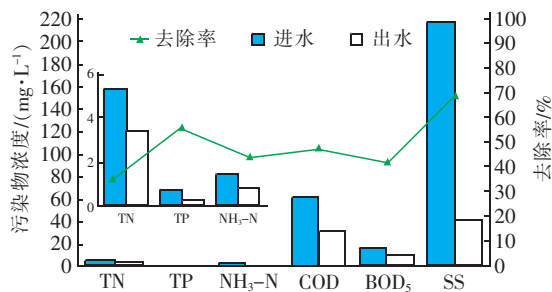


图8 壁挂式雨水净化示范工程效果分析

Fig. 8 Effect of hanging rainwater purification demonstration project

2.2.2 新宝象河原位净化工程

新宝象河的原位空间有两种情况，上段昆洛路至彩云北路平均水深仅 30 cm，属于浅水位区，下段

彩云北路至广福路平均水深为 1.5 m，属于深水位区。新运粮河原位使用的柔性填料、曝气等技术属于深水位区生境改造技术。但由于新宝象河河岸空间极度缺乏，曝气设备无处安放，深水位区采用河道原位 PGPR 技术。该技术将微生物生长需要的营养物质，采用漂浮于河面的装置搭载，利用缓释技术逐渐提供给水环境中的 PGPR 微生物，通过选择性激活有益微生物，恢复和增强水环境的自净能力，使污染物就地降解。

在河道浅水位区采用植生生态混凝土技术和 PCA 土壤植被互助系统技术，通过该技术改造了河床底部的生境，使得河床底部沉水植物增加，生长了篦齿眼子菜、菹草和刚毛藻。PCA 土壤植被互助工程区沉水植物生物量为 1 330.0 ~ 3 445.0 g/m²，平均值为 2 498.8 g/m²；生态混凝土区沉水植物生物量为 680.0 ~ 2 810.0 g/m²，平均值为 1 338.1 g/m²。河道内水生植物的恢复为生态环境的改善提供了良好的基础。

昆洛路断面 TN 浓度为 17.3 mg/L，TP 浓度为 0.945 mg/L， $\text{NH}_3 - \text{N}$ 浓度为 11.9 mg/L，COD 浓度为 64 mg/L， BOD_5 浓度为 17.4 mg/L，SS 浓度为 40.5 mg/L。新宝象河原位沿程减污示范工程效果见图 9。

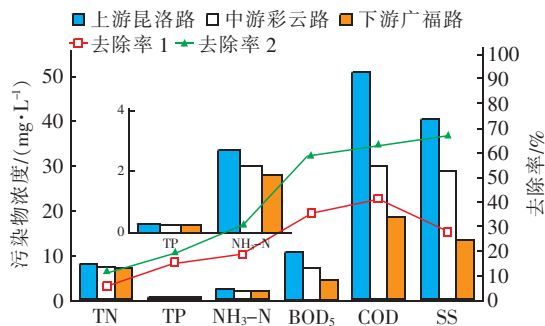


图9 新宝象河原位沿程减污示范工程效果分析

Fig. 9 Effect of in-situ purification engineering in Xinbaoxiang River

由图 9 可知，各污染物指标沿程都有一定程度的降低。根据各断面水质监测效果分析，原位沿程减污示范工程对 TN、TP、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、COD、 BOD_5 和 SS 去除率分别达到 11%、19%、30%、63%、59% 和 67%。

3 结论

针对城区河道所处区域人居密度大、面源污染重、河床“三面光”、缺乏治理空间、难以实施大规模的修建工程等情况，提出了“岸带立体控污、沿程梯

级减污”的城区河道污染治理技术体系。该技术体系充分利用河岸和河床的有效空间进行技术改造,最大程度地削减污染负荷,改善城区河道的生态环境。在滇池流域北岸和东北岸两条重要的入湖河流——新运粮河和新宝象河的实地工程应用,均表现出良好的工程效果,验证了该技术体系能够很好地指导不同情况下城区河道的修复,可为今后其他城区河道的治理提供有力的技术支撑。

参考文献:

- [1] 徐晓梅,吴雪,何佳,等. 滇池流域水污染特征(1988—2014年)及防治对策[J]. 湖泊科学,2016,28(3):476—484.
- Xu Xiaomei, Wu Xue, He Jia, *et al.* Research on the pollution characteristics of Dianchi watershed (1988—2014) and identification of countermeasures[J]. Journal of Lake Science, 2016, 28(3): 476—484 (in Chinese).
- [2] 郭怀成,贺彬,宋立荣,等. 滇池流域水污染治理与富营养化控制技术研究[M]. 北京:中国环境出版社,2017.
- Guo Huaicheng, He bin, Song Lirong, *et al.* Integrated Technical Framework for Water Pollution Control and Eutrophication Restoration of Lake Dianchi Watershed[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2017 (in Chinese).
- [3] 丁飞跃. 城市河道水环境生态治理研究[D]. 杭州:浙江大学,2015.
- Ding Feiyue. Ecological Treatment of Water Environment in Urban Rivers [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015 (in Chinese).
- [4] 金竹静,张春敏,杨逢乐,等. 城市河流沿程减污技术体系构建与工程实践[J]. 环境科学与技术,2013,36(12M):295—298.
- Jin Zhujiang, Zhang Chunmin, Yang Fengle, *et al.* Construction and engineering practice of ecological restoration technology system for reducing pollution in the typical urban river [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(12M): 295—298 (in Chinese).
- [5] 郭怀成,向南,周丰,等. 滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应[J]. 环境科学,2013,34(4):1298—1307.
- Guo Huaicheng, Xiang Nan, Zhou Feng, *et al.* First flush effects of storm events of Baoxiang River in Lake Dianchi watershed [J]. Environmental Science, 2013, 34(4): 1298—1307 (in Chinese).
- [6] 刘永,阳平坚,盛虎,等. 滇池流域水污染防治规划与富营养化控制战略研究[J]. 环境科学学报,2012,32(8):1962—1972.
- Liu Yong, Yang Pingjian, Sheng Hu, *et al.* Watershed pollution prevention planning and eutrophication control strategy for Lake Dianchi [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(8): 1962—1972 (in Chinese).
- [7] 李森,叶海,陈昕,等. 改良多介质土壤层系统对污染河水的脱氮效果[J]. 生态与农村环境学报,2012,28(5):569—573.
- Li Sen, Ye Hai, Chen Xin, *et al.* Use of a modified multi-soil-layering system to remove nitrogen from polluted river water [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2012, 28(5): 569—573 (in Chinese).
- [8] 叶海,李森,郑俊,等. 多介质土壤层系统(MSL)启动性能研究[J]. 环境科技,2011,24(5):1—4.
- Ye Hai, Li Sen, Zheng Jun, *et al.* Study on start-up performances of multi-soil-layering system (MSL) [J]. Environmental Science and Technology, 2011, 24(5): 1—4 (in Chinese).
- [9] 叶海,李森,薛峰,等. 表面负荷对多介质土壤层系统处理污染河水的影响[J]. 中国给水排水,2012,28(19):74—77.
- Ye Hai, Li Sen, Xue Feng, *et al.* Effect of surface load on treatment of polluted river water by MSL system [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(19): 74—77 (in Chinese).



作者简介:金竹静(1981—),女,湖南益阳人,在读博士,高级工程师,主要研究领域为水污染治理技术与工程应用。

E-mail:151717489@qq.com

收稿日期:2017—11—17