

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.16.006

水体内源污染原位生物修复技术探讨

陆大玮^{1,2}, 孟红雁^{1,2}, 梁兴印^{1,2}, 梁俊飞^{1,2}, 王东³, 姚瑞华³

(1. 北京全华环保技术标准研究中心, 北京 100096; 2. 中华环保联合会环保技术标准研究专业委员会, 北京 100096; 3. 生态环境部环境规划院, 北京 100012)

摘要: 针对流域水体的水质修复问题,提出了内源污染治理技术,并详细介绍了各种内源污染治理装置的设计思路和设计要点。为克服传统活性污泥法的不足,内源污染治理技术采用了载体固定化微生物,可以在水中静止不动,实现对水质修复净化;根据不同水体的特点,介绍了浅水式、深水式、喷泉式和游船式内源污染治理装置的结构设计方法和工程应用情况。

关键词: 内源污染治理; 载体固定化微生物; 曝气; 原位生物修复技术

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)16-0035-06

Study on In-situ Bioremediation Technology for Endogenous Pollution in Water

LU Da-wei^{1,2}, MENG Hong-yan^{1,2}, LIANG Xing-yin^{1,2}, LIANG Jun-fei^{1,2}, WANG Dong³,
YAO Rui-hua³

(1. Beijing Quanhua Standards Research Centre for Environmental Technology, Beijing 100096, China;
2. Environmental Technology and Standard Research Committee of All-China Environment Federation,
Beijing 100096, China; 3. Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China)

Abstract: In view of the problem of water quality restoration, the endogenous pollution treatment technology is proposed. The design ideas and key points of various endogenous pollution treatment devices are introduced in detail. In order to avoid the disadvantage of traditional activated sludge process, the endogenous pollution treatment technology uses carrier-immobilized microorganisms which can stand still in water to achieve water restoration and purification. According to the characteristics of different water bodies, this paper introduces the structural design methods and the application of four endogenous pollution control devices, including shallow-water type, deep-water type, fountain-type and pleasure-boat type.

Key words: endogenous pollution treatment; carrier-immobilized microorganism; aeration; in-situ bioremediation technology

流域水环境质量受多种因素影响,尽管外来污染源(主要有点源污染和面源污染)因素是主要的,但是目前基于水质达标的点源污染削减技术和面源污染减排措施都有了长足的发展,对阻止外来污染源进入水体、实现水环境质量改善起到了相应的作

用。在研究北运河流域的水体污染过程中,发现尽管有些河流的水较浅,但部分河段底泥较厚,底泥作为内源污染是造成水体污染的一个重要因素,仅仅对外来污染源进行控制无法彻底净化水质,有些水体即便外来污染源为零,水体的水质仍然很差。由

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07111003)

于水体的内源污染主要来自底泥,对内源污染治理最直接最有效的方法就是实施底泥疏浚,但是此方法工程量大,不能频繁地开展,只有当底泥积累到一定程度后才能开展,这个周期有时会很长,其间要想对底泥污染进行治理,需要设计一种水体内源污染治理技术和装置,要求其快捷有效、成本低,同时也可对进入水体的外来污染源进行处理。

1 水体内源污染治理技术

针对水体内源污染特点,采用原位微生物处理技术最为适宜。通常内源污染处理技术主要包括载体固定化微生物和支撑其工作的装置。载体固定化微生物技术是筛选优质高效的各种微生物及其组合,再通过离子吸附、包埋、交联、共价结合等生物工程手段,将这些微生物菌群“睡眠”在一个多酶体的载体中。载体通常由多孔惰性材料制成,具有一定的内表面积,可为其内的微生物“母体”提供足够的繁殖空间。载体具有特殊的保护层和营养物,使微生物“母体”的生存和繁殖得到了充分的保护,又可避免高浓度有害物质的冲击^[1-2]。组配的微生物有很多种,可根据不同水体污染情况筛选驯化配置不同的微生物。

内源污染治理装置主要是将载体固定化微生物置于水中^[3],配有曝气装置对水体曝气充氧,并通过曝气使水体流动,让经曝气充氧的水与固定化微生物充分反应,从而实现对水质的修复净化。该装置需要配备具有一定浮力的部件,以确保该装置漂浮在水体表面;同时需要给曝气器提供一定流量的气源。

2 内源污染治理装置的结构设计要点

在确定生物菌群后,需要借助一定的设备装置使载体固定化微生物在水体中原位就地对水质进行净化处理。该装置主要由以下几个部分组成:盛装载体固定化微生物的容器、为载体固定化微生物提供大量溶解氧的曝气器、为曝气器提供气源的风机、为整个装置提供浮力的浮桶、风机的防雨设备以及支撑连接上述各设备的框架。

2.1 浅水式内源污染治理装置的设计

在浅水水体中,水质原位净化装置水下部分的载体固定化微生物和曝气器容易被水体中的底泥覆盖,所以要保证该装置水下部分不触碰水底。由于曝气器向外喷气,不易被污泥覆盖堵塞^[4],所以载体固定化微生物放在曝气器的上方。

浅水式内源污染治理装置结构如图1所示。

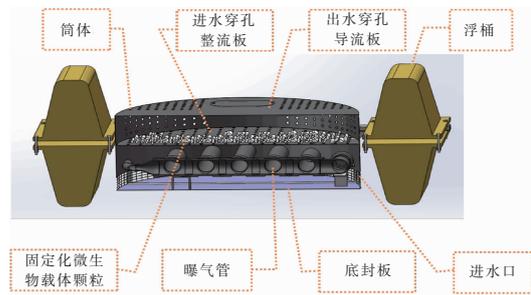


图1 浅水式内源污染治理装置示意

Fig. 1 Sketch of shallow-water endogenous pollution treatment device

浅水式内源污染治理装置质量不宜过大,其风机放在岸上,用管道将风机和该装置中的曝气器连接起来。根据曝气器的曝气量,风机与曝气器的数量关系可以是一对一,也可以一对多。

如前所述,曝气器放在筒体的下面,其上面是进水穿孔整流板,固定化微生物载体颗粒堆放在进水穿孔整流板上面,当曝气器工作时,气泡中的氧气一边溶于水中,一边向上运动,在气泡向上运动过程中,带动水流向上运动,穿过进水穿孔整流板,使带有氧气的污水和载体固定化微生物充分接触反应,曝气连续不断,这种反应也连续不断,逐步完成对水质的净化修复。

由于是在浅水区,水流在上升过程中容易将水底的污泥带起,对微生物与污水之间的反应不利,因此曝气器底部用板挡住底泥,水是从筒体侧面的下端进入筒体。为了防止水草等杂物进入筒体,进水筒体侧面的下端设计为格栅状。水进入筒体后,在曝气的作用下容易形成湍流,造成微生物与污水的不充分反应,为此设置了进水穿孔整流板。该整流板有一定数量的均布的孔,水流经过此板变成层流,能与微生物充分反应,反应后的水流经过出水穿孔导流板均匀地从反应区流出,在水流的带动下,一段时间后又进入筒体,继续反应,如此循环,最终实现水质的原位修复。

浮桶采用聚乙烯材质,耐腐蚀耐冲击,在需求量不大的情况下,可在市场上购买成品,其形状要与筒体等设备配套;筒体和各种板均采用304不锈钢材质,一是耐腐蚀,二是容易机械加工和焊接。筒体和浮桶之间的固定方式采用可调式,以适应不同水深。

2.2 深水式内源污染治理装置的设计

对于深水区,曝气器和载体固定化微生物必须

放置于一定的深度,否则将不能对水体水质进行有效修复。微生物与污水的接触时间越长,反应越充分,因此,在深水区载体固定化微生物放在曝气器的下端,避免曝气器工作后气流带着水流对微生物造成冲击。由于深水区水域通常较宽阔,风机不应放在岸上,可直接放在内源污染治理装置上方,否则输气管路过长,不易维护。

根据水深,装置的水下部分与水底应有足够的距离,以避免底泥覆盖装置携带的微生物,因此,与浅水式内源污染治理装置不同,其底部无需设置底板来阻挡底泥上升,但其侧面需设置挡板,以保证水在曝气气流的带动下,从装置的最底部进入装置,然后从装置的最上端流出装置。该装置的结构如图2所示。

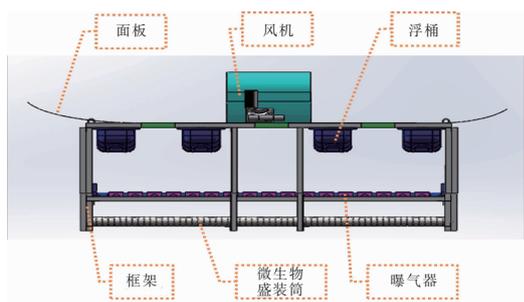


图2 深水式内源污染治理装置示意

Fig.2 Sketch of deep-water endogenous pollution treatment device

这种结构的内源污染治理装置由于在其上方设置了风机,必须要保证风机位于水面以上,防止其浸水损坏,因此在选择浮桶的体积和个数时,先要计算该装置在水中的重力(自身重力减去其浸入水中的浮力),使该重力与浮桶的净浮力(浮力减去自身重力)相平衡,并确保风机的底部与水面有10 cm左右的安全距离。为了保证水从装置的底部经过与微生物盛装筒充分接触反应后进入该装置,该装置前后左右均设置挡板并固定在框架上,挡板下部比微生物盛装筒略低,挡板的上端低于水面5~10 cm。

风机通过防水电缆与设置在岸上的电源相连接,风机接通电源后,给曝气器充气,曝气器开始曝气,带动水流向上移动,由于挡板的存在,后续的水经由微生物盛装筒向上移动,并溶解氧气,然后在后续气泡的推动下,越过挡板的顶端,向四周散去,若干时间后又吸入该装置,与微生物反应后,又被曝气器曝气后带出该装置,如此反复循环,直至最终完

成水质的净化。

浮桶与浅水式的装置一样,采用聚乙烯材质,耐腐蚀耐冲击,主要是在市场上购买成品,其形状要与框架等设备配套;微生物盛装筒采用304不锈钢板加工而成,在保证该筒体强度的前提下,筒壁上的孔越多越好,均匀分布,孔的大小以确保所有固定化微生物载体均不得漏出为准。挡板、风机的防雨罩、面板等均采用轻质防腐的板材。

一台内源污染治理装置所能处理修复水域的面积,主要取决于其工作时水流发散的面积。为此,对某装置周边经曝气器推动后水流动的最远距离进行了测试。该装置固定化微生物载体质量为75 kg,曝气量为 $1.84 \text{ m}^3/\text{min}$,测试结果见表1。可以看出,该规格的装置服务水域是半径为20 m的圆形区域。采用的微孔曝气器由于在停止曝气时微孔在水压的作用下自动闭合,所以微孔不会因为进入杂物而堵塞。

表1 深水式内源污染治理装置周围水流速度

Tab.1 Surrounding waterflow speed of deep-water endogenous pollution treatment device

水面距装置的距离/m	流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		
	0.1 m 水深	0.5 m 水深	1.0 m 水深
0.5	0.25	0.18	0.04
1.0	0.23	0.20	0.07
1.5	0.19	0.17	0.11
2.0	0.20	0.15	0.14
3.0	0.18	0.10	0.12
4.0	0.16	0.21	0.11
5.0	0.16	0.10	0.07
6.0	0.13	0.11	0.08
7.0	0.12	0.09	0.03
8.0	0.06	0.04	0.03
9.0	0.07	0.04	0.04
10.0	0.10	0.09	0.06
11.0	0.07	0.06	0.03
12.0	0.06	0.04	0.03
13.0	0.05	0.04	0.03
15.0	0.04	0.03	0.03
17.0	0.03	0.02	0.02
19.0	0.02	0.01	0.01
20.0	0.01	0.00	0.00

2.3 特殊水域内源污染治理装置的设计

有些水域由于其特殊位置或其他原因,在水面安装相关设施有一些限制或局限。例如,在有些水域,为了使水中的溶解氧达到一定数值,并使水流动

起来,通常在水体中设置一些喷泉设施^[5-6]。由于内源污染治理需要曝气,因此在有喷泉设施的水体中,可以将喷泉与内源污染治理装置相结合,省去装置中原有的曝气装置。喷泉装置可选择带浮桶的螺旋式喷泉,将盛有固定化微生物载体的容器置于喷泉装置的底部周围,并使用浮桶将其吊起,喷泉装置置于浮桶中间,其结构如图 3 所示。

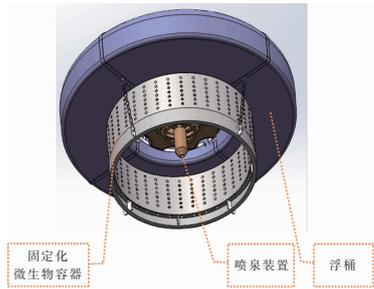


图 3 喷泉式内源污染治理装置

Fig. 3 Fountain-type endogenous pollution treatment device

在有些风景区、名胜古迹区和旅游区,上述修复装置会影响水体和区域的形象,因此需要对上述装置进行相关处理,以增强其美感,同时增加其他使用功能^[7]。例如,可以将原位修复装置和游船相结合,将修复装置的曝气器和固定化微生物载体吊在游船下面,风机放在游船中(见图 4)。这类装置在没有承载游客时,处于正常工作状态,其外观形象与风景区等相协调;在有游客登船游玩时,内源污染治

理装置停止工作,收起与岸上连接的电缆,此时该装置仅仅是一艘游船。

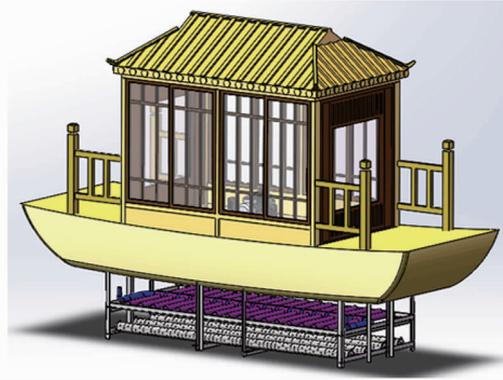


图 4 游船式内源污染治理装置

Fig. 4 Pleasure-boat type endogenous pollution treatment device

3 应用特点和案例分析

3.1 内源污染治理装置的应用条件和特点

上述几种内源污染治理装置主要是针对各种水体由于内源(底泥)污染造成的水质恶化而设计的,需要水体的流动性非常小,如果不具备这一特征,将不适合使用内源治理装置,因为该种装置需要对其服务范围内的污水反复地进行生物反应净化,若水的流动性强,则效果将大大减弱。不同类型的内源污染治理装置的应用条件、安装要点、效率、能耗、优势、成本等都不尽相同,其具体内容如表 2 所示。

表 2 不同类型装置的各项性能特点

Tab. 2 Performance characteristics of different types of devices

装置类型	水深/m	环境要求	安装要点	效率	能耗(24 h)/(kW · h · 100 m ⁻² 水域)	优点	成本
浅水式	0.3 ~ 0.8	除岸边外,水中无成群挺水植物和沉水植物	缆索固定于岸上	中	1.2 ~ 1.5	安装方便	中
深水式	>0.8	除岸边外,水中无成群挺水植物	缆索固定于岸上	高	0.7 ~ 1.0	风机和装置一体,岸上无输气管路	高
特殊式(喷泉式)	>0.6	除岸边外,水中无成群挺水植物	混凝土固定于水底	低	2.0 ~ 2.5	喷泉能美化环境	低

3.2 案例分析

3.2.1 浅水式内源污染治理装置

山东省临沂市对其境内的青龙河进行了综合治理,其中兰山区河段经河道清淤后水质有所好转,但由于附近居民生活污水的流入和生活垃圾的导入,一段时间后河道水质再次变差,为地表水 V 类或劣 V 类水平。该河段在丰水期河水会有所流动,其他时期流动性很小;由于经过河道清淤,河中的挺水植物和沉水植物都很少,水深为 0.3 ~ 0.5 m,因此适

用于浅水式内源污染治理装置。

河道水面宽 15 m 左右,采用筒体直径为 1.2 m 的浅水式内源污染治理装置,配置 15 kg 的载体固定化微生物。在生活污水入河口处两侧各 80 m 长的河段上安装内源污染治理装置,每间隔 20 m 安装一台;每台装置的曝气量为 150 m³/h,4 台装置共用一台风机,风机功率为 550 W。河段长 5.7 km,共有明显可见水流的生活污水入河口 4 处,安装浅水式内源污染治理装置 32 台,配置风机 8 台。

所有设备同时运行,除维修等特殊情况下,每台设备轮流每天停歇半小时,其余时间连续运行。经过检测得知,在设备运行一周以后水质才开始变好,再运行7~10 d,各区域的水质相继达到地表水Ⅳ类水平,约两个月以后,全河段水质相继达到Ⅳ类水质标准。但部分距离装置较远的水域(约占总水域的10%),其水质仍为Ⅴ类水质标准。

全河段水域面积约为0.086 km²,将该区域的水体从地表水Ⅴ类或劣Ⅴ类水平净化到Ⅳ类标准,电耗约为110 kW·h/d,日常运行维护至少需要1人并配机动车辆,工程总投资30万元。

3.2.2 喷泉式内源污染治理装置

天津市蓟州区境内的秦大铁路和津围公路交汇点有一处河塘,水域呈椭圆状,面积约2500 m²,一侧通过一条细长的河沟与附近的州河相连通,但河沟只有在丰水期内有小股水流过,河塘水深1.0~1.5 m,池底积泥0.3 m厚,塘内没有水草植物,水色发绿,异常浑浊,夏季有恶臭。为了美化环境和增加水中的溶解氧,相关部门在河塘中安装了3台螺旋式喷泉,白天运行,长时间运行后水质未见好转,仍有恶臭散出。

为进一步净化水质,借助其现有的喷泉,在河塘中安装喷泉式内源污染治理装置,每台装置配置载体固定化微生物30 kg。经过10 d的连续运行后,水质开始变好,20 d后水质稳定,经检测,水质优于Ⅴ类水标准。由于预先安装的喷泉装置不能长时间连续运行,工程和设施稳定运行后,喷泉恢复到只在白天运行12 h的状态,运行7~9 d后水质再次达到稳定状态,符合《天津市水污染防治工作方案》的要求。

喷泉的电机功率为1.5 kW,每天运行12 h的总电耗为54 kW·h,日常运行可安排1人兼职管理运行维护。

3.2.3 深水式内源污染治理装置

① 场地和设备选型

在北运河流域的天津市北辰区青光镇某村内有一处坑塘,水域面积约2000 m²,常年有水,地势低,与外界水系不连通,只有特大降雨量时才有水进出。附近周围有集镇、居民和宾馆,由于当地排水系统不完善,坑塘周围的部分居民的生活污水直接排入其中。坑塘中部水深1~2 m,底泥厚约0.5 m,水质浑浊且呈绿色,在夏季散发出臭味,严重影响附近居民

生活。相关部门通过在坑塘中种植鸢尾、菖蒲、香蒲、美人蕉、再力花、风车草等挺水植物,水质未见好转,随后确定使用内源污染治理装置。

根据测得的坑塘水的水质参数和坑塘的水深,选择深水式内源污染治理装置,载体固定化微生物80 kg,风机功率140 W,最大风量260 m³/h,电压220 V,曝气器位于水下0.5 m,风机风量(即曝气量)为190 m³/h,该装置150 kg,浮桶总浮力为180 kg,共两台。

② 实施要点和运行分析

根据坑塘的水域面积和轮廓形状,合理布置,确保两台装置的服务水域面积充分得到利用。确定位置后,在装置两个对角的位置上分别用耐用软绳固定,软绳的另一端分别固定在岸上;在岸上将电气控制柜安置于容易操作的地方;用防水电缆将装置上的风机和电气控制柜相连接。

正式运行后,每隔24 h取一次水样,测得水质变化情况如表3所示。可以看出,装置整体处理效果较好,COD去除率平均为59.43%,NH₃-N去除率为80.75%。

表3 坑塘水体的水质变化情况

Tab.3 Changes of water quality in pond

项目	pH值	COD/ (mg·L ⁻¹)	NH ₃ -N/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)
运行前水样	7.05	106	2.65	5.68	2.75
24 h水样	7.03	95	1.90	3.72	2.12
48 h水样	7.05	60	1.32	2.21	1.43
72 h水样	7.06	50	0.78	1.50	1.06
96 h水样	7.04	46	0.55	1.48	1.05
120 h水样	7.05	44	0.52	1.25	1.04
144 h水样	7.01	43	0.51	1.23	1.04

在运行过程中,水域能耗为两台风机的电耗,6.72 kW·h/d;人力配置上,日常运行过程中,可安排一名兼职人员进行运维,上、下午各巡视一次,持续1 h。

③ 安装要点及运维

a. 安装。装置150 kg,在安装过程中可使用吊车,但是成本过高,而且从岸上向河流坑塘水中吊装物品,一般场地不太适宜。宜采用人力搬运,为了防止装置受损,在装置底部固定一块木板,面积略大于装置的底面积。在人力搬运拖拉过程中,以木板滑地移动或在木板下放置若干滚杠滚动移动,从岸上

沿堤坡将装置推拉至水中。装置上除了风机外,其他零部件均可浸入水中,所以在装置下水前,应将风机卸下,待装置入水摆正后再装上风机。

b. 检查和取样。设备运行过程中,运维人员需不定期坐小船对装置进行查看,相关人员也会坐小船多点采取水样,包括装置旁边的水域,这两种情况下,由于曝气产生的水流,使得坐小船的人无法靠近装置。为此,需设置一根足够长的软绳,该绳子一端固定在装置上,在小船靠近装置过程中,人员可以通过拉拽该软绳来顺利移动或停止小船,实现污水采样和检查装置的目的。

由于该装置长年无间歇运行,这对风机要求很高,因此,在运维人员日常巡视时,应将两台装置错开停机0.5 h(水质监测结果表明停机不会对水体水质造成影响),也可在每个装置上安装两台风机交替运行。

4 结语

对于内源污染严重尤其是流动性不强、很少有外来补水的水体,采用载体固定化微生物的内源污染治理方式是适宜的。相对来说,该种处理方式对外界条件的要求少,适用各种类型的水体和不同的水质,具有操作简单、成本低、能耗低、易维护等特点,应用前景好。

参考文献:

- [1] 崔兵,贡恩伟. 畜禽养殖废弃物生态处理技术及资源化利用的研究[J]. 环境与发展,2018,30(6):86-87. CUI Bing, GONG Enwei. Study on ecological treatment technology and utilization of livestock and poultry breeding waste[J]. Environment & Development, 2018, 30(6):86-87(in Chinese).
- [2] 张小东,杨波,陈季华,等. 生态弹性填料及陶粒在微污染水体处理中的应用研究[J]. 中山大学学报(自然科学版),2007,46(增刊):125-127. ZHANG Xiaodong, YANG Bo, CHEN Jihua, et al. Applied study of ecological fibre and ceramic padding for micro-polluted water treatment[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2007, 46(z1):125-127(in Chinese).
- [3] 王里奥,崔志强,钱宗琴,等. 微生物固定化的发展及

在废水处理中的应用[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2004,27(3):125-129.

WANG Li'ao, CUI Zhiqiang, QIAN Zongqin, et al. Advances in immobilized microorganism and its applications of wastewater treatment[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2004, 27(3):125-129(in Chinese).

- [4] 王玮,陆庆刚,顾海涛,等. 微孔曝气增氧机的增氧能力试验[J]. 水产学报,2010,34(1):97-100. WANG Wei, LU Qinggang, GU Haitao, et al. The oxygen-enriched capacity experiment of micropore aerator[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(1):97-100(in Chinese).
- [5] 朱海波,荆勇. 景观水体生态增氧修复技术研究[J]. 环境保护与循环经济,2019,39(8):23-27. ZHU Haibo, JING Yong. Research on ecological oxygen-enrichment technology of landscape water[J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2019, 39(8):23-27(in Chinese).
- [6] 王云中,杨成建. 生态喷泉运用于景观水体水质稳定的可行性分析[J]. 生态经济,2009(11):180-182. WANG Yunzhong, YANG Chengjian. Study on feasibility of water applying ecological fountain in stabilization landscape water quality[J]. Ecological Economy, 2009(11):180-182(in Chinese).
- [7] 水利部水利风景区建设与管理领导小组办公室. 水利风景区水环境保护与水生态修复[J]. 水资源开发与管理,2017(9):76-83. Leading Group Office for the Water Scenic Areas Construction and Management of the Ministry of Water Resources. Water environmental protection and water ecological restoration of water parks[J]. Water Resources Development and Management, 2017(9):76-83(in Chinese).

作者简介:陆大玮(1976-),男,安徽安庆人,硕士,高级工程师,主要研究方向为环境保护管理制度和污染防治技术。

E-mail:cctvthree@sina.com

收稿日期:2020-01-19

修回日期:2020-03-02

(编辑:丁彩娟)