

# 多层横流渗滤床对西安浑浊景观水体的除浊效果

任勇翔<sup>1,2</sup>, 黄凯迪<sup>1,2</sup>, 高卫荣<sup>3</sup>, 杨 垒<sup>1,2</sup>, 刘 洋<sup>1,2</sup>, 张琼华<sup>1,2</sup>, 王晓昌<sup>1,2</sup>

(1. 西安建筑科技大学国家级环境类专业教学实验示范中心, 陕西 西安 710055;

2. 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 甘肃信合工程设计有限公司, 甘肃 庆阳 745000)

**摘要:** 水的浊度严重影响了城市水体的景观效果, 为高效大量去除浑浊景观水中的浊度物质, 通过竖向分层和多点进水, 开发了一种新型横流渗滤床, 在表面负荷相同时显著增加了相同表面积渗滤床的产水量. 处理水量大幅增加后渗滤床依然可以高效除浊, 三组滤料粒径(10~30、5~10、2~5 mm)渗滤床在表层水力负荷为  $0.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  时, 对浑浊景观水中浊度去除效率分别达到 85.09%、95.34%、97.41%. 考虑渗滤床运行稳定性及浊度去除效果, 建议在实际工程应用中采用 5~10 mm 粒径碎石作为渗滤床的主要填料组成. 渗滤床竖向分层与多点进水的运行方式有效分担了滤床常见的表层易堵塞的风险, 延长了渗滤床的使用周期.

**关键词:** 浑浊景观水体; 多层横流渗滤床; 产水量; 浊度; 滤床堵塞

**中图分类号:** TU992.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2018)04-0582-06

## Effect of a multi-layer cross flow infiltration bed on the treatment of turbidity from turbid landscape waters in Xi'an

REN Yongxiang<sup>1,2</sup>, HUANG Kaidi<sup>1,2</sup>, GAO Weirong<sup>3</sup>, YANG Lei<sup>1,2</sup>, LIU Yang<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Qionghua<sup>1,2</sup>, WANG Xiaochang<sup>1,2</sup>

(1. National Exemplary Center of Laboratory Education on Environmental Science and Engineering,  
Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Key Laboratory of Environmental Engineering of Shaanxi Province, Xi'an 710055, China;

3. Gansu Xin He Engineering Design Co., LTD, Qingyang 745000, China)

**Abstract:** The turbidity seriously affected the landscape effect of the urban water-body. A new infiltration bed was developed to effectively treat turbid landscape water. Through vertical stratification and multipoint inflow, the water production could be increased significantly by the same surface area of infiltration bed under the same surface loading. Although the water production increased dramatically, infiltration bed still had a high efficiency in turbidity removal. When the surface hydraulic loading rate was  $0.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , the infiltration bed with different sizes of particle (10~30, 5~10 and 2~5 mm) on the turbidity removal efficiency were 85.09%, 95.34% and 97.41%, respectively. Considering the characteristics of porosity change and turbidity removal, it was suggested that 5-10 mm diameter of gravel should be as the main filler in the practical work. The operation mode of vertical stratification and multipoint inflow could effectively share the blocking risk of the surface layer like that occurred in common filter, and prolong the operation duration of infiltration bed.

**Key words:** turbid landscape water; multi-layer cross flow infiltration system; water production; turbidity; infiltration bed blocking

西安位于我国西北地区, 地处黄土高原边缘, 是典型的资源型缺水城市, 景观用水短缺. 西安及周边地区的景观水体受当地自然条件影响较大<sup>[1]</sup>, 泥沙含量高, 水体浊度较大, 严重影响了城市水体的景观效果.

浑浊景观水体的除浊, 一般分为物理、化学、

生物及生态修复等方法<sup>[2]</sup>. 物化强化处理能够取得立竿见影的效果, 但往往局限于面积较小水域<sup>[3]</sup>. 国内外对生物及生态修复法研究较多, 尤其是人工湿地法. 王文东等<sup>[4]</sup>在利用表流-潜流人工湿地净化西安某景观湖时发现, 浊度去除率可达 80% 以上. 美国佛罗里达洲的 Apopka 湖利用潜流湿地

去除湖中的悬浮物,去除率也达到了85%以上<sup>[5]</sup>。但人工湿地水力负荷较低,占用土地面积大<sup>[6]</sup>,尤其在处理泥沙等无机物含量较大的景观用水时,常在短时间内即发生堵塞,这些都限制了其在西安地区景观水体除浊的应用。近年,人工渗滤系统在景观用水除浊领域的应用逐渐增多,韩芸<sup>[7]</sup>等在宝鸡利用岸边型渗滤系统处理景观水体中悬浮物,去除率达81.1%,但存在易堵塞、运行稳定性差等现象。在西安、咸阳等地建立的渗滤系统也存在类似问题,因此急需开发一种高效稳定的景观水体除浊处理技术。

本研究通过横流渗滤床竖向分层和多点进水,考察其对浊度的去除效果以及渗滤床孔隙率变化情况,旨在大幅提高渗滤床的产水量并延长渗滤床的使用周期,为西安及类似地区浑浊景观水体高效稳定除浊提供一条新的技术途径。

## 1 试验装置及方法

### 1.1 原水水质

径流雨水通常是景观水体的重要水源,所以结合西安市景观水体水质<sup>[8]</sup>以及西安市径流雨水水质<sup>[9]</sup>,采用浊度高于西安景观水体典型水质的人工配水,COD为30~40 mg/L(均值为35.4 mg/L), $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 为1.5~2.0 mg/L(均值为1.72 mg/L),

浊度为180~240 NTU(均值为204 NTU),TP为0.24~0.36 mg/L(均值为0.3 mg/L),其中浊度主要由经550℃高温加热1h的西安本地黄土配置,COD和部分浊度由腐殖酸配置。

### 1.2 试验装置

供试渗滤床共分三组,分别装填不同粒径的砾石,粒径分别为10~30、5~10、2~5 mm。试验装置(采用竖向三级分层串联横流渗滤工艺)如图1所示。原水通过1号进水管进入渗滤床,从第一层横流渗滤床末端隔水挡板处翻越流出,出水与2处进水管的原水混合流经第一级竖流与第二层横流渗滤床于末端翻越流出,出水与3处进水管的原水混合流经第二级竖流处与第三层横流渗滤床于出水口流出系统。试验装置表层水力负荷为 $0.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,各尺寸详见图1,宽度为35 cm。

### 1.3 分析项目及方法

浊度、COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TP的检测方法参照《水和废水检测分析方法(第四版)》,浊度采用上海昕瑞WGZ-2000浊度仪测定,COD采用酸性高锰酸盐法测定,TP采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法测定,氨氮采用纳氏试剂法测定。孔隙率按照基质饱和及放空的水量体积进行计算。统计分析工具采用SPSS19.0软件。

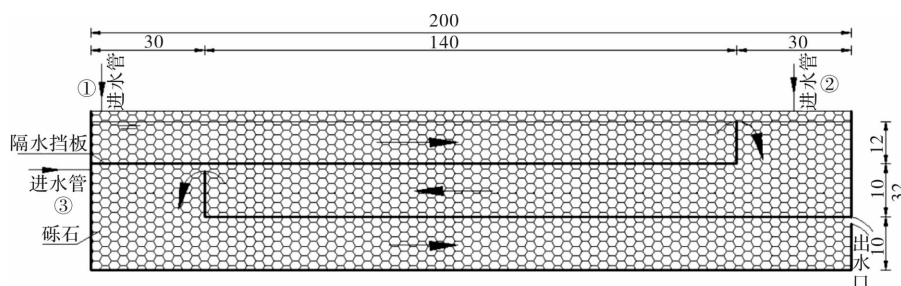


图1 多层横流渗滤床装置(单位:cm)

Fig. 1 Diagram of a multi-layer cross flow infiltration bed (unit: cm)

## 2 结果与分析

### 2.1 渗滤床产水量及水力停留时间

将某一固定厚度的渗滤床分为不分层单点进水和多层多点进水两种形式,在相同表面积和表面水力负荷 $q$ 为 $0.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,计算不分层和多层时渗滤床的产水量以及水力停留时间。渗滤床等分为 $n$ 层,每层厚度为 $h$ 。表层流量: $Q_{\text{表}} = q \cdot A$ ;水力停留时间 $T = V \cdot \epsilon / Q$ 。 $V$ 为渗滤床的体积; $\epsilon$ 为孔隙率,分别为46%、38.5%、33%; $A$ 为渗滤床表面积。为保证之后大、中、小

三组粒径渗滤床的每层压力传递,在每层横流末端设置挡板以提高出水口高度 $h(h \geq h_{f\max}, h_{f\max}$ 为最大延程水头损失)。根据达西定律,当渗滤床等分为 $n$ 层时, $n-1$ 个竖流处增加水量均为 $Q_{\text{竖}} = KFh/L$ ,总产水量为, $Q_n$ 则:

$$Q_n = Q_{\text{表}} + Q_{\text{竖}} + \dots + Q_{\text{竖}} = q \cdot A + (n-1) \cdot \frac{KFh}{L} \quad (1)$$

忽略竖流部分水力停留时间,第 $a$ 层进 waters 水力停留时间为 $T_a$ (其 $a=1, 2, \dots, n$ ),则:

$$T_a = \frac{V_a \cdot \epsilon}{Q_a} + \frac{V_{a+1} \cdot \epsilon}{Q_{a+1}} + \dots + \frac{V_n \cdot \epsilon}{Q_n} \quad (2)$$

其中： $V_n$  为渗滤床各层体积； $K$  为渗透系数，三组滤料的渗透系数分别为 125 m/d、99 m/d、55 m/d； $F$  为过水断面面积； $L$  为渗滤床横流段长度。

根据公式(1)、(2)，及各组渗滤床的初始条件，三组渗滤床在分三层和不分层情况下的理论产水量和水力停留时间计算表如表 1 所示。

表 1 渗滤床不同分层数产水量及水力停留时间

Tab. 1 The treatment capacity and surface hydraulic loading rate of infiltration bed with different layers

项目	分层数 $n$	10~30 mm 渗滤床	5~10 mm 渗滤床	2~5 mm 渗滤床
产水量 $Q_n$ / $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	不分层	0.30	0.30	0.30
	$n=3$	0.81	0.71	0.52
水力停留时间 $T_a/\text{d}$	不分层	0.27	0.23	0.20
	表层进水	0.17	0.15	0.15
	第二层进水	0.083	0.078	0.085
	第三层进水	0.034	0.032	0.037

由表 1 推导计算结果可知，在渗滤床竖向分层数为 3，多点进水时，其产水量分别为不分层的 2.7、2.4、1.7 倍，渗滤床产水量大幅增加。另外，由于产水量增加导致二、三层进水水力停留时间减少，但竖向分层有效延长了表层进水的

水力停留时间。质对悬浮颗粒也具有一定吸附作用<sup>[11]</sup>。还有，进水浊度由黄土和腐殖酸配置而成，虽然人工配水中有大量溶解态和胶体态物质，但是如图 2 所示三组渗滤床均有较高的浊度去除效果，表明采用该分层横流渗滤床对溶解态及胶体态浊度物质也能取得较好的去除。

## 2.2 不同粒径渗滤床对浊度的去除

图 2 反映了三组渗滤床在不同粒径、不同季节进出水浊度的变化。三组渗滤床对浊度的去除效果均较好，虽然进水浊度高达 200 NTU 左右，但出水浊度在不同季节都相对稳定，渗滤床的平均出水浊度分别为 31.15 NTU、9.59 NTU、5.37 NTU，平均去除率分别达到 85.09%、95.34%、97.41%，略高于韩芸等<sup>[7]</sup>在滤料为 2 mm 左右粗砂的岸边型渗滤系统的除浊效率，也明显高于传统滤池未经混凝处理时 50%~80%的浊质去除率<sup>[10]</sup>。可以看出，三组粒径不同的渗滤床均有较高的浊度去除率，填料粒径越小，去除率越高。渗滤床对浊度的去除主要是通过滤层填料对无机悬浮颗粒的截留吸附作用，滤料表面附着的微生物所分泌的粘性物

## 2.3 不同层渗滤床对浊度的去除

表 2 不同层渗滤床对浊度的去除效果

Tab. 2 Turbidity removal of infiltration bed in different layers

渗滤床粒径/mm	平均值	表层	二层	三层
10~30	出水浊度/NTU	34.7	33.32	31.15
	去除率/%	82.99	71.06	70.71
5~10	出水浊度/NTU	24.3	14.11	9.59
	去除率/%	88.31	84.31	85.46
2~5	出水浊度/NTU	17.54	10.10	5.37
	去除率/%	91.51	82.16	88.67

由表 2 可见，三组渗滤床各层对浊度均有较好的去除效果，出水浊度逐层减小。由表中还可看出表层对浊度的去除效率高于二、三层，二、三层对浊度的去除效率相近。渗滤床在 2、3 进水口加入的原水与上层出水混合，在一定程度上稀释了二、三层的进水浊度，同时二、三层进水水力停留时间较表层缩短，故其去除效果较表层略有下降。另外，即便竖向分层和多点进水的运行方式显著增加了二、三层渗滤床的水力负荷，但其依然能保持较高的浊度去除效果。

## 2.4 渗滤床孔隙率变化

### 2.4.1 三组渗滤床整体孔隙率的变化

渗滤床孔隙率的变化是影响渗滤床稳定运行的重要因素。试验条件下，各渗滤床孔隙率下降

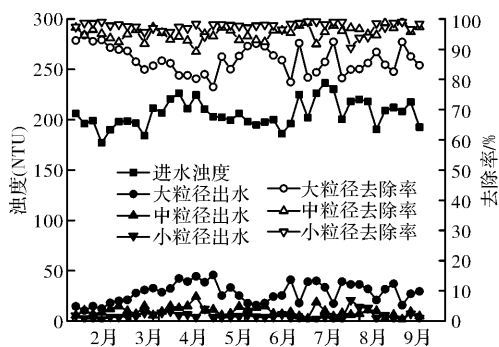


图 2 不同粒径渗滤床对浊度的去除效果

Fig. 2 Turbidity removal of infiltration bed with different particle sizes

百分比与运行时间拟合曲线如图 3, 其中孔隙率的变化未考虑生物作用影响。对三组渗滤床的实测数据进行分析可以看出, 渗滤床在运行过程中孔隙率都有一定程度的降低, 三组渗滤床(小、中、大粒径)孔隙率下降百分比速率分别为: 5.3%/月、5.0%/月、4.2%/月。经统计分析, 孔隙率下降百分比与浊度的去除效率呈显著正相关关系, 相关系数  $r$  分别为 0.771、0.882、0.731。考虑到中粒径和小粒径渗滤床对浊度的去除效果相近, 且中粒径渗滤床运行周期更长, 在实际工程应用中建议采用 5~10 mm 粒径碎石作为渗滤床的主要填料组成。

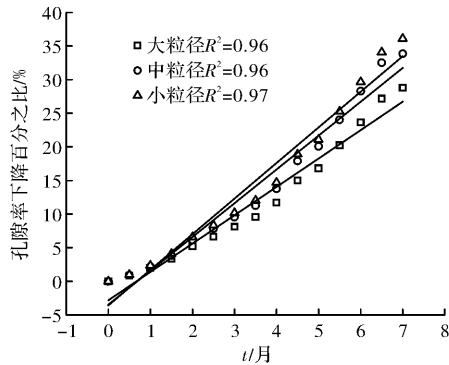


图 3 不同滤料粒径渗滤床孔隙率变化  
Fig. 3 The porosity change of infiltration bed with different particle sizes

2.4.2 三组渗滤床各层孔隙率的变化

定期对渗滤床各层孔隙率进行测定, 可得到 3 组渗滤床各层孔隙率拟合曲线图(图 4)。由图 4 可见, 三组渗滤床各层均有一定程度降低, 但降低的幅度各不相同。其中表层孔隙率降低速率最大, 而二、三层略低且基本相同, 经统计分析, 二、三层孔隙率下降百分比之间不存在显著性差异( $P > 0.05$ )。这主要是因为表层截留了大量的无机悬浮物, 致使无机悬浮物在表层出水中浓度大幅降低, 同时渗滤床在 2、3 进水口加入的原水与上一层的出水混合, 稀释了二三层进水中无机悬浮物浓度。而且二、三层进水水力停留时间较表层略小, 也影响了其截留效率。这与王荣<sup>[12]</sup>等试验结果相近。渗滤床相当于一个过滤器, 普遍认为, 截留作用使无机悬浮颗粒物的去除主要发生在渗滤床表层靠近入水口的区域<sup>[13]</sup>, 为渗滤床高效截留区。分层式横流渗滤床通过竖向三级分层, 增加了 2、3 入水口, 使其也成为渗滤床高效截留区。根据各层孔隙率变化情况, 得出各层的浊度截留贡献度如表 3, 可见渗滤床竖向分层有效分担了表层的堵塞风险。

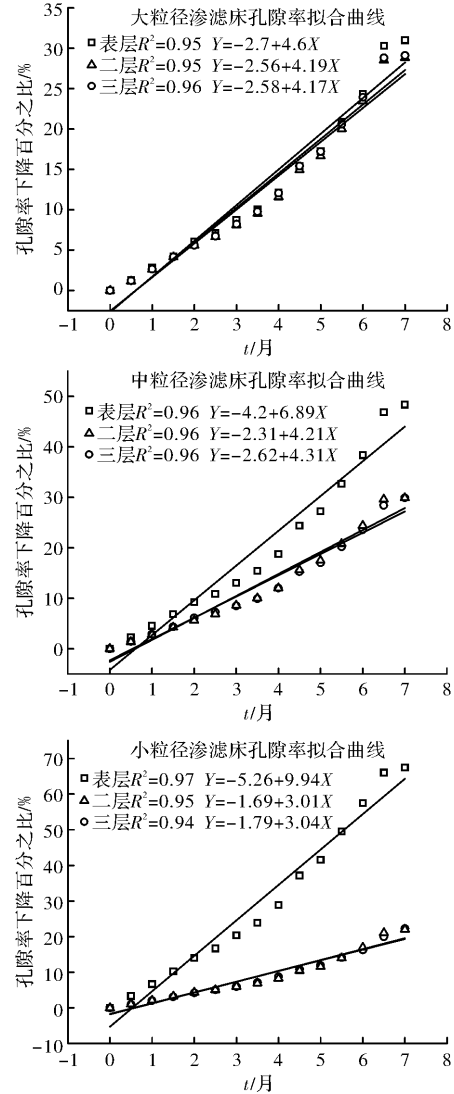


图 4 渗滤床不同层孔隙率变化  
Fig. 4 The porosity change of infiltration bed with different layers

表 3 渗滤床各层浊度截留贡献度  
Tab. 3 The contribution of turbidity retaining of infiltration bed in different layers

渗滤床粒径/mm	表层/%	二层/%	三层/%
10~30	36.28	31.99	31.73
5~10	39.76	29.73	30.51
2~5	54.16	22.80	23.04

2.5 运行周期预测

基于渗滤床填料中无机悬浮颗粒的积累而导致渗透性能的改变, Kozeny-Carman 方程<sup>[14]</sup>被广泛应用于基质堵塞时间的预测, 该方程描述了由于堵塞, 填料渗透性降低随时间变化的函数关系。

填料渗滤速率  $k$ (m/s)可表示为

$$k = \frac{1}{5} \cdot \frac{g}{v} \cdot \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2} \cdot \left(\frac{d}{\alpha}\right)^2 \quad (3)$$

式中:  $g$  为重力加速度, 取  $9.81 \text{ m/s}^2$ ; 为进水粘

度,  $\text{m}^2/\text{s}$ ; 为固体颗粒孔隙率;  $d$  为颗粒直径,  $\text{m}$ ; 为颗粒级配。

取  $v=10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $\alpha=10$ , 方程可简化为

$$k = 0.02 \times \frac{\varepsilon^2 d^2}{(1-\varepsilon)^2} \quad (4)$$

假设出水悬浮固体浓度为 0, 则可得:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon(0) - \frac{q_s \cdot t}{150 \cdot \rho_s (1 - \omega_c) \cdot d_{ef}} \quad (5)$$

式中:  $\varepsilon(0)$  为填料初始孔隙率;  $\rho_s$  为进水中固体物质的密度;  $\omega_c$  为积累在填料孔隙中固体物质的含水率;  $d_{ef}$  为填料有效粒径;  $q_s$  为单位面积渗滤床的悬浮物负荷;  $t$  为堵塞发生时间。

将方程(5)代入方程(4)可得填料渗透系数  $k$  随时间变化关系。填料渗滤达到饱和时  $k_{(t)} = Q/A = q$ , 即填料渗透速率等于水力负荷。确定从原水进入到持续积水的这段时间为堵塞发生时间, 即运行周期, 根据三组渗滤床的运行情况, 预测三组渗滤床堵塞时间分别为: 17.75 a、8.44 a、4.91 a。靖玉明等<sup>[15]</sup>在研究潜流人工湿地处理山东黄河流域污染河水的填料堵塞问题时发现, 运行 2 a 即发生了堵塞现象。其试验水力负荷 ( $0.15 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ )、进水 SS ( $49.5 \text{ mg/L}$ ) 均低于本研究, 填料粒径 ( $20 \sim 40 \text{ mm}$ ) 大于本研究, 且湿地表层种植的植物也会对延缓填料堵塞发挥重要作用。与本研究相比, 在诸多有利条件下, 上述湿地仍大大快于分层渗滤床发生堵塞, 因此, 竖向分层和多点进水的运行方式可大幅延长渗滤床的使用周期。

## 2.6 渗滤床对水中主要污染物的净化效果

运行期间, 渗滤床对水中主要污染物的净化效果变化如表 4 所示。

表 4 渗滤床对主要污染物的净化效果

Tab. 4 The removal efficiency of the main pollutants in infiltration bed

渗滤床粒 径/mm	测定项目	COD	$\text{NH}_4^+-\text{N}$	TP
	进水/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	35.4	1.72	0.3
10~30	初期去除率/%	19.97	25.35	12.33
	5 个月后来去除率/%	31.42	49.52	20.91
5~10	初期去除率/%	21.14	29.77	21.57
	5 个月后来去除率/%	34.27	60.58	34.37
2~5	初期去除率/%	27.77	34.06	25.88
	5 个月后来去除率/%	38.80	68.21	40.25

由表 4 可知, 运行初期, 渗滤床对 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TP 去除率较低。这与进水的组成有关, 研究用水中 COD 的来源为胶体态的腐殖酸, 氮磷等多为溶解态, 渗滤床运行初期仅靠物理化学作

用对其截留吸附作用有限。运行 5 个月之后, 渗滤床微生物作用增强, 对 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TP 的去除率迅速增加。可见, 随运行时间延长, 渗滤床对胶体态有机物以及溶解态氮磷也能表现出较好的处理能力。

## 3 结论

以多层横流渗滤床处理浑浊景观水体时, 其竖向三级分层和多点进水的运行方式显著增加了单位面积渗滤床的产水量。在表层进水负荷为  $0.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  时, 三组滤料粒径为  $10 \sim 30 \text{ mm}$ 、 $5 \sim 10 \text{ mm}$ 、 $2 \sim 5 \text{ mm}$  的渗滤床对浊度去除效率高, 达 85.09%、95.34%、97.41%, 可见, 即便处理水量显著增加, 渗滤床依然能保持较高的浊度去除效率。随着运行时间延长, 对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、COD、TP 也会表现出较好的处理能力。

综合考虑三组渗滤床孔隙率变化及浊度的去除效果, 建议在实际工程应用中采用  $5 \sim 10 \text{ mm}$  粒径碎石作为渗滤床的主要填料组成。渗滤床竖向分层有效分担了表层的堵塞风险, 竖向分层和多点进水的运行方式可大幅延长渗滤床的使用周期, 但用于景观水体除浊时, 仍需对渗滤床运行方式进行优化。

## 参考文献 References

- [1] 黄廷林, 宋李桐, 钟建红, 等. 人工浮床净化城市景观水体的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2007, 39(1): 30-34.  
HUANG Tinglin, SONG Litong, ZHONG Jianhong. Study on the urban scenic water purification by floating beds[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2007, 39 (1): 30-34.
- [2] 郭迎庆. 城市景观水体的污染控制和修复技术[J]. 环境科学与计术, 2005, 28(S1): 148-150.  
GUO Yingqing. Pollution control and remediation technology for urban landscape waters[J]. Environment Science and Technology, 2005, 28 (Z1): 148-150.
- [3] 邹平江, 霜英, 高廷耀, 等. 城市景观水的处理方法[J]. 中国给水排水, 1995, 16(3): 83-86.  
ZOU Pingjiang, SHUANG Ying, GAO Tingyao, et al. Methods of treatment of urban landscape water[J]. China Water & Wastewater. 1995, 16(3): 83-86.
- [4] 王文东, 王小刚, 高榕, 等. 表流-潜流人工湿地处理北方城市景观水体研究[J]. 水处理技术, 2013, 39(10): 76-79.  
WANG Wendong, WANG Xiaogang, GAO Rong, et

- al. Study on the treatment of urban landscape water by using the surface and subsurface flow constructed wetland in Northern China [J]. *Technology of Water Treatment*, 2013, 39(10):76-79.
- [5] COVENEY M F, STITES D L, LOWE E F, et al. Nutrient removal from eutrophic Lake water by wetland filtration[J]. *Eng*, 2002, 19:141-159.
- [6] 司马卫平,何强,夏安林,等. 人工湿地处理城市污水效能的影响因素分析[J]. *环境工程学报*, 2008, 2(3): 319-324.
- SIMA Weiping, HE Qiang, XIA Anlin, et al. Analysis on influencing factors of treatment efficiency of municipal wastewater with constructed wetlands [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2008, 2(3):319-324.
- [7] 韩芸,李斌,彭党聪,等. 宝鸡市雨水径流岸边渗滤系统设计与应用[J]. *给水排水*, 2009, 45(4):36-39.
- HAN Yun, LI Bin, PENG Dangcong, et al. Design and application of bank side filtration system for rainfall runoff in Baoji City[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2009, 45(4):36-39.
- [8] 黄廷林,邸诗雨,张海涵,等. 西安市典型景观水体水质与微生物种群结构多样性[J]. *应用与环境生物学报*, 2014, 20(4):697-703.
- HUNAG Tinglin, DI Shiyu, ZHANG Haihan, et al. Water quality and diversity of microbial community structure of Xi'an typical scenic water bodies[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2014, 20(4):697-703.
- [9] 孙常磊. 西安城市雨水利用分区及不同下垫面雨水径流水质研究[D]. 西安:西安理工大学, 2005.
- SUN Changlei. Research of partition in the rainwater utilization and water quality of runoff on the different surface in Xi'an[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005.
- [10] 李圭白,张杰. 水质工程学[M]. 北京:中国建筑工程出版社, 2005.
- LI Guibai, ZHANG Jie. *Water Science and Engineering* [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [11] 范平,吴纯德,陆少鸣,等. GAC-石英砂生物滤池处理微污染原水[J]. *水处理技术*, 2008, 34(8):59-62.
- FAN Ping, WU Chunde, LU Shaoming, et al. Study on Micro-Polluted Raw Water Treatment by GAC-Sand Biofiltration [J]. *Technology of Water Treatment*, 2008, 34(8):59-62.
- [12] 王荣,贺峰,肖蕾,等. 不同级配基质方式下垂直流人工湿地净化效果及渗透性能研究[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(5): 969-975.
- WANG Rong, HE Feng, XIAO Lei, et al. Treatment efficiency and permeability of vertical flow constructed wetland in different gradation substrates [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5): 969-975.
- [13] 叶建锋,徐祖信,李怀正,等. 垂直潜流人工湿地堵塞机制:堵塞成因及堵塞物积累规律[J]. *环境科学*, 2008, 29(6): 1508-1512.
- YE Jianfeng, XU Zuxin, LI Huaizheng, et al. Clogging mechanism in vertical-Flow constructed wetland: Clogging cause and accumulation distribution Characteristics [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(6): 1508-1512.
- [14] TANNER C C, SUKIAS J P S, UPSDELL M P. Organic matter accumulation during maturation of gravel-bed constructed wetlands treating farm dairy wastewaters[J]. *Wat. Res.*, 1998, 32(10): 3046-3054.
- [15] 靖玉明,张建,张成禄,等. 潜流人工湿地污染河水处理系统中的填料堵塞问题研究[J]. *环境污染与防治*, 2007, 29(10):770-772.
- JING Yuming, ZHANG Jian, ZHANG Chenglu, et al. Substrate Clogging of Constructed Wetland System for Subsurface Treatment of Polluted River Water[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2007, 29(10): 770-772.

(编辑 桂智刚)