

技术总结

## 基于絮凝沉淀-人工湿地-回灌的水处理工程实践

孙厚云<sup>1</sup>, 吴勇<sup>2</sup>, 高东东<sup>3</sup>, 张凡<sup>2</sup>

(1. 北京矿产地质研究院, 北京 100012; 2. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 3. 四川省环境保护科学研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:** 德阳市公共供水主要依靠地下水, 水资源短缺问题严重制约着社会经济发展。将微污染河水经絮凝沉淀与人工湿地处理后回灌补给地下水并建立傍河地下水水源地, 具有河水处理-再利用-调蓄开发三位一体的优势。通过构建一套絮凝沉淀-人工湿地-地下水回灌系统, 并结合数值模拟, 探讨了系统运行各阶段的水质净化效果及地下水回灌与开采供水的可行性。结果表明, 经絮凝沉淀-人工湿地处理后, 浊度、TP、TN、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  均可达到工程设计回灌水质要求。地下水回灌-开采供水系统对原生地下水环境造成的影响有限, 人工湿地-地下水回灌-供水系统能够正常运行。

**关键词:** 人工湿地; 絮凝沉淀; 人工补给; 地下水; 微污染河水

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)11-0034-06

## Water Treatment Engineering Practice Based on Flocculation Sedimentation, Constructed Wetland and Artificial Recharge System

SUN Hou-yun<sup>1</sup>, WU Yong<sup>2</sup>, GAO Dong-dong<sup>3</sup>, ZHANG Fan<sup>2</sup>

(1. Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. Sichuan Academy of Environmental Sciences, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The water supply of Deyang City mainly relies on groundwater, and the shortage of water resources seriously restricts its social and economic development. The micro-polluted river water was recharged groundwater after being treated by flocculation sedimentation and constructed wetland, and riverside groundwater resource field was established which had the advantages of river water treatment, reuse, storage and development. A set of flocculation sedimentation - constructed wetland - groundwater recharge system was established, and numerical simulation were carried out to investigate the water treatment effect at each operation stage and the feasibility of groundwater recharge and water supply. When the raw water was treated by flocculation sedimentation and constructed wetland, the turbidity, TP, TN,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  could meet the water quality standards of artificial recharge. The groundwater recharge and supply system had a limited impact on the original groundwater environment, and the constructed wetland - groundwater recharge - water supply system could be operated normally.

**Key words:** constructed wetland; flocculation sedimentation; artificial recharge; groundwater; micro-polluted river water

经过多年发展,人工湿地技术已日趋成熟。该技术通过人为调控进出水方式、基质填料、植物配置等因素,可优化水质处理效果,且具有良好的可持续性,环境效益和经济效益优势明显。目前,地下水水源地具有水质相对较好、水温稳定、不易受污染、处理工艺较简单、基建经济等特点,日渐成为重要的饮用水源<sup>[1]</sup>。在城市内河傍河带建立地下水回灌-开采利用工程,将微污染河水经絮凝沉淀与人工湿地处理后回灌补给地下水,再通过地下水回采,可实现微污染河水的生态化处理、污染水体的再利用以及地表水-地下水水资源的联合调蓄开发。同时,又兼具改善城市内河生态环境,建设具有美化景观、公共教育意义的湿地公园作用,可解决地下水超采引发的水位下降等环境地质问题,对增加地下水资源储备、缓解水资源短缺等具有重要意义。

## 1 区域概况

研究区位于德阳市旌阳区,德阳市是全国330个缺水城市之一<sup>[2]</sup>,是四川省唯一一个主要靠地下水开采解决工业生产和居民生活供水的重工业城市。绵远河为旌阳区的主要水系,是沱江流域的上游正源。由于旌阳区地下水超采问题严重,又缺乏地下水补给来源,绵远河旌阳区段沿程建有多级闸坝,如黄河路闸、凯江路闸、岷江路闸、珠江路闸、沱江路闸、柳梢堰闸以维持景观水位并补给地下水。但近年来,由于工农业发展与生活污水排放,绵远河受到了一定程度的污染。据多年监测数据及本试验采样检测数据显示,绵远河水主要污染物为TP,地表水氟化物(以 $F^-$ 计)、Cr(VI)、Pb、Zn、As、Hg、Cd、挥发性酚、氰化物、Se、阴离子合成洗涤剂、总大肠杆菌均达到地表水Ⅰ类标准,COD<sub>Mn</sub>、Cu符合地表水Ⅱ类标准,TP、TN符合地表水Ⅴ类标准。

德阳市旌南湿地公园属于德阳市基于湿地生态系统的地下水人工补给与供水水源地建设项目。该项目通过生态河道-人工湿地-地下水回灌系统的建设,改善城市内河绵远河水环境,同时将微污染河水改造为具有供水价值的地下水人工补给水源。研究场地位于旌阳区绵远河段下游柳梢堰闸口河岸旁,柳梢堰污水处理厂北侧。

## 2 工程概况

### 2.1 工艺流程

絮凝沉淀-人工湿地-地下水回灌水处理系统主要分为絮凝沉淀、人工湿地与地下水回灌3部分,

如图1所示。系统运行过程中,将原水从柳梢堰渠经泵房提升至絮凝沉淀池进行预处理,沉淀池出水达到湿地进水要求后进入人工湿地做进一步处理,人工湿地出水达到回灌入渗标准后进入入渗池以补给地下水,再由开采井开采后接入市政供水管网。

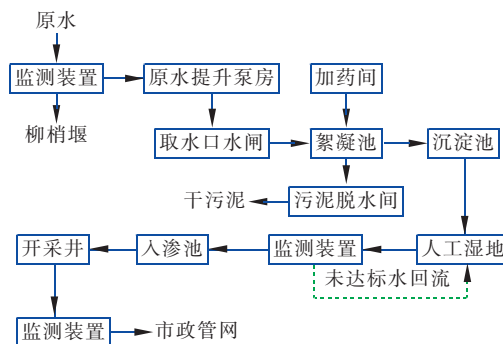


图1 水处理工艺流程

Fig. 1 Flow chart of water treatment process

### 2.1.1 絮凝沉淀单元

工程设计水处理量(开采量)为 $3\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 。根据绵远河原水预处理试验<sup>[3]</sup>,确定絮凝池为穿孔旋流型,设计体积为 $70\text{ m}^3$ 。沉淀池采用辐流式,体积为 $569\text{ m}^3$ 。原水提升泵房进水量为 $130\text{ m}^3/\text{h}$ ,水力停留时间为4 h。另外,在系统进水口处设置粗格栅,以拦截污水中粗大的悬浮物及杂质。

### 2.1.2 人工湿地处理单元

人工湿地处理单元设计主要涉及布水方式、基质填料、植物选配3方面。本试验采用复合潜流人工湿地,总体由3个处理单元呈梯级串联组成,一、二级处理单元为垂直潜流湿地(VSF),布水方式为上行流,三级处理单元为水平潜流湿地(HSF),布水方式为下行流。

在综合考虑水质净化效果、湿地水力负荷等因素,并结合前人实践的基础上<sup>[4,5]</sup>,选定砾石、灰岩、河砂、土壤作为基质填料。在一、二级处理单元由上至下填入砾石、灰岩、河砂和土壤,形成四层结构;在三级处理单元仅依次填入砾石和灰岩,形成两层结构。

经植物选配试验<sup>[4]</sup>确定人工湿地春、夏季运行期植物为蓝花鸢尾、旱伞草、灯芯草、美人蕉、千屈菜等,植物配置采用模块化设计,每个模块面积为 $3\text{ m}^2$ 。系统人工湿地构筑物平行设置,基质填料与植物配置采用模块化布设,以便于基质植物的更换与处理系统的连续运行。同时,冬季运行期更换人工

湿地基质与植物模块,引入 A/O 工艺,在基质层中添加活性污泥和缓释碳源<sup>[5]</sup>。

### 2.1.3 入渗-开采与监测系统

入渗池构筑物采用两组平行设计,总面积为 4 040 m<sup>2</sup>,入渗池与湿地周边设立生态驳岸带与背景生态林区。开采井设置在场址西侧,外径为 600 mm,内径为 300 mm,中间填砾。建立湿地-地下水回灌监测系统,并在原水进水口、絮凝沉淀出水口、人工湿地出水口、入渗池内布设 4 个地表水监测点,采用多参数水质分析仪监测相关指标。在场址中部垂直绵远河断面布设 6 个深为 18 m 的地下水监测孔(M01~M06,见图 2),采用自动监测仪监测相关指标。

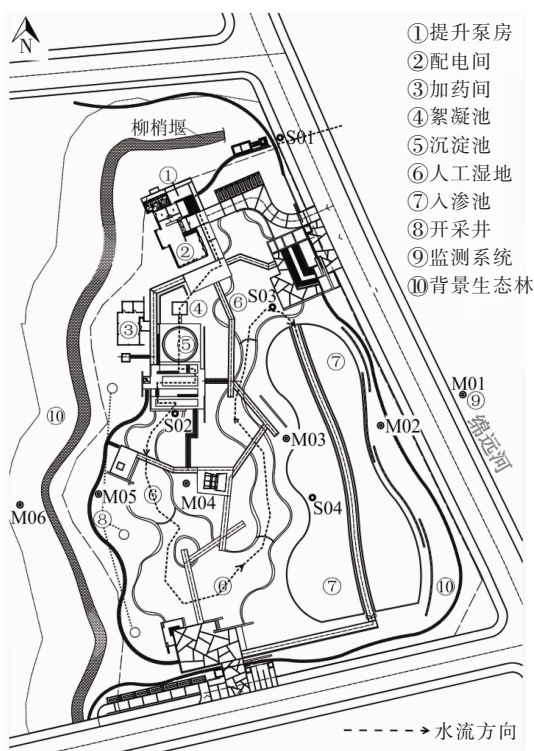


图2 水处理构筑物平面布局

Fig. 2 Layout of water treatment structure

## 2.2 进水与出水水质设计

地表水源经回灌补给地下水后参与地下水循环,回灌水质必须满足相关要求,以保证地下水不受污染。该人工湿地-地下水回灌系统回灌水的水质标准在参照北京、上海以及美国佛罗里达州、加利福尼亚州、马萨诸塞州和华盛顿州相关标准<sup>[6~8]</sup>,以及《城市污水再生利用 地下水回灌水质》(GB/T 19772—2005)的基础上,结合《地表水环境质量标

准》(GB 3838—2002)、《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)和杜新强等<sup>[9]</sup>确定的入渗防堵塞指标,设定各项指标限值如下:浊度为 5 NTU, pH 值为 6.5~8.5, COD<sub>Mn</sub> 为 3 mg/L, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 为 0.5 mg/L, TP 为 0.02 mg/L, TN 为 0.5 mg/L。

## 2.3 建设及运行成本

### 2.3.1 建设成本

旌南湿地公园总用地面积为 34 446 m<sup>2</sup>,建筑功能分区包括科教公园构筑物、硬质铺装区、景观小品构筑物、水处理与入渗回采构筑物、生态绿地区。生态绿地面积为 18 807.47 m<sup>2</sup>,占总面积的 54.60%。水处理构筑物面积约为 9 580.10 m<sup>2</sup>,占总面积的 27.81%。工程的总投资额为 2 363 万元,其中景观土建投资额为 673.34 万元,景观绿化投资额为 1 027.12 万元,景观安装(按景观土建加景观绿化的 10% 计算)投资额为 170 万元,其他费用(包含设备设施、地勘、场地整理等)为 492.52 万元。絮凝沉淀-湿地-回灌部分包括场地整理费、工程勘察费、不可预计费用估算与絮凝沉淀单元、人工湿地单元、入渗回采单元、监测设备、配套电气控制、管道管件、设备安装费等,总投资为 443.98 万元。

### 2.3.2 运行成本

旌南湿地公园兼具景观、水处理与公共教育意义,本次仅计算水处理部分的运行维护费用。水处理部分运行费用主要包括人员费、能耗费、维护维修费、药剂费、人工湿地模块更换费和其他费用。湿地公园定员为 5 人,主要为展览馆与监控中心人员、水处理设施专业人员、监测服务维护人员,平均每人每月费用为 3 000 元,人员总费用为 15 000 元/月。能耗费包括提升泵站、絮凝沉淀、淤泥处理间、消毒间运行电费。水处理单元 2 组提升泵功率总计 110 kW,絮凝沉淀、淤泥处理间、消毒间运行功率总计 5 kW,电费为 0.75 元/(kW·h),提升泵利用率为 0.5,运行期电费为 32 400 元/月。每年设备折旧与维修按设备总投资额的 5.0% 计算,维护维修费为 458 元/月。药剂费包括各种化学试剂、絮凝剂、消毒剂。以氯和二氧化氯为消毒剂,氯化铁为絮凝剂,总处理成本为 0.03 元/m<sup>3</sup>,运行期药剂费为 2 700 元/月。人工湿地植物模块每一年半更换一次,成本为 40 元/m<sup>2</sup>,湿地总面积为 4 455 m<sup>2</sup>,模块更换费用为 9 900 元/月。其他处置费用主要为对污泥及其他物体的外运处置而发生的费用,为 1 000 元/月。

综上所述,水处理单元运行成本为 61 458 元/月,净处理成本为 0.52 元/ $\text{m}^3$ ,工程运行成本为 0.68 元/ $\text{m}^3$ ,处理成本较为经济合理。

## 2.4 试运行方法

### 2.4.1 水质絮凝沉淀试验

本试验选用  $\text{FeCl}_3$  作为絮凝剂。先对绵远河柳梢堰闸口原水进行絮凝沉淀试验,共采集 5 组水样(各 50 L),分别加入 0、30、50、70、90 mL 质量分数为 41% 的  $\text{FeCl}_3$  溶液,充分搅拌混合后静置 2、4、6、8、10、12 h 取样检测。场地水处理构筑物建成后,进行第二次室内絮凝沉淀试验,采集 6 组水样(各 2 L),分别加入 0、2、4、6、8、10 mL 的  $\text{FeCl}_3$  (2 g/L,以 Fe 计)溶液后置于六联搅拌器上搅拌 10 min,静置 0.5、1.0、2.0、4.0 h 后检测上清液。现场试验过程中,选择室内试验确定的最适絮凝剂投加浓度,调节加药泵以 39 L/h 的速度向絮凝池投加质量分数为 41% 的  $\text{FeCl}_3$  溶液,分别取沉淀池进水 0、0.5、1.0、2.0、4.0 h 同一取样位置(设置两处平行采样点 S01、S02,位于沉淀池两端)上清液进行检测分析。

浊度采用浊度仪现场测定,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  采用高锰酸盐指数法测定, TP 采用钼酸铵分光光度法测定, TN 采用过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  采用纳氏试剂分光光度法测定。

### 2.4.2 人工湿地水质处理试验

人工湿地水质处理运行与水质预处理分阶段进行,定期检测湿地进水与出水水质,检测指标主要为 TP、TN、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 。各指标在试验初期及中期的采样频率为每 3 d 取一次,后期采样频率为每 7 d 取一次,共采集 39 组水样。

### 2.4.3 入渗池地下水回灌数值模拟

由于回灌对地下水的影响存在滞后效应,系统试运行阶段利用 Processing Modflow 建立场地地下水水流模型,分析地下水回灌对地下水位的影响,初步验证系统的可行性。预测模型采用矩形等距剖分,初始网格剖分为 40 行 40 列,试验场地部分进行了加密,剖分为 5 m  $\times$  5 m 的网格。最终模型剖分为 136 行、116 列,共计 15 776 个单元网格。

试验场地无明显地质边界,面积较小,模型未设置明显水流侧向边界。地下水径流平均水力坡度约为 2.7%,含水层厚度较大,将地下水作为二维平面流处理。定义入渗池为通用水头边界(GHB),场地东部绵远河为河流边界(第三类边界),河流多年平

均水位为 477 m,年平均降雨量为 463.12 mm,场地初始地下水水位为 480 m。垂向边界上,上部潜水面边界为水量交换边界,以降水入渗为主要补给项,人工开采为排泄项。模型底部为相对隔水基岩,概化为不透水边界。场地降雨入渗系数为 0.25,给水度为 0.18,渗透系数参数值由现场双环入渗试验及《供水水文地质手册》经验值综合考虑进行取值,含水层渗透系数为 8.3 m/d,弱透水层渗透系数的初始值取 0.008 m/d。场地设计有三口开采井,每口井每日开采量为 1 000  $\text{m}^3$ 。

## 3 结果与讨论

### 3.1 原水絮凝沉淀效果

由第一次绵远河原水预处理试验数据<sup>[5]</sup>可知,预处理絮凝剂最适投加量为 70 mL/ $\text{m}^3$ 。絮凝沉淀 4 h 后,TP、TN、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度趋于稳定,TP 去除率为 48.09% ~ 51.91%,TN 去除率为 19.68% ~ 30%, $\text{COD}_{\text{Mn}}$  去除率为 21.71% ~ 27.74% (见图 3)。一级预处理絮凝沉淀过程中,对浊度的去除效果最显著,絮凝沉淀 4 h 后,浊度去除率为 69.26%,8 h 时达到 90.75%。经絮凝沉淀处理后,浊度降至 3 NTU 以下,达到《地下水质量标准》(GB/T 14848—93) I 类标准。

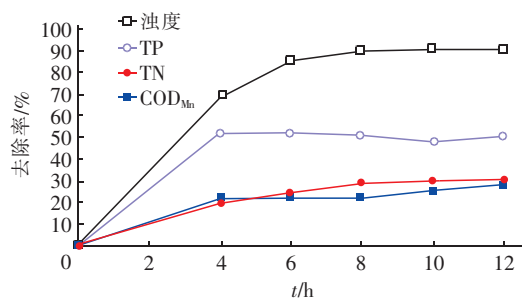


图3 第一次絮凝沉淀试验的水处理效果

Fig. 3 Water treatment effect of the first flocculation sedimentation experiment

绵远河属于微污染河水,主要污染物为 TP,在第一次絮凝沉淀基础上,试运行阶段絮凝沉淀试验的主要检测指标为浊度及 TP。由试运行室内絮凝沉淀结果可知,加入  $\text{FeCl}_3$  絮凝沉淀 4 h 后,浊度为 2.31 ~ 6.45 NTU (见图 4),TP 去除率为 58.67% ~ 85.33%,水样总磷浓度为 0.022 ~ 0.062 mg/L;浊度在絮凝沉淀 1 h 后去除速度开始减缓,出水浊度基本稳定。由此确定现场试验絮凝剂最适投加浓度为 1 L 原水加注 8 mL 的  $\text{FeCl}_3$  (2 g/L,以 Fe 计)溶

液,在此浓度下,经絮凝沉淀后浊度最低降至 2.29 NTU,且浊度去除速度最快。

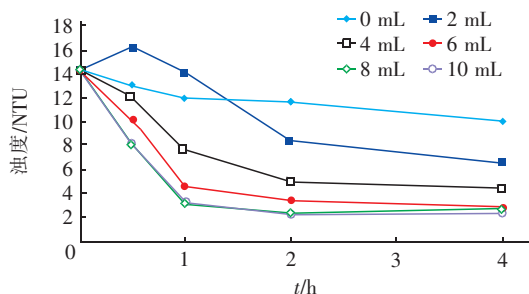


图4 第二次絮凝沉淀试验浊度的变化

Fig. 4 Change of turbidity in the second flocculation sedimentation experiment

根据现场试验数据可知,絮凝沉淀 2 h 时,pH 值基本稳定在 7.30。絮凝沉淀 4 h 后,出水浊度为 4.22 ~ 4.76 NTU,TDS 与 EC 的变化无明显规律。TP 在絮凝沉淀 2 h 后基本稳定,浓度均远小于 0.2 mg/L,去除率达到 48.33% ~ 66.67% (见图 5)。经絮凝沉淀后, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  远小于 1.0 mg/L。因此,人工湿地-地下水回灌系统预处理沉淀时间设计为 4 h 时,可以达到预期处理效果,满足人工湿地进水要求。

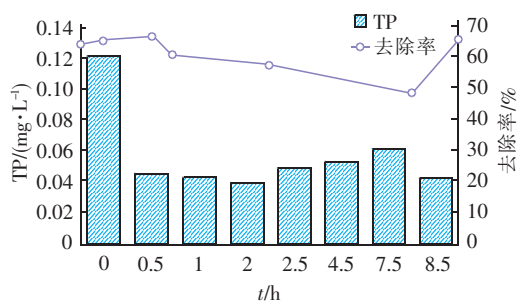


图5 现场絮凝沉淀试验中 TP 的变化

Fig. 5 Change of TP in field flocculation sedimentation experiment

### 3.2 人工湿地处理效果

人工湿地系统对湿地进水有比较明显的净化作用,在 3 000  $\text{m}^3/\text{d}$  水力负荷运行条件下,经人工湿地处理后,出水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP 分别为 1.46 ~ 1.77、0.012 ~ 0.016、0.174 ~ 0.275、0.018 ~ 0.029 mg/L,相应的去除率分别为 18.65% ~ 49.74%、6.49% ~ 48.28%、18.63% ~ 45.88% 以及 36.32% ~ 92.86%。根据绵远河八角断面的水质监测资料,绵远河水质较为稳定,原水经絮凝沉淀预处理后再经人工湿地处理,出水水质满足回灌标准。

### 3.3 地下水回灌补给数值模拟与分析

通过地下水入渗模拟可知,当开采量为 3 000  $\text{m}^3/\text{d}$  时,场地地下水含水层很快达到新的稳定状态。根据地下水等水位线及水流迹线可知,入渗补给与开采稳定后场地地下水含水层形成了一个新的局部地下水流系统,地下水位降深最大约为 3.5 m,影响面积较小,系统不会对周边地下水环境产生大的影响,且地下水开采不会引起较大的降落漏斗。试验场地地下水的主要补给来源是垂向入渗补给量,占总补给量的 63.25%,其次为河流渗漏补给,占总补给量的 36.73% (见表 1)。地下水排泄主要是人工开采,约 63.25% 的开采水源来自入渗补给池与原地下水混合作用,36.73% 来源于绵远河水的激发(诱导)补给。入渗补给水与原位地下水进行了充分混合,增加了地下水储备,平衡了供水温度,在一定程度上改善了含水层水质,未导致地下水水质的突变。通过模型计算得知,从入渗池流入开采井的时间为 60 d,可待地下水贮存一段时间后开采。

表1 模型识别期地下水潜水层水量均衡情况

Tab. 1 Water balance of groundwater in submersible layer during model identification period  $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$

补给项		排泄项	
降水入渗	0.30	河水溢出	0.35
河水入渗	1 102.40	潜水蒸发	0
垂向入渗补给量	1 897.95	开采井开采	3 000.00
总计	3 000.65	总计	3 000.35

### 4 结论

① 在原水处理过程中,预处理絮凝沉淀段主要去除浊度与 TP, $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、TN 主要在人工湿地中去除。一级预处理阶段中,TP 去除率为 48.33% ~ 66.67%, $\text{COD}_{\text{Mn}}$  去除率为 21.71% ~ 27.74%,TN 去除率为 19.68% ~ 30%,浊度去除率为 69.26%。人工湿地水处理阶段 COD 去除率为 18.65% ~ 49.74%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率为 6.49% ~ 48.28%,TN 去除率为 18.63% ~ 45.88%,TP 去除率为 36.32% ~ 92.86%。原水经一级预处理-人工湿地处理后,主要水质指标均可达到回灌标准要求。

② 地下水回灌-开采供水系统对原生地下水环境造成的影响较小,地下水入渗补给与回采使得原含水层形成一个局部地下水流系统,水位降深影响有限。工程水处理成本略高于城市污水处理厂处理成本,但工程兼具景观与公共教育功能,出水具有经济价值。人工湿地-地下水回灌-供水系统能够

保证绵远河微污染河水的水质处理效果与地下水补给和供水系统的自然正常运行。

#### 参考文献:

- [1] 周仰效,李文鹏. 地下水水质监测与评价[J]. 水文地质工程地质,2008,(1):1-11.  
Zhou Yangxiao, Li Wenpeng. Groundwater quality monitoring and assessment [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, (1): 1-11 (in Chinese).
- [2] 高东东,吴勇,尹恒,等. 德阳市城市规划区地下水资源现状及保护对策探讨[J]. 地下水,2012,34(1):53-57.  
Gao Dongdong, Wu Yong, Yin Heng, et al. Discusses on protection countermeasures of groundwater resources and discussions on its protection measures in planning area of Deyang City [J]. Underground Water, 2012, 34(1): 53-57 (in Chinese).
- [3] 张凡,吴勇,卓勇,等. 基于地下水回灌系统工程的原水预处理试验研究[J]. 科学技术与工程,2016,16(27):299-304.  
Zhang Fan, Wu Yong, Zhuo Yong, et al. Experimental study on the treatment of raw water for groundwater recharge system [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(27): 299-304 (in Chinese).
- [4] 熊昌龙. 人工湿地填料基质对污水厂尾水深度处理研究[D]. 成都:成都理工大学,2014.  
Xiong Changlong. A Study on the Advanced Treatment of Constructed Wetland's Filler Substrate in Tail Water from Sewage Plant [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014 (in Chinese).
- [5] 孟庆杰. A/O 功能湿地对城镇污水厂尾水脱氮除磷的效果研究[D]. 成都:成都理工大学,2014.  
Meng Qingjie. The Research about Removal Effects of Nitrogen and Phosphorus on Treating Tailwater in Sewage Treatment Plants of Town in A/O Functional Constructed Wetland [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014 (in Chinese).
- [6] 王子佳. 基于风险评价的北京平谷盆地雨洪水回灌水
- 质标准研究[D]. 长春:吉林大学,2009.  
Wang Zijia. Study on Water Quality Standards for Storm Water Infiltration Based on Risk Assessment in Pinggu Basin of Beijing [D]. Changchun: Jilin University, 2009 (in Chinese).
- [7] 王迎迎. 北京市平原区地下水回灌数值模拟研究[D]. 北京:清华大学,2011.  
Wang Yingying. Study on Numerical Simulation of Groundwater Recharge in Plain Area of Beijing [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011 (in Chinese).
- [8] 孙颖,苗礼文. 北京市深井人工回灌现状调查与前景分析[J]. 水文地质工程地质,2001,(1):21-23,48.  
Sun Ying, Miao Liwen. Current situation investigation and prospect analysis of artificial recharge of ground water in Beijing City [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2001, (1): 21-23, 48 (in Chinese).
- [9] 杜新强,冶雪艳,路莹,等. 地下水人工回灌堵塞问题研究进展[J]. 地球科学进展,2009,24(9):973-980.  
Du Xinqiang, Ye Xueyan, Lu Ying, et al. Advances in clogging research of artificial recharge [J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(9): 973-980 (in Chinese).



作者简介:孙厚云(1990-),男,湖北云梦人,硕士,助理工程师,研究方向为地下水污染与防治。

E-mail: shyun2016@126.com

收稿日期:2017-10-16