

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.05.004

集蓄坝与岸滤组合取水设施对村镇山区水源的适用性

杨涛^{1,2}, 杨静^{1,2}, 齐维晓³, 敖钰洁^{1,2}, 张志强^{1,2}, 庞鹤亮^{1,2},
黄星星^{1,2}, 陈鲲宇^{1,2}, 卢金锁^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 清华大学环境学院 清华大学水质与水生态研究中心, 北京 100084)

摘要: 山区溪流作为水厂水源之一,其水量、水质的常年波动严重增加了水厂的运行负荷,而集蓄坝与岸滤组合取水技术作为一种经济的水处理工艺,通过河岸过滤截留浊质和去除污染物、通过集蓄坝截留和汇集溪流入渗水,可满足水厂对进水量和水质的要求。探究了3种岸滤系统对不同水质原水的处理效果,结果表明,它们对有机物均有较高的去除率,且相较于砾石层、砂层来说,土石混合层的抗冲击负荷能力更好,并且对抗生素、农药等污染物具有更好的吸附性。Hydrus 2D/3D模拟结果证明,集蓄坝的设置能有效汇集地下水,保证渗井产水量满足水厂要求。可见,在一定条件下集蓄坝与岸滤组合取水技术普遍适用于山区溪流等水源的预处理。

关键词: 岸滤; 集蓄坝; 组合取水; 水源预处理

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)05-0024-07

Applicability of Combined Water Intake Technology of Storage Dam and Bank Filter to Water Sources in Rural Mountainous Areas

YANG Tao^{1,2}, YANG Jing^{1,2}, QI Wei-xiao³, AO Yu-jie^{1,2}, ZHANG Zhi-qiang^{1,2},
PANG He-liang^{1,2}, HUANG Xing-xing^{1,2}, CHEN Kun-yu^{1,2}, LU Jin-suo^{1,2}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an 710055, China; 3. Center for Water and Ecology, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As one of the sources of waterworks, the perennial fluctuation of water quality and quantity in the streams in the mountainous areas has seriously increased the operating load of waterworks. As an economic water treatment process, the combined water intake technology of storage dam and bank filter can meet the requirements of influent quantity and quality of waterworks. The mechanism is that the bank can filter and intercept turbidity and remove pollutants, while the storage dam intercepts and collects the streams into the seepage water. The treatment effects of three kinds of bank filtration systems on different water quality were investigated. It was found that the three systems had high removal rates of organic matter. Compared with gravel layer and sand layer, soil-rock mixed layer had better anti-impact

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD1100101)

通信作者: 卢金锁 E-mail: lujinsuo@xauat.edu.cn

load capacity and adsorption performance of antibiotics, pesticides and other pollutants. Hydrus 2D/3D simulation results showed that the setting of the storage dam could effectively collect groundwater and ensure the water production of the seepage well to meet the requirements of the waterworks. This study confirms that under certain conditions, the combined water intake technology of storage dam and bank filter is generally applicable to the pretreatment of water sources such as mountain streams.

Key words: bank filtration; storage dam; combined water intake; water source pretreatment

我国村镇供水水源以地表水为主,和地下水相比,地表水更易受污染,且不易进行卫生防护^[1],尤其是山区溪流等浅水水源,因其水量、水质无法得到保证,给人们的生活带来极大不便。

山区水源河道较窄,洪、枯流量变化大,枯水季水深较浅,为达到水厂所需取水高度^[2],需要设置拦河坝或者在河床内修建集水池进行取水,不仅造价高、工程量大,且当雨季来临时,洪水携带大量泥沙、漂浮物,易造成堵塞、淤积等现象,影响取水头部的正常使用,给水厂的运行管理带来不便。此外,雨水的冲刷会使得地表大量污染物如粪便、化肥、农药等进入河流中,导致水中浊度、氮、磷等浓度增高,水质变差,增加了水厂运行成本^[3-4]。因此,有必要对水源水进行预处理,保证其水质稳定。

河岸过滤(简称岸滤)是一种高效率、低成本、依托自然过程的饮用水预处理方式^[5]。欧洲将河岸过滤应用于饮用水预处理已逾 150 年,在中国河岸过滤也具有较好的应用基础和前景^[6]。岸滤是指通过在河岸旁设置渗井,使得河水向下渗透,在流向取水井的过程中,通过生物降解、吸附等作用有效削减 N、P、有机物以及重金属等。因此,相较于从污染的河流中直接取水,岸滤取水具有极大的优势。

此外由于山区溪流四周含水层厚度较小,且多为砂层、砾石层,加之地形坡度较大,难以蓄存水源,因此根据水量要求需在渗井周围建设集蓄坝,将坝打在基岩上,形成天然的蓄水池,从而保证渗井水量的稳定。将集蓄坝与岸滤组合取水设施作为山区水源的预处理方式,不仅能保证水质稳定,而且运行安全可靠、工艺简单、不占用河道过水面积、取水不受河道水位限制^[7-8],避免河道设置坝所带来的弊端,在枯水季也能保持稳定的水量供应。

尽管如此,集蓄坝与岸滤组合取水设施应用于实际仍然有一定的局限性,目前国内外的岸滤工艺均设置在大中河流处,具有较长的过滤路径,污染

物能得以有效去除。但山区过滤路径较短,水流通过速度较快,微生物没有充足的时间进行生物作用,因此对污染物的去除效果有一定影响。此外当河水流速小于其自净流速时,河床含水层截留的污染物无法被冲刷而导致河床堵塞,使得渗井产水量降低,需要定期进行清理,浪费成本和物力,因此该技术仅在当地水力条件合适的情况下才能使用。

笔者以山区含水层常见的砂层、砾石层为研究对象,同时设置土石混合层作为填料替换组,探究不同含水层岸滤系统对水质的净化效果以及抗负荷性能,旨在为不同条件下集蓄坝与岸滤组合取水设施的实地建造提供理论支撑。

1 试验材料与方法

1.1 模拟水样的配制

利用批次试验模拟不同含水层岸滤系统的水质净化效果。构建了两种水源水质:常规水质和高浊高污染水质,其中常规水质采用西安市和平门护城河为原水,用来对滤柱进行挂膜;高浊高污染水质是在护城河原水中添加高岭土、葡萄糖、氯化铵、抗生素(四环素)、农药(草甘膦),来模拟雨洪季山区水源水质特点。具体进水水质见表 1。

表 1 原水水质

Tab.1 Raw water quality index

项 目	浊度/ NTU	COD _{Mn} / (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	四环素/ (mg·L ⁻¹)	草甘膦/ (mg·L ⁻¹)
常规水源	10.23	4.28	1.28	—	—
污染水源	56.58	15.21	8.67	2.56	1.89

1.2 试验装置

搭建 3 套岸滤装置(如图 1 所示),在 3 根 PVC 管(高为 100 cm,直径为 15 cm,壁厚为 4 mm)中填充滤料来模拟河岸过滤系统,滤层厚度为 80 cm,在滤层表面以下 10、25、40、55、75 cm 处设置出水口,同时在滤层表面以上 10 cm 处设置溢流口;底部为承托层,采用小粒径卵石;通过蠕动泵由顶端进水、底部

出水。试验过程中分别用粒径为0.5~1.2 mm的石英砂(渗透系数约为 3.2×10^{-3} cm/s)模拟含水层中的砂层,粒径为8.0~10.5 mm砾石(渗透系数约为0.11 cm/s)模拟含水层中的砾石层,烘干后的底泥与粒径为8.0~10.5 mm的砾石模拟土石混合层(渗透系数为 0.8×10^{-3} cm/s)。石英砂、砾石来自西安鹏宇新材料公司,底泥为西安浐河岸泥。试验初期控制滤速为0.3 m/h,运行40 d,保证3个装置完成挂膜,达到稳定运行阶段^[9]。

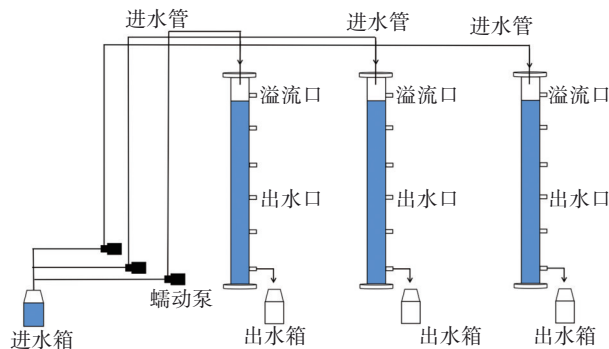


图1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

1.3 分析检测方法

浊度:WGZ-200B 便携式浊度仪, COD_{Mn} :高锰酸钾滴定法,氨氮:纳氏试剂光度法,四环素、草甘膦:紫外分光光度法,DO和pH:Thermo水质分析仪。

1.4 Hydrus 2D/3D 土壤水分入渗模型

Hydrus 2D/3D 是由美国农业部盐土实验室开发的一种水分在饱和-非饱和和多孔介质中运移的数学模型,通过建模的方式,模拟入渗结构在不同大气边界、定水头边界、变水头边界等条件下的土壤水分入渗过程^[10]。模型以有限单元网格为计算单位,通过迭代计算将离散化后的非线性控制方程组线性化。模拟过程中忽略温度、水分蒸发、土壤气阻对土壤水分运移的影响,其中土壤水分特征参数应用 Van-Genuchten (VG) 模型拟合,本试验中砂层主要水力参数:剩余含水量(Q_r)为 $0.045 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,饱和含水量(Q_s)为 $0.43 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,形状系数(n)为2.18,饱和导水率(K_s)为 29.7 cm/h 。

2 结果与讨论

2.1 不同含水层系统对污染物的去除效果

水源水经集蓄坝与岸滤组合取水设施处理后,能否达到水厂进水要求是评价其能否作为水源水预处理工艺的重要条件。试验过程中尽管进 waters

质有所波动,但系统出水水质基本保持稳定,对各污染物的平均去除率见图2。

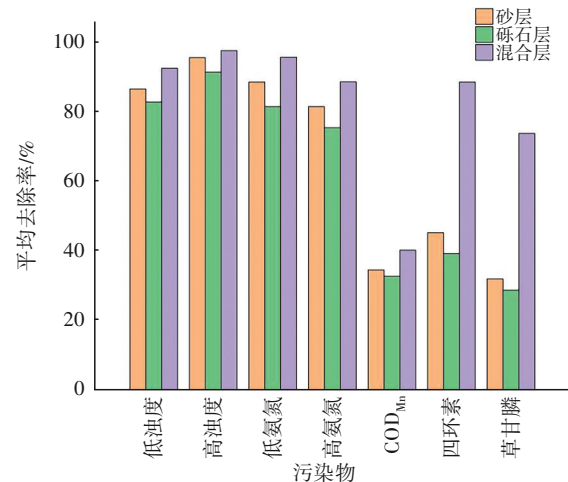


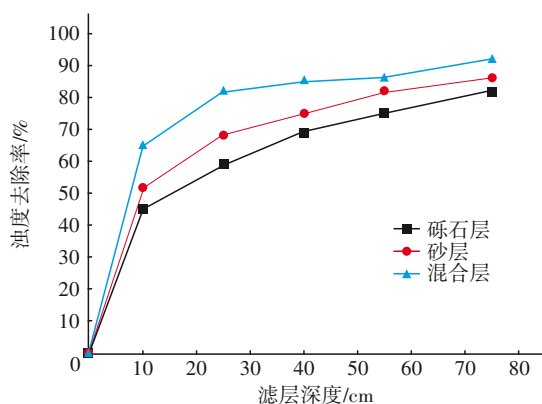
图2 对不同污染物的平均去除率

Fig.2 Average removal rate of different pollutants

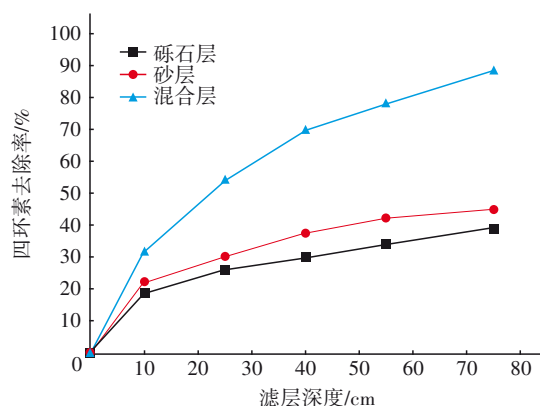
从图2可以看出,3套系统对各种污染物均具有良好的去除效果,对浊度的去除率达到80%以上,同时对一些典型的污染物如氨氮、抗生素以及农药等也都具有良好的去除效果,这是由多种作用共同造成的,除了滤层本身的物理拦截和机械过滤外,随着微生物在滤层不断附着,逐渐形成生物膜,从而发挥吸附、生物作用等^[11]。随着浊度的增加,水中悬浮大颗粒增多,系统的物理吸附、截留发挥了较大的作用,因而能保持较高的去除率。此外,不同滤层对污染物的去除效果有着显著差异,从整体上看,3种滤层去除效果由好到差依次为混合层、砂层、砾石层。同时,砾石层岸滤系统达到稳定运行需要30 d,而砂层和混合层岸滤系统达到稳定运行分别仅需27、20 d。这是由于砾石层颗粒较大,使得颗粒间的通道较宽,造成入渗过程中水流流速较快,影响了微生物的附着,从而降低了对污染物的去除效果,相比之下,混合层和砂层由于其结构比较紧密,更有利于微生物的附着,发挥其降解作用,同时土石层中含有较多土壤,其本身富含大量微生物并且具有较强的吸附性,因而混合层岸滤系统去除污染物的效果最好。

2.2 不同滤层深度下污染物的去除效果

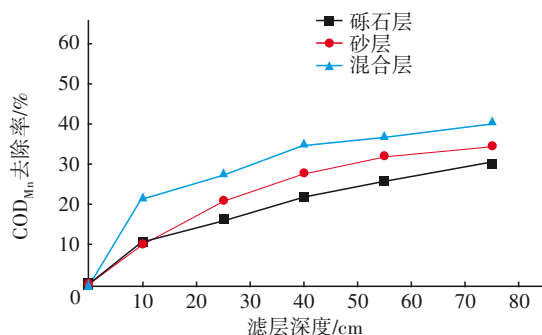
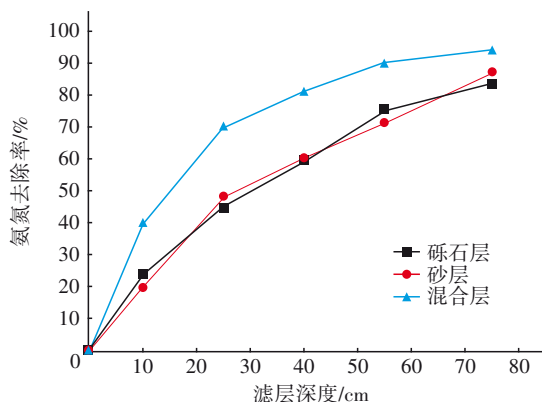
为了探究不同滤层深度处的污染物去除效果,确定实际建造过程中渗井到河岸的距离,分别在滤层下方10、25、40、55、75 cm处取样,检测其水质,图3为各滤层不同深度处的污染物去除率。



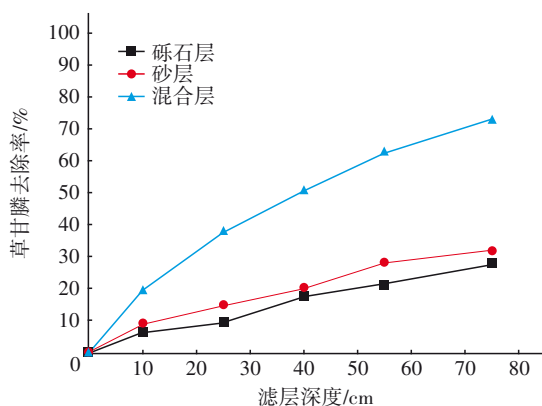
a. 对浊度去除效果的影响



e. 对四环素去除效果的影响

b. 对 COD_{Mn} 去除效果的影响

c. 对氨氮去除效果的影响



d. 对草甘膦去除效果的影响

图3 滤层深度对污染物去除效果的影响

Fig.3 Pollutant removal effect along the way

从整体上看,随着滤层深度的增加,原水通过滤料的时间也增加,微生物能够更充分地进行生物作用,因而去除效果越来越好。同时也发现,在滤层厚度为0~40 cm这一范围内污染物的去除效果最好,去除了大部分的污染物,而40~75 cm范围内污染物的去除速率明显下降^[12]。这是因为水流在穿过滤层时,大量有机物在上层被截留,供微生物降解利用,使得微生物较为活跃,能更好地发挥其降解作用。随着滤层深度的增加有机物减少,微生物因缺乏营养而活动减弱,因而滤柱上层的去除效果要好于底部。此外溶解氧的消耗也是造成这一现象的重要原因,测定显示进水溶解氧平均浓度为8.6 mg/L,而底部出水平均浓度为1.8 mg/L,由于溶解氧在滤料上层被微生物大量消耗,导致底部供氧不足,使得微生物无法充分发挥作用。

试验还发现,岸滤系统对农药、抗生素等物质也具有良好去除效果,且土石混合层岸滤系统的去除效果要远远优于砾石层和砂层系统,这是因为生物活动和吸附作用是此类物质去除的主要机制,由于土壤的吸附性更好,因此去除效果要优于其他两类。有研究表明,土壤颗粒和混合物之间的电子吸引力对抗生素等物质的去除具有重要影响^[13]。

2.3 滤速对污染物去除效果的影响

随着滤速的增加,砾石层和砂层系统对污染物的去除效果明显降低,滤速越高,污染物的去除效果越差(见图4),这种现象主要是由两个原因造成的,一方面滤速增加会增大水流对滤层的冲刷力,造成穿透现象,导致一部分微生物被冲离滤料表面,使其无法很好地发挥生物作用,并且降低了系

统物理吸附和截留效果。另一方面,滤速增加会导致水力停留时间变短,使得微生物没有充足的时间进行生物作用。相比之下,滤速对土石层的影响不大,尽管滤速增加,但仍能保持较稳定的去除率,这主要得益于土石混合物有着较强的吸附能力和较大的比表面积,维持着微生物稳定的生命活动。试验还发现,改变滤速对去除浊度的影响最大,其中砾石层的去除率最大降低20%,这是由于随着水力负荷增加,水力冲刷作用增强,一部分生物膜老化脱落以及悬浮颗粒被水流带出而导致^[14-15],之后各系统重新进入一个相较之前较低水平的稳定阶段,这是系统应对新工况而做出的改变。

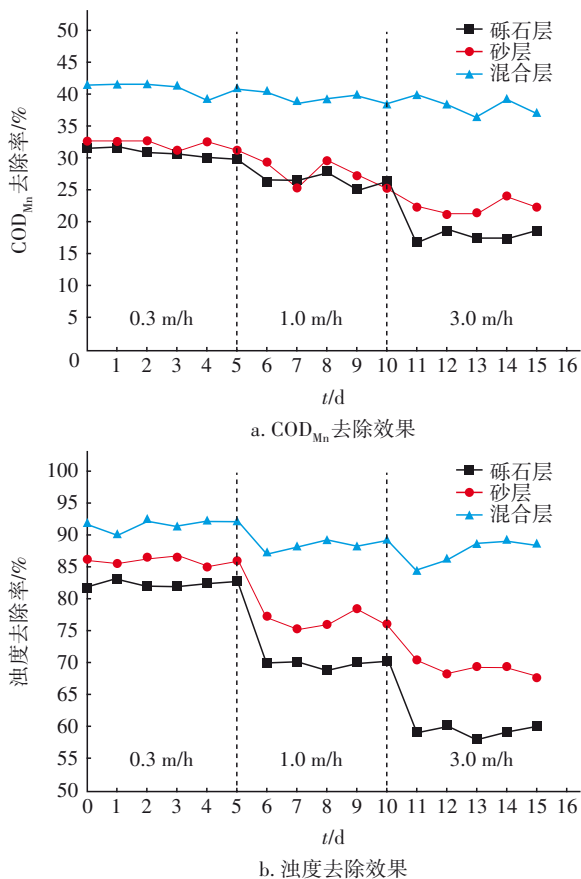


图4 不同滤速下各系统对 COD_{Mn} 和浊度的去除效果

Fig.4 Removal effect of various systems on COD_{Mn} and turbidity under different filtration rates

此外,在试验的最后将砾石层以及砂层岸滤系统上层40 cm滤料换成土石混合滤料,并分别在0.3、1.0、3.0 m/h的滤速下运行一段时间,结果表明,在不同滤速下岸滤系统对 COD_{Mn} 和浊度的去除效果无显著变化,由此可见,更换部分滤料后使砾石层和砂层岸滤系统具有更好的耐冲击负荷能力。

2.4 溶解氧浓度对污染物去除效果的影响

为了探究系统在不同复氧条件下对污染物的去除效果,进行一组平行试验,向混合层岸滤系统中引入两根直径为4 cm、长为80 cm的通气管,底部呈十字交叉形状分成4根支管,每根支管上均匀布置3个直径为5 mm的通气孔,对照组则不设空气导管,结果见图5。可以看出,引入空气导管后,系统的大气复氧能力得到提升,好氧微生物的活性增强,对污染物的去除能力也略有提高。

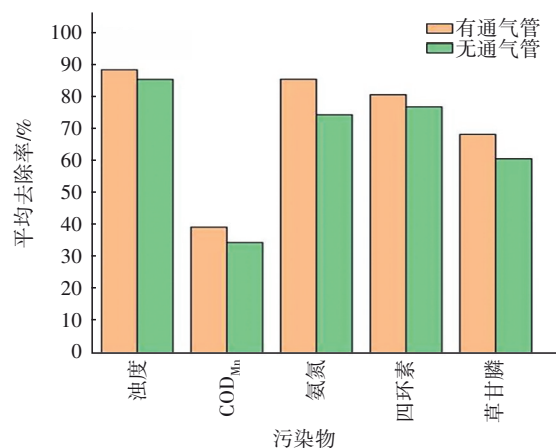


图5 空气导管强化效果

Fig.5 Enhancement effect of air duct

进出水的三维荧光光谱分析结果显示,设有通气管的装置出水相较无通气管出水各峰强度降低更明显,进一步证明了该系统内生物活性更高。此外,在全部的污染物中,氨氮的去除效果最为明显,这是因为在去除氨氮的过程中,硝化作用占主导地位,由于硝化细菌是好氧细菌,因此装置引入空气导管强化系统复氧能力后,硝化能力进一步得到提升。从整体上来看,引入空气导管后系统对污染物的去除效果提升不是很大,其主要原因是反应器以及空气导管太小,使得氧气的输入具有一定的限度。因此,在实际应用中,应当根据整个岸滤区域的大小来考虑空气导管的设置。

3 集蓄坝渗蓄效果的模拟

为了进一步探究集蓄坝对河水入渗、蓄存的效果,确定实际应用中集蓄坝的设置方式,以商洛市大荆镇为例,采用Hydrus 2D/3D软件进行模拟。该地区为山区,主要水源东峪河为浅水河流,平均水深只有20 cm,水厂难以直接取水,综合考虑后确定采用渗井取水,由于河流周围含水层较浅(约为6 m),主要结构为砂岩,地形坡度较大,地下水扩散较

快,为满足 $2\,600\text{ m}^3/\text{d}$ 的用水量,需设置集蓄坝。

图 6 为构建的集蓄坝蓄水模型,主要由入渗结构、渗井以及集蓄坝构成,初设长、宽、高分别为 10、10、6 m,左面为河流渗透面,模拟溪流入渗,设置定水头为 20 cm,其他面为零通量边界,模拟集蓄坝。

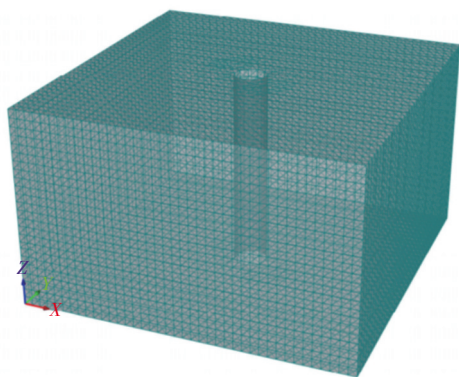


图 6 集蓄坝与岸滤蓄水模型

Fig.6 Storage dam and bank filtration storage model

图 7 为模拟得到的单位时间河流入渗量、单位时间井水产流量以及整个系统的总蓄水量。在 20 cm 的定水头边界条件下,该模型在 24 h 内能达到饱和状态,并且系统在非饱和状态下单位时间的入渗速度和产流速度较快,在饱和阶段速度趋于稳定。在 0~24 h 内,系统的入渗总量为 285 m^3 ,井的产流总量为 121 m^3 ,表面溢流总量约为 8 m^3 ,因此 24 h 内蓄水总量为该时段内入渗总量减去产流量再减去表面溢流总量,计算得出约为 $156\text{ m}^3/\text{d}$,符合蓄水总量模拟结果。由此可见,对于该山区薄含水层而言,建设集蓄坝有利于储存地下水,保证渗井水量的稳定。由于该水厂设计用水量为 $2\,600\text{ m}^3/\text{d}$,而渗井的产流量为 $121\text{ m}^3/\text{d}$,因此在含水层高度不变的条件下,根据实际地形增加集蓄坝的长度,使其形成更大的集水区即可。

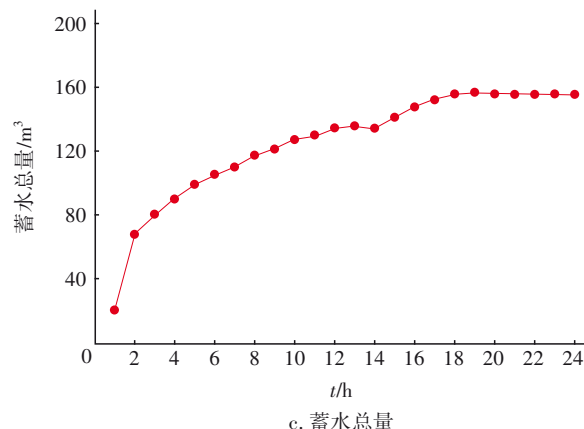
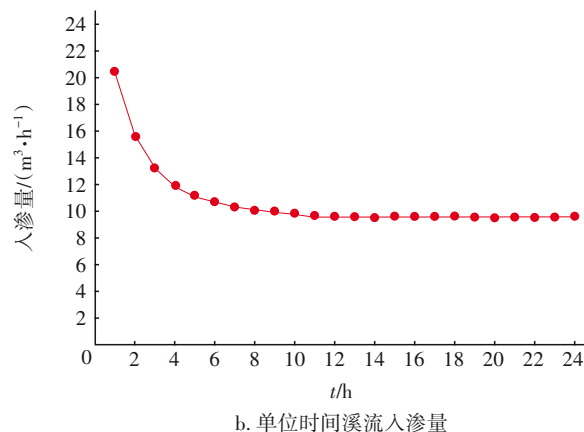
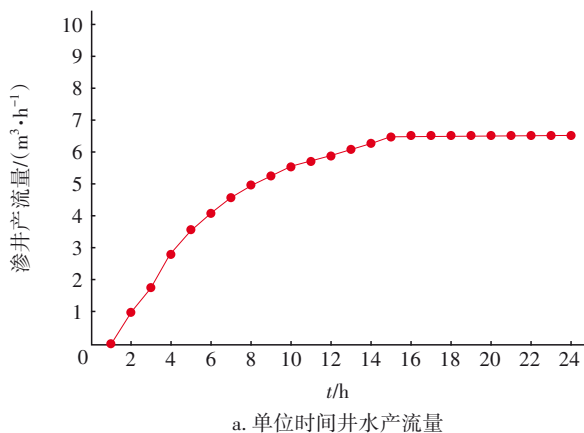


图 7 模型运算结果

Fig.7 Model operation results

由于模型的运行结果受到河流水位、地形、含水层介质厚度等多方面因素的影响,因此在实际建设过程中,应当先探明该地区的水文地质条件,再结合模型运算结果确定集蓄坝的构造方式。

4 结论

① 集蓄坝与岸滤组合取水设施作为一种新型的水处理技术,在不同的水质条件下,对污染物都有着良好的去除效果,能有效解决山区溪流等水源在雨洪季带来的高浊高污染问题,保证水厂进水水质,减轻水厂运行负担。

② 更换部分滤料可以提高岸滤系统的抗冲击负荷能力,维持极端条件下污染物的去除效果。

③ Hydrus 2D/3D 软件模拟结果表明,集蓄坝能有效蓄存地下水,在枯水季维持渗井水量稳定。

参考文献:

- [1] 李仰斌. 村镇饮用水源保护和污染防治技术 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2016.
LI Yangbin. Protection and Pollution Prevention and

- Control Technology of Drinking Water Source in Villages and Towns [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2016(in Chinese).
- [2] 何云. 贵州省某山区河流取水工程工艺设计方案介绍[J]. 轻工科技, 2013, 29(7): 2-3.
- HE Yun. Introduction to the process design scheme of a mountain river water intake project in Guizhou Province [J]. Light Industry Science and Technology, 2013, 29(7): 2-3(in Chinese).
- [3] 姜鸿烈, 薛军, 徐立军. 山区农村饮用水厂(站)的运维策略研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(12): 36-41.
- JIANG Honglie, XUE Jun, XU Lijun. Research on operation and maintenance strategy of rural drinking water plants (stations) in mountainous areas [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(12): 36-41 (in Chinese).
- [4] 姚振兴. 桐城市某山区性河流取水工程设计方案及问题分析[J]. 科学技术创新, 2018, 18(23): 1-2.
- YAO Zhenxing. Design scheme and problem analysis of water intake project for a mountainous river in Tongcheng City [J]. Science and Technology Innovation, 2018, 18(23): 1-2(in Chinese).
- [5] ABDLE LAN A K. Riverbank filtration for water supply in semi arid environment [J]. Journal of Engineering Sciences, 2013, 41(3): 840-850.
- [6] HUNCHEOL I, INSEOL Y, HEECHUI C. Fate of veterinary antibiotics in riverine soils: evaluation of applicability in riverbank filtration [J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 11(3): 1-7.
- [7] 代慧君, 魏叶敏. 山区乡镇水厂水源的选择及设计[J]. 水电水利, 2021, 4(12): 140-141.
- DAI Huijun, WEI Yemin. Selection and design of water sources for rural water plants in mountainous areas [J]. Hydropower and Water Conservancy, 2021, 4(12): 140-141(in Chinese)
- [8] GOPI D, SHERIF E, SURENDIRAN M, *et al.* Corrosion inhibition by benzotriazole derivatives and sodium dodecyl sulphate as corrosion inhibitors for copper in ground water at different temperatures [J]. Surface and Interface Analysis, 2015, 47(5): 618-625.
- [9] PIRSAHEB M, AZIZI E, ALMASI A, *et al.* Evaluating the efficiency of electrochemical process in removing COD and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ from landfill leachate [J]. Desalination and Water Treatment: Science and Engineering, 2016, 57(15): 57-58.
- [10] SIMUNEK J, VAN GENUCHTEN M T, MARTINUS S. Recent developments and applications of the hydrus computer software packages [J]. Vadose Zone Journal, 2016, 15(7): 3-5.
- [11] 李伟光, 吕龙义, 金佳林, 等. 两级生物强化过滤处理低温微污染地下水中试研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(21): 26-32.
- LI Weiguang, LÜ Longyi, JIN Jialin, *et al.* Pilot-scale study on treatment of low-temperature and micro-polluted groundwater by two-stage bio-enhanced filtration [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(21): 26-32 (in Chinese).
- [12] 丁卫, 盛德洋, 张晓健, 等. 活性炭-石英砂双层滤池去除氨氮和亚硝酸盐氮的特性[J]. 净水技术, 2012, 31(5): 20-24.
- DING Wei, SHENG Deyang, ZHANG Xiaojian, *et al.* Characteristics of ammonia nitrogen and nitrite nitrogen removal by activated carbon quartz sand double layer filter [J]. Water Purification Technology, 2012, 31(5): 20-24 (in Chinese).
- [13] ALSAADI Z H, TARISH A H, SAEED E A. Multiplex PCR rapid and sensitive screening method for detection of local strains of *Escherichia coli* [J]. Biochemical and Cellular Archives, 2018, 18(1): 31-35.
- [14] LEE J M, HYUN K H, CHOI J S. Analysis of the impact of low impact development on runoff from a new district in Korea [J]. Water Science and Technology, 2013, 68(6): 69-75.
- [15] LUNDY L, ASHLEY R, WONG T, *et al.* Water-sensitive urban design: opportunities for the UK [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 2013, 166(2): 257-264.

作者简介: 杨涛(1995-), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 主要研究方向为村镇饮用水水质提升技术。

E-mail: 425696639@qq.com

收稿日期: 2022-10-15

修回日期: 2022-11-08

(编辑: 李德强)