

文章编号 0559-9350(2005)09-1083-05

# 用土壤含水层处理系统去除水库微污染有机物的试验研究

郑艳侠<sup>1</sup>, 冯绍元<sup>1</sup>, 蔡金宝<sup>2</sup>, 黄炳彬<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083 2. 北京市水利科学研究所, 北京 100044)

**摘要** 本文针对当前中国饮用水源污染以微污染为主的特点, 以北京三家店水库原水和永定河河道砂为研究对象, 设计了用于表征土壤含水层处理系统的一维土柱, 进行污水净化效果的试验研究。结果表明, 土壤含水层处理系统对三家店水库微污染水中的有机物有一定的去除效果, 在 0.12m/d 的水力负荷条件下, 对 COD<sub>Mn</sub> 去除率虽然仅为 15%, 但是出水达到了地表水 II 类水质标准, 对 BOD<sub>5</sub> 的去除率达到了 55%, 可以被有效地去除。渗透速率相同时, 水力负荷周期对去除效果的影响不明显, 但在保证一定水力负荷的情况下, 可适当延长落干期, 恢复土壤的渗透能力, 达到较好的处理效果。同时, 土壤含水层处理系统的净化能力主要发生在土层 50cm 以内。

**关键词** 土壤含水层处理系统, 微污染原水, 有机物, 试验

中图分类号: X524

文献标识码: A

## 1 试验的意义

微污染水一般是指由于工业、农业和生活等方面产生的污水未经适当处理而排入供水水源使水质受到污染的水, 水质污染以氨氮和有机物等指标最为突出<sup>[1]</sup>。随着我国经济发展和城市人口的日益集中与增加, 众多河流受到污染, 成为微污染水, 丧失了饮用水水源的功能和作用<sup>[2]</sup>。在当前水资源严重短缺的形势下, 微污染原水仍将是重要水源, 然而采用微污染水将使得水厂的处理成本加大, 因此应采取必要的措施对微污染水进行预处理。根据微污染水的水质特点及供水水质的要求, 国内外提出了各种微污染原水的给水处理工艺, 其中清华大学王占生教授提出的接触氧化法处理微污染水效果良好, 但运行费用较高<sup>[3]</sup>。而土壤含水层处理系统不需要很多的日常操作和维护, 不需要地表存储设施。出水水质好, 对有机物和氨氮有较好的处理效果, 处理费用低<sup>[4]</sup>。随着水资源短缺形势的日益严重和污水回用研究的广泛开展, 在新的经济、环境条件下迫切需要对土壤含水层处理技术进行深入研究。

土壤含水层处理系统 (Soil Aquifer Treatment, SAT) 是污水土地处理系统之一<sup>[5]</sup>。其对污水的净化机制是, 污水在包气带及潜水层流动时, 借助于发生在土壤和浅部含水层中的物理、化学和生物作用, 使污染物通过吸附、微生物降解、沉淀及其它化学反应去除, 最终达到污水净化的目的。土壤含水层对有机物和氨氮的去除可以不断地进行下去, 土壤含水层相当于一个由好氧、缺氧、厌氧组合的生物反应器<sup>[6]</sup>。国外这方面的研究比较多, 而且其目标不仅仅放在轻微污染的地表原水<sup>[7]</sup>, 对中水进行处理以达到饮用水标准也在其研究范围内, 而且也有实际工程运行<sup>[8]</sup>。这种技术目前在我国主要用于污水处理, 应用于微污染原水的给水预处理, 2001 年前尚未见有人进行研究<sup>[9]</sup>。但近年来, 随着地下水回灌的研究逐渐增多, 土壤含水层系统处理微污染河水的研究也受到了重视, 但是尚处于起步阶段, 许多方面还有待进一步研究。

官厅水库曾是北京市重要的饮用水水源地, 由于受上游及库区周边地区排放大量污染物的影响, 水

收稿日期: 2004-11-25

基金项目: 科技部、水利部重大科技项目; 北京市“二四八”重大科技攻关项目(9550610400)

作者简介: 郑艳侠(1976-), 女, 河北承德人, 博士生, 主要从事水资源与水环境研究。

库水质不断下降,常年水质在IV~V类之间,逐渐失去了供水功能,被迫于1997年退出饮用水供水系统。因此,研究恢复官厅水库微污染水供水功能的水处理技术就显得尤为必要。本文主要是根据土壤含水层处理系统的工作原理,设计其相应的室内土柱,以北京三家店水库原水为对象,以水库河道的现状土壤为含水层渗透介质,进行相应的实验,探讨土壤含水层处理系统去除微污染有机物的效果。

## 2 材料与方法

**2.1 实验装置** 实验在图1所示的模拟土柱中进行。实验土柱采用直径为15cm的有机玻璃柱,高100cm。滤料高90cm,在土柱的上部留下5cm作为淹水水头空间,在土柱的底部均装以5cm厚的砾石层,以便于排水。沿土柱高设置取样孔(土体表面以下10cm、30cm、50cm和70cm),通过陶土头来收集样品。实验土柱采用原水由上部进入,底部出水口排出。实验设4个处理,2组重复,水力负荷周期有所不同,各柱水力负荷周期形式见表1。

表1 各实验土柱水力负荷周期形式

时间	柱号			
	1	2	3	4
淹水期/d	2	2	2	3
落干期/d	5	3	7	5

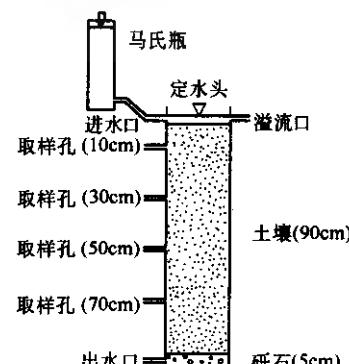


图1 实验装置示意

**2.2 供试水样及土样** 实验期间三家店水库水质情况见表2,根据历年资料,三家店水库有机物浓度几乎常年超标,所以本实验只对COD<sub>Mn</sub>和BOD<sub>5</sub>的去除效果进行了研究。

土样采自拟建地下水回灌工程的北京市永定河三家店河道,土粒级配见表3。土样的不均匀系数C<sub>u</sub>为21.15(C<sub>u</sub>=d<sub>60</sub>/d<sub>10</sub>)。其中d<sub>60</sub>为小于此种粒径的土的质量占总质量的60%;d<sub>10</sub>为小于此种粒径的土的质量占总土质量的10%(也称为有效粒径),有效粒径为0.026mm,土壤详细的物理参数见表4。

由于从野外取回的土壤样品含水率大体上处于风干到水分饱和状态之间,需要进行干燥。采用风干法干燥,过2mm筛,取通过2mm筛的土壤样品进行实验。实验前先将土壤样品进行湿润,使水分重分布,以获得均匀的初始含水率,按干容重1.55g/cm<sup>3</sup>分层装填,每3cm装填一层,层间打毛,并进行夯实,达到要求的厚度。

表2 实验期间三家店水库原水值(单位:mg/L)

项目	COD <sub>Mn</sub>	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TN	TP	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	SS
最大值	4.8	1.9	0.36	1.56	0.038	0.84	4
最小值	4.1	1.2	0.05	0.76	0.011	0.19	2

表3 土粒级配

取样点	砂粒/mm				粉粒/mm	黏粒/mm	土壤名称
	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	0.1~0.05			
永定河	43.64%	3.5%	26.86%	11.26%	14.34%	0.4%	细砂

表4 土壤物理性质参数

土壤名称	取样深度/cm	干容重(g/cm <sup>3</sup> )	孔隙度	pH值
细砂	100	1.55	0.30	7.80

2.3 水样分析项目及方法 化学需氧量(COD)采用高锰酸钾法(GB 11892—89);五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)采用标准稀释法(GB 7488—87)<sup>[10]</sup>。

2.4 实验过程 实验分两阶段运行。第一阶段共21d,主要进行土柱中微生物培养,虽然微污染水源水中污染物的浓度很低,但有利于贫营养菌的生长繁殖,如:假单细胞菌、土壤杆菌、黄杆菌和纤毛菌等<sup>[11]</sup>。由于实验期间水温较高,采用了自然挂膜的方式,这样培养的细菌适应性强,不易被冲刷。21d后 COD<sub>Mn</sub> 的去除率达到 10%,认为系统挂膜成功<sup>[12]</sup>,可以进入正式运行阶段。

第二阶段为正式运行阶段,按表1所示的水力负荷周期运行,每个土柱依照各自的水力负荷周期形式运行了5个周期,Fox等<sup>[13]</sup>将这种短期研究称为 Short-term SAT。实验过程中,对各土柱的渗透速率进行了测定。本实验进水悬浮物浓度低,不易发生堵塞,同时又采用了淹水落干交替的运行方式,渗透速率在各个周期内得到了很好的恢复,故每个土柱的渗透速率基本保持一个定值。系统的水力负荷主要取决于介质的渗透性能和水力负荷周期,介质的渗透性能越好,其在单位时间单位面积上处理的水量就越大,相应的各土柱的渗透速率和水力负荷见表5。

表 5 各实验土柱的渗透速率和水力负荷

柱号	No1	No2	No3	No4
渗透速率( m/d )	0.288	0.288	0.049	0.288
水力负荷( m/d )	0.08	0.12	0.01	0.11

### 3 结果与讨论

3.1 实验土柱对 COD<sub>Mn</sub> 和 BOD<sub>5</sub> 的总体去除效果 微污染原水中有机物的浓度较低,其本质上属于国家《地表水环境质量标准》中规定的Ⅲ、Ⅳ类水体水质。对这种污染较轻的微污染水,本文研究了土壤含水层处理系统对微污染水的总体去除效果。图2为2号柱按照淹水2d/落干3d的水力负荷周期运行时,5个周期的 COD<sub>Mn</sub> 进出水值和去除率;图3为2号柱按照淹水2d/落干3d的水力负荷周期运行时,5个周期的 BOD<sub>5</sub> 进出水值和去除率。从图中可能看出,在 0.12m/d 的水力负荷条件下,尽管 COD<sub>Mn</sub> 的去除率只有 15% 左右,但是出水 COD<sub>Mn</sub> < 4mg/L,达到了《地表水环境质量标准》(GB3838 2002)中Ⅱ类水质标准;而 BOD<sub>5</sub> 的去除率达到了 55%,BOD<sub>5</sub> 能够被有效地去除。研究结果表明,土壤含水层处理系统对微污染原水中有机物有一定的去除效果,特别是 BOD<sub>5</sub> 能够被有效的去除。

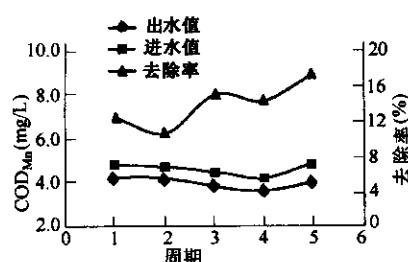


图 2 2号土柱进出水 COD<sub>Mn</sub> 值及去除率

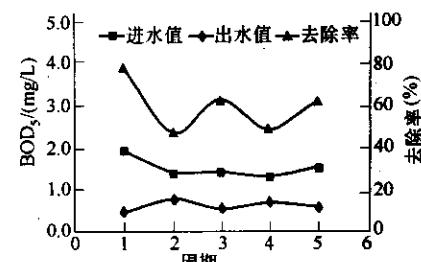


图 3 2号土柱进出水 BOD<sub>5</sub> 值及去除率

3.2 不同水力负荷周期下 COD<sub>Mn</sub> 和 BOD<sub>5</sub> 的去除效果 图4为各土柱进出水 COD<sub>Mn</sub> 值。从图中可以看出,对于不同的水力负荷周期,处理效果略有不同,表明水力负荷周期对系统的处理效果是有影响的,但是对于这种微污染水,其影响并不明显。在以相同的渗透速率运行时,去除率相对较高的是 No1 和 No2,分别为 16% 和 15%,其水力负荷周期依次为 2d/5d 和 2d/3d。总的来说,在淹水时间相同的情况下,还是落干期较长的土柱出水效果好些。但不是落干时间越长越好,因为大部分氧气量在落干的前 3d 即可进入土柱,因此欲使土壤中的氧气量增多,采用短水力负荷周期(即加快淹水-落干的频次)要比采用长落干期更有效。一般情况下,间歇时间越长则土壤处理能力恢复得越好,其渗透速率也越大,但是间歇时间也不能无限延长,应同时考虑处理效率的处理负荷。

图 5 为各土柱  $BOD_5$  去除效果曲线。从图中可以看出,土壤含水层处理系统对微污染水中  $BOD_5$  有很好的去除效果,平均去除率达到了 55%。

3.3 土柱不同深度处  $COD_{Mn}$  的出水值 实验过程中,在各土柱不同高度设置取样孔以取水样监测。各取样孔对应的滤层厚度分别为:土层表面为 10cm、30cm、50cm、和 70cm。2 号柱和 3 号柱不同深度处出水  $COD_{Mn}$  值变化分别如图 6、图 7 所示。虽然 2 号柱和 3 号柱的渗透速率不同,但是正如前面分析的,渗透速率对出水效果无明显影响。实验结果表明,对有机物净化主要发生在土层 50cm 以内,Bouwer 等<sup>[14]</sup>及 Amy 等<sup>[15]</sup>对土壤含水层处理城市污水的研究也得出了类似结果。主要原因是表层土壤中微生物活性最高。滤层厚度增加之后,系统对有机污染物的去除能力有所提高,但提高幅度不太明显。因此,在实际应用中,应充分考虑技术经济性,力求“性能价格比”的最大化。

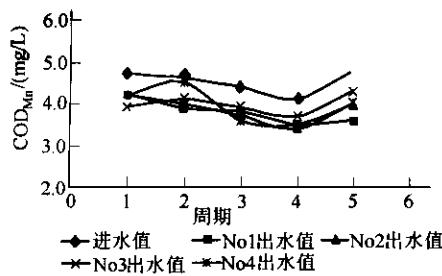


图 4 各实验土柱进出水  $COD_{Mn}$  浓度

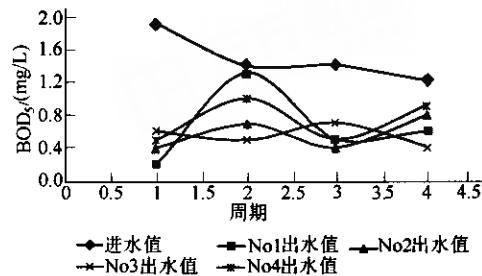


图 5 各实验土柱进出水  $BOD_5$  浓度

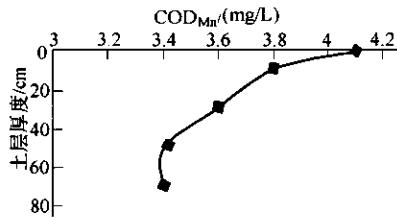


图 6 No2 土柱不同土层厚度  $COD_{Mn}$  出水值

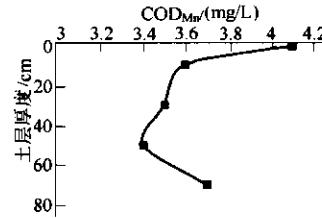


图 7 No3 土柱不同土层厚度  $COD_{Mn}$  出水值

#### 4 结语

通过室内土柱模型实验,证明了利用土壤含水层处理系统处理微污染有机物的可行性,且有一定去除能力。本实验在一定的水力负荷周期下,土壤含水层处理系统可达到良好的处理效果,在 0.12m/d 的水力负荷条件下,对  $COD_{Mn}$  去除率虽然仅为 15%,但土柱出水  $COD_{Mn}$  浓度小于 4mg/L,出水满足《地表水环境质量标准》(GB3838 2002)中Ⅱ类水质标准。渗透速率相同时,水力负荷周期对去除效果的影响不明显。但在保证一定水力负荷的情况下,可适当延长落干期,恢复土壤的渗透能力,以求达到较好的处理效果。土壤含水层处理系统的净化能力主要发生在土层 50cm 以内,所以在实际应用中,应充分考虑技术经济性,力求“性能价格比”的最大化。由此可见,以土壤含水层处理系统作为给水的预处理,不仅效果好,而且处理费用低,主要费用是征地费和抽水动力费。处理水量在快速渗滤系统的负荷范围为 0.016~0.356m/d。

本实验中,由于砂土装填较密实,原水的渗透速率慢,不能完全反映实际的情况,所以水力负荷还需要根据野外实验现场情况确定。

#### 参 考 文 献:

- [1] 国家环保局.中国环境状况公报[R].北京:国家环保局,2002.
- [2] 许建华,杨人隽,等.水的特种处理[M].上海:同济大学出版社,1989.

- [ 3 ] 王占生 ,刘文君 .微污染水源饮用水处理[ M ].北京 :中国建筑工业出版社 ,1999 .
- [ 4 ] Herman . Role of groundwater recharge in treatment and storage of wastewater for reuse[ J ]. Water Sci. Tech. , 1991 24 ( 9 ) 267 – 275 .
- [ 5 ] 皮运正 ,吴天宝 ,等 .土壤含水层处理去除可吸附有机卤化物的试验研究[ J ].重庆环境科学 ,2000 ,22( 1 ) 31 – 33 .
- [ 6 ] Kopchynski T , Fox P , Alsmaldi B , et al . Effects of soil type and effluent pre-treatment on soil aquifer treatment[ J ]. Water Sci. Tech. , 1996 ,34( 11 ) 235 – 242 .
- [ 7 ] May C , Melin G , Linsky R B . Riverbank filtration : improving source-water quality[ M ]. U. S. A :Kluwer Academic Publisher ,2003 .
- [ 8 ] Bosman T N P , Ballemans E M W , Hoekstra N K , et al . Biotransformation of organics in soil columns and an infiltration area[ J ]. Groundwater , 1996 ,34( 1 ) 49 – 56 .
- [ 9 ] 何江涛 ,钟佐 ,等 .污水土地处理技术与污水资源化[ J ].地学前缘 ,2001 ,8( 1 ) :155 – 161 .
- [ 10 ] 国家环保局 .水和废水监测分析方法( 第 3 版 )[ M ].北京 :中国环境科学出版社 ,1998 .
- [ 11 ] 刘双江 ,刘志培 ,王宝军 ,等 .水源水生物预处理反应器微生物学特性[ J ].城市环境与城市生态 ,1994 ,7( 2 ) :1 – 5 .
- [ 12 ] 吴为中 ,王占生 .水库水源水生物陶粒滤池预处理中试研究[ J ].环境科学研究 ,1999 ,12( 1 ) :10 – 14 .
- [ 13 ] Fox S. Houston , Westerhoff P , Drewes J E , et al . , Investigation on Soil-Aquifer Treatment for Sustainable Water Reuse [ Z ]. National Center for Sustainable Water Supply ( NCSWS ) , 2001 .
- [ 14 ] Bouwer H. Groundwater recharge with sewage effluent[ J ]. Water Sci. Tech , 1991 ,23 :2099 – 2108 .
- [ 15 ] Amy G , Wilson L G , Conroy A , et al . Fate of chlorination byproducts and nitrogen species during effluent recharge and soil aquifer treatment ( SAT )[ J ]. Water Environ. Res. , 1993 ,65 :726 – 734 .

## Experimental study on removal of organic substance in reservoir water by means of soil aquifer treatment system

ZHENG Yan-xia<sup>1</sup> ,FENG Shao-yuan<sup>1</sup> ,CAI Jin-bao<sup>2</sup> ,HUANG Bing-bin<sup>2</sup>

( 1. China Agricultural University ,Beijing 100083 ,China 2. Beijing Hydraulic Research Institute ,Beijing 100044 ,China )

**Abstract :**A soil aquifer treatment installation is built by using river sands in Yongding River to experimentally study the effectiveness of this kind of system for removing the organic substance in reservoir water. The slightly polluted water sample to be studied is the original water acquired from the Sanjiadian Reservoir , Beijing . The result shows that the system is effective in removing organic substance . When hydraulic loading is 0.12m/d , the average removal rate of COD<sub>Mn</sub> is 15% and the effluent concentration accords with the standard of class II . The average removal rate of BOD<sub>5</sub> is 55% . The effectiveness of removal varies with the wetting/drying ratio but not obviously under the same infiltration rate . The purification process happened mainly at the upper part of the soil column in the depth of 50cm .

**Key words :**soil aquifer treatment system ;slightly polluted water ;organic substance ;experiment

( 责任编辑 :吕斌秀 )