



文章栏目：水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202112112 中图分类号 X52 文献标识码 A

王军锋, 陈明, 王玉荣, 等. 室内模拟地表 PRB 处理离子型稀土矿区尾水[J]. 环境工程学报, 2022, 16(5): 1516-1524. [WANG Junfeng, CHEN Ming, WANG Yurong, et al. Indoor simulation of surface PRB treating tailwater in ionic rare earth mining area[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(5): 1516-1524.]

## 室内模拟地表 PRB 处理离子型稀土矿区尾水

王军锋<sup>1,2</sup>, 陈明<sup>1</sup>, 王玉荣<sup>2</sup>, 王兴祥<sup>2</sup>, 周志高<sup>2,✉</sup>

1. 江西理工大学资源与环境工程学院, 赣州 341000; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008

**摘要** 采用室内模拟 PRB 装置, 以粒径 2~4、0.6~1 mm 沸石为填料, 研究了地表 PRB 主要构造因子对渗流量的影响, 并考察了地表 PRB 对稀土矿区尾水氨氮削减和泥沙拦截的效果。结果表明, 细粒沸石级配为 10%~15% 时, 渗流量变化平缓, 有利于 PRB 系统稳定运行; 渗流量与 PRB 厚度成线性负相关, 与水位差成线性正相关; 当进水口位置为 1/3 PRB 高度时, 在较宽的水位差范围内水流均以渗流方式经过 PRB, 因而提高了 PRB 填料的利用率。优化设计 PRB 装置对稀土尾水的氨氮平均去除率为 14.2%, 泥沙平均去除率为 58.2%, 出水 pH 在运行前期有明显提高, 其处理容量放大 60 倍后相当于尾水日处理能力 354 t·d<sup>-1</sup>, 可满足矿区一般小流域支流的实际需要。以上研究结果可对南方离子型稀土矿区治理提供参考。

**关键词** 离子型稀土矿区; 地表 PRB; 渗流量; 氨氮; 泥沙

硫酸铵是南方离子型稀土矿区主要浸矿剂, 其使用造成大量的氨氮残留在堆浸场土壤和原地浸矿山体中, 并不断随淋滤水进入地表水, 导致矿区和周边水体氨氮污染。因此, 稀土矿区地表水已经被视为尾水进行处理<sup>[1-3]</sup>。由于堆浸场点和原地浸矿点在矿区呈分散式分布, 南方离子型稀土矿区地表水氨氮污染呈现点源污染和面源污染的双重特征, 水体除了氨氮质量浓度超标 (30~300 mg·L<sup>-1</sup>) 外, 还呈现强酸性、COD 含量低等特点<sup>[4]</sup>。目前, 以生化法去除水体中氨氮是稀土矿区尾水处理的主流工艺, 其工艺流程主要有“pH 调节+絮凝沉淀+生化处理池 (AO<sup>2</sup>)+二沉池+后处理的模式”<sup>[5]</sup>和“混合沉淀池+格栅槽+调节池+渗滤复合系统 A(好氧系统)+渗滤复合系统 B(厌氧系统)+消毒后排放”的双级渗滤耦合系统处理模式<sup>[6]</sup>。与城市污水处理相比, 离子型稀土矿区尾水因其酸性强、低 COD 等特点使得生化处理运行成本偏高<sup>[7-8]</sup>。在暴雨时节, 水土流失导致的浑浊水流, 又加重了末端处理负荷, 且严重影响生化池处理效果<sup>[9-10]</sup>; 而冬季降雨量少、水流量少, 尾水氨氮浓度高于夏季, 且冬季气温较低, 微生物活性降低, 氨氮处理能力下降, 导致出水难以达标排放<sup>[11]</sup>。因此, 有必要针对稀土矿区尾水的污染特点, 在上游支流设置拦沙坝-可渗透性反应墙 (Permeable Reactive Barriers) 复合系统进行过程拦截, 以调蓄水量、拦截悬浮物和泥沙、消减氨氮、提高 pH, 从而减轻末端处理压力, 提高稀土矿区尾水的处理效果。

在地表水原位净化技术中, 透水坝是比较常见方法, 其为基于人工湿地原理和快速渗滤机理而开发的一种非点源控制技术, 也可视为地表 PRB 的一种形式<sup>[12-13]</sup>。董慧峪等<sup>[14]</sup>针对山溪河流的

收稿日期: 2021-12-17; 录用日期: 2022-03-15

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2019YFC1805102)

第一作者: 王军锋 (1995—), 男, 硕士研究生, 2819242734@qq.com; ✉通信作者: 周志高 (1971—), 男, 博士, 助理研究员, zgzhou@issas.ac.cn

特征，以粒径 2~10 cm 砾石在河段内的水生植物带建设三级透水坝，河水浊度的平均去除率约为 25%，氨氮的去除率表现为夏季 (25.7%)>春季 (17.5%)>秋季 (13.3%)。朱柏林等<sup>[15]</sup>采用质量比 1:1 的沸石 (粒径 1~2 mm) 与铝基锁磷剂组合作为滤料，并控制渗流量为  $0.11 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  的条件下，在 37 d 内循环 11 次，氨氮去除率达 46.7%。刘露等<sup>[16]</sup>在实验室进水流量为  $5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  的条件下，以体积比 3:2 的沸石 (粒径 1.0~1.5 cm) 和砾石 (粒径 1.5~2.5 cm) 作为滤坝基质，发现基质厚 50 cm 时生物挂膜最多，水体净化效果最好，氨氮去除率达到了 68.02%~69.37%。由于离子型稀土矿区尾水的强酸性和低 COD 特征，地表 PRB 不宜采用耦合生物处理，而低渗流量循环处理方式也无法适应稀土矿区小流域水体流量水平，因此，在离子型稀土矿区构建地表 PRB 的滤料配比，不仅要达到一定的污染物去除效果，同时需要满足小流域流量的需求。

沸石具有阳离子交换容量高、空隙体积大和  $\text{NH}_4^+$  亲和力强的特点，且其粒径越小，离子交换能力越强<sup>[17]</sup>；沸石具有一定的碱性<sup>[18]</sup>，有利于酸性废水 pH 的提升；同时，沸石也是良好的土壤改良材料<sup>[19]</sup>，吸附氨氮后可回用于稀土矿区周边的农田、果园或山林等地，实现氨氮的资源化利用。通过实地调查，本研究选定定南县岭北镇某稀土矿区一条水体流量  $10\sim 300 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$  的支流作为实际建设地表 PRB 的拦截对象。针对该支流的流量和水质特点，以沸石为填料，模拟研究了拦沙坝—PRB 复合系统中 PRB 单元的最佳构造参数及其应用效果。首先，研究了不同粒径沸石级配、墙体厚度、水头高度等 PRB 构造因子与渗流量的关系，以及进水口位置对水流通过 PRB 路径的影响；其次，基于获得的构造因子取值范围和目标支流的水流水质条件优化 PRB 装置以及设定其他实验条件，测定氨氮去除效果、出水 pH 的提升效果以及泥沙拦截效果，并探讨了影响处理效能的因素及其对策，以期指导离子型稀土矿区小流域拦沙坝-PRB 建造，促进离子型稀土矿区小流域地表水环境的改善。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

1) 填料和试剂。填料为购自于内蒙古赤峰恒源矿产品有限公司的天然斜发沸石，粒径有 2~4 mm (粗粒)、0.6~1 mm (细粒) 2 种。分取一部分细粒沸石制备氯化钠改性沸石，用于氨氮去除实验。使用的试剂主要有氯化钠、硫酸铵、硫酸、氢氧化钠，均为分析纯，购自于国药集团化学试剂有限公司。

氯化钠改性沸石的制备方法：在  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  下，以自来水配制  $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaCl 溶液 100 L，投放 20 kg 沸石，每隔 10 min 搅拌 1 次，每次搅拌 2 min，共搅拌 5 次。然后，再以自来水进行清洗，当使用硝酸银检测不到水中氯离子时，清洗结束。最后将沸石以  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  烘干备用。

2) 实验用水。采用自来水进行不同 PRB 构造因子对渗流量影响的实验。基于实地调查获得的目标支流水质特征 (氨氮质量浓度  $20\sim 50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，pH 为 3~4)，以硫酸铵配制氨氮质量浓度为  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、pH 为 3.6 的模拟稀土矿区尾水，用于模拟 PRB 的氨氮消减实验。根据当地暴雨季节支流溪水泥沙含量，采集目标支流所在稀土矿区的地表土壤，添加自来水，配制泥沙含量为  $1.49 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  尾水，模拟雨季稀土矿区支流的浑浊水体，用于模拟 PRB 的泥沙拦截实验。

### 1.2 实验装置

PRB 实验装置采用有机玻璃板制作，构造如图 1 所示。装置的主体是填料槽，槽内高度 13.5 cm，宽度 20 cm，长度 110 cm。槽内设有一活动挡板，槽两边内壁上凿有插槽，挡板插进不同槽内，可得到不同的 PRB 厚度。活动挡板高 12 cm，其上布满透水孔 ( $d=3 \text{ mm}$ )，通过对透水孔的塞堵控制出水口的高度。在 PRB 前端设有进水阱，宽 20 cm，长 12 cm，高 23.5 cm。在填料槽一侧的阱壁上，12 cm 以下部分布满透水孔，通过对透水孔的塞堵，改变进水口的高度；在其对面阱壁上的不同高

度布设溢流孔,用来调节水头高度。PRB水头高度与出水口高度差即水位差,是水流动力来源。依据拟定级配(细粒沸石占其与粗粒沸石混合后总沸石重量的百分比)和PRB填充体积(高度均为12 cm,厚度根据实验条件而定)称取2种不同粒径的沸石,并搅拌均匀,然后填入槽内。

### 1.3 实验过程

1) 填料级配对PRB渗流量的影响。设置0、2.5%、5%、10%、15%、25% 6个级配水平处理。在PRB厚50 cm、进水口高度与PRB等高、水位差为6 cm(即PRB水头高度为12 cm,出水口高度为6 cm)的条件下运行PRB系统,测定渗流量。

2) PRB厚度对PRB渗流量影响实验。设置50、60、70、80、90 cm 5个PRB厚度。根据实验1)结果选定最佳填料级配,并在进水口高度与PRB等高、水位差6 cm的条件下运行PRB系统,测定渗流量。

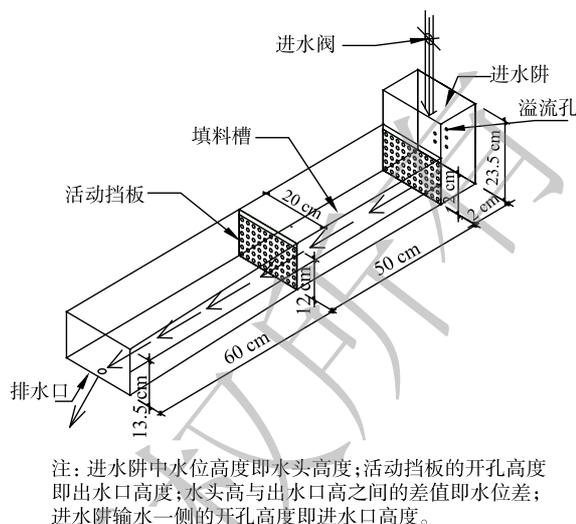
3) 水位差对PRB渗流量的影响。设置1、2、3、4、5、6 cm 6个水位差梯度处理(通过调整不同出水口高度获得不同的水位差)。在PRB厚50 cm,其他实验条件同实验2)条件下运行PRB系统,测定渗流量。

4) 进水口位置对PRB渗流量的影响。设置3个进水口高度处理:与PRB等高、1/2PRB高度、1/3PRB高度。填料级配同实验2),在PRB厚度为50 cm、PRB出水口高度为6 cm的条件下运行PRB系统,通过水头高度来调节水位差,逐步提高水头高度(12.0~15.0 cm),测定渗流量,并观察水流通过PRB的路径变化。

5) 静态沸石氨氮吸附效果。根据实验1)结果选定的最佳填料级配,取0.6~1 mm改性沸石和2~4 mm天然沸石共2 g混合放入1 000 mL容量瓶,加入400 mL模拟含氨氮尾水,以200 r·min<sup>-1</sup>振荡4 h,过0.45 μm滤膜,测定滤液氨氮浓度。更换尾水重复以上操作,当滤液氨氮质量浓度与尾水初始氨氮质量浓度无明显差异时,将400 mL尾水减为100 mL,其他操作不变,当滤液氨氮质量浓度与尾水初始氨氮质量浓度再无明显差异时,实验结束,计算单位质量沸石去除氨氮的量。

6) PRB去除尾水氨氮效果。首先,考察PRB消减尾水氨氮效果及对出水pH变化,由高到低设置4.0、3.2、2.6 L·min<sup>-1</sup> 3个连续阶梯渗流量水平处理。模拟尾水同上,根据实验1)结果选定最佳填料级配,根据实验4)选定最佳进水口高度,在厚度为50 cm、出水口高度为6 cm的条件下运行PRB系统,并且每隔720 min通过调整不同的水头高度改变1次渗流量,720 min内分别在1、2、5、10、30、60、120、180、240、300、600、660、720 min时间点采集出水口水样,一部分用于测定pH,一部分过0.45 μm滤膜,测定滤液氨氮质量浓度。其次,考察PRB厚度对PRB消减氨氮效果的影响,设置50 cm和70 cm 2个PRB厚度处理。渗流量为3.6 L·min<sup>-1</sup>,其他实验条件同上。分别在1、2、5、10、30、60、120、180、240、300、600 min时于出水口取样,过0.45 μm滤膜,测定滤液氨氮质量浓度。

7) PRB去除浑浊尾水泥沙效果。模拟浑浊尾水含沙量1.49 g·L<sup>-1</sup>,渗流量设定为4.0 L·min<sup>-1</sup>,分别收集0~25、25~50、50~75、75~100 min 4个时间段的出水,将每次收集的浑浊液搅拌均匀后取样,测定其泥沙含量。PRB装置构造与实验6)中连续阶梯渗流量处理实验相同。



注:进水阱中水位高度即水头高度;活动挡板的开孔高度即出水口高度;水头高与出水口高之间的差值即水位差;进水阱输水一侧的开孔高度即进水口高度。

图1 水平PRB沙箱设计示意图

Fig. 1 Schematic diagram of horizontal PRB sandbox design

## 1.4 分析方法与计算

通过水阀开关和溢流口配合来获得所需的进水阱水位,待其稳定后,将排水接入预先称重的水桶中,同时计时,过一段时间后再称重,以上操作重复3次,然后根据式(1)计算渗流量。

$$q = \frac{Q}{t} \quad (1)$$

式中:  $q$  为单位时间内流经 PRB 的水流量,即渗流量,  $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $t$  为时长,  $\text{min}$ ;  $Q$  为  $t$  时间内流经 PRB 的水流量(以体积计),  $\text{L}$ 。

水样氨氮含量采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535-2009)测定。PRB 氨氮累积去除量通过式(2)计算<sup>[20]</sup>,氨氮去除率根据式(3)计算,并以氨氮去除率来表征 PRB 对尾水氨氮的去除能力。以 PRB 去除尾水氨氮实验与静态沸石吸附氨氮实验所得出的单位质量沸石去除氨氮量的比值来表征填料利用率,如式(4)所示。

$$m = \sum_{i=1}^{n-1} \left( \left( \frac{(C_{0i+1} - C_{i+1}) + (C_{0i} - C_i)}{2} \right) (t_{i+1} - t_i) V_i \frac{1}{1000} \right) \quad (2)$$

$$\omega_1 = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (3)$$

$$\phi = \frac{\phi_2}{\phi_1} \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $m$  为氨氮累积去除量,  $\text{g}$ ;  $(t_{i+1} - t_i)$  为时间间隔,  $\text{min}$ ;  $C_{0i+1} C_{0i}$  分别为  $t_{i+1} t_i$  时进水氨氮质量浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $C_{i+1} C_i$  分别为  $t_{i+1} t_i$  时出水氨氮质量浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $V_i$  为渗流量,  $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $\omega_1$  为氨氮去除率, %;  $C_0$  为 PRB 进水氨氮质量浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $C_t$  为  $t$  时刻 PRB 出水氨氮质量浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $\phi$  为填料的利用率, %;  $\phi_1$  为静态吸附实验得出的单位质量沸石对氨氮的最大去除量,  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $\phi_2$  为 PRB 模拟实验得出的单位质量填料对氨氮的去除量,  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

采用重量法测定模拟尾水中泥沙质量,即将采集的样品静置 24 h,去除上清液,烘干残留泥浆,称重,根据式(5)计算尾水泥沙含量,以泥沙去除率来表征 PRB 拦截泥沙效果,其表达式如式(6)所示。

$$\rho = \frac{m_s}{V_t} \quad (5)$$

$$\sigma_1 = \frac{\rho_1}{\rho_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中:  $\rho$  为水样中泥沙含量,  $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $V_t$  为采样体积,  $\text{L}$ ;  $m_s$  为水样中泥沙质量,  $\text{g}$ ;  $\sigma_1$  为泥沙去除率, %;  $\rho_0$  为进水泥沙含量,  $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $\rho_1$  为排出水泥沙含量,  $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 填料级配对 PRB 渗流量的影响

由图2可以看出,渗流量随着细粒沸石级配的增加而降低。在不同的级配范围呈现出明显的下降趋势:当级配在 0~10% 时,渗流量随级配的增加急剧下降;当级配在 10%~15% 时,渗流量下降趋势减缓;提高级配至 15%~25% 时,渗流量下降幅度又开始增大。一般认为,在渗流过程中,构成基本骨架的粗粒沸石对 PRB 透水性起决定性作用<sup>[21]</sup>,但不断增加细颗粒含量时,部分细粒会填充到粗颗粒骨架空隙中,降低了骨架孔隙度,导致渗透性逐渐减小。在已报道的有关细粒土在粗粒沙中的含量对渗透系数的影响研究中均发现,细粒土在不同的含量范围,渗透系数下降幅度不同,其结果与本实验中级配对渗流量的影响规律基本一致<sup>[22-23]</sup>。从本实验结果来看,当细粒

沸石级配为 10%~15% 时, 渗流量可达 3.4~3.6  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ , 实地建设放大 60 倍后可满足实际溪流的日处理量水平。考虑到细粒越多吸附容量越大, 因此, 可将细粒占比 15% 作为本实验中 PRB 填料的最佳级配。

## 2.2 PRB 厚度与水位差对 PRB 渗流量的影响

当填料的级配确定后, PRB 厚度与水位差即成为影响渗流量的关键因子。由图 3 与图 4 可以看出, 渗流量与 PRB 厚度呈线性负相关, 而与水位差呈线性正相关。这与表征渗流的达西公式一致<sup>[24]</sup>。因此, 可以认为, 在此条件下水流主要以渗流方式通过 PRB。根据图 3 和图 4 中拟合公式得出: PRB 厚度每增加 10 cm, 水位差需要增加 0.86 cm 才可维持 PRB 渗流量不变。

为了保持水位差不变, 实验中 PRB 末端挡板出水口设置越高, 进水端水阱中水位就越高, 但当其高度超过 PRB 高度时, 容易形成表面流; 而当 PRB 末端挡板出水口设置较低时, 由于水流本身的重力作用, 水流仅从 PRB 底部渗流排出<sup>[25]</sup>, 上部填料难以被利用。因此, 本实验设定水头高度与 PRB 等高, 通过不断降低出水口高度实现 PRB 水位差的变化, 在水流完全透过 PRB 的条件下探究了渗流量与水位差的关系。

## 2.3 PRB 进水口位置对渗流路径的影响

由图 5 可以看出, 在进水口高度设置为 PRB 高的 1/2 与 1/3 时, 当水头高度为 12~14 cm 时, 渗流量随着水头的提高呈线性增加的趋势, 水流以渗流方式通过 PRB; 当水头提高至 14 cm 时, 渗流量分别达到 4.7  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$  与 4.1  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ , 水流仍然主要以渗流方式通过 PRB; 当水头高度大于 14 cm 之后, PRB 出水流量迅速增加, 此时一部分水流垂直向上流向 PRB 表面形成表面径流, 其中 1/2 PRB 进水口高度的表面径流更为明显, 表面径流最后与墙体内水平方向渗流汇成一股水流排出 PRB。在进水口高度设置为与 PRB 等高时, 容易形成表面径流, 在水头高 13 cm 时就出现了折点。此时渗流量的变化可分为 3 个阶段: 在水头高度低于 13 cm 时, 以渗流为主; 水头高度为 13~14 cm 时, 以表面径流为主; 水头高度超过 14 cm 时, 渗流可以忽略, 基本以表面径流形式经过 PRB。综合来

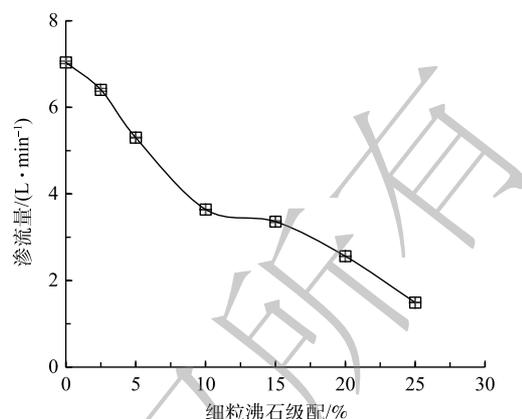


图 2 不同细粒沸石级配对渗流量与沸石用量的影响  
Fig. 2 Effect of different fine zeolites grading on seepage flow and zeolite dosage

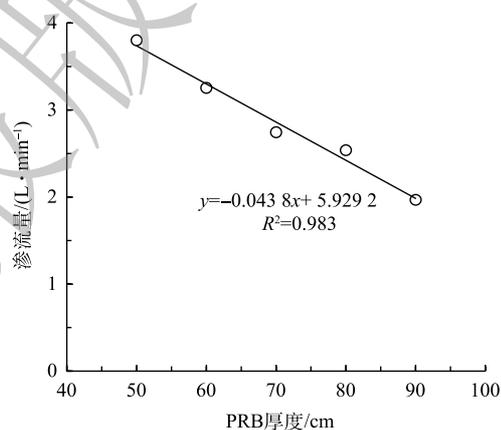


图 3 PRB 厚度对渗流量的影响

Fig. 3 Effect of PRB thickness on seepage flow

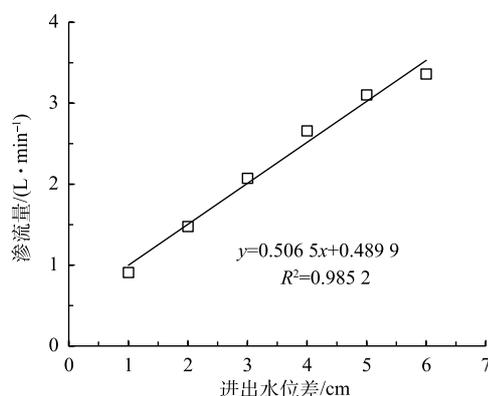


图 4 PRB 进出水位差对渗流量的影响

Fig. 4 Effect of PRB inlet and outlet water level difference on seepage flow

看,当进水口位置为1/3PRB高度时,在较宽的水头高度范围内水流仍以渗流方式经过PRB,更有利于提高填料利用率。

上述结果表明,为了确保水流能以渗流方式为主导透过PRB且具有满足实际需要的水流量水平,建议地表PRB进水口位置设在PRB高度的1/3以下,出水口高度为PRB高度的1/2。PRB厚度需要根据现场条件和尾水处理量来确定,增加PRB厚度所降低的渗流量可以通过提高水位差所增加的渗流量来弥补(图4)。本实验模拟PRB的横截面积为 $0.024\text{ m}^2$ ,约为目标支流拟建PRB的1/60,在级配为15%、PRB厚度为50 cm、进水口高度为1/3PRB高、水位差为8 cm时,PRB渗流量可达 $4.1\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ,放大60倍后PRB渗流量达 $354\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ ,能够满足PRB拟建点支流流量水平( $10\sim 300\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ )。

#### 2.4 静态吸附条件下沸石对氨氮的最大去除量

图6中的1~6次处理所用原始溶液体积为400 mL,相当于每增加1次处理,尾水处理量增加400 mL;7~16次处理所用原始溶液体积为100 mL,每增加1次处理,尾水处理量增加100 mL。由图6可以看出,在第5、6次处理中,溶液处理前后氨氮质量浓度差明显小于前几次处理,在第7次处理时,将原始溶液体积减为100 mL,在第16次处理中前后溶液氨氮质量浓度差约为 $1.88\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,可以认为沸石在此条件下已接近饱和。本次实验共处理3.4 L尾水,去除氨氮13.5 mg。

#### 2.5 PRB对稀土尾水氨氮的消减

为了模拟稀土矿山溪流水流量的季节性变化,在渗流量连续变化的条件下观察了PRB对尾水中氨氮消减效果及出水pH的影响。由图7可以看出,在渗流量为 $4.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,60 min后,PRB对尾水中氨氮去除率从85%迅速下降到20%,随后基本稳定在10%左右;当渗流量降低为 $3.2\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,氨氮去除率又提高至53%,30 min后氨氮去除率迅速下降到22%,随后去除率基本稳定在10%;当渗流量进一步降低为 $2.6\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,氨氮去除率又上升至18%,但5 min后去除率迅速下降到7%,随后基本稳定在5%。PRB对尾水中氨氮的去除效果呈现出快速吸附缓慢平衡的吸附特点<sup>[26]</sup>。在第1次降低渗流量后,氨氮去除率明显上升,后又逐渐趋于稳定;在第2次降低渗流量时,去除率没有明显提高,表明填料吸附氨氮已接近饱和。从整体来看,沸石在经过一段高渗流量的时间后,如果降低渗流量,则可继续发挥沸石对氨氮的去除能力。这是因为沸石对氨氮的去除主要依靠吸附和离子交换<sup>[27]</sup>。渗流量的大小在一定程度上代表了流速的大小,渗流量大时,流速较快,氨氮溶液在PRB中的停留时间较短,使得液膜扩散和填料内部扩散不充分<sup>[28]</sup>,从而影响填料内孔隙对氨氮的吸附,使得PRB对氨氮的去除率降低;但在降低渗流量时,则延长了尾水与填料的接触时间,PRB仍可以继续发挥去除氨氮的作用。经过2160 min后,PRB对氨氮的

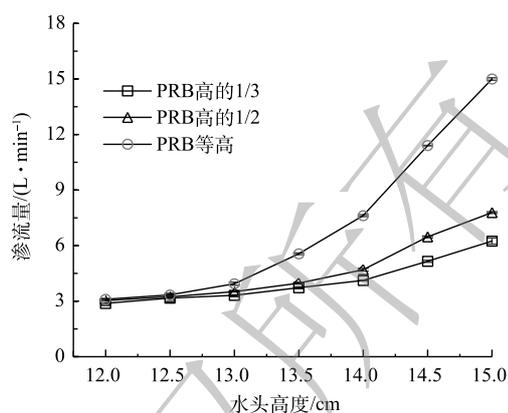


图5 不同进水口高度对渗流量的影响

Fig. 5 Effect of different inlet height on seepage flow

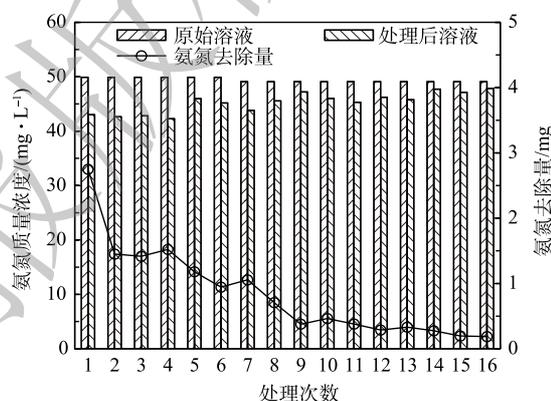


图6 尾水处理量对沸石去除氨氮效果的影响

Fig. 6 Effect of tail water treatment capacity on ammonia nitrogen removal by zeolite

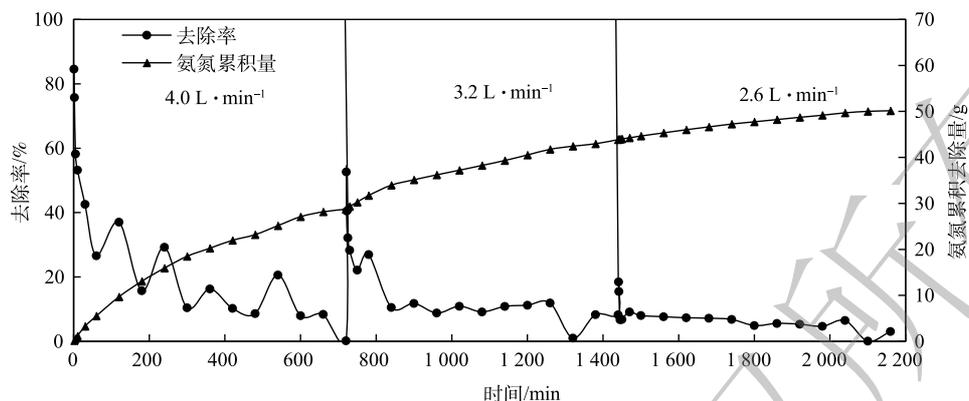


图7 渗流量对PRB去除氨氮效果的影响

Fig. 7 Effect of seepage flow on ammonia nitrogen removal by PRB

累积去除量达 50.14 g。

由图8可以看出,在前120 min,经PRB处理后的尾水pH提高了0.5个单位以上。随着时间的延长,pH提升效果逐渐减弱。沸石本身具有一定的碱性<sup>[18]</sup>,当尾水流经PRB时,尾水中一部分 $H^+$ 被快速中和,使得排出水中pH升高,且随着时间的延长这种作用逐渐减弱。图9表明,当PRB厚度增加时,氨氮去除率得到明显提高。这是因为水流经过的路径变长了,延长了尾水与沸石的接触时间,使得去除率有所提升;其次沸石用量增加,去除氨氮的物料总量增加,使PRB可去除更多的氨氮。根据以上数据计算得出,以13.75 kg的沸石填料,处理约7 t尾水,PRB的填料利用率为54.0%,氨氮平均去除率为14.2%。

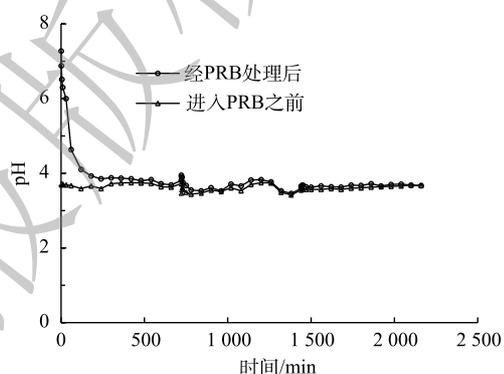


图8 不同时间下PRB对出水pH的影响

Fig. 8 Effect of PRB on pH in leachate at different time

## 2.6 PRB对尾水中泥沙的拦截

图10显示,泥沙去除率随着时间的延长逐渐降低。泥沙平均去除率在前25 min内达到80.5%,在75~100 min降低至35.4%。根据过滤机理,泥沙被截留的主要原因可能有:惯性碰撞、重力沉

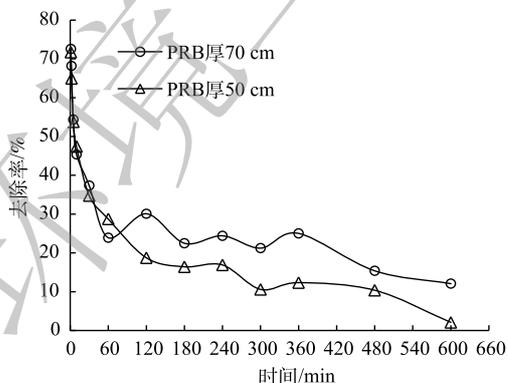


图9 厚度对PRB去除氨氮效果的影响

Fig. 9 Effect of thickness on ammonia nitrogen removal by PRB

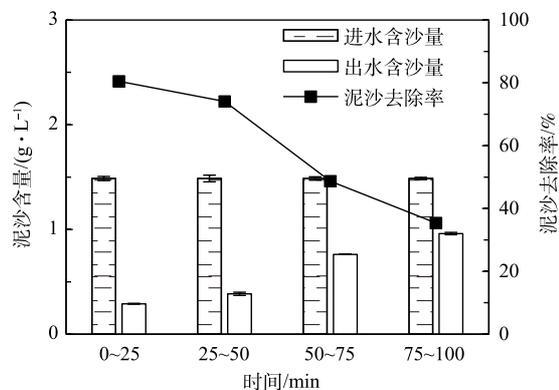


图10 不同时间段内进出水泥沙含量及平均去除率

Fig. 10 Sediment contents in inlet water and leachate and the corresponding average removal rates over different time periods

降、静电吸引、直接截留等<sup>[29-30]</sup>。张建锋等<sup>[31]</sup>在关于均质滤料过滤阻力数学模型的研究中指出，当滤层空隙减少到一定的程度，滤层就会丧失截留能力。从图10可以计算得出：在含沙尾水透过PRB 100 min后，共拦截314.9 g泥沙，平均拦沙率达58.2%。

### 3 结论

1) 当细粒沸石级配为0~10%或大于15%时，随着级配的增加，PRB渗流量急剧降低；级配为10%~15%时，渗流量变化较为平缓，有利于PRB稳定运行。与其他进水口高度相比，1/3 PRB高的进水口高度可在较宽的水位差范围内水流保持以渗流方式经过PRB，更有利于提高填料利用率。

2) 地表PRB具有消减氨氮、拦截泥沙的作用。在室内模拟实验条件下，优化设计PRB装置对氨氮的平均去除率可达14.2%；泥沙平均去除率可达58.2%，其处理容量放大60倍后相当于尾水日处理能力354 t·d<sup>-1</sup>，可满足矿区一般小流域支流的实际需要。

### 参考文献

- [1] 邓振乡, 秦磊, 王观石, 等. 离子型稀土矿山氨氮污染及其治理研究进展[J]. 稀土, 2019, 40(2): 120-129.
- [2] 张培, 谢海云, 曹广祝, 等. 硫酸铵浸出离子型稀土矿对土壤和地下水污染的研究现状[J]. 矿冶, 2021, 30(4): 95-101.
- [3] ZHANG Q, REN F, LI F, et al. Ammonia nitrogen sources and pollution along soil profiles in an in-situ leaching rare earth ore[J]. Environmental Pollution, 2020, 267(10): 115449.
- [4] 朱和玲, 姚骥. 南方离子型稀土矿区氨氮废水治理工艺研究[J]. 现代矿业, 2019, 35(6): 13-16.
- [5] 潘伟, 陈国梁, 李青. 离子型稀土矿区小流域级地表水氨氮治理工程效果分析及建议[J]. 有色金属(矿山部分), 2021, 73(1): 103-107.
- [6] 江西挺进环保, 双级渗流耦合系统, [EB/OL]. <http://www.eco-advance.cn/product/2019/1210/11.html>.
- [7] 李慧, 张潇, 曹岳, 等. 不同C/N下城市污水微氧处理装置处理效果研究[J]. 工业水处理, 2021, 41(11): 77-83.
- [8] 郭尚黎, 田曦, 艾胜书, 等. 好氧条件下pH的变化与氨氮去除率相关性关系研究[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2018, 19(1): 62-65.
- [9] 陈飞, 熊如宗, 郭顺, 等. 强降雨条件下的原地浸矿采场边坡稳定性研究[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(2): 34-37.
- [10] 吉芳英, 来铭笙, 何莉, 等. 细微泥沙粒径对活性污泥产率的影响及其计算公式[J]. 环境工程学报, 2016, 10(4): 1627-1632.
- [11] 黄方玉, 邓良伟, 杨红男, 等. 温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2357-2367.
- [12] 田猛, 张永春. 用于控制太湖流域农村面源污染的透水坝技术试验研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(10): 1665-1670.
- [13] FRONCZYK J. Artificial road runoff water treatment by a pilot-scale horizontal permeable treatment zone[J]. Ecological Engineering, 2017, 107: 198-207.
- [14] 董慧峪, 王为东, 强志民. 透水坝原位净化山溪性污染河流[J]. 环境工程学报, 2014, 8(10): 4249-4253.
- [15] 朱柏林, 林灿阳, 杨志敏, 等. 活性滤坝对城市内河中氮磷的削减效果[J]. 环境工程学报, 2021, 15(3): 1016-1024.
- [16] 刘露, 于鲁冀, 李廷梅, 等. 基质厚度对生态滤坝净化水体效果及机理的研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(5): 13-17.
- [17] HUANG H, XIAO X, YAN B, et al. Ammonium removal from aqueous solutions by using natural Chinese (Chende) zeolite as adsorbent[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 175(1/3): 247-252.
- [18] 温朗友, 陶克毅. 沸石的碱性催化性质[J]. 石油化工, 1992, 21(1): 47-54.
- [19] 邓世茂, 楚哲婷, 梁佳欣, 等. 沸石材料在土壤修复工程中的应用研究进展[J]. 科学通报, 2021, 66(9): 1002-1013.
- [20] WANG X L, QIAO B, LI S M, et al. Using natural Chinese zeolite to remove ammonium from rainfall runoff following urea fertilization of a paddy rice field[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2016, 23(6): 1-10.
- [21] 王双, 李小春, 王少泉, 等. 碎石土级配特征对渗透系数的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 4394-4402.
- [22] 孔令伟, 李新明, 田湖南. 砂土渗透系数的细粒效应与其状态参数关联性[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 21-26.
- [23] 王志坤, 张盟, 郑勤龙. 粗砂中细粒含量对其渗透系数的影响[J]. 黑龙江水利科技, 2012, 40(10): 63-64.
- [24] 朱崇辉. 粗粒土的渗透特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
- [25] 田猛, 张永春, 张龙江. 透水坝渗流流量计算模型的选择[J]. 中国给水排水, 2006, 22(13): 22-25.
- [26] 王曦, 谢宏华, 姚淑霞, 等. 斜发沸石对微污染浅层地下水氨氮的吸附特性研究[J]. 科技通报, 2020, 36(6): 106-109.
- [27] 何彩庆, 陈云嫩, 殷若愚, 等. 离子交换/吸附法净化氨氮废水的研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(2): 481-485.
- [28] 鲁秀国, 盘贤豪, 郑宇佳. 改性及天然沸石对水中氨氮吸附性能的研究[J]. 离子交换与吸附, 2020, 36(6): 520-529.
- [29] 王启燕, 高鸿恩, 何启梅. 颗粒床过滤中的惯性碰撞效应研究[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(10): 30-31.

- [30] 翟国亮, 陈刚, 赵红书, 等. 微灌用均质砂滤料过滤粉煤灰水时对颗粒质量分数与浊度的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 13-18.
- [31] 张建锋, 王晓昌, 金同轨. 均质滤料过滤阻力的数学模型[J]. 环境科学学报, 2003, 23(2): 246-251.

(责任编辑: 曲娜)

## Indoor simulation of surface PRB treating tailwater in ionic rare earth mining area

WANG Junfeng<sup>1,2</sup>, CHEN Ming<sup>1</sup>, WANG Yurong<sup>2</sup>, WANG Xingxiang<sup>2</sup>, ZHOU Zhigao<sup>2,\*</sup>

1. College of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 2. Institute of Soil Science, Chinese Academy Sciences, Nanjing 210008, China

\*Corresponding author, E-mail: zgzhou@issas.ac.cn

**Abstract** An indoor simulated permeable reactive barrier (PRB) unit filled with zeolite particles of 2~4 and 0.6~1 mm was used to study the influence of the main construction parameters of surface PRB on the seepage flow, and ammonia nitrogen reduction and sediment interception from the tail water in rare earth mining area. The results showed that at the fine zeolite grading of 10%~15%, the variation of the seepage flow was relatively smooth, which was conducive to the stable operation of PRB system. Seepage flow was linearly negatively correlated with PRB thickness while was positively correlated with water level difference between inlet and outlet of the PRB. At water inlet position set at 1/3 PRB height, the water seepage was able to flow through the PRB across a wide range of water head, which could improve the utilization rate of PRB packing. The optimal simulated PRB could achieve an average ammonia nitrogen removal rate of 14.2% and an average sediment removal rate of 58.2%. The leachate pH increased significantly at the early stage of PRB treatment. Its treatment capacity with magnification of 60 times can be equivalent to 354 t·d<sup>-1</sup> of tail water, which can generally meet the actual need of small tributaries in mining area. The above research results can provide a reference for the treatment of ion-type rare earth mining areas in south China.

**Keywords** ionic rare earth mining area; surface PRB; seepage flow; ammonia nitrogen; sediment