

文章编号:1000-5641(2011)01-0185-09

# 沸石和麦饭石组合滤料对城市降雨径流 氮磷去除效率的研究

周 栋, 陈振楼, 毕春娟, 王 骏, 林守民, 祁莹莹

(华东师范大学 资源与环境科学学院 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 以7 d为1个周期,分别研究了沸石与麦饭石以3种不同体积比例(5:5,7:3,3:7)组成的填充柱在2个周期的时间里对人工配制的模拟城市降雨径流中氮、磷的去除效率。结果表明,3:7配比的填充柱前后两个阶段对总氮的去除效率分别为78.61%和85.28%,而对磷的去除效率分别可以达到96.73%和94.59%;5:5配比的填充柱前后两个阶段脱氮除磷效率分别为83.18%,80.24%,97.02%和86.16%;7:3配比的脱氮除磷效率分别为92.39%,80.01%,51.79%和57.28%。在兼顾整个填充柱脱氮除磷效率、再生能力以及再生速度等因素的情况下,3:7配比为最优选择。

**关键词:** 沸石; 麦饭石; 氮磷; 去除效率

**中图分类号:** X131.2    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2011.01.022

## Efficiencies of different zeolite and medical stone combinations removing the nitrogen and phosphorus in urban rainfall runoff

ZHOU Dong, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan, WANG Jun, LIN Shou-min, QI Ying-ying

(Key Laboratory of Geographic Information Science of the Ministry of Education, School of Resources and Environment Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** One kind of packed columns, which were filled up with three different volume ratios of zeolite and medical stone (5:5, 7:3, 3:7; V:V), were used to investigate the efficiency of zeolite and medical stone to removal the nitrogen and phosphorus in synthetic urban rainfall runoff during a 7 days period. The experiments were token twice, and the results showed that 3:7 ratio of packed column could removal 78.61% and 85.28% nitrogen in the first and second phase experiment respectively, and the phosphorus removal rates reached 96.73% and 94.59%; the removal efficiency of nitrogen and phosphorus of 5:5 ratio packed column were 83.18% and 97.02% in the first phase, and 80.24% and 86.16% in the second phase; while in 7:3 ratio

收稿日期:2010-10

基金项目:国家科技重大专项(2009ZX07317-006);国家自然科学基金(40971259);上海市优秀学科带头人计划(10XD1401600)

第一作者:周栋,男,博士研究生,研究方向为城市水环境与水资源. E-mail:Damonzhou@163.com.

通讯作者:陈振楼,男,教授,博士生导师,研究方向为城市水环境与水资源. E-mail:zlchen@geo.ecnu.edu.cn.

packed column, about 92.39% and 80.01% nitrogen and 51.79% and 57.28% phosphorus was removed respectively. It was concluded that in considering the whole removal efficiency and regeneration capability of zeolite and medical stone, the combination of 3:7 ratio was the best choice.

**Key words:** zeolite; medical stone; nitrogen and phosphorus; removal efficiency

## 0 引 言

氮和磷是生态系统中主要的两种营养盐元素,当其含量较低时会成为植物生长的限制性因素.但是,随着工农业生产规模的不断扩大,尤其是人工化肥发明以来,人们为了追求产出的最大化,毫无节制地向自然环境中投入了大量的氮、磷等营养盐;这些营养盐除了小部分被植物利用或者被土壤吸附外,大部分会随着降水径流进入下一级收纳水体,造成湖泊、河流等水体中营养元素富集<sup>[1]</sup>,引起藻类及其他浮游生物大量繁殖,降低了水体的溶氧含量,造成鱼类或其他水生生物的大量死亡,水质进一步恶化.因此,氮和磷被认为是造成水体富营养化的主要物质,其中磷被认为是其关键限制因素<sup>[2]</sup>.

目前,随着我国对环境保护事业重视力度的不断加大,点源污染基本上得到了较好控制,非点源污染就成为了城市水质恶化的主要原因之一<sup>[3]</sup>.尤其是随着现代城市下垫面不透水比率的增大,城区地面已成为非点源污染的重要污染源<sup>[4-8]</sup>.非点源污染(non-point source pollution)是区别于点源污染而言的,是指溶解的或固体污染物从非特定的地点,在降水和径流的冲刷作用下通过径流过程而汇入收纳水体(如河流、湖泊、水库和海湾等)引起的水体污染<sup>[9,10]</sup>.与点源污染相比,非点源污染具有来源面积广、边界难以确定、危害规模大、防治难度大等特点.在美国,非点源污染已经成为环境污染的第一因素,60%的水环境污染来源于非点源污染<sup>[11]</sup>,而在多种非点源污染类型中,城市降雨径流是仅次于农业的非点源污染的第二大污染源<sup>[12]</sup>.1990年,美国EPA公布的不同污染物对河流污染的贡献比中,城市雨水占到了9%<sup>[13]</sup>.1993年,EPA已经把城市地表径流列为导致全美河流和湖泊污染的第三大污染源<sup>[14]</sup>.我国同样也面临着城市降水径流污染问题,寻求一种方便经济的治理方式是目前城市地表径流污染防治的重点.目前,吸附技术已经成为最为有效的城市降雨径流处理方式之一<sup>[15]</sup>,刘启明等<sup>[16]</sup>研究了沸石覆盖层对水库底泥氮磷释放的影响,发现在厌氧状态下,天然沸石覆盖层可以有效地控制总氮和总磷的释放;肖文浚<sup>[17]</sup>利用微孔沸石处理10 mg/L的模拟废水,发现去除率高达90%,且再生性较好;郝长虹等<sup>[18]</sup>发现天然沸石负载氧化镁对养猪场废水中磷素的去除率可以高达96.8%.近年来,针对麦饭石的研究多集中于其作为饲料添加剂或者复合肥添加剂的营养或者医疗功效,而忽视了其在水质净化方面广阔的应用前景,仅有赵哲等<sup>[19]</sup>研究了麦饭石在改善饮用水水质方面的应用技术,发现麦饭石对氨氮的去除效率在60%左右.本研究在总结前人研究的基础上,同时综合考虑了材料的效率性、经济性、易得性等因素,通过室内模拟实验选取沸石和麦饭石两种滤料,通过其不同比例填充柱对氮、磷的去除效率研究,确定最佳配比方案以及运行时间,以期为我国城市地表径流的污染治理和控制提供科学的理论依据和技术支撑.

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

实验选取了沸石与麦饭石两种较为常用的净水滤料. 沸石是一种来源广泛、价格低廉的无机非金属矿物,因其独特的吸附性能和良好的离子交换能力以及易再生等特点,在去除污水中的氮、磷等污染物方面具有较好的应用前景<sup>[20-24]</sup>;麦饭石是一种对生物无毒无害并具有一定生物活性的复合矿物,其空隙结构复杂、生物活性溶解性能稳定,有良好的吸附和分解能力,可以用于水质净化和污水处理,尤其是对氨氮的吸附效果较好,同时,水中总磷的去除主要以吸附过程为主,麦饭石良好的空隙结构决定了其在总磷去除方面的高效性,但是,目前麦饭石应用于水质净化方面的研究还较少,大部分研究都集中在研究沸石、钢渣等滤料对氮磷的去除效率上,本研究很好的补充了这一研究的不足.

实验用水则依据上海天然降雨径流污染负荷数据,采取室内人工配置的方法制备,并综合参考了多篇研究上海降雨径流污染负荷的相关文献<sup>[25-29]</sup>,确定用  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  配制总磷浓度为 3 mg/L、用  $\text{NH}_4\text{Cl}$  配制氨氮浓度 3 mg/L、用  $\text{NaNO}_3$  配制硝氮浓度为 1.5 mg/L 的混合溶液作为实验用水.

## 1.2 实验装置

本次实验室模拟小试装置为自行设计制做的有机玻璃管,内径 6.5 cm,整个填充柱高度为 60 cm,有效填充高度 50 cm. 距底端出水口 5 cm 处设一片多孔阻隔挡板,其目的为阻隔填充柱中的滤料,防止其随水流下渗堵塞出水口;顶端设一个深度为 5 cm 的自制多孔布水漏斗,以保证水流较大时可以均匀下落而非只冲击一个点. 整套实验装置还包括一台兰格 BT100-1L 型 8 通道数显蠕动泵、一组渗滤柱支架以及相关连通硅胶管若干.

## 1.3 实验过程

本次实验室小试在参考了 Kim<sup>[30]</sup>, Davis<sup>[31]</sup>, Hsieh<sup>[32]</sup> 和 Hatt<sup>[33]</sup> 等人研究的基础上,最终确定以 5:5, 7:3 和 3:7 (V:V, 沸石:麦饭石) 3 种比率填充渗滤柱,以确定两种滤料的最优体积配比,其中沸石的粒径控制在 0.5~1.0 mm,麦饭石的粒径范围为 0.25~0.5 mm. 为了防止滤料随水流下渗阻塞出水口,在多孔阻隔挡板上铺设了一层细孔纱网以及 2 cm 厚的石英砂;布水强度则同样是在总结前人经验的基础上选定了 3.2 mL/min;布水时间则参考了美国 EPA 推荐的 2+5 原则,即布水 2 d 后落干 5 d,以保证所填充的滤料能够较好地恢复其对氮、磷的去除能力. 本次室内小试实验共计运行了 2 个周期,即  $(2+5) \times 2 = 14$  d 时间,采样时间则是在装置出水后的 0, 2, 4, 8, 12, 24, 36 和 48 h 后分别收集水样一份. 实验进行过程中,各种配比填充柱均设平行柱一根,同时设空白柱两根,实验结果皆为两根平行柱结果的平均值. 利用 TOC/TN 分析仪测定样品总氮含量,氨氮、硝氮、亚硝态氮的含量参照《水和废水监测分析方法》<sup>[34]</sup> 进行测定,总磷含量则依照钼酸铵分光光度法进行测定,样品测定过程中均加入标样测定回收率,同时选取 10% 的样品进行重复率的测定,回收率与重复率皆能达到实验要求.

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同比例组合填充柱对氮的去除结果

本次实验室小试为了尽可能的模拟实际工程处理措施,因此特意选取了非饱和进水方式,即所有滤料均未进行任何预处理而直接填柱. 不同比例的沸石与麦饭石组合填充柱对人工配制的模拟城市降雨径流中总氮的去除效率如图 1 和 2 所示.

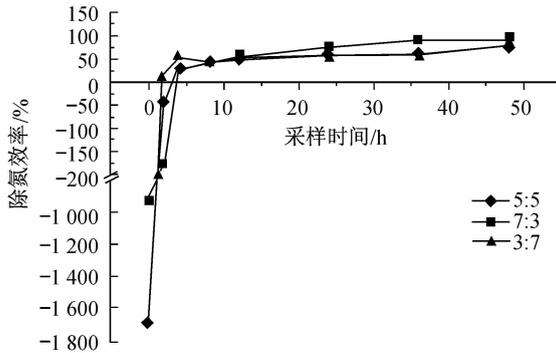


图1 不同配比填充柱第一阶段总氮去除效率

Fig. 1 Removal efficiency of total nitrogen among different packed columns in the first phase

由图1可见,由于本次实验为非饱和进水,而两种滤料本身又含有一定量的氮,因此造成整个装置的初期出水中总氮含量明显要高于入水,致使整个实验初期总氮的去除效率为负值,其最低值甚至达到了 $-1682.23\%$ 。随着出水时间的增加,整个装置对总氮的去除效率显著提高,到出水后2 h,3:7的填充柱对总氮的去除效率已经变为正值,而到出水后4 h,全部3种不同比例的填充柱对总氮的去除效率已经都变为正值,且效率较高,说明滤料本身含有的总氮能够很快的随水流排出,无论是何种比例的填充柱都可以很快的发挥作用,这与Dimova<sup>[35]</sup>等人的研究结果相类似。由此可以推断出,在实际工程操作中,只要对初期出水进行再循环处理,这两种滤料完全可以不经任何预处理而直接应用到城市降雨径流污染负荷的削减当中,可以节约整个工程的成本。

图1同样表明,3种不同比例的填充柱对总氮的去除效率的上升速率是不同的。其中以7:3填充柱的去除效率上升最快,而且最大去除效率也最好,而5:5和3:7两种比例的填充柱去除效率的上升速率相类似,最大去除效率也类似,说明沸石对总氮的去除效果较好、速率较快,这与朱克银<sup>[36]</sup>、王浩<sup>[37]</sup>和张美兰<sup>[38]</sup>等的研究结果相一致。

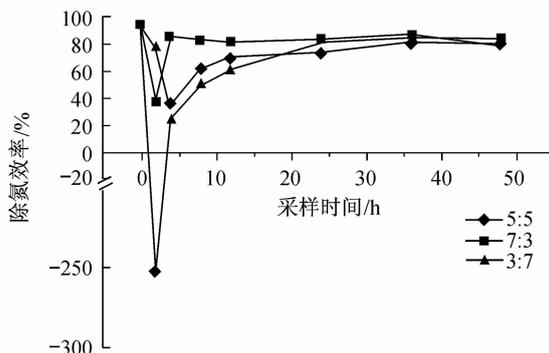


图2 不同配比填充柱第二阶段总氮去除效率

Fig. 2 Removal efficiency of total nitrogen among different packed columns in the second phase

图2显示了第一阶段布水结束后填充柱自然落干5 d,然后再次布水之后对总氮的去除效率。由图2可见,第二阶段初始出水的总氮去除效率很高,均达到了92%以上。但是这部分出水大部分为填充柱中颗粒物吸附的孔隙水,这部分水在填充柱中至少停留了5 d,所以

造成整个填充柱对总氮的去除效率偏高,同时也说明了所有填充柱对总氮的最大去除效率在 92%左右.此时填充柱仍为非饱和柱,随着布水的不断进行,新的模拟废水进入到渗滤柱中并且快速填充到大的空隙中,致使水流停留时间要低于填充柱饱和后的水力停留时间.由于过水与滤料的接触时间较短,因此整个装置对总氮的去除效率会有一个快速下降的过程.然后待填充柱饱和后,即水力停留时间恢复到正常水平时,整个装置对总氮的去除效率又会逐渐上升,直到维持在 80%左右.比较 3 种不同比例的填充柱总氮去除效率的恢复速率,可以明显的发现 7:3 配比的填充柱的恢复速率最快,基本上再次出水 4 h 之后就能达到最终的稳定去除效率,其次为 3:7 配比的填充柱,最后为 5:5 配比的填充柱,需要再次出水 36 h 后才能达到最终稳定的去除效率.比较 3 种不同比例的填充柱总氮去除效率的恢复程度,即二次布水后装置稳定脱氮效率与一次布水装置稳定脱氮效率之比,各配比装置之间差别不大,皆能满足再次利用的要求.

综上所述,如果仅从脱氮效果来看,3 种不同配比的渗滤装置出水水质皆能达到污水综合排放标准(GB 8978—1996)中所规定的一级排放标准,即各装置处理水水质完全能够满足直排河道的要求.但是如果从脱氮效率和落干后再次布水后整个装置脱氮能力的恢复速率与程度来看,7:3 配比的填充柱是最佳选择,其次为 3:7 配比的填充柱,5:5 配比的填充柱整体效果最差.

## 2.2 不同比例组合填充柱对磷的去除结果

不同比例组合填充柱两次布水对人工配制的模拟城市降雨径流中总磷的去除效果分别如图 3 和 4 所示.

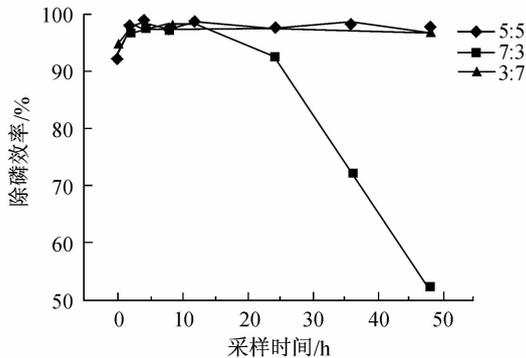


图 3 不同配比填充柱第一阶段总磷去除效率

Fig. 3 Removal efficiency of total phosphorus among different packed columns in the first phase

由图 3 可见,各种配比填充柱第一阶段初始出水中总磷的含量普遍较低,即整个装置对总磷的去除效率较高,皆高于 90%.随着布水的不断进行,整个装置对总磷的去除效率在小范围内波动直至出水 12 h 后,7:3 配比的填充柱对总磷的去除效率明显开始下降,最终可能降到 50%以下,则整个装置处理水的水质达不到设计目标,而其他两种配比的填充柱对总磷的去除效率则变化不大,仍然可以维持在 90%以上.

图 4 则显示不同配比的填充柱第二阶段对总磷的去除效率.跟填充柱对总氮的去除效率类似,第二次布水后的初始出水的总磷去除率较高,然后随着布水的不断进行,整个装置对总磷的去除效率会有一个波动下降的过程,最后逐步稳定在一个范围内.但是就总磷的去

除效果来看,7:3配比的填充柱第二阶段的效率要明显低于其他两种配比的填充柱.而跟其自身相比,虽然第二阶段初期对总磷的去除效率会有所恢复,但是恢复率较低,而且随着布水的进行,填充柱再次饱和后,7:3配比的填充柱对总磷的去除效率会迅速下降,最后稳定在50%左右.就处理水水质而言,除了7:3配比的填充柱后期出水无法达到污水综合排放标准(GB 8978—1996)中规定的二级标准之外,其他两种配比的填充柱处理水水质皆能满足设计目标,可以直接排放入城市河道或者污水管道而不会对接纳水体造成环境压力.

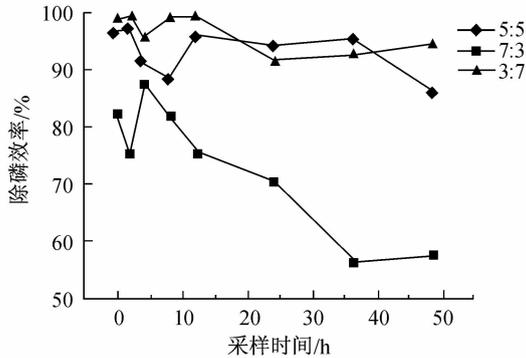


图4 不同配比填充柱第二阶段总磷去除效率

Fig. 4 Removal efficiency of total phosphorus among different packed columns in the second phase

因此,综合比较3种不同配比的填充柱对总磷的去除效果、去除能力的恢复速率与程度,5:5和3:7两种配比的填充柱皆能满足条件,其中3:7配比的填充柱整体效果稍微优于5:5配比的填充柱,而7:3配比的填充柱则不能满足实际工程要求.

### 2.3 填充柱脱氮除磷效率影响因素的讨论

沸石是一种呈骨架状结构的硅铝酸盐晶体,能够吸附和截留特定形状和大小的分子,尤其对氨氮的吸附效果很好<sup>[39,40]</sup>.因此本实验中,在沸石含量占优势的时候,整个装置对总氮的去除效率较高,而且能够较快地达到最终的稳定去除效率.同时实验结果也证明了麦饭石同样对氮的吸附效果较好,而且再生性要强于沸石,只是恢复的速率不及沸石而已.另外,虽然由第一阶段的实验结果可知麦饭石本身的氮素含量要高于沸石,但是其去除速度较快,所以只要对初始出水处理得当,麦饭石同样可以成为一种理想的脱氮滤料.

目前,吸附法除磷由于高效快速、无二次污染、易操作、可回收率大、金属氧化物活性点丰富且成本低廉,已成为国内外吸附除磷的研究热点<sup>[41]</sup>,本实验中同样利用了沸石与麦饭石多孔、易吸附磷的特性来去除模拟废水中的磷.本研究中选取的沸石粒径较粗,而所选取的麦饭石粒径则较细,因此当麦饭石的含量占优势的时候会增大整个装置的水力停留时间,也就增加了填料跟废水接触的时间,结果整个装置对磷的去除效率要高于麦饭石含量较低的填充柱.

## 3 结 论

由于滤料自身含有一定量的氮,因此无论何种配比的填充柱对总氮的起始去除效率均为负值,最低值甚至达到-1 682.23%,但是这部分总氮能够很快的随水流排出,所有填充柱都可以很快的发挥作用,而各种配比填充柱对总磷的起始去除效率普遍较高,随着布水的

不断进行最终会稳定在一个范围内。但是 7:3 配比的填充柱对总磷的去除效率会迅速下降,不能满足实际工程要求。

3:7 配比的填充柱前后两个阶段对氮的去除效率分别为 78.61% 和 85.28%,而对磷的去除效率分别可以达到 96.73% 和 94.59%,为 3 种配比的填充柱中综合效果最好的;5:5 配比的填充柱前后两个阶段脱氮除磷效率分别为 83.18%,80.24%,97.02% 和 86.16%;7:3 配比的填充柱两个阶段脱氮除磷效率分别为 92.39%,80.01%,51.79% 和 57.28%,综合效果最差。因此,在兼顾整个填充柱脱氮除磷效率、再生能力以及再生速度等因素的前提下,3:7 配比为最优选择。

### [参 考 文 献]

- [1] HSIEH C, DAVIS A P, NEEDELMAN B A. Bioretention column studies of phosphorus removal from urban stormwater runoff[J]. *Water Environment Research*, 2007, 79: 177-184.
- [2] 张志超,黄霞,肖康,等. 脱氮除磷膜-生物反应器的除磷效果及特性[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2008, 48(9): 92-94.  
ZHANG Z C, HUANG X, XIAO K, et al. Enhanced phosphorus removal in biological nitrogen and phosphorus removal process using membrane bioreactor[J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2008, 48(9): 92-94.
- [3] BREZONIK L P. Analysis and predictive models of storm water runoff volumes, loads, and pollution concentration from watersheds in the Twins Cities metropolitan area, Minnesota, USA[J]. *Water Research*, 2002, 36: 1742-1757.
- [4] BUCHELI T D, MÜLLER S R, HEBERLE S, et al. Occurrence and behavior of pesticides in rainwater, roof runoff, and artificial stormwater infiltration[J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, 32: 3457-3464.
- [5] BASNYAT P, TEETER L D, FLYNN K M, et al. Relationships between landscape characteristics and nonpoint source pollution input to coastal estuaries[J]. *Environmental Management*, 1999, 23(4): 539-549.
- [6] DAVIS A P, SHOKOUHIAN M, SHARMA H, et al. Laboratory study of biological retention for urban stormwater management[J]. *Water Environment Research*, 2001, 73: 5-14.
- [7] 郭青海,马克明,杨柳. 城市非点源污染的主要来源及分类控制对策[J]. *环境科学*, 2006, 27(11): 2170-2175.  
GUO Q H, MA K M, YANG L. Main sources of urban non-point source pollution and control measures for classified catchments[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(11): 2170-2175.
- [8] DAVIS A P. Field performance of bioretention: Water quality[J]. *Environmental Engineering Science*, 2007, 24: 1048-1064.
- [9] NOVOTNY V, OLEM H. *Water quality: prevention, identification and management of diffuse pollution*[J]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1993: 2.
- [10] 贺缠生,傅伯杰,陈利顶. 非点源污染的管理及控制[J]. *环境科学*, 1998, 5(19): 87-92.  
HE C S, FU B J, CHEN L D. Non-point source pollution control and management[J]. *Environmental Science*, 1998, 5(19): 87-92.
- [11] US EPA. National water quality inventory[R]// Report to Congress Executive Summary. Washington DC: US EPA, 1995: 497.
- [12] DELETIC A B, MAKSIMOVIC C T. Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved areas[J]. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 1998, 124: 869-879.
- [13] US EPA. *Meeting the Environment Challenge*[R]. Washington DC: US EPA, 1990: 46.
- [14] 王和意,刘敏,刘巧梅,等. 城市降雨径流非点源污染分析与研究进展[J]. *城市环境与城市生态*, 2003, 16(6): 283-285.  
WANG H Y, LIU M, LIU Q M, et al. Analysis and research progress on urban rainfall runoff non-point source

- pollution[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2003, 16(6): 283-285.
- [15] HSIEH C, DAVIS A P. Evaluation and optimization of bioretention media for treatment of urban storm water runoff[J]. *Journal of Environment Engineering*, 2005, 11: 1521-1531.
- [16] 刘启明, 成路, 沈冰心, 等. 沸石覆盖层控制水库底泥氮磷释放的影响因素[J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2010, 15(5): 18-21.
- LIU Q M, CHENG L, SHEN B X, et al. The influencing factors of natural zeolite barrier for controlling nitrogen and phosphorus release from sediment[J]. *Journal of Jimei University(Natural Science)*, 2010, 15(5): 18-21.
- [17] 肖文浚. 改性微孔沸石的制备及其去除微污染源中氨氮的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.
- XIAO W J. The preparation of modified porous zeolite pellet and its treatment effects of the ammonia-nitrogen in micro-polluted water source[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2003.
- [18] 郝长虹, 颜丽, 姜翼来, 等. 天然沸石负载氧化镁对养猪场废水中磷的净化效果及其机制研究[J]. *沈阳农业大学学报*, 2010, 41(3): 331-334.
- HAO C H, YAN L, LOU Y L, et al. Study on the removal efficiency and mechanism of natural zeolite loaded magnesia on phosphorus from the hoggerly wastewater[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2010, 41(3): 331-334.
- [19] 赵哲, 王国庆. 麦饭石改善饮用水水质技术研究[J]. *黑龙江环境通报*, 2007, 31(3): 87-89.
- ZHAO Z, WANG G Q. Research on improving drinking water quality with Maifan stone[J]. *Heilongjiang Environmental Journal*, 2007, 31(3): 87-89.
- [20] 李增新, 李相仁. 天然沸石在环境污染治理中的应用进展[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2004, 5(3): 19-22.
- LI Z X, LI X R. Progress of application of natural zeolite in the environmental pollution control[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2004, 5(3): 19-22.
- [21] 熊小京, 叶均磊, 王新红, 等. 天然沸石处理低浓度含氨废水的实验研究[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2006, 45(12): 828-831.
- XIONG X J, YE J L, WANG X H, et al. Experimental study on treatment of low concentration ammonia wastewater by natural zeolite[J]. *Journal of Xiamen University(Natural Science)*, 2006, 45(12): 828-831.
- [22] 李忠, 符敏, 夏启斌. 改性天然沸石的制备及对氨氮的吸附[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(4): 6-10.
- LI Z, FU K, XIA Q B. Modification of natural zeolite and adsorption of ammonia nitrogen by modified natural zeolite[J]. *Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition)*, 2007, 35(4): 6-10.
- [23] 段金明, 林建清, 方宏达, 等. 改性沸石同步深度脱氮除磷的实验研究[J]. *环境工程学报*, 2009, 3(5): 829-833.
- DUAN J M, LIN J Q, FANG H D, et al. Experimental study on simultaneous removal of ammonium and phosphate in treated wastewater by modified zeolite[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(5): 829-833.
- [24] 李丽, 王全金, 李忠卫. 四种填料对总磷的静态吸附试验研究[J]. *华东交通大学学报*, 2009, 26(4): 39-43.
- LI L, WANG Q J, LI Z W. Study on static absorption of total phosphorus in four matrixs[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2009, 26(4): 39-43.
- [25] 蒋海燕, 刘敏, 顾琦, 等. 上海城市降水径流营养盐氮负荷及空间分布[J]. *城市环境与城市生态*, 2002, 15(1): 15-17.
- JIANG H Y, LIU M, GU Q, et al. Nutrient nitrogen loading and spatial distribution of storm-water runoff in Shanghai City[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2002, 15(1): 15-17.
- [26] 顾琦, 刘敏, 蒋海燕. 上海市区降水径流磷的负荷空间分布[J]. *上海环境科学*, 2002, 21(4): 213-216.
- GU Q, LIU M, JIANG H Y. Nutrient phosphorus loading spatial distribution of precipitation-runoff in Shanghai proper[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2002, 21(4): 213-216.
- [27] 常静, 刘敏, 许世远, 等. 上海城市降雨径流污染时空分布与初始冲刷效应[J]. *地理研究*, 2006, 25(6): 994-1002.

- CHANG J, LIU M, XU S Y, et al. Temporal-spatial distribution and first flush effect of urban stormwater runoff pollution in Shanghai City[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(6): 994-1002.
- [28] KAN H, ZHUANG G H, CHANG X, et al. The chemistry of the severe acidic precipitation in Shanghai, China [J]. *Atmospheric Research*, 2008, 89: 149-160.
- [29] 程江, 杨凯, 黄小芳, 等. 上海中心城区苏州河沿岸排水系统降雨径流水文水质特性研究[J]. *环境科学*, 2009, 30(7): 1893-1900.
- CHENG J, YANG K, HUANG X F, et al. Hydrology and water quality of rainfall-runoff in combined sewerage system along Suzhou Creek in central Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(7): 1893-1900.
- [30] KIM H, SEAGREN E A, DAVIS A P. Engineered bioretention for removal of Nitrate from stormwater runoff [J]. *Water Environment Federation*, 2000.
- [31] DAVIS A P, SHOKOUHIAN M, SHARMA H, et al. Water quality improvement through bioretention media: nitrogen and phosphorus removal[J]. *Water Environment Research*, 2006, 78: 284-293.
- [32] HSIEH C, DAVIS A P, NEEDELMAN B A. Nitrogen removal from urban stormwater runoff through layered bioretention columns[J]. *Water Environment Research*, 2007, 79: 2404-2411.
- [33] HATT B E, FLETCHER T D, DELETIC A. Hydraulic and pollutant removal performance of fine media stormwater filtration systems[J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42: 2535-2541.
- [34] 国家环保局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration. *Water and Wastewater Monitoring Analysis Method*[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [35] DIMOVA G, MIHAILOV G, TZANKOV T Z. Combined filter for ammonia removal-Part I: Minimal zeolite contact time and requirements for desorption[J]. *Water Science and Technology*, 1999, 39: 123-129.
- [36] 朱克银, 曹亮. 天然沸石处理氨氮废水及农作物应用研究[J]. *安徽化工*, 2001, 27(2): 32-35.
- ZHU K Y, CAO L. Applied research on treatment of ammonia wastewater and agronomic crop by natural zeolite [J]. *Anhui Chemical Industry*, 2001, 27(2): 32-35.
- [37] 王浩, 陈吕军, 温东辉. 天然沸石对溶液中氨氮吸附特征的研究[J]. *生态环境*, 2006, 15(2): 219-223.
- WANG H, CHEN L J, WEN D H. Characteristics of ammonium adsorption by natural zeolite in solution[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(2): 219-223.
- [38] 张美兰, 何圣兵, 陈初雪, 等. 天然沸石和硅酸钙滤床的脱氮除磷效果[J]. *水处理技术*, 2007, 33(11): 71-74.
- ZHANG M L, HE S B, CHEN C X, et al. Removal of ammonia and phosphate by filtration bed packed with natural zeolite and calcium silicate[J]. *Technology of Water Treatment*, 2007, 33(11): 71-74.
- [39] 温东辉. 天然沸石吸附-生物再生技术及其在滇池流域暴雨径流污染控制中的试验与机理研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.
- WEN D H. Experiment and Mechanism Study on the Adsorption-bioregeneration Technology of Natural Zeolite Applied in the Pollution Control of the Storm Runoff in Dianchi Basin[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2003.
- [40] 吴彦霖, 周荣敏. MAP法与沸石吸附组合条件下去除氮磷的试验研究[J]. *上海环境科学*, 2009, 28(4): 178-181.
- WU Y L, ZHOU R M. A study on the removal of nitrogen and phosphorus by combination of MAP method and zeolite adsorption[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2009, 28(4): 178-181.
- [41] 苗文凭, 林海, 卢晓君. 粉煤灰吸附除磷的改性研究[J]. *环境工程学报*, 2008, 2(4): 502-506.
- MIAO W P, LIN H, LU X J. Adsorption of phosphate using modified fly ash from water solution[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2008, 2(4): 502-506.