

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2018. 04. 13

4 种生物滞留填料对径流污染净化效果对比

刘增超^{1,2},李家科¹,蒋春博¹,罗陶然²,陈梦杰²

(1. 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室(西安理工大学),陕西 西安 710048;
2. 西安工业大学材料与化工学院,陕西 西安 710021)

摘要:为提高生物滞留系统净化效果,探讨了绿沸石、蛭石、活性炭、珍珠岩等材料用作特殊填料时对道路径流雨水中NH₄⁺-N、TN、TP、COD等污染物的吸附性能。静态摇床实验研究了填料对各污染物的吸附能力,并建立了各填料等温吸附模型。结果表明沸石的综合吸附性能较好,活性炭次之,4种填料的等温吸附过程拟合结果基本符合朗格缪尔(Langmuir)吸附模型。以沸石作为特殊填料的小试结果表明,生物滞留系统对NH₄⁺-N、TN、TP、COD的负荷削减率可分别达到70.59%、85.83%、79.98%、66.02%。从净化性能及经济性方面考虑,沸石作为生物滞留系统特殊填料是一种较好的选择。

关键词:填料;生物滞留;径流;等温吸附模型;净化性能

中图分类号:X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2018)04 - 0071 - 09

Comparison of purification effects of 4 kinds of bioretention fillers on runoff pollutants

LIU Zengchao^{1,2}, LI Jiake¹, JIANG Chunbo¹, LUO Taoran², CHEN Mengjie²

(1. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China(Xi'an University of Technology), Xi'an 710048, China; 2. School of Materials Science and Chemical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: In order to improve the purification effect of bioretention systems, the adsorption properties of special fillers such as zeolite, vermiculite, activated carbon and perlite to the pollutants such as ammonia nitrogen, total nitrogen, total phosphorus, chemical oxygen demand in the road runoff of rainwater were studied. The adsorption capacity of fillers to various pollutants was studied by static shaking experiments, and the isothermal adsorption models of the fillers were established. The results showed that the comprehensive adsorption performance of the zeolite was better, followed by the activated carbon. The fitting results of isothermal adsorption process of the four fillers basically conform to Langmuir adsorption model. The bench-scale test results of zeolite as the special filler indicated that the load reduction rate of bioretention systems to ammonia nitrogen, total nitrogen, total phosphorus and chemical oxygen demand could reach 70.59%, 85.83%, 79.98% and 66.02%, respectively. Considering the purification performance and economy, zeolite can be selected as the special filler for bioretention system.

Key words: filler; bioretention; runoff; isothermal adsorption model; purification performance

基金项目:国家自然科学基金(51279158);陕西省自然科学基金(2015JZ013)
作者简介:刘增超(1978—),男,博士研究生,主要从事海绵城市及非点源污染控制研究。E-mail:58147782@qq.com
通信作者:李家科,教授。E-mail:xatu_ljk@163.com

生物滞留技术是当前我国海绵城市建设中常用技术之一^[1-2],在雨水径流污染控制、地下水回补及景观生态方面作用显著^[3]。就净化机理而言,主要是通过填料、植物和微生物三者之间的复杂物理、化学和生物协同作用实现对径流污染的净化^[4]。在生物滞留系统中,填料的作用是影响净化效果的关键,一方面填料可为微生物提供附着表面,另一方面填料还有吸附、离子交换等作用,使得径流污染物得以净化^[5]。传统的生物滞留填料常以沙、土为基质,其对径流中主要污染物浓度去除率约为40%^[6]。考虑到污染净化的同时,还应使系统保持良好的渗透性能及保水性能,现常在系统中添加一些比表面积大、吸附能力强、通透性好的介质作为特殊填料,如腐殖质、木屑、树皮等有机介质^[7-9],以及沸石、珍珠岩、蛭石、高炉渣、粉煤灰等吸附性矿物介质^[10-12]。如马里兰州推荐约50%的沙、30%的土、20%的有机质组成混合填料^[7],北卡罗莱州则推荐在填料中加入3%~5%的有机质^[8],而澳洲莫纳什大学生物滞留技术推广协会则推荐在填料系统添加10%~20%的矿物质^[12]以提高填料的净化性能。鉴于加入过多的有机质将造成COD、氮、磷等物质的溶淋现象^[13],进而影响污染物净化效果,本研究在生物滞留系统中添加无机吸附性物质,将沸石、活性炭、珍珠岩、蛭石等吸附剂作为特殊填料;同时以西安城区典型道路径流水质为基础,通过静态摇床吸附试验和等温吸附拟合筛选出一两种吸附能力较强的特殊填料;再将优选出的填料与沙土按一定比例混合开展一次小试试验,模拟生物滞留系统对降雨径流的综合净化效果,以期生物滞留系统特殊填料选配提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与仪器

试验用土取自西安理工大学校园未开发的空地,沙子取自该校周边某施工工地,以上材料均经自然风干备用;天然沸石(粒径2~4 mm)、珍珠岩(粒径3~5 mm)和蛭石(粒径3~6 mm)等特殊填料购自河南信阳某园艺厂,活性炭(粒径1~3 mm)购自江苏泰州某环保材料公司,以上特殊填料使用前先在110℃下烘干2 h备用。

实验仪器主要有NS4型紫外分光光度计、5B-1型化学需氧量快速消解仪、SHA-B型恒温振荡器、BT300-2J型蠕动泵等。

1.2 静态吸附试验

NH₄⁺-N废水采用NH₄Cl进行配置(质量浓度

分别为10、15、20 mg/L),TN废水采用KNO₃进行配置(质量浓度分别为20、30、40 mg/L),TP废水采用KH₂PO₄进行配置(质量浓度分别为1、3、5 mg/L),COD废水采用葡萄糖进行配置(质量浓度分别为50、100、150 mg/L)。取上述废水100 mL加入各锥形瓶中,并分别加入2g的绿沸石、珍珠岩、蛭石、活性炭颗粒,置于恒温水浴振荡器中进行静态震荡吸附,参照李琼辉等^[14-15]的实验研究方法,设置吸附温度为25℃,转速为(80±10) r/min匀速振荡,振荡时间取24 h(经预实验检验,24 h内吸附过程都已达到平衡状态),并每隔3 h以针孔滤头取样测定溶液中污染物浓度,并计算其吸附量。填料对污染物的吸附量可由下式计算:

$$Q = (\rho - \rho_t) V / m \quad (1)$$

式中:Q为填料对污染物的吸附量,mg/g;ρ为溶液初始质量浓度,mg/L;ρ_t为t时刻溶液质量浓度,mg/L;V为试样体积,L;m为填料质量,g。

1.3 等温吸附模型

恒温条件下固体表面吸附现象,常用朗格缪尔(Langmuir)和弗兰德里希(Freundlich)等温吸附方程来表示吸附量和介质中溶质平衡浓度间的关系^[16-17]。Langmuir及Freundlich吸附方程为

$$\frac{1}{Q_e} = \frac{1}{ab\rho_e} + \frac{1}{b} \quad (2)$$

$$\ln Q_e = \frac{1}{c} \ln \rho_e + \ln d \quad (3)$$

式中:Q_e为平衡吸附量,mg/g;ρ_e为吸附饱和时的质量浓度,mg/L;a为反映填料的吸附能力的常数;b为填料对污染物的理论最大吸附量,mg/g;c为填料对污染物的吸附强度;d为弗雷德利希常数,反映填料的吸附性能。

1.4 小试试验

将静态吸附试验优选出的填料与沙土按比例混匀并填入自制的生物滞留槽小试装置中,模拟径流参照西安市典型中小降雨的雨量及径流水质,小试装置从上至下依次为植被层、土壤及填料混合层、蓄水模块层,在装置底部的蓄水模块内取样分析其负荷削减率,验证填料对污染物的实际净化效果。生物滞留装置对径流污染物净化率R_c及污染负荷削减率R_Q计算公式为

$$R_c = \frac{\rho_{in} - \rho_{out}}{\rho_{in}} \times 100\% \quad (4)$$

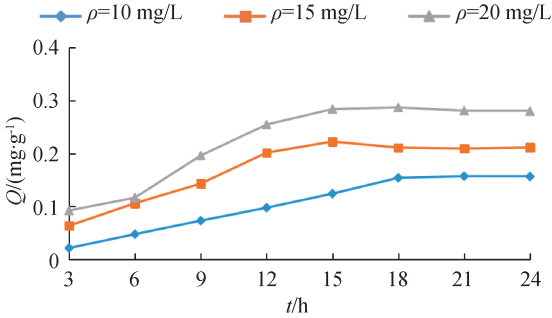
$$R_Q = \frac{\rho_{in} V_{in} - \rho_{out} V_{out}}{\rho_{in} V_{in}} \times 100\% \quad (5)$$

式中:V_{in}、V_{out}分别为入流及出流总水量,m³;ρ_{in}、ρ_{out}分别为入流及出流污染物平均质量浓度,mg/L。

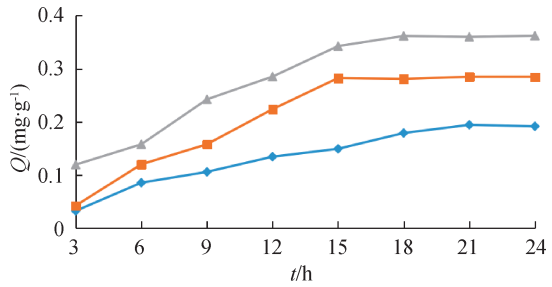
2 结果与讨论

2.1 静态吸附试验结果分析

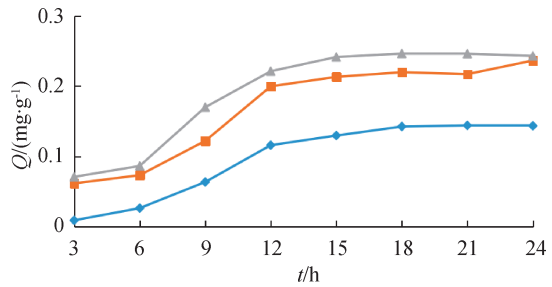
a. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附试验。图 1 为 4 种填料对模拟径流中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的等温吸附曲线。从试验结果可知,随着 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 初始质量浓度增大,填料的吸附量越大,约 15 h 后基本达到吸附平衡。当 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 初始质量浓度为 20 mg/L 时,分别测得各填料对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平衡吸附量:活性炭为 0.283 mg/g,绿沸石为 0.361 mg/g,珍珠岩为 0.231 mg/g,蛭石为 0.245 mg/g。这说明绿沸石、活性炭对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸



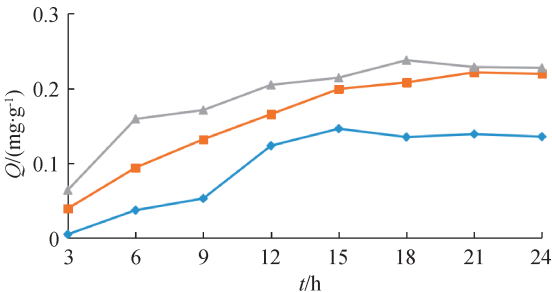
(a) 活性炭



(b) 绿沸石



(c) 珍珠岩

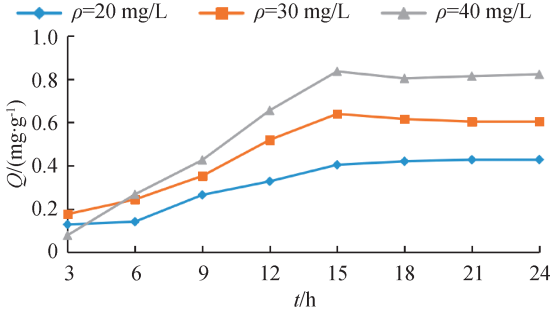


(d) 蛭石

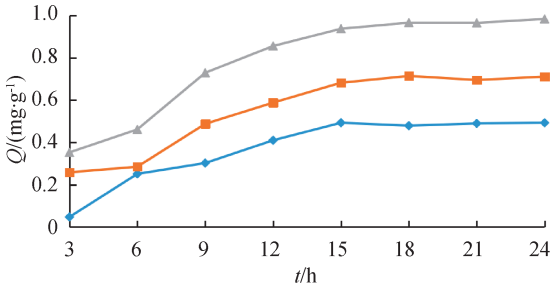
图 1 4 种填料对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的等温吸附曲线

附作用较为显著,这主要由于沸石及活性炭均具有较发达的微孔结构和高的比表面积^[18-19];相较于活性炭,沸石分子带负电荷,对水中阳离子污染物如 NH_4^+ 有强烈的离子交换作用^[20-21],且 NH_4^+ 直径大小与沸石内的孔穴和孔道直径相当,沸石可靠其孔壁的色散力作用吸附 NH_4^+ ^[22],故沸石对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附性能明显优于活性炭。

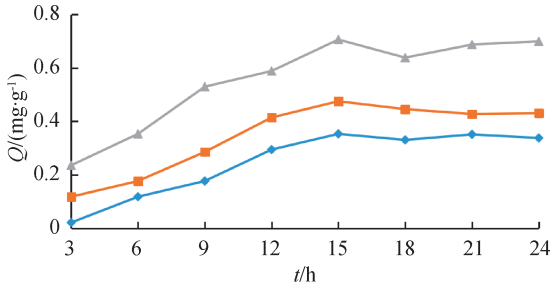
b. TN 吸附试验。图 2 为 4 种填料对模拟径流中 TN 的等温吸附曲线。从试验结果可知,当 TN 初始质量浓度为 40 mg/L 时,分别测得各填料对 TN 的平衡吸附量:活性炭为 0.813 mg/g,绿沸石为 0.972 mg/g,珍珠岩为 0.675 mg/g,蛭石为 0.783 mg/g。



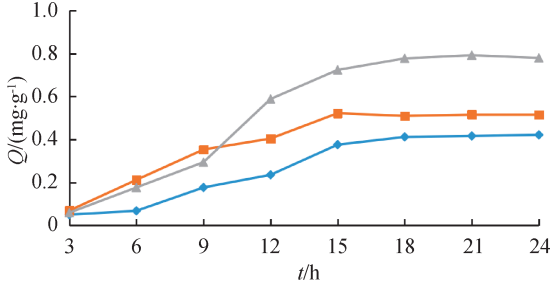
(a) 活性炭



(b) 绿沸石



(c) 珍珠岩



(d) 蛭石

图 2 4 种填料对 TN 的等温吸附曲线

从平衡吸附量看出沸石对 TN 的吸附性能明显优于其他填料,这与张美兰等^[23-24]的研究成果相一致。

c. TP 吸附试验。图 3 为 4 种填料对模拟径流中 TP 的等温吸附曲线。从试验结果可知,当 TP 初始质量浓度为 5 mg/L 时,分别测得各填料对 TP 的平衡吸附量:活性炭为 0.024 mg/g,绿沸石为 0.032 mg/g,珍珠岩为 0.028 mg/g,蛭石为 0.022 mg/g。沸石对磷具有较好的吸附性能,一方面是其具有较强的吸附能力,另一方面是因为其含有较多的 Ca、Fe、Al 等金属离子,可以与水中的磷酸根发生沉淀反应^[16,25],从而强化了对磷的吸附性能。珍珠

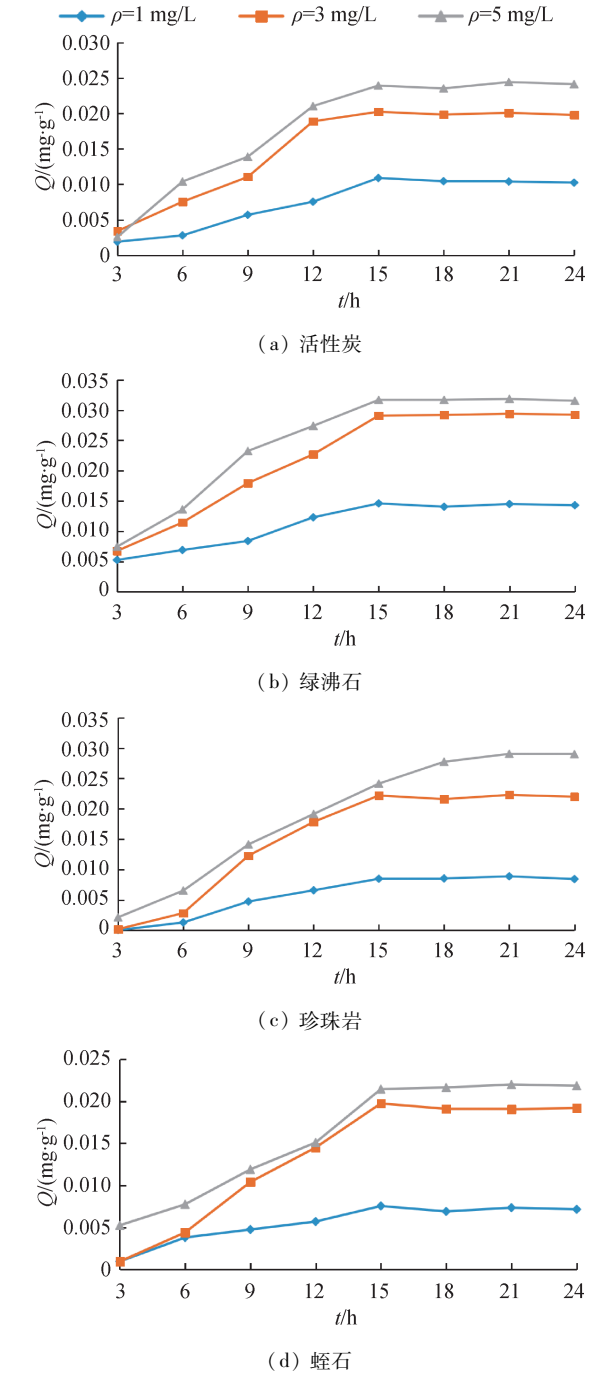


图 3 4 种填料对 TP 的等温吸附曲线

岩具有无数不规则气孔蜂窝状结构的白色颗粒,具有一定的吸附性^[26],其自身含有一定量的铝、铁、钙、镁等化学除磷成分^[27-28],故也表现出较好的除磷效果。

d. COD 吸附试验。图 4 为 4 种填料对模拟径流中 COD 的等温吸附曲线。从试验结果可知,各填料对 COD 的吸附也存在着吸附量随溶液浓度增大而增长的趋势,约 12 ~ 15 h 后基本达到吸附平衡状态。当 COD 初始质量浓度为 150 mg/L 时,分别测得各填料对 COD 的平衡吸附量:活性炭为 2.330 mg/g,绿沸石为 1.730 mg/g,珍珠岩为 1.478 mg/g,蛭石为 1.738 mg/g。活性炭的比表面积大,

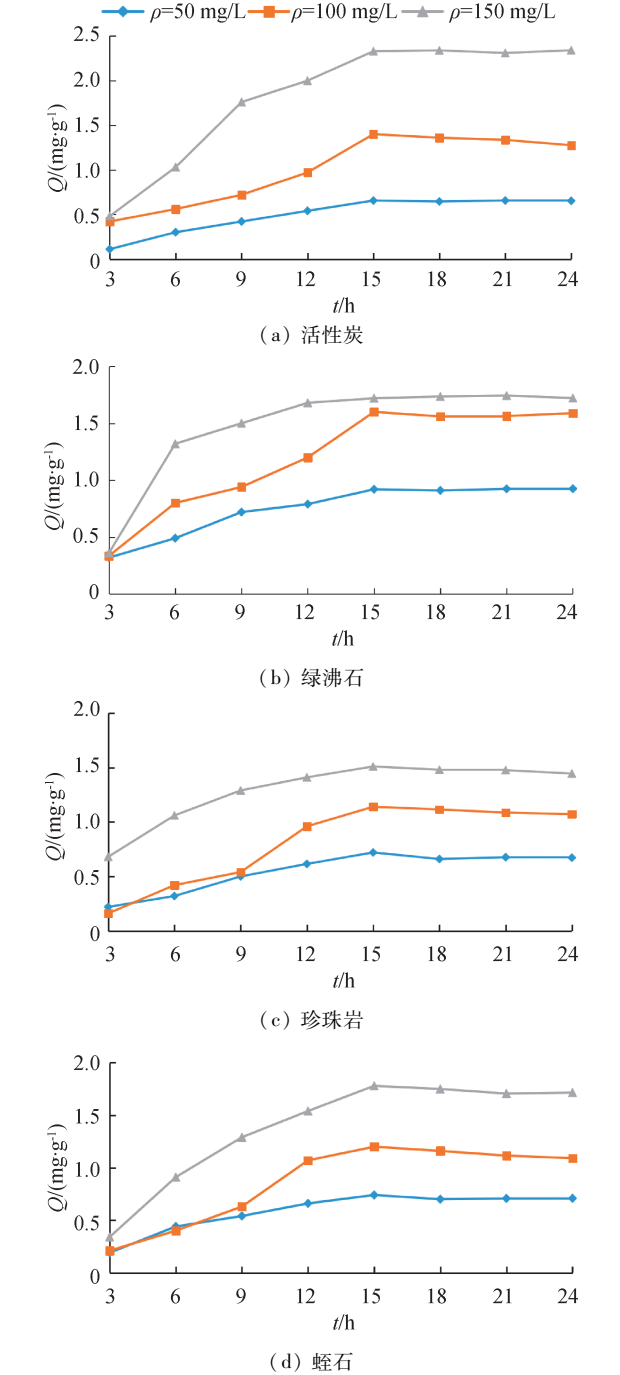


图 4 4 种填料对 COD 的等温吸附曲线

微孔结构很丰富,且其表面有较丰富的含氧官能团,因此对水相中的有机物具有良好的吸附性能^[29-31]。而蛭石结构中存有活性羟基、氧化与还原点等活性中心,可通过电子结合、极性吸附、配位结合以及羟基缩合等形式与某些有机物反应^[32-33],所以在有机物吸附方面,活性炭及蛭石表现出较好的有机物净化性能。

从图 1 至图 4 还可以看出两种趋势:一是吸附时间越长,填料对污染物的吸附作用越充分,吸附过程进行至 12 ~ 15 h 后,吸附过程趋于平衡状态;二是随着污染物初始质量浓度的增加,填料的平衡吸附量有所增大,这是由于污染物初始质量浓度越大,填料颗粒周围污染物浓度梯度越大,单位吸附剂可接纳的吸附质越多,因而随污染物初始质量浓度的增大,填料对污染物的吸附量越大^[14]。

2.2 等温吸附曲线拟合

等温吸附曲线能反映不同平衡浓度下吸附剂的最大吸附量。最大吸附量可初步反映填料的净化能力,是生物滞留设施填料选择时考虑的重要依据之一^[34-35]。

a. NH_4^+ -N 等温吸附曲线拟合。表 1 为 4 种填料对 NH_4^+ -N 的等温吸附曲线拟合结果及相关参数。从拟合曲线的决定系数 R^2 来看,活性炭、绿沸石对 NH_4^+ -N 的等温吸附曲线均可用 Langmuir 和 Freundlich 方程拟合,其 $R^2 > 0.90$;而珍珠岩及蛭石的等温吸附曲线用 Langmuir 方程拟合效果更好。从

Langmuir 方程拟合结果可知,4 种填料对 NH_4^+ -N 理论吸附量从大到小顺序为:绿沸石(1.079 0 mg/g),活性炭(0.905 1 mg/g),珍珠岩(0.561 9 mg/g),蛭石(0.536 0 mg/g),其中绿沸石和活性炭对 NH_4^+ -N 理论吸附量较大,可作为生物滞留设施净化 NH_4^+ -N 的理想填料。

b. TN 等温吸附曲线拟合。表 2 为 4 种填料对 TN 的等温吸附曲线拟合结果及相关参数,从拟合数据来看,活性炭、绿沸石对 TN 的等温吸附曲线均可用 Langmuir 和 Freundlich 方程拟合,其 $R^2 > 0.90$;而珍珠岩及蛭石对 TN 的等温吸附更符合 Langmuir 方程。从 Langmuir 方程拟合结果可知,填料对 TN 理论吸附量从大到小顺序为:绿沸石(4.246 3 mg/g),活性炭(2.705 6 mg/g),珍珠岩(1.664 4 mg/g),蛭石(1.350 4 mg/g),所以在净化 TN 方面,绿沸石和活性炭可优先考虑。

c. TP 等温吸附曲线拟合。表 3 为 TP 的等温吸附曲线拟合结果。从表 3 可见,4 种填料对 TP 的等温吸附曲线均可用 Langmuir 方程进行拟合;其中活性炭对 TP 的等温吸附也可采用 Freundlich 方程进行拟合。从 Langmuir 方程拟合结果可知,各填料对 TP 理论吸附量从大到小顺序为:绿沸石(0.102 1 mg/g),珍珠岩(0.074 0 mg/g),活性炭(0.039 4 mg/g),蛭石(0.039 3 mg/g)。故在净化 TP 方面绿沸石可作为生物滞留设施的理想填料,此外珍珠岩对 TP 也有较好的吸附性能,也可加以考虑。

表 1 NH_4^+ -N 等温吸附方程及相关参数

填料类型	Langmuir 模型				Freundlich 模型			
	方程	a	b	R^2	方程	c	d	R^2
活性炭	$1/Q_e = 32.263/\rho_e + 1.1048$	0.028 1	0.905 1	0.974 1	$\ln Q_e = 0.8003 \ln \rho_e - 3.3135$	1.249 5	0.036 4	0.978 2
绿沸石	$1/Q_e = 23.392/\rho_e + 0.9268$	0.046 1	1.079 0	0.992 0	$\ln Q_e = 0.7237 \ln \rho_e - 2.8650$	1.381 8	0.057 0	0.982 1
珍珠岩	$1/Q_e = 31.058/\rho_e + 1.7798$	0.018 1	0.561 9	0.917 3	$\ln Q_e = 0.5797 \ln \rho_e - 2.9381$	1.725 0	0.053 0	0.857 2
蛭石	$1/Q_e = 33.214/\rho_e + 1.8656$	0.016 1	0.536 0	0.898 4	$\ln Q_e = 0.5738 \ln \rho_e - 2.9826$	1.742 8	0.050 7	0.828 2

表 2 TN 等温吸附方程及相关参数

填料类型	Langmuir 模型				Freundlich 模型			
	方程	a	b	R^2	方程	c	d	R^2
活性炭	$1/Q_e = 22.2910/\rho_e + 0.3696$	0.121 4	2.705 6	0.964 5	$\ln Q_e = 0.8876 \ln \rho_e - 2.8609$	1.126 6	0.057 2	0.957 1
绿沸石	$1/Q_e = 18.1750/\rho_e + 0.2355$	0.233 6	4.246 3	0.948 3	$\ln Q_e = 0.8246 \ln \rho_e - 2.7752$	1.212 7	0.062 3	0.930 2
珍珠岩	$1/Q_e = 30.7770/\rho_e + 0.6008$	0.054 1	1.664 4	0.804 5	$\ln Q_e = 0.8129 \ln \rho_e - 3.1916$	1.230 2	0.041 1	0.772 1
蛭石	$1/Q_e = 19.2170/\rho_e + 0.7405$	0.070 3	1.350 4	0.748 8	$\ln Q_e = 0.6779 \ln \rho_e - 2.5522$	1.475 1	0.077 9	0.718 9

表 3 TP 等温吸附方程及相关参数

填料类型	Langmuir 模型				Freundlich 模型			
	方程	a	b	R^2	方程	c	d	R^2
活性炭	$1/Q_e = 67.7620/\rho_e + 25.355$	0.000 6	0.039 4	0.992 4	$\ln Q_e = 0.5333 \ln \rho_e - 4.5009$	1.875 1	0.011 1	0.954 6
绿沸石	$1/Q_e = 53.792/\rho_e + 9.7934$	0.001 9	0.102 1	0.999 0	$\ln Q_e = 0.5415 \ln \rho_e - 4.1596$	1.341 4	0.015 6	0.803 3
珍珠岩	$1/Q_e = 101.87/\rho_e + 13.506$	0.000 7	0.074 0	0.954 3	$\ln Q_e = 0.6752 \ln \rho_e - 4.6607$	1.632 7	0.077 0	0.859 0
蛭石	$1/Q_e = 107.74/\rho_e + 25.453$	0.000 4	0.039 3	0.884 7	$\ln Q_e = 0.7455 \ln \rho_e - 4.7702$	1.846 7	0.008 5	0.684 3

d. COD 等温吸附曲线拟合。从表 4 可以看出,活性炭、珍珠岩、蛭石 3 种填料对 COD 的等温吸附曲线既可采用 Langmuir 方程也可采用 Freundlich 方程进行拟合,而绿沸石更适宜采用 Langmuir 方程进行拟合。从 Langmuir 方程拟合结果可知,填料对 COD 的理论吸附量从大到小顺序为:活性炭(6.8918 mg/g),蛭石(3.046 9 mg/g),绿沸石(2.880 2 mg/g),珍珠岩(2.855 5 mg/g)。从吸附有机污染物角度看,活性炭可作为较理想的生物滞留填料。

2.3 小试结果及分析

自制小试装置高 100 cm,长 60 cm,宽 30 cm,由上至下依次为 10 cm 表面蓄水层,60 cm 混合填料层(表面种有麦冬草)、5 cm 中砂过滤层、25 cm 蓄水模块层,填料以下各层之间以透水土工布隔开,特殊填料选用静态试验中吸附性能较好的绿沸石及活性炭两种。土、沙使用前晾干备用,特殊填料使用前烘干备用;1 号装置混合填料层采用 $V_{\text{绿沸石}}:V_{\text{沙}}:V_{\text{土}}=1:1:3$ 进行充填,2 号装置采用 $V_{\text{活性炭}}:V_{\text{沙}}:V_{\text{土}}=1:1:3$ 进行充填。由于试验用土取自校内空地,无农业面源污染,故在小试前 7 d 仅将约 60 L 清水在 2 h 内泵入装置内以对填料层润洗一遍,以降低填料层溶出物的干扰。

小试试验进水一次,模拟雨强采用西安地区 2 年一遇 120 min 降雨^[36] 计算获得,装置汇流比取 1:10^[37],参考西安地区降雨径流水质^[38-39] 配置含 4 种污染物的模拟废水,采用蠕动泵恒速泵入装置内,出水样品采自装置底部蓄水模块中的混合液。各污染物的浓度及相关水量数据见表 5。

由表 5 可知,对于 2 年一遇降雨径流,选用绿沸石作为特殊填料时,装置出水中 COD、TP、NH₄⁺-N、TN 污染物浓度降低了 37.73%、70.0%、57.61%、28.04%,其污染物负荷削减率分别为 70.59 %、

85.83 %、79.98 %、66.02%。选用活性炭作为特殊填料时,装置出水中 COD、TP、NH₄⁺-N、TN 污染物浓度降低了 46.46%、51.43%、26.55%、3.34%,污染物负荷削减率分别为 72.91%、75.43 %、62.84%、51.09%。绿沸石作为特殊填料时,装置对 4 种污染物浓度平均去除率可达 48.34%,高于活性炭的 31.94%;对 4 种污染物的平均负荷削减率为 75.61%,也高于活性炭的 65.56%。从经济性方面考虑,天然绿沸石市场价约 400 ~ 700 元/t,活性炭市场价约 1800 ~ 3000 元/t,综合净化性能及价格因素,可优选绿沸石作为生物滞留系统的特殊填料。

3 结 论

通过活性炭、绿沸石、珍珠岩和蛭石 4 种填料对不同初始质量浓度的模拟废水进行静态吸附试验研究,并进行 Langmuir 型和 Freundlich 型等温吸附方程拟合,筛选出吸附量较大、污染物去除效率较高的特殊填料,再将其与沙土混合进行小试试验,验证填料的实际净化效果。

a. 静态吸附试验结果表明,实验条件下绿沸石对 NH₄⁺-N、TN、TP、COD 的吸附量可分别达 0.361 mg/g、0.972 mg/g、0.032 mg/g、1.730 mg/g;活性炭对 NH₄⁺-N、TN、TP、COD 的吸附量可分别达 0.283 mg/g、0.813 mg/g、0.024 mg/g、2.330 mg/g,从整体上看绿沸石、活性炭对 4 种污染物静态吸附性能较好。

b. 等温吸附拟合结果表明,4 种填料对污染物的吸附过程均可采用 Langmuir 方程进行拟合,对部分指标也可采用 Freundlich 方程进行拟合,Langmuir 方程拟合结果显示:NH₄⁺-N 理论最大吸附量从大到小顺序为:绿沸石,活性炭,珍珠岩,蛭石;TN 理论最大吸附量从大到小顺序为:绿沸石,活性炭,蛭石,珍

表 4 COD 等温吸附方程及相关参数

填料类型	Langmuir 模型				Freundlich 模型			
	方程	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	方程	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>R</i> ²
活性炭	1/ <i>Q_e</i> = 45.611/ <i>ρ_e</i> + 0.145 1	0.151 1	6.891 8	0.961 8	ln <i>Q_e</i> = 0.470 3ln <i>ρ_e</i> - 1.626 9	2.126 3	0.196 5	0.957 2
绿沸石	1/ <i>Q_e</i> = 22.034/ <i>ρ_e</i> + 0.347 2	0.130 7	2.880 2	0.954 4	ln <i>Q_e</i> = 0.939 5ln <i>ρ_e</i> - 3.768	1.064 4	0.023 1	0.869 4
珍珠岩	1/ <i>Q_e</i> = 40.079/ <i>ρ_e</i> + 0.350 2	0.071 2	2.855 5	0.975 6	ln <i>Q_e</i> = 0.677 4ln <i>ρ_e</i> - 2.821 8	1.476 2	0.059 5	0.983 8
蛭 石	1/ <i>Q_e</i> = 36.112/ <i>ρ_e</i> + 0.328 2	0.084 4	3.046 9	0.979 2	ln <i>Q_e</i> = 0.670 5ln <i>ρ_e</i> - 2.703 0	1.491 4	0.067 0	0.987 2

表 5 小试试验结果

污染指标	<i>ρ_{in}</i> / (mg · L ⁻¹)	<i>V_{in}</i> /L	1 号装置				2 号装置			
			<i>ρ_{out}</i> / (mg · L ⁻¹)	<i>V_{out}</i> /L	<i>R_C</i> /%	<i>R_Q</i> /%	<i>ρ_{out}</i> / (mg · L ⁻¹)	<i>V_{out}</i> /L	<i>R_C</i> /%	<i>R_Q</i> /%
COD	148.96	45.36	92.76	21.42	37.73	70.59	79.76	22.95	46.46	72.91
TP	0.70	45.36	0.21	21.42	70.00	85.83	0.34	22.95	51.43	75.43
NH ₄ ⁺ -N	6.44	45.36	2.73	21.42	57.61	79.98	4.73	22.95	26.55	62.84
TN	12.59	45.36	9.06	21.42	28.04	66.02	12.17	22.95	3.34	51.09

珠岩,TP 理论最大吸附量从大到小顺序为:绿沸石,珍珠岩,活性炭,蛭石,COD 理论最大吸附量从大到小顺序为:活性炭,蛭石,绿沸石,珍珠岩。这也印证了静态吸附试验中绿沸石、活性炭整体上吸附效果较好的结论。

c. 小试试验通过动态进水的方式验证了绿沸石、活性炭作为特殊填料时生物滞留系统的运行效果:采用绿沸石作为特殊填料时,COD、TP、NH₄⁺-N、TN 污染物负荷削减率分别达到 70.59 %、85.83 %、79.98 %、66.02%;选用活性炭作为特殊填料时,COD、TP、NH₄⁺-N、TN 的负荷削减率分别为 72.91 %、75.43 %、62.84%、51.09%。就性价比而言,可优选绿沸石作为生物滞留系统的特殊填料。

本研究仅考虑了填料的吸附性能,尚未开展填料的脱附性能及吸附动力学研究。此外,特殊填料的粒径级配与充填方式、混合填料层污染物淋失效应对水质净化效果的影响在今后的研究中也需加以考虑。

参考文献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.

[2] 李俊奇,李小静,王文亮,等. 美国雨水径流控制技术导则讨论及其借鉴[J]. 水资源保护,2017,33(2):6-12,62. (LI Junqi, LI Xiaojing, WANG Wenliang, et al. Technical guidance for stormwater runoff control in United States and its significance [J]. Water Resources Protection,2017,33(2):6-12,62. (in Chinese))

[3] DAVIS A P, TRAVER R G. Bioretention technology: overview of current practice and future needs[J]. Journal of Environmental Engineering,2009,135(3):109-117.

[4] 朱木兰,廖杰,陈国元,等. 针对 LID 型道路绿化带土壤渗透性能的改良[J]. 水资源保护,2013,29(3):25-28. (ZHU Mulan, LIAO Jie, CHEN Guoyuan, et al. Soil permeability improvement for LID-type road greenbelt[J]. Water Resources Protection, 2013, 29 (3) : 25-28. (in Chinese))

[5] 李家科,刘增超,黄宁俊,等. 低影响开发(LID)生物滞留技术研究进展[J]. 干旱区研究,2014,31(3):431-439. (LI Jiake, LIU Zengchao, HUANG Ningjun, et al. Advances in low-impact development (LID) bioretention technology[J]. Arid Land Research,2014,31(3):431-439. (in Chinese))

[6] 孟莹莹,王会肖,张书涵,等. 基于生物滞留的城市道路雨水滞蓄净化效果试验研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2013,49(2):286-291. (MENG Yingying, WANG Huixiao, ZHANG Shuhan, et al. Experiments on detention,retention and purifying effects of urban road runoff based on bioretention[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2013, 49 (2):286-291. (in Chinese))

[7] Maryland Department of the Environment (MDE). 2000 Maryland stormwater design manual, Vols. I and II [M]. Baltimore: Center for Watershed Protection and the Maryland Department of the Environment, Water Management Administration,2000.

[8] HUNT W F, LORD W G. Bioretention performance, design, construction, and maintenance[M]. Raleigh: North Carolina Cooperative Extension,2006.

[9] Delaware Natural Resources and Environmental Control (DNREC). Green technology: the Delaware urban runoff management approach [M]. Delaware : Delaware Department of Natural Resources and Environmental Control, Division of Soil and Water Conservation,2005.

[10] RUSCIANO G M, OBROPTA C C. Bioretention column study: fecal coliform and total suspended solids reduction [J]. Transactions of the Asabe,2007,50(4):1261-1269.

[11] BRATIEES K, FLETCHER T D, DELETIC A, et al. Nutrient and sediment removal by stormwater biofilter: a large-scale design optimization study[J]. Water Research, 2008,42(14):3930-3940.

[12] HATT B, MORISON P, FLECHER T D, et al. Adoption guidelines for stormwater biofiltration systems [M]. Monash: Monash University,2009.

[13] 高晓丽,张书函,肖娟,等. 雨水生物滞留设施中填料的研究进展[J]. 中国给水排水,2015,31(20):17-21. (GAO Xiaoli, ZHANG Shuhan, XIAO Juan, et al. Research progress on packing materials in rainwater bioretention facilities [J]. China Water & Wastewater, 2015,31(20):17-21. (in Chinese))

[14] 李琼辉,于伟鹏,李小荣,等. 6 种人工湿地填料对氮磷的吸附效果研究[J]. 安徽农业科学,2016,44(4):83-86. (LI Qionghui, YU Weipeng, LI Xiaorong, et al. Adsorption effect of six kinds of constructed wetland on nitrogen and phosphorus [J]. Anhui Agricultural Sciences,2016,44(4):83-86. (in Chinese))

[15] 蔡玉曼,陈冲,周永德,等. 天然沸石的铵吸附量研究[J]. 地质学刊,2009,33(4):403-410. (CAI Yuman, CHEN Chong, ZHOU Yongde, et al. Study on adsorption capacity for ammonium with natural zeolite[J]. Journal of Geology,2009,33(4):403-410. (in Chinese))

[16] 王功,魏东洋,方晓航,等. 3 种湿地填料对水体中氮磷的吸附特性研究[J]. 环境污染与防治,2012,34(11):9-13. (WANG Gong, WEI Dongyang, FANG Xiaohang, et al. Studies on the adsorption characteristics of nitrogen and phosphorus in three kinds of wetland fillers [J]. Environmental Pollution and Control,2012,34(11):9-13. (in Chinese))

[17] 游少鸿,佟小微,朱义年. 天然沸石对氨氮的吸附作用及其影响因素[J]. 水资源保护,2010,26(1):70-74. (YOU Shaohong, TONG Xiaowei, ZHU Yinian. Experimental study on ammonium adsorption onto natural stellerite and its factors[J]. Water Resources Protection, 2010,26(1):70-74. (in Chinese))

- [18] 田琳,孔强,仁宗明,等. 活性炭和沸石对氨氮的吸附特性及生物再生[J]. 环境工程学报,2012,6(10):3424-3428. (TIAN Lin, KONG Qiang, REN Zongming, et al. Adsorption properties and biological regeneration of ammonia nitrogen by activated carbon and zeolite [J]. Journal of Environmental Engineering,2012,6(10):3424-3428. (in Chinese))
- [19] 姚咏歌,李芸,彭婧,等. 天然沸石和蛭石的离子吸附性能研究[J]. 中南林业科技大学学报,2012,32(12):83-87. (YAO Yongge, LI Yun, PENG Jing, et al. Ion adsorption properties of natural zeolite and vermiculite [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology,2012,32(12):83-87. (in Chinese))
- [20] 戴兴春,黄民生,徐亚同,等. 沸石强化生化装置脱氮功能的效果及机理初探[J]. 环境科学,2007,28(8):1882-1888. (DAI Xingchun, HUANG Minsheng, XU Yatong, et al. Preliminary study on the effect and mechanism of denitrification of biochemical devices with zeolite [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2007,28(8):1882-1888. (in Chinese))
- [21] 安莹,王志伟,张一帆,等. 天然沸石吸附氨氮的影响因素[J]. 环境工程学报,2013,7(10):3927-3932. (AN Ying, WANG Zhiwei, ZHANG Yifan, et al. Influencing factors of ammonia adsorption on natural zeolite [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013,7(10):3927-3932. (in Chinese))
- [22] 王萌,房春生,颜昌宙,等. 沸石的改性及其对氨氮吸附特征[J]. 环境科学研究,2012,25(9):1024-1029. (WANG Meng, FANG Chunsheng, YAN Changzhou, et al. Modification of zeolite and its adsorption characteristics for ammonia nitrogen [J]. Chinese Journal of Environmental Science,2012,25(9):1024-1029. (in Chinese))
- [23] 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 Meilan, HE Shengbing, CHEN Chuxue, et al. Natural zeolite and calcium silicate filter bed deaminase and phosphorus removal [J]. Water Treatment Technology,2007,33(11):71-74. (in Chinese))
- [24] 周栋,陈振楼,毕春娟,等. 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[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),2011(1):185-193. (ZHOU Dong, CHEN Zhenlou, BI Chunjuan, et al. Efficiencies of different zeolite and medical stone combinations removing the nitrogen and phosphorus in urban rainfall runoff [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science),2011(1):185-193. (in Chinese))
- [25] 吴鹏,陆爽君,徐乐中,等. 改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制[J]. 环境科学,2017,38(2):580-588. (WU Peng, LU Shuangjun, XU Lezhong, et al. Effect and mechanism of nitrogen and phosphorus removal in modified zeolite wetlands [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2017,38(2):580-588. (in Chinese))
- [26] 茹菁宇,尹雯,王家强. 改性膨胀珍珠岩去除废水中磷酸盐的研究[J]. 绿色科技,2013,9:152-154. (RU Jingyu, YIN Wen, WANG Jiaqiang. Study on removal of phosphate from wastewater by modified expanded perlite [J]. Journal of Green Science and Technology,2013,9:152-154. (in Chinese))
- [27] 卢浩,康威,谭松明,等. 屋顶绿化基质对雨水径流水质的影响[J]. 中国给水排水,2016,32(7):135-138. (LU Hao, KANG Wei, TAN Songming, et al. Effect of roof greening matrix on stormwater runoff quality [J]. China Water & Wastewater,2016,32(7):135-138. (in Chinese))
- [28] 王贵领,高山,赵经贵,等. 珍珠岩制备4A分子筛初探[J]. 黑龙江大学自然科学学报,2003,3(1):115-117. (WANG Guiling, GAO Shane, ZHAO Jinggui, et al. Preparation of 4A molecular sieve perlite [J]. Journal of Heilongjiang University Natural Science,2003,3(1):115-117. (in Chinese))
- [29] 李子龙,马双枫,王栋,等. 活性炭吸附水中金属离子和有机物吸附模式和机理的研究[J]. 环境科学与管理,2009,34(10):88-92. (LI Zilong, MA Shuangfeng, WANG Dong, et al. Adsorption modes and mechanism of metal ions and organic compounds in activated carbon [J]. Environmental Science and Management,2009,34(10):88-92. (in Chinese))
- [30] 包金梅,凌琪,李瑞. 活性炭的吸附机理及其在水处理方面的应用[J]. 四川环境,2011,30(1):97-100. (BAO Jinmei, LING Qi, LI Rui. Adsorption mechanism of activated carbon and its application in water treatment [J]. Sichuan Environment, 2011,30(1):97-100. (in Chinese))
- [31] 徐丽军. 活性炭对水中有机物去除的研究进展[J]. 广州化工,2015,43(4):42-44. (XU Lijun. Research progress of activated carbon removal of organic matter in water [J]. Guangzhou Chemical Industry,2015,43(4):42-44. (in Chinese))
- [32] 李雪梅,廖立兵,曾青云,等. 蛭石的有机改性研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报,2007,26(4):410-418. (LI Xuemei, LIAO Libing, ZENG Qingyun, et al. Progress in organic modification of vermiculite [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry,2007,26(4):410-418. (in Chinese))
- [33] 曾铃,付宏渊,李传常,等. 面向能源与环境应用的蛭石结构修饰及其复合材料[J]. 硅酸盐学报,2016,44(8):1226-1234. (ZENG Ling, FU Hongyuan, LI Chuanchang, et al. Structural modification and composites of vermiculite for energy and environmental applications [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2016,44(8):1226-1234. (in Chinese))
- [34] 赵莹,张振亚,陈荣志,等. 改性陶土颗粒吸附砷的实验研究[J]. 水资源保护,2012,28(2):72-76. (ZHAO Ying, ZHANG Zhenya, CHEN Rongzhi, et al. Experimental

research on arsenic adsorption by modified ceramic granule[J]. Water Resources Protection,2012,28(2):72-76. (in Chinese))

[35] 邓天天,李晗晟,胡烨,等. 覆铁石英砂对 As 的固化机理及影响因素[J]. 水资源保护,2017,33(6):102-108. (DENG Tiantian, LI Hansheng, HU Ye, et al. Study on curing mechanisms and influence factors of arsenic by iron oxide coated sand[J]. Water Resources Protection,2017,33(6):102-108. (in Chinese))

[36] 卢金锁,程云,郑琴,等. 西安市暴雨强度公式的推求研究[J]. 中国给水排水,2010,26(17):83-84. (LU Jinsuo, CHENG Yun, ZHENG Qin, et al. Inference for storm intensity formula in Xi'an [J]. China Water and Wastewater,2010,26(17):83-84. (in Chinese))

[37] 刘增超,李家科,蒋春博,等. 生物滞留槽快速设计方法及实例研究[J]. 西安理工大学学报,2017,33(2):145-151. (LIU Zengchao, LI Jiake, JIANG Chunbo, et al. Rapid design of bioretention tank and examples [J]. Journal of Xi'an University of Technology,2017,33(2):145-151. (in Chinese))

[38] 袁宏林,陈海清,林原,等. 西安市降雨水质变化规律分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2011,43(3):391-395. (YUAN Honglin, CHEN Haiqing, LIN Yuan, et al. Analysis on the changing law of rainfall quality in Xi'an [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2011,43(3):391-395. (in Chinese))

[39] 陈莹,赵剑强,胡博,等. 西安市城市主干道路面径流污染负荷研究[J]. 安全与环境学报,2011,11(4):129-132. (CHEN Ying, ZHAO Jianqiang, HU Bo, et al. Study on runoff pollution load of urban main road in Xi'an [J]. Journal of Safety and Environment,2011,11(4):129-132. (in Chinese))

(收稿日期:2018-01-16 编辑:彭桃英)

+++++

(上接第 11 页)

[14] 谭红兵,金犇,王若安,等. 平凉黄土地带气候变化、人类活动与水资源问题[J]. 水资源保护,2015,31(6):45-51. (TAN Hongbing, JIN Ben, WANG Ruohan, et al. Climate change, human activity and water resources issues in loess hilly areas in Pingliang [J]. Water Resources Protection,2015,31(6):45-51. (in Chinese))

[15] 袁瑞强,王亚楠,王鹏,等. 降水集中度的变化特征及影响因素分析:以山西为例[J]. 气候变化研究进展,2018,14(1):11-20. (YAUN Ruiqiang, WANG Yanan, WANG Peng, et al. An analysis of precipitation concentration variation characteristics and influential factors in Shanxi Province, China [J]. Advances in Climate Change Research,2018,14(1):11-20. (in Chinese))

[16] 吕振豫,穆建新. 基于 Copula 函数的流域内降雨丰枯遭遇研究[J]. 水资源保护,2016,32(6):62-69. (LYU Zhenyu, MU Jianxin. Study on wetness-dryness encountering probability of basin precipitation based on Copula function [J]. Water Resources Protection,2016,32(6):62-69. (in Chinese))

[17] 史念海. 黄土高原历史地理研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2001. (收稿日期:2018-03-30 编辑:彭桃英)

+++++

(上接第 41 页)

[11] 叶磊,周建中,曾小凡,等. 水文多变量趋势分析的应用研究[J]. 水文,2014,(6):33-39. (YE Lei, ZHOU Jianzhong, ZENG Xiaofan, et al. Application of hydrological multivariate trend analysis [J]. Journal of China Hydrology,2014,(6):33-39. (in Chinese)).

[12] 汤洁,王宪泽,李青山,等. 第二松花江流域 1956—2006 年降水量时空变化特征分析[J]. 水资源保护,2011,27(6):14-18. (TANG Jie, WANG Xianze, LI Qingshan, et al. Temporal and spatial characteristics of precipitation over second tributary of Songhua River Basin from 1956 to 2006 [J]. Water Resources Protection,2011,27(6):14-18. (in Chinese))

[13] KUMAR P, FOUFOULA-GEORGIOU E. A multicomponent decomposition of spatial rainfall fields: 1. segregation of large-and small-scale features using wavelet transforms [J]. Water Resources Research, 1993, 29(8): 2515-2532.

[14] 桑燕芳,王中根,刘昌明. 小波分析方法在水文学研究中的应用现状及展望[J]. 地理科学进展,2013(9):1413-1422. (SANG Yanfang, WANG Zhonggen, LIU Changming. Applications of wavelet analysis to hydrology: status and prospects [J]. Progress in Geography,2013(9):1413-1422. (in Chinese)).

[15] 刘健,林琳,陈学群,等. 黄河三角洲地区降水时序变化特征研究[J]. 水资源保护,2012,28(1):22-28. (LIU Jian, LIN Lin, CHEN Xuequn, et al. Characteristics of variation of precipitation time series in Yellow River Delta [J]. Water Resources Protection,2012,28(1):22-28. (in Chinese))

[16] 左其亨,纪瓊芯,韩春辉,等. 基于 GIS 分析的水资源分布空间均衡计算方法及应用[J]. 水电能源科学,2018,36(6):33-36. (ZUO Qiting, JI Yingxin, HAN Chunhui, et al. The spatial equilibrium calculation method and application in regional water resource distribution based on GIS analysis [J]. Water Resources and Power,2018,36(6):33-36. (in Chinese))

(收稿日期:2018-02-28 编辑:王 芳)