

折流式人工湿地对矿区降雨径流的净化研究

方松林, 曹盼官

(西安石油大学 人文学院 设计系, 西安 710065)

摘要:根据陕西省渭南市蒲白矿区降雨径流的水质和水量特征,采用新型折流式人工湿地对人工湿地不同运行阶段模拟降雨径流的净化效果进行了对比,分析了 COD_{Cr} , SS, TN, TP, NH_4^+-N 以及重金属Pb, Zn, Cu在湿地系统中的沿程变化,探讨人工湿地的主要去除机制。结果表明:人工湿地对 COD_{Cr} , TP, TN, NH_4^+-N , SS的平均去除率分别为82.3%, 65.9%, 71.2%, 73.5%, 94.8%,对重金属Pb, Zn, Cu的平均去除率分别为91.3%, 94.5%, 81.2%,对重金属的去除率基本高于对营养元素的去除率;除了TN外,折流式人工湿地系统出水各污染物均达到《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)Ⅲ类质量标准,其中TN达Ⅳ类标准,出水重金属Pb, Zn, Cu均能达地表Ⅲ类水标准。降雨径流各污染物主要在人工湿地的第1格被去除,其中, COD_{Cr} , TP, SS和Pb均有一半以上的去除率发生在第1格。随着人工湿地沿程进水浓度的增加,其去除率逐渐下降。研究表明,折流式人工湿地系统对矿区降雨径流的净化效果显著,并且该湿地系统具有较强抗冲击负荷能力,可用于城市地面径流污染的控制和雨水利用。

关键词:人工湿地; 矿区; 降雨径流; 净化效果

中图分类号:X52

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)05-0126-06

Purification Effects of Baffled Constructed Wetland on Rain Runoff in the Mining Area

FANG Songlin, CAO Pangong

(Department of Design, College of Liberal Arts, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: According to water characteristics of the rain runoff in a catchment of Pubai mining area, Weinan, an improved baffled constructed wetland (BCW) was used for purification experiment study of simulated and on-the-spot rain runoff. The purification effects of simulated rain runoff were compared in different operated phases of BCW. Meanwhile, the variation of the pollutants (COD_{Cr} , SS, TN, TP, NH_4^+-N , Pb, Zn and Cu) along the BCW and their removal mechanism were analyzed and discussed, respectively. In the purification study of on-the-spot rain runoff, removal rates of COD_{Cr} , SS, TN, TP, NH_4^+-N were 82.3%, 65.9%, 71.2%, 73.5% and 94.8%, respectively, removal rates of Pb, Zn and Cu were 91.3%, 94.5% and 81.2%, respectively, the effluent met the grade Ⅲ. In the simulated experiment, the effluent water quality of BCW system met the needs of Environmental Quality Standard for Surface Water (GB3838—2002) Ⅲ, TN met Ⅳ, and most of the pollutants were removed in the front of the BCW, especially COD_{Cr} , TP, SS and Pb. The removal rates gradually decreased with the units. In total, there was remarkable treatment performance of the mining rain runoff when BCW system was used. BCW system can also withstand strong shock load. Moreover, and can be applied to control urban surface runoff pollution and use the rainwater.

Keywords: constructed wetland; mining area; rain runoff; purification effects

近年来,随着经济社会发展进步,大量不透水地表逐渐形成,加之城市点源污染控制和管理体系的逐步完善,城市降雨径流污染问题也显得日益突出,已

成为仅次于农业非点源污染的第二大非点源污染^[1-2];滞留池、滞留塘、地下涵水池、人工湿地等构筑物,是目前国际上解决城区初期径流污染所采取的主

要措施。在我国,非点源污染已经成为环境污染的第一因素,60%的水资源污染起源于非点源污染^[3]。因此,进行城市地面径流净化处理对控制非点源污染具有重要意义。随着城市大气污染及地面污染的加剧,降雨径流污染愈加严重,尤其是污染物浓度较高的初期雨水及溢流雨污水^[4-5]。有相关报道称陕西省固有的工业生产模式导致矿区降雨径流中的重金属严重超标,且监测结果还显示,其余监测指标均劣于地表水Ⅴ类水质,水体“富营养化”程度非常明显,故改善水质的需求愈加迫切。

人工湿地作为一种新的生态处理技术源于德国,是一种模拟自然土壤和基质(炉渣和粉煤灰等)按一定比例选择性种植人工生态系统,通过一系列物理、化学、生物途径能够对特定污染物高效的去除^[6-7];应用于污水的深度脱氮除磷处理领域中具有运行费用低、污染物净化效果好、生态环境效益显著等优点,故人工湿地污水处理技术适合中国等发展中国家的基本国情,在不少地区取得了良好的环境效果和经济效益^[8]。此外,人工湿地作为一种有效的生态污水处理技术,各国研究人员已进行了大量关于人工湿地处理生活污水、工业废水、垃圾渗滤液、农业废水等方面的研究,但利用人工湿地进行城市地面径流污染控制的研究报道相对较少^[8-9]。近年来,人工湿地技术在欧美及世界各国迅速发展,早期主要用于处理生活污水或二级污水厂出水、农业面源污染、城市雨水径流等非点源污染的治理等^[10]。而我国直到“七五”期间才开始较大规模地研究人工湿地,20 世纪 90 年代中期起才逐渐重视雨水径流的控制与利用,且目前国内鲜见有关人工湿地净化矿区雨水径流的研究^[11-12]。因此,运用人工湿地控制城市地面径流的研究具有重要意义,其研究成果可为人工湿地的规划与设计提供理论基础和科学依据。本文根据陕西省渭南市蒲白矿区降雨径流的水质、水量特征,矿区雨水径流有其独特的水质特征,水质受工厂作业强度、气候、干旱期长度、降雨事件强度及降雨持续时间的影响,以 COD_{Cr}、SS 及重金属等污染物为主,另包括 TN、TP、NH₄⁺-N 等其他污染物。采用新型折流式人工湿地对其进行降雨径流净化研究。对人工湿地不同运行阶段模拟降雨径流的净化效果进行对比,分析 COD_{Cr}、SS、TN、TP、NH₄⁺-N 以及重金属 Pb、Zn、Cu 在湿地系统中的沿程变化,探讨人工湿地的主要去除机制。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置为长方体湿地床,用 10 mm 厚有机玻璃建成,长×宽×高=1.6 m×1.5 m×0.8 m,坡度<5%,设有导流墙将湿地床体分成 4 个串联的单元床(0.4 m×1.5 m×1.0 m),导流墙上设置过水孔,第 1,3 格单元床呈下行流,2,4 呈上行流,相邻导流墙过水孔呈上下对角线,以实现水流的曲折性,增加污水与湿地的接触,提高湿地的利用率。在各单元床出水口采集水样并监测分析,考察水体中各污染物在湿地床中的空间分布规律,并探讨其去除机制。

试验所用人工湿地装置位于西安石油大学人工湿地控制示范基地内,池体由钢筋混凝土浇筑而成,长×宽×高=4.0 m×2.0 m×1.0 m。填料选用碎石、细砂及本地土壤,从下往上依次为碎石(20~30 mm)层 30 cm,细砂(2~3 mm)层 30 cm,本地土壤层 20 cm。设计水位为 50 cm。湿地植物选取陕西省常用的芦苇和香蒲,分两段种植,床体前段种植芦苇,后段种植香蒲,种植密度均为 10 株/m²,人工湿地装置于 2013 年 10 月建造完成,进行养护,并于 2014 年 1 月中旬开始正常稳定运行。

1.2 人工湿地的运行

根据陕西省渭南市蒲白矿区降雨径流的水质监测结果,首先进行人工模拟雨水径流试验研究,再以收集的矿区降雨径流作为人工湿地进水进行试验研究。人工湿地连续进水,定期放空,水力停留时间(HRT)约 3 d,取样间隔 2~3 d,于每单元格进出口处采样。试验时间为 2015 年 1—12 月,气温 10~32℃。人工湿地净化矿区降雨径流试验研究共约 24 个月,湿地用水为同沙水库集水区矿区各主要出口所收集的降雨径流,各出口同时段降雨径流混合后经保存处理及时用完。

人工模拟试验持续时间约 12 个月,模拟现场监测的径流水质。降雨过程中径流水质随时间呈规律性变化,故模拟水质也有相应波动。于天然水体中添加葡萄糖, KH₂PO₄, NH₄Cl, KNO₃, Pb(NO₃)₂, ZnSO₄, CuSO₄ 及其他小量、微量元素等配制成近似于矿区雨水径流的人工污水, pH 值近中性, COD_{Cr}, TN, TP 面积负荷分别为 13.59, 0.58, 0.17 g/(d·m²), 主要水质指标见表 1。

表 1 人工湿地进水水质								mg/L
试验进水	COD _{Cr}	TN	TH ₄ ⁺ -N	TP	SS	Pb	Zn	Cu
模拟进水	81.36~203.56	4.32~8.02	2.56~6.58	0.32~3.12	152.31~335.62	0.29~1.03	3.05~3.92	1.98~6.03
实地径流	92.36~215.68	4.36~9.25	2.14~7.03	0.29~3.14	149.85~329.74	0.31~0.95	2.91~3.87	2.03~5.98

监测指标有 COD_{Cr} , SS, TN, TP, NH_4^+-N 等^[13]; 重金属 Pb 采用石墨炉原子吸收法, Zn, Cu 采用 ICP-AES 法测定; pH 值采用原位测定。

1.3 数据分析

各指标的去除率 = (进水口值 - 出水口值) / 出水口值 $\times 100\%$

采用 SPSS 18.0 统计分析软件分别对数据进行单因素方差分析 (One-way ANOVA), 多重比较采用 LSD, Pearson 相关系数法检验各指标之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 人工湿地系统对矿区降雨径流的模拟净化

2.1.1 COD_{Cr} 的去除行为 人工湿地中 COD_{Cr} 的去除机制主要有: 截留、过滤、微生物的新陈代谢及植物的吸收。其中微生物的降解是有机物去除的主要途径, 植物对有机物的吸收相对较小, 但植物对有机物的去除有促进作用; 植物庞大的根系为微生物膜提供附着场所, 且输送氧气至湿地床体内。图 1 为 2015 年 (运营 1 a 以后) 全年人工湿地中 COD_{Cr} 的去除率和进出水浓度, 从图 1 中可知, 去除率与进水浓度变化总趋势基本相同。3 月, 由于人工湿地系统处于初期运行阶段, 植物生长初期, 系统内微生物种类、数量及活性水平均未达理想状态, 故出水 COD_{Cr} 较高, 平均 25.98 mg/L, 随着进水浓度的增加, 去除率小范围波动, 但总趋势上升。7 月, 去除率为 87.3% ~ 93.4%, 到 11 月湿地系统已达到稳定状态。另 7 月平均气温数全年最高, 植物生长率大, 根系发达, 微生物活性增强, 数量增多, 使得湿地床体对 COD_{Cr} 的截留、过滤作用及生物吸收作用增强, 故出水 COD_{Cr} 较低, 平均 14.3 mg/L。11 月, 平均去除率较 7 月下降 3.2%, 出水平均值 16.8 mg/L, 略高于 7 月平均值。12 月, 平均去除率与 7 月持平, 出水平均浓度 15.8 mg/L, 为以上四监测阶段最优。由此可推断: (1) 温度差值较大 (7 月 > 11 月), COD_{Cr} 去除率随温度升高而小幅增加; (2) 一定浓度范围内, 去除率随进水浓度增大而略增加; (3) 超出 (2) 所述的浓度范围, 去除率将随进水浓度的增加而减小, 而高温优势 (7 月 > 12 月) 可在某种程度上抵消去除率的降低。人工湿地稳定运行后, COD_{Cr} 在平均温度下, 出水均能达《地表水环境质量标准》(GB3838—2002) III 类质量标准。

2.1.2 TN, NH_4^+-N 的去除行为 氮在废水中主要以有机氮、氨态氮、硝态氮及亚硝态氮形态存在, 只要系统内存在氨化菌、硝化菌和反硝化菌, 以上各形态氮就会发生转化。TN, NH_4^+-N 去除率及进出水浓

度分别见图 2, 3。人工湿地运行初期 (3 月), TN 去除率逐渐增大, 整月平均进水浓度 5.6 mg/L, 去除率 75.3%, 出水浓度 1.63 mg/L; 7 月、11 月、12 月平均进水分别为 6.52, 4.2, 4.6 mg/L, 去除率分别为 73.8%, 62.4%, 48.2%。3 月 TN 去除率最低, 其一是由于运行初期, 湿地系统内相应微生物群还未适应系统内部微环境, 活性水平较低, 不能完全参与到氮的转化过程中; 其二是温度较低, 会抑制厌氧微生物基质酶的活性, 如抑制反硝化菌的生长, 抑制反硝化过程从而减小氮的去除率。7 月与 11 月、12 月相比, 去除率稍高, 出水浓度较低, 这是由 7 月进水浓度高、脱除负荷高、气温升高使得植物与微生物的协同作用加强等综合因素所导致的。从图 2 可知, 湿地稳定运行后, 去除率与进水浓度变化趋势一致, 且在 7 月有个持久的进水浓度、去除率高峰。

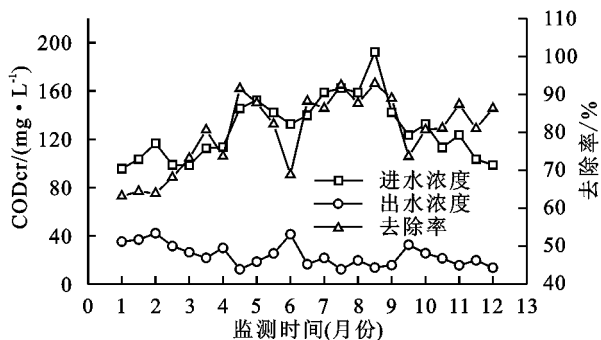


图 1 COD_{Cr} 去除率及进/出水浓度

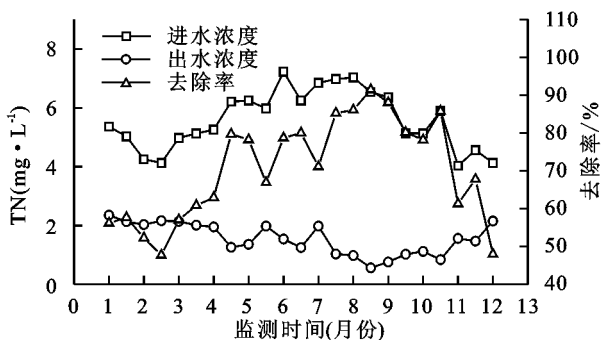


图 2 TN 的去除率及进/出水浓度

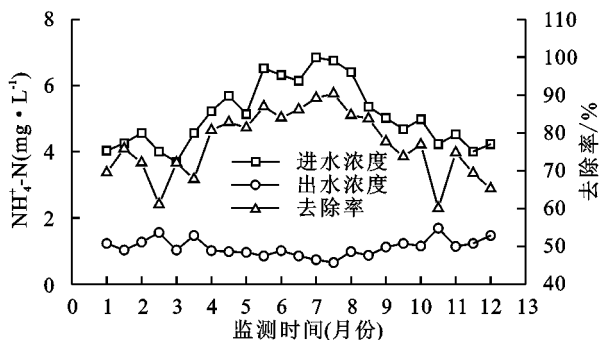


图 3 NH_4^+-N 的去除率及进/出水浓度

2.1.3 TP 的去除行为 人工湿地去除 TP 的主要途径是微生物的吸收、植物的吸收、基质的吸附和络

合及与基质的沉淀反应等。某些高效除磷菌在有氧且碳源充足的环境中能超量摄取磷;植物根主要吸收可溶性磷酸盐(HPO_4^{2-} 和 H_2PO_4^-)并同化为植物的有机成分(如磷脂,ATP,DNA 等);不溶性磷酸盐在物理作用下可沉积于湿地内部。人工湿地 TP 去除率及进出水浓度见图 4。3 月,湿地运行初期,TP 去除率 71.2%~72.5%,去除率波动较大,出水浓度低于 0.22 mg/L,达地表Ⅲ类水标准,其原因一方面是进水浓度较低(平均 0.42 mg/L),另一方面是基质吸附能力还很强。7 月、11 月和 12 月的 TP 平均进水浓度分别为 3.12、2.85、3.01 mg/L,出水均低于 0.65 mg/L,去除率波动较大,11 月进水浓度较低,脱除负荷也对应较低;12 月温度比 7 月低,在进水浓度相近时,其出水浓度、去除率与 7 月几乎持平。

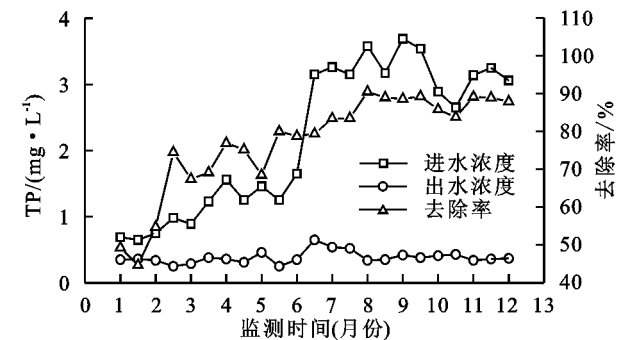


图 4 TP 的去除率及进/出水浓度

2.1.4 SS 的去除行为 SS 在人工系统中主要靠植物根茎拦截、湿地动物摄食、微生物降解和基质过滤等途径被去除。基质去除 SS 的机制有:废水中 SS 向基质表面的迁移机制和土壤颗粒表面的黏附机制。图 5 为所监测到的 SS 去除效果及进出水浓度,由图可知,进水 SS 浓度 128.3~231.5 mg/L,出水 SS 浓度<8.0 mg/L,平均去除率为 93.5%。由于湿地基质和植物根系构成了过滤层,使湿地系统保持了较高的 SS 去除率和较好的出水浓度。另外,监测期间,尽管 SS 进水浓度变化跨度较大,但其去除效果稳定,去除率稳定在 92.1%~96.8%,这表明人工湿地对 SS 有较强的抗冲击能力。

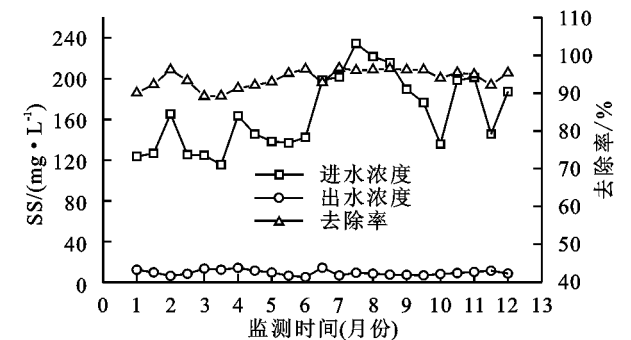


图 5 SS 的去除率及进/出水浓度

2.1.5 重金属的去除行为 重金属的主要去除机制有植物吸收和微生物富集作用、基质的吸附沉淀及金属离子与 S^{2-} 形成硫化物沉淀等。植物对重金属的吸收以被动吸收为主,其巨大的体表面积有利于重金属的附着、吸收、积累及降解等作用。Cheng 等曾报道风草能吸收富集水体中 30% 的铜,对锌、铅的富集也在 5%~15%。微生物能吸附重金属离子到细胞内,而某些细菌能释放蛋白质而使可溶性重金属离子沉淀,且在厌氧条件下,硫酸盐还原菌将 SO_4^{2-} 还原为 S^{2-} 而与重金属反应生成溶解度低的金属硫化物沉淀。重金属的最主要去除方式是和基质发生吸附及一系列化学反应,一般不能与基质发生化学反应形成沉淀,但可络合而转化为低毒状态。

由图 6—8 可知,降雨径流经过人工湿地后,这 3 种重金属均能被有效去除,Zn 和 Cu 去除率均在 90% 以上,Pb 的去除率波动性较大。Pb 进水浓度为 0.35~0.59 mg/L,出水浓度≤0.2 mg/L,去除率>70%;Zn 进水浓度 3.1~4.6 mg/L,出水浓度≤0.3 mg/L,去除率>90%;Cu 进水浓度 2.1~5.5 mg/L,出水≤0.2 mg/L,去除率 90% 以上。矿区降雨径流 Pb,Zn,Cu 平均浓度分别超出《地表水环境质量标准》Ⅲ类标准,经人工湿地净化后,出水水质均优于Ⅲ类标准。

COD_{Cr} ,TN 等在人工湿地中也都得到了有效的净化,出水平均浓度均能达地表Ⅲ类水标准。其中,TN,TP 脱除负荷与模拟净化试验相比有所降低,这可能是由于重金属对湿地系统中 TN,TP 的去除有一定的负面影响。Lim 等的研究表明,重金属由于络合作用和螯合作用,大多数被基质和植物根茎所固定,少量留存于液相中,正是留存于液相中的溶解态重金属抑制了脱氮途径之一——硝化作用,且重金属对植物摄取氮也有一定抑制作用。至于 TP,因为基质吸附沉淀是其主要去除基质,而重金属主要去除机制之一也是与基质发生吸附及一系列化学反应,而基质表面的吸附位有限,故重金属的存在可能会抑制 TP 的去除。

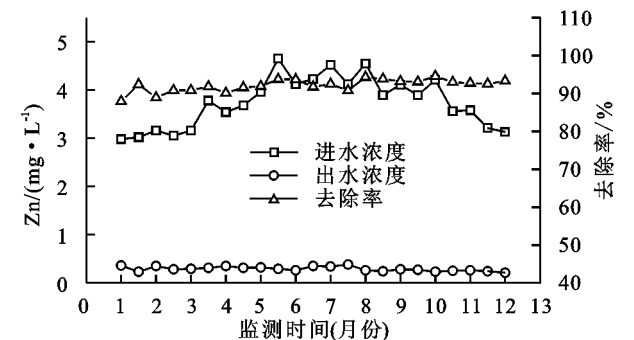


图 6 Zn 的去除率及进/出水浓度

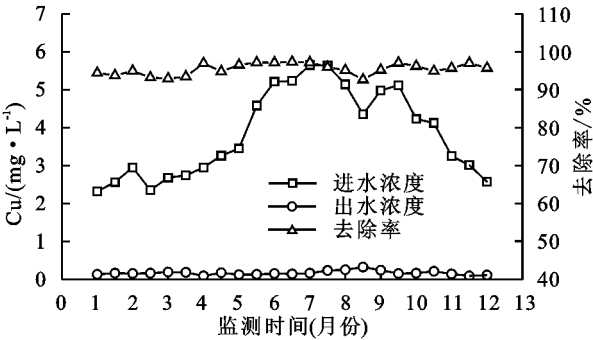


图 7 Cu 的去除率及进/出水浓度

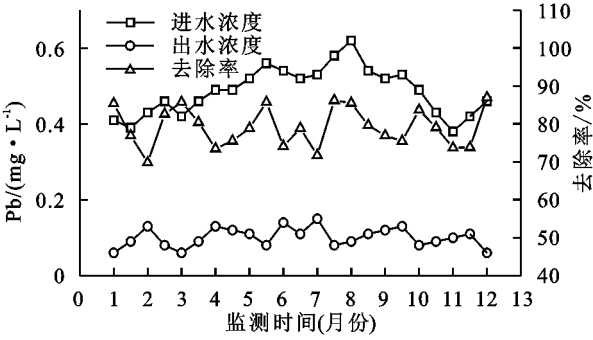


图 8 Pb 的去除率及进/出水浓度

表 2 降雨径流各污染物在人工湿地中的沿程变化

指标	去除率/%				
	第一单元格	第二单元格	第三单元格	第四单元格	合计
COD _{Cr}	55.2	13.8	14.1	6.2	89.3
TN	44.2	12.3	18.5	8.3	83.3
NH ₄ ⁺ -N	42.3	35.6	12.2	2.8	92.9
TP	62.3	11.5	9.8	3.8	87.4
SS	82.3	6.2	2.1	1.9	92.5
Pb	65.3	13.2	11.2	1.6	91.3
Zn	43.2	26.3	21.1	6.2	96.8
Cu	43.2	32.1	6.2	2.3	83.8

3 结论与讨论

人工湿地主要通过植被的截流、过滤以及微生物的新陈代谢等活动净化水质,通常情况下人工湿地基质均为孔隙度较高的砾石,为微生物提供了更多的挂膜空间^[6-7]。本研究中人工湿地基质为炉渣和泥沙,炉渣和泥沙能够避免土壤系统表面的短流,多孔扩大了表面积,有利于微生物的代谢活动,增强了人工湿地的去除效果。

人工湿地中,氮主要经微生物的氨化、硝化及反硝化,植物的吸收与挥发,基质的吸附、过滤与沉淀等作用去除^[5,8]。微生物作用是氮的主要去除途径,使污水中各种价态的氮最终转变为氮气,从而达到脱氮目的,其基本条件是系统中具有大量氨化菌、硝化菌、反硝化菌和适宜的土壤环境。植物根系能输氧及释氧,使湿地床内存在大量好氧、缺氧和厌氧区,相当于许多串联或并联的小单元,硝化和反硝化作用得以同时发生,提高氮去除速率^[5,8]。本研究中人工湿地稳定运行后,NH₄⁺-N 平均去除率约 72.1%,出水水质稳定,均不超过 1.8 mg/L,8 月前,去除率与进水浓度变化趋势一致,但 8 月进水浓度升高,去除率保持平稳不再增加,有两方面原因,其一是由于温度降低使得湿地生物活动减弱从而导致硝化作用减弱,其二是湿地系统对氨氮负荷有一承受限值。陈秀容等^[14]提出,人工湿地进水氮主要形态为 NH₄⁺-N 时,NH₄⁺-N 在人工湿地中主要去除途径为植物吸收、吸附和硝化、氨化。钟成华等^[15]认为这是由于系统中厌氧主导,不能提供良好的硝化环境,不能产生大量反硝化作用底物——亚硝酸盐和硝酸盐,从而抑制反硝化作用。由进出水 NH₄⁺-N/TN 值可知,人工湿地复氧能力欠佳,湿地系统中氨化作用及硝化作用较弱,从而反硝化过程受阻,导致 TN 出水浓度较高;TN 出水能达到或接近地表Ⅲ类水标准,NH₄⁺-N 出水则优于地表Ⅲ类水标准。

人工湿地不同植被对 P 的去除主要以吸附为

2.2 降雨径流各污染物在人工湿地中的沿程变化

由污染物沿程变化情况看出(表 2),降雨径流各污染物都主要在第 1 格被去除,其中,COD_{Cr},TP,SS 和 Pb 均有一半以上的去除率发生在第 1 格。随着人工湿地沿程进水浓度的增加,其去除率逐渐下降。首先,第 1 格基质及植物根系的过滤和截留作用能有效地去除大量 COD_{Cr};其次,第 1 格进水浓度较高,而去除率在一定进水浓度限值内,与其正相关;再者,进水夹带氧气,使得第 1 格内微生物活性水平较高,好氧、厌氧区分层明显,有利于 COD_{Cr}及 TN,TP 等营养物质被吸收。此外,沿程相邻两格进水浓度差值逐渐减小,去除率的差异也逐渐缩小,表明随着污染物负荷的减小,其对去除率的影响减弱。

水流状态下人工湿地第 1,3 格 TN、氨氮去除率较大,是由于随着水流的下渗,水面复氧加剧,使单元格内同时存在明显的好氧、厌氧区域,使得硝化、反硝化过程能同时、快速地进行,从而加大了氮的去除力度。而反硝化过程亦会由于有机碳源的不足而受限。故在保证氧气和碳源供给的情况下,湿地系统沿程能有效发挥脱氮作用。TP 在第 1 格中的去除率达 62.3%,与后续 3 格差异较大,沿程趋势减弱。这是由于湿地系统运行不到一年时间,基质吸附未达到饱和状态,故在第 1 格就取得较大去除率。随着 TP 浓度迅速降低,其后续进水中 TP 浓度及污染负荷较低,故去除率也迅速降低。SS 也是在湿地系统的前端就得到了有效的去除,在最后两格中几乎没有去除行为。

主,随泥沙颗粒在介质中被截留,通过植被吸收、物理化学作用及微生物降解三方面作用去除,其过程受湿地内 pH 值,Al,Fe,Ca 和基质磷本底值等因素的影响^[5,8]。而本试验人工湿地内 pH 值近于中性,又选用 Ca,Fe 较高的石灰石和高炉渣作为湿地基质填料,使磷以不溶性 Ca—P,Fe—P 沉淀为主;当吸附位点饱和后,吸附作用将停止甚至在来水浓度较低时基质会释放磷,基质在某种程度上相当于一个“磷缓冲容器”以调节水中的磷浓度。对于监测期间获得稳定的高去除率,主要为湿地基质如石灰石和高炉渣具有较高的吸附沉淀能力,另外植物根系输氧和水面复氧使湿地系统中存在好氧、厌氧交替的微环境,为微生物过量积累磷提供可能。

SS 的去除率还关系到有机物及氮、磷的去除,因为进水中会有部分有机物及氮、磷黏附在 SS 表面,且随 SS 被过滤、拦截等作用而被截留于湿地系统中,最终被微生物或植物等所利用而去除。与已有的人工湿地处理含重金属污废水的研究相比,Mungur 等^[16]进行了小试规模的人工湿地去除暴雨径流中重金属的研究,结果表明:当进水中的 Pb,Zn,Cu 浓度在 20 mg/L 以下时,该人工湿地能截留 99% 的重金属;另有研究^[13]广东韶关市凡口铅锌采矿废水经湿地系统处理后,Pb,Zn,Cu 的去除率均在 90% 以上,本研究中人工湿地对 Zn 和 Cu 去除率均在 90% 以上,对 Cu 的去除率在 70% 以上,由此可看出,人工湿地作为一种生态处理系统对重金属的净化具有一定优势。

人工湿地对重金属 Pb,Zn,Cu 的去除率趋势沿程减小,第 1 格去除率最大。重金属的主要去除方式有与基质发生吸附等,而且在第 1 格即能取得较大的去除率,表明湿地系统具有较大的重金属去除能力。此外,植被在人工湿地中发挥着重要作用,不仅可以直接摄取和利用污水中的营养物质和有机物,还能提高人工湿地的渗透系数,增强根际微生物活性、溶解性氧含量等,有利于各类微生物在湿地繁殖与扩散,强化人工湿地净化能力,也可延长湿地基质的使用期限。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 任玉芬,王效科,韩冰,等. 城市不同下垫面的降雨径流污染[J]. 生态学报,2005,25(12):3225-3230.
- [4] 边博,朱伟,黄峰,等. 镇江城市降雨径流营养盐污染特征研究[J]. 环境科学,2008,29(1):19-25.
- [5] 赵磊,杨逢乐,王俊松,等. 合流制排水系统降雨径流污染物的特性及来源[J]. 环境科学学报,2008,28(8):1561-1570.
- [6] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. 环境科学,1995,16(3):83-86.
- [7] 梁继东,周启星,孙铁珩. 人工湿地污水处理系统研究及性能改进分析[J]. 生态学杂志,2003,22(2):49-55.
- [8] 于少鹏,王海霞,万忠娟,等. 人工湿地污水处理技术及其在我国发展的现状与前景[J]. 地理科学进展,2004,23(1):22-29.
- [9] 张鸿,吴振斌. 两种人工湿地中氮磷净化率与细菌分布关系的初步研究[J]. 华中师范大学学报:自然科学版,1999,33(4):575-578.
- [10] 蒋玲燕,周琪. 潜流人工湿地降解受污染水体中有机物研究[D]. 上海:同济大学,2007.
- [11] 孙亚兵,冯景伟,田园春,等. 自动增氧型潜流人工湿地处理农村生活污水的研究[J]. 环境科学学报,2006,26(3):404-408.
- [12] 籍国东,孙铁珩,李顺. 人工湿地及其在工业废水处理中的应用[J]. 应用生态学报,2002,13(2):224-228.
- [13] 何丽君,马邕文,万金泉,等. 新型人工湿地对工业区降雨径流的净化研究[J]. 环境科学,2012,33(3):817-824.
- [14] 陈秀荣,周琪. 人工湿地脱氮除磷特性研究[J]. 环境污染与防治,2005,27(7):526-529.
- [15] 钟成华,李杰,邓春光. 人工湿地废水处理中氮、磷去除机理研究[J]. 重庆建筑大学学报,2008,30(4):141-146.
- [16] Mungur A S, Shutes R B E, Revitt D M, et al. An assessment of metal removal by a laboratory scale wetland[J]. Water Science and Technology, 1997,35(5):125-133.