

城区雨水管网径流污染特征研究

陈伟伟¹, 申继先², 卞艳丽¹, 宋静茹¹

(1. 黄河水利科学研究院 水利部黄河泥沙重点实验室, 河南 郑州 450003;

2. 河南省豫北水利工程管理局, 河南 新乡 453002)

摘 要:以新乡市城区屋面作为汇水区域,开展试验对雨水管网中场次降雨径流水文水质过程进行研究,可为有效利用城市雨水、控制非点源污染等提供依据。水质指标包括 SS、COD 和 TN。结果表明:水质指标中 SS、COD 变化趋势基本一致,随着降雨过程的持续浓度逐渐降低并趋于一个稳定值;TN 随着雨量的累积浓度逐渐降低,但在降雨结束前有反弹趋势;指标标准差率呈 SS > COD > TN 的趋势;径流初期屋面冲刷效应明显,初期径流量可定义为前 1~3mm 的降雨量;径流中 SS 与 COD、TN 之间的相关性较好,在控制径流污染时可采取措施同时去除;径流污染物直接通过城区排水管网汇入受纳水体后对其水质影响较大,尤以 SS、COD 的变化最为明显。

关键词:城区降雨径流;管网;径流污染;初期冲刷

中图分类号:X703

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2014)05-0085-04

Research on pollution characteristics of runoff of rain pipeline in urban

CHEN Weiwei¹, SHEN Jixian², BIAN Yanli¹, SONG Jingru¹

(1. Key Laboratory of Yellow River Sediment Research, the Ministry of Water Resources, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 2. Henan Province Yubei Hydraulic Engineering Administrative Bureau, Xinxiang 453002, China)

Abstract: Taking urban roof as the catchment area in Xinxiang City, the paper researched the hydrology and water quality process of each rainfall event so as to provide the basis for effective use of urban rainfall and control of non-point source pollution. The samples includes the contents of SS, COD and TN. The results show that the variation trend of pollutant index SS, COD in runoff is similar and tends to a steady value. the contents gradually decrease and reach a stable value with the duration of rainfall. With the accumulation of rainfall, the change amplitude of TN gradually reduce, but which has a rebound and increase tendency before the end of rain. The standard deviation rate of water quality indicator is in the order of SS > COD > TN. The first flush of roof runoff is clear, and the initial runoff amount is equivalent to former 1~3mm rainfall. The correlation between SS and COD, TN in runoff is good. It shows that the similar measures can be taken to remove them in controlling the runoff pollution. That the runoff pollutants flow into the receiving water body directly through urban drainage pipes has an important effect on its quality. The change of SS and COD is obvious.

Key words: urban runoff; pipe network; runoff pollution; first flush

城区屋面是城市不透水地表类型的重要组成部分,其上所累积的污染物在降雨冲刷下形成屋面径流,成为城市水环境污染的一个主要来源^[1]。20世纪70年代以来,国外相继开展了城市降雨径流污染过程与特征及其对受纳水体水质的影响、不同类型下垫面初期径流冲刷效应等方面的研究^[2-4],探讨了城市降雨径流污染的严重性。我国自20世纪80年代末开始进行城市非点源污染方面的研究,在不

同类型下垫面降雨径流变化过程、雨水径流污染特性和影响因子、初期冲刷效应^[5-9]等方面取得了较大进展。

当前,新乡市城区排水管网长1 519 km,其中污水管730 km,雨水管491 km,雨污合流管298 km,分流制管网是排放降雨径流的主要通道。本研究针对新乡市城区分流制雨水管网降雨径流过程开展试验,研究屋面径流汇入雨水管网后的水质变化特征

收稿日期:2014-05-07; 修回日期:2014-07-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51379085);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(HKY-JBYW-2013-21)

作者简介:陈伟伟(1980-),男,河南宜阳人,硕士,工程师,主要从事水资源与水环境研究。

以及对受纳水体水质的影响,为城市径流污染物控制、非点源污染负荷计算等提供理论支撑。

1 研究方案

1.1 试验监测

试验点设在新乡市某单位办公楼顶,下垫面为沥青 SBS 防水材料。采样区域呈矩形,长 18.05 m,宽 7.50 m,布设雨落管 1 根,天然降雨情况下利用 75L 聚乙烯桶收集雨水径流。利用自动气象站同步获得场次降雨过程线,根据雨量累积数据计算不同时刻降雨强度,其后将单次采样耗时与容器体积所计算的瞬时径流量作为采样起止时刻中值径流量,应用降雨强度、径流强度描述各场次降雨水文水力过程。

监测时间为 2010 年 8 月 4 日、8 月 10 日、8 月 13 日及 2013 年 11 月 8 日,降雨历时 195、225、325 和 450 min,降雨量 4.01、51.79、68.28 和 5.25 mm,平均雨强 0.021、0.23、0.21 和 0.012 mm/min。

利用 500 mL 聚乙烯瓶收集径流水质水样,采集后按照国家环境监测标准方法进行分析,水质指标包括 SS、COD 和 TN,其中 SS 利用固体悬浮物测定仪分析,COD 利用化学需氧量速测仪分析,TN 利用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法分析。一般情况下,采样频率为自产流起的 30 min 内每隔 5 min 采 1 个样;产流后 30~60 min 内,每隔 15 min 采 1 个样;其后每隔 30 min 采 1 个样。

1.2 分析方法

1.2.1 场次平均浓度 计算场次降雨污染物总量与径流总量之比即径流过程中污染物的流量加权平均浓度作为评价径流水质的方法^[8],由式(1)计算:

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^{t_r} C_t Q_t dt}{\int_0^{t_r} Q_t dt} = \frac{\sum C_t Q_t \Delta t}{\sum Q_t \Delta t} \quad (1)$$

式中: EMC 为场次径流污染平均浓度,mg/L; M 为场次径流污染物总量,g; V 为径流总量,m³; t 为时间,min; C_t 为 t 时刻污染物浓度,mg/L; Q_t 为 t 时刻径流流量,m³/min; Δt 为采样间隔时间,min。

1.2.2 标准差率 采用标准差率分析污染物变化幅度^[6],以消除污染物浓度相差较大的影响,由式(2)计算:

$$V = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / \bar{X}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: X_i 为污染物浓度,mg/L; $\bar{X}$ 为浓度均值,

mg/L; n 为样本数; V 为标准差率。

1.2.3 污染物负荷率 分析污染物负荷率与降雨量的关系^[7],由式(3) 计算:

$$l = Y_h / Y \quad (3)$$

式中: Y_h 为降雨量 h 时的污染负荷,g; Y 为场次降雨总污染负荷,g; h 为累积降雨量,mm; l 为污染物负荷率,%。

2 结果与讨论

2.1 雨水管网降雨径流水质特征分析

根据试验结果,各指标变化范围、场次平均浓度和标准差率见表 1。可知,SS 的 EMC 值范围为 11.42~113.49 mg/L,COD 在 21.89~865.31 mg/L 之间,TN 在 12.69~21.53 mg/L 之间。对于 4 场降雨而言,污染物浓度峰值出现时间与降雨强度峰值出现时间基本一致,大体在产流后的 10~15 min 内出现,之后随着降雨过程的持续其浓度逐渐降低。

表 1 径流中水质指标情况 mg/L

日期	项目	SS	COD	TN
08-04	范围	50~511	172.5~2591.4	11.98~38.41
	标准差率	0.82	0.68	0.34
	EMC	113.49	674.29	21.53
08-10	范围	9~40	20.9~98.8	9.4~15.5
	标准差率	0.57	0.45	0.16
	EMC	11.42	27.74	12.69
08-13	范围	15~591	7.6~89.7	10.1~40.72
	标准差率	2.22	0.76	0.43
	EMC	26.22	21.89	13.97
11-08	范围	51~285	623.6~1995.1	13.1~29.65
	标准差率	0.75	0.41	0.24
	EMC	101.57	865.31	14.51

污染物中以 SS、COD 的变化幅度最大,在径流初期浓度下降较快,随后逐渐变缓、降低并趋于一个稳定值;TN 变化幅度较大,随着降雨量的累积逐渐变小,但在降雨结束前有反弹的状态。从各指标标准差率来看,均呈 SS>COD>TN 的趋势,与各自浓度变化过程的指向性基本一致,并以 SS、COD 的标准差率较大,这与二者在试验过程中浓度变化幅度较大的事实相符。

径流中各指标浓度变化特征与污染物累积排放规律关系密切。一般情况下,新乡市城区由秋季到次年春季污染物主要处于累积阶段,夏季降雨频繁主要处于排放阶段。污染物主要来源于降雨对大气的淋洗、雨水径流对屋面沉积物的冲刷以及屋面材

料本身等,主要有 COD、SS、TN、TP、无机盐等污染物。受上述因素影响,水质指标变化情况如上所述。可见,雨水管网降雨径流水质特征与城区位置、下垫面类型、降雨量、降雨强度、降雨时间间隔、管理水平等因素有关,不同场次降雨径流水质指标波动较大。

2.2 雨水管网初期冲刷效应分析

本研究以 SS、COD、TN 作为污染物指标对雨水管网初期冲刷效应进行分析。根据水质指标变化曲线,初期径流中(前 15 ~ 20 min)SS 含量约为 18 ~ 591 mg/L、COD 含量约为 20.3 ~ 2591.4 mg/L、TN 含量约为 14.2 ~ 40.72 mg/L;后期径流中 SS 含量约为 9 ~ 127 mg/L、COD 含量约为 7.6 ~ 1011.5 mg/L、TN 含量约为 9.4 ~ 26.43 mg/L。根据时段内污染指标含量与径流量关系,可知各指标平均浓度

不仅超过了《地表水环境质量标准》(GB3838 - 2002)中 V 类水的要求,同时也超过了目前《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918 - 2002)中排入地表水Ⅲ类、Ⅳ ~ V 水体执行的一级 B 标准。可见,径流初期 SS、COD、TN 的浓度较高,随着降雨过程的持续逐渐降低,呈现出一定的初期冲刷效应。

径流中 SS、COD、TN 负荷率随降雨量的变化过程见图 1 ~ 3。由图 1 ~ 3 可知,降雨初期污染物负荷率增加速率较快,当降雨量达到一定值后,污染物负荷率增加速率降低。一般情况下,当降雨量为 1 ~ 3 mm 时污染物负荷率可达 60% 以上,当降雨量超过 3 mm 时,污染物负荷增加率降低。可见,场次降雨屋面初期径流量可确定为前 1 ~ 3 mm 的降雨量。

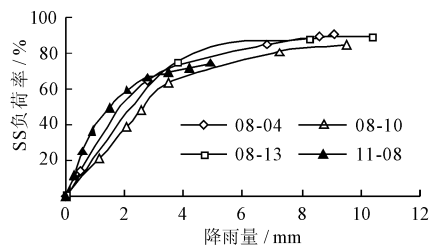


图 1 径流中 SS 负荷率随降雨量的变化

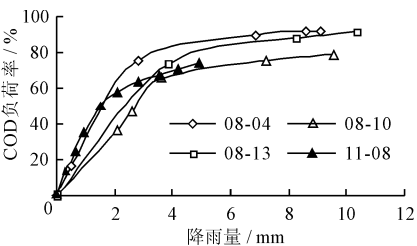


图 2 径流中 COD 负荷率随降雨量的变化

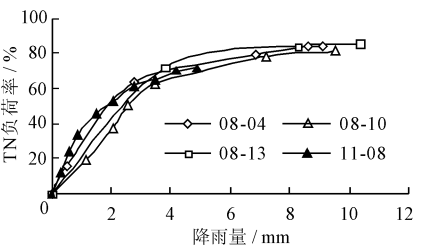


图 3 径流中 TN 负荷率随降雨量的变化

2.3 污染物之间相关性分析

本研究分别以 SS、COD、TN 代表颗粒物、有机物和无机物,分析管网径流中污染物之间的相关关系,见图 4。

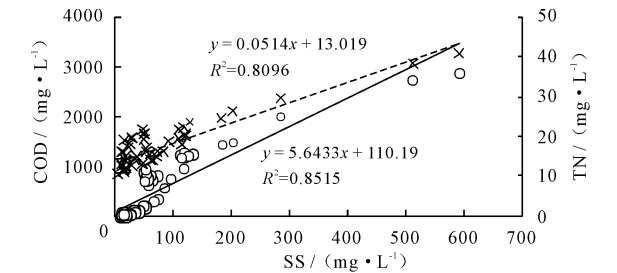


图 4 雨水管网中 COD、TN 与 SS 之间的相关性

结果表明,SS 与 COD、TN 之间表现出较强的相关性(显著水平在 0.1 以上),相关系数分别为 0.92、0.89。究其原因在于该区域大气以降尘为主要特征,场次降雨时间间隔较长,微尘等颗粒物可以获得较大的补充,降雨情况下将其携带的污染物溶解到径流中,致使 COD、TN 的浓度增加。此外,也说明 SS 与 COD、TN 之间的协同性较好,在制定径流污染控制措施时可采用统一手段同时去除。例

如,通过环境卫生清扫、雨水径流截污、沉淀或过滤等措施可有效控制屋面径流中的污染物负荷。

2.4 管网降雨径流污染物对受纳水体水质的影响

试验过程中,屋面降雨径流不加处理直接通过城区分流制管网输送到受纳水体(海河流域支流卫河),对其水质造成影响。分析各场次径流污染物对卫河东干桥断面水质的影响可知,降雨开始后 15 ~ 20 min 内断面流量开始增加,说明管网径流开始进入受纳水体,产流后 3.5 ~ 4 h 内,污染物浓度出现峰值,SS 浓度由雨前的 34 mg/L 升高至 126 mg/L, COD 由 75 mg/L 升高至 247 mg/L, TN 由 2.7 mg/L 升高至 23.1 mg/L,以 SS、COD 的上升幅度最大,降雨结束后 1.5 ~ 2 d 内断面水质基本恢复到雨前状况。根据水质指标变化曲线,水体监测断面浓度峰值出现时间有一定差异,8 月 4 日、8 月 10 日降雨径流以 SS、COD 峰值先出现,间隔约 1.4 ~ 1.8 h 后 TN 峰值出现;8 月 13 日、11 月 8 日断面浓度峰值呈双峰型,第一次峰值出现在产流后的 1.7 ~ 2.5 h,第二次峰值出现在产流后的 4.5 ~ 5 h,同样以 SS、COD 的升高幅度最大。可见,城区屋面非点源污染是一个长期的、动态变化的过程,具有复杂性、随机

性等特征,而有关城市屋面降雨径流冲刷所形成的污染负荷、对受纳水体影响程度、污染控制措施等问题需要采取原型试验、理论分析、模型构建与计算等手段深入研究。

3 结 语

(1)屋面径流水质指标中 SS、COD 变化趋势基本一致,随着降雨过程的持续,浓度逐渐降低并趋于一个稳定值;TN 随着雨量累积浓度逐渐降低,但在降雨结束前有反弹趋势;指标标准差率呈 $SS > COD > TN$ 的趋势,这与其各自浓度变化的指向性一致;

(2)径流初期污染物浓度较高,随之逐渐降低,呈现出一定的初期冲刷效应,屋面初期径流量为前 1~3 mm 的降雨量;

(3)径流中 SS 与 COD、TN 之间的相关性较好,表明在控制径流污染时可采取措施同时去除颗粒物、有机物和无机物;

(4)径流污染物直接通过城区排水管网汇入受纳水体后对其水质影响较大,尤以 SS、COD 的变化最为明显。

参考文献:

- [1] 张 巍. 城市径流有毒污染物的环境行为[M]. 北京:科学技术文献出版社,2014.
- [2] 李立青,尹澄清. 雨、污合流制城区降雨径流污染的迁移转化过程与来源研究[J]. 环境科学,2009,30(2):368-375.
- [3] 陈伟伟,詹小来,曹惠提,等. 城市雨水径流非点源污染研究进展[J]. 节水灌溉,2011(12):50-52.
- [4] 潘安君,张书函,陈 建,等. 城市雨水综合利用技术研究与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.
- [5] 祁赛君,王涌涛. 苏州城市典型汇水面雨水径流初期冲刷规律分析[J]. 环境科技,2011,24(z1):41-43.
- [6] 董 欣,杜鹏飞,李志一,等. 城市降雨屋面、路面径流水文水质特征研究[J]. 环境科学,2008,29(3):607-612.
- [7] 陈伟伟,张会敏,黄福贵,等. 城区屋面雨水径流水文水质特征研究[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(3):86-88.
- [8] 任南琪,冯玉杰,陈 卫,等. 城市水系统污染物转化规律及资源化理论与技术[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [9] Chen J, Adams B J. Urban water control evaluation with analytical probabilistic models[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2005, 131(5):307-315.
- [5] Lawrimore J H, Peterson T C. Pan evaporation in dry and humid regions of the United States[J]. J Hydrometeor, 2000,1(6):543-546.
- [6] Linacre E T. Evaporation trends[J]. Theoretical and Applied Climatology,2004,79:11-21.
- [7] 左洪超,李栋梁,胡隐樵. 近 40a 中国气候变化趋势及其同蒸发皿观测的蒸发量变化的关系[J]. 科学通报,2005,50(11):1125-1130.
- [8] 任国玉,郭 军. 中国水面蒸发量的变化[J]. 自然资源学报,2006,21(1):31-44.
- [9] 安月改,李元华. 河北省近 50 年蒸发量气候变化特征[J]. 干旱区资源与环境,2005,19(4):159-162.
- [10] 邱新法,刘昌明,曾 燕. 黄河流域近 40 年蒸发皿蒸发量的气候变化特征[J]. 自然资源学报,2003,18(4):437-442.
- [11] 杨建平,丁永健,陈仁升. 近 40a 中国北方降水量与蒸发量变化[J]. 干旱区资源与环境,2003,17(2):6-11.
- [12] 洪嘉琰,傅国斌. 一种新的水面蒸发计算方法[J]. 地理研究,1993,12(2):55-62.
- [13] 裴步祥,邹耀芳. 利用小型蒸发器观测水面蒸发量的几个问题[J]. 气象,1989,15(6):48-51+45.
- [14] 濮培民. 水面蒸发与散热系数公式研究[J]. 湖泊科学,1994,6(1):1-12.
- [15] 施成熙,卡毓明,朱晓原. 确定水面蒸发模型[J]. 地理科学,1984,4(1):1-11.
- [16] 洪嘉琰. 水面蒸发试验研究[M]. 北京:气象出版社,1991.
- [17] 姜海波,侍克斌,李玉建. 库盘大面积土工膜防渗体的渗漏估算[J]. 水利水运工程学报,2010(4):58-61.
- [18] 胡安焱,董新光. 南疆水面蒸发量研究[J]. 干旱区资源与环境,2006,20(4):22-24.
- [19] 张国威,周聿超. 新疆内陆干旱区蒸发的计算和分析[J]. 水科学进展,1992,3(3):226-232.
- [20] 胡安焱,郭西万. 新疆平原地区水面蒸发量预测模型研究[J]. 水文,2006,26(1):24-27+41.
- [21] 孙晓娟. 气候变化对阿克苏河流域径流量及平原水库的影响[D]. 阿克苏:塔里木大学,2010.