

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.21.019

# 基于人工降雨的北方城市道路径流污染特征研究

李曼<sup>1</sup>, 曲直<sup>1</sup>, 刘佩勇<sup>2</sup>, 李皓翔<sup>3</sup>, 赵轩<sup>1</sup>, 杜家慧<sup>1</sup>, 薛祥山<sup>1</sup>

(1. 北京清控人居环境研究院有限公司, 北京 100083; 2. 深圳华控赛格股份有限公司 北京分公司, 北京 100081; 3. 中建三局集团有限公司, 北京 100097)

**摘要:** 为了解迁安市典型道路下垫面的径流污染特征,通过人工降雨试验手段分别监测1、2、3年一遇重现期条件下的道路径流污染情况,并对径流中SS、NH<sub>3</sub>-N、TN、COD及TP的排放特征,单次降雨径流平均浓度(EMC)及相关性进行分析。结果表明,各项径流污染物浓度在设计降雨量为4~5 mm时达到峰值,此后浓度逐渐降低,并于10~15 mm时趋于平稳,前15 mm降雨是迁安市降雨径流污染的最佳控制阶段。道路径流中SS、NH<sub>3</sub>-N、TN、COD及TP的EMC值分别为36~39、0.47~0.61、4.71~9.51、43~54、0.18~0.23 mg/L,其中COD及TN浓度超过了《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的V类标准限值,是路面径流的主要污染物;SS浓度与其他4个指标浓度均可呈现良好的正相关关系,以SS作为迁安道路下垫面典型径流污染指标,分析得出径流SS控制率与设计降雨量的关系,可为基于水环境污染控制目的的道路海绵城市建设过程中设计降雨量的确定提供参考。

**关键词:** 道路径流污染; 面源污染控制; 人工降雨试验; 海绵城市

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)21-0110-05

## Characteristics of Urban Road Runoff Pollution in Northern City Based on Artificial Rainfall Test

LI Man<sup>1</sup>, QU Zhi<sup>1</sup>, LIU Pei-yong<sup>2</sup>, LI Hao-xiang<sup>3</sup>, ZHAO Xuan<sup>1</sup>, DU Jia-hui<sup>1</sup>, XUE Xiang-shan<sup>1</sup>

(1. Tsinghua Holdings Human Settlements Environment Institute, Beijing 100083, China; 2. Beijing Branch, Shenzhen Huakong Seg Co. Ltd., Beijing 100081, China; 3. China Construction Third Engineering Bureau Co. Ltd., Beijing 100097, China)

**Abstract:** In order to understand the characteristics of typical urban road underlying surface runoff pollution in Qian'an City, the road runoff pollution with return period of 1, 2 and 3 years was monitored by artificial rainfall test, and discharge characteristics, event mean concentration (EMC) and correlation of SS, NH<sub>3</sub>-N, TN, COD and TP in runoff were analyzed. Concentration of various runoff pollutants peaked when the designed rainfall was 4-5 mm. After that, the concentration gradually decreased and stabilized when the rainfall was 10-15 mm, indicating that the first 15 mm rainfall was the best stage for runoff pollution treatment in Qian'an City. EMCs of SS, NH<sub>3</sub>-N, TN, COD and TP in the road runoff were 36-39 mg/L, 0.47-0.61 mg/L, 4.71-9.51 mg/L, 43-54 mg/L and 0.18-0.23 mg/L, respectively. Among them, the concentrations of COD and TN exceeded the class V standard limitation

specified in *Environmental Quality Standards for Surface Water*(GB 3838-2002), which were the main road runoff pollutants. The concentration of SS had a good positive correlation with the concentrations of  $\text{NH}_3\text{-N}$ , TN, COD and TP. Based on this, SS was selected to be the typical road runoff pollutant in Qian'an City, and the relationship between control ratio of SS in runoff and designed rainfall was analyzed. The results could provide reference for the determination of designed rainfall in the process of road sponge city construction based on water environment pollution control.

**Key words:** road runoff pollution; non-point source pollution control; artificial rainfall test; sponge city

径流污染是在降雨径流与地表污染物的相互作用下形成的,具有分布面广、产生量大、突发性强的特点。降雨过程中,大量污染物由地表径流排入水体,已成为城市水环境恶化的重要原因之一<sup>[1-3]</sup>。城市径流污染控制是海绵城市建设的关键指标之一。源头通过“渗、滞、蓄、净、用、排”等海绵措施的综合搭配,可从地表径流污染物产生初期对其进行截留净化处理。受城市发展程度、区域环境特征等多因素影响,不同区域径流污染物的排放特征有所不同<sup>[4]</sup>。降雨径流量水质实测数据是城市道路径流污染规律研究与控制的基础。笔者以迁安市海绵城市试点区典型城市道路下垫面为例,在自然降雨条件难以捕捉的情况下,利用人工手段,通过智能人工模拟降雨试验系统,充分采集降雨过程中径流量水质实测数据,分析掌握典型城市道路下垫面降雨径流污染特征及污染物之间的相关性,并研究得出典型径流污染物控制率与年径流总量控制率之间的关系。通过此方式,科学认识和有效控制城市雨水径流所带来的面源污染,为迁安市海绵城市建设过程中径流污染的控制和水环境质量的改善提供数据基础和有效指导。

## 1 研究区域与方法

### 1.1 区域概况

迁安属于唐山市,位于河北省东北部,地处燕山南麓,滦河岸边,属北方半山区县级市。根据1984年—2014年降雨量数据统计分析,迁安市多年平均降雨量为639.7 mm,具有雨热同期、雨季分明、雨量集中的气候特点。迁安降水年际变化和年内分配不均,降雨多集中于6月—9月,占全年降水量的80%以上,其中,又以7、8月份最为集中,由此导致迁安夏季多出现暴雨或连阴雨,易造成水灾。

### 1.2 人工降雨试验方法

采用智能人工模拟降雨试验系统,对迁安市典

型道路下垫面实施不同重现期(1、2、3年一遇)降雨条件下历时2 h人工模拟降雨试验,以实时获取径流量及水质数据,为迁安市海绵城市建设过程中径流污染物控制与年径流总量控制关系的研究提供数据支撑。选择旱季(2018年4月)开展人工降雨试验,试验开展前1个月内无降雨事件发生,而且道路清扫频率(1~2次/d)保持不变。

### 1.3 测试指标和方法

将人工降雨设备运送至试验道路位置,结合现场地形地势,利用道路旁侧现状雨水算子作为试验区雨水汇流取样点,在出流口布设流量计以实时获取流量数据,并于产流后第1、3、6、10、15、20、30、40、60、90、120分钟至径流结束,在出水口人工采集水样,按照国家相关标准对样品进行保存和检测,检测指标包括SS(重量法)、 $\text{NH}_3\text{-N}$ (纳氏试剂分光光度法)、TN(碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法)、COD(重铬酸钾法)、TP(钼酸铵分光光度法)。

采用美国EPA提出的单次降雨径流平均浓度(EMC)作为人工降雨试验径流水质的评价标准<sup>[4]</sup>。EMC指单次完整径流过程中径流污染物的流量加权平均浓度,通过EMC可对每一场降雨径流的污染状况进行计算和全面评价。一次径流的持续时间为 $t_r$ ,那么EMC可表达为:

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

式中: $M$ 为整个径流过程中污染物的量,g; $V$ 为径流总量, $\text{m}^3$ ; $t$ 为时间,min; $C_t$ 为 $t$ 时刻的污染物浓度, $\text{mg/L}$ ; $Q_t$ 为 $t$ 时刻的径流流量, $\text{m}^3/\text{min}$ ; $\Delta t$ 为采样间隔时间,min。

## 2 结果与讨论

### 2.1 降雨径流产生规律

不同降雨重现期条件下典型道路下垫面径流的产生情况见图1。可以看出,在不同降雨条件下,道

路下垫面径流量均随着降雨量的增加而增加,且变化趋势较为一致。径流的产生滞后于降雨过程,滞后时间为3~9 min。随着降雨强度的增加,地表产流速度加快,滞后时间逐渐缩短。经计算,道路下垫面径流系数为0.84~0.87,与经验值一致。

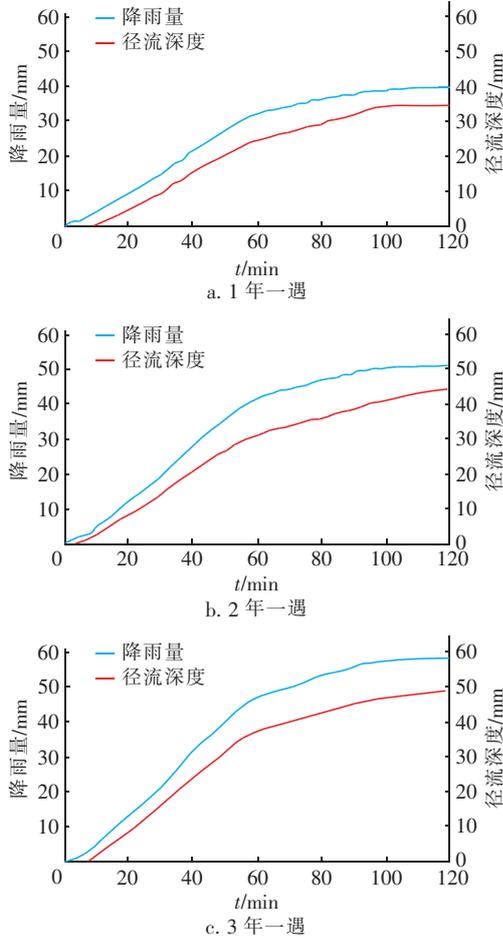


图1 人工降雨过程中设计降雨量与径流深度变化规律

Fig. 1 Variation of design rainfall and runoff depth

## 2.2 降雨径流污染特征

### 2.2.1 径流污染瞬时浓度变化规律

选取SS、NH<sub>3</sub>-N、TN、COD及TP指标对道路降雨径流水质变化情况进行分析评估,结果见图2。可知,5个污染物指标的瞬时浓度均随着降雨事件的发生呈现先升高后降低的趋势。在降雨初始阶段,大量沉积在路面的污染物质受雨水冲刷作用影响释放至水体中并随径流排放。在降雨量达到4~5 mm时,径流污染物浓度逐渐达到峰值。此后,随着降雨过程持续,径流污染物浓度逐渐降低,并于降雨量达到10~15 mm基本呈现较为平稳的低浓度状态。后续随着降雨量持续增加,径流中污染物浓

度基本不产生较大变化。由此可知,为了有效控制城市道路面源污染物的排放,应优先对污染物浓度高、变化较为显著的前15 mm降雨进行有效控制。

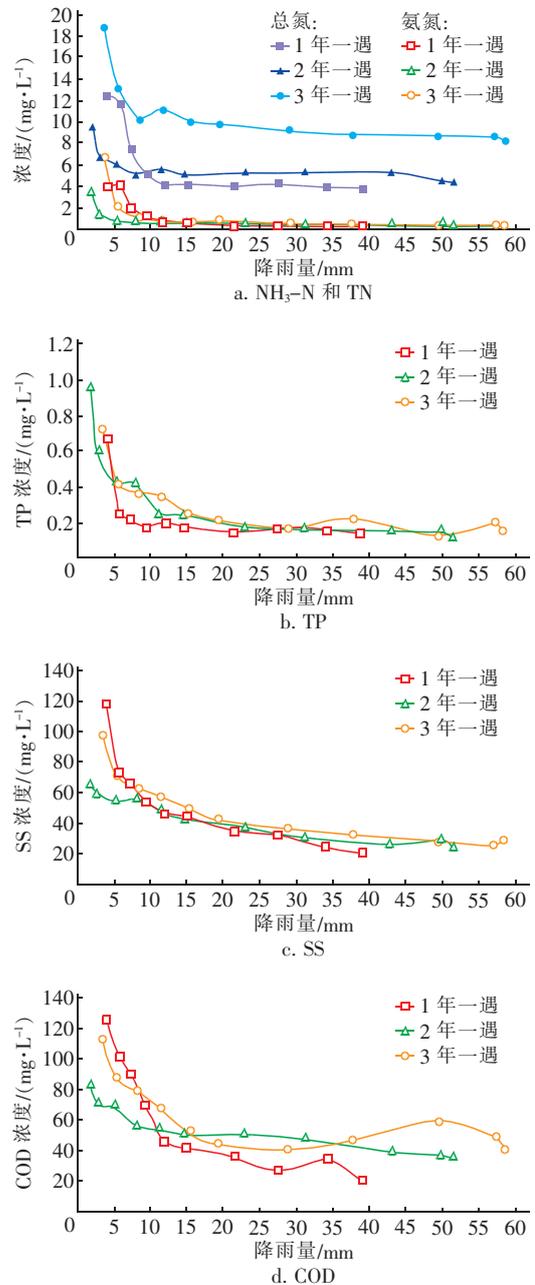


图2 径流污染物浓度与降雨量的关系

Fig. 2 Relationship between runoff pollutants concentration and cumulative rainfall

### 2.2.2 径流污染平均浓度(EMC)

不同降雨条件下道路下垫面径流污染物实测浓度及EMC值如表1所示。可知,不同降雨条件下同一污染指标的EMC值存在一定差异。将各污染指标的EMC均值与《地表水环境质量标准》比较,发

现 COD 和 TN 污染浓度超过了地表水 V 类标准限值,且 TN 超标程度较为严重,因此,在道路海绵城市建设过程中应加强对这两种污染物的控制。

表 1 不同降雨条件下道路下垫面径流污染物实测浓度和 EMC 值

Tab. 1 Concentration and EMC of road runoff pollutants under different rainfall conditions  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目		1 年一遇 2 h	2 年一遇 2 h	3 年一遇 2 h
SS	实测浓度	20 ~ 117	24 ~ 66	25 ~ 97
	EMC	38	36	39
氨氮	实测浓度	0.13 ~ 3.99	0.20 ~ 3.35	0.21 ~ 6.59
	EMC	0.59	0.47	0.61
TN	实测浓度	3.76 ~ 12.30	4.24 ~ 9.27	8.14 ~ 18.70
	EMC	4.71	5.12	9.51
COD	实测浓度	20 ~ 124	28 ~ 82	41 ~ 111
	EMC	43	47	54
TP	实测浓度	0.14 ~ 0.68	0.10 ~ 0.96	0.13 ~ 0.72
	EMC	0.18	0.22	0.23

### 2.2.3 径流污染物相关性分析

对道路降雨径流中 SS、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TN、COD 及 TP 这 5 个污染指标进行相关性分析,发现 SS 浓度与  $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TN、COD、TP 等指标浓度均呈现较好的线性关系,如图 3 所示。基于此,可选择 SS 作为迁安市道路下垫面典型径流污染指标,其他指标可通过换算成 SS 污染指标的方式进行合理管控。此方式通过多设计目标融合的方式,进一步简化了迁安市海绵城市建设过程中道路径流污染控制设施的设计过程,便于后续落地实施。

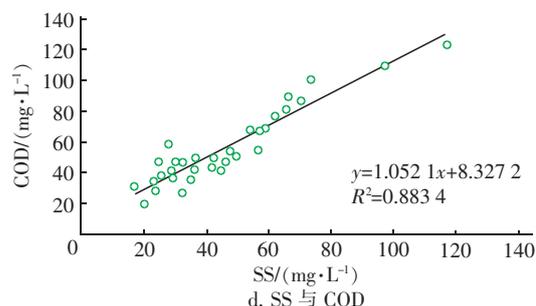
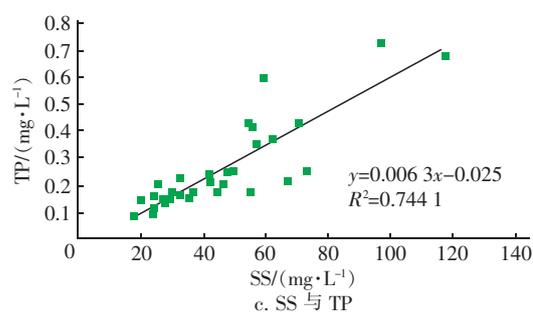
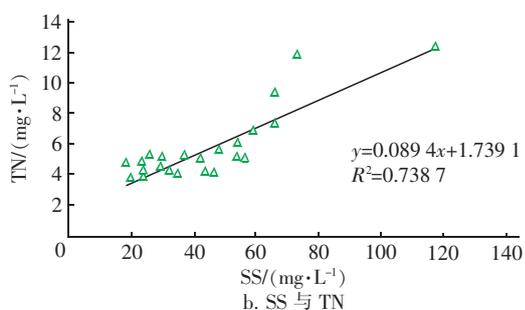
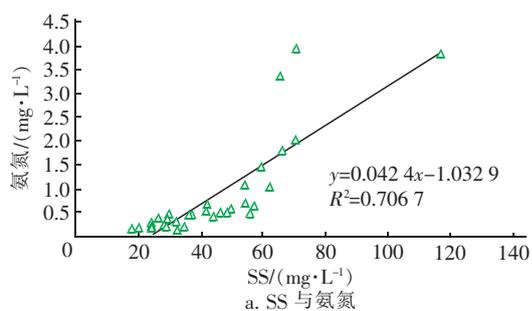


图 3 道路下垫面径流污染物的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis of road runoff pollutants

### 2.3 径流污染控制与径流总量控制关系

根据海绵城市建设理念,海绵设施从降雨开始便正式运行,并对降雨径流及其中携带的污染物进行滞蓄、净化处理,超出控制规模的地表径流可通过溢流的形式外排进入管网,即默认从降雨初期开始控制径流污染物的排放。

由前文分析可知,降雨初期径流污染物浓度较高,而后逐渐降低并最终趋于稳定。因此,对污染物浓度较高的初期降雨进行有效控制有利于径流污染控制目标的实现。基于此,自降雨事件发生开始计算径流污染物的累积产生量,并计算随着降雨事件的持续、降雨量的不断增加,径流污染物累积产生量占单场降雨总产生量的比例,视为可通过海绵设施在降雨初期进行控制的径流污染物占总污染物排放量的比例,即径流污染物的控制率。

选择 SS 作为迁安道路下垫面典型径流污染物指标,并通过以上方式,分析得出径流污染物控制率与设计降雨量的对应关系,见图 4。经拟合分析,SS 控制率与设计降雨量具有较好的对数关系,关系式为:  $y = 0.3374 \ln x - 0.4537$ ,  $R^2 = 0.9121$ 。降雨初期,SS 控制率随设计降雨量的增加而显著提高,这是由于初期降雨径流 SS 浓度较高,通过海绵设施控制较小的降雨量即可实现较高的污染物控制效果,此阶段是径流污染物的最佳有效控制期。后续随着

降雨量的增加,径流SS浓度逐渐降低,此阶段SS控制率虽然依旧随设计降雨量的增加而提高,但提高趋势渐缓,由此导致增加同样的海绵设施设计规模仅可实现较小的SS控制率提升。对于迁安市来说,控制20mm的降雨量即可实现50%以上的道路径流SS控制率,对应的年径流总量控制率为65%。

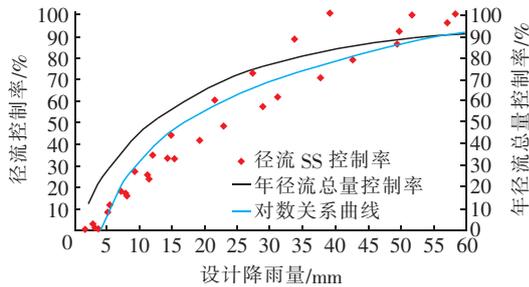


图4 径流SS控制率、年径流总量控制率与设计降雨量的关系

Fig.4 Relationship among runoff pollutant control ratio of SS, capture ratio of annual rainfall and cumulative rainfall

### 3 结论

① 迁安市典型道路下垫面径流污染物SS、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、COD及TP的瞬时浓度均随降雨事件的发生呈现先升高后降低的趋势,受降雨冲刷作用的影响,初期4~5mm降雨对应的径流污染物浓度最高,而后径流污染物浓度逐渐降低,并于10~15mm降雨发生后趋于稳定。

② 分析计算2h人工降雨试验过程中迁安市道路径流SS、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、COD及TP的EMC值,其中,COD、TN的EMC值分别为43~54、4.71~9.51mg/L,超过了国家地表水V类水质标准限值,是迁安市路面径流的主要污染物。

③ 迁安市道路径流SS浓度与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、COD、TP等指标浓度均呈良好的线性关系;以SS作为典型径流污染指标,得出SS控制率与设计降雨量的关系: $y = 0.3374 \ln x - 0.4537$  ( $R^2 = 0.9121$ )。迁安市以径流污染控制、水环境改善为目标的道路海绵建设过程中,可通过此方式确定适宜的设计降雨量及年径流总量控制率,实现多目标融合。

### 参考文献:

- [1] 张千千,李向全,王效科,等. 城市路面降雨径流污染特征及源解析的研究进展[J]. 生态环境学报,2014,23(2):352-358.

Zhang Qianqian, Li Xiangquan, Wang Xiaoke, et al. Research advance in the characterization and source apportionment of pollutants in urban roadway runoff[J]. Ecology and Environment Sciences, 2014, 23(2): 352-358(in Chinese).

- [2] 吴亚刚,陈莹,陈望,等. 西安市某文教区典型下垫面径流污染特征[J]. 中国环境科学,2018,38(8):3104-3112.

Wu Yagang, Chen Ying, Chen Wang, et al. Characteristics of runoff pollution of different underlying surfaces in typical cultural and educational area of Xi'an[J]. China Environmental Science, 2018, 38(8): 3104-3112(in Chinese).

- [3] 武俊良,任玉芬,王雪梅,等. 城市道路径流的排污特征[J]. 环境科学,2015,36(10):3691-3696.

Wu Junliang, Ren Yufen, Wang Xuemei, et al. Characterization of pollutant wash-off in the urban stormwater[J]. Environmental Science, 2015, 36(10): 3691-3696(in Chinese).

- [4] 张琼华,王倩,王晓昌,等. 典型城市道路雨水径流污染解析和利用标准探讨[J]. 环境工程学报,2016,10(7):3451-3456.

Zhang Qionghua, Wang Qian, Wang Xiaochang, et al. Discussion on road runoff pollution and its utilization standard in typical cities[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(7): 3451-3456(in Chinese).



作者简介:李曼(1990-),女,天津人,硕士,工程师,主要研究方向为海绵城市规划及河道水环境治理。

E-mail:1065719359@qq.com

收稿日期:2019-08-05