

城市高架公路雨水径流的污染特征

聂发辉¹, 向速林¹, 王全金¹, 王彪²

1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092

摘要: 对上海市内环高架一段路面的 7 场降雨径流进行监测, 分析了径流中固体悬浮物和营养盐的变化特征, 以期加深对城市高架公路径流污染物的认识和为高架公路径流净化工艺的选择提供理论支持。结果表明: 溶解态氮、颗粒态磷是径流中 TN 和 TP 的主要输出形式; TP 质量浓度变化与 TSS 基本一致, 但 TN 质量浓度变化与 TSS 相关关系较弱; 通过分析不同粒径固体悬浮物与污染物的相关性, 发现 $<45\ \mu\text{m}$ 固体悬浮物是径流中营养盐吸附的重要载体, 去除细小固体悬浮物是治理城市高架径流污染的有效途径。

关键词: 公路雨水径流; 颗粒态营养物; 颗粒粒径分布

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2012) 05-0924-05

城市公路径流含有相当数量的悬浮颗粒物、营养盐、重金属和有机污染物^[1]。公路径流是城市面源污染的重要组成部分, 公路表面尤其是交通活动频繁的城市高架道路表面, 能够通过汽车尾气排放、大气沉降等累积大量的污染物。有研究表明, 城市公路径流贡献了总污染负荷中 50% 的悬浮固体、30% 氮和磷, 其中 N、P 以及重金属形态可分为溶解态($<0.45\ \mu\text{m}$)和颗粒态($>45\ \mu\text{m}$)两种, 溶解态污染物具有较强的生物可给性, 易被水生生物所吸收^[2]。由于城市道路的高度不透水性, 这些污染物, 特别是氮和磷, 在降雨期间会被道路表面产生的雨水径流溶解、冲刷并通过城市排水管网迁移进入水体, 易引发水体富营养化和水生生态系统破坏等^[3]。掌握城市公路地表径流中营养盐的污染特征是对其进行有效控制与治理的前提。

美国、日本、法国等发达国家对城市公路径流中营养盐的污染物特性的研究已有逾 30 a 的历史, 并取得了大量的研究成果。其研究重点主要集中在污染物在径流中的累积、排放和运移规律的模拟^[4]、径流中固体颗粒物粒径分布(PSD)^[5]以及污染物在径流中固液相的分配特征^[6]等方面。这些都为雨水径流控制措施的设计和和实施提供了必要的数据和指导。我国对城市高架雨水径流的研究相对开展较少, 系统研究更是缺乏^[7], 而且大多没有考虑地表径流中污染物的赋存状态及其在颗粒物上的分布特征。由于城市高架路面雨水径流污染受到本地的气候条件, 地理环境以及道路维护和使用状况等多种因素的影响, 国外获得的资料和认识很难应用于本地, 其研究成果对我国的应用还只能作为参考。为此, 本文以上海市城市内环高架一处公路地表径

流中的悬浮颗粒物以及 N、P 为主要研究对象, 对高架路面径流水质进行了监测, 确定径流中悬浮颗粒物粒径分布(PSD)、变化规律及主要输出形态, 以期控制城市水体污染、改善城市水环境质量, 提供基础数据和科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点

选择上海城区中山北二路某路段排水口作为采样监测点。该道路为城市内环高架路, 水泥沥青路面, 双向四车道, 路面雨水径流经道路一侧的落水管排入地面雨水管接口, 对应汇水面积约 $300\ \text{m}^2$, 日均交通量约 $30\ 000\ \text{辆}\cdot\text{d}^{-1}$ 。同时在距采样点约 500 m 处设置自计雨量计采集降雨数据。

1.2 采样与监测

在降雨-径流发生期间, 用聚乙烯瓶在落水管口采集瞬时径流水样, 并在落水管地面排水口监测路面径流流量变化, 采样间隔 5~30 min, 视降雨历时和径流流量而定。径流流量的测量采用的是容积法。本研究共监测了 7 场降雨, 各场次降雨特征如表 1 所示。样品采集后, 贴上标签, 编好号码, 并且记录采样地点、日期、采样起止时间等, 并对样品进行预处理, 以备实验分析。

1.3 样品分析

径流样品的保存和水质参数的测定均依照标准方法进行^[8], 分析项目包括总氮(TN), 可溶性总氮(DN), 总磷(TP), 可溶性总磷(DP), 悬浮物(TSS)和颗粒物粒径分布(PSD)。

2 结果与分析

2.1 公路径流污染指标分析

同一区域不同降雨事件, 污染物质量浓度差别

基金项目: 国家自然科学基金(51148006; 06dz05808; 51169006); 江西省自然科学基金(2009GZH0023); 江西省教育厅青年科学基金(GJJ11108)

作者简介: 聂发辉(1977年生), 男, 副教授, 博士, 主要从事城市面源污染控制方面的研究。E-mail: wyynfh@yahoo.com.cn

收稿日期: 2012-02-18

表1 7场降雨事件主要特征

Table 1 Characterization of seven rainfall-runoff events

序号	降雨量/ mm	降雨历时/ min	平均降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	前期晴天/ h	前次降雨量/ mm
1	19.9	72	16.6	31	2.2
2	38	100	22.8	106	4.3
3	58.5	155	22.7	73	12.6
4	6.7	25	16.1	195	10.2
5	22.9	45	30.5	248	15.6
6	3.7	33	6.7	220	64.6
7	5.3	72	4.4	85	5.8

很大，而且随降雨过程持续变化。与径流过程污染物质量浓度的变化相比，接纳水体对径流污染物输入的反应相对较慢，因此通常使用次径流平均质量浓度(EMC)来表征雨水径流对接纳水体的影响^[9]。

次径流平均质量浓度 EMC(Event Mean Concentration)^[10]被定义为一场降雨径流事件期间释放的污染物总量(M)与径流排放总量(V)之间的商，常用于不同降雨径流事件之间污染水平的比较，其经典的数学表达式为：

$$EMC = \bar{C} = \frac{M}{V} = \frac{\int C(t)Q(t)}{\int Q(t)} = \frac{\sum C(t)Q(t)}{\sum Q(t)}$$

式中： $C(t)$ 、 $Q(t)$ —分别表示一次径流期间测得的随时间变化的质量浓度和流量； M —污染物的质量； V —径流体积。

上海城市公路雨水径流的主要污染物多次监测的 EMC 的值及相关统计结果如表 2 所示。结果表明，上海公路径流中 TSS 的算术平均值和 EMC 值不仅大大超过《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的三级标准，而且实际上甚至高于城市典型生活污水的质量浓度值，污染相当严重；TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的 EMC 范围分别为 4.14~13.82 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 2.53~6.18 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，基本低于污

表2 不同降雨事件各污染物的事件平均质量浓度值

Table 2 Mean concentration of different rainfall-runoff events

降雨 事件	EMC							
	$\rho(\text{TN})$	$\rho(\text{DN})$	$\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$	$\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$	$\rho(\text{NO}_2^-\text{-N})$	$\rho(\text{TP})$	$\rho(\text{PP})$	$\rho(\text{TSS})$
1	8.52	7.69	4.32	2.88	0.57	0.66	0.56	152
2	4.14	3.46	2.48	1.04	0.61	0.43	0.49	172
3	4.79	4.40	2.53	1.25	0.49	0.37	0.33	117
4	9.89	8.35	5.80	2.68	0.72	0.92	0.75	336
5	5.86	5.41	3.15	1.78	0.34	0.48	0.41	327
6	13.82	12.05	6.18	3.59	0.65	1.06	0.84	449
7	5.58	4.95	2.60	1.85	0.46	0.48	0.39	297
平均值	7.51	6.62	3.87	2.15	0.55	0.63	0.54	264
变差 系数	0.46	0.49	0.41	0.43	0.23	0.42	0.36	0.46

水综合排放标准，但远远超过地表水 V 类标准，其中溶解态氮(DN)是路面径流 TN 的主要输出形式；TP 的 EMC 值和算术平均值均超出地表水环境标准 V 类标准($\leq 0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)，TP 则主要以颗粒态磷(PP)的形式存在；与美国洛杉矶市区的公路径流水质调查结果^[11]比较，上海城市高架地表径流主要污染物质量浓度高出其近一倍；其中 TSS 和 TN 质量浓度之高更是突出。这说明交通流量高度密集的上海市中心城区内环高架路面污染状况较严重。此外，因为上海市的年均降雨量高达 1 200 mm 左右，雨水径流造成的污染较降雨量较小的地区更为严重。一般认为，年均降水量与径流污染物质量浓度呈负相关，但上海的实际情况并非完全如此，由于路面污染状况严重，且 90% 以上的降雨事件属于小型降雨，大部分污染物负荷可由出现频率较大的小降雨事件输出，因此，上海的地面径流在很高的年均降雨量与径流量情况下，仍然保持在很高的事件平均质量浓度。

2.2 径流中营养盐的输出形态及相关关系分析

上海市城市7次高架雨水径流中颗粒态氮(PN)和颗粒态磷(PP)平均值占总氮、总磷平均值的百分数见图1。径流中颗粒态磷占总磷的百分数范围为

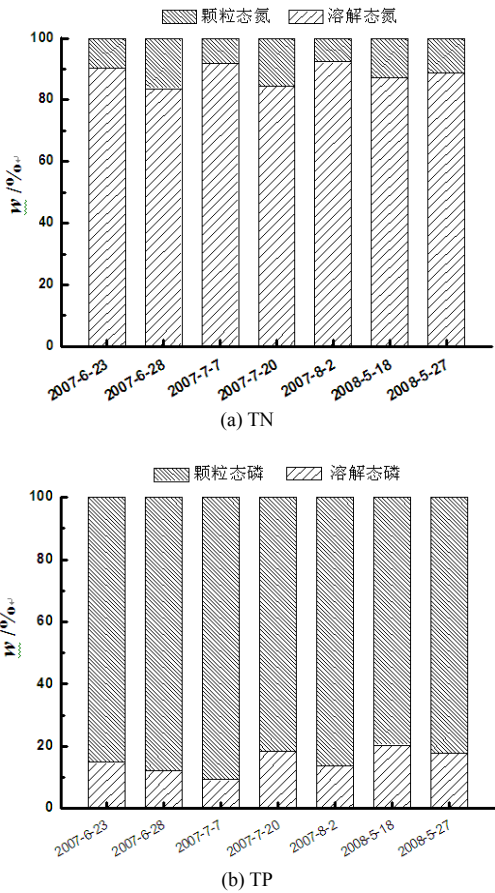


图1 雨水径流中氮、磷在固液相上的分配情况
Fig.1 Distribution characterization of TN and TP in storm runoff between solid and liquid phase

80.3%~88.6%，说明径流中主要以颗粒态磷为主。而溶解态氮(DN)是城市高架路面径流TN的主要输出形式，如图1a所示，溶解态氮占总氮的百分数范围为约为83.6%~92.8%。

地表径流中氮在降雨以及形成产流的过程中，由于整个环境的变化和有机质的矿化作用，使得氮的形态发生较大变化。径流中氮主要源于大气的干湿沉降、化肥的施用、物质的腐烂、机动车的排放、宠物的粪便^[12]。由于城市高架受地面干扰较小，大气干湿沉降是营养盐氮的主要来源。张修峰的研究表明^[13]，上海地区天然雨水中氮的质量浓度较高，1998—2003年的天然降雨中TN平均质量浓度为 $4.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，其中硝态氮和氨氮的质量浓度分别为 2.59 和 $2.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。由此可知，天然雨水中氮的含量在高架公路径流污染物中所占权重较大，径流中总氮、硝态氮和氨氮接近雨水本身质量浓度，这说明氮主要来自湿沉降，并非路面径流中的主要污染物。径流中磷较多的吸附于颗粒物上，当SS的负荷增大时，磷的负荷也随之增大。因此，机动车辆的排放物、大气的干湿沉降可能为TP的主要来源，当降雨发生时，由于降雨的溶解和冲刷等作用将前期累积于路面的颗粒态磷载入雨水径流之中带来污染。因此，TP的质量浓度与路面状况以及路面所承担的交通密度有关。

公路路面径流中的TSS与许多污染物间具有良好的线性相关性。分析径流中固体物质与污染物的相关性，有助于进一步弄清污染物在径流中的赋存状态，有效地预测颗粒态污染物的质量浓度，从而促进城市公路路面径流污染的治理，为开发合理的径流控制措施提供依据。因此，本研究对7场降雨事件中收集的所有水质样品中TN、TP质量浓度进行了分析测定，并分析了它们与TSS之间的相关性(图2)。

如图2所示，TP与TSS之间也表现出了良好的相关性，反映了径流中颗粒态的磷所占的比重较

大；TN与TSS的相关性较差，相关系数 R^2 只有0.221，进一步说明氮在公路径流中主要以溶解态的形式存在。

2.3 营养盐在颗粒物上的分布特征

污染物形态与颗粒物有着密切的关系。污染物分布状态的调查研究，对制定城市高架路面径流污染控制措施具有重要意义。颗粒物除本身会影响水体透明度和危害水生生物外，其表面还能吸附其它污染物如有机物、N、P等，从而成为污染物质的载体^[14]，因而在非点源污染研究中常常受到特别地关注。较大的比表面积使得悬浮固体成为了污染物的分配和运移的载体以及它们最后的汇。由于污染物在不同粒径的颗粒物上质量浓度分布不同，弄清颗粒物粒径分布在径流过程中的变化情况有助于更好地理解污染物质量浓度的变化过程。对其中一场降雨采集到的7个瞬时样品进行颗粒粒径分析(PSD)，得到不同的颗粒粒径分布，如图3所示。在绝大多数样品中，占最大质量比例的部分是粒径小于 $45 \mu\text{m}$ 的细颗粒，即不易被沉淀去除的部分。随着TSS质量浓度的升高，细颗粒($<45 \mu\text{m}$)所占的比重会下降，而粗颗粒($>250 \mu\text{m}$)所占的比重则会升高。然而对大多数样品来说，细颗粒($<45 \mu\text{m}$)所占比重均接近或超过50%， $250 \mu\text{m}$ 以上的部分所占比例非常小。Furumai等^[1]的研究也表明公路雨水径流中大部分固体颗粒物粒径小于 $45 \mu\text{m}$ ，机械清扫只能减少 $250 \mu\text{m}$ 的颗粒数量，因而仅靠机械清扫减少径流污染是不够的。传统的以减少径流中颗粒物含量为主要去除机理的雨水污染控制方法(譬如沉淀，过滤和混凝等)对控制总磷污染比较有效，但对总氮的削减作用有限。

地表径流氮和磷的组分与径流中的固体物质显著相关，尤其与固体悬浮物和小颗粒的质量浓度密切相关^[15]。为了进一步明确氮、磷与不同粒径颗粒物之间的关系，分析了随降雨历时变化污染物与4个颗粒粒径段及固体悬浮物的相关性，其中污染

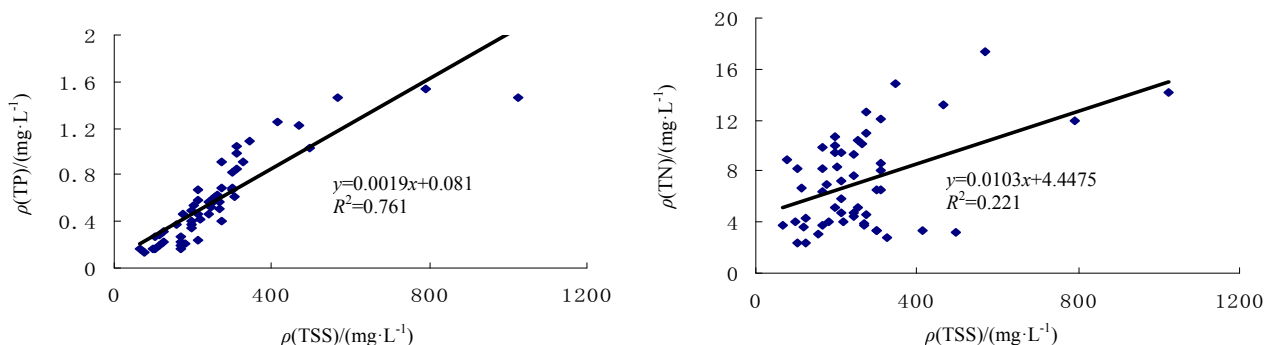


图2 TN、TP与TSS之间的相关关系

Fig.2 Correlation analysis Among TN, TP and TSS

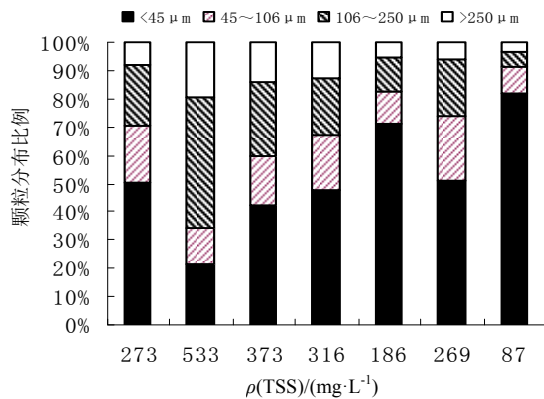


图3 径流中不同质量浓度 TSS 瞬时样中颗粒粒分布
Fig.3 Particle size distribution of different concentration TSS in sampling on Spot

物质量浓度和不同粒径级试验数据服从正态分布，利用 SPSS 软件计算了径流中污染物与颗粒不同粒径之间的 Pearson 相关系数(表 3)。TSS 质量浓度与 TP 的相关系数在 0.01 概率水平上显著，明显大于与 TN 的相关系数，这进一步验证了图 2、3 的结论。污染物质量浓度和粒径<45 μm 颗粒物质量浓度的相关系数最大，说明污染物主要吸附于细颗粒表面，且污染物与粒径的相关系数随着颗粒粒径的增加而变小。由此可见，上海年平均降雨量 1 200 mm，径流大部分经下水道或直接排入河流，这必将对水体造成很大污染，上海市要治理城市水体污染，控制公路地表径流颗粒物特别是小粒径颗粒物(<45 μm)的排放是关键。因此，选择治理技术时应充分考虑颗粒物特别是细小颗粒物的去除效率。

表 3 地表径流中营养盐质量浓度与颗粒粒径、TSS 的 Pearson 相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficients among nutrients, particle size and TSS in surface runoff

污染物	TSS	不同颗粒粒径段的颗粒物			
		<45 μm	45 ~ 106 μm	106 ~ 250 μm	>250 μm
TN	0.56	0.73*	0.48	0.21	0.12
TP	0.91**	0.95**	0.84*	0.46	0.19

**表示相关系数在 0.01 概率水平上显著；*表示相关系数在 0.05 概率水平上显著

3 结论

(1) 城市高架路面 TN 的多场径流平均质量浓度远远超过地表水 V 类标准，其中溶解态氮(DN)是路面径流 TN 的主要输出形式；TP 的 EMC 值和算术平均值均超出地表水环境标准 V 类标准，TP 则主要以颗粒态磷的形式存在。

(2) 颗粒物的去除是控制城市降雨径流污染的关键。径流中污染物质量浓度与细颗粒(<45 μm)的相关系数最大，且污染物质量浓度与粒径的相关系

数随着颗粒粒径的增加而变小，说明污染物主要吸附于细颗粒表面。

参考文献：

[1] FURUMAI H, BALMER H, BOLLER M. Dynamic behavior of suspended pollutants and particle size distribution in high wayrunoff[J]. Water Science and Technology, 2002, 46 (11/12): 413-418.

[2] DEAN C M, SANSALONE J J, CARTLEDGE F K, et al. Influence of hydrology on rainfall-runoff metal element speciation [J]. Journal of Environmental Engineering, 2005, 131(4): 632-642.

[3] DELETIC A, ORR D W. Pollution buildup on road surfaces. Journal of Environmental Engineering[J]. 2005, 131(1): 49-59.

[4] KIM L H, KAYHANIAN M, ZOH K D, et al. Modeling of highway stormwater runoff[J]. Science of the Total Environment, 2005, 348(1/3):1-18.

[5] TUCCILLO M E. Size fractionation of metals in runoff from residential and highway storm sewers[J]. Science of the Total Environment, 2006, 355(1-3): 288-300.

[6] SANSALONE J J, CRISTINA C M. First flush concepts for suspended and dissolved solids in small impervious watersheds[J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 2004, 130(11): 1301-1314.

[7] 甘华阳, 卓慕宁, 李定强, 等. 广州城市道路雨水径流的水质特征 [J]. 生态环境, 2006, 15(5): 969-973.

GAN Huayang, ZHUO Muning, LI Dingqiang, et al. Water quality characteristics of road runoff from urban area of Guangzhou[J]. Ecology and Environment, 2006, 15(5): 969-973.

[8] 国家环境保护总局. 《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4th ed. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

Edit committee of Water and Waste Water Monitoring Methods, China EPA. Water and waste water monitoring methods[M]. 4th ed. Beijing, China: China Environmental Science Press, 2002.

[9] STENSTROM M K, KAYHANIAN M. First flush phenomenon characterization. Reprort No.CTSW-RT-05-73-02.6, California Department of Transportation, Division of Environmental Analysis, Sacramento, USA, 2005: 1-69.

[10] SOLLER J, STEPHENSON, OLIVIERI K, et al. Evaluation of seasonal scale first flush pollutant loading and implications for urban runoff management[J]. Journal of Environmental Management, 2005, 76(4): 309-318.

[11] LEE J H, BANG K W, KETCHUM L H, et al. First flush analysis of urban storm runoff[J]. Science of the Total Environment, 2002, 293: 163-175.

[12] 黄金良, 杜鹏飞, 欧志丹, 等. 澳门城市小流域地表径流污染特征分析[J]. 环境科学, 2006, 27(9): 1753-1759.

HUANG Jinliang, DU Pengfei, AO Chitan, et al. Characterization of Urban Surface Runoff in Two Urban Catchments in Macau[J]. Environmental Science, 2006, 27(9): 1753-1759.

[13] 张修峰. 上海地区大气氮湿沉降及其对湿地水环境的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(6): 1099-1102.

ZHANG Xiufeng. Atmospheric nitrogen wet deposition and its effects on wetland water environment of Shanghai area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(6): 1099-1102.

[14] HALLBERG M, RENMAN G, LUNDBOM T. Seasonal variations of ten metals in highway runoff and their partition between dissolved and particulate matter[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2007, 181(1/4): 183-191.

[15] BRODIE I M. Prediction of stormwater particle loads from impervious urban surfaces based on a rainfall detachment index. Water Science and Technology, 2007, 55(4): 49-56.

Characterization of pollutants in urban overhead road

NIE Fahui¹, XIANG Sulin¹, WANG Quanjin¹, WANG Biao²

1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiao Tong University, Nanchang 330013, China;

2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: Sampling and monitoring of seven rainfall-runoff events from an overhead road in Shanghai were conducted to get more knowledge about overhead roads' runoff pollutants and lay the theoretic foundation for the selection of overhead roads' runoff treatment method. The results indicate that dissolved nitrogen (DN) and particle-bound phosphorous (PP) are the primary forms of TN and TP, respectively. The dynamic behavior of TP is similar to TSS, but the TN-TSS relationship in the course of runoff is not obvious. Through analyzing the correlation of TSS and other pollutants, we finds that SS less than 45 μm are the absorbed carrier of nutrients from urban overhead road runoff, and that removal of fine SS is the effective way to control urban overhead road runoff pollution.

Key words: overhead road runoff; particle-bound nutrient; particle size distribution