

城市道路路面径流污染特征及控制研究

蒋志刚

湖南省交通规划勘察设计院有限公司

摘要：城市路面径流已成为危害城市水质的重要污染源，为进一步深入研究分析城市道路路面径流污染特征。本文对道路沉积物的粒径分布特征进行研究，同时分析污染物随道路沉积物含量的变化。结果表明，除了小于0.075mm的道路沉积物颗粒组之外，每个道路沉积物颗粒组都有相似的污染物含量。然而，较小的颗粒对重金属（锌、铅、铜）的吸附能力较强，而对化学需氧量（COD）的吸附能力较弱。不同道路沉积物污染物的浓度与降雨量和径流时间有着不同的关系。本文提出的结果可为路面径流污染处理提供有益的参考。

关键词：城市道路；路面径流；污染特征；控制研究

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.05.054

一、引言

城市饮用水的质量与每个城市居民的健康息息相关。然而，随着车辆、工厂和人口数量的不断增加，包括重金属、有机物和石油碳氢化合物污染物在内的污染物总量也在逐渐增加。这些污染物通常附着在道路表面和细颗粒沉积物（如灰尘）上^[1]。降雨时，会随路面径流进入水体或周围土壤，导致生态退化和城市水体富营养化。骆辉研究发现^[2]，城市水环境中69.24%的颗粒污染物来自人行道径流。城市路面径流已成为城市水污染的重要来源，受到学者们的广泛关注。

对路面径流污染特征的研究可归纳为两个方面：径流污染和径流冲刷。有学者研究了重金属在道路沉积物中的积累规律。王新军^[3]等研究发现，76.3%-87%的重金属附着在粒径小于0.15mm的颗粒上。锌（Zn）在粗颗粒和细颗粒中的浓度都较高，而铜（Cu）和铅（Pb）在细颗粒中的浓度较高。严玉林^[4]认为，重金属浓度随颗粒大小的变化与幂函数有很好的相关性。汤桂荣^[5]等人进一步研究发现，重金属主要有三个来源，分别是汽车尾气排放、轮胎与地面的摩擦以及制动衬片。由此可见，所报道的研究主要集中于重金属的污染特征。然而，除重金属外，道路路面径流还含有其他使水质恶化的污染物，通常包括有机碳氢化合物和石油碳氢化合物。目前，有关化学需氧量（COD）和五日生化需氧量（BOD5）等有机污染物的研究很少。

南方某城市是中国长江中游和长江经济带的节点城市。某城市也是国家综合交通枢纽。然而，关于某城市路面径流污染的研究却很少。本文以某城市为研究对象，分析了路面径流的粒径分布、路面径流中污染物含量的变化。研究结果可为径流污染物的处理提供有益的参考。

二、材料和方法

（一）收集地点

采样地点位于中国南部某城市，属于典型的亚热带季风气候。随机选取某城市的两个典型路段作为采样

点。第一个采样点P1位于某城市郊区，车流量较小，周围有学校和居民区。第二个采样点P2是某城市主城区，车流量较大。周边多为酒店、商场和高层办公楼。为了全面分析城市径流污染的特征，本研究分为两部分：

（1）在干燥天气采集路面固体沉积物，分析污染物的种类和相对含量；（2）在降雨时连续采集径流样品，分析径流中污染物的特征^[6]。

考虑到风和路面积水对可吸入颗粒物积累的影响，收集可吸入颗粒物的时间节点选择在天气持续干燥三天以上且无风的情况下。且为确保样本的代表性和完整性，本研究的取样宽度为距离路缘石50cm，取样长度为10m。所有固体沉积物均用刷子和簸箕收集，然后将样本装入自封袋中保存^[7-8]。

（二）路面径流收集方法

在采样点的排水口和排水管处使用聚乙烯瓶收集路面径流。径流采样时间点分别为径流形成后的5分钟、10分钟、20分钟、30分钟、45分钟和60分钟，每次采样量为600mL。在采集径流样本时，用雨量计测量了降雨量。根据降雨量计算不同时间段的降雨强度。本研究从2022年2月至2022年3月在P1和P2处采集了三次降雨过程样本，共获得30个路面径流样本。

（三）污染物检测方法

对于从人行道上采集的沉积物样本，首先要去除烟头、树叶和枯枝等大块杂质。然后在阴凉处晾干并称重^[9]。将收集的沉积物样本过筛，筛孔尺寸分别为0.075mm、0.25mm、0.5mm、1mm和2mm。称量每个颗粒组的质量。不同粒径的沉积物样品经王水消解后，用原子吸收分光光度法测定重金属的浓度。COD和BOD5的浓度按照《局部生态地球化学评价规范》方法进行分析。COD指化学氧化剂氧化水中有机物所需的氧量^[10]。BOD5指水中有机物被微生物分解五天后所需的氧气的量。一般来说，在降雨初期，路面径流中携带的污染物浓度相对较高。然而，当降雨强度较小时，污染物很难被冲走。

三、结果与分析

（一）道路沉积物（RDS）的粒度分布

RDS的粒度会影响颗粒的迁移和吸附污染物的能力。为了分析道路沉积物的粒径分布，进行了一系列筛分测试。图1为两个采样点的道路沉积物粒径的质量百分比。

从图1可以看出，P1和P2的粒度分布相似。RDS以中等粒径的颗粒（ $0.075\text{mm} < d < 2\text{mm}$ ）为主，其次是粗颗粒（ $d > 2\text{mm}$ ），而细颗粒（ $d < 0.075\text{mm}$ ）的含量相对较低。P1和P2的差异主要集中在0.25-0.5mm和1.0mm-2.0mm这两个粒度组。质量百分比的差异分别仅为4.51%和4.09%。粒度在0.25mm-0.5mm的颗粒所占比例最大，数值范围在20%-30%之间。粒径小于0.075mm的颗粒所占比例最小，仅占总颗粒的2%-3%。粒度范围在0.075mm

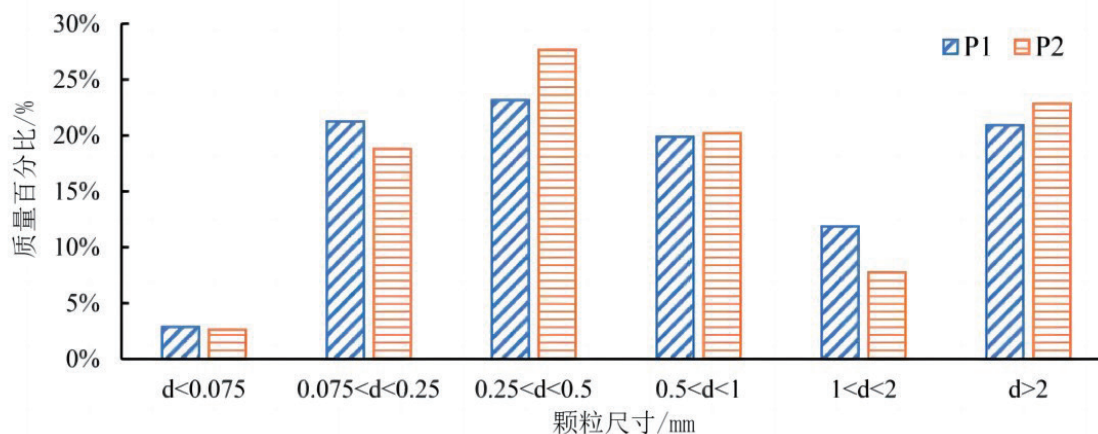


图1 道路沉积物中各粒径的质量百分比

<math>d < 0.25\text{mm}</math>, $0.5\text{mm} < d < 1\text{mm}</math>, $d \geq 2\text{mm}</math>的颗粒约占20%。粒径小于 $0.075\text{mm}</math>颗粒的RDS含量最少，主要因为小颗粒更容易被车辆漂浮到空气中。$$$

(二) 污染物浓度随道路沉积物粒径变化情况

污染物通常会附着在沉积物表面，不同粒径的污染物对沉积物的附着力存在差异。同时分析了污染物浓度随道路沉积物不同粒径的变化情况。各污染物的平均值随粒径变化的曲线见图2。

图2显示，道路沉积物中的铅含量随颗粒大小的变化最大。粒径小于 $0.075\text{mm}</math>的颗粒中的铅含量高达 $230.00\text{mg/kg}</math>，是当地土壤值($27\text{mg/kg}</math>)的8.52倍。粒径大于 $2\text{mm}</math>的颗粒中铅含量仅为 $17.00\text{mg/kg}</math>。铜的含量从 $11.40\text{mg/kg}</math>到 $94.00\text{mg/kg}</math>不等。当粒径小于 $2\text{mm}</math>时，颗粒中的铜含量高于当地土壤值($27\text{mg/kg}</math>)。且可以观察到每种粒径的锌含量均低于当地土壤值($95\text{mg/kg}</math>)。随着粒径的变化，道路沉积物中重金属(铅、$$$$$$$$$$

铜、锌)的含量也有相同的变化趋势。从图2中还可以看出，重金属含量随着粒径的增大而降低，主要原因为较小的颗粒具有较大的比表面积。因此，颗粒越小，对重金属的吸附能力越强。

化学需氧量(COD)通常用于测量有机物的含量。随着化学需氧量的增加，有机物的污染也越严重。当粒径大于 $0.075\text{mm}</math>时，化学需氧量含量随着粒径的增大呈上升趋势。在P1和P2处，五日生化需氧量(BOD5)的总体含量很低，这说明能被微生物氧化的有机物很少。但随着粒径的增大，五日生化需氧量(BOD5)的含量也呈下降趋势。污染物主要附着在颗粒表面，这意味着颗粒的表面积在一定程度上影响着颗粒的污染潜势。重金属的污染程度随着粒径的减小而增大。化学需氧量的污染程度也随粒径的增大而增大。从以上结果可以看出，控制道路沉积物小粒径颗粒可以有效减少重金属污染，控制道路沉积物大粒径颗粒可以有效减少有机物污染。$

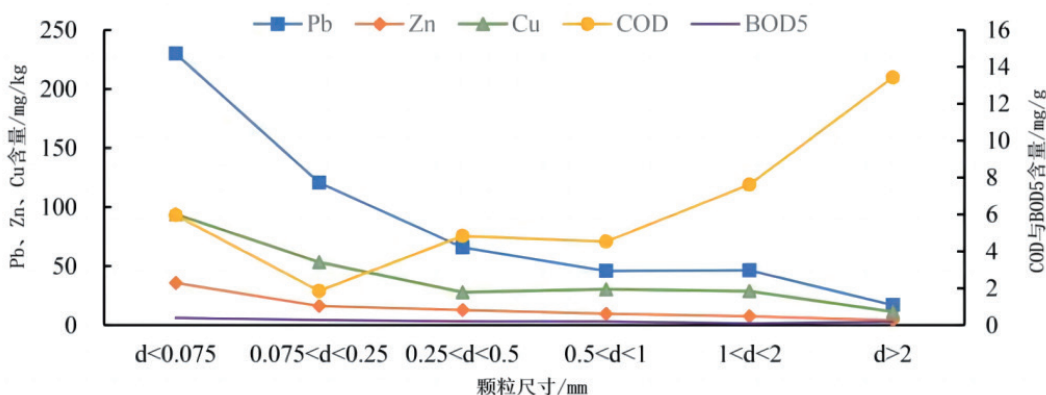


图2 污染物平均值随粒径的变化曲线

(三) 道路沉积物中污染物类型和含量分析

图3(a)和图3(b)分别为P1和P2污染物类型和浓度百分比。从图3中可以看出，市区域降解系统中的主要污染物为重金属(包括锌、铅、铜)、化学需氧量和生化需氧量。在这五种污染物中，铅的含量最高，接近总污染物含量的60%。其他污染物依次为铜、锌、化学需氧量和生化需氧量，其中生化需氧量最少，平均占

污染物总含量的0.17%。其中铅主要来自汽车尾气。锌主要来自轮胎磨损。铜主要来自制动衬片磨损。COD和BOD5主要来自汽车尾气、润滑油和轮胎中的有机物。P2中铅的比例高于P1，P1中锌和铜的比例高于P2。原因是P2位于市区，车流量大，汽车尾气排放量大。P1位于学校路段。车辆通过该路段时通常需要刹车。由于轮胎磨损，P1采样点的锌和铜含量较高。P1和P2采样点的污染

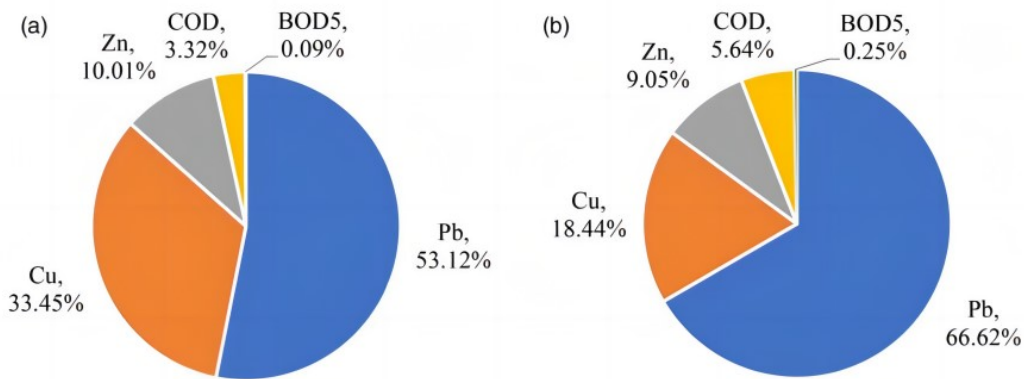


图3 RDS中污染物的百分比
(a) 采样点 P1, (b) 采样点 P2

物含量均遵循 $Pb > Cu > Zn > COD > BOD5$ 的规律。

同时本文以采样点P1的数据为例,进一步分析了路面径流中污染物的动态变化和降雨强度的变化曲线如图4所示。

从图4可以看出,不同污染物含量随径流时间的变化是不同的。TPHs、BOD5在不同时期都有波动。主要因为,冲洗不同的污染物需要不同的降雨量和降雨强度。TPHs和BOD5的浓度曲线始终处于最低水平,与降雨强度曲线保持一致。在径流的前20分钟,TPH和BOD5的浓度降低。当降雨强度最大时,TPHs和BOD5的浓度也同时达到峰值位置。究其原因,可能是石油烃类污染物主要来自沥青路面。随着降雨强度的增加,雨水对沥青路面的冲刷作用也随之增加,导致径流中TPHs浓度增加。BOD5主要来自RDS。随着降雨强度的增加,雨水的冲刷作用增加,使BOD5从沉积物中被冲走。因此,径流中BOD5的浓度随降雨强度的变化而变化。污染物浓度随径流的变化是降雨量和降雨强度综合作用的结果。随着降雨量的增加,各污染物浓度均呈下降趋势。然而,由于不同污染物的冲洗效应不同,浓度随径流时间的变化呈现出不同的发展规律。

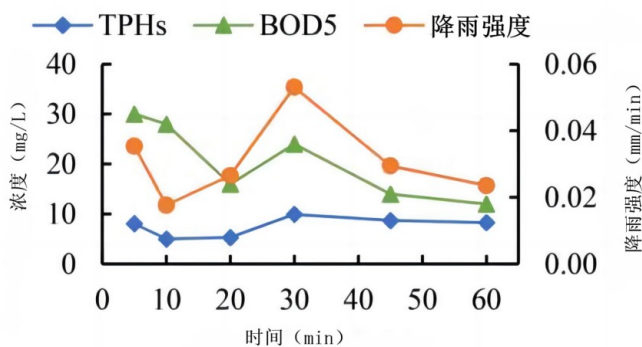


图4 浓度变化

四、结论

(1) 道路沉积物的粒度分布相对均匀。0.25mm-0.5mm组的颗粒所占比例最大,约为26.5%。小于0.075mm的颗粒比例最小,占总颗粒的2%-3%。但较小的颗粒携带重金属和五日生化需氧量的能力较强,携带化学需氧量的能力较弱。

(2) 道路沉积物中的污染物浓度普遍高于当地土壤标准值。污染物种类包括重金属(锌、铅和铜)、化学需氧量和生化需氧量。超过50%的污染物是铅,其次是铜、锌、化学需氧量和五日生化需氧量。

参考文献

[1] 尉岚, 朋四海, 郝彦璋等. 城市道路暴雨径流重金属污染特征及其控制策略[J]. 净水技术, 2022, 41(S1): 20-27.

[2] 骆辉, 李星琦, 张燕等. 城市道路路面初期径流污染特征分析——以南京市为例[J]. 环保科技, 2017, 23(05): 22-27.

[3] 王新军, 高硕哈, 姚嘉林等. 公路路面灰尘及其径流重金属污染研究[J]. 交通运输研究, 2018, 4(06): 62-68.

[4] 严玉林, 张蕾, 韩杰等. 北京春季屋面融雪径流污染空间分布特征研究[J]. 北京水务, 2023(03): 29-32+57.

[5] 汤桂荣, 张书函, 汪丽丽等. 北京城市副中心典型商务办公园区雨水径流特性研究[J]. 北京水务, 2023(01): 13-18.

[6] 尹珩, 周超群, 郭文思等. 城市湖泊总磷对干湿沉降和地表径流污染的响应研究[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(01): 14-18.

[7] 郝李霞, 张广胜, 陶萍萍等. 基于城市洪涝灾害的六安市“海绵城市”构建研究[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2023, 39(10): 93-97.

[8] 刘博, 梁宇廷, 孟棒棒等. 电解锰渣-赤泥路面砖中锰的浸出行为研究及长期释放预测[J]. 环境科学研究, 2023, 36(10): 2000-2010.

[9] 李小宁, 俞悦, 郑世威等. 基于野外监测的城市河道水温变化与管道混接评估方法研究[J]. 环境工程, 2023, 41(S2): 767-773.

[10] 李超骥, 朱鹏辉, 李可欣等. 城市形态与气候韧性关联性实证研究——以澳门的雨洪事件为例[J]. 国际城市规划, 2023, 38(04): 48-57.

作者简介: 蒋志刚(1985-), 男, 汉族, 湖南祁阳人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为市政给水排水。