

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.13.020

基于SWMM及聚类分析的雨水管道沉积物研究

张永恒¹, 马念^{2,3}, 姚娟娟¹, 徐永新³, 张智¹, 张志敏²,
韩璐²

(1. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400045; 2. 林同棧国际工程咨询<中国>有限公司, 重庆 401121; 3. 西开普大学, 南非)

摘要: 为更好地识别山地城市雨水管道淤积情况,以重庆市长寿区分流制雨水排水系统为例,提出通过数值模型与机器学习算法相结合的手段对雨水管道进行分类,建立了沉积物厚度、粒径分布等特性与各分类管段之间的关系。结果表明,基于SWMM模型及聚类分析的方法可以将研究区域的雨水管道分为7类,只有管径<DN1 200的第1、2、5类管段存在较严重的淤积风险,平均厚度为37.75 mm以上,淤积占比>4.9%,这主要是受管径小、坡度比大、转弯角度大等管段自身属性的影响导致冲刷时间较短,进而发生淤积。另外发现,山地城市雨水管道沉积物的粒径分布有着明显的两极分化现象,以>1 mm和<75 μm 的粒径居多。

关键词: 雨水管道沉积物; SWMM; 聚类分析; 山地城市

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)13-0129-08

Sediment Characteristics in Rainwater Pipe Based on SWMM and Cluster Analysis

ZHANG Yong-heng¹, MA Nian^{2,3}, YAO Juan-juan¹, XU Yong-xin³, ZHANG Zhi¹,
ZHANG Zhi-min², HAN Lu²

(1. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. T. Y. Lin International Engineering Consulting <China> Co. Ltd., Chongqing 401121, China;

3. University of the Western Cape, South Africa)

Abstract: A combination of numerical modeling and machine learning algorithms was proposed to classify rainwater pipes belonged to the drainage system of Changshou District in Chongqing, aiming to better identify siltation in mountainous cities. The study also established the correlation between each classification pipe section and the properties such as sediment thickness and particle size distribution. Utilizing the SWMM and cluster analysis method, the rainwater pipes within the research area could be categorized into 7 categories. Only categories 1, 2, and 5 with pipe diameter less than DN1 200 exhibited significant risk of silting, characterized by an average thickness exceeding 37.75 mm and a silting ratio surpassing 4.9%. This was primarily attributed to inherent characteristics of the pipe such as small pipe diameter, steep slope ratio, and sharp turning angle, leading to rapid erosion and sediment accumulation. Secondly, it was observed that the particle size distribution of sediment in rainwater pipes in mountainous

基金项目: 重庆市技术创新与发展应用专项(CSTB2022TIAD-GPX0035)

通信作者: 姚娟娟 E-mail: yaojuanjuan@cqu.edu.cn

cities exhibited a distinct polarization phenomenon, with majority of the particles greater than 1 mm and less than 75 μm .

Key words: sediment in rainwater pipe; SWMM; cluster analysis; mountain city

我国大部分城市的雨水管道都存在淤积现象,沉积物的存在一方面会阻塞管道,降低过流能力,严重时引发积水内涝;另一方面也是造成受纳水体污染的重要原因之一^[1-2]。目前国内虽然已有部分城市进行了沉积物特性的研究,但主要集中在平原城市开展^[3-4],且淤积点位的识别与选取过多依赖人为干预,不能真实反映整个研究区域内的管道淤积情况。因此,迫切需要一种客观、可靠的研究方法探究典型山地城市管道沉积物的淤积特性。

国内外对于排水管道淤积点的识别,主要依靠人工现场摸排或者借助于管道闭路电视监测系统/管道声呐系统等管内检测手段,后者虽然提供了可视化及数字化的管道淤积图像,但直接用于大面积的淤积检测及识别仍然存在费时且成本高的问题。因此,将区域内雨水管道进行有效的分类有助于识别各类淤积特征,极大减少管网摸排和检测的工作量,实现分时分级清淤。聚类分析作为一种无监督分类的机器学习方法,目前已经广泛应用于给排水管道的分类研究中^[5-6]。但聚类方法用于雨水管道淤积特性研究仍存在一定的不足,即需要对管道的自冲刷特性进行量化描述,如易于导致淤积的管网自身特征、区域降雨特征以及雨水管道内部流态等^[7]。然而,上述描述难以完全通过实测准确获取并相互产生关联,故限制了聚类分析在管道淤积特性分类中的应用。

SWMM作为传统的暴雨洪水管理模型,近些年主要用于海绵城市建设、合流制溢流污染控制、排水管道沉积物的累积冲刷模拟等^[8-9]。借助SWMM可以模拟计算出不同降雨条件下雨水管道的流量、流速及液位的实时变化^[7-9],反映雨水管道的自冲刷特性,从而为聚类法研究排水管道淤积提供了可行性。鉴于此,笔者提出借助SWMM对研究区域内各管道的冲刷特性(总自冲刷时长及总自冲刷次数)进行描述,利用基于无监督的机器学习的聚类分析法对山地城市雨水管道的淤积程度进行分类识别;通过现场实测,建立沉积物厚度、粒径分布等特性与各分类管段之间的关系,从而为山地城市雨水管

道精准清淤提供理论指导。

1 研究方法

1.1 代表性区域的选取

重庆市长寿区属于重庆主城区都市区,亦属于三峡库区生态经济区。桃花溪流域位于长寿区的西南部,为区政府所在地,具有完善的分流制雨水管网系统,雨水经管道收集后排入桃花溪并最终汇入长江。该区域土地利用性质以行政、商业、住宅区以及大面积的公园绿地为主,道路为混凝土道路。作为典型的山地丘陵城市,长寿区政府所在地地形总体呈现西高东低、北高南低的趋势,地面坡度起伏较大,最高点海拔为377.7 m,最低点海拔为155.0 m(桃花溪水面),平均海拔为327.4 m。通过对整个流域内分流制雨水干管进行坡度统计发现,50%累积频率对应的坡度为1.83%,出现次数较高的坡度依次为1.8%、0.6%、0.8%及1.2%。故该流域的雨水管网坡度较大,呈现陡缓坡交替的特点,较平原城市0.1%~0.3%的管道坡度有一定的差异。综上,从原始资料的完整程度、排水体制的完善程度以及区域内典型陡缓坡交替等因素综合考虑,最终选择上述区域开展符合山地城市特点的雨水管网沉积物特性研究。

1.2 研究方法与数据处理

1.2.1 SWMM模型的建立、率定及验证

根据区域分流制雨水管道摸排图、区域用地性质图以及数字高程图,本研究借助ArcGIS预处理工具进行管网概化、下垫面识别和汇水区划分等,最终建立了基于SWMM的分流制雨水系统水质水量动态模型(见图1,括号内为管段名称,括号外数字1~7表示管段所属类别),用于山地城市雨水管道沉积特性研究。SWMM模拟的研究区域总面积约为213.68 hm^2 ,结合下垫面汇水情况和土地利用类型,将研究区域划分为451个子汇水区、451个拓扑结构节点(包含1个排放口)和450条雨水管段(渠)。SWMM的入渗模型采用Horton模式,水力模拟采用动态波演算方式,污染物累积模型采用饱和函数累积模型,污染物冲刷模型采用指数冲刷模型。

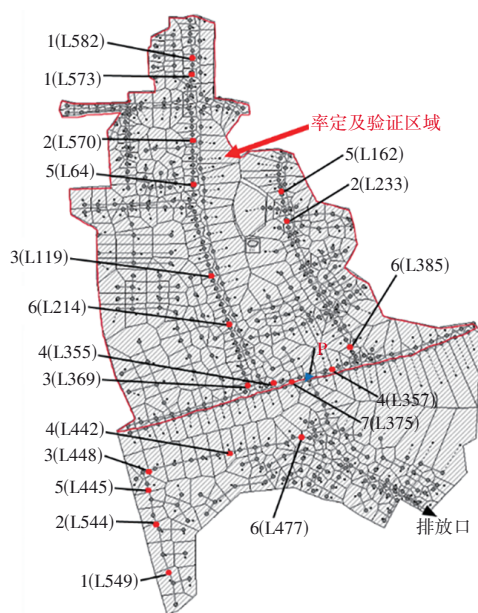


图1 基于SWMM的典型分流制雨水系统模型

Fig.1 Storm sewer system model based on SWMM

由于排放口附近的检查井均在马路上且多为地下暗箱涵,因此选择在两条分流制雨水主干管交汇的位置(如图1中的P点)安装多普勒超声波流量计和翻斗式雨量传感器,分别对该区域分流制雨水系统的流量、液位、流速以及降雨量进行测量,每5 min自动记录一次测量数据。为了准确率定与验证SWMM模型参数,选取雨水主干管交汇前的小区域地块(同时涵盖道路、绿地及住宅)用于SWMM模型的率定与验证(如图1中红线内区域)^[10]。

利用修正的Morris法对模型水量参数进行灵敏度分析,并对灵敏度高的参数逐一率定。采用2场实际降雨对率定后的模型进行验证。

1.2.2 SWMM模型及聚类分析方法

长寿区多年平均降雨量约为1 118 mm,雨季主要集中在4月—7月,其中最高月降雨量可达204.6 mm。本研究选择2022年4月—10月(跨越旱季和雨季)共计约466.0 mm的连续实测降雨作为SWMM模型的输入,计算步长取5 min,模拟计算研究区域内各管段每5 min的流速、液位及流量等数据。同时参考Lange等人^[11]对下水道自清洁设计的参数值,即当沉积物厚度在10~60 mm之间时,0.6 m/s的流速和1.5 Pa的剪切应力被认为可引起自清洁冲刷。因此,本研究统计了各管段流速>0.6 m/s的总时长,将其定义为该管段的总冲刷时长;考虑到研究区域两个检查井之间的雨水管长一般为20~

100 m,本研究将管段流速>0.6 m/s且持续冲刷时间超过20 min记为1次冲刷,据此统计该管段的总冲刷次数。最终,将管段的总冲刷时长和总冲刷次数作为描述符代入主成分分析及聚类分析中。

为减小统计工作量以及便于现场取样,忽略小区内部管段,只考虑市政雨水主干管的管段,并把相邻管道特性及下垫面类型差异不明显的两条管道合并为一条,最终将模型中455条管道简化为119条。本研究选择系统聚类法对管道属性和冲刷特性进行描述,包括管段坡度、管段截面积(考虑到区域内既有圆管又有箱涵,用于表示管径大小)、坡度比(上游管段坡度除以本管段坡度,比值越大表示陡缓坡的起伏越大)、截面积比(上游管段截面积除以本管段截面积,比值越小表示变径幅度越大)、转弯角度(与下游管段的夹角/补角,夹角越大表示与下游管段的转弯角度越小)、总冲刷时长、总冲刷次数等7个描述符。聚类分析的具体步骤如下:首先,使用Minitab Statistical Software 2021进行相关性分析,然后对选定的7个描述符进行主成分分析,以实现数学降维;接下来,将得到的主成分指标用于聚类分析,以确定不同的管道类别;最后,通过现场实测各分类管段内沉积物的淤积厚度和粒径分布等特性,建立与各分类标准之间的联系。

1.2.3 采样和分析方法

为避免频繁采样对管道沉积物输移规律的影响,本次采样与上次采样间隔12个月(在此期间管道未清淤),以保证沉积物淤积厚度测量的客观准确。且采样前5 d研究区域内无降雨。根据国标插杆法测量沉积物厚度(取3次测量的平均值)。沉积物样品采集后及时送至实验室进行冷冻干燥,弃去碎石、树叶等杂物。将处理好的沉积物过筛,得到粒径<1、1~2、>2 mm的颗粒物样品的质量占比;对于<1 mm的沉积物粒径分布,采用BT-9300HT型激光粒度仪进行测定,其余样品在-20℃冰箱保存并及时对各指标进行检测分析。

2 结果与讨论

2.1 SWMM模型的率定与验证结果

利用修正的Morris法对模型水量参数进行了灵敏度分析,以5%为固定步长对每个参数值进行逐一扰动,目标值选用场次降雨水力负荷和流量峰值模拟偏差^[12]。采用2022年7月18日的实际降雨(降

雨量为17.8 mm,重现期为0.4年)对水量参数逐一率定,并采用Nash-Sutcliffe(NS)系数对实测值及模型模拟值进行对比评价。率定后的模型参数如下:不渗透性粗糙系数为0.013,渗透性粗糙系数为0.2;不渗透性洼地蓄水量为2 mm,渗透性洼地蓄水量为4 mm;Horton模型最大入渗速率为80 mm/h,最小入渗速率为7.8 mm/h,衰减常数为4.1 h⁻¹;管道粗糙系数为0.015。经率定后模型的NS系数为0.859,模拟与实测流量峰的峰值偏差为4.28%,峰值时间偏差为1.19%。本研究另选2场实际降雨(2022年5月9日,降雨量为48.6 mm,重现期为1.3年;2022年10月6日,降雨量为9.4 mm,重现期为0.2年)对率定后的模型进行验证,结果如图2所示。可以看出,在2场实际降雨条件下,NS系数分别为0.807和0.813,均大于0.8;而且模拟与实测流量峰的峰值偏差为2.24%和3.63%,峰值时间偏差为6.67%和1.32%,均在10%以内。这表明模型模拟效果较好,结果较为可靠。

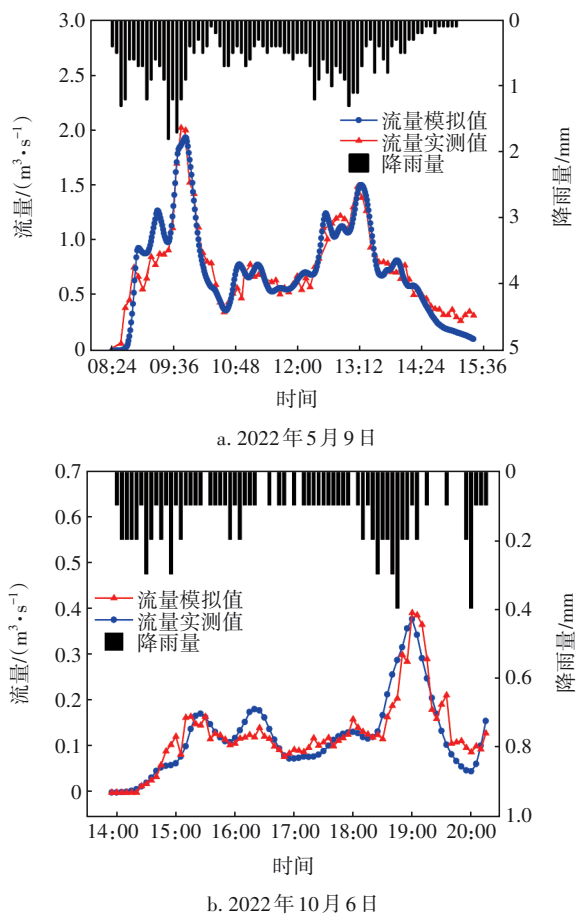


图2 率定后模型的验证结果

Fig.2 Validation results of calibrated model

2.2 相关性分析

由于影响管道沉积物分布特性的因素较多,且相互之间存在协同作用,需要将高度相关的数据集转换为不相关的主成分,进而简化后续的聚类分析。采用Pearson相关系数方法对7个描述符进行相关性分析,相关性系数矩阵如表1所示。可以看出,各描述符之间存在一定的相关性,其中管段坡度与总冲刷时长在 $p<0.01$ 水平上呈显著正相关,而坡度比与总冲刷时长在 $p<0.05$ 水平上呈负相关。由此可见,在一定强度的降雨冲刷下,坡度越大则冲刷时长就越大,不易淤积;而坡度比越大即下游管段坡度越缓,水流对管道的冲刷时长越短,沉积物就容易淤积。管段截面积与总冲刷时长、总冲刷次数均在 $p<0.01$ 水平上呈显著正相关,当管径越大时管道具有更大的过水能力,相应的汇流后冲刷时间更长、冲刷次数越多。另外还可以看出,转弯角度与坡度比有较强的相关性,说明山地城市雨水管道存在较多陡缓坡交替的转角点位,这对管道的冲刷影响也不容忽视。

表1 各描述符之间的相关性系数矩阵

Tab.1 Correlation coefficient matrix between various indicators

项目	管段坡度	坡度比	管段截面积	截面积比	转弯角度	总冲刷时长	总冲刷次数
管段坡度	1.000						
坡度比	-0.179	1.000					
管段截面积	-0.139	-0.054	1.000				
截面积比	-0.133	0.158	0.021	1.000			
转弯角度	-0.023	0.240**	0.092	-0.028	1.000		
总冲刷时长	0.264**	-0.207*	0.644**	0.097	0.025	1.000	
总冲刷次数	0.115	-0.146	0.446**	0.105	0.001	0.674**	1.000

注: *表示在0.05水平(双侧)上显著相关,**表示在0.01水平(双侧)上显著相关。

对各描述符进行KMO和巴特利特检验,以判别主成分分析法的可行性,得出KMO值为0.566,巴特利特球形度检验显著性 <0.001 。通常认为KMO检验结果在0.5~0.7之间,同时巴特利特球形度检

验结果的显著性 <0.05 ,则表示原始数据适宜进行主成分分析。因此,本研究可以利用主成分分析法对雨水管道描述符进行评价。

2.3 聚类分析

2.3.1 主成分分析

对119组数据进行主成分分析,分量数定为7,采用的矩阵类型为系数相关矩阵,得到的主成分分析载荷图如图3所示。根据主成分分析结果,选择特征值 >1 的3种成分作为主成分,记为 F_1 、 F_2 、 F_3 ,累计贡献率接近80%。第一主成分的贡献率为34.30%,其主要特点表现为总冲刷时长(0.618)、总冲刷次数(0.549)、管段截面积(0.503)有较高的正载荷。管段截面积表征管道容纳径流量和沉积物量的大小,而总冲刷时长和次数表征降雨量的大小和雨峰的位置对管道沉积物的冲刷能力,因此第一主成分的贡献主要反映了雨水管道自冲刷特性的影响。第二主成分的贡献率为24.00%,表现为管段坡度(0.502)的正载荷和坡度比(-0.584)的较高负载荷,这体现了雨水管道坡度和地面起伏的变化特性。第三主成分的贡献率为19.40%,表现为转弯角度(-0.718)的较高负载荷和截面积比(0.550)的正载荷,这主要体现雨水管道内部流线变化的影响。

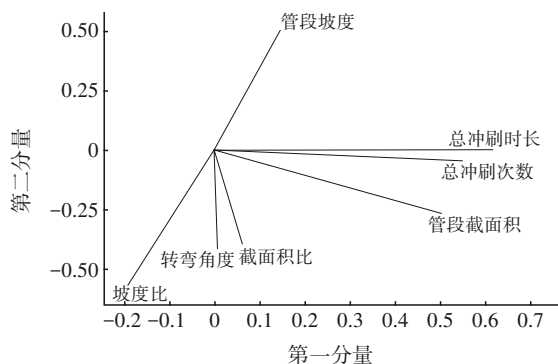


图3 主成分分析载荷图

Fig.3 Gravel plot of load diagram of each component

2.3.2 聚类分析

对于主成分分析得到的3个指标 F_1 、 F_2 、 F_3 进行聚类分析,使用观测值层次聚类分析方法,基于Ward聚类算法生成的Euclidean距离平方集聚系数作为相似性度量,检查团聚系数是否存在任何显著增加,从而选择聚类的数量^[13]。当合并距离分别取0.95、0.70、0.43、0.34时,分别可将雨水管道分为5、6、7、8类,只有距离从0.70到0.43(38.57%)移动

的比例增长最显著,这意味着集群解决方案的最佳数量是7。聚类分析后将管段分为7类,其中1~7类中分别有15、25、31、10、22、15、1条管段。

通过计算聚类分析中描述符的标准化平均值来定义每类管段的特征,雷达图如图4所示。聚类分析后发现,除第1类外,其他各分类中总冲刷次数值并不明显,推测是受雨峰位置的影响,同一时间段内各管段同时存在冲刷,冲刷次数相差不大。因此,以总冲刷时长和其他管段属性描述符来分析每类的特征。由聚类1可以看出,坡度比(1.09)较高,而像管段截面积(-1.67)、截面积比(-1.91)以及描述管道自冲刷特性的总冲刷时长(-1.46)和总冲刷次数(-2.01)这4个描述符的值均远低于其他类别,这类主要是一些位于管网起端、管径较小、变径幅度大、上游衔接较大陡坡管段的缓坡管段,因此冲刷时间较短。同理可以看出,聚类2的坡度比(1.40)和转弯角度(1.33)这两个描述符是所有类中最大的,而总冲刷时长(-0.74)和管段截面积(-0.30)较小,这类主要是一些存在较大转角且上游衔接大坡度管段的缓坡管段,由于转角大,内部流线弯折受阻不利于冲刷,因此冲刷时间较短。聚类3显示为较高的总冲刷时长(0.76)、管段截面积(0.86)、截面积比(0.69)以及较小的坡度比(-0.84),这类主要是一些位于管网下游、管径较大、变径幅度小的管段,由于汇流冲刷作用大,冲刷时间长。聚类4显示为较高的总冲刷时长(1.25)和管段截面积(0.92)、最大的管段坡度(1.96)以及最低的坡度比(-0.94),这类主要是位于管网下游、管径和坡度均较大的陡坡管段,且其上游也是大陡坡管段,由于汇流作用和连续的大坡度,冲刷流速较快,冲刷时间较长。聚类5显示为较大的转弯角度(0.91)和最高的截面积比(0.88),以及较低的总冲刷时长(-0.17)和管段截面积(-0.43),这类主要是存在较大转角且变径幅度很小的管段,同样受限于转角幅度大、水流受阻,因此冲刷时间较短。聚类6显示了较高的总冲刷时长(0.36)和管段截面积(0.62)以及最小的转弯角度(-1.24)和较小的管道坡度(-0.66),这类管段的转角幅度小,管内流线发展充分,管径大、通水顺畅,冲刷时间较长。聚类7由于只有一条管段,且有着较高的总冲刷时长和管段截面积值,位于两条主干管交汇前的上游管段,因此属于转角小、冲刷时间长的大管径管段。

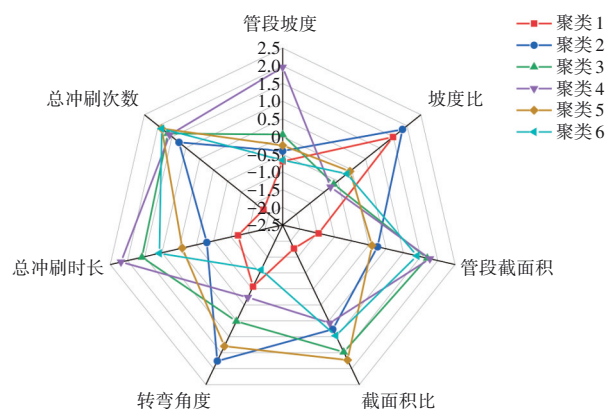


图4 不同类别的各描述符标准化平均值雷达图

Fig.4 Radar chart of standardized average values of descriptors of different clusters

2.4 聚类分析后的沉积物特征描述

根据聚类分析的结果,对7类不同管段进行沉积物厚度测量和特性分析。在选点过程中综合考虑了影响管段沉积物的各个描述符,避开沉沙井装置,尽量选择非机动车道路下以及检查井易开启的管段。最终选取第1~6类管段各3个、第7类管段1个,共计19个管段,其中,第2类中包含一个逆坡管段。各管段的空间位置及所属类别如图1所示。

通过实测管段淤积厚度,建立不同类别管段沉积物特性的差异,分别制作了淤积厚度和淤积占比的箱线图,如图5所示。可以看出,第1类管段的平均淤积厚度为37.75 mm,淤积占比为3.75%~11.5%,这是由于该类管段主要位于管网的起端,管径<DN800、平均坡度比较大(1.09)且总冲刷时间和次数较小而导致的淤积。统计发现,研究区域内管段的半年平均总冲刷时长范围为0~27 195 min,而第1类管段的平均总冲刷时长(502 min)的累积频率仅为10%。第2类和5类管段的平均淤积厚度分别为48和44 mm,相差不大,主要集中在管径为DN800~1 200的范围内,同时平均转弯角度均大于14°,管段的平均总冲刷时长分别为6 000和10 000 min,对应的累积频率分别为27%和53%。进一步分析发现,第2类管段的淤积厚度分布离散程度较大,最大淤积厚度为65 mm,淤积占比可达到7.5%,而最小淤积厚度仅为22 mm,淤积占比约为2.5%。分析其原因,淤积上限值高与第2类管段的平均坡度比(2.97)较大相关,属于上游衔接大坡度管段的下游缓坡管段,沉积物更易淤积;而淤积下限小是因为该部分管段的管径接近DN1 200,过水断面

积大,过水能力强,因此淤积占比小。对于第5类管段,平均淤积占比仅为4.9%,小于第2类的5.5%,这是由于第5类管段的平均坡度比(1.52)显著低于第2类管段,因此第5类的缓坡管段中淤积较小。

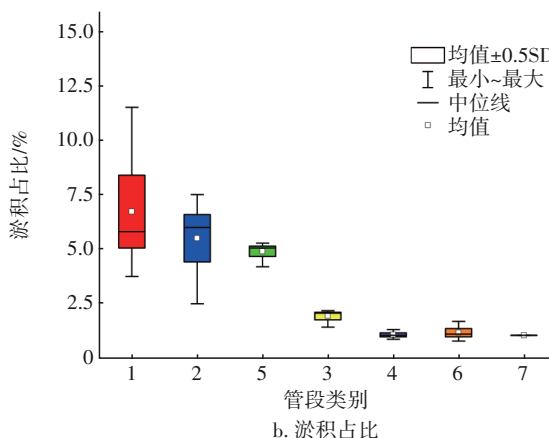
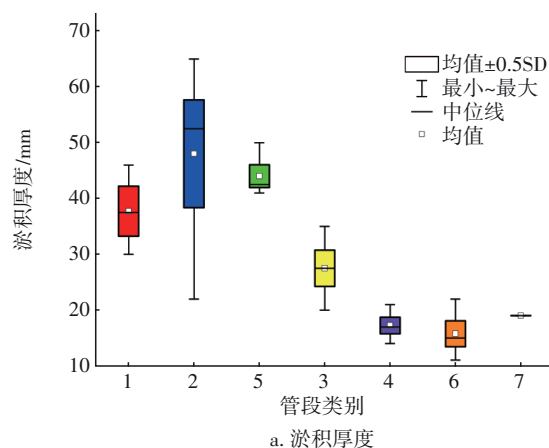


图5 不同分类管段实测淤积厚度和淤积占比

Fig.5 Siltation thickness and siltation ratio of different classification pipelines

对于第3、4、6、7类管段,平均淤积占比<2%,淤积不严重。由雷达图可知,总冲刷时长/次数和管段截面积的影响明显高于其他描述符,这是受下游管段(管径>DN1 300)雨水汇流冲刷的影响,半年平均总冲刷时长>15 000 min,对应的累积频率>70%。另外,第4类管段的平均坡度为1.78%,属于大陡坡管段,其上游仍为大坡度的陡坡管段;第6类管段的平均转弯角度为5°,明显小于其他几类管段,这些因素均可使得管道内水流更加通畅,沉积物被大量冲刷。相比之下,第3类管段的平均淤积厚度为27.5 mm,淤积占比(1.94%)显著大于第4、6、7类,这是由于第3类管段的平均转弯角度为11°,管内流线受阻,水流不通畅,因此更易发生淤积。综上所述,山

地城市排水管道易淤积点主要集中在第1、2、5类管段中,平均淤积厚度在37.75 mm以上,淤积占比>4.9%,这3类管段的共同特征为:管径<DN1 200、半年平均总冲刷时长累积频率<53%、平均转弯角度>14°、平均坡度比>1.52。

根据管道沉积物的CCTV照片,发现前端管段存在一定的淤积,而中后段基本不含沉积物,只有附着在管壁上的生物膜。这可能是由于降雨时前端流量较小,水流对沉积物的冲刷能力较弱,大量沉积物淤积在前端管道的底部;而中后段的管段冲刷强度大,管道内沉积物以悬浮物(粒径<100 μm)的形式存在,且该部分小颗粒的悬浮物被认为是雨水管道沉积物中污染物含量最高的组成部分^[14]。各分类管段中各级粒径的质量占比如图6(a)所示。

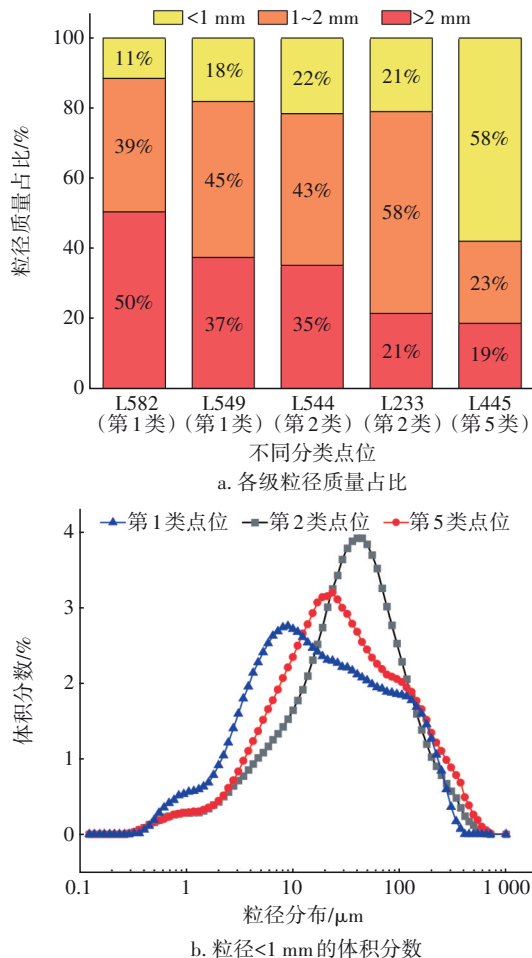


图6 各分类管段的各级粒径质量占比和粒径<1 mm的体积分数

Fig.6 Proportion of particle size mass at each level and volume fraction of particles smaller than 1 mm in each classified pipelines

从图6(a)可以看出,第1、2类管段以>1 mm的粒径分布为主,质量占比接近80%~90%,而<1 mm的粒径质量占比最低仅为11%;其次,这两类管段中粒径>2 mm的平均质量占比可达35.8%,其中第1类管段中的最高质量占比为50%。与之不同的是,第5类管段中<1 mm的小颗粒悬浮物质量占比明显高于第1、2类,这是受降雨冲刷、管道坡度起伏、管段截面积等多方面因素共同作用的结果。

使用激光粒度仪对1 mm以下的沉积物粒径进行检测,结果如图6(b)所示。可知,在第1、2、5类管段中,沉积物的中值粒径 D_{50} 分别为13.95、32.37、22.37 μm ,均以小于75 μm 的悬移质粒径居多,较平原城市的中值粒径(>200 μm)要小得多。经过筛分发现,越靠近下游的管段,沉积物粒径<1 mm的质量占比越高,以悬移质为主且中值粒径均低于40 μm 。这种粒径分布的两极分化现象在其他平原城市的管道沉积物研究中尚未发现。综上所述,在陡缓坡交替起伏较大的山地城市中,雨水管网的沉积现象是明显区别于平原城市的,受管道自冲刷特性和自身属性等多个因素的影响。

3 结论

基于SWMM及聚类分析手段,将重庆市长寿区典型区域的分流制雨水管道分为7类,建立了沉积物厚度、粒径分布等特性与不同管段类别之间的关系。经过初步探究发现,只有第1、2、5类管段存在较严重的淤积,需要定期清淤,这3类管段的共同特征为:管径<DN1 200、半年平均总冲刷时长的累积频率<53%、平均转弯角度>14°、平均坡度比>1.52。具体清淤方法为:针对第1、2、5类淤积比较严重的管道格外关注,每年定期加强清淤;对于第3类管段适当延长清淤周期,局部清淤;对于第4、6、7类管段,不需要进行清淤,在独特地形特点及年降雨强度的冲刷下可以实现管道的自清洁。

事实上,一定强度的降雨冲刷对雨水管道的清淤有着较好的作用,在陡缓坡交替、地势起伏较大的山地城市中尤为明显,但这也加剧了下游受纳水体的污染,引起河湖黑臭和水体恶化等环境问题。因此,为解决这种现状,需要对山地城市雨水管道的沉积特性以及相应的清淤措施进行深入探究,以合理控制管道沉积物的排放。

参考文献:

- [1] SONG Y H, YUN R, LEE E H, *et al.* Predicting sedimentation in urban sewer conduits [J]. *Water*, 2018, 10(4): 462.
- [2] 马珍, 韩梦琪. 管道溢流的污染特征及水质管控技术与策略[J]. *给水排水*, 2022, 48(9): 147-156.
- MA Zhen, HAN Mengqi. Pollution characteristics of sewer overflow and water quality control techniques and strategies [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48(9): 147-156 (in Chinese).
- [3] 李海燕, 梅慧瑞, 徐波平. 北京城市雨水管道中沉积物的状况调查与分析[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(6): 36-39.
- LI Haiyan, MEI Huirui, XU Boping. Investigation and analysis of storm sewer sediments in Beijing [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(6): 36-39 (in Chinese).
- [4] YU X Q, ZHAO Y M, ZHANG C T, *et al.* Abundance and characteristics of microplastics in the surface water and sediment of parks in Xi'an City, Northwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 806(4): 150953.
- [5] 马力辉, 崔建国, 刘遂庆, 等. 系统聚类分析用于供水管道漏损控制的研究[J]. *中国给水排水*, 2006, 22(23): 9-13.
- MA Lihui, CUI Jianguo, LIU Suiqing, *et al.* Study on application of system clustering analysis in leakage control of water supply pipelines [J]. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(23): 9-13 (in Chinese).
- [6] 何黎, 陈磊, 纪莎莎, 等. 基于K-shape聚类的连续液位监测数据异常检测方法[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(11): 56-61.
- HE Li, CHEN Lei, JI Shasha, *et al.* Abnormal detection of continuous water level monitoring data based on K-shape clustering [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(11): 56-61 (in Chinese).
- [7] LIU J, CAO Z, LI X, *et al.* Modelling urban flooding integrated with flow and sediment transport in drainage networks [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 850: 158027.
- [8] 陈韬, 夏蒙蒙, 刘云鹏, 等. 基于SWMM的海绵改建小区雨水径流调控研究[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(11): 103-111.
- CHEN Tao, XIA Mengmeng, LIU Yunpeng, *et al.* Regulation of stormwater runoff in sponge reconstructed community based on SWMM [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(11): 103-111 (in Chinese).
- [9] GHODSI S H, ZHU Z, GHEITH H, *et al.* Modeling the effectiveness of rain barrels, cisterns, and downspout disconnections for reducing combined sewer overflows in a city-scale watershed [J]. *Water Resources Management*, 2021, 35(9): 2895-2908.
- [10] 付朝晖, 赵雄, 陈诗浩, 等. 珠海市城中村合流制排水系统溢流污染控制策略研究[J]. *中国给水排水*, 2021, 38(3): 105-111.
- FU Zhaohui, ZHAO Xiong, CHEN Shihao, *et al.* Strategy for combined sewer overflow pollution control in urban villages of Zhuhai City [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(3): 105-111 (in Chinese).
- [11] LANGE R L, WICHERN M. Sedimentation dynamics in combined sewer systems [J]. *Water Science and Technology*, 2013, 68(4): 756-762.
- [12] 谭明豪, 姚娟娟, 张智, 等. 基于Morris的SWMM水质参数灵敏度分析与应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2015(6): 117-122.
- TAN Minghao, YAO Juanjuan, ZHANG Zhi, *et al.* Analysis and application of sensitivity of water quality parameter based on SWMM of Morris [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2015(6): 117-122 (in Chinese).
- [13] KRISHNAN V S, FIROZ C M. Assessment of regional environmental quality using cluster analysis [J]. *Environmental Development*, 2023, 45: 100832.
- [14] SHI X, REN B, JIN X, *et al.* Metabolic hazards of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in sewers [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 432: 128539.

作者简介:张永恒(1999-),男,山东日照人,硕士研究生,主要研究方向为排水管网优化控制。

E-mail:yhzhang1214@163.com

收稿日期:2023-04-15

修回日期:2023-07-14

(编辑:刘贵春)