

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.19.017

基于鲁棒优化模型的排水管道疏浚污泥量测算

桑稳姣¹, 郝世文¹, 陈志毅¹, 李敏², 张晓辉², 程建军³, 王亮³

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉市水务科学研究所,
湖北 武汉 430014; 3. 武汉市水务局, 湖北 武汉 430014)

摘要: 在调研武汉市排水管道日常疏浚污泥量的基础上,运用鲁棒优化理论建立模型,预测2025年武汉市日常疏浚污泥量将达到437 036 m³。根据鲁棒优化模型运行结果研究疏浚频次对疏浚污泥量的影响,得到较优疏浚频次为4次/年。分流制排水管道的疏浚污泥量明显少于合流制管道;不同用地功能对疏浚污泥量的影响程度为:商业区>文教区>居民区>综合服务区;此外,PVC管材的疏浚污泥量明显低于钢筋混凝土管,疏浚污泥量与管道管径呈正相关。

关键词: 疏浚污泥; 鲁棒优化模型; 排水管道; 归因分析

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)19-0106-06

Estimation of Dredging Sludge Volume in Drainage Pipe Based on Robust Optimization Model

SANG Wen-jiao¹, HAO Shi-wen¹, CHEN Zhi-yi¹, LI Min², ZHANG Xiao-hui²,
CHENG Jian-jun³, WANG Liang³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070,
China; 2. Wuhan Water Science Research Institute, Wuhan 430014, China; 3. Wuhan Water
Authority, Wuhan 430014, China)

Abstract: Based on the investigation of daily dredged sludge volume of drainage pipes in Wuhan, a model was established by using robust optimization theory, and it was predicted that the daily dredged sludge volume in Wuhan would reach 437 036 m³ in 2025. The effect of the dredging frequency on the accumulated volume of the dredged sludge was investigated according to the simulated results of the robust optimization model, and the optimal dredging frequency was 4 times per year. The volume of the dredged sludge in the separated drainage system was obviously smaller than that in the combined drainage system. The influence degree of different land use functions on the dredged sludge volume in descending order was commercial area, culture and educational area, residential area and integrated service area. In addition, the dredged sludge volume in the PVC pipe was obviously smaller than that in the reinforced concrete pipe, and the dredged sludge volume was positively correlated with the pipe diameter.

Key words: dredged sludge; robust optimization model; drainage pipe; attribution analysis

排水管网作为城市排水系统的重要组成部分,其日常疏浚管理成为城市黑臭水体整治完毕后保持

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51108360); 湖北省科技支撑计划项目(2015BCA304); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(185206009)

水体水质的重要控制手段。笔者在全面调研武汉市日常疏浚污泥量的基础上,建立鲁棒优化模型预测武汉市疏浚污泥累积量;同时选取特征区域,探讨影响武汉市排水管道疏浚污泥产生的因素,以期武汉市排水管网疏浚工作的调度管理和污泥处置规划制定提供参考,同时为其他城市排水管道的设计和维管理提供借鉴。

1 研究区域与方法

武汉市中心城区现有排水管道长度近 6 400 km,收集范围包括江岸区、江汉区、硚口区、汉阳区、武昌区、青山区、洪山区、东湖高新区和东湖风景区。本研究调查对象为武汉市中心城区的合流制排水管道以及分流制区域的雨水管道。结合《武汉市城市总体规划(2017年—2035年)》,通过实地踏勘,获取各区域的用地类型以及武汉市排水管网的基本情况。

鲁棒优化可对实际生活中具有不确定性因素的问题进行优化求解。对于不确定优化问题,先通过分析确定目标函数、不确定参数、约束函数、决策变量,建立鲁棒优化模型;再对鲁棒优化模型进行理论推导和计算,求解模型。

排水管道疏浚污泥量会受到天气、人类活动等不确定性因素的影响,一般的数学模型难以求解,可利用鲁棒优化理论进行分析。

一般的鲁棒优化模型为:

$$\begin{aligned} \min F \\ \text{s. t. } \begin{cases} f(x, \xi) \leq F, \forall \xi \in U \\ h(x, \xi) \leq 0, \forall \xi \in U \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $f(x, \xi) \leq F$ 为目标函数; x 为决策变量; $h(x, \xi)$ 为约束函数; ξ 为不确定参数; U 为不确定集合,指不确定参数的取值范围。

考虑到计算的可操作性,用于排水管道疏浚污泥量预测的鲁棒优化模型采用盒式不确定集合:

$$U = \{\xi \mid \xi^{\min} \leq \xi \leq \xi^{\max}\} \quad (2)$$

最后通过数学计算转化求解模型,通过设计计算程序并运行得到优化结果。

2 疏浚污泥量预测的鲁棒优化模型分析

2.1 疏浚污泥量数据统计分析

经统计,2015年—2019年武汉市疏浚污泥量分别为 196 131.2、205 436.5、208 077.3、212 366.0、226 098.3 m^3 ,发现近 5 年武汉市年疏浚污泥量呈递增态势。结合《武汉市统计年鉴》和《武汉市统计

公报》中这 5 年武汉市中心城区常住人口数,对人均年疏浚污泥量—人口拟合作图,如图 1 所示。

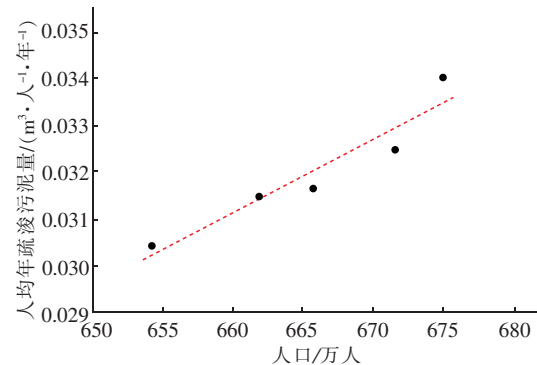


图1 武汉市中心城区人均年疏浚污泥量与人口数量的关系

Fig. 1 Relationship between per capita annual dredged sludge yield and population in center area of Wuhan

根据图 1,人均年疏浚污泥量与人口数量呈正相关关系,且拟合程度较好,确定系数 R^2 达到 0.915 9,人均年疏浚污泥量与人口数量满足如下关系,即污泥量增长模型:

$$\partial = 0.14 \times 10^{-8} \times p + 0.0261 \quad (3)$$

式中: ∂ 为人均年疏浚污泥量, $\text{m}^3/(\text{人} \cdot \text{年})$; p 为常住人口数,人。

2.2 疏浚污泥量鲁棒优化模型的建立

年疏浚污泥累积量的一般数学模型为:

$$\begin{aligned} \max W_A \\ \text{s. t. } \begin{cases} p^{\min} \leq p \leq p^{\max} \\ N_{\min} \leq N \leq N_{\max}, N \text{ 为整数} \\ W_A = \sum P + \sum W_E - \sum W_t \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: p^{\max} 和 p^{\min} 分别为常住人口数的上限和下限,根据《武汉市统计年鉴》,取 p^{\max} 为 1 000 万人、 p^{\min} 为 700 万人; N 为疏浚频次,次/年; N_{\max} 和 N_{\min} 为疏浚周期的上限和下限,根据经验,武汉市的排水管网疏浚频次不高于 12 次/年; W_A 为年疏浚污泥量,指疏浚人员从管道中疏浚得到的污泥总量, $\text{m}^3/\text{年}$; P 为每年排水管道内的污泥产生量,指因人们日常活动等导致排水管道内产生的疏浚污泥量, $\text{m}^3/\text{年}$; W_E 为每年紧急疏浚事件产生的疏浚污泥量,指疏浚工作人员在接到市民疏浚求助后处理管道意外堵塞事件所产生的疏浚污泥量, $\text{m}^3/\text{年}$; W_t 为每年雨天的疏浚污泥冲刷量, $\text{m}^3/\text{年}$ 。

在疏浚周期内,排水管道内的污泥量与疏浚周期天数有关,可采用 Michaelis - Menton 模型^[1]表达两者之间的关系,如下所示:

$$P = \frac{M \cdot b}{K_s + b} \quad (5)$$

式中: b 为疏浚周期, $b = 365/N, d$; M 为不进行疏浚情况下管道内最大污泥累积量, $M = \partial \cdot p, m^3$; K_s 为不进行疏浚情况下管内污泥量达到 $M/2$ 所需要的天数,根据马妍^[2]对管道沉积物进行抗侵蚀性的研究,管道沉积物在管道内的沉积时间为 30 ~ 40 d 时沉积稳定,并在 20 d 左右时达到 1/2 最大累积量,因此,在模型中 K_s 值取 20 d。

根据武汉市江汉区紧急疏浚记录,旱季为紧急疏浚高发期,2018 年旱季紧急疏浚污泥总量为 3 693 m^3 ,雨季紧急疏浚污泥总量为 1 738 m^3 ;经计算,江汉区旱季日均紧急疏浚污泥量为 20.1 m^3/d ,雨季日均紧急疏浚污泥量为 9.5 m^3/d 。根据 2016 年—2018 年武汉市年均疏浚污泥量是江汉区年均疏浚污泥量的 7.9 倍,估算武汉市旱季日均紧急疏浚污泥量为 158.8 m^3/d ,雨季日均紧急疏浚污泥量为 75.1 m^3/d ,据此计算武汉市紧急疏浚污泥量如下:

$$\begin{aligned} & \max W_A \\ & \text{s. t.} \begin{cases} p^{\min} \leq p \leq p^{\max} \\ 2 \leq N \leq 12 \\ W_A = \sum_1^N \frac{\partial \cdot p \cdot b}{K_s + b} + \sum_1^N \omega \cdot b - \sum_1^N \lambda \cdot (d \cdot b) \cdot \frac{M \cdot (b - y)}{K_s + (b - y)} \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

2.3 鲁棒优化模型分析

采用 Python 编写程序对式(10)进行求解,测算得到不同人口数和不同疏浚频次影响下武汉市中心城区的疏浚污泥量,见图 2。

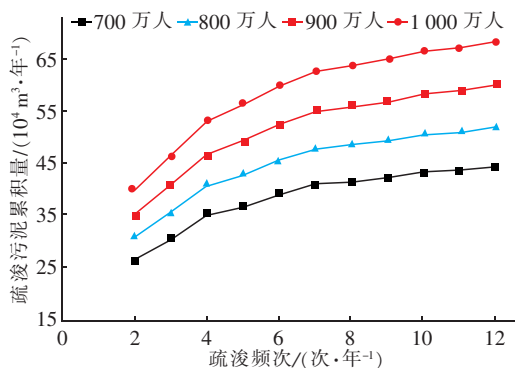


图2 武汉市中心城区的疏浚污泥累积量

Fig.2 Accumulation of dredged sludge in center area of Wuhan

根据程序运行结果,年疏浚污泥量与管网疏浚频次呈正相关。疏浚频次为 2 ~ 4 次/年时,疏浚污泥量的增长速度最快;随着疏浚频次的增加,疏浚污

$$W_E = \omega \cdot b \quad (6)$$

式中: ω 为日均紧急疏浚污泥量,旱季为 158.8 m^3/d ,雨季为 75.1 m^3/d 。

式(4)中的 W_l 可按式(7)进行计算:

$$W_l = \lambda \cdot y \cdot W_d \quad (7)$$

式中: λ 为雨天管道内污泥冲刷率,根据徐尚玲^[3]在雨季监测连续 3 次雨天时管道沉积物的冲刷效应,管道沉积物的平均冲刷率约为 44%,故取 λ 值为 0.44; y 为雨天天数, d ; W_d 指雨天前的疏浚污泥产生量, m^3 。 y 和 W_d 分别通过下式进行计算:

$$y = d \cdot b \quad (8)$$

$$W_d = \frac{M \cdot (b - y)}{K_s + (b - y)} \quad (9)$$

式中: d 为雨天率,表示各疏浚周期内雨天的概率,根据 2018 年武汉市雨天天数与季节的关系,旱季雨天率为 10%,雨季雨天率为 20%。

将式(5)~(9)代入式(4)中,得到排水管道内疏浚污泥量的鲁棒优化模型如下:

泥量的增加速率变小;当疏浚频次为 10 次/年或更高时,疏浚污泥量达到最大值,并稳定不变。另外,疏浚污泥量的最大值与武汉市中心城区人口数量呈正相关,当常住人口数分别为 700 万人、800 万人、900 万人、1 000 万人时,疏浚污泥量最大值分别为 444 828、520 200、600 054、684 390 m^3 。根据武汉市中心城区常住人口发展趋势,预测 2025 年武汉市中心城区常住人口数达到 850 万人。程序输入人口数为 850 万人和 2 次/年的疏浚频次时,运行得到武汉市中心城区疏浚污泥量为 329 714 m^3 。

根据武汉市水务局市政排水管道疏浚验收流程,疏浚人员在对某一管段完成疏浚后 1 d 内,验收人员将对已疏浚管段和雨水口进行检查,检查结果需达到管道和雨水口内无沉积固体的要求。将达到这种程度的疏浚效果设定为 100%。当人口数量一定时,量化各疏浚频次对应的疏浚效果,图 3 为武汉市中心城区常住人口数为 700 万人(2019 年的中心城区人口数)时各疏浚频次的疏浚效果。在进行武汉市排水管网疏浚工作调度时,理论上可以通过增加

疏浚频次获得更好的疏浚效果。从图3可以看出,随着疏浚频次的增加,疏浚效果的提升越来越不显著,特别是当疏浚频次达到7次/年之后,提升效果更加不明显。同时考虑到疏浚工作的人力和物力等成本投入,建议武汉市中心城区选择疏浚频次为4次/年,此时疏浚效果接近80%。

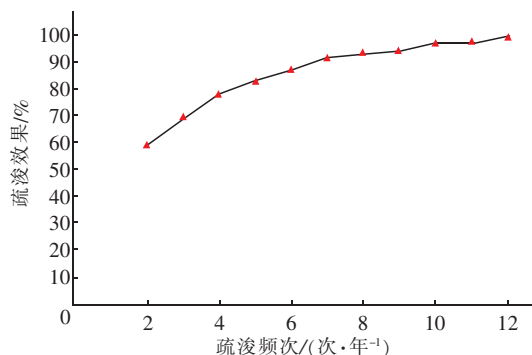


图3 不同疏浚频次的疏浚效果(人口数为700万人)

Fig.3 Dredging effect under different dredging frequencies
(population of 7 million)

3 疏浚污泥量的影响因素

3.1 排水体制对疏浚污泥量的影响

选取武汉市青山区工业路区域进行分析,该区域存在分流制和合流制管网,且该区域分流区和合流区分布面积基本相同。对该区域2018年的疏浚污泥量进行统计分析,得到合流区疏浚污泥量为737.71 m³,占全区域疏浚污泥量的58%,而分流区疏浚污泥量仅为531.02 m³,明显低于合流区疏浚污泥量。合流区排水管道内生活污水和雨水混流,旱天污水在管道内流速较慢,污水中的悬浮物等易沉积,而且路面垃圾通过雨水口进入排水管网,造成的堵塞和沉积现象都比分流制雨水管网严重^[4],导致合流制排水管网产生的疏浚污泥量更多。建议在日常疏浚频次为4次/年的基础上,局部增加对合流区排水管道的疏浚频次。按此预测,2025年武汉市中心城区的疏浚污泥量将达到437 036 m³。

3.2 区域用地功能对疏浚污泥量的影响

选取各用地功能区(文教区、商业区、居民区和综合服务区)占地面积基本相同的青山区建设二路附近区域,分析区域用地功能对雨水管网疏浚污泥量的影响。2018年该区域的疏浚污泥量统计数据如图4所示,其中2月、5月、7月和10月分别处于冬、春、夏、秋季,选择这几个月的数据对同一功能区不同季节的疏浚污泥量进行对比分析。经统计,

2018年青山区建设二路各功能区域的疏浚污泥量依次为:商业区(46.9 m³)>文教区(35.0 m³)>居民区(29.0 m³)>综合服务区(19.3 m³)。商业区和文教区的疏浚污泥量随季节的变化更为明显,其中,商业区2月的疏浚污泥量为14.2 m³,而7月明显减少,仅为9.6 m³;居民区和综合服务区在不同月份的疏浚污泥量差异相对较小。该研究结果与潘伟亮等人^[5]的研究结果一致。

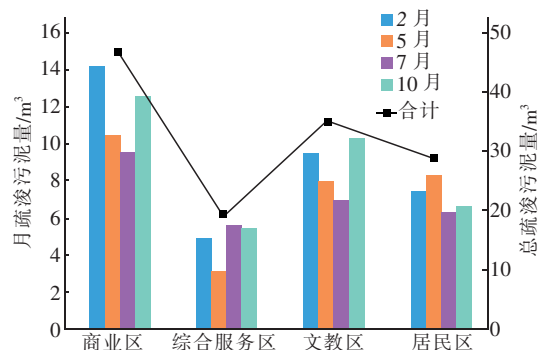


图4 不同功能区域的疏浚污泥量

Fig.4 Dredged sludge volume of different functional zones

研究发现,商业区流动人口较多,产生的垃圾会影响到疏浚污泥量,固体颗粒物质在雨水冲刷和路面清扫时,通过雨水口进入雨水管道中发生沉积^[6],该区域的疏浚污泥量明显高于其他区域。文教区人口流动大,在放学及假期后文教区内排水管道水流较小,固体颗粒沉积,导致该区域疏浚污泥量较高。而综合服务区因为基础卫生设施较好,管理完善,雨水管道中的沉积物相对较少。居民区生活用水较多,进入管道的固体物质较多,因此比综合服务区的疏浚污泥量要大,同时在居民区内有部分老旧社区排水管道不完善,管道过水断面小造成排水不畅,致使居民区的疏浚污泥量增多。此外,各功能区不同的建筑物和绿化用地的分布也会影响疏浚污泥量^[7]。因此,需要加大商业区和文教区的疏浚频次,并加强对商业区清扫垃圾进入排水管道的监管。

3.3 季节与气候对疏浚污泥量的影响

研究中发现,季节对武汉市排水管道疏浚污泥量的影响较为明显。选取2018年1月—2019年4月武汉市各月的疏浚污泥量数据,按照春、夏、秋、冬四季以及旱季和雨季分析季节与气候对疏浚污泥量的影响,结果如图5所示。武汉市的季节根据气温进行划分,连续5 d平均气温低于10℃为冬季,高于22℃为夏季,10~22℃则为春季和秋季。2018

年武汉市各季节的持续时间如下:春季(3月21日—5月23日)、夏季(5月24日—9月20日)、秋季(9月21日—11月21日)、冬季(11月22日—3月20日),其中,雨季为5月—10月、旱季为11月—次年4月。

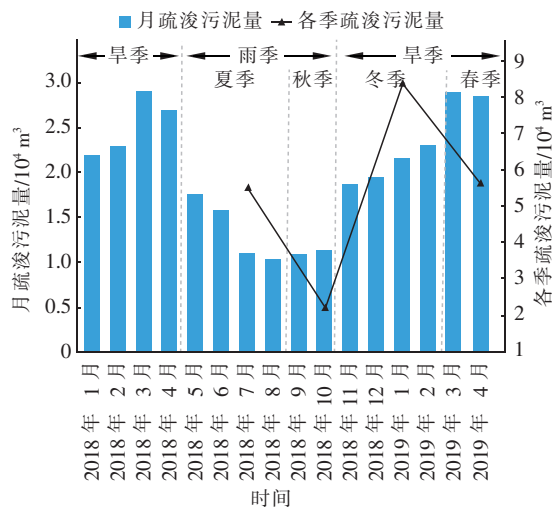


图5 武汉市2018年1月—2019年4月的疏浚污泥量

Fig.5 Dredged sludge volume in Wuhan during January

2018 to April 2019

由图5可见,疏浚污泥的产生在雨季和旱季有不同的特点。武汉市全年疏浚污泥量变化呈旱季多、雨季少的特点,旱季时每个月的疏浚污泥量均明显高于雨季,雨季月均疏浚污泥量为13 019.45 m³,仅为旱季疏浚污泥量(23 347.75 m³)的56%。经分析,雨季雨水较多,管道常处于水流状态,沉积现象少,且每次降雨过后雨水冲刷管道,管道内不易沉积。而旱季时降雨较少,合流制管道内为生活污水,固体物质含量高,极易在管道内沉积^[8];分流制雨水管道无水流,垃圾、树叶和沥青砂粒等通过路面清扫的方式进入雨水管道^[9],极易在管道内沉积,导致疏浚污泥量增多。

分析图5 各季度的疏浚污泥量发现,春季疏浚污泥量为49 649.27 m³,与夏季(48 181.82 m³)相差较小;但春季日均疏浚污泥量为775.77 m³/d,而夏季日均疏浚污泥量为401.52 m³/d,春季是夏季的1.9倍,且在4个季节中,春季日均疏浚污泥量最多,夏季日均疏浚污泥量最少。但是,冬季疏浚污泥总量最大,占全年疏浚污泥量的40%,日均疏浚污泥量为743.14 m³/d。研究发现,该结果与武汉市的疏浚调度有关。冬季与春季处于旱季,在汛期来临之前,是武汉市进行管道维护的重要时期,会加强

疏浚工作,因而疏浚污泥量多;夏季和秋季则处于雨季,以防涝排渍为主,疏浚污泥量相对较少。

3.4 管径和管材对疏浚污泥量的影响

以工业路区域的排水管网为研究对象,通过采集区域内各管道检查井内的疏浚污泥量,按照不同管径和管材,统计得到对应管道的疏浚污泥量,如图6所示。可见,随着管径的增大,相应管段的疏浚污泥量增多。管径为800 mm的钢筋混凝土管道中检查井的平均疏浚污泥量为1.34 m³/座,而当管径为1 800 mm时,平均疏浚污泥量达到3.95 m³/座,增加了150%;管径为800 mm的PVC管道中检查井的平均疏浚污泥量为0.89 m³/座,而当管径为1 800 mm时,平均疏浚污泥量为3.32 m³/座,疏浚污泥量增加明显。分析认为,管径越大,管道内水流与管道的接触面积就越大^[10],同时靠近管壁的水流速就越低,固体物质就越容易发生沉积。合流区管道需考虑雨水水量,设计管径一般比分流区更大,在旱天时,生活污水更易在合流制管道内发生沉积,因此,疏浚污泥量大于分流区。

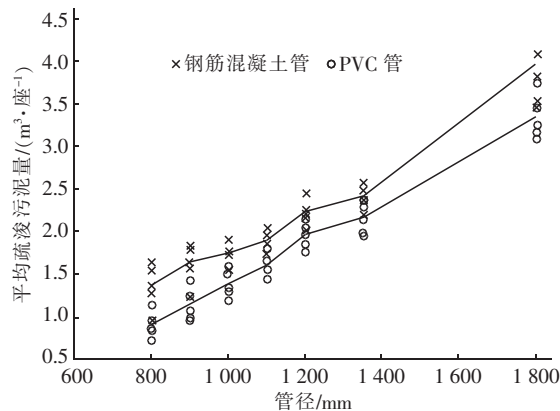


图6 不同管径和管材的疏浚污泥量

Fig.6 Dredged sludge volume under different pipe diameters and pipe materials

研究区域内的排水管道管材有PVC和钢筋混凝土。钢筋混凝土管道中检查井的平均疏浚污泥量均高于同规格的PVC管道。管径为800 mm的钢筋混凝土管道中检查井的平均疏浚污泥量为1.34 m³/座,比同管径的PVC管道(0.89 m³/座)多0.45 m³/座。管径为1 800 mm的PVC管道中检查井的平均疏浚污泥量为3.32 m³/座,比同管径的钢筋混凝土管(3.95 m³/座)减少了0.63 m³/座。管道内表面的粗糙程度与管道材料密切相关,影响管道内水体流动时的阻力。水体与管道接触的表面越粗

糙,水流受到的阻力就越大,流速受到影响而变慢,随水流迁移的固体悬浮物质越容易发生沉降,从而形成更多疏浚污泥。因此,建议多选择PVC管材。对于武汉市,可在承压要求不高的区域,尽量选用PVC材质的排水管。

4 结论

① 采用鲁棒优化理论建立武汉市中心城区疏浚污泥量的测算模型,按照现行2次/年的疏浚频次考虑,预测2025年武汉市中心城区的疏浚污泥量将达到329 714 m³。按照最佳疏浚效果下的4次/年考虑,测算得到2025年武汉市中心城区的疏浚污泥量为437 036 m³。

② 合流制排水管网的疏浚污泥量大于分流制;管网收集区域的用地功能对疏浚污泥量影响较大,影响顺序为:商业区>文教区>居民区>综合服务区;武汉市排水管道春季的日均疏浚污泥量最高,夏季最低;PVC管道产生的疏浚污泥量低于钢筋混凝土管;排水管道管径越大,疏浚污泥量就越大。

参考文献:

- [1] 栾忠庆. 青岛市雨水径流污染模拟及污染物总量计算[D]. 青岛:中国海洋大学,2007.
LUAN Zhongqing. The Study on Simulation of the Rainfall Runoff Pollution and the Calculation of Total Amount Pollutants in Qingdao [D]. Qindao: Ocean University of China,2007(in Chinese).
- [2] 马妍. 排水系统管内沉积物的冲刷输移特性与规律研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.
MA Yan. Study on Erosion Characteristic and Transport Principles of Sewer Sediment in Sewerage System [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2014(in Chinese).
- [3] 徐尚玲. 城市排水管道沉积物径流冲刷污染效应的研究[D]. 北京:北京建筑大学,2013.
XU Shangling. Researching on Pollution Load of Overflow in Combined Drainage Channels in Runoff Scouring [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture,2013(in Chinese).
- [4] 付博文,金鹏康,石山,等. 西安市污水管网中沉积物特性研究[J]. 中国给水排水,2018,34(17):119-122,127.
FU Bowen, JIN Pengkang, SHI Shan, et al. Sediment characteristics of sewer network in Xi'an City [J]. China Water & Wastewater,2018,34(17):119-122,127(in Chinese).
- [5] 潘伟亮,何强,李果,等. 重庆市主城区排水管道沉积物性质研究[J]. 中国环境科学,2014,34(6):1485-1490.
PAN Weiliang, HE Qiang, LI Guo, et al. Study on characteristics of sewer sediments in a mountainous city [J]. China Environmental Science, 2014, 34(6): 1485-1490(in Chinese).
- [6] 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).
- [7] 尚宇,周毅,廖安意,等. 雨水管道沉积物沉淀特性及主要污染物含量分布[J]. 环境科学,2018,39(8):3696-3703.
SHANG Yu, ZHOU Yi, LIAO Anyi, et al. Sedimentation characteristics and pollutant content distribution of storm drainage sediments [J]. Environmental Science, 2018, 39(8):3696-3703(in Chinese).
- [8] GROMAIRE M C, GARNAUD S, SAAD M, et al. Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers[J]. Water Research, 2001,35(2):521-533.
- [9] WANG Q, ZHANG Q, DZAKPASU M, et al. Transferral of HMs pollution from road-deposited sediments to stormwater runoff during transport processes [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2019,13(1):13.
- [10] 周英,徐瑾,侯齐敏. 天津市排水系统沉积物的沉积状况及影响因素[J]. 中国给水排水,2018,34(17):116-118.
ZHOU Ying, XU Jin, HOU Qimin. Sedimentary condition and influence factors of sediments in drainage system of Tianjin City [J]. China Water & Wastewater, 2018,34(17):116-118(in Chinese).

作者简介:桑稳姣(1974-),女,湖北公安人,博士,副教授,主要从事水污染控制与污泥减量等方面的研究。

E-mail:whlgdxswj@126.com

收稿日期:2020-09-06

修回日期:2020-10-21

(编辑:刘贵春)