

# 城市雨水管道排水能力评估中不同方法的对比分析

杨 涛<sup>1</sup>, 陈宝玉<sup>1</sup>, 王正雄<sup>1</sup>, 杜立刚<sup>1</sup>, 王旭峰<sup>1</sup>, 杨 墨<sup>2</sup>

(1. 武汉市政工程设计研究院有限责任公司, 湖北 武汉 430023; 2. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010)

**摘 要:** 以某排水区为例, 利用 ArcGIS 对其下垫面进行快速解析和预处理, 实现了复杂分布条件下下垫面和排水区的耦合。然后, 根据 InfoWorks ICM 模拟结果中排水区的产流情况和管道汇流情况, 对比分析了综合径流系数法、分项径流系数法和下垫面扣损法的差异。以管道排水能力能够承受的降雨事件对应的重现期为依据, 利用以上 3 种方法分别评估了案例区雨水管道的排水能力, 并结合下垫面扣损法评估结果阐述了其工程意义。

**关键词:** 城市雨水管道; 排水能力评估; 综合径流系数法; 分项径流系数法; 下垫面扣损法; 水动力学模型

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)23-0134-05

## Comparison of Different Methods Applied in Drainage Capacity Assessment of Municipal Storm Sewers

YANG Tao<sup>1</sup>, CHEN Bao-yu<sup>1</sup>, WANG Zheng-xiong<sup>1</sup>, DU Li-gang<sup>1</sup>, WANG Xu-feng<sup>1</sup>,  
YANG Mo<sup>2</sup>

(1. Wuhan Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430023, China;  
2. Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430010, China)

**Abstract:** ArcGIS was used to quickly analyze and preprocess the underlying surface (US) in a drainage area, and the coupling between the underlying surface and the drainage area under complex distribution conditions was realized. Then, the difference among the integrated runoff coefficient method (IRCM), clausal runoff coefficient method (CRCM) and underlying surface deduction method (DM) was compared and analyzed according to the runoff process and conduits' confluence process of the drainage area simulated by InfoWorks ICM. The tolerable recurrence interval (TRI) of the rainfall was used as the criterion to assess the drainage capacity of municipal storm sewers in this case, all the three methods above were adopted and its engineering significance was revealed based on the assessment results of DM.

**Key words:** municipal storm sewer; drainage capacity assessment; integrated runoff coefficient method; clausal runoff coefficient method; underlying surface deduction method; hydrodynamic model

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2014BAL04B04、2015BAL01B02)

推理公式法在城市雨水管网规划与设计中的应用广泛,其核心是恒定流方程和汇水面积叠加。但随着汇水面积的增大,降雨分布的时空不均性、管网汇流的过程性、地形地貌及下垫面的多样性对推理公式法的影响愈加明显。因此,2016版《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)要求汇水区面积超过 $2\text{ km}^2$ 时,宜采用数学模型法计算雨水设计流量。

下垫面是指包括屋面、地面、水面等降雨受水面的总称,而排水分区是根据排水管渠的收水边界划分的、相对独立汇集排放雨水的区域,二者本质不同。下垫面种类和空间分布的多样性客观存在,种类不同则产流量不同,位置不同则入网时间不同,排水区较大时这种情况对管道排水能力评估带来的影响更加明显且不容忽视。

目前,国内常用的建模方法有综合径流系数法(IRCM)和下垫面扣损法(DM)。在基于IRCM法的模型中,排水区下垫面属性信息被概化,各类型下垫面采用同一个径流系数(一般取综合径流系数),汇水面积乘以降雨强度即得其产流量。在基于DM法的模型中,产流量为汇水区接收的降雨量扣除土壤入渗量(暂不考虑填洼和生物滞留)之后的裕量,下垫面不同则入渗量、产流量不同。由此可见,DM法更接近水文学地表径流的原理,但DM法需要大量真实可靠的下垫面基质特征资料,而IRCM法则简单易行、操作方便。目前,基于DM法的建模研究与应用中,下垫面基质特征多采用SWMM软件默认值,也有部分地区通过专门的研究对下垫面水文参数进行校准,但总体来说这部分资料普遍存在针对性不足、种类偏少的情况。事实上,我国的给排水规范及规划往往只提供不同下垫面的径流系数,一般没有工程所在地下垫面基质特征资料可供参考。结合我国国情,根据规范和规划对不同的下垫面采用不同的径流系数,基于分项径流系数法(CRCM)的建模方法更容易实现。因此,笔者以某排水区域为例,利用ArcGIS 10.2和InfoWorks ICM 5.5软件模拟IRCM、CRCM和DM这3种方法条件下的地块产流和管道汇流情况,以管道排水能力能够承受的降雨事件所对应的重现期(TRI)作为评估依据,利用3种方法分别对案例区的雨水管道进行评估。

## 1 原理介绍

### 1.1 案例区概况

该案例区总面积为 $210.06\text{ hm}^2$ ,地势平坦,排

水体制为分流制。案例区内仅有一个排水分区,共有雨水检查井372个(含排水口),雨水管道371根、管径为 $500\sim 2\,200\text{ mm}$ 。案例区下垫面的组成以及YS362子排水区和枫叶社区的位置如表1和图1所示。

表1 案例区下垫面组成

Tab.1 Constitution of underlying surface in the case area

项 目	面积/ $\text{hm}^2$	占比/%	径流系数
裸地	29.11	13.86	0.30
建筑	56.08	26.70	0.95
铺装	37.46	17.83	0.85
道路	52.06	24.78	0.90
绿地	33.82	16.10	0.15
水域	1.53	0.73	0
合计	210.06	100.00	0.69

注: 案例区内水域为封闭水体,径流未接入市政管网。

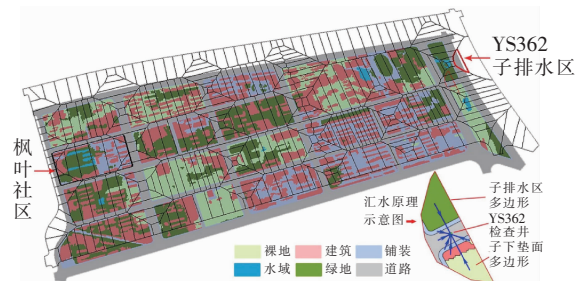


图1 案例区下垫面及子排水区的叠合效果

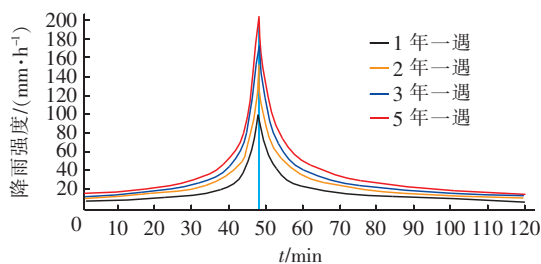
Fig.1 Overlay rendering of underlying surface and subcatchments in the case area

### 1.2 原理介绍

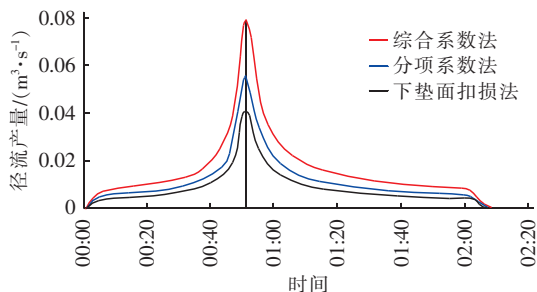
IRCM是一种常规方法,在计算机技术引入雨水管网水力计算之前,为了简化计算过程,设计中多采用该方法。IRCM最大的特点就是“删繁就简”“万象归一”,所有子排水区的径流系数均采用同一值。CRCM和DM两种方法计算量大,需借助ArcGIS对资料进行预处理<sup>[1]</sup>。首先,加载案例区下垫面shp文件,利用Create Thiessen Polygons功能根据检查井的分布自动划分子排水区(见图1),检查井属性信息会自动赋予包围它的子排水区多边形。然后,利用Intersect功能以子排水区多边形为边界对下垫面多边形进行划分,将被子排水区多边形完全包含的子下垫面自动划入子排水区(见图1)。最后,利用Explode功能将共用编号的子下垫面多边形组分开,使各个子下垫面多边形独立编号,以便于建模。经过前述操作,地块面积、位置等空间信息和用地性质等属性信息完成了自下垫面向子排水区多

边形的转移,进而实现了模型中雨水从降雨事件到下垫面、子排水区和管网的转移。

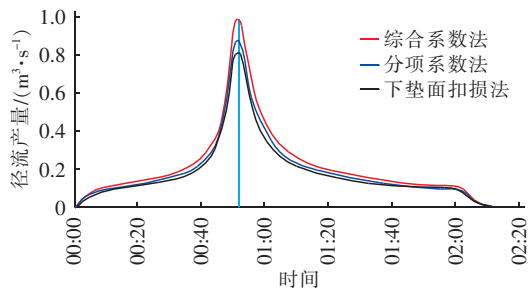
在 InfoWorks ICM 软件中,IRCM 模型以子排水区多边形为基本产流单元创建子排水区,最小面积为  $768.86 \text{ m}^2$ 、最大面积为  $22\,516.19 \text{ m}^2$ ,共计 370 个,子排水区和检查井一一对应;CRCM 模型和 DM 模型均以子下垫面多边形为基本产流单元创建子排水区,最小面积接近零、最大面积为  $14\,846 \text{ m}^2$ ,共计 4 192 个,子排水区和检查井多一对应(见图 1)。为便于对比分析,IRCM 模型中子排水区的径流系数统一设定为 0.69(案例区的综合径流系数),CRCM 模型中子排水区的径流系数则根据下垫面性质按照表 1 分别设定。DM 模型中绿地和裸地的渗流过程采用 Horton 入渗模型模拟,最大渗透率分别为 125、76 mm/h,最小渗透率均为 6.3 mm/h,入渗递减率均为  $2.0 \text{ h}^{-1}$ ;其他地块则按照表 1 设置固定径流系数<sup>[2]</sup>。



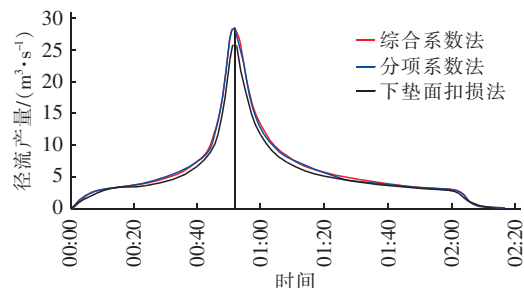
a. 设计降雨曲线



b. YS362 子排水区的产流曲线



c. 枫叶社区的产流曲线



d. 总排水区的产流曲线

图2 设计降雨曲线和不同集水区的产流曲线

Fig. 2 Design rainstorm curves and runoff curves of different catchments

## 2.2 管道汇流分析

管网末端为自由流出,与  $P=1, 3$  和 5 年时管道 YS400-YS72 的过流曲线见图 3(a)~(c),  $P=2$  年时管道 YS400-YS72 的蓄水体曲线见图 3(d)。  $P=1$  年时不同位置管道的峰值流量和时间及总过流量统计结果见表 2。由图 3 可知,  $P=1$  年时管道的过流曲线与降雨过程曲线相似,为典型的单峰型,

## 2 结果与讨论

### 2.1 地块产流分析

本研究中降雨事件采用芝加哥雨型降雨过程,时间序列步长  $\Delta t = 1 \text{ min}$ ,雨峰系数  $r = 0.398$ ,暴雨强度公式见式(1),所得降雨过程线见图 2(a)。当降雨重现期  $P = 1$  年时,YS362 子排水区、枫叶社区及总排水区的产流过程线分别见图 2(b)~(d)。可知,地块面积越小、下垫面组成越单一,3 种模型计算所得的产流量差别就越明显;地块面积越大、下垫面种类越多,3 种模型计算所得的产流量差别就越小。后者是因为本研究中综合径流系数采用的是分项径流系数的加权平均值,并非按照《室外排水设计规范》要求依据建筑密度取值。

$$q = \frac{885(1 + 1.58 \lg P)}{(t + 6.37)^{0.604}} \quad (1)$$

式中:  $q$  为暴雨强度,  $\text{L}/(\text{s} \cdot \text{hm}^2)$ ;  $P$  为设计重现期,年;  $t$  为降雨历时,  $\text{h}$ 。

$P=3$  年和 5 年时管道的过流曲线为多峰型,这说明在水流的汇聚过程中,各支管转输的雨水到达设计断面的时间不同,而随着降雨强度的增大,单股水流对管道过流曲线的影响越来越显著。对比图 3(b)和(c)可知,  $P=3$  年和 5 年时管道的过流曲线相似且峰值流量相近,这说明此时管道中出现压力流。理论上雨水管道存在满管非承压的临界状态,但实

际中由于管道过流量随时间适时变化,该临界状态无法长久保持,因此在实际降雨模拟中一旦管道的  $V-t$  曲线出现平直段而且此时管道内蓄水体积不小于其有效存水容积,即可认为此时管道中出现压力流。由图 3(d) 中管道 YS400-YS72 的  $V-t$  曲线可知,  $P=2$  年时管道中已经出现压力流,与前述结论一致,IRCM、CRCM 和 DM 这 3 种模型的压力流持续时间分别为 25、22 和 16 min。在压力流状态下,其排水动力是管道上下游液面高程差形成的水

力坡度。由于案例区地势平坦,上游检查井溢流后水流的水力坡降变化不大,因此管道出现压力流后,随着降雨强度的增大,管道峰值流量增幅有限。由表 2 可知,管道峰值流量发生时间均滞后于降雨峰值时间,这充分说明了管道汇流的过程性;另外,越靠近管网上游,CRCM 模型的计算结果与 IRCM 和 DM 模型的计算结果差异越大,反之越靠近下游则差异越小,这说明汇水区下垫面基质不同则产流量不同,而汇水区越大、下垫面种类越多则差异越小。

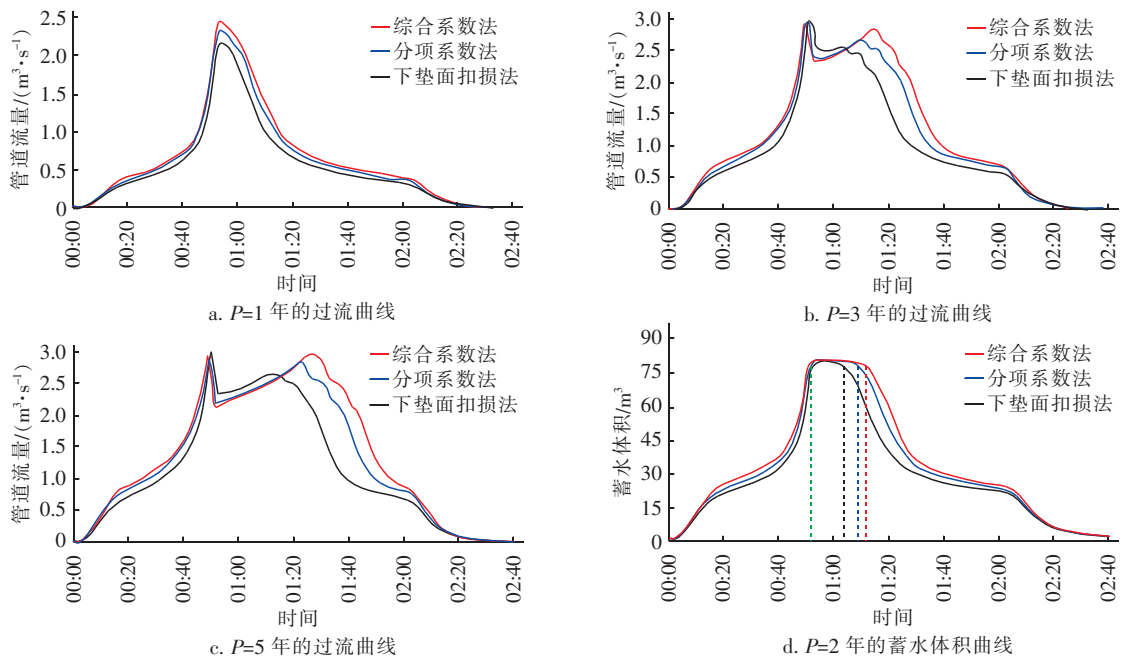


图 3 管道 YS400-YS72 的过流曲线和蓄水体积曲线

Fig. 3 Flow curves and stormwater volume curves of conduit YS400-YS72

表 2 典型管段的计算结果

Tab. 2 Simulation results of some typical conduits

管段编号	IRCM				CRCM				DM			
	TRI/ 年	$Q_{\max}/$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	峰现 时间	$\Sigma Q_i/$ $10^3 \text{ m}^3$	TRI/ 年	$Q_{\max}/$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	峰现 时间	$\Sigma Q_i/$ $10^3 \text{ m}^3$	TRI/ 年	$Q_{\max}/$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	峰现 时间	$\Sigma Q_i/$ $10^3 \text{ m}^3$
YS4-YS6	5	0.05	00:51	0.08	3	0.06	00:51	0.11	5	0.06	00:51	0.10
YS400-YS72	<1	2.44	00:54	6.24	1	2.34	00:54	5.83	1	2.17	00:55	5.14
YS109-YS116	<1	4.02	00:56	11.11	1	3.97	00:55	10.67	1	3.71	00:56	9.58
YS391-YS384	1	10.17	01:00	29.15	1	9.90	01:00	28.05	1	9.19	00:59	24.85
YS365-YS362	1	0.28	00:52	0.53	1	0.28	00:52	0.55	1	0.26	00:52	0.50
YS376-YS369	<1	2.12	00:55	5.29	1	1.96	00:54	4.86	1	1.75	00:54	4.25
YS326-YS314	1	4.09	00:55	11.33	1	4.17	00:54	11.93	1	4.04	00:55	11.12
YS275-YS384	5	7.44	00:58	20.58	3	7.87	00:57	21.97	3	7.50	00:57	20.44
YS384-YS385	5	17.54	00:59	49.73	5	17.67	00:59	50.02	5	16.62	00:59	45.28

2.3 排水能力评估

管道排水能力越强,说明其能够承受的降雨事

件的重现期就越大,反之亦然,即管道排水能力与其能够承受的降雨事件重现期成正比。因此,笔者以

管道能够承受的降雨事件的重现期作为评估管道排水能力的依据,而以峰值流量发生时管道的充满度是否大于1作为其排水能力是否充足的判断标准。若峰值时刻管道充满度大于1,说明在该降雨重现期对应的降雨过程中管道会出现压力流,则该管道即为管网的制约管道,重现期越小的管道制约越严重。3种方法的排水能力评估结果见表3,不同位置处管道的排水能力评估结果见表2,DM模型中雨水管网系统的排水能力评估见图4。由评估结果可知,3种方法的评估结果有差异,原因与上述分析一致;总的来讲,案例区内大多数管道只能抵抗1年一遇的降雨,排水能力普遍偏低;案例区干管的排水能力不足,且制约管道位于管网下游。

表3 雨水管网系统的排水能力评估

Tab.3 Assessment results of drainage system

管道重现期	占比/%		
	IRCM	CRCM	DM
$P < 1$ 年	15.4	7.0	0
$1 \text{ 年} \leq P < 2$ 年	69.5	77.4	65.3
$2 \text{ 年} \leq P < 3$ 年	5.7	6.5	19.1
$3 \text{ 年} \leq P < 5$ 年	1.9	1.6	5.1
$P \geq 5$ 年	7.5	7.5	10.5

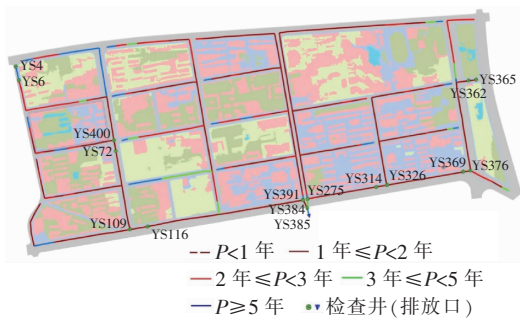


图4 下垫面扣损法对雨水管网系统排水能力的评估

Fig.4 Assessment results of drainage system by DM

### 3 结论

① 基于 ArcGIS 预处理,复杂下垫面条件下 InfoWorks ICM 水动力学模型得以高效创建。本研究借助 ArcGIS 强大的空间分析功能和丰富的数据管理功能,实现了下垫面和排水区的耦合,使复杂数学模型的创建过程更加便捷、合理。

② 使用综合径流系数法、分项径流系数法和下垫面扣损法分别评估了案例区雨水管网排水能力,并对比分析了三者异同。根据模拟结果建议如下:若下垫面数据(用地性质+基质特征)充足,采

用下垫面扣损法;若只有用地性质资料,可用分项径流系数法;若基础资料较少,可用综合径流系数法。综合径流系数法、分项径流系数法和下垫面扣损法这3种方法的工作量和运算量逐渐减少,模拟难度逐渐降低,但与客观实际的偏差逐渐增大。

③ 以管道能够承受的降雨事件重现期为依据,利用3种方法评估了案例区现状雨水管网的排水能力。根据排水能力评估结果可以快速定位制约管道的位置,制约管道的位置越靠近下游意味着其对整个管网的影响越显著。管道排水能力的评估和定位,不仅有助于运维人员制定针对性的维护方案,还能够为城市管理者指挥排涝防汛工作和开展排水设施升级改造工作提供科学依据。重现期越小、位置越靠近下游的管道越应该予以重点关注,升级改造时越应该予以优先实施。

### 参考文献:

- [1] Mair M, Sitzenfrie R, Kleidorfer M, et al. GIS-based applications of sensitivity analysis for sewer models[J]. Water Sci Technol, 2012, 65(7): 1215-1222.
  - [2] 陶涛, 颜合想, 李树平, 等. 城市雨水管理模型中关键问题探讨(二)——下渗模型[J]. 给水排水, 2017, 43(9): 115-119.
- Tao Tao, Yan Hexiang, Li Shuping, et al. Discussion on key issues in urban rainwater management model (II): infiltration model[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(9): 115-119 (in Chinese).



作者简介:杨涛(1990-),男,湖北武汉人,硕士,工程师,主要研究方向为污水资源化及区域低影响开发。

E-mail: cnyangtao@126.com

收稿日期:2019-03-22