

城市雨水管理

# 基于水力模型的年径流总量控制率研究及应用

付 浩, 邱长浩

(江苏省城镇与乡村规划设计院, 江苏 南京 210019)

**摘 要:** 作为海绵城市建设的核心指标,年径流总量控制率大多来源于自上而下的直接赋值,较少校核其目标的可达性。基于城市综合流域排水模型系统软件 InfoWorks ICM,建立经率定验证的产-汇流、管流及 SUDS 等系列模型,模拟典型用地不同海绵设施配置方案下的年径流总量控制率。以此为基础,由点及面计算排水分区层面的年径流总量控制率,并利用模型从侧面进行校核,验证目标的可达性;基于校核结果,制定年径流总量控制率应用图斑,为实际应用提供路径。

**关键词:** 海绵城市; 年径流总量控制率; 水力模型; 目标校核

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)09-0115-05

## Research and Application of Volume Capture Ratio of Annual Rainfall Based on Hydraulic Models

FU Hao, QIU Chang-hao

(Jiangsu Institute of Urban & Rural Planning and Design, Nanjing 210019, China)

**Abstract:** The volume capture ratio of annual rainfall, also known as a core indicator of sponge city construction, mostly comes from direct assignment from top to bottom, and the reachability of its target is seldom checked. A series of calibration and verified mathematical models of production-confluence, pipe flow and SUDS were established based on urban integrated drainage modeling system—InfoWorks ICM, and volume capture ratio of annual rainfall of typical sites under different sponge facility configuration schemes were simulated. Based on this, the volume capture ratio of annual rainfall of different drainage zones were calculated from point to area, and the model was used to check from the side which aimed to verify the reachability of objectives. According to the checked results, the application chart spot of the volume capture ratio of annual rainfall was established to provide a practical path for local application.

**Key words:** sponge city; volume capture ratio of annual rainfall; hydraulic model; objective check

海绵城市建设目标包括径流总量控制、径流峰值控制和径流污染控制。年径流总量控制率是径流总量控制的指标,是海绵城市建设目标的集中体现,也是径流峰值控制和污染控制的实施载体。因此,海绵城市建设的首要任务就是明确年径流总量控制

率。目前我国海绵城市年径流总量控制率的获取方法多为逐级分解赋值法,较少进行年径流总量控制率可达性校核。如康丹等人<sup>[1]</sup>提出的“三级法”将年径流总量控制率指标落地。少量文献运用 SWMM 软件进行了地块层面的校核,但并未上溯一

级从排水分区层面进行年径流总量控制率校核。

城市内涝、河道水环境等水系统问题往往体现在地块上一级的排水分区层面,排水分区及城市层面年径流总量控制率目标可达性与城市水系统反馈问题息息相关。针对上述问题,笔者利用城市综合流域排水模型系统软件 InfoWorks ICM 建立了产-汇流、管流、二维城市/流域洪涝淹没模型及可持续城市排水系统(SUDS)模型,并用实际降雨及内涝资料进行率定验证<sup>[2]</sup>。基于率定的数学模型,从海绵城市建设的基础——地块出发,模拟不同用地类型地块的年径流总量控制率,分析在不同标准海绵设施配置方案下的地块径流控制潜力,在此基础上,利用数学模型验证目标可达性,并基于验证结果,制定应用图斑,为地方海绵城市建设提供核心路径。

## 1 研究区域概况

研究区域的面积为 4.23 hm<sup>2</sup>,为独立排水区,位于江苏省南部,目前该区域为建成区及待建区的复合片区,现状地块类型主要为行政办公、居住、商业及公用设施等。该市从城市层面提出了 75% 的年径流总量控制率总目标。

## 2 模型建立及率定验证

### 2.1 基础资料

#### ① 管网

研究区域的管网数据来源于管线普查资料,每间隔 200 m 概化检查井及管网,最终将研究区域概化为 255 根管道及 314 个检查井节点,并进行标高缺失核查与合理推断。

#### ② 典型降雨数据

分析 1987 年—2016 年的降雨数据,发现 1990 年的平均降雨量及 24 h 最大降雨量与多年平均值分别相差 0.23% 和 0.1%,采用此年的逐日降雨数据并参照江苏省南部地区 24 h 雨型时程比例分配至小时,利用芝加哥雨型将小时降雨量分配为 525 600 个降雨数据,为年径流总量控制率的模拟提供降雨资料。

内涝计算采用近年来有完整内涝统计数据的典型降雨资料,即 2015 年 6 月 2 日的逐分钟降雨资料(相当于百年一遇降雨)。

#### ③ 典型用地下垫面

典型用地下垫面解析为水力模型计算的基础,将公共管理与公共服务设施用地、商业服务业设施用地、居住用地、道路与交通设施用地下垫面分解为

道路(含铺装)、建筑及绿地 3 部分,分析下垫面比例构成,解析结果见图 1。

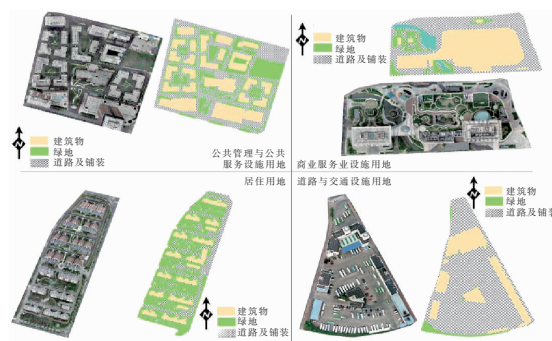


图1 典型用地下垫面解析示意

Fig. 1 Analysis diagram of typical ground surface

### 2.2 模型建立

#### ① 产-汇流模型

产流模型采用 HORTON 模型,汇流模型选用 SWMM 径流模型,汇流模型需定义子集水区宽度和地表曼宁粗糙系数,采用 Newton-Raphson 迭代法由连续性方程和曼宁方程联立求解流量和水深<sup>[3-4]</sup>。

#### ② 管流模型及流域洪涝淹没模型

选取动态波演算<sup>[4]</sup>,通过求解圣维南流量方程组得到管渠的洪水演进。在一维管流模型建立的基础上,建立流域洪涝淹没模型,采用二维有限体积法求解浅水流方程组,模拟出洪水在地面上行进的过程。首先引入地面高程模型;随后考虑地面上不同类型地块糙率对流速的影响,引入城市中的各类建筑物及其他阻碍,并在模型中将各类建筑物及其他阻碍设置为空白区;最后将市政道路作为网格化区间引入,设置道路下沉,并进行网格化,网格化后降雨形成径流不再流经建筑等各类阻碍物内部。

#### ③ 可持续城市排水系统(SUDS)模型

SUDS 模型是区别于传统排水的另一种排水方式,其核心是通过暂时拦蓄和缓慢排放来控制 and 利用地表雨水。SUDS 模型选用设施为生物滞留池、绿色屋顶、透水铺装、植草沟、下凹式绿地等。

### 2.3 模型率定验证

#### ① 模型的参数设置

将现状研究区域下垫面概化为道路铺装(地块内部)、建筑、绿地及市政道路,相关参数见表 1。管网概化后,由于管网汇水区的面积增大,检查井的井室面积设置为之前的 5 倍;管壁粗糙系数采用 InfoWorks ICM 软件推荐值。

表1 4种不同类型产流表面相关参数属性

Tab.1 Four different types of runoff surface flow related parameter properties

下垫面类型	径流量类型	固定径流系数	表面类型	初期损失值/mm	汇流类型	地表曼宁粗糙系数
道路铺装(地块内部)	Fixed	0.60	Impervious	0.07	Rel	0.025
房屋	Fixed	0.90	Impervious	0.04	Rel	0.020
绿地	Fixed	0.20	Pervious	0.03	Rel	0.050
市政道路	Fixed	0.75	Impervious	0.10	Rel	0.018

## ② 模型率定结果

采用2015年6月2日的降雨数据进行模型的率定验证,该场降雨下,研究范围内现状共有6处内涝点,逐一利用实测内涝点比对模拟结果,显示实测5个易涝点位置及最高淹水深度均与模拟出的内涝风险点一致,模拟结果和实测统计误差在20%以内<sup>[2]</sup>,模拟结果较准确,建立的模型可信,对后续海绵方案模拟具有实际指导意义。

## 3 结果与讨论

### 3.1 现状年径流总量控制率

#### ① 典型地块

以地块为整体进行年径流总量控制率计算,不考虑地块内部管网设置,计算结果表明,居住用地现状年径流总量控制率最高,为55.11%;其次为公共管理与公共服务设施用地,年径流总量控制率为46.23%;商业服务业设施用地现状年径流总量控制率为35.20%,仅大于道路与交通设施用地的现状年径流总量控制率(27.11%)。

#### ② 研究区域

在地块现状年径流总量控制率分析的基础上,扩展至排水分区层面的年径流总量控制率分析,对

研究区域内概化的市政管网各出水口的总出流量(即集水区径流产生量)进行统计,作为整个片区的未控制流量,计算片区年径流总量控制率。结果表明,研究区域总降雨量为 $329 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,现状总出流量为 $150 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,现状年径流总量控制率为54.41%,相对于单地块模拟出的径流总量控制率较高,主要原因为研究范围内有一定量的待开发用地,降低了总体的产流量,提升了年径流总量控制率。

### 3.2 不同方案下年径流总量控制率计算结果

基于现状年径流总量控制率的计算结果,设置不同的地块海绵设施配置方案,通过对各种情景的模拟,计算各方案下典型地块及排水分区的年径流总量控制率。

#### ① 地块海绵设施方案组成

地块海绵设施方案分为地块改建和新建方案,地块改建和新建方案分别再设置高、低标准海绵设施配置方案,新建地块低标准配置方案与改建地块高标准配置方案相同。海绵设施中,地块透水铺装、绿色屋顶、下凹式绿地、生物滞留池及植草沟的设置综合考虑地块绿地率、建设密度、改造难易程度等自身条件,具体指标见表2。

表2 地块海绵设施配置方案

Tab.2 Sponge facilities configuration scheme of land plots

%

项目		低标准方案					高标准方案				
		透水铺装	绿色屋顶	下凹式绿地	生物滞留池	植草沟	透水铺装	绿色屋顶	下凹式绿地	生物滞留池	植草沟
改建地块	A	40	10	10	2	5	40	20	10	5	5
	R	40	—	5	2	2	40	—	10	5	5
	B	40	10	10	5	5	40	20	15	10	5
	S	20	—	2	5	2	30	—	5	10	5
新建地块	A	40	20	10	5	5	50	20	20	5	5
	R	40	—	10	5	5	50	—	15	10	5
	B	40	20	15	10	5	50	40	20	10	5
	S	40	—	5	10	5	40	—	10	15	10

注: A为公共管理与公共服务设施用地,R为居住用地,B为商业服务业设施用地,S为道路与交通设施用地。

#### ② 地块年径流总量控制率潜力分析

SUDS模型中的主要参数:Area of subcatchment(占子集水区面积百分比)为该海绵设施面积占子

集水区总面积的比例;Unit surface width(设施表面宽度)为设施出流面宽度;Initial saturation(初始饱和度和)指土壤的初始饱和度或储蓄层的初始含水



量;Impervious area treated(被处理的不透水面积比例)用来定义集水区不透水面积的百分之多少要经过海绵设施处理,参数取值见表3。

表3 海绵设施高标准配置方案参数(以居住用地为例)

Tab.3 Parameters of sponge facilities with high-standard scheme (taking the residential area as an example)

项 目	面积/m <sup>2</sup>	占子集水区面积百分比/%	设施表面宽度/m	被处理的不透水面积比例/%
透水铺装	9 289	16.84	50.0	30.0
下凹式绿地	2 483	4.50	2.0	25.0
生物滞留池	1 655	3.00	0	20.0
植草沟	828	1.50	2.0	10.0

采用经率定验证的 SUDS 模型计算改建、新建地块年径流总量控制率潜力,结果见表4。以改建居住用地为例,高标准海绵设施配置方案的年径流总量控制率为81.84%,比现状提高了26.74%;低标准方案的年径流总量控制率为71.93%,比现状提高了16.82%。峰值流量削减方面,低标准海绵设施配置方案的峰值较现状削减了40%,高标准削减了67.2%。

表4 地块年径流总量控制率潜力

Tab.4 Capacity of land plots in volume capture ratio of annual rainfall %

项 目	公共管理与公共服务设施用地	居住用地	商业服务业设施用地	道路与交通设施用地
现状	46.23	55.11	35.20	27.11
改建(低标准)	76.32	71.93	65.87	60.75
改建(高标准)	82.39	81.84	70.12	66.21
新建(低标准)	82.39	81.84	70.12	66.21
新建(高标准)	87.05	86.46	83.41	68.90

### ③ 研究区域年径流总量控制率

依据改建、新建地块的年径流总量控制率模拟结果,结合规划用地类型,合理赋值各地块年径流总量控制率。依据研究区域内各地块年径流总量控制率赋值结果,统计不同年径流总量控制率的面积,加权平均计算研究区域的年径流总量控制率,为79.14%,较现状年径流总量控制率(54.41%)增加了24.73%。传统开发模式下总出流量为 $223.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,年径流总量控制率仅为32.00%。

### 3.3 年径流总量控制率目标可达性分析

采用地块高、低标准海绵设施配置方案模拟研究区域内所有地块均建设完成后的年径流总量排放

情况,在新建、改建地块均取低标准海绵设施配置方案下,年径流排放量为 $72.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,年径流总量控制率为78%;在新建、改建地块均取高标准海绵设施配置方案下,年径流排放量为 $56.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,年径流总量控制率为83.3%,峰值均有大幅度降低,经地块加权平均计算得出研究区域79.14%的年径流总量控制率目标可达。如图2所示,研究区域某集水区峰值出流量削减了75.5%,现状研究区域内涝情况改善效果明显。

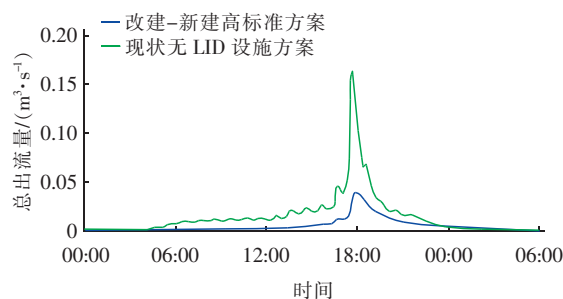


图2 研究区域某集水区现状和高标准配置方案总出流量对比

Fig.2 Comparison of total outflow between status and high-standard configuration scheme in a catchment of study area

### 3.4 年径流总量控制率成果应用

基于计算成果制定年径流总量控制率应用图斑,规划管理部门可直接要求地块下凹式绿地、绿色屋顶、透水铺装等海绵设施方案按此图斑年径流总量控制率进行设计。应用步骤分为3步:首先,规划管理部门查询地块年径流总量控制率,作为土地出让的条件;其次,地块方案设计时选择年径流总量控制率对应的降雨量,设计下凹式绿地、雨水花园、绿色屋顶、简易生物滞留池等不同低影响开发设施组合方式;最后,地块方案设计阶段用容积法或InfoWorks ICM进行地块建模,使设计方案满足地块年径流总量控制要求。

### 4 结论

基于城市综合流域排水模型系统软件InfoWorks ICM,建立了产-汇流、管流及SUDS等系列水力模型,通过率定验证,使其可精确有效地模拟本地海绵设施不同的配置方案。从海绵城市建设的基本落脚点出发,模拟了典型地块在不同标准海绵设施配置方案下的年径流总量控制率。在此基础上,由点及面,加权平均计算排水分区层面的年径流总量控制率,并利用模型从侧面进行了校核,验证加

权平均的目标可达性。基于校验结果,制作成可直接指导地方海绵建设的应用成果,可有效指导下一层次详细规划编制或供建设项目直接使用。

### 参考文献:

- [1] 康丹,叶青. 海绵城市年径流总量控制目标取值和分解研究[J]. 中国给水排水,2015,31(19):126-129.  
Kang Dan, Ye Qing. Study on evaluation and decomposition of volume capture ratio of annual rainfall in sponge city[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(19):126-129(in Chinese).
- [2] 王姝. 基于海绵城市理念的城镇雨水系统规划方案模拟与评价[D]. 天津:天津大学,2015.  
Wang Shu. Simulation and Evaluation of Plan on Urban Stormwater Drainage System Based on Sponge City Concept[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015(in Chinese).
- [3] 王晓晨. 基于低冲击开发技术的城镇区域雨水系统规划的优化[D]. 天津:天津大学,2013.  
Wang Xiaochen. Optimization of Urban Stormwater Drainage System Based on Low Impact Development[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013(in Chinese).
- [4] 谭琼. 排水系统模型在城市雨水水量管理中的应用研

究[D]. 上海:同济大学,2007.

Tan Qiong. Application of Drainage Model for Urban Storm Water Quantity Management[D]. Shanghai: Tongji University, 2007(in Chinese).



**作者简介:**付浩(1987-),男,江苏宿迁人,硕士,高级工程师,注册公用设备工程师(给水排水),注册城乡规划师,研究方向为给水排水,已发表论文数十篇,负责多项海绵城市专项规划编制工作。

**E-mail:** Hq1778@qq.com

**收稿日期:**2018-10-15

(上接第114页)

- 践[M]. 北京:高等教育出版社,2011.  
Qin Boqiang, Xu Hai, Dong Baili. The Principle and Practice of Eutrophic Lake Restoration and Management[M]. Beijing: High Education Press, 2011(in Chinese).
- [2] Wang C H, Zhu F, Zhao X, *et al.* The effects of N and P additions on microbial N transformations and biomass on saline-alkaline grassland of Loess Plateau of Northern China[J]. Geoderma, 2014, 213: 419-425.
- [3] Wang Y Y, Geng J J, Peng Y Z, *et al.* A comparison of endogenous processes during anaerobic starvation in anaerobic end sludge and aerobic end sludge from an anaerobic/anoxic/oxic sequencing batch reactor performing denitrifying phosphorus removal[J]. Bioresour Technol, 2012, 104: 19-27.
- [4] Zeng W, Li L, Yang Y Y, *et al.* Denitrifying phosphorus removal and impact of nitrite accumulation on phosphorus removal in a continuous anaerobic-anoxic-aerobic ( $A^2/O$ ) process treating domestic wastewater[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2011, 48(2): 134-142.
- [5] 吴昌永.  $A^2/O$ 工艺脱氮除磷及其优化控制的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.

Wu Changyong. Optimazation of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal in  $A^2/O$  Wastewater Treatment Process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010(in Chinese).



**作者简介:**吴春英(1973-),女,吉林图们人,博士,副教授,主要研究方向为生物脱氮处理以及污水资源化技术。

**E-mail:** chunyingwu.cn@gmail.com

**收稿日期:**2018-11-12