

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.13.020

# 基于特征参数的年径流总量控制率计算方法构建

卢亚静<sup>1</sup>, 胡方旭<sup>1,2</sup>, 肖志明<sup>1,3</sup>, 张书函<sup>1</sup>, 王丽晶<sup>1</sup>, 史秀芳<sup>1,4</sup>

(1. 北京市水科学技术研究院 防灾减灾研究所, 北京 100048; 2. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 深圳市广汇源环境水务有限公司, 广东 深圳 518003; 4. 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048)

**摘要:** 年径流总量控制率是海绵城市建设效果评估的关键指标,而无监测资料地区的年径流总量控制率计算是目前评价城市或区域尺度海绵城市建设效果的难点。通过分析年径流总量控制率与区域下垫面、海绵设施建设规模的关系,以排水分区为评估单元,选取透水铺装比例、下凹绿地比例、普通绿地比例、不透水比例和调蓄容积控制比例作为反映下垫面特征和海绵设施建设规模的5个特征参数,用多元线性和多元非线性回归方法进行模拟,建立了海绵城市建设区年径流总量控制率回归模型,并在北京市典型区域进行了验证。结果表明,排水分区的年径流总量控制率与各下垫面、海绵城市特征参数均有较好的相关关系,多元非线性回归方法的拟合结果优于多元线性回归方法;经有监测数据的排水分区验证,回归模型的模拟计算结果与实测结果匹配较好,误差范围为0.2%~1.3%,可用于无监测资料区域年径流总量控制率的计算。

**关键词:** 年径流总量控制率; 无监测资料地区; 多元回归模型; InfoWorks ICM

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)13-0124-08

## Construction of Calculation Method of Volume Capture Ratio of Annual Rainfall Based on Characteristic Parameters

LU Ya-jing<sup>1</sup>, HU Fang-xu<sup>1,2</sup>, XIAO Zhi-ming<sup>1,3</sup>, ZHANG Shu-han<sup>1</sup>, WANG Li-jing<sup>1</sup>,  
SHI Xiu-fang<sup>1,4</sup>

(1. Department for Disaster Prevention and Mitigation, Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Shenzhen Guanghuiyuan Environment Water Co. Ltd., Shenzhen 518003, China; 4. College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** The volume capture ratio of annual rainfall is a key index to evaluate the effect of sponge city construction. However, its calculation in areas without monitoring data is a bottleneck in sponge city construction effect evaluation from city or regional scale. By analyzing the relationship among volume capture ratio of annual rainfall, regional underlying surface and sponge facility construction scale, five characteristic parameters including the proportion of permeable pavement, the proportion of

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07103-002); 北京市科委课题(Z201100008220005); 国家自然科学基金资助项目(51709272)

通信作者: 卢亚静 E-mail: lyj@bwsti.com

concave-down green space, the proportion of green space, the proportion of imperviousness and the proportion of storage volume were selected to reflect the characteristics of underlying surface and the scale of sponge facility construction in each catchment. The regression model of volume capture ratio of annual rainfall in sponge city construction area was established by using multivariate linear regression and multivariate nonlinear regression, and verified in typical areas of Beijing. There was a good correlation between the volume capture ratio of annual rainfall and each underlying surface, the characteristic parameters of sponge city. And the fitting results of multivariate nonlinear regression were better than those of multivariate linear regression. The simulation results of the regression model matched well with the actual measured results in catchments with monitoring data, and the error range was between 0.2% and 1.3%, which indicated that the regression model could be used to calculate the volume capture ratio of annual rainfall in areas without monitoring data.

**Key words:** volume capture ratio of annual rainfall; area without monitoring data; multivariate regression model; InfoWorks ICM

为解决城镇化带来的一系列水资源、水环境、水安全、水生态问题,各地陆续开展了海绵城市建设,并且已初见成效<sup>[1]</sup>。对于海绵城市效果评估已有许多学者提出了不同的评价方法<sup>[2]</sup>,而年径流总量控制率是最为关键的考核指标。同时,该指标也是海绵城市建设的主要规划目标,与其相对应的设计降雨量是海绵城市规划、设计、建设的重要依据<sup>[3-4]</sup>。因此如何迅速准确地计算出区域的年径流总量控制率成为了研究热点。

已有的针对年径流总量控制率计算的研究往往依赖于历史降雨、水文监测数据,对区域整体的雨量控制效果进行评价<sup>[5-6]</sup>。2018年颁布的《海绵城市建设评价标准》(GB/T 51345—2018)中要求利用至少连续10年的降雨数据在水文或水力学模型中进行模拟,计算得到区域多年平均年径流总量控制率。模型使用历史降雨数据和当前下垫面数据,减少了因下垫面变化带来的误差,可以针对海绵城市建成区域进行精确计算,在很多地区取得了较好的应用成果<sup>[7-9]</sup>。但由于模型建立对于基础数据的要求很高,而许多地区缺乏精确的地形、河道、管网等数据;模型的率定需要精确的水质、水量监测数据,很多区域不具备布设相关监测站点或设施的条件,因此在无监测资料地区实施较为困难。针对此问题,笔者以监测资料完整的北京市东城区为分析对象,在排水分区内研究下垫面类型和年径流总量控制率的关系,通过回归分析推求无监测资料区域的年径流总量控制率计算方法,以期海绵城市的

整体建设效果评估提供支撑。

## 1 研究区概况

北京市东城区的下垫面类型见图1。

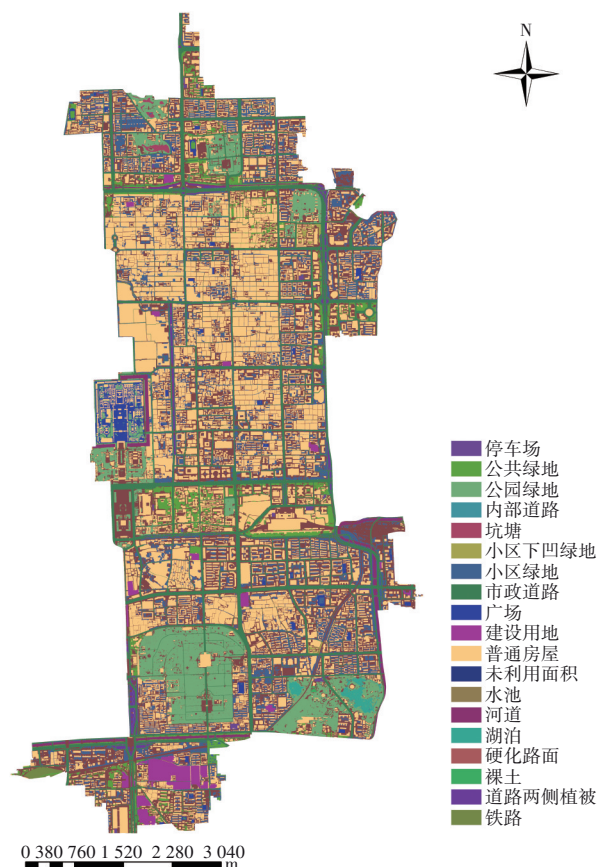


图1 北京市东城区下垫面类型解译结果

Fig.1 Satellite data interpretation results of underlying surface in Dongcheng District of Beijing City

北京市东城区位于市中心城区的东部,与朝阳区、丰台区、西城区毗邻,属于半湿润、暖温带,大陆性季风气候区。东城区地势平坦,由北向南缓倾,海拔30~50 m,总面积为41.84 km<sup>2</sup>;多年平均气温为11.7℃,多年平均降雨量为626 mm。

本研究中东城区下垫面解译主要运用了两套遥感影像数据,分别为高分一号卫星和高分二号卫星,用地类型数据综合利用了自动解译和人工判读方法获取。结合下垫面解译结果,挑选了部分区域进行现场调研,以校核解译数据的准确性。最终解译得到用地类型数据分为公园绿地、普通房屋、市政道路等19类,具体见图1。

## 2 数值模型构建与验证

本研究采用InfoWorks ICM软件建立研究区域雨水系统、排水系统以及地表漫流系统的数值模型,符合《海绵城市建设评价标准》对数值模型的要求。

通过资料收集整理以及实地调研,获取了东城区相关的基础地理、水文气象、排水设施等数据资料。通过同类下垫面合并,将东城区卫星解译数据中19种用地类型概化为屋面、道路、绿地、水域和其他5类,其中屋面、道路为不透水表面,绿地、水域和其他为透水表面。此外,为了率定模型参数,在东城区南北护城河雨水排放口进行水量监测,获得径流监测数据。数值模型的构建主要包括产流模型和汇流模型两个部分。产流模型确定从集水区进入排水系统的水量,汇流模型则确定降雨从集水区进入排水系统的时间。本研究中不透水表面产流模型采用Wallingford固定径流模型,透水表面产流模型采用Horton渗透模型,汇流模型采用非线性水库模型SWMM径流模型。率定得到的模型产汇流参数如表1所示。

表1 产汇流模型参数

Tab.1 Parameters of runoff and conflux models

产流表面	径流量类型	初期损失值/m	固定径流系数	Horton初渗率/(mm·h <sup>-1</sup> )	Horton稳渗率/(mm·h <sup>-1</sup> )	Horton衰减率/h <sup>-1</sup>	汇流参数
屋面	Fixed	0.002	0.85	—	—	—	0.015
道路	Fixed	0.002	0.80	—	—	—	0.012
绿地	Horton	0.006	—	125	12.7	2	0.12
其他	Horton	0.006	—	125	6.3	2	0.08
水域	Fixed	—	0	—	—	—	0.60

依据实测降雨径流数据对模型参数进行率定调整,通过已有的流量监测过程与模拟的流量过程进行纳什效率系数计算,来评价模拟过程曲线与实际监测结果的吻合程度。依据2019年7月17日降雨数据和同时间北护025雨水排口的流量监测数据对模型进行参数率定,得到纳什效率系数为0.859,监测值与模拟值的相关系数为0.871,模拟结果如图2(a)所示。依据2019年7月18日和8月7日场次降雨与同时间北护025雨水排口的流量监测数据进行参数验证,模拟结果如图2(b)、(c)所示。其中,2019年7月18日场次降雨过程数值模型的纳什效率系数为0.768,监测值与模拟值的相关系数为0.906;8月7日场次降雨过程数值模型的纳什效率系数为0.712,监测值与模拟值的相关系数为0.903。

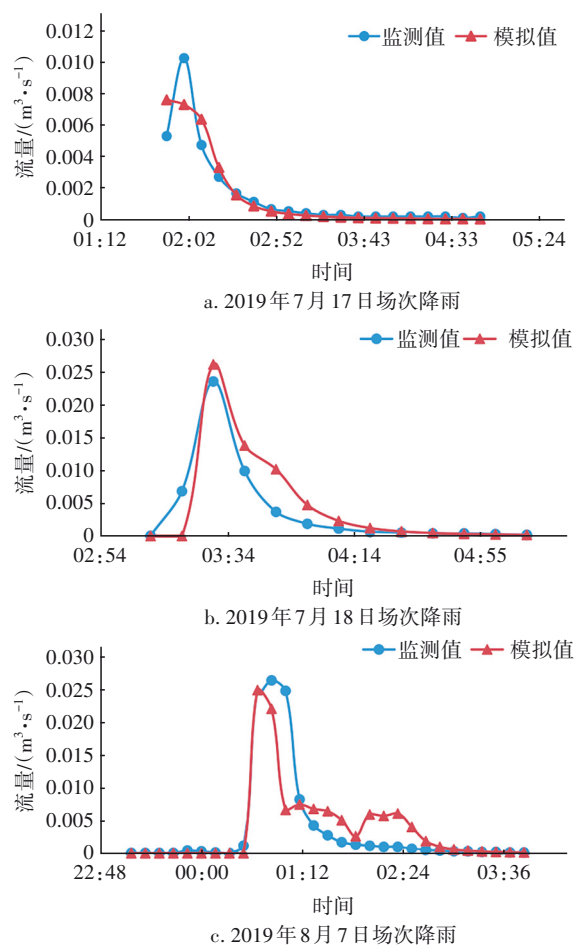


图2 北护025雨水排口的实测和模拟径流过程

Fig.2 Measured and simulated runoff at Beihu 025 outfall

从模拟计算结果可以看出,北护025雨水排口三场降雨的纳什效率系数均大于0.7,数值模型模



拟的可信度较高;三场降雨的监测径流过程与模拟径流过程的相关系数均在0.9左右,这说明模型模拟的径流过程与实际径流过程的变化趋势基本一致,拟合程度较高。模型验证结果表明,所构建模型的参数设置合理,模拟结果可靠,可以用于后续的模拟分析。

### 3 评估方法构建

#### 3.1 特征参数选取

综合考虑数值模型中影响年径流总量控制率计算的参数,主要包括下垫面类型和海绵城市建设情况,结合常见的海绵设施,包括下凹绿地、透水铺装、雨水调蓄池等,最终选取透水铺装比例( $X_1$ )、下凹绿地比例( $X_2$ )、普通绿地比例( $X_3$ )、不透水比例( $X_4$ )、调蓄容积控制比例( $X_5$ )5个特征参数来表征。其中,透水铺装比例是指排水分区内透水铺装面积 $S_1$ 占排水分区总面积 $S$ 的比例;下凹绿地比例是指排水分区内下凹绿地面积 $S_2$ 占排水分区总面积 $S$ 的比例;普通绿地比例是指排水分区内普通绿地面积 $S_3$ 占排水分区总面积 $S$ 的比例;不透水比例是指排水分区内不透水表面面积 $S_4$ 占排水分区总面积 $S$ 的比例;调蓄容积控制比例是指排水分区内调蓄设施所控制的总调蓄容积 $V$ 与不透水表面面积 $S_4$ 的比值,如式(1)所示。《雨水控制与利用工程设计规范》(DB 11/685—2013)中规定每1 000 m<sup>2</sup>硬化面积配建调蓄容积不小于30 m<sup>3</sup>。如果某排水分区内共有2 000 m<sup>2</sup>不透水表面,且调蓄设施的调蓄容积为30 m<sup>3</sup>,则此排水分区调蓄容积控制比例为50%;若调蓄设施的调蓄容积为60 m<sup>3</sup>,则此排水分区调蓄容积控制比例为100%。区域的调蓄设施包括雨水调节池、具有调蓄空间的景观水体、降雨前能及时排空的雨水收集池、洼地等,不包括仅低于周边地坪50 mm的下凹绿地的调蓄容积。

$$X_5 = \frac{1\,000 \times (V/30)}{S_4} = \frac{100V}{3S_4} \quad (1)$$

#### 3.2 情景设计与模拟

##### ① 排水分区及降雨事件选取

为了使构建的关系能够更加准确地评估建成区所有下垫面组成情况,本研究从已搭建好的东城区模型中挑选4个合适的排水分区(S1、S2、S3、S4)进行模拟分析,如图3所示。

根据《海绵城市建设评价标准》(GB/T 51345—2018)的要求,需要至少近10年的步长1 min或5

min的连续降雨作为降雨事件输入模型中,以此来模拟计算年径流总量控制率。本研究采用泰森多边形法计算出东城区6个站点2008年—2017年期间步长为5 min的平均降雨数据,将其作为最终的降雨数据输入模型中。

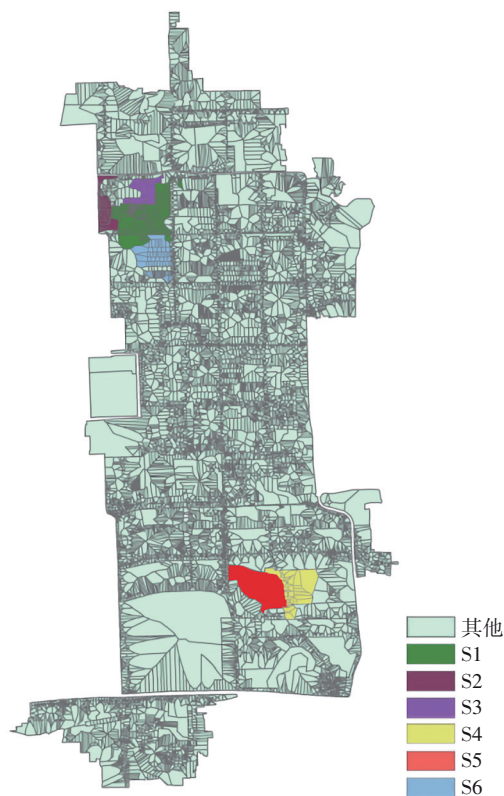


图3 排水分区的分布

Fig.3 Distribution of catchment

##### ② 情景方案设计

为分析各个自变量与因变量之间的关系,运用控制变量法,构建出不同模拟方案,通过数值模型模拟结果分析各因素与年径流总量控制率之间的关系。

以S3排水分区为例,通过改变5个特征参数中的某一个参数,在保证其他特征参数不变的情况下,设计出多种模拟方案。运用InfoWorks ICM模型模拟得到不同方案的年径流总量,根据模型模拟结果,计算出各方案的年径流总量控制率。通过在模型中改变调蓄池容积来调整调蓄容积控制比例,调蓄容积控制比例的设置以及年径流总量控制率的模拟结果见表2。

在进行海绵城市改造时,会把不透水道路改造成透水铺装道路,将普通绿地改造成下凹绿地,这

样就会导致在增加透水铺装比例的同时,相应的不透水表面比例下降;在增加下凹绿地比例的同时,普通绿地的比例下降。因此透水铺装比例与不透水比例存在共线性,下凹绿地比例和普通绿地比例存在共线性。在保证其他3个因素一定的情况下,

通过改变透水铺装面积,设计出11种透水铺装比例和不透水比例的模拟方案。同理,通过改变下凹绿地面积,设计出14种下凹绿地比例和普通绿地比例的模拟方案。各方案比例设置及模拟结果见表3和表4。

表2 不同调蓄容积控制比例下的年径流总量控制率模拟结果

Tab.2 Simulation results of volume capture ratio of annual rainfall at different proportions of storage volume %

方案编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
调蓄容积控制比例	0	1.0	3.0	5.0	7.0	10.0	15.0	20.0	30.0	50.0	60.0	80.0
年径流总量控制率	49.9	50.3	51.1	51.7	52.4	53.5	55.4	57.3	62.1	69.4	73.1	78.0

表3 不同透水铺装比例和不透水比例下的年径流总量控制率模拟结果

Tab.3 Simulation results of volume capture ratio of annual rainfall at different proportions of permeable pavement and imperviousness %

方案编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
透水铺装比例	0	2.0	3.0	4.0	7.0	9.0	11.0	13.0	14.0	16.0	18.0
不透水比例	65.8	63.8	62.8	61.8	58.8	56.8	54.8	52.8	51.8	49.8	47.8
年径流总量控制率	48.6	48.9	49.7	51.2	52.1	52.8	54.9	57.1	61.3	69.8	74.1

表4 不同下凹绿地比例及普通绿地比例下的年径流总量控制率模拟结果

Tab.4 Simulation results of volume capture ratio of annual rainfall at different proportions of concave-down green space and green space %

方案编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
下凹绿地比例	0	2.0	3.0	5.0	7.0	8.0	10.0	12.0	13.0	15.0	17.0	18.0	20.0	23.0
普通绿地比例	34.2	32.2	31.2	29.2	27.2	26.2	24.2	22.2	21.2	19.2	17.2	16.2	14.2	11.2
年径流总量控制率	48.6	49.8	51.0	52.4	53.5	55.0	56.3	57.6	58.8	60.2	61.5	62.8	64.2	66.8

为探究5个特征参数共同作用对年径流总量控制率的影响规律,根据海绵城市建设现状确定出各模拟因素水平,并根据各模拟因素水平构建出不同的正交方案用于模拟分析。

通过对各模拟因素的分析可知,同一排水分区透水铺装比例的取值会直接影响不透水比例,下凹绿地比例的取值会直接影响普通绿地比例,因此在创建模拟方案时,仅设置了调蓄容积控制比例、透水铺装比例和下凹绿地比例三者的模拟因素水平。根据目前海绵城市建设现状调研,存在部分区域海绵城市建设程度较高,调蓄设施容积较大,调蓄容积控制比例可以达到80%左右,甚至更高,透水铺装面积、下凹绿地面积可以分别占到排水分区总面积的15%左右。结合海绵城市建设现状,确定出各模拟因素水平,具体如表5所示。其中,调蓄容积控制比例设置5个梯度,透水铺装比例和下凹绿地比例均设置4个梯度,则每个排水分区可以构建出80个模拟方案,4个排水分区总共构建出320个模拟

方案。

表5 模拟因素水平

Tab.5 Level of simulation factors %

项目	水平1	水平2	水平3	水平4	水平5
调蓄容积控制比例	0	10	30	50	80
透水铺装比例	0	5	10	15	—
下凹绿地比例	0	5	10	15	—

### 3.3 回归分析

#### ① 单因素分析

对调蓄容积控制比例与年径流总量控制率( $\alpha$ )进行线性回归分析,其关系如下所示(模型拟合度 $R^2=0.995$ ):

$$\alpha_1 = 0.3678X_5 + 0.5011 \quad (2)$$

由于透水铺装比例( $X_1$ )与不透水比例( $X_4$ )、下凹绿地比例( $X_2$ )与普通绿地比例( $X_3$ )存在共线性问题,因此选用岭回归分析法处理,岭回归分析法是一种专用于共线性数据分析的有偏估计回归方法。采用SPSSAU软件进行岭回归分析,年径流总量控

制率( $\alpha$ )与透水铺装比例( $X_1$ )、不透水比例( $X_4$ )的关系如下所示(模型拟合度 $R^2=0.816$ ):

$$\alpha_2 = 0.631X_1 - 0.631X_4 + 0.869 \quad (3)$$

多重共线性处理原则:若模型仅用于预测,则只要拟合程度好,可不处理共线性问题,存在共线性问题的模型,往往不影响预测结果。模型拟合度 $R^2=0.816$ ,拟合度较好,共线性问题可不作处理,以下共线性问题进行同样的处理。

根据岭回归分析结果,年径流总量控制率( $\alpha$ )与下凹绿地比例( $X_2$ )、普通绿地比例( $X_3$ )的关系如

下所示(模型拟合度 $R^2=0.998$ ):

$$\alpha_3 = 0.392X_2 - 0.392X_3 + 0.619 \quad (4)$$

单因素分析结果表明,各参数与年径流总量控制率均有较好的线性关系,回归分析得到的模型与数据的拟合程度较高。由于参数之间存在共线性,不透水比例和普通绿地比例与年径流总量控制率呈现负相关关系。

## ② 多元线性回归分析

用SPSSAU软件对320个多因素模拟方案的计算结果进行岭回归分析,分析结果见表6。

表6 岭回归分析结果

Tab.6 Results of ridge regression analysis

项目	非标准化系数		标准化系数	$t$	$p$	$R^2$	调整 $R^2$	$F$
	$B$	标准误差	Beta					
常数	0.678	0.003	—	199.261	0.000**	0.959	0.958	$F(5,314)=1\ 461.694, p=0.000$
$X_1$	0.203	0.028	0.080	7.343	0.000**			
$X_2$	0.877	0.028	0.344	31.730	0.000**			
$X_3$	0.185	0.007	0.177	25.856	0.000**			
$X_4$	-0.367	0.007	-0.351	-51.283	0.000**			
$X_5$	0.380	0.006	0.765	67.488	0.000**			

注: \*\*表示 $p<0.01$ 。

从表6可知,回归得到的模型公式为:

$$\alpha = 0.678 + 0.203X_1 + 0.877X_2 + 0.185X_3 - 0.367X_4 + 0.380X_5 \quad (5)$$

从各参数的系数可以看出, $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_5$ 会对 $\alpha$ 产生显著的正向影响, $X_4$ 会对 $\alpha$ 产生显著的负向影响。回归模型的 $R^2$ 达到0.958,回归计算结果与模拟结果较为接近,但还有一定差距,这说明存在其他未考虑的因素对模型产生影响,线性回归模型需要改进。

## ③ 多元非线性回归分析

根据单因素分析和多元线性回归分析结果,结合拟合方程及拟合效果,提出年径流总量控制率多元非线性回归模型公式如下:

$$\alpha = b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_5 + \sum_{i=1}^5 a_{ij}X_iX_j + c \quad (6)$$

式中: $X_iX_j$ 体现各下垫面类型之间的相关性; $b_k$ 代表回归系数( $k=1,2,3,4,5$ ); $a_{ij}$ 代表待定多项式系数( $i,j=1,2,3,4,5$ )。式中参数均以小数计算。

采用SPSSAU软件,输入模拟得到的320组数据,即各方案特征参数值与其对应的年径流总量控制率,并将上面构建的多元非线性回归模型表达式

输入到非线性回归的模型表达式中。在软件中设定参数初始值,其中 $b_k$ 的初始值为1, $a_{ij}$ 和 $c$ 的初始值均为0。求解得到多元非线性回归方程式如下( $R^2=0.998$ ):

$$\alpha = 13.647X_1 + 14.448X_2 + 13.492X_3 + 12.768X_4 + 0.681X_5 - 0.746X_1X_5 - 1.032X_2X_5 - 0.676X_3X_5 + 0.227X_3X_4 - 12.586 \quad (7)$$

回归结果中,下凹绿地比例的系数最大,其次是透水铺装比例和普通绿地比例的系数,不透水表面比例的系数最小;而在4种下垫面类型中,下凹绿地的调蓄能力最大,不透水下垫面的调蓄能力最小,回归结果与实际情况相符。回归结果中 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 和 $X_5$ 的相关性较大,说明雨水调蓄池的调蓄效果受到其他下垫面类型的影响,这是由于蓄水池、雨水桶等设施通过收纳屋顶、绿地、路面等下垫面产生的径流,从而实现对雨水径流的调控。

综合考虑模型拟合度与系数合理性,多元非线性回归分析结果优于多元线性回归分析结果,因此选取多元非线性回归模型作为年径流总量控制率的回归计算模型。



## 4 回归模型验证

### 4.1 老城区数值模型验证

在东城区 InfoWorks ICM 模型中挑选另外两个排水分区 S5、S6 (见图3), 并新建立 16 个情景方案, 通过上述建立的多元非线性回归方程求得每个方案的年径流总量控制率的回归值, 并与东城区数值模型计算所得的模拟值进行比较分析, 以验证所得回归模型的准确性。16 个方案的计算结果见图4。可以看出, 16 个方案的模拟值与非线性回归模型的拟合值变化趋势几乎一致; 同一方案的模拟值与拟合值之间略有差异, 年径流总量控制率的误差最大值为 1.3%, 最小值为 0.2%, 平均值为 0.6%, 这说明所构建的回归模型在老城区的运用有效可行。

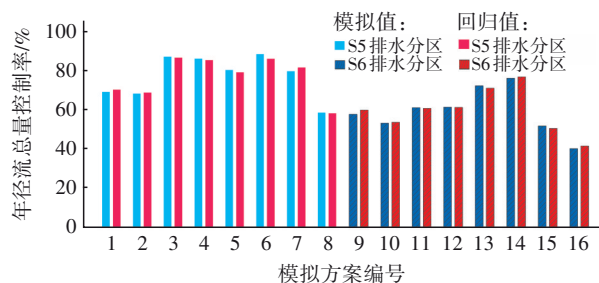


图4 年径流总量控制率模拟值与回归值的对比

Fig.4 Comparison of simulated and regression values of volume capture ratio of annual rainfall

### 4.2 老小区实测数据验证

在海绵城市老小区中选取海淀区双紫园小区作为回归模型验证区域。双紫园小区位于海淀区北洼路西侧, 总占地面积 2.3  $\text{hm}^2$ , 海绵设施建成于 2002 年, 是北京市最早建成的海绵型小区之一, 具有 10 年降雨、产流监测数据。双紫园小区的调蓄容积控制比例为 100%, 透水铺装比例为 44.0%, 下凹绿地比例为 0, 普通绿地比例为 30.8%, 不透水比例为 25.3%; 用双紫园小区 10 年的降雨、产流监测数据计算得到其年径流总量控制率为 96.5%。

根据实测下垫面参数进行计算, 双紫园小区年径流总量控制率的回归模型计算值为 96.7%, 与实测值相差 0.2%, 误差较小, 说明回归模型在老小区的运用效果良好, 年径流总量控制率回归模型模拟准确度较高。

### 4.3 新建区实测数据验证

在海绵城市新建区选取未来科学城园区作为回归模型验证区域。未来科学城园区位于北京市

昌平区定泗路北侧, 面积为 274  $\text{hm}^2$ , 是“城市地表径流污染控制综合观测和内涝防治技术”的综合示范区, 于 2015 年基本建设完成。园区主要由南北两个排水分区构成, 其中北排水分区自 2015 年示范区建成后连续进行了各种设施及排水口降雨径流过程的监测, 因此本次选取北排水分区 2016 年、2017 年、2019 年的降雨径流监测数据来检验回归模型的效果。未来科学城园区北排水分区的调蓄容积控制比例为 42.8%, 透水铺装比例为 5.6%, 下凹绿地比例为 10.4%, 普通绿地比例为 49.1%, 不透水比例为 34.9%; 用北排水分区 3 年的降雨、产流监测数据计算得到其年径流总量控制率为 89.6%。

根据实测下垫面参数计算, 未来科学城园区北排水分区年径流总量控制率的回归模型计算值为 88.6%, 与实测值相差 1.0%, 误差较小。这说明回归模型在海绵城市新建区也有较好的应用效果。

## 5 结论

① 多元线性回归分析结果表明, 排水分区年径流总量控制率与调蓄容积控制比例、透水铺装比例、下凹绿地比例、普通绿地比例存在正相关关系, 与不透水比例存在负相关关系, 由于线性回归分析结果与数值模拟结果仍有一定差距, 线性回归公式存在不合理性。

② 根据线性回归分析结果构建出多元非线性回归模型结构, 用多元非线性回归分析得到年径流总量控制率的回归模型计算方法, 回归分析结果的  $R^2$  为 0.998, 可靠性较好。

③ 回归模型在北京市各排水分区的验证应用效果良好, 回归模型计算结果与数值模型模拟结果误差不超过 1.3%, 与监测数据计算结果误差不超过 1.0%。

④ 由于水文气候条件和地理位置的差别, 回归模型在其他地区推广应用时需利用当地的水文数值模型和监测数据重新构建。

⑤ 在回归模型的建立过程中, 下垫面特征参数的选取十分重要, 应当结合区域的地理特征对下垫面类型分类。例如绿色屋顶较多的地区可以增加绿色屋顶比例作为特征参数, 河流、湖泊多的地区可以增加水域面积比例作为特征参数。当下垫面特征参数过多时, 回归模型的率定难度变大, 计算量增加, 因此不宜过多。

⑥ 回归模型计算方法具有精度高、计算量少的特点,在海绵城市建设区域,尤其是监测未完全覆盖的地区,具有较好的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG Z, MIAO Y, LI J, *et al.* Improvement effect of rainfall source control facilities on urban drainage capacity in different regions of China [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 579: 124127.
- [2] 张建云,王银堂,胡庆芳,等. 海绵城市建设有关问题讨论[J]. *水科学进展*, 2016, 27(6): 793-799.  
ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HU Qingfang, *et al.* Discussion and views on some issues of the sponge city construction in China [J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(6): 793-799 (in Chinese).
- [3] 王虹,丁留谦,程晓陶,等. 美国城市雨洪管理水文控制指标体系及其借鉴意义[J]. *水利学报*, 2015, 46(11): 1261-1271, 1279.  
WANG Hong, DING Liuqian, CHENG Xiaotao, *et al.* Hydrologic control criteria framework in the United States and its referential significance to China [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(11): 1261-1271, 1279 (in Chinese).
- [4] LI H, DING L, REN M, *et al.* Sponge city construction in China: a survey of the challenges and opportunities [J]. *Water*, 2017, 9: 594.
- [5] 刘绪为,李成江,徐洁,等. 海绵城市年径流总量控制率计算方法及应用探讨[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(5): 130-133.  
LIU Xuwei, LI Chengjiang, XU Jie, *et al.* Calculation and discussion on volume capture ratios of annual rainfalls in sponge city [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(5): 130-133 (in Chinese).
- [6] 杨默远,潘兴瑶,刘洪禄,等. 考虑场次降雨年际变化特征的年径流总量控制率准确核算[J]. *水利学报*, 2019, 50(12): 1510-1517, 1528.  
YANG Moyuan, PAN Xingyao, LIU Honglu, *et al.* Accurate calculation of the volume capture ratio of annual rainfall considering the field rainfall evolution [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(12): 1510-1517, 1528 (in Chinese).
- [7] 李春林,刘淼,胡远满,等. 基于暴雨径流管理模型(SWMM)的海绵城市低影响开发措施控制效果模拟[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2405-2412.  
LI Chunlin, LIU Miao, HU Yuanman, *et al.* Simulation on the control effect of low impact development measures of sponge city based on storm water management model (SWMM) [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(8): 2405-2412 (in Chinese).
- [8] RANDALL M, SUN F, ZHANG Y, *et al.* Evaluating sponge city volume capture ratio at the catchment scale using SWMM [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 246: 745-757.
- [9] 韩靖博,杨默远,潘兴瑶,等. 合流制排水分区海绵城市多层级调控效果定量评估[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(19): 95-101.  
HAN Jingbo, YANG Moyuan, PAN Xingyao, *et al.* Quantitative evaluation of multi-level regulation effect of sponge city in combined drainage zone [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(19): 95-101 (in Chinese).

作者简介:卢亚静(1990- ),女,河南洛阳人,博士,高级工程师,主要从事海绵城市、城市水文、防洪减灾研究。

E-mail: lyj@bwsti.com

收稿日期: 2021-09-22

修回日期: 2021-10-20

(编辑:刘贵春)