

邱长浩, 付浩. 管理视角下海绵城市年径流总量控制率[J]. 净水技术, 2023, 42(7):144-152.

QIU C H, FU H. Volume capture ratio of annual rainfall in the view of management for sponge city[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(7):144-152.

管理视角下海绵城市年径流总量控制率

邱长浩, 付浩*

(江苏省规划设计集团江苏省城镇与乡村规划设计院有限公司, 江苏南京 210019)

摘要 年径流总量控制率是海绵城市建设最重要的核心指标之一。我国各城市将年径流总量控制率逐级分解至城市管控分区层面,此做法缺乏管控分区层面目标可达性分析,且无法考证城市总体建设目标的可达成性。研究基于 InfoWorks ICM 建立的排水管网水力模型、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,从城市开发建设管控的基底——“地块”出发,在不同开发指标下研究其年径流总量控制率潜力,精确定义海绵城市管控分区层面目标可达性。以此为基础,将年径流总量控制率精准表达至地块并形成管控分区图,有效指导海绵城市建设与管理,保障城市、管控分区、地块三级指标稳定可达。

关键词 年径流总量控制率 管控分区 地块 目标可达 建设管理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2023)07-0144-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.07.019

Volume Capture Ratio of Annual Rainfall in the View of Management for Sponge City

QIU Changhao, FU Hao*

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

Abstract Volume capture ratio of annual rainfall is one of the most important core indices of sponge city construction, cities decompose the volume capture ratio of annual rainfall step by step to the control area. The objective attainable of control area is deficient, and it is impossible to verify the objective attainable of the sponge city construction goal. In this study, hydraulic model of drainage network, two dimensional urban/watershed flood inundation model and sustainable urban drainage system(SUDS) model were established by InfoWorks ICM. Sites were the base of urban development, construction and management, simulating volume capture ratio of annual rainfall of sites could analyse the goal of control area. On this basis, the volume capture ratio of annual rainfall was accurately expressed to the sites and forms the control chart. These control charts can make volume capture ratio of annual rainfall of city, control areas and sites steadily attainable.

Keywords volume capture ratio of annual rainfall control area site target available construction management

随着城市化的快速发展,我国许多城市都面临着内涝频发、径流污染、雨水资源大量流失、生态环境破坏等诸多城市问题,给人们的日常生活和社会的可持续发展带来极大的不便和危害^[1]。近年来,“海绵城市”及其相应的规划理念和方法得到社会各界认同,海绵城市建设通过雨水“渗、滞、蓄、净、

用、排”可有效解决城市水安全、水环境问题,保护城市水生态、水资源。年径流总量控制率是我国海绵城市建设中最关键的一项控制指标^[2],在海绵城市建设管理中起到至关重要的作用。

现阶段我国海绵城市建设管理主要依托海绵城市专项规划中确定的“城市-管控分区”层面年径流总量控制率,当前传统做法主要将海绵城市年径流总量控制率从城市至管控分区进行两级分解并赋值。首先,参考《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建》(试行),确定城市年径流总量控制率总目标;其次,综合考虑城市功能分区、水

[收稿日期] 2022-10-15

[作者简介] 邱长浩(1991—),男,研究方向为海绵城市规划建设、水生态保护、水环境治理、给水排水等, E-mail: 1258330613@qq.com。

[通信作者] 付浩, E-mail: 1069616596@qq.com。

系、道路、防洪排涝分区等,划分海绵城市管控分区,分析管控分区涉水系统各方面要求,将城市年径流总量控制率分解至各管控分区。此做法只考虑将年径流总量控制率目标逐级分解至管控分区,无法验证管控分区及城市年径流总量控制率目标可达性,且未能科学指导各地块的年径流总量控制率。

本文以苏南某市高铁新城为研究对象,首先,通过定性分析赋予城市层面及管控分区层面年径流总量控制率。其次,建立经率定验证的数学模型,“从上至下”由海绵城市建设管控的基点——“地块”出发,研究分析改建、新建地块年径流总量控制率潜力,根据地块潜力计算结果,考虑各地块的未来发展,进行逐一赋值,有效校核管控分区年径流总量控制率目标可达性,进而校核城市层面年径流总量控制率目标可达性,保障规划目标的可操作性与可实施性。最后,根据校核后的成果形成管控分区海绵城市建设引导图,明确管控分区内各地块年径流总量控制率使用情况及使用方法,指导地块出让与海绵城市建设管理。

1 研究方法

研究方法主要包括定性分析法、定量分析法,其中从城市层面至管控分区的“由上至下”目标分解采用定性分析法,从地块到管控分区的“由下至上”年径流总量控制率确定采用 InfoWorks ICM 定量分析法。

1.1 定性分析

首先将城市分为若干个管控分区,其次根据各管控分区地块性质、开发强度、内涝点风险、黑臭水体、生态岸线分布及管控分区建设策略,在城市年径流总量控制率基础上,明确各管控分区年径流总量控制率目标。管控分区年径流总量控制率 S 计算如式(1)。

$$S = S_{\text{基}} \pm \Delta S \quad (1)$$

其中: $S_{\text{基}}$ ——城市年径流总量控制率总目标,研究区域为 75%;

ΔS ——年径流总量控制率变化值,取值为 $\pm 10\%$,综合考虑水质、内涝风险、地块性质、规划开发强度以及建设策略(改建、新建比例及管控分区定位)等。

1.2 定量分析

采用 InfoWorks ICM 模型进行定量分析,主要为模型建立及率定验证、典型地块选取与海绵设施方案设置。

1.2.1 模型建立

建立的模型主要包括排水管网水力模型(一维)、二维城市/流域洪涝淹没模型(二维)以及可持续城市排水系统(SUDS)模型。

(1) 排水管网水力模型

产流计算不可渗透下垫面采用固定比例径流模型,可渗透下垫面采用 Horton 渗透模型。汇流计算采用暴雨洪水管理模型(SWMM),并定义产流表面曼宁粗糙系数。管流模块采用完全求解的圣·维南方程模拟管道,对于超负荷的模拟采用 Preissmann Slot 方法,利用贮存容量合理补偿反映管网储量,能够模拟各种复杂的水力状况。

模型建立所需的雨水管网数据来自研究区域管线普查资料,删除雨水算子及其连接管,并对检查井地面高程、底高程以及管网上下游标高、管径等信息进行复核;建筑、市政道路、地块内部道路铺装、绿地等各类下垫面资料主要利用地形图提取。排水管网水力模型作为一维模型,是二维城市/流域洪涝淹没模型建立的基础。

(2) 二维城市/流域洪涝淹没模型

排水管网水力模型建立后,引入地面高程模型、城市中各类建筑物及其他阻碍等,在此基础上二维模型自动生成三角计算网格。二维模型计算采用有限体积法求解浅水流方程组,计算出各三角网格内的积水深度及时间,最终得到地面积水的积水深度、时间及积水漫溢的路径等。

根据研究城市雨量监测站 1987 年—2019 年最大 24 h 降雨量统计数据,2015 年最大 24 h 降雨量最高为 226.53 mm,此降雨逐分钟降雨数据用于二维模型模拟计算。二维模型建立主要用于率定验证。

(3) 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,研究选用的设施为透水铺装、绿色屋顶、下凹式绿地、生物滞留池、植草沟。SUDS 模型建立主要为研究不同海绵设施指标下地块年径流总量控制率目标及潜力。

分析 1987 年—2019 年降雨资料,1990 年平均日降雨量及最大日降雨量最接近多年平均值。参照江苏省南部地区 24 h 雨型时程比例,将此年逐日降雨分配至逐小时。芝加哥雨型由于其降雨强度过程

容易确定,能较好反映降雨过程的平均特性,成为我国工程应用最为广泛的一种设计雨型^[3],利用芝加哥雨型将逐小时降雨分配为逐分钟,最后所得此年逐分钟降雨数据用于 SUDS 模型研究。

1.2.2 率定验证

模型率定验证主要是将初设参数代入模型得到模拟结果,然后把模拟结果与实测数据进行比较。若模拟结果与实测数据误差较小,则把此时参数作为模型参数;若模拟结果与实测数据相差较大,需调整参数代入模型重新模拟,并再次进行比对,直到模拟结果与实测数据的误差在允许范围之内。采用实测内涝点数据率定验证本研究建立的系列模型。

1.2.3 典型地块选取与海绵设施方案设置

(1) 典型地块选取

根据研究区域总体规划,选取最具城市建设用地代表性的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 3 种用地类别。此 3 类用地作为海绵城市实施建设的主要载体,其年径流总量控制率潜力影响着管控分区、城市的年径流总量控制率目标。

(2) 海绵设施方案设置

根据《城市排水(雨水)防涝综合规划编制大纲》,改建、新建地区的硬化地面中,透水性地面的比例分别不应小于 30%、40%;庞璇等^[4]研究表明绿色屋顶、下凹式绿地设置比例均不超过 40%。结合绿色屋顶、下凹式绿地、生物滞留池、植草沟各类海绵设施实地调查情况、新改建难易程度以及投资成本等,针对改建、新建地块分别设置海绵设施布局高低方案,低、高配置方案选择相关关系如图 1 所示,参数选取如表 1 所示。

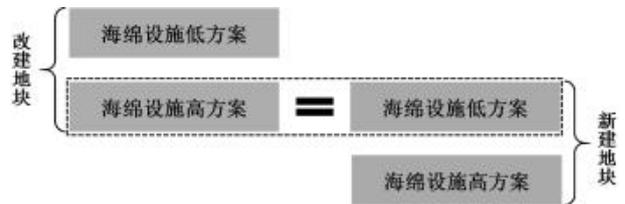


图 1 改建、新建地块海绵设施低、高配置方案选择相关关系

Fig. 1 Relationship between Low and High Sponge Facility Configurations of Reconstructed and Newly Built Sites

表 1 改建、新建地块海绵设施低、高配置方案参数选取

Tab. 1 Parameters of Low or High Sponge Facility Configurations of Reconstructed and Newly Built Sites

建设方式	用地类型	海绵设施设置比例									
		透水铺装		绿色屋顶		下凹式绿地		生物滞留池		植草沟	
		低	高	低	高	低	高	低	高	低	高
改建	公共管理与公共服务设施用地	40%	40%	10%	20%	10%	10%	2%	5%	5%	5%
	居住用地	40%	40%	-	-	5%	10%	2%	5%	2%	5%
	商业服务业设施用地	40%	40%	10%	20%	10%	15%	5%	10%	5%	5%
新建	公共管理与公共服务设施用地	40%	40%	20%	20%	10%	20%	5%	5%	5%	5%
	居住用地	40%	40%	-	-	10%	15%	5%	10%	5%	5%
	商业服务业设施用地	40%	40%	20%	40%	15%	20%	10%	10%	5%	5%

注:方案中下凹式绿地、生物滞留池、植草沟的比例为占地块绿地面积的比例,绿色屋顶的比例为占地块建筑屋顶面积的比例,透水铺装的比例为占铺装面积的比例。

2 结果与讨论

2.1 定性分析结果

管控分区年径流总量控制率以研究区域年径流总量控制目标 75% 为基础,结合相关涉水问题、海绵城市改建及新建的难度等调整指标值。研究区域各管控分区年径流总量控制率如表 2 所示。

2.2 定量分析结果

针对改建、新建地块设置低、高海绵设施配置方案,利用经率定的 InfoWorks ICM 模型计算现状以及

不同海绵设施配置方案的典型地块年径流总量控制率潜力,并反馈校核管控分区、城市目标。

2.2.1 模型率定结果

根据水利部门实测可靠的内涝点统计数据逐一比对模拟结果,模型模拟出的内涝点位置比实测值多,且实测数据中大部分内涝点与模拟的内涝风险点位置、积水深度、积水时间基本吻合,如图 2 所示。模拟结果和实测值误差在 20% 以内^[5],建立的此模型较为准确可靠,对方案的制定具有指导意义。

表2 研究区域各管控分区年径流总量控制率
Tab.2 Volume Capture Ratio of Annual Rainfall of Each Control Area

序号	管控分区	面积/km ²	管控分区规划建设策略	年径流总量控制率	序号	管控分区	面积/km ²	管控分区规划建设策略	年径流总量控制率
1	A	4.1	规划大型公共海绵	85%	7	G	3.84	保留更新	70%
2	B	4.96	高品质开发	75%	8	H	3.87	重点建设海绵城市	80%
3	C	7.19	高品质开发、规划大型公共海绵	80%	9	I	3.19	高品质开发	75%
4	D	2.52	高品质开发	80%	10	J	2.31	转型升级工业区	65%
5	E	3.43	高品质开发	80%	11	K	6.43	转型升级工业区	65%
6	F	2.37	高品质开发	75%					



图2 模型率定结果

Fig. 2 Results of Model Calibration

研究区域下垫面解析为建筑、市政道路、地块内井室、井筒平面积以及管渠糙率系数采用软件推荐值。检查井、井筒平面积以及管渠糙率系数采用软件推荐值。

表3 模型中各产流表面参数
Tab.3 Parameters of Runoff Surface Flows in Model

编号	产流表面	表面类型	初期损失值/mm	径流量类型	固定径流系数	汇流类型	汇流模型	地表曼宁粗糙系数
1	建筑	Impervious	0.04	Fixed	0.90	Rel	SWMM	0.020
2	市政道路	Impervious	0.10	Fixed	0.75	Rel	SWMM	0.018
3	地块内部道路铺装	Impervious	0.07	Fixed	0.60	Rel	SWMM	0.025
4	绿地	Pervious	-	Horton	-	Rel	SWMM	0.050

2.2.2 典型地块年径流总量控制率潜力计算结果
首先分析典型用地类型下垫面。选取典型居住

用地(图3)、公共管理与公共服务设施用地(图4)及商业服务业设施用地(图5),解析其下垫面构成,

其中居住用地建筑物、绿地、水体、道路(含铺装)占比分别为 41.81%、34.93%、1.55%、21.72%;公共管理与公共服务设施用地建筑物、绿地、道路(含铺

装)占比分别为 17.05%、22.95%、60%;商业服务业设施用地建筑物、绿地、道路(含铺装)占比分别为 43.31%、8.51%、48.18%。

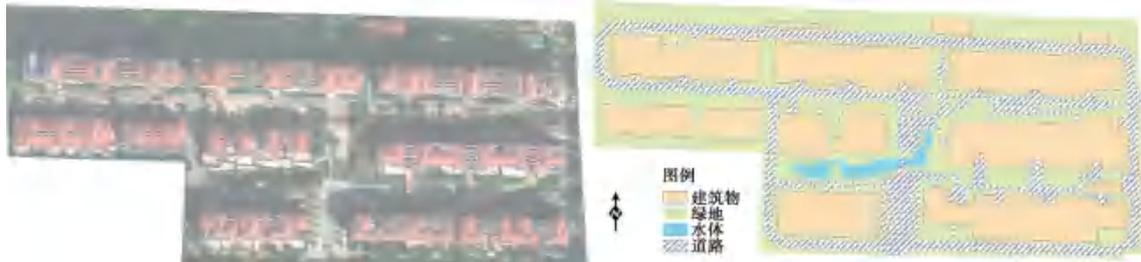


图 3 典型居住用地下垫面解析图

Fig. 3 Analysis Diagram of Typical Ground Surface of Residential Site

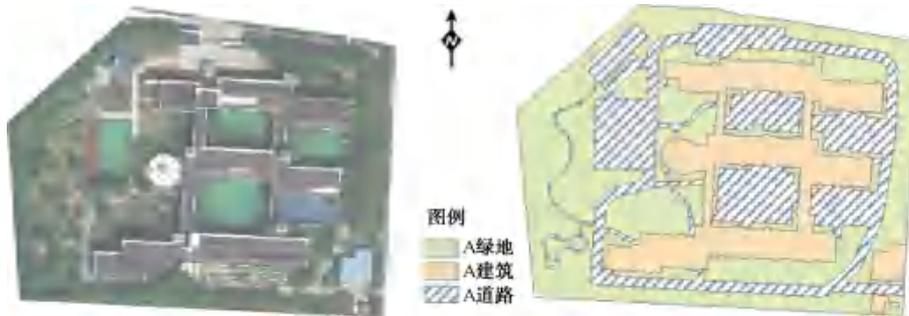


图 4 典型公共管理与服务设施用地下垫面解析图

Fig. 4 Analysis Diagram of Typical Ground Surface of Site for Public Management and Service Facilities

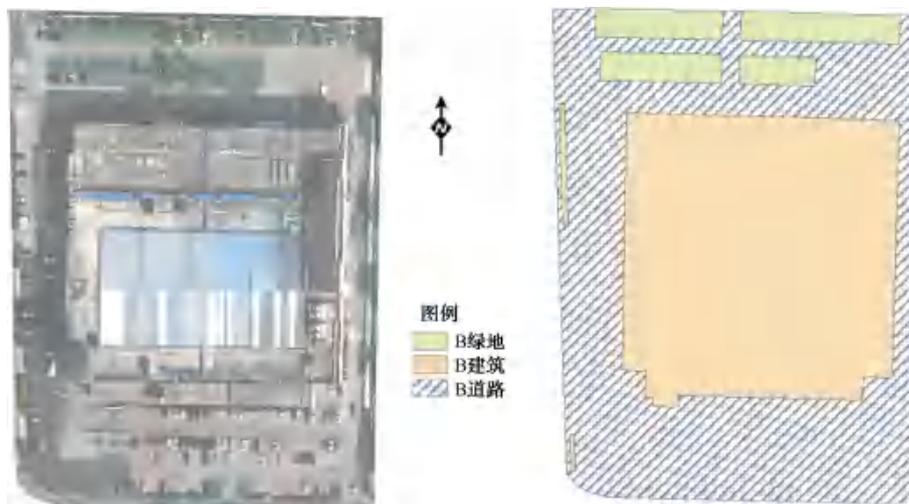


图 5 典型商业服务业设施用地下垫面解析图

Fig. 5 Analysis Diagram of Typical Ground Surface of Site for Commercial Service Facilities

其次计算现状地块及改建、新建方案下年径流总量控制率潜力。典型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模拟过程中,总降雨量分别为 2.81 万、3.22 万、3.02 万 m^3 ,总出流量分别为 1.34 万、1.91 万、2.13 万 m^3 ,现状年径流

总量控制率分别为 52.18%、40.68%、29.61%。

公共管理与公共服务设施用地改建低、高配置海绵设施方案年径流总量控制率分别为 77.28%、80.55%,其中改建海绵设施高方案参数如表 4 所示;居住用地改建低、高配置海绵设施方案年径流总

表 4 公共管理与服务设施用地改建海绵设施高方案参数

Tab. 4 High Sponge Facility Configurations Parameters of Site for Public Management and Service Facilities

序号	海绵设施	区域/ m ²	占子集水区 面积比例	设施表面 宽度/m	被处理的不透水 面积比例	表面层护坡 高度/mm	糙率系数 (曼宁 N 值)	铺装层 厚度/mm	土壤 类型
1	透水铺装	3 196.0	11.913%	50.0	30%	-	0.1	100	砂、黏土
2	绿色屋顶	1 186.0	4.421%	50.0	-	-	0.1	-	砂、黏土
3	下凹式绿地	1 291.0	4.812%	2.0	20%	150	0.1	-	-
4	生物滞留池	645.5	2.406%	-	10%	500	-	-	砂、黏土
5	植草沟	645.5	2.406%	2.0	10%	300	0.1	-	-

量控制率分别为 60.90%、76.18%；商业服务业设施用地改建低、高配置海绵设施方案年径流总量控制率分别为 62.45%、67.97%。

公共管理与公共服务设施用地新建低、高配置海绵设施方案年径流总量控制率分别为 80.55%、

84.81%；居住用地新建低、高配置海绵设施方案年径流总量控制率分别为 76.18%、82.56%；商业服务业设施用地新建低、高配置海绵设施方案年径流总量控制率分别为 67.97%、75.94% (图 6)。

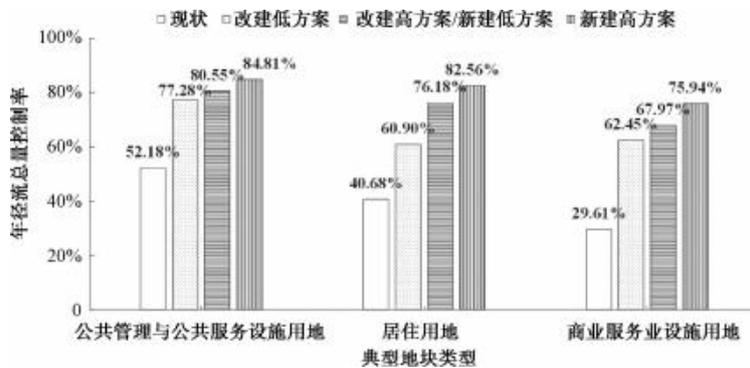


图 6 典型用地现状、改建低、改建高/新建低、新建高方案海绵设施年径流总量控制率

Fig. 6 Volume Capture Ratio of Annual Rainfall of Typical Sites in Different Situations

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年径流总量控制率分别可达 77.28% ~ 84.81%、60.90% ~ 82.56%、62.45% ~ 75.94%。段嘉洵等^[6]研究公共建筑改造年径流总量控制率可达 75%，胡栩豪等^[7]、张佳丽等^[8]、郑涛等^[9]等研究海绵小区建设年径流总量控制率分别可达 81.25%、78%、71.8%，本研究结果基本与上述学者研究结果一致。

以典型商业服务业设施用地改建低方案为例分析年雨水量控制效果，海绵设施实施后根据模型模拟结果，年径流总量控制率比现状提高了 32.81%，地块比现状多控制了 0.99 万 m³ 雨水；现状地块总出流量峰值为 0.187 m³/s，海绵设施实施后总出流量峰值为 0.104 m³/s，峰值削减了 44.4%。地块海绵设施实施后，可发挥其“渗、蓄、滞”等功能，就地消纳雨水，提高地块年径流总量控制率。同时，可有效削减地块雨水总出流量峰值，降低雨水快速排放

引起的风险。

最后，根据各地块未来规划及建设策略（保留、改建、新建等），进行管控分区层面逐一赋值，形成管控分区层面年径流总量控制率一览表。

2.2.3 管控分区、城市目标反馈校核

在管控分区层面年径流总量控制率一览表的基础上，采用面积加权法校核管控分区年径流总量控制率定性分析结果。其中，A、C、E、F、G、H、J、K 管控分区定性、定量分析结果相差较小，而 B、D、I 管控分区相差 1% ~ 2%，如表 5 所示。根据定量分析结果对 B、D、I 管控分区定性分解赋值的年径流总量控制率进行修正。

根据管控分区定量分析校核后的年径流总量控制率结果，反馈校核研究区域年径流总量控制率总目标。城市层面年径流总量控制率为 75%，定量分析结果为 75.6%，目标可达且合理。

表5 各管控分区、城市层面年径流总量控制率校核
Tab. 5 Checking of Volume Capture Ratio of Annual Rainfall
in City and Control Area

管控分区	面积/km ²	年径流总量控制率	
		定性分析	定量分析
A	4.1	85%	85%
B	4.96	75%	76%
C	7.19	80%	80%
D	2.52	80%	79%
E	3.43	80%	80%
F	2.37	75%	75%
G	3.84	70%	70%
H	3.87	80%	80%
I	3.19	75%	77%
J	2.31	65%	65%
K	6.43	65%	65%

2.3 管理视角下规划成果表达

通过定性、定量分析城市层面、管控分区层面年径流总量控制率指标分解,并考虑规划期限内地块用地性质的不确定性,形成以下“图+表格”的管控分区一览图(图7及表6~表7)。

海绵城市建设主管部门,可根据此管控分区图则指导海绵城市建设。首先,用地类型和管控分区图则中一致,直接根据管控分区图则中的地块年径流总量控制率图斑赋值。其次,用地类型实际出让时有变化,可根据右侧中各类用地径流控制要求表中最低值,并结合管控分区目标高低、各类地块年径流总量控制率潜力,综合考虑设置年径流总量控制率指标。最后,根据各用地年径流总量控制率计算管控分区指标,保障管控分区指标满足要求。管控分区图则中各类用地径流控制要求表包含的年径流总量控制率、综合雨量径流系数、单位面积控制容积指标,均为约束性,在地块海绵城市设计、建设时必须

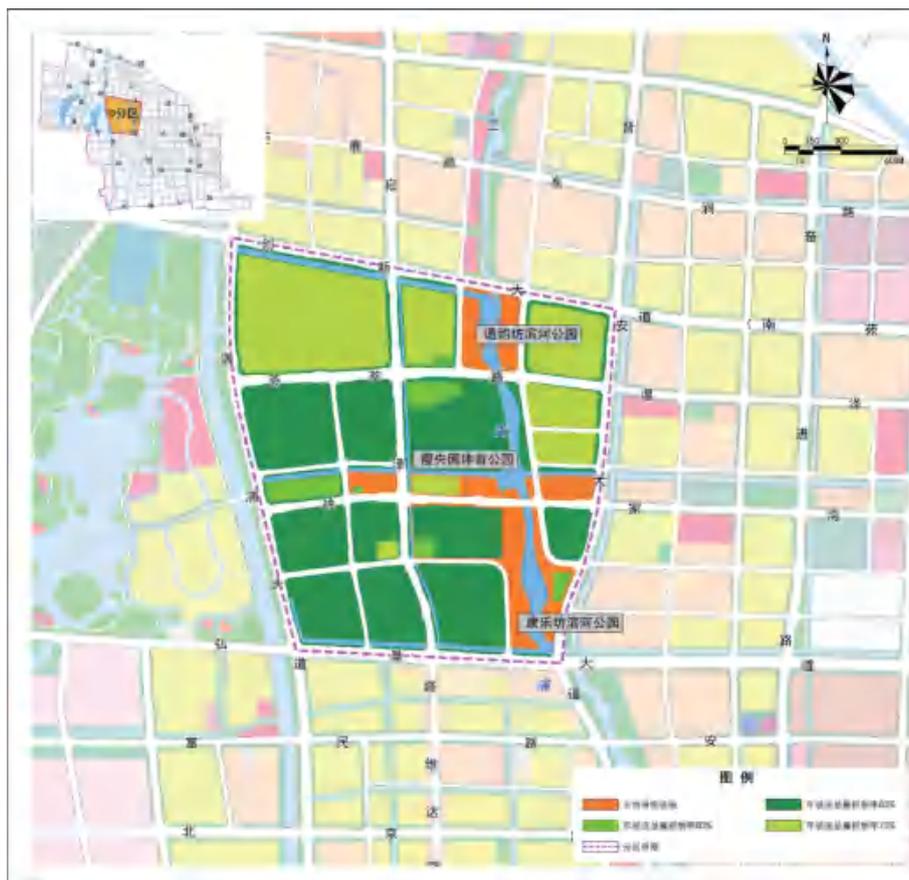


图7 海绵城市专项规划中某管控分区

Fig. 7 A Certain Control Area in Sponge City Planning

表6 分区分管指标参数

Tab. 6 Parameters of Control Indices in Control Area

序号	指标	指标数据
1	年径流总量控制率	79%
2	面源污染(SS)削减率	65%
3	峰值流量径流系数	≤0.65
4	水面率	≥7.94%
5	雨水利用替代城市供水比例	5%
6	生态岸线比例	90%
7	透水铺装率	≥40%

须满足。管理部门要求将年径流总量控制率等海绵城市指标纳入城市土地出让条件中,有效指导城市各类用地海绵城市建设与管理,保障年径流总量控制率等海绵城市目标的实现,保护城市生态系统。

3 结论

本研究形成以下主要结论。

(1)采用定性方法可以将城市年径流总量控制率目标分解至各管控分区,但无法进一步有效指导地块海绵城市建设与管理,且对于管控分区目标的

表7 径流控制参数要求

Tab. 7 Requirements for Runoff Control Parameters

用地类型	年径流总量控制率		综合雨量径流系数		单位面积控制容积/(m ³ ·km ⁻²)	
	新建	改建	新建	改建	新建	改建
居住用地	≥80%	-	≤0.5	-	15 000	-
公共设施用地	≥80%	-	≤0.5	-	15 000	-
商业用地	≥75%	-	≤0.5	-	12 000	-
道路交通用地	≥65%	-	≤0.75	-	9 500	-
市政设施用地	≥75%	-	≤0.5	-	12 000	-
绿地	≥85%	≥75%	≤0.2	≤0.25	15 000	10 000

可达性无法校核。

(2)通过模型建立,可准确定量分析当地主要用地类型年径流总量控制率潜力,其中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年径流总量控制率分别可达 77.28%~84.81%、60.90%~82.56%、62.45%~75.94%,典型用地类型海绵城市建设效果可观。

(3)通过典型地块年径流总量值,综合考虑管控分区内各地块规划建设情况,将年径流总量控制率赋值至每个地块,可有效检验、修正 A~K 管控分区年径流总量控制率,保证其目标可达。

(4)制作了管控分区图,可规范海绵城市管控成果表达。相关主管部门可快速查阅管控分区内各地块年径流总量控制率等指标,便于科学管理海绵城市建设。

(5)本文聚焦地块海绵城市建设的源头管控,以期在土地出让时将海绵城市相关指标纳入地块出让条件中,从源头强化对海绵城市建设。同时,海绵城市建设在强化源头管控时,也需关注“蓝”“绿”“灰”相互结合。

参考文献

- [1] 张学弟,王宁. 城市建成区海绵城市建设的几点思考[J]. 人民长江, 2019, 50(12): 85-89.
ZHANG X D, WANG N. Some thoughts on sponge city construction in urban built-up areas[J]. Yangtze River, 2019, 50(12): 85-89.
- [2] 苏定江,蒲贵兵,刘杰,等. 海绵城市年径流总量控制率与雨量径流系数关系探讨[J]. 中国给水排水, 2021, 37(6): 38-42.
SU D J, PU G B, LIU J, et al. Discussion on the relationship between volume capture ratio of annual rainfall and volumetric runoff coefficient in sponge cities [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(6): 38-42.
- [3] 李俊,吴珊,赵昕,等. 雨型选择对 LID 措施效果影响的分析探讨[J]. 给水排水, 2018, 54(5): 21-27.
LI J, WU S, ZHAO X, et al. Analysis on the effect of rain type selection on LID measures [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 54(5): 21-27.
- [4] 庞璇,张永勇,潘兴瑶,等. 城市雨洪模拟与年径流总量控制目标评估——以北京市未来科技城为例[J]. 资源科学, 2019, 41(4): 803-813.
PANG X, ZHANG Y Y, PAN X Y, et al. Urban stormwater simulation and assessment of the control rate of total annual

- runoff: A case of the future science and technology park in Beijing[J]. *Resources Science*, 2019, 41(4): 803-813.
- [5] 王妹. 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 S. Simulation and evaluation of plan on urban storm water drainage system based on sponge city concept [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.
- [6] 段嘉洵, 吴俊奇, 翟立晓. 基于海绵城市建设的公共建筑改造——以北京市通州文化馆和图书馆为例[J]. *给水排水*, 2018, 54(8): 79-83.
- DUAN J X, WU J Q, ZHAI L X. Reconstruction of public buildings based on sponge city construction: A case of Beijing Tongzhou cultural museum and library[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, 54(8): 79-83.
- [7] 胡栩豪, 王志高, 金天, 等. 新建住宅小区海绵专项工程设计及施工管理[J]. *净水技术*, 2021, 40(6): 134-139.
- HU X H, WANG Z G, JIN T, et al. Specialized engineering design and construction management for sponge city facilities in new residential area[J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(6): 134-139.
- [8] 张佳丽, 刘杨, 王凤. 老旧小区“+海绵”改造的理论与实践——以宁波市三和嘉园小区为例[J]. *城市发展研究*, 2021, 28(7): 24-29.
- ZHANG J L, LIU Y, WANG F. Theory and practice of “+sponge” reconstruction in old community: Taking Sanhe Jiayuan community in Ningbo City as an example [J]. *Urban Development Studies*, 2021, 28(7): 24-29.
- [9] 郑涛, 唐志芳, 张敏. 基于监测及排水模型的海绵城市小区建设效果评估[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(9): 118-122.
- ZHENG T, TANG Z F, ZHANG M. Assessment of community reconstruction performance during sponge city construction based on online monitoring and drainage model [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(9): 118-122.

(上接第 24 页)

- [44] SAHOO S K, HOTA G. Surface functionalization of GO with MgO/MgFe₂O₄ binary oxides: A novel magnetic nanoadsorbent for removal of fluoride ions [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018, 6: 2918-2931. DOI: 10.1016/j.jece.2018.04.054.
- [45] LIJIMA S. Helical microtubules of graphitic carbon[J]. *Nature*, 1991, 354: 56-58. DOI: 10.1038/354056a0.
- [46] 张勇, 葛泽龙, 綦秀玲. 钨、石墨阴极等离子弧制备碳纳米管[J]. *兵器材料科学与工程*, 2022, 45(3): 56-60.
- ZHANG Y, GE Z L, QI X L. Preparation of carbon nanotubes by plasma arc with tungsten and graphite cathode[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2022, 45(3): 56-60.
- [47] 尹东. 碳纳米管对环境污染物的吸附及其影响因素[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(s2): 276-283.
- YIN D. Adsorption of environmental pollutants by carbon nanotubes and their influencing factors [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(s2): 276-283.
- [48] DEHGHANI M H, HAGHIGHAT G A, YETILMEZSOY K, et al. Adsorptive removal of fluoride from aqueous solution using single- and multi-walled carbon nanotubes [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2016, 216: 401-410. DOI: 10.1016/j.molliq.2016.01.057.
- [49] RUAN Z Y, TIAN Y X, RUAN J F, et al. Synthesis of hydroxyapatite/ multi-walled carbon nanotubes for the removal of fluoride ions from solution[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 412: 578-590. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.03.215.
- [50] AFFONSO L N, MARQUES J R J L, LIMA V V C, et al. Removal of fluoride from fertilizer industry effluent using carbon nanotubes stabilized in chitosan sponge[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 388: 122042. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122042.
- [51] ZHU L, CHANG D W, DAI L M, et al. DNA damage induced by multiwalled carbon nanotubes in mouse embryonic stem cells [J]. *Nano Letters*, 2007, 7(12): 3592-3597. DOI: 10.1021/nl071303v.
- [52] ŠUŠTERŠIČ V. Possibility of using carbon nanotubes in water and wastewater treatment [J]. *Encyclopedia of Materials: Composites*, 2021, 2: 314-325. DOI: 10.1016/B978-0-12-819724-0.00017-3.