

王萌茜,侯东瑞,武静,等.蓝绿协同视角下武汉南湖汇水分区绿地削减雨水径流效应特征与情景模拟[J].华中农业大学学报,2024,43(6):171-181.DOI:10.13300/j.cnki.hnlnxb.2024.06.016

## 蓝绿协同视角下武汉南湖汇水分区绿地削减雨水径流 效应特征与情景模拟

王萌茜<sup>1</sup>,侯东瑞<sup>1</sup>,武静<sup>2</sup>,马驰<sup>1</sup>,朱春阳<sup>1</sup>

1. 华中农业大学园艺林学院,武汉 430070; 2. 武汉设计咨询集团有限公司,武汉 430024

**摘要** 为探究不同绿地调控方式对降雨径流的削减作用,以武汉市南湖汇水分区为研究对象,基于暴雨洪水平衡模型(storm water management model,SWMM)模拟分析海绵绿地改造措施下的年径流总量控制率、峰值流量及峰现时间的变化规律,揭示蓝绿协同视角下城市汇水分区绿地削减雨水径流效应特征。结果显示:城市汇水分区尺度20%~30%的下凹式绿地改造,可实现年径流控制率65%的海绵城市建设目标;不同的海绵绿地改造措施中,复杂下凹绿地(具备蓄水层和下排管)和简单下凹绿地(无蓄水层和下排管)对于单场降雨事件的作用差异不明显,但长历时多场次降雨情况复杂下凹绿地的效果会更加显著。

**关键词** 蓝绿空间;雨水径流;暴雨洪水平衡模型;汇水区;生态效应;情景模拟

**中图分类号** TU986    **文献标识码** A    **文章编号** 1000-2421(2024)06-0171-11

随着全球气候变化及城市化进程的加快,城市水循环过程发生了显著的变化,导致城市雨洪灾害问题日益严重<sup>[1]</sup>,北京、郑州、武汉、杭州、广州等大城市都受到过严重的内涝灾害影响。如何有效地减少城市暴雨径流对城市生活的影响是当前城市建设的巨大挑战。城市化对地表水的影响一直采用基于灰色基础设施的雨洪管理方式,但面对日益增加的城市内涝问题存在改造难、资金投入大等问题,迫切需要探索一种更具弹性的雨洪管理方式,专家学者们逐渐将目光放在绿色基础设施的建设调控及绿地系统的优化上,蓝-绿-灰耦合系统的建设成为目前雨洪管理研究的热点<sup>[2]</sup>。

城市汇水分区是海绵城市建设、滞纳雨洪的基本单元。城市蓝绿基础设施作为城市汇水分区系统仅存的保留有水气循环功能的重要组成部分,对改善城市生态环境、减少地表径流流量、增强土壤渗透性、回补地下水具有重要作用<sup>[3]</sup>。通过具体的蓝绿空间系统优化,实现对地块内雨水的控制和有效利用,是海绵城市规划的主要途径<sup>[4]</sup>。成玉宁等<sup>[5]</sup>提出在空间格局、水文过程以及生态服务上的伴生关系和

互补机制等方面改善蓝绿空间,可以有效提升城市雨洪韧性,创建有机、高效的城乡生态环境。程江等<sup>[6]</sup>基于土地利用变化的视角对高度城市化汇水区绿地系统的暴雨径流响应进行分析,表示城市汇水分区尺度的绿地系统在削减城市降雨径流、削减径流洪峰及推迟峰现时间方面具有良好的表现。Ahiablame等<sup>[7]</sup>通过PCMSWMM模拟研究汇水区尺度上LID措施对城市流域洪水的削减作用,结果表明LID措施在较大的城市汇水区尺度上可以有效降低洪水风险。目前针对城市建成区范围在建设过程中缺少进一步扩大绿地面积的条件,更多地选择是提升现有绿地的雨洪调蓄功能,调整绿地的位置及形状来消纳更多的径流。其中,下凹绿地是目前海绵绿地改造中最易实施的海绵改造措施,成本低、效果好,在城市汇水分区中截留雨水径流、蓄存雨水方面具有显著优势。邢国平等<sup>[8]</sup>基于天津市下凹绿地的研究发现,下凹绿地率为30%、下凹深度为100mm的下凹绿地改造在较为理想的径流汇入绿地情况下可以消纳1年1遇和2年1遇的降雨事件下70%的降雨径流。另外,屋顶绿化是城市存量发展过程

收稿日期:2023-08-11

基金项目:国家自然科学基金项目(32371950);中央高校自主创新基金项目(2662022YLYJ005);新疆生产建设兵团科技计划项目(2023CB008-24)

王萌茜,E-mail:1356706061@qq.com

通信作者:朱春阳,E-mail:zhuchunyang@mail.hzau.edu.cn

中最具优势的增加城市绿色空间占比的方式。

本研究以武汉市南湖汇水分区作为研究对象,通过模拟不同绿地调控情景下南湖汇水区降雨径流过程,探究不同绿地调控方式对降雨径流的削减作用以及雨洪调蓄需求下汇水区绿地的功能提升策略,旨在为城市汇分区尺度蓝绿空间整体性建设提供实践参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

南湖汇水区位于武汉市中心城区,水域面积760.11 hm<sup>2</sup>,汇分区面积3 744 hm<sup>2</sup>(依据《武汉市海绵城市专项规划(2016—2030年)》),为武汉市仅次于东湖和汤逊湖的第三大城中湖。南湖汇水区范围除狮子山外,整体地势较为平坦,地面高程在20.15~24.00 m(黄海高程系,下同),最高点为流域西南片的狮子山,海拔约67 m。从自然流域上来讲,南湖属于汤逊湖水系,位于汤逊湖水系的北部,通过南湖连通渠与其他湖泊、外江连通(图1)。

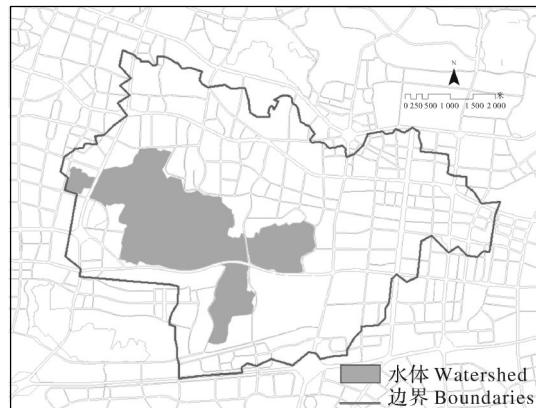


图1 南湖汇分区

Fig.1 South Lake catchment area

### 1.2 南湖汇水区用地现状

南湖汇水区绿地以附属绿地为主,主要分布在滨湖一带以及高等院校区域内,用地构成主要以居住用地(R)、教育科研用地(A3)和水域为主,同时存在少量工业用地(M)和商业设施用地(B1)。采用SPOT6遥感影像数据结合ENVI5.3及ArcGIS10.5进行遥感信息解译,提取南湖汇水区绿地共991.16 hm<sup>2</sup>(图2)。

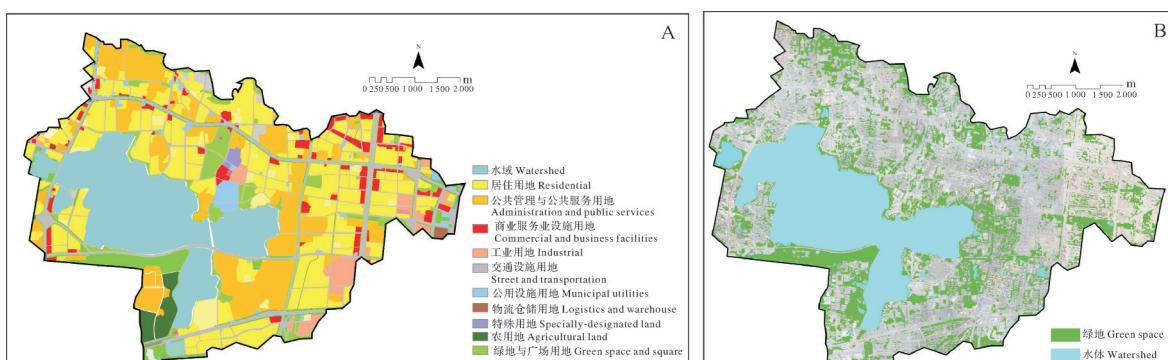


图2 南湖汇水区用地分布(A)和绿地分布(B)现状

Fig.2 Land use distribution(A) and green space status(B) in South Lake catchment area

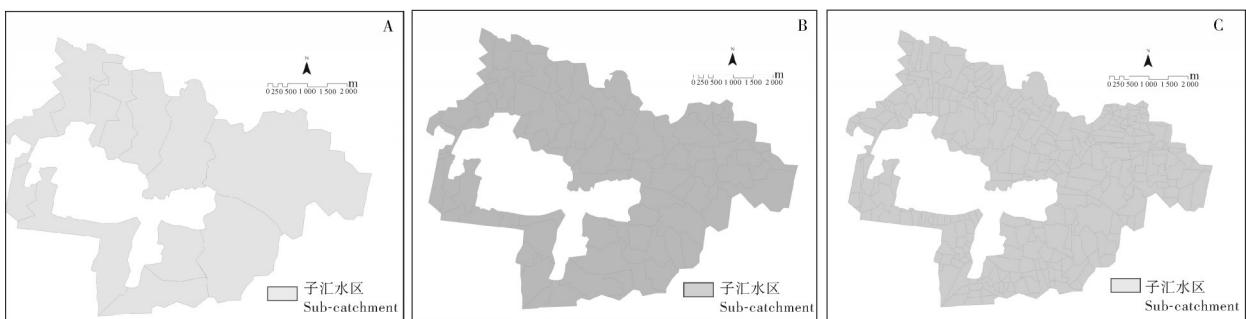
### 1.3 模型构建

1)子汇水区划分。汇水区是城市雨水管控的最优结构单元,在海绵城市建设中按照汇水区的不同来采取不同的管控措施和目标,汇水区的进一步细分输入对构建场地暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)的准确性具有重要的影响,为提高子汇水区划分精度,综合考虑地形和城市排水管网,最终本研究在南湖汇水区规划的13个区域子汇水区基础上,根据DEM水文分析法和泰森多边形法将整个研究区域划分为352个子汇水区(图3)。

2)排水管网概化。依据排水管网数据及实地调

查结果,采用GIS对排水管网上下游管底高程、管径等数据进行提取,便于后续构建SWMM模型。南湖汇水区现状为共有346条管道以及361个节点,并根据实际情况将湖泊及河道概化计入排水系统,因南湖汇水区进行了新的管网规划,故后续规划情景中的模型使用南湖汇水区规划排水管网进行概化,共得到489个节点和491条管道(图4)。

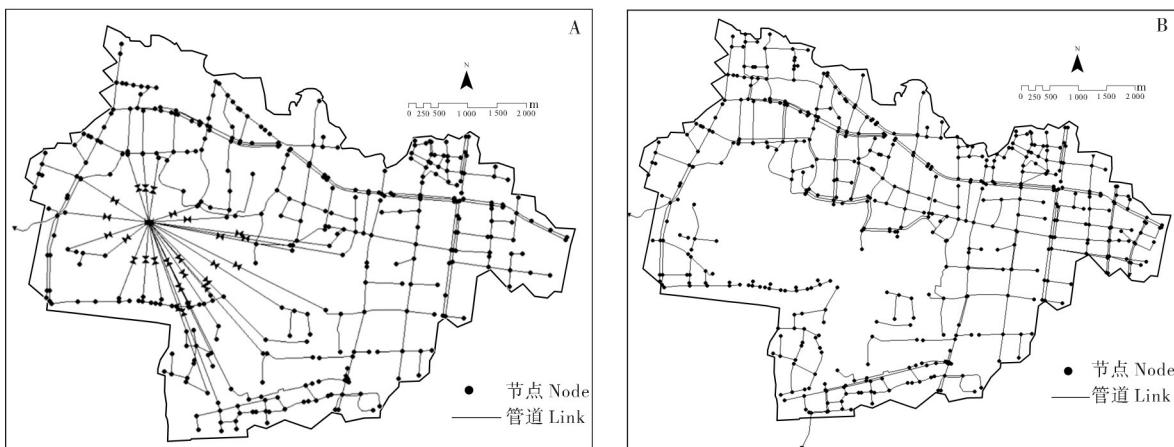
3)参数取值。SWMM模型径流模拟参数包括不透水率、平均坡度、初损雨量、地表状况参数、土壤下渗参数等。其中,不透水率通过遥感解译分析获取;平均坡度由高程数据计算获取;地表状况参数、土壤下渗模型选用Horton模型,参数取值结合不同



A:南湖汇水区划分 South Lake catchment area;B:基于水文分析及高程数据的子汇水区划分 Sub-catchment delineation based on hydrological analysis and elevation data;C:基于泰森多边形调整后的子汇水区划分 Adjusted sub-catchment delineation based on Tyson polygons.

图3 武汉海绵城市规划中南湖汇水区划分情况

Fig.3 Division of South Lake catchment area in Wuhan sponge city planning



A:现有的排水管网 Existing drainage network;B:规划排水管网 Planned drainage network.

图4 南湖汇水区排水管网概况结果

Fig.4 Results of the generalisation of drainage network in the South Lake catchment area

土地利用属性、土壤环刀取样分析获取。其余参数的设置主要参考SWMM用户手册<sup>[9]</sup>及相关研究经验值<sup>[10-11]</sup>,子汇水区的不透水曼宁系数取值0.016,汇水区曼宁系数取值0.18;排水管网选择动力波法,曼宁系数取值0.014;无洼地存蓄的不透水面积比值取25%。子汇水区特征宽度的取值使用雨水地表漫流距离进行换算,由于场地位于城市建成区,雨水地表漫流距离的一般经验值为30~50 m,多次尝试比对选择50 m作为地表漫流距离进行换算。利用子汇水区面积除以地表漫流距离得到每个子汇水区的特征宽度。

#### 1.4 降雨设计

本研究进行雨洪模拟的降雨事件分为3种。(1)基于武汉市气象站2015—2019全年日降雨量实测数据整理得到全年降雨事件。经验证2015年全年降雨事件与2015—2019年超长历时降雨事件的模拟结果基本一致,为了便于后期模拟分析,选择较有代表性的2015年全年降雨事件进行后期模拟。(2)设计

降雨量对应设计降雨事件。武汉市海绵城市建设规范中规定了不同年径流控制率对应的设计降雨量,《武汉市海绵城市专项规划(2016—2030年)》中规定南湖汇水区的年径流控制率目标是达到65%,本研究主要基于年径流控制率65%对应设计降雨量生成降雨事件进行模拟分析,设计降雨量为20.8 mm/d。(3)通过芝加哥雨型生成短历时暴雨事件。《武汉市暴雨强度公式及设计暴雨雨型》中暴雨强度公式为:

$$i = \frac{9.686(1 + 0.887 \lg P)}{(t + 11.23)^{0.658}} \quad (1)$$

$$q = \frac{1614(1 + 0.887 \lg P)}{(t + 11.23)^{0.658}} \quad (2)$$

式(1)~(2)中: $i$ 为设计暴雨强度,mm/min; $P$ 为重现期,a; $t$ 为降雨历时,min; $q$ 为设计暴雨强度,L/(s·hm<sup>2</sup>);适用范围:5 min ≤  $t$  ≤ 1 440 min,2 a ≤  $P$  ≤ 100 a。据此生成重现期  $P=1,2,3,5,10,50$  a 的3 h暴雨事件。

## 1.5 模型验证

本研究中的模型通过内涝区域、渍水点、年径流控制率及系统连续性误差进行验证。SWMM模型连续性误差包括地表径流和流量演算2个方面<sup>[12]</sup>,计算公式为:

$$Q_c = \left(1 - \frac{Q_o}{Q_i}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中,  $Q_c$  为连续性误差,  $Q_o$  为总出流量(径流量或流量),  $Q_i$  为总入流量。

根据模型模拟,3种降雨事件下模型的连续性误差均小于5%,初判模型结果合理;再利用超长历时降雨事件模拟计算得到年径流控制率为32.32%、重现期  $P=1, 2, 3, 5, 10, 50$  a 的短历时降雨事件得出历史内涝点主要位于卓刀泉保利华都、雄楚大道珞雄路口、光谷大道凌家山路口、关南园铁路桥下和民族大道新竹路口等地,均与实际情况相符。综上,模型能够较为合理地得到研究区域的水文状况。

## 1.6 绿地调控方式

汇水区绿地作为调控主体,通过海绵化改造的方式进行优化。绿地作为城市中少有的透水下垫面,对降雨径流有着显著的拦截、吸收以及调蓄作用,对于减少地表径流、改善城市内涝有着重要的意义。本研究结合相关研究确定了简单下凹绿地、复杂下凹绿地和屋顶绿化3种绿地调控方式,应用于规划情景。

## 1.7 情景设置

《武汉市海绵城市规划(2016—2030年)》和管网设计最新标准中分别对南湖汇水区做出了2个要求:一是管道满足设计重现期  $P=3$  a 的暴雨排洪;二是年径流控制率达到65%。根据这2个要求对南湖汇水区做出针对性模拟。结果显示,该区域满足要求的管道长度仅达33%,49.77%的管道在  $P=1$  a 的情况下超载,满足65%年径流控制率的汇水区为21个,面积为86.46 hm<sup>2</sup>,占南湖汇水区总面积(除水体外)的2.9%。

基于绿地削减雨水径流的思路,结合《武汉市海绵城市专项规划(2016—2030年)》中2020年达到20%的建成区面积完成海绵化改造(考虑2020年末完全实现,因此将该目标作为近期海绵城市改造目标)和在2030年实现80%的建成区面积完成海绵化改造这2个要求,分别设置了以下情景:S0:对照情景;S1:按照建成区范围20%面积进行海绵化改造的近期情景。充分考虑海绵绿地改造的现实可行性,按照20%~50%的绿地面积占比进行下凹式绿地改造;

S2:按照建成区范围80%面积进行海绵化改造的远期情景。充分考虑海绵绿地改造的现实可行性,按照20%~50%的绿地面积占比进行下凹式绿地改造。

1)近期情景设置。S1中进行海绵化改造区域参考《武汉市国土空间总体规划(2021—2035年)》《武汉市国土空间“十四五”规划》《南湖水环境提升规划》《武汉市2023年绿化工作方案》《武汉市海绵城市专项规划(2016—2030年)》,得到改造区域和新建绿地的空间分布情况,其中新建绿地主要为口袋公园、社区公园以及道路防护绿地、附属绿地等小面积绿地,总面积13.69 hm<sup>2</sup>,改造区域为7个大型院校区域和8个大型居住小区,总面积661.15 hm<sup>2</sup>,占南湖汇水区面积的22.15%(图5)。

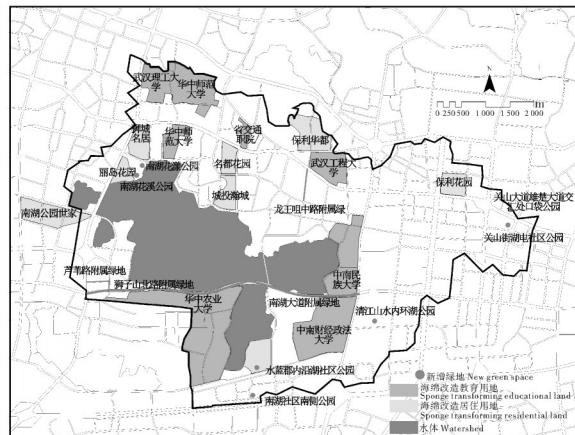


图5 南湖汇水区海绵化改造规划片区及新建绿地

Fig.5 Sponge transformation planning area and new green space in Nanhu Lake catchment area

2)远期情景设置。远期情景中需要达到80%的建成区完成海绵化改造,相关规划并未明确具体区域,结合历年渍水点和近期情景规划方向确定相关区域。其中,公共管理与公共服务用地面积775.03 hm<sup>2</sup>、居住用地面积1 070.85 hm<sup>2</sup>、绿地及广场用地面积449.55 hm<sup>2</sup>,共计2 295.43 hm<sup>2</sup>,占南湖汇水区除湖泊面积外的76.92%,基本符合南湖汇水区80%的区域完成海绵化改造的目标。

3)海绵改造措施。  
 ①屋顶绿化。《武汉市海绵城市规划设计导则(试行)》中规定新建建筑小区中高度在30 m以下、坡度小于10°的屋顶宜采用屋顶绿化,改造建筑小区根据条件考虑采用屋顶绿化,筛选出可设置屋顶绿化的建筑,分布如图6所示。

②下凹绿地。武汉海绵城市相关规范中下凹绿地率的引导性指标为25%,结合相关研究,将下凹绿地率设置为20%、30%、40%、50%。如图7所示,根

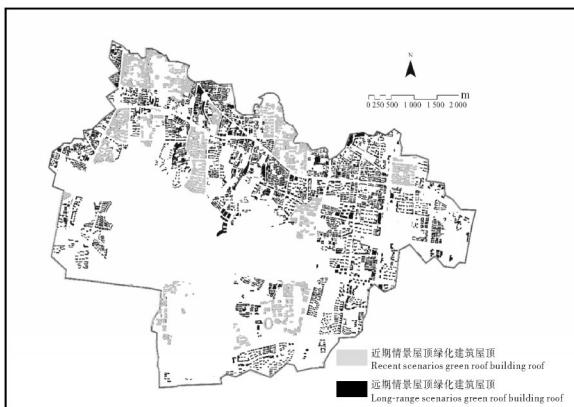


图6 屋顶绿化建筑屋顶分布

Fig. 6 Green roof building roof distribution

据实际情况选择2种不同的下凹绿地,分别为简单下凹绿地和复杂下凹绿地,两者的不同体现在前者减少了土壤下层砾石层或透水土工布等工程量较大的措施,更便于改造和管理。图7展示了SWMM模型中3种LID措施的示意图,相关参数取值见表1。

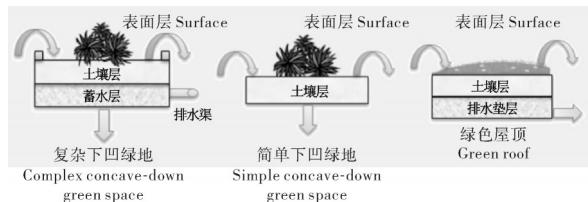


图7 LID措施示意图

Fig. 7 Schematic diagram of LID measures

表1 LID措施相关参数取值

Table 1 Values of LID measures

控制面 Control surfaces	相关参数 Relevant parameters	复杂下凹绿地 Complex concave-down green space	简单下凹绿地 Simple concave-down green space	绿色屋顶 Green roof
表面层 Surface	蓄水深度/mm Storage depth	200	200	50
土壤层 Soil	植被容积小数 Vegetative volume fraction	0.2	0.2	0.2
	表面曼宁系数 Surface roughness	0.2	0.2	0.2
	表面坡度/(°) Surface slope	1	1	1
	厚度/mm Thickness	300	300	150
	孔隙率 Porosity	0.5	0.5	0.5
蓄水层 Storage	产水能力 Field capacity	0.3	0.3	0.3
	枯萎点 Wilting point	0.2	0.2	0.2
	导水率/(mm/h) Conductivity	40	40	40
	导水率坡度/(°) Conductivity slope	10	10	10
	吸水头/mm Suction head	3.5	3.5	3.5
排水层 Drain	厚度/mm Thickness	300		
	孔隙比 Void ratio	0.75		
	渗透速率 Seepage rate	50		
	堵塞因子 Clogging factor	0		
排水垫层 Drainage mat	流量系数 Drain coefficient	4.7		
	流量指数 Drain exponent	0.5		
	偏移高度/mm Offset height	10		
	厚度/mm Thickness			150
	孔隙比 Void fraction			0.5
	表面曼宁系数 Roughness			0.2

4)详细规划情景。本研究充分考虑海绵绿地改造的可行性,结合各地块休憩、游览、教学、居住等功能,进行选择性海绵改造,具体比例设置的详细情景如表2所示。

## 2 结果与分析

### 2.1 近期情景对比

1)年径流总量控制率对比。采用65%年径流总

量控制率对应的24 h设计降雨事件,可以充分体现研究区域各海绵化改造措施在最佳状态下对单场次小降雨事件的响应,其中简单下凹绿地改造情景和复杂下凹绿地改造情景对径流的削减作用相差不大。模拟结果显示,S0情景、S1-1情景、S1-2情景、S1-3情景、S1-4情景、S1-5情景、S1-6情景、S1-7情景和S1-8得到的年径流总量控制率分别为40.10%、59.13%、61.00%、62.35%、63.47%、59.00%、

表2 规划情景详细设置  
Table 2 Detailed set of planning scenarios %

情景 Scenario	海绵改造 面积比例 Sponge renovation area	复杂下凹 绿地率 Complex concave-down green space ratio	简单下 凹绿地率 Simple concave-down green space ratio	屋顶 绿化率 Green roof ratio
S0	0	0	0	0
1	20	20	0	0
2	20	30	0	0
3	20	40	0	0
4	20	50	0	0
5	20	0	20	0
6	20	0	30	0
S1	7	20	0	40
8	20	0	50	0
9	20	0	0	90
10	20	0	20	90
11	20	0	30	90
12	20	0	40	90
13	20	0	50	90
14	80	20	0	0
15	80	30	0	0
16	80	40	0	0
17	80	50	0	0
18	80	0	20	0
S2	19	80	0	30
20	80	0	40	0
21	80	0	50	0
22	80	0	20	90
23	80	0	30	90
24	80	0	40	90
25	80	0	50	90

60.90%、62.27% 及 63.40%，可以看出其中对径流的控制效果是复杂下凹绿地>简单下凹绿地，但是复杂下凹绿地的优势在单场次降雨事件下不明显，这主要是因为在单场次小降雨事件下，地表径流流入下凹绿地基本都被表面层和土壤层吸收，在24 h的时间内只有极少数径流向下流入蓄水层和排水层，

导致2种下凹绿地改造情景对径流的削减作用基本一致。但是在更加贴近现实情况的全年降雨事件下，简单下凹绿地的削减效果就明显逊色于复杂下凹绿地，因为在年降雨事件下，绿地在消纳全年多场降雨时并不是时时处于最佳的状态，简单下凹绿地内所储存的水分不能及时下渗导致其对多场次降雨径流的削减作用不佳，复杂下凹绿地的蓄水层和排水层则能够使绿地内的水迅速排掉，使绿地能够在多场次降雨情况下保持较好的状态。

通过对比分析发现，不同的下凹绿地率与子汇水区的不透水率均会影响研究区域的径流控制效果。由于规划近期目标情景下改造面积有限，2种下凹绿地改造情景下研究区域均未达到65%的年径流总量控制目标，达标子汇水区分布及数量如图8所示。由图8可知，提高下凹绿地率对改善其径流状况作用有限。以该研究区子汇水区的达标率来看，下凹绿地率30%是对年径流总量控制率发生突变的重要值，此时达标率涨幅最高。而在相同的下凹绿地率情景下，分析简单下凹绿地情景中在单次降雨事件和年降雨事件中达标的子汇水区不透水率的差别，可以发现存在某一不透水率临界值，该临界值下的子汇水区简单下凹绿地情景在2种降雨事件下均能达标，但该临界值之上的子汇水区简单下凹绿地情景在单次降雨事件下可以达标，在年降雨事件下不能达标，分析得出此不透水率临界值约为55%。

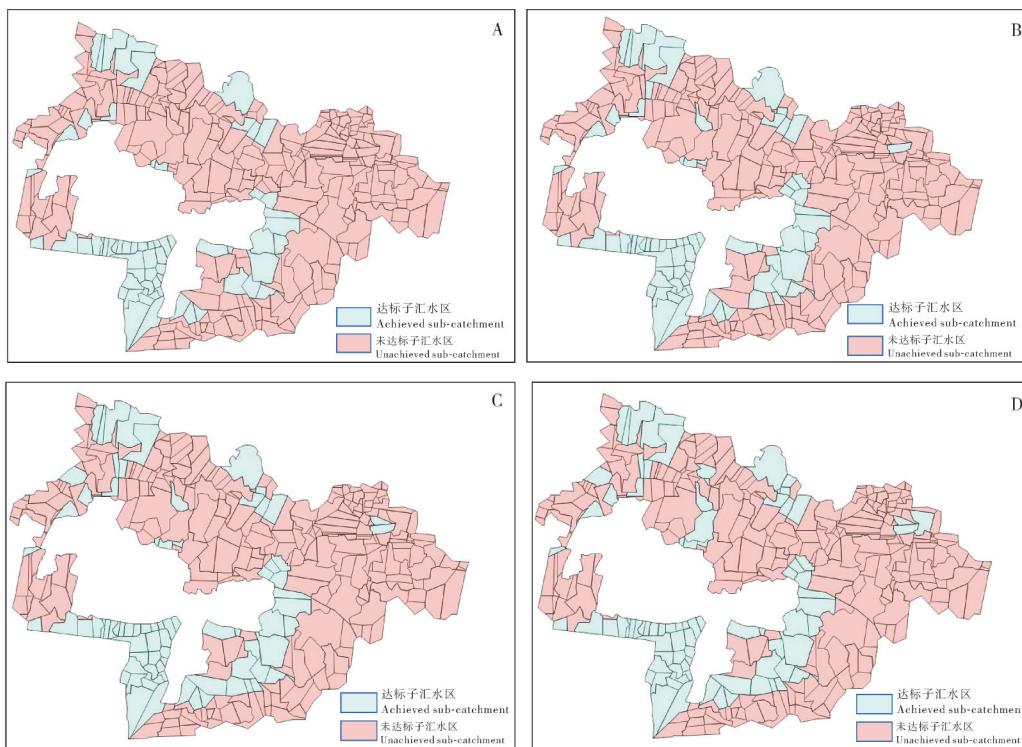
而添加绿色屋顶之后的S1-9到S1-13子情景径流削减率如表3所示，可以看出添加屋顶绿化对于径流控制具有良好作用。但由于改造面积有限，汇水区整体不能达到目标，添加屋顶绿化后新增达标子汇水区主要位于住宅小区。

2)峰值流量与峰现时间对比。短历时暴雨事件下，比较3种LID措施对峰值流量的削减作用，屋顶

表3 添加屋顶绿化前后不同下凹绿地率情景下径流削减率

Table 3 Runoff reduction rate with different concave-down green space ratio under the scenarios with green roof and without green roof %

情景 Scenario	下凹绿地率/% Concave-down green space ratio				
	0	20	30	40	50
径流削减率(简单下凹绿地+屋顶绿化) Runoff reduction rate under the scenario of simple concave-down green space and green roof	28.31	41.55	43.57	45.15	46.47
径流削减率(简单下凹绿地) Runoff reduction rate under the scenario of simple concave-down green space	0.00	31.56	34.74	37.02	38.91



A: 20%下凹绿地率, 达标 63 个 20% concave-down green space ratio, 63 achieved; B: 30%下凹绿地率, 达标 73 个 30% concave-down green space ratio, 73 achieved; C: 40%下凹绿地率, 达标 78 个 40% concave-down green space ratio, 78 achieved; D: 50%下凹绿地率, 达标 84 个 50% concave-down green space ratio, 84 achieved.

图8 不同下凹绿地率情景下达标子汇水区数量及分布

Fig.8 The quantity and distribution of standard sub-catchment areas under different concave-down green space ratio scenarios

绿化效果最小,在 $P=1\text{ a}$ 的降雨事件下其峰值削减率为3.74%,作用远不如下凹绿地,而简单下凹绿地和复杂下凹绿地差别不大,其峰流量值一致,峰现时间也基本一致,这可能是因为短历时降雨条件下复杂下凹绿地的蓄水层和排水层的作用难以显现。仅对比下凹绿地的各个情景发现,汇水区洪峰流量随

着下凹绿地率的增加而减少,洪峰削减率随着下凹绿地率的增加而增加,但增幅随着下凹绿地率的增加而减少,在 $P=1\text{ a}$ 降雨事件下不同下凹绿地率情景下的洪峰流量变化,其中洪峰削减率在30%的下凹绿地率情景下增幅最大,实现了效益最大化(表4)。

表4 添加屋顶绿化前后不同下凹绿地率情景下洪峰流量变化

Table 4 Changes in peak flow with different concave-down green space ratio under the scenario with green roof and without green roof

情景 Scenario	下凹绿地率/% Concave-down green space ratio				
	0	20	30	40	50
洪峰流量(简单下凹绿地+屋顶绿化)/( $\text{m}^3/\text{s}$ )					
Peak flow changes under the scenario of simple concave-down green space and green roof	309.64	219.78	219.34	219.10	219.07
洪峰流量(简单下凹绿地)/( $\text{m}^3/\text{s}$ )					
Peak flow changes under the scenario of simple concave-down green space	321.69	225.95	225.11	224.80	224.66
洪峰流量削减率(简单下凹绿地+屋顶绿化)/%					
Peak flow reduction rate under the scenario of simple concave-down green space and green roof	3.74	31.68	31.81	31.89	31.90
洪峰流量削减率(简单下凹绿地)/%					
Peak flow reduction rate under the scenario of simple concave-down green space	0.00	29.76	30.02	30.12	30.16

下凹绿地对不同重现期降雨事件的洪峰流量削减作用不同,但是在短历时降雨事件下简单下凹绿

地改造情景和复杂下凹绿地改造情景模拟结果相似,因此,以最高下凹绿地率50%的S1-8情景为例

进行分析(表5)。下凹绿地对汇水区洪峰流量的削减率随着重现期的增大而减小,表明下凹绿地对小

重现期的暴雨事件有着更好的削峰效果,这一结果也在屋顶绿化情景中得到了验证。

表5 不同重现期降雨事件下凹绿地的洪峰削减变化

Table 5 Changes of peak flow reduction in the concave-down green space under the rainfall events with different recurrence periods

降雨事件 Rainfall events	50%下凹绿地率情景下洪峰流量/(m <sup>3</sup> /s) Peak flows under the scenario with 50% concave-down green space	无下凹绿地改造情景下洪峰流量/(m <sup>3</sup> /s) Peak flows under the scenario without concave-down green space	洪峰削减率/% Peak flow reduction rate
P=1 a	224.66	321.69	30.16
P=2 a	302.83	431.28	29.78
P=3 a	351.66	498.97	29.52
P=5 a	417.00	588.63	29.16
P=10 a	512.18	717.86	28.65
P=50 a	752.45	1 041.15	27.73

## 2.2 远期情景对比

结合对近期情景的分析,对远期情景的子情景进行选择,仅选择20%、30%下凹绿地率与屋顶绿化的组合,并在绿地率小于45%的区域建设复杂下凹绿地,大于45%区域进行简单下凹绿地改造。用最优改造方式探寻远期情景对径流控制的最佳效果。

1)年径流总量控制率对比。首先用年降雨事件进行模拟推求不同情景的年径流控制率。模拟发现,当改造面积达到80%时候,下凹绿地率为20%和30%情景年径流总量控制率分别达到60.75%、64.31%;当改造面积达到100%时候,下凹绿地率为20%和30%情景年径流总量控制率分别为77.02%、81.25%。因实际模拟过程中改造面积为77%,基本可以认为当实现80%改造面积时,选择30%的下凹

绿地率与屋顶绿化的结合可以实现65%的年径流总量控制目标。

2)峰值流量与峰现时间对比。与近期情景对比,远期情景下较大的绿地改造面积较为均匀地分布在各个子汇水区,使得整个研究区域的径流曲线发生较为明显的变化。图9A展示了在P=1 a的降雨事件下不同情景的径流曲线,在短历时暴雨事件下,海绵化改造可以降低峰值流量还可以推迟峰现时间,从图9可以看出,随着LID措施面积的增加,峰值流量逐渐减小,未改造情景的峰现时间为1:14,远期情景的子情景对峰现时间均有推迟效果。较大的绿地改造面积对峰值流量的削减效应也更加明显,同样在P=1 a的降雨事件下,随着LID措施面积的增加,峰值流量减少,峰值流量削减率增加。如图9B所示,20%下凹绿地率情景峰值流量为11 m<sup>3</sup>/s,峰值

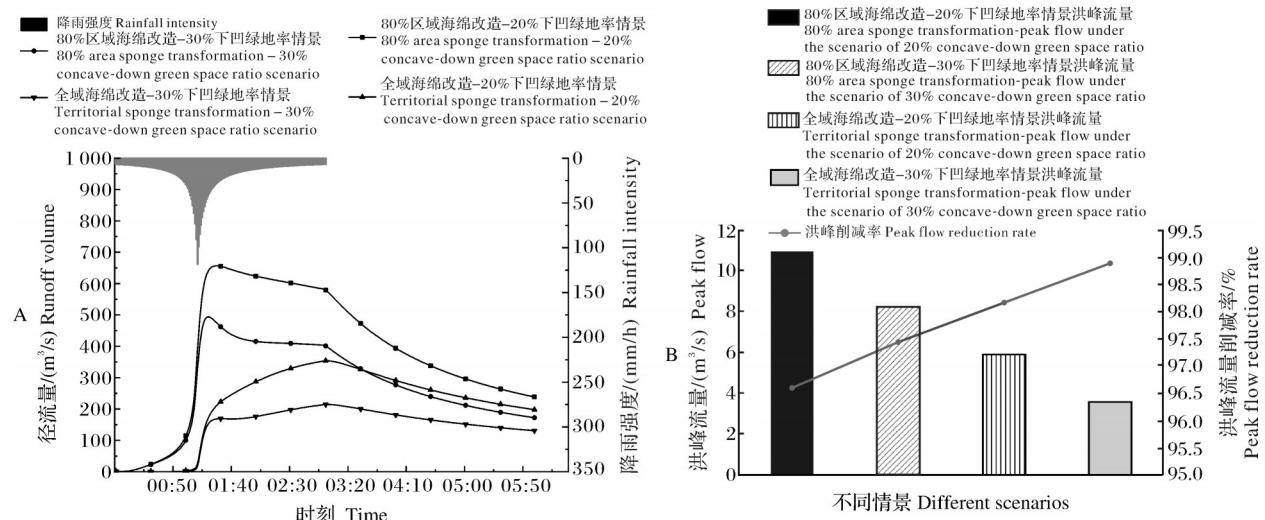


图9 重现期P=1 a的短历时降雨事件下不同情景的径流曲线(A)及洪峰流量及削减率(B)

Fig.9 Runoff curves(A) and peak flows and reduction rates(B) under the short-calendard rainfall event with a return period P= 1 a

流量削减率为4%,30%下凹绿地率情景峰值流量为8 m<sup>3</sup>/s,峰值流量削减率为6%。

不同降雨强度的降雨事件下,不同情景对峰值流量的削减和对峰现时间的推迟效果不同。图10展现了20%下凹绿地率远期情景对不同重现期降雨事

件的响应情况。结果显示, $P=1\text{ a}$ 、 $P=2\text{ a}$ 到 $P=50\text{ a}$ 的降雨事件模拟下,降雨强度增大,洪峰流量增大,洪峰流量削减率减小,洪峰推迟时间减小。从洪峰流量削减率的下降趋势来看,LID措施对小重现期的降雨事件尤其是重现期为1 a的降雨事件削减效果最好。

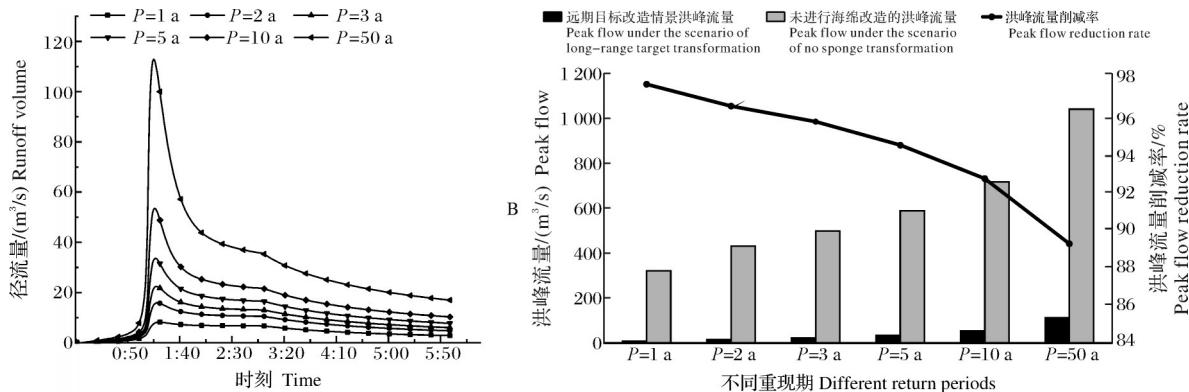


图10 远期情景20%下凹绿地率情景在不同重现期降雨事件的径流曲线(A)及削峰效果(B)

Fig.10 Runoff curves(A) and peak shaving effect(B) for the scenario of 20% concave-down green space ratio under the rainfall events with different return periods for the forward scenario

### 3 讨论

本研究以南湖汇水区为典型案例,在径流控制目标的导向下,以年径流总量控制和径流洪峰削减2种视角量化分析武汉市南湖汇水区适宜的绿地布局策略,通过模型模拟和情景设置揭示了蓝绿协同视角下城市汇水分区绿地削减雨水径流效应特征。城市汇水分区尺度20%~30%的下凹式绿地改造可实现年径流控制率65%的海绵城市建设目标。不同的海绵绿地改造措施中,复杂下凹绿地(具备蓄水层和下排管)和简单下凹绿地(无蓄水层和下排管)对单场降雨事件的作用差异不明显,但对长历时多场次降雨情况复杂下凹绿地的表现会更加显著。屋顶绿化对径流控制具有良好的作用,添加屋顶绿化前后不同下凹绿地率情景下子汇水区达标状况差异显著。比较3种LID措施对峰值流量的削减作用,屋顶绿化效果最小,在 $P=1\text{ a}$ 的降雨事件下其峰值削减率仅为3.74%。城市水域是天然雨洪调蓄池,做好武汉市南湖汇水区绿地和湖泊的联动发展,形成海绵体系,能大幅提升南湖汇水区的雨洪调蓄能力。针对武汉市南湖汇水区绿地海绵化改造措施,应遵循“源头滞蓄-过程消能-末端适应”的策略,根据绿地特点进行针对性建设。

源头滞蓄,提高绿地本体雨水蓄存能力。源头滞蓄,主要是块状的城市绿地、透水广场及道路、屋

顶绿化以及小面积极蓄水池等,主要是从源头消纳雨水,渗透滞留削减雨水径流,回补地下水。《武汉市中心城区湖泊“三线一路保护规划”》中规划有南湖汇水区环湖绿化控制线和环湖滨水建设控制线,绿化控制线内区域主要进行保护和提升,绿化控制线外滨水建设控制线内区域考虑适当增加公共绿地,作为汇水区雨水廊道的重要节点,滨水建设控制线外区域根据实际情况增加街头绿地,从源头控制径流。

针对武汉市南湖汇水区,具体海绵改造措施主要考虑下凹绿地及屋顶绿化2种措施。下凹绿地应用最广泛,本研究表明武汉市南湖汇水区20%~30%的下凹绿地率基本可以满足区域的需求,应当以此为引导进行绿地的海绵化改造。其中,简单下凹绿地适合45%绿地率以上的地块,而复杂下凹绿地适合45%绿地率以下的地块,屋顶绿化更适合建筑密度较高的居住区和商业区,作为辅助绿化手段消纳城市雨水径流。整体来看下凹绿地及屋顶绿化的组合措施对径流的削减效果最好,本研究表明30%下凹绿地率+屋顶绿化的方式可以达到65%的年径流控制率目标,是武汉市南湖汇水区绿地海绵化改造的适宜方式。同时,考虑到改造推进的难度和带来的收益,可以将改造顺序设计为:各大高校院区→绿化较好的新小区→医院、机关单位等公共服务片区→光谷软件园等工业用地→商业片区→老旧小区。改造过程中除注意改造顺序还需注意不透水

率,本研究发现武汉市南湖汇水区存在55%的不透水率临界值。根据相关文献,其他研究者也得到不透水率55%的结论,针对不同的地块该数值可能有所不同,但是可以利用该方法得出相应的临界值。

过程消能,形成蓝绿耦合的削减雨水径流廊道。过程消能主要是城市河道溪流、道路植草沟等线型绿道,特点是呈现线性分布,上游连接城市高密度建成区,下游连接城市水体,是城市线型海绵体,主要作为雨水廊道,发挥土壤渗透和植被截留的作用,削减径流流量,减轻下游水体的调蓄压力。南湖汇水区可结合汇水区及地表径流排放规律,梳理绿地现状,在远离南湖的高密度建成区、内涝较严重区域和南湖间尽量形成具有连通性雨水通廊,传输并削减过量雨水。

末端适应,发挥城市水域蓄滞雨水作用。末端适应主要为河流湖泊等城市自然水体以及部分人造池塘和调蓄池,具有较强的调蓄功能,能够存蓄城市雨水,用以维持周边生境及景观。在城市后续建设过程中应更注重对于南湖本体的生态保护与修复,还可打通南湖雨水的外排通道,完善南湖连通渠两侧绿地,引导过量雨水流出汇水区。根据不同绿地的特点进行针对性改造可以充分发挥南湖汇水区的海绵功能,最大程度地保护湖泊本底和发挥湖泊的调蓄作用。

## 参考文献 References

- [1] 宋晓猛,张建云,王国庆,等.变化环境下城市水文学的发展与挑战:II.城市雨洪模拟与管理[J].水科学进展,2014,25(5):752-764.SONG X M,ZHANG J Y,WANG G Q,et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: II: urban stormwater modeling and management [J]. Advances in water science, 2014, 25(5): 752-764(in Chinese with English abstract).
- [2] 朱黎青,高翅,朱春阳.气候变化视角下上海黄浦江滨水区洪涝风险评估与分区策[J].华中农业大学学报,2023,42(4):42-52.ZHU L Q,GAO C,ZHU C Y.Flood risk assessment and zoning strategies of Huangpu River waterfront in Shanghai from perspective of climate change [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(4): 42-52(in Chinese with English abstract).
- [3] 李涵.基于雨水利用的武汉市综合公园设计研究[D].武汉:华中农业大学,2015.LI H.Study on the design of comprehensive park in Wuhan based on rainwater utilization[D].Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015(in Chinese with English abstract).
- [4] 陈珂珂,何瑞珍,梁涛,等.基于“海绵城市”理念的城市绿地优化途径[J].水土保持通报,2016,36(3):258-264.CHEN K K,HE R Z,LIANG T,et al.Optimization approach of urban green space based on concept of “Sponge city”[J].Bulletin of soil and water conservation, 2016, 36(3): 258-264(in Chinese with English abstract).
- [5] 成玉宁,王雪原.城市蓝绿空间融合规划的生态逻辑[J].中国园林,2023,39(10):39-43.CHENG Y N,WANG X Y. Ecological logic of urban blue-green space integration planning [J]. Chinese landscape architecture, 2023, 39 (10) : 39-43 (in Chinese with English abstract).
- [6] 程江,杨凯,徐启新.高度城市化区域汇水域尺度LUCC的降雨径流调蓄效应:以上海城市绿地系统为例[J].生态学报,2008,28(7):2972-2980.CHENG J,YANG K,XU Q X.Rainfall-runoff storage-infiltration effect of LUCC in highly urbanized region on a catchment's scale: Shanghai urban green space system as an example[J].Acta ecologica sinica, 2008, 28 (7):2972-2980(in Chinese with English abstract).
- [7] AHIABLAME L,SHAKYA R.Modeling flood reduction effects of low impact development at a watershed scale[J].Journal of environmental management, 2016,171:81-91.
- [8] 邢国平,邵兆凤,周建芝,等.天津市建设下凹绿地的雨水蓄渗效果分析[J].水土保持通报,2012,32(6):120-122.XING G P,SHAO Z F,ZHOU J Z,et al.Effectiveness analysis on storage and infiltration rates of concave-down green space in Tianjin City[J].Bulletin of soil and water conservation, 2012, 32(6):120-122(in Chinese with English abstract).
- [9] ROSSMAN L A.Storm water management model user's manual version 5.1[M].Washington D.C.:United States Environment Protection Agency,2015:177-185.
- [10] 张嫣.基于雨洪调蓄的武汉中心城区湖泊公园体系构建与管控研究[D].武汉:华中农业大学,2021.ZHANG Y.Construction and regulation of lake park system in the central city of Wuhan based on stormwater retention and storage [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021(in Chinese with English abstract).
- [11] 叶阳,裘鸿菲.汇水系统绿地雨洪调蓄研究:以武汉港西汇水系统为例[J].中国园林,2020,36(4):55-60.YE Y,QIU H F. Stormwater regulation and storage by green space of drainage system: a case study of west port drainage system in Wuhan [J]. Chinese landscape architecture, 2020, 36 (4) : 55-60 (in Chinese with English abstract).
- [12] 雷泽鑫,罗俊杰,许涛,等.基于径流路径优化的校园景观海绵改造研究:以天津大学青年湖片区为例[J].中国园林,2022,38(7):103-108.LEI Z X,LUO J J,XU T,et al.Study on sponge transformation of campus landscape based on runoff path optimization: a case study of Youth Lake area of Tianjin University [J].Chinese landscape architecture, 2022, 38 (7) : 103-108(in Chinese with English abstract).

## Characteristics and scenario simulation of rainwater runoff effect reduction in urban catchment zoning green space from perspective of blue-green synergy :in case of South Lake of Wuhan

WANG Mengxi<sup>1</sup>, HOU Dongrui<sup>1</sup>, WU Jing<sup>2</sup>, MA Chi<sup>1</sup>, ZHU Chunyang<sup>1</sup>

1. College of Horticulture & Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Wuhan Design Consulting Group Co., Ltd., Wuhan 430024, China

**Abstract** In recent years, there has been a shift in the approach to using grey infrastructure for rainwater and flood management, and the rainwater and flood regulation and storage function from the perspective of blue-green synergy has begun to be emphasized. To explore the reduction effect of various green space regulation methods on rainfall runoff, taking the South Lake catchment zone of Wuhan City as the research object, this paper simulates the changes in the total annual runoff control rate, peak flow and peak time under the sponge green space renovation measures based on the SWMM (storm water management model), revealing the effect of green space on reducing rainwater runoff in the urban catchment zone from the perspective of blue-green synergy. The results show that: the transformation of concave green space with a scale of 20%-30% for urban catchment zones can achieve the sponge city construction goal of an annual runoff control rate of 65%. Among different sponge green space transformation measures, there is no significant difference in the effect of complex concave-down green space (with aquifer and lower pipe) and simple concave-down green space (without aquifer and lower pipe) on a single rainfall event. However, the performance of complex concave green space will be more significant for long-term and multi rainfall situations.

**Keywords** blue and green space ; rainwater runoff; storm water management model; catchment; ecological effect; scene simulation

(责任编辑:陆文昌)