

住宅小区径流削峰 LID 与调蓄池组合设置标准分析

陈雪娇¹, 姜应和¹, 徐天会^{2,3}

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056; 3. 中交城乡建设规划设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430051)

摘要: 以武汉市某住宅小区为研究对象,构建 SWMM 概化模型,在 2 h 短历时降雨条件下模拟分析设置不同比例的下凹式绿地、渗透铺装、绿色屋顶等单一 LID 措施的径流削峰效果,发现下凹式绿地、渗透铺装和绿色屋顶的设置标准宜为小区面积的 15%、6% 和 12.5%。LID 与分流式雨水调蓄池组合的模拟结果表明,下凹式绿地+渗透铺装+分流式调蓄池(280 m³/hm² 硬化面积、5 cm 偏移量)和下凹式绿地+渗透铺装+绿色屋顶+分流式调蓄池(211 m³/hm² 硬化面积、10 cm 偏移量)两种组合方案均能够使峰值流量与场地开发前接近,差额比例不超过 10%。

关键词: 住宅小区; 低影响开发; 径流削峰; SWMM; 调蓄池

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)19-0133-06

Analysis of Combination Setting Standard of LID Measures and Storage Tank to Control Runoff Peak in Residential Districts

CHEN Xue-jiao¹, JIANG Ying-he¹, XU Tian-hui^{2,3}

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. CCCC Second Highway Consultants Co. Ltd., Wuhan 430056, China; 3. CCCC Urban-Rural Construction Planning Consultants Co. Ltd., Wuhan 430051, China)

Abstract: A generalized SWMM model was developed to simulate and analyze the runoff peak reduction effect of setting different proportions of sunken lawn, pervious pavements, green roofs and other single LID measures under the condition of 2 h short duration rainfall in a residential district of Wuhan City. It was found that the setting standard for sunken lawn, pervious pavements and green roofs should be 15%, 6% and 12.5% of the plot area, respectively. Meanwhile, the simulation results of LID combined with split storage tanks showed that sunken lawn + pervious pavements + split storage tanks (280 m³/hm² impervious pavement, 5 cm offset) and sunken lawn + pervious pavements + green roofs + split storage tanks (211 m³/hm² impervious pavement, 10 cm offset) could make the runoff peak close to the site before development and the runoff peak difference was less than 10%.

Key words: residential district; low impact development; runoff peak reduction; SWMM; storage tank

随着对海绵城市建设研究的不断深入,已有许多地区提出了不同低影响开发(LID)措施的设置标

准。北京市建议新建工程硬化面积为 $2\,000\text{ m}^2$ 及以上的项目,绿地中至少应有 50% 下凹式绿地,透水铺装率不小于 70%。深圳光明新区采用 3 个 LID 引导控制指标:建筑与小区下沉式绿地率不小于 60%,绿色屋顶率为 25% ~ 50%,透水铺装率不小于 90%。李斯等^[1]提出,在建筑小区的设计中,每 $1\,000\text{ m}^2$ 硬化面积应配建容积不小于 30 m^3 的雨水调蓄池。武汉市规定新建建筑与小区屋顶绿化面积宜占该类建筑屋顶面积的 30% ~ 85%,透水铺装率不小于 50%。为了使开发后建成区与开发前径流峰值基本持平,一般需要建设雨水调蓄池。武汉市对于 LID 与调蓄池组合的最优方案尚缺少研究,也没有形成可以参考的设计标准。鉴于此,笔者利用 SWMM 模型、短历时芝加哥雨型模拟住宅小区尺度的 LID 措施对径流峰值的削减效果,得到了单一 LID 措施及 LID 与调蓄池组合措施的最优方案,使峰值流量削减目标能够满足海绵城市建设的考核标准,以期对其他城市的 LID 措施设置标准提供参考。

1 SWMM 模型构建

1.1 住宅小区模型

武汉市年平均降雨量约为 $1\,260\text{ mm}$,属亚热带季风性湿润气候。所研究小区位于武汉市洪山区,小区总面积为 9.32 hm^2 ,硬化面积、绿地面积、屋面面积、人行道及停车场面积占比分别为 48.8%、51.2%、25% 和 8.9%,地面坡度约为 1%。根据小区地形和雨水汇入管道的情况,将开发前的小区概化为 4 个子汇水区,地表径流分别经 P1、P2、P3 和 P4 这 4 个排放口进入城市雨水排放系统;将开发后的小区划分为 243 个子汇水区,雨水管网概化为 228 个节点和 231 段管道,地表径流分别经 4 个排放口进入城市雨水排放系统,具体见图 1。

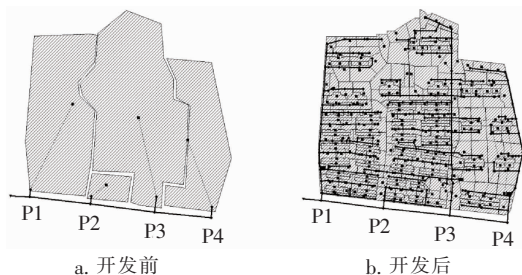


图1 所研究小区的 SWMM 概化示意

Fig.1 SWMM generalized chart of study residential district

1.2 雨型模拟

由于研究对象为小流域区域,为便于峰值流量

分析,采用武汉市短历时暴雨强度公式,见式(1)和式(2)。降雨重现期分别取 1、2、5、10、20 年,采用芝加哥雨型模拟降雨过程线,降雨历时定为 2 h,退水时间为 3 h,模拟总径流时间为 5 h,时间间隔为 1 min。根据武汉市雨量资料统计分析,雨型峰值系数 r 的取值如下:重现期为 1、2 年时, $r=0.4$;重现期为 5 年时, $r=0.45$;重现期为 10、20 年时, $r=0.5$ 。

$$q = \frac{885 [1 + 1.58 \lg(P + 0.66)]}{(t + 6.37)^{0.604}} \quad (0.5 \leq P < 10 \text{ 年}) \quad (1)$$

$$q = \frac{577 (1 + 0.96 \lg P)}{(t + 2.26)^{0.432}} \quad (10 \text{ 年} \leq P < 50 \text{ 年}) \quad (2)$$

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,min。

1.3 LID 措施选择及其设置标准取值

鉴于武汉市的土壤渗透性能较差、地下水位较高,应选择以“蓄”“滞”“净”“排”为主的 LID 措施。本研究区域为建筑密度较大的住宅小区,不适宜选择需要较大绿地面积的雨水花园、植被浅沟,也不适宜使用较难管理的雨水桶。考虑到上述因素,参考国内外 LID 设计导则,并结合国内海绵城市试点已建 LID 措施的建设与管理经验,分别选择下凹式绿地、渗透铺装、绿色屋顶以及分流式调蓄池(即离线式调蓄池)进行模拟分析。由于本研究小区的绿化品质较高,绿地面积较大,将大部分绿地开挖并改造为下凹式绿地的可行性不大,且费用较高,故选择小区内绿地较为集中的部分,将 20% ~ 40% 的绿地面积改造为下凹式绿地;将停车场及人行道面积的 50% ~ 90% 设置为渗透铺装;将屋面面积的 20% ~ 60% 设置为绿色屋顶。

1.4 模型参数

根据武汉市的水文地质特点,参考 SWMM 用户手册和相关文献^[2],对模型基本参数进行设定。入渗模型采用 Horton 模型,最大入渗率定为 76.2 mm/h ,最小入渗率定为 3.81 mm/h ,对应的衰减系数为 4 h^{-1} ;透水地表曼宁系数取 0.2,不透水地表曼宁系数取 0.015;透水地表洼地蓄水深度取 6 mm,不透水地表洼地蓄水深度取 2 mm;该小区无洼地蓄水的不透水地表占比为 25%,坡度为 1%。汇流模型采用非线性水库模型;水力模型采用动力波模型。LID 措施中的土壤性质根据《武汉市海绵城

市规划设计导则》中的数据选取;路面性质根据所采用透水砖的特性设置;各 LID 设施的层厚取值见表 1。

表 1 LID 参数设置

Tab. 1 Setting of LID parameters mm

项 目	表层	土壤层	路面层	蓄水层	排水层
下凹式绿地	125	305	—	305	—
渗透铺装	6	—	150	305	—
绿色屋顶	50	150	—	—	150

2 结果与讨论

该小区共有 P1、P2、P3 和 P4 这 4 个排放口,为简便起见,以下模拟结果仅针对 P1 排放口。

2.1 单一 LID 措施的削峰效果

在开发后住宅小区内可建 LID 的相应地块嵌入一定比例的单一 LID 设施,在图 1(b)的基础上建立嵌入若干单一 LID 设施单元后的概化模型,利用 SWMM 模拟设置不同面积比例的下凹式绿地、渗透铺装及绿色屋顶措施后不同排放口峰值流量的变化情况,P1 排放口的模拟结果如图 2 所示。可知,随着 LID 措施设置面积比例的增大,峰值流量削减率均逐渐增加,下凹式绿地的峰值流量削减率增加幅度与渗透铺装及绿色屋顶相比较小,但下凹式绿地对径流峰值的削减效果优于渗透铺装及绿色屋顶。这是由于下凹式绿地能够收集其所在汇水面积内不透水地面的径流,起到蓄水的作用,而渗透铺装及绿色屋顶只能处理直接降落其表面的雨水,主要依赖渗透作用。由于绿色屋顶还可以使雨水滞后流出,可以起到一定的错峰作用,故绿色屋顶的削峰效果要优于渗透铺装。

由图 2 还可以发现,LID 措施对小重现期降雨有较好的削峰作用,但对大重现期降雨的削峰作用有限,例如对于 20 年一遇的暴雨,峰值流量削减率均在 7% 以内,故选取 LID 措施最优比例时仅需要考虑能够使 5 年一遇降雨的径流峰值达到较好削减效果的比例即可。部分导则建议下凹式绿地设置标准应为 50% 以上的绿地面积,但本模拟结果显示,大幅度提高下凹式绿地的设置比例并不能大幅度提高径流峰值削减率。由于在小雨时,20% 的下凹式绿地也足以将其所在汇水范围内不透水地面的径流大部分收集,进一步提高下凹式绿地设置比例对小雨的影响不大。若以 5 年一遇降雨条件下有较好的峰值流量削减效果为标准,则宜将 30% 的绿地面积

建成下凹式绿地。渗透铺装及绿色屋顶在小重现期降雨条件下,设置比例越大则径流峰值削减效果越好,且削减率呈线性增加,理论上应取最大面积比例为最优比例,但考虑到实际设置时的可能性,并参考导则和其他学者的研究成果^[3],渗透铺装的设置比例不宜大于 70%、绿色屋顶的设置面积不宜超过其所在下垫面面积的一半。因此,宜将 70% 的人行道及停车场面积设置为渗透铺装、50% 的屋面面积设置为绿色屋顶。

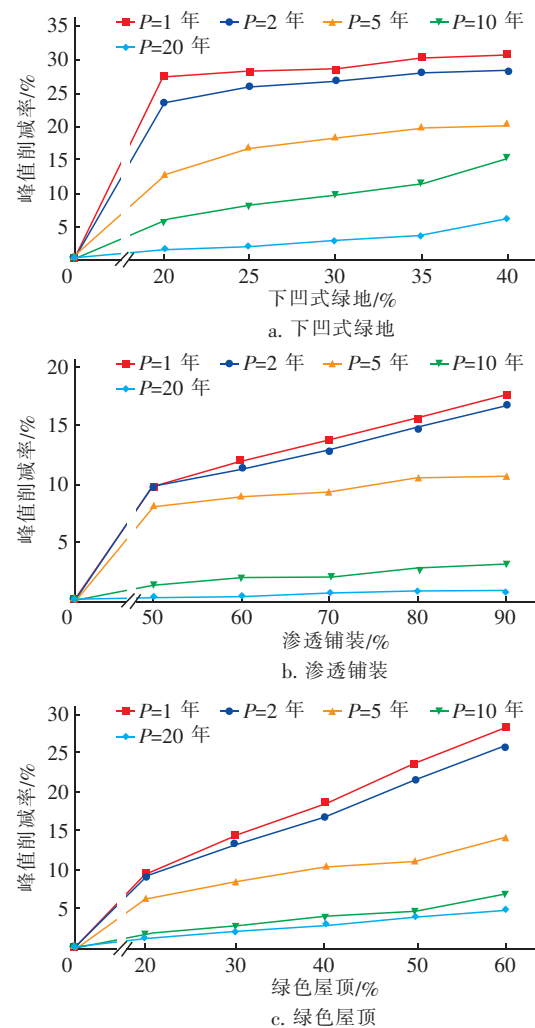


图 2 设置不同面积比例下凹式绿地、渗透铺装和绿色屋顶时对峰值流量的削减率

Fig. 2 Runoff peak reduction rate by setting different area ratios of sunken lawn, pervious pavement and green roof

2.2 LID 与调蓄池组合方案的削峰效果

模拟发现,仅选取上述 3 种 LID 措施的组合无法使峰值流量达到控制目标要求,故在此基础上加入常用于削减峰值流量的分流式调蓄池进行模拟分

析。分流调蓄池采用干管末端调蓄的形式,设置在靠近 P1、P2、P3 和 P4 干管排放口的节点处,调蓄池采用分流管进水,其管径与被分流雨水干管一致,进水管管底与雨水干管管底之间设置了一定的偏移量(如图3所示),仅当雨水干管内的水深高于偏移量时调蓄池才开始蓄水。



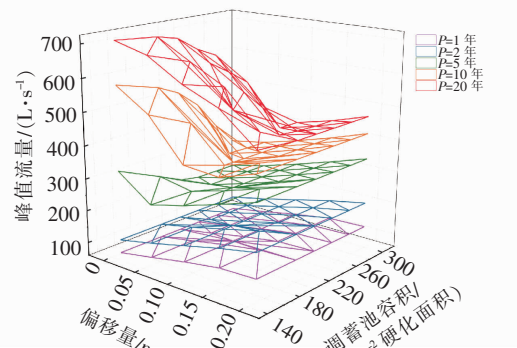
图3 分流式调蓄池示意

Fig.3 Schematic diagram of split storage tank

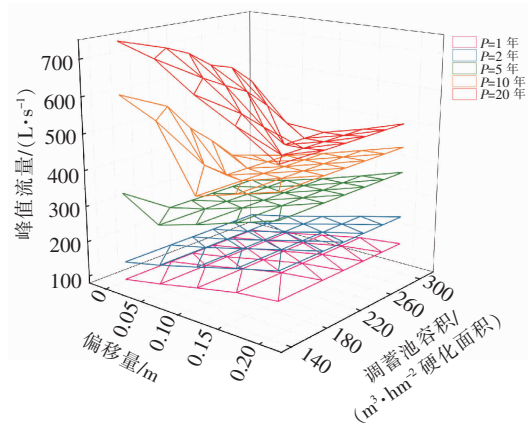
选取30%绿地面积的下凹式绿地和70%人行道及停车场面积的渗透铺装作为组合LID的预设标准。由于设置绿色屋顶需要屋面符合荷载、防水等条件,且屋顶坡度需不大于 15° ,故将能否设置绿色屋顶单独考虑。若能够设置绿色屋顶,则将50%的屋面面积设置为绿色屋顶。在已选取的几个LID措施设置标准的基础上,设置分流式调蓄池使开发区域的峰值流量与开发前基本一致。满足削峰要求的两种不同组合方案如下:组合一,下凹式绿地(30%绿地面积)+渗透铺装(70%人行道及停车场面积)+分流式调蓄池;组合二,下凹式绿地(30%绿地面积)+渗透铺装(70%人行道及停车场面积)+绿色屋顶(50%屋面面积)+分流式调蓄池,其中,分流式调蓄池的容积及偏移量还需进一步确定。

模拟结果表明,分流式调蓄池的偏移量及容积对峰值流量的削减率有很大的影响。为选取组合方案中的最优偏移量,分别将两个方案中分流式调蓄池的偏移量设为0、0.05、0.1、0.15、0.2 m,组合一和组合二方案中的调蓄池容积分别设置为150、200、225、250、275、300 m^3/hm^2 硬化面积和150、175、200、225、250、300 m^3/hm^2 硬化面积,其他措施设置标准保持不变,利用SWMM模型进行模拟,考察不同调蓄池容积和偏移量对峰值流量的影响,并选取最优组合方案,P1排放口的模拟结果见图4。可知,在调蓄池偏移量和容积均相同的条件下,随着重现期的增大,峰值流量削减率逐渐减小。当偏移量为零、重现期为1年时,组合一和组合二的峰值流量削减率均达到最大值,分别为69.53%、77.44%,且与调蓄池容积大小无关。组合二在小重现期降雨

条件下的峰值流量削减率高于组合一,这是因为在小雨条件下,分流式调蓄池的偏移量使雨水不能流入调蓄池,对削减峰值流量起作用的是LID措施,组合二比组合一多设置了绿色屋顶,削峰、错峰的效果更优;大雨时,LID措施的作用有限,对削减峰值流量起主要作用的是分流式调蓄池,组合一与组合二对大雨的削峰作用均主要取决于调蓄池容积的大小及偏移量的取值。



a. 组合一



b. 组合二

图4 不同重现期降雨、调蓄池容积和偏移量条件下 P1 排放口的峰值流量

Fig.4 Peak flow of P1 discharge port under different return periods, offset and volume of storage tank

在相同的调蓄池偏移量条件下,随着调蓄池容积的增大,小重现期降雨条件下的峰值流量削减率保持不变,大重现期降雨条件下的峰值流量削减率呈现出先增加后不变的规律。当重现期为1、2年时,调蓄池的最小设计容积150 m^3/hm^2 硬化面积也未能蓄满,故增加调蓄池容积不会改变峰值流量削减率;当重现期 >5 年时,调蓄池容积成为峰值流量削减率的限制因素,提高调蓄池容积能够有效减小

峰值流量,但当调蓄池容积大于径流量时,峰值流量削减率不再改变。

在不同的重现期和调蓄池容积条件下,均存在一个最优偏移量,即此偏移量能使峰值流量削减率达到最大,最优偏移量随着重现期的增大而增大。当重现期较小时,雨量无法使调蓄池蓄满,不设偏移量能够使调蓄池最早开始蓄水,削峰效果最好;重现期较大时,雨量能够使调蓄池很快蓄满,蓄满时雨水干管排出流量即会出现一个二次峰值,根据 SWMM 模拟结果可以发现,使两次流量峰值相同的偏移量即为最优偏移量。

若要选取组合一和组合二方案最适宜的分流式调蓄池偏移量,应使不同重现期条件下的峰值流量与开发前大体接近,从而与低影响开发的理念相吻合。模拟结果显示,要达到开发前的峰值流量,对于小重现期降雨,不宜选择过大的偏移量;对于大重现期降雨,需选择较大的偏移量及较大的调蓄池容积。在组合一中,为了使 $P=1、2、5$ 年降雨条件下的峰值流量与开发前相近,调蓄池的偏移量不宜大于 0.05 m ;对于 $P=10、20$ 年的降雨,当偏移量取 0.05 m 时,模拟出最接近于开发前峰值流量的调蓄池容积。组合二同理。

最终得到满足削峰要求的两种组合方案的 LID 措施设计标准如下:组合一,下凹式绿地(30% 绿地面积) + 渗透铺装(70% 人行道及停车场面积) + 分流式调蓄池($280\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 硬化面积、 5 cm 偏移量)和下凹式绿地(30% 绿地面积) + 渗透铺装(70% 人行道及停车场面积) + 绿色屋顶(50% 屋面面积) + 分流式调蓄池($211\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 硬化面积、 10 cm 偏移量)。

利用 SWMM 模拟两种 LID 组合方案及开发前后 P1 排放口的流量过程线,结果如图 5 所示。可知,对于不同重现期的降雨,组合一和组合二均可使其峰值流量与场地开发前基本保持一致。

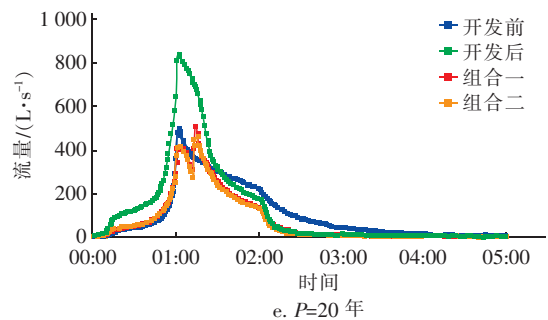
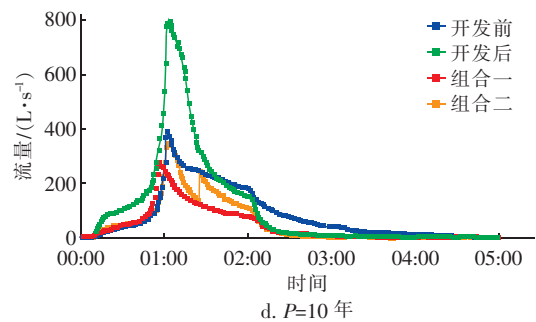
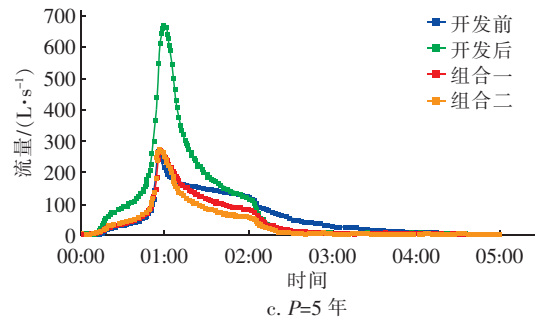
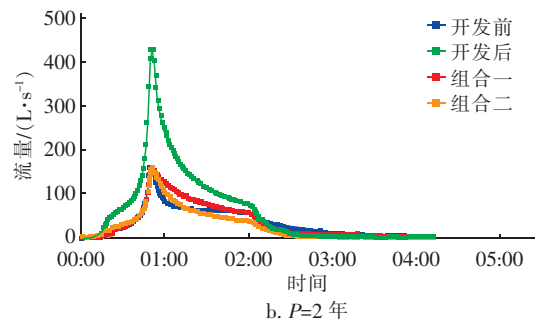
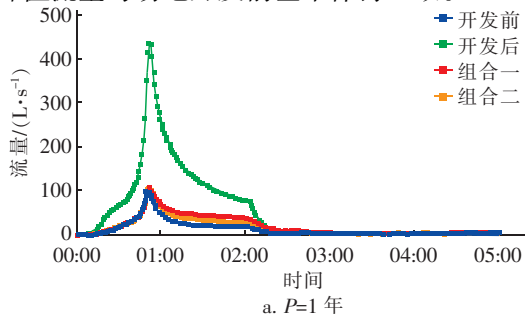


图 5 不同重现期及排水系统条件下 P1 排放口的流量过程线

Fig. 5 Flow duration curve of P1 discharge port under different return periods and different drainage systems

不同重现期降雨条件下组合一及组合二的峰值流量削减效果见表 2。可知,组合一和组合二的峰值流量削减率均随着重现期的增加而先增大后减小。这是因为小雨时,管道中的雨水无法进入分流式调蓄池,仅 LID 措施发挥作用;当雨量增大至一定程度,管道内的水深高于偏移量时,分流式调蓄池开

始蓄水,与 LID 措施共同发挥作用;随着重现期的增大,LID 措施的作用相对较小,分流式调蓄池起主要

的削峰作用,但当雨强过大时,调蓄池一旦蓄满就无法再发挥作用,故峰值流量削减率也会逐渐降低。

表2 不同重现期降雨条件下 LID 组合措施的径流峰值削减效果

Tab.2 Runoff peak reduction effect of LID combination measures under different return periods

项 目		$P=1$ 年	$P=2$ 年	$P=5$ 年	$P=10$ 年	$P=20$ 年
组合一	峰值流量削减率/%	61.97	63.32	59.36	56.31	40.03
	与开发前峰值流量比值	1.08	1.02	1.02	0.90	1.00
组合二	峰值流量削减率/%	62.88	64.86	59.33	56.16	39.88
	与开发前峰值流量比值	1.05	0.98	1.02	0.91	1.01

两种组合均能使开发后的峰值流量与开发前的差额比例不超过 10%。组合方案表明,要达到海绵城市的建设要求,仅靠 LID 措施并不可行,在最大限度设置 LID 措施后,增设调蓄池也是必不可少的。

3 结论

① 武汉市住宅小区层面短历时降雨条件下单一 LID 措施的设置标准如下:下凹式绿地宜为绿地面积的 30%,约为小区总面积的 15%;渗透铺装宜为停车场及人行道面积的 70%,约为小区总面积的 6%;绿色屋顶宜为屋面面积的 50%,约为小区总面积的 12.5%。

② LID 措施对小雨径流均有较好的削峰效果,但对大雨的削峰效果有限。虽然 LID 措施可以在源头控制径流,取代部分灰色建筑,但仅设置 LID 措施无法满足径流峰值低影响开发的削减要求。在最大程度地设置了 LID 措施后,仍需设置调蓄池。

③ 根据是否设置绿色屋顶,武汉市住宅小区层面短历时降雨条件下以峰值流量为控制目标的 LID 组合措施有两种设置标准:若屋面可以设置绿色屋顶,下凹式绿地、渗透铺装和绿色屋顶分别为小区面积的 15%、6% 和 12.5%,按 $211 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 硬化面积且偏移量为 0.1 m 设置分流式调蓄池;若屋面不可以设置绿色屋顶,下凹式绿地、渗透铺装分别为小区面积的 15% 和 6%,按 $280 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 硬化面积且偏移量为 0.05 m 设置分流式调蓄池。两个组合在不同重现期降雨条件下所产生的径流峰值与开发前径流峰值的差额比例均不超过 10%。

参考文献:

- [1] 李斯,许萍,郑克白,等. 建筑小区雨水调蓄池容积计算分析[J]. 给水排水,2014,40(11):81-84.
Li Si,Xu Ping,Zheng Kebai,et al. Volume calculation

and analysis of rainwater storage ponds in residential areas [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(11): 81-84 (in Chinese).

- [2] 胡爱兵,任心欣,裴古中. 采用 SWMM 模拟 LID 市政道路的雨洪控制效果[J]. 中国给水排水,2015,31(23):130-133.

Hu Aibing, Ren Xinxin, Pei Guzhong. Simulation of stormwater control effect of LID municipal road based on SWMM[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(23): 130-133 (in Chinese).

- [3] 雷洪彝. 海绵城市背景雨水 LID 模型研究及规划应用——以武汉市武昌滨江商务核心区为例[J]. 城市道桥与防洪,2015(11):93-96.

Lei Hongben. Rainwater LID model research and planning application under sponge city background—Taking Binjiang Business Core District of Wuhan City as an example[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2015(11):93-96 (in Chinese).



作者简介:陈雪娇(1994-),女,湖北襄阳人,硕士研究生,主要研究方向为海绵城市建设、SWMM 模型等。

E-mail:343214925@qq.com

收稿日期:2019-03-11