

基于“海绵城市”理念的下沉式绿地 优化设计^{*}

Optimization Design of Sunken Greenbelt Based on the Concept of
“Sponge City”

苏义敬¹ 王思思² 车伍³ 魏一哲⁴ 董音⁵
Su Yijing Wang Sisi Che Wu Wei Yizhe Dong Yin

摘要 我国许多城市洪涝灾害频发与水资源短缺的矛盾不断加深,融合“海绵城市”与国内外最新的雨洪管理理念建设下沉式绿地,实现防治内涝、水资源利用、景观美化的多重效益。基于北京《雨水控制与利用工程设计规范》,通过水量平衡法计算下沉式绿地的设计参数。在壤质砂土地区,绿地下沉率为50%,年径流总量控制率85%的条件下,绿地率为20%、30%、40%时,合理的下沉式绿地设计深度分别为200、120、75mm。最后介绍了下沉式绿地的竖向设计、景观美化、植物淹水时间的优化设计方法。

关键词 城市绿地;绿色基础设施;雨洪管理;海绵城市;下沉式绿地;优化设计

ABSTRACT In many Chinese cities, the conflict of frequent flooding and water shortage got deeper, it is necessary to integrate the latest concept of ecological stormwater management and “sponge city” into the construction of sunken green space landscape, so as to realize multiple benefits including the flooding control, water resource utilization and landscaping. Based on Beijing “Code for design of stormwater management and harvest engineering”, through water balance method, the design parameters of sunken greenbelt is determined. In the loamy sand area, sink rate of green space is 50%, under the condition of the control rate of total annual runoff more than 85%, when the ratio of green space for 20%, 30%, and 40%, the proper sinking depth of sunken greenbelt are 200mm, 120mm, and 75mm, respectively. Finally, the article briefly introduces the optimum design of grading, landscaping, and plant waterlogging time.

KEY WORDS Urban green space; green infrastructure; stormwater management; sponge city; sunken greenbelt; optimal design

^{*} 北京市教委环境科学及环境工程教学专项,项目编号:PXM2013-014210-000157;国家自然科学基金青年科学基金项目:城市绿地景观格局对雨洪过程和雨水系统效果的影响及优化调控研究,项目编号:51208020。

中图分类号 S731.2; TU985.12^{*}3 文献标识码 A

DOL 10.3969/j.issn.1000-0232.2014.03.039 文章编号 1000-0232(2014)03-0039-05

作者简介 ¹ 硕士研究生; ² 讲师 & 通讯作者; 电子邮箱: ezhu0309@sina.com; ³ 教授; ⁴ 本科生; ^{1&2&3&4} 城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室、北京建筑节能减排关键技术协同创新中心、北京建筑大学环能学院环境科学与工程系(北京,100044); ⁵ 中国·城市建设研究院,工程师(北京,100120)

1 引言

城市内涝防治以及雨洪控制利用无疑成为当前城市面临的热点问题, 依赖大规模基础设施和管网建设的传统雨水排放思路已经无法满足现代城市雨水管理的要求, 国内外许多城市开始实践新型雨洪管理的理念, 将雨洪蓄渗工程技术与城市绿地景观相结合设计, 构建以自然积存、自然渗透、自然净化为目标的“海绵城市”。《国务院关于加强城市基础设施建设的意见》(国发〔2013〕36号)中明确指出, 建设下沉式绿地及城市湿地公园, 提升城市绿地汇聚雨水、蓄洪排涝、补充地下水、净化生态等功能。可见在新型城镇化建设中, 下沉式绿地对提升城市绿地的水文调蓄功能具有重要意义。

下沉式绿地(Sunken Greenbelt)有狭义和广义之分, 狭义的下沉式绿地又称为低势绿地、下凹式绿地, 其典型结构为绿地高程低于周围硬化地面高程5~25cm左右, 雨水溢流口设在绿地中或绿地和硬化地面交界处, 雨水口高程高于绿地高程且低于硬化地面高程^[1]; 广义的下沉式绿地除了狭义的下沉式绿地之外, 还包括洼地、雨水花园、雨水塘、雨水湿地、多功能调蓄等生态雨水设施^[2]。本文的研究对象是狭义的下沉式绿地, 主要原因是其作为一种形式最简单的雨水蓄渗设施, 应用范围较广, 可以在道路、广场、停车场等周围设置。

下沉式绿地可汇集周围硬化地表产生的降雨径流, 利用植被、土壤、微生物的作用, 截留和净化小流量雨水径流, 超过绿地蓄渗容量的雨水经雨水口排入雨水管网^[3]。下沉式绿地不仅可以起到削减径流量、减轻城市洪涝灾害的作用, 而且下渗的雨水可以起到增加土壤水分含量以减少绿地浇灌用水量, 以及补充地下水资源量的作用。同时, 径流携带的氮、磷等污染物可以转变为植被所需的营养物质, 促进植物的生长。

目前下沉式绿地的研究主要集中在雨水净化与利用方面, 例如程江等学者^[4-6]就下沉式绿地对雨水径流污染物的削减效应进行了研究, 结果表明下沉式绿地对COD、NH⁴-N和TP的平均削减率范围分别为52.2%~41.3%, 49.0%~44.1%和47.4%~39.0%; 余绍武等^[3,7-10]对下沉式绿地的雨水蓄渗效益及其影响因素进行分析, 绿地下沉深度、绿地面积比例、土壤稳定入渗系数、设计暴雨重现期是影响其雨水蓄渗效益的主要因素。

国家或地方标准为下沉式绿地的设计应用提供了依据, 如《建筑与小区雨水利用工程技术规范》(GB50400-2006)提出小区下沉式绿地与周围路面的高程差, 以及有保证雨水进入绿地的措施; 北京《雨水

控制与利用工程设计规范》(DB11/685-2013, 以下简称北京雨水控制利用规范), 指出新建或改建城市道路绿化隔离带可结合用地条件和绿化方案设置下沉式绿地, 并规定了下沉式绿地的规模、竖向设计参数及与周边路面的衔接方式。

本文以北京雨水控制利用规范为例, 分析计算区域内下沉式绿地对场地整体的年径流总量削减效果, 并提出下沉式绿地的优化设计参数。介绍下沉式绿地在竖向设计、景观效果美化, 以及植物淹水时间的优化设计方法, 以期为下沉式绿地的推广应用、规范修编提供借鉴。

2 下沉式绿地设计参数确定

北京雨水控制利用规范明确指出, 新建或改建城市道路绿化隔离带可结合用地条件和绿化方案设置下沉式绿地; 凡涉及绿地率指标要求的建设工程, 绿地中至少有50%为用于滞留雨水的下沉式绿地; 下沉式绿地应低于周围铺砌地面或道路, 下沉深度宜为50~100mm, 且不大于200mm。

而实际工程项目中, 不同场地的绿地率、土壤渗透条件、雨洪控制目标等方面存在一定差异性, 因此下沉式绿地的设计参数不能照搬规范中的统一标准, 应基于场地条件合理确定。例如笔者所参与的浙江嘉兴某居住区项目中, 土壤渗透性较差, 并且绿地下方均为地下车库顶板, 雨水没有下渗的条件, 下沉式绿地设计规模偏大不仅会增加施工难度和成本, 还很难达到较好的雨洪控制效果。本文对北京地区下沉式绿地的设计参数进行了细化研究。

2.1 下沉式绿地水量平衡分析

降雨过程中, 下沉式绿地内同时存在汇流、下渗、蓄集、蒸发和溢流过程^[3]。忽略计算时段内的蒸发量, 且进入下沉式绿地的雨水无溢流排放的情况下, 则存在以下平衡关系:

$$W=S+U \quad (1)$$

式中: W —计算时段内下沉式绿地总入流量, 即雨水设计控制容积 m^3 ;

S —计算时段内下沉式绿地雨水下渗量, m^3 ;

U —计算时段内下沉式绿地的蓄水量差值, m^3 。

下沉式绿地的雨水设计控制容积根据式(2)计算^[11]:

$$W=0.001h(F_n+F_g) \quad (2)$$

式中: λ —服务面积综合径流系数(表1);

h —设计降雨量, mm;

F_n —下沉式绿地服务面积, m^2 ;

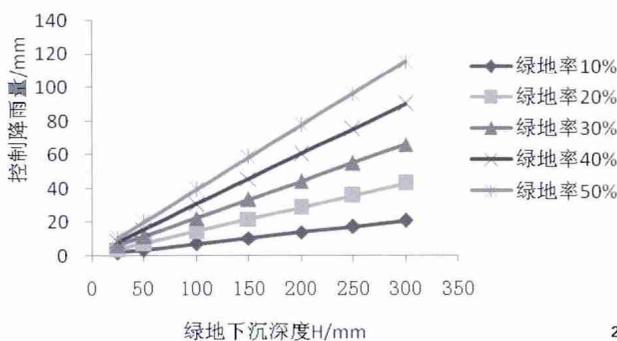
F_g —下沉式绿地面积, m^2 。

表1 土地用地类型对应的径流系数(雨量径流系数)

用地类型	绿地	透水铺装路面	混凝土或沥青路面	屋面
径流系数	0.15	0.45	0.9	0.9

表2 年径流总量控制率对应的设计降雨量

年径流总量控制率(%)	55	60	70	75	80	85	90	96
设计降雨量(mm)	11.5	13.7	19.0	22.5	26.7	32.5	40.8	65



下沉式绿地雨水下渗量计算公式为：

$$S=60kJF_gT \quad (3)$$

式中： k —土壤稳定入渗速率， m/s ；

J —水力坡度，垂直下渗时取值为1；

T —蓄渗计算时间，取北京降雨历时的经验值

60min。

下沉式绿地蓄水量 U 计算公式为：

$$U=0.001HF_g$$

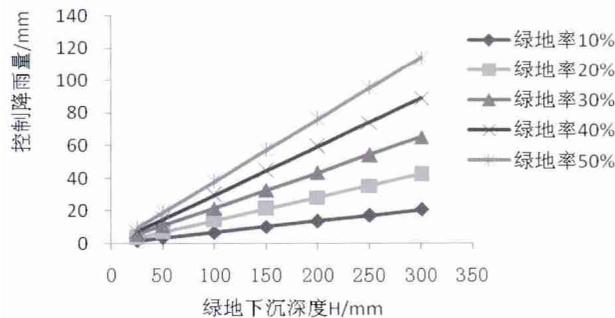
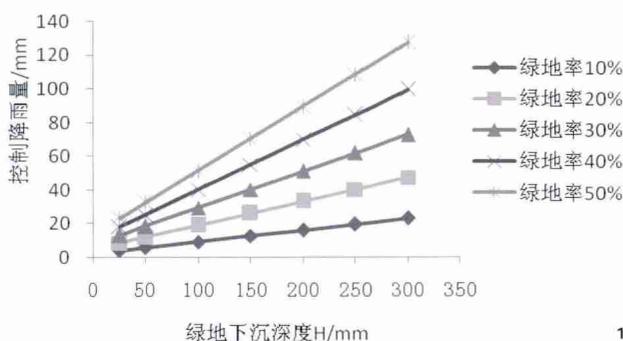
式中： H —下沉式绿地深度， mm ；

当土壤稳定入渗系数、下沉式绿地面积、下沉式绿地深度等条件一定时，由式(1~4)可以估算出下沉式绿地控制的设计降雨量，查表2可以确定设计降雨量对应的年径流总量控制率。

2.2 下沉式绿地设计参数选择

为定量描述下沉式绿地的控制雨水量，以 10^4m^2 计算区域为例，绿地率 f 取值分别为10%、20%、30%、40%、50%，绿地下沉率50%，铺装面积与其它硬化面积的比例为1:1，透水铺装率70%。选择砂质土、砂质壤土、砂质黏土三类典型土壤，设其土壤稳定入渗系数 K 分别为 $1 \times 10^{-5}m/s$ 、 $1 \times 10^{-6}m/s$ 、 $1 \times 10^{-7}m/s$ ，估算下沉式绿地在不同下沉深度、绿地率条件下能够全部控制的降雨量(图1~3)。

从图1可知，对于土质主要为砂质土、壤质砂土的地区，土壤稳定入渗系数 K 取值 $1 \times 10^{-5}m/s$ ，当年径流总量控制率目标为70%时，设计降雨量为19mm/h，绿地率 $f=10\%$ 、20%、30%、40%、50%所需的下沉式绿地深度分别约为250mm、100mm、50mm、30mm、



15mm；当年径流总量控制率目标为85%时，设计降雨量为32.5mm/h，绿地率 $f=10\%$ 、20%、30%、40%、50%所需的下沉式绿地深度分别约为450mm、200mm、120mm、75mm、50mm。

从图2可知，对于土质为砂质壤土、壤土的地区，土壤稳定入渗系数 K 取值 $1 \times 10^{-6}m/s$ ，当年径流总量控制率目标为70%时，设计降雨量为19mm/h，绿地率 $f=10\%$ 、20%、30%、40%、50%所需的下沉式绿地深度分别约为280mm、130mm、85mm、60mm、50mm；当年径流总量控制率目标为85%时，设计降雨量为32.5mm/h，绿地率 $f=10\%$ 、20%、30%、40%、50%所需的下沉式绿地深度分别约为475mm、230mm、150mm、110mm、85mm。

从图3可知，对于土质主要是壤质黏土、砂质黏土、黏土的地区，土壤稳定入渗系数 K 取值 $1 \times 10^{-7}m/s$ ，当年径流总量控制率目标为70%时，设计降雨量为19mm/h，绿地率 $f=10\%$ 、20%、30%、40%、50%所需的下沉式绿地深度分别约为280mm、135mm、90mm、65mm、50mm；当年径流总量控制率目标为85%时，设计降雨量为32.5mm/h，绿地率 $f=10\%$ 、20%、30%、40%、50%所需的下沉式绿地深度分别约为480mm、230mm、150mm、110mm、85mm。

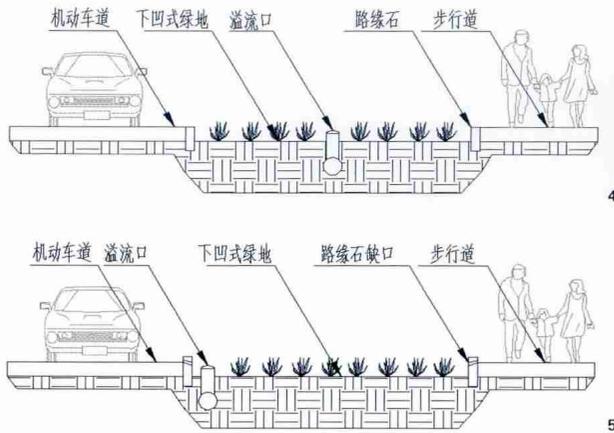
当土壤稳定入渗系数较小时，下沉式绿地深度超过临界值，将会造成植物长期淹水的情况，甚至有可能危害植物的正常生长。例如土壤稳定入渗速率 $K=1 \times 10^{-6}m/s$ 时，设计淹水时间最大值48h，则临界下沉深度约为170mm，宜选择150mm。表3列举出了不同场地条件下的下沉式绿地优化设计参数。

图1 $K=1 \times 10^{-5}m/s$ 时下沉式绿地控制降雨量图2 $K=1 \times 10^{-6}m/s$ 时下沉式绿地控制降雨量图3 $K=1 \times 10^{-7}m/s$ 时下沉式绿地控制降雨量

表 3 下沉式绿地优化设计参数

K/m/s	绿地下沉率	f=20%		f=30%		f=40%	
		H/mm	N	H/mm	N	H/mm	N
10^{-5}	50%	200	85%	120	85%	75	85%
10^{-6}		150	75%	150	85%	110	85%
10^{-7}		20	<55%	20	<55%	20	<55%

注：k- 土壤稳定入渗速率，m/s；f- 绿地率，%；H- 下沉式绿地深度，mm；N- 年径流总量控制率，%。



从表 3 可以看出，土壤稳定入渗速率较低时，下沉式绿地对径流的削减效果较差，可以通过土壤改良的方法增大土壤的渗透性来提高控制效果；或者采用下沉式绿地与雨水花园、雨水塘、雨水调蓄池、景观水体、多功能调蓄等设施结合设计的方法，共同实现场地总体的年径流削减率的控制目标。

3 下沉式绿地优化设计

3.1 竖向设计

下沉式绿地的实现需要与场地规划设计结合，将道路、硬化铺装周围的绿地设计为一系列的下沉式绿地，消纳硬化地表产生的雨水径流。为确保雨水能够进入下沉式绿地内，并保证行人和行车的安全，需合理设计下沉式绿地与周围铺装以及雨水口的竖向衔接方式。

首先，确保硬化地表的坡度坡向下沉式绿地，雨水径流通过地表坡度汇集到绿地附近；其次，路缘石设计高度与周围地表平齐，雨水径流可以分散式进入下沉式绿地，若路缘石高度大于周围地表，可在路缘石上设置 20~60cm 宽度的缺口，径流通过缺口集中汇入下沉式绿地，但在集中入水口需铺设卵石等消能设施；最后，雨水溢流口位置可以设置在绿地中（图 4），也可以设置绿地与硬化地表的交界处（图 5），雨水口高程高于下沉式绿地高程且低于地面高程，超过下沉式绿地蓄渗能力的雨水通过溢流口排入雨水管道。

在下沉式绿地的雨水集中入口、坡度较大的植被缓

冲带以及雨落管与下沉式绿地连接处，由于径流冲刷作用容易导致土壤的侵蚀。为了防止雨水径流对土壤的侵蚀，一般常用的稳固方法包括：放置隔离纺织物料，栽种临时或永久性的植被，以及在裸露的地方添加覆盖物。Peter 等^[12]的研究表明雨水径流污染物（如固体悬浮物、重金属、氮磷等营养物质）存在初期冲刷的现象，适宜采用初期弃流装置控制径流污染。对于污染较重的道路、停车场等场地，可在下沉式绿地集中入水口前设计截污雨水口、截污检查井或截污树池等（图 6）；对于水质较好的屋面雨水，可直接采用容积弃流法控制径流污染物。根据研究，路面、停车场的雨水弃流量为 4~8mm，屋面雨水弃流量为 1~3mm。发达国家多采用“半英寸”（约 12mm）作为初期雨水控制量^[12]。

3.2 景观效果设计

从使用功能和景观效果来看，目前下沉式绿地的设计形式较为单调，削弱了下沉式绿地景观美化和改善生态环境的作用。改变下沉式绿地的单一形式，可以采取与雕塑、水景、座椅、亭台、堆石相结合的方式（图 7~9），还可以与人工湿地、雨水花园、雨水塘等结合设计，增强下沉式绿地的可达性、观赏性与实用性。下沉式绿地种植植物优先选择具有一定耐涝性的乡土植物，采用乔、灌、草相结合的多种群落结构，形成季相变化丰富的绿地景观。

对于大型绿地项目，将绿地全部下沉的土方工程量较大，费用高，因此建议按照分区域、分路段设计下沉

图 4 下沉式绿地典型构造图一
图 5 下沉式绿地典型构造图二
图 6 深圳光明新区道路绿化带
图 7 上海后滩公园下沉式绿地景观
图 8 天津张家窝社会山小区下沉式绿地景观
图 9 南京大学下沉式绿地景观

式绿地,利用地形曲直、起伏等微地形变化营造良好的景观效果。

3.3 植物淹水时间设计

造成植物淹水时间较长的原因主要有以两点:一方面土壤入渗速率较低,导致植物淹水时间过长,主要原因有施工过程中对土壤的过度夯实,区域土质特性差异会影响土壤的渗透速率;另一方面是绿地下沉深度以及雨水口高度设计不合理,蓄水高度较大延长植物淹水时间。

缩短植物淹水时间,一方面需要维持绿地开发前的土壤渗透条件,主要方法为:(1)对施工过程中场地上不可避免被夯实的作业空间设计为硬质铺装,而预定的下沉式绿地区域尽量避免重型机械的碾压;(2)对已压实的土壤需要借助机械改善土壤夯实度,可以适量加入有机质、膨胀页岩、多孔陶粒等碎材来改良土壤结构^[13];(3)土壤渗透性较差的地区可以通过添加炉渣等措施增大土壤渗透能力,缩短下沉式绿地中植物的淹水时间^[14]。

另一方面是因地制宜的选择绿地下沉深度。对于壤质砂土、壤土、砂质壤土等渗透性能较好的地区,可适当增大绿地下沉深度到150~300mm甚至更大,需确保植物淹水时间小于24h。但是随着绿地下沉深度的增加,建设成本也会加大,一般下沉深度不宜大于500mm。对于壤质黏土、砂质黏土、黏土等渗透性较差的地区,植物长期淹水导致根部缺氧,会危害植物的生长,因此绿地下沉深度不宜大于100mm,还可以适当缩小雨水溢流口高程与绿地高程的差值,使得下沉绿地集蓄的雨水能够在24h内完全下渗。

4 结语

下沉式绿地是一种分散式、小型化的绿色基础设施(生态基础设施),结合城市绿地进行综合设计,在不增加用地面积、少量建设成本的条件下,能够实现绿地多功能化、就地消纳雨水径流、减少外排雨水量、雨水资源化利用、改善生态环境等多种目标^[15]。景观园林、市政等多专业的配合,科学的水文计算,合理的场地规划与竖向设计,是保障下沉式绿地真正发挥水文调蓄功能的重要举措。☐

图表来源

图1-8为作者绘制和拍摄;

图9为于荣兴拍摄;

本文表格均为作者绘制。

参考文献

- [1] 李俊奇,车伍,池莲,等.住区低势绿地设计的关键参数及其影响因素分析[J].给水排水,2004,30(9):41-46.
- [2] Chaill T L.Low Impact Development and Sustainable Stormwater Management[M]. INC:A JOHN WILEY & SONS, 2011:133-151.
- [3] 程江,徐启新,杨凯,等.下沉式绿地雨水蓄渗效应及其影响因素[J].给水排水.2007,33(5):45-49.
- [4] 程江,杨凯,黄民生,等.下沉式绿地对城市降雨径流污染的削减效应[J].中国环境科学,2009,29(6):611-616.
- [5] 杨栩,尤学一,季民.城市绿地对雨水径流污染物的削减作用[J].土木建筑与环境科学,2012(34):1-6.
- [6] 杨清海,吕淑华,李秀艳,等.城市绿地对雨水径流污染物的削减作用[J].华东师范大学学报(自然科学版),2008(2):41-47.
- [7] 余绍武,丁年,任心欣,等.城市下沉式绿地雨水蓄渗利用技术的探讨[J].给水排水,2010,36:116-118.
- [8] 张彪,谢高地,薛康,等.北京城市绿地调蓄雨水径流功能及其价值评估[J].生态学报,2011,31(13):3839-3845.
- [9] 李永福,王冬梅.下沉式绿地对城市雨水集蓄利用作用研究进展[J].南水北调与水利科技,2011,9(1):160-165,176.
- [10] 张金龙,张志政.下沉式绿地蓄渗能力及其影响因素分析[J].节水灌溉,2012,(1):44-47.
- [11] 潘国庆,车伍,李俊奇,等.中国城市径流污染控制量及其设计降雨量[J].中国给水排水.2008,24(22):25-29.
- [12] Bach P M, McCarthy D T, Deletic A. Redefining the stormwater first flush phenomenon[J]. Water Research, 2010, 44:2487-2498.
- [13] 张志维.土壤:水系统中被忽视的向度[J].景观设计学,2013,1(4):70-77.
- [14] 韩世平,李俊奇.合理利用地势绿地[J].住宅科技,2006,8:45-47.
- [15] 王思思,苏义敬,车伍,等.景观雨水系统修复城市水文循环的技术与案例[J].中国园林,2014,30(217):18-22.