

建筑与小区低影响开发措施的线性规划模型初探

贾玲玉, 尤学一

(天津大学环境科学与工程学院 天津市城市河道水质生态净化技术工程中心,
天津 300350)

摘要: 以《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》为基础,结合低影响开发措施的优缺点及其适用范围,采用线性规划的方法,以综合径流系数和径流污染控制作为主要约束条件,结合各项法规标准,以最低造价为目标函数,提出了建筑与小区低影响开发优化或改造方案的构建方法。示范小区的研究结果显示,提出的优化方法在满足各项标准和造价最低的前提下,实现了低影响开发措施的合理分配,小区径流系数由改造前的0.65降为0.46,对径流中TSS的去除率也可达到50%。

关键词: 海绵城市; 建筑与小区; 低影响开发; 线性规划

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)05-0131-05

Linear Programming Model of Low Impact Development Techniques in Building and Community

JIA Ling-yu, YOU Xue-yi

(Tianjin Engineering Center of Urban River Eco-purification Technology, School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: A construction method of low impact development optimization or reconstruction scheme in building and community was established. The construction method was based on *Sponge City Development Technical Guide: Low Impact Development*, and considered the advantages, disadvantages and application scope of the existing low impact development techniques and various laws and standards. Meanwhile, the linear programming method was adopted, the comprehensive runoff coefficient and runoff pollution was chosen as the main constraint conditions and the lowest cost was taken as the objective function. Results obtained from the typical area showed that, reasonable distribution of low impact development measures was realized under the presupposition that the reconstruction scheme met all the standards and the lowest cost, where the runoff coefficient was decreased from 0.65 to 0.46 and the TSS removal efficiency reached 50%.

Key words: sponge city; building and community; low impact development; linear programming

低影响开发(LID)理念由美国 Maryland 州环境 资源署于1990年提出,在国外已经由单一的雨洪控

制管理过渡到雨水资源回收利用和补充地下水的全新阶段,而其作为我国海绵城市建设的重要途径,系统性研究和应用才刚刚开始。建筑与小区作为海绵城市建设的重要组成部分,其低影响开发与改造十分重要。笔者通过线性规划的方法,以径流总量和径流污染为主要约束条件,结合相关规范要求,提出了以最低造价作为目标函数进行建筑与小区低影响开发措施优化的方法,以期对建筑与小区低影响开发措施的优化分配提供模型基础和应用指导。

1 低影响开发措施选择

LID 改造设计的重点在于对 LID 措施的准确选择及适建性区域的宏观把握^[1,2],在工程建设层面将海绵城市建设分为建筑与小区、绿地与广场、城市道路和城市水系四大部分,海绵城市建设应重点考虑各项 LID 措施对径流总量、径流污染、径流峰值等目标控制效果的强弱,以及不同 LID 措施在不同用地类型地块中的适用程度。

建筑与小区的 LID 改造应充分结合地形地貌进行场地设计,在坡度较小的建筑屋顶,可结合实际尽量采用绿化屋顶^[3],小区道路可进行透水铺装。当雨水超过绿化屋顶或透水铺装下渗滞蓄能力时,可将雨水引入附近的下凹式绿地或通过植草沟等设施引入附近的生物滞留设施、渗透塘等。这些 LID 设施占地较少,适于建筑与小区的开发改造,还可为小区居民提供良好的绿化景观,改善居住环境。

建筑与小区的优化改造,可分为建筑屋面、小区绿化、小区道路及水面四大类,应选择适宜的 LID 措

施进行开发改造,候选 LID 技术如图 1 所示。

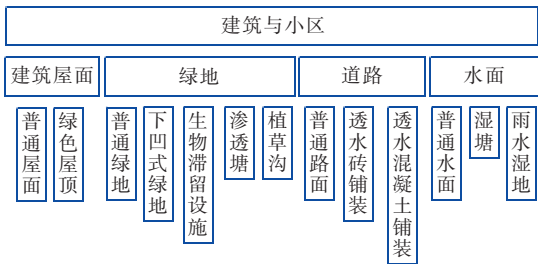


图 1 建筑与小区低影响开发改造候选技术

Fig. 1 Candidate LID technologies of building and community

2 低影响开发线性规划模型

线性规划是运筹学中应用范围较广的一个重要分支,用于研究线性约束条件下目标函数的极值问题,可为合理利用有限的人力、物力、财力等资源进行最优决策。本研究利用线性规划原理,建立了建筑与小区 LID 技术选择优化模型。该优化模型将综合径流系数和径流污染控制作为强制约束条件,同时综合考虑多项法规标准约束,以最低造价作为目标,通过 LINGO 软件进行优化求解,获得建筑与小区内各地块 LID 措施选择和使用的合理分配方案。

2.1 自变量的选取

将待开发改造的建筑与小区下垫面分为建筑屋面 A_1 、绿地 A_2 、道路 A_3 和水面 A_4 ,其面积分别记作 X_1 、 X_2 、 X_3 和 X_4 ,其中道路 A_3 细分为机动车道 A_{31} 和人行道、广场、停车场等非机动车道 A_{32} 。根据图 1,确定模型中自变量及其特性参数见表 1。

表 1 优化措施分类及其相关参数

Tab. 1 Classification and related parameters of optimization techniques

项目	下垫面	雨量径流系数 Φ	流量径流系数 Ψ	TSS 去除率/%	造价/(元·m ⁻²)
X_{11}	普通屋顶	0.60~0.90	0.80~1.0	—	—
X_{12}	绿色屋顶	0.30~0.40	0.40	70~80	60~200
X_{21}	普通绿地	0.15~0.40	0.25~0.40	—	—
X_{22}	下凹式绿地	0.05~0.15	0.05~0.15	—	40~50
X_{23}	生物滞留设施	0.20~0.60	0.20~0.60	70~95	150~800
X_{24}	渗透塘	0.10~0.50	0.10~0.50	70~80	200~400*
X_{25}	植草沟	0.40~0.60	0.40~0.60	35~90	30~200
X_{31}	普通路面	0.80~0.90	0.90~0.95	—	—
X_{32}	透水砖铺装	0.08~0.45	0.08~0.45	80~90	60~200
X_{33}	透水混凝土/沥青铺装	0.40~0.60	0.35~0.65	80~90	60~200
X_{41}	普通水面	1.0	1.0	—	—
X_{42}	湿塘	1.0	1.0	50~80	400~600
X_{43}	雨水湿地	1.0	1.0	50~80	500~700

注: “*”数据单位为元/m³。以上数据部分参考《建筑与小区雨水利用工程技术规范》(GB 50400—2006)、《雨水控制与利用工程设计规范》(DB 11/685—2013)及《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》。

影响 LID 性能的主要因素包括设计施工情况、当地水文、气候条件、使用年数等。已有研究表明^[4],降雨量、降雨强度及持续时间、季节的交替是影响 LID 性能的主要地域因素,径流衰减率随降雨量、降雨强度及持续时间的增加而降低。同时,介质(基质)种类及组成是影响 LID 基础措施性能最主要的设计因素。因此,不同的地区和不同的设计方法,LID 措施性能存在差异性,这些应根据实际情况,查阅当地详细的技术性能资料和相应的措施建设单价来具体考虑。

2.2 约束条件

2.2.1 流量径流系数限制

依据《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》和《雨水控制与利用工程设计规范》(DB 11/685—2013),建筑与小区建设区域的外排水总量不得大于开发前的水平,并满足已建成区的外排水流量径流系数不大于 0.5、新开发区域外排水流量径流系数不大于 0.4 的要求:

$$\Psi' = \sum_{i=1}^4 \frac{\sum_{j=1}^{m(i)} (\Psi_{ij} X_{ij})}{X_i} \leq 0.5 \quad (1)$$

式中, Ψ' 为改造后用地的流量综合径流系数; X_i 为原用地类型地块面积, m^2 ; X_{ij} 为改造方案中各措施用地面积, m^2 ; Ψ_{ij} 为改造方案中各措施的流量径流系数; $m(i)$ 为 j 对应 i 所能取值范围, $m(1)=2$, $m(2)=5$, $m(3)=3$, $m(4)=3$ 。

2.2.2 径流污染去除率限制

径流污染是低影响开发的控制目标之一,各地应结合城市水环境质量要求、径流污染等特征确定径流污染综合控制指标和污染物指标,污染物可以采用 TSS、COD、TN、TP 等表示。

城市径流污染物中,TSS 与其他污染物指标具有相关性,一般可以采用 TSS 作为径流污染物控制指标。低影响开发雨水系统的年 TSS 总去除率一般可以达到 40%~60%,在模型约束条件中设置去除率 $> M$,即剩余率 $\leq 1 - M$ 。

$$T' = \frac{\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{m(i)} \varphi_{ij} X_{ij} (1 - S_{ij}) C_i}{\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{m(i)} \varphi_{ij} X_{ij} C_i} \leq 1 - M \quad (2)$$

式中, T' 为径流污染中 TSS 的剩余率; φ_{ij} 为改造方案中各措施的雨量径流系数; C_i 为径流中的 TSS 浓度, C_1 为屋面, C_2 为绿地, C_3 为道路, C_4 为水面,

mg/L ; S_{ij} 为改造方案中各措施的 TSS 去除率; M 为设置的 TSS 去除率。

2.2.3 下凹式绿地率及透水铺装率约束

依据《雨水控制与利用工程设计规范》(DB 11/685—2013)的要求,雨水控制与利用应该优先利用低洼地形、下凹式绿地、透水铺装等设施减少外排水量,并满足以下规定:凡涉及绿地率指标要求的建设项目,绿地中至少应该有 50% 的用于滞留雨水的下凹式绿地;公共停车场、人行道、步行街、自行车道和休闲广场、室外庭院的透水铺装率不小于 70%。

$$X_{22} \geq 0.50 X_2 \quad (3)$$

$$X_{32} \geq 0.70 X_{A32} \quad (4)$$

2.2.4 施工养护难度约束

由于绿化屋顶和渗透路面(道路类)的施工养护难度较大^[5],绿化屋顶的改造面积一般不大于建筑占地面积的 60%,渗透路面(道路类)的改造面积一般不大于原有道路面积的 50%。

$$X_{12} \leq 0.60 X_1 \quad (5)$$

$$X_{33} \leq 0.50 X_{A31} \quad (6)$$

2.2.5 建筑安全约束

对于距离建筑物 3 m 的区域,为保证建筑物的安全,不考虑将绿化措施改建为下凹式绿地或生物滞留设施,即要保证一定面积的普通绿地,不小于总绿化面积的 10%。

$$X_{21} \geq 0.10 X_2 \quad (7)$$

2.2.6 生物滞留设施约束

生物滞留设施宜分散布置且规模不宜过大,生物滞留设施的面积与汇水面积之比一般为 5%~10%。

$$0.05 (X_1 + X_2 + X_3) \leq X_{23} \leq 0.10 (X_1 + X_2 + X_3) \quad (8)$$

2.3 目标函数

依据各措施的改造面积,结合各措施的改造单价,建立以造价为目标函数的线性方程式:

$$Z = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{m(i)} X_{ij} P_{ij} \quad (9)$$

式中, Z 为改造方案的总造价,元; P_{ij} 为改造方案中各种措施的造价,元/ m^2 或元/ m^3 。

3 实例求解

3.1 研究区域基础资料

研究区域选定为扬州市某居住小区,用地面积为 109 107 m^2 ,建筑面积为 27 760 m^2 ,建筑密度为

25% ;绿化面积为 39 137 m²,绿化率为 36% ;车行道的道路面积为 16 366.5 m²,非机动车道的道路面积为 25 843.5 m²;无景观水体,绿色星级目标为一星。建筑屋面、绿化、道路(车行道)和道路(非机动车道)的降雨径流中 TSS 浓度分别为 97.5、71.3、156.4、110.3 mg/L。

3.2 参数设置

研究区域地处江苏省中部,位于长江北岸、江淮平原南端,属于亚热带季风性湿润气候向温带季风气候的过渡区,四季分明,日照充足,雨量丰沛,其低冲击技术参数见表 2。

表 2 LID 措施参数设置

Tab. 2 Parameter setting of LID techniques

项目	LID 措施	流量径流系数 ψ	雨量径流系数 ϕ	TSS 去除率/%	造价/(元·m ⁻²)
X_{11}	普通屋面	0.85	0.75	—	—
X_{12}	绿色屋面	0.40	0.35	75	100
X_{21}	普通绿地	0.30	0.25	—	—
X_{22}	下凹式绿地	0.15	0.10	—	45
X_{23}	生物滞留设施	0.40	0.40	85	300
X_{24}	渗透塘	0.30	0.30	75	200*
X_{25}	植草沟	0.45	0.40	75	80
X_{31}	普通路面	0.85	0.80	—	—
X_{32}	透水砖铺装	0.45	0.40	85	80
X_{33}	透水混凝土/沥青铺装	0.55	0.50	85	120

注: “*”数据单位为元/m³。流量径流系数、TSS 去除率及造价参考《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》,并结合当地经济技术水平调研资料确定。

3.3 模型约束调整求解

由于模型建立时部分约束条件参考北京市地方标准,扬州目前没有类似标准,笔者结合实际情况进行部分调整。考虑绿色建筑一星目标,依据《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378—2014)的要求,住区非机动车道路、地面停车场和其他硬质铺装采用透水面,场地透水率要符合“透水率>0.5(1-建筑覆盖率)”的规定,结合区域开发的相关规划,对低影响开发指标约束条件赋值:下凹式绿地率>50%,非机动车道透水铺装率>70%,进行模型求解,结果见表 3。求解结果显示,解在研究区域内满足所有约束条件,综合径流系数由改造前的 0.65 降到 0.46, TSS 去除率达到 50%,满足设计要求,此时方案总造价为 909.82 万元。若将约束条件中的 TSS 去除率降低 10%,即设为 40%,则综合径流系数只降低到

0.47,但总造价却大幅降低,为 654.21 万元。由此可见,本研究提出的规划模型可根据研究区域实际经济状况,通过调整约束条件,如调整径流污染的控制效果,来实现开发改造成本的合理控制。

表 3 优化模型求解结果

Tab. 3 Results of optimization model

项目	方案 1 (TSS 去除率=50%)		方案 2 (TSS 去除率=40%)	
	面积/m ²	造价/万元	面积/m ²	造价/万元
X_{11}	11 104	—	18 006.04	—
X_{12}	16 656	166.56	9 753.96	97.54
X_{21}	3 913.7	—	14 113.15	—
X_{22}	19 568.5	88.06	19 568.5	88.06
X_{23}	10 227.6	306.83	5 455.35	163.66
X_{24}	—	—	—	—
X_{25}	5 427.2	43.42	—	—
X_{31}	8 183.25	—	8 183.25	—
X_{32}	25 843.5	206.75	25 843.5	206.75
X_{33}	8 183.25	98.20	8 183.25	98.20
总计		909.82		654.21

4 结论

根据规范和标准,基于 LID 措施的优缺点,在开发改造成本最低的前提下,建立了海绵城市中建筑与小区低影响开发线性规划模型,实现了各低影响开发措施应用的面积合理分配,达到了减少径流总量和径流污染的目标。模型使用时,应根据当地经济技术水平和气象条件,合理选择径流总量和径流污染的控制目标,同时根据研究区域的实际情况进行约束条件的调整,求出适合当地特色的低影响开发优化结果,更好地为海绵城市建设提供理论和方案指导。

参考文献:

- [1] 王琼珊,刘晓梅,赵冬泉. 低影响开发措施比选及适建区域分析[J]. 中国给水排水,2014,30(3):96-100.
Wang Qionshan,Liu Xiaomei,Zhao Dongquan. Selection of low impact development techniques and analysis of suitable construction area [J]. China Water & Wastewater,2014,30(3):96-100(in Chinese).
- [2] 刘建,李四新,陈慧,等. 市政道路低影响开发设施设计案例分析[J]. 中国给水排水,2017,33(4):14-19.
Liu Jian,Li Sixin,Chen Hui,et al. Case study of low impact development facilities for municipal roads[J]. China Water & Wastewater,2017,33(4):14-19(in Chinese).
- [3] 王海玲,刘旭军,王浩正,等. 基于城市高密度地区的

低影响开发规划研究[J]. 中国给水排水,2013,29(12):11-13.

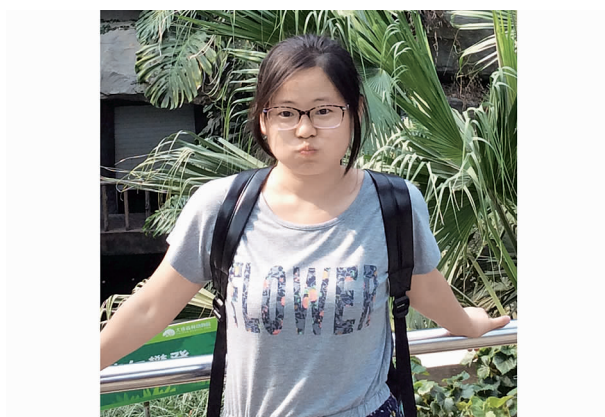
Wang Hailing, Liu Xujun, Wang Haozheng, *et al.* Research on low impact development planning in high-density urban area[J]. China Water & Wastewater,2013,29(12):11-13(in Chinese).

- [4] 牛志广,崔珍珍,陈彦熹. 低冲击开发模式基础措施性能研究现状及进展[J]. 安全与环境学报,2014,14(6):320-325.

Niu Zhiguang, Cui Zhenzhen, Chen Yanxi. Situation and progress in the low-impact development of basic measures for performance[J]. Journal of Safety and Environment, 2014,14(6):320-325(in Chinese).

- [5] 王晓晨. 基于低冲击开发技术的城镇区域雨水系统规划的优化[D]. 天津:天津大学,2013.

Wang Xiaochen. Optimization of Urban Stormwater Drainage System Based on Low Impact Development [D]. Tianjin:Tianjin University,2013(in Chinese).



作者简介:贾玲玉(1992-),女,江苏扬州人,硕士,主要研究方向为城市排水管网模拟、雨水管网优化、城市面源污染控制、海绵城市中低影响开发雨水系统的构建等。

E-mail:840130343@qq.com

收稿日期:2017-06-28

(上接第125页)

特征及源解析的研究进展[J]. 生态环境学报,2014,23(2):352-358.

Zhang Qianqian, Li Xiangquan, Wang Xiaoke, *et al.* Research advance in the characterization and source apportionment of pollutants in urban roadway runoff[J]. Ecology and Environment Sciences,2014,23(2):352-358(in Chinese).

- [8] 陈莹,赵剑强,胡博. 西安市城市主干道路面径流污染特征研究[J]. 中国环境科学,2011,31(5):781-788.

Chen Ying, Zhao Jianqiang, Hu Bo. Pollution characteristics of urban trunkroad runoff in Xi'an City[J]. China Environmental Science,2011,31(5):781-788(in Chinese).

- [9] 郝丽岭,张千千,王效科,等. 重庆市不同材质路面径流污染特征分析[J]. 环境科学学报,2012,32(7):1662-1669.

Hao Liling, Zhang Qianqian, Wang Xiaoke, *et al.* Characteristics of runoff pollution on urban pavements with different materials in Chongqing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2012,32(7):1662-1669(in Chinese).

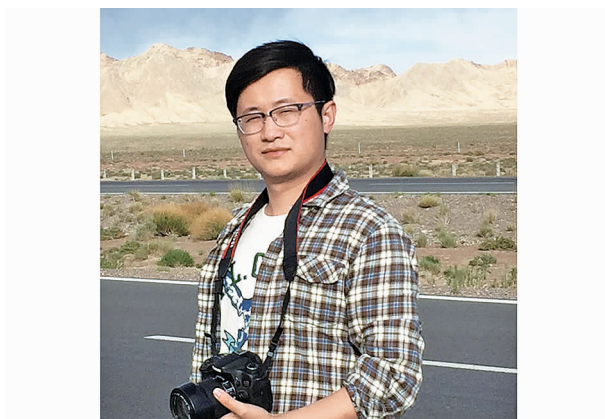
- [10] 李贺,石峻青,沈刚,等. 高速公路雨水径流重金属污染特性研究[J]. 环境科学,2009,30(6):1621-1625.

Li He, Shi Junqing, Shen Gang, *et al.* Characteristics of metals pollution in expressway stormwater runoff[J].

Environmental Science,2009,30(6):1621-1625(in Chinese).

- [11] 张科峰,李贺,傅大放,等. 三种不同屋面雨水径流重金属污染特性及影响因素分析[J]. 环境科学学报,2011,31(4):724-730.

Zhang Kefeng, Li He, Fu Dafang, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution in runoff from three different types of roofs[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2011,31(4):724-730(in Chinese).



作者简介:张忠祥(1992-),男,安徽淮北人,硕士研究生,研究方向为水处理工程技术、海绵城市建设技术。

E-mail:skywalker831@163.com

收稿日期:2017-06-20