

建筑小区雨水利用优化设计

徐得潜, 余育速, 汪维伟

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 建筑小区雨水利用是解决水资源短缺和城市内涝等问题的重要途径,分析了各类雨水利用设施的雨水利用强度及其基本规模。在满足外排径流系数不大于开发建设前的前提下,以年成本最小为目标函数,应用非线性规划建立了建筑小区雨水利用优化设计模型。以合肥市某小区为例,对其雨水利用进行了优化,结果表明,该模型能较好地对建筑小区的雨水利用进行优化,为建筑小区雨水的合理利用提供了依据。

关键词: 建筑小区; 雨水利用; 径流系数; 优化设计

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)01-0131-05

Optimal Design of Rainwater Utilization in Buildings and Communities

XU De-qian, YU Yu-su, WANG Wei-wei

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Rainwater utilization in buildings and communities is an important way to solve the problems of water resource shortage and urban flooding. The rainwater utilization intensity and the basic scale of all kinds of facilities were analyzed. Under the premise of ensuring the discharge runoff coefficient not greater than that before the development and taking the minimum annual cost as the objective function, the nonlinear programming was used to establish the model for optimal design of rainwater utilization in buildings and communities. Taking a community in Hefei City as an example, the rainwater utilization in the community was optimized. The results showed that the model could be used in optimal design of rainwater utilization in buildings and communities very well, thus providing the basis for rational utilization of rainwater in buildings and communities.

Key words: building and community; rainwater utilization; runoff coefficient; optimal design

随着城市化水平的提高,水资源短缺加剧,城市内涝灾害时有发生,雨水利用逐渐被重视起来并迅速发展。雨水利用是雨水入渗、收集回用、调蓄排放等的总称,可分为直接利用、间接利用和综合利用^[1]。目前国内外对雨水利用研究较多,主要集中于雨水利用方式^[2,3]、蓄水池设计^[4]、雨水利用节水率^[5]、雨水利用成本效益^[6]和典型案例^[7]等方面,也有部分学者对雨水利用优化设计进行了研究,如李俊奇等^[8]依据储存池的工作过程和费用效益分析原理提出了雨水储存池经济规模优化求解方法;

李海燕等^[9]对大型场馆雨水利用系统优化设计进行了研究。上述研究仅限于某雨水利用构筑物或某特定场所的雨水利用优化,未从整体上研究建筑小区雨水利用优化模型的建立与应用。

雨水利用工程设计的基本目标是,通过采取不同的措施使项目区域在设计降雨条件下的雨水外排流量控制在要求的范围内。优化设计则是在满足这一目标的前提下,综合考虑小区用地条件、土壤渗透性能、雨水回用等因素,建立小区雨水利用优化设计模型,以寻求雨水利用最佳方式和规模。

1 雨水利用优化设计基础

在建立建筑小区雨水利用优化设计模型之前,需对径流系数、各类设施的雨水利用强度及其基本规模等问题进行讨论。

1.1 径流系数

径流系数是描述降雨和径流关系的重要参数,在雨水管网设计、雨水利用设施规模的确定以及雨洪控制等方面起着重要作用。雨水径流系数分为雨量径流系数和流量径流系数,前者是指在一定时间内降雨产生的径流总量与总降雨量的比值,取决于下垫面构成,主要用于计算雨水收集回用量;后者是指在降雨形成高峰流量的历时内产生的径流量同降雨量的比值,取决于地面覆盖的透水性、雨水调蓄利用规模、降雨历时及暴雨强度等因素,主要用于雨水设计流量计算。

考虑到产流期间汇水面上径流损失与小区雨水利用对流量径流系数的影响,用扣损法计算流量径流系数:

$$\Psi_m = 1 - \frac{\mu}{A} \tau^n \quad (1)$$

式中, μ 为产流期间平均损失强度,是汇水面上的损失强度 μ_1 与雨水利用设施的雨水利用强度 μ_2 之和, mm/h ; A 为设计频率暴雨强度, mm/h ; τ 为场地汇流时间, h ; n 为暴雨强度衰减指数。

1.2 雨水利用强度

雨水利用设施按其主要功能可以分为以下几类:①渗透设施,如下凹式绿地、透水铺装、渗透塘、渗井等;②调蓄设施,如调节池、调节塘、湿塘、蓄水池、雨水罐等;③转输设施,如渗管、渗沟、植草沟等;④净化设施,如生物滞留设施(雨水花园、生态树池等)、雨水湿地、绿色屋顶等。上述部分设施可同时具有多种功能,如下凹式绿地兼具净化功能、雨水花园兼具调蓄功能等,但各类设施在设计降雨历时内所增加的雨水利用强度可统一用下式计算^[10]:

$$\mu_{2,i} = 1\,000 \times \frac{3\,600 K A_s t J + V}{\Psi_{m,i} t F} \quad (2)$$

式中, K 为土壤渗透系数, m/s ; J 为水力坡度,一般取1.0; t 为设计降雨历时, h ; $\Psi_{m,i}$ 为 t 时段综合流量径流系数; F 为汇水面积, m^2 ; A_s 为有效渗透面积, m^2 ; V 为设计降雨历时内雨水利用设施蓄存的雨量, m^3 。

雨水利用设施的有效渗透面积 A_s 应按下列要

求确定^[1]:①水平渗透面按投影面积计算;②竖直渗透面按有效水位高度的1/2计算;③斜渗透面按有效水位高度的1/2所对应的斜面实际面积计算;④地下渗透设施的顶面积不计;⑤无渗透功能的设施取零。

设计降雨历时内雨水利用设施蓄存的雨量 V 分以下几种情况计算:①蓄水空间较小的设施。对于绿色屋顶、转输型植草沟、渗管、渗沟等蓄水空间较小的设施, $V=0$ 。②顶部或结构内部有蓄水空间的渗透设施。下凹式绿地、透水铺装、渗透塘、生物滞留设施、湿塘等设施, $V=Fh$, F 为渗透设施的面积(m^2), h 为蓄水深度(m)。考虑到下凹式绿地面积远小于雨水汇入面积, h 可近似等于下凹深度,取值范围为0.05~0.25 m ^[11];透水铺装的 h 为透水铺装层容水量;渗透塘的 h 为溢流水位与塘底高程之差,一般不小于0.6 m ;生物滞留设施的 h 应为0.2~0.3 m ;湿塘的 h 为溢流水位与设计水位之差。③储水设施。对于蓄水池等储水设施,应根据设计降雨历时内降雨量及蓄水池容积确定 V ,并小于或等于蓄水池容积。

1.3 雨水利用设施基本规模

雨水利用设施基本规模是根据小区用地条件和相关规范(标准、指南)确定的最小规模。目前我国与雨水利用相关的规范(标准)有:《绿色建筑评价标准》^[12](简称《标准》)、《建筑与小区雨水利用工程技术规范》^[1](简称《技术规范》)、《室外排水设计规范》^[13](简称《设计规范》)和《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》^[14](简称《指南》),根据上述规范(标准、指南)确定雨水利用设施基本规模如下。

① 雨水利用设施总规模

《技术规范》规定,雨水利用系统的规模应满足建设用地外排雨水设计流量不大于开发建设前的水平或规定的值,设计重现期不得小于1年,宜按2年确定;根据该规定,由式(1)可得雨水利用总规模应满足:

$$\mu_2 = (1 - \Psi_m) \frac{A}{\tau^n} - \mu_1 \quad (3)$$

对于特定的小区, A 、 τ^n 及 μ_1 均为定值,则雨水利用总强度仅与径流系数有关,因此径流系数的合理取值至关重要。《技术规范》同时指出,建设用地开发前一般可视为自然绿地,径流系数根据设计重

现期一般取 0.25 ~ 0.40, 本研究按此确定雨水利用总规模。

② 调蓄设施基本规模

《技术规范》规定,雨水储存设施的有效储水容积不宜小于集水面重现期 1 ~ 2 年的日雨水设计径流总量扣除设计初期径流弃流量;当资料具备时,储存设施的有效容积应根据逐日降雨量和逐日用水量经模拟计算确定。本研究以日为单位进行水量平衡计算,以使计算的雨水利用量与实际情况相符,并确定合理的蓄水池容积,亦即雨水回用设施基本规模,具体步骤参见文献[15]。并按收集集水面上 2 年一遇日降雨量确定蓄水池容积和集水面积之间的关系。

小区内已有的池塘、景观水体,可作为雨水调节设施,其溢流水位与设计水位之间的调蓄容积即为其基本规模。

③ 渗透设施基本规模

《技术规范》规定,渗透设施的日渗透能力不宜小于其汇水面上重现期 2 年一遇的日雨水设计径流总量,但对具体的雨水入渗设施规模(渗透能力)没有明确规定。《标准》规定下凹式绿地、雨水花园等有雨水调蓄功能的绿地和水体的面积之和占绿地面积的比例达到 30%,得 3 分;硬质铺装地面中透水铺装面积的比例达到 50%,得 3 分。本研究按《标准》确定下凹式绿地、生物滞留设施、湿塘和透水铺装的基本规模。《指南》规定,生物滞留设施面积与汇水面积之比宜为 5% ~ 10%,本研究据此确定生物滞留设施面积与汇水面积的关系。

2 雨水利用优化设计模型

应用非线性规划建立建筑小区雨水利用优化设计模型。

2.1 目标函数

雨水利用优化设计目标函数为雨水利用年成本最小,雨水代替自来水产生的效益按负成本计入,则有:

$$\text{Min}Y = \frac{i(i+1)^n}{(1+i)^n - 1} \sum_{j=1}^m C_j - pQ(V_z) \quad (4)$$

式中, i 为社会折现率,%; n 为计算期, a; C_j 为雨水利用设施建造成本, 元; m 为小区雨水利用设施数目; p 为自来水价格, 元/ m^3 ; $Q(V_z)$ 为年雨水利用量与蓄水池容积 V_z 的函数, 由逐日水量平衡模拟计算求得。

2.2 约束条件

① 雨水利用设施总规模约束

$$\sum_{i=1}^m \mu_{2,i} \geq \mu_2 \quad (5)$$

② 各雨水利用设施基本规模约束

a. 蓄水池容积约束

$$V_{\min} \leq V_z \leq V_{\max} \quad (6)$$

式中, V_{\min} 、 V_{\max} 分别为蓄水池最小、最大容积, 根据蓄水池经济性、回用水量及相关规范确定, m^3 。

b. 透水铺装路面约束

$$0.5F_{yh} \leq F_t \leq F_{yh} \quad (7)$$

式中, F_t 为透水铺装路面面积, m^2 ; F_{yh} 为小区铺装地面面积, m^2 。

c. 渗透设施规模约束

下凹式绿地、渗透塘、生物滞留设施、湿塘等面积应满足以下要求:

$$F_{imin} \leq F_i \leq F_{imax} \quad (8)$$

式中, F_i 为各渗透设施的面积, m^2 ; F_{imin} 、 F_{imax} 分别为各渗透设施的最小、最大建设规模, 根据各设施建设要求及小区用地条件确定, m^2 。

③ 各雨水利用设施之间的约束

a. 蓄水池的集水面积和绿色屋顶面积约束

由于屋面雨水水质优于道路雨水, 屋面常被作为蓄水池的集水面, 因此蓄水池的集水面积和绿色屋顶面积应满足下列要求:

$$0 \leq F_{xj} + F_{lw} \leq F_w \quad (9)$$

$$V_z = \varphi F_{xj} (h_{2y} - h_q) \quad (10)$$

式中, F_{xj} 为蓄水池的集水面积, m^2 ; F_{lw} 为绿色屋顶的面积, m^2 ; F_w 为小区屋面面积, m^2 ; φ 为屋面的径流系数; h_{2y} 为 2 年一遇日降雨量, mm; h_q 为雨水弃流量, mm。

b. 渗透设施之间的约束

各渗透设施之和应满足下列要求:

$$0.3F_{lh} \leq \sum F_i \leq F_{lh} \quad (11)$$

式中, F_{lh} 为小区的绿化面积, m^2 。

c. 转输设施之间的约束

渗管、渗渠、植草沟等转输设施长度约束:

$$0 \leq L_g + L_q + L_z \leq L_{\max} \quad (12)$$

式中, L_g 、 L_q 、 L_z 分别为渗管、渗沟、植草沟的长度, m; L_{\max} 为所需的最大转输距离, 根据小区用地条件和各设施设置位置确定, m。

④ 非负约束

上述各变量均为非负数,即应满足:

$$V_z, F_t, F_i, F_{sj}, F_{lw}, L_g, L_q, L_z \geq 0 \quad (13)$$

3 合肥市某小区雨水利用优化设计

3.1 工程概况及原雨水利用方案

合肥市锦绣淮苑小区位于徽州大道与云谷路交叉口西北角,共有住宅1 062套,占地面积为52 253 m²,其中,人行道、广场及停车场面积为6 800 m²;机动车道面积为10 200 m²;绿化面积为24 416 m²,其中在小区西南角、东南角及东北角有面积分别为160、200、150 m²的低洼绿地;屋面面积为9 769 m²;小区中央有面积为1 068 m²的湿塘,溢流水位与设计水位之差为0.3 m。小区开发前该地块为自然绿地,土壤渗透系数为 $(0.17 \sim 1.33) \times 10^{-5}$ m/s。

根据小区用地情况,设计方拟定的雨水利用方案如下:屋面雨水收集后回用,根据《技术规范》确定蓄水池容积为685 m³,造价为65.76万元;人行道、广场及停车场按《标准》采用透水铺装路面,透水铺装率为50%,面积为3 400 m²,造价为44.20万元;三块低洼绿地设计成雨水花园,面积为510 m²,造价为23.72万元;下凹式绿地按《标准》规定设计,面积为5 746.8 m²,下凹深度为0.1 m,造价为25.86万元;湿塘面积为1 068 m²,造价为48.06万元;道路雨水和非透水铺装路面雨水就近排入下凹式绿地、湿塘或雨水花园。

3.2 技术经济参数

合肥市2年一遇日降雨量为82.1 mm,暴雨强度公式为:

$$q = \frac{3\,600(1+0.76\lg P)}{(t+14)^{0.84}} \quad (14)$$

式中, q 为设计暴雨强度,L/(s·hm²); P 为设计重现期,a; t 为降雨历时,min。

根据小区规划图计算得到汇流时间为12 min,暴雨强度衰减系数为0.84,重现期取2年,暴雨强

度为103.16 mm/h, μ_1 值为2.10 mm/h,初期雨水弃流量取4 mm,允许的外排流量径流系数为0.30,小区渗透系数取 0.75×10^{-5} m/s。社会折现率取8%,计算期取30年,自来水价格为2.31元/m³。

3.3 雨水利用设施规模

① 雨水回用规模

结合小区实际情况,收集部分屋面雨水处理后用于浇洒绿地和冲洗道路。道路冲洗用水定额取2.0 L/(m²·d),绿化浇洒用水定额取1.0 L/(m²·d)^[16],则日用水量为44.8 m³。按文献[15]提出的方法计算不同容积下的雨水利用率和效益费用比,当蓄水池容积为351~740 m³时,雨水利用率较高且效益费用比大于1,确定 V_{\min} 为351 m³、 V_{\max} 为740 m³,当蓄水池容积在此范围内时,年雨水利用量与蓄水池容积的关系为:

$$Q = -0.004\,7V_z^2 + 7.995\,7V_z + 2\,281.9$$

$$R^2 = 0.998\,9 \quad (15)$$

② 其他设施规模

各雨水利用设施基本尺寸设计如下:下凹式绿地的下凹深度取0.1 m;透水路面砖厚度取0.06 m、孔隙率为20%,垫层厚度取0.2 m、孔隙率为30%,容水量为0.072 m;雨水花园蓄水深度取0.25 m;湿塘的调蓄深度为0.3 m。

根据各类雨水设施建设要求及小区用地条件,各设施规模约束如下:透水铺装路面最小规模为3 400 m²,最大规模为6 800 m²;下凹式绿地、湿塘、雨水花园面积之和的最小值为7 324.8 m²,最大值为25 484 m²;湿塘面积与原方案保持一致;雨水花园面积与其集水面积之比按《指南》确定,蓄水池容积与集水面积关系按《技术规范》确定。

3.4 雨水利用优化设计

利用上述模型优化雨水利用设施规模,采用MATLAB编程对模型进行求解,结果如表1所示。

表1 雨水利用优化设计结果

Tab. 1 Results of rainwater utilization optimal design

雨水利用设施	原方案				优化方案			
	规模/m ³	造价/万元	年成本/万元	径流系数减少值	规模/m ³	造价/万元	年成本/万元	径流系数减少值
蓄水池	685	65.76	4.57	0.27	351	33.70	1.95	0.14
下凹式绿地	5 746.8	25.86	2.30	0.23	7 567	34.05	3.02	0.31
透水铺装路面	3 400	44.20	3.92	0.10	3 400	44.20	3.93	0.10
雨水花园	510	23.72	2.11	0.05	246.3	11.45	1.02	0.02
湿塘	1 068	48.06	4.27	0.12	1 068	48.06	4.27	0.12
总计		207.60	17.17	0.77		171.46	14.19	0.69

优化方案中蓄水池容积为 351 m^3 ,可收集大约 $5\,000 \text{ m}^2$ 的屋面雨水,剩余屋面雨水可就近排入雨水花园;机动车道及部分铺装路面雨水可就近排入下凹式绿地或湿塘,从而实现对小区雨水的利用与控制。

由表1可知,优化方案各雨水利用设施总造价比原方案低30多万元,年成本比原方案低3万元左右;所减少的外排径流系数为0.69,加上小区汇水面上的雨水损失强度,小区的外排径流系数可以满足0.30的要求;各雨水利用设施也均能满足基本规模的要求,优化方案符合规范要求。综上可知,优化方案优于原方案,为该小区雨水利用最优方案。

4 结论

雨水利用是解决城市水问题的重要途径之一,但盲目地进行雨水利用设计会造成资源浪费,因此在雨水利用工程建设之前,有必要对雨水利用方案进行优化。本研究提出的雨水利用优化设计数学模型是在定量分析了各设施的雨水利用强度及其基本规模的基础上,综合考虑相关规范及小区用地条件的前提下建立的,该模型得出的优化结果是以最小成本实现雨水利用基本目标的最优方案,可为建筑小区雨水利用提供参考。

参考文献:

- [1] GB 50400—2006,建筑与小区雨水利用工程技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [2] Kim R H, Lee S, Lee J H, et al. Developing technologies for rainwater utilization in urbanized area[J]. Environ Technol, 2005, 26(4): 401–410.
- [3] Guo F T, Mao X C. Study on rainwater utilization engineering mode in northern cities of China[J]. Procedia Engineering, 2012, 28(12): 453–457.
- [4] Hu L M, Li Y Z. Study on the effective volume determination of rainwater cistern in city districts[J]. Adv Mater Res, 2012, 461: 101–104.
- [5] Ghisi E, Bressan D L, Martini M. Rainwater tank capacity and potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of southeastern Brazil[J]. Building and Environment, 2007, 42(4): 1654–1666.
- [6] 左建兵,刘昌明,郑红星. 北京市城市雨水利用的成本效益分析[J]. 资源科学, 2009, 31(8): 1295–1302.
- [7] 樊华,李曼,张霖,等. 北京四中房山分校雨水控制与利用实例分析[J]. 给水排水, 2014, 40(12): 90–94.
- [8] 李俊奇,余苹,车伍,等. 城市雨水集蓄利用工程规模的优化[J]. 中国给水排水, 2005, 21(3): 49–52.
- [9] 李海燕,车伍,李俊奇,等. 大型场馆雨水利用系统的优化设计[J]. 中国给水排水, 2006, 22(10): 50–53.
- [10] 王彩娟. 合肥市建筑与小区雨水及中水利用研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2010.
- [11] 李俊奇,余苹,车伍,等. 小区雨水利用工程费用模型与优化设计[J]. 给水排水, 2005, 31(10): 14–18.
- [12] GB/T 50378—2014,绿色建筑评价标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [13] GB 50014—2006,室外排水设计规范(2014年版)[S]. 北京:中国计划出版社,2014.
- [14] 住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [15] 徐得潜,李兴彩,张丽峰,等. 合肥市建筑与小区雨水利用[J]. 武汉大学学报:工学版, 2009, 42(6): 741–744.
- [16] GB 50015—2003,建筑给水排水设计规范(2009年版)[S]. 北京:中国计划出版社,2010.



作者简介:徐得潜(1960—),男,安徽青阳人,博士,教授,住建部绿色建筑评价标识专家,注册公用设备工程师(给水排水),研究方向为水资源利用与水环境保护、建筑给水排水工程、给水排水工程优化规划与经济运行。

E-mail: xudeqian60@163.com

收稿日期: 2016-06-02