

南方低层住宅楼雨水资源化利用系统 在海绵城市中的应用

戴晓钰, 陈 平*, 沈德林

(扬州大学水利与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要:针对南方地区雨水资源充沛的特性,对低层住宅楼雨水资源化利用的可行性和潜力进行分析,提出通过设置屋顶与地面2个水箱进行雨水收集,利用泵管连接2个水箱实现相互补给以供住宅自压冲厕和小区景观利用的方法,从而达到节约能源、充分利用雨水资源和减少城市排涝压力的目的;并以系统利用效率最大为目标,优化了水箱集蓄容积,可为海绵城市建设提供新思路。实例分析了扬州地区不同降雨水平年条件下,该系统每单元户楼顶水箱可自压集蓄利用雨水量 $60 \sim 100 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,节省提水送到楼顶电能平均 $20 \text{ kWh} \cdot \text{a}^{-1}$;楼上与楼下2个集水箱联合调度可集蓄利用雨水总量 $250 \sim 310 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,也达到减少利用自来水量和减少城镇的排水压力量。由每单元户拦蓄利用雨水资源数量来看,虽数量有限,但推及整个城镇影响将十分巨大。

关键词:低层住宅楼;雨水资源化;系统设计

中图分类号:TV213.9

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2019)08-0021-05

Application of rainwater resources utilization system in southern low – rise residential buildings in sponge city

DAI Xiaoyu, CHEN Ping*, SHEN Delin

(College of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu)

Abstract: In view of the abundant characteristics of rainwater resources in south China, the feasibility and potential of rainwater resources utilization in low – rise residential buildings were analyzed. The method of collecting rainwater by setting two water tanks on the roof and the ground was put forward, and two water tanks were connected by the pump pipe to supply each other for the self pressure toilet and the use of the residential landscape in the residential area, so as to save energy, make full use of rainwater resources and reduce the pressure of urban drainage. At the same time, taking the maximum efficiency of the system as the goal, the volume of water tank storage was optimized, which could provide new ideas for the construction of sponge city. It's analyzed that under different rainfall level in Yangzhou, the water tank in the system could collect and store rainwater volume by $60 \sim 100 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ for each unit, and the average energy of water pumping to the roof was $20 \text{ kWh} \cdot \text{a}^{-1}$. The combined operation of two water tanks on the upstairs and downstairs could collect and utilize the total amount of rainwater $250 \sim 310 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, which could reduce the use of tap water and reduce the drainage pressure in cities and towns. The amount of rainwater resources collected by each unit was limited, but the impact on the whole town would be enormous.

Key words: low – rise residential building; rainwater resources; system design

收稿日期:2019-04-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51379181)

作者简介:戴晓钰(1994—),女,硕士研究生,研究方向为水生态水环境。

通讯作者:陈 平(1965—),男,博士,副教授,研究方向为水资源高效利用与规划。

0 引言

我国本是一个洪涝灾害严重的国家,然而在全球化的影响下,城市化不断发展,使得城市洪涝灾害日益严重,洪涝灾害已成为我国防灾减灾体系中的短板和制约经济发展的一大障碍。近年来,每逢雨季许多城市就轮番上演“暴雨看海”景象,造成了严重的人员伤亡和财产损失。城市暴雨洪灾已经成为中国自然灾害中非常严重的一部分了。同时,随着社会的发展,人类对水资源需求不断增加,水资源短缺已成为限制社会发展的一大阻碍^[1]。在水资源短缺和城市洪涝灾害频发的今天,将雨水作为一种资源进行回收利用,可以达到一个双赢的局面:既可以充分利用雨水资源,又可以缓解城市内涝问题。同时,雨水的回收利用对水污染控制、水生态改善等方面也具有重大意义。从长远看,雨水回收利用是发展循环经济和改善区域生态环境的有效手段之一。

城市化使居民小区建设不断发展。小区景观用水及每家每户抽水马桶用水量是个不可小觑的数字,给城市用水增加了不少压力。一般小区植被浇灌、道路喷洒及抽水马桶用水对水质要求不高,针对这种情况,很多学者对雨水回收利用进行了研究^[2-4]。王一钧、欧阳志云^[5]等人提出了通过不同过程的过滤与净化,使屋面雨水、道路雨水与停车场雨水进入室外雨水管道,然后以抽取利用的方式,将水用于灌溉、道路喷洒及补充水体景观;蒋岚岚、蔡丹新^[6]等人提出屋面雨水经收集管进入整流井,再自流进入雨水调蓄池,通过提升泵提升后进入雨水处理系统,过滤后至清水池,最后通过变频系统加压配送,用于绿化和冲洗用水的方案;曹秀芹、车武^[7]提出在贮水池中收集通过管道、渠的屋面雨水,经泵及管道上混凝加药装置投加混凝剂后提升至压力滤池,再经过消毒进入中水池,用于小区各种生活杂用水的方案;杨劲松、王祥勇^[8]等人采用将雨水收集和处理结合起来同步进行,实行分散式控制的方式,道路雨水通过过滤器后进入道路浅草沟,屋面雨水通过管道直接排入室外浅草沟,净化后通过雨水篦子进入雨水管,然后通过沉砂检查井处理后排入小区调蓄池内,池内的水经过水泵加压后进入高位水箱,用于绿化浇灌和景观用水。

纵观以上雨水利用方案几乎都是地面雨水收集系统,再采用水泵加压取水利用,虽然合理利用了雨水资源,但需要耗费大量电能,没有达到节能

目的。本文针对南方地区多雨特性及低层住宅的特点,提出了在住宅楼顶设置集蓄雨水水箱进行自压冲厕利用,并与地面水箱通过泵管进行水箱间的相互补给,供小区住户冲厕及小区景观用水,既可实现雨水资源化利用,又能自压利用节约提水能源,还可以减轻城市排水压力,减少城市内涝出现。

1 雨水资源化的可行性

雨水是每个地区都拥有的天然资源,雨水资源化是将雨水转化为可利用资源的过程。在我国南方地区,雨水充沛,降雨频繁,多年平均降雨量大于 1000 mm,为小区内进行雨水资源的收集利用提供了较为可靠的自然条件。住宅楼楼顶平坦且为不透水面积,雨水水质较好、径流系数大、便于收集和自压利用;住宅楼下的小区地面绿化及硬质地面面积大,也便于雨水收集利用。因此,在住宅楼楼顶及楼下绿化中修建集水箱,并通过泵管连接进行上下水箱间的相互补给,提高了雨水集蓄和高效利用的可靠性。

2 雨水资源化潜力分析计算

2.1 住宅楼楼顶雨水资源化潜力

小流域雨水资源化潜力可分为 3 个层次,分别是理论潜力、可实现潜力和现实潜力^[9-10]。居民楼楼顶就是一个小的不透水集流场,具有相似的特性。每栋住宅楼的雨水资源化理论潜力即为楼顶降雨产流总量:

$$W_L = P \times A \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中:

W_L ——雨水资源的理论潜力, m^3 ;

P ——降水量, mm;

A ——集水面积, m^2 。

住宅楼屋顶虽具有严格不透水性,雨水集流率高,但由于雨水的激溅、汇流时部分流失等,雨水资源不可能完全被收集,为此,可实现潜力为理论潜力扣除部分损失量。可实现潜力由下式表达:

$$W_k = C \times P \times A \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中:

W_k ——雨水资源可实现潜力, m^3 ;

C ——降雨径流系数(住宅楼顶为混凝土结构, C 值一般可达 0.90 以上)。

可实现潜力是能够被充分利用的雨水资源量。它与实际集蓄能力(即蓄水容积)和利用技术有关。若集蓄能力大于可实现潜力,则实际可利用的雨水

资源等于可实现潜力;反之,实际可利用的雨水资源等于集蓄能力,这就是所谓的现实潜力。其关系可由下式表示:

$$W_x = \begin{cases} W_k & \text{当 } W_k \leq V \text{ 时} \\ V & \text{当 } W_k > V \text{ 时} \end{cases} \quad (3)$$

式中:

W_x ——雨水资源化现实潜力, m^3 ;

V ——水箱集蓄能力, m^3 。

由以上雨水资源潜力分析可知,湿润地区年平均降雨量 1000 mm 以上,雨水资源化潜力是巨大的。另外,住宅楼楼顶为雨水资源化提供了较为优越的集流场条件,只需增设集、蓄系统,即可实现雨水资源化利用。住宅小区的雨水资源化关键在于集蓄能力的大小,但集蓄能力也不是越大越好,集蓄能力过大会导致长期无水可蓄或蓄满机率较小,使投资浪费;反之,集蓄能力过小,蓄水很少,大量降雨径流外溢,可被实际利用的雨水量较少,需要更多的自来水补给,达不到节能高效的目的。“蓄水为用”还需要考虑用水需求,不能出现“蓄水过多用不掉、过少不够用”的状况,因此,对不同地区的集水系统而言,如何合理确定集蓄能力是非常重要的,同时,还需要考虑使用的方便性与合理性,达到雨水的用、蓄平衡。

2.2 绿化及硬质地面雨水资源化潜力

住宅小区内的绿化及硬质地面也是一个非常好的集流场,于住宅楼下草坪内设置集蓄水箱,通过地面沟道或地下排水管网系统集水到水箱内,一是可补充楼顶水箱的供水不足,提高供水可靠性和雨水利用的高效性;二是可以供干旱时浇灌草坪、道路洒水及景观用水。其雨水资源化潜力分析计算同住宅楼楼顶方法,只是降水径流系数 C 值不一样:不透水路面一般为混凝土结构,可达 0.9 以上;草地透水性与持蓄水能力较强,一般在 0.4 左右。

3 集用水量平衡计算

雨水资源化集蓄利用系统适用于 7 层以下商用楼或住宅楼,下面按照 6 层住宅楼,每层两户,每单元 12 户,每户 3.5 人、建筑面积 100 m^2 ,小区容积率 1.5 为例进行分析计算,分析计算单元为每单元住户所平均占用的下垫面面积。收集的雨水首要供给居民冲厕,当雨水有多余时用于草坪浇灌、道路洒水及景观用水。

3.1 水资源需求量

集水为用,楼顶与地面的集水箱所集蓄的雨水

主要以供给居民冲厕使用,少量用于浇灌草坪与道路洒水及景观用水。按照《民用建筑节能设计标准》(GB 50555-2010),冲厕用水日需求量按下式计算:

$$W_{ca} = \frac{q_c \times n_c}{1000} \quad (4)$$

式中:

W_{ca} ——日冲厕用水量(m^3/a);

q_c ——日均用水定额,取 25 ($\text{L}/\text{人} \cdot \text{d}$);

n_c ——户均使用人数,取 3.5 (人),使用率按 80% 计算。

每单元计算的冲厕日用水量为 0.84 m^3 ,则冲厕用水每单元年需求水量为 306.6 m^3 。

小区地面雨水集流面积按照容积率估算,低层住宅区每单元的平均草坪及绿化的汇水面积约 1000 m^2 。根据平均每年灌溉 3 次,每次灌溉 20 mm 计算,年用水量为 60 m^3 。

低层住宅区每单元平均道路面积约 200 m^2 。根据《民用建筑节能设计标准》(GB50555-2010)规定,道路的浇洒用水定额可按洒水面积 0.5L/($\text{m}^2 \cdot \text{次}$)计算,每年约洒水 30 次,则年用水量为 3 m^3 。

3.2 雨水可蓄量

南方地区多年平均年降雨量 ≥ 1000 mm,现以年降雨量 1000 mm 进行实例计算。雨水的来源主要考虑两方面:一是住宅楼楼顶的雨水径流,另一个是小区道路及绿化带产生的地面雨水径流,计算单元的雨水汇水面积及雨水集蓄潜力,见表 1。

3.3 水量平衡分析

根据南方地区多年平均降雨的情况,计算得计算单元的年雨水集蓄潜力为 532 m^3 ,而冲厕用水年需求水量为 306.6 m^3 ,说明雨水资源化利用可以满足住户冲厕用水需求,多余水量可以作为绿化及景观用水需要。若连续多日不降雨,雨水供给不足时,可用自来水补给。

4 雨水资源化利用系统设计

4.1 雨水利用系统组成

小区雨水集蓄主要来自楼顶雨水、地面绿化带雨水和道路雨水。楼顶雨水收集到位于楼顶的集水箱(图 1),沉淀后可以供本单元居民自压冲厕利用;地面绿化带雨水和道路雨水收集到位于绿化带中的地下集水箱,2 个集水箱通过泵、管道相连,实现相互补给,以下补上为主,提高供水可靠性与雨

表 1 计算单元的雨水汇水面积及雨水集蓄潜力

汇水区域	汇水面积/m ²	雨水径流系数	雨水集蓄潜力/m ³ ·a ⁻¹
硬质楼顶屋面	200	0.9	126
绿化及透水地面	1000	0.4	280
硬质地面	200	0.9	126
雨水集蓄总潜力量			532

水利用效率;雨水资源不足时再由自来水补给。在集水箱 1 和集水箱 2 中安装液位开关,自来水补水管安装电磁阀,当集水箱 1 达到最小水位时自动启动水泵补水,当集水箱 2 达到最小水位时启动电磁阀进行自来水补水。具体结构如图 1 所示。

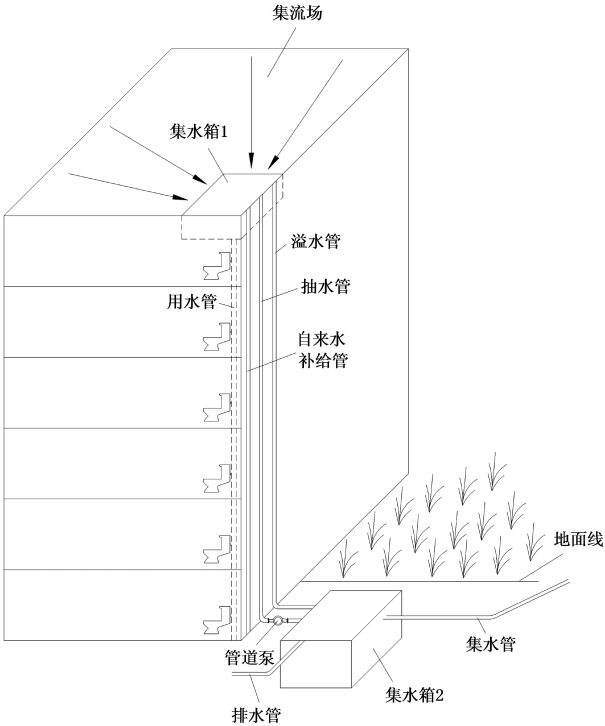


图 1 雨水回收利用系统示意图

该系统的运行方案为:

- ①当降雨径流使集水箱 1 蓄满后,通过溢水管溢入集水箱 2;集水箱 1 内的水供本单元住户自压冲厕使用;当集水箱 1 蓄水不足时,通过箱内最低水位传感器感应,自动启动管道水泵由集水箱 2 向集水箱 1 补给,即保证集水箱 1 用水优先原则;
- ②当集水箱 1 蓄水不足,集水箱 2 也缺水时,通过自来水管补给集水箱 1;
- ③当集水箱 1 和集水箱 2 都蓄满,且仍有降雨径流时,由集水箱 2 溢水进入地下排水管网排出小区外。

4.2 集水箱容积优化

小区雨水集蓄利用系统设计关键就是确定最优的水箱容积。水箱容积过大,降雨径流蓄满几率小,造成投资浪费;水箱容积过小,降雨径流蓄积量小,雨水利用效率低。需要根据不同日降雨量频率分析与用水量综合考虑。

(1)集水箱 1

扬州市处于长江下游南北交界的地区,根据 20 年(1996~2015 年)的日降雨量次数统计分析结果,见表 2。日降雨量≤30 mm 出现的频率为 91%。

以出现频率 85% 的日雨量 20 mm 为设计蓄积目标,确定集水箱 1 的尺寸为 2.5 m×2.5 m×1 m(考虑不占用过多顶层住宅的上部空间,所以深度设置 1 m),遭遇日降雨量 20 mm 以上时,一次最大可蓄积雨水径流量 6.25 m³。而前面计算的每个单元住户冲厕用水日用水量为 0.84 m³,则水箱 1 的次蓄满水量可用 5~7 d,而南方地区平均每 5 d 发生一次降雨的概率极大,所以该系统雨水集蓄利用的水箱容积按照日雨量 20 mm 是适宜的。遇降雨量少水箱 1 蓄水量不足时,可由地面蓄水箱 2 经管道泵提水补充。

(2)集水箱 2

该集水箱收集绿化及道路的雨水,汇水面积按照单元分摊有 1200 m²,雨水量径流量较多,地面有空间,所以就以尽量多蓄为目标。在日雨量 20 mm 时可产生地面径流量 11.6 m³,故将集水箱 2 尺寸定为 3 m×3 m×2 m,超过水箱蓄积能力的水量通过溢水排水管排入下水管网。

4.3 两水箱间连接系统

①抽水管:在集水箱 2 上安装一台管道泵,通过抽水管向楼上集水箱 1 补水。根据住宅楼的高度和流量,选用型号为 ISG40-20 的泵,管道可采用 DN40 的镀锌钢管。

②溢水管:在集水箱 1 上安装溢水管,将集水箱 1 中多余的水通过溢水管溢到集水箱 2 中。溢水

表 2 日降雨量次数统计分析

降水量 P/mm	P≤10	10<P≤20	20<P≤30	30<P≤40	40<P≤50	50<P≤60	60<P≤70	P>70
出现频率	70%	13%	8%	1%	1%	1%	1%	5%

管选用 DN110 的 UPVC 管。

③自来水补给管: 当集水箱 1 和集水箱 2 中都缺水时, 由自来水补给到集水箱 1 中, 保证住户用水。自来水补给管选用 DN40 的镀锌钢管。

④用水管: 从集水箱 1 向下安装用水管, 水箱中的水通过用水管向住户的抽水马桶供水, 选用 DN40 的镀锌钢管。

在集水箱 1 和 2 内安装水位传感器, 设定各自的最低控制水位, 自动调度管道泵及自来水电磁阀的启闭, 自动运行。

5 应用分析

扬州城区属于长江流域下游区域, 根据 1956 ~ 2000 年共 45 年的降雨资料统计分析, 年降雨量均值 1054.7 mm, $C_v=0.2$; $C_s/C_v=2$ 。20% 丰水年代表年为 1989 年, 降雨量为 1194.4 mm; 50% 平水年代表年为 1996 年, 年降雨量为 1061.4 mm; 75% 一般干旱年的代表年为 1988 年, 年降雨量为 887.3 mm; 95% 特殊干旱年为 1978 年, 年降雨量为 530.3 mm。按照前述典型住宅楼及小区情况与确定的集水箱容积, 经各代表年 365 天的逐日降雨量进行调蓄计算, 结果见表 3。

日降雨量随机性分布, 所以计算的集蓄水量、补水量不具有严格的规律性。如一般干旱年份自来水补给量就大于特殊干旱年份。(3) 2 个水箱在楼顶与地面分别蓄积雨水, 通过管道连接实现相互补给, 增加了地面水箱向楼顶补给雨水量 $130 \sim 160 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 提高了住户供水的可靠性, 也增加了当地雨水资源利用率。(4) 2 个水箱集蓄利用雨水资源量, 即为减少的自来水用水量, 也即为减少小区内雨水排水量 $250 \sim 310 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 这对减少地区水资源供需矛盾、减轻城区的排水压力具有重要意义。

6 结论与讨论

根据南方地区的降雨特点及住宅小区集流场的优势, 提出了利用楼顶与地面两个水箱构成相互补给雨水资源集蓄利用系统的新思路, 并给出了雨水回收利用系统的设计方法。该系统可以将小区的大部分雨水收纳再利用, 以此起到减少小区积水, 减轻小区排水压力的目的。扩大到整个城市来说, 该系统可以降低城市洪水暴发概率、提升城市水利用效率, 为治理城市内涝、降低水资源浪费和保护城市生态环境起着重要的作用。

表 3 不同代表年雨水回收利用系统雨水集蓄利用情况表

年份	集水箱 1 集蓄水量 (自压供水量)/ $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$	集水箱 2 集蓄水量 / $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$	集水箱 2 向集水箱 1 补水量/ $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$	自来水补给水量 / $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$
丰水年(20%)	102.05	207.01	160.18	44.36
平水年(50%)	98.57	190.17	150.78	58.38
一般干旱年(75%)	84.57	183.66	133.9	89.41
特殊干旱年(95%)	60.51	187.51	161.62	84.47

表 3 结果表明: (1) 楼顶集水箱 1 拦蓄利用雨水量在 $60 \sim 100 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 利用该蓄水可自压向 12 个住户的抽水马桶供水, 相应节约了从地面提水到楼顶的电费平均 $20 \text{ kWh} \cdot \text{a}^{-1}$; 如果加上由楼下水箱向楼顶补水量, 可节约冲厕自来水水量 $220 \sim 260 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$; 考虑景观用水量, 年集蓄利用雨水总量 $250 \sim 310 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 。(2) 由于不同代表年内的逐

该雨水集蓄利用系统只是从雨水高效集蓄利用角度进行了分析与设计, 对可能增加开发商的建造成本、顶层住户个别房间上部空间受到影响、结构是否能承受等未进行深入分析; 楼顶集水箱要进行防漏水, 客观上给设计与施工也带来了一定难度, 需要在实际应用中进一步优化。

(下转第 30 页)

(上接第 25 页)

参考文献:

- [1] 王一钧, 欧阳志云, 郑华, 等. 雨水回收利用生态工程及其应用[J]. 生态学报, 2010, 30(10): 2687 - 2694.
- [2] 蒋岚岚, 蔡丹新, 江后梅. 无锡市某住宅小区雨水利用系统设计[J]. 给水排水, 2011, 37(12): 77 - 79.
- [3] 曹秀芹, 车武. 城市屋面雨水收集利用系统方案设计分析[J]. 给水排水, 2002, 28(1): 13 - 15.
- [4] 杨劲松, 王祥勇, 侯改娟. 绿色低碳生态小区雨水利用系统设计实例[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(4): 144 - 146.
- [5] 陈平, 王景成, 金兆森, 等. 设施农业雨水资源自压利用系统研究[J]. 节水灌溉, 2002(1): 11 - 14.
- [6] 冯浩, 邵明安, 吴普特. 黄土高原小流域雨水资源化潜力计算与评价初探[J]. 自然资源学报, 2001, 16(2): 140 - 144.
- [7] 徐锦升. 雨水回收利用生态工程[J]. 后勤工程学院学报, 2012, 28(1): 60 - 64.
- [8] 杨民, 殷晨鸣, 陆萍. 虹吸雨水系统在上海中心大厦的应用[J]. 给水排水, 2015, 41(6): 76 - 81.
- [9] 李长在. 雨水回收利用系统在建筑中的应用[J]. 施工技术, 2013, 42: 493 - 495.
- [10] 沈捷, 宋文清. 海绵城市理念在海花岛雨水回收利用设计中的实践[J]. 给水排水, 2016, 42(10): 69 - 73.