

城市雨水调蓄利用及效益分析

——以南京大学仙林校区为例

孙媛, 张兴奇, 李港妹

(南京大学地理与海洋科学学院, 江苏南京 210023)

摘要: 随着城市化发展,水资源短缺、水环境污染和城市内涝等问题日益突出,雨水调蓄利用成为缓解以上问题的重要手段。以南京大学仙林校区为研究区,进行可集雨量与室外用水需求的水量平衡计算,结合雨水利用措施分析,开展雨水调蓄利用的方案设计及综合效益分析。结果表明:雨水调蓄利用后,研究区综合径流系数下降为0.532,重现期2、5、10 a对应的屋面集雨量均能满足室外用水需求,对应的单位面积雨水利用年综合效益分别为8 475.6、10 506.3、11 786.4元/hm²。城市雨水调蓄利用可产生显著的生态、经济和社会效益,在城市新区开发和旧城改造过程中应当得到足够的重视。

关键词: 城市内涝; 水短缺; 水量平衡; 雨水调蓄利用; 效益分析

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2018)05-0035-06

Analysis on urban rainwater storage and utilization and its benefits:

A case study in Xianlin Campus, Nanjing University

SUN Yuan, ZHANG Xingqi, LI Gangmei

(School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The water resource shortages, water pollutions and urban waterlogging disasters have become increasingly prominent with the development of urbanization. Rainwater storage and utilization have become an important means of alleviating above-mentioned problems. This paper calculated the water balance between the collectable rainfall and the outdoor water consumption in Xianlin campus of Nanjing University and analyzed rainwater utilization measures to carry out conceptual design and comprehensive benefits evaluation of rainwater storage and utilization. The results showed that after rainwater storage and utilization, the comprehensive runoff coefficient of the study area decreased to 0.532 and the corresponding rainwater collected from the rooftops at the recurrence interval of 2, 5 and 10a can meet outdoor water demand. The corresponding monetary values of comprehensive benefits generated by rainwater utilization of per unit area will be 8 475.6, 10 506.3, and 11 786.4 yuan/hm², respectively. Urban rainwater storage and utilization can produce significant ecological, economic and social benefits, and should be given sufficient attention in the development of new urban areas and the transformation of built-up urban areas.

Key words: urban waterlogging; rainwater shortage; water balance; rainwater storage and utilization; benefit analysis

1 研究背景

全球气候变化和人类活动改变了水循环要素的时空分布,增加了极端水文事件发生的频率,使城市

暴雨洪涝问题日益增多^[1],城市化进程中出现水供需矛盾、洪涝灾害与水环境污染等问题。长期以来,雨水被视为城市洪涝的致灾因子,城市雨水管理的目标是快速排水,以求降低风险,但传统的雨水排放

收稿日期:2018-04-14; 修回日期:2018-06-01

基金项目:江苏省水利科技项目(2015057)

作者简介:孙媛(1994-),女,江苏南京人,硕士研究生,主要从事水资源与水环境研究。

通讯作者:张兴奇(1964-),男,贵州仁怀人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事水资源与水土保持研究。

系统难以应对日益增大的洪涝防控与水环境保护的需求。为了应对城市化带来的水问题,需要对城市雨水资源进行科学管理^[2],以可持续发展的策略为指导,将潜在的致灾因子转为雨水资源。

随着科学认识的进步,国外雨水管理的发展先后经历了排涝蓄洪、点源污染治理以及雨水可持续管理阶段^[3],完成了从单一排水到综合利用的转变。近年来许多国家展开了雨水利用的探索与实践^[2,4],包括美国的雨水最佳管理实践(BMPs)和低影响开发(LID)、澳大利亚的水敏感城市设计(WSUD)、英国的可持续性城市排水系统(SUDS)等,从尊重自然、生态保护、城市可持续发展角度出发,有较为完善的法律制度和社会经济支持为保障。除此之外,有研究指出雨水利用要以恢复自然条件下的水文状态为设计目标^[5],针对雨水调蓄利用措施进行经济可行性分析,包括净现值、还本期的计算^[6]以及研究经验数据的收集和社会经济制度对实践开展的影响程度^[7],均为完善相关研究的重要思路与方向。20 世纪 90 年代,我国开始对雨水利用进行研究,近几年来尤其对低影响开发理念进行探索,LID 采用分散的小规模措施对雨水径流进行源头控制,通过入渗、过滤和蒸发等方式模拟雨水的自然循环过程^[8]。借鉴国外雨水资源管理的经验,针对城镇化进程中的水问题,我国的研究向着形成具有中国特色的雨水利用管理体系而努力^[9],如何因地制宜地开展实践、科学地规划管理、有效地建立评估体系等需要进一步探讨。

雨水利用的核心是雨水管理,即采用雨水截留入渗、雨水收集回用及调蓄排放等方式来缓解城市用水紧张、内涝灾害并减少径流污染。国内有关研究主要集中在方案设计^[10]、技术可行性分析^[11]、景观营造^[12]、激励政策与措施^[13]、效益评价^[14]等方面,具有定量化发展的趋势。吴淑君等^[12]以城市小区为例,在雨水利用措施的方案设计中考虑修建雨水花园,但在效益分析上有所欠缺;李美娟等^[14]应用多层次半结构模糊决策法,对雨水利用方案的综合效益进行定量识别和综合评价,但雨水利用目标不够明确。此外,有关文章缺少对降雨重现期的综合考虑,以高校作为研究区的案例研究相对较少。高校是人才培养与科学研究的重镇,校园内人口与建筑物密集、用水方式多样且用水量大,景观环境相对较好,雨水收集利用的条件较为优越,同时有利于宣传节水与环保意识。目前国内有文献^[15-16]关注校园雨水利用,集中在方案设计与可行性讨论,综合

效益分析相对较少。综上所述,本文以南京大学仙林校区为研究对象,在分析南京市降雨特征的基础上,进行可集雨量与室外用水需求的水量平衡计算,设计雨水利用方案,分析雨水综合利用产生的经济、生态和社会效益,为校园雨水利用及其综合效益评价提供参考。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

南京大学仙林校区位于江苏省南京市栖霞区,经纬度分别为 32°06' N 和 118°57' E,具体范围是仙林大道以北,纬地路以南,九乡河东路以东,元化路以西,于 2009 年投入使用,目前校区总人数接近 30 000 人。研究区总面积 254.7 hm²,其中不透水下垫面面积 110.1 hm²,占总面积的 43.23%,包括道路、屋顶和其他建设用地;除丘陵以外,透水下垫面包括透水路面和透水停车位,所占比例极小,其中人行道的透水材质主要是透水性混凝土和透水砖,停车位的透水材质主要是草坪砖,校区内没有配套建设屋面雨水收集系统与下凹式绿地。南京大学仙林校区自投入使用以来,雨水径流被排入市政排水系统,并未得到有效利用,校园内已经多次出现较为严重的内涝灾害,研究区下垫面类型统计结果见表 1 和图 1。

表 1 研究区下垫面类型及面积构成情况

下垫面类型	面积/hm ²	比例/%
道路	28.0	10.99
透水路面	2.7	1.06
屋顶	32.1	12.60
透水停车位	2.5	0.98
绿地	59.7	23.45
水面	4.3	1.69
丘陵	75.4	29.60
其他建设用地	50.0	19.63
总面积	254.7	100

2.2 雨水调蓄利用研究方法

2.2.1 水量平衡分析 为充分发挥雨水利用的最大效益,在开展方案设计前进行雨水利用潜力分析,即进行水量平衡计算,统计不同重现期与下垫面条件下的可集雨量以及室外用水需求量。

可收集雨量根据《室外排水设计规范》^[17],按下式进行计算:

$$Q = P \cdot A \cdot \psi \cdot \alpha \cdot \beta \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

式中: Q 为年可收集雨量, m^3 ; P 为不同重现期对应的降雨量, mm ; A 为集雨面积, m^2 ; ψ 为平均径流系数; α 为季节折减系数; β 为初期弃流系数。

室外用水需求根据研究区而定, 校园主要包括绿化用水 $W_1(\text{m}^3)$ 、道路浇洒用水 $W_2(\text{m}^3)$ 、景观水体补给 $W_3(\text{m}^3)$ 与车辆冲洗用水 $W_4(\text{m}^3)$, 根据江苏省《雨水利用工程技术规范》^[18] 和《绿色建筑评价标准》^[19], 计算公式如下:

$$W_1 = q_1 \cdot A_1 \cdot D \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

$$W_2 = q_2 \cdot A_2 \cdot T_1 \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

$$W_3 = e \cdot A_3 \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

$$W_4 = q_3 \cdot T_2 \cdot Y \quad (5)$$

式中: q_1 为绿化用水定额, $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 取值为 2; A_1 为绿地面积, m^2 ; D 为年平均浇洒天数 (不超过 122d), 取 122 d; q_2 为道路浇洒用水定额, 《规范》中规定用水定额为 0.4 ~ 1.5 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 取 1.5; A_2 为道路面积, m^2 ; T_1 为年洒水次数, 取值为 40; e 为水面年均蒸发量, mm ; A_3 为景观水体面积, m^2 ; q_3 为车辆冲洗用水定额, m^3 , 取 0.3; T_2 为年平均洗车次数, 取值为 48; Y 为研究区车辆数, 根据校园停车位与登记车辆数, 取值为 3000。



图1 研究区下垫面类型图

2.2.2 雨水调蓄利用方案设计 雨水调蓄利用的措施包括雨水收集系统与蓄水设施建设, 以及将原有部分绿地和道路改建为下凹式绿地、透水路面, 方案设计根据上述 3 个方面展开。

蓄水池容积根据雨水设计流量法确定, 根据一

次暴雨可集雨量进行计算, 《南京市暴雨强度公式 (修订) 查算表》中的暴雨强度计算公式如下:

$$q = \frac{10716.7(1 + 0.837 \lg P)}{(t + 32.9)^{1.011}} \quad (6)$$

式中: q 为设计暴雨强度, $\text{L}/(\text{s} \cdot \text{hm}^2)$; t 为降雨历时, min ; P 为重现期, a 。

蓄水池容积 $V(\text{m}^3)$ 可根据公式 (9) ~ (11) 计算^[20]:

$$Q = \psi \cdot q \cdot F \quad (7)$$

$$V = Q \cdot t \cdot 60 \cdot 10^{-3} - F \cdot h \cdot 10 \quad (8)$$

式中: Q 为一次暴雨可集雨量, L/s ; ψ 为集雨面的平均径流系数; q 为设计暴雨强度, $\text{L}/(\text{s} \cdot \text{hm}^2)$; F 为集雨区域面积, hm^2 ; t 为降雨时间, min ; h 为初期弃流量, mm 。

下凹式绿地指地面高程低于周围地面的绿地, 能接收周边地面径流, 在一定程度缓解内涝灾害。下凹式绿地参数根据渗蓄率确定, 渗蓄率是指降雨过程中绿地渗透、蓄积雨水量占进入绿地总雨水径流量的百分比, 用 N 表示, 由公式 (9) ~ (11) 计算^[21]:

$$N = \frac{S + U_1}{(P_Z \cdot F_1 \cdot C_n + P_Z \cdot F_2) / 1000} \times 100\% \quad (9)$$

$$S = 60K \cdot J \cdot F_2 \cdot T \quad (10)$$

$$U_1 = F_2 \cdot \Delta h \quad (11)$$

式中: P_Z 为降雨量, mm ; F_1 为下凹式绿色周边汇水区面积 (集水区面积), m^2 ; F_2 为下凹式绿地面积, m^2 ; C_n 为周边汇水区的径流系数; S 为下渗量, m^3 ; U_1 为蓄水量, m^3 ; K 为土壤稳定入渗速率, m/s ; J 为水力坡度, 垂直下渗时, $J = 1$; T 为渗蓄计算时段, min ; Δh 为下凹深度, 即下凹式绿地与溢流口或路面之间的高差, m 。

2.2.3 雨水利用的效益分析 雨水调蓄利用后, 会产生相应的生态效益、经济效益和社会效益。

生态效益主要体现在节省水资源、缓解城市内涝灾害、增加土壤下渗、回补地下水、调节气候、缓解热岛效应等, 生态效益具有整体性与系统性, 包含定量指标与定性指标。

本文考虑的定量指标包括综合径流系数、蓄水池年调蓄量、增加的雨水下渗量以及回补地下水量。综合径流系数 φ_c 计算公式如下:

$$\varphi_c = \frac{\sum (A_i \cdot \varphi_i)}{\sum A_i} \quad (12)$$

式中: A_i 为不同下垫面面积; φ_i 为不同下垫面的径

流系数。

各透水面雨水下渗量 $B_1(\text{m}^3)$ 计算公式如下:

$$B_1 = \alpha_1 \cdot P \cdot A \cdot 10^{-3} \\ = (1 - r) \cdot P \cdot A \cdot 10^{-3} \quad (13)$$

式中: α_1 为透水面面对地表径流的截流系数; P 为不同重现期对应的降雨量, mm; A 为承接雨水的投影面积, m^2 ; r 为径流系数。

下渗雨水回补地下水量 $B_2(\text{m}^3)$ 的计算公式如下:

$$B_2 = \alpha_2 \cdot P \cdot A \cdot 10^{-3} \quad (14)$$

式中: α_2 为雨水对地下水的下渗补给系数, 取 0.2; P 为不同重现期对应的降雨量, mm; A 为承接雨水的投影面积, m^2 。

经济效益包括直接效益与间接效益两部分, 直接效益为节约水费 E_1 (元); 间接效益包括消除污染而减少的社会损失 E_2 (元)、节省城市排水设施的运行费用 E_3 (元) 以及回补地下水产生的经济效益 E_4 (元)。计算公式如下:

$$E_1 = 3.19V_1 \quad (15)$$

式中: V_1 为屋面雨水收集量, m^3 , 南京市的到户水价为 3.19 元/ m^3 。

$$E_2 = 0.7 \times 3V_2 \quad (16)$$

式中: V_2 为不同降雨重现期对应的减少外排量, m^3 , 包括雨水调蓄池年调节雨量、增设下凹式绿地的调蓄量及增设透水面而增加的下渗雨量; 国家环境保护部《排污费征收标准管理办法》规定每一污染当量征收标准为 0.7 元, 为消除污染每投入 1 元可减少的环境资源损失为 3 元。

$$E_3 = 0.08V_3 \quad (17)$$

式中: V_3 为减少外排量, m^3 , 与 V_2 相同, 排水设施中管网运行费用为 0.08 元/ m^3 。

$$E_4 = 1.57\beta \cdot V_4 \quad (18)$$

式中: β 为降雨入渗回补地下水系数, 取 0.2; V_4 为不同降雨重现期对应的雨水下渗量; 地下水资源费取 1.57 元/ m^3 。

3 结果与分析

3.1 降雨特征分析

在气候与海陆位置等因素的影响下, 南京地区雨水资源充足, 同时也增加了内涝灾害风险。对南京水文站 1951—2014 年的降雨资料进行统计分析, 降雨量大于 2 mm 的多年平均年降雨次数为 69 次, 南京多年平均降雨量为 1 056.52 mm, 其中, 最大年降雨量为 1991 年的 1 825.8 mm, 最大日降雨量为

207.2 mm, 多年平均最大日降雨量为 96.61 mm, 6—8 月平均总降雨量为 499.16 mm, 占多年平均降雨量的 47.2%, 可见研究区降水集中于夏季且降雨量大。南京降雨频率分析结果见表 2, 月平均降雨量见图 2。

表 2 南京站 1951—2014 年降雨量频率分析

频率/ %	模比 系数	降雨量/ mm	频率/ %	模比 系数	降雨量/ mm
1	1.76	1854.19	50	0.96	1014.26
2	1.64	1727.41	75	0.82	863.70
5	1.47	1553.08	90	0.72	758.05
10	1.34	1410.45	95	0.67	707.87
20	1.19	1257.26	99	0.60	636.55

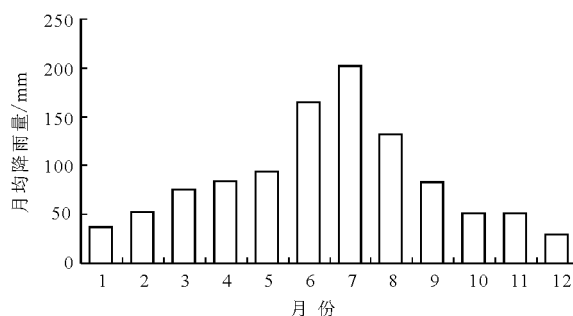


图 2 南京水文站 1951—2014 年月平均降雨量

3.2 水量平衡分析

综合考虑降雨季节分配、下垫面性质等因素, 计算重现期为 2、5、10 a 对应的可集雨量, 选取的下垫面包括屋面、道路、绿地、透水路面及景观水体, 根据公式(1)及表 1、2 的数据, 可集雨量计算结果见表 3。在室外用水需求统计中, 校园绿化用水、道路浇洒用水、景观水体补给与车辆冲洗用水量的结果见表 4。由此可见, 重现期为 2、5、10 a 对应的可集雨量均能满足校园室外用水需求, 仅硬化屋面的可集雨量就能够满足室外需水量, 鉴于屋面雨水的水质良好与可收集性, 在雨水利用方案中优先考虑收集屋面雨水。

表 3 不同下垫面在相应重现期下的年可收集雨量 m^3

类型	ψ	重现期/a		
		2	5	10
硬化屋面	0.90	239121.7	296411.3	332527.3
道路	0.90	208579.6	258551.9	290055.0
绿地	0.15	74120.3	91878.3	103073.1
透水路面	0.40	8939.1	11080.8	12430.9
景观水体	1.00	35591.0	44118.0	49493.5

表 4 研究区室外年用水需求量 m^3

绿化用水	道路浇洒用水	景观水体用水	车辆冲洗用水	合计
145668	16800	25800	43200	231468

3.3 雨水调蓄利用方案的确定

3.3.1 屋面雨水利用与蓄水池容积 研究区屋顶面积为 32.1 hm^2 ,径流系数为 0.90,代入公式(6)~(8)得到不同重现期和降雨历时下蓄水池的容积曲线,如图 3 所示。当重现期一定时,蓄水池容积随降雨历时的增加而增加,增速呈先快后慢;当降雨历时一定时,蓄水池容积与重现期成对数关系,容积随重现期的增大而增大。重现期的确定需综合考虑汇水区类型、降雨特征和地形特点等因素,积水能在短期内引起严重后果的地区通常取 3~5 a,一般地区取 1~3 a。根据南京地区多年降水情况以及研究区存在的内涝问题,重现期取 5 a,降雨历时取 30 min,计算得设计暴雨强度为 $258.03 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{hm}^2)$,需要修建的蓄水池总容积为 $12\,776 \text{ m}^3$ 。

3.3.2 下凹式绿地的渗蓄作用 下凹式绿地周边

汇水区的面积($748\,000 \text{ m}^3$)为不透水道路和其他建设用地面积之和,其径流系数 C_n 为 0.9, K 值分别以中等入渗能力 $1.25 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 和极慢入渗能力 $2.50 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 为代表,选择 2、5、10 a 为设计暴雨重现期,代入公式(9)~(11),计算 30 min 内不同绿地面积比 f ($f = F_1/F_2$)、不同下凹深度 Δh 条件下的雨水渗蓄率 N ,结果见表 5。分析可知,雨水渗蓄率与下凹深度、下凹式绿地的面积成正比,与设计暴雨重现期呈反比。根据计算结果以及工程可操作性,选取 $f = 50\%$ 、 $\Delta h = 0.15$,即在研究区增设 $374\,000 \text{ m}^2$ 的下凹式绿地,并使其低于路面 0.15 m,雨水口顶面高于绿地地面 0.05 m,有效储水深度为 0.1 m。

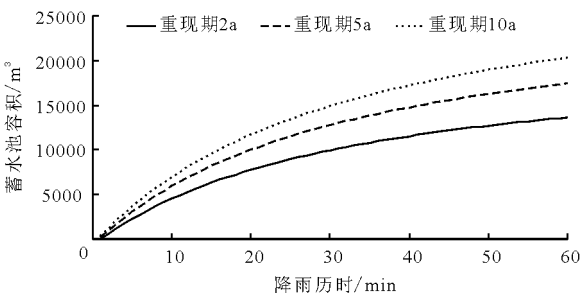


图 3 不同重现期和降雨历时下的屋面集雨蓄水池容积

表 5 不同参数对应的下凹式绿地雨水渗蓄率 %

土壤稳定入渗速率/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	设计暴雨 重现期/a	$\Delta h(f = 40\%) / \text{m}$			$\Delta h(f = 50\%) / \text{m}$			$\Delta h(f = 60\%) / \text{m}$		
		0.1	0.15	0.2	0.1	0.15	0.2	0.1	0.15	0.2
2.50×10^{-7}	2	84	126	168	98	146	195	110	164	219
	5	67	100	133	77	116	154	87	130	173
	10	57	86	115	67	100	133	75	112	149
1.25×10^{-5}	2	103	145	187	119	168	217	134	188	243
	5	81	114	147	94	133	171	106	149	192
	10	70	99	127	81	114	148	91	128	165

3.3.3 透水路面的下渗作用 透水路面是具有下渗功能的人工铺设的渗透性地面。研究区现有透水路面与透水停车位合计 $52\,000 \text{ m}^2$,占道路面积的 18.6%。考虑到主干道的通行需求,将硬地广场、非主干道和停车位面积 $32\,000 \text{ m}^2$ 改为透水路面,使其占道路的比例达到 30%,新建的透水路面采用组件式混凝土砌块,堵塞时只需要及时清理,便可恢复其透水功能。

3.4 雨水调蓄利用的效益分析

3.4.1 生态效益 针对研究区制定的方案包括修建容积为 $12\,776 \text{ m}^3$ 的蓄水池、面积为 $374\,000 \text{ m}^2$ 的下凹式绿地以及 $32\,000 \text{ m}^2$ 的透水路面。根据公

式(12),研究区雨水调蓄措施增设后综合径流系数降为 0.532,满足《室外排水设计规范》^[17]中控制综合径流系数不高于 0.7 的要求。

方案实施后,重现期为 2、5、10 a 对应的不同措施的调蓄量、增加入渗量以及回补地下水量见表 6,可见研究区通过增设雨水调蓄利用措施,在不同的降雨重现期下,均能产生可观的生态效益。

3.4.2 经济效益 根据公式(15)~(18)的计算,研究区在实施调蓄利用措施后,不仅能产生一系列的生态效益,还具有广泛的经济收益。如表 7 所示,单位面积年经济效益在重现期为 2、5、10 a 时分别为 $8\,475.6$ 、 $10\,506.3$ 、 $11\,786.4 \text{ 元}/\text{hm}^2$,产生的可观

收入可用于调蓄利用措施的运行与维护或学校建设发展,具有现实意义。

表 6 不同重现期下增设措施对应的雨水调节量 m^3

增设措施	类型	重现期		
		2	5	10
蓄水池	调蓄量	239121.7	296411.3	332527.3
下凹式绿地	增加下渗量	322433.3	399683.0	448382.1
	回补地下水量	75866.6	94043.0	105501.7
渗透性铺设	增加下渗量	19473.8	24139.4	27080.6
	回补地下水量	6491.3	8046.5	9026.9

表 7 不同重现期下雨水利用措施对应的经济效益

元/ hm^2

效益类型	重现期/a		
	2	5	10
节水效益	2994.9	3712.4	4164.8
消除污染而减少的社会损失	4790.6	5938.3	6661.9
节省城市排水设施的运行费用	182.5	226.2	253.8
回补地下水的收益	507.7	629.3	782.3
合计	8475.6	10506.3	11786.4

3.4.3 社会效益 通过校园雨水利用设施的建设,不仅能充分利用雨水资源,满足一定的用水需求,而且能减少地表径流、降低内涝风险,保障校园正常的工作和生活秩序。另外,在校园内开展雨水利用研究与应用示范,能增强学生有关雨水资源利用与节约水资源的意识,亦能发挥宣传示范作用,为政府制定城市雨水利用的相关政策、促进低影响开发建设等提供参考。

4 结论与展望

(1)在分析南京市降雨特征的基础上,通过水量平衡计算,重现期为 2、5、10 a 对应的屋面雨水收集量,均能满足研究区绿化用水、道路浇洒、景观水体补水、车辆冲洗共计 $231\ 468\ \text{m}^3$ 的年室外用水需求,表明研究区雨水调蓄利用的潜力很大。

(2)根据雨水利用措施相关参数的计算,设计了容积为 $12\ 776\ \text{m}^3$ 的蓄水池、面积为 $374\ 000\ \text{m}^2$ 的下凹式绿地和 $3\ 200\ \text{m}^2$ 的透水路面组成的雨水调蓄利用方案。研究区实施雨水调蓄利用方案后,综合径流系数降为 0.532,既能满足室外用水需求,又增加雨水的渗蓄能力并削减地表径流量,对雨水

资源的有效利用和地表径流的调节具有明显的促进作用。

(3)重现期为 2、5、10 a 对应的单位面积年经济效益分别为 8 475.6、10 506.3、11 786.4 元/ hm^2 ,可为雨水资源丰沛地区的调蓄利用系统构建提供参考。本文采用水量平衡分析、雨水调蓄利用措施分析与效益分析的方案设计思路,雨水调蓄利用潜力分析表明,所设计的雨水方案还能满足一定的室内用水需求,有待今后进一步研究。同时,在实际建设中还有诸多因素需要考虑,例如雨水调蓄利用设施布局的合理性、可操作性、工程建设成本等。可预见的是,雨水调蓄利用将会成为城市规划设计与建设中不容忽视的环节,无论是城市新区建设还是旧城改造中都要予以充分的重视。

参考文献:

- [1] 张建云,宋晓猛,王国庆,等.变化环境下城市水文学的发展与挑战——I.城市水文效应[J].水科学进展,2014,25(4):594-605.
- [2] FLETCHER T D, SHUSTER W, HUNT W F, et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more - The evolution and application of terminology surrounding urban drainage[J]. Urban Water Journal, 2015,12(7):525-542.
- [3] 张玉鹏.国外雨水管理理念与实践[J].国际城市规划,2015,30(S1):89-93.
- [4] HAJANI E, RAHMAN A. Rainwater utilization from roof catchments in arid regions: A case study for Australia[J]. Journal of Arid Environments, 2014,111:35-41.
- [5] MATTHEW J. BURNS. Hydrologic shortcomings of conventional urban stormwater management and opportunities for reform[J]. Landscape & Urban Planning, 2012,105(3):230-240.
- [6] CAMPISANO A, BUTLER D, WARD S, et al. Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives[J]. Water Research, 2017,115:195-209.
- [7] NETO R F M, CARVALHO I D C, CALIJURI M L, et al. Rainwater use in airports: A case study in Brazil[J]. Resources Conservation & Recycling, 2012,68(6):36-43.
- [8] 刘文,陈卫平,彭驰.城市雨洪管理低影响开发技术研究与利用进展[J].应用生态学报,2015,26(6):1901-1912.
- [9] 蒋涤非,邱慧,易欣.城市雨水资源化的景观学途径及其综合效益评价[J].资源科学,2014,36(1):65-74.
- [10] 徐得潜,汪维伟,余育速.合肥市建筑小区雨水利用设计方法[J].水土保持通报,2016,36(5):225-230.

(下转第 45 页)

11月份,个别年甚至推迟到12月份;枯水年枯水出现时间可提前至8、9月份,除个别年份外,最晚出现时间为10月份,平水年枯水出现时间集中在10、11月份。无论丰水年、枯水年还是平水年,枯水出现时间都呈波动提前的状态。

(4)鄱阳湖枯水特性变化复杂,影响因素较多,如气象因素导致的入湖流量的变化、人类活动影响如采砂、湖区整治工程导致长江水文特性的变化等,对此变化的成因及定量分析需要进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 杨沛钧,廖智凌. 鄱阳湖流域江湖关系研究综述[J]. 中国农村水利水电, 2017(3):65-67+74.
- [2] 李鹏,封志明,姜鲁光,等. 鄱阳湖天然湖面遥感监测及其与水位关系研究[J]. 自然资源学报, 2013,28(9):1556-1568.
- [3] 姚静,李云良,李梦凡,等. 地形变化对鄱阳湖枯水的影响[J]. 湖泊科学, 2017,29(4):955-964.
- [4] 邓志民,张翔,肖洋,等. 鄱阳湖水位演变及其影响因素分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2015,48(5):615-621.
- [5] 闵骞,占腊生. 1952-2011年鄱阳湖枯水变化分析[J]. 湖泊科学, 2012,24(5):675-678.
- [6] 李世勤,闵骞,谭国良,等. 鄱阳湖2006年枯水特征及其成因研究[J]. 水文, 2008,28(6):73-76.
- [7] 赖锡军,姜加虎,黄群. 三峡工程蓄水对鄱阳湖水情的影响格局及作用机制分析[J]. 水力发电学报, 2012,31(6):132-136+148.
- [8] 刘章君,成静清,温天福,等. 三峡水库汛末蓄水对鄱阳湖水位的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(2):103-108+112.
- [9] 邬年华,罗优,刘同宦,等. 三峡工程运行对鄱阳湖水位影响试验[J]. 湖泊科学, 2014,26(4):522-528.
- [10] 李子龙,莫淑红,万晓明,等. 鄱阳湖水位变化特征及河湖相转化规律探究[J]. 黑龙江大学学报, 2016,7(1):17-22.
- [11] 许继军,陈进. 三峡水库运行对鄱阳湖影响及对策研究[J]. 水利学报, 2013,44(7):757-763.
- [12] 罗蔚. 变化环境下鄱阳湖典型湿地生态水文过程及其调控对策研究[D]. 武汉:武汉大学, 2014.
- [13] 夏少霞,于秀波,刘宇,等. 鄱阳湖湿地现状问题与未来趋势[J]. 长江流域资源与环境, 2016,25(7):1103-1111.
- [14] 叶春,刘元波,赵晓松,等. 基于MODIS的鄱阳湖湿地植被变化及其对水位的响应研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013,22(6):705-712.
- [15] 齐述华,张起明,江丰,等. 水位对鄱阳湖湿地越冬候鸟生境景观格局的影响研究[J]. 自然资源学报, 2014,29(8):1345-1355.
- [16] 史常乐,唐立模,肖洋. 鄱阳湖都昌水位站50年水位特征变化分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016,27(2):45-50.
- [17] 吴龙华. 长江三峡工程对鄱阳湖生态环境的影响研究[J]. 水利学报, 2007(S1):586-591.
- [11] 田宇,刘志强. 天津城区雨水利用的前景分析[J]. 环境科学与技术, 2012,35(3):178-181.
- [12] 吴淑君,李欣昀,李晓英. 城市小区景观雨水利用研究——杭州一典型性居民区为例[J]. 给水排水, 2016,52(S1):237-241.
- [13] 黎小红. 城市雨水利用政策及激励机制研究[D]. 北京:清华大学, 2009.
- [14] 李美娟,徐向舟,许士国,等. 城市雨水利用效益综合评价[J]. 水土保持通报, 2011,31(1):222-226.
- [15] 朱玲,罗范颖. 沈阳建筑大学校园景观环境雨水收集与利用实践探究[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版), 2016,18(6):541-547.
- [16] 张丽峰. 城市小学校园雨水利用规模与效益分析[J]. 水资源与水工程学报, 2012,23(4):64-166+170.
- [17] 住房和城乡建设部. 室外排水设计规范 GB 50014-2006 [S]. 北京:中国计划出版社, 2014.
- [18] 江苏省住房和城乡建设厅. 雨水利用工程技术规范: DGJ32/TJ113-2011 [S]. 南京:江苏科学技术出版社, 2011.
- [19] 住房和城乡建设部. 绿色建筑评价标准:GB/T 50378-2014 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2014.
- [20] 胡茂川,张兴奇,陈刚. 城市屋面雨水利用潜力分析——以南京市河西地区某小区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2012,21(4):489-493.
- [21] 张金龙,张志政. 下凹式绿地蓄渗能力及其影响因素分析[J]. 节水灌溉, 2012(1):44-47.

(上接第40页)