

# 基于日水量平衡模型的城市小区雨水池计算分析

邢国平<sup>1</sup>, 李爽<sup>1</sup>, 周建芝<sup>2</sup>, 唐宗<sup>2</sup>, 季民<sup>1</sup>

(1. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300072; 2. 天津市节约用水事务管理中心, 天津 300074)

**摘要:** 随着我国城市雨洪利用工程的快速发展, 关于雨水池设计理论及计算也有了较多的探讨和研究, 但仍需进一步完善。针对雨水池设计现状, 以及半干旱地区的降雨情况, 通过对天津市日降雨量的分析, 建立了日降雨—用水平衡模型。利用计算机编程计算出不同用水需求条件下, 城市小区雨水蓄水池的合理规模。该模型可为雨水池修建提供设计依据, 同时也可为源头污染控制以及雨水洪峰调蓄提供数据支持。

**关键词:** 雨水池容积; 日降雨量; 平衡模型; 源头利用

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2013)02-0120-04

中图分类号: TV213.9

## Analysis of Rainwater Collection Tanks in Urban Residence Based on Daily Water Balance Model

XING Guo-ping<sup>1</sup>, LI Shuang<sup>1</sup>, ZHOU Jian-zhi<sup>2</sup>, TANG Zong<sup>2</sup>, JI Min<sup>1</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Municipal Water Conservation Office, Tianjin 300074, China)

**Abstract:** With the accelerated development of urban rainwater utilization in China, theoretical design and calculation of rain tanks have been studied and reported widely. However, improvements are still required to realize efficient rainwater collection and utilization. Based on current design of rain tanks and rainfall characteristics of semi-arid area, a daily rainfall-water usage balance model was established by analyzing of daily rainfall in Tianjin City. A reasonable volume of rainwater tanks calculated by a computer program with respect to different water usage conditions. This balance model not only provides a design basis for rain water tank deployment, but also plays an important role for source pollution control and flood peak adjustment.

**Keywords:** rainwater tank volume; daily rainfall; balance model; source utilization

传统的雨水处置措施多集中于弃流排放, 雨水的价值未能合理利用。与市政排污管道合流排放, 是大部分城市, 尤其是老城区的处置模式。在暴雨或融雪期条件下, 会发生管道溢流, 不仅严重污染受纳水体, 还会威胁城市居民的健康, 制约城市的可持续发展<sup>[1]</sup>。作为一种滞洪和控制雨水污染的手段, 雨水池成为最受欢迎并广泛应用的佳管理措施之一<sup>[2]</sup>, 同时也符合低影响开发(LID)的理念<sup>[3]</sup>。利用城市建筑屋顶、庭院等不透水面收集雨水, 修建雨水蓄水设施, 汇集贮存城市雨水作为城市杂用水, 可用于冲厕、洗车、消防、浇绿地和洗衣等很多方面<sup>[4]</sup>。目前我国雨水池的设计多采取国外的经验公式<sup>[5]</sup>, 或由年降雨量估算而来。很多新建小区不修建雨水池的一个很重要的原因就是无法获知其最优的设计规格。因此,

开发适用于当地、规模适度的城市雨洪利用设施的设计和计算方法, 能更经济和更显著地调蓄利用城市雨水资源和改善城市生态环境<sup>[6]</sup>。

### 1 雨水池模型建立及分析计算

雨水池暂时滞留雨水, 待降雨洪峰过后, 再将所滞留的雨水排入污水处理厂或加以利用, 起到调节洪峰流量的作用<sup>[7]</sup>。研究发现, 设置在住宅小区、学校等场所的雨水池, 因其集水面污染浓度不高, 所收集的雨水不需处理, 就可以达到市政杂用水标准, 用于绿地灌溉、道路浇洒等。

#### 1.1 每日水量平衡模型

选取天津市某住宅小区为研究对象, 雨水收集汇水面分为建筑屋面及不透水路面。开始降雨后, 建筑

收稿日期: 2012-04-01

修回日期: 2012-04-25

资助项目: 天津市水利科学技术项目专项基金“天津市城市雨水综合利用及技术措施研究”(KY2009-25)

作者简介: 邢国平(1955—), 男(汉族), 天津市人, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为城市雨水资源化与综合利用技术措施研究。E-mail: xgp@tju.edu.cn。

通信作者: 李爽(1987—), 女(汉族), 河南省偃师市人, 硕士研究生, 主要研究方向为城市雨水综合利用。E-mail: sunmay051109@163.com。

屋面及不透水路面开始汇集雨水,通过管道流入小区雨水池,扣除雨水径流过程中的损失(蒸发、渗漏、初期弃流等),实际收集雨水量按径流量的 90% 计算<sup>[8]</sup>。假设雨水池设置在地下,不需考虑蒸发量,雨水池当日所容纳的水量应为汇水面收集到的雨水量加上雨水池中原有的储蓄水量,再减去当日所用去的雨水量(图 1)。图 1 雨水池日水量平衡模型每日雨水需水量平衡计算公式<sup>[9-11]</sup>为:

$$W_{t+1} = Q_t + W_t - D \quad (0 \leq W_{t+1} \leq V) \quad (1)$$

$$W_{t+1} = 0 \quad (W_{t+1} < 0) \quad (2)$$

$$W_{t+1} = V \quad (W_{t+1} > V) \quad (3)$$

$$U = D - W_{t+1} \quad (W_{t+1} < D) \quad (4)$$

$$F = W_{t+1} - V \quad (W_{t+1} > V) \quad (5)$$

式中: $W_{t+1}$ ——第  $t$  天结束时储存在储蓄池中的水量( $m^3$ );  $W_t$ ——第  $t$  天开始时储存在储蓄池中的水量( $m^3$ );  $Q_t$ ——第  $t$  天从汇水面收集到的雨水水量( $m^3$ );  $D$ ——每日的需水量,即每日的用水量( $m^3$ );  $V$ ——雨水池的容积( $m^3$ );  $U$ ——每日需水量无法满足时的自来水补水量( $m^3$ );  $F$ ——雨水的溢流外排量( $m^3$ )。

当第  $t+1$  天的雨水蓄水量无法满足当天的雨水使用量时,该天的雨水储蓄池中的水量按零计算,当该天结束时雨水蓄水量大于雨水池容积时,该天的雨水最终蓄水量为雨水池的容积量,多余雨水可通过管道溢流外排。

$$R = 1 - \frac{P}{T} \quad (6)$$

式中: $R$ ——可满足每日用水量的雨水储蓄池容积的有效利用率(%);  $P$ ——雨水池空置或无法满足当日用水量的天数( $d$ );  $T$ ——当年中纳入计算的所有天数( $d$ )。

计算第  $t$  天的降雨量、蓄水池的储存量以及雨水池的空置天数,即可得出假设雨水池容积下,为满足不同用水需求条件下该雨水池容积的可行性,即该容

积的有效使用率。

### 1.2 雨水池容积利用率计算

1.2.1 降雨资料 天津市地处华北平原的东北部,属严重缺水地区,多年平均降水量为 566.5 mm,且雨水多集中在 6—8 月份,占全年总降水量的 70%~73%。

对天津市 1970—2010 年的降雨数据进行统计分析,选取最大年降雨量、平均年降雨量、最小年降雨量数据详见表 1<sup>[12]</sup>。

表 1 天津市最大年、平均年和最小年降雨量

| 项目            | 年降雨量/mm |
|---------------|---------|
| 最大降雨量(1977 年) | 1 091.1 |
| 平均降雨量(2009 年) | 566.1   |
| 最小降雨量(1982 年) | 324.2   |

1.2.2 有效利用率计算 该住宅小区占地面积  $4.5 \times 10^4 m^2$ ,其中各汇水面面积状况及每日用水量<sup>[2]</sup>详见表 2。

表 2 汇水面面积及市政用水定额

| 汇水面  | 面积/<br>$10^4 m^2$ | 占总面积<br>比例/% | 径流<br>系数 | 需水量/<br>( $L \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ) |
|------|-------------------|--------------|----------|---|
| 屋顶   | 1.7               | 38           | 0.9      |   |
| 硬化路面 | 1.4               | 31           | 0.9      | 2.5                                       |
| 绿地   | 1.4               | 31           |          | 2.0                                       |
| 总面积  | 4.5               |              |          |   |

分别假设小区雨水池的不同容积,选取市政杂用水的用途分别为绿地灌溉、道路浇洒、以及同时满足以上两者的需求,天津市全年冬季不实施绿地灌溉及道路浇洒,因此计算天数从 3 月 1 日至 10 月 31 日,共 245 d。根据公式(1)~(5)计算不同雨水池容积及不同用水需求条件下,雨水池容积可满足需求的天数,利用公式(6)计算出该容积下,雨水池容积的有效使用率,结果详见表 3。

表 3 天津市雨水池容积有效使用率

%

| 年型  | 雨水用途      | 雨水池容积/ $m^3$ |      |      |      |      |      |      |       |       |       |
|-----|-----------|--------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
|     |           | 100          | 200  | 300  | 400  | 500  | 600  | 800  | 1 000 | 1 200 | 1 500 |
| 平均年 | 灌溉绿地      | 47.3         | 59.2 | 69.0 | 73.4 | 78.4 | 82.0 | 84.9 | 88.2  | 90.4  | 91.6  |
|     | 浇洒路面      | 42.9         | 52.7 | 56.0 | 66.1 | 67.8 | 71.8 | 78.0 | 81.6  | 83.2  | 84.7  |
|     | 灌溉绿地及浇洒路面 | 32.2         | 36.7 | 42.4 | 45.3 | 49.0 | 52.7 | 57.1 | 60.4  | 62.9  | 64.9  |
| 最大年 | 灌溉绿地      | 60.1         | 73.5 | 81.7 | 87.1 | 93.4 | 96.3 | 98.8 | 100   | 100   | 100   |
|     | 浇洒路面      | 54.3         | 63.3 | 71.5 | 77.4 | 83.4 | 88.9 | 93.7 | 98.2  | 100   | 100   |
|     | 灌溉绿地及浇洒路面 | 43.6         | 51.7 | 58.3 | 64.2 | 68.7 | 72.0 | 77.1 | 81.6  | 85.3  | 88.4  |
| 最小年 | 灌溉绿地      | 32.7         | 41.3 | 49.2 | 54.4 | 60.0 | 62.4 | 64.3 | 65.8  | 66.9  | 68.3  |
|     | 浇洒路面      | 28.7         | 35.0 | 41.0 | 46.0 | 50.9 | 53.7 | 57.2 | 60.1  | 62.3  | 63.7  |
|     | 灌溉绿地及浇洒路面 | 13.4         | 17.2 | 19.7 | 22.3 | 24.2 | 25.9 | 29.6 | 31.5  | 32.7  | 34.3  |

## 2 雨水池容积不同用途的作用分析

根据表 3 的计算结果可以看出,随着雨水池容积的增加,雨水池的有效利用率随之增大,说明雨水池容积越大,储存的雨水越多,可利用的水量就越多。当容积增大到一定体积后,其利用率的增加却显著放缓,反而增加了修建雨水池的成本以及后续维护费用。

在 3 种不同的降雨条件下,根据雨水的不同利用途径绘制雨水池有效使用率曲线图(图 1—3)。由图 1—2 可以看出,汇流收集的雨水如果只用于灌溉绿地或只用于道路浇洒,在最大降雨年,雨水池容积为 800 m<sup>3</sup> 时,雨水池的有效率就接近了 100%。说明在此容积下,不用自来水补给就可以满足需求。在平均降雨量年份下雨水池容积为 1 500 m<sup>3</sup> 时,雨水池有效容积也几乎可以满足全年的灌溉用水及 80% 的道路浇洒用水。而在最小降雨量年份,满足任一个雨水用途时,也只能带来 60% 左右的有效使用率,且随着雨水池容积的增大,其使用率增加趋势逐渐趋于平缓。由图 3 可以看出,蓄水池中的雨水同时用于绿地灌溉和道路浇洒时,3 种不同降雨条件下雨水池的使用率均随着容积的增大而增加,但其 1 500 m<sup>3</sup> 时的利用效率在平均年和最小年也只达到了 65% 和 34%。

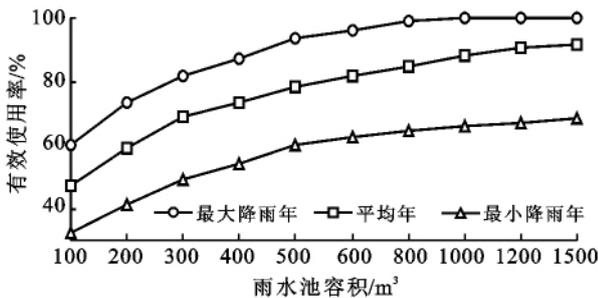


图 1 只用于绿地灌溉时的雨水池有效使用率

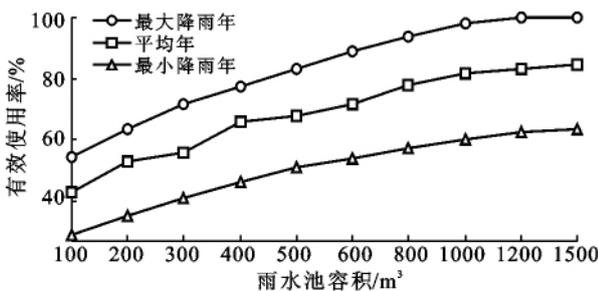


图 2 只用于道路浇洒时的雨水池有效使用率

在平均降雨量年份下,根据雨水池空置或不能满足用水需求的天数,计算不同容积下全年自来水的补给量。由图 4 可以看出,虽然随着池容的增大,满足

不同需求条件下的自来水的补给量有所降低,但收集后的雨水同时用于绿地灌溉和道路浇洒,仍然需要较大的补给量,且随着池容的增大,补给量减少的趋势放缓,这说明在增加建设投资的基础上,水量的节约及经济收益并未与之产生同样的效果。而在满足单一需水量条件下,水量的节约效果较为显著,结合图 1—2 可以看出,当雨水池容积为 800 m<sup>3</sup> 时,其有效利用率几乎可以达到最大值。

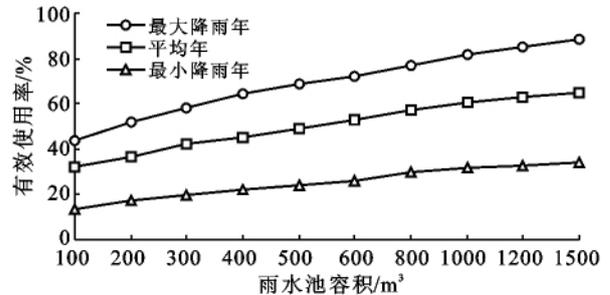


图 3 同时用于绿地灌溉和道路浇洒时雨水池有效使用率

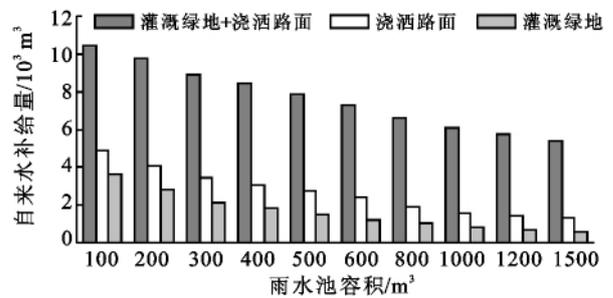


图 4 平均降雨量年份下不同用途的自来水补给量

雨水池按照土建工程费用及节约水量计算其运行效益<sup>[13]</sup>。其中,土建工程费用按照天津市土建造价 800 元/m<sup>3</sup> 计算。年耗运行费用项目包括动力及维护管理费,共折合 0.7 元/m<sup>3</sup>。雨水售价按自来水价格考虑,按 4.5 元/m<sup>3</sup> 计算。间接经济效益包括雨水回用减少面源污染造成的损失、减少城市排水设施的投资与运行费用,以及缺水造成的国家财政收入的损失等,按 6.38 元/m<sup>3</sup> 计算<sup>[14]</sup>。设施的使用年限为 30 a<sup>[2]</sup>,折旧残值取零,贴现率为 5%。计算平均年只用于道路浇洒时,500 m<sup>3</sup> 雨水池动态效益费用比值最大。因此从经济效益方面考虑,也可以看出,500 m<sup>3</sup> 是最优的建设规模。

## 3 结论

在进行雨水集蓄利用系统设计中,雨水池的规模往往是雨水利用工程可行与否的关键。采用日降雨量代替传统的年降雨量数据,用日水量平衡模型代替估算公式,计算城市小区雨水池的容积,能够更加准

确反映一定汇水面积上收集雨水的可利用率,以及雨水池的有效使用率,从而更加准确地计算出雨水池的有效容积,节省建设费用。

雨水池的规模与当地降雨条件、汇水面积和雨水使用途径等有关。根据天津市的实际情况,按照平均降雨量年份计算,占地面积  $4.5 \times 10^4 \text{ m}^2$  的住宅小区建造  $500 \text{ m}^3$  的雨水池即可满足单一用水途径的需求而不需自来水补给;为同时满足绿地灌溉和道路浇洒的目的,小区内雨水池建设容积将会过大,且在天津市降雨条件下无法满足水量需求;当小区内绿地为下凹绿地时,可按照浇洒道路的用途修筑雨水池。在不同的降雨季节或年份,可调整小区雨水的使用途径,以达到雨水池使用效率的最大化。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 徐一茗. 合流制管道溢流的影响因素及其污染治理措施[J]. 山西建筑, 2010, 3(34):170-172.
- [2] 车伍, 李俊奇. 城市雨水利用技术与管理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [3] 王建龙, 车伍, 易红星. 基于低影响开发的都市雨洪控制与利用方法[J]. 中国给水排水, 2009, 25(14):6-9.
- [4] 全新峰, 张克峰, 李秀芝. 国内外城市雨水利用现状及趋势[J]. 能源与环境, 2006(1):19-21.
- [5] 周玉文. 关于城市雨洪利用问题的探讨[J]. 给水排水, 2007, 33(7):1-3.
- [6] 车伍, 张燕, 李俊奇, 等. 城市雨洪多功能调蓄技术[J]. 给水排水, 2005, 31(9):25-29.
- [7] 俞珏瑾. 雨水调蓄池容积的简易计算方法探讨[J]. 城市道桥与防洪, 2011, 9(9):97-102.
- [8] 《建筑与小区雨水利用工程技术规范》编制组. 建筑与小区雨水利用工程技术规范实施指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [9] Imteaz M A, Ahsan A, Naser J, et al. Reliability analysis of rainwater tanks in Melbourne using daily water balance model[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2011, 56(1):80-86.
- [10] Khastagir A, Jayasuriya N. Optimal sizing of rain water tanks for domestic water conservation[J]. Journal of Hydrology, 2010, 381(3/4):181-188.
- [11] Mun J S, Han M Y. Design and operational parameters of a rooftop rainwater harvesting system: Definition, sensitivity and verification[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 93(1):147-153.
- [12] 王宁. 天津市暴雨分布规律分析与设计暴雨问题的研究及应用[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [13] 宁静. 上海市短历时暴雨强度公式与设计雨型研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [14] 李俊奇, 车伍, 孟光辉, 等. 城市雨水利用方案设计与技术经济分析[J]. 给水排水, 2001, 27(12):25-28.
- [11] 危向峰, 段建南, 胡振琪, 等. 层次分析法在耕地地力评价因子权重确定中的应用[J]. 湖南农业科学, 2006(2):43-46.
- [12] 陈端吕, 董明辉. GIS 支持的土地利用适宜性评价[J]. 国土与自然资源研究, 2009(4):44-46.
- [13] 吴燕辉, 周勇. 土地利用规划中的土地适宜性评价[J]. 农业系统科学和综合研究, 2008, 24(2):232-235.
- [14] 张庭伟. 控制城市用地蔓延: 一个全球的问题[J]. 城市规划, 1999, 23(8):44-48.
- [15] 陈江龙, 曲福田, 陈雯. 农地非农化效率的空间差异及其对土地利用政策调整的启示[J]. 管理世界, 2004(8):37-42.

(上接第 119 页)

- [6] 马享优, 宋治文, 陆文龙, 等. 基于 WebGIS 的天津滨海新区农用地评价信息系统开发应用[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(19):10455-10457.
- [7] 吴勤书, 吴国平, 宋崇辉, 等. 基于 GIS 的城市化背景下的村域农用地评价[J]. 现代测绘, 2007, 30(2):3-6.
- [8] 牛彦斌, 周亚鹏. GIS 支持下的耕地地力评价方法研究[J]. 河北农业大学学报, 2004, 27(3):84-88.
- [9] 曹茂林. 层次分析法确定评价指标权重及 Excel 计算[J]. 江苏科技信息, 2012(2):39-40.
- [10] 杨明龙, 潘萍. 层次分析法在耕地质量评价中的应用[J]. 昆明冶金高等专科学校学报, 2010, 26(3):23-26.