

雨水控制与利用系统与小区域水循环修复理论*

张亚峰¹ 高乃云¹ 冯旭东²

(1 同济大学环境科学与工程学院, 上海, 200092; 2 华东建筑设计研究院有限公司, 上海, 200002)

摘要: 城市化进程中, 对自然水循环得无知与漠视, 致使水系循环的末端遭受严重的破坏, 继而引发城市内涝与城市热岛。论文以上海地区某项目为实际案例, 介绍城市雨水控制与利用系统设计的理念与要点; 通过对多年降雨量及降雨水质数据的分析, 提出以增加入渗为主要修复手段, 根据水量平衡计算结果合理设计系统形式; 结合国内外发展现状与研究趋势, 以自然状态下雨水循环为参照, 提出小区域水循环修复理论; 根据小区域水循环主要载体模型 (GSPAC), 研究雨水循环的各个环节: 降雨、蒸腾、蒸发、径流、入渗的耦合关系, 希望能够改善和修复由于建造给地块小区域水循环所带来的破坏, 还城市一个“吸水”、“透气”的“皮肤”。

关键词: 雨水; 控制系统; 利用系统; 小区域水循环; 水量平衡; 入渗; 修复理论

Rain Water Control and Utilization System with Plot Scale Water Circulation Repair Theory

Zhang Yafeng¹ Gao Naiyun¹ Feng Xudong²

(1 College of Environmental Science and Engineering, Shanghai 200092;
2 East China Architectural Design and Research Institute Co., Ltd. Shanghai, 200002)

Abstract: During the process of urbanization, the ignorance and indifference on the natural water circulation cause serious damages to the water circulation ends, and then result urban flood and urban heat island. A project of shanghai is studied in this thesis, the main ideas and key points of rain water control and utilization system are introduced; By analyzing of the quantity and quality of the several years rain water data, it is suggested that increasing infiltration is the main way of repair and rational design of the system should base on the water balance calculations; according to the development of both domestic and foreign, and referencing to the natural rain water circulation, plot scale water circulation repair theory is proposed; According to the main carrier model (GSPAC) of the plot scale water circulation, the coupling relationship of precipitation, transpiration, evaporation, runoff and infiltration of the water circulation are studied. This study aims at improving and repairing the destruction of the plot scale rain water circulation caused by the construction, and gives back the city a “permeable” and “breathable” skin.

Key words: rain water, control system, utilization system, plot scale water circulation, water balance, infiltration, repair theory.

一、引言

越来越多的科学家认为, 地球已经进入了一个崭新的发展时期“人类纪”, 人类活动的范围、规模及强度空前, 对环境的影响远超自然本身。其中与人类自身密切相关的影响是: 人类活动对水

* 本项研究工作得到了上海市科学技术委员会的资助, 课题编号为 11DZ2282400

循环, 水量平衡要素及水文情势的影响。随着城市化进程的加快, 大面积硬化路面、大型地下空间等, 导致城市透水区域迅速减少, 天然的雨水循环体系(蒸发、降水、地表径流、下渗、地下径流等构成的天然水循环系统)在城市区域被严重破坏。与此同时, 降雨事件随大气候事件(厄尔尼诺与拉尼娜)变化, 表现出暴雨频发, 暴雨强度增加等现象, 导致许多地区雨水设计数据与实际降雨数据失真, 超百年重现期降雨频发。上述两个因素的叠加, 引起了城市内涝的频发, 雨水控制与利用也越来越受到人们的重视。

城市的发展是以“让生活更美好”为原则, 而“美好生活”的最终表现形式应该是一种既可以满足人类需求又可以与自然和谐相处的可持续模式。在建筑建造的前后, 最大限度地保证小区域水循环系统不发生变化, 以自然状态下的小区域水循环为参照, 根据实际情况, 改善和修复由于建造给地块小区域水循环带来的破坏, 还城市一个“吸水”、“透气”的“皮肤”, 在降雨时, 可以对雨水起到“吸收”与滞留的作用, 在太阳照射时, 可以产生地表蒸发与蒸腾作用, 不仅可以降低雨水对城市排涝系统的冲击, 还可以减低城市热岛效应。

文章以上海地区某项目为实例, 介绍该项目的雨水控制与利用系统, 并结合该项目的研究成果与应用效果, 引出小区域水循环修复理论。项目投入运行约两年半时间, 经历过三个雨季, 目前运行状况良好。并在 2012 年 8 月 9 日成功地经受了台风“海葵”的洗礼。

二、雨水控制与利用系统

雨水控制与利用系统拥有两个功能: 控制与利用。对于非水源性缺水的区域, 如上海地域应该以控制为主, 利用为辅。

控制以尽量不增加地块外排水量为主要目的, 通过增加入渗, 增加调蓄等手段, 减少对市政雨水管网的冲击; 利用应该以增加地块蒸发为主要目的, 其余的回用方案要根据项目的实际情况确定, 经过详细的水量平衡计算, 设置经济、合理的回用方案。

(一)水量分析

水量分析是雨水控制与利用系统设计的第一步, 一般包括年降雨量分析、年可收集水量分析及年需水量分析三部分, 通常一个地区的年降雨量分析根据当地的气象资料进行。可收集水量则根据项目的实际情况结合地区的降雨资料计算。年需水量在项目考虑利用的前提下, 根据各系统的水量平衡计算得出。

1. 年降雨量分析

根据中国气象数据网站的数据提供的 1991~2005 年上海市日降雨数据显示: 最大日降雨量约 180mm。1991~2005 年日降雨量统计数据如图 1 所示:

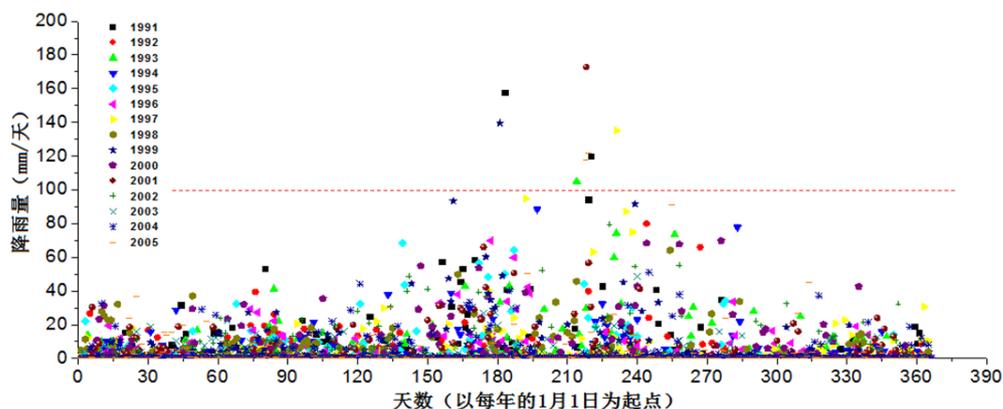


图 1: 1991~2005 年日降雨量统计数据 (mm/天)

图中的红色虚线表示日降雨量 100mm 分界线,从图 1 中可以看出,95%以上的降雨都小于 100mm,而在城市生活中 95%的降雨是不会给我们带来内涝。所以可以认为现阶段城市的雨水排水体系有接纳 100mm 的降雨的能力;另外,最大的日降雨量在 180mm 左右,如果可以通过某种手段,让地块自行解决 100mm 的降雨,那么,即便是最高日降雨条件下,排放到市政的雨水也只有 80mm,应该在市政雨水排水能力范围内,所以初步认为 100mm 是一个系统设置的分界点(不同地区的分界点应该根据当地降雨资料分析得出)。

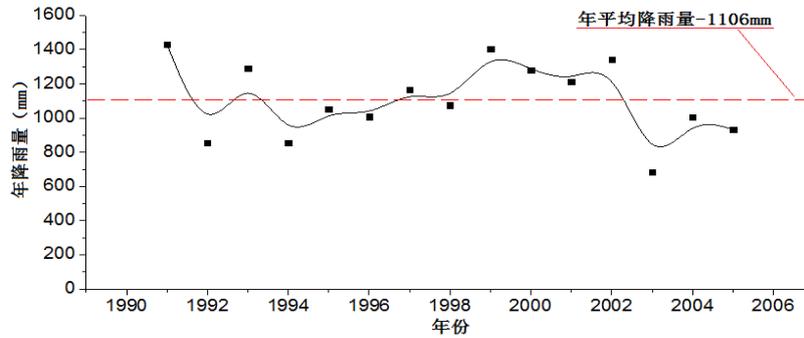


图 2: 1991~2005 年平均降雨量 (mm/年)

2. 可收集水量分析

降雨量分析涉及项目所有可接纳降雨的面,包括:地面及屋面。项目总面积约 66526m²,其中地面面积约 36417m²,建筑屋面面积约 30109m²。地面中包含:道路、绿化、停车场、水景等。

项目年设计雨水收集水量按照年平均雨水量 1100mm 计算(如图 2 所示),其中地面区域按照完全渗透考虑,折减率 100%。屋面草皮区域按照 10%折减,屋面其余区域不考虑折减。则项目年入渗雨水量与年最大可收集雨水量如表 1 所示:

表 1 年入渗雨水量与年最大可收集雨水量

序号	分类	最大雨水量 (m ³ /a)	折算后可收集雨水量 (m ³ /a)	备注
1	道路	22284.9	0	入渗
2	地面绿化	15787.2	0	入渗
3	地面水景	56.1	0	入渗
4	停车场	1930.5	0	入渗
	小计 1	40058.7	0	入渗
5	屋面绿化	16360.3	14724.27	10%折减
6	屋面水景	709.5	709.5	
7	硬质屋面	16050.1	16050.1	
	小计 2	33119.9	31483.87	
合计	小计 1+小计 2	73178.6	31483.87	

从表中可以看出,项目地块的年降雨量为 73178.6 m³,其中 41694.73 m³ (73178.6-31483.87=41694.73m³)入渗回补地下水或植物吸收蒸腾,可收集的量为 31483.87m³。

3. 可回用雨水量分析

实际上,可收集雨水不完全等于可回用雨水。有些量很小的降雨,无法被收集;有些连续、量大的降雨不能全部收集。通过计算,最终得到实际可收集雨水量。具体如图 3 所示:

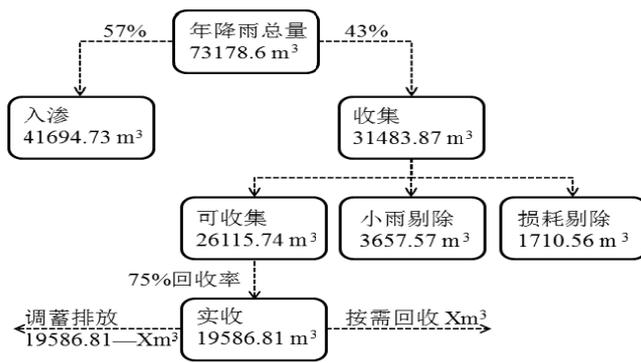


图 3 雨水控制与利用系统水量分配



图 4 屋面雨水采样

从图 3 中可以看出本项目 57% 的降雨自然入渗，43% 的降雨拟收集；拟收集的降雨中，有 5.4% 被屋面绿化消耗，有 11.6% 无法被收集（雨量小于 2mm 的降雨^[2]），剩余 83%（1-11.6%-5.4%）的降雨量可被收集，参照相关工程^[2]，取不可用雨水率为 25%，折减后得实际可收集雨水量 19586.81m³。最终可收回雨水水量要根据实际运行情况确认。

(二) 水质监测

根据项目的需求，针对上海地区降雨雨水水质进行了长达 2 年的监控，监控的范围为屋面雨水。结果显示上海市屋面雨水水质较好，大部分情况下的屋面雨水水质指标满足《城市杂用水水质标准》道路清扫及城市绿化的水质标准，具体监测数据如下表所示：

表 2 城市屋面雨水水质数据

取样点	PH	COD _{mn} (mg/L)	NH ₃ -N (mg/L)	浊度 (NTU)	SS (mg/L)
1	7.3	5.73	0.54	1.53	94
2	7.7	3.82	1.09	1.82	72
3	7.8	3.91	0.42	1.63	83
4	7.6	4.53	0.18	2.53	91
5	7.5	6.75	0.35	3.73	87
6	7.5	6.48	0.47	6.72	76
7	7.7	3.11	0.29	1.73	58
8	7.7	4.53	0.19	0.99	108
国标	6.0~9.0	10 (BOD ₅)	10	5	1500 (TDS)

图 4 左边是屋面雨水水样，右边是纯净水。从感官上来说，屋面雨水水质比较好。

通过上述的雨水水质监测，根据项目的实际情况，设置经济有效的回用处理工艺。

1. 系统设计

设计范围包括：建筑、水景、道路、绿化、停车场等。根据水量分析与水质监测结果进行系统设计，包含透水性设计、调蓄设计、回用设计及管理运行方案设计。

2. 透水设计

除建筑和水景外，道路、绿化、停车场均设置透水措施，所有道路均采用由炼钢废炉渣为原料的透水材质铺设（如图 5 所示），该材质以钢渣为主要骨料，根据设计参数要求适当配以天然砂、石或特殊集料，并以水泥和钢渣微粉为主要胶凝材料制成的路面砖，在砖体内部形成大量透气的微腔，



图 5 透水材质

可以在砖体铺设两面保持正常水、气循环。透水材质的孔隙率在 15%~20%之间[3]，综合考虑地块土壤的入渗系数、需要调控的雨水量及可以设置透水地面的面积等因素后，计算透水措施的蓄水能力。

3. 管路及调蓄设计

地块内的雨水管路系统主要负责收集和排放屋面雨水，屋面雨水经过室内雨水收集系统收集后，排至室外雨水系统。室外雨水系统有两路雨水管：一路为雨水收集管路，一路为雨水排放管路，收集管路与排放管路之间设置五个分散的雨水调蓄池。收集管路负责将屋面雨水收集至总体调蓄池，调蓄池之后是排放管路，从调蓄池后接出，最终排放至市政雨水管路接口；排放管路主要负责排放超设计调蓄容积的雨水。根据透水材料的性能与对降雨量的研究，项目针对透水区域的雨水不再设置雨水排水管路系统，而以透水材料的渗透为主要排水措施，总体未设置雨水收水口。

4. 管理运行设计

雨水控制与利用系统的管理运行策略如同系统的使用说明书，系统的良好运行与运行策略的有效执行有密切的关系。对于雨水控制与利用系统应当在雨季期间，利用两次降雨的间隔时间段，有序的对调蓄池进行放空，以保证系统以最大的容积来调蓄下一次降雨的峰值。在暴雨与日照交替出现的季节，应该通过增加地面浇洒的方式，增加地块的雨水蒸发，一方面可以减少调蓄池内的雨水，一方面可以对周边环境降温。根据上述雨水水质的研究结果，屋面雨水可以直接冲洗路面。

三、小区域水循环修复理论

上述实例是对现阶段城市化进程中出现的内涝频发与城市热岛效应问题的小试实验，或者说是初探。旨在寻求一种可以有效解决上述问题，又可以满足人们需求的模式，那么究竟应该是一种什么模式？

《中国至 2050 年的水资源领域科技发展路线图》显示：水系统循环的主要控制要素及演化趋势是一个主要的研究方向^[4]；

小区域水循环主要是指：地块周边雨水循环的各个环节：降雨、蒸腾、蒸发、径流、入渗等之间的耦合关系。

小区域水循环修复理论主要针对未来建筑的生态化演变过程中所遇到的常规水系统生态化升级的问题，希望能够找出建筑建造对地块自然水循环生态的破坏，以及如何通过有效的整合屋面雨水、地表水景、浅层地下水等各种生态因素将这些破坏减小或消除，使得建筑物建造前后地块的水生态循环保持或基本保持与自然生态一样，使得建筑能够成为溶于大自然的生态元素，还城市一个“吸水”、“透气”的“皮肤”。

英国的生态及水文研究计划将小区尺度 (Plot scale) 的水、土壤、空气之间的循环关系研究作为修正全球气候模型的主要手段；

日本与德国等发展了雨洪控制和就地利用方面的理论与技术，日本在城市屋面修建雨水浇灌“空中花园”^[5]，期待能够改善城市热岛效应，德国的雨水利用标准已经发展到第三代。

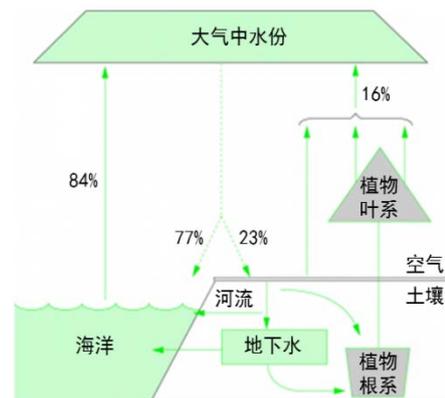


图 6 水循环分配比例

(一) GSPAC 研究模型

Groundwater-soil-plant-atmosphere continuum (GSPAC) 即为：地下水-土壤-植物-大气连续体，小区域水循环系统的主要介质就是 GSPAC。现有的研究表明：海洋蒸发量约占整个地球蒸发量的 84%，地面蒸发量约占 16%（如图 6 所示）；16% 的蒸发量即发生在 GSPAC 中。现阶段针对 GSPAC

中水分的分配与运移机理还不是十分明确,相应的研究也正在展开^[6],但是人类活动对 GSPAC 中水分分配与运移破坏的副作用在慢慢显现。

(二) 小区域水循环修复理论

在摸清 GSPAC 模型中的各个环节的水分分配与运移的基础上,根据现有的技术手段,修复建造后地块的 GSPAC 中被破坏的环节即为:小区域水循环修复理论。主要包含:入渗模块、蒸发模块、蒸腾模块、地下水回补模块、降雨模块等。传统的建造工艺多采用硬化路面及大面积地下空间的模式,这些模式直接破坏了 GSPAC 中入渗模块及蒸发模块,导致雨水入渗量减少,蒸发量降低;同时,大面积硬化路面带来植物覆盖面积的减少,同样减少了地块的蒸腾作用;入渗量的减少导致雨水对地下水回补量降低,降雨被迅速汇集排放地表水体,往往为了尽快排放雨水,不得不通过设置加压泵站来抬高雨水势能,增加地表水向江河的汇集速度,良好的小区域水循环系统遭到破坏。

随着城市化进程的发展,破坏效应开始叠加,问题开始显现,城市内涝频发,城市热岛越来越厉害等。然而传统的思维又将人们带进了死胡同:增加设计重现期,增大排水系统能力,增加泵站排水能力等。真正的解决方案应该是化整为零的思想,以小区域水循环主要载体(GSPAC)模型为基础,研究雨水循环的各个环节:降雨、蒸腾、蒸发、径流、入渗的耦合关系,通过一定的技术手段修复被破坏的小区域水循环模型,让城市的每一个地块恢复其原有的活力,恢复其对雨水的吞吐与吸纳能力,这才是持续有效的解决方案。

四、结论

城市雨水控制与利用系统应该以生态及可持续发展的观点出发,对自然抱以敬畏的心态,认识自然,顺应自然,模仿自然。以自然状态下雨水循环为参照,研究、完善小区域水循环修复理论。根据小区域水循环主要载体(GSPAC)模型,研究雨水循环的各个环节:降雨、蒸腾、蒸发、径流、入渗的耦合关系,改善和修复由于建造给地块小区域水循环所带来的破坏,还城市一个“吸水”、“透气”的“皮肤”,将城市内涝与城市热岛化解于城市的“每一寸肌肤”而不是排水管网。

参考文献

- [1] 李贺,李田,于学珍.上海市屋面雨水回用处理技术研究【J】.环境科学与技术,2006,29(03):97-98.
- [2] 游孟陶,徐竟成.城市大型公共建筑雨水利用问题【J】.南通纺织职业技术学院学报(综合版),2004,9(03):16-19.
- [3] Bhavana Viswanathana, Astrid Voldera, W. Todd Watsonb, Jacqueline A. Aitkenhead-Petersonc. Impervious and pervious pavements increase soil CO₂ concentrations and reduce root production of American sweet gum (*Liquidambar styraciflua*)【J】Urban Forestry & Urban Greening, Volume 10, Issue 2, 2011, Pages 133-139.
- [4] 中国科学院水资源领域战略研究组《中国至 2050 年水资源领域科技发展路线图》【M】.北京 科学出版社 2011.01.
- [5] やってみよう《Rain Water and You》【M】网络资料。
- [6] 石立波.浅层地下水模型及应用【J】.工程勘察,1995 1:20-21.