

# 基于SWMM模型的校园海绵化改造方案研究

曹万春, 张彬, 黄克虎

(江苏省城市规划设计研究院, 江苏 南京 210036)

**摘要:** 以昆山市某高级中学为例,对校园海绵化改造系统方案进行了研究。以问题和目标为导向,系统规划设计校园场地分区的海绵化改造策略,根据场地绿化、竖向等条件,结合景观需求合理确定汇水区径流组织形式,将校园分为分散式源头处理区、蓄水池收集处理区、生态湿地处理区,详细布置生物滞留池、蓄水池、生态湿地等海绵设施。同时,采用SWMM模型对设计方案进行校核,结果表明,校园海绵化改造方案合理可行,满足海绵城市建设目标要求,提高了项目规划设计科学性,也为其他校园海绵化改造项目的方案研究提供了参考。

**关键词:** 海绵城市; 校园改造; 雨水资源化利用; SWMM

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)15-0122-05

## Campus Sponge Transformation Scheme Based on SWMM Model

CAO Wan-chun, ZHANG Bin, HUANG Ke-hu

(Jiangsu Institute of Urban Planning and Design, Nanjing 210036, China)

**Abstract:** A high school in Kunshan City was taken as an example to study the scheme of campus sponge transformation system. Based on the problems and goals, sponge transformation strategies of campus area partition were systematically designed. According to the site greening, vertical and other conditions, runoff organizational form of the catchment area was reasonably determined combined with the needs of the landscape. The campus was divided into distributed source treatment area, reservoir collection and treatment area and ecological wetland treatment area, and sponge facilities such as biological detention pond, reservoir and ecological wetland were arranged in detail. Meanwhile, the SWMM model was used to verify the design scheme. The results showed that the campus sponge transformation scheme was reasonable which met the construction goals and requirements of sponge city. The practice not only improved the scientific nature of the project planning and design, but also provided a reference for the study of campus sponge transformation project.

**Key words:** sponge city; campus transformation; rainwater resource utilization; SWMM

在“海绵城市”概念提出之前,昆山市先后与美国和澳大利亚相关机构合作,实践了低影响开发(LID)技术和水敏性城市设计(WSUD)技术;“海绵城市”概念提出后,昆山市积极开展海绵城市项目实践,在2016年5月被评为首批江苏省海绵城市建设试点城市,并有住宅小区、市政道路、校园等3个项目类别入选全国《海绵城市建设典型案例》<sup>[1]</sup>。SWMM由不同计算模块和服务模块组成,可以模拟

不同时段任意时刻各汇水区产生径流的水量和水质,以及各管道或河道中流量、水深与水质等情况<sup>[2]</sup>。近年来基于SWMM的LID研究较多<sup>[3,4]</sup>,但以场次设计降雨模拟及水文效应分析居多。笔者以昆山市某高级中学改造项目为例,规划采用生物滞留池、蓄水池、雨水湿地等海绵措施,根据多年降雨资料采用SWMM模型进行连续性模拟,校核系统方案年径流总量控制率,并利用模型中雨水桶模块概

化模拟蓄水池,为系统方案设计提供技术支撑。

## 1 校园海绵方案设计

### 1.1 项目概况

昆山气候温和湿润,四季分明,雨量充沛,夏季暴雨频发,年平均降雨量为 1 133.3 mm,年平均蒸发量为 822.2 mm;属于典型平原河网城市,地势平坦,河道纵横交错,以圩区方式排水防涝。该高级中学所属玉山圩区水质好,内涝风险高,开发强度高。校园总用地面积约为 8.4 hm<sup>2</sup>,建筑密度为 24.4%,绿地率为 35%。校园改造建筑包括学生宿舍、食堂、艺体楼、教学楼、科技楼、教师宿舍以及相关配套用房等,改造建筑面积为 4.49 hm<sup>2</sup>。

### 1.2 下垫面条件

项目改造范围内绿化面积约为 1.22 hm<sup>2</sup>,屋顶面积约为 1.89 hm<sup>2</sup>,硬质铺装面积约为 2.21 hm<sup>2</sup>,路面面积约为 0.66 hm<sup>2</sup>,水域面积约为 0.1 hm<sup>2</sup>,校园内硬化面积比例接近 78%,现状综合径流系数约为 0.70,年径流总量控制率约为 48%。

### 1.3 设计目标

根据《昆山市海绵城市建设实施方案》分区分管控要求,玉山圩区的年径流总量控制率应为 70%,面源污染削减率为 55%。该项目属于老城区校园改造,校园绿化率不高且已建保留用地的占比大于 60%,对设计目标应适当下调,最终确定年径流总量控制目标为 65%,面源污染控制目标为 55%。昆山市年径流总量控制率对应的设计降雨量见图 1。

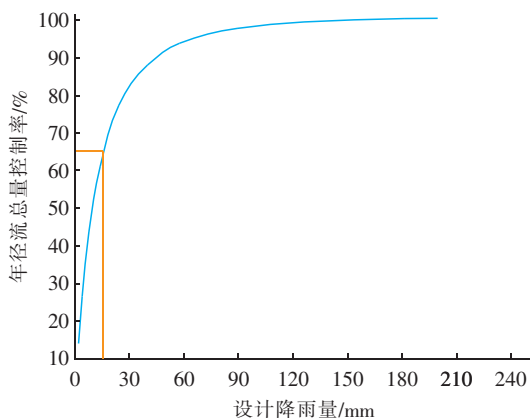


图1 昆山市年径流总量控制率与设计降雨量的对应关系

Fig. 1 Corresponding relationship between volume capture ratio of annual rainfall and design rainfall in Kunshan City

### 1.4 分区设计策略

根据校园内场地雨水径流方向、雨水管网、绿地

布局、校园改造方案,将校园改造范围划分为分散式源头处理区、蓄水池收集处理区和生态湿地处理区等 3 类雨水径流控制区,如图 2 所示。

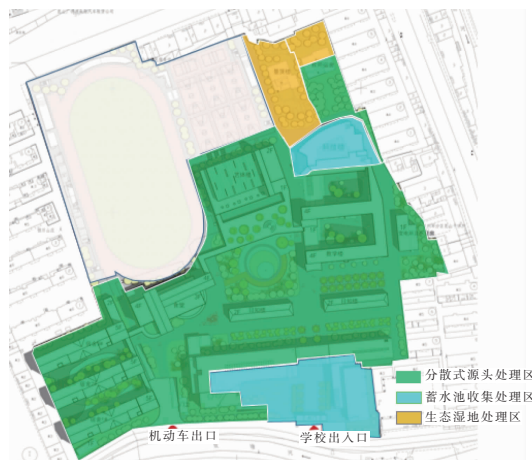


图2 校园分区分类划分示意

Fig. 2 Diagram of campus partition classification

分散式源头处理区:屋面、铺装、绿化雨水经植草沟或边沟收集转输后,进入雨水滞留池(过量雨水溢流进入市政管道),经净化处理后排入河道。分散式源头处理区包括宿舍、食堂、日知楼、教学楼、艺体楼、变电站等建筑,汇水面积约为 44 204 m<sup>2</sup>。

蓄水池收集处理区:屋面、绿化、铺装雨水收集后进入雨水蓄水池,一部分雨水经净化后储存,用于景观补水及绿化浇洒;一部分雨水溢流排入雨水管道。蓄水池收集处理区包括行政楼、行政综合楼、科技楼等,汇水面积约为 8 009 m<sup>2</sup>。由于蓄水池处理区的子汇水区下垫面硬化比例较高,且汇水路径长度接近,基于蓄水池调蓄原理和功能考虑,规划集中布设蓄水池,不影响年径流总量控制目标的实现。

生态湿地处理区:雨期屋面、绿化、铺装雨水经边沟收集进入生态湿地,净化后流入景观水体;非雨期抽引景观水体至生态湿地净化。生态湿地处理区包括景贤楼、教师宿舍等,汇水面积约为 3 673 m<sup>2</sup>。

## 1.5 海绵设施布局

### 1.5.1 汇水分区划分

综合校园建筑总平面图及景观方案,依据地形标高及雨水管网布局、建筑屋面分水线及落雨管位置等信息划分排水分区,并分区域进行海绵设施设计,每个分区都是一个独立的目标核算单元,共划分 31 个汇水分区。

### 1.5.2 设施规模计算

#### ① 设计调蓄容积

根据分析的下垫面情况,采用《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建》(试行)中的容积法分别计算每个分区的调蓄容积:

$$V=10\times H\times\psi\times F\tag{1}$$

式中: $V$ 为设计调蓄容积, $\text{m}^3$ ; $H$ 为设计降雨量, $\text{mm}$ ; $\psi$ 为综合雨量径流系数; $F$ 为汇水面积, $\text{hm}^2$ 。

② 生物滞留池的有效调蓄容积

生物滞留设施属于渗透功能设施,其设计规模计算公式为:

$$V_s=V-W_p\tag{2}$$

式中: $V_s$ 为渗透设施的有效调蓄容积,包括设施顶部和结构内部蓄水空间的容积, $\text{m}^3$ ; $V$ 为渗透设施进水量, $\text{m}^3$ ; $W_p$ 为渗透量, $\text{m}^3$ 。

生物滞留设施的渗透量根据渗透量公式计算:

$$W_p=K\times J\times A_s\times t_s\tag{3}$$

式中: $K$ 为改性土壤(渗透层)的渗透系数,取 $100\text{ mm/h}$ ; $J$ 为水力坡降,一般可取 $1$ ; $A_s$ 为有效渗透面积, $\text{m}^2$ ; $t_s$ 为渗透时间,指降雨过程中设施的渗透历时,一般可取 $2\text{ h}$ 。

本项目中大部分生物滞留池离建筑基础较近,底部需做防渗层,侧壁渗透量有限,可以忽略不计,根据生物滞留池的调蓄容积计算公式及相关参数,设计生物滞留池的调蓄容积为 $0.39\text{ m}^3/\text{m}^2$ 。

③ 设置规模及布局

海绵设施规模计算见表1,系统方案布设生物滞留池为 $1\,361\text{ m}^2$ ,生态湿地为 $51\text{ m}^2$ ,蓄水池调蓄舱为 $100\text{ m}^3$ ,海绵设施布局及径流组织见图3。设计年径流总量控制率可达到 $65.9\%$ ,设施的污染物去除率按 $70\%\sim 85\%$ 计,则设计面源污染削减率可达到 $55.7\%$ ,符合昆山市分区管控设计目标要求。

表1 海绵设施规模计算一览  
Tab.1 List of sponge facilities scale calculation

序号	分类	分区编号	汇水面积/m <sup>2</sup>	综合径流系数	年径流总量控制目标/%	设计降雨量/mm	所需调蓄容积/m <sup>3</sup>	绿色设施面积/m <sup>2</sup>	蓄水池调蓄容积/m <sup>3</sup>	面源污染削减率/%
1	分散式源头处理区	XZ2	3 511	0.64	75	22.5	50.7	129.9	—	63.8
2		ZH2	3 407	0.68	50	10	23.3	59.7	—	42.5
.....										
27	生态湿地处理区	JXL	2 750	0.84	40	8	18.5	—	—	26.0
28		JS3	923	0.28	88	39	10.2	51	—	74.8
29	蓄水池集中处理区	XZ1	3 102	0.77	65	16	38.4	—	100	55.3
30		ZH1	2 657	0.79	65	16	33.6	—		
31		JX4	2 250	0.8	65	16	28.7	—		
合计			55 886	0.69	65.9	16.2	660.2	1 412	100	55.7



图3 校园海绵设施布局示意  
Fig.3 Campus sponge facilities layout diagram

2 模型校核

2.1 模型构建

2.1.1 子汇水区概化

在SWMM模型构建过程中,对于汇水区相关参数进行概化,概化原则如下:①本方案各子汇水区面积的降雨是均匀分布的,降雨强度是相同的;②子汇水区依据小区现阶段总平面及竖向进行划分,各子汇水区汇集的雨水根据竖向设计就近排入海绵设施,进行雨水径流的控制;③根据汇水分区的下垫面特性,将下垫面分为透水地面、有洼蓄量的不透水地面和无洼蓄量的不透水地面,其中认为,透水地面不产生径流,有洼蓄量的不透水地面在降雨过程中首先满足地表的洼蓄量后再产生径流,无洼蓄量的不透水地面在暴雨初始即产生径流。依据汇水分区划分方案,校园场地概化为31个子汇水分区,模型构



建界面如图4所示。

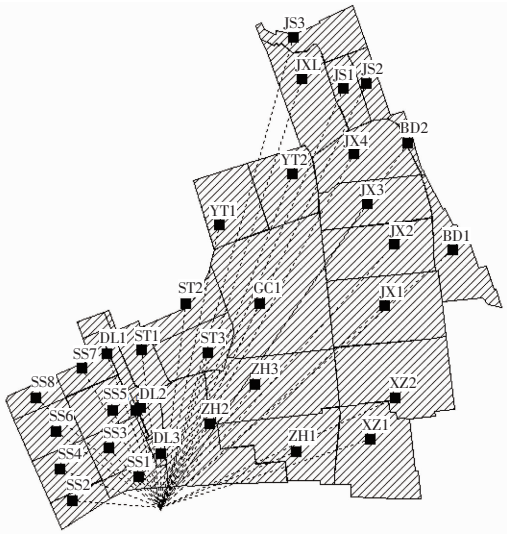


图4 模型概化示意

Fig. 4 Schematics of model generalization

### 2.1.2 参数设置

各子汇水区面积、不透水率、坡度、宽度具有显著的空间特征,可以通过测量计算得到。其他水文参数结合各汇水分区特征及地勘资料,依据SWMM用户手册而定。汇水分区参数设计取值如下:汇水分区面积取集水区面积,特征宽度取地表径流的径流宽度,集水区坡度取集水区的地面整体坡度,不透水率按照不同分区下垫面透水性确定,不透水地表曼宁系数取0.013,透水地表曼宁系数取0.15,不透水地表和透水地表的洼地存储分别取2.54和5 mm;采用Horton下渗模型,最大下渗速率取25 mm/h,最小下渗速率取0.36 mm/h,衰减常数取3(一般在2~7之间),土壤干燥时间取7 d(一般在2~14 d之间)。

方案中较多采用生物滞留设施,生物滞留设施主要参数设置如下:稳定后渗透系数取100 mm/h,土壤水平和垂直方向渗透系数分别取4.7、2.1 mm/h,滞留层厚度取100 mm,渗透层厚度取500 mm,过渡层厚度取100 mm,排水层厚度取200 mm,渗透层结构孔隙率取15%。模型中采用雨水桶模块模拟蓄水池,雨水桶高度取1 m、面积取100 m<sup>2</sup>。

### 2.1.3 降雨及蒸发输入

为更好地模拟该项目的年径流总量控制效果,采用SWMM模型进行连续模拟。选用2013年—2015年昆山市日降雨数据和日蒸发数据作为模型的降雨和蒸发序列,如图5所示。

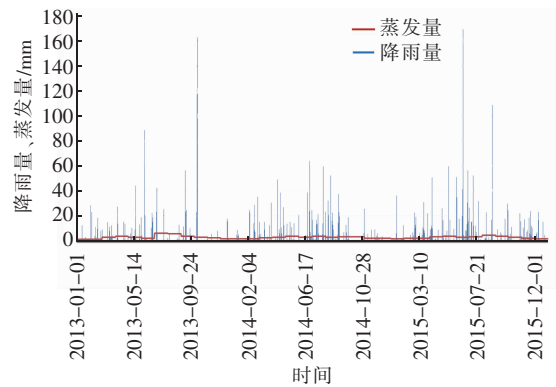


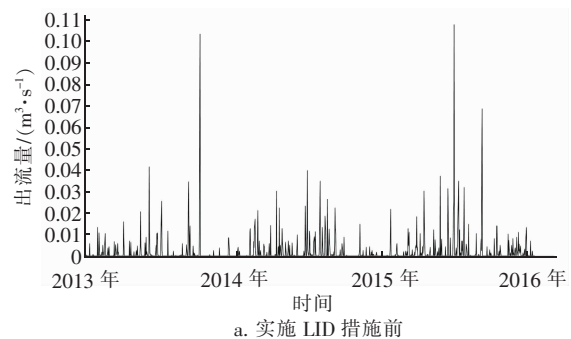
图5 2013年—2015年降雨及蒸发数据系列

Fig. 5 Data series of rainfall and evaporation from 2013 to 2015

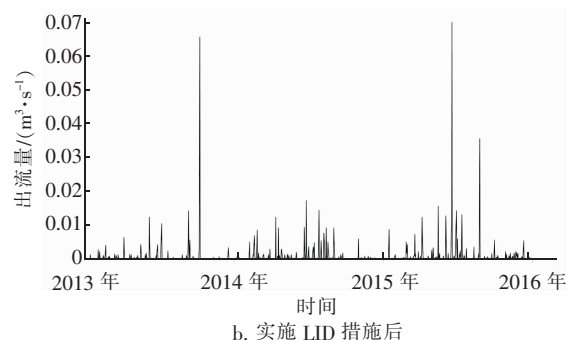
## 2.2 模型验证

### 2.2.1 设计目标校核

2013年—2015年场地总降雨量为229 030 m<sup>3</sup>,通过海绵设计方案后,场地直接出流总量由186 370 m<sup>3</sup>降至69 780 m<sup>3</sup>(如图6所示)。通过SWMM连续模拟结果分析,校园海绵设施能够实现69.5%的年径流总量控制率,满足65%的年径流总量控制率目标要求。



a. 实施LID措施前



b. 实施LID措施后

图6 实施LID措施前后场地排水口径流量的变化

Fig. 6 Change of drainage flow before and after implementation of LID measures

### 2.2.2 蓄水池规模校核

采用水力模型校核蓄水池容积,技术路线如图

7所示。

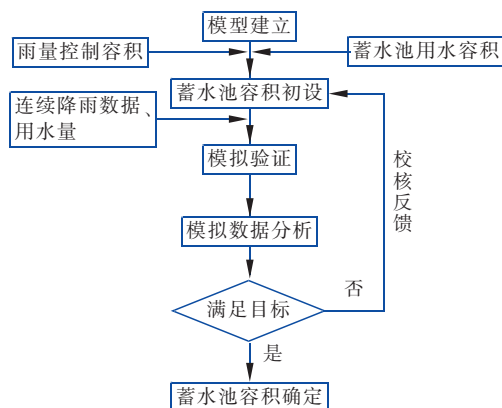


图7 蓄水池容量模拟校核技术路线

Fig.7 Simulation verification of reservoir capacity

根据校园雨水回用要求,系统方案规划布设 $100\text{ m}^3$ 蓄水池清水舱。根据径流控制要求,一般规定蓄水池调蓄舱蓄满后6 h或12 h后放空,为下一场暴雨径流腾出调蓄空间。由于蓄水舱为实现雨水径流控制目标及时排空,蓄水量难以实现全部回收利用。利用SWMM模拟蓄水池水量平衡,结果表明,调蓄舱年平均调蓄量为 $4\,825.8\text{ m}^3$ ,清水舱年平均可收集净化雨水量为 $4\,450\text{ m}^3$ ,年平均实际需水量为 $7\,199\text{ m}^3$ ,则雨水回用可靠性为61.8%,通常认为雨水回用可靠性在50%~80%即可被视为合理。蓄水池调蓄容积变化与雨水回用量的关系见图8。

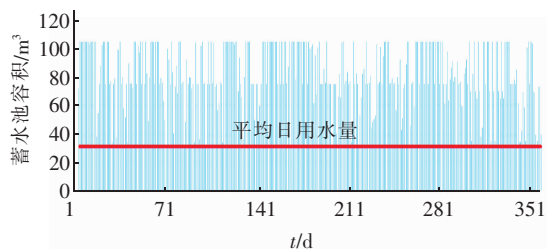


图8 蓄水池调蓄容积变化与平均日用水量的关系

Fig.8 Relationship between reservoir volume and average daily water consumption

### 3 结论

在分析昆山市某中学校园现状海绵城市建设条件的基础上,为实现地块年径流总量控制目标和面源污染削减目标,将校园分为分散源头处理区、蓄水池收集处理区、生态湿地处理区,详细布置生物滞留池、蓄水池、生态湿地等海绵设施,并通过SWMM模型校核方案,为海绵技术设施规模设计提供数据支撑,以保证规划的科学性。同时探索了雨水调蓄与

雨水利用多功能蓄水池的设计方案,通过SWMM模型连续模拟分析蓄水池的水量平衡,阐述蓄水池调蓄量与清水舱雨水回用量之间的关系,验证蓄水池多功能目标实现的可行性。

### 参考文献:

- [1] 章林伟. 海绵城市建设典型案例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.  
Zhang Linwei. Sponge City Case Studies[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017 (in Chinese).
- [2] Roseen R M, Ballester T P, Houle J J, et al. Seasonal performance variations for storm-water management systems in cold climate conditions[J]. J Environ Eng, 2009, 135(3): 128-137.
- [3] 王文亮, 李俊奇, 宫永伟, 等. 基于SWMM模型的低影响开发雨洪控制效果模拟[J]. 中国给水排水, 2012, 28(21): 42-44.  
Wang Wenliang, Li Junqi, Gong Yongwei, et al. LID stormwater control effect simulation based on SWMM[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(21): 42-44 (in Chinese).
- [4] 宋晓阳, 刘绪为, 李成江, 等. 基于SWMM模型对镇江玉带河汇水区域的模拟分析[J]. 中国给水排水, 2016, 32(23): 151-154.  
Song Xiaoyang, Liu Xuwei, Li Chengjiang, et al. Simulation of Zhenjiang Yudai River catchment based on SWMM[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(23): 151-154 (in Chinese).



作者简介: 曹万春(1980-), 男, 湖北宜昌人, 本科, 高级工程师, 主要从事给排水工程设计及海绵城市规划工作。

E-mail: 55824132@qq.com

收稿日期: 2018-01-04