

监测与评价

基于 MIKE URBAN 的中心城区内涝预测与评估——以上海市霍山-惠民系统为例

谢家强, 廖振良, 顾献勇

(同济大学环境科学与工程学院 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要:频发的内涝事件给城市雨水管理带来了极大的挑战,科学的管理决策广泛借助于模型进行评估。MIKE URBAN 具有所需数据少,建模与运行简单,精准等优点,在发达国家已经得到广泛的应用。然而我国中心城区(老城区)的地面硬化化率高,排水管网复杂、建模数据较少等情况突出,运用数学模型对内涝进行预测评估的经验相对欠缺。本文将 MIKE URBAN 应用于上海市中心城区的霍山-惠民排水系统,在多种降雨强度和降雨历时工况下,对系统管网改造方案中的瓶颈节点、管网超负荷运行以及内涝风险情况进行预测分析,指出在管网设计重现期内,扩增管径可作为缓解城市内涝的可行性措施。而解决城市内涝的根本途径是从源头控制径流产生量,恢复城市良性水文循环。研究结果为预测其他中心城区排水管网的改造评估提供了借鉴。

关键词:中心城区;MIKE URBAN;排水系统;内涝预测与评估

中图分类号:X43

文献标识码:B

文章编号:1006-8759(2016)05-0044-06

PREDICTION AND EVALUATION OF WATERLOGGING IN HIGHLY URBANIZED AREAS BASED ON MIKE URBAN: DEMONSTRATED ON THE EXAMPLE OF HUOSHAN- HUIMIN DRAINAGE SYSTEM IN SHANGHAI

XIE Jia-qiang, LIAO Zhen-liang, GU Xian-yong

(Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, Shanghai
200092, China)

Abstract:The frequent urban waterlogging events have brought great challenges to the urban rainwater management. The Scientific decision-making usually depends on model to assess. The MIKE URBAN model has been widely used in developed countries for predicting and evaluating urban waterlogging for its characteristics of little input data, simple and convenient modeling process, predicting accurately etc. However, few study is implemented in the highly urbanized areas of developing countries(such as China), where the rate of impermeable ground is higher, complex drainage network, limited modeling data. In this paper, MIKE URBAN is applied to build Huoshan-Huimin drainage system model in Shanghai. Design storm events in different conditions of rainfall intensity and duration are employed to simulate and analyze the bottleneck nodes, the overload networks and the waterlogging risk. The analytical results

收稿日期:2016-02-22

基金项目:上海市科学技术委员会科研计划项目课题-暴雨径流源头消减与内涝风险评估技术研究(13231201402)。

第一作者简介:谢家强(1990-),男,在读硕士研究生,主要从事城市排水管网改造及溢流污染控制研究。

presents that increasing the pipe diameter is the feasible strategy to alleviate urban waterlogging at some degree under the design return period rainfall. While the best and most radical solution for controlling waterlogging is to recover the urban benign hydrologic cycle and reduce the the peak runoff from the source. In brief, the research results are valuable for providing a guidance on prediction and evaluation of waterlogging and plan of drainage network for other highly urbanized areas in developing countries.

Key words: highly urbanized areas; MIKE URBAN; drainage system; prediction and evaluation of waterlogging

城市排水系统是收集并输送城市污水和雨水的重要基础设施^[1]。快速地城市化进程^[2]增加了不透水下垫面的比重,而排水基础设施的建设与维护却难以同步。加之气候变化的越发显著,造成城市易出现局部地区的“雨岛效应”,特别是在我国城市的中心城区,导致城市局部地区内涝事件频发^[3,4],引发城市交通瘫痪,严重影响了人们的生活质量与城市面貌^[5]。因而排水系统的改造将是缓解城市内涝的首要问题。同时准确的评估排水系统的运行能力,快速识别瓶颈节点、管网超负荷运行以及内涝风险情况,也将是判断改造方案可行的关键点。

目前国内外学者针对城市内涝已开展了大量的研究,并广泛借助排水管网模型对各种控制策略进行评估。李彦伟^[6]等应用 SWMM 评估了雨水管网的运行现状,提出采用扩增管径和提高节点高程来缓解节点溢流和管道过载的策略;王喜东^[7]利用 Infoworks 和 MIKE11 建立了香港岛南区的雨水管网模型,对管网改造方案进行优化;此外 Chen A et al^[8]采用多层次粗网格的方法建立了 2D 地表洪涝模型,可以更加准确地模拟地表积水的动态变化过程。近期国外研究^[9,10]集中于将实时控制(RTC)技术与管网模型结合,建立起远程控制与实地监测间的反馈控制系统,使排水系统的各组成部分协调运行,从而优化系统运行工况。

排水系统模型可作为城市雨洪管理分析与决策的重要辅助工具,不同模型在水力模拟方面各有优缺点^[11,12];但大部分模型仅在径流或管网模拟等某单方面表现出优势,因此模拟过程常常是孤立的,缺乏从系统的角度进行综合集成模拟,而集成模型耗费大量的工作、时间等收集数据,且集成模型之间也存在数据格式差异性的难点。相比其他模型,MIKE URBAN 具有较高的技术集成度,广泛的数据接口,建模与运行简单、精准等优点,

不仅可以模拟城市排水管网的运行情况,还可以实现二维地面洪水的演算。在发达国家该模型已被广泛应用于城市排水管网的模拟评估^[13,14],此外也适用于数据资料有限的发展中国家^[15,16],但在我国中心城区运用 MIKE URBAN 模型对内涝进行预测评估的经验相对欠缺。

本文将 MIKE URBAN 应用于上海市中心城区的某合流制排水系统改造方案的模拟评估,在不同的降雨强度和历时条件下,分析了改造方案的瓶颈节点、管网超负荷以及内涝风险情况,为快速识别内涝,预测其他中心城区排水管网的改造评估提供借鉴。

1 研究方法

MIKE URBAN 是丹麦水力研究所(DHI)开发的排水管网模拟软件。本研究中主要应用 MIKE URBAN 中的径流模型与管网模型。

1.1 径流模型

MIKE URBAN 提供了四种常用的径流计算模型:时间/面积模型、动力波模型-非线性水库、线性水库模型、单位水文过程线模型。由于数据资料有限,本研究采用最简单的时间/面积曲线模型。该模型考虑影响径流产生的主要因素包括:初损、水文衰减系数以及时间/面积曲线类型。水文衰减系数表示降雨持续过程中蒸发、洼地存储、植被拦截等造成的降雨损失量。时间/面积曲线类型则决定了径流计算路径,该模型采用等时间步长(Δt)将径流过程离散化,根据模型概化的子汇水区形状自动选择相应的时间/面积曲线(1)^[17]。

$$\begin{cases} y = 1 - (1-x)^{\frac{1}{a}}, 0 < a < 1 \\ y = x^a, 1 \leq a \end{cases} \quad (1)$$

式中: x -集水时间无量纲化值; a -时间/面积曲线系数;

图 1 为常用的三种时间面积曲线:1)

TACurve1 - Rectangular (a = 1); 2) TACurve2 - Divergent (a=0.5); 3) TACurve3- Convergent (a=2);

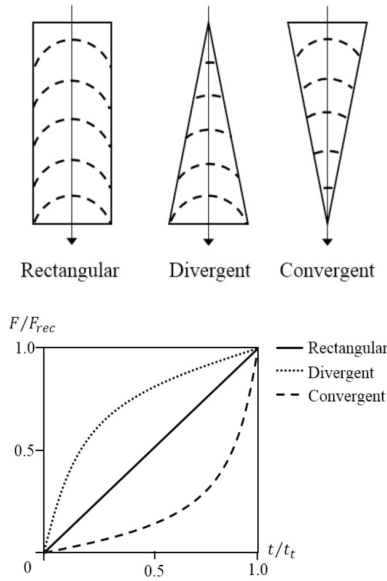


图1 常用的三种时间面积/曲线

1.2 管网模型

MIKE URBAN 将管流看作一维模型,描述管网非恒定流运动的控制方程为:Saint-Venant equations(2)。:选用适用范围广动力波计算路径,充分考虑了管网中流态变化剧烈,回水效应等过程。方程组的数值求解则选用无条件稳定的六点隐式差分交替格式。

质量守恒方程: $\frac{\delta A}{\delta t} + \frac{\delta Q}{\delta x} = 0$

动量守恒方程:

$\frac{1}{gA} \frac{\delta Q}{\delta t} + \frac{Q}{gA} \frac{\delta}{\delta x} (\frac{Q}{A}) + \frac{\delta h}{\delta x} = S_0 - S_f$ (2)

式中:A-过水断面面积 (m²);Q-管流流量 (m³/s);t-时间坐标 (s);x-管道堰水流方向长度 (m);g-重力加速度 (m/s²);h-管道水深(m);S₀-管道坡度;S_f-水力坡度;

1.3 率定与验证

考虑到监测的方便,选择与降雨同步的泵站前池水位作为模型参数率定和验证的指标。在合流制排水系统中,雨前池的旱季水位变化情况对系统在降雨期间的运行也具有影响,也将作为率定与验证的重要部分。本研究采用确定性系数 R² (3)来判断实际监测和模拟结果的拟合一致性。R² 越接近 1,表明监测值与模拟值的一致性越好。在模型的率定过程中,反复调整模型参数:降雨初

损,水文衰减系数,地面径流平均流速,曼宁系数,使 R² 尽量接近 1。在率定的基础上,选择实际监测降雨以及泵站水位数据进行验证。通常情况下,当验证结果中 R² ≥ 0.9,可认为模型参数可靠性较好。

$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (h_t^f - h_{avg}^f)(h_t^s - h_{avg}^s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (h_t^f - h_{avg}^f)^2 \sum_{i=1}^n (h_t^s - h_{avg}^s)^2}} \right)^2$ (3)

式中:h_t^f为实际监测水位值 (m);h_{avg}^f为实际监测平均水位值(m);h_t^s模拟水位值(m);h_{avg}^s模拟水位平均值(m)。

2 案例研究

2.1 区域概况

上海市杨浦区属于高度城市化的中心城区。其中霍山和惠民排水系统属于年代已久的合流制系统,设计重现期为 1 年。由于两个排水系统部分支管相互混接,常作为一个整体进行运行调度。系统末端设置截流泵,截流污水纳入两港截流工程污水总管,过量的污水(雨污混合水)由雨水泵直接排入杨树浦港。现状霍山和惠民排水系统的服务面积分别为 1.1 km²、0.88 km²,后期规划拟将杨树浦路与黄浦江北岸间的 0.59 km²划入该排水系统,并拟建丹东泵站。研究区域的详细概括如图 2 所示,泵站的概况如表 1 所示。目前霍山和惠民排水系统的综合径流系数分别为 Φ=0.6,Φ=0.7,降雨绝大部分产生径流,快速汇集到排水系统。尽管区域内管网已基本普及,但管网达标率仅约为 50%,难以满足现状排水的需求,因此很有必要借助排水系统模型对管网改造方案进行预测分析,提出科学合理的指导意见。

2.2 数据收集

排水系统模型的建立需要收集从降雨径流产生,管网输移,到末端排放的数据资料。主要包括以下几方面:

研究区域地形拓扑,管网的基本水力参数等数据:由上海排水公司提供,主要以电子地图的形式存储在 ArcGIS Geodatabase 数据库中,方便数据的输入与管理;

用地类型的水文参数:通过前期人工降雨实验研究了上海市中心城区典型下垫面的动态径流的产流规律,以及结合文献资料,查阅各类土地利用类型的不透水率水文参数:建筑 85~95 %(95

%,道路 80~90 %(85 %),绿地 15~25 %(20 %),开发用地 60 %,广场 70~80 %(75 %),水面 0 %。(括号中参数为本研究取值)

旱季居民生活污水量:区域人口密度约为 220 cap/ha(2012 年上海市政府统计资料),综合用水定额为 220L/(capod),人均污水定额按照用水定额的 90 %计算。

实际降雨监测数据以及对应的泵站运行数据(<http://www.smsc.sh.cn/indexpage.shtml>)。

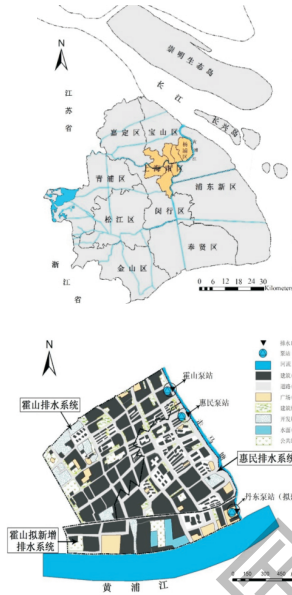


图 2 研究区域排水系统概况

表 1 研究区域排水泵站的概况

排水系统	水泵类型	流量 m ³ /s	水泵台数	单泵流量 m ³ /s
霍山 1.10km ²	雨水泵	6.90	3	2.3
	截污泵	0.4	1	0.4
丹东 0.59 km ²	雨水泵	5.52	3	1.84
	截污泵	0.34	1	1
惠民 0.88 km ²	雨水泵	5.52	3	1.84
	截污泵	0.34	1	1

2.3 排水系统模型的建立、率定与验证

2.3.1 模型建立

本研究中排水系统模型是建立以下假设基础上:①区域内降雨强度处处相等;②选取所有主干管和干管上的雨水井作为节点;③考虑设定旱流量作为基流,保证了降雨期前管道中已经有部分积水,符合强排系统实际情况;④径流按就近原则排入的节点。

运用 MIKE URBAN 建立排水系统模型所需要的基础数据,可由 ArcGIS 数据接口快速导入;

子汇水区的划分是以概化的检查井为中心,按照泰森多边形原则划分,并自动就近接入管网检查井;子汇水区的综合不透水率计算方法是根据子汇水区中所包含的各种土地利用类型的透水率以及面积权重进行加权求得。图 3 分别展示了现状排水系统模型和规划改造方案排水系统模型。两个模型的概化统计结果如表 2 所示:

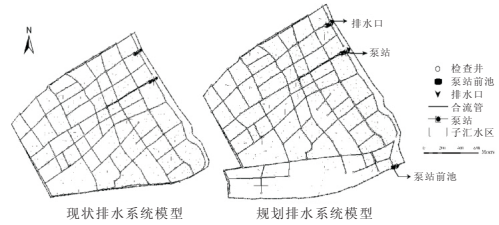


图 3 左图为现状排水系统模型,右图为规划改造方案排水系统模型

表 2 排水系统概化结果概况

项目	现状模型	规划方案模型
排水系统面(km ²)	1.98	2.59
子汇水区数量(个)	287	304
检查井数量(个)	301	322
管段数量(个)	349	346
管段总长度(m)	24156	26709
管道尺寸范围(mm)	300~220	300~2200

2.3.2 模型率定与验证

研究中选择了 2015 年 5 月~7 月的四场降雨对现状排水管网模型进行参数率定,为保证模型参数的准确性,选用 2015 年 7 月两场降雨进行验证。泵站的雨量计实时记录的六场降雨的情况如表 3 所示:

表 3 排水系统模型率定和验证的实际降雨监测数据

降雨事件	降雨量 (mm)	降雨历时 (h)	平均降雨强 度(mm/h)	最大降雨强 度(mm/h)
2015.5.2	16.1	10	1.61	6.5
2015.5.8	7.5	13	0.58	4.25
2015.5.15	38.8	16	2.38	14.8
2015.6.15	38.5	6	6.42	13.0
2015.7.11~13	78.7	37	2.13	6.4
2015.7.23	27.0	4.4	6.14	11.2

根据泵站前池水文的模拟值和监测值,求出 R² 变化范围为 0.87~0.98,表明二者的相关性较好。因而现状模型率定的参数可用于进一步评估分析排水系统改造方案。参数的率定与验证结果如表 4 所示;图 4 分别为霍山泵站前池 2015 年 7 月 11~13 日(37 h)和惠民泵站前池 2015 年 7 月 23 日(17 h)两场降雨情景下模型的验证结果。

表4 模型的率定与验证参数

参数	取值范围	率定验证值
降雨初损(mm)	0.5~1.5	1.0
水文衰减系数	0.6~0.9 ^[17-19]	0.9
地面径流平均流速 v (m/s)	0.25~0.30	0.25
管道曼宁数 ($M=1/n$)	$M=5\sim75(m^{1/3}/s)$ ^[18] 或 $n=0.009\sim0.017$ ^[20]	75 或 0.013

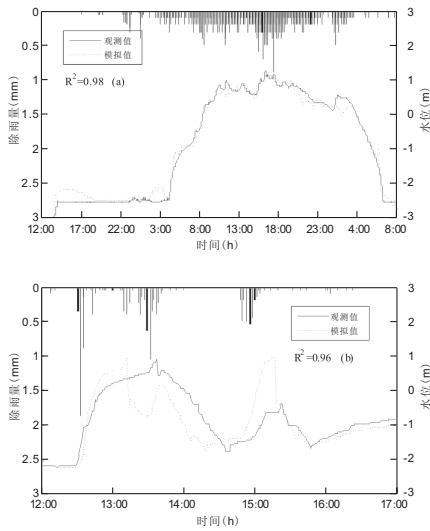


图4 (a)为霍山泵站前池水位验证结果, (b)惠民泵站前池水位验证结果

2.4 降雨雨型设计

降雨雨型的设计将直接影响系统的内涝情况。本研究采用上海市城建院编制的暴雨强度设计公式(4):

$$i = \frac{9.45 + 6.7932 \lg P}{(t + 5.54)^{0.6514}} \quad (4)$$

式中: i —暴雨强度 (mm/min); P —降雨重现期(a); t —降雨历时(min)。

宁静^[21]对上海地区短历时暴雨强度公式与设计雨型进行研究,指出雨峰系数为0.375的芝加哥雨型(Keifer and Chu rainfall pattern)更适用于上海地区降雨设计。根据K-C雨型和上海市暴雨强度公式推导出整个降雨历时的瞬时降雨强度曲线公式(5-6):

$$\text{峰前: } i_b = \frac{9.45 + 6.7932 \lg P \left[\frac{(1 - 0.6154)t_b}{0.375} + 5.54 \right]}{\left(\frac{t_b}{0.375} + 5.54 \right)^{0.6514 + 1}} \quad (5)$$

$$\text{峰后: } i_a = \frac{(9.45 + 6.7932 \lg P) \left[\frac{(1 - 0.6514)t_a}{1 - 0.375} + 5.54 \right]}{\left(\frac{t_a}{1 - 0.375} + 5.54 \right)^{0.6514 + 1}} \quad (6)$$

研究区域排水系统设计重现期为1a,单场降

雨持续时间一般集中在1h~3h。故本文研究选择短历时(60min、120min、180min)在不同重现期(1a,2a,3a)的降雨条件下对排水管网系统改造方案进行评估。图5为设计的9种降雨场景。

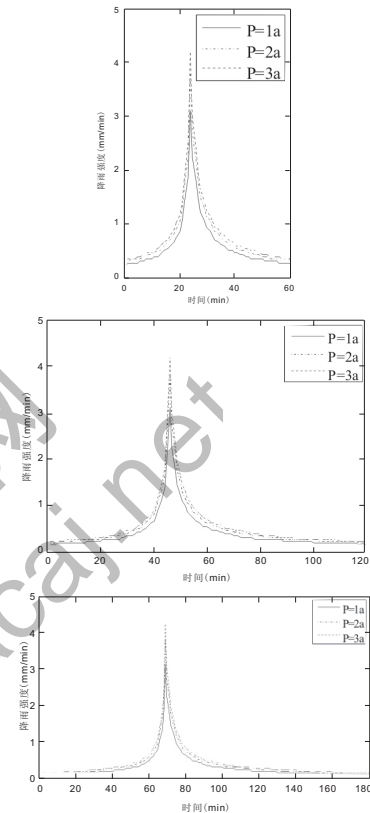


图5 降雨历时60min、120min、180min的IDF曲线

2.5 结果分析与讨论

2.5.1 溢流点模拟结果及分析

管网系统的瓶颈节点分析主要包括:各降雨场景模拟结果中的溢流点数量、溢流积水最长时间以及最大积水深度统计分析。其中系统的溢流点数量指管网在峰值降雨强度时发生地面溢流的检查井数量,其统计结果如表5所示。

表5 溢流积水点模拟结果

重现期	降雨历时 60min			降雨历时 120min			降雨历时 180min		
	溢流点数量(个)	积水时间(min)	最大积水深度(m)	溢流点数量(个)	积水时间(min)	最大积水深度(m)	溢流点数量(个)	积水时间(min)	最大积水深度(m)
1a	83	38	0.80	115	48	0.99	194	55	1.05
2a	189	53	1.03	160	56	1.11	248	79	1.26
3a	242	63	1.26	254	87	1.33	259	94	1.38

溢流积水点模拟分析结果表明:1) 重现期对系统溢流的影响作用要强于降雨历时;排水系统的溢流程度随重现期的增长而明显增强。2) 针对

管网设计重现期 1 a, 增大管径的方案可使溢流情况得到一定的缓解, 但是也存在小部分的溢流情况; 超过设计重现期的降雨情景(2 a, 3 a), 扩增管径的方案控制城市内涝, 将失去意义。

2.5.2 管网超负荷运行模拟结果及分析

管道的超负荷运行情况间接反映出内涝的潜在风险性。管网超负荷运行是指管道处于满管超压运行, 管网超负荷运行情况则在峰值流量时发生超负荷运行时的管段分布范围表示。图 6 为排水管网系统改造方案在重现期 1 a 和降雨历时 60 min 时, 管道超负荷运行情况。结果显示: 在峰值流量时, 超过半数以上的管道处于超荷载运行, 且主要集中在现状区域; 而拟增规划的丹东区域管道超负荷较少。此外在重现期 $P=2$ a, 3 a 的短历时的降雨情况下, 系统在洪峰流量时超负荷运行情况更加明显, 几乎将近整个排水管网都处于超负荷运行, 溢流风险情况突出。



图 6 重现期 1a, 降雨历时 60min 情景的管网超负荷运行模拟结果(说明: 图例中正值对应的管道为超负荷管道, 颜色越深超负荷越严重)

2.5.3 内涝风险模拟结果及分析

管网发生溢流现象将导致城市出现地表漫流积水。MIKE URBAN 模型可以利用有限的的数据资料实现城市地表漫流(2 D)的计算模拟。在本研究中的地表漫流主要考虑雨水从概化的检查井节点溢流后积水情况, 而忽略了地面径流进入管网前产生的积水现象。由于缺乏比较详细的地面高程数据、地表曼宁系数等, 研究仅对设计重现期(1 a)降雨情景下的内涝进行粗略的模拟。图 7 显示了降雨重现期 1 a 和降雨历时 120 min 情景的地面积水情况。结果表明: 较大范围的积水易发生在地势较低处, 特别是洼地, 一旦溢流则容易发生地面积水。通过溢流积水点溯源排查管网情况可知: 规划后的排水系统, 仍存在小部分管道是设计最小管径 300 mm 等, 是导致溢流积水的重要原因,

与此相对应的街道均发生溢流积水的现象, 成为方案修改的重要目标。



图 7 重现期 1a, 降雨历时 120min 的系统内涝积水情况

利用模型可以快速地对管网瓶颈节点、超负荷运行情况以及内涝风险进行分析, 辅助决策者系统而全面地了解改造方案中存在的问题, 更加直观地判断方案的可行性。综合研究表明: 仅靠规划扩增管径的措施能在一定程度上起到缓解中心城区内涝现状的作用, 但要从根本上解决霍山—惠民排水系统发生内涝的可能性, 需要结合源头消减措施(LID), 改变传统的“雨后快排”思想, 恢复城市良性水文循环, 减少进入排水管网峰值流量。

3 结论

城市排水系统改造广泛借助于排水系统模型进行预测研究。针对我国城市的中心城区的地面硬化率高, 排水管网设计标准偏低、规划不合理等突出问题, 本文应用 MIKE URBAN 模型的优点, 克服了研究区域数据资料缺乏的问题, 从系统的角度成功建立排水系统模型, 从瓶颈节点、超负荷运行情况以及内涝风险对改造方案进行内涝评估。丰富了我国中心城区(老城区)运用 MIKE URBAN 模型对内涝预测评估的经验, 特别是模型建立中参数的选取, 为科学的指导排水管网的改造提供了借鉴意义。

在排水管网设计重现期内, 扩增管径可作为缓解城市内涝的可行性措施。而解决城市内涝的根本途径是从源头控制径流产生量, 恢复城市良性水文循环, 消减进入排水管网峰值流量。因而提出在扩增管径改造方案的基础上, 定位定量地研究源头消减措施对城市内涝的缓解效果具有重要的意义。

本研究仅从工程的角度对研究区域排水管网

(下转第 37 页)

电厂烟气治理面临的技术难题,远达环保采用了低氮燃烧+SCR烟气脱硝+高效干式电除尘+单塔双循环脱硫+湿式电除尘的超低排放技术方案。项目建成后的实际运行效果理想,这为我国全面实施燃煤电厂超低排放改造的目标奠定了坚实基础。

参考文献

[1] 国家发展改革委数据库. 煤电节能减排升级与改造行动计划(2014-2020年)(发改能源[2014]2093号)[EB/OL]. http://bgt.ndrc.gov.cn/zcfb/201409/t20140919_626242.html, 2014-09-12.

[2] 国家环保部数据库. 关于印发《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》的通知(环发[2015]164号)[EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201512/t20151215_319170.htm?_sm_au_=iVVVR2PCFskVlJ6H, 2015-12-11.

[3] 朱法华,王临清. 煤电超低排放的技术经济与环境效益分析[J]. 环境保护. 2014(21):28-33.

[4] 朱法华,王圣. 煤电大气污染物超低排放技术集成与建议[J]. 环境影响评价. 2014(05):25-29.

[5] 杨娜,刘逾涛. 渭河项目林业界新标[N]. 中国电力报. 2015-09-01(002).

(上接第49页)

改造方案进行内涝预测与评估,而进一步结合全生命周期的经济效益分析,评估管网改造方案的可行性将更有参考价值。

参考文献

[1] Chocat B, Ashley R, Marsalek J, et al. Toward the Sustainable Management of Urban Storm-Water[J]. *Indoor and Built Environment*. 2007, 16(3): 273-285.

[2] Seto K C, Fragkias M, Neralp B G, et al. A Meta-Analysis of Global Urban Land Expansion[J]. *PLoS ONE*. 2011.

[3] Semadeni-Davies A, Hernebring C, Svensson G, et al. The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Suburban stormwater[J]. *Journal of Hydrology*. 2008, 350(1-2): 114-125.

[4] Huong H T L, Pathirana A. Urbanization and climate change impacts on future urban flooding in Can Tho city, Vietnam[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2013, 17(1): 379-394.

[5] Wang J, Da L, Song K, et al. Temporal variations of surface water quality in urban, suburban and rural areas during rapid urbanization in Shanghai, China[J]. *Environmental Pollution*. 2008, 152(2): 387-393.

[6] 李彦伟,尤学一,季民,等. 基于SWMM模型的雨水管网优化[J]. *中国给水排水*. 2010, 26(23): 40-43.

[7] 王喜冬. 香港岛南区雨水管网改造总体规划概述[J]. *给水排水*. 2005, 31(6): 103-107.

[8] Chen A S, Evans B, Djordjevi? S, et al. Multi-layered coarse grid modelling in 2D urban flood simulations[J]. *Journal of Hydrology*. 2012, 470-471: 1-11.

[9] Chang F, Chen P, Lu Y, et al. Real-time multi-step-ahead water level forecasting by recurrent neural networks for urban flood control[J]. *Journal of Hydrology*. 2014, 517: 836-846.

[10] Mollerup A L, Mikkelsen P S, Thornberg D, et al. Regulatory control analysis and design for sewer systems[J]. *Environmental Modelling & Software*. 2015, 66: 153-166.

[11] Elliott A, Trowsdale S. A review of models for low impact urban

stormwater drainage[J]. *Environmental Modelling & Software*. 2007, 22(3): 394-405.

[12] Zhou Q. A Review of Sustainable Urban Drainage Systems Considering the Climate Change and Urbanization Impacts[J]. *Water*. 2014, 6(4): 976-992.

[13] Semadeni-Davies A, Hernebring C, Svensson G, et al. The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Combined sewer system[J]. *Journal of Hydrology*. 2008, 350(1-2): 100-113.

[14] Carsten Jakobsen A B A M. Using MOUSE LTS to analyze sewer mains in Greater Copenhagen[J]. Paper for DHI software conference 6-8. June 2001, Scanticon, Snekkersten, Denmark. 2001.

[15] Mark O, Lacoursière J O, Vought L B M, et al. Application of hydroinformatics tools for water quality modeling and management: case study of Vientiane, Lao P.D.R[J]. *Journal of Hydroinformatics*. 2010, 12(2): 161.

[16] Mark O, Apirumanekul C, Kamal M M, et al. Modelling of urban flooding in Dhaka City[J]. *Proceedings UDM*. 2001, 1: 333-343.

[17] Artina S, Bolognesi A, Liserra T, et al. Simulation of a storm sewer network in industrial area: Comparison between models calibrated through experimental data[J]. *Environmental Modelling & Software*. 2007, 22(8): 1221-1228.

[18] Thorndahl S, Beven K J, Jensen J B, et al. Event based uncertainty assessment in urban drainage modelling, applying the GLUE methodology[J]. *Journal of Hydrology*. 2008, 357(3-4): 421-437.

[19] Thorndahl S, Johansen C, Schaarup-Jensen K. Assessment of runoff contributing catchment areas in rainfall runoff modelling[J]. *Water Science & Technology*. 2006, 54(6-7): 49.

[20] Rossman L A. Storm water management model user's manual, version 5.0[M]. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency Cincinnati, 2010.

[21] 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.