

基于GIS与SWMM的暴雨内涝风险评价

——以山东半岛某LNG接收站为例

郑元杰¹, 胡海燕², 宗乐斌², 安培源^{2*}

¹中国石化青岛液化天然气有限责任公司, 山东 青岛

²北京中地华安科技股份有限公司, 北京

收稿日期: 2023年10月31日; 录用日期: 2023年12月22日; 发布日期: 2023年12月29日

摘要

随着全球变暖和厄尔尼诺事件回归导致极端天气频发, 洪涝灾害频次和程度逐步上升。暴雨内涝风险评价逐渐成为城市防灾减灾工作的重点。本文基于GIS和SWMM构建了山东半岛LNG接收站暴雨内涝模型, 采用50 mm、100 mm、200 mm、400 mm四种降雨情景, 对山东半岛某LNG接收站开展暴雨内涝模拟分析及风险评价。根据评价结果提出山东半岛LNG接收站站暴雨内涝预警及治理措施。研究思路对于国内同类型LNG接收站开展暴雨内涝风险防范工作具有借鉴意义, 研究结果可供山东半岛LNG接收站暴雨内涝风险应对参考。

关键词

LNG接收站, 暴雨内涝, 积水模拟, 风险评价, 风险防控

Risk Assessment of Rainstorm Waterlogging Based on GIS and SWMM

—A Case Study of Shandong Peninsula LNG Receiving Station

Yuanjie Zheng¹, Haiyan Hu², Lebin Zong², Peiyuan An^{2*}

¹Sinopec Qingdao LNG Co., Ltd., Qingdao Shandong

²Beijing Zhongdi Hua'an Technology Co., LTD., Beijing

Received: Oct. 31st, 2023; accepted: Dec. 22nd, 2023; published: Dec. 29th, 2023

*通讯作者。

文章引用: 郑元杰, 胡海燕, 宗乐斌, 安培源. 基于GIS与SWMM的暴雨内涝风险评价[J]. 地球科学前沿, 2023, 13(12): 1394-1401. DOI: 10.12677/ag.2023.1312134

Abstract

With the return of global warming and El Niño events, extreme weather events have become more frequent, and the frequency and severity of floods have gradually increased. Rainstorm waterlogging risk assessment has gradually become the focus of urban disaster prevention and reduction. In this paper, based on GIS and SWMM, a rainstorm waterlogging model of Shandong Peninsula LNG Terminal is constructed. Four rainfall scenarios of 50 mm, 100 mm, 200 mm and 400 mm are used to carry out simulation analysis and risk assessment on rainstorm waterlogging of Shandong Peninsula LNG Terminal. According to the evaluation results, the early warning and control measures for rainstorm and waterlogging in Qingdao LNG Terminal are proposed. The research idea has reference significance for domestic LNG terminals of the same type to carry out rainstorm waterlogging risk prevention work, and the research results can provide reference for rainstorm waterlogging risk response of Shandong Peninsula LNG terminals.

Keywords

LNG Terminal, Rainstorm Waterlogging, Flood Simulation, Risk Assessment, Risk Prevention and Control

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着全球变暖和厄尔尼诺事件回归导致极端天气频发[1],短时性强降水的频率和强度同步增大,导致城市洪涝灾害频次和程度逐步上升[2][3][4]。例如,2012年7月21日北京特大暴雨[5],2021年郑州“7·20”极端暴雨[6]等事件都造成了重大的人员伤亡和财产损失。山东半岛 LNG 接收站受东南季风和台风影响,气候条件复杂,场区内涝灾害频发[7]。

暴雨内涝风险评估作为防灾减灾基础性工作,基于评估结果可针对性地进行预防和治理,是降低内涝灾害损失的一条有效途径[8][9]。因此,本文以山东半岛某 LNG 接收站为研究区,基于自然灾害风险评估理论,开展山东半岛 LNG 接收站暴雨内涝风险评估,并提出相应的防范对策,为山东半岛 LNG 接收站暴雨内涝风险控制提供技术支持。

2. 研究区及暴雨内涝概况

研究区为山东半岛某 LNG 接收站,位于山东省青岛市黄岛区董家口港(见图 1),总面积约为 1 km²,场区地势北高南低,东高西低,场区北部为生活管理区、汽车装卸区,地面基本已硬化,少量绿化场地,南部为工艺装置区、液化天然气罐区、轻烃罐区等,场区下垫面较为简单,分为五类:屋面、硬化场地、绿地、路面、碎石铺装。

研究区所在青岛市黄岛区暴雨多发生在夏季,持续性暴雨和局地短时强降水易引发洪涝灾害,对城市排水能力和管网设计提出了严峻的挑战和考验[10]。从暴雨日数分布图可以看出接收站区域出现暴雨(大于 50 mm)频次最多,达到 101 次(见图 2)[11]。在暴雨条件下,接收站部分区域不能及时排出雨水,导致场区部分地段产生积水,由于工艺设施大部分为金属构件,浸泡后易造成部件腐蚀,进而影响生产安全。同时积水可能造成行人、行车困难,影响场区正常生产活动。

3. 数据与方法

研究方法:

研究采用 SWMM 模型, 该模型由地表产流计算模型、地表径流计算模型、下渗计算模型和管网汇流计算模型四个模块构成[12], 可以模拟城市区域在降雨时径流量产生的各种水文过程, 和径流量输送过程中的各种水力特征, 反映降雨入渗、汇流、积水过程, 广泛应用于城市防洪、空间规划、生态修复等领域[13]。

研究需要获取以下数据:

① 排水管网数据基于现场测绘数据, 部分地下管网由于无法测量参考场区给排水设计资料, 数据包括管网经纬度、尺寸、沟底/顶标高、坡度等。

② 下垫层数据包括汇水区尺寸、土地利用类型和地形坡度等, 主要通过无人机倾斜摄影测量结合现场调查获取, 通过高精度倾斜摄影模型可以精准刻画汇水区大小并分辨实际用地分类, 同时基于倾斜摄影模型构建的数字地面高程模型(DEM)可以轻松得到场地地形坡度, 为暴雨内涝情景模拟提供关键参数。不同下垫层汇水区的径流系数参考《石油化工场区雨水明沟设计规范》[14]。

研究区总面积为 514,421 m², 结合场区内各建构筑物及道路等因素, 以及排水管网现场实测成果, 划分汇水区域, 在 ArcGIS 中绘制排水系统拓扑结构, 将研究区域进行概化, 共设置 4 个排水口, 如图所示(见图 3):

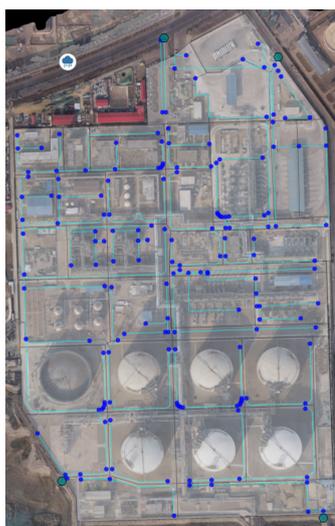


Figure 3. Topology of drainage system in study area
图 3. 研究区排水系统拓扑结构图

③ 降雨数据用于确定设计暴雨强度, 采用青岛西海岸新区公布的《西海岸新区城市排水(雨水)防涝综合规划(2016~2035)》[15]中的暴雨强度公式计算得到。

根据青岛西海岸新区最新发布的暴雨公式计算降雨历程中各时段的瞬时降雨强度。

$$q = \frac{902.934 \times (1 + 0.919 \log P)}{(t + 4.160)^{0.534}}$$

式中:

P ——设计重现期(年);

q ——设计暴雨强度(升/秒/公顷);

t ——降雨历时(分钟)。

模拟基于以上设计暴雨公式, 并按照中国气象局公布的暴雨预警等级[16]: 暴雨蓝色预警(12 小时内降雨量 50 mm)、暴雨黄色预警(6 小时内降雨量 50 mm, 即 12 小时 100 mm)、暴雨橙色预警(3 小时内降雨量 50 mm, 即 12 小时 200 mm)、暴雨红色预警(3 小时内降雨量 100 mm, 即 12 小时 400 mm)进行模拟, 降雨历时根据模拟预警等级分别设置为 12 小时、6 小时、3 小时、3 小时, 时间步长为 1 分钟, 其对应的设计暴雨时间序列图如图所示(见图 4)。

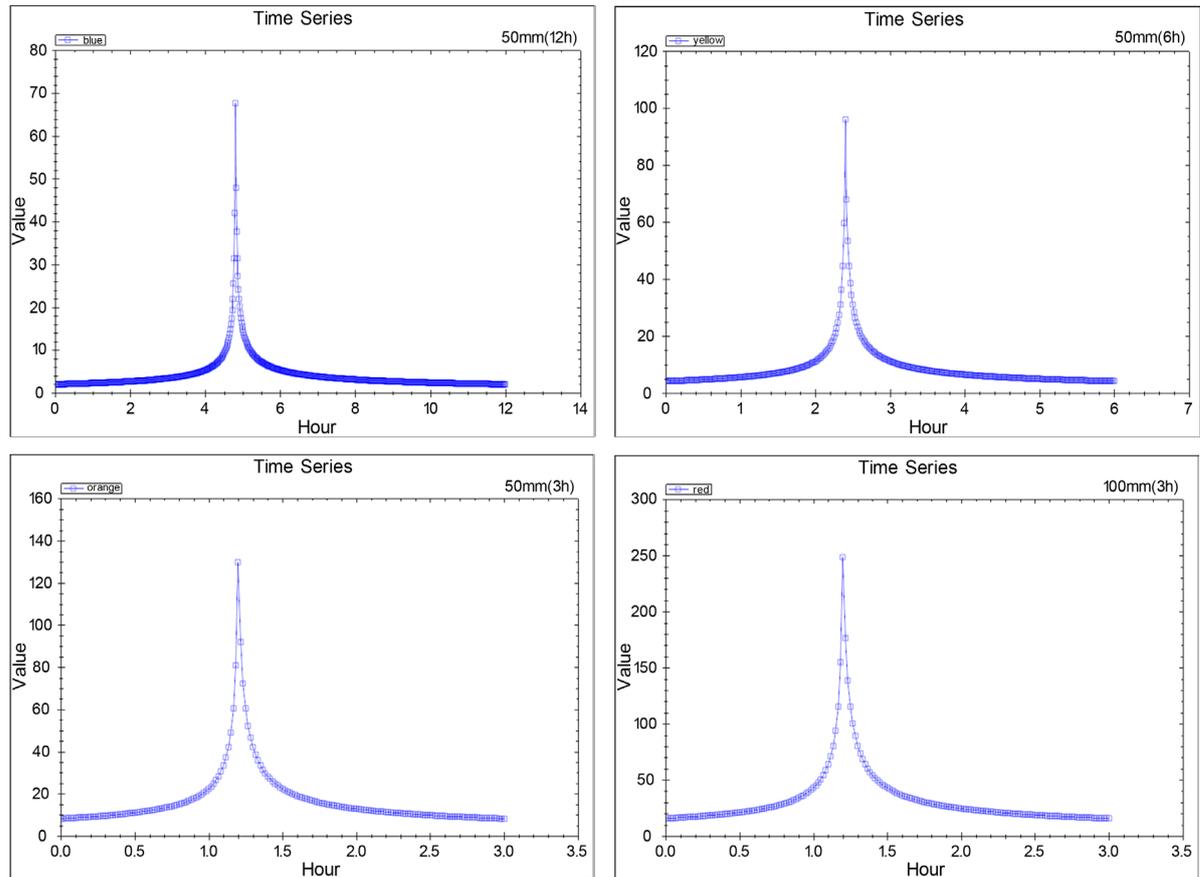


Figure 4. The chart of Chicago rainfall process line (Qingdao City)

图 4. 青岛市芝加哥雨型降雨过程线

4. 模型参数设置及模拟结果

4.1. 模型参数设置

模拟采用 StormDesk 软件, 该软件是基于 SWMM 模型研发的排水管网水力模拟软件, 建模操作及模拟结果展示形式得到优化。选取 Hortin 模型作为计算的入渗模型。

模拟所需要参数包括确定性参数和不确定性参数, 其中确定性参数包括汇水区面积、坡度、透水区百分比、管网尺寸、管网节点高度等物理参数, 该类数据主要通过现场实测获取, 获取方法第 2 节已表述, 该类参数不同分区、节点、管段都不相同, 数据量较大, 不再一一列举, 汇水区分区及管网结构见图 4。不确定性参数包括径流系数、透水/不透水区曼宁系数、透水区/不透水区洼蓄量、管段曼宁系数、入渗率等经验参数。该类参数一般受条件限制无法得到准确的数值, 主要参考 SWMM 模型应用手册、《石油化工场区雨水明沟设计规范》并结合相关文献确定, 具体取值见表 1。

Table 1. Parameter table
表 1. 参数取值表

参数名称	透水区/不透水区曼宁系数	管段曼宁系数	透水区/不透水区注蓄量	最大入渗率	最小入渗率	衰减系数	径流系数(不同分区根据规范[14]选取)
取值	0.25/0.035	0.013	3.5/8.5 mm	76.2 mm/h	3.18 mm/h	4	0.1~0.9

4.2. 模拟结果

分别选取四个不同暴雨预警等级的降雨时间序列, 并进行降雨模拟, 得到 LNG 场区内的积水情况(以各降雨情景下积水最深为例), 如图所示(图中随蓝色 - 黄色 - 橙色 - 红色变化积水程度增加)(见图 5)。

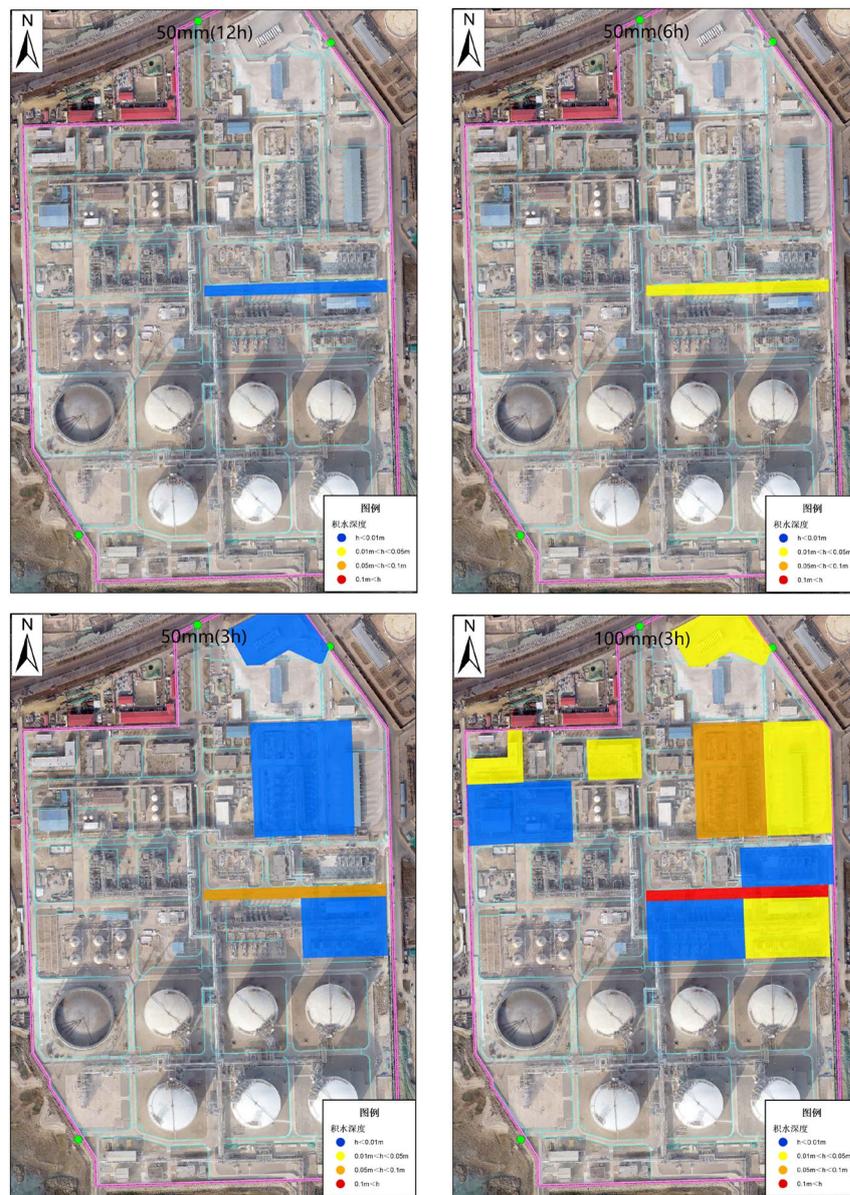


Figure 5. Spatial distribution of inundation depth in different rainfall conditions
图 5. 不同降雨条件下积水深度空间分布

5. 风险评价

通过基于 GIS 与 SWMM 的城市雨洪模拟模型,对 LNG 接收站进行暴雨积水模拟,得到场区内的降水过程,积水点分布及积水程度情况,在不同降雨条件下场区内的积水情况有所区别,从 LNG 接收站积水情况分布图可以看到随着降雨量的增加,场区内的积水面积和积水程度明显提高,其中工艺设施区域最易积水,北部槽车充装站停车区和办公楼区域在暴雨橙色预警情况下同样存在积水可能。考虑到接收站所在地区历史最大降雨量为 358 mm,结合国家预报暴雨量级,采用 100 mm (3 h) (即 12 h 累计降雨 400 mm)降雨量下的暴雨模拟结果对场区内各区域暴雨灾害积水风险进行分级。分级标准如表 2 所示。

Table 2. Standard for classification of water accumulation risk in rainstorm disasters

表 2. 暴雨灾害积水风险等级划分标准

积水风险等级	I 级(高)	II 级(较高)	III 级(较低)	IV 级(低)
积水深度(m)	$0.1 \leq H$	$0.05 \leq H_s < 0.1$	$0.01 \leq H_s < 0.05$	$H_s < 0.01$

根据降雨积水模拟情况,依照暴雨灾害积水风险等级划分标准确定青岛 LNG 接收站暴雨灾害积水风险等级,其中工艺设施区的暴雨灾害积水风险等级为高(I 级),槽车充装站停车区、办公区、总变电站的暴雨灾害积水风险等级为较低(III 级),空空空压站、软化水站、锅炉房的暴雨灾害积水风险等级为低(IV 级)。

6. 暴雨内涝风险控制

6.1. 暴雨内涝风险预警

考虑到场区实际应用需求,针对暴雨灾害建立预警分级标准,依据国家预报暴雨预警分级并结合降雨情境下的模拟场区内积水情况,对青岛 LNG 接收站暴雨预警分级如下,其中降雨量为经过换算后的 12 小时内累计降雨量值: 50 mm (IV 级蓝色预警,场区内发生积水的可能性较小); 100 mm (III 级黄色预警,场区内发生积水的可能性较大); 200 mm (II 级橙色预警,场区内发生积水的可能性大) (II 级); 400 mm (I 级红色预警,场区内发生积水的可能性很大)。

预警信息可以通过 LNG 自然灾害防治手机 APP “海防通”及短信方式实时发送到管理人员手机上,接收站管理人员可以根据预警信息及时采取防范措施,有效应对暴雨内涝风险。

6.2. 暴雨内涝风险治理

基于场区现有排水系统和场区地形条件,结合和暴雨内涝模拟情况,提出场区排水系统改造方案。建议将积水最严重的工艺区处的东区和西区排水系统进行连通,加宽加深西区排水干渠,在场区西南角增加一处排海口,将接收站西区汇水相对独立的排出场外,并对厂区存在的多处排水沟弯道进行截弯取直。通过上述方案以期解决目前厂区暴雨内涝问题。

7. 结论

本文基于 GIS 和 SWMM 模型构建了青岛 LNG 接收站暴雨内涝模型,根据青岛西海岸新区暴雨强度公式,考虑当地历史最大降雨并结合国家暴雨预警等级,采用 50 mm、100 mm、200 mm、400 mm 四种降雨情景进行模拟,得到四种情境下的场区地表暴雨内涝积水淹没范围和深度。结果显示随着降雨量的增大,积水区域的面积、积水深度都明显增大,内涝积水形势逐渐严峻。

结合 LNG 接收站防汛工作需求,针对暴雨灾害建立预警分级标准,并通过手机 APP 和短信等方

式提前发布预警信息, 管理人员可以提前采取防范措施合理应对暴雨内涝灾害。同时根据场区地形条件, 结合暴雨内涝模拟结果, 针对场区现有排水系统提出改造建议, 期望解决或减缓当前场区内涝积水问题。

参考文献

- [1] 彭艳玉, 郜倩倩, 刘煜. 厄尔尼诺对中国东部季风区夏季不同持续性降水的影响[J]. 气象学报, 2023, 81(3): 375-392.
- [2] 徐宗学, 赵刚, 程涛. “城市看海”: 城市水文学面临的挑战与机遇[J]. 中国防汛抗旱, 2016, 26(5): 54-55+57.
- [3] 城市防洪问题与对策调研组. 我国城市防洪问题与对策[J]. 中国防汛抗旱, 2014, 24(3): 46-48+65.
- [4] 张金良, 罗秋实, 王冰洁, 等. 城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展与展望[J/OL]. 水资源保护, 2023: 1-13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20230906.1924.002.html>
- [5] 俞小鼎. 2012年7月21日北京特大暴雨成因分析[J]. 气象, 2012, 38(11): 1313-1329.
- [6] 张霞, 杨慧, 王新敏, 等. “21·7”河南极端强降水特征及环流异常性分析[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 672-687.
- [7] 吴运逸, 郑元杰, 黄超, 胡海燕, 宗乐斌, 安培源. 青岛 LNG 接收站自然灾害风险识别、评价及防控[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(12): 1669-1680. <https://doi.org/10.12677/AG.2022.1212162>
- [8] 孙阿丽. 基于情景模拟的城市暴雨内涝风险评估[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- [9] 徐美, 刘舒, 孙杨, 等. 利用洪涝模型进行城市内涝风险快速识别与预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(8): 1185-1194.
- [10] 方娟, 张玉政, 贾旭亮, 等. 青岛市中心城区防洪排涝研究[J]. 中国水利, 2013(11): 42-43.
- [11] 马艳, 黄容, 于进付, 等. 青岛环胶州湾地区暴雨特征及暴雨灾害风险分析[J]. 灾害学, 2012, 27(4): 42-46.
- [12] 陈晓燕, 张娜, 吴芳芳, 等. 雨洪管理模型 SWMM 的原理、参数和应用[J]. 中国给水排水, 2013, 29(4): 4-7.
- [13] 李博. 基于 GIS 与 SWMM 的 M 市暴雨内涝模拟及防治研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
- [14] SH/T 3094-2013 石油化工厂区雨水明沟设计规范[S]. 北京: 中国石化出版社, 2013.
- [15] 青岛西海岸新区城市管理局. 西海岸新区城市排水(雨水)防涝综合规划(2016-2035) [S]. 青岛: 青岛西海岸新区城市管理局, 2018.
- [16] 中国气象局令(第 16 号). 气象灾害预警信号发布与传播办法[S]. 北京: 中国气象局, 2007.