

基于海绵城市建设理念的圩垸地区城市 排涝主要设计参数优化方法

盛子涵¹, 蒋晓红¹, 龚志浩¹, 王阳²

(1. 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 2. 扬州市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225000)

摘要: 针对圩垸地区的城市排涝问题, 基于海绵城市建设理念, 以城市圩区排蓄工程总费用现值最小为目标函数, 以海绵城市建设标准下的泵站外排能力、排涝设计标准下的泵站外排能力与圩内水面率和下沉式绿地率等排涝主要参数的关系、城市生态需水量等为约束条件, 以泵站外排能力、水面率、下沉式绿地率、透水铺装率等为决策变量, 构建非线性数学模型, 采用罚函数法进行求解。对常州市新北区北部新城高铁片区排蓄工程进行了实例分析, 得出排涝流量为 $61.28 \text{ m}^3/\text{s}$ 、水面率为 11.97%、下沉式绿地率为 51.77%、透水铺装率为 15.00% 的优化方案, 取得了良好效果, 为圩垸地区城市排涝主要设计参数优化提供了一条新的途径。

关键词: 海绵城市; 城市排涝; 设计参数; 优化方法; 非线性规划; 排涝泵站; 圩垸地区

中图分类号: TU992

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)05-0164-07

Design parameters of urban drainage in polder areas based on sponge city construction concept

SHENG Zihan¹, JIANG Xiaohong¹, GONG Zhihao¹, WANG Yang²

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. Yangzhou Survey Design Research Institute Co., Ltd., Yangzhou 225000, China.)

Abstract: In order to solve the drainage problem and minimize the total water drainage and storage cost in urban polder areas, an optimization model is developed with the present minimal total cost as the objective function, based on the construction concept of sponge city. In this model, constraints include pumping capacity according to the sponge city construction standards, the relationship between pumping capacity and main drainage parameters such as surface water ratio and sunken green space ratio in the polder area according to the design standards of drainage, and the urban ecological water demand. The decision variables are pumping capacity, surface water ratio, sunken green space ratio and permeable pavement ratio. This model is a non-linear mathematical model using penalty function method. It was then applied to the water drainage and storage project in Xincheng high-speed railway district, north Xincbei of Changzhou. The results of the drainage discharge, surface water ratio, sunken green space ratio and permeable pavement ratio were $61.28 \text{ m}^3/\text{s}$, 11.97%, 51.77% and 15.00% respectively, optimal results were achieved. This model provides a new approach to the optimization of main design parameters of urban drainage in polder areas.

Key words: sponge city; urban drainage; design parameter; optimization method; non-linear planning; drainage pump station; polder area

1 研究背景

在近 30 年的城市化进程中, 不少城市过多地进

行硬化改造和开发建设活动, 使得城市的浑浊岛效应和热岛效应增强^[1-4], 城市中出现了洪涝灾害增加、排水不畅、水系恶化、水面率普遍下降等问

收稿日期: 2019-12-10; 修回日期: 2020-03-03

基金项目: 江苏省水利科技项目(2018069、2018045)

作者简介: 盛子涵(1995-), 女, 江苏沛县人, 硕士研究生, 主要从事农业水土工程规划和管理研究。

通讯作者: 蒋晓红(1976-), 女, 江苏涟水人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事农田水利、水利工程规划、水利工程优化调度等。

题^[5-6]。近年来,城市开发建设以及旧城改造逐渐将“自然积存、自然渗透、自然净化”等海绵城市^[7-9]理念融入建设之中,许多研究表明,海绵城市建设对提高城市排涝能力、修复城市生态环境和维持城市可持续发展具有十分重要的意义^[10]。李沐寒等^[11]运用GIS和SWMM模型构建低影响开发(LID)的空间配置方案,并分析5个降雨事件下LID组合方案的雨洪调控效应和定量评价成本效益,结果表明LID建设后地表径流系数平均可减少0.26且屋顶绿化+透水铺装组合的成本效益最好。Liu等^[12]研究结果表明,低影响开发能够降低城市发展对水文水环境的影响,不仅可以改善城市水质,还可以起到美化环境等作用。武永新等^[13]基于低影响开发的旧城区内涝数值模拟研究表明:LID措施整体上可有效缩减城区内涝面积,不同排涝设施的联用可有效缓解城市内涝。

对于平原圩地区而言,由于其地形平坦,地势低洼,地面高程大多处于外河洪枯水位之间,每逢汛期,外水高于地面,导致圩内涝水无法自排,需依靠泵站进行抽排。若遭遇超标准降雨或者抽排不及时,涝水无法外排,往往会形成灾害,严重影响人们的生产生活。据统计,我国江苏省平原圩区约占全省总面积的69%,主要分布在太湖、里下河及沿江沿河地区^[14]。

基于独特的圩区排水特征和水系统需求,发挥海绵城市对雨水的吸纳、蓄渗和缓释作用,能够有效控制雨水地面径流、缓解城市内涝、保护和改善城市生态环境。本文结合海绵城市的规划控制指标体系^[15],针对圩区排水特点,在注重城市排涝泵站建设的同时,重视城市水面、下沉式绿地以及透水铺装^[16-18]等措施对降雨的集蓄、渗吸作用,从而提高圩区城市排涝能力。

2 模型构建与求解

针对圩区排水特点,本文以排蓄工程总费用现值最小为目标函数,以海绵城市建设标准下的泵站外排能力及排涝设计标准下的泵站外排能力与圩内水面率和下沉式绿地率等排涝主要参数的关系、城市生态需水量等为约束条件,构建数学模型,优化泵站外排能力、水面率、下沉式绿地率、透水铺装率等主要参数。

2.1 目标函数

在规定设计除涝标准情况下,以排蓄工程总费用现值最少为目标函数:

$$Z = \min \{ (C_1 + C_2) \cdot x_1 + C_3 \cdot (x_2 - p_1) \cdot F \cdot h_1 + C_4 \cdot (x_3 - p_2) \cdot F \cdot h_2 + (C_5 + C_6) \cdot x_4 \cdot F_{\text{绿地}} + (C_7 + C_8) \cdot x_5 \cdot F_{\text{硬化}} \} \quad (1)$$

式中: Z 为工程总费用现值, 10^4 元; C_1 、 C_2 分别为排涝泵站单位装机流量的投资现值、运行管理现值(包括年大修理费提存、年维护费、职工工资及福利费、燃料动力费及其他费用),元/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); x_1 为排涝泵站的总装机流量, m^3/s ; C_3 、 C_4 分别为每立方米开挖湖泊、河网费用,元/ m^3 ; x_2 、 x_3 分别为规划湖泊、河网水面率(以占规划区总面积的百分比计); p_1 、 p_2 分别为现有湖泊、河网水面率(以占规划区面积的百分比计); F 为规划区的总面积, km^2 ; h_1 、 h_2 分别为湖泊、河网的平均深度, m ; C_5 、 C_6 分别为每平方米下沉式绿地建设费用现值(一次性建设投资)、年管理维护费用现值(即在后期运行中管理维护的花费,包括除草、清淤、修建等人力和资金的投入^[19]),元/ m^2 ; x_4 为规划的下沉式绿地率(以占规划区绿地总面积的百分比计); $F_{\text{绿地}}$ 为城市绿地面积, km^2 ; C_7 、 C_8 分别为每平方米透水铺装建设费用现值(一次性建设投资)、年管理维护费用现值,元/ m^2 ; x_5 为规划的透水铺装率(以占城市硬化地面总面积的百分比计); $F_{\text{硬化}}$ 为城市硬化地面面积, km^2 。

2.2 约束条件

(1)泵站最大允许外排流量。根据文献[9]中要求通过海绵城市建设能将70%的降雨就地消纳和利用,要求在规定的排水时间(T)内排除70%降雨产生的水量,则排涝泵站的装机能力约束为:

$$0 \leq x_1 \leq \frac{0.3 \cdot 0.8 \cdot P \cdot F}{3.6 \cdot T} \quad (2)$$

式中: P 为降雨量, mm ,因考虑到降雨有一部分被其他设施所耗损和滞蓄,取降雨量的80%计算径流量; T 为设计排涝历时, h ;其余符号同前。

(2)水面率上下限。水面率是指一定区域范围内承载水域功能的区域面积占区域总面积的比率。适宜的水面率可提升城市发展的综合效能,能够在暴雨期为城市雨洪提供弹性的调蓄空间,减轻河道排涝压力。为满足湖区养鱼、供水等多种经营及综合利用的要求和区域行洪排涝输水,规划的湖泊、河网水面率应不小于最小的湖泊、河网水面率,且不大于最大的湖泊、河网水面率:

$$x_2 \geq x_2^*, x_3 \geq x_3^*, x_2 + x_3 \leq \frac{F - F_{\text{绿化}} - F_{\text{硬化}}}{F} \quad (3)$$

式中: x_2^* 、 x_3^* 为最小的湖泊、河网水面率(以占规划区总面积的百分比计); $F_{\text{绿化}}$ 为城市绿化面积,主要

包括城市绿地面积、林木面积等, km^2 ; 其余符号意义同前。

(3) 下沉式绿地率和透水铺装率上下限。本文所提及的是狭义的下沉式绿地, 下沉式绿地率是指高程低于周围汇水区域的面积占规划区绿地面积的比例^[16]。相比较平式和凸式绿地, 下沉式绿地具有削减洪峰流量、增加土壤含水率、滞蓄雨水和补充地下水等作用。透水铺装率为人行道、停车场、广场等采用透水铺装面积占城市硬化地面总面积(包含建设用地面积、道路面积、广场面积等)的比例^[17]。透水铺装是“软化”地表、增加雨水蓄渗的重要途径, 能够实现降雨径流的就地消纳, 缓解城市热岛效应和浑浊岛效应。

根据建设空间、难易程度、规划定位目标等多方面的条件, 同时考虑城市对雨水的渗透、滞留和调蓄能力, 参考其他海绵城市试点城市各指标取值综合确定下沉式绿地率和透水铺装率约束:

$$x_4 \geq x_4^*, x_5^* \leq x_5 \leq \frac{F_{\text{硬化}} - F_{\text{道路}} - F_{\text{建设用地}}}{F_{\text{硬化}}} \quad (4)$$

式中: x_4^* 为规定的下沉式绿地率的指标取值(以占规划区绿地总面积的百分比计); x_5^* 为规定的透水铺装率的指标取值(以占规划区硬化地面总面积的百分比计); $F_{\text{道路}}$ 为城市道路面积, 主要包含铁路、公路等道路, km^2 ; $F_{\text{建设用地}}$ 为城市建设用地面积, 主要包括城区住宅和公共设施用地、工矿用地、旅游用地、军事用地等建筑物、构筑物用地, km^2 ; 其余符号意义同前。

(4) 排涝流量与水面率、下沉式绿地率及透水铺装率的关系。城市水面、下沉式绿地和透水铺装蓄渗作用影响着降雨的产汇流过程, 相同排涝设计标准情况下, 通过逐时段水量调蓄计算可以得到不同水面率、下沉式绿地率及透水铺装率所对应的外排泵站设计排涝流量, 利用多元回归分析法可拟合出泵站排涝流量与水面率、下沉式绿地率及透水铺装率之间的关系:

$$x_1 = f(x_2, x_3, x_4, x_5) \quad (5)$$

(5) 城市生态环境需水量。研究城市生态环境需水量对城市的水系生态系统可持续发展具有重要意义。城市生态环境需水量 W_c ($10^4 \text{ m}^3/\text{a}$) 主要包括绿地需水量 $W_{\text{绿地}}$ (即植被蒸散发需水量、植被生长制造有机物需水量以及可供植被生存的土壤含水需水量)、林木需水量 $W_{\text{林地}}$ 、河湖生态环境需水量(包括水面蒸发需水量 $W_{\text{蒸发}}$ 、河湖渗漏蓄水量 $W_{\text{渗漏}}$ 和河道基流需水量 $W_{\text{基流}}$) 等几个方面^[20]:

$$W_c = W_{\text{绿地}} + W_{\text{林地}} + W_{\text{蒸发}} + W_{\text{渗漏}} + W_{\text{基流}} \quad (6)$$

城市圩区的河网供水量主要用于满足城市生态环境需水、景观用水以及某些工业用水等, 所以在非汛期的骨干河道和湖泊滞蓄水量需要在换水时段内满足日常的城市生态环境需水量:

$$\frac{W_c \cdot t}{F \cdot (x_2 + x_3) \cdot 365} \leq z_1 - z_2 \quad (7)$$

式中: z_1 、 z_2 分别为日常水位、最低水位, m ; t 为换水时间间隔, d ; 其余符号意义同上。

2.3 模型求解

由于所建的数学模型是含有等式约束和不等式约束的非线性规划模型, 拟采用外点罚函数法进行优化求解, 其基本思想是根据约束特点构造某种具有惩罚性质的函数, 将非线性规划问题转化为无约束优化问题求解。

约束优化问题的一般形式:

$$\begin{aligned} \min & f(x) \\ \text{s. t.} & g_i(x) \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \\ & h_j(x) = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, l) \end{aligned} \quad (8)$$

构建罚函数 $F(x, \sigma) = f(x) + \sigma P(x)$, 其中 $P(x)$ 具有惩罚的性质, 其表达式为:

$$P(x) = \sum_{i=1}^m \phi(g_i(x)) + \sum_{j=1}^l \psi(h_j(x)) \quad (9)$$

其中 $\phi(y)$ 、 $\psi(y)$ 为满足以下条件的连续函数:

当 $y \geq 0$ 时, $\phi(y) = 0$; 当 $y < 0$ 时, $\phi(y) > 0$;

当 $y = 0$ 时, $\psi(y) = 0$; 当 $y \neq 0$ 时, $\psi(y) > 0$;

$\phi = [\max\{0, -g_i(x)\}]^2$, $\psi = [h_j(x)]^2$

求解最优解的步骤和流程图如下:

(1) 给定初始点 $x^{(0)}$, 初始罚因子 σ_1 , 放大系数 $c > 1$, 允许误差 $\varepsilon > 0$, 置 $k = 1$ 。

(2) 以 $x^{(k-1)}$ 为初始点, 求解无约束优化问题 $F(x, \sigma_k) = f(x) + \sigma_k P(x)$, 设其极小点为 $x^{(k)}$ 。

(3) 若 $\sigma_k P(x^{(k)}) < \varepsilon$, 则停止计算, 得到点 $x^{(k)}$; 否则, 令 $\sigma_{k+1} = c\sigma_k$, 置 $k = k + 1$ 转步骤 2。

外点罚函数法优化求解流程如图 1 所示。

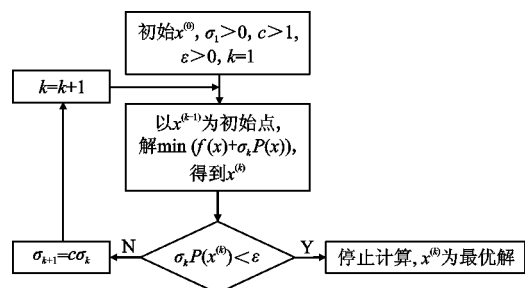


图1 外点罚函数法优化求解流程图

3 常州市新北区北部新城高铁片区排涝设计参数优化实例

常州市新北区北部新城高铁片区规划范围为:北至长江,西至德胜河,东到溧港河,南至京沪高速铁路,规划区面积约 101 km²,常州市新北区北部新城高铁片区示意图见图 2。

近年来,随着常州市城市化进程不断加速,外河水位不断提高加上排涝能力大与泄洪能力有限的矛盾,增加了常州市新北区的行洪泄洪压力,导致城区防洪排涝压力增大。另外,城市建设对地面的硬化很大程度上削弱了土地对暴雨洪水的削减作用,严重影响了自然的降雨-产流-汇流规律,为此,采用低影响开发等海绵建设理念优化新北区北部新城高铁片区的排涝主要设计参数。

3.1 数学模型

数学模型见公式(1)~(7)。

3.1.1 模型中相关参数确定 采用工程概算指标法以及根据当地建筑材料行情对排蓄工程费用现值进行估算,模型中相关参数确定见表 1。

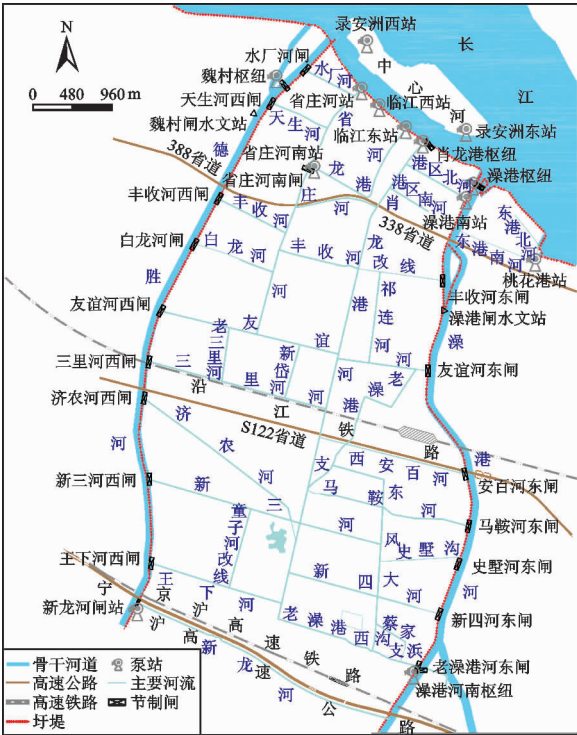


图 2 常州市新北区北部新城高铁片区示意图

表 1 模型中的相关参数确定表

参数	数值	参数	数值
现有湖泊水面率/ %	0.84	设计排涝时间/ h	22
现有骨干河网率/ %	3.5	换水时间/ d	60
最小湖泊水面率/ %	1.2	20 年一遇最大 24 h 设计暴雨/ mm	200.22
最小河网水面率/ %	4	多年平均降水量/ mm	1077
绿化覆盖率/ %	43.03	灌溉定额/ 10 ⁴ (m ³ · hm ⁻²)	15
绿地覆盖率/ %	30	林木平均需水量/ (mm · a ⁻¹)	671.0
森林覆盖率/ %	20	水面蒸发量/ (mm · a ⁻¹)	941.8
地面硬化率/ %	45	排涝泵站投资现值 C ₁ / 10 ⁴ (元 · m ⁻³ · s)	100
下沉式绿地率指标值/ %	30	排涝泵站运行管理费 C ₂ / 10 ⁴ (元 · m ⁻³ · s)	10
透水性铺装率指标值/ %	15	开挖湖泊费用 C ₃ / (元 · m ⁻³)	12
道路面积/ %	8	开挖河网费用 C ₄ / (元 · m ⁻³)	14
建筑用地面积/ %	22	下沉式绿地建设费用现值 C ₅ / (元 · m ⁻²)	50
湖泊平均深度/ m	2.0	下沉式绿地年管理维护费用 C ₆ / (元 · m ⁻²)	3.5
河网平均水深/ m	3.0	透水铺装建设费用现值 C ₇ / (元 · m ⁻²)	100
河道日常水位/ m	3.5	透水铺装年管理维护费用 C ₈ / (元 · m ⁻²)	8
河道最低水位/ m	3.0		

注:(1)表中除下沉式绿地指标值、透水铺装指标值外,均按占规划区总面积的百分比计。(2)排涝泵站运行管理费按每 m³/s 泵站投资的 10% 计算。(3)绿地需水量(W_{绿地}):以 95% 保证率的灌溉定额进行估算;河湖渗漏需水量(W_{渗漏}):由于常州市河道内常年水量丰富,所以河床含水率一般是饱和的,可以忽略其渗流损失;河道基流需水量(W_{基流}):采用改进 Tennant 法对河道基流需水量进行直接估算,即按照河流生态用水流量在汛期、非汛期期间占年平均流量的百分比进行计算^[21-22]。

3.1.2 外排泵站设计流量与不同水面率、透水铺装率、下沉式绿地率关系 根据新北区用地规划和水系特征,排涝标准为达到 20 年一遇最大 24 h 降雨确保每个时段(以 1 h 为一时段)骨干河道水位不超过控制水位,计划 24 h 降雨产生的径流当日内将调蓄的洪水量全部排出。不同水面率、下沉式绿地率及透水铺装率均影响外排泵站设计排涝流量,规划区内排涝水量调蓄计算需考虑河道、湖泊、下沉式绿地及透水铺装的调蓄作用,采用逐时段水量平衡法计算,调蓄计算公式如下:

$$V_2 = V_1 + \frac{Q_1 + Q_2}{2} - q\Delta t \quad (10)$$

$$Q_1 = 0.8 \cdot P_1 \cdot F - 0.01 \cdot x_4 \cdot F_{\text{绿地}} \cdot P_1 - 0.01 \cdot x_5 \cdot F_{\text{硬化}} \cdot (1 - \varphi) \cdot P_1 \quad (11)$$

$$Q_2 = 0.8 \cdot P_2 \cdot F - 0.01 \cdot x_4 \cdot F_{\text{绿地}} \cdot P_2 - 0.01 \cdot x_5 \cdot F_{\text{硬化}} \cdot (1 - \varphi) \cdot P_2 \quad (12)$$

式中: V_1 、 V_2 分别为时段始、末的河道蓄水量, m^3 ;

Q_1 、 Q_2 分别为时段始、末的入流量, m^3 ; P_1 、 P_2 为每一时段的降雨量, mm ; φ 为透水铺装的雨量径流系数,一般为 0.08 ~ 0.45,取值为 0.2; q 为泵站外排设计排涝能力, m^3/s ; Δt 为时段始、末的时间间隔, s ;其余符号意义同上。

根据正常水位、起排水位、最低控制水位和最高控制水位进行时段调蓄计算,开机抽排应控制内河水位在最低控制水位和最高控制水位之间。若排前水位不超过起排水位则不排水,如果河道最高水位大于最高控制水位,则需重新进行调蓄计算,直达到每个时段河道水位降至最高控制水位以下^[14,23],依此计算排涝流量。根据表 1 中新北区北部新城高铁片区的基本数据和数学模型中的约束条件确定水面率、下沉式绿地率及透水铺装率大致的工况范围,不同水面率(6% ~ 12%)、下沉式绿地率(30% ~ 70%)及透水铺装率(15% ~ 35%)情况下的排涝流量的计算成果见表 2。

表 2 不同水面率、下沉式绿地率及透水铺装率下排涝流量的计算成果

m^3/s

透水铺装率/%	下沉式绿地率/%	水面率/%						
		6	7	8	9	10	11	12
15	30	135.9	126.4	117.0	107.5	98.0	88.6	79.2
	40	127.1	117.7	108.2	98.8	89.2	79.8	70.3
	50	118.3	108.8	99.4	90.0	80.5	71.0	61.5
	60	109.5	100.0	90.5	81.2	71.6	62.2	52.8
	70	100.7	91.2	81.8	72.3	62.8	53.4	44.0
20	30	130.6	121.1	111.7	102.2	92.8	83.4	74.0
	40	121.8	112.3	102.9	93.4	84.0	74.5	65.0
	50	113.0	103.5	94.1	84.6	75.1	65.8	56.2
	60	104.2	94.8	85.2	75.8	66.4	57.0	47.4
	70	95.4	86.0	76.5	67.0	57.5	48.1	38.8
25	30	125.3	115.8	106.3	97.0	87.5	78.0	68.7
	40	116.5	107.0	97.6	88.1	78.7	69.2	59.8
	50	107.7	98.2	88.8	79.3	70.0	60.5	51.0
	60	98.9	89.4	80.0	70.5	61.0	51.6	42.1
	70	90.1	80.6	71.2	61.8	52.2	42.8	33.3
30	30	120.0	110.6	101.1	91.6	82.2	72.8	63.3
	40	111.2	101.8	92.3	82.8	73.4	64.0	54.5
	50	102.4	93.0	83.5	74.0	64.6	55.1	45.8
	60	93.6	84.1	74.8	65.3	55.8	46.4	37.0
	70	84.8	75.4	66.0	56.5	47.0	37.5	28.0
35	30	114.8	105.3	95.9	86.5	77.0	67.5	58.0
	40	106.0	96.5	87.0	77.5	68.2	58.8	49.2
	50	97.1	87.7	78.2	68.8	59.4	50.0	40.5
	60	88.3	78.9	69.4	60.0	50.5	41.0	31.6
	70	79.5	70.0	60.6	51.1	41.8	32.2	22.8

根据表 2,可以利用多元非线性回归分析法拟合泵站排涝流量 x_1 与湖泊水面率 x_2 、河网水面率 x_3 、下沉式绿地率 x_4 、透水铺装率 x_5 的函数关系,用相关系数 R^2 反映拟合精度,拟合的关系为:

$$x_1 - 0.002695(x_2 + x_3)^3 + 0.0788(x_2 + x_3)^2 + 8.62(x_2 + x_3) + 0.86x_4 + 1.09x_5 - 232.00 = 0$$

(13)

$$(R^2 = 0.9912)$$

3.2 模型计算结果与分析

常州市新北区北部新城高铁片区海绵城市建设的优化模型整理为:

目标函数:

$$\min f(x) = 110x_1 + 2424x_2 + 4242x_3 + 1621.05x_4 + 4908.6x_5 - 16883.16$$

(14)

约束条件:

$$\begin{cases} 0 \leq x_1 \leq \frac{0.3 \times 0.8 \times 200.22 \times 101 \times 10^3}{22 \times 3600} \\ \quad = 61.28 \text{ m}^3/\text{s} \\ x_2 \geq 12\%, x_3 \geq 4\%, x_2 + x_3 \leq 11.97\% \\ x_4 \geq 30\%, 15\% \leq x_5 \leq 33.33\% \\ x_1 - 0.002695(x_2 + x_3)^3 + 0.0788(x_2 + x_3)^2 + 8.62(x_2 + x_3) + 0.86x_4 + 1.09x_5 - 232.00 = 0 \\ x_2 + x_3 \geq 8.36\% \end{cases}$$

模型求解的结果为:排涝流量 $x_1 = 61.28 \text{ m}^3/\text{s}$,

湖泊水面率 $x_2 = 7.97\%$,河网水面率 $x_3 = 4.00\%$,下沉式绿地率 $x_4 = 51.77\%$,透水铺装率 $x_5 = 15.00\%$ 。上述数学模型记为方案 1,再对不同方案进行计算,对比分析如下:

(1)最优河网水面率为最小河网水面率取值,若对此不进行限制,其他约束条件不变,得到的数学模型记为方案 2,求解结果见表 3。在方案 2 中,可以看出投资费用比方案 1 小,但是规划的河网水面率却为 0。河网是城市生态景观的一部分,能够有效减少城区所产生的径流量,提高城市的防洪排涝标准,对城市的防洪排涝体系的安全性起着至关重要的作用,所以方案 2 的规划不合理,河网水面率应加以限制。

(2)最优透水铺装率为透水铺装率指标值,若对透水铺装率不加以约束,其他约束条件不变,得到的数学模型记为方案 3,求解结果见表 3。可以看出方案 3 最小费用相比较方案 1、方案 2 而言是较为经济的。但此方案采用了大量的下沉式绿地,虽然能够很好地对雨水进行净化、调蓄和缓释,有效消减洪峰流量,但是日常的除草、清淤、修建等维护管理工作量过大,需要大量的人力资源。另外计算出透水铺装率为 0,忽略了透水铺装透水速率快、能够有效补充地下水、提高城市的下渗能力的作用。从长远效益上看,应对透水铺装率进行约束。

表 3 常州市新北区北部新城高铁片区海绵城市建设相关参数优化方案比选表

方案	排涝流量 $x_1 / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	湖泊水面率 $x_2 / \%$	河网水面率 $x_3 / \%$	下沉式绿地率 $x_4 / \%$	透水铺装率 $x_5 / \%$	排蓄工程总费用 现值 $Z / 10^4$ 元
方案 1	61.28	7.97	4	51.77	15	183691.88
方案 2	61.28	11.97	0	51.77	15	176419.88
方案 3	61.28	7.97	4	70.78	0	140881.68

通过以上分析,应该采取方案 1,该方案不仅考虑到了河网的滞蓄能力,也体现了下沉式绿地和透水铺装等海绵城市建设措施对雨水的吸纳、蓄渗、缓释能力,能够在一定程度上减小城市径流量和排涝泵站的排涝模数。

4 结 论

本文基于海绵城市建设理念,针对圩垸地区城市排涝问题并结合海绵城市的规划控制指标体系,构建了以城市圩区排水工程总费用现值最小为目标函数的非线性数学模型,采用非线性规划罚函数法进行求解。利用该模型对常州市新北区北部新城高

铁片区排涝设计参数进行实例研究和分析,得到如下成果与结论:

(1)在一定排涝设计标准下,建立了城市圩区泵站外排能力与圩内水面率、下沉式绿地率及透水铺装率等排涝主要参数的相关关系,为处于不同城市化水平下排涝工程建设提供依据。

(2)通过对模型求解方案的比选,结果表明此方法不仅增强了城市对雨水的吸纳拦截能力、提高了城市排涝能力,而且对于修复城市生态环境和维持城市可持续发展的具有现实意义。

(3)模型为科学合理规划泵站外排能力、城市水面率及低影响开发措施提供了理论依据和研究方

向,对圩垸地区推进海绵城市建设和城市排涝主要设计参数优化具有一定的参考价值。我国海绵城市建设处于发展中,许多建设措施还不完善,需要进一步地加强研究和实践。

参考文献:

- [1] 林中立,徐涵秋. 基于 DTR 的城市热岛强度指数构建与应用——以福州市为例[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(2): 266-275.
- [2] 周子栋. 海绵城市建设条件评价及年径流总量控制率定量分解研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
- [3] CHOW W T L, BRENNAN D, BRAZEL A J. Urban Heat Island research in Phoenix, Arizona: Theoretical contributions and policy applications [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(4): 517-530.
- [4] 黄泽钧. 关于城市内涝灾害问题与对策的思考[J]. 水科学与工程技术, 2012(1): 7-10.
- [5] 刘力,侯精明,李家科,等. 西咸新区海绵城市建设对中型降雨致涝影响[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1): 155-159.
- [6] 顾孝天,李宁,周扬,等. 北京“7.21”暴雨引发的城市内涝灾害防御思考[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(2): 1-6.
- [7] 李大龙,贾绍凤,吕爱锋,等. 中国城市 LID 技术设施的成本效益区域差异[J]. 地理科学进展, 2017, 36(11): 1402-1412.
- [8] 成玉宁,袁旸洋. 让自然做功 事半功倍——正确理解“自然积存、自然渗透、自然净化”[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 4943-4945.
- [9] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于推进海绵城市建设的指导意见[EB/OL]. [2015-10-16]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-10/16/content_10228.htm.
- [10] 刘烨璇,李顺群,胡铁馨,等. 砂石渗井在黏土地区海绵城市建设中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 113-118.
- [11] 李沐寒,尹海伟,孔繁花,等. 南京市鼓楼区 LID 空间配置与雨洪调控效益研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 30-38.
- [12] LIU Yaoze, AHIABLAIME L M, BRALTS V F, et al. Enhancing a rainfall-runoff model to assess the impacts of BMPs and practices on storm runoff[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 147: 12-23.
- [13] 武永新,张立洪. 基于低影响开发的旧城区内涝数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(1): 114-119.
- [14] 董宇. 苏南圩区治理规划相关问题探讨[D]. 扬州: 扬州大学, 2016.
- [15] 周杨军,赵祥,宋源. 弱透水地质条件下的海绵城市规划建设方法探索[J]. 中国给水排水, 2017, 33(13): 124-129.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南: 低影响开发雨水系统构建(试行)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [17] 高曼,池勇志,赵建海,等. 基于边际效益分析的 LID 设施组合比例研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(9): 127-138.
- [18] 焦胜,贺颖鑫,罗碧虹,等. 基于雨水年径流控制下的下凹式绿地面积比研究[J]. 给水排水, 2016, 42(S1): 66-72.
- [19] 李运杰. 大连市主城区雨水资源利用措施优选与模拟评价[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [20] 胡东起,徐慧. 城市生态环境需水量计算方法与应用[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2018, 40(2): 29-34.
- [21] 杨裕恒,曹升乐,刘阳. 基于改进 Tennant 法的河流生态基流量计算[J]. 中国农村水利水电, 2017(8): 136-141.
- [22] 吴玲玲,闫中月,阮晓红. 基于 Tennant 法改进的生态水位计算方法研究[J]. 人民长江, 2019, 50(5): 47-51.
- [23] 陈璇,果利娟,管桂玲,等. 平原混合圩区排涝模数理论模型的研究与改进[J]. 中国农村水利水电, 2018(12): 8-12.