

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtq.2021.0065

张湘洁, 乔昌凯, 万航, 等. 气候变化条件下基于河岸带生态韧性的防洪堤高程优化模型[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(3): 614-624. ZHANG X J, QIAO C K, WAN H, et al. Elevation optimization model of flood control levee based on ecological resilience of riparian zone under climate change[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(3): 614-624. (in Chinese)

# 气候变化条件下基于河岸带生态韧性的 防洪堤高程优化模型

张湘洁<sup>1,2</sup>, 乔昌凯<sup>1,2</sup>, 万航<sup>1,2</sup>, 蔡宴朋<sup>1,2</sup>, 谭倩<sup>1,2</sup>

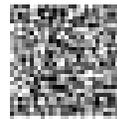
(1. 广东工业大学环境生态工程研究院, 广东省流域水环境治理与水生态修复重点实验室, 广州 510006;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458)

**摘要:**针对基于河岸带生态韧性的防洪堤高程优化过程中存在的不确定性问题, 建立一个区间混合整数随机鲁棒优化模型(IMISRO)。该模型不仅能够通过防洪堤高程的优化设计来达到调控河岸带应对洪水的生态韧性的目的, 还可以处理防洪堤高程优化设计中以概率分布函数和区间值形式存在的包括洪峰水位、经济成本等参数的不确定性。同时, 决策者可以通过在模型中设置不同的风险参数对系统稳定性与经济性进行权衡。将所开发的IMISRO模型应用于城市河道两岸的3个规划区域, 在不同的洪峰水位及河岸带生态韧性条件下可得出最优的防洪工程设计。该案例验证了模型能够为决策者提供考虑河岸带生态韧性的防洪优化策略, 可为气候变化条件下城市防洪堤安全策略的研究提供借鉴。

**关键词:**生态韧性; 河岸带; 防洪堤; 不确定性; 优化模型

中图分类号: TV622 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



水资源分布不均及水安全问题已经成为经济社会可持续发展和生态环境保护的重要障碍<sup>[1]</sup>。随着我国城市化进程的快速推进, 河道沿岸城市防洪安全标准逐渐提高。但是, 钢筋混凝土防洪堤的建设阻碍了河岸带水陆系统间物质能量的自然连通性, 导致水生态环境系统逐渐失衡, 也增加了洪水灾害发生的频率和强度<sup>[2-4]</sup>。作为河流生态系统与陆地生态系统进行物质、能量、信息交换的一个重要过渡带, 河岸带具有净化水质、改善生境、蓄滞洪水、缓解洪涝灾害的作用, 对其不当开发会导致河流生态功能退化, 甚至减弱河流抗洪能力<sup>[5-6]</sup>。与此同时, 气候变化对流域水资源系统产生了显著的影响, 导致降水模式在时间和空间上发生变化, 洪水灾害发生

风险不断增加。频发的洪水使人们开始反思传统单一防洪标准堤防抵抗策略的合理性<sup>[7]</sup>并逐渐认识到通过在河流两岸建造防洪堤、丁坝和渠化河道等防洪工程来抵御洪水的做法, 不仅破坏了城市河岸应对洪水的韧性, 且无法应对因气候变化造成的超过规划防洪标准的极端洪水灾害, 所以不是解决城市防洪安全问题的长期有效方法<sup>[8-9]</sup>。考虑到硬化的防洪堤在抵御极端洪水方面的不足, 城市防洪安全规划正越来越多地从单一防洪工程解决方案转向基于河岸带生态韧性来构建城市防洪系统的韧性抗洪策略<sup>[10-11]</sup>。因此, 研究气候变化条件下基于河岸带生态韧性的防洪堤高程优化模型具有重要的意义, 可以为决策者提供一种考虑河岸带生态韧性的抗洪

收稿日期: 2020-09-28 修回日期: 2021-03-12 网络出版时间: 2021-03-28

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210326.1114.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51822905; 51779255); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0403); 广东省重点实验室专项(2019B121203011)

作者简介: 张湘洁(1997—), 女, 广东潮州人, 主要从事水资源系统分析。E-mail: 2111907044@mail2.gdut.edu.cn

通信作者: 谭倩(1981—), 女, 四川安岳人, 教授, 博士, 主要从事水资源与环境系统分析。E-mail: qian\_tan@gdut.edu.cn

策略。

生态学家 Holling<sup>[12]</sup> 最先将韧性的概念引入生态学,他将韧性定义为系统吸收扰动后仍继续存在的能力,并认为生态韧性是系统发生状态改变前可以承受的干扰的量。韧性的概念较早应用到水管理中,而后又被应用到洪水风险管理。例如,在洪灾管理中,防御意味着通过防洪工程设施抗洪,而韧性则是从洪灾状态中恢复到正常状态的概率<sup>[13]</sup>。Cai 等<sup>[14]</sup>将湿地的承洪生态韧性定义为其在洪水来临时可以作为滞洪区,成为缓解洪水压力的第一道屏障;同时在洪水期过后,又能依靠自然景观的自我修复能力回到原始生境状态的能力。廖桂贤等<sup>[15]</sup>将城市的承洪韧性定义为城市承受洪水的能力,并指出应当利用洪泛区生态系统自然的蓄滞洪功能建立城市承洪韧性,增强城市应对洪水的适应性。基于上述研究,河岸带生态韧性是指河岸带生态系统天然具有的蓄滞洪水的功能,即洪水来临时,自然河岸带能够通过水体渗透和两岸河岸带湿地消纳洪水起到抵御洪峰、削弱洪水破坏力的作用,洪峰过后又能恢复其原有生态系统状态的能力。虽然在洪灾管理领域中对韧性理念的关注不断增加,但目前许多城市仍依赖防洪工程设施(如堤、坝和渠化)来应对洪灾,基于河岸生态韧性来建设城市防洪系统的实际应用并不普及。由于防洪堤高程的优化设计能恢复河岸带应对洪水的生态韧性<sup>[16-17]</sup>,所以本研究构建一个考虑河岸生态韧性的防洪堤高程优化模型,以期对未来气候变化条件下城市防洪堤安全优化设计方案的制定提供决策支持。

然而,基于河岸带生态韧性的防洪堤高程优化设计中存在许多不确定性问题。例如,洪峰流量及其对应的河道洪水水位,自然河岸带对洪水的生态恢复能力(抵抗洪水的生态韧性)以及河岸带修复后增加的生态抗洪能力等,这些参数很难用确定的数据量化。此外,受到气候变化和人类活动的影响,这些不确定参数会呈现出更大的复杂性。为了解决上述不确定性以及变化环境条件所带来的复杂性,很多不确定性优化方法被用于水资源规划系统中,其中两阶段规划(two-stage stochastic programming, TSP)受到研究者<sup>[18-21]</sup>的广泛关注。在气候变化影响下,洪水模式不断变化,为适应城市防洪规划建设管理的需要,决策者应在考虑防洪工程总体布局优化的基础上制定适宜的城市防洪方案。TSP模型在规划未来防洪设计方案时,能够通过第一阶段预先确定的防洪目

标进行修正,从而减少由于洪峰流量的随机性所造成的经济损失,因此是在未来洪峰流量不确定情况下对河岸带防洪系统进行优化设计的有效方法。但是,TSP模型存在2个方面的缺陷。其一是它需要参数的概率分布信息,然而在实际应用过程中,有些参数的已知数据信息不足以通过概率分布函数的形式进行量化,这时TSP模型就不能应用。此外,在气候变化影响下,自然生态河岸抵御洪水的生态韧性也可能出现不足的情况,因此需要对河岸带进行恢复重建,以增加防洪系统的抗洪生态韧性,但TSP模型并没有考虑这种动态性对系统的影响。为了弥补上述缺陷,研究者将区间线性规划(interval linear programming, ILP)、混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)整合到TSP模型中,建立了区间混合整数两阶段随机规划(interval mixed-integer two-stage stochastic programming, IMITSP)模型<sup>[22-23]</sup>。不过,IMITSP模型以系统成本的期望值作为目标函数,没有考虑模型优化结果的不均衡性问题,这可能会增加防洪优化系统的失效风险。因此,本研究在IMITSP模型基础上引入了鲁棒优化(RO)建立了区间混合整数随机鲁棒优化(interval mixed integer stochastic robust optimization, IMISRO)模型并将其应用于城市河道两岸3个规划区域的防洪规划,在不同的洪峰水位及河岸带生态韧性条件下得出防洪堤的最优设计高程。案例研究验证了该模型不仅能够处理多种不确定信息,为决策者提供不确定条件下基于河岸带生态韧性的防洪优化策略,还能够通过风险参数的设置实现系统稳定性和经济性的权衡。

## 1 模型方法

### 1.1 模型的建立

按照单一防洪标准兴建堤防的防洪策略已不是应对洪水灾害的有效方法。由于自然河岸带具有抵抗洪水的生态韧性,因此可以将河道直立岸坡减缓形成一定宽度的生态护岸,以河岸带缓坡宽度换取堤防高度来优化防洪堤的设计高程,从而达到改善河岸带应对洪水的韧性的目的。基于已有数据资料和城市的防洪规划标准,可对河岸带现有的生态恢复能力进行评估。在此基础上,决策者可以预先确定防洪堤的设计高程(第一阶段决策变量)。由于未来洪峰水位的不确定性,决策者预先确定的防洪目标可能存在一定的风险。如果实际洪峰水位低于防洪堤顶高程,则预定的防洪目标可以实现,产生常规

经济成本;但当极端洪水事件发生时,预定的防洪工程不足以抵御当前洪水,过量的洪水会漫堤溢流淹没城市造成经济损失。为了避免系统出现这种失效风险,两阶段随机规划模型可以通过第二阶段决策的修正来弥补第一阶段预设标准的不合理所带来的损失。其次,在气候变化条件下,未来洪水发生的频率和强度可能增大。当洪水的破坏能力远远超过自然河岸带现有的生态恢复能力时,就需要对河岸带生态防洪系统进行恢复重建,以增强河岸带生态系统应对洪水的韧性。此时,防洪堤的设计高程也会相应增加。为了表征这种动态性对系统的影响,本文引入二进制变量来表示是否需要生态河岸带进行恢复重建以提高其现有的生态恢复能力。此外,河岸带的生态韧性及其相关的经济参数难以用确定值表示,通常将其处理为具有上下界的区间变量。基于上述不确定性和动态性,建立的区间混合整数两阶段随机规划(IMITSP)模型表示为

目标函数

$$\min f_{\text{opt}}^{\pm} = \sum_{i=1}^u C_i^{\pm} W_i^{\pm} + \sum_{i=1}^u \sum_{j=1}^v [p_j (C_i^{\pm} T_{ij}^{\pm} + D_i^{\pm} S_{ij}^{\pm}) + \sum_{k=1}^l \Delta R_k^{\pm} E_k^{\pm} Y_{ijk}^{\pm}] \quad (1)$$

约束条件

(1) 河岸带目前承受洪水的生态韧性约束

$$W_i^{\pm} \leq R_i^{\pm} \quad \forall i \quad (2)$$

(2) 河岸带目前最大的生态韧性约束

$$W_i^{\pm} + S_{ij}^{\pm} \leq R_{\text{imax}}^{\pm} \quad \forall i, j \quad (3)$$

(3) 河岸带恢复重建增加的生态韧性约束

$$T_{ij}^{\pm} \leq \sum_{k=1}^l \Delta R_k^{\pm} Y_{ijk}^{\pm} \quad \forall i, j \quad (4)$$

(4) 总的生态韧性约束

$$\sum_{i=1}^u (W_i^{\pm} + S_{ij}^{\pm} + T_{ij}^{\pm}) \leq \sum_{i=1}^u R_{\text{imax}}^{\pm} + \sum_{i=1}^u \sum_{k=1}^l \Delta R_k^{\pm} Y_{ijk}^{\pm} \quad \forall j \quad (5)$$

(5) 洪峰水位约束

$$\sum_{i=1}^u (W_i^{\pm} + S_{ij}^{\pm} + T_{ij}^{\pm}) \geq h_j^{\pm} \quad \forall j \quad (6)$$

(6) 技术约束

$$Y_{ijk}^{\pm} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad \forall i, j, k \quad (7)$$

(7) 河岸带恢复重建方案约束

$$\sum_{k=1}^l Y_{ijk}^{\pm} \leq 1 \quad \forall i, j \quad (8)$$

式中:  $f^{\pm}$  为防洪系统成本目标函数, 万元;  $i$  表示河岸带不同规划区域;  $j$  为不同大小的洪峰水位水平;  $k$  是河岸带各规划区域的不同重建方案;  $C_i^{\pm}$  为在

河岸带规划区域  $i$  修建防洪堤的常规费用, 万元/m;  $W_i^{\pm}$  为基于河岸带规划区域  $i$  的生态韧性而修建防洪堤的设计高程, m;  $p_j$  为不同洪峰水平出现的概率;  $h_j^{\pm}$  为河流的实际洪水水位, m;  $T_{ij}^{\pm}$  为当河流洪水水位为  $h_j^{\pm}$  时, 河岸带进行生态重建而增加的防洪堤的高程, m;  $S_{ij}^{\pm}$  为当河流洪水水位为  $h_j^{\pm}$  时, 河岸带规划区域  $i$  的防洪堤高程仍不足以抵御当前洪水而产生的溢流洪水水位, m;  $D_i^{\pm}$  为洪水漫堤溢流的经济损失, 万元/m;  $\Delta R_k^{\pm}$  为选择生态重建方案  $k$  使得河岸带规划区域  $i$  增加的生态韧性, m;  $E_k^{\pm}$  为重建方案  $k$  给河岸带规划区域  $i$  带来的经济成本, 万元/m;  $R_i^{\pm}$  为河岸带规划区域  $i$  目前能够承受的洪水水位(现有的生态恢复能力), m;  $R_{\text{imax}}^{\pm}$  为河岸带规划区域  $i$  生态系统当前能够承受的最大洪水水位, m;  $Y_{ijk}^{\pm}$  为二进制变量, 当其取值为 1 时说明在洪峰水位水平  $j$  时, 规划区域  $i$  需要选择重建方案  $k$  来恢复生态韧性, 若其取值为 0 则不需要进行恢复重建。

区间混合整数两阶段随机规划(IMITSP)模型可以处理以概率分布函数表示的洪水水位、以区间变量表示的经济参数和河岸带应对洪水的生态恢复能力等不确定信息, 同时还考虑了气候变化影响导致的河岸生态系统应对洪水韧性的动态变化。但该模型以防洪系统成本的期望值作为目标函数, 没有考虑洪峰流量的随机性导致的模型优化结果的不均衡性, 从而给系统带来了一定的失效风险。因此, 在 IMITSP 模型的基础上, 引入鲁棒优化(RO)<sup>[24-25]</sup>来控制模型优化结果与均值之间的偏差, 保证系统能够达到稳健状态。所形成区间混合整数随机鲁棒优化(IMIS-RO)模型为

目标函数

$$\min f_{\text{opt}}^{\pm} = \sum_{i=1}^u C_i^{\pm} W_i^{\pm} + \sum_{i=1}^u \sum_{j=1}^v [p_j (C_i^{\pm} T_{ij}^{\pm} + D_i^{\pm} S_{ij}^{\pm}) + \sum_{k=1}^l \Delta R_k^{\pm} E_k^{\pm} Y_{ijk}^{\pm}] + \rho \sum_{i=1}^u \sum_{j=1}^v p_j V_{ij}^{\pm} \quad (9)$$

约束条件

$$V_{ij}^{\pm} \geq (C_i^{\pm} T_{ij}^{\pm} + D_i^{\pm} S_{ij}^{\pm}) - \sum_{j=1}^v p_j (C_i^{\pm} T_{ij}^{\pm} + D_i^{\pm} S_{ij}^{\pm}) \quad \forall i, j \quad (10)$$

$$W_i^{\pm} \leq R_i^{\pm} \quad \forall i \quad (11)$$

$$W_i^{\pm} + S_{ij}^{\pm} \leq R_{\text{imax}}^{\pm} \quad \forall i, j \quad (12)$$

$$T_{ij}^{\pm} \leq \sum_{k=1}^l \Delta R_k^{\pm} Y_{ijk}^{\pm} \quad \forall i, j \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^u (W_i^{\pm} + S_{ij}^{\pm} + T_{ij}^{\pm}) \leq \sum_{i=1}^u P_{\text{imax}}^{\pm} + \sum_{i=1}^u \sum_{k=1}^l \Delta R_k^{\pm} Y_{ijk}^{\pm} \quad \forall j \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^u (W_i^{\pm} + S_{ij}^{\pm} + T_{ij}^{\pm}) \geq h_j^{\pm} \quad \forall j \quad (15)$$

$$Y_{ijk}^{\pm} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad \forall i, j, k \quad (16)$$

$$\sum_{k=1}^l Y_{ijk}^{\pm} \leq 1 \quad \forall i, j \quad (17)$$

式中： $\rho$ 为风险水平参数，决策者可以根据所面临的洪峰水位这一随机变量的变化性，选择合适的参数值来权衡系统经济性与稳健性之间的关系<sup>[26]</sup>。当 $\rho=0$ 时，目标函数为最小化系统成本的期望值，说明决策者对风险采取中立态度，不考虑第二阶段惩罚成本的变化给系统带来的失效风险； $\rho$ 取1表示河流可能爆发极端洪水的概率极高，决策者对河岸带的生态韧性持保守态度，因此十分重视优化结果的均衡性和系统的稳健性。 $V_{ij}^{\pm}$ 表示第二阶段惩罚成本的变化值，万元。

## 1.2 模型的求解

由于模型目标为系统的经济成本最小，根据区间交互算法，应先求其下界子模型，再将下界子模型的解代入上界子模型，从而求得整个模型的最优解<sup>[27-28]</sup>。

### 1.2.1 下界子模型

目标函数

$$\min f_{\text{opt}}^{-} = \sum_{i=1}^u C_i^{-} W_i^{-} + \sum_{i=1}^u \sum_{j=1}^v [p_j (C_i^{-} T_{ij}^{-} + D_i^{-} S_{ij}^{-}) + \sum_{k=1}^l \Delta R_k^{-} E_k^{-} Y_{ijk}^{-}] + \rho \sum_{i=1}^u \sum_{j=1}^v p_j V_{ij}^{-} \quad (18)$$

约束条件

$$(1) \text{ 河岸带规划区域 } i \text{ 目前的生态韧性约束} \\ W_i^{-} \leq R_i^{-} \quad \forall i \quad (19)$$

(2) 河岸带规划区域  $i$  目前抵抗最大洪水的生态韧性约束

$$W_i^{-} + S_{ij}^{-} \leq R_{\text{imax}}^{-} \quad \forall i, j \quad (20)$$

(3) 河岸带规划区域  $i$  恢复重建增加的生态韧性约束

$$T_{ij}^{-} \leq \sum_{k=1}^l \Delta R_k^{-} Y_{ijk}^{-} \quad \forall i, j \quad (21)$$

(4) 总的生态韧性约束

$$\sum_{i=1}^u (W_i^{-} + S_{ij}^{-} + T_{ij}^{-}) \leq \sum_{i=1}^u P_{i, \text{max}}^{-} + \sum_{i=1}^u \sum_{j=1}^v \Delta R_k^{-} Y_{ijk}^{-} \quad \forall j \quad (22)$$

(5) 洪峰水位约束

$$\sum_{i=1}^u (W_i^{-} + S_{ij}^{-} + T_{ij}^{-}) \geq h_j^{-} \quad \forall j \quad (23)$$

(6) 技术约束

$$Y_{ijk}^{-} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad \forall i, j, k \quad (24)$$

$$V_{ij}^{-} \geq (C_i^{-} T_{ij}^{-} + D_i^{-} S_{ij}^{-}) - \sum_{j=1}^v p_j (C_i^{-} T_{ij}^{-} + D_i^{-} S_{ij}^{-}) \quad \forall i, j \quad (25)$$

(7) 重建方案约束

$$\sum_{k=1}^l Y_{ijk}^{-} \leq 1 \quad \forall i, j \quad (26)$$

式中： $W_i^{-}$ 、 $S_{ij}^{-}$ 、 $T_{ij}^{-}$ 、 $Y_{ijk}^{-}$ 为下界子模型的决策变量。

下界子模型考虑河岸带规划区域  $i$  防洪系统生态韧性的防洪堤的优化高程为

$$A_{ij, \text{opt}}^{-} = W_{i, \text{opt}}^{-} + S_{ij, \text{opt}}^{-} + T_{ij, \text{opt}}^{-} \quad \forall i, j \quad (27)$$

式中： $W_{i, \text{opt}}^{-}$ 、 $S_{ij, \text{opt}}^{-}$ 、 $T_{ij, \text{opt}}^{-}$ 和 $Y_{ijk}^{-}$ 为优化解。

### 1.2.2 上界子模型

目标函数

$$\min f_{\text{opt}}^{+} = \sum_{i=1}^u C_i^{+} W_i^{+} + \sum_{i=1}^u \sum_{j=1}^v [p_j (C_i^{+} T_{ij}^{+} + D_i^{+} S_{ij}^{+}) + \sum_{k=1}^l \Delta R_k^{+} E_k^{+} Y_{ijk}^{+}] + \rho \sum_{i=1}^u \sum_{j=1}^v p_j V_{ij}^{+} \quad (28)$$

约束条件

(1) 河岸带规划区域  $i$  目前的生态韧性约束

$$W_i^{+} \leq R_i^{+} \quad \forall i \quad (29)$$

(2) 河岸带规划区域  $i$  目前承受最大洪水的生态韧性约束

$$W_i^{+} + S_{ij}^{+} \leq R_{\text{imax}}^{+} \quad \forall i, j \quad (30)$$

(3) 河岸带规划区域  $i$  恢复重建增加的生态韧性约束

$$T_{ij}^{+} \leq \sum_{k=1}^l \Delta R_k^{+} Y_{ijk}^{+} \quad \forall i, j \quad (31)$$

(4) 总的生态韧性约束

$$\sum_{i=1}^u (W_i^{+} + S_{ij}^{+} + T_{ij}^{+}) \leq \sum_{i=1}^u P_{i, \text{max}}^{+} + \sum_{i=1}^u \sum_{j=1}^v \Delta R_k^{+} Y_{ijk}^{+} \quad \forall j \quad (32)$$

(5) 洪峰水位约束

$$\sum_{i=1}^u (W_i^{+} + S_{ij}^{+} + T_{ij}^{+}) \geq h_j^{+} \quad \forall j \quad (33)$$

(6) 技术约束

$$W_i^{+} \geq W_{i, \text{opt}}^{-} \quad \forall i \quad (34)$$

$$S_{ij}^{+} \geq S_{ij, \text{opt}}^{-} \quad \forall i, j \quad (35)$$

$$T_{ij}^{+} \geq T_{ij, \text{opt}}^{-} \quad \forall i, j \quad (36)$$

$$Y_{ij, k}^{+} \geq Y_{ijk, \text{opt}}^{-} \quad \forall i, j, k \quad (37)$$

$$V_{ij}^{+} \geq (C_j^{+} T_{ij}^{+} + D_i^{+} S_{ij}^{+}) - \sum_{j=1}^v p_j (C_i^{+} T_{ij}^{+} + D_i^{+} S_{ij}^{+}) \quad \forall i, j \quad (38)$$

(7) 重建方案约束

$$\sum_{k=1}^l Y_{ijk}^{+} \leq 1 \quad \forall i, j \quad (39)$$

式中： $W_i^{+}$ 、 $S_{ij}^{+}$ 、 $T_{ij}^{+}$ 、 $Y_{ijk}^{+}$ 为上界子模型的决策变量。

上界子模型考虑河岸带规划区域  $i$  防洪系统生

态韧性的防洪堤的优化高程为

$$A_{ij, \text{opt}}^+ = W_{i, \text{opt}}^+ + S_{ij, \text{opt}}^+ + T_{ij, \text{opt}}^+ \quad \forall i, j \quad (40)$$

式中:  $W_{i, \text{opt}}^+$ 、 $S_{ij, \text{opt}}^+$ 、 $T_{ij, \text{opt}}^+$  为优化解。

因此,建立的 IMISRO 模型的优化解为

$$f_{\text{opt}}^\pm = [f_{\text{opt}}^-, f_{\text{opt}}^+]$$

$$W_{i, \text{opt}}^\pm = [W_{i, \text{opt}}^-, W_{i, \text{opt}}^+] \quad \forall i$$

$$S_{ij, \text{opt}}^\pm = [S_{ij, \text{opt}}^-, S_{ij, \text{opt}}^+] \quad \forall i, j$$

$$T_{ij, \text{opt}}^\pm = [T_{ij, \text{opt}}^-, T_{ij, \text{opt}}^+] \quad \forall i, j$$

$$Y_{ijk, \text{opt}}^\pm = [Y_{ijk, \text{opt}}^-, Y_{ijk, \text{opt}}^+] \quad \forall i, j, k$$

$$A_{ij, \text{opt}}^\pm = W_{i, \text{opt}}^\pm + S_{ij, \text{opt}}^\pm + T_{ij, \text{opt}}^\pm \quad \forall i, j$$

建立的区间混合整数随机鲁棒优化(IMISRO)模型不仅能够处理以区间值和概率分布形式表示的不确定信息,还能够帮助决策者权衡系统经济性与稳健性之间的关系。图 1 给出了 IMISRO 模型的技术路线图。

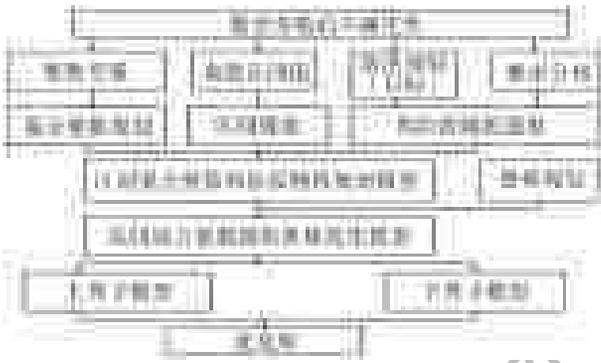


图 1 区间混合整数随机鲁棒优化的技术路线

Fig. 1 Framework of an interval mixed integer stochastic robust optimization model (IMISRO)

## 2 案例应用

### 2.1 研究区情况及数据

研究区的地理位置分布情况为:区域 1 和 2 分布在河道右岸,右岸上游为规划区域 2,下游为老城区域 1,新城防洪规划标准高于老城;河道左岸分布有一片较开阔的河岸带漫滩湿地区域 3,该区域面积较大,跨越的岸线长度较长,因此河道左岸岸线毗邻区域被湿地区域 3 完全覆盖。与传统修建堤防工程的抵抗性策略不同,河岸带韧性抗洪策略考虑了自然河岸带抵御洪水的生态韧性,并通过原有防洪堤高程的优化来提高河岸带防洪系统应对洪水的韧性。表 1 至 3 中的参数来源于洪泛区防洪能力优化和河岸湿地承洪生态韧性优化的相关文献<sup>[14,29]</sup>,其中成本参数由防洪堤建设工程造价估算得到。表 1 是不同天然河岸带目前能够承受的洪水水位(现有的生态恢复能力)及其相关的经济参数。河岸带防洪系统能够抵御实际发生的洪水水位时只产生常规费用,反之,如果生态恢复能力不足以承受当前洪水水位,洪水会淹没部分城市区域产生经济损失。此外,考虑到气候变化对洪水模式的影响,当洪峰水位超过自然河岸带的现有的生态恢复能力时,就需要对河岸带进行恢复重建以增加抗洪韧性。表 2 列出了相关的重建方案和相应的成本,表 3 则给出了不同气候条件下该河流实际洪水水位的变化及其发生的概率。

表 1 天然河岸带生态系统能够承受的洪水水位及其相关经济参数

Tab. 1 Flood water level and related economic parameters of natural riparian ecosystem

项目	区域		
	$i=1$	$i=2$	$i=3$
河岸带生态系统能够承受的洪水水位/m	[11.8, 12.5]	[13.0, 14.0]	[14.5, 15.8]
当前生态韧性下最大允许的洪水水位/m	[12.0, 13.0]	[13.0, 14.0]	[15.0, 16.0]
修建防洪堤的常规费用/(万元·m <sup>-1</sup> )	[8, 12]	[10, 12]	[11, 13]
经济惩罚/(万元·m <sup>-1</sup> )	[20, 25]	[15, 18]	[14, 17]

表 2 河岸带生态韧性恢复方案及其相关经济成本

Tab. 2 Restoration schemes of ecological resilience in riparian zone and its related costs

区域		$i=1$	$i=2$	$i=3$
区域 $i$ 生态承洪能力重建方案高程增加值/m	方案 1	[2.8, 3.5]	[3.0, 4.0]	0
	方案 2	[3.0, 3.8]	[3.5, 4.4]	0
	方案 3	[3.5, 4.0]	[4.0, 4.5]	0
相关的经济成本/(万元·m <sup>-1</sup> )	方案 1	[6, 7]	[9, 10]	0
	方案 2	[7, 8]	[10, 11]	0
	方案 3	[8, 9]	[11, 12]	0

表3 洪峰水位及其概率分布

Tab. 3 Flood peak water level and its probability distribution

洪峰水位水平	概率/%	洪峰水位/m
非常低( $j=1$ )	5	[36.3, 37.1]
低( $j=2$ )	10	[37.2, 38.4]
中低( $j=3$ )	15	[38.5, 39.5]
中( $j=4$ )	40	[39.6, 41.4]
中高( $j=5$ )	15	[41.5, 42.9]
高( $j=6$ )	10	[43.1, 44.6]
非常高( $j=7$ )	5	[44.7, 45.3]

## 2.2 结果分析

风险水平参数  $\rho$  的取值范围为  $0 \sim 1$ ,  $\rho$  的取值越高,模型鲁棒性水平更高,但是相应的系统成本也会随之增加。实际上,决策者在选择优化方案时不仅需要考察方案的稳健性,也要综合开支预算选择经济性较高的方案。 $\rho$  取值为 0.5 能够兼顾模型的鲁棒性和系统成本的经济性,所以更易为决策者所接受。因此,表 4 给出了  $\rho$  取值为 0.5 情况下通过 IMISRO 模型得到的二进制变量的优化解。结果表明,规划区域 1 在洪水水位为中高到非常高时需要生态重建以增加其抵御洪水的韧性,而规划区域 2 仅在非常高的洪水水位下才需要进行生态重建。相反地,由于规划区域 3 所在地区的条件限制,在所有设计洪水水位下都不进行重建。此外,生态重建会增加河岸带应对洪水的韧性,从而使得基于河岸生态韧性而建设的防洪堤的设计高程也相应地增加。结合图 2 和表 4 可以确定规划区域 1 在不同洪峰水位下选择的生态重建方案所带来的防洪堤设计高程的增加值。可以看出,区域 1 在河流洪峰水位为非常低到中水平下不需要进行重建。当洪峰水位水平处于中高和非常高的状态时,区域 1 的防洪堤设计高程增加值为  $T_{15}^{\pm} = T_{17}^{\pm} = [2.8, 3.5]m$ 。然而,在洪水水位水平为高时,位于区域 1 的防洪堤的设计高程增加值为  $[3.5, 4.0]m$ ,这一结果表明:在洪峰流量较低的理想情况下,即河流实际洪峰水位取其下限的情况下,区域 1 的防洪堤设计高程需增加 3.5 m;而在洪峰流量较高的非理想情况下,即河流实际洪峰水位取其上限的情况下,防洪堤的设计高程应增加 4.0 m。类似地,从图 3 可以看出规划区域 2 在不同洪峰水位下的生态重建方案及其引起的防洪堤设计高程的增加值。很明显,区域 1 和区域 2 的情况存在很大的差别。区域 2 在洪峰水位水平为非常低到高的情况下都不进行生态区重建,而当洪峰水位为非常高的情况时,其防洪堤设计高程增加值为  $T_{27}^{\pm} = [3.0, 4.0]m$ 。由于区域 2 进行生

态区重建的经济成本较高,所以当区域 1 的重建方案已经足够恢复系统应对洪水的生态韧性时,就不对区域 2 进行生态重建。当发生极端降雨时,由于区域 1 的生态韧性仍无法承受当前洪水水位,所以需要区域 2 进行生态重建以提高地区整体的防洪能力。因此,当区域 2 的洪峰流量处于非常高的水平时,在河流洪峰水位取下限的情况下,其防洪堤的高程应增加 3.0 m,而在河流洪峰水位取上限的情况下,防洪堤的设计高程应增加 4.0 m。

表4 IMISRO 模型的二进制变量解

Tab. 4 Binary variable solution of the IMISRO model

洪峰水位水平	概率/%	重建方案	二进制变量		优化解	
			区域 1	区域 2	区域 1	区域 2
非常低	5	1	$Y_{111}^{\pm}$	$Y_{211}^{\pm}$	0	0
非常低	5	2	$Y_{112}^{\pm}$	$Y_{212}^{\pm}$	0	0
非常低	5	3	$Y_{113}^{\pm}$	$Y_{213}^{\pm}$	0	0
低	10	1	$Y_{121}^{\pm}$	$Y_{221}^{\pm}$	0	0
低	10	2	$Y_{122}^{\pm}$	$Y_{222}^{\pm}$	0	0
低	10	3	$Y_{123}^{\pm}$	$Y_{223}^{\pm}$	0	0
中低	15	1	$Y_{131}^{\pm}$	$Y_{231}^{\pm}$	0	0
中低	15	2	$Y_{132}^{\pm}$	$Y_{232}^{\pm}$	0	0
中低	15	3	$Y_{133}^{\pm}$	$Y_{233}^{\pm}$	0	0
中	40	1	$Y_{141}^{\pm}$	$Y_{241}^{\pm}$	0	0
中	40	2	$Y_{142}^{\pm}$	$Y_{242}^{\pm}$	0	0
中	40	3	$Y_{143}^{\pm}$	$Y_{243}^{\pm}$	0	0
中高	15	1	$Y_{151}^{\pm}$	$Y_{251}^{\pm}$	1	0
中高	15	2	$Y_{152}^{\pm}$	$Y_{252}^{\pm}$	0	0
中高	15	3	$Y_{153}^{\pm}$	$Y_{253}^{\pm}$	0	0
高	10	1	$Y_{161}^{\pm}$	$Y_{261}^{\pm}$	0	0
高	10	2	$Y_{162}^{\pm}$	$Y_{262}^{\pm}$	0	0
高	10	3	$Y_{163}^{\pm}$	$Y_{263}^{\pm}$	1	0
非常高	5	1	$Y_{171}^{\pm}$	$Y_{271}^{\pm}$	1	1
非常高	5	2	$Y_{172}^{\pm}$	$Y_{272}^{\pm}$	0	0
非常高	5	3	$Y_{173}^{\pm}$	$Y_{273}^{\pm}$	0	0

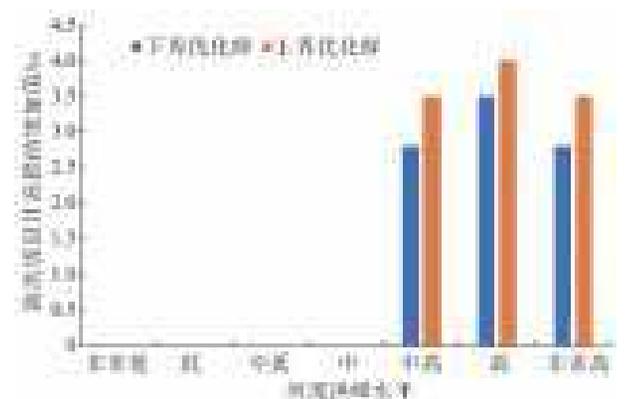


图2 在不同洪峰下区域 1 防洪堤设计高程的增加值  
Fig. 2 Design elevation increment of flood control embankment in area 1 under different flood peak water level

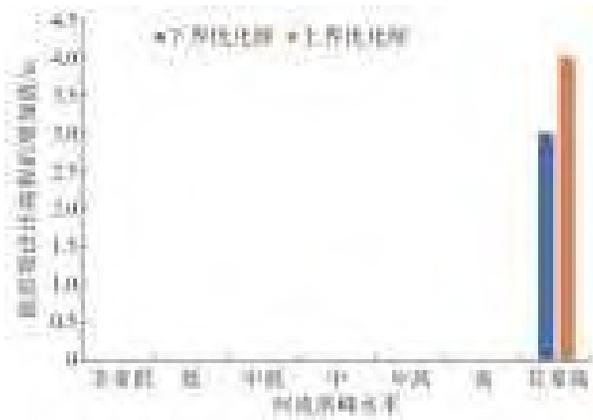


图 3 在不同洪峰下区域 2 防洪堤设计高程的增加值

Fig. 3 Design elevation increment of flood control embankment in area 2 under different flood peak water level

当发生洪灾时,河流的洪水首先将由基于河岸生态韧性优化的防洪堤来承担。如果此时防洪堤不足以抵御洪水,超过防洪堤目前设计高程的洪水会漫堤溢流淹没城市,带来一定的经济惩罚。表 5 给出了 IMISRO 模型求得的连续变量的优化解。从表 5 中可以看出,区域 1 进行生态重建前其防洪堤的设计高程为 11.8 m,区域 1 在中高、高和非常高的洪水水位水平下会进行生态重建,使得其承受洪水的韧性分别增加[2.8,3.5]、[3.5,4.0]和[2.8,3.5]m。综上所述,在非常低到中等水平的洪水情况下,区域 1 的防洪堤的优化高程为 11.8 m;在中高和非常高

的洪峰水位水平下则为[14.6,15.3]m;而在洪峰水位为高时该值为[15.3,15.8]m。同理,可以确定区域 2 进行生态重建前其防洪堤的设计高程为[13.0,13.8]m。这正是区域 2 与其他两个区域的不同之处:区域 2 生态重建前其防洪堤的抗洪韧性是以区间值而不是确定值的形式表示的,说明该区域受气候变化引起的不确定因素的影响比较明显。此外,由表 5 可知区域 2 仅在非常高的洪水水位水平下需要进行生态重建,此时该区域生态韧性的增额为[3.0,4.0]m。因此,在非常低到高的洪峰水位水平下,区域 2 的防洪堤的优化高程为[13.0,13.8]m,仅在洪峰水位为非常高时该值为[16.0,17.8]m。至于区域 3,目前该区域防洪堤的设计高程为 13.9 m。可以注意到,该区域在洪水水位为中、高和非常高的水平时会发生漫堤,这是区域 3 区别于其他两个区域的地方。这一现象产生的原因是该区域为较开阔平缓的漫滩湿地,超标洪水带来的经济损失相对较少,所以当地区整体的防洪能力不足以抵御极端洪水的侵扰时,超标洪水会优先分配给区域 3 承担。由于区域 3 不进行生态重建,因此在洪峰水位为非常低、低、中低、中高时,该区域防洪堤的优化设计高程为 13.9 m,在中水平的洪峰水位下则为[14.8,15.8]m,而在洪峰水位为高和非常高时该值分别变为[14.8,15.0]和 14.1 m。

表 5 IMISRO 模型求得的连续变量的优化解

Tab. 5 Optimal solution of continuous variables obtained by IMISRO model

洪峰水位水平	概率/%	区域	$W_{i,opt}^{\pm}/m$	$T_{ij,opt}^{\pm}/m$	$S_{ij,opt}^{\pm}/m$	$(W_{i,opt}^{\pm} + T_{ij,opt}^{\pm} + S_{ij,opt}^{\pm})/m$
非常低	5	1	11.8	0	0	11.8
非常低	5	2	[13.0,13.8]	0	0	[13.0,13.8]
非常低	5	3	13.9	0	0	13.9
低	10	1	11.8	0	0	11.8
低	10	2	[13.0,13.8]	0	0	[13.0,13.8]
低	10	3	13.9	0	0	13.9
中低	15	1	11.8	0	0	11.8
中低	15	2	[13.0,13.8]	0	0	[13.0,13.8]
中低	15	3	13.9	0	0	13.9
中	40	1	11.8	0	0	11.8
中	40	2	[13.0,13.8]	0	0	[13.0,13.8]
中	40	3	13.9	0	[0.9,1.9]	[14.8,15.8]
中高	15	1	11.8	[2.8,3.5]	0	[14.6,15.3]
中高	15	2	[13.0,13.8]	0	0	[13.0,13.8]
中高	15	3	13.9	0	0	13.9
高	10	1	11.8	[3.5,4.0]	0	[15.3,15.8]
高	10	2	[13.0,13.8]	0	0	[13.0,13.8]
高	10	3	13.9	0	[0.9,1.1]	[14.8,15.0]
非常高	5	1	11.8	[2.8,3.5]	0	[14.6,15.3]
非常高	5	2	[13.0,13.8]	[3.0,4.0]	0	[16.0,17.8]
非常高	5	3	13.9	0	0.2	14.1

同时,表 5 还给出了系统成本的区间上下限  $f_{\text{opt}}^-$  和  $f_{\text{opt}}^+$  的求解结果。由于不确定性参数的存在,模型变量在其上下界内变化,系统成本也随之变化。系统成本的下界意味着决策者对该区域当前的洪峰水位水平采取积极的态度,即认为洪水水位应取其下限值。此时,如果实际洪峰水位较高,则系统失效的风险增加。相反,系统成本的上界对应洪水水位取其上限值时的优化情景,此时系统失效的风险低,但相应的经济成本也较高。

通过调整风险水平参数  $\rho$  的取值范围,决策者可以在系统经济性和稳定性之间进行权衡。表 6 给出了不同风险参数  $\rho$  下第二阶段惩罚成本的变化值。由表 6 可知,当风险参数从  $\rho=0$  到  $\rho=1.0$ ,第二阶段惩罚成本的变化值出现逐渐减少的趋势。这说明,随着风险水平参数取值的增加,第二阶段惩罚成本与其期望值之间的偏离程度逐渐降低,模型优化结果的均衡性逐渐增强。例如,当  $\rho=0$  时第二阶段惩罚成本的变化值为 [13.6, 26.5] 万元,而当  $\rho=0.5$  时则变为 [12.2, 23.5] 万元,当  $\rho=1.0$  时更是减少为 [9.3, 18.9] 万元。同时,可以看出,随着风险水平系数的增加,第二阶段惩罚成本变化值的区间会变小。例如,当风险水平参数的取值分别为 0、0.5、0.8、1.0 时,相应的区间值分别为 12.9、11.3、10、9.6 万元。这一结果表明,随着风险水平参数取值的增加,IMSRO 模型结果的稳定性也会随之增强。

表 6 在不同风险参数下第二阶段惩罚成本的变化量

Tab. 6 Penalty cost in the second stage under different weights

风险参数	$\rho=0$	$\rho=0.5$	$\rho=0.8$	$\rho=1.0$
惩罚成本的变化值/万元	[13.6, 26.5]	[12.2, 23.5]	[11.1, 21.1]	[9.3, 18.9]

图 4 和图 5 分别展示了在不同风险参数下上界和下界子模型的系统成本,从图中曲线的变化趋势可以看出,随着风险参数取值的增加,上下界子模型的系统成本即目标函数值也呈现出增大的趋势。例如,当  $\rho=0$  时系统成本为 [480.9, 643.7] 万元,而当  $\rho=1.0$  时则变为 [492.6, 665.6] 万元。这一结果表明,当风险参数取值较小时产生的系统成本较低,这时决策者对区域的极端洪水风险采取的是乐观的态度。因此,当发生极端洪水事件时,系统要承受的失效风险也就越高。相反,风险参数取值较大的决策方案可以更好地抵御极端洪水事件的侵扰,此时系统的稳定性较高,但这也意味着需要承担更高的系统成本。以上分析表明,在系统稳定性和系统经济性之间存在一种权衡关系。所以,在实际应用时,决策者应综合考虑气候变化引发的极端降水灾害风险

以及系统抵御极端洪水的韧性水平,在此基础上选取合适的风险参数值来控制优化结果的均衡性,得到较优的决策方案。



图 4 上界子模型在不同风险参数下的系统成本

Fig. 4 System cost of upper bound sub-model under different risk coefficients

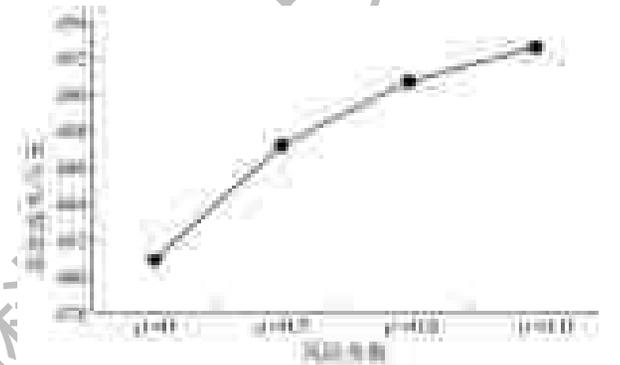


图 5 下界子模型在不同风险参数下的系统成本

Fig. 5 System cost of lower bound sub-model under different risk coefficients

### 3 结 论

本文针对基于河岸带生态韧性的防洪堤高程优化过程中存在不确定性问题,建立了一个区间混合整数随机鲁棒优化模型(IMISRO)来优化防洪堤的设计高程。该模型将区间规划、整数规划、鲁棒优化与两阶段随机规划相结合,可处理以离散区间、概率分布函数的形式表示的不确定性,也可以通过二进制变量来表征在最小化系统成本的情况下生态河岸带是否需要恢复重建以提高其现有的生态抗洪能力。由于气候变化的影响,极端洪水发生的频率和强度有很强的不确定性,所以本文将不同洪峰水平下的洪水水位表示为区间参数。其中,下界和上界分别表示不同气候变化场景下的两个极值。因此,所构建的模型能够反映气候条件变化对防洪堤高程设计的影响。此外,决策者可以通过设置不同的风险水平参数来控制第二阶段惩罚成本与其期望值之间的偏离程度,提高模型结果与最终实际情况的适配性,因而可以规避模型的失效风险,实现系统经济性与系统稳定性之间的定量权衡。案例应用结

果表明,所建立的区间混合整数随机鲁棒优化模型能客观地反映防洪堤高程优化设计中存在的不确定性和复杂性,可为气候变化条件下基于城市河岸带生态韧性的防洪堤高程优化提供决策支持。

#### 参考文献(References):

- [1] LI Y P, HUANG G H. Risk analysis and management for water resources systems[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2013, 27(3): 593-597. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-012-0625-6>.
- [2] 陈利顶,齐鑫,李芬,等.城市化过程对河道系统的干扰与生态修复原则和方法[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(4): 805-811. (CHEN L D, QI X, LI F, et al. Disturbances of urbanization to river course system and related ecological restoration principles and approaches[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(4): 805-811. (in Chinese)) DOI: 10.13292/j.1000-4890.2010.0105.
- [3] 张建春,彭补拙.河岸带研究及其退化生态系统的恢复与重建[J]. *生态学报*, 2003, 23(1): 56-63. (ZHANG J C, PENG B Z. Study on riparian zone and the restoration and rebuilding of its degraded ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(1): 56-63. (in Chinese))
- [4] CORRELL D L. Principles of planning and establishment of buffer zones[J]. *Ecological Engineering*, 2005, 24(5): 433-439. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.01.007>.
- [5] 倪晋仁,刘元元.论河流生态修复[J]. *水利学报*, 2006, 37(9): 1029-1037. (NI J R, LIU Y Y. Ecological rehabilitation of damaged river system[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(9): 1029-1037. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2006.09.001.
- [6] 夏继红,严忠民.生态河岸带研究进展与发展趋势[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(3): 252-255. (XIA J H, YAN Z M. Advances in research of ecological riparian zones and its trend of development[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2004, 32(3): 252-255. (in Chinese))
- [7] 俞孔坚,许涛,李迪华,等.城市水系统弹性研究进展[J]. *城市规划学刊*, 2015(1): 75-83. (YU K J, XU T, LI D H, et al. A review: Urban water resilience[J]. *Urban Planning Forum*, 2015(1): 75-83. (in Chinese)) DOI: 10.16361/j.upf.201501011.
- [8] 李鑫,车生泉.城市韧性研究回顾与未来展望[J]. *南方建筑*, 2017(3): 7-12. (LI X, CHE S Q. Progress and prospect of urban resilience research in social-ecological system[J]. *South Architecture*, 2017(3): 7-12. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0232.2017.03.007.
- [9] PALMER M A, BERNHARDT E S, ALLAN J D, et al. Standards for ecologically successful river restoration[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 42(2): 208-217. DOI: 10.1111/j.1365-2664.2005.01004.x.
- [10] MANDER Ü, HAYAKAWA Y, KUUSEMETS V. Purification processes, ecological functions, planning and design of riparian buffer zones in agricultural watersheds[J]. *Ecological Engineering*, 2005, 24(5): 421-432. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.01.015>.
- [11] 邓雪湲,干靓.韧性理念下的高密度城区河流护岸带生态改造研究:以上海市“一江一河”岸线为例[J]. *城市建筑*, 2018(33): 48-51. (DENG X Y, GAN J. Research on ecological restoration of river bank revetment in high density urban areas based on resilience concept: The case of Huangpu River and Suzhou creek in Shanghai [J]. *Urbanism and Architecture*, 2018(33): 48-51. (in Chinese)) DOI: 10.19892/j.cnki.csjz.2018.33.011.
- [12] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(1): 1-23. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>.
- [13] DE BRUIJN K M. Resilience indicators for flood risk management systems of lowland rivers[J]. *International Journal of River Basin Management*, 2004, 2(3): 199-210. DOI: <https://doi.org/10.1080/15715124.2004.9635232>.
- [14] CAI Y P, HUANG G H, TAN Q, et al. Identification of optimal strategies for improving eco-resilience to floods in ecologically vulnerable regions of a wetland[J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(2): 360-369. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.12.012>.
- [15] 廖桂贤,林贺佳,汪洋.城市韧性承洪理论:另一种规划实践的基础[J]. *国际城市规划*, 2015, 30(2): 36-47. (LIAO G X, LIN H J, WANG Y. A theory on urban resilience to floods: A basis for alternative planning practices [J]. *Urban Planning International*, 2015, 30(2): 36-47. (in Chinese))
- [16] MONDAL S, PATEL P P. Examining the utility of river restoration approaches for flood mitigation and channel stability enhancement: A recent review[J]. *Environmental earth sciences*, 2018, 77(5). DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7381-y>.
- [17] GUIDA R J, SWANSON T L, REMO J W F, et al. Strategic floodplain reconnection for the Lower Tisza River, Hungary: Opportunities for flood-height reduction and flood plain-wetland reconnection[J]. *Journal*

- of Hydrology, 2015, 521: 274-285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.080>.
- [18] 付银环,郭萍,方世奇,等.基于两阶段随机规划方法的灌区水资源优化配置[J].农业工程学报,2014,30(5):73-81.(FU Y H, GUO P, FANG S Q, et al. Optimal water resources planning based on interval-parameter two-stage stochastic programming[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(5): 73-81. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.05.010.
- [19] 申梦阳,赵建平,桂东伟,等.基于两阶段随机规划方法的绿洲水资源优化配置[J].干旱地区农业研究,2018,36(4):233-238,245.(SHEN M Y, ZHAO J P, GUI D W, et al. Study on the optimal allocation of oasis water resources based on the two-stages stochastic programming method[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(4): 233-238, 245. (in Chinese)) DOI: 10.7606/j.issn.1000-7601.2018.04.33.
- [20] 刘寒青,赵勇,李海红,等.基于区间两阶段随机规划方法的北京市水资源优化配置[J].南水北调与水利科技,2020,18(1):34-41,137.(LIU H Q, ZHAO Y, LI H H, et al. Optimal water resources allocation based on interval two-stage stochastic programming in Beijing[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(1): 34-41, 137. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdk.2020.0005.
- [21] 靳舒葳,张凯.模糊两阶段优化方法应用于东营市生态系统规划[J].生态学报,2018,38(4):1500-1509.(JIN S W, ZHANG K. A fuzzy two-stage optimization method for ecosystem planning in Dongying[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(4): 1500-1509. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201605040844.
- [22] CAI Y P, HUANG G H, NIE X H, et al. Municipal solid waste management under uncertainty: A mixed interval parameter fuzzy-stochastic robust programming approach[J]. Environmental Engineering Science, 2007, 24(3): 338-352. DOI: <https://doi.org/10.1089/ees.2005.0140>.
- [23] LI Y P, HUANG G H. An inexact two-stage mixed integer linear programming method for solid waste management in the City of Regina[J]. Journal of Environmental Management, 2006, 81(3): 188-209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.10.007>.
- [24] CHEN C, HUANG G H, LI Y P, et al. A robust risk analysis method for water resources allocation under uncertainty[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2013, 27(3): 713-723. DOI: 10.1007/s00477-012-0634-5.
- [25] XU Y, HUANG G, QIN X. Inexact two-stage stochastic robust optimization model for water resources management under uncertainty[J]. Environmental Engineering Science, 2009, 26(12): 1765-1776. DOI: <https://doi.org/10.1089/ees.2009.0212>.
- [26] CHEN C, LI Y P, HUANG G H, et al. A robust optimization method for planning regional-scale electric power systems and managing carbon dioxide[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 40(1): 70-84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.02.007>.
- [27] HUANG G H, DAN MOORE R. Grey linear programming, its solving approach, and its application[J]. International Journal of Systems Science, 1993, 24(1): 159-172. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207729308949477>.
- [28] DING X W, HUA D X, JIANG G H, et al. Two-stage interval stochastic chance-constrained robust programming and its application in flood management[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 167: 908-918. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.205>.
- [29] GUO P, HUANG G H, LI Y P. An inexact fuzzy-chance-constrained two-stage mixed-integer linear programming approach for flood diversion planning under multiple uncertainties[J]. Advances in Water Resources, 2010, 33(1): 81-91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2009.10.009>.

### Elevation optimization model of flood control levee

#### based on ecological resilience of riparian zone under climate change

ZHANG Xiangjie<sup>1,2</sup>, QIAO Changkai<sup>1,2</sup>, WAN Hang<sup>1,2</sup>, CAI Yanpeng<sup>1,2</sup>, TAN Qian<sup>1,2</sup>

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Water Quality Improvement and Ecological Restoration for Watersheds, Institute of Environmental and Ecological Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China)

**Abstract:** The construction of reinforced concrete levees damaged the resilience of the riparian zone to resist flood. It was also unable to cope with extreme flood disasters that exceeded the planned flood control standards under climate change conditions. Therefore, the traditional flood control strategy by increasing the elevation of concrete flood-control levee was not the most effective way to solve the problem of urban flood control safety. It was urgent to establish an elevation optimization model of flood

control levee considering ecological resilience of riparian zone, so as to provide decision support for the formulation of urban levee safety optimization scheme in the context of climate change.

Aiming at the uncertainty in the elevation optimization model of flood control levee, an interval mixed-integer stochastic robust optimization model was established. The model could not only regulate the ecological resilience of riparian zone to resist flood, but also deal with the uncertainty of parameters in the optimal design of levee elevation. These uncertain parameters included the flood peak level in the form of the probability distribution function and the economic cost in the form of interval value. Besides, considering the dynamic change of riparian ecosystem resilience to flood due to the impact of climate change, binary variables were introduced into the model to indicate whether the restoration and reconstruction of the ecological riparian zone were necessary. Moreover, decision-makers could also make a quantitative trade-off between system stability and economy by setting different risk parameters.

The developed model was applied to three planned areas located on both sides of the urban river. Under the condition of the different flood peak levels and riparian ecological resilience, the optimal design elevation of the flood control levee was obtained. The result showed that when the value of the risk parameter was 0.5, the system cost was [4.872, 6.552] million yuan. Before ecological reconstruction, the designed elevations of the flood control levees in the three areas were 11.8, [13.0, 13.8], 13.9 meters, respectively. It could be seen that the impact of uncertain factors caused by climate change on the second region was more obvious. Affected by extreme flood disasters, ecological reconstruction was needed in the first area to increase the resilience of the riparian zone against floods when the flood level ranges from medium-high to very-high. Correspondingly, the levee needed to be raised [2.8, 3.5], [3.5, 4.0], and [2.8, 3.5] meters respectively. The situation in the second area seemed to be different. It only carried out ecological reconstruction at very-high flood level, and after the reconstruction, the flood-control levee in this area increased [3.0, 4.0] meters. In addition, when the flood level was medium, high, and very-high, the flood overflowed the levee and submerged the third area. Furthermore, when the value of the risk parameter increased from 0 to 1, the system cost increased from [4.809, 6.437] million yuan to [4.926, 6.656] million yuan. At the same time, the stability of the model result was improved.

It could be seen from the results that when the overall flood control capacity of the region was not enough to resist the intrusion of the extreme flood, the model would prioritize the allocation of excessive flood to subareas where the cost of flood damage was lower. Also, it must be recognized that there was a trade-off between system stability and economy. Therefore, in practical application, decision-makers should comprehensively consider the extreme flood risk caused by climate change and the system's resilience to resist extreme floods. Based on this, appropriate risk parameter values should be selected to control the proportionality of the optimization results, so as to obtain a better decision-making scheme. The results of the case showed that the model could provide decision-makers with a reasonable flood control optimization strategy that considered the ecological resilience of riparian zones, and could provide a reference for the study of urban levee safety strategy under climate change.

**Key words:** ecological resilience; riparian zone; flood levee; uncertainty; optimization model

(上接第 613 页)

The shape of the bed surface and the ripple scale affect the energy dissipation and flow state of the wave bottom boundary layer, and the ripple scale had a significant effect on the roughness of the bed surface. However, there were some differences in the calculation methods of the ripple height and the ripple length. The new formula for calculating the shape of the ripple was more accurate and could better reflect the influence of the ripple scale on the friction coefficient of wave bottom. The new formula is more general in expression form and easy to be applied in engineering. This paper provides an effective basis for analyzing the shape resistance of bed surface under wave action and also provides a reference for further studying the total resistance of bed surface and sediment transport.

**Key words:** sand ripple moving; wave; mobility number; effective roughness; wave friction