

# 基于博弈论赋权耦合灰色关联分析的 调蓄池优化选址

李红艳<sup>1,2</sup>, 张 翀<sup>1,2</sup>, 崔建国<sup>1,2</sup>, 张 峰<sup>1,2</sup>, 马熠阳<sup>1,2</sup>, 史文韬<sup>1,2</sup>

(1. 太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 晋中 030600; 2. 山西省市政工程研究生教育创新中心, 山西 晋中 030600)

**摘要:** 在构建城市内涝风险评估指标体系的基础上, 采用博弈论(GT)思想将层次分析法(AHP)所得主观权重与改进熵值法(IEVM)所得客观权重组合赋权, 并将灰色关联分析(GRA)与逼近理想解排序(TOPSIS)相结合, 建立量化评估框架, 最终通过各节点的相对贴适度确定调蓄池的位置。结果表明: GRA-TOPSIS 所得综合值的变异系数为 0.628, 均高于单独使用 GRA 或 TOPSIS 的变异系数, 更有利于对各节点内涝风险进行辨识。此外, 应用该方法对消除城市内涝风险、提高城市防涝标准有显著效果。

**关键词:** 调蓄池选址; 博弈论(GT); 灰色关联分析(GRA); 逼近理想解排序(TOPSIS); 雨水管理模型(SWMM)

中图分类号: TU992

文献标志码: A

## Optimal Location of Storage Tanks Based on Game Theory Weighting GRA-TOPSIS

LI Hongyan<sup>1,2</sup>, ZHANG Chong<sup>1,2</sup>, CUI Jianguo<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Feng<sup>1,2</sup>, MA Yiyang<sup>1,2</sup>, SHI Wentao<sup>1,2</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China; 2. Shanxi Municipal Engineering Graduate Education Innovation Center, Jinzhong 030600, China)

**Abstract:** After constructing the index system of urban waterlogging risk assessment, the idea of game theory (GT) was used to combine the subjective weight obtained by the analytic hierarchy process (AHP) and the objective weight obtained by the improved entropy value method (IEVM). The quantitative evaluation framework was established by combining the grey relation analysis (GRA) with the technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS), and finally the location of the storage tanks was determined by the relative closeness of

each node. It is shown that the coefficient of variation of the comprehensive value from GRA-TOPSIS is 0.628, higher than that from GRA or TOPSIS alone, which is more conducive to the identification of waterlogging risk at each node. In addition, the method can eliminate the risk of urban waterlogging and improve the standard of urban waterlogging prevention.

**Key words:** location of storage tanks; game theory (GT); grey relational analysis (GRA); technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS); storm water management model (SWMM)

随着全球气候变化和我国城市化进程不断加快, 城区降雨量和暴雨以上的降雨场次均有明显增加<sup>[1]</sup>, 极端暴雨天气引起的城市内涝问题日益突出, 已成为影响城市健康发展的重要因素, “暴雨一来, 城市看海”的现象屡见不鲜<sup>[2]</sup>。为保障人民群众的生命财产安全, 提高城市内涝防治水平, 亟需加强城市内涝治理及防洪能力。

雨水调蓄池作为一种降低城市内涝风险的设施, 其运行稳定性高, 工程影响性低, 而且雨水资源可以得到有效利用<sup>[3]</sup>, 被国内外学者广泛关注。然而, 调蓄池的设置位置对城市内涝治理效果的差异也十分明显<sup>[4]</sup>。邓培德<sup>[5]</sup>对雨水调蓄池的位置进行了效益分析, 提出了雨水调蓄池最佳理论位置的计算方法。Duan 等<sup>[6]</sup>基于地形、土地利用、地质结构和可获得的调蓄容积, 提出 2 种调节池潜在位置方案。Liaw 等<sup>[7]</sup>采用遗传算法优化雨水调蓄池位置, 结果表明位于水系中上游的蓄水池能显著降低下游的洪峰流量。郭芝瑞等<sup>[8]</sup>利用 Infoworks ICM 模型对降

收稿日期: 2021-10-28

基金项目: 山西省科技成果转化引导专项(201904D131065); 吕梁市引进高层次科技人才重点研发项目(2021RC-1-22)

第一作者: 李红艳(1975—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为城市水资源与水系统、水处理与能源资源化。

E-mail: lhy3162@126.com

通信作者: 张 翀(1997—), 男, 硕士生, 主要研究方向为城市水资源与水系统。E-mail: 1650287666@qq.com



论文  
拓展  
介绍

雨过程中的地表积水进行了分析,在积水严重的地区设置调蓄池取得了较好的处理效果。为解决简单层次分析法(AHP)中主观因素的影响,杨浩宇<sup>[9]</sup>引入三角模糊数,用评价区间代替层次分析法中的单点评价,在模糊度上略优于层次分析法,弱化了人的主观因素对评价的影响。

综上所述,虽然调蓄池的相关成果较以往有了新高度,但是在规划布局和应用选址方面还缺乏系统的方法,有待深入研究。充分考虑影响城市内涝的积水与超载两大因素,构建了节点内涝风险评估指标体系;运用博弈论(GT)思想将各指标层次分析法所得的主观权重与改进熵值法(IEVM)所得的客观权重进行组合赋权,得到组合权重;利用灰色关联分析-逼近理想解排序(GRA-TOPSIS)得到各节点指标与正负理想方案之间的相对贴近度,依据相对贴近度确定节点的内涝风险排序,在内涝风险大的节点设置调蓄池,降低城市内涝风险,提高城市防洪水平。

## 1 指标体系构建

影响调蓄池选址的因素较多,本研究基于城市内涝治理的目的以及科学性、系统性和合理性原则,兼顾数据来源的代表性、可靠性与有限性,选取了与内涝直接相关的因素:节点积水和节点超载。节点积水指标包括积水时间、积水面积和积水深度,节点超载指标包括超载时间和超载高度<sup>[10]</sup>,具体如图1所示。

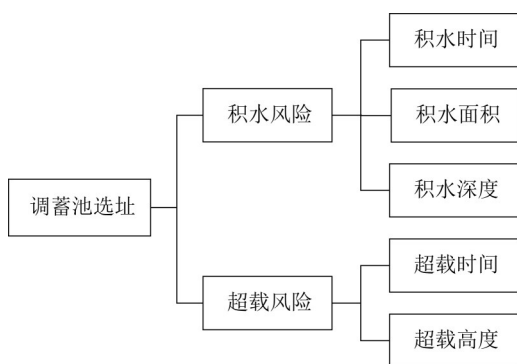


图1 调蓄池选址评估指标体系

Fig.1 Evaluation index system for location of storage tanks

积水时间、超载时间和超载高度可由雨水管理模型(SWMM)模拟结果直接读取。积水面积和积水深度分别由积水体积、汇水面积宽度、地面坡度计算得到,计算式如下所示<sup>[11]</sup>:

$$S = \frac{2W\sqrt{iV}}{i} \quad (1)$$

$$h = \sqrt{\frac{iV}{W}} \quad (2)$$

式中: $S$ 为积水面积, $m^2$ ;  $W$ 为汇水面积宽度, $m$ ;  $V$ 为积水体积, $m^3$ ;  $i$ 为地面坡度, $\%$ ;  $h$ 为积水深度, $cm$ 。

## 2 调蓄池选址流程

### 2.1 指标预处理

依据现有城市内涝防治规划标准,积水深度超过15 cm时城市交通不便,故首先筛选出研究区内积水深度超过15 cm的节点,对这些节点进行评估选址。假设研究区内有 $m$ 个积水深度超过15 cm的节点,每个节点有 $n$ 个评估指标,建立决策矩阵 $A = (x_{ij})_{m \times n}$  ( $x_{ij}$ 为 $i$ 节点 $j$ 指标的数据)。

为消除指标类型与量纲对评判的影响,需对 $x_{ij}$ 规范化处理,采用极值处理法作为预处理方法<sup>[11]</sup>,具体表达式为

$$y_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - \min_j x_{ij}}{\max_j x_{ij} - \min_j x_{ij}}, & \text{正向指标} \\ \frac{\max_j x_{ij} - x_{ij}}{\max_j x_{ij} - \min_j x_{ij}}, & \text{负向指标} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可得规范化矩阵 $B = (y_{ij})_{m \times n}$  ( $y_{ij}$ 为 $i$ 节点 $j$ 指标的规范化数据)。

### 2.2 博弈论赋权模型

指标权重的确定是多属性决策中至关重要的一步,合理的决策结果与准确的指标权重有很大关系。目前,主要的赋权方法有主观赋权法、客观赋权法和组合赋权法。主观赋权法是通过主观的专家知识和工作经验进行赋权(如层次分析法),客观赋权法是通过决策数据建立数学模型进而求解权重(如改进熵值法)。主观赋权和客观赋权各有优缺点,单独使用某类赋权法均会导致决策结果存在一定局限性<sup>[12]</sup>。组合赋权法综合了主、客观赋权的优点,能够克服单一赋权法由于忽略某一方面的信息而造成的赋权不准确,故采用博弈论对评价指标进行组合赋权。

#### 2.2.1 层次分析法赋权

层次分析法详细步骤见文献<sup>[13]</sup>,此处不再赘述。

### 2.2.2 改进熵值法赋权

改进熵值法是根据指标的变异信息熵来确定权重的一种客观赋权法,详细步骤见文献[14],此处不再赘述。

### 2.2.3 博弈论组合赋权

利用博弈论综合主、客观赋权的优点,对指标进行组合赋权,步骤如下:

(1)用 $L$ 种不同赋权法对指标分别赋权,构造出基础权重向量集。令 $\mathbf{u}_k=(u_{k1}, u_{k2}, \dots, u_{kn}) (k=1, 2, \dots, L)$ ,记这 $L$ 个不同向量的任意线性组合为

$$\mathbf{u} = \sum_{k=1}^L \alpha_k \mathbf{u}_k^T, \alpha_k > 0, \sum_{k=1}^L \alpha_k = 1 \quad (4)$$

式中: $\mathbf{u}$ 为权重集的一种可能的权重向量; $\alpha_k$ 为线性组合系数。

(2)运用博弈论思想优化 $L$ 个线性组合系数 $\alpha_k$ ,使得 $\mathbf{u}$ 与各个 $\mathbf{u}_{kn}$ 的离差最小,即:

$$\min \left| \sum_{j=1}^L \alpha_j \mathbf{u}_j^T - \mathbf{u}_i \right|, i=1, 2, \dots, L \quad (5)$$

式(5)的最优化一阶导数条件可转换为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_1^T & \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_2^T & \cdots & \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_L^T \\ \mathbf{u}_2 \mathbf{u}_1^T & \mathbf{u}_2 \mathbf{u}_2^T & \cdots & \mathbf{u}_2 \mathbf{u}_L^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{u}_L \mathbf{u}_1^T & \mathbf{u}_L \mathbf{u}_2^T & \cdots & \mathbf{u}_L \mathbf{u}_L^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_1^T \\ \mathbf{u}_2 \mathbf{u}_2^T \\ \vdots \\ \mathbf{u}_L \mathbf{u}_L^T \end{bmatrix} \quad (6)$$

(3)根据式(6)求得 $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L)$ 后进行归一化处理,即:

$$r_i(j) = \frac{\min_n \min_m |z_0^+(j) - z_i(j)| + \lambda \max_n \max_m |z_0^+(j) - z_i(j)|}{|z_0^+(j) - z_i(j)| + \lambda \max_n \max_m |z_0^+(j) - z_i(j)|} \quad (10)$$

式中: $\lambda$ 为分辨系数; $z_i(j)$ 为评估节点的 $z_{ij}$ 值。

计算时分辨系数 $\lambda$ 常取定值0.5,无论参考数列和对比数列如何变化,相应的关联系数下限均为0.3333,这显然是不合理的<sup>[15]</sup>。 $\lambda$ 作为最大值的系数,应充分体现系统各因素对关联度的影响,同时应具有抗干扰作用,即能够削弱观测序列中异常值对整个关联空间的误差影响<sup>[16]</sup>。参照文献[16]确定分辨系数 $\lambda$ 的方法,并结合实际,分辨系数 $\lambda$ 取0.3。由式(10)得到灰色关联系数矩阵 $\mathbf{R}=(r_i(j))_{m \times n}$ 。

(4)确定矩阵 $\mathbf{R}$ 的正理想解集 $r_0^+$ 、负理想解集 $r_0^-$ ,如下所示:

$$\begin{cases} r_0^+ = \max_{1 \leq i \leq m} r_i(j) = (r_0^+(1), r_0^+(2), \dots, r_0^+(n)) \\ r_0^- = \min_{1 \leq i \leq m} r_i(j) = (r_0^-(1), r_0^-(2), \dots, r_0^-(n)) \end{cases} \quad (11)$$

(5)分别计算节点 $i$ 到 $r_0^+$ 、 $r_0^-$ 的欧氏距离 $D_i^+$ 、 $D_i^-$ ,如下所示:

$$\alpha_k^* = \frac{|\alpha_k|}{\sum_{k=1}^L |\alpha_k|} \quad (7)$$

最后得到最满意的综合权重向量

$$\mathbf{u}^* = \sum_{k=1}^L \alpha_k^* \mathbf{u}_k^T \quad (8)$$

## 2.3 GRA-TOPSIS 步骤

TOPSIS 和 GRA 都是通过计算每个决策方案的指标序列与正负理想状态序列之间的接近度来对决策进行排序。GRA 只考虑了评估方案与参考方案的形状相似性, TOPSIS 仅考虑了位置上的相似性,未考虑评估指标的动态变化,单独使用 GRA 或 TOPSIS 都存在不足。GRA 能较好地反映各方案的内部变化规律,弥补 TOPSIS 的不足。因此,为充分利用评价指标所含信息,将 TOPSIS 和 GRA 联合使用。具体步骤如下:

(1)求加权规范矩阵 $\mathbf{C}$ 。将矩阵 $\mathbf{B}$ 的每一列与其对应的博弈论权重 $u_j^*$ 相乘,得到 $\mathbf{C}=(z_{ij})_{m \times n} (z_{ij}$ 为规范化数据 $y_{ij}$ 与 $u_j^*$ 之积,即 $z_{ij}=y_{ij}u_j^*$ )。

(2)确定正理想解集 $z_0^+$ 。筛选出矩阵 $\mathbf{C}$ 各指标的最优值组成正理想解集,并将其作为 GRA 模型中的参考数列,即:

$$z_0^+ = \max_{1 \leq i \leq m} z_{ij} = (z_0^+(1), z_0^+(2), \dots, z_0^+(n)) \quad (9)$$

(3)求各评估节点与正理想解集的灰色关联系数 $r_i(j)$ ,如下所示:

$$\begin{cases} D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (r_i(j) - r_0^+(j))^2}, i=1, 2, \dots, m \\ D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (r_i(j) - r_0^-(j))^2}, i=1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (12)$$

(6)各评估节点的灰色相对贴近度 $\tau$ 计算式为

$$\tau_i = \frac{D_i^+}{D_i^+ + D_i^-}, i=1, 2, \dots, m \quad (13)$$

$\tau$ 决定各节点的内涝风险排序, $\tau$ 越大内涝风险越大,越应该首先在该点设置调蓄池。

## 3 工程实例分析

### 3.1 模型建立

#### 3.1.1 模型概化

选取山西省某市一区域作为研究区域,计划设计5座调蓄池,采用 SWMM 对该区域建模,如图2所示。

模型共包括24个子汇水分区(图中以“H”表示)、24条管段(图中以“数字”表示)、24个节点(图中以“J”表示)和1个出水口(图中以“C1”表示)。

### 3.1.2 模型参数设定

SWMM 参数主要包括洼地蓄水量、入渗模型及

曼宁系数等。根据模型用户手册中的取值范围并依据文献[17-18]的研究成果综合确定模型参数。研究范围属于城市区域,所以土壤入渗模型选用 Horton 模型。演算模型为动力波,演算时间步长取 30 s。其余相关参数如表1所示。

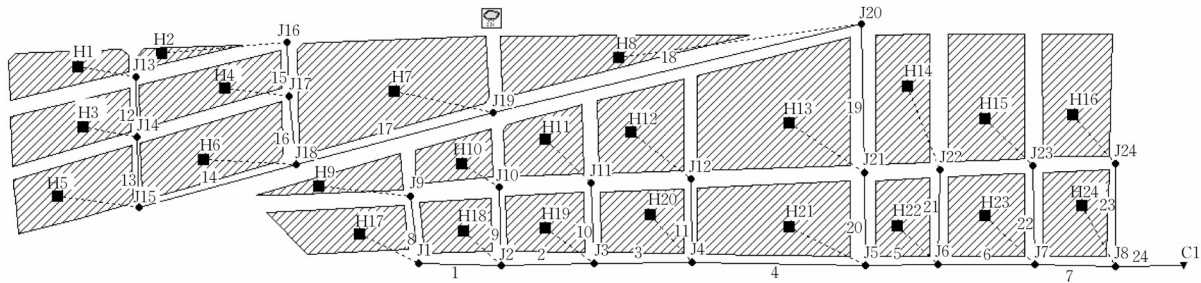


图2 研究区SWMM

Fig.2 SWMM of study area

表1 SWMM参数取值

Tab.1 Values of parameter for SWMM

类别	参数名称	取值
蓄水量参数	渗透性洼地蓄水	1
	不渗透性洼地蓄水	3
渗透参数	最大入渗速率/(mm·h <sup>-1</sup> )	40.6
	最小入渗速率/(mm·h <sup>-1</sup> )	1.4
	衰减系数/h <sup>-1</sup>	7
	排干时间/d	4
曼宁系数	透水地表曼宁系数	0.170
	不透水地表曼宁系数	0.013
	管道曼宁系数	0.016

### 3.1.3 设计暴雨雨型

暴雨强度计算式如下所示:

$$q = \frac{1532.7(1 + 1.08 \lg T)}{(t + 6.9)^{0.87}} \quad (14)$$

式中:  $q$  为降雨强度,  $L \cdot (s \cdot hm^2)^{-1}$ ;  $T$  为重现期,  $a$ ;  $t$  为降雨历时,  $min$ 。

管网设计重现期为 0.5 a, 本研究选取重现期为 5 a 和 10 a 的降雨进行模拟, 采用芝加哥雨型对设计暴雨进行雨量分配, 模拟降雨历时取 2 h, 雨峰系数取 0.4。

### 3.2 调蓄池选址

下面以重现期为 5 a 一遇的暴雨为例进行调蓄池选址。

运用博弈论思想将层次分析法所得的主客观权重与改进熵值法所得的客观权重综合, 并对每个指标进行组合赋权, 结果如图3所示。

主观赋权和客观赋权各有优缺点, 单独使用其一均会导致评价结果存在一定局限性<sup>[14]</sup>。由图3可知, 不同的计算原理及侧重点致使层次分析法与改

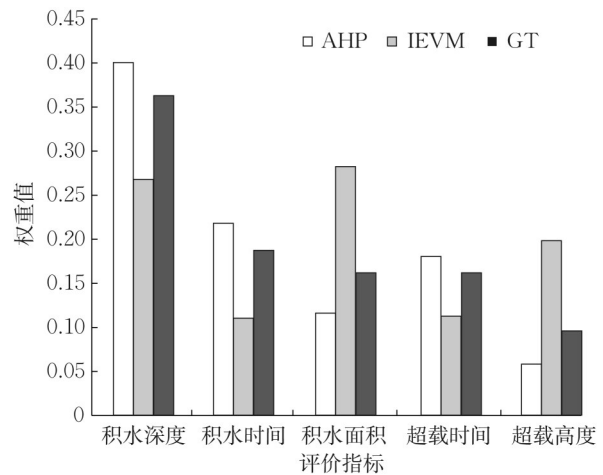


图3 博弈论赋权的各指标权重

Fig.3 Weight of each index for game theory weighting

进熵值法所得权重分配差异性显著, 而博弈论恰好可协调该矛盾, 如专家们给出积水面积指标的权重仅为 0.123, 而改进熵值法求得的权重高达 0.288, 最终博弈论优化得到的权重为 0.169。

由 GRA-TOPSIS 模型求得重现期为 5 a 一遇时积水深度超过 15 cm 下各节点的欧氏距离与灰色相对贴近度, 并传统 TOPSIS 进行对比, 依据贴近度从小到大的顺序排列, 如图4所示。对图4中的贴近度进行线性拟合, 拟合线性系数  $R^2$  高达 0.970 6, 验证了 GRA-TOPSIS 模型所得评价分布均匀合理。

为了增强对照性, 不仅将 GRA-TOPSIS 与 TOPSIS 对比, 还与 GRA 对比, 结果如图5所示。需要指出的是, 这3种方法所用的权重为图3中的博弈论权重, 数据预处理方法均为极值标准化法。由图5

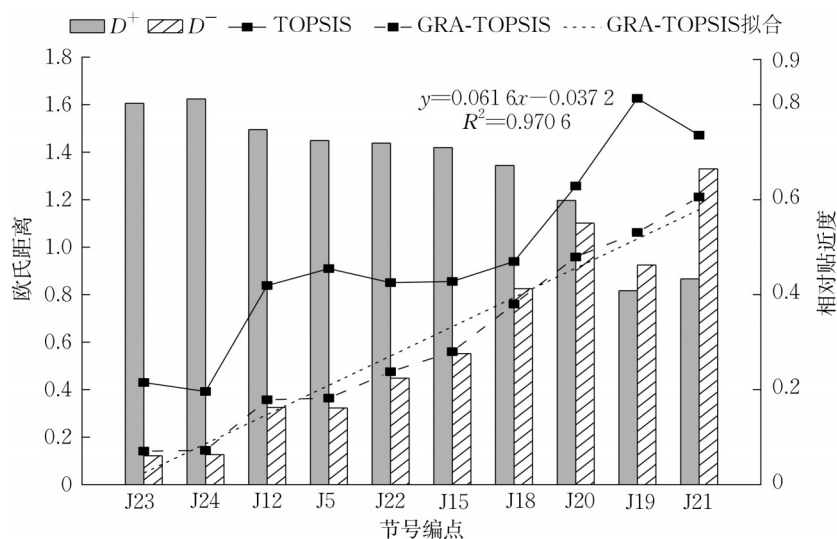


图4 5a一遇时积水深度超过15 cm下节点的欧氏距离与灰色相对贴近度

Fig.4 Euclidean distance and gray relative closeness of the node when the depth of water is more than 15 cm in case of 5 a

可知,对于GRA-TOPSIS、GRA、TOPSIS,同一节点最终综合排序的位次相差均不超过2。同时,利用Spearman等级相关系数检验法来检验GRA-TOPSIS与其他2种方法的关联程度,相关系数分别为0.976和0.939( $P < 0.01$ ),表明这3种评价法关联度极高,即所得评价结果一致性令人满意,也进一步说明了GRA-TOPSIS计算结果的合理性。

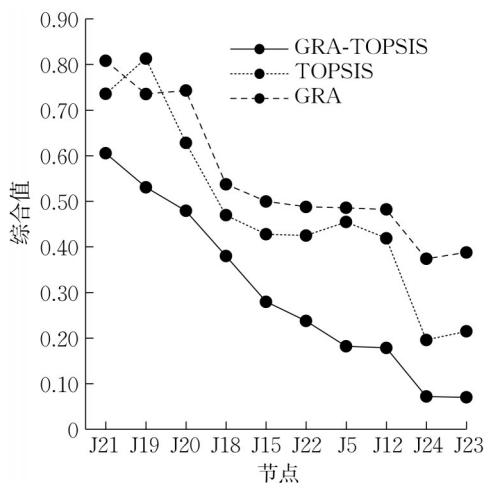


图5 5a一遇时3种评价方法综合值对比

Fig.5 Comparison of comprehensive value between three evaluation methods in case of 5 a

此外,GRA-TOPSIS、GRA、TOPSIS所得节点内涝综合评价值的变异系数分别为0.628、0.276、0.418。变异系数越大说明综合评价值分辨水平、离散程度越高,对区分不同节点内涝风险等级具有更强的适宜性。显然,GRA-TOPSIS所得综合值

的变异系数比GRA、TOPSIS均大很多,可知GRA-TOPSIS综合值的分布较其他2种方法分布更均匀合理,而且相邻排序间综合值差异更明显,更有利于直观地区分各节点内涝情况。因此,采用GRA-TOPSIS评价结果进行选址。

由图5可知,5a一遇时调蓄池位置分别选在J21、J19、J20、J18、J15。

同理,10a一遇时各节点内涝评价结果如图6所示,调蓄池位置分别选在J21、J19、J20、J17、J18。

### 3.3 结果与分析

分散调蓄池的位置确定以后,对调蓄池的容积进行确定。节点分散调蓄池和末端调蓄池的容积分别根据该节点和所有节点积水深度超过15 cm部分的体积确定。调蓄池容积计算式如下所示:

$$V_{\text{调}} = \frac{(h - 15)^2 W}{i} \quad (15)$$

式中: $V_{\text{调}}$ 为调蓄池容积, $\text{m}^3$ 。

由式(15)计算可得,5a一遇时J21、J19、J20、J18和J15节点积水深度超过15 cm部分的体积分别为9 363、6 727、2 037、62、16  $\text{m}^3$ ,将以上各节点的调蓄池容积设置为9 400、6 800、2 100、100、100,共18 500  $\text{m}^3$ ,传统末端调蓄池的容积设置为22 000  $\text{m}^3$ 。10a一遇时J21、J19、J20、J17和J18节点积水深度超过15 cm部分的体积分别为20 512、16 071、6 775、346、1 629  $\text{m}^3$ ,将以上各节点的调蓄池容积设置为20 600、16 100、6 800、400、1 700  $\text{m}^3$ ,共45 600  $\text{m}^3$ ,传统末端调蓄池的容积设置为66 400  $\text{m}^3$ 。分散调蓄与传统末端调蓄相比,5a和10a一遇调蓄池容

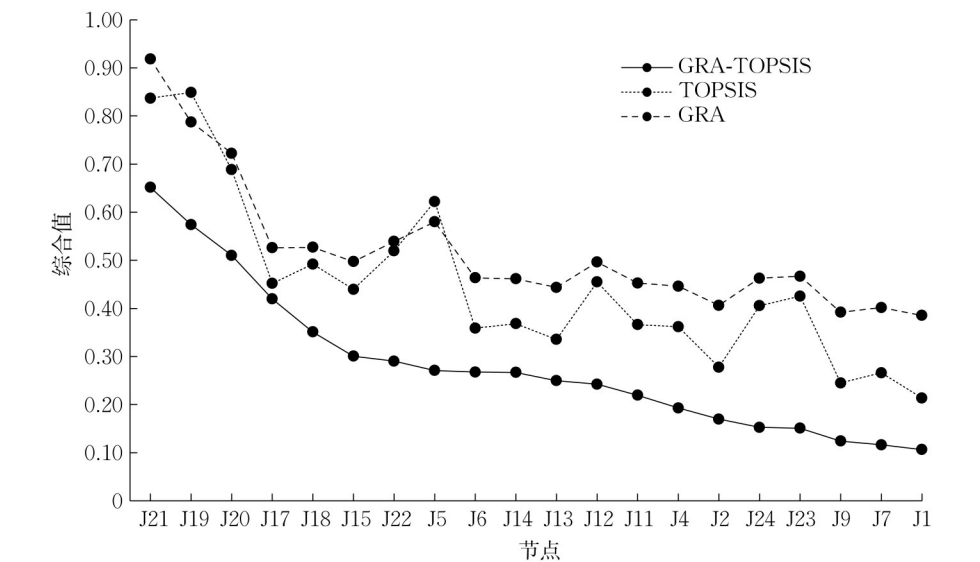


图 6 10 a 一遇时 3 种评价方法综合值对比

Fig.6 Comparison of comprehensive value between three evaluation methods in case of 10 a

积分分别减少近 15.91% 和 31.31%。2 种调蓄方式的 内涝治理效果对比如表 2 所示。

表 2 5 a 和 10 a 重现期下末端调蓄与分散调蓄内涝治理对比

Tab.2 Comparison of waterlogging management between terminal regulated storage and decentralized regulated storage during the return period of 5 a and 10 a

重现期	方案	调蓄规模/m <sup>3</sup>	积水深度超过 15 cm 的节点个数/个	占总节点百分比/%	积水深度超过 15 cm 的节点削减率/%	最大积水深度/cm	最大积水深度削减率/%
5 a	末端调蓄	22 000	10	42		18.50	
	分散调蓄	18 500	6	25	40	16.30	11.89
10 a	末端调蓄	66 400	20	83		20.09	
	分散调蓄	45 600	19	79	5	18.83	6.27

由表 2 可知,分散调蓄与传统末端调蓄相比,重现期为 5 a 一遇时,积水深度超过 15 cm 的节点数由 10 个减少为 6 个,削减率达 40%,最大积水深度由 18.50 cm 降到 16.30 cm,削减率为 11.89%。重现期为 10 a 一遇时,积水深度超过 15 cm 的节点数由 20 个减少为 19 个,削减率为 5%,最大积水深度由 20.09 cm 降到 18.83 cm,削减率为 6.27%。因此,在 5 a 和 10 a 一遇 2 种不同情况下,分散调蓄改善城市内涝效果均比较明显,排水系统排水能力均大大提升。

## 4 结论

(1)建立了普适的城市内涝风险评估指标体系,运用博弈论思想将主客观权重综合,既可整体分析影响城市内涝的主次因素,又能最大程度上规避不确定因素,减少了单独赋权带来的信息损失,提高了

方法的适用性和准确性。

(2)提出将 GRA-TOPSIS 应用于调蓄池选址,克服了 TOPSIS 和 GRA 2 种方法本身的局限性,使节点内涝风险相对贴切度更加准确,从而更加合理地反映节点内涝风险。

(3)GRA-TOPSIS 所得节点内涝综合评价值的变异系数最大,为 0.628,验证了 GRA-TOPSIS 比单独使用 GRA 或 TOPSIS 更具优越性,有助于对节点内涝风险进行更精细准确地排序。

(4)通过实例验证了 GRA-TOPSIS 选址结果在多情景暴雨重现期下对城市内涝的改善效果。在较少内涝节点设置调蓄池,缓解城市内涝效果更明显,可解决当前城市用地紧张问题。

### 作者贡献声明:

李红艳:论文撰写思路指导,文献资料汇总及论文修改、校对。  
张 翀:处理数据,撰写论文。  
崔建国:修改论文。

张 峰:修改论文。

马熠阳:修改图表及公式。

史文韬:修改图表及公式。

## 参考文献:

- [1] 黄国如,何泓杰. 城市化对济南市汛期降雨特征的影响[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(3): 7.  
HUANG Guoru, HE Hongjie. The impact of urbanization on the rainfall characteristics of Jinan during the flood season[J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(3): 7.
- [2] 左其享. 我国海绵城市建设中的水科学难题[J]. 水资源保护, 2016, 32(4): 21.  
ZUO Qiting. Water science problems in the construction of sponge cities in my country[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(4): 21.
- [3] 高玉琴,陈佳慧,王冬冬,等. 海绵城市低影响开发措施综合效益评价体系及应用[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 13.  
GAO Yuqin, CHEN Jiahui, WANG Dongdong, *et al.* Comprehensive benefit evaluation system and application of low-impact development measures for sponge cities[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 13.
- [4] LI Hui Feng, LU Lijun, HUANG Xiangfeng, *et al.* An optimal design strategy of decentralized storage tank locations for multi-objective control of initial rainwater quality[J]. Water Supply, 2020, 20(6): 2069.
- [5] 邓培德. 雨水调节池设置位置的效益分析[J]. 中国给水排水, 1987(1): 23.  
DENG Peide. Benefit analysis of the location of rainwater regulation ponds[J]. China Water & Wastewater, 1987(1): 23.
- [6] DUAN Huanfeng, LI Fei, TAO Tao. Multi-objective optimal design of detention tanks in the urban stormwater drainage system: framework development and case study[J]. Water Resources Management, 2015, 29(7): 2125.
- [7] LIAW C-H, TSAI Y-L, CHENG M-S. Assessing flood mitigation alternatives in Shijr area in metropolitan Taipei[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2006, 42(2): 311.
- [8] 郭芝瑞,崔建国,张峰,等. 基于Infoworks ICM的城市排水调蓄池位置选择[J]. 给水排水, 2016, 52(2): 49.  
GUO Zhirui, CUI Jianguo, ZHANG Feng, *et al.* Location selection of urban drainage storage tank based on Infoworks ICM[J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 52(2): 49.
- [9] 杨昊宇. 基于TFN-AHP的海绵城市调蓄池选址模糊综合评判[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2018.  
YANG Haoyu. Fuzzy comprehensive evaluation of sponge city storage pool location based on TFN-AHP[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2018.
- [10] 张翀,李红艳,崔建国,等. 基于AHP-GRA的城市内涝风险评估及调蓄池选址[J]. 给水排水, 2021, 57(11): 149.  
ZHANG Chong, LI Hongyan, CUI Jianguo, *et al.* Urban waterlogging risk assessment based on AHP-GRA and site selection of storage tanks[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(11): 149.
- [11] 汪明明,孙远祥,马雄飞. 基于SWMM和层次分析法的调蓄池预选址方案选择[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(1): 120.  
WANG Mingming, SUN Yuanxiang, MA Xiongfei. Scheme selection of storage tank pre-selection based on SWMM and analytic hierarchy process[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(1): 120.
- [12] LAI Chengguang, CHEN Xiaohong, CHEN Xiaoyu. A fuzzy comprehensive evaluation model for flood risk based on the combination weight of game theory[J]. Natural Hazards, 2015, 77(2): 1243.
- [13] 张曾莲. 风险评估方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.  
ZHANG Zenglian. Risk assessment method[M]. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [14] 项颂,庞燕,侯泽英,等. 基于熵值法的云南高原浅水湖泊水生态健康评价[J]. 环境科学研究, 2020, 33(10): 2272.  
XIANG Song, PANG Yan, HOU Zeying, *et al.* Water ecological health assessment of shallow lakes in Yunnan Plateau based on entropy method[J]. Environmental Science Research, 2020, 33(10): 2272.
- [15] 刘震宇. 灰色系统分析中存在的两个基本问题[J]. 系统工程理论与实践, 2000(9): 123.  
LIU Zhenyu. Two basic problems in grey system analysis[J]. System Engineering Theory and Practice, 2000(9): 123.
- [16] 周翔,蒋根谋. 基于组合赋权和改进灰色关联分析法的项目风险分析[J]. 建筑管理现代化, 2008(6): 78.  
ZHOU Xiang, JIANG Genmou. Project risk analysis based on combined weighting and improved grey relational analysis method[J]. Building Management Modernization, 2008(6): 78.
- [17] 桂哈亮,张春萍,武治国. 基于BP神经网络的人机联合率定SWMM研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(3): 36.  
GUI Hanliang, ZHANG Chunping, WU Zhiguo. Research on SWMM calibration based on BP neural network[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(3): 36.
- [18] 何胜男,陈文学,刘燕,等. 基于人工神经网络和粒子群优化的初期雨水调蓄池设计方法研究[J]. 水利学报, 2020, 51(12): 1558.  
HE Shengnan, CHEN Wenxue, LIU Yan, *et al.* Research on the design method of initial rainwater storage tank based on artificial neural network and particle swarm optimization[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(12): 1558.