

基于 TOPSIS-AHP 模型的嫩江柔性防浪林植物优选

韦一鸣,董增川,徐伟,王建婷,任杰

(河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098)

摘要:筛选嫩江柔性防浪林植物,为嫩江防浪林植物群落模式的构建提供借鉴。构建的嫩江柔性防浪林植物选择指标体系包括消浪功能、生长习性和辅助功能等 3 项 1 级指标和根系发达程度、枝条柔韧性、植被高度等 8 项 2 级指标。在传统 TOPSIS 方法的基础上,引入了区间数、三角模糊数及其处理方法,同时在权重确定方法上引入了层次分析法,建立了 TOPSIS-AHP 柔性防浪林植物的优选模型。计算结果表明,杞柳、芦苇和芦竹是嫩江柔性防浪林建设的适宜植物,其中杞柳最适宜。未来的研究还应从植物群落角度出发,考虑构建多层次、互惠共生、稳定性强的柔性防浪林植物群落模式或刚柔组合防浪林植物群落模式。

关键词:TOPSIS 方法;层次分析法;柔性防浪林;植物优选;嫩江

中图分类号:TV871.2,S727.26 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2019)05-0020-06

防浪林是堤防抵御风浪的一道有效屏障,因其生态性和经济性较佳,在河流、湖泊、海洋等生态护岸工程中得到广泛应用(樊守斌,2016)。但由于植被不同的生长习性特点、待种植区域的气候与土壤特征以及消浪效果等因素,使得在某一给定区域营造生态护岸工程时如何选择合适的防浪林植物成为决策者面临的复杂问题。嫩江流域地处北温带季风气候区,大陆性气候特点显著。流域多年平均降水量为 440 mm,其中汛期(6-9 月)降水量约占全年降水量的 80%,易形成全流域型的暴雨洪水(盛长滨等,2011)。嫩江干流堤防砂基及双层地基堤占的比重比较大,堤防迎水坡除少部分有工程护坡外,绝大部分是自然状态(伏世红等,2011)。因此,嫩江干流堤防受风浪的威胁较大,极易发生堤防滑坡、塌岸、波浪淘刷等现象。营造防浪林是解决这一问题的有效方法,能显著降低堤防前的波浪爬高,延长堤防的使用寿命。

TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution)法是一种根据有限个评价对象与理想化目标的接近程度来进行排序的用于处理多目标问题的决策方法(潘治等,2010)。因其最大程度利用数据的特点(信桂新等,2017),常被用于水利工程协同度评价(江新等,2016)、资

源承载力评估(徐建新等,2012)和生态系统健康评价(Ren Li et al,2014)等。TOPSIS 可以对基础数据信息实现充分利用,能准确、直观、可靠地反映各方案之间的差距,具有普遍适用性。但该方法在评价各类问题过程中还存在着如下不足:①评价指标值多为精确数,但在许多实际问题中,区间数和三角模糊数也会经常涉及到;②各评价指标的权重值往往是在事先依靠主观臆断,其可靠性不高。层次分析法(Antalytic Hierarchy Process,AHP)是一种将定性分析与定量分析方法相结合的多目标决策分析方法。该法主要将复杂问题分解为若干层次和若干指标,对两两指标之间的重要程度作出比较判断;建立判断矩阵,通过计算判断矩阵的最大特征值以及对特征向量,就可得出不同指标重要性程度的权重,为最佳植物的选择提供依据(郭金玉等,2008;秦吉等,1999)。本文在传统 TOPSIS 方法的基础上,引入了区间数、三角模糊数及其处理方法,同时在权重确定方法上引入了层次分析法,建立了 TOPSIS-AHP 柔性防浪林植物的优选模型,并筛选出嫩江柔性防浪林植物,为嫩江防浪林植物群落模式的构建提供借鉴。

1 柔性防浪林植物选择指标体系

1.1 植物选择

根据目前国内外的已有研究,柔性防浪林的植物选择需要满足以下几个条件。①由于柔性防浪林种植于河道迎水侧,河岸带生境具有水涝不均的特点,汛期时林带常被淹没,因此要求植物耐水淹,

收稿日期:2018-02-22

基金项目:黑龙江省应用技术与开发计划项目(GZ16B031)。

作者简介:韦一鸣,1996 年生,男,安徽合肥人,硕士生,主要从事水文水资源、生态水文学研究。E-mail:leonwui@hhu.edu.cn

在潮湿条件下也能正常生长;同时又要求植物在枯水期也能正常生长,因此也需要有较好的耐旱性。②植物具有较佳的消浪性能,因此要求根系发达,主根较深,不易倒伏;枝条柔韧性要好,能抵抗水流的冲击;生长速度快,使防浪林体系尽早发挥防浪效益。③植物具有较强的生命力,因此要求病虫害种类少、土壤肥力适应性强。④对研究区嫩江而言,为了响应“建设东北新丝路带振兴东北经济”的号召,并创造优美的水生态环境,要求防浪林在尽可能的条件下选择经济价值和景观价值均较高的植物(张茂章,2015)。

基于以上原则,参考相关文献(李东健等,2001;黑龙江森林编委会,2011;徐文铎,1983),选择了10种常见的防浪林柔性植物获(*Triarrhena sacchariflora*)、菖蒲(*Acorus calamus*)、再力花(*Thalia dealbata*)、狼尾草(*Pennisetum alopecuroides*)、杞柳(*Salix integra*)、香蒲(*Typha orientalis*)、千屈菜(*Lythrum salicaria*)、芦竹(*Arundo donax*)、水葱(*Scirpus validus*)、芦苇(*Phragmites communis*)作为优选对象(孔维静等,2015;倪晓燕,2016;刘冉等,2017;郭建民等,2016;杨洪云等,2017)。

1.2 指标体系

构建的嫩江柔性防浪林植物选择指标体系见图1。体系包括消浪功能、生长习性和辅助功能等3项1级指标和根系发达程度、枝条柔韧性、植被高度等8项2级指标。

本研究待选植物均为耐水耐旱植物,因此指标体系中未列入耐水淹性和耐旱性指标。病虫害种类包括柔性植物常见的病虫害类型,如叶腥黑粉病、条锈病、叶锈病、黑锈病、斑纹病、褐斑病、斑点病、胡麻斑病等;经济价值种类包括造纸原料、建筑材料、编织原料、化学制品原料、制药原料、牲畜饲料等。

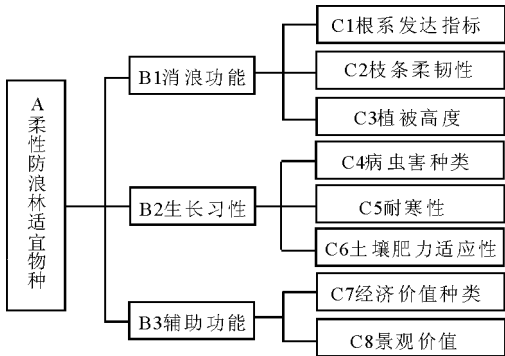


图 1 嫩江柔性防浪林植物选择指标体系

Fig.1 Vegetation selection index for flexible wave break forests (Nenjiang River)

2 柔性防浪林植物优选模型

基于改进多属性 TOPSIS-AHP 柔性防浪林植物优选模型的计算步骤如下。

步骤1:假设有 m 个柔性防浪林待选植物,每个植物有 n 个指标,则柔性防浪林植物选择的初始数据矩阵为:

$$x' = \begin{pmatrix} x_{11}' & x_{12}' & \cdots & x_{1n}' \\ x_{21}' & x_{22}' & \cdots & x_{2n}' \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1}' & x_{m2}' & \cdots & x_{mn}' \end{pmatrix} \tag{1}$$

步骤2:若指标体系中含有成本型指标,比如图1中的病虫害种类指标,则先将其转换为效益型指标,进行同趋势化处理:

$$x_{ij} = 1/x_{ij}' \tag{2}$$

步骤3:对同趋势化处理后的矩阵进行归一化处理:

(a)对于是精确数的指标(x_{ij}),其归一化方法为:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \tag{3}$$

(b)对于是区间数的指标($[x_{ij}^L, x_{ij}^U]$),其归一化方法如下:

$$r_{ij}^L = \frac{x_{ij}^L}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^{U2}}} \tag{4}$$

$$r_{ij}^U = \frac{x_{ij}^U}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^{L2}}}$$

(c)对于是三角模糊数的指标($[x_{ij}^L, x_{ij}^M, x_{ij}^U]$),其归一化方法如下:

$$r_{ij}^L = \frac{x_{ij}^L}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^{U2}}} \tag{5}$$
$$r_{ij}^M = \frac{x_{ij}^M}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^{M2}}}$$

$$r_{ij}^U = \frac{x_{ij}^U}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^{L2}}}$$

然后得到归一化矩阵:

$$R = \begin{pmatrix} x_{11}' & x_{12}' & \cdots & x_{1n}' \\ x_{21}' & x_{22}' & \cdots & x_{2n}' \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1}' & x_{m2}' & \cdots & x_{mn}' \end{pmatrix} \tag{6}$$

步骤4:采用层次分析法确定柔性防浪林待选植物每个指标的权重: $W=(w_1,w_2,\cdots,w_n)$ 。

建立递阶层次结构是层次分析法中最重要的一步。首先,如图1把柔性防浪林植物选择问题分解为8个指标,并把这8个指标按属性不同分为3个层次。建立相应的判断矩阵如下:

$$A-B: \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$
$$(B-C)_1: \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 1 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$
$$(B-C)_2: \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/3 \\ 3 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$
$$(B-C)_3: \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

计算各判断矩阵的特征向量和特征值,并对判断矩阵进行一致性检验:

对于判断矩阵 A-B:
 $X_1=(0.637, 0.258, 0.104)^T, \lambda_{\max}=3.039,$
 $CI=0.019, RI=0.58, CR=0.03$

对于判断矩阵 $(B-C)_1$:
 $X_2=(0.429, 0.429, 0.43)^T, \lambda_{\max}=3, CI=0,$
 $RI=0.58, CR=0$

对于判断矩阵 $(B-C)_2$:
 $X_3=(0.143, 0.429, 0.429)^T, \lambda_{\max}=3, CI=0,$
 $RI=0.58, CR=0$

对于判断矩阵 $(B-C)_3$:
 $X_4=(0.75, 0.25)^T, \lambda_{\max}=2, CI=0, RI=0,$
 $CR=0$

于是,可得柔性防浪林植物选择指标体系权重结果如表1。

表1 柔性防浪林植物选择指标体系权重
Tab.1 Index weighting for the vegetation selection index system for flexible wave break forests

指标	B1 (0.637)	B2(0.258)	B3 (0.105)	总排序
C1	0.429	0	0	0.273
C2	0.429	0	0	0.273
C3	0.143	0	0	0.091
C4	0	0.143	0	0.037
C5	0	0.429	0	0.111
C6	0	0.429	0	0.111
C7	0	0	0.75	0.079
C8	0	0	0.25	0.026

步骤5:通过权重与归一化矩阵相乘得到加权

决策矩阵:

$$Z_{ij}=w_j\times r_{ij}$$

(7)

步骤6:求柔性防浪林植物选择问题的理想解和负理想解。

(a)对于是精确数的指标:

$$A^*=\max_i Z_{ij}=[a_1^*, a_2^*, \cdots, a_n^*]$$

(8)

$$A^-=\max_i Z_{ij}=[a_1^-, a_2^-, \cdots, a_n^-]$$

(b)对于是区间数的指标:

$$A^*=[\max Z_{ij}^L, \max Z_{ij}^U]$$

(9)

(c)对于是三角模糊数的指标:

$$A^*=[\max Z_{ij}^L, \max Z_{ij}^M, \max Z_{ij}^U]$$

(10)

步骤7:计算所有方案到理想解的欧氏距离和负理想解的欧氏距离:

$$d_i^*=\sqrt{\sum_{j=1}^n d_{ij}^{*2}}$$

(11)

$$d_i^-=\sqrt{\sum_{j=1}^n d_{ij}^{-2}}$$

(12)

(a)对于是精确数的指标:

$$d_{ij}^*=Z_{ij}-a_j^*$$

(13)

$$d_{ij}^-=Z_{ij}-a_j^-$$

(14)

(b)对于是区间数的指标:

$$d_{ij}^*=\sqrt{(Z_{ij}-a_j^{L*})^2+(Z_{ij}-a_j^{U*})^2}$$

(15)

$$d_{ij}^-=\sqrt{(Z_{ij}-a_j^{L-})^2+(Z_{ij}-a_j^{U-})^2}$$

(16)

(c)对于是三角模糊数的指标:

$$d_{ij}^*=\sqrt{(Z_{ij}-a_j^{L*})^2+(Z_{ij}-a_j^{M*})^2+(Z_{ij}-a_j^{U*})^2}$$

(17)

$$d_{ij}^-=\sqrt{(Z_{ij}-a_j^{L-})^2+(Z_{ij}-a_j^{M-})^2+(Z_{ij}-a_j^{U-})^2}$$

(18)

步骤8:计算方案与理想解之间的接近度:

$$C_i^*=\frac{d_i^-}{d_i^-+d_i^*}$$

(19)

如果待选植物与理想解相同,则适宜度为1;如果待选植物与负理想解相同,则适宜度为0。因此,适宜度与1越接近,表明该待选植物越好。计算完所有植物的适宜度后,将其按从大到小顺序排列。适宜度最大的植物是该区域柔性防浪林植物的最佳选择。

3 嫩江柔性防浪林植物优选

嫩江柔性防浪林植物选择指标体系(图1)中,根系发达程度、枝条柔韧性、景观价值、耐寒性和土壤肥力适应性等5项指标无法用精确的数字表示,

需要通过定性描述:很低、低、一般、高、很高,这 5 个等级对应的三角模糊数分别为:[2/3,5/6,1]、[1/2,2/3,5/6]、[1/3,1/2,2/3]、[1/6,1/3,1/2]、[0,1/6,1/3];植被高度指标以一个区间数来表述。10 种待选植物 8 项指标见表 2,柔性防浪林适宜植物 8 项指标的标准见表 3。

表 2 待选植物的指标值

Tab.2 Index values or descriptions of plants selected for the flexible wave break forest

植物	根系发达程度	枝条柔韧性	植被高度/m	经济价值种类/个	景观价值	病虫害种类/个	耐寒性	土壤肥力适应性
荻	高	一般	1~1.5	5	高	2	高	很高
菖蒲	低	一般	0.9~1.5	2	一般	8	一般	一般
再力花	很低	高	1~2.5	1	很高	1	低	高
狼尾草	高	高	0.3~1.2	2	低	1	很高	一般
杞柳	很高	很高	1~3	2	低	3	很高	低
香蒲	高	高	1.3~2	5	一般	2	很高	高
千屈菜	高	高	0.7~1	4	高	1	高	高
芦竹	很高	高	2~4	4	很低	1	很低	高
水葱	很高	一般	1~2	2	低	2	很高	很低
芦苇	很高	高	1~3	5	高	2	很高	高

表 3 柔性防浪林植物适宜标准

Tab.3 Thresholds of the index system ranking for the flexible wave break forest

适宜度	根系发达程度	枝条柔韧性	植被高度/m	经济价值种类/个	景观价值	病虫害种类/个	耐寒性	土壤肥力适应性
最适宜	很高	很高	3~5	5	很高	2	很高	很高
适宜	高	高	2~3	4	高	4	高	高
一般	一般	一般	1.5~2	3	一般	6	一般	一般
不适宜	低	低	1~1.5	2	低	8	低	低
最不适宜	很低	很低	0~1	1	很低	10	很低	很低

在优选时,同时将最适宜、适宜、一般、不适宜和最不适宜这 5 个标准加入优选模型,与 10 个植物共形成 15 个评价对象。

根据上述定性描述与三角模糊数之间的关系,可得到柔性防浪林植物优选问题的初始矩阵,通过对其进行同趋势化和归一化处理,并根据表 1 中计算获得的权重可利用式(7)获得柔性防浪林植物选择的加权决策矩阵,得到问题的理想解和负理想解:

$$A^* = ([0.059, 0.091, 0.143], [0.061, 0.096, 0.155], [0.028, 0.085], 0.029, [0.006, 0.010, 0.017], 0.016, [0.024, 0.037, 0.058], [0.026, 0.041, 0.039])$$

$$A^- = ([0.000, 0.018, 0.048], [0.000, 0.019, 0.052], [0.000, 0.017], 0.006, [0.000, 0.002, 0.006], 0.002, [0.000, 0.007, 0.019], [0.000, 0.008, 0.013])$$

通过式(19)计算出 10 种植物与 5 个评价标准的适宜度如表 4。

10 种待选植物的接近度排序如下:杞柳、芦苇、芦竹、香蒲、千屈菜、狼尾草、水葱、荻、再力花、菖蒲。根据评价标准,杞柳、芦苇和芦竹 3 种植物处于最适宜和适宜之间。杞柳是嫩江最适宜的柔性防浪林植

物,其接近度达到 0.779;芦苇和芦竹的接近度也很高,分别为 0.775 和 0.724。因此嫩江柔性防浪林的推荐植物顺序为杞柳、芦苇和芦竹。

表 4 植物与评价标准适宜度

Tab.4 Suitability degree of the selected vegetation species

植物	d^+	d^-	C^*
最适宜	0.102	0.141	0.966
杞柳	0.145	0.088	0.779
芦苇	0.154	0.119	0.775
芦竹	0.091	0.159	0.724
适宜	0.058	0.206	0.716
香蒲	0.074	0.164	0.687
千屈菜	0.089	0.158	0.641
狼尾草	0.070	0.185	0.636
水葱	0.105	0.162	0.608
荻	0.055	0.188	0.582
一般	0.008	0.223	0.475
再力花	0.064	0.162	0.436
菖蒲	0.118	0.107	0.378
不适宜	0.170	0.054	0.241
最不适宜	0.223	0.000	0.000

4 结论

本文在传统 TOPSIS 模型中引入了区间数、三角模糊数及其处理方法,解决了一些指标无法用精确数直接描述的问题,使得优选结果定量化,更具科

学性;在计算指标体系权重时,引入了层次分析法,避免了计算指标体系权重时依靠主观臆断的问题。建立了基于 TOPSIS-AHP 方法的嫩江防浪林柔性植物选择模型,根据模型计算结果,杞柳、芦苇和芦竹是嫩江柔性防浪林的适宜植物,其中杞柳最适宜。

防浪林作为植物群落整体发挥抵御风浪作用和生态效益。单纯的柔性植物筛选是不够的,在未来的研究中还应从植物群落角度出发,考虑构建多层次、互惠共生、稳定性强的柔性防浪林植物群落模式或刚柔组合防浪林植物群落模式。

参考文献

樊守斌,2016.堤防防浪林树种筛选实践探索[J]. 治淮, (5): 50-51.

伏世红,乔双全,王吉永,2011. 嫩江干流齐富堤防双层地基渗流稳定分析[J]. 水利科技与经济,17(7):13-15.

郭建民,褚东花,张楠,等,2016.临沂市水生草本植物病虫害防治及对水质、环境的影响[J]. 现代农业科技, (6): 160,165.

郭金玉,张忠彬,孙庆云,2008. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 18(5):148-153.

黑龙江森林编委会,2011.黑龙江森林[M].哈尔滨:东北林业大学出版社.

江新,余璐,2016. 基于熵权-TOPSIS 的水电工程项目群协同度评价[J]. 人民长江,47(2):51-55.

孔维静,夏会娟,张远,等,2015.辽河保护区及其支流河岸草本植物群落数量分析[J].应用与环境生物学报,21(5): 904-911.

李东健,杨允菲,2001.松嫩平原植物群落时空变化及数据库[M].北京:科学出版社.

刘冉,甘淳丹,赵海燕,等,2017. 四种大型湿地植物对水产养殖废水中矿质元素和重金属富集特征的影响[J]. 南京农业大学学报, 40(5):859-866.

倪晓燕,2016.东北黑土区水源地上游入库河道植物优化配置研究[D]. 长春:东北师范大学.

潘治,李学斌,2010. 改进的多目标优化算法及其在船舶设计中的应用[J]. 中国造船,51(2):99-106.

秦吉,张翼鹏,1999. 现代统计信息分析技术在安全工程方面的应用——层次分析法原理[J]. 工业安全与环保, (5):44-48.

盛长滨,盛滨龙,2011. 嫩江流域洪水分析[J]. 东北水利水电, 29(11):35-36.

信桂新,杨朝现,杨庆媛,等,2017. 用熵权法和改进 TOPSIS 模型评价高标准基本农田建设后效应[J]. 农业工程学报,33(1):238-249.

徐建新,樊华,胡笑涛,2012. 熵权与改进 TOPSIS 结合模型在地下水资源承载力评价中的应用[J]. 中国农村水利水电, (2):30-33.

徐文铎,1983.东北地带性植被建群种及常见种的分布与水土条件关系的初步研究[J].植物学报,25(3):255-274.

杨洪云,王永刚,李焕利,等,2017.两种浮床植物对水体中氮磷吸收能力及其水质净化效果[J].净水技术, (3):63-67.

张茂章,2015. 影响淮河中游防浪林建设的因素分析及树种选择[J]. 中国水利, (9):22-24.

Ren L, Liu J T, Ni J J, et al,2014. Health evaluation of a lake wetland ecosystem based on the TOPSIS method [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 23(6): 2183-2190.

(责任编辑 张俊友)

Optimization of Vegetation in a Flexible Wave Break Forest for Nenjiang River Using a Multi-attribute TOPSIS-AHP Model

WEI Yi-ming, DONG Zeng-chuan, XU Wei, WANG Jian-ting, REN Jie

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

Abstract: Because they are ecologically sound and cost-effective, wave break forests are widely used for attenuating waves to protect river banks and shorelines. But plant selection for bank protection is complex, and plant growth characteristics, climate, soil characteristics and wave dissipation efficiency must all be considered and optimized. In this study, we developed a plant selection index system for a flexible wave break forest along Nenjiang River and then used the system to select plants for the forest. Our aim was to provide a reference to guide plant community development for ecological restoration projects. The TOPSIS-AHP model, developed to assist plant selection for the flexible wave break forest, was based on the traditional TOPSIS method and included the interval number, triangular fuzzy number and processing techniques. The plant selection index system consisted of eight indicators, grouped into three first-level indices: wave attenuation function, growth habits and auxiliary function. Index weighting for each of the eight indicators was determined using the Analytic Hierarchy Process (AHP). A five-level qualitative description for each of the eight indicators was developed, along with the corresponding criteria. The index values of ten plants were evaluated and the suitability degree of each plant was determined. Results show that *Salix integra*, *Phragmites communis* and *Arundo donax* were suitable for constructing the Nenjiang flexible wave break forest, with *Salix integra* ranking highest. Future research should focus on establishing wave break forests that are multi-level, mutually beneficial and stable, based on the rigid-flexible plant community model.

Key words: TOPSIS method; analytic hierarchy process; flexible wave break forest; vegetation selection; Nenjiang River