

“双碳”背景下京津冀林木碳汇发展潜力探究——基于灰色关联分析和熵权 TOPSIS 法

摘要：为了研究我国京津冀地区林木碳汇的影响因素，以更好的保护国家环境，促进“双碳”政策的顺利落实，促进人与自然和谐发展。以《中国统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》为主要的数据来源，选取 2001-2021 近 20 年数据，选取林木碳汇为因变量，社会经济、森林资源、森林经营管理、环境规制为准则层，建立 12 个指标与因变量之间的灰色关联，以此为基础进行熵权法 TOPSIS 分析评价，在（TOPSIS）的基础上，建立障碍度模型，研究影响林木碳汇潜力的主要因素。结果表明，人口、活立木蓄积量、森林覆盖率、森林面积、森林蓄积量、人工林六个指标在京津冀三个省份与林木碳汇之间的关联度均大于 0.9，表现出强相关。同时，河北的相对接近度远远高于北京和天津，位于 0.8 以上，但是环境规制因素影响京津冀的林木碳汇潜力，且社会经济、环境规制两个方面严重影响着河北林木碳汇的发展。为此，我们要从社会经济、森林资源、森林经营管理、环境规制四个方面着手，因地制宜，挖掘碳汇潜力，切实解决人与自然和谐发展问题。

关键词：双碳；林木碳汇；灰色关联分析；熵权法 TOPSIS；障碍度模型

Exploration of the Development Potential of Forest Carbon Sequestration in the Beijing Tianjin Hebei Region under the Background of "Dual Carbon": Based on Grey Correlation Analysis and Entropy Weight TOPSIS Method

Abstract: In order to study the influencing factors of forest carbon sequestration in the Beijing Tianjin Hebei region of China, in order to better protect the national environment, promote the smooth implementation of the "dual carbon" policy, and promote the harmonious development of humans and nature. Using the "China Statistical Yearbook" and "China Environmental Statistical Yearbook" as the main data sources, data from the past 20 years from 2001 to 2021 were selected. Forest carbon sink was chosen as the dependent variable, and social economy, forest resources, forest management, and environmental regulation were used as the criterion layer to establish a grey correlation between 12 indicators and the dependent variable. Based on this, entropy weight method TOPSIS analysis and evaluation were conducted. On the basis of TOPSIS, an obstacle degree model was established to study the main factors affecting the potential of forest carbon sink. The results showed that the correlation between population, standing timber volume, forest coverage, forest area, forest volume, and artificial forests in the three provinces of Beijing Tianjin Hebei was greater than 0.9, indicating a strong correlation. At the same time, the relative closeness of Hebei is much higher than that of Beijing and Tianjin, at over 0.8. However, environmental regulatory factors affect the potential of forest carbon sequestration in the Beijing Tianjin Hebei region, and the development of forest carbon sequestration in Hebei is seriously affected by both socio-economic and environmental regulations. To this end, we need to start from four aspects: social economy, forest resources, forest management, and environmental regulation, adapt to local conditions, tap into the potential of carbon sinks, and effectively solve the problem of harmonious development between humans and nature.

Keywords: dual carbon; Forest carbon sink; Grey correlation analysis; Entropy weight method TOPSIS; Obstacle level model

随着全球气候变化问题日益严峻,减少温室气体排放、实现碳达峰和碳中和已成为国际社会的共同目标。中国在应对气候变化方面展现出了坚定的决心和行动力,明确提出了“双碳”目标,并以此为引领,积极推动绿色低碳发展。森林生态系统是巨大的碳储存库和重要碳汇,森林通过碳汇功能,储存了陆地生态系统中 50% ~ 60% 的碳(Dixon et al.,1994)。^[1]在这一背景下,林木碳汇作为一种有效的自然减排方式,其潜力巨大,备受关注。

京津冀地区作为中国的重要经济区域,其林业资源丰富,具有发展林木碳汇的天然优势。然而,如何准确评估京津冀地区林木碳汇的潜力,并制定科学有效的发展策略,是实现“双碳”目标的关键问题之一。因此,本文基于灰色关联分析和熵权 TOPSIS 法,对京津冀地区林木碳汇发展潜力进行深入探究。通过障碍度模型进行分析,找出影响京津冀林木碳汇潜力的关键因素,根据相关指标提出相应建议,切实挖掘林木碳汇潜力,促进“双碳”政策的落实,保证人与自然和谐共生。

1. 研究概况及研究方法

1.1 研究区概况

北京位于中国北部,华北大平原的北端,背靠燕山,毗邻天津市和河北省。地理坐标为 $39^{\circ} 28' \sim 41^{\circ} 03' \text{ N}$, $115^{\circ} 25' \sim 117^{\circ} 30' \text{ E}$ 。它是中国政治、文化和国际交流的中心,也是世界著名的古都之一。天津市地处太平洋西岸,华北平原东北部,海河流域下游,东临渤海,北依燕山,西靠首都北京,其余均与河北省相邻。地理坐标为 $38^{\circ} 34' \sim 40^{\circ} 15' \text{ N}$, $116^{\circ} 43' \sim 118^{\circ} 4' \text{ E}$,处于国际时区的东八区。天津是中国北方最大的沿海开放城市,也是中国北方的经济、金融、贸易和航运中心。河北省位于中国华北地区,北邻北京和天津,东临渤海,南接山东、河南两省,西与山西、内蒙古自治区相连,它是中国的交通枢纽之一。地理坐标为 $36^{\circ} 05' \sim 42^{\circ} 40' \text{ N}$, $113^{\circ} 27' \sim 119^{\circ} 50' \text{ E}$ 。

京津冀地区位于中国的东北部,地处华北平原,是中国的“首都经济圈”。京津冀三省因为其地理位置、资源优势等等诸多方面存在差异,造成其森林资源与经济发展不平衡。京津冀一体化发展是重大国家战略,旨在实现资源共享、市场统一、产业互补、协同发展的目标。因此,根据当地的特点,挖掘其林木碳汇的潜力,促进人与自然和谐发展势在必行。

1.2 数据来源

数据资料摘自《中国统计年鉴》、《北京统计年鉴》、《天津统计年鉴》、《河北统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》,少量缺失值运用线性插值法进行填补。指标数据包含经济、人口、森林资源等方面,因此,数据具体来源第二章人口、第三章国民经济核算、第八章资源与环境。

1.3 研究方法

1.3.1 灰色关联分析

灰色关联分析指的是一种用于定量描述和比较系统发展变化趋势的方法。^[2]灰色关联分析方法自 1982 年由邓聚龙教授创立以来,被广泛应用到经济、社会、生态等领域,在系统态势分析、投资效益分析、产业结构调整等方面发挥了重要的分析作用。其基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断不同序列之间的联系是否紧密。这种分析方法将一个系统的发展变化态势进行了量化描述和比较。在灰色关联分析中,首先确定反映系统行为特征的参考数列和影响系统行为的比较数列。随后,对这两类数列进行无量纲化处理,以消除不同物理意义或量纲对数据比较的影响。接着,计算参考数列与比较数列之间的灰色关联系数,这实质上是衡量曲线间几何形状差别程度的指标。最后,通过对关联系数的集中处理,得到关联度,从而描述各因素与系统主行为之间的关联程度。

1.3.2 熵权 TOPSIS

熵权 TOPSIS 是一种融合了熵值法与 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) 法的综合评价方法。这种方法适用于多准则决策问题,尤其是在涉及多个方案和对对象的比较中,能够帮助确定最佳方案或竞争力最强的对象。熵权 TOPSIS 能够充分利用原始数据中的信息,充分考虑各指标间的权重和相对重要性。通过熵值法确定权重,减少了主观赋值带来的偏差,使得评价结果更加客观和科学。熵权 TOPSIS 已经广泛应用于多个领域,如环境质量评价、水资源管理、城市竞争力分析等。通过这种方法,可以科学、有效地进行多准则决策分析,为政策制定和决策支持提供有力工具。

1.3.3 障碍度模型

障碍度模型是一种综合性的研究方法,它通过量化评估各项评价指标的偏离程度和对整体目标的影响权重,精准识别出制约系统或事物发展的主要障碍因素。这种方法结合了因子贡献度和指标偏离度两个核心概念,能够科学、客观地分析出问题的关键所在,为决策者提供针对性的解决策略和方向。

2 指标选取与构建

2.1 文献综述

王姝雅(2018)从林业碳保护管理行为、碳吸引管理行为、林业经济发展规模三个方面分析森林碳汇影响因素。发现林业总产值、森林病虫害发生面积对碳储量变化产生直接影响,而造林面积通过影响林业总产值影响了森林碳储量的变化,同时森林火灾受害面积与森林病虫害发生面积之间存在着影响关系。^[3]高鸿杰(2020)从森林经营管理者角度出发选取造林面积、木材产量、林业系统累计完成投资额、火灾受害森林面积、森林病鼠虫害发生面积五个因素作为比较数列,研究了其与广东省森林总碳汇量之间具有很强的关联性。^[4]张娟(2020)分别是自然地理因素、人口变量、经济社会变量三方面分析森林碳汇量的影响因素。自然因素方面选取森林面积、森林面积与林业用地面积比值为解释变量;人口和经济社会变量方面选取人均地区生产总值、林业产值、农业产值、林业从业人员数量为解释变量。因变量选取蓄积量扩展法估算的森林碳储量为被解释变量,结果表明林业人员数、林业人员数、森林面积和森林面积占林业用地面积与森林碳储量存在显著的正相关关系,人均 GDP、农业产值与森林碳储量存在显著的负相关关系。^[5]李琛(2022)选取“总碳储量”替代“森林碳汇经济价值”作为参考序列,选取“林业产值”“森林抚育面积”“木材采伐量”“林业固定资产投资完成额”“森林火灾受灾程度”“森林病虫害受灾程度”“平均气温”和“平均降水量”八个指标作为比较序列,通过改进的灰色斜率关联度模型进行影响因素分析。^[6]龚泊舟(2022)对2000—2019年云南省森林碳汇量的统计数据基础上,重点选取气温、降水量、造林面积、森林火灾受害面积、木材采伐量、林业投资和林业总产值七个方面的数据,分析影响森林碳汇量的主要因素,为云南省提高森林碳汇能力提供理论依据。^[7]于鲁冀(2023)以2010-2020年河南省数据为依据,验证了城镇化率、人均GDP值、林业产业比例、和森林面积均对河南省森林碳汇价值产生正向影响关系。^[8]田晓霞,包庆丰(2023)从森林资源、森林保护、社会经济、气候效应和林业产业五个方面选取16个指标构建森林碳汇发展潜力评价指标体系,运用熵值法、空间自相关分析和障碍度模型对中国31个省份2011—2020年森林碳汇发展潜力水平进行分析和评价,并探究其主要障碍因子。^[9]

国内外学者就森林碳储量、森林碳汇量、森林碳汇经济价值等方面探究其与相关影响因素的关系,从不同的方面选取不同的指标,研究角度多种多样。但是,侧重人对自然的影响相关研究寥寥无几,环境规制层面还未见提出。

2.2 指标选取

与森林碳汇相比,林木碳汇更侧重于通过人工造林、林木种植、森林管理等手段,促进森林生态系统的碳汇功能,增加对二氧化碳的吸收和储存。它不仅涵盖了森林的自然碳汇过程,还强调了人为干预和管理在增强碳汇功能中的作用。从森林资源管理整个系统来看,社会经济、森林资源、森林经营管理、环境规制四个方面起到决定性作用,因此从这四个准则层分析其与森林碳汇的关系。同时,在四个准则层的基

础上划分 12 个指标（如表 1），系统化研究不同指标对林木碳汇的影响程度，进而评价、挖掘林木碳汇的发展潜力。

表格 1 指标体系的建立与划分

准则层	指标层	变量符号
社会经济	人口（万人）	X1
	人均 GDP（元/人）	X2
	林业草原投资（万元）	X3
森林资源	活立木蓄积量（万立方米）	X4
	森林覆盖率（%）	X5
	林业用地面积（万公顷）	X6
森林经营管理	森林面积（万公顷）	X7
	森林蓄积量（万立方米）	X8
	森林火灾受灾面积（公顷）	X9
环境规划	造林总面积（公顷）	X10
	森林有害生物防治率（%）	X11
	人工林（万公顷）	X12

3 数据处理与结果分析

3.1林木碳汇的灰色关联度分析

3.1.1 建模分析

灰色关联分析通过确定参考数据列即林木碳汇量和若干个比较数据列即 12 个指标序列的集合形状相似程度来判断其联系是否紧密，反映了曲线间的关联程度。在系统发展过程中，若两个因素变化的趋势具有一致性，即同步变化程度较高，则两者关联程度较高；反之则较低。建模主要步骤如下：

1.确定参考数列和比较数列：反映系统行为特征的数据序列称为参考数列（林木碳汇量）。影响系统行为的因素组成的数据序列称为比较数列（12 个指标）。

2.无量纲化处理：由于系统中各因素的物理意义不同，导致数据的量纲也不一定相同，不便于比较，或在比较时难以得到正确的结论。因此，通常需要对参考数列和比较数列进行无量纲化的数据处理。

3. 求灰色关联系数：关联程度实质上是曲线间几何形状的差别程度。因此，曲线间差值大小可作为关联程度的衡量尺度。关联系数 $\xi(X_i)$ 由特定公式计算得出，其中涉及到分辨系数 ζ （通常取 0.5）、两级最小差 $\Delta_{\min}$ 、两级最大差 $\Delta_{\max}$ ，以及各比较数列 X_i 曲线上的每一个点与参考数列 X_0 曲线上的每一个点的绝对差值 $\Delta_{oi}(k)$ 。

4. 求关联度：关联系数是比较数列与参考数列在各个时刻的关联程度值，信息较为分散，不便于整体性比较。因此，需要将其集中为一个值，即求其平均值作为关联度的数量表示。根据 $\gamma(x_0(k),x_i(k))=$

$$(\min_i \min_k |x_0(k)-x_i(k)| + \xi \max_i \max_k |x_0(k)-x_i(k)|) / (|x_0(k)-x_i(k)| + \xi \max_i \max_k |x_0(k)-x_i(k)|)$$

$\gamma(X_0,X_i)=1/n \cdot \sum \gamma(x_0(k),x_i(k))$ 求得相关邓氏关联度，关联度值 γ 越接近 1，说明相关性越好。运用灰色建模软件第七版，分别对北京、天津、河北进行邓氏关联度分析，得到结果如下表 2。

表格 2 京津冀相应指标与林木碳汇的邓氏关联度

指标名称	北京关联度	天津关联度	河北关联度
人口	0.9109	0.9857	0.9413
人均 GDP	0.9355	0.9522	0.7905
林业草原投资	0.6771	0.7778	0.7228
活立木蓄积量	0.9181	0.9882	0.9754
森林覆盖率	0.9241	0.9851	0.9645
林业用地面积	0.8974	0.9829	0.9461
森林面积	0.9190	0.9847	0.9659
森林蓄积量	0.9357	0.9881	0.9626
森林火灾受灾面积	0.8555	0.9524	0.8138
造林总面积	0.8986	0.9771	0.8666
森林有害生物防治率	0.8956	0.9793	0.9347
人工林	0.9151	0.9846	0.9419

5. 关联度排序：因素间的关联程度主要通过关联度的大小次序描述。将各子序列对同一母序列的关联度按大小顺序排列，反映了对于母序列来说各子序列的“优劣”关系。根据不同的关联度大小，进行相应的结果分析。

3.1.2 结果分析

根据邓氏关联度进行结果分析，人口、活立木蓄积量、森林覆盖率、森林面积、森林蓄积量、人工林六个指标在京津冀三个省份与林木碳汇之间的关联度均大于 0.9，表现出强相关，可见在京津冀地区社会经济、森林资源、森林经营管理、环境规制四个方面均影响着林木碳汇。

京津冀地区的森林草原投资与林木碳汇的关联度分别为 0.6771、0.7778、0.7228，这些关联度数值在 0 到 1 的范围内，通常被认为是中等程度的关联。然而，如果与其他指标相比较时，这些关联度显得相对较弱，意味着在该地区，森林草原投资与林木碳汇之间的关系并不是最为显著或直接的。可能原因是津冀地区的森林草原投资可能不仅局限于增加林木碳汇，还可能涉及生态旅游、水资源保护、生物多样性保护等多个方面。因此，与林木碳汇的单一指标相比，投资可能更多地受到其他因素的影响。同时，森林草原投资对林木碳汇的影响可能存在时间滞后效应。也就是说，投资的增加可能需要一段时间才能显著地提高林木碳汇。因此，短期的关联度可能无法完全反映这种长期的影响。

京津冀其他相关指标与林木碳汇的关联度在 0.8 左右，均呈现较高的关联度。意味着当这些指标发生变化时，林木碳汇也会相应地发生显著变化。这种高关联度可能源于林木碳汇形成过程中的多种因素共同作用。例如，人均 GDP 的增加、森林管理水平的提高、生态环境质量的改善等都可能直接影响林木碳汇量。为了实现碳中和目标并应对气候变化挑战，京津冀地区应继续加强这些相关指标的管理和优化工作，以进一步提高林木碳汇量并促进生态环境的持续改善。

3.2林木碳汇潜力熵权TOPSIS评价建立

3.2.1 模型建立

1.准备原始矩阵 X 。为不同对象在不同指标下的评分数据， $n \times m$ 的矩阵， n 为对象个数， m 为指标个数。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix}$$

2.原始矩阵正向化和标准化,得到标准化矩阵 Z , 此处使用极差法。

(1) 正向指标

$$z'_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}}$$

(2) 负向指标

$$z'_{ij} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}}$$

(3) 适度指标

$$z'_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{a - x_{ij}}{\max(a - x_j^{\min}, x_j^{\max} - b)} & , x_{ij} < a \\ 1 & , a \leq x_{ij} \leq b \\ 1 - \frac{x_{ij} - b}{\max(a - x_j^{\min}, x_j^{\max} - b)} & , x_{ij} > b \end{cases}$$

其中 a 和 b 不相等时可以叫做范围型指标, a 和 b 相等时可以叫做中间型指标。

3. 计算第 j 项指标下第 i 个对象的值占该指标的比重 P_{ij} 。此时的标准化矩阵 Z 为:

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1m} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{nm} \end{bmatrix}$$

则

$$P_{ij} = z_{ij} / \sum_{i=1}^n z_{ij}, (j = 1, 2, \cdots, m)$$

4. 计算第 j 项指标熵值 E_j , 当 $P_{ij} = 0$ 时, $P_{ij} \ln P_{ij} = 0$ (此处未进行非负平移)

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij}, (j = 1, 2, \cdots, m)$$

5. 计算第 j 项指标的差异系数 G_j

$$G_j = 1 - E_j$$

6. 计算第 j 项指标的权重 W_j

$$W_j = G_j / \sum_{j=1}^m G_j$$

7. 标准化后求加权矩阵;

8. 求正、负理想解距离

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (Z_j^+ - z_{ij})^2}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (Z_j^- - z_{ij})^2}$$

[10]

3.2.2 碳汇潜力评价结果及分析

通过熵权法，根据已经选择的指标进行分析，计算各指标权重（如表 3）

表格 3 京津冀林木碳汇潜力发展评价体系及指标权重

准则层	指标层	属性	指标权重
社会经济	人口（万人）	+	0.090081
	人均 GDP（元/人）	+	0.041154
	林业草原投资（万元	+	0.097329
森林资源	活立木蓄积量（万立方米）	+	0.109975
	森林覆盖率（%）	+	0.053645
	林业用地面积（万公顷）	+	0.110128
森林经营管理	森林面积（万公顷）	+	0.116193
	森林蓄积量（万立方米）	+	0.111918
	森林火灾受灾面积（公顷）	-	0.009645
环境规划	造林总面积（公顷）	+	0.13537
	森林有害生物防治率（%）	+	0.01527
	人工林（万公顷）	+	0.109291

将计算所得的指标权重代入加权决策矩阵，进行 TOPSIS 分析，并求得各个省份碳汇潜力相对接近度及排序。如表 4

表格 4 2001–2021 年京津冀 TOPSIS 评价结果

年份	北京	天津	河北
	相对接近度 C	相对接近度 C	相对接近度 C
2001	0.245	0.101	0.878
2002	0.246	0.109	0.878
2003	0.245	0.117	0.878
2004	0.243	0.121	0.872
2005	0.239	0.118	0.872
2006	0.311	0.118	0.871
2007	0.309	0.120	0.837
2008	0.306	0.121	0.838
2009	0.303	0.121	0.871
2010	0.302	0.124	0.868
2011	0.305	0.121	0.819
2012	0.308	0.121	0.804
2013	0.310	0.124	0.778
2014	0.304	0.121	0.783
2015	0.303	0.121	0.818
2016	0.302	0.121	0.829
2017	0.305	0.117	0.809
2018	0.308	0.121	0.841

2019	0.308	0.121	0.810
2020	0.313	0.121	0.804
2021	0.314	0.114	0.848
排序	2	3	1

根据表 4 可以看出，河北的相对接近度远远高于北京和天津，同时北京又高于天津，从时间顺序上来看京津冀三省的评价分数在一定水平上上下下波动。从北京来看，2006 年以后，北京的相对接近度处于 0.3 水平上下波动不大，天津在 2006 年后稳定相对接近度为 0.12，河北相对波动较大，但评分均为下降到 0.8 以下。

3.3碳汇潜力发展的障碍度模型

3.3.1 障碍度模型建立

障碍度模型建立在综合评价模型（topsis）的基础上，用来对影响事物发展的障碍因素进行全面挖掘。

- 1. 计算单一指标对总目标的贡献，一般用指标的全局权重表示，记作*F*。
- 2. 计算原始数据的标准化矩阵*X*，一般使用极差法。
- 3. 计算指标偏离度*I*，表示指标实际值与最优值之间的差距。

$$I = 1 - X$$

- 4. 计算指标障碍度*O*。

$$O_{ij} = \frac{F_j I_{ij}}{\sum_{j=1}^n F_j I_{ij}}$$

- 5. 根据指标层级关系，将底层指标的障碍度向上求和汇总，得到上层指标的障碍度。

3.3.2 障碍度结果分析

通过障碍度模型的建立，分别对北京、天津、河北进行障碍度分析，得到如下不同地区、不同年份相同准则层下的障碍度。

表格 5 北京障碍度模型分析结果

年份	社会经济	森林资源	森林经营管理	环境规划
2001	0.237	0.262	0.240	0.261
2002	0.236	0.263	0.240	0.261
2003	0.236	0.264	0.241	0.259
2004	0.237	0.263	0.242	0.258
2005	0.234	0.261	0.240	0.264
2006	0.229	0.263	0.243	0.264
2007	0.225	0.265	0.244	0.265
2008	0.222	0.267	0.245	0.266
2009	0.228	0.255	0.247	0.270
2010	0.226	0.256	0.247	0.271
2011	0.206	0.263	0.254	0.277
2012	0.189	0.270	0.261	0.280
2013	0.171	0.270	0.268	0.291
2014	0.158	0.273	0.270	0.299
2015	0.183	0.264	0.262	0.291
2016	0.176	0.266	0.265	0.293
2017	0.164	0.272	0.269	0.295

2018	0.156	0.261	0.271	0.312
2019	0.157	0.261	0.271	0.311
2020	0.134	0.268	0.280	0.318
2021	0.187	0.251	0.260	0.302

对北京进行障碍度分析，依据表 5 数据可知，社会经济、森林资源、森林经营管理、环境规制四个准则层的障碍度均位于 0.2 左右，社会经济因素有所缓和，森林资源、森林经营管理、环境规制三个层面的问题依然严峻，尤其是环境规制层面。障碍度逐年增加，因此，对北京地区进行环境规制刻不容缓。

表格 6 天津障碍度模型分析结果

年份	社会经济	森林资源	森林经营管理	环境规制
2001	0.230	0.281	0.235	0.254
2002	0.230	0.281	0.234	0.254
2003	0.228	0.281	0.234	0.257
2004	0.229	0.282	0.236	0.253
2005	0.226	0.281	0.235	0.257
2006	0.225	0.282	0.236	0.257
2007	0.224	0.284	0.237	0.255
2008	0.223	0.285	0.238	0.254
2009	0.221	0.286	0.239	0.254
2010	0.218	0.287	0.240	0.256
2011	0.214	0.288	0.241	0.257
2012	0.212	0.288	0.241	0.258
2013	0.209	0.288	0.243	0.260
2014	0.205	0.290	0.243	0.262
2015	0.204	0.290	0.244	0.262
2016	0.203	0.291	0.244	0.262
2017	0.192	0.294	0.247	0.267
2018	0.201	0.289	0.246	0.265
2019	0.191	0.293	0.250	0.267
2020	0.197	0.289	0.247	0.267
2021	0.195	0.286	0.243	0.276

对天津地区进行障碍度分析，依据表 6 数据可以看出，天津的社会经济方面对林木碳汇的障碍度有所缓和，森林资源层面较为严峻，森林资源不是一朝一夕可以改变的，要在政策的引导下，积极落实，全民协作，促进森林资源增长。

表格 7 河北障碍度模型分析结果

年份	社会经济	森林资源	森林经营管理	环境规制
2001	0.357	0.286	0.261	0.096
2002	0.357	0.288	0.259	0.095
2003	0.343	0.279	0.250	0.129
2004	0.303	0.242	0.238	0.217
2005	0.289	0.233	0.222	0.257
2006	0.273	0.221	0.216	0.291
2007	0.283	0.232	0.210	0.275
2008	0.295	0.246	0.222	0.237
2009	0.344	0.218	0.178	0.260

2010	0.338	0.219	0.171	0.272
2011	0.305	0.212	0.190	0.293
2012	0.299	0.218	0.186	0.297
2013	0.355	0.186	0.128	0.332
2014	0.339	0.192	0.144	0.325
2015	0.338	0.196	0.140	0.326
2016	0.387	0.242	0.178	0.193
2017	0.343	0.225	0.185	0.246
2018	0.576	0.216	0.016	0.193
2019	0.542	0.171	0.020	0.267
2020	0.491	0.161	0.001	0.347
2021	0.401	0.116	0.003	0.481

对河北地区进行障碍度分析，根据表 7 可以明显看出，社会经济、环境规制两个方面严重影响着河北林木碳汇的发展，集中力量解决这两个方面的矛盾，能够挖掘河北省碳汇潜力，促进人与自然和谐共生。

4 “双碳”背景下京津冀林木碳汇发展策略

在“双碳”（碳达峰、碳中和）背景下，京津冀地区的林木碳汇发展策略可以从社会经济、森林资源、森林经营管理以及环境规制四个方面进行规划和实施。

4.1 建立市场主导机制，促进政府企业双主体协作

建立林业碳汇交易市场，完善碳汇计量、监测和评估体系，形成公正、透明的交易环境。同时，探索碳排放权交易与林业碳汇交易的衔接机制，鼓励企业购买林业碳汇以抵消其碳排放，形成有效的市场激励机制。政府应出台相关政策，明确林木碳汇在“双碳”目标中的战略地位，并设立专项资金支持林木碳汇项目的发展。通过税收优惠、财政补贴等方式，引导社会资本进入林业碳汇领域，推动相关产业的形成与发展。

4.2 保护现有森林资源，多元扩展新型森林资源

扩大森林面积，通过植树造林、退耕还林等措施，增加京津冀地区的森林面积。同时，优化树种结构，选择具有较强碳汇能力的树种进行种植，提高森林生态系统的碳汇能力。加强森林抚育和更新改造，通过合理采伐、补植等措施，提高森林的生长量和蓄积量。同时，加强森林病虫害防治和森林防火工作，确保森林生态系统的健康稳定。建立健全森林资源保护体系，严厉打击非法占用林地、盗伐滥伐等破坏森林资源的行为。同时，加强森林资源监测和评估工作，及时发现和解决问题，确保森林资源的可持续利用。

4.3 进行科学森林管理，提高森林系统碳汇功能

制定科学的森林经营规划和管理方案，明确经营目标、任务和措施。同时，加强森林经营管理人员的培训和教育，提高其专业素质和管理水平。积极引进和推广先进的林业技术和管理模式，提高林业生产经营效率和质量。通过技术创新和管理创新，提升森林生态系统的碳汇能力。推动林业产业结构调整和优化升级，发展森林生态旅游、林下经济等多元化林业产业。通过产业融合和协同发展，提高林业碳汇项目的综合效益。

4.4 加强法律法规建设，保证人与自然和谐共生

完善法律法规体系：加强法律法规建设，制定和完善关于林木碳汇的法律法规和政策措施。通过立法保障和执法监督，确保林木碳汇项目的合法性和规范性。加强监管与评估：建立健全林木碳汇项目的监管

和评估机制,对项目的实施情况进行定期检查和评估。同时,加强与国际组织的合作与交流,学习借鉴先进的管理经验和技术标准。建立奖惩机制:对于积极参与林木碳汇项目的单位和个人给予表彰和奖励;对于违反相关法律法规和政策措施的行为进行严厉打击和惩罚。通过奖惩结合的方式推动林木碳汇项目的顺利发展。

参考文献:

- [1] 付晓,张煜星,王雪军.2060年前我国森林生物量碳库及碳汇潜力预测[J].林业科学,2022,58(02):32-41.
- [2] 包一婷,赵华.乡村振兴背景下甘肃农村物流发展策略研究——基于灰色关联分析和熵权法[J].物流科技,2024,47(11):105-109.DOI:10.13714/j.cnki.1002-3100.2024.11.026.
- [3] 王姝雅,高丹丹,刘鹏,等.应用结构关系识别法对黑龙江省森林碳储量的预测[J].东北林业大学学报,2018,46(09):59-64. DOI:10.13759/j.cnki.dlxb.2018.09.013.
- [4] 高鸿杰.广东省森林碳汇经济价值评估及影响因素研究[D].仲恺农业工程学院,2020.DOI:10.27700/d.cnki.gzcny.2020.000091.
- [5] 张娟,林晓薇.中国森林碳储量的影响因素研究——基于社会经济视角[J].长春工程学院学报(社会科学版),2020,21(04):34-39.
- [6] 李琛.湖北省森林碳汇经济价值影响因素及潜力分析[D].武汉轻工大学,2022.DOI:10.27776/d.cnki.gwhgy.2022.000036.
- [7] 龚泊舟,彭海英,刘新有.基于格兰杰因果检验的云南省森林碳汇量影响因素分析[J].资源与人居环境,2022,(04):44-49.
- [8] 于鲁冀,张亚慧,王燕鹏,等.河南省森林碳汇价值时空特征及其影响因素[J].水土保持通报,2023,43(05):288-296.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.034.
- [9] 田晓霞,包庆丰.森林碳汇发展潜力时空演变与障碍因子诊断——基于31个省份[J].中国林业经济,2023,(06):111-117.DOI:10.13691/j.cnki.cn23-1539/f.2023.06.017.
- [10] 郑梓林,陈楚民,林娜,等.基于熵权TOPSIS法的林长制实施成效评估及障碍度研究[J].绿色科技,2024,26(07):70-76.DOI:10.16663/j.cnki.lskj.2024.07.038.