

doi:10.3969/j.issn.1006-8023.2023.01.002

基于系统动力学的帽儿山实验林场 可持续发展水平预测

李泓莹,董灵波,刘兆刚*

(森林生态系统可持续经营教育部重点实验室(东北林业大学),哈尔滨 150040)

摘要:建立可持续发展评价体系是研究可持续发展水平的重要手段,然而多数相关研究仅对研究区域现状进行分析,对区域未来的可持续发展趋势进行仿真预测的研究相对较少。为此,以帽儿山实验林场 2004 年和 2016 年的 2 期森林资源二类调查数据为基础,结合前人经验从经济、环境和社会等方面选择 23 项指标建立经营单位尺度可持续发展评价指标体系;通过熵权法和层次分析法(AHP)确定指标权重,采用指数加权法计算得到评价结果;并借助系统动力学方法,采用 Vensim PLE 软件绘制系统动力学流程图,寻找变量间的关系,构建系统动力学模型,对未来至 2035 年 5 种不同发展路径下林场的可持续发展水平进行预测。结果表明,2004 年可持续发展水平为 0.597,2016 年为 0.833,表明帽儿山实验林场已经由弱可持续阶段提升到了初级可持续阶段,呈现出了良好的发展趋势;在模拟的 5 种发展路径中,综合发展型可使林场的可持续发展水平于 2035 年达到 0.924,相比于保持现状型路径(模拟水平 0.899)及其他发展路径,其为更优的发展路径。

关键词:帽儿山实验林场;可持续发展;熵权法;AHP 法;系统动力学

中图分类号:S757

文献标识码:A

文章编号:1006-8023(2023)01-0011-10

Prediction of Sustainable Development Level of Maoershan Forest Farm Based on System Dynamics

LI Hongying, DONG Lingbo, LIU Zhaogang*

(Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management, Ministry of Education,
Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Establishing a sustainable development evaluation system was an important means to study the level of sustainable development. However, most relevant researches only analyze the current situation of the research area, and there were relatively few studies on the simulation and prediction of the future sustainable development trend of the area. Therefore, this paper selected 23 indicators from the economic, environmental, social and other aspects to establish sustainable development at the management unit scale based on the second-phase forest resources survey data of Maoershan Forest Farm in 2004 and 2016. The index weight was determined by the entropy weight method and the AHP method, and the evaluation result was calculated by the exponential weighting method; and with the help of the system dynamics method, Vensim PLE software was used to draw the system dynamics flow chart, find the relationship between variables, and construct the system dynamics model, then predicted the sustainable development level of the forest farm to 2035 under five different development paths in the future. The results showed that the sustainable development level in 2004 was 0.597, and in 2016 it was 0.833, indicating that the Maoershan Forest Farm had been upgraded from the weak sustainable stage to the primary sustainable stage, showing a good development trend. Under the five simulated development paths, the comprehensive development type can make the sustainable development level of the forest farm reach 0.924 in 2035, which was a better development path compared with the current status path simulation level of 0.899 and other development paths.

Keywords: Maoershan Forest Farm; sustainable development; entropy weight method; AHP method; system dynamics

收稿日期:2022-05-03

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2572021DT07);黑龙江头雁创新团队计划项目(森林资源高效培育技术研发团队);国家林业和草原科学数据中心黑龙江子平台(2005DKA32200-OH)

第一作者简介:李泓莹,硕士研究生。研究方向为森林经理学。E-mail: lihongying1126@163.com

* **通信作者:**刘兆刚,博士,教授。研究方向为森林经理学。E-mail: lzg19700602@163.com

引文格式:李泓莹,董灵波,刘兆刚. 基于系统动力学的帽儿山实验林场可持续发展水平预测[J]. 森林工程, 2023, 39(1): 11-20.

LI H Y, DONG L B, LIU Z G. Prediction of sustainable development level of Maoershan Forest Farm based on system dynamics[J]. Forest Engineering, 2023, 39(1): 11-20.

0 引言

自森林可持续发展理论提出至开始进行实质性研究以来,建立可持续发展评价指标体系一直都是重要的研究内容之一。筛选建立评价指标体系,可以得到量化的结果评估区域可持续发展水平,为区域的可持续发展提供理论和政策依据^[1-3]。中国 2020 年新施行的《森林法》提出应以培育稳定、健康、优质、高效的森林生态系统为目标,发挥森林的多种功能,实现森林资源可持续发展,这也进一步明确和体现了可持续发展规划的重要性^[4]。因此,建立可持续发展评价体系,了解研究区域在经济、环境和社会方面的表现,并通过科学合理的方式量化指标间的相互作用是十分必要的。

近年来,国内外许多学者针对可持续发展从指标体系构建、内容特点等方面做了大量研究工作。曹安等^[5]构建可持续发展评价体系,运用可拓模型从微观视角开展典型案例实证,最终得到雅玛里克山可持续发展等级,并从 3 个方面提出建议;李思勤^[6]基于国有三门江林场现状,建立可持续发展评价体系,得到综合评价结果并进行分析,为林场可持续发展水平的提高策略提供理论依据和正确方向;伍珊^[7]通过构建福建连城林场的评价指标体系,发现其经营良好,但在管理方面仍有可改进之处;韩慧翔^[8]构建 4 个层次的指标体系,根据 2009 年和 2014 年的结果,认为湖南省林业可持续水平发展态势较好,讨论并给出了针对性发展对策;Zhu 等^[9]以中国福建省的和坑村为研究对象,深入了解农村生态系统及历史背景,建立评价指标体系,并基于参考指标提供了促进农村系统可持续发展的建议;Lu 等^[10]为研究中国长江经济带的森林生态系统可持续性,构建评价体系,收集 2010 年和 2015 年相关数据,分析结果,并给出具体改进措施。前人的研究使得在建立评价体系时更容易确定指标和计算方法,但也存在一定的局限,如建立的可持续评价指标体系为某一年的数据,不能体现出林场或地区的可持续发展趋势;建立多期数据评估可持续发展水平,其数据的时间跨度对于森林的发展来说相对较短,难以从中分析出林场或地区长期发展的弊端或优势;在观察分析研究区域的发展状态变化及趋势时,只能根据现有时间节点的数据指标值给出发展建议。系统动力学适用于复杂的非线性关系、因

果循环和信息反馈等动态问题,广泛应用于各领域的仿真分析,但是,目前将系统动力学应用于森林可持续发展水平预测的研究较少。

为此,本研究以帽儿山实验林场森林资源二类调查数据为基础,构建可持续发展评价体系,借助系统动力学方法,采用 Vensim PLE 软件构建了仿真模型,并通过控制变量设计 5 种发展路径,量化了不同发展路径对研究区域未来(至 2035 年)可持续发展水平的影响,为研究区域的可持续发展对策提供理论依据和技术支撑。

1 研究区概况及数据收集

1.1 研究区概况

帽儿山实验林场(127°29′~127°44′ E, 45°14′~45°29′ N)位于黑龙江省尚志市的西北部,地处哈尔滨市东南部。帽儿山实验林场始建于 1958 年,共划分为 10 个施业区,施业区内有 1 镇 1 乡 15 个自然屯。林场总面积为 26 496 hm²,其中林权属性分为国有(面积约占 16%)和集体所有(面积约占 84%)。林场森林覆盖率达 95.7%,在 2016 年其活立木总蓄积量为 337.9 万 m³,其森林资源丰富,在维持地区生态平衡方面具有重要作用;有滨绥铁路、哈牡客运专线、301 国道穿镇而过,交通较为便利;其一二三产业产值比约为 28:25:47,人均生产总值约 37 914 元,林场社会经济比较繁荣。

1.2 数据收集来源

本研究可持续发展评价体系中的森林资源与环境指标来自 2004 年和 2016 年 2 个时期的帽儿山实验林场森林资源二类调查数据资料以及中国科学院地理科学与资源研究所公布的植被指数空间分布数据集;经济、社会数据及城市建设与环境指标的实际值及参照值均参考了 2004—2016 年的《哈尔滨统计年鉴》(其中包含尚志市数据)及尚志市国民经济和社会发展统计公报等数据,见表 1。收集过程中确保指标数据来源权威、准确,且各年份间的数据具有比较意义。在采用系统动力学方法进行模拟时经济相关数据已通过年鉴中的相关平减指数换算为 2004 年可比价。

2 研究方法

2.1 可持续发展指标体系

可持续发展评价指标体系是较为复杂的系统,建立的指标体系不但要在经济、环境和社会等方面

分别收集筛选数据,而且必须既要体现这 3 个方面可持续的现状,又能反映其发展潜力^[11-13];评价结果可以为日后区域森林资源的合理利用给出适当建议,也可以从经济、环境和社会等方面为区域的可持续发展提供对策。

表 1 指标数据收集来源

Tab. 1 Indicators data collection sources

指标 Indicators	数据来源 Data sources
林业经济 Forestry economy	尚志市国民经济和社会发展统计公报、《哈尔滨统计年鉴》(2004—2016 年)
国民经济 National economy	尚志市国民经济和社会发展统计公报、《哈尔滨统计年鉴》(2004—2016 年)
森林资源与环境 Forest resources and environment	森林资源二类调查数据(2004 年、2016 年);中国科学院地理科学与资源研究所数据
城市建设与环境 Urban construction and environment	《哈尔滨统计年鉴》2004—2016 年
人民生活 Citizens' lives	尚志市国民经济和社会发展统计公报、《哈尔滨统计年鉴》(2004—2016 年)
文教卫生 Culture, education and health	《哈尔滨统计年鉴》(2004—2016 年)

由于我国幅员辽阔,地势多样,在实际进行可持续发展评价研究时应以能够综合反映研究区域可持续发展水平为目标,在可持续发展理论的指导下,因地制宜。指标体系常见的构建方法有系统法、目标法、归类法和专家咨询法等一种或几种的组合,本研究采用了目标法。在构建评价体系时,参考了蒙特利尔进程以及刘代汉等^[14]和梁会民等^[15]所建立的评价体系指标,删除由于时间关系已经没有比较意义的指标,结合数据收集情况及近年国内外相关文献^[16-19],从林场的经济、环境和社会等方面的条件出发,综合考虑科学性、针对性、操作性、时空性和整体协调性这 5 个原则选取指标,构建了一个含有 4 个层次(目标层、系统层、类别层和指标层),共包含 23 个指标的可持续发展评价指标体系,见表 2。

2.2 指标权重的确定

由于每个指标的单位、量纲等不同,无法直接比较其好坏,故需要指标标准化计算。收集指标值(D_i)和参照值(S_i)来计算评价值(P_i),对指标体系中的正效指标, $P_i = D_i/S_i$,当 $D_i > S_i$ 时,取 $P_i = 1$;对

于负效指标, $P_i = S_i/D_i$,当 $D_i < S_i$ 时,取 $P_i = 1$ 。其中 D_{16} 、 D_{17} 、 D_{18} 为负效指标,其余为正效指标。

确定指标标准化值(即指标层的评价值)后,需要结合相应权重值进行计算得出不同层级的评价值。在本研究中确定体系指标权重值时运用了熵权法和 AHP 法,即主客观结合的方式。因为指标的层次分析权重排序与熵权重排序有较大差别,用公式修正(其中 $\alpha \in [0, 1]$, α 取 0.5^[20]),计算得该研究的熵-AHP 权重。

$$\varphi_j = \mu_j \alpha + \omega_j (1 - \alpha) \quad (1)$$

式中: φ_j 为熵-AHP 权重; μ_j 和 ω_j 分别为熵权法和 AHP 法得出的权重。

在计算各层次指标的评价值时,考虑评价体系层级中的构成成分及各个层级之间均有着较强的关联性,因此,本研究选择了指数加权法^[21]。其模型表达式为

$$A = (P_1^{w_1} P_2^{w_2} \cdots P_n^{w_n})^{\frac{1}{\sum w_i}}, i = 1, 2, \cdots, n \quad (2)$$

式中: A 为本层的某个因素综合评价值; P_n 为第 i 个指标的评价值; w_i 为第 i 个指标相对于该因素的权重; n 为该因素包含的指标个数。

2.3 系统动力学模型构建

系统动力学通过分析系统中变量间的因果关系建立数学模型,以实现系统的仿真模拟。这种方法将研究对象从单纯的技术问题拓展至经济社会等较为复杂的问题,其应用范围逐渐扩大,遍及各个领域,最终形成成熟的学科。

本研究根据已建立的可持续发展评价指标体系,通过 Vensim PLE 软件建立因果关系图,如图 1 所示。由图 1 可知,系统各要素间的相关关系,但模拟区域可持续发展水平仍需进一步细化变量类型。收集 2004—2016 年共 13 a 的经济、社会、城市建设与环境等数据构建系统动力学流程图,其中涉及到的变量类型有水平变量、速率变量、辅助变量及常量等;其中森林资源与环境指标由于只有两期的森林资源二类调查资料,缺失数据用线性插值法补全。在系统模型中,变量间一般由方程式联系起来。本研究中系统动力学模型设置的时间边界为 2004—2035 年,其中 2004—2016 年为历史验证时期,2017—2035 年为仿真预测时期,时间步长为 1 a。

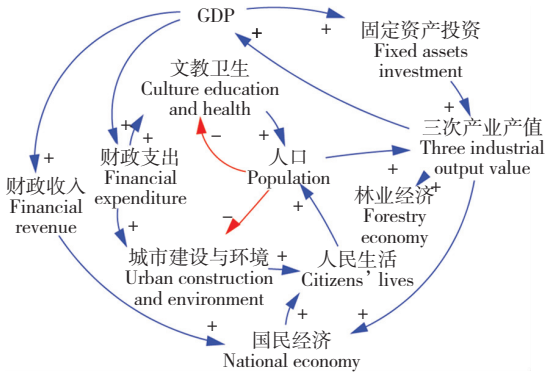
表 2 帽儿山实验林场可持续发展评价指标体系

Tab. 2 Sustainable management evaluation index system of Maoershan Forest Farm

目标层(A)	系统层(B)	类别层(C)	指标层(D)	指标计算方法	参照值
Target layer (A)	System layer (B)	Category layer (C)	Index layer (D)	The calculation method of index	Reference value
林场可持续发展评价指标体系(A) Evaluation index system for sustainable development of forest farms (A)	经济可持续指标(B ₁)	林业经济指标(C ₁)	林业产值增长率(D ₁)(%)	林业产值/上一年度林业产值	106.9;105 ^①
			产业平均工资(D ₂)/元	农林牧渔业平均工资	9 714;51 164 ^①
			林业产值占比(D ₃)(%)	林业产值/农业产值(指广义农业,即包含农林牧渔及副业等5种产业形式)	3.7;2.7 ^①
		国民经济指标(C ₂)	人均地区生产总值(D ₄)/(元·人 ⁻¹)	地区生产总值/总人口	17 464;63 445 ^①
			第三产业比重(D ₅)(%)	第三产业产值/GDP	45.3;57.6 ^①
			固定资产投资增长率(D ₆)(%)	固定资产投资/上一年固定资产投资	122.4;109.7 ^①
			财政收入占比(D ₇)(%)	财政收入/GDP	5.7;6.2 ^①
		森林资源与环境指标(C ₃)	森林蓄积量(D ₈)/(m ³ ·hm ⁻²)	森林总蓄积量/总面积	100 ^②
			龄组结构(D ₉)(%)	近、成熟林的面积和蓄积量分别占总体比例	50;60 ^②
			森林生物量(D ₁₀)/(t·hm ⁻²)	森林生物量/总面积	168.5;180.1 ^③
	混交林蓄积量占比(D ₁₁)(%)		混交林蓄积量/森林总蓄积	100 ^②	
	植被指数(D ₁₂)		植被指数	0.9 ^③	
	城市建设与环境指标(C ₄)	城区绿化覆盖率(D ₁₃)(%)	建成区绿化覆盖面积/建成区面积	40 ^②	
		道路占有率(D ₁₄)/(m ² ·人 ⁻¹)	铺装道路总面积/总人口	14 ^②	
		集中供热普及率(D ₁₅)(%)	集中供热面积/需供热建筑面积	100 ^②	
	社会可持续指标(B ₃)	人民生活指标(C ₅)	城乡居民收入比(D ₁₆)	城市居民人均收入/农村居民人均收入	2 ^②
			恩格尔系数(D ₁₇)(%)	人均食品消费支出/人均消费支出	30 ^②
			总负担系数(D ₁₈)(%)	老年人(60岁以上)和青少年人口(18岁以下)/青壮年人口(19~59岁)	41.3 ^②
			城镇化率(D ₁₉)(%)	城镇人口/总人口	70 ^②
		文教卫生指标(C ₆)	医疗服务指数(D ₂₀)	卫生技术人员数/总人口	100 ^②
			图书馆藏书量(D ₂₁)/(千册·万人 ⁻¹)	图书馆藏书量/地区人口数	5.9;9.0 ^①
			财政性教育支出比例(D ₂₂)(%)	财政性教育支出/财政支出	16.6;13.9 ^①
			初中升学率(D ₂₃)(%)	初中升学人数/毕业人数	34.4;63.9 ^①

注:①为哈尔滨市(即参照区域)平均值;②为能够达到的理想值或国家、省市规划值;③为当年林场小班可达到的最高值。

Note:① The average value of Harbin City (that is, the reference area); ② The ideal value that can be achieved or the national, provincial and municipal planning value; ③ The highest value that can be achieved by the sub-compartment of the forest farm in that year.



“+”及蓝色表示正相关关系,“-”及红色表示负相关关系。

“+” and blue indicate positive correlation,“-” and red indicate negative correlation.

图 1 变量间的因果关系

Fig. 1 Causal relationship between variables

由于本研究同时对研究区域和参照区域的数据进行模拟,涉及到的变量更多,完整的系统动力学流程图较为复杂。因此,以其中一条关系链为例:根据年份的变化,固定资产投资占 GDP 的比例有所不同,结合当年 GDP 计算出固定资产投资的数值,再通过查找资料得到第三产业固定投资额占当年总固定资产投资额的比例,计算出第三产业的固定资产投资额;第三产业固定资产总额初始值加上本年投资额,去除固定损耗,即为当年产业固定资产总额的实际值。第三产业就业人员占比与总人口结合得到第三产业就业人员数,再结合第三产业固定资产总额,通过关系式计算得出第三产业产值,最终得出第三产业所占比重,如图 2 所示。

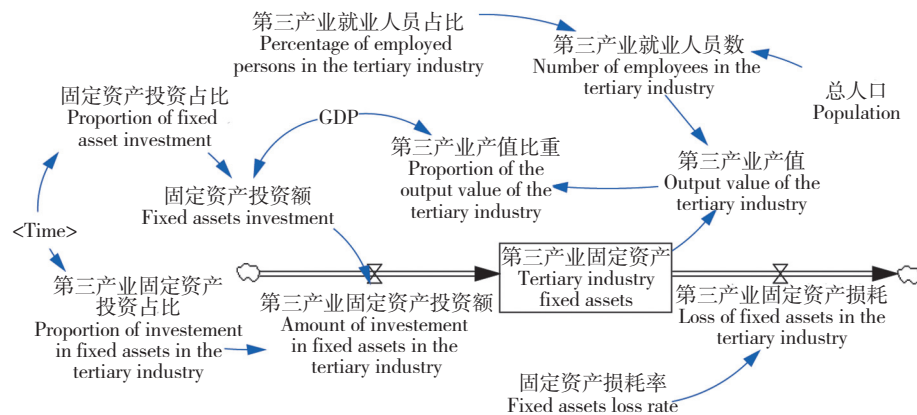


图 2 关系链示意图

Fig. 2 Schematic diagram of relationship chain

2.4 系统动力学模型优化路径的确定

参考已有文献[22]并结合研究内容,选择对模型有重要影响的 5 个研究区域变量调整其参数来进行路径优化,本研究共选择了 5 条路径进行优化如下。

(1)保持现状型路径:假设研究区域各项指标发展无较大变化,仍保持原增长速度,因此各控制变量值为研究区域历史数据近 5 a 的算术平均值。将此路径结果作为其他路径结果参照值。

(2)人口发展型路径:重点关注人口的发展,因此人口自然增长率变量取值参考研究区域的历史

数据最高值。

(3)产业调整型路径:通过改变 3 次产业的固定资产投资比例从而改变研究区域可持续发展水平,按参照区域近 5 a 投资比例的平均水平确定控制变量的取值。

(4)经济突出型路径:重点发展经济,因此 GDP 增速变量按近 5 a 参照区域平均值确定。

(5)综合发展型路径:在增加人口自然增长率的前提下,发展经济并调整产业固定资产投资,即综合以上几种调整思路选择控制变量。其变量取值及组合见表 3。

表 3 优化路径变量及取值组合

Tab. 3 Optimized route variables and their value combinations

调控变量 Control variables	GDP 增速 GDP growth	人口自然 增长率 Natural population growth rate	固定资产投资 占比 Proportion of fixed assets investment	第一产业固定资产 投资占比 The proportion of investment in fixed assets in the primary industry	第二产业固定资产 投资占比 The proportion of investment in fixed assets in the secondary industry
保持现状型 Keep the status quo route	104	0.198	34.4	7	59
人口发展型 Population development route	104	0.690	34.4	7	59
产业调整型 Industrial adjustment route	104	0.198	42.6	5	36
经济突出型 Economic outstanding route	108	0.198	34.4	7	59
综合发展型 Comprehensive development route	108	0.690	42.6	5	36

3 结果与分析

3.1 可持续发展评价结果

可持续发展评价体系指标层评价值及权重见

表 4。将表 4 中帽儿山实验林场可持续发展评价体系中指标层评价值和熵-AHP 综合权重值代入公式(2)中,得到类别层的评价值;将此评价值与类别层相应权重代入公式(2)得到系统层的评价值;再以

同样方法代入系统层的评价值与权重,最终得出帽 儿山实验林场可持续发展评价值,见表 5。

表 4 可持续发展评价体系指标层评价值及权重

Tab. 4 Evaluation value and weight of index layer of sustainable development evaluation system

指标层(D) Index layer(D)	评价值 Evaluation value		权重 Weight		
	2004	2016	熵权法	AHP 法	熵-AHP
			Entropy method	AHP method	Entropy-AHP
D ₁	0.974	0.962	0.000	0.068	0.034
D ₂	0.583	0.770	0.042	0.015	0.029
D ₃	1.000	1.000	0.000	0.039	0.020
D ₄	0.817	0.597	0.053	0.005	0.029
D ₅	0.764	0.814	0.002	0.013	0.008
D ₆	0.895	1.000	0.007	0.019	0.013
D ₇	0.292	0.357	0.022	0.003	0.012
D ₈	1.000	1.000	0.000	0.026	0.013
D ₉	0.848	1.000	0.015	0.169	0.092
D ₁₀	0.713	0.773	0.004	0.094	0.049
D ₁₁	0.917	0.863	0.002	0.070	0.036
D ₁₂	0.971	0.990	0.000	0.045	0.023
D ₁₃	0.668	0.840	0.029	0.027	0.028
D ₁₄	0.336	0.829	0.406	0.037	0.221
D ₁₅	0.550	0.900	0.129	0.071	0.100
D ₁₆	0.810	0.870	0.003	0.072	0.037
D ₁₇	0.771	0.920	0.017	0.120	0.069
D ₁₈	0.902	0.834	0.003	0.035	0.019
D ₁₉	0.581	0.700	0.019	0.021	0.020
D ₂₀	0.400	0.657	0.131	0.013	0.072
D ₂₁	0.203	0.244	0.018	0.002	0.010
D ₂₂	1.000	1.000	0.088	0.007	0.048
D ₂₃	0.753	0.864	0.010	0.027	0.018

表 5 帽儿山实验林场可持续发展评价值

Tab. 5 Sustainable development evaluation value of Maoershan Forest Farm

年份 Year	评价值 Evaluation value									
	总体层(A) Target (A)	系统层(B) System layer (B)			类别层(C) Category layer (C)					
		B ₁	B ₂	B ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
2004	0.597	0.753	0.538	0.650	0.821	0.672	0.847	0.409	0.767	0.554
2016	0.833	0.768	0.875	0.790	0.899	0.623	0.918	0.849	0.862	0.726

将得到的可持续发展评价值(表 5)与可持续发展等级划分表(表 6)对比可知,研究区域 2004 年可持续发展评价值 0.597,处于弱可持续状态;到了 2016 年评价值为 0.833,已经到达初级可持续状态,在指标体系中,环境可持续指标评价值为 0.875,已率先进入中级可持续状态,经济可持续评价值 0.768 和社会可持续评价值 0.790 均处于初级可持续状态的阶段。对比两期可持续发展评价值,林业

经济指标和森林资源与环境指标发展均较好;2004—2016 年,产业平均工资(D₂)评价值增长明显,森林的龄组结构(D₉)更加合理,而混交林蓄积量占比(D₁₁)降低;国民经济指标的评价值整体由 0.672 下降至 0.623,指标层中的人均地区生产总值(D₄)指标评价值下降尤为突出,说明研究区域的经济发 展未能和参照区域同步增长,其差距逐渐拉大导致评价值降低,因此应重视经济发展,促进地区

生产总值的提高;城市建设与环境指标和文教卫生指标评价值的升高与我国倡导的发展精神文明和物质文明步伐一致,其中道路占有率(D_{14})、集中供热普及率(D_{15})和医疗服务指数(D_{20})提升幅度均大于 60%;人民生活指标评价价值略有提升,指标变化与实际相符。

对总体层(A)的评价价值结果,按表 6 的标准划分等级^[23]。

3.2 系统动力学模型历史检验

以 2004 年数据为初始值,将参数输入模型后得到的仿真数值与历史真实值对比,计算误差率,若结果误差率在±10%以内,代表能较好反映变量的变化趋势;在±20%以内,能大致反映变量变化趋势^[18]。选取人均 GDP、总负担系数、恩格尔系数、第一产业产值及可持续发展评价价值等 5 个变量检验历

表 7 历史误差率

Tab. 7 Historical error rates

年份 Year	人均 GDP GDP per capita	总负担系数 Total burden factor	恩格尔系数 Engel coefficient	第一产业产值 Output value of primary industry	可持续发展评价价值 Sustainable development evaluation value
2004	0.00	-3.17	-6.85	0.69	1.13
2005	0.23	-2.72	3.06	2.50	-0.18
2006	0.35	4.72	3.44	-2.02	0.82
2007	0.35	10.39	-2.46	3.76	2.04
2008	0.38	7.97	-1.29	-6.79	3.47
2009	0.14	4.49	-1.59	-3.67	5.44
2010	0.02	-6.66	-0.19	4.21	2.38
2011	0.02	2.83	0.84	3.52	-0.15
2012	0.41	2.19	-2.84	1.14	-1.67
2013	0.20	-1.86	-0.66	-5.75	-1.49
2014	0.53	-15.49	-0.32	-1.11	-0.73
2015	0.29	-1.60	-1.35	0.07	-0.95
2016	0.58	1.21	-1.62	3.95	-1.22

3.3 系统动力学模型仿真模拟结果

未来 5 种优化路径结果如图 3 所示。由图 3 可以看出,5 种路径综合可持续评价价值均在 2021 年左右增长减缓,保持现状型、人口发展型和产业调整型路径的可持续发展评价价值均在 2031 年增长再次放缓,其可持续发展评价价值到达瓶颈期,从 2031 年到 2035 年基本保持不变。

以保持现状型路径 2035 年的模拟结果 0.899 为参照值,整体来看:人口发展型路径结果略降低,原因在于选取评价指标时为了能够具有对比性,包含许多人均指标,人口增多会导致最终评价价值略微合理下降。但从两期评价体系可以看出,总负担系数在增高,结合历史数据中人口自然增长率总体呈

表 6 可持续发展等级划分

Tab. 6 Classification of sustainable development levels

可持续发展评价价值 Sustainability evaluation value	可持续发展等级 Sustainable development level	等级含义 Meaning of level
0.95~1.00	I	完全可持续状态
0.85~0.95	II	中级可持续状态
0.70~0.85	III	初级可持续状态
0.50~0.70	IV	弱可持续状态
<0.50	V	非可持续状态

史误差率,见表 7。其中 98%的指标误差率在 10%以内,88%的指标误差率在 5%以内,表明模型仿真效果较好,与实际情况基本吻合,认为模型能够对当地发展趋势做出较为真实、准确的模拟,可应用于未来发展的预测和优化调控。

下降趋势,说明当前青壮年人口不足,人口老龄化较为严重,因此,人口发展型路径模拟结果虽没有增加可持续发展水平,但鼓励生育,提高人口自然增长率仍有其必要性。产业调整型发展路径模拟评价价值高于前者,但不会影响发展趋势,说明选择的产业调整方向大体正确,研究区域应该降低一、二产业的固定资产投资比例并提高第三产业固定资产投资,优化产业结构。第三产业消耗资源少,和第二产业对比,环境污染少,可以减轻环境负担,且第三产业的就业弹性较高,能促进产业结构高度化,改善经济结构,从根本上提高善经济质量;另外,第三产业产值增长更加平稳,能有效缓解经济的波动。

从经济突出型路径结果(在2035年以前可持续发展水平持续增长)来看,研究区域的经济水平与参照区域的均值差距较大,改善经济后2035年的整体评价值从0.899升到0.919,有明显提升;且从两期的指标体系评价结果也可以观察到经济可持续指标的评价值从2004年的0.753提高至2016年的0.768,提升缓慢,制约了可持续发展水平的提高。由图3可以看出,综合发展型路径表现最好,2035年模拟评价值可达0.924,与经济突出型路径结果(0.919)相比仍有提高,因此,在鼓励人口生育、提升地区生产总值增速的同时需减少一、二产业的固定资产投资比例,此为最优的发展路径。

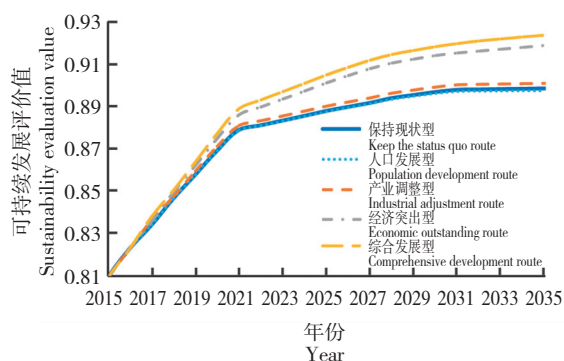


图3 优化路径仿真预测结果

Fig. 3 Prediction results of optimization route simulation

4 讨论

在可持续发展评价体系中计算权重的方法有很多,包括层次分析法^[24]、德尔菲法^[25]和主成分分析法^[26]等。其中层次分析法应用最为广泛,但因其结果完全由主观因素决定,因此需引入客观的熵权法与层次分析法共同确定指标权重。结果表明研究区域的经济和社会可持续评价值较低是制约林场可持续发展水平增长的主要原因。本研究主要对经济、社会可持续指标和城市建设与环境指标进行仿真模拟并预测。目前在区域发展预测上有多种方法,主要分为结构化预测和非结构化预测。结构化预测的方法主要寻找各评价因素间的关系,运用物理原型或数学方法建立模型进行预测,常用的有回归预测法^[27]、人工神经网络^[28]、马尔可夫预测法^[29]和灰色预测模型^[30-31]等,非结构化预测主要依靠经验判断进行,比如专家会议法、德尔菲法等。

系统动力学是通过分析系统内部各变量之间的反馈结构关系来研究整个系统整体行为的理论,适用于处理长期性和周期性的问题,因此常被学者

用以对系统行为结果的预测。王奕淇等^[32]采用此方法评测渭河流域的水资源承载力,在设计5种仿真优化路径中得到最大化改善水资源承载力的方案为协调发展经济、保护环境并节约水资源;李静静^[33]借助系统动力学方法预测贵阳市若能够控制建设用地扩张、加大环保资金投入和合理城镇化进程,其土地资源承载力将在2032年达到较高水平;鲁宏旺^[34]采用系统动力学方法模拟了2025年长株潭城市群的景观格局,对比了4种发展情境下的组合方案,兼顾各方面效益的协调发展方案最符合长株潭城市群的可持续发展目标。

本研究采用系统动力学这种基于多变量解决复杂大系统问题的方法,根据已建立的评价指标体系绘制系统动力学流程图,对研究区域可持续发展水平的未来发展情况进行模拟及预测。同时预测了指标的实际值与参照值,即以动态视角观测一个地区的发展。结果表明研究区域应该重视人口发展,大力发展经济并进行产业结构调整,以便更好地提高研究区域的可持续发展水平。李福香等^[35]认为招远市若提升可持续发展潜力需要注意人口问题;贾雪慧^[18]和燕波^[22]认为研究区域模拟的优化路径均需要调整产业结构。然而从系统动力学角度出发进行预测可持续发展水平时,涉及到的指标较多,数据需求量较大,存在部分年份统计口径不完全一致的问题,一定程度上会降低预测的准确性,如能够获取更为完善的统计数据,则能够进一步提升研究的模拟精准度。

5 结论

本研究以帽儿山实验林场森林资源二类调查数据为基础,对构建可持续发展的指标体系进行评价及预测,得出以下结论。

(1)研究区域2004年的可持续发展评价值为0.597,处于弱可持续发展水平;2016年评价值为0.833,处于初级可持续发展水平。

(2)构建系统动力学模型并进行历史检验,发现88%的指标误差率在5%以内,确认其模拟水平较好,可以进行仿真预测。

(3)分析模型的预测结果,发现按照现有趋势发展,研究区域在2035年评价值可达0.899;以保持现状型路径为参照,若着重发展人口,则评价值会略微下降至0.897;调整产业固定资产投资,评价值可提升至0.901;重视经济发展对评价值提升影

响较明显,可达0.919;结合以上几种调整策略的综合发展型模拟结果为0.924,为最优的发展路径。

根据综合评价结果,发现林场可持续发展的优势在于环境可持续性较高,尤其森林资源与环境可持续性方面发展较好,2004—2016年,森林的龄组结构更加合理,森林蓄积量仍在增加,但值得注意的是,混交林蓄积量占比有所下降,因此在人工造林时应注意避免营造人工纯林,需增加混交林面积。而经济和社会可持续性仍有较大上升空间,通过各路径分析,发现应大力发展经济并增大第三产业固定资产投资,增加第三产业比重,如发展旅游业等;且其人口有老龄化趋势,因此,应增加人才引进,同时提高工资,留住现有人才,增加青壮年人口,并为未来长远发展考虑,应响应国家号召,鼓励生育。如此,符合综合发展路径策略,林场可持续发展水平可在2035年达到0.924。

【参 考 文 献】

- [1] 刘小丽. 东北林区经营单位级森林可持续经营监测评价[D]. 北京:中国林业科学研究院,2013.
LIU X L. Monitoring and assessment for sustainable forest management at forest management unit level in northeast China[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013.
- [2] HASLE G, HAAVARDTUN J, KLOSTER O, et al. Interactive planning for sustainable forest management[J]. *Annals of Operations Research*, 2000, 95(1): 19-40.
- [3] BUYUKOZKAN G, KARABULUT Y. Sustainability performance evaluation: literature review and future directions[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 217: 253-267.
- [4] 赵海兰,郭瑜富. 中德林业项目合作回顾及展望[J]. *农业展望*, 2020, 16(12): 139-146.
ZHAO H L, GUO Y F. Review and prospects of China-German forestry project cooperation[J]. *Agricultural Outlook*, 2020, 16(12): 139-146.
- [5] 曹安,汪晶晶,苏洋,等. 城市社会林业可持续发展能力评价指标体系构建及应用研究[J]. *林业经济*, 2019, 41(1): 104-111.
CAO A, WANG J J, SU Y, et al. Study on construction and application of evaluation index system for sustainable development of urban social forestry[J]. *Forestry Economics*, 2019, 41(1): 104-111.
- [6] 李思勤. 广西国有三门江林场可持续发展评价研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2019.
LI S Q. Research on forestry industry development evaluation of Sanmenjiang forestry farm in Guangxi[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2019.
- [7] 伍珊. 新时代改革背景下福建连城县国有林场经营现状评价与对策[D]. 福州:福建农林大学,2019.
WU S. Assessment and countermeasure of management status in Li-ancheng County state-owned forest farm, Fujian Province under background of new era reform[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019.
- [8] 韩慧翔. 湖南省林业可持续发展能力评价研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2016.
HAN H X. Hunan Province forestry sustainable development ability evaluation research[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2016.
- [9] ZHU J X, YUAN X M, YUAN X Z, et al. Evaluating the sustainability of rural complex ecosystems during the development of traditional farming villages into tourism destinations: a diachronic emergy approach[J]. *Journal of Rural Studies*, 2021, 86: 473-484.
- [10] LU S S, TANG X, GUAN X L, et al. The assessment of forest ecological security and its determining indicators: a case study of the Yangtze River Economic Belt in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 258: 110048.
- [11] LINSER S, WOLFSLEHNER B, ASMAR F, et al. 25 years of criteria and indicators for sustainable forest management: Why some intergovernmental C&I processes flourished while others faded[J]. *Forests*, 2018, 9(9): 578.
- [12] CHEN Y, ZHANG D N. Evaluation of city sustainability using multi-criteria decision-making considering interaction among criteria in Liaoning Province China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 59: 102211.
- [13] 温英萍. 林业可持续发展评价指标体系的构建[J]. *南方农业*, 2021, 15(36): 82-84.
WEN Y P. Construction of evaluation index system of forestry sustainable development[J]. *South China Agriculture*, 2021, 15(36): 82-84.
- [14] 刘代汉,郑小贤. 森林经营单位级可持续经营指标体系研究[J]. *北京林业大学学报*, 2004, 26(6): 44-48.
LIU D H, ZHENG X X. Index system of sustainable management based on forest management unit level[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2004, 26(6): 44-48.
- [15] 梁会民,彭世揆,石小平. 基于熵 AHP 的子午岭林区可持续经营评价[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2010, 34(3): 93-96.
LIANG H M, PENG S K, SHI X P. The evaluation of sustainable forest management based on the method of entropy AHP in Zi-wuling[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2010, 34(3): 93-96.
- [16] LI F, LU S, SUN Y, et al. Integrated evaluation and scenario simulation for forest ecological security of Beijing based on system dynamics model[J]. *Sustainability*, 2015, 7(10): 13631-13659.
- [17] 宋广军. 伊春林区森林可持续经营的综合评价[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2017.
SONG G J. Research on comprehensive evaluation of sustainable forest management in Yichun forest region[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.
- [18] 贾雪慧. 基于 SDGs 的银川市可持续性评价及路径优化研究[D]. 兰州:兰州大学,2021.
JIA X H. Study on evaluation and path optimization of sustainability of Yinchuan City based on the SDGs[D]. Lanzhou: Lanzhou

- University, 2021.
- [19] 陈媛媛. 塞罕坝机械林场可持续发展现状评价研究[D]. 北京:北京林业大学, 2019.
- CHEN Y Y. Research on the sustainable development situation evaluation in Saihanba forest form[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [20] 罗扬, 余光辉, 刘恩斌. 基于熵权重的喀斯特地区林业可持续发展评价方法[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2007, 31(1): 114-118.
- LUO Y, SHE G H, LIU E B. An appraisal method of the forestry sustainable development based on entropy weight[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2007, 31(1): 114-118.
- [21] 马丹, 庄培章. 区域城市化水平初探[J]. 闽西职业大学学报, 2005, 7(3): 11-14.
- MA D, ZHUANG P Z. Exploration of district's urbanization development level[J]. Journal of Minxi Vocational College, 2005, 7(3): 11-14.
- [22] 燕波. 基于系统动力学模型的江苏省绿色发展潜力研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2020.
- YAN B. Research of green development potential in Jiangsu Province based on system dynamic model[D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2020.
- [23] 杨学民, 姜志林, 张慧. 徐州市林业可持续发展评价[J]. 福建林学院学报, 2003, 23(2): 177-181.
- YANG X M, JIANG Z L, ZHANG H. Evaluation of sustainable development of forestry in Xuzhou City[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2003, 23(2): 177-181.
- [24] KUMAR M, KALRA N, SINGH H, et al. Indicator-based vulnerability assessment of forest ecosystem in the Indian Western Himalayas: An analytical hierarchy process integrated approach[J]. TERI Information Digest on Energy and Environment, 2021, 20(1): 117-118.
- [25] SALAS-GARITA C, SOLINO M. Set of reference indicators for the evaluation of sustainable management of natural forests in Costa Rica: the relevance of the institutional dimension[J/OL]. Ecological Indicators, 2021, 121: 106979[2022-05-02]http://doi. 10.1016/j.ecolind. 2020. 106979.
- [26] RICCIOLI F, FRATINI R, MARONE E, et al. Indicators of sustainable forest management to evaluate the socio-economic functions of coppice in Tuscany, Italy[J/OL]. Socio-Economic Planning Sciences, 2020, 70: 100732. [2022-05-02]http://doi. 10.1016/j.seps. 319. 100732.
- [27] 朱春江, SINGH S P, COMER S L. 中国农业产值优化组合预测研究[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(23): 5930-5933.
- ZHU C J, SINGH S P, COMER S L. Studies on optimization combination C forecasting for agricultural gross domestic product of China[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52(23): 5930-5933.
- [28] 戚莹. 基于模糊神经网络的森林虫害预测预报的应用研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- QI Y. The research on forest pest forecast based on fuzzy neural network[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011.
- [29] 马玉妍, 马艳敏, 于万辉, 等. 松嫩平原土地利用生态安全评价与预测[J]. 水土保持通报, 2014, 34(2): 262-266, 325.
- MA Y Y, MA Y M, YU W H, et al. Evaluation and prediction of ecological security of land use in Songnen plain[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(2): 262-266, 325.
- [30] PAN S P, LIANG J L, CHEN W X, et al. Gray forecast of ecosystem services value and its driving forces in Karst areas of China: A case study in Guizhou Province, China[J/OL]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(23): 12404. [2022-05-02]http://doi. 10.3390/ijerhp182312404.
- [31] 马洪艳. 基于灰色预测法节能减排对大气环境的改善[J]. 环境与发展, 2018, 30(4): 129, 131.
- MA H Y. Improvement of atmospheric environment by energy saving and emission reduction based on grey prediction[J]. Environment and Development, 2018, 30(4): 129, 131.
- [32] 王奕淇, 李国平, 延步青. 基于 SD 与 AHP 模型的流域水资源承载力仿真研究[J]. 系统工程, 2022, 40(3): 24-32.
- WANG Y Q, LI G P, YAN B Q. Simulation research on carrying capacity of basin water resources based on SD and AHP model[J]. Systems Engineering, 2022, 40(3): 24-32.
- [33] 李静静. 基于系统动力学的贵阳市土地资源综合承载力评价与预测研究[D]. 贵阳: 贵州财经大学, 2021.
- LI J J. Evaluation and prediction of comprehensive carrying capacity of land resources in Guiyang City based on system dynamics[D]. Guiyang: Guizhou University of Finance and Economics, 2021.
- [34] 鲁宏旺. 基于系统动力学的长株潭城市群景观格局优化[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.
- LU H W. Landscape pattern optimization of Changsha Zhuzhou Xiangtan urban agglomeration based on system dynamics[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2020.
- [35] 李福香, 刘殿锋, 孔雪松, 等. 基于动态模拟视角与共享社会经济路径的多情景县域可持续发展潜力评价[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(4): 684-697.
- LI F X, LIU D F, KONG X S, et al. Multi-scenario evaluation of County-scale development potential based on shared socioeconomic pathways and dynamic simulation approach[J]. Journal of Geo-Information Science, 2022, 24(4): 684-697.