

基于 SD 模型的县域“绿水青山就是金山银山” 发展路径研究

沈辉¹ 董梦婷² 高才慧² 张清宇²¹

(1. 中央党校(国家行政学院)报刊社, 北京 100089;

2. 浙江大学 生态文明研究院, 浙江 杭州 310000)

【摘要】:“绿水青山就是金山银山”理论(以下简称“两山”理论)是我国生态文明建设的重要指导思想。将系统动力学模型与县域“两山”发展评价指标体系相结合,以工业主导型县域宁海县为例,分析其在过去 10 年的“两山”建设情况,并利用 SD 模型对“两山”发展进行了系统仿真,探明其今后的“两山”发展目标,分析影响“两山”发展的关键要素。研究表明:对于工业主导型县域而言,现阶段最重要的是提高水质监控力度以及降低低保人口比例;在模型中优化指标后预计到 2025 年宁海县“两山”发展水平可达 0.869,比继续原发展模式提高了 0.022;验证了将系统动力学模型与“两山”发展指数相结合以指导县域“两山”发展的可行性,该方法可为县域发展建设提供科学指导。

【关键词】:“两山”发展 县域 系统动力学模型 系统优化 实施路径

【中图分类号】: X196; F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2022)04-210-07

“两山”理念道出了生态环境与经济发展之间的辩证统一关系^[1],但当前许多县域在落实“两山”理念的发展过程中遇到了瓶颈^[2],某些县域为了追求生态环境质量制约了工业的发展,进而影响了其经济水平的增长;部分县域在“两山”发展建设的过程中,其环境保护跟不上经济增长的步伐,难以把握绿水青山和金山银山之间的耦合协调^[3,4,5,6]。各县域的特征不同,发展同一要素对“两山”建设起到的驱动力也不尽相同^[7],因此不能简单地套用某种固定的模式。由于“两山”建设涉及经济、生态、民生、制度建设等方方面面,反映了多维多目标全面发展的要求^[8,9,10]。而各元素之间存在相互联系、相互制约的关系,某项要素的变动可能会对其他要素产生正面或负面的影响。因此,不能只着眼于局部针对发展某一要素,而应从全局出发寻求各要素发展的平衡点,即利用系统工程工具对县域“两山”发展过程进行分析,建立起一套普适性方法以解决实现县域“两山”系统最优化的问题。

研究复杂系统的方法主要有神经网络模型^[11](简称 ANN)、灰色预测模型^[12]和系统动力学模型^[13](简称 SD)等。其中 SD 模型综合应用了系统论、信息论、控制论等理论,借助于计算机仿真模拟技术,通过分析并研究信息反馈系统的结构和行为,从而为管理决策提供科学有效的依据^[14]。由于 SD 模型的主要研究对象是开放系统,追求的是整个系统的最佳目标,强调各个子系统之间相互协调发展,因此能够满足模拟“两山”发展系统的需要。

作者简介: 沈辉,编辑,研究方向为生态文明与区域可持续发展。E-mail:w7@studytimes.cn

基金项目: 中国工程院战略研究与咨询项目“面向 2035 年的美丽中国建设战略与实施路线图研究”(2021-XZ-15)

近年来，SD 模型已在社会发展、资源开发、环境保护等领域的战略分析中得到了广泛的应用。Zhang 等^[15]从能源、经济、社会发展和生态环境四个方面建立了区域生态系统结构 SD 模型，用于评价中国生态系统的生态承载力和耦合协调度；Bottero 等^[16]基于系统动力学模型评估了意大利都灵市巴斯迪斯图拉地区不同城市发展战略对城市韧性的影响；Wang 等^[17]建立了辽宁省抚顺市水环境和社会经济系统动力学模型，为改善当地的水环境承载力提供了发展思路；徐升华和吴丹^[18]对鄱阳湖生态产业集群建立了“产业—经济—资源”SD 模型，研究政府投资、教育水平、资源水平、科技转化能力等对于区域可持续发展的影响。

本文将“两山”指数与系统动力学模型相结合，将整个“两山”发展系统进行数学量化，并以宁海县为例，用 SD 模型模拟其经济环境社会的发展，研究各因素间的相互作用，验证 SD 模型表征“两山”发展实际情况的可行性，并探究影响工业主导型县域“两山”发展的限制因素，为县域提高自身的“两山”发展水平，探索今后发展的具体实施路径，寻求突破发展瓶颈的关键点提供了科学性的建议。

1 研究方法

1.1 研究对象与数据来源

我国县域众多，因其自身条件各异，发展方式也各有不同。其中有一类工业型县域，其发展方式比较粗放，在生产过程中不可避免地会对生态环境造成破坏，难以协调经济发展与环境保护。表 1 列举了一些工业主导型县域。

也有部分县域实现了经济与生态的双赢，表 2 在“两山”发展百强县中列举了一些“两山”建设卓有成效的县域。

表 1 工业主导型县域

县域	所属地区	第二产业占比
如皋市	江苏省	47.7%
宁海县	浙江省	52.3%
龙口市	山东省	56.1%
晋江市	福建省	59.8%
浏阳市	湖南省	64.4%

表 2 部分“两山”发展百强县

县域	所属地区	“两山”发展排名
安吉县	浙江省	1
宁海县	浙江省	2
昆山市	江苏省	3
太仓市	江苏省	4

诸暨市	浙江省	5
-----	-----	---

从表 1 和表 2 可以看出, 宁海县作为一个工业强县, 同时其“两山”建设也卓有成效, 很好地平衡了经济和生态的协同发展。故本文选取宁海县作为研究案例, 探究工业主导型县域“两山”发展的实施路径。

宁海县地处浙江省东部沿海地区, 具有“七山一水二分田”的地貌特征, 拥有较高的资源可利用水平。由于地处中国大陆沿海和长江黄金水道交汇处, 发达的交通条件催生了发达的工业集群。宁海县的发展一直以工业为主导, 过去十几年 GDP 增速明显, 2003—2018 年间年均增长率约为 12.72%, 居民社会保障水平提升显著。环境方面虽然也曾走过“先污染、后治理”的老路, 但经过近年来多措并举的“两山”建设, 逐步走向了高质量绿色发展。自 2014 年起, 宁海县大气、水环境质量及污染物等整体呈现出良好的改善态势, 如今已实现了经济与生态的协同发展, 并于 2019 年获批全国“绿水青山就是金山银山”实践创新基地^[19]。

本研究利用的 2003—2018 年宁海县经济发展、生态环境、社会民生等数据主要来源于宁海县的国民经济和社会发展统计公报^[20]、环境质量公报^[21]和各部门实地调研数据。

1.2 系统动力学模型

借助系统动力学模型可以了解系统结构, 预测系统发展趋势, 为决策者制定科学有效可行的政策或解决问题提供有效的理论依据^[22]。构建系统动力学模型主要包含以下几个关键步骤: (1) 系统分析: 辨析研究的目的是和主要影响因素, 分析系统内部的结构从而发现问题的根源。依据模拟的目标, 确立一个封闭的系统边界, 并将与之相关的关键变量纳入其中。(2) 结构分析: 在系统界限内划分出不同的层次和子块, 明确变量的类型, 辨析变量之间的关系, 确定系统内部各部分之间的反馈机制。(3) 模型建立: 将 SD 模型分为流图和结构方程两个部分。流图通过图形的方式表现系统的结构以及行为。结构方程主要以原始数据为基础, 通过趋势外推法、线性回归法等表达系统结构。(4) 模型检验: 在模拟之前对模型进行测试, 包括单位、结构和历史性检验, 来确保系统结构的有效性; 而后根据模拟的结果不断修正模型, 直到模型通过测试。(5) 模型预测: 根据模型的运行结果进行预测和分析。

2 宁海县“两山”发展建模

2.1 模型概述

SD 模型的基本结构由多种相互关联、相互作用的一阶反馈回路构成。反馈回路又包含状态变量、速率和辅助变量三个基本组成部分。其中, 状态变量的变化取决于自身的反馈条件, 或遵循系统自身的规律^[23]。

SD 模型的主干是流率方程, 主要描述状态变量的变化规律, 其形式为:

$$L_k=L_j+DT \cdot (IR_{jk}-OR_{jk}) \tag{1}$$

式中: L_k 和 L_j 是状态向量, IR_{jk} 和 OR_{jk} 是流速向量, DT 为时间间隔, j 是过去时刻, k 是现在时刻, jk 为 j 时刻到 k 时刻时间段。

2.2 要素分析

由于影响和制约县域“两山”发展的因素众多，本文依据“两山”理论内涵，精简了要素间的因果关系，从社会经济、资源环境、民生保障三个角度研究县域“两山”发展系统。

其中，社会经济是评价“两山”建设的物质条件，包括人口自然增长率、国内生产总值、中央和地方的财政收入、三产的增加值及占比、三产的从业人数、旅游业和工业对 GDP 的贡献和全社会固定资产投资等要素。

资源环境是评价“两山”建设的具体成效，包括环境质量、空气质量、水质、排污情况、污染治理情况、能耗情况和资源利用情况等要素。

民生保障是评价“两山”建设的最终目标以及保障长效运行的机制体制，包含居民的生活水平、民生发展和管理保障体系等要素。

2.3 模型建立

由于系统内部的关系错综复杂，存在相互促进的同时也可能存在冲突。如在社会经济中，随着人口的增长能够保证充足的劳动力，而人口过度增长则会导致额外的资源消耗。经济水平升高一方面可以增加对环境的投入，提高环境治理技术，进而提升环境质量；但另一方面经济发展又有可能污染环境、破坏生态，从而导致县域环境承载力的下降。本研究基于对三大子系统之间逻辑关系的系统分析，综合前人研究成果以及宁海县的历史数据，构造了符合实际的“两山”发展系统动力学方程。对没有显著关联的变量和一些随时间变化的变量，利用软件中的表函数进行赋值。其他变量则基于宁海县的历史数据，利用趋势外推法、平均值法、线性回归法等进行赋值。宁海县“两山”发展 SD 模型的部分主要方程如表 3 所示。

表 3 模型主要函数关系式

变量名称	单位	函数关系式
GDP	亿元	$\text{INTEG}(\text{GDP 增长量}, 100.2)$
全社会固定资产投资额	亿元	$\text{GDP} \times 0.45$
第二产业产值	亿元	$\text{INTEG}(\text{第二产业变化量}, 58.57)$
第二产业投资额	亿元	$\text{WITHLOOKUP}(\text{全社会固定资产投资额}, \text{第二产业投资额})$
总人口	万人	$\text{INTEG}(\text{人口增长数}, 58.24)$
第二产业从业人数	万人	$\text{第二产业从业人数比例表函数}(\text{Time}) \times \text{从业人员总数}$
工业废水排放量	万吨	$\text{INTEG}(\text{工业废水产生量} - \text{工业废水处理量}, 499.23)$
工业废水处理量	万吨	$\text{环保投入总量} \times \text{废水投资比例} \times \text{技术因子} / \text{单位处理成本}$
能源消费总量	万吨标准煤	$[\text{人口} \times \text{人均生活用能} + \text{第一产业增加值} \times \text{第一产业能源消费表函数}(\text{Time}) + \text{第二产业增加值} \times \text{第二产业能源消费表函数}(\text{Time}) + \text{第三产业增加值} \times \text{第三产业能源消费表函数}(\text{Time})]$

基于县域的经济环境社会发展现状，利用 VensimPLE 软件以县域范围为模型的边界，建立县域“两山”发展系统动力学模

型。该模型涵盖了人口、国内生产总值、能源消耗量、环境质量、空气质量、水资源占有量、水质、森林面积、耕地面积、工业废水排放量、工业废气排放量、工业固体废弃物产生量、资源利用、环境治理、生态环境和民生保障等状态变量，并辐射出系统中其余 80 余个相关变量，构造出 146 个方程式，形成互相连接、紧密关联的复杂系统。宁海县“两山”发展 SD 模型如图 1 所示。

2.4 模型检验

为了验证模型的准确度，对上述模型进行了有效性检验。分别从三个子系统中选取了国内生产总值、工业废水排放量、农村居民可支配收入三项指标作为历史检验的对象。图 2 显示了历史检验结果，可以看出模型的仿真结果与历史实际的误差均在 10% 的允许范围内^[24]，相对误差较小，拟合程度高，该系统的基本结构能够合理地表征宁海县“两山”发展的实际情况。

3 “两山”发展分析

3.1 情景设置

在众多“两山”发展评价指标体系中，县域“两山”发展指数不仅能够体现“经济山”与“生态山”^[25]的互利共生关系，同时还兼顾了指标数据的易得性。鉴于在该评估体系中部分变化率相关的指标在评价时存在着高水平难以大幅提高的不公平问题，本研究作出了修订，采用修正后的县域“两山”发展指数对宁海县 2010—2018 年的“两山”实施情况进行了量化评价。

为了验证宁海县当前发展模式的未来可持续性，判别评价体系对于县域发展的指导作用，实现对宁海县“两山”发展的支撑作用，分别设立以下两种情景，对宁海县到“十四五”末即 2025 年“两山”建设的发展趋势进行分析预测：

(1) 原情景：

继续维持当前发展模式，依据历年资料对系统进行模拟。

(2) 优化情景：

根据宁海县当前“两山”发展评价中发现的不足，令水质监测站点在原基础上增加 1 倍、低保人口比例下降 10% 后的模拟情景。

3.2 两种情景模拟结果对比

在优化了水质监测站和低保人口比例两项指标后，宁海县“两山”发展 SD 模型主要变量的变化情况对比如图 3 和图 4 所示。

模型预测结果表明，在生态环境方面，宁海县水质不断提高，空气质量达标率在短暂的降低后也开始上升，工业废水排放量在 2011 年达到顶峰后开始稳步减少，总体来看宁海县生态环境呈现良好态势。在经济和民生方面，宁海县“十四五”期间的国内生产总值、城镇和农村人民可支配收入均保持平缓增长，增长速率不高，低保人口比例也在逐年缓慢下降。

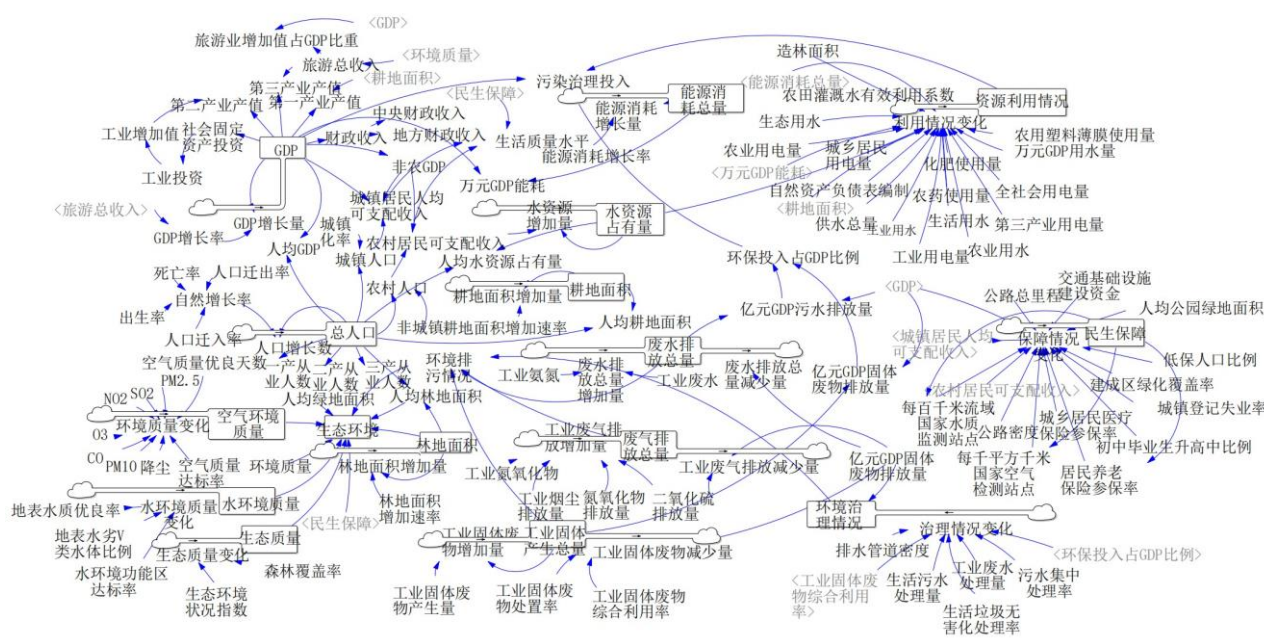


图1 宁海县“两山”发展SD模型

对比两种情景的预测结果可以发现，若继续原有发展模式，宁海县 2025 年的国民生产总值将超过 700 亿元，空气质量和水质将继续保持良好水平并略有增加，依然能够实现生态—经济双赢的良性协调发展。在优化情景下，更加严格的水质监测将提高政府对水污染治理的重视，从而推动生态环境的改善，进一步促进旅游业的发展。要想减少低保人口比例，则要求政府加大投入扶贫资金、努力提高人民的生活水平，则意味着需要促进产业的发展、提高 GDP。在优化情景下，到 2025 年宁海县国内生产总值可超过 800 亿元，工业废水排放量也比原情景减少了 60 万吨，空气质量和地表水质也比原情景有所提高。

3.3 两种情景下“两山”发展水平预测分析

基于上述两种情景的模拟结果，采用修订后的县域“两山”发展评价指标衡量“十四五”期间宁海县的“两山”发展水平，结果如图 5 所示。

从图 5 中可以得知，若继续原有发展模式，到 2025 年宁海县的“两山”发展指数将达到 0.847，这证实了宁海县当前发展模式的优越性和可持续性。而在优化情景下，“两山”发展指数预计将达到 0.869，比原情景进一步提高了 2.67%。意味着经过“两山”发展指标体系的评价指导，县域可以更好地建设“绿水青山”和“金山银山”的协同发展。

3.4 政策建议

研究发现，宁海县不仅实现了“既要金山银山又要绿水青山”的生态和经济协同发展，成为“两山”理论的实践范本，同时对继续当前发展模式的未来发展预测也证实了这种发展模式的可持续性。探索宁海县“两山”发展的具体实践路径，发现其可归纳为顶层设计、产业发展、资源环境、民生保障四个方面，可供其他工业主导型县域的“两山”发展借鉴：

在顶层设计方面，宁海县充分统筹环境承载力，合理规划空间布局，科学规划“三区三线”，绘制了统领全局的“一张蓝图”。宁海县城镇空间、农业空间和生态空间的比例为 13：30：57，生态红线面积占国土总面积的 18.54%，以顶层规划战略支

持县域的可持续发展。

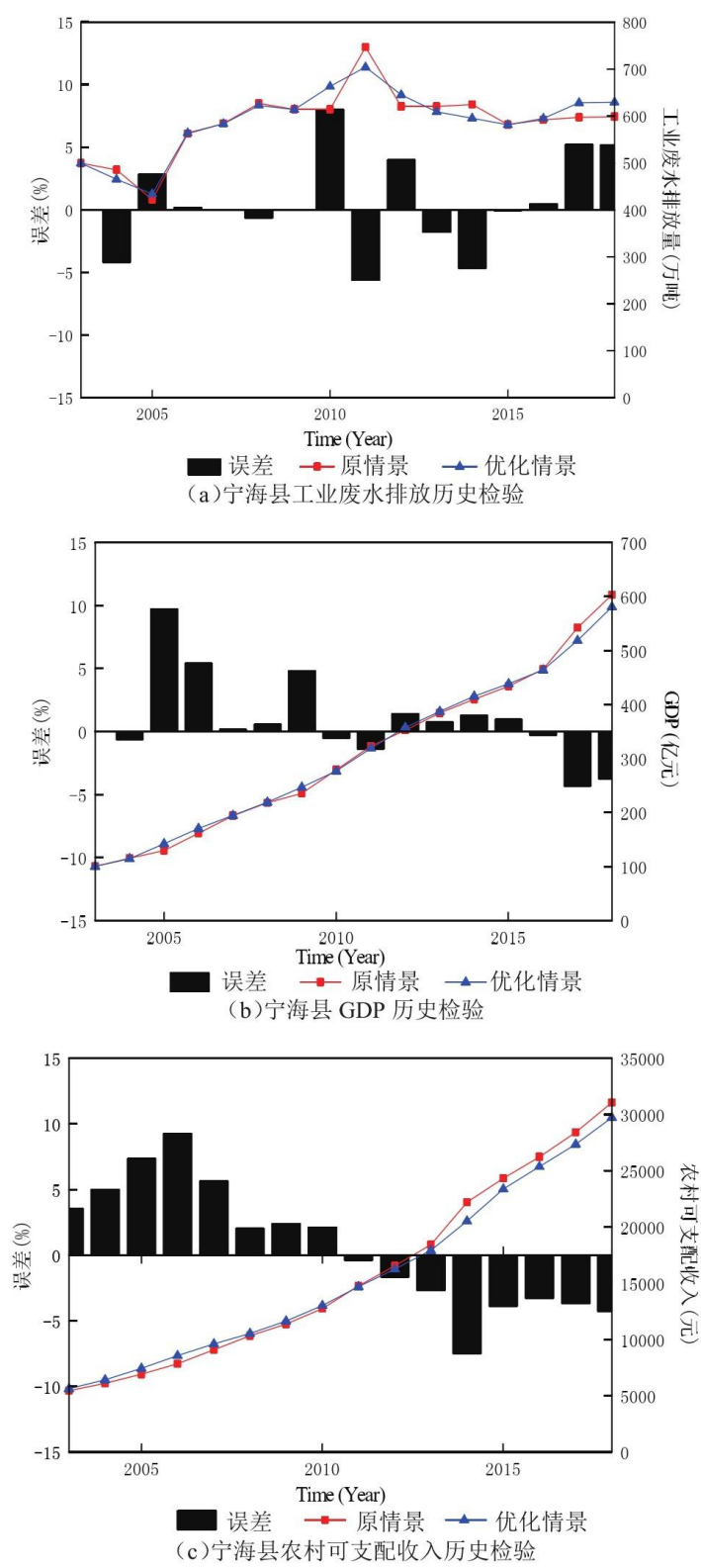


图 2 宁海县“两山”发展系统动力学模型历史检验结果

在产业发展方面，因地制宜推动产业结构调整。推进工业企业绿色转型，形成更加精细、完整、可循环的产业园区形态，实现产业生态化。促进精品农业、三级生态循环农业的发展，着力延长农产品产业链，促进农产品精加工，打造特色农业品牌。大力发展旅游业，促进“文、农、体、商、旅”融合发展，带动旅游经济的提升。

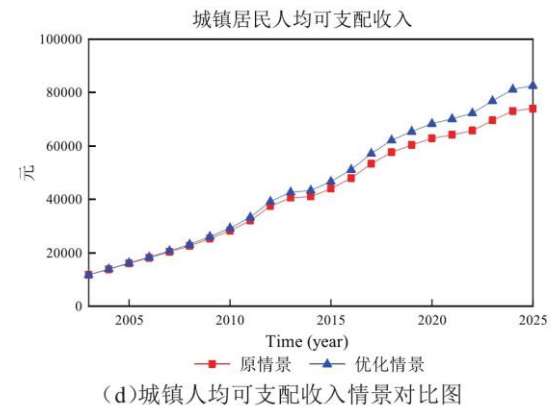
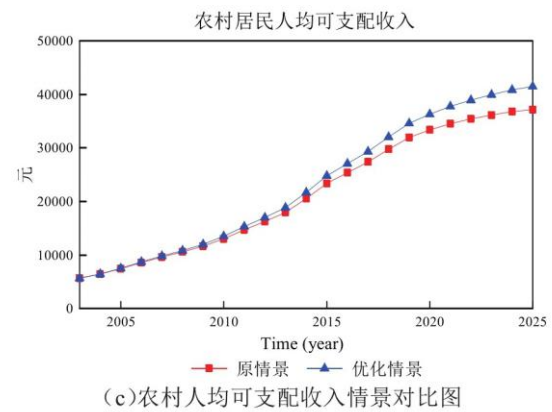
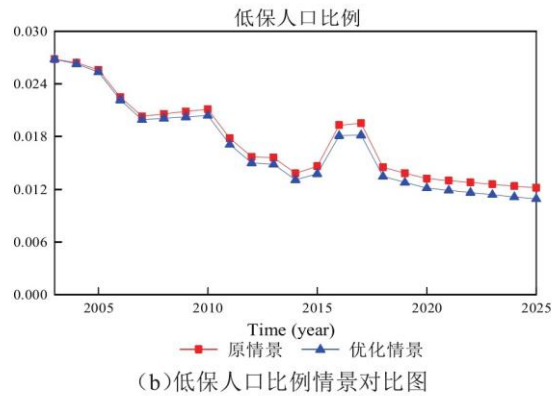
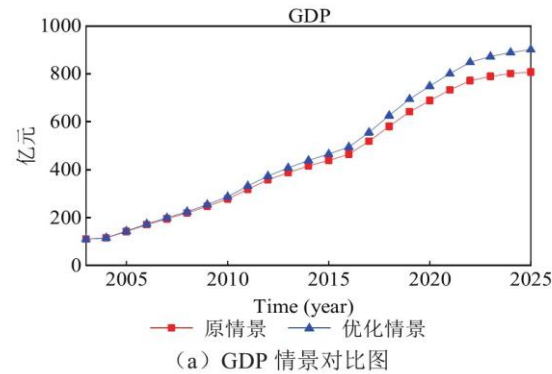
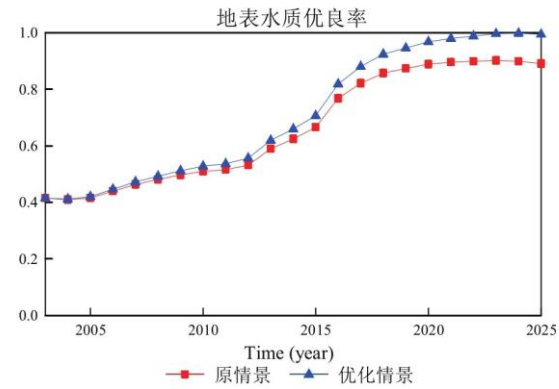
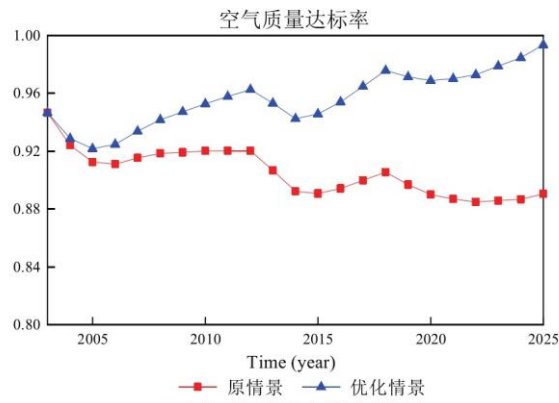


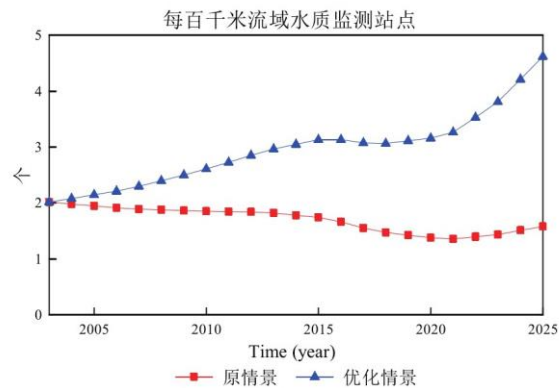
图 3 两种情景下宁海县社会经济和民生变化模拟情况



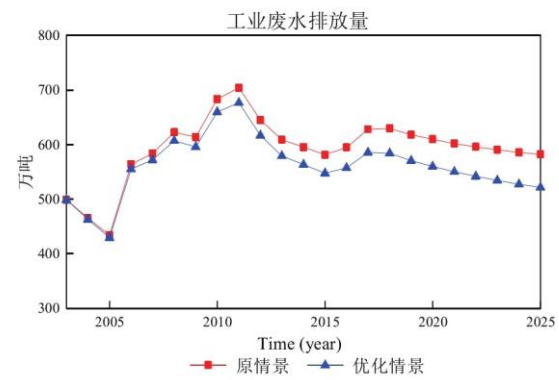
(a)地表水质优良率情景对比图



(b)空气质量达标率情景对比图



(c)水质监测站点布设情景对比图



(d)工业废水排放量情景对比图

图 4 两种情景下宁海县资源环境及保障变化模拟情况

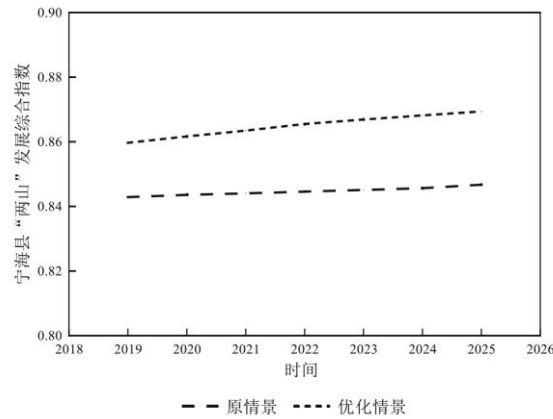


图 5 两种情景下宁海县“两山”发展综合指数对比

在资源环境方面，宁海县实行“碧水、蓝天、净土、清废”保卫行动，着力打好污染防治攻坚战，调整能源结构，推进资源的综合利用。通过垃圾革命、农村厕所革命、基建革命等一系列措施改善全域生态环境，推进美丽城乡的建设。通过生态廊道的建设，将破碎、脆弱的生境有机连接起来，形成完整、安全、美丽的生态带，促进生物多样性的维护。

在民生保障方面，形成科学完善的生态补偿机制，如财政转移支付内部生态补偿制度等。建立严格全面的考核体系，建设更加完善的教育、医疗、交通、公共服务等各类民生设施。以文化为引领，提升文化产品和服务的质量，满足人们美好生活的需要，为“两山”发展建设提供制度保障。

4 结论与讨论

本文基于系统动力学理论，结合宁海县过去 16 年的历史数据，构建了系统动力学模型，对宁海县“两山”发展进行了系统仿真。并采用修正后的县域“两山”发展指数对宁海县 2010—2018 年的“两山”实施情况进行了量化评价，由此找出当前发展中的短板。基于此设计出改进后的优化情景，并对不同情景下宁海县“十四五”期间的“两山”建设情况进行模拟，研究发现：

(1) 宁海县若继续保持原有发展模式，将实现持续高水平绿色发展，“两山”发展水平持续提高，证实了宁海县当前发展模式的可持续性。工业主导型县域在“两山”实践过程中可借鉴宁海县的“两山”发展路径，充分统筹生态环境承载力，合理规划空间布局，科学规划“三区三线”，厘清支撑当地绿色可持续发展的底盘；因地制宜推动产业结构调整，打造特色农业品牌，以“文、农、体、商、旅”融合发展带动旅游经济的提升；实行“碧水、蓝天、净土、清废”保卫行动，打好污染防治攻坚战；建立科学合理的生态补偿机制，为“两山”发展建设提供制度保障。

(2) 在优化了水质监测站数量和低保人口比例两项指标后，宁海县的“两山”发展综合指数在 2025 年将达到 0.869，比原情景提高了 2.67%，“两山”发展水平进一步提高。这不仅验证了县域“两山”发展指数这一评价指标体系对于县域发展的指导意义，同时也说明对于工业主导型县域而言，水质监测、低保人口可能是“两山”发展的限制因素，需要着重关注。

(3) 系统动力学模型对宁海县“两山”发展的模拟结果与实际历史数据的误差小，拟合程度高，表明系统内部结构能够表征宁海县“两山”发展实际情况。文章还验证了利用 SD 模型模拟“两山”发展复杂系统的可行性，以及将系统动力学模型与县域“两山”发展指标体系相结合，探索县域“两山”发展路径这一方法的普适性，为其他县域探索未来“两山”发展的具体方向

提供了一条新思路。

参考文献:

- [1]徐朝旭,裴士军.“绿水青山就是金山银山”理念的深刻内涵和价值观基础——基于中西生态哲学视野[J].东南学术,2019(3):17-24.
- [2]车文斌.区域协调发展的县域角色[J].当代县域经济,2018(11):20-25.
- [3]管红燕.湖北省金山银山与绿水青山发展水平的耦合协调关系研究[D].武汉:湖北省社会科学院,2020.
- [4]Zhang H Q,Xu E Q.An evaluation of the ecological and environmental security on China's terrestrial ecosystems[J].Scientific Reports,2017,7(1):811.
- [5]郑玥.“两山理论”与建设生态浙江研究[D].杭州:浙江理工大学,2018.
- [6]倪秀峰,王儒威,蔡飞旋,等.燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险[J].环境科学,2021(4):1660-1667.
- [7]成金华,戴胜,王然.县域生态文明评价指标体系构建及其应用[J].环境经济研究,2017(4):107-122.
- [8]国家环境保护部.关于印发《国家生态文明建设试点示范区指标(试行)》的通知[EB/OL].(2013-05-23).http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201306/t20130603_253114.htm.
- [9]国家环境保护部.关于印发《国家生态文明建设示范区管理规程(试行)》《国家生态文明建设示范县、市指标(试行)》的通知[EB/OL].(2016-01-22).http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201601/t20160128_327045.htm.
- [10]生态环境部.关于印发《国家生态文明建设示范市县建设指标》《国家生态文明建设示范市县管理规程》和《“绿水青山就是金山银山”实践创新基地建设管理规程(试行)》的通知[EB/OL].(2019-09-11).http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/201909/t20190919_734509.html.
- [11]Challoner A,Pilla F,Gill L.Prediction of indoor air exposure from outdoor air quality using an artificial neural network model for inner city commercial buildings[J].International Journal of Environmental Research and Public Health,2015,12(12):15233-15253.
- [12]熊萍萍,袁玮莹,叶琳琳,等.灰色 MGM(1,m,N)模型的构建及其在雾霾预测中的应用[J].系统工程理论与实践,2020(3):771-782.
- [13]Dyson B,Chang N B.Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modeling[J].Waste Management,2005,25(7):669-679.
- [14]陈先鹏.基于 PCA 和 SD 模型的区域国土资源环境承载力评价——以浙江省义乌市为例[D].杭州:浙江大学,2015.

-
- [15]Zhang L H,Nie Q Y,Chen B Y,et al.Multi-scale evaluation and multi-scenario simulation analysis of regional energy carrying capacity-case study:China[J].Science of the Total Environment,2020,734:139440.
- [16]Bottero M,Datola G,De Angelis E.A system dynamics model and analytic network process:An integrated approach to investigate urban resilience[J].Land,2020,9(28):1-26.
- [17]Wang X E,Zhan W,Wang S.Uncertain water environment carrying capacity simulation based on the Monte Carlo method-system dynamics model:A case study of Fushun City[J].International Journal of Environmental Research and Public Health,2020,17(16):5860.
- [18]徐升华,吴丹.基于系统动力学的鄱阳湖生态产业集群“产业-经济-资源”系统模拟分析[J].资源科学,2016(5):871-887.
- [19]生态环境部.关于命名第三批“绿水青山就是金山银山”实践创新基地的公告[EB/OL].(2019-11-14).http://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk01/201911/t20191114_742443.html.
- [20]宁海县统计局.2018年宁海县国民经济和社会发展统计公报[EB/OL].(2019-03-15).http://www.ninghai.gov.cn/art/2019/3/15/art_1229092456_48928606.html.
- [21]宁海县人民政府.2009年宁海县环境质量公报[EB/OL].[2020-09-18].http://www.ninghai.gov.cn/art/2010/7/15/art_1229235479_49163406.html.
- [22]Koul S,Falebita O A,Akinbami J K,et al.System dynamics,uncertainty and hydrocarbon resources modelling:A systematic review[J].Renewable & Sustainable Energy Reviews,2016,59:199-205.
- [23]郑富玲.银川市再生水回用SD模型的构建[D].银川:宁夏大学,2015.
- [24]连莲.基于系统动力学视角的产业经济增长研究[D].北京:北京交通大学,2017.
- [25]付伟,罗明灿,李娅.基于“两山”理论的绿色发展模式研究[J].生态经济,2017(11):217-222.