
湿地“三生”空间耦合的系统动力学模型实证分析

——以西溪国家湿地公园为例^{*1}

胡玉玺^{1, 2, 3} 吴晓磊^{*1, 2} 马世昌^{1, 2} 郭啸⁴ 刘新儒^{*5}

- (1. 北京大学工学院, 中国北京 100082;
2. 国家湿地保护与修复技术中心, 中国北京 100082;
3. 中南大学出版社, 中国湖南长沙 410083;
4. 长沙师范学院初等教育系, 中国湖南长沙 410100;
5. 中南大学数学与统计学院, 中国湖南长沙 410083)

【摘要】: 在系统论视角下, 将湿地生态、生产、生活融合, 构建了湿地生态—经济—社会复合系统, 分析了该复合系统存在的因果特性、多重反馈特性、系统非线性和系统惯性的系统动力学特征, 并将其划分为湿地生态子系统、湿地区域经济子系统和湿地社会子系统共3个子系统。在系统动力学的指导下, 分别设计了湿地生态、生产、生活的因果反馈分析图和系统结构流图, 并以西溪国家湿地公园为例, 完成了系统动力学方程模型的构建与预测分析, 为湿地生态、生产、生活的协同耦合问题研究提供了新思路。

【关键词】: 湿地; “生态—生产—生活”空间 (“三生”空间); 湿地生态系统; 复合系统; 系统动力学; 西溪国家湿地公园

【中图分类号】: X21 **【文献标志码】**: A **【文章编号】**: 1000 - 8462 (2018) 07 - 0173 - 08

DOI: 10.15957/j.cnki.jjdl.2018.07.021

¹ 收稿时间: 2018 - 01 - 19; 修回时间: 2018 - 04 - 13

基金项目: 国家自然科学基金项目(61602524); 湖南省自然科学基金项目(2015JJ4067); 湖南省哲学社会科学基金项目(14YBA400)

作者简介: 胡玉玺(1979—), 男, 安徽寿县人, 博士、博士后。主要研究方向为湿地经济理论与实践。E-mail: huyuxi@csu.edu.cn。

***通讯作者**: 吴晓磊(1968—), 男, 安徽安庆人, 博士, 长江学者特聘教授, 博士生导师。主要研究方向为湿地保护与修复。

E-mail: xiaolei_wu@pku.edu.cn。

***共同通讯作者**: 刘新儒(1982—), 男, 湖南新化人, 博士, 副教授, 硕士生导师。主要研究方向为湿地经济计量、科学计算及计算几何。Email: liuxinru@csu.edu.cn。

2016年5月,习近平总书记在伊春考察调研强调“生态就是资源、生态就是生产力”。实际上,湿地是大自然赐予人类的绿色财富,湿地与森林、海洋共同组成了地球三大生态系统,享有“地球之肾”的美誉^[1]。

然而,湿地周边生产、生活对湿地区域的占用、对湿地资源的过度采掘、对湿地生态的肆意破坏,湿地资源的快速退化和湿地环境的恶性破坏不仅导致湿地生态功能的大幅丧失^[2],而且对湿地区域的自然灾害防护、工农业生产安全等构成了严重的威胁^[3]。为了发展生产和改善生活而对湿地资源进行的过度开发,不仅影响了湿地的生态功能,还反过来对湿地区域的生产、生活造成了严重的影响^[4]。

因此,笔者认为,应当充分考虑湿地生态、生产、生活的交互胁迫反馈机制,在此基础上制定出湿地生态有效保护、湿地资源合理配置、湿地周边生产生活合理安排的模式和方案,实现湿地资源的保护与利用的协调耦合,才能实现湿地生态经济的可持续健康发展,实现湿地区域经济建设、社会建设与生态文明建设的有机统一^[5]。那么,如何科学地评判湿地生态、生产、生活的综合结构,定量地研究“三生”之间的互动耦合关系,从理论层面实现“三生”的和谐稳定,这一系列问题亟待科学地研究与论证。

马世骏等曾提出“生态经济系统”的概念,提出区域生态、区域经济应纳入到统一的框架中进行研究^[6]。但是在湿地生态问题领域,相关的研究还相当匮乏,现有的学者基本停留在独立研究湿地资源保护、湿地生态效益评价、湿地资源利用问题的阶段,如:牛振国、吴吉东、鲍达明、吕宪国等关注湿地资源面积的动态变化^[7-10];熊建新、Lucas R、冯夏清等从生态系统尺度研究湿地资源生态要素变化^[11-13];卞奕轩、王铁良等研究湿地资源变化与环境变化的互动关联^[14-15];薛星宇、张树文、吴涛等则关注于湿地资源的勘测技术^[16-18]。总结这些研究,当前关于湿地生态、湿地经济、湿地区域社会发展的研究较为割裂,虽然部分学者在研究中尝试将其中两者相结合,但是仍没有将湿地生态、生产、生活纳入同一框架下的理论研究^[19]。

基于此,笔者借鉴马世骏的生态经济系统的概念和研究框架^[6],将湿地区域的生态、生产和生活融合至一个复合系统,该系统即为“湿地生态—经济—社会复合系统”。本文将首先研究湿地生态—经济—社会复合系统的系统动力学特征,在此基础上详细研究和剖析湿地复合系统的组成结构,通过构建该系统的因果反馈分析图和结构流图,来建立湿地生态—生产—生活互动耦合的系统动力学模型,从而可以量化地研究湿地生态、生产、生活的协同发展路径。

1 湿地生态—经济—社会复合系统建模分析

1.1 系统动力学特征

将湿地区域生态经济作为一个复合系统来研究,是因为其具有系统的一般性质。总体上来讲,区域生态经济系统具有因果特性、多重反馈特性、共生耦合性、非线性和系统惯性等特征。

1.1.1 因果特性

湿地复合系统的因果特性是对湿地区域生态经济系统进行分析的基本出发点,同时也是湿地区域生态经济系统的基本规律。对系统中任何一个对象实施外在力量,都会产生一定的作用和效果;反之,系统中任何一个结果的产生都是受到某种力量的牵引,即都是有原因的。在系统分析时,需要对因果辨别清楚,了解什么是原因和什么是结果,以及这种影响是积极的还是消极的^[20]。此外,湿地区域生态经济系统中普遍存在着“一因多果”和“一果多因”的现象,同时因果作用持续的时间也有长期和短期之分。比如,湿地生态环境的破坏可能来自于经济子系统的工业层面,同时部分来源于生活污染物的排放;经济发展不仅可以促使人民生活水平的提高,同时有利于技术改造、技术创新,进而有利于生态环境的保护。因此,在分析湿地区域生态经济系统时,必须充分结合湿地生态经济发展现状,考虑各子系统之间的相互作用以及作用的时间长短。

1.1.2 多重反馈特性

无论是复合系统的内部结构还是子系统要素之间，只要存在因果关系，就称为存在反馈关系^[21]。同时，根据反馈路径的相互影响系数，可以划分为正反馈和负反馈。正反馈使得系统之间的行为得到加强，负反馈使得系统之间的行为虚弱而趋于稳定。通过周而复始的正负反馈关系，系统得以不断演化发展，进而最终处于稳定状态。此外，除了正负反馈外，系统一般还存在多重反馈关系。

对于湿地区域生态经济系统整体而言，经济子系统、社会子系统与生态子系统三者相互作用，存在明显的多重反馈特性。比如，经济子系统的发展会加大对社会基础设施的建设以及教育、文化、卫生事业的发展，同时会产生工业污染物排放到湿地生态子系统，导致湿地生态环境的恶化。反过来，湿地生态资源的较少又会限制经济子系统的发展，同时湿地生态环境的改善会促进社会的发展。同时，对于同一子系统，也存在多重反馈特征。以经济子系统而言，资本存量和就业人数的增加会促进国民生产总值的增加，进而促进 R&D 投入的增加，反过来 R&D 投入会促进技术创新，又会促进经济的发展。因此，研究湿地区域生态经济系统时，充分考虑复合系统内部和各子系统要素之间的多重反馈特性是十分必要的。

1.1.3 共生耦合性

在整个复合系统中，由于湿地生态是非常独特的资源，在整个系统中处于主导地位，其区域经济子系统和社会发展子系统都无法取代，故此复合系统为典型的依托共生耦合。

湿地生态的良性发展，能为湿地经济发展提供充足多样的原料，并有利于湿地地域范围内的社会发展；湿地经济的稳步发展，能提升湿地社会发展水平，增加湿地生态的经济投入；湿地社会的逐渐进步，能促进人类对湿地生态增强保护意识，同时更加有效合理地利用湿地生态，发展湿地经济。

另一方面，湿地生态环境的恶化，将导致其为湿地经济发展所能提供湿地资源质量变差或匮乏，并制约或阻碍湿地社会的发展；而若湿地经济不能有效地良性发展，势必造成对湿地生态资源的不合理使用，从而客观上破坏了生态环境，并进而影响湿地社会的发展；而社会发展的停滞甚至后退，将弱化对湿地生态保护的意识及力度，并降低对湿地生态的有效合理利用，影响湿地经济。

1.1.4 系统非线性

对于复合系统而言，非线性是其基本特征之一，普遍存在于系统内部。这里的非线性包括两个层面：一是复合系统各子系统之间的因果关系存在的相互作用为非线性，二是各自系统的要素之间以及投入产出之间存在的非线性关系。相对于线性关系而言，非线性更能反映出系统的复杂性。区域生态经济系统本身就是一个很复杂的复合系统，因此，充分认识系统内部结构之间的非线性关系，为对其效率评价提供必要条件。以经济子系统与生态子系统为例，简单地认为两者存在线性关系是不恰当的。原因在于，随着经济的发展，工业生产技术得到不断改进，同时管理模式也在不断适应生产的需要。因此，伴随着经济的逐步增长，单位 GDP 能耗在逐步减小，而非为常数。因此，在对区域生态经济系统进行研究时，应当充分考虑非线性这一特征，结合数据分析，准确把握区域生态经济系统中的非线性关系。

1.1.5 系统惯性

惯性的概念源于物理学，特指物体保持原有运动形式的能力。对于系统而言，其惯性特征普遍存在，一般用“习惯势力”来表示。由于系统存在着惯性，系统的变化需要更为强大的外在作用力。对于湿地区域生态经济系统而言，传统的经济增长模式造成湿地生态资源浪费严重，环境保护力度微弱。现阶段，伴随着“两型社会”和“生态文明建设”的提出，要想改变已有

的粗放型生产模式，需要了解到当前阶段我国工业生产技术地下、管理模式较落后。因此，要想实现“生态文明建设”这一目标，需要很长一段时间去完成，而非朝夕^[20-21]。

1.2 湿地生态—经济—社会复合系统结构

参考马世骏的生态经济系统的研究框架，结合如上的湿地复合系统的动力学特征，构建湿地生态—经济—社会复合系统，该系统是由湿地生态子系统、湿地区域经济子系统和湿地社会发展子系统互动耦合而成的，其内部互动关系剖析如图 1。

1.2.1 湿地生态子系统

湿地生态系统指的湿地生物与湿地环境通过能量流动和物质循环而形成的能够实现内部相互作用和自我调节的有机整体。在湿地生态系统中，生物组分和非生物组分的存在组成了系统的层次空间结构。正是由于湿地资源能够提供湿地动植物、微生物、能源、物质、水文地理等生物和非生物组分，因此湿地生态系统在人类生产、生活中发挥着重要的功能。在湿地生态系统中，其所提供的生态物质或生态服务，进入到湿地区域社会系统和湿地经济系统当中，就可以转化成有效的价值资源。

1.2.2 湿地区域经济子系统

经济系统是特定环境或制度下的生产力与生产关系组成的特定整体。湿地经济系统的核心是湿地环境下湿地生产力与湿地生产关系的匹配与互动影响机制。湿地生产力系统和湿地生产关系系统将通过湿地资源的开发、利用、保护和服务，而形成特定的生产结构、流通结构、分配结构、消费结构和所有制结构。在湿地经济系统中，来源于湿地资源供给的湿地生产力是湿地经济系统的物质保障和动力根源。

湿地区域经济系统在湿地生产力和湿地生产关系互动匹配的过程中，形成了价值创造和价值积累的功能，反映到经济主体上，也就是形成了湿地产业。湿地产业，指的就是利用湿地资源所带来的湿地生产力而形成的各类物质生产及服务部门的总称具有湿地农业、湿地旅游业、湿地教育产业等具体形式。湿地产业是现有产业的有效延伸，更具绿色生态性。

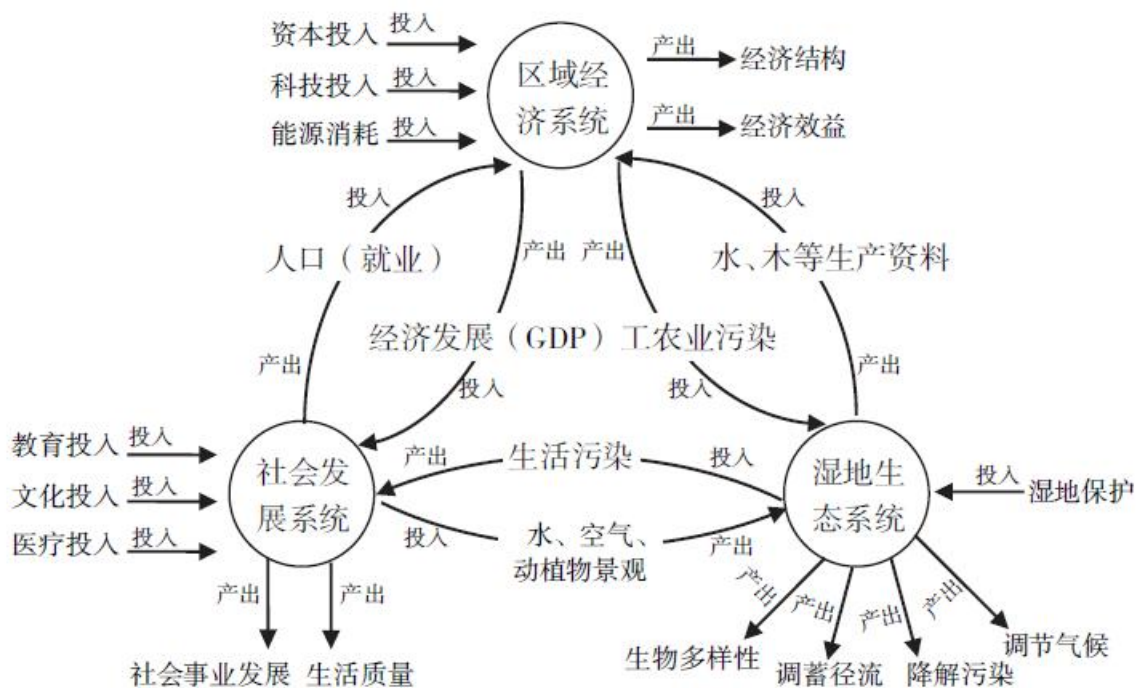


图1 湿地生态—经济—社会复合系统结构图

Fig.1 Structure of wetland ecology-economic-society composite system

1.2.3 湿地社会发展子系统

湿地社会发展系统，是指聚集在湿地地域范围内，依赖湿地经济产品和生态服务生活的社会群体及其之间的交互机制。湿地社会发展系统以人为核心，融合了湿地区域内所形成和积淀的思想观念、道德精神、文化艺术、教育、科技和法规制度。湿地社会系统向湿地经济系统及湿地生态系统提供劳力与智力支持。

一方面，人的存在、生产和生活是湿地社会系统存在和发展的前提，依托湿地进行生产生活的口数量的增加、质量的提高、素质的提高、需要的满足等是湿地社会发展系统的核心。在湿地复合系统中，由于湿地生态系统的阈值限制，客观上要求以适度的人的需求为准来调节和控制湿地产品的生产，其应遵循客观的生产规律。另一方面，湿地是生命和文化的起源地，最原始的人类临水而居、择水而憩，人类生命诞生、成长于湿地。在湿地区域人类演化进程中沉淀下来的思想、信仰、艺术、科学等，构成了湿地精神和湿地历史文化，是湿地社会发展系统的重要内容。其为湿地经济系统的运行和生态系统的修复改造提供智力支持；为人类认识、利用、改造湿地提供方法论；满足湿地社会中人的精神文化需要。

2 湿地生态—经济—社会复合系统动力学模型构建

2.1 因果反馈分析图

在湿地复合系统当中，湿地生态子系统和湿地经济子系统的互动影响机制在于：湿地及湿地区域内的多样化生物（笔者记其为“湿地资源质量”）可以为湿地农业、湿地相关的工业提供水、空气以及原材料等生产资料，此外湿地还能向湿地科技产业等湿地服务业提供产业发展的素材等资料，促进湿地第三产业发展。

湿地经济子系统和湿地社会子系统的互动影响机制在于：湿地相关的第一、第二、第三产业构成了所在区域 GDP 的重要部分，而经济发展状况影响着当地的教育水平、医疗健康水平等生活水平；同时第二产业的发展状况决定了废水、废渣等固体液体废弃物的排放量，进行影响着人民的生活水平。

湿地社会子系统和湿地生态子系统的互动影响机制在于：人口数量决定着固体液体废弃物的排放量，加之工业上的废弃物排放，这都影响着湿地面积的变化和湿地生物多样性的变化；同时，区域社会和政策因素决定了当地对于湿地保护的投入情况，这也会对湿地面积和湿地质量造成影响。基于以上基本分析，利用 Vensim PLE 软件绘制湿地生态—经济—社会复合系统的因果反馈分析图，如图 2。

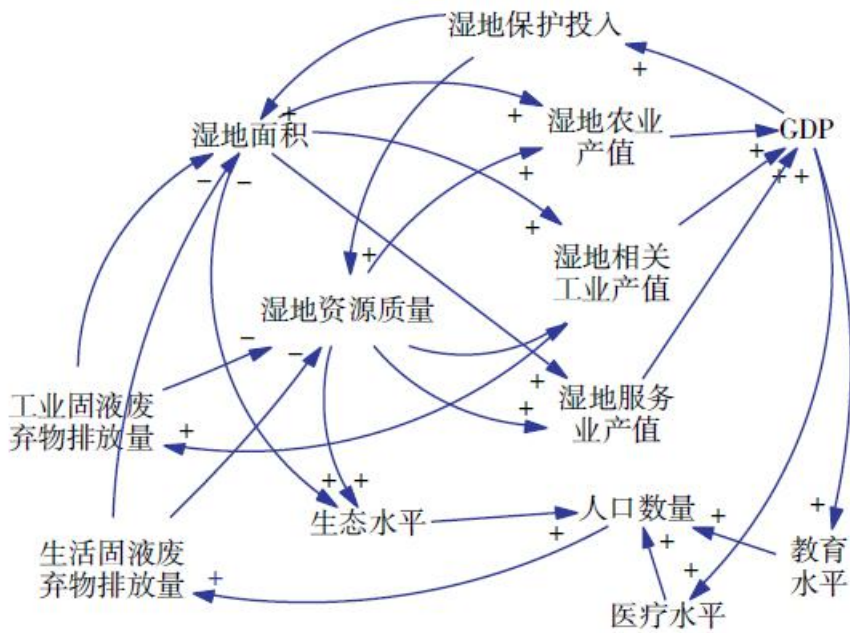


图 2 湿地生态—经济—社会复合系统因果反馈分析图
Fig.2 Causes and feedback analysis of the wetland ecology-economic-society composite system

图 2 反映了在湿地生态—经济—社会复合系统存在的因果反馈回路，以湿地面积为起止点的反馈回路共有 11 条，其中极性为正的反馈回路有 1 条，极性为负的反馈回路有 10 条。以湿地资源质量为起止点的反馈回路共有 11 条，其中极性为正的反馈回路有 1 条，极性为负的反馈回路有 10 条。

2.2 系统结构流程图

因果反馈分析图描述了变量之间的联系和因果关系，而进一步地刻画系统要素的内部相关性质则需要借助系统结构流程图。在前文所绘制的湿地生态—经济—社会复合系统因果反馈分析图的基础上，通过分析变量间关系和变量的类型，利用 Vensim PLE 软件绘制湿地生态—经济—社会复合系统结构流程图，如图 3。

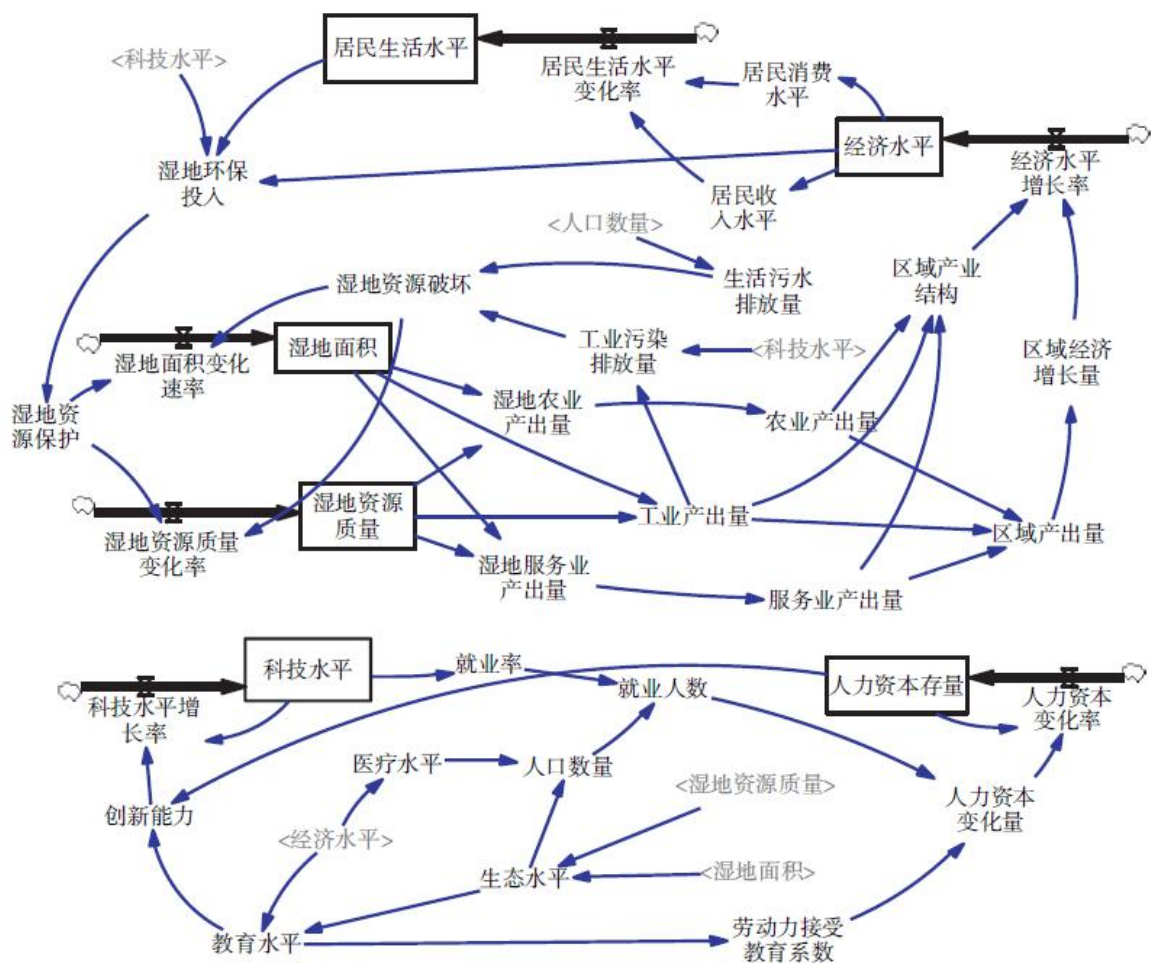


图3 湿地生态—经济—社会复合系统结构流图

Fig.3 Structure flow of the wetland ecology-economic-society composite system

在构建了因果反馈图和系统流图后，湿地生态—经济—社会复合系统的系统动力学模型框架即构建完毕。

2.3 系统动力学方程

湿地生态—经济—社会复合系统是一个庞大而又复杂的自然—社会复合大系统，具有长时效、

多层次、高阶非线性、动态性、自组织性等特征，难以用一般的数学方法对其进行量化描述和分析。如图3建立的系统动力学模型展示了湿地生态、区域经济与社会系统之间的复杂关系。该模型包括的状态变量为居民生活水平、经济水平 GDP 产值、湿地面积、湿地资源质量。

根据图3流图分析，社会经济指标与生态环境指标的耦合关系可用经济水平 GDP 总量、居民生活水平、湿地的面积以及湿地资源质量所构成的系统动力学方程来描述。

$$\begin{cases} \frac{dG}{dt} = G \cdot k_1(t) + p_z(R, \delta_1, \delta_2, \delta_3) + p_c(R, \delta_1, \delta_2, \delta_3) \\ \frac{dL}{dt} = L \cdot k_2(t) + G \cdot (1 - \delta_4) \cdot \gamma \\ \frac{dA}{dt} = A \cdot k_3(t) + h(L, T, G, \delta_4) \cdot \delta_5 - c(w_L, w_I) \cdot \delta_6 \\ \frac{dR}{dt} = R \cdot k_4(t) + h(L, T, G, \delta_4) \cdot \delta_7 - c(w_L, w_I) \cdot \delta_8 \\ G|_{t=t_0} = G_0, L|_{t=t_0} = L_0, A|_{t=t_0} = A_0, R|_{t=t_0} = R_0 \end{cases}$$

式中： G 、 L 、 A 、 R 分别表示湿地所在区域 GDP 总量 G 、居民生活水平、湿地面积、湿地资源质量； $k_i(t)$ ($i = 1, 2, 3, 4$) 分别表示 G 、 L 、 A 、 R 的自身增长率； δ_1 、 δ_2 、 δ_3 分别表示湿地资源质量对湿地工业、湿地农业、湿地服务业产量的转化率； $p_1(R \cdot \delta_1)$ 、 $p_2(R \cdot \delta_2)$ 、 $p_3(R \cdot \delta_3)$ 分别表示湿地资源对湿地工业、湿地农业、湿地服务业的经济增长量； $p_z(R, \delta_1, \delta_2, \delta_3) = p_1(R \cdot \delta_1) + p_2(R \cdot \delta_2) + p_3(R \cdot \delta_3)$ 为区域经济增长量； $p_c(R, \delta_1, \delta_2, \delta_3)$ 是区域经 济结构调整带来的经济增长量； δ_4 为 GDP 产值中用于环保投入的比率； γ 为 GDP 投入对居民生活水平增长转化率； $h(L, T, G, \delta_4)$ 是居民生活 L 、科技水平 T 、GDP 环保投入决定的湿地环保投资值； δ_5 为湿地环保投入产生的湿地面积转化率； w_L 是生活 污水排放量， $w_I = cI(R \cdot \delta_1, T)$ 是由科技水平、工业产值产生的工业污染排放量； $c(w_L, w_I)$ 是指因生活污水排放量 w_L 和 工业污水排放量 w_I 引起的环境恶化因子； δ_6 为污染产生的湿地面积损失的转化率； δ_7 为湿地环保投入产出的湿地资源质量 变化率； δ_8 为污染产生的湿地资源质量的变化率。

实际中系统的各种增长率、转化率、转化量均为时间的函数，需要大量数据进行回归分析来讨论其函数形式，这在当前的 统计数据条件下，是比较困难的。考虑到在一个时期内区域的生态、经济、社会具有一定平稳发展的特性，故为了简化而不失 正确性，我们采用合理估算的常数来作为系统中各与时间有关的增长率、转化率及转化量。

根据前面方程可知社会、经济与湿地生态系统的状态变量相互联系、互为参数。在实际计算中方程参数的获取有多种途径， 比如预先人为确定、其它方程推算等。针对具体研究区域，相应的动力学方程基本结构形式相似，应当基于历史数据拟合变量 之间的关系方程，利用当前数据展开对未来的预测和分析。

3 案例研究

西溪国家湿地公园位于杭州市西部，横跨西湖区和余杭区两区，历史上曾有 60 多 km^2 面积，自民国后日渐萎缩，现在全区 规划面积为 10.08 km^2 ，河流总长 100 多 km ，约 70% 的面积为河港、池塘、湖漾、沼泽等水域，陆地绿化率在 85% 以上^[22]。它是 第一个集城市湿地、农耕湿地、文化湿地于一体的国家湿地公园，具有重要的“生态—经济—社会复合系统”研究价值。 故本文选择西溪国家湿地公园作为研究案例，利用面板数据进行仿真研究，进而优化模拟，提出优化策略。考虑到西溪国家湿 地公园并未作为独立区域进行各种统计数据采集及分析，除旅游价值及生态资源价值有学者进行相关研究外，并无可获得的公 开数据，故我们根据杭州市统计年鉴，尽可能在包含湿地的较小地域范围内来测算并得到西溪湿地生态—经济—社会发展的系 统参数。

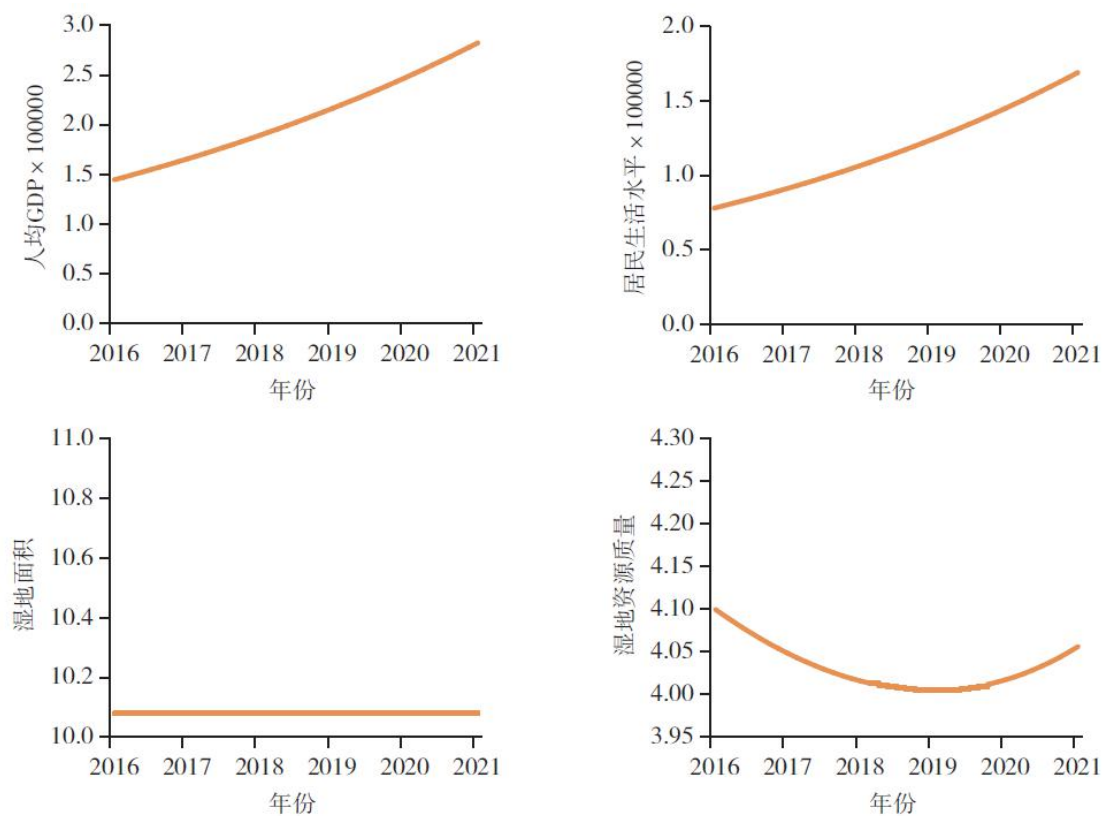


图4 基于常规发展的湿地生态—经济—社会复合系统10年期预测

Fig.4 Ten years forecast of the wetland ecology-economic-society composite system based on conventional development

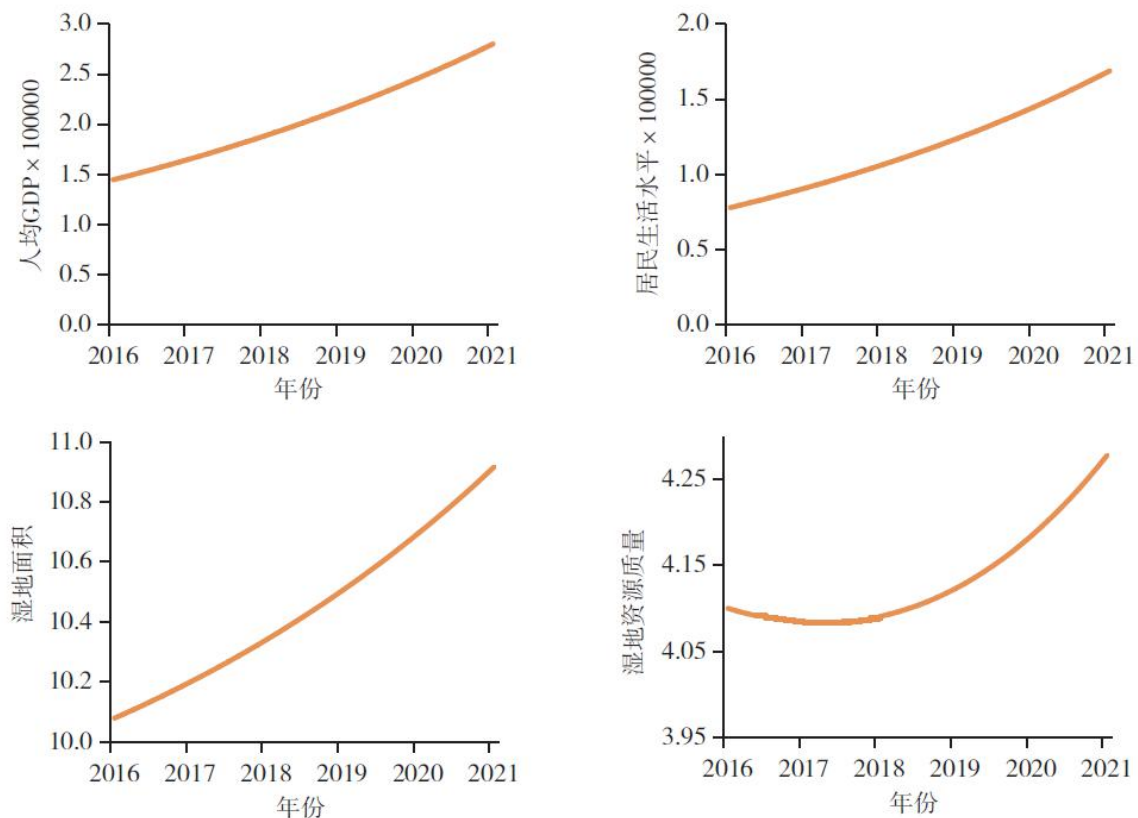


图5 基于优化策略的湿地生态—经济—社会复合系统10年期预测

Fig.5 Ten years forecast of the wetland ecology-economic-society composite system based on optimization strategy

根据杭州市统计年鉴：2016年西湖区和余杭区两区总人口数为167.6万人，GDP总量为2424.7亿元；工业污染废水排放量为28382万t；2016年居民家庭人均可支配收入为46116元；2016年居民家庭人均消费支出为31905元。另，杭州市的十三五规划中，GDP的年均增长率为7.5%，居民人均可支配收入增长率为8%。湿地资源对湿地工业、湿地农业、湿地服务业的经济增长量2016年为15亿元^[23-24]。目前，西溪湿地的环境生态资源价值为532.58亿元^[27]，2014年西溪湿地国家公园接待游客445万人，经营收入超过2亿元，西溪创意产业园实现总产值9.2亿元^[25]，推算得知区域经济结构调整带来的经济增长量约为11.2亿元。杭州市每年投入西溪湿地的综合治理保护费为10亿元^[25]，投入率为GDP的0.41%。由于国家湿地公园的建立，西溪湿地的面积没有发生变化。湿地资源质量可用湿地物种多样性的香农指数来衡量，且根据2011—2015年均香农指数^[26]得到2015年西溪湿地香农指数为4.1，年均复合增长率为-2.69%。结合统计年鉴，我们使用人均数值来衡量西溪湿地所在地区的GDP、经济增长量、环保投入，用居民家庭人均可支配收入与消费支出衡量居民生活水平。并假设湿地资源质量产生的湿地工业、工业、服务业产量转化率比为1:2:5，同时用自然对数函数将复合增长率换算为自身增长率。

根据2016年情况，测算西溪国家湿地公园内的生态—经济—社会复合系统今后10年的发展变化（图4）。从结果可以看出，湿地所在区域GDP（人均GDP）以及人民生活水平在逐渐提高，由于西溪湿地采取了保护措施，故湿地面积保持不变。但由于历史原因，湿地资源质量存在自身下降趋势^[26]，故即使按现有力度进行了湿地环保投资^[25]，在经济、社会发展对湿地资源的攫取及影响下，湿地资源质量依然在不断下降，直到6年后的2021年才止住下滑趋势，湿地资源质量在不断改善。

从前面的分析及预测结果中可以看出，对湿地生态，若将重心放在追求经济的策略下，对湿地环境的影响是严重的。若在现有经济形势及趋势下，更进一步地向湿地索取经济效益，将导致湿地面积、湿地质量不可逆转的恶化，从历史上的60多km²到现在的约10km²，就是这种导致目标的必然结果。

另一方面,湿地生态圈内居民生活水平及人均 GDP 都随杭州市、浙江省乃至全国经济形势而变化,与占经济总量很小的湿地经济效益关联不大,也即湿地所产生的经济效应在整个社会中的比例是比较低的。如果降低湿地生态地经济服务目标,能更好地提升湿地生态功能及社会效益。若将湿地对工业、农业、服务业的营收目标降低,将相应的转化率降低 50%,并加大环保投入为当前的 1.2 倍,同时放开对湿地面积的约束,则可在较小影响 GDP 及居民生活水平的前提下,实现湿地面积的扩大、湿地资源质量的更快速修复(图 5)。

3 结论与讨论

本文关注地球三大生态系统之一的湿地,探索如何实现湿地区域内生态、生产、生活和谐发展的科学方法。基于系统学的理论和思想,将湿地生态、生产、生活纳入到一个统一的研究框架之下,构建了包含有湿地生态子系统、湿地区域经济子系统和湿地社会子系统共 3 个子系统的湿地生态—经济—社会复合系统。基于湿地三个子系统内部的互动耦合机理,分别设计了湿地生态、生产、生活的因果反馈分析图和系统结构流图,完成了系统动力学模型的构建。研究发现:系统动力学的方法是适合于研究湿地生态、生产、生活问题的;在构建的因果反馈图中,系统内共形成了 22 条反馈回路,其中有 20 条反馈回路的极性是负的,有 2 条反馈回路的极性是正的。西溪国家湿地公园的实例分析结果直观表明,复合系统中经济活动与湿地生态的相互影响。

在未来的研究当中,应结合更为精准、全面、丰富的湿地生态、生产、生活的实际数据,更加合理地选择变量和指标,定量地对所建立的系统动力学模型中的变量关系建立拟合方程,并应用实际的数据展开实证研究,从量化的角度寻求湿地生态、生产、生活和谐统一的根本路径。

参考文献:

- [1] 崔保山,杨志峰. 湿地学 [M]. 北京:北京师范大学出版社,2006.
- [2] 孟宪民. 湿地与全球环境变化 [J]. 地理科学,1999,19(5): 385- 391.
- [3] 陈宜瑜,吕宪国. 湿地功能与湿地科学的研究方向 [J]. 湿地科学,2003(1): 7 - 11.
- [4] 曾贤刚,孙承泳,韩威. 湿地经济价值的研究 [J]. 生态经济,2002(9): 51 - 54.
- [5] Millennium A. Ecosystems and human well-being: Synthesis [M]. Washington DC: Island Press, 2005.
- [6] 马世骏,王如松. 社会—经济—自然复合生态系统 [J]. 生态学报,1984,4(1): 1 - 9.
- [7] 牛振国,张海英,王显威,等. 1978~2008 年中国湿地类型变化 [J]. 科学通报,2012,57(16): 1 400 - 1 411.
- [8] 吴吉东,李宁,李春华. 深圳市海岸带湿地变化及存在的威胁 [J]. 海洋环境科学,2008,27(3): 278 - 282.
- [9] 鲍达明,谢屹,温亚利. 构建中国湿地生态效益补偿制度的思考 [J]. 湿地科学,2007,5(2): 128 - 132.
- [10] 吕宪国. 湿地生态系统保护与管理 [M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [11] 熊建新,陈端吕,彭保发,等. 洞庭湖区生态承载力及系统耦合效应 [J]. 经济地理,2013,33(6): 155 - 161.

-
- [12] Lucas R. On the mechanics of economic development [J]. Journal of Monetary Economics, 2010, 22(88): 3 - 42.
- [13] 冯夏清, 章光新. 基于水循环模拟的流域湿地水资源合理配置初探 [J]. 湿地科学, 2012, 10(4): 459 - 466.
- [14] 邝奕轩, 王圣瑞, 李贵宝. 我国新型城镇化建设中的城市湖泊湿地保护研究 [J]. 环境保护, 2014, 42(16): 37 - 40.
- [15] 王铁良, 袁鑫, 芦晓峰, 等. 基于多目标规划理论的辽宁双台河口湿地水资源合理配置研究 [J]. 沈阳农业大学学报, 2011, 42(5): 588 - 591.
- [16] 薛星宇, 刘红玉. 基于 ALOS 影像的盐城海滨湿地遥感信息分类方法研究 [J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(2): 248 - 255.
- [17] 张树文, 颜凤芹, 于灵雪, 等. 湿地遥感研究进展 [J]. 地理科学, 2013, 33(11): 1 406 - 1 412.
- [18] 吴涛, 赵冬至, 康建成. 基于遥感技术的河口三角洲湿地景观生态健康研究进展 [J]. 海洋环境科学, 2010, 29(3): 451 - 456.
- [19] 刘定慧, 杨永春. 区域经济—旅游—生态环境耦合协调度研究——以安徽省为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(7): 892 - 896.
- [20] 魏晓旭, 赵军, 魏伟. 基于县域单元的中国生态经济系统协调度及空间演化 [J]. 地理科学进展, 2014, 33(11): 1 535 - 1 545.
- [21] 贾仁安. 系统动力学: 反馈动态性复杂分析 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [22] 李紫芳, 张放, 华桂芳. 杭州西溪湿地现有维管植物区系多样性研究 [J]. 浙江农业科学, 2007(6): 655 - 658.
- [27] 张枝实. 基于资产评估理论的环境生态资源价值计量方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [23] 王国新. 杭州城市湿地变迁及其服务功能评价 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2010.
- [24] 张伟, 朱玉碧, 王春叶. 杭州西溪湿地生态系统服务价值稳定性分析 [J]. 湿地科学, 2017, 15(1): 52 - 59.
- [25] 王嘉芃. 西溪湿地生态监测数据库系统的设计及初步应用研究 [D]. 浙江: 杭州师范大学, 2016.
- [26] 陈鸣渊. 浅析西溪湿地五年水质状况 [J]. 广东化工, 2016, 43(15): 172 - 174.