

基于 SD 模型的中国西南水-能源-粮食 纽带系统仿真模拟

孙才志 周舟 赵良仕¹

(辽宁师范大学 海洋经济与可持续发展研究中心,

中国辽宁 大连 116029)

【摘要】：基于系统动力学构建以水资源、能源、粮食为主体，涵盖经济、社会、环境的复杂系统，以西南四省市 2004—2017 年数据为基础模拟 2018—2030 年该区域水—能源—粮食与水电生产状况，并设置四个情景进行仿真模拟，在单要素模拟基础上协同分析其水—能源—粮食三者的纽带关系。结果表明：①西南四省市的用水总量呈现先上升后下降趋势，2030 年预计超过 606 亿 m³，整体水资源压力低于 30%；能源消费总量逐年递增，预计达到 7.4 亿 t 标准煤，平均单位能耗仍较高；粮食生产量稳步增长到 7900 万 t，但人均粮食产量仍低于全国平均水平；水力发电总量在保持现有的开发速度，预计超过 1.5 万亿 kW·h，为 2018 年的 2.2 倍。②水—能源—粮食纽带关系呈协同优化趋势，三者资源利用效率明显提升，推动社会经济与生态环境呈良性发展态势。③通过对四种情景进行权衡协同分析，建议选择情景四即综合节约与水能发展，有助于当地经济与生态可持续发展。

【关键词】：水-能源-粮食纽带 水能资源 可持续发展 生态安全

【中图分类号】：TV213.9 **【文献标志码】**：A **【文章编号】**：1000-8462 (2021) 06-0020-10

自 2011 年在德国波恩召开探讨水—能源—粮食纽带关系安全的国际会议后^[1]，WEF-Nexus 逐渐成为学术界研究热点。这类纽带分析的核心内容是在自然资源系统和社会经济系统中寻求最佳的权衡解决方案，以实现多目标的共赢^[2]，并最终实现全球可持续发展目标 (SDGs)。从全球角度来看，2015 年“水—能源—粮食”问题分别成为联合国 SDGs 中的三个重要基础目标，对于人类可持续绿色发展具有至关重要的意义^[3]。从中国角度看，作为拥有 14 亿人口的全球第二大经济体，水—能源—粮食不协调的现状成为制约国家高质量发展的“短板”。西南四省市位于青藏高原边缘过渡带，水资源与能源蕴藏量丰富，但耕地面积少导致无法保证粮食安全，作为研究区对于推动中国人地关系脆弱地区的可持续发展具有重要意义。

纽带关系研究最早可追溯到 1970 年代 Meadows 等人出版的《增长的极限》^[4]，2008 年 Siegfried 在前人研究基础上正式提出了对水、能源和粮食之间相互作用的认识^[5]，近年来国内外学者对 WEFNexus 取得丰富的研究成果。以研究对象来看，横跨全球、区域、国家到城市各个尺度^[6-9]，如 Moili 以水—能源—粮食视角分析了全球生物燃料生产的现状^[6]，李桂君等预测了北京市水—能源—粮食的变化趋势并提出可持续发展对策^[9]。从研究方法而言，通过以水足迹、生态足迹为代表的过程视角评估^[10-13]，以综合评价指标体系、投入产出分析、网络分析工具、系统动力学模拟为代表的系统整体视角分析预测^[14-17]，以开

¹**基金项目**：国家社会科学基金重点项目 (19AJY010)

作者简介：孙才志 (1970-)，男，山东烟台人，教授，博士生导师，研究方向为水资源经济与海洋经济。E-mail: suncaizhi@lnnu.edu.cn

赵良仕 (1985-)，男，辽宁沈阳人，博士，副教授，研究方向为水资源经济。E-mail: liangshizhao@lnnu.edu.cn

发定量集成工具为代表的多要素综合评估^[18-20]三类方法为主。沈镭等基于粮食安全角度定量评估了中国生物质能发展与粮食安全的关系^[12]；Zhang 等利用生命周期法分析中国能源生产过程中的用水及对环境的影响^[13]；孙才志等通过构建基于指标体系的耦合协调度模型，对我国纽带系统协调性和安全性进行了系统的评价^[14]；OwenA 等采用多区域投入产出法计算了水、能源、粮食的资源流通使用情况，利用路径结构分析确定了具有高水—能源—粮食资源使用量的供应链^[15]；Wang 等基于 IOA 分析中国能一水之间的情景评估框架，结合生态网络分析部门之间的控制与依赖关系^[16]；王慧敏等基于系统动力学方法模拟仿真了山东省的水—能源—粮食纽带关系^[17]；Daher 等人开发了 WEFNexusTool2.0 平台，用于线上核算三者纽带关系及其与外部要素之间的复杂关系，为学者和决策者评估与确定资源分配方案提供了公共分析平台^[19]。综上所述，如何反映 WEFNexus 系统本质和变化趋势，如何系统地对于跨省域 WEFNexus 进行动态评估与模拟仿真，相关问题仍有待进一步研究。

本文采用的系统动力学（System Dynamics, SD）是 Forrester 在 1956 年创立的强调用系统、整体的视角^[21]，结合定性定量分析优势，借助计算机模拟、分析、解决复杂多系统问题的方法^[22]。本文通过行政区划确定资源边界，以 2004—2017 年中国西南四省市（重庆、四川、贵州、云南）的粮食生产与水资源、能源消费数据为研究对象，研究生态脆弱地区的 WEFNexus 关系。其次，为反映 WEFNexus 系统的真实运行状态，基于刘鸿明等弱范式理论^[23]选取经济、社会和环境三个维度构建 WEF 可持续发展框架，刻画兼备社会属性与自然属性的水、能源和粮食三大子系统间的复杂纽带关系。最后，围绕西南四省市 WEF 可持续发展特征识别 WEFNexus 决策变量，构建系统动力学理论模型并模拟仿真 2018—2030 年该区域水资源、能源消费量与粮食、水电生产量，通过权衡 4 种不同的发展情景，分析其水—能源—粮食纽带关系与发展趋势并提供决策建议。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 系统动力学

1.1.1 西南四省市水—能源—粮食现状

水资源现状：西南四省市年平均降水量超过 1000mm，是中国水资源最丰富的地区^[24]，当地水资源总量极为丰富但时空分布不均。

能源现状：西南四省市是国家重要的绿色能源工业基地、“西电东输”基地，是以水能为代表的清洁能源富集区。其中四川、云南省理论水能资源蕴藏量居全国第 2、3 位，可开发水能资源位居全国前两位^[25]。

粮食现状：西南四省市的地形以山地、高原为主，平原面积小，导致适宜耕作的土地少，截至 2017 年耕地面积约占全区总面积 15.3%，人均粮食生产量约占全国平均水平的 79%，总体上粮食需要外部少量进口^[26]。

三要素纽带关系现状：以消费视角来看，西南四省市的粮食生产消耗蓝水约占用水总量的 56%，消耗能源约占能源消费总量 2%；能源生产消耗水资源占用水总量的 26%；水资源污染处理需要消耗较多资源。为保障当地粮食安全，首先需要在现有耕地资源的基础上加大技术投入，提高亩产量，此外考虑市场成本因素加强区外的粮食调入。整体上该区域单位面积粮食产量、万元 GDP 能耗、万元 GDP 水耗均低于全国平均水平，三要素无论在数量上、质量上都呈恶化状态。即三者之间的纽带关系处于弱可持续发展水平。

1.1.2 WEF Nexus 系统动力学模型研究边界

因为 WEF Nexus 是涵盖自然与社会属性的复杂系统，内部复杂的关系导致必须明确定义研究区的水—能—粮食研究边界。本文基于刘鸿明等弱范式理论选取经济、社会和环境三个维度构建 WEF 可持续发展框架^[23]，设置了西南四省市的水、能源、粮食子系统之间的网络纽带关系，如图 1 所示。

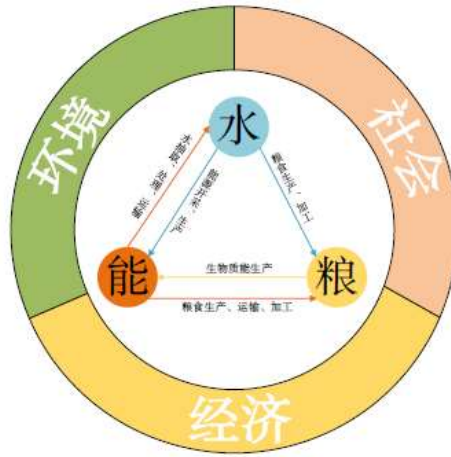


图1 模型子系统纽带网络结构

该模型 3 个子系统之间的关系包含：一次能源的开采、加工、运输整个过程中以及水电、火电开发过程中都需要消耗水资源；粮食的种植生产过程与后期的精加工过程对水资源消费巨大；在水资源抽取、水厂处理、输送到社区的整个过程消耗能源；现代化规模农业在粮食生产（播种、灌溉、施肥、播撒农药、收割）、运输、加工过程对能源的消费；生物质能生产过程对粮食的消费。

1.1.3 WEF Nexus 系统动力学模型构建

系统动力学（System Dynamics，SD）起初是用来分析生产管理及库存管理等企业问题而提出的系统仿真方法，最初名为工业动态学^[21]，后期应用范围逐渐扩大到各个领域。它具有五个基本特点：研究对象为开放系统；应用于非线性、多变量复杂巨系统；具有模拟仿真假设功能；以定性定量相结合；融合其他系统学科的精髓^[27]。因此 SD 对于解决涵盖经济、社会、环境等复合系统的 WEFNexus 刻画具有很好的适应性^[28]。

本文基于 SD 模拟西南四省市 WEFNexus 系统，通过构建以五个子系统之间的因果关系图为基础，以存量流量图来刻画系统之间的逻辑关系并以函数等形式量化，明确复杂系统的反馈形式与控制规律^[19]。SD 模型引入状态变量、速率变量、源与汇等概念，能够清晰地描述影响反馈系统的动态性能的积累效应，以更准确地对研究对象进行模拟仿真。模型的存量流量图以系统动力学专用模拟软件 VensimPLE 制成，如图 2。

水资源子系统主要由西南四省市的水资源供给总量和水资源消费总量构成，两者之间由供水缺口衔接。水资源子系统通过水力发电耗水量、火力发电耗水量 2 个指标关联能源子系统；通过单位面积水资源量关联粮食子系统；通过万元 GDP 水耗关联经济子系统；通过水资源节约总量关联环境子系统。

能源子系统主要由西南四省市区域的能源供应总量、能源消费总量、能源调出量构成，供应与消费由能源自给率衔接。能源子系统通过一产耗能关联粮食子系统；通过万元 GDP 能耗关联经济子系统；通过能源节约总量关联环境子系统。

粮食子系统由粮食生产量、农作物播种面积、耕地面积、复种指数、粮食单位面积产量 5 部分组成。因为粮食相关数据缺乏，故在西南四省市 WEFNexus 系统中对于粮食子系统关联指标较少。

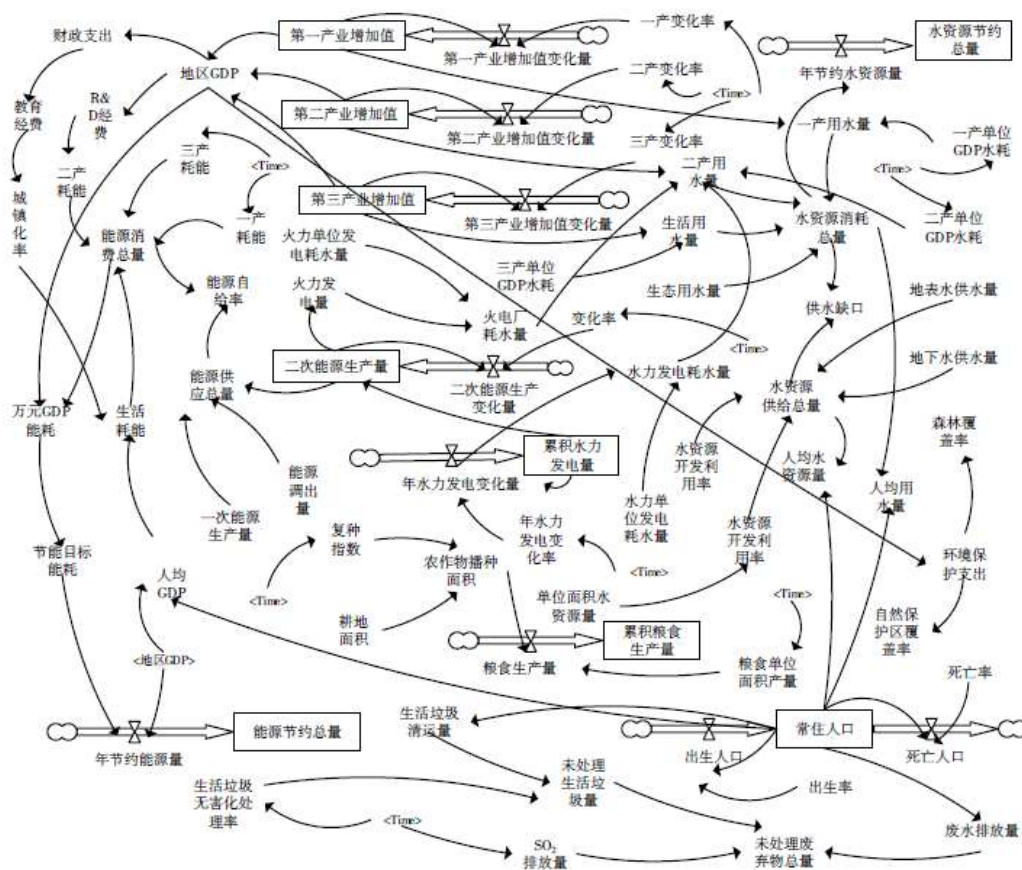


图2 西南四省市 WEF Nexus 系统存量流量图

经济子系统由 GDP、财政支出、常住人口等共 15 部分组成，区域的发展必然需要消耗水资源、能源、粮食等必需品来维持经济增长，在这个过程中也会产生废水、废气、固体废弃物等非期望产出，造成环境的负面影响。

环境子系统由废水排放总量、SO₂ 排放量、生活垃圾无害化处理率等共 11 部分组成。其中水资源节约总量、能源节约总量是西南四省市 WEFNexus 系统存量流量图中重要的两个水平变量，也是该区域可持续发展水平的重要衡量指标。

根据数据选取时间范围和 SD 模型模拟仿真功能，西南四省市 WEF Nexus 系统时间设置模型的初始时间为 2004 年，结束时间为 2030 年，时间步长为 1a。本文在此基础上根据西南地区丰富的水能资源与可持续发展要求设置四种情景方案，探究不同的发展模式对西南四省市水—能源—粮食系统可能带来的影响。

假设条件：①能源之间可以相互替代；②粮食只涵盖五大主粮即稻谷、玉米、小麦、豆类、薯类，粮食之间可以相互替代；③水能发电只消耗部分水资源，不产生其他污染；④未考虑与区域外部的商品流动。

1.2 数据来源

本文选取 2004—2017 年西南四省市水—能源—粮食—经济—社会数据进行 SD 模拟仿真，数据来源于《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国能源统计年鉴》，重庆市、四川省、贵州省、云南省的水资源公报。火力发电的蓝色水足迹主要指冷却系统用水，根据相关研究^[26]采用 $2.45\text{m}^3/\text{MW} \cdot \text{h}$ 作为计算当量；水力发电主要为发电过程中的直接消耗，根据 He 等的研究，水

电的蓝色水足迹参数取 $6.75\text{m}^3/\text{GJ}$ ^[30]。

2 实证分析

2.1 模型检验

为了确保系统动力学模型模拟效度，本文参照对比 2004—2017 年常住人口、GDP、水资源消费总量、能源消费总量 4 个变量的预测值与实际值绝对值的偏差 ^[9]，如检验公式（1）所示。

$$\theta = \frac{|\hat{x} - x|}{x} \times 100\% \tag{1}$$

式中： θ 为模型误差； $\hat{x}$ 为仿真数值； x 为实际值。结果如图 3 所示，常住人口与 GDP 模拟精度较好，误差控制在 3%左右；水资源消费总量和能源消费总量误差控制在 5%左右，参考李桂君等 ^[10] 的研究，误差值控制在 5%左右可视为有效，即预测结果可供使用。



图 3 SD 模型检验效果

2.2 情景设定

决策变量的选取过程是一个定性定量相结合的过程 ^[9]，根据已建立模型的试运行，并结合西南四省市水—能源—粮食复合系统的具体情况，选取“节水目标、节能目标、二产 GDP 增长率、三产 GDP 增长率、水力发电增长率”这 5 个指标作为决策变量。通过改变决策变量的值得到不同方案下相关指标的模拟结果 ^[22]。

情景一常规发展：指按照《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》^[31]、西南四省市的“十三五”规划、《全国农业现代化规划》^[32] 规定的约束性指标，确定节水目标、节能目标、二产与三产 GDP 增长率、水力发电增长率的参数。

情景二强化节约发展：在保障该区域经济稳定发展的基础上，推动西南四省市的生态保护与可持续发展，通过能源与水资源

源的生产与消费环节的节约保护以提高资源利用率，推动当地经济高质量绿色发展。故提高节水、节能目标的年变化速率，适度降低水力发电的增长率。

情景三强化水能发展：根据《国家水电发展“十三五”规划》以及各省市的发展目标^[33]，确定常规水电年增长率、强化水电年增长率参数。西南四省市作为全国清洁能源生产基地和“西电东送”的主要基地之一，大力发展以水电为代表的清洁能源是西南四省市经济规划的重要发展目标，也是保障国家能源安全的重要战略之一。故模拟提高水力发电增长率，适度降低节水、节能目标年变化速率。

情景四综合节约与水能发展：西南四省市调整经济结构以实现高质量发展，必须要求资源高效利用和经济中高速增长同时兼备。所以该情景结合情景二和情景三的优势，即在情景一的基础上提高节水、节能目标的年变化速率与水力发电的增长率。

2.3 仿真结果分析

在西南四省市 WEFNexus 系统 SD 模型中分别输入 4 种发展情景的参数，得到不同发展情景下 2018—2030 年的仿真结果。选取较能代表西南四省市水—能源—粮食特征的用水总量、能源消费量、粮食生产量、水力发电量的供需平衡比的仿真结果作对比分析。

2.3.1 用水总量趋势变化

图 4 显示四种发展情景下四省市年总用水量，以及各省市在四种情景之下的年平均用水量。在国家“十三五”规划中指出到 2020 年单位 GDP 水耗较 2015 年降低 23%，即情景一保持每年 5% 的降耗幅度；情景二强化节约发展，故保持每年 8% 的降耗幅度；情景三强化水能发展，所以在情景一的基础上会小幅度增加用水量，故保持每年 4% 的降耗幅度；情景四综合节约与水能发展，即降耗幅度等于情景二。

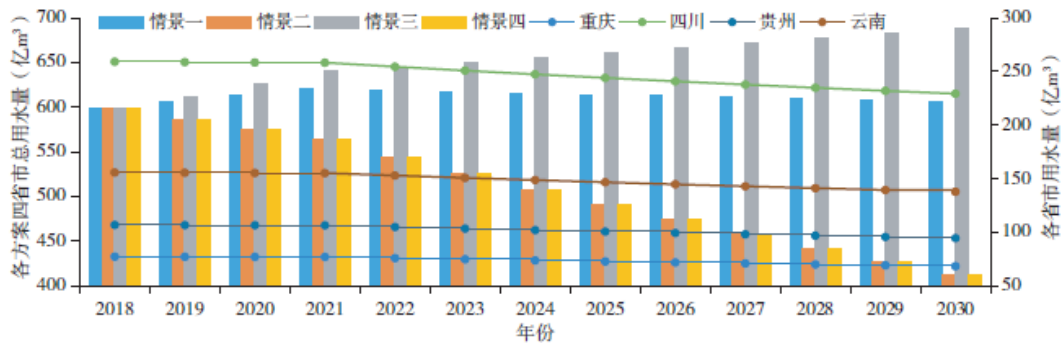


图 4 用水量仿真趋势

从仿真的四个情景看，在 2018—2030 年期间情景一用水总量呈现先升后降的趋势，在 2021 年到达用水总量的峰值 620 亿 m³，随后每年呈小幅度下降趋势；情景二与情景四在强节约的模式下，用水总量呈现逐年下降的趋势，预测 2030 年用水总量 413 亿 m³，约占情景一的 68%；情景三在强化水能发展的条件下，用水总量呈现逐年递增的趋势，预测 2030 年用水总量 688 亿 m³，约为情景一的 1.13 倍、为情景二的 1.67 倍，即比情景二节约 81 亿 m³ 用水。

从各省市角度看，在 2018—2030 年期间西南四省市的用水量都呈现下降趋势，表明在国家宏观调控与产业转型升级的政策下西南四省市经济发展质量稳步提高，水资源环境压力在逐步减小。其中四川作为人口大省用水量一直位居西南四省市首位，

预测 2030 年用水量 229 亿 m^3 ，约为当年重庆市 3.35 倍、贵州省 2.43 倍、云南省 1.66 倍，比 2018 当年节约 30 亿 m^3 。此外各省市的用水总量占可利用水资源量均不超过 30%，水资源压力相较于全国其他区域较小。

以上分析表明，基于国家“十三五”规划的情景一与强化节约的情景二利于保护当地水资源生态环境，利于保障长江和西南诸河流域的水资源统筹协调，维护我国西部生态屏障的战略地位。

2.3.2 能源消费量趋势变化

图 5 显示四种发展情景下四省市年能源消费总量，以及各省市在四种情景之下的年平均能源消费量。在国家“十三五”规划中指出到 2020 年单位 GDP 能耗较 2015 年降低 15%^[31]，即情景一保持每年 3%的降耗幅度；情景二强化节约发展，故保持每年 4%的降耗幅度；情景三强化水能发展，所以在情景一的基础上会小幅度增加能源消费量，故保持每年 2.6%的降耗幅度；情景四综合情景二和情景三，即降耗幅度等于情景二。

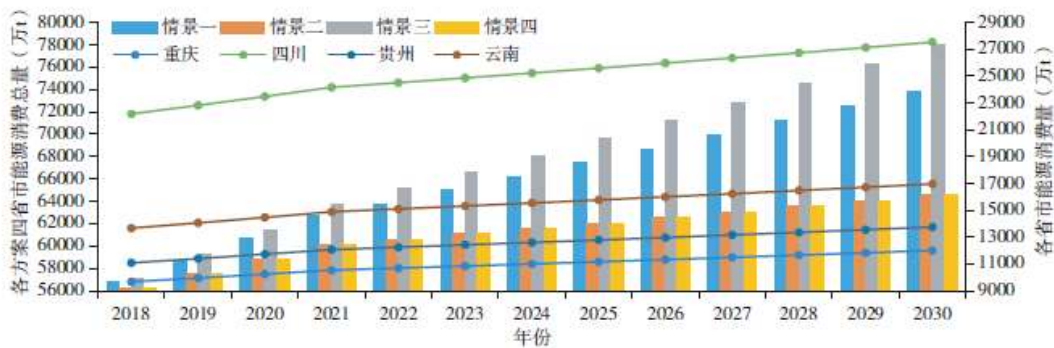


图 5 能源消费量仿真趋势

从仿真的四个情景看，在 2018—2030 年期间四个情景的能源消费量均呈现上升趋势，维持在 5.6-7.8 亿 t 标准煤之间，因为西南四省市 GDP 的增速高于单位 GDP 能耗降幅，并且随着人民生活水平的提高，能源消费总量仍将呈微增趋势。预测 2030 年情景一—能源消费总量为 7.39 亿 t 标准煤，为情景二的 1.14 倍，超出其 0.93 亿 t 标准煤，为情景三的 95%，低于其 0.4 亿 t 标准煤，即节约发展比强化发展在当年节约 1.34 亿 t 标准煤，约相当于整个贵州省的年能源消费量。

从各省市角度看，作为全国能源基地的西南四省市在 2030 年比 2018 年的能源消费总量各增加 24%。以预测的 2030 年能源消费总量为例，重庆作为西南城镇化率最高与经济最发达的直辖市，单位 GDP 能耗最优为 0.29t 标准煤/万元；四川作为西南经济总量最高的人口大省消费能源 2.75 亿 t 标准煤；贵州作为西南地区的煤炭生产消费大省故单位 GDP 能耗最高，为 0.46t 标准煤/万元；云南省经济总量与能源消耗量排名一致，均位于第二位。

以上分析表明，基于国家“十三五”规划为基础强化节约的情景二利于当地能源开发与经济可持续发展。伴随西南地区作为国家清洁能源生产基地的战略实施，当地清洁能源比重进一步提升会促进能源结构更加优化，利于带动当地经济高质量发展并巩固“脱贫攻坚”成果。

2.3.3 粮食生产量趋势变化

图 6 显示四种发展情景下四省市年粮食生产总量，以及各省市在四种情景之下的年粮食生产量。根据《全国农业现代化规划》中粮食生产目标，结合西南地区的耕地少的实际情况，确定发展目标即情景一保持每年 1.5%的增长率；情景二强化节约发

展，故保持每年 1%的增长率；情景三强化水能发展，在情景一的基础上增加当地财政收入，推动农业现代化发展，故保持每年 2%的增长率；情景四综合节约与水能发展，即增长幅度等于情景三。

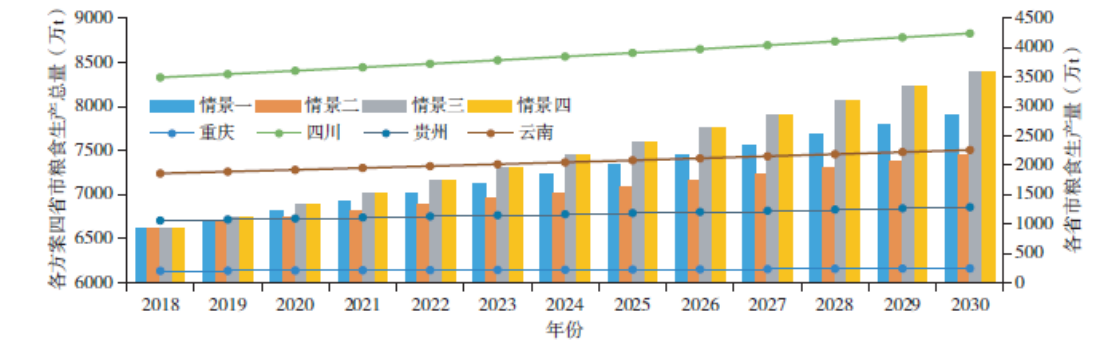


图 6 粮食生产仿真趋势

从仿真的四个情景看，在 2018—2030 年期间四个情景的粮食生产量均呈现稳步上升趋势，维持在 7455 万 t 以上，但人均粮食产量仍然低于全国平均水平。预测 2030 年情景一粮食生产总量为 7910 万 t，为情景二的 1.06 倍，超出其 455 万 t，为情景三的 94%，低于其 480 万 t，即强化发展比节约发展在当年增产 935 万 t。

基于各省市 2030 年粮食预测产量，重庆因为城镇化率最高、耕地面积最少，年粮食产量低且每年需要调入粮食；四川省耕地面积在四省市面积最大、质量最好，年粮食生产总量与人均粮食产量均居于首位分别达 4243 万 t、480kg；贵州与云南粮食产量分别居第三位和第二位，但两省水果、茶叶、烟叶等经济作物产量较高，同样也消耗了大量的水、能源。

以上分析表明，西南四省市的短板在于粮食生产，水热条件优越但耕地面积不足的根本矛盾短期无法解决，只能依靠农业技术提高生产效率来提升粮食产量或依赖东南亚等地区的粮食进口。建议西南四省市依托优越的水热条件和先进的农业技术，保证当地的主要粮食能够自给自足，为国家粮食安全做出贡献。

2.3.4 水力发电量趋势变化

图 7 显示四种发展情景下四省市年水力发电总量，以及各省市在四种情景之下的年平均水力发电量。基于西南四省市近五年的水力发电增长率平均数，确定情景一保持每年 8%的增长幅度；情景二强化节约发展，即稍微低于情景一，保持每年 7%的增长幅度；情景三强化水能发展，故保持每年 10%的增长幅度；情景四综合情景二和情景三，即增长幅度等于情景三。



图 7 水力发电量仿真趋势

从仿真的四个情景看，在 2018—2030 年期间四个情景的水力发电量均呈现较快上升趋势，符合当地作为“西电东送”能源基地的发展方向。预测 2030 年情景一水力发电总量为 1.72 亿 kW·h，为情景二的 1.13 倍，超出其 0.2 亿 kW·h，为情景三的 80%，低于其 0.43 亿 kW·h，即强化水能发展比节约发展在当年增加 0.62 亿 kW·h，约相当于 3 个贵州省的年水电生产量。

从各省市角度看，作为全国水能资源最丰富的西南地区在 2030 年的水电生产量各提升至比 2018 年的 176%。以预测的 2030 年能源消费总量为例，重庆作为直辖市水能蕴藏量较小，水电占当地发电量的 31%左右；四川省水能资源理论蕴藏量与可开发量均位于全国首位，水电生产量约占西南四省市的一半，且每年为华中、华东等经济发达地区输送大量的清洁水电；贵州省水电比重占当地发电量的 35%左右，由于当地煤炭资源丰富导致火力发电比重很大，“水火互济”对于“西电东送”具有很好的调节稳定作用；云南省水能资源理论蕴藏量居全国第 3 位，可开发装机容量居全国第 2 位，每年为华南地区输送大量清洁水电。

以上分析表明，建设以水能为代表的西南能源基地对于保障国家能源安全、推动“高质量”发展具有重要意义。水电投资开发对于拉动当地经济发展、促进就业、降低贫困率具有积极贡献，此外还优化了发达地区的能源结构，利于全国经济与生态可持续发展。

2.3.5 水—能源—粮食纽带趋势变化

基于以上水—能源—粮食三要素仿真结果，参照最优发展方案即情景四为代表，模拟分析三者在 2018—2030 年的纽带关系及变化趋势，如图 8 所示。本文研究区西南四省市的水资源极为丰富且为当地 WEFNexus 系统的主导要素，故以用水总量为自变量、能源消费和粮食生产为因变量，分析三者纽带关系的变化趋势。

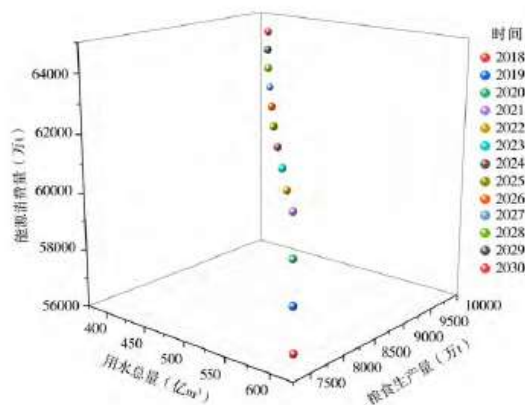


图 8 水—能源—粮食纽带变化趋势

西南四省市水—能源—粮食三要素回归分析结果显示， R^2 为 0.9，即三变量之间呈强相关。用水总量 2018—2030 年呈逐年下降趋势，自最高峰近 600 亿 m^3 降至 413 亿 m^3 ；与此同时，能源消费量呈上升趋势，与用水总量呈明显的负相关变化，2030 年较 2018 年增幅达 15%；粮食生产量与用水总量也呈负相关变化，研究期内增幅近 26%。综合来看，基于情景四水—能源—粮食三要素仿真结果，当地水资源利用效率在研究期内有较大提升，单位能源耗水与单位粮食耗水均有显著下降，且粮食生产用水效率有更高提升空间，即当地 WEFNexus 关系向协同优化方向改善。

2.4 权衡与协同分析

权衡 (tradeoffs) 是指某些类型生态系统服务的供给, 由于其它类型生态系统服务使用的增加而减少的状况^[34]; 协同 (synergies 或 co-benefits) 是指两种或多种生态系统服务同时增强的情形^[35]。情景分析是目前权衡与协同研究最为常见的一种方法, 通过制定若干生态保护或社会经济发展优先或兼顾的情景, 来分析各种生态系统服务之间的动态变化^[36]。

通过对比发现, 情景二在情景一的基础上单独加强水资源和能源节约。根据设置的西南四省市 WEF Nexus 系统五大子系统因果回路图, 情景二各个子系统之间的影响如下: 水、能源资源的节约—废弃物排放降低—生态环境改善, 与此同时只单独干预的水资源与能源单位消耗导致经济发展缓慢—财政收入降低—科技投入降低—资源利用率低—资源消耗增加—环境破坏—西南四省市 WEF Nexus 系统不可持续发展。

情景三在情景一的基础上只强化水能资源的开发, 各个子系统之间影响如下: 水能开发增加—灌溉用水减少—粮食产量降低—化肥等投入增加—环境污染加剧—西南四省市 WEF Nexus 系统不可持续发展。

情景四结合情景二与情景三的优势, 将节约资源与加强水能开发结合, 即在保护自然生态环境的基础上开发当地的水能资源以带动当地经济发展。根据图 2 显示, 影响效果如下: 节约用水—地下水恢复—径流增加—水能增加—水电发电量提升—能源结构优化—煤炭消耗降低—温室气体等污染排放减少—生态环境改善—西南四省市可持续发展能力提升。所以情景四依据西南地区的实际情况, 权衡当地资源消耗以保持粮食生产稳定, 水能、环境与经济系统较高质量发展的可持续发展路径。

3 结论与讨论

3.1 结论

①研究期内, 西南四省市的用水总量分别呈现下降趋势, 整体水资源压力低于 30%, 但单位水耗仍较高; 在农业和能源方向仍然有较大的节水潜力, 所以西南四省市的水资源利用效率仍有较大进步空间。能源消费总量逐年递增, 能源消耗量大且单位能耗较高, 当地生态环境压力和能源安全压力较大, 故需要大力发展以水能为代表的清洁能源来优化当地能源结构、缓解脆弱的生态环境。粮食生产总量保持稳步增长态势, 但人均粮食产量仍低于全国平均水平, 需要大力推进高标准农田建设、加快农业科技支持以提升单位产量, 逐步提高粮食自给率。水力发电量在保持现有的开发速度上, 预计 2030 年水力发电量匹配该区域的技术可开发量达到全国的 2/3, 助力国家清洁能源生产基地建设。

②研究期内, 西南四省市水—能源—粮食纽带关系呈协同优化方向改善, 单位能源耗水与单位粮食生产耗水均显著降低, 推动当地社会经济效率的提升, 缓解区域生态环境压力, 利于当地 WEF Nexus 系统可持续发展, 提升当地高质量发展水平。

③WEF Nexus 系统的复杂性意味着无论采取哪种方案, 都无法实现水—能源—粮食的完美协同发展。因此未来发展中需要同时从生产端和消费端系统、科学地调整发展目标, 加强水—能源—粮食—生态环境—经济—社会的协同作用, 推动区域可持续发展。

3.2 讨论

基于当下的国内外复杂环境, 落实总体国家安全观要求系统评估以 WEF 为代表的可持续发展目标, 所以必须以系统性水能开发为重点加强西南经济发展与民生保障, 才能保障国家能源安全, 才能维护国家西部生态安全屏障。除了建设大型水电站之外, 后期应确保电力的调配、输送、管理等系统配套工程, 防止之前大规模的“弃水”现象的发生造成的大量资源浪费; 在建设水电站的过程中需要全过程秉持环保理念, 保护当地脆弱的生态环境。

无论哪种情景方案都无法实现西南四省市 WEF 纽带系统完美地协同发展, 需要根据实际情况不断优化调整情景目标, 并且

加强居民对低碳生活从根本上的认同，对生产端和消费端的双重约束，以系统性工程科学地实现三者的良性循环。本文构建的西南四省市 WEF 纽带系统，没有考虑到水电开发对生态环境的影响；由于省际间贸易数据的缺失，本文只单方面建议提高水电等清洁能源的调出、区域外部的粮食调入，未能考虑西南地区与域外水—能源—粮食的贸易流动带来的具体影响，这也是后期研究的重点。

参考文献:

- [1]HOFF H. Understanding the nexus[C]//Background Paper for the Bonn 2011 Conference:the Water,Energy and Food Security Nexus. Stockholm:Stockholm Environment Institute,2011:16-18.
- [2]沈镭,钟帅,胡纾寒. 新时代中国自然资源研究的机遇与挑战[J]. 自然资源学报,2020,35(8):1773-1788.
- [3]UNEP. Towards a green economy:pathways to sustainable development and poverty eradication[R]. France:Nairobi Kenya Unep,2017:31-32.
- [4]Endo A,Tsurita I,Burnett K,et al. A review of the current state of research on the water,energy,and food nexus[J]. Journal of Hydrology:Regional Studies,2017(11):20-30.
- [5]Siegfried T U,Fishman R,Modi V,et al. An entitlement approach to address the water-energy-food nexus in rural India[C].American Geophysical Union Fall Meeting,San Francisco,2008.
- [6]Moioli E,Salvati F,Chies M,et al. Analysis of the current world biofuel production under a water-food-energy nexus perspective[J]. Advances inWater Resources,2018(121):22-31.
- [7]米红,周伟. 未来 30 年我国粮食、淡水、能源需求的系统仿真[J]. 人口与经济,2010,31(1):1-7.
- [8]肖仁俊,董志,李秀婷,等. 新疆能源可持续发展的系统动力学模型与分析[J]. 管理评论,2014,26(8):31-41.
- [9]李桂君,李玉龙,贾晓菁,等. 北京市水—能源—粮食可持续发展系统动力学模型构建与仿真[J]. 管理评论,2016,28(10):11-26.
- [10]关伟,赵湘宁,许淑婷. 中国能源水足迹时空特征及其与水资源匹配关系[J]. 资源科学,2019,41(11):2008-2019.
- [11]吴燕,王效科,逯非. 北京市居民食物消耗生态足迹和水足迹[J]. 资源科学,2011,33(6):1145-1152.
- [12]Shen Lei,Xue Jingjing,Gao Tianming. China's sustainable energy development based on food security:opportunities and challenges[J]. Journal of Resources and Ecology,2013,4(1):80-87.
- [13]Zhang C,Anadon L D. Life cycle water use of energy production and its environmental impacts in China[J]Environmental Science & Technology,2013,47(24):14459-14467.
- [14]孙才志,阎晓东. 中国水资源—能源—粮食耦合系统安全评价及空间纽带分析[J]. 水资源保护,2018,34(5):1-8.

-
- [15]Owen A, Scott K, Barrett J. Identifying critical supply chains and final products:An input-output approach to exploring the energy-water-food nexus[J]. Applied energy, 2018, 210(15):632-642.
- [16]Wang S, Fath B, Chen, B. Energy-water nexus under energy mix scenarios using input-output and ecological network analyses[J]. Applied Energy, 2019, 233(1):827-839.
- [17]王慧敏, 洪俊, 刘钢. “水—能源—粮食”纽带关系下区域绿色发展政策仿真研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(6):74-84.
- [18]Howells M, Hermann S, Welsch M, et al. Integrated analysis of climate change, land-use, energy and water strategies[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(7):621-626.
- [19]Daher B T, Mohtar R H. Water-energy-food (WEF) Nexus Tool 2.0:guiding integrative resource planning and decisionmaking[J]. Water International, 2015, 40(5/6):748-771.
- [20]Karnib A. Bridging science and policy in water-energy-food nexus:using the Q-Nexus model for informing policy making[J]. Water Resources Management, 2018, 32(15):4895-4909.
- [21]Forrester J W. Industrial dynamics[J]. Journal of the Operational Research Society, 1997, 48(10):1037-1041.
- [22]荣绍辉. 基于 SD 仿真模型的区域水资源承载力研究:以应城市为案例[D]. 武汉:华中科技大学, 2009.
- [23]刘鸿明, 邓久根. 可持续发展理论研究的两种范式述评[J]. 经济纵横, 2010, 26(4):122-125.
- [24]吴勇. 山地城镇空间结构演变研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
- [25]刘玥. 产业联动网络演化模型与联动路径研究——基于我国西部能源的开发与利用[D]. 徐州:中国矿业大学, 2008.
- [26]张治会. 西南山区农业现代化研究——以四川省攀枝花市为例[D]. 北京:中国农业科学院, 2017.
- [27]李旭. 社会系统动力学:政策研究的原理、方法和应用[M]. 上海:复旦大学出版社, 2009.
- [28]Endo A, Tsurita I, Burnett K, et al. A review of the current state of research on the water, energy, and food nexus[J]. Journal of Hydrology Regional Studies, 2017, 11(1):20-30.
- [29]Ding N, Liu J R, Jianxin Jx, et al. Water footprints of energy sources in China:Exploring options to improve water efficiency[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 174(10):1021-1031.
- [30]He Y, Ji C M, Shi P. Calculation analysis and discussion of blue water footprint for hydropower station[J]. Water Resources Power, 2015, 33(2):37-41.
- [31]国务院. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-03/17/content_5054992.htm, 2016-03-17.

[32] 国务院. 全国农业现代化规划(2016-2020 年) [EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-10/20/content_5122217.htm, 2016-10-20.

[33] 国家能源局. 中国水电发展“十三五”规划(2016-2020 年) [EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2016-11/29/c_135867663.htm, 2016-11-29.

[34] Rodriguez J P, Beard T D. Trade-offs across space, time, and ecosystem services[J]. Ecology and Society, 2006, 11(1): 747-760.

[35] John B-Bradford, Anthony W-D'Amato. Recognizing tradeoffs in multi-objective land management[J]. The Ecological Society of America, 2012, 10(4): 210-216.

[36] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 等. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题[J]. 地理研究, 2013, 32(8): 1379-1390.