

# 黑龙江省水-能源-粮食系统动力学模拟

王雨,王会肖,杨雅雪,李红芳

(北京师范大学水科学研究院,北京 100875)

**摘要:**基于系统动力学理论,建立黑龙江省水-能源-粮食纽带关系仿真模型,对2010—2017年黑龙江省水资源的供需情况和能源、粮食的生产与消费进行模拟。通过设置和对比4种不同的发展方案,探究黑龙江省水-能源-粮食合理的配置方案。结果表明:黑龙江省的水资源安全形势较为严峻,在4种发展方案中,采取严格规划方案的正面效果最显著;强化发展方案下的能源消耗最明显,无论采取哪种发展方案,如果不对能源消费量加以控制,全省的能源安全可能无法保证;黑龙江省的粮食安全比较稳定,不易受外部条件的影响,保守节约方案下的粮食库存和粮食供需平衡比最大;仅采取一种发展方案可能无法实现水-能源-粮食系统的整体安全。

**关键词:**水-能源-粮食纽带关系;系统动力学模型;情景设置;现状仿真;黑龙江省

中图分类号:TV213

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2020)04-0008-08

**System dynamics simulation of WEF nexus in Heilongjiang Province//WANG Yu, WANG Huixiao, YANG Yaxue, LI Hongfang (College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)**

**Abstract:** A simulation model of WEF nexus in Heilongjiang Province was established based on the theory of system dynamics, in which the supply and demand of water resources and the production and consumption of energy and food from 2010 to 2017 were simulated. Four different development patterns were set for exploring the rational allocation pattern of water-energy-food in Heilongjiang Province. The results show that the situation of water security in Heilongjiang Province is severe. Adoption of the strictest planning pattern will lead to a most significant positive effect among the four development patterns. The consumption of energy under the enhanced development pattern is the most obvious, and the energy security of the whole province could not be guaranteed no matter which development pattern is adopted if the energy consumption is not under control. The food security of Heilongjiang Province is relatively stable and not easily affected by external conditions. The ratio of food inventory and food supply-demand balance will get maximum under the conservative saving pattern. The overall security of the water-energy-food system may not be achieved by a single development pattern.

**Key words:** WEF nexus; system dynamics model; scenario setting; current situation simulation; Heilongjiang Province

作为人类生存和发展不可或缺的资源,水资源、能源和粮食三者之间存在着紧密而复杂的联系,任一要素的波动都会对其他要素带来影响<sup>[1]</sup>。2011年1月,世界经济论坛发布的《全球风险报告》提出了“水-能源-粮食风险群”的概念,并将其列为全球三大风险群之一<sup>[2]</sup>。同年11月,德国联邦政府在波恩召开的国际性会议首次将水安全、能源安全和粮食安全之间的关系总结为一种“纽带关系”(WEF Nexus),并指出这3种资源间的复杂关联关系,尤其是在生产、消耗与管理过程中普遍存在权衡取舍与潜在冲突,任意基于单一资源的战略都将会产生严重的不可预期的后果<sup>[3]</sup>。之后,WEF Nexus的概念得到了不同机构与组织的关注,其内在机理被逐渐

阐明,同时 WEF Nexus 在多领域的可应用性也成为研究热点之一。例如,联合国亚太经济与社会理事会(UNESCAP)在2013年发布了《亚太地区水-粮食-能源纽带关系报告》,提出了 WEF 在时间和空间上具有紧密联系的特征<sup>[4]</sup>;Pittock 等<sup>[5]</sup>研究了在集中生态环境与社会变化的影响下,WEF 关系的动态变化与应对策略;亚洲开发银行(ADB)从水资源管理的角度,提出 WEF Nexus 的复杂性要求我们提高水治理水平,改变粗放的水资源开发利用情况<sup>[6]</sup>;联合国粮农组织(FAO)在2014年从粮食安全角度对 WEF Nexus 进行了阐述,并从保障粮食安全和农业可持续发展的角度分析了如何采用 WEF Nexus 方法进行决策<sup>[7]</sup>。

虽然学者们对 WEF Nexus 进行了诸多探讨,尝试从不同角度、采用多种方法展开理论探讨与实证检验<sup>[8-12]</sup>,但关于 WEF Nexus 的研究仍处于起步阶段<sup>[13]</sup>。相较于国外,国内对于 WEF Nexus 的研究则相对滞后,缺乏探索性的研究成果,正逐渐完成从定性研究阶段<sup>[14-17]</sup>向定量研究阶段<sup>[18-19]</sup>的过渡,并致力于寻求面向多资源协同安全的解决方案与保障技术。

系统动力学(system dynamics, SD)是由美国麻省理工学院福瑞斯特教授在1956年创立<sup>[20]</sup>的分析和研究信息反馈行为和结构的科学,是模拟社会、经济、生态系统结构和动态行为的计算机技术,也是管理系统科学的重要组成部分<sup>[21-23]</sup>。它强调用系统、整体的,以及联系、发展、运动的观点,结合定性定量分析,借助计算机模拟技术来分析研究系统内部结构及其动态行为的关系,寻求解决问题的对策<sup>[24]</sup>,易于解决经济、社会、生态环境等方面具有高阶次、非线性、复杂时变特点的系统问题,被誉为“战略与决策实验室”<sup>[25]</sup>。国内外研究成果表明,系统动力学对于 WEF Nexus 的刻画具有很好的适应性<sup>[26]</sup>。本文采用系统动力学方法,建立了黑龙江省水-能源-粮食纽带关系仿真模型,对2010—2017年黑龙江省水资源、能源和粮食的生产与消费进行模拟,并通过设置和对比4种不同的发展方案,探究黑龙江省水-能源-粮食合理的配置方案,为该地区的水-能源-粮食资源配置提供科学的参考依据。

## 1 黑龙江省水-能源-粮食现状分析

### 1.1 水资源现状

黑龙江省位于中国东北部,面积47.3万km<sup>2</sup>(含加格达奇区和松岭区),属于寒温带与温带大陆性季风气候。黑龙江省的年降水量一般在400~650mm之间,且降水的季节特征较为明显,夏季雨水充沛,冬季干燥少雨,夏季降水量占全年降水量的60%以上<sup>[27]</sup>。

黑龙江省江河纵横,湖泊众多,全省流域面积在50km<sup>2</sup>以上的河流有1918条,多年平均水资源量为810.3亿m<sup>3</sup>,居北方各省之首。但黑龙江省的水资源量和人均水资源量(2017年为1959.6m<sup>3</sup>)仍低于全国平均水平,属于水资源缺乏的省份。如果不对水资源进行合理配置,黑龙江省原本不丰富的水资源可能会更加缺乏。

### 1.2 能源现状

黑龙江省是国家重要的能源工业基地,能源资源相对富集,品种较为齐全。主要特点为多煤、多油、少气。东部的优质煤炭产区,是中国煤油焦煤的重要产区之一。省内有目前中国最大的油田——大

庆油田。除此之外,电力和燃气也占有重要地位。

虽然黑龙江省的能源禀赋较好,但由于能源资源开采程度的限制,黑龙江省的原煤供应已从2010年的6899.8万t(标准煤,下同)下降到2017年的4256.0万t,原煤供应量也呈现出了逐年下降的趋势。与此同时,能源消费总量持续增长,其中原煤消费量已从2010年的7621.8万t增长到2017年的8683.1万t。现阶段,黑龙江省的能源供给格局尚未得到根本转变,能源发展的一些薄弱环节和不容忽视的问题,如开发成本高、利用效率过低<sup>[28]</sup>、能源结构性矛盾、在能源开发和利用过程中的生态环境污染等迫切需要加以解决。如果不能改变目前以重工业为主的经济结构,以及控制能耗、进行能源的综合利用,挖掘可再生能源的利用潜力,黑龙江省的能源供需缺口可能将持续扩大。

### 1.3 粮食现状

作为中国重要的商品粮基地,截止至2017年,黑龙江省耕地面积1586.6万hm<sup>2</sup>,约占全省总面积的35.1%,其中有效灌溉面积为603.1万hm<sup>2</sup>。近5年,黑龙江省的粮食总产量和人均粮食产量均为全国第一,为国家的粮食安全做出了贡献。2017年,黑龙江省粮食总产量7410.3万t,约占全国粮食总产量的11.2%。人均粮食产量为1956kg。水稻、玉米、大豆3大作物等在黑龙江省粮食生产安全中占据重要地位<sup>[29]</sup>。

虽然目前黑龙江省的粮食安全已达到较高水平,但未来仍面临着一系列挑战:与粮食总产量相比,单位面积粮食产量仍有提高的空间;部分地区超采地下水严重,2017年,黑龙江省的农田灌溉用水中地下水占比达47.4%,需发展节水农业加以控制;农业灌溉面积的增加会加剧部分区域产业结构的不协调性,如果不能稳定提高粮食综合生产能力<sup>[30]</sup>,平衡水资源与粮食之间的联动关系,以目前的可灌溉面积不足以维持现在的粮食安全水平。

## 2 WEF Nexus 系统动力学模型构建

### 2.1 研究边界

由于 WEF Nexus 涉及到社会、经济、环境等多方面的因素,其内部的相互关系比较复杂,因此,开展对水-能源-粮食系统的研究,明确地定义研究的边界十分重要。本文从资源安全性出发,设置水资源、能源和粮食3个子系统如图1所示。

各个子系统之间,主要考虑的关系包括:化石能源(石油、煤炭、天然气)在开采和加工过程中,以及生物质能在生产过程中对水资源的消费;粮食(小麦、玉米、大豆、水稻)在生产过程中,以及食品加工

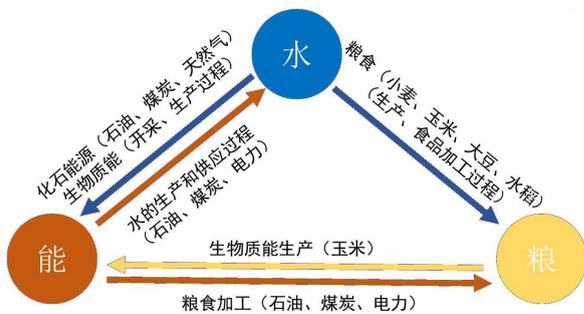


图1 模型子系统组成及主要互馈关系

过程中对水资源的消费;生物质能生产过程中对粮食(玉米)的消费;水的生产和供应过程对能源(石油、煤炭、电力)的消费;粮食加工过程对能源(石油、煤炭、电力)的消费。其中,引入能源政策因素作为对能源子系统的扰动因素。主要的模型变量见表1。

表1 模型变量

变量类型	变量名称
状态变量	水资源库存、能源库存、粮食库存
速率变量	全年实际供水量、全年总用水量、能源生产量、能源消费量、粮食生产量、粮食消费量
常量 (列举部分)	农田灌溉水有效利用系数、小麦粉加工用水定额、城镇居民生活用水定额、生物质能生产系数、单位生物质能耗玉米量、农业耗能换算系数、水稻灌溉定额、原粮折算系数、粮食损耗等
辅助变量 (列举部分)	居民生活需水量、城镇人口、农林牧渔能源消费量、温室气体排放量、粮食净调出量、工业粮食消费量等

## 2.2 模型构建

### 2.2.1 构建思路

模型构建主要分为因果关系图构建和存量流量图构建两部分。其中因果关系图由两个或两个以上的因果链组成的因果回路表达<sup>[24]</sup>,多用于构思模型的初始阶段,能够直观地描述模型的结构<sup>[31]</sup>,便于进一步用流图刻画模型。

存量流量图简称流图,是在因果关系图的基础上进一步区分变量的性质,用符号刻画系统要素之间的逻辑关系,明确系统的反馈形式和控制规律的图形表示法<sup>[24]</sup>。它与因果关系图最直观的区别是,流图具有表示状态变量、源和汇以及输入流和输出流的特殊符号。模型的存量流量图见图2。

水资源子系统由全年实际供水量和全年总用水量需求构成,其中全年实际供水量分为地表水供水量、地下水供水量和其他水源供水量3部分,全年总用水量需求分为工业需水量、居民生活需水量、城镇公共需水量、生态环境需水量、林牧渔畜需水量和农田灌溉需水量6部分。其中农田灌溉需水量起到了衔接水资源子系统和粮食子系统的的作用。在工业需水量部分,通过影子变量衔接粮食子系统和能源子系统。

能源子系统由能源生产量、能源消费量和能源净调出量构成。为了研究生物质能在能源子系统和粮食子系统之间的流通,将生物质能生产量作为能

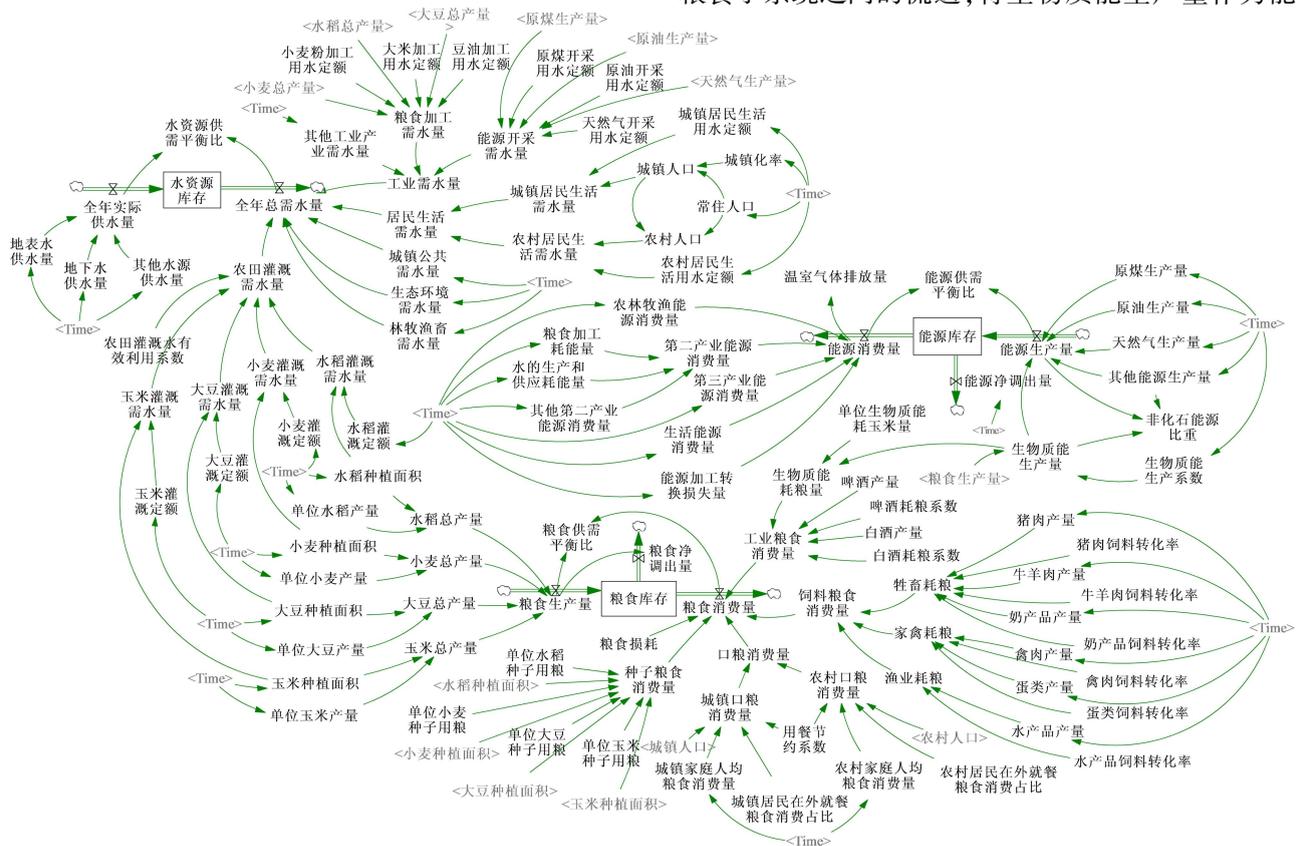


图2 黑龙江省 WEF Nexus 系统存量流量图

源生产量中独立的一部分。其余能源生产量为原煤生产量、原油生产量、天然气生产量、其他能源生产量(排除生物质能部分)。能源消费量分为农林牧渔能源消费量、第二产业能源消费量、第三产业能源消费量、生活能源消费量和能源加工转换损失量5部分,其中第二产业能源消费量单独考虑水的生产和供应耗能以及粮食加工耗能。

粮食子系统由粮食生产量、粮食消费量和粮食净调出量构成,考虑水稻、小麦、玉米和大豆这4种黑龙江省主要粮食作物的生产和口粮消费、饲料粮食消费、工业粮食消费以及种子粮食消费。其中口粮消费包括城镇口粮消费和在农村口粮消费两部分,饲料粮食消费包括牲畜耗粮、家禽耗粮和渔业耗粮3部分,工业粮食消费仅考虑生物质能耗粮和酒类的生产耗粮,种子粮食消费由粮食种植面积和单位种子用粮决定。

### 2.2.2 变量与公式

根据存量流量图中变量关系构建的方程是系统动力学模型的重要组成部分。黑龙江省 WEF Nexus 系统动力学模型包含 113 个变量,其中,3 个状态变量的值由积分方程得出,例如,粮食库存 = INTEG(粮食生产量-粮食消费量-粮食净调出量,0)。其余变量之间的辅助方程,均遵循真实系统的逻辑关系,例如,城镇居民生活需水量 = 城镇人口 × 城镇居民生活用水定额 × 365 / 1 000。

### 2.2.3 模型时间设置与假设

考虑到模型预测的不确定性,仅对现状进行模拟。设置模型的初始时间为 2010 年,结束时间为 2017 年,时间步长为 1 a。并在此基础上进行情景设置,探究不同的发展模式对黑龙江省水-能源-粮食系统可能带来的影响。

作为对现实系统的客观反映,为了保证模型的简洁性,需对模型进行必要的假设。模型的主要假设如下:对于水资源子系统,仅考虑水资源的供需(结果),不考虑调入调出(过程)。对于能源子系统,能源的消费不计类别,只计总量。对于粮食子系

统:①粮食净调出量与粮食总生产量呈线性关系;②白酒产量和啤酒产量保持不变;③居民在外就餐粮食占比保持不变;④粮食损耗保持不变;⑤单位种子用粮(水稻、小麦、玉米、大豆)保持不变。关于库存,区别于真实库存,初始库存设置为 0,从 2010 年开始累积,用以表示研究时段内水资源、能源或粮食的累积盈余或亏损情况。

### 2.3 模型检验

选取 2010—2017 年研究区域内居民生活需水量、能源消费量和粮食产量的模拟值和实际值进行比较,以验证模型的可靠性和准确性,检验结果见表 2。

通过比较可以发现模拟值与实际值基本吻合,除了 2010 年的能源消费量的相对误差稍高(不同电厂实际发电煤耗不同,这里统一采用的电力标准煤折算系数为 4.04 t/(万 kW · h),因此可能与实际值有偏差,但不影响能源库存的变化趋势),其余相对误差的绝对值均小于 10%,满足模型的精度要求,具有较高的可靠性。

为检验模型的结构稳定性,设置 3 种仿真步长  $\Delta t = 1 \text{ a}, 0.5 \text{ a}$  和  $0.25 \text{ a}$ ,选取水资源库存、能源库存和粮食库存的模拟值进行对比,见图 3。可以看出,在不同时间步长的条件下,水资源库存、能源库存和粮食库存模拟值的变化趋势基本一致,因此模型的结构稳定性较好。综上所述,可以认为所用模型满足建模要求,能够用于实际模拟与政策分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 参数灵敏度分析

为了更直观地表示水资源库存、能源库存和粮食库存的影响程度,对模型进行了参数灵敏度分析。模型灵敏度  $S$  的计算公式为

$$S = \frac{\Delta Q}{Q_0} \frac{X_0}{\Delta X} \quad (1)$$

式中: $X_0$  和  $Q_0$  分别为初始条件下参数和状态变量的值; $\Delta X$  和  $\Delta Q$  分别为参数改变量的绝对值和参数改变引起的状态变量改变量的绝对值。

表 2 模型检验

年份	居民生活需水量			能源消费量			粮食生产量		
	实际值/亿 m <sup>3</sup>	模拟值/亿 m <sup>3</sup>	相对误差/%	实际值/万 t	模拟值/万 t	相对误差/%	实际值/万 t	模拟值/万 t	相对误差/%
2010	12.11	12.85	6.11	11 032.50	12 819.50	13.94	5 498.52	5 628.44	2.36
2011	13.06	12.92	-1.07	12 118.50	11 722.57	-3.38	6 067.57	6 587.52	8.57
2012	12.97	12.95	-0.15	12 757.80	12 808.10	0.39	6 474.94	6 968.38	7.62
2013	13.02	13.00	-0.15	13 178.34	13 146.58	-0.24	6 938.37	7 426.78	7.04
2014	13.46	13.49	0.22	11 954.90	11 617.72	-2.90	7 286.44	7 490.25	2.80
2015	13.09	13.09	0.00	12 126.19	12 657.90	4.20	7 521.31	7 830.15	4.11
2016	12.60	12.78	1.43	12 280.46	12 669.42	3.07	7 267.84	7 131.26	-1.88
2017	12.41	12.39	-0.16	12 535.56	12 928.99	3.04	7 249.96	7 249.96	0.00

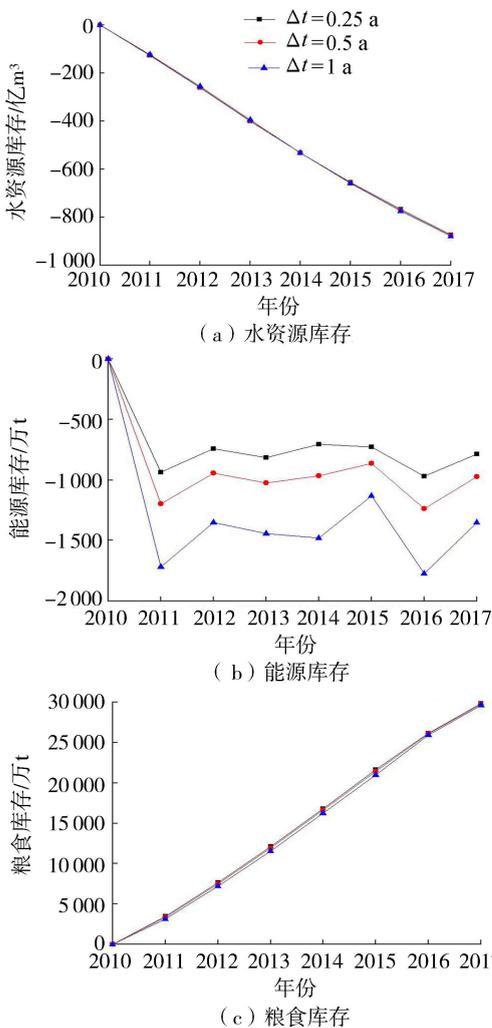


图3 不同时间步长的库存运行结果对比

检验3个状态变量(水资源库存、能源库存和粮食库存)对各参数的灵敏度,分析结果见图4(图中各参数依次为:全年实际供水量、地表水供水量、地下水供水量、农田灌溉需水量、全年总需水量、水稻种植面积、小麦种植面积、玉米种植面积、大豆种植面积、粮食生产量、能源生产量、其他能源生产量、能源消费量)。其中,能源生产量、粮食生产量、全年总需水量、能源消费量、农田灌溉需水量、水稻种植面积、地下水供水量、玉米种植面积和地表水供水量9个参数的灵敏度均大于0.1,可作为情景方案设计的决策变量。

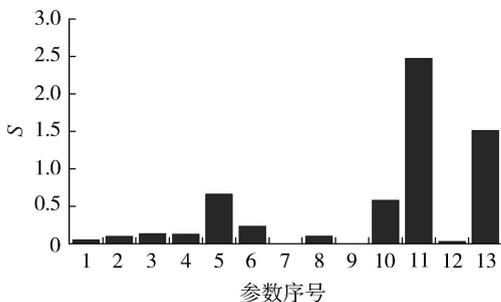


图4 参数灵敏度分析结果柱状图

### 3.2 情景设置

选择灵敏度分析中对系统影响较大的9个参数和5个能在模型中反映现实政策变化的参数(农田灌溉水有效利用系数、城镇居民生活用水定额、农村居民生活用水定额、其他工业产业需水量和用餐节约系数)作为决策变量,通过调整决策变量的大小,设置不同的发展方案,来模拟研究区在不同模式下2010—2017年的发展情况。具体方案设置如下:

**方案1 常规发展方案。**保持所有模型变量的参数不变,是其他发展方案的对比基础。

**方案2 严格规划方案。**严格按照《黑龙江省水利发展“十三五”规划》、《黑龙江省能源发展“十三五”规划》和《黑龙江省国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》对资源量及相关系数的约束,对常规发展模式超出规划的部分进行制约,使资源的供给和消费刚好符合规划要求。调整的参数有全年总需水量、水稻种植面积、地下水供水量、玉米种植面积和地表水供水量。

**方案3 强化发展方案。**尽可能地使资源的生产和消费在不过分偏离“十三五”规划要求的基础上追求高效益发展。调整的参数有能源生产量、能源消费量、水稻种植面积、玉米种植面积、地表水供水量和农田灌溉水有效利用系数。

**方案4 保守节约方案。**以保障不过度支出为前提,一方面通过改进技术,改善供水结构,充分开发利用地表水资源,合理减少地下水开采,并提高用水效率,另一方面通过教育宣传,调整用水定额,提高餐桌节约效率,双向约束资源消费。调整的参数有水稻种植面积、地下水供水量、地表水供水量、农田灌溉水有效利用系数、城镇居民生活用水定额、农村居民生活用水定额、其他工业产业需水量和用餐节约系数。

### 3.3 仿真结果分析

在模型中分别输入4种发展方案的参数,得到不同发展方案下的仿真结果。选取较能代表黑龙江省水-能源-粮食安全状况的水资源库存、能源库存和粮食库存和资源的供需平衡比的仿真结果作对比分析。

#### 3.3.1 水资源库存变化趋势

图5为不同发展方案下的水资源库存变化趋势和水资源供需平衡比变化趋势。可以看出,除了严格规划方案,其他3种发展方案下黑龙江省的水资源都会延续供需较不平衡的严峻状况。在严格规划方案下,研究区的水资源供需平衡比在2011年便上升至1.034,与此同时其他3种发展方案下的水资源供需平衡比均在0.85以下,虽然自2012年起水资源供需平衡比有小幅上升趋势,但始终在0.9以下,与严格规划方案仍存在16%~31%的差距,差

距较为明显,说明“十三五”规划对水资源供给与消费双约束的效果十分显著,这种增益效果甚至比改进技术和在终端节约资源(保守节约方案)更为显著。这进一步说明了国家宏观调控的必要性。另外,常规发展方案下水资源供需平衡比最小,表明采取资源措施至少会带来一定的缓解效果。

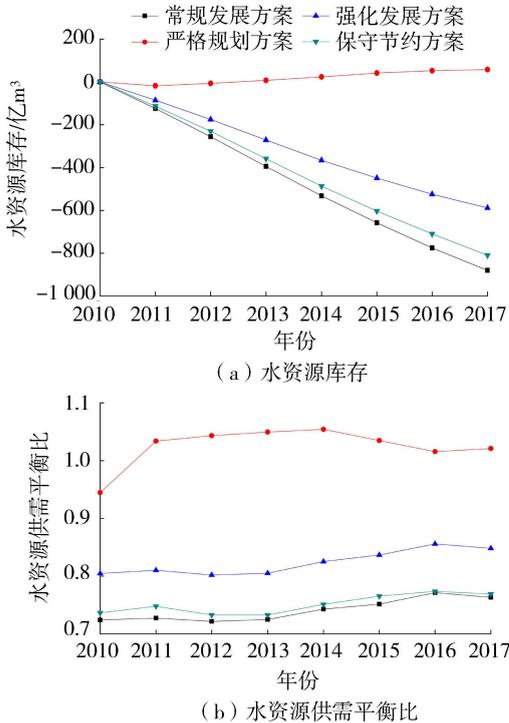


图5 不同发展方案下的水资源库存与供需平衡比变化趋势

### 3.3.2 能源库存变化趋势

图6为不同发展方案下的能源库存变化趋势和能源供需平衡比变化趋势。由图6可以看出,在研究时段内,4种发展方案下黑龙江省的能源库存均小于0(不包括研究时段起点)。其中,强化发展方案下的能源消耗最为明显,能源库存在2010—2016年呈递减趋势,年均降幅约33%。值得注意的是,该方案下的能源库存在2017年有增幅约13%的回升,并且在2014年第4季度能源供需平衡比其他3种发展方案产生交点,这意味着在2015年之后,强化发展方案下的能源供需比比其他3种发展方案要高,但仍小于1。结合图6(a)(b)可以发现,虽然常规发展方案、严格规划方案和保守节约方案能够使黑龙江省的能源库存维持一种“不会变得更危险的稳定状态”,但实际上自2011年起能源供需比已经在动荡下跌(年均降幅5%),如果不及时采取更加合理的对应措施,黑龙江省的能源供需平衡将难以维持。从另一个角度来看,无论是强化发展方案,还是其他3种方案,黑龙江省的能源安全都无法保证,但能源库存和能源供需平衡比的变化情况至少提

供了一个新的思路:既要合理控制能源的终端使用,也要积极开发以生物质燃料为代表的新型能源来增加供给,同时提高使用效率,减少加工转换损失。

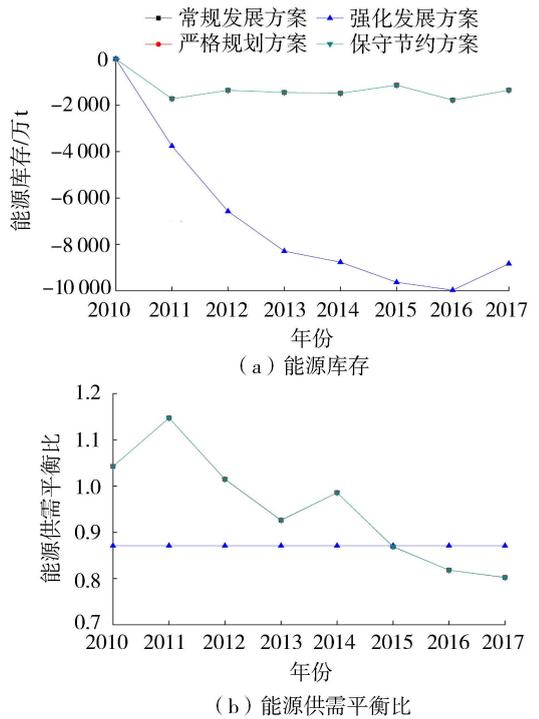


图6 不同发展方案下的能源库存与供需平衡比变化趋势

### 3.3.3 粮食库存变化趋势

图7为不同发展方案下的粮食库存变化趋势和粮食供需平衡比变化趋势。无论采取哪种发展方案,黑龙江省的粮食库存整体都是逐年增加的,粮食

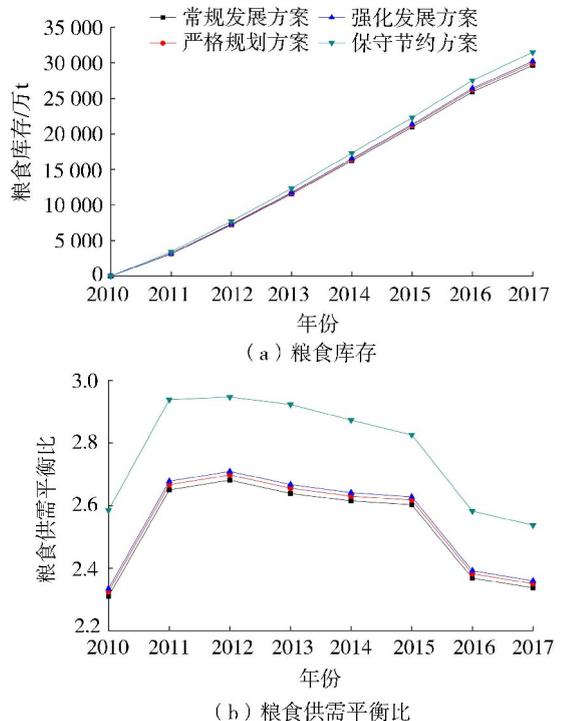


图7 不同发展方案下的粮食库存与供需平衡比变化趋势

供需平衡比均大于1,虽有波动但总体上有稳定在2.2左右的趋势。其中,保守节约方案下的粮食库存和粮食供需平衡比最大,说明通过推广餐桌节约观念和限制定额约束水能粮消费对黑龙江省的粮食安全有一定的正向促进作用。另外,相较水资源库存和能源库存,4种方案下的粮食库存差别不大,最大值与最小值相差仅为2%(相应的水资源库存为107%,能源库存为96%),这表明黑龙江省的粮食安全较为稳定,不易受外部条件改变的影响。

## 4 结论

a. 黑龙江省的水资源安全形势较为严峻,采取强化发展方案和保守节约方案虽然能小幅改善现状,但效果不如严格规划方案显著。

b. 黑龙江省的能源潜力在现阶段巨大的能源消费量面前仍不容乐观,如果不加以控制,未来的能源供应将无法保证其消费。虽然在4种发展方案中,强化发展方案下的能源消耗最为明显,但综合看来,传统的“节流”措施可能无法保障能源供需差额有效缩小,未来应以合理“开源”作为突破口,注重生物质能等新型能源的开发利用,同时提高能源使用效率。

c. 黑龙江省的粮食安全较为稳定,且推广餐桌节约观念和限制定额约束水能粮消费具有一定的正面效果。现阶段可以在保证不破坏粮食生产的条件下,优先考虑水资源和能源优化配置。

d. 无论采取哪种发展方案,都难以实现完美的水-能源-粮食系统安全,在未来发展中应尽可能发挥多种发展方案的优势,依据“十三五”规划对水资源供给与消费进行有合理的双重约束,同时兼顾新型能源的开发利用,并提高居民的餐桌节约意识,根据实际需求对发展方案进行动态调整,实现三者纽带关系的动态平衡。

## 参考文献:

[1] 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关联分析[J]. 水资源保护,2018,34(5):1-8. (SUN Caizhi, YAN Xiaodong. Security evaluation and spatial correlation pattern analysis of water resources-energy-food nexus coupling system in China[J]. Water Resources Protection,2018,34(5):1-8. (in Chinese))

[2] World Economic Forum. Global risks report 2011 [R]. 6th edition. Cologne:World Economic Forum,2011.

[3] 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.

[4] ADNAN H. The status of the water, food and energy nexus in Asia and the Pacific [R]. Thailand: United Nations Economic and Social Commission for Asia and Pacific (UNESCAP),2013.

[5] PITTOCK J, HUSSEY K, MCGLENNON S. Australian climate, energy and water policies: conflicts and synergies [J]. Australian Geographer,2013,44(1):3-22.

[6] DOMINGUEZ P. Thinking about water differently: managing the water-food-energy nexus [R]. Manila: Asian Development Bank (ADB),2013.

[7] FAO. The water-energy-food nexus: a new approach in support of food security and sustainable agriculture [EB/OL]. [2014-06-01]. <http://www.fao.org/policy-support/resources/resources-details/en/c/421718>.

[8] GAIN A K, GIUPPONI C, BENSON D. The water-energy-food (WEF) security nexus: the policy perspective of Bangladesh [J]. Water International, 2015, 40 (5/6): 895-910.

[9] LARCOM S, GEVELT T V. Regulating the water-energy-food nexus: Interdependencies, transaction costs and procedural justice [J]. Environmental Science & Policy, 2017, 72:55-64.

[10] KURIAN M. The water-energy-food nexus: trade-offs, thresholds and transdisciplinary approaches to sustainable development [J]. Environmental Science & Policy, 2017, 68:97-106.

[11] TANIGUCHI M, ENDO A, GURDAK J J, et al. Water-energy-food nexus in the Asia-Pacific region [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2017, 11:1-8.

[12] SPIEGELBERG M, BALTAZAR D E, SARIGUMBA M P E, et al. Unfolding livelihood aspects of the water-energy-food nexus in the dampalit watershed, philippines [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2017, 11:53-68.

[13] EBRAHIM N. Ripples from the water-energy-food nexus [J]. OECD Observer, 2015, 302:11.

[14] 常远,夏朋,王建平. 水-能源-粮食纽带关系概述及对我国的启示 [J]. 水利发展研究, 2016, 16(5):67-70. (CHANG Yuan, XIA Peng, WANG Jianping. An overview of water-energy-food nexus and its enlightenment to China [J]. Water Resources Development Research, 2016, 16(5):67-70. (in Chinese))

[15] 李桂君,黄道涵,李玉龙. 水-能源-粮食关联关系:区域可持续发展研究的新视角 [J]. 中央财经大学学报, 2016(12):76-90. (LI Guijun, HUANG Daohan, LI Yulong. Water-energy-food nexus (WEF-Nexus): new perspective on regional sustainable development [J]. Journal of University of Finance & Economics, 2016(12):76-90. (in Chinese))

[16] 郑人瑞,唐金荣,金玺. 水-能源-粮食纽带关系:地球科学的认知与解决方案 [J]. 中国矿业, 2018, 27(10):36-41. (ZHENG Renrui, TANG Jinrong, JIN Xi. Water-

- energy-food nexus:cognition and solution of earth science [J]. China Mining Magazine,2018,27(10):36-41. (in Chinese))
- [17] 李良,毕军,周元春,等. 基于粮食-能源-水关联关系的风险管控研究进展[J]. 中国人口·资源与环境,2018,28(7):85-92. (LI Liang, BI Jun, ZHOU Yuanchun, et al. Research progress of regional environmental risk management:from the perspectives of food-energy-water nexus[J]. China Population, Resources and Environment,2018,28(7):85-92. (in Chinese))
- [18] 邓鹏,陈菁,陈丹,等. 区域水-能源-粮食耦合协调演化特征研究:以江苏省为例[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(6):232-238. (DENG Peng, CHEN Jing, CHEN Dan, et al. The evolutionary characteristics analysis of the coupling and coordination among water, energy and food: take Jiangsu Province as an example[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2017, 28(6):232-238. (in Chinese))
- [19] 李东林,刘建华,郝林钢,等. “一带一路”非洲区水-粮-能安全分析[J]. 水资源保护,2018,34(4):22-28. (LI Donglin, LIU Jianhua, HAO Lingang, et al. Analysis of water-food-energy safety in Africa area of “Belt and Road”[J]. Water Resources Protection,2018,34(4):22-28. (in Chinese))
- [20] FORRESTER J W. Industrial dynamics [J]. Journal of the Operational Research Society, 1997, 48(10):1037-1041.
- [21] 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.
- [22] 邓丽,李政霖,华坚. 基于系统动力学的重大水利工程项目社会经济生态交织影响研究[J]. 水利经济,2017,35(4):16-23. (DENG Li, LI Zhenglin, HUA Jian. Interweaved impact of large hydraulic projects on society, economy and ecology using system dynamics [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2017, 35(4):16-23. (in Chinese))
- [23] 华坚,李晶晶. 基于系统动力学的重大水利工程项目决策社会稳定风险评估有效性分析[J]. 水利经济,2017,35(2):11-15. (HUA Jian, LI Jingjing. Effectiveness analysis of risk assessment of social stability of large-scale water conservancy projects based on system dynamics [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2017, 35(2):11-15. (in Chinese))
- [24] 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.
- [25] 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. (LI Guijun, LI Yulong, JIA Xiaojing, et al. Establishment and simulation study of system dynamic model on sustainable development of water-energy-food nexus in Beijing [J]. Management Review,2016,28(10):11-26. (in Chinese))
- [26] 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.
- [27] 靳春香,王秀茹,王希,等. 黑龙江省近50年降水变化趋势及空间分布特征[J]. 中国水土保持科学,2015,13(1):76-83. (JIN Chunxiang, WANG Xiuru, WANG Xi, et al. Variation trend and spatial distribution characteristics of precipitation in recent 50 years in Heilongjiang Province [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(1):76-83. (in Chinese))
- [28] 蔡宇新,崔玉婳. 黑龙江省能源产业的现状和存在问题的调查分析[J]. 商业经济,2017(6):22-23. (CAI Yuxin, CUI Yujie. Investigation and analysis of the current situation and existing problems of energy industry in Heilongjiang Province [J]. Business Economy, 2017(6):22-23. (in Chinese))
- [29] 田文凯,侯保灯,陈海涛,等. 基于粮食安全黑龙江省水资源承载力评价[J]. 中国农村水利水电,2018(5):119-122. (TIAN Wenkai, HOU Baodeng, CHEN Haitao, et al. The evaluation of water resources carrying in Heilongjiang Province based on food security [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(5):119-122. (in Chinese))
- [30] 翟绪军,姜法竹,贾永全. 基于农业现代化与粮食安全的黑龙江垦区持续发展建议[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2015,27(3):101-105. (ZHAI Xujun, JIANG Fazhu, JIA Yongquan. Suggestions for sustainable development based on agricultural modernization and food security in Heilongjiang Reclamation Area [J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2015, 27(3):101-105. (in Chinese))
- [31] 王其藩. 高级系统动力学 [M]. 北京:清华大学出版社,1995.

(收稿日期:2019-07-19 编辑:郑孝宇)

